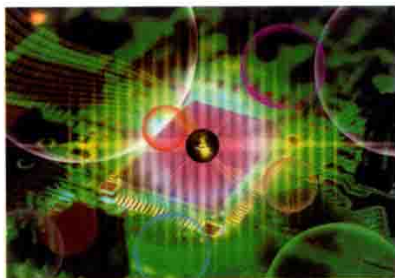




国防科技图书出版基金



肖芳 赵克 孙力 编著

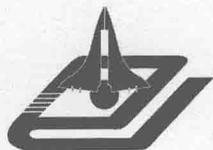
一体化电机系统中的 电磁兼容

Electromagnetic Compatibility in
Integrative Motor System

非外借



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

一体化电机系统中的电磁兼容

Electromagnetic Compatibility in Integrative Motor System

肖芳 赵克 孙力 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

一体化电机系统中的电磁兼容 / 肖芳, 赵克, 孙力
编著. —北京: 国防工业出版社, 2017.9

ISBN 978 - 7 - 118 - 11223 - 8

I. ①一... II. ①肖... ②赵... ③孙... III. ①机电
一体化 - 电磁兼容性 IV. ①TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 189951 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 字数 267 千字

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 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

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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		

前 言

随着电力电子技术的飞速发展,采用了脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)策略的功率变换器广泛应用于电机驱动系统,较大地提高了电机系统的性能指标。但是功率变换器在对电能进行控制和变换的同时,其中高速开通和关断状态的开关器件,不可避免地造成电压和电流在短时间内发生瞬变,产生丰富的高次谐波,其电磁能量以电路连接或电磁波空间耦合的方式形成电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI),干扰噪声的频率从几千赫兹到数十兆赫兹,影响电机系统自身的正常运行和周围电气系统的正常工作,使设备或装置达不到电磁兼容标准规定的要求。随着近几年电磁兼容标准的强制实施,特别是系统可靠性要求的增强,国内外许多学者从不同角度开展了一体化电机系统电磁干扰问题的研究。

与其他电气系统的电磁兼容问题相比,一体化电机系统电磁干扰产生的机理、干扰源的分布、抑制的方法都有其特殊性。本书系统地总结了作者及其研发团队十余年来在一体化电机系统电磁兼容问题上的研究成果,包括一体化电机系统电磁干扰产生的机理和干扰耦合途径的分析及建模,以及针对系统电磁干扰的抑制措施等内容。

本书从整体上可以分为两大部分。第一部分包括第1~4章:介绍电磁兼容理论的基础,分别阐述了电磁兼容的定义、电磁干扰的形成、国内外电磁兼容标准、电磁干扰传播理论、电磁兼容性测量的研究(包括测量的主要内容、标准及仪器、场地等),以及屏蔽、接地等电磁干扰抑制的基本原理和措施。第二部分包括第5~12章:首先介绍无源器件的高频特性,为阐述一体化电机系统的电磁兼容问题打了基础;其次详细介绍了一体化电机系统及其负面效应,分析了电机系统EMI问题的特征及性质,并以PWM驱动电机系统传导电磁干扰为主,介绍了电磁干扰产生的机理和建立系统电磁干扰模型的主要问题,介绍了系统中的共模和差模,以及传导电磁干扰的测试与诊断技术,建立了一体化电机系统传导干扰源数学模型及等效电路,并预测系统干扰源;最后介绍了一体化电机系统电磁干扰防护的主要措施,从两个方面进行介绍,一是干扰源的抑制技术,二是切断干扰传播途径,即采用EMI滤波器。

本书是作者在总结本单位相关研究成果并吸收国内外该领域最新研究成果

的基础上完成的,其中包括作者与其团队多名博士研究生和硕士研究生的研究工作,尤其是聂剑红博士、姜保军博士、严冬博士、孙亚秀博士等。孙力教授负责本书的统筹规划及框架构思,并编写了第1章和第6章,肖芳编写了第2、3、5、7、8、9章,赵克编写了第4、10、11、12章。

在本书的编著过程中,作者得到了许多同志直接或间接的帮助和支持。中国工程院院士梁维燕、哈尔滨工程大学教授罗耀华审阅了本书,博士研究生郭嘉、田兵等协助绘制了本书的部分插图,在此一并表示诚挚的谢意。

