

# 电子工业静电放电(ESD) 防护与控制技术

主编 孙可平 Albert Kow

大连海事大学出版社

## 第一章 静电与静电放电概述

人们一般意义上所说的静电,是指静电荷或静电场。所谓静电荷,是指相对于观察者而言静止的电荷或带电体。无论是静电荷或带电体,都会在空间激发出静电场。静电场才是静电荷或带电体的物理本质,因为其对外表现是通过静电场来实现的。静电场是一种物质存在,有能量,有动量,对其中的其他带电体施加力的作用。

静电放电(Electrostatic Discharge, 简称为ESD)则是另外不同的物理概念或物理过程。因为伴随着静电放电,往往有电量的转移、电流的产生和电磁场辐射。

要讨论电子工业中ESD的防护与控制技术,不但需要了解静电与静电放电的基本概念与基本规律,还需要站在现代静电学的高度,高屋建瓴地来审视这一专门技术领域,可能会收到意想不到的效果。因此,下面编者简单介绍一下现代静电学的研究范围。

### 第一节 现代静电学简介

所谓现代静电学,是相对于经典静电学而言的。因为现代静电学,研究范围之广,远远超出了经典静电学的范畴,已经是理、工学科的交叉;理、工、医学科的交叉;理、工、生物、生命等学科的交叉与融合。读者可从下面的简介中略见端倪。

#### 一、现代静电学涉及的基本方程与基本理论

关于静电场:

静电场的基本方程仍然是泊松方程,即

$$\nabla^2 \Phi = -\rho/\varepsilon \quad (1-1)$$

静电场是一个有源场。场中某点静电电位在直角坐标系中的表达式为:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon, \varepsilon_0} \quad (1-2)$$

该方程是求解静电场分布的基本方程。对于对称分布的静电场,用高斯定理求解,可大大简化求解过程:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \varepsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \iiint \rho dv \quad (1-3)$$

静电场又是一个保守场(有势场),反映这一基本特性的方程就是静电场环流定律:

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-4)$$

正是静电场的这一特性,才有了电势或电位的概念,场内任意两点之间的电位差才有意义,并通过下式求解:

$$V_{ab} = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-5)$$

静电场的对外表现形式之一,就是对其他带电体施加电场力。如果是一个点电荷,它受到的电场力则可用下式计算:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (1-6)$$

关于静电放电(ESD):

如果静电场内任意两点(包括任意带电体)之间的电位差超过了某一阈值,就可能发生静电放电。如前所述,由于静电放电伴随着电量的转移和电流的产生,则在空间必然发生电磁辐射,在空间激发出电磁场。反过来又会对其他物体施加电磁作用。

讨论 ESD 的电磁辐射场要相对复杂得多。但其基本方程为麦克斯韦(Maxwell)方程组(有微分形式或积分形式,此处仅给出微分形式):

$$\nabla \times H = \delta_c + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-7)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1-9)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1-10)$$

如果 ESD 形成的辐射场可以用电偶极子辐射场来计算,则这种辐射电场和磁场在球坐标系中的三个分量分别为:

$$\dot{E}_r = \frac{I\Delta l}{2\pi\omega\epsilon_0} \left( \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \cos\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-11)$$

$$\dot{E}_\theta = \frac{I\Delta l}{4\pi\omega\epsilon_0} \left( -\frac{k^2}{r} + \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-12)$$

$$\dot{H}_\varphi = \frac{I\Delta l}{4\pi} \left( -\frac{k}{r} + \frac{k}{r^2} \right) \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-13)$$

式中:  $k$ ——传播系数,在不考虑损耗时  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为电磁波波长;

$r$ ——观察点到场源的距离;

