

电磁兼容原理、 设计和预测技术

蔡仁钢 主编



北京航空航天大学出版社

7-11
S144

电磁兼容原理、 设计和预测技术

蔡仁钢 主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

0031/15

《电磁兼容原理、设计和预测技术》系统地阐述了电磁兼容性的基本原理,结合工程实际论述了典型电磁干扰模式、耦合机理和分析方法,介绍了电磁兼容的工程设计方法和计算机预测技术。本书内容丰富、深入浅出、体系新颖。书中反映了编者多年从事电磁兼容技术科研的心得和见解,并汲取了国内外的最新研究成果。因此它既有很强的理论性,又具有较好的工程应用参考价值。

电磁兼容是一门近代发展起来的综合性交叉学科。它是电气和电子工程技术人员必备的专业基础知识,也是系统可靠性工程高级工程师的必备知识。为适应高等学校硕士研究生培养并满足本科高年级学生的教学需要,以及在职工程技术人员继续教育的需要,特编写了本教材。

本教材适合电子和电气工程、无线电和通信工程、信息和计算机技术、仪器和测试技术、工业自动化技术、机电一体化技术以及系统可靠性工程等专业师生教学使用,亦可供上述专业工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理、设计和预测技术/蔡仁钢主编. —北京
:北京航空航天大学出版社,1997.12
ISBN 7-81012-673-3

I. 电… II. 蔡… III. 电磁兼容性 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 14804 号

电磁兼容原理、设计和预测技术

蔡仁钢 主 编
责任编辑 韦秋虎
责任校对 陈 坤

北京航空航天大学出版社出版发行
(北京市学院路 37 号,邮编 100083, 发行部电话 62015720)
北京市宏文印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:434 千字
1997 年 11 月第 1 版 1997 年 11 月第 1 次印刷 印数:4 000 册
ISBN 7-81012-673-3/O · 035 定价:23.00 元

前 言

电磁兼容性是一门新兴的综合性交叉学科,它的内容较为广泛,应用于许多领域。随着科学技术的发展、信息时代的到来以及电气化与自动化水平的不断提高,电磁干扰及电磁防护问题日益突出,世界各发达国家均对此予以广泛的重视,积极开展电磁兼容性的理论和应用研究,并已在军事装备、尖端技术产品和民用产品的研制和生产中获得很大效益。

我国的电磁兼容性研究起步较晚,与国外先进水平相比尚有差距。为适应 21 世纪科学技术发展形势和培养跨世纪人才的需要,应该加强电磁兼容性技术的研究,重视这方面理论和技术的教育和培训。

本书编著者近年来在航空航天部门为部分工程技术人员举办电磁兼容原理和应用技术培训班;在北京航空航天大学为研究生讲授“系统电磁兼容性与可靠性分析”课程,编写了《电磁兼容原理、设计和预测技术》讲义。在上述教学实践基础上形成的这本教材,总结了作者多年从事电磁兼容性理论与应用技术研究成果和教学经验,引入和吸收了国外发达国家的研究成果和最新资料。全书内容丰富,深入浅出,既有较强的理论性,又具有很好的实用性。

全书共分七章。第一章概述电磁兼容性学科的发展概况和它研究的主要内容。第二章主要论述电磁干扰形成的三要素和电磁兼容性的基本概念。第三、四章着重阐述电磁干扰传导和辐射的基本理论及其耦合机理,由此提出电磁兼容控制的策略和准则。第五章结合工程实际论述典型电磁干扰模式以及实用工程分析方法。第六章着重论述电磁兼容性设计的内容和分析计算方法。第七章主要论述电磁兼容计算机预测的原理和方法,简要介绍美国、俄罗斯和我国研制的电磁兼容预测应用程序的概况和特点。

电磁兼容性广泛应用于科研、工业和军事技术领域,特别对于从事电气及电子工程的技术人员应该是必须掌握的专业基础理论,对于从事系统可靠性工程的高级工程师应是必备的知识。

本书可作为高等院校有关专业硕士研究生的教材,也可供大学高年级学生选修;可以作为相关专业工程技术人员继续教育的培训教材,也可供从事科研和工程项目的有关人员作为电磁兼容性分析和设计的参考书。

本书由北京航空航天大学蔡仁钢教授担任主编。北京航空航天大学王雅娴同志编写第二章、第四章和第六章的 § 6.5 节,其余各章节均由蔡仁钢编写。

在本书编写出版过程中,得到了原电磁兼容性研究课题组全体成员的支持和帮助,北京航空航天大学出版社韦秋虎副编审提出了不少宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

由于编著者水平所限和时间仓促,书中难免有欠妥和错误之处,恳请读者指正和赐教。

编著者

1997. 11. 27

目 录

第一章 电磁兼容性概述

- § 1.1 电磁兼容技术的发展 (1)
- § 1.2 电磁兼容学科的特点 (2)
- § 1.3 系统可靠性与电磁兼容性 (6)
- § 1.4 电磁分贝单位的定义及换算关系 (8)

