

TH-33

428918

S09

机电工程师继续教育丛书

机电一体化系统的 电磁兼容技术

沙斐 编著



00428918

中国电力出版社

《机电工程师继续教育丛书》

编委会名单

名誉主任 丁舜年

主任 赵明生

副主任 刘 恕

委 员 (按姓名笔画为序)

万遇良 马 阳 王赞基 吕 森 严陆光

杨竞衡 吴伟文 汪 耕 陈伯时 陈忠信

周鹤良 张林昌 赵长德 郝广发 赖 坚

梁维燕 蔡宣三

主 编 万遇良

副主编 王 忱

序 言

当今世界科技发展的特点之一是新技术不断兴起,而且这些技术之间以及他们与传统技术之间,又互相渗透、彼此结合,形成多种技术的交叉融合,又进一步推动了科技发展不断出现新高潮。机电一体化技术是机械技术与微电子技术、计算机技术和自动控制技术等结合而发展起来的一种高新技术,是这些技术在产品的设计与制造过程中进行最佳协同集成的技术,是先进制造技术的重要组成部分,是制造业的重要发展方向。因此,对在职科技人员实施继续教育,掌握机电一体化技术的最新发展,对提高我国机电产品的技术水平和市场竞争能力,满足各方面的需求,推动科技进步和经济发展具有重要意义。

中国电工技术学会主办的电气工程师进修学院在电气工程师继续教育方面已经开展了十多年的工作,取得了一定成绩,为了在机电工业和国民经济其他部门推广应用机电一体化技术,满足广大工程人员对新技术的渴求,电气工程师进修学院特邀请有关专家编写了这套《机电工程师继续教育丛书》。这套丛书将跟踪高新技术的发展,陆续编写出版,首批编写6种,它们是:《机电一体化系统的设计与分析》、《机电一体化系统的电磁兼容技术》、《机电一体化系统中的计算机控制技术》、《机电一体化系统的软件技术》、《电源技术》、《电气传动与调速系统》。

本丛书将力求达到以下几点要求:

一、力争先进。本丛书的内容将跟踪国内外机电一体化技术的发展与进步,反映其发展趋势。作者均为有关高等院校、科研机构从事相关专业科研、教学和生产多年的专家。

二、力求实用。本丛书主要适用于具有大专以上专业水平的在职科技人员的继续教育和知识更新,也可用作高等院校学生的教材和相关专业研究生的参考书。丛书内容理论联系实际,能够指导读者在需要时运用到实际工作中去。

三、内容简明。每种书集中阐述一个问题,要求内容简明扼要,不包罗万象。

四、学习方式灵活。本丛书既可用于自学,也可用于面授。每种书除包括基本内容外,还包括思考题、练习题,以及深入学习用的参考书目,有助于读者理解掌握和深入钻研。

编写出版这套丛书是一种新的尝试,不可避免地会存在不少问题和缺点,热切希望广大读者给予支持和理解,更欢迎给予批评指正。

《机电工程师继续教育丛书》编委会

1998年7月

前 言

电磁兼容是一门多种学科相互交叉的新兴的边缘性学科。电磁兼容技术已在很多领域中得到广泛的应用,在机电一体化领域也越来越受到重视。任何电子电气设备在运行时向周围发射电磁能量,可能对其他设备的正常工作产生干扰,同时设备本身也可能受到周围电磁环境的干扰,电磁兼容研究的主要问题就是如何使处于同一电磁环境中的各种设备和系统都能正常工作而又互不干扰。机电一体化系统中既包含使用强电的各种电气电动设备和大功率大电流的电力电子设备,又包含小功率小电流的微电子器件构成的控制设备以及产生微弱状态信号的各种传感器。强电设备产生的强烈的电磁噪声将对弱电设备产生严重的干扰,因此电磁兼容技术的应用在机电一体化领域中显得尤为重要。

本书是机电工程师继续教育丛书之一,目的是帮助读者系统地了解有关电磁兼容的基础知识。围绕电磁干扰的三要素,即电磁骚扰源、电磁骚扰的传播途径和敏感设备分析并讨论了抑制干扰的三大基本技术,即滤波、屏蔽、接地。在掌握了这些基本原理和基本方法的基础上进一步讨论对组成机电一体化系统的主要设备的干扰抑制技术,包括计算机与数字设备的干扰抑制和电力电子设备的干扰抑制。本书还介绍了系统组成时需遵循的电磁兼容原则和电磁兼容测试及相关的国际国内标准。本书编撰时既吸收了国内外电磁兼容专家学者们的成熟经验和研究成果也溶入了作者多年来从事电磁兼容教学和科研的体会。在阐述时以基本概念为重点,避免繁琐的理论推导。当系统出现电磁兼容问题时往往表面现象复杂,令人无法下手,国外常称为“黑色魔术”。为了使读者能牢固掌握基本概念并用于解决实际问题,书中提供了尽可能多的实例进行分析。书后附有习题和参考文献,以便读者深入学习。本书的主要读者对象是从事机电一体化系统设计、制造、使用和维护的工程技术人员,也可作为高等院校有关专业的教材和参考书。

本书经北方交通大学张林昌教授审稿,提出了宝贵的意见和建议,在此谨向他表示衷心的感谢。

由于电磁兼容学科内容丰富,发展迅速,本人水平有限,书中有不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

