

普通高等教育规划教材
高等学校土木工程系列教材

高速铁路线路工程

主编 李良英 何 江
主审 李向国

High Speed Railway Line Project



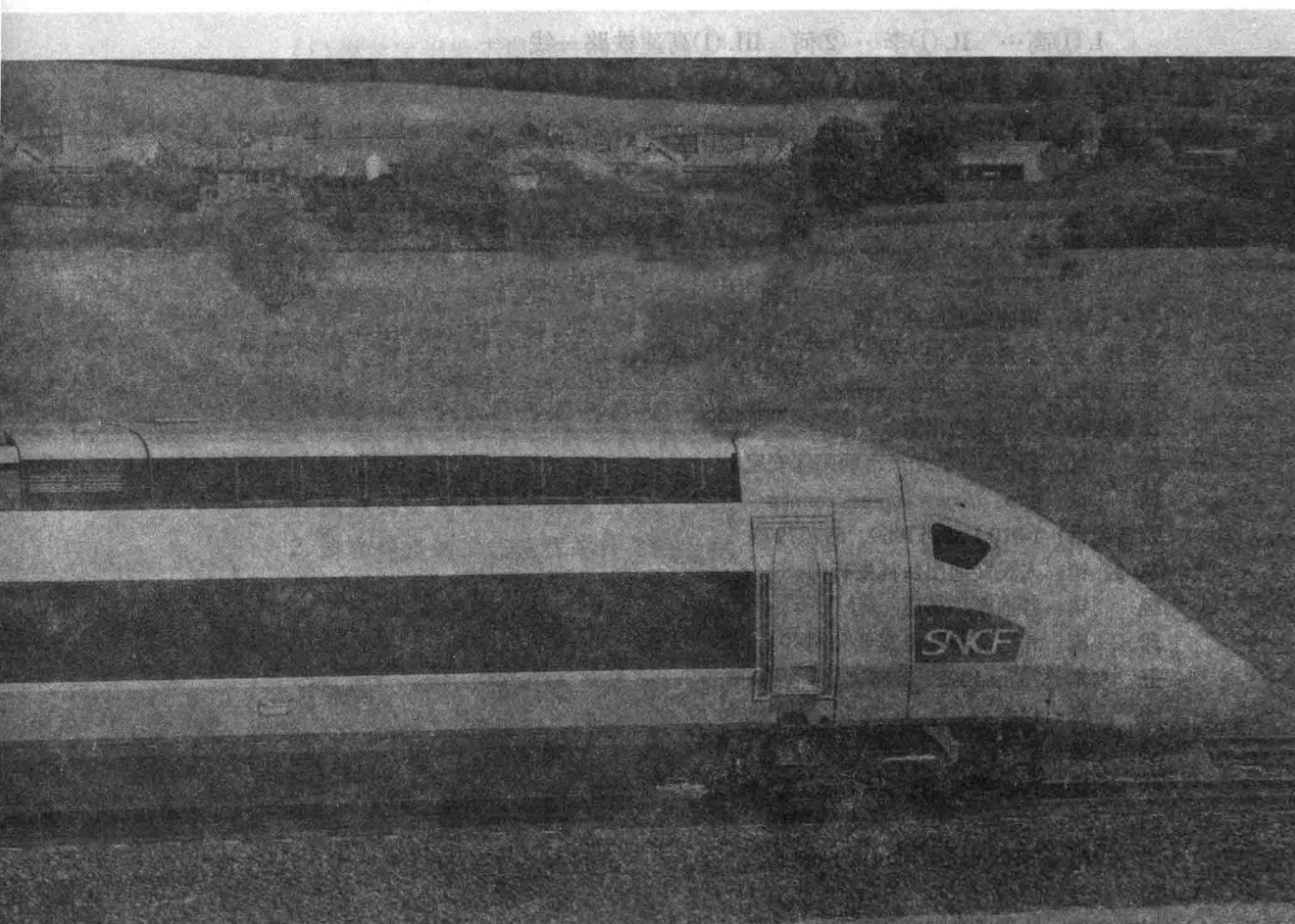
人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育规划教材
高等学校土木工程专业系列教材

高速铁路线路工程

主编 李良英 何 江
主审 李向国

High Speed Railway Line Project



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书结合我国高速铁路的建设现状,以铁道行业现行规范为依据,较为全面、系统地阐述了高速铁路线路工程的设计、施工等内容,详细介绍了高速铁路线路平纵断面设计、有砟轨道结构、无砟轨道结构、道岔结构、路基设计、路基施工、精密测量、无砟轨道施工、无砟道岔施工的内容。

本书可供普通高等院校土木工程及其相关专业的教师、学生作为教材使用,亦可供从事高速铁路建设的设计和施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路线路工程/李良英,何江主编. —北京:
人民交通出版社,2012.8
ISBN 978-7-114-09958-8

I. ①高… II. ①李… ②何 III. ①高速铁路—线
路工程 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 169672 号

书 名: 高速铁路线路工程
著 作 者: 李良英 何 江
责任编辑: 杜 琛 (dc@ccpress.com.cn)
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010) 59757969, 59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京交通印务实业公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 14.5
字 数: 353千
版 次: 2012年 8 月 第 1 版
印 次: 2012年 8 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-09958-8
定 价: 32.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前 言

Foreword

铁路作为国民经济发展的主动脉、国家基础设施和大众化交通工具,在我国经济社会发展中有着至关重要的地位和作用。发展高速铁路,建成快速铁路网,满足大运量、高密度、快速便捷的客运需求,是我国《中长期铁路网规划(2008年调整)》的重大建设目标。高速铁路线路工程由于行车速度快,因而对线路的平顺性、稳定性等方面提出了高要求,与普通线路相比较,在设计理念、施工方法等方面有较大创新。本书立足于我国高速铁路建设实际情况,突出高速铁路线路工程与普通铁路的异同点和创新点,着重阐述高速铁路线路工程的新技术、新工艺、新设备、新材料。