$\epsilon_0$ ——自由空间的介电常数。

如果 ESD 形成的辐射场可以用磁偶极子辐射场来计算,则这种辐射电场和磁场在球坐标系中的三个分量分别为:

$$\dot{H}_\theta = \frac{I\Delta S k^3}{4\pi} \left[ -\frac{1}{kr} - \frac{1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-14)$$

$$\dot{H}_r = \frac{I\Delta S^3}{2\pi} \left( -\frac{1}{j(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^3} \right) \cos\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-15)$$

$$\dot{E}_\varphi = \frac{I\Delta S^3}{4\pi\omega\epsilon} \left[ -\frac{1}{r} - \frac{1}{j(kr)^2} \right] \sin\theta \cdot e^{-jkr} \quad (1-16)$$

式中  $\Delta S = \frac{\pi}{4}d^2$  为磁偶极子小圆环面积。

在电子工业 ESD 防护与控制技术领域内,往往考虑这种辐射场中的近区场(感应场)对电子器件的影响。如果距离辐射源不远,比如说当距离  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$  时,则  $kr \ll 1$ , 此时,上述方程中的项  $e^{-jkr} \approx e^0 = 1$ , 方程中  $\left(-\frac{1}{kr}\right)$  的高次项  $\left(-\frac{1}{kr}\right)^2, \left(-\frac{1}{kr}\right)^3$  占主要成分,可以忽略低次项。这样一来,电磁场  $E, H$  的表达式可简化为:

对于电偶极子近区场有:

$$H_{\varphi} \approx j \frac{I\Delta lk}{4\pi r^2} \sin\theta \quad (1-17)$$

$$E_{\theta} \approx \frac{I\Delta lk}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sin\theta \quad (1-18)$$

$$E_r \approx \frac{I\Delta lk}{2\pi\epsilon_0 r^3} \cos\theta \quad (1-19)$$

同理,对于磁偶极子感应场为:

$$H_{\theta} \approx \frac{I\Delta S}{4\pi r} \sin\theta \quad (1-20)$$

$$H_r \approx \frac{I\Delta S}{2\pi r^3} \cos\theta \quad (1-21)$$

$$H_{\varphi} \approx j \frac{I\Delta S}{4\pi\omega\epsilon_0 r^2} \sin\theta \quad (1-22)$$

说明:

① 在 ESD 工程中,往往把  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$  的区域即可作近场处理。

② 近区感应场中,  $E$  和  $H$  的分布随  $r$  变化显著,按  $\frac{1}{r^2}$  或  $\frac{1}{r^3}$  减少,因此在近区场测量时应特别注意测试距离的影响。感应场的这一特征,为利用加大空间距离来减少近场电磁场影响提供了理论依据。

③在近区场,电场强度表达式近似地与静止电偶极子产生的静电场相同。磁场表达式近似地与稳恒电流元产生的稳恒磁场相同。ESD工程中,由于电场对电子器件的影响要强于磁场的影响,有时就只考虑电场的影响,而忽略磁场的影响。但编者希望读者注意,静电场与ESD辐射近区场,在精确测量技术与防护原理上,均有显著区别。

## 二、现代静电学的主要研究内容

如同世界上的任何事物一样,静电对人类同样是有利有弊。现代静电学的基本任务,就是一方面尽量利用静电为人类服务,另一方面则要尽可能地防止或减少静电对我们的生产、生活带来的危害与影响。下面简要介绍一下现代静电学的主要研究内容。

### 1. 静电应用技术

涉及到的主要行业或产业有:

静电除尘技术,是把粉尘粒子先带电(称为粒子荷电),再在电场中使其按一定轨迹运动,加以收集,使除尘效率高达97%以上。目前,低温等离子体技术、静电除尘技术、静电除雾和静电消烟等,都得到了广泛应用。

静电喷涂技术,是把待涂覆的涂料粒子先荷电,再使其按一定轨迹淀积在工件上。目前已由最初的静电喷漆,发展到如今的直接粉末静电涂覆。而静电植绒、静电植毛等技术,也早已为人们所熟悉了。

静电复印与电摄影技术,电子成像、数码照相、静电复印,早已深入了人们的日常生活。可以说,静电复印机、电脑打印机、数码照相机等现代产品,对普通人而言,都已是离不开的用品了。

