

诸邦田 编著

# 电子线路抗干扰 技术手册



北京科学技术出版社

# 电子线路抗干扰技术手册

诸邦田 编著

北京科学技术出版社

## 内 容 提 要

本手册系统地介绍了电子线路的抗干扰技术。书中以大量实例分析为基础，围绕着电子线路抗干扰的三个要素，讨论了干扰产生、传播及接收的机理，详细地叙述了各类电子线路抑制干扰的措施。

本手册共分七章。第一章介绍抗干扰的基础知识；第二章至第五章分别介绍电源电路、数字电路、模拟电路和高频电路的抗干扰措施；第六章介绍噪声测量及其各种规程；第七章介绍干扰的模拟试验。

本书内容丰富，对提高各类电子线路的抗干扰性能有较高的实用价值。本手册可供设计、制造或使用、维护各种电子设备的人员参考，也可供大专院校有关专业的师生阅读。

### 电子线路抗干扰技术手册

诸邦田 编著

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京顺义小店印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 20.75印张 501千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数1—4,200册

ISBN7-5304-0191-2/T·28

定价：6.20元

# 前 言

电子线路的抗干扰技术是目前国外所称的EMC的一个主要组成部分。EMC是Electro-Magnetic Compatibility的缩写，可译成电磁环境兼容性。现在世界各国对EMC技术十分重视，特别是将电子线路的抗干扰作为一个重要课题进行研究，并且还成立了国际性机构，以便交流各国研究成果和制订统一的技术规范和标准。对于EMC，国外文献曾给了通俗的说明：“这种技术的目的是在于，使一个电气装置或系统既不受周围电磁环境的影响，又不给环境以这种影响。它不会因电磁环境导致性能变差或产生误动作，而完全可以按原设计的能力可靠地工作。”可见，EMC技术对于电气装置或系统，特别是对电子线路构成的装置或系统的可靠性等有着十分密切的关系。为了推广应用这方面的知识，介绍国内外在电子线路抗干扰问题上的先进技术和作者在这方面的一些经验体会，因而编写了本手册，希望本书对电子技术工作者有所帮助。

本书通过对大量线路实例的分析，提出了电子线路抗干扰的三个要素，即应该从噪声的产生、传播及接收这三个方面来抑制干扰。由于电子线路的抗干扰技术在很多方面仍然是利用线路设计原理来达到抗干扰的目的，因此，在讨论抑制电子线路所接收的噪声问题时，结合了各类电路的原理和特点，较系统地叙述了电源电路、数字电路、模拟电路和高频电路的抗干扰典型措施。最后，还介绍了噪声测量及其各种规程，并向读者推荐了几种模拟干扰的试验方法。

电子线路的抗干扰技术在某种意义上也可以说是一种实验技术，一种工艺技术。从事电子技术的人都有这样的体会，有一个好的线路并不一定能组装出达到预期效果的装置，常常要在排除干扰的调试上花费大量的时间和精力。这是由于理论(理想条件)与实际有一定距离的缘故，而抗干扰技术实质上是解决这个问题的一种工艺措施。为此，本书在介绍各类电子线路的抗干扰措施时，着重推荐了一些典型的装配、调试工艺技术，并尽可能地举实际例子加以说明。这对于从事电子技术的人员是很重要的，特别是有利于缺乏实际经验的读者了解和掌握这项技术。

本书在编写和审校过程中得到了北京大学王洪涛、单豪侠等同志的指导和帮助，在此表示衷心感谢。

作 者 1987.2

# 目 录

<b>第一章 电子线路抗干扰技术基础</b> .....	( 1 )
<b>第一节 噪声的定义和种类</b> .....	( 1 )
一、噪声的定义.....	( 1 )
二、噪声的种类.....	( 1 )
<b>第二节 抗干扰的三要素和抗干扰的积极措施</b> .....	( 6 )
一、抗干扰的三要素.....	( 6 )
二、在噪声源处抑制噪声最为有效.....	( 6 )
<b>第三节 在噪声传播途径中抑制噪声的措施</b> .....	( 16 )
一、导线传导耦合噪声的抑制方法.....	( 16 )
二、公共阻抗耦合噪声的抑制方法.....	( 19 )
三、电容性耦合噪声及其抑制方法.....	( 24 )
四、电感性耦合噪声及其抑制方法.....	( 29 )
五、电磁场耦合噪声及其抑制方法.....	( 36 )
<b>第二章 电源电路的抗干扰措施</b> .....	( 39 )
<b>第一节 电源变压器的抗干扰措施</b> .....	( 39 )
一、变压器的初次级屏蔽及其更加完善的措施.....	( 39 )
二、改变变压器的绕制方法以降低共模噪声.....	( 41 )
三、防雷变压器的抗干扰效果.....	( 43 )
四、减少电源变压器泄漏磁通的措施.....	( 46 )
五、噪声隔离变压器的效果.....	( 49 )
<b>第二节 电源滤波器</b> .....	( 50 )
一、电源滤波器的构造及抗干扰特性.....	( 50 )
二、电源滤波器的实际效果及其频率特性.....	( 53 )
三、电源滤波器的装配布线与抗干扰效果的关系.....	( 57 )
四、有源滤波器.....	( 60 )
五、铁氧体磁珠滤波器.....	( 60 )
六、浪涌吸收器.....	( 62 )
<b>第三节 串联调整型稳压电源抗干扰措施</b> .....	( 63 )
一、抑制穿过稳压电源的电网噪声.....	( 63 )
二、抑制稳压电源本身产生的噪声.....	( 65 )
<b>第四节 开关式稳压电源抗干扰措施</b> .....	( 68 )
一、开关电源产生的噪声.....	( 68 )
二、整流二极管产生的噪声和缓冲器的效果.....	( 70 )

