

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.12.007

支柱瓷绝缘子表面缺陷的电场分析与检测

郑 重^{1,2}, 冯 伟^{1,2}, 潘春辉³, 张长虹⁴, 李 冬⁵

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 3. 深圳供电局有限公司, 深圳 518001; 4. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 5. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 高压支柱瓷绝缘子断裂而引发系统断电及设备损毁在电力系统中并不罕见。文中在充分统计故障规律的基础上, 确定了断裂易发生位置, 并针对断裂发生前期出现的表面缺陷状态进行了三维有限元分析, 得出其表面电场变化的规律性, 并依据该规律性设计了相应的故障检测方法。最后, 文中讨论了该方法的灵敏度及抗干扰能力。

关键词: 支柱瓷绝缘子; 断裂事故; 无损检测; 有限元法; 电场检测法

Detection and Electric Field Analysis of Surface Defects on Porcelain Post Insulator

ZHENG Zhong^{1,2}, FENG Wei^{1,2}, PAN Chunhui³, ZHANG Changhong⁴, LI Dong⁵

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 4. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China; 5. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: The power grid has had experiences with high voltage post insulator breakdown, which cause further power outage and equipment damage. The failure statistics shows the failure patterns and indicates the most vulnerable position along the pole. The precursory scenario of such breakdown, where a small groove appears at the bottom surface of the pole, is analyzed for the spatial electric field distribution using finite element method. The analyses show large electric field variation at the point of defect, which gives rise to an innovative approach to detect such defect prior to failures. The feasibility and sensitivity of such method is discussed and the online field interferences are cleaned.

Key words: porcelain post insulators; breakdown accident; nondestructive testing; finite element method; electric field detection method

0 引言

支柱瓷绝缘子断裂事故一旦发生, 会使高压母线(或是高压隔离开关)中间一段距离失去支撑, 而且重新更换支柱瓷绝缘子比较复杂, 往往造成大面积、长时间停电; 同时, 随着电网容量的增大, 大型电

厂、变电所和高电压大容量交、直流输电线路日益增多, 由支柱瓷绝缘子断裂事故造成的损失也越来越大。因此, 支柱瓷绝缘子断裂事故已成为电网安全运行的严重威胁。即时准确检测出在役支柱瓷绝缘子的缺陷情况, 避免断裂事故的发生, 提高输变电系统运行的可靠性, 已经成为高压输变电技术中非常重要的课题。

高压支柱瓷绝缘子的断裂是一种突发现象, 但

收稿日期: 2015-07-03; 修回日期: 2015-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB724508); 北京市自然科学基金资助(4122072); 中央高校基本科研业务费专项资金(13MS02)项目。

Project Supported by National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB724508), Beijing Natural Science Foundation(4122072), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13MS02).

它的发生既有绝缘子本身的原因, 又有运行过程中外部因素的影响。从现场探测结果看, 支柱瓷绝缘子在运行和操作中受伤是产生缺陷和断裂的主要原因, 同时从现场调查结果来看, 制造工艺落后, 产品质量不高, 也是绝缘子断裂的内在原因^[1-4]。因此十分有必要开展对支柱瓷绝缘子无损检测方法的原理和应用研究。

对各省所属 66~500 kV 变电站和电厂升压站高压支柱瓷绝缘子事故的统计数据显示: 支柱瓷绝缘子开裂事故中, 损坏发生在瓷柱下部情况占总数的 60% 以上^[1]。且有数据表明, 支柱瓷绝缘子断裂多发生在下法兰和第一瓷沿之间。

针对支柱瓷绝缘子断裂事故, 文[5-6]中研究小角度纵波和超声爬波进行检测的方法, 验证了超声波无损检测支柱瓷绝缘子的有效性; 而文[7]中指出超声波在支柱瓷绝缘子探伤检测中存在误判的现象; 文[8]中从检测原理和试验验证两个角度探讨了振动法用于支柱瓷绝缘子探伤的可行性。但是目前该方法对于检测的灵敏度和准确性并没有相关研究的支撑, 并且在现场应用的抗干扰能力也有待进一步探讨。文[9]中的研究结果表明, 紫外成像法仅对于支柱绝缘子加压端的缺陷检测有效。