其他如驻极体(electet)、静电分选技术、电流体力学(electrohydrodynamics)、静电药物传送(electrostatic drug delivery)、静电微囊技术(electrostatic microencapsulation)、电泳技术(electrophoresis)、微机电系统(MEMS)、电粘滞效应

(electroviscous effect)、静电推进(electrostatic propulsion)、静电喷射与微滴技术(electrostatic spray and droplets)、静电起电机等,也已成为世界各国的研究热点领域。

### 2. 静电安全技术

船舶静电安全技术主要研究 ESD 引起船舶燃烧与爆炸事故的防治对策;石油和石油化工静电安全技术主要研究轻质油品输送过程中的 ESD 燃爆事故,聚合物粉体、塑料粒子料仓的 ESD 燃爆事故的防治对策;雷电与防雷技术主要研究大气静电学与防雷技术;此外,静电安全技术还涉及橡胶行业、塑料行业、制药、纺织、印刷、面粉、炸药、电火工品、航空航天等的 ESD 危害与防治。

### 3. 静电生物效应

主要研究静电场中的动物、植物受到的影响,静电场处理各种植物种子的影响,静电场中的细胞融合等生物、生命科学技术。

对于电子行业静电安全技术、抗静电材料与制品、消静电设备、静电测试技术,本书会作出较详细论述,此处不再简述。

## 第二节 人类对静电起电的认识历程

### 一、经典静电学阶段

公元前 600 年 Thales 就记载了丝绸与琥珀的摩擦起电现象。我国关于静电现象的最早记载见于汉代。东汉王充《论衡》中有“顿牟辘芥”等摩擦起电的论述。西晋张华《博物志》有“今人梳头,解著衣,有随梳解结,有光者,亦有咤声”的记载,与我们现代人的生活经历已很接近。

大约几百年前,人们就发现了不同金属之间摩擦带电的序列不同,排出了早期的静电起电序列:(+) 铝, 锌, 锡, 镉, 铅, 铋, 铌, 汞, 铁, 铜, 银, 金, 钡(-)。1879 年 Hlmholtz 发现了偶电层理论,可以较好地解释静电起电序列。

总的来讲,人们对静电的认识还是感性的、初级的,还未上升到理论阶段,也不能定量地计算或分析各种静电起电现象。

## 二、现代静电学阶段

20世纪二三十年代,量子力学的建立,开创了物理学的新纪元。人们对静电起电规律的认识,也发生了质的飞跃。偶电层理论得到了进一步的完善。1951年 Harper 根据金属势能井理论,可以定量计算出两种不同金属接触时接触面上的面电荷密度:

$$\sigma_{12} = \frac{\epsilon}{ed}(\Phi_1 - \Phi_2) \quad (1-23)$$

式中: $\sigma_{12}$ ——偶电层上的面电荷密度;

$\epsilon$ ——接触间隙的介电常数;

$e$ ——电子电量;

$d$ ——接触间隙距离;

$\Phi_1, \Phi_2$ ——两种金属的电子逸出功或功函数。

该公式能很好地解释静电带电序列。功函数高者带正电,低者带负电。

1971年, Krupp 根据金属—半导体接触面的势垒理论,给出了计算金属与半导体接触面上的电荷密度的公式:

$$\sigma_{12} = \frac{\epsilon}{ed}(\Phi_m - \Phi_s) = \frac{\epsilon}{ed}(\Phi_m - E_g - x + \Phi_0) \quad (1-24)$$

式中: $\Phi_m$ ——金属费米能级至导带的距离;

$\Phi_s$ ——半导体功函数;

$E_g$ ——禁带宽度;

$x$ ——半导体导带底在表面处的电子逸出功,又称半导体电子亲和势;

