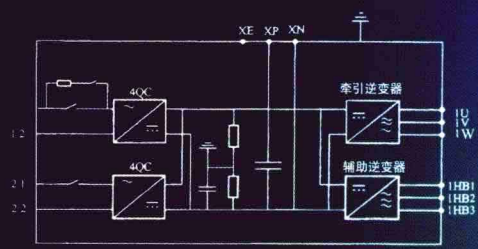


“十二五” 国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎郭世明 编著

机车动车牵引 交流传动技术



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子新技术系列图书

机车动车牵引交流传动技术

郭世明 编著



机械工业出版社

本书从应用角度出发,着重介绍电力牵引交流传动系统的具体结构、参数、控制原理和试验方法,突出实际应用。全书共分11章。内容包括:电力电子器件及其控制、四象限脉冲整流器、牵引逆变器、牵引变流器的冷却、交流牵引电动机的控制策略、列车通信网络技术、牵引传动系统的微机网络控制、辅助变流器及其控制、牵引传动系统的试验技术与故障诊断。

本书面向广大工程技术人员,具有较强的工程性和实用性,适于从事电力牵引传动领域的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机车动车牵引交流传动技术/郭世明编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 3

(电力电子新技术系列图书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-37250-9

I. ①机… II. ①郭… III. ①机车—电力牵引—交流传动系统②动车—电力牵引—交流传动系统 IV. ①U260.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第013507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:罗莉 责任编辑:罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16.75印张·346千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37250-9

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。
2. 理论联系实际，以应用技术为主。
3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

高速铁路及铁路重载运输，近几年在我国得到了飞速发展，在新建铁路中，修建了一批时速 200km/h 以上的客运专线，根据工期安排和工程进度，到 2012 年，将有 1.3 万 km 客运专线及城际铁路投入运营，其中时速 300 ~ 350km/h 的有 8000km，时速 200 ~ 250km/h 的有 5000km。此外，环渤海、长三角、珠三角、东北地区、中原地区、川渝地区、海峡西岸等经济发达和人口稠密地区的部分城际铁路也将建成通车。到 2012 年，我国铁路营业里程将达到 11 万 km，电气化率、复线率均达到 50% 以上，发达完善的铁路网即将初具规模。

高速铁路及重载运输中的关键装备——高速动车组和大功率电力机车也得到了快速发展，预计到 2012 年有 800 列动车组投入运用。届时，客运专线、城际铁路、提速线路上将大密度开行高速动车组。在机车方面，目前已广泛应用六轴 7200kW、9600kW 的大功率交流传动电力机车。预计到 2012 年底，繁忙干线和主要煤运通道将全面实现大功率交流传动机车牵引。

现代的高速动车组与大功率电力机车无一例外都采用了交流传动技术，这是因为和传统的直流传动相比，交流传动系统具有很多优点。例如：①粘着性能好。异步电动机的机械特性属于硬特性，本身具有很强的粘着恢复能力。另外，异步电动机的工作点可以很方便地进行平滑调节，可以根据检测有关粘着控制的信号，准确、迅速地改变逆变器输出的电压和频率，寻求最佳工作点，使驱动系统既不能发生空转，又能充分发挥最大的牵引力。②体积小、重量轻、可靠性高、维修简便。与同样功率等级的直流电动机比较，异步电动机的重量轻 30% 左右，并且交流异步电动机无换向器、无电刷装置；密封性好，防潮、防尘性能好。因此故障率低，可靠性高。驱动系统的全部运行过程和控制过程均由无触点电子元器件完成，所以不存在传统系统中经常发生的触点磨损、粘连、接触不良、机械卡滞等问题。③效率高，利用率高，使用灵活性强。交流传动系统的总效率约为 90%，由于可靠性、耐久性和易于维修的结合，使交流传动机车的利用率显著提高。与直流传动机车相比，交流传动机车的利用率提高了 10%。交流传动机车有很强的使用灵活性，它既可满足货运的大起动牵引力的要求，又可满足客运高速度的要求。④交流传动电力机车都采用四象限脉冲整流器作为机车电源侧的变流器，该整流器可以在广泛的负载范围内保持功率因数接近 1，电流的波形接近于正弦波，而且在再生制动时也是如此。交流传动电力机车牵引和再生工况的功率因数均接近于 1，不仅降低了电网损耗，而且在再生制动时可将高质量电能反馈给电网，消除了电网对信号和通信系统的干扰。⑤现今的交流传动电力机车都采用再生制动技术，当列车需要制动

