

 电磁兼容技术与应用丛书

# 静电放电及危害防护

JINGDIAN FANGDIAN JI WEIHAI FANGHU

刘尚合 武占成 等编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# 静电放电及危害防护

主 编 刘尚合  
副主编 武占成  
编 者 朱长清 胡小锋 张希军 杨士亮  
刘存礼 杨 洁 雷 磊

北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

以研究静电放电和静电危害及其防护为主的静电防护工程学,是一门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的新兴学科,其理论与技术正处在发展和完善阶段。本书系统地介绍了静电基础理论、静电起电原理、静电放电的特点及规律、静电放电模型、静电危害及其防护、微电子器件静电防护及失效分析、潜在性失效机理、防静电工作区设计、静电测试原理及方法,反映了近几年国内外静电放电及危害防护领域的最新进展。

本书可供从事静电防护工程、电磁兼容性和电磁环境效应研究的科技人员参考,也可作为相关专业研究生和高年级大学生的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

静电放电及危害防护/刘尚合,武占成等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004  
ISBN 7-5635-0877-5

I. 静... II. ①刘...②武... III. ①静电—放电②静电—灾害防治 IV. O441.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 078744 号

---

书 名: 静电放电及危害防护

编 著: 刘尚合 武占成等

责任编辑: 李茂林

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

电话传真: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

电子信箱: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17.5

字 数: 412 千字

印 数: 1—5 000 册

版 次: 2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

---

ISBN 7-5635-0877-5/TN·339

定 价:29.00 元

·如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系·

## 序

当今科学技术突飞猛进,各种电气及电子设备数量正急剧增加,而家用电器的应用,更使这些设备遍及千家万户。根据统计资料表明,世界用电量平均每年上增7%~14%。如按此速度计算,则25年后空间电磁能量密度最高将增至现有空间能量密度的26倍,50年后则可增至700倍,21世纪电磁环境恶化已成定局。而且这种电磁污染已不仅限于设备与设备之间的问题,还要进一步涉及到人类本身的生存环境。

如何使各种电气及电子设备在有限的空间、时间及频谱资源条件下,能于共同的电磁环境中正常工作而互不干扰并降低电磁环境对人类及生物的危害影响是广大电磁兼容科技工作者的光荣使命。

电磁兼容应用范围涉及所有用电领域,而电磁兼容技术现已形成一种产业,并在国民经济中发挥着重要作用,创造着巨大的经济效益。为使人类在高度享受物质文明和精神文明的同时,仍能确保社会生活及生产的安全、健康、持续有效的发展,电磁兼容知识的进一步宣传推广及电磁兼容技术的研究开发,刻不容缓。

有鉴于此,北京邮电大学出版社曾于2001年组织我们编写出版了《电磁兼容理论及应用技术丛书》,该书包括五个分册:《电磁兼容总论》、《电磁兼容设计》、《电磁兼容实验技术》、《电磁兼容标准与认证》和《电磁生物效应》。该套丛书的大部分分册已再版或三版发行,颇受读者欢迎。

由于不少读者需要更进一步深入掌握电磁兼容理论及相关技术,北京邮电大学出版社又组织我们就以下几个重要专题再次编写一套《电磁兼容技术及应用丛书》,包括屏蔽与接地、静电防护、雷电与电磁脉冲防护、印刷电路中的电磁兼容及计算电磁学在电磁兼容中的应用。这套丛书可看作前一套《电磁兼容理论及应用技术丛书》的续编。书中理论结合实际,可供大专以上水平的科技人员阅读参考,也可作为电磁兼容研究领域的本科及研究生用作辅助教材。

