

Design Technology of
System-level EMC Engineering

系统电磁兼容 工程设计技术

唐晓斌 高斌 张玉 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

系统电磁兼容工程 设计技术

Design Technology of System-level EMC
Engineering

唐晓斌 高斌 张玉 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

系统电磁兼容工程设计技术 / 唐晓斌, 高斌, 张玉
著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 118 - 10802 - 6

I. ①系... II. ①唐... ②高... ③张... III. ①电磁兼
容性 - 设计 IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 279942 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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18 字数 332 千字

2016 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 129.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作

需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)技术是一门跨学科的综合应用学科,它以电磁场与微波技术的基本理论为基础,并涉及许多技术领域,如无线电技术、微电子技术、计算机技术、通信和网络技术以及材料技术等。电磁兼容是装备电磁环境适应能力、系统电磁效能的直接表征,关系到武器装备整体效能能否正常发挥。而现代战争的成败越发依赖于信息系统的电磁效能发挥,如何解决好系统的电磁兼容问题受到越来越多的关注。

随着陆海空天电一体化的战场电磁环境日益复杂化,电磁兼容技术的研究重点也从设备电磁兼容性研究转向系统级电磁兼容性、装备在战场复杂电磁环境中的效应和复杂电磁环境条件下的应用模式,电磁环境效应研究从单一电磁效应转向多种电磁场共同作用下的效应,电磁兼容性试验研究向各种试验方法的等效性和相关性研究转变,电磁环境管控研究由单一的静态频域管控向频域、时域、空域、能域全域动态管控发展。

为了使广大读者对体系对抗环境中的系统电磁兼容工程设计有一个全面与系统的了解,本书作者以多年来在型号研制中取得的研究成果介绍了系统电磁兼容的基本原理、工程设计、仿真实理论与方法、电磁兼容预测分析、电磁兼容试验与评估、电磁兼容控制、系统电磁兼容工程技术应用实例与新技术发展等。

本书以工程技术为主,以技术理论为辅,较为系统、全面、深入地阐述系统工程与实践中一些值得研究和认识的系统电磁兼容技术。全书共有8章,各章之间既有一定联系,又具有相对独立性,读者可以根据需要选读或通读。对工程实践更感兴趣的读者,可以跳过某些理论性较强的章节。

第1章概括了系统电磁兼容工程设计技术主要内容、设计流程、技术标准和技术发展等。第2章主要介绍系统电磁兼容原理所涉及的电磁干扰源、电磁能量的耦合与传输理论、电磁敏感源特性等理论与模型和原理分析实例。第3章主要介绍系统电磁兼容设计方法、设计原则、设计流程、8项设计内容和设计实例。第4章主要介绍系统电磁仿真实理论与方法所涉及的基本概念、频域方法、时域方法、高频算法、高低频混合算法、并行电磁计算和机载天线系统电磁兼容仿真实例。第5章主要介绍系统电磁兼容预测分析所涉及的系统电磁兼容预测原理、预测方法、电磁兼容预测软件和系统电磁兼容预测实例。第6章主要介绍系统电磁兼容测试与试验体系架构、测试与试验内容、试验设施与场地、试验评估

方法和试验评估平台。第7章主要介绍系统电磁兼容控制技术所涉及的空域、频域、能域、时域、综合管理控制技术及控制实例。第8章主要介绍系统电磁兼容工程技术应用实例和系统电磁兼容新技术发展。

本书的出版是多方面共同支持的结果。在以往的研究过程中,作者得到上级机关,各军兵种,相关院所、部队、厂家,作者所在单位领导和机关以及众多专家的大力支持,尤其是课题组的专家、同事给予了无私的帮助和极大的支持。作者的同事刘姜玲、贾翠霞、陈捷、宋海峰、姬慧莲、阚德鹏、王如意、陈浩、赵丹、李鹏、刘轩、黄辰在对相关内容进行资料整理、仿真实验和绘图(部分)等方面付出了辛勤的劳动。本书所述的研究工作受到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“复杂电磁环境数值模拟”(2012AA01A308)的支持。另外,本书责任编辑王晓光同志也给予了具体指导,所有这些,都令作者万分感激。另外,书中还引用了国内外有关学者的部分研究结论。在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,加上系统电磁兼容工程设计技术是一门在实践和运用中不断发展的学科,书中所述学术观点和研究体会难免会有不当之处,甚至存在错误和疏漏,恳请各位专家和同仁批评指正。

