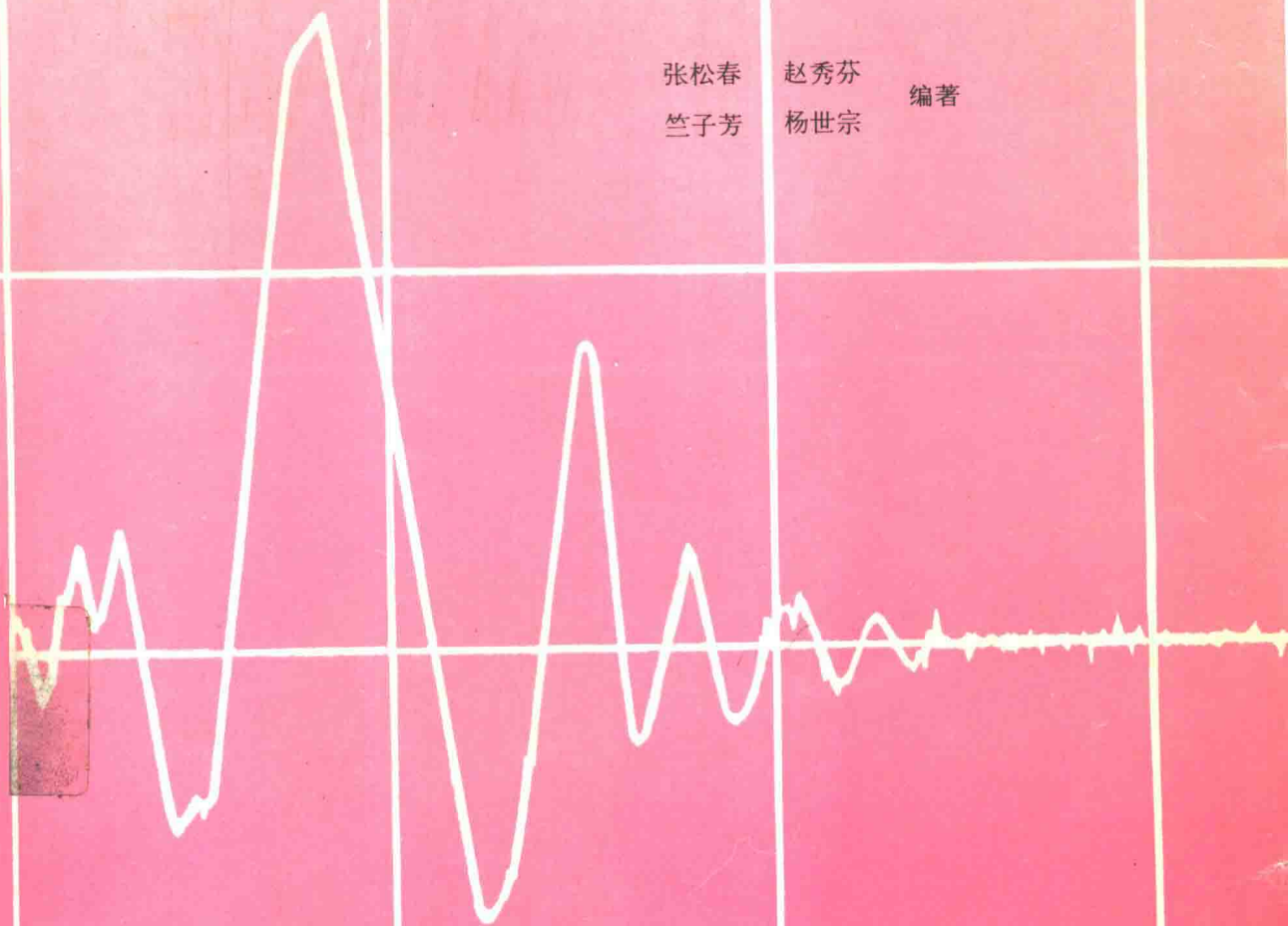


电子控制设备 抗干扰技术及其应用

张松春
竺子芳

赵秀芬
杨世宗
编著



机械工业出版社

电 子 控 制 设 备 抗干扰技术及其应用

张松春 赵秀芬
竺子芳 杨世宗 编著

机械工业出版社

本书以电子控制设备的电磁兼容性技术为核心,深入浅出地论述电磁干扰的产生机理和抑制方法,汇集大量数据和实例,方便使用。前四章阐述基础知识,对国外80年代前后的抗干扰技术做一概述,同时介绍多种测量电磁干扰和设备抗扰度的方法。后五章讲述模拟电路、数字电路、计算机和系统、成套控制设备及自动化系统等抗干扰措施。

本书对从事研究和设计电子电路、电子控制设备和自动化系统的专业人员甚有裨益,适于制造、安装、调试和维修电子控制设备的工程技术人员参考使用,也可作为大专院校有关专业高年级学生和研究生参考书。

电子控制设备抗干扰技术及其应用

张松春 赵秀芬 编著
竺子芳 杨世宗

责任编辑:孙流芳 版式设计:庄明珠
封面设计:范培彦

机械工业出版社(北京阜成门外百万庄南里一号,
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)
天津电气传动设计研究所服务公司印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $20^{1/2}$ ·字数488千字
1989年6月北京第一版·1989年6月天津第一次印刷
印数0,001—4,000·定价12.60元

ISBN7-111-01815-X/TN·38(X)

