

# 电子设备的防干扰设计

天津科学技术出版社

602743

602743

EN97/11

# 电子设备的防干扰设计

雷振烈 编



C0162614

天津科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书比较系统地分析了电子设备中产生干扰的原因、干扰波耦合途径以及抑制干扰的措施、原理及方法。

全书分9章，内容包括：干扰的产生；干扰波的耦合；电磁屏蔽原理；电磁屏蔽效能计算；屏蔽结构设计；导线间的耦合与屏蔽；接地；噪声干扰抑制电路；电路元件的选择和应用。

本书可供从事电子技术工作的人员和有关专业师生参考。

## 电子设备的防干扰设计

雷振烈 编

责任编辑：王定一

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

开本 787×1092毫米 1/32 印张 8 字数 169,000

一九八五年 六月第一版

一九八五年 六月第一次印刷

印数：1 - 8,200

书号：15212·137 定价：1.50元

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
<b>第 1 章 干扰的产生 .....</b>	<b>( 1 )</b>
1.1 干扰的分类及特征.....	( 4 )
1.2 自然干扰源.....	( 5 )
1.3 电气设备干扰源.....	( 6 )
<b>第 2 章 干扰波的耦合 .....</b>	<b>( 18 )</b>
2.1 耦合及其一般形式.....	( 18 )
2.2 直接 (传导) 耦合.....	( 19 )
2.3 共阻抗耦合.....	( 19 )
2.4 电场 (电容性) 耦合.....	( 23 )
2.5 磁场 (互感) 耦合.....	( 27 )
2.6 辐射电磁场感应.....	( 34 )
小结 .....	( 38 )
<b>第 3 章 电磁屏蔽原理 .....</b>	<b>( 40 )</b>
3.1 电磁场的传播.....	( 40 )
3.2 电场屏蔽.....	( 48 )
3.3 磁场屏蔽.....	( 51 )
3.4 电磁屏蔽.....	( 58 )
小结 .....	( 58 )
<b>第 4 章 电磁屏蔽效能计算 .....</b>	<b>( 60 )</b>
4.1 电磁屏蔽效能的表示.....	( 60 )

4·2	屏蔽系数的计算	( 61 )
4·3	无缝金属板的电磁屏蔽效能计算	( 63 )
4·4	有缝隙 ( 孔隙 ) 金属板的电磁屏蔽效能计算	( 87 )
4·5	截止波导管的屏蔽效能计算	( 92 )
4·6	孔阵的电磁屏蔽效能计算	( 95 )
4·7	低频磁场屏蔽效能计算	( 96 )
4·8	磁性材料屏蔽体的电磁屏蔽性能	( 99 )
	小结	(104)
<b>第 5 章</b>	<b>屏蔽结构设计</b>	(107)
5·1	屏蔽的结构形式与安装	(107)
5·2	设备的屏蔽	(115)
<b>第 6 章</b>	<b>导线间的耦合与屏蔽</b>	(118)
6·1	导线间的电容性耦合	(118)
6·2	电容性耦合的屏蔽	(121)
6·3	电感性耦合	(124)
6·4	屏蔽体与导线间的磁耦合	(126)
6·5	干扰源的磁屏蔽	(128)
6·6	被干扰电路的磁屏蔽	(131)
6·7	磁屏蔽实验数据	(133)
	小结	(136)
<b>第 7 章</b>	<b>接地</b>	(138)
7·1	概述	(138)
7·2	安全地线	(139)
7·3	信号地线的接地方式	(140)
7·4	电路一点接地基准	(144)

7.5	放大器屏蔽的接地	(118)
7.6	电缆屏蔽层的接地	(149)
7.7	地环路干扰的抑制措施	(152)
7.8	电路系统的实用低频接地组合	(161)
7.9	金属件地线	(163)
	小结	(165)
<b>第 8 章</b>	<b>噪声干扰抑制电路</b>	<b>(167)</b>
8.1	平衡电路	(167)
8.2	去耦滤波器	(173)
8.3	电源去耦	(179)
8.4	放大器去耦	(181)
8.5	高频滤波	(183)
8.6	电子设备中各种电路产生干扰的抑制方法	(184)
8.7	感性负载的瞬态抑制及其接点的保护网络	(187)
	小结	(196)
<b>第 9 章</b>	<b>电路元件的选择和应用</b>	<b>(198)</b>
9.1	电感器	(198)
9.2	铁氧体磁珠	(214)
9.3	变压器	(219)
9.4	电阻器	(229)
9.5	电容器	(239)
	小结	(247)
<b>参考资料</b>		<b>(249)</b>

