

对地空气式静电放电特性试验

刘鹏宇¹, 徐晓英¹, 甘瑛洁², 舒晓榕¹, 张成铭¹

(1. 武汉理工大学 理学院, 武汉 430070; 2. ESDEMC 科技有限公司, 密苏里 罗拉 65401, 美国)

摘要:为充分了解电子设备空气式静电放电(ESD)放电电流的特点,利用研制的带垂直导轨可调速ESD模拟器空气式ESD试验平台,在不同放电电压、不同放电极性和模拟器不同接近速度,针对对地空气式ESD进行了试验研究。试验结果表明,在一定电压范围内,放电电流峰值随放电电压的升高减小,同时上升时间随放电电压的升高而增大;模拟器接近速度越大,放电电流峰值越大,上升时间越小;在某些放电电压下出现多次波形。对地空气式ESD可与电子设备空气式ESD试验结果相互印证,为电子设备ESD损伤机制提供试验和理论基础。

关键词:空气式静电放电;放电电流波形;放电电流峰值;上升时间;多次波形

中图分类号:O441.1

文献标志码:A

文章编号:1001-9944(2019)04-0001-05

Experimental Characteristics of Air Electrostatic Discharge to Ground

LIU Peng-yu¹, XU Xiao-ying¹, GAN Ying-jie², SHU Xiao-rong¹, ZHANG Cheng-ming¹

(1.School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. ESDEMC Technology Limited Liability Company, Rolla, MO 65401, USA)

Abstract: In order to fully understand the characteristics of the discharge current of air electrostatic discharge (ESD) in electronic equipment, an experimental platform for air ESD with a vertical guide is developed. The relationship between discharge current waveform and characteristic parameters was studied under different discharge voltage, discharge polarity and simulator proximity velocity. The experimental results show that the peak value of discharge current decreases with the increase of discharge voltage and the rising time increases with the increase of discharge voltage within a certain voltage range, and the larger the approaching speed of simulator is, the greater the peak value of discharge current is, and the smaller the rising time is. Multiple waveforms appear under certain discharge voltages. Ground-air ESD and air ESD test results of electronic equipment can verify each other, and provide experimental and theoretical basis for ESD damage mechanism of electronic equipment.

Key words: air electrostatic discharge (ESD); discharge current waveform; peak current; rise time; multiple waveform

静电放电 ESD 具有高电位和大瞬时电流^[1],会对电子设备造成损伤或干扰。近年来,随着微电子技术和器件工艺的迅猛发展,各种微电子器件的集成度大幅度提高,使得电子设备的电磁抗扰度降低且抗过压能力下降。ESD 严重威胁着现代信息化电子设备和武器系统,尤其对电子设备的潜在性失效

威胁更为严重且难以预测^[2-3]。

ESD 可分为 2 类,电流注入放电和空气击穿放电^[1]。由于空气式 ESD 涉及到外部火花通道的形成过程,温度、湿度、放电电压的大小与极性、模拟器放电电极接近被测物体的速度等因素都会引起放电过程的显著变化,因此该方式的放电重复性极差^[4]。

收稿日期:2019-02-20;修订日期:2019-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(11775164);刘尚合院士专家工作站静电研究基金项目(BOIMTLSHJD20161005)

作者简介:刘鹏宇(1994—),男,硕士,研究方向为静电放电。

然而,空气式 ESD 是实际工程技术和生活环境中出现概率最大的放电现象,也是对电子器件和设备造成损伤或干扰的最主要方式之一,成为电子工业迫切需要解决的一个重要问题^[3-5]。因此对空气式 ESD 的试验研究及其规律的研究刻不容缓。

在前期,原青云、贺其元等人进行了关于电流靶的空气式 ESD 试验^[4,6],但在实际 ESD 抗扰度测试中,受测对象不是电流靶而是某一电子设备。为了能够使电流靶的空气式 ESD 与具体电子设备的空气式 ESD 的试验结果相互印证,在相同环境、相同位置进行了不同放电电压、不同极性、不同放电电极接近速度等条件下对地空气式 ESD 试验研究。