时, 机车将列车的动能变为电能, 反馈至接触网, 这样不但节约了电能, 而且还提高了机车的制动力。

目前国内投入使用的和谐型大功率电力机车及和谐型动车组是南车集团和北车集团与国外企业合作, 引进消化技术, 并国产化的新一代交流传动货运机车和高速动车组。交流传动货运机车分为每轴 1200kW 的和谐 1、2、3 型 (1、2 型为 8 轴, 3 型为 6 轴); 6 轴, 每轴 1600kW 的和谐 1B、2B、3B 型; 6 轴, 每轴 1200kW 的和谐 1C、2C、3C 型三代。设计最高时速均为 120km/h。动车组有 CRH1 型、CRH2 型、CRH3 型和 CRH5 型。

HXD1 型交流传动电力机车是由株洲电力机车有限公司与德国西门子公司在 EuroSprinter (欧洲短跑者) 机车技术平台上联合研发的新型大功率交流传动 8 轴货运机车; HXD2 型交流传动电力机车是由大同电力机车有限公司与法国阿尔斯通公司在 PRIMA 机车技术平台上联合研发的新型大功率交流传动 8 轴货运机车。HXD3 型交流传动电力机车是由大连机车车辆有限公司与日本东芝公司联合研发的新型大功率 6 轴货运机车。

CRH1 型动车组是由青岛四方一庞巴迪-鲍尔铁路运输设备有限公司 (简称青岛 BSP 公司) 生产, 最高运行速度为 200km/h。CRH2 型动车组是由四方机车车辆股份有限公司与日本川崎重工公司合作生产, 最高运行速度为 250km/h 和 300km/h。CRH3 型动车组是由唐山机车车辆厂与德国西门子公司合作生产, 最高运行速度为 350km/h。CRH5 型动车组是由长春轨道客车股份有限公司与阿尔斯通公司合作生产, 最高运行速度为 250km/h。

为了促进机车动车交流传动技术的进步, 并使广大工程技术人员了解、掌握和运用这一领域的最新技术, 故编写了本书。

本书从应用角度出发, 着重介绍电力牵引交流传动系统的具体结构、参数、控制原理和试验方法, 突出实际应用, 面向广大工程技术人员, 具有较强的工程性和实用性。本书适宜于从事电力牵引传动领域的工程技术人员阅读。

全书共分 11 章。内容包括: 电力电子器件及其控制、四象限脉冲整流器、牵引逆变器、牵引变流器的冷却、交流牵引电动机的控制策略、列车通信网络技术、牵引传动系统的微机网络控制、辅助变流器及其控制、牵引传动系统的试验技术与故障诊断。

本书编写提纲曾由《电力电子新技术系列图书》编委会组织审查并提出了很多宝贵意见, 另外, 本书在编写过程中参考和引用了国内外同行的著作和文章, 作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 加之时间仓促, 书中的缺点和错误一定不少, 恳请广大同行和读者批评指正。

