

» 卢祖文 编著

客运专线

铁路轨道



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

客运专线铁路轨道

卢祖文 编著

中 国 铁 道 出 版 社

2 0 0 5 年 · 北 京

内 容 简 介

本书结合我国铁路普遍提高列车速度和客运专线发展的形势,在介绍各国高速铁路轨道方面情况的基础上,详细阐述了我国在高速铁路和客运专线铁路轨道结构、修理等方面开展研究试验和制定标准的成果,力图提供建设高速铁路和客运专线铁路轨道方面的技术资料。本书内容简明扼要、资料翔实,是高速铁路和客运专线铁路实用的专业书。

图书在版编目(CIP)数据

客运专线铁路轨道/卢祖文编. —北京:中国铁道出版社,2005. 1

ISBN 7-113-06320-9

I. 客... II. 卢... III. 铁路运输:旅客运输-轨道(铁路)

IV. U213. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 137575 号

书 名:客运专线铁路轨道

作 者:卢祖文

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:傅希刚

责任编辑:傅希刚 编辑部电话:路(021)73142,市(010)51873142

封面设计:蔡 涛

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:22.5 字数:560 千

版 本:2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~5 000 册

书 号:ISBN 7-113-06320-9/TU·800

定 价:56.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:路(021)73169,市(010)63545969

序

建设中国客运专线,是几代中国铁路人的梦想。

2004年1月7日,温家宝总理主持召开国务院常务会议,讨论并原则通过了《中长期铁路网规划》,明确了我国铁路网中长期建设目标:到2020年,全国铁路营业里程达到10万千米,主要繁忙干线实现客货分线,复线率和电气化率达到50%,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。根据《中长期铁路网规划》,我国铁路主要通道将建设客运专线1.2万千米以上,环渤海地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区将建设城际客运系统,同时既有线提速改造达到2万千米,形成我国铁路快速客运网,为广大旅客提供更加安全、快捷、舒适的服务。目前,全国铁路干部职工正在以科学发展观为指导,加快实施《中长期铁路网规划》,快速扩充铁路运输能力,快速提高铁路技术装备水平,推进铁路跨越式发展,努力为全面建设小康社会提供可靠的运力保证。

最近,国家批准了武广、郑西、石太、京津、合宁、合武、温福、福厦、甬温等9个客运专线项目。这些项目不久就可开工建设。

建设客运专线,对于中国铁路来讲是一个全新的领域。认真学习借鉴发达国家客运专线建设及运营的经验,潜心研究和掌握客运专线技术,是摆在中国铁路各级领导干部和广大工程技术人员面前的一项重要任务。卢祖文同志编著的这本《客运专线铁路轨道》,介绍了世界各国客运专线轨道结构及其修理等方面的技术情况,对我国铁路轨道技术如何适应客运专线的技术要求做了有益的研究与探索。希望有更多的同志加入到客运专线技术研究的行列中来,为建设中国客运专线,推进铁路跨越式发展,早日实现中国铁路现代化贡献聪明才智。

刘志军

前言

2004年1月7日国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议,讨论并原则通过“中长期铁路网规划”。会议指出,铁路具有大运力、低成本优势,在运输中占有重要地位。制定中长期铁路网规划,加快铁路发展,对于促进国民经济持续快速增长,全面建设小康社会是十分必要的,会议原则同意这个规划。无疑,会议的决定是对铁路发展的有力支持。

“中长期铁路网规划”指出:为满足铁路增长的旅客运输需求,建立省会城市及大中城市间的快速客运通道,规划“四纵四横”铁路快速客运通道以及三个城际快速客运系统。建设客运专线1.2万km以上,客车速度目标值达到200 km/h及以上。

世界铁路已经经历了180年的发展历程,基本形成三种运输模式:以欧洲、日本铁路为代表的以客运为主的模式;以北美、澳大利亚为代表的以货运为主的模式;客、货混运,同时追求列车运输密度、速度和轴重的模式,这种特点在我国铁路体现最为明显。“中长期铁路网规划”明确提出了客、货分线的要求,完全符合世界铁路发展的趋势和我国国民经济发展的需要。客运专线与既有客、货混运的铁路是完全不同的概念,也有完全不同的标准体系。从技术标准、装备水平和运营等方面,客运专线包含了更广泛的内容。因此,本书从世界高速铁路的发展入手,介绍高速铁路和客运专线的轨道结构及修理,其内容更全面、更符合当前客运专线建设的实际。

以高速高效、安全可靠、技术创新、优质服务为标志的高速铁路的成功运营,有力地促进了各国的经济发展。鉴此,除法国、德国、日本继续建设和完善本国的高速铁路网外,意大利、西班牙、比利时、荷兰、韩国、中国台湾等国家和地区都在积极建设高速铁路,欧洲还拟定了连接各国首都的高速铁路网规划。高速铁路是20世纪交通运输的重大成果,是人类的共同财富。作为铁路大国,根据铁道部提出的跨越式发展思路,我国理应尽快建设高速铁路和客运专线。