$\Phi_0$ ——能距,下位置为价带顶,上位置是为使半导体表面电中性,电子占据的那些表面态的顶。

金属与介质或高分子接触后,高分子材料固体表面的电荷密



度为:

$$\sigma_{12} = eD_s(\Phi_m - \Phi_p) \quad (1-25)$$

$$\text{其中 } D_s \ll \frac{\epsilon_1}{e^2 d}$$

式中:  $D_s$ ——高分子表面态密度。

两种高分子材料相接触时,则面电荷密度为:

$$\sigma = 1.77 \times 10^{-9} \frac{\Phi_{P1} - \Phi_{P2}}{e \left( \frac{\lambda_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{\lambda_2}{\epsilon_{r2}} \right)} \quad (1-26)$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2$ ——两种介质接触面处的电荷深入深度。

### 三、目前发现的基本起电机理

目前,人们已经发现的起电机理多达十几种。其中最基本、最重要的起电机理是接触分离起电,摩擦起电包括其中,因为本质上摩擦只是增加了两种物质的接触紧密程度。

静电感应电子工业 ESD 防护中也经常遇到。任何金属物体,只要处于静电场中,就会在垂直电场的两端面上出现等量异号的正负电荷。静电感应电位可达数千伏以上,这样高的静电电压能对电子器件造成不良影响。由于一般参考书中均能了解静电感应的一般知识,此处不作详细介绍。

目前人们发现的其他起电机理还有:断裂起电(包括分裂起电、破碎起电);压电效应起电;热电效应(包括冷冻起电);剥离起电;电渗现象中的电动电势(包括电虹吸、电毛吸);喷射起电;沉降起电;溅泼起电等等。

### 四、几种常见的静电现象简述

**大气静电现象** 人类生活的地球本身就是极大的导体,地球储有的负电荷总量大约为  $9.02 \times 10^5 \text{ C}$ 。距地面 60 ~ 350 km 的电离层区建立了方向垂直于地面的电场。空气中电场强度离地面越远而越低。如海平面晴天场强为 120 V/m; 3 km 高处为 25 V/m;

80 km 高处空气近乎导电。大气闪电是自然界静电现象之一。它和自然界的电解、气流、风沙烟尘等呈现着大量的静电现象,所以人们生活在无处不在的地球静电场中。

在日常生活中,许多 ESD 现象,我们都亲身经历过。譬如,在冬季一间温暖的房间里,走在覆盖地毯的地面时,当你伸手接触门的把手时,就会有电击的感觉;脱下合成纤维衣服或脱毛衣时会产生“噼啪”放电声,夜间还可以看到火花(空气的击穿场强为 30 kV/cm);天气干燥时,用塑料梳子梳头也会产生放电声。

**工业静电现象** 这里涉及的静电现象是指:同种或异种物质的机械分离(流动、摩擦、粉碎等),或静电感应导体上所积累的电荷。

工业中存在的几种常见静电现象有:

(1) 船舶静电:超级油轮用海水洗舱时,高速喷射出的海水会形成带电水雾,弥散在整个船舱内,使船舱中心呈现高达 50 kV 的静电电位,从而诱发 ESD,甚至引起船舶的燃爆事故;用于船舶压载平衡的压舱水,在航行过程中会使压舱水激涌,由此在舱内形成的静电电位甚至比船舶洗舱时的电位还要高,也会引起船舶的燃爆事故;高度绝缘的各种轻质油品,例如汽油、柴油、航空煤油等,在装船、卸船过程中,也会使油品带上很高的静电荷。由 ESD 引起的船舶静电事故,特别是大型、超大型船舶的静电事故,几乎每年都会发生。

(2) 纺织工业中,合成纤维等高电阻率的特性,使得这些纤维在各个生产过程中带上大量静电荷。各种典型纺织纤维的静电位参考值为:棉花 50 V,人造丝 100 V,尼龙 1.05 kV,电荷量为  $10^{-12}$  C 左右。这种带电的纤维会给后道工序带来意想不到的麻烦,例如纤维蓬松,造成粘卷;纤维缠绕;断丝;集束困难;纤维难于梳理等。

