

实用电子电路

抗干扰设计及应用

陈梓城 邓海 邵长军 马玉亮 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

实用电子电路

抗干扰设计及应用

陈梓城 邓海 邵长军 马玉亮 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对实用电子电路抗干扰的设计及其应用进行了详细介绍。内容包括抗干扰技术与电磁兼容性、噪声传播途径及其抑制措施、电源电路抗干扰设计及其应用、集成运放电路抗干扰设计及其应用、高频电路抗干扰设计及其应用、数字电路的抗干扰设计及其应用、微型计算机及微处理机电路抗干扰设计及其应用、印制电路板抗干扰设计、电子设备抗干扰测试技术等。给读者一个较清晰的电子电路抗干扰设计思路、设计方法和应用知识，具有较强的系统性、针对性。同时兼顾教学需要，每章编写思考题与习题，为教学提供方便。

本书既可作为大学本科、高职电类专业教材，也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用电子电路抗干扰设计及应用/陈梓城等编著. —北京：中国电力出版社，2014.8
ISBN 978-7-5123-5902-4

I. ①实… II. ①陈… III. ①电子电路-抗干扰-技术 IV. ①TN973.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 102008 号



中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：杨淑玲 责任印制：郭华清 责任校对：林霞

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2014 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·14.5 印张·351 千字

定价：36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

刚参加工作的电子技术人员和大、中专学生在进行电子电路设计和调试过程中，常为缺乏较系统、较完整的参考资料而犯难，给工作和学习带来不便。究其原因有三：一是所需资料散落在浩渺的参考文献之中，寻找困难；二是不少参考文献言犹未尽，有的缺乏依据，使人将信犹疑；三是有的电路尚无可信有据的元器件参数估算公式。为此，笔者策划编写了《实用电子电路设计与调试》，由中国电力出版社于2006年出版。2010年策划编写了“实用电子电路设计与调试丛书”，分《模拟电路》、《数字电路》、《电源电路》三册先后于2011年、2012年出版发行，受到读者的欢迎和好评。电子电路抗干扰技术是电子电路设计中十分重要的内容之一，对电子设备的质量起到重要保障作用。掌握电子电路抗干扰技术，进行抗干扰设计，是电子工程技术人员的基本功。本书作为“实用电子电路设计与调试丛书”系列之一出版发行。

编写本书时，一般不进行公式推导，而是给读者一个较清晰的电子电路抗干扰设计思路、设计方法和应用知识，具有较强的针对性和系统性。

编写时力求通俗易懂，降低难度，凡涉及较新基本概念和技术名词，一般均有解释，便于具有电工、电子电路基础知识的人员自学。

笔者力图把本书编写成电子电路抗干扰设计及其应用方面较详尽规范的科技书。同时兼顾教学需要，每章还编写了思考题与习题。

本书由陈梓城、邓海、邵长军、马玉亮编写。其中，第3章、第4章由邵长军编写；第5章由马玉亮编写；邓海编写了第7章、第8章，并负责全书审阅工作；陈梓城编写了第1章、第2章、第6章和第9章，并负责本书的策划和统稿工作。

本书在编写时参考了大量文献资料，未能一一列举，在此对文献资料的作者及关心支持本书的同仁、读者表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中疏漏与不当之处在所难免，恳请同行专家和读者改正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 抗干扰技术与电磁兼容性	1
1.1 抗干扰技术与电磁兼容性概述	1
1.1.1 抗干扰与电磁兼容性	1
1.1.2 电磁兼容与抗干扰主要术语	3
1.2 噪声的种类及其特点	4
1.2.1 按噪声表现的状态分类	5
1.2.2 按形成噪声的机理分类	5
1.2.3 根据噪声频率分类	7
1.2.4 根据噪声对电路作用的形态分类	7
1.2.5 按噪声不同传播途径分类	9
1.3 抗干扰三要素及其应用	9
1.3.1 抗干扰三要素	9
1.3.2 噪声源的寻找原则	10
1.3.3 噪声传播途径的寻找原则	10
思考题与习题	10
第 2 章 噪声传播途径及其抑制措施	11
2.1 导线传导耦合噪声及其抑制方法	11
2.1.1 导线传导噪声的抑制措施——串接滤波器	11
2.1.2 滤波器的分类、特性及其主要性能参数	11
2.1.3 常用滤波器及其选用	12
2.1.4 有源陷波器设计示例	19
2.1.5 用铁氧体磁珠滤波器抑制高频噪声	21
2.1.6 三端电容与穿心电容滤波器	24
2.1.7 电缆滤波器	26
2.1.8 组合滤波器	27
2.1.9 滤波连接器	27
2.2 公共阻抗耦合噪声的抑制	28
2.2.1 公共阻抗耦合噪声形成的干扰	28
2.2.2 抑制公共阻抗耦合噪声的方法	30
2.3 电容性耦合噪声及其抑制方法	32
2.3.1 电容性耦合噪声产生机理	32
2.3.2 电容性耦合噪声抑制方法	33
2.3.3 电屏蔽设计	34
2.4 电磁感应耦合噪声抑制方法	37
2.4.1 电磁感应耦合噪声的产生机理及其抑制方法概述	37

