

# 机车辅助电源控制端静电放电问题处理方法研究

窦爱玉<sup>1</sup>, 张岳明<sup>2</sup>, 颜伟<sup>1</sup>, 张宇环<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 郭青龙<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)  
(2. 南京华士电子科技有限公司, 江苏 南京 211106)

[摘要] 针对机车辅助电源控制端的静电放电(ESD)抗扰度问题,分析了静电放电产生和骚扰机理,研究了静电放电的处理方法,提出了针对控制端印刷电路板(PCB)静电放电问题的解决方法.试验结果表明,所提方法可以有效提高机车辅助电源控制端ESD抗扰度等级,达到GB/T17626.2—2006标准要求.

[关键词] 辅助电源,控制端,静电放电,印刷电路板

[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)01-0011-04

## Study of the Treatment Method for ESD Problems of the Console Terminal of Locomotive Auxiliary Power

Dou Aiyu<sup>1</sup>, Zhang Yueming<sup>2</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>, Zhang Yuhuan<sup>1</sup>, Liu Yong<sup>1</sup>, Guo Qinglong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)  
(2. Nanjing Huashi Electronic Scientific CO., LTD, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at the ESD problems of the console terminal of locomotive auxiliary power, the mechanism of production and harassment to ESD is employed, the processing method of ESD, and the solution to ESD problems of printed circuit board is put forward. The experimental results show that the ESD level of console terminal of locomotive auxiliary power is efficiently improved, and GB/T17626.2—2006 is reached.

**Key words:** auxiliary power, console terminal, electrostatic discharge, printed circuit board

随着电子技术的飞速发展,特别是微电子、IT等高科技产业的飞速进步,电子产品日趋微型化、智能化,但这些电子产品一般对静电放电ESD(Electrostatic Discharge)比较敏感<sup>[1,2]</sup>.ESD对电子产品的危害可以分为两大类:非破坏性影响和破坏性影响<sup>[3]</sup>.非破坏性影响主要是由于ESD形成的骚扰电流或电磁波被PCB接收,对电子系统造成传导骚扰和辐射骚扰,这些骚扰能够造成数据错误或者电路故障.破坏性影响主要是由于ESD电流产生的热量导致设备的热失效和由于ESD感应出高电压导致绝缘击穿.

机车电源作为高度集成化的电子产品,在机车高速行驶时,易形成静电积累,一旦发生静电放电,对电源的危害较大.目前,对机车电源的ESD抗扰度研究,主要集中在电源主体的结构和防护设计上,忽略了电源控制端的保护.由于机车电源的电源主体和控制端处于不同的机箱中,电源控制端起到控制电源闭合和关断、传输数据的作用,一旦控制端受到ESD骚扰,将严重影响电源的安全稳定.

针对上述问题,本文分析了静电产生和骚扰机理,针对PCB的敏感电路和敏感器件问题,提出了ESD解决方案,从传导和辐射两方面提出整改措施,试验结果表明,采用所提方法可有效提高某型机车辅助电源控制端的ESD抗扰度等级,通过了GB/T 17626.2—2006标准.

## 1 ESD机理分析

### 1.1 ESD产生机理

静电产生的两种主要方式为物体间相互摩擦起电和感应起电<sup>[4]</sup>.当两个绝缘体互相接触摩擦时,电

收稿日期:2012-11-25.  
基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12\_0404、CXLX12\_0411).  
通讯联系人:颜伟,博士研究生,研究方向:电磁兼容技术应用. E-mail: kae19860202@163.com

- Electrical Machines,2003(3):32-34. (in Chinese)
- [4] Matthew Rickard,Derek Dunn-Rankin. Characterization of ionic wind velocity[J]. Journal of Electrostatics,2005,63(6-10):711-716.
- [5] Lawton J,Mayo P J. Factors influencing maximum ionic wind velocities[J]. Combustion and Flame,1971,16(3):253-263.
- [6] 亢燕铭,荣美丽,沈恒星,等. 空气净化过程中的电晕放电与离子风[J]. 自然杂志,2002,24(3):125-128.  
Kang Yanming,Rong Meili,Shen Hengxing,et al. The corona discharge and ionic wind in air purification[J]. Journal Nature,2002,24(3):125-128. (in Chinese)
- [7] 田林. 地板送风空调系统在商业建筑的应用探讨[J]. 建筑科学,2008,20:43-45.  
Tian Lin. The apply of underfloor air distribution system in commercial buildings[J]. Building Sciences,2008,20:43-45. (in Chinese)
- [8] Allen P H G,Karaylannis T G. Electrohydynamic enhancement of heat transfer and fluid flow[J]. Heat Recovery System & CHP,1995,15(5):389-423.
- [9] 向晓东,陈旺生,刘新敏,等. 芒刺电晕极场强分析与离子风测定[J]. 武汉冶金科技大学学报:自然科学版,1999(1):39-41.  
Xiang Xiaodong,Chen Wangsheng,Liu Xinmin,et al. The analysis of filed of corona electrodes and determination of Ionic wind[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology of Metallurgy:Natural Science Edition,1999(1):39-41. (in Chinese)
- [10] 《正交实验法》编写组. 正交实验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976.  
The Orthogonal Experiment Editorial Group. The Orthogonal Experiment[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1976. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]

