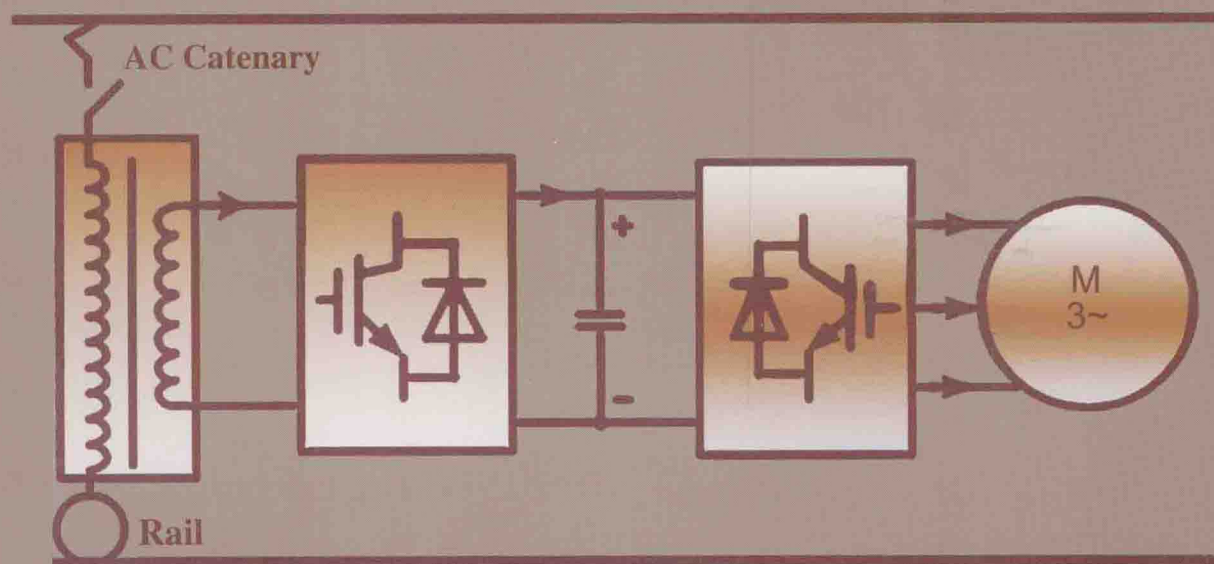


电力牵引

交流传动控制与调制技术

宋文胜 冯晓云 著

Control and Modulation Technologies of
Electric Traction AC Drives



电力牵引交流传动控制与调制技术

宋文胜 冯晓云 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先概述列车电力牵引传动系统的发展历程、拓扑结构,以及控制与调制技术现状;然后重点探讨四象限脉冲整流器的控制器设计、谐波特性及其抑制方法、载波调制算法、空间矢量调制技术;随后对牵引逆变器空间矢量调制与载波调制内在联系、全速域多模式空间矢量调制算法,以及牵引电机直接转矩控制算法、牵引逆变器-电机拍频现象及其抑制技术进行了深入研究;最后介绍电力牵引交流传动系统的半实物建模与仿真设计。

本书可供从事电力电子与电力传动、电力牵引变流技术等相关领域的高年级本科生、研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引交流传动控制与调制技术 / 宋文胜, 冯晓云著. —北京: 科学出版社, 2014.8

ISBN 978-7-03-041771-8

I. ①电… II. ①宋…②冯… III. ①电力牵引-交流传动系统②电力牵引-调制技术 IV. ①TM922

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 201799 号

责任编辑: 杨 岭 朱小刚 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 葛茂香 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年8月第一版 开本: 787*1092 1/16

2014年8月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 400千字

定价: 68.00元

序

随着国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，快速便捷、节能环保、舒适灵活、票价低廉的交通工具已成为交通运输发展的主题。近年来，以高速铁路、城轨地铁、有轨电车等为典型代表的轨道交通在我国取得了迅猛发展。其中，在高速铁路方面的成就最为卓越，在短短几年间，通过采用技术引进、消化吸收、再创新的模式，我国从无高速铁路的国家发展为高速铁路运营里程世界第一的大国，成为继日本、德国、法国之后的又一个掌握高速铁路核心技术的强国。目前，我国政府正在积极推进铁路技术出口和高速铁路“走出去”的外交战略。

自轨道交通诞生以来，列车作为铁路运输工具和载体，先后经历了蒸汽机车、内燃机车和电力机车三个发展阶段。电力传动由于具有节能环保、效率高、功率大、噪声低等特点，成为当前轨道交通列车动力驱动的主流。电力传动主要分为直流传动和交流传动两类。自20世纪70年代交流传动电力机车诞生以来，交流传动系统由于具有高功率密度、网侧高功率因数、大黏着利用率、大启动转矩等优点而逐步取代传统的直流传动系统，成为当前轨道交通列车的主要动力驱动模式。

电力牵引交流传动系统主要由受电弓、牵引变压器、单相脉冲整流器、三相牵引逆变器 and 牵引电机构成。其控制与调制技术既是电力牵引传动系统的核心，也是决定列车性能的关键。