2.4.2	低频磁场磁屏蔽	38
2.4.3	高频磁场磁屏蔽	41
2.4.4	磁屏蔽的其他形式	42
2.5	电磁场耦合噪声抑制	43
2.5.1	电磁场耦合噪声的传播及其抑制	43
2.5.2	电磁场屏蔽	44
2.5.3	电磁屏蔽设计步骤	47
2.5.4	电磁屏蔽材料及其选用	48
2.6	静电防护	53
2.6.1	静电的产生和防护特点	53
2.6.2	静电敏感器件保护电路	54
2.6.3	常用防静电措施及其应用	56
2.7	瞬态干扰的抑制方法	61
2.7.1	瞬态干扰概述	61
2.7.2	电快速瞬变脉冲群 (EFT) 及其抑制	62
2.7.3	雷击浪涌及其防护	67
2.7.4	静电放电产生的电磁干扰及其抑制	74
2.7.5	常用抑制瞬变电磁干扰器件及其选用	77
2.8	接地与搭接设计及其应用	87
2.8.1	接地的目的	87
2.8.2	接地的基本形式	88
2.8.3	地线环路干扰及其抑制	90
2.8.4	电子电路及系统的接地	93
2.8.5	搭接及其应用	98
	思考题与习题	100
第3章	电源电路抗干扰设计及其应用	102
3.1	变压器抗干扰设计	102
3.1.1	高频尖峰脉冲在变压器中传播途径	102
3.1.2	变压器抗干扰措施	102
3.2	线性稳压电源抗干扰设计及其应用	105
3.2.1	抑制穿过稳压电源的噪声	105
3.2.2	抑制线性稳压电源纹波电压	106
3.3	开关电源抗干扰设计及其应用	107
3.3.1	串联型开关电源噪声分析	107
3.3.2	反激型开关电源抗干扰措施	108
3.3.3	开关电源功率器件的抗干扰设计	111
3.3.4	用铁氧体磁珠滤波器抑制电源高频噪声	115
3.3.5	改进开关电源装配工艺抑制噪声	115
3.3.6	开关电源高频变压器的磁屏蔽	116
3.3.7	开关电源抗干扰措施应用实例分析	116
3.4	电源电磁干扰滤波器的设计与选用	117

3.4.1	电源电磁干扰滤波器概述	117
3.4.2	电源 EMI 滤波器主要技术参数	117
3.4.3	电源 EMI 滤波器设计步骤	119
3.4.4	电源 EMI 滤波器成品及其安装	119
3.4.5	电源 EMI 滤波器设计示例	120
	思考题与习题	122
第 4 章	集成运放电路抗干扰设计及其应用	123
4.1	集成运放电路的噪声及其抗共模噪声特性	123
4.1.1	集成运放电路的噪声及其抑制	123
4.1.2	集成运放电路共模噪声的抑制	124
4.1.3	运放电路自激振荡的消除	127
4.2	微小电压放大电路的抗干扰设计及其应用	128
4.2.1	放大器电路设计的抗干扰规则	128
4.2.2	典型微小电压放大电路干扰分析	129
4.2.3	微小电压放大电路的抗干扰措施	130
4.2.4	高频噪声对微小电压放大电路的影响及其抑制	132
4.2.5	影响微小电压放大电路的其他因素及其抑制	134
4.3	集成运放电路抗干扰装配工艺	134
4.3.1	使高输入阻抗电路有稳定的高绝缘输入	134
4.3.2	高增益放大器装配抗干扰措施	135
	思考题与习题	136
第 5 章	高频电路抗干扰设计及其应用	137
5.1	高频电路外界噪声及其抑制	137
5.1.1	工业噪声及其抑制措施	137
5.1.2	自然噪声及其抑制	137
5.2	接收机电路的几种干扰及其抑制措施	138
5.2.1	组合频率干扰和副波道干扰	138
5.2.2	交叉调制干扰及其抑制措施	139
5.2.3	互相调制干扰及其抑制措施	139
5.2.4	阻塞干扰及其抑制措施	139
5.2.5	倒易混频干扰及其抑制措施	140
5.2.6	接收机的干扰熄灭装置	140
5.3	高频电路抗干扰装配工艺	141
5.3.1	高频电路实验组装	141
5.3.2	高频电路装配工艺及其抗干扰措施	141
5.3.3	高频电路、高速电路元器件选用的注意事项	146
	思考题与习题	147
第 6 章	数字电路的抗干扰设计及其应用	148
6.1	数字电路抗干扰概述	148
6.1.1	数字电路抗干扰特点	148
6.1.2	数字电路抗干扰设计规则	148

