



国防科技图书出版基金

电磁兼容现场测量 与分析技术

T echnology of In-Situ
Electromagnetic Compatibility Measurement
and Analysis

刘培国 覃宇建 卢中昊 王晖 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

电磁兼容现场测量 与分析技术

Technology of In-Situ Electromagnetic
Compatibility Measurement and Analysis

刘培国 覃宇建 卢中昊 王晖 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容现场测量与分析技术/刘培国等编著. —北京:国防工业出版社,2013.6
ISBN 978-7-118-08754-3

I. ①电... II. ①刘... III. ①电磁兼容性-测试技术②电磁兼容性-分析- IV. ①TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 106133 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 16¼ 字数 305 千字

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 65.00 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	王 峰			
副主任委员	吴有生	蔡 镛	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
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	陆 军	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
	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		

前 言

电磁兼容是电子电器设备、系统利用电磁频谱,在共同的电磁环境中,避免因电磁辐射和敏感而引起的不可接受的降级而实现其功能的能力。因此,具有良好的电磁兼容性能对任何用频设备、系统来讲都至关重要。一方面,随着科学技术的不断发展,现代信息化系统越来越复杂,同一平台上装载的电子设备越来越多,对电磁兼容的要求也越来越高;另一方面,电磁环境日益复杂恶劣,电子电器设备面临着越来越多的电磁干扰,造成性能降低、功能丧失的概率显著增加。因此,在电子设备、系统的设计、制造到使用整个生命周期内,必须采取各种电磁兼容措施使其实现并保持良好的电磁兼容性能,电磁兼容测量、分析评估就是最基础和最重要的电磁兼容措施之一。现阶段涉及电磁兼容测量的专著已有不少,但是大都针对在实验室、标准测量环境下的电磁兼容测量方法和操作,鲜有电磁兼容现场测量的专著。对于复杂电子系统或大型平台以及体积有限、数量众多、使用频繁的电子设备和系统来讲,进行在线电磁兼容测量,是最为合情合理及必须进行的工作,所以电磁兼容现场测量必不可少且急迫,撰写本书就是为了填补该项空白。在本书中电磁兼容测量也可指电磁兼容测试、电磁兼容试验等。

本书在分析电磁兼容标准测量基础上,主要讨论电磁兼容现场测量特点、关键技术以及基于测量数据的分析评估技术,重点是时域测量技术、抗背景干扰测量技术、非线性测量技术以及分析评估技术。

全书共分6章。第1章概述,分析电磁兼容测量的基本概念、现场测量的特点、相关测量标准以及测量的方法;第2章电磁兼容现场测量,介绍现场测量的一般方法、关键技术、仪器和系统;第3章电磁兼容时域测量技术,分析时域测量系统的基本原理及其组成,介绍其在现场测量中的应用;第4章抗背景干扰电磁兼容现场测量技术,分析抑制辐射发射特性测量中背景噪声的虚拟暗室技术以及基于空间滤波技术的现场EMI测量的原理、特点、组成以及应用;第5章系统非线性特性测量,分析非线性特性测量的双(多)频测量技术的数学模型和算法、基本应用以及测量配置;第6章基于测量数据的电磁兼容分析评估技术,讲述基于测量数据的分析评估,包括发射特性分析评估、敏感特性分析评估、电磁兼容综合分析评估以及电磁环境适应性分析评估,最后介绍电磁兼容专家系统。

本书是作者科研成果的总结,内容具体、实用,可应用于舰船、飞机等大型平台的电磁兼容现场测量及分析,找到存在的电磁不兼容问题,有较好的应用价值,可

作为相关工程技术人员的参考用书,也可作为相关专业高等院校研究生教学用书。

本书由刘培国负责内容编排,参加编写的有覃宇建、卢中昊、王晖等,电磁兼容性国防科技重点实验室侯冬云为第6章的编写提供了有益资料。浙江大学尹文言、静电与电磁防护国防科技重点实验室主任魏光辉审阅了全书。刘继斌、黄纪军、周东明、李高升、薛国义等为本书提供了具体指导和宝贵意见,在此一并表示感谢。