(3) 橡胶工业中的静电现象非常严重,生产工序中接触分离过程随处可见,而且因橡胶电阻率很高,使橡胶工业静电危害呈现

出静电电位高、火灾次数频繁等特点。典型的检测值有：合成橡胶从苯槽出来时带电量为  $7 \times 10^{-6} \text{ C/m}^2$ ，静电电位（电压）可达 250 kV。

(4) 石油工业和石油炼制行业也是静电灾害多发行业。汽油等高电阻率液体在管道中流动时静电起电严重。航空煤油经过滤器后静电起电量会成倍增长。各种高电阻率粉体在合成、精练、输送、储运过程中都会产生极高的静电电位。例如粉体料仓内的静电电位高达几万伏。槽车装油时的油面电位高达 10 kV 以上。由此引发的 ESD 灾害数不胜数。

(5) 印刷、造纸工业中，典型的静电起电参考数据有：纸离开辊筒时电位达 15 ~ 20 kV，经加光机达 50 kV；印刷时纸张可达 1.0 kV，油墨雾化亦带电。

(6) 汽车运输工业中轮胎的电阻率为  $10^8 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。一般车速下可充电到 15 ~ 50 kV，有时达 100 kV。自行车在柏油马路上行驶时轮胎电位可达 10 kV 以上。

(7) 塑料工业中的塑料制品表面电阻率为  $\rho_s = 10^{16} \sim 10^{29} \Omega \cdot \text{cm}$ ，表面经摩擦产生的静电极难泄放，故产生危害很多。

(8) 粉碎工业中，大多数粉体的体电阻率  $\rho \geq 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在传输、加工中都会起电，如煤粉、面粉及塑料粉加工厂之粉粒悬浮在空气中形成了气溶胶的胶状粒子，从而产生静电。例如，煤粉涡流与金刚砂混合带电电位可达 5.4 kV。

(9) 黑火药、礼花生产过程中因环境特别干燥，摩擦、破碎、混料、输送等工艺极易产生和积累静电。该行业中因 ESD 引发的爆炸等恶性事故屡见不鲜。

(10) 航空航天工业中，飞机燃油加油、塑料油箱内油品的晃动、摩擦都可能引发严重的 ESD 灾难。卫星及其他飞行器，ESD 产生的静电噪声不仅像飞机静电一样干扰无线电通信，还能使航天器姿态失控、飞行失败甚至自毁。

电子工业中的静电问题,下面会单独论述。

### 第三节 静电起电序列

国内外学者研究表明:不同物质摩擦起电所带的电荷极性会有不同。与甲物质摩擦带正电,而与乙物质摩擦却带负电。通过大量试验,科学家已将许多物质的起电极性作了记载,并将其排列成序,称为静电起电序列,见图 1-1。目前,静电序列已包括了常见的绝大多数物质,该图仅列出一部分。图中,任意两种物质发生摩擦后,靠近正号端的物质带正电,而位于负号端的带负电。如果两种物质在静电序列中相距越远,该两种物质的静电起电量就越多。

静电序列不仅是判断物质带电极性的一个简图,更重要的,它已是控制静电危害的一种设计手段。如果某种物质材料带电量已对生产、生活带来潜在威胁,可在下道工序选材时,有意识地选取与之配伍时能产生相反极性电荷的材料,起到中和静电的目的。