轨道是高速铁路和客运专线铁路的重要组成部分。本书本质上是2002年本人编著《铁路轨道结构及修理》的姐妹篇。《铁路轨道结构及修理》是在总结本人多年从事铁路工务管理工作经验的基础上,汇集了既有线轨道结构及修理方面的最新成果而成的。本书则在介绍国外高速铁路和客运专线铁路轨道方面有关情况的基础上,详细介绍我国在高速铁路和客运专线铁路轨道研究、试验、标准、工艺、管理等方面所做的工作和取得的成果。从内容上讲,两书基本上没有重复的部分,只是前者内容都是经过实践验证,比较成熟;而后者属于研究和探讨,需要在高速铁路和客运专线铁路的实践中验证。另外,本书还引用了部分研究成果、考察报告的内容,在此向提供这些资料的铁道科学研究院、中国铁路工程总公司等单位表示诚挚的谢意。本书提纲的构思、资料的搜集都得到郭福安、赵国堂等同志的帮助,在此一并致谢。

作者

2004年12月15日

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 客运专线和高速铁路轨道标准	5
第一节 客运专线和高速铁路荷载	5
一、垂直荷载	5
二、横向水平荷载	8
三、纵向荷载	9
四、振动荷载	9
第二节 世界各国客运专线和高速铁路轨道结构	9
一、概 述	9
二、高速铁路轨道结构方案选择	11
三、各国客运专线和高速铁路轨道结构	13
第三节 客运专线和高速铁路对轨道结构的要求	15
一、稳定的轨道结构	15
二、平顺的运行表面	16
三、良好的轨道弹性	18
四、可靠的轨道部件	19
五、便利的养护维修	20
第三章 客运专线和高速铁路轨道结构	22
第一节 钢 轨	22
一、客运专线和高速铁路对钢轨的基本要求	22
二、国外高速铁路钢轨生产现状及发展趋势	23
三、我国钢轨生产情况	26
四、客运专线和高速铁路钢轨的主要伤损类型和我国铁路钢轨的主要差距	28
五、客运专线和高速铁路钢轨选材	30
六、选择钢轨断面	32
七、钢轨定尺长度	37
八、钢轨技术条件	39
第二节 无碴轨道	47
一、国外铁路无碴轨道概况	47
二、我国铁路无碴轨道概况	52
三、无碴轨道的结构	53
四、无碴轨道部件技术要求	61
五、无碴轨道的设计	75
六、无碴轨道的技术经济性	78

第三节 轨 枕	79
一、国外高速铁路轨枕的结构特点	80
二、我国铁路混凝土枕的发展	84
三、客运专线和高速铁路轨枕选型	90
四、客运专线和高速铁路轨枕技术要求	96
第四节 扣 件	101
一、扣件的功能	101
二、世界各国高速铁路用钢轨扣件	102
三、我国钢轨扣件	105
四、客运专线和高速铁路钢轨扣件技术条件	115
第五节 道 床	122
一、道床功能及性能	122
二、道床结构	123
三、道床断面	124
四、高速有碴轨道道床参数的选择及试验	130
五、道碴材质基本参数	132
六、高速铁路用道碴材料标准	144
第六节 道 岔	151
一、国外高速铁路道岔	152
二、我国铁路道岔发展及存在的主要问题	168
三、高速铁路道岔技术	181
第七节 无缝线路	220
一、我国已具备一次性新建无缝线路的技术条件	220
二、新建铁路一次铺设无缝线路应注意的问题	226
三、钢轨焊接	243
第四章 客运专线和高速铁路轨道修理	261
第一节 世界各国高速铁路轨道修理	261
一、法国高速铁路的轨道管理	261
二、德国高速铁路的轨道管理	262
三、日本高速铁路的轨道管理	263
四、其他国家高速铁路的轨道管理	264
五、我国铁路轨道管理	266
第二节 客运专线和高速铁路不平顺管理	269
一、轨道不平顺的种类及产生的原因	269
二、随机性轨道不平顺特征描述	274
三、各种轨道不平顺的影响及车轨相互作用的特点	277
四、高速铁路平顺性控制标准和建设高平顺线路的技术关键	280
五、建设阶段控制平顺性的主要技术措施	285
六、轨道平顺状态的评定及不良状态的诊断	288
七、高速铁路轨道平顺状态的维修管理	290

第三节 大型养路机械	292
一、国外养路机械的发展	293
二、我国养路机械发展回顾	294
三、主要大型养路机械装备标准	296
四、我国目前使用的主要大型养路机械	299
第四节 有碴轨道修理作业	315
一、大型养路机械作业基本要求	315
二、无缝线路养护维修	316
三、钢轨打磨	324
四、无碴轨道修理作业	327
第五节 轨道检测	330
一、高速铁路轨道平顺状态监测的要求和设备	330
二、轨道检查车	332
三、钢轨探伤车	346
四、综合检测车	349

