



普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆传动与控制

宋雷鸣 主编



科学出版社

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

轨道车辆传动与控制

宋雷鸣 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书作为普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材之一,介绍了现代轨道车辆电传动系统的工作原理与系统,全书以高速动车组的传动系统及控制为重点,简要介绍了电力机车及城市轨道车辆的传动系统。

全书共7章。第一章介绍了传动系统的基本概念及涉及的一些基本问题,第二章介绍了变压器的基本原理和动车组的变压器系统,第三章介绍了直流电动机,第四章介绍三相交流电动机的结构、工作原理及特性,第五章介绍了交流电动机的调速与控制,第六章介绍轨道车辆传动与控制系统的原理及典型系统,第七章介绍了牵引传动系统的主要部件。

本书可作为高等学校车辆工程和铁道机车车辆专业教材,也可供铁路高等职业学校师生及从事机车车辆、动车组、城市轨道车辆相关专业的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆传动与控制/宋雷鸣主编。—北京:科学出版社,2016.3

普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材

ISBN 978-7-03-046016-5

I. ①轨… II. ①宋… III. ①轻轨车辆-电力传动-高等学校-教材
②轻轨车辆-电动控制-高等学校-教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第246216号

责任编辑:毛莹 朱晓颖 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍兵 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:448 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

铁路运输客运的高速化、货运的重载化已经成为现代交通运输领域的趋势。高速铁路是庞大复杂的系统工程，被称作“大国技术”，集成了多学科、多领域的高新技术，集中展示综合国力、经济社会发展水平和自主创新能力。高速列车是高速铁路的核心技术之一，高速列车融合了高速转向架技术、高强轻型车体结构技术、交流传动技术、复合制动技术、减阻降噪与密封技术、现代控制与诊断技术等一系列当代最新技术成果。

城市轨道交通是近十多年才开始快速发展的一种交通方式。轨道交通车辆虽然速度比高速列车低，传动系统设备功率也较少，但是随着城市化进程不断加快，具有节能、快捷和大运量特征的新型轨道交通车辆越来越受到众多城市的关注，各城市对城市轨道交通类人才需求量也一直在不断高涨。

学生的培养和知识的传播，教材建设是必不可少的重要环节，尤其是在现代技术与知识不断更新的情况下，编写共性基础理论与新技术结合的教材尤为迫切。北京交通大学车辆工程专业是国家级特色专业、首批教育部“卓越工程师教育培养计划”和“专业综合改革试点项目”专业。本专业一直将教材建设作为保持轨道交通特色、引领专业发展的重要工作。“普通高等学校车辆工程专业卓越特色系列规划教材”就是在轨道交通行业对车辆人才旺盛的需求和技术不断发展的背景下，在以往教材编写的基础上进行策划的。

本书作为系列教材之一，以动车组传动与控制系统为重点，同时简要介绍电力机车及城市轨道交通车辆相关系统。本书由宋雷鸣任主编，吴鑫任副主编，岳建海参加了本书的编写。具体编写分工如下：宋雷鸣编写第一章，第四章，第六章的第一节、第三~七节，第七章；吴鑫编写第五章，第六章的第二节；岳建海编写第二章、第三章。

北京交通大学的杨中平教授审阅了全稿，并提出许多重要的修改意见。在此，对他的工作和帮助表示衷心的感谢！

南车青岛四方机车车辆股份有限公司、长春轨道客车股份有限公司、青岛庞巴迪车辆股份有限公司、唐山轨道客车股份有限公司、中国铁道科学研究院机车车辆研究所等企业和单位为教材的编写提供了资料和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2015年10月于北京