6.2	数字电路外部干扰及其抑制方法	150
6.2.1	外来干扰及其抑制	150
6.2.2	电源干扰及其抑制	151
6.2.3	地线的干扰及其抑制	151
6.3	数字电路的内部干扰及其抑制	151
6.3.1	瞬态电流干扰及其抑制	151
6.3.2	窜扰及其抑制	152
6.3.3	反射干扰及其抑制	152
6.3.4	常用终端匹配的方法	153
6.3.5	A/D、D/A 转换器噪声的抑制	156
	思考题与习题	159
第 7 章	微型计算机和微处理机电路抗干扰设计及其应用	160
7.1	增加总线的抗干扰能力	160
7.1.1	采用三态门方式提高总线抗干扰能力	160
7.1.2	总线加吊高电阻提高抗干扰能力	160
7.1.3	总线的接收加缓冲器减少噪声影响	161
7.1.4	防止总线上数据冲突措施	161
7.2	系统的防辐射措施	162
7.3	抑制存储器产生的噪声	163
7.3.1	动态 RAM 抗干扰措施	163
7.3.2	静态 RAM 的抗干扰措施	164
7.4	微机系统的装接设计	165
7.4.1	总体安排原则	165
7.4.2	印制电路板安装及布线注意事项	165
7.4.3	微机系统印制电路板抗干扰设计示例	166
7.5	微机系统的软件抗干扰措施	168
7.5.1	数字滤波	168
7.5.2	设立软件陷阱	168
7.5.3	时间监视器	169
7.5.4	掉电保护	171
7.5.5	待机抗干扰	172
7.5.6	输入/输出软件抗干扰措施	172
	思考题与习题	173
第 8 章	印制电路板抗干扰设计	175
8.1	印制电路板简介	175
8.1.1	印制电路板分类	175
8.1.2	表面安装印制电路板单面板	176
8.1.3	表面安装印制电路板双面板	176
8.1.4	表面安装印制电路板多层板结构	176
8.1.5	印制电路板组成	178
8.1.6	印制电路板设计流程	180

8.2 印制电路板的合理布局	183
8.2.1 印制电路板板层的规划原则	183
8.2.2 元器件布局原则	184
8.2.3 电路功能模块布局原则	185
8.3 印制电路板抗干扰设计	187
8.3.1 单面、双面印制电路板的抗干扰设计	187
8.3.2 多层印制电路板叠层设计	190
8.3.3 印制电路板布线技术及其应用	191
8.3.4 印制电路板的地线设计及其应用	199
8.3.5 印制电路板的终端匹配方法	204
思考题与习题	204
第9章 电子设备抗干扰测试技术	205
9.1 概述	205
9.1.1 电子设备抗干扰测试目的和意义	205
9.1.2 电子设备抗干扰测试分类与项目	205
9.2 常用电子设备抗干扰测量仪器	207
9.2.1 常用电子设备抗干扰测量设备及其功能	207
9.2.2 频谱分析仪	207
9.2.3 测量接收机	209
9.2.4 其他测试仪器设备	210
9.3 电磁兼容性测量环境	213
9.3.1 EMC 实验室基本要求	213
9.3.2 开阔测试场地	214
9.3.3 屏蔽室	214
9.3.4 电波暗室	215
9.3.5 横向电磁波传输小室	215
9.3.6 吉赫兹横向电磁波室	215
9.4 EMC 测量系统软件 EMC32 简介	216
9.5 传导干扰测试	217
9.5.1 传导干扰测试布置	217
9.5.2 电流探头法	217
9.5.3 电源阻抗稳定网络法	218
9.5.4 功率吸收钳测量干扰功率的方法	219
9.5.5 定向耦合器法	219
9.6 辐射发射及抗扰度测试	219
9.6.1 辐射发射测试概述	219
9.6.2 磁场辐射发射测试	221
9.6.3 电场辐射发射测试	221
9.6.4 辐射抗扰度测试	221
思考题与习题	223
参考文献	224

