

城市配电网规划优化组合负荷预测软件设计

根据城市配电网规划需求,开发了适用于城市配电网规划的优化组合负荷预测软件。对数据库进行了分类分层精细化设计,并具有数据的自动查错和纠错能力。设计了单项模型算法库,集成了大量的优秀单项预测模型。软件能根据用电量和最大负荷的增长规律,通过评价指标体系和冗余性校验,对不同单项模型进行自动优化组合,形成组合优化模型,使软件的通用性更好。根据城市负荷的发展特性,提出了基于大用户报装的负荷预测模型,并将其作为组合预测的必选模型,使预测算法更贴近城市负荷的实际发展规律。利用广东省惠州市的实际负荷数据对软件进行了验证,预测结果和误差分析表明该软件具有较高的预测准确度和较强的适应性。目前,该软件在南方惠州市已经投入使用,为该市

阳绍峰¹ 陈奇芳² 王程² 刘念^{2/1}. 广东电网责任有限公司惠州供电局
2. 华北电力大学

0 引言

中长期负荷预测是电网规划的基础,主要为电力系统的发电计划和发展规划服务,预测的准确性对电力系统长期稳定的发展和投资具有很大影响^[1-2]。对于城市的中长期用电负荷的预测,受到多方面因素的影响,如经济发展水平、城市发展规划政策和地区气候等随机因素^[3]。目前,国内有大量文献对中长期负荷预测算法进行了研究,提出了很多预测算法和预测模型,人工智能预测算法和组合预测算法是目前的研究热点,并取得了良好的成果^[4-5]。文献[6]根据电力系统中长期负荷的特点利用径向基函数神经网络的非线性识别功能,提出了一种改进的基于径向网络的中长期负荷预测模型。该模型能够对空缺数据进行补全,对失真数据进行修正。文献[7]提出了一种由模糊逻辑单元组成的聚

类神经网络中长期负荷预测算法。改算法能够将影响因素综合引入预测模型,提高预测准确度。文献[6-7]将人工智能预测算法引入到中长期负荷预测中,取得了一定的效果。但是,由于人工智能预测算法需要大量数据进行训练,以得到优化的模型参数,因而对历史数据的要求高。

为了降低对历史数据的要求,不少文献研究了基于多个单项模型的组合预测算法。该类组合预测算法一般采用简单有效的单项负荷预测算法进行加权组合,以便得到良好的预测效果。文献[8]根据负荷曲线的走势,对于不同变化趋势的阶段进行组合,提出了一种基于灰色理论的变权组合中长期负荷预测模型。该模型能够简单有效地将变权组合预测应用到电力中长期负荷预测中。文献[9]提出了基于诱导有序几何加权平均算子和加权马尔可夫链的中长期组合预测模型。该算法根据单项预测方法的预测准确度来赋予权值,实现了组合预测模型中权系数与拟合准确度的相关性。

虽然大部分中长期负荷预测算法取得了较好的预测效果,但是仅限于实验室理论研究,并未开发负荷预测软件并投入到实际应用。已有的负荷预测软件大部分技术和算法陈旧。如文献[10]基于面向对象技术,开发了一款电力系统中长期负荷预测软件。该软件采用单一的预测模型进行预测,并且未关注数据库的设计。

本文根据城市配电网规划需求,开发了适用于城市配电网规划的优化组合负荷预测软件。本文设计的负荷预测软件对数据库进行了分类分层精细化设



阳绍峰/中级工程师

关键词/Keywords

组合预测·
负荷预测·
中长期预测·
软件设计·

计，具有数据查错和纠错能力。设计了单项模型算法库，集成了大量的优秀单项预测模型。软件能根据用电量和最大负荷的增长规律，通过评价指标体系和冗余性校验，对不同单项模型进行自动优化组合，形成组合优化模型，使软件的通用性更好。根据城市负荷的发展特性，将提出的基于大用户报装的负荷预测模型作为组合预测的必选模型，使预测算法更贴近负荷发展规律。利用广东省惠州市的实际负荷数据对软件进行了验证，预测结果和误差分析表明该软件具有较高的

