

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.007

沿面放电的可见光图像RGB颜色分析及应用

陈锐民¹, 吴 鹭², 谭 丹², 叶齐政², 李兴旺¹, 王增彬¹

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510600; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 针对放电可见光图像的背景干扰影响图像的空间分布问题,在对可见光电晕图像的灰度分析的基础上,提出了一种基于RGB颜色系统提取沿面放电有效放电区域的新方法。对沿面放电可见光图像的红(R)、绿(G)、蓝(B)三分量的空间分布特征研究发现: G 分量所占比例低,主要反映放电主干部分, R 、 B 分量能很好地反映放电的空间结构,分布区域较为相似。然后利用 $R+B$ 的合成分量对放电图像进行了降噪处理。研究结果表明,此方法优于通过设定单一灰度级作为背景阈值的方法,为后期定量研究沿面放电图像提供了一套高效可行的方法。

关键词: RGB颜色系统; 有效放电区域; 沿面放电; 阈值

Visible Light Image RGB Color Analysis of Surface Discharge and Its Application

CHEN Ruimin¹, WU Ao², TAN Dan², YE Qizheng², LI Xingwang¹, WANG Zengbin¹

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Electric Power Grid Company, Guangzhou 510600, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problem of the background light interference on the optical image of discharge, a digital image processing method presented in our previously paper is used to develop a new method to extract the effective discharge area, which is based on red, green and blue (RGB) color system. Firstly, the spatial distribution of each color component(R , G , B) is analyzed. Component G takes up low proportion, which reflects the main part of the discharge. Components R and B can reflect the spatial distribution of the discharge, and they have similar distribution area. Then the synthetic components($R+B$)are used to reduce the noise of discharge image. This method is better than the method of setting a single gray level as a threshold value of background and can be a feasible and efficient method for the further study of the surface discharge.

Key words: RGB color system; effective discharge area; surface discharge; threshold

0 引言

视觉是人类最重要的感知手段,据统计人类获取外部世界 80%的信息来源于视觉,而图像又是人类视觉的基础,因此图像处理技术的发展十分迅速。最早的气体放电研究就是从图像开始,例如电晕的描述就是形象化的 Corona,但大都是定性的研究^[1-3],后来由于统计技术和分形理论的发展,对击穿路径的研究取得进展^[4-6]。近来随着紫外照相技术的发展,从紫外图像面积、边缘和光子数等参数的

提取方法和降噪手段^[7-10],到灰度直方图和熵在气体放电领域的应用^[8-14]都取得新的进步。相比较而言,可见光照相技术用于放电研究却进展缓慢^[15-18],彩色图像的研究更少。实际上可见光相机的像素远远高于紫外相机,在同样幅面的照片中,意味着空间分辨率要远远高于紫外相机的照片,因此可见光彩色原图含有的信息量更大。当然可见光图像由于背景干扰需要降噪处理。如何对图像进行降噪,提取其中与放电状态相关的信息,找到其中的规律对放电的研究是一个新的任务。

沿面放电是高电压绝缘领域一种常见的放电现象,通常的研究集中在在电信号、光强信号、光谱信

收稿日期:2016-03-15; 修回日期:2016-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577081)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51577081).

号、电磁波和超声波,光学图像方面的研究相对较少。

笔者前期曾利用数值图像处理技术研究过介质阻挡放电的均匀性,提出了灰度、方差和变异系数的指标表征特点^[19-21],后来又将其用于电晕长度的研究^[22],但上述研究均限于可见光图像的灰度图。文中将前期研究成果拓展到沿面放电,特别是彩色原图三原色分量的分析,希望从一个新的视角来研究气体放电。

1 实验装置

文中所采用的强垂直电场沿面放电实验装置见图 1。采用针—板结构构成沿面放电主体,针电极头部为球形,直径为 0.64 mm。利用 FTO(fluorine-doped tin oxide)导电玻璃形成的介质板为玻璃,背面是导电膜,板厚度为 2 cm,直径为 6 cm。放电图像从板电极底面获得,并采用最大分辨率为 3 008 像素×2 000 像素的 Nikon D50 数码相机进行记录,实验在空气中进行。