著者 唐晓斌

目 录

第1章 绪论	001
1.1 引言	001
1.2 系统电磁兼容工程设计技术	002
1.2.1 系统电磁兼容技术工程应用需求	002
1.2.2 系统电磁兼容工程设计技术研究内容	005
1.3 系统电磁兼容工程设计流程	017
1.4 系统电磁兼容工程设计相关标准	019
参考文献	023
第2章 系统电磁兼容原理	024
2.1 基本概念	024
2.2 电磁干扰源	027
2.2.1 电磁干扰的条件	027
2.2.2 电磁干扰源的分类	028
2.3 电磁能量的耦合与传输理论	029
2.3.1 电磁干扰的耦合途径	029
2.3.2 传导耦合的基本原理	030
2.3.3 辐射耦合的基本原理	034
2.4 电磁敏感源特性	040
2.4.1 接收机通道模型	041
2.4.2 接收机的阻塞、交叉失真和互调	042
2.5 电磁兼容原理应用实例	042
参考文献	044
第3章 系统电磁兼容工程设计	045
3.1 设计方法	045
3.2 设计原则	046
3.3 设计流程	047

3.3.1	确定设计边界	048
3.3.2	预测分析	048
3.3.3	分级设计	049
3.4	设计内容	049
3.4.1	设备/分系统电磁发射和敏感度控制设计	050
3.4.2	天线间干扰控制设计	060
3.4.3	线缆间干扰控制设计	063
3.4.4	电磁防护设计	073
3.4.5	搭接和接地设计	080
3.4.6	雷电防护设计	085
3.4.7	静电防护设计	087
3.4.8	电源设计	089
3.5	工程设计实例	091
	参考文献	094
第4章 系统电磁仿真实理论与方法		095
4.1	电磁仿真方法	095
4.1.1	矩量法	097
4.1.2	时域有限差分法	102
4.1.3	高频算法	107
4.1.4	高低频混合算法	113
4.1.5	并行电磁计算	116
4.2	机载天线系统电磁兼容仿真实例	123
4.2.1	机载单极子天线辐射特性	123
4.2.2	机载微带相控阵辐射特性	125
4.2.3	金属平板上方波导缝隙相控阵辐射特性	137
4.2.4	机载波导缝隙天线阵辐射特性	139
	参考文献	143
第5章 系统电磁兼容预测分析		145
5.1	系统电磁兼容预测原理	145
5.1.1	电磁兼容预测方程	145
5.1.2	发射机模型	146
5.1.3	接收机模型	150
5.1.4	天线模型	153
5.1.5	传播模型	157

5.2	系统电磁兼容预测方法	162
5.2.1	系统电磁兼容预测步骤	162
5.2.2	系统电磁兼容预测方法	163
5.3	电磁兼容预测软件介绍	169
5.3.1	国内外电磁兼容预测软件	169
5.3.2	机载平台电磁兼容软件	171
5.4	系统电磁兼容预测实例	174
	参考文献	178
第6章 系统电磁兼容性试验与评估		180
6.1	电磁兼容性测试与试验体系架构	180
6.2	系统电磁兼容性测试与试验内容	182
6.2.1	设备级/LRU级电磁兼容性试验	182
6.2.2	分系统/机柜级电磁兼容性试验	184
6.2.3	系统级电磁兼容性试验	185
6.2.4	系统电磁环境适应性验证试验	188
6.2.5	系统电磁兼容测试结果与报告要求	189
6.3	电磁兼容性试验设施与场地	190
6.3.1	开阔试验场	190
6.3.2	半电波暗室	190
6.3.3	混响室	191
6.3.4	横电磁波室	193
6.3.5	吉赫横电磁波室	193
6.3.6	屏蔽室	194
6.4	系统电磁兼容性试验评估方法	195
6.4.1	电磁干扰发射和电磁敏感度试验方法	195
6.4.2	系统内电磁兼容性试验方法	202
6.4.3	系统间电磁兼容评估方法	208
6.5	典型电磁兼容性试验评估平台与应用实例	210
6.5.1	设备及分系统电磁兼容验证系统	210
6.5.2	电磁环境及电磁频谱监测系统	212
6.5.3	高功率微波电磁环境激励系统	214
6.5.4	电磁环境效应验证评估系统	218
	参考文献	223
第7章 系统电磁兼容控制		225
7.1	空域电磁兼容控制技术	227

