



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育铁道部规划教材

电力牵引

交流传动及其控制系统

■ 冯晓云 主编



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育铁道部规划教材

79
介商内

电力牵引

交流传动及其控制系统

冯晓云 主编

本书主要介绍交流传动系统的主要组成部分，包括交流牵引电动机、齿轮箱等。重点介绍牵引逆变器的工作原理、PWM调制技术、异步电动机的数学模型和电机控制技术。电机控制技术主要包括：矢量控制技术、直接转矩控制技术、无速度传感器技术和直接转矩技术等。

交流电机的控制技术主要集中在矢量控制。Blaschke提出交流电动机矢量控制理论，且该控制技术就在德国DE2500型交流传动的内燃机上得到了应用。它的出现对电机控制技术的发展具有划时代的意义，使得电机控制技术的发展步入一个全新的阶段。1986年，德国莱比锡大学Depenbrock教授提出了直接转矩控制技术，由于它直接控制定子磁链空间矢量和电磁转矩，故使得控制系统得以简化，并且提高了快速响应能力。它不仅拓宽了矢量控制理论，也促进了电机控制技术的进一步发展。直接转矩控制技术还有待进一步深入研究。

本书共分5章。第1章介绍交流传动系统的发展概况；第2章介绍交流传动系统各个较为全面的了解；第3章介绍电力牵引传动系统的主要组成部分，包括牵引逆变器、牵引供电系统、电力牵引交流传动系统以及牵引电动机等；第4章介绍异步电动机的控制方式，并给出了满足列车牵引特性的控制策略；第5章分别介绍了两电、三电、四电、五电、六电、七电、八电、九电、十电、十一电、十二电、十三电、十四电、十五电、十六电、十七电、十八电、十九电、二十电、二十一电、二十二电、二十三电、二十四电、二十五电、二十六电、二十七电、二十八电、二十九电、三十电、三十一电、三十二电、三十三电、三十四电、三十五电、三十六电、三十七电、三十八电、三十九电、四十电、四十一电、四十二电、四十三电、四十四电、四十五电、四十六电、四十七电、四十八电、四十九电、五十电、五十一电、五十二电、五十三电、五十四电、五十五电、五十六电、五十七电、五十八电、五十九电、六十电、六十一电、六十二电、六十三电、六十四电、六十五电、六十六电、六十七电、六十八电、六十九电、七十电、七十一电、七十二电、七十三电、七十四电、七十五电、七十六电、七十七电、七十八电、七十九电、八十电、八十一电、八十二电、八十三电、八十四电、八十五电、八十六电、八十七电、八十八电、八十九电、九十电、九十一电、九十二电、九十三电、九十四电、九十五电、九十六电、九十七电、九十八电、九十九电、一百电。

U264.2
F528

高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,主要介绍了电力牵引交流传动系统的发展历史、现状以及发展趋势;电力牵引传动系统设计基础;变频调速异步电动机的控制方式及其不同坐标系下的数学模型;两电平和三电平脉冲整流器的主电路拓扑结构及其工作原理;两电平和三电平逆变器主电路拓扑结构及其工作原理;异步电动机矢量控制系统;异步电动机直接转矩控制系统;无速度传感器控制技术、直接驱动技术等新技术。

本书注重理论基础、工程概念和思维方法,每章后附有习题,附录包括中国最先进的4种动车组及3种大功率交流传动电力机车的主电路结构框图、参数和牵引特性曲线等基础数据,并给出了在实验室条件下可以完成的交流传动系统的相关实验。

本书可作为高等学校电力电子与电力传动、电力牵引、动车组、轨道交通和磁浮等专业的本科生及研究生教材,也可供电力牵引交流传动领域从事设计、开发或研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引交流传动及其控制系统/冯晓云主编.

—北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-028046-3

I. 电… II. 冯… III. 电力机车-交流电动机传动-控制系统 IV. U264.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第196379号

策划编辑 金春英 责任编辑 魏芳 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉
版式设计 余杨 责任校对 杨凤玲 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 潮河印业有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.25
字 数 470 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009年12月第1版
印 次 2009年12月第1次印刷
定 价 24.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28046-00



冯晓云教授简介

冯晓云，女，1962年生，博士、教授、博士生导师，国家教学名师奖获得者。1983年7月毕业于西南交通大学并留校任教至今，曾留学日本东京大学。长期从事电力电子与电力传动学科领域的教学和科学研究工作。主持完成国家级教改项目7项，主持国家精品课程、国家级教学团队、国家级特色专业、国家级实验教学示范中心等质量工程建设项目，获得国家级教学成果一等奖1项、二等奖3项、铁道部詹天佑科技基金育人奖等；主持完成国家级和省部级科研项目10余项，现主持在研高速动车组牵引传动与控制、重载货运机车牵引变流器研制等国家科技支撑计划项目，曾获得铁道部科技进步二等奖1项，三等奖1项。

主要学术兼职有：教育部电气工程与自动化专业教学指导分委员会委员，铁道部铁道电气化专业教学指导委员会委员兼秘书长，全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会委员，全国电力电子技术学会理事等。

前 言

铁路作为国家重要的基础设施,国民经济的大动脉,大众化的交通工具,综合交通体系的骨干,近年来在我国得到了显著的发展。围绕铁路“高速、重载”的发展方向,我国已开行一批具有世界先进水平的高速动车组和大功率交流传动电力机车。

