

 同济大学研究生教材

高速铁路路基与轨道工程

Subgrade and Track Engineering of High Speed Railway

王炳龙 杨新文 周宇 宫全美 编著

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

高速铁路路基与轨道工程

王炳龙 杨新文 周 宇 宫全美 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书针对高速铁路技术特点,吸收国内外高速铁路路基与轨道工程的研究成果,理论联系实际,对高速铁路路基与轨道工程的主要技术问题进行了介绍和论述。全书共 12 章。其中,主要内容包括:高速铁路路基与轨道结构;无砟轨道;道岔;无缝线路;路基沉降变形控制标准;软土地基路基;湿陷性黄土路基;膨胀土路基;过渡段路基;既有线提速路基与轨道。书的最大特色在于:一是本书能反应近几年高速铁路路基与轨道最新的设计理论、方法和研究成果;二是将构成线路的路基和轨道作为一个相互依存、相互补充的系统进行内容的安排和编写。

本书可作为道路与铁道工程专业硕士研究生教材,也可供从事路基与轨道工程方面的相关工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路路基与轨道工程 /王炳龙编著. — 上海:
同济大学出版社,2015. 1

ISBN 978-7-5608-5705-3

I. ①高… II. ①王… III. ①高速铁路-铁路路基-工程施工-研究生-教材②高速铁路-轨道(铁路)-工程施工-研究生-教材 IV. ①U213.1②U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 286287 号

高速铁路路基与轨道工程

王炳龙 杨新文 周 宇 宫全美 编著

责任编辑 陆克丽霞

责任校对 徐春莲

封面设计 张 微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.75

字 数 418 000

版 次 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5705-3

定 价 45.00 元

前 言

经过多年的高速铁路建设和对既有铁路的高速化改造,中国目前已经拥有全世界最大规模以及最高运营速度的高速铁路网。高速铁路对轨道结构有高平顺性和高稳定性的要求,而路基作为轨道基础,其强度、刚度、稳定性以及在运营条件下使线路轨道参数保持在允许的标准范围之内,是确保列车高速、安全、舒适平顺运行的前提条件。构成线路的路基和轨道,作为轮轨大系统中的子系统,两者相互作用、相互影响。

随着高速铁路的发展,新技术不断被应用于高速铁路建设中,相关的规范和技术标准不断完善,路基与轨道的设计理论、施工技术和检测手段等都有了很大发展,因此,本书结合高速铁路路基与轨道工程的技术特点,吸收国内外高速铁路路基与轨道的最新研究成果,理论联系实际,对高速铁路路基与轨道的主要技术问题进行了介绍和论述。

本书由同济大学几位教师编写,由王炳龙主编。各章编写分工如下:第1章由王炳龙和杨新文编写;第2章由官全美和杨新文编写;第3章由杨新文编写;第4章、第5章由周宇编写;第6章由官全美编写;第7—12章由王炳龙编写;周顺华教授对本书的内容提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

限于时间和编者水平,书中错误之处,敬请广大读者批评、指正。

编者
2015年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高速铁路路基与轨道工程的特点	1
1.1.1 高速铁路路基工程的特点	1
1.1.2 高速铁路轨道工程的特点	3
1.2 路基与轨道工程技术的发展和展望	7
1.2.1 路基工程技术的发展和展望	7
1.2.2 高速铁路轨道工程技术的现状与展望	10
第 2 章 高速铁路路基与轨道结构	14
2.1 高速列车载荷作用的特点	14
2.1.1 垂直荷载	14
2.1.2 横向水平荷载	15
2.1.3 纵向荷载	16
2.1.4 冲击力	17
2.1.5 振动荷载	17
2.2 路基与轨道结构横断面	17
2.2.1 路基型式	17
2.2.2 高速铁路路基标准横断面	18
2.3 高速铁路路基结构	21
2.3.1 我国高速铁路路基结构	21
2.3.2 日本高速铁路路基结构	23
2.3.3 德国高速铁路路基结构	25
2.3.4 法国高速铁路路基结构	26
2.4 高速铁路轨道结构类型	28
2.4.1 有砟轨道	28
2.4.2 无砟轨道结构类型	28