全书共分为十章,包括:绪论、高速铁路线路平纵断面、高速铁路有砟轨道、高速铁路无砟轨道、高速铁路道岔、高速铁路路基设计、高速铁路路基施工、高速铁路精密测量、高速铁路无砟轨道施工、高速铁路无砟道岔施工。

全书由李良英、何江统稿并任主编,具体编写分工如下:第一章、第八章、第十章由中国中铁七局集团第三工程有限公司何江撰写;第二章由中国铁第二勘察设计院宋贤昌撰写;第三章由辽宁省交通规划设计院刘丽撰写;第四章、第五章、第九章由兰州交通大学李良英撰写;第六章、第七章由兰州交通大学段晓峰撰写。兰州交通大学牟航、崔腾斐、刘文涛、李阳参与了本书的文字整理和校对工作。石家庄铁道大学李向国副教授对本书进行了审阅工作,提出了中肯的修改意见和建议,在此表示由衷感谢。本书在撰写过程中,参考了大量的国内外文献和资料。由于参考的文献和资料较多,只能就其中主要的文献列于书后。在此谨向所有文献和资料的作者表示衷心的感谢和敬意。

本书所涉及的内容多为高新技术,由于各方面的技术都处在不断变化之中,同时由于时间和作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2012年5月

目录 contents

第一章 绪论	1
第一节 高速铁路的发展	1
第二节 高速铁路的主要经济优势	5
第三节 高速铁路线路特征	8
第四节 高速铁路设计的主要技术标准	11
习题	13
第二章 高速铁路线路平纵断面	14
第一节 概述	14
第二节 高速铁路线路平面	15
第三节 高速铁路线路纵断面	23
习题	27
第三章 高速铁路有砟轨道	29
第一节 高速铁路对轨道结构的基本要求	29
第二节 钢轨	30
第三节 轨枕	32
第四节 扣件	33
第五节 道床	35
第六节 钢轨伸缩调节器	38
习题	40
第四章 高速铁路无砟轨道	41
第一节 概述	41
第二节 无砟轨道结构类型	47
第三节 无砟轨道扣件	65
第四节 其他类型无砟轨道	75
习题	78
第五章 高速铁路道岔	79
第一节 高速铁路道岔的结构特点	79
第二节 高速铁路道岔的分类与技术特点	80
第三节 国外高速铁路道岔结构	82
第四节 我国高速铁路道岔结构	89
习题	98
第六章 高速铁路路基设计	99
第一节 路基横断面	99

第二节	高速铁路路基设计荷载	103
第三节	基床	106
第四节	路基与路堑	108
第五节	过渡段	110
第六节	路基防排水及边坡防护	113
习题		116
第七章	高速铁路路基施工	117
第一节	施工准备及施工测量	117
第二节	地基处理	122
第三节	路堤施工技术	129
第四节	路堑施工技术	141
第五节	路基与其他建筑物过渡段施工技术	149
第六节	基床	151
第七节	路基变形观测及评估	154
第八节	支挡结构	157
习题		162
第八章	高速铁路精密测量	163
第一节	概述	163
第二节	CPⅢ测量内容与作业流程	163
第三节	CPⅢ控制网的布设和测量	164
习题		172
第九章	高速铁路无砟轨道施工	173
第一节	无砟轨道施工准备	173
第二节	无砟轨道施工工艺流程	174
第三节	支承层和底座施工	180
第四节	CRTS I 型板式无砟轨道道床板施工	184
第五节	CRTS I 型双块式无砟轨道道床板施工	189
第六节	CRTS II 型板式无砟轨道道床板施工	198
第七节	CRTS II 型双块式无砟轨道道床板施工	205
第八节	CRTS III 型板式无砟轨道道床板施工	208
第九节	无砟轨道长钢轨铺设施工	209
习题		215
第十章	高速铁路无砟道岔施工	216
第一节	概述	216
第二节	无砟道岔施工工艺	218
第三节	道岔焊接	224
习题		225
参考文献		226

第一章 绪 论

第一节 高速铁路的发展

一、高速铁路的定义

高速铁路是指新建铁路最高运行速度达到 250km/h 及以上,或既有线改造最高运行速度达到 200km/h 及以上的铁路。

高速铁路运输模式,各国因国情不同而异,大致有以下四种类型:

- (1)新建高速铁路双线,专门用于旅客快速运输,如日本新干线和法国高速铁路,均为客运专线,白天行车,夜间维修。
- (2)新建高速铁路双线,实行客货共线运行,如意大利罗马—佛罗伦萨高速铁路,客运速度为 250km/h,货运速度为 120km/h。
- (3)部分新建高速线与部分既有线混合运行,如德国柏林—汉诺威线,承担着客运和货运任务。
- (4)在既有线上使用摆式列车运行,这在欧洲国家较为多见,在美国“东北走廊”摆式列车速度为 240km/h。

二、铁路运输的高速化

回顾铁路技术发展的历史,即是牵引能力与车速提高过程的历史。各国铁路都把提高速度作为技术发展的目标,显然也是作为提高竞争能力的重要手段,而铁路要想生存发展必须提高车速。1825 年世界第一条铁路在英国出现时,时速为 24km。1829 年 10 月 6 日,在利物浦—曼彻斯特线上“罗克特”号蒸汽机车首创 48km/h 的世界纪录。20 年后法国的车速已经超过了 100km/h,至 1890 年“克洛伯顿”号蒸汽机车时速达 143.5km。1903 年德国车速超过了 200km/h。1901 年德国首先使用西门子—哈尔斯克和通用电气公司共同制造的电力机车,试验速度为 160km/h 以上。1931 年 6 月 21 日,德国费兰获·克鲁肯贝格设计的流线型“钢轨策佩林”号机车创造了 230km/h 的纪录。1936 年 2 月 17 日,柴油机车“莱比锡”号在德国的帝国铁路线上运行速度达到 205km/h。1955 年 5 月 29 日,德国波尔多—达克斯线上“BB9004”号机车创造了 331km/h 的纪录。1981 年 2 月 26 日,法国巴黎—里昂线 TGV 高速机车达到时速 380km。1988 年 5 月 1 日,德国 ICE 高速列车,在富尔达—维尔茨堡区段上达到时速 409km。1990 年 5 月 18 日,德国 TGV-A 高速列车创造了试验速度 515.3km/h 的纪录。1996 年 7 月 26 日,日本 X300 系列高速列车达到时速 443km。2003 年 11 月 19 日,日本 MLX01 型磁悬浮列车创造了 558km/h 的世界纪录。2007 年 4 月 3 日,法国进行了超高速列车最新型“V150”列车的行驶试验,时速达到 574.8km。

