

电磁兼容原理

[美] B·E·凯瑟 著

肖华庭 等译

电子工业出版社

内 容 简 介

本书吸收了近年来国外关于电磁兼容性研究的成果,针对从事该领域工作的实际需要,对电磁兼容性的各方面问题作了较全面的介绍,包括对接地、屏蔽、滤波等基本电磁兼容技术的论述,电磁兼容性的实验方法和测量设备及分析电磁兼容用的计算机程序的介绍,最后介绍了有关电磁兼容的国际标准,美国军用标准,美国民用标准。本书通过大量实例来说明实际干扰的情况及消除办法,是涉及电磁兼容性各个方面的一部重要论著。

电 磁 兼 容 原 理

[美]B·E·凯瑟 著

肖华庭 等译

责任编辑:荆 州

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张: 9.93 字数: 267千字

1985年3月第1版 1985年4月第1次印刷

印数: 10,000册 定价: 2.50元

统一书号: 15290·109

目 录

第一章 绪论

1.1 电磁干扰的原因	1
1.2 电传输	2
1.3 电磁干扰效应	4
1.4 电磁兼容性的实施方法	5
1.5 电磁兼容性领域的发展	7
1.6 本书的安排	7

第二章 传导干扰源及其性质

2.1 传导干扰源的性质	8
2.2 干扰的性质	13
2.3 减小传导干扰的设计要领	18
2.4 参考文献	22

第三章 辐射干扰源及其特性

3.1 辐射干扰源的性质	23
3.2 电磁脉冲	44
3.3 设计方法	50
3.4 参考文献	51

第四章 由传导和辐射耦合造成的干扰

4.1 传导耦合	54
4.2 辐射耦合	58
4.3 设计方法	63
4.4 参考文献	65

第五章 接地与搭接

5.1 设计程序	66
5.2 接地与搭接的定义	67
5.3 基本的接地概念	68
5.4 电路接地的考虑	72
5.5 电源的接地	75
5.6 继电器的接地	78
5.7 电缆屏蔽层的接地	79
5.8 接地设计准则	83
5.9 搭接的目的与种类	84
5.10 搭接的方法	86
5.11 搭接面的处理	87
5.12 腐蚀与合金化	87
5.13 搭接的有效性	91
5.14 搭接电阻	92
5.15 搭接阻抗	95
5.16 搭接的测试	96
5.17 良好搭接的一般原则	99
5.18 参考文献	100

第六章 屏蔽

6.1 实心型材料的屏蔽效果	101
6.2 多层实心型屏蔽	107
6.3 薄膜屏蔽	109
6.4 屏蔽接缝	111
6.5 非实心型屏蔽	113
6.6 电缆和连接器的屏蔽	122
6.7 良好屏蔽要领的综述	128
6.8 参考文献	131

第七章 滤波

7.1	滤波器的特性	132
7.2	滤波器的构成	135
7.3	感性负载的瞬态抑制	144
7.4	电源线滤波器	146
7.5	噪声抑制电路	148
7.6	专用滤波元件	150
7.7	专用滤波器	153
7.8	参考文献	157
 第八章 专门的屏蔽材料和元件		
8.1	衬垫	158
8.2	弹性指簧	164
8.3	导电涂层	165
8.4	滤波器触点连接器	171
8.5	参考文献	174
 第九章 设备的设计		
9.1	发射机	175
9.2	接收机	177
9.3	天线系统	178
9.4	电源	178
9.5	电动机	179
9.6	控制器件	179
9.7	数字电路	180
9.8	数字计算机	181
 第十章 数学模型		
10.1	源模型	186
10.2	耦合模型	187
10.3	接受器模型	189

10.4	模型设计示例	190
10.5	小结	192
10.6	参考文献	193

第十一章 系统内部和系统之间的分析程序

11.1	系统内部干扰的分析程序	197
11.2	系统之间的分析程序	218
11.3	程序选择	222
11.4	参考文献	225

第十二章 电磁干扰预测

12.1	计算机分析原理	227
12.2	用模型进行兼容性分析	228
12.3	用模型进行规范研制	230
12.4	利用模型计算弃权	234
12.5	测试数据的使用与输入	235
12.6	程序输出示例	236