第3章 无砟轨道	34
3.1 无砟轨道设计理论	34
3.1.1 无砟轨道设计原则	34
3.1.2 无砟轨道设计理论	34
3.2 无砟轨道结构及技术标准	35
3.2.1 国外无砟轨道结构及技术标准	35
3.2.2 我国无砟轨道结构及技术标准	41
3.3 无砟轨道的钢轨和扣件	46
3.3.1 无砟轨道的钢轨	46
3.3.2 无砟轨道的扣件	50
3.4 无砟轨道精密工程测量技术	53
3.4.1 三级平面控制网	53
3.4.2 高程控制网	53
3.4.3 线路基桩测设	53
3.5 无砟轨道施工及质量控制	55
3.5.1 施工方法种类	55
3.5.2 工程质量保障准则	56
3.5.3 无砟轨道施工案例	56
第4章 道岔	58
4.1 道岔设计理论	58
4.1.1 高速道岔的特点	58
4.1.2 高速道岔的设计原则	60
4.1.3 大号码道岔的设计	61
4.2 道岔结构及技术标准	61
4.2.1 轨枕埋入式无砟道岔	61
4.2.2 板式无砟道岔	69
4.3 道岔施工	74
4.3.1 轨枕埋入式无砟道岔的施工	74
4.3.2 板式无砟道岔的施工	90
4.3.3 大号码道岔的施工注意事项	95
4.4 道岔精密工程测量技术	96
4.4.1 道岔精调流程	96
4.4.2 关键精调方法	97

第 5 章 无缝线路	101
5.1 跨区间无缝线路设计	101
5.1.1 单元轨节布置	101
5.1.2 钢轨焊接	101
5.1.3 钢轨胶接	102
5.1.4 锁定轨温	102
5.1.5 位移观测桩	103
5.2 无缝线路施工	105
5.2.1 铺轨基地的规划与设计	105
5.2.2 长轨条布设与焊接	108
5.2.3 长轨放散与锁定	115
第 6 章 路基动力特性	119
6.1 路基中的动荷载特性	119
6.2 路基土的动力特性	120
6.2.1 土的动强度	120
6.2.2 土的动变形特性	121
6.2.3 土的动应力-应变关系	123
6.3 路基中动应力的分布规律	124
6.3.1 有砟轨道线路路基动应力	124
6.3.2 高速铁路无砟轨道线路路基动应力	127
6.4 路基动应力计算方法	130
6.4.1 拟静力的简化计算方法	130
6.4.2 计算方法	134
6.5 无砟轨道桩网结构路基动力响应特性	137
6.5.1 概述	137
6.5.2 路基中动应力随时间的变化曲线	137
6.5.3 动应力沿路基横断面的分布规律	139
6.5.4 动应力沿路基本体深度方向的分布规律	140
第 7 章 路基沉降变形控制标准	142
7.1 路基工后沉降的定义及控制标准	142
7.1.1 有砟轨道路基工后沉降控制标准	143
7.1.2 无砟轨道路基工后沉降控制标准	143

7.2	沉降变形规律及工后沉降的组成	145
7.2.1	路基填土压密下沉	145
7.2.2	行车引起的基床累积下沉	146
7.2.3	地基引起的工后沉降	146
第8章	软土地基处理方法	148
8.1	软土地基处理方法概述	148
8.2	排水固结法	149
8.2.1	排水固结法原理	149
8.2.2	堆载预压与真空预压加固软土地基的机理分析	150
8.2.3	超载预压和真空预压加固软土地基的设计	152
8.2.4	超载预压和真空联合堆载预压加固高速铁路软基试验	158
8.3	水泥搅拌桩复合地基	167
8.3.1	水泥搅拌桩加固高速铁路软土地基概述	167
8.3.2	水泥搅拌桩加固高速铁路深厚层软土地基试验	168
第9章	无砟轨道路基地基加固技术	176
9.1	桩网结构、桩筏结构和桩板结构	176
9.1.1	桩网结构	176
9.1.2	桩筏结构	201
9.1.3	桩板结构	201
9.1.4	结构计算	203
9.1.5	桩板结构布置	204
9.2	桩网、桩筏及桩板结构路基沉降变形性状及计算方法	204
9.2.1	桩网、桩筏及桩板结构路基沉降变形基本特征	204
9.2.2	桩网、桩筏及桩板结构沉降计算方法	206
9.3	工程实例	208
9.3.1	桩网结构和桩筏结构	208
9.3.2	桩(梁)板结构	212
第10章	膨胀土路基	215
10.1	膨胀土的定义及工程性质	215
10.1.1	膨胀土定义	215
10.1.2	膨胀土判别及分类	215