作 者

2011 年 9 月

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 交流传动机车的特点	1
1.2 交流传动机车的发展概况	3
1.2.1 早期发展阶段 (19 世纪 90 年代至 20 世纪 50 年代初)	3
1.2.2 近代发展阶段 (20 世纪 60 年代以来)	3
1.3 HXD 型电力机车的技术特点	6
1.3.1 HXD1 型电力机车	6
1.3.2 HXD2 型电力机车	8
1.3.3 HXD3 型电力机车	10
1.4 CRH 型动车组的技术特点	12
1.4.1 CRH1 型动车组	12
1.4.2 CRH2 型动车组	15
1.4.3 CRH3 型动车组	17
1.4.4 CRH5 型动车组	18
第 2 章 电力电子器件及其控制	21
2.1 门极关断晶闸管	21
2.1.1 GTO 的工作原理	21
2.1.2 GTO 的开通、关断过程和正向门极特性	23
2.1.3 GTO 的主要参数	24
2.2 绝缘栅双极型晶体管	26
2.2.1 IGBT 的工作原理	26
2.2.2 IGBT 的基本特性	27
2.2.3 IGBT 的擎住效应和安全工作区	28
2.2.4 IGBT 的主要技术参数	30
2.3 集成门极换向晶闸管	31
2.3.1 IGCT 的工作原理	31
2.3.2 IGCT 的主要技术参数和性能特点	33

2.4 IGBT 的栅极驱动电路	34
2.4.1 对 IGBT 栅极驱动电路的要求	34
2.4.2 EXB840 系列集成驱动电路	36
2.4.3 M579 系列集成驱动电路	39
2.4.4 2SD315A 型集成驱动电路	41
2.5 IGBT 的短路保护	43
2.5.1 IGBT 的短路保护问题	43
2.5.2 IGBT 的短路承受能力	44
2.5.3 短路保护的时限	44
2.5.4 IGBT 过电流的检测方法	45
2.5.5 短路保护方法	46
第 3 章 四象限脉冲整流器	50
3.1 四象限脉冲整流器的基本工作原理	50
3.2 四象限脉冲整流器的拓扑结构	52
3.2.1 电压型四象限脉冲整流器的拓扑结构	52
3.2.2 电流型四象限脉冲整流器的拓扑结构	55
3.3 电压型单相四象限脉冲整流器的工作模式	56
3.4 电压型四象限脉冲整流器的控制	58
3.4.1 间接电流控制	58
3.4.2 直接电流控制	59
3.4.3 采用直接电流控制的四象限脉冲整流器系统	62
3.5 四象限脉冲整流器的结构及参数	63
3.5.1 HXD1 型电力机车四象限脉冲整流器的构成及参数	63
3.5.2 CRH1 型动车组四象限脉冲	

整流器的构成及参数	66	5.2 牵引变流器的损耗	99
3.5.3 CRH2 型动车组四象限脉冲		5.2.1 IGBT 功率模块的通态损	
整流器的构成及参数	70	耗	99
第4章 牵引逆变器	74	5.2.2 IGBT 的开关损耗	100
4.1 概述	74	5.3 牵引变流器冷却方式	101
4.1.1 牵引逆变器的发展	74	5.3.1 空气冷却方式	101
4.1.2 对牵引逆变器的要求	76	5.3.2 油冷却方式	102
4.1.3 国外的主要牵引变流器	76	5.3.3 水冷却方式	102
4.2 HXD3 型电力机车牵引逆变器及		5.3.4 热管冷却方式	104
其控制	77	5.3.5 蒸发冷却方式	105
4.2.1 HXD3 型电力机车牵引逆变		5.3.6 不同冷却方式的特点	106
器的构成及参数	77	5.4 牵引变流器冷却系统	107
4.2.2 牵引逆变器的控制原理	77	5.4.1 CRH2 型动车组牵引变流	
4.3 CRH1 型动车组牵引逆变器及其		器冷却系统	107
控制	82	5.4.2 HXD3 型电力机车牵引变	
4.3.1 CRH1 型动车组牵引逆变器		流器冷却系统	110
模块 (MCM) 的结构	82	第6章 交流牵引电动机的控制	
4.3.2 牵引逆变器的 DC 环节	84	策略	112
4.3.3 MCM 的驱动控制单元 DCU		6.1 交流牵引电动机的转差频率	
/M	85	控制	112
4.3.4 CRH1 型动车组牵引电动机		6.1.1 转差频率控制的基本概	
的控制策略	88	念	112
4.4 CRH2 型动车组牵引逆变器及其		6.1.2 转差频率控制的变压变	
控制	89	频调速系统	113
4.4.1 CRH2 型动车组牵引逆变器		6.2 交流牵引电动机的矢量控制	114
的工作原理及参数	89	6.2.1 概述	114
4.4.2 牵引逆变器的空间电压矢量		6.2.2 矢量控制原理	115
控制	91	6.2.3 直接矢量控制	116
4.4.3 改善中点电位偏移的 PWM		6.2.4 间接矢量控制	117
控制方式	92	6.2.5 矢量控制在牵引传动系统	
4.4.4 CRH2 型动车组牵引逆变器		中的应用	120
的矢量控制	93	6.3 交流牵引电动机的直接转矩	
4.5 牵引逆变器测试系统	96	控制	121
4.5.1 概述	96	6.3.1 概述	121
4.5.2 牵引逆变器测试系统的构		6.3.2 直接转矩控制的基本概	
成	96	念	122
4.5.3 测试原理	97	6.3.3 直接转矩控制系统的构成	
第5章 牵引变流器的冷却	99	原理	126
5.1 概述	99	6.3.4 直接转矩控制在牵引传动	