第一章 绪 论

自以日本新干线、法国 TGV 为代表的高速铁路投入运营以来,以安全可靠、技术创新、优质服务为铁路的发展带来了新的机遇,为国民经济的发展带来了巨大动力。高速铁路的成功,有力地促进了国家经济的增长和社会进步,促进了沿线经济发展。高速铁路的发展规划,不仅在欧洲、亚洲得到推广,目前美洲和澳大利亚也在进行中。我国高速铁路的研究工作起步于 20 世纪 90 年代,现已为高速铁路的建设做了大量技术准备。

在亚洲,日本于 1964 年建成了世界上第一条高速铁路——东海道新干线,其后相继完成了山阳、东北、上越、北陆、山形、秋田等新干线,形成了 2 175 km 的新干线网,并且还有新建新干线和改造既有线的计划;韩国、中国台湾正在建设高速铁路,不久将投入运营;印度也在开展高速铁路建设的前期工作。

欧洲是目前高速铁路投入运营最多的地区。截止到 2002 年末,欧洲高速铁路已有 3 260 km 投入运营,预计 2010 年将达到 6 000 km。欧洲高速铁路始于法国。法国 1981 年开通了巴黎—里昂线(410 km),1989 年开通了 TGV 大西洋线(280 km),1993 年开通了 TGV 北方线(332 km),正在建设中的 TGV 东方线将于 2007 年完工;在德国,汉诺威—维尔茨堡铁路(327 km)和曼海姆—斯图加特铁路(100 km)于 1991 年投入运营,汉诺威—柏林铁路(263 km)于 1998 年投入运营(其中有 170 km 的高速区段),从科隆—法兰克福开通 ICE 高速运营后,大大缩短了法兰克福—科隆的运行时间;意大利的罗马—那不勒斯铁路(210 km)始建于 1994 年,米兰—波洛尼亚铁路将于 2006 年开通,同时意大利已制定了一项高速铁路网长期发展计划,将用 2 条重要的 T 形轴线构建路网;西班牙在新建马德里—塞维利亚(471 km)高速线取得巨大成功后,又建设马德里—巴塞罗那(620 km)高速线;比利时和荷兰等国也正在建设高速铁路。除了西欧各国正在建设高速铁路网外,东欧、南部欧洲各国也在积极进行既有线基础设施提速改造。

如今,一贯比较重视发展航空和公路运输的美国也开始拟订高速铁路的建设计划;美国加利福尼亚州已决定在州内建设 1 131.3 km 长的高速铁路;佛罗里达州则通过立法准备在州内建设匹兹堡—坦帕—奥兰多高速铁路。

澳大利亚铁路的重载运输驰名于世,近年也委托 TMG 国际公司对墨尔本—布里斯班(2 000 km)东海岸铁路的轮轨高速进行论证。

至 2002 年底,全世界已经建成高速铁路并投入运营的国家有 9 个,线路总长 5 435 km;在建高速铁路 16 条,总长度达到 3 267 km,将于 2007 年前陆续在世界 9 个国家及我国台湾省建成并投入运营。欧洲高速铁路建设有一个比较完整的规划。根据这个规划,2020 年将形成一个新建高速铁路 10 000 km、改造既有线 15 000 km、遍及全欧洲并连接主要国家首都的高速铁路网。

从以上情况可以看出,世界高速铁路发展具有以下特点:

1. 高速国家增多,发展速度加快

日本、法国、德国高速铁路的巨大成功有力地推动了各国铁路的发展,已投入运营和在建

的高速铁路越来越多,已制定高速铁路发展规划的国家也越来越多,而一个国家新建高速铁路的周期越来越短。作为泛欧高速铁路网的重要组成部分,比利时处于北欧高速枢纽地位,已经开通了布鲁塞尔—法国边境的高速铁路,并还有两条高速铁路正在建设中。荷兰作为欧洲路网的终端,也积极安排了高速铁路的修建计划。不在国际大路网的英国、韩国和我国台湾也很早就开始了高速铁路的研究工作并已付诸实施。

2. 新建改造结合,加速路网效应

日本总长 2 175 km 的高速铁路波及影响到全国铁路;法国总长 1 420 km 的高速铁路影响范围达 5 600 km;德国高速铁路不足 1 000 km,但影响却达到 4 000 km。各国在新建高速铁路的同时,大力改造既有线,充分发挥网络效应。高速铁路的发展结合既有线改造分三个层次展开:国内、国际、洲际。法国、德国和日本的高速铁路基本成网,并按各自的规划还在继续完善中;开行欧洲之星的巴黎—伦敦是率先实现国际高速运行的国际网络,接着在中欧西部的法国、德国、比利时、荷兰以及法国、德国、卢森堡、瑞士均形成高速国际联运;以时速 200 km 为速度目标值的既有线改造将连接欧亚大陆,提高洲际间的铁路运输能力。

3. 技术已经成熟,欧亚各有特点

高速铁路经过 40 年的发展,基础设施等各方面的技术日臻成熟,并且各国均有独到的优点。日本是世界上建设高速铁路最早的国家之一,在经历了初期路基沉降量大、路基病害多、桥梁安全储备低、轨道结构标准偏低等问题的困扰后,在这些方面进行了深入研究,取得了大量成果,在以后建设的高速铁路均采用了科学、先进的标准,保持了良好的运行记录。法国高速铁路的特点是强化基础设施、保持良好弹性、严控机辆轴重、各项指标良好。德国高速铁路在基础设施方面采用了较高标准,但机辆轴重的控制不如法国严格,因此在运行五年后陆续出现病害,后来改为轴重 150 kN 以下,现已形成完善的高速运输体系。

