基于改进固定系数法的互联电网频率特性系数实测方法及应用

电网频率偏差系数*B*是电力系统调频的重要参数，而电网频率静态特性系数*β*实测值是确定电网频率偏差系数*B*的基础，如何获取准确的电网频率静态特性系数*β*值，其测试方法十分关键。在固定系数法的基础上进行改进，提出了定步长增减出力的电源扰动方法实测大电网频率静态特性系数，再对测试数据进行最小二乘法拟合，根据拟合结果设定区域电网频率偏差系数，然后应用于实际电网试验，从电网频率和控制区联络线功率的实测结果来看，频率恢复快速、联络线功率稳定。因此，采用定步长功率扰动方法不仅能够准确地得到电网频率静态特性系数*β*，且具有安全可靠的优点。

李 华[1] 任 凯[2] 张江滨[2] 万天虎[1]/1.国网陕西省电力公司电力科学研究院
2.西安理工大学水利水电学院

李 华/高级工程师

关键词/Keywords
互联电网·
频率静态特性系数·
改进固定系数法·
最小二乘法·
频率恢复·
联络线功率·

0 引言

随着我国电网规模持续快速扩大、电压等级的提高以及新能源比重和新型用电服务的增加，互联电网持续供电的可靠性和经济性面临巨大考验[1-2]。频率偏差系数*B*涉及事故频率控制系统和实施频率控制考核的重要参数，在区域控制偏差（Area Control Error，ACE）计算、控制性能评价标准（Control Performance Standards，CPS）考核及互联电网自动发电控制（Automatic Generation Control，AGC）等方面广泛应用，一般应每年设定一次[3]，设定原则是要尽可能接近频率静态特性系数*β*。*B*与*β*之间的差额越小，所计算出来的ACE与被测算控制区域的功率控制偏差就越接近，频率调节责任的分配就更为公平合理[4-5]。

频率偏差系数*B*设定方法分为固定系数法和动态系数法[3]。目前电力系统区域控制频率偏差系数*B*的设定普遍采用固定系数法。文献[6]将实测实验与系统统计数据、负荷曲线相结合，为计算系统负荷频率特性系数提供了一种实用方法，但是实验过程受到二次调频的影响，计算过程存在一定的误差。国调中心印发的《联络线偏差控制技术规范》（试行）中现有*β*值的测试过程中有三个基本条件。但是这三个基本条件要求苛刻，得到的结果受到二次调频影响，扰动过后频率稳态值求解困难，误差较大；测试往往采用人为扰动的形式，实验过程中频率可能超过允许的范围，不利于系统的稳定性。文献[7]在固定*B*值的基础上，提出了不同运行方式下全天分时段*B*系数模型，而且对频率调节区域等级作了详细的划分，但是分段较多，设定和调整不易实施。文献[8-9]中提出用先进的计算机技术在线计算*β*值，设定非线性时变的*B*值，对数据的实时采集和处理要求很高，会增加系统频率控制的延时。文献[10]提出按照水、火电的死区分三段设置*B*值并进行仿真分析及实际验证，但是未考虑新能源发电对*β*值的影响。文献[11]在动态系数的基础上，考虑扰动区内机组容量限制和调节速率限制下，*B*值的设定对AGC的影响，为本文提供了参考。本文在固定系数法的基础上进行改进，提出了定步长增减出力的电源扰动方法实测电网频率静态特性系数*β*，对数据进行最小二乘法分析拟合再设定*B*值，通过实际扰动试验验证此方法对电网频率的恢复和联络线功率的稳定具有积极意义。

1 改进固定系数实测思路

互联电力系统控制管理中，采用固定系数法的各控制区的频率静态特性系数每年调整一次，固定的计算方法如下所述。

1）以上一年高峰时段互联电网发生扰动时，根据控制区的联络线功率变化量与频率偏差变化量的比值，计算出的控制区实际电网频率特性系数为依据，由计算出的实际平均值来确定控制区频率响应系数。按照式（1）计算为

$$\beta_i = (\Delta p_{pi} - \Delta P_{ri}) / [10(f_{1i} - f_{2i})] \quad (1)$$

式中，Δp_{pi}为扰动前后联络线功率计划差值；ΔP_{ri}为扰动前后联络线功率实际差值；f_{1i}为扰动前互联系统频率稳态值；f_{2i}为扰动后互联系统频率稳态值。

