

电磁兼容性技术简介

赠阅

国防科委工程设计所

一九八一年八月

目 录

第一部分 什么是电磁兼容性技术

一、问题的提出	2
二、什么是电磁兼容性	6
三、干扰系统的组成	7
四、干扰源的种类	8
五、干扰的耦合方式	9
六、消除干扰的方法	12
七、附录1 干扰源的特性	13
八、附录2 抑制噪声查对表	13

第二部分 接地

一、接地的意义和目的	15
二、保护地线	17
三、信号地线	18

第三部分 屏蔽

一、屏蔽的目的和种类	20
二、静电屏蔽	21
三、电磁屏蔽	23
四、低频磁屏蔽	25

第四部分 其它抑制干扰技术

一、概论	26
二、隔离	27
三、平衡	28
四、滤波	28
五、系统带宽	29

主要参考资料	29
--------	----

第一部分 什么是电磁兼容性技术

一、问题的提出

电子设备的电磁干扰是一个十分重要的问题，在电子设备小型化、集成化和数字化的今天，这个问题日趋严重。它不仅使电子设备受到环境干扰不能可靠地正常工作，甚至使电子设备完全失去工作能力，影响生产，引起事故。

随着科学技术的突飞猛进，电子设备的品种越来越多，采用的电子线路越来越复杂，不仅各种类型的设备之间容易产生干扰，就是同一设备本身各功能级之间以及部件和元件之间也会产生干扰。近来由于大量使用集成电路，电子设备体积大大缩小，整机电路日益小型化和日益复杂，以及大量的元、器件安装在一个小小的空间里，因而相互之间的干扰将会显著增加。如果对于这种不断增长的干扰危险认识不足或者处理不当，就会引起设备本身串杂音指标的降低或者成为潜伏的不稳定因素，致使设备带着隐患运行，在恶劣环境干扰的时候甚至失去生存的能力。

今天技术人员设计的电子设备，不但要求设备具有完善的性能指标，而且要求具有长期、稳定、可靠工作的能力；不但要求设备在理想的实验室内能够正常工作，而且要求设备在实用环境中也能正常工作。这就是说技术人员在研制电子设备的时候，不仅使电子设备的性能指标满足用户的使用要求，而且要求电子设备不应该受到干扰的影响，同时设备本身也不应该成为一个干扰源。对于技术人员来说，研制高性能指标的电子设备与采取有效措施消除或避免设备受环境干扰是同等重要的。

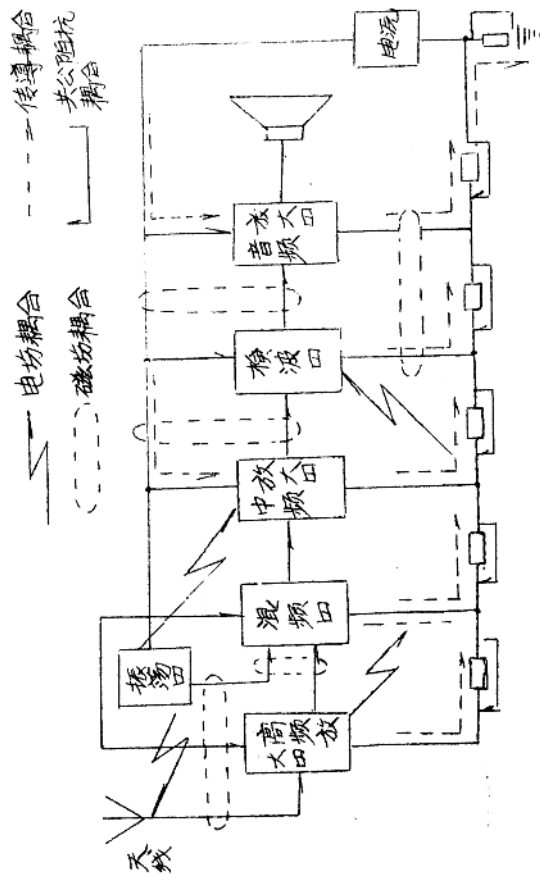


图 1-1 设备内部各电路之间的相互干扰的途径

图 1-1 表示一台收音机的方框图，用以说明在设备上产生的各种不同形式的干扰。各级之间的布线将传导干扰信号，而且某些级中将会幅射干扰信号。又因为各级的地电流都流经公共地线阻抗，所以在接地母线上会产生干扰电压。图中也表示了信号在各导线之间电场和磁场的耦合。这个例子说明了收音机在实验室工作时就要解决设备内部的电磁干扰问题。当装备好了的收音机置于实用环境时就等于放在外部干扰源中。如图 1-2 所示，这时收音机将从交流电源线上传入干扰电流，而且收音机处于各种干扰源的电磁幅射之中，在这种情况下，技术人员对于干扰是无能为力的，但是要求技术人员采取相应的措施，使设备在这种环境中也能正常工作。