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 轨道车辆牵引传动系统组成	1
一、轨道车辆牵引传动系统的组成及作用	1
二、能量变换及其技术实现	2
三、轨道车辆牵引传动设备布置方式	4
四、动车组供电牵引系统发展概况	7
第二节 轨道车辆牵引特性及控制策略	10
一、轨道车辆牵引特性	10
二、列车牵引特性的计算	11
三、轨道车辆牵引系统控制策略	13
四、牵引变流器与牵引电机的参数匹配	15
思考题	16
第二章 变压器	17
第一节 变压器的基本工作原理	17
一、变压器的用途、结构与分类	17
二、变压器的基本参数	18
三、变压器的基本工作原理	18
第二节 变压器的运行特性分析	19
一、正方向的规定	19
二、变压器的空载运行	19
三、变压器的负载运行	22
四、变压器的等效电路和相量图	24
五、变压器的运行特性	27
第三节 变压器参数的测定	29
一、空载实验	29
二、短路试验	30
第四节 自耦变压器	31
第五节 几种典型的动车组用牵引变压器	32
一、CRH1 主变压器	32
二、CRH2 主变压器	38
三、CRH3 主变压器	43
四、CRH5 主变压器	45

第三章 直流电动机	48
第一节 直流电动机的基本原理	48
一、直流电机的用途与结构	48
二、直流电机的电枢绕组	51
三、直流电机的磁场	57
四、直流电机的基本方程	60
第二节 直流电动机的运行特性	64
一、他励与并励电动机的运行特性	64
二、串励电动机的运行特性	65
三、复励电动机的运行特性	67
第三节 直流电动机的使用	67
一、直流电动机的启动	67
二、直流电动机速度的调节	68
三、直流电动机的制动	73
四、直流电机的连接	74
第四章 交流牵引电动机	75
第一节 交流电动机的基本结构和工作原理	75
一、三相异步电动机的类型	75
二、三相异步电动机的结构	76
三、三相异步电动机的工作原理	79
四、三相异步电动机的定子绕组	84
第二节 交流电动机的特性	89
一、三相异步电动机的电路特性及其功率	89
二、三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	92
三、三相异步电动机的工作特性	95
第三节 交流电动机的额定值	96
第四节 三相异步电动机的启动、调速和制动	98
一、三相异步电动机的启动	98
二、三相异步电动机的调速	100
三、三相异步电动机的制动	102
第五节 牵引电机设计时要考虑的几个特殊问题	103
一、牵引电机谐波分析	103
二、并联运行时的负载分配	105
第五章 交流电动机调速与控制	106
第一节 异步电动机的特性和变频调速基础	106
一、异步电动机的机械特性	107
二、异步电动机变频控制的理论基础	108
三、列车牵引电动机及其运行特性	115
第二节 标量控制技术	117
一、闭环控制的变压调速系统	117

二、转速开环、恒压频比控制的变频调速系统	119
三、转速闭环、转差频率控制的变频调速系统	120
四、并联电动机的牵引传动	122
第三节 矢量控制技术	123
一、问题的提出	123
二、坐标变换的基本概念	124
三、异步电动机在不同坐标系上的数学模型	126
四、异步电动机矢量控制的基本原理	132
五、转子磁链矢量的检测	133
六、异步电动机的矢量控制系统	135
第四节 直接转矩控制技术	142
一、直接转矩控制思想	142
二、直接转矩控制的异步电动机数学模型	143
三、直接转矩控制基本原理	145
四、直接转矩控制在列车牵引中的应用	149
五、直接转矩控制的特点	152
思考题	154
第六章 轨道车辆牵引与控制原理	155
第一节 轨道车辆牵引变流器原理及控制	155
一、牵引变流器用电力电子器件	155
二、脉冲整流器工作原理	156
三、牵引逆变器工作原理	163
四、中间直流环节工作原理	169
五、动车组牵引控制策略及其实现	170
第二节 CRH1 动车组牵引传动系统	171
一、CRH1 动车组牵引传动系统组成及工作原理	171
二、CRH1 牵引传动系统控制与保护	186
第三节 CRH2 牵引传动与控制系统	201
一、CRH2 牵引传动与控制系统概要	201
二、CRH2 牵引传动系统主电路及控制	204
三、CRH2 牵引电机及牵引特性	220
四、CRH2 牵引传动系统容量的计算	223
五、CRH2 牵引传动系统特点	224
第四节 CRH3 型动车组传动与控制系统	225
一、CRH3 型动车组传动与控制系统概述	225
二、CRH3 型动车组传动与控制系统的工作原理	225
第五节 CRH5 型动车组传动与控制系统	235
一、CRH5 牵引传动与控制系统概要	235
二、CRH5 牵引传动与控制系统组成及工作原理	236
第六节 城市轨道交通车辆传动与控制系统	248
一、城市轨道交通车辆典型主电路	248