西南交通大学宋文胜、冯晓云老师在前人研究成果的基础上，结合其团队多年来在电力牵引交流传动领域的科研与教学成果，分别从网侧脉冲整流器和电机侧牵引逆变器的控制理论与调制方法两个方面撰写了该书。该书主要包括以下内容：①网侧脉冲整流器的控制与调制、三电平中点电位平衡、谐波产生机理及其抑制；②电机侧牵引逆变器载波调制与空间矢量调制的本质、全速域多模式调制、直接转矩控制、无拍频补偿控制；③电力牵引传动系统的硬件在环半实物实时建模与仿真等。该书较为完整地涵盖了电力牵引交流传动控制与调制理论和技术，内容较为丰富，具有系统性。

鉴于该书内容上的系统性、学术上的创新性及工程上的应用性，相信该书的出版将对我国电力牵引传动领域的科学研究和工程设计工作有所裨益，能给从事该领域相关工作的高校教师、研究生和科研设计人员带来新的思路和收获。因此，我向从事电力牵引传动系统研究与设计的同行们热情推荐此书，并为之作序。



2014年6月

前 言

2004 年以来,我国高速铁路先后经历了技术引进、消化吸收和再创新的艰辛发展历程,高速铁路里程也从零跨越式增长到 1 万余公里,截至 2014 年初,运营里程数约占世界高速铁路里程的一半,居世界首位。我国高速铁路取得的辉煌成就,使高速铁路技术成为当前中国的外交名片,政府随之积极推进高速铁路技术“走出去”的外交战略。

电力牵引交流传动系统是高速列车的动力源泉和核心部件,其控制与调制技术既是决定牵引传动系统性能的关键因素,也是高速列车电力牵引交流传动领域重点消化吸收、再创新和完全自主化的核心部分。2006 年来,西南交通大学在我国高速列车技术引进、消化吸收、再创新、自主化浪潮的推动和引领下,先后在铁道部重点攻关项目、国家科技支撑计划课题(2009BAG12A05)、国家自然科学基金(51207131、51277153)等项目的资助下,重点开展了电力牵引交流传动系统控制与调制技术的理论与仿真建模工作,取得一些创新性的科研成果。作者在总结这些研究成果的基础上,分别从网侧脉冲整流器和电机侧牵引逆变器的控制理论与调制方法两个方面撰写了本书。期待能给从事电力牵引相关工作的高校教师、研究生及工程技术人员提供借鉴和参考。

本书首先概述了列车电力牵引传动系统的发展历程、拓扑结构、控制与调制技术现状;然后针对电力牵引传动系统网侧四象限脉冲整流器,重点讨论了其控制器设计和控制技术、谐波特性与抑制方法、载波调制与空间矢量调制方法,提出了多种含有中点电位平衡的单相三电平载波调制与空间矢量调制方法,揭示了各种载波调制与空间矢量调制的本质和内在联系,针对电机侧的牵引逆变器—异步牵引电机系统,重点介绍了牵引逆变器的载波调制与空间矢量调制的内在联系和统一性、牵引逆变器全速域多模式空间矢量调制、牵引电机全速域直接转矩控制,以及牵引逆变器—电机系统的拍频现象及其抑制技术;最后,介绍了电力牵引交流传动系统硬件在环半实物建模与仿真技术。

本书集理论性和应用性于一体,具有较强的创新性和前沿性,力求为当前电力牵引交流传动中的一些技术难题和前沿问题提供解决方案和理论支撑。

本书是西南交通大学列车控制与牵引传动研究室的集体成果,本研究团队的研究生参与部分内容的撰写、文字整理和修改工作,其中方辉博士在第 6 章、江才硕士在第 7 章、廖永衡博士在第 8 章、苟斌博士在第 9 章、崔恒斌博士在第 10 章做了部分初稿撰写工作;王娜、王顺亮、马俊鹏、吴瑕杰、张杰、刘卉圻、王隼龙、王志远、张靖、高儒、张文明、郑志军、邓知先、王为介等做了大量的文字整理与修改工作,作者在此对他们表示感谢!此外,第 9 章中有关单周期控制牵引逆变器—电机系统的拍频抑制研究工作是作者在美国加州大学欧文分校 Keyue Ma Smedley 教授的指导下完成的,第 10 章的硬件在环半实物建模与仿真的部分工作是与中国铁道科学研究院机车车辆所的科研人员联合完成,在此向他们表示感谢!株洲电力机车研究所的丁荣军院士慨然应允为本书作序,在此向丁院士深表感谢!年迈八旬的沈本荫教授审阅了全书,并给予许多很好的建议,

在此向老先生深表感谢和敬意！在本书的选题和撰写过程中，西南交通大学葛兴来副教授、熊成林助理研究员，以及中国铁道科学研究院机车车辆所、南车株洲电力机车研究所、北车永济新时速电机公司等单位科研人员给予作者很大的关心、支持与帮助，在此向他们致以衷心的感谢！

由于本书涉及的理论和技术仍在不断发展且具有一定的前沿性，限于作者的水平，书中难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者

