

高速列车耦合大系统动力学 理论与实践

DYNAMICS OF COUPLED SYSTEMS IN
HIGH-SPEED TRAINS: THEORY AND PRACTICE



张卫华 著



科学出版社

高速列车耦合大系统动力学 理论与实践

张卫华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了高速列车耦合大系统动力学的理论基础及应用实践。全书共8章,前4章描述了高速列车耦合大系统动力学的内涵、建模方法、实现平台以及耦合大系统动力学性能的基本特征。后4章主要介绍该理论的工程应用实践,基于耦合大系统动力学的性能要求,开展了第5章的动力学性能优化设计、第6章的耦合大系统参数优化设计以及第7章的耦合大系统动力学性能试验设计,并在第8章中探讨了高速列车服役周期内的性能变化,提出了一系列的安全控制策略和措施。

本书可供从事高速列车设计的相关专业院校与科研机构的研究生和研究人员查阅、参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速列车耦合大系统动力学理论与实践 / 张卫华著. —北京: 科学出版社, 2013.3

ISBN 978-7-03-036749-5

I. ①高… II. ①张… III. ①高速列车-耦合系统-系统动力学-研究 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 034204 号

责任编辑: 杨 岭 华宗琪 / 封面设计: 陈思思

责任校对: 孟苏成 / 责任印制: 邝志强

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013年3月第一次印刷 印张: 26 3/4

字数: 620 千字

定价: 93.00 元

前 言

笔者于 2005 年撰写《机车车辆动态模拟》一书时,正值我国高速铁路建设初期,虽然在第十五章“高速列车动态模拟研究的发展”中,思考了高速列车中的基础理论问题以及拟开展的相关课题,但因缺乏中国高铁的“实战”经验,未形成系统的高速列车动力学理论。从 2006 年至 2012 年,中国高速铁路 7 年的快速发展,使得中国一跃成为世界上高速铁路里程最长的国家。中国高速列车的发展秉承“引进先进技术,联合设计生产,打造中国品牌”的指导方针,实现了高速动车组的引进、消化吸收和再创新。伴随中国高速铁路的发展和高速列车的自主创新,笔者在理论上和实践上对高速列车有了新的认识,提升了高速列车理论系统研究的高度,并累积了大量的实践经验。本书旨在及时总结理论研究成果和经验,以为高速列车设计、分析、运用和维护提供更加系统的理论和依据。

笔者在《机车车辆动态模拟》一书中提及到机车车辆与其他系统的耦合作用,并用实物模拟、计算机模拟和混合模拟研究了机车车辆、轮轨关系和弓网关系。在我国高速列车研究中,笔者愈加重视高速列车与线路系统、弓网系统、供电系统及气流状态的耦合作用,在 2007 年铁道部制订的《时速 300~350 km 动车组总体技术方案》中,笔者所提出的“应用与发展高速列车耦合大系统动力学理论”已作为高速动车组基础理论的创新要点。之后,笔者不断思考和研究了高速列车耦合大系统动力学理论框架,构建了仿真平台,并尝试将其应用于高速列车动力学及其轮轨、弓网、流固和机电耦合关系研究之中。目前,有相当一部分研究成果在实际工程中得到了应用。

高速列车耦合大系统动力学是构建高速列车设计—制造—运用—维护全寿命周期的动力学性能研究与试验体系的重要理论支撑。利用轨道交通国家实验室筹建之机,笔者主持构建了高速列车数字化仿真平台,并主持建设了高速列车基础研究实验平台和高速列车服役性能研究实验平台。这些实验和检测装备的建立,已成为高速列车全寿命周期动力学研究与试验体系的重要组成部分,也为高速列车耦合大系统动力学理论的建立和验证提供了条件。

在高速列车耦合大系统动力学理论、仿真和试验平台建立的基础上,笔者主持完成了国家“973 计划”项目“高速列车安全服役关键基础问题研究”和国家“科技支撑计划”项目“中国高速列车关键技术研究及装备研制——共性基础及系统集成技术”,相关研究成果汇集形成了本书。

本书共分 8 章。第 1 章总结了世界高速铁路发展概况,回顾了法国、德国、日本和中国高速铁路技术的发展特点,并从车辆系统动力学、列车系统动力学、轨道系统动力学、空气动力学以及弓网系统动力学 5 个方面展示了铁路领域动力学理论研究的现状,针对高速铁路系统的特殊性以及当前高速铁路面临的动力学问题,提出了开展高速列车耦合大系统动力学研究的必要性,并对耦合大系统动力学的基本研究内容进行了介绍。

第 2 章首先定义了高速列车耦合大系统动力学的概念,将其建模分解为 7 个子系统的建模、系统耦合建模以及各系统综合的耦合大系统动力学模型,并在此基础上拓展至列车

运行牵引控制和高速列车服役的建模。详细介绍了各子系统建模的内涵,对车辆系统、线路系统、受电弓系统、接触网系统、空气动力学、供电系统和传动系统7个子系统的建模方法、建模思路以及理论支撑进行了逐一说明。从车间耦合模型、列车耦合模型、弓网耦合模型、轮轨耦合模型、车线耦合模型、流固耦合模型以及机电耦合模型7个方面对高速列车系统中存在的耦合模型进行了理论建模。最后,在子系统和耦合关系模型的基础上构建了高速列车耦合大系统动力学模型。本章详细描述的各类模型的建立和计算方法,是高速列车耦合大系统动力学理论研究的核心,是展开理论研究的必要前提。

