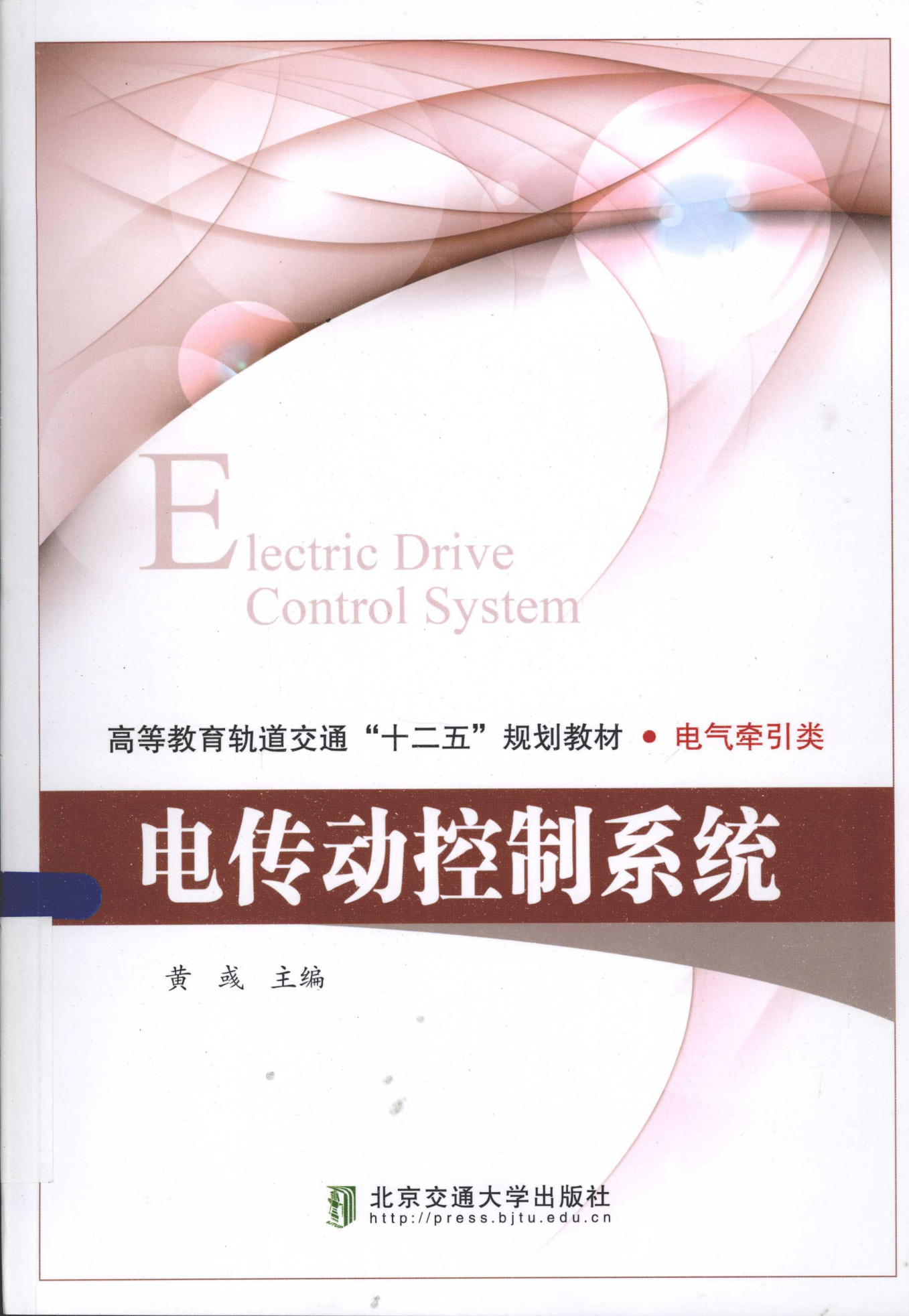




Electric Drive Control System

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 电气牵引类

电传动控制系统

黄 彧 主编



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

013022109

U264
07

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

电传动控制系统

黄 彧 主编



U264
07

北京交通大学出版社

· 北京 ·



北航

C1631706

内 容 简 介

本书详细介绍了直流电传动机车控制技术和交流电传动机车控制系统的基本构成和工作原理。本书共分七章,内容包括:绪论、直流电传动机车调速、有级调速与继电器控制系统、电力机车功率因数、相控电力机车及其控制系统、交流电传动机车调速和交流电传动机车及其控制系统。

本书可以作为高等院校电力系统及其自动化、车辆工程、机电一体化等专业的本、专科教材,也可供相关专业的研究生及从事电力传动工程的技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电传动控制系统 / 黄彧主编. — 北京: 北京交通大学出版社, 2012. 10

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1198-1

I. ① 电… II. ① 黄… III. ① 电力机车-电力传动系统-控制系统-高等学校-教材 IV. ① U264

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 215463 号

责任编辑: 陈跃琴 特邀编辑: 宋望溪

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010-51686414

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 北京时代华都印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 14.75 字数: 368 千字

版 次: 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-1198-1/U·116

印 数: 1~3 000 册 定价: 35.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：陈 庚 姜久春