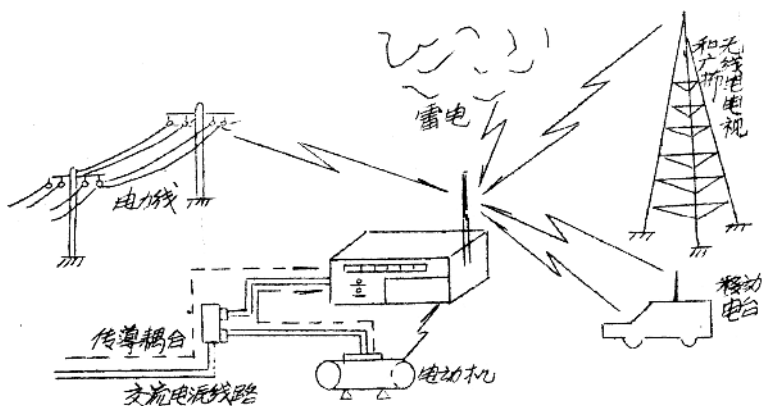


图 1-2 收音机易遭受的各种电磁干扰源

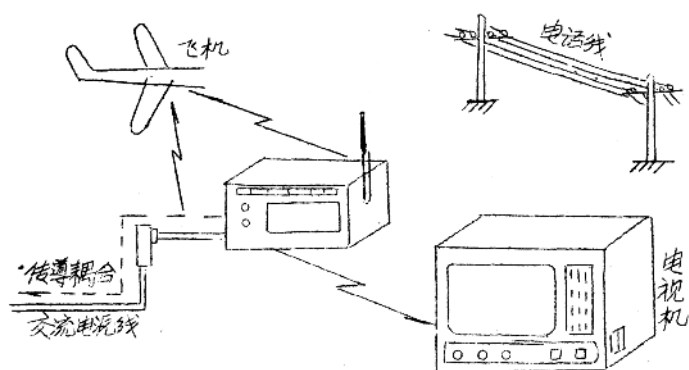


图1-3 收音机也是一个干扰源

图1-3为干扰问题的另一个方面，收音机本身也是一个干扰源，它也会干扰别的设备。如收音机的部分电路（本机振荡器、差拍振荡器等）会直接幅射干扰电磁波，或通过电源线将干扰信号传导到别的电路中去，这些干扰电流流经电源线时，电源线也将幅射干扰电磁波。所以我们对收音机提出了一个“反向幅射”要小的性能指标，以便在研制收音机时充分注意干扰电磁波信号的幅射，防止向外界扩散干扰。

从目前情况来看，一般研制单位和技术人员把研究的精力几乎全部集中于设备通路的研究以求性能的完善，对于电子设备的抗干扰问题往往重视不够。可是从设备运行的角度来看，抗干扰问题往往又是一个相当突出的问题。可以设想，一台通路性能十分良好的设备，若它的抗干扰性能很差，迁到较差的环境即失去生存能力，这种设备又有什么实用价值呢？因此电磁兼容性的问题目前已经成为发展中必须重视和必须解决的一项科研课题。从近期效果看，对它的研究可以提高电子设备的

生存力与可靠性,从长远角度来看,可以使各种发展中的电子设备更好地互相协调工作,不致出现互相抵触而造成浪费。

二、什么是电磁兼容性

所谓电磁兼容性简单地讲就是指电子设备在电磁环境中的适应能力,它包括两个方面的含义:

第一它是指电子设备内部各部分之间在电和磁的条件下互相兼容和相容的能力,其中“各部分”是指线路、元器件、导线、部件、组件构件等;

