

直流离子流场发生装置优化设计

李冰^{1,2}, 郑凤杰¹, 彭春荣¹, 陈博¹, 凌必赞^{1,2}, 夏善红¹

(1. 中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 海淀区 100190;

2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 石景山区 100049)

【摘要】直流离子流场发生装置对电场传感器在离子流场环境下的测试标定具有重要作用,传统直流离子流场发生装置体积较大难于满足新型电场传感器研制和便携式现场应用,对此该文研究了一种缩小尺寸直流离子流场发生装置。基于理论计算和有限元仿真对装置尺寸、结构等关键参数进行了优化设计。采用在平行板边缘处等分电位的方法减少了边缘效应影响,有效增大了平行板间均匀电场区域,减小了均匀性误差。实验结果表明,在电晕丝电压7 kV时离子流场内不同位置离子流电流强度的相对平均偏差仅为1.66%,说明缩小尺寸的直流离子流场发生装置能够提供均匀的离子流场环境。

关键词 直流离子流场; 边缘效应; 有限元分析; 均匀性

中图分类号 TP212 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.06.013

Optimal Design of Direct Current Ionized Field Generator

LI Bing^{1,2}, ZHENG Feng-jie¹, PENG Chun-rong¹, CHEN Bo¹, LING Bi-yun^{1,2}, and XIA Shan-hong¹

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190;

2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences Shijingshan Beijing 100049)

Abstract Direct current (DC) ionized field generator plays an important role in the test and calibration of electric field sensors under the condition of ionized field. Traditional DC ionized field generator is difficult to meet the development needs of novel electric field sensors and inconvenient to apply in outdoor fields for its large volume. This paper presents a reduced-scale DC ionized field generator. Based on theoretical calculations and finite element simulation, the critical parameters of device size and structure are analyzed and optimized. The structure is optimized and the fringing field effect is eliminated by equaling potential at the edge of the parallel plate. So the uniform electric field region between the parallel plates is increased and the uniformity error of electric field is reduced. The experimental results show that the relative average deviation of the ion current intensity at different places of the ionized field is only 1.66% when the voltage of corona wires is 7 kV. The reduced-scale DC ionized field generator presented in this paper can generate the uniform ionized field.

Key words direct current ionized field; fringing field effect; the finite element analysis; uniformity

电场传感器在电力领域有着重要的应用。在特直流高压输电环境下,由输电线路电晕放电引起的具有空间电荷和空间离子流的复杂电场环境会对传感器的信号输出产生影响。为了研究空间电荷和空间离子流干扰对电场传感器输出特性的影响,实现传感器在离子流场环境下的准确测量,需要设计均匀直流离子流场发生装置。文献[1]基于场磨式电场传感器提出了一种在实验室产生直流离子流场环境的测试装置。IEEE标准机构在1990年将这一装置列入其有关直流离子流电场测量的标准^[2],文献[3]也据此进行过直流离子流场的研究。为保证离子流场均匀性,传统的直流离子流场发生装置具有较大的

平行板面积和较高输出的直流高压电源。整个装置体积庞大,很难加载环境载荷进行传感器环境影响因素研究,限制了新型电场传感器的研究发展,并且不适于移动到户外现场进行测试校准应用。因此本文设计了一种缩小尺寸直流离子流场发生装置。

1 整体设计

缩小尺寸直流离子流场发生装置如图1所示,由离子流产生部分、离子流控制部分和均匀直流离子流场3部分组成。离子流产生部分由金属盖板、平行排列的电晕丝和离子流控制网板组成,通过给电晕丝加载直流高压电源使之发生电晕放电的方法产生

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项(61327810); 国家自然科学基金(61302032)

作者简介: 李冰(1989-), 男, 博士生, 主要从事电场传感器及电场传感器测试系统方面的研究。

空间电荷, 加载直流高压的金属盖板吸收异极性离子, 驱动同极性离子向下运动形成离子流。离子流控制部分由离子流控制板和平行板电场上极板组成, 控制加载在离子流控制板和平行板电场上极板间的电场强度能够控制进入平行板电场的离子流的大小。均匀直流离子流场部分由平行极板结构电场