二、IGBT 变流器模块	251
第七节 现代交-直-交电力机车主电路	252
一、机车功率	253
二、可靠性要求	253
三、控制要求	253
四、经济性能比较	253
五、HXD3 型机车电传动系统	254
第七章 车辆传动系统元件	257
第一节 受流设备	257
一、DSA250 型受电弓	257
二、受流器	260
第二节 其他主要高压电器简介	261
一、主断路器	261
二、电压互感器和电流互感器概述	263
三、避雷器概述	265
四、接地开关	267
五、能量消耗计	268
六、高压电缆	268
参考文献	271

第一章 绪 论

第一节 轨道车辆牵引传动系统组成

一、轨道车辆牵引传动系统的组成及作用

电力牵引高速列车的供电、牵引传动系统，包括从变电站到列车受电弓在内的供电部分和轨道车辆本身的传动系统，目前根据系统的传动方式和动力布置形式等的差异，轨道车辆牵引传动系统的组成也有所不同。本书主要介绍列车装备部分，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。虽然受电弓一般列为牵引供电系统中，但由于其为车载设备，因此也列为本书内容。现代电力牵引的铁路动车组、电力机车的牵引传动系统的构成基本相同，城市轨道车辆系统由于采用电压较低的直流供电，传动系统的构成相对简单，去除了变压器及整流环节。

目前铁路电力牵引移动设备，包括电动车组及电力机车，主要采用特高压交流供电，牵引传动方式主要包括交-直传动方式和交-直-交、交-交流的传动方式。图 1-1 所示为交-直牵引传动系统的构成图，图 1-2 所示为交-直-交牵引传动系统的构成图。

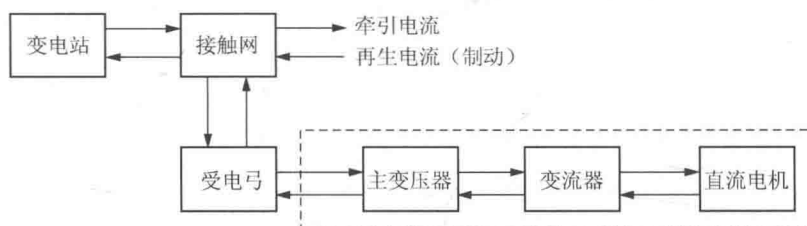


图 1-1 交-直牵引传动系统构成

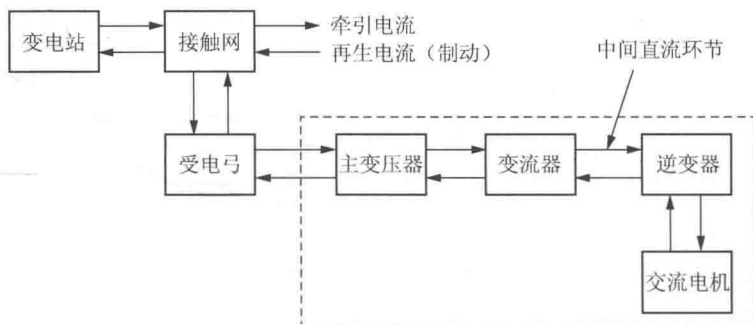


图 1-2 交-直-交牵引传动系统构成

交-直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车辆运行的传动系统。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交流异步或同步电动机作为动力的机车和动车组传动系统。变流器主要有直接式变流器（交-交变流器）和带有中间直流环节的间接式变流器