第3章基于第2章的动力学模型,组建了高速列车耦合大系统动力学的仿真平台。首先从仿真平台功能、软件架构和硬件架构3方面搭建了仿真平台的框架,并利用面向CAD的动力学属性提取技术、高速列车的参数化建模以及动力学的图形化建模等方法进行了高速列车的建模,采用集成建模技术(组件建模)、三层耦合控制仿真方法和耦合器以实现高速列车耦合大系统动力学的仿真计算,并从高速列车耦合大系统仿真平台的数据体系的特征、任务和技术要求出发,设计了仿真平台的数据体系,建立了数据体系与动力学仿真工况之间的对应关系。随后运用不同粒度、不同域以及多样化的动态数据展示技术对仿真结果进行后处理。最后,对比了高速列车耦合大系统动力学仿真结果和高速列车试验结果,验证了仿真平台的建模方法和耦合仿真方法的有效性。

第4章首先从高速列车、轮轨耦合、弓网耦合、流固耦合和机电耦合5个方面对高速列车耦合大系统动力学参数进行了细致的描述,随后介绍了评价列车振动、弓网关系、流固关系和机电耦合关系的各性能指标,并针对高速列车耦合大系统中各耦合系统的动力学性能进行了基本特性描述。

第5章基于高速列车动力学性能的优化目标以及高速列车的顶层设计指标,探讨了高速列车的运动稳定性设计方法、运行平稳性设计方法和运行安全性设计方法,明确了相应的控制策略以及参数优化设计的方法。随后综合了高速列车参数对动力学性能的影响程度,提出参数设计需要系统优化的观点,并将其运用于轮对踏面设计、轮径、轴距、一系定位纵向刚度、二系空气弹簧参数以及减振器参数等转向架参数的设计中。

第6章从轮轨耦合关系、弓网关系和流固耦合关系出发,对高速铁路线路参数、高速受电弓和接触网参数以及高速列车气动参数进行了探讨。通过线路平纵断面特点、线路刚度以及轨道不平顺对动车组的安全性和舒适性的影响分析,提出了线路参数的基本优化方法。针对受电弓结构参数和悬挂参数、接触网型式和结构参数以及受电弓的弓间距对弓网动力学性能的影响特性,提出了合理的弓网参数优化设计方法。分析了高速列车头部剖面控制线外形、线路线间距以及挡风墙对高速列车气动特性的影响,并提出了合理的线路间距设置以及挡风墙高度取值。

第7章首先从系统性、试验性和实践性3方面介绍高速列车创新研究平台的总体技术方案,确立了高速列车基础研究试验、数字化仿真以及服役性能试验的3大平台建设框架,并对高速列车各项基础研究台架试验技术、动力学服役性能跟踪试验技术以及高速列车科学研究性试验的试验技术进行了详细的说明。以京津城际高速铁路的研究性试验为例,利用试验结果充分展现高速列车各系统间的耦合作用以及试验技术的有效性。

第8章基于高速列车跟踪检测结果,探讨了高速列车服役过程中动力学性能的演变规律;结合高速列车走行部的安全监控平台、车载安全检测技术、地面安全检测技术对高速

列车走行部的监控技术进行了介绍；从车轮踏面磨耗、轮对尺寸误差和车辆悬挂参数对高速列车动力学性能的影响出发，给出了各参数的阈值；引入高速列车服役可靠度的概念，以轮对踏面和一系定位系统的可靠性设计进行了举例说明，并提出了高速列车服役可靠度的控制策略。

本书的出版，得到了诸多的支持和帮助。首先要感谢我的导师——中国科学院和中国工程院院士沈志云教授，正是他的引导和鼓励，我才有勇气探索高速列车耦合大系统动力学；当然我要特别感谢牵引动力国家重点实验室的同事们和参与轨道交通国家实验室建设的同仁们，正是他们的积极配合和支持，才保证了高速列车设计—制造—运用—维护全寿命周期的动力学性能研究与试验体系构建这项系统而又复杂工作的完成；还要感谢所有参加我主持的各项科研课题研究的老师和研究生，他们的研究成果极大地丰富了本书的内容，本书的成稿也是他们共同努力的结果。最后要衷心感谢科学出版社的领导和编辑，是他们的直接支持和辛勤工作促成了本书的及时出版。

高速列车耦合大系统动力学理论的形成时间还不长，高速列车设计—制造—运用—维护全寿命周期的动力学性能研究与试验体系还需要在实践中不断完善，加之作者在专业上的限制，而且有些研究还在进行之中，书稿并没有达到预期的要求，希望在以后的工作中逐步完善。如此种种，限于作者水平，肤浅和粗糙之处敬请同行们多多指教，书中错误和不当之处也敬请广大读者批评指正。

张卫华

2012年12月9日

于成都西南交通大学

目 录

序言	i
前言	iii
第 1 章 绪 论	1
1.1 世界高速铁路发展概况	1
1.2 铁路领域动力学研究的现状	18
1.3 高速列车耦合大系统动力学研究的必要性	40
1.4 高速列车耦合大系统动力学研究内容	43
参考文献	45
第 2 章 高速列车耦合大系统动力学建模	56
2.1 高速列车耦合大系统动力学的基本定义	56
2.2 子系统动力学建模	57
2.3 耦合模型及耦合计算方法	108
参考文献	142
第 3 章 高速列车耦合大系统动力学仿真平台	144
3.1 高速列车耦合大系统动力学仿真平台框架	144
3.2 基于参数化和图形化的高速列车建模方法	152
3.3 高速列车耦合大系统动力学仿真计算方法	159
3.4 高速列车耦合大系统动力学仿真平台数据体系	166
3.5 高速列车耦合大系统动力学仿真后处理展示技术	173
3.6 高速列车耦合大系统动力学仿真平台及验证	178
参考文献	193
第 4 章 高速列车耦合大系统动力学性能基本特征与评价	194
4.1 高速列车耦合大系统动力学参数	194
4.2 动力学性能评价指标	217
4.3 高速列车耦合大系统动力学性能	229
参考文献	249
第 5 章 高速列车动力学性能优化设计方法	251
5.1 高速列车优化目标和顶层指标设计	251
5.2 高速列车运动稳定性设计方法	258
5.3 高速列车运行平稳性性能优化设计方法	269
5.4 高速列车运行安全设计方法	273
5.5 高速列车参数的综合设计	276
参考文献	287

