

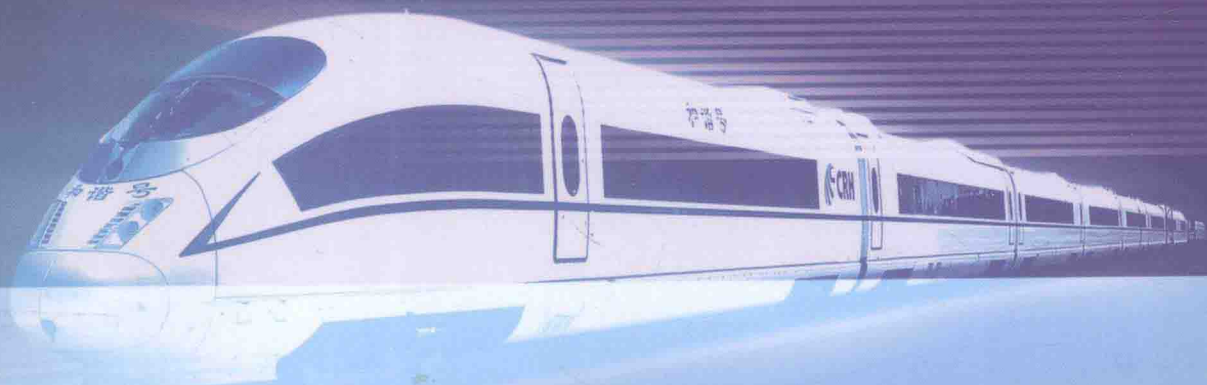
高等学校教材

GAODENG XUOXIAO JIAOCAI

动车组 牵引与制动

DONGCHEZU QIANYIN YU ZHIDONG

■ 李小平 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

第一章 高速列车概述

第一节 高速列车分类及基本概念

一、高速铁路与高速列车定义

迄今,高速铁路的定义有如下几种:

1970年,日本政府第71号令将高速铁路定义为:凡在一条铁路的主要区段上,列车的最高运行速度达到200 km/h及以上的干线铁路。

1985年,欧洲经济委员会在日内瓦签署的国际铁路干线协议规定:列车最高运行速度达到300 km/h及以上的客运专线或最高速度达到250 km/h及以上的客货混用线。

1986年,国际铁路联盟将高速铁路定义为:最高速度至少达到250 km/h的专用线或最高速度达200 km/h的既有线。

我国《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)中将高速铁路定义为:新建设计开行250 km/h(含预留)及以上动车组列车,初期运营速度不小于200 km/h的客运专线铁路。

可以看出,各个机构对高速铁路的定义不尽相同,随着科学技术的进步,高速铁路的定义还会变化。目前,一般将铁路速度分级定义如下:100~120 km/h称为常速;120~160 km/h称为中速;160~200 km/h称为准高速或快速;200 km/h以上称为高速。因此,以最高速度200 km/h及以上运行的列车称为高速列车,相应的铁路称为高速铁路。

二、高速列车分类

高速列车的分类方法很多,从不同的角度有不同的分类方法。常用的分类方法主要有:

1. 按速度等级分类

按照速度等级可以分为准高速、高速和超高速列车。

(1) 准高速列车

最高运行速度为160~200 km/h的列车。

(2) 高速列车

最高运行速度为200~400 km/h的列车。

(3) 特高速列车

最高运行速度为400 km/h以上的列车。

2. 按牵引动力类型分类

高速列车按照牵引动力的类型可以分为:电力牵引高速列车、内燃牵引高速列车和磁悬浮高速列车。

(1) 电力牵引高速列车

从高速铁路发展状况看来,尽管电力牵引具有较大的初始投资,但是电力牵引具有牵引功

率大、轴重轻、经济性好、利于环保等优点,绝大多数国家的高速列车都是采用电力牵引。

(2) 内燃牵引高速列车

内燃牵引高速列车由于其投资少、见效快、经济性好等优点,常常用于尚未电气化的高速铁路区段,或者作为发展高速铁路建设的一种过渡牵引形式。

(3) 磁悬浮列车

磁悬浮列车是一种全新的交通运输工具,它与传统列车有着截然不同的特点。它是利用电磁系统产生的吸引力和排斥力将列车托起,使整个列车悬浮在导轨上,并利用电磁力进行导向,利用直线电机将电能直接转换为推进力,推动列车高速前进。磁悬浮列车由于轮轨不接触,不存在轮轨摩擦阻力,因而适于超高速运行,速度可达 500 km/h 以上,而且安全性好,无污染、利于环保,占地面积小,运行平稳,舒适性好等,因而具有非常好的发展前景。目前,由于磁悬浮系统与现有的轮轨系统不兼容,投资费用较高等缺点,尚处于进一步试验、试运营和积累经验阶段。

3. 按牵引形式分类

高速列车按牵引形式可以分为:机车牵引的高速列车和高速动车组。

(1) 机车牵引的高速列车

这是传统的牵引形式,由机车牵引车辆,不固定编组,牵引比较灵活,可一端牵引,也可两端推挽牵引。这种牵引形式一般应用于既有线改造为客货混用的高速铁路上,其运行速度一般在 200 km/h 左右。它在高速化初期被不少国家所采用,是一种投资少、见效快的牵引形式。但这种牵引形式由于机车总功率的限制,难以满足速度进一步提高的要求。

(2) 高速动车组

动车组是一种带有可操作动力的具有固定编组的列车组。按照牵引动力类型又可分为电动车组和内燃动车组。高速动车组由于轴重轻、牵引功率大、载客量多、舒适、快捷、经济等优点,因而被绝大部分高速铁路所采用。