电场法是通过检测沿绝缘子轴线方向的电场分布, 并与正常电场分布比较来检测绝缘子缺陷的。文[4]中指出, 电场法可用于检测零值绝缘子; 文[10-11]中研究了电场测量法应用于在线检测合成绝缘子的内绝缘缺陷。然而, 关于电场法检测支柱瓷绝缘子表面缺陷方面的研究却极为少见。文中利用有限元软件 COMSOL Multiphysics, 对电场法检测支柱瓷绝缘子的表面缺陷进行了仿真研究。

1 电磁场有限元方法

1.1 有限元法

有限元方法的基础是变分原理和加权余量法。其基本思路是把求解域离散成有限个互不重叠的单元, 在每个单元内选择一些合适的节点作为插值点, 然后把待求偏微分方程中的因变量改写成依据节点上的值的插值函数组成的线性方程组, 从而可以通过适当的数值方法求解得到所需的解。

1.2 基本方程

微分形式的麦克斯韦方程组为:

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t; \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \partial D / \partial t; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0. \quad (4)$$

输电线路通电情况下其周围工频电场变化频率很低, 属准静态场范畴。当电场的变化频率很低时, 库仑电场远大于感应电场, 即 $-\partial B / \partial t = 0$ 。若只考虑时变电场, 则不考虑式(4), 得到控制方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \rho \\ J = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)E \\ E = -\nabla V \end{cases} \quad (5)$$

2 计算模型

以户外棒形支柱瓷绝缘子为例, 建立三维模型, 见图 1。

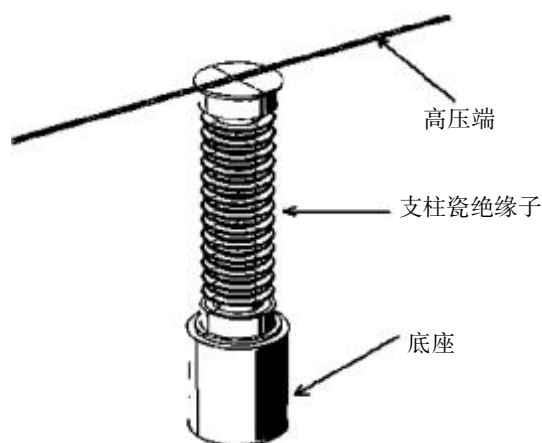


图 1 支柱瓷绝缘子三维模型图

Fig. 1 Three dimensional model of post porcelain insulator

根据对支柱瓷绝缘子的无损检测要求, 必须在裂纹扩展速率处于慢速裂纹扩展区时检测出来, 即无损检测灵敏度必须发现最高应力下的最小临界尺寸^[15-20]。根据断裂力学的理论分析支柱瓷绝缘子的断裂过程, 可以计算出该支柱瓷绝缘子的最小临界尺寸约为 5 mm。因此, 在下法兰到第一瓷沿之间的瓷柱表面上, 设置一个深度为 5 mm、宽度为 1 mm 的裂纹, 然后比较表面裂纹对电场分布的影响。能够反映出该影响的测量方式, 即可以被用来检测支柱瓷绝缘子的表面缺陷。仿真结果表明: 沿着绝缘支柱轴向的整体电场分布, 无法反应出裂纹对于电场分布的影响, 见图 2。但是, 针对断裂事故的多发部位的局部电场分析, 见图 3, 与正常情况下的电场相比, 裂纹处电场强度会有明显的增大。从仿真示例来看, 定量分析一个深度为 5 mm、宽度为 1 mm 的裂纹对局部电场的畸变影响程度为 100%~200%, 这种影响可以通过技术手段测量出来。因此电场法对于支柱瓷绝缘子局部裂纹的检测是有效的。图 2、3 中: 横坐标表示检测位置的高度; 纵坐标表示支柱瓷绝缘子表面电场强度的轴向分量大小。