前 言

随着电力电子、微电子和计算机技术的迅速开发和广泛应用,原来以强电和电器为主、功能简单的电气控制设备已发展成强弱电紧密结合、以电力电子和微电子器件为核心、功能齐全的新型电子控制设备。然而,电子控制设备由于其所用的元器件和电子线路,具有工作信号电平低、速度快、元器件安装密度高等特点,对电磁干扰较敏感,因而对使用现场的电磁环境要求也较苛刻。另一方面,电子控制设备本身在工作时也向外界发出电磁干扰,往往影响其它电子设备的正常工作。

国内外实践证明,如果现代电子控制设备和系统在设计、制造、安装和使用缺乏正确的抗干扰技术的指导,则往往设备既不能迅速投入正常工作,也不能长期稳定可靠地运行,有的甚至严重影响整个企业的经济效益。

为此,国内外许多部门先后投入了相当力量从事电子控制设备抗干扰技术的研究,对电磁干扰进行了大量的调查,开发了各种干扰量和抗干扰能力的测试方法和测试仪器,制定了一系列有关抗干扰的试验、设计、施工等标准和规范,大力推广研究成果,将抗干扰技术从凭经验和定性分析的低级阶段提高到依靠科学和定量分析来抑制干扰的高级阶段。现在已经能够有目的地采取经济而有效的措施来提高电子控制设备的抗干扰能力,减少其发出的干扰,并且使它们能在现场严酷的电磁环境中长期稳定可靠地运行,从而在实践中取得了明显的社会效益和经济效益。

为了适应我国目前电子控制设备迅速发展的形势,满足生产实践对解决抗干扰问题的迫切要求,我学会组织了几位长期从事电子控制设备和系统的开发设计和抗干扰技术研究的高级科技人员,广泛收集了近十余年国内外抗干扰技术的研究成果和比较成熟的经验的600多篇文章,并结合工程实践,编撰了本书。选材时以电子控制设备的实用抗干扰技术和措施为重点,辅以丰富的实例和数据,具有内容全面、丰富、技术先进及实用性强的特点。书中所论述的基本论点在电子控制设备和系统进一步发展的行程中仍会长时间地具有参考价值,它将成为从事电子控制技术工作人员的一本很有价值的参考书。

全书共九章。其中第一、四、六、七、八章由赵秀芬执笔,第二、五章由竺子芳执笔,第三、九章由张松春执笔。杨世宗为第八章提供了资料。各章内容经过作者们互相修改、定稿,张松春对全书各章作了技术校对和必要的修正。叶镜兰负责插图和整理加工,机械电子工业部天津电气传动设计研究所总工程师、研究员级高级工程师高通文对作者的工作给予了鼓励和支持,并审阅了本书,以及对本书给与协助的同志,特此致以衷心的感谢。

中国自动化学会电气自动化专业委员会

1988年6月

目 录

第一章 电磁环境与干扰

- 1.1 电磁兼容性技术的主要内容 (1)
- 1.2 噪声定义和噪声种类 (4)
- 1.3 噪声发生机理和传递方式 (8)
- 1.4 描述噪声的常用术语 (11)
- 1.5 抑制电磁干扰的一般措施 (14)
- 1.6 检查电磁干扰和预防失误的思路 (17)

第二章 电子控制设备的噪声及其特点

- 2.1 常见噪声的种类 (22)
- 2.2 电网噪声 (23)
- 2.3 信号传输线上的噪声 (27)
- 2.4 直流电源的噪声 (29)
- 2.5 瞬变噪声 (32)
- 2.6 静电放电噪声 (37)
- 2.7 其他噪声 (40)

第三章 电磁干扰测量技术

- 3.1 干扰测量的一般问题 (51)
- 3.2 常用的干扰测量仪器 (56)
- 3.3 传导干扰测量 (63)
- 3.4 传导敏感度测量 (71)
- 3.5 辐射干扰测量 (80)
- 3.6 辐射敏感度测量 (82)
- 3.7 静电放电敏感度测量 (83)
- 3.8 测量结果的统计处理 (84)

第四章 常用的抗干扰元器件

- 4.1 电容器 (88)
- 4.2 电阻器 (95)
- 4.3 浪涌吸收器 (101)
- 4.4 滤波器 (108)
- 4.5 变压器 (123)

4.6	电子设备中的连接器	(137)
4.7	发展中的导电塑料	(138)
4.8	避免电磁干扰的新材料——光导纤维	(139)
第五章 模拟电路的噪声抑制技术		
5.1	模拟电路抑制噪声的一般措施	(142)
5.2	运算放大器	(143)
5.3	模拟量检测装置的噪声抑制	(153)
5.4	模-数转换器的噪声抑制	(162)
5.5	晶体管开关电源的噪声抑制	(168)
5.6	串联型直流稳压电源的噪声抑制	(175)
5.7	高频噪声的抑制	(177)
第六章 数字电路的噪声抑制技术		
6.1	数字电路的噪声容限	(182)
6.2	数字电路常见噪声和一般抑制措施	(184)
6.3	数字电路中的反射	(185)
6.4	数字电路的串扰	(189)
6.5	数字量信号输入回路的噪声抑制	(191)
6.6	逻辑组件多余输入端的处理方法	(198)
6.7	数字量信号输出回路的噪声抑制	(199)
6.8	电源噪声的抑制	(202)
6.9	静电对MOS器件的危害和克服办法	(206)
6.10	α 射线软误差	(207)
第七章 印制电路板和配线组装方面的抗干扰技术		
7.1	印制电路板种类和抗干扰措施	(209)
7.2	小型母线和条型电源母线	(215)
7.3	电子设备中常用的导线	(224)
7.4	电子设备配线设计的基本原则	(231)
7.5	绕接技术	(237)
第八章 电子计算机控制系统的噪声抑制技术		
8.1	计算机系统抗干扰的一般措施	(240)
8.2	计算机控制系统电源装置的噪声抑制	(242)
8.3	计算机系统设备的连接方式	(247)
8.4	过程输入输出接口的噪声抑制	(252)
8.5	CRT显示装置的噪声抑制	(262)
8.6	磁盘装置的噪声抑制	(265)
8.7	用软件手段抑制干扰的措施	(267)
8.8	计算机设备本身的噪声抑制	(275)

