

电子工业防静电危害

鲍重光 编译

北京工业学院出版社

内 容 提 要

本书叙述了静电的基本概念,在半导体器件、集成电路及电子仪器的生产和使用中出现的静电危害,以及对它们的防治措施;并对防静电危害的环境设计作了扼要介绍。适用于从事电子元器件和仪器设计使用的技术人员阅读,亦可供其它从事静电研究的人员及大专院校师生参考。

电子工业防静电危害

鲍重光 编译

*

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 32 开本 13.875印张 298千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

ISBN 7-81013-051-X/TN·3

印数: 1—5,000册

定价: 2.30元

目 录

第一章 静电现象概论	1
§1.1 静电危害的产生	3
1.1.1 静电的产生和消失	6
1.1.2 电荷产生、消失、积累与材料等因素的关系	19
§1.2 绝缘击穿和静电放电	45
1.2.1 气体的电离	45
1.2.2 火花放电	54
1.2.3 电晕放电	72
1.2.4 沿面放电	80
1.2.5 静电放电和介质击穿	81
§1.3 防止静电危害的措施	88
1.3.1 静电放电危害的防止	88
1.3.2 防止带电的措施	93
第二章 静电的测试方法	103
§2.1 静电测量仪表	105
2.1.1 静电测量仪器的简单原理	106
2.1.2 若干常见的静电测量仪器	108
§2.2 静电以及静电危害的测量	118
2.2.1 电量的测量	118
2.2.2 电位的测量	123
2.2.3 静电噪声及电磁干扰的模拟	128
2.2.4 人体带电的测量	136
2.2.5 材料静电特性测试	149
2.2.6 放电现象的观测	168

第三章 半导体器件的防静电措施	176
§3.1 半导体器件的静电击穿现象	177
3.1.1 支配静电击穿的因素	177
3.1.2 器件的静电击穿	183
3.1.3 判断击穿的方法	199
3.1.4 半导体器件静电放电基础试验和理论进展概况	205
§3.2 器件击穿的实际情况	210
3.2.1 半导体器件静电击穿的实际情况	210
3.2.2 IC、LSI击穿的实际情况	219
§3.3 静电击穿的试验方法	228
3.3.1 人体模型法	229
3.3.2 器件带电模型	240
3.3.3 各种检测方法存在的共同问题	249
§3.4 耐击穿性能和器件的保护	252
3.4.1 Si器件	253
3.4.2 化合物半导体器件	277
§3.5 处理及使用半导体器件时的注意事项	282
3.5.1 各过程中的注意事项	283
3.5.2 考虑到用户时的注意事项	287
第四章 电子仪器的防静电措施	290
§4.1 静电噪声的防止	292
4.1.1 基础研究	292
4.1.2 静电放电噪声模拟装置	300
4.1.3 防静电噪声的措施	310
§4.2 电子计算机的防静电措施	339
4.2.1 电子计算机的环境因素	340
4.2.2 小型机系统的防静电措施	348
4.2.3 终端的防静电措施	363
§4.3 磁带录象机及家用电器的防静电措施	377
4.3.1 磁带录象机的防静电措施	377

4.3.2 彩色电视机的防静电措施	387
4.3.3 录音机的防静电措施	396
第五章 防静电危害的环境设计	403
§5.1 环境设计的要点	404
5.1.1 事后处理的环境设计	404
5.1.2 事前处置的环境设计	411
§5.2 静电管理	419
5.2.1 人体带电的管理	420
5.2.2 物品类带电的管理	426
§5.3 尺寸效应	429
主要参考文献	433

第一章 静电现象概论

早在十九世纪，就已经建立起了形式完美的静电学体系。在1932年左右，由于电子显微镜以及各种高压机器的使用，静电学作为电子光学、高电压工程的一个部分，在工业应用领域占据了一席之地。随之，电摄影、电集尘、静电喷涂、静电起电等一系列静电应用技术应运而生。与之相应，包含绝缘体中的导电过程、电荷的吸收、带电粒子的凝聚和附着，带电粒子的能量与运动轨迹、沿面放电等众多方面内容的静电工程学逐步兴起，给古老的静电学科赋予了新的生命力。另一方面，随着石油化工、高分子工程、半导体及电子工业的发展，防止静电危害的问题开始提到日程上来。这就要求从实用的立场进一步阐明种种基于界面带电现象的静电带电和衰减过程，从而建立起各种相应的防灾、防危害系统。