第二章 电磁兼容基本概念

- § 2.1 电磁环境..... (14)
 - 2.1.1 大地磁场..... (14)
 - 2.1.2 大地电场..... (14)
 - 2.1.3 自然电磁噪声..... (16)
- § 2.2 电磁干扰源..... (16)
 - 2.2.1 电磁干扰源的分类..... (16)
 - 2.2.2 常见人工电磁干扰源..... (17)
 - 2.2.3 飞机系统的干扰源分析举例..... (20)
- § 2.3 电磁干扰及其危害..... (24)
 - 2.3.1 电磁干扰三要素..... (24)
 - 2.3.2 电磁干扰的危害..... (27)
- § 2.4 电磁兼容性定义..... (31)
- § 2.5 电磁干扰信号的频谱分析..... (31)
 - 2.5.1 一般信号的分类..... (31)
 - 2.5.2 信号的时域分析与频域分析..... (32)
 - 2.5.3 傅里叶变换的应用..... (39)

第三章 电磁干扰传播和耦合理论

- § 3.1 电磁干扰的传输途径..... (42)
- § 3.2 传导耦合的基本原理..... (43)
- § 3.3 典型传导耦合的分析..... (46)
- § 3.4 电磁辐射的基本理论..... (50)
 - 3.4.1 电磁辐射的概念..... (50)
 - 3.4.2 辐射场强的分析..... (54)
 - 3.4.3 电磁场的性质..... (59)
- § 3.5 辐射耦合方式..... (61)

第四章 电磁兼容控制技术

- § 4.1 电磁干扰的控制策略..... (63)
- § 4.2 空间分离..... (64)
- § 4.3 时间分隔..... (64)

§ 4.4 频率划分和管制	(65)
4.4.1 频谱管制	(65)
4.4.2 滤波	(65)
4.4.3 频率调制	(65)
4.4.4 数字传输	(67)
4.4.5 光电传输	(67)
§ 4.5 电气隔离	(67)

第五章 电磁耦合的工程分析方法

§ 5.1 天线对天线的干扰分析	(69)
5.1.1 无线电发射机的辐射特性	(69)
5.1.2 无线电接收机的敏感特性	(75)
5.1.3 天线的辐射特性	(77)
5.1.4 飞机机载天线相互干扰的分析	(81)
§ 5.2 导线对导线的耦合分析	(87)
5.2.1 导线在回路中的连接形式	(87)
5.2.2 导线与导线感应耦合的一般原理	(89)
5.2.3 高频线间耦合分析	(90)
§ 5.3 电磁场对导线耦合的干扰分析	(102)
5.3.1 场对线干扰的类型	(102)
5.3.2 场对线的感应耦合	(103)
5.3.3 高频辐射场对导线的干扰	(106)
5.3.4 孔缝泄漏场对导线的感应耦合分析	(109)

第六章 电磁兼容性设计

§ 6.1 电磁兼容性设计的一般概念	(118)
§ 6.2 滤波技术及其应用	(122)
6.2.1 滤波器的主要特性	(122)
6.2.2 滤波器设计原理	(125)
6.2.3 电源滤波器	(132)
6.2.4 数字信号线滤波器	(138)
6.2.5 专用滤波器	(138)
§ 6.3 接地技术及其应用	(140)
6.3.1 安全接地	(141)
6.3.2 信号接地	(146)
6.3.3 电子电路的接地设计	(150)
6.3.4 运动系统的接地	(166)
§ 6.4 屏蔽原理和屏蔽技术的应用	(167)
6.4.1 电磁屏蔽的基本原理	(167)
6.4.2 屏蔽效能的计算	(173)
6.4.3 薄膜屏蔽和多层屏蔽	(182)
6.4.4 机壳箱体的屏蔽设计	(186)

§ 6.5	搭接及搭接技术	(203)
6.5.1	搭接的基本概念	(203)
6.5.2	搭接的基本理论	(205)
6.5.3	搭接的加工方法	(209)
6.5.4	搭接表面的清理和防腐涂覆	(210)
6.5.5	搭接的设计	(211)

第七章 电磁兼容性预测技术

§ 7.1	电磁兼容性预测的原理	(216)
7.1.1	电磁兼容性预测的概念	(216)
7.1.2	电磁兼容性预测的基本方程	(217)
7.1.3	电磁兼容性预测的数学方法概述	(217)
7.1.4	电磁场的数值分析方法	(220)
7.1.5	数值分析方法的评估	(222)
§ 7.2	电磁兼容性预测的数学模型	(223)
§ 7.3	电磁兼容性预测的主要作用和分析步骤	(225)
§ 7.4	美国的电磁兼容性预测程序介绍	(227)
§ 7.5	国内航空电磁兼容性预测程序介绍	(232)
7.5.1	飞机总体模块	(232)
7.5.2	天线对天线预测模块	(232)
7.5.3	电缆耦合预测模块	(233)
7.5.4	电磁场对机内设备耦合干扰预测模块	(235)
7.5.5	设备对设备干扰的分析模块	(237)
§ 7.6	俄罗斯的电磁兼容性评估计算软件介绍	(238)

第一章 电磁兼容性概述

§ 1.1 电磁兼容技术的发展

在人类尚未发明发电机和使用电能之前,地球上就存在自然界产生的电磁现象。自从 1866 年世界上第一台发电机发电以来,利用电磁效应工作的电气设备越来越广泛,同时也产生了越来越多的有害的电磁干扰,人类生活的电磁环境产生了巨大的变化,人为产生的电磁电平与日俱增,造成了所谓电磁环境的“污染”。

