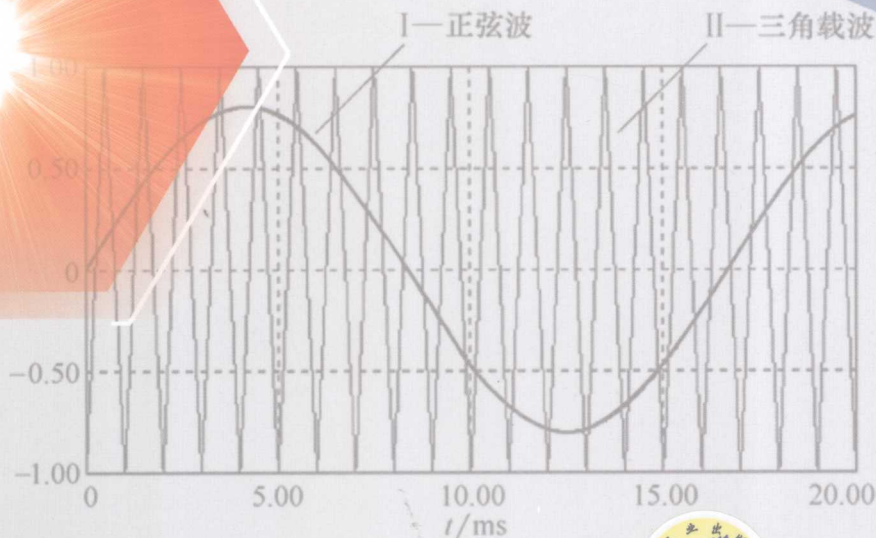


# 电力电子与电机系统 集成分析基础

INTEGRATED ANALYSIS OF POWER ELECTRONICS  
AND MOTOR DRIVE SYSTEM

赵争鸣 袁立强 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 电力电子与电机系统 集成分析基础

赵争鸣 袁立强 编著

图书在版编目(CIP)数据

题名页

电力电子与电机系统

袁立强 赵争鸣 著

ISBN 978-7-

前言

1. 电机…

2. 电力电子…

号 9787000000000

中国标准书号

机械工业出版社 (100071)

机械工业出版社

北京

100071

1. 3

2. 1

3. 1

4. 1

5. 1

6. 1

7. 1

8. 1

9. 1

0. 1

1. 1

2. 1

3. 1

4. 1

5. 1

6. 1

7. 1



机械工业出版社

凡在本社发行部购书，均可享受九折优待。

销售热线：(010) 88379728

发行部电话：(010) 88379728

编辑部电话：(010) 88379728

地址：北京市机械工业出版社

本书从电力电子与电机系统集成的角度出发,将电机、电力电子变换及其控制有机地结合在一起进行分析和应用。本书共分8章,主要介绍电力电子与电机集成系统的基本特征和主要内容;分析变频电源对交流电机的影响,介绍变频调速电机设计概念及谐波分析和可控优化运行;介绍电力电子变换器中的半导体器件及其主回路特点,重点介绍多电平主回路结构;介绍与多电平结构相对应的PWM控制方法及其变异;着重分析系统中的部件匹配和集成特性效应;讨论系统高精度闭环控制方法;分析集成系统中的数据通信;从能量变换的角度,讨论集成系统中的电磁关系、电磁能量变换建模以及电磁能量传输等。

本书可供从事电力传动系统设计、研究、运行和管理等工作的专业科技人员、技术管理人员以及高等院校有关专业的教师与学生参考使用,本书可作为电力电子与电力传动学科的研究生教材。

#### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子与电机系统集成分析基础/赵争鸣,袁立强编著. —北京:机械工业出版社,2009.6

ISBN 978-7-111-27367-7

I. 电… II. ①赵…②袁… III. ①电力电子学—研究生—教材②电机学—研究生—教材 IV. TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第089909号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.75印张·343千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27367-7

定价:31.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379728

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

当今世界正迅速地从工业化社会向信息化社会过渡，传统意义上的制造业在经历着日益深刻的变化。许多一度被称为“夕阳产业”的行业在吸收、溶入了大批新技术之后，又呈现出蓬勃发展的势头，这在电力传动行业体现得尤为突出。包括现代电力电子、计算机控制、计算机辅助设计、信息采集与交换网络及新型电工材料等在内的一系列新技术的采用，极大地促进了电力传动产业的发展。