三、开关电源自激振荡的抑制	( 75 )
四、装配工艺的改进可以有效地抑制开关电源噪声	( 76 )
<b>第五节 可控硅电源的噪声抑制方法</b>	( 85 )
一、电源功率控制电路的抑制噪声措施	( 85 )
二、用零电压开关的方法抑制可控硅噪声	( 86 )
<b>第六节 对电网电压瞬时变动的措施</b>	( 88 )
一、电网电压瞬时变动的原因及其对线路的影响	( 88 )
二、对于电网电压瞬时变动的对应措施	( 89 )
<b>第三章 数字电路的抗干扰措施</b>	( 93 )
<b>第一节 数字集成电路的抗干扰性能及抗干扰措施</b>	( 93 )
一、数字集成电路的噪声容限	( 93 )
二、数字集成电路的噪声能量容限	( 96 )
三、集成电路的扇出及其不用端子的处理	( 99 )
四、数字集成电路输出波形中的振荡及其抑制方法	( 101 )
五、信号输入回路上的各种抗干扰措施	( 105 )
六、使用同步型逻辑电路可提高抗干扰能力	( 114 )
<b>第二节 单稳态电路和双稳态电路的抗干扰措施</b>	( 117 )
一、提高单稳态电路抗干扰性能的若干方法	( 118 )
二、提高双稳态电路抗干扰性能的若干方法	( 122 )
<b>第三节 电压-数字转换技术中的抗干扰措施</b>	( 123 )
一、串模噪声的抑制	( 124 )
二、共模噪声的抑制	( 125 )
<b>第四节 微型计算机和微处理机电路的各种抗干扰措施</b>	( 128 )
一、增加总线的抗干扰能力	( 128 )
二、系统受干扰后软件处理的几种方法	( 131 )
三、系统中各部分的安排及相互连接的注意点	( 135 )
四、系统的防辐射措施	( 140 )
五、注意抑制存储器部分产生的噪声	( 142 )
六、抑制电源的瞬时变动对系统的干扰	( 143 )
<b>第五节 改进印刷线路设计与制作, 增强抗干扰能力</b>	( 146 )
一、抑制印刷线条电感成分所造成的噪声电压	( 147 )
二、抑制印刷线条之间的串音干扰	( 155 )
三、抑制印刷线条终端的反射干扰	( 161 )
<b>第六节 数字信号传输过程中的抗干扰问题</b>	( 165 )
一、信号传输过程中受噪声影响的两种形态	( 165 )
二、抑制信号传输过程中共模噪声影响的几种主要方法	( 166 )
三、传输中的平衡技术	( 174 )
四、传输线的长度、结构等因素与抗干扰性能的关系	( 177 )

五、长线传输的反射干扰及其抑制措施·····	(185)
<b>第四章 模拟电路的抗干扰措施</b> ·····	(191)
<b>第一节 低频电路中抑制噪声的几个典型问题</b> ·····	(192)
一、低噪声放大器的几个关键·····	(192)
二、放大器的自激振荡及其抑制方法·····	(197)
三、调制式直流放大器的噪声及其抑制措施·····	(201)
<b>第二节 运算放大器电路的噪声分析及其抗共模噪声特性</b> ·····	(204)
一、运算放大器的内部噪声·····	(204)
二、运算放大器受外部噪声的影响·····	(206)
三、运算放大器的自激振荡问题·····	(208)
四、运算放大器抗共模噪声特性·····	(212)
<b>第三节 运算放大器在微小电压放大时抗干扰注意事项</b> ·····	(216)
一、微小电压放大时应考虑合适的电路形式·····	(216)
二、微小电压放大时应特别注意高频噪声的影响·····	(221)
三、微小电压放大要重视热电势的影响·····	(224)
四、电源对微小电压放大器的影响·····	(225)
五、微小电压放大电路中信号传输电平的考虑及屏蔽驱动措施·····	(226)
六、微小电压信号的长距离传输方法·····	(227)
七、微小电压信号的接点处理方法·····	(229)
<b>第四节 模拟信号数据采集的微型计算机系统的抗干扰措施</b> ·····	(230)
一、模拟电路和数字电路的隔离·····	(231)
二、对输入的模拟信号实行软件滤波的方法·····	(232)
<b>第五节 运算放大器电路的抗干扰装配工艺措施</b> ·····	(234)
一、使高输入阻抗电路有稳定的高绝缘输入的措施·····	(234)
二、高增益放大器装配的注意点·····	(238)
三、宽频带运算放大器电路的大平面接地方式印刷板设计·····	(240)
四、在运放电路中使用电位器应注意的几个问题·····	(241)
五、在装配工艺上注意克服地线公共阻抗的耦合·····	(244)
六、其他一些在装配上要注意的问题·····	(246)
<b>第五章 高频电路的抗干扰措施</b> ·····	(249)
<b>第一节 高频电路的外界噪声</b> ·····	(250)
一、工业噪声·····	(250)
二、自然噪声·····	(251)
<b>第二节 接收机电路中的几种干扰及其抑制措施</b> ·····	(251)
一、组合频率干扰和副波道干扰·····	(251)
二、交叉调制干扰及其抑制措施·····	(253)
三、互相调制干扰及其抑制措施·····	(253)
四、阻塞干扰及其抑制措施·····	(254)

