

普通高等教育“卓越工程师计划”本科教材

轨道交通车辆

电力牵引控制系统

刘敏军 宋平岗 许期英 编著

清华大学出版社



轨道交通车辆

电力牵引控制系统

刘敏军 宋平岗 许期英 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育教材、“卓越工程师计划”本科教材,主要介绍电力牵引传动的发展历程、电力牵引供电方式及供电系统、电力牵引控制系统的类型、电力牵引传动的控制方式、电力牵引的基本原理、电力牵引控制系统常用的电力电子器件、电力牵引变流器等基本理论知识,以及直流牵引控制系统、交流牵引控制系统、电气制动控制系统、黏着控制系统、列车微机控制系统、高速磁悬浮列车控制系统、电力牵引传动与电磁兼容等知识。

本书为车辆工程专业(铁道机车车辆方向、城市轨道交通车辆方向、高速动车组方向)、电力牵引及电气传动控制专业的“卓越工程师计划”本科生教材,也可作为普通本科生、专科生教材,还可作为从事车辆工程专业或电力牵引及电气传动控制专业技术工作的工程技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通车辆电力牵引控制系统/刘敏军,宋平岗,许期英编著.--北京:清华大学出版社,2014
ISBN 978-7-302-35374-4

I. ①轨… II. ①刘… ②宋… ③许… III. ①轻轨车辆—电力牵引—牵引设备—控制系统—高等学校—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 020910 号

责任编辑:孙 坚 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:21.25

字 数:515 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版

印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:48.00 元

产品编号:057206-01

前 言

电力牵引是我国最主要的轨道交通车辆的牵引方式。近年来我国轨道交通车辆发展迅猛,从以往单一的铁路形式发展成为包括高速铁路、城际客运专线、城市地铁和轻轨以及磁悬浮列车等在内的多种形式,通过轨道交通车辆出行已经成为人们最重要的交通方式。随着轨道交通车辆的发展,电力牵引技术也得到了极大的提高和发展。目前电力牵引系统已经发展到了交-直-交的交流传动系统,并得到了空前的应用。微机、网络、FPGA 和智能控制等先进技术都在电力牵引系统中获得了广泛的运用,新型的电力牵引和控制系统在不断涌现。

为了适应轨道交通车辆电力牵引控制系统的发展现状,使学生所学知识与现场技术发展同步,本书在编写的过程中力求体现以下特点:

(1) 反映当前电力牵引系统的状态和水平,在理论上有一定的深度。

(2) 内容结合实际,将当前实际应用的系统和技术与本书相结合。

(3) 介绍有关方面应用的先进技术。

(4) 对电力牵引系统做一个比较全面的介绍,以满足从事车辆工程专业(铁道机车车辆方向、城市轨道交通车辆方向、高速动车组方向)、电力牵引及电气传动控制专业的学生学习和不同层次、不同专业方向相关专业技术人员工作的需求。

(5) 书中带“▼”符号的章节为学生课后阅读内容,带“※”符号的章节为选学内容,教师可根据专业方向进行选择。

(6) 每章后有基本理论知识复习与思考题,以及能力培养题。在巩固加深所学理论知识的同时,注重学习能力和科研创新能力的培养。

全书共分 11 章,第 1 章介绍电力牵引传动的发展历程、电力牵引供电方式及供电系统、电力牵引控制系统的类型和电力牵引传动的控制方式;第 2 章介绍牵引理论基础;第 3 章介绍电力牵引控制系统常用的电力电子器件;第 4 章介绍电力牵引变流器;第 5 章介绍直流牵引系统;第 6 章介绍交流牵引系统;第 7 章介绍电气制动控制系统;第 8 章介绍黏着控制系统;第 9 章介绍列车微机控制系统;第 10 章介绍高速磁悬浮列车控制系统;第 11 章介绍电力牵引传动与电磁兼容。

本书由华东交通大学刘敏军、宋平岗、许期英合作完成,刘敏军统稿。

本书在编写过程中得到了华东交通大学有关领导及专家、学者的大力支持和协助,也得到了南昌铁路局、上海地铁公司等有关技术人员的鼎力支持,在此对他们表示感谢。在本书的编写过程中参考了许多文献资料,在参考文献中一一列出,以示谢意!