委 员：(按姓氏笔画排序)

王立德 方 进 刘文正

刘慧娟 吴俊勇 张晓冬

周 晖 黄 辉

编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：孙秀翠

成 员：(按姓氏笔画排序)

吴嫦娥 郝建英 徐 琤 高 琦

出版说明

为促进高等轨道交通专业电气牵引类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学电气工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·电气牵引类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年起陆续推出,首批包括:《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《工程电磁场》、《电机学》、《电传动控制系统》、《电力系统分析》、《电力系统继电保护》、《高电压技术》、《牵引供电系统》、《城市轨道交通供电》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通电气牵引专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会

2012年7月

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到18万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展的需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和交通土木工程四个系列,涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域,每本教材都是由该领域的专家执笔,教材覆盖面广,内容丰富实用。在教材的组织过程中,我们进行了充分调研,精

前言

电传动控制系统在交通运输和城市轨道交通领域中发挥着重要的作用。自 20 世纪 90 年代以来,电力电子技术、微电子技术和控制技术的不断发展,将电力牵引控制系统带入了一个前所未有的高度。目前,高速和重载已经成为电力牵引的两个重要发展方向,因此为了保障电力牵引系统正常安全运行,与数字脉宽调制技术、微型计算机控制技术及现代控制技术相结合的高性能电力牵引控制系统不断涌现。

本书突出铁路专业特色,以电力牵引控制技术的发展为主线,详细介绍了第一代有级调速机车和继电器控制系统、第二代相控调速机车与模数混合控制系统及现代交流传动机车与列车网络控制系统,涵盖了电力牵引轨道交通的直流传动和交流传动的整个发展历程。本书分为两大部分,前半部分主要介绍直流电传动系统的主体结构及控制系统的基本工作原理;后半部分以交流传动机车为主要介绍对象,针对交流传动控制系统进行详细的剖析,分析具有代表性的典型车型,展示交流电传动机车和交流动车组的最新技术和发展。

本书共分为七章,第 1 章绪论,主要介绍电力牵引技术的发展历程及电力牵引技术应用领域;第 2 章直流电传动机车调速,主要介绍直流电传动机车的调速原理与方法;第 3 章有级调速与继电器控制系统,以 SS1 型电力机车为例详细分析了有级调速机车的调速原理及继电器控制系统的基本工作原理;第 4 章为电力机车功率因数,针对相控电力机车功率因数低的问题,详细分析了电力机车功率因数的决定因素及提高机车功率因数的具体方法;第 5 章相控电力机车及其控制系统,主要介绍了在直流电传动发展过程中发挥重要作用的 8K 型电力机车,详细论述其主电路调压的原理,以及模数控制的基本构成和单元控制电路的工作原理;第 6 章交流电传动机车调速,分析交流电传动机车异步电机的四种主要控制方法;第 7 章交流电传动机车及其控制系统,重点讨论了交流电传动机车主电路各个环节的控制方法及实现方式,并详细介绍了国内外典型交流动车组和列车控制网络技术。

本书由北京交通大学黄彧主编。由于编者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编者

2012 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论.....	1	4.6 PWM 控制	68
1.1 电力牵引技术发展历程	1	4.7 多段桥顺序控制.....	69
1.2 电力牵引传动方式	2	4.8 无功功率和谐波补偿.....	72
1.3 国外电力牵引轨道交通	6	复习参考题	74
1.4 国内电力牵引轨道交通.....	10	第 5 章 相控电力机车及其控制系统 ..	75
1.5 国内外轨道交通的发展.....	13	5.1 电力机车闭环控制系统.....	75
1.6 电力牵引控制技术.....	16	5.2 6G 型电力机车	86
复习参考题	17	5.3 8K 型电力机车	97
第 2 章 直流电传动机车调速	18	复习参考题.....	114
2.1 直流电机工作原理.....	18	第 6 章 交流电传动机车调速.....	115
2.2 直流电机特性与机车特性.....	22	6.1 交流电传动机车发展	115
2.3 各种励磁方式直流牵引电机 性能分析与比较.....	25	6.2 交流异步电机工作原理	117
2.4 直流电传动机车调速方法.....	33	6.3 异步电机特性与机车特性	123
复习参考题	37	6.4 标量控制技术	132
第 3 章 有级调速与继电器控制系统 ..	38	6.5 矢量控制技术	137
3.1 SS1 型电力机车主电路工作 原理.....	38	6.6 直接转矩控制技术	152
3.2 机车基本开关电器设备.....	43	复习参考题.....	162
3.3 典型继电器控制系统.....	49	第 7 章 交流电传动机车及其控制 系统.....	163
复习参考题	58	7.1 交流电传动机车主电路	163
第 4 章 电力机车功率因数	60	7.2 国外交流机车及其控制	178
4.1 电力机车谐波影响.....	60	7.3 国内交流机车及其控制	186
4.2 电力机车功率因数定义.....	61	7.4 列车控制网络	208
4.3 典型相控整流电路功率因数 分析.....	62	复习参考题.....	222
4.4 不对称触发控制.....	65	附录 A 模拟试题.....	224
4.5 扇形控制.....	66	A1 模拟试题一	224
		A2 模拟试题二	225
		参考文献	