1998年10月

目 录

序 言	
前 言	
第一章 电磁兼容和电磁骚扰	1
第一节 电磁兼容概述.....	1
第二节 电磁骚扰的种类.....	3
第三节 机电一体化系统中常见的电磁骚扰.....	6
第四节 电磁骚扰的数学描述方法.....	13
第五节 骚扰对敏感设备的干扰.....	19
第二章 骚扰的传输途径	26
第一节 骚扰通过导线传输.....	26
第二节 骚扰通过空间传输.....	37
第三章 滤波技术	52
第一节 滤波器的插入损耗及频率特性.....	52
第二节 反射式滤波器.....	53
第三节 吸收式滤波器.....	58
第四章 屏蔽技术	61
第一节 电场屏蔽.....	61
第二节 磁场屏蔽.....	63
第三节 电磁场屏蔽.....	67
第四节 屏蔽机箱.....	73
第五节 元器件的屏蔽.....	77
第六节 自屏蔽.....	81
第五章 接地	84
第一节 保护地线.....	84
第二节 工作地线.....	85
第三节 地环路.....	88
第四节 屏蔽电缆的接地.....	89
第六章 计算机和数字设备的干扰抑制技术	101
第一节 输入输出口.....	101
第二节 电源母线.....	111
第三节 印制电路板的布线和设计.....	120
第七章 机电一体化设备的骚扰抑制	131

第一节	晶闸管骚扰的抑制	131
第二节	感性负载的瞬态噪声抑制及其触点的保护	134
第三节	小型整流子电机的骚扰抑制	140
第四节	接通负载时冲击电流的抑制	142
第五节	电磁阀和继电器的骚扰抑制	143
第六节	开关电源的骚扰抑制	144
第七节	晶闸管触发电路的抗干扰	148
第八章	机电一体化系统的电磁兼容	150
第一节	系统的电源供电	151
第二节	系统的接地布置	157
第三节	系统的配线	162
第四节	系统的防雷	164
第五节	静电防护	167
第九章	电磁兼容测试和有关标准	171
第一节	电磁兼容标准	171
第二节	电磁骚扰发射测试	177
第三节	设备的抗扰度测试	187
习题		194
参考文献		200

第一章 电磁兼容和电磁骚扰

第一节 电磁兼容概述

电磁兼容是一门新兴的综合性学科。电磁兼容性 (EMC—Electromagnetic Compatibility) 的定义根据国家军用标准 GJB72-85 《电磁干扰和电磁兼容性名词术语》第 5.10 条为：“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；它也不会使同一电磁环境中其他设备（分系统、系统）因受其电磁发射而导致或遭受不允许的降级。”由此可见电磁兼容学科主要研究的是如何使在同一电磁环境下工作的各种电气电子系统、分系统、设备和元器件都能正常工作，互不干扰，达到兼容状态。在某种程度上也可以说是研究干扰和抗干扰的问题。但作为一门学科它的研究对象已不仅仅限于电气电子设备，而是拓宽到自然干扰源、核电磁脉冲、静电放电；频谱管理工程；电磁辐射对人体的生态效应；信息处理设备电磁泄漏产生的失密；检测地震前的电磁辐射，进行震前预报等等方面。因此电磁兼容学科包含的内容十分广泛，实用性很强，几乎所有的现代工业包括航天、军工、电力、通信、交通、计算机、医疗卫生部门都必须解决电磁兼容问题。近年来随着电力电子器件的不断发展以及计算机技术在工业自动化控制中的广泛应用，已逐渐形成了电力和电子设备互相结合；强电和弱电配合工作的机电一体化系统。强电和弱电本身是不相容的，但又必须在同一个系统内工作，这就使电磁兼容成为机电一体化系统能否可靠运行的一个关键性问题。

虽然电磁兼容作为一门学科是在 60 年代开始发展的，但早在 1934 年就由国际电工委员会 (IEC) 发起并联合一些国际组织成立了国际无线电干扰特别委员会 (CISPR)，当时主要是保护音频广播免遭干扰。1945 年美国军方制订了世界上最早的军用电磁干扰标准 JAN-I-225，用于控制机载电气设备的电磁干扰。进入 60 年代以后世界上一些技术先进的国家全面深入地开展了电磁兼容的研究工作，包括对电磁兼容测量技术的研究和相应测量仪器的开发。CISPR 制订了一系列的民用推荐标准，美国军方制订了全面的军用标准 MIL-STD-461/462。这些标准随着新产品、新系统和新技术的不断出现也随之进行不断地补充、修改和扩展。目前世界上的发达国家例如美国、欧共体国家、日本等已形成了一整套完整的电磁兼容体系，表现在：具有完善的电磁兼容标准和规范；具有有效地对军用和民用产品进行电磁兼容检测和管理的机构；具有高精度的电磁兼容自动测试系统；研制了很多关于电磁兼容预测、分析和设计的程序，有的已经商品化；电磁兼容控制技术使用的新材料、新工艺、新产品不断出现。这个体系保证了产品从设计、制造到进入市场和使用的全过程都得到充分地控制，以达到最终实现电磁兼容的目的。这个体系的逐步建立是以电磁兼容方面的学术研究为先导和基础的，国外电磁兼容的学术活动非常活跃。跨国电气电子工程师

学会 (IEEE) 的电磁兼容学会每年在美国举办一次国际 EMC 学术会议, 其出版物 IEEE EMC Transactions 是世界电磁兼容界的一级刊物。在欧洲的瑞士苏黎世和波兰的 Wroclow 每年轮流举行 EMC 学术会议, 参加的人数和规模都比较大。此外, 英国、日本、意大利、印度等国也定期举办会议。这些学术活动对促进交流和推动世界范围内的电磁兼容学科的发展起了很大的作用。