三、国外高速铁路发展概况

世界高速铁路的发展,从根本上来讲就是一个技术不断创新、运行速度不断提高来满足社会

经济发展需要的过程,主要特征表现为高速铁路建设标准等级不断提高、建设里程不断增加、参与建设的国家和地区不断增多。

经过半个世纪的发展,世界高速铁路技术逐渐形成以日本、德国、法国三个技术原创国为代表,适合各自国情和发展状况的技术格局。日本、法国、德国三个国家构建了各自独立、各具特点的高速铁路技术体系,分别建成了新干线、TGV 和 ICE 高速铁路系统,并在实际运营中表现出良好的综合效益。

1. 日本高速铁路

1964 年 10 月 1 日,日本建成了世界上第一条高速铁路——东京到大阪的东海道高速铁路新干线,全长 515.4km,最高运行速度为 210km/h。东海道新干线创造了世界上铁路与航空竞争中首次取胜的实例,日本誉之为“经济起飞的脊骨”。该铁路代表了当时世界第一流的高速铁路技术水平,并标志着世界高速铁路由试验阶段跨入了商业运营阶段。

新干线高速铁路系统的典型特征是全部修建新线,旅客列车专用。目前,已有东海道新干线、山阳新干线、东北新干线、上越新干线、北陆新干线等多条高速铁路投入运营,相关数据统计见表 1-1。

日本运营中的新干线 表 1-1

新干线名称	到 发 站	里程(km)	最高运营速度(km/h)	运 营 时 间
东海道	东京—大阪	515	270	1964 年
山阳	大阪—博多	554	300	1972/1975 年(分阶段)
东北	东京—八户	593	275	1982/1985/1991/2002 年(分阶段)
上越	大宫—新潟	270	275	1982 年
北陆	高崎—长野	125	260	1997 年
九州	新八代—鹿儿岛	128	260	2004 年

2. 法国高速铁路

1981 年,建成并投入运营的法国 TGV 巴黎东南线是继日本新干线后的第二条商业运营的高速铁路,其运营速度达到了 270km/h。该线建成通车后,客运量迅速增长,带来了极好的经济效益,10 年内的赢利还清了线路建设和车辆购置贷款本息,开辟了一条以低造价建造高速铁路的新途径,把高速铁路建设推向了一个新的台阶。

TGV 高速铁路系统的典型特征是部分修建新线、部分改造既有线。自法国 TGV 巴黎东南线建成之后,越来越多的高速铁路在法国建成,包括大西洋线、北欧线、罗纳—阿尔卑斯线、地中海线和东线,相关数据统计见表 1-2。

法国运营中的 TGV 线路 表 1-2

TGV 线路名称	到 发 站	里程(km)	最高运营速度(km/h)	运 营 时 间
巴黎东南线	巴黎—里昂	417	270	1981/1983 年(分阶段)
大西洋线	巴黎—勒芒/图尔	282	300	1989/1990 年(分阶段)
里昂迂回线		38	270	1992 年
北欧线	巴黎—里尔—加莱/比利时边境	332	300	1993 年
罗纳—阿尔卑斯线	里昂—瓦朗斯	83	270	1994 年
地中海线	瓦朗斯—马赛	295	320	2001 年

3. 德国高速铁路

继法国之后,1986 年德国正式开始研发高速铁路,实施城际高速铁路 ICE 计划,并于 1991 年建成全长 107km 的曼海姆—斯图加特和全长 327km 的汉诺威—维尔茨堡两条线路,其最高运营速度达到了 280km/h,在当时创造了 406.9km/h 的试验纪录。

ICE 高速铁路系统的典型特征是全部修建新线,旅客列车及货物列车混用。目前,德国运营中的高速铁路数据统计见表 1-3。

德国运营中的 ICE 线路

表 1-3

ICE 线路名称	里程(km)	最高运营速度(km/h)	运营时间
曼海姆—斯图加特	107	280	1991 年
汉诺威—维尔茨堡	327	280	1991 年
汉诺威—柏林	263	280	1998 年
科隆—莱茵/美茵	215	300	2002 年
纽伦堡—尹格尔斯塔特	88	300	2006 年

4. 其他国家高速铁路

在意大利,1970 年开始建设第一条罗马—佛罗伦萨高速铁路。该线为既有线改造而成,1992 年完工,最高运营速度为 250km/h。2006 年建成的最高运营速度为 300km/h 的罗马—那波利高速铁路投入运营,是欧洲铁路跨国运输发展的一个里程碑。目前,意大利投入运营的高速铁路里程达到 468km。

西班牙从 1987 年开始建设,1992 年投入运营时速 270km、全长 471km 的马德里—塞爾維亞高速铁路后,又于 2003 年开通了马德里—莱里达线,目前有共计 1290km 的高速铁路投入运营。

此外,俄罗斯、韩国、澳大利亚、美国、英国、荷兰等国家均先后开始了高速铁路的建设。欧洲更是规划至 2020 年新建高速铁路约 10000km,改造 15000km,形成遍布欧洲,连接欧盟各国首都的高速铁路网络。