## 绪 论

电子设备或通讯设备是以传输信息进行工作的。通过电路所传输的信息以电压或电流进行模拟。但是，电子设备或通讯设备的电路在传递有用信息的同时，往往要伴随产生一些并不代表有用信息且对有用信息的传输产生有害影响的信息（电压或电流）。这就形成了电子设备或通讯设备中的干扰（或称噪声）。

干扰（或噪声）是电子设备或通讯设备工作中出现的主要问题之一。它影响电子设备或通讯设备工作性能的良好、可靠和稳定程度。当干扰电平达到或超过有用信号电平时，电子设备或通讯设备就根本不能正常工作。因此，每个设备的干扰电平都需要消除或抑制到标准规定的电平。

抑制干扰或噪声是电子设备或通讯设备在设计、制造时需要解决的主要问题。要使一个电子设备或通讯设备有抑制干扰或噪声的良好性能，就需要在电路设计、结构设计以及元件选择、制造、装配工艺等方面采取抗干扰措施。新产品从设计开始时就应进行抗干扰设计，采取抗干扰措施。如果等到设备制成之后，才去解决干扰问题，就比较麻烦了。即使通过改装电路结构、装配工艺等措施使出现的干扰问题得以解决，也往往使设备趋于复杂化，而且不可避免地造成时间、人力和物力的浪费。

电子产品抑制干扰措施的有效性和成本随着产品进展阶

段而不同。如图0·1所示，随着设计、试制、投产阶段的进展，技术难度和造价都将不断增加。

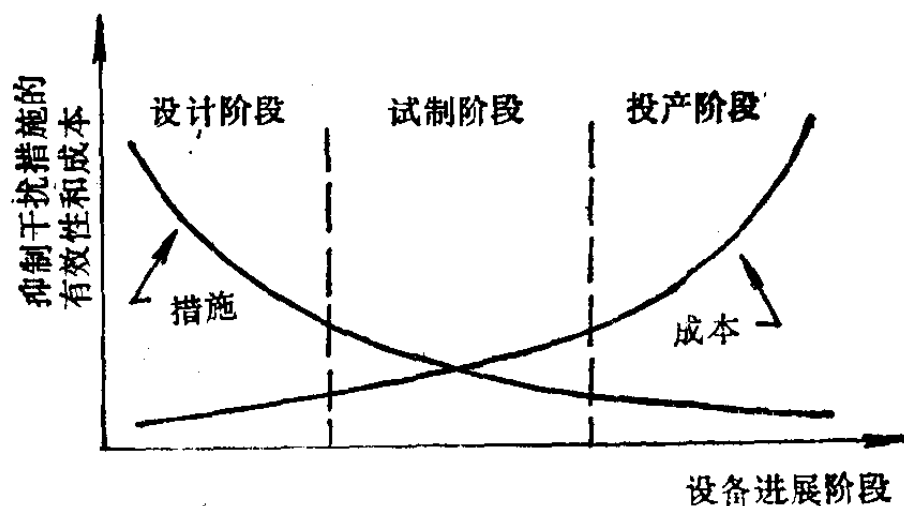


图 0·1 电子产品抑制干扰措施的有效性和成本与产品进展阶段的关系

经验证明，如果在设计开始时，就把抑制干扰问题在设备的每一级中或分系统中加以考虑并解决，则在设备试验之前，就可把可能出现的干扰消除80~90%。而且在这个阶段消除干扰的措施也是比较简单易行的。

必须注意到，一个电子设备可能受干扰，也可能产生干扰而干扰其它电子设备。在同一个电子设备中的各部分电路之间也存在着这样的问题，即一个电路可能受其它电路的干扰，也可能干扰周围其它电路。

电磁干扰是电子设备或通讯设备中的最主要的干扰形式。电磁兼容性就是指电子设备在电磁场环境中的适应能力。电磁兼容设计的要求，就是使所设计的电子设备与在同一环境中工作的其它电子设备，既不产生也不受到电磁干扰的影响。所以电子设备的抗干扰设计也就是电磁兼容设计。电磁兼容设计问题在国外已日益为从事电子设备设计及制造