4. 按动力配置方式分类

高速列车按照列车牵引动力配置方式可以分为:动力集中型高速列车和动力分散型高速列车。

(1) 动力集中型高速列车

动力集中型列车是将动力装置集中安装于列车的一端或两端的动力车上,仅有动力车的轮对受电机驱动,为动力轮对。将电气设备和动力装置集中安装在动力车上,由动力车牵引列车,动力车只牵引不载客,拖车只载客不牵引。

(2) 动力分散型高速列车

动力分散型列车是将由电机驱动的动力轮对分散布置在所有或多组轮对上,同时将主要电气设备及动力装置吊挂在车辆下部。列车的全部车辆都可以载客。

5. 按转向架连接方式分类

高速列车按照车辆间转向架的连接方式可以分为:独立式高速列车和铰接式高速列车。

(1) 独立式高速列车

独立式列车即为传统的车辆与转向架的连接方式,每节车辆的车体都置于两台转向架上,车辆与车辆之间用密封式车钩相连接,列车解体后车辆可独立行走。

(2) 铰接式高速列车

铰接式列车是将车辆的车体之间用弹性铰接相连接,并放置一个共用的转向架,因此每节车辆不能从列车上分解下来独立行走。

高速列车按照动力配置和转向架连接方式组合可以分为:独立式动力集中型、铰接式动力集中型、独立式动力分散型和铰接式动力分散型高速列车。这四种类型的高速列车各有其优缺点,都能满足运行速度 300 km/h 以上的要求。各个国家和地区可根据自身的情况和列车的使用条件来选择适用的类型。例如,德国的 ICE1、ICE2 型列车采用独立式动力集中型,如图 1-1(a)所示;法国 TGV 型和西班牙的 TALGO-350 型列车采用铰接式动力集中型,如图 1-1(b)所示;日本新干线和德国 ICE3 型列车采用独立式动力分散型,如图 1-1(c)所示;法国 AGV 型列车采用铰接式动力分散型,如图 1-1(d)所示。

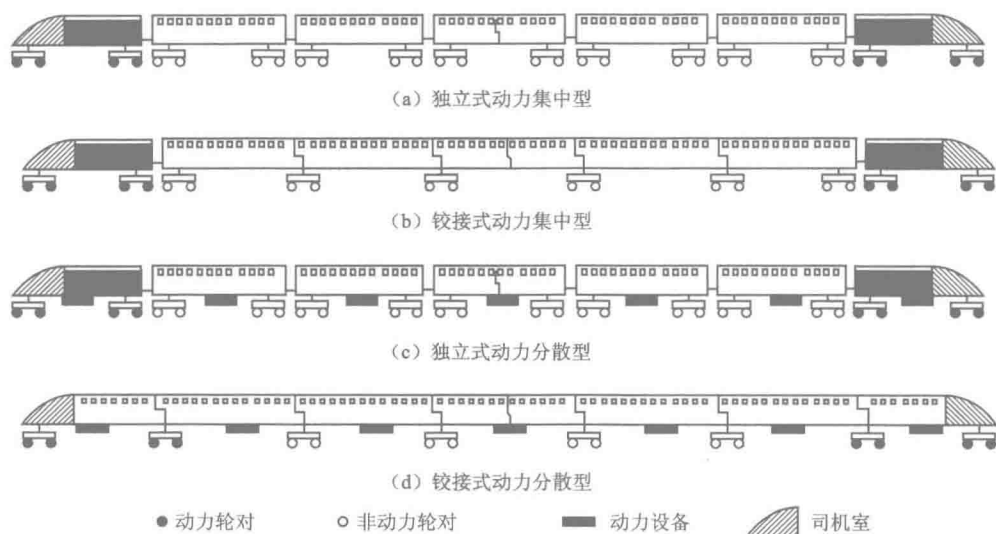


图 1-1 高速列车动力配置和转向架连接方式类型图

第二节 高速列车牵引制动关键技术

一、大功率电力牵引传动系统

大功率电力牵引传动系统是高速列车的原动力。高速列车由于在高速区运行时的基本阻力为空气阻力,可近似地认为基本阻力与速度的平方成正比,所需功率与速度的三次方成正比。高速列车运行速度在 300 km/h 以上时,空气阻力已占到总阻力的 90% 以上,所需功率是 100 km/h 级列车的 15 倍以上。如此大幅度的增加功率,则意味着新技术的大量应用。因此,高速列车的电力牵引传动系统必须向功率大、重量轻、体积小、可靠性高和低成本方向发展,这就决定了高速列车的电力牵引传动系统必然采用先进的牵引传动系统。它主要包括:牵引变流器、主变压器、牵引电机和牵引传动控制。

1. 牵引变流器

牵引变流器采用新型大功率半导体器件,从最早的晶闸管发展到 GTO、IGBT、IPM,以至

IGCT。牵引变流器发展的目标是小型化、轻量化、节能、环保、可靠和经济适用。随着变流器的模块化、系列化和小型化,出现了将牵引变流器与辅助变流器和列车供电变流器统筹考虑、集成设计、制造的新趋势。牵引变流器的冷却是另一项关键技术,它要求冷却效率高、体积小、易于维修、不污染环境,目前的冷却方式主要是风冷、油冷、水冷、沸腾冷却和热管冷却。