第十三章 军用标准和规范

13.1	标准与规范的特点	237
13.2	军用电磁兼容标准	239
13.3	表示电磁兼容性极限的单位	244
13.4	定义与术语	245
13.5	军用电磁兼容性标准的发展趋向	248
13.6	参考文献	249

第十四章 工业与政府规范

14.1	颁布电磁兼容性标准的机构	250
14.2	联邦通讯委员会的要求	251
14.3	辐射卫生局(BRH)的要求	252
14.4	汽车工程师学会(SAE)的标准	253

14.5	国际无线电干扰特别委员会的建议	253
14.6	参考文献	255

第十五章 电磁兼容性试验计划与步骤

15.1	试验环境的建立	258
15.2	接口的考虑	258
15.3	试验方案的内容	258
15.4	兼容性准则	259
15.5	试验的自动化	260
15.6	试验的准备	260
15.7	试验步骤	263

第十六章 场强与传导干扰的测量方法

16.1	带宽与接收机的灵敏度	264
16.2	扫频测量	265
16.3	场强测量	266
16.4	时域测量与频域测量的对比	268
16.5	参考文献	269

第十七章 试验装置与设备

17.1	传导测量	270
17.2	辐射测量	274
17.3	信号源	277
17.4	接收机	279
17.5	电磁干扰的自动测量系统	280
17.6	光导纤维	282
17.7	参考文献	283

第十八章 试验设施

18.1	屏蔽室	284
18.2	吸收材料	286

附录 I：本书主要技术术语中英文对照表·····	288
附录 II：本书用到的名词缩写对照表·····	301

第一章 绪 论

当电子设备或电气设备所产生的电噪声不干扰任何其它设备正常工作时,我们说这些设备是电磁兼容的。电磁兼容性(EMC)是一种令人满意的情况,在这种情况下,无论是在系统内部,还是对其所处的环境,系统均能如预期的那样工作。

当不希望的电压和电流影响设备性能时,称之为存在电磁干扰,这些电压和电流可以通过传导或电磁场辐射传到受害的设备。改变设计、调整信号电平或噪声电平的过程,称为电磁干扰控制(EMIC)。通常也用这个词表示实现这种控制的管理措施。

1.1 电磁干扰的原因

电磁干扰可以来自系统内部,也可以来自系统外部,前一种情况称为系统内部的干扰,后一种情况称为系统之间的干扰。在分析电磁干扰时,所谓系统是指人们对之进行设计和管理控制的一些设备的综合整体。

产生系统内部干扰和系统之间干扰的共同原因是,预定给某一线路的信号传到不需要此信号的一个或几个其它线路上。表1.1列出了一些电磁干扰的原因,这些干扰主要是系统内部的干扰,包括开关瞬态、信号谐波、乱真发射或伴随需要信号的无用信号等。表1.2列出了系统之间电磁干扰的几种原因。在两个表中“发射器”(emitter)这个术语是指电磁能量源,而接受器(susceptor)这个术语是指对电磁能量产生响应的设备。在发射器栏中的每一项可以影响接受器栏中的任一项。读者可以看到,许多项目在两个表中都有。

在所有的情况下，电磁干扰都是由三个要素组合而产生的，它们是：意外的源、意外的传输途径和意外的响应。

表 1.1 系统内部的电磁干扰原因

发 射 器	接 受 器
汽车点火系统	显示设备
电源	继电器
发电机	导航仪器
计算机	计算机
雷达发射机	雷达接收机
无线电发射机	无线电接收机
荧光灯	军用设备

表 1.2 系统之间的电磁干扰原因

发 射 器	接 受 器
无线电发射机	无线电接收机
微波中继无线电发射机	微波中继无线电接收机
广播无线电发射机	广播无线电接收机
机载无线电发射机	机载无线电接收机
船载无线电发射机	船载无线电接收机
陆地移动式无线电发射机	陆地移动式无线电接收机
无线电接收机本地振荡器	无线电发射机低电平线路
雷达发射机	雷达接收机
输电线	心脏起搏器
雷击	计算机
发动机	导航仪器
荧光灯	工业控制

