



黄济荣 编著

# 电力牵引 交流传动 与控制

电气自动化  
新技术  
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

# 电力牵引交流传动与控制

黄济荣 编著



机械工业出版社

铁路是国民经济大动脉。随着电力电子技术的发展,交流传动的电力机车、内燃机车、高速列车和城市运输车辆得到了迅速发展,表明交流传动异步牵引技术已趋成熟。

本书在介绍电力牵引交流传动的基础上,介绍了包括四象限脉冲整流器和 PWM 逆变器的交-直-交变频器的工作原理、电路结构与控制,包括 GTO 晶闸管的大功率变频器的应用技术、电力牵引交流传动控制系统、列车通信网和电机控制策略(包括转差控制、磁场定向控制和直接转矩自控制)。对粘着控制技术、大功率异步牵引电动机的一些设计和结构问题、电磁兼容性要求等也做了一些介绍。

本书可供从事电力牵引技术和电力电子应用技术的科技人员和大专院校有关专业的师生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力牵引交流传动与控制/黄济荣编著. —北京:机械工业出版社, 1998.9

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-06300-7

I. 电… II. 黄… III. ①电力牵引-控制②电力牵引-交流电传动 IV. TM922

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16656 号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 张世琴 责任校对: 林去菲

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 5 月第 1 版第 2 次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·11.25 印张·290 千字

3 501—5 500 册

定价: 23.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

# 《电气自动化新技术丛书》

## 序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，

难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

# 《电气自动化新技术丛书》

## 编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德钤 李永东

委 员：(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德钤	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 洁	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

## 《电气自动化新技术丛书》

### 出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

中国电工技术学会

# 前 言

基于半导体技术的电力电子学的迅速发展，使科技界和工业界重新把电气传动和工业自动化领域的聚焦点从直流传动转向交流传动。进入 20 世纪 70 年代，由于德国 BBC（曼海姆）公司研制的 DE-2500 交流传动内燃机车和 E120 交流传动电力机车在莱茵河畔异乎寻常的成功，使世界铁路运输装备制造制造业和运营部门着手掀起新一轮的技术创新和产业革命。沉寂多时的三相交流传动技术、特别是异步牵引重新焕发出活力。迄今，先是欧洲、继而北美和亚洲，交流传动机车和高速列车组正在迅速取代原有的相控机车和交流换向器电动机驱动的机车。

电力电子技术的发展成就为交流牵引传动提供了必不可少的物质基础，与此同时，铁路装备的交流传动化又为电力半导体和微电子控制装置的推广应用提供了新的广阔的领域和进一步发展的动力，有力地推动了工业电气传动和自动化技术的变革。

数以千台计的交流传动电力机车、内燃机车、高速列车、城市运输车辆在不同环境和应用条件下的成功运行，表明交流传动异步牵引技术的成熟。本书试图汇聚当代交流传动电力机车和电动车组的最新技术发展成就，介绍交流异步牵引传动技术的发展概貌。作为交流传动电力机车和电动车组核心的交-直-交变流器、交流异步电动机、传动的开环与闭环控制，不仅适应于其它铁路装备和城市运输车辆，对一般工业传动应用领域，也是适用的。四象限脉冲整流器是电力机车和电动车组一类由接触网供电的运输装备的专用变流器，但对广泛追求节能目标的工业用户来说，这也是十分有用的。轮轨关系与粘着控制是铁路运输的特殊问题。

本书第 1 章简述电力牵引传动技术的发展和效益，介绍了当



代交流传动电力机车的最新情况；第2章以异步电机的自然和变频变压调节特性为基础，阐述了电力牵引交流传动的基础；第3章和第4章着重介绍了交-直-交变流器，包括四象限脉冲整流器和PWM逆变器的工作原理、电路结构与开环控制；第5章重点介绍当今在电力机车和电动车组上主要使用的大功率变流器，比较详细地介绍了包括GTO晶闸管在内的应用技术；第6章叙述电力牵引交流传动控制系统、列车通信网络和电动机控制策略，这里仅涉及在机车车辆上广泛采用的转差控制、磁场定向控制和直接转矩自控制。也介绍了粘着控制技术的最新进展；第7章讨论大功率异步牵引电动机的一些设计和结构问题；第8章对当今电力电子学发展的新的、日益变得重要的电磁兼容性要求，作了一些基本介绍。