根据这样一个简单的历史回顾，不难看出，静电工程学尽管本身是从静电学的母体当中脱胎而出的，但它们基本上走了各自独立发展的道路。不过，随着研究范围的扩展，由于它们二者都是以多相系绝缘体的带电现象为研究对象，从而，人们已经自然地将它们统一和混同起来。二者之间名词术语的相互借用也已习惯了。但是，从防危害的角度看，我们还不能把它们完全等同起来。举一个最简单的例子来说，电荷作为静电学最基本的概念，早已被人们所接受；然而，

从防危害的角度考虑，抽象的“电荷”这一概念已经不足以囊括现实中引起危害的各种事实，因此，在建立防静电危害体系时，同一个电荷的概念，在不同的场合下，将进一步被细分为正电荷和负电荷；束缚性电荷与非束缚性电荷；单极性电荷和双极性电荷等等，不同形式的电荷，将会导致不同模式的静电危害，这种区别自然也会反映到防害系统的建立上来。从这例子可以看出，在人类意识到静电将会带来危害之前，作为一种纯学术的静电学的“硬件”部分，与为防止静电危害提供有用资料的静电学的“软件”部分，最初是互不相关的。只有了解了这一点，才能够区分开纯学术的静电学与为建立防害系统所必须的静电学。这样一个前提条件，往往被许多正在从事防静电危害的人们所忽视。经常可以看到由于不加区别地援引以往纯学术性的静电知识，形而上学地来处理实际工程中的静电现象，从而导致适得其反的效果的例子。

本书是从防止电子工业中静电危害观点出发的，因此，在一些叙述过程中，必然有若干地方与正统的纯学术性静电论述不尽相符。但读者只要牢记住防静电危害这一基本宗旨，对许多问题就不难理解了。

一言以蔽之，静电学是建立在电荷这个基本量上的理论体系，可是从防静电危害的角度看，毋宁说从减小电位差的方法去考虑更为实际。但是，防静电技术的发展又期待着静电学研究的最新成果。也就是说，只有从它们既相互统一，又存在着矛盾的观点去认识问题，才能不断地推进防静电技术的发展。

显然，全面系统地叙述读者早已熟知的静电学原理，并

非本书的目的。因此，在这一章中，我们仅从防止静电危害的角度，对静电现象作一简单的综述，以对建立正确的防灾体系有所启迪。

§1.1 静电危害的产生

脱下合成纤维衣服时产生的劈劈啪啪放电；从合成革椅子上站起来后触摸其它物体、或者在化纤地毯上行走后接触金属制的门把手时感到的电击；日光灯、电视机、唱片以及合成纤维的裙子上容易吸附灰尘等现象，都是日常生活中司空见惯的静电现象。然而，尽管感到不愉快，人们还是难于将它们作为一种危害来看待。的确，当您在听贝多芬的交响乐时，由被灰尘污染了的唱片中发出的噪声，会使人感到刺耳和心烦，但对于一般人而言，说这是静电危害则似乎有点危言耸听之感。可是，在计算机房中工作的操作者和从事电子仪器调试的技术人员带电时，他们在操作中产生的放电将成为机器故障或者误动作的原因。在当今这样一个从家用电器直至卫星、航天飞机都广泛使用电子仪器的时代，静电放电引起的故障和误动作将会带来多么可怕的后果，这是不难想像的。由于计算机日益渗透到生活和生产的各个领域，所以可以毫不夸张地说，静电放电对各类电子仪器形成危害的损失，绝不亚于火灾和爆炸对人类的威胁。但是，产生静电并不一定就引起危害，仅仅当它足以引起机器故障的时候，人们才把它当作“静电危害”来看待。因此，所谓防静电措施，就是要实际测量各个机器足以引起故障的最小静电量，通过电子回路的补偿或者环境条件的调节，来使之保持在该

最小静电量水平之下。

现在回到有关电子仪器的主题上来。一般来说，电子仪器的元器件，都是通过表 1-1 所列举的各种现象来实现其功能的。

电子器件中所利用的电现象

表1.1

分 类	现 象
电动力学现象	碰撞电离、二次电子辐射、压电效应、电致伸缩现象、库仑力、电磁感应、静电感应、磁致伸缩效应、绝缘击穿
电光现象 电磁波现象	光电作用、光电离、光电导作用、光电效应、光电磁效应、光生电动势、胶片感光
电子效应现象	种种电子现象（发光、克尔效应、斯塔克斯效应、契仑柯夫效应等）、场致发射、电子雪崩、齐纳效应、极化、珀耳帖效应、焦耳热、电分解、绝缘击穿
电磁现象	磁致伸缩、法拉第效应、磁克尔效应、霍尔效应、感应电动势、磁化现象、磁滞损耗