10.1.3	膨胀土的矿物成分	216
10.1.4	膨胀土的工程性质	216
10.2	膨胀土改良技术	218
10.2.1	改良的室内试验	218
10.2.2	现场室内试验	227
10.2.3	改良效果评价及改良参数的确定	228
10.3	膨胀土路堑结构设计	230
10.3.1	概述	230
10.3.2	动载试验	230
10.3.3	路堑基床换填厚度分析	233
第 11 章	过渡段主要技术标准与处理方法	236
11.1	高速铁路过渡段的主要技术标准	236
11.1.1	过渡段的特点和作用	236
11.1.2	影响过渡段不平顺的因素分析	238
11.1.3	路桥过渡段动力学特性评价指标与不平顺控制标准	240
11.2	过渡段的处理原则和方法	242
11.2.1	路桥过渡段变形控制与长度设置原则	242
11.2.2	过渡段的处理原则和方法	244
第 12 章	既有线提速路基主要问题及对策	250
12.1	既有线提速改造中路基的主要问题及对策	250
12.1.1	路基病害整治	251
12.1.2	路基本体的承载力问题及对策	252
12.1.3	路基沉降变形问题及对策	253
12.1.4	路基刚度问题及对策	253
12.1.5	其他对策	254
12.2	高速铁路运营线软土路基沉降处治方法	254
参考文献	256

中国高速铁路正在进入高速发展时代,截至目前,我国已成为世界上高速铁路发展最快、运营里程最长、运营时速最高、在建规模最大的国家,到 2020 年,我国高速铁路将达 1.6 万公里以上。

由弓网、列车(机车或动车、车辆)、轨道、路基(或桥梁、隧道等轨下基础)组成了一个轮轨大系统。构成线路的路基和轨道,作为这一大系统中的子系统,在荷载作用下,两者相互作用、相互影响,从线路供列车运行这一点来看,它们各自所需要的性能是相互依存、相互补充的。

高速铁路建设应达到其系统具有高安全性和可靠性的目标。为实现这一目标,高速铁路必然对轨道结构提出高平顺性和高稳定性的要求,而路基作为轨道基础,其强度、刚度、稳定性以及在运营条件下使线路轨道参数保持在允许的标准范围之内,是确保列车高速、安全、舒适、平顺运行的前提条件。

1.1 高速铁路路基与轨道工程的特点

1.1.1 高速铁路路基工程的特点

高速铁路的出现对传统铁路的设计、施工和养护维修提出了新的挑战,在许多方面深化和改变了传统的设计观念。就路基工程而言,表现出以下技术特点。

1. 控制路基工后沉降是高速路基设计的关键

高速铁路对路基的要求主要体现在对线路的长期稳定性和沉降变形的严格控制上,包括路基在静载作用下的工后沉降和列车长期动荷载作用下的附加沉降。工后沉降是高速铁路设计所考虑的主要控制因素,尤其是路基。一般来说强度不是问题,因为通常情况下路基在达到强度破坏前,已经出现了不能容许的过大变形。

我国对路基工后沉降的标准认识和制定有一个过程。传统的铁路路基是按强度设计的,对路基的变形不作要求,由此带来的经验教训是惨痛的,许多线路运营后就出现相当的病害,铁路工务部门只有通过加大维修工作量来保证列车正常运营。随着路基变形对铁路运行影响的逐步认识,《铁路特殊土路基设计规范》(TBJ 35—1992)第一次对工后沉降提出了要求,而高速铁路对路基的工后沉降更有严格的标准,如 200~250 km/h 时速的客运专线,有砟轨道路基一般地段的工后沉降要求小于 10~15 cm,路桥过渡段的工后沉降小于 5~8 cm。而对于无砟轨道,由于其基础一旦出现变形或破坏,其整治和修复较困难,资金和人力投入很大,维修耗时长,对无砟轨道的变形控制较有砟轨道更严格。我国对无砟轨道的路基工后沉降要求一般不应超过扣件允许的沉降调高量 15 mm;路桥或路隧交界处的差异沉降不应大于

5 mm, 过渡段沉降造成的路基与桥梁或隧道的折角不应大于 $1/1\ 000$ 。可以说, 对路基工后沉降控制的高标准, 是高速铁路路基区别于普通铁路路基的一个最大技术特点。

路基工后沉降包括长期行车引起的基床累积下沉以及路基本体填土和地基的压缩下沉。从设计角度来看, 对路基工后沉降和不均匀沉降的控制主要也是从这三方面着手。

第一是要控制地基的沉降变形。天然地基或加固地基在路堤和轨道结构荷载作用下将会产生沉降。通常情况下, 由路基填土压密下沉、行车引起的工后沉降很小, 因此, 控制路基工后沉降主要是控制地基的工后沉降。

地基引起的工后沉降大小取决于路堤的高度、地基类型、土层性质以及采用的地基加固措施, 也与施工周期等因素有关。特别是对软土、松软土地基而言, 路建成建后, 需延续较长时间沉降才能完成, 因此, 对软土、松软土地基的加固方案直接关系到路基工后沉降能否满足要求。