“电力电子与电机集成系统”正是在这样的发展背景下形成的学科研究方向。它以现代电力传动系统中的集成化、智能化、通用化和信息化为主要内容，以综合运用机电能量转换、电力电子、微电子和通信控制等多种学科的方法为其特征。随着该学科方向的深入研究，大大地扩展了电力传动学科的内涵和外延，完善和提升现代电力传动学理论与方法，为提高电力传动系统的综合效用，促进电力传动产业的发展，提供更有力的理论指导和丰富的技术储备。

清华大学电机工程与应用电子技术系自1998年以来开始了电力电子与电机集成系统的研究。先后研究了变频调速电机设计和分析方法、高次谐波的影响以及电机高频等效模型、系统故障容错、任意波形电力电子功率放大器、多电平变频电源、矢量控制与直接转矩控制的分析比较、功率半导体器件应用特性研究等，解决了和正在研究解决系统集成中的一些关键性问题，如：变频电源与电机集成设计、集成系统安全工作区、基于脉冲及其脉冲序列的闭环控制、集成系统全时域暂态过程分析和建模、系统瞬态电磁能量平衡等，取得了一些有意义的研究成果。

正是在这样的研究过程中，我们认识到：电力电子、电机及控制技术已经高度的一体化。电机、变换器及其控制已不能单独地作为一个个孤立的对象来进行设计、分析和应用，而应把这些部件的研究置于整个系统之中。相应地，在有关专业教学课程内容上也出现了将电力电子、电机及控制理论有机地融为一体的趋势，如逆变器供电下的电机设计与分析、变频调速下的电机建模、电机在线运行中的参数辨识、电机现代控制技术等，这些内容都体现出电力电子与电机系统一体化的特点。为此，从2001年开始至今，作者在清华大学电机系研究生选修课程中，开设了“电力电子与电机系统集成分析

基础”这门课程。该课程作为本科生专业课程“电力拖动自动控制系统”的研究生后续专业课程，涵盖了变频电源对交流电机的影响、变频电源对电机适应性的影响、集成系统内部参数优化及其系统特性、系统闭环控制及其通信、电磁能量瞬变过程及其转换关系等。

本书是我们多年来在电力电子与电机集成系统研究实践和作者多年来的教学实践基础上，同时汇集了许多专家学者在这方面的研究成果编著而成的。全书共分8章，第1章为电力电子与电机系统集成概述，回顾了电力传动基础，概述了变频电源带来的变化以及集成系统的特征。第2章分析了变频电源供电下的电机特性，包括变频调速电机设计、谐波分析以及可控优化运行。第3章阐述电力电子变换器中的半导体器件及其主回路特点，特别介绍了为减小输出谐波而设计的多电平拓扑结构及其瞬态换流回路。第4章介绍针对多电平主回路结构的PWM控制方法及其变异，特别提及开关器件中的死区和最小脉宽对输出特性的影响。第5章着重分析系统中的部件优化匹配和集成特性效应。第6章着重讨论交流电机高性能闭环控制方法，并对矢量控制与直接转矩控制方法进行分析比较。第7章介绍控制与检测信号数据通信，包括通信硬件与软件基础，分析了复杂系统中的通信协调问题。最后，作为面向未来的发展，在第8章中尝试从能量变换的角度，初步讨论了集成系统中的电磁关系、电磁能量变换建模以及电磁能量传输等。

鉴于本书的特殊情况，书中的“电机”专指“电动机”，不再与“电动机”混用。

本书由赵争鸣编写第1、2、5、6、7和8章，袁立强与赵争鸣共同编写第3和第4章。全书由赵争鸣负责统筹和定稿，袁立强负责公式与符号校核。孙晓瑛为本书做了大量的绘图和文字格式编辑工作，张永昌为第6章提供了重要的素材，在此特对他们表示感谢。曾经在本研究室学习和工作过的不少学者和同学，为我们的电力电子与电机集成系统研究做出了很多贡献，他们是孟朔、白华、张海涛、吴理博、易荣、关慧、刘姗姗、崔志良、钱珏、刘树、张怀晟、王世静、王海南、杨志、郭伟、张颖超、周德佳、汪书苹、蒋栋、冯博等，在此一并表示感谢。