四、我国高速铁路发展概况

我国自 1994 年开通了时速 160km 的广深准高速铁路线路以来,一直不断地进行铁路的提速改造和高速铁路建设工作。从 1997 年至 2007 年,铁路先后实施了六次大提速。通过区间半径的改造,路、桥、隧的加固和改造,提速道岔的更换以及列车提速系统装备、客运设施、跨线设施和相关检修设施的提升,在京沪、京哈、京广、京九、陇海、兰新、沪昆、广深、胶济等主要干线上成功实施了六次大面积提速调图。提速后的既有列车最高运营速度提高到了 200km/h,部分区间达到了 250km/h,标志着我国铁路迈入了高速化运行的时代。

1. 我国高速铁路的发展规划

根据《中长期铁路网规划(2008 年调整)》,到 2020 年,我国铁路营业里程将达到 12 万 km 以上,其中高速铁路为 1.6 万 km。快速客运网络建成后,将形成北京、上海、郑州、武汉、广州、西安、成都等中心城市与邻近省会城市的 1~2h 交通圈和“四纵四横”高速铁路网。

(1) “四纵”高速铁路

①北京—上海,贯通京津至长江三角洲东部沿海经济发达地区。

- ②北京—武汉—广州—深圳,连接华北和华南地区。
- ③北京—沈阳—哈尔滨(大连),连接东北和关内地区。
- ④杭州—宁波—福州—深圳,连接长江、珠江三角洲和东南沿海地区。

(2)“四横”高速铁路

- ①徐州—郑州—兰州,连接西北和华东地区。
- ②杭州—南昌—长沙,连接华中和华东地区。
- ③青岛—石家庄—太原,连接华北和华东地区。
- ④南京—武汉—重庆—成都,连接西南和华东地区。

(3)城际客运系统

在环渤海、长江三角洲、珠江三角洲、长株潭、成渝以及中原城市群、武汉城市圈、关中城市群、海峡西岸城镇群等经济发达和人口稠密地区建设城际客运系统,覆盖区域内主要城镇。

总之,到 21 世纪中叶,我国将形成北京—上海、北京—哈尔滨(大连)、北京—广州—深圳、上海—福州—深圳和青岛—太原、徐州—兰州、上海—武汉—成都、上海—长沙—昆明“四纵四横”高速铁路网,以及环渤海、长三角和珠三角地区三个城际快速客运系统。高速铁路网的总规模将达到 14000km。高速铁路网将覆盖目前人口 100 万以上的 38 个城市中的 33 个,100 万以上城市的覆盖面为 86.8%,省会城市的覆盖面为 80%。

2. 我国目前开通运营的主要高速铁路

2008 年 8 月 1 日,我国第一条具有自主知识产权、具有国际一流水平的高速城际铁路——京津城际铁路正式开通运营。线路全长 113.544km,途设北京南、亦庄、武清、天津 4 座车站,正式运营时速为 350km,创造了世界上运营中的列车速度之最,CRH3“和谐号”动车组更于 2008 年 6 月 24 日跑出 394.3km 的时速。图 1-1 所示为行驶在京津城际铁路上的“和谐号”动车。

武广客运专线为京广客运专线的南段,位于湖北、湖南和广东境内,于 2005 年 6 月 23 日在长沙首先开始动工。全长约 1068.8km,投资总额达 1166 亿元。2009 年 12 月 26 日正式运营。设计速度为 350km/h,试车最高时速为 394.2km,这条高速大动脉将广州至武汉间旅客列车运行时间由 11h 缩短至 3h,极大缓解了既有京广铁路特别是武汉至广州间紧张的运输状况,是世界上第一条时速为 350km 的长大客运干线。图 1-2 为武广客运专线铁路线路。

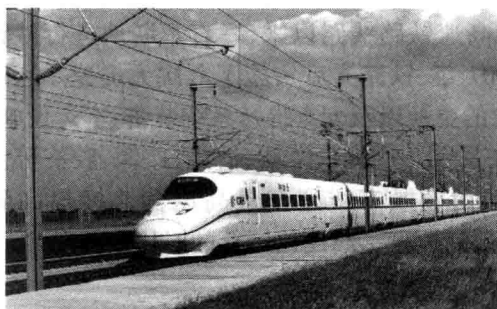


图 1-1 “和谐号”动车组运行在京津城际铁路上

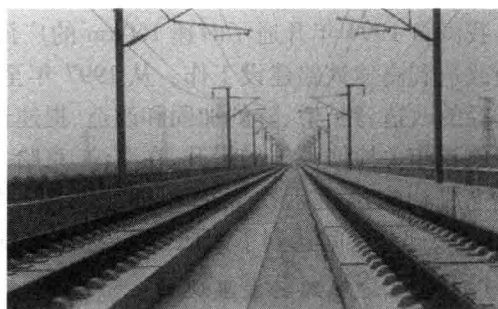


图 1-2 武广客运专线铁路线路

郑西铁路客运专线东起郑州国家综合交通枢纽的新郑州东站(即新郑州站),向西经过洛阳市、三门峡市、渭南市,至西安枢纽的西安北站(新建),分别连接京港高铁、京广铁路大通道(包括京广深客运专线、京广线)、大湛通道、包柳通道。正线长 456.639km,另由西安北站向西延伸至陇海线咸阳西站,线路长 27.879km。郑西客运专线于 2005 年 9 月 25 日正式开工,

2009 年 12 月 28 日正式投入运营,设计速度为 350km/h。郑西客运专线穿越豫西山地和渭河冲积平原,南倚秦岭,北临黄河,沿线 80% 区段为黄土覆盖,湿陷性黄土区施工技术是最大的技术难题。

京沪高速铁路于 2008 年 4 月 18 日开工,从北京南站出发,终止于上海虹桥站,总长度为 1318km。全线为新建双线,设计时速为 380km,安全运营速度为 350km,总投资约 2209 亿元。全线纵贯北京、天津、上海三大直辖市和河北、山东、安徽、江苏四省,是新中国成立以来一次建设里程最长、投资最大、标准最高的高速铁路。2011 年 6 月 30 日正式开通运营。

