

# 静电防护工程的研究与进展

刘尚合, 谭志良, 武占成

(军械工程学院静电与电磁防护研究所 石家庄 050003)

**[摘要]** 静电放电已成为信息化时代的公害之一, 它不仅是危险场所的点火源、引爆源, 而且是信息化设备的电磁干扰源。文章在论述静电放电危害、静电放电的特点、作用机理和形成静电危害基本条件的同时, 报道了我国在静电检测与静电防护工程研究方面的成果与进展, 提出了“信号自屏蔽-电荷耦合”测试原理、真实静电感度测试方法、织物电位测试方法和人体静电动态电位测试技术, 建立了电火工品静电发火数理模型、“静电危险场所”等级划分标准和分类防护措施、预测静电危害的逻辑关系图和静电防护的一般原则与对策。文章介绍了部分实验数据和该领域当前研究的热点问题及发展趋势。

**[关键词]** 静电危害; 作用机理; 防护工程; 成果与进展

## 1 前言

随着科学技术的发展, 人类社会的进步, 高分子材料、微电子器件和电爆装置广泛应用于各个领域, 静电造成的危害日益受到人们的关注。静电放电不仅可以造成电爆装置和易燃、易爆气体意外的燃烧、爆炸, 而且可以使电子设备受到干扰, 造成意外事故。静电放电曾使机毁人亡、火箭发射失败、卫星出现故障。静电放电还使人体遭受电击引发二次危害。为此, 静电防护工程的研究已成为工业发达国家十分重视的一个研究领域。我国自改革开放以来, 对有关行业发生的静电危害进行了深入的调查分析, 开展了大量的研究工作。在静电防护理论与技术研究方面, 在静电防护设施和防静电产品研制、生产方面以及静电检测与静电安全管理方面都取得了较大的进展<sup>[1,2]</sup>。

## 2 静电起电-放电及其危害

物体的静电带电, 又称静电起电, 它是由于处于不同带电序列位置的物质之间接触分离(摩擦)使物体上正负电荷失去平衡而发生的静电现象。在

大多数情况下, 静电起电与放电是同时发生的, 而且静电起电-放电是一个随机的动态过程, 在这过程中, 不仅有静电能量的传导输出, 而且有电磁脉冲场的辐射。静电造成的危害主要分三种类型:

1) 静电放电引发的瞬时大电流(静电火花)引燃引爆易燃、易爆气体混合物或电火工品, 造成意外燃烧、爆炸事故。如1969年12月下旬, 20天之内, 荷兰、美国、挪威三艘20万吨以上的超级油轮由于静电放电造成油轮爆炸沉没海底。我国在20世纪下半叶, 由于静电放电火花造成的恶性事故也有多起。如太原北郊烟花厂发生的特大燃烧爆炸事故、天津北仓液化气二罐站连续两次由于静电火花引发的大火燃烧事故和众所周知的哈尔滨亚麻厂粉尘爆炸事故等。这类静电危害都属于静电火花能量释放引发的燃烧爆炸事故。