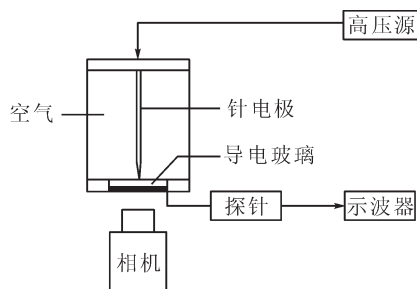


图 1 沿面放电实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2 计算方法

2.1 圆环分割法计算灰度相关系数

实验所得典型的沿面放电图像见图 2。放电形态为径向发射状,放电区域近似为圆形。文中将放电区域以针尖处为圆心,分割为个不同半径的圆环,笔者称之为单元,每个单元宽度相同,见图 2。假设第 n 个圆环中有 l 个像素点,对灰度图像来说,每个像素点的灰度值为 $g(x, y)$,范围从 0(黑)到 255(白),则每个圆环单元的平均灰度($\bar{g}$)为

$$\bar{g} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l g(x, y)。 \quad (1)$$

每个圆环单元的灰度标准差(std)为

$$std = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l [g(x, y) - \bar{g}]^2}。 \quad (2)$$

它反映了该单元内每个像素点的灰度值偏离

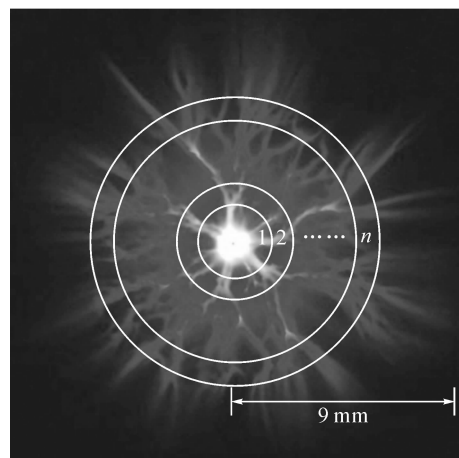


图 2 典型的沿面放电图像

Fig. 2 Typical image of creeping discharge

平均灰度值的程度,显然标准差越小,该单元灰度越均匀。但是当需要比较两个圆环单元灰度离散程度大小时,直接使用标准差比较就不太合适,文中引入具有归一化作用的变异系数(cv)

$$cv = \frac{std}{\bar{g}}。 \quad (3)$$

这样就可以进行客观比较了。知道每个圆环单元的相关系数后,就可以得到沿放电径向的图像分布特征规律。

对彩色图像来说,它是由红 red、绿 green 和蓝 blue 3 种原色光所构成,每一种色光也存在着 256 种不同等级的亮度(灰度),3 种颜色的叠加可得到所有颜色。图像处理时,可以将彩色图像先变为灰度图像后再分析,也可以将彩色图像转换为每种颜色的分量图像,提取每种颜色的亮度值,最后再分析计算每种颜色的相关系数。

2.2 放电图像的 RGB 分量特征

在确定分析图像边缘及降噪的方法前,先分析图像特征。

1)提取图 2 的 R 、 G 、 B 分量图并观察其特点,见图 3(像素点和真彩色图一样)。显然, G 分量主要集中在放电分支的主干部分,放电区域最小。 R 和 B 分量的区域比较相似,都覆盖了 G 分量区域,并且达到了放电区域的边缘,且 B 分量覆盖面积最大,直观上能够反映有效的放电区域(考虑到蓝色光更接近紫外)。

2)分别针对 R 、 G 、 B 分量图,计算每个圆环单元 R 、 G 、 B 分量所占比例。用圆环分割算法,统计某个分量图每个圆环单元内总的像素点个数及该分量像素点个数,其中 R 、 G 、 B 分量的亮度为 0 的不计入各自的像素点个数,再将该分量像素点个数分别除以

对应圆环所含像素点总数得出 R 、 G 、 B 的像素含量。计算结果见图 4, 纵坐标为所占比例, 横轴为圆环半径。从图 4 中见, G 分量所占比例明显小于 R 、 B 分量, 并且和 R 、 B 的分布曲线也有所不同, 而 R 、 B 分量的分布规律比较相似, B 分量所占比例最大。