4. 速度稳中有升,提高竞争能力

列车运营速度除与设计速度目标值有关外,还与经济指标有密切关系。日本高速铁路设计时速一般为 250~260 km,实际运营时速为 220~240 km,在近期修建的高速铁路已有把时速提高到 270 km 以上的计划。法国早期高速铁路设计时速为 300 km,实际运营速度为 270~300 km;近期修建的北方线和东方线设计时速为 350 km,实际运营速度已突破 300 km。西班牙、韩国、中国台湾高速铁路的设计时速都是 350 km,已为运营时速突破 300 km 作准备。

高速铁路是 20 世纪交通运输的重大成果,是人类共同财富。各国高速铁路都是在既有铁路基础上,借鉴或借用相关技术设备和其他国家高速铁路标准进行修建的。中国铁路是国际上发挥重要作用的铁路,营业里程居世界第三、亚洲第一,其年货物发送量和旅客周转量均为世界第一,客货周转量分别占全社会的 35% 和 53% 以上。作为一个铁路大国,根据铁道部提出的跨越式发展思路,中国理应尽快建设高速铁路。

解放以来,我国铁路得到巨大发展,特别是改革开放以来,铁路各专业的技术和装备水平有了空前提高。自 1997 年以来,铁路实施了五次大面积提速,使长期在较低速度徘徊的局面取得重大突破,列车时速超过 120 km 的地段已达 1.6 万 km。特别是 2004 年 4 月 18 日实施的第五次提速,第一次把列车最高时速提高到 200 km,成为我国铁路史上的又一个里程碑。2005 年的第六次提速工程将使时速 120 km 以上的线路达到 2 万 km 以上。2003 年 10 月 12 日投入运营的秦沈客运专线,在基础设施方面有不少进展。这些都为高速铁路建设奠定了基础。

我国不仅有迫切修建高速铁路的必要性,而且具备修建高速铁路的能力。但是,我国毕竟

没有修建高速铁路的实践,高速铁路又是涉及面极广、科技水平极高的系统工程,因此必须转变观念,全力以赴,贯彻“先进、成熟、经济、实用、可靠”的技术方针,开创我国的客运专线和高速铁路事业。

多年来我们习惯于那种“限额设计、限期开通、现状交接”的粗放型建设模式,建设、运输结合的松散性带来诸多后遗症。客运专线和高速铁路的建设绝不能重入这个怪圈。从这个意义上讲,客运专线和高速铁路的成败决定于建设理念,即是否能以铁道部党组提出的跨越式发展思路为指导,转变观念,义无反顾,做好各项工作。

1. 克服存在的就是合理的理念,树立与时俱进的观念

列车速度是铁路运输的重要要素。随着列车速度的提高,基础设施承受的各种力的作用往往以几何级数递增,这 and 传统铁路按准静态设计是完全不同的概念。各国高速铁路的实践充分证明了这一点。在与国外专家进行技术交流时,他们反复强调的就是这一点。《高速铁路设计暂行规定》是在“八五”、“九五”研究课题基础上编制的,在传统观念的基础上已有很大进步,对被证明失败的技术标准已经进行了部分修订,但用高速铁路的标准进行衡量,差距还很大。

2. 克服无所作为的理念,树立时不我待的观念

与“存在就是合理”对应的另一个极端是认为客运专线和高速铁路技术要求高、实施难度大而畏首畏尾,这和跨越式发展思路是格格不入的。客运专线和高速铁路在我国是前无古人的伟大事业,能不能搞好这项工程,关系到党和国家的利益和铁路的发展,使命极其神圣,责任重于泰山。如果能赶上这样一个时代,承担高速铁路这样的伟大工程,是极为光荣的。我们必须站在践行“三个代表”、实现中华民族伟大复兴、全面建设小康社会和实现铁路跨越式发展的高度,来认识和对待高速铁路工程,以极其强烈的使命感和时不我待的紧迫感,把客运专线和高速铁路这一伟大、艰巨的工程设计好、建设好、运营好。

3. 克服专业分割的理念,树立系统论的观念

客运专线和客运专线和高速铁路建设不是一项孤立的事物,必须运用系统论的思想和方法,综合考虑各种要素,实现各要素间的匹配和最佳组合。从大的方面看,高速铁路要与自然界和社会这个大系统相统一,工程设计、工程标准、技术准备、运营管理一定要适应自然环境和沿线经济、社会发展的要求;与我国铁路路网相统一,做到与既有线有机衔接;各种设施之间要有机统一,固定设备之间、移动设备之间、固定与移动设备之间要匹配协调,达到最佳组合;设计和建设要与劳动组织、运输组织相统一,为减员增效创造条件。从基础设施本身而言,线下设备和线上设备相统一,线下设备对线上设备高平顺性起保证作用;桥梁、轨道从结构上统一,结构内各部件之间性能、寿命有机衔接;各种设施寿命与高速行车要求相统一,确立高质量、全寿命的保障系统;各项设备的高可靠性和少维修相统一,建立高效管理体系,确保设备正常运转。

