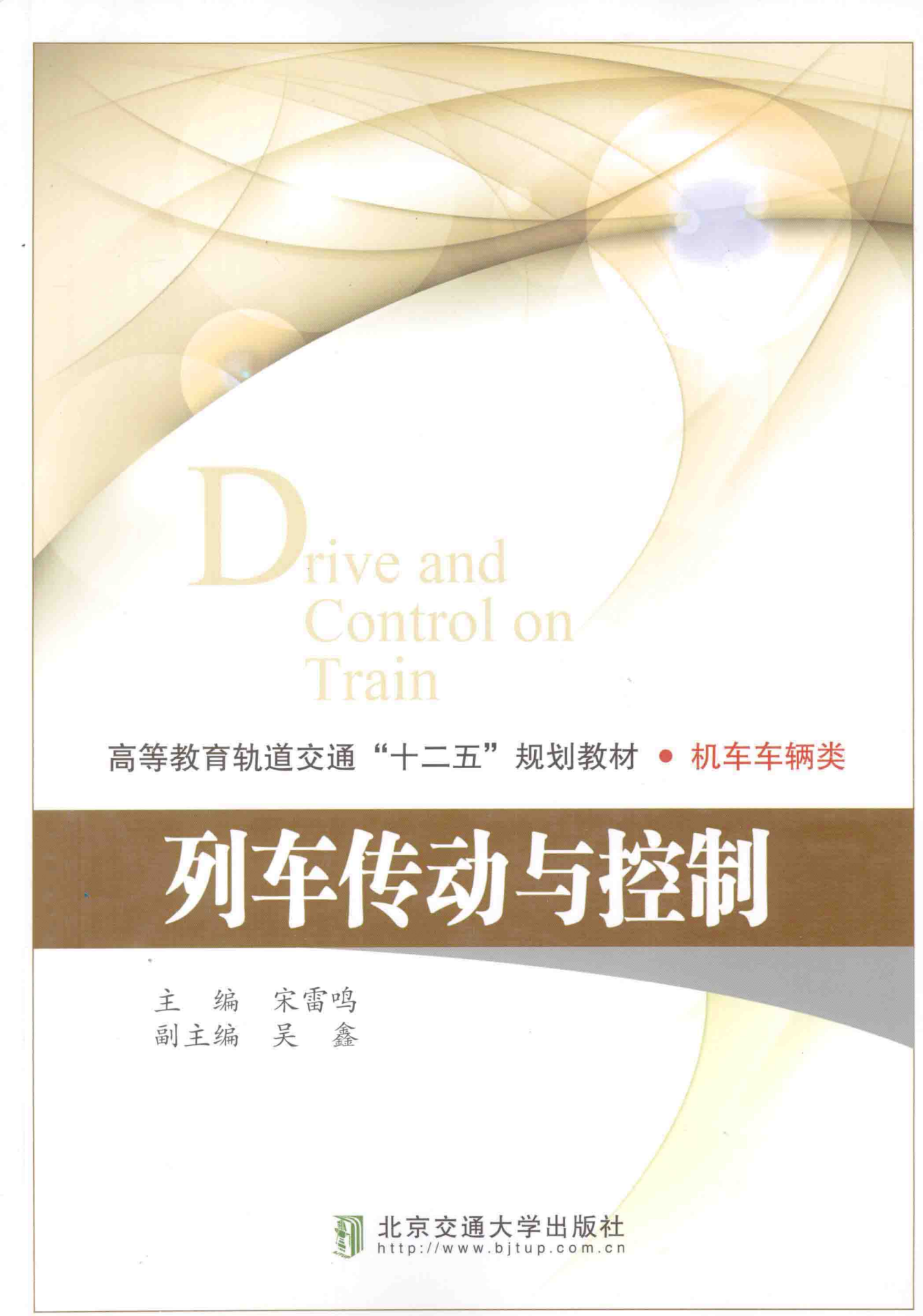




# Drive and Control on Train

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 机车车辆类

## 列车传动与控制

主 编 宋雷鸣  
副主编 吴 鑫



北京交通大学出版社  
<http://www.bjtup.com.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

