

电磁兼容技术系列

现代工业中 电能质量

与电磁干扰控制

◎ 杨继深 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电磁兼容技术系列

现代工业中 电能质量与电磁干扰控制

杨继深 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

序 言

现代工业的特征是：高度信息化、高度自动化、能源高效利用。受益于电子技术和信息技术的高速发展，许多现代化的工厂已经达到了极高的自动化和信息化。随着国家发展低碳型产业策略的实施，高效利用能源以及发展清洁能源将成为下一个时代的核心。

然而，随着现代化的进程，电磁兼容与电能质量的问题日益突出。这些问题导致的具体后果包括：自动化生产线不稳定、配电系统损坏、仪器仪表的精度降低、生产设备提前损坏等，给企业和社会造成了巨大的经济损失。例如，某化工厂的自动化生产线，PLC的一次误动作，会导致产品批次报废，损失达到十余万元。电磁兼容与电能质量问题已经在某种程度上成为制约工业现代化进程的障碍。造成这种后果的原因有两个方面：

一方面，电子化、信息化的核心技术是微电子技术，也就是基于大规模集成电路的各类电子设备。这些设备对于电能质量提出了前所未有的高要求。传统工业中，电压畸变、电压骤变、浪涌电压等并不会对设备造成严重的影响；而对于现代化的电子设备，这些都会导致设备的工作异常，甚至硬件损坏。

另一方面，高效利用电能的有效方法是变流技术。也就是将发电厂发出的 50Hz 交流电，转换成更便于高效利用的形式，如直流电、频率更高的交流电等。这些变流设备在工作时，会向电网发射电磁干扰，导致电网上的电压发生畸变，同时也会向空间辐射电磁波。电压畸变和空间电磁辐射对于电子设备都是干扰源。而传统的工业设备大多是电感、电容和电阻性负载，这些负载并不会导致电压发生畸变，也不会产生电磁波辐射。

由于上述两个方面的因素，现代工业中的电磁兼容问题和电能质量问题日益突出。我国的工业现代化发展迅猛，这些问题表现得更为突出，以至于大多数工程技术人员还来不及做好技术上应对的准备，面对这些问题感到束手无策。

近几年来，作者经常接到有关问题的咨询。一些企业，被一些简单的电磁兼容问题困扰了数月之久，导致生产线不能正常开工，或者投资引进的先进设备长期闲置不能使用；还有一些企业，为了解决某个问题，专门组织技术攻关队伍，但是结果并不令人满意。作者也在互联网上查阅了相关的信息，发现很多人将自己遇到的困扰发表出来，征询答案，但是能够获得准确回答的情况十分罕见。

实际上，工业现场出现的电磁兼容与电能质量问题虽然千差万别，但是导致问题的机理并不复杂，技术人员只要掌握了这些基本原理，就能够妥善处理大部分问题。只是目前还没有一本书能够系统性地阐述这些问题，并提出具有工程实用性的解决方案。

为此，作者感到十分有必要编写一本相关图书，帮助有关技术人员理解问题的根源，并掌握处理这些问题的方法。2010 年 8 月，与电子工业出版社的张榕编辑谈了这个想法，并得到了张榕编辑的大力支持。

本书以现代制造系统的设计人员、系统集成人员、维护人员为读者对象，力争在两个方面达到统一。一个是揭示各类电磁兼容问题和电能质量问题的本质，使读者能够具备独

立分析问题,并提出解决方案的能力;另一个是避免抽象的理论叙述,特别是繁冗的公式推导,尽量使读者能够轻松阅读理解。由于本书从一个新的角度论述电磁兼容和电能质量,而目的又是解决伴随着工业现代化出现的各种新问题,因此在内容组织方面难免不足,为此,在参考文献中将作者的另一本书《电磁兼容技术之产品研发与认证》作为第一本参考资料列出,可以作为本书的有效补充,满足一些读者了解更多内容的需要。

本书分为7章。

第1章,介绍电磁兼容、电能质量问题导致的典型现象,使读者能够结合自己的工作,对本书要讨论的问题有一个大概的认识。

第2章,介绍地线的概念及地线相关的电磁兼容问题。在工业现场中,地环路是导致电磁干扰的主要原因之一,本章揭示了地环路的本质,并给出了解决这类问题的方法。

第3章,介绍电缆相关的电磁兼容问题和解决方法。电缆的问题是电磁兼容领域研究的重要内容。90%以上的电磁兼容问题与电缆相关,如果没有电缆,电磁兼容问题将变得十分简单。因此,将来如果设备之间的互连全部采用光纤,电磁兼容的问题就不再是严重的问题。

