

国防科技图书出版基金

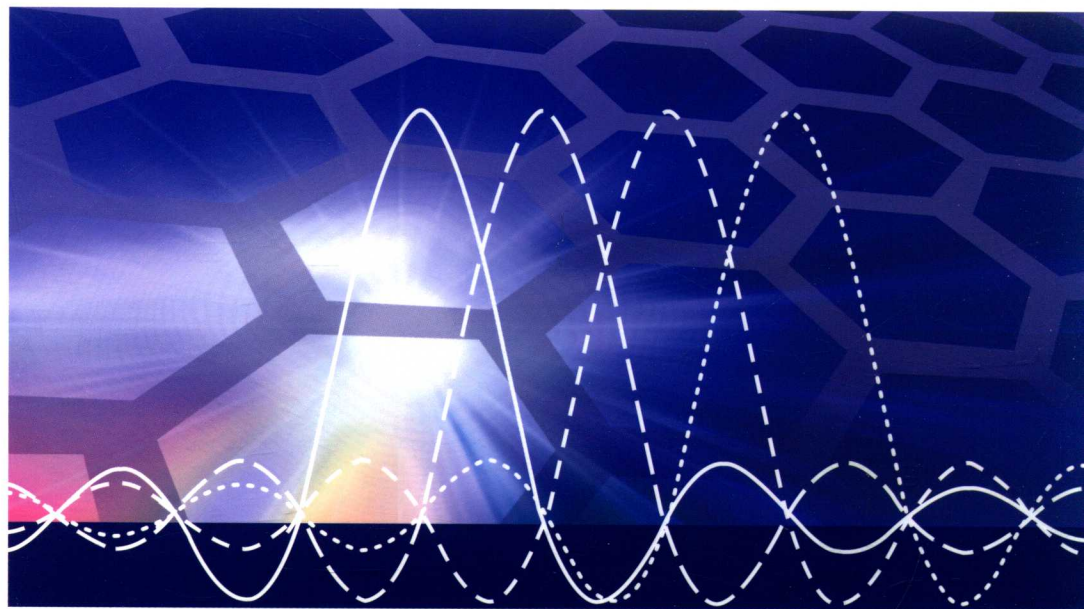


电磁兼容与电磁防护系列著作

系统级电磁兼容性 量化设计理论与方法

The Theory and Methods of Quantification
Design on System-Level Electromagnetic Compatibility

■ 苏东林 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

电磁兼容与电磁防护系列著作

系统级电磁兼容性 量化设计理论与方法

The Theory and Methods of Quantification Design
on System-Level Electromagnetic Compatibility

苏东林 谢树果 戴飞 刘焱 贾云峰 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

系统级电磁兼容性量化设计理论与方法/苏东林等著. —北京:国防工业出版社,2015.3

(电磁兼容与电磁防护系列著作)

ISBN 978-7-118-10082-2

I. ①系... II. ①苏... III. ①飞机-电磁兼容性-设计 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 047717 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 18½ 字数 348 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 128.00 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 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

序

系统级电磁兼容性设计是武器装备研制的核心技术之一,随着大型平台上装载电子系统的日益复杂和电磁环境的日益恶劣,系统级电磁兼容性量化设计的研究意义越来越重要,应用需求越来越迫切。

本书是苏东林教授带领的北京航空航天大学电磁兼容研究团队近 30 年理论研究和工程实践成果的结晶。书中首先深入论述电磁兼容性基础理论知识,然后阐述系统级电磁兼容性量化设计的基本概念,在此基础上结合其从事飞机整机电磁兼容性能分析、工程设计、问题整改的经验和体会,论述系统级电磁兼容性量化设计中的关键技术;以飞机系统级电磁兼容性设计为例,给出系统级电磁兼容性量化设计与评估的方法,从全寿命电磁兼容性能控制的角度论述电磁兼容性评估与质量控制方法,并结合工程实例解析 CE102、RE102、RS103 等试验普遍存在的问题和解决方案。本书理论联系实际,既具有较强的理论性,又有很好的应用指导性,是我国首本系统论述系统级电磁兼容性量化设计理论与方法的学术专著。

苏东林教授热爱航空事业,热爱电磁兼容事业。她 30 年如一日致力于系统级电磁兼容性量化设计方面的理论研究和工程实践,取得了可喜的创新性研究成果,学术水平处于国内领先地位,为推动我国电磁兼容事业的发展做出了突出贡献。她提出的“自顶向下飞机系统级电磁兼容性量化设计”理论与方法,在解决飞机系统级电磁兼容性设计方面具有独到的创新之处,为飞机成功研制发挥了重要作用,研究成果获得了国家科技进步二等奖。