第1章

绪 论

【本章内容概要】

本章主要介绍电力牵引技术的发展历程及电力牵引系统的主要传动方式，并全面展示了世界各国电力牵引发展的现状。

【本章学习重点与难点】

学习重点：电传动机车的概念、电力牵引系统的主要传动方式，以及机车主电路的基本结构和应用领域。

学习难点：供电方式、驱动方式与电力牵引系统的关系。

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系统。电力牵引系统以牵引电动机为控制对象，通过开环或闭环控制系统对牵引电动机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。电力牵引系统主要指各种轨道交通运输工具，如干线电力机车、电传动内燃机车、矿山用电力机车、城市地铁列车、轻轨列车、有轨/无轨电车及磁悬浮列车等。

自从1879年德国诞生第一辆电力机车以来，电力牵引已成为牵引动力的首席，同以煤作为动力能源的蒸汽机车牵引和以柴油作为动力能源的内燃机车牵引相比，电力牵引具有突出的优势，因此，电力牵引作为轨道交通牵引动力的世界性趋势正在蓬勃发展。

1.1 电力牵引技术发展历程

很早以前，人们就一直努力探索机车牵引动力系统的电传动技术。1879年的世界第一台电力机车和1881年的第一台城际电车都在尝试直流供电牵引方式。1891年西门子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，1971年德国又试制了采用“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。这些技术探索终因系统庞大、能量转换效率低、电能转换为机械能的转换能量小等因素，未能成为牵引动力的适合模式。

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，硅可控整流器的发明，标志着电力牵引跨入了电力电子时代。1965年，晶闸管整流器机车问世，使牵引动力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。除了传统的 $16\frac{2}{3}$ Hz 交流和 3 000 kV 直流电气化铁路，新电气化铁路均采用

50 Hz和 60 Hz 工频。因此,欧洲出现了多种铁路电网电流制式。20 世纪 70 年代,采用异步交流传动系统的 DE2500 内燃机车问世,交流传动在牵引领域重新展现出前所未有的活力。

与其他牵引动力形式相比,电力牵引具有无与伦比的优势。

(1) 牵引功率大,为发展大功率、重载、高速的牵引动力提供技术基础。蒸汽机车锅炉装机容量最大为 2 237 kW,轴功率为 400 kW;内燃机车柴油机装机容量最大为 4 474 kW,轴功率最大为 600 kW;而电力机车的能源取自电网,尤其在进入工频交流制电力牵引输电以后,可与工业电网联网,供电网容量不受限制。因此,电力机车设计容量可以不受能源装机容量的限制,机车总功率仅取决于轴功率。我国电力机车单轴功率已达到 800 kW、900 kW、1 000 kW、1 200 kW,国外电力机车单轴功率最大已达 1 600 kW。由此可见电力牵引、内燃牵引、蒸汽牵引的牵引动力的功率比为 $2:1:0.7$ 。另外,电力机车目前是唯一通过电能传输能够接受多种能源(核、太阳、水力、风、化学等)的牵引动力装置,因而可以很好地解决能源危机的问题。

(2) 牵引效率高。在轨道交通的三种主要运载工具中,蒸汽机车最大效率仅为 $8\%\sim 9\%$,难以在技术上突破;内燃机车由于提高柴油机效率在技术上存在难度,最大效率为 $40\%\sim 45\%$;电力机车直接利用电能进行牵引,因此其总效率一般在 $82\%\sim 86\%$ 左右。由此可见,采用电力牵引具有明显的节能效应。

(3) 过载能力强。机车在启动、牵引重载列车和通过困难区段时,需要具有一定的过载能力。蒸汽机车和内燃机车由于自身携带能源装置的限制,因此过载能力较低;而电力牵引机车能源来自外界的供电网,因而电力机车的过载能力明显高于蒸汽机车和内燃机车。

(4) 能够很好保护环境。蒸汽机车大量的煤烟排放,内燃机车严重的废气排放,都会对生态环境带来破坏。而电力机车完全没有燃烧物废气排放,故深受世界各国的垂青,成为轨道交通牵引方式的主流。

电气化高速铁路凭借其良好的环保性、节能、无污染、能源多样性、节省用地、安全、高效、准点、舒适、便捷等优点,在国际上已被视为现代化的象征。

1.2 电力牵引传动方式

电传动机车是采用电力传动方式,以电机为动力驱动轮对各型机车的总称,主要包括干线电力机车、电传动内燃机车、工矿用电力机车、近郊城市无轨电车、地铁电动车组等。在电传动机车上,接触网输入的电能或者柴油机牵引发发电机组产生的电能要通过一套与电能有关的能量变换、传递及控制的装置才能传递给机车动轮,进行机车牵引运行。电传动机车的传动方式及主体结构与机车供电制式及采用的牵引电机密切相关。

1.2.1 电力牵引系统供电制式

从能源获得的方式上,电力牵引系统可以分为电网供电和自给式供电两种。电传动内燃机车属于自给式供电,通过自身携带的柴油发电机组向牵引系统供电;而干线电力机车、城

市地铁、轻轨等则是由电网供电,可以采用架空式的接触网也可以采用第三轨供电。接触网供给电力牵引系统的电流制,又称为供电制式,分为直流制和交流制两种(交流制中又分单相交流和三相交流)。