第 6 章	高速列车耦合大系统参数优化设计方法	289
6.1	高速铁路线路参数优化设计	289
6.2	高速受电弓和接触网参数优化设计	303
6.3	高速列车气动特性优化设计	314
	参考文献	330
第 7 章	高速列车耦合大系统动力学性能试验技术	332
7.1	轨道交通国家实验室的高速列车研究平台建设	332
7.2	高速列车基础研究台架试验技术	335
7.3	高速列车动力学服役性能线路试验技术	356
7.4	高速列车科学研究性试验	361
	参考文献	376
第 8 章	高速列车服役性能及其安全控制	378
8.1	高速列车服役性能的演变规律	378
8.2	高速列车走行部安全监控技术	387
8.3	高速列车服役性能预测与阈值	397
8.4	高速列车服役性能控制	403
	参考文献	414

第 1 章 绪 论

1.1 世界高速铁路发展概况

世界高速铁路发展至今已近半个世纪，全世界已建成高速铁路约 1.4 万公里，高速铁路将欧洲、亚洲和其他许多国家及地区都连接起来了，欧洲和亚洲逐步成为高速铁路发展中心，形成了以德国、法国高速铁路技术和以日本新干线高速铁路技术为代表的高速铁路技术体系。基于不同设计理念的两大技术体系，各具独特优势，都在不断地探寻着更高速、更安全、更舒适的高速铁路设计技术，不断地发展着更先进、更高效、更优良的高速铁路装备制造技术，也不断地累积着更丰富、更深刻的高速铁路系统运营经验。

· 高速铁路是一个庞大的系统工程，其核心是高速列车系统。高速列车系统不仅包括高速列车自身，还涵盖着高速轨道线路、高速接触网(供电系统)、通信信号等子系统，如图 1.1 所示。目前，德国的 ICE、法国的 TGV、日本的新干线以及中国的 CRH，已成为高速铁路和高速列车技术发展的代名词。四国的高速铁路系统各具鲜明特点，涵盖了典型的高速列车技术。以高速列车的牵引方式为例，高速列车主要采用了两种牵引方式——动力集中和动力分散，各自以独特的优势被广泛应用于全世界的高速列车中；以高速轨道线路技术为例，目前铺设的线路主要有有砟轨道和无砟轨道两种型式，有砟轨道的低噪声特性和无砟轨道的高平顺性都深受设计者的喜爱，设计者在尽情发挥它们的优势的同时也在不断进行技术升级，规避各自的弊端；以高速接触网技术为例，因其悬挂方式的不同，形成了简单链型悬挂、弹性链型悬挂和复链型悬挂 3 种结构，都在为提高受流质量而不断优化发展着。

下面将分别对法国、德国、日本和中国为代表的四国高速列车及其相关技术的发展和特点进行简单回顾。

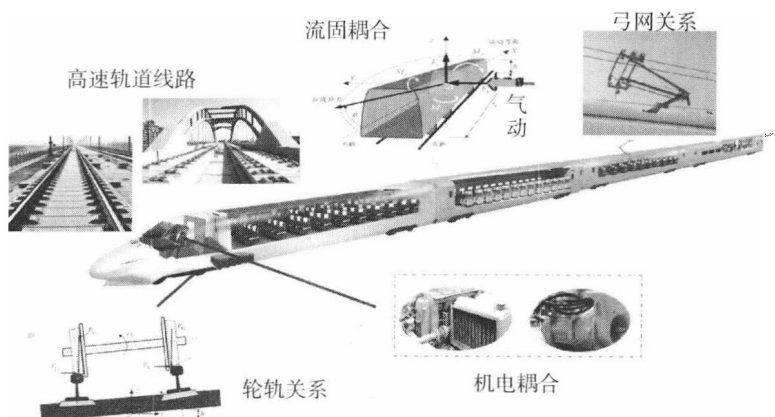
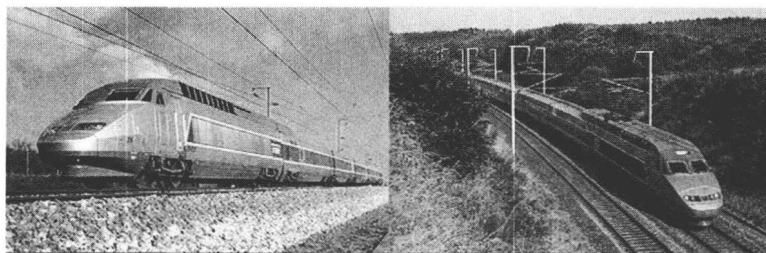


