

可调速自控ESD模拟器空气放电稳定性分析及实验验证

季启政¹, 苏新光¹, 舒晓榕², 甘瑛洁³, 刘鹏宇², 徐晓英²

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100094; 2. 武汉理工大学理学院, 武汉 430070;

3. ESDMC 科技有限公司, 罗拉 65401)

摘要: 空气放电是最常见的静电放电(ESD)形式, 但由于其重复性低, 相关标准中没有给出其放电电流的标准波形, 这直接影响了对空气放电抗扰度实验的研究。ESD 模拟器放电电极的接近速度是影响空气放电的电流波形重复性的主要原因之一。利用研制的带垂直导轨可调速 ESD 模拟器空气式静电放电实验平台, 能够对 ESD 模拟器放电电极驱近速度进行精确控制。利用该平台与人手持 ESD 模拟器分别对电流靶和受试设备(EUT)进行了空气放电实验研究, 结果表明, 研制的实验平台由于实现了放电电极接近速度的精确控制, 能够使放电电流波形达到较好的一致性。该装置将为电子设备静电放电抗扰度实验中空气放电实验的重复性提供一种解决方案。

关键词: 静电放电; 空气放电; 放电电流; 抗扰度测试; 接近速度

Air Discharge Stability Analysis and Its Experimental Verification of Speed Variable and Automatically Controllable ESD Simulator

Ji Qizheng¹, Su Xinguang¹, Shu Xiaorong², Gan Yingjie³, Liu Pengyu², Xu Xiaoying²

(1. Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100094, China;

2. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. ESDMC Technology Limited Liability Company, Rolla 65401, USA)

Abstract: Air discharge is the most common form of electrostatic discharge(ESD). However, there is no standard waveform of the discharge current in related standards for its low reproducibility, thus the experimental research of the air discharge immunity is impaired. The approaching speed of the discharge electrode for the ESD simulator is one of the main reasons of causing the low reproducibility of the air discharge current waveform. Consequently, we developed an experimental platform for air discharge of speed-variable ESD simulator with vertically guiding rail. Through this experimental platform, the approaching speed of the discharge electrode in the ESD simulator could be precisely controlled. Meanwhile, the air discharge experimental research on the current target and the equipment under test (EUT) with the experimental platform and the hand-held ESD simulator are carried out separately. The results show that the developed experimental platform can be adopted to realize a good consistency for the discharge current waveforms by the precise control of the approaching speed of the discharge electrode. Therefore, the development of the experimental platform can provide a possible solution for improving the reproducibility of the air discharge in ESD immunity test for electronic equipment.

Key words: electrostatic discharge; air discharge; discharge current; immunity test; approaching speed

0 引言

静电放电(electrostatic discharge, ESD)是常见的近场电磁危害源, 会通过传导或辐射干扰对电子产品产生干扰或损坏。为了研究电子设备或系统抗静

电干扰的能力, 人们制定了相关标准, 规定了静电放电抗扰度实验测试平台、测试方法等。在静电放电抗扰度实验中, 是利用 ESD 模拟器模拟实际中的静电放电。而 ESD 模拟器的放电形式有接触式放电和空气放电。在现行的静电放电测试标准 IEC 61000-4-2 标准中, 直接放电以接触式放电为首选方法, 在不能使用接触式放电的情况下, 才考虑用空气放电进行测试。标准中的间接放电是对金属耦合

基金资助项目: 刘尚合院士专家工作站静电研究基金(BOIMTLSHJD20161005)。
Project supported by Expert LIU Shanghe Workstation Electrostatic Research Foundation (BOIMTLSHJD20161005).

板进行放电, 首选的实验方式也是接触式放电。此外, 虽然标准中保留了空气放电实验方式, 但它只给出了针对接触式放电的校准电流波形, 没有针对空气放电的校准电流波形。

由于空气放电的放电机理复杂, 放电电流波形受到很多因素的影响。除了温度、湿度、压强等环境因素外, 放电电极接近待测设备的速度、放电电压大小等都会对空气放电的电流波形造成影响^[1-5]。因此, 空气放电的可重复性较差。

针对电子设备的系统级 ESD 测试^[6-9]及仿真研究^[10-13], 基本是选择可重复性较好的接触式放电。但在实际生产和生活中, 空气放电是最常见的放电形式, 也是对电子设备造成干扰和损害的主要原因。在缺乏空气放电的标准放电电流波形的情况下, 通过研究和改善测试平台和测试方法^[14-17], 获得重复性、稳定性较好的放电电流波形十分重要。