(上接第14页)

- [5] 刘尚合,武占城,朱长清. 静电放电及危害防护[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:62-257.  
Liu Shanghe,Wu Zhancheng,Zhu Changqing. Electrostatic Discharge and Protection[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004:62-257. (in Chinese)
- [6] Wilson P F,Ma M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1991,33(1):10-18.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 24338. 4—2009,机车车辆设备电磁兼容试验[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 24338. 4—2009, Rolling stock equipment electromagnetic compatibility test[S]. Beijing:Standards Press of China,2009. (in Chinese)
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17626. 2—2006,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,2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 17626. 2—2006, Testing and measurement techniques of electromagnetic compatibility:Electrostatic discharge immunity test[S]. Beijing:Standards Press of China,2007. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]

荷会从一个绝缘体转移到另一个绝缘体上,即一个带正电,另一个带负电.当两者分离时,绝缘体上所带电荷无法自由移动,电荷仍然留存于两个绝缘体中.对于感应起电而言,当一个孤立的电中性导体处在电场中时,外加电场对导体的自由电子将产生力的作用,使它们逆着电场的方向运动,最终使负电荷和正电荷分别位于导体两端.

1.2 ESD 骚扰机理

静电放电产生的骚扰主要基于自身的强电场效应、热效应和电磁脉冲效应<sup>[5]</sup>.  
静电的强电场效应是指静电荷在物体上的积累使物体对地具有高电压,在附近形成强电场.在电子工业中,该强电场会导致 MOS 场效应器件的栅氧化膜被击穿,使器件失效.

ESD 一般都是在 ns 或 μs 量级完成的.在微电子领域,ESD 过程是静电能量在十分之一 μs 内通过器件电阻释放的,其平均功率可达几 kW,如此大功率的短脉冲电流足以烧毁器件,导致电路损坏失效.

由于 ESD 的过程是瞬时大电流的过程,其电流脉冲的上升沿非常陡,因此 ESD 过程必然会产生强烈的电磁辐射.根据 Wilson 偶极子模型<sup>[6]</sup>,ESD 过程中的电磁场可以等效为一个电偶极子产生的辐射电磁场,如图 1 所示.

偶极子长度 dl 取为放电间隙的长度,认为电流均匀分布,利用推迟势,可以得到空间任一点 A 处的电场和磁场表达式:

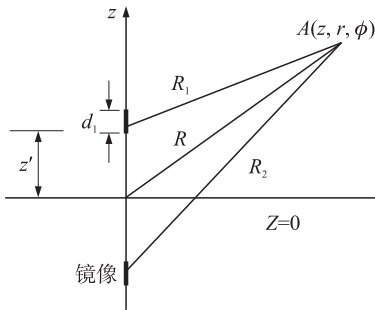


图 1 偶极子模型  
Fig. 1 Dipole model

$$H(z,r,\phi,t)=e_{\phi}\frac{\Delta l}{2\pi}\frac{r}{R}\times\left[\frac{i(t-R/c)}{R^2}+\frac{1}{cR}\frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t}\right],\tag{1}$$

$$E(z,r,\phi,t)=a_r\frac{\Delta l}{2\pi\epsilon_0}\frac{rz}{R^2}\times\left[\frac{3\oint_{-\infty}^t i(t'-R/c)dt'-3\oint_{-\infty}^t i(t')dt'}{R^3}+\frac{3i(t-R/c)}{cR^2}+\frac{1}{c^2R}\frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t}\right]+a_z\frac{\Delta l}{2\pi\epsilon_0}\left\{\left(\frac{3z^2}{R^2}-1\right)\left[\frac{3\oint_{-\infty}^t i(t'-R/c)dt'-3\oint_{-\infty}^t i(t)dt}{R^3}+\frac{i(t-R/c)}{cR^2}\right]-\frac{r^2}{c^2R^3}\frac{\partial i(t-R/c)}{\partial t}\right\},\tag{2}$$

其中,φ,r,z 分别为场点所在位置的 3 个坐标轴的坐标;e<sub>φ</sub>,a<sub>r</sub>,a<sub>z</sub> 分别为 φ,r,z 3 个方向的单位矢量;Δl 为放电火花长度;ε<sub>0</sub> 为真空介电常数;c 为光速;R 为观察点到放电中心的距离;t 为时间;t'为微积分变量.