2014.03

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力牵引交流传动机车的发展历史	1
1.2 电力牵引交流传动系统的类型与拓扑结构	2
1.3 电力牵引交流传动系统控制与调制技术的现状	5
1.3.1 控制目标	5
1.3.2 网侧脉冲整流器控制技术	6
1.3.3 牵引逆变器—电机控制技术	7
1.3.4 脉宽调制技术	10
参考文献	12
第 2 章 四象限脉冲整流器的控制算法	20
2.1 概述	20
2.2 四象限脉冲整流器工作原理与数学模型	20
2.2.1 两电平脉冲整流器工作原理与数学模型	20
2.2.2 三电平脉冲整流器工作原理与数学模型	22
2.3 四象限脉冲整流器双闭环控制系统设计	24
2.3.1 电流内环控制器设计	25
2.3.2 电压外环控制器设计	29
2.4 四象限脉冲整流器的直接电流控制技术	30
2.4.1 直接电流控制概述	30
2.4.2 瞬态直接电流控制技术	30
2.4.3 预测直接电流控制技术	31
2.4.4 基于 $d-q$ 坐标系的有功与无功电流控制技术	32
2.5 四象限脉冲整流器的直接功率控制技术	37
2.5.1 直接功率控制概述	38
2.5.2 传统直接功率控制技术	38
2.5.3 功率前馈解耦控制技术	40
2.5.4 功率预测控制技术	42
2.5.5 计算机仿真与半实物仿真研究	44
参考文献	48
第 3 章 四象限脉冲整流器的谐波特性及其抑制方法	50
3.1 概述	50
3.2 网侧电流低次谐波产生机理及其抑制方法	50
3.2.1 网侧电流低次谐波产生机理及其分布规律	50

3.2.2	网侧电流低次谐波抑制方法	53
3.2.3	计算机仿真验证	63
3.3	网侧电流高次谐波产生机理及其抑制方法	68
3.3.1	两电平脉冲整流器网侧电流高次谐波产生机理及其分布规律	69
3.3.2	三电平脉冲整流器网侧电流高次谐波产生机理及其分布规律	74
3.3.3	网侧电流高次谐波抑制方法	76
3.3.4	计算机仿真验证	79
3.4	直流侧电压谐波产生机理及其抑制方法	82
3.4.1	直流侧电压谐波产生机理及其抑制方法	82
3.4.2	计算机仿真验证	84
	参考文献	88
第4章	四象限脉冲整流器的载波调制算法	89
4.1	概述	89
4.2	单相两电平单极性载波调制算法	89
4.2.1	单相两电平单倍频载波调制算法	89
4.2.2	单相两电平两倍频载波调制算法	91
4.3	单相三电平单极性载波调制算法	92
4.3.1	单相三电平单倍频载波调制算法	92
4.3.2	单相三电平两倍频载波调制算法 ^[2]	93
4.3.3	单相三电平整流器直流侧中点电位特性分析	93
4.4	基于电压补偿分量注入的单相三电平两倍频载波调制算法	95
4.4.1	单相三电平单极性 DF-CBPWM-OVI 算法	95
4.4.2	单相三电平单极性 DF-CBPWM-MOVI 算法	99
4.4.3	两种算法特性的对比分析	101
4.4.4	计算机仿真与实验研究	102
4.5	基于电压补偿分量注入的单相三电平单倍频载波调制算法	106
4.5.1	单相三电平单极性 SF-CBPWM-OVI 算法	106
4.5.2	单相三电平单极性 SF-CBPWM-MOVI 算法	111
4.5.3	两种算法特性的对比分析	112
4.5.4	计算机仿真与实验研究	114
	参考文献	119
第5章	四象限脉冲整流器的空间矢量调制技术	120
5.1	概述	120
5.2	单相空间矢量调制技术的思想	120
5.2.1	两电平 SVPWM 技术的思想	120
5.2.2	三电平 SVPWM 技术的思想	122
5.3	单相两电平空间矢量调制技术	123
5.3.1	两电平 SVPWM 的基本原理与设计	123

5.3.2	两电平 SVPWM 算法的特性与 CBPWM 算法的内在联系	126
5.4	单相三电平空间矢量调制技术 SVPWM-I	127
5.4.1	三电平 SVPWM-I 的基本原理与设计	127
5.4.2	三电平 SVPWM-I 的电平跳变幅值限制补偿	131
5.4.3	三电平 SVPWM-I 的特性及其与 CBPWM 的内在联系	131
5.4.4	计算机仿真与实验研究	132
5.5	单相三电平空间矢量调制技术 SVPWM-II	134
5.5.1	三电平 SVPWM-II 的基本原理与设计	134
5.5.2	三电平 SVPWM-II 的电平跳变幅值限制补偿	141
5.5.3	三电平 SVPWM-II 的特性及其与 CBPWM 的内在联系	142
5.5.4	计算机仿真与实验研究	145
5.6	单相三电平空间矢量调制技术 SVPWM-III	150
5.6.1	三电平 SVPWM-III 的基本原理与设计	150
5.6.2	三电平 SVPWM-III 算法的电平跳变幅值限制补偿	154
5.6.3	三电平 SVPWM-III 的特性及其与 CBPWM 的内在联系	155
5.6.4	计算机仿真与实验研究	157
	参考文献	159
第 6 章	牵引逆变器 SVPWM 与 CBPWM 的内在联系	161
6.1	概述	161
6.2	线性调制区内两电平 SVPWM 与 CBPWM 的内在联系	161
6.2.1	基波调制信号与空间矢量扇区之间的关系	161
6.2.2	调制信号与空间矢量之间的关系	162
6.2.3	基波调制信号与空间矢量之间的关系	163
6.2.4	零序信号与零矢量分布的关系	164
6.3	过调制区内两电平 SVPWM 与 CBPWM 的内在联系	167
6.3.1	SVPWM 过调制分段原理	167
6.3.2	过调制 I 段原理	168
6.3.3	过调制 II 段原理	169
6.3.4	过调制区内与 SVPWM 等效的 CBPWM 调制函数	169
6.4	线性调制区内三电平 SVPWM 与 CBPWM 的内在联系	174
6.5	过调制区内三电平 SVPWM 与 CBPWM 的内在联系	177
	参考文献	179
第 7 章	牵引逆变器全速域多模式空间矢量调制算法	181
7.1	概述	181
7.2	磁场定向控制基本思想	182
7.2.1	异步电机的数学模型	182
7.2.2	间接磁场定向控制	184
7.3	两电平空间矢量调制技术	185