第4章,介绍一些基本的电磁兼容技术措施,这些措施对于解决实际的电磁兼容问题都是十分有用的。其中一些方法都是最近几年国外新出现的,对于保证工业制造系统是十分有效的,例如正弦波跟踪滤波器、电能质量调节器等。

第5章,谐波是现代工业的重要副产品,谐波带来的各种危害比以往任何时候都严重。本章分析谐波产生的原因,通过揭示谐波产生的机理,使读者能够从种类繁多的设备中识别谐波源。本章还对谐波造成的危害进行了介绍,使读者能够识别由于谐波导致的故障。

第6章,介绍了谐波治理的原理和方法,特别是对设备级的谐波治理进行了讨论。由于以往关于谐波的书籍大多关注电网层面,谐波治理的方法也大多在电网母线上实施。但是对于工业制造系统,在谐波源处治理谐波是保证系统稳定运行的最好办法。本章明确了设备级谐波治理的具体要求和实施方法。

第7章,重点介绍变频器相关的电磁兼容和电能质量问题的解决。变频器是目前工业现场最主要的电能污染源和电磁干扰源。然而,对其有深入认识的人很少。变频器又是电机节能的重要手段,结果随着企业节能技术改造的实施,变频器导致的种种故障给企业带来巨大的损失和困惑。本章对这些问题进行了全面讨论,学习完本章后,能够很好地解决变频器相关的各种电磁兼容和电能质量问题。

由于本书编写的目标是成为一本易读、有用的工程性指导资料,在编写方面不追求理论体系的完整和结论推导的严密,而注重问题现象及其背后的物理概念的描述。限于作者对工业现场的经验和认识,本书的内容必然不能满足广大读者的所有要求,希望读者能够积极提出宝贵意见,使本书能够得到改进,并更加具有工程指导性。

本书能够出版,首先感谢电子工业出版社的张榕女士,是她们的热情鼓励促使我下决心编写本书,同时,在编写过程中,也得到了她的密切关注。同时,感谢她认真的审阅、修改和各种建议,才保证了本书的质量。

参加本书编写的还有:杨菊根、侯原平、臧晓农。在本书的编写过程中,还得到了同

事们的鼓励和有益的讨论，特别要感谢富根对本书编写的鼓励，还要特别感谢沈志达、张飞然、祝典、郑丹等同事，在与他们的讨论中获得了较多的启发。由于本书的编写主要利用业余时间，在编写过程中得到了家人的理解和大力支持。特别是女儿杨婧，编写本书的时间正好是她为考入大学努力的时期，为了保证本书的顺利完成，她牺牲了很多与父亲交流的时间，在此与她共勉，希望她能够考入理想的大学，成为社会的有用之才。

编著者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 现代化带来的一些困扰	1
1.1.1 日常生活和工作中的奇怪现象	1
1.1.2 工业现场的奇怪现象	2
1.1.3 从现实获得的启示	2
1.2 电磁兼容性	2
1.2.1 电磁兼容性	2
1.2.2 电磁兼容性的三个要素	4
1.2.3 电磁干扰源的识别	5
1.2.4 电磁干扰的发射途径	6
1.2.5 敏感源的识别	7
1.2.6 耦合路径的识别	7
1.3 电能质量	9
1.3.1 什么是电能质量	10
1.3.2 电力谐波	12
1.3.3 浪涌电压	13
1.3.4 电压暂降	14
1.3.5 射频噪声	15
1.3.6 电磁兼容与电能质量的关系	16
1.3.7 电能质量控制	17
第 2 章 地线与地线相关的干扰	19
2.1 地线的概念	19
2.1.1 地电位与接地	19
2.1.2 安全地	20
2.1.3 电路地	22
2.1.4 地线的阻抗	23
2.2 地线导致的电磁干扰	25
2.2.1 地环路导致的电磁干扰	25
2.2.2 公共地线阻抗的问题	28
2.3 地线干扰的解决方法	29
2.3.1 地环路问题的解决	29
2.3.2 公共地线阻抗问题的解决	31