2. 主变压器

主变压器是牵引传动系统中重量、体积最大,耗损最多的部件,尤其在动力分散式高速列车中,由于要求启动加速功率和再生制动功率大,而安装空间又有限,所以主变压器损耗占到总损耗的30%。因此减轻重量、减小体积、降低损耗,一直是主变压器技术发展的目标。近来,随着电子技术的发展和高温超导线材性能的提高,出现了两种新型变压器,即电子变压器和高温超导变压器,它们与传统的工频变压器完全不同,具备重量轻、体积小、效率高等特点。

3. 牵引电机

近代高速列车大多采用三相交流异步牵引电机,与直流电机相比,它具有重量轻、功率大、转速高、结构简单、运用可靠,寿命长、维修简便的特点。近代开发的永磁多极同步牵引电机,由于可实现很高的转矩密度,从而有可能实现无传动齿轮的直接驱动,与带传动装置的异步牵引电机相比,具有损耗低、重量轻、噪声小、无油泄露等优点,很有发展前途。

4. 牵引传动控制

牵引传动控制的水平取决于牵引传动控制的策略和手段。牵引传动控制策略由最初的转差特性控制发展到矢量变换控制,近代又实现了电机转矩控制的新技术:直接转矩控制(DTC)和直接自控制(DSC)。这项技术具有控制简单、性能优良和鲁棒性较强的特点。近代牵引传动控制手段普遍采用数字电路和大规模、超大规模集成电路以及微处理器、微控制器和数字信号处理器等组成的计算机控制系统,由单机个别控制向车载计算机网络发展。车载计算机网络由列车控制级、车厢控制级和功能控制级组成。

二、高速制动技术

高速列车的制动系统是实现列车高速、安全运行的保障。列车高速运行时具有相当大的运动能量,而高速列车的制动技术必须解决列车动能的快速转换和能量消耗问题,并在轮轨黏着允许的条件下,做到高速列车的可靠制停或降速。另外,由于轮轨黏着系数随运行速度的提高而下降,因此更增加了高速制动技术的难度。目前,高速列车制动的关键技术有:复合制动、制动控制、盘形制动、动力制动、非黏着制动和防止高速制动时车轮打滑。

1. 复合制动

高速列车由于所需的制动能量巨大,靠单一的制动方式不能满足要求,因此高速列车均需采用由多种制动方式组合的复合式制动方式来制动,并配有电子防滑装置,以提高轮轨黏着系数。在动力转向架上应尽量采用动力制动(电阻制动和再生制动),再配合以盘形制动(摩擦制动);而在非动力转向架上在盘形制动以外再辅以非黏着制动(涡流轨道制动和磁轨制动)。例如,日本300X、德国ICE3和法国AGV动力分散式高速列车的非动力转向架上,采用了涡流轨道制动来提高制动力。

2. 制动控制

高速列车制动系统是一个整体,动力制动、空气制动、非黏着制动等需协调一致工作,这就是制动控制系统的任务。高速列车一般都采用电气指令直通式电空制动控制系统,以微处理

机为控制中心,优先采用动力制动,当动力制动力不足时,由制动控制单元发布电气指令,通过EP电空单元使制动缸动作,产生空气制动,补充动力制动的不足。在故障时能导向安全,并与中央诊断系统相连接。

高速列车制动空走时间是非常重要的,制动空走时间每延长1 s,制动距离将增加70 m。电气指令式电空制动控制与其他控制方式相比,高速时的列车空走时间最短,这是由于其制动和缓解信号均为电信号,因此其反应灵敏,动作迅速,满足高速列车缩短制动距离的要求。

3. 盘形制动

按照欧洲铁路联盟UIC的规定,高速列车行驶时,应能在盘形制动(摩擦制动)的单一作用下,在规定的制动距离内停车,其目的是在动力制动发生故障时也能保证列车运行安全。可见盘形制动仍被视为高速列车的主要制动方式。但传统的闸瓦制动,由于其在高速时对车轮轮轨的热损害愈发严重,而且制动力不足。因此,其逐渐被盘形制动所取代,即使仍有闸瓦装置,也只是作为盘形制动的补充,主要是为了清扫踏面,改善黏着。

盘形制动的制动盘和闸片在高速列车上承受着极为苛刻的工作条件,因此一方面要求提高强度和耐热性,减少裂纹的发生;另一方面又要简化结构、减轻重量。制动盘的材质经历了特种铸铁、铸钢和锻钢等,已发展到了碳纤维和铝合金复合材料。其结构向无通风式、利于散热和冷却的结构发展。闸片材质的发展方向是以粉末冶金代替合成材料,以改善制动盘的受热状况。非动力转向架的车轴上可以安装多达4个制动盘,以降低闸片压力,从而延长制动盘和闸片的使用寿命。动力转向架一般轴重较大,制动盘的安装数量受到限制,因而工作条件比较恶劣。

4. 动力制动

动力制动包括电阻制动和再生制动。过去动力制动多为电阻制动,将列车动能转换成热能予以耗散。电阻制动的优点是可以在任何转矩下利用蓄电池实现励磁,从而在断电情况下也能实现制动;缺点是高速时制动力急剧下降,因而电阻制动主要用于坡道地段限制速度和停车用。近代UIC已明确规定了安全制动距离,即在受流失效的情况下的安全制动距离应该与正常紧急制动距离保持一致。对于最高运行速度300 km/h的高速列车,如德国ICE、法国TGV-2N和日本500系,在受流失效时都是采用纯盘形制动作为安全制动的唯一技术手段。但是对于更高运行速度(例如350 km/h)的高速列车,由于制动盘的制动功率已经超出其极限范围,无法满足安全制动距离的要求,为此可利用电阻制动在断电时也能制动的优点予以制动。近代在动力分散式高速列车上采用电阻制动作为安全制动的新技术,例如在德国ICE350E、西班牙Tal90350和法国AGV高速列车上均采用了这种安全制动方式。

