高压直流输电系统换相失败实时监测研究

换相失败故障是基于晶闸管电网换相技术中最常见的问题之一，随着我国直流输电线路规模的日益增加，对于导致换相失败因素的分析以及对换相过程实时监测等问题的研究是十分有必要的。首先根据高压直流输电系统中换流器工作原理分析换相失败产生的机理；在此基础上研究导致换相失败的因素及其各自的特点；然后提出对换相失败问题的实时监测方法；最后在PSCAD/ EMTDC软件中建立HVDC系统分析模型对其换相实时监测系统进行仿真验证。通过研究可知，在影响换相失败的因素中交流电压是导致换相失败发生最主要的因素，其中交流电压幅值跌落和电压波形畸变都可能导致换相失败的发生。通过对换相过程进行实时监测，可以看到换相过程是否正常进行，以及换相失败发生的时刻，为换流器控制保护和换相失败预防提供依据。

张　军[1]　牛　犁[2]　吴金龙[1]　崔　勇[3]/1．西安许继电力电子技术有限公司
2．国网西安供电公司　3．国网上海电力公司

张　军/工程师

关键词/Keywords
高压直流输电系统·
换相失败·
熄弧角·
实时监测·

0　引言

由于晶闸管为半控型电力电子器件，同时高压直流输电系统采用了电网换相技术，因此换相失败对于高压直流输电是不可避免的一个故障[1-3]。关于换相失败的研究从高压直流输电工程诞生以来就从未间断。目前国内外关于直流输电系统换相失败的研究非常多，同时伴随着我国直流输电线路的增加，在部分地区形成了多馈入直流输电系统[4-7]。单个换流站的换相失败可能会导致其他换流站发生继发性换相失败，从而对整个地区的电网稳定带来非常大的威胁[8-10]。换相失败问题是非常复杂的，交直流系统之间相互作用关系、直流系统的控制方式以及交流系统谐波不稳定因素等都可能导致换相失败的发生[14-21]。因此很有必要对高压直流输电系统中换相失败故障进行深入的探讨与分析。

文献[11]通过多馈入直流输电系统仿真研究了交流系统引起换相失败和直流闭锁的差异。文献[12]中对换相失败的因素进行了分析，但是并没有研究交流电压跌落导致熄弧角减小的灵敏度。文献[13]对多落点高压直流输电系统中影响逆变站换相失败的三个因素：耦合导纳、交流系统强度和故障位置进行了仿真分析。文献[14]中提出了以基于最小熄弧角的多馈入交互作用因子来判断换相失败的方法。文献[15]中对用于判断换相失败的电压时间面积方法进行了改进。上述研究中，无法判断发生的是单次换相失败，还是连续多次换相失败等；同时上述文献中并没有对谐波因素引发换相失败现象的发展过程进行深入研究。因此，在上述研究中无法对换流器的保护动作与预防措施动作提供相应的依据。

本文以±500 kV高压直流输电系统为研究对象，从晶闸管工作原理和逆变器运行特性出发推导和分析有可能导致换相失败发生的因素；并对每种因素对换相失败的影响进行分析；最后，通过直流电压、触发超前角、交流电压幅值和交流系统谐波含量等参数建立起换相过程的实时监测系统，以达到对换相失败问题的实时监测作用。

国家电网公司科技项目 (5209401350BW)。

1 换相失败发生机理

实际工程中，高压直流输电系统中均采用了12脉波或者双12脉波换流器；每个12脉波换流器由两个6脉波换流器串联组成，换流器基本都是以半控器件晶闸管为元器件。

在换流过程中，晶闸管处于周期性的开通和关断状态。根据晶闸管换流器的运行特点，在实际工程中整流器出现换相失败的概率非常低，因此换相失败的研究主要针对逆变器。晶闸管有源逆变电路换流过程如图1所示。图1中，U_{dc}为逆变器直流电压，u_a、u_b和u_c为交流系统三相电源。

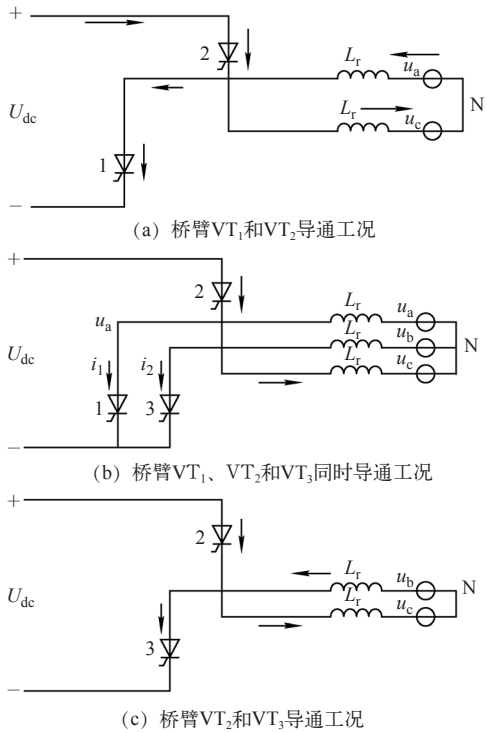


图1 晶闸管有源逆变器换流过程

由图1可知，从换流器（VT_1、VT_2）通态－（VT_1、VT_2和VT_3）通态－（VT_2、VT_3）通态过程中，电流从VT1换到了VT_3上。将该过程称之为换相。

换相过程中，桥臂上的电流如图2所示。在图2中，u_v为逆变器交流线电压；u_{VT_1}为一个桥臂两端的电压；i_1、i_3分别为桥臂1和桥臂3的电流；β为逆变器触发超前角，μ为换相重叠角，γ为逆变器的关断角（熄弧角），三者的关系为

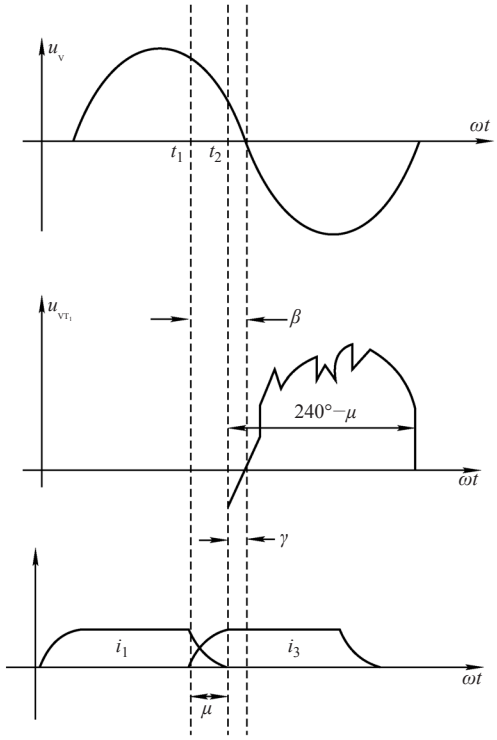


图2 换相过程桥臂上的电流

$\beta=\mu+\gamma$。

VT_3触发后经过μ的电角度，VT_1上的电流变为零。正常情况下，在VT_3导通后，经过一段时间（$\mu+\gamma$）后VT_1退出导通，换流过程完成。如果γ小于晶闸管自身要求的关断角γ_{min}，晶闸管VT_1可能重新导通，电流无法从VT_1换相到VT_3，该过程的发生称为换相失败。逆变器发生连续两次以及以上次数的换相失败，称之为连续换相失败，反之称为一次换相失败。

2 换相失败影响因素分析

在逆变器运行过程中，换相失败的本质原因是换相过程中系统提供的熄弧角γ小于换流器自身需要的熄弧角的最小值γ_{min}。因此对于换相过程中熄弧角的分析十分必要。

逆变器中触发超前角和熄弧角存在以下关系[16]

$$\cos\beta=\cos\gamma-\frac{\sqrt{2}X_iI_d}{E_i} \quad (1)$$

式中，I_d为直流电流；E_i为逆变器交流线电压有效值；X_i为交流系统每一相的换相电抗；β为逆变器

触发超前角；γ为逆变器的熄弧角。

从式（1）看出上述4个因素都有可能导致换相失败的发生，其中换相电抗是换流变压器固有的参数，在系统运行时为常数。因此，以下就触发超前角、直流电压和交流电压3个因素对换相失败的影响分别进行分析。

2.1 触发超前角对换相失败的影响

换相过程中电流从I_d降到0的过程对应的是换相重叠角，和触发超前角的逆变器的关系为

$$\gamma=\beta-\mu \tag{2}$$

式中，β为逆变器触发超前角；γ为逆变器的熄弧角，μ为换相重叠角。

换相重叠角由系统的运行参数所决定的，每一次换相过程中需要的换相重叠角值是固定的。当控制器产生触发超前角减小时，熄弧角也随之线性减小。

$$\Delta\gamma=\Delta\beta \tag{3}$$

由于逆变站采用了定熄弧角控制策略，因此由于触发超前角而导致换相失败的工况极少。

2.2 直流电流对换相失败的影响

在触发超前角和交流系统电压不变的情况下，直流电流I_d的增加会导致换相过程中熄弧角减小。熄弧角的减小量计算公式为

$$\Delta\gamma=\gamma-\arccos\left(\cos\gamma+\frac{\sqrt{2}X_i\Delta I_d}{E_i}\right) \tag{4}$$

式中，$\Delta\gamma$为由于直流电流增加而导致的熄弧角减小量。

直流电流的增量越大，逆变器熄弧角就越小，当小于逆变器自身所需的最小熄弧角时，本次换相过程无法顺利进行。

系统在运行过程中，整流侧采用定电流控制策略。当直流电流有所波动的情况下，整流器通过调节触发角α来稳定直流电流。因此，实际工况中由于直流电流增加而引起的换相失败是可以控制和快速恢复的。

2.3 交流电压对换相失败的影响

对于式（1）中影响换相失败的几个因素中，只有交流电压属于逆变器的外在因素，而且具有随机性和不可控性。

2.3.1 交流电压有效值对换相失败的影响

稳态运行的情况下，认为直流电流I_d和X_i为常数，控制器产生的触发超前角指令不能突变，因此换相过程中交流电压幅值和熄弧角的关系可以表示为

$$\begin{aligned}\cos\gamma&=C_1+\frac{C_2}{E_i}\\ \gamma&=\arccos\left(C_1+\frac{C_2}{E_i}\right)\end{aligned} \tag{5}$$

根据式（5），熄弧角随着交流线电压有效值的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}E_i}=\frac{C_2}{E_i^2\sqrt{1-\left(C_1+\frac{C_2}{E_i}\right)^2}} \tag{6}$$

式中，C_1、C_2为常数；E_i为交流线电压有效值，可以看出当交流电压出现跌落时，熄弧角也会相应的减小。

当仿真系统中的额定参数为：E_i=230 kV，I_d=2 kA，X_i=12.5 Ω。为了解决电压波动引起熄弧角变化的灵敏度问题，假设式（1）中$\beta=2\pi/9$。

不同电流工况情况下，电压波动引起的熄弧角的变化率如图3所示。

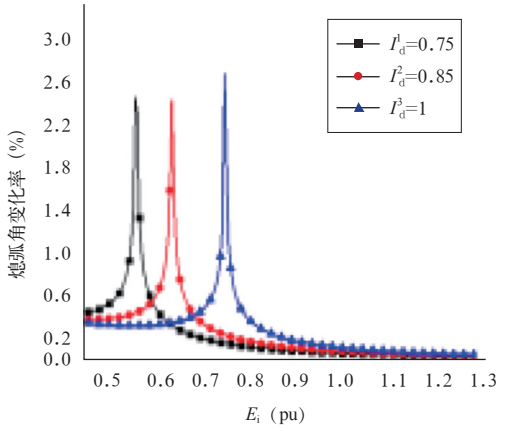


图3 逆变器熄弧角随着电压有效值的变化率

由图3可以看出，交流电压波动和熄弧角为非线性关系，电压跌落会相应地导致熄弧角的减小。标幺值I_d为1，E_i在0.77（pu）以下运行，γ的灵敏度将迅速增加；标幺值I_d为0.85，E_i在0.66（pu）以下运行，γ的灵敏度将迅速增加；标幺值I_d为0.75，E_i在0.58（pu）

以下运行，γ的灵敏度将迅速增加。当熄弧角灵敏度比较大时，较小的电压有效值跌落都可能导致换相失败发生。随着直流电流的下降，熄弧角变化率曲线将整体左移。熄弧角变化灵敏点将会左移。电网电压幅值的下跌会严重影响到逆变器的换相过程。

2.3.2 电压谐波对换相失败的影响

在换相过程中，认为I_d为恒定值。由图2可知，在换相过程中，换相过程中有以下关系[17]。

$$2L_rI_d=\int_{t_1}^{t_2}u_v(t)\mathrm{d}t=S \tag{7}$$

式中，S为线电压波形和在时间[t_1，t_2]上围成的面积。当系统的I_d是一定的时候，换相过程中交流系统需要提供的电压时间面积是一定的。

如果电压波形在时间[t_1，t_2]内的积分面积小于需要的面积$2L_rI_d$，换相重叠角μ就会变大，从而导致关断角γ减小，进而引发换相失败。因此保证换相过程正常进行的交流电压时间面积为

$$S_v=\int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma_{min}}u_v(\omega t)\mathrm{d}\omega t>|S|=2L_r|I_d| \tag{8}$$

式中，S_v为交流系统能提供保证换相顺利进行的电压时间面积；S为换相过程需要提供的电压时间面积。

从式（8）中可以看出，交流电压幅值的下跌和波形畸变都可能导致换相失败发生，幅值E_i对换相失败的影响如2.3.1节所述。

谐波是导致交流电压波形发生畸变的重要因素。同相位的偶次谐波或者相位差大于180°的奇次谐波都会导致电压时间面积减小，电压基波和畸变波形如图4所示。

由图4可知，部分谐波的存在会使电压波形变“窄”，电压时间面积随之减小。因此对逆变站换相过程进行检测时，应重点监测谐波含量。

3 换相失败实时监测

换相失败对于换流器是非常危险的，如果发生连续的换相失败可能会导致重大电力事故[18-20]。因此，对于高压直流输电系统换相过程的在线监测是非常有必要的。

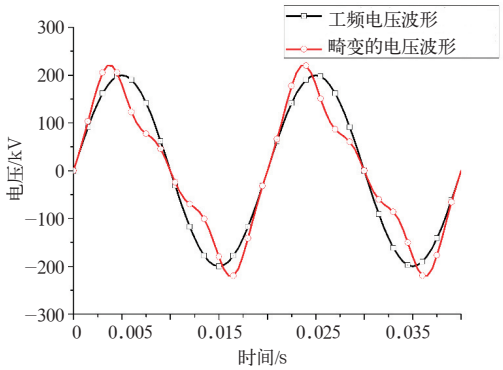


图4 谐波对交流电压时间面积的影响

3.1 基于熄弧角原理的在线监测系统

3.1.1 监测系统原理

从上述可以得知，换相重叠角根据系统参数来决定的，结合式（1）对熄弧角的实时监测原理如图5所示。

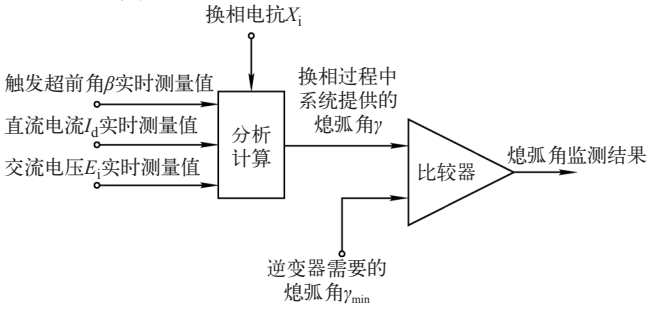


图5 熄弧角实时监测系统

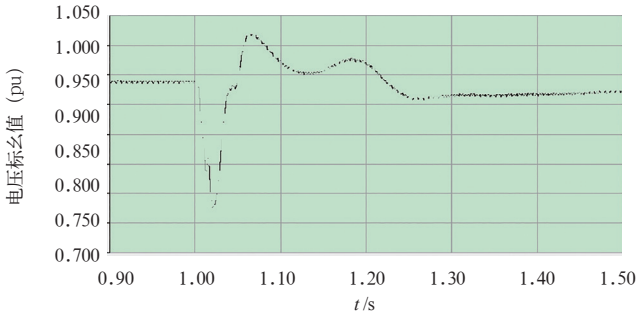
实时根据触发超前角、直流电流和交流电压计算得到每一个周期内系统提供的熄弧角γ，通过和逆变器需要的最小熄弧角γ_{min}进行比较判断换相是否顺利进行。换相成功结果输出“1”，换相失败结果输出“0”，输出结果用于换相失败监测。

3.1.2 熄弧角实时监测系统仿真验证

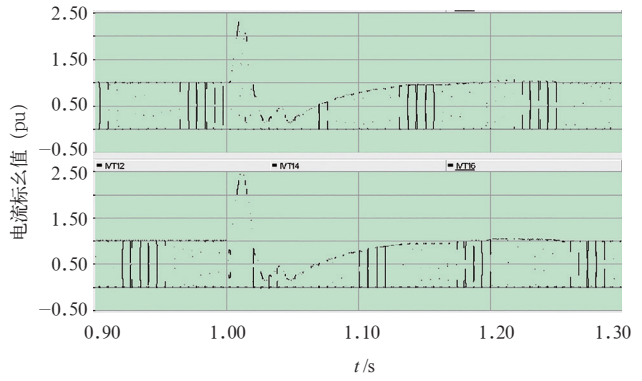
当由于故障原因，导致交流电压出现跌落时，交流电压有效值如图6所示。

图6a中，在1 s时刻，交流电压出现跌落，有效值跌落为原来的67%；根据式（1）可知熄弧角将下降。由图6b可知，换相过程无法顺利进行，发生一次换相失败。由图6c可知，换相失败监测系统在1 s时刻输出结果为“0”，而且只出现了一次“0”输出结果。

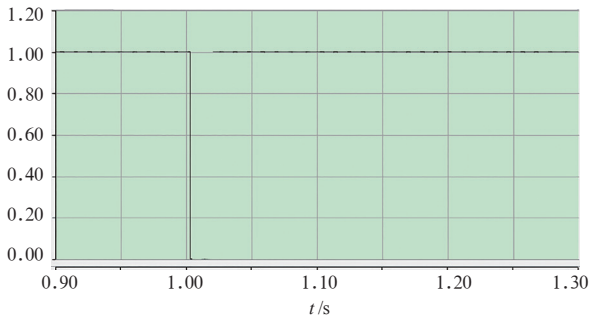
通过熄弧角的监测可以直观地判断换相过程的进行以及发生换相失败的类型（一次、多次和连续多次）等，为换流器的控制保护策略提供依据。



（a）交流电压有效值变化波形



（b）换流器中桥臂电流波形



（c）熄弧角实时监测输出结果

图6　熄弧角实时监测系统仿真结果

3.2 基于电压时间面积方法的监测系统

3.2.1 监测系统原理

交流电压出现谐波时，会导致电压时间面积减小，进而导致换相失败的发生。基于电压时间面积方法的监测系统如图7所示。

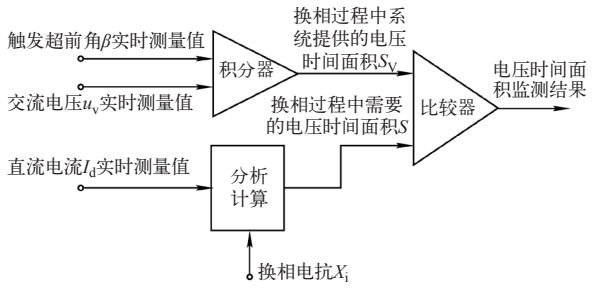
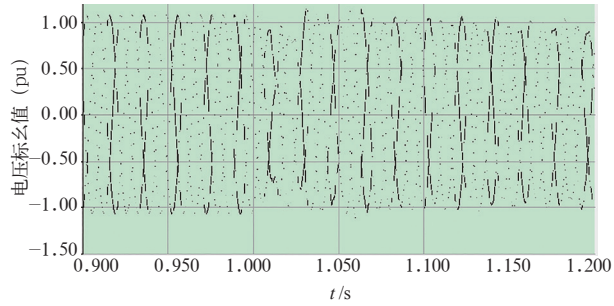


图7　电压时间面积实时监测系统

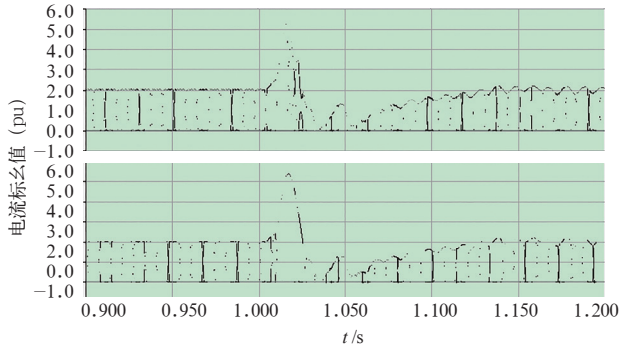
根据实时测量交流电压，可以计算出周期内提供的电压时间面积S_V，然后和系统需要的换相电压时间面积S值实时比较输出，用于观察是否由于谐波因素导致换相失败发生。

3.1.2 电压时间面积监测系统仿真验证

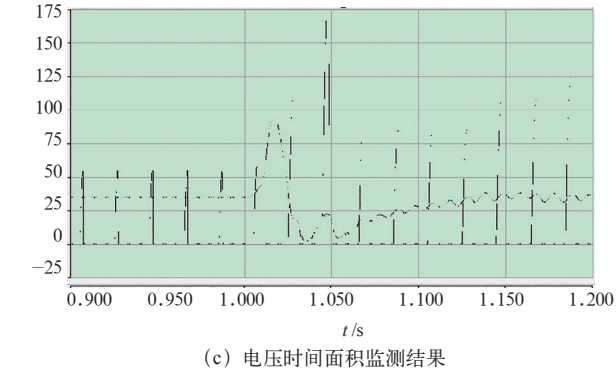
当由于谐波原因导致交流电压发生严重畸变时，交流电压波形图8所示。



（a）交流电压波形



（b）桥臂电流波形



（c）电压时间面积监测结果

图8　电压时间面积实时监测系统仿真结果

在图8中，从1 s时刻到1.02 s时刻，交流电压中由于谐波的作用出现严重的波形畸变，导致换相过程无法进行，出现一次换相失败。根据式（8）可知，换相过程无法顺利进行，发生一次换相失败。实时监测系统显示在1 s时刻交流电压时间面积S_V小于换相过程需要的电压时间面积S。

通过电压时间面积的实时监测系统可以直观

地分析换相过程是否顺利进行，同时可以清楚地反映*Sv*和*S*实时的变化情况，并根据电压时间面积的变化为谐波抑制、无功补偿等用于换相失败预防的设备提供控制依据。

4 结束语

根据本文的分析，可以得出如下结论。

1）高压直流输电系统换相失败的本质原因是系统提供的熄弧角小于换流器自身关断需要的最小熄弧角。导致换相失败的因素的作用机理都是减小了系统提供的熄弧角。

2）交流电压对于换流器来说具有不可控和随系统运行状态不同而不断变化的特性，交流电压幅值跌落和波形畸变都容易引发换相失败。

3）通过换相失败监测系统的观测，可以实时判断每个周期内换相过程是否顺利进行，而且通过所提出的两个监测系统可以清楚地定位换相失败发生位置。通过电压时间面积的监测，可以为后续换相失败的预防和换流器控制保护动作提供依据。

参考文献

[1] 刘振亚．特高压交直流电网[M]．北京：中国电力出版社，2013．

[2] 王兆安．电力电子技术[M]．北京：机械工业出版社，2009．

[3] 王学之，周全，国建宝，等．南方电网直流换相失败机理及判别方法[J]．南方电网技术，2013，7(6)：44-47．

[4] 索明贵．多直流落点系统中高压直流换相失败问题的研究[D]．广州：华南理工大学，2013．

[5] 刘俊磊，王钢，李海锋，等．HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]．中国电机工程学报，2013，33(19)：111-118．

[6] Bauman J，Kazerani M．Commutation failure reduction in HVDC systems using adaptive fuzzy logic controller [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2007，22(4)：1995-2002．

[7] 许韦华，陈争光，汤广福，等．换流阀设备换相失败故障的暂态分析[J]．电网技术，2013，37(6)：1759-1763．

[8] 陈建斌，周保荣，熊卿，等．溪洛渡直流工程换相失败特性及相关因素分析[J]．南方电网技术，2013，7(6)：48-52．

[9] 康青．动态无功补偿设备在高压直流输电换相失败中的应用研究[D]．北京：北京交通大学，2014．

[10] 余瑜，刘开培，陈俊，等．基于调制理论的高压直流输电系统混合谐振型谐波不稳定判据[J]．高电压技术，2014，40(5)：1582-1589．

[11] 李新年，易俊，李柏青，等．直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]．电网技术，2012，36(6)：266-271．

[12] 吴萍，林伟芳，孙华东，等．多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]．电网技术，2012，36(5)：269-274．

[13] 程道卫，刘天琪，张金，等．多落点直流输电系统换相失败影响因素的仿真分析[J]．电网技术，2010，34(11)：59-64．

[14] 邵瑶，汤涌．采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]．中国电机工程学报，2012，32(4)：108-114．

[15] 刘济豪，郭春义，刘文静，等．基于改进换相面积的直流输电换相失败判别方法[J]．华北电力大学学报，2014，41(1)：108-114．

[16] 韩民晓．高电压直流输电原理与运行[M]．北京：机械工业出版社，2013．

[17] 李思思，白仕雄，丁志林，等．基于换相电流时间面积的换相失败判别方法[J]．电力系统及其自动化，2013，25(2)：98-102．

[18] Hansen A，Havemann H．Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2000，15(3)：1022-1026．

[19] 洪潮．直流输电系统换相失败和功率恢复特性的工程实例仿真分析[J]．南方电网技术，2011，5(1)：1-7．

[20] 巢睿祺，叶义新，王杰．多馈入直流输电系统换相失败影响因素的分析与仿真[J]．电力科学与工程，2013，29(11)：11-16．

（收稿日期：2017－04－22）EA

基于V2G的充放电站建模及运行策略研究

目前大部分关于V2G技术的研究都是针对电动汽车侧或电网侧的，而对于电动汽车和电网之间的充放电站侧的研究则较少。在分析充放电站建模的五个要素前提下对考虑V2G的充放电站进行建模，并给出其V2G容量及充放电量计算模型。然后针对V2G模式下充放电站运行研究一种基于双荷电状态临界的V2G策略，并通过对比充放电站运行在无序充电策略和基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电量和充放电费用，验证基于双荷电状态临界的V2G策略有效性。

张宏伟　张向锋　文传博／上海电机学院电气学院

张宏伟／硕士研究生

关键词／Keywords

V2G·
电动汽车·
充放电站·

0　引言

随着电动汽车数量逐渐达到一定规模[1]，电动汽车大规模入网给电力系统的稳定运行带来不可忽视的影响[2-3]。首先，其充电地点的分散性、充电时间的随机性和充电频率的变化等，使得电网对这些负荷难以预测和控制；其次，由于电动汽车充放电的随机性和不确定性，其接入后将对电网装机容量及变压器运行能力等提出更高的要求[2-4]。

为了减小大量电动汽车充放电对电网的影响，V2G(Vehicle to Grid)技术应运而生。V2G的核心思想是利用电动汽车自带的储能电池为电网和微电网提供电能缓冲，电动汽车既可以在用电低谷时从电网中吸收能量，同时，其动力电池也可作为储能系统，在电网负荷离峰时段，反向供电，实现电动汽车与电网能量互动。

目前关于V2G技术已有一些研究。文献[5-6]利用V2G 技术帮助电网系统调峰、调频和经济运行。文献[7]考虑了用户起始充放电时刻的Poisson分布特性，基于经济学理论提出了电动汽车放电需求函数。文献[8]定义了“V2G可用容量”概念，同时研究了引入私家 EV 电池群集、公交 EV 电池集群和梯次利用EV电池集群参与微网V2G服务的方案。文献[9]在考虑电动汽车用户的充电需求、动力电池的充电约束和传输线的功率约束的基础上，以配电网负荷曲线波动方差最小为目标，构建了优化分析模型。文献[10]提出了考虑放电模式的单台电动汽车迟滞控制模型。在此基础之上，研究一种基于迟滞控制模型的集群电动汽车参与实时需求响应的V2G 控制策略。文献[11]提出了基于优先级的集群电动汽车实时需求响应控制策略。文献[12]提出了一种电动汽车V2G放电负荷时空分布预测方法。以城市停车需求预测模型为基础，分析了工商业区和居住区内电动汽车在时空上的停放分布特性。文献[13]研究了停车场应用场合下，电动汽车用户V2G运行如何实现收益最大化的问题。文献[14]提出一种V2G模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法。文献[15]在充分考虑电V2G作用前提下，建立合理的电价机制，引导电动汽车用户在负荷高峰期合理有序地充放电。文献[16]总结了大规模电动汽车接入对配电网的影响，同时从市场、服务以及存在的挑战等几方面对V2G技术做了详细介绍。文献[17]系统地总结了电

动汽车接入对电源发展、电网运行和充电设施影响，并分析了电动汽车V2G的研究现状和应用难点。

充放电站是电动汽车充放电的主要场所，也是电动汽车和电网之间实现V2G的重要媒介。然而，目前有关V2G技术的研究大多数是针对电动汽车侧的，而有关充放电站方面的研究又主要针对充放电站的选址定容[18-21]、运营模式[20]和入网[22]等方面，而对充放电V2G模式下的建模和充放电策略方面研究较少。

与受诸多不确定因素影响的电动汽车侧相比，充放电站侧充放电量更大，且更具规律性，尤其是当充放电站具备一定规模的时候，充放电站进行V2G调度对电网削峰填谷效果更好。本文将对充放电站的建模要素进行分析，研究充放电站V2G容量和充放电量的计算模型，并提出基于双荷电状态临界的充放电站V2G策略，通过与无序充电策略的对比，验证该策略的有效性。

1 充放电站建模的要素分析

1.1 充放电站的性质

根据停车场所服务对象的不同，可将停车场分为以下几个类型。

1）居民区停车场。这类停车场主要是服务于小区的居民业主或者租户等。

2）机关单位或企业的停车场。这类停车场主要服务于上班族。

3）服务性行业停车场（服务性行业例如酒店、餐馆、网吧、酒吧和电影院等）。这类停车场主要服务于进行购物、娱乐和消遣的人们。

这三类停车场使用情况有明显的差异：由于人们大部分遵守白天上班，晚上回家的生活规律，居民区停车场和机关单位或企业的停车场都有明显的昼夜特征。服务性行业停车场使用情况则与其他两种停车场不同，尽管白天服务性行业停车场使用率会比夜晚服务性行业停车场使用率稍高，但之间差距较小，远没有其他两种停车场那么大。图1为某地区三种不同类型停车场的停车位使用情况[23]。

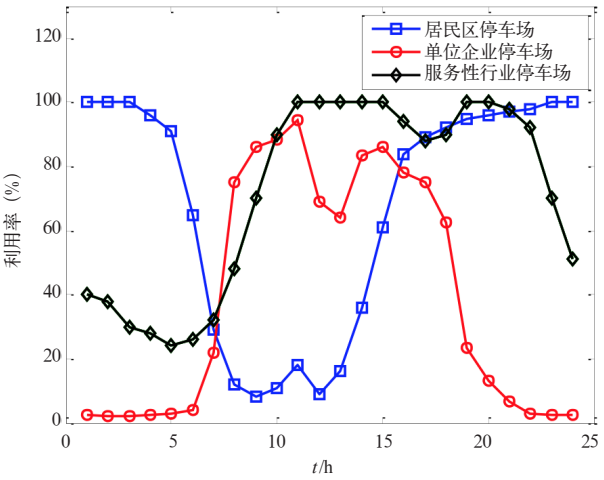


图1 某地区三种不同类型停车场的停车位使用率

与停车场类型划分相似，把充放电站分为：居民区充放电站、机关单位或企业的充放电站和服务性行业充放电站。这些不同类型的充放电站的使用特点与上述讨论的停车场使用特点相同。

1.2 站内进行充放电的电动汽车数量

站内进行充放电的车辆数决定着充放电站电动汽车V2G的容量，为方便建模，进行如下假设：①假设每一辆停在含充电桩的停车位的电动汽车都会立即进行充放电；②含充放电桩的停车位与其所处的停车场停车位使用率相等；③含充放电桩的停车位只能被电动汽车使用。

通过以上假设，即可计算得某时刻充放电站内进行充放电的电动汽车数量，计算公式为

$$evCarMum_i(t)=total_stop\eta\beta(t) \quad (1)$$

式中，evCarMum(t)为t时刻该充放电站内进行充放电的电动汽车数量；total_stop为该停车场总的停车位数量；η为该停车场内含充放电桩的停车位数量占总停车位数量的百分比；$\beta(t)$为该时刻停车场内停车位使用率。

1.3 站内进行充放电的电动汽车的电池容量及充放电功率

电动汽车的电池容量及充放电功率与该电动汽车的参数有关，目前市场上几种常见的电动汽车参数如表1所示。

表1 几种常见的电动汽车型号及参数

指标	特斯拉 MODELS70	日产 Altra	日产 leaf	荣威 E50	比亚迪 E6
电池容量/kW·h	70	33	24	18	60
百公里耗能/(kW·h/100 km)	15.5	14.2	12	10	19.5
续航能力/km	420	200	161	180	300
常规充电功率/kW·h	8.75	5	4.8	3.6	12

假设以上五种电动汽车出现在停车场的概率相等，则可得某一时刻停车场内不同类型的电动汽车数量及总的电池容量，计算公式分别为

$$\mathrm{evCarNum}_i(t)=0.2\mathrm{evCarNum}(t)\quad i\in\{1,2,3,4,5\} \tag{2}$$

$$\mathrm{total_battery}(t)=\sum_{i=1}^{5}\mathrm{evCarNum}_i(t)C^i_{\mathrm{battery}}\quad i\in\{1,2,3,4,5\} \tag{3}$$

式中，i为电动汽车的种类，电动汽车从表1中选择；$\mathrm{evCarMum}_i(t)$为t时刻停车场内第i种电动汽车的数量；C^i_{battery}为第i种电动汽车的储能电池容量；total_battery(t)为t时刻停车场内电动汽车储能电池总容量。

1.4 站内进行充放电的电动汽车储能电池的荷电状态

电动汽车储能电池的荷电状态是决定电动汽车充放电行为的依据，也是决定电动汽车V2G充放电容量的因素。在文献[24]提出的V2G可用容量的基础上，进一步对电动汽车荷电状态作如下划分，如图2所示。

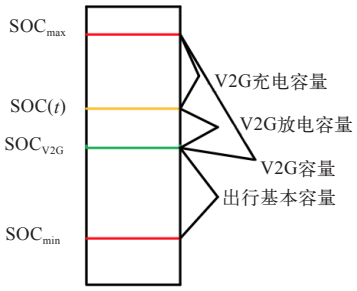


图2 对电动汽车荷电状态的划分一

图2中，$\mathrm{SOC}_{\min}$为正常使用情况下电动汽车电池荷电状态下限；$\mathrm{SOC}_{\max}$为正常使用情况下电动汽车荷电状态上限。正常情况下电动汽车的荷电状态都会在上下限之间，本文中$\mathrm{SOC}_{\max}$=0.85，$\mathrm{SOC}_{\min}$=0.20，后文均按照此约束。$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$为电动汽车荷电状态的V2G临界，当电动汽车停在含充电桩的停车位时若其荷电状态低于该临界值时，则该电动汽车立即充电，该临界值由用户自行设定。SOC(t)为电动汽车储能电池当前荷电状态。

图2中，将电动汽车SOC在[$\mathrm{SOC}_{\min}$，$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$]之间的荷电状态区间称为电动汽车的基本出行容量区间；将SOC在[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]之间的荷电状态区间称为电动汽车V2G容量区间。若充放电站内的任意一辆电动汽车的荷电状态在基本出行容量区间，则该电动汽车会立即进行充电；若充放电站内的任意一辆电动汽车荷电状态在V2G区间，则电动汽车将按照设定的V2G充放电策略进行充放电。

由图2的荷电状态划分可得出单辆电动汽车的基本出行容量、V2G容量、V2G充电容量和V2G放电容量的计算公式。

当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\min}$，$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$]时，有

$$C_{\mathrm{base}}=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}-\mathrm{SOC}_{\min}) \tag{4}$$

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\max}-SOC_{\mathrm{V2G}}) \tag{5}$$

$$C^{\mathrm{In}}_{\mathrm{V2G}}(t)=0 \tag{6}$$

$$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)=0 \tag{7}$$

当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]时，有

$$C_{\mathrm{base}}=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}-\mathrm{SOC}_{\min}) \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}(\mathrm{SOC}_{\max}-\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}) \tag{9}$$

$$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}[\mathrm{SOC}_{\max}-\mathrm{SOC}(t)] \tag{10}$$

$$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)=C_{\mathrm{battery}}[(\mathrm{SOC}(t)-\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}] \tag{11}$$

式中，C_{base}为电动汽车的出行基本容量；$C_{\mathrm{V2G}}(t)$为t时刻电动汽车的V2G容量；$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)$为$t$时刻电动汽车的V2G充电容量；$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)$为$t$时刻电动汽车的V2G放电容量。

由式（8）～式（11）可得，当SOC(t)∈[$\mathrm{SOC}_{\mathrm{V2G}}$，$\mathrm{SOC}_{\max}$]、$C_{\mathrm{V2G}}(t)$和$C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)$及$C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t)$三者之间存在如下关系，即

$$C_{\mathrm{V2G}}(t)=C^{\mathrm{in}}_{\mathrm{V2G}}(t)+C^{\mathrm{out}}_{\mathrm{V2G}}(t) \tag{12}$$

由式（4）～式（11）亦可看出，对于单辆电动汽车来说，在荷电状态的V2G临界确定的情况

下，其出行基本容量和V2G容量是定值，而其V2G充电容量和V2G放电容量则是随电动汽车此刻荷电状态变化而变化的。

1.5 站内电动汽车车辆的充放电时长

电动汽车的充放电时长，影响着电动汽车的充放电量，两者之间关系式为

$$C_{\text{power}}^{\text{in}} = P_{\text{in}} T_{\text{in}} \tag{13}$$

$$C_{\text{power}}^{\text{out}} = P_{\text{out}} T_{\text{out}} \tag{14}$$

式中，$C_{\text{power}}^{\text{in}}$为电动汽车的充电电量；$C_{\text{power}}^{\text{out}}$为电动汽车的放电电量；$P_{\text{in}}$为电动汽车的充电功率；$P_{\text{out}}$为电动汽车的放电功率；$T_{\text{in}}$为电动汽车充电时间；$T_{\text{out}}$为电动汽车的放电时间。

2 充放电站V2G容量及V2G充放电容量的计算模型

充放电站V2G容量表示某时刻站内所有电动汽车能参与V2G的最大容量，而V2G充放电容量表征着充放电站某时刻站内电动汽车能够按照V2G策略充放电的最大容量。式（4）和式（5）给出了单台电动汽车V2G容量和V2G充放电容量的计算模型，本节将据此给出充放电站的某时刻的V2G容量和V2G充放电容量的计算模型。

充放电站的V2G容量和V2G充放电容量的计算公式为

$$C_{\text{V2G_}s}(t) = \sum_{i}^{m} C_{\text{V2G}} \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{15}$$

$$C_{\text{V2G_}s}^{\text{in}}(t) = \sum_{i=1}^{m} C_{\text{V2G}}^{\text{in}}(t) \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{16}$$

$$C_{\text{V2G_}s}^{\text{out}}(t) = \sum_{i=1}^{m} C_{\text{V2G}}^{\text{out}}(t) \quad , \quad m = \text{evCarNum}(t) \tag{17}$$

式中，$C_{\text{V2G_}s}(t)$为充放电站t时刻V2G容量；$C_{\text{V2G_}s}^{\text{in}}(t)$为充放电站$t$时刻V2G充电容量；$C_{\text{V2G_}s}^{\text{out}}(t)$为充放电站$t$时刻的V2G放电容量。

3 充放电站充放电量计算模型

对电动汽车充放电站建模不同于对电动汽车建模：电动汽车可以通过使用者的出行习惯及电动汽车的参数建立模型预测其日行里程和充放电时长，而电动汽车充放电站无法预测其站内电动汽车的充放电时长。本节将研究一种考虑V2G技术的电动汽车充放电站充放电量的计算模型。

本节考虑V2G技术的电动汽车充放电站充放电量的计算模型是基于以下两个基本假设的。

1）如果ΔT_{set}为模型设定的单位计算时间长度，且$t_1 - t_2 = \Delta T_{\text{set}}$，则如果$t_1$时刻某辆电动汽车在充放电站进行充放电，那么$t_2$时刻该电动汽车仍在充放电站进行充放电。

2）如果ΔT_{set}为模型设定的单位计算时间长度，且$t_1 - t_2 = \Delta T_{\text{set}}$，则如果$t_1$时刻某辆电动汽车处于充电状态，那么$t_2$时刻该电动汽车仍处于充电状态；或者如果$t_1$时刻某电动汽车处于放电状态，则$t_2$时刻该电动汽车仍处于放电状态。

有了以上两个假设，就可以得到$t_1 \sim t_2$时间段内，充放电站的总充放电电量的计算公式为

$$C_{\text{power_total}}^{\text{in}}(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^{m} [\lambda_i^1 P_i^{\text{in}} T_i^{\text{in}}(t_1, t_2)] \quad m = \text{evCarNum}(t_1) \tag{18}$$

$$C_{\text{power_total}}(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^{m} [\lambda_i^2 P_i^{\text{out}} T_i^{\text{out}}(t_1, t_2)] \quad m = \text{evCarNum}(t_1) \tag{19}$$

$$t_2 - t_1 = T_{set} \tag{20}$$

式中，$C_{\text{power_total}}^{\text{in}}(t_1, t_2)$和$C_{\text{power_total}}^{\text{out}}(t_1, t_2)$分别为$t_1 \sim t_2$时间段内，充放电站的总充电电量和总放电电量；$\lambda_i^1$为$t_1$时刻第$i$辆电动汽车的充电状态指示，若$t_1$时刻，该电动汽车处于充电状态，则$\lambda_i^1$值为1，否则为0；$\lambda_i^2$为$t_1$时刻第$i$辆电动汽车的放电状态指示，若$t_1$时刻，该电动汽车处于放电状态，则$\lambda_i^2$值为1，否则为0；$P_i^{\text{in}}$和$P_i^{\text{out}}$分别为第$i$辆电动汽车的充电功率和放电功率；$T_i^{\text{in}}(t_1, t_2)$、$T_i^{\text{out}}(t_1, t_2)$分别为$t_1 \sim t_2$时间段内，第$i$辆电动汽车的充电时长和放电时长，h。

由于t_1和t_2之间的时间间隔等于计算单位时间长度ΔT_{set}，故由基本假设2）可得

$$T_i^{\text{in}}(t_1, t_2) = T_i^{\text{out}}(t_1, t_2) = \Delta T_{\text{set}} \tag{21}$$

结合式（15）～式（20）亦可知，若$t_1 \sim t_2$的时间间隔等于设定的模型计算单位时长ΔT_{set}，那么$t_1 \sim t_2$时间段内的充放电站内的总的充放电量仅与t_1时刻充放电站内电动汽车的状态有关，与t_2时刻

无关。

下面利用式（18）～式（21）计算一家服务性行业充放电站在16:00～17:00时间段内的充放电总量。该充放电站里面有200个带充放电桩的停车位，由图1可得，该类型停车场16:00时刻的停车位利用率为94%，则16:00时刻停车场内共有192辆电动汽车在进行充放电。设ΔT_{set}=1 h，则可得16:00～17:00的充放电电量计算公式为

$$C^{in}_{power_total}(16:00,\ 17:00)=\sum_{I=1}^{192}P_i^{in}\lambda_i^1 \quad (22)$$

$$C^{out}_{power_total}(16:00,\ 17:00)=\sum_{I=1}^{192}P_i^{out}\lambda_i^2 \quad (23)$$

结合实际，很明显，若设ΔT_{set}=1 h，则充电站内电动汽车有不少电动汽车可能不遵守上面提到的两个基本假设，这就会使得模型计算出来的结果与实际相比有很大误差。为了减小这种误差应该将ΔT_{set}设置的小些，如设ΔT_{set}=0.05 h，这样即使把16:00～17:00的时间段分为20个计算单位时间长度，每个计算单位时间长度为3 min。按照式（18）～式（21）把每个计算单位长度内的充放电总量计算出来，然后相加，即可得到16:00～17:00内充放电站充电总量和放电总量。由于ΔT_{set}设置的非常小，因此，在ΔT_{set}内充放电站里绝大部分电动汽车都满足上面提到的两个基本假设。

4 基于双荷电状态临界的充放电站V2G策略

4.1 策略介绍

如果不加V2G充放电策略进行引导的话，电动汽车用户会在到达充电站后即开始充电，不考虑峰谷分时电价的影响，这将加剧系统负荷高峰时的电能需求。而且用户一般不会主动放电，来帮助电网削峰填谷，这种情况叫做无序充电。

显然无序充电会加剧电网负荷的波动，影响其稳定性。人们寄希望于V2G策略能削弱这样问题。本节将在分时电价下讨论一种用户侧和电网侧共享充放电决策权的V2G策略，即基于双荷电状态临界的V2G策略。

基于双荷电状态临界的V2G策略在对电动汽车荷电状态划分的基础上，增加一个V2G价格临界SOC_{V2G_price}，如图3所示。

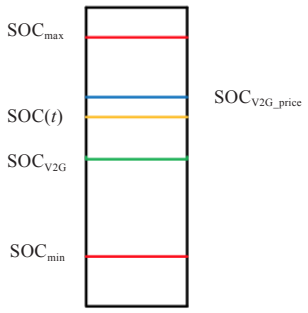


图3 对电动汽车荷电状态的划分二

由图3可以看出，相比图2，其多了一条SOC_{V2G_price}分界线，其中$SOC_{V2G_price}\in[SOC_{V2G},\ SOC_{max}]$，$SOC_{V2G_price}$的设立将帮助电动汽车更合理地充放电。

基于双荷电状态临界的V2G策略具体如下。

1）当$SOC(t)\in[SOC_{min},\ SOC_{V2G}]$时，电动汽车只充电不放电。

2）当$SOC(t)\in[SOC_{V2G},\ SOC_{V2G_price}]$时，若此时充放电站电价为峰电价时，电动汽车放电，若此时充放电站电价为平电价和谷电价时，电动汽车充电。

3）当$SOC(t)\in[SOC_{V2G_price},\ SOC_{max}]$时，若此时充放电站电价为峰电价和平电价时，电动汽车放电，若此时充放电站电价为谷电价时，电动汽车充电。

充放电站是该策略的执行者，电动汽车进入充放电站充放电时会被强制执行此策略。

4.2 策略分析

从4.1节基于双荷电状态临界的V2G策略中可以看出：

1）用户侧和电网侧均对电动汽车充放电有决策权：用户侧可以通过改变SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值来改变电动汽车充放电；电网侧则可通过改变发给充放电站的分时电价来改变电动汽车

充放电。

2）当充放电站当前分时电价处于谷电价时，电动汽车不管荷电状态和SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值如何，都会进行充电；而当荷电状态在[SOC_{V2G}，SOC_{max}]区间内而充放电站内分时电价为峰电价时，电动汽车不管荷电状态和SOC_{V2G}、SOC_{V2G_price}这两个临界值如何，都会进行放电。

注意：在模型和策略中，电网发给充放电站的分时电价可以与电网的分时电价相同，也可以不相同，为了达到调度目的，不同的充放电站收到电网发来的分时电价也可以不同。

5 算例及仿真分析

5.1 算例

某大型酒店（服务性行业）的停车场共有100个安装有充放电桩的停车位，这些停车位组成一个充放电站。该停车场出现电动汽车类型如表2（表2中没给出放电功率，本文按放电功率等于充电功率的0.65倍计算）所示，并假定每种电动汽车出现概率相同。假定每时刻充放电站内的电动汽车的荷电状态满足期望方差如表2所示的正态分布。该停车场的分时电价如图4所示，所有电动汽车荷电状态的V2G临界定为SOC_{V2G}=50%，V2G价格临界SOC_{V2G_price}=0.65。

表2 充放电站内电动汽车的荷电状态正态分布在不同时刻的期望和方差

时刻	期望	方差
1:00	51	7
2:00	51	8
3:00	50	7
4:00	50	7
5:00	49	6
6:00	49	6
7:00	50	7
8:00	52	7
9:00	54	7
10:00	54	8
11:00	52	7
12:00	50	9
13:00	48	9
14:00	46	9
15:00	45	8
16:00	46	6
17:00	46	7
18:00	45	8
19:00	47	6
20:00	47	6
21:00	48	8
22:00	49	7
23:00	50	6
24:00	50	7

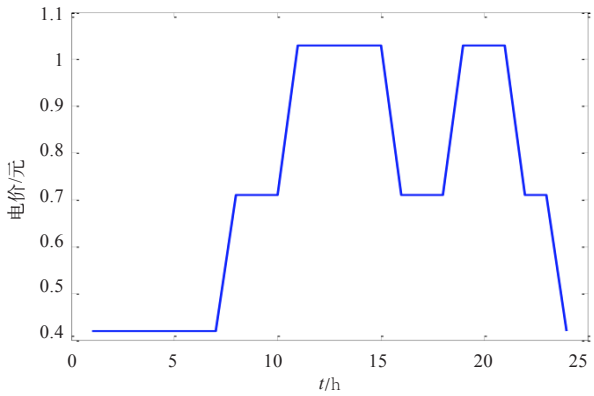


图4 充放电站分时电价

5.2 充放电站V2G容量及V2G充放电容量的计算

任一时刻充放电站的V2G容量和V2G充放电容量计算步骤如下。

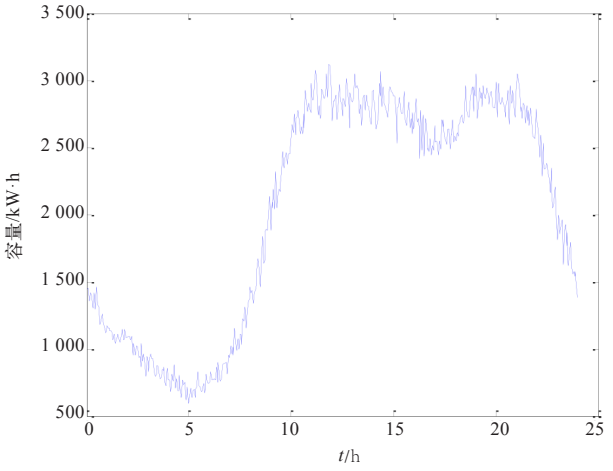
1）获得该时刻充放电站内车辆数evCarMum(t)。

2）从表1中随机抽取不同类型的电动汽车，抽取evCarMum(t)次，得到t_1时刻充放电站内这evCarMum(t)辆电动汽车的参数（主要有用的参数是电池容量和充放电功率）。