根据式(1)和(2),给出 i(t),就可以求出电场和磁场时空分布,但在 ESD 火花放电的近场区域主要是电荷引起的感应场,其随空间距离衰减较快;而在远场区域主要是放电电流产生的辐射场.

1.3 ESD 模型

依据轨道交通电磁兼容试验的国家标准 GB/T 24338.4—2009 第 3-2 部分规定<sup>[7]</sup>,机车车辆设备的 ESD 抗扰度试验参照基础标准 GB/T 17626.2—2006<sup>[8]</sup>,试验等级为 6kV 接触放电和 8kV 空气放电.

由 Wilson 偶极子模型可知,ESD 会产生较高的感应电压和感应电流,并会产生较强的电磁场.根据对数款机车辅助电源控制端的现场检测发现,控制端机箱内部 PCB 敏感电路易感应 ESD 形成的电磁场,形成放电火花;并且控制端内部 PCB 上元器件易感应带电.因此,针对机车辅助电源控制端的 ESD 抗扰度问题,本文建立了如下两种模型.

1.3.1 敏感电路 ESD 模型

机箱在 ESD 测试时会聚集大量电荷,形成电磁场,使 PCB 上敏感电路感应,造成静电泄放.由于 PCB 电路采用的多为低压小电流器件,耐压等级较低,ESD 形成的泄放电流会导致敏感器件无法正常工作,甚至损坏敏感器件,此为敏感电路 ESD 模型.

1.3.2 敏感器件 ESD 模型

电路中的敏感器件多为半导体器件,由静电的骚扰机理可知,ESD 会击穿半导体器件的氧化膜,高密度泄放电流会烧毁 PN 结,高击穿电压易破坏器件功能性,此为敏感器件 ESD 模型.

2 ESD 防护方法

了解静电敏感元器件和静电放电容易发生的环节后,可以通过一定的方法措施,将静电放电控制在一定的范围内,使静电不足以对电子产品造成更大的危害。目前基本的防护方法有 4 种,包括静电泄漏与耗散、静电中和、静电屏蔽和环境增湿。根据国家标准,机车电源设备有其规定的空气湿度,因此无法用环境增湿来实现静电防护。此外,现有的静电中和材料如静电消除器,易随时间逐渐损耗,系统鲁棒性较低。据此,本文提出了基于 ESD 敏感电路和敏感器件的 ESD 防护方法。

PCB 上敏感电路可等效为短直天线和环形天线两种模型,如图 2、图 3 所示。由于天线能发射和接收电磁场,一旦 ESD 形成强烈的电磁辐射,必然会对 PCB 的敏感电路和器件形成骚扰。为了降低天线接收到的电磁辐射,消除干扰源是最直接的方法,也可在天线与电路连接处串联磁珠。由于磁珠主要由软磁铁氧体材料组成,具有高体积电阻率特性,针对特定频段的 RF 噪声具有较高的阻抗,和天线串联可最大限度的降低电磁辐射对 PCB 的影响。此外,针对环形天线,也可在设计之初减小环路面积,降低其对电磁辐射的敏感度。

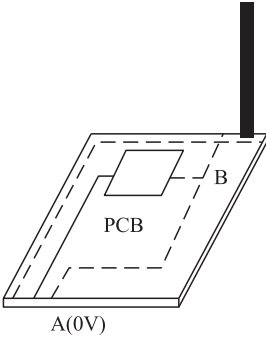


图 2 短直天线模型  
Fig.2 Short and straight antenna model

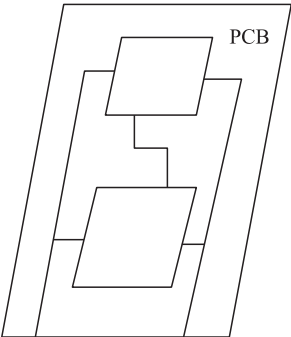


图 3 环形天线模型  
Fig.3 Loop antenna model

敏感器件受 ESD 骚扰主要缘于两方面:ESD 电流的直接冲击和与其有连接关系的器件上积累的静电荷的骚扰。对此,可以在大地和输入电路之间接入瞬态保护抑制器,瞬态保护抑制器能减小并消除 PCB 走线中的 ESD 电流。此外,消除有连接关系的器件上积累的电荷,也能降低 ESD 对敏感器件的骚扰。