1 试验装置与试验方法

对地 ESD 放电电流波形测量系统如图 1 所示。该系统包括 ESD 模拟器、1 GHz 带宽 F65 电流钳、ESD 空气式静电放电速度控制器、采样率 5 GS/s 和带宽 2 GHz 的示波器、20 dB 衰减器、法拉第笼。

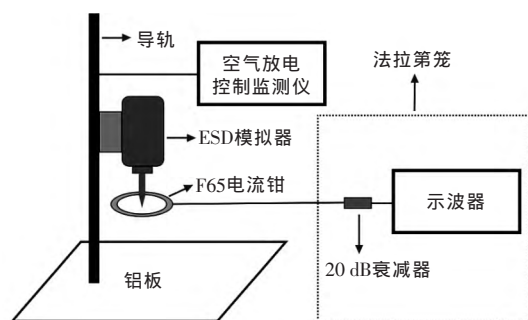


图 1 测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of measuring system

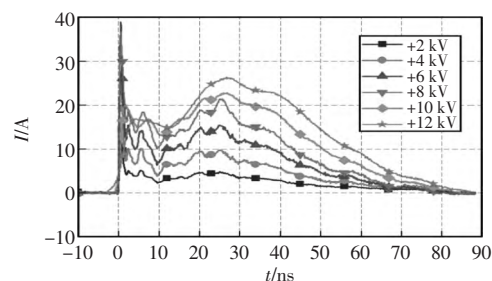
空气式 ESD 速度控制器由空气放电控制监测仪、导轨、铝板 3 部分组成。ESD 模拟器由特制的夹具固定于导轨上,由空气放电控制监测仪控制上下移动,速度 0.05~0.5 m/s 可调。F65 电流钳置于 ESD 模拟器夹具之中,位于 ESD 模拟器放电尖端处。铝板放置在标准 ESD 抗扰度测试平台上。法拉第笼、示波器、铝板接地。

试验前,校准 ESD 模拟器和电流钳,环境湿度 30%,温度 22 °C。试验时,ESD 模拟器选择人体金属模型和空气式放电模式,在不同放电电压水平、放电极性($\pm 2, \pm 4, \pm 6, \pm 8, \pm 10, \pm 12$ kV)以及不同放电电极接近速度(0.1, 0.3, 0.5 m/s)的条件下,分别进行对地空气式 ESD 试验,记录放电电流波形的特征值并保存波形数据,每种试验条件重复 6 次。

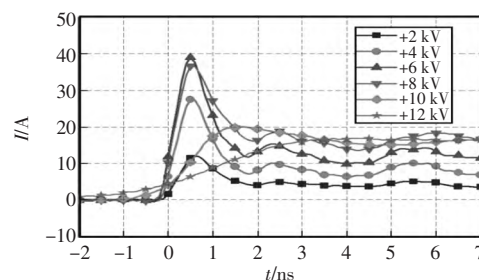
2 试验结果与分析

2.1 放电电压对空气式 ESD 的影响

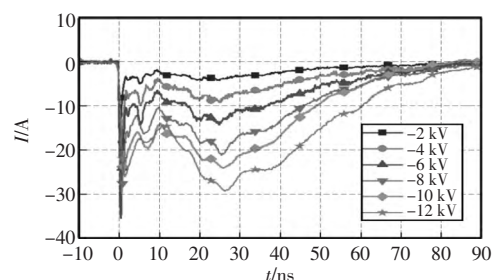
试验研究发现,放电电极接近速度一定时,随着放电电压的增加,无论正极性还是负极性的放电,放电电流波形均发生极大变化,如图 2 所示。图 2 为模拟器接近速度为 0.3 m/s 时,不同放电电压 U 的放电电流波形主波形。图 2a 和图 2c 为放电的完整主波形,图 2b 和图 2d 为对应主波形第一峰的放大图。