预测准确度和较强的适应性。目前，该软件运用于惠州市的中长期负荷预测中，对惠州市电网规划提供了参考作用。

1 软件设计

软件采用模块化和开放式接口设计理念，将功能进行模块化分解，并为数据库和算法库提供开放式接口。图1为负荷预测软件的系统功能结构图，软件主要围绕数据库和预测算法进行功能分解。

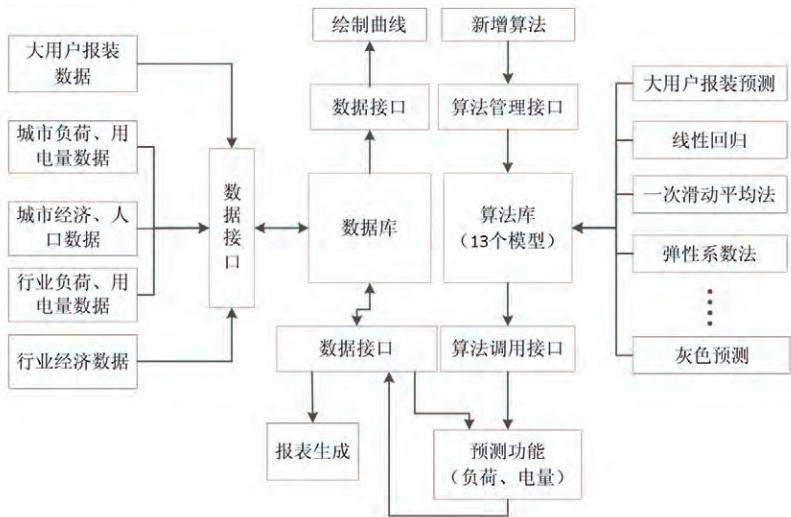


图1 负荷预测系统结构图

1.1 精细化数据库设计

数据库是组成负荷预测软件的核心部分之一，为负荷预测算法的实现提供所有的数据支持。本文对数据库采用精细化和层次化设计，首先将负荷分为大用户报装负荷数据；城市负荷和用电量数据；城市经济和人口等数据；行业负荷和用电量数据；行业经济数据5大部分。然后，将5个部分进行进一步精细化分解，得到分区域和分行业的负荷数据，为软件的层次化设计提供数据支撑，精细化数据库设计如图2所示。

精细化数据库具有开放式接口，数据接口能够识别如图3所示的Excel数据文件，数据在Excel中按类分块存储。每个数据块包括数据类型标志、区域/行业标志和数据内容。其中“数据类型标志”对应5大数据分类，不能为空；“区域/行业标志”对应5大数据分类，不能为空；“区域/行业标志”与5大数据分类对应，若数据类型标志为

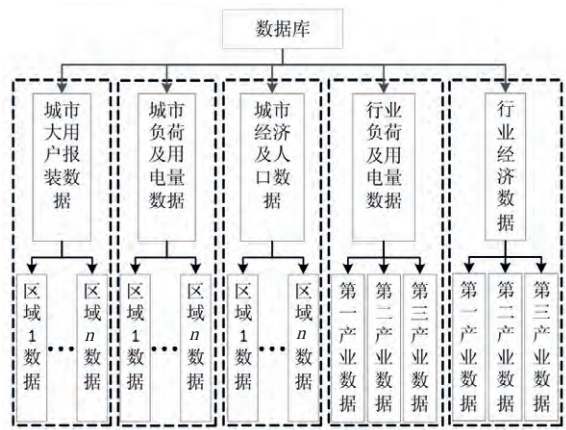


图2 精细化数据库设计

“城市负荷及用电量数据”对应的类型，则“区域/行业标志”的内容应为不同地区对应的标志，若数据类型为“行业经济数据”对应的类型，则“区域/行业标志”的内容应为不同产业对应的标志。若“区域/行业标志”为空，则表示数据内容为数据库分层中的上层数据，即城市层级的数