此外,自 2008 年以来,我国还相继开通了石太客运专线、合武客运专线、沪宁城际、沪杭高铁、昌九城际等高速铁路,统计数据见表 1-4。

我国投入运营的高速铁路 表 1-4

线 路 名 称	起 始 站	里 程 (km)	设计行车速度 (km/h)	运 营 时 间
京津城际	北京南—天津	113.544	350	2008 年
石太客专	石家庄—太原	189.9	250	2009 年
合武客专	合肥—武汉	359.361	250	2009 年
武广客专	武汉—广州	1068.8	350	2009 年
郑西高铁	郑州—咸阳	484.518	350	2010 年
昌九城际	南昌—九江	131.27	250	2010 年
沪杭高铁	上海—杭州	202	350	2010 年
京沪高铁	北京—上海	1318	380	2011 年

第二节 高速铁路的主要经济优势

高速铁路技术是当代世界铁路的一项重大技术成就,之所以受到各国政府的普遍重视,是由于其克服了普通铁路速度较低的不足。它是解决大量旅客快速输送问题的最有效途径,已成为世界各国铁路普遍发展的趋势。与高速公路的汽车运输和长途航空运输比较,高速铁路的主要技术经济优势表现为以下几个方面。

一、速度快

速度是高速铁路的技术核心,也是其主要的技术经济优势所在。迄今为止,高速铁路是陆上运行距离最长、运行速度最高的交通运输方式。近几年相继建成的高速铁路,其最高运行速度都可达到 350km/h。法国、日本、德国、西班牙和意大利高速列车的最高运行时速分别达到了 350km、300km、330km、270km、250km。

除了最高速度以外,旅客更关心旅行时间。旅行时间由三部分组成:一是由出发地(家)至始发站(港)的走行(或短途运输方式的运行)时间及等待时间;二是所乘坐的交通运输方式由始发站(港)至到达站(港)的旅行时间;三是由到达站(港)至目的地(家)的走行(或短途运输方式的运行)时间。日本、法国、德国、西班牙、意大利在部分区段上统计的旅行速度可分别达到 242.5km/h、245.6km/h、192.4km/h、217.9km/h、163.7km/h。武广客运专线 350km/h 动车组旅行速度为 280km/h。如果旅客出行的附加时间以高速公路为零、高速铁路为 1.0h、航空为 2.5h(上飞机前 1.5h,下飞机后 1.0h),汽车平均运行速度取 120km/h,飞机飞行速度取

700km/h,高速铁路最高运行速度分别取 200km/h、250km/h、300km/h、和 350km/h,从旅客总时间进行比较,其有利吸引范围如下。

汽车:优势距离在 200km 以内。

航空:优势距离在 1000km 以上。

高速列车:速度为 200km/h,优势距离为 300 ~ 500km;

速度为 250km/h,优势距离为 250 ~ 600km;

速度为 300km/h,优势距离为 200 ~ 800km;

速度为 350km/h,优势距离为 180 ~ 1100km。

二、运能大

目前各国高速铁路几乎都能满足最小行车间隔 4min 及其以下(日本可达 3min)的要求。日本东海道新干线高峰期发车间隔为 3min,平均每小时发车达 11 列。在东京与新大阪间 2.5h 的运行路程中,开行“希望”号 1 列、只停大站的“光”号 7 列,以及各站都停的“回声”号 3 列,每列列车可载客 1200 ~ 1300 人,年均输送旅客达 1.2 亿人次。品川站建成后,东京站每小时可发车 15 列。东海道新干线目前每天旅客发送人数是开通之初的 6 倍多,最高达到 37 万人/日。其他国家由于铁路客运量比日本要少,高速铁路日行车量一般在 100 对以内。目前最大的飞机可乘坐 300 ~ 400 人,两地飞行按单向每天 20 架计算,每天单向输送旅客仅 7000 ~ 8000 人。

高速铁路旅客列车最小行车间隔可达到 3 min,列车密度可达 20 列/h,每列列车载客人数也比较多。如采用动力分散方式及双层客车,其列车定员可达 1200 ~ 1500 人/列,理论上每小时的输送能力可以达到 $2 \times 24000 \sim 2 \times 30000$ 人。4 车道的高速公路每小时的输送能力约为 2×4800 人,两条跑道的机场每小时的吞吐能力约为 2×6000 人。可见高速铁路的运输能力是高速公路和民用航空等现代交通运输方式不可比拟的。

三、安全性高

安全是人们出行选择交通运输方式最关心的因素。尽管各种现代交通运输方式都在竭力提高自身的安全性能,但交通事故仍有发生。日本每 10 亿人·km 死亡人数:既有铁路为 1.97 人,汽车为 18.3 人。欧洲铁路共同体 14 个成员国,每年因公路交通事故死亡 54000 人,受伤 170 万人,超过铁路的 125 倍。美国死于高速公路交通事故者每年约 5 万人,伤亡人数则高达 200 多万人。据研究,我国交通运输中每 1 亿人·km 交通事故死伤人数:公路为死亡 10.5 人,重伤 24.88 人;民航为死亡 0.1 人,受伤 0.01 人;铁路为 0.29 人,重伤 0.72 人。

高速铁路采用了先进的列车运行控制系统,能保证前后两列列车有必要的安全距离,防止列车追尾及正面冲撞事故发生。与行车有关的固定设施与移动设备,几乎都有信息化程度很高的诊断与检测设备,并有科学的养护维修制度。对一些有可能危及行车安全的自然灾害,设有预报预警装置。所有这些构成了高速铁路现代化的、完善的安全保障系统。这一系统可以防止人为的过失、设备保障及自然灾害等突发事件引起的事故。

