

《国防科研试验工程技术系列教材》

导弹航天测量控制系统

电 磁 兼 容 技 术

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容技术/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出版社, 2005.2

国防科研试验工程技术系列教材·导弹航天测量控制系统

ISBN 7-118-03677-3

I.电... II.中... III.电磁兼容性-教材 IV.TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第110921号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 14% 369 千字

2005年2月第1版 2005年2月北京第1次印刷

印数:1—5000册 定价:44.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》 总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委 员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 皞 陶有勤 郭詮水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 导弹航天测量控制系统》编审委员会

主任委员 王文宝

副主任委员 董德义 陶有勤 赵 军 周建生

委 员 余同杰 于志坚 贺瑞法 侯 鹰

赵龙海 梁勤亚 陈长贵 姚意学

张 渊 王元钦 马志强 韦亚南

王 华 李立杰

主 编 贺瑞法

副 主 编 张殷龙 张忠华

秘 书 李国强

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业40年来重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

电磁兼容技术

主 编 邹逢兴

编著者 邹逢兴 张湘平

李汉军 王成友

晏振乾

主 审 毛钧杰

技术保障；四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为：导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识，各专业及相关学科的基础理论与专业知识，主要设备的基本组成、原理与应用，主要试验方法与工作程序，本学科专业的主要科技成果，国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是：具有大专以上学历的科技与管理干部，从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养，有益于国防科研试验事业的发展，有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

导弹航天测量控制系统是国防科研试验工程中导弹试验工程和航天工程的重要组成部分。

40年来,我国导弹、航天测控技术人员坚持了自力更生的指导思想,严谨求实,团结奋战,建成了布局合理、系统完善、覆盖面广的导弹航天测控网,承担并完成了一系列导弹、运载火箭发射试验和卫星的跟踪、测量与控制任务,为我国导弹、航天事业的发展作出了重要贡献。

在导弹、航天测控网的建设、发展与使用管理过程中,几代科技人员投入了毕生的精力与智慧,付出了辛勤劳动,建立或创造了适应我国导弹航天测控实际的理论,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的成果。为了培养和造就新一代航天测控人才,使我国导弹、航天测控事业不断巩固和发展,将该系统40年来的理论与实践成果进行认真系统的整理总结,编写出一套既适应人才培养需要,又对试验工作具有指导与技术支持作用的系列教材,具有重要的现实意义和深远的历史意义。

本套教材以具有大专以上学历的导弹、航天测控工程技术人员和技术、计划协调管理人员为主要对象,以测控系统相关专业理论、系统组成、原理、工作程序、技术实施方案、方法以及测控技术的发展动态与发展方向等为主要内容,以测控系统理论基础、经验总结和总体工作与分析思路为重点,既可作为实际工作指导用书,亦可作为院校相关专业师生和测控设备研制人员的参考用书。

本套教材共分14卷。包括:《导弹航天测控总体》(上、下册)、《无线电跟踪测量》、《无线电遥测遥控》(上、下册)、《光电测量》、《航天器轨道确定》、《航天器飞行控制与仿真》、《航天测量

船》、《测控计算机与监控显示系统》、《GPS 技术与应用》、《电磁兼容技术》、《外弹道测量数据处理》、《遥测数据处理》、《试验指挥与管理自动化系统》和《靶场大地测量》。

本套教材在编写过程中,得到了有关部队、院校、设备研制生产单位的大力支持与协助,陈芳允、程开甲院士等老一代专家,为编写工作提出了很多宝贵的建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编著水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·
导弹航天测量控制系统》编审委员会
1999 年 10 月

前 言

随着电子信息的飞速发展及各类电气、电子、信息设备的日益广泛应用,人类与电磁干扰、电磁污染的斗争变得越来越复杂、越来越重要。斗争的最终目标是实现在所关心环境中和范围内的电磁兼容。电磁兼容技术作为一门新兴的综合性交叉学科,一方面有其独立的理论体系,内涵丰富,涉及面较宽;另一方面其理论体系又尚不够严密、系统、成熟,有待于在不断的理论研究和实践探索中去完善。

在航天测控领域,由于航天测控系统相比于一般电子信息系统具有设备组成庞杂、射频设备多、设备密集度高、电磁兼容环境恶劣和可靠性要求高等显著特点,使得电磁兼容技术在该领域的应用具有特殊重要的意义,因而可以说,没有或很少有像航天测控系统那样,对电磁兼容技术应用得这么广泛、深入的。正因为这样,所以本书编写的最初动因是来自总装备部的《国防科研试验工程技术系列教材·导弹航天测量控制系统》出版规划,即来自航天测控领域的电磁兼容性工程需求。当然,这并不意味着本书就只适用于该领域,恰恰相反,正是因为航天测控领域的电磁兼容问题所具有的特殊复杂性,才使得本书具有更好的典型性和一般性,它所论及的各种电磁干扰抑制技术和电磁兼容性预测、设计和测量方法,对一切电气、电子、信息系统的电磁兼容性工程或电磁干扰控制都是适用的,因而可作为从事相关方面教学的各类学校、培训机构的本科生、研究生教科书,也可作为从事相关方面工作的科技人员的实用参考书。