4. 克服等、靠、要的理念,树立市场化观念

一流观念只有在市场化运作中才能确立,一流的质量也只有在竞争中才能产生。尽管我国在客运专线和高速铁路的技术方面做了大量工作,取得很多成果,但是这些成果的取得是靠各方面力量既竞争又合作才取得的。为了实现建设世界一流客运专线和高速铁路的目标,还必须在科研、设计、施工、物资采购等各个环节实行招、投标制度,很多项目还要进行国际招标,坚持公开、公平、公正原则,确保设计、建设和产品质量。

5. 克服大而全、小而全理念,树立工业化大生产观念

客运专线和高速铁路是庞大的系统工程,要有严密的组织、科学的管理才能搞好设计和建

设,要坚持专业化、标准化、理性化生产。铺架设备是客运专线和高速铁路施工的必要设备,技术要求高、制造难度大,而且由于工期紧张和桥梁数量大,需要设置的架桥基地比较多,如果各施工单位各搞一套、百花齐放,势必造成低水平的重复研制,不仅无法保证设备的性能和质量,而且会造成投入的浪费。所以,从一开始就要按专业化要求,组织国内最具实力的科研、设计、制造、施工等方面的专家拟订统一的技术条件,并集中对最先进的方案进行优化,再通过招标确定设计单位和制造单位,以保证把最好的设备用于客运专线和高速铁路建设。类似这样的项目还很多,虽然协调难度很大,但必须按现代企业管理制度的要求,以符合客运专线和高速铁路建设规律的工业化大生产的方式进行建设。

6. 克服片面强调国产化的理念,树立利用成熟技术、形成后发优势的观念

引进技术、组织消化吸收、实现国产化是我国科技发展的重要途径,但如果片面强调国产化,甚至以保护民族工业为名,消极对待引进先进技术,把国产化与引进技术对立起来则是不合适的。我国铁路养路机械化的发展之路就是采取技贸结合的方式,从引进世界最先进的设备和技术开始,组织有关工厂和研究单位对关键技术进行消化吸收,使国产化率逐步提高,现在已达到 70% 以上。在这个方针指导下,我国大型养路机械得到快速发展,08-32 型捣固车已自行生产 100 多台,达到普拉塞原装机械的水平,适应了铁路发展的需要,节约了大量外汇。目前,09-32 型捣固车也实现了国产化,为国内市场提供了 20 多台,使养路机械的装备水平得到很大提高。稳定车、配碴整形车和清筛机也顺利实现了国产化。如果沿着闭关自守的路走下去,我国养路机械化之路至少要推迟 20 年。

7. 克服规章就是一切的理念,树立为质量负全责的观念

规章是我们开展工作的依据。但在执行规章的过程中,由于情况千差万别,应该从实际出发,才可能得到满意的结果。例如,最小曲线半径是各国铁路规章都有的基本技术指标,但我国在执行这个规定时与国外却有天壤之别。按常理,选择最小曲线半径应进行详细的技术经济比较,国外也都是这样执行的,但多年来我们为了节省建设投资,不顾具体条件,使用了大量小半径曲线,给运营带来极大困难,并造成运营成本的大量增加。又如产品质量检验、施工质量监理等,在执行规章的同时,必须充分考虑现场情况,防止可能出现的弄虚作假,严格控制质量。

8. 克服任务观点,树立设备全寿命的观念

客运专线和高速铁路主要结构物的寿命要达到 100 年。多年来我国的铁路工程没有强调耐久性的要求,一般待工程交接后,设计和工程承包方就算完成任务,不再承担使用期间环境破坏、修复、重建等相关义务和责任,造成大量因耐久性不足带来的经济损失。1998 年实施的《中华人民共和国建筑法》和 2000 年国务院颁发的《建设工程质量管理条例》都规定,建筑结构应注明使用年限。铁路作为国民经济的重要产业,理应率先执行法律规定,但实际上铁路在这方面的的工作还比较落后,要以客运专线和高速铁路为契机,引入全寿命的观念,拟订技术标准,加强质量监测,确保主要结构的 100 年使用寿命。

第二章 客运专线和高速 铁路轨道标准

传统的铁路轨道结构类型的划分有两种方法：一是按铁路等级划分；二是按运营条件划分。按铁路等级划分轨道类型，要求同一等级的铁路采用同一种轨道类型。但实际上同属一个等级的铁路，其近期运量增长速度却相差很大，有的在通车以后很快达到远期规模，有的在运营一段时期以后才迅速增长，有的在很长时期内运量一直很小。所以轨道类型完全按铁路等级划分，有时与实际情况不完全相符，造成轨道能力不足或过剩的使用不合理现象。按运营条件划分轨道类型，是按列车密度、轴重、速度等运输条件确定轨道类型，使之互相适应。在客、货混运的线路上，运营条件实际是以轨道年通过总重密度为主要依据。轨道通过总重密度是在铁路运营线路上，某一运营区段平均每千米线路在一年内通过线路的所有质量，其单位为 $\text{万 t} \cdot \text{km/km}$ 。它是表征轨道承受荷载情况的重要指标，也是线路运营繁忙程度的主要标志。但是在轨道类型划分中，仍然考虑了速度的因素。