电力牵引传动系统是高速动车组和大功率电力机车的原动力,其发展方向是功率大、重量轻、体积小、可靠性高和低成本,这些特点就决定了电力牵引传动系统必然采用先进的交流传动系统。

交流传动系统的广泛应用主要取决于三大技术的迅速发展:电力电子器件、数字化微处理器技术和交流电机控制技术。

电力牵引交流传动系统主要由受电弓、主断路器、牵引变压器、牵引变流器、三相交流牵引电动机、齿轮箱等组成。牵引变流器主要分为3个主要环节:网侧四象限脉冲整流器实现功率调节,电动机侧逆变器实现频率变换,异步牵引电动机和机械传动部分实现机电能量转换。本书重点介绍牵引变流器的工作原理、PWM调制技术、异步电动机的数学模型和电机控制技术。电机控制技术主要包括:矢量控制技术、直接转矩控制技术、无速度传感器控制技术和直接驱动技术等。

交流电机的控制技术主要集中在矢量控制理论和直接转矩控制理论。1971年,德国西门子的Blaschke提出交流电动机矢量控制理论,且该控制技术就在德国DE2500型交流传动内燃机车上得到了应用。它的出现对电机控制技术的研究具有划时代的意义,使得电机控制技术的发展步入一个全新的阶段。1985年,德国鲁尔大学Depenbrock教授提出了直接转矩控制理论,由于它直接控制定子磁链空间矢量和电磁转矩,故使得控制系统得以简化,并且提高了快速响应能力。它不仅拓宽了矢量控制理论,也促进了电机控制技术的进一步发展。直接转矩控制技术还有待进一步深入研究和改进,加快向实用化方向推进的步伐。该控制技术已在我国中华之星高速动车组上得到了应用。

矢量控制和直接转矩控制技术的两个新的发展方向是无速度传感器控制技术和直接驱动技术。无速度传感器控制技术具有能够有效地减少机车故障,减小电机体积等特点;直接驱动技术消除了传动机械传动链带来的一系列不良影响,极大提高了系统的快速响应能力和运动精度。这两大新技术虽然带来了许多优点,但同时引入了很多新的问题,目前正处于研究阶段,需要电机控制技术的进一步提高和创新。

全书共分10章及6个附录。第1章绪论介绍了电力牵引交流传动系统的发展历史、现状以及发展趋势,希望读者对电力牵引交流传动系统有个较为全面的了解;第2章介绍电力牵引传动系统设计基础,包括了列车牵引计算、牵引供电系统、电力牵引交流传动系统以及牵引电机设计时要考虑的关键问题;第3章从异步电动机等值电路、恒磁通控制、恒压频比控制、恒功率控制等方面介绍变频调速异步电动机的控制方式,并给出了满足列车牵引特性的控制方案;第4章介绍变频调速异步电动机在不同坐标系下的数学模型;第5章分别介绍了两电平和三电平脉冲整流

器的主电路拓扑结构及其工作原理,并重点介绍了交流传动系统中脉冲整流器的控制方式,同时分析了脉冲整流器谐波产生机理;第6章分别介绍了两电平和三电平逆变器主电路拓扑结构及其工作原理,重点介绍了交流传动系统逆变器控制时使用的 SPWM 和 SVPWM 两种脉宽调制方式以及方波控制,并介绍了 SPWM 和 SVPWM 的关联性;第7章主要介绍异步电动机的矢量控制系统,内容涉及矢量控制的基本原理与实现、全数字化矢量控制系统设计等,其中重点以 CRH2 型动车组交流传动系统为例,介绍了电力牵引传动系统中磁场定向矢量控制方案;第8章主要介绍异步电动机直接转矩控制系统,内容涉及直接转矩控制的基本原理与实现、全数字化直接转矩控制系统设计等,重点以“中华之星”动车组交流传动系统为例,介绍了电力牵引传动系统中直接转矩控制系统方案;第9章介绍无速度传感器控制技术以及电力牵引无速度传感器控制的带速重投技术;第10章主要介绍直接驱动技术。在学习和研究电力牵引交流传动控制系统时,往往需要些实际的对象,故附录1中给出了4种动车组及3种大功率交流传动电力机车的主电路结构框图;附录2中给出了4种动车组及3种大功率交流传动电力机车各部分参数;附录3中给出了4种动车组及3种大功率交流传动电力机车的牵引特性曲线;附录4中给出了在功率不变条件下的坐标变换;附录5中给出了由三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换(3s/2r变换);附录6为在实验室条件下可以完成的交流传动系统的相关实验。总之,读者可以通过本书对电力牵引交流传动系统有全面的了解。

本书在内容编排上力求反映电力牵引交流传动发展的水平,除适于用作相关专业本科生和研究生的教材外,对在电力牵引交流传动领域内从事设计、开发或研究的工程技术人员也有较大的参考价值。