高速列车采用三相交流牵引电机,为再生制动的采用创造了条件。再生制动可以在全部速度范围内保持强大的制动力,并可以制停,这对高速列车的制动具有重大的意义。再生制动还可以将部分制动能量转换成电能返回电网,有利于节能。因此,近代高速列车的动力车制动方式均以再生制动为主。

5. 非黏着制动

非黏着制动主要是指电磁轨道制动和涡流轨道制动。电磁轨道制动是将制动电磁铁励磁,使其吸附于钢轨上,由电磁铁的摩擦块与钢轨摩擦产生制动力。磁轨制动的优点是消耗功率小,由蓄电池即可励磁,对钢轨表面有清扫作用,有利于提高黏着系数。由于其制动作用是

以摩擦块与钢轨间的摩擦为基础,缺点是磨损大,会引起钢轨表面局部过热磨损,严重时会导致钢轨损伤。因此,这种制动只被用于紧急或安全制动。

涡流轨道制动与磁轨制动相似,也是利用电磁效应来产生制动力,但不同的是,磁铁不与钢轨接触,始终保持 7~10 mm 的距离。列车制动时,利用磁场交变,在钢轨内产生感应涡流,从而产生涡流制动力。涡流轨道制动的优点是:可以无磨损地应用于紧急制动和常规制动,无需维修。同时,它的制动力是可控的,在高速范围内具有很好的制动特性。因此,涡流轨道制动应用于高速列车具有很好的发展前景。涡流轨道制动的缺点是所需制动功率较大,制动时会产生钢轨局部高温的现象。

6. 防止高速制动时车轮打滑

列车高速运行时轮轨间的黏着系数急剧下降,特别是在轨面潮湿情况下,黏着系数更低。要想缩短制动距离,又不产生车轮打滑,必须采用的主要措施有三种:一是按照列车运行速度控制制动力的大小,以充分利用黏着。例如,日本新干线 0 系高速列车按照列车速度分级来控制制动力,使之与黏着系数变化曲线相接近。在采用动力制动时,也按黏着系数的变化曲线施加动力制动。二是采用高性能的防滑装置。近代,几乎所有的高速列车都采用计算机控制的高性能防滑装置来提高可利用的制动黏着系数。一般来说,采用电子防滑装置可使黏着系数提高 20%左右。三是采取增黏措施。日本高速列车应用踏面增黏闸瓦和在轮轨间喷射陶瓷粒子等方法来增加黏着,取得了一定的成效。

三、列车的监控与诊断技术

列车监控与诊断系统对于高速列车安全运行起着重要的作用,因为高速列车的故障会带来严重的后果,因此必须在事故发生前,利用先进的装备发现和预防故障。高速列车监控与诊断技术大致可以分为:运行监控、故障检测与诊断以及通信网络三方面的内容。

1. 运行监控

为了保证高速安全运行,防止列车冒进和追尾等冲撞事故,高速列车必须采用列车自动控制(ATC)系统。一个完善的 ATC 系统应该包括 ATP(列车自动防护)、ATO(列车自动驾驶)和 ATS(列车自动监控)三个部分。ATP 负责操作防护的所有工作,目前世界高速铁路的列车自动防护,包括所有子系统的安全控制、诸如线路空闲、列车间隔、超速防护和操作安全等的监视。ATO 负责牵引和电制动的所有控制及停站操作,包括列车的区间速度调节。ATS 负责运行监督,对 ATO 发出运行时刻指令,监督运行并对偏差作出反应。ATP 和 ATO 分成车上和车下两部分,而 ATS 完全在地面上。

目前,世界高速铁路的列车自动控制方式有两种:一种是设备为主,人控为辅的方式,以日本新干线采用的 ATC(列车自动控制)方式为代表;另一种是人机共用,人为主的控制方式,以法国铁路采用的 TVM430 列车自动控制系统为代表。为了确保高速列车运行安全,广泛采用了冗余技术,发送和接受设备都是双套,必须在相互比较一致后才输出。

2. 故障监测与诊断

故障诊断是通过正确的故障识别(检查和检测),找出故障的正确位置,把需要修复或更换的零部件隔离开来,从而大大缩短维修过程,减少维修停时。

(1)诊断方式。高速列车应用的诊断方式有三种:人工诊断、自动测试设备(ATE)诊断和机内测试设备(BITE)的诊断。近代,高速列车故障诊断方式都是把重点放在机内测试设备

(BITE)的诊断上,也就是说,尽量完善高速列车的车载监测诊断系统,使之在高速列车运行时发现和传输故障信息。自动测试设备(ATE)诊断一般在列车库停和动车段检修时使用,例如车轮的超声波探伤、车轮磨损及外形的检测等。

(2)车载监测诊断系统。目前世界上高速列车通用的测试性指标是:故障检测率为90%~98%;故障隔离率为90%~99%(隔离到LRU);故障虚警率为1%~5%。高速列车车载监测诊断系统的安全监测的项目(例如法国TGV动车组)有:防止司机睡眠监视器、速度监测、防撞监测控制、轴温报警、走行部监测、防滑装置的安全防护、旅客安全防护、车门控制等。德国ICE高速列车内部诊断系统的主要功能有:对所有电子控制的范围进行检测诊断,通过显示屏给司机以排除故障的提示,按照优先级和故障后果来划分故障等级,通过履历存档、实验曲线、过程参数的查询和软件为维修提供决策。