本书分为四部分,共9章。第一部分为电磁兼容概论,包括第1章和第2章,第1章绪论,介绍了有关电磁兼容与电磁兼容技术

的基本概念和内涵;第2章分析了形成电磁干扰的三要素——干扰源、耦合通道和敏感体的特性。第二部分为电磁干扰抑制,包括第3章~第5章,分别介绍了屏蔽、滤波、接地与搭接这3种最主要的干扰抑制技术。第三部分为电磁兼容实施,包括第6章~第8章,介绍了电磁兼容性分析(预测)、设计和试验。第四部分为综合应用,即第9章内容,主要以航天测量船为例,介绍了电磁兼容技术在航天测控领域的应用情况。

本书第1章、第3章、第5章由邹逢兴编写,第2章、第6章、第7章由张湘平编写,第4章由李汉军编写,第8章由王成友编写,第9章由晏振乾和邹逢兴合编。全书由邹逢兴教授主编和统稿,由毛钧杰教授主审。

在本书编著过程中,参考了国内外许多专家、学者和科技人员的成果(论文、著作),详见书末参考文献。在此谨向他们一并致谢。同时,还要向对本书的文字、图表录入、编辑付出了辛勤劳动的卜正明、郭咏新、刘永峰等国防科技大学的研究生表示感谢!

由于主编和作者水平有限,尤其直接从事航天测控领域电磁兼容性工程的经验不足,书中不可避免地会有错误和欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2004年8月

目 录

第一部分 电磁兼容概论

第 1 章 绪论	1
1.1 电磁兼容概述	1
1.1.1 电磁干扰及其危害	1
1.1.2 电磁兼容与电磁兼容性	4
1.1.3 与电磁兼容有关的常用术语	6
1.1.4 电磁干扰形成三要素与电磁干扰效应	11
1.1.5 电磁兼容的实施	13
1.2 电磁兼容技术	15
1.2.1 电磁兼容技术的内涵和学科特点	15
1.2.2 电磁兼容技术在现代社会中的地位 and 作用	23
1.2.3 电磁兼容技术的主要应用领域	24
1.2.4 电磁兼容技术发展概要	28
1.3 电磁频谱工程	33
1.3.1 频谱的频段划分及命名	33
1.3.2 频谱管理	34
1.3.3 频谱工程	37
1.4 电磁兼容性标准与规范	41
1.4.1 标准与规范的内容和特点	42
1.4.2 电磁分贝单位的定义及换算	44
1.4.3 国内标准与规范	47
1.4.4 国外标准与规范	56
第 2 章 电磁干扰三要素及其特性分析	58
2.1 概述	58
2.2 电磁干扰源及其特性分析	59

2.2.1	电磁干扰源的分类	59
2.2.2	自然干扰源	62
2.2.3	人为干扰源	66
2.2.4	电磁干扰源的特性分析	75
2.3	电磁干扰的传播及其特性分析	83
2.3.1	电磁干扰传播的一般途径	83
2.3.2	传导耦合	84
2.3.3	辐射耦合	104
2.4	敏感体及其特性分析	113
2.4.1	敏感体及其敏感度、抗扰度概念	113
2.4.2	接收器对干扰的敏感度	114
2.4.3	关于接收器敏感度的几点结论	116

第二部分 电磁干扰抑制

第3章	屏蔽技术	121
3.1	屏蔽与屏蔽分类	121
3.2	屏蔽原理及分析	122
3.2.1	电屏蔽原理	122
3.2.2	磁屏蔽原理	127
3.2.3	电磁屏蔽原理	130
3.3	屏蔽效能确定	135
3.3.1	屏蔽效能确定的解析法	136
3.3.2	屏蔽效能确定的图解法	142
3.3.3	屏蔽效能确定的查表法	147
3.3.4	实际屏蔽效能综合评定	150
3.4	屏蔽材料的选择	152
3.5	屏蔽结构选择	155
3.5.1	电屏蔽结构	155
3.5.2	磁屏蔽结构	157
3.5.3	电磁屏蔽结构	158
3.6	屏蔽设计	158
3.6.1	屏蔽设计概要	158