# 列车传动与控制

主 编 宋雷鸣

副主编 吴 鑫

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书共 8 章, 主要介绍铁路现代车辆传动与控制系统的基本原理与设备。第 1 章介绍动车组传动与控制系统的概念及涉及的一些基本问题; 第 2 章介绍直流电机的基本原理、结构及特性; 第 3 章介绍交流异步电动机的基本原理与结构及特性; 第 4 章介绍交流异步电动机变频调速的基本概念与原理; 第 5 章介绍现代铁路机车及动车组牵引变流电路及控制; 第 6 章介绍 CRH1 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备; 第 7 章介绍 CRH2 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备; 第 8 章介绍 CRH3 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备。

本书可作为铁路动车组系列网络课程教材, 也可供高职院校轨道交通类学生和相关工程人员参考使用。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

列车传动与控制 / 宋雷鸣主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2013. 5

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类)

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1437 - 1

I. ① 列… II. ① 宋… III. ① 动车 - 电力传动系统 - 高等学校 - 教材 ② 动车 - 控制系统 - 高等学校 - 教材 IV. ① U266

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 074709 号

责任编辑: 赵 娟 杨 硕

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 19.25 字数: 487 千字 插页: 1

版 次: 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1437 - 1/U · 135

印 数: 1 ~ 3 000 册 定价: 39.00 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·机车车辆类

## 编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：李建勇 陈 庚

委 员：（按姓氏笔画排序）

王文静 史红梅 刘 伟

刘志明 齐红元 宋永增

宋雷鸣 张励忠 张欣欣

周明连

## 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

# 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12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到1.8万千米。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长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，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会  
2013 年 3 月

# 出版说明

为促进高等轨道交通专业机车车辆类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学机械与电子控制工程学院、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·机车车辆类”。

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1月起陆续推出,首批包括:《互换性与测量技术》、《可靠性工程基础》、《液压与气动技术》、《测试技术》、《单片机原理与接口技术》、《计算机辅助机械设计》、《控制理论基础》、《机械振动基础》、《动车组网络控制》、《动车组运行控制》、《机车车辆设计与装备》、《列车传动与控制》、《机车车辆运用与维修》。

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,特别是轨道交通机车车辆专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会  
2013年3月

# 前 言

---

现代铁路列车有很多高新技术问题，它涉及系统集成技术、车体技术、转向架技术、制动技术、牵引传动技术、自动控制技术、网络与信息技术等。本书是在整理相关的技术资料并结合以往本科教学及动车组机械师培训经验的基础上编写的。本书主要介绍现代列车传动的基础理论、电路及系统控制。动车组是铁路车辆的典型代表，本书以动车组的传动与控制系统为例进行讲解。

全书共 8 章：第 1 章介绍动车组传动与控制系统的基本概念及涉及的一些基本问题；第 2 章介绍直流电机的基本原理、结构及特性；第 3 章介绍交流异步电动机的基本原理与结构及特性；第 4 章介绍交流异步电动机变频调速的基本概念与原理；第 5 章介绍现代铁路机车及动车组牵引变流电路及控制；第 6 章介绍 CRH1 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备；第 7 章介绍 CRH2 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备；第 8 章介绍 CRH3 型动车组供电牵引传动系统的基本原理、系统构成与作用及主要设备。

本书可作为铁路动车组系列网络课程教材，也可供高职院校轨道交通类学生和相关工程人员参考使用。

本书由北京交通大学宋雷鸣担任主编，吴鑫担任副主编，编写分工如下：宋雷鸣编写第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 7 章、第 8 章，吴鑫编写第 4 章、第 6 章。