2）有负荷控制区的频率静态特性系数可按控制区预计的年最高负荷的（1%～2%）/0.1 Hz设置。

3）对没有负荷的控制区，静态特性系数可按控制区预计的最高发电水平的1%/0.1 Hz设置。

本文在固定系数的测试方法上进行改进，实测思路如下所述。

1）选择电源调整单位及第一调频厂单位。

2）退出并网机组AGC功能。

3）电源调整单位定步长增减发电机出力，需确保功率稳定后作下一次调整。

4）网调PMU记录各省区系统频率、地理联络线数据（联络线功率和ACE值）及主要厂站出力等数据。

5）通过系统频率和电源扰动功率对应曲线，找出增减出力过程中各个功率稳定点对应的频率稳定值。

6）通过最小二乘法拟合多次试验曲线，一次曲线斜率取平均值就是电网频率静态特性系数值。

7）通过静态特性系数值实测结果分段设置B值，通过实际扰动分析验证结果的准确性。

2 改进固定系数法在多区域互联系统下的应用分析

AGC是现代大型互联电网实现频率和联络线交换功率控制的最有效手段[12]。控制区AGC的控制模式分为定频率控制模式（Constant Frequency Control，CFC）、恒定联络线交换功率控制（Flat Tie-line Control，FTC）和定联络线偏差控制模式（Tie-line Bias Control，TBC）[13]。如下表所示，AGC三种控制模式的优缺点及适用范围。

表 AGC控制模式对比

控制模式	优点	缺点	适用范围
CFC	控制系统频率在基准频率范围内	没有考虑与外部控制区的功率交换	独立电网或互联电网的主控制区
FTC	控制实际交换功率与计划值一致	须有其他控制系统采用CFC或TBC方式来维持系统频率	小容量的控制系统
TBC	既控制交换功率又控制频率	B值设定与β不一致，会发生过调或欠调	一般互联电网均推荐TBC模式

目前电力系统采用“主－子控制区”（CFC＋TBC）的控制策略，即分调按照CFC模式进行控制，省调按照TBC模式进行控制。省调负责制定其直调机组的运行计划，负责按照 TBC 控制模式，通过调整机组实时出力，满足本控制区电力实时平衡，控制省间联络线潮流。在发生大扰动的情况下，省调需按照分调指令，参与跨省联络线调整[14-15]。

互联电网各控制区AGC模式普遍采用TBC模式，其计算公式为

$$\mathrm{ACE} = \Delta P_t - 10B\Delta f \quad (2)$$

式中，ΔP_t为地理联络线交换功率实际值与计划值之差；B为控制区的频率偏差系数，MW/0.1 Hz；Δf为系统频率实际值。

对于多区域互联系统，各控制区域的功率缺额为ΔP_i（$i=1,2,\cdots,n$），频率静态特性系数为β_i（$i=1,2,\cdots,n$），则

$$\begin{cases} \Delta P_1 + \Delta P_{t1} = -\beta_1 \Delta f \\ \Delta P_2 + \Delta P_{t2} = -\beta_2 \Delta f \\ \vdots \\ \Delta P_1 + \Delta P_{ti} = -\beta_i \Delta f \end{cases} \quad (3)$$

得到

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_\Sigma}{\beta_\Sigma} \quad (4)$$

$$\Delta P_{ti}=\frac{\beta_i\Delta P_\Sigma-\beta_\Sigma\Delta P_i}{\beta_\Sigma} \tag{5}$$

其中

$$\Delta P_\Sigma=\sum_{i=1}^{n}\Delta P_i \tag{6}$$

$$\beta_\Sigma=\sum_{i=1}^{n}\beta_i \tag{7}$$

当控制区采用TBC控制模式时，各控制区的AGC机组调整量为

$$\mathrm{ACE}_i=\Delta P_{ti}-10B_i\Delta f \tag{8}$$

即

$$\mathrm{ACE}_i=\frac{\beta_i\Delta P_\Sigma-\beta_\Sigma\Delta P_i}{\beta_\Sigma}-K_i\frac{\Delta P_\Sigma}{\beta_\Sigma} \tag{9}$$

当采用固定系数法将控制区域K_i的设置与β_i近似相等时，ACE_i为

$$\mathrm{ACE}_i\approx\frac{\beta_i\Delta P_\Sigma-\beta_\Sigma\Delta P_i}{\beta_\Sigma}-\beta_i\frac{\Delta P_\Sigma}{\beta_\Sigma}=-\Delta P_i \tag{10}$$