五、倒易混频干扰及其抑制措施	(254)
六、接收机的干扰熄灭装置	(255)
<b>第三节 高频电路的内部噪声</b>	(256)
一、电阻的热噪声	(256)
二、晶体管的噪声	(258)
<b>第四节 噪声系数和降低噪声系数的措施</b>	(258)
一、高频放大器的噪声系数和噪声温度	(258)
二、多级放大器的噪声系数	(259)
三、降低噪声系数的措施	(260)
<b>第五节 高频电路抗干扰的装配工艺措施</b>	(261)
一、高频电路的实验组装技巧	(261)
二、高频电路的印刷线路的装配	(263)
三、高频电路在装配上的屏蔽措施	(266)
四、活动接触部件的正确安装方法	(272)
五、高频电路元器件的选用注意点	(272)
<b>第六章 噪声的测量</b>	(280)
<b>第一节 若干噪声测量的基本概念</b>	(280)
一、噪声的几个最基本的量度	(280)
二、电路内部噪声的统计学概念	(280)
<b>第二节 噪声测量的常用仪器及其特点</b>	(283)
一、根据实际噪声形态选用合适的测量仪器	(283)
二、常用测量仪器及其特点	(283)
三、示波器在噪声测量中的使用方法	(286)
<b>第三节 放大器噪声系数的测量</b>	(289)
一、放大器输出噪声电压的测量	(289)
二、放大器噪声系数的测量	(290)
<b>第四节 无线电电磁噪声的允许值及其测量方法</b>	(292)
一、无线电电磁噪声允许值的各种规定	(292)
二、无线电电磁噪声的测量	(296)
<b>第七章 干扰的模拟试验</b>	(302)
<b>第一节 电网脉冲噪声的模拟试验</b>	(302)
一、电网脉冲噪声发生器的结构原理	(303)
二、将脉冲噪声注入电源电路的方法	(305)
三、试验和测试时应注意的几个问题	(306)
四、几种简易而实用的电网脉冲噪声发生器	(308)
五、电网浪涌脉冲的模拟标准	(310)
<b>第二节 电网电压瞬时变动的模拟试验</b>	(311)
<b>第三节 在电路上直接进行的干扰模拟试验</b>	(313)



一、简易模拟试验·····	( 313 )
二、携带式噪声脉冲模拟发生器·····	( 313 )
三、使用携带式噪声脉冲模拟发生器的试验方法·····	( 314 )
<b>第四节 静电放电干扰的模拟试验·····</b>	<b>( 316 )</b>
一、静电放电模拟器的原理·····	( 317 )
二、人体放电电阻和放电波形上升沿的模拟·····	( 318 )
三、静电放电模拟器的国际标准·····	( 319 )
<b>第五节 电磁辐射和电磁耦合的模拟试验·····</b>	<b>( 319 )</b>
一、窄带电磁辐射的模拟·····	( 319 )
二、宽带电磁辐射的模拟·····	( 319 )
三、电磁耦合的简易模拟试验·····	( 320 )
<b>主要参考文献·····</b>	<b>( 321 )</b>

# 第一章 电子线路抗干扰技术基础

## 第一节 噪声的定义和种类

### 一、噪声的定义

对于电子线路中所称的噪声，可以概括地认为，它是对目的信号以外的所有电子信号的一个总称。

最初，人们把造成收音机之类音响设备所发出噪声的那些电子信号，称为噪声。但是，一些非目的电子信号对电子线路造成的后果并非都和声音有关，因而，后来人们逐步扩大了噪声概念。例如，把造成电视屏幕有白斑或条纹的那些电子信号也称为噪声。现在，可以说，电路中除目的信号以外的一切信号，不管它对电路是否造成影响，都可称为噪声。

例如，电源电压中的纹波或自激振荡，可以对电路造成不良的影响，使音响装置发出交流声或导致电路误动作，但有时也许并不导致上述后果。对于这种纹波或振荡，不管它对电路造成影响与否，都应称为电路的一种噪声。又如，某一频率的无线电波信号，对需要接收这种信号的接收机来讲，它是正常的目的信号，而对另一接收机它就是一种非目的信号，即是噪声。

在电子学中常使用干扰这个术语，有时会与噪声的概念相混淆。其实，它们之间是有一定区别的。噪声是一种电子信号，而干扰是指的某种效应，是由于噪声原因对电路造成的一种不良反应。而电路中存在着噪声，却不一定就有干扰。在数字电路中，往往可以用示波器观察到在正常的脉冲信号上混有一些小的尖峰脉冲，这种小尖峰脉冲是所不期望的，而是一种噪声。但由于电路特性关系，这些小尖峰脉冲还不致于使数字电路的逻辑受到影响而发生混乱，所以可以认为是没有干扰。当然，噪声与干扰的区分有时候也是比较困难的，特别是由于人们在判别是否受到干扰这个问题的认识上有差异，故不容易区分哪些应叫做噪声，哪些应称为干扰。