系统中的应用	128	制系统	182
第 7 章 列车通信网络技术	129	8.3.1 概述	182
7.1 概述	129	8.3.2 微机网络控制系统结构	182
7.2 TCN	133	8.3.3 微机网络控制系统 (TCMS) 功能	189
7.2.1 列车通信网络的结构	134	8.4 HXD3 型电力机车微机网络控制 系统	193
7.2.2 TCN 的通信协议及网络管 理与组态	135	8.4.1 概述	193
7.2.3 列车总线	137	8.4.2 TCMS 和微机显示屏	194
7.2.4 多功能车辆总线	140	8.4.3 网络控制系统	196
7.2.5 TCN 网络的数据传输	142	第 9 章 辅助变流器及其控制	200
7.2.6 TCN 网络的编址与寻址方 式	146	9.1 概述	200
7.2.7 MVB 网络接口单元	148	9.1.1 辅助变流器的作用及特 点	200
7.3 LonWorks 网络	150	9.1.2 对辅助变流器的要求	201
7.3.1 LonWorks 网络的组成	151	9.1.3 辅助变流器的结构与特 点	202
7.3.2 神经元芯片	152	9.2 机车动车辅助变流器的构成 原理	204
7.3.3 LonTalk 通信协议	158	9.2.1 HXD2 型电力机车辅助变 流器	204
7.4 WorldFIP 现场总线	164	9.2.2 HXD3 型电力机车辅助变 流器	209
7.4.1 WorldFIP 的基本性能	164	9.2.3 CRH2 型动车组辅助变流 器	216
7.4.2 WorldFIP 通信芯片、软件 和开发工具	167	9.2.4 CRH5 型动车组辅助变流 器	219
7.4.3 WorldFIP 的技术特点	169	9.3 辅助变流器试验系统	223
第 8 章 牵引传动系统的微机网 络控制	170	9.3.1 试验的项目及要求	223
8.1 概述	170	9.3.2 能量消耗型辅助变流器 试验系统	224
8.1.1 机车微机网络控制系统的特点	170	9.3.3 能量回馈型辅助变流器 试验系统	226
8.1.2 微机网络控制系统的基本 结构	170	第 10 章 牵引传动系统的试验 技术	228
8.1.3 国外主要厂商的机车微机 网络控制系统	171	10.1 概述	228
8.2 HXD1 型电力机车微机网络控 制系统	174	10.1.1 试验的目的与项目	228
8.2.1 微机网络控制系统的拓扑 结构	174	10.1.2 系统性能试验	228
8.2.2 控制系统主要部件及其功 能	174	10.1.3 研究试验	229
8.2.3 TCN 列车通信网络	176		
8.3 HXD2 型电力机车微机网络控			

