

仪器设备的接地和屏蔽技术

第二版

[美] R·莫里森 著

科学普及出版社

仪器设备的接地和 屏蔽技术

第 二 版

〔美〕R·莫里森 著

梁 怀 璧 译

科学普及出版社

内 容 提 要

本书比较全面而通俗地阐述了仪器设备的接地和屏蔽技术的基本理论、屏蔽规则、消除干扰的方法，以及推出了大量的典型应用线路，特别是提出了新的静电罩的图解分析方法。它对读者掌握屏蔽与接地技术将有较大帮助。

本书文字简练，内容新颖，图文并茂，物理概念明确，深入浅出，紧密结合工程实际，对解决干扰问题有一定的指导意义和实用价值。

仪器设备的接地和屏蔽技术

第 二 版

〔美〕R·莫里森 著

梁 怀 璧 译

责任编辑：高宝成

封面设计：王序德

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京燕山印刷厂印刷

开本，787×1092毫米 1/32 印张，5.125 字数：113千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数：1—4,380册 定价：1.15元

统一书号，15051·1271 本社书号：1560

ISBN 7-110-00311-6/TN·7

第二版序言

我在第一版序言中所说明的事情，显然已经没有必要重复了。该书和书中所涉及的定义能被人们广泛接受，是很令人满意的。

自1967年以来，电子设备和仪器有了相当大的变化，但是接地和屏蔽的概念仍然不变。在某些领域中，新型电子设备对噪声污染不太敏感，但在实际上扩大了外来干扰的信号导体系统中，一切常见的问题仍需深入地研究。换句话说，就是在这个领域里的物理现象实际上是不变的。

第二版提出了说明静电罩的图象的新的处理方法。这种方法对读者而言，易于使屏蔽问题形象化。在一种二维的示意图中，特别是当边界和导体往往成为一体时，是难以将导体与边界分别开来的。这种新图可以更清楚地显示出屏蔽边界和区别出具有不同信号电位的屏蔽罩。

本书努力阐明在技术要求上比较困难的地方。例如，屏蔽与共模抑制是密切相关的，对这种技术要求进行处理是必要的。书中许多章节还加了注解，以便使它们易读。还加了有关数字电路和系统接地的处理方法。

象许多书的第一版一样，有些方面写得不成功。我希望修订和扩充这些部分，以便使读者的工作更易于进行。

我谨向读者们和再版本书的发行人致以谢意。

拉尔夫·莫里森

(Ralph Morrison)

1977年6月

于加利福尼亚州长滩

译 者 的 话

电子仪器和电子设备不可避免地要在电磁环境中工作，因而会受到电磁的干扰。特别是在电子仪器向微型化、数字化、高速和高灵敏度迅速发展的今天，干扰问题就显得更加突出。干扰不但影响设备的性能，而且会产生差错，影响生产，甚至造成事故。因此，科学地分析和消除干扰，是电子仪器设计、制造和使用人员所必须解决的重要问题。

消除干扰的方法很多，其中最主要的是屏蔽和接地两种，本书就是这方面的一本专著。作者根据仪器仪表中的静电、磁和射频的过程，全面而系统地阐述了仪器设备的屏蔽和接地技术的基本理论、规则以及消除干扰的方法。在这一版中，还增添了不少新的内容，特别是作者提出的新的静电罩图解分析方法，颇有实用价值，使读者对屏蔽和接地问题的理解更加形象化、具体化、给制造和使用电子仪器的科技人员带来很大的方便。

本书写得通俗易懂。作者不是从定义出发引出物理概念；而是从简单的例子开始，围绕大量实用线路和实践中存在的问题，作深入浅出、图文并茂地阐述。既讲清了屏蔽和接地技术中的物理概念，又提供了消除干扰的有效措施；并且对仪器使用中容易出错的地方，用实例反复对比和强调，从而使读者能够正确地运用屏蔽和接地技术，来解决仪器设备中的干扰问题。