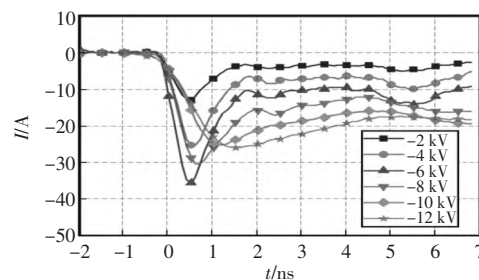
(a) 正极性放电时



(b) 图 a 第一峰的放大图



(c) 负极性放电时



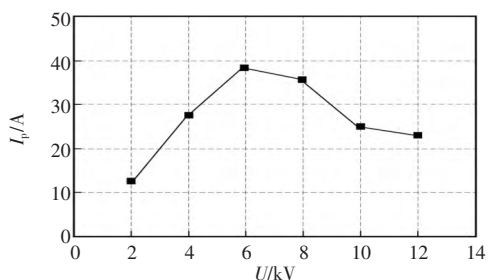
(d) 图 c 第一峰的放大图

图 2 不同放电电压的放电电流波形

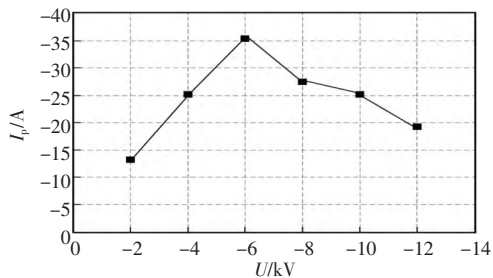
Fig.2 Discharge current waveform of different discharge voltage

IEC 61000-4-2 标准^[7]中,给出的ESD模拟器接触式放电电流波形的典型参数,放电电流峰值 I_p 与放电电压成正比,上升时间 t_r 为0.7~1 ns。文献[4,6]中对电流靶的空气式ESD实际测量值表明:放电电流峰值大小在 ± 20 kV以下大体上随放电电压线性增加,与接触式放电情况一致;上升时间随放电电压的增加而增加,但呈非线性,即电流波形的前沿逐渐变得平坦,这在 ± 12 kV及以下放电电压时是极其明显的。

对地空气式ESD试验中, $\pm 2, \pm 4, \pm 6$ kV放电电压的放电电流峰值及变化趋势与IEC 61000-4-2标准一致,上升时间趋近相同;但在 $\pm 8, \pm 10, \pm 12$ kV,放电电流峰值随放电电压的增大而减小,上升时间随放电电压的增大而增大,如图3和图4所示。图3,图4分别为模拟器接近速度为0.3 m/s时,不同电压放电的放电电流峰值和上升时间。