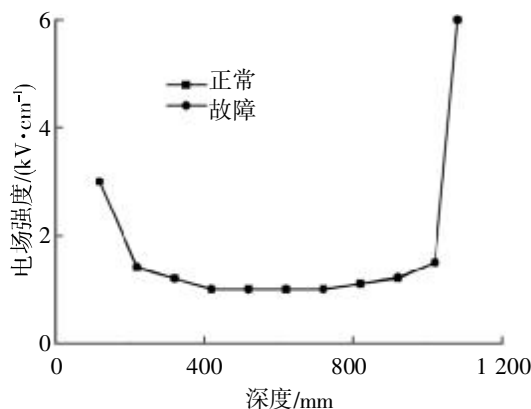


图 2 裂纹对绝缘支柱外沿电场分布的影响

Fig. 2 Effect of cracks on the electric field distribution in the outer edge of the insulating pillar

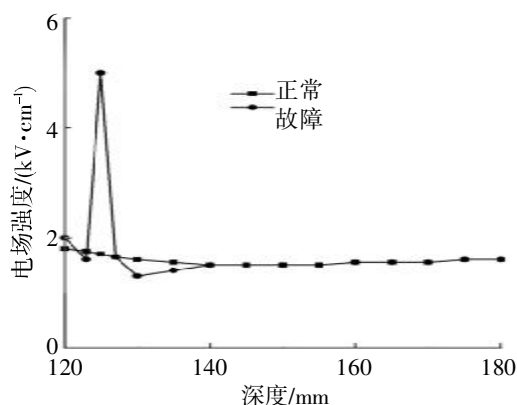


图 3 裂纹对局部电场的轴向分量的影响

Fig. 3 Effect of cracks on the axial component of the local electric field

3 裂纹特性对检测结果的影响

电场法可以应用于支柱瓷绝缘子表面裂纹的检测,进一步分析该检测方法的灵敏度。采用人工切槽来分别研究表面裂纹的深度与宽度对电场轴向分量的影响情况,并且采用人工的近表面球型孔隙来分析近表面孔隙型缺陷对电场分布的影响。考虑实际瓷体裂纹与人工切槽相比,其开口细小,裂纹尖端更细小,也无人工切槽平直光滑。产品烧结过程中形成的孔隙也和人工制作的有很大的区别,实际孔隙的形状极其复杂,分布有很大的随机性。因此现场方法应用时,需设计制作系列模拟试块,如表面自然裂纹、烧结裂纹(在坯样上预制裂纹再烧结)以及瓷体内部缺陷等。通过对系列模拟试块的电场轴向分量的测量,来校验该方法的分辨率及灵敏度。

3.1 裂纹深度的影响

裂纹宽度为 1 mm 时,深度分别为 1、3、5 mm 的系列模型,进行仿真计算的结果见图 4。与良好绝缘支柱的电场相比,裂纹处电场的畸变率(畸变率=(缺陷情况下的电场畸变最大值-良好情况下的电场值)/良好情况下的电场值;计算时均采用电场强度的轴

向分量)分别为 75%、135%、190%。裂纹越深对电场分布的影响越大,也越容易检测出裂纹缺陷。

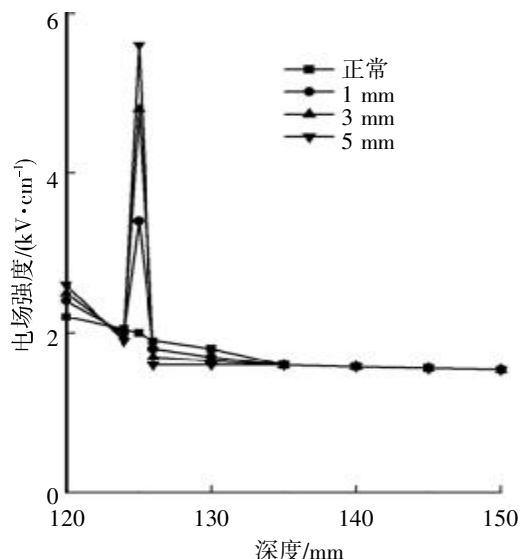


图 4 裂纹深度对电场轴向分量的影响

Fig. 4 Influence of crack depth on the axial components of the electric field distribution