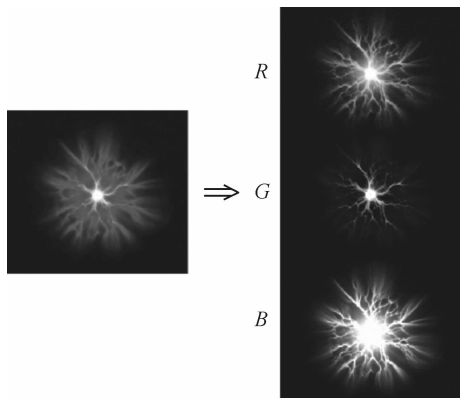


图 3 放电真彩图的 R 、 G 、 B 分量图

Fig. 3 R 、 G 、 B component of real color image

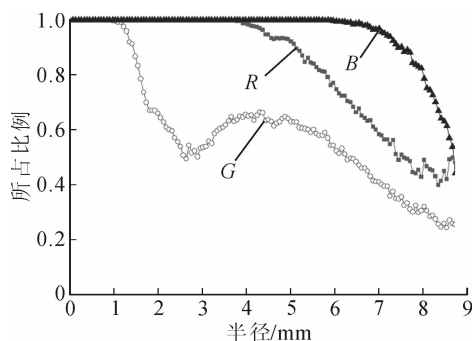


图 4 R 、 G 、 B 各分量像素所占的比例

Fig. 4 The proportion of R 、 G 、 B

2.3 基于 RGB 分量特征的图像降噪方法

根据前面的分析结果, 文中引入基于 RGB 分量特征的图像降噪方法。为了比较其效果, 同时也介绍直接针对灰度图的参考域灰度法, 这里称为方法 1。方法 1 设定某个灰度级为背景灰度级, 当灰度级小于等于设定值时认为是背景干扰, 直接置零。具体做法为: 在原放电灰度图的明显没有放电的区域截取一小块矩形区域, 计算此区域内各灰度级的含量, 然后通过对比此区域各个灰度级含量来确定背景灰度级。例如, 图 2 中选取的某一背景部分灰度含量(比值)见表 1。由表 1 知, 灰度级在 5~255 之间的含量可忽略不计, 因此认为背景灰度级为 4。此方法直接且容易操作, 但背景的灰度级含量十分丰富, 光凭单一灰度级作为背景阈值并不能完全去除背景干扰。

基于 RGB 分量特征的图像降噪方法称为方法 2。首先来研究灰度图中灰度为 4 的未放电区域

表 1 背景部分灰度含量

Table 1 Gray scale content of background

灰度	1	2	3	4	5~255
含量	0.272 0	0.366 4	0.208 8	0.108 4	0.044 4

对应的彩色图的 R 、 G 、 B 分量。在 MATLAB 中将 RGB 彩色图转换为灰度图的公式为

$$Gray=0.299R+0.587G+0.114B. \quad (4)$$

式(4)示出了灰度系统与 RGB 系统的联系, 方法 1 中确定的背景灰度级 4 所包含的像素点满足式(4)。

$$0.299R+0.587G+0.114B=4. \quad (5)$$

当 R 、 G 、 B 中有两个分量的值为 0 时, 剩下的分量取到最大值, 由此可以确定背景灰度级为 4 时, R 、 G 、 B 各自的变化范围: $0 \leq R \leq 4/0.299$ (≈ 13), $0 \leq G \leq 7$, $0 \leq B \leq 35$ 。显然实际情况中不可能取到上限值, 这个范围偏大了, 它并不能代表背景像素点 R 、 G 、 B 各分量的范围, 需要在此基础上得出更精确的范围。

从前面的分析可知, R 、 B 分量具有较好的相似性, 说明 R 分量和 B 分量联系紧密, 而 G 分量相对独立。所以可以把 R 、 B 分量视为一个整体, 记为 $R+B$ 。采用求 R 和 B 并集的方法确定 $R+B$ 的范围, 即 $0 \leq (R+B) \leq 35$ 。而此时由于 R 、 B 的变化范围确定, 结合式(5), G 分量的变化范围自动确定了。具体做法是, 根据灰度图背景灰度为 4 的限制, 将彩色图中满足 $0 \leq R+B \leq 35$ 的像素点的亮度直接置零, 然后将彩色图转换为灰度图。

3 沿面放电图像边缘计算结果

原放电灰度图见图 5。通过比较原放电灰度图, 方法 1 去除背景后的图像效果及经过方法 2 去除背景后的图像效果, 可以看出, 通过方法 1 提取的放电区域排除了大部分背景干扰, 但在放电区域逐渐过渡到背景时出现了大量的“噪点”, 这是残留的背景成分造成的, 也验证了文中提到的方法 1 有缺陷这一推论。方法 2 提取的放电区域在方法 1 的基础上完全去掉了残留的“噪点”, 并且能将放电区域的边缘与背景很好的区分。