电力牵引系统的供电制式经历了低压直流供电、低频单相交流供电和工频单相交流供电三个阶段。早期的电气化铁路采用电压相对较低的直流供电。机车或动车组的电机直接连接在电网主线上,通过并联或串联在电机上的电阻和继电器来进行控制。通常有轨电车和地铁的电压是600 V和750 V,干线铁路采用1 500 V和3 000 V。采用直流供电的系统比较简单,但是它需要较粗的导线,车站之间距离较短,因此一般应用于地铁和轻轨等城市轨道交通领域中。荷兰、日本、澳大利亚、印尼、马来西亚的一些地区、法国的少数地区使用1 500 V的直流电,其中,荷兰实际使用的电压大约有1 600 V到1 700 V。比利时、意大利、波兰、捷克北部、斯洛伐克、俄罗斯使用3 000 V直流电。

交流供电制式可以采用较高的电压等级,减小了线路损耗,提高了供电系统效率,因此车站之间的距离可以较长,并且适用较大的牵引功率,所以干线铁路中一般采用交流供电制式。最早交流供电制式为单相低频交流电。由于机车采用单相整流子电机,只有在电网频率低的情况下,换相绕组的变压器电势小,有利于换向;同时谐波分量减小,对通信系统的干扰小。但是其供电系统不能与其他供电电网连接,牵引电机在机械和电气方面受到限制,只在少数国家应用,如德国、奥地利、瑞士、挪威和瑞典使用15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz(电网频率50 Hz的三分之一)的交流电。美国使用11 kV或12.5 kV, 25 Hz的交流电。

在20世纪30年代,匈牙利首次在电气化铁路上使用50 Hz的工频交流电。然而直到50年代以后才被广泛使用。目前,中国、法国、英国、芬兰、丹麦、俄罗斯、西班牙(标准轨高铁路段)、日本(东北、上越、北海道新干线及北陆新干线轻井泽以东)、使用单相25 kV, 50 Hz电力供应,韩国、日本(东海道、山阳、九州新干线及北陆新干线轻井泽以西)使用单相25 kV, 60 Hz电力供应,而美国通常使用单相12.5 kV和25 kV, 60 Hz的交流电。另外日本东北、北海道地区使用20 kV, 50 Hz交流电,北陆地区、九州地区使用20 kV, 60 Hz交流电。

1.2.2 电力牵引系统驱动方式

电力牵引系统驱动方式可以分为直流驱动和交流驱动两种。

直流驱动采用直流电机作为牵引电机。直流牵引电机的工作原理、结构与普通直流电机没有区别,但是干线电力机车的直流电是通过整流器和平波电抗器得到的,附加有脉动的交流分量。交流分量会引起电机的电磁脉动,造成电机换向恶化,甚至引起环火,因此这类直流牵引电机又称为脉流牵引电机。脉流牵引电机除了需要改善换向之外,还需改善电机的散热。

交流驱动采用交流电机作为牵引电机。交流牵引电机又可分为交流异步牵引电机和交流同步牵引电机。目前在电力牵引系统中广泛使用交流异步牵引电机。交流异步牵引电机的工作频率范围宽广,在整个工作频率范围内交流异步电机的各个参数要求保持一致,因此电机的结构和材料需要特殊的设计,特别是转子的导体材料、转子导体的电阻性能、转子的槽形和漏抗等。另外交流异步牵引电机定子绕组的绝缘也需要特殊的考虑。

另外,牵引电机与普通电机的运用环境不同。列车的牵引电机悬挂在转向架上,需要承受巨大的振动和冲击力,因此电机结构必须需要特殊设计;其次牵引电机一般都是多个并联

运行, 因此要求各个电机的参数一致, 否则会造成牵引电机的负载分配不均匀, 个别电机过载过热, 甚至出现更加严重的影响运行安全的问题。

1.2.3 电力牵引系统传动方式

根据牵引供电制式和牵引电机的种类, 电力牵引系统的传动方式可以分为直直型、交直型、交直交型、交交型和直交型五类。

1. 直直型电传动机车

直直型电传动机车是现代电传动机车中最为简单的一种, 是牵引供电系统采用直流供电、牵引电机采用直流电机的电传动机车。直直型电传动机车工作原理如图 1-1 所示。目前有些工矿电力机车、地铁电动车组和城市无轨电车仍采用这种型式。

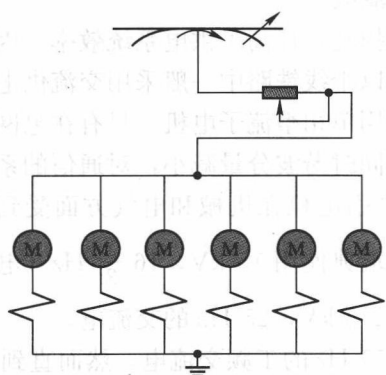


图 1-1 直直型电传动机车工作原理

图 1-1 为六轴直直型电传动机车工作原理, 由受电弓从接触网获得直流电, 通过启动电阻向六台直流牵引电机供电, 牵引电流经钢轨流回变电所。当六台牵引电机接通电源后旋转, 通过调节调速电阻进行调速, 把电能转变为即行机械能, 驱动机车动轮牵引列车运行。