我国由于过去经济基础比较薄弱, 电磁兼容的矛盾不突出, 所以起步较晚, 目前与国外的差距仍然很大。在 70 年代国内一些单位特别是军品单位在实际工作中遇到了电磁兼容问题, 开始引起了重视。80 年代成立了全国无线电干扰标准化技术委员会, 与 CISPR 对口, 研究和制订了一些电磁兼容标准。国内的一些科研单位、大学也逐步建立了实验室, 开展电磁兼容研究。90 年代的海湾战争为国人敲响了警钟, 使人们认识到电磁兼容的重要性, 而欧共体的电磁兼容指令 89/336/EEC 则更增加了这种迫切性。指令规定自 1996 年 1 月 1 日起凡不符合电磁兼容标准的产品一律不准进入欧洲市场, 这无疑对我国产品的出口带来了很大压力。因此电磁兼容热在这一、二年中迅速升温。目前国家正在加快建立电磁兼容认证体系, 以保证中国的电磁兼容事业能正常地健康地发展。在学术活动方面, 虽然我国尚未成立电磁兼容一级学会, 但不少一级学会设置了电磁兼容二级学会, 并曾联合召开了 4 次规模较大的全国性会议。令人欣喜的是我国还成功地举办了 2 次国际 EMC 学术会议。相信在不久的将来中国将会有自己的电磁兼容完整体系, 并不断发展完善。

电磁兼容学科研究的主要内容是围绕构成干扰的三要素进行的, 即电磁骚扰源、传输途径和敏感设备。具体内容如下:

1. 电磁骚扰源

电磁骚扰 (Electromagnetic Disturbance) 的定义为: “任何可能引起装置、设备或系统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、无用信号或传播媒介自身的变化。电磁噪声 (Electromagnetic Noise) 是指 “一种明显不传送信息的时变电磁现象, 它可能与有用信号叠加或组合。” 例如电气设备运行中经常产生的放电噪声、浪涌噪声、振荡噪声等不带任何有用信息。无用信号是指一些功能性的信号例如广播、电视、雷达等, 本身是有用信号, 但如果干扰其他设备的正常工作则对被干扰的设备而言它们是 “无用信号”, 所以电磁骚扰的含义比电磁噪声更广泛一些。有时人们常把骚扰、噪声和 “干扰” 混同起来, 实际上 “电磁干扰” 是有明确定义的, 即 “由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。“骚扰” 是一种客观存在, 只有在影响敏感设备正常工作时才构成了 “干扰”。骚扰源可分为自然骚扰源和人为骚扰源。骚扰源的研究包括其发生的机理、时域和频域的定量描述, 以便从源端来抑制骚扰的发射。

2. 传输途径

骚扰的传输途径有二条, 通过空间辐射和通过导线传导, 即辐射发射和传导发射。辐射发射主要研究在远场条件下骚扰以电磁波的形式发射的规律以及在近场条件下的电磁耦合。共模电流辐射也是重要研究内容之一。传导发射讨论传输线的分布参数和电流的传输方式对噪声传输的影响, 例如共阻抗耦合、共模—差模电流转换等。

3. 敏感设备

主要研究电磁骚扰如何使设备产生性能降低或产生不希望有的响应，如何提高设备的抗干扰能力，即降低对骚扰的敏感性，提高抗扰性。

4. 电磁兼容控制技术

最常用的是屏蔽、滤波、接地。屏蔽用于切断空间的辐射发射途径。滤波用于切断通过导线的传导发射途径。接地的好坏则直接影响到设备内部和外部的电磁兼容性。此外，平衡技术、隔离技术等也是电磁兼容的重要控制技术。随着新工艺、新材料、新产品的出现，电磁兼容控制技术也得到不断的发展。

5. 电磁兼容测量

电磁兼容测量贯穿于电磁兼容分析、建模、产品开发、检验诊断等各个阶段。由于测量对象是电磁骚扰，不同于一般有用信号，因此骚扰的拾取、度量和误差分析等都有自己的特点，对于测量方法、仪器设备、测量场地的研究是电磁兼容学科的重要组成部分。

6. 电磁兼容标准

目前国际上有权威性的电磁兼容标准有 CISPR 标准、IEC 标准、欧共体的 EN 标准、德国的 VDE 标准、美国的 FCC 标准和军用标准 MIL-STD。我国也已制订了约 50 多种电磁兼容标准。这些标准规定了各个频段各种类型电气电子设备的骚扰发射限值和抗扰性限值，并规定了相应的试验方法、仪器设备和试验场地。标准是大量理论研究和科学实践的结晶，同时也渗透着巨大的商业利益，所以对标准的研究和制订是历次国际会议的重要议题。由于我国的电磁兼容标准大多是等同采用国际先进标准，因此对标准的来龙去脉、理论依据、实施方法的研究也是我国电磁兼容界必须进行的课题。

7. 电磁兼容分析预测和设计

分析、预测和设计是电磁兼容学科发展的高级阶段。在产品使用后出现电磁兼容问题再去着手解决将浪费大量的时间和经费，因此应该在产品开发的最初阶段就进行电磁兼容的分析和预测，取得必要的参数，然后进行电磁兼容设计。分析和预测的关键在于数学模型的建立和计算机分析程序的编制。数学模型包括根据实际电路、布线和参数建立起来的全部骚扰源、传输途径和敏感部件的模型。分析程序应能计算所有骚扰源通过各种可能途径对每个敏感部件的影响，并判断这些综合影响的危害是否超出相应标准的限值和设计要求，然后进行修整补充和再计算。系统越复杂，分析和预测的难度就越大。