2) 静电放电使人体遭受电击引发操作失误造成二次事故、静电场的库仑力作用使纺织、印刷、塑料包装等自动化生产线受阻。这类静电危害通常叫作生产障害。

3) 第三类静电危害是由于静电放电的电磁辐射或静电放电电磁脉冲(ESD EMP)对电子设备

造成的电磁干扰引发的各种事故。表 1、表 2 是国际上公开发表的静电放电电磁干扰使卫星和火箭发射失败的统计资料<sup>[3]</sup>。

表 1 静电放电使卫星发生故障的统计表

Table 1 The statistics of the satellite fault due to ESD

卫星名称	所属国家组织	故障名称
国际通讯卫星 III - F <sub>3</sub>	国际通讯	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 III - F <sub>4</sub>	卫星组织	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 III - F <sub>6</sub>	国际通讯	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 III - F <sub>7</sub>	卫星组织	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 IV - F <sub>6</sub>	卫星组织	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 IV - F <sub>7</sub>	国际通讯	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 IV - F <sub>8</sub>	卫星组织	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 II - F <sub>1</sub>	美国	电子设备乱真切换
国际通讯卫星 II - F <sub>2</sub>	美国	电子设备乱真切换
阿妮克 A <sub>1</sub>	美国	编码器乱真切换
阿妮克 A <sub>2</sub>	美国	编码器乱真切换
阿妮克 A <sub>3</sub>	加拿大	编码器乱真切换
天狼星 - 1	意大利	姿态传感器异常
阿妮克 A <sub>3</sub>	加拿大	姿态传感器异常
天狼星 - 1	意大利	姿态传感器异常
阿妮克 B	加拿大	温控性能衰减
欧洲航海通讯卫星 1	欧洲航天局	干扰电子设备
交响乐 - II	法 - 德	干扰遥测设备
交响 - I	法 - 德	干扰电源调节系统
林肯实验卫星	美国	陀螺漂移

随着科学技术的发展和微电子技术的广泛应用，静电放电作为一种近场电磁干扰源，其第三类危害受到有关部门的更大关注。由于静电放电造成的危害，在微电子技术领域全球每年损失高达数百亿美元。静电放电作为一种近场危害源，有的报道把静电放电及其电磁脉冲的危害与雷电电磁脉冲和核电磁脉冲的危害相提并论<sup>[4]</sup>。图 1 说明了静电放

电与雷电电磁脉冲、核电磁脉冲、开关电脉冲之间的对比关系。

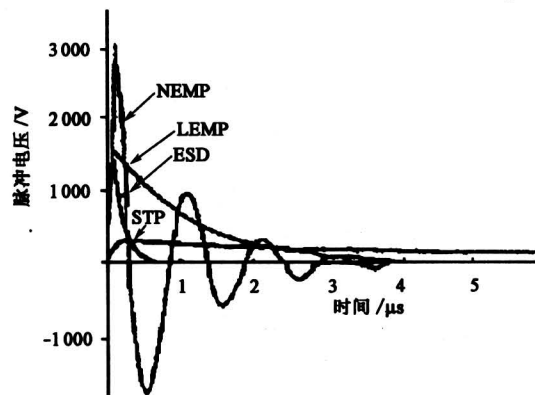


图 1 静电放电与典型电磁脉冲的关系

Fig.1 The relationship between ESD and typical EMP

### 3 静电放电的特点和静电危害的作用机理

静电学是人们熟悉的一门古老学科，有丰富的实验基础和较完整的理论体系。但是静电工程学，特别是与静电放电相关联的静电安全工程学，却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

表 2 火箭飞行失败统计资料

Table 2 The statistics of the rocket failure during flying

火箭名称	飞行试验代号	发射时间	故障出现时高度/km	故障出现时的真空度/kPa	故障简况及原因
民兵 I	FTM - 502	1962	7.6	42.13	静电放电造成制导计算机故障，I 级发动机关闭前自毁，发射失败
民兵 I	FTM - 503	1962	21.8	5.28	静电放电造成制导计算机故障，I 级发动机关闭前自毁，发射失败
欧罗尼 II	F - 11	1971	27	1.06	静电放电使制导计算机阻塞，姿态失控，约 1 min 后，火箭 I、II 级过载自毁，发射失败
侦察兵	S - 112	1964	38~42	0.39~0.25	电爆管桥丝和壳体之间因电弧击穿，II 级发动机自毁系统爆炸，发射失败
侦察兵	S - 128	1964	38~42	0.39~0.25	电爆管桥丝和壳体之间因电弧击穿，II 级发动机自毁系统爆炸，发射失败
大力神 III C	C - 10	1967	26	1.19	静电放电使制导计算机故障后自动转移到应急后备状态
大力神 III C	C - 14	1967	17	6.93	静电放电使制导计算机故障后，经地面发射指令，修正到预定轨道
德尔安	2313	1974			制导系统控制器器件故障，火箭翻滚，发射失败