X

10.1.4 主要部件试验	230	11.1.3 变压器预防性实验	245
10.2 牵引传动试验系统方案	230	11.2 牵引变流器的故障诊断	245
10.2.1 能量消耗型	230	11.2.1 变流器的故障分类	245
10.2.2 能量反馈型	232	11.2.2 变流器的故障诊断	246
10.2.3 智能型负载	233	11.2.3 基于专家系统的牵引变流器故障诊断系统	247
10.3 基于模拟负载的牵引传动装置		11.3 牵引电动机的故障诊断	249
地面试验系统	234	11.3.1 牵引电动机故障的类型 ...	249
10.3.1 概述	234	11.3.2 牵引电动机故障的原因 ...	250
10.3.2 试验系统的构成	234	11.3.3 牵引电动机故障诊断的方法	251
第 11 章 牵引传动设备的故障诊断	238	11.3.4 交流牵引电动机的故障诊断技术	252
11.1 牵引变压器的故障诊断	238	参考文献	255
11.1.1 牵引变压器的常见故障类型	238		
11.1.2 变压器故障的诊断方法 ...	240		

第 1 章 绪 论

1.1 交流传动机车的特点

目前采用交流传动技术的机车正在取代采用直流传动技术的机车而成为机车应用的主流。交流传动机车与直流传动机车相比具有如下特点：

1. 机车的粘着性能好

交流传动机车的起动粘着系数可达 45%，全天候牵引粘着系数可达 32%。交流传动机车之所以有这么高的粘着系数，其原因是：

1) 牵引电动机采用了异步电动机，而异步电动机具有很硬的机械特性，所以当某电动机发生空转时，随着转速的升高，转矩很快降低，具有很强的恢复粘着的能力。空转发生时，转速上升值不大，即使是同步转速，与原工作点的转速差不会超出 5%。

2) 牵引异步电动机的工作点可以很方便地进行平滑调节，以实现最大可能的粘着利用，不会出现粘着中断情况。根据检测有关粘着控制的信号，准确、迅速地改变逆变器输出的电压和频率，寻求最佳工作点，使驱动系统既不能发生空转，又能充分发挥最大的牵引力。

3) 机车可实现各轴单独控制。当某台电动机发生空转时，可调节该台电动机，这样能充分利用机车的粘着性能。

2. 机车的功率大，牵引力大

这个概念是指在其他条件大致相同的前提下，在机车结构所提供的空间条件下，可以装更大功率的异步电动机。如加拿大改造的 CP4744 号机车，在给定的设计空间条件下，直流电动机的功率大约被限制在 600 ~ 700kW/轴。装用瑞士 BBC 公司的 6FRA40B 型异步牵引电动机，其功率可达 1492kW/轴以上。正因为如此，才可使机车的牵引功率大大提高。牵引功率大导致牵引力大，而又由于粘着性能好，大的牵引力能充分发挥其牵引能力。

目前，不同类型电动机其单位重量功率可达到的比值为：直流电动机为 0.33kW/kg，同步电动机为 0.5kW/kg，异步电动机为 0.68kW/kg。随着科技的发展，异步电动机的单位重量功率将越来越高。如日本新干线 300 系列原型试验车，所采用的交流异步牵引电动机其功率达到 300kW，而其重量不足 400kg，单位重量功率可达 0.75kW/kg。