第 1 章 抗干扰技术与电磁兼容性

1.1 抗干扰技术与电磁兼容性概述

1.1.1 抗干扰与电磁兼容性

1. 干扰的定义

干扰是指由外部噪声和无用电磁波在接收中造成的骚扰。也可定义为：在接收一些所需信号时，非所需能量造成的扰乱效应，包括其他信号的影响、杂散发射、人为噪声等，自然噪声一般不计算在内。

2. 电磁兼容与抗干扰

电子设备和电子电路一方面受外界干扰，另一方面它又会对外界产生干扰。所以电子信号对本电路是有用信号，而对其他电路可能成为噪声。

电子电路抗干扰技术是目前国外所称 EMC 的一个重要组成部分。EMC 是 Electro Magnetic Compatibility 的缩写，译成电磁兼容。世界各国对 EMC 技术十分重视，特别是将电子电路抗干扰作为一个重要课题研究，并成立了国际性组织，以便交流各国研究成果和制定统一的技术规范和标准。

所谓电磁兼容，是指干扰可在不损害信息的前提下与有用信号共存。国际电工委员会（IEC）对电磁兼容性的定义为：“电磁兼容性是电子设备的一种功能，电子设备在电磁环境中能完成其功能，而不产生不能容忍的干扰。”

GB/T 4365—2003《电磁兼容术语》定义为：“设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。”

GJB 72—1985《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》定义为：“设备（分系统、系统）在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态。即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射导致或遭受不允许的降级，它也不会使在同一电磁环境中其他设备（分系统、系统）因受其电磁发射导致或遭受不允许的降级。”

电磁兼容性有三层含义：①电子设备应具有抑制外部电磁干扰的能力；②该设备所产生的电磁干扰应低于规定的限度，不得影响同一电磁环境中其他电子设备的正常工作；③任何电子设备的电磁兼容性都是可测量的。

干扰是噪声在电路中的某种效应。抗干扰就是结合电路特点使干扰减小到最小，符合国际、国家制定的电磁兼容性标准。

抗干扰技术在军事上具有重要意义。例如，1982 年英国与阿根廷马岛之战中，英国的“谢尔菲尔德”号驱逐舰因未解决好电磁兼容性问题，暂时关闭雷达以保证远程通信不受干扰，结果被阿根廷飞鱼式导弹击中，造成舰毁人亡。又如 1991 年海湾战争以及 1999 年科索沃战争期间，美军使用了电磁脉冲炸弹这种新概念武器，产生极强电磁干扰脉冲，使对方雷达、通信网彻底瘫痪，进而完全获得制空权。

电磁干扰危害性极大。能够损坏电子元器件的单个脉冲及连续脉冲的能量见表 1-1。

表 1-1 能够损坏电子元器件的单个脉冲及连续脉冲的能量

元器件名称	能损坏元器件的单个脉冲能量/ μJ	能损坏元器件的连续脉冲能量/ μJ
0.25W 电阻器	10^4	10^2
电解电容器	$60\sim10^3$	$0.6\sim10$
继电器	$10^3\sim10^5$	$10\sim10^3$
二极管（点接触型）	$10^{-2}\sim10$	$10^{-4}\sim10^{-1}$
小功率晶体管	$20\sim10^3$	$0.2\sim10$
大功率晶体管	10^3	10

电磁辐射能引爆电起爆装置、弹药库，还能对人体造成危害。实验表明，当微波照射功率密度为 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 时，人体温度能上升 1°C 。如用 1200MHz 、 $330\text{mW}/\text{cm}^2$ 的微波来辐射一条狗，狗在 15min 内死亡。我国制定的微波对人体辐射的安全限度定为 $0.025\sim0.05\text{mW}/\text{cm}^2$ 。此外，飞机在飞行中不准使用移动电话，这是因为移动电话的电磁波会干扰导航系统，对飞行安全造成威胁。