客运专线和高速铁路是以高速行车为目的，行车速度已取代年通过总重作为运输条件的主要指标，因此只要是高速行车，在同一条线路上均应采用相同标准的轨道结构，甚至在高中速混运时，在高速车进入既有路网和返回高速线的径路上也应该采用高速铁路的轨道结构。

第一节 客运专线和高速铁路荷载

铁路轨道结构是连续的长大工程结构物，它直接承受列车的各种荷载、轮、轨之间构成一个十分复杂的庞大系统。列车荷载对轨道结构的工作状态有决定性影响，而轨道结构自身的状态又直接影响列车的运行品质，进而使轨道承受的荷载发生变化。经过对轮和轨之间这种交替式影响的研究，形成了一门新的学科，即轮轨动力学。因此，在研究高速铁路轨道结构时必须研究客运专线和高速铁路的荷载。客运专线和高速铁路的荷载按其作用力方向可分为垂直荷载、横向水平荷载、纵向荷载和振动荷载。

一、垂直荷载

我国既有铁路对列车垂直荷载进行了大量的研究工作，提出了列车速度 120 km/h 及以下的轨道强度计算方法，确定了包括速度系数在内的有关影响系数。但是随着列车速度的提高，轮轨间的动力作用明显增大。西南交通大学经过研究，提出了车辆以各种不同速度通过同一接头不平顺时所引起的轮轨垂向作用力的变化关系，当列车速度由 80 km/h 提高到 160 km/h 和 250 km/h 时，轮轨间的高频冲击力增大 45% 和 100% ，低频响应力增大 38% 和 80% 。近年来，我国经过五次大面积提速，列车速度超过 120 km/h 的区段已达到 $16\,000 \text{ km}$ ，其中允许速度达到 160 km/h 的线路 $2\,000 \text{ km}$ ，目前正在安排并预计 2005 年实施的第六次提速工程，将使我国铁路路网允许速度 120 km/h 以上的区段达到 2 万 km ，并且通过第五、六次

提速工程,允许速度达到 200 km/h 的区段进入实际运营阶段,路网水平获得本质的提高。我国铁路十几年前就开展了客运专线和高速铁路的研究并取得大量研究成果,目前即将进入实施阶段。在这种情况下,我国现有轨道强度计算方法涉及的荷载系数已不适用。为此,有关部门在提速工程中进行大量试验的基础上,提出了中速列车的动力附加系数,同时参考德国资料,列出了高速列车的动力附加系数,见表 2-1-1。

表 2-1-1 轨道设计荷载参数

列车种类	设计最高速度 (km/h)	轴重 $2P_0$ (kN)		轮径 (mm)		速度动力附加系数 α		
		机 车 (动车)	车 辆 (从车)	机 车	车 辆	速度范围 (km/h)		
						80~160	160~210	210 以上
高速列车	300	195	140	1 050	840	0.15~0.22	0.32~0.41	0.75~1.00
中速列车	200	230	160	1 050	840	0.15~0.22	0.32~0.41	—

我国高速铁路的建设还没有起步,即使是对 200 km/h 铁路的轮轨关系也缺少研究,因此表列数据缺乏充分的理论根据和实测结果的验证,只能暂作参考。随着铁路跨越式发展思路的逐步展开和实施,以及高速铁路的建设和深入研究,还需进行补充和完善。

根据动力附加系数可求出轨道的设计动荷载,即

$$P_d = P_j(1 + \alpha) \quad (2-1-1)$$

式中 P_j ——列车的静轮重或静轴重。

各国都有自己的计算轨道所承受动轮重(设计轮重)的方法。对高速铁路来说,日本和德国铁路的计算方法具有代表性。

日本铁路采用以下对不同情况分类计算的方法:

(1) 常用的正常设计轮重

$$P_d = P_j \cdot \alpha \quad (2-1-2)$$

式中 α ——速度系数,高速铁路 $\alpha=1.45$,既有铁路 $\alpha=1.3$ 。

(2) 考虑车轮有最长为 70 mm 的扁疤时的设计轮重

$$P_d = 3P_j$$

(3) 考虑到曲线上作用有横向力时采用的异常情况设计轮重

$$P_d = 4P_j$$

德国铁路在考虑设计动荷载与静荷载的关系时,还计入了列车荷载的正态分布规律、轨道状态及列车类型的因素,在大量试验研究的基础上提出了一个比较全面的计算公式,即

$$P_d = P_j(1 + t \cdot \bar{S}) \quad (2-1-3)$$

式中 P_d ——轨道设计动荷载;

P_j ——轨道设计静荷载;

t ——与概率 p 有关的置信度,按下表取值:

$t=0$	1	1.28	1.65	1.96	2	2.33	3
$p=0$	68.3%	80%	90%	95%	95.5%	98%	99.7%

$\bar{S}$ ——与轨道状态、行车速度和列车类型有关的表示荷载离散程度的均方差,

轨道状态良好 $\bar{S}=0.1\phi$

轨道状态一般 $\bar{S}=0.2\phi$

轨道状态差 $\bar{S}=0.3\phi$

ϕ ——速度系数,

$$\begin{aligned} v \leq 60 \text{ km/h} & \quad \phi = 1 \\ v > 60 \text{ km/h} & \quad \begin{cases} \phi = 1 + \frac{v-60}{380} (\text{客车}) \\ \phi = 1 + \frac{v-60}{180} (\text{货车}) \end{cases} \end{aligned}$$

德国公式只用来计算正常状态下的轨道设计荷载,未考虑车轮扁疤等情况,但对轨道状态受到车荷载的影响进行了充分的考虑,并顾及了荷载的分布规律,这是德国公式的优点和完善之处。当轨道状态良好、 t 值采用3时,时速250 km高速铁路的动力系数为1.45,这与日本铁路正常设计轮重时的高速铁路动力系数相等,说明日本高速铁路正常设计轮重相当于速度250 km/h时德国公式的计算值,因此,德国公式的应用范围更广也更合理。

此外,法国、德国、比利时和荷兰曾对连接四国的高速铁路静轴重和动轮重作出规定:该高速通道的允许静轴重为170 kN,在 $v=300$ km/h及正常维修状态时,线路上作用的垂直动态轮重 ≤ 170 kN(动轴重 ≤ 340 kN)。由此推算,作用在轨道上的动载应比静载大一倍,即动力附加系数 $\alpha=1$ 。

北京交通大学范俊杰教授提出,在我国200 km/h以上铁路轨道设计荷载尚未确定的情况下,建议设计轨道结构时采用2倍的静荷载作为动荷载,客货混运提速线路可采用3倍静荷载设计轨道结构,而在检算既有轨道结构时可采用德国公式进行计算。

轨道结构是承受动荷载的,因此在考虑垂直荷载时必须计入冲击荷载的影响。大量的试验研究表明,列车速度提高后,车轮和轨道的不平顺都会引起轮轨间巨大的冲击荷载,通常可用下列公式进行计算和评估:

$$\Delta P = \alpha \cdot v \cdot \sqrt{km} \quad (2-1-4)$$

式中 α ——不平顺斜率;

v ——行车速度(m/s);

k ——线路刚度(N/m);

m ——车轮簧下质量(kg)。

北京交通大学曾在京秦线对有轨面掉块的钢轨垂直力进行过测试。当列车速度由70 km/h提高到130 km/h时,其垂直冲击动力由231 kN增加到398 kN,速度提高85.7%,动力荷载增加72.3%,与上述公式的计算结果基本相符。

在高速行车条件下,轮轨系统对不同类型的轨道不平顺会产生不同的动力响应。轮轨间的不平顺大约分为脉冲型、谐波型和动力型三类。

脉冲型不平顺:高速铁路的轨道结构采用无缝线路,有缝线路固有的钢轨接头不平顺已不存在,而车轮扁疤、轨面擦伤或剥离、焊缝不平顺等将对轮轨间的动力作用产生影响。

谐波型不平顺:钢轨波浪型磨耗、车轮表面不圆顺或车轮存在静偏心距时,都将形成对机车车辆和轨道结构的动力作用。对于车轮偏心或存在偏静距的情况,轮轨间的动力效应与列车速度的平方成正比,而钢轨的波浪型磨耗对高速运行列车的影响比普通速度的列车大得多。

动力型不平顺:轨下基础的缺陷,如垫层弹性不均匀、空吊板、几何尺寸超限等都会形成一定的动力坡度,当列车运行时,将出现超出正常状态的轨道变化,导致轨道局部残余变形。

二、横向水平荷载

轨道承受的横向水平荷载也是进行轨道设计和检算以及列车运行安全性评估的重要数据。通常把轨道承受的水平荷载分为两类来分析和运用：一类用来进行轨道设计、检算及评估列车脱轨危险的横向集中作用力 Q ；另一类用来评估轨道横向移动的位移阻力 S ，这是涉及轨道养护维修和无缝线路稳定性的参数。

(一) 横向力 Q

各国铁路根据各自运营状况规定了横向荷载 Q 的计算方法。

1. 日本

- (1) 进行轨道设计时, $Q=0.8P_j$, P_j 为静轮重；
- (2) 当轨道承受横向水平力的反复作用时, 可用下式检算：

$$Q = 0.4P_j \text{ (或 } 0.6P_j \text{)}$$

2. 德国

$$Q = 0.6P_j$$

按此式进行轨道的设计和检算。

3. 国际铁路联盟

暂定为 $Q \leq 60 \text{ kN}$ 。

4. 中国

高速铁路 $Q \leq 80 \text{ kN}$ 。

(二) 轨道横向位移阻力

当列车运行在轨道上时, 其在 2 m 长的轨道范围内作用于轨道的横向力超过 S 值时, 轨道要产生横移。 S 值与轨道结构和部件有关, 一般通过试验确定。当前国内外文献广泛引用的经验公式为

$$\sum Q \text{ (或 } S) \leq \alpha(10 + P_0/3) \quad (\text{kN}) \quad (2-1-5)$$

