

# 一种静电问题处理方法分析与应用

陈向阳<sup>1</sup>, 杨雄<sup>2</sup>, 周孟夏<sup>2</sup>, 吴玠<sup>2</sup>, 夏清<sup>2</sup>

(1. 江苏省产品质量监督检验研究院, 江苏 南京 210007)

(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

**[摘要]** 该文围绕一款立式医用盆腔医疗仪在电磁兼容测试的静电放电项目中出现的三个问题,从静电放电机理及等效模型入手,详细分析了问题的成因,根据上述原因提供了金属杆接地处理、电磁场屏蔽保护、电源的TVS防护等三个整改措施,并详细解释了各措施的静电抑制原理,最终通过测试验证方案可行。

**[关键词]** 静电放电, 盆腔治疗仪, 电磁兼容

**[中图分类号]** TM461; TN03 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0035-06

## Analysis and Application of an Electrostatic Problem

Chen Xiangyang<sup>1</sup>, Yang Xiong<sup>2</sup>, Zhou Mengxia<sup>2</sup>, Wu Jie<sup>2</sup>, Xia Qing<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Supervising & Testing Research Institute for Products Quality, Nanjing 210007, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** This article focuses on the three problems about the EMC test of a vertical medical pelvic cavity Instrument. The causes of these problems are analysed from the aspect of theory and model of electrostatic discharge machine. According to the above reasons, grounding of metal rod, shielding of electromagnetic field and TVS protection for electric source are taken in this equipment, and explains the measures of electrostatic suppression principle in detail, finally through the verification test scheme is feasible.

**Key words:** electrostatic discharge, pelvic treatment instrument, EMC

随着电力电子技术日益发展,电子设备中的器件结构日益复杂,其中存在的ESD问题也凸显出来,并成为电子设备及系统的严重隐患。当静电源接触电力电子器件时,会产生电荷的转移,在这个大电量的高速传送过程中,可能产生潜在的破坏电压、电流及电磁场。这些潜在因素在严重时可能导致被接触电力电子器件因过压、过流等原因被损坏,从而影响设备的正常工作。静电放电(ESD, Electro-Static Discharge)可形成高电位、强电场、瞬时大电流的特点,会在极短时间内产生很大的电流变化并对器件和设备形成冲击。大多数半导体器件都很容易受ESD损坏,特别是大规模集成电路器件更为脆弱。因此ESD抗扰度性能已成为衡量电子产品性能的一项重要指标。同时由于医疗器械产品必须依据YY 0505—2012《医用电气设备第1-2部分安全通用要求并列标准电磁兼容要求和试验》强制实施电磁兼容(EMC)的要求,使得医疗设备的静电放电抗扰度能力亟待提高。鉴于此,本文以一种医疗设备为案例,分析其ESD的形成机理及等效模型,详细描述盆腔治疗仪在ESD测试中遇到的故障情况,并进行成因分析,从而进一步采取多种整改措施,最终使得该款产品能够达到相应的静电抗扰度要求。本文为已经成型的产品提供了有效的整改方案,并为医疗器械工程设计人员提供了解决思路和参考,具有一定的实用意义。

## 1 静电放电的形成机理及等效模型

静电放电ESD是具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触引起的电荷转移,须具备电荷积累和电荷转移的条件,才能有效地抑制静电放电。产生放电的方式主要有两种,即接触放电和气隙放电。静电

收稿日期: 2016-04-20.

基金项目: 毫米波国家重点实验室开放基金(K201309)、南京师范大学科技成果转化基金项目(BY2012004)。

通讯联系人: 赵阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

放电过程中,电流是变化的,其表达式如下:

$$i(t) = 213(1 - e^{-t/0.62})^8 e^{-t/1.1} + 121(1 - e^{-t/55})e^{-t/26} \quad (1)$$

将静电放电模型等效为以下两种电路模型,即人体放电模型、机器放电模型. 人体接触电子设备产生的 ESD 的过程可以用人体模型进行描述,其等效电路如图 1 所示,使用一个 100 pF 的电容器串联一个 1 500  $\Omega$  的电阻模拟带电人体. 而电子设备静电放电抗干扰度检测过程可以用机器模型来描述,等效电路如图 2 所示,使用一个等效电阻为 0 的 200 pF 的电容器充当模拟器件.