(3)诊断技术。高速列车常用的诊断技术有:电机及电器的诊断、电子控制设备的诊断、振动诊断、声诊断、红外线诊断、润滑油分析和性能趋向监测等。诊断技术不只包括硬件设备,更重要的是软件系统,特别是人工智能和专家系统。

3. 通信网络

高速列车的控制命令、运行监控、故障监测与诊断的信息都是通过列车通信网络传送的。各个计算机控制的部件相互联网,通过网络通信来交换信息。对于动力集中方式的高速列车,需要由网络传递联控逻辑信号、制动和速度控制信息,而列车的各个单节和部件的工作状态也需要通过网络传送到主控机车(动车),用以状态监测和故障诊断。对于动力分散方式的高速列车,需要由网络传递牵引或制动控制信息,以保障各单元协调统一的工作。同时,各动车或拖车的工作状态也通过网络传输给主控车,用以状态监测和故障诊断。因此,近代高速列车必须有网络技术的支持,这样不仅可以节省列车连线,减轻列车重量,并且可以提高系统的集成度、可靠性和维修性。

目前,国外通信网络技术已经比较成熟,网络应用正朝着车载通信网络、地面通信网络、车地无线通信网络、地面通信网络与以太网接口等全方位方向发展。车载通信网络可以实现牵引、制动、照明、空调等的控制与监测,实现控制系统的故障诊断和维修信息的提示,还可以实现旅客动态信息管理,包括处理旅行信息和座位预留信息等。车地无线通信网络可以实现车载设备与地面设备之间的信息交换,为高速列车库停高效维修创造了条件。车载通信网络、车地无线通信网络和地面综合监视系统相结合,可以实现车载控制系统的远程实时监控。

列车通信网络从应用范围来区分,主要有两种模式。一种是欧洲模式,如TCN(Train Communication Network)和Wold FIP。主要特点是传输速率较高,实时性较强;另一种是美洲模式,如Lon Work通信网络,传输速率不是很高。不同的模式应用于不同的场合,高速列车应用网络技术实现司机控制器指令(牵引和制动)控制、司机室显示屏控制、逆变器控制、主发电机励磁控制、辅助电系统控制、蓄电池控制、防空转/防滑控制、地面/列车信号通信、故障诊断和记录等,另外还可提供完善的列车服务功能,例如声频/视频通信、乘客信息提示、车门控制、采暖、通风和照明等,因此要求传输速率较高,实时性较强的网络,欧洲模式适合于高速列车的使用。TCN主要用于德国高速列车ICE,并得到许多欧洲大机车车辆制造厂商和部件制造商的支持,也被我国一些工厂和研究单位采用;Word FIP主要被法国ALSTOM公司采用,用于法国TGV高速列车。而美洲模式Lon words主要用于地铁、城市轨道车辆和货车。

第三节 国产动车组概况

动车组一词英文名为 EMU(Electric Multiple Units)即电力动车组;内燃动车组英文名为 DMU(Diesel Multiple Units)。其实它是一个非常宽泛的概念,不同的国家有不同的理解。国际上普遍将动车分为动力分散型和动力集中型两种,在我国又分为常速动车组和高速动车组两种。国内对动车组的认识,简而言之就是列车采取集中控制、使用分散或集中的动力方式,有固定的动力车且一般不做解除编组,使用电空制动等高新技术的列车。我国目前大量推广的和谐号动车组可以理解为 EMU 动车组,而运行于北京市郊 S2 线的和谐长城号为内燃动车组,即 DMU 动车组。

CRH 是 China Railway High-speed(中国铁路高速动车组)的缩写,目前拥有 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5 共四大车型(均属和谐号)。这些车型的技术分别来自日本、德国、法国等高速铁路先进国家,通过我国的消化吸收及国产化,最终成为“具有我国自主知识产权”的动车组产品系列。

1. CRH1 系列动车组

CRH1 型动车组是由中国中车集团青岛四方—庞巴迪—鲍尔铁路运输设备有限公司(现为四方—庞巴迪公司)制造。原车型是瑞典 Regina C2008 型,最高运行速度为 200 km/h,该车既有快速、舒适、可靠的特点,又能满足中国铁路客运大运量的需求。CRH1 型动车组最大运行速度为 200 km/h,每列编组 8 车,5 动 3 拖,定员 668 人,两列重联编组可提供 1 336 个座位。采用动车分散模式驱动,该车灯光布置和座椅较舒适,宽敞明亮,自动化程度较高。2007 年 4 月 18 日,CRH1 正式开始在广深线投入服务,首航车次为 T971 次,由广州东站出发前往深圳。