异；欧姆定律是经典物理学和电工学中的基础理论之一，但是在静电安全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电磁脉冲，其频谱宽度在兆赫至吉赫范围，这种高频强辐射电磁场对信息化电子设备和精确制导武器及电火工品的危害是十分严重的。所以，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。

物体的静电起电-放电，一般具有高电位、强电场和宽带电磁干扰等特点。与常规电能相比，静电能量比较小，在静电起电-放电过程中，ESD 参数是不可控制的，是一种难于重复的随机过程。因此，它的作用往往被人们所忽视。但是在静电放电过程中，不仅有瞬态大电流能量集中注入，导致火炸药、电火工品等易燃易爆物质意外燃烧爆炸，而且会形成强电磁脉冲，产生频谱很宽的电磁辐射场，对微电子设备造成电磁干扰及浪涌效应。图 2 是实际测量的人体带上不同的静电电压时，静电放电的电流波形。从图中可以看出，静电放电过程，其峰值电流有时可达数十安培，甚至更大。其电磁辐射场可在附近导线上感应出数百伏电压。

静电危害源对受害物质的影响，主要是通过能量的传导耦合和/或辐射耦合模式发生作用，其作用机理可概括为以下四个方面<sup>[5]</sup>：

1) 热效应 静电放电产生的热效应是在纳秒或微秒量级完成的，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；可以使微电子器件、电磁敏感电路过热，造成局部热损伤，电路性能变坏或失效。

2) 电磁辐射和浪涌效应 静电放电引起的射频干扰，对信息化设备造成电噪声、电磁干扰，使其产生误动作或功能失效。强电磁脉冲及其浪涌效应对电子设备可以造成硬损伤或软损伤，既可以造成器件或电路的性能参数劣化或完全失效，也可以形成累积效应，埋下潜在的危害，使电路或设备的可靠性降低。

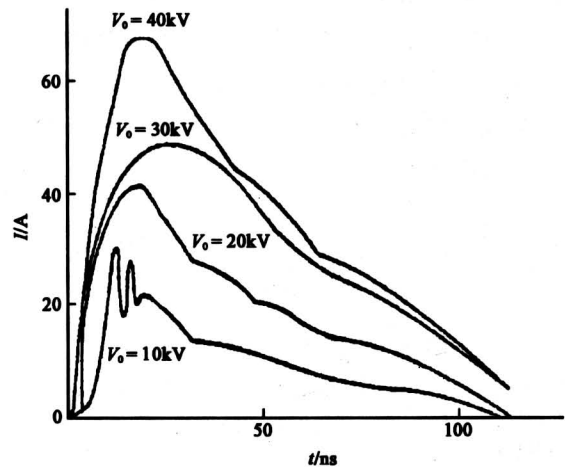


图 2 人体带上不同的静电电压时，静电放电的电流波形

Fig.2 The current waveform of ESD at different electrostatic potential on human body

3) 强电场效应 静电危害源形成的强电场不仅可以使 MOS 场效应器件的栅氧化层击穿或金属化线间介质击穿，造成电路失效，而且对许多测试仪器和敏感器件的工作可靠性造成影响，对电磁屏蔽提出了更高的要求。

4) 磁效应 静电放电在设备的金属外壳等导电材料中引起的强电流可产生强磁场，干扰电子设备的正常工作。因此对信息化设备的设计和磁屏蔽材料的选择都提出了苛刻的要求。

## 4 静电危害形成的基本条件和静电防护理论与技术

### 4.1 形成静电危害的基本条件

通过对静电危害事故现场分析研究和实验室模拟验证，可以确定构成静电危害的基本条件：

1) 产生并积累起足够的静电，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所有易燃易爆气体混合物并达到爆炸浓度极限，或有电火工品、火炸药之类爆炸危险品，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点火能或静电敏感度。