图 6 为上述 3 种不同图像对应的灰度系数计算结果。采用圆环分割法计算, 纵坐标为不同的灰度系数, 横坐标为圆环半径。由图 6(a)、(b)可以看出, 方法 1、2 在提取的放电区域内均与原图曲线重合, 说明两种方法都没有在排除背景干扰时去掉有用的放电信息; 从图 6(c)可以看出, 1、2 的曲线变化规

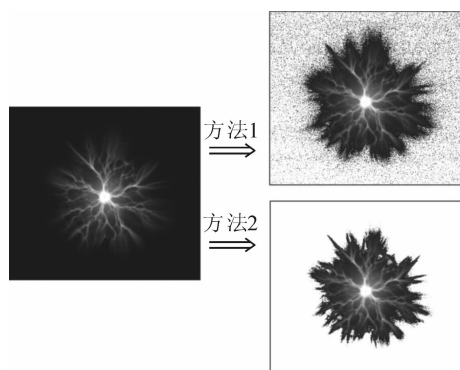


图 5 不同处理方法的图像比较

Fig. 5 Results using different methods

律均与原图曲线截然不同,说明背景干扰掩盖了真实的放电信息。对比方法 1、方法 2 的变异系数曲线可以看出,虽然方法 1 在原图基础上已经有了很大改善,但方法 1 提取的放电区域有效半径几乎和原图是一样的,说明方法 1 没有完全“隔断”放电区域与背景的联系,不能很好地“降噪”。方法 2 曲线在放电发展的边缘处跳变,有效区分了放电区域和背景,定量地反映了放电发展的最大距离。

4 结论

由于紫外成像仪的空间分辨率非常低,不能用于放电图像的空间分布研究,而可见光图像由于背景干扰需要降噪处理。通过笔者研究发现,可见光放电彩色图像含有丰富的放电信息,可用于放电的研究,特别是图像降噪处理。具体结论如下:

1) G 分量所占比例低,主要反映放电主干部分, R 、 B 分量能很好地反映放电的空间结构,分布区域较为相似。

2) 远离沿面放电中心的放电区域混有一定比例的背景干扰,简单的划分放电区域进行分析计算会掩盖放电信息,影响结果的准确性。

3) 利用 $R+B$ 的合成分量对放电图像进行了降噪处理,获得了较好的可见光图像,达到了有效提取放电区域的目的。此方法优于通过设定单一灰度级作为背景阈值的方法,为后期定量研究沿面放电提供了一套高效可行的方法。

参考文献:

- [1] MARKUS D T, LEE T S, A method of direct corona imaging on a dielectric transparency[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1996, 32(4): 832-836.
- [2] ARAO Y, FUJII T, YATSUZUKA M. Image evaluation of atmospheric corona discharge applied for road tunnel high-velocity electrostatic precipitator[J]. IEEE Trans. on Plas-

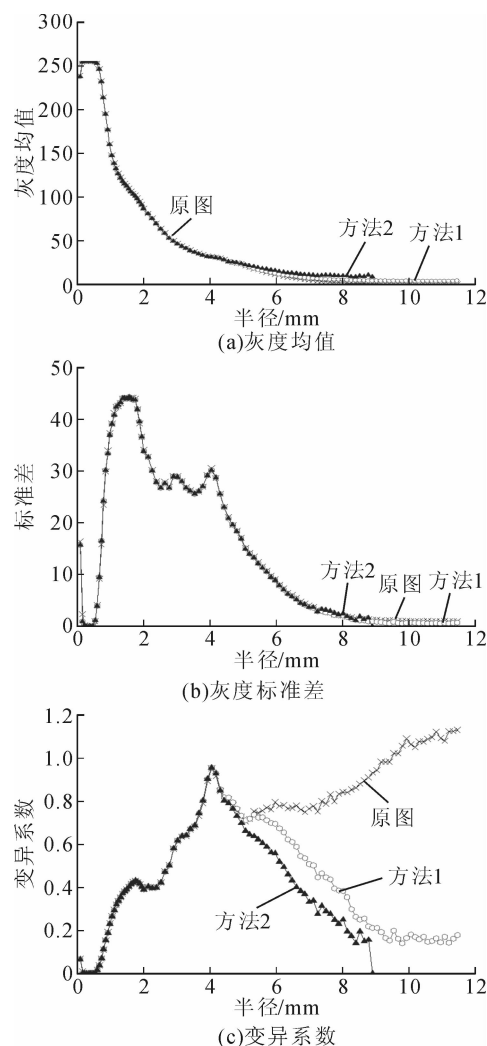


图 6 灰度系数计算结果比较

Fig. 6 Results of different grayscale coefficients

ma Sci., 2005, 33(2): 312-313.