电磁兼容测量技术内容丰富,发展迅速,工程要求不断提高,本书不可能全部介绍。由于编者水平有限,书中不当甚至错误之处在所难免,衷心希望广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 标准测量与现场测量的区别	1
1.1.1 电磁兼容测量	1
1.1.2 现场测量的特点	5
1.2 电磁兼容标准测量	6
1.2.1 电磁兼容测量标准	6
1.2.2 电磁兼容测量设备	11
1.2.3 测量项目分析	11
1.3 系统电磁兼容性测量	14
1.3.1 电磁辐射危害测量	14
1.3.2 电源特性测量	18
1.3.3 天线干扰耦合测量	20
1.3.4 安全裕度测量	23
第 2 章 电磁兼容现场测量	25
2.1 电磁兼容现场测量关键问题	25
2.1.1 现场时域测量	25
2.1.2 抗背景干扰测量	26
2.1.3 测量数据的分析评估	28
2.2 电磁兼容现场测量要求	29
2.2.1 测量文件和性能判据	30
2.2.2 辐射特性测量	31
2.2.3 敏感特性测量	35
2.3 电磁兼容现场测量与分析系统	40
2.3.1 总体设计	40
2.3.2 系统构成	43
第 3 章 电磁兼容时域测量技术	54
3.1 时域测量与分析	54
3.1.1 时域信号测量与分析的总体框架	55
3.1.2 数字滤波	55

3.1.3	信号的离散化与有限化处理	56
3.1.4	实时触发与实时信号处理	58
3.1.5	频域分析	59
3.1.6	调制分析	62
3.2	时域信号处理	62
3.2.1	快速傅里叶变换	63
3.2.2	时频分析方法	64
3.3	时域测量设备	81
3.3.1	数字示波器	82
3.3.2	实时频谱分析仪	83
3.4	时域测试在现场测量中的典型应用	85
3.4.1	现场时域测量系统	85
3.4.2	现场测量及结果分析	87
第4章	抗背景干扰电磁兼容现场测量技术	93
4.1	虚拟暗室技术	93
4.1.1	自适应干扰抵消原理及其应用	93
4.1.2	虚拟暗室干扰抵消模式的理论模型	96
4.1.3	虚拟暗室技术中的信号处理方法	98
4.1.4	虚拟暗室技术的典型应用——CASSPER 系统	105
4.2	虚拟暗室技术的改进	107
4.2.1	高信噪比下的改进方法	107
4.2.2	增加额外噪声的改进方法	109
4.2.3	基于经验模式分解的改进算法	110
4.3	虚拟暗室技术在电磁兼容现场测量中的应用	115
4.3.1	虚拟暗室测试系统的一般体系结构	115
4.3.2	双通道电磁兼容综合测试仪	116
4.4	基于空间滤波技术的现场 EMI 测量方法	119
4.4.1	基本原理	119
4.4.2	测向算法与波束形成	121
4.4.3	仿真结果	128
4.4.4	实测性能	132
第5章	系统非线性特性测量	134
5.1	多音测量技术	134
5.1.1	单音信号激励	134
5.1.2	双音信号激励	135
5.1.3	多音信号激励	138