形成静电危害的这三个条件是缺一不可的, 只要控制其中一个条件不成立, 就不会有静电危害发生。当然, 要研究如何防止或控制静电危害, 首先要了解静电放电的安全阈值(也称静电危险极限)。由上述基本条件2可知发生静电放电时, 静电场强要达到介质的击穿场强。因此, 介质的击穿场强就是能否产生静电危害的一个阈值。表3给出了一般情况下常见气体的击穿场强。

表3 气体介质的击穿场强

Table 3 The breakdown strength of gas dielectric

气体种类	空气	氢	氧	氮	二氧化 化碳	一氧 化碳	氨	甲烷	丙烷	乙炔
击穿场强 /MV·m <sup>-1</sup>	3.0	1.5	2.9	3.8	2.6	4.5	5.7	2.2	3.7	7.5

#### 4.2 静电检测理论与技术

从形成静电危害的基本条件可以看出, 探测“危险静电源”、评价材料静电性能、测定电火工品和器件的静电敏感度是研究和实施静电防护工程的技术基础和前提条件。近10年来, 我国在静电检测理论与测试技术方面取得了突破性进展, 先后提

出了“信号自屏蔽-电荷耦合”测试原理、真实静电感度测试方法、织物摩擦电位衰减测试方法和人体静电动态电位测试技术等一系列具有国际先进水平的检测理论与技术, 并建立了国防静电计量测试站。在此基础上, 综合运用国内外研究成果, 取得了一大批实验数据, 为静电防护工程的研究和实施提供了科学依据。

表4~8是用现有测试技术求出关于火炸药和电火工品的静电敏感度和真实静电感度数据<sup>[6]</sup>。表9是参照美国国防部颁布的标准DOD-HDBK-263规定的测试方法对器件的静电放电敏感度进行分类, 表10是部分器件的静电敏感度值<sup>[7]</sup>。

#### 4.3 静电防护理论与技术

在静电防护研究中, 我国科技工作者, 吸收国内外最新研究成果, 突破经典静电学理论框架, 建立了电火工品静电发火数理模型和静电放电的各种电路模型并研制成功实验模拟系统。首次提出“静电危险场所”等级划分标准和分类防护措施。在研究静电起电-放电规律和形成静电危害基本条件的基础上, 提出预测静电危害的逻辑关系图和静电防护的一般原则与对策。

表4 部分起爆药剂静电感度

Table 4 The electrostatic sensitivity of partial initiation propellant agent

敏感 排序	起爆药名称	粒度/ $\mu\text{m}$	试验结果			
			50%发火电压/kV	标准偏差/kV	试验间隔/kV	50%发火能量/mJ
1	D·S共晶起爆药	120~200	1.04	0.092	0.05	0.295
2	沥青三硝基间苯二酚铅	10~49	1.12	0.10	0.05	0.342
3	二硝基间苯二酚铅	<100	1.14	0.052	0.10	0.355
4	二硝基间苯二酚铅氯化铅共晶	<100	1.16	0.09	0.05	0.367
5	三硝基间苯二酚铅(正盐)	20~150	1.20	0.114	0.05 0.10	0.393
6	三硝基间苯二酚铅(正盐)	48~200	1.25	0.038	0.05	0.423
7	氯化银		1.31	0.195	0.10	0.468
8	三硝基间苯二酚铅(碱式盐)	50~200	1.36	0.038	0.05	0.504
9	粉末氯化铅		1.56	0.184	0.10	0.664
10	三硝基间苯二酚铅钡共晶	300~400	1.83	0.028	0.05	0.960
11	羧甲基纤维素氯化铅	<100	2.04	0.308	0.10	1.14
12	苦味酸铅、硝酸铅	(1.36)*	3.52	0.310	0.20	0.88
13	乙酸铅共晶	50	4.73	0.849	0.20	0.60
14	糊精氯化铅	40~80	11.28	2.48	1.0	
15	糊精氯化铅		18.42	1.59	1.0	651