- [3] CARDOSO J A, FILHO O, LEVY A F. Correlating digital measurements of electrical quantities and related images on micro discharges under high voltages[C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008: 9-13.
- [4] WATSON D B, KHO S K, SAMUELS K A, et al. Impulse flashover trajectory in air in non-uniform fields[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1993, 28(2): 200-208.
- [5] QIU D H, MACALPINE J M, LI Z Y. An incremental analysis of spark paths in air using 3-dimensional image processing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(6): 758-763.
- [6] WEI Gang, TANG Ju. Study of minimum box-counting method for image fractal dimension estimation[C]//2008 China International Conference on Electricity Distribution, (CICED). Guangzhou, China: IEEE, 2008: 1-5.
- [7] 刘云鹏, 马国明, 刘肇鸣, 等. 低通滤波在紫外成像降噪

- 处理中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 129-132.
- LIU Yunpeng, MA Guoming, LIU Zhao'ou, et al. Application of low pass filter technology in electric equipment UV detection[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 129-132.
- [8] 马 斌, 周文俊, 汪 涛, 等. 棒—板模型交流电晕放电紫外数字图像处理及其应用判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 74-79.
- MA Bin, ZHOU Wenjun, WANG Tao, et al. An experimental investigations on applicable criterion for AC corona discharge evolvement of rod-plane gap based on UV digital image processing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 74-79.
- [9] 刘渝根, 柴艳莉. 两种紫外成像参数在绝缘子故障诊断中的比较[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 22-26.
- LIU Yugen, CHAI Yanli. Comparison between two ultraviolet imaging parameters for insulator fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 22-26.
- [10] 金立军, 陈俊佑, 张文豪, 等. 基于图像处理技术的电力设备局部放电紫外成像检测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 43-48.
- JIN Lijun, CHEN Junyou, ZHANG Wenhao, et al. Partial discharge detection of power equipment by ultraviolet imaging based on image processing technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 43-48.
- [11] 彭向阳, 钟 清, 饶章权, 等. 基于无人机紫外检测的输电线路电晕放电缺陷智能诊断技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2292-2298.
- PENG Xiangyang, ZHONG Qing, RAO Zhangquan, et al. Intelligent diagnostic techniques of transmission lines corona discharge defect based on ultraviolet detection from unmanned aerial vehicle[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2292-2298.
- [12] 文 华, 周文俊, 唐泽洋, 等. 基于紫外成像技术的 110 kV 输电线路复合绝缘子融冰闪络预警方法及判据[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2589-2595.
- WEN Hua, ZHOU Wenjun, TANG Zeyang, et al. Ice-melting flashover pre-warning method and criterion of composite insulators on 110 kV transmission lines based on ultraviolet imaging technology[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2589-2595.
- [13] 张 奇, 马全亮, 孙建刚, 等. 离散液滴诱发复合绝缘子沿面放电的紫外成像特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(10): 78-83.
- ZHANG Qi, MA Quanliang, SUN Jiangang, et al. UV-light imaging characteristics of surface discharges on polymer insulator in presence of discrete water droplets[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(10): 78-83.
- [14] 马立新, 黄大海, 王 伟. 高压放电紫外检测系统及故障定位的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 12-15.
- MA Lixin, HUANG Dahai, WANG Wei. Ultraviolet-based detection system and fault location for high-voltage discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 12-15.
- [15] AMARASINGHE D, SONNADARA U, BERG M, et al. Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1154-1160.
- [16] 王静红, 刘教民. 基于双目立视技术的开关电弧图像处理[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 86-91.
- WANG Jinghong, LIU Jiaomin. Switching arc image processing based on binocular stereo vision[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 86-91.
- [17] 金 锋, 李 鹏, 葛 楠. 基于可见光图像处理的双射流直流电弧等离子体放电稳定性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2057-2064.
- JIN Feng, LI Peng, GE Nan. Instability evaluation of a dual-jet DC arc plasma based on the visible image treatment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2057-2064.
- [18] 刘志强, 刘 铁, 郭 威, 等. 大气中针板负电晕放电相对发光强度的研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1201-1206.
- LIU Zhiqiang, LIU Tie, GUO Wei, et al. Research of relative luminous intensity of negative corona discharge of needle-plate in the atmosphere[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1201-1206.
- [19] WU Y, YE Q, LI X. et al. Classification of dielectric barrier discharges using digital image processing technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(5): 1371-1379.
- [20] YE Q, WU Y, LI X. et al. Uniformity of dielectric barrier discharges using mesh electrodes[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2012, 21(6): 65-72.
- [21] YE Q, YU D, YANG F, et al. Application of the gray-level standard deviation in the analysis of the uniformity of DBD caused by the rotary electrode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(3): 540-544.
- [22] YE Q, LI X, HU Y, et al. Research the length of the positive corona using the digital image processing technology [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2014) Des Moines. Iowa, USA: IEEE, 2014: 98-101.
- 陈锐民(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备可靠性研究工作。
- 吴 鹭(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘。
- 谭 丹(1963—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电信号检测与处理技术、电力电子技术应用、电路理论、