在TBC模式下ACE只与本控制区额功率缺额有关，当本区域无扰动发生时，ACE近似为零，控制区AGC机组只向扰动区提供一次调频功率支援，联络线功率随着扰动结束恢复至计划值。

通过改进的固定系数法测量的β值设定互联系统B值，在稳态情况下，对各控制区而言，能够尽可能确保其联络线交换功率值与交换功率计划值一致，系统频率与目标值一致，以满足系统安全、经济和公平的需要。

3 现场实测方法

本次实测以西北电网为例，测试期间并网发电火电机组容量为60 760 MW，水电为18 450 MW，有典型的风电、光伏电站参加。各主控制区具体的参加试验的机组（西北分中心直调机组）共38台机组，其中水电机组22台，火电机组16台。本次联调试验选定拉西瓦水电厂作为试验用调整电源单位，选定李家峡水电厂作为第一调频厂单位。

3.1 传统固定系数法测试频率静态特性

扰动源动作情况为甩拉西瓦水电站5#、6#机组共1 200 MW负荷。在全网机组一次调频功能投入，AGC功能退出情况下，分析电网对负向频率阶跃扰动的响应特性，如图1所示，频率起始值为49.96 Hz，大约13 s后电网频率恢复至49.927 Hz，大约60 s后系统频率逐步降低至49.923 Hz并保持，系统最低频率为49.882 Hz。试验过程中这个极值是不可控的，由于远动通信和PMU给AGC控制系统下发指令的控制周期和数据延迟，这个测试过程很可能导致AGC机组在短时间快速增减负荷，对机组和电网的稳定性不利。

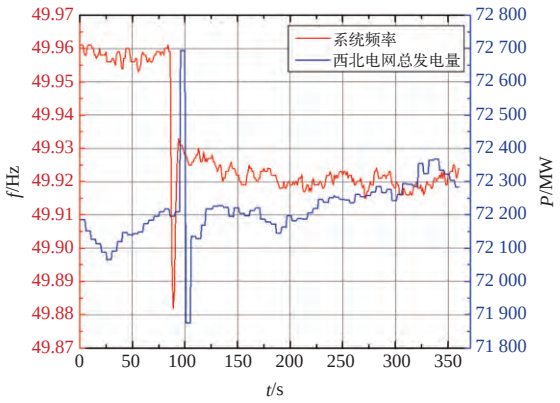

图1 传统固定系数法测试过程

3.2 改进固定系数法实测频率静态特性

本文提出的测试方法通过拉西瓦机组快速增、减出力逐步推升及拉低电网稳定频率。试验过程中全网AGC退出，一次调频投入。测试电网在49.92～50.08 Hz范围内的频率静态特性。

如图2所示，拉西瓦两台机组按照150 MW的步长增减负荷，系统的频率在一次调频的作用下达到一个稳定运行点，经过多次试验，记录功率

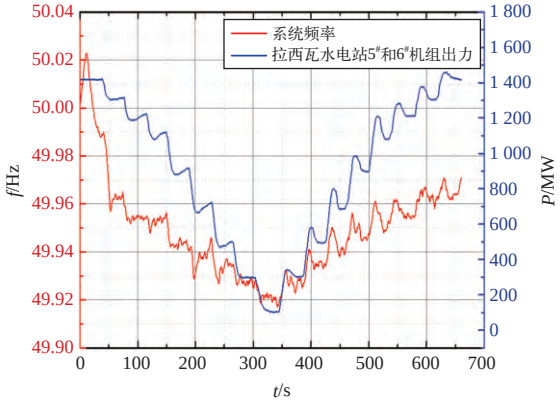

图2 改进固定系数法测试过程

和频率的对应关系。可以看出改进固定系数法测试过程中系统频率差值小，对电力系统的安全稳定运行无影响，频率极值为49.918 Hz，较传统测试方法安全可控。

进一步分析测试数据，得到实测过程中功率和频率的对应数值，最小二乘拟合功率与电网频率，可知曲线的斜率就是所测得的电力系统频率静态特性系数β。

本次实测共进行了三组试验，将每组试验的实测稳定运行点提取出来，把每个稳定点的频率和机组有功功率的对应关系进行最小二乘线性拟合，如图3和图4所示，分别为系统频率小于50 Hz和大于50 Hz时的最小二乘拟合曲线。可以看出，通过本文提出的定步长增减出力的方法测得的互联电网系统频率静态特性系数值误差较小，多次试验通过最小二乘拟合曲线斜率基本接近，将电网频率在50±0.033 Hz范围之外的在升、降出力方向通过最小二乘法拟合，得到系统频率静态特性系数β的测试值分别为−3 125 MW/0.1 Hz和−3 100 MW/0.1 Hz。