本书获得国家自然科学基金会重点项目(编号50237040)资助,特此致谢。

高攸纲

2004年10月

# 目 录

## 1 绪 论

- 1.1 历史的回顾与静电学的新生 ..... 1
- 1.2 静电防护与电磁兼容性 ..... 2

## 2 静电学基础理论

- 2.1 电荷与库仑定律 ..... 5
  - 2.1.1 电荷和电量 ..... 5
  - 2.1.2 电荷守恒定律与物体的带电 ..... 6
  - 2.1.3 电荷的量子性 ..... 7
  - 2.1.4 库仑定律 ..... 7
- 2.2 电场与高斯定理 ..... 7
  - 2.2.1 电场 ..... 7
  - 2.2.2 电场强度 ..... 8
  - 2.2.3 场强叠加原理 ..... 8
  - 2.2.4 高斯定理 ..... 10
  - 2.2.5 静电场的散度 ..... 13
- 2.3 静电场的环流定理 ..... 13
  - 2.3.1 静电场的环流定理 ..... 13
  - 2.3.2 静电场的旋度 ..... 14
  - 2.3.3 电场力的功 ..... 14
  - 2.3.4 电压 ..... 15
  - 2.3.5 电位 ..... 16
  - 2.3.6 电位分布计算 ..... 16
  - 2.3.7 电场强度与电位的关系 ..... 17
- 2.4 静电场中的导体 ..... 18
  - 2.4.1 导体的静电平衡 ..... 18
  - 2.4.2 静电感应 ..... 18
  - 2.4.3 静电屏蔽 ..... 19
  - 2.4.4 在静电领域材料的分类 ..... 19
- 2.5 静电场中的电介质 ..... 20

2.5.1	电介质的极化	20
2.5.2	电极化强度	20
2.5.3	束缚电荷	21
2.5.4	电位移矢量	22
2.5.5	静电场的边界条件	22
2.6	电容和部分电容	23
2.6.1	电容和电容器	23
2.6.2	部分电容	25
2.7	静电场的能量	27
2.7.1	点电荷系统的静电场能量	27
2.7.2	电荷连续分布时的静电场的能量	29
2.7.3	$n$ 个导体组成的带电系统的静电场能量	29
2.7.4	电容器的储能	29
2.7.5	静电场能量的场量表示	29
<b>3</b>	<b>静电起电与消散</b>	
3.1	静电起电原理	32
3.1.1	金属间的接触起电理论	33
3.1.2	金属与绝缘材料的接触起电	36
3.1.3	绝缘材料之间的接触起电	37
3.1.4	分离过程	38
3.1.5	摩擦在接触起电过程中的作用	39
3.2	固体起电	40
3.2.1	剥离起电	41
3.2.2	破裂起电	41
3.2.3	电解起电	41
3.2.4	压电起电	42
3.2.5	热电起电	42
3.2.6	感应起电	43
3.2.7	吸附起电	43
3.2.8	喷电起电	43
3.2.9	影响固体静电起电的因素	44
3.3	粉体的静电起电	45
3.3.1	粉体特性及其起电机理	45
3.3.2	粉体气力输送过程静电起电的主要影响因素	45
3.4	液体起电	47
3.4.1	液体静电起电机理	47
3.4.2	液体的冲流起电	48

3.4.3 液体中微粒的沉降起电	50
3.4.4 液体喷射起电	50
3.4.5 液体的冲击起电	50
3.4.6 液体溅泼起电	51
3.4.7 气体-液体起电	51
3.5 气体的静电起电	51
3.6 人体的静电起电	52
3.6.1 人体静电起电的方式	53
3.6.2 人体静电的定义	54
3.6.3 影响人体静电积累的因素	54
3.6.4 人体静电电位的极端值	55
3.6.5 人体存储的静电能量	57
3.7 静电的消散	57
3.7.1 物质对静电的泄漏性能	57
3.7.2 介质内部电荷的衰减规律	58
3.7.3 绝缘导体上电荷的消散	60
<b>4 静电放电与静电危害分析</b>	
4.1 静电放电的特点及类型	62
4.1.1 静电放电的特点	62
4.1.2 静电放电的类型	63
4.2 静电效应及其作用规律	66
4.2.1 静电力学效应	66
4.2.2 静电放电的热效应	67
4.2.3 静电的强电场效应	67
4.2.4 静电放电的电磁脉冲效应	68
4.2.5 静电放电对人体的电击效应	68
4.3 工业生产中的静电障碍	68
4.4 静电燃爆危害	69
4.4.1 静电危害实例	69
4.4.2 静电安全界限	72
4.4.3 爆炸极限	74
4.4.4 最小点火能	75
4.4.5 静电感度	80
4.5 电子行业的静电危害	83
4.5.1 静电危害造成的损失	84
4.5.2 电子产品静电危害的特点	84
4.5.3 电子器件静电损伤的失效类型	85