(交-直-交变流器)两大类。

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源。而牵引电动机在所要求的转速、转矩范围内工作，需要的是电压和频率均可以调节变化的三相交流电。因此，必须设计一组变流调频装置。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调节的能量；而交-直-交变流器，先把电网交流能量转换成直流能量，然后进一步转换成电压和频率可调节的交流能量，如图 1-2 所示。

现有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-交变流器供电的异步电机系统、电流型交-直-交变流器供电的异步电机系统和交-交变流器供电的同步电机系统。

交-直-交牵引传动系统主要由受电弓(包括高压电器设备)、牵引变压器、四象限变流器、中间环节、牵引逆变器、牵引电机、齿轮传动系统等组成。

牵引传动系统组成如图 1-2 所示。受电弓将接触网的 AC25kV 单相工频交流电输送给牵引变压器，经变压器降压后的单相交流电供给脉冲整流器，脉冲整流器将单相交流转换成直流电经中间直流电路将直流电输出给牵引逆变器，牵引逆变器输出电压、电流、频率可控的三相交流电供给牵引电动机，牵引电机轴端输出的转矩与转速通过齿轮传动传递给轮对，转换成轮缘牵引力和线速度。

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，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。

城市轨道交通车辆传动系统一般采用直流供电，由受电弓或第三轨将直流电引到车辆上，不用降压与整流，牵引传动系统设备大大简化。

二、能量变换及其技术实现

图 1-3 给出了交-直-交牵引传动系统的能量传递关系。列车牵引运行是将电能转换成机械能，能量变换与传递的途径如图 1-3 黑色箭头所示；再生制动运行是将机械能转换成电能，能量变换与传递的途径如图 1-3 白色箭头所示。

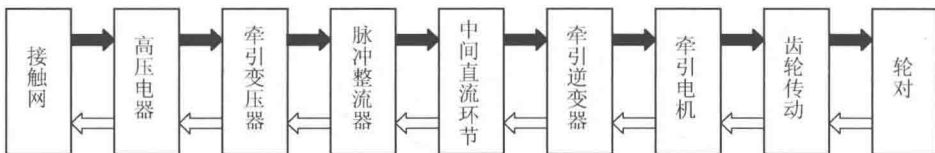


图 1-3 能量变换与传递途径示意图

高压电器设备完成从接触网到牵引变压器的接通与断开。主要包括受电弓、主断路器、避雷器、电流互感器、接地保护开关等；完成供电系统的接入与断开控制、网侧电流检测、保护等功能，不参与能量的转换。其中受电弓最为关键，它负责完成列车运行过程中的高速受流并确保受流质量。因此，弓网关系是非常重要的研究课题。

牵引变压器用来把接触网上取得的 25kV 高压电转换为供给牵引变流器及电机、电器工作所适合的电压，其工作原理与普通电力变压器相同。针对高速列车交流传动系统的特点，为了抑制变压器二次侧电流纹波、控制开关器件的关断电流以及抑制网侧谐波电流，要求牵引

变压各绕组有很高的电抗；为了使二次侧并联的脉冲整流器的负荷平衡，各牵引绕组的电抗必须相等；二次侧各绕组之间相互干扰很强时，电流波形会产生紊乱，严重影响开关器件的关断电流，因此各绕组之间要采取磁去耦结构；由于变流器负载的谐波电流等会引起牵引变压器局部发热，对冷却系统要求很高；同时高速列车要求其体积小、重量轻、性能稳定。