3 基于机车辅助电源的 ESD 问题实验分析

为了验证上述方法,本文分析了某型机车 180kVA 机车辅助电源控制端的 ESD 抗扰度问题。依据 ESD 抗扰度国家标准 GB/T 17626.2—2006 规定,该控制端 ESD 试验等级为 6 kV 接触放电和 8 kV 空气放电,由于其外壳为金属外壳,因此只需进行 6 kV 的接触放电试验。试验现场采用苏州某公司生产的 ESD-20G 静电放电发生器进行静电放电抗扰度试验。由于该电源为台式设备,根据 GB/T 17626.2—2006 规定,将被测电源放置在高 0.8 m 的水平木桌上,木桌与地面之间垫上厚度为 0.5 mm 的铝制接地参考平面,同时桌面上放置面积为 1.6 m×0.8 m 的水平耦合板,并用一个厚 0.5 mm 的绝缘衬垫将被测电源与耦合板隔离。

为了获得较为全面的试验数据,现场采用将试验电压逐步递增的方法,试验数据如表 1 所示。当对金属外壳加载 6 kV 电压时,出现 FPGA 死机、总线错位的现象;当对前面板以太网口的金属外壳附近打静电时会出现较严重的放电现象,并且是经一侧的 PCB 放电。

针对上述问题,本文采取了如下防护措施。

3.1 基于 FPGA 死机的 ESD 处理

由于重新启动电源后,FPGA 能正常工作,因此初步分析是由于连续对机箱进行 ESD 测试,使得 FPGA 芯片上积累了一定数量的电荷,造成 FPGA 死机。查看芯片的各个脚的连接情况,发现该芯片的模式脚和片选脚原先接 10 kΩ 电阻接地。当用手拿着导线去接触这两个电阻与芯片相连的一端时,发现 FPGA 能够

表 1 分别设置不同试验电压的测试结果

Table 1 Experimental results of different test voltage

试验电压/kV	试验结果
2	通过
3	通过
4	通过
5	通过
6	未通过
7	未通过

复位. 因此,选择在模式脚和片选脚处接入瞬态保护抑制器. 再次试验证明,该方法能有效保证 FPGA 在 ESD 测试时正常工作. 此外,在该 PCB 板中,模式脚和片选脚是不需要工作的,本着节约成本的原则,选择将模式脚和片选脚直接接地.

### 3.2 基于总线错位的 ESD 处理

依据 FPGA 的 ESD 处理方法,先了解总线芯片各个脚的连接情况. 在与总线芯片有连接关系的各元器件中,控制以太网的 CP2200 芯片是与以太网口的铝制外壳相连的,而铝制外壳又与前面板相接触,如图 4 所示;同时 CP2200 的复位脚接 1 k $\Omega$  电阻到地. 当对机箱外壳和前面板打静电时,由于传导和辐射两方面的原因,使得 CP2200 芯片上积累了静电,成为了带电器件,从而将静电传给了总线芯片,使得总线错位. 由于在该 PCB 板中,以太网 CP2200 芯片不需要工作,因此将其复位脚所接的 1 k $\Omega$  电阻去掉,使复位脚直接接地,使得 CP2200 芯片不断地复位,之后再测试,没有出现总线错位的现象.

### 3.3 基于 PCB 放电的 ESD 处理

装上前面板,当对以太网口附近进行 ESD 测试时,左侧 PCB 上产生强烈的放电现象. 以太网口的金属外壳与前面板有接触,并且该外壳有两个金属固定端,如图 5 所示. 电荷在这两个端口上形成了球形电极模型,产生了较强的空间电磁辐射,耦合到一旁的 PCB 上,并在该 PCB 上找到了最佳泄放路径,形成电荷泄放. 依据放电部位,找出敏感电路,并在该电路上焊接磁珠,并且该磁珠并未影响电路的正常工作. 由于之前已经对以太网芯片做了复位处理,因此我们直接将其外壳去掉,再次进行 ESD 测试时,没有产生放电现象.