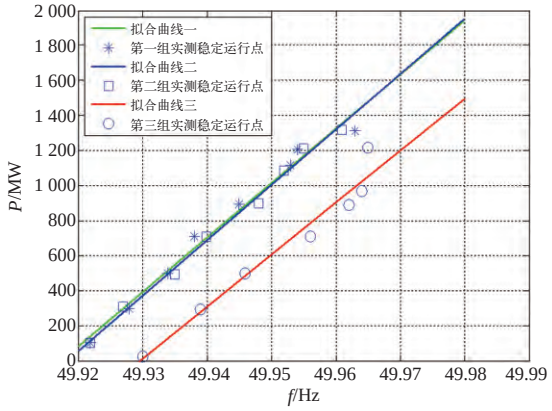

图3 频率小于50 Hz时静态特性最小二乘拟合

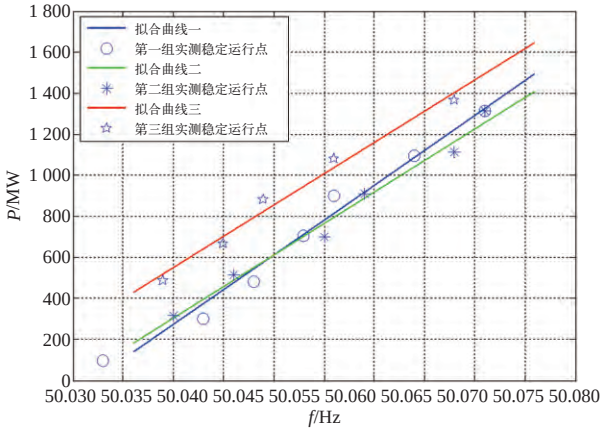

图4 频率大于50 Hz时系统静态特性最小二乘拟合

考虑到水电机组一次调频人工死区设置为±0.05 Hz；火电机组一次调频人工死区设置为±0.033 Hz；B值的设定需要按照频率区间分段求解并设置。频率在50±0.033 Hz范围之内，测量数据通过最小二乘法拟合，多次平均得到系统频率静态特性系数为−300 MW/0.1 Hz。考虑到机组的限负荷情况，当系统频率在50±0.15 Hz范围之外时，得到电力系统的的频率静态特性系数为−1 600 MW/0.1 Hz。如图5所示，就得到了西北电网分段频率静态特性系数全特性，通过其就能设定更切合实际电网的频率偏差系数B值。

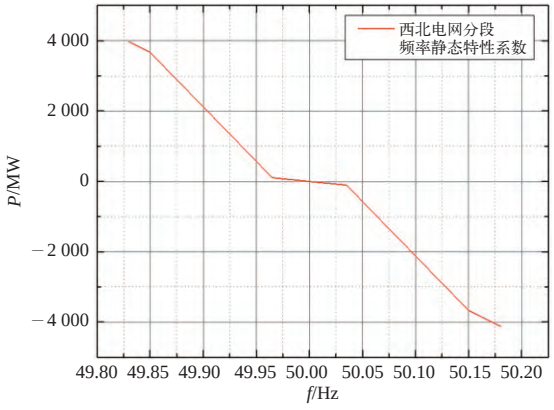

图5 西北电网分段频率静态特性系数

4 改进固定系数法在互联电网中的实际优势

根据本文的改进固定系数法实际设置西北电网的频率偏差系数，对互联电网频率恢复情况和联络线功率稳定情况进行分析，验证本文测试方法的实际优势，共4次对比试验，试验条件分别为全网AGC退出、扰动区AGC投入在TBC模式；B值按照本文方法设定、扰动区AGC投入TBC模式；B值按照传统扰动法设定、扰动区AGC投入FTC模式。