组成, 其中上极板是金属网板, 下极板上布置威尔逊板^[4-5]。离子流经过上极板均匀布置的细密网眼进入平行板电场, 形成均匀离子流场。由如图1所示布置在下极板上的9个威尔逊板($S_1 \sim S_9$)监测离子流电流强度, 分析离子流场均匀性。在均匀直流离子流场部分进行电场传感器的测试标定。

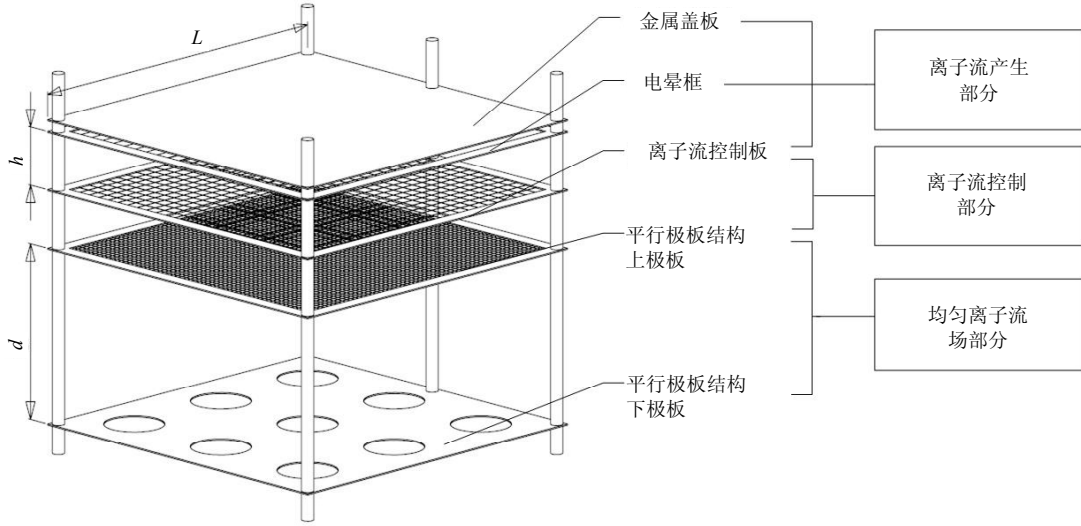


图1 直流离子流场发生装置结构

2 结构设计优化

2.1 离子流产生部分结构参数

离子流产生部分采用电晕丝电晕放电产生空间电荷, 起晕场强计算公式^[6]为:

$$E_s = mE_0\delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1)$$

式中, E_s 表示电晕起始场强, 单位为kV/cm; E_0 和 K 表示相应参数, 由给电晕丝加载的电压特性决定; r 表示电晕丝半径; m 表示电晕丝表面的粗糙程度, 理想情况下电晕丝表面平滑则 $m=1$; δ 表示电晕丝周围空气的相对密度, 标准情况下为 $\delta=1$ 。实际计算时, E_0 一般情况选取31.5, K 选取0.305; 当电晕丝表面不光滑且全面电晕放电时 $m=0.82$, 实际起晕场强计算公式^[7-10]为:

$$E_s = 31.5 \times 0.82 \left(1 + \frac{0.305}{\sqrt{r}} \right) \quad (2)$$

$$U_s = E_s r \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (3)$$

式(3)为起晕电压的计算公式, 其中 h 表示离子流产生区域间距。由式(2)与式(3)可以得到不同离子流产生区域间距 h 时, 电晕丝半径 r 与起晕电压 U_s 关系曲线如图2所示, 电晕丝半径 r 与起晕场强 E_s 的曲线如图3所示。