电磁干扰是人们早就发现的电磁现象,它几乎和电磁效应的现象同时被发现。早在 19 世纪初,随着电磁学的萌芽和发展,1823 年安培发表了电流产生磁力的基本定律,1831 年法拉第发现电磁感应现象,总结出电磁感应定律,揭示了变化的磁场在导线中产生感应电动势的规律。1840 年美国人亨利成功地获得了高频电磁振荡。1864 年麦克斯韦综合了电磁感应定律和安培全电流定律,总结出麦克斯韦方程,提出了位移电流的理论,全面地论述了电和磁的相互作用并预言电磁波的存在。麦克斯韦的电磁场理论为认识和研究电磁干扰现象奠定了理论基础。1881 年英国科学家希维赛德发表了“论干扰”的文章,标志着研究干扰问题的开端。

1888 年德国物理学家赫兹首创了天线,第一次把电磁波辐射到自由空间,同时又成功地接收到电磁波,用实验证实了电磁波的存在,从此开始了对电磁干扰问题的实验研究。

1889 年英国邮电部门研究了通信中的干扰问题,使干扰问题研究开始走向工程化和产业化。

20 世纪以来,由于电气电子技术的发展和应用,随着通信、广播等无线电事业的发展,使人们逐渐认识到需要对各种电磁干扰进行控制,特别是工业发达国家格外重视控制干扰,他们成立了国家级以及国际间的组织,如德国的电气工程师协会、国际电工委员会(IEC)、国际无线电干扰特别委员会(CISPR)等,开始对电磁干扰问题进行世界性有组织的研究。为了解决干扰问题,保证设备和系统的高可靠性,40 年代初提出电磁兼容性的概念。1944 年德国电气工程师协会制订了世界上第一个电磁兼容性规范 VDE 0878。接着美国在 1945 年颁布了美国最早的军用规范 JAN—I—225。

虽然电磁干扰问题由来已久,但电磁兼容这个新兴的综合性学科却是近代形成的。从 40 年代提出电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility 缩写为 EMC)概念,使电磁干扰问题由单纯的排除干扰逐步发展成为从理论上、技术上全面控制用电设备在其电磁环境中正常工作能力保证的系统工程。电磁兼容学科在认识电磁干扰、研究电磁干扰和控制电磁干扰的过程中得到发展,它深入阐述了电磁干扰产生的原因,分清了干扰的性质,深刻研究了干扰传输及耦合的机理,系统地提出了抑制干扰的技术措施,制定了电磁兼容的系列标准和规范,建立了电磁兼容试验和测量的体系,解决了电磁兼容设计、分析和预测的一系列理论和技术问题。

70 年代以来,电磁兼容技术逐渐成为非常活跃的学科领域之一,较大规模的国际性电磁兼容学术会议,每年召开一次。美国最有影响的电子电气工程师协会“IEEE”的权威杂志,专门设有 EMC 分册。美国学者 B·E·凯瑟撰写了系统性的论著《电磁兼容原理》。美国国防部编辑出版了各种电磁兼容性手册,广泛应用于工程设计。

到 80 年代,美国、德国、日本、前苏联、法国等经济发达国家在电磁兼容研究和应用方面达到了很高的水平。主要研究和应用的内容包括电磁兼容标准和规范、分析设计和预测、试验测量和开发屏蔽导电材料、培训教育和管理等。在工程应用方面研制出高精度的电磁干扰及电磁敏感度自动测量系统,开发出多种系统内和系统间电磁兼容性计算机分析和预测软件,形成了一套完整的设计体系,还开发研制成功多种抑制电磁干扰的新材料和新工艺。电磁兼容设计成为民用电子设备和军用武器装备研制中必须严格遵循的原则和步骤。在产品的设计、加工、检测、试验和使用的各个阶段都要考虑电磁兼容技术和管理。电磁兼容性成为产品可靠性保证中的重要组成部分。

90 年代,电磁兼容性工程已经从事后检测处理发展到预先分析评估、预先检验、预先设计。电磁兼容工程师必须与产品设计师、制造商以及各方面的专家共同合作,在方案设计阶段就开展有针对性的预测分析工作。把过去用于研制后期试验测量和处理以及返工补救的费用安排到加强事前设计和预测检验中来。电磁兼容技术已成为现代工业生产并行工程系统的实施项目组成部分。

产品电磁兼容性达标认证已由一个国家范围发展到一个地区或一个贸易联盟采取统一行动,从 1996 年 1 月 1 日开始,欧洲共同体 12 个国家和欧洲自由贸易联盟的北欧 6 国共同宣布实行电磁兼容性许可证制度,使得电磁兼容性认证与电工电子产品安全性认证处于同等重要的地位。

可以预言,在 21 世纪,电磁兼容学科将获得更加迅速的发展,将得到全人类的高度重视。

在我国对电磁兼容理论和技术的研究起步较晚,直到 80 年代初才组织系统地研究并制订国家级和行业级的电磁兼容性标准和规范。1981 年颁布了第一个航空工业部较为完整的标准 HB5662—81《飞机设备电磁兼容性要求和测试方法》。此后,在标准和规范的研究与制订方面有了较大进展,到目前已制定了 30 多个国家标准和国家军用标准。

80 年代以来,国内电磁兼容学术组织纷纷成立,学术活动频繁开展,1987 年召开了第一届全国性电磁兼容性学术会议,1990 年在北京成功地举办了第一次国际电磁兼容性学术会议,标志着我国电磁兼容学科的迅速发展并开始参与世界交流。

90 年代以来,随着国民经济和高科技产业的迅速发展,在航空、航天、通信、电子等部门,电磁兼容技术受到格外重视,并投入了较大的财力和人力建立了一批电磁兼容性试验测试中心,引进了许多先进的电磁干扰及敏感度自动测试系统和试验设备。