在我国高速铁路路基的软土、松软土地基处理中, 通常采用桩网、桩筏和桩板结构。桩网、桩筏结构中的桩一般采用 CFG 桩和预应力管桩。桩网结构由桩(可带桩帽)、网(一般采用土工格栅)构成; 桩筏结构由“桩+碎石垫层+钢筋混凝土板”组成, 桩顶设 15 cm 或 20 cm 碎石垫层, 垫层上面通常是 50 cm 厚的 C25 钢筋混凝土板, 因此, 桩网、桩筏结构本质上可归类为复合地基; 而桩板结构由“桩+钢筋混凝土板”组成, 桩一般为预应力管桩, 也可采用钻孔灌注桩等刚性桩, 板通常为 50 cm 厚的 C30 钢筋混凝土板, 桩与板刚性联接, 因此, 桩板结构可认为是一种桩基础, 特殊条件下可以采用桩-梁-板结构。

设计时, 上述结构中的桩应穿透软弱土层, 选择承载力相对较高的土层作为桩端持力层; 根据工程实践, 采用上述结构后一般地基的沉降变形都很小。

路基工后沉降的第二部分是路基本身在自重作用下的压缩变形。这一部分压缩变形量取决于路基高度、路基填料和填筑质量。根据现有的资料分析, 由于高速铁路对路基填料、压实系数和 K_{30} 值等均有严格的要求, 这一部分压缩变形量很小, 其大部分在施工期就已经收敛, 若能组织安排合理的施工和放置工期, 路基本身的压缩沉降可不计入工后沉降。

路基工后沉降的第三部分是路基在列车长期动荷载作用下产生的塑性变形(附加沉降变形)。列车动荷载在路基中产生的动应力在路基面下 3.0 m 通常已很小, 因此, 这一部分附加的沉降变形一般也限于基床, 由于基床表层和底层对填料和填筑质量比基床以下路堤部分要求还要高, 附加变形一般不会超过 5 mm。对低路堤和路堑情况, 特别是软土地区的低路堤, 动力荷载还可能对地基产生影响, 应特别注意动力荷载对其长期稳定性和附加变形的影响。

控制路基沉降变形的关键是控制路基不均匀沉降变形。理论上, 当路基出现均匀沉降变形时, 除了线路高程外, 它对轨道结构的应力、轨面平顺性和行车安全性基本没有影响。但事实上, 由于地基土的工程性质沿线路纵向的变化, 以及不同的地基处理方法, 路基沿线路纵向的沉降变形不可能均匀, 特别是在桥(涵)路、隧路等过渡段, 由于刚性结构物和路基结构物的加固方式不同, 容易产生不均匀沉降。路基结构沿线路纵向过大的不均匀沉降变形, 一方面可能使轨道结构承受附加变形应力, 影响其耐久性甚至安全性; 另一方面路基的不均匀沉降变形降低了轨道的几何平顺性和行车舒适性。

为控制路基的不均匀沉降变形, 设计时对路基一般地段, 通常根据地基条件的变化来确定地基处理方法和设计参数; 对过渡段, 为减低、限制轨道基础的几何和刚度不平顺, 路基结构上采取能同时考虑降低路堤本身在自重作用下的压缩变形和实现刚度平缓过渡效应的方法, 如在刚性结构物后设计倒梯形或梯形的掺水泥级配碎石。在地基处理方法上, 采用变化的处理方案或设计参数。

2. 路基结构形式的变化

为保证路基强度大、变形小,并具有足够的稳定性和耐久性,高速铁路路基结构的形式与传统铁路路基有明显的变化。

高速铁路一般为双线路基,也有路堤、路堑、半路堤半路堑等形式。但由于高速铁路考虑到高速列车相遇时的风压及将来铺设渡线道岔等条件而增大,而且由于高速列车行驶时产生较强的风速,在列车尾部通过时产生轨侧涡流效应而直接影响到在路肩待避作业人员的安全,故还需加大路肩宽度。

高速铁路轨道结构主要类型包括有砟轨道和无砟轨道两种类型。从技术上看,两类轨道结构都能满足高速行车的要求。作为传统轨道结构的重要组成部分,碎石道床在列车重复荷载的作用下,承受来自轨枕的压力和振动,并传递到路基,以及担负抵抗轨枕纵向和横向移动、缓和机车车辆冲击等作用,具有弹性良好、价格低廉、更换与维修方便、吸噪特性好等优点,自有铁路一百多年以来,碎石道床仍保持其旺盛生命力。