当一个噪声电压大到足以使电路受到干扰时，该噪声电压就称为干扰电压。而一个电路或一个器件，当它还能保持正常工作时所加的最大噪声电压，称为该电路或器件的抗干扰容限或抗扰度。一般说来，噪声很难消除，但可以设法降低噪声的强度或提高电路的抗扰度，以使噪声不致于形成干扰。

### 二、噪声的种类

噪声的分类在各种文献中都不一样，原因在于分类的角度不同。在这里，从几个角度来对电子系统的噪声进行分类，并阐述一些关于噪声的基本特点。

#### 1. 从噪声表现的状态来分类

从噪声表现的状态可以把噪声分为规则噪声、连续的不规则噪声和间歇、瞬时的噪声。

规则噪声的典型例子如电源纹波，它是在直流电压上叠加的50Hz电网频率（或二倍电网频率）的脉动波形，它是连续的规则的。连续的不规则噪声如直流电机在运转时产生的噪声、开关式元器件工作时产生的噪声等，它们的振幅、频率及波形都是不规则的，但是连续发生的。间歇或瞬时噪声大多是外来的噪声，如电网中大功率设备的突然起动在电路中造成瞬间的浪涌脉冲等。

## 2. 从造成噪声的机理来分类

从造成噪声的机理来看可分成内部噪声和外部噪声两大类。内部噪声又可分为下列几种。

(1) 热噪声 如电阻等由于热能作用，电子骚动所产生的噪声，它几乎覆盖整个频谱。这种噪声总是存在的，但温度越低噪声越小。

(2) 颤噪噪声（话筒效应噪声） 当设备中的电路和元器件受到机械振动时，电路参数发生变化，如同微音器一样，在电路内产生噪声电压，这种噪声称颤噪噪声或话筒效应噪声。

(3) 散粒噪声 如电子管阴极所发射的电子，每个都是彼此独立的，在各个暂短的瞬间，它们都是不连续的不规则的，这种不规则性引起的电特性变化，就成为一种频谱范围很宽的噪声。

(4) 闪变噪声 电子管阴极物质的电子释放条件因时间而不同，从而引起电特性的变化，形成闪变效应的噪声。

(5) 交流声 由于直流电源的整流滤波性能不好，或因布线等使电路耦合了变压器等的泄漏磁通，产生和电网频率相同或倍频的交流成分。这种噪声往往会在音响设备上发出令人讨厌的低频哼声，这种噪声就叫作交流声。

(6) 热电势噪声 异种金属相接触，在它们之间有温度差时，会产生电势，而成为一种热电势噪声。

(7) 接触噪声 材料间不完全的接触所引起的起伏电导率而导致电势的变化，这种噪声常见于假焊、导线连接不牢靠、开关接点接触不良等。

(8) 尖峰或振铃噪声 电路中电流的突变，在电感负载上引起的尖峰反冲电压波或衰减振荡波。

(9) 自激振荡 自激振荡也是一种典型的内部噪声。它是由于在具有放大功能的电路中，其输出的一部分通过耦合以正反馈方式加到输入端而产生的。

(10) 反射噪声 前后级电路不匹配，使长线传输的信号在接点处引起反射，产生相移，这就成为一种叠加在信号上的噪声。

(11) 分配噪声 晶体管发射极区注入到基极区的少数载流子中，一部分经过基极区到达集电极形成集电极电流，一部分在基极区中复合。由于载流子复合时，其数量时多时少，导致集电极电流也随着起伏而引起所谓的分配噪声。

(12) 1/f噪声或闪烁噪声 晶体管、场效应管等器件在低频端所产生的一种噪声，其功率与频率成反比地增大，故称1/f噪声。对这种噪声产生的机理，目前尚有不同见解，但已经知道它与半导体材料制作时清洁处理有关。

(13) 天线热噪声 天线本身的热噪声是非常小的。但是，天线周围的介质微粒处于热运动状态，这种热运动产生扰动的电磁波辐射被天线接收，然后又由天线辐射出去。当接收

与辐射的噪声功率相等时，天线和周围的介质处于热平衡状态，这样天线中就有了这种天线热噪声。

(14) 电化电势噪声 这是电路中的金属在腐蚀时产生的一种电池效应，这种电池效应形成的噪声称电化电势噪声。

外部噪声可以分成人为噪声和自然噪声二种。下列的前六种属于人为噪声，后三种为自然噪声。

(1) 火花放电噪声 如汽车的汽缸点火、继电器触点的开断、火花式高频设备的工作及电钻中整流子式电机转动时都会产生火花放电，火花放电会形成一种含有很高频率成分的强烈噪声。

(2) 电晕放电噪声 如臭氧发生器和高压输电线等都会产生一种电晕放电，这种放电具有间歇性质，并产生脉冲电流，从而成为一种噪声干扰的原因；而且电晕放电过程还产生一种高频振荡，也会对电路产生干扰。电晕放电噪声主要对载波电话、低频航空无线电通讯以及调幅广播等产生干扰。