4.1 频率恢复情况

如图6所示，可以得出，采用本文提出的改进

固定系数法设定的B值相比按照传统固定系数法频率恢复情况更优，一次调频和AGC能够更好地协调配合，频率恢复值更接近扰动前的稳态值；采用以往固定系数法，频率恢复过程中出现了一定的反弹波动，频率稳定值较低；当系统采用FTC模式时，不涉及B值的设定，系统频率恢复速率明显较低，频率稳态值介于前两者之间。证明了通过本文的测试方法测得的β值更接近实际系统的自然频率特性系数，频率的恢复过程更加优化。

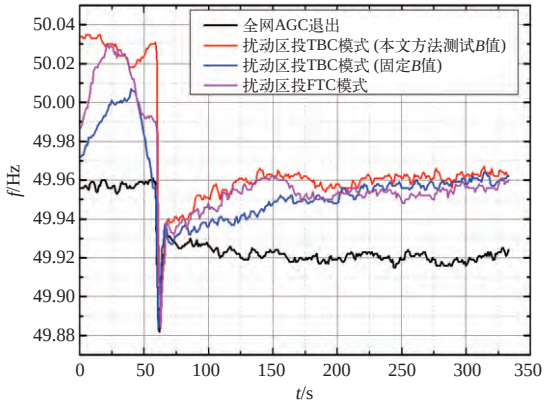

图6　扰动情况下系统频率响应

4.2　联络线功率响应情况

当青海电网发生扰动时，以陕西地理联络线功率为研究对象，分析当扰动发生在控制区外时，本控制区通过地理联络线对其支援情况。当B值按照本控制区频率静态特性系数β设定时，考虑到公平性和经济性的原则，其他控制区只提供一次调频时的功率支援，扰动缺额由扰动区AGC机组进行补充，当调频过程结束后，其他控制区联络线功率应当恢复至计划值。如图7和图8所示，当系统AGC退出的情况下，从系统发生扰动到系统稳定，陕西控制区地理联络线交换功率向外输送功率约200 MW并维持，系统频率无法恢复的同时联络线功率也无法恢复到扰动前的计划值，这对于整个系统来说都是不允许的；当系统AGC投入TBC模式，并按照本文测试方法分段设定B值时，陕西控制区联络线功率在系统发生扰动前和扰动后稳态值基本相等，陕西控制区只负责提供一次调频产生的电量，AGC机组不会增加出力；当系统AGC投入TBC模式，B值按照固定系数法设定，陕西控制区联络线功率扰动前后的稳态值有明显的功率差值，对互联电网的稳定性不利；当系统AGC投入在FTC模式时，不涉及B值的设定，陕西控制区能够按照定联络线功率模式对青海控制区进行功率支援，但是联络线功率在扰动恢复过程中出现较大的波动，这对电力系统和机组的稳定性是不利的。