4.5.4	造成器件静电危害的基本 ESD 事件 .....	85
4.5.5	电子器件静电放电损伤失效机理 .....	86
4.6	静电电击危害 .....	87
4.6.1	静电放电对人体电击的感知阈值 .....	88
4.6.2	静电放电对人体电击的疼痛阈值 .....	88
4.6.3	带电人体对接地导体放电时的生理反映 .....	90
4.6.4	带电体是绝缘体时人体的电击界限 .....	91
4.6.5	静电放电电击造成的恐慌 .....	91
4.7	静电危害的预测和事故分析 .....	91
4.7.1	构成静电危害的基本条件 .....	92
4.7.2	静电危害的预测依据和方法 .....	92
4.7.3	静电危害的事故分析 .....	93
<b>5</b>	<b>静电危害防护</b>	
5.1	防静电危害的一般原则和对策 .....	95
5.1.1	确立静电安全防护原则的依据 .....	95
5.1.2	静电安全防护原则 .....	95
5.2	静电接地 .....	97
5.2.1	静电接地的定义 .....	97
5.2.2	静电接地电阻与静电泄漏电阻 .....	98
5.2.3	静电接地系统有关电阻的取值范围 .....	100
5.2.4	静电接地的设施和实施方法 .....	101
5.2.5	人体静电接地方法 .....	103
5.2.6	典型设备的静电接地举例 .....	103
5.3	空气加湿 .....	104
5.3.1	湿度对材料静电性能的影响 .....	104
5.3.2	加湿方法与装置 .....	105
5.4	材料的抗静电改性 .....	107
5.4.1	抗静电改性剂 .....	107
5.4.2	材料的导电性填充 .....	110
5.4.3	射束辐照抗静电改性 .....	111
5.4.4	层压复合防静电阻隔材料 .....	112
5.5	静电消除器 .....	113
5.5.1	无源自感应式消电器 .....	113
5.5.2	一般高压电源式消电器 .....	116
5.5.3	离子风高压电源式消电器 .....	118
5.5.4	防爆型高压电源式消电器 .....	118
5.5.5	放射源式消电器 .....	119



5.5.6	消电器的选择与安装 .....	121
5.5.7	消电器的残压 .....	122
5.6	人体静电的防护 .....	122
5.6.1	防静电鞋和导电鞋 .....	123
5.6.2	防静电(或导电)地面 .....	123
5.6.3	防静电腕带 .....	124
5.6.4	防静电工作服 .....	125
5.6.5	防静电工作帽、手套 .....	126
5.6.6	防静电椅 .....	126
5.6.7	防静电地垫 .....	127
<b>6</b>	<b>静电放电建模与模拟</b>	
6.1	静电放电模型 .....	128
6.1.1	人体模型 .....	128
6.1.2	机器模型 .....	132
6.1.3	带电器件模型 .....	134
6.1.4	传输线脉冲模型 .....	137
6.1.5	场感应模型 .....	139
6.1.6	人体金属模型 .....	139
6.1.7	ESD 家具模型 .....	143
6.1.8	其他模型 .....	144
6.1.9	ESD 模型比较与总结 .....	146
6.2	静电放电模拟器 .....	147
6.2.1	ESD 模拟器的放电方式 .....	148
6.2.2	典型 ESD 模拟器的主要参数及其放电电流波形 .....	149
6.2.3	常用 ESD 模拟器介绍 .....	151
6.3	静电放电辐射场的理论建模 .....	153
6.3.1	长导体模型 .....	154
6.3.2	球型电极模型 .....	154
6.3.3	偶极子模型 .....	155
6.3.4	三种模型的比较分析 .....	156
6.3.5	改进的偶极子模型 .....	157
6.3.6	静电放电电磁场的实验模拟 .....	159
<b>7</b>	<b>微电子器件静电防护和失效分析</b>	
7.1	防护策略和基本步骤 .....	162
7.1.1	防护策略 .....	162
7.1.2	静电放电控制方案的基本步骤 .....	163