3. 抗干扰技术内涵与抗干扰设计

抗干扰技术内涵：噪声很难消除；采取必要措施使干扰降低到最低限度。

抗干扰设计就是在电子电路和设备设计过程中，采用各种抗干扰措施，使电子设备达到电磁兼容性标准。所以，抗干扰设计等于电磁兼容性设计。

电子电路抗干扰技术可以说是一种实验技术，一种工艺技术。在电子设备样机调试过程中，可能因设计考虑不周，样机受干扰导致工作异常或达不到国家或国际标准；有的设备在恶劣的电磁环境下，不能正常运行，就要运用抗干扰技术，采用抗干扰措施，进行试验，降低或消除干扰，直至达到国家或国际标准，并修改设计图纸和生产工艺，这一过程称为抗干扰调试。

从事电子技术的技术人员都有共同体会：有好的电子线路不一定能组装出达到预期效果的装置或设备，常常要在排除干扰的调试上花大量的时间和精力。这是理论（理想条件）与工程实际有一定距离的缘故。抗干扰技术实质上是解决干扰问题的一种工艺措施与技巧。电子电路抗干扰技术是理论与实践相结合、设计与调试试验相结合的技术。

在电子设备的研发过程中，要充分考虑到系统、分系统（电子电路）、设备与周围环境之间的相互干扰，在电子系统、电子电路的开发与设计过程中采取正确的防护措施，减小电子系统本身的电磁发射。在设备或系统功能设计的初始阶段，同时进行抗干扰（电磁兼容）

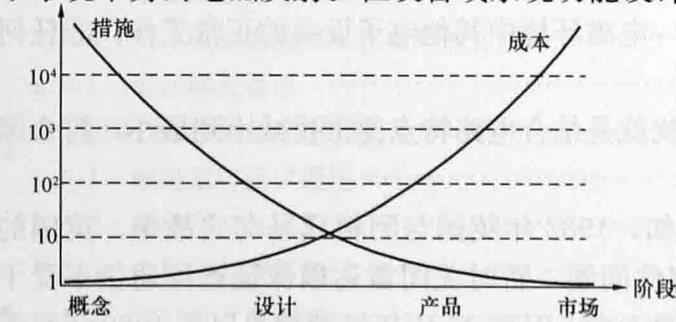


图 1-1 解决电磁兼容（抗干扰）措施、成本与产品开发、生产过程之间的关系

设计，把电磁兼容（抗干扰）的大部分问题解决在设计定型之前，这样可得到最高的效费比。研究表明，有 80% 的潜在干扰问题可在设计与研发阶段解决。

通过总结多年来电磁兼容技术与工业的发展的经验，可得出解决电磁兼容（抗干扰）措施、成本与产品开发、生产过程之间的关系图如图 1-1 所示。

图 1-1 中横坐标为电子、电气产品推

出过程的各个阶段,纵坐标为对该产品解决电磁兼容问题的成本及措施。由图可见,在产品开发早期阶段(概念阶段)解决电磁兼容(抗干扰)问题所需成本为1;到型号研制阶段(设计阶段),所需可能为10;到批量生产阶段(产品阶段)时,成本可能达到100。因为在产品批量化生产时加以解决,模具及工艺流程都可能需要改变。如在批量生产时尚未发现或未能解决电磁兼容问题,到现场安装调试阶段(市场阶段)再来解决,成本将成千上万地增加。同样,越早发现电磁兼容问题,解决问题的方法就越多,如在产品投产后发现还有问题存在,解决的措施就大大减少,解决的难度也会大得多。由此可见,对于一个产品或系统,防患于未然,尽早地解决电磁兼容问题是十分必要的。

1.1.2 电磁兼容与抗干扰主要术语

1. 噪声

电子信号分为有用信号和无用信号。噪声是指有用信号以外电子信号的总称,不管它对电路产生影响与否。例如,直流电源中的纹波电压和放大电路中的自激振荡等。

2. 噪声系数

噪声系数 N_F 是用来衡量放大器内部噪声特性的一个重要参数, N_F 定义为放大器输入端信噪比与输出端信噪比的比值

$$N_F = \frac{\text{输入端信噪比}}{\text{输出端信噪比}} = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{P_{no}}{A_p P_{ni}} \quad (1-1)$$