第3章 电缆相关的电磁干扰	33
3.1 电缆的电磁辐射与控制	33
3.1.1 电缆的电磁辐射	33
3.1.2 电缆电磁辐射的控制	35
3.2 电缆之间的串扰与控制	37
3.2.1 电缆之间串扰的机理	37
3.2.2 减小电容耦合的方法	40
3.2.3 减小互感耦合的方法	40
3.2.4 电缆分类	43
3.3 电磁场在电缆上产生的干扰与控制	44
3.3.1 电磁场在电缆上的干扰	44
3.3.2 电磁场在电缆上形成干扰的控制	45
第4章 电磁兼容控制技术基础	49
4.1 电磁屏蔽	50
4.1.1 屏蔽效能的定义	50
4.1.2 屏蔽材料的选择	51
4.1.3 实际屏蔽体的关键因素	53
4.2 电磁干扰滤波	54
4.2.1 滤波器在解决电磁兼容问题上的应用	54
4.2.2 电源线滤波器	56
4.2.3 信号线滤波器	59
4.3 浪涌与瞬态干扰的对策	62
4.3.1 基本的浪涌保护器	63
4.3.2 正弦波跟踪滤波器	65
4.3.3 浪涌保护的实施	67
4.4 电能质量调节	70
第5章 电力谐波及其危害	72
5.1 定义	72
5.1.1 傅里叶级数	72
5.1.2 电力谐波	73
5.2 电力谐波产生的机理	75
5.2.1 谐波电压与谐波电流的关系	75
5.2.2 识别谐波源的方法	80
5.2.3 典型的谐波源负载	84
5.3 谐波的度量	87
5.4 谐波的危害	88
5.4.1 电缆过热	88
5.4.2 变压器过热	89

5.4.3 谐波电流对无功补偿装置的影响	90
5.4.4 3次谐波的特殊危害	92
5.4.5 谐波对电气电子设备的影响	96
5.4.6 谐波电流导致意外跳闸	98
5.4.7 谐波电流导致的能量损失	99
5.5 电力谐波相关的标准	100
5.5.1 针对设备的谐波电流发射限制	100
5.5.2 国际通用的 IEEE 519 标准	102
5.5.3 GB 14549 标准	103
第6章 谐波的治理	105
6.1 概述	105
6.2 谐波治理方案的确定	107
6.3 谐波治理的原理	109
6.3.1 无源滤波器	109
6.3.2 有源滤波器	112
6.3.3 移相对消	112
6.4 母线无源谐波滤波器	114
6.5 设备级无源谐波滤波器	115
6.6 针对3次谐波的滤波设备	118
6.6.1 有源滤波器	119
6.6.2 单相谐波滤波器	119
6.6.3 零线3次谐波电流阻断器	120
6.6.4 3次谐波电流旁路器	121
6.7 多脉整流电路	122
第7章 变频器相关的电磁兼容问题	125
7.1 概述	125
7.2 变频器的谐波电流与解决方案	128
7.2.1 变频器产生的谐波电流	128
7.2.2 变频器谐波电流的限制要求	130
7.2.3 用电抗器减小变频器的谐波电流发射	133
7.2.4 用无源滤波器减小谐波电流发射	134
7.3 变频器对电机绕组的损伤与对策	137
7.3.1 变频器在电机上产生的尖峰电压	137
7.3.2 变频器对电机绕组的损伤	140
7.3.3 电机绕组绝缘的保护	141
7.3.4 du/dt 滤波器	143
7.3.5 正弦波滤波器	145
7.3.6 尖峰电压吸收器	148



7.3.7 终端阻抗匹配器	149
7.4 变频器对电机轴承的损伤与对策	150
7.4.1 电机轴承电流产生的机理	150
7.4.2 轴承电流的对策	152
7.5 传导性射频干扰与解决方案	155
7.6 辐射性射频干扰与解决方案	156
7.7 变频器的浪涌保护	157
参考文献	159

第 1 章

概 述



1.1 现代化带来的一些困扰

所谓现代化，就是生产制造的高效率、高精度，生活设施的高度自动化、信息化、智能化，国防装备的高度电子化、信息化、机械化。构造现代化的基础是电子技术、信息技术、自动控制技术。随着现代化程度的提高，越来越多的奇怪现象开始困扰工程技术人员。本节列出一些常见的现象，作为本书讨论问题的开始，也使读者认识到本书讨论这些问题的必要性。

1.1.1 日常生活和工作中的奇怪现象

某新建的网吧，准备开业，却在工程验收时发现，零线的电流很大，达到了相线电流的 1.5 倍左右。业主感到十分困惑，150 台计算机，每相连接了 50 台，当全部打开时，三相负荷是平衡的，为什么出现这种情况？