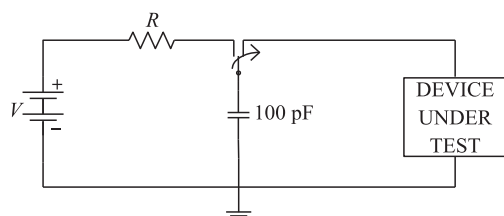


图1 人体模型

Fig.1 Human-body model

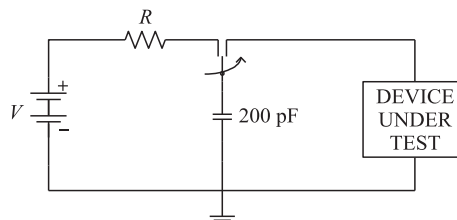


图2 机器模型

Fig.2 Machine model

## 2 医疗设备的防ESD技术

### 2.1 测试要求及问题描述

测试用盆腔医疗仪,外壳是金属材料并覆盖有绝缘漆层,外壳盖上后壳体完整,无明显孔缝,上表面有多个显示器,外接部分金属配件,背面有裸露金属螺丝.其实物如图 3 所示. 外壳打开后,其内部有带显示器的 PCB 电路板. 内壳为金属材质,覆盖有绝缘漆层. 根据国标 GB/T 17626.2 的要求,设备表面的金属可接触部位需要进行放电等级为 6 kV 的接触放电测试,表面的非金属可接触部分需要进行放电等级为 8 kV 的空气放电测试.

静电防护时,被测设备的外部结构通常对其抗静电干扰能力影响较大. 密封外壳能有效地增强设备的抗静电性能,保护内部电路. 但由于工程应用时往往需要在外壳上开孔,并留有缝隙,因此在工程中想要达到全封闭结构很不现实. 此时静电会通过孔和缝隙耦合进去,一旦遇到敏感器件会耦合到电路板上,形成流经电路板的大量电荷泄流,产生诸如控制信号失效,设备死机等问题. 该款设备在表面金属部分 4 kV 接触放电和非金属部分 4 kV 空气放电测试中均未通过,几次静电枪放电后显示器上的时间便停止跳动,出现死机现象,如图 4. 由此可见此盆腔治疗仪对静电放电干扰较为敏感,需要对其进行整改. 通过观察和简单地加拆措施对比试验,发现本产品虽拥有外接电源,但金属杆内部地线并未达到良好接地的效果,显示屏未做 ESD 防护措施,电路板没有专门的 ESD 防护器件,对静电干扰较为敏感.



图3 盆腔治疗仪

Fig.3 Pelvic therapy instrument



图4 设备故障情况

Fig.4 Fault condition of equipment

### 2.2 整改措施

整改过程中,主要采取了 3 个措施:

#### (1) 金属杆接地处理

良好接地可以为静电冲击提供良好的电荷泄放通道,使带电体上积聚的电荷可以避开敏感器件迅速导入大地. 具体来说当用完整的金属屏蔽体将带电导体包围起来时,在屏蔽体的内侧将感应出与带电导体等量异种的电荷,外侧出现与带电导体等量同种的电荷,因此外侧仍有电场存在. 如果将金属屏蔽接

地,则外侧感应出与带电导体等量同种的电荷将流入大地,金属壳外侧将不会存在电场,相当于壳内带电体的电场被屏蔽起来了.根据以上原理,在该设备的内壳处刮去绝缘漆,再用铜箔将金属杆内部地线连接到外壳地,具体措施如图 5,示意图与等效模型图,分别为图 6、图 7.