7.2	微电子器件、设备 ESD 敏感度测试 .....	164
7.2.1	测试部位的选择 .....	164
7.2.2	放电方式的选择 .....	166
7.2.3	静电放电敏感度分类 .....	167
7.2.4	敏感元器件的静电放电敏感度试验 .....	169
7.2.5	设备的静电放电抗扰度试验 .....	171
7.2.6	组件的静电放电抗扰度试验 .....	173
7.3	微电子器件静电放电失效分析方法 .....	173
7.3.1	失效分析内容和失效分析程序 .....	173
7.3.2	失效分析技术 .....	174
7.4	潜在性失效 .....	176
7.4.1	时间累积效应和事件累积效应 .....	176
7.4.2	潜在性失效机理 .....	177
7.4.3	潜在性失效的检测方法 .....	177
7.4.4	器件潜在性失效实验分析 .....	178
7.4.5	结论与措施 .....	181
7.5	微电子器件静电防护设计方法 .....	182
7.5.1	概述 .....	182
7.5.2	静电放电防护器件 .....	183
7.5.3	ESD 防护网络设计时需考虑的问题 .....	184
7.5.4	组件设计时需考虑的问题 .....	185
7.5.5	电子产品的 ESD 加固设计 .....	186
7.5.6	ESDS 器件防护网络 .....	187
7.5.7	瞬态抑制器 .....	188
7.6	防静电工作区设计 .....	189
7.6.1	概述 .....	189
7.6.2	防静电工作区内的接地方法 .....	190
7.6.3	防静电工作区内人员和移动目标的静电控制 .....	192
7.6.4	防静电工作区内物品防静电性能指标要求 .....	193
7.7	制造集成电路净化间的静电防护 .....	194
7.7.1	制造过程的静电防护 .....	194
7.7.2	晶片的 ESD 及其防护 .....	196
7.7.3	静电带电尘埃的影响 .....	196
7.7.4	受静电荷影响的制造工序 .....	197
7.8	防静电包装 .....	198
7.8.1	防护包装材料的静电性能要求 .....	198
7.8.2	静电包装材料分类 .....	199
7.8.3	防静电包装级别 .....	200

7.8.4	包装防护操作的一般准则 .....	201
7.8.5	防静电包装件运输、存储时应注意的问题 .....	202
<b>8</b>	<b>静电测试技术</b>	
8.1	概述 .....	203
8.1.1	静电测试的目的 .....	203
8.1.2	静电测试的特点 .....	203
8.1.3	静电测试的主要内容 .....	204
8.2	静电基本参量测试 .....	205
8.2.1	静电电位(电压)测试 .....	205
8.2.2	静电电量测试 .....	211
8.2.3	静电电容的测试 .....	214
8.2.4	电阻与电阻率的测试 .....	217
8.3	防静电设施及器具静电性能测试 .....	228
8.3.1	ESD 防护腕带、鞋束(足跟带)静电性能测试 .....	229
8.3.2	ESD 防护工作服静电性能测试 .....	230
8.3.3	防静电鞋电阻测试 .....	231
8.3.4	静电消除器消除静电能力测试 .....	232
8.3.5	工作椅、存放架、运输小车对地电阻和表面电阻的测试 .....	234
8.3.6	手套、指套对地电阻的测试 .....	235
8.3.7	防静电工作台面静电性能测试 .....	235
8.3.8	防静电地面对地电阻和表面电阻的测试 .....	236
8.4	防静电包装材料静电性能测试 .....	236
8.4.1	概述 .....	236
8.4.2	摩擦起电性能的测试 .....	237
8.4.3	包装材料静电泄漏(衰减)性能的测试 .....	238
8.4.4	包装材料静电屏蔽性能的测试 .....	240
8.5	人体静电参数测试 .....	242
8.5.1	人体静电动态电位测试 .....	243
8.5.2	人体对地静电电容的测试 .....	243
8.5.3	人体综合电阻测试 .....	244
8.6	防静电织物静电性能测试 .....	245
8.6.1	概述 .....	245
8.6.2	测试样品与要求 .....	246
8.6.3	半衰期测试方法 .....	246
8.6.4	织物摩擦带电电位测试方法 .....	247
8.6.5	摩擦电位衰减测试方法 .....	248

8.6.6	电荷面密度测试方法 .....	249
8.6.7	极间等效电阻法 .....	251
8.7	静电感度测试与数据处理方法 .....	252
8.7.1	静电感度测试 .....	253
8.7.2	静电感度试验数据处理方法 .....	257