7.1.1	空域控制基本原理	227
7.1.2	空域控制设计流程	229
7.2	频域电磁兼容控制技术	232
7.2.1	频率指配基本原理	232
7.2.2	频率管理流程	234
7.3	能域电磁兼容控制技术	237
7.3.1	滤波技术基本原理	238
7.3.2	滤波器设计流程	238
7.4	时域电磁兼容控制技术	239
7.4.1	时域控制基本原理	239
7.4.2	时域控制工作流程	239
7.5	系统电磁兼容控制实例	240
	参考文献	245
第8章 工程应用实例与新技术发展		246
8.1	系统电磁兼容设计	246
8.1.1	系统电磁环境基本状态	247
8.1.2	系统电磁环境设计	247
8.2	预测仿真	249
8.2.1	预测分析	249
8.2.2	仿真分析	249
8.3	系统电磁兼容测试	250
8.3.1	设备级/分系统级测试	250
8.3.2	系统级测试	251
8.4	系统电磁兼容性控制	253
8.4.1	设计控制	253
8.4.2	测试控制	255
8.5	系统电磁兼容评估	256
8.6	电磁兼容新技术和发展	257
8.6.1	综合设计技术	257
8.6.2	仿真预测技术	260
8.6.3	试验测试技术	261
8.6.4	频谱管控技术	263
	参考文献	266
缩略语		267

Contents

Chapter 1 Introduction and preview	001
1.1 Introduction	001
1.2 Design technologies of system-level EMC engineering	002
1.2.1 Application demands of system-level EMC technology engineering	002
1.2.2 Research focus of design technology of system-level EMC engineering	005
1.3 Design flow of system-level EMC engineering	017
1.4 Standards related to system-level EMC engineering design	019
References	023
Chapter 2 Theory of system-level EMC	024
2.1 Basic concept	024
2.2 Electromagnetic interference sources	027
2.2.1 Conditions of EMI	027
2.2.2 Types of EMI sources	028
2.3 Theory of transmission and coupling of EM energy	029
2.3.1 Path of EMI coupling	029
2.3.2 Basic theory of conduction coupling	030
2.3.3 Basic theory of radiation coupling	034
2.4 Characteristic of EM sensitivity sources	040
2.4.1 Channel model of receiver	041
2.4.2 Blockage crossover distortion and intermodulation of receiver	042
2.5 Examples of the application of EMC theory	042
References	044
Chapter 3 Engineering design of system-level EMC	045
3.1 Design method	045

3.2	Design principles	046
3.3	Design flow	047
3.3.1	Confirmation of boundary condition	048
3.3.2	Predictive analysis	048
3.3.3	Multi-level design	049
3.4	Content of design	049
3.4.1	Design for controlling the EM emission and Sensitivity of equipment/sub-system	050
3.4.2	Design for controlling inter-antenna interference	060
3.4.3	Design for controlling inter-cable interference	063
3.4.4	Design for EM radiation protection	073
3.4.5	Design of lapping and grounding	080
3.4.6	Design for lightning protection	085
3.4.7	Design for electrostatic protection	087
3.4.8	Design of power supply	089
3.5	Examples of engineering design	091
	References	094