电磁兼容学科的研究内容十分广泛，本书主要讨论机电一体化系统中的电磁兼容性问题。

第二节 电磁骚扰的种类

电磁骚扰的分类方法很多，有从骚扰的来源划分，有从发生机理划分，还有从传输方式、频率范围、时域特性等方面来分类。这里主要从来源和发生机理来分类。

一、电磁骚扰的来源

电磁骚扰源有自然骚扰源和人为骚扰源。

(一) 自然骚扰源

由自然界的电磁现象产生的电磁噪声，比较典型的有：

- (1) 大气噪声，如雷电；
- (2) 太阳噪声，太阳黑子活动时产生的磁暴；
- (3) 宇宙噪声，来自银河系；
- (4) 静电放电 (ESD)。

(二) 人为骚扰源

由电气电子设备和其他人工装置产生的电磁骚扰，这些骚扰包括功能性的无用信号和非功能性的电磁噪声。需指出的是这里的人为骚扰源指的是无意识的干扰，至于为了达到某种目的而施放的有意识的人为骚扰，例如电子对抗等不属于电磁兼容的研究范围。此外电子电路内部的热噪声即设备的本机噪声也不在研究之列，它属于通信理论研究范畴。任何电气电子设备都可能产生人为骚扰，这里只是列出一些容易产生骚扰的设备。

1. 家用电器和民用设备

- (1) 有触点电器，例如电冰箱、电熨斗、电热被褥、电磁开关、继电器等等。
- (2) 使用整流子电动机的机器，例如电钻、电动刮胡刀、电按摩器、吸尘器、电动搅拌机、牙科医疗器械等等。
- (3) 家用电力半导体器件装置，例如硅整流调光器、开关电源等等。

2. 高频设备

- (1) 工业用高频设备，例如塑料热合机、高频加热器、高频电焊机等等。
- (2) 高频医疗设备，例如甚高频或超高频理疗装置、高频手术刀、电测仪、X光机等。

3. 电力设备

- (1) 电力传动设备，例如各种直流、交流伺服电动机、步进电机、电磁阀、接触器等等。
- (2) 电力电子器件组成的变流装置，例如可控整流器、逆变器、变频器、斩波器、无触点开关、交流调压器、UPS电源、高频开关电源等。
- (3) 电力传输设备，例如高压电力传输线、高压断路器、变压器等。
- (4) 电气化铁道，例如电力机车、接触网等。

4. 内燃机

包括点火系统、发电机、电压调节器、电刷等。

5. 无线电发射和接收设备

包括移动通信系统、广播、电视、雷达、导航设备等。

6. 高速数字电路设备

包括计算机及其相关设备。

二、电磁骚扰的发生机理

1. 放电噪声

由于放电而产生噪声是最常见的现象，这时往往伴随着急剧的电流电压的瞬时变化，即 di/dt 或 du/dt 很大。例如：雷电是由于雷云之间或雷云和大地之间产生火花放电而产生的；

静电放电是由于人身所带的静电在接触到金属物体后火花放电造成的；整流子电机转动时，电刷与整流片之间产生火花放电；电气化铁道受电弓在高压接触网下滑动时伴随一系列火花；带电感负载的开关断开时触点间有火花跳过；高压输电线常出现淡蓝色的电晕放电并滋滋作响；荧光灯、霓虹灯中存在辉光放电等。

放电的类型有好几种，这里以金属细棒与金属板之间的放电为例说明这几种放电现象。图 1-1 (a) 中金属棒与金属板相距很近，通过电源 E 在棒上加正电压，在板上加负电压， R 是回路限流电阻， U 是棒板之间电压， I 是放电回路电流。图 1-1 (b) 是放电电压 U 和放电电流 I 的关系曲线。在 OA 段中棒板之间只有非常小的电流，是由大气中的带电粒子产生的，这时不发光，称暗流。当所加电压超过起始电压 U_0 时，棒板间开始放电，有淡蓝色的光点，称辉光放电，电压升高时电流也升高，见 AB 段，放电现象见图 1-1 (c) 中的示意图。当电压再升高时进入刷状电晕阶段即 BC 段，刷状电晕发出羽毛状的白光，电流仍随电压升高而升高。 CD 段为火花放电，棒与板之间基本上被火花连接了，但火花是不连续的，这时棒板间电压随电流升高而降低。 D 点以上阶段为弧光放电，这时棒板间的气隙完全电离，构成连续导电通道，电流很大，但电压很低。

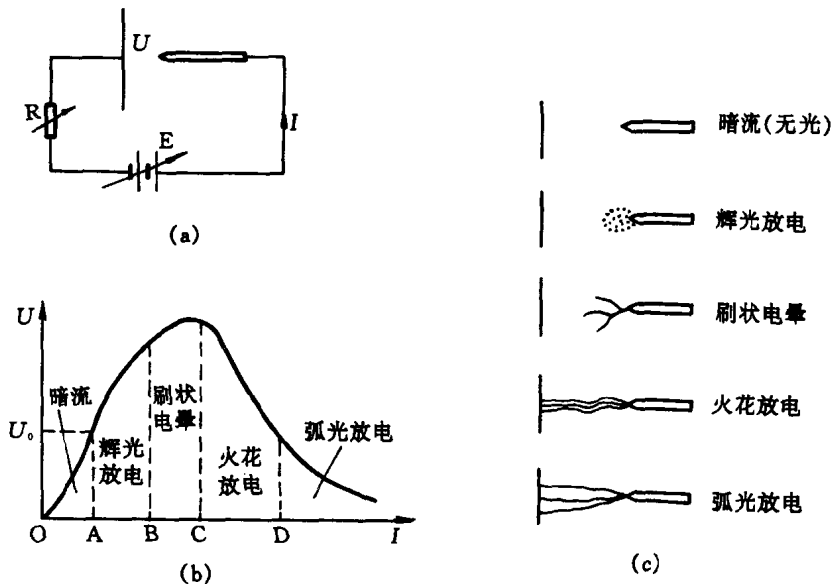


图 1-1 放电噪声

(a) 棒板放电装置；(b) 放电电压—电流的关系曲线；(c) 放电的几种类型

起始电压 U_0 的大小由棒板间的距离、气体类型、气压等决定，距离越短起始电压越低。棒板间电压超过起始电压后气隙开始击穿，但保持何种放电状态则由电路条件决定，这是由 R 和 E 决定。放电时回路里伴随着脉冲电流，这是产生电磁噪声的根源，同时火花和电晕本身也会向外辐射噪声。