本书承上海大学陈伯时教授和沈阳工业大学王凤翔教授仔细审阅并提出许多宝贵意见，在此谨致深切的感谢。在编写本书过程中，还得到研究室其他人员，如张永昌、鲁挺、雷一、钟玉林、胡斯登、贺凡波、陈剑、王雪松、邓夷、尹璐、邹高域等同学的帮助和校核，在此一并表示感谢。另外，在编写本书的过程中，我们参阅了大量的论著文献，主要的已经列入了每章后面的参考文献中。在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

本书部分内容是在国家自然科学基金重点项目(50737002)资助下完成的,如瞬态换流回路分析、信号脉冲与功率脉冲差异比较与集成系统能量变换等,在此深表感谢。

本书可供从事电力传动的科技人员和有关科技管理人员参考,可供高等院校相关专业的教师和研究生作为参考教材。

由于作者水平有限,编写时间仓促,且电力电子与电机集成系统研究仍在发展之中,我们在这方面仅做了初步的工作,书中难免存在许多不足,甚至是错误,恳请广大读者批评指正。

赵争鸣

2008年10月于清华园

1	.....	1.1.1
2	.....	1.1.1
3	.....	1.1.1
4	.....	1.1.1
5	.....	1.1.1
6	.....	1.1.1
7	.....	1.1.1
8	.....	1.1.1
9	.....	1.1.1
10	.....	1.1.1
11	.....	1.1.1
12	.....	1.1.1
13	.....	1.1.1
14	.....	1.1.1
15	.....	1.1.1
16	.....	1.1.1
17	.....	1.1.1
18	.....	1.1.1
19	.....	1.1.1
20	.....	1.1.1
21	.....	1.1.1
22	.....	1.1.1
23	.....	1.1.1
24	.....	1.1.1
25	.....	1.1.1
26	.....	1.1.1
27	.....	1.1.1
28	.....	1.1.1
29	.....	1.1.1
30	.....	1.1.1
31	.....	1.1.1
32	.....	1.1.1
33	.....	1.1.1
34	.....	1.1.1
35	.....	1.1.1
36	.....	1.1.1
37	.....	1.1.1
38	.....	1.1.1
39	.....	1.1.1
40	.....	1.1.1
41	.....	1.1.1
42	.....	1.1.1
43	.....	1.1.1
44	.....	1.1.1
45	.....	1.1.1
46	.....	1.1.1
47	.....	1.1.1
48	.....	1.1.1
49	.....	1.1.1
50	.....	1.1.1

## 本书常用符号及含义

符号	定义
$A$	电流线密度; 电机绝缘材料系数; 系数矩阵; 磁场矢量位函数; 面积
$A_{\text{Cu1}}$	电机定子槽的铜面积
$A_{\text{s1}}$	电机定子槽面积
$a$	热扩散率; 面积
$B$	磁通密度(磁密); 系数矩阵
$B_g$	电机的气隙磁密
$B_m$	电机气隙磁密的幅值; 被低优先级信息延迟的时间
$B_{\text{tl}}, B_{\text{yl}}$	电机定子齿、轭磁密
$B_\mu$	第 $\mu$ 次谐波磁密
$b_1, b_2, b_3$	电机槽形尺寸
$C$	系数矩阵
$C_0$	单位长度传输线间的电容
$C_B$	器件的势垒电容
$C_D$	器件的扩散电容
$C_{\text{CL}}$	吸收电容
$C_m$	电机的转矩系数; 信息通过总线传输的时间
$\cos\varphi$	功率因数
$D$	电位移; 占空比
$D_2$	电机转子直径
$D_{\text{il}}$	电机定子内径
$D_L, D_m$	负载和电机的阻尼系数
$d$	高度
$e, E, E_m$	电机感应电势瞬时值、有效值和幅值
$E$	电场强度
$E_a$	直流电机的电枢感应电动势
$E_\mu$	第 $\mu$ 次谐波感应电动势幅值
$F_s$	电机磁通波幅系数
$F_\alpha$	电机转子导条的电磁力