由于编写时间仓促，本书中疏漏之处在所难免，望读者指正！

编 者

2013 年 3 月

# 目 录

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 第1章 绪论..... 1                   | 第5章 现代机车及动车组牵引变流电路及控制..... 117 |
| 1.1 动车组牵引传动系统的组成及作用..... 1      | 5.1 牵引变流元件简述..... 117          |
| 1.2 动车组牵引设备布置方式..... 2          | 5.2 脉冲整流器工作原理及控制... 118        |
| 1.3 动车组供电牵引系统发展概况... 6          | 5.3 车辆传动系统牵引逆变器工作原理..... 125   |
| 复习参考题..... 7                    | 5.4 变流器中间直流环节及变流器控制策略..... 131 |
| 第2章 直流电动机..... 8                | 复习参考题..... 134                 |
| 2.1 直流电动机的基本原理..... 8           | 第6章 CRH1型动车组牵引传动系统及控制..... 135 |
| 2.2 直流电机的磁场..... 18             | 6.1 概述..... 135                |
| 2.3 直流电机的基本方程..... 22           | 6.2 CRH1型动车组传动系统主电路..... 141   |
| 2.4 直流电动机的运行特性..... 26          | 6.3 CRH1型动车组受电弓及高压电器..... 158  |
| 2.5 直流电动机的使用..... 29            | 6.4 CRH1型动车组变压器..... 166       |
| 复习参考题..... 38                   | 6.5 CRH1型动车组主变流器..... 175      |
| 第3章 三相交流异步牵引电动机..... 39         | 6.6 CRH1型动车组牵引电动机... 196       |
| 3.1 三相交流异步电动机的基本结构和工作原理..... 39 | 复习参考题..... 200                 |
| 3.2 交流电动机的特性..... 53            | 第7章 CRH2型动车组牵引传动与控制..... 201   |
| 3.3 交流电动机的额定值..... 61           | 7.1 概述..... 201                |
| 3.4 三相异步电动机的启动、调速和制动..... 63    | 7.2 动车组传动系统主电路..... 205        |
| 3.5 牵引电机设计时要考虑的几个特殊问题..... 69   | 7.3 动车组受电弓..... 211            |
| 复习参考题..... 72                   | 7.4 动车组主变压器..... 221           |
| 第4章 交流电动机调速与控制..... 73          | 7.5 动车组主变流器..... 230           |
| 4.1 异步电动机的特性和变频调速基础..... 73     | 7.6 动车组牵引电动机..... 251          |
| 4.2 标量控制技术..... 83              | 7.7 主电路其他元件的使用维护... 255        |
| 4.3 矢量控制技术..... 89              | 复习参考题..... 262                 |
| 4.4 直接转矩控制技术..... 104           |                                |
| 复习参考题..... 116                  |                                |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 第 8 章 | CRH3 型动车组供电牵引传动 |     |
|       | 系统与控制           | 263 |
| 8.1   | 概述              | 263 |
| 8.2   | 牵引传动系统          | 264 |
| 8.3   | 高压电器            | 265 |
| 8.4   | 牵引变压器           | 281 |
| 8.5   | 牵引变流器           | 284 |
| 8.6   | 牵引电机            | 293 |
|       | 复习参考题           | 295 |
| 附录 A  | CRH1 常用英文缩写     |     |
|       | 对照表             | 296 |
| 附录 B  | 模拟试题            | 297 |
|       | B1 模拟试题一        | 297 |
|       | B2 模拟试题二        | 297 |
|       | 参考文献            | 298 |

# 第1章

## 绪论

### 【本章内容概要】

本章介绍了列车牵引传动系统的基本构成及各部分的作用，讲述了现代牵引传动系统的基本特征，动车组动力系统的布置方式，简要介绍了传动系统发展的概况。

### 【本章学习重点与难点】

本章重点了解动车组传动系统的基本构成，掌握动车组传动系统的布置方式。

## 1.1 动车组牵引传动系统的组成及作用

电力牵引列车的动力系统，包括从变电站到列车受电弓在内的供电部分和动车组本身的传动系统，目前根据系统的传动方式和动力布置方式等的差异，列车牵引传动系统的组成有所不同。本书主要介绍列车传动系统装备部分，即从受电弓、主变压器到牵引电动机的主电路部分涉及的内容。从动车组的发展过程来看，动车组的传动方式主要包括交—直、交—直—交传动方式。如图 1-1 所示为交—直牵引传动系统的构成图，如图 1-2 所示为交—直—交牵引传动系统的构成图。