本书由西南交通大学冯晓云教授担任主编,株洲电力机车研究所黄济荣教授级高工担任主审,参编人员包括葛兴来、熊成林、王青元等青年教师,宋文胜、韩坤、蒋威、廖永衡、王利军、刘志敏、李官军、赵小皓、黄金、谢望玉、于欣韵、刘柏思、龙胜、崔恒斌、侯黎明、李云峰等研究生在成稿过程中均承担了一定的文字整理工作,在本书的选题和编写过程中得到铁道部人事司李智、铁道部知识产权处周力、株洲所黄济荣、西南交通大学沈本荫、连级三等多位领导和专家的关心、支持与帮助,在此向对本书给予支持和帮助的所有人员致以最衷心的感谢。

由于本书涉及的理论和技術仍在不断发展,编者也在不断地研究和探索中,书中肯定有不妥甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年7月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010) 58581118

目 录

第 1 章 绪论	1	第 3 章 变频调速异步电动机的控制方式	35
1.1 发展历史	1	3.1 频率调节时异步电动机的等值电路及转矩表示	35
1.2 电力牵引交流传动与控制系统的现状及发展趋势	3	3.1.1 变频调速异步电动机的等值电路	35
1.2.1 电力电子器件	4	3.1.2 变频调速异步电动机的转矩公式	37
1.2.2 控制理论	5	3.2 恒磁通控制	38
1.2.3 交流传动系统的控制技术	6	3.2.1 概述	38
1.2.4 变频电机技术	7	3.2.2 恒磁通运行	39
1.2.5 牵引传动新技术	8	3.3 恒电压/频率比控制	41
习题	10	3.4 恒转子全磁通控制	44
第 2 章 电力牵引传动系统设计基础 ..	11	3.5 恒功率控制	44
2.1 列车牵引计算基础	11	3.6 列车牵引中变频调速系统的调节特性	47
2.1.1 列车运行过程的数学描述 ..	11	3.7 谐波分析	49
2.1.2 列车牵引力	12	3.7.1 谐波等值电路	51
2.1.3 列车阻力	15	3.7.2 谐波电流	52
2.1.4 列车牵引特性	16	3.7.3 谐波转矩	54
2.1.5 粘着控制	18	3.8 仿真案例	56
2.2 牵引供电系统简介	20	习题	57
2.3 电力牵引交流传动系统简介	23	第 4 章 变频调速异步电动机的数学模型	58
2.3.1 电力牵引传动系统分类	23	4.1 三相异步电动机的数学模型	58
2.3.2 电力牵引交流传动系统组成	23	4.1.1 电压方程	58
2.4 牵引传动系统的优化匹配与容量选定	28	4.1.2 磁链方程	59
2.4.1 牵引变流器与牵引电机的参数匹配	28	4.1.3 转矩方程	60
2.4.2 牵引系统与机械传动的匹配	29	4.1.4 运动方程	61
2.4.3 牵引传动系统容量的计算 ..	30	4.2 常用的坐标系和坐标变换	61
2.5 牵引电机设计时要考虑的五个特殊问题	33	4.2.1 常用的坐标系	61
习题	34	4.2.2 坐标变换的原则及约束条件	62

4.2.3 坐标变换的基本思路	63	5.3.2 三电平脉冲整流器 SPWM 调制原理	90
4.2.4 三相/两相变换(3/2 变换)	65	5.3.3 三电平脉冲整流器中点电位 平衡策略	91
4.2.5 两相/两相旋转变换(2s/2r 变换)	67	5.4 中间直流回路的功能与参数	93
4.2.6 直角坐标/极坐标变换(K/P 变换)	67	5.4.1 串联谐振电路	93
4.3 三相异步电动机在两相坐标系 上的数学模型	68	5.4.2 支撑电容器	94
4.3.1 异步电动机在两相任意 旋转坐标系(dq 坐标系) 上的数学模型	68	5.5 脉冲整流器谐波产生机理	95
4.3.2 异步电动机在两相静止 坐标系($\alpha\beta$ 坐标系)上的 数学模型	71	5.5.1 低次谐波产生机理	96
4.3.3 异步电动机在两相同步旋转 坐标系上的数学模型	72	5.5.2 高次谐波产生机理	97
4.4 三相异步电动机在两相坐标系上 的状态方程	72	5.6 脉冲整流器控制技术	98
4.4.1 $\omega_r-\Psi_r-i_s$ 状态方程	72	5.6.1 脉冲整流器的可变相位角 控制策略	100
4.4.2 $\omega_r-\Psi_s-i_s$ 状态方程	74	5.6.2 瞬态直接电流控制策略	103
4.4.3 $\omega_r-\Psi_r-\Psi_s$ 状态方程	74	5.6.3 预测直接电流控制策略	104
4.5 异步电动机的建模仿真	75	5.6.4 多重化脉冲整流器的 载波移相技术	105
习题	77	5.7 仿真案例	108
第 5 章 脉冲整流器主电路及其控制 ...	78	习题	109
5.1 脉冲整流器概述	78	第 6 章 牵引逆变器主电路及其 控制	111
5.1.1 引言	78	6.1 两电平牵引逆变器主电路	111
5.1.2 脉冲整流器的等效电路 模型	79	6.1.1 两电平牵引逆变器的结构与 工作原理	111
5.1.3 脉冲整流器的工作原理	81	6.1.2 两电平牵引逆变器方波 控制	113
5.2 两电平脉冲整流器主电路	84	6.1.3 两电平牵引逆变器 SPWM 控制	117
5.2.1 两电平脉冲整流器的结构与 工作原理	84	6.1.4 两电平牵引逆变器 SVPWM 控制	121
5.2.2 两电平脉冲整流器的 SPWM 调制原理	87	6.2 三电平牵引逆变器主电路	126
5.3 三电平脉冲整流器主电路	88	6.2.1 三电平牵引逆变器的 结构与工作原理	126
5.3.1 三电平脉冲整流器的结构与 工作原理	88	6.2.2 三电平牵引逆变器方波 控制	128
		6.2.3 三电平牵引逆变器 SPWM 控制	132
		6.2.4 三电平牵引逆变器 SVPWM	