第九章 成套控制设备和自动化系统的噪声抑制技术

9.1 成套控制设备和自动化系统的电磁兼容性	(279)
9.2 电源系统的干扰和抑制	(282)
9.3 负载回路的干扰和抑制	(285)
9.4 信号回路的干扰和抑制	(291)
9.5 接地	(295)
9.6 电缆选择和敷设	(308)
9.7 晶闸管传动设备中的干扰和抑制	(312)
9.8 设备结构与干扰抑制	(315)
参考文献	(318)

第一章 电磁环境与干扰

利用电能进行工作的各种电气设备和电子设备,与其他物体及设备一样,工作在一定环境之中。运行中的电气、电子设备大多伴随着电磁能量的转换,往往对周围环境中的其他用电设备发生影响,与此同时,电子设备本身也会受到所处环境的各种电磁干扰。

早期的、结构和工作原理均比较简单的电气设备大多是强电设备,它们的运行时常会对无线电、通信等弱电设备产生干扰。然而,其本身却很少受到所处电磁环境的影响,或者虽然受到某种程度的电磁干扰,但大多不会造成严重恶果。

从50年代开始,随着自动化技术和半导体器件的迅速发展,电力电子技术和微电子技术迅速地向电气控制设备领域渗透,逐渐形成电力与电子设备互相结合,强电与弱电交叉工作的局面。人们已察觉到电磁环境和干扰问题在影响成套工业控制设备的可靠性。因此,电磁干扰问题也开始被从事电气控制设备研究、设计、制造和使用的工程技术人员重视起来。近些年来,由于机-电-仪一体化技术的发展,出现了机械、电力、电子、仪表,强电、弱电,硬件、软件紧密结合的又一新局面,形成了更高一级的自动化系统,而且往往在结构方面也融为一体。因此,电磁环境和电磁干扰问题也日趋复杂。对于这样的机电设备,如何抑制电磁干扰,防止相互之间的有害影响,便成为电控设备和自动化系统能否可靠运行的关键技术之一,成为自动化技术、计算技术、仪表检测技术等一系列专业都要求解决的共同性课题,于是形成一门新的技术分支——工业电子控制设备电磁兼容性技术。

早在大量应用无线电电子通信设备的初期,因发现周围电磁环境对通信的干扰而广泛开展无线电电子通信设备的电磁兼容性研究,如今它已是一门比较成熟的技术学科,并已制定了一系列标准和规范。其中许多成果可供工业电子控制设备的电磁兼容技术借鉴。但是,工业电子控制设备具有自己的特点,设计和研制这种设备与有效利用电磁能及协调电磁环境的电工技术等相关的多种理工学科,及至经济学、社会学等很多方面都有密切关系,所以工业电子控制设备的电磁兼容性技术涉及多种学科,许多问题相当复杂,加以起步较晚,所以是现阶段迫切应予解决的突出问题。

1.1 电磁兼容性技术的主要内容

所谓电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility,简称EMC,俗称抗干扰),是指干扰可以在不损害信息的前提下与有用信号共存。国外曾对EMC的定义提出过各种见解,互相间略有差别。其中D.怀特(D.White)所提的定义最为贴切:“装置或者系统具有在其设置的预定场所投入实际运行时,既不受周围电磁环境的影响,又不影响周围环境,也不发生性能恶化和误动作,而能按设计要求正常工作的能力”。综合国外各方面的意见,工业电子设备电磁兼容技术的任务是:在阐明电磁环境和电磁环境对电力电子设备影响的基础上,全面研究电力电子设备、强电-弱电紧密结合的系统等在信息传递、线路结构、组装配置等各

方面的电磁噪声抑制措施,提出科学的设计原则和实用方法,使产品能够在其所处的电磁环境中长期稳定运行,发挥其应有的效能,既不被周围设备发射的电磁能量所干扰,也不妨碍它的周围设备的正常工作。

1.1.1 电磁环境

一切电力电子设备和系统,也包括生产、制造和使用它们的人类在内,都存在于一定的环境中。温度、湿度、尘埃、压力、冲击、振动、气体、声、光等是易被人们直接感觉到的环境,电磁环境则时常被人们忽略,可是电子设备对电磁环境却十分敏感。自然界的各种充放电现象和人类的各种用电活动都会使空间电场和磁场不断地变化,电磁环境的稳定状态和变化过程会对处于该环境中的各种用电设备产生各种形式的电磁干扰。现用图1.1说明一个系统所处的电磁环境及其相互作用的情况。

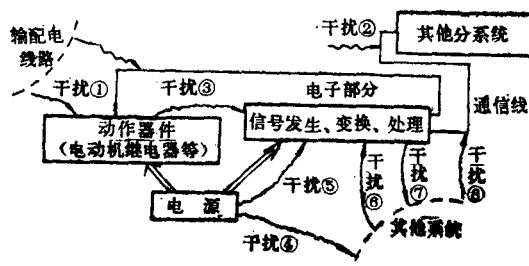


图1.1 系统的电磁兼容性示意图

这个系统中,电源和动作器件产生的电磁场对电子部分的干扰是③和⑤,电动机、继电器等需要有正确信号才能执行其规定动作,可是它们本身的动作又产生电磁干扰,使信号源不能提供正确信号,这是系统内部的电磁干扰;闪电、输配电线路和其他系统对电子部分及其通信线的干扰是①、⑥和⑧,而此系统对其他系统的干扰是②、④和⑦,这是系统之间的干扰。