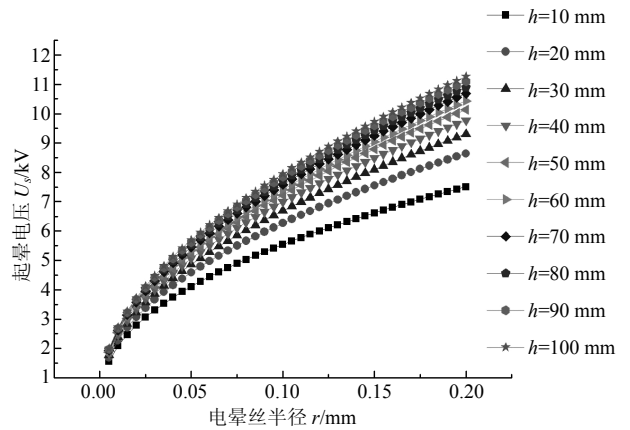


图2 电晕丝半径 r 与起晕电压 U_s 关系

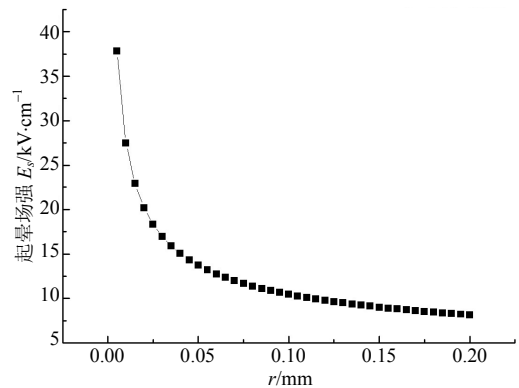


图3 电晕丝半径 r 与起晕场强 E_s 关系

从图2和图3可知, 电晕丝的半径越小, 起晕电

压越小,起晕场强越大,越容易发生电晕放电。因此应该选取半径尽量小的电晕丝,但实际应用过程中还需考虑电晕丝的损耗情况。因此本文装置选用 $r=0.025\text{ mm}$ 的不锈钢丝。

由图2,当电晕丝选用 $r=0.025\text{ mm}$ 的不锈钢丝, h 从 10 mm 变化到 100 mm 时,起晕电压 U_s 从 3.06 kV 增加到 4.12 kV 。为便于离子流产生同时为了避免电晕丝与离子流控制板发生击穿放电,取 $h=60\text{ mm}$,此时起晕电压理论值为 3.886 kV 。

2.2 有限元分析

2.2.1 正方形平行极板边长 L 与平行极板间距 d

本文装置均匀离子流场部分采用正方形平行极板结构^[11],其关键参数为平行极板边长 L 和极板间距 d ,理想电场 E 计算公式为:

$$E = \frac{U}{d} \quad (4)$$

式中, U 为平行极板间电压。

基于有限元理论建立平行极板结构模型,其中 E_1 和 E_2 表示两平行极板中间位置和下极板表面中心位置电场强度,加载不同 L 与 d 可以获得如图4所示 E_1 和 E_2 分别与 E 的相对误差随 L/d 的变化曲线。其中 Δ_1 表示 E_1 与 E 的相对误差, Δ_2 表示 E_2 与 E 的相对误差。

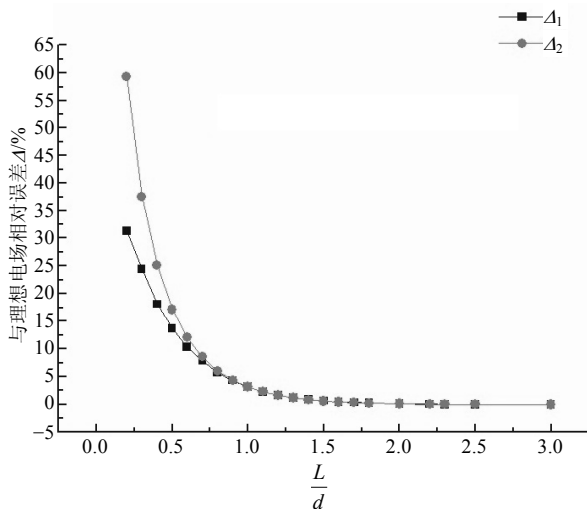


图4 电场强度相对误差与 L/d 的关系曲线

由图4可以得到当平行板尺寸 L 与平行板间距 d 满足式(5)关系时, $\Delta_1 \leq 0.15\%$,有:

$$L \geq 2d \quad (5)$$

均匀离子流场部分用于电场传感器的测试标定,在优化平行板结构时候需要考虑电场传感器的放置对电场造成的影响。电场传感器在平行极板结构的下极板中心处进行测试标定时,平行板间距 d 与传感器测试孔半径 R 需要满足式(6)关系,此时电场强度相对误差小于 0.32% ^[2]。在两平行板中间位置

对电场传感器进行测试标定时电场强度相对误差为:

$$d \geq 4R \quad (6)$$

$$\Delta = 100 \left(\frac{v}{d^3} \right) \% \quad (7)$$

式中, v 表示放入电场中传感器的体积^[12]。针对边长为 50 mm 的立方体电场传感器,若在平行极板下极板中心位置进行测试标定时,需要满足 $d \geq 200\text{ mm}$;若在平行极板中间位置进行测试标定时,由式(7)计算可得当 $d \geq 232\text{ mm}$ 时,电场相对误差 $\Delta \leq 1\%$ 。

综上本文将均匀离子流场部分平行极板结构尺寸确定为 $L \times L \times d = 600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 250\text{ mm}$,此时 $L/d = 2.4$, Δ_1 与 Δ_2 均小于 0.15% ,且对边长小于 50 mm 的立方体电场传感器在测试标定时所带来的电场强度相对误差小于 0.8% 。与IEEE有关直流离子流电场测量的标准中的装置相比,本文装置面积仅为其传统装置体积的 $1/8$ 。

2.2.2 边缘效应及结构优化

边缘效应是指在实际设计平行极板结构过程中,极板边缘处电场发生畸变导致电场分布不均匀,实际电场与理论电场存在偏差的情况^[13]。受边缘效应影响平行极板结构间均匀电场区域小于理想状况,且电场均匀性误差很大。对于带有空间离子流的电场环境,边缘效应导致的电场不均匀分布会引起空间离子流在平行板电场中的不均匀分布,继而影响均匀离子流场环境的产生。

为了解决这一问题,本文采用了在平行板边缘处等分电位的方法进行结构优化,即将平行板四周分成若干层等位线环,每层线环之间用高阻值电阻连接进行分压。利用ANSYS有限元分析软件,分别对结构优化前和优化后的装置进行仿真分析。建立尺寸为 $L \times L \times d = 600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的模型A和在模型A基础上添加5条等分电位线进行结构优化的模型B,在平行板间加载 $+2.5\text{ kV}$ 直流电压,则两模型的电场分布情况如图5所示。

模型A、模型B的电场均匀性仿真结果分别如图5a、图5b所示。从图5中可以很明显看到模型A边缘处的电场不均匀。模型A与模型B电场强度分布曲线如图6所示。分别选模型A、模型B进行电场均匀性误差分析。模型A电场强度理论值为 10 kV/m ,平行极板边缘处电场为 7.571 kV/m ,电场均匀性误差为 22.339% ,电场均匀性误差小于 0.5% 的区域为模型A平行板电场中心区域 $240\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 范围内。

模型B电场强度理论值为 10 kV/m ,平行极板边缘处电场为 9.557 kV/m ,电场均匀性误差为 4.427% 。

电场均匀性误差小于0.5%的区域为模型B平行板电场中心区域336 mm×336 mm范围内。选模型B平行板电场中心区域240 mm×240 mm范围，计算得到电场均匀性误差为0.147%。从仿真和计算结果可以看出采用平行板边缘等分电位方法能够有效减小电场均匀性误差，增大平行极板间均匀电场区域范围。