控制	133	7.6.2 神经网络解耦控制器设计	183
6.3 SPWM 与 SVPWM 的关联性	140	7.6.3 神经网络转矩控制器设计	184
6.3.1 脉宽调制的基本类型	140	7.6.4 神经网络矢量控制系统	184
6.3.2 关联性存在的前提	143	习题	185
6.3.3 参考信号与空间矢量扇区 之间的关系	144	第 8 章 异步电动机直接转矩控制 系统	186
6.3.4 参考信号与空间矢量 之间的关系	145	8.1 直接转矩控制的基本原理	186
6.3.5 基波参考信号与空间矢量 之间的关系	145	8.1.1 电磁转矩控制原理	186
6.3.6 零序信号与零矢量的分布	146	8.1.2 空间电压矢量对定子 磁链及转矩的作用	187
6.3.7 SPWM 与 SVPWM 的 开关模式	147	8.2 异步电动机直接转矩控制的 实现	189
6.4 仿真案例	149	8.2.1 定子磁链与电磁转矩 估计	189
习题	154	8.2.2 六边形磁链轨迹直接 转矩控制	190
第 7 章 异步电动机的矢量控制 系统	155	8.2.3 近似圆形磁链轨迹直接 转矩控制	192
7.1 矢量控制基本思想	155	8.3 电力牵引传动中直接转矩 控制方案	195
7.2 异步电动机矢量控制的实现	157	8.3.1 低速范围的直接转矩 控制策略	196
7.2.1 矢量控制的基本方程	157	8.3.2 高速范围内的控制策略	200
7.2.2 坐标变换电路	160	8.3.3 弱磁范围内的控制策略	201
7.2.3 转子磁链观测模型	161	8.3.4 附属控制环节	203
7.3 电力牵引传动中磁场定向 矢量控制方案	166	8.4 仿真案例	204
7.3.1 转差频率矢量控制系统	166	8.5 全数字化直接转矩控制系统 设计	208
7.3.2 直接矢量控制系统	170	8.6 矢量控制与直接转矩控制的 内在联系	210
7.4 仿真案例	173	8.7 模糊控制在直接转矩控制 系统中的应用	213
7.5 全数字化矢量控制系统设计	175	习题	216
7.5.1 全数字化矢量控制系统 结构简介	175	第 9 章 牵引传动系统无速度 传感器控制	217
7.5.2 参数的离散化与数字化	177	9.1 概述	217
7.5.3 PI 调节器的数字化	178	9.2 转速估算方法	218
7.5.4 数字化滤波器	180	9.2.1 转差频率计算法	218
7.5.5 速度数字化采集	181		
7.6 智能控制在矢量控制系统中的 应用	182		
7.6.1 神经网络转子磁链与电磁 转矩估计器设计	183		

9.2.2	基于状态方程的直接综合法	218	10.3	直接驱动永磁同步牵引电机控制策略	248
9.2.3	模型参考自适应法	220	10.3.1	永磁同步牵引电机控制策略	248
9.2.4	转速自适应磁链观测器(Luenberger观测器)法	221	10.3.2	永磁同步牵引电机控制系统在牵引传动系统中的应用	257
9.2.5	扩展卡尔曼滤波器(EKF)法	226	10.4	全数字化永磁同步牵引电机控制系统的仿真与实现	262
9.2.6	滑模观测器法	228	10.4.1	控制系统的仿真实现	262
9.3	智能控制技术在无速度传感器控制中的应用	229	10.4.2	控制系统的全数字化实现	266
9.3.1	基于神经网络的无速度传感器控制	229	习题		267
9.3.2	利用人工智能技术辨识电机参数变化	232	附录1	4种动车组及3种大功率交流传动电力机车的主电路结构框图	268
9.4	电力牵引无速度传感器控制的带速重投研究	233	附录2	4种动车组及3种大功率交流传动电力机车各部分参数	272
习题		238	附录3	4种动车组及3种大功率交流传动电力机车的牵引特性曲线	274
第10章	直接驱动技术	239	附录4	在功率不变条件下的坐标变换	277
10.1	直接驱动技术概述	239	附录5	由三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换(3s/2r变换)	280
10.1.1	直接驱动技术及其特点	239	附录6	交流传动实验介绍	285
10.1.2	直接驱动牵引电机的现状与发展趋势	240	参考文献		294
10.1.3	直接驱动永磁同步牵引电机的特点与应用	241			
10.2	直接驱动永磁同步牵引电机理论基础	243			
10.2.1	永磁同步牵引电机的数学模型	243			
10.2.2	永磁同步牵引电机系统的稳态特性	244			