7.4	分段同步调制技术	187
7.4.1	分段同步调制的基本原理	187
7.4.2	分段同步调制的定子磁链轨迹设计	188
7.4.3	计算机仿真	193
7.5	基于定子磁链轨迹的分段同步调制技术	195
7.5.1	基于定子磁链轨迹的调制技术	196
7.5.2	定子磁链轨迹分段同步调制下最小转矩脉动的零矢量设计	201
7.5.3	多模式 PWM 切换点算法设计	204
7.5.4	计算机仿真	206
	参考文献	207
第 8 章	牵引电机直接转矩控制算法	209
8.1	概述	209
8.2	低速启动时的圆形磁链轨迹直接转矩控制算法	209
8.2.1	基于查表法的传统直接转矩控制	209
8.2.2	间接定子量控制 ISC	211
8.3	高速区直接转矩控制算法	214
8.3.1	高速六边形直接转矩控制算法	215
8.3.2	十八边形直接转矩控制算法	217
8.4	直接转矩控制算法中的定子磁链观测模型	222
8.4.1	电压-电流和电流-转速模型	222
8.4.2	电压-转速模型	224
8.4.3	全阶观测器模型	225
	参考文献	228
第 9 章	牵引逆变器-电机拍频现象及其抑制技术	230
9.1	概述	230
9.2	拍频现象	230
9.2.1	牵引逆变器相电压谐波特性	230
9.2.2	牵引电机定子电流谐波特性	231
9.3	牵引逆变器-电机无拍频数字控制技术	233
9.3.1	基于电压幅值补偿的无拍频控制技术	233
9.3.2	基于电压频率补偿的无拍频控制技术	236
9.4	牵引逆变器-电机无拍频数字控制技术仿真	238
9.4.1	基于电压幅值补偿的无拍频控制技术仿真	238
9.4.2	基于电压频率补偿的无拍频控制技术仿真	240
9.5	牵引逆变器-电机无拍频模拟控制技术	243
9.5.1	传统单周期控制算法的基本原理	243
9.5.2	改进的单周期控制算法的基本原理	247
9.5.3	基于 DTC+OCC 的多脉冲区无拍频模拟控制技术	249

9.5.4 基于 OCC 的单脉冲区无拍频模拟控制技术	255
参考文献	262
第 10 章 电力牵引交流传动系统半实物仿真设计	264
10.1 概述	264
10.2 实时仿真平台介绍	264
10.2.1 dSPACE 仿真平台介绍	264
10.2.2 RT-LAB 仿真平台介绍	266
10.2.3 实时仿真器优势与应用	266
10.3 电力牵引交流传动系统半实物仿真系统设计	268
10.3.1 半实物仿真系统设计思路	268
10.3.2 电力牵引交流传动半实物仿真(HILS)系统框架设计	269
10.4 电力牵引交流传动系统建模	271
10.4.1 符号	272
10.4.2 牵引变压器	272
10.4.3 脉冲整流器	273
10.4.4 中间直流回路	274
10.4.5 牵引逆变器	275
10.4.6 牵引电机	275
10.5 补偿算法在模型中的应用	276
10.6 电力牵引交流传动系统半实物仿真结果分析	279
10.6.1 牵引特性测试结果	279
10.6.2 牵引工况测试结果	279
10.6.3 制动工况测试结果	280
参考文献	281

第 1 章 绪 论

1.1 电力牵引交流传动机车的发展历史

自 1825 年英国修建了世界第一条铁路以来,由于运输速度和运输能力上的优点,铁路在很长的历史时期内成为各国的交通运输骨干。从 20 世纪 50 年代开始,公路和航空运输的迅速发展,使铁路在速度上居于劣势,长途客运受航空运输排挤,短途客运被汽车运输取代,铁路进入成为“夕阳产业”的被动局面。然而从 20 世纪 70 年代以后,由于能源危机、环境恶化、交通安全等问题的困扰,人们重新认识到铁路的价值。特别是高速铁路以其速度快、运能大、能耗低、污染轻等一系列的技术优势,适应了现代社会经济发展的新需求。1964 年 10 月,日本东海道新干线东京至大阪高速铁路以 210km/h 的速度运行;1981 年,法国修建第一条高速铁路(TGV 东南线),高速铁路显示出旺盛的生命力。由于它具有明显的经济效益和社会效益,所以欧洲、北美洲和亚洲等地区纷纷兴建、改建或规划修建高速铁路。据国际铁路联盟(UIC)的统计,截至 2010 年 5 月,全世界运营中的高速铁路营业里程总长达 13414km,这些线路分布在 14 个国家和地区。可以说,发展高速铁路已是当今世界铁路发展的共同趋势,且世界铁路已步入全盛发展时期。