某火锅店，使用电磁炉作为炊具，开业没有几天，却发现当客人较多时，总是跳闸。找到负责施工的电力安装公司解决。安装公司工程人员感到很困惑，因为保护装置的额定电流远大于全部火锅打开到最大功率时所需要的电流。增大保护装置的额定电流，固然可以防止跳闸，但是却失去了对线路保护的意义。无奈，火锅店只好在经营中想办法，即由服务员在安排客人时，向客人提出一个奇怪的问题，“是要电磁炉的，还是要炭火的？”并极力推荐：“用炭火的吧，有气氛！”。

在家里看电视，发现有几个频道的图像质量很差，时常有马赛克出现。把有线电视公司的维修人员叫来，进行检测。维修人员在有线电视入室的地方检测出信号强度，回答说信号没有问题，他们无法解决这个问题。

某建筑公司的电工来电话，他们在建筑工地的周围安装了一圈广告灯箱。发现零线电流很大，相线电流为 60A 左右，而零线电流达到了 90A 以上。作为专业的施工单位，他们保证三相负荷是平衡的。按照传统理论，当三相负荷平衡时，零线的电流应该为零。这位电工百思不得其解。

某建材城运营后，频繁跳闸，商户反映强烈。物业管理部门进行了调查，与建材城内的大屏幕显示屏有关，只要这个大屏幕一开，就会出现跳闸现象。进一步调查发现，

这个大屏幕一开，零线电流就很大。于是责令大屏幕的安装厂商限期整改。大屏幕的安装厂商认定是屏幕电源的问题，于是找到了电源的厂家。但是经过测试，电源各项指标完全符合国家标准。这个问题究竟应该由谁来负责？

1.1.2 工业现场的奇怪现象

某纺织厂，引进了一批进口的先进设备，然而在工作时，发现设备发出异常噪声。经过调查，发现与附近的一家轧钢厂有关。仅当轧钢厂开工时，设备发出噪声。

某自动化生产线，生产原料为粉状，通过传送带送入加工容器。传送带由交流电机驱动，交流电机由变频器驱动。加工容器内有一个物位计，测量原料的位置，并将结果反馈到 PLC，控制传送带的运行。在系统运行时，物位计送到 PLC 的数据误差很大，达到不能接受的程度。进一步调查发现，当传送带的电机不用变频器驱动、而用工频电压驱动时，没有问题。

某水泵厂，其产品一直得到用户的好评。最近，用户的投诉增多，原因是水泵的寿命大大缩短，许多水泵还在保修期内就出现损坏。经过调查，发现这些早期损坏的水泵都是由变频器驱动的。

某燃煤供热站，用鼓风机向锅炉内吹煤渣，过去通过风门的大小控制风量，现在改成用变频器控制风量，节电效果显著。但是发现，自从变频器运行后，原来的无功补偿柜中的保险频繁烧断。以至在变频器运行时，不得不断开无功补偿装置，结果导致功率因数过低，受到供电部门的处罚。

1.1.3 从现实中获得的启示

上述这些现象都在提示我们，随着信息化、自动化、智能化的进展，要求我们用新的观念来进行工程的设计，否则就会出现一些意想不到的问题。这种新的观念就是电能质量与电磁兼容。本书的目的就是使系统设计人员、系统维护人员了解这些新观念，并学会在实践中应用。



1.2 电磁兼容性

1.2.1 电磁兼容性

电磁兼容性的含义是：电气电子设备在预定的电磁环境中能够稳定地工作。这包括两个方面内容，第一，设备之间不会通过电磁现象产生相互的干扰，也就是说，两台设备同时工作时，它们都不会出现性能降低或者损坏的现象；第二，电气电子设备在预定的电磁环境中能够稳定工作。下面通过几个现实中的没有达到电磁兼容的现象帮

助读者理解上面的说明。

现代灯具导致的问题

提高照明设备的效率一直是照明工程师孜孜不倦的追求，荧光灯代替白炽灯是一个进步，现在高效荧光灯开始替代传统的荧光灯。但是，人们发现，当大量使用这些节能灯后，中短波广播的质量变得很差，收到的电台很少，即使收到电台信号，噪声也十分严重。节能灯之所以高效，是因为荧光灯内的气体发光效率在电流频率更高时具有更高的效率。因此，节能灯采用电力电子技术将 50Hz 的工频电流变换到 10kHz 以上的频率，大大提高了发光效率。这种电流变换的过程会产生严重的电磁干扰发射，干扰了收音机的工作，我们就说，节能灯与收音机之间出现了电磁兼容的问题。