据。对5大部分数据采用统一的格式从外部Excel导入数据或对外导出Excel数据，具有以下优点：

1) 方便对城市5大类历史数据进行分层设计、管理和维护。

2) 由于采用统一的模板，对数据的规范化操作起到了一定的作用，操作人员只需要从一张Excel表中导入所有数据，从而减少了多次导入数据的重复工作。

3) 由于采用了规范的数据模板，将同类数据集中处理，避免了传统的混合处理方式，能在一定程度上减少人为的数据错误。

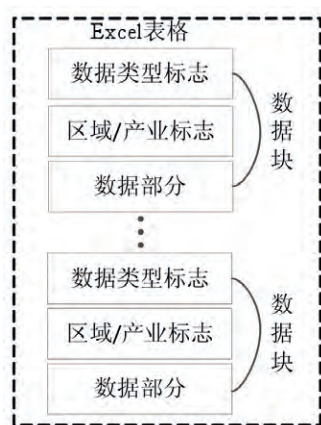


图3 开放式精细化数据导入模板

1.2 算法库设计

本文设计的负荷预测软件采用优化组合负荷预测算法，将多种单项预测算法进行优化组合，综合发挥各类算法的优势。算法库是负荷预测软件的另一个核心部分，主要包含13类单项预测模型、覆盖线性、非线性模型、快增长模型和慢增长模型等。这些算法的共同优点是：计算量小，效率高，对历史数据要求低，便于软件实现和实际应用。

单项预测模型分别为：基于大用户报装的负荷预测模型、线性回归模型、弹性系数模型、Compertz曲线模型、双曲线模型、S型曲线模型、多项式模型、指数曲线模型、一次滑动平均模型、二次滑动平均模型、一次指数平均模型、一阶灰色预测模型和等维新息模型。其中，基于大用户报装的负荷预测模型，是根据城市负荷变化特点而提出的专用模型，为本文设计的负荷预测软件必选模型。此外，通过算法匹配度评价指标

体系自动选择额外的最优4个单项预测模型进行优化组合，形成最终的优化组合负荷预测算法。

1.2.1 基于大用户报装的负荷预测模型

在城市发展过程中，负荷的增长主要来源于大负荷用户的增长。大用户在建设之前，需要向供电局申请供电并上报负荷容量，因此，通过供电局对城市大用户的报装情况进行统计，并对大用户的发展规律进行分析，便能得到有基于大用户报装的负荷预测模型。该模型是一种简单有效的负荷预测模型，如式（1）所示。

$$\begin{cases} F = cR \\ c = \alpha\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中， F 为预测新增负荷量； C 为实用系数； R 为报装容量； α 为负荷调整系数； β 为负荷阶段系数。

年报装容量 R 可以通过供电局报装数据得到；负荷调整系数 α 和阶段负荷系数 β 需要根据不同行业的数据进行统计分析得到。以广东省惠州市为例，得到不同行业的调整系数和阶段系数如表1所示。不同城市四大类型大用户的调整系数和阶段系数存在一定的差异，软件为提供了大用户报装数据维护接口，通过该接口，用户可以自行设定调整系数和阶段系数。

表1 惠州市各类型用户调整系数和阶段系数

负荷类型	调整系数	阶段系数		
		第1年	第2年	第3年
住宅	0.4	0.5	0.6	0.8
商业	0.6	0.7	0.8	1
工业	0.7	0.7	0.8	1
其他	0.5	0.7	0.8	1

1.2.2 算法库接口设计

本文采用面向对象的程序设计方法实现算法调用接口，将现有的所有算法封装成类，算法采用动态链接库的形式实现。在程序调用算法的过程中只需要调用算法类的实例进行计算即可。采用面向对象的程序设计方法，使算法库能够成为独立的模块，可移植性好。

除现有算法之外，软件设计了新增算法管理功能，支持用户通过动态调用的形式新增单项预测算法。用户只需要按照规则将新增的算法打包

成动态链接库的形式，便能通过软件的动态调用接口实现新增算法的调用。

本文设计的负荷预测软件中，创建了一个指向需要调用的新增算法函数指针，该函数指针用来存储新增算法的函数地址，以实现函数调用。通过Win32 API函数LoadLibrary()显式实现动态链接库的加载，然后通过Win32 API函数GetProcAddress()获取新增算法的函数地址，并将改地址赋值给函数指针，使用该指针来调用动态链接库的函数。调用完成之后，通过Win32 API函数FreeLibrary()释放动态链接库中的算法函数。

1.2.3 组合预测模型设计

本文以灰色关联度和预测有效度两类指标为基础，建立一个单项预测模型的评价指标体系。通过对各单项预测模型的评价，筛选出描述性最好的几个预测模型。再对这些模型进行冗余性校验，删除冗余模型。最后使用最优组合方法或递归等权组合预测方法求得各单项预测模型的权重，得到最终的最优组合模型^[1]。该软件的算法流程图如图4所示。