作为铁路运载工具的牵引动力机车先后经历了蒸汽机车、内燃机车、电力机车三个发展阶段。电力机车和电动车组的主传动控制系统被称为电力牵引传动及其控制系统。电力牵引传动系统主要分为直流传动系统和交流传动系统两大类。直流传动是指采用直流电机驱动的传动系统;交流传动是指采用交流电机驱动的传动系统^[1-4]。

1879 年德国西门子公司研制了世界上第一台电力机车,并于当年在柏林工业产品展览会上引起了很大的轰动,该电力机车采用直流传动的驱动结构;1881 年,世界首台城市有轨电车在德国柏林投入运营,该车也是采用直流传动牵引方式;1891 年德国西门子公司试验了由三相交流直接供电、绕线式转子异步电动机牵引的机车,该车的诞生标志着交流传动技术在铁路领域的首次成功应用;1903 年,西门子公司将铁路电厂发出的电能经 3 极接触网向车辆供给频率可变的三相交流电,创造了 210km/h 以上的高速纪录。由于三相交流供电制的接触网建造和维护费用高,且交流电机调速主要采用变阻、变极和级联调速方式,无法获得理想的牵引特性。为此人们做了很多新的改进尝试,但都未取得成功。例如,1917 年,为了简化接触网结构,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、能量转换效率低等因素而未能取得成功和应用。随后,电力牵引交流传动技术的发展一直处于迟滞状态,直至 1955 年,水银整流器机车的问世和实用化,结束了电力牵引交流传动技术的早期发展阶段。

由于交流传动系统具有优异的运行性能和良好的可靠性、可用性、可维护性,因此在实现铁路高速和重载运输方面具有无可比拟的优越性。从 20 世纪 70 年代开始,随着电力电子和微电子技术的发展,电力牵引交流传动技术得到人们的重新认识和关注,1971 年,第一台交流传动内燃机车 DE2500 在德国莱茵河畔诞生,证实了三相交流机车具有牵引力大、黏着利用好、制动性能优越以及维修量小等优点,从而掀起了研制交流传动机车的热潮。1979 年,第一台大功率交流传动电力机车 E120 在联邦德国诞生,历经三年的试验、改进和运用考核,1982 年,E120 型电力机车开始投入批量应用,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,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。在 20 世纪 80 年代交流传动系统逐步发展成熟;90 年代先进控制理论和新材料、新工艺的应用,使得电传动系统的品质不断提高,机车车辆普遍采用交流传动技术实现了电力牵引领域的技术飞跃。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、中国等国家的铁路线上运行,其制造厂家有德国西门子子公司,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、川崎重工,中国南车集团和北车集团等大型企业。从 20 世纪 90 年代开始,铁路发达的国家已停止生产交直传动的电力机车和直传动的内燃机车,全部采用交流传动控制技术^[5]。

国内交流电传动的研究起步于 20 世纪 70 年代;80 年代完成了中等功率交流电传动系统的试验研究;90 年代初研制了 1MW 大功率变流系统并促进原型机车的研制;90 年代中期相继启动高性能交流传动控制技术、大功率 GTO 牵引变流器工程化、中大功率 IGBT 牵引变流器、大功率异步牵引电机等一系列核心技术的攻关工程,取得了丰硕成果,并于 21 世纪初相继应用于“中华之星”高速电力机车、“中原之星”城间动车组等^[6-8]。

为加快实现我国铁路机车车辆现代化的步伐,原铁道部遵照 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,先后引进时速在 200km 及以上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,我国高速动车组主要有 CRH1^[9]、CRH2^[10,11]、CRH3^[12]和 CRH5^[13]四种类型,其中 CRH2-300 和 CRH3 动车组的持续运行速度为 300~380km/h,以这 4 种原型车为基础和平台,我国科技工作者开展了一系列核心技术的自主化和国产化,研制了具有自主知识产权的 CRH380 系列中国高速动车组,这些动车组已在我国京沪、武广、郑西、沪宁等高铁客运专线投入运营。我国大功率交流传动电力机车主要有 HXD1^[14]、HXD2^[15]和 HXD3^[16]三种类型,这三种车型担负着我国铁路货运和普通客运列车的牵引运输工作。因此,电力牵引交流传动机车和动车组在我国铁路运输中担负着至关重要的牵引作用,是我国电气化铁路的主力车型。

1.2 电力牵引交流传动系统的类型与拓扑结构

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、牵引

电机和齿轮传动箱组成，其中牵引变流器由预充电单元、四象限脉冲整流器、中间直流侧回路、牵引逆变器组成^[1-4]。图 1-1 所示为电力牵引交流传动系统的结构框图。