第二它是指电子设备和环境之间在电和磁的条件下互相兼容和相容的能力,其中“环境”是指邻近的电子设备、电气设备、电火花、闪电雷击、宇宙射线等。

电磁兼容性是一个新概念,它是从过去的“抗电磁干扰”这一个概念演变和发展起来的,这不只是一个名词的变化,而是概念的深化与扩大。在现代电子科学技术向高频、高速、高灵敏度、高密度、高集成度、高可靠性方向发展的过程中,电子设备的电磁兼容性问题越来越显得突出。六十年代以来,迅速发展起来的电子设备电磁兼容性的科研课题就是一项研究并解决各种不同类型的电子设备和电气设备相容兼容、互不干扰地协调工作的学科,它是电子学的一个重要分支,其研究内容包括:

1. 对于各种类型的电子设备和电气设备电磁兼容性指标的研究和制定;
2. 各种干扰源频谱和输出功率的分析及其抑制方法;
3. 干扰途径的分析及其抑制干扰方法的研究;
4. 各种干扰测试仪表的研制和测试方法的探讨;
5. 各种干扰的予研、予测等。

在广播、通信、电视、遥控遥测、自动控制、计量技术、

宇宙飞行、尖端武器研制等各个领域，电磁兼容性都是一个普遍需要引起重视的问题。最近若干年来，由于逻辑电路的高速化，抗干扰的问题更加突出起来，因为以极快的时间变化率而变化的开关速度所产生的场，能够引起邻近逻辑电路工作状态的变化。

对于通信设备来说，干扰对于信号的产生、传输和接收有严重的影响。由于通信设备的数量越来越多，发射机的功率越来越大，接收机灵敏度越来越高，以及这些设备工作的电磁波频谱越来越拥挤，所以干扰问题越来越严重。因此，电磁兼容性要求：所有的电子设备和电气设备在同一环境中工作的其它设备，既不能产生干扰也不应受到干扰的影响。

三、干扰系统的组成

任何一个干扰系统的组成，必须同时具备下列三个条件：即干扰源，对干扰敏感接收电路；干扰源到接收电路的耦合通道，如图 1-4 所示。

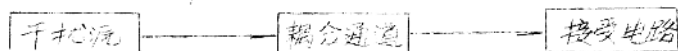
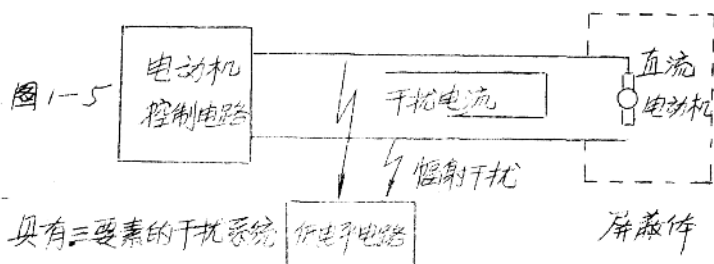


图 1-4 干扰系统的组成要素

分析干扰问题的第一步首先应该肯定干扰源是什么，接收电路是什么，“源”和“接收电路”之间是怎样耦合的。提高一个设备的抗干扰能力或排除一个电磁干扰的根本方法就在于分析、查找和确定各个干扰环节，并设法加以扼止和消除，从而提高设备的抗干扰能力。

切断干扰途径通常有下列三种方法：1、控制干扰源的影响，2、使接收电路对干扰不敏感，3、抑制耦合通道的传输。在某些情况下，要同时采用以上两个或三个办法。



例如图 1-5 所示的电路，干扰源是直流电动机，由其电刷与整流子之间的电弧形成；耦合通道是由二部分组成的，即与电动机相连接的导线以传导和导线上的幅射；接收电路是低电平电路，在这种情况下要消除干扰，对于干扰源和接收电路都很难采取措施。但可以用切断耦合通道的办法来排除干扰。即采取相应措施不让干扰经导线从屏蔽罩中传导出来，或者防止干扰以导线幅射出来，必要时可将两种措施并用：

四、干扰源的种类

干扰源按其产生的原因可以归纳为三种：

1. 固有干扰源：即物理性的无规则运动所形成的噪声，例如热噪声和散粒噪声等；
2. 人为干扰源：例如电子设备、电气设备、工业和民用设备，各种工具和机械，各种发动机的点火系统等产生的干扰；
3. 自然界干扰源：例如闪电雷击、太阳黑子、宇宙射线等。