脉冲整流器是牵引传动系统的电源侧变流器，列车牵引时作为整流器，再生制动时作为逆变器，可以实现牵引与再生工况间快速平滑的转换。列车牵引运行时，将牵引变压器的牵引绕组输出的单相交流变换成直流电，并要保证中间直流环节的电压恒定，交流电网侧功率因数接近 1，使电网电流尽量接近正弦，减少电网对周围环境的电磁污染；对直流侧，在电网电压或负载发生变化时，能够维持中间直流电压的稳定，给牵引逆变器提供良好的工作条件。列车再生制动运行时，将中间直流环节的直流电压变换成电压、频率、相位满足要求的单相交流电，通过牵引变压器实现并网。再生制动及其并网技术是最关键的技术问题。

牵引逆变器是牵引传动系统的电机驱动侧变流器，列车牵引时作为逆变器，再生制动时作为整流器，可以实现牵引与再生工况间快速平滑的转换。列车牵引运行时，将中间直流环节的直流电压变换成电压、电流、频率按照牵引特性要求控制的三相交流电，并要保证三相电压对称、电流尽量接近正弦，减少谐波及电压不对称对牵引电机的影响。列车制动运行时，牵引电机工作在发电状态，将牵引电机输出的电压、频率变化的三相交流电变换成直流电，输出给中间直流环节。高速列车采用转子磁场定向矢量控制技术和直接转矩控制技术实现对逆变器的 PWM 控制。逆变器-牵引电机的驱动控制技术是牵引传动控制系统的核心技术。

牵引电机是实现电能和机械能转换的最核心的部件。列车牵引时作为电动机运行将电能转化成机械能，制动时作为发电机运行将机械能转化为电能。高速列车要求牵引电机机械强度、高速运行时能承受很大的轮轨冲击力；采用耐电压、低介质损耗的绝缘系统以适应变频电源供电；电机前后端采用绝缘轴承，以防止电机轴承的电蚀；转子导条采用低电阻、温度系数高的铜合金材料，保证传动系统的控制精度；电机采用轻质高强度材料，以减轻电机自重；采用经过验证的轴承和轴承润滑结构，从而减少电机的维护，保证电机轴承更可靠工作；在输出一定功率的情况下，为减少体积，采用强迫通风和优化的通风结构，充分散热，以降低电机的温升，提高材料的利用率；电机的非传动轴端安装了速度传感器，用于给传动控制系统提供速度信号，便于逆变器控制和制动控制。高速列车交流牵引电机的优化设计理论与方法研究至关重要。

牵引传动系统是高压系统，为保证系统安全可靠工作，系统的保护十分必要。因此，牵引驱动系统应对各种故障具有检测和保护功能；为了有效利用黏着力，牵引变流器设有牵引时检测空转实施再黏着控制的功能，在制动控制装置设有制动时检测滑行并进行再黏着控制的功能；为了在故障和并联电机载荷分配不均匀等情况时保护牵引电机，设有电机过流检测、电机电流不平衡检测、接地检测等保护功能。

日本新干线 100 系高速列车采用电阻制动，将动能转变为热能消散掉，在由牵引工况转变为制动工况时，主电路要进行转换，同时，在低速区，难以产生大的制动力。而 300 系高速列车由于采用交-直-交牵引变流器，可以十分方便地实现再生制动，且牵引、再生两种工况转换平稳、连续无冲击，无需主电路换接。当电机转速低于同步转速时，即牵引工况，当电机转速高于同步转速时，即转为制动工况，这样，只要控制逆变器的输出频率（即同步转速），即可控制牵引与再生工况转换及牵引力或制动力的的大小。

由于交流传动系统的诸多优点，20 世纪 80 年代以来世界各国所研制的高速列车均采用

交流传动技术。如前所述,动车组通过牵引电机将电能转换为机械能驱动列车的动力轮对。动力轮对通过轮轨黏着蠕滑作用,将牵引电机的驱动转矩转换为轮轨之间的牵引力,牵引列车运行。

三、轨道车辆牵引传动设备布置方式

列车牵引动力系统除包括如图 1-2 所示的主变压器、变流器、逆变器等各种动力设备外,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:动力集中方式和动力分散方式。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,欧洲主要采用这种方式。随着动车组运行速度的不断提高,欧洲 300km/h 以上的动车组也转向动力分散的形式。城市轨道车辆系统一般采用动力分散式。

