

## 静电防护研究与进展\*

刘尚合 谭伟

(军械工程学院静电技术研究所 石家庄 050003)

**摘要** 文章综述了形成静电危害的基本条件和静电放电作用机理、静电测试技术、静电放电理论模型与静电放电模拟技术及静电防护理论与技术等方面的研究现状和该领域当前研究的热点与进展。

**关键词** 静电放电(ESD), 静电测试, 静电放电模拟, 静电防护

### ADVANCE IN ELECTROSTATIC PROTECTION

LIU Shang-He TAN Wei

(Electrostatic Technology Institute, The Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

**Abstract** The formation of electrostatic hazards, the mechanism of electrostatic discharge (ESD), electrostatic measurement techniques, ESD theoretical models and simulation techniques, and the theories and techniques of electrostatic protection are summarized. Current progress and topic of interest in the field of electrostatic protection are also presented.

**Key words** ESD, electrostatic measurement, ESD simulation, electrostatic protection

静电现象早在两千多年前就已为人们所知,当时只是作为一种简单而有趣的物理现象为人们所认识。随着科学技术的发展,静电学从实验科学阶段走向实际应用阶段,到本世纪初,静电在除尘、喷涂和静电复印等方面开始得到广泛应用。然而,人们对静电危害的认识却要晚半个世纪。随着现代化工业水平的不断提高,高分子材料、微电子器件、电爆装置广泛应用于各个领域,静电放电(ESD)造成的危害已涉及到电子、纺织、印刷、石油化工、船舶、国防和航天等众多领域。静电放电曾多次引起火灾和爆炸事故,它可以使人体遭到电击,引发二次事故;它曾引起火炸药、电火工品和石油液化气发生意外爆炸;它曾引起20万吨级超级油轮发生爆炸;它损坏电子元器件使得全球电子工业每年损失高达数百亿美元;它使得火箭和导弹发射失败;在太空飞行器中,它破坏太阳能电池组使卫星寿命缩短,干扰各类航天飞行器与地面的联系,造成飞行器失控。由于静电危害问题如此严重,因而静电防护研究受到了人们的普遍关注和重视。尤其是近十几年来,静电防护研究得到了长足的发展,在静电危害及作用机理、静电测试、ESD标准、防护理论与技术等方面都取得了

丰硕的研究成果。

#### 1 静电危害的形成及作用机理研究

掌握静电危害形成的条件是控制静电危害发生和研究防护措施的前提,因此研究静电危害形成的条件是静电防护研究的重要内容之一。通过大量静电危害的实例分析,目前人们认为静电危害的形成应具备三个基本条件:

(1)某处产生并积累足够的静电量,形成了“危险静电源”,以致局部电场强度达到或超过周围介质的击穿场强,发生静电放电。

(2)危险静电源存在的场所有易燃易爆气体混合物并达到爆炸极限浓度,或有电火工品、火炸药之类的危险品,或有静电敏感器件及电子装置等静电易爆易损物质。

(3)危险静电源与静电易爆易损物质之间能够形成能量耦合并且ESD能量等于或大于前者最小

\* 国防科技重点实验室基金资助项目

1999-10-09收到初稿,1999-12-21修回

点火能或静电敏感度。

形成静电危害的三个基本条件在事故链中是串联因素,只要控制其中一个条件不成立,就不会有静电危害发生。

为了全面研究静电放电造成的危害,采取有效的防护措施,不仅要掌握形成静电危害的基本条件,还需要对静电放电的作用机理进行研究。根据目前国内外研究报道<sup>[1]</sup>,可以将 ESD 产生危害的作用机理和效应概括为以下五种:

(1) ESD 激起的热效应是在 ns 或  $\mu\text{s}$  量级完成的,是一种绝热过程,作为点火源、引爆源,瞬时可引起易燃易爆气体或电火工品等燃烧、爆炸。可以使半导体器件、集成电路过热,造成局部热损伤,电路性能变坏或失效。

(2) 静电放电过程是电压、电流随机瞬时变化的电磁辐射过程。这种近场电磁辐射或电磁脉冲对航空、航天以及许多信息化设备可以造成电噪声和很强的电磁干扰。

(3) 静电带电体周围形成的强电场不仅可以使 MOS 场效应器件栅氧化层击穿或金属化线之间介质击穿,造成电路失效,而且可以在半导体器件中造成潜在的失效,导致电路和设备可靠性降低。