式中 $\sum Q$ (或 S) —— 2 m 长轨道范围内轮轨接触横向力或车轴横向力之和；

P_0 ——轴重(kN)；

α ——与机车车辆类型有关的系数, 机车、客车、动车组 $\alpha=1$, 货车 $\alpha=0.85$ 。

该公式是法国在一定轨道条件(46 kg/m 钢轨、轨枕间距 65 cm 、碎石道床)下经试验推出来的。根据北京交通大学的试验资料, 并参照国外有关资料, 当采用 60 kg/m 钢轨、混凝土枕且轨枕间距不大于 60 cm 时, α 值取 1.5 比较合适。

根据国内外的试验资料, 由于客运专线和高速铁路大多采用动力分散的动车组, 即使采用动力集中的方式, 机车车辆的轴重也都比较小, 因此, 轨道承受的低频荷载和横向水平力一般都低于低速货车。北京交通大学曾在京秦快速线路上对轨道结构进行动力测试。结果表明, 货车以 $50 \sim 60 \text{ km/h}$ 的速度运行时, 其车轮作用在钢轨上的垂直压力平均为 150 kN 左右; 客车以 $130 \sim 140 \text{ km/h}$ 的速度通过时, 其车轮作用在钢轨上的垂直压力平均约为 90 kN ; 通过半径为 1500 m 的曲线时, 横向水平力也只有 30 kN 左右。因此, 动车组和客车虽然速度较高, 但其低频荷载和横向水平力却不大, 造成轨道的基本应力、疲劳伤损及轨道变形不会很大。日本铁路根据多年的运营经验, 对轨道的破坏力与列车轴重和行车速度的关系得到如下经验公式:

$$F = \sum P \cdot K \cdot v \quad (2-1-6)$$

式中 F ——列车对轨道的破坏力；

ΣP ——列车各轴轴重之和，即通过总重；

v ——行车速度(km/h)；

K ——车体系数，机车 $K=0.4$ ，货车 $K=0.27$ ，客车 $K=0.2$ ，高速列车 $K=0.18$ 。

根据这个经验公式的计算结果，当总重为 3 000 t 的货车以 60 km/h 的速度运行时，其对轨道的破坏力比总重为 1 500 t 的客车以 160 km/h 速度运行时对轨道的破坏力大。由此可以看出，高速运行要求极高的轨道平顺性，而在客货混运的情况下，货物列车又极大地破坏轨道状态，因此，随着列车速度的提高，客货分开、建设高速客运专线就是必然的趋势。例如，当 $v=250$ km/h 时，即使客车总重仅为 1 200 t， $K=0.18$ ，高速客车对轨道的破坏也比上述货车大。

三、纵向荷载

1. 列车的制动力和起动力

在进行轨道计算时，通常只在计算钢轨应力时考虑列车制动力和起动力的影响。我国把其引起的钢轨应力按 10 MPa 计。

2. 钢轨承受的温度力

我国采用的无缝线路一般都是温度应力式的无缝线路，由轨温变化引起的钢轨温度力 P_t 为

$$P_t = 242.8 F \Delta t \quad (\text{N}) \quad (2-1-7)$$

式中 t ——轨温变化幅度(°C)；

F ——钢轨断面积(cm^2)。

高速铁路的轨道结构都是无缝线路，因此必须考虑无缝线路的作用。

四、振动荷载

由高速列车引起的振动荷载，其振动频率较高，多在 50~200 Hz 之间。德国曾在距高速铁路轨道 2.5 m 处进行过振动测试，并绘制了振动频谱分布图。测试表明，随着行车速度的提高，高频振动的峰区在增多。 $v=150\sim 160$ km/h 时有 1 个峰区， $v=250$ km/h 时有 3 个峰区， $v=320$ km/h 时有 4 个峰区。而且行车速度越高，振动荷载的量级越大。无碴轨道的振动较大。无碴轨道在行车速度为 250 km/h 时的振动状况与有碴轨道速度为 300 km/h 时差不多，这就是为什么无碴轨道十分重视解决轨道结构弹性问题的原因。法国高速铁路采用有碴轨道，其轨道结构的弹性主要由散粒状的道床提供。德国和日本采用无碴轨道，其轨下基础为整体道床，因此提高轨下垫层弹性就显得尤为重要。

第二节 世界各国客运专线和高速铁路轨道结构

一、概 述

作为铁路基础设施的轨道结构是庞大的系统工程，其受力状态极其复杂，运营条件的任何变化都会直接引发受力状态的变化，而作为轨道结构基础的桥梁、路基的状态和性能对轨道结构有决定性影响，因此，作为客运专线和高速铁路的轨道结构，具备良好的基础并在正常受力