\* 松装密度值: 散粒物单位体积(自然堆积)的质量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

表 5 部分炸药的静电火花感度

Table 5 The electrostatic spark sensitivity of partial explosives

] 炸药名称	静电火花感度 /mJ									试样粒度/ $\mu\text{m}$	试样重量 /mg	产品爆发点/ $^{\circ}\text{C}$
	C=1.1 nF					C=10 nF						
	0%		50%	100%	湿度/%	0%	50%	100%	湿度/%			
	计算值	检验值	计算值	计算值		计算值	计算值	计算值				
黑索今	17	40	60	131	59	17	70	161	56	>97	17.3	230
钝化黑索今	31	45	87	169	73	38	118	242	72	>150	16.5	
钝化太安	44	50	67	95.8	68	47	106	187	71	>200	27.1	225 (太安)
奥克托今	23	31	49	84	54	34	61	97	72	>97	16.9	327
8321	26	36	56	108	62	19	61	127	58	>200	14.0	231
TNT	35	27	173	418	66	43	122	242	67	>97	10.4	475

注：试样装入铁砧的小坑内，小坑尺寸  $\phi 5 \times 1 \text{ mm}$ ，放电针长  $l = 1.5 \text{ mm}$ ，针尖距药面  $0.55 \text{ mm}$

表 6 部分无烟药的静电感度

Table 6 The electrostatic sensitivity of partial smokeless propellant

试样名称	试验条件					试验结果		
	电极极性	电容/ $\mu\text{F}$	间隙/ $\text{mm}$	串联电阻/ $\text{k}\Omega$	相对湿度/%	50%发火电压/ $\text{kV}$	标准偏差/ $\text{kV}$	50%发火能量/ $\text{J}$
硝化棉	+	0.25	0.50	100	57	2.60	0.355	0.845
美 M30 硝基胍 (含石墨)	+	0.25	0.50	100	57	2.48	0.184	0.269
双芳 3	+	0.25	0.50	100	56	2.85	0.313	1.02
双芳 3 (片状)	+	0.22	0.80	510	68	3.92	0.28	1.69
	-	0.22	0.80	510	63	3.84	0.32	1.62
双芳 3 (粉末)	+	0.22	0.80	510	63	3.64	0.16	1.46
	-	0.22	0.80	510	63	2.68	0.11	0.79
7/7 单基药	+	0.25	0.50	100	65	2.21	0.076	0.611
7/7 标准药	+	0.22	0.50	510	59	4.40	0.93	2.13
	-	0.22	0.50	169	50	5.00	0.40	2.75
4号点火药 (片)		0.099	1.00		48	2.09	0.301	0.216
4号点火药 (粉)		0.01	1.00		63	8.35	0.80	0.350
1号点火药		0.99	1.00	44	44	2.72	0.81	0.366
		0.01	1.00	55.8	48	2.48	0.40	0.031
2/14Pb	+	0.22	1.00	510	63	4.00	0.80	1.76
2/78-25	-	0.22	1.00	510	63	4.13	0.45	1.88
7/14Tb	+	0.22	1.00	510	63~64	8.36	1.42	7.69
1/78-25	-	0.22	1.00	510	63~64	9.53	0.40	9.69
钝感点火药		0.01	1.25	163	68	5.20	0.15	0.135
黑药		0.10 (1 mH)	0.75	730				0.0213 (4.06 mJ)

依据形成静电危害的“三个基本条件”有了三条静电安全防护原则：第一条是控制静电起电量和电荷积聚，防止危险静电电源的形成；第二条是使用静电感度低的物质，降低场所危险程度；第三条是