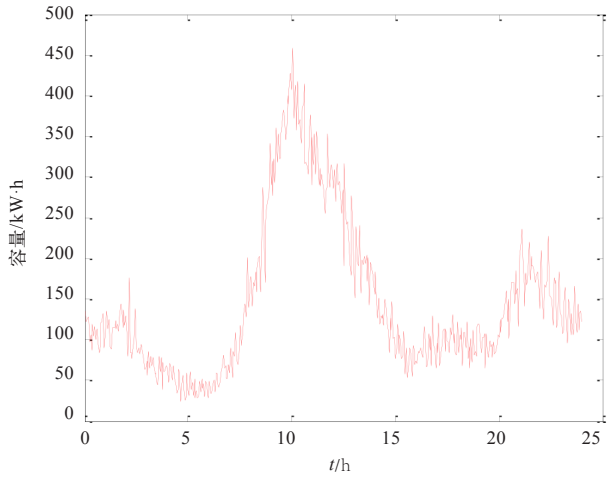
3）得到t_1时刻充放电站内evCarMum(t)量电动汽车每辆车的荷电状态；根据式（4）～式（11）即可以计算出单台电动汽车的V2G容量、V2G放电容量和V2G充电容量，然后按式（15）～式（17）即可得充放电站的V2G容量、V2G充放电容量。

以3 min为时间间隔（即每1 h 20个计算时刻），计算全天480个不同计算时刻的充放电站的V2G容量和V2G充放电容量。

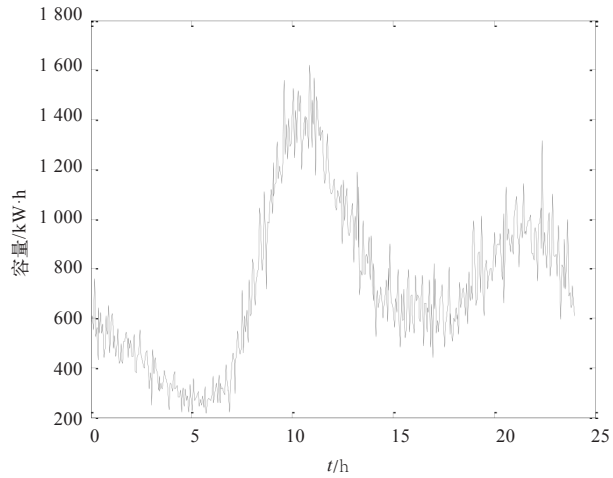
已知充放电站每个小时的电动汽车数量和电动汽车荷电状态分布参数，为了获得每个计算时刻的充放电站内的电动汽车数量和荷电状态分布参数，分别对图1和表2中的数据进行样条插值，获得计算时刻充放电站内的电动汽车数量和荷电状态的分布参数，并将其带入到式（4）～式（11），求得计算时刻的充放电站内电动汽车V2G容量、V2G充电容量和V2G放电容量，所得结果如图5所示。



（a）V2G容量随时间的变化



（b）V2G充电容量随时间的变化



（c）充放电站V2G放电容量随时间的变化

图5　充放电站V2G容量随时间变化

5.3　充放电站充放电量的计算

（1）无序充电策略下的充放电站运行

无序充电策略下充放电站只有充电负荷，而没有放电负荷。对无序充电策略下的充放电站运行进行仿真，结果如表3所示。

表3　无序充电策略下充放电站各时段的总充电电量和电费

时段	充电电量/kW·h	充电电费/元
0:00～1:00	308.230	129.47
1:00～2:00	267.475	112.34
2:00～3:00	236.687 5	99.41
3:00～4:00	196.260	82.43
4:00～5:00	178.375	74.92
5:00～6:00	167.360	70.29
6:00～7:00	202.595	85.09
7:00～8:00	275.792 5	115.83
8:00～9:00	404.495	287.19
9:00～10:00	544.777 5	386.79
10:00～11:00	639.267 5	453.88
11:00～12:00	685.797 5	706.37
12:00～13:00	674.670	694.91
13:00～14:00	684.245	704.77
14:00～15:00	682.942 5	703.43
15:00～16:00	657.202 5	676.92
16:00～17:00	618.725	439.29
17:00～18:00	612.415	434.81
18:00～19:00	637.622 5	452.71
19:00～20:00	676.752 5	697.06
20:00～21:00	677.850	698.19
21:00～22:00	645.485	664.85
22:00～23:00	562.087 5	399.08
23:00～24:00	410.175	291.22
总计	11 647	9 461

（2）基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电站运行

基于双荷电状态临界的V2G策略下的充放电站既有充电电量也有放电电量，所以要计算充电费用也要计算放电收入。对基于双荷电状态临界的V2G策略运行充放电站进行仿真，结果如表4所示。

对比表3和表4可以发现，基于双荷电状态临界的V2G充放电策略下，该酒店充放电站运行一天净充电电量相比无序充电策略下的情况减小了3 560 kW·h，减幅达到30.56%（由于无序充电策略下，充放电站只有充电电量没有放电电量，所以其充电电量可视为净充电电量，充电电费可视为净充电电费），净充电电费相比无序充电策略下的情况减少了3 597元，减幅达到38.02%。可见基于双荷电状态临界的V2G策略能够减小充放电站净充电负荷量，同时减小净充电费用，证明了其策

表4 基于双荷电状态临界的V2G策略下充放电站各时段的总充放电电量和充放电费用

时间段	充电电量/kW·h	放电电量/kW·h	净充电电量/kW·h	充电电费/元	放电收入/元	净充电电费/元
0:00～1:00	316.842 9	0	316.842 9	133.074	0	133.07
1:00～2:00	262.983 4	0	262.983 4	110.453	0	110.45
2:00～3:00	227.754	0	227.754	95.656 7	0	95.66
3:00～4:00	195.175 9	0	195.175 9	81.973 9	0	81.97
4:00～5:00	175.816 5	0	175.816 5	73.842 9	0	73.84
5:00～6:00	172.690	0	172.690 0	72.529 8	0	72.53
6:00～7:00	202.513 5	0	202.513 5	85.055 7	0	85.06
7:00～8:00	273.265 4	0	273.265 4	114.771 5	0	114.77
8:00～9:00	385.782 5	12.486 5	373.296	273.905 6	8.865 4	265.04
9:00～10:00	491.412 5	30.267 3	461.145 2	348.902 9	21.489 7	327.41
10:00～11:00	611.100	27.837 9	583.262 1	433.881	19.764 9	414.12
11:00～12:00	305.225	242.736	62.489	314.381 7	250.018 1	64.36
12:00～13:00	383.340	194.668 5	188.671 5	394.840 2	200.508 6	194.33
13:00～14:00	424.075	166.068 5	258.006 5	436.797 2	171.050 6	265.75
14:00～15:00	479.785	128.222 2	351.562 7	494.178 5	132.068 9	362.12
15:00～16:00	495.985	108.395 6	387.589 4	510.864 6	111.647 5	399.22
16:00～17:00	617.712 5	0.669 5	617.043	438.575 9	0.475 3	438.10
17:00～18:00	601.202 5	2.804 8	598.397 7	426.853 8	1.991 4	424.86
18:00～19:00	645.550	1.7453	643.804 7	458.340 5	1.239 1	457.10
19:00～20:00	450.297 5	144.079	306.218 5	463.806 4	148.401 4	315.41
20:00～21:00	429.690	157.012 4	272.677 6	442.580 7	161.722 7	280.86
21:00～22:00	383.210	172.136 2	211.073 7	394.706 3	177.300 3	217.41
22:00～23:00	547.182 5	2.770 6	544.411 9	388.499 6	1.967 1	386.53
23:00～24:00	402.805	2.119	400.686	285.991 5	1.504 5	284.49
总计	9 481.4	1 394	8 087.40	7 274.5	1 410	5 864.4

略的有效性。

另外结合表4和图4可知，当电价处于谷电价时段（0:00～7:00），充放电站放电量为0；而当电价处平电价时段（7:00～10：00、15:00～18:00和21:00～23:00），放电量比较小；而当电价处于峰电价时段(10:00～15:00 和18:00～21:00)，放电量较大，这与4.2节中的策略分析的第三条相呼应。同时这也表明在V2G技术下，电网运营商可以通过改变发送给充放电站的分时电价来引导充放电站内的电动汽车负荷进行充放电，达到削峰填谷的目的。

6 结束语

在目前大多数V2G的研究中，充放电站所扮演的角色常被忽略。本文针对V2G的充放电站侧进行建模，分析了充放电建模的五个基本要素，并给出了充放电站V2G容量和充放电量计算的模型，然后针对V2G下充放电站的运行，研究了一种基于双荷电状态临界的V2G策略，并让充放电站分别按无序充电策略和基于双荷电状态临界的V2G策略运行，计算两种情况下充放电站的净充电容量和净充电费用。证明充放电站运行在基于双荷电状态临界的V2G策略下时净充电量和充电费用更少，且结合电站分时电价信息可以进一分析得出充放电站运行在基于双荷电状态临界的V2G策略下时，电网能够通过改变分时电价达到削峰填谷的目的。

参考文献

[1] 张文亮，武斌，李武峰，等．电动汽车我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]．电网技术，2009，33(4)：1-5．

[2] Qian Kejun，Zhou Chengke，Allan M，et al．Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2011，26(2)：802-810．

[3] Kristien C，Edwin H，Johan D．The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2010，25(1)：371-380．

[4] Clement-Nyns K，Haesen E，Driesen J．The impact of charging plug-in hybrid electric vehicle on a residential distribution grid[J]．IEEE Transactions Power Systems，2010，25(1)：371-380．

[5] Kadurek P，Ioakimidis C，Ferrao P，et al．Electric vehicles and their impact to the electric grid in isolated systems[C]．Lisbon:Proceedings of International Conference on Power Engineering，Energy and Electrical Drives，2009：49-54．

[6] Sekyung H，Soohee H，Sezaki K．Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2010，1(1)：65-72．

[7] 项顶，宋永华，胡泽春．电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]．中国电机工程学报，2013，33(31)：15-25．

[8] 翁国庆，张有兵，戚军，等．多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J]．电工技术学报，2014，29(8)：36-45．

[9] 雷永强．基于V2G的配电网负荷优化策略研究[J]水电能源科学，2013，3(8)：208-211．

[10] 唐佳，王丹，贾宏杰．基于迟滞模型的集群电动汽车参与实时需求响应V2G控制策略研究[J]．2017，41(7)：2155：2164．

[11] Kumar K N，Sivaneasan B，So P L．Impact of priority criteria on electric vehicle charge scheduling[J]．IEEE Transactions on Transportation Electrification，2015，1(3)：200-210．

[12] 刘晓飞，崔淑梅，谢富鸿．基于停车需求模型的电动汽车V2G放电负荷时空分布预测[J]．电气工程学报，2015，10(8)：22-28．

[13] 刘晓飞，崔淑梅，李锦塘．停车场电动汽车用户侧最优V2G控制策略研究[J]．电气工程学报，2015，10(10)：44-50．

[14] 王湘，杨健维，何正友．一种 V2G 模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法[J]．电网技术，2014，38(8)：2213-2219．

[15] 艾圣芳，林湘宁，万云飞，等．考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]．中国电机工程学报，2013，33(4)：122-129．

[16] Su W，Rahimi-Eichi H，W Zeng，et al．A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]．IEEE Transactions on Industrial Informatics，2012，8(1)：1-10．

[17] 胡泽春，宋永华，徐智威，等．电动汽车接入电网的影响与利用[J]．中国电机工程学报，2012，32(4)：1-10．

[18] 寇凌峰，刘自发，周欢．区域电动汽车充电站规划的模型与算法[J]．现代电力，2010，27(4)：44-48．

[19] 刘志鹏，文福栓，薛禹胜，等．电动汽车充电站的最优选址和定容[J]．电力系统自动化，2012，36(3)：54-59．

[20] 高赐威，张亮，薛飞，等．考虑集中型充电定址分容的电网规划研究[J]．中国电机工程学报，2012，32(7)：40-46．

[21] 杜爱虎，胡泽春，宋永华，等．考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]．电网技术，2011，35(11)：35-42．

[22] 曹一家，谭益，黎灿兵，等．具有反向放电能力的电动汽车充电设施入网典型方案[J]．电力系统自动化，2011，35(14)：48-52．

[23] 潘驰，赵胜川，姚荣涵．基于出行目的停车行为差异性分析[J]．交通信息与安全，2012，30(1)：39-42．

[24] 刘晓飞．电动汽车V2G系统及充放电控制策略研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015．

（收稿日期：2017－09－21）EA

基于TMS320F2812控制的高频逆变死区时间补偿方法研究

为了防止逆变桥中同一个变流臂上下两组元件同时导通而引起直流侧电源的短路，要求导通上下桥臂的PWM互不重叠，就此提出了一种基于TMS320F2812控制的高频逆变死区时间补偿方法。通过实验表明，该补偿方法能合理地控制死区时间，避免同一个变流臂上的上下两组元件同时导通，成功地解决了逆变电路输出电压失真的问题，操作简单、实用性强，有广阔的应用前景。

万英英　李　宏／西安石油大学电子工程学院

万英英／硕士研究生

关键词／Keywords

高频逆变·

死区时间·

死区补偿·

0　引言

在逆变桥中，同一个变流臂上下两组元件绝对不能同时导通，否则会发生短路。为了避免逆变过程中同一桥臂上下开关管直通的现象，必须为其设定适当的死区时间。一般都采取先断开再导通的方法来控制逆变电路中同一桥臂上两个高速开关器件的打开和关断。不合理的死区时间设置会使得系统输出电压的幅值和相位产生一定的误差，并且随着开关频率的提高，误差电压也会不断地累积，这样不但会引发严重的电压波形畸变现象，同时基频电压也会下降，更为严重时还可能会产生高次谐波，对电网的污染较严重[1]。因此，死区时间的合理设置对高频逆变电路的设计来说是至关重要的。与此同时如果死区时间设置不合理，会使逆变器产生过高的浪涌电压，这个电压往往能够达到额定电压的几十倍甚至近百倍，情况严重时将会直接导致器件损坏。所以很有必要对逆变电路中同一变流臂上的上下两组电力电子器件添加合适的死区时间补偿。死区时间的补偿方法通常可分为硬件补偿和软件补偿这两种。通过查阅相关文献资料可知死区时间的软件补偿不需要添加硬件电路，而且更加灵活，适应性更强。国外基本都使用软件补偿的方法对死区时间进行补偿[2]。

根据对硬件死区时间补偿和软件死区时间补偿方法知识的了解和优缺点的分析，本文提出了基于TMS320F2812控制的高频逆变死区时间补偿的软件补偿方法。由于该方法仅根据原始的驱动信号进行死区时间的补偿，因此当没有电流流过逆变电路中的电力电子器件时，系统仍然为其提供相对应的驱动信号，因而不会导致逆变电路输出电压波形的失真[3]。

1　带有死区控制的PWM电路

数字化是现代控制系统的核心，TMS320F2812作为TI公司具有较强信号处理能力和编程较简单的处理器，其共有EVA和EVB这两个事件管理器模块所包含的功能单元是完全相同的。由于事件管理器中存在PWM电路，所以事件管理器的比较单元可以通过比较功能来产生PWM波。EVA模块中的PWM电路功能和EVB的一样，只是改变了相应的寄存器[4]。下面以EVA模块为例对PWM电路的功能进行详细介绍，功能框图如图1所示。

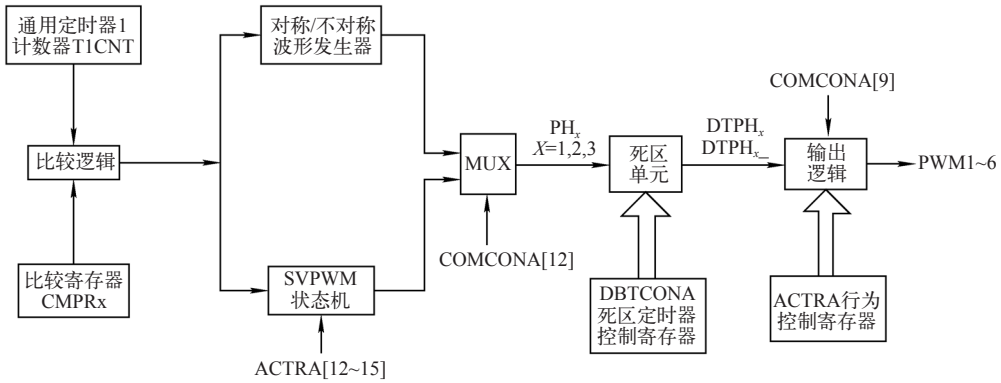


图1　EVA模块的PWM电路功能框图

EVA模块的PWM电路的功能单元由图1可知主要包括比较逻辑、非对称/对称波形发生器、可编程的死区单元、输出逻辑和SVPWM状态机。当有一个比较匹配事件生成时，波形发生器就相应地产生一对互补的PWM波形。然后通过死区单元为这对PWM波设置适当的死区时间，改变原始的PWM波形。最后，输出的PWM波形的状态再通过输出逻辑电路对其进行设置。当输出逻辑是高电平有效时，输出PWM的逻辑和波形发生器的逻辑相同，即比较匹配后输出高电平；当输出逻辑为低电平有效时，输出PWM的逻辑与波形发生器的逻辑相反。当输出逻辑始终为低电平时，则比较匹配后输出低电平；当输出逻辑恒定为高时，则输出高电平。

2　死区的产生原理

比较单元的PWM电路之所以会输出带有死区的PWM波形，是因为其内部可编程的死区单元的存在。死区单元的输入是PH_x，它来自比较单元的非对称/对称波形发生器。正常情况下，对于每一个输入信号PH_x，都会产生$DTPH_x$和$DTPH_{x_}$这两个输出信号，在未使能比较单元和它相关输出的死区时，这两个输出信号是完全一致的。当比较单元的死区被启用并且为输入信号设置适当的死区时间后，输出信号如图2所示。PH_x的上升沿延时t_{BD}，下降沿不变，就形成了$DTPH_x$；$PH_{x_}$的上升沿延时t_{BD}，下降沿不变，就形成了$DTPH_{x_}$。当比较单元的死区禁止时，即死区时间为0，这时PHx和DTPHx是相同的，$PH_{x_}$和$DTPH_{x_}$也是相同的。

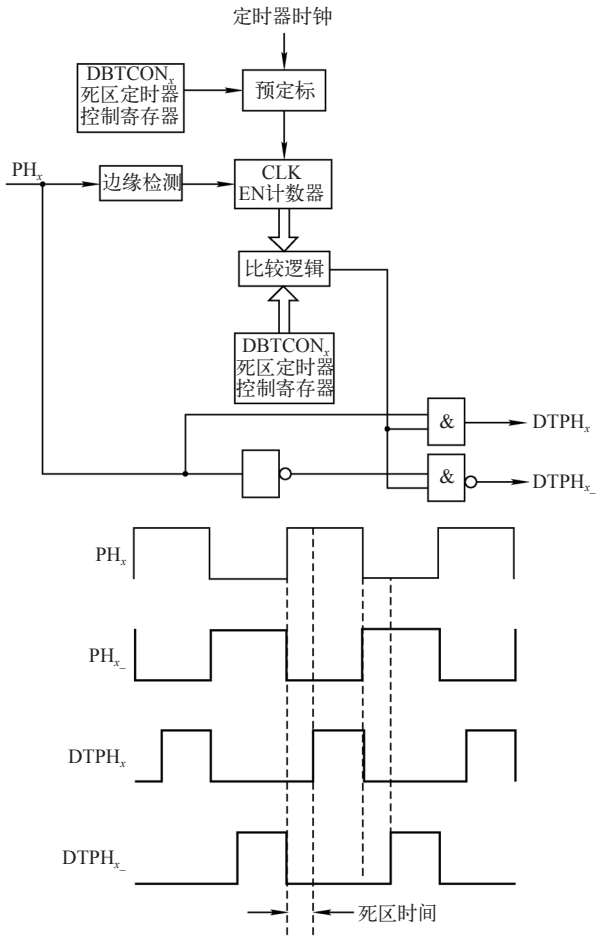


图2　死区单元模块图

当使能比较单元后，每一个输入信号PHx就会输出具有死区时间的$DTPH_x$和$DTPH_{x_}$这两路互补的PWM信号，并且死区时间为t_{BD}。设置死区的目的是防止逆变桥中同一个变流臂上下两组元件在任何操作下同时导通，而导致直流侧电源的短路[5]。在设置死区时间之前，必须对死区控制器$DBTCON_x$[8~11]位的死区定时器周期和

DBTCON$_x$[2~4]位的死区定时器预定标因子进行合理设置。

死区时间的计算方法如下：若将死区定时器周期设置为T，死区定时器预定标因子设置为x/p，高速时钟HSPCLK的时钟周期设置为t，则死区时间tBD为：$t_{BD}=T_{pt}$。

3 死区时间的软件实现

本论文中选用的TMS320F2812芯片具有16位定点，40MIPS的执行速度和25 ns缩短指令周期，由于执行速度达到了一定的高度，操作数寻址允许支持并行的程序。该芯片中的33个捕获单元能够捕获到引脚上的电压跳变，并可以获得相应信号的频率。所以，此芯片使用在逆变桥中同一个变流臂上下两组元件驱动波形的死区时间补偿控制上显得游刃有余。死区时间设置的软件流程如图3所示。在死区时间设置的软件流程中，采用中断程序中的查表方法，用其结果参数与比较器中的值进行比较，然后更新SPWM表中函数的值并产生调制比，即载波和调制波的比发生变化。这样不断重复循环，就会得到带有死区时间的PWM波形。

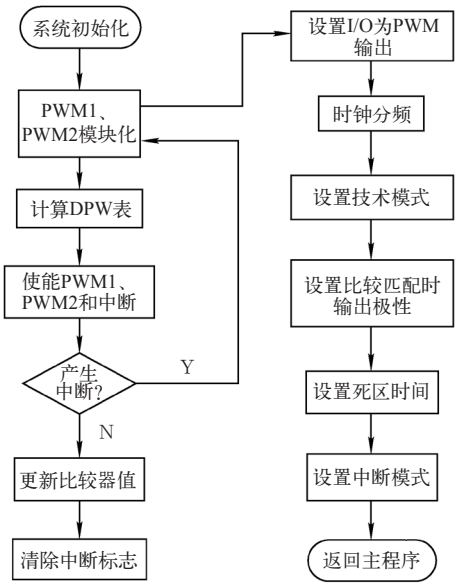


图 3 死区时间的软件设计流程

4 实验结果与分析

开关电源的直流电源方案在国内刚刚起步，主要用于小功率场合，该方案中高频逆变电路是必不可少的。在本实验中，以开关电源为基础，应用4个IGBT作为高频逆变电路中的电力电子器件，并且选用4个具有自保护功能的HL402驱动器对IGBT进行驱动，并采用软件死区补偿方法对逆变桥中同一个变流臂上下两组元件的驱动波形进行死区补偿，进一步验证本论文提出的软件死区时间补偿方法的可操作性。具体电路如图4所示。

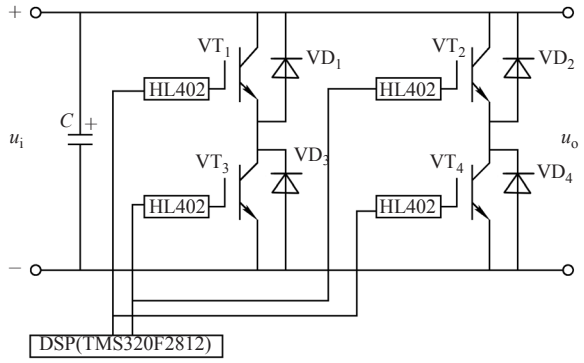


图4 高频逆变电路

当全桥逆变电路对角线上的IGBT未添加死区时间的补偿方法时，其驱动波形如图5所示。根据波形显示，在没有设置合理的死区时间的情况下，对角线上的IGBT是同时开通和关断的。然而，由于IGBT的开通和关断具有一定的延迟时间，所以非常容易发生同一桥臂上的IGBT直通的现象，更严重时则会发生正负电源短路故障，进而不可避免地会影响到整个开关电源正常运行。再有现在国内无法生产IGBT，使用的IGBT全部依赖进口，所以维护技术及备件有所限制，在使用时应尽量保护其不受损坏。而加入死区时间补偿，可大大减小逆变电路中主功率器件IGBT损坏的风险，更好地保障整个系统正常运行。

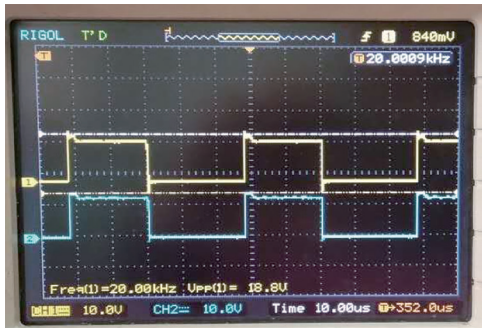


图 5 未添加死区时间补偿时对角线上的IGBT的驱动波形

由于IGBT的工作频率为20 kHz，一个开关周期为50 μs，参考IGBT参数可以得出，IGBT最大开通时间和关断时间不超过1 μs，即死区时间t_d必须大于2 μs。在本实验中，IGBT的死区时间设置为5 μs，死区时间采取对称方式插入，即IGBT导通时延迟$t_d/2$，关断时提前$t_d/2$，来实现整个死区时间为t_d。添加死区时间补偿之后，同一桥臂的上下IGBT的驱动波形如图6所示。图7为开关电源的输出电压波形。由图7可看出，输出电压波形相当理想。

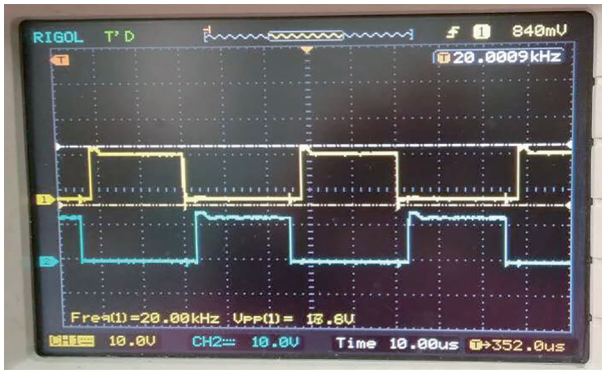


图 6　添加死区时间补偿方法后同一桥臂上下IGBT的驱动波形

图 7　开关电源的输出电压波形

5　结束语

实验中，通过改变TMS320F2812芯片中相关参数的值，可以得到带有死区时间的驱动波形。即本实验在开关电源基础上设计的逆变电路，其同一桥臂上的开关器件IGBT的驱动波形成功地通过软件死区时间补偿方法为其设置了合适的死区时间补偿。本实验证实了所提出的基于TMS320F2812软件死区时间补偿方法的实用性和可操作性都比较强，可以准确地开通和关断逆变电路中的电力电子开关管IGBT，使得电路输出理想的电压波形，保证了整个电源系统能够稳定运行。

参考文献

[1] 刘庆雪，姜文化，杜兆．基于DSP的高频电源死区时间的选择系统[J]．电测与仪表，2008(10)：56-61．

[2] 杨脱颖，李 宏．一种DSP控制的高频逆变器死区时间补偿方法[J]．工业控制计算机，2017(3)：128-129．

[3] 顾卫刚．手把手教你学DSP:基于TMS320X2812x[M]．北京：北京航空航天大学出版社，2011．

[4] 万山明．TMS320F2812xDSP原理及应用实例[M]．北京：北京航空航天大学出版社，2007．

（收稿日期：2018－11－03）EA

电力系统电压调节器在大型发电机组中的应用

基于电力系统电压调节器（PSVR）控制原理和数学模型，分析了PSVR与调差的区别；以温州发电厂300 MW发电机PSVR实际应用工程为背景，通过试验验证了PSVR在提高机组动态无功方面的作用。试验结果表明，通过适当修改PSVR系数，可以使PSVR静态特性与调差系数基本一致；PSVR的放大倍数越大，其负调差特性越好。

于 颖[1] 陈新琪[2] 陈 蓉[3] 王一鹤[2] 韩 兵[4]/1.萧山发电厂 2.浙江浙能技术研究院有限公司 3. 温州发电厂 4. 南京南瑞继保电气有限公司

于 颖/工程师

关键词/Keywords

电力系统电压调节器（PSVR）·

调差·

动态无功·

0 引言

随着西电东送工程的逐步实施，多条大功率交流输电通道和多馈入直流输电的出现，500 kV及以上系统短路容量大幅降低，充足的动态无功储备对于保持受端电网电压稳定性及动态无功支撑越来越重要[1]。

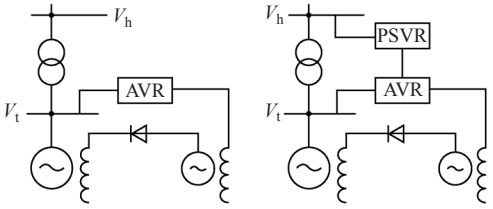
常规发电机励磁调节器都以控制发电机机端电压为目标，在电网故障需要更多无功功率以提高系统电压稳定性方面存在不足。若加装电力系统电压调节器，可以提高发电机有效无功储备容量，达到提高电力系统电压稳定性的目的。因此，近年来，采用发电机主变压器高压侧电压控制的励磁控制方式得到了重视[2-11]。

本文以温州电厂300 MW发电机电力系统电压调节器（Power System Voltage Regulator，PSVR）实际应用工程为背景，基于PSVR控制原理及现场试验结果，分析PSVR与调差的区别，并定量分析PSVR对发电机动态无功功率的影响，检查PSVR对PSS有效性的影响。

温州发电厂三期工程220 kV母线共接有5号机和6号机两台300 MW机组，均采用发电机主变压器单元接线方式。为提高发电机励磁系统调节性能，提高发电机动态无功水平，改造后的PCS9410励磁调节器实现了PSVR功能。为了考验PSVR性能指标是否符合设计要求，需通过现场试验加以检验。

1 PSVR控制原理及数学模型

常规励磁调节器（AVR）励磁控制方式以发电机的电压偏差作为反馈量进行调节，并维持发电机机端电压V_t为给定值；PSVR控制方式引入发电机主变压器高压侧电压V_h参与AVR的控制，以控制发电机机端外某一点电压为目标，可以补偿发电机升压变压器的电抗，使发电机高压侧母线电压维持在较高水平。控制方式如图1所示。PSVR由V_h与高压母线电压给定V_{href}的比较、放大、相位补偿、输出限幅和投入退出控制等环节组成，其输出结果送至AVR控制励磁电流，使高压母线电压维持在较高的稳定运行范围内。图2为PSVR控制系统的数学模型，其中点画线框内为PSVR的控制组成。



（a）AVR方式 （b）PSVR方式

图1 发电机励磁控制方式

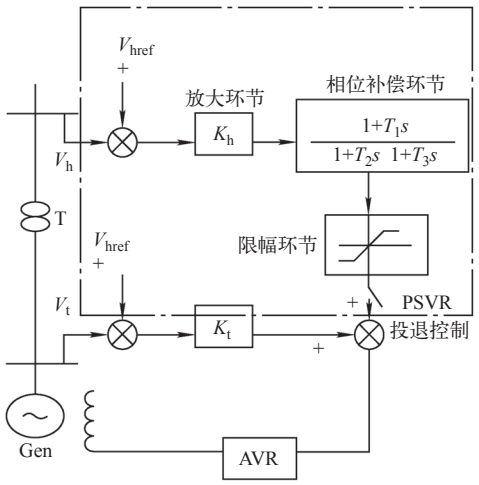


图2 PSVR控制系统数学模型

2 PSVR与调差功能的区别

2.1 原理分析

不考虑AVR的调差功能，设AVR为无差调节，且不考虑暂态调节过程影响，可得稳态方程为

$$K_h\left(V_{href}-V_h\right)+K_a\left(V_{tref}-V_t\right)=V_{err}\approx 0 \tag{1}$$

$$V_t-V_h\approx I_P R_T+I_Q X_T \tag{2}$$

式中，I_P、I_Q为发电机的有功和无功电流；R_T、X_T为升压变压器的电阻和电抗。

经过整理可得

$$K_h\left(V_{href}-V_t+I_P R_T+I_Q X_T\right)+K_t\left(V_{href}-V_t\right)=0 \tag{3}$$

$$K_h\left(V_{href}-V_h\right)+K_t\left(V_{tref}-V_h-I_P R_T-I_Q X_T\right)=0 \tag{4}$$

由式（3）得

$$\Delta V_t=\frac{K_h}{K_h+K_t}X_T\Delta I_Q+\frac{K_h}{K_h+K_t}R_T\Delta I_P+\frac{K_h\Delta V_{href}+K_t\Delta V_{tref}}{K_h+K_t} \tag{5}$$

由式（4）得

$$\Delta V_h=-\frac{K_t}{K_h+K_t}X_T\Delta I_Q-\frac{K_t}{K_h+K_t}R_T\Delta I_P+\frac{K_h\Delta V_{href}+K_t\Delta V_{tref}}{K_h+K_t} \tag{6}$$

式（5）和式（6）的第一项是无功调差率，第二项是有功调差率，第三项是平移。

可见，调节给定不影响调差率；调差率由K_t和K_h的比例决定。

考虑调节器原来的无功调差系数D_Q和有功调差系数D_P，即

$$\Delta V_t=-D_Q\Delta I_Q-D_P\Delta I_P \tag{7}$$

则式（5）为

$$\Delta V_t=\left(\frac{K_h}{K_h+K_t}X_T-D_Q\right)\Delta I_Q+\left(\frac{K_h}{K_h+K_t}R_T-D_P\right)\Delta I_P+\frac{K_h\Delta V_{href}+K_t\Delta V_{tref}}{K_h+K_t} \tag{8}$$

因 $V_t-V_h\approx I_P R_T+I_Q X_T$ （9）

由式（8）和式（9），得

$$\Delta V_h=\left(-\frac{K_t}{K_h+K_t}X_T-D_Q\right)\Delta I_Q+\left(-\frac{K_t}{K_h+K_t}R_T-D_P\right)\Delta I_Q+\frac{K_h\Delta V_{href}+K_t\Delta V_{tref}}{K_h+K_t} \tag{10}$$

由式（8）和式（10）可以得到如下结论：

1）PSVR减少等效的主变压器电抗和电阻，减少程度取决于K_t和K_h的比例，具有负调差的作用，但不影响发电机组原有调差系数D_Q和D_P。

2）由于PSVR采用闭环控制，PSVR比负调差特性更优越。

2.2 PSVR与调差系数静特性对比测试

在稳态情况下，通过投切电容器、电抗器记录了分别投入调差、PSVR情况下端电压与无功出力的情况，具体如图3所示。横坐标为无功功率标幺值，纵坐标为机端电压标幺值。

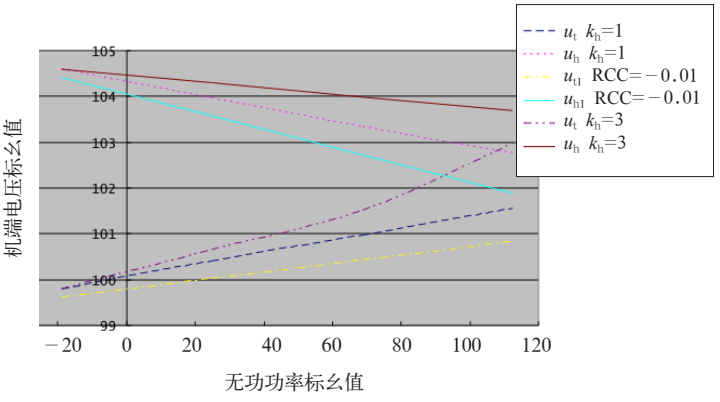


图3 不同调差、PSVR参数情况下发电机静特性

由图3可见，PSVR具有负调差系数的特性。

根据无功调差系数的计算方法与记录数据，当PSVR的放大倍数为1时，其等效调差系数为－1.23%；而当调差系数设为－1%时，其实测调差系数为－0.934%。由此可见，通过适当修改PSVR系数，可以使PSVR静态特性与调差系数的一致；PSVR的放大倍数越大，其负调差特性越好。

3　现场试验结果

3.1　PSVR对调差功能的影响试验

现场调整发电机至额定机端电压附近，保持给定值不变，分别在PSVR退出和投入情况下，逐步调整调差设定值参数，观察无功功率变化情况，如图4、图5所示。

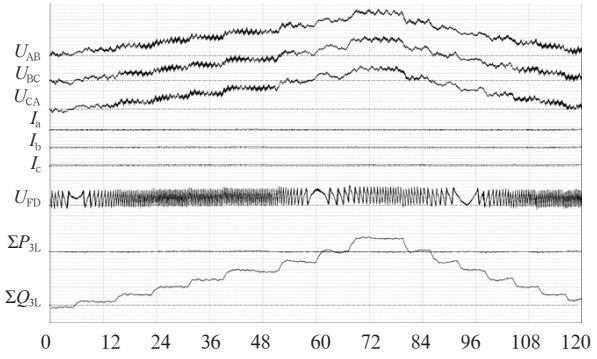


图4　PSVR退出调差功能试验

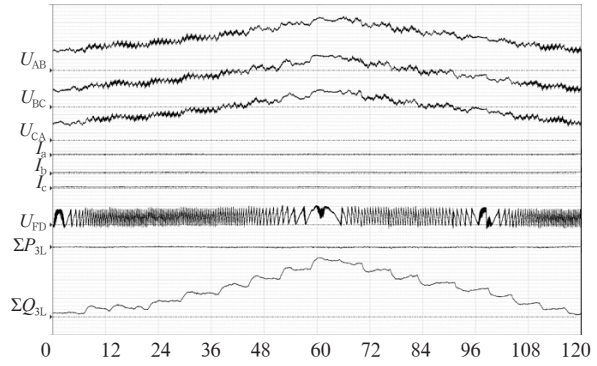


图5　PSVR投入调差功能试验

由图5可知，PSVR可以与常规AVR调差功能一起使用，PSVR的投入使发电机与系统的联系更加紧密，对调差系数改变引起的无功功率变化反应灵敏。

3.2　进行无功冲击和切除无功试验

在PSVR投入或退出的不同工况下，进行6号机±3%电压给定阶跃试验，观测5号机无功电压的影响，如图6、图7所示。由图6、图7可得5号机无功电压的变化量，如下表所示。

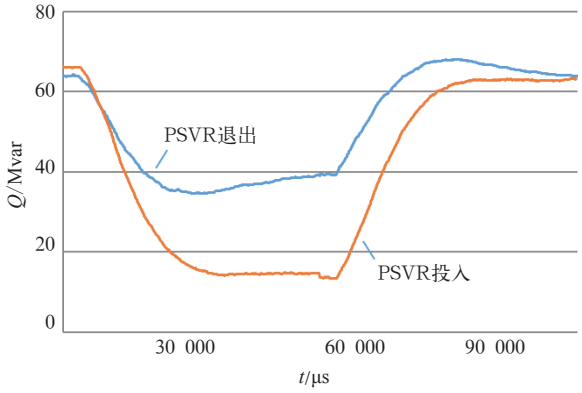


图6　6号机PSVR退出5号机无功变化

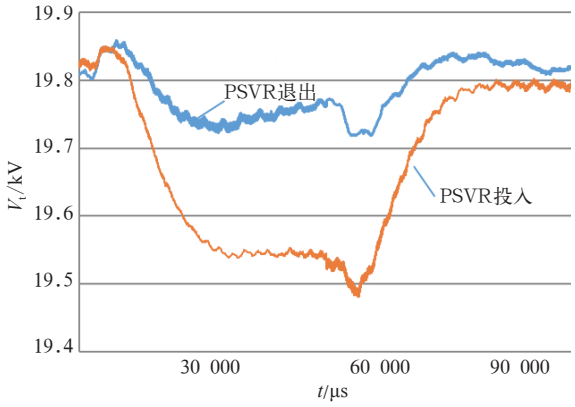


图7　6号机PSVR退出5号机机端电压

表　6号机阶跃响应试验PSVR对5号机无功电压的影响

条件		V_t/V	Q/Mvar	P/MW
5号机PSVR退出，6号机PSVR退出（t25）	+3%阶跃前	19 888	65.63	296.91
	+3%阶跃后	19 844	41.65	298.84
5号机PSVR投入，6号机PSVR退出（t24）	+3%阶跃前	19 929	68.97	299.25
	+3%阶跃后	19 603	14.58	299.42

由上表数据可知，当5号机PSVR投入时，6号机3%阶跃试验引起的5号机电压和无功功率变化相比于5号机PSVR退出时大30.4 Mvar。因此，PSVR的投入使发电机与系统联系更加紧密，对系统的无功负荷波动更灵敏。

比较PSVR投入前后的阶跃波形，可以发现在PSVR投入后，AVR电压给定阶跃前后的机端电压U_g变化减小，由此可见发电机与系统的联系更加

紧密，部分补偿了发电机升压变压器电抗。

4 结束语

1）现场试验结果表明，采用PSVR与常规AVR相比较更有利于维持系统电压，暂态电压恢复更快。

2）试验结果表明，通过适当修改PSVR系数，可以使PSVR静态特性与调差系数的基本一致；PSVR的放大倍数越大，其负调差特性越好。

3）PSVR可以与常规AVR调差功能一起使用，使发电机本身与系统的联系更加紧密，对系统的无功负荷波动反应灵敏，电压调节特性好，更有利于大系统的电压稳定性。

参考文献

[1] 吴浩，郭瑞鹏，甘德强，等．发电机有效无功储备的分析和计算[J]．电力系统自动化，2011，35(15)：13-17.

[2] 李福兴，徐光昶，郭明星，等．发电机与电网参数配合的研究[J]．华东电力，2008，36(11)：33-36.

[3] Dmitry Kosterev．Design，installation and initial operation experience with line drop compensation at John Day Powerhouse[J]．IEEE Transaction on Power System，2001，16(2)：261-265.

[4] Davies J B，Midford L E．High side voltage control at manitoba hydro[C]．Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting，Washington，2000.

[5] Sandro Corsi．The secondary voltage regulation in Italy[C]．Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting，Washington，2000.

[6] 李基成．电力系统电压调节器PSVR[J]．水电厂自动化，2001，10(4)：1-7.

[7] 王琦，周双喜，朱凌志．采用高压侧电压控制改善系统的角度稳定性[J]．电网技术，2003，27(6)：19-21.

[8] 周晓渊，邱家驹，陈新琪．高压侧电压控制对单机－无穷大系统稳定性的影响[J]．中国电机工程学报，2003，23(1)：60-63.

[9] 陈新琪，陈皓，竺士章．电力系统电压调节器参数整定[J]．中国电力，2004，37(7)：12-15.

[10] 陈新琪，俞鸿飞，卢嘉华，等．电力系统电压调节器原理及试验分析[J]．电力系统自动化，2012，36(3)：92-96.

[11] 陈新琪，孙维真，周依芬，等．电力系统电压调节器对浙江电网电压稳定性的影响[J]．中国电力，2013，46(12)：16-19.

（收稿日期：2018－10－15）EA

甘肃省高压电力客户智能交费模式研究

目前电力公司的电费回收形势十分严峻和复杂，因此亟需设计合理的费控改造方案，彻底解决电费回收困难问题。主要从费控设备、费控方式两方面提出合理的改造方案，并针对方案实施过程提出改造建议。

王林信　罗世刚　黎启明　台树杰／国网甘肃省电力公司

王林信／高级工程师

关键词／Keywords
电费回收·
费控改造·
费控方式·

0　引言

高压费控是在用电信息采集的基础上，通过现场安装高压费控装置，实现对用户远程停电、送电管理，解决营销业务中电费回收困难等问题，同时将用电后付费方式改变为预付费方式，降低供电企业的电费回收风险，提升管控能力[1]。

目前在国内总体经济形势下行情况下，各电网公司企业经营成本和经营风险加大，电费回收异常困难。西部地区高耗能行业大幅减产，欠费金额巨大，停电追费和社会稳定之间的矛盾异常突出，造成了电力公司的电费回收形势十分严峻和复杂。

此外，由于长期受计划经济时期电力消费“先用电后付费”习惯的影响，每个抄表催费周期需要消耗大量人力、物力和财力用于催费、停电和复电的工作，而且电费回收效果甚微，电费拖欠已经成为困扰供电企业经营和发展的重要问题之一。为有效缓解电费收取困难，减小企业资金压力加大的问题，需要改变人们的用电消费方式，推广普及先付费后用电。

因此，亟需提出合理可靠的解决方案来改善目前电费回收形势严峻的局面。本文提出的费控系统解决方案适合于电力公司、医院、物业、石油石化、通信、生产企业和公司等企事业单位。选择预付费计费方式，可实现交费方式多样化、自动远程控制等目标，进一步减少费用支出，解决收费难的问题。

1　费控设备的改造

在实际工作中，要求费控装置可以实现对高供高计、高供低计的用户采用不同的技术方案，通过已有用电信息采集系统实现对用户的电费计算、欠费判断及进行远程欠费分闸、缴费后手动（自动）合闸功能，彻底解决电费回收困难问题，并精确判断故障进行有效隔离。费控装置技术实现拓扑如图1所示。

1.1　高供高计

10 kV高供高计拟采用两种规格的安装方式：WS－ZKW8型高压预付费装置与WS-ZKW32型高压预付费装置。该装置由开关、费控计量箱、计量互感器和控制机构等组成。实物如图2和图3所示。

1.2　费控计量箱

将电能表和终端等设备集中在一起安装，有一表位和二表位可供选择，便于安装维护管理。箱体有电源、分闸指示灯、合闸指示灯、报警灯、分闸按钮和合闸按钮等辅助设备。具有安装方

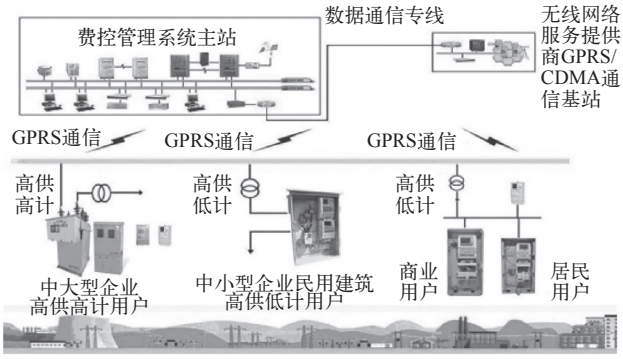


图1 费控装置技术实现拓扑图

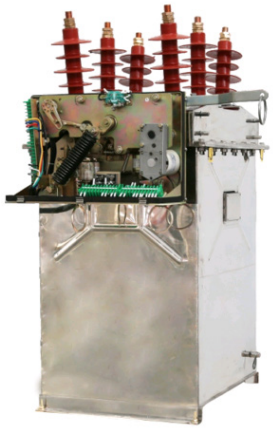


图2 WS－ZKW8型高供高计

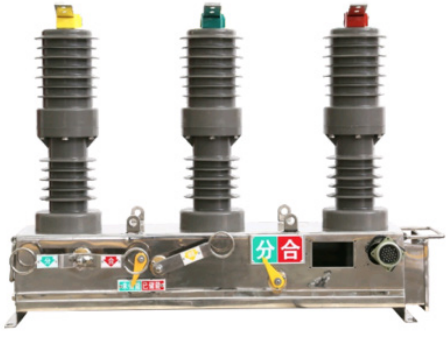


图3 WS－ZKW32高供高计

便、易于管理、辅助指示多、方便观察与排查故障、箱体可加铅封及防止人为破坏等。

此外，还可利用现有费控计量箱进行改造，当不需要费控计量箱时，可以在已有的设备上进行改造[2]。

1）只将控制线接入至终端或电能表进行远程分闸。

2）采用在箱体上打孔的方式加装分闸、合闸等按钮。

该方案的优点是：省去了箱体，改造成本降低。

该方案的缺点是：现有箱体存在损坏或安装装置不够，不直观，不美观。

针对费控计量箱现场接线的控制方式改造问题，新装箱体上的功能已经比较完整，不需要太多的人工干预；而老旧的箱体需要进行现场改造，改造的方式有以下两种：

1）利用客户现有高压开关（需具备手动与电动操动机构），加装费控计量箱。

2）利用客户现有高压开关或加装高压开关（需具备手动与电动操动机构），不加装费控计量箱。在现场已安装了费控计量箱的情况下，直接将控制回路接入终端或电能表进行控制。

1.3 通用接线控制方式改造

国家电网Ⅲ型终端辅助端子定义如图4所示。

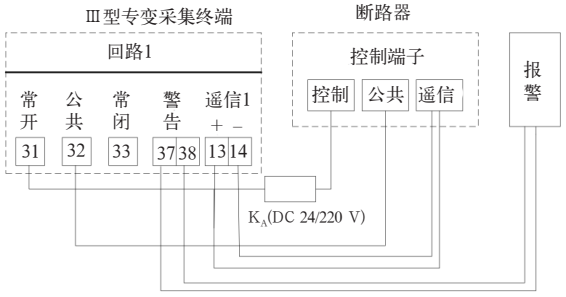


图4 国家电网Ⅲ型终端辅助端子定义

接线注意事项如下。

1）遥控接线。对失电压型跳闸操动机构，遥控线接到终端输出继电器的常闭触点，如轮次1的32、33；对励型跳分闸操动机构，遥控线接常开触点，如轮次1的31、32（遥控输出、告警输出继电器的容量为AC 250 V/5 A，使用时不能超出继电器的容量范围）。

2）遥信接线。遥信采用无源空接点，遥信与遥控对应关系为：轮次1对遥信1，轮次2对遥信2。

3）告警接线。告警输出触点为常开。告警控制原理与遥控相同，所以其接线方式也类似于遥控接线。

此外，可以利用电能表进行本地与远程相结合的费控方式，由电能表辅助端子跳闸。DTZY341C型电能表辅助端子定义如图5所示，电能表控制方式接线示意图如图6所示。

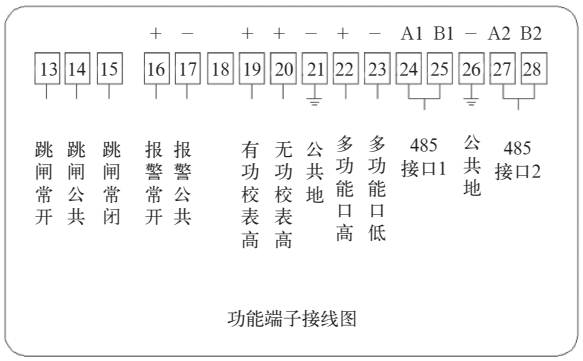


图5 DTZY341C型电能表辅助端子定义

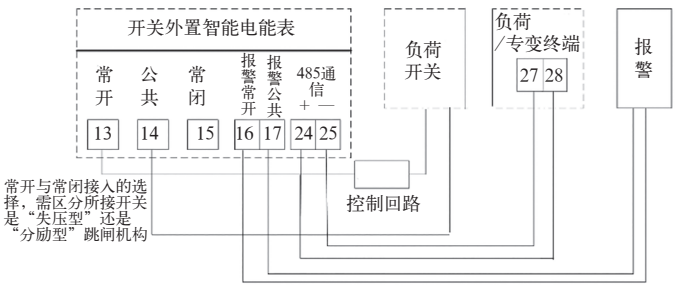


图6 电能表控制方式接线示意图

注意事项如下。

1）电能表的报警辅助端子为常开触点，继电器规格：DC 30 V/5 A，AC 277 V/3 A。跳闸辅助端子提供了常开和常闭两组触点，继电器规格：DC 30 V/5 A，AC 277 V/3 A。