由于编著者的水平所限,书中可能存在错误和不妥,殷切期望读者批评指正。

编 者

2014 年 4 月

目 录

1 绪论	1
▼1.1 电力牵引传动的发展历程	1
1.1.1 电力牵引传动控制系统的概念	1
1.1.2 电力牵引传动的发展历程	1
1.2 电力牵引供电方式及供电系统	7
1.2.1 电力牵引供电方式	7
1.2.2 电力牵引供电系统	8
1.3 电力牵引控制系统的类型	10
1.3.1 直流-直流(直-直)牵引系统	11
1.3.2 交流-直流(交-直)牵引系统	11
1.3.3 交流-直流-交流(交-直-交)牵引系统	12
1.3.4 直流-交流(直-交)牵引系统	13
1.4 电力牵引传动的控制方式	14
复习与思考题	15
能力培养题	15
2 牵引理论基础	16
2.1 动轮与钢轨间的黏着与蠕滑	16
2.1.1 黏着	16
2.1.2 蠕滑	17
2.2 牵引力的形成及限制	17
2.2.1 牵引力的形成	17
2.2.2 黏着对牵引力的限制	18
2.2.3 黏着系数的影响因素及计算黏着系数	18
2.3 制动力的产生	20
2.3.1 制动力的概念及制动方法	20
2.3.2 制动力的产生	21
2.4 空转与滑行的产生及黏着的控制	22
2.4.1 空转与滑行的产生及防止	22
2.4.2 黏着控制的意义及分类	23
2.5 牵引运行及特性	24

2.5.1	列车运行过程	24
2.5.2	列车阻力	26
2.5.3	列车牵引特性	27
	复习与思考题	29
	能力培养题	30
3	电力牵引控制系统常用的电力电子器件	31
3.1	普通晶闸管	31
3.1.1	晶闸管的结构与工作原理	31
3.1.2	晶闸管的特性	33
3.1.3	晶闸管的主要参数	33
3.1.4	晶闸管的触发电路	35
3.1.5	晶闸管的串并联	39
3.1.6	晶闸管的应用与保护	41
3.2	门极可关断晶闸管	41
3.2.1	GTO 的结构与工作原理	41
3.2.2	GTO 的主要参数特性	44
3.2.3	GTO 的门极驱动电路	47
3.3	绝缘栅双极晶体管	51
3.3.1	IGBT 的基本结构与工作原理	51
3.3.2	IGBT 的特性	53
3.3.3	IGBT 的擎住效应与安全工作区	54
3.3.4	IGBT 的驱动与保护技术	55
3.4	功率集成电路	63
3.4.1	PIC 技术	64
3.4.2	智能功率模块	65
▼3.5	缓冲电路	67
3.5.1	缓冲电路的作用与基本类型	67
3.5.2	缓冲电路的基本结构	68
3.5.3	缓冲电路中 C_s 和 R_s 值的确定	70
	复习与思考题	71
	能力培养题	71
4	电力牵引变流器	72
4.1	斩波电路(斩波器)	72
4.1.1	降压斩波电路	72
4.1.2	升压斩波电路	81
4.1.3	升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路	84
4.1.4	Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路	86
4.1.5	复合斩波电路和多相多重斩波电路	87
4.2	整流电路(整流器)	93

4.2.1	入端整流器概述	93
4.2.2	电压型四象限脉冲整流器	97
4.3	逆变电路(逆变器)	111
4.3.1	基本逆变电路	111
4.3.2	正弦波脉宽调制逆变电路	116
4.3.3	感性负载下三相桥式逆变器的电流波形和能量反馈	124
4.3.4	三点式(三电平)逆变电路	127
	复习与思考题	132
	能力培养题	133
5	直流牵引系统	134
5.1	直流牵引电动机的牵引性能	134
5.1.1	牵引电动机之间的负载分配	136
5.1.2	电压波动对牵引电动机工作的影响	136
5.1.3	直流牵引电动机的功率利用	137
5.1.4	直流牵引电动机的黏着特性	138
5.2	直流牵引系统的牵引特性	138
5.2.1	恒电压牵引特性	139
5.2.2	恒功率牵引特性	139
5.2.3	恒电流牵引特性	140
5.2.4	恒速度牵引特性	140
5.2.5	组合牵引特性	141
5.3	直流牵引系统的控制	141
5.3.1	直流牵引电动机的调速	142
5.3.2	直流牵引系统的控制方法	142
*5.4	SS ₉ 型电力机车直流牵引控制系统	146
5.4.1	SS ₉ 型电力机车牵引系统概述	146
5.4.2	SS ₉ 型电力机车牵引系统的主要技术参数	147
5.4.3	SS ₉ 型电力机车牵引系统的主电路	147
5.4.4	机车特性	147
*5.5	DF ₁₁ 型内燃机车直流牵引控制系统	152
5.5.1	DF ₁₁ 型内燃机车概述	152
5.5.2	DF ₁₁ 型内燃机车的牵引特性	155
5.5.3	DF ₁₁ 型内燃机车的功率控制	156
5.5.4	DF ₁₁ 型内燃机车的主电路	160
5.5.5	DF ₁₁ 型内燃机车的速度控制	162
*5.6	城市轨道交通车辆直流牵引控制系统	163
5.6.1	变阻控制	163
5.6.2	斩波调压控制	167
	复习与思考题	179