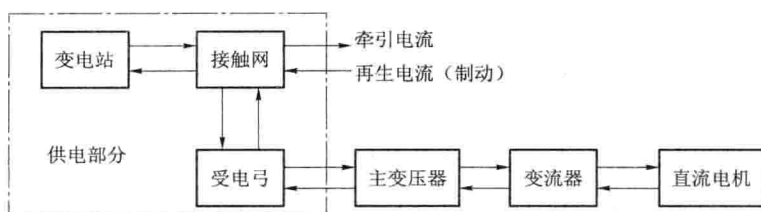


图 1-1 交—直牵引传动系统构成

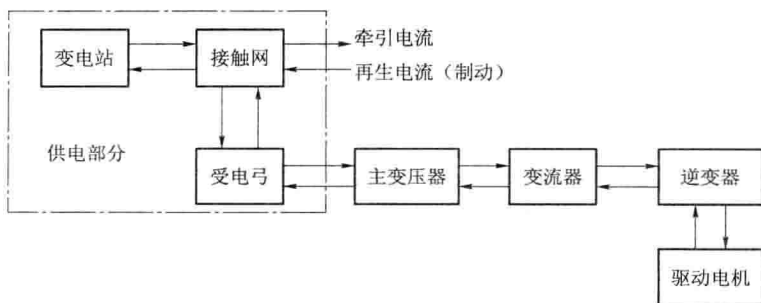


图 1-2 交—直—交牵引传动系统构成

直一直传动的列车牵引传动系统的电网采用直流供电,牵引电机采用直流电机,该种类型的传动系统由于系统的能耗及可靠性差,在目前的铁路列车牵引系统中已经很少采用了。

交一直流传动系统是指机车或动车组采用交流供电,而采用直流电动机驱动动车运行的传动系统。从图 1-1 可以看出为了能够用电网提供的交流电驱动直流电动机工作,系统中采用了变流器,将交流电转换成直流电,并通过对变流器的控制来调整直流电动机的工作速度。

交流传动系统是指由各种变流器供电的异步或同步电动机作为动力的列车(机车和动车组)传动系统。列车受电弓从接触网上取得的是一定频率和恒定电压的电,给牵引电动机供电,由于列车运行要求电动机在所需的转速、转矩范围内工作,并采用变频变压控制技术,需要对供电电压和频率进行调节。因此,必须设计一组变流调频装置,即变流器。变流器主要有直接式变流器(即交—交变流器)和带有中间直流环节的间接式变流器(即交—直—交变流器)两大类。交—交变流器是把电网的交流能量直接转换为电压和频率适合交流电机运行要求的电,中间不通过直流环节;而交—直—交变流器,先把电网交流电转换成直流电,然后进一步转换成电压和频率可调节的交流电,如图 1-2 所示。

现有电力牵引列车(机车或动车组)采用的交流传动系统基本结构为电压型交—直—交系统、电流型交—直—交系统和交—交系统,我国干线铁路牵引传动系统主要采用电压型交—直—交三相异步电机系统。

交流传动技术卓有成效的发展,一方面是由于功率半导体和变流技术的进步;另一方面取决于日臻完善的控制方法和控制装置。后者能够使变流器—电机的整个系统具备不同的性能,以满足不同应用场合的要求。对于铁路牵引来说,这些要求包括:平稳启动、抑制滑行和空转、再生制动、调速范围宽。此外,常常还希望多台并联工作的电动机能够由一个控制器进行控制。

列车通过牵引电机将电能转换为机械能,驱动列车运行。列车高速化,需要的功率比一般列车大,就存在一个功率在列车不同位置如何分配的问题,也就是列车传动系统是按动力集中还是动力分散布置的。

我国铁路新型列车牵引系统,包括动车组及电力机车,都采用交—直—交传动形式,无论是动力集中还是动力分散,牵引传动系统的基本工作原理相同,本书将主要围绕我国新型动车组的牵引传动与控制系统展开。

## 1.2 动车组牵引设备布置方式

电动车组列车牵引动力系统有如图 1-2 所示的主变压器、变流器、逆变器等各种动力设备,除此之外,还有空调机、空压机、各种风机、蓄电池、辅助逆变器等多种辅助设备,在考虑列车动力配置的同时,必须考虑这些设备的布置。

目前,世界上高速电动车组有两种牵引方式:动力分散方式和动力集中方式。前者以日本为代表;后者以欧洲为代表,列车头尾各有一台动力车,中间为拖车,如果动力不够,靠近动力车的中间车转向架,亦装有牵引电动机,这种动力布置方式实质上是传统机车牵引方式的变型——动力集中传动方式,欧洲 300 km/h 以下的高速列车主要采用这种方式。随着

动车组运行速度的不断提高,欧洲 300 km/h 以上的动车组也转向动力分散的形式。

动力集中型高速列车是将这些动力设备全部设置在一辆头车中,如图 1-3 (a) 所示,全列车的牵引力由集中在动力头车及相邻的中间车的动轴提供。这时必须注意两个问题:第一,动力轴的重量必须足够提供所需的牵引力,否则动力车轮将产生空转,丧失牵引力,这不但使电机功率不能发挥反而会损伤车轮和钢轨;第二,动力轴的重量又不能过大,否则在高速运行时会产生过大的轮轨力,损坏钢轨和线路。为此,欧洲高速铁路网在有关的技术规程中规定高速列车的最大轴重不能超 17 t,在作牵引力计算时轮轨黏着系数值定为:

低速启动时: 0.2;

100 km/h 时: 0.17;

200 km/h 时: 0.13;

300 km/h 时: 0.09。

动力车轴重及轮轨黏着系数的限值给高速列车的动力配置造成了很多困难。如德国设计的 ICE 型动力集中型高速列车的动力车每轴功率 1 200 kW,一台动力头车的功率 4 800 kW,较大功率的动力设备和传动机构,使每轴的轴重达到 19.5 t。尽管它有很大功率的牵引电机,并且可以产生较大的启动牵引力(双机启动牵引力为 400 kN),但过大的轴重使欧洲高速路网拒绝接纳。法国的办法是保持动力轴轴重为 17 t,采用增加动力转向架的方式来满足列车功率和牵引力的需要。即在紧接动力头车的拖车中将靠近动力车的一台转向架设为动力转向架,如用在巴黎——伦敦的 EUROSTAR 型和出口韩国的 TGV 高速列车,就是这样的动力设置。

动力集中设置的特点在于集中在头车的动力设备便于检修和集中通风冷却,同时使拖车少负担动力设备的重量和噪声干扰。

另一种动力系统配置方法,却将全列车分为若干个动力单元,在每一个动力单元中带牵引电机的驱动轴(动力轴)分散布置在单元的每一个或部分车轴上,更重要的是将传动系统的各个动力设备也分散地设置在各个车辆底下,而不占用任何一节车厢。图 1-3 (b) 即是该类动力配置的一个例子,图示为 2 辆动力车和 1 辆无动力拖车(简称 2 动 1 拖)组成的一个列车单元。列车可以按需要由若干个单元组成,列车两端必须设有带驾驶室的车头。由图例可见动力系统的主要设备:主变压器(MTr)、变流器/逆变器(C/I)及空压机、空调机等辅助设备都以吊挂的方式置于各车体的底部。为了平衡重量分配,拖车下面也安装一定的动力设备,图示为一种典型的配置方式,主变压器承担前后 2 台动力车的功率供给,即 2 台动力车共用一台主变压器。

动力分散布置列车的单元一般可由 2~4 辆车构成。根据列车的牵引、加速、最高速度等特性决定各单元动力车(M)和拖车(T)的组合。如可能的组合有 2M、2M1T、2M2T、3M1T、4M 等。其特点如下。

- (1) 包括头车在内的各车厢都用来布置乘客坐席和旅客设施。
- (2) 每组单元都具有完善的牵引、制动、控制、信息和辅助电源系统。
- (3) 每列编组中设 2 架受电弓,采用高压线连接以抑制离线和电弧的发生。
- (4) 动力设备分散置于车底下部,设备的工作环境和检修条件较差。

动力分散型动车组轴重小,牵引动力大,启动加速快,驱动动轴多,黏着性能比较稳定,容易实现高速运转;其动力设备均可安装于地板底下,所有车辆(包括头车和中间车)