本书的主要读者对象是从事该领域的教学和研究工作的有关人员。

在本书编写过程中，承蒙上海大学陈伯时教授、上海铁道大学邵丙衡教授、天津电气传动设计研究所喻士林总工程师和铁道部株洲电力机车研究所、机械工业出版社的同志们给予了大力支持和帮助，在初稿交付之前，铁道部科学研究院机车车辆研究所吴茂杉研究员初步审阅了全书，提出了许多宝贵的意见，特此致谢，并感谢株洲电力机车研究所李益丰高级工程师提供了宝贵材料，以及孙强工程师为整理书稿付出了辛勤劳动。

由于时间紧迫，更限于作者水平，书中谬误和不妥之处，真诚希望读者和专家给予批评指正。

作者

1998年2月于株洲

# 目 录

## 《电气自动化新技术丛书》序言

### 前 言

第 1 章 概述 .....	1
1.1 电力牵引交流传动技术发展的由来与时代特点 .....	1
1.2 电力牵引交流传动技术的社会效益 .....	5
1.3 交流传动技术开创了铁路运输的新局面 .....	8
第 2 章 电力牵引交流传动基础 .....	17
2.1 电气化系统问题——电流制与电力机车 .....	17
2.2 电力牵引交流传动系统的结构及类型 .....	19
2.3 三相异步交流传动 .....	28
2.3.1 三相交流异步电动机 .....	28
2.3.2 三相交流异步电动机的数学模型 .....	29
2.3.3 异步电动机的自然特性（稳态转矩-转速特性） .....	35
2.3.4 异步电动机的调节特性 .....	40
2.3.5 电力牵引交流传动系统的硬件配置 .....	47
第 3 章 交-直-交变流器与逆变器 .....	50
3.1 采用电压型交-直-交变流器的电力机车主电路 .....	50
3.1.1 二点式电路与三点式电路 .....	50
3.1.2 单流制电力机车和电动车组的主电路 .....	54
3.1.3 多流制电力机车和电动车组的主电路 .....	57
3.2 直-交变流器（逆变器）的电路 .....	60
3.2.1 逆变器的顺序关断与独立关断——换相原理 .....	60
3.2.2 独立关断的逆变器电路（电压源逆变器） .....	62
3.2.3 顺序关断的逆变器电路（电流源逆变器） .....	63
3.3 直-交变流器（逆变器）的控制 .....	67
3.3.1 方波逆变器 .....	67
3.3.2 脉宽调制（PWM）电压源逆变器控制 .....	71

3.3.3	脉宽调制电流源逆变器 .....	101
3.4	基于微处理器的 PWM 控制器 .....	106
3.4.1	微处理器 PWM 控制器的功能要求 .....	106
3.4.2	基于微处理器的 SPWM 控制 .....	109
3.4.3	基于微处理器的磁场轨迹跟踪 PWM 控制 .....	119
第 4 章	交-直变流器 .....	122
4.1	入端变流器概述 .....	122
4.1.1	自然换相的可控整流器 .....	123
4.1.2	强迫换相的可控整流器 .....	125
4.2	电压型四象限脉冲整流器 .....	127
4.2.1	电压型脉冲整流器基本原理 .....	128
4.2.2	电压型四象限脉冲整流器主电路 .....	131
4.2.3	储能器的功能与参数 .....	137
4.2.4	电压型四象限脉冲整流器的控制 .....	140
4.3	电流型四象限脉冲整流器 .....	150
第 5 章	电力电子变流器的设计 .....	157
5.1	半导体逆变器的基本原理 .....	157
5.2	逆变器的“开关”器件——电力电子器件 .....	158
5.2.1	电力电子器件的基本结构与机理 .....	159
5.2.2	半导体开关器件的导通与关断性能 .....	164
5.3	电力电子器件的应用技术之一——吸收电路 .....	167
5.3.1	晶闸管的吸收电路 .....	168
5.3.2	GTO 晶闸管的吸收电路 .....	172
5.3.3	IGBT 的吸收电路 .....	186
5.4	电力电子器件的门极（或栅极）驱动装置 .....	191
5.4.1	GTO 晶闸管的门极驱动装置 .....	192
5.4.2	IGBT 的栅极驱动装置 .....	198
5.5	牵引变流器机组 .....	200
第 6 章	电力牵引交流传动的控制 .....	207
6.1	电力牵引控制系统的分级管理与功能配置 .....	207
6.1.1	电力牵引电子控制系统的分级管理模式 .....	207
6.1.2	电力牵引电子控制装置的功能组与模块化设计 .....	211
6.2	列车通信网络和信息交换技术 .....	216