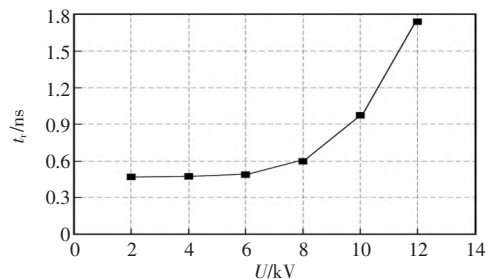
(a) 正极性放电时



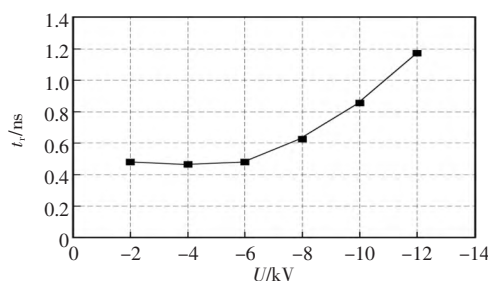
(b) 负极性放电时

图3 不同放电电压的放电电流峰值

Fig.3 Peak discharge current of different discharge voltage



(a) 正极性放电时



(b) 负极性放电时

图4 不同放电电压的上升时间

Fig.4 Rise time of different discharge voltage

试验发现,在相同放电电压、极性和相同模拟器接近速度条件下,放电电流峰值越大,上升时间越小,如图5所示。

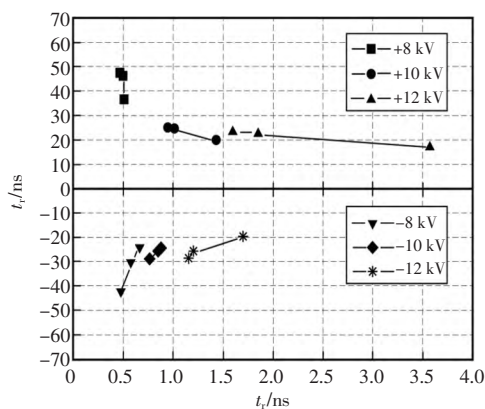


图5 放电电流峰值与上升时间的关系

Fig.5 Relationship between peak current and rise time

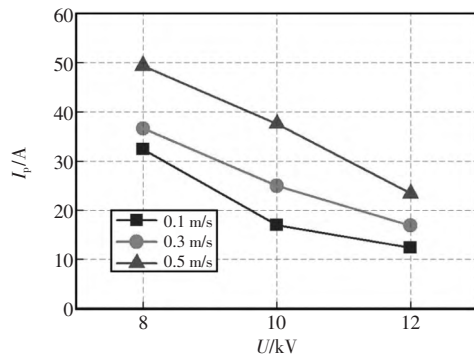
图5为在同一试验条件下记录不同放电电压、极性的峰值放电电流与上升时间,接近速度0.3 m/s。试验条件改变时,放电电流峰值与上升时间同时发生变化:随着放电电压的升高,放电电流峰值变小的同时,上升时间增加。在图中表现为放电电流波形第一峰高度变小的同时变平缓,在8 kV时尤为明显,第二峰高度随放电电压增加不断增大;而在8,10,12 kV时第一峰高度不断变小, ± 12 kV时第二峰的高度甚至超过了第一峰。

上升时间随放电电压的增加而增加,但呈非线性,即放电电流波形前沿逐渐变得平坦的现象,出现的原因是放电电压较低时电弧长度很短,而在放电电压较高时电弧长度较长^[2]。放电电压相同时,放电能量相同,当电弧长度较长时,上升时间会增加,能量在更长时间释放,则电流峰值减小。同时,电晕也会造成部分能量的损耗,导致放电电流波形总能量减少,电流峰值随之减小。

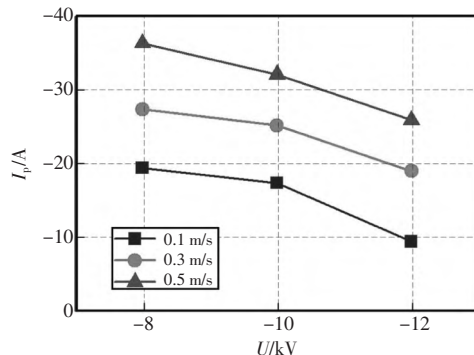
2.2 接近速度对空气式 ESD 的影响

不同接近速度、不同放电电压时放电电流峰值和上升时间分别如图 6,图 7 所示。由于放电电流峰值的异变从 ± 8 kV 开始,而放电电压小于 ± 8 kV 时,上升时间趋近相同,因此图中仅列出 $\pm 8, \pm 10, \pm 12$ kV 时的放电电流峰值和上升时间。

由图 6 可见,模拟器接近速度越大,放电电流峰值越大,与放电电压极性无关。由图 7 可见,模拟器接近速度越大,上升时间越小,与放电电压极性无关;随着放电电压的增大,上升时间随之变大,在放电电压极性为正时尤为明显。在接近速度为 0.5 m/s 时,上升时间变化极其微小。