5.2	双频测试技术的原理	138
5.2.1	基本原理	138
5.2.2	双频图的生成	139
5.2.3	双频信号的扫描方式	140
5.3	双频图参数辨识方法	141
5.3.1	通过双频图中图像的位置确定参数	141
5.3.2	根据相对位置确定乱真响应和互调路径	142
5.4	自动双频测试系统	150
5.4.1	自动双频测试系统所需硬件	150
5.4.2	自动双频测试系统的配置	151
5.4.3	自动双频测试系统的校准	153
5.5	双频测试技术的应用	154
5.5.1	谐波测试,交调互调测试	154
5.5.2	宽带选择性测试	154
5.5.3	测试二端口器件的非线性	155
5.5.4	将测试结果导入非线性模型	155
5.6	示例	156
5.6.1	低功率信号源的双频测试结果	156
5.6.2	SMR4518 型 EMI 接收机的双频测试结果	157
5.6.3	功率放大器的双频测试结果	166
第 6 章	基于测量数据的电磁兼容分析评估技术	171
6.1	发射特性分析评估	171
6.1.1	概述	171
6.1.2	非标分析	172
6.1.3	标准分析	180
6.1.4	发射特性分析评估示例	192
6.2	敏感特性分析评估	193
6.2.1	概述	193
6.2.2	非标分析	193
6.2.3	标准分析	195
6.2.4	敏感特性分析评估示例	205
6.3	综合分析评估	206
6.3.1	耦合途径的确定	207
6.3.2	频点匹配	208
6.3.3	普通分析评估	209
6.3.4	非线性分析评估	212

6.3.5 综合分析评估示例	215
6.4 电磁环境适应性分析评估	216
6.4.1 关键区域电磁环境分析评估	216
6.4.2 频谱冲突分析评估	217
6.4.3 信号识别分析评估	220
6.4.4 关键区域分析评估示例	226
6.5 电磁兼容专家系统	226
6.5.1 专家系统的构造	227
6.5.2 推理机的神经网络方法	229
6.5.3 专家系统在电磁兼容分析评估中的应用	237
参考文献	239

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Difference between Standard Measurement and In-situ Measurement	1
1.1.1 EMC Measurement	1
1.1.2 Characteristic of In-situ Measurement	5
1.2 EMC Standard Measurement	6
1.2.1 Standards	6
1.2.2 Equipments	11
1.2.3 Measurement Items	11
1.3 EMC Measurement for Systems	14
1.3.1 Measurement for Harzards of Electromagnetic Radiation	14
1.3.2 Measurement for Characteristic of Power Supply	18
1.3.3 Measurement for Coupling between Antennas	20
1.3.4 Measurement for Safety Margin	23
Chapter 2 EMC In-situ Measurement	25
2.1 Key Points	25
2.1.1 Time Domain Measurement	25
2.1.2 Background Interference Suppressing Measurement	26
2.1.3 Analysis	28
2.2 Requirements	29
2.2.1 Measurement File and Performance Criterion	30
2.2.2 Measurement of Emission	31
2.2.3 Measurement of Susceptibility	35
2.3 A System of EMC In-situ Measurement and Analysis	40
2.3.1 General Design	40
2.3.2 Formation of the System	43
Chapter 3 Time Domain Measurement Technologies for EMC	54
3.1 Measurement and Analysis in Time Domian	54
3.1.1 General Framework of Measurement and Analysis in Time Domian	55

3.1.2	Digital Filtering	55
3.1.3	The Discretization and Limitation Processing for Signal	56
3.1.4	Triggering and Signal Processing in Real Time	58
3.1.5	Analysis in Frequency Domain	59
3.1.6	Analysis in Modulation Domain	62
3.2	Signal Processing in Time Domain	62
3.2.1	Fast Fourier Transform	63
3.2.2	Joint Time-Frequency Analysis Aethod	64
3.3	Measurement Equipments in Time Domain	81
3.3.1	Digital Oscilloscope	82
3.3.2	Real Time Spectrum Analyzer	83
3.4	The Typical Applications of Time-Domain Measurement for In-situ Measurement	85
3.4.1	The In-situ Measurement System in Time Domain	85
3.4.2	In-situ Measurement and Results Analysis	87
Chapter 4	The Ambient Interferences Suppressing Technologies for In-situ EMC Measurement	93
4.1	Virtual Chamber	93
4.1.1	Theory of Adaptive Noise Cancellation and its Application	93
4.1.2	The Rationale Model of Virtual Chamber	96
4.1.3	Signal Processing Methods in Virtual Chamber Technology	98
4.1.4	CASSPER: Typical Application of Virtual Chamber Technology	105
4.2	The Improvements for Virtual Chamber Technology	107
4.2.1	The Improved methods in High SNR Condition	107
4.2.2	The Improve Method of Increasing Additional Noises	109
4.2.3	The Improve Method Based on Empirical Mode Decomposition	110
4.3	Virtual Chamber and its Application for In-situ EMC Measurement	115
4.3.1	General Structure of Virtual Chamber Measurement System	115
4.3.2	Dual-channel Integrated Measurement Instrument	116
4.4	The In-situ EMI Measurement Method Based on Spatial Filter Technology	119
4.4.1	Fundamental	119
4.4.2	Spatial Spectrum Estimation and Beamforming	121
4.4.3	Simulation Results	128
4.4.4	Experimental Results	132