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 1-4(a)所示,全列车的牵引力由集中在动力头车的动力轮对上的电动机提供。这时必须注意两个问题:第一,动力轴的重量必须足够提供牵引力所需的黏着力,否则动力车轮将产生空转,丧失牵引力,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 17t,在作牵引力计算时轮轨黏着系数值定为

低速启动时: 0.2

100km/h 时: 0.17

200km/h 时: 0.13

300km/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 ICE1 型动力集中型高速列车的动力车每轴功率 1200kW,一台动力头车的功率 4800kW,较大功率的动力设备和传动机构,使每轴的轴重达到 19.5t。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 400kN),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 17t,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 高速列车都是这样的动力设置。

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,而不占用任何一辆车厢。图 1-4(b)即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)以及空压机、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。

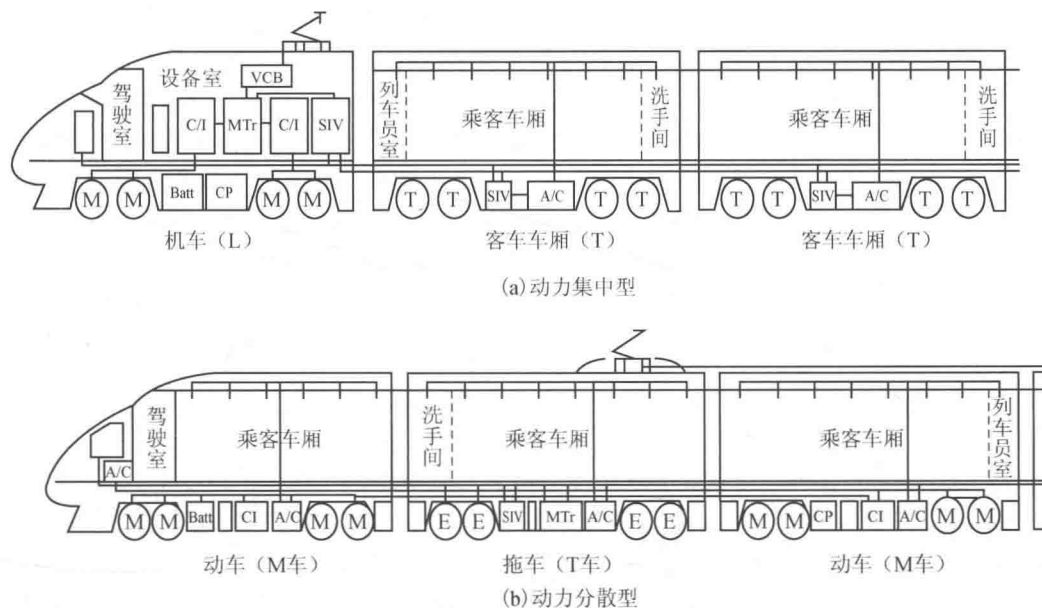


图 1-4 动力配置形式

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-气压机；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）

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。它的特点是：①包括头车在内的各车厢都用来布置乘客座席和旅客设施。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)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 12000kW，启动加速牵引力可达到 360kN，每吨启动加速牵引力可达到 0.5kN，由启动加速到 250km/h 速度的时间仅需 215s、走行 9.6km。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、站距较短的日本等国家。40 年来，日本始终坚持动力分散电动车组，从 0 系到 700 系，一直不变，取得辉煌成绩。之所以取得这样大的成绩，主要缘于：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 330km/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。

(一) 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 550kW;动力集中方式的大,目前最大可达 1200kW。就车组总功率而言,由于动力分散方式动轴多,可以超过 10000kW;动力集中方式目前尚未超过 10000kW。当然也可以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。但总体来说,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。启动加速度快。