四、准确性高

高速铁路的安全保障系统不但保证了高速列车运行安全,也使铁路运输全天候的优势得到了更充分的发挥。除可危及行车安全的自然灾害外,几乎不受大气和气候条件的影响,24h

内都可以安全地正常运行。

随着生活节奏的加快,人们除了时间价值观念日益增强外,还对普通运输的准确性提出了更高的要求。航空运输受气候影响,航班很难做到准点,有时还会停航。国外高速公路经常发生堵塞,行车延误在所难免。由于高速铁路事故几乎为零,再加上全天候都可正常运行,因此高速列车始终是在一个十分稳定的系统中运行,其正点率非常高。日本东海道新干线列车平均晚点不到 0.3min,几乎与钟表一样的准。这是其他任何一种现代交通运输方式都做不到的。西班牙 AVE 高速列车晚点 5min,就要向旅客退回全部票款。这是其他任何一种现代交通方式都不敢承诺的。

五、能耗少

交通运输是能源消耗大户,能耗标准是评价交通运输方式优劣的重要技术标准。研究表明:若以普通铁路 1 人·km 消耗的能源为 1,则高速铁路为 1.3,公共汽车为 1.5,小汽车为 8.8,飞机为 9.8。高速铁路大约是小汽车和飞机的 1/5。高速铁路使用的是二次能源——电力,而汽车、飞机使用的是不可再生的一次能源——石油。随着水电和核电的发展,高速铁路在能源消耗方面的优势还将更加突出。这也是在当今能源紧张的情况下,选择发展高速铁路的原因之一。

六、占地少

交通运输,尤其是陆地上交通运输,由于要修建道路和停车场,需要占用大量的土地,而且大部分是耕地。双线高速铁路路基面宽 9.6 ~ 14 m,而 4 车道的高速公路路基面宽达 26m。双线铁路连同两侧排水沟用地在内,每千米用地约 70 亩^①,而 4 车道的高速公路每千米用地为 105 亩。高速铁路占地只有 4 车道高速公路的 2/3,而每小时可完成的运量却是 4 车道高速公路的 4 倍以上。一个大型飞机场,包括跑道、滑行道、停机坪、候机大楼及其他设施,面积大,又多为市郊良田,而 500km 的法国 TGV 高速铁路才只相当于一个大型机场用地。

七、工程投资低

工程投资是制约某种现代交通运输方式能否得到迅速发展的重要因素。高速铁路的工程投资要高于普通铁路,但并不比高速公路高。例如,法国高速铁路基础设施造价要比 4 车道的高速公路节约 17%。有人估计在美国城区修建高速铁路其造价仅为高速公路的 1/4 ~ 1/5。这些都说明,高速铁路工程投资在高速交通中是比较低的。

八、污染环境轻

环境保护已成为全球性的紧迫问题,发展交通运输应注意环境生态问题,交通运输污染环境的主要是废气和噪声。在旅客运输中,各种交通工具有害物质的换算排放量,公路为每 1 人·km 排放 CO 0.902kg,公路为铁路的 8 倍。铁路的噪声污染也是最低的,日本以航空运输每 1000 人·km 产生的噪声为 1,则小汽车为 1,公共汽车为 0.2,高速铁路仅为 0.1。高速电气化铁路基本上消除了粉尘、烟油和其他废气污染,噪声比高速铁路低 5 ~ 10dB(A)。一架喷气式客机平均每小时排放 46.8kg 的 CO₂、635kg 的 CO、15kg 的 SO₃,这些物质在大气中要停留约 2

^①1 亩 = 666.6m²

年以上,是造成大面积酸雨、植被生态遭到破坏和建筑物遭受侵蚀的主要原因。根据我国的研究,每1人·km污染治理费用,如以高速铁路为1,则高速公路为3.76,飞机为5.21。有识之士建议,为防止地球上臭氧层被破坏而造成的气候异常现象,除应力争使汽车排放的废气减少25%和控制高速公路的发展之外,还应力争以高速铁路网部分替代国内和国际大城市间的航空运输。

九、舒适度高

随着生活水平的提高,乘坐舒适是人们出行选择交通运输方式的重要条件之一。高速铁路线路平顺、稳定,列车运行平稳,振动和摆动幅度很小。每一旅客所占有的活动空间,高速铁路比汽车和飞机都大得多,座位宽敞,设施先进,装备齐全,乘坐非常舒适,这些是飞机和汽车难以做到的。

十、效益好

高速公路的交通堵塞和事故给国民经济带来了巨大损失,欧盟国家用于解决高速公路堵塞的费用占国民生产总值的2.6%~3.1%,总金额在900亿~1100亿美元,相当于整个欧洲高速铁路网的全部投资;用于处理公路事故的费用占国民生产总值的2.5%。

修建高速铁路的直接经济效益是很好的。据统计,日本东海道新干线总投资为3800亿日元,由于投入运营后客流迅速增长,而运输成本只有飞机的1/5,正式投入运营的第七年便全部收回投资,其直接经济效益在20世纪末已达到投资额的13.5倍。1964~1985年间,日本东海道新干线的营业系数(营业支出与营业收入之比)就达到了0.42,山阳新干线的营业系数高达0.66。法国TGV高速线运营情况也很好,20世纪90年代中期,TGV东南线和大西洋线净赢利率就分别达到31%及21%,运营11年或12年就能收回投资。

第三节 高速铁路线路特征

列车与线路是相互依存、相互适应的关系,列车是载体,线路是基础。高速运行的列车要求线路具有高平顺性、高稳定性、高精度、小残变、少维修以及良好的环境保护等功能,也只有这样的线路才能保证列车高速、不间断运行的安全、平稳与舒适。

一、高平顺性

轮轨相互作用的理论研究指出,轨道不平顺所引起的轮轨动力响应及其对行车安全性、平稳性和乘车舒适性的影响,均随行车速度的提高而显著增大。

高速铁路的理论研究和实践表明,在平顺的轨道上,当车辆处于稳态运行状态,列车速度低于临界速度时,即使速度很高,轮轨动力附加荷载也很小。反之,即使轨道、路基和桥梁结构在强度方面完全满足要求,而平顺性不良时,列车运行虽未接近临界速度,但由线路引起的车辆振动和轮轨作用力将大幅度增加。例如,幅值为10mm、波长为40m的连续高低不平顺,在常规速度下引起的车体振动和轮轨动力附加荷载都很小,可以不予处理;但在速度达300km/h时,可使车体产生频率为2Hz、半幅值为0.18g(有效值 rms 为0.13g)的持续振动加速度。根据ISO2631国际振动环境控制标准中有关“保障健康限度”的规定,人体承受这种加速度的持续时间只有5h。否则,会导致乘客血压、脉搏、消化等生理现象不正常。又如,幅值