图 1.1 高速列车系统

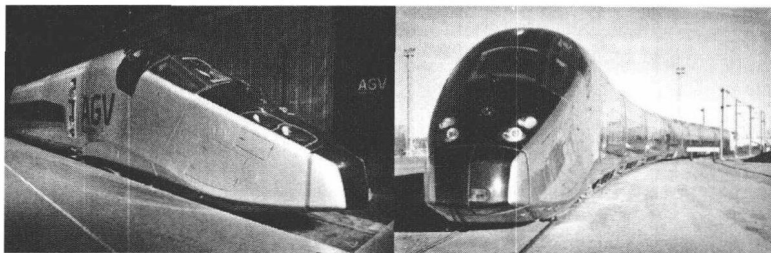
1.1.1 法国高速铁路的技术特点

法国高速铁路(TGV)的研发计划于20世纪60年代晚期展开。20世纪70年代初,编号001的首辆TGV001开展试车,在1972年创下时速318 km的世界纪录;1981年再度创下了380 km的新记录。同年9月法国第一条高速线——东南线(巴黎—里昂)上行驶了TGV-PSE型动车组,最高运行速度达270 km/h,开启了铁路史的新纪元。1990年5月18日,法国第二代高速列车——TGV-A创造轮轨系高速列车最高试验速度515.3 km/h的记录,并开行于法国第二条高速铁路——大西洋线(巴黎—勒芒、图尔),最高运行速度达300 km/h。随后增开法国北部、地中海地区、东部路线以及各地区联络线,并开行了TGV-R、TGV-D、TGV-POS、欧洲之星TGV-TMST以及国际列车Thalys等系列高速列车,使各大城市间的旅行时间大大缩短。2007年4月3日,法国最新型超高速列车AGV V-150试验型高速列车在巴黎—斯特拉斯堡高速线上创造了地面交通运输系统试验速度的世界最高记录574.8 km/h^[1-7]。法国高速铁路一直用全世界最高试验速度的记录,完美地诠释着“超高速铁路”(TGV的法文意思)。

高速列车一代又一代地更新,典型高速列车如图1.2所示,其主要技术特点如下所述。



(a)第二代(TGV-Atlantique)



(b)第四代(AGV)

图1.2 法国典型的高速列车^[8,9]

1.1.1.1 动力驱动方式多样,以动力集中为主

法国在1970年开始研制高速列车,最初采用燃气轮机为动力,经过5227次试车经历^[10],造出了第一台样机TGV001号。1975年第一次石油危机的到来,使得法国高速列车的动力转向了电力驱动方式,发展并沿用至今。TGV由第一代发展到第四代,前三代都是动力集中式,第四代是动力分散式。

第一代是东南线高速列车TGV-PSE,采用的是直流电机,编组方式2M8T,动力集中牵引,可联挂两列运行,商业运营速度达270 km/h。此车配备6台动转向架,7台从转

向架和12台直流牵引电机^[2]。

第二代是大西洋线TGV-A,采用的是交流同步电机,投入北方线路网使用的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。编组方式主要为2M10T,可联挂两列运行,商业运营速度达300 km/h。此车型配备4台动转向架和8台同步牵引电机,采用了双流制牵引——1 500 V直流/25 kV~50 Hz,最大功率达8 800 kW,列车爬坡能力达27‰。欧洲之星的编组2M18T,法国境内最高商业运营速度达300 km/h,此车型配备6台动转向架,18台从转向架和12台同步牵引电机。双层TGV,亦是第二代的延伸产品,1996年投入使用,该车采用的仍然是交流同步电机。编组方式主要为2M8T,最高商业运营速度可提高到320~330 km/h。此车型配备4台动转向架,9台从转向架和8台同步牵引电机^[2]。

第三代是2007年6月在东部线使用的TGV-POS,采用的是以IGBT为功率元件的交流异步电机^[11]。

第四代是2008年在法国巴黎—斯特拉斯堡高速新线上投入运营的AGV^[1],如图1.2(b)所示。前三代都是动力集中式,编组辆数受到限制,第四代是动力分散式,采用的是交流永磁同步电机。此车型设计时速360 km/h,每三辆车组成一个不可分离的牵引单元,设计的编组方案有6辆、9辆、12辆等多种,以列车编组9辆为例,共有14根动轴,8根非动轴,头车的两端为非动力转向架。

法国高速列车的驱动技术从燃气涡轮机发展到直流电机、交流同步电机,再到交流异步电机、交流永磁同步电机;高速列车动力配置方式在成熟的动力集中式技术的基础上,亦发展了动力分散式技术,加大了车辆编组,但目前仍然以动力集中式技术车型应用较广。

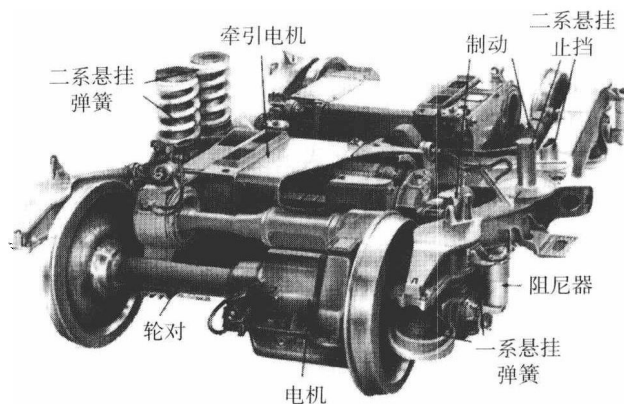
1.1.1.2 变长度的车辆底盘技术

TGV车辆底盘长度是可变的,且在共轴方向发生。列车加速时底盘将被拉长,列车间碰撞或刹车时,底盘将被压缩以吸收碰撞能量。变长度底盘技术,可吸收车体之间的挤压弹性能力,从而防止列车间发生“扭麻花”或“Z”形翻覆^[8]。

1.1.1.3 技术优良的铰接式转向架

法国TGV系列高速列车都是铰接式高速列车,此方式降低了高速列车转向架数量,并将转向架的振动转移至离乘客区较远的列车端部;但加大了车辆轴重控制的难度,经过有效的设计,TGV列车的轴重满足了小于17 t的要求。