能力培养题	180
6 交流牵引系统	181
6.1 概述	181
6.2 交流异步电动机的调速	182
6.2.1 交流异步电动机的机械特性	183
6.2.2 交流异步电动机的调速特性	184
6.3 交流牵引系统的逆变器	185
6.3.1 牵引逆变器的基本电路	185
6.3.2 牵引逆变器的主电路	186
6.3.3 牵引逆变器的控制	188
6.4 交流牵引系统的控制	194
6.4.1 牵引特性	194
6.4.2 交流牵引系统的主电路	195
6.4.3 交流牵引系统的控制方法	198
6.4.4 牵引控制单元	200
*6.5 HXD ₃ 型电力机车的交流牵引系统	201
6.5.1 HXD ₃ 型电力机车概述	201
6.5.2 HXD ₃ 型电力机车的牵引特性	202
6.5.3 HXD ₃ 型电力机车的电路	204
6.5.4 HXD ₃ 型电力机车的矢量控制	208
*6.6 CRH ₁ 型动车组交流牵引系统	210
6.6.1 CRH ₁ 型动车组的技术特点	210
6.6.2 CRH ₁ 型动车组的主要性能参数	212
6.6.3 CRH ₁ 型动车组牵引系统的主电路	213
6.6.4 CRH ₁ 型动车组的控制	213
*6.7 城市轨道交通车辆的交流牵引系统	215
6.7.1 城市轨道交通车辆牵引传动系统的主要设备和工作原理	215
6.7.2 VVVF 控制下的城市轨道交通车辆牵引特性	216
6.7.3 磁场定向式矢量控制系统	217
6.7.4 直接转矩控制系统的结构及原理	221
复习与思考题	222
能力培养题	223
7 电气制动控制系统	224
7.1 概述	224
7.1.1 电气制动的种类	224
7.1.2 电气制动的特点	225
7.2 电气制动的基本原理	225
7.2.1 电阻制动和再生制动的基本原理	225
7.2.2 电磁制动的基本原理	227

7.3	电阻制动	230
7.3.1	直流牵引系统的电阻制动	230
7.3.2	电阻制动的控制	232
7.3.3	加馈电阻制动	234
7.4	再生制动	235
7.4.1	直-交牵引系统的再生制动	235
7.4.2	交-直牵引系统的再生制动	236
7.4.3	交-直-交牵引系统的再生制动	238
☆7.5	电气制动控制系统实例	238
7.5.1	SS ₉ 型电力机车的加馈电阻制动系统	238
7.5.2	ND ₅ 型内燃机车的电阻制动系统	240
7.5.3	DF ₁₁ 型内燃机车的电阻制动系统	242
7.5.4	HXD ₃ 型电力机车的扩展再生制动系统	249
7.5.5	城市轨道交通车辆的制动控制系统	250
	复习与思考题	259
	能力培养题	260
8	黏着控制系统	261
8.1	概述	261
8.2	黏着控制模式	262
8.2.1	黏着控制的功能目标	262
8.2.2	黏着控制的基本模式	262
8.2.3	黏着状态检测	263
8.2.4	黏着控制策略	264
8.3	黏着控制系统的性能指标	265
☆8.4	内燃机车的黏着控制系统	266
8.4.1	概述	266
8.4.2	轮径校正	267
8.4.3	速度与加速度信号处理	268
8.4.4	控制基准的产生	268
8.4.5	控制信号的形成	269
☆8.5	电力机车的黏着控制系统	269
8.5.1	防空转和防滑行系统概述	270
8.5.2	轮径修正	270
8.5.3	速度差、加速度、加加速度信号的检测	271
8.5.4	防空转、防滑行系统的电流修正	272
8.5.5	记忆最大黏着系数时电流值的电路	273
☆8.6	城市轨道交通车辆的黏着控制系统	273
8.6.1	电牵引与电制动的防空转与防滑行保护系统	274
8.6.2	空气制动的滑行保护系统	274