(4) 静电的吸附效应成为洁净工作间的污染源,使产品质量下降,影响纺织、印刷、塑料薄膜包装等自动化生产,成为现代工业的障碍之一。

(5) 静电放电对人体电击或人体静电本身的放电都会对人体形成意外刺激,导致精神紧张,手脚动作失常,引发机械故障、碰伤、高空坠落等“二次事故”。

## 2 静电防护理论与技术研究

静电学是物理学的一个分支,但是静电防护研究却涉及到气体放电理论、材料科学和近代电测技术等多学科知识,其理论与技术仍处在研究与发展阶段。它虽然建立在传统静电学的基础之上,然而单纯使用传统的静电学概念和理论,却不能解决静电防护研究工程中的某些问题。例如,通常意义上的导体与非导体和静电导体与静电非导体在概念和量值划分上都有很大的差异。库仑定律和高斯定理是经典静电学的理论基础,它们的发现使静电学能够用数学进行定量研究。也正是在此理论基础上,导出静电泄漏(衰减)遵循指数衰减规律。可是近代静电防护理论研究表明,在高压静电场下物质导电规律并

不服从常规意义上的欧姆定律,而是遵循欧姆定律微分形式的一般表达式<sup>[2]</sup>。欧姆定律微分形式的一般表达式不仅揭示了静电衰减 Cross-over 效应的微观机制,还告诉人们,物体上的静电泄漏规律不能简单地用指数衰减曲线来描述。这一理论为正确评价材料静电性能提供了科学的依据。另外,在电火工品静电感度和静电发火机理等方面,我国已建立了真实静电感度测试方法和静电发火数理模型,并已实际应用于静电防护工程<sup>[3]</sup>。

在粉体静电爆炸与防护研究方面,瑞士 CIBA 公司的 Glor 博士用高速摄影、无线电遥测、ESD 电荷转移量测试等技术,实验研究了料仓尺寸、物料粒径、物流量等对粉体静电放电的影响,给出了正确评价粉体静电放电危险性的定量数据<sup>[4]</sup>。与此同时,英国南开普敦大学 Bailly 等在粉体带电危险性研究方面得出了同样的结论,指出粉体带电与常规现象不同,在高湿度下也存在静电爆炸的危险性。

值得注意的是,目前一些新理论、新方法也应用到静电防护研究领域,如用混沌理论解释在静电起电、放电过程中的非线性规律,用时域有限差分法(FDTD)等数值计算方法研究 ESD 辐射场对复杂形体结构系统内部设备的影响<sup>[5]</sup>。

在上述研究的基础上,常规条件下的静电防护技术正日益完善,并制定了各种静电防护标准。如美国先后制定了 100 多个 ESD 防护标准,大到静电控制大纲,小到静电产品(如腕带、手套、包装袋等)的企业标准。从测试方法到产品性能、技术规格、技术参数,都有相应的技术标准。这就为各种防静电产品的公平竞争和全方位的综合治理 ESD 危害,奠定了重要的技术基础。目前,国外从事 ESD 测试标准研究和制定的机构主要有:国际电工委员会(IEC)、欧洲计算机制造协会(ECMA)、美国国家标准协会(ANSI)和 IEEE 能量工程协会等。国际电工委员会于 1991 年和 1995 年两次修改 ESD 标准(分别为 IEC801-2 和 IEC1000-4-2),并与欧洲标准委员会、国际无线电干扰特别委员会(CISPR)协调统一了标准规定的 ESD 模型参数,使 ESD 研究进一步标准化、规范化。

我国 ESD 技术标准和法规的制定与颁布起步于 80 年代中期,先后参照国外相关标准制定了数十种国家标准和行业标准,并于 1995 年首次定义了“静电危险场所”,提出了分类防护的技术等级和措施。但是无论在数量上,还是质量上,都不能满足我国静电防护工程发展的需要,急待研究补充。

### 3 静电测试技术研究

在静电防护研究中,静电测试是一项十分重要而有意义的工作,它直接制约着静电防护理论与技术的发展.目前,静电动态电位和静电放电辐射电磁场的测试是该领域研究的重点.