式中: P_{si} 为输入信号功率; P_{so} 为输出信号功率; P_{ni} 为输入噪声功率; P_{no} 为输出噪声功率; A_p 为功率放大倍数。

用分贝(dB)表示噪声系数 N_F 为

$$N_F = 10 \lg \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (1-2)$$

3. 电磁发射

电磁发射(Electromagnetic Emission)就是“从源向外发出电磁能的现象”。电磁兼容中的发射既包含传导发射,也包括辐射发射,电磁兼容中的发射通常是无意的,因而并不存在有意设计制造的发射部分,一些本来派做其他用途的部件(如印制导线、电线、电缆等)充当了发射的角色。

4. 电磁骚扰

电磁骚扰(Electromagnetic Disturbance)是指任何可能引起装置、设备或系统的性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传输媒介自身的变化。

5. 电磁干扰

电磁干扰(Electromagnetic Interference)是指电磁骚扰引起设备、传输通道或系统性能的下降。电磁骚扰仅是电磁现象,是指客观存在的一种物理现象。它可能引起电路、设备、系统的降级或损坏,但不一定形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。

电磁骚扰包括了无用信号。例如,对于受寻呼台干扰的电视频道而言,该寻呼台信号对寻呼台是有用信号,而对被干扰的电视频道是无用信号。

电磁骚扰还包括传播媒介的自身变化,这属于无源骚扰。例如,对短波通信而言电离层的变化;对微波通信而言空气中的雨、雾的影响等,是典型的传播媒介变化引起骚扰。

6. 对骚扰的抗扰度

对骚扰的抗扰度 (Immunity To a Disturbance) 是指装置、设备或系统面临电磁骚扰时降低运行性能的能力。

7. 电磁敏感性

电磁敏感性 (Electromagnetic Susceptibility, EMS) 是指在存在电磁骚扰的情况下, 装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。

电磁敏感性高, 则抗扰度低。实际上电磁敏感性、抗扰度都反映了抗干扰能力, 仅是从不同的角度出发而已。在国际与国内, 军用标准体系常用敏感性这一术语, 而民用标准惯用抗扰度这一术语。

8. 带宽

带宽 (Bandwidth) 是指一个接收机响应信号的上升 3dB 点和下降 3dB 点之间的频率间隔。

9. 共模

共模 (Common Mode, CM) 是指存在于两根或多根导线上, 流经所有导线上的电流均为同极性的。

10. 差模

差模 (Differential Mode, DM) 是指在导线对上极性相反的电压或电流。

11. 共模抑制比

共模抑制比 (Common-Mode Rejection Ratio, CMRR 或 K_{CMR}) 是指衡量运算放大器对共模电压抑制能力的参数。其计算公式如下

$$CMRR = K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ 或 } K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \text{ dB} \quad (1-3)$$

式中: A_{ud} 为差模电压放大倍数; A_{uc} 为共模电压放大倍数。

12. 串扰 (串音)

串扰 (串音) (Crosstalk) 是指在被干扰电缆上, 从邻近干扰源电缆耦合的电压与该邻近电缆上电压之比。单位为分贝 (dB)。

13. 远场区

远场区 (Far Field) 是指信号源距测量点有 $\frac{1}{6}$ 波长以上的辐射场, 也称为平面波。

14. 近场区

近场区 (Near Field) 是指信号源距测量点小于 $\frac{1}{6}$ 波长的辐射场。

15. 灵敏度

灵敏度 (Sensitivity) 是指当模拟电路中的噪声为有限带宽白噪声时, 即 S (信号) = N (噪声) 时对应的输入信号值。该值以下, 电路没有响应信号输出, 或输出信号可忽略。

白噪声是指功率谱密度在整个频域内均匀分布的噪声。例如, 热噪声和散弹噪声在很宽的频率范围内具有均匀的功率谱密度, 通常可以认为它们是白噪声。

1.2 噪声的种类及其特点

由于分类的角度不同, 噪声的分类在各种文献中并不一样。这里从几个角度来对电子系

统的噪声进行分类,并介绍一些噪声的基本特点。

1.2.1 按噪声表现的状态分类

按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、间歇和瞬时噪声。

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,是连续的和规则的。连续的不规则噪声如直流电动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时的浪涌脉冲等。

1.2.2 按形成噪声的机理分类

按形成噪声的机理可分成内部噪声和外部噪声两大类。

1. 内部噪声

内部噪声可分为以下 14 种:

(1) **热噪声** 是指电阻等由于热能作用时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)** 是指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,如同话筒一样,在电路内产生噪声电压的噪声。