3. 机车的可靠性高，维修简便

交流异步牵引电动机无换向器和电刷装置；除轴承外无摩擦部件，密封性好，

防潮、防尘、防雪性能好；全部电气部件均是绝缘的，且所用绝缘材料均为 H 级或 F 级，绝缘性能好，耐热性能好，因此故障率低，可靠性高。

控制装置是模块结构，驱动系统的全部运行过程和控制过程均由无触点电子元件完成，所以不存在传统系统中经常发生的触点磨损、粘连、接触不良、机械卡滞等问题。

加拿大 CP4744 型机车在运用过程中，只发生过极少的故障，而这些故障无一件是与逆变器或牵引电动机一类的主要硬件有关的。德国 MaK 公司制造的交流异步牵引电动机连续工作 7 年没有发生过一件烧损事故。另外，交流传动机车有完备的微机监视系统和故障诊断系统，可随时监视系统的技术状态，进行故障诊断。综上所述，可知交流传动系统的可靠性是很高的，维修量很小，且检修简便，维修费用大大降低。

4. 机车的效率高、利用率高、使用灵活性强

交流传动系统的总效率约为 90%，而交直流传动系统的总效率约为 86%。E120 型交流传动机车在长期应用对比中发现，客运作业时可节能 3% ~ 6%，货运作业时可节能 8% ~ 10%。由于有可靠性、耐久性和易于维修的结合，使交流传动机车的利用率显著提高。与直流传动机车相比，BBC 公司交流传动机车的利用率提高了 10%。对铁路运营管理来说，在计算所需数量时，机车利用率起着重要作用，对所需投资有决定性的影响。

交流传动机车有很强的使用灵活性，既可满足货运的大起动牵引力的要求，又可满足客运高速度的要求。

5. 机车的动力性能好、制动性能好

异步电动机结构紧凑、重量轻，同时采用特殊的悬挂装置，簧下重量小，有较高的曲线通过能力，对轨面的冲击力小。

可在广阔的速度范围内实行电制动，甚至可以制动到零，制动功率大。一部分电制动的能量可用于其他辅助设备。

6. 机车的功率因数高、谐波干扰电流小

近年生产的交流传动电力机车，网侧采用了四象限脉宽调制整流器。使得机车不论在额定功率，还是小负载时，在牵引或再生制动工况，机车的功率系数都在 0.98 以上。这就意味着铁路电网所需提供的无功功率很小，接触网上的损耗就很小。那么在给定的电网功率下，使用一定功率的机车就越多。与此相对，20 世纪 60 年代发展起来的整流器式机车，即使在额定功率时，机车的功率系数也仅为 0.84 左右。此外，采用四象限脉宽调制整流器后，可使等效干扰电流小于 2A；而整流器式机车在该功率等级时，等效干扰电流将大于 9A。由上可见，这种机车对电网有很好的特性。

7. 机车在整个生命周期中，成本低。

整个生命周期的成本由制造成本、维修成本、运行费用等组成。由于前面所述

交流电动机的特点以及整流元件的模块化,没有有触点电器等因素,大大节省制造成本。交流电力机车的维修工作量小,维修周期长,再生制动能耗低,都大大节省了维修和运行成本。

1.2 交流传动机车的发展概况

人们开展对交流传动机车的研究,已有 100 多年的历史,其发展历程按交流传动机车的技术水平可分为两个阶段:

1.2.1 早期发展阶段(19 世纪 90 年代至 20 世纪 50 年代初)

1891/1892 年德国西门子公司制造的试验车,选择的是三相交流电源直接供电的绕线转子异步牵引电动机系统,该系统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。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。

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。

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。随即还试验了其他的一些变相、交流系统。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,匈牙利国铁定购的机车和 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 20 世纪 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。

1.2.2 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,随着电力电子技术和微电子技术的发展,人们重

新开始对交流传动机车的研究。

20 世纪 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的新的能量形式。

进入 20 世纪 70 年代,因采用异步交流传动系统的 DE-2500 型内燃机车在莱茵河畔试验成功,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 3 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 型机车在系统设计、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。