图 4 机箱前面板

Fig. 4 Front panel of chassis

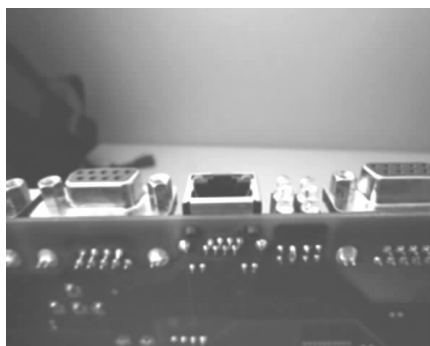


图 5 以太网口

Fig. 5 Ethernet port

## 4 结论

针对机车辅助电源控制端产生的 ESD 抗扰度问题,本文分析了 ESD 的产生和骚扰机理,建立了 ESD 模型,提出了基于敏感电路和敏感器件的防护方法,并进行了试验验证. 结果表明,采用本文所提方法能有效提高机车辅助电源控制端的 ESD 抗扰度等级,并通过 GB/T 17626.2—2006 标准.

### [参考文献](References)

- [1] Caccavo G, Cerri G. ESD field penetration into a populated metallic enclosure[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1): 243-249.
- [2] 薛纯, 王耀军. 静电放电危害及防护技术研究[J]. 机械与电子, 2010(351): 492-493.  
Xue Chun, Wang Yaojun. Research on the perniciousness and protection technology of ESD[J]. Machinery and Electronics, 2010(351): 492-493. (in Chinese)
- [3] 辛理科, 倪建平, 李劲, 等. 静电放电骚扰整改实例[J]. 安全与电磁兼容, 2010(103): 46-48.  
Xin Like, Ni Jianping, Li Jing, et al. Examples of rectification for ESD disturbance[J]. SAFETY and EMC, 2010(103): 46-48. (in Chinese)
- [4] 居荣, 赵阳, 刘勇, 等. 智能电网电力集中器静电放电抗扰度机理及防护方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 30-33.  
Ju Rong, Zhao Yang, Liu Yong, et al. ESD mechanism of power concentrator and its prevention[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 30-33. (in Chinese)

(下转第 39 页)

- Electrical Machines,2003(3):32-34. (in Chinese)
- [4] Matthew Rickard,Derek Dunn-Rankin. Characterization of ionic wind velocity[J]. Journal of Electrostatics,2005,63(6-10):711-716.
- [5] Lawton J,Mayo P J. Factors influencing maximum ionic wind velocities[J]. Combustion and Flame,1971,16(3):253-263.
- [6] 亢燕铭,荣美丽,沈恒星,等. 空气净化过程中的电晕放电与离子风[J]. 自然杂志,2002,24(3):125-128.  
Kang Yanming,Rong Meili,Shen Hengxing,et al. The corona discharge and ionic wind in air purification[J]. Journal Nature,2002,24(3):125-128. (in Chinese)
- [7] 田林. 地板送风空调系统在商业建筑的应用探讨[J]. 建筑科学,2008,20:43-45.  
Tian Lin. The apply of underfloor air distribution system in commercial buildings[J]. Building Sciences,2008,20:43-45. (in Chinese)
- [8] Allen P H G,Karaylannis T G. Electrohydynamic enhancement of heat transfer and fluid flow[J]. Heat Recovery System & CHP,1995,15(5):389-423.
- [9] 向晓东,陈旺生,刘新敏,等. 芒刺电晕极场强分析与离子风测定[J]. 武汉冶金科技大学学报:自然科学版,1999(1):39-41.  
Xiang Xiaodong,Chen Wangsheng,Liu Xinmin,et al. The analysis of filed of corona electrodes and determination of Ionic wind[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology of Metallurgy:Natural Science Edition,1999(1):39-41. (in Chinese)
- [10] 《正交实验法》编写组. 正交实验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976.  
The Orthogonal Experiment Editorial Group. The Orthogonal Experiment[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1976. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]

(上接第14页)

- [5] 刘尚合,武占城,朱长清. 静电放电及危害防护[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:62-257.  
Liu Shanghe,Wu Zhancheng,Zhu Changqing. Electrostatic Discharge and Protection[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004:62-257. (in Chinese)
- [6] Wilson P F,Ma M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1991,33(1):10-18.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 24338. 4—2009,机车车辆设备电磁兼容试验[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 24338. 4—2009, Rolling stock equipment electromagnetic compatibility test[S]. Beijing:Standards Press of China,2009. (in Chinese)
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17626. 2—2006,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,2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 17626. 2—2006, Testing and measurement techniques of electromagnetic compatibility:Electrostatic discharge immunity test[S]. Beijing:Standards Press of China,2007. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]