与灯具相关的另一种电磁干扰来自调光灯具。人们可以通过一个旋钮方便地调节亮度，达到节省电能的目的。但是，这种调光装置在工作时产生严重的干扰发射，会影响广播通信。

自动控制系统误动作

现代化制造的核心是自动控制技术。自动化加工大大提高了生产效率，保证了产品一致性，降低了制造成本。但是，自动控制系统出现的误动作也会给生产带来巨大的损失，甚至导致安全事故。在工厂中，经常出现某台大功率设备（变频器、中频炉、点焊机等）工作时，PLC、数控机床等出现误动作的现象。这就是大功率设备与自动控制设备之间的电磁兼容问题。

实际上，相同设备之间也会出现不兼容的状况。某金属加工厂，主要加工设备是电焊机。人们发现，当同时工作的电焊机台数较多时，就出现焊接质量不稳定的现象。开始以为是大量电焊机同时工作导致电压过低，影响了焊接质量。现场测试表明，电压正常。进一步的调查表明，是电焊机之间的相互干扰，导致控制电路错误。这就是电焊机之间没有达到电磁兼容状态。

雷电对电子设备和自动控制系统的影响

雷电天气，电子设备（计算机、变频器等）被雷电损坏的现象十分常见。雷电不仅会导致设备直接损坏，还会导致设备软损伤。软损伤的含义是，设备并不是在发生雷电的当时就出现损坏，而是寿命缩短，在某一个条件下，突然失效。软损伤经常导致故障排查困难，人们往往将这种损坏归结为设备的质量问题。因为雷电是十分常见的自然现象，电子设备在这种环境中不能生存，也属于电磁兼容问题。

过去对于雷电防护的认识局限在发生雷电时，电气、电子设备不要被损坏，就达到了防护目标。现代化对雷电防护提出了新的要求，这就是，发生雷电时系统不能出现数据错误。显然这是正确的，人们不能想象，企业在雷电天气停工，银行在雷电天气停业，等等。这种要求对雷电防护技术提出了更高的要求。

实际上，人们对电磁兼容的认识也是随着现代化程度的提高而加深的。20 世纪 80 年代，随着电子信息技术的普及，人们对电磁兼容问题的关注达到了空前的高度。这主要是由于以下几个原因：

（1）电子线路对电磁干扰更加敏感，特别是数字逻辑电路的广泛应用，一个干扰就可以导致系统彻底崩溃；

- (2) 数字电路、脉冲电路的广泛应用, 产生了更强的电磁干扰;
- (3) 电子设备的密度急剧增长, 增加了相互干扰的概率;
- (4) 人们对电子信息技术的依赖程度增加, 任何干扰都可能导致巨大的经济损失, 甚至危及人身安全。

1.2.2 电磁兼容性的三个要素

发生一个电磁兼容问题, 或者叫做电磁干扰问题, 需要同时具备三个条件:

- (1) 干扰源——产生干扰的电路或设备。
- (2) 敏感源——受这种干扰影响的电路或设备。
- (3) 耦合路径——能够将干扰源产生的干扰能量传递到敏感源的路径。

以上三个条件称为电磁兼容的三要素, 只要将三个要素中的一个消除, 电磁兼容的问题就不再存在。因此, 电磁兼容技术的研究是围绕着这三个要素展开的。通过研究每个要素的特点, 提出消除每个要素的技术手段, 以及这些技术手段在实际工程中的实现方法。

图 1-1 是一个工业现场典型的电磁干扰现象。当中频炉工作时, 周围的监控仪表出现较大的误差, 甚至导致自动控制设备出现误动作。并且, 空间距离与中频炉越近的仪表受干扰越严重, 同时发现, 当将受干扰的电子设备的电源通过另外的变压器供电时, 干扰的情况就会大为改善。