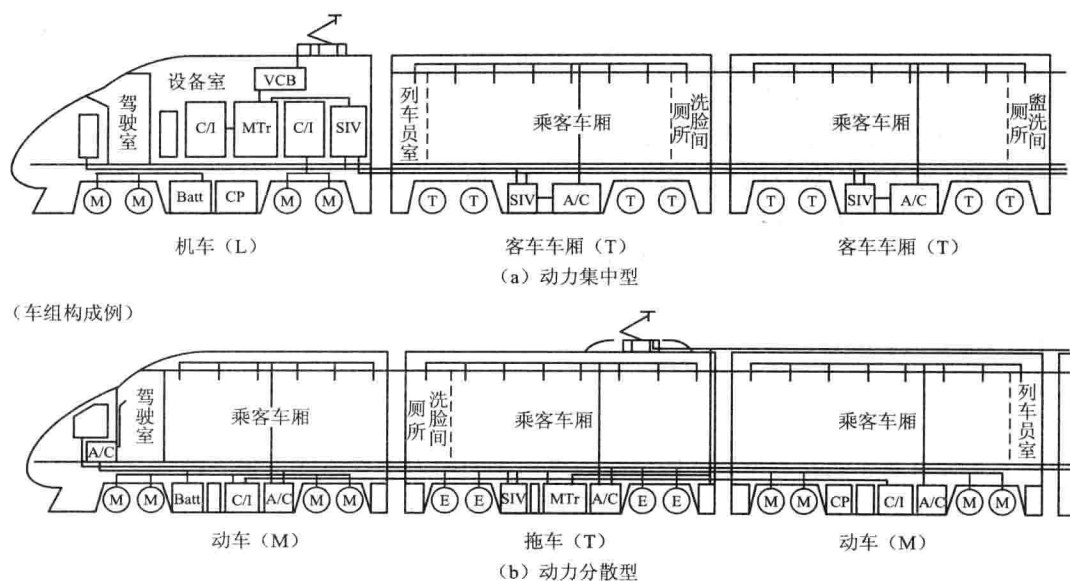


图 1-3 动力配置形式

VCB—真空断路器；MTr—主变压器；C/I—变流器/逆变器；SIV—静止式逆变器；Batt—蓄电池；A/C—空调装置；CP—空压机；M—设有驱动电动机的车辆；E—拖车车轴（设有涡流制动盘或机械制动盘）；T—拖车车轴（设有机械制动盘）

均可成为客车使用，这样可提高列车定员。以新干线 300 系为例，其额定功率为 12 000 kW，

启动加速牵引力可达到 360 kN，每吨启动加速牵引力可达到 0.5 kN，由启动加速到 250 km/h 速度的时间仅需 215 s、走行 9.6 km。新干线 300 系每米定员为 3.29 人，超过 TGV-A 的 2.04 人和 ICE 的 1.85 人。基于这种特点，动力分散型动车组比较适合铁路路基松软、站距较短的国家，如日本等。40 年来，日本始终采用动力分散电动车组，从 0 系到 700 系，一直不变，取得了辉煌成绩。之所以取得这样大的成绩，主要缘由如下。

- (1) 轮轨作用力小，牵引、制动性能良好。
- (2) 采用交流传动（300 系开始）。
- (3) 部件轻量化。
- (4) 采取了减小运行阻力和噪声的措施。

动力集中型动车组为世界许多国家广泛采用，其运行速度也可达到 330 km/h。动力集中型动车组技术成熟，编组较动力分散型动车组更为灵活。另外，在成本方面，动力集中型两端为动力车，设备集中，动力设备数量少，在车内环境方面，动力集中型驱动装置集中在两端，远离旅客座位，噪声小；动力分散型驱动设备分布在车下，有一定的振动影响。

可从如下的几个方面来分析动力集中与动力分散之间的特点。

#### 1) 牵引总功率和轴功率

从轮轨关系来看，理论上每根动轴能传递的牵引功率为轴重、黏着系数和速度的乘积，而实际上能实现的功率受轮径、传动装置布置方式和电传动技术水平等的限制。由于动力分散方式电动车组的轮径和车体底下空间位置比动力集中方式的小（实际上也不需要大），所

以就单轴功率而言,动力分散方式的小,目前最大为 550 kW;动力集中方式的大,目前最大可达 1 200 kW。就车组总功率而言,由于动力分散方式动轴多,可以超过 10 000 kW;动力集中方式目前尚未超过 10 000 kW。当然也可以通过在动力车相邻的中间车转向架上加牵引电动机的办法来增加总功率。但总的来说,只要站线长度允许,动力分散方式可以增加动力单元,其总功率比动力集中方式大,从而可牵引更多的旅客。

### 2) 最大轴重和簧下质量

根据日本新干线的运行经验,在速度和簧下质量一定时,轨道下沉量随着轴重增加而增加。所以采用动力分散方式的理由之一是为了减少线路建设费用,采取低轴重。一般轴重在 16 t 以下,300 系车降到 14 t,准备降到 12 t。动力集中方式电动车组一般轴重大,规定不超过 17 t,但 ICE 车高达 19.5 t,所以就最大轴重而言,动力集中方式比动力分散方式对线路不利。但对轨道的破坏不只是轴重,簧下质量也起着同样重要的作用。日本曾就轴重 14 t、10 t 计算了簧下质量与运行速度的关系。结果表明,如果簧下质量不变,即使减轻轴重,对轨道的破坏不会有太大的好转,簧下质量必须与轴重一起减少。

### 3) 黏着利用

动力分散方式一般轴重较轻,单轴黏着力也较小,但由于动轴多,可以发挥的黏着牵引力大,而动力集中方式虽然轴重大,单轴黏着力大,但由于动轴少,单轴黏着利用接近极限,可以发挥的总的黏着牵引力小。就启动加速度而言,经计算表明,在低速区段,动力分散方式可以充分利用黏着重量大的特点,动力集中方式黏着重量小,低速时采用恒流控制。