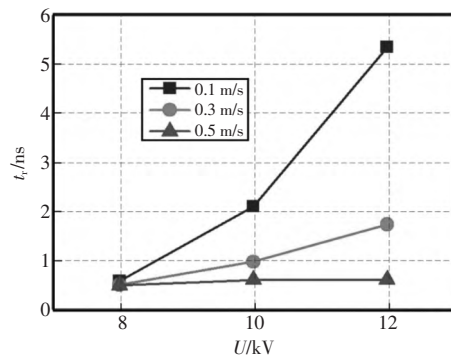
(a) 正极性放电时



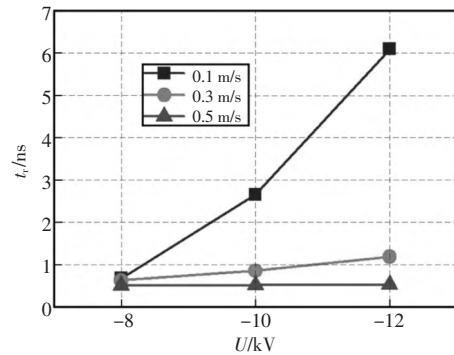
(b) 负极性放电时

图 6 不同接近速度的放电电流峰值

Fig.6 Peak discharge current at different speeds



(a) 正极性放电时



(b) 负极性放电时

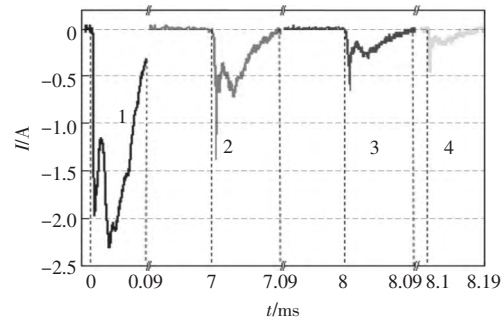
图 7 不同接近速度的上升时间平均值

Fig.7 Rise time at different speeds

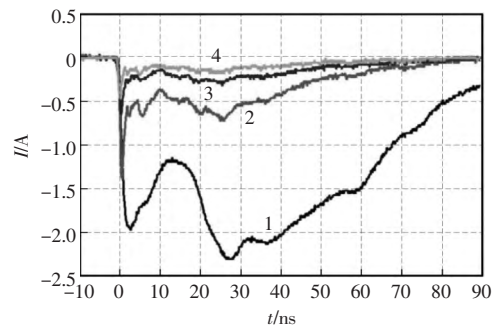
接近速度会影响到统计时间延迟,进而影响到电弧长度^[4]。放电电压一定时,接近速度越快,在相同时间延迟内电极移动距离越长,电弧长度越短,放电能量释放越集中,则放电电流峰值越大,上升时间越快。

2.3 放电电流波形出现多次波形

试验发现,放电电流波形出现了二次、三次甚至四次波形。放电电压为-12 kV,接近速度为 0.3 m/s 时完整的放电电流波形如图 8 所示。



(a) 实际波形



(b) 多次波形起始点重合后

1.主波形;2.二次波形;3.三次波形;4.四次波形

放电电压-12 kV;接近速度 0.3 m/s

图 8 完整的放电电流波形

Fig.8 Whole discharge current waveform

不同放电电压、不同极性单次放电下产生的完整放电电流波形如图9所示。为方便制图与观察,将多次波形的时间轴前移,使各次波形处于同一起点。模拟器接近速度为0.3 m/s,各图中横轴坐标的范围相同,纵轴分度不同,大小不能直接比较。由图9可知,多次波形分别在+2 kV和-8 kV初次显现。

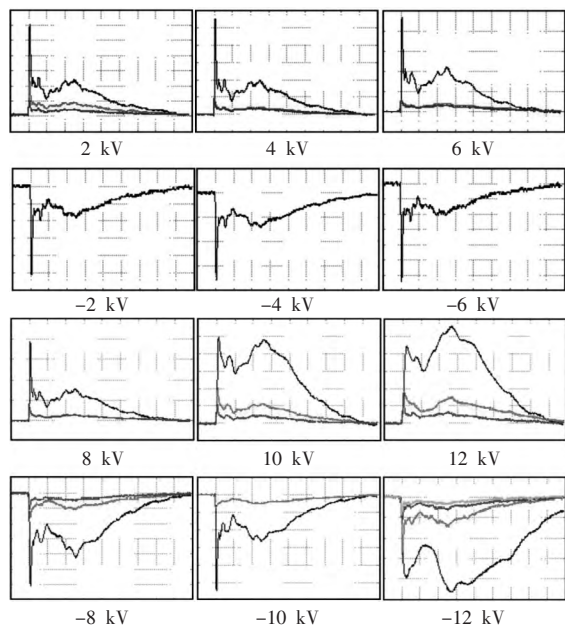
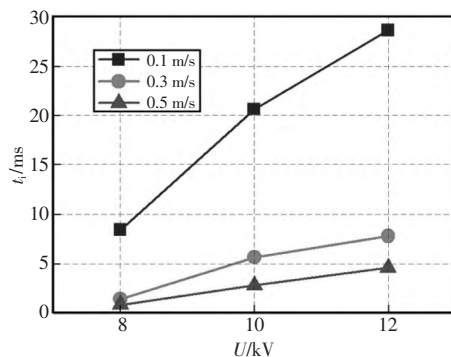