复习与思考题	275
能力培养题	275
▼9 列车微机控制系统	276
9.1 列车微机控制系统的结构	277
9.1.1 微机控制系统的结构模型	277
9.1.2 微机控制系统的功能结构	279
9.2 车载微机的组成	279
9.2.1 车载微机的功能结构	279
9.2.2 车载微机的机械结构	281
9.2.3 车载微机的软件结构	282
9.3 列车控制网络	283
9.3.1 列车通信网络标准——TCN 标准	283
9.3.2 World-FIP 协议	288
9.3.3 IEEE 1473 标准和 Lon-Works 总线	290
9.3.4 ARCNET 总线	292
9.4 微机控制系统的应用实例	294
9.4.1 SIBAS 系统	294
9.4.2 MITRAC 系统	295
9.4.3 AGATE 系统	296
9.4.4 TIS 信息系统	298
复习与思考题	300
能力培养题	300
▼10 高速磁悬浮列车控制系统	301
10.1 概述	301
10.2 直线牵引电动机	301
10.2.1 直线电动机的基本结构	301
10.2.2 直线电动机的工作原理	304
10.3 直线磁悬浮电动机	306
10.3.1 概述	306
10.3.2 直线磁悬浮电动机的分类与结构	307
10.3.3 直线磁悬浮电动机的性能指标	307
10.4 直线电动机驱动的磁悬浮列车	309
10.4.1 概述	309
10.4.2 常导吸浮型磁悬浮列车	310
10.4.3 超导斥浮型磁悬浮列车	312
复习与思考题	316
能力培养题	316
▼11 电力牵引传动与电磁兼容	317
11.1 电磁兼容的基本概念	317

11.2 电磁干扰量及其传播途径	318
11.3 电气化铁路的电磁干扰问题	319
11.4 电力牵引系统的干扰	321
11.5 改善电磁兼容的措施	322
复习与思考题	324
能力培养题	324
参考文献	325

1 绪 论

▼1.1 电力牵引传动的发展历程

1.1.1 电力牵引传动控制系统的概念

在交通运输工具中采用电动机驱动的电气传动部分称为电力牵引传动控制系统,它以牵引电动机为控制对象,通过开环或闭环控制系统对电动机所产生的牵引力和速度进行调节,以满足车辆牵引和制动特性的要求,从而实现对各类交通运输工具的运行控制。电力牵引传动控制系统的应用范围很广,包括水上的运输船只,陆上的大型载重汽车以及电气传动的电动轿车和轨道交通车辆。本书中的电力牵引传动控制系统主要是指应用于各种轨道交通的轨道交通车辆(注:本书中的轨道交通车辆是指电传动内燃机车、电力机车、高速动车组、城市轨道交通车辆以及磁悬浮列车,其中城市轨道交通车辆包括速度较低的地铁列车、轻轨列车、有轨电车等,由于磁悬浮列车不存在轮轨接触问题,因此在与轮轨接触有关章节的内容中,轨道交通车辆不包括磁悬浮列车)的主传动控制系统。

1.1.2 电力牵引传动的发展历程

电力牵引传动的发展可分为直流传动(直-直、交-直)控制阶段及交流传动控制阶段。

1. 直流传动控制阶段

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采用了直流供电牵引方式,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、变换为三相交流供电的试验车。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(又称可控硅)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,全球掀起了单相工频交流电网电气化的高潮。交-直流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了交-直流传动电力机车并投入运行。

1958 年 12 月 28 日,我国第一台干线铁路电力机车试制成功,当时命名为 6Y₁ 型。其采用引燃管整流器,机车持续功率 3410kW,最高速度 100km/h。在此基础上,从引燃管整流器到硅整流器,不断改进和提高机车的性能,并正式命名为韶山型(SS₁型)电力机车。SS₁型电力机车在 1976 年第 131 号机车时已基本定型,截止到 1989 年停止生产。SS₁型电力机车共制造了 926 台,是中国电气化铁路干线的首批主型机车。