采用综合防护加固技术，阻止 ESD 能量耦合。

遵照上述三条静电安全防护原则，为防止静电危害，可采取如下对策：

- 1) 控制静电起电率防止危险静电电源的形成；

表 7 各种电火工品的静电感度数据  
Table 7 The electrostatic sensitivity of EEDs

类别	型号名称	电阻/ $\Omega$	发火技术条件	安全电 流/ $\text{mA}$	静电感度/ $\text{kV}$	
					脚—脚	脚—壳体
火花式	LD-1 电雷管	$\geq 2 \times 10^3$	195 pF、3 000 V			1.36
	24-1 电雷管				6.49	7.10
薄膜式	J-206-2 电雷管	50~100	3 200 pF 350 V		5.58	3.21
	玻半电雷管	$(2 \sim 10) \times 10^7$	195 pF 3 000 V			3.20
导电药式	LD-3 电雷管	$1 \times 10^5$	1 500 pF 500 V			0.47
	$\Theta$ Д-k-13 电雷管	5~9	0.2 $\mu\text{F}$ 60 V	30	7.73	18 通过
	801-4 电雷管	5~9	0.2 $\mu\text{F}$ 60 V	30	12.60	4.47
	J-206 电雷管	6~13	3 200 pF 450 V	50	13.90	5.60
	$\Theta$ Д-202 电雷管				18.30	7.10
	QD-32 电雷管	16~32	0.5 $\mu\text{F}$ 90 V	50	>25	7.31
	JL-1 电雷管	1.5~3.5	20 V	100	>15	>25
	DB-035 电雷管	0.5~1		200	>25	2.08
	302 电雷管	1.5	30 $\mu\text{F}$ 20 V		>25	>20
	耐高温电雷管	1.5	500 mA		>25	>25
	东三点火器			500	>25	>25
	III-9	0.15~0.8	6 V	500	>25	
桥丝式	302-红				>25	>20
	302-陀				>25	>20
	302-燃				>25	>20
	Jz-235 电发火管				>25	2.08
	65-1 电点火具	1~3.5	500 mA	100	>25	
	68-1 电点火具	0.15~0.8	6 V	200	>25	
	小电咀电发火管	1.4~1.8			<25	5.00
	DD-17 电发火管	12~15		25	<25	1.78
	DF-1.2 电点火管				<12	
	yj-钝感发火管				>25	>25
	可燃性底火	0.5		1 A	>25	>25
	J5510-00A 电爆管					6.45
J5510-00D 电爆管						5.77

表 8 电爆火工品的真实静电感度数据  
Table 8 The real electrostatic sensitivity of EEDs

型号名称	电阻/ $\Omega$	发火条件	安全条件		50 % 发火能量/ $\text{mJ}$
			$I$ / $\text{mA}$	$t$ / $\text{s}$	
JD-11 电点火具	1.25~2.25	700 mA	180	5~10	1.73
JD-1 电点火具	0.15~0.80	6 V	150	300	12.0
DD-4.5 电点火管	2.5~4.5	400 mA	50	300	1.00
DD-17 电点火管	12~17	500 mA	25	30	0.225
105 电火帽	15~60	24 V 串 4 $\Omega$	0.1 $\mu\text{F}$ 45 V		0.270

- 2) 增大电荷消散速率防止电荷积聚;
- 3) 采用抗静电火工品和元器件降低场所危险程度;
- 4) 控制气体混合物浓度防止爆炸事故发生;
- 5) 采用抗 ESD 设计和防护加固技术提高电路抗电磁干扰能力;