Chapter 5 Measurement for Nonlinear Characteristic	134
5.1 Multi-tone Measurement	134
5.1.1 Single-tone Excitation	134
5.1.2 Double-tone Excitation	135
5.1.3 Multi-tone Excitation	138
5.2 The Principle of the Double Frequency Test Technique	138
5.2.1 Principles	138
5.2.2 Generate Double Frequency Diagram	139
5.2.3 Sweep Method of Double Frequency Signal	140
5.3 Identification of Double Frequency Diagram	141
5.3.1 Parameter Identification by Image Location on the Double Frequency Diagram	141
5.3.2 Identification with the Use of the Laws of Relative Location of Receiver Spurious Response and Intermodulation Paths Images	142
5.4 Double Frequency Test System	150
5.4.1 List of Hardware	150
5.4.2 Configuration of Double Frequency Test System	151
5.4.3 Calibration of Double Frequency Test System	153
5.5 The Application of Double Frequency Test System	154
5.5.1 Harmonic, Intermodulation and Cross Modulation Test	154
5.5.2 Wideband Selection Test	154
5.5.3 Test the Nonlinearity of Two Port Network	155
5.5.4 Import the Test Results to Nonlinear Model	155
5.6 Examples	156
5.6.1 Low-power RF Generator Testing	156
5.6.2 Radio Receiver Testing	157
5.6.3 RF Amplifier Testing	166
Chapter 6 Analysis based on Measurement Data	171
6.1 Analysis of Emission Characteristic	171
6.1.1 Introduction	171
6.1.2 Non-Standard Analysis	172
6.1.3 Analysis based on Standard	180
6.1.4 Examples	192
6.2 Analysis of Susceptibility Characteristic	193
6.2.1 Introduction	193
6.2.2 Non-Standard Analysis	193

6.2.3	Analysis based on Standard	195
6.2.4	Examples	205
6.3	Synthetical Analysis	206
6.3.1	Confirmation of Coupling Path	207
6.3.2	Frequency Matching	208
6.3.3	General Analysis	209
6.3.4	Nonlinear Analysis	212
6.3.5	Examples	215
6.4	Analysis of Electromagnetic Environment Effect	216
6.4.1	Electromagnetic Environment of Key Area	216
6.4.2	Frequency Conflict	217
6.4.3	Signal Recognition	220
6.4.4	Examples	226
6.5	EMC Expert System	226
6.5.1	Construction of Expert System	227
6.5.2	Neutral Network Method in Inference Engine	229
6.5.3	Application in EMC Analysis	237
References		239

第 1 章 概 述

1.1 标准测量与现场测量的区别

1.1.1 电磁兼容测量

电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)是指设备在共同的电磁环境中能一起执行各自功能的共存状态和能力,即该设备不会由于受到处于同一电磁环境中其他设备的电磁发射导致不允许的降级;也不会使同一电磁环境中其他设备因受其电磁发射而导致不允许的降级。这个定义的前半部分体现的是设备的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)特性,即不对其他设备产生电磁干扰,不对环境构成电磁污染;后半部分体现的是设备的电磁敏感(Electromagnetic Susceptibility, EMS)特性,即不受其他设备的电磁干扰,不对电磁环境产生敏感反应。符合电-磁兼容的不同电子设备可以在一起正常工作,它们是相互兼容的,否则就是不兼容的。电磁兼容有时又称为电磁兼容性,某些场合两者通用,但是显然电磁兼容含义更广,电磁兼容性更偏重于从性能方面描述。