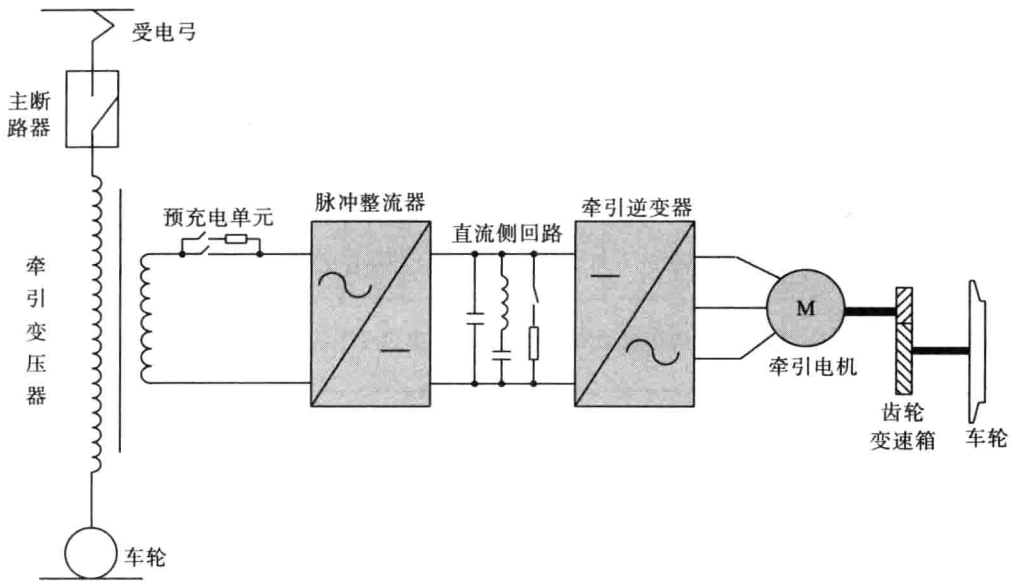


图 1-1 电力牵引交流传动系统的结构框图

在电力牵引交流传动系统中，电力牵引变流器的拓扑结构主要有两电平和三电平模式，世界各国的交流传动电力机车和动车组的牵引变流器大部分为两电平拓扑结构，在我国也是如此，我国 CRH1、CRH3 和 CRH5 型高速动车组，以及 HXD1、HXD2 和 HXD3 系列大功率机车都采用两电平拓扑结构的牵引变流器。图 1-2 所示为 CRH1 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构；图 1-3 所示为 CRH3 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构；图 1-4 所示为 CRH5 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构。由于铁路单相供电的特殊性，四象限脉冲整流器为单相全桥脉冲整流器。为了提高牵引传动系统的输出功率，CRH1、CRH3 和 CRH5 型动车组中的脉冲整流器单元采用了两重化级联模式，中间直流侧回路由支撑电容 C_d 和二次谐波滤波电路 L_2C_2 组成。由图 1-2 至图 1-4 可知，CRH1 和 CRH5 型动车组的牵引传动系统拓扑结构基本类似，仅其牵引逆变器所驱动电机数不同，且 CRH5 型动车组的牵引变流器直流侧没有 L_2C_2 谐波滤波电路；而 CRH3 型动车组中则采用 1 台牵引逆变器驱动 4 台牵引异步电机。

自 1981 年日本长冈技术科技大学的 Nabae A 等提出了三电平二极管钳位(NPC)变流器拓扑结构^[17]以来，该三电平及其多电平 NPC 结构的变流器在中高功率场合的电机驱动、有源滤波器(APF)、静止无功补偿器(STATCOM)和风能发电并网变流器中得到广泛应用^[18-26]。与两电平结构变流器相比，三电平 NPC 结构的变流器具有开关器件所承受的电压应力低、输出电压谐波小和电磁干扰小等特点，但是三电平及多电平结构的变流器存在拓扑结构复杂和直流侧中点电位不平衡的缺点^[18]。