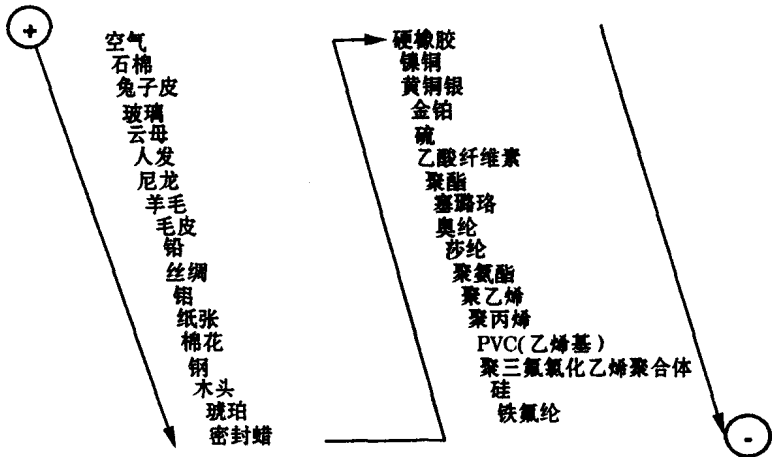


图 1-1 静电序列示意图

而表 1 - 1 则选自美国军事标准中的静电起电序列。我国军事标准 GJB/Z10598 也等同采用此标准。编者在本章同时给出图 1 - 1 和表 1 - 1 是想向读者说明:摩擦起电给出的静电起电序列中的顺序并不是永远固定的或可重复的。另外也想向读者传递如下信息:静电序列中的顺序和电荷的多少与物质的性能和种类相关,而这些性能又可以利用下列因素如纯度、环境条件、接触压力、摩擦和分离的速度、发生摩擦时的接触面积等来调节与改变。

表 1 - 1 摩擦起电静电序列

正(+)	人手
	兔毛
	玻璃
	云母
	人发
	尼龙
	羊毛
	毛皮
	铅
	丝绸
	铝
	纸
	棉布
	钢
	木板
	琥珀
	封蜡
	硬橡胶
	镍,铜
	黄铜,银
	金,铂
	硫黄

	醋酸人造纤维
	聚酯
	明胶
	奥纶
	聚氨酯
	聚乙烯
	聚丙烯
	聚氯乙烯
	聚三氟氯化乙烯聚合物
	硅
	聚四氟乙烯

原标准注:本表仅供参考。在摩擦起电序列中材料的精确次序与许多变化因素有关。任何给定的摩擦起电序列可能不是可重复的。

## 第四节 电子工业中的主要静电源

绝大多数电子元器件的生产工艺均要求洁净车间或超净车间,除了安装各种吸尘设备之外,还要采用各种无机或有机不发尘材料,再加上空气调节、硅材料的高起电本身,使得电子行业已成为静电高发区和 ESD 重灾区。

此外,电子器件在生产及组装成电子设备的各种工序中,例如测试、焊接、加热、烘干、清洗、检验、搬运、包装、运输等工序中,难免相互碰撞和接触摩擦而形成很高的静电电位。再如,当操作者因某种原因带电、又未采取确实可靠的防静电措施时,人体的静电电位可能高达 1.5 ~ 35 kV,如此之高的静电电位,也能招致电子器件的损坏或软击穿。

实际上,人体和电子器件本身就是重要的静电源。带电的人体和带电的器件,均构成 ESD 源,对电子器件构成威胁。除此之外,电子器件周围的环境中还存在其他静电源(比如,工作表面、包装

袋等)。不同静电源所带的电量、产生的电压及对电子器件的影响也各不相同。以工作服为例,作业人员穿用的普通工作服(纯棉制)与工作台面摩擦时可产生 $0.2 \sim 10 \mu\text{C}$ 的电荷量,在服装表面能产生 $6000 \text{ V}$ 以上的静电电压。当人体与电子器件接触时,即可导致静电放电,损害电子器件的事件就会发生。

美国军事标准列出了电子行业常见的静电源,见表1-2。

表1-2 电子工业典型的主要静电源

	材料或活动
工作表面	打蜡的、油漆的、涂清漆的表面 普通的乙烯基材料 各种塑料
地板	封闭式混凝土 打蜡或油漆木地板 普通乙烯地砖或薄板
工作服	一般清洁室工作服 一般人造丝工作服 普通鞋子 干净棉花(RH30%以下)
椅子	油漆木质椅子 乙烯基椅子 玻璃纤维椅子
包装和处置	一般塑料——袋、皮包、信封 一般气泡、泡沫材料 一般塑料盘、周转箱、运输盒、小瓶、 元件盒、各种元件存储器
组装、清洗、测试、维修区	喷雾清洗器 一般吸锡器 烙铁头未接地的烙铁 刷子(人造硬毛) 用液化或蒸发来清洗或干燥 烘箱 低温喷雾 热喷雾枪或热吹风 喷沙 静电复印
芯片载体	芯片板托架 盘 工具类
物流器具(用品)	运转车 存放柜
高压设备或高压源	能发生静电感应的各种金属零件 部件 设备