研究人员先期研制了一种通过步进电机控制 ESD 模拟器放电电极使其以固定速度对电流靶进行空气放电的装置, 但该装置是控制放电电极水平移动接近电流靶的^[18-19]。为了解决某些电子产品需要水平放置以方便对其进行静电放电实验(例如本文 2.3 节所介绍的液晶显示触摸屏)的问题, 本文进一步研制了带有垂直导轨的可调速自控 ESD 模拟器空气放电实验平台, 该平台不仅可使 ESD 模拟器的放电电极从竖直方向接近电流靶或受试设备(equipment under test, EUT)放电, 而且由于采用了更好的步进电机控制设计和整体结构的力学稳定性设计, 能精确控制 ESD 模拟器驱近速度, 使得空气放电的稳定性大大提高。通过将该装置与人手持 ESD 模拟器进行放电的结果进行比较, 可调速自控 ESD 模拟器空气放电实验平台的放电电流波形的一致性有显著提高。

1 带垂直导轨的自控 ESD 模拟器空气放电实验平台

1.1 装置介绍

可调速自控 ESD 模拟器空气放电实验平台由空气放电控制监测仪、装配有 ESD 模拟器夹具(托架)的垂直导轨和计算机组成, 完整的实验平台装置见图 1。ESD 模拟器的夹具固定在垂直铝制导轨上, 该夹具采用 3D 打印机设计并打印, 具有可调节孔径, 以适合不同型号的 ESD 模拟器, 垂直导轨可使 ESD 模拟器放电尖端垂直向下移动放电。导轨依托

于三角形支架, 并与 1 块水平放置的大铝板固定, 从而实现了整个系统的力学结构稳定性。测试时, 可将水平铝板接地, 形成接地金属平面, EUT(本文为液晶显示触摸屏)放置于大铝板上, 可方便移动和更改放电位置。空气放电实验平台的装置结构框图见图 2。电极接近速度控制系统的简图见图 3, 置于托架上的 ESD 模拟器可在顶部限位开关和底部限位开关之间的导轨上垂直移动。

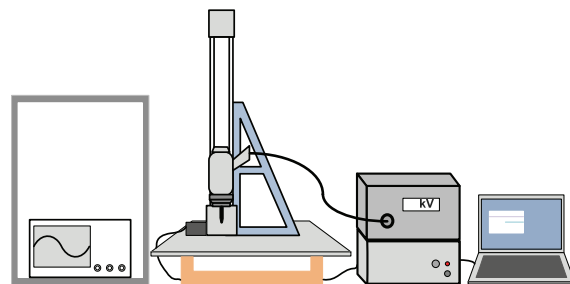


图 1 带垂直导轨自控 ESD 模拟器空气放电实验平台
Fig.1 Experimental platform for air discharge of speed-variable ESD simulator with vertically guiding rail

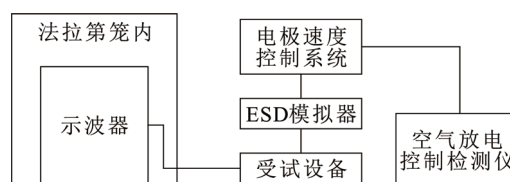


图 2 测试平台结构框图

Fig.2 Block diagram of structure for the experimental platform

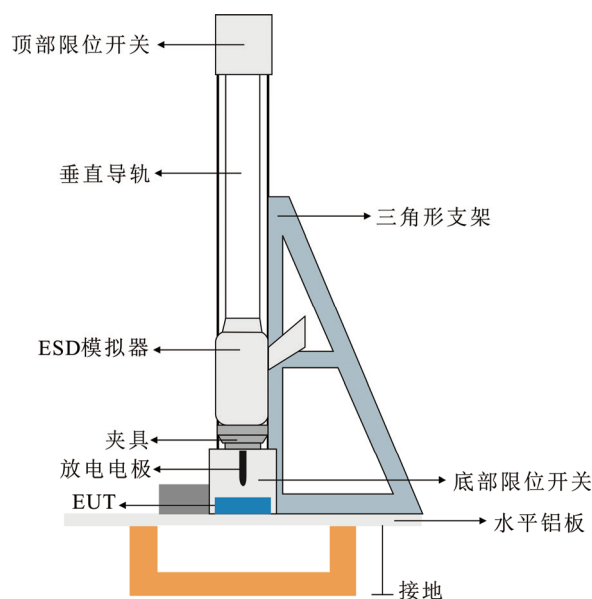


图 3 电极接近速度控制系统(带 ESD 模拟器)简图

Fig.3 Diagrammatic sketch for the system controlling approaching speed of electrode (with ESD simulator)