图9 完整的放电电流波形

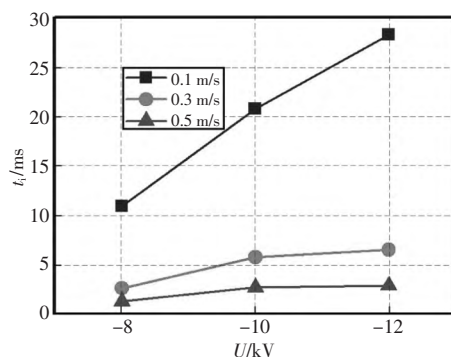
Fig.9 Whole discharge current waveform

记录多次波形参数以及单次放电的多次波形之间时间间隔 t_i ,由于多次波形个数即使在试验条件完全相同时也不尽然相同,所以仅列出主波形与二次波形之间的时间间隔,如图10所示。

图10为不同放电电压、不同极性单次放电产生的完整放电电流波形的主波形与二次波形的时间间隔。由图可见,随着模拟器接近速度的增加,主波形与二次波形之间的时间间隔减小。图10结果表明,时间间隔随放电电压的增大而增大,随接近速度的增大而增大。



(a) 正极性放电时



(b) 负极性放电

图10 主波形与二次波形之间的时间间隔

Fig.10 Time interval between the primary and secondary waveforms

对多次波形产生原因的分析是电容的充放电作用,即ESD抗扰度试验平台的结构,如图11所示。铝板、水平参考平面、接地参考平面通过接地线构成3层电容结构,ESD模拟器放电尖端携带静电荷,铝板、水平参考平面感应出静电荷,放电尖端击穿空气放电后,由于水平参考平面与大地之间连接2个470 k Ω 电阻,电荷倾泄较慢,反之对ESD模拟器放电尖端产生感应,使放电尖端再次携带静电荷。与此同时,ESD模拟器在自动速度控制器的控制下继续向下移动,直到放电尖端携带的静电荷再次击穿空气对铝板放电产生多次波形,这同时也解释了随着模拟器接近速度的增加,主波形与二次波形之间的时间间隔减小。如图8和图9所示,二次波形的形状与主波形一致,上升时间与主波形相近,二次波形电流峰值达到13.8 A,可能对设备造成二次损伤或累积效应。

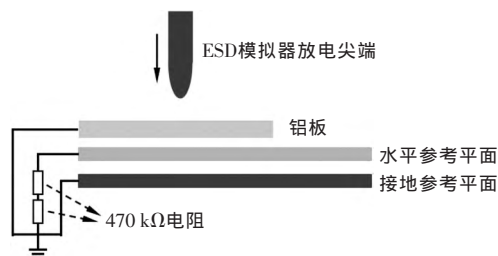


图11 静电放电抗扰度试验平台结构

Fig.11 Structure of ESD immunity experimental platform

3 结语

对地空气式ESD试验中, $\pm 2, \pm 4, \pm 6$ kV放电电压的放电电流峰值及变化趋势与IEC 61000-4-2标准一致,上升时间趋于相同;但在 $\pm 8, \pm 10, \pm 12$ kV,放电电流峰值随放电电压的增大而减小,上升时间随放电电压的增大而增大。其原因(下转第35页)