最后感谢国家自然科学基金“一体化电机系统的电磁干扰研究”、黑龙江省自然科学基金“交流驱动系统 PWM 逆变器负面效应的机理与抑制”、哈尔滨市科技创新人才研究专项资金“电机系统功率变换器的 EMI 机理研究与抑制”对本书所述研究内容的资助;感谢国防科技图书出版基金对本书出版的资助。

由于电磁兼容学科内容丰富、发展迅速、涉及面广,加之作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请各位同行以及广大读者批评指正。

作者

目 录

第一部分 电磁兼容理论基础

第 1 章 概述	2
1.1 电磁兼容的定义	2
1.2 电磁兼容性标准、规范与工程管理	3
1.3 电磁兼容设计所涉及的技术	4
1.4 电磁兼容设计的内容与设计要点	6
1.4.1 电磁兼容设计的内容	6
1.4.2 电磁兼容设计的要点	7
第 2 章 电磁兼容基础理论	9
2.1 电磁干扰信号的时域与频域分析	9
2.2 电磁干扰形成的条件	10
2.2.1 电磁干扰源	10
2.2.2 传播途径	13
2.2.3 受扰体	17
2.3 电磁干扰的分类	17
2.4 基本电磁兼容术语	17
第 3 章 电磁兼容性测量	23
3.1 电磁兼容性测量的主要内容	23
3.2 电磁兼容基本测量单位	24
3.3 电磁兼容测量的标准	28
3.4 电磁兼容测量场地的要求	29
第 4 章 屏蔽技术和接地	33
4.1 屏蔽技术	33
4.1.1 屏蔽的基本原理	33
4.1.2 屏蔽效能	36
4.1.3 屏蔽体的设计	38

4.2	接地	48
4.2.1	接地及其分类	49
4.2.2	安全接地	50
4.2.3	信号接地	53

第二部分 一体化电机系统的电磁兼容问题

第5章	无源器件的高频特性	60
5.1	电阻的高频特性分析	60
5.2	电容的高频特性分析	62
5.3	电感的高频特性分析	64
5.3.1	电感的理想模型和实际高频特性	64
5.3.2	共模扼流圈	65
5.3.3	电感线圈参数	68
5.3.4	磁饱和的影响	69
5.4	导线的高频特性分析	69
5.4.1	导线的高频特性	69
5.4.2	印制电路板布线的杂散参数抽取	71
第6章	一体化电机系统与电磁兼容问题	73
6.1	电机系统基本构成	73
6.1.1	系统的特征与基本结构	73
6.1.2	功率变换器的控制策略	76
6.2	PWM变频器驱动电机系统的负面效应	78
6.2.1	共模电压	78
6.2.2	漏电流	81
6.2.3	轴电压和轴承电流	82
6.2.4	电机端部过电压	83
6.2.5	电机系统的EMI	84
6.3	电机系统EMI问题的特征与性质	85
第7章	电机驱动系统电磁干扰产生的机理	87
7.1	功率半导体器件开关过程造成的电磁噪声	87
7.1.1	功率二极管开关过程造成的电磁噪声	87
7.1.2	SCR、GTO、BJT、IGBT、MOSFET开关过程造成的 电磁噪声	88

7.1.3	高速数字脉冲电路中门电路造成的开关电磁噪声	98
7.1.4	PWM 控制策略产生的电磁噪声	99
7.2	PWM 电机驱动系统共模电压的产生机理	102
7.2.1	三相整流桥产生的共模电压	102
7.2.2	三相逆变器产生的共模电压	104
7.2.3	长电缆连接时电机端共模电压的瞬时过电压	106
7.2.4	共模电压的傅里叶分析	109
7.3	电机系统传导干扰的传播途径	110
7.3.1	功率变换侧共模 EMI 的传播途径	110
7.3.2	感应电机侧共模 EMI 的传播途径	111
第 8 章	电机系统主要部件的高频等效模型	113
8.1	PWM 功率变换器的高频模型	113
8.2	PWM 电机驱动系统中长线电缆的高频等效模型	115
8.2.1	传输线理论分析	115
8.2.2	电压反射过程	116
8.2.3	PWM 脉冲波在电缆上的传输反射过程分析	118
8.2.4	电缆的高频传输线模型	120
8.3	电机本体的高频模型	122
8.3.1	交流电机的高频模型	122
8.3.2	直流电机的高频模型	134
第 9 章	电机系统传导干扰测试与诊断技术	136
9.1	电机系统传导干扰的检测机理	136
9.2	电磁干扰中的共模和差模	138
9.2.1	差模信号和共模信号	138
9.2.2	单相的共模干扰和差模干扰	139
9.2.3	三相的共模干扰和差模干扰	143
9.3	共模和差模的分离技术	146
9.4	软硬件结合的共模和差模分离技术	149
9.4.1	硬件方法检测共模噪声	149
9.4.2	软件方法计算差模噪声	150
9.4.3	分离技术的性能评价	151
9.4.4	分离技术的应用实例	152
第 10 章	一体化电机系统干扰源的预测	158
10.1	传导干扰源的数学模型分析	158
10.1.1	整流桥产生的干扰源	158