直直型电传动机车结构简单, 造价低, 经济性好, 控制简单, 调速方便, 运行可靠。但是由于采用直流供电, 供电网电压受到牵引电动机端电压的限制, 接触网电压一般为 $1\,500 \sim 3\,000\text{ V}$ 。因此, 接触网损耗较大, 供电效率低, 基建投资大。所以直直型电传动机车的功率等级较低, 不适合于干线大功率的牵引要求, 一般应用于工矿及地铁、城铁、有轨/无轨电车等城市交通运输领域。

2. 交直型电传动机车

随着大功率硅整流器和可控硅的发展, 出现了一种新的传动方式——交直传动。交直型电传动机车又称为相控电传动机车, 牵引供电系统采用单相工频交流电、牵引电机采用直流电机。交直型电传动机车将接触网供给的单相工频交流电, 经机车内部的牵引变压器降压, 再经整流装置将交流转换为直流, 然后向直流(脉流)牵引电动机供电, 从而产生牵引力牵引列车运行。

图 1-2 所示为采用中抽式全波整流器的交直型电传动机车工作原理。牵引变压器二次侧绕组分成 oa 、 ob 两段, 两段电压大小相等、方向相反。整流元件 D_1 、 D_2 的正极分别与二次侧绕组的 a 、 b 点相接, 负极相互联接在一起。牵引电动机的一端与变压器二次侧绕组的中点 o 相接, 另一端经平波电抗器 PK 与整流电路的输出端即整流元件的负极相接。

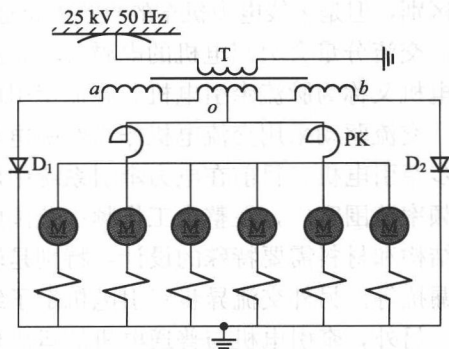


图 1-2 交直型电传动机车工作原理

当变压器二次侧电压正半周 a 点为高电位时,

整流元件 D_1 导通, 电流由 a 点经整流元件 D_1 、平波电抗器 PK、牵引电动机 M 回到 o 点, 构成闭合回路。此时, 整流元件 D_2 因承受反向电压而截止。当变压器二次侧电压负半周 b 点为高电位时, 整流元件 D_2 导通, 电流由 b 点经整流元件 D_2 、平波电抗器 PK、牵引电动机 M 回到 o 点, 也构成闭合回路。此时, 整流元件 D_1 因承受反向电压而截止。由此可知, 在交流电压的正负两个半周内, 变压器二次侧绕组 oa 、 ob 交替流过电流, 从而牵引电动机 M 中始终流过连续不断的方向不变的电流, 保证了直流(脉流)牵引电动机的正常工作。

从上面的分析可见, 交直型电传动机车的变流过程是在机车内完成的, 因此交直型电传动机车是一个集变压、变流、牵引为一体的综合装置, 不仅简化了电气化牵引的供电设备, 而且由于采用交流电网供电, 提高了接触网的供电电压, 使一定功率的电能得以采用小电流输送, 既可减小接触网导线的截面, 节省有色金属用量, 也可减少电能损耗, 提高机车的供电效率。由于机车内设有变压器, 调压十分方便, 牵引电动机的工作电压不再受接触网电压的限制, 机车就可以选择最有利的工作电压, 使牵引电动机的重量造价比降低, 同时工作更为可靠。牵引电动机采用适合牵引的串励或复励电动机, 可以获得良好的牵引性能和启动性能, 尤其启动时它采用了调节整流电压的方式, 省略了启动电阻, 不仅减轻了电气设备的重量、降低了启动能耗, 而且改善了电力机车的启动性能, 提高了机车的运行可靠性。

但是, 由于交直型电传动机车采用单相 50 Hz 整流, 其输出电压有很大脉动, 因而流过牵引电动机的电流也有较大脉动。脉动电流不仅使牵引电机的损耗增加, 而且使牵引电机的换向恶化, 因此在交直型电传动机车上需要装设平波电抗器和固定磁场分路电阻以限制电流的脉动, 改善电动机的工作条件。

3. 交直交型电传动机车

与直流牵引电机相比, 由于交流异步电机具有结构简单, 运行可靠, 体积小重量轻等显著优点, 并且随着大功率半导体器件以及电力电子技术的不断发展, 可以方便地实现交流异步电机的调速, 因此, 交流异步电机已经普遍应用在电力牵引领域。

交直交型电传动机车是牵引供电系统采用单相工频交流电、牵引电机采用交流电机的带有中间直流环节的电传动机车。交直交型电传动机车工作原理如图 1-3 所示, 机车主电路由整流器、中间直流环节和牵引逆变器组成。牵引变压器输出的单相交流电