图5 金属棒地线连接到外壳地

Fig.5 Ground of metal rod connected to the ground of shell

根据图 7 所示,干扰回路和被干扰回路之间存在一个公共阻抗  $Z_i$ ,该公共阻抗上的电压为:

$$U_i = U_1 + U_2 = Z_i I_1 + Z_i I_2. \quad (2)$$

通常由于干扰电流  $I_1$  巨大,故不考虑被干扰回路电流  $I_2$ ,令  $U_2=0$ ,此时干扰电压可表示为

$$U_n = \frac{Z_i R_{L2}}{(R_{g1} + R_{L1})(R_{g2} + R_{L2})} U_1. \quad (3)$$

经接地处理后,上式中的  $Z_i$  被大大降低,从而使干扰电压  $U_i$  大幅降低,从而达到静电防护的效果.经过测试,当设备进行如上接地处理后,其抗接触放电能力已经提高到 5 000 V 同时其抗空气放电能力提高到了 6 000 V,故以上措施有效.

## (2) 电磁场屏蔽保护

当电磁波被射向一块金属体表面时,其能量强度将因损耗不断衰减为零.当进入导体表面时,导体中将产生高频交流电磁场.电磁波透入金属体的深度受频率及导体的电导率、磁导率的影响.频率越低电导率越小,磁导率越小深度越大,反之亦然.从能量角度分析,电磁波在电介质中传播时伴有能量的损耗,因此,场量振幅逐渐衰减.由于衰减因子的存在,高频电磁波仅能透入到导体表面薄层,并在这一薄层内形成高频交变电流(涡流),此现象称为趋肤效应.涡流的存在会使电磁波反射,部分电磁波的能量将透入导体内部,形成导体表面薄层内的电磁波,最终通过传导电流把这部分能量以焦耳热的形式消耗殆尽.静电放电干扰 ESD 也可视为一高频电磁波干扰,根据上述原理将显示器所在 PCB 板上的部分敏感区域用铜箔覆盖,进行屏蔽处理,如图 8.此时根据图 10 可得出电荷量  $Q$  和等效电容  $C$  之间有如下关系:

$$U = \frac{Q}{C}. \quad (4)$$

根据式(4),由于设备固定,所以可以看做  $C$  一定的情况下是不变的,我们可以通过降低  $Q$  值大小来降低  $U$  的目的,当敏感器件被铜箔覆盖时,因趋肤效应将部分能量反射出去使  $Q$  值降低,另外,因铜箔层可等效为一个等电位体,因而其内部空间的电磁场为零,电压差也为零,将  $Q$  值泄放为 0,从而提高了设备的抗静电干扰性能.