2. 接触噪声

接触噪声是由于触点间接触电阻发生变化而产生的，例如触点静压力变化、振动、冲击、滑动、虚接、氧化、污渍、表面损坏等都会引起接触电阻变化。此外，触点上的金属

氧化物整流检波效应；不同金属材料接触时的温差热电动势；医疗电子设备电极处的涂料极化引起的电压波动等都可能产生电磁噪声。

3. 过渡现象

过渡现象即电气电子电路中电流电压的瞬态变化 di/dt 、 du/dt 。这是产生噪声的根本原因，也是普遍发生的现象。例如高速数字脉冲的上升沿、下降沿；电力电子器件工作时的瞬态电压电流变化；电源接通时白炽灯和电动机的冲击电流；电力设备开闭或故障时的异常电压变化；导线上感应到雷电后产生的尖峰衰减振荡等等。

4. 反射现象

反射现象指空间电磁波传播时遇到障碍物被反射并与原信号叠加，例如电视重影；传输线与负载和源内阻抗不匹配引起反射等。

5. 非功能性噪声

电子电路工作时存在着一些与完成特定功能无关的信号，例如由于分布电感、分布电容产生的振荡；波形失真引起的高次谐波；电源哼声等等。

6. 无用信号

这里的无用信号是指功能性信号，是完成特定功能时使用的信号，例如广播、电视、移动通信、雷达、导航等信号，但如果对其他设备产生了干扰则对敏感设备而言是无用的。

第三节 机电一体化系统中常见的电磁骚扰

一、电力电子器件的噪声

电力电子器件是一种可控开关元件，可以用小信号输入控制大容量的输出，功率放大倍数在 10^4 以上，因此可以作为强电与弱电之间的接口基础。用电力电子器件构成的变流装置主要有可控整流器（AC-DC 变换）、逆变器（DC-AC 变换）、斩波器（DC-DC 变换）、交流调压器（AC-AC 变换）、变频器（AC-AC 变换）等，这些变流器广泛应用于各种交直流电动机的拖动和变速系统、中频电源、不间断电源（UPS）、无触点电子开关等场合。但是实践证明电力电子器件构成的变流装置是十分强烈的噪声源，现以晶闸管为例说明。晶闸管变流装置产生的噪声主要表现在以下几个方面：

1. 使电网中的谐波含量大大增加

由于晶闸管变流器是非线性负载，工作时将从电网中吸收含有高次谐波的电流，谐波电流流过电源内阻抗时产生高次谐波压降，使电源的端电压波形发生畸变。有时供电回路会与某次谐波产生谐振，例如供电变压器的漏电感加上供电线的分布电感与分布电容可能在某次谐波上发生谐振，结果将使电网电压的波形严重畸变，从而影响同一电网上的其他负载的正常运行。图 1-2 (a) 是电力机车主变压器的结构图，主变压器的牵引绕组接有晶闸管桥式整流器，供电力机车的直流牵引电机使用。晶闸管整流器产生的高次谐波可通过主变压器耦合到辅助绕组上，使其端口电压产生严重的畸变，图 1-2 (b) 是产生畸变的辅助绕组的端口电压。电源电压的畸变程度用电压畸变率表示