该测试平台使用了优质步进电机, 通过控制总线与计算机相连, 并通过控制硬件和软件编程控制步进电机的移动。通过步进电机的转速, 准确计算出 ESD 模拟器在垂直导轨上的移动速度, 其速度控制范围为 5~500 mm/s, 误差绝对值 < 5%。该实验平台兼具对环境温度、湿度、压强的监测。

1.2 实验方法

电子设备的起电源(人体等)通常是在接近电子设备的过程中发生静电放电, 因此放电模式为空气放电。在研究静电放电对电子设备的影响时, 必须对放电因素进行考虑, 并在实验过程中对各因素加以监测和控制。通过利用自控式平台, 能够实现对影响因素之一的电极接近速度的精准控制。

如图 4 所示, ESD 模拟器被放置在 ESD 模拟器托架中, 设置好移动速度, 按下启动按钮后, ESD 模拟器托架会带着 ESD 模拟器以设定的速度沿导轨垂直向下运动, 直到到达底部限位开关为止。在这个过程中, 放电电极以一定的放电间隙对 EUT 进行空气放电。但在实际应用中, ESD 模拟器可以不用到达底部限位开关, 其向下运动的终止位置可根据 EUT 的高度不同进行调整。通过几次上下移动, 确定移动的起始位置和移动的距离, 然后在控制软件中设置移动的距离, 这样能够防止 ESD 模拟器放电电极在接近速度较大的情况下撞击到 EUT, 造成硬件损伤。

对 EUT 进行空气放电之前, 需要对实验平台稳定性进行初步验证。实验平台初步稳定性的验证中, 将首先使用电流靶作为受测对象, 连接到电流靶的示波器用来记录流过电流靶的放电电流。实验平台稳定性得到初步验证后, 将利用该平台对 EUT 进行空气放电, 使用电流钳及示波器记录放电电流波形, 通过对比同一接近速度下的电流波形的稳定性进一步验证该平台的稳定性。在测试中, 示波器均通过衰减器连接到电流靶或电流钳, 以避免瞬时大信号对示波器的损坏, 同时, 示波器被置入法拉第笼内, 以减小辐射场的干扰。

2 稳定性验证

2.1 ESD 模拟器放电电流校验

在验证实验平台空气放电的稳定性前, 需对 ESD 模拟器的放电电流进行校验。由于 IEC 标准中只规定了接触式放电的标准放电电流波形, 因此需选择接触式放电模式, 对通过 20 dB 衰减器连接到