$F_\phi$	电机一相电流所产生的磁通幅值
$F_\mu$	第 $\mu$ 次谐波磁动势
$f$	频率
$f_1$	线电压基波频率
$f_s$	开关频率
$f_\mu$	第 $\mu$ 次谐波频率
$f_m, f_{ma}, f_{mm}$	电机合成磁动势的分布值、平均值和最大值
$G$	增益矩阵
$H$	磁场强度
$H(e^{j\omega})$	频率响应
$h_{cl}, h_1, h_2$	电机的硅钢片尺寸
$I, i$	电流的有效值和瞬时值
$I_s$	电机的定子电流
$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$	电机定子绕组 a、b、c 三相电流矢量
$I'_{s\alpha}, I'_{s\beta}$	电机定子电流 $\alpha$ 和 $\beta$ 轴分量
$I'_r$	电机的转子电流
$I_-, I_+$	晶体管流经发射结的电流和空穴电流
$I_{+x}, I_0$	晶体管流入集电结的电流和集电结的漏电流
$I_{AK}$	二极管的电流
$I_a$	直流电机的电枢电流
$I_B, I_C, I_E$	晶体管基极、集电极和发射极电流
$I_{channel}, I_{displace}, I_{ext}$	电力电子电路中器件硅片内部电流, 位移电流和外电路电流
$I_f$	电机的励磁电流
$I_i$	通过绕组的电流
$I_m$	信息 m 的队列延迟
$I_{TM}$	器件导通过程中的电流峰值
$I_\mu$	第 $\mu$ 次谐波电流的有效值
$i_s, i_r$	电机定子和转子的电流
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	电机定子电流的 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴分量
$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$	电机定子和转子电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量
$i_{av}$	器件导通时间内的平均电流
$i_L$	负载电流
$i_{rms}$	器件中电流的有效值
$J$	电流密度; 转动惯量



$J_1$	电机定子的电流密度
$J_c$	传导电流密度
$J_j$	信息 $j$ 受到的扰动
$J_L$	负载的转动惯量
$J_m$	电机的转动惯量
$K_{Cu1}$	电机定子槽导体的填充率
$K_{d\nu}$	电机 $\nu$ 次空间谐波的绕组系数
$K_e$	电机的电动势系数
$K_r$	电机的铁耗电阻系数
$K_s$	电机的铁芯叠片系数
$K_{W1}$	电机的定子绕组系数
$k_0, k_1, k_2, k_3$	电机的负载特性常数; 器件损耗计算修正系数
$k_s$	电机的饱和系数
$L, l$	长度; 电感
$L_0$	单位长度传输线的电感
$L_s, L_r$	电机定、转子等效两相绕组的自感
$L_{sl}, L_{tl}$	电机定、转子的漏感
$L_{L1}-L_{I9}$	变换器连接母排的分布电感
$L_m$	电机定、转子等效两相绕组互感; 励磁电感
$L_{PU1}-L_{PU9}$	变换器第 I 相相母排的分布电感
$L_{PV1}-L_{PV9}$	变换器第 II 相相母排的分布电感
$L_{S1}-L_{S6}$	变换器吸收电路母排的分布电感
$M$	元器件类型数; PWM 算法最大调制比
$m_1$	电机定子绕组的相数
$N_i$	第 $i$ 类元器件的数量
$n$	机械转速
$n_1$	电机的同步转速
$n_L$	负载的转速
$n_r$	电机转子的转速
$\nu$	空间谐波次数
$P$	功率
$P_2$	电机的输出功率
$P_{Cu}$	铜耗
$P_{Cu1}, P_{Cu2}$	电机定、转子的铜耗
$P_{em}$	电机的电磁功率