第 1 章

绪 论

1.1 发展历史

自世界上第一条铁路诞生以来,作为载运工具的牵引动力机车已经历了蒸汽机车、内燃机车、电力机车 3 个发展阶段。电力机车与电动车组的主传动控制系统称为电力牵引传动控制系统,其发展可分为电力牵引传动摸索阶段、交传动控制阶段及交流传动控制阶段。

1879 年出现的第一台电力机车和 1881 年出现的第一台城市电车均在尝试采用直流供电牵引方式,1891 年德国西门子公司试验了三相交流直接供电、绕线式转子异步电动机牵引的机车,1917 年德国试制了采用“劈相机”将单相交流供电进行旋转、变换为三相交流电的试验车。这些技术终因系统庞大、能量转换效率低、电能转化为机械能的转换能量小等因素,未能成为牵引动力的适用技术。

1955 年,水银整流器机车问世,标志着牵引动力电传动技术实用化的开始。1957 年,晶闸管(旧称可控硅)整流器的发明,标志着电力牵引进入了电力电子时代。1965 年,晶闸管整流器机车问世,使牵引电传动系统发生了根本性的技术变革,全球兴起了单相工频交流电网电气化的高潮。牵引供电主要采用 4 种电流制式:欧洲部分电气化铁路采用 1 500 V、3 000 V 直流供电方式,德国、瑞士、奥地利部分电气化铁路采用 15 kV、16.67 Hz 的单相工频交流供电方式,新电气化铁路均采用 25 000 V、50/60 Hz 单相工频交流供电方式,中国的电气化铁路均采用 25 000 V、50 Hz 的单相工频交流供电方式。交传动电力机车相继问世,日本、德国、法国、苏联等铁路发达国家均研制成功交传动电力机车并投入运行。

1958 年底,我国试制出第 1 台干线电力机车,即 6Y1 型电力机车,该电力机车是以苏联 H60 型干线交传动电力机车为样车,采用的整流器件是引燃管。随着我国电力电子工业的发展,大功率整流二极管开始进入到工程实用阶段,我国第 1 代有级调压、交传动电力机车——SS1 型电力机车于 1968 年试制成功,1969 年开始批量生产。晶闸管的问世,使机车电传动技术跨上了一个新的台阶,1978 年底,由株洲电力机车厂和株洲电力机车研究所共同研制成功的 SS3 型电力机车是我国首次采用相控无级调压的第 2 代交传动客货运电力机车。随着大功率晶闸管性能的不断提高,相控整流技术的成功应用,性能更优的 SS4 型电力机车研制成功,它与随后研发出的 SS5、SS6、SS7、SS8 及 SS9 型系列相控整流货运与客运电力机车,形成了我国以晶闸管相控整流技术为核心的交传动电力机车系列产品。

交流传动技术用于牵引传动是从 20 世纪 70 年代开始的,1971 年联邦德国研制了第 1 批

DE2500 型交流传动内燃机车,经试运行后,证实了三相交流机车的一系列重大优点,如牵引力大、粘着利用好、制动性能优越以及维修量小等,从而掀起了研究三相交流机车的热潮。1983 年,联邦德国联邦铁路公司又将第 1 批 BR120 型交流传动干线电力机车投入运行,该机车在系统设计、总体布置、参数选择与优化规则、电路结构方面,以及在主要部件如卧式主变压器、牵引变流器、牵引电动机、空心轴万向节传动装置、辅助变流器等的设计和制造方面,成功地进行了尝试,奠定了当代交流机车设计和运行的基本模式。自 20 世纪 80 年代末 90 年代初至今,已有多种型号的三相交流电力机车、交流电传动内燃机车和高速动车组,分别在德国、法国、日本、中国等众多国家的铁路线上运行,制造厂家有德国西门子公司、法国阿尔斯通公司、加拿大庞巴迪公司、美国 GE 公司、日本日立公司和川崎重工、中国的南车集团和北车集团等大型企业。从 20 世纪 90 年代开始,铁路发达国家已不再生产交直传动电力机车和直传动内燃机车,而是全部采用交流传动控制技术。

交流传动电力机车具有如下优势。

① 良好的牵引性能:合理地利用系统的调压、调频特性,可以实现宽范围的平滑调速,使机车和动车组的高速利用功率 $K_p=1$,恒功率调速比 $K_n=2\sim 3$ 。另外,调节调频特性能使机车和动车组起动时发出较大的起动转矩。

② 电网功率因数高、谐波干扰小:在交-直-交电力机车和动车组上,其电源侧变流器可以采用四象限脉冲整流器,它通过 PWM 控制方法,可以调节电网输入电流的相位,使所取电流接近正弦波形,并能在广泛的负载范围内使机车和动车组的功率因数接近于 1,这在减小对通信信号的谐波干扰方面和充分利用电网的传输功率方面都有很大的意义。另外,四象限脉冲整流器能很方便地实现牵引和再生之间的能量转换,取得显著的节能效果。

③ 牵引系统功率大、体积小、重量轻、运行可靠:由于异步牵引电动机转速可达 4 000 r/min,利用了直流电动机换向器所占的空间,所以交流电动机能够做到功率大、重量轻,与带换向器的直流(脉流)电动机相比,其单位质量功率(kW/kg)是直流电动机的 3 倍。在列车车体提供的空间范围内,异步电动机的功率可以达到 1 400~2 000 kW。另外,交流电动机没有换向器和电刷装置,机车和动车组主电路系统又可以省去许多有触点电器,因此,可以进一步提高运行可靠性。