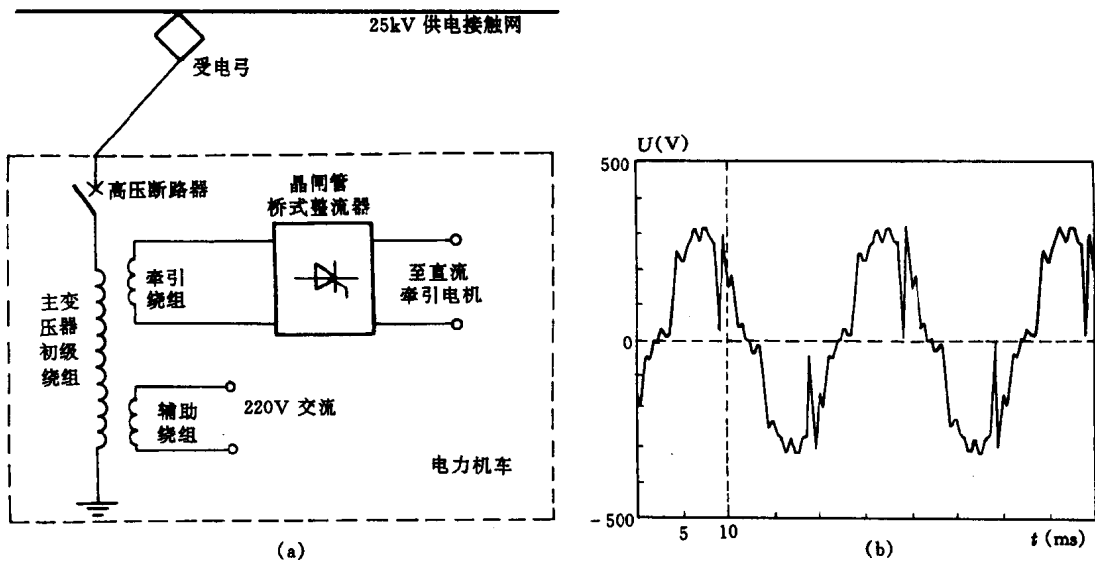


图 1-2 电力机车中晶闸管引起的电压畸变
(a) 电力机车供电简图；(b) 辅助绕组端口电压畸变

$$\text{电压畸变率} = \frac{\text{所有谐波电压有效值}}{\text{基波电压有效值}}$$

公用电网的电压畸变率应被限制在 3%~5% 之内。

晶闸管产生高次谐波的原理可以广泛运用的三相桥式全控整流器为例来加以说明。图 1-3 (a) 是其简易电路图。设负载是大电感，则负载电流 i_0 基本不变为 I_0 。晶闸管 T1、T3、T5 为共阴组，T2、T4、T6 为共阳组。设 α 为触发角，6 个晶闸管的触发次序按 6—1—2—3—4—5—6 顺序循环进行，相邻两次触发的相位差为 $\pi/3$ ，即晶闸管每隔 $\pi/3$ 换一次相，同组晶闸管每间隔 $2\pi/3$ 换一次相，任何时刻总有两个不同组的晶闸管同时导通，循环顺序是 61—12—23—34—45—56。电路中各点波形如图 1-3 (b) 所示。由图可知负载上的电压 u_0 是脉动的，每个电源周期包括 6 个脉波。桥式变流器交流侧线电流 i_a 、 i_b 、 i_c 是一系列矩形波，图中仅列出了 A 相的电流 i_a ，每个矩形波宽度为 $2\pi/3$ ，间隔 $\pi/3$ ，每个电源周期有正负各一个矩形，矩形幅度等于负载电流 I_0 。由于矩形波具有很陡峭的上升和下降沿，因此含有丰富的谐波。6 脉波变流器的谐波次数为

$$n = 6k \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

即包含 5、7、11、13……等次谐波，谐波电流幅度为基波的 1/5、1/7、1/11、1/13…。其他三相变流装置的谐波数为

$$n = mk \pm 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

其中 m 为该种变流器负载电压中包含的脉波数。上述谐波是在理想条件下获得的称特征谐波，如果电源电压畸变或不平衡、变压器漏抗不对称或晶闸管的触发脉冲间隔不均匀都会产生新的谐波，称非特征谐波。

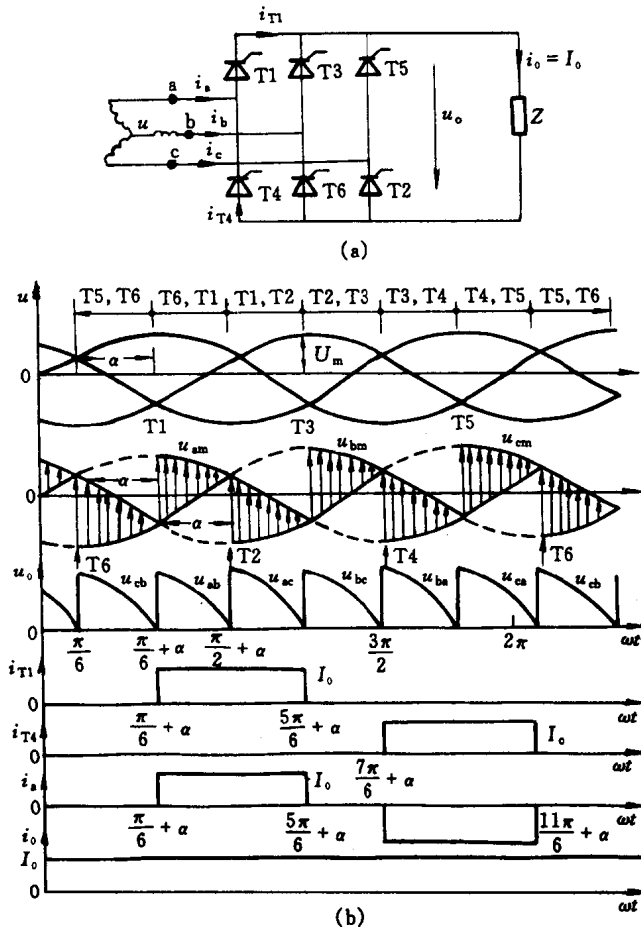


图 1-3 三相全控桥式整流电路

(a) 电路简图；(b) 各点波形

电网中的谐波成分增加将影响电网中其他用电设备的正常工作，例如高次谐波会使变压器损耗增大。高次谐波会使电机内部产生频率较高的磁场，从而使旋转电机发热、振动、损耗增加、效率降低。在大中型电力系统中为补偿电感性负载的无功功率常采用电力电容器，过大的持续谐波电流会导致电容器过热，影响其寿命甚至损坏电容器。电力系统中大多数控制装置的控制信号取自于电网工频正弦信号，由于高次谐波的影响将使控制信号的相位和幅值变化，从而发生失控现象。配电系统中的继电保护装置也会因为严重的谐波产生误动作。

2. 使电网电压产生严重缺口即瞬时电压跌落（有时甚至超过 20%）

这里仍以三相桥式全控整流器为例。在以上关于谐波的讨论中我们忽略了供电回路的分布电感，实际上交流回路总是存在着输电线路的分布电感和变压器漏感。设每相总电感为 L_s ，见图 1-4 (a)，由于 L_s 的存在晶闸管的换相就不能瞬时完成，需要一定的时间，所对应的角度称换相重叠角 γ 。图中换相时导通晶闸管为 T1 和 T2，换相后应该是 T2 和 T3 导通。换相时如果没有 L_s ，T3 管一经触发导通则 T1 管应立即关断，但实际上由于 L_s 的反