### 4) 制动

动力分散方式的一个主要优点是动轴多,对每个动轴都可以施加电力制动和盘形制动,制动功率大,甚至可以超过牵引功率,使列车迅速停车。动力集中方式动轴少,制动功率没有动力分散那么大。

### 5) 制造成本

采用动力分散方式电动车组,电气设备分散、总重大、造价高。日本曾用传统机车牵引客车和动力分散方式电动车组做过比较,BD75 型机车牵引 12 辆客车,一列车造价为 34 240 万日元,而 583 电动车组 6 辆动力车和 6 辆拖车的造价为 47 740 万日元。为了降低列车制造成本,日本已由 16 个全动车减少到 12M+4T、10M+6T。意大利 ETR450 型 10M+1T 一列车造价 2 200 万美元,法国 M-P 型 1M+8T+1M 一列车造价 1 300 万美元来比较,也说明动力集中方式电动车组造价比动力分散方式电动车组低得多。

### 6) 维修费用

由于动力分散方式电动车组的每辆动力车均装有一套电气设备,维修工作量大。原西德曾把 1 辆动力分散方式电动车组与 1 辆牵引 3 辆客车的 BR410 型电力穿梭列车做过比较,结果表明,如果只分析每千米折旧维修费,则 BR430 型电动车组约贵 50%,BR420/421 电动车组约贵 20%。日本也承认动力分散方式维修费用比动力集中方式电动车组高得多。就拿 TGV-A 与 TGV-P 来比较,由于电动机由 12 台减少到 8 台,中间车由 8 辆增加到 10 辆,每座位千米的检修费用 TGV-A 比 TGV-P 低 20%。

德国 ICE1 列车和 ICE2 长编组列车采用推挽式电动车组,两端为动力车,中间为拖车,即采用传统的机车牵引模式,而到了 ICE3 转为动力分散型动车组。(EMUs) 欧洲铁路联盟拟建统一的高速铁路网,新“全欧通用”技术规范于 1997 年生效。要进入这个网,德国铁

路必须与国际接轨,在技术上、性能上满足欧洲高速运输对高速列车的要求。考虑市场竞争的需要,因此 ICE3 采用动力集中已不适合,原因是轴重限制 17 t (ICE1 是 19.4 t),最高速度 300 km/h,线路坡度 40‰,并且要增加座位数等。采用动力分散型动车组可增加乘员,并使整列车质量分布更均匀,随之降低了最大轴重,得到更好的牵引特性和降低单位坐席的质量。此外,还提高了再生制动的利用率,制动功率 8.2 MW,最大电制动力为 300 kN,相当于 ICE2 短编组的 2 倍,减少了盘形制动的磨耗量及维修费用。

### 1.3 动车组供电牵引系统发展概况

日本从 1964 年首条高速线开通以来,动车组从 0 系发展到 700 系,从直传动发展到交流传动,运营速度从 210 km/h 到 300 km/h,一直坚持动力分散模式。法、德两国原先一直推崇动力集中牵引的动车组模式。法国以直传动速度 260 km/h 起步,经过同步电机传动,第三代实现三相交流异步传动高速动车组,而下一代的 AGV 动车组改用动力分散式,速度 320 ~ 360 km/h。德国 ICE1、ICE2 高速动车组率先采用交流异步电机传动,实现 280 km/h 的运营速度,采用动力集中传动方式。然而 ICE3 新一代高速动车组也转而采用动力分散方式 (2M2T)。可见,开发 300 km/h 以上高速动车组采用动力分散是目前世界的发展趋势。

早期的电力牵引传动系统均采用交一直传动,用直流电动机驱动。采用抽头切换,间断控制或可控硅连续相位控制技术进行调速。无论是日本 0 系、100 系、200 系还是法国 TGV - P 和意大利的 ETR450 均采用直流牵引电机,继承了传统的交一直牵引传动系统技术。由于直流电动机的单位功率重量较大,直流牵引电动机一般不超过 500 kW,使高速列车既要大功率驱动又要求减轻轴重,特别是减轻簧下部分质量,形成难以克服的矛盾。

到 20 世纪 80 年代末 90 年代初,高速列车开始采用交流电动机驱动。并存在两种不同的技术路线,即交流同步电机和交流异步电机。法国选择了自换相三相同步牵引电动机,把单台电机功率提高到 1 100 kW,从而在 TGV - A 上用 8 台交流牵引电机,代替 TGV - P 上的 12 台直流牵引电机,将列车功率由 6 800 kW 提高到 8 800 kW。运行速度由 270 km/h 提高到 300 km/h,列车重量由 418 t 增加到 479 t,列车定员由 368 人增加到 485 人。