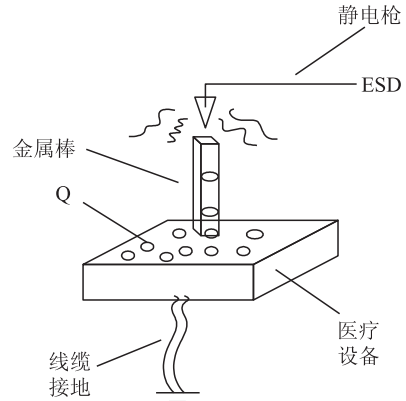


图6 接地示意图

Fig.6 Sketch diagram of ground connection

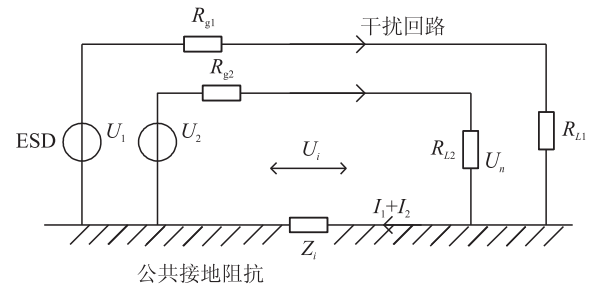


图7 接地原理图

Fig.7 Schematic diagram of ground connection

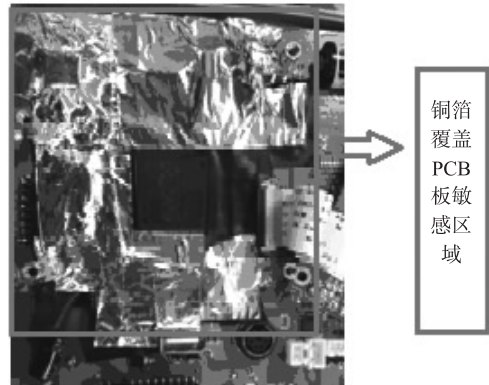


图8 铜箔处理

Fig.8 Disposing with copper

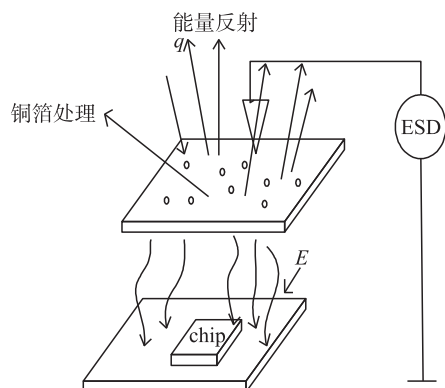


图9 电磁场屏蔽保护模型

Fig.9 Electromagnetic shielding model

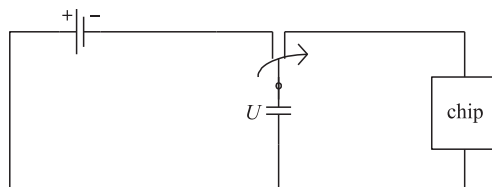


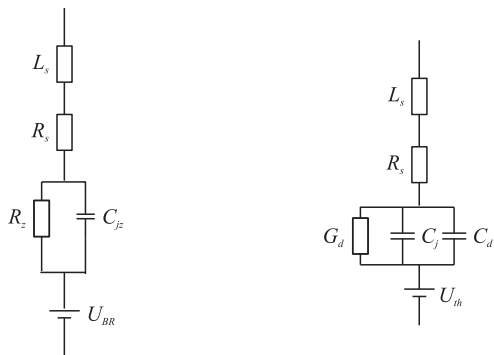
图10 铜箔处理原理图

Fig.10 Schematic diagram of disposing with copper

经测试,当设备进行如上铜箔覆盖处理后,其抗接触放电能力已经提高到 5 500 V 同时其抗空气放电能力提高到了 7 000 V,故以上措施有效。

### (3)使用 TVS 的 PCB 电源防 ESD 处理

瞬态电压抑制器(TVS, Transient Voltage Suppressor)是一种高效电路保护器件,其响应时间极快,为亚纳秒级,具有很强的静电防护能力。TVS 具有双向稳压作用,同时有很强的电流导通能力,当 TVS 的两端经受瞬间的高能量冲击时,一旦两端的电压超过 TVS 的钳位电压,TVS 瞬间被击穿,由高阻抗变为低阻抗,吸收一个瞬间的大电流,从而将 TVS 两端的电压钳制在器件的标识值附近。因此,TVS 对电子电路具有良好的静电防护作用。通过将 TVS 并联在芯片的电源和地之间,可以避免静电对芯片的冲击,使其工作正常。TVS 承受高电压泄放冲击能量时的等效电路如图 11 所示,将其分布阻抗简化后可得到如图 12 所示的 TVS 抑制静电的等效电路图, $R_g$ 是电源内阻,TVS 并联在电源两端,其中电源内阻  $R_g$ 、TVS 静电抑制器的分布阻抗  $R_s$  以及负载  $R_L$  之间满足  $R_g > R_s + R_L > R_s$  这一关系。