(3) 辉光放电噪声 当两个接点间的气体被电离时，在两个接点间就会产生一种再生的、能自己维持的辉光放电。辉光放电经常在继电器触点、开关接点处发生，这种放电除了能引起高频辐射外，还在配电线上引起电压电流的冲击。

(4) 脉冲式噪声 数字电路中的脉冲信号、晶体振荡产生的时钟频率脉冲等，通过各种方式对其他电路产生干扰。

(5) 开关式噪声 在开关电路中如晶体管、可控硅开关在工作时所产生的尖峰脉冲噪声。特别是在断开电感负载时产生的开关式噪声特别强烈。

(6) 电波噪声 高频电路、无线电广播和通讯设备所辐射出的电磁波是对电路影响的一种电波噪声。

(7) 大气噪声 有时也称为天电噪声。自然界的雷电现象是一种常见大气噪声。地球上平均每秒钟发生100次左右的雷击闪电，每次雷电都产生强烈的电磁场骚动，并以电磁波形式传播到很远，即使距雷电几千公里以外，在看不见雷电现象的情况下，干扰也可能很严重。除此之外，对设备、电网输电线的直接雷击或雷电感应的浪涌电压而形成更厉害的干扰。另外，大气电离或空间电位变动，以及其他气象现象所产生的噪声也属于大气噪声。

(8) 太阳系噪声 这是指太阳及太阳系行星所辐射的无线电噪声。其中太阳的影响最大，而且极不稳定，与太阳的黑子数及日辉(即太阳大爆发)有关，对地面的干扰比较严重。

(9) 宇宙噪声 主要指太阳系外其他星系所辐射的无线电噪声。通常银河系的辐射较强，其影响主要在米波及更长波段内(1.5米、1.85米、3米、15米)。

### 3. 根据噪声频率来分类

根据噪声频率，一般将噪声分为低频噪声和高频噪声两种。其大致的分类、噪声源及噪声的性质见表1.1。

### 4. 根据噪声对干电路作用的形态来分类

表 1.1 高频噪声和低频噪声

名称	类别	发生源	性质和特点
低频噪声	直流, 低频 (50Hz 以下)	热电势, 电化电势, 低频直流漂移, 大地电流的作用等	与信号分开很困难
	市电频率 (50Hz)	电源线, 电源装置等	呈周期性, 与市电频率有关, 对小信号模拟电路影响较大
高频噪声	脉冲性或宽频带噪声 (50Hz~100MHz)	开关电容性, 电感性负载等及其他原因导致电路中电压和电流突变	幅度大小及重复频率都是随机的, 往往因幅度大及频率较高很容易对其他线路产生感应
	高频无线电波 (1MHz以上)	高频电路的辐射, 无线电广播及通讯设备的发射	对电路产生电磁波感应噪声, 或非线性元件产生低频成分的噪声

噪声对于电路作用的形态有两种, 一种是串模, 一种是共模。串模噪声也常称正态噪声、常态噪声, 串态噪声或平衡噪声等; 共模噪声常称为共态噪声、同相噪声、对地噪声或不平衡噪声等。

串模噪声对电路的作用形态可由图 1.1 来说明。对于信号电压  $V_s$  来讲, 加上了一个与它

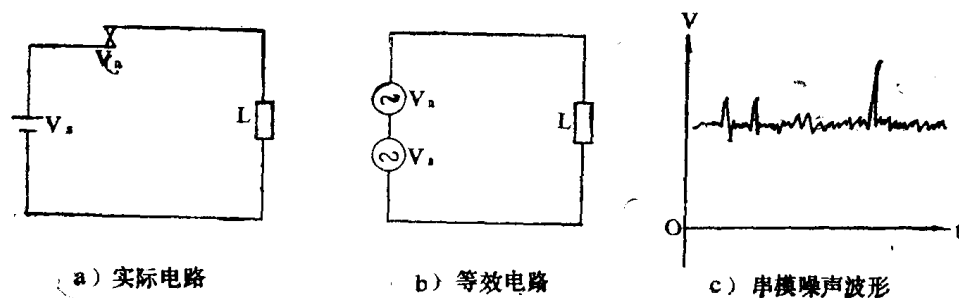


图 1.1 串模噪声

串联的噪声  $V_n$ 。线路上的接点热电势或接触电势噪声就是一个典型的串模噪声例子。图 1.1c) 是串模噪声叠加于直流信号电压  $V_s$  之上的波形。