(3) **散粒噪声** 是指电子管阴极所发射的电子,每个都是彼此独立的,在各个短暂的瞬间,它们都是不连续的、不规则的,由于这种不规则性引起的电特性变化,而形成的一种频谱范围很宽的噪声。

(4) **闪变噪声** 是指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,形成的噪声。

(5) **交流声** 是指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的噪声,往往会在音响设备上发出令人讨厌的低频哼声。

(6) **热电势噪声** 是指异种金属相接触,在它们之间有温度差时,会产生电动势,而形成的一种噪声。

(7) **接触噪声** 是指材料接触处接触不良使该处电导率起伏变化而引起的噪声。接触噪声常见于假焊、导线连接不牢靠、开关接点接触不良等。

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

(9) **自激振荡** 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,产生相移的一种叠加在信号上的噪声。

(11) **分配噪声** 是指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的噪声。

(12) **1/f 噪声或闪烁噪声** 是指晶体管、场效应晶体管等器件在低频端产生的一种噪声,其噪声功率与频率成反比地增大。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 是电路中金属在腐蚀时产生一种电池效应所形成的噪声。

2. 外部噪声

外部噪声可以分为人为噪声和自然噪声两种。它们分别是由人为干扰源和自然干扰源产生的。人为干扰源可分为两类: 一类是非功能性干扰源, 如电源线、电力线、旋转机械、点火系统等; 另一类是功能性干扰源, 如大到雷达、通信设施及辅助设备、射频加热器、医用电子仪器设备等, 小到荧光灯和气体放电管等, 而且随着科技的发展, 每一种电子新产品都可能成为新的人为干扰源。下列前 6 种属于人为噪声, 后 3 种为自然噪声。

(1) 人为噪声

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动机转动时都会产生火花放电, 火花放电会形成一系列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、低频航空无线电通信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。是指在开关电路中如晶体管、晶闸管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非常强烈。

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

(2) 自然噪声

1) 大气噪声。有时又称为天电噪声。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, 雷电是一连串的干扰脉冲, 它从极低频到 50MHz 都有能量分布, 主要能量分布在 100kHz 左右, 高频分量随 $1/f^2$ 衰减。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。即使距雷电几千千米以外, 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、电网输电线的直线雷击或雷电感应, 会对电路产生幅度很高的浪涌电压而形成更严重的干扰。

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。例如, 沙暴、尘暴也会引发干扰, 是由于带电尘粒与导体表面或介质表面相撞后, 交换电荷形成电晕放电而产生的。

2) 太阳系噪声。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，太阳的无线电噪声随着太阳的活动，特别是太阳耀斑的发生而显著增加，干扰频率从 10MHz 到几十吉赫。太阳耀斑会导致地球表面的磁暴，使航天器发生失效和异常现象，还可能造成通信和遥测中断。太阳耀斑的大量出现还会影响到电离层，从而干扰短波的传播。

(3) 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（波长为 1.5m、1.85m、3m、15m）。

1.2.3 根据噪声频率分类

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 1-2。需要说明的是，这里定义的低频、高频的频率范围以 50Hz 划界，与《高频电子电路》所定义的频率范围是不同的。

表 1-2 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	很难与信号分开
	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，无线电广播及通信设备的发射	对电路产生电磁波感应噪声，或使非线性元件产生低频成分的噪声

在工程实际中把干扰源分为以下 6 类：

(1) 工频干扰源 由交流供电而产生的，频率为 50Hz 及其谐波，包括输配电系统和电力牵引系统所产生的干扰。

(2) 甚低频干扰源 频率范围在 30kHz 以下，波长大于 10km。

(3) 载频干扰源 频率范围在 10~300kHz，波长大于 1km。包括高压直流输电谐波干扰、交流输电谐波干扰及交流电气铁道的谐波干扰。

(4) 射频及视频干扰源 频率范围在 300kHz~300MHz，波长在 1~1000m。包括工业、科学和医用射频设备、输电线电晕放电、高压设备和电力牵引系统的火花放电以及内燃机、电动机、家用电器和照明电器干扰等。

(5) 微波干扰源 频率范围在 300MHz~300GHz，波长在 1mm~1m。包括特高频、超高频、极高频干扰。

(6) 雷电及核电磁脉冲 频谱在 0~1GHz。

1.2.4 根据噪声对电路作用的形态分类

噪声对于电路作用的形态有两种：一种是串模，一种是共模。串模噪声常称为正态噪声、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 1-2 来说明。对于信号电压 U_s 来讲，加