而表 1-3 则是美国军事标准中给出的操作人员做各种活动时,人体起电的实测值。

表 1-3 典型的静电电压

静电产生方法	静电电压(V)	
	相对湿度 10% ~ 20%	相对湿度 65% ~ 90%
走过地毯	35 000	1 500
走过乙烯地板	12 000	250
工作台处的操作者	6 000	100
包说明书的乙烯封皮	7 000	600
从工作台拿起一般的聚乙烯袋	20 000	1 200
用聚氟甲酸乙酯泡沫材料制作坐垫的工作椅子	18 000	1 500

表 1-2 明确地告诉人们,静电起电伴随了电子器件的绝大部分生产工艺,表 1-3 则说明仅仅人体静电,就可能对电子器件构成巨大威胁。下一节,则较详细地说明 ESD 对电子工业的危害。

## 第五节 ESD 对电子工业的危害

### 一、ESD 对电子设备的危害

在电子器件生产过程中,静电放电可以改变半导体器件的电性能,造成器件的降级或损坏。静电放电可以使 IC(集成电路)芯片介质击穿,芯线熔断、漏电流增大、加速老化、电性能参数改变等等。有人把 ESD 造成的 IC 器件击穿分成两类,一类称为硬击穿,即直接把器件的某一部分击穿,使其完全失效;另一类称为软击穿,即静电放电并未使电子器件完全击穿,但对其焊点或 P-N 结、连接线造成了损伤,这种损伤具有潜在和缓慢失效性。但是,这种情况危害更大,因为,一旦软击穿的器件装入整机或分系统、系统,也许一周、也许一月、也许半年,这种软击穿的影响就会暴露,先是性能不稳,继而失效,从而使整个系统瘫痪。据有关资料统计表明,潜



在性缓慢失效占电子器件静电放电失效总数的 90% ,因此其危害极大。

## 二、ESD 对电子器件侵害方式

ESD 对电子器件侵害方式主要有三种:① 静电源直接对电子器件放电;② 带电器件对其他导体的静电放电;③ 电场感应放电。

### 1. 静电源直接对电子器件放电

ESD 事件常常发生在带电导体(包括人体)对敏感电子器件的放电过程中。一般的静电危害是因人体或带电导体直接对敏感电子器件放电造成的。

### 2. 带电器件对其他导体的静电放电

当静电放电敏感器件在操作过程中,或者与包装材料、机器表面接触后,就会积累静电荷。当器件在包装盒移动或振动时就会发生静电放电。这种放电情况,涉及的电容和能量不同于人体对敏感电子器件的放电情况。在某些情况下,带电器件比带电人体所造成的危害更大。

### 3. 电场感应放电

感应场可以直接或间接对电子器件造成危害,因为任何带电体周围都存在静电场。如果敏感电子器件、金属零部件、人体等进入静电场范围,就会因为感应而带电,成为潜在的 ESD 危害源。

## 三、电子器件的 ESD 损伤

无论 ESD 直接对电子器件放电,还是对电子器件间接放电,均能使电子器件受到损伤。既能引起器件功能的突发性失效,又能引起器件功能的潜在性失效。

### 1. 突发性失效

突发性失效是指当电子器件暴露在 ESD 环境中时,电路参数可能明显发生变化,它的功能可能丧失。ESD 可能引起金属熔化,造成短路或者绝缘层击穿等,使器件的电路遭到永久性的破坏。这类失效可以在装运之前的成品测试中检查出来。据有关资料统计