电磁兼容不仅是一种理论技术,而且是技术与管理并重的实用工程学。随着市场经济的发展,我国要参与世界技术市场的竞争,进出口的电子产品都必须通过电磁兼容检验。因此,我国政府和相关部门越来越关注电磁兼容问题,不断制定有关的强制性贯彻标准,各部门建立了不同规模的电磁兼容实验室和检测中心、电磁兼容认证机构等。

电磁兼容研究领域日益扩大,现已不只限于电子设备本身,还涉及电磁污染、电磁饥饿等一系列生态效应问题以及其他多方面的问题,“电磁兼容”一词似已不能包含电磁兼容学科的全部内容。有文献对电磁兼容作了定义:“电磁兼容是一门独立的学科,随着电磁能量利用的发展,它将研究:预测并控制变化着的地球和天体周围的电磁环境、为了协调环境所采取控制方法、各项电气规程的制定以及电磁环境的协调和电磁能量的合理应用等。”可见,电磁兼容学科涉及范围越来越宽,包括工程学、自然科学、医学、经济学、社会学等基础科学。

1. 电磁兼容测量

电磁兼容测量是电磁兼容领域主要的研究内容之一,电磁兼容测量是指利用仪器与设施等手段对设备、系统电磁兼容状态进行的测量。电磁兼容测量是获取设备、系统电磁兼容性能数据最直接的手段,也是掌握设备、系统电磁兼容性能、进

行电磁兼容维护的基础。在本书中电磁兼容测量也指电磁兼容测试、电磁兼容试验等。

电磁兼容测量主要是通过测量电子设备和系统内部电路中的电流或空间的电磁波,围绕构成电磁干扰的三要素(即电磁干扰源、耦合路径和敏感设备)来开展研究的。

2. 电磁干扰三要素

电磁干扰源是指产生电磁干扰的元器件、设备或自然现象;耦合路径是指把能量从干扰源耦合到敏感设备上并使该设备产生响应的媒介和通道;敏感设备是指对电磁干扰产生响应的设备。

由电磁干扰源产生的电磁能量,经过某种耦合途径传输到敏感设备,导致敏感设备出现某种形式的响应。当电磁干扰超过敏感设备敏感度时就会产生电磁干扰。这一作用过程及其效果称为电磁干扰效应,作用机理如 1-1 所示。

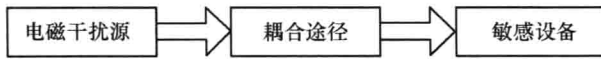


图 1-1 电磁干扰三要素

产生电磁干扰的方式和途径不一,其中电磁辐射、传导是产生电磁干扰的主要电磁活动方式或途径。有的电磁干扰既以辐射方式传播,也以传导方式传播。

为了分析研究电磁干扰的性质、影响等,必须确定电磁干扰的空间、时间、频率、能量、信号形式等特性。因此,通常采用频率、电平、波形、出现率、极化、方向等参数描述电磁干扰。这些特性与电磁干扰三要素密切相关。

电磁干扰可以存在,三个要素缺一不可,因此只要消除其中任何一个要素,就解决了电磁干扰问题,如 1-2 所示。

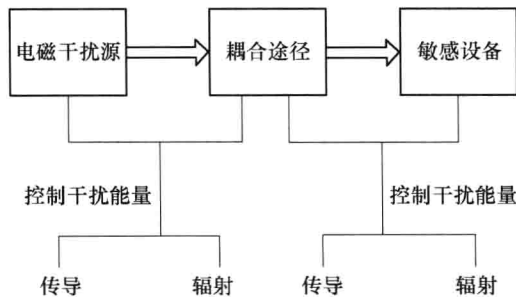


图 1-2 基于三要素的电磁干扰控制

处理电磁干扰时,最重要的是从以下 5 点入手:

- (1) 频率:产生干扰的频率是多少。
- (2) 强度:电磁干扰有多强,引起的后果多严重。