就一个电子设备而言，人为干扰源和自然界干扰源都是设备外部的干扰源；元件的固有热噪声，设备各功能级例如振荡器、放大器、调制器等寄生输出又构成了设备内部的干扰源。

除此之外，两种金属之间的电化作用会产生噪声电压；介质由于摩擦可以带电；振动的电缆和导线在杂散磁场中会产生感应电压，所有这些情况也都能形成干扰，需要引起重视。

五、干扰的耦合方式

干扰的耦合方式主要有三种：直接传导耦合，公共阻抗耦合、幅射电磁场耦合。

1、直接传导耦合方式：通过地线、信号线、控制线、电源线、机架连接线的各种导线将干扰耦合到接收电路中去，但是这种最明显的干扰事实却经常被人们忽视。导线经过干扰环境时，即拾取干扰信号并传送到接收电路中去。解决的办法是在干扰到达接收电路之前实行去耦，即不让导线拾取干扰信号或者使导线远离干扰环境。

这种耦合的主要例子是：干扰信号经电源线传至接收电路中来。若技术人员没有对电源采取措施，或电源还要接向其它设备时，则应对电源线进行去耦，把干扰滤掉以后再接至电路。

2、经公共阻抗的耦合

这种耦合一般发生在两个电路中的电流，流经一个公共阻抗时，一个电路在该阻抗上的压降会影响到另一个电路。这个公共阻抗可以是一个电阻、一个电感、一个电容或者是它们的组合，一般来说公共

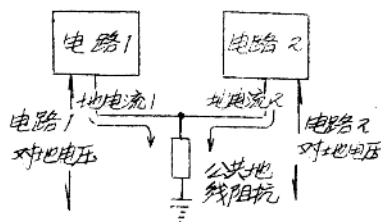


图 1-6 公共地线阻抗耦合

阻抗是频率的函数。由于经济和体积上的原因，常常需要共用

一个公共电路，共用一个接地通道，于是原来要开断成两电路通过公共阻抗而发生联系。

图 1-6 所示电路说明当两个电路有公共地线时，每个电路的地电位受到另一电路地线电流的影响。图 1-7 所示电路是公共电源耦合的另一个例子，当两个电路用同一电源时，一个电路引出的电流会影响另一个电路的电压。这里电源是一个公共阻抗，电源内阻也是一个公共阻抗。

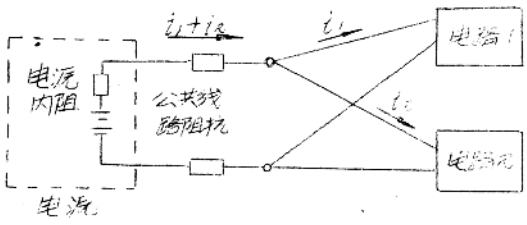


图 1-7 公共电源耦合

一个电路引出的电流会影响另一个电路的电压。这里电源是一个公共阻抗，电源内阻也是一个公共阻抗。

改进的办法是尽量减小公共电源的内阻以及公共电源线内长度和阻抗；各个电路分别单独供电。但是电源内阻造成的干扰耦合是不能被抑制掉的，只能设法降低其干扰耦合的程度。

3、电场和磁场引起的干扰耦合

幅射的电场和磁场将使干扰和接收电路构成耦合。所有的元件包括导线在内，当有电荷运动时都会幅射电磁场。除了这些无目的幅射之外，还有象广播电台和雷达发射机等有意产生的幅射电磁场，这些都是幅射干扰流。当接收电路靠近干扰流时，为近区场电容耦合，分别按电场（电容性耦合）和磁场（电感性耦合）来处理。当接收电路远离干扰流时，为远区场辐射耦合，则按电磁波场处理。近区场和远区场划分的原則是波长，分界点是在距离为 $(\lambda/2\pi)$ 的地方。改善电磁场幅射耦合的办法是：避免导线平行布置；尽量减少导线的闭合面积；最

大可能地使各部分电路隔开；限制工作的频率；屏蔽和接地也是最常用的有效方法。

需要引起注意的是干扰途径往往是混合的，干扰首先由一种途径（传导、公共阻抗或场）进行传播，经转换后，再以另一种途径浸入接收电路，这种混合形式的耦合通道实际上遇到的较多，可以说绝大多数的干扰是经由这种途径形成的，对它的分析、判断和控制较为困难。

由于高速数字通信设备的大量使用，通过反射作用引起的干扰也日趋严重。我们知道，导线在传输不同频率的信号时呈现不同的性质。从表 1-1 可以看出，当 $L/\lambda > 0.05$ 时，导线呈现分布参数的传输性质。