经过整流器变换成直流电, 形成中间直流环节, 再经过牵引逆变器把直流电变换为电压、频率可调的三相交流电供给交流电机, 驱动机车运行。交直交电传动机车已在高速动车组、大功率电力机车中得到广泛应用。

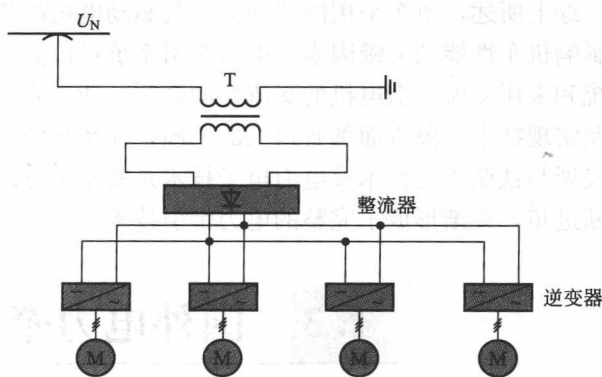


图 1-3 交直交型电传动机车工作原理

4. 交交型电传动机车

交交型电传动机车是牵引供电系统采用单相工频交流电、牵引电机采用交流电机的不带有中间直流环节的电传动机车。其工作原理如图 1-4 所示, 交交型电传动机车主电路采用交交变频器, 直接进行交交变换, 不经过中间直流环节, 将输入的单相交流电直接变换为频率可调的三相交流电供给交流电机, 驱动机车运行。交流电机选用三相同步电机的电力牵引系统一般采用交交传动方式。

5. 直交型电传动机车

直交型电传动机车是牵引供电系统采用直流供电、牵引电机采用交流电机的电传动机车, 属于交流传动范畴, 已在现代轻轨、地铁列车中得到应用。其工作原理如图 1-5 所示, 机车从接触网获得 3 000 V 直流电, 首先通过斩波器进行降压斩波变换为 1 500 V 直流电, 再通过逆变器将直流电变换成电压、频率可调的三相交流电供给交流电机。

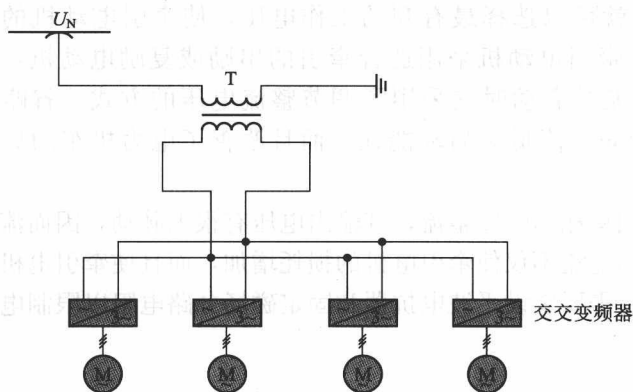


图 1-4 交交型电传动机车工作原理

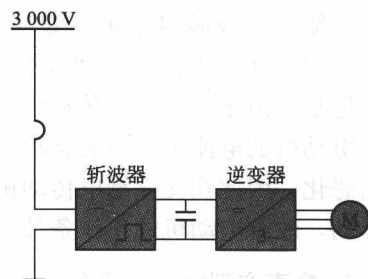


图 1-5 直交型电传动机车工作原理

综上所述, 机车采用的传动方式及驱动电机的不同直接决定了电传动机车主电路结构, 是影响机车性能的关键因素。电力牵引系统可以分为两大类: 采用直流牵引电机的直流传动系统和采用交流牵引电机的交流传动系统。两者在使用的电子电气装置、控制方法和策略, 以及实现技术手段方面都有很大的不同, 在系统的性能方面也有很大的差别。电力牵引技术的发展与铁路供电技术及电力电子技术是密不可分的, 随着电流制的不同和电力电子技术的不断进步, 逐渐形成了完整的电力牵引技术。

1.3 国外电力牵引轨道交通

1.3.1 国外干线电力牵引发展

轨道交通一直是以铁路为主体, 世界上第一条铁路自 1825 年在英国诞生以来, 一直被视为工业革命的象征与先驱和国民经济发展的基础之一。进入 20 世纪以后, 铁路、公路、水路、航空、管道为五大运输方式既形成竞争态势, 同时又相互支撑相互衔接, 形成全方位

的综合运输体系,成为社会经济运行的大动脉。铁路作为轨道交通的主体,具有集中、大宗、安全、舒适、价廉、全天候的优势,被称为大众交通。

世界铁路总里程达 128×10^4 km 以上,主要集中在欧洲和北美,共占 70% 以上,亚洲居第三位,占 12%。超过 5×10^4 km 铁路的国家有美国、俄国、加拿大、印度和中国,截至 2009 年年底,我国铁路营运里程达到 8.6 万公里,跃居世界第 2 位。