由于译者的水平有限，译文中可能有一些不妥之处，诚恳地希望读者给以批评指正。

目 录

一 静电学	1
1.1 电荷	1
1.2 电荷间的作用力	1
1.3 电场	2
1.4 电压	3
1.5 电压梯度	3
1.6 带电的球形导体	4
1.7 导体的电场	6
1.8 位移电场	6
1.9 电场的表示方法	7
1.10 难点	9
1.11 米、千克、秒单位制	10
1.12 球壳上的电荷	11
1.13 典型的电荷分布	14
1.14 圆柱面	15
1.15 平行板电容器	16
二 电容及能量储存	18
2.1 概论	18
2.2 格临互易定理	18
2.3 自倒电容和互倒电容	20
2.4 自电容和互电容	21
2.5 电屏蔽	22
2.6 单电容器中的能量	23
2.7 储存在多导体系统中的能量	24

2.8	用电场表示能量	24
2.9	电场概念的重要性	25
三	静电学在实际过程中的应用	27
3.1	概述	27
3.2	电容器中的电流	27
3.3	电压源	29
3.4	静电屏蔽	30
3.5	地平面	31
3.6	典型的电容量	32
3.7	室内的干扰	33
四	仪器的实际屏蔽	34
4.1	放大器的屏蔽	34
4.2	信号引入屏蔽罩	36
4.3	屏蔽电流	37
4.4	屏蔽泄漏方向	38
4.5	屏蔽的连接——分段	39
4.6	电源的接入	40
4.7	电源变压器规定	40
4.8	单层屏蔽的变压器	41
4.9	线圈到屏蔽的电容	42
4.10	变压器的单层屏蔽及其连接	43
4.11	双层静电屏蔽	45
4.12	单端放大器	47
4.13	放大器屏蔽的分段	48
4.14	屏蔽罩的一条规则	49
4.15	原边屏蔽的连接	50
4.16	确定电流回路的说明	50
五	差动放大器	52
5.1	概述	52

5.2	测试仪器的基本问题	53
5.3	仪器用的差动放大器	54
5.4	共模电压	56
5.5	共模成分	57
5.6	共模抑制比(CMRR)	57
5.7	差动放大器问题的解决方法	58
5.8	磁通耦合的差动直流放大器	61
5.9	磁通耦合的输入调制技术	61
5.10	磁通耦合仪器中的后调制技术	63
5.11	磁通耦合仪器的优缺点	65
5.12	电子耦合的差动直流放大器	66
5.13	电子耦合仪器中的后置放大	67
5.14	电子耦合仪器中的前置放大	68
5.15	对电子耦合仪器返回通道的要求	70
5.16	电子耦合仪器的优缺点	70
5.17	光电耦合技术	71
六	一般应用问题	72
	几点说明	72
6.1	单端放大器的使用	72
6.2	电荷放大器	72
6.3	输入同轴电缆应用于单端放大器	73
6.4	同轴电缆与屏蔽式双芯电缆的对接	74
6.5	电阻电桥的应用	74
6.6	浮接的电阻电桥及一接地观察点	75
6.7	单端放大器和热电偶	76
6.8	差动放大器的使用	77
6.9	浮接信号源及差动放大器	78
6.10	热电偶的滥用屏蔽	80
6.11	热电偶的双层输入屏蔽	81

6.12	接地与浮接信号线的比较	82
6.13	屏蔽电流的控制(医学问题)	84
6.14	隔离变压器的应用	86
6.15	机架隔离用的隔离变压器	88
6.16	用缓冲级把单端转接到差动	90
6.17	标定问题	91
6.18	系统中星形接地的布线顺序	93
6.19	高频地回路	94
七	电阻电桥系统中的屏蔽	97
7.1	概述	97
7.2	电阻电桥及其信号设施	97
7.3	浮接电源	98
7.4	浮接电源的屏蔽	99
7.5	多芯电缆	100
7.6	差动放大器与电阻电桥	101
7.7	公共激励电源	102
7.8	屏蔽标定方法	103
7.9	放大器和桥路电源的组合	105
八	仪器中的磁过程	106
8.1	前言	106
8.2	基本概念	106
8.3	楞次定律	109
8.4	安培定律	110
8.5	同轴电流	111
8.6	磁回路面积	112
8.7	磁的单位	112
8.8	自感和互感	113
8.9	信号电路的磁场耦合	114
8.10	静电屏蔽问题	115