- characteristics at ends of valve-side winding in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 121-124.
- [10] 陈庆国, 张杰, 高源, 等. 混合电场作用下换流变压器阀侧绕组电场分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 484-488.
- CHEN Qingguo, ZHANG Jie, GAO Yuan, et al. Analysis of complex electrical field on valve side winding of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 484-488.
- [11] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. ± 500 kV 直流输电系统换流站阀厅内金具表面电场数值求解[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 404-410.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of the surface electric field of electric power fittings in ± 500 kV DC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 404-410.
- [12] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. ± 660 kV 直流换流站阀厅内金具表面电场数值求解[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2594-2600.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of electric power fittings about surface electric field in ± 660 kV DC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2594-2600.
- [13] 杜志叶, 阮江军, 詹婷, 等. ± 660 kV 阀厅金具电场分布计算及优化研究[R]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, ZHAN Ting, et al. Research on the calculation and optimization of the surface electric field of electric power fittings in ± 660 kV valve hall[D]. Wuhan: Wuhan University 2012.
- [14] 王栋, 阮江军, 杜志叶, 等. 直流换流站阀厅内部场域电位和电场强度子模型法数值求解[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 158-163.
- WANG Dong, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Numerical solution of potential and electric field intensity in field domain of valve hall of DC converter station by sub-model method[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 158-163.
- [15] 阮江军, 詹婷, 杜志叶, 等. ± 800 kV 特高压直流换流站阀厅金具表面电场计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2916-2923.
- RUAN Jiangjun, ZHAN Ting, DU Zhishe, et al. Numerical solution of electric power fittings about surface electric field in ± 800 kV UHVDC converter station valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2916-2923.
- [16] 姬大潜, 刘泽洪, 邓桃, 等. 特高压直流输电系统稳态运行时高端阀厅内部的电场分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3000-3008.
- JI Daqian, LIU Zehong, DENG Tao, et al. Analysis of overall electric field in high-voltage valve hall end on steady state of UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3000-3008.
- [17] BOLEY B A. Some observations on saint-venant's principle [C]//Proceedings of the 3rd US National Congress of Applied Mechanics. New York, USA: [s.n.], 1958: 259-264.
- [18] 许安, 何大猛, 刘守豹, 等. ± 500 kV 德阳换流站支柱绝缘子放电故障电场计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 12-19.
- XU An, HE Dameng, LIU Shoubao, et al. The electric field analysis on ± 500 kV post insulator with discharge failure in deyang converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(3): 12-19.

周胜(1990—), 男, 硕士生, 研究方向为电磁场计算、高电压与绝缘技术。

杜志叶(1974—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术、特高压直流输电关键技术等方面的研究工作。

(上接第42页)

电磁场理论及其应用。

叶齐政(1965—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电磁场理论与气体放电研究。

李兴旺(1985—), 男, 硕士, 主要从事高压开关、绝缘诊断

技术测试等研究工作。

王增彬(1983—), 男, 博士, 主要从事高压设备沿面闪络、状态诊断和绝缘诊断研究工作。