表 1 测量误差

Tab.1 Measurement error

试验序号	待测距离	
	实际环境/cm	仿真环境/cm
1	4	3
2	5	3
3	4	4
4	6	5
5	6	4
平均值	5	3.8
方差	0.8	0.56

试验过程由于受激光传感器的限制,与传感器不在同一平面的障碍物无法检测。对此,可以通过调整传感器高度,重复扫描环境以建立更准确的地图。

5 结语

所提出的基于图优化的移动机器人同步定位与地图构建算法,在仿真环境和实际环境中对算法进行了验证。传统粒子滤波优化方法需要维护全局地图中的所有粒子,随着地图范围的增大,需要维护的粒子数增多,对计算机的性能有较高的要求。而图优化方法不需要地图中每一个粒子的信息,减少了累积误差,提高了有效性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 孙海波,董紫原,唐守锋,董敏明,纪玉明.基于卡尔曼滤波与粒子滤波的SLAM研究综述[J].软件导刊,2018,17(12):1-3,7.
- [2] 柳俊城,李迪,翁潇文.基于激光信息的移动机器人SLAM研究[J].自动化与仪表,2018,33(6):43-47.
- [3] Labbé M,Michaud F. Online global loop closure detection for

large-scale multi-session graph-based SLAM[J]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). 2014.

- [4] 梁明杰,闵华清,罗荣华.基于图优化的同时定位与地图创建综述[J].机器人,2013,35(4):500-512.
- [5] Yuan X,Zhao C X,Tang Z M.Lidar scan-matching for mobile robot localization[J].//Information Technology Journal.2010,9(1):27-33.
- [6] 熊安,卞春江,周海,等.基于ROS的机器人定位与导航系统的仿真设计[J].电子设计工程,2018,26(24):188-193.
- [7] 杨宇,田应仲,郑天江.基于2.5D激光的全向移动机器人室内SLAM研究[J].计量与测试技术,2018,45(12):2-7.
- [8] 沈一鸣,赵希宇.基于激光SLAM的移动机器人的改进实现[J].机械工程与自动化,2018,47(6):36-38.
- [9] 彭晟远.基于激光测距仪的室内机器人SLAM研究[D].武汉:武汉科技大学,2012.
- [10] 危双丰,庞帆,刘振彬,等.基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述 [J/OL]. 计算机应用研究,2018-09-13 [2019-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20181219.1936.001.html>.
- [11] 乐斌,曾兴斌.V-REP 机器人仿真远程控制方法研究[J].工业控制计算机,2018,31(9):41-43.
- [12] 陈炜灿.基于ROS的机器人三维仿真平台设计与研究[D].沈阳:东北大学,2014.
- [13] 徐曙.基于SLAM的移动机器人导航系统研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [14] 寿佳鑫,张志明,苏永清,等.基于ROS和激光雷达的室内移动机器人定位和导航系统设计与实现[J].机械与电子,2018,36(11):76-80.
- [15] Martinez-Barbera H,Herrero-Perez D.Development of a flexible AGV for flexible manufacturing systems[J].Industrial Robot,2010,37(5):459-468.

(上接第5页)为放电电压较高时,电弧长度较长,上升时间增加,能量在更长时间释放,电流峰值减小。

放电电流峰值随接近速度的增大而增大,上升时间随接近速度的增大而减小;接近速度越快,在相同时间延迟内电极移动距离约长,电弧长度越短,放电能量释放越集中,则放电电流峰值越大,上升时间越快。

多次波形由于试验平台结构的电容振荡而产生。多次波形的上升时间与主波形一致,其中二次波形的峰值可达13.8 A,存在对电子设备造成二次损伤或累积效应的可能。

参考文献:

- [1] Xu X Y,Li Q L,Li Q R,et al. Study on the relation of electro-

static discharge parameters[C]//2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments.IEEE,2007:1721-1724.

- [2] 贺其元,刘尚合,陈京平,等.对空气式静电放电的研究[J].高电压技术,2006,32(7):72-75.
- [3] 吴勇,刘国红,顾立娟,等.空气式静电放电的实验分析[J].高电压技术,2011,37(1):131-135.
- [4] 原青云,张希军,刘尚合,等.影响空气式静电放电特性的相关因素分析[J].高电压技术,2010,36(10):2500-2506.
- [5] 原青云,刘尚合,张希军,等.空气静电放电若干特性分析[J].高电压技术,2009,35(8):1951-1956.
- [6] 贺其元,刘尚合,陈京平.空气式静电放电的放电特性研究[J].安全与电磁兼容,2006,18(6):97-100,104.
- [7] 全国电磁兼容标准化技术委员会.GB/T 17626.2—2018/IEC 61000-4-2:2008 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验[S].北京:中国标准出版社,2018.