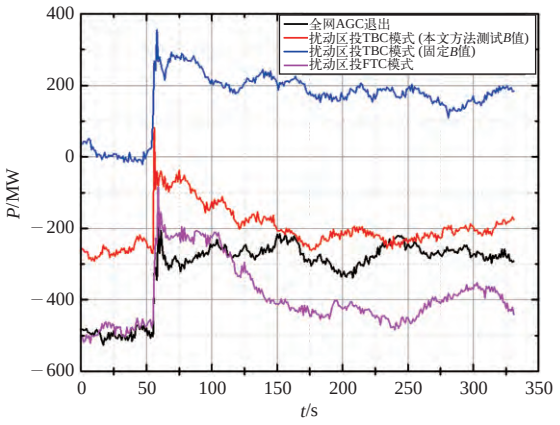

图7　扰动情况下陕西地理联络线功率

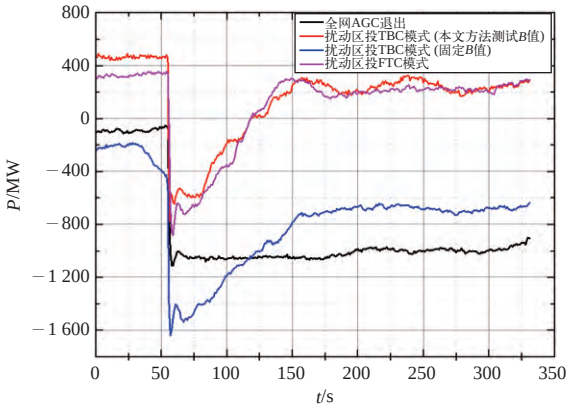

图8　扰动情况下青海地理联络线功率

5　结束语

通过本文改进固定系数法对互联电网频率静态特性系数的实测方法介绍及实际验证可以得出：

1）互联电网控制区AGC投入在TBC模式时，B值的设定大小直接影响到电力系统二次调频性能，通过固定系数法设定B值时，要保证设定值尽可能接近频率静态特性系数β。

2）采用本文改进固定系数法，通过定步长增

减出力的方法实测的B值能够准确反映系统静态频率特性系数β的实际值，实测过程安全可靠、测试方法更加优化且工程操作方面易于实现。

参考文献

[1] 刘振亚．中国电力与能源 [M]．北京：中国电力出版社，2012．

[2] 孙玉娇，周勤勇，申洪．未来中国输电网发展模式的分析与展望 [J]．电网技术，2013，37 (7)：1929-1935．

[3] 高翔，等．现代电网频率控制应用技术 [M]．北京：中国电力出版社，2010．

[4] 李卫东，常烨骅，陈兆庆，等．区域控制偏差的动态内涵 [J]．电力系统自动化，2016，40 (24)：146-150．

[5] 唐跃中．AGC按联络线偏差控制时频率偏差系数的确定 [J]．电网技术，1997，21 (6)：5-7，13．

[6] 魏晖，沈善德，朱守真，等．系统自然频率特性系数的实测与计算 [J]．电力系统自动化，2001，25 (5)：49-52．

[7] 刘娆，李卫东．自动发电控制中频率偏差系数确定方法的探讨 [J]．电力系统自动化，2006，30 (6)：42-47．

[8] Kennedy T，Hoyt S M，Abell C F．Variable，nonlinear tie-line frequency bias for interconnected systems control [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1988，3 (3)：1244-1253．

[9] Oni B，Graham H，Walker L．Investigation of nonlinear tie line bias control of interconnected power systems [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1981，PAS-100 (5)：2350-2356．

[10] 文丽，王坚，陈明辉，等．三段式频率偏差系数及其在互联电网调频中的应用 [J]．电力系统自动化，2010，34 (19)：59-63．

[11] 赵万宗，李滨，韦化，等．互联电网CPS标准下计及一次调频的最优AGC控制模型 [J]．中国电机工程学报，2016，36 (10)：2656-2664．

[12] 贾燕冰，严正，高翔，等．基于动态系数法的互联电网K系数调整策略 [J]．电网技术，2009，33 (12)：72-76．

[13] DL/T 5003—2005 电力系统调度自动化设计技术规程 [S]．北京：中国电力出版社，2005．

[14] 任广宇．CPS 标准下动态调整频率偏差系数的自动发电控制 [D]．武汉：华中科技大学，2006．

[15] 袁炜灯，关杰康，郑风雷，等．多元件并列运行电力系统供电可靠性评估方法 [J]．2017，12 (2)：43-46．

（收稿日期：2017－02－18）EA

(上接第29页)

[D]．长沙：湖南大学，2012．

[2] Q/GDW 1168—2013 输变电设备状态检修试验规程 [S]．北京：中国电力出版社，2013．

[3] 王静雷．热红外图像异常目标检测算法研究 [D]．杭州：浙江大学，2013．

[4] 何洪英，姚建刚，蒋正龙，等．利用红外图像特征和径向基概率神经网络识别不同湿度条件下绝缘子的污秽等级 [J]．中国电机工程学报，2006，26 (8)：117-123．

[5] 张杰．红外热成像测温技术及其应用研究 [D]．成都：电子科技大学，2011．

[6] 李佐胜，李文刚，姚建刚，等．应用绝缘子红外热像处理的现场污秽等级检测方法 [J]．中国电机工程学报，2014，34 (4)：132-138．

[7] 陈水桥，陈洪山，张训生．红外热成像法研究电路板热分布特性 [J]．物理实验，2011，6 (3)：8-11．

[8] 张彦，姚建刚，毛田，等．WebGIS红外热像零值绝缘子在线检测系统 [J]．电力系统及其自动化学报，2013，25 (4)：51-57．

[9] 李旦．基于红外热像的零值绝缘子图像处理关键技术研究 [D]．长沙：湖南大学，2013．

[10] 陈金法．基于红外热像技术的绝缘子状态检测与诊断 [J]．电工电气，2011 (12)：42-47．

（收稿日期：2016－11－08）EA