2）常开与常闭的接线方式需要区分开关是失电压型还是分励型分闸操作机构。

2 费控方式的改变

智能电能表是智能电网的智能终端，由测量单元、数据处理单元和通信单元等组成，具有电能量计量、数据处理、实时监测、自动控制和信息交互等功能。根据其费控方式不同可以分为本地费控智能表和远程费控智能表。

2.1 本地费控

本地费控智能电能表[3]是在本地实现费控功能的电能表。其支持CPU购电卡和射频卡等固态介质进行充值及参数设置。本地费控是一种“先交费后用电”的预付费方式。本地费控智能电能表是以智能芯片为核心，具有电能量计量、信息存储及处理、实时监测、自动控制和信息交互等功能的电能表。

本地费控智能表用户通过CPU购电卡交费购电输入表中，电表才能供电。一户一表一卡，卡互不通用，凭卡用电，具有预收电费、自动抄表、防窃电和卡中电量用完后自动拉闸断电等功能。同时，用户的购电信息实行计算机管理，方便进行查询、统计、收费及打印票据等。具体功能特点如下。

1）预付费功能。预收电费，剩余金额到达设定金额时，发出提醒缴费的灯光报警信号，剩余金额为零时自动拉闸断电。

2）合闸拉闸方式。分为内置开关和外置控电开关两种规格。内置开关的智能表对表箱没有特殊要求，普通表箱即可；外置开关的智能表对表箱要求很严格，必须为配套专用的表箱，具有刀开关和断路器（开关），现在国家电网公司正在推广应用的是非金属单表位透明表箱。

3）记忆功能。断电情况下表内数据可保存10年。

4）显示功能。LED显示器显示剩余电量及其他信息。

2.2 远程费控

高压远程费控系统是国家电网公司推出的一种新型用电管理模式，实现了客户由“先用电后付费”向“先付费后用电”的转变。该系统借助信息通信技术，以电力营销应用系统和用电信息采集系统为依托，以智能电表的费控业务应用为起点，实现集抄、预警、通知、停电和复电等一系列远程智能自动化控制。通过用电信息采集系统，高压远程费控系统可定时读取客户用电表码，自动计算出每天剩余电费，并与之前设定的短信预警电费限额比较后完成预警、跳闸及合闸复电等指令。如果客户剩余电费不足，该系统即可向客户预留的手机号码发送提示短信，提醒客户及时交费。

通过“远程费控”业务的使用，既能实现电费100%回收，维护供电企业的自身利益，也能较大程度上方便用电客户，增强用户的电费缴纳意

识。通过远程费控的推广应用，降低低压用户的欠费数量及金额，减少人员现场停复电工作量，减少用户的停电时间。

因此，通过改变人们的用电消费方式，推广普及先付费后用电，不但实现了电费余额自动测算、余额信息自动预警和停复电指令自动发送，而且电费计算数据更加精准，达到了实时自动预警、远程按需控制的目标。

3 高压费控的改造建议

3.1 施工建议

高压费控施工改造建议如下：

1）甘肃目前已在营销、采集和费控三个系统中分别部署费控执行机制。执行方式为每日零点开始费控系统从中间库读取用户电费、电量数据，自动根据电价计算出每天的剩余电费，并与设定的电费阈值进行比较，比较结果推送至营销、采集系统，由营销系统下发指令，采集系统执行指令，控制智能表的预警、跳闸和合闸。

2）进行电费测算时，费控系统通过用户电价信息、营销系统账务余额和采集系统日冻结数据，测算用户的可用余额。

3）甘肃目前存在部分费控设备为县公司上划前遗留的用户资产，涉及老旧费控回路改造时，需征得用户同意。若用户不予投资，由供电公司进行投资改造，则改造后资产属性变为供方资产，费控设备的责任风险，对其进行的日常维护的工作量都将大大增加。

4）对高压用户实现费控，必须让用户充分了解费控之后对其提供更加便捷、高效的智能交费服务，才能促进费控推广工作。这取决于对用户的宣传工作与优质服务工作，希望国家电网公司能在知名媒体上加大智能交费宣传力度。

5）目前高压费控实施需要用户购置开关并进行安装改造，具体落实存在困难，因此需合理分配购置费，实现用户与电网公司的和谐共存。

3.2 费控渠道建议

费控渠道建议如下：

1）对于新装用户，在线路建设初期便将费控装置纳入规划，要求必须加装费控装置。在供用电合同中要求由用户出资，只有安装费控装置，供电公司才给予签订供用电合同。

2）对于改造用户，可由用户出资或供用电双方承担50%的费用。

3）给予用户在一段时间内优惠电费的政策。

4）自有资金采购或集中招标方式。

4 结束语

当前，我国智能电网进入全面建设阶段，智能电网的发展对智能电能表提出了越来越多的要求。同时，为有效缓解电费回收困难，减小企业资金压力加大的问题，本文针对甘肃省高压费控的现状提出了相应的改造方案，可使经营者实时了解动态经营数据，企业经营指标有依据、分解、监督和考核；便于管理者解决客户管理混乱、账务不清和收费困难等问题；降低人力成本；生产者可使用多种缴费方式，提供给生产者优质的服务，实现远程控制。

参考文献

[1] 孟祥甫，刘于超．用电信息采集系统费控模式探讨[J]. 工业计量，2011(增刊2)：80-81．

[2] 梁波，张伟，杨铭海，等．一变多户费控计量箱的设计与应用[J]．电世界，2017(4)：41-43．

[3] 高国梁．本地费控与远程费控智能表购用电模式的区别探讨[J]．电子技术与软件工程，2014(22)：115-115．

（收稿日期：2018－10－12）EA

亚特兰蒂斯酒店电气设计简析

三亚亚特兰蒂斯酒店项目具有建筑高度高、功能复合多样和维生系统供电可靠性要求高等特点，着重对该酒店负荷分级、供配电方案、应急电源和水族馆维生系统等方面的电气设计内容进行技术分析和探讨。

高晓明／上海建筑设计研究院有限公司

高晓明／高级工程师

关键词／Keywords
超高层酒店·
水族馆·
维生系统·
应急电源·
设备选型·

0 引言

三亚海棠湾亚特兰蒂斯酒店是Kerzner International 酒店管理公司旗下的第三家奢华度假酒店，是一座以海洋为主题的度假胜地。和常规的五星级度假酒店相比，本项目具有以下特点：建筑高180 m，构架顶点239.2 m；建筑面积大，近26万m^2；功能复合多样，除有客房、全日餐厅、宴会厅、泳池和健身房等功能之外，还有失落的世界水族馆、白鲸水族箱、暂养和医疗池以及4D影院等多种康乐设施；维生系统是为各类海洋生物营造一个适于生存和健康环境的生命维护系统，其供电可靠性是水族馆能否成功运营的关键技术之一。本文借此酒店的设计实例，着重分享一些具有特色的设计内容，提出自己的一些设计思路。

1 负荷分级

在满足JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》附录A 和JGJ 62—2014《旅馆建筑设计规范》6.3电气章节的前提下，结合酒店管理公司的机电技术标准对该酒店的负荷进行分级。本项目比国家规范要求高的负荷有一台小功率低压制冷机组及其配套水泵和冷却塔，宴会厅、大堂、天桥套房、皇家套房和总统套房的空调系统新风机组及其末端风机盘管，客房层走廊、大堂和各类康乐设施30%照明，后勤服务区10%照明，酒店logo灯和维生系统设备为一级负荷中特别重要的负荷。

2 供配电方案

2.1 负荷统计

本项目负荷统计如下表所示。

表 亚特兰蒂斯酒店负荷统计

（单位：kW）

功能分区	一级负荷中特别重要的负荷	一、二级负荷（含特别重要负荷）	三级负荷	安装容量	计算负荷
酒店塔楼高区变电站	953	2 066	2 941	5 007	2 350
酒店塔楼低区变电站	751	1 220	3 665	4 885	2 618
酒店裙房变电站	4 142	6 126	4 743	10 869	4 648
酒店低压制冷机变电站	724	754	1 975	2 729	2 204
酒店10 kV制冷机	无	无	3 289	3 289	3 289
酒店室内开关站合计	7 570	11 666	16 613	27 779	15 109
酒店商业区变电站	634	967	2 300	3 267	1 809
酒店水族馆变电站	3 332	3 772	620	4 392	2 911
酒店室外开关站合计	3 966	4 739	2 920	7 659	4 720

注：酒店室外开关站除为酒店商业区域和酒店水族馆区域供电外，还将为未来酒店二期供电，酒店二期用电未计入本表。

2.2 用户开关站设置

本项目在酒店室内和室外分设两座10 kV用户开关站，其中酒店室内10 kV用户开关站变压器容量为20 800 kV·A，酒店室外10 kV用户开关站变压器容量为17 800 kV·A。

2.3 供电电源

2.3.1 项目周边电力系统情况

在供配电方案设计时，需要充分了解项目周边的电力系统情况和当地供电部门的要求。亚特兰蒂斯项目周边的已建市政电源点主要有220 kV大茂变电站以及110 kV铁炉港变电站、林旺变电站和海棠湾变电站，未来还将建设一座110 kV龙江塘变电站。其中，110 kV海棠湾变电站和110 kV铁炉港变电站变电容量裕度和10 kV出线间隔数量充足，110 kV林旺站10 kV出线间隔紧张，但经优化后可调整出一个出线间隔。根据向供电部门了解的上述情况结合当地供电政策，本项目采用多路10 kV供电。

2.3.2 10 kV供配电方案

初步设计时，向上级电业申请引入四路10 kV市政电源，分别提供酒店室内10 kV用户开关站和室外10 kV用户开关站两路双重电源，各用户开关站两路10 kV电源同时供电，当一路电源失电时，另外一路电源可以承担全部一、二级负荷，即可承担本项目全部计算负荷的68.8%。

设计施工图时，经过和供电部门再次沟通，亚特兰蒂斯酒店项目为较特殊的项目，其中超高层酒店在三亚当地极为少见，酒店内的水族馆、白鲸港等属于三亚第一家，供电部门无法对整个酒店负荷接入当地电网的影响进行准确的预测工作，项目的实际负荷值可能超出供电部门的预测值。另外考虑到海棠湾当地酒店项目和配套的不断完善，承担国事项目的可能性也会大大增加，所以最终实施的供电方案是，由上级电业引入六路10 kV市政电源，每座用户10 kV开关站按照3回进线（2供1备）接线方式进行建设。因此，当任意一路主供10 kV电源失电时，备供电源投入使用，可以完全替代一路主供电源，即可承担本项目全部计算负荷的百分比为100%，和初步设计相比供电可靠性增加较大。

2.3.3 酒店高区变电站设置

本项目塔楼共47层，建筑高度180 m，构架顶点239.2 m。如采取仅在地下层设置变电站的方案，建筑上部的供电半径将达到300 m。如果不采用放大电缆截面积的措施，电压降将超过国家规范的允许值，从而引起供电质量下降，并影响电梯等设备的正常运行；如果放大电缆截面积，则将导致投资费用大量增加，也不是合理的方案。所以，设计时考虑在塔楼的上部设置高区变电站。

常规超高层项目的高区变电站一般设置于高区的避难层中，并向上方（或下方）若干楼层提供0.4 kV电源。但是根据当地规划部门规定，层高3 m及以下的避难层可以不计入面积，所以业主为了经济效益的最大化，不允许避难层的层高超过3 m，这样一来如果在避难层中设置变电站，其梁底净高将只有约2.1 m，无法满足其设备使用和安全距离的要求。

针对这个情况，结合《20 kV及以下变电所设计规范》，采用高区变电站设置在屋顶的方案，并在设计时充分考虑变压器上楼的运输方案和高区变电站的降噪措施。首先限制变压器的单台容量，高区变电站均选择800 kV·A变压器，其次利用货梯井道对变压器进行运输，最后选择低噪声变压器配置减振器，减少对下方楼层的影响。

3 应急电源

本项目为超五星级标准酒店，根据规范要求设置柴油发电机组作为自备电源。

3.1 发电机组的电压等级：

目前国内超高层中发电机组采用0.4 kV、10 kV的情况都有存在，一般发电机组供电距离超过400 m时，应选用中压发电机组；超过250 m时，宜采用中压发电机组；低于150 m时，宜采用低压发电机组。本项目建筑高度180 m，在进行技术经济分析后，最终选择低压发电机组。

3.2 发电机组的燃料选择

发电机组的燃料可以选择燃油或者燃气。燃油发电机组的优点为结构简单、前期投入成本低和稳定性好；燃气发电机组的优点为运行成本低、噪声小振动小和对环境污染小。本项目为民用建筑，且具有较为可靠的市政电源引入，柴油发电机仅作为应急电源使用，故选择成本低、稳定性好的柴油发电机组。

3.3 消防负荷和重要负荷是否分设柴油发电机组

柴油发电机组可以选择同时为消防负荷和重要负荷供电，计算容量时取二者之间的较大者，也可以选择消防负荷和重要负荷分设柴油发电机组。在数据中心、金融中心等火灾时仍需保证数据或金融设施安全的场所，消防负荷和重要负荷分设柴油发电机组较为合理，而酒店客房及前场康乐区在火灾时基本会采取全楼疏散的方案，很难保证酒店能够继续运营，所以采用消防负荷和重要负荷柴油发电机组组合设置方案较为经济。

本项目根据负荷特点，酒店塔楼、酒店裙房及商业建筑采用消防负荷和重要负荷合设柴油发电机组的方案。水族馆维生系统由于在火灾时仍需要考虑水缸中重要海洋鱼类的生命保障，所以独立设置柴油发电机组为其提供应急电源。

4 水族馆供配电及照明系统设计

本项目酒店的特色是在其中设置了失落的世界水族馆和白鲸水族箱，在其中有86 000多尾、超过280种的海洋生物生活，包括各类鲨鱼和珍贵的白鲸。水族馆主要的用电负荷有维生系统、海水冷却和加热设备、水族馆照明及小型电力系统等。其中，维生系统是生命维护系统的简称，它运用现代的水族科技模仿自然环境为养殖生物创造人工的水环境。该系统需要提供水族馆生物足够的氧气、适宜的温度和良好的水质。维生系统的供电可靠性是水族馆能否成功运营的关键技术之一。

4.1 维生系统用电设备

维生系统主要的用电设备有过滤泵、去沫器升压泵、臭氧反应缸注射泵、循环供水泵、蛋白泵、造波泵、臭氧发生器、蛋白质分离器、制氧机、空压机、紫外线消毒器和电解氯化器等。常规工程设计中，维生系统会有专业的工艺单位负责设计其工艺流程和设备选型。

4.2 维生系统负荷分级

维生系统中的大部分设备若中断供电，将会造成海洋生物死亡，并造成重大的经济损失，业主也将其定义为特别重要场所不允许中断供电的负荷，故这类负荷定义为一级负荷中特别重要的负荷，采用两路市电外加柴油发电机组作为应急电源。在设计时需要和维生系统工艺设计单位紧密配合，不但需要其提出所有用电设备的功率、电流、起动方式及是否需要变频等电气参数要求，同时还需要其提供设备的主备用、是否需要配置应急电源和应急电源的类型等要求。

4.3 维生系统供电方案

根据和业主、顾问以及工艺单位沟通的结果，为避免其他类别负荷对维生系统负荷产生影响，为维生系统单独设置两台变压器，并由柴油发电机组提供应急电源。两台变压器同时使用，正常状态下，每台变压器的负载率不超过50%，当一台变压器损坏或失电时，另外一台变压器可以承担100%负荷。当两路市电均失电时，起动柴油发电机组承担100%维生系统负荷。

4.4 水族馆照明系统设计

水族馆内需要配置一般照明、疏散照明、安全照明和水中照明等不同类型的照明灯具。一般照明主要为整个场馆提供正常的照度，烘托整个水族馆的气氛。疏散照明主要在火灾状态下用于确保疏散通道被有效地辨认。安全照明主要为水族馆中的工作人员提供安全照明。水中照明主要分为水上照明、水面照明和水下照明，水中照明设置的位置不能被观众看到，但要为观众创造良好的视觉条件，避免产生镜面反射的现象。水池水下灯安装位置示意图如下图所示。

4.5 电缆桥架选型

本项目酒店依海岸而建，本身就属于盐雾较

(下转第56页)

异步电动机的故障模式与可靠性分析

通过分析异步电动机故障状态和失效模式，依据电动机的故障分析进行分类，找出电动机失效原因中最为显著部分。如发现绝缘出现故障，将其更换或维修，分析并统计电动机失效影响生产的根本原因，将设备故障详细分类，分为预防性维护、状态监测维护、预知性维护和事故后维护四种维护策略。最终通过减少电动机失效事件的发生，预计电动机零部件寿命，提高电动机的可靠性。

刘　强／中沙（天津）石化有限公司

刘　强／工程师

关键词／Keywords
电动机·
可靠性·
失效模式·

0　引言

总结国内外诸多电动机失效案例，据统计，电动机内部最容易发生故障的部位为绕组绝缘和轴承。下面阐述这两方面的研究情况。

（1）绕组绝缘的可靠性和寿命

很多科学家采集了运行在高温高湿环境下电动机大量的现场数据，并对这些数据进行统计和研究，结果表明这些电动机的使用寿命比正常环境下的要短很多。从现场数据中得出的失效模式分析，在施加电压的情况下，湿度大是导致电动机失效的根本原因，温度高是加速电动机失效的直接原因[1]。所以，电动机绕组绝缘下降或老化都是由于绕组发生开路或短路造成的。在环境和机械力的作用下，导致绝缘材料产生物理变化和化学变化，这就是绝缘系统故障的主要原因。

（2）轴承的可靠性和寿命

19世纪末，很多生产企业开始将电动机故障的焦点集中在轴承上，包括不同应用的设备（如电动机的滚动轴承、滑动轴承、尺寸的制定和制造工艺）都作了深入的可靠性研究。

轴承寿命的分析是需要精密的仪器和大量的采集数据反复试验获得的，这就要使用国际上一些先进的诊断设备才能预估出轴承的寿命。

1　电动机的失效模式分析

对某化工厂区现场2 000多台电动机的故障数据进行分析发现，电动机的各种故障率λ与时间的关系可以用“浴盆曲线”来表示。

电动机寿命周期大致分为三个阶段。

1）早期失效阶段。设计、制造、安装、调试和试验期间都可能发生早期故障，早期发现，可以更改设计、制造、安装和调试。

2）偶然失效阶段。电动机经过一段时间的磨合运行后，故障率逐渐稳定，如果发生大的事故和危害，就要考虑设计制造水平，这一阶段也是重点分析阶段。

3）耗损失效阶段。这一阶段电动机接近寿命晚期，电动机的各个零部件开始老化，故障率增大。尤其电动机的绝缘可以通过试验手段预计电动机的寿命[2]。

在某化工企业中，电动机的故障率接近于恒定，主要集中在电动机绝缘和轴承上，据统计在71%左右，所以这也是分析电动机故障的主要方向。

电动机指数函数的分布性质如下。

1）电动机寿命的密度函数

$$f(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda t} & t>0\\ 0 & t<0\end{cases} \tag{1}$$

2）电动机寿命的累积分布函数

$$F(t)=\int_0^t \lambda e^{-\lambda t}dt=\begin{cases}1-e^{-\lambda t} & t<0<\infty\\ 0 & -\infty<t<0\end{cases} \tag{2}$$

其可靠度函数计算公式为

$$R(t)=1-F(t)=\begin{cases}e^{-\lambda t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases} \tag{3}$$

由于电动机没有设计冗余元件，所以任何一部分出现问题都有可能导致电动机失效。根据前面的电动机故障树对系统的影响可分为三类。

1）失效故障（致命故障）。由于电气绝缘及最重要的零部件发生故障，导致电动机失效或是有可能引起人身伤害的严重事故。

2）非失效故障（一般故障）。不影响电动机停机或失效，维修时间短。

3）非关联故障。跟电动机本体没有关系的故障，但是也可能导致电动机出现隐患和失效的风险。

假定电动机各个故障相互独立，可以设个系统的可靠度为$R_I(t)$，故障率分别为$\lambda_i(i=1，2，\cdots，N)$，可靠度为

$$R_I(t)=R_1(t)R_2(t)\cdots R_N(t)=\prod_{i=1}^{N}R_i(t) \tag{4}$$

如果假设均为常数，则有

$$R(t)=\begin{cases}e^{-\lambda_1 t}e^{-\lambda_2 t}\cdots e^{-\lambda_N t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases}=\begin{cases}\prod_{i=1}^{N}e^{-\lambda_i t} & t>0\\ 1 & t<0\end{cases} \tag{5}$$

3　电动机绕组的可靠性预估

电动机元器件的失效率影响因素有很多，比如包括元器件本身的基本失效率、温度、电磁力、元器件制造质量、使用环境和老化等。所以电动机绕组失效率和电动机的轴承失效率由下面的公式表达出来。通过参考手册可以查询到这些调整系数和计算方法。国产元器件的相关参数可以参考GJB 299C—2006《电子电动机可靠性预计手册》[3]，国外元器件的相关参数可以参考MIL－HDBK－217F《电子设备可靠性预计》[4]，详细计算内容和参考系数参见手册内容。本论文所研究的异步电动机工作环境、类别应该选择一般地面固定，代号G_{F1}。

电动机绕组失效率预计模型为

$$\lambda_P=\lambda_b\pi_E\pi_Q\pi_K\pi_C \tag{6}$$

式中，λ_b为基本失效率，10^{-6}/h；π_E为环境系数；π_Q为质量系数；π_K为种类系数；π_C为结构系数。

查阅GJB 299C—2006《电子电动机可靠性预计手册》可知：$\pi_E=2$，$\pi_Q=1$，$\pi_K=1$，$\pi_C=1$。

绕组基本失效率模型符合指数函数为

$$\lambda_b=Ae^{\left(\frac{T_{HS}+273}{N_T}\right)^G} \tag{7}$$

式中，A为失效率水平调整参数；N_T为温度常数；G为加速常数；T_{HS}为热点温度，所涉及温度单位不作特殊说明均为摄氏度。

热点温度估算式为

$$T_{HS}=T_A+1.1\Delta T \tag{8}$$

式中，T_A为工作环境温度，预计电动机工作环境温度$T_A=20$ ℃；ΔT为平均温升，按小功率射频线圈取近似值，$\Delta T\approx5$ ℃。

则可求得$T_{HS}=25.5$ ℃。

绕组基本失效率模型参数如表1所示。

表1　绕组基本失效率模型参数

绝缘等级	额定工作温度/℃	A	N_T	G
Y	90	0.006 4	282	5
A	105	0.007 3	302	4.5
E，B	120，130	0.006 0	312	2.8
F	155	0.006 6	351	3.2

从表1中得：$A=0.006\ 6$，$N_T=351$，$G=3.2$。则可求得$\lambda_b=0.012\times10^{-6}$/h，$\lambda_P=0.024\times10^{-6}$/h。

长时间运行的电动机要定期做一些绝缘的检测试验，监控电动机的剩余寿命。

4　电动机轴承的可靠性预估

异步电动机有滚动轴承和滑动轴承两种，故障模式分析原因有很多，接触疲劳失效是很早时期由外国学者提出来的，至今也是难以解决的故障。塑性变形一般是由于高温或者安装导致，大

于70 mm直径的轴承需要80～100 ℃的热处理后安装。磨损和断裂失效原因很多，一般是由于应力变化导致。电蚀失效一般是由于漏电导致绝缘降低或裂纹。游隙变化失效是要依据电动机检修的标准，尺寸不同，游隙大小也不同。轴承寿命到期大多是由于接触器疲劳所引发的。电动机轴承失效的原因很多，一般都是机械故障，需要采集大量的数据证明轴承寿命符合威布尔分布。目前，很多企业对电动机轴承的可靠性要求很高，需要建立威布尔分布的轴承可靠性模型来进行预估寿命。

失效率密度函数为

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{9}$$

失效分布函数为

$$F(t)=\int_{\gamma}^{t}\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中，β为寿命离散指数，决定威布尔曲线的形状参数，数值越大，寿命离散型越小；η为尺度参数；γ为位置参数，表示轴承从时刻γ之后失效，γ时刻以前可靠度为100%。

轴承的老化需要长时间的累积，失效分布曲线要从γ时刻开始，相当于将曲线沿时间轴整体向左移动γ，此时，失效分布函数为

$$F(t)=\int_{\gamma}^{\frac{t-\gamma}{\eta}}\frac{1}{\beta t^{\beta-1}}\mathrm{e}^{-t^{\beta}}\mathrm{d}t=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{11}$$

可靠度为

$$R(t)=1-F(t)=\mathrm{e}^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{12}$$

轴承寿命计算式为

$$R(L_{\mathrm{F}})=\mathrm{e}^{-\left(\frac{L_{\mathrm{F}}-L_0}{L_{10}-L_0}\right)^{\beta}} \tag{13}$$

式中，L_{F}为轴承寿命；L_0为对应时刻的最小安全寿命；L_{10}为轴承额定载荷寿命。

轴承额定载荷寿命指大部分的轴承在老化失效时达到的使用寿命，不同功能的轴承对应的轴承与其寿命不同，如表2所示。

表2 电动机轴承预期额定载荷计算寿命

电动机轴承预期额定载荷计算寿命	
电动机类型	预期额定载荷计算寿命L_{10}/h
不经常转动的电动机	200～500
短期运转，故障后不会引起大的影响	4 000～8 000
短期运转，故障后引起了比较大的影响	8 000～10 000
每日8 h连续使用机械，如间歇起动电动机、污水泵	10 000～40 000
连续不间歇运行，如生产装置中的电动机	40 000～80 000
连续不间歇运行，停用后会产生严重的后果，如发电机、生产重要的电动机	120 000～200 000

考虑异步电动机的工作特点，L_{10}应在8 000～12 000 h之间，取L_{10}=8 000 h。根据大量现场实际数据证明，一般取$L_0=0.05L_{10}$。对于轴承钢轴承，β在1.1～1.5之间，取L_{10}=1.2。L_{F}=500 h时，可计算一个轴承的可靠度为：R(500)=0.994 48。

一般电动机有非轴伸端和轴伸端两个轴承，在互不影响的情况下是乘积关系，故电动机轴承的可靠度为R_2=0.988 99。

目前，国内外对轴承失效模式分析都服从威布尔分布，计算式为

$$F_{\mathrm{B}}(t)=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\eta_{\mathrm{B}}}\right)^{m_{\mathrm{B}}}} \tag{14}$$

式中，$F_{\mathrm{B}}(t)$为轴承失效分布函数；η_{B}为轴承的特征寿命；m_{B}为轴承失效分布的形状参数。

对于球轴承m_{B}=10/9，η_{B}与电动机运行转速、负载和轴承质量等级有关。

近年来对滚动轴承寿命影响的研究成果，总结起来可用下式来计算滚动轴承的寿命，即

$$L_R=\left(\frac{10^6}{60n}\right)\cdot\left(\frac{C}{f_{\mathrm{P}}P}\right)^{\varepsilon}f_{\mathrm{R}}f_{\mathrm{L}}f_{\mathrm{G}}f_{\mathrm{S}}f_{\mathrm{Y}}f_{\mathrm{H}}f_{\mathrm{T}}f_{\mathrm{E}} \tag{15}$$

式中，L_R为可靠度为R时的轴承寿命，h；n为轴承的转速，r/min；C为滚动轴承额定动负荷，N；P为滚动轴承承受的当量动负荷，N；ε为寿命指数，球轴承为3，滚子轴承为10/3；f_{P}为载荷因素；f_{R}为可靠度的寿命修正系数；f_{L}为润滑的寿命修正

系数；f_G为润滑油过滤准确度的寿命修正系数；f_S为润滑油中含水的寿命修正系数；f_Y为材料熔炼寿命修正系数；f_H为表面硬度的寿命修正系数；f_T为温度的寿命修正系数；f_E为轴向偏斜的修正系数。

5 提升电动机可靠性

通过上面的预先性检查来减少电动机的失效，利用预防性的维护来提高电动机的可靠性，延长生命的周期。电动机经过长期运行之后，性能逐渐变差，为保证其正常工作，制定相关维护工作。

定期预防维修指电动机按固定的周期进行维修，如定期地对电动机进行清洁、润滑，有计划地更换轴承和配件，定期做检测试验等。这种维修方式，对保证电动机安全稳定运行，减少维修成本能起到一定作用，但是如果缺乏对电动机故障规律的认识，没有有效的监测手段，检修周期基本上是凭人的经验加上某些统计资料制定来的，它很难预防那些由于随机因素引起的事故，而且会造成过剩维护，甚至维护不当，反而增加了故障率。

根据电动机预防性维护的理论，新制造出厂的电动机和刚刚维修过的电动机，其故障率是较低的。随着时间的推移，故障率会逐渐增大，当出现故障的电动机数量达到2%时，就应对全部设备进行修理，这会使98%的电动机有剩余寿命，但是如果不按期维修，则在更短时间内又将会有2%的电动机发生故障。

但是事实并非如此，对某化工企业200台高压电动机进行调查发现，只有3%的设备故障率随时间推移按照一定的规律增加，而其余97%的设备故障率接近一个常数。多数电动机故障率并不随时间增加而变大，全部电动机都定期进行检修是不科学的，无形中浪费了大量的人力和物力，减少了电动机可以运行的时间，这就是所谓的过剩维修。所以想要达到精准的维修，还需要准确地制定出检修周期。

6 结束语

为了提升电动机的可靠性，状态监测维修是作为维护策略最为可靠的方法，通过越来越先进的监测仪器对电动机进行实时监测或者定期检测，根据实际测出的故障数据加以分析，最后制定维护方案。是否维修需要根据数据来判定，但是一旦出现假数据或者数据出现误差，就会影响决策方向。所以检测仪器的硬件设备和通信设备必须可靠耐用。将定期维修变成定期监测电动机的运行状态，跟踪故障的发展过程及推算电动机状态超标发生的时间，就可以根据电动机状态劣化程度，在故障发生前的某个时间内做好维修准备，有针对性、有计划地安排停工修理。如果生产条件不允许，也有可能让故障电动机坚持运行到出现故障时再停下维修。实行这种方式维修，无论对减少备件库存量，缩短维修时间，提高检修质量，减少故障造成的人身伤害事故还是提高电动机的有效利用率都是有好处的。

参考文献

[1] 黄洪剑．航天电机可靠性及加速寿命试验研究[D]．杭州：浙江大学，2000.

[2] 薛建辉．异步电动机振动故障诊断技术研究[D]．西安：西安理工大学，2010.

[3] GJB 299C—2006 电子电动机可靠性预计手册[S].

[4] MIL－HDBK－217F 电子设备可靠性预计[S].

（收稿日期：2018－06－12）EA

饮食建筑电气设计的几点思考

为了更好地与各位同仁交流对JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》的相关内容的理解及学习，通过对该规范中电气专业几点规定的思考，结合《民用建筑电气的设计规范》、《建筑设计防火规范》和《建筑照明设计标准》等相关规范，提出饮食建筑电气设计中，对负荷分级、照度确定及应急照明设置等方面的一些问题的想法。

王瑞霞/浙江省建工建筑设计院有限公司

王瑞霞/高级工程师

关键词/Keywords
负荷等级·
照度·
照明功率密度值·
应急照明·
启动时间·

0 引言

随着我国经济的迅猛发展，人民的生活水平不断提高，餐饮行业日新月异，原来的JGJ 64—89《饮食建筑设计规范》已经无法适应目前的形势，我国住房和城乡建设部于2017年7月发布了修订后的新版规范——JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》，并于2018年2月1日起开始实施。新版的规范对电气专业的相关内容作了大刀阔斧的补充及修订，较之旧版丰富了很多内容，对电气设计具有更强的指导作用和可操作性。笔者针对该新版规范的几点规定，结合电气设计的实际情况，进行了思考和总结，并提出一些具体的想法，供大家一起探讨，不足之处还望各位同行批评指正。

1 关于用电负荷分级

在JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》实施之前，1989版的规范仅对一级餐馆的宴会厅及其服务的厨房照明有按二级负荷配电的要求，其他饮食建筑内相关电气负荷的分级设计主要是参照JGJ 16—2008《民用建筑电气的设计规范》的附录A执行，具体规定如表1所示。

表1 建筑内电气负荷分级

序号	建筑物名称	用电负荷名称	负荷级别
1	国家级会堂、国宾馆和国家级国际会议中心	主会场、接见厅和宴会厅照明，电声、录像和计算机系统用电	一级*
		客梯、总值班室、会议室、主要办公室和档案室用电	一级
21旅游饭店		四星级及以上旅游饭店的经营及设备管理用计算机系统用电	一级*
		四星级及以上旅游饭店的宴会厅、餐厅、厨房、康乐设施、门厅、高级客房和主要通道等场所的照明用电，厨房、排污泵、生活水泵、主要客梯用电，计算机、电话、电声、录像设备、新闻摄影用电	一级
		四星级旅游饭店的宴会厅、餐厅、厨房、康乐设施、门厅、高级客房和主要通道等场所的照明用电，厨房、排污泵、生活水泵和主要客梯用电，计算机、电话、电声、录像设备和新闻摄影用电，除上栏所述之外的四星及以上旅游饭店的其他用电	二级

JGJ 16—2008《民用建筑电气的设计规范》也仅对国家级会堂、国宾馆和国际会议中心的宴会厅照明及三星级、四星级的旅游饭店内的宴会厅、餐厅和厨房等场所的用电负荷有所规定，其他类的饮食建筑的负荷级别并未提及。

JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》第5.3.1条，根据重要性及中断供电所造成的影响和损失程度，对饮食建筑的电气负荷进行了如下的规定。

1）特大型饮食建筑的用餐区域、公共区域的备用照明用电应为一级负荷，自动扶梯、空调系统用电应为二级负荷。

2）大型、中型饮食建筑用餐区域、公共区域的备用照明用电应为二级负荷。

3）小型饮食建筑的用电应为三级负荷。

4）饮食建筑中的计算机管理设备应设置不间断供电电源作为备用电源。

5）特大型、大型和中型饮食建筑的冷藏、冷冻设备宜配置备用电源。

6）饮食建筑中消防用电设备的负荷等级应符合国家现行防火相关标准的规定。

可见，JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》给出了更详细的用电负荷分级的依据，其可操作性更强。

结合该规范第1.0.4条对不同类型不同规模餐饮建筑的定义，对不同类型饮食建筑中的一、二级用电负荷进行总结，具体如表2所示。

表2　不同饮食建筑用电负荷分级

分类	建筑规模	建筑面积（m^2）或用餐区域座位数（座）、就餐人数	用电负荷名称	负荷级别（要求）
餐馆、快餐店和饮品店	中型	150＜面积≤500或75＜座位数≤250	用餐区域、公共区域的备用照明用电	二级
	大型	500＜面积≤3 000或250＜座位数≤1000		
	特大型	面积＞3 000或座位数＞1 000	用餐区域、公共区域的备用照明用电	一级
			自动扶梯、空调系统用电	二级
食堂	中型	100＜人数≤1000	用餐区域、公共区域的备用照明用电	二级
	大型	1 000＜人数≤5 000		
	特大型	人数＞5 000	用餐区域、公共区域的备用照明用电	一级
			自动扶梯、空调系统用电	二级
中型以上饮食建筑			冷藏、冷冻设备	建议二级
饮食建筑			计算机管理设备	应设置不间断供电电源作备用电源
饮食建筑			消防用电设备	应符合国家现行防火相关标准的规定

注：1.表中建筑面积指与食品制作供应直接或间接相关区域的建筑面积，包括用餐区域、厨房区域和辅助区域。

2.食堂按服务的人数划分规模。食堂服务的人数指就餐时段内食堂供餐的全部就餐者人数。

3.表中未提及相关用电可按三级负荷配电。

2　关于相关场所的照度要求

电气设计中，各功能场所的照度要求主要参照GB 50034—2013《建筑照明设计标准》。其有关饮食建筑的照度要求及功率密度值的要求主要有如下规定。

GB 50034—2013《建筑照明设计标准》第5.3.5条的规定如表3所示。

表3　旅馆建筑照明标准值

房间或场所		参考水平面及高度/m	照度标准值/lx	UGR	U_0	R_a
客房	一般活动区	地面	75	–	–	80
	床头	0.75水平面	150	–	–	80
	写字台	0.75水平面	300*	–	–	80
	卫生间	0.75水平面	150	–	–	80
中餐厅		0.75水平面	200	22	0.60	80
西餐厅		0.75水平面	150	–	0.60	80
酒吧间、咖啡厅		0.75水平面	75	–	0.40	80
多功能厅、宴会厅		0.75水平面	300	22	0.60	80
会议室		0.75水平面	300	19	0.60	80
大堂		地面	200	–	0.40	80
总服务台		台面	300*	–	–	80
休息厅		地面	200	22	0.40	80
客房层走廊		地面	50	–	0.40	80
厨房		台面	500*	–	0.70	80
游泳池		水面	200	22	0.60	80
健身房		0.75水平面	200	22	0.60	80
洗衣房		0.75水平面	200	–	0.40	80

注：*指混合照明照度。

GB 50034—2013《建筑照明设计标准》第6.3.5条对饮食建筑相关场所LPD值的控制如表4所示。

表4　旅馆建筑照明功率密度限值

房间或场所	照度标准值/lx	照明功率密度限值/(W/m^2)	
		现行值	目标值
客房	–	≤7.0	≤6.0
中餐厅	200	≤9.0	≤8.0
西餐厅	150	≤6.5	≤5.5
多功能厅	300	≤13.5	≤12.0
客房层走廊	50	≤4.0	≤3.5
大堂	200	≤9.0	≤8.0
会议室	300	≤9.0	≤8.0

JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》第5.3.3条对饮食建筑各类房间的照度值进行了规定，如表5所示。

表5 饮食建筑照度标准值

序号	房间名称	参考水平面及高度/m	照度/lx	显色指数R_a
1	更衣室	地面	150	80
2	粗加工区（间）	0.75水平面	200	80
3	细加工区（间）	0.75水平面	300	80
4	热加工区（间）	0.75水平面	300	80
5	洗消间	0.75水平面	200	80
6	宴会厅	0.75水平面	150～500（可调光）	80

JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》虽然细化了各类房间的照度值要求，但是依然不够详尽，而且忽略了对相关场所对应照度下的照明功率密度值的规定，对照明设计的指导有所欠缺。

笔者结合以上两本规范对饮食建筑的相关场所照度、照明功率密度值等进行了总结，如表6所示。

表6 饮食建筑照度和照明功率密度值

房间名称	参考水平面及高度/m	照度/lx	照明功率密度值/（W/m²）		统一眩光值（UGR）	照度均匀度（U_0）	显色指数R_a
			现行值	目标值			
更衣室	地面	150	6.0	5.0	–	–	80
粗加工区（间）	0.75水平面	200	7.0	6.0	–	0.7	80
细加工区（间）	0.75水平面	300	9.0	8.0	–	0.7	80
热加工区（间）	0.75水平面	300	9.0	8.0	–	0.7	80
洗消间	0.75水平面	200	7.0	6.0	–	–	80
宴会厅	0.75水平面	150～500（可调光）	6.0~15.0	5.0~13.5	22	0.7	80
中餐厅	0.75水平面	200	7.0	6.0	22	0.6	80
西餐厅	0.75水平面	150	6.0	5.0	–	0.6	80
酒吧间、咖啡厅	0.75水平面	75	3.5	3.0	–	0.4	80
厨房	台面	500*			–	0.7	80
大堂	地面	200	9.0	8.0	–	0.4	80
走廊	地面	100	4.0	3.5	25	0.4	80

注：1. * 指混合照明照度。

2.设装饰性灯具的场所,可将实际采用装饰性灯具总功率的50%计入照明功率密度值的计算。

3.设在地下层（室）内的饮食建筑各类用房，如无天然采光或天然采光不足时，宜将设计照度提高一级。

4.当房间或场所的照度标准值提高或者降低一级时，其照明功率密度值应按比例提高或折减。

5.当房间或场所的室形指数不大于1时，其照明功率密度限制应增加，但增加值不应超过限值的20%。

6.各类饮食建筑的食品展示台、展示柜等应设局部照明。

3 关于应急照明

GB 50016—2014《建筑设计防火规范》作为消防的主要规范，第10.3.1条和第10.3.2条对应急照明的设置及应急时照度要求有强制性规定。

第10.3.1条规定，除建筑高度小于 27 m 的住宅建筑外，民用建筑、厂房和丙类仓库的下列部位应设置疏散照明。

1）封闭楼梯间、防烟楼梯间及其前室、消防电梯间的前室或合用前室、避难走道和避难层（间）。

2）观众厅、展览厅、多功能厅、建筑面积大于200 m²的营业厅、餐厅和演播室等人员密集的场所。

3）建筑面积大于100 m²的地下或半地下公共活动场所。

4）公共建筑内的疏散走道。

5）人员密集的厂房内的生产场所及疏散走道。

第10.3.2条指出， 建筑内疏散照明的地面最低水平照度应符合下列规定。

1）对于疏散走道，不应低于 1 lx。

2）对于人员密集场所、避难层(间)，不应低于 3 lx ；对于老年人照料设施、病房楼或手术部的避难间，不应低于10 lx。

3）对于楼梯间、前室或合用前室、避难走道，不应低于5 lx；对于人员密集场所、 老年人照料设施、病房楼或手术部内的楼梯间、前室或合用前室和避难走道，不应低于10 lx。

针对饮食建筑的特性，JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》在满足GB 50016—2014《建筑设计防火规范》的基础上，对应急时的照度提出了更高的要求。

1）中型及中型以上饮食建筑的厨房区域应设

置供继续工作的备用照明，其照度不应低于正常照明的1/5；用餐区域应设置供继续营业的备用照明，其照度不应低于正常照明的1/10。

2）小型饮食建筑的厨房区域、用餐区域宜设置备用照明，其照度不应低于10 lx。结合相关场所的一般照明要求，可知中型及中型以上饮食建筑的厨房区域应设置备用照明，其照度不应低于40 lx；用餐区域应设置备用照明，其照度不应低于15 lx。相关规定远高于GB 50016—2014《建筑设计防火规范》。

JGJ 64—2017《饮食建筑设计规范》对应急照明启动时间的要求也提高很多。

一般场所的备用照明启动时间不应大于1.5 s，贵重物品区域和收银台的备用照明应单独设置，其启动时间不应大于0.5 s。

之前通常参照JGJ 16—2008《民用建筑电气的设计规范》第13.8.5条确定应急照明启动时间的要求。应急照明在正常供电电源停止供电后，其应急电源供电转换时间：备用照明不应大于5 s，金融商业交易场所不应大于1.5 s；疏散照明不应大于5 s。

4　结束语

饮食建筑由于其人员密集而且流动性较大，高峰期时间比较集中，人员聚集比较快等特性，加之饮食对“色、香、味”等的特殊要求，对电气设计提出了更高的要求。在满足功能要求的基础上，贯彻并落实相关的规范执行，合理地进行设计，并设计出业主满意的图样，永远是电气设计人员的必修课。笔者通过对饮食建筑电气设计中几个问题的思考，提出个人对规范的理解及观点，以供各位同仁探讨，不足之处欢迎指正。

参考文献

[1] JGJ 64—2017 饮食建筑设计规范[S].
[2] GB 50016—2014 建筑设计防火规范[S].
[3] JGJ 16—2008 民用建筑电气设计规范[S].
[4] GB 50034—2013 建筑照明设计标准[S].