TGV-PSE的动力转向架Y230是在法国燃气轮动车组转向架Y226型的基础上发展而来的,并被法国所有的第二代、第三代高速列车用作动力转向架,如图1.3所示。Y230型动力转向架采用了轻量化设计,是无摇枕式转向架,每轴箱配一个垂向液压减振器,二系悬挂采用高挠度圆簧直接支承车体,加装了两个垂向液压减振器、一个横向液压减振器和两个抗蛇行液压减振器。为防止车体相对于转向架横移过量,在枕梁中部装有两个刚度递增的横向橡胶止挡。构架由箱型的鱼腹形侧梁和横梁组成,采用H形焊接结构;齿轮箱体采用铝合金铸造,最终将转向架的自重控制在7.263 t。此转向架结构简单,便于组装和拆卸,可靠地实现了牵引电机体悬和较好的驱动动力学性能,是典型的动力集中式高速列车体悬式动力转向架。

图 1.3 Y230 典型转向架^[12]

1.1.1.4 主要铺设有砟轨道，试验研究无砟轨道

法国是以有砟轨道为代表的高速铁路国家，一直以有砟轨道能以 270~300 km/h 运营而感到骄傲，但后来发现在早期建造的东南线、大西洋线上，道砟的粉化严重，轨道几何尺寸难以保持，维修周期缩短，维修费用大大增加，甚至影响正常的运营，使用不到 10 年就必须进行全面大修^[13]。为此，法国高速铁路线路的发展主要围绕对既有有砟轨道技术的改进和无砟轨道技术的研究而展开。

高速铁路有砟轨道的几何质量，由于“石块路面下的填砂技术”的引入而得以提高；轨道维修质量和能力也因捣固铺平机、春打机、稳定器等填充机器的发展而得以提高。关于高速列车在行进过程中道砟的松动和飞起，是有砟轨道技术发展必须面对的问题，然而，这对于 TGV 车辆的特殊铰接式结构而言，高速运行引起的气流扰动较非铰接式车辆小很多，因此，道砟飞溅现象对于 TGV 来说并非解决难题。这在地中海高速线路(瓦朗斯—马赛)试验段的试验结果中得到了很好的验证^[3]。

无砟轨道的优越性^[14,15]也促使了法国对其研究和试验。法国开发的 VSB—STEDEF 是双块式无砟轨道，属于 LVT 型无砟轨道。此轨道采用双块式轨枕，轨枕角度用角钢联结，混凝土道床板用滑膜摊铺机施工，留有凹槽，将轨枕块放入凹槽，再填充混凝土。目前，无砟轨道仅在英吉利海峡隧道内和地中海线靠近马赛的一个隧道内铺设，并未在法国境内进行大面积的应用。

1.1.1.5 简单链型悬挂式接触网

法国在 20 世纪 80 年代建成的巴黎—里昂东南线主要采用弹性链型悬挂。但在正式运营的 3 个月内，发生了两次重大事故，造成导线拉断、接触网损坏。90 年代初，法国总结了东南线的经验教训，在大量的理论和试验研究的基础上认为，弹性吊索对于时速超过 250 km 的高速来说意义不是很大，反而成为影响行车安全的因素之一。从而，后续的巴黎—勒芒大西洋线采用了简单链型悬挂。

简链悬挂结构简单，造价低廉，并能适应高速受流的需要。TGV 大西南线接触网取消了弹性吊索，采用简链悬挂，允许的最高运营速度为 300 km/h。法国试验研究还表明，接触网取消弹性吊索后，弹性均匀性不如以前，但通过提高接触线张力，可使接触网弹性

满足 470 km/h 运行的受流需要。1990 年 5 月 18 日, TGV 电动车组 515.3 km/h 的运行速度纪录就是在大西洋线西南段线路上实现的, 接触线张力提高到 33 kN^[16]。

1.1.2 德国高速铁路的技术特点

德国拥有世界闻名的高技术荟萃的 ICE 高速铁路系统。早在 1903 年, 德国铁路的一辆电动车组曾经在试验中达到 210 km/h 的速度。1971 年, 德国开工建设第一条高速铁路新线——汉诺威—维尔茨堡高速线(327 km), 之后又开始修建第二条高速新线——曼海姆—斯图加特高速线(99 km)。随后, 1998 年开通运营了汉诺威—柏林高速铁路(264 km), 2002 年 8 月科隆—法兰克福高速铁路(219 km)开通, 2006 年纽伦堡—慕尼黑(171 km)开通运营。

德国高速列车车型体系的发展也比较完善。依靠扎实和严谨的基础理论研究、慕尼黑的机车车辆滚动振动试验台研究、大量线路试验研究以及多年的高铁实际运营经验, 德国 ICE 系列高速列车共发展了 ICE1、ICE2、ICE3、ICE-T/ICE-TD 等车型体系, 系统的车辆制造和设计体系不断完备。