共模噪声对于电路的作用形态可由图 1.2 来说明。在以大地电位为基准的回路中, 两根

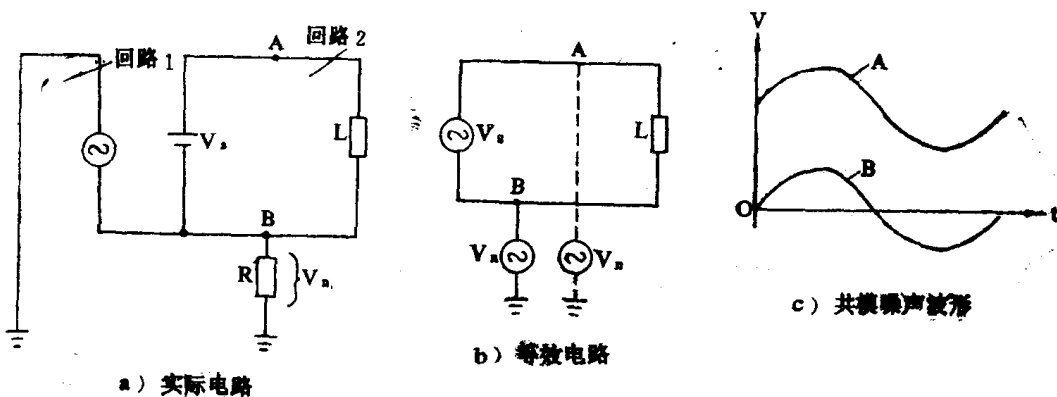


图 1.2 共模噪声

线A与B上均对地有一个噪声电压 $V_n$ 。在这个电路中， $V_n$ 的产生是由于二个回路间存在着一个公共阻抗 $R$ ，回路1的电流变化，通过公共阻抗的耦合，给回路2造成了影响。当 $V_s$ 是直流信号、 $V_n$ 是交流信号的话，线A与B上的波形如图1.2c)所示。

共模噪声往往可以转换为串模噪声。在图1.3所示的电路中， $e_{CM}$ 对于电路的影响是以共模噪声的形态出现的。如果电路中阻抗 $Z_1=Z_2; Z_3=Z_4$ ，那么很显然 $Z_L$ 两端的压降为零，即 $e_{NM}=0$ 。就是说，虽然有共模噪声的影响，但由于线路的阻抗平衡，它对线路的负载并不起作用。然而，当 $Z_1 \neq Z_2; Z_3 \neq Z_4$ 时，共模噪声电压 $e_{CM}$ 分别以二股电流流过 $Z_1、Z_4$ 和 $Z_2、Z_3$ ，因而形成电位差作用于负载 $Z_L$ 上

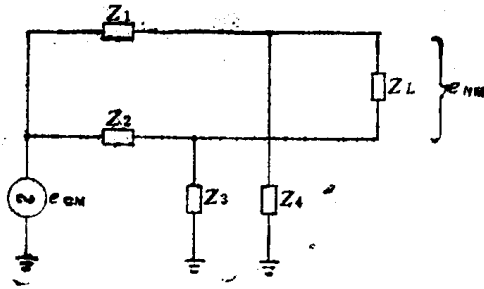


图 1.3 共模噪声转化成串模噪声和CMRR定义

$$e_{NM} = \left( \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4} - \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) e_{CM} \quad (1-1)$$

由于 $e_{NM}$ 是以串模形态作用于电路而加于 $Z_L$ 的两端，所以可以认为是共模噪声转化为串模噪声。当然，要在一定条件下才会转化，这个条件就是线路的阻抗不平衡。

一般说来，共模噪声要转化成串模噪声才对电路起影响。若一电路完全平衡，则说明它有完全不使共模噪声转化成串模噪声的能力。然而，完全平衡是做不到的，总存在程度不同的不平衡，因而也总存在串模噪声的影响。衡量一个电路抗共模噪声的能力，可以用它抑制转化成串模噪声的能力来表示，即用 $e_{CM}/e_{NM}$ 的比值表示。

电路的共模抑制能力常用CMRR (分贝) 表示

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{e_{CM}}{e_{NM}} \quad (1-2)$$

串模噪声和共模噪声的概念很重要，在分析线路受干扰时，要根据噪声的不同形态来加以正确区分。只有在这基础上才能正确地采取相应的措施。对于串模噪声和共模噪声的区分，在图1.1和图1.2中已经看到，前者是回路的两根线之间所加上的噪声电压，后者是回路的两根线和地之间所加上的噪声电压。另外，还可以从噪声电流和信号电流的关系上区别这两种不同形态的噪声。在图1.4中， $V_N$ 是噪声电压， $I_N$ 是由噪声电压所产生的噪声电流， $I_s$ 是正常信号电流。图1.4a)是串模噪声的情况，由图可见，串模噪声电流方向与信号电流方向

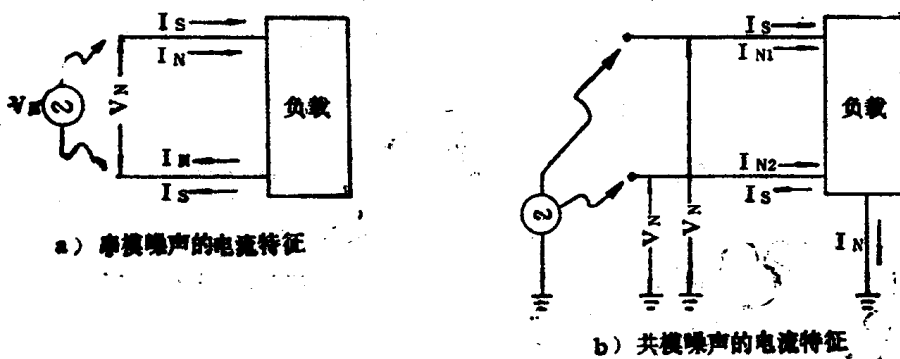


图 1.4 串模噪声与共模噪声的区分

在两根线上是一致的。图1.4b) 是共模噪声的情况, 总的噪声电流 $I_N$ 是两根线上的噪声电流 $I_{N1}$ 与 $I_{N2}$ 之和, 而且 $I_{N2}$ 的方向与信号电流的方向是相反的。