本书的出版对推动我国电磁兼容领域的发展将起到极大的促进作用。

中国工程院院士



前言

飞机、卫星、导弹、舰船、电子信息系统等是大型复杂信息化平台,其系统级(也称为平台级)电磁兼容性论证、设计问题一直是公认的难题。主要有两个原因:一是缺少设计标准;二是缺乏论证和设计技术手段,这也许是目前绝大多数大型复杂信息化平台论证、设计时电磁兼容性难以落实的一个主要原因。

“良好的电磁兼容性是设计出来的”。

“系统级电磁兼容性量化技术”是北京航空航天大学电磁兼容研究团队的百余位老师、学生和工程技术人员,学习、分析、总结国内外电磁兼容性研究先进经验、成果,深入持续开展电磁兼容及相关学科理论方法研究,结合 20 余项系统级电磁兼容性设计和问题整改等工程实践,经过近 30 年的不懈努力,总结、凝炼出来的,相信对我国电磁兼容及相关科技人员有借鉴、参考意义。

为了便于理解,本书分两篇编写:第 1 篇详细介绍系统级电磁兼容性量化设计的基本理论,包括电磁场与电磁波、微波技术、天线原理与工程等;第 2 篇着重介绍北京航空航天大学电磁兼容研究团队在系统级电磁兼容性量化设计方面的主要研究成果,包括基本概念、理论方法、关键技术的解决方案,电磁兼容性质量控制流程与评估方法,研究开发的辅助工具软件,应用实例等。

本书主要由苏东林教授编写;谢树果教授参与编写了天馈系统部分;戴飞副教授参与编写了试验要求与指标部分;刘焱博士参与编写了电磁兼容性量化设计应用实例部分内容;贾云峰博士参与编写了电磁兼容性质量控制应用实例部分内容。

在本书编写过程中我们深切感到,中国国防和航空事业的发展赐给了我们最大的良机,北京航空航天大学为我们的发展构建了难得的平台,在此衷心地向中国国防事业和航空事业致敬,向我们的母校北京航空航天大学敬礼!

北京航空航天大学电磁兼容研究团队在成长过程中,得到了各级主管单位的厚爱与支持,得到了相关总体研制单位和成品厂家倾力配合,得到了国内外电磁兼容领域及相关领域专家的无私指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金重点、面上、青年等项目的大力资助,得到了国防基金、航空基金等基金的大力支持,在此深表谢意。

承蒙刘尚合院士、张明高院士、王均宏教授推荐,感谢国防科技图书出版基金的资助。

由于作者水平和写作经验有限,疏漏和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

著者

目 录

第 1 篇 电磁兼容性基本理论

第 1 章 电磁场与电磁波	2
1.1 麦克斯韦方程整体物理意义	2
1.1.1 基本源量	2
1.1.2 基本场量	4
1.1.3 自由空间麦克斯韦方程组	4
1.1.4 电磁场定律的物理意义	4
1.1.5 电磁场定律的整体物理意义	5
1.2 电磁功率流	8
1.2.1 电磁功率流的传输通道	8
1.2.2 电容器的本质——存储电能	11
1.2.3 电感器的本质——存储磁能	11
1.2.4 器件属性分析实例	12
1.3 电磁波的反射	13
1.3.1 理想导体表面电磁场的边界条件	13
1.3.2 空气电壁	15
第 2 章 微波技术	18
2.1 微波传输线理论	18
2.1.1 微波传输线概述	19
2.1.2 微波传输线中的传输状态和截止状态	20
2.1.3 微波传输线中的 TEM 模、TE 模和 TM 模	21
2.1.4 同轴线的主要特性	22
2.1.5 波导传输线的主要特性	23
2.1.6 微波传输线分布参数效应	25
2.2 传输线理论在电磁兼容性研究中的应用	30

2.2.1	单导体传输线特性在电磁兼容性研究中的应用	30
2.2.2	多导体传输线特性在电磁兼容性研究中的应用	31

第3章 天线原理与工程 33

3.1	交变电偶极子产生的场	33
3.1.1	近区场	34
3.1.2	远区场	34
3.2	天线的基本概念	35
3.2.1	方向性函数与方向图	35
3.2.2	辐射功率	36
3.2.3	辐射电阻	36
3.2.4	天线波瓣宽度及增益	36
3.2.5	天线带外特性对整机电磁兼容性的影响	38
3.2.6	天馈系统	40