世界铁路借助电力牵引等新技术,实现了客运高速和货运重载两大战略目标,完成了从传统产业向现代化产业发展的历史性转变。以 1964 年日本第一条电气化高速铁路(东海道新干线)开通营业为标志,法国、德国、意大利、西班牙、瑞典、英国等国相继建成电气化高速铁路,电力牵引列车最高运营速度从 210 km/h 跨越到 300 km/h,最高试验速度达到 574 km/h。韩国、俄国、美国、加拿大已相继修建了电气化高速铁路。高速技术在发达国家已几度更新,技术日臻成熟。全世界电气化高速铁路通车里程已有 5 000 km,其中日本新干线 1 952 km、法国 TGV 1 282 km、德国 ICE 427 km、西班牙 AVE 471 km、意大利 ETR 237 km,还有近 10 000 km 正在建设。21 世纪将是高速铁路时代,仅日本就要使高速铁路总里程增加到 7 000 km,形成以东京为中心的“全国一日交通圈”高速铁路网。法国高速铁路将以巴黎为中心,覆盖 70% 的法国国土。即使在航空及高速公路十分发达的美国,也开始掀起修建高速铁路的高潮。

重载货运始于 20 世纪 60 年代,从北美铁路兴起,目前已有美国、加拿大、俄国、澳大利亚、巴西、南非、中国等近 10 个国家的铁路开行万吨以上重载列车,主要形式也是电力牵引。

1.3.2 国外发达国家高速铁路

1. 日本新干线

0 系高速列车从 1964 年 10 月 1 日投入东海道新干线高速铁路营业运行以来,日本新干线高速列车已有 30 多年的发展历史了,相继研制开发了 100 系、100N 系、200 系、E1 (Max) 系、400 系、300 系、500 系等高速列车,并为 21 世纪最高运行营业速度 300~350 km/h,开发了 WIN350、300X、STAR2I 等 3 种高速试验列车。

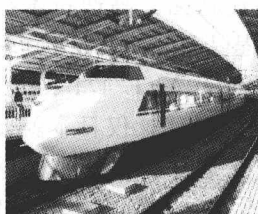
日本是最早并一直采用动力分散型高速列车的国家,主要原因是其国土狭小;城市密集、铁路线路各站间距短、启动和制动加、减速度要求高等要求,并且起源于日本原来较发达的城市轨道交通,同时机电工业发达,容易做到轴重小。

0 系新干线采用直流电机驱动,分散动力,每个车轴一台直流电机,功率 185 kW。调速采用变压器抽头,机械开关切换电压。电磁制动时,电动机处于发电机状态,发出的电能用电阻消耗。0 系新干线的技术虽然简单,但缺点也是显而易见的。直流电机虽然控制简单,实现容易,但有整流器和电刷部件,维护工作量大,寿命短,也限制了速度提高。电磁制动时,电能不能回送电网,只能用电阻变为热白白损失掉。进入 80 年代,随着电力半导体技术的逐步成熟,逐步从直流向交流电机驱动过渡。

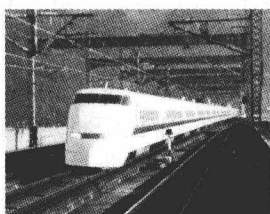
从 1985 年开始,逐渐从直流向交流过渡。在 100、200 和 400 系的新干线上采用可控硅调相调速。用可控硅取代 0 系新干线上的机械开关切换电压,实现无级电压调节,还是使用直流电机驱动。400 系是最后一种采用直流电机驱动的新干线。

随着半导体技术的进展,出现了 GTO 器件,可以实现 VVVF 控制器,实现对交流电

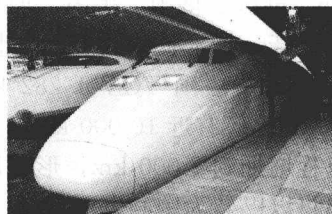
机的控制。300、500、E1、E2、E3 系采用了交流异步电机驱动。交流异步电机结构简单可靠,免维护,转速高,使新干线由原来的 210 km/h 的速度提到高 270 km/h,500 系的速度则达到 300 km/h。由于高速化,需要减轻车体重量,大量使用铝合金结构。半导体技术的继续进展,出现了 IGBT 器件。IGBT 比 GTO 有更高的开关频率,还可以省略关断回路,能够使系统更加小型轻量高效率化,降低了噪声。使用 IGBT 的 VVVF 控制器的新干线为 700、E2 的一部、E4 系。E2 系新干线的特点是适合在频繁停靠站的线路使用,例如站间间隔 30 km,有优良的加速特性,并且减速时电能回送电网特性。E2 系新干线大量采用了轻量化技术,铝合金车体,由于轻量化,列车轴重只有 13 t。轻量化进一步提高了列车的启动停止性能。日本新干线动车组参见图 1-6。



(a) 100系



(b) 300系



(c) E1系

图 1-6 日本新干线动车组

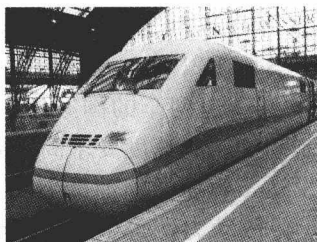
2. 德国 ICE

德国的人口密度比法国大,与日本类似,除了长距离的高速区间以外,也有间隔数十公里的车站,于是开发法国与日本的中间车型,1 列车定员 700 人左右。

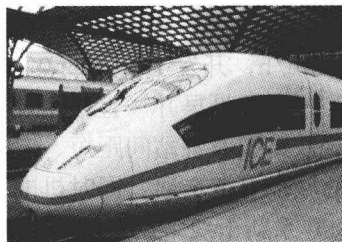
如图 1-7 所示,德国 ICE 系高速列车主要有 ICE1、ICE2、ICE3、ICT (ICE-T、ICE-TD) 等,还包括目前正在处于试验阶段的 Velaro E 高速列车。ICE 也是采用集中动力结构,但 ICE3 则转向了分散动力,提高加减速性能。