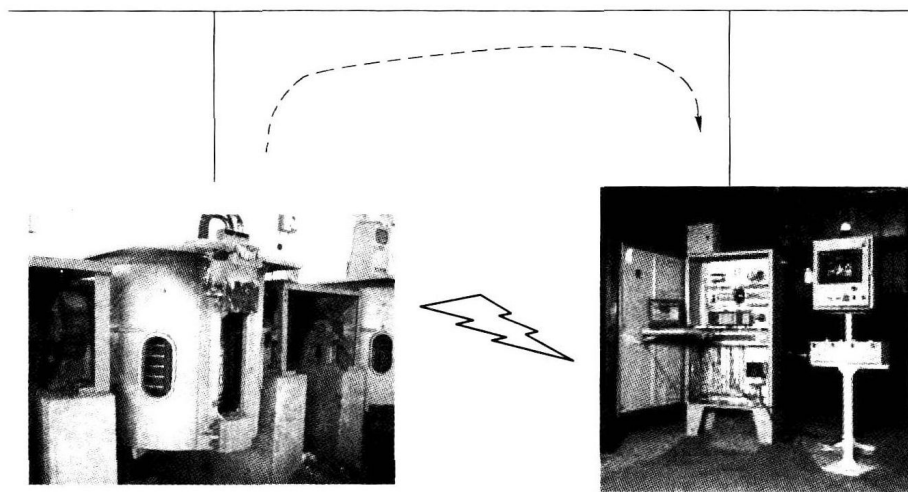


图 1-1 工业现场典型的电磁干扰现象

在这个例子中, 敏感源是仪表和控制设备, 干扰源是中频炉, 耦合路径有以下两个:

- (1) 中频炉与电子设备共用的配电系统, 中频炉产生的干扰通过电源线以传导的方式传进电子设备, 对电子设备形成干扰;
- (2) 中频炉产生空间辐射电磁波, 这些电磁波从空间耦合进电子设备的电路, 形成干扰。

要解决电磁兼容的问题,就要清晰地识别这三个要素。通常,敏感源是人们最熟悉的,这就是电磁兼容问题中的受害体。其次是干扰源,人们通过观察受害设备的状态与其他设备工作状态之间的关系,就可以判断干扰源。例如,在上述例子中,人们发现,当中频炉没有工作时,就没有干扰现象。因此,断定中频炉是干扰源。

耦合路径是最难识别的。也就是人们通常不知道干扰源与敏感源之间是如何建立联系的,干扰能量是怎样从干扰源进入敏感源的。

1.2.3 电磁干扰源的识别

关注电磁兼容问题,最重要的就是发现电磁干扰源。实际上,在预防和解决电磁兼容问题时,首选的方案就是消除电磁干扰源,这是最主动的方法。本节的内容就是揭示电磁干扰源具有的一些共同特征,通过识别这些特征,就能够发现电磁干扰源,从而对其特别关注。

电磁干扰源分为人为的干扰源和自然的干扰源。对于人为的干扰源,我们可以通过技术措施,减小其产生的电磁干扰。对于自然干扰源,只能通过加强敏感源的抗干扰能力,或者切断干扰进入敏感设备的路径来解决问题。

雷电是一种主要的自然干扰源。雷电现象实际上是发生在云块之间或云与地面之间的静电放电现象,其实际过程十分复杂。我们关心的是这种现象所产生的电磁干扰。

雷电的瞬间放电电流会达到20万A,这个电流会感应出一个很强的电磁场。这个电磁场作用在设备的电源线或信号电缆上,通过电磁感应产生幅度很高的电压,对设备造成伤害(图1-2)。这种很高的电压称为浪涌电压。

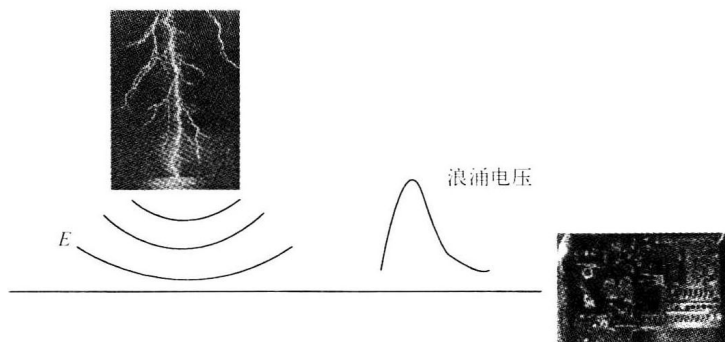


图1-2 雷电对电子设备的伤害

雷电现象是无法控制的,只能通过对设备进行抗雷电设计,提高设备在雷电环境中的生存能力。对于电子设备而言,抗浪涌电压性能是电磁兼容设计中的重要内容。

需要注意的是,电磁兼容设计中提到的设备抗雷电能力,是指对这种雷电产生的电磁场的抵抗性,而不是传统意义上讲的防雷击。另外,对于雷电浪涌的抵抗程度也有不同的解释,对于不关键的系统,我们只是要求在雷电浪涌到来时,系统能够生存。对于关键的系统,我们要求雷电浪涌电压到来时,不能出现数据错误、误动作、系统