8.11	平行电缆走线	116
8.12	屏蔽连接中的磁通耦合	116
8.13	用电缆管道减小磁场	117
8.14	实际的变压器屏蔽	117
8.15	超级屏蔽隔离变压器	119
8.16	磁环的屏蔽	122
8.17	平衡变压器结构	123
8.18	特殊的屏蔽技术	124
8.19	变压器的互电容测量	125
8.20	互电容的有源测量	126
九	仪器中的射频过程	128
	概述	128
9.1	辐射能量	128
9.2	受控制的射频通道	129
9.3	传输线	130
9.4	仪器中的传输线	131
9.5	对射频的评论	131
9.6	波导	132
9.7	射频的屏蔽	132
9.8	集肤效应	133
9.9	接地线的电感	134
9.10	屏蔽罩	135
9.11	射频干扰的消除	135
9.12	射频共模信号	137
9.13	隔离变压器	138
9.14	长信号线	138
9.15	减小电容的激励线	140
9.16	传输线的方程式	141
9.17	信号电缆	142

9.18	电缆的幅频响应	143
9.19	电缆的屏蔽效率	143
9.20	低噪声电缆	144
十	地平面	145
10.1	概述	145
10.2	电阻率的单位	145
10.3	典型的土壤电阻率	145
10.4	用电容模拟电阻	146
10.5	接地棒	146
10.6	公用设施与雷击	147
10.7	公用措施	147
10.8	多导体接大地问题	148
10.9	地汇流条	148
10.10	中性线上的电流	149
10.11	仪器机壳的浮接	150

一、静 电 学

静电屏蔽和静电能量储存的物理现象是不可分割的。许多普通的静电效应,就是基础如电容那样的概念,也不是被忽视就是没有被理解。本章的目的就在于复习这些基本概念,以及牢记把这些概念与常见的问题联系起来的的要求。

1.1 电荷

电荷的基本单位是库仑(简称为库)。如果电荷在导体中匀速流动,每秒钟在导体横截面上流过 1 库仑的电荷,则就称为流过 1 安培的电流。由 6.28×10^{18} 个电子组成的负电荷等于 1 库。库是个大单位,实际上通常取皮库或微库作为电荷的单位。皮库是 10^{-12} 库,微库则是 10^{-6} 库。

1.2 电荷间的作用力

可以作各种试验来说明带电物体之间存在着引力或斥力。如果把一些余量的电子放到两个物体上,那就说它们带了负电,于是两物体将互相排斥;如果从两个物体上移走电子,那就说它们带了正电,此时仍将互相排斥;若用带相反电荷的两个物体做试验,则它们将互相吸引。

两个带电物体之间的静电作用力 f 与它们的电量 Q 的乘积成正比,而与它们之间的距离 r 的平方成反比。在不考虑所用的单位时,其数学表达式为

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1)$$

如果电荷符号相同,二者乘积为正,则表示为斥力。

两个带电物体之间的作用力还随它们所处的介质而变化，此作用力在真空中最大，可以把作用力减少的程度作为衡量介质的介电常数 k 的尺度。通常，这两个带电体之间作用力的正确表达式为

$$f = \frac{Q_1 Q_2}{r^2 k} \quad (2)$$

1.3 电场

带电物体之间的相互作用引出了电场的概念。电场图说明了带电体周围的电力性质。表征电场的两个量，是对试验电荷的作用力和作用方向。可以用试验电荷来测量电场强度，但所用的试验电荷必须很小，否则试验电荷的出现将影响被测电场的特性。