(a) TVS受正电压时的等效电路

(b) TVS受负电压时的等效电路

图11 TVS的等效电路

Fig.11 Equivalent circuit of TVS

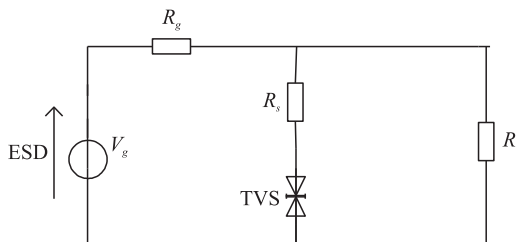


图12 TVS在PCB板工作时的等效电路

Fig.12 Equivalent circuit of working TVS in PCB

分析电路可知负载两端的电压为：

$$V_L = V_{BR} + \frac{R_s V_g}{R_g} \quad (5)$$

根据式(5)我们可以有效的通过 TVS 的钳位特性使  $V_L$  稳定在一定的范围内,故采用在显示屏 PCB 板上的时间信号芯片的电源引脚和信号引脚上对地并 TVS 整改措施,如图 13 所示,当遭遇 ESD 干扰形成的瞬态过冲电压时,耦合到敏感线路上的大电压会击穿 TVS,如图 14 所示,使大电流流经芯片前已经通过 TVS 管泄放,从而抑制静电干扰。

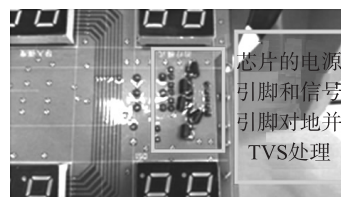


图13 TVS管处理

Fig.13 Disposing with TVS



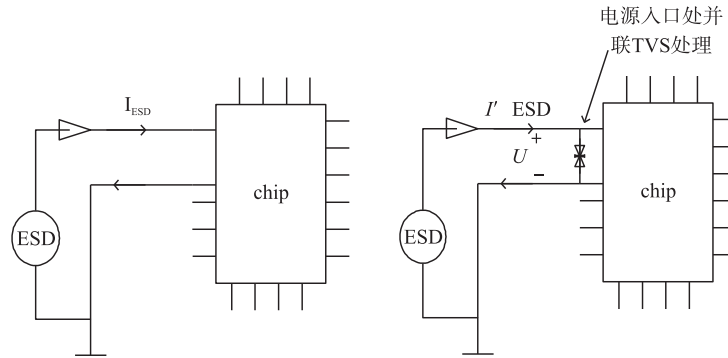


图14 TVS管处理示意图

Fig.14 Sketch diagram of disposing with TVS

经过测试,当设备进行如上 TVS 处理后,其抗接触放电能力已经提高到 6 000 V 同时其抗空气放电能力提高到了 8 000 V,故以上措施有效,同时设备已通过静电测试。

### 3 结语

本文结合实际整改案例,提出了某立式医疗设备的三种 ESD 防护措施:

(1)通过改良设备中敏感器件的接地方式,使外来 ESD 干扰能够在避开敏感器件的同时,安全把电荷泄放到大地上,以此达到保护电路的效果。

(2)通过使用铜膜包裹覆盖 PCB 板上的敏感区域,根据趋肤效应将部分能量反射,并形成等电位体,使其内部空间的电磁场及电压差都为零,从而达到提高设备的抗静电干扰性能的目的。

(3)在片上的电源处及信号端并联 TVS 静电抑制器,利用 TVS 的稳压性能,能将 ESD 过冲电压降低下来,使 PCB 板及其上面芯片的电源电压维持在正常范围内。事实证明,以上三种措施能对该款医疗设备进行 ESD 防护,使其通过 ESD 抗干扰度检测,得以正常生产使用。