1.1.2 抑制电磁干扰的原则

从图1.1还可看出,形成电磁干扰的条件有三:①向外发送电磁干扰的源——噪声源;②传递电磁干扰的途径——噪声耦合和辐射;③承受电磁干扰(对噪声敏感)的客体——受扰设备。为保证某系统在特定的电磁环境中免受内外电磁干扰,必须从设计阶段起便采取三方面的抑制措施:①抑制噪声源,直接消除干扰原因;②消除噪声源和受扰设备之间的噪声耦合和辐射,切断电磁干扰的传递途径,或者提高传递途径对电磁干扰的衰减作用;③加强受扰设备抵抗电磁干扰的能力,降低其对噪声的敏感度。这也是抑制电磁干扰的原则。

在有计算机的系统中,可利用硬件和软件手段,如采用时序程序等,对形成电磁干扰的三个条件加以限制。例如,当甲台设备发出电磁干扰时,令乙台设备降低噪声敏感度;或者,当乙台的噪声敏感度较高时,控制甲台设备少发生,甚至不发生电磁干扰,或者把甲台设备发出电磁干扰的期间与乙台设备有较高噪声敏感度的期间,在时间上错开等。总之,为使系统的抵抗电磁干扰能力与其所处的内外电磁环境相适应,并留有充分余地,以保证该系统在特定电磁环境中可靠运行,且不影响其他设备正常工作而进行的设计工作,称为电磁兼容性设计。

1.1.3 电磁兼容性设计的基础条件

为进行电磁兼容性设计,必须掌握具体电磁环境的噪声与干扰的物理特性,这是采取相应措施的基本依据。图1.2是电子设备和系统所处的电磁环境示意图。电磁干扰产生的原因很多,噪声频谱宽窄不一,时间长短参差不齐,且周期性与随机性互相交织,噪声传递途径多

种多样。可以看出,电磁环境错综复杂,很多情况下是在系统出现异常状态后人们才意识到所处电磁环境的严峻程度。因此,只对电磁环境有定性认识是不够的,应通过测量对电磁环境做出定量描述,如:用电场强度和磁场强度表示稳定电场和磁场;用电压、电流表示局部电路与整体关系;用统计量和振幅概率分布函数表示随机变化的干扰特性;用脉冲峰值分布、能量分布、发生频度分布等参数表示脉冲噪声等。到目前为止,已对某些孤立的电磁现象获得了若干描述有关特性的参数和模型,但距取得综合描述电磁环境的参数还有相当距离,尚需进行大量研究工作。

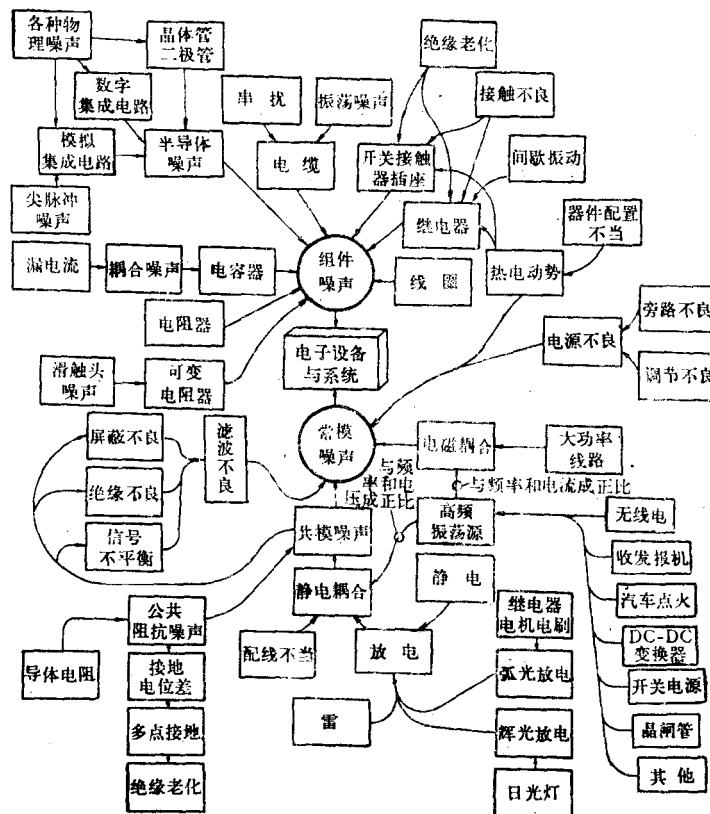


图1.2 电磁环境示意图

对处于各种电磁环境中的受扰设备的特性做出正确评价,是进行电磁兼容设计的又一个方面。如:利用适宜的试验手段、试验线路、测试方法,借助于静电放电模拟器、噪声模拟器等仪器对数字设备、模拟设备等进行测量,以得出设备能承受的电磁干扰极限值和噪声敏感度等。目前在这个方面同样有许多问题有待进一步研究和解决。

进行电磁兼容性设计时,需要根据具体电子设备和其所处的特定环境的多方面数据及正确理解,做好所用各种元件、器件和设备的布局;发挥屏蔽、接地、布线设计的作用,采用适当的滤波手段来处理电源等引起的电压瞬变干扰和电流瞬变干扰;选择其他行之有效的方