1.1.2.1 动力集中驱动向动力分散式技术发展

ICE 系列高速列车中有动力集中型和动力分散型的高速动车组, 各车型的动力驱动方式^[17]如表 1.1 所示。ICE1 是德国 20 世纪 80 年代中期开始开发, 1991 年投入运营的动力集中型高速动车组, 共计生产了 60 列。ICE2 是 1995 年开发, 1997 年投入运营的动力集中动车组, 最高速度可达 280 km/h。ICE3 是 1997 年开发, 2000 年投入运营的动力分散高速动车组, 生产了两代共 67 列。ICE-T 是 1997 年开发的动力分散型高速摆式动车组, 生产了两代^[17]。两套驱动方式的牵引控制系统都能实现 280 km/h 及以上的速度, 两者的优势、功能也发挥得淋漓尽致。动力集中的大功率牵引模式, 在确保车辆快速行进的同时, 也提高着车辆的乘坐舒适性; 动力分散的多节电力牵引模式, 在确保高速状态下足够轮轨粘着条件的同时, 也完善着车辆驱动装置等设备的高效率和高可靠性。德国从 200 km/h 速度等级的动力集中牵引模式起步, 发展到 300 km/h 速度等级时, 采用了动力分散技术, 德国本土 ICE 高速列车最高商业运营速度为 300 km/h, 并在无砟轨道线路上运营。德国随后出口至西班牙、中国和俄罗斯的高速列车车型, 均属于在 ICE3 基础上开发的 Velaro 平台, 都是动力分散型高速动车组。

表 1.1 德国典型车型的动力配置方式

车型	ICE1	ICE2	ICE3	ICE-T
编组数	14	8	8	5 或 7
编组方式	2M12T	1M7T	4M4T	3M2T 或 4M3T
驱动方式	动力集中	动力集中	动力分散	动力分散
最高运行速度/(km·h ⁻¹)	280	280	330	230

1.1.2.2 不锈钢车体发展至大断面铝合金车体

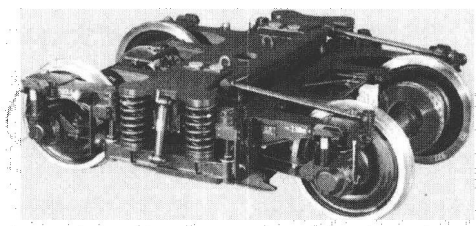
ICE1、ICE2 高速列车的动车均采用不锈钢车体, 拖车采用铝合金车体。ICE3 高速列车动拖车都采用了由闭口铝型材组成的铝合金车体结构。ICE1 拖车车体由 18 块连续通长

的铝型材组焊接而成,其中车顶由1块中顶型材、2块中侧顶型材与2块侧顶型材组成;侧墙由1块上侧墙型材、1块中侧墙型材与1块下侧墙型材组成;底架由2块边梁型材与5块地板型材组成。车体的铝合金型材和车体结构都比较原始。ICE2列车的铝合金车体做了一定的改进。ICE3及以后的车型,又进行了进一步的改进,将车体强度、刚度提高了,如车体与转向架结构部位的抗冲击强度提高到了 $5g^{[17]}$ 。

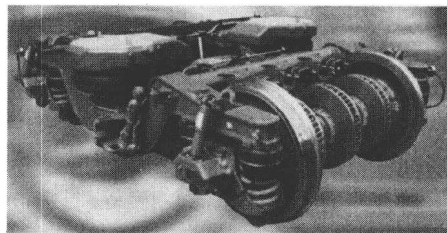
铝合金薄壁焊接结构质量轻、耐腐蚀、加工性能优异、易于连接而在高速列车车体中大量应用。由于铝合金的热膨胀系数大、弹性模量小,焊接变形问题相当突出,严重影响结构的制造精度和使用性能。铝合金车体用薄板自身拘束度小,再加上铝合金热膨胀系数较大,传统的热输入量较大的焊接方法容易出现熔池下塌或烧穿,容易产生难以矫正的波浪变形,因此铝合金车体薄板焊接工艺水平显得极为重要。铝合金薄板在高速列车中主要应用在车头蒙皮、地板、端墙等部位,主要使用的合金牌号有5754和5083两种非热处理强化铝合金。铝合金薄板应用较为广泛的焊接方法有弧焊、激光焊和搅拌摩擦焊等^[18]。德国经过多年铝合金焊接技术的发展,目前已形成很完善和高效的焊接工艺,铝合金焊接工艺水平处于世界领先水平,焊接缺陷少,焊接产品质量稳定。

1.1.2.3 高性能转向架

德国ICE系列高速列车采用的转向架有ET401/ET402、MD530^[19]与SGP系列的SGP300(SF300)、SGP400(SF400)^[20]、SF500等型号,均非铰接式转向架,如图1.4所示。



(a)MD530



(b)SF400

图 1.4 德国高性能转向架^[19,20]

ICE1 动车采用 ET401 转向架,二系悬挂采用高圆钢弹簧,拖车采用 MD530 转向架,二系悬挂采用螺旋钢弹簧。

ICE2 高速列车初期动车采用 ET402 型转向架,其后都采用 SGP400 型转向架,该转向架采用 H 形焊接构架,一系悬挂采用螺旋钢弹簧与垂向液压减振器。轴向轮对装置采用垂向液压导柱式定位,靠导柱与导筒之间的液体传递纵向力和横向力,属于弹性定位。二系悬挂采用空气弹簧与横向液压减振器。

ICE3 采用 SF500 型转向架,该转向架一系悬挂采用钢螺旋弹簧与垂向液压减振器,轴箱采用转臂式橡胶节点定位,定位转臂一端与圆筒形轴箱体固接,另一端以橡胶弹簧节点与转向架构架相连。二系悬挂采用大气囊空气弹簧与横向液压减振器。

德国将 SGP300、SGP400 与 SF500 转向架皆统一为 SF 系列(SF300、SF400、SF500)转向架,并采用了经过 20 年不断完善的动力学仿真软件进行优化,完善了该系列转向架