的人员所重视，成为重要的研究课题。

干扰（或噪声）形成的三个要素是：干扰（或噪声）源；耦合通道；受感器（接收器或被干扰电路），如图 0.2 所示。

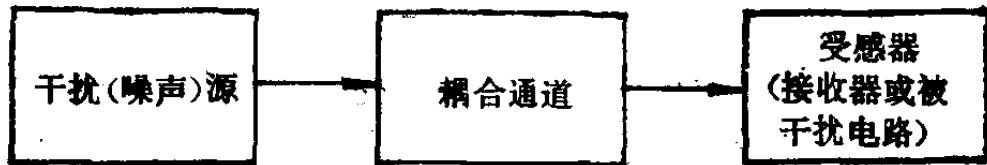


图 0.2 干扰形成的要素

分析干扰问题，必须明确干扰源是什么，被干扰电路是什么，以及干扰源和被干扰电路之间是怎样耦合的。

抑制干扰的方法有：

- (1) 抑制干扰源。
- (2) 提高受感器（被干扰电路）的抗干扰能力。
- (3) 抑制传输干扰的耦合通道。

在某些情况下，需要同时采用以上的两种或三种方法。

通常把抑制干扰源的措施称为积极防干扰措施，而把抑制耦合通道或受感器（被干扰电路）的措施称为消极防干扰措施。

# 第1章 干扰的产生

干扰来源于干扰源。为了抑制干扰，一般说来，在干扰源方面采取措施是比较方便的。当干扰很严重时，不仅要对所设计的电子设备进行检查，同时也要对干扰源进行检查。因此在解决电子设备的防干扰问题时，首先应对干扰源进行分析。

## 1.1 干扰的分类及特征

按照干扰场的性质，干扰可分为：电场干扰，磁场干扰及电磁场干扰。

按照干扰信号的波形特征，干扰可分为：正弦的、波动的（例如电路及元、器件所产生的固有噪声）、脉冲及间歇型（或称准脉冲）等。

按照抑制干扰的可能性，干扰可分为自然干扰及人工干扰。自然干扰只能采取消极的防干扰措施，即只能采取抑制受感器（被干扰电路）的措施来抑制干扰。人工干扰是指各种电气设备所产生的干扰，包括电子设备本身内部产生的干扰以及其它的外部电气设备所产生的干扰。抑制人工干扰可以采取积极的和消极的防干扰措施，即抑制干扰源和抑制受感器（被干扰电路）。

按照干扰源的作用性质，干扰可分为：放电干扰（包括

自然放电及放电设备等)；由电气开关的通断产生的干扰；由大功率输电线产生的工频干扰；无线电设备辐射电磁波的干扰；交流电源的低频耦合干扰(交流声)；设备内相邻电路及元部件间的寄生耦合干扰；电路及元、器件的固有噪声。

## 1.2 自然干扰源

属于自然发生的干扰有：宇宙干扰(由地球以外的能源，其中包括太阳能产生的无线电辐射)；地球大气的放电干扰；地球大气热辐射产生的干扰(水蒸气及分子氧等)；大气中的水蒸气、雪、砂、烟尘等作用在电子设备及电路上引起静电放电产生的干扰。

除上述有源干扰外，自然干扰中还有妨碍无线电波的正常传播的无源干扰，例如无线电波在大气电离层表面反射条件的变化、电离层中的非线性现象、无线电回波等。

宇宙干扰的频率在几十兆到一、二百兆的范围，其干扰电平一般为1/10微伏左右。这一干扰电平并不是常数，通常宇宙干扰电平在早晨最大，而在傍晚时最小。

太阳“骚动”时的无线电辐射量超过太阳“平静”时的许多倍。

大气层中因自然现象引起的火花放电所产生的干扰噪声，以雷电最为典型。它可以在低频(几千赫左右)至甚高频或更高频率范围内造成干扰，而且还可以传播很远的距离，有时甚至会损坏设备，因此应予以极大注意。