CHR1 型动车组首尾车辆设有司机室,可双向驾驶,编成后结构如图 1-2 所示,可两编组连挂运行。

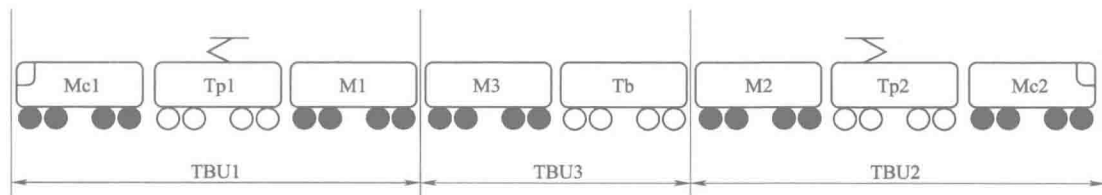


图 1-2 CHR1 型动车组基本组成

2. CRH2 系列动车组

CRH2 型动车组是中国中车集团青岛四方机车车辆有限公司与日本川崎重工合资生产的,目前我国已拥有自主知识产权。该车原型为日本新干线 E2-1000 系,每列编组 8 辆,定员 610 人,该型列车最初配属于济南、武汉、北京、郑州、上海及南昌等铁路局,随后几年中逐步在全国各铁路局中大量配置,是目前 200 km/h 以上等级高速铁路客运的主力车型。第二批 CRH2 型电动车组编号由 2061 开始,是以 CRH2A 型设计作为基础进行修改,改动包括把动车数量增至 6 节(6M2T),使用 DSA350 型高速受电弓,以及在受电弓两边加装挡板等。列车速度级别属 C 型(标称时速 300 km),最高运行速度为 350 km/h,用于新建的高速客运专线上。除 2A

及 2C 型外,四方又设计出 16 节长大编组的 CRH2B 型电动车组(编号 2111~2120),级别属 B 型(标称时速 200 km),最高运行速度为 250 km/h,以及 16 节长大编组的 CRH2E 型卧铺电动车组,编号由 2121 开始,级别属于 E 型(标称时速 200 km),最高运行速度为 250 km/h。

CRH2A 型动车组(运行时速 200 km)由 8 辆车组成,其中 4 辆动车 4 辆拖车。首尾车辆设有司机室,可双向驾驶,编成后结构如图 1-3 所示,可两编组连挂运行。

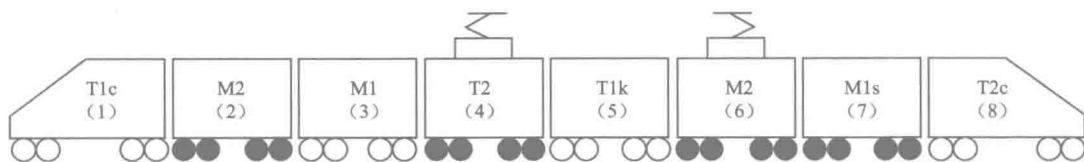


图 1-3 CRH2A 型动车组基本组成

CRH2C 型动车组(运行时速 300 km)由 8 辆车组成,其中 6 辆动车 2 辆拖车,编成后结构如图 1-4 所示,可两编组连挂运行。

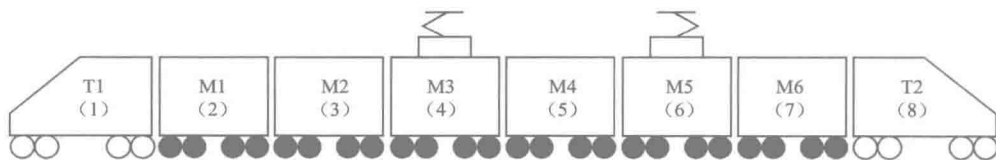


图 1-4 CRH2C 型动车组基本组成

3. CRH3 系列动车组

CRH3 型动车组是中国中车集团唐山轨道客车有限公司引进德国西门子技术(部分进口)生产的时速 350 km 级动力分散式动车组,原型车是西门子公司为德国城际快车(ICE)制造的 ICE3,该车型于 2008 年北京奥运会召开前交付京津高铁使用。

CRH3 型动车组基于西门子高速列车 Velaro 平台生产制造, Velaro 采用了与 ICE3 完全相同的 SF500 转向架与牵引、控制技术,仅将牵引功率由 ICE3 8000 kW 增加到 8 800 kW,以保证最高运行速度达 350 km/h,牵引变流器的元件由 ICE3 GTO 改进为 IGBT,并配备了最先进的欧洲 ETCS2 级信号系统,是目前世界范围内轮轨商业运行等级最高(350 km/h 等级)的车型,也是目前国内造价最高、车内装修最为豪华的车型。京津城际铁路于 2008 年 8 月 1 日通车,CRH3 也于当日起开始载客。

CRH3 型动车组由 8 辆车组成,其中 4 辆动车 4 辆拖车,编成后结构如图 1-5 所示,可两编组连挂运行。

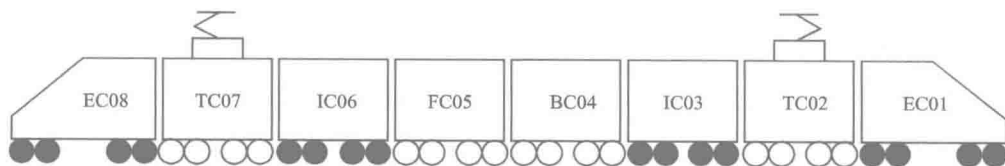


图 1-5 CRH3 型动车组的基本组成

4. CRH5 系列动车组

CRH5 型动车组是中国中车集团长春轨道客车股份有限公司引进法国阿尔斯通公司技术

生产的高速客运列车。该车型采用动力分散式设计,运行速度为 200 km/h 以上,是我国高速铁路客运的主力车型。CRH5 型电力动车组采用动力分散式设计,有别于 TGV 的动力集中式设计,是以法国阿尔斯通的 Pendolino 宽体摆式列车为基础,但取消装设摆式功能,而车体以芬兰铁路的 SM3 动车组为原型。