示波器的电流靶进行放电。放电电压 ± 4 kV 和 ± 8 kV 下获得的放电电流分别见图 5 和图 6。

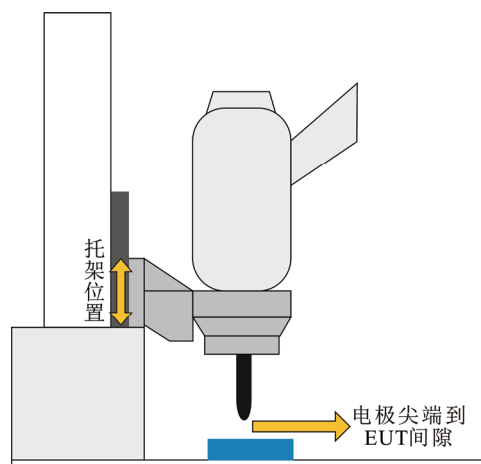


图 4 ESD 模拟器及托架

Fig.4 ESD simulator and bracket

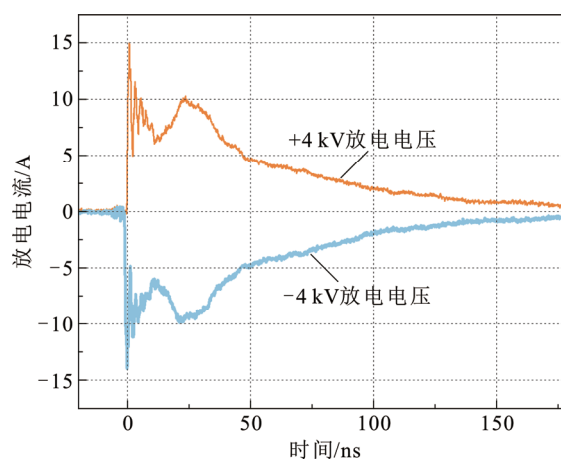


图 5 ± 4 kV 放电电压下的放电电流

Fig.5 Discharge currents at ± 4 kV discharge voltage

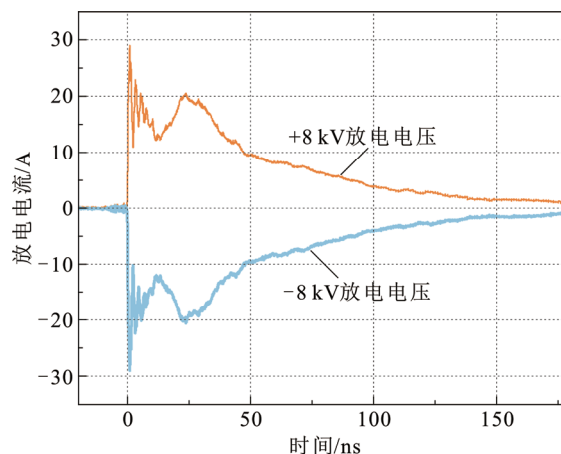


图 6 ± 8 kV 放电电压下的放电电流

Fig.6 Discharge currents at ± 8 kV discharge voltage

根据 IEC 61000-4-2 规定的标准放电电流波形和相关参数,该 ESD 模拟器产生的放电电流波形符合标准规定的放电电流。

2.2 对电流靶进行放电

通过比较人手持 ESD 模拟器和平台控制 ESD 模拟器对电流靶进行空气放电时的放电电流波形一致性,对该测试平台的稳定性进行初步验证。放电电压为 ± 8 kV,接近速度选取为慢速(平台电极接近速度为 0.1 m/s)和中速(平台电极接近速度为 0.3 m/s)。每种情况测量 3~5 次。图 7 为测量结果,图中的 I_{peak} 为电流峰值,下标数字分别对应实验序号。在 ± 8 kV 放电电压下,空气放电电流波形主要有 2 种,一是放电电流第 1 个峰的上升沿陡峭,接近于接触放电电流,此时 I_{peak} 表示放电电流第 1 个峰的峰值;二是第 1 个峰的上升时间明显增大,第 1 个峰不明显,此时 I_{peak} 表示放电电流第 2 个峰的峰值,如图 7(c)所示。

由图 7 可以看出,在放电电压极性为正时,2 种控制方式下的波形稳定性、一致性没有明显的差异。但相较于人手持 ESD 模拟器放电,平台控制下

的放电电流的第 1 个波峰的峰值大于第 2 个波峰,场分量较大。在放电电压极性为负的情况下,人手持 ESD 模拟器放电时的放电电流波形一致性则明显差于平台控制下的放电电流波形。在温度、湿度以及放电电压和极性相同的情况下,为了尽可能得到稳定性好的空气放电电流波形,电极接近速度的控制成为关键。人控制的慢速和中速具有很大的随机性,且无法保证是匀速接近电流靶。相比较之下,能够精确控制放电电极以某一速度匀速接近电流靶的实验平台测得的波形一致性比较好。此外,放电点位置的准确性也是影响波形稳定性的因素之一。

平台控制和人手持 ESD 模拟器进行空气放电时的电流峰值见表 1。

由表 1 可知,在同一放电电压和接近速度下,自控式平台测得的电流峰值均大于人控制 ESD 模拟器放电时的电流峰值,其放电电流的能量较大。随着接近速度的增加,平台测得的电流峰值和手动测得的电流峰值有所增大。但由于接近速度偏小,增加的幅度不是很大,在 1~4 A 左右,这与文献[2]中的结论是符合的。