电动势将继续维持 T1 的导通状态，这时 T1 和 T3 同时处于导通状态，而且 T1 和 T3 同是阴极组的，因此使 A 相和 B 相电源短路，引起电源电压波形产生明显的缺口，缺口的宽度即为换相重叠角 γ ， γ 与触发角 α 、负载电流和 L_s 有关。图 1-4 (b) 绘出了整流器各点的波形， u 是没有考虑 L_s 时的电压波形， u' 是考虑了 L_s 后的电压波形， u_o 是整流器输出电压波形。整流器变压器次级电压波形的畸变必然通过变压器初级绕组反映到电网上去。

对于 6 脉波的三相桥式全控整流器而言每个电源周期有 6 次换相，每次换相涉及两相电源，每相电源经受 4 次换相，因此每相电源电压将出现 4 次缺口。3 脉波的三相半波可控整流器每相电源每周期出现 2 次电压缺口。单相桥式全控整流器的电源电压每周期出现 2 次缺口。

3. 使电网电压产生波动

晶闸管变流装置引起的电网电压波动是由于无功功率的变化产生的。无功功率与装置的功率因数密切相关。对于给定的输入功率，如功率因数越小，则要求电网提供的电流越大，电网的无功功率损耗和线路压降就越大，因而将引起电网电压的波动。功率因数定义为

$$PF = P_{AC}/S \quad (1-1)$$

式中 P_{AC} ——输入有功功率；

S ——视在功率。

视在功率定义为

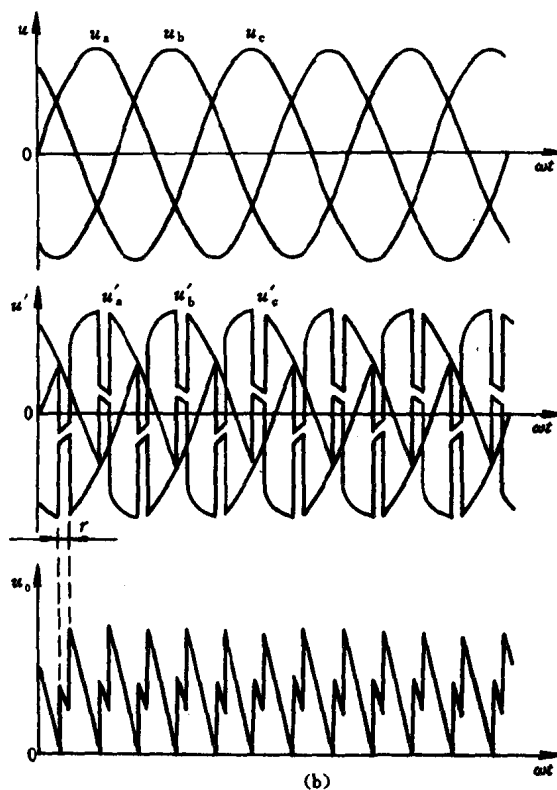
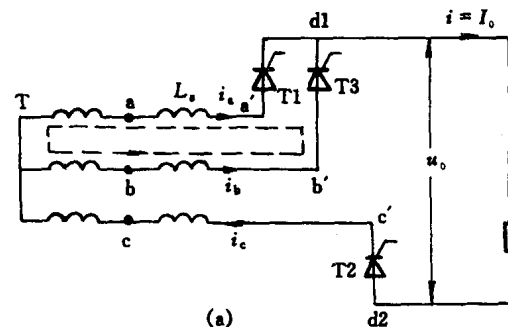


图 1-4 晶闸管引起的电源电压缺口

(a) 考虑回路电感后的换相等效电路；(b) 各点波形

$$S = U_s I_s \quad (1-2)$$

式中 U_s ——输入电压；

I_s ——输入电流。

上式中 U_1 、 I_1 都是指有效值。可以证明采用相位控制的整流电源其网侧输入功率因数可表达为

$$PF = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos\varphi \quad (1-3)$$

式中 I_{s1} 是输入电流基波分量， φ 是输入电压与基波分量的相位角， I_{s1}/I_s 也称为畸变因数， $\cos\varphi$ 也称为位移因数。

由于晶闸管整流装置是依靠改变触发角 α 来实现调压和稳压目的的，所以网侧输入电流是非正弦波。由式 (1-3) 可知功率因数总是小于 1，即使位移因数 $\cos\varphi$ 为 1 即输入电压和基波电流同相也是如此，而且随着触发角 α 的增大功率因数将进一步减小。现仍以三相桥式全控整流器为例说明。由图 1-3 (b) 可知整流器输出电压 u_o 是 6 脉波的，其平均值 U_o 可由下式表示

$$U_o = \frac{3\sqrt{3}U_m \cos\alpha}{\pi} \quad (1-4)$$

式中 U_m 是输入电压的幅值， α 为晶闸管触发角 ($\alpha < \frac{\pi}{2}$)，当 α 由 0 增大时 U_o 下降，则负载上消耗的功率减小，反映到网侧为输入有功功率 P_{AC} 也相应减小。由图 1-3 (b) 还可知对大电感负载，输出电流基本不变为 I_o ，反映到网侧输入电流 (图中的 i_s) 也不随 α 的变化而改变，即 I_s 不变。输入电压 U_s 通常是不变的，所以由式 (1-2) 可知视在功率 S 不变。由式 (1-1) 可知 P_{AC} 下降而 S 不变则功率因数下降，无功功率变大了。由以上分析可知晶闸管变流装置的功率因数总是小于 1，而且随着触发角 α 的变化而变化，触发角越大功率因数越小。