高速铁路有砟轨道线路结构,已经突破了传统的轨道-道床-土路基这种结构形式,在高速铁路发达国家,铁路路基基床结构各不相同,有各自的特点。如日本基床表层的选择比较特殊,法国路基结构基床厚度的确定与线路运营养护结合起来,德国路基结构有严格的防冻要求,但都具有强化基床表层的共性,而且都采取了路基基床防水措施,以保护基床下部填土不受水影响。如:日本以沥青层或水硬性级配矿砟防止雨水渗透;德国对路基保护层进行强化;法国则增设防水层以保证路基土不受水侵蚀。我国高速铁路有砟轨道基床厚度3.0 m,基床表层采用0.7 m等级配碎石,这也是与传统铁路基床结构明显不同的地方。高速铁路另一种轨道类型为无砟轨道,我国高速铁路路基上采用的无砟轨道主要有板式轨道和双块式无砟轨道。无砟轨道路基基床厚度目前统一为2.7 m,基床表层由0.4 m级配碎石组成,底层厚2.3 m。在路基与其他结构的连接处,为保证差异沉降小和纵向刚度均匀,过渡段路基的结构形式与一般地段不同(详见本书第11章)。

为控制路基工后沉降和保证路基刚度,高速铁路对路基填料及压密标准较传统铁路有更严格的要求,并且对路基各部位的地基系数 K_{30} 、动态变形模量 E_{vd} 或变形模量 E_{v2} 有严格的要求。

3. 与列车-轨道系统相匹配的路基刚度是实现列车高速和舒适运行的根本

构成线路的路基和轨道,在荷载作用下,两者相互作用、相互影响,但从线路供列车运行这一点来看,它们各自所需要的性能是相互依存、相互补充的。

与高速列车、轨道系统相匹配的路基刚度问题,不仅关系到高速列车运行的舒适性和安全性,而且还直接影响到路基的设计、施工和线路维修标准。路基的刚度过大或过小都不利于高速行车或各部件的使用寿命。刚度小,会影响高速行车的速度、平稳和安全;刚度大,则轨道、车辆系统振动加剧。对路基而言,既要为轨道提供列车运行时的较小弹性变形基础,又必须具有适宜的刚度以降低系统的动力作用。路基刚度重要性,另一方面表现在不同结构类型之间的过渡段上,包括路桥过渡、路涵过渡、路隧过渡、堑堤过渡、无砟轨道与有砟轨道的过渡等。过渡段由于下部结构本身刚度差别大,线路刚度产生突变,高速运行下轮轨间动力作用大大增加,而且还会直接影响行车安全性和舒适性。因此,过渡段结构与施工都应围绕实现纵向刚度均匀来进行。

1.1.2 高速铁路轨道工程的特点

高速铁路究竟应采用哪种轨道结构,是有砟轨道还是无砟轨道?为适应高速铁路运输

的快速、舒适、安全三大要素,无论哪种轨道都应具备以下基本性能。

1. 高平顺性

高平顺性是高速铁路对轨道的最根本要求,也是建设高速铁路的控制性条件。这是因为轨道不平顺是引起列车振动、轮轨作用力增大的主要原因。在高平顺的轨道上,高速列车引起的振动和轮轨间的动作用力均较小,行车安全和平稳性、舒适性能得到保证,轨道和机车车辆部件的使用寿命和维修周期也较长。因此,为保障高速行车的平稳、安全和舒适,必须严格控制轨道的平顺性。

高速铁路轨道的高平顺性主要体现在以下几个方面:①钢轨的原始平直度公差要小;焊缝的几何尺寸公差要小;②道岔区不能有接头轨缝、有害空间等不平顺;③高低、轨向、水平、扭曲和轨距偏差等局部孤立存在的小平顺幅值要小;④敏感波长和周期性不平顺的幅值要小;⑤轨道不平顺,各种波长的功率谱密度值都要小。

要达到高速铁路轨道高平顺性,必须满足以下条件:

(1) 路基设计和施工必须满足路基的工后沉降小、不均匀沉降小,在动力作用下变形小、稳定性高等要求。高平顺性、高稳定性的路基是确保轨道高平顺性的前提条件。

(2) 桥梁的动挠度等变形必须满足高平顺的要求。

(3) 道床必须选用硬质、耐磨的道砟,并在铺枕前整平压实。选用硬质、耐磨的道砟,并压实道床,对于保证平顺性、提高开通速度、减少道床残余变形积累、降低轨道的养护维修工作量非常有效。近十多年来国外重载、高速铁路均已采用硬质、耐磨的道砟。

(4) 严格控制轨道的初始不平顺。轨道初始不平顺是运营后各种轨道不平顺发生、发展和恶化的根源,若不进行严格控制,将造成运营过程中难以处置的无穷后患。根据欧洲的研究,轨道的初始不平顺状态对以后轨道长期的平顺状态和维修工作量有决定性影响。初始状态好的轨道,维修周期长,能长期保持良好的水平;初期状态不好的轨道,不仅维修周期短,即使增加维修作业次数也很难改变轨道初期“先天”的不良水平。日、法、德、瑞等国都制定了非常严格的轨道铺设精度标准。因此,要提高轨道的铺设精度标准,严格控制轨道的初始不平顺。