对于脉冲信号的数字电路来说，导线呈现传输性质的临界

$\frac{\text{导线长度 } L}{\text{信号波长 } \lambda}$ 比值	频率范围	导线性质
0	直流	电阻
0 ~ 0.0001	低频	以电阻为主
0.0001 ~ 0.05	较高效率	电容和电感
> 0.05	很高频率	分布参数的传输线

长度 L_{cr} 为：

$$L_{cr} = \frac{tr}{\pi T_p}$$
 式中：tr 为脉冲信号的上升时间 (ns)；
 T_p 为脉冲信号

表 1-1

的传输延迟 (ns/mm)。

这里 L_{cr} 的计算公式是与上表中 $\frac{L}{\lambda} > 0.05$ 是对应的，其中换算的关系式为：

$$\lambda (\text{mm}) = \frac{3 \times 10^5}{f (\text{mc})} \quad f (\text{c}) = \frac{1}{2\pi tr (\text{sec})}$$

当数字电路的脉冲上升时间 tr 快到几个毫微微秒或亚毫微微秒范围时，电平的变化速度是十分快的，对于这种高速数字电路，如果导线的长度超过临界长度 L_{cr} 后，则呈现分布参数的

表 1-2

脉冲上升时间 t_r (ns)	L_{cr} (mm)
20	1500
10	750
2	150
1	75

传输线情况，并且当导线阻抗与负载阻抗不匹配时，则在信号传输过程中出现信号反射现象，使信号发生畸变，由反射引起的传输信号的幅度变化会造成数字逻辑电

路的判决错误。所以高频和高速要注意避免反射引起的瞬态干扰，因而导线长度要严格控制，其控制的导线长度参见表 1-2。

六、消除干扰的方法

各种不同类型的电子设备对于抗电磁干扰都有其特定的要求。要满足这些要求，一方面从电路设计上进行考虑，另一方面从设备的实际结构和布局上进行考虑，两者相辅相成，共同完成整机抗干扰性能的要求。当一部装备好了的电子设备置于实用的环境中时，就等于放在外部的干扰流中，为了使设备稳定可靠地工作，充分发挥其效能，我们还要采取必要的措施控制干扰流和干扰途径，以避免或减小外界干扰的影响。消除干扰常用的方法如下：接地、屏蔽、平衡、滤波、隔离、分离和定向、控制电路阻抗、改进电缆设计等。一般来说，电磁干扰是难以消除的，即使上述这些方法都是可行的，也只能把干扰限制到不致影响电子设备正常工作的程度。除了特殊的情况外，用一种简单的方法来解决干扰问题往往难以奏效，所以最好用几种不同的方法组合起来加以试验解决。设备研制人员和设备使用人员在工作中应当灵活运用抑制电磁干扰的各种措施。

七、附录1：干扰源的特性

常见干扰源	干扰源举例	频谱	效应
瞬态开关	接触开关、继电器、逻辑电路	宽带可能高达几~几十兆赫	在附近的设备中产生脉冲干扰
换相装置	马达、信号装置投流口、振动口、电铃蜂鸣口	" "	感应出脉冲
气体火花放电	荧光灯、霓虹灯、气体整流口、火花开关	宽带一般50~100兆赫	" "
电晕放电	在几KV以下不严重，大约5~10KV高压时才产生	宽带的感应脉冲	干扰脉冲可以使逻辑电路出现错误动作
接觸电位	不同金属接触不良时或脱落时	直流电压	信号工作点偏移
正弦波信号源	大功率振荡口、放大器中的寄生振荡	振荡频率和谐波	感应正弦干扰
非正弦信号源	逻辑门脉冲电路多谐振荡口	不一定	感应干扰
电磁脉冲	核爆炸	KHz~MHz	电子设备失常
闪电雷击	闪电雷击中的设备	100KHz以下，宽带高频	引起破坏性的干扰，由大电流电压击穿设备而破坏

八、附录二：抑制噪声查对表

下列查对表以简略形式列出较常用的抑制噪声的方法，在这些项目中带“*”号的不用增加成本就可采用，其余的方法可根据需要采用。

1、抑制噪声源

- <1>、用屏蔽罩罩住噪声源
- <2>、通过噪声环境的全部导线要经滤波
- <3>、限制脉冲上升时间
- <4>、继电器线圈应具有浪涌阻尼的性能
- <5>、把有噪声的导线绞合在一起*
- <6>、屏蔽并绞合有噪声的导线
- <7>、屏蔽体在两端接地以抑制幅射干扰(屏蔽体无需绝缘)。*