1.2 电 传 输

电传输途径的不同是对设备的电磁兼容特性进行分类的基本依据。电传输途径分为传导途径和辐射途径两种。“传导”是指经过金属线路的传输，包括集总元件如电容器、变压器等。“辐射”则用来表征经非金属线路的传输，这种传输机理可能是天线的“近场”或感应场，而不是辐射场。这样就可以用传导发射和

辐射发射来描写发射器的特性，而用接受器的传导敏感度和辐射敏感度来说明接受器的特性。图 1.1 说明了这四种途径：

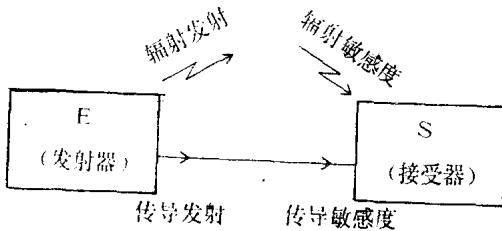


图 1.1 传输途径

传导发射和传导敏感度的强弱是用电压和电流表示的，其单位为 V、dBV、dB μ V 或 A、dBA、dB μ A。辐射发射和辐射敏感度的强弱是用场强表示的，其单位为 V/m、dBV/m、dB μ v/m 或 T(特斯拉*)、dBpT**等。

在传导测量领域中，耦合可能是电导性的、电容性的(电的)或电感性的(磁的)。电导性耦合来自两个元件或两根导线之间的欧姆接触；电容性耦合是由两个元件或两根导线之间的杂散电容造成的；电感性耦合是两个导体之间的互感引起的。三种类型的耦合均可用传输阻抗(transfer impedance)来说明它们的性质，传输阻抗是接受器上的电压与流过发射器的电流之比。传输阻抗一般是四端网络，它可以是三种耦合类型中的一种，也可以是三种耦合类型的组合。

电传输中值得注意的是频谱。把需要的信号从不需要的信号和噪声中分出的主要方法就是利用它们的频谱不同。每个周期性的电波形都可以分解为一个或更多的频谱分量。非周期性的波形，也称为单次冲击瞬态(one-shot transients)，可以用能量密度与频率关系的形式来表示其频谱成分。重复瞬态和随机噪声可以表

* “特斯拉”(Tesla)是磁通密度单位，等于 1 韦伯/米²。

** dBpT 是指“相对于 1 微秒特斯拉(10⁻¹² 特斯拉)的分贝数”。

示为功率谱密度与频率的关系。

由于频谱对系统之间电磁兼容的重要性，所以国际协议对强度足以干扰其它系统工作的、来自一个系统的辐射发射做了限定，后来根据国际协议规定的允许范围，各国在各自国家内，进行了频率分配。根据这些国际协议，国际电讯联盟(ITU)公布了无线电条例*。1979年在日内瓦召开的世界无线电管理会议(The World Administrative Radio Conference)是检查国际频率分配事务的一次重要会议。

为了进行频率分配，把全世界分为三个区域：

一区——欧洲、非洲、苏联的亚洲部分、小亚细亚和阿拉伯半岛。

二区——北美洲和南美洲(包括夏威夷)。

三区——澳大利亚和亚洲(除苏联的亚洲部分)。

对任一个区域规定的频率一般是相同的，但不同的区域之间规定的频率可以不同。

1.3 电磁干扰(EMI)效应

形成电磁干扰必须同时具备三个因素，它们是：

- 电磁干扰源；
- 对此种类型的干扰能量敏感的吸收器；
- 把能量从干扰源耦合到吸收器上，并使系统性能明显恶化的媒质，或称耦合通道。

在我们周围到处都可以看到电磁干扰现象，如晚上接收标准广播频段时的同波道干扰、飞机导航误差、心脏起搏器的失效以及在电视接收机中的“重影”。

电磁干扰的效果包括系统内部干扰和系统之间干扰两个方

* 可向国际电讯联盟秘书长索取无线电条例的文本，地点：瑞士日内瓦20CH-1211(Geneva20, Switzerland.)