表 9 ESD 敏感器件分类和敏感电压范围

Table 9 The classification and sensitive voltage of ESDS devices

元 器 件 类 型	
器件分类及敏感度	(包括 C、D、N、P、V 和其他 MOS 工艺的金属氧化物半导体器件、不加保护电路或具有 1 类敏感性的保护电路)
1 类 0~1 kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>·声表面声波器件</li> <li>·具有无保护电容器的运算放大器 (OPAMP)</li> <li>·结型场效应晶体管 (JFETs)</li> <li>·可控硅整流器 (SCR): 环境温度 100℃ 时, <math>I_0 \leq 0.175 \text{ A}</math></li> <li>·精密电压调整器微型电路: 电源电压或负载调整率 <math>&lt; 0.5 \%</math></li> <li>·微波和超高频半导体和微型电路: 频率 <math>&gt; 1 \text{ GHz}</math></li> <li>·薄膜电阻器 (RN 型): 公差 <math>\leq 0.1 \%</math>, 功率 <math>\geq 0.05 \text{ W}</math></li> <li>·薄膜电阻器 (RN 型): 公差 <math>&gt; 0.1 \%</math>, 功率 <math>\leq 0.05 \text{ W}</math></li> <li>·大规模集成电路 (LSI) 微型电路: 包括无保护电阻或加 1 类敏感性保护电路的微处理器和存储器 (LSI 器通常有二到三层金属喷镀跨交和小型有源元件的电路)</li> <li>·使用 1 类器件的混合电路</li> </ul>
2 类 1~4 kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>·加有 2 类敏感性保护电路的 MOS 器件或包含 MOS 组成部分具有 C、D、N、P、V 或其他 MOS 工艺的器件</li> <li>·肖特基二极管</li> <li>·精密电阻器网络 (R1 类型)</li> <li>·高速发射极耦合逻辑 (ECL) 微型电路, 扩散延迟 <math>\leq 1 \text{ ns}</math></li> <li>·晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 微型电路 (肖特基、小功率、高速和标准的)</li> <li>·有 MOS 电容器和加有 2 类敏感性保护电路的运算放大 (OPAMP)</li> <li>·加有 2 类敏感性输入保护的 LSI</li> <li>·使用 2 类器件的混合电路</li> </ul>
3 类 4~10 kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>·小功率削波电阻器</li> <li>·电阻器基片</li> <li>·小信号二极管, 除齐纳外, 功率 <math>\leq 1 \text{ W}</math></li> <li>·一般用途的硅整流二极管和快速恢复二极管</li> <li>·小功率硅晶体管, 在 25℃ 时, 功率 <math>\leq 5 \text{ W}</math></li> <li>·1 类和 2 类中未包括的所有其他微型电路</li> <li>·压电晶体</li> <li>·使用 3 类器件的混合电路</li> </ul>

6) 加强静电安全管理。

## 5 静电防护研究的热点与发展趋势

随着信息化、数字化时代的到来, 静电防护工程研究由原来重点研究静电放电引起燃烧爆炸之类灾害事故的防护, 逐渐转移为重点研究静电放电引发的电磁干扰防护。尤其是静电放电辐射场的理论建模、数值计算与仿真研究和静电放电电磁脉冲效应研究, 是当前该研究领域的热点和难点<sup>[8~11]</sup>。

另外, 许多部门把静电危害的防护研究作为电

表 10 一些器件的静电敏感度

Table 10 The electrostatic sensitivity of some devices

器件类型	实 例	静电敏感度 /V
MOSFET	3CO, 3D0 系列	100~200
JFET	3CT 系列	140~1 000
GaAsFET		100~300
CMOS	CO00, CD 4000 系列	250~2 000
HMOS	6800 系列	50~500
E/DMOS	Z80 系列	200~1 000
VMOS		30~1 800
PROM		100
ECL 电路	E000 系列	300~2 500
SCL (可控硅)		680~1 000
S-TTL	54S, 74S 系列	300~2 500
DTL	7400, 5400 系列	380~7 000
石英及压电晶体		$< 10 000$

磁兼容性 (EMC) 研究内容之一, 统一考虑。1991 年美国政府工作报告 (AD-A243367) 中把静电放电和十多种电磁危害源综合考虑为电磁环境效应 (Electromagnetic Environment Effect) 简称 E3 问题。可见, 把静电放电作为电磁环境因素之一, 综合进行电磁防护研究, 是该研究领域的发展趋势。