6.2.1	列车信息系统 .....	216
6.2.2	列车通信网络体系结构 .....	219
6.2.3	列车通信网络的信息交换技术 .....	226
6.3	电动机的控制策略 .....	229
6.3.1	转差频率控制 .....	231
6.3.2	磁场定向控制 .....	238
6.3.3	直接转矩自控制 .....	262
6.4	粘着控制 .....	284
6.4.1	轮/轨接触与蠕滑率 .....	284
6.4.2	粘着特性 .....	285
6.4.3	粘着控制 .....	287
第7章	异步牵引电动机 .....	300
7.1	牵引电动机的运行条件与设计考虑 .....	300
7.1.1	高次谐波 .....	300
7.1.2	并联运行 .....	302
7.1.3	轮径偏差 .....	303
7.2	变流器—电动机的系统优化 .....	304
7.2.1	变流器和电动机的容量 .....	304
7.2.2	变流器与电动机容量的匹配 .....	305
7.3	异步牵引电动机的设计 .....	307
7.3.1	异步牵引电动机设计的依据和流程 .....	308
7.3.2	异步牵引电动机主要参数的选择 .....	312
7.3.3	计算方法的优化 .....	315
7.4	异步牵引电动机结构设计要点 .....	317
第8章	牵引传动与电磁兼容 .....	320
8.1	电磁兼容的基本概念 .....	321
8.2	电磁干扰量及其传播途径 .....	322
8.3	电气化铁路的电磁干扰问题 .....	326
8.4	电力电子牵引系统的干扰 .....	329
8.5	改善电磁兼容的措施 .....	331
8.6	验证电磁兼容的试验 .....	334
参考文献	.....	337

# 第 1 章 概 述

## 1.1 电力牵引交流传动技术发展的由来与时代特点

自 1879 年世界上出现第一条电气化铁路以来的 100 余年时间内，人们不懈地作出努力，试图制造出具有实用价值的交流传动电力机车。但是由于科学技术发展水平和物质基础的制约，在相当长的时间内，人们的努力并没有取得预期的效果。半导体的出现和发展，使情况有了巨大的转机，曾一度沉寂下来的交流传动牵引领域再度辉煌，成为推动当代高新技术发展的新的舞台。我们将以此为界，分两个阶段来表述电力牵引交流传动技术的出现与演变。

### 1. 早期发展阶段（19 世纪 90 年代至 20 世纪 50 年代初）

1879 年出现的世界第一台电力机车，好像今天儿童乐园的电动玩具，司机是骑在车顶上驾驶的。但在它的拖车上，确实坐了 10 名乘客。1881 年世界上出现的第一台城市电车，已经很像样了。这些车都是直流供电的。对于干线铁路来说，直流供电还有重大的技术问题未获解决，所以对于第一条电气化铁路，人们选择的是交流传动电力机车。

最早的方案是选择三相交流电源直接供电的绕线转子异步牵引电动机系统。如 1891/1892 年德国西门子公司制造的试验车，就是通过两条架空线和一条轨道提供 550V 的三相交流电。1898 年西门子公司进一步在一台两轴车上安装了变压器，并由三根架空线提供 10kV、50Hz 的三相交流电。绕线转子异步电动机（本书中未特别说明的异步电动机均指感应电动机）的转子串接电阻，通过变阻器实现转差调节。为此，当时意大利的交流传动电力机车上采用了水电阻。为了改善调速性能，电动机上装有可变