地球赤道附近的热带地区是强大雷雨活动的主要策源

地。局部地区的雷雨也会产生大气干扰。地球上每秒钟内发生的雷电有100次左右,这些雷电放电在时间上是互相重叠的,听起来是连续的沙沙声。遥远的雷电产生的干扰在初次接近时可认为是波动的。邻近的雷电的干扰则是典型的脉冲类型。在大多数情况下大气干扰属于准脉冲型。

大气干扰随着接收地点和季节的不同,其干扰噪声强度和干扰频率也是不同的。大气干扰的频率一般在几十兆赫以内,其干扰电平通常在百分之一至一百微伏的数量级,并且干扰电平随着频率的增加大致按直线规律下降。这种噪声干扰对通过热带区的短波通信的干扰尤为严重。在长、中、短波范围内,大气干扰的发生还可能由于带电荷的雪、砂、水滴等碰击电子设备的电路或天线,造成电荷转移或静电放电。由于这些电荷或静电放电引起随机电流,增加了电噪声。

### 1.3 电气设备干扰源

电气设备干扰源包括电子设备内部以及外部电气设备所产生的干扰源。它是电子设备产生干扰的主要来源。这种干扰是可以采取抑制干扰源的措施(积极防干扰措施)来防止干扰的。电气设备干扰源是需要着重分析研究并采取措施加以抑制的干扰源。

#### 一、电气设备干扰源的主要类型

电气设备中的主要干扰源按其产生的性质可分为下列几种:

(1) 放电干扰 包括:电晕放电(如高压输电线、发

射机高压电路)；气体放电或辉光放电(如荧光灯、放电器、霓虹灯、闸流管)；金属雾放电或弧光放电(如电焊机、电弧放电探照灯)；火花放电(如内燃机、电火花加工设备)。

(2) 由电路断开或接通产生的电压或电流的急变(脉冲)而造成的干扰。造成这种干扰的设备包括：有触点设备(如继电器、开关、各种断电式设备)；直流与交流整流子电机。

(3) 由于电路中电压与电流脉冲振荡造成的干扰。产生这种干扰的设备根据电路作用原理分为：脉冲振荡器(间歇振荡器、扫描发生器)、脉冲调制器、脉冲放大器、多谐振荡器、触发器、脉冲计数器、脉冲变频器；脉冲整形器。

(4) 由于磁性元件的磁饱和使电压和电流的正弦波形失真而造成的干扰。这类器件有：磁放大器、磁性逻辑元件、电流互感器。

(5) 在整流过程中由于电压与电流正弦波形的变化而造成的干扰，例如整流器。

(6) 由于高频或低频振荡带有很大谐波分量而造成的干扰。例如振荡器；倍频器与分频器；变频与混频器；功率放大器。

(7) 由于各种缺陷而造成的干扰。例如：由于触点和带滑环线路的接触不良以及接触点不清洁、不完全贴紧、扭曲等引起电压与电流的急变或脉冲；由于高压导体和零件有毛刺和尖端、不清洁以及绝缘子裂缝引起的电晕放电；由于电气设备绝缘的击穿或急剧变化而造成的寄生电流和电压；由于电机、变压器结构上的缺点以及偏离所用磁性材料磁化曲线的