在电磁兼容性工程设计和预测分析方面也开展了研究并逐渐开始实际应用。在部分高等院校中开设了电磁兼容原理及设计课程,翻译和编写了一批教材,1993 年由国家军用标准化中心组织编写了《电磁兼容性工程设计手册》,表明我国军用设备的电磁兼容性工程设计进入全面实施阶段。

§ 1.2 电磁兼容学科的特点

电磁兼容学科的宗旨是为了降低和消除人为的和自然的电磁干扰,减少它的危害,提高设备和系统的抗电磁干扰能力,实现设备和系统的电磁兼容,最大限度地发挥设备和系统的效能。

一、电磁兼容学科的主要研究内容

电磁兼容学科研究的主要内容包括:

1. 电磁干扰特性及其传播耦合理论

人们为了抑制电磁干扰,首先必须弄清电磁干扰的特性和它的传播机理。如根据干扰信号的频谱特性可以了解它是宽带干扰还是窄带干扰;根据干扰信号的时间特性可知其为连续波、间歇波还是瞬态波,以便决定采取不同的方法加以抑制。因此对电磁干扰特性及其传播耦合理论研究是电

电磁兼容学科最基本的任务之一。

2. 电磁危害及电磁频谱利用和管理

人为的电磁污染已成为人类社会发展的公害。电磁能危害的主要表现为射频辐射、核电磁脉冲放电和静电放电对人体健康的危害,还有对电引爆装置和燃油系统的破坏与对电子元器件及其电路功能的损害,这些危害将影响到安全性和可靠性。

在关注电磁能危害的同时,人们还清醒地认识到人为的电磁频谱污染的问题也已相当严重。电磁频谱是一个有限的资源,由于被占用的频谱范围和数量日益扩张,频谱利用方法的进展远慢于频谱需求的增加,以至使电磁兼容问题出现许多实施方面的困难,不得不由专门的国际电信联盟机构来加以管理,在我国范围内由中国无线电管理委员会来分配和协调无线电频段。因此,有效管理、保护和合理地利用电磁频谱成为电磁兼容研究的一项必要的内容。

3. 电磁耦合的工程分析和电磁兼容控制技术

由于电子设备和系统的结构日益复杂,技术更加密集,频谱占用拥挤,在实际工程中,电磁干扰的传播和耦合很少以单一的基本耦合形态发生,而是由多种基本耦合特性的组合,表现为综合性的典型耦合模式,如两根平行导线间的电磁耦合实质是电容性耦合和电感性耦合的综合。电磁场对导线感应耦合并传输到导线终端的耦合模式,实际上是空间辐射耦合和传输线传送两种基本形态的组合。这些典型的耦合干扰模式在实际工程分析中作为一种固定的工程模式直接用于分析更复杂的现象,从而使电磁兼容工程分析的理论更加成熟。因此,分析和研究典型耦合模式成为电磁兼容研究中快速识别干扰机理的捷径。

电磁兼容控制技术是在不断发展的。众所周知,屏蔽、滤波、合理接地和合理布局等抑制干扰的措施都是很有有效的,在工程实践中被广泛采用。但是随着用电系统的集成化、综合化,以上措施的应用往往会与成本、质量、功能要求产生矛盾,必须权衡利弊研究出最合理的措施来满足电磁兼容性要求。又如新的导电和屏蔽材料以及工艺方法的出现,使电磁兼容控制技术有了新的措施,可见电磁兼容控制技术始终是电磁兼容学科中最活跃的研究课题。

4. 电磁兼容设计理论和设计方法

任何一项工程设计,最起码和最主要的是对费效比的考虑,当然它也是电磁兼容设计的一项重要指标。在一个产品从设计到投产的过程中,可以分为设计、试制和投产三个阶段,若在产品设计的初始阶段解决电磁干扰问题,花钱最少,控制干扰的措施最容易实现。如果等到产品投产后发现干扰问题再去解决它,成本就会大大上升。因此费效比的综合分析是电磁兼容性设计研究的一部分。另一部分则是电磁兼容性设计方法的研究。电磁兼容性设计不同于设备和系统的功能设计,它往往是在功能设计方案基础上进行,电磁兼容工程师必须和系统工程师密切合作,反复协调,把电磁兼容设计作为系统工程的一部分。

5. 电磁兼容性测量和试验技术

由于电磁干扰特性和电磁环境复杂,频率范围宽广,加上用电设备和系统占用的空间有限,因此电磁兼容性要求测试项目较多,而且不断的深入扩大,这就促进了测量技术的提高和测量设备的更新。在电磁兼容性试验中,为了对设备进行敏感度测量,需要研制多种模拟信号源及其装置来模拟产生传导和辐射干扰信号,因此推动了试验装置的研究开发,促进了测量和试验设备的自动化程度不断提高。高精度的电磁干扰及电磁敏感度自动测量系统的研制、开发并应用于工程试验,这些都是电磁兼容学科研究的重要内容。

6. 电磁兼容性标准、规范与工程管理

电磁兼容性标准、规范是电磁兼容性设计和试验的主要依据。通过制订规范和标准来控制用电设备和系统的电磁发射和敏感度,从而使系统和设备相互干扰的可能性大大下降,达到防患于未然。标准规定的测试方法和极限值要恰到好处,符合国家经济发展综合实力和工业发展水平,这样才能促进产品质量提高、技术进步,否则会造成人力、物力和时间的浪费。为此制订标准时必须进行大量的实验和数据分析研究。