④ 动态性能和粘着利用好:由于交流异步电动机有较硬的自然特性,其防空转(机车粘着利用)性能较好。当机车和动车组轮对发生空转(粘着破坏)时,牵引力会急剧下降,使粘着牵引力很快恢复。经过近 10 年的研究,机车和动车组的牵引控制已用矢量控制或直接转矩控制取代了转差-电流控制,这些控制技术,不仅能使系统稳态精度高,而且能获得高的动态性能,可以使牵引力沿着轮轨之间蠕滑极限进行控制,极其适合当代动车组高速牵引、机车重载牵引的要求。

20 世纪 70 年代,我国许多科研单位已开始进行电力半导体变流技术和三相交流传动的研究,容量从几千瓦逐渐扩大,到 1989 年交流传动系统的容量已达到 300 kW 以上。与此同时,铁道科学研究院与株洲电力机车研究所等也在进行交流传动机车的研制,到 1992 年已经完成了单机功率为 1 000 kW 级的地面试验系统。根据地面试验系统研制取得的成果和经验,1996 年研制成功单轴功率 1 000 kW 的 AC4000 型交流传动原型机车,这是我国牵引传动由交直传动转变为交流传动的一个重要里程碑。迄今我国已研制成功 DJ1、DJ2 型等交流传动大功率电力机车、“中华之星”等交流传动高速动车组以及交流传动内燃机车。

为加快实现我国铁路机车车辆现代化的步伐,铁道部遵照 2004 年 4 月国务院下发的《研究

铁路机车车辆装备有关问题的会议纪要》精神,贯彻“引进先进技术、联合设计生产、打造中国品牌”的总体要求和“先进、成熟、经济、适用、可靠”的基本方针,以关键技术的引进为“龙头”,以国内企业为主导,通过“市场换技术”,以国内公开招标方式,先后引进 200 km/h 及以上的多种铁路客车动车组和大功率电力机车制造技术,并在此基础上研发具有我国自主知识产权的高速动车组和大功率交流传动电力机车。

目前,我国具有自主知识产权的高速列车有 CRH1、CRH2、CRH2-300、CRH3 以及 CRH5 型高速动车组。CRH1 型动车组是由青岛四方-庞巴迪-鲍尔铁路运输设备有限公司(简称 BSP)生产的动力配置为 5M3T 的动力分散型高速列车;CRH2 和 CRH2-300 型高速动车组分别是由南车四方机车车辆股份有限公司生产的动力配置为 4M4T 和 6M2T 动力分散型高速列车;CRH3 型动车组是由唐山轨道客车股份有限公司生产的动力配置为 4M4T 的动力分散型高速列车;CRH5 型高速动车组是由长春轨道客车股份有限公司生产的动力配置为 5M3T 的动力分散型高速列车。

我国具有自主知识产权的大功率交流传动电力机车有 HXD1、HXD2 以及 HXD3 型电力机车。HXD1 型电力机车是由株洲电力机车有限公司生产的 8 轴 9 600 kW、120 km/h 的货运高速电力机车;HXD2 型电力机车是由大同电力机车有限公司生产的 8 轴 10 MW、120 km/h 的货运高速电力机车;HXD3 型电力机车是由大连机车车辆有限公司生产的 6 轴 7 500 kW、120 km/h 的货运高速电力机车。这些高速动车组和大功率电力机车融合了世界各国最先进的交流传动技术,成为我国高速动车组和大功率机车的系列品牌列车。