TGV - A 采用 GTO 晶闸管逆变器,同步电动机加上辅助设备的质量比 TGV - P 的直流电动机增加 30 kg,而功率却增加了一倍。

日本和德国则与法国不同,它们采用异步牵引电动机驱动。同步牵引电动机结构上虽然比直流牵引电动机简单,但它仍有滑环及电枢绕组。而异步电动机中的鼠笼式感应电机 (简称异步电机),转子用硅钢片叠压,用裸铜条作为导体,无滑环等磨耗装置。因此,异步电机结构简单、可靠、体积小、重量轻、可实现电机无维修。

交流传动系统采用三相交流鼠笼式感应电机。三相异步电机与直流电机相比具有很多优点:

① 结构简单、可靠性高、维护少、价格低、易于制造;

② 功率大 (目前,世界上最大的直流牵引电机功率为 1 000 kW,而交流牵引电机功率已达到 1 800 kW)、效率高、质量轻;

- ③ 无换向引起的电气损耗和机械损耗,无环火引起的故障;
- ④ 耐振动、冲击的性能较好;
- ⑤ 耐风雪、多尘、潮湿等恶劣环境;
- ⑥ 具有可持续的大启动牵引力;
- ⑦ 过载能力强(仅受定子绕组热时间常数的影响);
- ⑧ 转速高、功率/质量比高、有利于电机悬挂;
- ⑨ 转矩—速度特性较陡,可抑制空转,提高黏着利用率;
- ⑩ 在几台电机并联时,不会发生单台电机空转现象;
- ⑪ 由于取消了整流子和碳刷,大大减少了维修工作量(据统计,不到直流电机的1/3)。

鉴于逆变器技术和交流电机控制技术的进步为采用异步牵引电动机驱动提供了条件。因此,交—直—交传动并采用异步电机驱动是高速列车牵引传动系统的发展主流。

大功率交—直—交传动系统性能的提高与电力半导体器件的发展密切相关,电力半导体器件的特性决定了变流装置的性能、体积、重量和价格。从铁道牵引的角度看,理想的电力半导体器件应是:断态时能够承受高电压,通态时可流过大电流且通态压降小,可在通态和断态之间进行快速切换,即开关频率高、损耗小、易于控制。应用于铁道牵引的电力半导体器件大致经历了晶闸管、GTO、IGBT三个发展阶段。新干线高速列车电传动技术的发展与电力半导体技术的发展紧密相关,20世纪60年代初研制的0系高速列车,限于当时的电力半导体器件水平,只能采用牵引变压器次边抽头,二极管整流调压方式。到80年代,大功率晶闸管应用技术成熟,新研制的200系、100系、400系高速列车,均采用相控调压方式。进入90年代,在电力牵引领域,交流传动开始取代直流通动,加之大功率GTO元件的应用,使得电压型交流传动技术在该领域中占据了主导地位。因此,新研制的300系、500系、700系,E1、E2、E3、E4等高速列车均采用了交流传动技术。

随着新型大功率半导体器件(诸如IGBT、IPM)的出现,E2和700系高速列车牵引变流器开始采用IGBT或IPM器件,进一步改善了传动系统性能。

采用交流电机时,网上的单相交流电经变压、整流之后,还必须通过逆变器变成三相交流电,才能用于驱动三相交流电机。整个变流过程是从单相交流变直流,再由直流变三相交流,这套交—直—交变流技术,特别是交流牵引电机的控制技术,是高速列车牵引技术的核心,而逆变器又是其中的关键,其中包括下列三项主要技术:一是电力半导体器件,它是逆变器中的关键元件,目前比较先进的是GTO元件和IGBT元件,后者将逐步取代前者;二是变流电路的结构性能,它是随半导体器件的发展而发展的,目前其设计重点已转向牵引性能、谐波含量、电磁干扰、控制特性及运用成本等;三是交—直—交传动的控制技术,这一技术由网侧变流器控制和电机侧逆变器控制两部分组成。

## 复习参考题

1. 铁路高速列车传动系统由哪几部分组成?各部分的基本作用是什么?
2. 一般情况下,动车组传动系统有哪几种布置方式?各有什么特点?