韶山型(SS 型)电力机车是采用直流牵引系统的电力机车系列,共有 9 大型号——SS₁ ~

SS₉, 其中还有许多子型号, 如 SS_{4G}、SS_{7E} 等。从 SS₁ 到 SS₉, 我国直流牵引的电力机车走过了 40 多年的发展历程, 在这个过程中, 电力牵引系统的技术得到了很大的发展, 从引燃管整流器到硅整流器再到可控整流器; 从有级调压控制到无级调压控制; 从继电器逻辑控制到电子控制再到微机控制; 从空转保护到黏着控制; 单台牵引电动机的功率从 500 多千瓦到 900kW 等, 我国的直流牵引系统技术逐步走向成熟。SS 型机车还有着令人骄傲的业绩, 如第一台列车微机控制系统是在 SS₄ 型机车上研制成功的; 设计时速为 160km/h 的准高速四轴电力机车 SS₈ 曾创造了当时中国铁路机车的最高时速 240km/h 等。但随着国际上牵引技术从直流向交流的转换, 我国也逐步停止了直流牵引技术的发展而转向交流牵引技术的研究和发展。

我国第一台自主制造的内燃机车是 1958 年大连机车车辆厂仿照苏联 TЭ3 型电传动内燃机车试制成功的。它就是“巨龙”号电传动内燃机车, 后经过改进设计定型, 命名为东风型并批量生产。同年, 北京二七机车厂试制成功“建设”号电传动内燃机车, 戚墅堰机车车辆厂试制成功“先行”号电传动内燃机车, 但这两种机车都没有批量生产。四方机车车辆厂也于 1958 年开始设计内燃机车, 1959 年试制成功中国第一台液力传动内燃机车, 当时命名为“卫星”号, 代号 NY₁。后经过长期试验和多次改进, 定型为“东方红”型, 于 1966 年批量生产。我国设计制造的内燃机车目前已形成“北京”、“东方红”和“东风”三个系列, 质量达到世界先进水平。“北京”型和“东方红”型是液力传动内燃机车, 而“东风”系列是电传动内燃机车, 也是中国内燃机车的主力, 其保有量占国产内燃机车总数的一半以上。

“东风”是个大家族, 有东风(DF)、DF₂、DF₃、DF₄、DF₅、DF₆、DF₇、DF₈、DF₉、DF₁₀、DF₁₁ 和 DF₁₂ 等型号。下面对各种型号进行简单介绍。

DF 型内燃机车是大连机车车辆厂 1964 年开始批量生产的干线货运机车, 机车标称功率是 1500kW, 最大速度 100km/h, 车长 16685mm, 轴式 C₀—C₀, 传动方式为直-直流电传动。

DF₂ 型内燃机车是戚墅堰机车车辆厂 1964—1974 年间制造的调车内燃机车, 机车标称功率是 650kW, 最大速度 95km/h, 车长 15140mm, 轴式 C₀—C₀, 传动方式为直-直流电传动。

DF₃ 型内燃机车与“东风”型构造基本相同, 仅牵引齿轮传动比由 4.41 改为 3.38, 机车标称功率降为 1050kW, 也是大连机车车辆厂 1969 年开始批量生产的干线货运机车, 车长 16685mm, 轴式 C₀—C₀, 传动方式为直-直流电传动。

DF₄ 型内燃机车是大连机车车辆厂 1969 年开始试制的大功率干线客货运内燃机车, 1974 年投入批量生产。在实际运行中不断改进设计, 生产了 DF_{4B} 型、DF_{4C} 型、DF_{4D} 型系列产品。DF₄ 型的传动方式与第一代 DF 型内燃机车的最大不同是开始采用交-直流电传动。DF_{4B} 型内燃机车是 1984 年由大连、资阳、大同机车厂生产的干线客货运内燃机车, 机车标称功率增加到 1985kW, 最大速度分别为货运 100km/h、客运 120km/h, 车长 20500mm, 轴式 C₀—C₀, 传动方式为直-直流电传动。DF_{4C} 型内燃机车分客运、货运两种, 除牵引齿轮传动比不同外, 两者结构完全相同。DF_{4C} 型是在 DF_{4B} 型内燃机车的基础上开发研制的升级产品, 其提高了机车的经济性、可靠性, 延长了使用寿命, 使机车具有 20 世纪 80 年代世界先进水平。机车标称功率增加到 2165kW, 最大速度分别为货运 100km/h、客运 120km/h, 车长 20500mm, 轴式 C₀—C₀, 传动方式为交-直流电传动; DF_{4CK} 型内燃机车是资阳内燃机车厂开发的干线客运内燃机车, 采用 A1A 轴式, 牵引电机全悬挂、轮对空心轴驱动转向架。机车标