对交流传动机车的发展起关键作用是电力电子技术的发展。1957 年发明了硅可控整流器 [SCR, 后改称为晶闸管 (Thyristor)][⊙], 开始跨入电力电子技术时代。随后,在 20 世纪 80 年代中期,大功率门极关断 (GTO) 晶闸管[⊙]在电力机车上装车使用,20 世纪 90 年代绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 在机车上投入使用。作为交流传动技术核心的变流器,就是随着电力电子器件技术的进步而不断地得到发展。

在交流传动机车发展的过程中,1964 年提出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 年提出的磁场定向矢量控制和 1985 年提出的直接转矩自控制方法起到了重要作用。

交流传动技术根据牵引变流器主电路使用的电力电子器件不同可分为

1. 用高频晶闸管的交流传动技术

这时期研制了 4 台 DE-2500 型交流传动内燃机车 (德国),改装了 12001 型交流传动电力机车 (瑞士),对不同供电方式下的脉宽调制 (PWM) 逆变器—异步牵引电动机系统在转差—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 型机车和一节装有变压器、四象限脉冲整流器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, BBC 公司对 1400kW 机组的地面系统进行了试验,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。

1980 年, BBC 公司的 BR120 型试验机车投入运行。1987 年, BBC 公司供应了

⊙ 为方便起见,人们常用 SCR 代表普通晶闸管。

⊙ 为方便起见,人们常用 GTO 代表门极关断晶闸管。

首批 60 台这种机车。随后应用该技术的有丹麦国家铁路（DSB）的 EA3000 型电力机车和德国联邦铁路的部分 ICE1 系列电动车组。当时自换相的变流器需使用快速或高频晶闸管。起初可供使用的快速晶闸管反向电压只有 1400V。为了控制当时采用的 2800V 中间直流环节电压（避免用并联电路），必须串联 4 只器件，以致变流器结构较复杂。

2. 用 GTO 的交流传动技术

20 世纪 80 年代，微处理器承担了越来越多的电子控制任务，尽管功能增多，但体积却缩小了。日本首先开发了 GTO，它大大简化了变流器结构，在首次使用的 2500V GTO 的基础上，（瑞士）BBC 公司开发了首台 1400V 中间直流环节电压的机车传动变流器（1987 年起向 BT/SZU 铁路提供了 8 台使用这种 GTO 变流器的机车，从 1989 年起向瑞士联邦铁路（SBB）、苏黎世城市高速铁路提供了 115 台用这种 GTO 变流器的 Re450 型电力机车）。

20 世纪 80 年代末，有了可供使用的 4500V/3000A 的 GTO，可以实现 2800V 中间直流环节电压或更高电压的大功率应用。6.1MW 功率的 Re460 型机车采用了三电平变流器（每台逆变器用 12 只 GTO）。

投入首批应用的部分 ICE1 电动车组（1989 ~ 1990 年）、挪威国家铁路（NSB）的 IC70 型电动车组（1992 年）和 CL7000 型欧洲穿梭式电力机车（1992 年），使用了西门子和庞巴迪公司开发的用 4.5kV GTO 的中间直流环节电压为 2800V 的两电平 GTO 变流器（无串联连接，每台逆变器用 6 只 GTO）。后来用 4.5kV 器件、2800V 中间直流环节电压的两电平变流器成了西门子和庞巴迪公司的标准产品，直到 2001 年所有批量生产的电力机车和动车组用的变流器都采用了这种电路。

在控制方面：

1) 用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 位高速数字信号处理器（DSP），如 TMS320 等。

2) 采用具有高动态性能的磁场定向矢量控制和直接转矩自控制方法替代转差—电流控制方法。

3) 采用具有更好的冷却效果，并利于环境保护的变流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。

3. 用 IGBT 的三相交流传动技术

早在 GTO 变流器投入使用的初期，就发现其可靠性水平受到变流装置的复杂性极大的限制。GTO 的控制电路对系统的影响特别大。与 GTO 不同的是，IGBT 由电压控制，而器件输入电容的充放电控制电流很小，因此，其栅极控制电路大为简化。