3.2 裂纹宽度的影响

裂纹深度为 1 mm,宽度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 mm 的系列模型,进行仿真计算的结果见图 5。与良好绝缘支柱的电场相比,裂纹处电场的畸变率分别为 150%、116.67%、108.33%、75%。裂纹宽度越小对电场分布的影响越大,也越容易检测出裂纹缺陷。

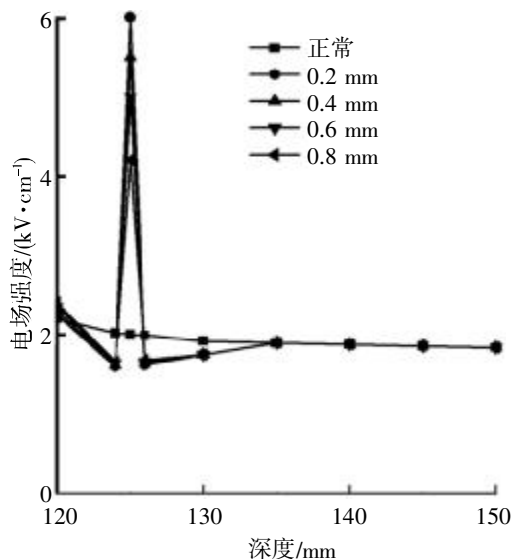


图 5 裂纹宽度对电场轴向分量的影响

Fig. 5 Influence of crack width on the axial components of the electric field distribution

3.3 裂纹位置的影响

近表面的孔隙型缺陷用直径为 2 mm 的球型孔

隙代替。球型孔隙的表面距离瓷柱的表面分别为 0.5、1 mm 的系列模型, 进行仿真计算的结果见图 6, 与良好绝缘支柱的电场相比, 电场的畸变率分别为 15.79%、0.5%。结果表明: 电场法仅对非常靠近支柱表面的孔隙型缺陷可检测, 但是灵敏度较低。

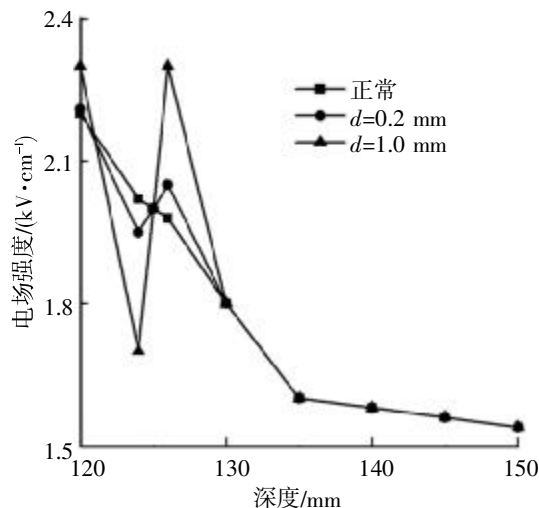


图 6 近表面孔隙型缺陷对电场轴向分量的影响

Fig. 6 Effect of near surface porosity type defects on the axial component of the electric field