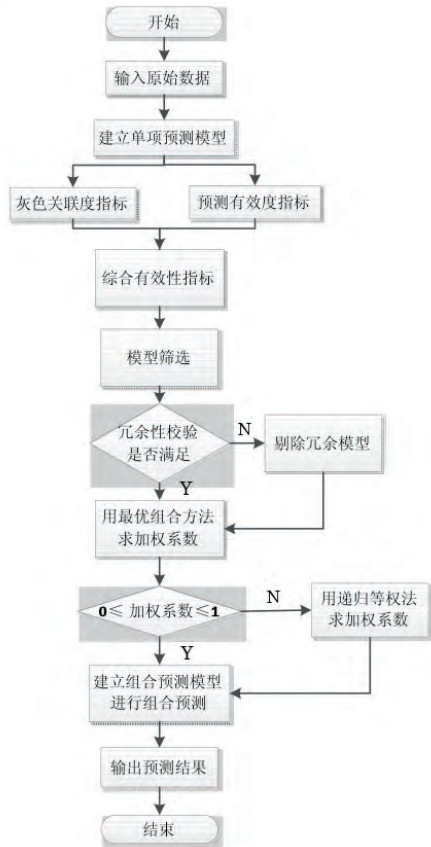


图4 精优化组合负荷预测模型

在对单项算法进行最优组合前，根据历史数据计算单项预测算法的灰色关联度和预测有效度，然后通过对单项模型的综合筛选，得到第一批合格的单项预测模型。第一批合格的单项预测模型可能大于4种，可能存在冗余算法，因此需要通过冗余校验来剔除冗余模型，最终得到需要的单项预测模型。

对于同一问题有 m 预测方法，共有 n 期观测值，第 t 期实际值和应用各种方法所得的预测值 $y_i(t) (i=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, n)$ ，相应的预测误差为 $e_i(t)=y(t)-y_i(t)$ ，称 E_m 为预测误差信息矩阵 e_i 为第 i 种方法的预测误差平方和。

$$E_m = (e_{ij})_{m \times m}, e_{ij} = \sum_{t=1}^n e_i(t)e_j(t) \tag{2}$$

1) 若预测误差信息矩阵主对角线元素中的最小者也是其所在行（列）的最小者，则除预测准确度最高的单项方法外，其余方法均冗余。

2) 若预测误差信息矩阵主对角线元素中的最大值所在行（列）的每个元素都不小于所在列（行）中的主对角线元素，则预测准确度最低的预测方法为冗余方法。

3) 若预测误差信息矩阵的某些行（列）的每个元素都不小于预测误差信息矩阵主对角线元素的最小者，则这些行（列）对应的预测方法为冗余方法。

经过冗余剔除之后，对剩下的算法与基于大用户报装的预测算法进行优化组合，采用递归等权法求解每项算法的加权系数，最终得到组合负荷预测模型。最优组合预测方法的预测误差平方和不大与参加组合预测的各个单一预测方法预测误差平方和的最小者，因此，最优组合预测模型性能优于参与组合的个体模型。

2 结果及误差分析

2.1 社会用电量预测结果及误差分析

本软件以惠州市2007~2011年的用电量数据作为历史数据，分别用组合预测模型、线性回归模型、指数曲线模型、等增长率模型、弹性系数模型和灰色预测模型对惠州市2012~2017年的社会用电量进行预测。6种预测算法的预测结果如表

2和图5所示。

表2 惠州市社会用电量预测结果表 (单位: 亿kW·h)

年份	线性 回归	指数 曲线	等增 长率	弹性 系数	灰色 预测	组合 预测
2012	232.7	228.2	235.5	248.4	235.6	243.5
2013	251.2	244.3	256.5	272.8	247.3	260.2
2014	273.7	267.6	289.9	307.6	287.9	281.4
2015	294.2	292.8	314.3	329.7	305.4	303.4
2016	313.7	324.3	336.7	357.3	327.8	326.2
2017	330.1	356.5	365.2	379.6	353.3	349.9