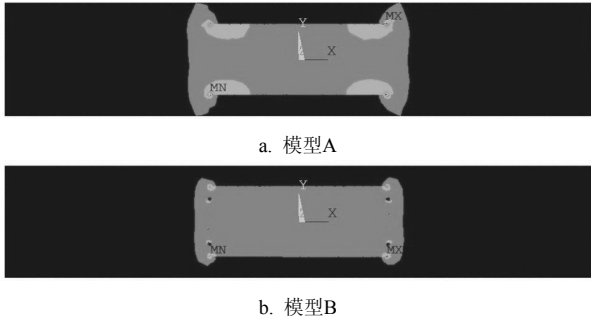


图5 模型A与模型B电场均匀性二维仿真结果

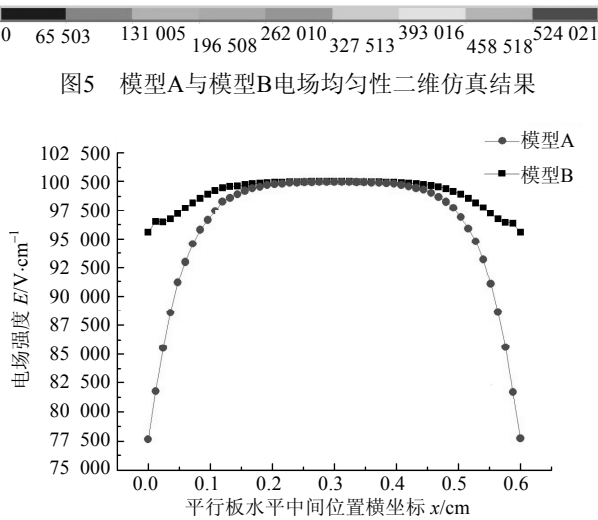


图6 模型A与模型B电场强度分布曲线

3 实验验证

缩小尺寸直流离子流场发生装置实际设计结构如图7所示，电晕框采用直径0.05 mm的不锈钢丝平行排列组成，其下方60 mm是离子流控制板。离子流控制板下方是边长为600 mm、间距为250 mm的平行极板。如图1所示在下极板上布置 $S_1 \sim S_9$ 9个圆形威尔逊板，利用吉时利6517B静电计分别测量各位置威尔逊板的离子流电流。在温度为25 °C，相对湿度为36%，一个标准大气压的环境下对电晕丝加载直流高压进行离子电流分布实验，实验结果如图8所示。

从图8中可以看出 $S_1 \sim S_9$ 各威尔逊板测得的离子流电流分布情况一致，在电晕线电压为4~5 kV左右时离子流电流开始增大，但此时离子流电流很微弱受环境影响很大。因此选取电晕线电压为7 kV时的测量值进行分析。此时9个威尔逊板测得的离子流电