4 现场应用

在现场复杂的工频电磁场环境下, 实现电场法测量, 很容易受到干扰。考虑到一些典型的干扰, 如谐波、白噪、随机脉冲等。在现场检测时, 可以运用微秒级电场检测传感器在瓷柱表面滑动来采集数据。因为传感器 A/D 采样的时间及时间间隔都在微秒级, 所以在进行瞬时测量时, 可以不考虑电场的容性效应, 所有测量值都满足线性迭加条件。最终的数据都是在干扰迭加的情况下测量的, 对测量数据进行差模处理就可以有效地排除干扰。例如: 在瓷柱的一个水平圆周上选取四个测量点, 提取轴向测量信号, 利用差模比较的方法进行数据信号分析, 结果见图 7, 可以明显判断出线 1 对应的是裂纹缺陷所在。

5 结论

文中利用有限元软件 COMSOL Mutiphysics, 开展了裂纹缺陷对支柱瓷绝缘子表面电场畸变影响的仿真研究, 得出如下结论:

1) 通过测量支柱瓷绝缘子表面电场的轴向分量, 可以有效地检测出瓷柱表面的微小裂纹缺陷, 实现对支柱瓷绝缘子的无损检测。

2) 支柱表面裂纹的深度越大, 宽度越窄, 对电场分布的影响越大, 也容易被检测到。当深度增大一倍时, 电场畸变增大大约 1.4 倍, 当宽度缩小一倍时,

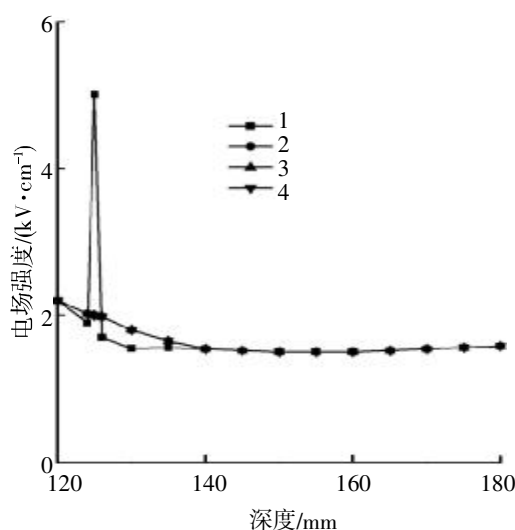


图 7 数据信号分析的结果

Fig. 7 Results of analyzing the data signals

电场畸变增大大约 1.28 倍。

3) 对于支柱瓷绝缘子表面的微小裂纹, 电场检测方法不仅具有很高的灵敏度, 而且可以具有很好的抗干扰能力。另外, 电场法仅对于近表面的孔隙性缺陷可检测, 但灵敏度很低。

参考文献:

- [1] 国家电力公司发输电运营部高压支柱瓷绝缘子事故调查工作小组. 高压支柱瓷绝缘子事故调查分析及预防措施[J]. 电力设备, 2002, 3(4): 32-37.
The State Power Corporation Transmission Operation Department High Voltage Post Insulators Accident Investigation Team. High voltage post insulator fault investigation analysis and preventive measures[J]. Electrical Equipment, 2002, 3(4): 32-37
- [2] 吴光亚, 姚忠森, 何宏明, 等. 高压支柱瓷绝缘子运行事故分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(5): 22-24.
WU Guangya, YAO Zhongsen, HE Hongming, et al. Failure analyses for high voltage post insulators of ceramic material[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(5): 22-24.
- [3] 雍 军, 沈庆河, 胡晓黎, 等. 浅析山东电网高压支柱瓷绝缘子断裂原因[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 90-91.
YONG Jun, SHEN Qinghe, HU Xiaoli, et al. Analysis on broken accident of high voltage porcelain post insulators of Shandong electric power corporation [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 90-91.
- [4] 关志成, 刘瑛岩, 周远翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulator and external insulation of electric transmission and transformation equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