### 参考文献

- [1] 刘尚合, 魏光辉, 刘直承, 等. 静电理论与防护 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999. 4~5
- [2] 刘尚合. 十年来防静电危害的研究成果 [J]. 静电, 1995, 10 (4): 1~6
- [3] 孙可平, 宋广成. 工业静电 [M]. 北京: 中国石油出版社, 1994. 297~302
- [4] Lanrin J, Zaky G, Keith G B. On the prediction of digital circuit susceptibility to radiated EMI [J]. IEEE Trans. on EMC, 1995, 37 (4): 528~535
- [5] 刘尚合. 静电防护的发展趋势和 ESD 危害的作用机理 [J]. 静电, 1998, 13 (1): 2~6
- [6] 王万禄. 静电危害及其防护 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992. 146~156
- [7] 涂延林, 马峰, 黄能斌, 等. 电子工业静电防护技术 [M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1994. 22~25
- [8] Wilson P F, Ma M T. Fields radiated by electrostatic discharges [J]. IEEE Trans. on EMC, 1991, 33 (1): 10~18
- [9] 谭伟. 静电放电电磁脉冲效应及防护加固技术研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 1999
- [10] Ishigami S, Lwasaki T. Two-source model of transient

electromagnetic fields generated by electrostatic discharge [A]. In Nitta S. EMC '99 [C]. Tokyo: Chou University, 1999. 130~133

[11] Kim K C, Lee K S, Lee D I, et al. On the estimation

of ESD current wave shapes by radiated electromagnetic fields [A]. In Nitta S. EMC '99 [C]. Tokyo: Chou University, 1999. 145~148

## The Development in Electrostatic Protection Engineering

Liu Shanghe, Tan Zhiliang, Wu Zhancheng

(*The Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China*)

**[Abstract]** ESD has become one of the common hazards in information times. It is not only the ignition or detonation source at hazardous area, but also the EMI source for information equipment. In this paper, ESD hazards and its characteristics, effect mechanism and basic conditions to form electrostatic hazards are described. The success and development in electrostatic protection engineering in China are introduced. The test principle of "signal self-shielding and charge coupling", test method of the real electrostatic sensitivity and friction potential decay of fabric, test technique of electrostatic dynamic potential on human body, etc., are presented. And the classification standard and protection measures at electrostatic hazardous area, the logical configuration to forecast electrostatic hazards and the general principle and measures to be taken for electrostatic protection have been built up. Part of the experimental data is provided in this paper, and the current problems and development trends are introduced.

**[Key words]** Electrostatic hazards; effect mechanism; protection engineering; success and development

向您推荐：大型综合性权威性国防科技工业军转民指导性刊物

## 《中国军转民》

《中国军转民》杂志于 2000 年创刊。该刊是由国防科学技术工业委员会主管、中国和平利用军工技术协会主办、中国航空信息中心协办的中央级综合性刊物，是国家指导军转民工作的重要手段和对外交流的窗口，也是中国和平利用军工技术协会的会刊。

该刊将及时宣传党和国家的军转民方针政策，介绍军转民的成就和经验，反映军转民方面的问题，探讨军转民的理论和前景，展示军转民的科技与产品成果，报道国内外军转民的动态和信息，开展国内外军转民的学术交流，促进军工技术向民用转移，推动军转民事业的健康发展。

该刊内容划分为封面专题、军转民天地、新视野、服务之窗、消息与动态等板块。

该刊的服务对象是国防科技工业的各级领导、科技和管理人员，以及民用工业经济部门的上述人员。对与中国军转民企业进行贸易和合作感兴趣的

境外企业及其他机构的有关人员也是本刊的服务对象。

该刊为月刊，大 16 开本，48 个页码，彩色四封，国内外公开发行，本刊自办发行，每期国内定价 5 元。

2001 年将出版 12 期，征订工作已经开始，欢迎各单位和个人踊跃订阅。

该刊国际标准刊号 ISSN1008 - 5874，国内统一刊号 CN11 - 4014/N

汇款请寄：北京市朝阳区安外小关东里 14 号（或北京 9816 信箱）中国军转民杂志社

邮政编码：100029

联系人：马青君

开户银行：交通银行北京分行惠新西街分理处

帐号：7452015009922

户名：中国军转民杂志社