#### 3.1 静电动态电位测试

由于静电起电是一个起电与泄漏相平衡的动态过程,静电造成危害的概念大小不仅取决于危险静电源的静态电位或能量,而且还与静电的动态特性密切相关.经典静电学的静态测试技术在许多情况下已不能满足要求,为此我国科技工作者在静电防护工程研究的基础上,提出了“信号自屏蔽电荷耦合”原理,研制成功 ZPD-1 型静电电位动态测试仪<sup>[6]</sup>,解决了高电位、高起电率危险静电源的动态测试和传统静电测试技术中接地屏蔽带来的一系列问题.当前这种仪器已成为静电防护领域人体等静电导体的静电动态电位测试的重要手段.

#### 3.2 静电放电辐射场的测试

随着信息化时代的到来,以计算机控制为中心的各种电子装备、智能化仪表对静电放电的电磁辐射场非常敏感.所以,静电放电辐射场的测试与防护研究已成为静电防护研究中的一个热点问题.美国 1991 年的政府工作报告(AD-A243367)和英国军械局备忘录(OBS/04/91)中都在电磁环境中首先提到静电放电电磁辐射、电磁脉冲问题.甚至有的报道把静电放电及其电磁脉冲(EMP)的危害与雷电电磁脉冲(LEMP)、核电磁脉冲(NEMP)相提并论<sup>[7]</sup>.图 1 是静电放电与雷电电磁脉冲、核电磁脉冲和开

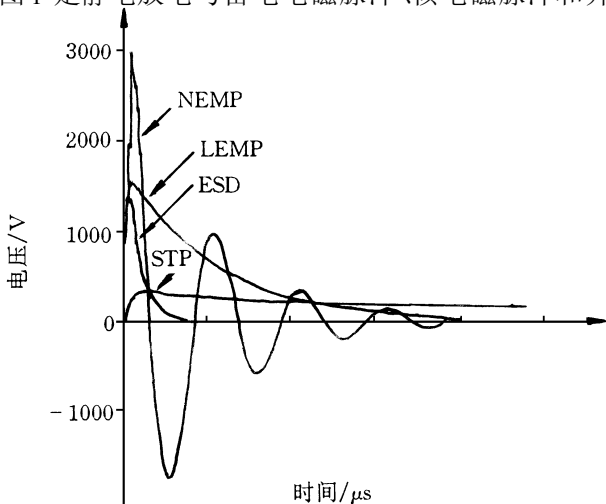


图 1 几种典型的电磁脉冲波形

关电磁脉冲(STP)之间的比较.

由于 ESD 辐射场具有极宽的频谱(频谱上限可达几个 GHz),其电磁场的测量是一项非常困难的工作.ESD 辐射场时域测量系统由脉冲天线、探头和示波器组成.由于目前数字示波器的采样速率已很高,带宽也能满足要求,所以 ESD 辐射场测量研究主要集中在宽带脉冲天线的研制上.除了研制高性能的天线外,波形重建方法在电磁场测量中也开始研究应用.

### 4 静电放电模拟技术

静电放电是一个复杂多变的随机过程,造成静电危害的危险静电源多种多样,为了有效地控制 ESD 危害,正确评价 ESD 效应,对静电放电进行模拟是十分必要的,也是 ESD 危害及其控制研究和防静电产品性能检验的重要方法和手段.因此静电放电模拟技术的研究一直受到人们的重视.

#### 4.1 静电放电模型的建立

随着静电防护研究的进展,人们先后建立了各种 ESD 模型<sup>[8]</sup>,如人体模型、人体-金属模型(场增强模型)、带电器件模型、场感应模型、机器模型(日本模型)、电容耦合模型、悬浮器件模型、家具模型和瞬时感应模型等.人体是最常见的静电危害源,因而人体模型和人体-金属模型是最有代表性的模型.表 1 给出了目前国内外标准规定的人体 ESD 模型参数.静电放电模型的建立,不仅可以用于静电防护的理论建模研究,同时还为静电放电模拟器的研制和静电放电标准的制定提供了理论依据.研究某类静电放电事件时,可将静电危害源用某种合适的 ESD 模型来等效,并结合其放电通路,进行定量研究.

表 1 国内外标准中人体 ESD 模型参数

机构	电容/pF	电阻/ $\Omega$
IEC 801-2(第一次)	150	150
IEC 801-2(第二次)	150	330
IEC 61000-4-2	150	330
EN 61000-4-2	150	330
ECMA	150	330
MIL-STD-883B	100	1500
DOD-HD BK263	100	1500
MIL-STD-1512	500	5000
EIA	60	10000
GJB736	500	5000

#### 4.2 静电放电辐射场模型研究

静电放电辐射场的研究是当前该领域研究的新

物理

课题.由于静电放电辐射场与发射-接收体的形状、带电体电压、接近速度、电流波形和空气湿度等存在着某种复杂的关系,因而静电放电辐射场不可能用简单的模型去精确描述,这给理论建模带来较大的困难.目前,文献报道的静电放电辐射场模型主要有偶极子模型、线性导体模型<sup>[8]</sup>和球体模型<sup>[9]</sup>.它们是在不同的情形下简化得来的.当放电电流路径相对耦合距离来说很短时,可以将该短电流等效为一带变短线性偶极子.相反,如果放电路径相对耦合距离大得多,可以用长线性导体模型来等效.