$P_{Fe}$	电机的铁耗
$P_{\text{foff0}}$	器件阻态的最大损耗
$P_m$	电机的机械损耗
$P_n$	电机的额定功率
$P_{\text{on0}}$	器件通态的最大损耗
$P_{s\mu}$	第 $\mu$ 次谐波的杂散损耗
$P_{\text{T-off}}$	器件在阻断过程中的功率损耗
$P_{\text{T-on}}$	器件在开通过程中的功率损耗
$P_{\Delta}$	电机的附加损耗
$p$	微分算子
$p_0$	电机的极对数
$Q_1, Q_2$	电机定、转子的槽数
$Q_s$	每秒钟的通信数据量
$Q_T$	每一控制周期内需要完成的有效通信量
$R$	电阻
$R_0$	单位长度传输线的电阻
$R_{\text{on}}$	器件通态压降斜率电阻
$R_{\text{th1}}, R_{\text{th2}}, R_{\text{th3}}$	热路模型的广义热阻
$r$	电阻; 长度比率
$r_2$	电机的槽形尺寸
$r_s, r_r$	电机定、转子的绕组电阻
$r_F$	器件的通态电阻
$r_L$	负载电阻
$r_m$	电机的等效铁耗电阻
$r_T$	器件的体电阻
$r_a$	直流电机的电枢内阻
$S$	坡印亭矢量
$S_c$	通过平板电容的电磁能流
$S_{\text{charge}}$	由电荷流动引起的电磁能流
$S_{\text{ext}}$	硅片外部的电磁能流
$S_{\text{in}}$	硅片内部的电磁能流
$S_{\text{induced}}$	由磁场变化引起的电磁能流
$s$	转差率; 拉普拉斯算子
$s_m$	最大电磁转矩时的转差率; 信息 $m$ 的字节数
$T$	转矩; 时间

$T_{em}$	电机的电磁转矩
$T_L$	负载转矩
$T_m$	最大转矩
$T_{max}$	最大电磁转矩
$T_{min}$	器件的最小脉宽时间
$T_n$	电机的额定转矩
$T_r$	电机转子的电磁时间常数
$T_s$	开关周期
$T_{st}$	起动转矩
$T_w$	人机界面数据的更新周期
$THD$	总畸变率
$t$	时间
$t_1$	电机定子的齿宽
$t_{BD}$	死区时间
$t_{dyn}$	吸收电路的动态过程持续时间
$t_{OFFMIN}$	阻态最小的脉宽时间
$t_{ONMIN}$	通态最小的脉宽时间
$U_a$	逆变器的输出电位
$U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$	电机的三相电压
$U_s$	电机定子的相电压
$U_{GE}$	IGBT 的门-射极之间电压
$U_{GE(th)}$	IGBT 的开启电压
$U_n$	电机的中点电压
$U_p$	电机的相电压幅值
$U_\mu$	第 $\mu$ 次谐波电压的有效值
$u_D$	二极管两端的电压
$u_{int}$	积分器的输出值
$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$	电机定子电压的 $\alpha$ 、 $\beta$ 分量
$u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$	电机定、转子电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量
$U$	电压; 电压矢量
$U_{AK}$	器件的端电压
$U_{az}$	逆变器输出相对于 $z$ 点的电压
$U_{d0}$	器件阻态的最大电压
$U_{ext}$	外施电压
$U_F$	器件关断后的稳态电压

$U_{FO}$	器件通态的初始电压
$U_{GS}$	MOSFET 的栅源极电压
$U_{induced}$	平板导体上的感应电压
$U_{int}$	器件的内部电压
$U_O$	输出电压
$U_{ref}$	参考电压的空间矢量
$U_S$	电源电压
$U_T$	器件关断后的稳态电压
$U_{TO}$	器件的通态压降
$U_{Tp}$	器件开通前的端电压
$U_t$	器件的端电压
$W$	电磁场能量
$W$	电机绕组的匝数
$x$	长度尺寸
$x_a$	不考虑饱和时的励磁电抗
$x_{as}$	饱和励磁电抗
$x_d, x_q$	电机同步电抗的 $d$ 、 $q$ 轴分量
$x_m$	励磁电抗
$x_{sl}, x'_{rl}$	电机定、转子的等效电感
$\alpha$	空间电弧度; 变频调速调制比; 晶体管的电流放大系数
$\alpha_1, \alpha_2$	定、转子磁场轴线位置
$\gamma$	晶体管发射结注入比
$\epsilon_0$	真空介电常数
$\eta$	效率
$\eta_{drive}, \eta_{sys}$	驱动器的效率; 系统的效率
$\theta$	角度
$\theta_{avr}$	变频电源的温升
$\theta_L$	负载的转动角度
$\theta_m$	电机转子的电角度
$\lambda$	电机定子的内外径比值; 单个元器件的失效率; 定子电流的有功分量和无功分量的比值
$\lambda_i$	在一定温度和应力下元器件的失效率
$\lambda_m$	定子电流有功分量和无功分量比值的最大值
$\lambda_s$	系统的失效率