（收稿日期：2018－07－11）EA

广告 | AD

全新改版

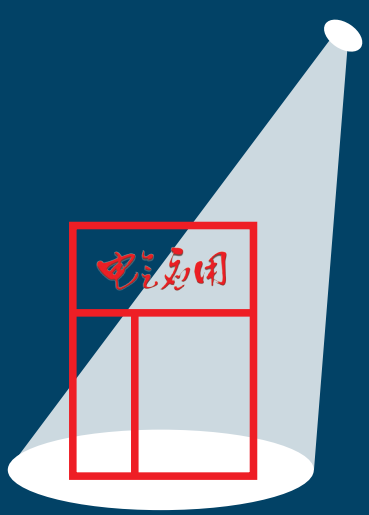
色彩丰富　凸显主题
2019《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容，力求赏心悦目。

栏目设置　独具风格
坚持继承与开拓并举，以丰富内涵充实经典栏目，持续深化专家访谈、EA经理人等栏目，密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评　精辟深刻
每期都将围绕一个热点话题，隆重推出一场专题讨论的盛宴，共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂，针对焦点问题作出评析。

行业案例　生动丰富
关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用，以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间，促进应用经验交流。

国内邮发代号：82-341　国外发行代号：M1409
每期定价：25.00元　全年定价：300.00元



·电气应用 盛情呈现·

2019

监控管理系统在新一代数据中心的应用前景展望

阐述了数据中心监控管理系统的发展历程与技术展望，对数据中心进行有效可靠的监控管理可极大地提升数据中心管理效率与水平。同时详细阐述了国内外目前的监控系统的主要技术路线与将来的发展趋势。

贾　涛[1]　王力坚[2]　欧阳述嘉[3]　张林锋[4]　赵景程[5]/1.国家电网有限公司信息通信分公司　2.北京工翔科技有限公司　3.国家电网有限公司信息通信分公司　4.国家电网有限公司信息通信分公司　5.国家电网有限公司信息通信分公司

贾　涛/工程师

关键词/Keywords

大数据·
机房管理·
监控管理系统·
人工智能·

0　引言

随着各行业对计算机依赖性的日益提高，计算机信息系统的发展使得作为其网络设备、主机服务器、数据存储设备和网络安全设备等核心设备存放地的计算机机房日益显现出它的重要地位，而机房的环境和动力设备，如供配电系统、不间断电源系统（UPS）、空调系统、消防系统和安防系统等必须时刻为计算机信息系统提供正常的运行环境。一旦机房环境和动力设备出现故障，就会对数据传输、存储及系统运行的可靠性构成威胁。如果故障不能及时处理，就可能损坏硬件设备，造成严重后果。对于电网、银行、证券、海关和邮局等需要实时交换数据的单位，机房管理更为重要，一旦系统发生故障，造成的经济损失更是不可估量。

数据中心包含IT设施与应用、场地设施和相关楼宇设施等，涵盖服务器、存储设备、网络、操作系统、数据库、中间件和应用等IT技术，高低压供配电、电力电子、防雷与接地、制冷系统、空调系统、门禁和视频监控等机房场地技术。由于专业知识门类与程度不同，管理流程复杂，要管理好如此复杂的对象，对IT管理者是极大挑战。数据中心的运行管理实际状况表明，数据中心有约80%问题是由于事件管理、事故管理和变更管理等运维管理流程的不到位，忘记做某些事情、知识与经验不足、备份错误或安全疏忽等运维操作与管理人员的能力不足造成的。由于管理对象极其复杂，数据中心技术与管理专业化要求越来越高，只有大幅提高IT运行操作与管理人员的专业化水平才能应对。

1　数据中心管理存在的问题

目前许多机房的管理人员不得不采用24 h专人值班，定时巡查机房环境设备，这样不仅加重了管理人员的负担，而且不能及时排除故障，对事故发生的时间及责任也无科学的管理。尤其目前国内普遍缺乏机房环境设备的专业管理人员，在许多地方的机房不得不安排软件人员，或者不太懂机房设备管理甚至根本不懂机房设备维护的人员值班，这对机房的安全运行无疑又是一个不利因素。而且数据中心管理有如下特点。

1）数据中心复杂度高、管理难度大。数据中心相关的技术复杂，技术种类多且关联度高，运维及管理人员需要很长时间的学习与培训；数据中心建成与系统部署后，便投入运行，运维人员常需要数年的时间才能获得足够的操练

机会，积累足够的经验。培养运维管理工作人员是个漫长的过程。

2）管理成本高。随着数据中心的数量与规模不断扩大，数据的重要性越来越高，使得数据中心的资源管理日益复杂，运维人才竞争激烈，管理成本越来越高。运维成本的增长速度如图1所示。

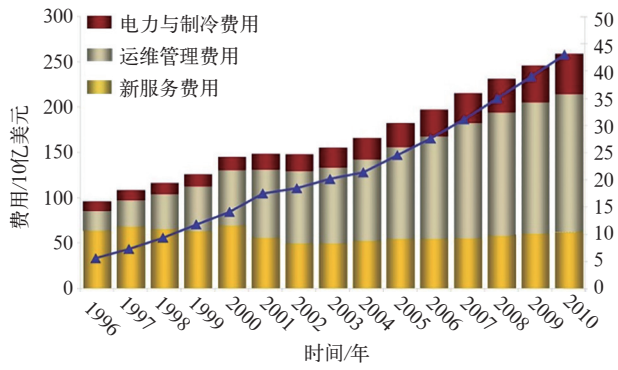


图1 运维成本快速增长

2 机房管理系统的发展阶段

针对上述两个问题，机房管理系统应运而生。

早期的机房管理系统又叫数据中心动力环境监控系统，是一个综合利用计算机网络技术、数据库技术、通信技术、自动控制技术和新型传感技术等构成的计算机网络，提供一种以计算机技术为基础，基于集中管理监控模式的自动化、智能化和高效率的技术手段，系统监控对象主要是机房动力设备和环境设备(如配电系统、UPS、空调系统、温湿度、漏水、烟雾、视频、门禁、防雷和消防系统等)。

机房管理系统从一开始的认识阶段到其重要性体现再到现在成为不可或缺的机房子系统，经历了二十多年的演变，大致分为以下三个主要发展阶段。

（1）第一阶段：零散的子系统阶段

早期的机房场地监控系统、网管系统等主要功能是集中了解机房运行情况，及时发现故障报警。这个阶段在技术上比较好又成熟的大多是国外的大公司，但是价格很高。国内厂家只能生产些零散的子系统。一些设备厂家提供设备运行状态的监控，集成商则依据客户某方面的需求，设计软件和一些小系统的集成。此阶段机房环境监控基本上是极其散乱的子系统，客户需要在服务器上同时安装几个系统，如精密空调系统的监测、UPS的监测、门禁系统和安防视频系统等，多个系统的存在，很容易形成数据中心监控管理的信息孤岛。

（2）第二阶段：整体系统阶段

数据中心管理系统在国外有两条技术路线。国外的楼宇控制技术发展较早，机房基础环境的建设与运维管理往往由物业部门负责，形成了Honeywell、Johnson、Siemens、APC和EMERSON等数据中心场地设施监控管理的技术发展路线；而IT系统的建设管理由信息部门负责，形成了HP、IBM、CA和BMC等IT服务管理的技术发展路线（没有含机房基础设施）。两条技术发展路线使现代数据中心的场地设施与IT设施的监控管理人为撕裂，近几年两条路线都发现各自的缺陷，并开始意识到需要在ISO20000/ITIL框架下进行整合，即走数据中心甚至更顶层的信息系统一体化监控管理路线。

越来越多用户存在对机房环境进行整体监控的需求，国内厂家也很快推出了机房环境监控整体解决方案及系统。这个阶段的特点是厂家的核心技术基本上就是软件，用工控机来作为数据采集的主机。

（3）第三阶段：成熟阶段

尽管在管理理论总结与流程信息化方面，发达国家仍然走在前面，但在监控管理一体化设计方面，国际品牌因为要满足西方管理模式，因而在两个方向上分别走得较远，整合难度大，难以在中国形成优势。中国绝大多数单位的数据中心（机房）与IT系统的建设与管理同属信息技术部门，具有对数据中心的监控管理进行顶层设计的基本条件，也符合ISO20000/ITIL的要求。中国应利用这一有利因素，充分吸取先进国家的经验教训，走符合我国国情与数据中心（信息系统）监控和运维管理发展规律的技术路线，避免跟着别人的“弯路”走。

随着信息网络技术的成熟，嵌入式集中监控系统成为发展趋势。软件加工控机的技术架构逐渐显露弊端：一方面Windows系统的工控机易宕机，无法全年持续稳定运作(工控机毕竟是一台计算机， 365天全天工作，硬盘、内存、主机、电源和病毒引起的故障率高)；另一方面，每个监控点只能采用轮询实时数据，对于较大机房和多个机房，当需要监控的数据量较大时，无法及时处理所有点的实时数据，造成报警的严重滞后，因而失去了监控系统的意义。

改善的办法是数据采集主机采用嵌入式系统，即技术架构的硬件和软件都采用嵌入式系统，从底层开始研发；告警事件主动上报机制；无论是数据采集主机还是最前端的采集模块都是可分析判断处理采集数据的智能设备，而不仅仅是数据采集的设备，这样可以大大减轻数据的处理量，保证系统的稳定。

3 机房管理系统的发展展望

智能化已经成为下一代数据中心监控管理系统的重点，其包括如下核心功能。

（1）实时监控

系统提供各类数据接口与协议，并基于统一的数据中心对象模型，可快速接入各类数据中心基础设施的实时运行参数与状态（遥测、遥信），并可通过策略配置实现对基础设施的控制（遥调、遥控）。

（2）告警管理

提供用户自定义报警通知规则功能，支持事件模块和基于权限用户模式的通知规则定义；并可支持通知方式、等级、时段和延时等不同通知策略，通知内容以模板方式由客户自定义；通过故障树模型与设备关系，对告警进行智能判断，识别根源告警。

（3）资产管理

实现资产的全生命周期管理，包括入库、出库、上架、下架、迁移、上电和下电等，并结合备件库，实现维修过程与备件使用的记录；具备线下机柜级的智能监测终端，可实时监测机柜内设备的位置变化，出现异常自动生成告警，可与流程工单联动实现任务执行位置的灯光指示，并可提供实时的位置，自动生成盘点报告。

（4）容量管理

具备多维度的容量信息统计与分析，支持各空间节点的容量统计，并可展示关键设备（如UPS、HVDC、蓄电池和冷水机组等）的容量实时状态；并通过容量推荐算法，记录用户上架的行为偏好，结合数据中心实际的容量峰谷，推荐最佳上架位置；具备容量模拟功能，可基于当前数据中心各类容量状态进行容量优化模拟操作，查看优化后各节点的容量变化情况，形成容量模拟分析报告。

（5）能效管理

具备各类能耗参数的实时计算与统计，包括PUE、pPUE、DCiE、WUE和CUE等，并支持进一步的能耗组成统计；具备空调系统节能的机器学习算法，通过汇聚IT设备吞吐量、环境温度和空调系统出风口风量等，生成能效最优的优化策略，并通过持续训练不断提升准确度。

（6）智能巡检

通过配置巡检计划自动生成巡检任务，并推送至运维人员的APP中，执行巡检任务的，与监控数据实时关联，巡检过程可实时查看监控状态与参数；也可分派巡检任务至机器人，实现7×24 h的全时无人工巡检。

（7）值班管理

制订值班计划，并生成班次任务，规范运维人员的工作交接，具备自动排班引擎，可保障人员作息习惯，并平衡与优化工时、假期等排班条件。

（8）知识库

进行知识的录入与管理，并提供用户评价、提问等功能；具备与告警、设备和工单的关联，实现SOP、MOP等各类文档的快速访问。

（9）智能机器人技术

集成各类监测单元，并引入人工智能技术，实现环境指标全方位的覆盖，并提供设备识别、人机交互应用；可提供运维人员进行远程控制，实时回传视频页面；具备机械臂以及门禁信号发

射器，实现通道无障碍通过、机械臂开闭机柜门等复杂仿生动作。

2018年夏天，笔者受邀参观了北京亦庄某大型数据中心，该数据中心是兴建的一幢主体3层高、局部5层高的精装修建筑总建筑面积为18 810m^2，机柜4 300个。该数据中心效果图如图2所示。

图2 某云数据中心

笔者在现场深刻感受到数据中心管理人员对新一代数据中心监控管理系统的重视程度，它已经纳入管理者对数据中心管理的必选内容。一体化的管理融合现代信息管理的先进方法，通过大屏的展示，使每个设备的健康状态都可以直观地看到，配合三维的效果，给视觉上带来极度的震撼。三维效果图如图3所示。

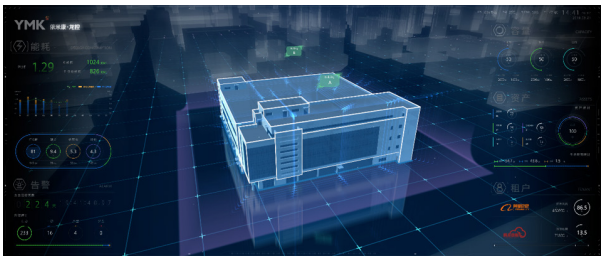


图3 某云数据中心三维效果图

监控管理系统页面融合了工业及信息化管理要素，图元直观，多图表让管理者更直接地了解这个数据中心基础设施的运营情况。从系统上来看，原来数据中心多个子系统已经集成到一个平台，并形成信息之间的共享，很好地解决了信息孤岛的问题。据现场人员介绍，目前系统运用了最先进的技术，智能化解决设备查找问题和容量的使用趋势，关键一点是用在告警中的故障定位方法使用了大数据分析，很好地解决了告警风暴问题。监控界面如图4所示。

信息化的发展，给企业的发展提供了很好的契合度，也带动了数据中心的发展。在目前数据中心人才紧缺情况下，智能化的监控管理系统在很大程度上推动和完善了数据中心的管理。

图4 监控界面

4 结束语

云计算、大数据、物联网、移动互联网和人工智能等新一代信息技术快速发展，硬件、软件和服务等核心技术体系加速重构，正在引发电子信息产业新一轮变革。

发达国家依然占据电子信息产业价值制高点，在大力构建信息经济新优势的同时，积极以信息技术为手段推动再工业化进程，争取未来全球高端产业发展主导权。

电子信息产业正日益成为我国实现制造强国、网络强国的关键力量之一。“互联网+”行动指导意见的持续推进，要求密切跟踪信息技术变革趋势，努力发展新技术、新模式和新业态，构建以互联网为基础的融合型产业生态体系。

人类社会经历了机械化、电气化和数字化时代，正在向智能化时代演变，传统的生产生活方式和产业发展模式逐步被颠覆。“智能”的概念已逐渐成为全社会所熟知，智能技术、智能产品和智能服务成为各界关注的焦点。从国内外产业发展实践看，智能化正在成为电子信息产业的重要发展趋势，能够为电子信息产业提供新的发展机遇、发展空间和发展动力。

（收稿日期：2018－09－21）EA

(上接第43页)

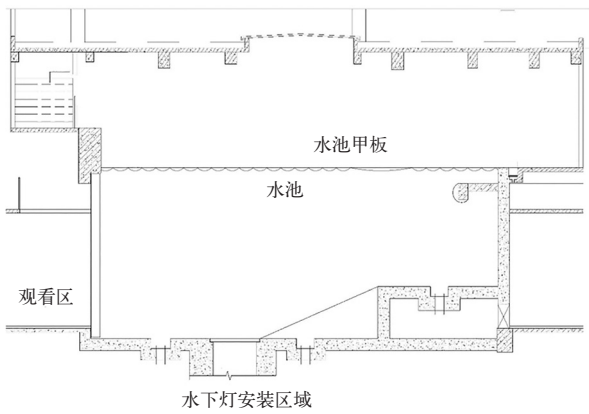


图　水池水下灯安装位置示意图

为严重的区域，特别是水族馆内的水池、水缸区域和维生机房区域，盐雾对电气设备的腐蚀更为严重。因此，常规区域的电缆桥架及其支架、吊杆和螺钉等均选用热浸锌电缆桥架，水族馆及其配套维生机房区域选用不锈钢和玻璃钢电缆桥架。

5 结束语

以上是笔者在亚特兰蒂斯酒店设计过程中的一些心得和体会，对于一些具有特点的设计内容提出自己的设计思路，欢迎各位同行的指正和批评。

（收稿日期：2018－09－25）EA

一起110 kV GIS断路器缺相故障分析与处理

GIS设备因其诸多优点，在电网系统得到了越来越多的应用，但由于GIS结构的全封闭性，使得其内部缺陷难以准确诊断。分析了一起110 kV GIS断路器缺相故障而导致的全站停电事故，首先对故障发生过程及特征进行了简要描述，发现了导致故障产生的原因，并给出了检修方案。通过此次事故分析，对GIS设备的运行维护具有一定的借鉴意义。

罗 杨 吴 雄 蔡 川 黄 昆 邱 炜 彭晓娟/国网成都供电公司

罗 杨/高级工程师

关键词/Keywords

GIS·

断路器·

缺相故障·

全站停电·

0 引言

随着电力工业技术的发展，GIS即SF_6全封闭组合电器在变电站的运用日益广泛，相对于常规敞开式配电装置，其具有体积小、技术性能优良和设备运行可靠等优点[1-2]，但也对运行维护存在一些负面影响。由于GIS属于全封闭式，其内部绝缘件（如盆式绝缘子、绝缘支座和绝缘拉杆等）会存在质量不良、安装不当或老化等缺陷，而且难以采用较为直观的试验手段发现这些缺陷[3-6]；GIS中的SF_6气体可能存在泄漏、水分超标和纯度不合格等缺陷[7-9]。同时，GIS弹操/液压机构、传动连杆和紧固螺栓等也会导致GIS出现故障，从而影响供电可靠性[10]。GIS出现故障时，由于其紧凑密闭等特点，故障位置往往难以确定，检修难度也比常规设备大。因此，应加强GIS在出厂、安装、验收和运行维护等全过程的管理，及时发现并处理缺陷，避免GIS故障发生或扩大，提高供电可靠性。

本文分析了一起110 kV GIS操动机构螺栓松动导致断路器合闸不到位，从而引起GIS断路器非全相导通，最终导致全站停电的事故，并提出了GIS设备的全过程技术监督建议。

1 故障过程及特征分析

1.1 故障前运行方式

某110 kV GIS站的一次接线如图1所示，其为内桥接线，两条电源进线分别为110 kV 151间隔进线及110 kV 152间隔进线，10 kV为单母分段接线。

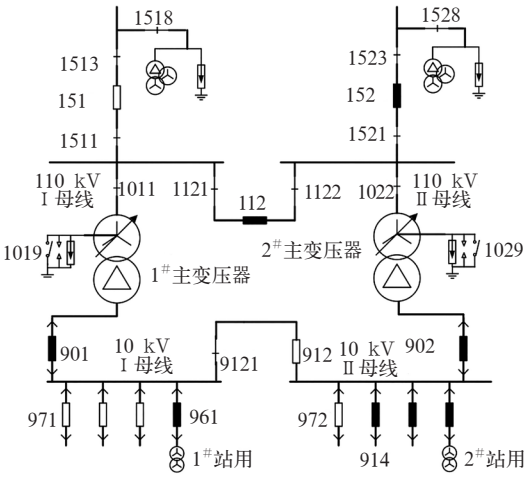


图1 事故变电站故障前运行方式

该变电站事故前正进行解环操作，151断路器、152断路器和110 kV内桥112断路器均在合位。此时1#主变压器中性点接地运行，2#主变压器中性点不接地运行，901断路器、902断路器在合位，10 kV分段912断路器在分位。

1.2 故障发生经过

（1）1#号主变压器动作情况

在151断路器、112断路器和152断路

器合环运行时，从图2故障录波可以看出，在151断路器拉开前，151断路器有负荷电流，而152断路器基本无电流。从该现象可以推测此时152断路器触头处的阻抗较151断路器大许多，甚至断开。07：54：52：251，拉开151断路器，151断路器电流消失，152断路器 B、C相流过负荷电流，但A相无电流，如图2所示。由于该变电站无母线TV，因此无法检测母线电压。

此时全站负荷基本由152断路器B、C两相提供电源，造成非全相运行。由于1#主变压器中性点接地运行，B、C两相合成的零序电流通过1#主变压器中性点入地，因此1#主变压器高后备保护感受到了二次1.81 A的零序电流（一次电流217.2 A），如图3所示。经3 005 ms延时，保护起动，主变压器高后备保护零序过电流III段动作，跳开112断路器、901断路器，10 kV I母线失电压。

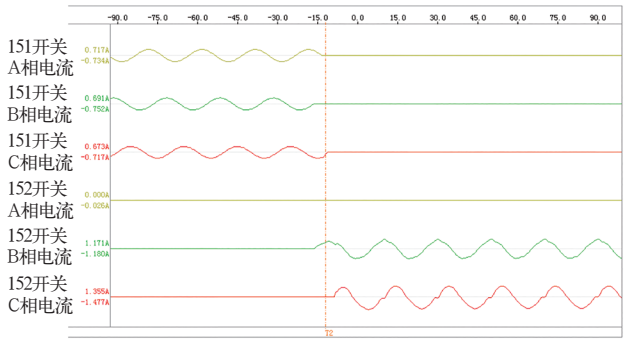


图2 拉开151断路器后151、152断路器TA电流波形

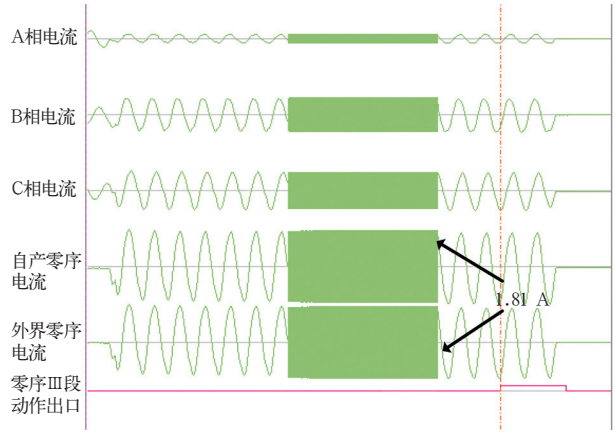


图3 1#主变压器套管TA电流及零序电流波形

当全相运行时，主变压器中性点电压为0；当缺A相运行时，对于1#主变压器（中性点接地）而言，其中性点电压为0，但是对于2#主变压器（中性点接地开关断开）而言，其中性点电压相量如图4所示。2#主变压器中性点电压值约为正常相电压的1/2，即$U_{1N}=U_C/2=U_B/2=31.8$ kV，该电压方向与原A相电压方向相反。此时，1#、2#主变压器中性点存在电压差，将会形成从2#主变压器中性点经1#、2#主变压器A相绕组再到1#主变压器中性点的电流。因此，1#主变压器A相套管TA会检测到电流。1#主变压器中性点TA也会检测到零序电流，导致1#主变压器后备保护动作。如图5所示。

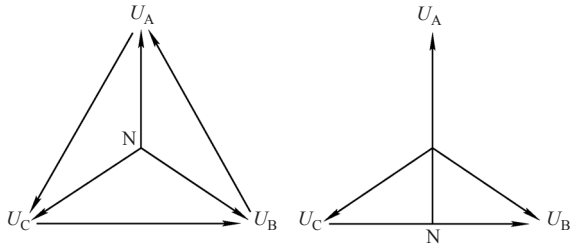


图4 正常时的三相电压和缺相时的中性点电压

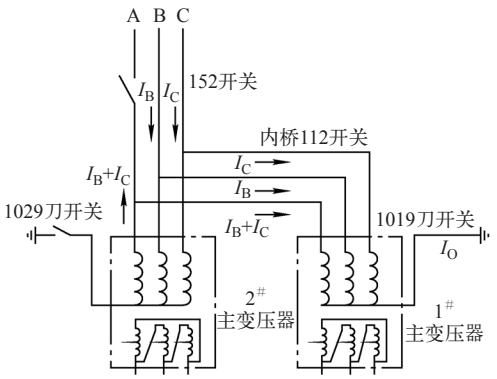


图5 A相缺相时电流路径示意图

（2）全站失电压过程

112断路器跳开后，内桥112断路器电流消失，152断路器B、C两相电流减小，152断路器A相出现负荷电流，幅值与B、C两相接近，152断路器三相负荷电流恢复正常，如图6所示。

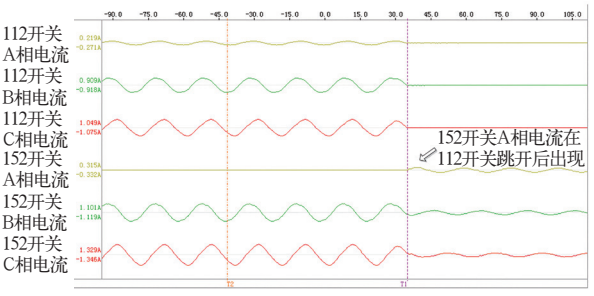


图6 112断路器跳开后时152断路器电流变化情况

152断路器三相电流恢复正常后，经过约10 min左右，08：05：52：587，2#主变压器保护感受到152断路器TA C相故障电流，二次值为37.5 A（一次电流值6 000 A），2#主变压器差动保护动作，比率差动出口跳开152断路器、902断路器。152断路器、902断路器跳开后，全站失电压。然而，152断路器TA此时仍持续感受到故障电流，16.5 ms后，152断路器采集到三相故障电流，二次值为29.4 A（一次电流值4 704 A），如图7所示。

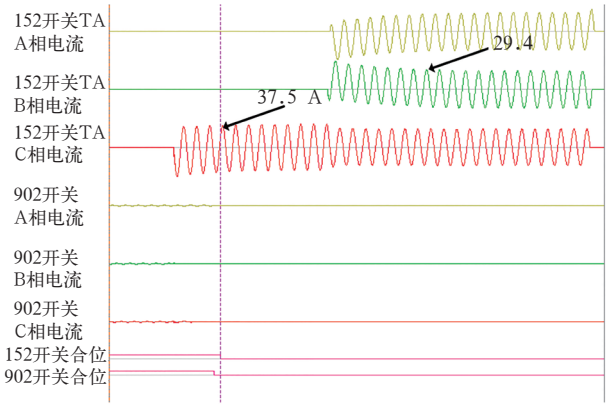


图7　2#主变压器差动保护录波

从现场GIS设备结构特点可以看出，152断路器和152断路器TA位于同一气室，且152断路器TA位于靠线路侧，152断路器线路保护和2#主变压器差动保护的保护范围如图8所示。主变压器差动保护跳开152断路器后，接地故障仍未切除，TA仍有电流，直到8：05：53：228，152间隔对侧站线路保护动作跳开对侧断路器，TA电流为0，故障才被切除。因此，可以推断故障范围大致位于152断路器与152断路器TA之间，其故障过程为GIS内部首先发生了A相单相接地故障，继而发展到三相接地故障。

2　故障查找

2.1　SF_6分解产物检测

故障发生后，对152断路器气室（152断路器和152断路器TA位于同一气室）开展SF_6气体诊断试验，发现152断路器气室SF_6分解产物含量异常，其SO_2含量为138.6 μL/L，H_2S含量为131.8 μL/L，CO含量为735.5 μL/L，远高于H_2S、SO_2的注意值1 μL/L。SO_2和H_2S是判断GIS等SF_6气体设备是否存在放电、过热故障的重要指标，因此从测试结果可以推断，在152断路器气室内发生了严重放电。

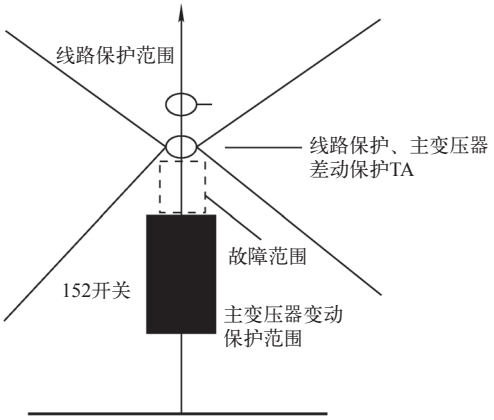


图8　线路保护、主变压器差动保护范围

2.2　解体分析

从前文来看，152断路器缺相是导致此次事故的主要原因，而断路器缺相很有可能是由于合闸不到位引起的。因此，事故发生后，检修和厂家人员首先对152断路器机构箱进行了检查，发现152断路器机构底座紧固螺栓一侧明显松动，另一侧底座紧固螺栓已经完全脱落，如图9所示。从而导致机构底座松动，且存在明显间隙，如图10所示。由于整个机构固定不牢，处于晃动状态，因此，断路器在分合闸过程中，其操动机构会在外力下摇晃，使传动连杆不能准确地将行程传递给动触头，致使断路器触头分合闸行程不够，合闸时动静触头虚接或接触不良；分闸时动静触头又不能有效分开，导致持续燃弧。这不仅无法满足拉开短路电流的运行要求，而且连承载极低负载电流的能力都受到影响。

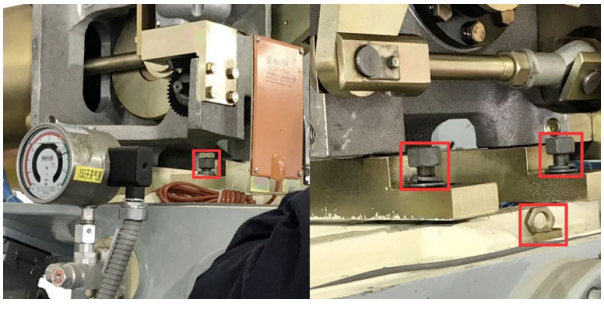


图9　152断路器机构底座螺栓情况

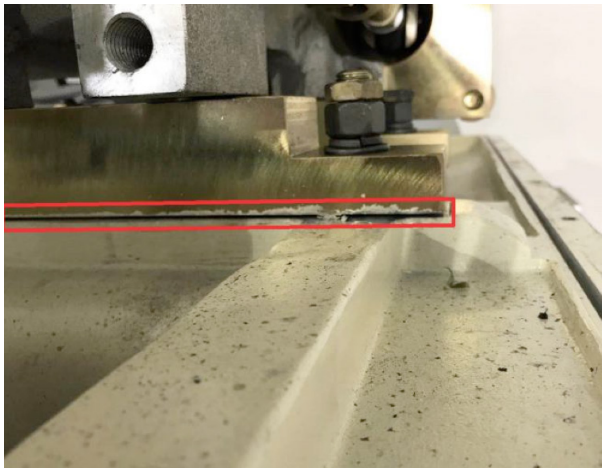


图10 底座存在间隙

152断路器解体之后，在内部发现有大量的灰色粉末。152断路器C相被电弧击穿导通后，SF_6气体在电弧的作用下分解产生H_2S、SO_2等故障气体，同时产生大量铜蒸汽以及碳化燃烧的粉末，铜蒸汽和碳化粉末从C相故障点向四周扩散，形成游离导电介质，使断路器气室绝缘逐渐降低，并最终导致A、B两相也对外壳/地导通，形成放电通道，故障发展为三相对地短路。由于保护死区，152断路器跳开后并没有消除接地故障，因此距离保护动作跳开152对侧断路器。152断路器静触头如图11所示。

图11 152断路器静触头

3 检修处理

揭开该站151断路器机构箱，发现其机构底座螺栓依旧松动，存在分合闸不到位的风险。因此，为安全起见，公司已将其列为家族性缺陷，在公司内部对该厂家生产的该类型GIS设备进行梳理，并安排进行逐一停电排查。未排查的断路器不能再进行分合闸操作。排查时应先拉开对侧站相应间隔的断路器，然后在不带负荷的情况下拉开缺陷断路器，最后依次测试机械特性、低跳特性和回路电阻等。紧固操作机构底座螺栓，并涂覆防松胶，再次复核机械特性、低跳和回路电阻试验，合格后投运。

4 结束语

此次事故主要是由于断路器机构底座螺母松动造成的，暴露了GIS设备在出厂、安装、验收和运维等环节中存在的诸多问题，可采取以下措施加以改善。

1）该变电站一次部分采用典型的内桥结构，其110 kV母线未安装母线TV，靠两组110 kV线路侧TV监视110 kV母线电压，虽节约了投资，但暴露出在断路器、刀开关合不到位时，无法有效监视母线电压的弊端。建议对于受端GIS变电站设置独立的母线TA，以监测线路断路器、刀开关是否合闸到位，确保线路电压送到110 kV母线上。

2）GIS设备免维护是相对的，由于断路器、刀开关分闸和合闸操作会对从操动机构到罐内导体的一系列连接的传动部分产生较大冲击力，经过多次操作，累积效应可能会使螺栓松动，部件发生变形、松动或脱落。应加强日常维护，对操动机构、传动连杆定期检查。

3）加强GIS设备的出厂、安装和验收管理，防止“带病”设备入网。

4）运维人员对GIS设备进行倒闸操作后，必须认真核查断路器、隔离断路器在各处的位置指示是否一致，同时，还要核实各相的电压电流信号是否正常。

参考文献

[1] 罗学琛．SF_6气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]．北京：中国电力出版社，1998．

(下转第84页)

电动汽车用户选择充电站最佳经济途径的方法研究

电动汽车将电能转化为驱动汽车的动能，绿色、环保且无污染。政府积极提倡发展电动汽车，电动汽车的数量得到了一定的发展。当电动汽车的电量不能够满足用户的需求时，要对其进行电量的补充。如何合理有效地选择充电站进行充电是一个非常值得研究的问题。针对区域内电动汽车用户如何选择充电站提出一种经济的选择方法。通过搭建电动汽车用户与各个充电站的信息交互平台，引入排队论数学模型，计算电动汽车到达充电站时间成本的同时，进一步计算里程成本。基于前期研究成果，在区域内电动汽车的充电站布局合理的情况下，确定单目标函数选择充电站，从而确定最经济的途径，电动汽车用户以经济成本最低来选择充电站进行充电。

徐天奇[1] 冯培磊[1] 李 琰[1] 曹 富[2] 刘晓欣[3]/1.云南民族大学电气信息工程学院 2.中国科学技术大学管理学院 3.云南电网有限责任公司怒江供电局

徐天奇/副教授

关键词/Keywords
电动汽车·
M/M/C/N排队论·
时间成本·
里程成本·

0 引言

有限的石油资源不断减少，环境污染日益严重[1]。传统汽车是环境污染的主要因素之一，电动汽车（Electric Vehicle，EV）具有高效节能、零排放等优点，因而得到了快速发展。文献[2]通过排队论的思想研究EV进站排队系统，推算出系统相关的运行指标。文献[3]主要研究了排队系统建模仿真，深入分析EV与站内充电桩的充电时间联系，可以有效保证优质的服务效率。电动汽车规模化充电给电网造成一定的影响，通过技术的革新电动汽车整车充电将会呈现出明显的优势[4]。文献[5-6]将排队论模型运用到城区的选址定容的研究中，在点需求模式下借助统计数学中的期望模型，在合适的响应时间范围内充电站以获取最大EV数量为目标。EV的充电行为具有较大不确定性，文献[7]分析EV用户的充电行为基于排队论模型，以充电设施服务系统投资的总费用最小建立充电站设施服务系统。文献[8]将用户带有不厌烦和止步行为的M/M/C/N排队模型考虑在内，对充电场所服务设施进行研究，获得站内系统稳态下的动态平衡方程。文献[9-10]将路网状态结构、EV车流量信息和配电网络的容量相关因素考虑在内，提出进一步优化EV充电站的规划策略。文献[11]通过对电动汽车运营实际数据的调研，建立提高充电设备利用率的模型，运用改进的自适应粒子群遗传算法来引导车辆的充电行为。

通过对电动汽车充电站的数据进行分析，车辆到站的时间间隔满足负指数分布，充电服务时间满足正态分布，通过对比M/G/k排队模型和M/M/k排队模型两种经典的排队论模型，分析了两者的差别，电动汽车的荷电状态会对充电排队系统产生一定的影响[2]。充电设施的分布情况对电动汽车用户选择会产生影响，通过随机离散事件建立系统排队论模型，优化了充电桩的数量。运用Matlab/Kstest函数对数据进行K－S负指数分布检验，证明了在h_0=0时，充电时间间隔的时间满足负指数分布[3]。文献[6]运用排队论模型，基于点需求模式下

国家自然科学基金项目（61761049，61461055）；云南省应用基础研究计划项目（2017FD120）；云南民族大学创新基金校级重点项目（2018YJCXS）；云南电网公司技术创新项目（050000KK52150006）。

研究区域内充电站的选址定容问题，以用户最大的容忍响应时间为条件进行灵敏度的检验，深入分析各个影响因素。文献[8]指出电动汽车的充放电行为具有不确定性，用户选择充电如果排队时间过长会出现不厌烦情绪，或者用户看到充电排队等候的人比较多会放弃充电。文献[7]基于有限容量的M/M/C/N排队模型对服务系统整体建模，建立平衡方程进行动态求解，将社会经济效益考虑在内建立数学模型。

之前的研究成果将排队论模型用于电动汽车的选址定容研究，当区域内充电站建设好之后，电动汽车用户需要根据电动汽车自身的荷电状态选择充电站进行充电。本文主要研究区域内电动汽车选择充电站充电最佳经济途径的确定方法，根据具体情况修改传统排队论中的基本限制条件。将排队论数学模型中的一些评价指标运用在电动汽车选择充电站的问题上。EV选择充电站根据不同的经济成本，本文主要通过EV用户与电动汽车充电站交互平台的信息，确定EV选择充电站的时间成本和里程成本。最后通过总成本值的比较得到最经济的途径。

1 M/M/C/N排队论模型

1.1 排队论发展简介

排队论（Queuing Theory，QT）最初由电话通话的现象引起，起源于20世纪早期。1909年丹麦著名的电气工程师Erang A. K.采用概率论与数理统计的方法，研究电话的通话问题，从而产生这门有趣的学科。1940年，Feller G. W. 将生灭过程引入排队论，系统排队论被数学界所公认。二战以后运筹学中的排队论被广泛重视，成为新领域中比较重要的分支之一。20世纪50年代，Kendall D. G. 将排队论进行系统化的研究，将Mmarkov A. A. (马尔科夫)理论方法嵌入到排队论中，排队论得到了进一步的发展。排队论模型是运筹学的一个分支，也是研究系统的随机聚散现象和服务运营过程中的方法理论。

排队论的输入过程通常考虑的是顾客到达服务系统的规律性，通常顾客流按照泊松分布的规律，在时间t内到达n个顾客的概率满足

$$p_n(t)=\frac{e^{-\lambda t}(\lambda t)^n}{n!} \quad n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots,\ N \tag{1}$$

相继到达顾客的间隔时间T服从负指数分布，即

$$p(T\leqslant t)=1-e^{-\lambda t} \tag{2}$$

式中，λ为单位时间顾客期望到达数目，也就是平均到达率。

电动汽车用户的时间采用随机的服务时间，v满足负指数函数分布，即

$$p(v\leqslant t)=1-e^{-ut} \quad (t\geqslant 0) \tag{3}$$

式中，u为平均服务率；$1/u$为平均服务的时间。

1.2 M/M/C/N排队论模型

M/M/C/N排队论模型表示电动汽车用户的到达时间间隔满足参数为λ的负指数分布；电动汽车用户充电的服务时间满足参数为u的负指数分布；电动汽车用户到达的时间与充电接受服务的时间相互独立；电动汽车充电站一共拥有C个充电桩，系统的容量为N。M/M/C/N模型状态流如图1所示。

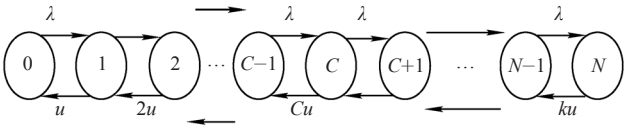


图1 M/M/C/N模型状态流[12]

文献[13]对于该排队论系统，当电动汽车数量小于充电站充电桩的数量系统的总服务率为ku；当电动汽车数量超过系统充电桩的数量时，系统的总服务率为Cu。

电动汽车接受充电的概率为

$$p_k=\begin{cases}\dfrac{\rho^k}{k!}p_0=\dfrac{C^k}{k!}\rho^k p_0 & 0\leqslant k<C\\ \dfrac{\rho^k}{C!C^{k-C}}p_0=\dfrac{C^C}{C!}\rho^k p_0 & C\leqslant k<N\end{cases} \tag{4}$$

服务台处于空闲状态的概率计算式为

$$p_0=\begin{cases}\left[\sum_{k=0}^{C-1}\dfrac{(C\rho)^k}{k!}+\dfrac{(C\rho)^C}{C!}\cdot\dfrac{1-\rho^{N-C+1}}{1-\rho}\right]^{-1} & \rho\neq 1\\ \left[\sum_{k=0}^{C-1}\dfrac{C^k}{k!}+\dfrac{C^C}{C!}(N-C+1)\right] & \rho=1\end{cases} \tag{5}$$

平均等待队长计算式为

$$L_q=\begin{cases}\dfrac{C^C\rho^{C+1}p_0}{C!(1-\rho)^2}[1-(N-C+1)\ \ \rho^{N-C}\rho^{N-C+1}] & \rho\neq1\\ \dfrac{C^C}{2C!}(N-C)(N-C+1)P_0 & \rho=1\end{cases}\tag{6}$$

排队系统平均队长计算式为

$$L_s=\begin{cases}L_q+\dfrac{\lambda_e}{u} & \rho=1\\ L_q+C-\sum\limits_{k=0}^{C-1}(C-k)p_k & \rho\neq1\end{cases}\tag{7}$$

平均等待时间计算式为

$$W_q=\begin{cases}\dfrac{C^C\rho^{C+1}p_0[1-(N-C+1)\rho^{N-C}+(N-C)\rho^{N-C+1}]}{C!(1-\rho)^2u[C-\sum\limits_{k=0}^{C-1}(C-k)p_k]} & \rho\neq1\\ \dfrac{C^Cp_0(N-C)(N-C+1)}{2C!u[C-\sum\limits_{k=0}^{C-1}(C-k)p_k]} & \rho=1\end{cases}\tag{8}$$

平均逗留时间计算式为

$$W_s=W_q+1/u\tag{9}$$

M/M/C/N排队模型的电动汽车用户充电的服务时间，具体满足分布需要考虑到所在城市的人口和经济发展水平，还需要根据具体问题来选择排队论的具体模型，这样才能合理有效地解决实际问题。本文调用排队论模型的评价指标进行时间成本的相关计算。

2　电动汽车用户选择充电站数学模型

2.1　信息交互平台的搭建

电动汽车用户与充电站信息交互平台如图2所示。

充电站通过因特网传递不同充电站的位置信息、充电桩的数量信息和系统容量信息。区域内的电动汽车用户通过GPS/移动互联网传递自身的荷电状态信息（电动汽车当前的电量）和位置信息（电动汽车的里程），在一些特定的约束条件下，给出电动汽车用户的充电决策，也就是电动汽车用户如何选择充电站。

电动汽车的交互平台按照等时间间隔给该区域内的电动汽车进行实时状态信息的发布，引导

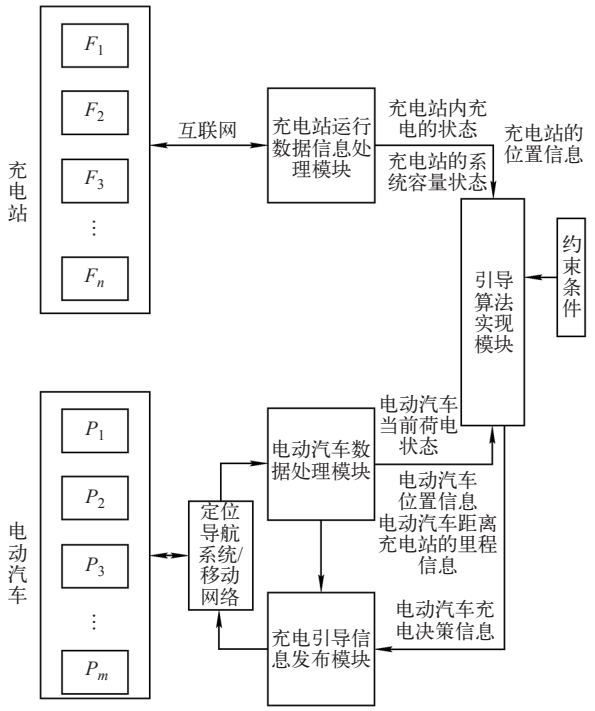


图2　EV用户与充电站信息交互平台

电动汽车根据自身的实际情况作出响应，并选择最佳的经济充电路径。

（1）充电站反映的状态信息

n个不同充电站内充电桩的状态信息计算式为

$$\begin{bmatrix}F_{1\text{-}1} & F_{1\text{-}2} & \cdots & F_{1\text{-}P_1}\\ F_{2\text{-}1} & F_{2\text{-}2} & \cdots & F_{2\text{-}P_2}\\ F_{3\text{-}1} & F_{3\text{-}2} & \cdots & F_{3\text{-}P_3}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ F_{n\text{-}1} & F_{n\text{-}2} & \cdots & F_{n\text{-}P_n}\end{bmatrix}\tag{10}$$

式中，区域内充电站的数目为n个，每个充电站对应的充电桩数目分别为P_1，P_2，…，P_j，…，P_n，数值各不相同(P_j>1)。

充电站对应的系统容量状态信息计算式为

$$(N_1,\ N_2,\ N_3,\ \cdots,\ N_j,\ \cdots,\ N_n)^{\mathrm{T}}\tag{11}$$

充电站的位置信息计算式为

$$(L_1,\ L_2,\ L_3,\ \cdots,\ L_j,\ \cdots,\ L_n)^{\mathrm{T}}\tag{12}$$

（2）电动汽车反映的状态信息

m辆电动汽车当前位置的荷电状态信息计算式为

$$(S_{oc1},\ S_{oc2},\ S_{oc3},\ \cdots,\ S_{oci},\ \cdots,\ S_{ocm})^{\mathrm{T}}\tag{13}$$

第i辆EV用户距离不同充电站j的里程矩阵状态

信息计算式为

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ l_{31} & l_{32} & \cdots & l_{3n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & l_{mn} \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中，i=1，2，…，m；j=1，2，…，n。

电动汽车的位置状态信息计算式为

$$(L_1,\ L_2,\ L_3,\ \cdots,\ L_i,\ \cdots,\ L_m)^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

第i辆电动汽车与不同充电站之间的信息交互，通过目标函数根据实际情况提前预约。

2.2 电动汽车用户的时间成本与里程成本

2.2.1 电动汽车用户的时间成本

计算第i辆EV到达第j个充电站的排队等候时间，本文采用$M/M/P_j/N_j$排队论的相关知识，分别对应：第一个M为EV用户充电的时间间隔满足指数分布，假设单位时间到达的电动汽车数量为λ，则$1/\lambda$表示EV用户到达充电站的平均间隔时间；第二个M为充电站的服务时间满足正态分布，假设u为单位时间能完成EV的充电时间，则$1/u$表示平均服务充电时间；充电站中的充电桩数量对应的为P_j；充电站的系统容量为N_j。

根据排队论基本原理，电动汽车用户排队系统平稳分布，记$p_n=p\{N=n\}$，n=0，1，2，…为系统达到平稳队长N的概率分布，可以得到EV充电站服务系统的平衡方程为[4]

$$\begin{cases} u_1 p_1=\lambda_0 p_0 \\ \lambda_{n-1} p_{n-1}+u_{n+1} p_{n+1}=(\lambda_0+u_n) p_0 \end{cases} \tag{16}$$

式中，λ_n为状态为n的系统到下一辆EV到达时刻止的到达率；u_n为状态为n的系统到下一辆EV离开时止的平均服务率。

$$\lambda_n=\lambda_j=\lambda \tag{17}$$

对于充电桩个数为P_j的系统

$$u_n=\begin{cases} nu & n=0,\ 1,\ 2,\ \cdots P_j \\ pu & n=P_j,\ P_j+1,\ \cdots \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} p_1=\dfrac{\lambda_0}{u_1} p_0 \\ p_{n+1}=\dfrac{\lambda_n}{u_{n+1}} p_n=\dfrac{\lambda_n \lambda_{n-1} \cdots \lambda_0}{u_{n+1} u_n \cdots u_1} p_0 \end{cases} \tag{19}$$

ρ为EV充电站系统中正在接受充电服务的EV的平均数量，表示充电站的服务强度，反映了该充电站的繁忙程度，$\rho=\lambda/u$；u为单位时间EV能完成充电的数量。

对于有P_j个充电桩的充电服务系统，用ρ_{P_j}表示充电设施的利用率，计算式为

$$\rho_{P_j}=\frac{\rho}{P_j}=\frac{\lambda}{P_j u} \tag{20}$$

在EV等待排队的模型中，要求满足条件$\rho_{P_j}<1$，才可以使充电站达到系统平衡。

服务台都处于空闲状态的概率计算式为

$$p_0=\frac{1}{\sum_{n=0}^{P_j-1}\frac{\rho^n}{n!}+\frac{\rho_{P_j}(1-\rho_{P_j}^{N_j-P_j+1})}{P_j!(1-\rho_{P_j})}} \tag{21}$$

电动汽车充电站服务系统的平均排队长度计算式为

$$L_{\mathrm{q}}=\frac{p_0 \rho^{P_j} \rho_{P_j}}{P_j!(1-\rho_{P_j})^2}[1-\rho_{P_j}^{N_j-P_j+1}-(1-\rho_{P_j})(N_j-P_j+1)\rho_{P_j}^{N_j-P_j}] \tag{22}$$

平均排队时间计算式为

$$t_j^{\mathrm{f}}=L_{\mathrm{q}}/\lambda_{\mathrm{e}} \tag{23}$$

由于充电站系统的空间有限性，必须考虑电动汽车的有效到达率λ_{e}，计算式为

$$\lambda_{\mathrm{e}}=\lambda(1-p_{N_j}) \tag{24}$$

$$p_{N_j}=\frac{\lambda^{N_j}}{N_j!u^{N_j}} p_0 \tag{25}$$

第i辆电动汽车从当前位置到达N_j充电站消耗的电能需要进行充电时间的折算，计算式为

$$t_j^p=\frac{l_{ij}}{l_{\mathrm{s}}}\cdot\frac{S_{\mathrm{total}}}{P_{\mathrm{N}}} \quad j=1,\ 2,\ \cdots,\ n \tag{26}$$

式中，P_{N}为EV充电的额定功率；l_{s}为EV总的续航里程；S_{total}为EV额定功率。

第i辆EV用户到达第j个充电站所用的时间计算式为

$$t_{ij}=\delta_j\sum_{i=1}^{m}x_{ij}+\frac{l_{ij}}{v_i}+t_j^{\mathrm{f}}+t_j^{\mathrm{p}} \tag{27}$$

式中，δ_j为充电站的优先等级系数；l_{ij}为电动汽车到达充电站的里程；v_i为取最近两次调度时间之间的平均速度；t_j^{f}为电动汽车排队时间；t_j^{p}为电动汽车到达目的地消耗的电池电量折算成的充电时间。

对于第i辆到达第j个充电站可得到如下时间矩阵，即

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \tag{28}$$

式中，i=1，2，…，m；j=1，2，…，n。

对于第i辆电动汽车取

$$t_{ij}^{\max}=\max(t_{i1},\ t_{i2},\ t_{i3},\ \cdots,\ t_{in}) \tag{29}$$

$$\alpha_{ij}=\frac{t_{ij}}{t_{ij}^{\max}} \tag{30}$$

因时间成本的单位和里程的单位不一致，故需要去除量纲处理，对于第i辆电动汽车到达不同的充电站j的时间成本是不同的。对应的值越大，说明需要花费的成本越高，充电站被选择的机会越少。时间成本对应的数值越大，说明到达充电站需要花费的时间越多，充电用户选择该充电站的机会越小。

2.2.2 确定EV用户里程成本

第i辆EV到达第j个充电站，将l_{ij}作为基本目标对充电站进行选择，$m\times n$的里程矩阵为

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & l_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{取 } l_{ij}^{\max}=\max(l_{i1},\ l_{i2},\ l_{in}) \tag{31}$$

$$\beta_{ij}=\frac{l_{ij}}{l_{ij}^{\max}}$$

对应的数值越大，充电站被选择机会越少。

3 约束条件与目标函数

3.1 约束条件

1）区域内待充EV只能选择1个充电站进行充电：$\sum_{j=1}^{n}x_{ij}=1$ 。

2）第i辆EV到达第j个充电站的最大距离应该小于第i辆车可以行使的最远距离，即$l_{ij}^{\max}\leqslant l_i^{\max}$。

3）充电中EV的充电桩满足$P_j>1$。

4）充电站的系统容量大于充电站中充电桩的数量，即$N_j>P_j$。

5）对于有P_j个充电桩的充电服务系统，ρ_{Pj}表示充电设施的利用率，计算式为

$$\rho_{P_j}=\frac{\rho}{P_j}=\frac{\lambda}{P_j u}<1 \tag{32}$$

3.2 目标函数

第i辆电动汽车选择不同路径的成本目标函数为

$$F=\min(\sum_{j=1}^{n}[x_{ij}(\alpha_{ij}+\beta_{ij})]) \tag{33}$$

$$x_{ij}=\begin{cases}1 & j=n\\ 0 & j\neq n\end{cases} \tag{34}$$

第i辆EV到达不同充电站j的成本值。对于特定i辆EV选择其周围的充电站，对于不同的充电站j将获得不同的时间成本与里程成本。确定选择出第i辆电动汽车到达不同充电站j的时间成本和里程成本之和最小，根据数值的大小来选择最佳的充电站。经济成本求解流程如图3所示。

方法步骤如下。

1）搭建电动汽车用户与电动汽车充电站信息交互平台。

2）确定电动汽车到达充电站的时间成本。

3）确定电动汽车到达充电站的里程成本。

4）确定单目标函数，寻找确定的充电站，从而确定最经济的途径，也就是确定选择出第i辆电动汽车到达不同充电站j的时间成本和里程成本之和最小。

4 算例仿真

4.1 参数设定相关假设

1）设定一个区域范围内运营的充电站数量和

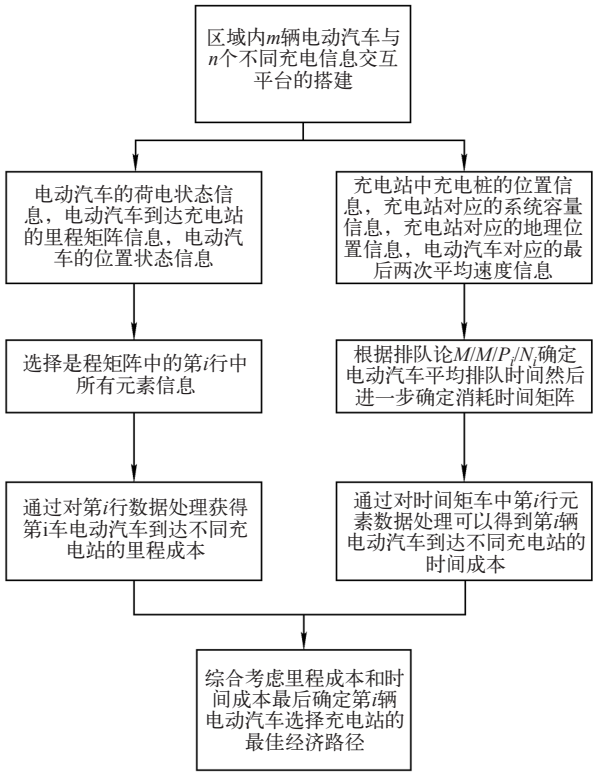


图3　经济成本求解流程

电动汽车的数量是有限的。电动汽车的数目为m辆，充电站的数量为n个。充电站对应的充电桩数目为Pj，系统容量数目为N_j(j=1，2，…，n)。

2）在电动汽车需要充电时，电动汽车用户选择充电站的时间比较短[14]。电动汽车用户能且只能选择一个充电站，并且提前预约可以准时到达。电动汽车的充电状态用x_{ij}表示，取值为1表示第i辆电动汽车选择第j个充电站充电。取值为0表示电动汽车i不到第j个充电站充电。

3）根据GPS导航系统反馈的信息，假设最近两次调度之间的平均速度作为电动汽车从当前位置运动到充电站位置的速度V_{ij}。

4）需要考虑每个充电站的系统容量N_j，当待充电动汽车的数目超过站内充电桩的位置时，电动汽车需要进行排队等待。

5）电动汽车的行驶里程L与电动汽车的荷电状态SOC近似呈线性关系。

6）等待时间与充电站的规模呈线性关系，充电站的规模越小，等待时间越长。

4.2　电动汽车充电站运行特点

1）客户源是无限的，电动汽车用户到达的时间有比较明显的随机特征。

2）对于一个确定的充电站来说，充电桩的数量是固定的P_j，每台充电机的工作效率一样且相互独立。充电桩的数量大于1。

3）电动汽车的充电时长和电池的剩余容量相关，具有一定的明显随机特征。

4）电动汽车的系统容量大于电动汽车的充电桩数目。

5）充电站的服务能力是固定的，一般都是给固定区域的电动汽车充电。当充电站没有充电的地方，电动汽车可以选择排队等待直到完成充电服务，也可以直接寻找其他充电站接受服务。

4.3　仿真结果及分析

区域内电动汽车充电站的数量为10；服务的电动汽车数量为200辆；不同充电站对应的充电桩数目不同，在[3,12]之间随机取值；电动汽车到充电站最大的里程设置为10 km；充电站对应的系统容量设置为充电桩的数目；电动汽车剩余电量的百分比在[0,1]内随机取值。