称功率 2165kW,最大速度 160km/h,最大试验速度 176km/h,车长 20500mm,传动方式为交-直流电传动。DF_{4D}型内燃机车是一种以成熟设计、成熟技术和成熟零部件集合而成的干线客货运内燃机车的新产品。机车标称功率 2425kW,最大速度分别为货运 100km/h、客运 145km/h,车长 20500mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。DF_{4E}型内燃机车是四方机车车辆厂生产的干线客货运内燃机车。机车标称功率 2×2430kW,最大速度 100km/h,轴式 2×(C₀—C₀),传动方式为交-直流电传动。

DF₅型内燃机车,1974 年开始设计试制,1985 年由大连机车车辆厂批量生产,适用于编组站和区段站进行调车作业,也可作为小运转及厂矿作业的牵引动力。机车标称功率 1210kW,最大速度 60km/h,车长 18000mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。DF_{5B}型内燃机车是大连机车车辆厂在原 DF₅型的基础上变形设计而成的,其动力装置改用 12V240ZJF 型柴油机,机车车体采用外廊式,适合于调车作业和厂矿使用。机车标称功率 1500kW,最大速度 100km/h,车长 18000mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。

DF₆型内燃机车是大连机车车辆厂生产的新一代大功率、高性能的干线客货运内燃机车新产品,其机车动力装置采用的 16V240ZJD 型柴油机是与英国里卡多咨询工程公司合作改进的,传动装置是与美国 G. E 公司合作改进的。机车采用了微机控制、电阻制动系统等多项先进技术。机车的牵引性能、经济性和耐久可靠性均进入世界先进行列。机车标称功率 2425kW,最大速度 118km/h,车长 21100mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。

DF₇型内燃机车是北京二七机车厂 1982 年设计,1985 年正式生产的,适用于大型枢纽、编组站场调车及工矿企业小运转作业。机车启动加速快,油耗低、噪声小,效率高,运行安全可靠,操纵和维修方便。机车标称功率 1470kW,最大速度 100km/h,车长 17800mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。DF_{7B}型内燃机车是北京二七机车厂生产的 DF₇型电传动内燃机车系列产品的一种,柴油机装车功率 1840kW,适用于干线货运、大型枢纽、编组站场、工矿企业的调车和小运转作业。该机车能多机重联,机车可双向操纵,最大速度 100km/h,机车全长 18800mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。DF_{7C}型内燃机车是北京二七机车厂生产的 DF₇型电传动内燃机车系列产品的一种,适应于调车作业。柴油机装车功率分 1470kW 和 1840kW 两种。其余技术参数与 DF_{7B}型相同。同系列的产品还有 DF_{7D}型,其适用于寒冷地区和山区线路。该型机车具有油耗低、维修方便等优点。

DF₈型内燃机车是戚墅堰机车车辆厂于 1984 年 11 月 20 日试制成功的,其采用我国自主设计试制的 16V280ZJ 型中速柴油机,为国内首次采用球墨铸铁整体铸造机体,柴油机的运动件采用 42CrMo 合金钢全纤维挤压成形、全加工、氮化曲轴,并列式、全加工、抛物连杆,钢顶铝裙组合活塞,其气缸直径 280mm,活塞行程 285mm,标称功率 3676kW,是目前国内外机车上缸径最大、功率最大的柴油机。DF₈型内燃机车的特点突出表现为功率大、效率高、结构合理、性能优良,与同类型货运内燃机车相比,在相同的条件下,可提高运输能力 28%左右。DF_{8B}型内燃机车是戚墅堰机车车辆厂在 DF₈型内燃机车的基础上开发研制的升级换代产品,可满足繁忙干线货运重载高速的要求。机车具有可变换轴重,以供不同线路选择,微机控制和大屏幕彩色液晶显示屏,改善了乘务员工作条件,机车操纵更方便。机车标称功率 3100kW,最大速度 100km/h,机车全长 22000mm,轴式 C₀—C₀,传动方式为交-直流电传动。

DF₉型内燃机车是戚墅堰机车车辆厂研制的准高速客运内燃机车,采用了轮对空心轴

式牵引电动机全悬挂转向架、6 连杆万向轴两级弹性驱动、两系高柔圆弹簧串联瓦状橡胶垫车体悬挂、蛇型液压减振器等当代先进技术,可以满足高速运行要求。柴油机装车功率达到 4500kW,最大速度 160km/h,轴式 C_0-C_0 ,传动方式为交-直流电传动。