法抑制干扰源和切断干扰传递途径等等。在这些方面,国内外均积累了相当丰富的经验,可以充分加以运用。

目前,一些工业发达国家在电磁兼容性技术领域取得了若干成果。从表面上看似乎也没有什么新奇的发现和创造,但实质上电磁兼容性的研究成果提高了他们所生产的电子设备的可靠性,显著地减少了系统和设备的故障率,获得了巨大的技术经济效益。

1.2 噪声定义和噪声种类

通常,不同频率不同程度杂乱组合在一起的声音叫做噪声。而在电工学、电子学和无线电等学科中,一些不需要的电流和电压在某种条件下成为影响电路正常工作的干扰电流和干扰电压,也被称为“噪声”,或者称为“干扰”,因此需要对“噪声”做出确切定义。

1.2.1 噪声定义

按照我国国家标准GB2900·1—82,噪声的定义是“任何不希望有的信号;广义地说是在一有用频带内的任何不希望有的干扰”。

国外许多国家和部门及国际性组织对噪声的定义都提出自己的看法,先后制定繁简不一或大同小异的噪声定义,并分别写入各自的标准。这里把目前流行的几种说法加以简单归纳,得出“噪声”一词的综合性定义,以便后面各章能在这一定义下对抗干扰技术展开讨论。

(1) 收音机、电话机、对讲机、扩音机、磁带录音机等电子装置以真实重现音响为己任。可是,时常有一些杂乱音响掺混在真实音响中,如“呜”、“喀咧”、“卡达”和“噼”、“咚”之类的嘈杂声、哼声和连续振荡声等,很不悦耳,严重时甚至完全遮盖真实音响的再现。这类妨碍收听的讨厌的音响叫做“基本噪声”,与基本噪声相对应的变化电量称为“电噪声”,表现为对声音的干扰。

(2) 电视机等藉电波传输再现图象,可是荧光屏上常出现雪花、波浪纹和图象颤抖等现象,影响图象的清晰度,甚至使图象模糊变形,虽然与音响没有直接联系,但也是一些有害的变化电量造成的,这也是电噪声,表现为对电视图象的干扰。

(3) 电噪声的概念再延伸一步,如:正常运行的控制装置由于受到指令之外的一些变化电量的干扰而陷入运行紊乱状态;检测仪表由于接收到与检测值不准确对应的变化电量而指示错误的检测值;计数器因接收到正常计数信号以外的脉冲而出现错误的计数等。这一切都是危害性冲击电流或电压等变化电量对正常信号的干扰,都属于电噪声。

因此,电噪声的定义是:“叠加于有用信号上,扰乱信号传输,使原来的有用信号发生畸变的变化电量叫做电噪声,简称噪声”。

以危害性变化电量为对象开展研究讨论时,习惯上多使用“噪声”(noise)这个词。

由于噪声在一定条件下干扰电子设备等的工作,所以也把危害性变化电量称为电磁干扰(Electromagnetic Interference),简称干扰。以危害性变化电量的危害作用为对象开展研究讨论时,习惯上多使用“干扰”(Interference)这个词。

1.2.2 噪声种类

噪声种类的划分方法很多,可以按噪声的产生原因,也可以按噪声的性质、波形、持续时间,还可以按噪声的传递途径等各种表现或特点来进行分类。然而,不论哪种分类方法都有局限性,不能全面地反映噪声的错综复杂的性质和形态。本书只能概要地叙述与电子设备

有直接关系的内部噪声和外来噪声。

(1)内部噪声 指的是在电子装置和设备内部或器件本身产生的噪声。主要有下面几种:

①热噪声 由导体和半导体中电子热骚动所形成的电子噪声,是一种几乎遍布整个频谱的均匀噪声,即白噪声。所有具有电阻的元件都产生热噪声。温度越低,热噪声越小,只是在极端低温的情况下才能避免热噪声的产生。热噪声也叫电阻噪声,约翰逊噪声等。

②散粒噪声 电子管和半导体器件都会产生散粒噪声。当电子管热阴极发射的电子随机变化和半导体载流子随机迁移时,由于在一定时间内阴极电子和载流子形成一种不规则和不连续的运动而在很宽的频谱内出现电压起伏现象,称为散粒噪声,也叫肖特基噪声。

③闪变噪声 电子管阴极产生的噪声叫做闪变噪声,是各种表面漏电效应造成的载流子密度的波动,氧化物阴极的闪变噪声最大。这种噪声的谱密度在低频下最高,故又称为低频噪声。闪变噪声的大小与直流电流成正比,其功率密度与频率的倒数($1/f$)成正比,所以又称为 $1/f$ 噪声。

④颤噪声 电子管在受到其他部件或系统的机械振动时会引起电子管电极振动,使电极电流波动,导致电路参数变化,从而引起电路中的电压波动,故也称为振动噪声。

⑤交流哼声 在电子设备的输出中,出现电源频率或为电源频率整数倍频率的噪声。电子设备多用工频交流电整流后的直流电作电源。若滤波电路不理想,往往混入交流分量而形成交流哼声。此外,电子管灯丝电路、指示灯电路和变压器的漏磁通所感应的交流分量等都会产生交流哼声。

⑥感应噪声 如果电路的器件布局、配线和接地方式等不当,则发生静电感应、电磁感应,并通过一定线路耦合而形成感应噪声。

⑦断裂噪声 如果电路器件的接触不良,如电路配线连接得不好,或者开关器件的触点接触不良时,便产生“喀咧”、“卡嗒”等噪声,称为断裂噪声。

⑧尖峰噪声 切断电路中的电感性负载电流时发生的冲击或衰减振荡噪声,称为尖峰噪声。

⑨振荡噪声 由于对某种去耦电路考虑不周,放大电路的部分输出功率反馈到输入端而引起振荡,称之为振荡噪声。

⑩反射噪声 高速电路在长线传输时,由于阻抗不匹配,使所传输的信号在电路的阻抗变化点或传输线路的始端及终端等处发生反射,叠加于电路信号上,从而使信号波形畸变,谓之反射噪声。