对于共模噪声的研究很重要, 不只是因为以这种形态出现的噪声十分普遍, 而主要是由于它最终会转变成串模的形式来影响电路, 并且又难以被人觉察, 抑制共模噪声在措施上又往往要比抑制串模噪声更困难。

### 5. 以噪声不同传播途径来分类

以噪声传播途径的角度来分类, 大致可有: 导线传导的耦合噪声, 经公共阻抗的耦合噪声和电磁场的耦合噪声。其中, 电磁场的耦合根据离辐射源的距离远近, 可分为近场的感应和远场的辐射。在近场感应噪声中又可分电容性耦合噪声和电感性耦合噪声两种。电容性耦合的噪声主要由电力线通过相互间电容耦合来传播的; 电感性耦合的噪声主要由磁力线通过相互间的电感来传播的; 而远场的辐射则是电磁波方式传播的。

## 第二节 抗干扰的三要素和抗干扰的积极措施

### 一、抗干扰的三要素

描述一个电路所受干扰的程度若用 $N$ 表示, 则 $N$ 可用一个关系式来定义

$$N = \frac{G \cdot C}{I} \quad (1-3)$$

这里,  $G$ 代表噪声发生源的强度;  $C$ 代表从噪声源通过某种途径传到受干扰处的耦合因素;  $I$ 表示受干扰的电路的抗干扰性能。  $G$ 、 $C$ 、 $I$ 即表示了抗干扰的三要素。要使电路受干扰的程度小, 则必须在这三方面想办法。第一使 $G$ 变小, 就是将客观存在的干扰源强度在发生处抑制得很小; 第二使 $C$ 减小, 将噪声在传播途径上给予很大的衰减; 第三应使 $I$ 增大, 在受干扰处用各种措施, 使电路的抗干扰能力提高, 或在受干扰处将噪声抑制下去。

不管在如何错综复杂的干扰情况下, 抗干扰的三要素却给我们提示了一个解决问题的很清楚的思路。不过, 根据条件, 有的仅能在一个方面采取措施, 有的在三个方面的均能有措施。

在这一节中, 主要介绍几种典型的在噪声源处加抑制措施的例子, 在下一节中将分析几种在噪声传播途径中抑制噪声的方法, 对于在各种电路处抑制噪声和提高抗干扰性能, 将在其他几章中讨论。

### 二、在噪声源处抑制噪声最为有效

人们自然会想到, 如果能找到噪声源, 而且在噪声源处加措施不让噪声传播出来, 那不就彻底地解决了问题吗? 在其余二方面就不必多花力气了。可是事实表明, 在干扰现场, 因情况复杂, 往往注意力被各种受干扰的效应和现象所吸引, 忘记了这一基本道理, 却忙于在受干扰处加各种措施, 结果效果并不理想。例如, 在一个实验室里经常发现一些电子设备受干扰而误动作, 曾花了不少精力来提高这些设备的抗干扰性能, 但效果却不好。到最后却发

现这些干扰均是一只电磁继电器所引起的，结果只用了一个二极管并接在继电器线圈上就将问题全部解决。所以在理论上和实践上都告诉我们，无论受干扰的情况怎样复杂，应首先去研究如何在噪声源处就将噪声抑制下去的办法，这样往往可以取得事半功倍的效果。

按上述原则，首要的条件是要找到干扰源，其次分析有否抑制噪声的可能性和采取相应的措施等。

有的干扰源是很明显的，例如雷电、广播电台的发射、电网上大功率设备的运行等。不过，象在这种干扰源处是不可能采取什么措施的。但是，在电子线路的许多干扰源处都有可能加各种有效措施的，问题在于往往不清楚干扰源是什么，在什么地方。寻找干扰源也有一个原则，就是：电流和电压发生剧变的地方就是电子线路的干扰源。用数学描述，就是  $di/dt$ 、 $dv/dt$  大的地方就是干扰源。

从电子线路噪声传播的几种主要途径来看，电流变化大或大电流工作的场合，常常是产生电感性耦合噪声的主要根源。电压变化大或高电压工作的场合，常常是产生电容性耦合噪声的主要根源。公共阻抗耦合的噪声也是由于变化剧烈的电流在公共阻抗上所产生的压降造成的。对剧烈变化的电流来讲，其电感成分所造成的影响十分严重。如果电压电流不变化，即使它们的绝对值很大，也不会引发电感性或电容性的耦合噪声，对公共阻抗也只是加上了一个稳定的压降。