（1）仿真结果1

当参数λ=1、u=1时输出的结果。

本文选择第一个充电站进行分析。电动汽车到达充电站的时间间隔满足λ=1的负指数分布，电动汽车用户的充电时间满足参数u=1的指数分布。主要从电动汽车用户行驶到充电站的到达时间、电动汽车用户接受充电服务的时间、电动汽车排队等待的时间和电动汽车离开充电站的时间来研究电动汽车的时间里程成本问题。

对于第一个充电站来说，区域内电动汽车一般都会选择离用户相对较近的地方进行充电。从整体变化的趋势来看，电动汽车用户的到达时间随着电动汽车数量增加而增加。因为随着电动汽车数量的增大拥挤度就会增加，用户在路上的行驶时间也会增加。电动汽车到达充电站的时间随电动汽车的变化如图4所示。由图知，电动汽车数量在区间[0,20]内变化时，到达时间整体呈线性趋

势。在区间[50,70]时，电动汽车的到达时间产生微小的变化，此时已经产生了拥挤。

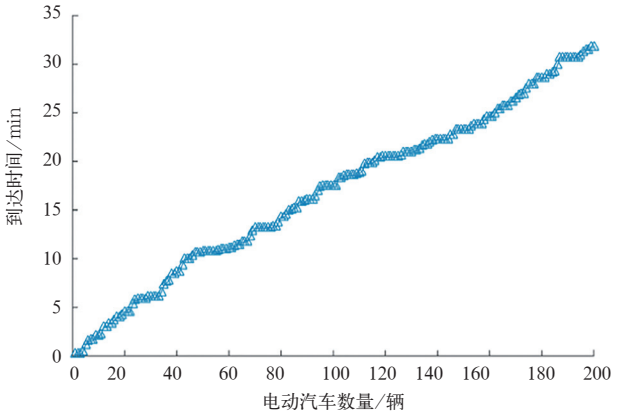


图4 电动汽车到达充电站的时间随电动汽车的变化

电动汽车充电服务时间与电动汽车的数量变化没有明显的规律，电动汽车的充电服务时间与电动汽车的起始荷电状态相关。电动汽车服务时间随电动汽车数量的变化如图5所示。大部分电动汽车的充电时间在3 min以下。对于大部分电动汽车来说,其出行满足日常的生活规律。少部分电动汽车用户的充电时间超过4 min。电动汽车的充电服务时间较长，首先说明在进入充电站之前电动汽车的电池电量比较低，原因可能是行驶的时间比较长，也有可能在前一天满足用户需求的前提下用户并没有选择充电。电动汽车的充电服务时间比较短，电动汽车用户的起始荷电状态比较高。电动汽车前期已经充好电，不需要进行充电，充电服务时间为0。

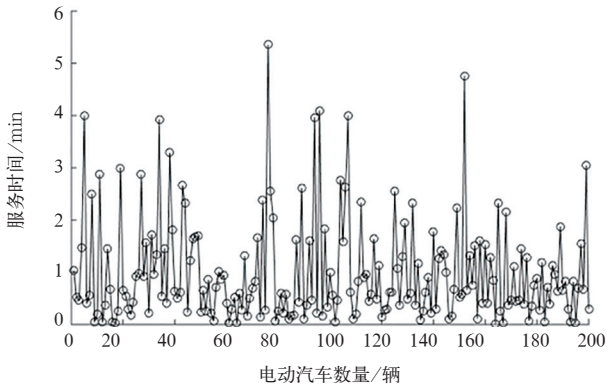


图5 电动汽车服务时间随电动汽车数量的变化

电动汽车等待时间随电动汽车数量的变化如图6所示。对于前20辆电动汽车的等待时间为0，

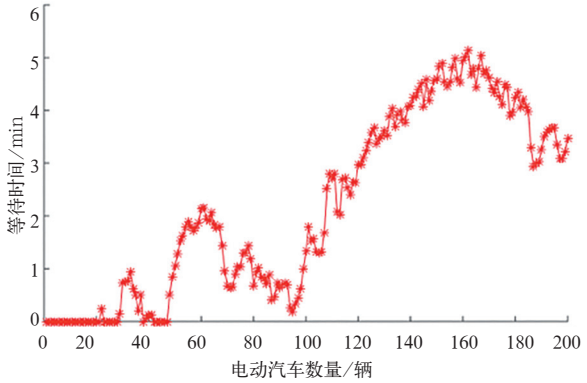


图6 电动汽车等待时间随电动汽车数量的变化

说明此时电动汽车选择距离比较近的充电站进行充电，电动汽车的数量在[140,160]范围时，等待时间比较长，充电站内已经没有多余的空位，电动汽车用户需要排队等待。随着排队等待充电的电动汽车增加，后面增加的电动汽车用户排队时间就会更长。在等待时间长的情况下，部分电动汽车可能会放弃充电直接离开，或者选择其他充电站进行充电。[180,200]电动汽车用户的等待时间下降与站内电动汽车用户的荷电状态有关，充电的电动汽车用户荷电状态比较高，充电的时间比较短，后面用户排队等待的时间就会下降。

电动汽车队列长度随电动汽车数量的变化如图7所示。在[0,20]电动汽车进站直接充电不需要排队等待，充电站内没有多余的充电桩时，电动汽车需要排队等待，电动汽车的队列长度随着电动汽车数量的增加而增加。在[75,85]电动汽车排队长度下降，部分电动汽车离开，选择其他充电站进行充电。在[100,150]电动汽车的排队长度整体趋势增加，对于电动汽车用户并没有紧急的事情而选择愿意等待，如果选择其他充电站进行充电，会增加电动汽车的里程成本。

电动汽车的离开时间随着电动汽车数量的增加整体也存在增加的趋势，具体如图8所示。电动汽车的离开时间是电动汽车到达充电站时间、排队等待时间和充电时间之和。电动汽车充电时，前面排队人数越多，需要等待的时间就会越长，会出现个别用户放弃充电的现象，也有少部分用户选择离开进一步寻找其他充电站进行充电。

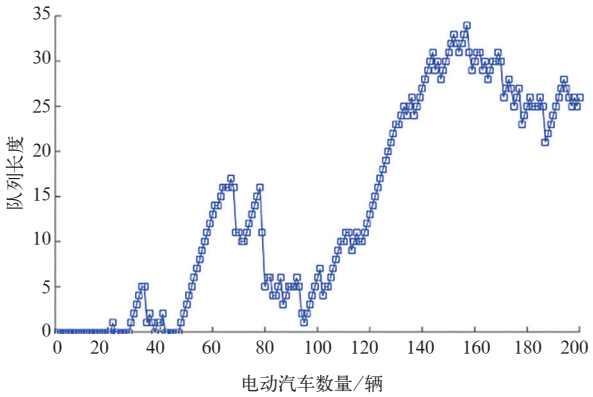


图7 电动汽车队列长度随电动汽车数量的变化

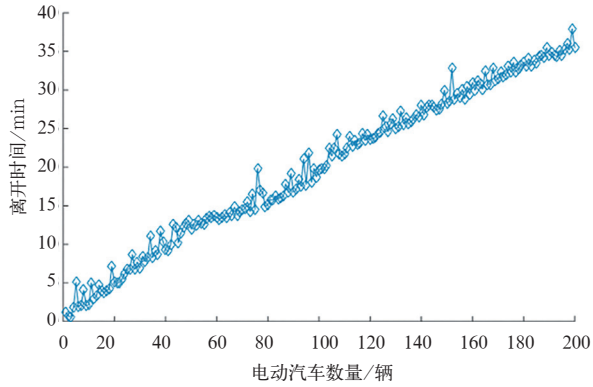


图8 电动汽车离开时间随电动汽车的变化

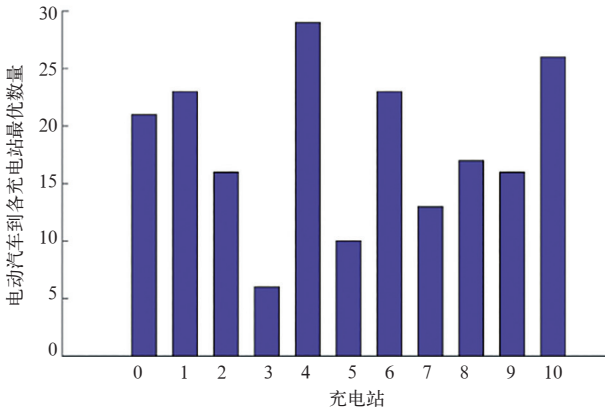


图9 电动汽车到各个充电站的最优数量

建立的数学模型是依据时间成本和里程成本来选择最经济的路径，求取时间成本和里程成本之和最小。该模型作为电动汽车选择充电站的理论依据，电动汽车用户到达充电站的数量不同，充电站序号为0说明电动汽车用户不需要进行充电，或者电动汽车用户在前一天已经充好电，电动汽车用户的荷电状态可以满足电动汽车用户当前的需求。电动汽车到各个充电站的最优数量如图9所示。由图9可知，选择充电站3的数量最少，最优的充电车辆数值为5辆；选择充电站4的数量最多，接近30。选择充电站的成本因素可以直接影响到电动汽车用户的决策，电动汽车根据经济成本选择最合适的充电站进行充电。

电动汽车用户选择各个充电站进行充电的百分比如图10所示。4号充电站被选择的概率近15%，3号电动汽车充电站被选择的概率仅为3%，1号、6号和10号与3号、5号相比，被选择的概率更大。电动汽车用户根据成本来，决策如何选择充电站，对于电动汽车用户个体来说，经济成本比较低，充电站被选择的概率就会比较大。

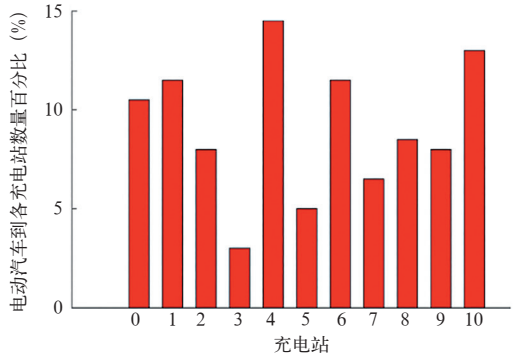


图10 电动汽车到各充电站数量百分比

（2）仿真结果2

根据公式约束条件$\lambda/P_j<1$，取值u为1时，P_j的取值大于3。λ的取值范围小于3时对$\lambda=2$的情况进一步仿真。电动汽车到达充电站的时间间隔满足$\lambda=2$的负指数分布，电动汽车用户的充电时间满足参数$u=1$的指数分布。

当参数$\lambda=2$、$u=1$时输出的结果如图11、图12所示。

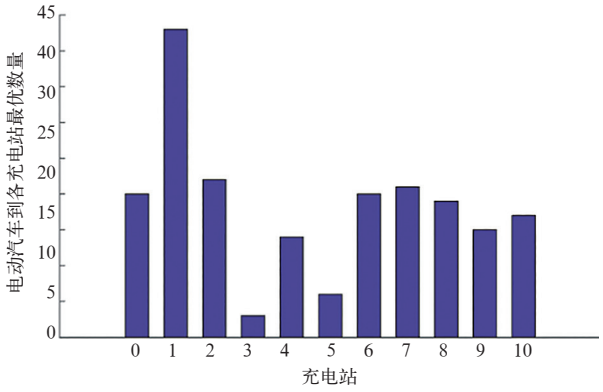


图11 电动汽车到各个充电站的最优数量

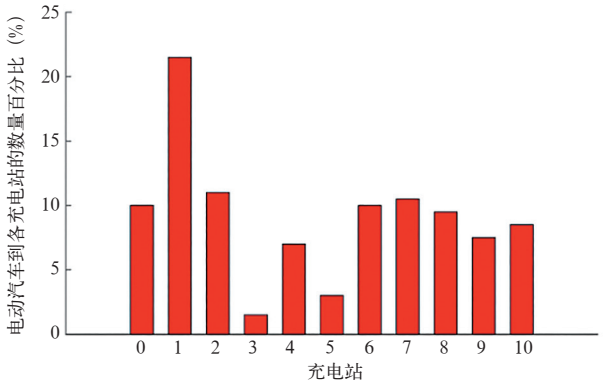


图12 电动汽车到各充电站数量百分比

充电桩数值为8时，不同电动汽车数量下各充电站电动汽车最优数量如图13所示。

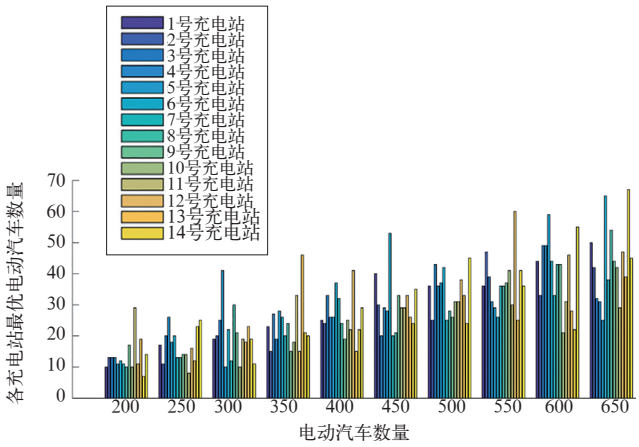


图13 电动汽车数量不同

随着电动汽车数量的增加，不同充电站的电动汽车最优数量也会增加。当区域内电动汽车超过一定的数量时，区域内的固有充电站不能满足电动汽车的充电需求。1号充电站在电动汽车数量由200辆增加到450辆时，电动汽车最优数量呈增加的趋势，后期呈减少的趋势，说明原本选择1号充电站的电动汽车用户开始向其他充电站转移，前期2号充电站并没有受到电动汽车数量增加的影响，后期电动汽车充电站最优数目增加。电动汽车充电站的最优数量实现各个充电站的相互转移，电动汽车数量增加的同时，对于不同的充电站系统的评价指标会增大，充电站的服务质量会下降，效率也会降低。

（3）仿真结果3

电动汽车的数量不变，充电站数量不断增加，各个充电站的最优充电数量下降。仿真结果如图14所示。在经济成本可以被用户接受的前提下，电动汽车用户向其他充电站转移。电动汽车排队等待时间下降，从区域的整体来看，随着充电站数目的增加，会减小电动汽车用户的里程成本，电动汽车的服务质量效率也会得到提高，需要增加基础设施投资的成本。

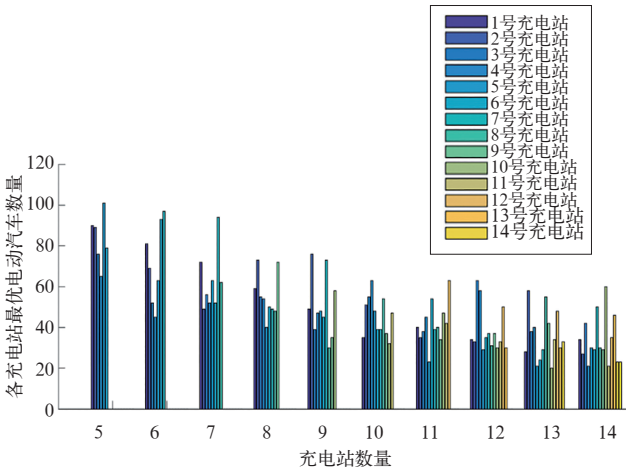


图14 电动汽车充电站数目不同

（4）仿真结果4

充电站内充电桩数量的增加，对小部分电动汽车用户没有影响。充电站1的最优充电桩数量向充电站2和充电站3少部分转移，减小了充电站1的压力。充电站8、充电站9和充电站10没受到太多影响。充电站5、充电站6和充电站7内最优电动汽车数量变化量相对比较小。仿真结果如图15所示。

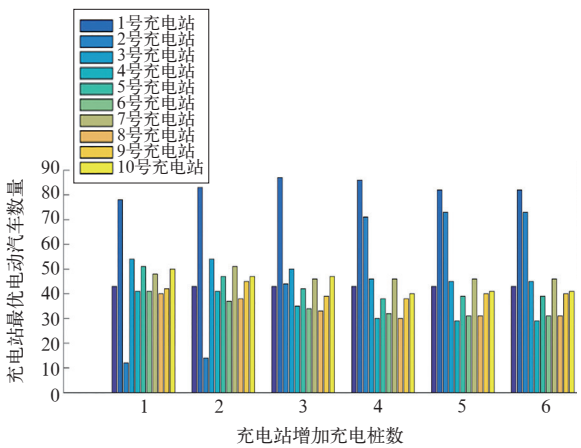


图15 充电桩数目不同

5 结束语

本文将排队论数学模型引入电动汽车用户选择充电站具有一定的实际意义，可以帮助电动汽

车的用户选择最佳的充电路线。首先搭建电动汽车用户与电动汽车充电站信息交互平台，分别确定电动汽车到达充电站的时间成本和里程成本。确定单目标函数去寻找确定的充电站，从而确定最经济的途径。

通过搭建信息交互平台，区域内电动汽车的用户根据时间成本和里程成本确定选择最佳充电站。在对时间成本求解的模型中引入了经典的排队论，电动汽车选择不同充电站，对应着不同的到达时间、排队等待时间和充电站的服务时间。通过对时间成本的计算进行归一化处理，确定无量纲的时间成本。电动汽车用户选择不同的充电站，对应不同的里程，电动汽车行驶过程中会消耗一定的电量，本文将消耗的电量折算到充电服务的时间成本中。基于时间成本和里程成本，同时考虑到电动汽车用户和区域内充电站两方面建立最小经济成本函数。通过对数学模型的仿真，得到不同充电站的最优电动汽车的数量。充电站最优电动汽车数量越大，里程成本和时间成本确定的经济成本就越低，可以为电动汽车用户提供指导。通过仿真进一步对时间成本中的电动汽车到达时间、充电服务时间和排队等待时间进行深入分析。并对电动汽车数目不同、充电站数目不同和充电桩数目不同三种情况进行仿真，求解不同情况下充电站的最优数目。

依据时间成本和里程成本确定经济成本，通过求解成本的最小值统计不同充电站内最优电动汽车充电数量。最优充电数量多说明该充电站容易被电动汽车用户选择；最优充电数量少说明电动汽车用户花费的经济成本比较高，不容易被选择。该模型为电动汽车用户提供了选择充电路径的参考方案，具有一定的实用价值。电动汽车用户也需要根据实际情况作出判断，合理地选择充电站。

参考文献

[1] 冯培磊，董治全，徐天奇，等．电动汽车入网控制策略研究综述[J]．电气技术，2017(12)：8-14，18．

[2] 张维戈，陈连福，黄彧，等．M/G/k排队模型在电动出租汽车充电站排队系统中的应用[J]．电网技术，2015，39(3)：724-729．

[3] 朱成军．纯电动汽车充电桩的数量优化[J]．北京汽车，2017(4)：4-6，26，34．

[4] 张帝，姜久春，张维戈，等．电动出租车充电桩优化配置[J]．电工技术学报，2015，30(18)：181-188．

[5] 麻秀范，李颖，王皓，等．基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[J]．电工技术学报，2017，32(增刊2)：190-202．

[6] 陈文锋．基于排队论的城区内电动汽车充电站选址定容问题研究[J]．物流工程与管理，2016，38(7)：189-191．

[7] 李如琦，苏浩益．基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]．电力系统自动化，2011，35(14)：58-61．

[8] 李建军，刘力维，黄振生．基于排队模型的电动汽车充电桩数量优化设计[J]．数学的实践与认识，2017，47(9)：212-218．

[9] 葛少云，冯亮，刘洪，等．考虑车流信息与配电网络容量约束的充电站规划[J]．电网技术，2013，37(3)：582-589．

[10] 周雪会，王希平．考虑顾客满意度的电动汽车充电桩规划策略[J]．可再生能源，2017，35(6)：933-939．

[11] 牛利勇，张帝，王晓峰，等．基于自适应变异粒子群算法的电动出租车充电引导[J]．电网技术，2015，39(1)：63-68．

[12] 李厚朋．输入率为幂函数且不耐烦顾客离开强度为一次函数的M/M/C/N排队模型[D]．重庆：重庆师范大学，2014．

[13] 李松．多服务窗混合制M/M/C/N排队模型研究[D]．重庆：重庆师范大学，2013．

[14] 李颖．基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[D]．北京：华北电力大学，2017．

（收稿日期：2015－11－03）EA

基于云平台用于模块化数据中心的微动力环境监控系统设计

论述了一种基于云平台的用于模块化数据中心的微动力环境监控系统，该系统利用云平台实现数据存储、数据挖掘、控制逻辑和客户端响应，从而完成数据中心日常巡检、故障报警、数据分析和状态设置。着重阐述了该系统的方案特点、总体方案、云数据采集器设计和云连接构建。该系统提供一种数据安全、架构简单，且容易实现的微动力环境监控系统，结合云计算技术优势，消除了数据中心地域限制。

徐　磊/施耐德电气（中国）有限公司

徐　磊/工程师

关键词/Keywords
动环监控·
云平台·
模块化·
数据中心·
采集器·

0　引言

模块化数据中心是一种严格遵循模块化设计概念建造、可快速部署且通过工厂预制生产的数据中心类型，它由多个不同作用的功能模块协同配合，同时多个完全相同或者功能相同的模块组合体还会进一步搭配。模块通常按照标准化设计，绝大多数在工厂完成预制，可便捷地采购和组合，具备较高的安全防护，最重要的特点是能够在现场完成快速安装，减少建设周期，进而令业主能够非常灵活、快速和动态地进行业务拓展和应用扩充。模块化因为其便于管理和扩容，被作为当前数据中心最看重的特质，在数据中心的发展中得到越来越广泛的共识[1]。

模块化数据中心主要分为集装箱式数据中心、微模块数据中心和整机柜服务器三类。模块化数据中心具有节能、高效、标准化、易扩容、建设快速、易复制、节省成本和易于管理等特点，使其越来越受到数据中心建设方的关注，特别是以微模块类型为主的模块化数据中心进入飞速成长阶段[2]。

图1为典型冷通道密封的微模块数据中心结构示意图。可以看出模块化数据中心是由机柜、密闭通道、供配电系统、制冷系统、监控系统、照明系统、综合布线和消防系统等组成，同时各个组成部分（如制冷系统、供电系统和监控系统）也都实现了区域化、模块化。

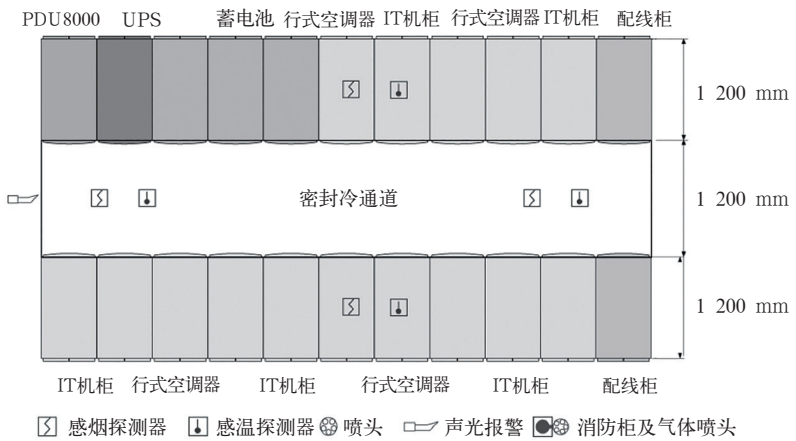


图1　典型冷通道密封的微模块数据中心结构示意图

1 国内外现状

目前国内无论针对集装箱式数据中心、微模块数据中心还是整机柜服务器，所应用的微动力环境监控系统的主要架构都是独立的数据采集器搭配监控服务器工作，或者是数据采集器和监控服务器整合在同一设备。但利用单一硬件设备同时实现数据采集器和监控服务器两部分功能，则对硬件的运算速度、存储深度和外设数量等提出了较高的要求，而目前在客户大幅控制数据中心建设成本的背景下，显然采用高标准的硬件设备并不现实。

独立服务器的存在，导致在微动力环境监控系统硬件上存在中间服务层，系统复杂度过高，可靠性低，也给动力环境数据安全性和稳定性增加了更大的风险。同时，目前客户只能依据地理位置对数据中心基础硬件设施进行管理，无法按照实际承载业务或者硬件型号进行分类，运维中各地所产生的物料采购、故障排除也都是独自管理，无法集中资源优化成本。

针对服务器和网络资源的监控系统（如Datadog、Boundary 、阿里云监控和Open-Falcon）早已在云层次上实现运维监控，但对于除服务器外的动力环境基础硬件设施，依然受到地域限制，且一直停留在节点式监控的阶段。伴随着简化IT、实现降低运营成本、集中化管理和提高安全性能等目标，以及云平台和通信技术逐渐成熟，通信速率等瓶颈已经被打破，那么一种替代传统采集器+服务器架构的基于云平台的用于模块化数据中心的微动力环境监控系统具有重要意义[3]。

2 方案特点

该微动力环境监控系统具备如下特点。

1）快速接入云平台，利用云端替代独立监控服务器，实现海量变量存储、深度数据挖掘等功能。

2）可创建模块化数据中心冷热通道温度场以及模块化数据中心3D可视化，云端负责模型数据存储、客户端响应等，本地承担3D渲染，降低硬件负担。

3）借助云存储可实现模块化数据中心超长历史数据存储，提供更长时间周期的历史曲线参考，增加历史数据的可用性。

4）移动端可以提供APP查看模块信息，同时可以直接APP通知、微信报警提醒，代替原有短信、电话报警等功能，实现运维管理移动化，降低运营时通信服务商成本。

5）可实现异地多点等单一数据中心模块的云端管理，适用于租用用户在不同地点租赁的不同数据中心模块集合在一起统一管理。

6）实现异地同种类型物料同步管理（如蓄电池），集中替换，降低运维采购成本。

7）在数据中心动力环境监控系统硬件架构层面取消中间服务层，直接实现云采集器连入云端，监控层可与单一模块化数据中心实现对点直接观测，减少系统复杂度，降低系统深度。

8）提高数据中心运行状态等数据安全性。

微动力环境监控系统功能如下表所示。

表 微动力环境监控系统功能

功能分类	功能描述
电源监控	通过配电柜、高压直流柜配置的智能仪表上传数据，并对电源系统进行监控
后备监控	通过不间断电源系统（UPS）、高压直流柜、电池柜等通信接口，采集运行参数，实时监控其运行状态
制冷监控	通过空调器、CDU等通信接口，采集运行参数，实时监控其运行状态
安防监控	通过配置于通道内（外）的视频摄像头，对通道内（外）部场景环境进行实时视频监控
环境监控	通过分布于模块内（外）的温湿度传感器，实时监测模块内外热分布状态，确保安全运行
门禁监控	通过对配置于模块内的门禁控制器、出门按钮和门磁等进行监测，了解人员出入情况
消防监控	通过配置于通道内的烟雾传感器、温度传感器和极早期消防预警，对模块内产生的火灾隐患监测
能效管理	对模块化数据中心能效（PUE）实时监测与管理
资产管理	通过对资产监控单元通信，实现模块化数据中心内设备安全及设备管理
报表管理	提供丰富的报表管理功能，包括报表的浏览界面、报表格式定义和报表发布管理等功能
图形界面	可显示各设备运行状态参数、各种报表、温度场、3D展示和历史曲线等
报警管理	可通过本地声光报警、邮件和APP提醒等方式实现报警通知，并记录各类告警信息

3 总体方案

基于云平台的用于模块化数据中心的微动力环境监控系统框图如图2所示。

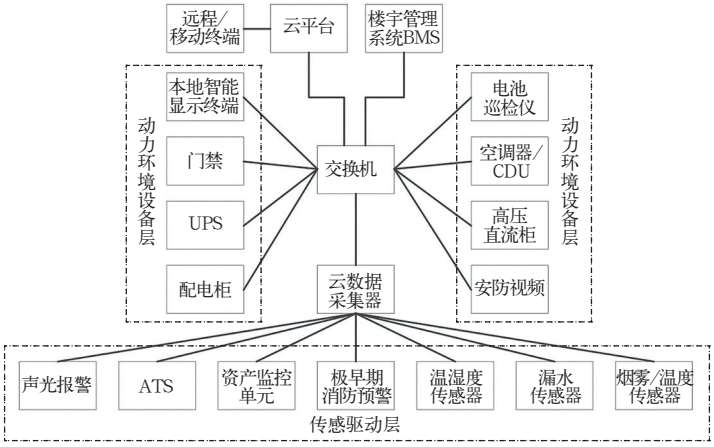


图2 云平台微动力环境监控系统框图

该系统包含功能如下。

1）一个可向上与交换机通信和向下与传感驱动层进行通信的云数据采集器，它通过有线或者无线通信方式将传感驱动层采集到的物理参量传送至交换机。

2）一个通用型或者特定型通信协议交换机，它通过有线或者无线通信方式将下层云数据采集器上传的物理参量、各类动力环境设备上传的物理参量传送到云平台或者楼宇管理系统（BMS），同时也可以将上层云平台或者BMS下发的各类命令发送给各类动力环境设备。

3）传感驱动层包括但不限于声光报警、自动转换开关（ATS）、资产管理、极早期消防预警、温湿度传感器、漏水传感器以及烟雾/温度传感器等，它通过I/O、有线通信或者无线通信方式接入云数据采集器，传送各类传感器物理参量，同时接收来自云数据采集器的部分控制命令。

4）动力环境设备层包括但不限于配电柜、门禁、UPS、本地智能显示终端、电池巡检仪、空调系统、冷冻水分配单元CDU、高压直流柜和安防视频等，它通过有线通信或者无线通信方式接入交换机，上传动力环境设备层的运行状态，同时接收来自交换机下发的控制命令。

5）云平台负责数据存储、挖掘和计算，同时还需要负责承担用于显示的Web Server功能。本地智能显示终端、远程/移动终端相对于云平台作为客户端Client，而云平台作为服务器端Server。显示界面形式和模型数据都存储在云平台上，同时云平台可以对数据进行深层挖掘，可构建温湿度历史曲线、各机柜电量历史曲线等，可为数据中心运维的优化提供参考[4]。

6）本地智能显示终端、远程/移动终端则通过访问Web的形式访问存储在云平台端的界面。可直接查看模块化数据中心运行状态，实现数据中心日常巡检、维护等工作。本地智能显示终端、远程/移动终端承担3D渲染和显示工作。通过客户端Client不断定时对服务器端Server进行访问，实现模块化数据中心中的动力环境设备层、传感器驱动层的数据界面刷新。

7）BMS遵循业主设计，可通过Modbus TCP/IP、SNMP等协议从交换机获取各类模块化数据中心动力环境参量，实时监测其运行状态。同时BMS也可以通过交换机下发控制命令给动力环境设备层和云数据采集器，从而控制动力环境设备层和传感驱动层的运行状态。

8）传感驱动层和云数据采集器之间通信可以是有线通信或者是无线通信方式，如RS 485、CAN和ZigBee等，遵循各现场总线对应的通信协议。

9）动力环境设备层和交换机之间通信可以是有线通信或者是无线通信方式，如4G、5G、Enthernet和光纤等，遵循TCP/IP或者SNMP通信协议。

4 云数据采集器设计

云数据采集器系统框图如图3所示。整个微动力环境监控系统中最关键的设备是云数据采集器，它是整个系统与云平台沟通的核心，可以使模块化数据中心基础硬件设施能够快速接入云端，包含模拟量输入电路、模拟量输出电路、数字量输入电路、数字量输出电路、处理器、总线型通信电路和网关型通信电路，其中模拟量输入电路、模拟量输出电路、数字量输入电路、数字量输出电路、总线型通信电路和网关型通信电路均可以采用电气隔离形式或者非电气隔离形式。

网关型通信电路可以是有线通信或者是无线通信方式，如4G、5G、Enthernet和光纤等，遵循TCP/IP、SNMP通信协议，负责与交换机通信；总线型通信电路可以是有线通信或者是无线通信方式，如RS 485、CAN和ZigBee等，遵循各种现场总线对应的通信协议，负责与传感驱动层通信。

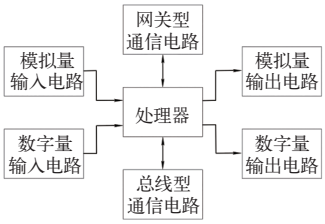


图3 云数据采集器系统框图

由于传感驱动层中的ATS、资产管理、极早期消防预警、温湿度传感器、漏水传感器以及烟雾/温度传感器输出信号不同，其分别采集到的物理量可能通过数据采集器中的模拟量输入电路、数字量输入电路或总线型通信电路传送到处理器中，同时处理器将这些数据通过网关型通信电路传送到上层交换机。上层交换机转发的来自云平台或者BMS的命令通过网关型通信电路传送到处理器中。处理器再将这些命令通过模拟量输出电路、数字量输出电路或总线型通信电路传送到具体执行的传感驱动层设备。

5 云连接构建

云连接数据传输流向如图4所示。该微动力环境监控系统接入云平台需要的传输协议（如MQTT、HTTP、SSL和XML）也都是在云数据采集器中实现支持，并且在云数据采集器和云端的传输通道采取了多种安全措施，如网关密匙、加密算法和设备认证等，云数据采集器在完成与下次设备接口通信后取得目标数据，同时与云服务后台实现数据池同步，能够保持两者的实时同步，根据时间戳来判断是否有更新的数据。摘要数据传输采用内存到内存的架构，最大程度地降低了传输延时。前端则通过开放的API接口调用后台数据[5]。

基于云平台的微动力环境监控系统与传统的微动力环境监控系统一个重要区别在于数据安全性。传统的微动力环境监控系统往往在通往监控服务器端链路上采用明文传送，虽然数据中心的保卫安全等级很高，对于上传至监控服务器层的链路也大多是与外界隔离的局域网，但这些措施只能防范人员实际物理破坏和底层系统入侵。云连接却恰恰从数据传输链路、后台的数据存储到客户端展示用的API数据接口也能够提供非常完备的数据安全部署。

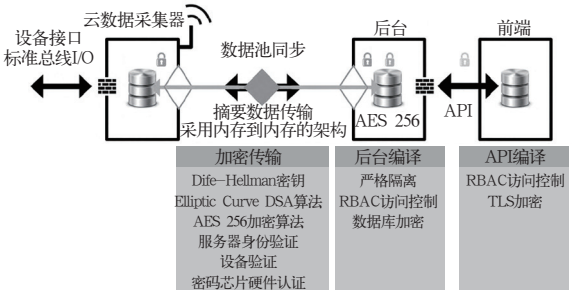


图4 云连接数据传输流向

6 结束语

基于云平台的用于模块化数据中心的微动力环境监控系统，利用云平台代替现有监控服务器功能，在硬件需求较低情况下具备更丰富的微动力环境监控功能，且提升了系统的可靠性、稳定性和安全性。同时消除了数据中心地域限制，可将模块化数据中心按照实际业务或者硬件型号编组，而非按照地理位置编组，实现同类物料集中管理，降低运维中物料采购成本。同时集合运维故障，为其他地区的同类数据中心快速排除故障提供参考。

参考文献

[1] Dennis Bouley，Wendy Torell．集装箱式数据中心电源和制冷模块[R]．3版．施耐德电气数据中心科研中心，2017．

[2] GB 50174—2008电子信息系统机房设计规范[S]．北京：中国计划出版社，2009．

[3] 郭亮．浅析微模块数据中心的关键技术[J]．信息通信技术，2013(1)：33-37．

[4] 孙亚迪．数据中心监控系统的研究[D]．成都：电子科技大学，2017．

[5] 许文俊．基于物联网的数据中心监控系统设计与实现[D]．北京：北京邮电大学，2015．

（收稿日期：2018－07－10）EA

考虑气象因素影响的北京电网短期负荷预测研究

北京作为我国首都，其电网城市负荷特性日渐明显，这一变化给电网负荷预测工作带来了新的挑战。从北京电网负荷特性情况出发，分析了在气象因素影响下，电采暖负荷、日照敏感负荷等对电网短期负荷预测的影响。针对不同类型负荷受体感温度、日照强度等气象因素影响的特点，采用BP神经网络及聚类算法对北京电网负荷进行短期负荷预测，并通过历史电网负荷及气象数据对预测结果进行了对比分析。

喻　乐[1]　施　磊[1]　沈茂亚[2]　谢　旭[1]　张　晶[1]/1．国家电网公司华北分部
2．国电南瑞科技股份有限公司

喻　乐/高级工程师

关键词/Keywords
气象因素·
体感温度·
短期负荷预测·
层次聚类·
神经网络·

0　引言

短期负荷预测是电网公司编制日前发电计划、实时运行控制工作开展的基础，通过准确的负荷预测，可以经济安排发电机组的起停，合理安排发电机组的计划检修，在保证电网稳定、可靠供电的同时，又能有效地降低发电成本，提高社会整体经济效益。

随着居民生活水平和生活质量的不断提高，居民生活用电负荷在电网负荷中所占的比重也越来越大，最明显的是夏季空调器负荷和冬季电采暖负荷，也就是气象条件变化导致人体舒适感觉变化引起的用电负荷。长期以来，电网的调度工作者及科研工作者在这一课题上进行了卓有成效的研究。夏季大量使用空调器而带来的调温负荷被证明同气温、湿度等气象因素密切相关[2-3]。目前，针对该问题的研究主要从以下两方面进行：一是利用精细化的气象资料，基于小时级别气象因素进行综合建模分析，以提高短期负荷预测的准确度[4-6]；二是基于较长的逐日电网负荷数据和气象资料[7-8]，研究不同气象因素对负荷变化的影响[9]。

本文选取华北地区城市负荷特性最为明显的北京电网作为研究目标，针对负荷受气象条件等因素影响的特性，通过挖掘其中的典型规律，建立贴合北京电网实际的负荷预测系统，也为其他地区电网负荷预测工作提供参考。

1　北京电网负荷特性分析

北京作为我国首都，随着社会、经济的高速发展，其城市负荷特性逐年加强。表1为产业及城乡居民用电量同比增长情况，可以看出北京负荷第三产业及居民生活用电量变化特点：自2016年以来，城乡居民生活用电负荷均保持10%以上同比增长率，远超全社会用电量，主要是受夏季空调器负荷及冬季煤改电负荷高速增长影响。

表1　2015～2017年北京地区全社会及城乡居民用电量

年份	全社会用电量/亿kW·h	同比增长（%）
2017年	106.69	4.57
2016年	102.03	7.09
2015年	95.27	1.67

年份	城市居民生活用电量/亿kW·h	同比增长（%）	乡村居民生活用电量/亿kW·h	同比增长（%）
2017年	18.53	11.34	3.27	12.90
2016年	16.65	11.26	2.90	15.21
2015年	14.96	2.65	2.52	6.92

1.1　电采暖负荷特性与发展情况

早在2003年，北京地区便开始实施

煤改电改造工程。2016年以后，受雾霾治理政策影响，煤改电工程改造力度逐渐增强，对电网负荷影响也日趋明显。

电采暖负荷在中长期尺度来看，主要受开展规模、分时电价因素两方面影响，这两方面因素在供暖季内变化较小；在短期尺度来看，与夏季空调器负荷类似，电采暖负荷同样受体感温度影响。

图1为2014～2017年12月北京电网日平均负荷曲线。由图1可知，2014～2016年平均负荷曲线在21:00时刻有明显增长，而2017年该增长前移至20:00；低谷负荷增长远超高峰负荷增长。这是由于北京地区煤改电工程的快速推广，且2017年电采暖低谷电价起始时刻由21:00提前至20:00，使负荷曲线特性在近两年已经发生了明显的变化。

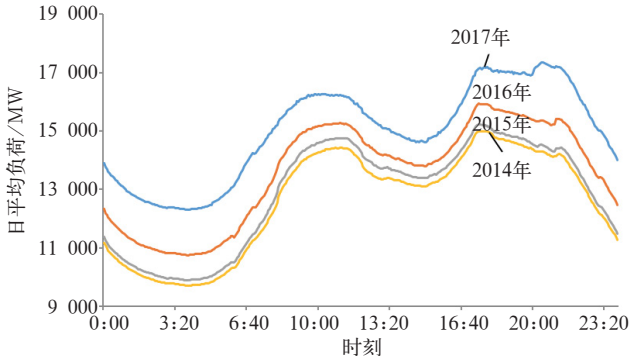


图1 2014～2017年12月北京电网日平均负荷曲线

1.2 光照敏感负荷特性及发展情况

分布式光伏一般特指接入35 kV或更低电压等级电网的光伏发电系统，其特点为用户自发自用、余量上网。分布式光伏在环保与用户经济性上的优势使得我国从中央到地方均在政策上给予鼓励，各地分布式光伏装机容量在2016年后呈高速增长态势。

照明负荷增长一般认为与城市化程度相关，随经济、社会发展呈自然增长态势，在实际预测工作中，其负荷规模可按年作为周期进行考虑。

在实际预测工作中，分布式光伏与日常照明负荷分别作为电源与负荷，在日照强度变化时，对电网负荷增长与减小影响呈现类似的线性关系，可将其作为光照敏感负荷进行整体考虑。其逻辑关系如图2所示。

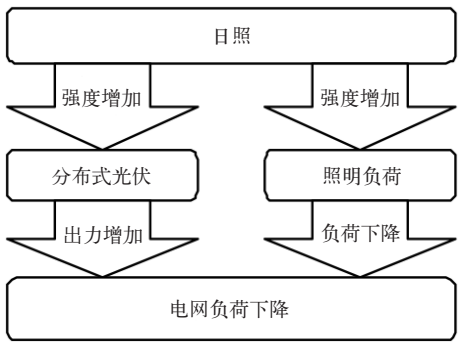


图2 日照敏感负荷结构

图3为日照条件变化较大的北京电网相邻两个工作日负荷曲线。由图3可知，在晚高峰负荷基本一致的情况下，早高峰负荷产生了较大变化，如将两日负荷曲线做差值可得曲线情况如图4所示，差值曲线特性基本与一般光伏发电系统特性一致。因此，采用日照敏感负荷对分布式光伏与照明负荷统一开展负荷预测工作具备可行性。

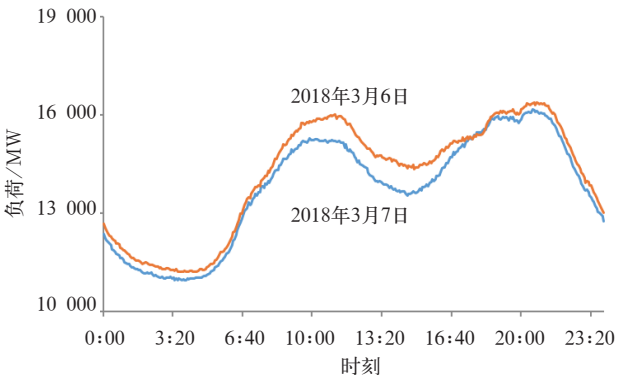


图3 北京电网相邻两日负荷曲线

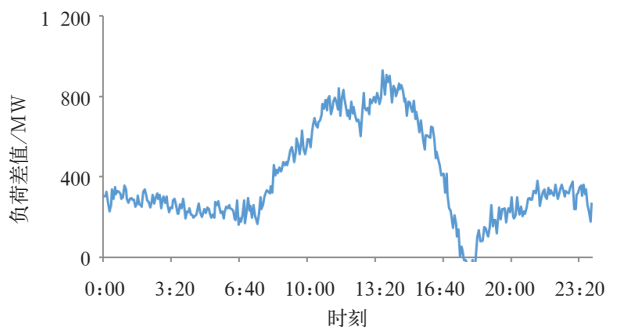


图4 北京电网相邻两日负荷曲线差值

2 体感温度与负荷相关性研究

2.1 体感温度的定义和计算方法

根据气象学者的研究，在影响人体舒适感

觉的三个主要的气象因素中，气温的作用最明显，大气相对湿度和风力的作用次之。对于气温因素，人们对一天中的最高气温以及最高气温与最低气温之间的温差感觉较为敏感。当气温较高时，温差越小，越感觉闷热，而湿度与风力都影响人体的热代谢，所以用体感温度来表达人体对周围环境条件的综合感受。体感温度的具体计算方法随着地区气象条件的差异而显著不同[15-16]。

结合北京的实际气象条件和气象资料收集的实际情况，本文在研究中采用北京气象局提出的公式[17]，具体计算公式为

$$T_g=T_a+T_u+T_h-T_v \quad (1)$$

式中，T_g为体感温度；T_a为常规气温；T_u为辐射作用对体感温度的修正；T_h为湿度对体感温度的修正；T_v为风速对体感温度的修正。

T_u是针对个体而言的。本文在研究体感温度和负荷之间的关系时，考虑的是地区整体的平均体感温度。因此，在对地区进行整体研究过程中，可以忽略辐射对体感温度的影响。

湿度对体感温度修正公式为

$$T_h=-0.4(T_a-10)(0.6-h) \quad (2)$$

式中，h为相对湿度，其值取百分数，范围为0～1.0。

风速对体感温度的修正公式为

$$T_v=(1.0-T_a h/32)\sqrt{v} \quad (3)$$

式中，h为相对湿度，其值取百分数，范围为0～1.0；v为风速大小，单位为m/s。

因此忽略辐射后的体感温度计算公式为

$$T_g=T_a-0.4(T_a-10)(0.6-h)-(1.0-T_a h/32)\sqrt{v} \quad (4)$$

式中，T_a为常规气温；h为相对湿度；v为风速大小。这些变量都是常规数据，正常情况下，气象台均可以提供。

2.2 体感温度对负荷的影响

为了验证体感温度和北京电网负荷的相关性，对近年的体感温度和北京电网负荷进行了相关性分析。

通过2016～2018年的夏季（6～9月）天气与北京电网负荷数据，按照日最高常规温度－最大负荷、体感最高温度－最大负荷分别进行线性拟合分析，其对比结果如图5、图6所示。

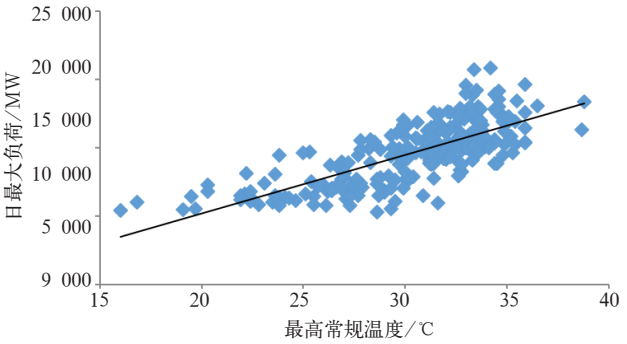


图 5 最高常规温度－最大负荷相关性分析

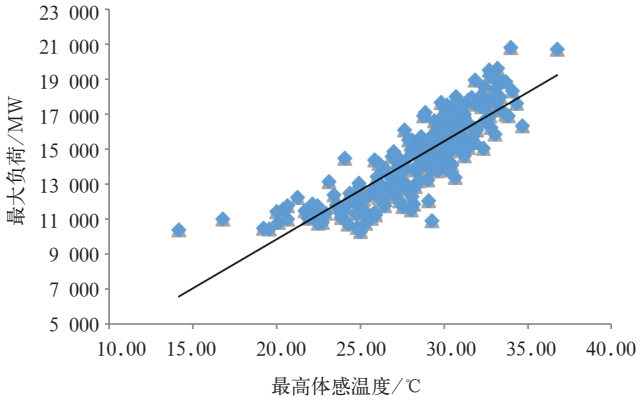


图 6 最高体感温度－最大负荷相关性分析

从上面对比的相关性分析中可知，夏季体感温度每升高1 ℃，最大负荷升高约558 MW；常规温度每升高1 ℃，最大负荷升高约429 MW。这与前面从相关性分析角度得到的结论完全一致。常规温度/体感温度－最大负荷相关性对比如表2所示。

表 2 常规温度/体感温度－最大负荷相关性对比

分析对比	常规温度/℃	体感温度/℃
相关系数	0.74	0.85
标准误差	1 549.51	1 221.41

从表2中可看出体感最高温度－最大负荷的相关系数明显要高于常规最高温度－最大负荷的相关性，其误差也相对更小。

2.3 相关性分析小结

通过对体感温度与北京电网夏季最大负荷相关性分析，并和常规温度相关性进行对比可知：体感温度和负荷相关性明显高于常规温度和负荷

的相关性，但日照敏感负荷、基础负荷等受体感温度影响较小，对负荷采用体感温度进行整体预测时，误差仍较大。因此，需同时考虑上述因素对负荷的影响，进一步提高预测准确度。

3 北京电网负荷预测模型

结合北京电网负荷构成与特性，在前述研究的基础上，本文采用以日照强度和体感温度作为主导影响因素，利用BP神经网络建立合理的短期负荷预测模型，预测未来日北京电网的日96点负荷。

BP神经网络通过多个神经元的相互连接，使其输入和输出构成复杂的非线性处理系统，并用于日负荷预测，同样利用其可以记忆复杂的非线性输入输出映射关系的特性，而传统的负荷预测方法难以实现这种特性[18-19]。

理论上，BP神经网络可以直接对日96点负荷进行预测，但是输入神经元和输出神经元的个数较多，在进行网络训练时耗时较长，收敛较慢。考虑调度负荷预测实际工作需求，本文采用一种减轻网络训练负担的建模方法：通过体感温度、日照强度以及历史负荷数据预测未来日的最大负荷和最小负荷，降低网络输入向量的维数，大量减少网络中神经元的数目，使网络训练负担减轻；再通过历史负荷数据预测未来日的归一化负荷系数；根据预测日的综合最大、最小负荷以及归一化系数得到日96点体感温度敏感负荷预测结果。

3.1 最大（小）负荷预测

根据上述模型建设思路，本文对负荷预测模块进行了设计，将前m天的实际最高体感温度、日照强度和最大负荷及预测日最高体感温度、日照强度作为输入样本数据，BP神经网络负荷预测模型如图7所示。

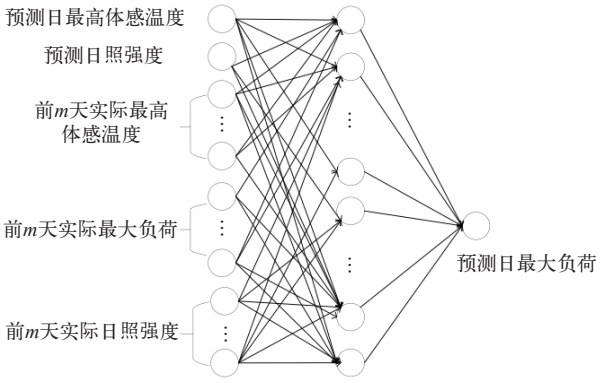


图7 BP神经网络负荷预测模型

其预测步骤如下。

1）初始化，即随机地设置各层权系数$W_{ij}^{(k-1)}$和阈值$\theta_i^{(k)}$。

2）选定输入输出样本集。

3）由样本输入$y_1^{(0)}$、$y_2^{(0)}$、…$y_n^{(0)}$计算各层实际输出$y_1^{(k)}$，$y_2^{(k)}$，…，$y_{nk}^{(k)}$，（k=1，2，…，m）。