(二) 最大轴重和簧下质量

根据日本新干线的运用经验,在速度和簧下质量一定时,轨道下沉量随轴重增加而增加。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 16t 以下,300 系车降到 11.4t。动力集中方式动车组一般轴重大,规定不超过 17t,但 ICE 车高达 19.5t,所以就最大轴重而言,动力集中方式比动力分散方式大,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 14t、10t 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。

(三) 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。

(四) 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。

(五) 制造成本

采用动力分散方式动车组,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动车组作过比较,BD75 型机车牵引 12 辆客车,一列车造价为 342400 千日元,而 583 动车组 6 辆动力车和 6 辆拖车的造价为 477400 千日元。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 2200 万美元,法国 M-P 型 1M+8T+1M 一列车造价 1300 万美元来比较,也说明动力集中方式动车组造价比动力分散方式动车组低得多。

(六) 维修费用

由于动力分散方式动车组的每辆动力车均装有一套电气设备,维修工作量大。德国曾把动力分散方式动车组与一台 BR41 型电力机车牵引三辆客车的穿梭列车作过比较,结果表明,如果只分析每公里折旧维修费用,则 BR430 型动车组约贵 50%,BR420/421 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,每座位公里

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 17t (ICE1 是 19.4t)，最高速度 300km/h，线路坡度 40%，并且要增加座位数等。采用动力分散可增加乘员，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座席的质量。此外还提高了再生制动的利用率，制动功率 8.2MW，最大电制动力为 300kN，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。

四、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，从直流传动发展到交流传动，运营速度从 210km/h 到 300km/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。法国以直流传动速度 260km/h 起步，经过同步电机传动，第三代实现三相交流异步电机传动高速动车组，而下一代的 AGV 动车组改用动力分散式，速度 320~360km/h。德国 ICE1、ICE2 高速动车组率先采用交流异步电机传动，实现 280km/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 300km/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-直传动，用直流电动机驱动，采用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-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 500kW，使高速列车既要大功率驱动又要减轻轴重，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 1100kW，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 6800kW 提高到 8800kW。运行速度由 270km/h 提高到 300km/h，列车质量由 418t 增加到 479t，列车定员由 368 人增加到 485 人。

TGV-A 采用 GT0 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 30kg，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。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，效率高，重量轻；
- ③ 目前，世界上最大的直流牵引电机功率为 1000kW，而交流牵引电机功率，已达到 1800kW；
- ④ 无换向引起的电气损耗和机械损耗，无环火引起的故障；

- ⑤ 耐振动、冲击的性能较好;
- ⑥ 耐风雪、多尘、潮湿等恶劣环境;
- ⑦ 具有可持续的大启动牵引力;
- ⑧ 过载能力强(仅受定子绕组热时间常数的影响);
- ⑨ 转速高, 功率/重量比高, 有利于电机悬挂;
- ⑩ 转矩-速度特性较陡, 可抑制空转, 提高黏着利用率;
- ⑪ 在几台电机并联时, 不会发生单台电机空转现象;
- ⑫ 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。

早期, 日本的科学技术和国力比不上欧洲, 但比欧洲早 17 年实现世界第一条高速铁路, 促进了它的经济高速发展。欧洲原来的技术实力和水平较高, 坚持发展动力集中, 但滞后 17 年才实现高速铁路; 而在 1989 年实现 300km/h 高速列车运行时, 欧洲又比日本早 9 年。

日本采用电动车组的主要理由是它属于岛国, 山丘、坡道、弯道多, 地质松软, 对动轴轴重限制十分严格, 而欧洲铁路土质坚硬, 路基结实, 轨道基础好, 承受作用力较大。