⑪其他 由于电路条件不符合要求而使信号波形产生的畸变;由于电路参数选择不当或其他原因而出现的高次谐波;由于扬声器及扩大机等机电设备的结构和器件特性恶化而诱发出的有害干扰等,因为也是变化的电量,所以也以噪声对待。

(2)外来噪声 这是从外部侵入电子设备和装置的噪声。主要有自然噪声和来自其他机器和设备的人为噪声。

所谓自然噪声,是指天文气象中大自然现象所产生的噪声,最常见的有大气层噪声、太阳噪声和宇宙噪声。而来自其他机器和设备的人为噪声是指用电设备及其他设备与机器产生的噪声。因为用电设备在大量增加,所以人为噪声也相应地加大,正是因为人为噪声的不断

增加而形成电磁环境逐年逐月恶化的局面。为叙述简便明了起见，将自然噪声和人为噪声做一整理归纳，如表1.1和表1.2所示。

表1.1 自然噪声

种 类	产 生 原 因	特 点
大气层噪声 (空中雷电噪声)	凡大气层中能够构成电荷分离、积蓄等条件时都会产生充电放电现象。如：雷闪，低压，台风，严寒地带的飞雪，火山喷烟，黄砂等	• 火花放电 • 干扰频带很宽，从极低频至超高频或甚高频 • 传送距离相当远 • 噪声强度和干扰频度随季节和地区而异
太阳噪声	太阳黑子发射出的噪声和太阳黑子增加和活动激烈时产生的磁暴	• 噪声大小取决于太阳黑子的数量和活动激烈程度，有时可增强数千倍 • 对无线电通信有严重干扰
宇宙噪声 (银河噪声)	目前尚未探明产生原因，但已提出很多学说，如：宇宙太空电子自由转移说；银河系恒星体上爆炸现象说	• 干扰无线电通信 • 对宇宙航行有危害

表1.2 人为噪声

产生噪声的设备		噪声源 (括弧内为产生原因)	噪声表现方式
普通民用电器设备	有触点电器	霓虹灯、彩色电珠等灯具，继电器，电磁开关，电热被褥，电冰箱，电熨斗等恒温器	火花放电 电弧放电 脉冲噪声
	使用换向器电动机的机器	电钻，牙科医疗器械，汽车发动机，电吸尘器，电动搅拌机，电动刮脸刀，电按摩器等	火花放电 电弧放电 摩擦接触
	放 电 管	荧光灯，霓虹放电管，高压水银灯等	辉光放电
	用电力半导体器件组装的供电及控制装置	晶体管，晶闸管，整流器组成的整流、逆变等变流器	谐波和高频噪声、电源畸变等
高频设备	工业用高频设备	工业用高频加热器，高频电焊机，电子加热器等	无用信号
	高频医疗设备	甚高频、特高频理疗装置，电测仪等	无用信号
	超声波设备	探伤仪，测深仪，鱼群探测器，超声波清洗机等	无用信号
电力设备	电力线 (输配电线路)	(工频感应，静电感应，电磁感应，)(大地漏电流)	工频或脉冲
	电气化铁路	(绝缘老化，触点金属腐蚀，接触不良)	电晕放电 电弧放电
		车厢内机器，整流器等 (驶轮瞬时脱离铁轨)	火花放电 电弧放电
		(本身引起反射)	反射
内燃机	机动车	点火系统	放电
		发电机，电刷，喇叭，方向指示器，电压调节器等	多种噪声

(续)

产生噪声的设备	噪声源 (括弧内为产生原因)	噪声表现方式
无线电通信设备	大功率发射装置	广播设备, 雷达装置 (发报机的高次谐波)
	接收装置	电视接收机, 调频接收机, 调幅接收机
高速数字电路	电子计算机	时钟发生器, 开关电源等
	核爆炸设备	核爆炸时, 四周的气体发生电离, 使地磁场突然突变, 呈消失状态 100kA级电磁脉冲

注: 无用信号一对本系统是有用信号, 而对其他系统是无用且有害的信号。

1.2.3 常模噪声和共模噪声

从噪声对电子电路发生电磁干扰的模式来说, 常模噪声和共模噪声是对上节所述各种噪声的又一种更有实用价值的分类方法。

(1) 常模噪声(Normal Mode Noise) 又叫线间感应噪声或对称噪声。有些书中也称其为串模噪声或差动噪声、横向噪声等。如图1.3(a)所示, 噪声侵入往返两条线路间, N 为噪声源, R 为受扰设备, V_N 为噪声电压, 噪声电流 I_N 和信号电流 I_S 的路径在往返两条线上是一致的。这种噪声较难除掉。

(2) 共模噪声(Common Mode Noise) 又叫对地感应噪声、纵向噪声或不对称噪声。如图1.3(b)所示, 噪声侵入线路和地线间。噪声电流在两条线上各流过一部分, 以地为公共回路, 而信号电流只在往返两条线路中流过。从本质讲, 这种噪声是可以除掉的。但是由于线路的不平衡状态, 共模噪声会转换成常模噪声。可用图1.4来阐明共模噪声转换成常模噪声的原理。