10.1.2	逆变桥产生的干扰源	162
10.2	等效电路的建立	167
10.2.1	共模等效电路	167
10.2.2	差模等效电路	171
10.3	实验验证	174
10.3.1	整流桥产生的共模和差模干扰源验证	174
10.3.2	逆变桥产生的共模和差模干扰源验证	177
10.3.3	系统的共模和差模干扰的验证	178
第 11 章	PWM 驱动电机系统干扰源的抑制	181
11.1	改变电路拓扑	181
11.2	改进控制策略	185
11.3	优化驱动电路	186
第 12 章	电机系统 EMI 滤波器的设计	189
12.1	滤波器概述	189
12.1.1	滤波器的类型	189
12.1.2	滤波器的特性	191
12.1.3	滤波器的安装	195
12.2	EMI 滤波器	195
12.2.1	无源 EMI 滤波	196
12.2.2	有源 EMI 滤波	198
12.3	一体化电机系统有源滤波器的设计	203
12.3.1	抑制传导干扰的有源滤波器拓扑结构分析	203
12.3.2	滤波器的参数设计	206
12.4	一体化电机系统电磁干扰无源滤波器的设计	207
12.4.1	一体化电机系统的阻抗特性	207
12.4.2	无源滤波器参数设计	209
12.4.3	无源滤波器高频特性及其改善	210
参考文献		215

Contents

Part I Theoretical Basis of Electromagnetic Compatibility

Chapter 1 Introduction	2
1.1 Concepts of EMC	2
1.2 EMC standards, measurements and engineering management	3
1.3 Techniques of EMC	4
1.4 Design contents and key points of electromagnetic compatibility	6
1.4.1 Design contents of electromagnetic compatibility	6
1.4.2 Design key points of electromagnetic compatibility	7
Chapter 2 Background knowledge of electromagnetic compatibility	9
2.1 Time and frequency domain analysis of electromagnetic interference signal	9
2.2 Formative conditions of electromagnetic interference	10
2.2.1 Electromagnetic interference source	10
2.2.2 Route of propagation	13
2.2.3 Susceptible equipment	17
2.3 Classification of electromagnetic interference	17
2.4 Basic terms of electromagnetic interference	17
Chapter 3 EMC measurements	23
3.1 Main contents of EMC measurements	23
3.2 Basic measurement units of EMC measurements	24
3.3 Standard of EMC measurements	28
3.4 Field requirements of EMC measurements	29
Chapter 4 Shield technique and ground	33
4.1 Shield technique	33
4.1.1 Fundamental principles of shield	33
4.1.2 Shielding effectiveness	36

4. 1. 3	Design of shield	38
4. 2	Ground	48
4. 2. 1	Ground and Classification	49
4. 2. 2	Safety ground	50
4. 2. 3	Signal ground	53

Part II Electromagnetic Compatibility of Integrative Motor System

Chapter 5	High frequency characteristic of passive device	60
5. 1	High frequency characteristic analysis of resistor	60
5. 2	High frequency characteristic analysis of capacitor	62
5. 3	High frequency characteristic analysis of inductor	64
5. 3. 1	Ideal model and high frequency model of inductor	64
5. 3. 2	Common mode choke	65
5. 3. 3	Parameters of inductance coil	68
5. 3. 4	Influence of magnetic saturation	69
5. 4	High frequency characteristic analysis of wire	69
5. 4. 1	High frequency characteristic of wire	69
5. 4. 2	Stray parameter extract of PCB	71
Chapter 6	Integrative motor system and electromagnetic compatibility	73
6. 1	Basic constitution of integrative motor system	73
6. 1. 1	The Characteristics and basic structure of the system	73
6. 1. 2	Control strategy of power converter	76
6. 2	Negative effects of PWM motor drive system	78
6. 2. 1	Common mode voltage	78
6. 2. 2	Leakage current	81
6. 2. 3	Shaft voltage and shaft current	82
6. 2. 4	Overvoltage of motor terminal	83
6. 2. 5	EMI in motor system	84
6. 3	Characteristic of EMI in motor system	85
Chapter 7	Mechanism of EMI in motor system	87
7. 1	Electromagnetic noise caused in switching process of power	