CRH5 型动车组由 8 辆车组成,其中 5 辆动车 3 辆拖车,定员 602+2(轮椅)人编成后结构如图 1-6 所示,可两编组连挂运行。

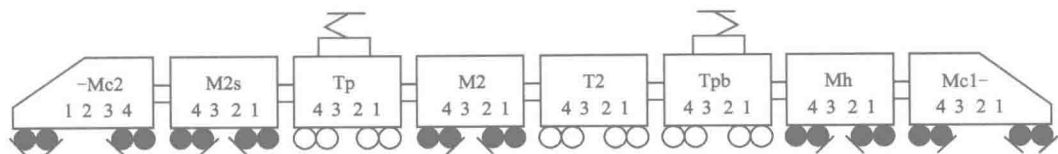


图 1-6 CRH5 型动车组基本组成

表 1-1 为国产动车组的主要参数,表 1-2 为国产动车组牵引变压器参数对比表,表 1-3 为国产动车组牵引变流器参数对比表,表 1-4 为国产动车组牵引电机参数对比表。

表 1-1 国产动车组的主要参数

车型	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5
编组形式	8 辆编组	8 辆编组	8 辆编组	8 辆编组
动力配置	$2 \times (2M+1T) + (1M+1T)$	$4M+4T$	$2 \times (2M+1T) + 2T$	$(3M+1T) + (2M+2T)$
车种	一等车、二等车、 酒吧坐车合造车	一等车、二等车、 酒吧坐车合造车	一等车、二等车、 酒吧坐车合造车	一等车、二等车、 酒吧坐车合造车
定员	670	610	557	606+2(残疾人)
客室布置	一等车 2+2 二等车 2+3	一等车 2+2 二等车 2+3	一等车 2+2 二等车 2+3	一等车 2+2 二等车 2+3
最高运行速度	200 km/h	200 km/h	350 km/h	200 km/h
最高试验速度	250 km/h	250 km/h	小于 400 km/h	250 km/h
适应轨距	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm	1 435 mm
适应站台高度	500~1 200 mm	1 200 mm	500~1 200 mm	500~1 200 mm
传动方式	交一直一交	交一直一交	交一直一交	交一直一交
牵引功率	5 500 kW	4 800 kW	8 992 kW	5 500 kW
受流电压制式	AC 25 kV/50 Hz	AC 25 kV/50 Hz	AC 25 kV/50 Hz	AC 25 kV/50 Hz
牵引变流器	IGBT 水冷 VVVF	IGBT 水冷 VVVF	250	IGBT 水冷 VVVF
牵引电机	265 kW	300 kW	562 kW	550 kW
启动加速度	0.6 m/s^2	0.406 m/s^2	0.5 m/s^2	0.5 m/s^2
制动方式	再生制动优先,空气 制动采用直通式电空 制动	再生制动优先,空气制 动采用直通式电空制动	再生制动优先,空气制 动采用直通式电空制动, 备用自动式空气制动	再生制动优先,空气制 动采用直通式电空制动, 备用自动式空气制动
紧急制动距离	$\leq 2\,000 \text{ m}$	$\leq 1\,800 \text{ m}$	$\leq 1\,600 \text{ m}$	$\leq 2\,000 \text{ m}$

续上表

车型	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5
辅助供电制式	三相 AC 380 V/ 50 Hz, DC 110 V	DC 100 V, 单相 AC 100 V, AC 220 V, AC 400 V	三相 440 V/ 50 Hz, DC 110 V	三相 AC 380 V/ 50 Hz, DC 24 V
列车控制 网络系统	车载分布式计算机网 络系统, 符合 IEC61375 (TCN)标准	车载分布式计算机网 络系统, 符合 ANSI878. 1(ARCNET)+EIA485/ ISO3309/4335 (HDLC) 标准	车载分布式计算机网 络系统通信协议基本上 基本标准 UIC556 和 IEC61375-1;1999	车载分布式计算机网 络系统, 符合 IEC61375 (TCN)标准

表 1-2 国产动车组牵引变压器参数对比表

车型	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5
原边绕组	1 600 kV · A, 25 kV, 50 Hz	3 060 kV · A, 25 kV, 22 A, 50 Hz	5 600 kV · A, 25 kV, 50 Hz	5 735 kV · A, 25 kV, 229.4 A, 50 Hz
牵引绕组	930 V, 430 A	2 570 kV · A, 1 500 V, 857 A × 2	1 400 kV · A, 1 550 V	955.8 kV · A, 1 770 V, 540 A

表 1-3 国产动车组牵引变流器参数对比表

车型	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5
输入	930 V, 430 A	1 285 kV · A(单相 AC 1 500 V, 857 A, 50 Hz)	2 × 1 430 kW AC 2 × 1 550 V	AC 2 × 1 770 V
中间直流电路	DC 1 650 V	1 296 kW(DC 3 000 V, 432 A)	562 kW	DC 3 600 V
输出	AC 3 × 1 287 V	1 475 kV · A(三相 AC 2 300 V, 424 A, 0~220 Hz)	0~2 800 V, 0~200 Hz	10~2 808 V, 0.5~180 Hz

表 1-4 国产动车组牵引电机参数对比表

车 型	CRH1	CRH2	CRH3	CRH5
功率	265 kW	300 kW	562 kW	564 kW
电压	1 287 V	2 000 V	2 800 V	2 808 V
电流	158 A	106 A	220 A	
频率	92 Hz	140 Hz		84 Hz
转差率	1.27%	1.4%		1.8%
额定转速	2 725 r/min	4 140 r/min	4 100 r/min	1 650 r/min
效率	0.94	0.94	0.947	0.935
功率因数	0.80	0.87	0.89	
质量	596 kg	440 kg		