$\mu$	时间的谐波次数
$\xi$	电机设计公式的常数
$\pi_{Ei}$	第 $i$ 类元器件的环境系数
$\rho$	通信媒质在总线传输过程中产生的延迟
$\sigma$	电机等效电路的修正系数; 电机的漏磁系数; 变换器控制的损耗因子
$\tau$	时间常数; 控制算法中的滞环输出量
$\tau_1$	电机定子的极距
$\tau_{bit}$	总线上发送一个 bit 所用的时间
$\Phi$	磁通
$\Phi_{am}$	电机合成磁通平均值的最大值
$\Phi_m$	电机的主磁通
$\Phi_\mu$	转速为 $\mu\omega$ 的基波平均磁通
$\phi$	相角; 磁链滞环输出量
$\varphi$	电场标量势函数; 角度
$\varphi_\mu$	第 $\mu$ 次谐波电压的初相角
$\Psi_s, \Psi_r$	电机定、转子的磁链矢量
$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$	电机定子磁链的 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴分量
$\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$	电机定、转子磁链的 $d$ 、 $q$ 轴分量
$\Psi_g$	电机的气隙磁链
$\omega$	角速度
$\omega_1$	电机定子电源的角速度
$\omega_2$	电机转子的转速
$\omega_c$	截止频率
$\omega_k$	任意角速度
$\omega_n$	额定转速
$\omega_s$	转子转差角频率
$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$	热路分析时逆变部分、整流和直流母排、控制与保护损耗

# 目 录

## 前言

## 本书常用符号及含义

第1章 电力电子与电机系统集成概述	1
1.1 电力传动基础	2
1.1.1 麦克斯韦电磁定律	3
1.1.2 电机的结构与原理	5
1.1.3 电机的机械特性	9
1.2 可变电源下的电力传动	14
1.2.1 VVVF 控制方法	14
1.2.2 矢量控制	16
1.2.3 PWM 调制与谐波分量	18
1.3 集成系统的特征及内容	21
1.3.1 集成实例分析	21
1.3.2 集成系统的特征	24
1.3.3 集成系统的基本内容	26
参考文献	28
第2章 变频电源驱动下的电机特性	30
2.1 变频调速对电机运行的影响	30
2.1.1 电机机械特性的变化	30
2.1.2 电机内部磁场分布的变化	31
2.1.3 电机的电流谐波和电压谐波增加	32
2.1.4 电流和磁场矢量控制	33
2.2 变频调速电机设计主要概念	33
2.2.1 变频调速电机设计理念	34
2.2.2 变频调速电机设计公式	35
2.3 变频调速电机中的谐波分析	40
2.3.1 变频调速电机的分析模型	40
2.3.2 谐波电流对磁场的影响及磁场分析	43
2.3.3 谐波对损耗的影响及计算方法	45
2.3.4 高次谐波对电机运行性能的影响分析	46
2.4 闭环控制中的电机运行	49
2.4.1 矢量控制中电机运行性能的分析模型	50

2.4.2	闭环控制系统中电机稳态运行点分析	53
2.4.3	闭环控制下的电机性能分析	55
2.4.4	最优转差率控制与电机运行点的匹配	56
2.5	小结	58
	参考文献	59
<b>第3章</b>	<b>电力电子器件与变换器</b>	<b>61</b>
3.1	电力半导体器件的分类	62
3.1.1	按照电力半导体器件发展来分类	62
3.1.2	按照电力半导体器件控制方式来分类	62
3.1.3	按照电力半导体器件驱动方式分类	63
3.1.4	按照电力半导体器件中载流子性质分类	63
3.2	电力半导体器件的工作原理及特性	66
3.2.1	单PN结器件(二极管)的工作原理与特性	66
3.2.2	多PN结器件的工作原理	74
3.2.3	多PN结器件的特性	80
3.3	电力电子变换器的拓扑结构	82
3.3.1	变换器理想开关的定义	83
3.3.2	变换器的基本拓扑单元	84
3.3.3	基于器件特性的变换器基本拓扑单元	87
3.3.4	两电平拓扑结构	88
3.4	多电平电力电子变换器	90
3.4.1	多电平变换器基础	90
3.4.2	二极管钳位式多电平变换器	92
3.4.3	电容悬浮式多电平变换器	94
3.4.4	级联式多电平变换器	96
3.4.5	多电平统一变换拓扑及瞬态换流回路	99
	参考文献	102
<b>第4章</b>	<b>PWM控制及其变异</b>	<b>104</b>
4.1	变换器的PWM控制方法及多电平SPWM	104
4.1.1	PWM的基本概念	104
4.1.2	载波PWM	106
4.2	空间矢量PWM	111
4.2.1	SVPWM基本原理	111
4.2.2	SVPWM矢量合成	114
4.2.3	SVPWM开关顺序	116
4.2.4	多电平SVPWM	121
4.3	其他类型的PWM方法	124
4.3.1	特定消谐PWM	124