4）利用下式调整权重系数

$$\Delta W_{ij}^{(k-1)}=\eta\sum_{h=1}^{n}\delta_{hi}^{(k)}y_{hi}^{(k)} \tag{5}$$

式中，η为步长，它的选择没有固定准则；$y_{hi}^{(k)}$为第k层第i个神经元在第h个样本输入时的输出值；$\delta_{hi}^{(k)}$为误差传播项。

当k=m时，对应输出层有

$$\delta_{hi}^{(m)}=[\overset{\Lambda^{(m)}}{y_{hi}}-y_{hi}^{(k)}]\times f[\overset{\Lambda^{(m)}}{y_{hi}}] \tag{6}$$

当 $k < m$ 时，对应隐层有

$$\delta_{hi}^{(k)}=f[y_{hi}^{(m)}]\sum_{l=1}^{n_k+1}\delta_{hl}^{(k+1)}W_{il}^{k} \tag{7}$$

误差ε计算式为

$$\varepsilon=\sum_{h=1}^{n}\left\|\overset{\Lambda^{(m)}}{Y_h}-Y_h^{(m)}\right\|^2=\sum_{h=1}^{n}\sum_{j=1}^{n_k}(\overset{\Lambda^{(m)}}{y_{hj}}-y_{hj}^{(m)})^2 \tag{8}$$

如果$\varepsilon>\varepsilon_0$（为给定误差），则返回至步骤3）继续学习；如果$\varepsilon\leqslant\varepsilon_0$，则认为已收敛而停止学习，由此时的连接权重构成网络，就可以在误差范围内反映对应的输入输出关系。

最小负荷预测方法类似，只需相应地在上述过程中将最高体感温度改为对应最低体感温度，最大负荷改为最小负荷即可，不再赘述。

3.2 负荷曲线模式预测

通常情况下，电网负荷曲线的形状按日和周呈现一定的周期性变化，也可能由于气象条件变化、人类活动等影响而出现小的随机波动[20]。对于工业负荷占比较高的电网，特别是大工业负荷占比越高，其负荷曲线周期性变化越不明显；而对于城市负荷占比高的北京电网，其负荷曲线周期性变化较为明显。一般来说，周末负荷不同于一般的工作日负荷，其负荷水平低于工作日负荷。而且工作日和周末负荷出现峰荷的时间也有所不同。

聚类算法可以有效减小样本数据规模，提高计算效率[21-22]。本文选择凝聚层次聚类算法研究中用于对北京电网实际样本曲线进行模式分类。凝聚层次算法是一种自下而上的归并算法，通过计算每个个体样本之间的欧氏距离来实现最终归并的效果。

计算任意两个历史负荷之间的欧氏距离方法如下：设n维样本空间S中任意两个数据序列X、Y分别为$X=\{x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n\}$，$Y=\{y_1, y_2, \cdots, y_{n-1}, y_n\}$，其欧氏距离计算公式为

$$d(X,Y)=\sqrt{(x_1-y_1)^2+(x_2-y_2)^2+\ldots+(x_n-y_n)^2} \quad (9)$$

设定负荷曲线间距离阈值为d。在样本集S中有N条样本负荷数据序列$S=\{k=L_1, L_2, \cdots, L_{n-1}, L_N\}$，任意取出负荷数据$L_k=\{1, 2, \cdots, N\}$，并计算该负荷数据与其他负荷数据序列的欧氏距离，合并最近的两个簇，直到达到预定的分类目标即可停止。利用上述方法对北京地区总负荷近两年的数据进行聚类分析，得到具体如下模式分类：

- 工作日
  - 周一
  - 周二、三、四、五
- 周末
  - 周六
  - 周日

通过近4年北京电网实际日负荷曲线，按照上述四类负荷曲线模式进行分类，求取平均负荷曲线，结果如图8所示。

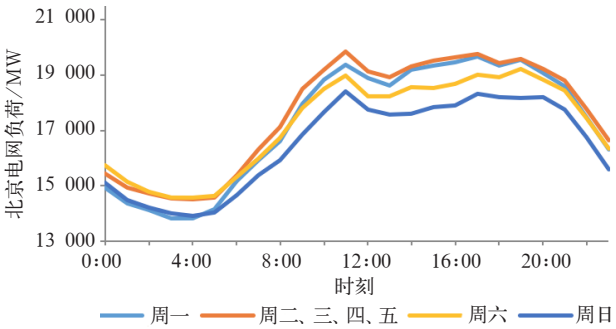


图 8 分类负荷曲线

选择近N天历史负荷曲线，根据预测日的星期信息，选择M（$M<N$）天对应的历史日期作为计算的“模式相似日”，并进行预测日的曲线模式计算。其具体计算步骤如下。

1）计算预测日的日类型信息，查询预测日天气信息。

2）对N天历史日依次计算每天的日类型信息并查询天气信息，如果日类型信息和预测日相同，且历史日的天气信息和预测日的天气预报信息接近，则该日期作为“模式相似日”。

3）得到M天“模式相似日”后，依次对M天历史负荷进行归一化处理。

4）利用M天的96点归一化负荷曲线进行平均计算，得到预测日的归一化负荷曲线，即完成负荷模式预测计算。

3.3 短期负荷预测总体流程

基于上述研究的分解预测模型的应用流程如图9所示。

1）从历史数据库获取历史N天电网负荷数据、气象数据；通过查询气象预报系统获取预测日气象数据。

2）利用考虑体感温度和日照强度的预测模型，分别预测未来日最大负荷和最小负荷。

3）根据预测日期和聚类分析得到的负荷曲线模式，进行归一化负荷预测计算。

4）通过预测日最大负荷、最小负荷和负荷模式，获得预测北京电网日96点负荷预测值。

4 算例分析

本文选择北京电网连续3年的负荷数据和天气

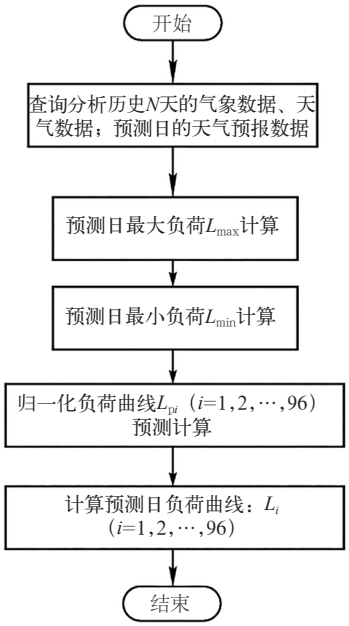


图 9　短期负荷预测模型流程

数据作为历史样本数据，并进行算例研发分析。

为了便于对照分析，本文除采用上述基于体感温度及日照强度的BP神经网络负荷预测模型（简称方法一）外，还采用基于常规温度的BP神经网络预测模型（简称方法二）和基于体感温度的总负荷预测模型（简称方法三）进行对比分析。采用2017年6月上旬天气及前期实际负荷数据进行预测对比分析，结果如表3所示。可以看出，方法一的结果在总体上优于其他方法。

表 3　预测结果对比分析

分析对比	平均相对预测误差（%）		
	方法一	方法二	方法三
2017-06-01	2.26	2.98	2.32
2017-06-02	2.72	3.02	2.78
2017-06-03	2.91	3.19	2.99
2017-06-04	2.76	3.42	2.71
2017-06-05	2.87	3.07	3.01
2017-06-06	2.07	2.57	2.18
2017-06-07	2.63	3.16	2.56
2017-06-08	2.31	3.06	2.32
2017-06-09	2.71	3.42	2.78
2017-06-10	2.86	3.05	2.98
平均	2.61	3.10	2.66

5　结束语

本文通过分析气象因素对北京电网短期负荷预测的影响，提出适合北京电网负荷结构与特性的短期负荷预测模型，并采用实际数据对预测结果进行对比分析，结果表明该模型在减少计算量的基础上，能够有效降低预测误差，提高预测准确度。

随着现代能源综合利用技术不断发展，以及峰谷电价的价格信号刺激，冷热电三联供、蓄冰制冷和热泵等新型用电负荷项目也得到了快速发展，电网负荷特性随之也产生巨大变化，还需要电网工作者根据其各自特点，结合实际工作，对电网短期负荷预测工作不断进行提升。

参考文献

[1] 杨静，郝毅，陈冬梅，等．新疆农业区电力负荷与天气的关系[J]．气象，2009，35(1)：114-118．

[2] 高赐威，李倩玉，苏卫华，等．短期负荷预测中考虑积温效应的温度修正模型研究[J]．电工技术学报，2015，30(4)：242-248．

[3] 马瑞，周谢，彭舟，等．考虑气温因素的负荷特性统计指标关联特征数据挖掘[J]．中国电机工程学报，2015(1)：43-51．

[4] Deihimi A，Orang O，Showkati H．Short-term electric load and temperature forecasting using wavelet echo state networks with neural reconstruction[J]．Energy，2013，57(3)：382-401．

[5] 宋易阳，李存斌，祁之强．基于云模型和模糊聚类的电力负荷模式提取方法[J]．电网技术，2014，38(12)：3378-3383．

[6] 雷绍兰，古亮，杨佳，等．重庆地区电力负荷特性及其影响因素分析[J]．中国电力，2014，47(12)：61-65，71．

[7] 罗慧，徐军昶，肖波，等．气象因子对西安城市用电量的影响研究及中长期系统化预测[J]．气象，2016，42(1)：54-60．

[8] 张贲，史沛然，蒋超．气象因素对京津唐电网

夏季负荷特性影响分析[J]．电力自动化设备，2013，33(12)：140-144．
[9] 焦润海，苏辰隽，林碧英，等．基于气象信息因素修正的灰色短期负荷预测模型[J]．电网技术，2013，37(3)：720-725．
[10] 张祥，肖达强，吕东晓．体感温度在电网负荷预计工作中的修正作用[J]．华中电力，2003，16(3)：37-39．
[11] 成涛．体感温度滚动预报系统及在湖南电网短期负荷预测中的应用[J]．湖南电力，2006，26(6)：1-4．
[12] 权轶．电网负荷与温度关系研究[D]．武汉：华中科技大学，2006．
[13] 高亚静，孙永健，杨文海，等．基于新型人体舒适度的气象敏感负荷短期预测研究[J]．中国电机工程学报，2017，37(7)：1946-1954．
[14] 王佳楠，郑蕾，王冰，等．四平市体感温度研究初探[J]．吉林气象，2013(4)：44-46．
[15] 王式功，马盼，尚可政，等．一种基于黄金分割法构建人体舒适度计算方法：中国，CN201210596366.0[P]．2013-05-15．
[16] 唐进时，申双和，华荣强，等．热气候指数评价中国南方城市夏季舒适度[J]．气象科学，2015，35(6)：769-774．
[17] 吕伟林．体感温度及其计算方法[J]．北京气象，1997(4)：23-25．
[18] 陈耀武，汪乐宇，龙洪玉．基于组合式神经网络的短期电力负荷预测模型[J]．中国电机工程学报，2001，21(4)：79-82．
[19] 彭信淞，贺辉，姚建刚，等．用PSO优化BP神经网络的母线负荷预测方法[J]．电力系统及其自动化学报，2010，22(5)：146-151．
[20] 冯丽，邱家驹．基于电力负荷模式分类的短期电力负荷预测[J]．电网技术，2009，29(4)：23-26，41．
[21] 贾慧敏，何光宇，方朝雄，等．用于负荷预测的层次聚类和双向夹逼结合的多层次聚类法[J]．电网技术，2007，31(23)：33-36．
[22] 冯晓蒲．基于实际负荷曲线的电力用户分类技术研究[D]．北京：华北电力大学，2011．

（收稿日期：2018－09－04）EA

典藏技术 革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展

《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自1982年创刊至今，已走过几十年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋，也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱，在众多电工类专业技术期刊中颇具影响力。

国内统一刊号：CN11-5249/TM 国际标准刊号：ISSN1672-9560 国内邮发代号：82-341 国外发行代号：M1409

电气应用

基于轨道交通工程电动机直接起动的一种简单算法

通过轨道交通系统特定的参数,结合电动机起动时母线压降计算公式，通过推理，得出一个简单计算方法，可便于设计同行在设计过程中快捷应用，提高效率，节约时间。

张振宇/北京城建设计发展集团股份有限公司

张振宇/高级工程师

关键词/Keywords
电动机·
直接起动·
母线压降·
启动容量·

0 引言

目前轨道交通正大规模建设，轨道交通车站、区间、车辆段及停车场的电动机设备数量众多，且部分电动机容量较大，有的配电线路距离较长，电动机设备能否直接起动，是否采取降压起动措施是设计者应考虑的问题。一般来讲电动机除特殊要求外，全压起动是最简单、最可靠和最经济的起动方式，应优先采用。但是直接起动电流大，在配电母线上引起的电压下降也大，电动机配电回路直接起动需要满足如下条件。

1）电动机频繁起动时，不应低于系统标称电压的90%；电动机不频繁起动时，不宜低于系统标称电压的85%。

2）配电母线上未接照明负荷或其他对电压下降敏感的负荷，且电动机不频繁起动时，不应低于系统标称电压的80%。

3）配电母线上未接其他设备时，可按保证电动机起动转矩的条件决定，对于低压电动机，还应保证接触器线圈的电压不小于释放电压。

4）被拖动机械能承受全压起动时的冲击转矩。

电动机是否能直接起动，设计者一般按照《工业与民用配电设计手册》第4版的相关要求进行计算，并按如下公式计算相关数据。

1）母线短路容量S_{scB}

$$S_{scB}=\frac{1}{\frac{1}{S_{sC}}+\frac{1}{S_T}}=\frac{1}{\frac{1}{S_{sC}}+\frac{U_K\%}{100S_{rT}}} \quad (1)$$

2）起动回路的计算容量计算公式为

$$S_{st}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{1}{S_l}}=\frac{1}{\frac{1}{S_{stM}}+\frac{X_l}{U^2_{av}}} \quad (2)$$

3）母线电压相对值计算公式为

$$u_{stB}=u_s\frac{S_{scB}}{S_{scB}+Q_L+S_{st}} \quad (3)$$

式中，S_{rT}为变压器容量，轨道交通配电变压器范围一般在315～1 600 kV·A（地面车站为315～500 kV·A，地下车站为630～1 600 kV·A）；X_l为配电线路的电抗；S_{stM}为电动机的起动容量；U_K为变压器电抗相对值，本文容量为630 kV·A及以上的变压器取值为6，容量为630 kV·A以下的变压器取4；S_{sC}为最小运行方式下的短路容量，此值越小，电动机起动时母线电压越小，也就越不利于起动，一般来讲最小短路容量在100 MV·A以上，本文按照100 MV·A进行计算；Q_L为预接无功负荷。

电动机的起动容量计算式为

$$S_{stM}=k_{st}S_{rM}=7\times0.38\times I \quad (4)$$

式中，I为电动机计算电流。

无功负荷的计算式为

$$Q_L=S_{rT}\sqrt{1-\cos^2\varphi}=S_{rT}\sqrt{1-0.9^2}=0.436S_{rT} \quad (5)$$

轨道交通低压侧设置无功补充装置，补偿后功率因数不小于0.9。

通过式（1）~式（3）计算，最终确定U_{stB}的值，计算过程烦琐，如果能找到一个简单算法，那么设计者在设计过程中可以节约时间，提高效率。

2　计算思路

通过上述式（1）～式（3），发现影响电动机起动的因素为为Q_L、X_1、S_{stM}、S_{rT}、U_K和S_{sC}。

地铁中电动机设备属于不频繁起动类设备，直接起动时，只要母线压降控制在85%以上即可，即

$$u_{stB}=u_s\frac{S_{scB}}{S_{scB}+Q_L+S_{st}}\geqslant 85\% \quad (6)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{u_{stB}}=\frac{1}{u_s\dfrac{S_{scB}}{S_{scB}+Q_L+S_{st}}}\leqslant\frac{1}{85\%}=1.176 \quad (7)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{u_s}\times\frac{S_{scB}+Q_L+S_{st}}{S_{scB}}\leqslant 1.176 \quad (8)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{u_s}\times\left(1+\frac{Q_L}{S_{scB}}+\frac{S_{st}}{S_{scB}}\right)\leqslant 1.176 \quad (9)$$

$$\Rightarrow \quad 1+\frac{Q_L}{S_{scB}}+\frac{S_{st}}{S_{scB}}\leqslant 1.176u_s \quad (10)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q_L}{S_{scB}}+\frac{S_{st}}{S_{scB}}\leqslant 1.176u_s-1 \quad (11)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q_L}{S_{scB}}+\frac{S_{st}}{S_{scB}}\leqslant 1.176\times 1.05-1 \quad (12)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{Q_L}{S_{scB}}+\frac{S_{st}}{S_{scB}}\leqslant 0.235 \quad (13)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{0.436S_{rT}}{S_{scB}}+\frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{7\times 0.38\times I}+\dfrac{X'L}{0.4^2}}}{S_{scB}}\leqslant 0.235 \quad (14)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{7\times 0.38\times I}+\dfrac{X_1}{0.4^2}}+0.436S_{rT}}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{S_{sC}}+\dfrac{U_K\%}{100S_{rT}}}}\leqslant 0.235 \quad (15)$$

把式（15）左端看成一个函数，可以看出线路阻抗X_1越大，函数值越小。为了简便，更有利于工程简单快捷计算，先将线路阻抗置零。

在某个实际工程中U_K为定值，S_{rT}为定值，现分别计算容量为315～1 600 kV·A变压器的直接起动电动机电流限值。

以容量为1 000 kV·A的变压器为例计算如下。

$$\Rightarrow \quad \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{7\times 0.38\times I}}+0.436}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{100}+\dfrac{6}{100}}}\leqslant 0.235$$

$$\Rightarrow \quad \frac{7\times 0.38\times I+0.436}{\dfrac{100}{7}}\leqslant 0.235 \quad (16)$$

$$\Rightarrow \quad 7\times 0.38\times I\leqslant 2.92$$

$$\Rightarrow \quad I\leqslant 1.1 \ \text{kA}$$

按照上述算法，单台电动机起动时，可计算出容量为315～1 600 kV·A变压器与电动机的计算电流间的关系，具体如下表所示。

表　变压器容量与直接起动电动机电流限值关系

序号	变压器容量/kV·A	直接起动电动机电流限制值/A
1	315（U_K=4）	593
2	400（U_K=4）	737
3	500（U_K=4）	900
4	630（U_K=6）	736
5	800（U_K=6）	908
6	1 000（U_K=6）	1 098
7	1 250（U_K=6）	1 318
8	1 600（U_K=6）	1 597

轨道交通中还会遇到一种工况，那就是一个供电回路上的电动机会依次起动，如在正线至

车辆段出入段线雨水泵，雨水泵会根据水位情况自动确定起动泵的数量，如起动2台泵，这时式（15）调整为

$$\Rightarrow \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{(7+1)\times 0.38\times I}+\dfrac{X_1}{0.4^2}}+0.436S_{rT}}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{S_{sC}}+\dfrac{U_K\%}{100S_{rT}}}} \leqslant 0.235 \quad (17)$$

只要在起动容量中考虑回路一台泵正在运行，另一台泵起动时的工况即可。其他起动多台泵时可按照上述思路进行计算。

3 结束语

本文提供了电动机起动时的一种简单算法，给设计同行提供了一种计算思路，仅供参考。计算时系统的短路容量按照100 MV·A考虑，若采用其他类型供电方案，还需咨询当地供电部门并加以计算得出相应值。

参考文献

[1] 新时代国际工程公司．GB 50055－2011 通用用电设备配电设计规范[S]．北京：中国计划出版社，2012．

[2] 中国航空规划设计研究总院有限公司．工业与民用供配电设计手册[M]．4版．北京：中国电力出版社，2016．

[3] 北京城建设计研究总院有限责任公司，中国地铁工程咨询有限责任公司．GB 50157－2013地铁设计规范[S]．北京：中国建筑工业出版社，2013．

（收稿日期：2018－06－29）EA

（上接第60页）

[2] 邱毓昌．GIS装置及其绝缘技术[M]．北京：水利电力出版社，1994．

[3] 齐波，李成榕，耿弼博．GIS设备绝缘子高压电极故障局部放电严重程度的诊断与评估[J]．高电压技术，2011，37（7）：1719-1727.

[4] 段剑，张立群，甄利，等．一起500 kV断路器故障的分析和治理[J]．高压电器，2010，46(7)：90-92．

[5] 张若飞，杜黎明，张利燕．SF_6高压断路器故障分析[J]．高压电器，2010，46(2)：99-102．

[6] 杨会民，宋明刚．HPL-55082型断路器故障分析[J]．高压电器，2009，45(1)：114-115．

[7] 陈安明，杨洋，黄文龙，等．基于 SF_6分解产物的GIS放电故障诊断分析[J]．绝缘材料，2013，46(2):83-85．

[81] 郭伟．气体分解产物应用于SF_6电气设备故障查找的分析[J]．绝缘材料，2012，45(4):69-72．

[9] 季严松，王承玉，杨韧，等．SF_6气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用[J]．高压电 器，2011，47(2):100-103．

[10] 周敏琛，苏秀苹．断路器操作机构中连杆的可靠性分析[J]．江苏电器，2003(6):21-23．

（收稿日期：2018－02－04）EA

电力工控系统攻击威胁分析技术研究

随着信息化和工业化的深度融合以及物联网的快速发展，越来越多的信息技术被应用到工业领域，电力工控系统面临着网络攻击威胁。因此，必须针对电网工控系统的威胁进行有效的监测，才能及时发现可能存在的安全问题。通过对电力工控系统攻击威胁的分析，提出一种基于攻击树的电力工控安全的威胁模型。根据威胁模型，自下向上迭代地计算各个节点的威胁值，从而评估威胁风险等级。威胁值越大，威胁风险等级越高，并且通过电力工控系统中的嗅探实例验证了该方法的实用性。在威胁模型的基础上，设计了电力工控协议威胁识别与监测平台。

张传远　杨夏祎　梁薇　齐永忠／北京中电普华信息技术有限公司

张传远／工程师

关键词／Keywords

电力工控系统·
威胁模型·
风险等级·
威胁监测·

0　引言

近年来，随着电力工控系统采取分区分域和纵深防御策略，通过实施内外网安全隔离、电网生产大区与管理信息大区安全隔离等关键安全防护工程[1]，系统安全防护体系逐渐得到完善。但是，随着工业控制系统和设备中新的漏洞、后门等脆弱性信息的发现和披露，电力工控系统面临更加隐蔽、更加曲折的恶意攻击风险（如APT）。另一方面，由于电网与发电厂工业控制系统安全防护体系及其防护能力的不均衡、不对称，特别是近年来大量光伏发电、风能发电等新能源发电站的接入，使电力工控系统面临越来越复杂的安全威胁[2]，迫切需要在电力工控系统关键节点构建安全威胁监测机制，以保护电力工控系统安全稳定，保证国家重要基础设施安全运行。因此，为解决存在的攻击威胁，开展电力工控系统攻击威胁分析技术的研究，研发了电力工控系统威胁识别与监测平台。

1 电力工控系统攻击威胁分析

1.1　攻击威胁概述

攻击威胁是一种对组织或者资产具有潜在性破坏的可能性因素或事件。无论电力工控系统安全级别有多高，攻击威胁都是客观存在的，它是电力工控系统风险评估的重要因素之一[3-6]。

产生安全威胁的主要因素分为人为因素和环境因素。人为因素有无意和有意之分；而环境因素则是自然界中一些不可抗因素和其他物理因素，如断电、洪灾和火灾等。攻击威胁的作用形式是对电力系统直接或间接的攻击，如非授权的泄密、篡改数据和窃听敏感信息等，在可用性、保密性和完整性等方面造成损害，致使系统瘫痪。通常来讲，攻击威胁总是要利用网络、系统应用或数据的脆弱性才可能对内部有价值的资产造成损害，这里数据的脆弱性是指能被威胁所利用的资产或若干资产的薄弱环节。安全事件及其后果是分析威胁的重要依据。但是有相当一部分攻击威胁发生时，由于未能造成后果，或者没有意识到，而被安全管理人员忽略，这将导致对攻击威胁的认识出现偏差。威胁分析关系如图1所示。

1.2 攻击威胁分类

电力工控系统由设备、系统平台、

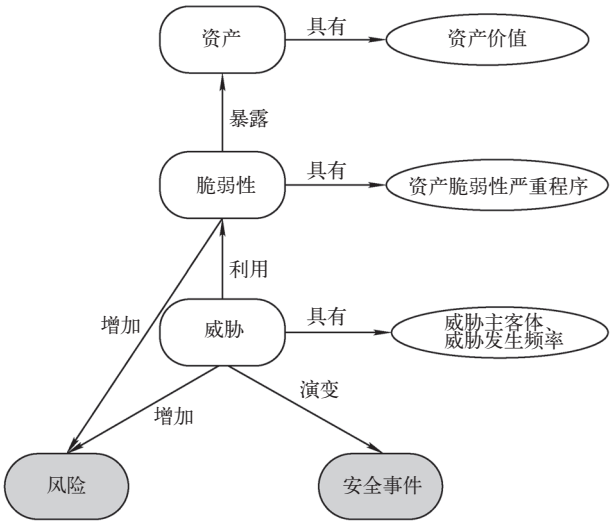


图1 威胁分析关系图

业务系统和网络等要素构成，其每个要素都存在着各种可能被攻击的脆弱性，随着攻击手段的层出不穷，其面临的攻击威胁越来越严重，要想针对每个攻击威胁提出相应的检测方法，需要了解电力工控系统中存在哪些攻击威胁。

1）嗅探[7]。指在网络内部监听、窃取机密数据，冒充合法ID破解通信密钥，造成数据泄密。

2）拒绝服务攻击（DDOS）[8]。借助网络系统或协议的缺陷和配置漏洞进行网络攻击，使网络拥塞、系统资源耗尽或系统应用锁死，常见攻击方式包括SYN Flood、UDP Flood、IP欺骗和Smurf攻击。

3）旁路控制。入侵者针对电网工控系统发送非法控制命令，可修改系统配置、程序和敏感数据，造成网络或系统瘫痪。

4）违规外联。系统内网直接连通互联网或通过其他网络访问互联网，电力工控系统中的设备未经安全防护及策略设置直接连通其他网络，当发生违规外联时，内部网络将面临病毒木马、非授权访问和数据泄密等多种安全威胁。

5）病毒攻击。工控智能设备主要基于Linux系统作为底层操作系统，其可能感染很多种类的Linux木马病毒，主要包括感染ELF格式文件的病毒、脚本病毒、蠕虫病毒、后门程序和其他病毒。

2 基于攻击树的电力工控安全威胁模型

2.1 安全威胁模型

在电力工控系统的攻击过程中，攻击不会以一种方式或者一个步骤得以实现，而是以不同的攻击进程采取不同的攻击方法，且并不是以既定模式展开攻击。本文以攻击树为基础，实现电力工控系统的安全威胁建模。攻击树虽然逻辑结构简单，但其树形结构可以直观准确地描述系统中包含哪些攻击方式和威胁种类，同时攻击树具有很强的扩展性，可以根据逻辑结构按需求增加或删除对系统不足以构成威胁的攻击。

安全威胁建模的思想就是基于攻击树模型，把从系统安全风险中分析出来的安全威胁行为作为树的结构形式建立威胁树，表示威胁行为及其攻击步骤之间的逻辑关系。其中每棵威胁树代表攻击者使用的威胁方法，每条路径代表具体的攻击方式。因此，任何一个网络都会存在一个威胁树集合。一棵基本的威胁树模型包含根节点、叶节点以及中间节点。根节点表示攻击者对系统威胁的最终目标；叶节点表示威胁可能采取的攻击手段；而中间节点则表示攻击者达到最终目标时所采取的中间步骤。其中根节点的各个子树是可选路径，攻击者可采取不同的攻击进程。

传统的攻击树模型[9]包含“与”（AND）节点和“或”（OR）节点。“与”节点表示攻击者需要完成全部子目标，攻击才能继续；否则攻击无效。“或”节点表示攻击者只要达到其中任一子目标，攻击方可继续。而威胁树在此基础上增加了“顺序与”（SAND）节点，表示攻击需要按子目标的顺序进行才可以继续传播。三种威胁树节点关系如图2所示。

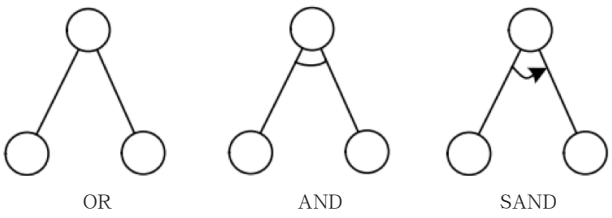


图2 威胁树节点关系

电力工控系统中存在大量对电力公司有价值的信息或资源，是保护的重点对象，威胁则利用资产的脆弱性对资产造成不必要的损失。在电力工控系统的资产识别、设备特征分析与识别中，主要分析变电站综合自动化系统、AGC/AVC和PMU等设备的组成结构、工作原理和工作过程，在此基础上确定各终端的关键性元素，即关键资产（如硬件、软件、系统接口、数据和信息、操作以及它们的用途），也是确定这些终端的安全界限，通过划定安全界限确定需要保护的资产以及易受攻击的过程，同时获取威胁的存在方式以及将要攻击的切入点，从而构造安全威胁建模[10]。构造的具体过程如下。

1）在安全界限处可以推断出存在哪些攻击行为，将电力工控系统的网络安全作为威胁树的根节点，根据各种安全威胁对网络安全的影响，分别从机密性、完整性和可用性三个安全目标出发，依照攻击者可能会使用的攻击手段对系统造成的安全威胁向下逐层扩展。

2）分析了解电力工控系统中存在的安全隐患以及脆弱性，站在攻击者的角度去思考以何种攻击方法攻击最终要达到的目标，列出工控系统中包含的所有威胁、利用其实现攻击的所有可能攻击途径和所要具备的攻击条件。如上述所提到的拒绝服务攻击（DDOS），有“耗尽能源”和“洪泛攻击”两种攻击途径，要达到“耗尽能源”的攻击需要顺序进行两步攻击步骤，首先安装射频装置，其次不断向RFID读写器发送请求，耗尽其读卡器资源，从而达到拒绝服务攻击。其他几种典型的攻击手段以及攻击途径如图3所示。

3）重复步骤1）和步骤2），找出可能针对电力工控系统具有威胁的攻击源，对所有父节点进行扩展，对各个子节点进行细化，直到细化到叶节点。叶节点即为原子节点，是威胁建模的最底层不可再细化的节点，通过威胁评估方法能够对其进行安全评估的节点。由于电力工控系统网络的结构极其复杂，终端设备种类繁多，攻击手段也逐步增多。因此，安全威胁建模会很庞大。

经过上述步骤可构建具有很好扩展性的威胁建模，操作也很方便，若发现一种新的攻击方式，只要在该攻击节点的隶属父节点下加一个代表新攻击方式的子节点即可。威胁建模也具有很好的可重用性，安全人员可以选取威胁建模中的一部分作为新的威胁模型，这样可以简化安全人员的工作。

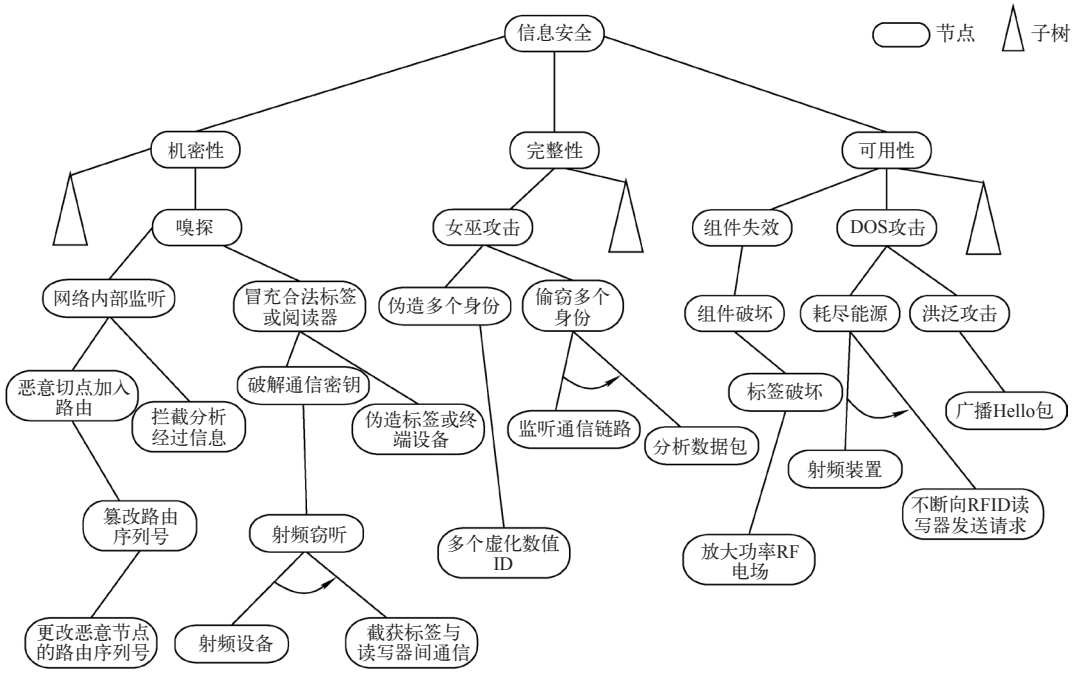


图3 电力工控系统攻击威胁建模

2.2 算法分析

威胁建模建立后，可方便观察电力工控系统中存在的攻击威胁以及其攻击手段和攻击路径，但无法判断攻击威胁的风险值，也就无法确定攻击威胁的风险等级，需要计算攻击威胁风险值[11]。因此，本文提出一种基于威胁攻击路径的威胁评估算法，借助威胁建模，将逻辑结构中每个路径节点看作一个威胁因子[12]，分析各威胁因子可能会被利用到的几率，计算威胁因子的权值，根据威胁因子的权值确定威胁风险值，由此评估威胁攻击能力以及其对电力工控系统造成损失的严重程度确定威胁风险等级等相关信息。

将图3的攻击威胁建模表示为有向树$T=\{V, E, G, c, f, h, g\}$。

其中

$$V=V_e \cup V_m \tag{1}$$

式中，V为树中节点集合；V_e为树中叶子节点集合；V_m为树中非叶子节点集合。

$$E=E_u \cup E_m \tag{2}$$

式中，E为树中弧的集合；E_u为“OR”边；E_m为“AND”边。

$G=\{s, m, n, p\}$表示三个安全威胁类型的集合，其中，m为机密性威胁；n为完整性威胁，p为可用性威胁；s为综合威胁。

$e(i, j)\in E$的权值，当$e\in E_u$时，j为单点集，需要多点共同完成；当$e\in E_m$时，j表示为多点集。

v表示树中某一节点，f为函数计算节点v的安全威胁类型，表示该节点是机密性威胁、完整性威胁、可用性威胁还是综合威胁。节点v是树中叶子节点时，根据节点的安全威胁类型确定其值，计算式为

$$f(v)=\begin{cases} s\ v\in V_m \\ x\in\{m,n,p\}\ v\in V_e \end{cases} x \tag{3}$$

h函数用于计算节点威胁类型的威胁因子，当该节点是机密性威胁、完整性威胁和可用性威胁时，其值用一个常量表示威胁类型的大小；当该节点是综合威胁时，其值为所有子节点值中的最大值，计算式为

$$h[f(v)]=\begin{cases} \alpha\ f(v)=x \\ \max h[f(k)]\ f(v)=s \end{cases} \tag{4}$$

g函数用于评估节点所受的威胁值，其值越大代表该威胁攻击性越大，判断节点是否是叶子节点。计算公式为

$$g(v)=\begin{cases} h(f(v))\ v\ v\text{是叶子的节点} \\ \sum_{(v,j)\cup E_u} E(v,j)[h(f(j))]+g(j)+ \\ \sum_{(v,j)\cup E_n} \Pi_{(v,j)\cup E_n} E(v,j)[h(f(j))+g(j)] \\ v\text{不是叶子的节点} \end{cases} \tag{5}$$

2.3 实例验证

电网工业控制系统安全威胁监测系统是一个综合性的安全风险监控系统，需要和电网边界分析相结合，其中以调控系统与光伏电站工控系统边界为重点，因此必须重视新能源电站工控系统安全风险和电网调控系统安全风险的具体特点。经过上述算法的分析，本文以电力工控系统中基于工控协议的攻击威胁为例[13]，说明具体的威胁建模以及风险评估。计算图3安全威胁建模中的机密性威胁类型，假设每条边的权值为1，α=0.5，根据式（2）～式（4）计算出威胁建模中各节点的威胁值，如图4所示，从而评估各攻击威胁的风险值，威胁风险值越高，威胁也就越大。

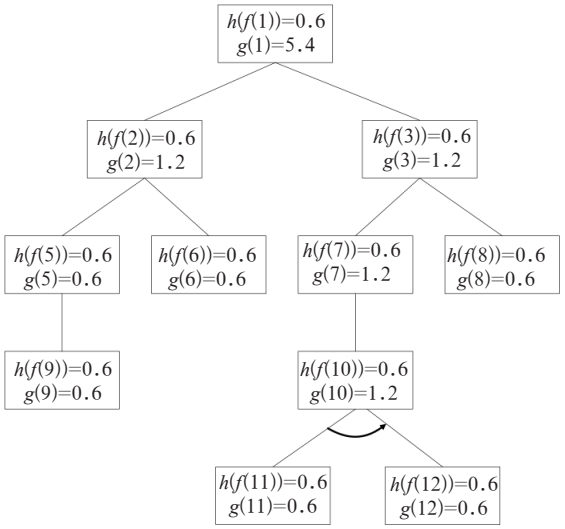


图4 机密性威胁风险值

3 电力工控协议威胁识别与监测

通过对电力工控系统安全威胁的辨识与分析，评估了系统中威胁风险等级，并确定了电力工控系统中安全风险的特点和规律，为研究开发

电力工控系统威胁识别与监测平台提供了技术支持，接下来基于攻击树的安全威胁模型，初步设计了电力工控系统威胁识别与监测平台。

电力工控系统系统由设备、系统平台、业务软件和网络等要素组成，其中每个要素都存在着各种可被攻击的弱点，随着攻击手段的层出不穷，其面临的威胁越来越严重。安全威胁监测主要针对用电采集系统智能终端和配电自动化终端的安全问题进行威胁的监测与分析，系统地分析其所面临的威胁及其存在的脆弱性，评估安全事件一旦发生可能造成的危害程度，并且安全威胁监测需要结合实际的攻击手段来验证安全威胁监测与分析能力。

系统主要面向工业控制系统的控制设备、网络通信流量、I/O状态、DCS工程师站、DCS操作站、网络设备和安全设备等进行数据采集、解析、分析、安全监测及告警。系统基于模块化分层设计原则包括数据采集层、大数据存储层、大数据分析层、监测业务层和数据展现层等层面，提供全方位的异构数据采集能力、大数据存储与分析能力以及进行综合的安全分析及异常攻击告警与管理能力。其中数据采集层针对集散控制系统（DCS）的异构数据源、专有通信协议和组态控制等特点提供工控环网专用采集现场监测装置、设备状态采集代理、I/O状态采集模块、基于Syslog和SNMP的日志与状态采集代理、基于FTP和HTTP/HTTPS的系统配置、关键文件及组态程序采集代理。大数据存储主要针对采集的数据进行解析并格式化，以便于进一步地存储与分析。大数据分析层通过数据预分析构建分类数据库，并基于云数据进行存储，利用大数据分析技术对数据进行抽取、预处理和数据整合提供集散控制系统的控制指令、组态程序等的完整性分析、系统和网络流量的异常分析、攻击的关联分析及系统状态的时序分析等能力。监测业务层提供针对集散控制系统的安全监测核心功能，包括异常流量监测、病毒攻击监测、通信行为监测、总线访问监测、系统负载监测、状态参数监测、控制信号监测、DCS组态监测和DCS数据与操控指令监测等多种安全功能。数据展现层提供统一的可视化的安全态势展现、实时监控、监测告警、溯源分析和统计报表等功能。系统和接口管理提供用户管理、权限控制、配置管理、日志管理、设备管理、监测对象管理及健康自检等管理与配置功能，同时还提供和外部系统的接口管理，包括网管接口、告警推送接口和升级同步接口等。电力工控系统威胁监测体系如图5所示。

电力工控系统威胁识别与监测平台如图6所示。工业网络现场监测装置用于对工业以太网流量的采集与分析，总线现场监测装置用于对典型现场总线上的流量进行采集与分析，控制信号现场监测装置用于对I/O信号线上的信号进行直接地采集与分析，所有采集到的实时数据会被存储到MongoDB数据库集群，供异常监测中央平台分析。

所有监控类设备通过交换机进行连接，分配合理的IP地址保证可以正常通信即可，设备之间的通信会有产品上的VPN服务保证完整性与保密性。

4 结束语

本文对电力工控系统攻击威胁分析的技术研究，主要提出了基于攻击树的安全威胁建模的方法，对威胁监测系统的安全问题展开了整体上的研究，但是由于电力工控系统的智能设备应用十分广泛，种类也较多，再加上以往人们也更关注于后台信息系统的安全性，与电力工控系统智能设备相关的安全体系、标准规范和监测方法还有待完善。而在电力系统中，电力工控系统智能设备的正常安全运行关系到整个电网的安全，因此对信息安全问题展开进一步研究是很有必要的。

参考文献

[1] 徐新国．工控系统信息安全策略探讨[J]．自动化博览，2013(11)：25-25．

[2] 白雪原．工控系统安全威胁及防护应用探讨[J]．中国信息化，2018(5)：48-49．

[3] 于永忱．浅谈网络的攻击源[J]．科技风，

图5　电力工控系统威胁监测体系

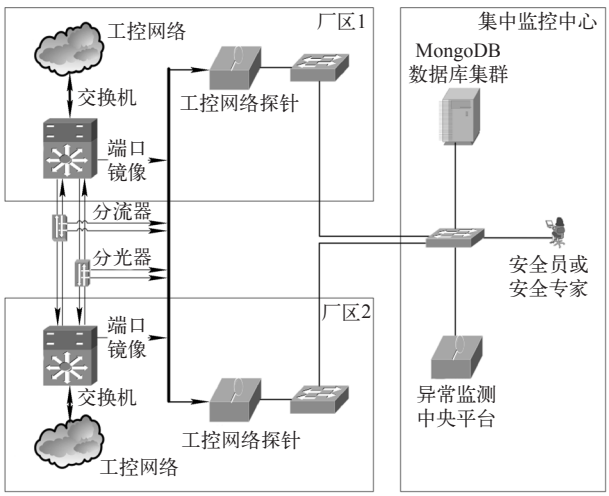


图6　电力工控系统威胁识别与监测平台

2011(13)：7，12.

[4] 闫巧，吴建平，江勇．网络攻击源追踪技术的分类和展望[J]．清华大学学报：自然科学版，2005，45(4)：497-500.

[5] 缪嘉嘉，张瞩熹，贾焰，等．一种基于数据流的网络威胁监控框架[J]．计算机工程与科学，2009(12)：23-26，51.

[6] 卢锦玲，朱永利．基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]．电工技术学报，2010，25(6)：96-103.

[7] 徐鸿，杨云江．基于嗅探技术的内部网络安全研究[J]．微型机与应用，2011(1)：38-40.

[8] Michael Walfish，Mythili Vutukuru，Hari Balakrishnan，et al．DDoS defense by offense[J]．ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)，2010，28 (1)：55-108.