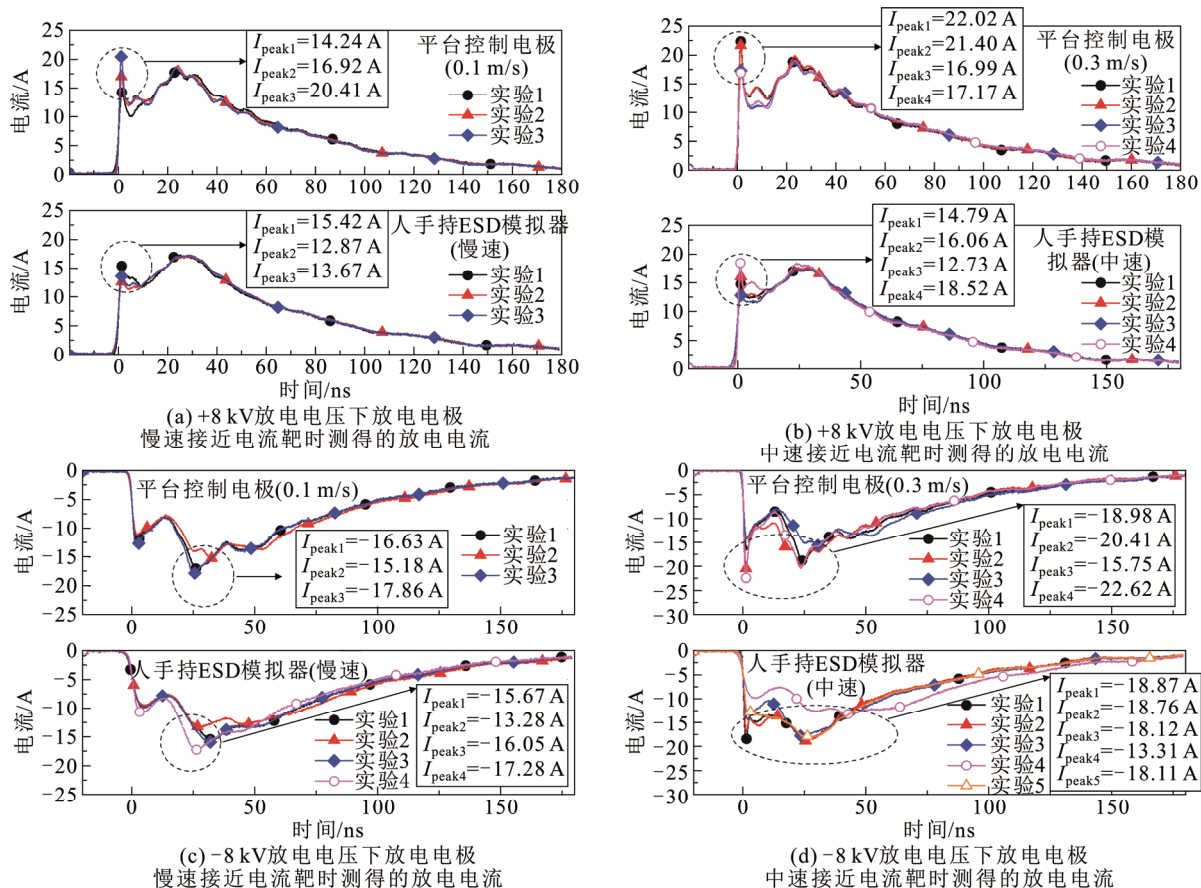


图 7 平台控制电极和人手持 ESD 模拟器的测试结果比较

Fig.7 Comparison of test results of platform-controlled electrode and hand-held ESD simulator

表 1 $\pm 8\text{ kV}$ 下平台控制和人手持 ESD 模拟器时的
放电电流峰值

Table 1 Peak discharge currents of platform-controlled and
hand-held ESD simulator at $\pm 8\text{ kV}$ discharge voltage

放电 电压 /kV	电流峰值/A			
	自控式平台 (0.1 m/s)	自控式平台 (0.3 m/s)	人手持模拟器 (慢速)	人手持模拟器 (中速)
8	20.41	22.02	15.42	18.52
-8	-17.86	-22.62	-17.28	-18.87

图 8 为平台控制电极快速(0.5 m/s)接近电流靶放电时的放电电流, 放电电压选取为 $\pm 4\text{ kV}$ 和 $\pm 8\text{ kV}$ 。考虑到电流靶放电点接触面积较小, 人手持 ESD 模拟器快速接近电流靶时, 可能会造成放电点偏离正确位置, 影响放电电流。这里没有进行人手持 ESD 模拟器进行放电的测试。

由图 8 可知, 在 $\pm 4\text{ kV}$ 的放电电压下, 电流波形重合度高, 稳定性较好。比较而言 $\pm 8\text{ kV}$ 放电电压下的电流波形稳定性较差。放电电压对电弧结构的影响可能是造成电流稳定性差异的原因。