流平均值为28.130 pA，测量值的最大偏差仅为1.832 pA，最大相对偏差为6.51%，相对平均偏差仅为1.66%。



图7 直流离子流场发生装置

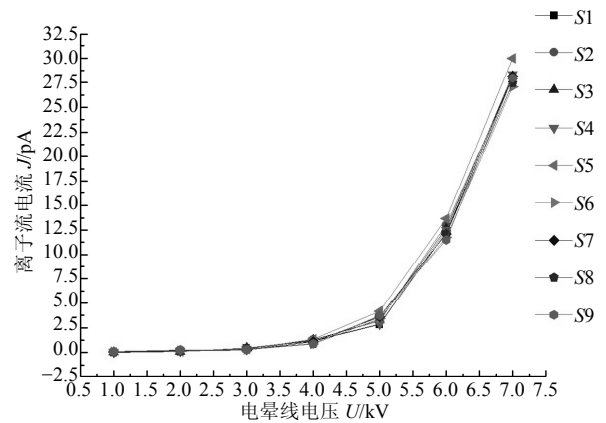


图8 $S_1 \sim S_9$ 位置离子流电流变化曲线

4 结束语

本文设计了缩小尺寸的直流离子流场发生装置。基于理论计算对离子流产生部分结构进行了优化设计，确定了电晕丝半径 r 和离子流场产生区域间距。基于有限元理论对均匀离子流场平行板结构进行了建模仿真，确定了直流离子流场平行板结构的尺寸 L 和间距 d ，将装置体积减小为传统装置体积的1/8。采用在平行板边缘处等分电位的方法解决了边缘效应造成的电场不均匀问题，将平行板结构边缘处电场均匀性误差从22.339%降到了4.427%，改善了电场均匀性，增大了平行极板结构中的均匀电场区域范围。最后离子电流分布实验验证了缩小尺寸直流离子流场发生装置的离子流场的均匀性，在电晕丝电压7 kV时离子流电流强度相对平均偏差仅为1.66%，该装置能够提供均匀的离子流场环境。

缩小尺寸直流离子流场发生装置与传统离子流场发生装置相比具有体积小，对高压电源要求低，适用于电场传感器外场环境的现场测试校准，易于

集成环境载荷进行传感器环境影响因素研究等优点。本文装置能够为离子流环境下电场的准确测量提供便利和保障,为电场传感器在离子流环境下的输出特性研究提供基础,有利于新型电场传感器的应用和研究发展。

参 考 文 献

- [1] MISAKIAN M. Generation and measurement of DC electric fields with space charge[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(5): 3135-3144.
- [2] IEEE Standard 1227-1990. IEEE guide for the measurement of DC electric-field strength and ion related quantities[S]. New York: IEEE, 1990.
- [3] 秦柏林, 蒋国雄. 直流离子流场的产生与测量[J]. *高电压技术*, 1986(1): 62-66.
QIN Bo-lin, JIANG Guo-xiong. The generation and measurement of DC ion flow fields[J]. *High Voltage Engineering*, 1986(1): 62-66.
- [4] 秦松林. 直流离子流电场的离子流密度测量[EB/OL]. (2013-03-29). <http://www.paper.edu.cn/>.
QIN Song-lin. Ion current density measurement of DC electrical field with space charge[EB/OL]. (2013-03-29). <http://www.paper.edu.cn/>.
- [5] FANG Chao, CUI Xiang, ZHOU Xiang-xian, et al. Impact factors in measurements of ion-current density produced by high-voltage DC wire's corona[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1414-1422.
- [6] PEEK F W. Dielectric phenomena in high voltage engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1929: 1-263.
- [7] 范建斌, 李中新, 谷琛, 等. 直流电压下导线起晕电压计算方法[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(10): 100-105.
FAN Jian-bin, LI Zhong-xin, GU Chen, et al. Calculation method for DC onset corona voltage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(10): 100-105.
- [8] 徐明铭. 空气湿度对直流电晕放电影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
XU Ming-ming. Study on influences of air humidity on direct current corona discharge[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [9] 林锐. 直流正极性下导线电晕放电特性及影响因素的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
LIN Rui. Research on DC positive corona discharge characteristics of conductors and its affecting factors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [10] 欧阳科文. 直流导线电晕起晕电压的影响因素及计算方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
OUYANG Ke-wen. Research on influence factors and calculation method of DC corona onset voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [11] 罗福山, 庄洪春, 何喻晖, 等. 电场标定装置[J]. *电测与仪表*, 1993(6): 31-34.
LUO Fu-shan, ZHUANG Hong-chun, HE Yu-hui, et al. Electric field calibration device[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 1993(6): 31-34.
- [12] TAKUMA T, KAWAMOTO T, SUNAGA Y. Analysis of calibration arrangements for AC field strength meters[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 1985, 104(2): 488-496.
- [13] 崔勇, 袁海文, 赵录兴, 等. 基于有限元方法的场磨式电场传感器标定装置优化设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(10): 1807-1812.
CUI Yong, YUAN Hai-wen, ZHAO Lu-xing, et al. Optimum design of calibration device for field mill type electric field sensor based on finite element method[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(10): 1807-1812.

编辑 漆蓉