直线部分而造成电压与电流曲线的失真；由于放大级的过载或工作在电子管或半导体器件工作特性的非线性部分而造成电压与电流曲线的失真。

## 二、放电干扰

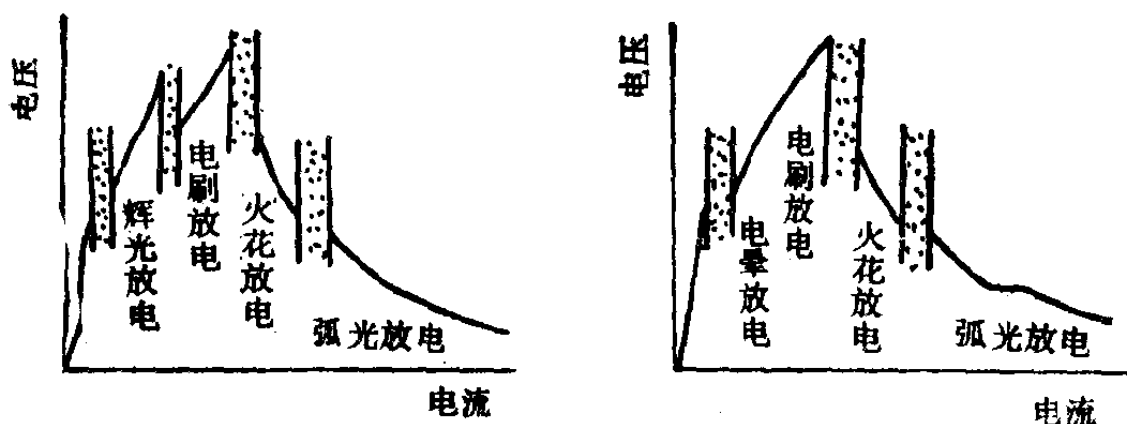
干扰各种电子设备和通信设备的噪声，其产生原因多属于放电现象。各种放电现象都要产生高频辐射，在配线上引起电压及电流的冲击。这种高频辐射和电压电流的冲击就形成对其它电路的干扰。

### 1. 放电现象

在放电现象中属于持续放电的有：电晕放电、辉光放电和弧光放电；属于过渡现象的有火花放电。

在一个大气压的空气中，给曲率半径比较小的两个电极间加上电压。当慢慢地升高电压时，最初几乎无电流通过，但是当电极的尖端产生局部破坏时，电流就急剧增加，形成电晕放电，最后经过火花放电过渡到弧光放电。放电情况随两电极中曲率半径小的电极的正负极性而有所不同，如图1·1所示。

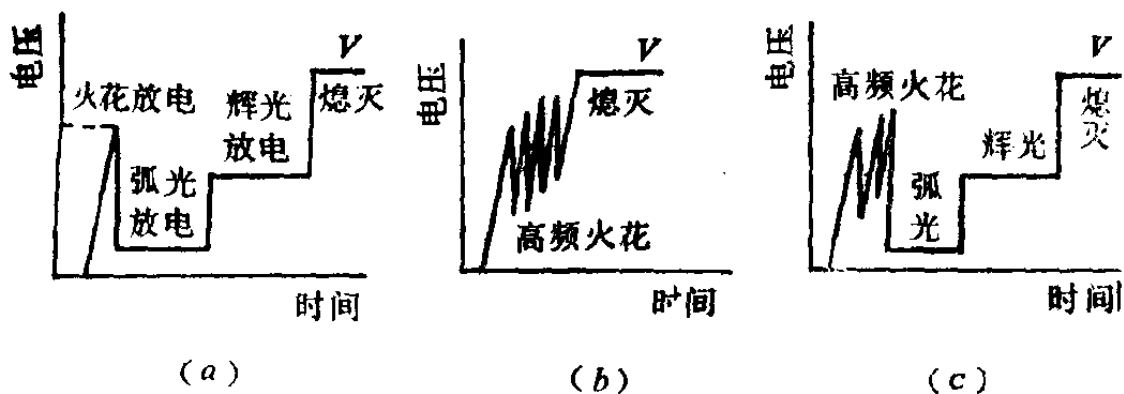
触点断开时，若触点间的电压在最小点火电压 ( $V_0 = 300 \sim 350$ 伏) 以上，就会产生火花放电。当电路具有产生弧光放电、辉光放电的条件时，其变化如图1·2(a)所示，放电逐步过渡到熄灭。当不具备此条件时（如图1·2b所示），就产生高频明暗交替的火花放电（高频火花放电），从而成为噪声干扰的原因。此噪声的频率取决于电路常数以及火花路径的离子扩散速度。如果处于产生弧光放电的临界状态（如图1·2c所示），则在经过高频火花状态后产生弧光放电或辉光放电。



(a) 正放电

(b) 负放电

图 1.1 一个大气压空气中的放电特性



(a)

(b)

(c)

图 1.2 触点断开时的电压

## 2. 电晕放电

电晕放电具有间歇性质，并产生脉冲电流，从而成为产生各种噪声干扰的原因。随着电晕放电过程产生的高频振荡也是一种干扰。电晕噪声的危害主要来自高压输电线。在输电线的垂直方向，电晕噪声的衰减特性大致与频率的平方成反比。在15kHz~400MHz的频率范围内，电晕噪声电平的衰减特性与频率成反比：当频率低于1MHz时，其降低是很微弱的；当频率高于1MHz时，其下降急剧（在1~10MHz，其下降约为20dB）。所以电晕放电噪声主要是对