[9] 李奕林，穆灵．电力工控系统安全面临的威胁与对

(下转第107页)

基于用电行为习惯的家庭节能用电策略研究

提出一种基于用户用电习惯的家庭用电策略，该策略把用户习惯作为首要考虑因素，首先统计电器的开、闭时刻信息，通过聚类算法求得用户对电器的n种用电习惯，根据聚类中的对象数量对用电习惯进行优先级排序；然后基于用电习惯构建用户满意度函数，结合分时电价环境下的费用函数制定用电策略目标函数，通过调节目标函数中电费和满意度的权重系数，对应生成多种节能效果不同的用电方案；最后利用粒子群算法对目标函数进行寻优，找出用电方案中电器的最佳开启时间。实验结果表明，该策略可明显减少用户的用电费用，同时结合用电习惯保证了用户对方案的满意度；该策略可引导用户用电时间向用电低谷段靠近，为电网负荷均衡起到了削峰填谷的作用。

张中超　叶伟灵／广东电网有限责任公司河源供电局

张中超／工程师

关键词／Keywords

用电行为·
用户满意度·
家庭用电节能策略·
粒子群算法·
分时电价·

0　引言

随着智能用电技术的发展，通过监测控制技术获取家庭用电信息已成为可能。这些数据不仅具有海量、高频和分散等特点，而且数据之间存在关联性和相似性，同时，数据中还隐藏着用户的用电行为习惯和电器的运行状态（如开启、运行和关闭）。如何充分利用这些数据信息进行能效评估，发掘用户对某电器的使用习惯，并基于此有针对性地制订家庭用电节能策略是本文研究的重点。

目前，国内外学者在家庭用电节能策略方面已经进行了大量研究。文献[1-3]针对智能小区提出一种用电模式，为用户提供科学用电策略，积极地影响用户的电力消费习惯，达到节能和削峰填谷的目的。文献[4] 针对空调系统使用直接膨胀系统和周期停机控制方法执行节能程序，并提供不同的能耗节约模式供用户选择，人性化地实现了家庭空调系统能源的节约。文献[5-6]分别通过定制的用电反馈信息和电力消耗反馈模型，尝试改变用户对能源的使用和与能源有关的行为，以帮助家庭用户更好地控制能源消费，实现能源节约。

本文首先对家用电器的开、闭时刻信息进行分类统计，利用聚类算法对电器开启时刻处理得出用户的用电习惯；然后结合分时电价的环境，为用户制定节能用电策略函数，提供多种用电方案，用户根据自身习惯和当天的实际情况选择用电方案。本研究通过为用户提供科学合理的节能策略，积极地影响用户的消费习惯，不仅可为家庭节约用电成本，还为电网的负荷均衡起到了一定的作用，达到节能和削峰填谷的目的。

1　总体框架设计

根据用户行为习惯和电器的运行特性，本文将总体框架分为三个模块，如图1所示。

第一模块为用电习惯的获取。首先对用户电器的开启、关闭时刻信息进行统计、聚类分析，生成k个类簇，对应k种用电习惯。然后对用电习惯进行优先级排序，为用户提供用电方案时应尽量靠近优先级高的习惯时间，以提高方案的满意度。

第二模块为节能用电数学模型的构

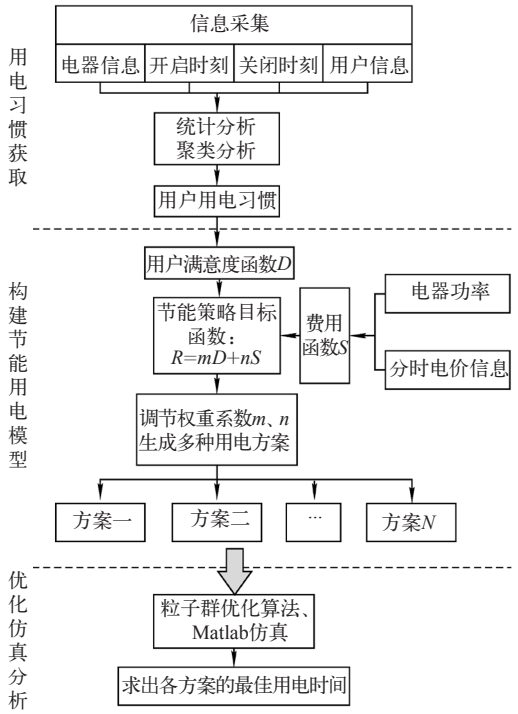


图1　总体框架图

建。首先根据用电习惯制订用户满意度函数，并结合分时电价的信息构建节能用电数学模型，建立策略目标函数，并作归一化处理。然后调节目标函数中的权重系数，为用户提供多种不同节能效果的用电方案。

第三模块为优化仿真实验。首先分析分时电价环境，确定用电费用函数，然后利用粒子群优化算法对不同的方案进行寻优，求出不同方案下电器的最佳开启时间。

2　用户用电习惯的获取

每个家庭都有自己的生活作息习惯，用户对不同电器也有不同的使用习惯，如何从海量的用户用电数据中挖掘出每种电器的使用习惯是本研究的前提条件。

本文对电器的开启时刻进行统计，从大量数据中挖掘出用户对某一电器的使用习惯，首先利用K-means算法对电器的开启时刻进行聚类分析，聚类结果中一个类簇代表一种用电行为习惯，类簇中对象个数越多，说明用户在该类簇对应的时间域内使用电器的概率越大，即越习惯在该时间域使用电器；然后根据类簇中对象数量对用电习惯进行优先级排序：第一用电习惯，第二用电习惯，…，第k用电习惯；最后计算每个类簇中所有对象的均值，该值对应的时刻为电器习惯开启时间。

3　构建家庭用电数学模型

3.1　用电费用函数S

在分时电价环境下，不同时段电价水平不同，居民的家庭用电费用S的计算公式为

$$S=\sum_{i=1}^{k}\int_{T_i}^{T_i+\Delta t_i}P_i\Delta t_i Q(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中，P_i为电器的功率；T_i为电器i的开启时刻；Δt_i为电器i的用电时长；$Q(t)$为电价量随时间的变化函数。

由上述电费支出公式可知，总电费是多个电器的费用加权和，电器的功率是无法改变的，用电时长缩短会影响用户的正常生活，所以在分时电价环境下，要想减少电费支出，只能改变用电时段的电价，即改变用电的使用时段，调节用电时间域至分时电价低水平阶段。

3.2　用户满意度函数D

用户对节能方案的满意度是衡量本研究实用性的重要依据，方案越靠近用户的习惯，用户的满意度越高，故用户的满意度可用方案和习惯的电器开启时刻之差来表示。为了保证用户的满意度，本研究只选取前三个用电习惯进行研究。

设A_i，B_i，…，N_i分别为电器A，B，…，N对应第i用电习惯的开启时间；A_t，B_t，…，N_t为本策略用电方案开启时间；d_1、d_2和d_3分别为用电方案的电器开启时间与用户第一用电习惯、第二用电习惯和第三用电习惯开启时间的距离差，其计算公式为

$$\begin{aligned}d_1&=|A_1-A_t|+|B_1-B_t|+\cdots+|N_1-N_t|\\d_2&=|A_2-A_t|+|B_2-B_t|+\cdots+|N_2-N_t|\\d_3&=|A_3-A_t|+|B_3-B_t|+\cdots+|N_3-N_t|\end{aligned} \tag{2}$$

用户满意度D的函数可表示为

$$D=\alpha d_1+\beta d_2+\gamma d_3 \tag{3}$$

式中，α、β和γ分别为d_1、d_2和d_3的系数，表示用户对第一用电习惯、第二用电习惯和第三用电习惯的依赖程度，一般$\alpha>\beta>\gamma$，且满足$\alpha+\beta+\gamma=1$。

通过调节α、β和γ值的大小，可以体现用户对不同习惯的依赖程度，从而生成基于不同习惯依赖度的用电方案。

3.3 用电策略目标函数的制定

本研究在为用户提供用电方案的同时，充分考虑用户的用电习惯，故此用电策略目标函数由两个因素决定：一个是电费支出S，用来衡量方案是否节省费用；另一个是用户满意度D，用来衡量方案与用户的习惯方案的距离差，此因素决定用户对方案的满意度，方案越靠近用户的习惯时间，用户越满意，越容易接受。

由式（3）可知用电满意度D以时间为单位，而电费支出S以货币为单位。为了解决两个因素单位不匹配的问题，本文采用无量纲的表示方式，首先分别对用户满意度D和电费支出S进行归一化处理，即

$$\overline{D}=\frac{D-D_{\min}}{D_{\max}-D_{\min}} \tag{4}$$

式中，$D_{\max}$、$D_{\min}$分别为通过调节电器开启时间得到用户满意度的最大值和最小值。

$$\overline{S}=\frac{S-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}} \tag{5}$$

式中，$S_{\max}$、$S_{\min}$分别为在分时电价环境下，方案中电器使用时长不变条件下改变用电时段时电费支出的最大值和最小值，显然$S_{\max}$出现在波峰电价时段，$S_{\min}$出现在波谷电价时段。

经归一化处理后，用电策略目标函数可表示为

$$R=m\overline{D}+n\overline{S} \tag{6}$$

式中，m、n分别为满意度$\overline{D}$、用电费用$\overline{S}$权重系数，且满足$m+n=1$。

其中，m、n的取值不同，对应用电方案的用户满意度、节能效果也不同。m越大，表明方案越接近用户的用电习惯，满意度越高；n越大，表明节能效果越佳，其用户满意度则相对较低。

3.4 方案节能效果与m、n的关系

本研究可以通过调节m、n的值生成节能效果不同的用电方案，结合分时电价的价格特点，节能效果优良的方案其用户满意度则相对较低，故用户需要综合考虑满意度和节能效果选择m、n的值，从而确定用电方案。本研究把节能效果初步分为五个等级，各等级与m、n的值关系如表1所示。

表1 节能效果与m、n的关系表

节能效果	m	n
优	0.1	0.9
良	0.3	0.7
好	0.5	0.5
一般	0.7	0.3
次	0.9	0.1

4 用电方案算法寻优

基于用户习惯的节能策略目标函数寻优是一个多目标优化问题，其寻优的结果既要减少电费支出，还要保证用户的满意度，故本研究采用多目标寻优的常用算法——粒子群优化算法对目标函数进行寻优，以R取最小值为目标值。

在粒子群算法中适应度函数的变量为用电方案中各电器的开启时间，A_i，B_i，…，N_i，对于给定m、n目标函数R，粒子群通过迭代求得取最小值时的电器开启时间A_i'，B_i'，…，N_i'，算法具体步骤如下。

1）初始化粒子种群大小PopSize、粒子的维数Dim，粒子的维数为电器个数；设置最大迭代次数MaxIter；并限定粒子的最大寻优范围$X_{\max}$，保证粒子在一天24 h内寻求最优解。

2）随机初始化粒子位置，粒子群的初始化可表示为

$$X=\text{rand(PopSize，Dim)}X_{\max}$$

然后迭代更新粒子位置。

3）计算每次迭代中个粒子的适应度函数R，

确定粒子i的自身历史最优位置P_i和全局最优位置G_i。然后通过跟踪自身历史最优值P_i和群体最优值G_i来更新自己的速度和位置，进行下一次迭代。粒子i速度的更新公式为

$$V = wV' + c_1r_1(P_i - X_{\text{present}}) + c_2r_2(G_i - X_{\text{present}})$$

式中，w为惯性权重系数；c_1、c_2为学习因子，控制粒子向自身最优位置和全局最优位置靠近学习强度；r_1、r_2为0～1之间的随机数，用来防止算法陷入局部最优；V'为粒子当前的速度；X_{presend}为粒子当前的位置。

4）根据粒子速度更新粒子位置，即

$$X'=X_{\text{presend}}+V$$

5）检查迭代次数是否达到最大值MaxIter或寻优结果是否满足规定条件。若满足迭代终止；否则，重复步骤3）～步骤5）。

6）迭代终止，得出各维粒子的最优位置，即各电器的最佳开启时间A'_t，B'_t，…，N'_t。

5 实例分析

5.1 电价环境及用户用电信息

分时电价环境是本研究的环境基础，本实例以广东省某地区实行的峰谷分时电价为例，具体时段划分如表2所示。

表2 广东省某地区分时电价方案

	低谷时段	平时段	高峰时段
时间区间	0:00~8:00	8:00~14:00 17:00~19:00 22:00~24:00	14:00~17:00 19:00~22:00
电价水平/(元kW·h)	0.314	0.628	1.036

由于家庭耗电费用是各电器的费用加权和，提供的节能策略中各电器使用方案相互独立，故本算例以一种电器为例进行分析。以广东某家庭两年内使用洗衣机的数据为例，该数据包括洗衣机开启时刻、关闭时刻信息，通过对开启时刻数据进行聚类分析可以得出：

1）本数据聚类出五个类簇，代表五种不同的用电习惯。

2）其中五个类簇中对象个数分别为90、60、30、12和8，后两类包含对象数目较少，属于稀少类，不具有代表性，故本文只考虑个数较多的前三个用电习惯做为研究对象进行分析。

3）计算类簇中心可得，用户第一用电习惯时间为20:15，第二用电习惯时间为8:10，第三用电习惯时间为14:40。

用户对洗衣机的用电习惯在分时电价环境下的分布情况如图2所示。

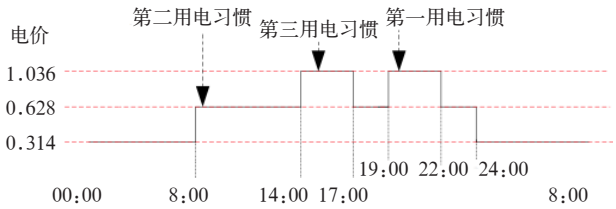


图2 某用户用电习惯与分时电价关系图

5.2 费用函数和用户满意度实例仿真

为了便于研究分析本文中的时间，以分钟为单位进行累计标记，00:00为时间起点，按分钟累计，如8:00记为480 min，则上述洗衣机的第一用电习惯的值为1 215，第二、第三用电习惯时间值为490、880。

（1）耗电费用函数S

假设洗衣机的使用时长为60 min，平均功率为400 W，电费计量单位1度=1 kW·h，如若每度电的费用为x元，则洗衣机耗电t分钟的用电费用为$(400/1\ 000)(t/60)x$。在广东省分时电价方案的背景下，洗衣机以时刻t为起点工作1 h的费用函数$S = 0.4\int_t^{t+60} Q(t)\,\mathrm{d}t$，其中，$Q(t)$为电价随时间$t$的变化函数$S$。利用Matlab对费用函数仿真结果如图3所示。

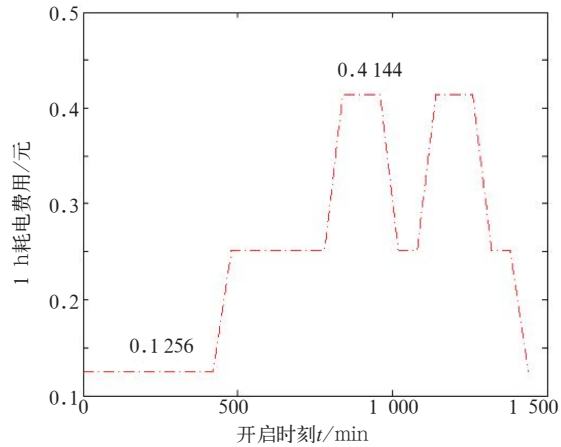


图3 洗衣机在不同时间点开启1 h的费用函数S

图3为分时电价环境下在不同时刻开启洗衣机运行1 h的耗电费用。由图3可知，在波谷电价时段运行洗衣机1 h的费用最低为0.125 6元；在波峰时段1 h的耗电费用最高为0.414 4元。两个费用相差很大。由此可见，在耗电费用空间内作适当调整可以满足减小费用的需求。

为了满足无量纲的要求，对费用函数进行归一化处理：$\overline{S}=(S-0.125\,6)/(0.414\,4-0.125\,6)$。

（2）用户满意度函数D

假设三个用电习惯的权重系数分别为0.6、0.3和0.1，则在任意时刻t开启洗衣机时，用户的满意度为

$$D=0.6|t-1\,215|+0.3|t-490|+0.1|t-880|$$

用Matlab对用户满意度进行仿真，如图4所示。

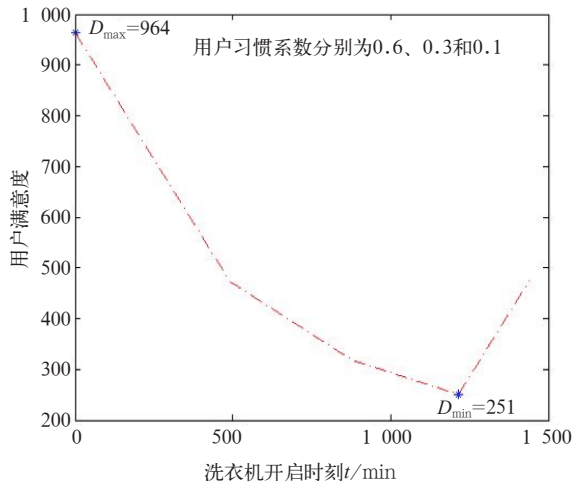


图4 用户习惯满意度D

图4中，t=1 215时刻函数的值最小，该时间点与用户的三个习惯开启时间点综合距离最小，如此刻开启洗衣机最容易为用户所接收，即用户满意度最大；在t=0即0:00开启洗衣机时，其行为与用户的用电行为习惯相差最大，故用户满意度最小。

用户满意度的最小值、最大值分别为D_{min}=251，D_{max}=964。

同样对D进行归一化处理：$\overline{D}=(D-251)/(964-251)$。

5.3 目标函数寻优

利用粒子群算法对目标函数寻优，求得不同方案下洗衣机的最佳开启时间，实验设定粒子群数目为10，由于粒子寻优范围为0～1 440，最大寻优速度V_{max}=20；学习因子$c_1=c_2=2$；最大迭代次数设为MaxIter=50。当迭代次数达到最大值时寻优终止。

图5～图7为m、n取不同的值时粒子群算法对目标函数的寻优结果。

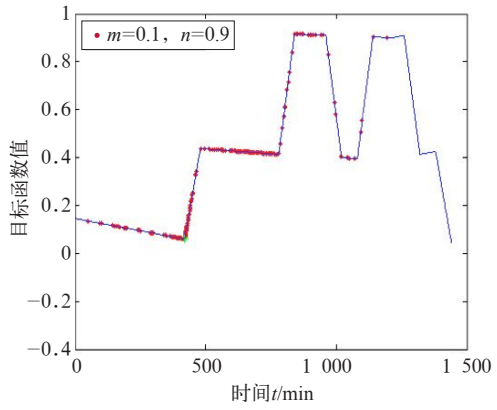


图5 当m=0.1，n=0.9时的粒子寻优结果

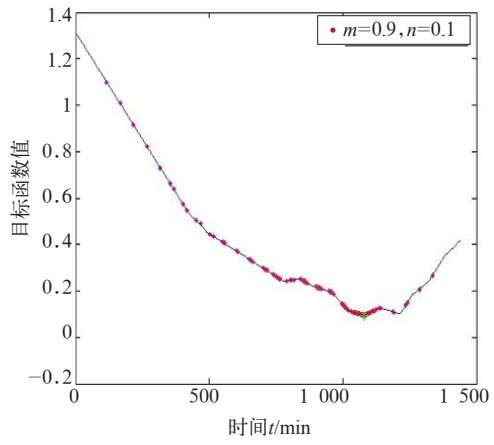


图6 当m=0.9，n=0.1时的粒子寻优结果

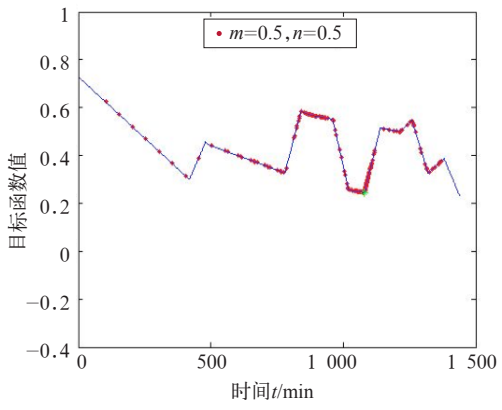


图7 当m=0.5，n=0.5时的粒子寻优结果

图5为m=0.1，n=0.9时的用电方案，由于权

重系数$m<n$，考虑用电习惯的影响，目标函数最小值取在波谷电价与平时段交界处，即洗衣机的最佳开启时间为t=420。此方案最佳大大减少了费用支出，但与用户的习惯用电时间差距最大。

图6为m=0.9，n=0.1时的用电方案，该方案比较充分地考虑了用户的用电习惯，对费用的节省要求不高，故最佳开启时间在第一用电习惯时间附近。此方案用户满意度最高，但节能效果不明显。

图7为m=0.5，n=0.5时的用电方案，此时最佳开启时间为t=1 080，该方案兼顾两个目标，在节省用电费用的同时，保证了用户的满意度，更易于被用户接受。

三种方案下对应具体情况如表3所示。

表3 不同节能效果对应的开启时间－电价表

m、n 的取值	最佳开启时间	开启时刻电价 /（元 /kW·h）
m=0.1，n=0.9	7:00	0.314
m=0.5，n=0.5	18:00	0.628
m=0.9，n=0.1	19:20	1.036

由此可见，本策略提供的用电方案与用户的习惯相比，大大节省了用电费用，同时兼顾了用户的用电行为习惯，效果良好。

6 结束语

所提出的这种节能策略，在考虑用电习惯的基础上通过调整节能效果生成多种用电方案供用户选择，体现了一种新的用电模式。该策略在分时电价的环境下，从用户的用电习惯出发，统计分析用户对电器的使用习惯，通过习惯用电时间和推荐用电时间的差来描述用户的满意度，结合分时电价下的用电费用制订用电策略模型，然后调节模型中满意度和费用的权重系数对应生成不同节能效果的用电方案。这种方法提供的用电方案不仅保证了用户的满意度，降低了用电成本，还起着引导用户用电向低峰时段靠拢的作用，从而实现削峰填谷的目的。

参考文献

[1] 黄海涛．居民分时阶梯电价联合优化模型研究[J]．电网技术，2012，36(10)：253-258．

[2] 方江晓，周晖，黄梅，等．基于统计聚类分析的短期风电功率预测[J]．电力系统保护与控制，2011，39(11)：67-73，78

[3] 谢江宏，王进平，上官明霞．一种智能小区用户用电模式的探索与研究[J]．华东电力，2013(1)：157-159．

[4] 王雁凌，程倩．基于节能降耗的发电权交易模型[J]．电力系统保护与控制，2010，38(18)：28-32．

[5] Abrahamse W，Steg L，Vlek C．The effect of tailored information goal setting and tailored feedback on household energy use energy related behaviors and behavioral antecedents [J]．Journal of Environmental Psychology，2007，27(4)：265-276．

[6] Fischer C．Feedback on household electricity consumption：a tool for saving energy[J]．Energy Efficiency，2008，1(1)：79-104．

[7] Silva D，Vieira S，Lima C，et al．Home energy saving adviser system power engineering[C]．Energy and Electrical Drives，2011 International Conference on Power Engineering，2011．

[8] 曾鸣，李娜，王涛，等．兼容需求侧资源的负荷预测新方法[J]．电力自动化设备，2013，33(10)：59-62，73．

[9] 张素香，刘建明，赵丙镇，等．基于云计算的居民用电行为分析模型研究[J]．电网技术，2013，37(6)：1542-1546．

（收稿日期：2018－06－21）EA

新能源集群动态划分研究

现有研究对新能源集群划分缺乏有效策略，以区域光伏发电站与风力发电站为研究对象，从电站集群聚合平滑效应产生机理展开研究。首先提出趋势不一致性系数来衡量光伏电站出力变化的不一致性，并以此刻画光伏电站的平滑效应。然后将趋势不一致性作为相似性的度量标准，采用层次聚类法对光伏电站进行集群划分。最后依据单个并网点下接入的新能源场站的种类不同，提出不同新能源集群划分方法。利用云南地区多个新能源场站，验证方案可行性和优异性。

陈世游　左为恒　李长春/重庆大学电气工程学院

陈世游/硕士研究生

关键词/Keywords
集群聚合·
趋势不一致系数·
层次聚类·
集群划分·

0　引言

随着全球化石能源的紧缺，清洁、可再生及蕴藏量大的新能源得到了快速的发展。但由于新能源具有间歇性、随机性和波动性的特点，输出功率的波动势必给大规模电站集中并网带来困难。因此，针对新能源集群科学划分平抑出力波动是解决新能源发电集中并网问题的基础与前提[1]。

现有文献对集群光伏电站特性研究较少，而同样具有随机性、间歇性和波动性的风力发电，其集群出力特性的研究相比之下较为成熟。文献[2]给出了风电场平滑效应的量化方法，并从风电场出力之间相关系数的角度解释了平滑效应产生的内在原因。文献[3-4]采用平滑效应系数来描述不同空间尺度下风电场的出力波动的变化规律。现有文献对于风电场平滑效应给出了定量化描述，进而能够对风电场集群进行科学划分。而光伏电站集群聚合出力特性的研究尚停留在定性分析层面，缺乏定量研究，无法对光伏电站集群定量划分[5-6]。在此基础上，无法给出含有光伏电站、风电站集群的科学划分方法。

本文针对现有问题，首先提出趋势不一致系数，来表征光伏电站集群平滑性产生机理；其次以趋势不一致系数作为相似性度量，对光伏集群电站进行层次聚类分析，给出集群划分方案；最后，以新能源场站次日的短期预测数据序列为输入，以满足电网拓扑约束、集群各站点出力互补、满足可控电源约束以及集群数目尽可能少为划分原则，根据光伏电站和风电场数量不同，分别给出不同集群划分方法。本文研究流程图如图1所示。

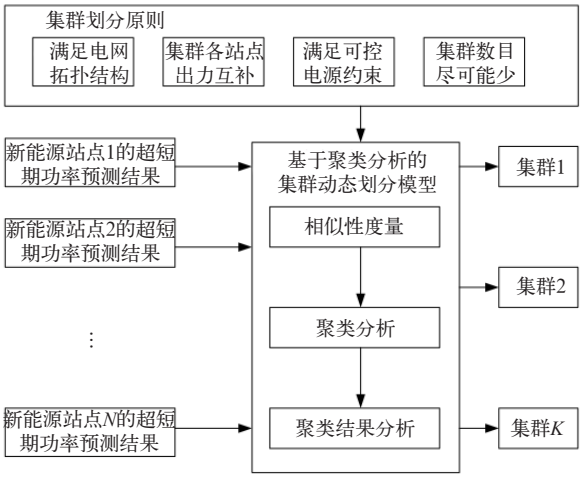


图1　集群划分方法技术路线

1　风力发电和光伏发电平滑效应分析

风电集群的平滑效应通常可用风电

场间的相关系数来解释不同于风电出力曲线，光伏发电出力曲线由固有波动和随机波动两部分叠加而成[7]，将相关性理论直接应用于解释光伏的平滑效应会存在一定问题。举例说明，图2给出了云南大理地区两个不同光伏电站同一天昼间的出力曲线，从图2中可以看出，这两条曲线相关性较差，而计算这两者的相关系数却高达0.956，这主要是因为光伏发电出力曲线的总体趋势均是先上升后下降的，实际光伏电站出力的空间相关性主要受到这种固有波动性出力的影响，而随机波动的影响作用相对较小，这就使得实际计算得到的相关性系数较大，不符合实际情况。

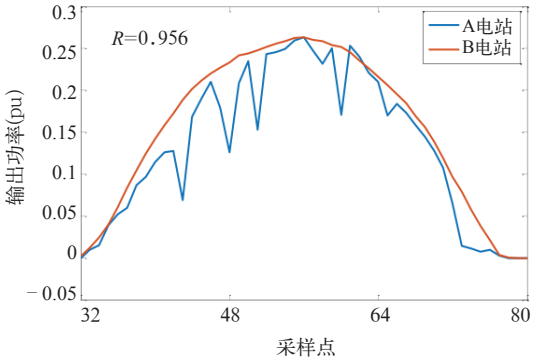


图2　两个光伏电站同一天出力曲线的相关系数

本文提出趋势不一致性系数K来衡量两个光伏电站出力变化的不一致性，并以此来解释光伏电站的平滑效应，其计算公式为

$$K=\sum_{i=2}^{n} f_i(P^1,P^2)/(n-1) \tag{1}$$

式中，P^1、P^2为两个不同的光伏电站的出力序列，n为昼间光伏出力不为零时的采样点个数。

$f_i(P^1,P^2)$的表达式为

$$f_i(P^1,P^2)=\begin{cases}1, & (P_i^1-P_{i-1}^1)(P_i^2-P_{i-1}^2)<0\\ 0, & (P_i^1-P_{i-1}^1)(P_i^2-P_{i-1}^2)\geqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

式中，$f_i(P^1,P^2)$为第$i-1$个采样点与第i个采样点之间两光伏电站出力曲线趋势的不一致性。如图3所示，两采样点间二者出力曲线趋势不一致时$f_i(P^1,P^2)$取1，反之取0。

不一致性系数K表示两出力曲线上趋势不一致的采样间隔个数占总间隔个数的比值，是一个大于0小于1的数，由于两出力曲线的固有波动具有

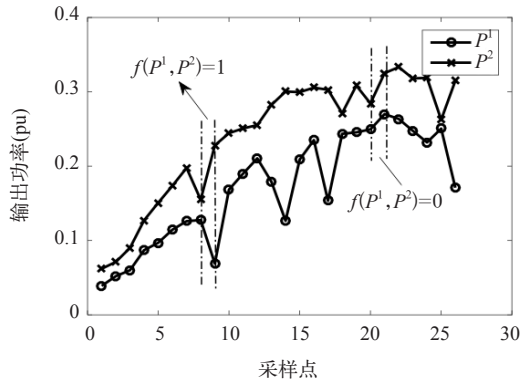


图3　不一致性示意图

相同的趋势，针对该波动不一致性系数为0，该指标仅反映随机波动的影响，因此可用来解释电站集群聚合的平滑效应，K值越大说明这两个光伏电站集群聚合的平滑效应越好。

需要说明的是，由于光伏出力曲线的总体趋势是先上升后下降的，因此不存在两条完全互补的出力曲线，换言之任意两条出力曲线的不一致性系数不可能达到1。经过大量实验计算，该指标的实际范围在0～0.5左右，因此当不一致性系数接近0.5时就可认为它们之间的相似性较差，互补性较好。

2　基于聚类分析的新能源场站集群动态划分方法

在对新能源场站进行集群划分时，需要遵循如下原则。对于原则一，这里将电网拓扑作为硬约束进行考虑，直接对同一并网点下的各个新能源场站进行聚类，这样保证最终得到的聚类结果满足电网拓扑的约束。根据原则二，需要使得划分得到的集群内各个电站的出力具有互补性。风电场与光伏电站互补性的度量标准不同。对于风电场，可以采用相关系数进行度量，相关系数越大表明两个出力序列的相似性越好，而互补性越差；反之，互补性越好。而对于光伏电站，则可以利用前文所提出的趋势不一致性系数进行度量，趋势不一致性系数越大表明互补性越好。为了保证集群出力的平滑，需要将互补性好的新能源场站归为一类，反之则聚成不同的类。在实际中单个并网点下接入的新能源场站的种类可能有

所不同，可考虑如下两种情况：第一，待划分的新能源场站以风电场为主，即风电场的数目多于光伏电站的数目；第二，待划分的新能源场站以光伏电站为主，即光伏电站的数目多于风电场的数目。下面分别对这两种情况的具体划分步骤进行阐述。

（1）以风电场为主的集群划分方法

对于这种情况，先将风电场按照出力互补性[8]进行划分，再将剩余光伏电站按照出力互补性原则分配到划分好的风电集群中，使得最终划分得到的集群平滑性最好。在进行风电场集群划分时，直接将相关系数[4]作为各个对象相似性的度量标准，相关性计算公式为

$$r_{i,j}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i^q-\overline{p^q})(p_i^h-\overline{p^h})}{\sqrt{\sum_{i=n}^{n}(p_i^q-\overline{p^q})\cdot\sum_{i}^{n}(p_i^h-\overline{p^h})}} \tag{3}$$

式中，p_i^q 为第q个风电场典型日第i点的预测功率；p_i^h 为第h个风电场典型日第i点的实际输出功率；$\overline{p^q}$、$\overline{p^h}$ 分别为两场站的日平均输出功率。

相关系数越小，表明对象越“相似”（需要说明的是，这里的相似是按照聚类目的而言的）。本文采用直接聚类法对风电站进行集群划分，即以全天96点出力功率作为特征输入，建立基于层次聚类方法的风电站集群划分模型。风电站集群划分模型可以将具有互补出力曲线形状的风电场出力曲线聚为一类，形成具有平滑出力的风电站集群。将风电场集群划分的结果记为$C=\{C_1,C_2,\cdots,C_k\}$，其中C_k为第k个集群的聚类中心。其可通过计算第k类内包含的所有风电场的出力曲线平均值得到。

本文采用CDI作为聚类评价指标对聚类结果进行评价[15]，其计算公式为

$$\mathrm{CDI}=\frac{1}{\overline{d(C)}}\sqrt{\sum_{i=1}^{K}\overline{d(x_i)}} \tag{4}$$

式中，$\overline{d(C)}$为各聚类中心之间的平均距离，距离采用欧式距离进行计算，设置聚类数目从2至x变化，分别计算这$x-1$次聚类结果中CDI指标，综合考虑CDI数值以及工程实际中的约束，选定合适的聚类数目以确定初步的集群划分结果。

在划分完风电集群后，需要将剩余的光伏电站分配到各个集群中，从而形成最终的新能源场站集群划分结果。光伏电站的分配同样需要遵循出力互补原则，这里提出一种逐群搜索的方法将光伏电站归并到风电集群中，具体实施方法如下：穷尽所有可能的归并方案，分别计算每种归并方案的平均波动率，即分别计算各个集群的功率波动率，再将所有集群功率波动率的均值作为每种归并方案的平均波动率。取平均波动率最小所对应的归并方案作为最终的新能源集群划分结果。在将所有的新能源电站划分成若干集群后需要为每个新能源集群配置一定的可控电源（火电或水电），这是为了保证在新能源集群功率出现大幅度变化的情况下还能维持稳定的输出功率，可控电源的配置需要根据新能源集群的总容量以及日最大功率波动来决定，即可控电源的容量必须大于日最大波动功率。

（2）以光伏电站为主的集群划分方法

对于以光伏电站为主的新能源集群，先将光伏电站按照出力互补性进行划分，再将剩余的风电场按照出力的原则进行分配。在进行光伏电站集群划分时，这里提出趋势不一致性距离的概念，其计算公式为

$$\overline{S}=\frac{S-S_{\min}}{S_t} \tag{5}$$

式中，KD为趋势不一致性距离；K_t为趋势不一致性系数。

由式（5）可知，两个光伏功率序列的趋势性一致性距离越小，表明两者的互补性越好。因此将趋势不一致性距离作为相似性的度量标准，采用直接聚类法对光伏电站进行集群划分，即以全天96点出力功率作为特征输入，建立基于层次聚类方法的光伏电站集群划分模型。该模型可以将具有互补出力曲线形状的光伏出力曲线聚为一类，形成具有平滑出力的光伏集群。

类似地，在划分完光伏集群后，需要将剩余的风电场分配到各个集群中，从而形成最终

的新能源场站集群划分结果。风电场的分配同样需要遵循出力互补原则，仍然采用逐群搜索的方法将风电场归并到光伏集群中，再将可控电源分配到各个新能源集群中，形成最终的集群划分结果。

3 大理新能源集群划分实例

以大理地区220 kV海东变电站下杨梅坪、西村、老鹰岩、四角山、干塘子、干海子和岩溯七个光伏电站以及巨龙山一期、巨龙山二期两座风电场形成的新能源集群为例，说明所提出的集群划分方法的合理性。该新能源集群以光伏为主，其电网拓扑图如图4所示。分别采集得到这九座新能源场站的实际出力以及预测出力数据，数据采集时间间隔为15 min，数据采集时间为2016年12月1日至2017年11月31日。

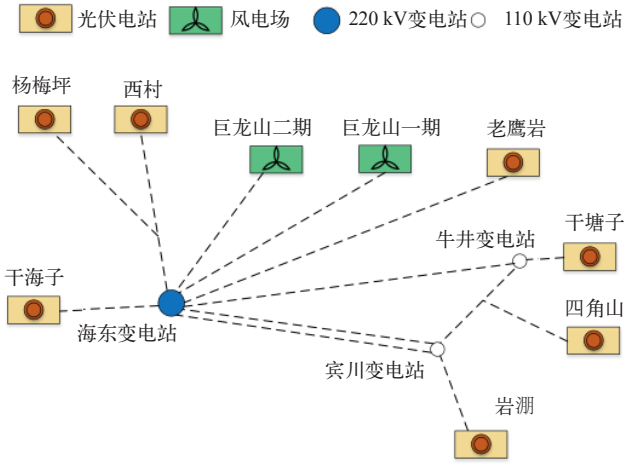


图4 大理地区海东变电站下新能源集群接线图

由于该集群以光伏电站为主，因此先对光伏电站按照出力曲线的互补性进行聚类，再将剩余的风电场按照出力互补性原则分配到上述聚类得到的集群中，形成最终的新能源电站集群划分结果。选取这七座光伏电站某典型日的短期预测功率序列作为输入，以全天96个功率采样点作为电站的输出功率特征，构成7×96的输出功率特征矩阵，以各光伏电站日输出功率序列的趋势不一致性距离作为各电站间的距离量度，建立基于层次聚类算法的光伏电站集群划分模型，七座光伏电站出力曲线的趋势不一致性距离如图5所示，层次聚类模型聚类结果如图6所示。

	干海子	干塘子	老鹰岩	四角山	西村	杨梅坪	岩溯
干海子	1.000	0.792	0.750	0.781	0.813	0.792	0.823
干塘子	0.792	1.000	0.823	0.844	0.698	0.771	0.771
老鹰岩	0.750	0.823	1.000	0.813	0.750	0.760	0.792
四角山	0.781	0.844	0.813	1.000	0.792	0.865	0.802
西村	0.813	0.698	0.750	0.792	1.000	0.760	0.865
杨梅坪	0.792	0.771	0.760	0.865	0.760	1.000	0.771
岩溯	0.823	0.771	0.792	0.802	0.865	0.771	1.000

图5 各光伏电站间趋势不一致性距离计算结果

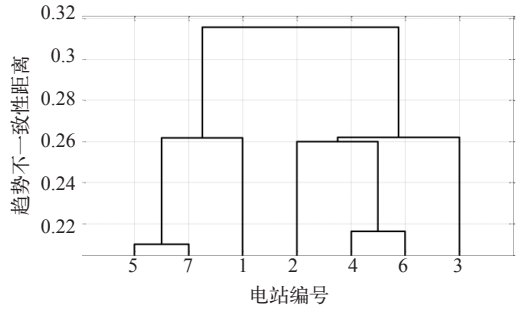


图6 某典型日新能源场站划分结果

同理，分别计算各个聚类数下的CDI指标，最终选择聚类数为2，完成光伏集群划分后，再利用逐群搜索法将剩余两个风电场分配到这两个光伏集群中，最终的集群划分结果如下表所示。

表 海东变电站新能源集群划分结果

集群编号	集群所包含的场站名称
集群一	干海子、西村、岩溯和巨龙山二期
集群二	杨梅坪、老鹰岩、干塘子、四角山和巨龙山一期

各个集群内各个新能源场站在典型日的出力曲线分别如图7、图8所示。划分得到的两个集群的总出力如图9所示。

从上述结果可以看出，各集群内光伏电站均与风电场表现出良好的互补特性，两个集群的总

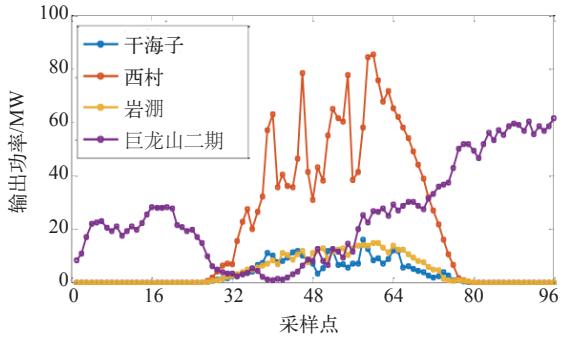


图7 集群一内各新能源场站出力曲线

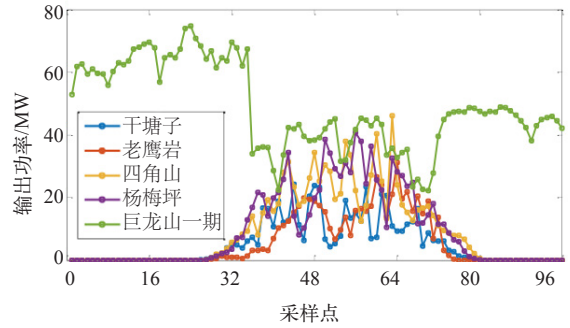


图8 集群二内各新能源场站出力曲线

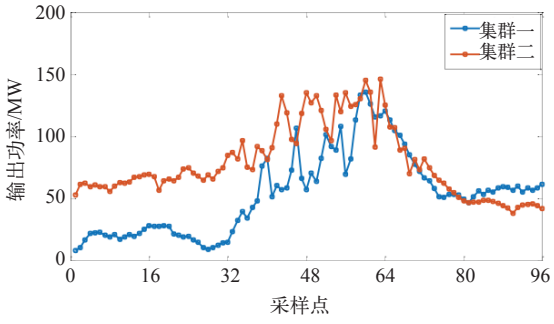


图9 两个集群的总出力曲线

出力相较于单个新能源站点更加平滑，集群的可控性有了很好的提升，有利于实施集群协调控制。

4 结束语

对多个光伏电站聚集后的平滑效应进行分析，提出了趋势不一致性系数来衡量光伏电站间出力的互补性，将各光伏电站日输出功率序列的趋势不一致性进行相似性度量计算，将计算结果作为各电站间的距离量度，建立基于层次聚类算法的光伏电站集群划分模型。依据单个并网点下接入的新能源场站的种类不同，采用不同集群划分方法。经过集群划分后，每个集群的出力相对于单个电站的出力在平滑性上都有不同程度的提升，将可控电源配置到各个新能源集群，对促进新能源消纳具有重要意义。

参考文献

[1] 王长贵，王斯成．太阳能光伏发电技术[M]．2版．北京：化学工业出版社，2009．

[2] 申颖，赵千川，李明扬．多时空尺度下风电平滑效应的分析[J]．电网技术，2015，39(2)：401-405．

[3] 崔杨，穆钢，刘玉，等．风电功率波动的时空分布特性[J]．电网技术，2011，35(2)：110-114．

[4] 李剑楠，乔颖，鲁宗相，等．多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J]．中国电机工程学报，2013，33(13)：53-61．

[5] 张曦，康重庆，张宁，等．太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]．电力系统自动化，2004，38(6)：6-13．

[6] Thomas E Hoff，Richard Perez．Quantifying PV power output variability[J]．Solar Energy，2010，84(10)：1782-1793．

[7] 卞海红，郑维高，林章岁，等．集群风电场出力统计指标建模与应用[J]．电力自动化设备，2015，35(12)：21-27．

[8] 姜文玲，王勃，等．多时空尺度下大型风电基地出力特性研究[J]．电网技术，2017，41(2)：492-499．

(收稿日期：2018－04－17)EA

基于D-S证据理论的光伏发电量预测

结合北京地区实际环境因素和某光伏并网发电系统运行数据，对光伏系统发电功率进行预测。利用决策树算法，设环境温度、组件温度和辐射量为系统特征，发电量为决策标签，得到特征的分类主次关系，进而将原始数据划分为数个集合作为D-S证据理论中的证据。提取集合中的权重系数并将其等效为证据理论中的基本信任分配函数，并进行证据的融合，最终得到预测结果。最后对比分析经过D-S证据理论融合的预测数据和平均值法得到的预测结果，并计算分析绝对误差和相对误差，验证了D-S证据理论预测的准确性，所预测的光伏发电功率可指导光伏并网发电生产。

李英姿[1] 曾万昕[1] 戴 玉[2] 郭俊杉[3] 胡亚伟[4]/1.北京建筑大学电气与信息工程学院 2.中国建筑设计院有限公司 3.国网北京市电力公司房山供电公司 4.北京电力工程有限公司

李英姿/教授

关键词/Keywords

决策树·
光伏发电量·
D-S证据理论·
组件温度·
环境温度·
辐射量·

0 引言

截至2017年末，我国光伏装机容量达130 GW，是光伏新增容量首次超过火电容量(46 GW)的年份。据国家能源局估计，2017年我国风电和光伏发电的总限电量为49.2 TW·h。这意味着可再生能源发电资产所有者至少因为限电损失了307亿元人民币。要提高光伏发电的使用率，降低限电率，就要解决好光伏功率预测问题。目前的发电功率预测手段可以被分为四大类，即基于数值天气预报或太阳辐照度预测的物理原理预测法，以回归分析时间序列为主的统计预测法，包括灰色模型、马尔科夫的不确定性理论预测法，利用神经网络、支持向量机的智能预测法。

光伏发电系统受环境以及其组件特性等多因素的影响，其出力有着随机性的特点。要综合考虑预测时刻的气象环境等因素和历史光伏发电数据。传统的预测方法很难对其进行精准的预测，因此研究新的预测方法成为必然[1]。目前比较常用的预测方法有数值天气预报法、灰色理论和BP神经网络等[2]。数值天气预报的主要思想是通过物理模型结合数值天气预报预测有效的辐射量，进而预测光伏发电量[3]，这种方法依赖于其他的数据采集装置；灰色系统理论是以针对既不是完全明确也不是完全未知的系统进行建模研究，进而来进行预测[4]，这一预测方法不要求数据的完备，但是预测准确度会受到限制；基于BP算法的多层前馈神经网络是一种智能方法，现在得到广泛应用[5]，但是可能出现局部最优解问题。

本文将D-S证据理论应用于决策树算法，并结合2014年1月1日~2017年12月31日北京地区的天气状况与北京市西城区某5.3 kW光伏并网发电系统的实际检测数据，用2014～2016年包含各个影响因素的光伏系统实测数据作为决策树的输入，分类得出的数据组再利用D-S证据理论进行数据融合，得到2017年预测结果。本文使用Python计算机工具，并主要使用Pandas和Numpy函数库编程实现运算。针对预测结果进行误差分析，针对每日不同时刻和同一时刻不同日期进行对比分析，并最终得出结论。

1 基本理论

1.1 决策树理论

决策树[6-7]是一种常见的机器学习方法，作为分类工具被广泛使用。本文将

决策树应用于对光伏发电系统的历史数据及环境参数的分类处理中，将光伏发电功率作为分类标签，环境影响因素作为条件属性分析影响因素的重要程度，并得到分类结果。

决策树对历史数据分类的步骤为如下。

1）计算信息熵。信息熵是度量样本集合纯度最常用的一种指标，设符号x_i的信息被定义为$l(x_i)=\log_2 p(x_i)$，其中$p(x_i)$为这一信息的概率。则信息熵为

$$H=-\sum_{i=1}^{n}p(x_i)\log_2 p(x_i) \tag{1}$$

式中，n为类别的数量。

2）划分数据集。根据不同的特征计算得到的信息熵，比较之后剔除掉对数据集纯度提成最大的特征。

3）建立决策树。循环上述步骤直到分析完每一个特征，并绘图建立决策树。

1.2 D-S证据理论

（1）D-S证据基本理论

D-S证据理论[8]建立了命题和结论一一对应的关系，用D-S证据理论合成规则代替了贝叶斯公式来更新信任函数。D-S证据理论用“识别框架”表示所感兴趣的命题集，若识别框架在集函数m:2^{Θ}→[0,1](其中，2^{Θ}为Θ的幂集)上满足

$$\begin{cases} m(\varnothing)=0 \\ \sum m(A)=1 \\ A\subset\Theta \end{cases} \tag{2}$$

式中，m为框架Θ上的基本概率指派函数或基本可信度分配；若∀A⊆Θ，$m(A)$称为A的基本可信数；若$m(A)>0$，则称所有满足该条件的集合A为m的焦点元素，并将与基本可信度分配m相对应的信度函数记为Bel。

（2）D-S证据理论合成法则

D-S合成法则是一个反映证据联合作用的法则。若证据不是完全冲突的，则可以利用 D-S合成法则计算出一个新的信任函数。

设Bel_1、Bel_2是同一个识别框架上两个信任函数，m_1、m_2分别为其对应的基本可信度分配，对应焦元分别为A_i和B_j。设$K=\sum_{A_i\cap B_j=A}m_1(A_i)m_2(B_j)<1$，则D-S合成法则为

$$m(A)=\begin{cases}\dfrac{\sum_{A_i\cap B_j=A}m_1(A_i)m_2(B_j)}{1-K} & A\neq\varnothing \\ 0 & A=\varnothing\end{cases} \tag{3}$$

式中，K为两个证据的冲突程度，其值越大表示两个证据冲突越大，K=1表示两个证据矛盾不能合成。

$1/(1-K)$称为归一化因子，其作用是避免证据合成时空集得到非零的概率。若待合成的函数多于两个，则可以采用上述方法将前一步合成结果与下一个函数进行合成，直至所有函数合成完毕。

（3）基于证据理论的权重融合

1）权重提取。首先要提取权重，对上述决策树分类得到的数组命名为D_j，由数个数组组成模型的识别框架Θ={D_1, D_2, …, D_n}($n>0$)。设每一个时刻的环境参数和光伏发电功率数据就是一条证据。假设有s个时刻的数据，就有证据集。表示证据支持相应数组d_j的程度，其中i=1, …, s, j=1, …, n。对于模型识别框架，数据的相对误差越小，相应的权值应该越大。本文权值的计算方法为

$$w_i(d_j)=\frac{1/\varepsilon_i(d_j)}{\sum_{j=1}^{n}[\varepsilon_i(d_j)]} \tag{4}$$

$$\varepsilon_i(d_j)=\frac{\left|x_i-x_i^{'}(d_j)\right|}{\left|x_i\right|} \tag{5}$$

式中，$\varepsilon_i(d_j)$为第i个时刻来自第j个数据组的相对误差；x_i为第i个时刻的实测值；$x_i^{'}(d_j)$为上一个时刻的实测值计算。

2）权重融合。在发电量预测融合模型中，对于预测准确度高的预测值赋予较大的权重，对于预测准确度低的预测值赋予较小的权重，此过程类似于证据理论中基本可信度函数的分配，通过类比的思想，模型权重可视为证据理论的基本信度值。

对于四个决策树模型预测值$\hat{d}_1$、$\hat{d}_2$、$\hat{d}_3$和$\hat{d}_4$，

对应权重分别为w_1、w_2、w_3和w_4，在识别框架$\Theta=\{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3, \hat{y}_4\}$上建立基本信任分配函数$m(\hat{d}_i)$，其对应的信度值为$m(\hat{d}_i)=w_i(i=1, 2, 3, 4)$。假设四个发电量预测值所对应的信度值为$m(\hat{d}_i)=(i=1, \cdots, s; j=1, \cdots, n)$。假设以五个时刻进行合成，最终的到的信度值为$m_4(\hat{d}_1)$、$m_4(\hat{d}_2)$、$m_4(\hat{d}_3)$和$m_4(\hat{d}_4)$。假设第五个时刻的发电量预测值为$\hat{d}_1^5$，$\hat{d}_2^5$，$\hat{d}_3^5$，$\hat{d}_4^5$，则最终合成结果表示为[9-12]

$$\hat{d}_4 = m_4(\hat{d}_1)\hat{d}_1^5 + m_4(\hat{d}_2)\hat{d}_2^5 + m_4(\hat{d}_3)\hat{d}_3^5 + m_4(\hat{d}_4)\hat{d}_4^5 \quad (6)$$

（4）基于D-S证据理论的光伏发电量预测方法

基于D-S证据理论的光伏发电量预测的计算步骤如下。

1）步骤1。根据日期时间索引，确定历史数据的预测空间Data1。

2）步骤2。以待预测时刻的环境条件参数建立决策树分类原始数据D_0，以发电功率P作为决策标签，环境温度T_1、组件温度T_2、辐射量R和环境湿度W作为属性条件，进行决策树分类，并得到四个预测矩阵d^1、d^2、d^3和d^4。设每个矩阵中有s个时刻，则有

$$d^i = \begin{bmatrix} d_1, r_1, t_{1.1}, t_{2.1}, w_1, p_1 \\ d_2, r_2, t_{1.2}, t_{2.2}, w_2, p_2 \\ \vdots \vdots \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ d_s, r_s, t_{1.s}, t_{2.s}, w_s, p_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

3）步骤3。对四个矩阵进行数据预处理，删掉粗大误差，并依据时间最近原则将这四矩阵补齐成为行相等的矩阵$D^{1'}$、$D^{2'}$、$D^{3'}$和$D^{4'}$。

4）步骤4。取出上述矩阵中的发电量预测值，根据式（3）计算出权值矩阵$\boldsymbol{M}$。

5）步骤5。迭代计算出权值矩阵最终权值。

$$m_j(\hat{d}_i):\{m_s(\hat{d}_1),\ m_s(\hat{d}_2),\ \cdots,\ m_s(\hat{d}_n)\} \quad (8)$$

6）步骤6。根据式（6）迭代计算出最终预测值。

图1为基于D-S证据理论的光伏发电量预测流程图。

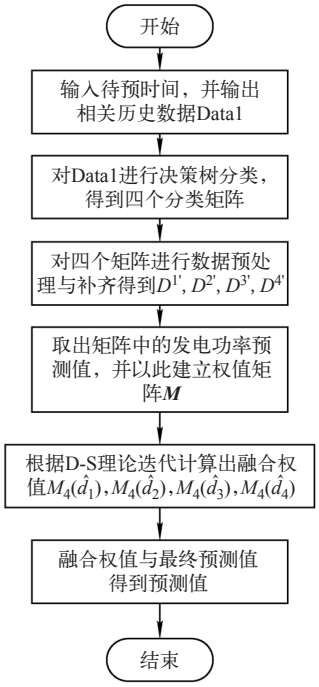


图1 基于D-S证据理论的光伏发电量预测流程图

2 算例分析

以北京市西城区某5.3 kW光伏并网发电实验设备2014~2017年的实际环境参数和设备运行数据为依据。

2.1 案例数据

表1为待预测时刻t_0（以2017年10月24日15:25为例）的环境和设备数据。

表1 2017年10月24日15:25的环境和设备数据

日期	辐射量 R /(W/m²)	环境湿度 W (%)	组件温度 T_1/℃	环境温度 T_2/℃
2017-10-24 15:25	82.59	42.01	19.80	18.78

表2为待预测时刻前1 h的历史数据。在此表中确定辐射量最接近待预测时刻的一条数据，以此来确定最接近真值的功率值。

表2 待预测时刻前1 h数据

时间	辐射量 R/(W/m²)	环境湿度 W (%)	组件温度 T_1/℃	组件温度 T_2/℃	发电功率 P_0/kW
14:25	296.89	42.01	26.03	19.96	0.77
14:30	275.77	42.01	25.81	19.85	0.74
14:35	251.54	42.02	25.47	19.84	0.70
14:40	231.39	42.02	24.95	19.74	0.65
14:45	210.77	42.02	24.12	19.68	0.60
14:50	203.29	42.02	23.90	19.69	0.57
14:55	182.83	42.01	23.39	19.58	0.53
15:00	131.29	42.01	22.45	19.49	0.49
15:05	113.32	42.01	21.26	19.25	0.47
15:10	107.49	42.01	20.41	19.05	0.44
15:15	100.18	42.02	19.77	18.96	0.41
15:20	90.85	42.01	19.39	18.83	0.36

表2中得到功率接近值 $\tilde{P}_0$=0.36 kW，再由误差标准得到在 $\tilde{P}_0$ 的15%范围内为合格的功率值，以此标准来建立决策树。搜索前三年的表格得到的决策表格如表3所示。由于该表格行数达到两万余行，本文仅部分展示。

表3 决策树决策分类表格

日期	辐射量 R（W/m²）	环境湿度 W（%）	组件温度 T_1/℃	环境温度 T_2/℃
2014-10-09 12:00	302.87	42.012	28.34	22.17
2014-10-09 12:05	302.41	42.007	28.26	22.28
2014-10-09 12:10	301.38	42.012	28.56	22.38
2014-10-09 12:15	298.36	42.012	28.65	22.41
2014-10-09 12:20	297.01	42.012	28.38	22.23
2014-10-09 12:35	290.65	42.012	28.47	22.60
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2016-11-08 15:40	43.73	42.003	10.81	11.60
2016-11-08 15:45	38.31	42.008	10.58	11.50
2016-11-08 15:50	32.23	42.013	10.35	11.46
2016-11-08 15:55	27.19	42.017	10.03	11.34
2016-11-08 16:00	22.18	42.017	9.71	11.16

2.2 决策树计算

表格以最终功率预测规范的功率值为标签，逐步进行决策树分类计算，其分别将辐射量在待预测时刻10 W/m²，组件温度和环境温度在待预测时刻2 ℃，湿度在1%范围内。决策树决策分类图如图2所示。

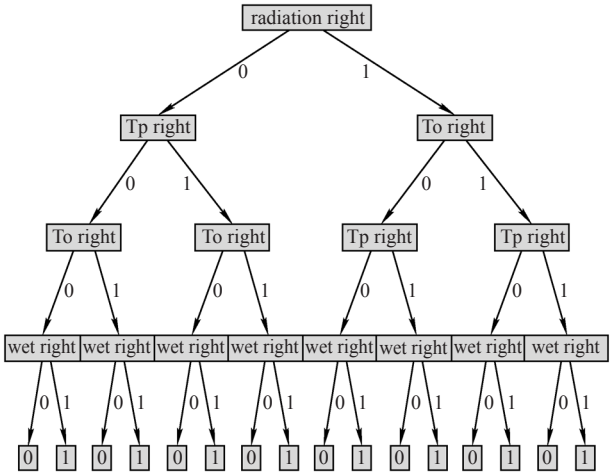


图2 决策树分类图

每个时刻的预测表格都不尽相同，但是经过多次决策分类发现辐射量为主要条件，而环境湿度的数据对决策分类并没有太大影响，于是按照辐射、量组件温度和环境温度这三个条件的不同取值得到四个矩阵。如表4所示。