为 5mm、波长为 40m 的方向不平顺,在常规速度下同样不用管理;而在 300km/h 速度下,车体将产生频率约 2Hz、半振幅约 0.066g(rms 值为 0.045g)的横向振动加速度。根据 ISO2631 有关“工作能力减退”限度标准,乘务人员在此种振动环境下仅能工作 3h,否则将会导致疲劳、工作能力下降,驾驶员的判断、应急能力将减退。而 ISO2631 的“舒适度减退”限度仅为“工作能力减退”限度的 1/3。在振动频率为 1~2Hz、累计时间为 4h 的车体振动环境下,保持舒适感不减退的振动加速度,横向为 0.017g(rms 值为 0.0118g),垂向为 0.035~0.05g(rms 值为 0.025~0.035g)。对于数量较少而幅值较大的局部轨道不平顺,为保障旅客阅读、书写、餐饮等不受干扰,日、法、德等国规定,局部轨道不平顺引起的瞬时作用的垂向加速度不得大于 0.12~0.15g,横向加速度不得大于 0.10~0.12g。再如,一个微小的 0.2mm 的迎轮台阶形焊缝不平顺,在 300km/h 行车速度下,引起的冲击性轮轨高频动作用力 P_1 达 720kN,低频轮轨附加力 P_2 达 320kN,可导致轨道破坏,路基产生不均匀沉陷。各种微小的短波不平顺,都是恶化轨道几何状态的根源,可能引发轮、轨、轴断裂,也是产生噪声的根源之一。

因此,高速铁路要求高平顺性的轨道。而高平顺性的轨道是依托在高平顺性的线路空间曲线、路基、桥梁等基础之上的。所以,要从线形、路基、道床、钢轨、桥梁等各方面采取保证措施,以满足高平顺性要求。

二、高稳定性

稳定、沉降小且沉降均匀的平顺路基是高平顺性轨道的基础。稳定性好的路基,主要是靠控制路基工后沉降和不均匀沉降,以及控制路基顶面的初始不平顺保证。这正是高速铁路路基设计、施工与普速铁路的主要区别。即高速铁路主要是以“变形”控制路基的设计、施工,而普速铁路则主要是以“强度”控制路基的设计与施工。因为,路基的工后沉降大或沉降不均匀,就要求经常维修线路,而经常处于维修的线路,其稳定性、平顺性肯定是差的,这就影响了高速行车。同时,路基的不均匀沉降过大,或其顶面初始不平顺大,将导致道床厚度不一致,道床的残余变形积累不均匀。这在日、法等国高速铁路上是有教训的。当行车速度在 160km/h 以下时,对波长为 56m、70m、83m、97m 的中长波高低不平顺可不予管理,但分别在 200km/h、250km/h、300km/h、350km/h 速度下,其激励频率与日、法高速车辆的车体垂向自振频率 1Hz 相当,导致车体产生一度称为“不明原因的强烈振动”。该“振动”轨检车测不出,养路机械修不了,较长时间后才认识到此道理,从而重视了路基的不均匀沉降和初始不平顺问题。法国高速铁路规定,路基铺轨后,5 年内最大允许沉降量为 5cm,韩国高速铁路规定为 7cm。日、法等国对路基顶面不平顺规定为:每 20m 测点不得超过 $\pm 25\text{mm}$ 。

高稳定性特征反映在桥梁上,表现为对桥梁结构要求有足够大的刚度。因为高速列车对桥梁的动力作用远大于普速列车对桥梁的作用。桥梁出现较大挠度会直接影响桥上轨道的平顺性,使结构物承受到很大的冲击力,旅客舒适度受到严重影响,轨道状态不能保持稳定,甚至影响列车的运行安全。此外,为保证轨道的平顺性,还必须限制桥梁预应力徐变上拱和不均匀温差引起的结构变形。这些都对高速铁路桥梁结构刚度和整体性提出很高的要求,需要对桥梁挠度、梁端转角、扭转变形、横向变形、结构自振频率和车辆竖向加速度方面作出严格的限定。所以,高速铁路桥梁设计主要由刚度控制。尽管高速铁路桥梁活载小于普通铁路,但实际应用的高速铁路桥梁,在梁高、梁重上,均超过普速铁路桥梁。

此外,无缝线路钢轨在桥上的受力状态与在路基上不同。桥梁结构的温度变化、列车制动、桥梁挠曲等,使桥梁在纵向产生一定的位移,引起桥上钢轨产生附加应力。过大的附加应

力会造成桥上无缝线路失稳,影响行车安全。因此,墩台基础要有足够的纵向刚度,以尽量减小钢轨附加应力和梁轨间的相对位移。

三、高精度、小残变、少维修

严格控制轨道铺设精度是实现轨道初始高平顺的保证。轨道铺设的初始不平顺,是运营后不平顺发生、发展、恶化的根源。初始状态好的轨道,维修周期长,可长期保持轨道的良好水平;而初期状态不好的轨道,不仅维修周期短,即使增加维修次数,也难改变“先天不良”的痼疾。