### [参考文献](References)

- [1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.  
ZHAO Y, FENG Z M, HUANG X J. EMC test methods and engineering applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-12. (in Chinese)
- [2] 赵阳,SEE K Y. 电磁兼容基础与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006:1-20.  
ZHAO Y, SEE K Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-20. (in Chinese)
- [3] WANG K, POMMERENKE D, CHUNDRU R, et al. Numerical modeling of electrostatic discharge generators[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2003, 45(2): 258-271.
- [4] TAKADA T, SEKINE T, ASAI H. Efficient circuit/electromagnetic hybrid simulation for the electrostatic discharge events[C]. Melbourne, Engineers Australia, 2013: 146.
- [5] SEKINE T, ASAI H, LEE J S. Unified circuit modeling technique for the simulation of electrostatic discharge(ESD) injected by an ESD generator[C]. Pittsburgh, IEEE, 2012: 340-345.
- [6] TAKADA T, SEKINE T, ASAI H. Circuit/electromagnetic hybrid simulation of electrostatic discharge in contact discharge mode[C]. Rome, IEEE, 2012: 1-6.
- [7] YOSHIDA T, MASUI N. A study on system-level ESD stress simulation using circuit simulator[C]. Melbourne, Engineers Australia, 2013: 224.
- [8] CANIGGIA S, MARADEI F. Circuit and numerical modeling of electrostatic discharge generators[J]. IEEE transactions on industry applications, 2006, 42(6): 1 350-1 357.
- [9] KER M D, LIAO C S, YEN C C. Transient detection circuit for system-level ESD protection and its on-board behavior with EMI/EMC filters[C]. Oaks, IEEE, 2008.
- [10] KER M D. Whole-chip ESD protection design with efficient VDD-to-VSS ESD clamp circuits for submicron CMOS VLSI[J].

- IEEE transactions on electron devices, 1999, 46(1):173-183.
- [11] LIN C Y, CHU L W, TSAI S Y, et al. Design of compact ESD protection circuit for V-band RF applications in a 65-nm CMOS technology[J]. IEEE transactions on device and materials reliability, 2012, 12(3):554-561.
- [12] KER M D, KUO B J. ESD protection design for broadband RF circuits with decreasing-size distributed protection scheme [C]. California, IEEE, 2004.
- [13] KER M D, LIN C Y, HSIAO Y W. Overview on ESD protection designs of low-parasitic capacitance for RF ICs in CMOS technologies[J]. IEEE transactions on device and materials reliability, 2011, 11(2):207-218.
- [14] HYVONEN S, JOSHI S, ROSENBAUM E. Comprehensive ESD protection for RF inputs [J]. Microelectronics reliability, 2005, 45(2):245-254.
- [15] WONG S, HU C, CHAN S. SPICE macro model for the simulation of zener diode current-voltage characteristics [J]. IEEE circuits and devices magazine, 1991, 7(4):9-12.
- [16] BLEY M, FILHO M, RAIZER A. Modeling transient discharge suppressors [J]. IEEE potentials, 2004, 23(3):43-45.
- [17] LOU L F, DUVVURY C, JAHANZEB A, et al. SPICE simulation methodology for system level ESD design [C]. Nevada: IEEE, 2010:1-10.
- [18] 罗广孝, 崔翔. TVS 静电抑制器等效电路参数估算及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16):204-211.  
LUO G X, CUI X. Equivalent circuit parameter estimation and application of TVS electrostatic discharge suppressor [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):204-211. (in Chinese)
- [19] 赵阳, 罗永超. 高频电路辐射干扰快速分析与预估方法 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(3):6-13  
ZHAO Y, LUO Y C. Rapid analysis and prediction method of radiation interference of high frequency circuit [J]. Chinese journal of radio science, 2010, 25(3):6-13. (in Chinese)
- [20] 赵阳, 颜伟, 赵波. 电路辐射干扰机理诊断与特性估计方法研究 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(10):6-13.  
ZHAO Y, YAN W, ZHAO B. EMI radiated noise diagnosis and estimation for HF circuits [J]. Transactions of China electro-technical society, 2010, 25(10):6-13. (in Chinese)
- [21] 赵阳, 戎融, 张宇环. 提高 GTEM 小室测量 EMI 噪声精度的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27):169-176.  
ZHAO Y, RONG R, ZHANG Y H. Accuracy improvement of GTEM cells for EMI noise measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27):169-176. (in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]