第2篇 系统级电磁兼容性量化设计方法与应用

第4章 系统级电磁兼容性量化设计基本概念 45

4.1	与电磁兼容性相关的基本概念	45
4.1.1	电磁干扰	45
4.1.2	电磁兼容性	47
4.1.3	电磁易损性	47
4.1.4	电磁环境	49
4.1.5	电磁环境效应	50
4.1.6	电磁环境适应性	51
4.1.7	电磁频谱管理	51
4.1.8	频谱使用认可	51
4.1.9	频谱支持度	52
4.2	电磁兼容性量化设计要点	53
4.2.1	电磁耦合要素识别	53
4.2.2	电磁兼容性三个发展阶段	55
4.2.3	系统级电磁兼容性	56
4.2.4	系统级电磁兼容性的特点	57
4.2.5	不同领域对电磁干扰的解读	58

4.3	电磁兼容性量化设计基本概念	59
4.3.1	干扰关联关系	59
4.3.2	干扰关联矩阵	60
4.3.3	系统级电磁兼容性要求及指标	60
4.3.4	电磁泄漏剖面 and 电磁敏感剖面	62
4.3.5	设备隔离度	63
4.3.6	指标量化分配	64
4.3.7	电磁兼容性行为级建模	66
4.3.8	电磁兼容性行为级仿真	68
4.3.9	电磁兼容性灰色关联量化建模	69
第5章	系统级电磁兼容性量化设计中的关键技术	71
5.1	系统级电磁兼容性量化设计的基本原理、方法与流程	72
5.2	电磁兼容度求解方法	74
5.3	电磁兼容性建模方法	81
5.3.1	系统建模方法	81
5.3.2	行为级建模方法	83
5.3.3	灰色关联量化建模方法	142
5.4	电磁兼容性仿真方法	150
5.4.1	飞机系统级电磁兼容性仿真方法(案例1)	150
5.4.2	发射和接收系统带外非线性干扰仿真方法(案例2)	160
5.4.3	基于灰色模型的电磁发射要素识别(案例3)	178
第6章	系统级电磁兼容性量化设计与评估方法应用举例	198
6.1	用于电磁兼容性设计评估的几何模型建模方法	198
6.2	系统级电磁兼容性量化评估方法	200
6.2.1	干扰对判定和干扰量计算	200
6.2.2	场路协同评估技术	204
6.2.3	电磁兼容性统筹评估方法	206
6.3	系统级电磁兼容性量化设计方法	214
6.3.1	电磁兼容性指标权重量化方法	214
6.3.2	电磁兼容性单指标优化方法	216
6.3.3	电磁兼容性多指标协同优化方法	218

第 7 章 电磁兼容性评估与质量控制方法	226
7.1 电磁兼容性评估依据	226
7.2 评估内容	226
7.2.1 电磁兼容性设计	226
7.2.2 电磁兼容性管理	228
7.2.3 电磁兼容性试验	228
7.3 评估方法	229
7.3.1 分层次评估方法	229
7.3.2 分阶段评估方法	230
7.3.3 对文件的具体要求	232
7.3.4 具体评估方法	237
第 8 章 电磁兼容性工程实例解析	239
8.1 CE102、RE102、RS103 试验项目不合格带来的危害	239
8.2 CE102、RE102、RS103 试验项目不合格的主要原因	241
8.2.1 CE102 试验	242
8.2.2 RE102 试验	244
8.2.3 RS103 试验	245
8.3 顺利通过 CE102、RE102 和 RS103 试验考核的解决方案	246
8.3.1 电磁兼容性问题定位	246
8.3.2 整改建议	246
附录 A 系统级电磁兼容性量化设计软件平台简介	251
附录 B 飞机电磁兼容性转段评估管理软件	260
附录 C 飞机电磁兼容性质量管理软件	263
符号表	266
参考文献	272

Contents

Section 1 Electromagnetic Compatibility (EMC) Fundamental Theories

Chapter 1	Electromagnetic Field and Wave	2
1.1	The Physics of Maxwell's Equations	2
1.1.1	The Elementary Source Variables	2
1.1.2	The Elementary Field Variables	4
1.1.3	Maxwell's Equations in Free Space	4
1.1.4	The Physics of Maxwell's Equations	4
1.1.5	The Integral Physics of Maxwell's Equations	5
1.2	Electromagnetic Power Flux	8
1.2.1	The Transmission of Electromagnetic Power Flux	8
1.2.2	The Capacitor—Electric Energy Storage	11
1.2.3	The Inductance—Magnetic Energy Storage	11
1.2.4	Analyses of Device Properties	12
1.3	The Reflection of Electromagnetic Wave	13
1.3.1	Boundary Conditions for Ideal Conductor Surface	13
1.3.2	Air Electric Wall	15
Chapter 2	Microwave Technology	18
2.1	The Theory of Microwave Transmission Line	18
2.1.1	Overview of Microwave Transmission Lines	19
2.1.2	Transmission and Termination States of Microwave Transmission Line	20
2.1.3	TEM, TE, and TM Waves in Microwave Transmission Line	21