极绕组，并采用了每两台电动机级联的电路。这样，总算得到了虽然很少、但已足可应付的持续运行的级数了。德国和意大利先后修建了一些三相交流制的电气化铁路区段。1903年在德国试验线上交流传动车辆的最大时速达到210km/h。特别是意大利，在其北部1500km的线路上采用3kV、 $16\frac{2}{3}$ Hz三相交流制实现电气化。但由于接触网的建造及维修费用很高，而且采用变阻、变极和级联调速的方法，仍无法获得理想的牵引特性。所以，这种三相交流电气化方案，终于还是被放弃了。50年代，意大利北部的电气化区段改造为直流3kV供电制式。

为了简化接触网的结构，人们也曾考虑如何使已有的交流传动电力机车进一步适应单相供电的情况。当时的一种办法就是在机车上加装同步旋转的“劈相机”，其余部分不变。这种机车曾经在匈牙利西部平原地带50Hz线路上试验，还比较满意。后来，又按这种系统模式为奥地利联邦铁路制造两台由 $16\frac{2}{3}$ Hz供电的机车，但经过第一次试验以后就没有下文了。1917年德国试制了装有异步劈相机的系统，由11kV、25Hz的接触网供电。随即还试验了其它的一些变相、变流系统。此时的一个最重要的进步是人们开始考虑采用改变定子频率的控制方法。1943年，匈牙利国铁订购的机车和1955年法国国营铁路的一台样车上都装有旋转变频机组。但由于系统结构复杂、机组体积庞大，这两种机车都没有继续发展下去。特别是50年代初，整流器机车的问世，使电力牵引交流传动技术的早期发展阶段终告结束。

2. 近代发展阶段（20世纪60年代以来） 经过了10余年的沉寂之后，电力电子学和微电子技术的崛起与进步，重新唤起人们对交流传动系统的向往与热情。60年代中期，已经有可能在全新的物质和技术基础上，把单线接触网送到机车上的能量，变换为三相的适合牵引用新的能量形式。进入70年代，因采用异步交流传动系统的DE—2500内燃机车在莱茵河畔试验的成功，交流传动在牵引领域重新焕发出了前所未有的活力。1983年底，历经三年的试验、试运行和改进之后，世界上首批5台

BR120 型大功率干线交流传动电力机车，终于赢得了相当挑剔的原联邦德国铁路当局的认可。BR120 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，如卧式牵引变压器、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生产方面，进行了成功的尝试，并奠定了当代交流传动机车设计和运行的基本模式，推动了铁路牵引动力的新一轮革命性的变化。

对交流传动技术的发展起关键作用的半导体装置，这至少可以追溯到 1948 年发现锗晶体中的晶体管效应。次年完善了 PN 结理论，1957 年发明了硅可控整流器（后国际电工委员会正式定名为普通晶闸管），开始跨入电力电子学时代。随后，在 80 年代中期，大功率门极可关断晶闸管在电力机车上装车使用。作为交流传动技术的核心的变流器，就是在这种局面下随着器件技术的进步而不断地发展的。其实，早在 30 年代，人们就已经提出了逆变器的基本电路。但是，使半导体变流器和交流传动从小功率到大功率、从试验室到产品化的过程中，以下四种技术的出现是至关重要的：1964 年的分谐波控制的逆变器（即现在的脉宽调制逆变器）、1973 年提出的在斩波整流理论的基础上研制的所谓四象限脉冲整流器、1971 年提出的磁场定向控制和 1985 年提出的直接转矩自控制方法。

如果从 70 年代初的 DE—2500 交流传动内燃机车问世算起，那么交流传动机车的现代发展阶段已经经历了以下几个时期：

(1) 技术准备时期（1970~1979 年） 这时期研制了四台 DE—2500 交流传动内燃机车（德国），改装了 12001 交流传动电力机车（瑞士），对不同供电方式下的 PWM 逆变器-异步牵引电机系统在转差-电流控制下的机车性能进行了多方面的试验，结果向世人确认了交流传动系统的意想不到的优越性。而由一台 DE—2500 机车和一节装有变压器、四象限脉冲整流的控制车组成的试验电力机车，证实了这种类型的系统对电网没有任何不良反应，从而更加坚定了人们推广这种新一代技术的决心和信心。