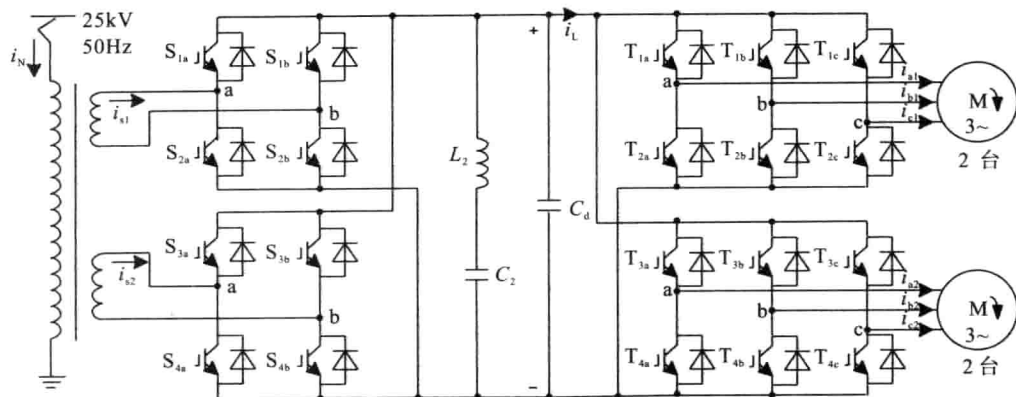


图 1-2 CRH1 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构

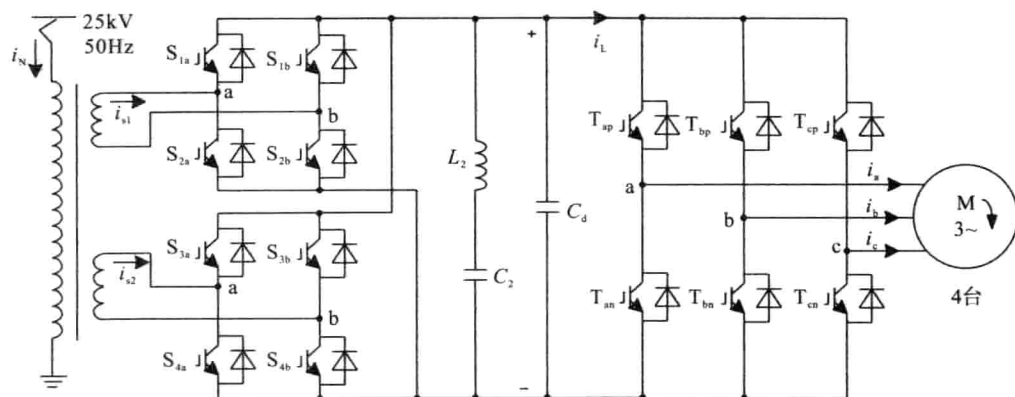


图 1-3 CRH3 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构

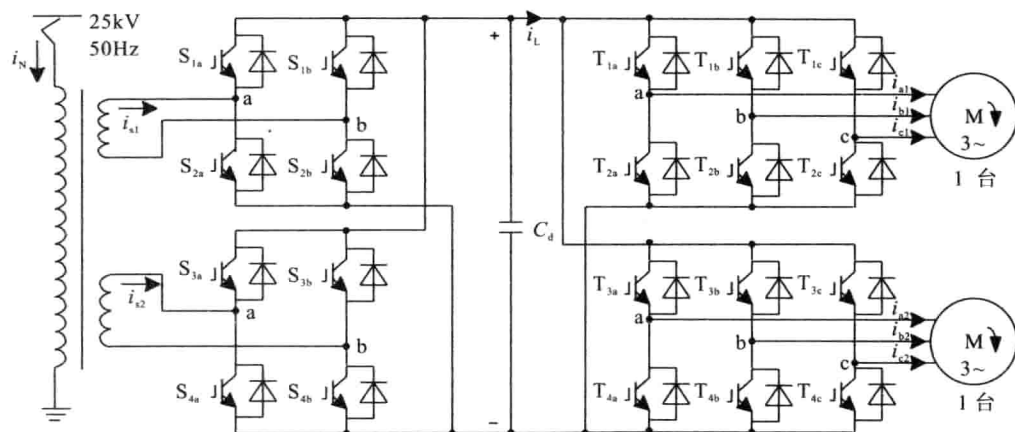


图 1-4 CRH5 型动车组动力单元的两电平电力牵引传动系统拓扑结构

在铁路电力牵引交流传动的应用中，基于 GTO 模块的三电平 NPC 结构牵引变流器于 1992 年在奥地利铁路的 1822 型双重电压型机车和瑞士联邦铁路的 460 型机车中得到应用^[27]。三年后，日本日立公司研制了 721 型电动车组，其牵引变流器采用了基于 IGBT 模块的三电平 NPC 结构变流器，该 721 型电动车组于 1995 年 10 月在日本函馆至千

岁铁路线正式投入运营^[27,28]。在我国 CRH 系列高速动车组中,中国南车集团青岛四方车辆有限公司生产的 CRH2 型动车组的电力牵引变流器就是采用三电平 NPC 型拓扑结构^[10]。图 1-5 所示为 CRH2 型动车组动力单元的三电平电力牵引传动系统拓扑结构图。与图 1-2 至图 1-4 中两电平结构的变流器相比,由于三电平结构的变流器的直流侧支撑电容 C_1 和 C_2 的容量都较大,所以直流侧取消了二次谐振滤波电路。

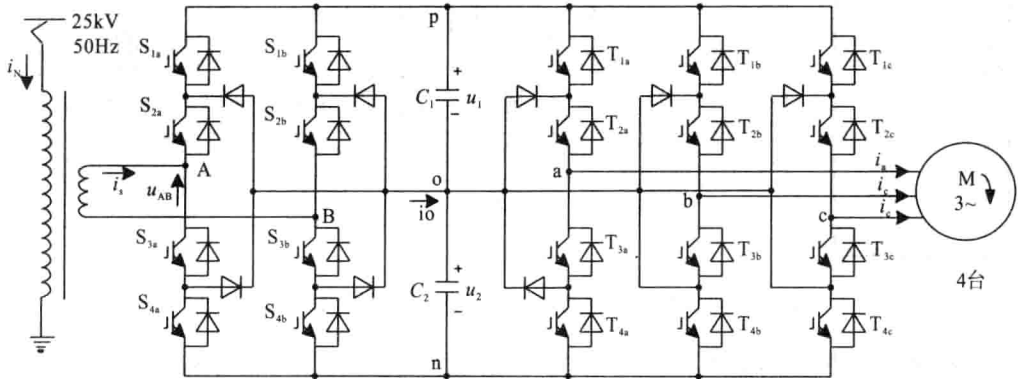


图 1-5 CRH2 型动车组动力单元的三电平电力牵引传动系统拓扑结构

1.3 电力牵引交流传动系统控制与调制技术的现状

1.3.1 控制目标

动车组在高速运行时对安全性和可靠性的要求越来越高,在电力牵引交流传动的系列核心技术中,最重要的一项是牵引传动系统的控制技术,该技术主要包括基于电力电子开关器件的 PWM 技术和基于先进控制理论的变流器-电机系统控制技术。