所谓静电现象，指的是在电荷产生和消失过程中所产生的电现象的总称。它的主要表现是带电体形成的电场作用（库仑力、感应电荷、感应电位、电场强度、电位差等）以及带电体的放电作用（电磁波辐射、磁场的产生、静电场的变化、电流、绝缘击穿等）。因此，在产生静电现象时，将会在元器件实现其功能的最小能量状态或者信号电平之上，叠加进静电现象所附加的作用能量。而这部分能量将会导致误动作、噪声、击穿等一系列不测事件的发生，从而降低了元器件的可靠性。这就是在电子仪器上产生静电危害的实

质。在表 1.1 所示的范围中，随着灵敏度的提高和小型化，电子仪器出现了系列化的倾向，从而，潜在的静电危害，还会进一步增加。

根据静电引起的现象，将足以造成电子仪器性能失调的危害列于表 1.2：

危害的种类

表1.2

器件或仪器的种类	危 害 状 况
半导体器件	由于加上了超过其耐压能力的电场而导致器件击穿、半击穿、性能劣化
磁带录像机	由于静电力吸附灰尘，促使磁头磨损、磁带运转不良；由于在制造时混入灰尘而漏失信息，产生噪声、颤音
电子计算机	静电放电引起的噪声使系统停机、记录错误、漏失信息
计算机外围设备	由于静电力使卡片难于整理、磁鼓不良、机械性能不稳定等
测量仪器类	零点变动、误信号

要想找出一种对于表 1.2 列举的各种静电危害都适用的万全之策，除去减小静电量之外，别无他法。然而，对于特定的危害，还可以从防止形成危害源方面着手。对于不同的电子仪器，也可以实施“个性化”的防护措施。譬如，设法改变放电的形态。因为，当电场强度超过空气的击穿强度时，将会发生静电放电。由于放电的条件不同，气体放电将呈现出电晕放电和火花放电等不同的样式，一般说来，电晕放电释放的能量远小于火花放电，因此，只要我们在机器的设

计方面，设法将易于产生火花放电的结构形式改变成为仅可形成电晕放电的结构，自然也可相应地起到防静电危害的效果。

1.1.1 静电的产生和消失

要采取防静电的有力措施，必须首先了解静电产生的过程。这个问题，一般电磁学的教科书中早已论及，现在，我们主要从静电工程的角度来复习一下这些内容。

从静电工程学的立场来看，形成危害的带电体多为绝缘体。随着绝缘体所处场所的不同，其表面电荷密度是不相同的。因此，即使带电体的形状、总电量均相同，而电荷的分布状况不同时，它周围的电场分布也就不相同。从而，诱发的危害状况自然不会一样。因此，作为防静电危害的防范手段，除了测量出带电体的电量之外，还必须同时推测出电荷分布的状况，只有这样，才可能得到关于产生危害的极限带电量的信息，以便采取相应的措施。

另一方面，就带电量这个物理量来说，一旦将其纳入防静电危害的范畴时，随着用途的不同，对电荷必须重新加以分类。首先应当指出，在一般的电动力学中，由库仑定律、拉普拉斯方程以及泊松方程等所描述的静电场，丝毫没有涉及电荷载体具有质量这一事实。而在静电工程学中遇到的具体对象，都是具有质量的电荷载体，因此，必须将质量、化学作用等因素考虑进去，再通过电动力学的方法去寻求解答。在静电工程学中，考虑起电过程时，首先要分析引起这类带电现象的基元载体是什么，按照质量的大小来对电荷载体进行分类排队。一般来说，按照质量由小到大的顺序，即按照电子、氢离子、各种原子电离形成的离子、在水蒸汽上

附着了离子而形成的较大离子、在微粒上附着了离子而形成的更大一些的离子等的顺序来排列的。当这些电荷载体置于电场中时，由于电场力的作用，它们将沿电场的方向移动。质量越大的载体，其加速度越小，体积越大的载体，与其它媒质分子碰撞的可能性越大，从而移动的阻力也越大。换句话说，其电荷较难泄漏（ H^+ 与 OH^- 除外）。