第二章 动车组牵引传动电路及控制

第一节 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,目前根据传动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。本书中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一直、交一直—交传动方式。图 2-1 为交一直牵引传动系统的构成图,图 2-2 为交一直—交牵引传动系统的构成图。

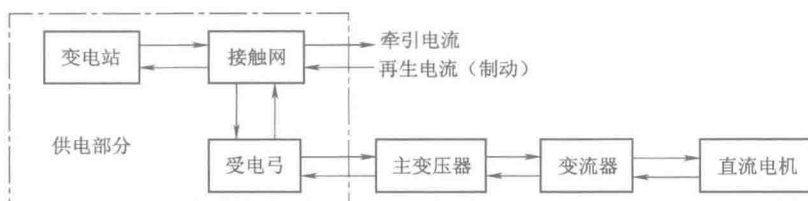


图 2-1 交一直牵引传动系统

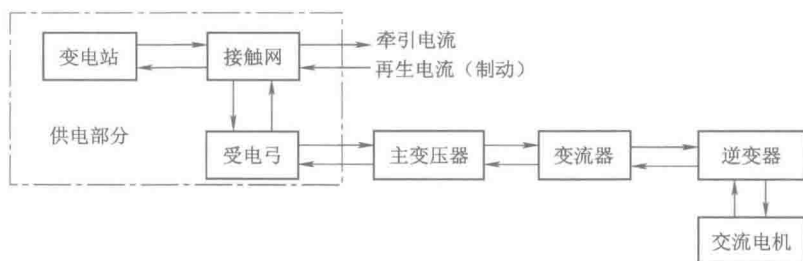


图 2-2 交一直—交牵引传动系统的构成

交一直牵引传动系统是指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 2-1 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车组的传动系统。列车受电弓从接触网上取得是一定频率和恒定电压的电能,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(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。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能,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。

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化为机械能,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。

我国动车组都采用交—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。

第二节 动车组牵引设备布置方式

动车组列车牵引动力系统包括主变压器、变流器、逆变器等各种动力设备,以及空调机、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。动力集中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 2-3(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黏着牵引力,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,降低钢轨和线路使用寿命。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。

另一种动力系统配制方法是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 2-3(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车。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。

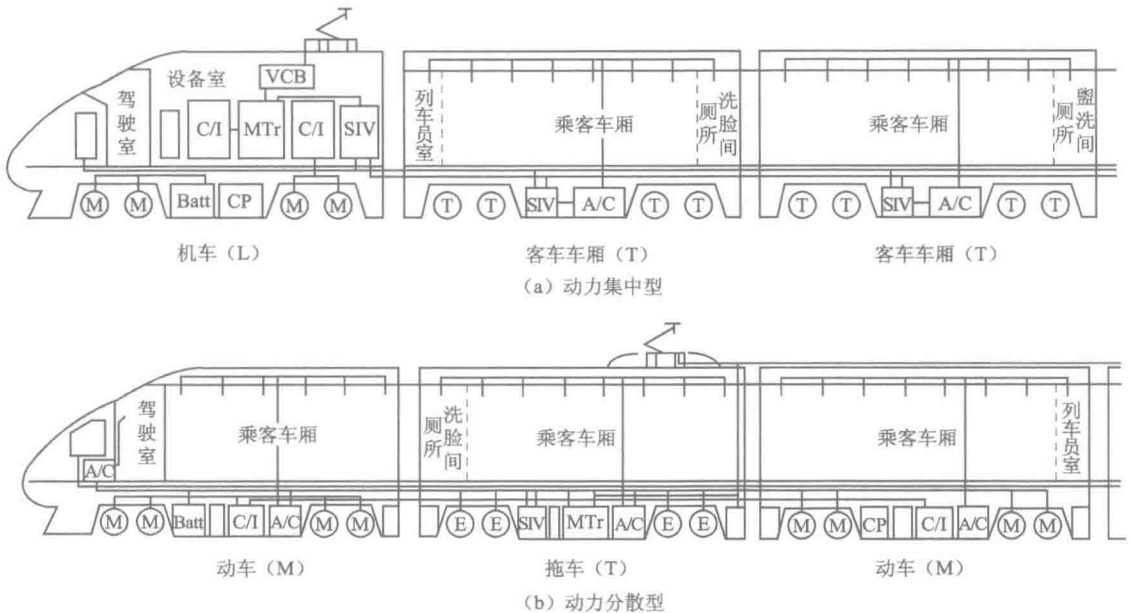


图 2-3 动力配置形式

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以由 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体下部,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,起动加速快,驱动动轴多,黏着性能比较稳定,容易实现高速运转,且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 12 000 kW,起动加速牵引力可达到 360 kN,每吨起动加速牵引力可达到 0.5 kN,由起动加速到 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。多年来,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。

可以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、传动装置的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,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。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。就起动加速度而言,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动车组做过比较,BD75型机车牵引12辆客车,一列车造价为34240万日元,而583动车组6辆动力车和6辆拖车的造价为47740万日元。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。

(6)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。原西德曾把一辆动力分散方式动车组与一辆牵引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型动车组约贵50%,BR420/421动车组约贵20%。日本也认为动力分散方式维修费用比动力集中方式动车组高得多。以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。欧洲铁路联盟(EMUs)拟建统一的高速铁路网。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8.2MW,最大电制动力为300kN,相当于ICE2短编组的两倍,减少了盘形制动的磨耗量及维修费用。

第三节 动车组供电牵引系统发展概况

一、概 述

日本从1964年首条高速铁路开通以来,动车组从0系发展到700系,从直流传动发展到交流传动,运行速度从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的运行速度,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控制技术。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