2. 消除噪声耦合

- <1>、绞合低电平信号导线*
- <2>、低电平导线要接近机架(特别是高阻抗电路)
- <3>、绞合并屏蔽信号导线(高频可用同轴电缆)
- <4>、用以防护低电平信号的屏蔽电缆在一端接地(用于高频的同轴电缆其屏蔽两端接地)*
- <5>、信号导线的屏蔽要绝缘
- <6>、当低电平信号和带有噪声的线在同一杆接件上时,要把它们分开,并在它们中间设置地线*
- <7>、在分立的杆接件上要对通过接线柱的信号线加以屏蔽

屏蔽

- <8>、高电平和低电平设备之间应避免采用公共地线*
- <9>、金属件地线和电路地线要分开
- <10>、地线应尽可能地短*
- <11>、对于金属表面的防护应采用导电性涂料,不用非导电性涂料

- <12>、有噪声和无噪声的导线要分开*
- <13>、电路只有一处接地(高频电路除外)*
- <14>、避免可能的或偶然的接地。

<15> 应用灵敏设备时，要按信号源和负载在工作时对地平

衡

<16> 灵敏的设备要放在屏蔽罩内

<17> 进入屏蔽体内连接灵敏设备的导线要滤波或去耦

<18> 灵敏设备引线的长度应尽可能地短*

<19> 露出电缆屏蔽的导线的长度要尽可能地短*

<20> 用低阻抗配电线

<21> 避免地环路*

<22> 应考虑应用以下四件断开地环路

1> 隔离变压器

2> 平衡变压器

3> 光耦合器

4> 差分放大器

5> 带屏蔽罩的放大器

6> 平衡电路

3. 在接收电路中抑制噪声

<1> 仅用必需的带宽

<2> 适当的选用选频滤波器

<3> 适当的电流去耦

<4> 用小的高频电容 π 旁路电解电容 π

<5> 分开信号地线、有噪声的地线和金属件地线*

<6> 使用屏蔽罩

<7> 用叠状电容时，把连接外层金属箔的一端接地*

第二部分 接地

一、接地的意义和目的

在电子设备中，接地是抑制噪声和防止干扰的主要方法之

一。在产品设计中，如能把接地和屏蔽正确地结合起来使用，就能解决大部分的干扰问题，因此在产品设计中对接地方式必须加以充分注意。从表面上看，接地问题似乎很简单，无须付出更多的精力，但从长远来看，设备投入运用以后，如不产生干扰，这将对使用和维修带来许多方便，从而节省了人力、物力和时间。

所谓接地就是将设备的一个点和大地之间或者和大地可以看成是公共点的某种构件之间用低电阻导体连接起来。设备接地有三个基本目的：1、为了安全，将某种设备接地可以防止在该设备上由于电荷积累、电压上升而引起火花放电造成人员和设备不安全。2、防止干扰，将设备机壳或导线屏蔽层等接地给干扰信号形成低电阻通路，以防止干扰信号对电子设备的干扰。3、构成回路，以地线完成其回路的电子设备是很多的，例如信号流、放大器、振荡器、调制器、滤波器等功能级的一端都是直接接地而完成其信号回路的。

从一般的电路图上可以看出，一台电子设备里都有一根公共线，这就是地线。从这个意义上讲，接地的概念可以理解为一个等电位点或等电位面，它是电路或系统的基准电位，但不一定是大地电位。如果该接地线经过一个低电阻导体接至大地时，则该点电位就是大地电位。保护地线必须接在大地电位上；而信号地线根据使用要求可以是大地电位，也可以不是大地电位。

由于一个电子设备直接与地线联接的电路很多，这些电路电流都要流经一个公共的地线阻抗，又由于电磁场和地电位差的影响，容易形成地环路，再加上设备暴露在空间或通过各种联线与外界发生联系，因此地线上必然存在着各种成份的干扰电流。如何使设备地线既能起到各局部电路相互联接的作用又不致通过它成为传递干扰信号的通道，这就是设备接地所要解决的一个主要矛盾。由于电子设备的工作频率、工作电平、工