3.6.2 完整性屏蔽设计的几种实用屏蔽技术	161
第4章 滤波技术	175
4.1 滤波器的特性与分类	176
4.2 EMI 滤波器的特点与特殊组件	177
4.2.1 EMI 滤波器的特点	177
4.2.2 EMI 滤波器的特殊组件	179
4.3 反射式滤波器	182
4.3.1 低通滤波器	182
4.3.2 高通滤波器	188
4.3.3 带通滤波器	190
4.3.4 带阻滤波器	194
4.4 吸收式滤波器	195
4.5 电源滤波器	199
4.5.1 一般电源滤波器及网络结构	200
4.5.2 开关电源滤波器	202
4.6 信号选择滤波器	203
4.7 宽频带抗 EMI 新型材料与器件	207
4.8 有源滤波器	210
4.9 滤波器的选择与使用	214
4.10 几种最通常的实用滤波方法	218
第5章 接地与搭接技术	222
5.1 搭接与接地概念	222
5.2 接地线类型	223
5.3 安全接地	224
5.3.1 设备安全接地	224
5.3.2 防雷接地	226
5.3.3 安全接地的有效性	227
5.4 信号接地	232
5.4.1 单点接地系统	232
5.4.2 多点接地系统	235
5.4.3 混合接地系统	236

5.4.4	悬浮接地系统	238
5.5	实际系统的接地设计	238
5.5.1	单元电路的接地	239
5.5.2	多级电路的接地	239
5.5.3	电缆屏蔽层的接地	241
5.5.4	电路屏蔽盒的接地	248
5.5.5	飞行器系统的接地	250
5.6	地环路干扰及抑制	252
5.6.1	引入隔离变压器	252
5.6.2	引入中和变压器	254
5.6.3	引入光电耦合器	258
5.6.4	使用浮地方法	259
5.6.5	使用差分放大电路	260
5.7	搭接技术	263
5.7.1	搭接处理	263
5.7.2	搭接安全考虑	265
5.7.3	搭接的有效性测试	266

第三部分 电磁兼容实施

第6章	电磁干扰预测	269
6.1	电磁干扰预测的目的和内容	269
6.2	实施干扰预测的基本思想和方法	270
6.3	干扰预测模型	272
6.3.1	干扰源模型	272
6.3.2	耦合通道模型	273
6.3.3	接受器模型	277
6.3.4	小结	277
6.4	系统模型及建模方法	278
6.4.1	系统模型	278
6.4.2	建模方法	279
6.4.3	小结	281
6.5	干扰预测计算	282

6.5.1	幅度过滤	282
6.5.2	频率筛选	283
6.5.3	详细分析	283
6.5.4	性能评定	284
6.5.5	小结	284
6.6	系统内的电磁干扰预测	286
6.6.1	预测方法	286
6.6.2	预测实例	289
6.7	系统间的电磁干扰预测	292
6.7.1	预测方法	292
6.7.2	预测实例	296
6.8	电磁干扰预测计算机程序	300
6.8.1	概述	300
6.8.2	飞机电磁兼容性预测软件	304
第7章	电磁兼容性设计	315
7.1	电磁兼容设计的主要内容	315
7.1.1	系统内电磁兼容设计	315
7.1.2	系统间电磁干扰控制	316
7.2	电磁兼容性设计的基本参数	317
7.3	影响电磁兼容性的发射机特性	320
7.3.1	概述	320
7.3.2	发射机的离散模式	320
7.3.3	发射机的频带模式	322
7.4	影响电磁兼容性的天线特性	324
7.4.1	有意、无意辐射区	324
7.4.2	全方向性天线特性	326
7.4.3	定向天线特性	329
7.4.4	发射天线 - 接收天线对的配置	334
7.5	影响电磁兼容性的传播特性	337
7.5.1	自由空间传播损耗特性	337
7.5.2	各波段的电波传播特性	339
7.6	影响电磁兼容性的接收机特性	346

7.6.1	接收机通道特性	346
7.6.2	接收机的阻塞、交叉失真与互调特性	349
7.7	电磁兼容设计要点	350
7.7.1	抑制干扰源的设计要点	350
7.7.2	抑制干扰耦合的设计要点	351
7.7.3	敏感设备的设计要点	352
7.7.4	搭接设计要点	352
7.7.5	接地设计要点	353
7.7.6	屏蔽设计要点	354
7.8	电磁兼容设计的一般流程	355
7.9	复杂系统电磁兼容设计的拓扑图论方法	359
7.9.1	系统电磁兼容性问题的分解	359
7.9.2	系统电磁兼容性问题的拓扑描述	361
7.9.3	系统电磁兼容性问题的拓扑关联信息	363
7.9.4	系统电磁兼容性分析与设计	364
第8章	电磁兼容性试验	366
8.1	电磁兼容性试验的内容与要求	366
8.1.1	电磁兼容性试验项目	366
8.1.2	对试验场地的要求	368
8.1.3	对测试设备的要求	373
8.2	常用测试设备	374
8.2.1	电磁干扰测量仪	374
8.2.2	频谱分析仪	376
8.2.3	亥姆霍兹线圈	377
8.2.4	人工电源网络	378
8.2.5	功率定向耦合器	379
8.2.6	试验用天线	379
8.3	电磁干扰发射与电磁敏感度测试	381
8.3.1	测试频率与工作状态	381
8.3.2	传导干扰发射测试	382
8.3.3	辐射干扰发射测试	385
8.3.4	传导干扰敏感度测试	387