DF_{10D} 型内燃机车是 DF₁₀ 系列机车中的一个品种,是大连机车车辆厂生产的重型调车和小运转作业内燃机车。其柴油机装车功率 2200kW,最大速度 100km/h,车长 18800mm,轴式 C_0-C_0 ,传动方式为交-直流电传动。DF_{10F} 型内燃机车是 DF₁₀ 系列机车中的一个品种,是大连机车车辆厂生产的适用于客流繁忙干线开行速度为 140~160km/h 旅客列车的牵引动力。机车由结构完全相同的两个单节机车联挂而成。柴油机装车功率 2×2200 kW,最大速度 160km/h,车长 2×18200 mm,轴式为双 C_0-C_0 ,传动方式为交-直流电传动。

DF₁₁ 型准高速客运内燃机车,1992 年由戚墅堰机车车辆厂试制成功,机车采用 16V280ZJA 型柴油机,并运用微机控制,采用电空制动、机车速度控制系统、轴温检测、独立作用式单元制动器及双流道散热器等一系列新技术,使机车在任何情况下均可恒功率运行。其转向架采用锥形空心轴全悬挂、双节连杆万向节驱动装置、高柔圆弹簧旁承等新技术,具有较好的动力学性能。机车标称功率 3040kW,最高运行速度 170km/h,最高试验速度达到 183km/h。其传动方式为交-直流电传动。

DF₁₂ 型电传动内燃机车是资阳内燃机车厂生产的国内功率最大的调车机车,适用于路内大型编组站和工矿企业 5000t 级货物列车的调车和小运转作业,也可以用于牵引干线货物列车,是目前国内多功能、通用性最好的调车机车。机车标称功率为 1990kW,最大速度 100km/h,车长 19900mm,轴式 C_0-C_0 ,传动方式为交-直流电传动。

世界上第一条地铁诞生在英国伦敦。1863 年,短途的“大都市铁道”建成开通,该地铁采用“挖一盖”工序(即挖掘一条深沟,然后封盖其上面),全长 6.5km,当年达到了 950 万人的客流量。不久,其他国家城市也纷纷仿效伦敦,布达佩斯、波士顿、巴黎、纽约在 1896—1904 年相继开通了地铁。

北京地铁是中国第一条地铁。1965 年 7 月 1 日北京地铁第一期工程开工,经过 4 年的艰苦奋战,全长 23.6km 的地铁一期工程于 1969 年 10 月 1 日建成通车。从此,结束了中国没有地铁的历史。全长 16.1km 的二期工程于 1971 年 3 月开工,1984 年 9 月建成,并于 1987 年实现了两线的联网运营。从此,我国城市轨道交通发展又经历了三个阶段:

第一阶段为建设阶段,从 20 世纪 80 年代末至 90 年代中期。以上海地铁一号线(21km)、北京地铁复八线(13.6km)、北京地铁一号线改造、广州地铁一号线(18.5km)建设为标志,我国真正以交通为目的的地铁项目开始建设。沈阳、天津、南京、重庆、武汉、深圳、成都、青岛等都开始建设轨道交通项目。

第二阶段为调整整顿阶段,从 1995 年至 1998 年。由于地铁建设发展迅猛,许多地方不考虑经济的承受能力和社会发展的需要,城市轨道交通建设带有很大的盲目性。针对工程造价高、轨道交通车辆全部引进、设备大量引进、城市地铁每公里造价 1 亿美元左右等问题,1995 年国务院办公厅 60 号文件通知,除上海地铁二号线项目外,所有地铁项目一律暂停审批,并要求做好发展规划和国产化工作。这期间近 3 年国家没有审批城市轨道交通项目。1997 年底开始,国家计委研究城市轨道设备国产化实施方案,提出深圳地铁一号线(19.5km)、上海明珠线(24.5km)、广州地铁二号线(23km)作为国产化依托项目,于 1998 年批复 3 个项目立项,轨道交通项目又重新开始启动。

第三阶段为发展阶段,从1999年至今。国家先后批准了深圳、上海、广州、重庆、武汉、南京、杭州、成都、哈尔滨等10多个城市轨道交通项目开工建设,并投入40亿元国债资金予以支持,我国轨道交通建设进入高速发展期。