复位。

实际环境中更常见的干扰是人为干扰源。人为产生的干扰源分为两类。第一类，为了特定功能发射出来的电磁能量，如无线通信、雷达等，称为功能性发射。第二类，电磁能量是设备工作时伴随发射的，如前面提到的节能灯，称为非功能性发射。功能性发射很容易识别，本节讨论伴随发射的干扰源的识别方法。

除了专业人士以外，大多数人不了解非功能性发射。有几个人能想到计算机在工作时要向电网注入谐波电流和射频电流，向空间辐射电磁波？正是由于这种干扰的发射，计算机集中的场所，如科研楼、写字楼内，零线电流过大，甚至导致电缆过热，酿成火灾。还有一个鲜为人知的领域，就是情报人员可以通过从电网上、从空间中截获这些计算机发射的信号，从中获得敏感信息。

究竟什么样的设备会产生伴随电磁发射呢？也就是说，怎样识别一台设备是否会成为干扰源呢？

最重要的一点就是，看这台设备工作时其内部电路是否会导致电压、电流的突然变化。这是最关键的一点，当然，这要求分析人员了解设备的工作原理。掌握了这个核心，就能够从现实中种类繁多的设备和自然现象中迅速识别出干扰源。

表 1-1 列出一些常见的干扰源，并指出产生干扰的原因，其中涉及相应设备的工作原理，不熟悉的读者可以忽略，这里只是想加深对“电压、电流突变产生电磁干扰”概念的认识。

表 1-1 常见的干扰源及其原因

干 扰 源	产生干扰的机理
雷电	云块之间，或云块与大地之间，静电放电，产生了突发的电流
电气开关的接通和断开	线路中有突变的电压和电流
节能灯	整流电路产生脉冲的电流，逆变器产生脉冲电压
调光灯具	晶闸管对正弦波进行斩波，导致电压突变和电流突变
变频器、中频炉	整流电路产生脉冲的电流，逆变器产生脉冲电压（PWM）
带静电的人体接触电子设备	人体上的电流转移到电子设备上，形成突发的电流
直流电源、UPS 电源	整流电路产生脉冲的电流，逆变器产生脉冲电压

1.2.4 电磁干扰的发射途径

1.2.3 节介绍了识别电磁干扰源的方法。只要有电压、电流的突变，就具备了产生的电磁干扰的内在条件。但是，电磁干扰能量只有发射出来，才能对其他设备形成干扰。电磁干扰能量的发射途径有两个，传导发射和辐射发射。

传导发射是指电磁能量通过电源线将能量注入电网，通过电网对其他设备形成干扰。

辐射发射是指电磁能量通过电磁场或电磁波的形式发射到空间，被其他设备接收到，形成干扰。电磁辐射的分析十分复杂，但是辐射性电磁干扰是十分重要的一种干扰形式，

在现实中不可避免,了解电磁辐射的基本特性十分必要。

电磁辐射是通过天线发生的。在无线通信十分普及的今天,我们对于天线这个术语不会陌生。天线就是将电压或电流变换成电磁波,或者将电磁波变换成电压或电流的装置。产生电磁波的两个基本条件就是,变化的电压或电流及天线。前面已经提到,干扰源的一个特征就是设备在工作时,电压或电流是变化的,就隐含了这个意思。

天线在无线电里是一个专门学科,这个学科的任务就是研究如何使天线具有更高的辐射效率和接收效率。但是,本书中所关注的是寄生天线。寄生天线的含义是,设备中的一些电路结构具有天线的功能,而这种结构并不是我们故意设计成天线结构的。

电磁兼容设计的目的之一就是降低这些寄生天线的辐射效率。在天线理论中,有一个重要的结论叫做天线的互易性。天线的互易性是指,如果一种结构具有较高的辐射效率,那么一定具有较高的接收效率。因此,电磁兼容设计中,如果降低了寄生天线的辐射效率,就同时降低了寄生天线的接收效率。这意味着,只要我们设法降低了某个系统的干扰性电磁波辐射,那么同时也提高了这个系统的抗电磁波干扰的能力。另外,用于降低天线辐射效率的方法,同样可以用于降低天线的接收效率。

天线的理论十分复杂,即使对于电磁波专业的技术人员,研究天线也不是一个简单的事。根据本书中所涉及的领域,读者只要知道,设备外拖的各种电缆,包括电源线、信号传输线、电机驱动电缆,都是天线。这些电缆中存在快速变化的电压或电流时,就会产生电磁辐射。电缆越长,辐射效率越高。