综合比较可得, 在温度、湿度、电压和极性可控的条件下, 对电极接近速度进行控制能够得到稳定性较好的空气放电电流。该实验平台进行空气放电时放电电流的一致性得到初步验证。

2.3 对触摸屏进行放电

在实际的静电放电抗扰度测试中, 受测对象不是电流靶, 而是某一电子设备。注入电子设备的放电电流的一致性将直接影响到测试结果的可信度。

目前带有液晶显示(liquid crystal display, LCD) 触摸屏的智能手机、平板是人们日常生活中使用率最高的便携式电子设备。人体是最常见的静电携带源, 触摸屏使用的频繁性以及由大量感应元件组成的触摸屏本身高灵敏度的特性都大大增加了触摸屏受到静电放电干扰的可能性。因此, 本文将选取智能手机、平板等作为待测对象, 基于该实验平台进行空气放电测试, 研究注入到触摸屏上的放电电流波形的稳定性。这里需要注意的是, 由于屏幕四周有绝缘结构, 火花难以穿透屏幕, 因此对 LCD 触摸屏的空气放电一般是无火花放电^[20-21]。

随机选取 3 种市面上常见品牌的智能手机、平板作为待测设备, 使其良好接地, 屏幕均用酒精擦拭干净, 避免屏幕上积累的静电荷或灰尘、油脂对测试结果的影响。进行 $+8\text{ kV}$ 空气放电, 放电位置为触摸屏

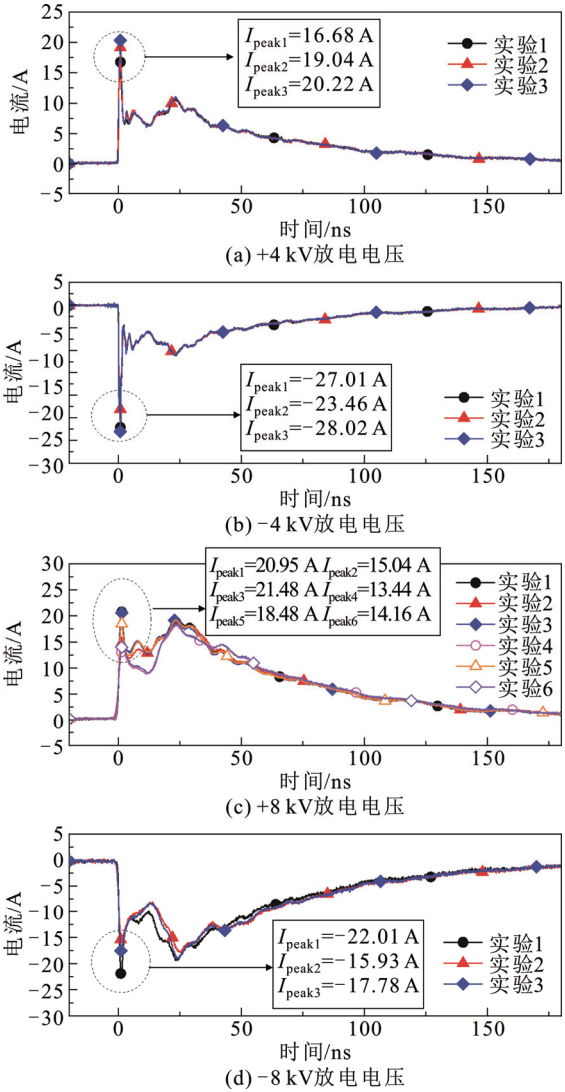


图 8 $\pm 4\text{ kV}$ 和 $\pm 8\text{ kV}$ 放电电压下平台控制电极以快速
(0.5 m/s)接近电流靶时的放电电流

Fig.8 Discharge currents of platform-controlled electrode
approaching current target at high speed(0.5 m/s) under $\pm 4\text{ kV}$
and $\pm 8\text{ kV}$ discharge voltage

中心, 放电速度分别为慢速(0.1 m/s)、中速(0.3 m/s)和快速(0.5 m/s)。使用通过 20 dB 衰减器连接到示波器通道的 F65 电流钳测量对屏幕进行空气放电时的放电电流。其中, 示波器被放置在法拉第笼内以防止辐射电磁场的干扰。测试结构框图见图 9。