欧洲时速 200 km/h 区间以上轨道铺设精度标准如表 1-1 所示,日本新干线建设时的铺设精度标准如表 1-2—表 1-4 所列。

表 1-1 欧洲铁路时速 200 km 区间轨道铺设精度标准

不平顺种类	瑞典国铁	西德联邦铁路	法国国铁	西班牙铁路
水平/mm	2	2	3	4
扭曲(三角坑)	2 mm	—	1‰(每 3 m 测量基线)	1.3‰
高低	2 mm	2/5 m	3 mm	3 mm
轨向/mm	2	2	2	3
轨距/mm	±2	—	—	±3

表 1-2 日本新干线有砟轨道的铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	轨距
标准值/mm	3(10 m 弦正矢)	3(10 m 弦正矢)	2	±2

表 1-3 日本新干线无砟轨道的铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	轨距
标准值/mm	2(10 m 弦正矢)	2(10 m 弦正矢)	1	±1

表 1-4 日本新干线道岔的铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	轨距
标准值/mm	3(10 m 弦正矢)	2(10 m 弦正矢)	2	±1

结合我国铁路的国情,京沪高速铁路轨道平顺度铺设精度标准如表 1-5—表 1-7 所列。

表 1-5 京沪高速铁路有砟轨道平顺度铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	扭曲(2.5 m)	轨距
幅值/mm	2	2	2	2	±2
弦长/m	10		—		

表 1-6 京沪高速铁路无砟轨道平顺度铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	轨距
幅值/mm	2	2	1	±1
弦长/m	10		—	

表 1-7 京沪高速铁路道岔平顺度铺设精度标准

项目	高低	轨向	水平	轨距
幅值/mm	2	2	2	±1
弦长/m	10		—	

轨道维修养护质量的优劣是优化轮轨效应的关键,也是确保行车安全和旅客舒适度的重要因素之一。因此,高标准设计、高标准施工和高质量的维修管理是高速铁路的重要技术特点。日本、法国、德国高速铁路轨道不平顺管理主要标准如表 1-8 所列。

表 1-8 日本、法国、德国高速铁路轨道不平顺管理标准

	A			B			C			D		
	日	法	德	日	法	德	日	法	德	日	法	德
高低/ mm	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
	≤4	3	6	≤6	5	(10) 14	7	10	20	15	15	35
轨向/ mm	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>
	≤3	2	6	4	6	(10) 14	4	8	20	9	12	35

注: A—新线铺设或维修作业后验收目标值。运营期间无须评定。

B—需要编制维修计划的管理目标值。德国在达到“()”内值时,应进行详细评定。

C—日本为舒适度管理目标值;法国、德国为限期维修或紧急补修目标值。

D—限速运行目标值。德国为安全极限值;日本新干线为舒适度目标值。

a, *b*—测量基线弦长。在日本 *a* 和 *b* 均为 10.0 m;法国分别为 12.2 m 和 10.0 m;德国分别为 2.6/6.0 m 和 4.0/6.0 m。

各国还对轨道的水平、三角坑等不平顺制定了管理目标值。试验研究结果表明,长钢轨长波不平顺对高速行驶时的旅客舒适度影响较大,法国、日本等国还规定了弦长为30~40 m的管理标准。法国高速铁路在对轨道局部不平顺评价、管理的同时,还采用300 m区段内轨道不平顺绝对值的滑动平顺值,即所谓综合指标管理方法,其标准为高低、水平0.3~0.6 mm。此外,各国高速铁路还通过测定车体和转向架振动加速度来评价轨道的质量状态,如日本新干线规定车体振动加速度为:垂向0.25g、横向0.20g(舒适度管理目标,均为全振幅)。

运用检测车等现代化设备对轨道质量进行定期和不定期检查,已成为各国高速铁路质量管理措施的重要组成部分,检测结果已成为分析、评价轨道质量和编制维修计划的基本依据。图1-1为日本“黄医生”轨道电气综合检测车,由JR东海及西日本公司开发,1999年投入运用,7辆编组,最高速度285 km/h,管辖东海道、山阳新干线的检测。

总之,高速铁路是否能够安全、平稳、舒适运行,是通过轨道的平顺性来体现的,但真正影响高速列车安全、平稳、舒适运行的不仅仅是轨道,而是由路基、桥梁和轨道等组成的基础设施整体。因此,高速铁路各结构物的设计,不仅要强调各结构物本身的高平顺性和稳定性,还要强调各结构物组合后的平顺性和稳定性,要对车、线、桥或路基的组合进行动力仿真分析,确保高速列车安全和舒适地运行。