4.3.2	具有反馈环节的 PWM	126
4.3.3	单周期控制(One-cycle control)	128
4.4	PWM 波形的死区、最小脉宽和异常脉冲	129
4.4.1	死区及最小脉宽	129
4.4.2	信号脉冲与功率脉冲	132
	参考文献	134
<b>第 5 章 集成系统特性分析</b>		136
5.1	电机与负载集成	136
5.1.1	典型负载及其数学描述	136
5.1.2	电机与负载参数的匹配	137
5.2	电机与变频电源集成	140
5.2.1	变频调速下的电机效率	140
5.2.2	变频电源参数及其开关损耗	143
5.2.3	集成系统的热分析	147
5.2.4	集成系统的过载保护	149
5.3	高频模型及其分析	149
5.3.1	高频模型的基本原理	149
5.3.2	高频等效电路	151
5.4	集成系统的故障容错	154
5.4.1	容错策略的基本原理	154
5.4.2	故障容错的应用	156
5.5	集成系统分析的特点	161
	参考文献	162
<b>第 6 章 系统的闭环控制</b>		163
6.1	异步电机动态数学模型	163
6.1.1	基本假设与物理模型	163
6.1.2	动态数学模型	164
6.2	矢量控制	166
6.2.1	矢量控制的基本原理	166
6.2.2	矢量控制系统的类型	167
6.2.3	磁通观测器	168
6.3	直接转矩控制	170
6.3.1	直接转矩控制的基本原理	170
6.3.2	基本直接转矩控制	173
6.3.3	磁链观测	174
6.4	无速度传感器控制	176
6.4.1	直接算法	177
6.4.2	模型参考自适应法	178



6.4.3 观测器	179
6.4.4 其他方法	180
6.5 数字滤波器在磁链观测中的应用	181
6.5.1 有限冲击响应滤波器的工作原理	182
6.5.2 使用有限冲击响应数字滤波器的定子磁链观测器	182
6.5.3 有限冲击响应数字滤波器的效果	183
6.6 矢量控制与直接转矩控制的鲁棒性分析	185
6.6.1 关于鲁棒性的简单说明	185
6.6.2 变频调速系统的鲁棒性分析	186
6.6.3 速度传感器对控制系统鲁棒性的影响	187
6.7 矢量控制与直接转矩控制试验比较	188
6.7.1 试验条件	188
6.7.2 试验系统平台	188
6.7.3 试验原理分析	189
6.7.4 试验内容与结果分析	191
参考文献	195
<b>第7章 控制与检测信号的数据通信</b>	<b>198</b>
7.1 数据通信系统的结构及分类	198
7.1.1 通信信号及其特点	198
7.1.2 集成系统中的通信系统型式	201
7.1.3 通信的可靠性与容错	203
7.2 集成系统信号数据流特点	203
7.2.1 控制系统的特征	203
7.2.2 控制系统的信号流模型	208
7.3 通信系统的硬件结构	210
7.3.1 通信媒质的选取	211
7.3.2 光纤 CAN 总线网络硬件设计	213
7.3.3 串行 RS-422 通信硬件设计	217
7.3.4 双口 RAM 通信的硬件设计	217
7.4 数据结构设计	218
7.4.1 控制系统数据结构的统筹设计	218
7.4.2 CAN 总线通信协议与软件的结构化设计	219
7.4.3 RS-232 通信协议与软件的结构化设计	223
7.4.4 RS-422 通信协议与软件的结构化设计	226
7.4.5 双口 RAM 通信协议与软件的结构化设计	227
7.4.6 通信容错策略	229
7.5 多种通信系统协同实现的综合控制	230
7.5.1 协调控制的实现步骤	230