电力机车或高速动车组作为牵引供电系统的移动式负荷和谐波源,其负荷特性不仅与列车位置和牵引网压有关,而且与牵引传动系统拓扑结构和控制策略密切相关^[29-30]。图 1-6 所示为简化的牵引供电网与列车电力牵引传动系统结构图。

在电力牵引交流传动系统中,脉冲整流器的输入侧与牵引供电网通过牵引变压器相互耦合,对牵引供电网而言,则希望列车这个移动式负荷具有网侧单位功率因数,且电流谐波含量小等特点;脉冲整流器输出侧为牵引变流器直流中间回路,其要为牵引逆变器提供稳定的直流侧电压,则需要脉冲整流器能输出稳定的直流侧电压。因此,网侧脉冲整流器的控制目标可以总结为两个:第一,网侧单位功率因数,电流谐波含量低;第二,直流侧电压稳定且纹波含量小^[31]。

电机侧牵引逆变器系统的输入端为直流侧中间回路,因此需降低其对直流侧纹波的影响,并且在直流侧电压波动的情况下,牵引逆变器-电机系统要能够稳定安全运行。电机轴端与机械齿轮传动箱连接,因此要求牵引逆变器-电机能够输出满足列车牵引特性的转矩,并且转矩波动小,电机定子电流谐波小,以降低电机的发热损耗。这也是牵

引逆变器—电机的控制目标^[32]。

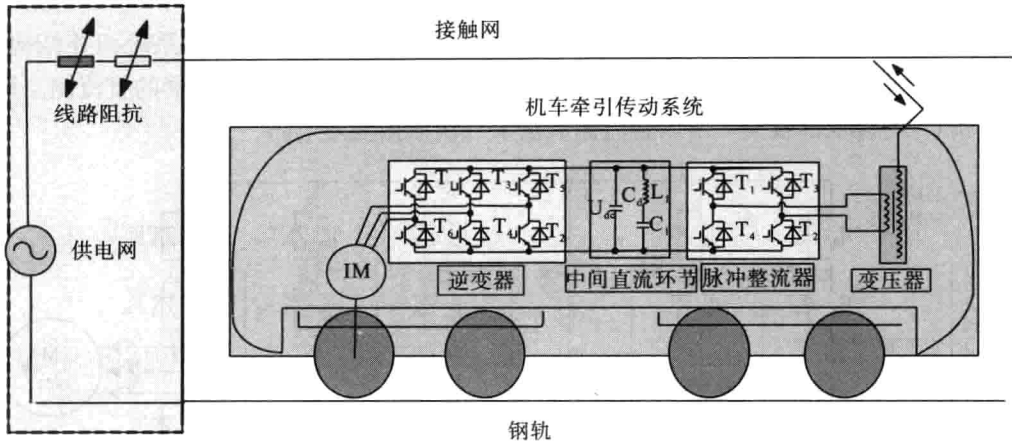


图 1-6 简化的牵引供电网与列车电力牵引传动系统结构图

尽管网侧脉冲整流器的应用可以减轻对电网的污染，以及对信号和通信系统的干扰，但由于交流传动控制方式的特殊性，会有一些新的问题产生。例如，网侧产生的谐波对牵引供电回路、轨道电路、通信信号以及机车主电路的重要部件(主变压器等)均将产生较大的影响；为了实现动车组高速化，可以从牵引传动的角度取消直流侧二次谐振 LC 滤波电路来实现动车组轻量化，当中间直流环节无二次滤波 LC 谐振电路时，直流侧会出现 2 倍电网频率的纹波，该波动会对电机侧产生谐波和转矩脉动。电机侧电流产生的谐波会引起牵引电机的温升、损耗及转矩的脉动，这种现象叫做拍频现象^[33]。因此，针对电力牵引变流器的拓扑结构和特点，要解决诸如上述的问题，研究网侧脉冲整流器和电机侧牵引逆变器的控制与调制策略是铁路工作者的重大课题。

针对电力牵引交流传动系统，下面将重点从其网侧脉冲整流器控制技术、牵引逆变器—电机控制技术、PWM 与中点电位控制技术三个方面介绍其国内外研究现状。

1.3.2 网侧脉冲整流器控制技术

对于单相供电的牵引变流器来说，网侧脉冲整流器是整个牵引系统中的一个重要组成部分，它对牵引供电网的功率因数和网侧电流的谐波含量有着决定性影响。脉冲整流器可以保持牵引供电网功率因数接近 1，并使网侧电流接近正弦波，提高了牵引供电网的经济效益，减少了其对环境的电磁干扰。同时，脉冲整流器具有良好的稳压效果，当负载和网压发生变化时，能够维持中间直流电压的恒定，还可以方便地实现牵引和再生工况的转换^[34-43]。脉冲整流器的控制策略可以分为间接电流控制(亦称幅值相位控制)^[31,34]、瞬态电流控制^[35-38]、预测电流控制^[39-42]、 $d-q$ 旋转坐标系电流解耦控制^[43-45]、滞环电流控制^[46]、开关逻辑控制^[47-50]、直接功率控制^[51,52]等方法。这些控制策略中，除幅值相位控制方法外，其他的控制策略都是基于双闭环控制原理，且以直流侧电压控制器为外环，电流控制器或功率控制器为内环的双闭环控制器。而在电力牵引交流传动系