的动力学性能^[17]。

1.1.2.4 逐步铺设无砟轨道

德国高速铁路在建设初期使用有砟轨道,其散粒状碎石为轨道提供了良好的弹性,但经过多年运营发现了碎石道床容易产生变形、粉化和脏污等现象,需要不断地进行维修。因此,在修建第三代高速铁路时普遍采用了无砟轨道。无砟轨道具有稳定性好、耐久性强、轨道平顺性好、少维修、结构高度小、自重轻、能避免高速行车产生的道砟飞溅和有利于保持无缝线路稳定性等优点。早在1968年德国便开始研究试铺无砟轨道,在1972年德国 Rheda 车站试铺了长枕埋入式无砟轨道,此结构运营了30多年,未经过任何养护。为了研究和发展无砟轨道技术,德国铁路曾在卡尔斯鲁厄到巴塞尔线路上,选择8 km 地段铺设了8种不同的轨道类型。其中有长枕埋入式、双块式、绿色无砟轨道、长梁式、宽轨枕等^[21],如图1.5所示。每段长度约390 m,不同结构间采用了过渡型式。各种不同型式的轨道在运营后通过检测和观测,通过不断总结和改进,研制出更先进的无砟轨道结构型式。到目前,德国有代表性的无砟轨道有 Rheda2000、旭普林和博格板式轨道^[21]。

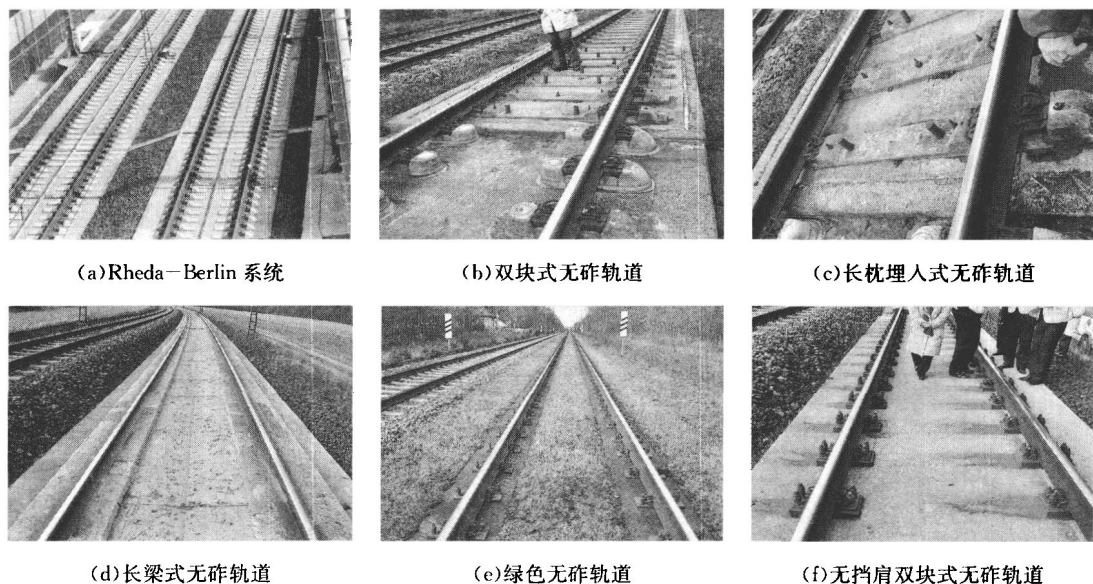


图 1.5 德国无砟轨道类型^[21]

法兰克福—科隆铁路是德国第一条客运专线,亦是第三条高速线路,设计速度300 km/h,个别地段速度330 km/h。全线主要采用无砟轨道型式,其中在中间一段铺设了 Rheda-Berlin 系统无砟轨道。德国无砟轨道在路基地段其轨道板或道床板和支承层是连续铺设的。纽伦堡—慕尼黑的高速铁路使用了博格板式轨道,这是一种预制轨道板,在制作、铺设方面有更特殊的工艺要求。

1.1.2.5 弹性链型悬挂式接触网

德国在20世纪50年代开始接触网的标准设计,并提出了 Re75、Re100、Re160 和 Re200(Re 表示标准接触网,后边的数字为在该标准接触网形式下列车可运行的最大时速)

4 种标准弹性链式接触网；到 70 年代，又推出了 Re250 和 Re330 标准系列，均采用全补偿方式。德国在研发 Re250 标准接触网时，先在德国铁路慕尼黑铁道技术研究中心的接触网试验设备上进行了多种接触悬挂形式的静态特性研究，最终选定了弹链及其相关参数，后又在运营线路 Rhecla 至 Oelde 高速试验段上，按照时速 250 km 的设计目标进行了多年的高速行驶弓网试验。试验过程中曾经把承力索张力 19 kN、弹性吊索张力 3.5 kN 作为首选方案，经过整个接触网系统的优化后才最终确定承力索张力 15 kN、弹性吊索张力 2.8 kN^[22]。1988 年 5 月 1 日，Re250 加强型接触网，将接触线张力由 15 kN 提高到 21 kN，在维尔茨堡—富尔达区段，ICE 试验速度达到 406.9 km/h。同样，德国在研发 Re330 标准接触网时，又在哥廷恩—汉诺威共 10 km 高速试验段上，进行了 335 km/h 双受电弓高速行驶试验。

全补偿型弹链悬挂结构的接触网弹性均匀，利于受电弓高速受流，然而其关键部件弹性吊索的设置需要相当精确的计算和一套严格的施工程序，其设计、施工和检测较困难。再加上弹性吊索本身的长度和张力是随着温度发生变化的，要想保证它在各种温度条件下不使附近的接触网变形，是一件相当困难的事情。所以，德国专家现在也开始研究简单链型悬挂。