图1-1 日本“黄医生”轨道电气综合检测车

2. 高可靠性和长寿命

高可靠性主要是指轨道结构保持平顺性,维持线路正常运营的能力。高速列车的轴重较轻,在高平顺性条件下所产生的轮轨动力附加荷载也较小,因而轨道各部件的静强度指标通常易于得到满足。高速列车荷载的特点主要在于高频冲击和振动,这种高频荷载容易造成扣件松动、轨下胶垫磨损、混凝土轨枕承轨槽破损,特别是有砟轨道中道砟破碎、粉化,道床沉降和变形。所有上述现象都会导致轨道结构不均、轨道弹性不匀,并最终引起轨道中、长波不平顺,导致轨道平顺性破坏,影响线路的正常运营。

长寿命,指的是轨道结构有较长的维修和大修周期。由于高速铁路的行车密度大,速度高,在行车间隔中人员不可能上道,只能利用天窗时间进行轨道的检查和维修。因此,其维修工作量必须少,维修周期必须长,才能保证不中断行车和维持列车的正常运行。大修要求的天窗时间更长,天窗次数更多,更应尽量延长其周期,减少大修次数。

3. 高稳定性

采用跨区间无缝线路是提高轨道结构连续性、均匀性的重大举措。在跨区间无缝线路中,道岔的连续焊接会使道岔区基本轨产生附加的温度力,从而使结构、受力和变形更为复杂的道岔区成为高速铁路稳定性的控制区;高速列车的高频冲击和振动会使轨道结构的纵、

横向阻力,即轨道自身保持稳定的能力降低;而高速列车的蛇行和横向振动又会使作用在轨道上的横向荷载加大,增加轨道横向失稳(胀轨、跑道)的可能性。因此,高速铁路轨道的稳定性仍是值得特别关注的课题。

1.2 路基与轨道工程技术的发展和展望

1.2.1 路基工程技术的发展和展望

20世纪90年代前,我国铁路旅客列车最高运行速度一直徘徊在80~110 km/h。由于设计和施工的标准低,加上长期以来存在着重桥隧轻路基的观念,路基填筑大多靠近近取土,移挖作填完成。路基填料差,施工质量不能保证,运营后都出现相当的病害。铁路工务部门只有通过加大维修工作量来保证列车正常运营。

为了使铁路交通系统充分发挥在我国国民经济发展中的“先行”作用,解决运能与运量日趋严重的矛盾,20世纪90年代中,铁道部做出了分步骤在繁忙干线上实现提速的决定。提速已作为重大发展战略列入我国铁路发展计划之中,并将指导路网的改造和建设。截至2006年,铁道部已实施6次大提速,涉及的提速线路总里程达2万公里左右。

在一些线路提速中,路基已成了提速的关键因素。随着提速范围的扩大,列车最高速度不断提高,路基暴露出的问题会越来越严重。首先,由于行车速度的提高,提速后行车密度加大,列车对路基产生的动应力增加,特别是原有的路基病害地段,动应力加大会使病害加重,反过来又会使轨道状态恶化,造成线路的恶性循环,影响行车安全;其次,提速后列车平稳性指标和车体振动加速度是作为提速评判的重要指标,要求路基具有更高的强度和更好的均匀性,并保持良好状态。

铁路路基是轨道结构的基础,不仅要承受线路上部结构的重量,还要承受列车荷载的重复作用,是线路最薄弱最不稳定的环节。列车速度的提高对路基在强度、刚度、变形、水稳定性及运营养护维修等方面提出了新的要求。总的来说,若要保证提速的安全性及长期稳定,应从根除路基病害、提高路基基床强度、减少变形、增强路基的刚度均匀性几个方面考虑,需要解决既有路基状态评估、路基基床加固、路堤帮宽和新旧路堤、既有路桥(涵)过渡段等问题。经过几次大提速的经验,提出了第六次提速200 km/h提速改造工务技术指导性意见。

首先,路基应消除病害,无基床翻浆、下沉外挤、道砟囊、排水不良等病害,边坡防护良好,地基稳定。站场应设置排水系统,道岔区的排水应畅通;其次,对既有路基基床表层承载力现状进行调查分析,根据既有路基状态评估情况,适时采用适宜的加固措施,如:换填、注浆、封闭、挤密桩、搅拌桩、土工合成材料加固及土质改良等加固方案;对帮填路基地段,路基填筑应开挖台阶分层压实,保证线路横向均匀与一致,当帮填宽度小于3 m时,应在台阶铺设土工格栅,避免新旧路基结合部出现滑动面,新路基面应与旧路基面做好衔接,设置排水坡及排水设施,保证排水畅通;未经特殊处理或专门设置的既有线路桥和路涵过渡段应作加固处理,加固方案可采用注浆、挤密桩、搅拌桩、换填、封闭等;对于年沉降量大于4 cm的一般路基路段和年沉降量大于2 cm的路桥、路涵等过渡段应进行地基加固。