(a) ICE1



(b) ICE2



(c) ICE3

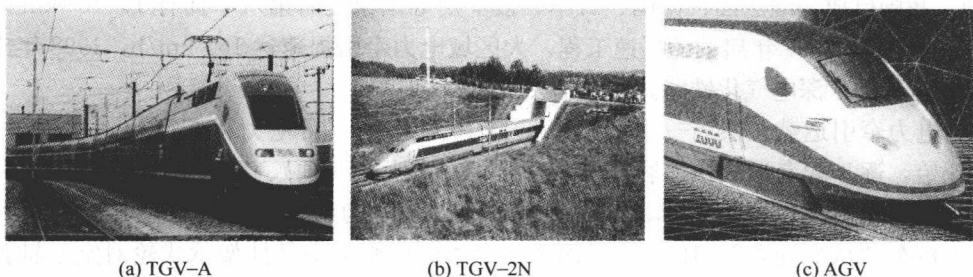
图 1-7 德国高速列车 ICE

ICE1 是德国 20 世纪 80 年代中期开始开发,1991 年投入运用的动力集中型高速动车组。该组有 2M14T、2M12T、2M10T 三种不同的编组形式,额定牵引功率均为 9 600 kW,均采用交流感应电机。ICE2 是德国于 1995 年开发,1997 年投入运用的动力集中型高速动车组。该组是 8 辆车组成的 1M7T 的短编组列车,额定牵引功率为 4 800 kW。ICE3 是德国 1997 年开发,2000 年投入运用的动力分散型高速动车组。该组是 8 辆车组成的 4M4T 的短编组列车。ICE-T 是德国 1997 年开发的动力分散型高速摆式电动车组。到目前为止,

ICE-T 也生产了两代。在第一代 ICE-T 中,由 7 辆车构成的 4M3T 和 5 辆车构成的 3M2T 两种编组形式。在第二代 ICE-T 中只有 4M3T 的编组形式,其最高运营速度均为 230 km/h。车组采取 4M 的编组形式,牵引功率 2 240 kW。Velaro E 是德国 2001 年在 ICE 3 列车的基础上,经过适当的改进而开发的动力分散型高速电动车组,其最高运营速度为 350 km/h。该车组是由 8 辆车组成的 4M4T 的短编组列车,牵引功率 8 800 kW。半导体变流依然使用 GTO。

3. 法国 TGV

法国是继日本之后,在欧洲首先发展高速铁路的国家。虽然从 1981 年第一列高速动车组投入运行至今 20 多年,已开发了 3 代 TGV 高速列车(参见图 1-8),列车的型号也较多,但在技术上始终坚持保留了 TGV 高速动车组的特点。列车编组结构始终保持两端的动力车,中间车辆为铰接式联结,形成不可分解的动车组;具有优良的整体性,加强对列车蛇行运动的约束,有利于安全运行;保持列车的轻量化,电力制动采用电阻制动而不采用再生制动,可以保证在接触网突然无电的情况下,电力制动仍然有效,而不至于损坏基础制动。TGV 从第一代发展到第四代,以上原则没有改变。只是正在研发的第五代 AGV,将动力集中式改为动力分散式。



(a) TGV-A

(b) TGV-2N

(c) AGV

图 1-8 法国高速列车 TGV

法国由于人口密度小,法国不需要新干线那么大的输送能力,而需要距离数百公里的点对点运输。这种点对点的运输,对启动停止性能要求不高,于是采用集中动力结构,一头一尾两个动力车,中间则是无动力车。同时法国铁路认为动力集中式维修比较容易,并有利于降低客室噪声,另外 20 世纪 70 年代发展高速车时计算机网络技术还不是非常成熟,发展动力分散式有一定困难。

法国在 1970 年开始研制高速列车时,最初选择是采用燃气轮机为动力,认为造价较低,并造出了第一台样机 TGV-001 号,当时的试验速度达到了 320 km/h。但随着 1975 年第一次石油危机的到来,彻底放弃发展燃气轮机的计划,改为发展电力驱动。

第一代是东南线 TGV,采用的是直流电机,列车为 2M8T,6 台动力转向架(与动车相邻的拖车转向架为动力转向架),12 台直流牵引电机,每台电机功率为 535 kW,无车载计算机网络。

第二代是大西洋线 TGV,采用的是交流同步电机,列车为 2M10T,4 台动力转向架,8 台交流同步牵引电机,每台电机功率为 1 100 kW。装有车载计算机网络;之后北方线使用的 TGV 以及 Thalys 也属于同一代。“欧洲之星”属于第二代的延伸,于 1994 年投入使用,但采用的是以 GTO 为功率元件的交流异步电机,列车为 2M18T,6 台动力转向架,12