若把电荷 Q_1 放到一个位于真空中的小球上，电场力将全部指向小球的中心，而且试验表明此电场力与到球心距离 r 的平方成反比，并与球上的电荷 Q_1 成正比。我们可以用这两个量来定义被测量的电场强度 E ，于是，在电介质中可以得到

$$E = \frac{Q_1}{kr^2} \quad (1)$$

式中 E 的方向是沿着 r 的指向。

1.2节的式(2)中的力 f ，可以用1.3节的式(1)中的电场强度 E 来表示，代入后得

$$f = Q_2 \left(\frac{Q_1}{kr^2} \right) = Q_2 E \quad (2)$$

式1.3(2)说明电场强度 E 是直接衡量电场力 f 的尺度，其比例系数为试验电荷 Q_2 。如果设 Q_2 等于1，则 f 等于 E 。换句话说，电场强度 E 是单位电荷在电场中所受的力。 E 的矢量

方向与电场作用力的方向相同。

1.4 电压

当电荷在电场 E 中移动时,就必须对电荷做功以产生位移。例如,若在电场中对电荷的作用力是 10^{-5} 牛,电荷被移动 10^{-2} 米,则对电荷所做的功为 10^{-7} 牛·米,即 10^{-7} 焦。电场做功的大小取决于电场强度 E 和被移动的电荷 Q 。用单位电荷来测量功是非常方便的,因为对任何给定的电荷 Q 用简单的乘法便可得到所做的功。

根据定义,在静电系统中把单位电荷从一点移动到另一点时,则电场力所做的功可以用伏为单位来度量。在上述定义中,单位电荷经常会引起一个概念性的困难,即为了实地测量两点之间的电压,必须使用非常小的试验电荷,以便使被测电场的特性不致因电荷的存在而改变,这样一来相应的功也就很小,不过电场力对每个单位电荷所做的功是容易计算出来的。

在静电系统中,两点之间移动单位电荷所需的功与力学中举起重物的问题相类似。例如把1千克的重物升高10米,为产生这个变化就消耗了98焦的功。于是我们说此重物的势能增加了98焦,并且这个势能与重物升高到新位置所经过的路径无关。

在电场中可以完全模仿以上的情况,如果在两点之间移动单位电荷所做的功为10伏,则此功与做功所走的路径无关。在这个方面,电场和重力场是一样的,而具有这种特性的场称为保守力场。这样一来,提高重物势能的概念可以完整地移到静电场中。可以把电位差这个术语称为电势差,当电荷被移动到高势能点时,就说它的电势或电位升高了。

1.5 电压梯度

高山或丘陵在给定点上的斜度是衡量它们势梯度的尺度。该斜度可以用沿水平线每移动 1 米时与所增加的势能之比来度量。水平移动的方向应当与梯度上升的方向相应。

在电学中，当电荷在电场中移动时，电荷 Q 的势能将产生变化。如果电荷运动的方向与电场 E 的方向相同，则势能增加的速率最大，因此确切地说，势能变化最大的方向是在电场 E 的方向上。依此类推，就可以根据单位电荷沿电场方向移动单位距离时势能的变化，来测得电位梯度，此梯度等于电位的变化与移动距离 x 之比。其增量表达式为

$$G = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (1)$$

式中 x 是沿着 E 的方向。

ΔU 项是电位的增量 或对单位电荷 做功的增量。因为 $\Delta U = G \Delta x$ ，所以 ΔU 可用单位电荷所做功的增量来表示。如果把 G 表示成单位电荷所受的电场力，则上述关系中的所有单位都是正确的。即

$$\Delta U = \frac{\Delta \text{功}}{\text{单位电荷}} = \frac{\text{力}}{\text{单位电荷}} \cdot \Delta x = G \Delta x \quad (2)$$