#### 4.3 静电放电模拟器(室)

在 IEC61000-4-2 等相关标准中,规定了 ESD 模拟器的放电方式(接触放电和空气放电)、ESD 模型参数和典型放电电流波形.为此,有关公司依据标准的要求,研制了相应的 ESD 模拟器.如:瑞士生产的 NSG435 多功能 ESD 模拟器、日本生产的 ESS200 AX ESD 模拟器、MZ-15/EC-ESD 试验设备以及上海三基公司生产的智能化静电放电模拟发生器等都是商品化的 ESD 模拟试验仪器,近几年在我国许多领域得到了应用.

用 ESD 模拟器接触放电,可以模拟静电放电电流注入的直接作用,而且可重复性好.采用空气放电方式时,通过再现 ESD 电弧可以模拟静电放电辐射场的真实情况,方法简单且费用少,但是却很难做到可控制、可重复的测试.因此,人们先后提出了采用核电磁脉冲模型装置、TEM 室( DE89014484) 和 GTEM 室等大型设施模拟静电放电的电磁脉冲场.表 2 是目前几种静电放电模拟装置与试验方法的比较.

表 2 ESD 模拟与试验方法比较

方法	设备	模拟特点	模拟效果	成本
空气放电	ESD 模拟器	真实放电	重复性差	低
接触放电	ESD 模拟器	电流注入	重复性好	低
有界波	NEMP 模拟器	EMP 场	重复性好	较高
TEM 波	TEM 室	EMP 场	重复性好	较高
TEM 波	GTEM 室	EMP 场	重复性好,频带宽	高

## 5 结束语

随着信息化时代的到来,静电危害问题已涉及到我们的生活、工作的各个领域.静电防护问题的研究,已发展成为利用系统工程理论和仿真模拟技术对静电起电原理、静电作用机理与效应、静电测试技术和静电防护理论与技术进行全面研究的新学科.近十年来,该领域取得了重要的研究成果,许多新理论、新的实验技术已经形成.但是随着科学技术的发展,仍有许多新的问题有待深入研究解决.如静电放电电磁脉冲场的测试和模型的建立,既是该领域当前研究的热点,也是静电防护研究中的一个难题.

### 参 考 文 献

- [1] 刘尚合. 静电, 1998, 13: 2[ LIU Shang He. Electrostatics, 1998, 13: 2(in Chinese) ]
- [2] 刘尚合等编著. 静电理论与防护. 北京:兵器工业出版社, 1999. 143[ LIU Shang he et al. Electrostatic Theories and its Protection, Beijing: Weapons Industry Press, 1999. 143(in Chinese) ]
- [3] 徐义根,魏光辉,刘尚合. 兵工学报(火化工分册), 1997, 19: 48[ XU Yi Gen, WEI Guang Hui, LIU Shang He. Acta Armamentarii( The Fascicule of Explosives and Propellants ), 1997, 19: 48(in Chinese) ]
- [4] 谭凤贵,周本谋. 现代静电科学技术研究. 西安:西安出版社, 1999. 142[ TAN Feng Gui, ZHOU Ben Mou. A Research of Modern Electrostatic Science and Technology. Xi'an: Xi'an Press, 1999. 142(in Chinese) ]
- [5] Angeli M, Cardelli E. IEEE Trans. on Magnetic, 1997 33: 2199
- [6] Liu Shang He et al. A New Principle of Electrostatic Potential Measurement and its Application. In: Li Rui Nian ed. Applied Electrostatic Proceedings of the 2nd International Conference, Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 468
- [7] Laurin J, Zaky G B. IEEE Trans. on EMC, 1995, 37: 528
- [8] Reinaldo P. Handbook of Electromagnetic Compatibility. San Diego, California: Academic Press, 1995. 814
- [9] Tabata Y, Tomota H. J. Electrostatics, 1990, 24: 155