为了保证设备和系统在全寿命期内有效而经济地实现电磁兼容性要求,必须实施电磁兼容性管理,建立一个管理系统,通过对这个系统的有效运转,应用系统工程的方法,实施全面管理。电磁兼容管理的基本职能是计划、组织、监督、控制和指导。管理的对象是研制、生产和使用过程中与电磁兼容性有关的全部活动。因此电磁兼容性管理要有全面的计划,从工程管理的较高层次抓起,建立工程管理协调网络和工作程序,确立各研制阶段的电磁兼容工作目标,突出重点,加强评审,提高工作的有效性。

综上所述,电磁兼容标准、规范与工程管理都是保证设备和系统实现电磁兼容性的重要工程技术。它们是电磁兼容学科的研究内容。

7. 电磁兼容预测和分析

电磁兼容预测和分析是进行合理的电磁兼容性设计的基础。通过对电磁干扰的预测,能够对可能存在的干扰进行定量的估计和模拟,以免采取过高的防护措施,造成不应有的浪费;同时也可避免系统建成后才发现不兼容而带来难题。因为在系统建成后修改设计,重新调整布局要花费很大的代价,有时也未必能彻底解决不兼容问题。因此在系统设计开始阶段就开展电磁兼容性分析和预测是十分必要的。

电磁兼容预测和分析的方法是采用计算机数字仿真技术,将各种电磁干扰特性、传输函数和敏感度特性全都用数学模型描述编制成程序,然后根据预测对象的具体状态,运行预测程序来获得潜在的电磁干扰计算结果。该预测方法在世界发达国家已普遍采用,实践证明它是行之有效的方法。因此研究预测数学模型、建立输入参数数据库、提高预测准确度等成为电磁兼容学科关于预测分析技术深入发展的基本内容。

8. 信息设备电磁泄漏及防护技术

随着科学技术的发展,计算机系统已广泛应用于机要信息的存储和数据处理。当计算机系统、工作站、办公室系统和笔记本式个人计算机以及与之配套的电传打字机、文电终端、行式打印机、绘图仪等机要电子设备工作时,机密信息可通过设备泄漏的电磁波辐射出去,也可能通过电源线、地线和信号线以传导的方式耦合出去。在一定距离内,往往不需要特殊的仪器设备便可接收到这些机密设备所发射的机要信息的内容。为了机要信息设备的安全防护,防止电磁泄漏,70年代在西方科技文献上出现了一项新的技术,称为防电磁泄漏技术 TEMPEST(Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard)。它的任务是检测、评价和控制来自机要信息设备的非功能传导发射和辐射发射,以防止窃听泄密的危险。

TEMPEST 技术与电磁兼容技术都是研究抑制电磁发射的,两者有许多共同的概念和技术,因此把防电磁泄漏技术列入电磁兼容学科的研究领域。由于它有着特殊性,因此它与电磁兼容性的一般防护技术相比还有很多特别的研究内容。

9. 环境电磁脉冲及其防护

电磁脉冲(EMP)是十分严重的电磁干扰源。其频谱覆盖范围很宽,可以从甚低频到几百 MHz,场强很大,电场强度可达 40 kV/m 或更高;作用范围很广,可达数千 km。不论是架空天线、输电

线、电缆线(外露的或埋设在地下的)、各种屏蔽壳体等都会被它感应产生强大的脉冲射频电流,这种脉冲电流如进入设备内部将产生严重的干扰甚至使设备遭到破坏。因此电磁脉冲的干扰及其防护问题已引起广泛的重视。

电磁脉冲可分为两类:一类为环境电磁脉冲。主要由核爆炸产生,因此又称为核电磁脉冲(NEMP);另一类是系统电磁脉冲。主要由 γ 射线或X射线直接打在设备壳体上激发产生电磁脉冲。

电磁脉冲对于卫星、航天飞机、宇宙飞船、导弹武器、雷达、广播通信、电力、电子、仪器设备等系统都有严重影响。近年来电磁脉冲干扰及其防护已被作为电磁兼容学科的一个重要研究内容。

二、电磁兼容学科的主要特点

电磁兼容学科是一个新兴的综合性学科。它虽然有独立的理论体系,但由于它的学科形成还处于发展和完善的过程中,因此它的理论体系还存在一些不够严密和系统的地方。加上它涉及的基础知识面比较宽广,直接应用和涉及的知识有电磁理论、电工原理、电子技术、电磁测量、信号分析、机械结构、自动控制、生物医学、材料及工艺等,因此电磁兼容理论和技术对于初学者来说具有一定的难度。

电磁兼容理论具有三个明显的特点,读者必须对这些特点有清醒的认识才能减少“入门”的障碍。

1. 大量引用无线电技术的概念和术语

电磁兼容理论和技术是以电学为基础的各类工科专业学生必须了解和掌握的专业基础知识。然而它的理论形成并不像电工基础或电子技术基础那样作为公共基础面向众多专业。它是从无线电技术的抗电磁干扰问题开始发展起来的。