面。表 1.2 中所列的任一干扰源与该表中列举的任一接受器之间的组合都能产生系统间的干扰，例如：

- 雷达干扰飞机的导航系统；
- 输电线干扰电讯系统；
- 移动电台干扰电视接收机；
- 输电线瞬态变化干扰计算机系统；
- 飞机无线电台干扰船舶系统；
- 出租汽车无线电干扰警方无线电系统；
- 远处的调频发射台和电视发射台干扰近处 B 级覆盖范围的调频和电视发射台。

系统内部的干扰举例如下：

- 汽车发动机系统对汽车内的无线电接收机的干扰；
- 雷达发射机的能量泄漏到雷达接收机；
- 地线回路电流引起的无意中的级间耦合；
- 计算机中磁带驱动器的磁场对低电平数字电路的干扰；
- 数字电路对共用同一电源的低电平模拟电路的干扰。

从事电磁兼容领域的工作人员，对噪声非常严重的情况经常会成功地提出一种看来简单、甚至不需复杂计算的解决办法。但是，干扰的任何降低，甚至零点几分贝的改善也是有一定道理的，详细解释和论证所采取的措施的尝试可能超过解释本身的价值。例如要得到 10dB 的改善，最简单的办法可能是使用一个能提供 40dB 隔离度的屏蔽。为此最重要的是掌握有关电磁兼容的原理知识，有了这种知识，不仅可以使人们选择合适的解决问题的方式，而且在需要时能进行明智的计算。

1.4 电磁兼容性的实施方法

电磁兼容性实施方法的目的是保证系统或子系统的兼容性。应用那些已由理论和实践证明的、能保证系统相对地免除电磁干

扰的设计方法，可以对干扰加以控制。理论分析、实验室测量和系统性能检查都已证明这些标准的实施方法是有效的。本书有关电磁兼容设计的各章后面，都列有相应的设计实施方法。

分析电磁兼容性问题，首先可按源（发射器）和敏感设备（接受器）之间的耦合途径分类，如分为传导的、辐射的或二者的组合。再根据发射器和接受器之间的频谱共同性（frequency spectrum commonality）和时域共同性（time domain commonality）进一步进行分类。还可以根据其它一些因素，如彼此之间的位置关系（距离和方向）来分类。

如果问题属于系统之间的干扰，则发射器和接受器可能受不同的组织机构控制。此时，人们可能首先提出这样的问题：“发射器是否符合无线电管理条例？”（如果是辐射发射问题）；或者“发射器是否符合规范？”（如果是辐射发射或传导发射）。如果问题属于系统内部的干扰，则后面的这个问题也是适用的。

对于系统之间的干扰，只要证实了发射器的工作符合无线电条例或规范的规定，那么人们就要试图确定发射器和接受器之间的传输途径的性质。如果存在这样的可能性：发射器、传输途径或接受器不需要在全部时间都工作，那么可以用时间分割（time sharing）或开关时间同步的办法来消除干扰。最后，如果允许增加发射器和接受器之间的距离，或者可以改变它们的天线方向性，也可使干扰减轻。

对于系统内部干扰，可以采用把源和接受器位置分开的办法，也可以采用频率分隔和时间分隔的办法。同样也可以采用上述的一些干扰控制方法。然而，和系统之间的干扰问题相比，系统内部的干扰情况一般要涉及更近的距离。因此在分析此种干扰情况时，通常要考虑采用合适的接地、合理的布线、对线路和电缆的屏蔽，以及滤波等方法*，以减少干扰的影响。这些技术将在本书第五、六、七章中分别讨论。