因此 G 就等于单位电荷所受的电场力，这正好是 1.3 节中所给出的电场 E 的确切定义，于是我们得出电场强度 E 就是电位梯度 G 的重要结论。既然电位梯度是衡量电荷 Q 电位位垒斜度的尺度，因此更确切地说

$$E = \frac{dU}{dx} = \text{grad} U \quad (3)$$

式中 x 的方向是单位距离内的电位增加量最大值的方向。

1.6 带电的球形导体

前几节讨论了在电场 E 内移动电荷所需要的功。在讨论

这些电场时都未涉及到电荷的实际分布情况。但是由于电荷必定存在于导体表面或绝缘体内，因此更详细地了解电荷的分布就很重要了。

我们研究的最简单的系统是一个导电球。当导电球的表面充以电荷 Q 时，在它的外部就产生了电场 E ，并且 E 以球心为中心成辐射状分布，其大小由下式给出

$$E = \frac{Q}{kr^2} \quad (1)$$

于是把一个小电荷 ΔQ 从无穷远处移到这个球表面时所需的功 W ，就可以用电场力在距离上的积分求出，即

$$W = - \int_{\infty}^r \frac{Q \cdot \Delta Q}{kr^2} dr = \frac{Q \cdot \Delta Q}{kr} \quad (2)$$

为了计算无穷远处和球表面之间的电位差，就必须把功 W 与单位电荷联系起来。我们用 ΔQ 除1.6节的式(2)可以求得电位差 U_D ，即电压 U_D 为

$$U_D = \frac{W}{\Delta Q} = \frac{Q}{kr} \quad (3)$$

如果规定无穷远处的电位为零，则球面上的电位就可以由1.6节的式(3)求出。

描述导电球运载电荷的能力是很方便的，因为从式(3)已知电荷与电压成正比，而电荷与电压的比值仅取决于带电体的几何形状。通常就把这个比值称为导电球体的电容，其大小为

$$C = \frac{Q}{U_D} = Q \left(\frac{kr}{Q} \right) = kr \quad (4)$$

可以把电容 C 看作是衡量每个单位电位差载荷能力的尺度。方程式(4)简单的表明：假设两个球的电位相同，则半径为

$2r$ 的球表面上的电荷等于半径为 r 的球的两倍。

1.7 导体的电场

上面讨论的带电球体有一个从表面扩展到无穷远处的电场 E 。此系统中的势能被认是储存在无穷大的电场 E 内。这种想法在概念上非常重要，但是球形导体并不能代表仪器中常见的几何形状。

在讨论比较复杂的导体表面之前，必须对电场 E 进行更为详细的研究。我们首先考虑一下导体的内部电场 E 。导体内有许多自由电荷即自由电子，这些电子在电场力的方向上得到加速，但是由于相互碰撞的缘故，所以假定它们只是采取某一个平均速度而运动，简而言之就是在导体内流着电流。因为我们考虑的是静电过程，即只局限在全部电流或电荷运动为零的状态下，那么问题就很清楚了，对静电来说，导体的内部电场 E 必定为零，也就是说，电场 E 只能终止于导体表面而不能穿过表面，这就意味着产生电场的电荷只能存在于导体表面，这就是我们得出的唯一逻辑推论。由此可见，在给导电小球充电时，电荷必然在其表面上均匀地分布。

电场 E 必须垂直于任何导体表面，否则就会存在电场的切线分量，从而引起表面电流，由于这种现象在静电过程中是不可能出现的，所以电场必须垂直地离开或终止于导体表面。

1.8 位移电场

电荷系产生的电场 E 是因电介质材料的存在而减小的。

1.6节的式(1)给出了在介电常数为 k 的介质中导电球的电场强度 E 。为了便于描述介质中的电场，我们引入了一个新电场 D 的新概念，它只与建立电场的原始电荷有关。因为 E 场和 D 场是同时出现的。所以如果知道了 E 就可以求出 D ，反之亦然。对于式1.6(1)中导电球的电场 D 可以用下式表示