1.2 电力牵引交流传动与控制系统的现状及发展趋势

电力牵引交流传动系统主要由受电弓、主断路器、牵引变压器、牵引变流器、三相交流牵引电动机、齿轮箱等组成,主电路如图 1-1 所示。

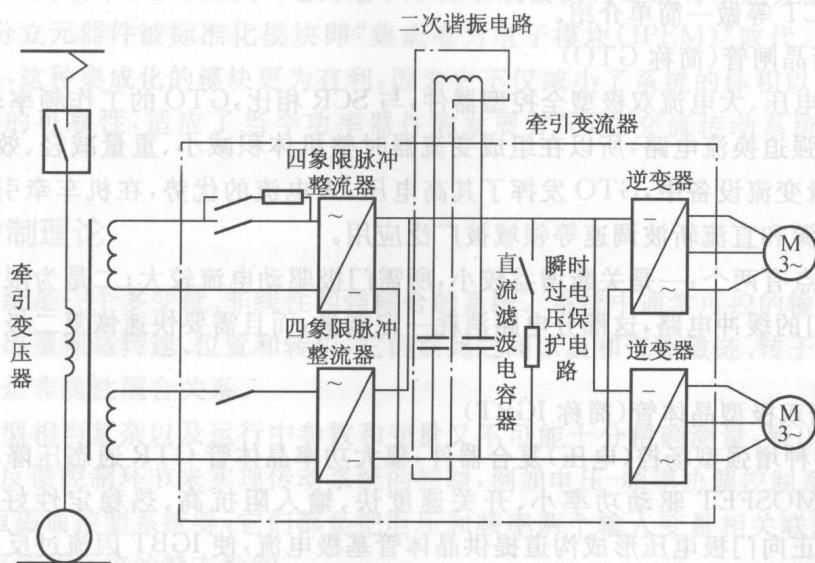


图 1-1 电力牵引交流传动系统主电路图

牵引变流器可分为 3 个主要环节:网侧四象限脉冲整流器实现功率调节,电动机侧逆变器实现频率变换,交流牵引电动机和机械传动部分实现机电能量转换。

牵引工况时,牵引变压器二次牵引绕组将单相交流电供给牵引变流器,在变流器内部,单相交流电通过四象限脉冲整流器进行交-直变换,输出直流电压;中间直流环节由直流滤波电容器、瞬时过电压保护电路、LC 二次谐振电路等部分构成,起稳定中间直流电压的作用;逆变器进行直-交变换,将中间直流电压逆变成三相变频变压的交流电压,驱动三相交流牵引电动机。

再生制动工况时,逆变器将三相交流牵引电动机再生的交流电能进行交-直变换,输出直流电能至中间直流环节,四象限脉冲整流器进行直-交变换,将电能回送电网。

电力牵引交流传动技术是一门跨学科的技术,它涉及电力电子器件、脉宽调制技术、电机电器、控制及微电子学在内的许多领域。经过近 30 年的发展,交流传动技术在国内外轨道交通运载装备中得到了广泛应用。但是,由于这一领域所具有的跨学科特点,在系统控制理论和许多实用技术上,还存在一些问题,有待进一步研究改进和提高。

1.2.1 电力电子器件

1. 电力电子器件简介

电力电子器件是列车牵引变流器的基础与核心,其性能直接决定了牵引变流器的性能指标。电力电子器件的发展经历了两个重要阶段,即以晶闸管(简称 SCR)为代表的传统半控型电力电子器件时代和以绝缘栅双极型晶体管(简称 IGBT)为代表的全控型自关断现代电力电子器件时代。

电力电子器件可分为双极型、单极型和混合型三大类型。除了 SCR(晶闸管, Silicon Controlled Rectifier)、RCT(逆导晶闸管, Reverse-Conducting Thyristor)、ASCR(非对称晶闸管, Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier)和 TRIAC(三端双向交流开关, TRIode AC semiconductor switch)等器件之外, GTO、IGBT/IPM、IGCT 等均为全控型器件。下面对常用的 GTO、IGBT/IPM、IGCT 等做一简单介绍。

(1) 可关断晶闸管(简称 GTO)

GTO 是高电压、大电流双极型全控型器件,与 SCR 相比, GTO 的工作频率较高且具有自关断能力,省去了强迫换流电路,所以在组成变流器时整机体积减小、重量减轻、效率提高、可靠性增加。在大容量变流设备中, GTO 发挥了其高电压、大电流的优势,在机车牵引传动、交流电机调速、不停电电源和直流斩波调速等领域被广泛应用。

GTO 的缺点有两个:一是关断增益较小,所需门极驱动电流较大;二是为限制 du/dt 及关断损耗需设置专门的缓冲电路,这部分电路消耗一定能量,而且需要快速恢复二极管、无感电阻、无感电容等器件。

(2) 绝缘栅双极型晶体管(简称 IGBT)

IGBT 是一种增强型场控(电压)复合器件,集大功率晶体管 GTR 通态压降小、载流密度大、耐压高和功率 MOSFET 驱动功率小、开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好的优点于一身。IGBT 通过施加正向门极电压形成沟道提供晶体管基极电流,使 IGBT 因流过反向门极电流而关断,其门极控制电路大为简化。大功率 IGBT 的研制成功为提高电力电子装置的性能,特别是为牵引变流器的小型化、高效化、低噪化提供了有利条件。目前常用于机车牵引变流器的 IGBT 器

件容量有 3 300 V/1 200 A、6 500 V/600 A 等多个等级。

智能型功率模块 IPM 是以 IGBT 技术为基础的电力电子开关,由高速低功耗的管芯和优化了的门极驱动电路以及快速保护电路构成。与 IGBT 器件相比,IPM 还具有以下特点:① 快速的过电流保护;② 过热保护;③ 桥臂对管互锁保护;④ 器件布局合理,无外部驱动线,抗干扰能力强,工作可靠性高;⑤ 驱动电源欠电压保护。

(3) 集成门极换流晶闸管(简称 IGCT)

IGCT 的特点在于采用了“穿通型”结构,硅片厚度约减少 30%,有利于减少工作损耗;采用了“阳极透明发射极”结构,使器件关断更均匀、快速;在结构上将半导体元件与门极电路合成一体,简化了应用,提高了性能;封装为低电感,实现了硬关断,缩短了下降时间,降低了关断损耗。IGCT 器件适用于大功率高压变流器,特别是电力补偿器、有源滤波器、电机驱动装置、可再生资源发电系统、电力牵引装置等,在工业传动和地面设备中已有不俗的业绩。

2. 电力电子器件的发展趋势

电力电子器件的发展要求器件具有大电流、高电压、低损耗、高频率、功能集成化、高可靠性等特点。为了实现大电流、高电压,需要采用新材料和新工艺;为了提高可靠性和简单化,需要对电力电子系统采用集成化技术。