下面，我们通过几种典型例子，来分析说明干扰源及抗干扰的措施。

### 1. 开关白炽灯

装置中的各种指示灯常用白炽灯。我们知道，白炽灯在暗的时候，灯丝是冷的，电阻很小。在电源接通的瞬间，灯丝上突然流过比稳定时大五至十五倍的冲击电流，灯丝变热后，电阻变大，电流才变小而稳定下来。如小型灯泡的正常稳定电流是50mA，则冲击电流瞬间可达0.5A左右。如用很多指示灯，或者一些灯同时点亮，其电流的突变更严重，这就成为隐藏在电路内部的干扰源。这类干扰源的抑制方法很简单。例如在指示灯的开关上并联一个电阻，使关断时灯丝上仍通过一定暗电流。这样，灯丝温度提高，减少灯丝冷热时的温差和电阻值，从而减小冲击电流。图1.5a)所示的是采用分流电阻的措施。在灯暗的时候，经分流电阻，流过一定的暗电流，减少了冲击电流。图1.5b)表示采用电流限制电路来抑制冲击电流。图1.5c)分别表示不加措施的冲击电流曲线，加了分流电阻的冲击电流曲线及加电流限制电路的冲击电流曲线。

### 2. 集成电路的开关工作

数字集成电路在输出状态翻转时，其工作电流的变化是很大的。特别是如图1.6所示的具有图腾柱输出结构的TTL电路，在状态转换的瞬间，其输出部分的两个晶体管（电流吸收管和输出缓冲管）由于电荷储存的原因，会有大约10ns的瞬间同时导通，这相当于电源对地短路（限流电阻很小）。每一个门电路，在这转换瞬间有30mA左右的冲击电流输出。冲击电流是宽度约为10ns的三角波，因此含有十分高的频率成分，它在印刷线的阻抗上产生尖峰噪声电压。随着印刷线路板装配密度提高以及集成电路的集成度提高，一块印刷板上会有几十个门电路同时翻转，特别是随着大规模集成电路的广泛应用，这种冲击电流可能更大。例如，动态RAM电路在平时消耗电流很小，而在某瞬间工作时消耗的电流量很大。一片MK4096工作时有80mA左右的冲击电流，16片电路一起工作时可达1.28A。而这个冲击电流的变化时间仅有15ns。按 $di/dt$ 计，其突变是很陡峭的。象这种电流变化，稳压电源是难



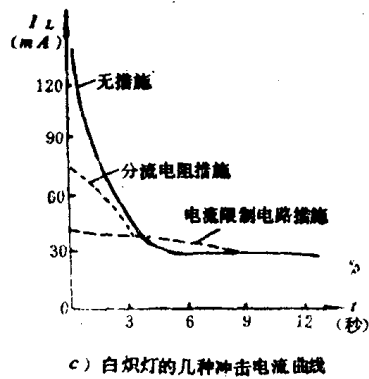
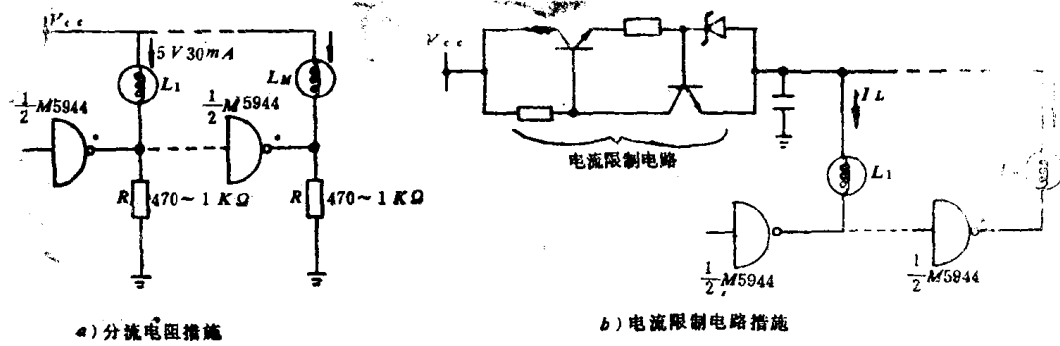


图 1.5 抑制白炽灯冲击电流的措施

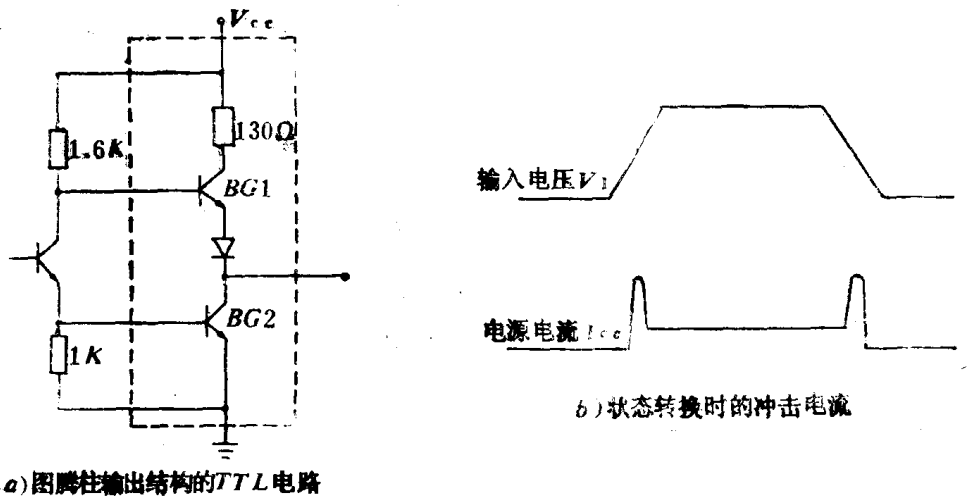


图 1.6 图腾柱输出结构电路产生的冲击电流