semiconductor devices	87
7. 1. 1 Electromagnetic noise caused in switching process of power diode switch	87
7. 1. 2 Electromagnetic noise caused in switching process of SCR, GTO, BJT, IGBT and MOSFET	88
7. 1. 3 Electromagnetic noise caused by high – speed digital pulse circuit	98
7. 1. 4 Electromagnetic noise caused by PWM control strategy	99
7. 2 Mechanism of common mode voltage in PWM motor drive system	102
7. 2. 1 Common mode voltage produced by three phase rectifier bridge	102
7. 2. 2 Common mode voltage produced by three phase inverter ...	104
7. 2. 3 Instantaneous overvoltage caused by long cable in motor terminal	106
7. 2. 4 Fourier analysis of common mode voltage	109
7. 3 Propagation route of conducted interference in motor system	110
7. 3. 1 Common mode EMI Propagation route in the power converter side	110
7. 3. 2 Common mode EMI Propagation route in the motor side	111
Chapter 8 High frequency model of maior components in motor system	113
8. 1 High frequency model of PWM power converter	113
8. 2 High frequency model of long cable in PWM motor drive system	115
8. 2. 1 Theoretical analysis of transmission lines	115
8. 2. 2 The process of voltage reflection	116
8. 2. 3 The process analysis of voltage reflection for PWN pulse ...	118
8. 2. 4 High frequency model of transmission cable	120
8. 3 High frequency model of motor	122
8. 3. 1 High frequency model of AC motor	122
8. 3. 2 High frequency model of DC motor	134
Chapter 9 Conducted interference test and diagnostic techniques in motor system	136
9. 1 Test mechanism of conducted interference in motor system	136

9.2	Common mode interference and differential mode interference	138
9.2.1	Common mode signal and differential mode signal	138
9.2.2	Single – phase common mode interference and differential mode interference	139
9.2.3	Three – phase common mode interference and differential mode interference	143
9.3	Common and differential mode interference separation technology	146
9.4	Common and differential mode interference separation technology from both software and hardware	149
9.4.1	Common mode interference detected using hardware method	149
9.4.2	Differential mode interference computed using software method	150
9.4.3	Performance estimate of separation technology	151
9.4.4	Application example of separation technology	152
Chapter 10 Interference source prediction of integrative motor system		
	motor system	158
10.1	Mathematic model analysis of conducted interference	158
10.1.1	Interference source analysis of rectifier bridge	158
10.1.2	Interference source analysis of inverter bridge	162
10.2	Establishment of equivalent circuit	167
10.2.1	Common mode equivalent circuit	167
10.2.2	Differential mode equivalent circuit	171
10.3	Experiment validation	174
10.3.1	Interference source validation of common mode and differential mode for rectifier bridge	174
10.3.2	Interference source validation of common mode and differential mode for inverter bridge	177
10.3.3	Common mode and differential mode interference validation for system	178
Chapter 11 Suppression of PWM drive motor system noise source		
11.1	Changing circuit topology	181
11.2	Improving control strategy	185
11.3	Optimizing drive circuit	186

Chapter 12	Design of EMI filter in motor system	189
12.1	Summarization of filter	189
12.1.1	Types of filters	189
12.1.2	Characters of filters	191
12.1.3	Installation of filters	195
12.2	EMI filter	195
12.2.1	Passive EMI filter	196
12.2.2	Active EMI filter	198
12.3	Active EMI filter design of integrative motor system	203
12.3.1	Topological structure analysis of active EMI filter for suppressing conducted interference	203
12.3.2	Parameter design of filter	206
12.4	Passive EMI filter design of integrative motor system	207
12.4.1	Impedance characteristic of integrative motor system	207
12.4.2	Parameter design of passive filter	209
12.4.3	High frequency characteristic and improvement of passive filter	210
References		215

第一部分

电磁兼容理论基础

- 第 1 章 概述
- 第 2 章 电磁兼容基础理论
- 第 3 章 电磁兼容性测量
- 第 4 章 屏蔽技术和接地