当电网联接负载变化很大的设备时，例如电弧炉、可逆热轨机等，它们产生的无功功率变化很大，对电网造成很大冲击，引起电网电压的严重波动，所以这些负载亦称为冲击负载。

4. 产生高频噪声

通常晶闸管流过的电流很大，约几安培到几十安培，甚至上百安培，而开关时间却很短，约 $1\sim 10\mu s$ ，在瞬间导通和关断时电流变化率 di/dt 很大，极易产生较大的高频噪声，特别是在晶闸管关断时还可能引起高频振荡。高频噪声的频谱约在调幅广播频段，可直接向空间辐射，也可通过晶闸管变流装置的输入输出线向外传导，干扰附近的通信、广播和其他敏感电子设备。此外，电源电压中的缺口、三相整流装置电源侧的方波电流等由于其陡峭的上升、下降沿都会产生较大的高频噪声。

二、电感负载切断时产生的瞬变噪声

先研究直流回路中电感负载切断时产生的瞬变噪声。设电感线圈的电感量为 L ，电阻为 r_L ，分布电容为 C_d ， K 为开关，如图 1-5 所示。开关 K 闭合时电感中电流为 I 。当开关 K 突然开启时开关的两触点间将产生放电现象。放电发生的机理有两种即金属的弧光放电和气体的火花放电。触点间的起始放电电压和停止放电电压与触点间的距离有关，见图 1-6。金属的弧光放电是由于高温使触点金属气化，形成放电通路，没有气体分子也仍然可以产生

弧光放电。放电所需起始电压随触点距离增加而升高，触点距离小于 $1\mu\text{m}$ 时十几伏的电压就可以产生电弧。气体的火花放电是由于触点间气体分子发生电离而产生的放电现象。起始放电电压与气体种类、气压和触点距离有关。1 个标准大气压时如触点间隔 $10\mu\text{m}$ 时起始放电电压为 320V ，距离增加或减小时起始放电电压都要增加。气体放电在触点间电压低于 300V 时不再持续放电。

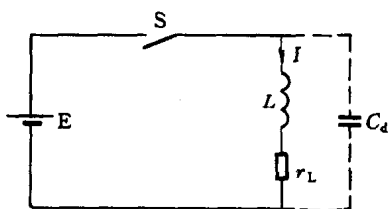


图 1-5 切断直流回路中的电感负载

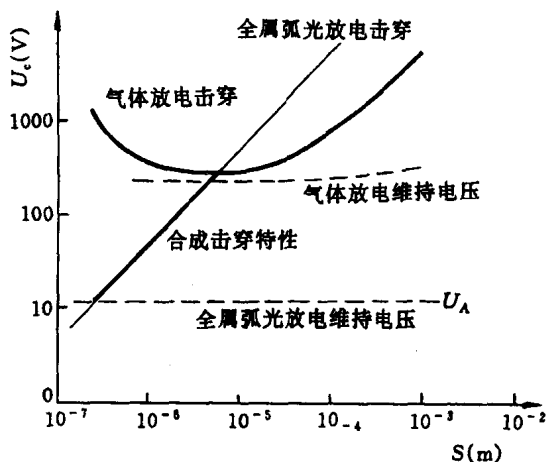


图 1-6 起始放电电压与触点间距的关系

以下分析开关断开时产生放电现象和瞬变尖峰脉冲噪声的机理，其过程可用图 1-7 表示。图中横轴是时间对数也可看成是触点间的距离，因为触点随时间而拉开。纵轴是触点间的电压对数。其中曲线 I 对应于金属弧光放电的起始放电电压曲线，曲线 II 对应于空气火花放电的起始放电电压曲线。 U_A 是弧光放电维持电压， U_G 是火花放电维持电压。当开关 K 的触点放松即将离开但仍有接触时，触点间的接触面积大大减小，接触电阻增加，电流流过时产生的耗散功率产生了高温使触点金属气化，触点周围被金属气体包围。当触点刚一离开，电流为零的瞬间，电感产生反电动势，其值

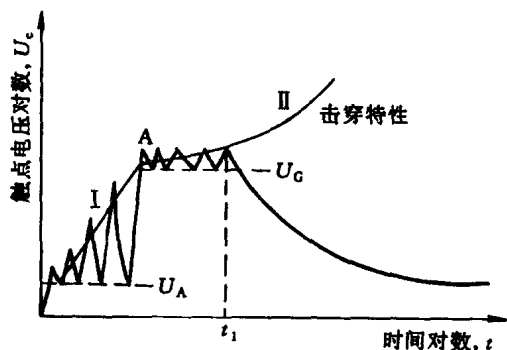


图 1-7 切断感性负载产生放电现象的机理

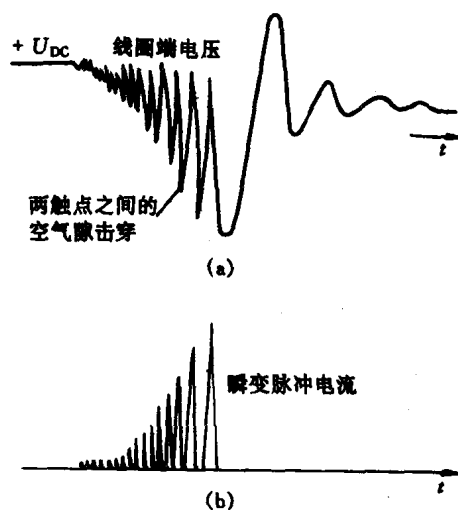


图 1-8 电源回路中电感负载上的瞬变脉冲
(a) 电感负载上的瞬变脉冲；
(b) 电源回路中的瞬变脉冲