图 10 为利用 3 种接近速度分别对 3 个触摸屏进行放电时的放电电流波形测量结果。

从图 10 中可以看出, 放电电流波形和接近速度有明显的相关性。由于空气放电本身的可重复性问题以及不同电子产品的特性不同, 会使得同一接近速度下的放电电流有所不同。但显然, 同一接近速度下不同触摸屏的放电电流波形一致性较高, 峰

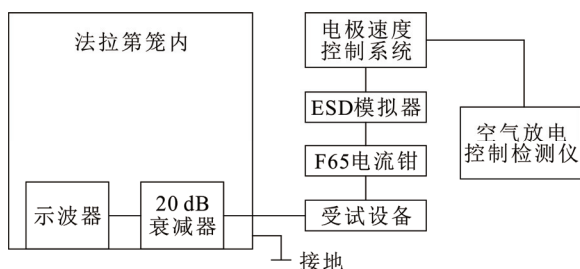


图9 测试结构框图

Fig.9 Block diagram of structure for test

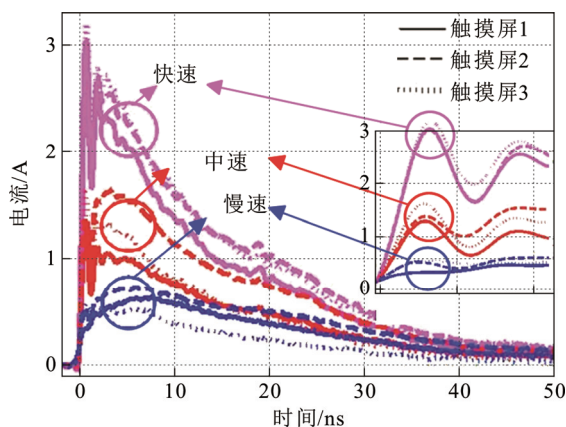


图10 不同接近速度下的放电电流波形

Fig.10 Discharge current waveforms at different approaching speeds

值、上升时间等参数相似度较好，这再次论证了前面对实验平台稳定性的验证。在研究空气放电对电子设备的影响时，对放电电极的移动速度进行准确的控制能够很好地提高测试的可重复性和测试结果的稳定性。

3 结论

1) 由于空气放电的机理复杂性，其放电电流很难达到类似于接触式放电下放电电流的波形稳定性。通过对电极接近速度的准确控制，和手持ESD模拟器相比，可调速自控空气静电放电实验平台得到的空气放电电流波形达到了更好的一致性。

2) 对触摸屏的空气放电测试表明，同一接近速度下的放电电流波形具有较好的相似度。这表明，在电极速度可控的情况下，电子设备的空气放电测试具有一定的可重复性。

3) 研制的可调速自控空气静电放电实验平台总体上能够获取重复性较高的放电电流。这为完善电子产品的空气放电抗扰度测试、提升测试结果的

可信度提供了参考。但目前，该实验平台控制的电极移动速度最高只能达到0.5 m/s，无法进行高接近速度(> 0.8 m/s)下的空气放电实验，这是后续研究可以进行完善的地方。

参考文献 References

- [1] POMMERENKE D. On the influence of the speed of approach, humidity and arc length on ESD breakdown[C]// The 3rd ESD Forum. Grainau, Germany: [s.n.], 1993: 103-111.
- [2] 贺其元, 刘尚合, 徐晓英, 等. 接近速度对空气静电放电特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 524-528.
HE Qiyuan, LIU Shanghe, XU Xiaoying, et al. Influence of approaching velocity on the characteristics of air electrostatic discharge[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(3): 524-528.
- [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.
WU Yong, LIU Guohong, GU Lijuan, et al. Experimental analysis on air electrostatic discharge[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 131-135.
- [4] 贺其元, 刘尚合, 施荣绪. 空气间隙固定和连续变化时的空气静电放电事件研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1746-1751.
HE Qiyuan, LIU Shanghe, SHI Rongxu. Study on the air electrostatic discharge event at constant and alterable air gap[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1746-1751.
- [5] RICHMAN P. Classification of ESD hand/metal current waves versus approach speed, voltage, electrode geometry and humidity[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-10.
- [6] KO J H, KIM K Y, JEON J S, et al. System-level ESD on-chip protection for mobile display driver IC[C] // Electrical Overstress/electrostatic Discharge Symposium. [S.l.]: IEEE, 2011: 1-8.
- [7] KER M D, HSU S F. Physical mechanism and device simulation on transient-induced latchup in CMOS ICs under system-level ESD test[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(8): 1821-1831.
- [8] ZHOU J, SHINDE S, GUO Y, et al. IEC 61000-4-2 ESD test in display down configuration for cell phones[C] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2016: 713-718.
- [9] VORA S, JIANG R, VASUDEVAN S, et al. Application level investigation of system-level ESD-induced soft failures[C] // Electrical Overstress/electrostatic Discharge Symposium. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-10.
- [10] GAN Y, XU X, MAGHLAKELIDZE G, et al. System-level modeling methodology of ESD cable discharge to ethernet transceiver through magnetics[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(5): 1407-1416.
- [11] CENTOLA F, POMMERENKE D, KAI W, et al. ESD excitation model for susceptibility study[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2003: 58-63.
- [12] LIU D, NANDY A, POMMERENKE D, et al. Full wave model for simulating a Noiseken ESD generator[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2009: 334-339.
- [13] 汪项伟, 万发雨, 冯超超, 等. 静电放电辐射场模拟及干扰预测[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3396-3402.