1975年在BBC(曼海姆)的1400kW机组的地面系统试验,为选择未来机车的参数、电路和控制方法提供了充分的依据。

(2) 技术成熟时期(1980~1987年) 前联邦德国的5台BR120机车历经三年、耗资1亿马克的试验、试运行、改进之后,在牵引领域中采用交流传动技术的基本模式就确定下来了。在随后的几年里,欧洲国家的铁路运输部门开始成批订购交流传动电力机车,更新它们原有的装备。这当中包括丹麦的EA3000、挪威的EL17、奥地利的1063和1064型电力机车、前联邦德国的ICE高速动力车和BR121型电力机车。

还应该提到的是,这期间在法国国营铁路上已成功地使用了交流同步传动系统的电力机车和高速车组。

(3) 品质提升阶段(1988年以来) 由于客户层出不穷的新要求,新生的交流传动电力机车仍然面临不断革新和品质升华的压力。在短短的数年间,新设计、新材料、新工艺纷至沓来。

——GTO晶闸管替代快速晶闸管。1988年瑞士私营铁路订购的Re4/4机车首先采用GTO晶闸管交-直-交变频器,开创了牵引变频器的新篇章。

——微处理器替代模拟控制装置。除了16位的芯片外,目前批量生产的交流传动电力机车上,已成功地应用了32位高速信号处理器,如TMS320等。

——具有高动态性能的磁场定向控制和直接转矩自控制方法替代转差-电流控制方法。

——具有更好的冷却效果,并利于环境保护的变频器水冷却系统开始装车使用。目前有用去离子水和用普通水的两种结构。

——采用三点式电路、中间回路直流电压为3.5kV的机车研制成功,如奥地利的1822型机车、瑞士的460机车,后者已大批量投入使用。

——研制成功多流制交流传动电力机车,如双流制交流15kV、 $16\frac{2}{3}$ Hz和直流3kV;交流25kV、50Hz和直流3kV等。

在这个时期内,还研制成功蠕滑率控制器、粘着控制器,以



取代防空转/防滑装置，研制成功了特大功率的异步电动机，其重量功率比值仅为 1.1。一批又一批采用如上这些新技术的交流传动电力机车涌向世界各地的铁路网，如瑞士的 460，英吉利海峡穿梭运输的 BSL9000 (Le Shuttle)，西班牙的 S252，英国和法国的 92 系列，奥地利的 1822、1014、1012，德国的 ICE、ICE2 高速动车头，直至德国的最新 BR101、BR145 和 BR152 型客运或货运机车都已投入运行。交流传动电力机车也开始在美国、印度、日本铁路上使用。

我国在电力牵引交流传动技术方面的研究工作，始于 60 年代末、70 年代初，起步不算太晚。异步与同步两种方案都曾尝试过。同步电机的调速，即所谓无换向器直流电动机的研究主要集中在铁道部株洲电力机车研究所进行。国内其它一些科研院所和大学，都做过异步调速的试验研究工作。90 年代初，铁道部株洲电力机车研究所和铁道部科学研究院共同研制成功功率达 1.0MW 的、由包括四象限脉冲整流器和脉宽调制逆变器在内的电压型变流器供电的异步电动机系统，并在此基础上，试制了我国第一台 4.0MW 的 4 轴 AC4000 交流传动货运电力机车。在本世纪末，我国铁路上将可能开始使用交流传动电力机车和高速电动车组。

## 1.2 电力牵引交流传动技术的社会效益

自从有了电气化铁路，特别是对于交流供电制的情况，铁路和机车制造业的工程师们，首先想到的是使用安装了异步牵引电动机的电力机车。当时主要还是着眼于异步电动机本身的优点：

(1) 异步电动机体积小，重量轻。在转向架的有限安装空间内可以设置更大的功率。

(2) 大部分与转速有关的限制条件，如换向器表面线速度的限制等都没有了。

(3) 能在静止状态下任意的时间内发出满转矩，这对于复杂线路条件下重载起动特别重要。