严格控制轨道的铺设精度涉及三方面内容。一是提高线路的测量精度。日、法等国在建设高速铁路时,线路放线测量要求每 10m 设一基桩,基桩的定位允许误差在 x 、 y 、 z 方向各为 1mm。二是严格控制钢轨的平直性和焊接接头的平顺性。我国目前生产的 60kg/m 钢轨,其断面形状和尺寸与 UIC60 轨相似,但轨面平直度、尺寸公差、轨面缺陷以及焊接接头尺寸公差与 UIC 标准及国外高速铁路钢轨标准的差距很大。三是在完成铺轨后、开通运营前,打磨钢轨,去掉钢轨在轧制和施工过程中造成的轨面微小不平顺,提高焊接接头平顺性。这已被国外证明是一项技术经济效益显著的成功经验,既保证了高速铁路在开通运营之日列车即按设计速度运行,并降低了轮轨噪声,又延长了钢轨和道砟的使用寿命,大大减少了维修工作量,延长了维修周期。

严格控制轨道铺设精度,仅是实现高平顺性轨道的第一步。由于铁路轨道是由多种部件组成,特别是有砟轨道,轨排位于碎石道砟散粒体之上,在高速列车荷载的作用下,这些部件会发生变形,当变形的量值或其变形发展的速度超过一定限值时,将失去轨道的高平顺性。因此,对高速铁路轨道各部件的设计,不仅要保证强度,更重要的是保证小的残余变形,这样既保证了高平顺性,又达到了少维修的要求。

四、宽大、独行的线路空间

列车沿地面高速运行时,将带动列车周围的空气随之运动,形成一种特定的非定常流场,称为“列车绕流”,俗称“列车风”。这种列车风形成的列车气动力将威胁沿线工作人员和站台旅客的安全,对沿线建筑物也有破坏作用。列车风卷起的杂物也可能危及行车安全。相邻线路两列列车相向高速运行交会时,产生的空气压力冲击波易震碎车窗玻璃,使旅客耳朵感到不适,甚至影响列车运行的平稳性。所以高速铁路要求有一个宽大的行车空间,即增大两线间的距离和加宽站台上旅客的安全退避距离。在有高速列车通过的车站站台上,除加宽临近站台的安全退避距离外,还需在安全线上设置手扶安全护栏,留出可供旅客上下车的活门。

此外,由于高速列车动能和惯性力都很大,一旦与其他物体发生碰撞,其后果是不堪设想的。故高速线路要求一个独行的空间,即采用全封闭形式,沿线路两侧设全长护栏。同时,在高速铁路与道路或既有铁路相交时,一律采用立体交叉。这样可避免列车在平交道口与汽车等物体相撞的可能,也可避免出现列车频繁加减速的可能。

五、高标准的环境保护

高速铁路作为重要的现代化交通运输工具,强调需要重视现代化的文明,各种设施应与周围环境协调,注重环境保护。如桥梁的造型设计,要注重结构外观和色彩。法国高速铁路的桥梁造型设计甚至要请建筑师和环保师参与或请他们审查。

防止噪声污染是环境保护的一项重要内容,当列车速度超过 250km/h 后,噪声量级随列车速度的六次方关系增大。因此,建设高速铁路时,应重视降低噪声的措施。法国规定,高速铁路通过地区,若原来噪声低于 65dB,则需保持原噪声水平;若原来噪声大于 65dB,则需控制在 70dB 以内。因此,沿线通过居民区,均设有隔音墙、明洞或隔音土堆。

六、开通运营之日列车即以设计速度运行

目前世界上所建成的高速铁路,除日本东海道新干线外,其后修建的所有高速铁路,均在通车之日列车即按设计最高速度运营。东海道新干线因是第一条高速铁路,没有修建经验,开通运营第一年因路基问题列车未能达到设计速度目标值,经过一年多的整修后,最高运营速度才达到 210km/h。法国高速铁路在铺轨完成后,一般经过 5~6 个月的调试后验交,列车即以最高速度运行。

我国目前新建铁路通车之时某些地段允许速度仅为 50~60km/h,半年后也仅允许 70~80km/h,通车一年后还不一定能达到设计速度。这对于高速铁路来说是绝不允许的。因为,由于线路初始状态达不到设计标准而限速运行,列车虽以低速通过这些不合格地段,但线路将产生“记忆”性病害或不平顺,其后果将是花数倍的物力去整修才可能达到高速运行的目标。这正是高速铁路与普速铁路在工程验交时的重要差别。

七、严格的轨道状态检测和严密的防灾安全监控

高平顺的轨道在列车荷载的不断作用下,当轨道及其各部件的变形、位移量值或其变形、位移发展的速度超过一定限值时,将失去轨道的高平顺性,从而恶化轮轨间的相互作用,影响列车运行的舒适性、安全性。因此,对运营中的高速线路要实行严格的轨道状态检测和科学的轨道管理制度,及时掌握铁路运营过程中轨道不平顺的量值及其发展速度,并予以校正,使其恢复到小残变或初始高平顺状态,以保证高速列车运行的安全、平稳、舒适。

安全对于任何交通工具都是第一位的技术条件,对于高速铁路来说就更为重要。因此,高速铁路除了保证设备本身安全的要求外,对于一些超出设备本身安全限度范围的灾害,如自然灾害——暴雨、强风、地震等,突发性灾害——塌方落石、异物侵入限界等,以及设备的运用状态、故障等需要实时监测,并根据这些监测信息,对列车的运行进行严格的管理,如限速、停车等。

综上所述,高速线路的外表结构形式与普速铁路差别不大,但是组成高速线路的每一个分部所采用的技术及其条件,以及各分部的接合,却大大有别于普速线路。对于线路平、纵断面而言,在同样条件下的线路上,列车的竖向和横向加速度在高速条件下增大,列车各种振动的衰减周期在高速条件下延长,各种振动叠加的可能性在高速条件下增加,导致相应旅客乘坐舒适度在高速条件下更加敏感。因此,客运专线铁路平、纵断面设计应采用较大的线路平面圆曲线半径、较长的纵断面坡度和较大的竖曲线半径,提高线路的平顺性,以尽可能降低列车的横向和竖向加速度,降低列车各种振动叠加的可能性,从而提高旅客的乘坐舒适度。

第四节 高速铁路设计的主要技术标准

一、设计原则

《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009)中明确规定了我国高速铁路设计应遵循的几项基本原则。