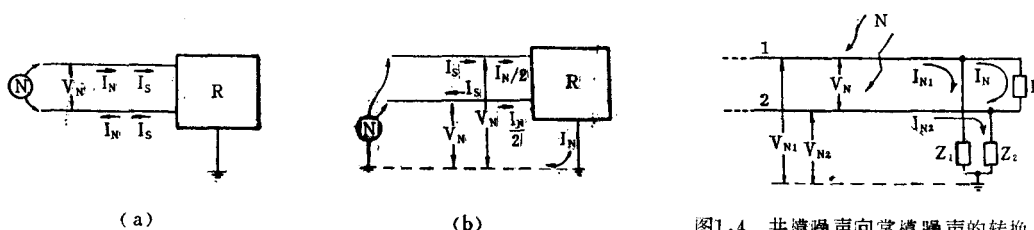


图1.3 常模噪声和共模噪声

(a) 常模噪声 (b) 共模噪声

图1.4 共模噪声向常模噪声的转换

在图1.4中, E 为噪声源, L 为负载, Z_1 和 Z_2 是导线1和导线2的对地阻抗。如果 $Z_1 = Z_2$, 则噪声电压 V_{N1} 和噪声电压 V_{N2} 相等, 从而噪声电流 I_{N1} 和 I_{N2} 相等, 即噪声电流不流过负载, L 这是共模噪声。然而当 $Z_1 \neq Z_2$ 时, 则 $V_{N1} \neq V_{N2}$, 从而 $I_{N1} \neq I_{N2}$, 于是 $V_{N1} - V_{N2} = V_N V_N / Z_L = I_N (Z_L - \text{负载阻抗})$, 这是常模噪声。因此, 当发现常模噪声时, 首先应考虑它是否由于线路不平衡状态而从共模噪声转换来的。

共模噪声有交、直流之分。交流共模噪声分布很广, 而直流共模噪声有时是由接大地处电化腐蚀作用形成的局部整流效应造成的, 或者是由于直流动力网的直流地电位差产生的。接地不当或泄漏电流等所造成的共模噪声大多在转换成常模噪声后才暴露其危害作用。通

常，输入输出线与大地或机壳之间发生的噪声都是共模噪声，信号线受到静电感应时产生的噪声也多为共模噪声。抑制共模噪声的方法很多，如屏蔽、接地、隔离等。抗干扰技术在很多方面都是围绕共模噪声来研究其有效的抑制措施。

1.3 噪声发生机理和传递方式

为便于掌握有代表性的噪声现象和它们的发生机理，把性质相近的噪声归纳在一起，用表1.3示出它们的主要发生机理和典型情况。

关于噪声传递方式，可以说几乎所有噪声都是通过各种导线，或者通过空间和大地传递的。虽然称沿导线传递的噪声为传导噪声，但实际上它往往也包含着其他多种噪声，既有与导线直接相连的噪声源所发出的噪声，也有导线沿途通过感应、辐射等空间电磁场作用而吸

表1.3 噪声发生机理

种类	发生机理	典型情况
放电噪声	火花放电	线路绝缘损坏造成放电
	静电放电	静电放电引起火花放电
	持续放电	电晕、辉光、电弧放电使部分线路绝缘损坏
	直击雷	天空云层和大地地表之间的放电
接触噪声	静态接触	接点的接触压力改变，引起接触电阻变化
	冲击	在冲击过程中的接触电阻变化
	振动	机械振动引起的接触电阻变化
	表面损坏	接点表面损坏引起的电阻变化
	触点抖动	触点断开又闭合时的抖动状态引起断续电流
	触点不完全接触	触点的面或点未完全断开和闭合的断续状态
	电极电荷起伏，电极电压波动	医用电子设备电极处的电压波动
	金属氧化物整流、检波输出	金属氧化物的调制检波
	热电动势，直流成分	不同金属材料接触处温差所引起的电动势
	金属接触面的断-续接触	金属接触面断-续接触引起的电流、电压变化
过渡性噪声	电感电容(LC)元件的振荡	LC微弱振荡形成的无用信号
	高速数字电路的电源通-断	集成电路中的过渡过程尖峰电流
	接通时冲击电流	白炽灯和电动机的冲击电流
	动力线过渡电压	线路通-断或故障时的异常电压
	感应雷	云层在导线上感应的电荷放电成为自由电荷，是电力线上的行波
	电子开关的动作	电子开关器件的相位控制
无用信号	工频电源的非预期信号	电源哼声，波形畸变
	无线电频率	高频设备、发报机、振荡器等的高频信号
	脉冲信号	数字电路等的数字脉冲信号扩散
	无用发射	发射机高次谐波，接收机局部振荡
反射波	信号本身的延迟信号	空中的反射波
	不匹配	传输线路阻抗不匹配引起的反射

收的噪声。由于噪声的传递是形成电磁干扰的极重要过程，或者说噪声源大多是通过电磁场对有关电子设备发生电磁干扰作用的，所以下面把噪声的传递方式列于表1.4，同时还对电磁场的特性做一简要分析。

表1.4 噪声的传递方式

传递途径	传递方式	决定因素		噪声表现方式
导线	传导	经导线侵入	干扰的模式	常模噪声：叠加于往返两线间的噪声
				共模噪声：叠加于线路和地线间的噪声
		侵入的线路		电源线：从电源电路侵入的噪声
				信号线：从信号输入线、输出线侵入的噪声
空间	辐射	辐射电磁场距离 辐射源的波长		电磁波
	感应	平行配线 and 多芯电缆等近距离 电磁场		静电感应：高阻抗电场静电耦合
				电磁感应：低阻抗磁场电磁耦合
	大地和接地电路	地线上出现的噪声电压		静电耦合：由地线侵入的噪声 电磁耦合：
	地线传导			电导耦合：外电流流入裸线
	地线感应			天线效应：接地线成为天线，辐射出噪声
	接地噪声	地电流		共模噪声：接地点间的电位差