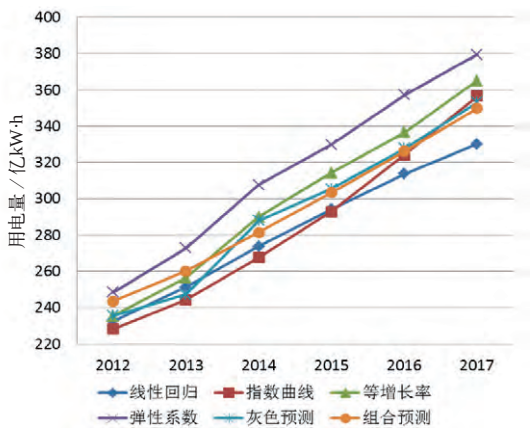


图5 惠州市2012-2017年用电量预测增长曲线

从表2和图5中可以看出，弹性系数法得到的预测结果是所有预测算法中最高的。灰色预测算法结果与组合预测算法的结果很接近。在预测年中，2012年和2013年的用电量是已知的，分别为：241亿 kW·h和259亿 kW·h。用2012年与2013年的数据对各种预测算法的预测准确度进行分析，各类算法的误差如表3和图6所示。

表3 惠州市社会用电量预测误差表 (%)

年份	线性 回归	指数 曲线	等增 长率	弹性 系数	灰色 预测	组合 预测
2012	3.4	5.3	2.3	3.1	2.3	1.0
2013	3.0	5.7	1.0	5.3	4.5	0.5

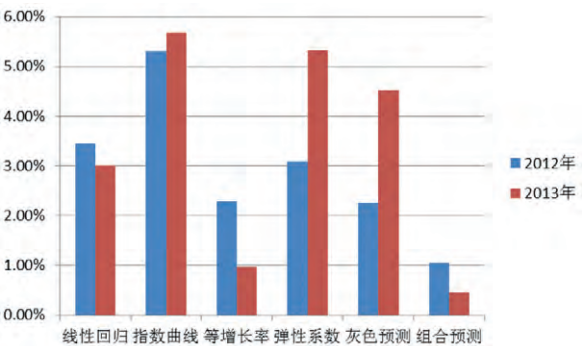


图6 各类算法对2012年与2013年用电量的预测误差

从表3和图6中可以看出6种预测算法都能取得较好的预测效果，预测误差都在6%以下。其中组合预测算法对于惠州市2012年和2013年用电量增长情况的预测误差分别为1.0%和0.5%，在6种对比算法中预测误差最小。

2.2 社会用电量预测结果及误差分析

以惠州市2007~2011年的最大负荷数据作为历史数据，分别用组合预测模型、线性回归模型、指数曲线模型、多项式模型和灰色预测模型对惠州市2012~2017年的最大负荷进行预测。5种预测算法的预测结果如表4和图7所示。

表4 惠州市社会用电量预测结果表 (单位: 亿kW·h)

年份	线性 回归	指数 曲线	多项式	灰色 预测	组合 预测
2012	457.3	477.4	458.9	478.4	464.4
2013	484.1	513.9	490.4	511.2	498.7
2014	540.9	573.2	558.2	565.6	554.9
2015	585.9	632.8	607.8	617.8	603.4
2016	639.7	696.7	659.5	674.7	661.4
2017	706.2	783.3	727.3	741.8	728.8

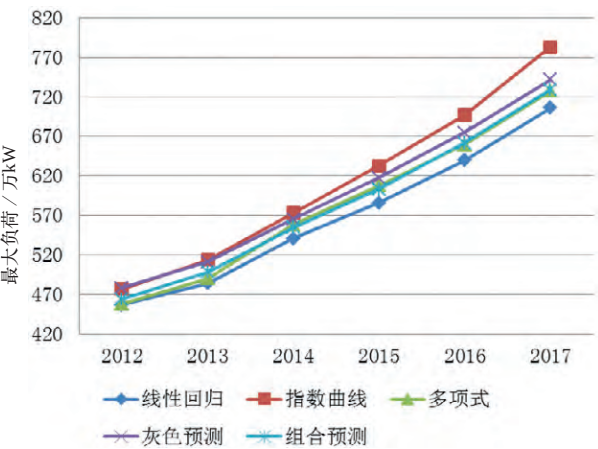


图7 惠州市2012-2017年最大负荷预测增长曲线

从表4和图7中可以看到，在对惠州市最大负荷进行预测时，指数曲线得到的预测结果最高，线性回归得到的预测结果最低。

惠州市2012年和2013年的最大负荷分别为468.9万 kW和503.3万 kW，5类算法对惠州市最大

负荷的预测误差如表5和图8所示。

表5 惠州市社会最大负荷预测误差表 (%)