上了一个与它串联的噪声 U_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 1-2 (c) 是串模噪声叠加于直流信号电压 U_s 之上的波形。串模干扰电压是指在仪器或电路输入端, 叠加在有用信号上那部分不需要的输入电压。

串模干扰的抑制能力用串模抑制比 SMRR 来表征

$$\text{SMRR} = 20 \lg \frac{U_{\text{dm}}}{U_{\text{nmi}}} \text{ (dB)} \quad (1-4)$$

式中: U_{dm} 为串模干扰电压, U_{nmi} 为输入端由串模干扰引起的等效差模电压。

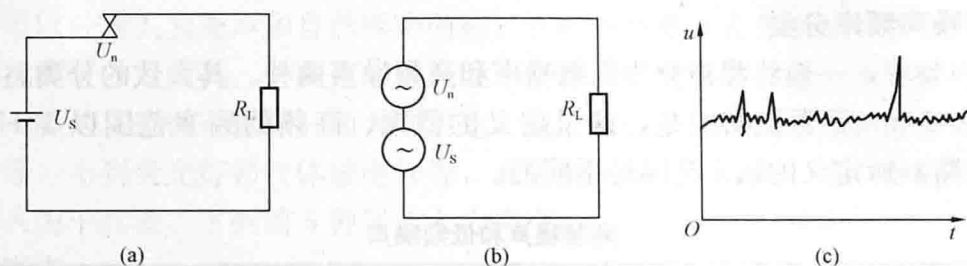


图 1-2 串模噪声

(a) 实际电路; (b) 等效电路; (c) 串模噪声波形

共模噪声对于电路的作用形态可由图 1-3 来说明。在以大地电位为基准的回路中, 两根线 A 与 B 上均对地有一个噪声电压 U_n 。在这个电路中, U_n 的产生是由于两个回路间存在着一个公共阻抗 Z , 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 U_s 是直流信号、 U_n 是交流信号时, 线 A 与 B 上的波形如图 1-3 (c) 所示。共模噪声可视为在 A 线上和 B 线上传输的电位相等、相位相同的噪声信号。共模干扰电压是指仪器或电路的两个输入端和地之间存在的电压。图 1-3 (b) 中 A 线和 B 线之间电压 U_{AB} 可视为在 A、B 线有 180° 相位差的共模干扰信号。共模干扰的抑制能力用共模抑制比 CMRR 来表征

$$\text{CMRR} = 20 \lg \frac{U_{\text{cm}}}{U_{\text{cmi}}} \text{ (dB)}$$

式中: U_{cm} 为共模干扰电压, U_{cmi} 为输入端由共模干扰引起的等效电压。

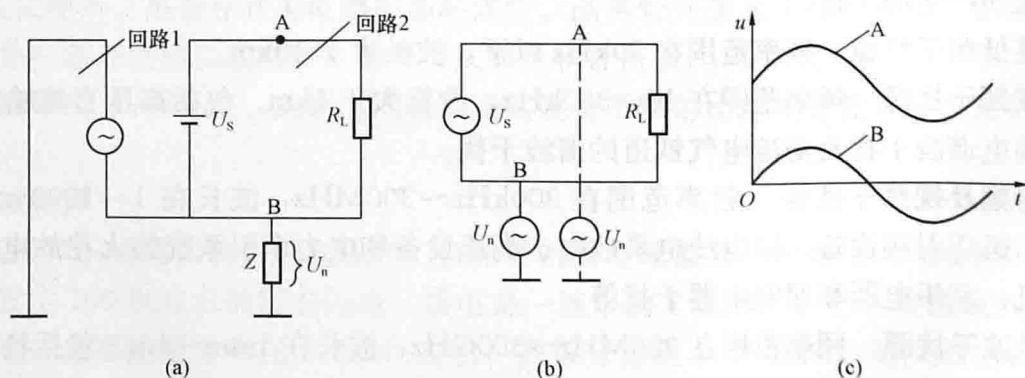


图 1-3 共模噪声

(a) 实际电路; (b) 等效电路; (c) 共模噪声波形

共模噪声往往可以转换成串模噪声。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。一般来说, 共模噪声只有转化成串模噪声才会对电路起影响。若一电路完全平衡, 则说明它有完全阻止共模噪声转化成串模噪声的能力。然而, 完全平衡是很难做到