* 这些方法也适用于系统之间的干扰问题

1.5 电磁兼容性领域的发展

电磁兼容是一个正在发展的领域,这是由于在现代的计算、通讯、控制系统中,电气和电子线路的密度以及它们之间相关功能的日益增加。在许多复杂的系统中,由于性能要求的扩展,往往需要更高速度的电路和更宽的频带。频谱使用的日益扩展(包括幅度和频率两者)以及各个频段上使用频率的日益密集,对电磁干扰的数量和严重程度产生了重大的影响。一个系统中,只要把两个以上很小的元件放在同一环境中,就会产生电磁干扰,而且,每加入一个新的元件都使电磁干扰的可能性进一步增加。甚至看来很小的干扰都可能引起严重的故障或降低稳定性。

1.6 本书的安排

本书首先讨论电磁干扰源和耦合通道(第一章至第四章),接着讲解避免干扰和消除干扰的知识(第五章至第九章),然后介绍如何预测和分析电磁干扰(第十章至第十二章),在第十三章至第十五章将讨论各种规范和试验大纲,第十六章至第十八章的要点则是介绍试验方法及有关测试设备。

第二章 传导干扰源及其性质

设计者通常都不希望他们设计的设备成为一种干扰源。然而，在一个通道中是有用的信号，如果它偶然地进入另一个通道中去，就可能成为该通道所不希望的信号或“噪声”。特别是目前在很大的功率范围内（例如从微瓦一直到几兆瓦），都有不同的设备在工作。伴随电源转换的一个较小的火花对一个敏感电路（低功率电平电路）可能产生严重的骚扰。所以任何一个电子设备都可能是一个干扰源。

传导干扰是指通过金属导体，例如导线或任何金属结构包括电感器、电容器和变压器传播的干扰。正如我们将在第四章讨论的那样，载有电流的导线可以起着天线的作用，因此，许多传导干扰源同时也对周围产生辐射干扰。本章讨论通常被认为是传导干扰的干扰源，第三章讨论的是：主要属于辐射的干扰源。然而，由于载流导线与周围的场的相互作用，往往同一个源可以产生两种类型的干扰。所以，当一个导体能把干扰从线路中的某一点直接传到另一点时，它也就把传导干扰转换为辐射干扰。

2.1 传导干扰源的性质

传导干扰源可能是无意的（unintentional）或非功能性的（nonfunctional），例如弧光放电或导体中的电流突然变化引起的噪声。也可能是有意的（intentional）或功能性的（functional），如正弦波或方波发生器的输出。

2.1.1 非功能源

非功能传导噪声源通常与功能性的机电设备有关,如转换器、加热电路、数据处理机和静态功率设备。这些干扰形成的机理可能是由于电弧放电或电流的突然改变。当两个导体之间的电场强度超过导体之间介质的击穿强度时会产生电弧。所以在触点接通或断开时都可能产生这种电弧。在固体中,电弧会引起或促使击穿和故障。而在气体介质中,电弧虽然不致使设备产生故障,但却会形成严重的干扰。

根据 $E = L \, di/dt$ 的关系,导体内电流突然改变时,会产生突变的电压降 E , 这里 L 是导体的电感, di/dt 是流过导体的电流变化率。

下面讨论一些非功能性噪声源。

2.1.1.1 转换器

含有整流子的直流电机,由于电弧和电流快速改变而产生干扰。可以归为下列四种不同类型的整流子干扰:

- 电枢绕组中电流改变方向;
- 由于每个绕组在磁场中的位置变化,其感应电压变化,所以当整流子从一个绕组移到另一个绕组时,电压发生变化;
- 由于某些电枢绕组经电刷短路,使电刷之间总的电枢阻抗变化;
- 常见的电刷电弧。

在遥测系统中,可以使用电子式转换器,以便对不同的线路进行周期性的采样。此时,产生的宽带转换器干扰会传导到系统的电源线中。由傅里叶分析可以得出数据采样率的谐波和直流分量,谐波可以从音频范围一直伸展到几百兆赫。

2.1.1.2 加热器电路

在温度敏感设备中,时常用加热器元件来补偿温度变化,从而使温度保持在规定的窄范围内。恒温箱加热器的接点可以控制