设电荷载体的质量为 m ，电量为 q ，电场强度为 E ，则电荷载体在电场中受力为

$$F = qE = ma \quad (1-1)$$

故其加速度为

$$a = \frac{qE}{m} \quad (1-2)$$

它在电场力方向上的速度 v 将随着时间而增大。但由于在与周围媒质分子碰撞时将丧失一部分动能，因而最后可达到一个稳定的速度 v_d 。一般而言， v_d 与电场强度 E 之间存在下列的关系：

$$v_d = \mu E \quad (1-3)$$

其中的 μ 表示迁移率。由 (1-2) 式不难看出，电荷载体的质量 m 越大， a 越小，表示移动困难，即 μ 变小（ H^+ 、 OH^- 除外）。设在单位体积中有 n 个速度为 v_d 的粒子通过电场为 E 的区域，则电流密度为：

$$J = q \cdot n \cdot v_d \quad (1-4)$$

由此得电导率为

$$\kappa = \frac{J}{E} = qn\mu \quad (1-5)$$

电阻率为：

$$\rho = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{qn\mu} \quad (1-6)$$

从(1-5)和(1-6)式看出，即使 $(n \cdot q)$ 的大小相同，如果带电粒子的迁移率不同，则泄漏的速度也不相同。

一般情况下， μ 不仅与质量有关，而且还受到电荷载体间的化学结合力影响。因此，在静电工程中的电荷移动（导电现象）过程较之导体的导电过程要复杂得多。电阻将是电场强度 E 的函数，电荷的泄漏速度也将随电场强度而变化。即：

$$R = f(E) \quad (1-7)$$

$$\frac{dq}{dt} = i = g(E) \quad (1-8)$$

所以，在测量试样电阻时，如果电源电压或测量电极选择不当，则测得的评价带电性的指标将会发生错误。在评价产生静电危害的可能性时，即使产生的电量较大，但电荷消失的速度很快时，也不致于导致危害的发生。因此，通常用时间常数或者弛豫时间来表征试样的这种特性。但是，对于不同的机器，能够容忍电荷消失到不致引起危害程度的时间是不相同的。换句话说，如果在由机器特性所确定的时间当中，电荷载体所具有的电荷尚不能消失到某个必要限度的话，那么，从防害的角度看，这类电荷载体的迁移率就等同于零。也就是表明，电荷将被束缚在机器上。这类电荷称之为束缚性电荷。考虑到这一点，可以说在实施防静电措施时，作为试样特性的指标并不是弛豫时间本身，而是机器所能容许的电荷由非束缚性变至束缚性的时间。对于束缚性电荷，则必须通过强制性的复合手段来使之消失。由此可见，束缚性和

非束缚性电荷的区分，对于防止静电危害来说，是起着一种前提条件的作用。

在另外一种情况下，我们还可以将电荷区分为单极性电荷和双极性电荷两类。

当给一个金属球带上电荷时，在球面上将分布有相同极性的电荷。与之相反，当摩擦一个固体绝缘体时，在绝缘体的表面将会产生正的和负的两种极性的电荷。在实际问题中，在同一个面上，正负两种极性的电荷并非等量发生，总是有一种较另一种多一些。这样，从防灾的角度，将仅仅由正极性或负极性电荷引起的带电，称之为单极性带电，而将具有正极性和负极性两种电荷载体的带电体，称之为双极性带电体。在考察防止静电危害的时候，处理问题的对象多半是双极性带电体。

进一步考察双极性带电体的带电状况，我们还可以将它的带电量区分为以下几类。

第一类是代数和电量。设正电量为 q_p ，负电量为 $-q_n$ 时，则可得：

$$q_p - q_n = Q \quad (1-9)$$

Q 称为代数和电量。我们在一般情况下所说的物体带电量，指的就是它。通常用法拉第筒测出的电量就是代数和电量。在考虑离开带电体甚远处的电场强度、电位时，可以使用这个电量的概念。

然而，当我们在处理静电污损、带电体的放电等问题时，由于与局部的电场强度有关系，因此，必须使用带电粒子数电量的概念。显而易见，当用法拉第筒来测量正电量与负电量大致相等的带电体时，带电量很小。然而，利用这样