Chapter 4 Theory and method of system-level EM simulation 095

4.1	EM simulation methods	095
4.1.1	Frequency-domain method	097
4.1.2	Time-domain method	102
4.1.3	High-frequency algorithm	107
4.1.4	High-low frequency hybrid algorithm	113
4.1.5	Parallel computing for EM simulation	116
4.2	Examples of airborne antenna system-level EMC simulation	123
4.2.1	Radiation and coupling of airborne monopole antenna	123
4.2.2	Radiation of airborne microstrip phased array antenna	125
4.2.3	Radiation of waveguide slots phased array antenna on metal slab	137
4.2.4	Radiation of airborne waveguide slots phased array antenna	139
	References	143

Chapter 5 Analysis of system-level EMC prediction 145

5.1	Theory of system-level EMC prediction	145
-----	---	-----

5.1.1	Equation of system-level EMC prediction	145
5.1.2	Transmitter model	146
5.1.3	Receiver model	150
5.1.4	Antenna model	153
5.1.5	Transmission model	157
5.2	Strategy of system-level EMC prediction	162
5.2.1	Step of system-level EMC prediction	162
5.2.2	Method of system-level EMC prediction	163
5.3	Introduction of EMC prediction softwares	169
5.3.1	Domestic and international EMC prediction softwares	169
5.3.2	EMC softwares for airborne platform	171
5.4	Examples of system-level EMC prediction	174
	References	178

Chapter 6 Experiment and assessment of system-level EMC 180

6.1	EMC tests and experiment system frame	180
6.2	System-level EMC tests and experiment contents	182
6.2.1	Equipment-level/LRU-level EMC experiment	182
6.2.2	Sub-system/rack-level EMC experiment	184
6.2.3	Whole-system EMC experiment	185
6.2.4	Verification tests of EM environment adaptability	188
6.2.5	Test results and report details of system-level EMC experiment	189
6.3	Experimental facility and test field of EMC	190
6.3.1	Open area test field	190
6.3.2	Semi-anechoic chamber	190
6.3.3	Reverberation chamber	191
6.3.4	TEM chamber	193
6.3.5	GTEM chamber	193
6.3.6	Shielded room	194
6.4	Evaluation method of system-level EMC experiment	195
6.4.1	Experiment method of EMI emission and EM sensitivity	195
6.4.2	Experiment method of system-level EMC	202
6.4.3	Evaluation method of system-level EMC	208
6.5	Typical evaluation platform for EMC experiment and examples of their application	210

6.5.1	Equipment-level and subsystem-level EMC verification system	210
6.5.2	Monitoring system of EM environment and EM spectrum	212
6.5.3	System of HPM excitation for EM environment	214
6.5.4	Verification and evaluation system for EM environmental effects	218
	References	223
Chapter 7 Stage control of system-level EMC		225
7.1	Stage control technology of spatial EMC	227
7.1.1	Basic concept of spatial EMC control	227
7.1.2	Design flow of spatial EMC control	229
7.2	Stage control technology of frequency-domain EMC	232
7.2.1	Basic concept of frequency-domain distribution EMC	232
7.2.2	Design flow of frequency management	234
7.3	Stage control technology of energy-domain EMC	237
7.3.1	Basic concept of filtering	238
7.3.2	Design flow of filtering	238
7.4	Stage control technology of time-domain EMC	239
7.4.1	Basic concept of time-domain EMC control	239
7.4.2	Design flow of time-domain EMC control	239
7.5	Application examples of system-level EMC control	240
	References	245
Chapter 8 Applications in engineering projects and progress in new technologies		246
8.1	Design of system-level EMC	246
8.1.1	Basic status of system-level EM environment	247
8.1.2	Design of system-level EM environment	247
8.2	Simulation of EMC prediction	249
8.2.1	Analysis of EMC prediction	249
8.2.2	Simulation of EMC prediction	249
8.3	System-level EMC testing	250
8.3.1	Equipment-level / subsystem-level EMC testing	250
8.3.2	System-level EMC testing	251

8.4	System-level EMC control	253
8.4.1	Design control	253
8.4.2	Testing control	255
8.5	System-level EMC Evaluation	256
8.6	EMC new technologies and progress	257
8.6.1	Comprehensive design technology	257
8.6.2	New simulation prediction technology	260
8.6.3	New technology of measurement	261
8.6.4	New technology of EM spectrum control	263
	References	266
	Abbreviations	267