**参考文献**

# 1 绪 论

## 1.1 历史的回顾与静电学的新生

人类对电磁现象的认识是从研究静电现象开始的。早在几千年以前,古希腊人就发现了琥珀经摩擦后会吸附轻小物体。古希腊及古罗马人的观察记录一直流传至今。我国春秋战国时代的史料也有类似的记载。我国东汉时期王充所著《论衡》里有“顿牟辘芥”的记载,在西晋张华的《博物志》中有:“今人梳头,解著衣,有随梳解结,有光者,亦有咤声”的记载,这些都说明,在中国古代,人们对静电现象已有认识。从16世纪起,人类对静电现象开始进行科学的观察与研究。其中最有名的一位是英国伊丽莎白女王的御医威廉·吉尔伯特,他在观察和研究大量静电现象后,出版了《论磁石》(De Magnete)一书。在那本书里,吉尔伯特提到除了琥珀之外,钻石、蛋白石、蓝宝石和硫磺等10多种物质都具有吸引轻小物体的能力。他将这类物质冠以起源于琥珀的名称“埃莱克特里卡”。英语中的“电(electricity)”一词是1646年左右出现的,就是来自古希腊语的“琥珀”一词,当时它的含义就是“吸引轻小物体的力”。在古代的中国,人们对大自然的静电放电现象——闪电和雷雨——进行了研究。所以,汉字中繁体字的“電”(diàn)是由“雷”和“雨”组合演变而来的。还有一种说法认为在古代的中国,龙作为能呼风唤雨的神而受到人们的尊敬,古人认为电闪雷鸣是和龙联系在一起的。所以,有人认为“電”是由繁体字的“龍”(lóng)字演变而来的。

直至18世纪中叶,人类才通过科学实验的方法,发现电荷有正电荷与负电荷之分。1785年库仑通过实验证明了静电学的基本定律——库仑定律。1799年,伏打在仔细研究了摩擦起电和两种不同金属接触都会使青蛙腿抽搐的现象之后,认为青蛙腿的抽搐不过是对电流刺激的灵敏反应,而肌肉提供了一定的溶液。因此,电流产生的先决条件是两种不同的金属插在一定的溶液中并构成回路。于是,他在1800年用锌板和铜板插入一瓶稀硫酸溶液中做成了人类的第一个电池。这种电池,后来人们叫做伏特电池。把几个伏特电池串起来,可以得到更强的电流。从此,人们的兴趣由研究静电现象转向研究电流现象。1820年,安培和奥斯特发现了电流的磁效应。1831年,法拉第发现了电磁感应定律。1865年,麦克斯韦在全面总结前人研究成果的基础上,揭示了宏观电磁现象的基本规律,形成了人们今天熟悉的麦克斯韦方程组:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum q$$

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I + \frac{d\phi_e}{dt}$$

至此,人类在研究和应用电磁规律方面取得了空前的进展。而静电这个古老的课题却被人们长期搁置下来,几乎被人们遗忘了。

进入 20 世纪后,随着工业技术的发展,人们开始研究静电技术的应用。与此同时,静电这个不速之客闯进了许多高速发展的工业部门,造成了人们难以预料的各种障碍和事故。特别是近半个世纪,随着科学技术的发展,高分子材料、微电子技术和电爆装置的广泛应用,静电造成的危害已受到世界各发达国家的普遍重视。古老的静电学生长出了新的边缘学科,并且逐渐由经典的静电学发展成为静电工程学和静电防护工程学。