- WANG Xiangwei, WAN Fayu, FENG Chaochao. et al. Radiation field simulation and interference prediction of electrostatic discharge[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3396-3402.
- [14] CHUNDRU R, POMMERENKE D, WANG K, et al. Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels-part I: reference event[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 498-504.
- [15] HIRATA M, TAKAHASHI T, SCHIBUYA N. Evaluation of falling time restriction of ESD immunity test current waveform: the result of IEC 61000-4-2 round robin test in Japan[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-4.
- [16] 原青云, 张希军, 马立云. 静电放电抗扰度试验中放电电压对放电参数的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3659-3665.
- YUAN Qingyun, ZHANG Xijun, MA Liyun, et al. Effect of discharge voltage on discharge parameters in electrostatic discharge immunity test[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3659-3665.
- [17] 徐晓英, 甘瑛洁, 浦实, 等. ESD 防护器件 HMM 和 TLP 测试方法及性能评价[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1348-1353.
- XU Xiaoying, GAN Yingjie, PU Shi, et al. ESD protection device HMM and TLP test methods and performance evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1348-1353.
- [18] 雷磊, 原亮, 刘尚合, 等. 一种用于 ESD 测试的 PLC 单轴运动控制台研究[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(1): 7-10.
- LEI Lei, YUAN Liang, LIU Shanghe, et al. Designing of PLC single axle motion console used in ESD test[J]. Journal of Ordnance Engineering Academy, 2005, 17(1): 7-10.
- [19] 徐晓英, 贺其元, 刘尚合, 等. 自控式空气放电重复性实验研究[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(4): 13-15.
- XU Xiaoying, HE Qiyuan, LIU Shanghe, et al. Experimental investigation on the repeatability of air electrostatic discharge with self-controlled set-up[J]. Journal of Ordnance Engineering Academy, 2005, 17(4): 13-15.
- [20] TALEBZADEH A, GAN Y, KIM K H, et al. Spark-less electrostatic discharge (ESD) on display screens[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 2015: 1284-1289.

- [21] GAN Y, TALEBZADEH A, XU X, et al. Experimental characterization and modeling of surface discharging for an electrostatic discharge (ESD) to an LCD display[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 60(1): 96-106.



Ji Qizheng
Senior engineer



GAN Yingjie
Ph.D.



XU Xiaoying
Ph. D., Professor
Corresponding author

季启政

1979—, 男, 硕士, 高工, 硕导
研究方向为静电、洁净技术研究与管理。主持参与国防、军队等科研项目 10 余项, 主/参编国家、军用等标准近 20 项。国家注册一级计量师, 国家 CNAS 实验室认可评审员, 国家 CCAA 检查员
E-mail: qzhji@sina.com

甘瑛洁

1989—, 女, 博士
研究方向为静电放电机理与测试
E-mail: ganyj1989@sina.com

徐晓英(通信作者)

1957—, 女, 博士, 教授, 博导
主要从事静电放电、电磁兼容和数值计算方面的工作。主持完成了国家自然科学基金项目和交通部重点项目。现为中国物理学会静电专业委员会委员
E-mail: xu_xiao_ying@126.com

收稿日期 2018-12-09 修回日期 2019-04-17 编辑 曾文君