表4 决策树分类表格

决策条件	辐射量 R/（W/m²）	组件温度 T_1/℃	环境温度 T_2/℃
111	在范围内	在范围内	在范围内
110	在范围内	在范围内	在范围外
101	在范围内	在范围外	在范围内
100	在范围内	在范围外	在范围外

将得到的矩阵按照时间最近原则补齐，得到下列四个数表，如表5所示。

表5 决策树处理结果

决策条件	日期	时间	辐射量 R/（W/m²）	组件温度 T_1/℃	环境湿度 W（%）	发电功率 P_0/kW	发电功率是否在范围内
	2016-10-26	15:10:00	85.952	18.239	17.013	0.358	1
	2016-10-25	15:40:00	77.378	18.870	18.243	0.292	0
111	2016-10-25	15:35:00	87.120	19.241	18.459	0.355	1
	2016-10-25	15:20:00	76.709	19.858	18.800	0.279	0
	2016-10-23	15:30:00	77.397	18.119	17.423	0.325	1
	2016-10-18	14:20:00	83.791	21.913	20.387	0.384	1
	2016-10-18	14:25:00	74.153	21.650	20.433	0.323	1
110	2015-11-02	15:10:00	78.734	22.952	20.370	0.469	0
	2015-11-02	15:15:00	73.883	21.491	20.191	0.434	0
	2015-10-19	15:40:00	83.883	21.487	20.604	0.314	1
	2016-10-26	15:15:00	73.791	17.504	16.735	0.314	1
	2014-11-04	15:15:00	87.486	18.533	16.393	0.422	0
101	2014-11-04	15:20:00	80.965	17.560	16.387	0.368	1
	2014-10-28	15:05:00	80.391	19.667	16.338	0.315	1
	2014-10-27	15:25:00	82.969	18.138	16.346	0.368	1
	2016-11-08	15:10:00	72.688	12.213	12.091	0.270	0
	2016-11-08	15:05:00	76.809	12.777	12.300	0.315	1
100	2016-11-08	15:00:00	80.320	13.387	12.478	0.370	1
	2016-11-08	14:55:00	86.021	14.491	12.483	0.459	0
	2016-11-06	14:00:00	87.832	12.136	11.576	0.434	0

2.3 D-S证据融合计算

首先得到功率预测矩阵

$$P_1=\begin{bmatrix}P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14}\\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24}\\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34}\\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44}\\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.358 & 0.384 & 0.314 & 0.270\\ 0.292 & 0.323 & 0.422 & 0.315\\ 0.355 & 0.469 & 0.367 & 0.370\\ 0.279 & 0.434 & 0.315 & 0.459\\ 0.325 & 0.314 & 0.368 & 0.434\end{bmatrix} \tag{9}$$

由上可知功率近似值为 $\tilde{P}_0$=0.36 kW，由此计算上述矩阵的相对误差（此处提取功率值计算），即

$$\varepsilon(P_1)=\frac{\left|P_1-\tilde{P}_0\right|}{\left|P_1\right|}$$

$$\varepsilon(P_1)=\begin{bmatrix}\varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} & \varepsilon_{14}\\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{24}\\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} & \varepsilon_{34}\\ \varepsilon_{41} & \varepsilon_{42} & \varepsilon_{43} & \varepsilon_{44}\\ \varepsilon_{51} & \varepsilon_{52} & \varepsilon_{53} & \varepsilon_{54}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.013\,3 & 0.056\,4 & 0.136\,9 & 0.256\,1\\ 0.195\,3 & 0.111\,5 & 0.162\,1 & 0.133\,4\\ 0.022\,6 & 0.290\,4 & 0.012\,5 & 0.017\,8\\ 0.233\,3 & 0.194\,9 & 0.134\,0 & 0.263\,4\\ 0.106\,6 & 0.136\,6 & 0.013\,0 & 0.195\,3\end{bmatrix} \tag{10}$$

进而计算出权值矩阵 $m(\hat{P}_i)=w_i(i=1,2,3,4)$

$$m(\hat{P}_j)=\frac{1/\varepsilon(\hat{P}_j)}{\sum_{j=1}^{n}[\varepsilon(\hat{P}_j)]}$$

$$w=\begin{bmatrix}w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14}\\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24}\\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34}\\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44}\\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.358\,4 & 0.383\,7 & 0.313\,5 & 0.270\,2\\ 0.292\,3 & 0.322\,8 & 0.422\,1 & 0.314\,8\\ 0.355\,0 & 0.468\,7 & 0.367\,8 & 0.369\,7\\ 0.278\,5 & 0.434\,0 & 0.314\,6 & 0.459\,0\\ 0.324\,5 & 0.313\,7 & 0.368\,0 & 0.434\,2\end{bmatrix} \tag{11}$$

逐一合成权值得到最终权值数组为

$$w(\hat{P}_i)=[m(\hat{P}_1),m(\hat{P}_2),\cdots,m(\hat{P}_4)]$$

$$w(\hat{P}_i)=[0.670\,1\ 0.025\,8\ 0.246\,9\ 0.057\,2] \tag{12}$$

与最后的预测值合成得到预测结果为

$$\begin{aligned}\hat{P}_4&=m_4(\hat{P}_1)\hat{P}_1^5+m_4(\hat{P}_2)\hat{P}_2^5+m_4(\hat{P}_3)\hat{P}_3^5+m_4(\hat{P}_4)\hat{P}_4^5\\&=0.670\,1\times0.325+0.025\,8\times0.314+0.246\,9\times\\&\quad 0.368+0.057\,2\times0.434=0.341\,3\end{aligned} \tag{13}$$

则2017年10月24日15:25的预测结果为 $\tilde{P}_0$=0.341 3 kW，实测值为P=0.327 3 kW。

3 误差分析

根据以上预测方法对一天中的不同时刻进行预测，选取的时间为2017年10月24日9:00~16:00的每个整点时刻。如图3所示。

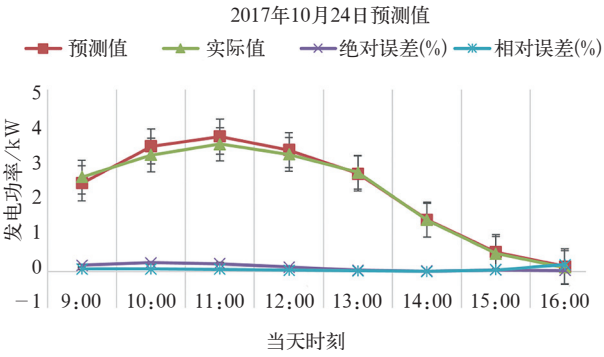


图3 2017年10月24日预测及误差分析图

从图3中可以看出，10:00和11:00的误差相对较大，最大的绝对误差为11:00的0.214 5 kW，最大相对误差为9:00的7.8%，均能达到规范要求。将通过D-S证据理论融合的数据与算数平均值的预测数据进行分析比较，并给出各自的误差计算如表6、表7所示。

表6 不同时刻预测结果

时刻	实测功率/kW	D-S融合预测功率/kW	绝对误差/kW	相对误差(%)
9:00	2.598 5	2.426 7	0.171 9	6.613 4
10:00	3.205 2	3.439 8	−0.234 6	−7.319
11:00	3.498	3.712 5	−0.214 5	−6.133
12:00	3.225 3	3.341 5	−0.116 2	−3.602
13:00	2.721 6	2.686 8	0.034 8	1.278 7
14:00	1.413 2	1.418 1	−0.004 9	−0.347
15:00	0.489 7	0.534 4	−0.044 8	−0.914 1

表7 2017年10月24日平均预测结果

时刻	实测功率/kW	D-S融合预测功率/kW	绝对误差/kW	相对误差(%)
9:00	2.598 5	2.923 6	−0.325 1	−12.511
10:00	3.205 2	3.362 1	−0.156 9	−4.894
11:00	3.498	3.756 5	−0.258 5	−7.39
12:00	3.225 3	3.349 3	−0.124	−3.844
13:00	2.721 6	2.733 5	−0.012	−0.44
14:00	1.413 2	1.372	0.041 2	2.918 1
15:00	0.489 7	0.567 9	−0.078 2	−15.973

针对10月的气候特征，上午11:00应该是辐射量较大的时刻，然而可能会出现辐射量很小的时刻，这种情况与天气有关。对比经过数据融合的数据与平均值的数据可得，经过数据融合的预测绝对误差和相对误差均优于平均值预测数据，而且在规定的预测范围内保证了预测准确度，并具

有更高的稳定性。

4 结束语

本文采用的预测方法，是基于不确定性理论的D-S证据理论针对光伏发电受环境、设备因素等不确定因素影响的发电量预测，采用了数据挖掘中的决策树算法，全面综合历史数据，利用Python程序实现算法，得到预测结果。

从预测结果与误差分析来看，所采用的预测方法具有一定的预测准确度，满足NB/T 32011—2013《光伏发电站功率预测系统技术要求》规范要求。

参考文献

[1] 龚莺飞，鲁宗相，乔颖，等．光伏功率预测技术[J]．电力系统自动化，2016，40(4)：140-152

[2] 张玉，张振涛，莫寒．光伏发电的预测综述[J]．制造业自动化，2015，37(11)：27-30．

[3] Heinrich Morf．The stochastic two-state cloud cover model STSCCM [J]．Solar Energy，2011 (85)：985-999．

[4] 王守相，张娜．基于灰色神经网络组合模型的光伏短期出力预测[J]．电力系统自动化，2012，36(19)：37-41．

[5] 姚仲敏，潘飞，沈玉会，等，基于 GA-BP和POS-BP神经网络的光伏电站出力短期预测[J]．电力系统保护与控制，2015，43(20)：83-89．

[6] 周志华．机器学习[M]．北京：清华大学出版社，2016．

[7] Peter harrington machine learing in action [M]．United States of America：Manning Publications，2012．

[8] 杨风暴，王肖霞．D-S证据理论的冲突合成方法[M]．北京：清华大学出版社，2010．

[9] 丛林虎，徐延学，荀凯．基于D-S证据理论的导弹制导控制系统的联合最小二乘支持向量机预测模型[J]．兵工学报，2015，36(8)：1466-1472．

[10] 陈毅波，郑玲，姚建刚．基于粗糙集理论与D-S证据理论改进的多元回归负荷预测方法[J]．电力系统保护与控制，2016，44(6)：62-67．

[11] 吴京秋，孙奇，杨伟，等．基于D-S证据理论的短期负荷预测模型融合[J]．电力自动化设备，2009，29(4)：66-70．

[12] 刘亚南，卫志龙，朱艳，等 基于D-S证据理论的短期风速预测模型[J]．电力自动化设备，2013，33(8)：131-136．

(收稿日期：2018－04－04)EA

(上接第90页)

策[J]．信息安全与通信保密，2014(6)：62-63．

[10] 王继业，孙利民，李晔，等．电力工控系统攻击仿真验证关键技术研究[J]．电力信息与通信技术，2017(6)：9-14．

[11] Baiardi F，Telmon C，Sgandurra D．Hierarchical，model-based risk management of critical infrastructures[J]．Reliability Engineering and System Safety，2009，94(9)：1403-1415．

[12] Esmalifalak M，Ge Shi，Zhu Han，et al．Bad data injection attack and defense in electricity market using game theory study[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2013，4(1)：160-169．

[13] Eom Jung-Ho，Han Young-Ju，Park Seon-Ho．Active cyber attack model for network system's vulnerability assessment[C]．2008 International Conference on Information Science and Security，Seoul，2008．

[14] 王德文，周青．一种电力设备状态监测大数据的分布式联机分析处理方法[J]．中国电机工程学报，2016(19)：5111-5121．

[15] 赵峰，乌大鹏．电力系统高速数据采集系统设计[J]．数字技术与应用，2013(3)：163．

[16] Jia Zhiwei，Wang Lijun，Zhang Jinchuan et al．High efficiency，low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]．Nanoscale Research Letters，2017，12(1):281．

(收稿日期：2018－08－14) EA

提升地区电网母线功率平衡合格率的方法探讨

母线功率平衡合格率是基础数据质量的重要体现，其维护与调试目的是为了提升基础数据质量及为其他高级应用功能奠定基础，也是调度自动化专业的一项基础工作，行业和企业标准对母线功率平衡合格率有明确的要求。首先对母线功率平衡合格率指标简要说明，对当前地区母线功率平衡合格率存在的问题进行分析，针对现状从电网特性、技术等因素分析并提出解决方法，重点阐述智能变电站母线功率平衡问题处理方案，最后进行了效果验证，并提出进一步提升母线功率平衡合格率的改进措施。

甘景福　田新成/国网冀北电力有限公司唐山供电公司

甘景福/高级工程师

关键词/Keywords

母线功率平衡·
合格率·
预警·
智能变电站·
同步·

0　引言

母线功率是否平衡是电网调度自动化基础数据质量好坏的标志，直接反映出电网的运行状况。正常运行时母线功率平衡应控制在合理的范围之内，如果有功功率不平衡量偏大，应及时确定故障原因以满足电网对数据的完整性、正确性和准确性的要求[1]。衡量母线功率平衡的指标是母线功率平衡合格率，它的判定是依据地区调度220 kV变电站的220 kV电压等级母线的有功平衡和无功平衡情况。“母线功率平衡合格率”指标直接采用省调D5000系统计算结果，与状态估计遥测合格率相比更准确，是进一步反映地区电网基础数据质量、自动化设备运维水平和模型参数准确性的重要指标。该指标受电网客观情况影响较大，母线功率合格率降低给电网运行、维护带来很大的安全隐患。本文针对该问题进行调研分析，从实时监控预警、基础数据优化完善和技术措施实施等方面探讨提升母线功率平衡合格率的方法，提升电网预警能力。

1　母线功率平衡合格率简介

母线功率平衡合格率统计口径是省调D5000系统省调直调40余座220 kV变电站。该指标受地区电网网架结构、220 kV运行方式、电磁环网、冲击负荷（瞬时负荷波动为50～100 MW）、负荷水平和负荷性质（谐波负序电流对测量装置的影响）等因素影响较大。

母线功率平衡合格率计算方法如下。母线功率平衡为输入母线的有功（无功）电能与输出母线有功（无功）的电能之差，即电源有功（无功）电能与负载有功（无功）电能之差[2]。以有功计算为例，计算公式为

$$\Delta W = \sum W_1 - \sum W_2 \qquad (1)$$

式中，ΔW为电能平衡误差值（有功平衡偏差）；$\sum W_1$为有功潮流流入母线的各线路有功电能之和；$\sum W_2$为有功潮流流出母线的各线路有功电能之和。

母线功率平衡合格率定义为：B=[(有功功率平衡母线总数+无功功率平衡母线总数)/(参与计算母线总数×2)]×100%。

公式中母线为状态估计计算模型中的计算母线，母线功率平衡的判定限值为220 kV或330 kV，母线有功功率平衡偏差ΔW不大于10 MW，无功功率不平衡偏差不大于20 Mvar；500 kV及以上电压

等级母线有功功率不平衡偏差ΔW不大于20 MW，无功功率不平衡偏差不大于30 Mvar[3]。

2 某地区电网母线功率不平衡问题分析

（1）基础数据质量与指标要求差距较大

部分厂站存在量测不准确、母线不平衡、主变压器不平衡、遥信错误或异常变位、数据不刷新、极性错误和遥测跳变等情况，通信中断时有发生，存在少数缺陷处理不及时、设备老化、负荷性质及装置参数配置等问题。如图1所示，不平衡量在±25 MW范围内波动。

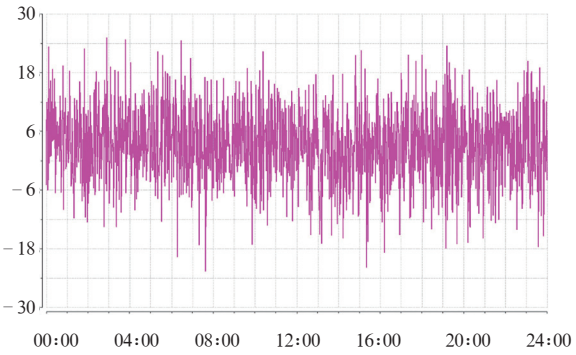


图1 某站220 kV母线功率不平衡

（2）负荷性质影响

由于该地区电网中工业负荷占比重、长距离线路多，网络结构复杂，电铁、钢铁轧钢等冲击负荷普遍。具有电铁、钢铁负荷的220 kV变电站多达30余座，负荷大幅波动情况较为突出。冲击性负荷客观存在且不可控，瞬时冲击往往超过50 MW。

（3）量测不同时影响

量测不同时是电力系统固有误差，但是该地区电网中负荷波动大，量测不同时现象更加严重。另外，同一条交流线段两端不同厂站的遥测值刷新不一致，遥测刷新频率不同步，也是造成母线功率不平衡的重要原因。

（4）通信或通道异常

通道异常，双通道频繁切换会造成主站接收数据时断时续，采集断面不一致增大不平衡量的计算误差。

（5）其他因素

其他因素包括主站状态估计模型建立错误或未建模，母线功率平衡计算模块处理数据异常等系统软硬件问题，以及人工调试如遥测封锁，代路等其他人为因素等。

对某地区电网2016年7月～2017年3月母线功率平衡结果进行统计，折线图如图2所示。

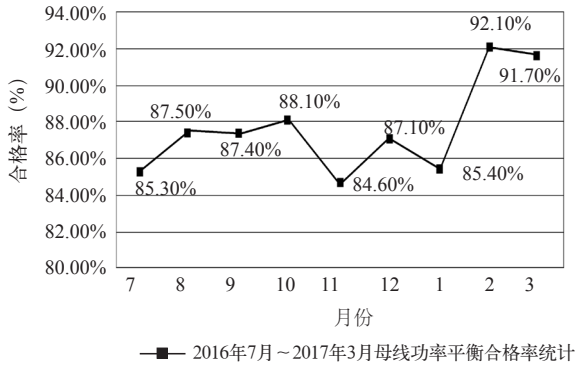


图2 母线功率平衡合格率统计

由图2可以看出，2017年3月前，该地区电网母线功率平衡合格率为87.69%，远低于考核指标大于99.5%的要求。

综上所述，非管理和设备等不可控因素导致某地区母线功率平衡合格率指标偏低问题较为突出。

3 提升方法

3.1 母线功率实时监控预警

3.1.1 省、地调模型校核和比对

因母线功率平衡计算是以状态估计计算模型中的计算母线为依据，随着省级电网厂站不断接入，及时对地调D5000系统中网络拓扑中缺失的厂站进行补充，对发现的厂站拓扑错误进行修正。将省调D5000的母线功率平衡以及地调D5000母线功率平衡结果进行对照，对影响指标的变电站进一步确认和划分预警监控区域。通过模型参数校核比对发现并修正模型错误问题。

3.1.2 开发D5000系统实时监控预警模块

（1）设计思路

对监控设备不平衡状态的智能告警，当三相电流（电压）最大值与最小值差值比例达到限值发出告警，判断设备功率平衡状况，尤其是针对母线有功、无功功率不平衡状态，对不平衡结果提示；根据主变压器不平衡判据指出可能出现的

问题量测，并弹出告警对话框等辅助处理手段，提示运维人员正确操作。

（2）模块流程

首先在D5000平台系统中获取元件模型信息并进行分类，然后获取实时数据断面，模型匹配实时遥测数据；然后分为7个处理子模块对该断面数据进行筛选归类，分别为断路器三相电流、交流线段三相电流、母线有功无功不平衡量、交流线段有功无功不平衡量和变压器有功无功等不平衡量；接着进入关键的异常判别流程，当三相电流差值大于设定阈值（或百分比）时，给出具体元件设备三相不平衡告警；当连接母线（主变压器）上的所有元件有功、无功代数和的差值大于设定值，给出母线（主变压器）功率不平衡实时告警。交流线段比较线路两端的有功量测是否平衡，无功根据线路参数计算差值在合理范围内。如果没有异常，抽取下一个实时数据断面进行重复筛选比较；根据省调母线功率平衡计算周期设定为1 min。模块中的重要实时告警可以设定优先级，对重要的弹出对话框显示，可以列表显示，预警后进行下一轮抽取实时数据断面循环。

（3）实现功能

实现设备不平衡预警功能，可以将具体的元件（线路、负荷和主变压器）不平衡与母线功率平衡联系起来，因母线功率不平衡是由具体元件引起的，可快速判断影响母线功率平衡的具体元件。不平衡告警模块实现流程如图3所示。

3.2 变电站端处理母线功率不平衡

基于“源端维护，全网共享”思路提升各变电站的基础数据质量，母线功率平衡涉及到站端上送的不同间隔遥测数据的求和计算，在经过不同测控装置采集、远动汇总数据上送以及调度接收数据求和等诸多环节后，在调度端进行功率相加得出不平衡量值，是基础数据质量的直接体现。

3.2.1 站端基础数据提升思路

从站端设备角度提升基础数据质量思路是：①梳理站端测控装置、远动工作站等二次设备的

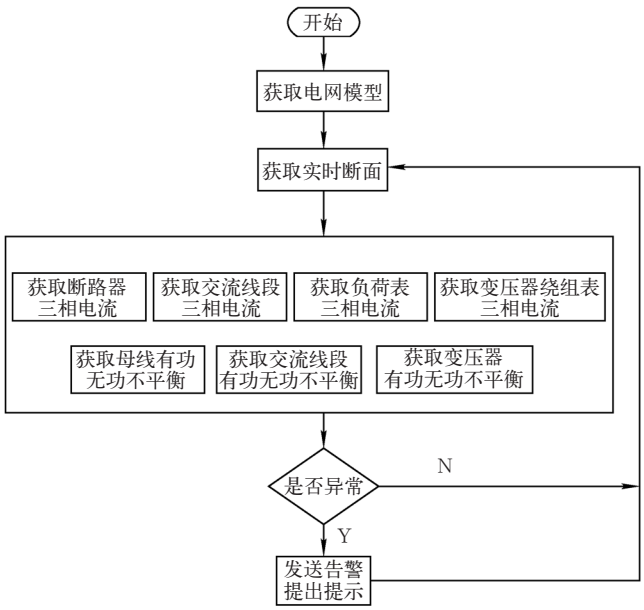


图3 不平衡告警模块实现流程

死区值、阈值和延时等运行参数设定情况，遥测阈值设定在0.1%以内，或在站内监控系统能够负荷情况下阈值设为最小；②所有涉及到遥测乘系数环节，系数精确到小数点后6位；③按照QGDW 140—2006 《交流采样测量装置运行检验管理规程》相关要求规范交流采样试验，减小远动系统遥测误差；④进一步规范和统一站端各类参数配置，例如对220 kV电压等级、主变压器三侧省调转发通道IEC104规约遥测设为循环上送，循环上送周期尽量短并确保同一帧上送，保证主站采集断面的同时性；⑤对于超过运行年限的设备按照技改大修计划进行阶段性地整改；⑥对智能变电站采集同步问题进行分析及处理。

3.2.2 对影响母线平衡问题二次设备分析

站端至主站数据网通道“三遥”采集传输结构图如图4所示。

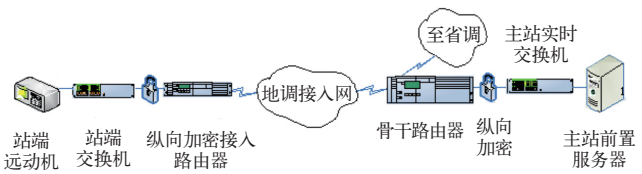


图4 站端至主站数据网通道“三遥”采集传输结构图

（1）装置采集环节

影响因素主要有装置采集准确度、零死区和

变化遥测死区等。采集准确度直接影响到遥测数据的准确性；零死区大小关系到遥测数据的跳零值，不宜过大；变化遥测死区影响到装置对遥测变化反映的灵敏度、遥测的刷新速度[4]。

1）采集准确度问题及处理。可定期通过标准源对参与功率计算的装置重新进行准确度校正，以提高测量准确度。

2）零死区和变化遥测死区问题及处理。通过在测控装置设置零漂门槛和死区门槛可以减小零死区和变化遥测死区，同时在一定程度上提高各测控装置送出数据的时间同步性。例如：南瑞科技RCS 9700装置的遥测死区值一般默认为1%，零漂死区为0.2%，可以将死区门槛最小设置为0.1%，零漂死区最小为0.1%。

3）保证传输数据在满码值范围内。

（2）远动处理上送环节

影响因素主要有远动装置的数据处理能力、遥测数据组包方式以及给调度的报文上送速度。远动装置的数据处理能力影响到网络报文的接收、解析和数据处理速度；参与计算的重要遥测数据组包方式可分为变化遥测随机组包上送和遥测数据同一帧组包上送两种，组包方式影响到调度接收数据的时间同步性；远动给调度的报文上送速度影响到调度数据的刷新速度和实时性[5]。

1）提升远动装置的数据处理能力。如扩展内存容量，提升实时性。

2）遥测数据的组包方式。将参与计算的重要遥测点的变化遥测放入同一帧上送，让上送主站的各间隔数据的采样时刻尽可能接近，以提高主站功率平衡计算的合格率。

（3）远动报文上送速度

选择既能保证总控正常运行，又尽可能快地上送速度，变化遥测的扫描周期一般为100～600 ms。

（4）智能变电站采集同步问题分析及解决方法

通过对智能变电站的调研，发现测控装置、远动等对采集的遥测数据未进行同步处理。测控上送遥测数据不同步，同一时刻不同测控装置采集的遥测数据也存在偏差。由不同步的数据计算出来的功率平衡值误差是无法预料的，是影响功率平衡度指标的重要原因。

目前主站、后台和远动对测控的数据采集使用的方式不考虑报文中的时标，而是将收到的测量值直接入实时库，计算时取最新断面。因此，同步问题就是影响站端后台/远动出口考察点的平衡度的重要因素。如果对于同一条母线的变化数据，各间隔测控上送不同步，那么此处断面数据同步性就会因上送的延时差异不同而被破坏，而远动装置若未及时接收、上送遥测数据，将会进一步加大采集数据不同步带来的影响，一定程度加大了功率不平衡现象出现的概率。

考虑智能站硬件设备较先进，能够支持更严格时间校正和更复杂的计算模式，且站内IEC 61850规约和IEC 104规约均支持带时标的数据传输。由于PT/CT 等一次设备在已投运的厂站中较难进行准确度问题的整改优化，设计的优化方案从智能变电站测控装置和远动装置两个环节处理。

1）测控环节优化。模拟量传输采用带时标数据，时间戳在状态采集环节增加，时间准确度精确到毫秒，支持带“厚度”的缓存实时数据；设计全站测控装置同步遥测计算机制，使得测控装置均在同时刻启动遥测计算，保证遥测计算的同步性。采用基准时间作为启动遥测计算的辅助信号：装置正常校时后，测控装置采用同一时刻作为遥测计算的参考时间，以达到同步计算的目的。例如：设定200 ms 进行一次遥测计算，在1 s周期内，站内测控装置在0、200 ms、400 ms、600 ms和800 ms等时刻触发计算，即每隔200 ms启动一次遥测计算，并将数据实时上送。提高关键遥测类数据的上送速率，保证遥测变化后100 ms内上送到远动装置是同步的带时标数据。

2）远动环节优化。提高远动程序对于关键遥测的处理速率，遥测分组处理，分级同步上送。遥测数据的组包方式和远动报文上送速度保证关键遥测数据每100 ms 完成一次处理，当分组的重要遥测发生变化时，要能够保证进行优先上送。远动能够接收、处理和转发带时标的模拟量数据，可以按照时间获取同一时间断面中的数

据，也可以通过插值算法计算出与实际更接近的数据。

4 应用效果对比

应用上述方法对2017年4月～2017年12月母线功率平衡合格率指标进行统计，如下表所示。2017年全年合格率大于99.5%达到并高于目标要求。

表 2017年4～12月母线功率平衡合格率统计

月份	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
合格率（%）	99.25	99.59	99.66	99.45	99.59	99.63	99.57	99.55	99.69

以甲变电站（常规变电站）、乙变电站（智能变电站）为例，进行整改后母线功率平衡合格率效果对比分析。

（1）甲变电站

母线功率不平衡得到明显改善，如图5所示。

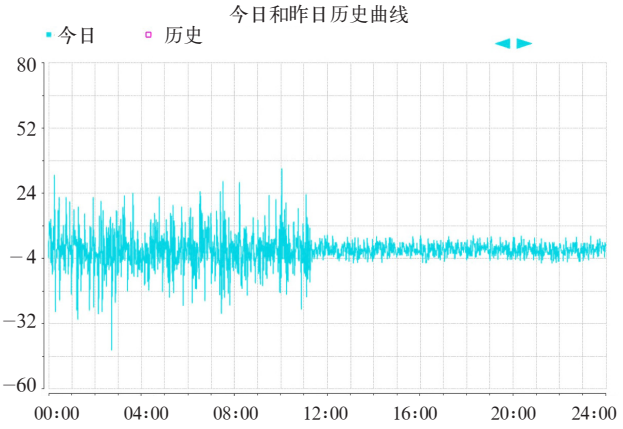


图5 甲变电站母线有功平衡整改前后对比

通过图5观察到甲变电站整改后，母线功率不平衡状态得到了显著改善，并且比较稳定，甲变电站整改前母线有功平衡合格率为87.43%，整改后母线有功平衡合格率提升为100%。

（2）乙变电站

针对乙变电站母线功率不平衡整改后，母线功率不平衡得到明显改善，如图6所示，母线功率不平衡限制保持在6 MW以内。乙变电站整改前母线有功平衡合格率为90%，整改后母线有功平衡合格率提升为100%。

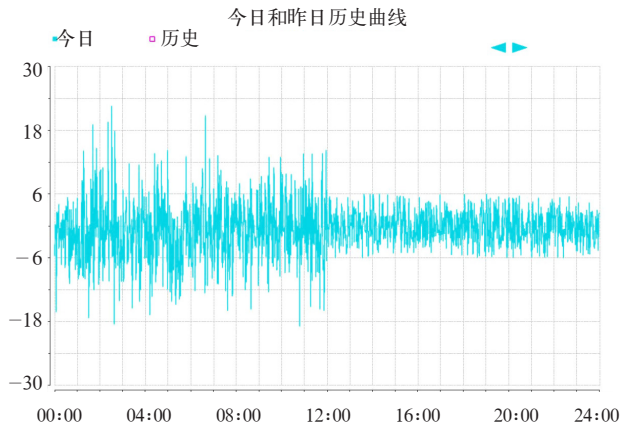


图6 乙变电站母线有功平衡整改前后对比

5 结束语

本文在现状分析基础上，从设备不平衡实时监控预警、变电站基础数据质量提升方法等方面，通过省、地调模型对比，在实时监控预警模块开发、站端实时信息采集和传输处理各个环节提出提升基础数据质量具体措施，尤其是对智能变电站分析探讨了采集同步问题解决方案，通过对齐遥测时标和毫秒级同步机制使不同间隔、不同厂站的遥测信息在同一时间断面上实现功率平衡。实施效果表明，在电网负荷波动较大的地区，遥测信息采集、处理及传送方式需与严格的同步机制匹配才能更真实地反映电网实时数据。

参考文献

[1] 孙莹，王葵．电力系统自动化[M]．北京：中国电力出版社，2004．

[2] 张征，陈赤培．母线有功功率不平衡原因分析与处理[J]．江西电力，2010(4)：27-28.

[3] 邢金，宋磊，侯贝贝，等．电力系统厂站端母线功率不平衡原因分析及解决方法研究[J]．华北电力技术，2015(9)：49-51．

[4] 田新成，尹秀艳．提升唐山电网状态估计合格率的方法探讨[J]．华北电力技术，2016(9)：35-37．

[5] 殷超，姚鹏，汤鹏．电力自动化系统中的坏数据分析与处理[J]．电子测试，2013(17)：17-18．

（收稿日期：2018－09－03）EA

基于蚁群算法的变电站巡检机器人路径优化研究

针对变电站巡检路径优化问题，将蚁群算法应用于变电站巡检机器人导航中；因该算法要求路径随机可变，机器人的导航控制采用激光导航方式。对蚁群算法的数学模型进行分析并仿真，进一步验证了通过该算法能够满足巡检路径的优化并找到最优路径。

刘煊琨　刘红兵／太原科技大学电子信息工程学院
王　瑾／中核北京控制系统有限公司

刘煊琨／硕士研究生

关键词／Keywords
变电站·
巡检机器人·
激光导航·
蚁群算法·
路径优化·

0　引言

变电站的正常运行对于电网输电起着举足轻重的作用，因此，变电站巡检工作是保障变电站设备安全运行、提高供电可靠性的一项基础工作。传统的巡检工作是由人工来完成的，除了需要消耗大量的人力、物力和财力，还面临着复杂的环境和电磁辐射带来的危害[1]。随着科技的发展和机器人技术的兴起，将机器人应用于变电站的巡检工作，其便捷、高效和精准的技术使得巡检机器人拥有广阔的应用前景。

由于算法需要是基于路径在线可变的模式，因此本文采用激光导航作为变电站巡检机器人的导航方式，地面无须安装定位设施，巡检行驶路径可灵活多变，能够适合变电站复杂的环境。采用SICK公司的NAV350作为激光扫描器。

对于巡检机器人的路径规划问题，目前有很多种AGV的路径规划方法，例如C空间法、栅格（grid）法、蚁群算法和遗传算法等。蚁群算法由Marco Dorigo于1992年在其博士论文中提出，其灵感来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。蚁群算法是用来解决TSP（旅行商）问题的，TSP问题就是一个商人从他所在的城市出发到n个城市去，每个城市只能去一次，最后返回他出发的城市，并且要求花费最少（即距离最短）[2]。而巡检机器人可以看作一个商人，从充电室出发，对每个检测点进行巡视一次且不重复，最后返回充电室，要求走过的路径最短。因此，在激光导航的基础上，将蚁群算法融入，来寻求巡检机器人巡检的最优路径，最后用Matlab对蚁群算法在路径优化上的应用进行仿真。

1　变电站巡检机器人的激光导航系统

1.1　激光定位原理

巡检机器人激光导航原理与激光测距相同，即通过测量激光从发出到接收的时间计算出距离前方障碍物的距离。只不过激光测距测量一次即可，而激光导航则是需要进行多点位的测距，以定位自己在整个坐标系所处的位置。本文所述激光导航系统是在变电站道路两旁合理布局路标（反光板），巡检机器人车体前部搭载NAV350激光扫描器，行进过程中激光传感器旋转扫描路标，通过发出光到反光板，反射回激光传感器的传播时间可以计算出到物体的距离，经三角形几何计算，可得到巡检机器人在变电站中的位置和行驶方向[3]。图1为激光定位原理图。

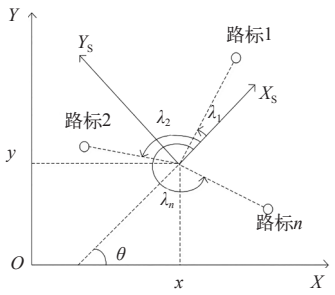


图1 激光定位原理图

1.2 导航控制原理

根据文献[4]所述，在变电站内，巡检机器人所要巡检的路线大多数为直线，对于需要转弯、掉头的位置，弯曲路线相当于多个直线路径组合而成。因此，巡检机器人的导航控制可以说是对当前路径的位置偏差ΔS和航向偏差Δθ的控制。导航过程中，利用激光定位传感器解码并实时输出的高精度位置坐标数据，对当前位置及目标环境位置进行精准定位，通过微计算机向机器人控制系统发送指令信号，机器人运动控制器处理后闭环控制机器人左右两轮速度，使其沿着预先设定的路径运行。图2为导航控制原理图。

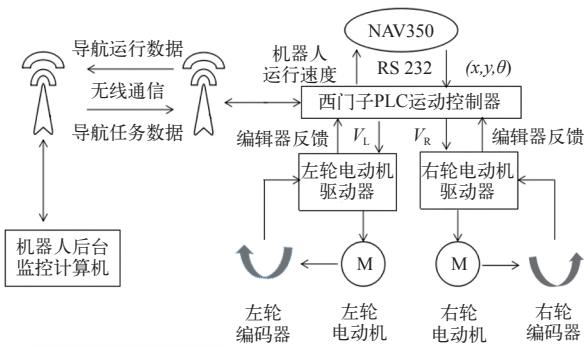


图2 机器人导航控制原理

1.3 硬件系统设计

本文的激光定位系统采用SICK公司研制的NAV350系统，该系统由一台NAV350激光扫描器和一些反光板路标构成。旋转激光扫描器包含激光发射装置、接收装置和计算单元，其路标检测的最远距离为70 m，定位准确度为±4 mm到±25 mm(取决于反光板的间距)，测角准确度为±0.1°，轮廓测量高达35 m，数据输出频率为8 Hz。激光定位系统通过旋转激光扫描器360°扫描角检测反光板，来计算机器人在全局坐标系下的位置和方向。巡检机器人运动控制器采用西门子PLC运动控制器T－CPU，通过RS 232接口与NAV350进行通信，一方面采集当前机器人实际运行速度并传送至NAV350供其定位计算使用，另一方面接收NAV350输出的定位数据，根据后台监控计算机下发的导航任务控制机器人沿设定路线运行[5]。最后，机器人控制器将巡检车体导航运行数据通过无线传输方式回传至计算机基站。图3为导航系统硬件组成示意图。

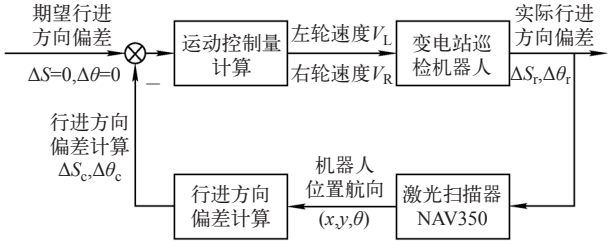


图3 导航系统硬件组成示意图

1.4 路标布局与检测

在路标检测模式下NAV350在扫描头一个周期内会产生一个当前反光板环境的图像。NAV350在这时最多检测40个反光板并确定每一个反光板对应的位置。AGV扫描反光板行进路线如图4所示。

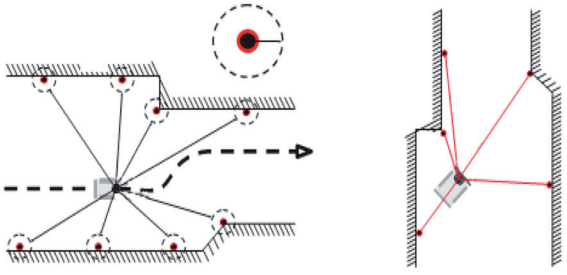


图4 AGV扫描反光板行进路线

反光标记设计成圆柱形，圆柱形在任何角度都能被检测到。并且反光板和反光的物体必须区分开，因为激光扫描器要从周围反光板的位置来分配所测量的数据。反光板的垂直尺寸和垂直位置必须选好，使得即使在不平的地面上时光束也能照射到反光板。NAV350最大扫描距离为70 m，确定反光板最低高度时要考虑地面的特点和要扫描的距离，因地面不平引起机器人的倾斜也必须考虑在内(包括安全裕量)。圆柱反光板直径最小为

80 mm，同一层反光板的直径可以不同，但是如果要映射整层，则只能用直径相同的反光板。

反光板的分布必须使激光扫描器在任意的地方都能扫描检测到至少三个反光板，并要求在道路两旁尽可能安装数量相同的反光板。激光扫描器识别反光板是把检测到的位置按存储的位置进行分配，在初始化位置时必须要考虑到特殊的要求，NAV350要在初始化时可以清楚地分辨反光板的位置，它需要一个能被反复认出的不对称布局，在这种不对称布局中每两个反光板间必须有至少500 mm的距离。不是所有的反光板都能被检测到，或者由于特殊情况某次被遮挡时，也要保证至少三个反光板能被检测到[6]。在定位准确度要求的地方和拐弯处，在NAV350限制半径范围内至少有四个反光板被检测到，而且每两个反光板之间的角度要大于120°。

2 巡检机器人路径规划的蚁群算法

2.1 蚁群算法（ACO）原理

通过生物学的观察和研究，蚂蚁从蚁穴出来觅食到获得食物后回蚁穴的路径中，会在走过的地方留下信息素作为标记，其他蚂蚁会感知到信息素的存在。由于短的路径蚂蚁来回的次数较多，所以留下的信息素多，其他蚂蚁就会沿着短的路径走，这样信息素就越来越多，这是一个正反馈的过程。随着信息素的挥发，其余路径上的信息素逐渐消失，只留下了最短路径，从而蚂蚁就会寻觅到蚁穴和食物之间的最优路径[7]。

2.2 ACO数学模型

t时刻蚂蚁从巡视点i到巡视点j的概率为

$$P_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}(t)}{\sum\limits_{s\in A_k}\tau_{is}^{\alpha}(t)\eta_{is}^{\beta}(t)} & j\in A_k\\ 0 & j\notin A_k\end{cases} \tag{1}$$

式中，$\tau_{ij}(t)$为t时刻(i,j)上的信息素数量；α为信息素启发因子；β为期望启发因子；$d_{ij}=\{i,j=1,2...n\}$为巡视点i和巡视点j的距离，选取的距离是欧式距离；$\eta_{ij}=1/d_{ij}$为(i,j)上的启发函数，表示巡视点i到巡视点j的期望度；$A_k=\{C-\mathrm{tab}U_k\}$，$\mathrm{tab}U_k=\{1,2...m\}$为蚂蚁$k$的禁忌表，用来记录蚂蚁$k$已经走过的巡视点。

考虑到外界环境的影响和信息素的挥发，需要设ρ来表征信息素挥发的程度，那么信息素还剩余的程度用$1-\rho$来表示。当所有的蚂蚁都完成巡视后，所有的巡视路径根据下面的全局信息素更新公式更新路径上的信息素，得出最短路径为

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}(t) \tag{2}$$

$$\Delta\tau_{ij}(t)=\sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^{k}(t) \tag{3}$$

式中，$\tau_{ij}^{k}(t)$为第k只蚂蚁在路径(i,j)上留下的信息素的增量；m为蚂蚁群的总数量；Q为信息素强度；L_k为蚂蚁k走过的路程[8]。

2.3 ACO步骤

蚁群算法步骤如下。

1）设蚁群总数为m，巡视点为n个。首先初始化，初始时刻迭代次数N_c=0，蚂蚁个体计数k=1，最大迭代次数为$N_{c.max}$。

2）迭代次数$N_c=N_c+1$。

3）蚂蚁计数$k=k+1$。

4）根据式（1）选择下一个巡视点，修改蚂蚁k的禁忌表，将下一个巡视点放入禁忌表中，并且进行局部信息素更新，$\mathrm{tab}U_k=\mathrm{tab}U_k+1$。

5）若$k\geq m$则跳转到步骤6），若$k<m$则跳转到步骤3）。

6）根据信息量更新式（2）和信息素增量式（3），更新每条路径上的信息量。

7）若不满足结束条件，即$N_c<N_{c.max}$时，返回步骤2）；若满足结束条件，即$N_{c.max}\geq N_c$时，则循环结束并输出计算结果。

蚁群算法步骤框图如图5所示。

3 仿真分析

以图6所示的某实际变电站为例，利用ACO算法对其进行规划并寻找最优巡检路径。将变电站建立在平面直角坐标系内，黑色圆点表示巡检机器人需要巡视的监测点。巡检机器人从充电室出

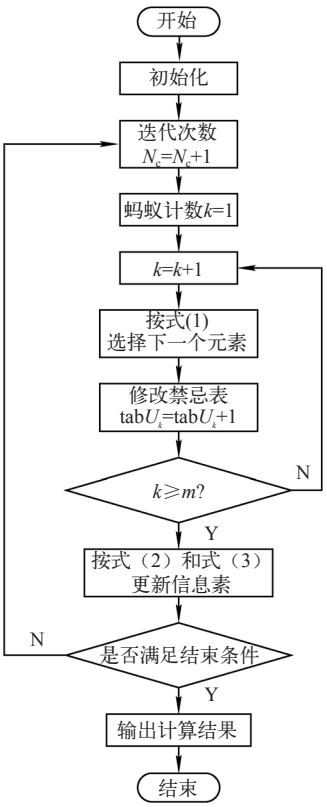


图5　蚁群算法步骤框图

发，对22个监测点进行巡检，每个监测点只到一次，全部监测点巡检完成后返回充电室。

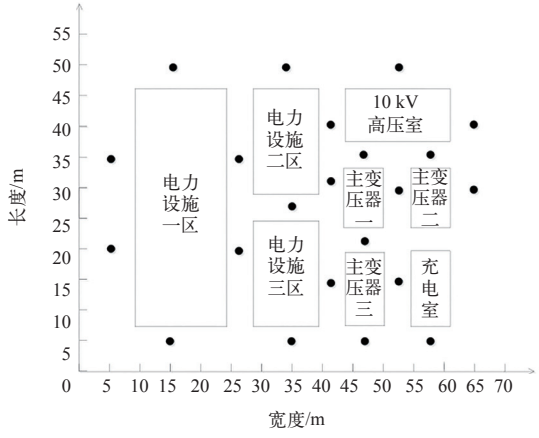


图6　平面坐标系中的变电站及巡视点图

通过Matlab仿真求解，得出最优路径，如图7所示。

Matlab仿真过程中，设置相关参数如下。

1）蚁群中蚂蚁的数量m=22（当m接近或等于巡视点个数n时，本算法可以在最少的迭代次数内找到最优解）。

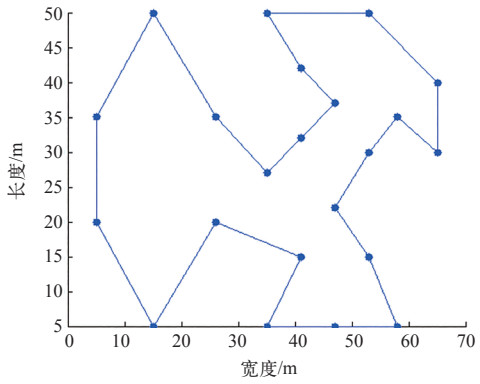


图7　通过蚁群算法找出的最优路径

2）最大循环次数N_{c_max}=200，即算法迭代的次数。

3）信息素因子为1（蚂蚁在运动过程中所积累信息）。

4）启发信息因子为2（启发式因子在蚂蚁选择路径时的相对重要程度）。

5）局部挥发系数的初值为0.2（表示路径上信息素的衰减系数）。

图8为迭代200次中每次机器人巡检一圈路径的总长度。从图8中可以看出，随着迭代次数的增加，路径总长度越来越短，迭代达到80次以上后，最优距离趋近于270~275 m之间，仿真过程中，迭代500次后的值也在这个范围内，由此可以确定本应用中的最优路径长度为273.9 m。

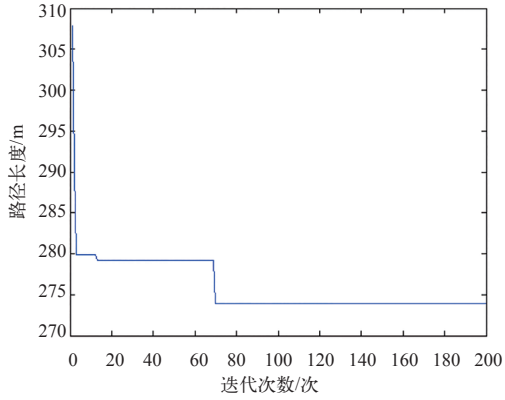


图8　迭代次数与路径长度的关系

4　结束语

对蚁群算法在变电站巡检导航中的应用进行了研究，从信息素更新、启发函数和状态转移规则等方面来改进蚁群算法。通过某变电站的平

面图来模拟变电站巡视点，利用蚁群算法先找出巡检的最优路径，在最优路径的基础上布局反光板，实现变电站巡检机器人的激光导航。通过仿真分析，运用蚁群算法减少了搜索最短路径的时间，同时搜索到最优路径的成功率大，再结合激光导航，使得巡检机器人导航效果大大提升。

参考文献

[1] 李强．浅谈城区高压变电站对人体及环境的危害问题[J]．大众科技，2009(11)：133．

[2] Goss S，Aron S，Deneubourg J L，et al．Self-organized shortcuts in the argentine ant[J]．Naturwissenschaften，1989，76(12)：579-581．

[3] 胡艳．基于激光导航路径识别的实验室自动引导小车（AGV）设计[J]．装备制造技术，2017(5)：19-21．

[4] 肖鹏，栾贻青，郭锐，等．变电站智能巡检机器人激光导航系统研究[J]．自动化与仪表，2012(5)：5-9．

[5] Wu Shaobin，Wang Xuewei，Geng Ruonan．Research on monitoring technique of intelligent vehicle based on laser scanner[C]．2011 International Conference on Mechanical，Industrial，and Manufacturing Engineering，2011：1-2．

[6] Meng Lixia，Sun Fuchun，Liu Huaping，et al．A fusion navigation of double laser radar for intelligent vehicle[C]．Advanced Materials Research，2012，346：711-718．

[7] 来学伟．基于蚁群算法的TSP问题研究[J]．佛山科学技术学院学报，2017，5(3)：72-74．

[8] 田德伟．基于蚁群算法的机器人路径规划研究[D]．西安：西安建筑科技大学，2017．

（收稿日期：2018－09－15）EA

广告 | AD

全新改版

色彩丰富　凸显主题

2019《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容，力求赏心悦目。

栏目设置　独具风格

坚持继承与开拓并举，以丰富内涵充实经典栏目，持续深化专家访谈、EA经理人等栏目，密切关注电气技术的发展和应用。

专家点评　精辟深刻

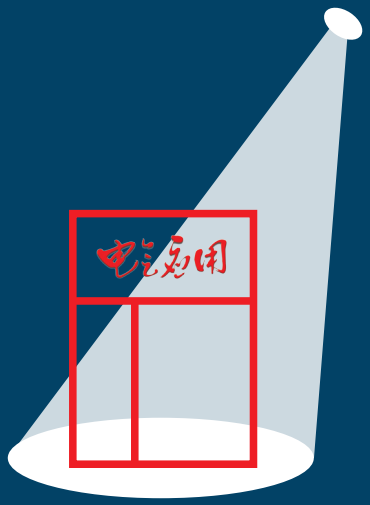
每期都将围绕一个热点话题，隆重推出一场专题讨论的盛宴，共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂，针对焦点问题作出评析。

行业案例　生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用，以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间，促进应用经验交流。

国内邮发代号：82-341　国外发行代号：M1409

每期定价：25.00元　全年定价：300.00元



·电气应用 盛情呈现·

2019