低频、电力载波电话、调幅广播等产生影响，而对电视和调频广播的影响则不大。

### 3. 辉光放电

辉光放电即气体放电。当两个接点之间的气体被电离时，由于离子碰撞而产生辉光放电。辉光放电所需要的电压与接点周围的气体种类、接点之间的距离以及气体压力有关。如果气体是空气且在常温常压条件下，当接点距离为 $0.0076\text{mm}$ ，加上 $320\text{V}$ 电压时即可发生辉光放电（如图1·3中的虚线位置）。当接点间隙加大或减小时，辉光放电所需要的电压都要相应加大。引起辉光放电的接点间距离与所需电压 $V_B$ 的关系如图1·3所示。由图可以看出，击穿后为了维持气体的电离，需要一个较小的电压（ $V_G$ ），在空气中 $V_G$ 约为 $300\text{V}$ 。这个维持电压与接点间隙的大小无关，并且近似于一个常数。此外还需要一个最小的电流来维持其辉光，其值约为几个毫安。

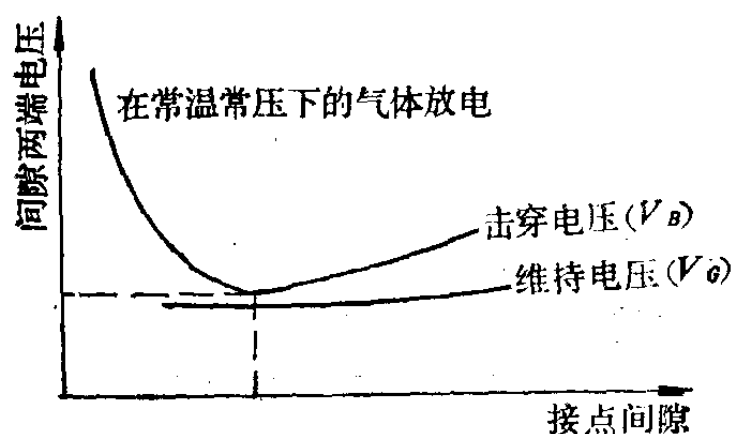


图 1·3 辉光放电电压与距离的关系

为了避免发生辉光放电，两接点之间的电压必须保持在 $300\text{V}$ 以下。如能做到这一点，那么接点损坏的因素就只有飞弧放电一项了。



荧光灯、霓虹灯、闸流管等属于辉光放电设备，因此成为一种噪声干扰源。因为通常放电管的电压电流关系是负特性的，所以与外接电路连接时就容易引起振荡。荧光灯的干扰电平为几十到几千微伏，甚至达几十毫伏，其干扰频带一般在超高频。

#### 4. 弧光放电

弧光放电即金属雾放电。弧光放电的产生无论在接点距离上和所需电压上都比辉光放电的要求低得多。弧光放电可以在真空中进行。弧光放电是由电子发射感应场引起的，其电位梯度为 $0.5\mu\text{V}/\text{cm}$ 。

当通有电流但未加任何保护的接点间隙很小时，其电位梯度往往超过产生飞弧所需要的数值。弧光放电时，在电场最强的阴极的一个小面上产生电子放射。

利用显微镜可以观察到，所有接点表面都是很粗糙的，如图1·4所示。在阴极上，凡是最高和最尖的地方都具有最大的电位梯度，这些地方也是由于场放射作用而产生电子的发源地。电子流由阴极以扇形射出，跨过接点间隙，最后冲击到阳极。这时局部电流具有最大的密度，使接点材料加热（由于 $I^2R$ 的功耗）到绝对温度几千度，这样高的温度完全可使接点气化。究竟是阳极还是阴极先被气化，与向接点提供热能和移去热能的速度有关。此外，接点的外形尺寸、金属种类及接点间隙等不同，气化的先后也不同。

从被熔化了了的金属表面可以观察到由场放射（电子流）到金属被气化形成飞弧的过程情况。这个过渡所存在的时间是很短的，一般在毫微秒以下。一旦有了这种被熔化的金属以后，在两个接点之间就形成了导电“桥”。所以即使电位