我国城市轨道交通的发展历史并不长,但发展势头十分迅猛,2000年左右全国仅有4座城市拥有城市轨道交通,但目前全国已有包括北京、上海、广州、深圳、南京、天津等13个城市的轨道交通投入运营,先后建成并开通运营了50多条城市轨道交通线路,运营里程达到1576km,比2000年增长了8倍多。

截至2010年底,国内已有36座城市向国家主管部门上报了城市轨道交通建设规划,其中有28座城市的近期轨道交通建设规划已经得到政府批准,共规划线路90多条,总里程约2700km,总投资超过10270亿元。

地铁列车和轻轨列车速度都较低,一般采用直-直流电力传动。

2. 交流传动控制阶段

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一批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、黏着利用好、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、辅助变流器等主要部件的设计和制造方面,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,已有多型号三相交流电力机车、交流电传动内燃机车和高速电动车组,分别在德国、法国、日本、中国等国家的铁路线上运行,其制造厂家有德国的西门子公司、法国的阿尔斯通公司、加拿大的庞巴迪公司、美国的GE公司、日本的日立公司和川崎重工、中国的南车集团和北车集团等。从20世纪90年代开始,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,而全部采用交流传动控制技术。

采用交流传动控制技术具有以下优点:

(1) 可实现良好的牵引性能。交流传动控制技术可以合理地利用系统的调压、调频特性,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,调节调频特性还能使机车和动车组在启动时发出较大的启动转矩。

(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,它可以通过PWM控制方法,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方便地实现牵引和再生之间的能量转换,有显著的节能效果。

(3) 牵引系统功率大、体积小、质量轻、运行可靠。由于异步牵引电动机转速可达4000r/min,利用了直流电动机换向器所占的空间,所以交流电动机功率大、质量轻,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1400~2000kW。另外,交流电动机没有换向器和电刷装置,机车或动车组主电路系统又可以省去许多有触点的电器,因此,可以进一步提高运行可靠性。

(4) 动态性能和黏着利用好。由于交流异步电动机有较硬的自然特性,其防空转(机车黏着利用)性能较好。当机车和动车组轮对发生空转(黏着破坏)时,牵引力会急剧下降,使黏着牵引力很快恢复。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,不但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,非常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技术的研究,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 300kW 以上。与此同时,铁道科学研究所与株洲电力机车研究所等科研单位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 1000kW 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 1000kW 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。1999 年 9 月 8 日,中国第一台交流传动内燃机车在青岛四方机车车辆厂研制成功。迄今为止,我国已研制成功 DJ₁、DJ₂ 等型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“捷力”号交流传动内燃机车,另外研究比较成功的还有 DF_{8B} 型交流传动内燃机车,又名 NJ₂ 型,是资阳内燃机车厂和株洲电力机车研究所联合研制的国产化交流传动干线客、货运内燃机车。DF_{8B} 型交流传动内燃机车采用计算机控制等先进技术,柴油机采用电子喷射技术。在确保机车可靠性前提下,其主要部件均采用国产件,以降低机车制造和运用成本。机车按“重载 5000t、最高速度 120km/h”牵引要求进行设计,其总体技术水平达到 20 世纪 90 年代末世界先进水平。由于采用了微机控制等多项新技术,能在机车各种工况(牵引、电阻制动及自负荷)运行时,综合、分析、比较来自机车各系统的信号,并用来控制机车,使其按最佳状态运行。为了充分利用和发挥柴油机的最大运用功率,确保机车有一个较宽广的恒功率运行范围,这种机车采用了两套微机控制恒功率调节系统。其装车功率 4000kW,最大速度 120km/h,传动方式为交-直-交电力传动。

为加快实现我国铁路机车车辆现代化的步伐,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”,以国内公开招标的方式,先后引进了 200km/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,并在此基础上研发出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)生产的动力分散型高速列车,动力配置为 5M3T; CRH₂ 和 CRH₂-300 型高速动车组是由南车四方机车车辆股份有限公司生产的动力分散型高速列车,动力配置分别为 4M4T 和 6M2T; CRH₃ 型动车组是由唐山轨道客车股份有限公司生产的动力分散型高速列车,动力配置为 4M4T; 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分散型高速列车,动力配置为 5M3T。

我国目前具有自主知识产权的大功率交流传动机车有 HXD₁、HXD₂、HXD₃ 型电力机车,以及 HXN₃、HXN₅ 型内燃机车。HXD₁ 型电力机车是由株洲电力机车有限公司生产的