的测量结果来研究静电污损以及静电噪声时，将会发现，在尚未达到规定的电荷限度时就会引起灾害。这是因为，尘埃的附着以及静电噪声，并不是与代数和电量成比例，而是与表面带电粒子的总数及其分布状态有关系。因此，在处理这类危害问题以及与平均电场和局部电场强度有关的沿面放电现象问题时，有必要知道带电体上的正电量与负电量的绝对值之和，令正电量为 q_p ，负电量为 $-q_n$ 时，带电粒子数电量应为：

$$q_p + |-q_n| = Q \quad (1-10)$$

再深入一步考虑，即使在带电体上产生的是单极性电荷，然而，由于试样以及环境的影响，电荷密度完全均匀的情况也是极为罕见的；随着场所的不同，电荷密度会发生差异。即使从整体上看，平均电荷密度很小，但若电荷分布的非均匀性十分显著，则会在局部区域产生强电场。这就是我们在处理问题时经常看到的“危害的发生与带电量不成比例”的原因之一。譬如，在印刷时，当纸的端部产生高密度的带电时，会导致纸张的吸附现象；在纤维工业中，丝的卷绕工序也易于形成局部的高密度带电。当电荷的分布不均匀时，自然会导致带电体内的电位以及电场强度的不均匀。因此，判断外观的平均电场强度与内部电场强度分布的不同，对于研究电子仪器的绝缘击穿以及静电噪声来说是不可缺少的一环。从而，在考察这类电荷或电场强度的分布状态时，必须将电荷密度、电场强度、电位分别表示为座标和时间的函数 $Q(x, y, z, t)$ 、 $E(x, y, z, t)$ 和 $V(x, y, z, t)$ 。这种表示方法称为电荷、电场强度、电位的测绘（地图）表示。当然，正确地测绘出这种分布是比较困难的，往往是在

若干的假定之下，进行大致的推测。

最后，应当指出的是，静电的产生方式是多种多样的，简单地列举一下，就有摩擦带电、接触带电、冲流带电、冻结带电等许多种类。不同种类的电荷，其衰减的方式也各不相同。一般来说，它们往往会偏离用弛豫时间表示出来的普遍性衰减过程。因此，从防静电危害的立场看，有必要对每个被考察的部位电荷的成因进行仔细地推敲。对具体的问题必须具体分析，切忌以共性来掩盖了静电现象个性十分突出的特点。

不同种类的电荷引起的灾危害如表 1.3 所示。

电荷种类与灾危害种类

表 1.3

现 象	电荷种类	灾 危 害 种 类	影 响
静电引力	单极性	吸附尘埃 粘附在机器上	污损、品质劣 化、操作效率降 低、无法操作。
	双极性	无法剥离	
	束缚性	筛网堵塞	
	非束缚性	凝聚	
静电排斥力	单极性	纸张等凌乱不规	污损、品质劣 化、操作效率降 低、无法操作。
	双极性	整形性不佳	
	束缚性	混合不良	
	非束缚性	物料杂乱无章	
	单极性	起毛	污损、品质劣 化、操作效率降 低、无法操作。
	束缚性	墨粉飞散	
	非束缚性	断线	

续表

现 象	电荷种类	灾 危 害 种 类	影 响
静电感应	单极性	静电噪声	可靠性降低、 出现废品、不安 的感觉。
	双极性	机器损耗	
	束缚性	继电器误动作	
	非束缚性	继电器误动作	
放 电	单极性	静电噪声	可靠性降低、 出现废品、不安 的感觉。
	束缚性	着火、爆炸	
	非束缚性	机器损坏 生理上的不愉快感 机器的误动作	

在电磁学中，通常是以电子的电量作为基本的电荷单位。而在引起灾危害的情况下，随着机器和材料的不同，导致灾害的基本电量将发生变化。也就是说，在防灾问题中，电量具有一种相对性的意义。譬如说，有某一种导电性织品，它是由导电的导体纤维和不导电的合成纤维（涤纶线）交织而成的，将其置于绝缘台上，当以负电晕放电对其喷电时，则试样整体均匀地带负电。接着，让导体纤维与接地导体接触，则有与试样上的负电荷大体等量的正电荷，由大地流入试样中，在其代数和电量变为零的同时，用场强计测得其附近的电场亦趋近于零。然而，若我们根据同样的道理，在宽度为2cm的聚酯薄膜中心，镶嵌上宽度为0.5cm的金属箔，用电晕照射之后，使金属箔接地。那么，其电荷的分配应当与上述导电性织品的情况相似。可是，这时若用