起初,电磁干扰仅在无线电技术中比较突出。由于电报、电话、微波通讯、广播电视等技术的飞速发展,推动了抗电磁干扰理论和技术形成和壮大。后来随着半导体微电子技术的迅猛进展和电子技术的广泛应用,研究电磁兼容性不再仅仅是无线电技术的需要,而成为所有用电设备和系统共同的基本要求。于是电磁兼容学科迅速地在无线电抗干扰技术的基础上,经过扩展延伸和系统化,上升到公共技术基础的地位。然而,在它的理论中大量沿袭了无线电技术的概念和术语。例如,用电设备对干扰信号的响应称为“敏感”或“接受”;导线和导线相互之间的耦合,有时被称为“串扰”(“串音”),交变电磁场使导线产生感应电势称“电磁场激励”;把相互垂直的两个电场分量的矢量随时间变化的形态称“极化”等等。这些在无线电工程中极为平常的概念,对于电子技术、电气工程、自动控制、计算机技术、仪表测量、电力工程等专业却是十分生疏的。因此初学者要根据它们的物理本质理解和掌握这些概念。

2. 计量单位的特殊性

电磁兼容性工程中最常应用的度量单位是分贝(dB),它是两个参量的倍率的度量。

在电学理论和电工技术中,功率、电压、电流单位一般都用W,V,A(或者mW,mV,mA,kW,kV,kA)而在电磁兼容性工程中却用dBW,dBV,dBA(或dBmW,dBmV,dBmA)作单位,而且dBW,dBV,dBA与W,V,A的换算不是简单的关系。这就给初学者在定量分析的单位制概念上形成了一道障碍,感到生疏和别扭。关于dBW,dBV,dBA的定义及换算将在§1.4中叙述。

3. 以电磁场为基础的理论体系

电磁兼容学科是在研究电磁干扰规律和寻找抑制干扰方法中发展前进的。大部分电磁干扰是以“电磁场”的形态产生和相互作用的。因此在电磁兼容理论和技术中必然引用了大量的电磁场理论的方法和结论,许多电磁工程的分析和计算也都以电磁场计算公式为基础,经过简化和演绎而形

成,所以电磁兼容原理是以电磁场理论为基础的。

由于很多专业的学生和工程技术人员没有系统地学习电磁场理论,在学习掌握电磁兼容理论时会碰到一些困难,本教材将考虑这一实际情况,对此给予适当的铺垫和补充。

§ 1.3 系统可靠性与电磁兼容性

一、质量与可靠性

现代质量观念认为,产品质量是产品满足使用要求特性的总和,即产品具有适用性。性能、可靠性、维修性、安全性、适应性、经济性和时间性都是产品质量的基本目标,如图 1-1 所示。

其中产品性能、可靠性、维修性、安全性和适应性是产品的内在质量特性。经济性和时间性反映了产品的竞争能力,称为外延质量特性。这 7 项基本目标的综合评价决定了产品的质量。由此可见,可靠性是产品质量的重要组成部分。

产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。其中规定的条件包括环境条件、使用应力条件、储存条件、使用维护人员的素质条件等。环境条件中分为温度、湿度、振动、辐射等不同环境。电磁辐射环境是产品可靠性中规定的环境条件之一。

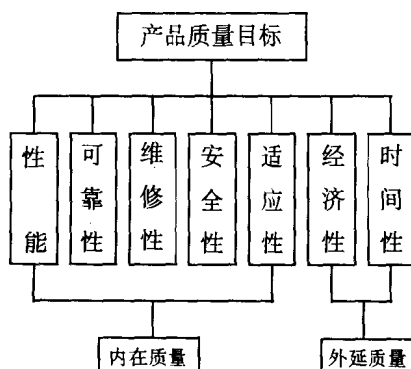


图 1-1 产品质量基本目标

二、电磁兼容性与可靠性

1. 电磁兼容性是产品可靠性的技术措施

众所周知,产品可靠性是相对于产品故障(或失效)而言的概念。电磁干扰是造成电气、电子产品故障或性能降级的主要原因之一,因此电磁干扰也就成为产品不可靠的因素。为了提高可靠性必须要求产品具有电磁兼容性,由此可见,保证产品的电磁兼容性是提高其可靠性的技术途径之一。

2. 电磁兼容性设计是可靠性工程的组成部分

“产品的可靠性是靠设计出来的,生产出来的,管理出来的”。可靠性工程就是为了达到产品或系统可靠性目标而进行的有关设计、试验和生产等一系列工作的总和,因此可靠性设计是可靠性工程的重要组成部分。可靠性设计已发展得比较成熟,设计的内容包括:根据系统的原理建立“可靠性模型”;将系统可靠性指标分配给各级组成部分的“可靠性分配”;根据设计方案对系统的可靠性进行预估的“可靠性预计”;在设计阶段就从设计方案上寻找不可靠的薄弱环节,进行“故障模式影响及致命性分析”和“故障树分析”;为降低工作应力提高可靠性而采用的“元器件降额使用技术”;防止电磁干扰引起不可靠的“电磁兼容性设计”;防止局部温升过高的“热设计”;防止软件出

现错误的“软件可靠性分析”等等。

综上所述,电磁兼容性设计是可靠性设计的重要部分,也是可靠性工程的组成部分。

3. 电磁兼容性是可靠性和维修性工程的重点发展应用项目

根据国内外武器装备发展的经验和资料报道,认为在可靠性和维修性工程中有 20 多个重点项目需要大力开展和应用,以提高武器装备的综合效能,其中电磁兼容性就是重要项目之一。表 1-1 给出了航空装备可靠性和维修性工程的重点开展应用项目重要度分析表。

由表 1-1 可见,在 20 多个重点项目中又按重要度加权进行了分析,电磁兼容性项目的重要度加权系数为 10 分,是少数几项最高分项目之一。可见,电磁兼容性是可靠性工程中最重点的项目之一。