铁路大提速提高了运输效率,带来了明显的社会效益和经济效益。

中国高速铁路正在进入高速时代,截至目前,我国已成为世界上高速铁路发展最快、运

营里程最长、运营时速最高的国家,到2020年,我国高速铁路将达16 000 km以上。高速铁路的出现,已彻底改变了以往重桥隧轻路基的观念,其设计理念已发生了根本性的转变,真正地把路基作为一种结构物来设计。

2010年我国出版发行了《高铁设规》(TB 10621—2009),填补了我国高速铁路设计规范的空白,其路基部分最大程度地吸收了我国多年来围绕高速铁路开展的一系列科学研究成果以及多条高速铁路的建设、运营经验,在《新建时速300~350 km客运专线铁路设计暂行规定》(铁建设[2007]47号)基础上进行了较大幅度的修改和完善,体现了目前我国高速铁路路基设计技术的最新进展和最高水平。对路基设计标准修改的工作基础、技术背景和创新点,周诗广博士在《高速铁路路基设计的新特点解析》一文中作了深刻的阐述。周诗广总结其创新点主要有以下几点。

1. 明确提出了路基工程的土工结构物设计新理念

根据工程的重要性和可修复性,高铁设计规范首次明确规定了不同路基工程的设计使用:路基主体工程中的地基处理、基础结构及支挡结构必须具有足够的强度、稳定性和耐久性,其设计使用年限为100年,路基本体虽然不是混凝土结构,其强度和变形性能趋于稳定,一般不随时间而衰减,且不存在疲劳破坏问题,其设计年限也为100年;路基边坡防护结构为60年;电缆槽、路基排水设施等小型混凝土结构为30年。

高速铁路对路基填料的材质、级配、水稳性和密实度有着很高的要求,填料最大粒径的限制对于保证路基工程质量非常重要。根据既有高速铁路施工经验,我国铁路对填料的划分较粗,尤其是粗颗粒填料在实际施工填筑中存在组别合格但级配不良,直接碾压不能达到所规定的压实控制指标等问题。因此,《高速铁路设计规范(试行)》(以下简称《高铁设规》)在《新建时速300~350 km客运专线铁路设计暂行规定》(以下简称《客专暂规》)基础上进一步对填料粒径进行控制。与《客专暂规》相比,《高铁设规》中路基填料最大粒径,在基床以下路堤内由150 mm修改为75 mm,在基床底层由100 mm修改为60 mm。结合基床表层级配碎石45 mm的最大粒径要求,填料最大粒径在路基本体的多层结构中形成了合理匹配,也解决了地基系数 K_{30} 及变形模量 E_v 检测方法要求与填料粒径不匹配的问题。

水是铁路路基强度和稳定性减低的重要因素,需要对路基排水设施进行合理的设计。排水设施合理设计中一个重要因素是确定设计降雨重现期。设计降雨重现期与铁路的重要性、各项排水设施的排水目的和类型以及浸水或水淹对铁路使用和周围地区的影响程度有关,将影响工程造价。《高铁设规》修改了沿袭至今的桥涵设计洪水频率概念,通过对水利、公路、桥涵和铁路工程降雨重现期的对比分析,规定高速铁路排水设施设计降雨的重现期为50年。这为准确计算设计流量,从而合理确定排水设施的结构尺寸创造了有利条件。

2. 优化调整了路基填筑的压实标准

《客专暂规》的编制阶段,由于我国客运专线的建设、运营经验相对匮乏,路基填筑的压实标准体系中同时纳入了德日两国的压实指标,很好地控制了路基填筑质量,但同时其检测体系庞大,检测繁复等弊端也逐渐显露出来。随着我国诸条高速铁路的顺利建成和成功运营,基于经验的积累,特别是铁道部针对高速铁路路基压实标准体系的优化工作,开展了大量专项研究。结合研究成果,《高铁设规》遵循在保证路基压实质量的前提下,最大程度地减少压实指标和现场检测工作量的原则,对路基填筑的压实标准在以下几方面进行了修改完善:

- (1) 路基的压实指标仍采用物理和力学双指标控制;
- (2) 取消《客专暂规》中对级配碎石和粗颗粒土的物理指标孔隙率规定,物理指标统一