1.1.3 日本高速铁路的技术特点

高速铁路的实际应用发源于日本。1959 年，日本国铁开始建造东京至大阪的高速铁路；1964 年 10 月 1 日，日本东海道新干线作为全球第一条全程高速铁路正式投入运营，全长 515.4 km，使用了新干线 0 系“子弹头”高速列车，最高时速可达 210 km，旅行时间由 6 小时 30 分钟缩短至 3 小时 10 分钟^[23]。继东海道新干线开通后，日本高速轨道交通的宏伟规划亦逐步开展起来了。随后新干线向西延伸发展，于 1972 年开通至冈山，1975 年开通至终点站博多。大阪至博多称为山阳新干线，全长 1 069 km。1982 年，大宫至盛冈间 465 km 的东北新干线开通，同年 11 月，大宫至新潟间的上越新干线也开通运营。1970 年，日本制定《全国新干线铁路网建设法》，并确定了总长约为 6 000 km 的新干线铁路建设基本计划。1972 年日本运输省又规划了 5 条新干线：北陆新干线（东京—大阪—富山）、东北新干线延长线（盛冈—青森）、九州新干线（博多—鹿儿岛）、长崎新干线（博多—长崎）、北海道新干线（青森—札幌）。截至 2010 年，新干线网络已经有 2 414 km 的轨道连接起日本的主要城市，现已形成了以东京、大阪、博多、盛冈为中心，线路半径在 500 km 左右的高速铁路输送网。到 2011 年，偏居一角的九州新干线将修建至博多与山阳的新干线连通，鹿儿岛中央—新大阪直通运转开始；2015 年，新干线将延伸至北海道的札幌。至此，日本四岛被新干线全部连接到了一起，届时新干线不但可以通江达海环绕整个日本岛，而且还有横向线路贯通连接，形成宏伟的日本高速铁路网。

日本新干线高速列车体系，自 1964 年发展至今，运营车速由 210 km/h 提升至 320 km/h，发展了 0 系、100 系、200 系、300 系、400 系、500 系、700 系、800 系、E1 系、E2 系、E3 系、E4 系、E5 系以及最新投入运营的 N700 系等不同系列的产品，分属“东海道—山阳”和“东北”两大家族，能适应不同线路、不同速度、不同运能等要求。JR 东日本还开发了以商业运营时速 360 km 为目标的 E954 系（FASTECH 360S）和 E955 系高速动车组试验车，分别在 2005 年和 2006 年进行了首次行驶。E954 系用于新干线区段，

E955 系用于既有线区段^[3]。

日本的地质、地理和气候条件复杂，自然灾害频发；人口密度高，对车辆振动和环境噪声有着严格的要求等，这些都是日本高速列车系统设计必须面对和解决的问题，这亦决定了日本高速列车技术路线必将和欧洲高速列车技术路线存在差别。

1.1.3.1 始终运用动力分散式驱动技术

与欧洲国家不同，日本一直致力于发展动力分散模式的高速列车。日本土质松软，山丘、坡道、弯道多，因此对动轴轴重限制十分严格；这与欧洲土质坚硬，路基结实，能承受较大作用的特点相比，在日本这个岛国上发展高速列车的轻量化设计以及动力分散式的驱动技术就凸显得更加必要。高速列车轴重的减轻，可减小轮轨动力作用，而路基、桥梁建筑中亦可采用轻型标准规格来降低修建成本；当然，这也会导致单个轮对轮轨粘着系数的减小，但动轴数量的增多可以弥补这一点，且能在高速情况下保证充足的粘着系数冗余。

另外，日本城市人口密集、铁路线路各站间距短、起动和制动加/减速度要求高等特点，又正是动力集中式驱动的弱点所在。再结合日本国内发达的机电工业技术，动力分散式技术在日本高速列车的运用更为便捷和有利。因此，新干线高速列车如今灵敏的加减速反应、平稳运营于大坡度的线路以及极高准时点率的运行等优点越来越受到乘客的好评。

新干线所有车型中，都设计为动力分散模式，部分车型的动力配置^[1,3,24]如表 1.2 所示。伴随车型的持续技术更新和车速的提高，动轴数目亦在增加，且编组型式多样。动力分散式驱动，关键是车辆中动力单元的定义和划分，充分利用动力单元特性，灵活编组车辆，可以满足不同的需求。

表 1.2 日本主要车型的编组型式

车型	0 系	100 系	300 系	400 系	500 系	700 系
编组	16M	12M4T	10M6T	6M1T	16M	12M4T
车型	800 系	E1 系	E2 系	E3 系	E4 系	E5 系
编组	6M	6M6T	6M2T	4M1T	4M4T	8M2T

1.1.3.2 车辆轻量化技术

日本在保证高速车体 15 年使用寿命和客车结构承受各种载荷工况下（特别是在隧道内气压交变工况下），实现了客车结构的轻量化，减少了列车运行阻力，降低了列车牵引功率，改善了环保，减少了沿线路基的振动，降低了噪声，改善了列车的运行品质。

高速列车轻量化措施之一是铝合金高速车体结构的采用。日本采用了大型中空挤压铝型材焊接结构、锡焊的铝蜂窝铝合金车体结构和航空骨架式铝合金车体结构 3 种方案^[24]，如图 1.6 所示。采用铝合金制的车体结构较钢制车体可减重约 30%~40%，而双层客车更为显著，减重约 5 t。日本新干线选用的铝合金大体上有：Al-Mg 系合金、Al-Mg-Si 系合金，Al-Zn-Mg 系合金，如日本的东北、上越新干线选用了 5083、7003 等牌号的铝合金^[25]。为保证铝合金车体的加工精度及焊接质量，采用了专用的铝合金型材自动加工装置和加强筋全自动焊接装置；为减少焊接变形，车体总组装工艺亦有严格的顺序要求。