1.2.5 敏感源的识别

任何电力电子设备都可能成为敏感源。当出现了电磁兼容的问题后,敏感源是十分明显的。但是,在系统没有建成,或者系统没有表现出电磁兼容问题时,要识别敏感源十分困难,不像干扰源那样,只要有导致电压或电流突变的电路,就可认为是潜在的干扰源。

从实用的角度出发,可以认为包含电子线路的设备,特别是包含微处理器的设备都是敏感源。特别是当这些设备具有外拖电缆时,更增加了成为敏感源的概率。

需要提醒的是,要特别关注那些外拖了较多电缆的设备。这在自动控制系统中十分常见,各种传感器信号的传输电缆、各种控制信号的传输电缆,都是敏感源具有的特征。

对于配电系统,继电保护器、电容补偿柜等也都是敏感装置。在谐波电流存在的条件下,这些装置的误动作,甚至损坏,都是对电磁干扰敏感的表现。

1.2.6 耦合路径的识别

识别耦合路径是解决电磁兼容问题中最关键的一项工作,也是难度最大的一项工作。不要说在系统建成之前,就是当出现了电磁兼容的问题之后,尽管干扰源和敏感源都很清楚,要知道它们是如何联系起来的,也是十分困难的。一些复杂的电磁兼容问题,对于电

磁兼容专业人员也不是能很快查清耦合路径的。

分析耦合路径是解决电磁兼容问题的关键，如果不了解一些基本概念，几乎不可能对电磁兼容问题进行分析。根据本书所涉及的领域，仅介绍公共阻抗耦合的概念，掌握这个概念可以解决大部分工业现场的电磁兼容问题。读者如果对其他耦合感兴趣，可以参阅文献 [1]。

所谓公共阻抗耦合是指干扰源和敏感源共用了一段电路，这段电路的阻抗充当了耦合的介质。典型的情况是电源线和地线。本书的重点是电能质量与电磁兼容，因此侧重于电源线导致的公共阻抗耦合分析。地线导致的公共阻抗耦合对于本书所涉及领域重要性较低，因此不进行讨论。但是地线与电磁兼容的关系是十分重要的内容，本书专门用一章介绍相关的概念。

首先，看一下公共阻抗耦合的原理。在放大电路中，如果一级放大电路的放大量不够，需要再增加一级放大电路，这两个电路之间的一种连接方式是公共阻抗耦合，如图 1-3 所示。这里前级放大器的输出电流 i ，在电阻 R 产生了一个电压 u ， u 作为后级放大器的输入电压，后级放大器继续对 u 进行放大。这是一个利用公共阻抗耦合的原理实现信号耦合目的的例子。

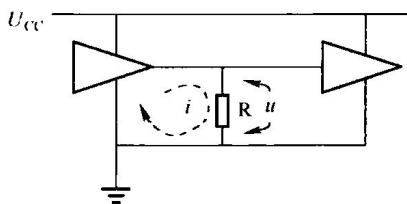


图 1-3 放大器中的公共阻抗耦合

如图 1-4 所示，如果两台设备共用一个电网，情况会是怎样呢？

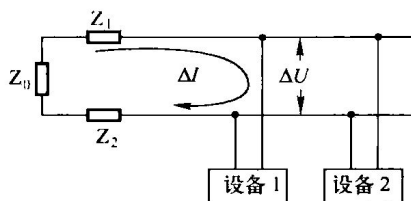


图 1-4 干扰源和敏感源通过电源线阻抗发生的耦合

这时，电网的阻抗就充当了公共阻抗，电网阻抗包括变压器的阻抗 Z_0 、线路的阻抗 Z_1 和 Z_2 ，总的阻抗就 $Z = (Z_0 + Z_1 + Z_2)$ 。当设备 1 从电网吸取的电流发生变化时（电流变化记为 ΔI ），则在电网的阻抗 Z 上产生了电压变化（电压变化记为 ΔU ），于是设备 2 的电源输入端也发生了电压变化 ΔU 。如果设备 2 对这个电压变化敏感，就发生了电磁兼容的问题。

在现实中，设备 1 往往是中频炉、变频器、直流电机驱动器等工作电流发生剧烈变化的设备，设备 2 往往是 PLC、数控机床、计算机等设备。设备 1 对设备 2 的干扰强度与什