新工艺主要包括薄片工艺、引线键合、平板压接式、无焊料内压接式和双面散热结构等技术,目的是为了进一步降低开关器件的通态损耗和提高器件的耐压值与耐流值。

就电力电子器件而言,硅材料并不是最理想的材料,比较理想的材料应当是临界雪崩击穿电场强度、载流子饱和漂移速度和热导率都比较高的宽禁带半导体材料,这种材料比较典型的有砷化镓(GaAs)、碳化硅(SiC)等。虽然碳化硅场效应器件的阻断电压可以做到硅器件所无法达到的 10 kV,但更高的阻断电压也面临通态电阻问题,因此碳化硅的研究还有待于材料和工艺技术的进一步发展。

电力电子器件的发展趋势是紧凑化、薄型化、智能化、集成化,为了使电力电子系统具有高可靠性、高功率密度、高效率以及低成本,电力电子系统集成被认为是最有效的方法。在电力电子集成系统中,各分立元器件被标准化模块即“集成电力电子模块(IPEM)”取代。对交流传动电力机车控制来说,这种集成化的模块更为有利,因为它不仅减小了系统的体积以及开发时间,也大大增强了系统的可靠性,适应了当今功率器件的发展方向,在交流传动系统中越来越受到重视。

1.2.2 控制理论

交流传动系统是一个多变量、非线性和强耦合的系统。系统中通常可控的输入量是电压(或电流)和频率,输出量则是转速、位置和转矩,它们彼此之间以及和气隙磁链、转子磁链、转子电流等内部量之间都是非线性耦合关系。

由于系统模型相当复杂以及运行中参数和变量又不可能十分精确测量,所以传统的几种控制系统都是基于反馈控制环节来实现传动系统的控制,例如电压-频率协调控制系统、电流-转差频率控制系统、恒磁通控制系统等,它们都是把电压和频率两个输入变量相关联起来,从而转化成单变量系统,保证了系统的静态性能。

现代控制理论的发展应用促进多种控制系统的诞生,并解决了传统反馈控制理论所不能解

决的控制问题,例如取得重要突破的矢量控制系统、直接转矩控制系统、变结构控制系统、自适应控制系统和智能控制系统等。

矢量控制系统是采用参数重构和状态重构的现代控制概念,实现电机定子电流的励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而使交流电机能像直流电机一样分别对其励磁分量和转矩分量进行独立控制,这一控制思想给高性能的交流电机调速技术奠定了理论基础。围绕矢量控制技术的完善化,相继提出了如下许多提高矢量控制性能的方法。

① 为了克服由电机内部压降造成的耦合,系统加入前馈控制器。

② 为了克服模型运算的误差,系统低速用电流模型而高速用电压模型控制;

③ 为了克服运行中电机转子电阻变化,采用对系统参数辨识修正的方法。

继矢量控制技术之后交流调速控制理论的另一个突破是直接转矩控制技术。与矢量解耦控制的方法不同,它无需进行两次坐标变换及矢量的模与相角的复杂计算,而是直接在定子坐标系上计算电机磁链和转矩的实际值,并与磁链和转矩的给定值相比较,通过 Bang - Bang 调节器进行转矩的直接调节,加快了转矩的响应速度,使响应时间控制在一拍之内,能使系统的静、动态性能得到很大的提高。

采用滑模变结构控制系统是为了克服矢量控制系统在运行时参数变化对系统的影响,这种控制系统是使系统结构在动态过程中根据系统当时的偏差及其导数以跃变的方式作预先设定的改变,使系统达到最佳性能指标,并使系统具有对参数的不敏感性和抗干扰的鲁棒性,对系统的数学模型和参数的精确性要求不高。它实际上解决了非线性控制问题,但这种方法对状态观察要求很高。

对于一个较复杂的交流传动系统,在运行中参数发生变化时,采用模型参考自适应控制能够实时地在线确定系统的模型或参数,并及时调速,以达到高精度的控制目的。

为了解决系统的非线性问题,实现大范围的线性化,同时实现解耦,近年来一些学者又提出了一种非线性解耦控制,其基本思想是通过非线性坐标变换和非线性状态反馈量,使非线性控制对象完全线性化,同时实现解耦,然后将线性解耦控制的多变量系统转化成单变量系统,这样就可以按单变量系统进行综合,并可以借助经典控制理论设计最佳调节参数。这种方法是一种新的探索,在理论和实践上还有待做进一步的论证。

在高性能传动控制系统中,为了进一步解决高性能驱动系统中的非线性、参数变化、扰动和噪声等控制问题,进一步提高驱动系统的控制精度和控制性能,人们运用现代控制理论,不断寻求和采用更先进的控制方法、控制策略和控制技术。人工智能是指机器模仿人类的思维过程,人工智能控制是传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、专家系统等相结合的产物,人工智能控制理论的处理方法不再是依赖单一的数学模型,而是数学模型与知识系统相结合的广义模型,充分利用人类的经验、思维和判断能力实现对复杂系统的控制。人工智能控制的许多优点已在电力电子和电力传动领域得到了验证和应用。可以预测,未来人工智能控制将在电力电子学和传动控制领域中发挥引领时代新潮流的作用。

1.2.3 交流传动系统的控制技术

异步牵引电动机的控制方法经历了转差-电流控制、磁场定向控制和直接转矩控制 3 个发展过程。早期的转差-电流控制方法基于异步电动机的稳态数学模型,其动态性能远不能与直流调