以研究静电放电和静电危害及其防护为主的静电防护工程学,是一门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的新兴学科,其理论与技术正处在发展和完善阶段。这些理论和技术虽然建立在经典静电学的基础之上,但是单纯使用传统的静电学概念和理论,有时无法解决静电防护工程的实际问题。比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方面有很大的差异;欧姆定律是经典物理学和电工学中的基础理论之一,但是在静电防护工程学中却不能简单地使用人们熟悉的欧姆定律去研究高压强静电场中的物质导电问题;又如,在静电学中研究的对象主要是“相对观察者静止电荷激发的静电场”,或者说,电荷处于相对稳定,仅仅考虑它周围的电场效应,其磁场效应相比之下可以忽略不计,但是近代科学技术的发展已告诫人们,在静电防护工程中,不仅要研究静电带电体的电场作用,还要研究它在周围产生的磁场效应,尤其是静电放电产生的快上升沿电磁脉冲,其频带宽度超过 1GHz。这种高频强辐射电磁场对信息化电子设备和某些电磁敏感装置的影响是十分严重的。可见,研究静电放电的特点及其电磁辐射危害的防护在信息化时代的今天,具有十分重要的意义。所以,“静电”问题,已不是原来意义上的“静电学”问题,而是与静电放电及其电磁辐射相关联的静电应用技术和静电防护工程问题。从这个意义上讲,古老的静电学获得了新生。除静电应用技术之外,还形成了以静电起电原理、静电放电模型、静电作用机理、静电危害及其防护,以及与其相关的静电测试技术等研究内容为主的静电防护工程学。

## 1.2 静电防护与电磁兼容性

静电作为一种近场自然危害源,给人类社会已经造成了重大损失和危害。1969 年底在不到一个月的时间里,由于静电放电(ESD)引发荷兰、挪威、英国三艘 20 万吨超级油轮洗舱时相继发生爆炸;静电放电曾使国际通讯卫星 II-F<sub>1</sub>~IV-F<sub>8</sub> 及美国的阿尼克、欧洲航天局的航海通讯卫星等数十颗卫星发生故障,不能正常飞行;第一个阿波罗载人宇宙飞船也是由于静电放电导致火灾、爆炸,使三名宇航员丧生。在石油、化工、粉体和炸药生产、

加工的过程中,由于 ESD 火花引发的恶性事故也时有发生。据统计,美国从 1960 年到 1975 年,由于静电放电引起的火灾爆炸事故就有 116 起。我国在上个世纪中后期,石化企业曾发生 30 多起较大的静电事故,如上海某石化公司的 2000 m<sup>3</sup> 甲苯罐、山东齐鲁某公司的胶渣罐、抚顺某石化公司的航煤罐以及天津某公司的北仓二罐站等都因静电造成了严重的火灾爆炸事故。在烟花、爆竹、弹药、火工品生产领域,因静电放电造成的恶性事故,更是触目惊心!如 1984 年春,我国太原市北郊烟花厂,因静电放电引发的燃烧爆炸造成厂毁人亡的重大恶性事故,死伤人数几乎占当天出勤人数的一半,整个工厂被毁。

除此之外,由于静电场的库仑力作用或静电放电的其他效应,在塑料和橡胶制品加工、成型过程中,在纺织、印刷、自动化包装、感光胶片生产等过程中,都会由于静电场的存在或静电放电使其生产出现故障,造成静电障碍。所以,国外把这种静电危害称为“障害”。

随着微电子技术的迅猛发展,电子产品的更新换代周期愈来愈短,大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)、专用集成电路(ASIC)以及超高速集成电路(UHSIC)已广泛应用于各个领域。近几年,由于航天、军事领域的特殊需要,各种微电子器件已大大提高了集成度,而且做到了低功耗、高可靠、多功能。电路中的绝缘层越来越薄,其互连导线的宽度与间距也越来越小。这样发展的器件的电磁敏感度大大提高,抗过电压能力却有所下降。如 CMOS 电路的耐击穿电压已降到 80~100 V, VMOS 电路的耐击穿电压有的只是 30V,而千兆位的 DRAM 耐压为 10~20V。但是,这些器件在生产、运输、储存、周转和使用过程中,人体及周围环境中的静电源的电压常常在数千伏甚至上万伏范围。如果不采取静电防护措施,将会造成严重损失。据报道,日本国曾统计,不合格的电子器件中有 45% 是静电放电危害造成。在电子工业领域,全球每年因静电造成的损失高达百亿美元。