表 1-1 可靠性、维修性工程工作项目重要度分析表

序号	可靠性、维修性工作项目	型号(产品)类别项目重要度加权值		
		新机(新品)	改型機種	改型成品
1	大纲计划	8	6	6
2	R. M 管理	10	10	10
3	R 分配	6	6	4
4	R 设计	6	4	4
5	热设计分析	8	4	4
6	降额设计	8	6	6
7	维修方案(概念)	4	2	2
8	维修性分析	8	4	4
9	维修性预计	6	2	2
10	保障性分析	8	2	2
11	元部件控制	10	10	10
12	可靠性、维修性设计准则	10	10	10
13	FMECA 分析	10	10	10
14	关键产品控制	8	8	8
15	可测试性分析、设计	6	4	4
16	软件可靠性	(6)	(4)	(4)
17	电磁兼容性	10	10	10
18	环境应力筛选	10	10	10
19	结构可靠性	8	8	4
20	耐久性、贮存寿命影响	6	6	6
21	初步和关键设计评审	8	8	8
22	R. M 增长	8	10	10
23	可靠性验证	4	4	4

续表 1-1

序号	可靠性、维修性工作项目	型号(产品)类别项目重要度加权值		
		新机(新品)	改型机种	改型成品
24	维修性验证	4	4	4
25	生产筛选	10	10	10
26	FRACAS 系统	10	10	10
27	信息反馈、闭环控制	10	10	10
28	RCM 改革	10	8	8

4. 电磁兼容性和可靠性有着共同的工程管理和实施技术

电磁兼容性和可靠性虽有不同的理论基础,但是它们在工程实际中却有共同的管理要求和实施技术,如它们都必须从产品的设计阶段开始实施,而后贯穿于研制、生产、试验、使用、维护的全过程。它们都有工程标准和规范,都要通过实验验证和试验达标。它们都有预先估计的预测或预计技术。

§ 1.4 电磁分贝单位的定义及换算关系

分贝(dB)表示两个参量的倍率关系,通常用来表示变化范围很大的数值关系。两个功率比值的分贝定义为

$$[\text{dB}] = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1.1)$$

其中, P_1 为某一功率电平;

P_2 为比较的基准功率电平。

如果以 $P_2 = 1 \text{ W}$ 作为基准功率,式(1.1)的分贝值就表示 P_1 功率相对于 1 W 的倍率,用符号 dBW 表示,它可以用来作为功率的单位,称为瓦分贝。功率单位 W 和 dBW 的关系表示为

$$P_{\text{dBW}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{W}}}{1} \right) = 10 \lg P_{\text{W}} \quad (1.2)$$

式中, P_{dBW} 为以 dBW 作单位的功率电平;

P_{W} 为以 W 作单位的功率电平。

如果式(1.1)中用 $P_2 = 1 \text{ mW}$ 作为功率基准, P_1 的分贝值就用符号 dBm 表示其单位,称为毫瓦分贝。dBm 和 W 的关系为

$$P_{\text{dBm}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{W}}}{10^{-3}} \right) = 10 \lg P_{\text{W}} + 30 \text{ dBm} \quad (1.3)$$

如果式(1.1)中以 $P_2 = 1 \mu\text{W}$ 作为参考基准功率, P_1 的分贝值单位就用 $\text{dB}\mu\text{W}$ 表示,称为微瓦分贝。dBW, dBm, $\text{dB}\mu\text{W}$ 与 W 的换算关系为

$$\begin{aligned} P_{\text{dBW}} &= 10 \lg P_{\text{W}} (\text{dBW}) \\ P_{\text{dBm}} &= 10 \lg P_{\text{W}} + 30 (\text{dBm}) \\ P_{\text{dB}\mu\text{W}} &= 10 \lg P_{\text{W}} + 60 (\text{dB}\mu\text{W}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

表 1-2 列出了用 dBm 为单位和以 W 为单位的功率之间的换算关系。

表 1-2 以 dBm 为单位和以 W 为单位的功率值换算对照表

dBm	W	dBm	W	dBm	W	dBm	W
110	100 MW	80	100 kW	50	100 W	20	100 mW
109	80 MW	79	80 kW	49	80 W	19	80 mW
108	63 MW	78	63 kW	48	63 W	18	63 mW
107	50 MW	77	50 kW	47	50 W	17	50 mW
106	40 MW	76	40 kW	46	40 W	16	40 mW
105	32 MW	75	32 kW	45	32 W	15	32 mW
104	25 MW	74	25 kW	44	25 W	14	25 mW
103	20 MW	73	20 kW	43	20 W	13	20 mW
102	16 MW	72	16 kW	42	16 W	12	16 mW
101	13 MW	71	13 kW	41	13 W	11	13 mW
100	10 MW	70	10 kW	40	10 W	10	10 mW
99	8 MW	69	8 kW	39	8 W	9	8 mW
98	6.3 MW	68	6.3 kW	38	6.3 W	8	6.3 mW
97	5 MW	67	5 kW	37	5 W	7	5 mW
96	4 MW	66	4 kW	36	4 W	6	4 mW
95	3.2 MW	65	3.2 kW	35	3.2 W	5	3.2 mW
94	2.5 MW	64	2.5 kW	34	2.5 W	4	2.5 mW
93	2 MW	63	2 kW	33	2 W	3	2 mW
92	1.6 MW	62	1.6 kW	32	1.6 W	2	1.6 mW
91	1.3 MW	61	1.3 kW	31	1.3 W	1	1.3 mW
90	1 MW	60	1 kW	30	1 W	0	1 mW
89	800 kW	59	800 W	29	800 mW	-1	800 μ W
88	630 kW	58	630 W	28	630 mW	-2	630 μ W
87	500 kW	57	500 W	27	500 mW	-3	500 μ W
86	400 kW	56	400 W	26	400 mW	-4	400 μ W
85	316 kW	55	316 W	25	316 mW	-5	316 μ W
84	252 kW	54	252 W	24	252 mW	-6	252 μ W
83	200 kW	53	200 W	23	200 mW	-7	200 μ W
82	159 kW	52	159 W	22	159 mW	-8	159 μ W
81	126 kW	51	126 W	21	126 mW	-9	126 μ W
80	100 kW	50	100 W	20	100 mW	-10	100 μ W