由于 IGBT 能通过改变电压实现控制，因而使得变流器系统有很多优点。

1) 由于控制单元体积小和无需吸收电路，变流器结构简单而轻巧。

2) 有效地限制了内部或外部损坏情况下 IGBT 栅极可能产生的过电压, 从而可保护变流器免受较大短路电流的影响。在这些器件中, 可以考虑采取很多种短路保护。

3) 由于简化了变流器电路, 系统的可靠性较高。

IGBT 首先是在辅助逆变器中取代了 GTO。后来才用于轻型和重型近郊运输、城市高速列车的主传动 (BR423.2 型电动车组), 最后用于大功率机车 (从 2002 年起供应的欧洲穿梭式机车、从 2002 年起供应的 BR189 型机车、从 2003 年起供应的 BR185.2 型机车和从 2004 年起向 SBB 供应的 Re484 型机车) 的主传动。

1.3 HXD 型电力机车的技术特点

1.3.1 HXD1 型电力机车

1. HXD1 型电力机车的主要技术特点

1) 轴牵引功率 1200kW, 总功率 9600kW, 为大功率电力机车。

2) 采用水冷 IGBT 的主变流器, 其中含有 4 个四象限变流器, 供两个单独的中间直流电压环节; 2 个牵引逆变器, 每个牵引逆变器供电给同一转向架的两台并联的牵引电动机。辅助逆变器集成在主变流器柜中, 主变流器柜的集成度高, 冗余性好, 电制动采用再生制动。

3) 采用 SIBAS 32 型微机控制技术和 TCN 通信技术, 具有当代机车微机网络控制的先进性。

4) 车体采用整体承载结构, 并以中梁为主要传递牵引力构件, 具有高强度低重量的优点, 适合重载牵引。

5) 重载牵引的转向架采用低位牵引杆, 构架强度高, 结构合理, 基础制动采用轮盘制动。

6) 采用标准化、模块化设计, 便于维护检修。

7) 采用 CCBII 空气制动系统, 适合重载列车制动。

8) 装有 LOCOTROL 远程重联控制系统, 适合于多机分布式重载牵引。

9) 采用独立的机械室通风系统, 使得机车的内部环境清洁, 通风效果好。

10) 车上装备卫生间、床等必要的生活设施。

2. HXD1 型电力机车的主要技术参数

用途	货运
电流制	单相交流 50Hz
工作电压	
额定值	25kV
最高值	<31kV

最低值	> 17.5kV
轴式	2 (B ₀ - B ₀)
电传动方式	交-直-交电传动
机车轮周功率 (持续制)	9600kW
机车持续牵引力	
23t 轴重时	494kN
25t 轴重时	532kN
机车起动牵引力	
23t 轴重时	≥700kN
25t 轴重时	≥760kN
机车持续额定速度	
23t 轴重时	70km/h
25t 轴重时	65 km/h
机车最高运行速度	120 km/h
机车最高速度	132 km/h
牵引特性恒功率速度范围	
23t 轴重时	70 ~ 120 km/h
25t 轴重时	65 ~ 120 km/h
功率因数 当机车功率大于 10% 额定功率时, $\lambda \geq 0.97$	
机车总效率 (额定工况)	≥85%
机车电制动方式	再生制动
机车轮周电制动功率 (持续制)	9600kW
最大电制动力	461kN
电传动系统	水冷 IGBT 变流器 每节车 4 个四象限整流器, 两个中间直流电压环节, 2 个脉宽调制 (PWM) 逆变器; 每个脉宽调制 (PWM) 逆变器向同一个转向架下的 2 台三相异步牵引电动机供电 (架控) 电动机为滚动轴承抱轴式悬挂
控制设备	SIBAS32 中央控制单元 SIBAS32 牵引控制单元 每个司机室安装彩色显示屏 中央诊断、记录器 电气空转/滑行保护系统 列车无线电系统
制动设备	再生制动作为首选常用制动