年份	线性 回归	指数 曲线	等增 长率	弹性 系数	组合 预测
2012	2.5	1.8	2.1	2.0	0.96
2013	3.8	2.1	2.6	1.6	0.91

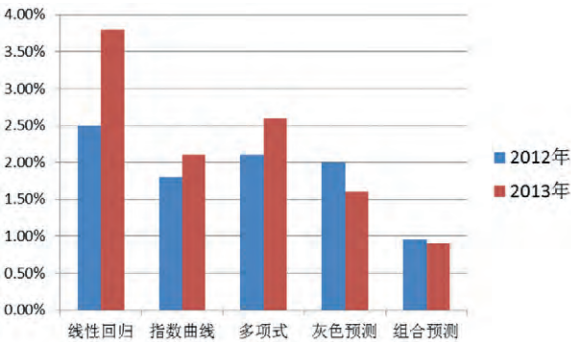


图8 各类算法对2012年与2013年最大负荷的预测误差

从表5和图8中可以看出，各类预测算法都取得了较好的预测效果，预测误差在5%以下。由于组合预测算法对单项预测模型进行了优选，采用了最优加权组合，从而使组合预测算法的误差比所有的单项预测算法误差低，对2012年和2013年最大负荷的预测误差不到1%。

通过各类单项算法和组合预测算法对社会用电量 and 最大负荷预测结果对比分析可知，组合预测算法能够选择合适的单项预测算法进行优化组合，能够充分挖掘负荷的变化规律，大大提高了预测的准确度。

3 结束语

本文设计的负荷预测软件对数据库进行了分类分层精细化设计，具有数据查错和纠错能力。设计了单项模型算法库，集成了大量的优秀单项预测模型。软件能根据用电量和最大负荷的增长规律，通过评价指标体系和冗余性校验，对不同单项模型进行自动优化组合，形成组合优化模型，使软件的通用性更好。根据城市负荷的发展特性，将提出基于大用户报装的负荷预测模型作为组合预测的必选模型，使预测算法更贴近负荷发展规律。从预测结果中可以看到，该软件对用电量和最大负荷的预测能

取得良好的效果。目前，该软件运用于惠州市的中长期负荷预测中，对惠州市电网规划提供了有效的参考作用。

参考文献

[1] 蒋燕, 王少杨, 封芸. 基于递归等权组合模型的中长期电力负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, (1): 151-155.

[2] 张健美, 周步祥, 林楠, 等. 灰色Elman神经网络的电网中长期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4).

[3] 黎祚, 周步祥, 李君, 等. 考虑权重标度法的中长期负荷预测综合模型[J]. 电力系统及其自动化学报 2013, 25(5).

[4] Wang Xiaozhe, Smith-Miles K, Hyndman R. Rule induction for forecasting method selection: Meta-learning the characteristics of univariate time series [J]. Neurocomputing, 2009, 72(10/11/12): 2581-2594.

[5] 杨科, 谭伦农. 电力市场环境下中长期负荷预测的应用分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, (3): 54-57.

[6] 陈泽淮, 张尧, 武志刚. RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (1): 15-19.

[7] 岳璐, 张尧, 钟庆, 等. 基于模糊逻辑聚类神经网络算法的中长期负荷预测[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(2): 42-46.

[8] 徐健明, 燕飞, 杨文字. 中长期电力负荷的变权灰色组合预测模型[J]. 电网技术, 2005, 29 (17): 26-29.

[9] 毛李帆, 姚建刚, 金永顺, 等. 中长期电力组合预测模型的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (16) : 53-59.

[10] 史林军, 唐国庆, 马晓东, 等. 基于面向对象的电力系统中长期负荷预测软件的开发[J]. 继电器, 2007(14): 59-62.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

阳绍峰 (1981-), 男, 中级工程师, 主要研究方向为配网规划。