例如表 1-2 中 10 W 对应的 dBm 单位功率为 40 dBm, 即 $10 \text{ W}=40 \text{ dBm}$, 它们的换算关系为

$$P_{\text{dBm}}=10\lg 10+30=40(\text{dBm}) \quad (1.5)$$

在电磁兼容工程中除了功率习惯用分贝单位表示以外, 电压、电流和场强也都常用分贝单位表示。

(1) 电压的分贝单位

电压的分贝单位表示为

$$[\text{dB}]=20\lg\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (1.6)$$

式中, V_2 为基准电压。分贝值表示 V_1 相对于 V_2 的比值的对数函数, 反映 V_1 和 V_2 两个电压的倍率

关系。

如果令 $V_2=1\text{ V}$ 作基准,则得到 V_1 相对于 1 V 的比值的对数。用 dBV 为单位表示,称为伏分贝。在这样的条件下可以用 dBV 作单位表示电压 V_1 的数值。

如果 V_2 用 1 mV 作基准电压,则 V_1 电压分贝值的单位表示为 dBmV,称为毫伏分贝。若 V_2 用 $1\text{ }\mu\text{V}$ 作基准电压,则 V_1 分贝值的单位表示为 dB μ V。

电压用 V 单位和用 dBV, dBmV, dB μ V 作单位的换算关系为

$$V_{\text{dBV}}=20\lg\left(\frac{V_1}{1}\right)=20\lg V \quad (\text{dBV}) \quad (1.7)$$

$$V_{\text{dBmV}}=20\lg\left(\frac{V_1}{10^{-3}}\right)=20\lg V+60 \quad (\text{dBmV}) \quad (1.8)$$

$$V_{\text{dB}\mu\text{V}}=20\lg\left(\frac{V_1}{10^{-6}}\right)=20\lg V+120 \quad (\text{dB}\mu\text{V}) \quad (1.9)$$

例如, $V=10\text{ V}$, 用 dBV 单位表示,等于 20 dBV; 用 dBmV 单位表示,等于 80 dBmV; 用 dB μ V 单位表示,等于 140 dB μ V。

即 $10\text{ V}=20\text{ dBV}=80\text{ dBmV}=140\text{ dB}\mu\text{V}$ 。

(2) 电流的分贝单位

同理,电流的分贝单位定义为

$$[\text{dB}]=20\lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (1.10)$$

当 I_2 为 1 A 时, I_1 可用 dBA 单位表示;

当 I_2 为 1 mA 时, I_1 可用 dBmA 单位表示;

当 I_2 为 $1\text{ }\mu\text{A}$ 时, I_1 可用 dB μ A 单位表示。

电流用 A 单位和用 dBA, dBmA, dB μ A 单位的换算关系为

$$I_{\text{dBA}}=20\lg I \quad (\text{dBA}) \quad (1.11)$$

$$I_{\text{dBmA}}=20\lg I+60 \quad (\text{dBmA}) \quad (1.12)$$

$$I_{\text{dB}\mu\text{A}}=20\lg I+120 \quad (\text{dB}\mu\text{A}) \quad (1.13)$$

例如有 $I=100\text{ mA}$, 用 dBA 单位表示,等于 -20 dBA; 用 dBmA 表示,等于 40 dBmA; 用 dB μ A 表示,等于 100 dB μ A。

即 $100\text{ mA}=-20\text{ dBA}=40\text{ dBmA}=100\text{ dB}\mu\text{A}$ 。

表 1-3 表示电压、电流由 V, A 单位转换成不同分贝单位的换算表。

表 1-3 电流和电压表示成分贝单位的换算表

电压 V	dBV	dBmV	dB μ V	电压 V	dBV	dBmV	dB μ V
电流 A	dBA	dBmA	dB μ A	电流 A	dBA	dBmA	dB μ A
1.00	0.0	60.0	120.0	1.00	0	60.0	120.0
1.02	0.2	60.2	120.2	0.98	-0.2	59.8	119.8
1.04	0.3	60.3	120.3	0.96	-0.4	59.6	119.6
1.07	0.6	60.6	120.6	0.93	-0.6	59.4	119.4
1.10	0.8	60.8	120.8	0.90	-0.9	59.1	119.1
1.15	1.2	61.2	121.2	0.87	-1.2	58.8	118.8
1.20	1.6	61.6	121.6	0.85	-1.4	58.6	118.6
1.30	2.3	62.3	122.3	0.80	-1.9	58.1	118.1
1.40	2.9	62.9	121.9	0.75	-2.5	57.5	117.5