- [5] 李晓红, 王 敏, 吴 敏, 等. 支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 159-162.
LI Xiaohong, WANG Min, WU Min, et al. Ultrasonic testing validity of porcelain post insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 159-162.
- [6] 季昌国. 超声爬波法在支柱瓷绝缘子在役检测中的应用[J]. 华北电力技术, 2008(7): 35-37.
JI Changguo. Application of ultrasonic creep waves on post insulator in-service inspection[J]. North China Electric Power, 2008(7): 35-37.
- [7] 左重华. 绝缘子探伤谨防“伪缺陷”导致误判[J]. 电力安全技术, 2010, 12(4): 54.
ZUO Chonghua. Beware of pseudo defects lead to misjudgment in the insulator detection [J]. Electric Safety Technology, 2010, 12(4): 54.
- [8] 臧春艳, 廖一帆, 肖声扬, 等. 振动法检测支柱绝缘子缺陷的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 8-12.
ZANG Chunyan, LIAO Yifan, XIAO Shengyang, et al. Vibration method for the defects detection of post insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(3): 8-12.
- [9] 雷红才, 臧春艳, 蒋正龙, 等. 紫外成像法检测支柱绝缘子的破损缺陷[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 87-91.
LEI Hongcai, ZANG Chunyan, JIANG Zhenglong, et al. Detecting breakage defect of post insulator with ultraviolet imaging method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 87-91.
- [10] 李成榕, 程养春, 陈 宇, 等. 电场测量法在线检测合成绝缘子内绝缘缺陷的研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 39-41.
LI Chengrong, CHENG Yangchun, CHEN Yu, et al. On-line detect ion of internal defects of composite insulator by electric field mapping [J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 39-41.
- [11] 程养春, 李成榕, 王晓刚, 等. DL-1 型合成绝缘子检测仪现场测试分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 42-44.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, WANG Xiaogang, et al. Analysis of field test of DL-1 composite insulator detector[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(5): 42-44.
- [12] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.
- [13] 樊亚东, 文习山, 李晓萍, 等. 复合绝缘子和玻璃绝缘子电位分布的数值仿真[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 1-3.
FAN Yadong, WEN Xishan, LI Xiaoping, et al. Numerical simulation of electric potential distribution of composite insulator and glass insulator [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 1-3.
- [14] 黎卫国, 郝艳捧, 熊国锟, 等. 覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 29-35.
LI Weiguo, HAO Yanpeng, XIONG Guokun, et al. Simulation and analysis of potential distribution of iced composite insulator based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 29-35.
- [15] 刘士利, 王泽忠, 孙 静. 基于线—面模型的边界元法计算特高压交流变电站设备附近工频电场[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 162-167.
LIU Shili, WANG Zezhong, SUN Jing. Calculation of power frequency electric field near equipments in UHV substations with BEM based on line-area models [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 162-167.
- [16] 李晓红, 刘叙笔, 张 杰, 等. 支柱瓷绝缘子断裂临纹尺寸的分析与计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(z1): 102-103.
LI Xiaohong, LIU Xubi, ZHANG Jie, et al. Analysis and calation of critical crack dimension of fracture in the strut porcelain insulator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(z1): 102-103.
- [17] MOROCUTTI T, BERG T, MUHR M, et al. Developments of high voltage porcelain post-insulators [C]//IEEE Conference Record of the 2012. [S.l.]: IEEE, 2012: 395-398.
- [18] WU Xinqiao, PENG Zongren, LIU Peng, et al. Calculation of electric-field distribution and research on characteristics of shielding ring [C]// 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials. [S.l.]: IEEE, 2006: 603-606.
- [19] 阎 东, 罗 菁, 卢 明, 等. 支柱绝缘子强度计算方法的探讨[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 123-124.
YAN Dong, LUO Jing, LU Ming, et al. Discussion on calculation of strength of post insulator [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 123-124.
- [20] 倪光正, 崔 翔. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
NI Guangzheng, CUI Xiang. Theory of engineering electromagnetic field [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- 郑 重(1975—), 男, 硕士生导师, 研究方向为电力设备检测与诊断技术、损坏机理研究以及非线性电磁热力场耦合分析等。
- 冯 伟(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备的状态监测与故障诊断、有限元计算等。