2.1.4	Coaxial Line	22
2.1.5	Waveguides	23
2.1.6	The Distributed Circuit Model of Microwave Transmission Line	25
2.2	Application of Transmission Line Theories in EMC	30
2.2.1	Single Conductor Transmission Line Theory	30
2.2.2	Multiple Conductor Transmission Line Theory	31
Chapter 3	Antenna Theory and Engineering	33
3.1	Field of Alternating Electric Dipole	33
3.1.1	Near Field	34
3.1.2	Far Field	34
3.2	Basic Antenna Concepts	35
3.2.1	Directivity Function and Pattern	35
3.2.2	Radiation Power	36
3.2.3	Radiation Resistance	36
3.2.4	Antenna Beamwidth and Gain	36
3.2.5	The Impact of Antenna Out – Band Characteristics for Aircraft EMC	38
3.2.6	Antenna Feeder System	40

Section 2 Methods and Applications of Quantitative System – Level EMC Design

Chapter 4	Basic Concepts of Quantitative System – Level EMC Design	45
4.1	Basic Definitions of EMC	45
4.1.1	Electromagnetic Interference	45
4.1.2	Electromagnetic Compatibility	47
4.1.3	Electromagnetic Vulnerability	47
4.1.4	Electromagnetic Environment	49
4.1.5	Electromagnetic Environment Effect	50
4.1.6	Electromagnetic Environment Adaptability	51

4.1.7	Spectrum Management	51
4.1.8	Spectrum Certification	51
4.1.9	Spectrum Supportability	52
4.2	Essences of Quantitative EMC Design	53
4.2.1	Difficulties to Identify the Electromagnetic Coupling Elements	53
4.2.2	Three Stages of EMC Technology Development	55
4.2.3	System – Level EMC	56
4.2.4	Characteristics of System – Level EMC	57
4.2.5	Interpretations of the Electromagnetic Interference	58
4.3	Basic Concepts of EMC Quantitative Design	59
4.3.1	The Correlations of Interferences	59
4.3.2	Interference Correlation Matrix	60
4.3.3	System – Level EMC Indexes	60
4.3.4	Electromagnetic Emission and Susceptibility Boundary	62
4.3.5	Equipment Isolation	63
4.3.6	The Quantitative Index Assignment Methodology	64
4.3.7	The Construction of EMC Behavioral Model	66
4.3.8	The Behavior Simulation of EMC	68
4.3.9	The Construction of Grey Correlation Model	69

Chapter 5 Critical Techniques of Quantitative System – Level EMC Design

5.1	Basic Principles, Methods, and Flow for Quantitative EMC Design	72
5.2	The Metric of EMC	74
5.3	The Modeling of EMC	81
5.3.1	The System Modeling Methodology	81
5.3.2	The Behavioral Modeling Methodology	83
5.3.3	The Grey Correlation Quantitative Modeling Methodology	142
5.4	The EMC Simulation Cases	150
5.4.1	A System – Level EMC Simulation for Aircraft (Case 1) ...	150

5.4.2	An Out – Band Non linear Interference Simulation of Transmitting and Receiving Systems (Case 2)	160
5.4.3	The Identification of Electromagnetic Emission Elements Based on Grey Model (Case 3)	178
Chapter 6	Cases of System – Level Quantitative Design and Evaluation ...	198
6.1	The Geometric Modeling for EMC	198
6.2	Methods for Quantitative System – Level EMC Evaluation	200
6.2.1	Determination and Quantification of Interference Pairs	200
6.2.2	The Field – Circuit Hybrid Evaluation Technique	204
6.2.3	Methods for Coordination to Optimize EMC	206
6.3	Methods for Quantitative System – Level EMC Design	214
6.3.1	The EMC Index Weight Quantitative Methodology	214
6.3.2	The Signal EMC Index Quantitative Methodology	216
6.3.3	The Multiple EMC Index Concurrent Optimization Methodology	218
Chapter 7	EMC Evaluation and Quality Control Methodologies	226
7.1	EMC Evaluation Basis	226
7.2	The Scope of EMC Evaluation	226
7.2.1	EMC Design	226
7.2.2	EMC Management	228
7.2.3	EMC Test	228
7.3	The Methodologies of EMC Evaluation	229
7.3.1	The Hierarchical Evaluation Methodology	229
7.3.2	The Phased Evaluation Methodology	230
7.3.3	The Requirements for Documentation	232
7.3.4	The Evaluation Examples (Procedures)	237
Chapter 8	EMC Engineering Case Analyses	239
8.1	CE102, RE102, and RS103 Tests and Importance	239
8.2	The Main Reasons for CE102, RE102, and RS103 Test Failures	241
8.2.1	CE102 Test	242