按照电磁场理论，场中某点的特性取决于场源的性质和该点与场源的距离。电磁场由下列三种场组成：

(1) 辐射场 也叫远场，离场源足够远的空间属于这种电磁场区域。其特性主要由传递电磁场的介质来决定。在辐射场内，电场强度 E 与磁场强度 H 之比是一常数，等于介质的波阻抗，真空或空气的波阻抗 $Z_0 = 377\Omega$ 。由于 E 和 H 在时间上同相而向外发射电磁能量。辐射场的场强与场源强度(电流强度等)有关，而且与频率成正比，频率越高，辐射场越强。

(2) 静电场和静磁场 也叫近场，离场源足够近的空间是这种电磁场的区域。场源性质决定该近场是电场还是磁场。在高电压小电流的场源附近，如一段垂直天线附近，主要是电场，而在低电压大电流的场源附近，如电流线圈或框形天线的附近，主要是磁场。因为这种电场或磁场的强度可按静电场和稳定磁场的计算方法求出；所以称其为静电场和静磁场。但实际上其场强随场源而变，并使近场中的电子设备产生感应噪声，所以其性质实属感应场，对外不辐射能量。

(3) 感应电磁场 介于辐射场和静电场、静磁场之间的过渡区域，所以场的性质比较复杂。

上述三种区域间的边界与波长和距离有关。设波长为 λ ($\lambda = c/f$ ， c 为电磁波在真空中的传播速度，即光速， $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$)，距离为 r_0 ($r_0 = \lambda/2\pi$)。通常把离场源的距离 $r \geq 3r_0$ 的

区域作为远场, 即 $r \geq \lambda/2$ 的区域为远场; 把 $r \leq r_0/3$ 的区域作为近场, 即 $r \leq \lambda/20$ 的区域为近场。实践证明, 这样划分已相当准确, 在处理实际问题时, 即使把近场的范围扩大到 $r = r_0 \approx \lambda/6$, 也能获得有效结果。例如 $f = 1\text{MHz}$, 其 $\lambda = 300\text{m}$, $r_0 = 50\text{m}$, 因此 1MHz 以下的电子设备内的噪声耦合性质是近场感应, 只需按照场源的性质, 考虑其电场或磁场即可。

然而, 从电场或磁场角度研究噪声传递仍然是比较麻烦的。为简化成电路性质的处理方法, 可以认为两个带电导体间, 其电场集中在以带电导体为极板的电容器中; 磁场集中在载流回路构成的电感中。这样, 噪声耦合通道可用集中参数的电容 C 和电感 L 来表示。也就是说, 电位变化在两个导体间引起的静电感应, 可以用两个导体间的电容耦合来代替; 电流变化在两个回路间引起的电磁感应, 可用两回路间的互感耦合来代替。这便是采用集中参数的回路分析法。不过, 当电路的尺寸, 如传输线的长度, 接近信号波长时, 便不能忽略电磁场的波动特性, 对电流和电压沿线路发生的变化必须予以考虑。在进行这种电路研究时, 把整个线路设想为许多足够小的线路段, 每段仍可用集中参数来表示, 于是整个线路就能用分布参数的电路来表示。至于电磁屏蔽等问题, 由于涉及到电磁场分布和电磁波在介质中的吸收和反射等, 仍需从电磁场出发进行计算。

下面用回路理论来讨论电子设备间的噪声耦合。

图1.5中有三个噪声源 N_1 、 N_2 、 N_3 , 接收器 R 可以认为是机-电-仪一体化设备中电子部分的总称。这里举出三种耦合:

①公共阻抗耦合 是噪声源和信号源具有公共阻抗时的传导耦合, 图中的噪声源 N_1 与接收器 R 有公共阻抗 Z 而发生耦合。公共阻抗随元件配置和实际器件的具体条件而变。例如: 电源线和接地线的电阻和电感在一定条件下会形成公共阻抗; 一个电源电路对几个电路供电时, 如果电源不是内阻抗为零的理想电压源, 则其内阻抗成为接受其供电的几个电路的公共阻抗, 只要其中某一电路的电流有变化, 便会使其他电路的供电电压发生变化, 形成公共阻抗耦合。

②静电感应耦合 设 V_{N3} 对接收器 R 的感应电压为 V_{NC} , 则

$$V_{NC} = j\omega C V_{N3} Z_R$$

式中 Z_R ——接收器阻抗, $Z_R \ll 1/\omega C$;

C —— N_3 与接收器 R 间的分布电容。

形成这种 C 耦合的情况是很多的。

③电磁感应耦合 就 I_{N2} 对接收器 R 的感应电压 V_{NM} 来说, 称为 M 耦合, 即

$$V_{NM} = j\omega M I_{N2}$$

式中 M ——互感。

C 耦合和 M 耦合都与频率成正比。如果电路结构相同, 则频率越高, 干扰越大。

除上述三种耦合外, 通常在电子设备的机柜内还有漏电流耦合。种种耦合有时单独发生, 有时同时或者交叉地发生, 形成错综复杂的噪声, 需要兼用多种措施进行抑制。

为便于概括地掌握噪声耦合机理, 下面用表1.5列出电子设备中各种耦合机理的等效电路、计算式、与实际器件的对应关系和常用的抑制方法。

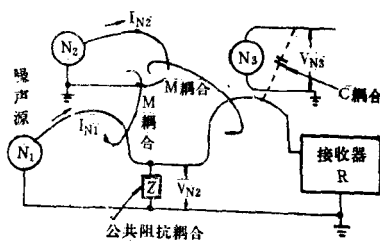


图1.5 噪声的耦合