近几年,随着微纳米器件和微细加工的发展,对静电防护问题提出了更高的要求。为此,世界各工业发达国家都十分重视静电危害及其防护研究。人们不仅在各个工业生产领域研究防止静电危害的对策,保证生产过程的安全性和产品质量、性能的可靠性,而且注重研究产品在静电存在的环境中使用过程的电磁兼容性。静电放电形成的宽频带电磁辐射会对各种电子系统造成电磁干扰,所以,在各种电子产品的电磁兼容性设计中都要考虑静电防护这一要求。美国政府工作报告(AD-A243367)于 1991 年就明确指出静电放电是电磁环境效应的重要组成部分。美国的军用标准和国际电工委员会标准等相关的电磁兼容性内容都对静电放电防护提出了具体要求。如国际电工委员会 IEC61000-4-2,不仅对静电放电模型(人体金属 ESD 模型)参数、仪器及试验方法作出了严格的规定,而且随着静电放电试验的研究和工业生产发展的要求,对该标准不断进行了修订。从 1991 年的 IEC801-2 到目前的 IEC61000-4-2 已进行了多次大的修改。可见,静电放电的防护问题已不是过去单纯研究静电引起灾害事故和生产障碍的安全性问题,而是包括静电放电形成电磁干扰的系统及系统间的电磁兼容性问题。

总之,静电放电是一种常见的近场危害源,静电放电过程可形成高电压、强电场、瞬态大电流,其电流波形的上升时间可小于 1 ns,并伴随有强电磁辐射,形成静电放电电磁脉冲(ESD EMP)。静电放电电磁脉冲不仅可以对电子设备造成严重干扰和损伤,而且还

可能形成潜在性危害,使电子设备的工作可靠性降低,引发重大工程事故。尤其是潜在性失效具有隐蔽性,实验很难检测到,用筛选的方法也很难剔除。因此,危害性很大。特别是在卫星、海底电缆通讯系统等无法维修的设备中造成的危害更为严重。

纵观静电防护工程发展的全过程,这门古老而又新生的边缘学科,伴随着科学技术和工业生产的飞速发展,已经取得了长足的进步。但是,微电子技术的发展,信息化时代的到来,给静电防工程研究又提出了电磁兼容性研究的新内容、新课题和技术难点。如静电放电辐射场的模拟方法和数理模型的建立;ESD产生的单次脉冲场的测试技术与测试手段;微电子器件受 ESD 作用的机理;潜在性失效的实验分析方法和潜在性失效的微观机制以及有效的防护原则与防护技术等,都是该研究领域当前急待解决的难点和热点问题。这些问题的解决,必将推动静电防护工程及与之相关的工程技术取得更大的进展。



## 2 静电学基础理论

本章主要介绍静电学的基本概念和基础理论。包括电荷、电荷密度、电场、电场强度、电压、电位等基本概念以及库仑定律、高斯定理等静电学基本原理。

### 2.1 电荷与库仑定律

#### 2.1.1 电荷和电量

由不同材料组成的物体,互相摩擦或紧密接触分离后,都能吸引灰尘、纸片等轻微物体。这时,我们说该物体已处于带电状态,或称物体带上了电荷,处于这种状态的物体称为带电体。物体所带的电荷有两种,分别称为正电荷和负电荷。

物质由原子组成,而原子由原子核和核外电子组成,电子所带的电荷是负电荷,而组成原子核的质子所带的电荷是正电荷,中子也是组成原子核的基本粒子,中子不带电荷。物体相互摩擦后,失去电子的一方带正电荷,得到电子的一方带负电荷。

带同号电荷的物体互相排斥,带异号电荷的物体互相吸引,这种电荷间的相互作用称为静电力。

表示物体所带电荷多少程度的物理量称为电量,通常用“ $Q$ ”表示电量。电量的单位是库仑,用符号“ $C$ ”表示。一个电子所带电量为 $-1.6 \times 10^{-19} C$ 。一个质子所带电量为 $+1.6 \times 10^{-19} C$ 。在工程上,常用的电量单位还有毫库( $mC$ )、微库( $\mu C$ )、纳库( $nC$ )和皮库( $pC$ )。

$$1 mC = 10^{-3} C$$

$$1 \mu C = 10^{-6} C$$

$$1 nC = 10^{-9} C$$

$$1 pC = 10^{-12} C$$

为了研究电荷在物体上的分布情况,人们引入了体电荷密度、面电荷密度、线电荷密度和荷质比来描述物体等带电情况。

##### 1. 体电荷密度

体电荷密度是单位体积内的电量,反映物体体积带电情况。

$$\rho = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

式中, $\rho$ 为体电荷密度, $Q$ 为电量, $V$ 为带电体的体积。体电荷密度的单位是库/米<sup>3</sup>