法国、德国和日本的货运中, 铁路所占的比例不一样, 法国、德国近年仍占 20%, 而日本水运比例大, 铁路货运只占 5%~6%。日本铁路货运量太少, 可以针对客运专线专门设计轻量客运列车。由于轴重量轻, 在路基、桥梁建筑中可采用轻型标准规格, 以降低修路成本。而对于欧洲, 货运无法摈除, 采用客货通用的线路和机车牵引客货通用方式, 可以提高机车的利用率, 或者通过技术延伸, 把货运机车技术延伸到客运机车中去。欧洲坚持发展动力集中实现高速, 一是凭借先进技术, 二是客货混跑的缘故。欧洲实现高速比日本要付出高得多的代价和克服更多的困难, 因此实现高速比日本滞后了 17 年, 而后通过采用先进技术(特别是交流传动技术和双空心轴悬挂传动技术), 坚持采用动力集中模式, 在日本之前突破了 300km/h 的高速, 但代价是相当大的。

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传动, 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(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, 才能作为交流电机的驱动电流。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。IPM 元件是 GTO 元件、驱动及保护电路的集成块，它具有短路、过流、过热及电流实时控制等保护功能，将更有利于实用。

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于牵引性能、谐波含量、电磁干扰、控制特性及运用成本等。软开关电路是进一步降低开关损耗，减少开关过程中的电磁干扰和对环境的电磁污染的重要途径，有待研究开发。

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。

列车牵引传动长期以来采用交-直传动系统，牵引电机为直流电机。近 30 年来，由于电子技术尤其是大功率交流技术的发展、控制理论和控制技术的完善以及变频器技术的成熟，使三相交流电动机在高速列车牵引中的应用得到了关键性突破，获得了极为迅速的发展。高速动车组采用的就是交流传动系统，其牵引电机采用的是三相交流异步电机。交流传动系统有以下优点。

(1) 有良好的牵引性能。合理地利用系统的调压、调频特性，可以实现宽范围的平滑调速，使高速列车的高速利用率 $K_p = 1$ ，恒功率调速比 $K_n \geq 2$ ；能使列车启动时发挥出较大的启动力矩。

(2) 电网功率因数高、谐波干扰小。电源侧采用脉冲整流器，通过 PWM 控制技术，可以调节电网输入电流的相位，并能在广泛的负载范围内使高速列车的功率因数接近于 1；使所取电流接近正弦波形，谐波干扰小。

(3) 单位重量体积的牵引功率大。由于异步电动机无换向器，转速可达 4000r/min 或更高，且功率大、重量轻、体积小、单位重量体积的牵引功率大且运行可靠。

(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（黏着利用）性能较好。特别是牵引控制采用矢量控制或直接力矩控制策略，不仅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，更适用于高速、重载牵引的要求。

高速动车组牵引传动系统采用的新技术主要表现在以下几个方面。

(1) 新型全控电力电子器件的应用。电力电子器件是牵引变流技术的基础和核心。诞生于 20 世纪 80 年代的新型全控制电力电子器件 IGBT 是一种 MOSFET 与晶体管复合的器件，由于它既有易于驱动、控制简单、开关频率高的优点，又有功率晶体管的导通电压低、通态电流大、损耗小的显著优点，IGBT 的发展及应用领域的拓展十分迅速。高速动车组牵引变流器的功率电子器件大多采用大功率 IGBT/IPM。

(2) 牵引变流器 PWM 控制技术。交流调速传动系统中的变流器，无论是电源侧的整流器还是电机侧的逆变器都属于开关电路，电路中开关器件的周期性通断，从根本上破坏了交流电压、电流的连续性和正弦性。电压、电流中的高次谐波，一方面给交流电网带来严重危害，另一方面又使电机运行性能恶化。谐波电流产生的脉动力矩，会引起运动轴系振动，增大运行噪声，严重时还会使电机不稳定运行。减小谐波含量的有效办法是牵引变流器采用 PWM 技术。高速列车牵引变流器均采用 PWM 控制技术。

(3) 列车驱动控制技术。高速列车牵引传动系统是一个多变量、非线性和强耦合的系统，通常电压（或电流）和频率是可控的输入量，输出量则是转速、位置和力矩，它们彼此之间以及和气隙磁链、转子磁链、转子电流等内部量之间都是非线性耦合关系。