

现代铁路轨道

范俊杰 编著

中国铁道出版社

2001年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书总结了作者几十年来在铁路轨道方面的教学和科研工作,及长期为现场工程技术人员讲学的先进经验。本书涵盖了现代铁路轨道方面的热点和难点问题,既满足现场实际需要,又有相当高的理论水平。主要内容包括高速铁路轨道、跨区间无缝线路、重载铁路轨道、脱轨分析和防振减噪轨道等。

图书在版编目(CIP)数据

现代铁路轨道/范俊杰编著. - 北京:中国铁道出版社, 2001. 1

ISBN 7-113-03930-8

. 现... . 范... . 轨道(铁路)-研究
. U213. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 51467 号

书 名:现代铁路轨道

著作责任者:范俊杰

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:许士杰

封 面 设 计:陈东山

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:850 mm× 1 168 mm 1/32 印张:8.75 字数:226 千

版 本:2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4 000 册

书 号:ISBN 7-113-03930-8/TU·644

定 价:19.00 元

版权所有 盗印必究

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。

序

世纪之交, 铁路面临改革与发展两大主题。铁路技术发展的目标是逐步建立客运快速、货运快捷和重载、行车高密技术协调发展, 高新技术与适用技术并重, 不同层次技术装备并存的具有中国铁路特点的技术体系。

铁路线路设备作为重要的基础设施, 面临快速和重载的双重压力。截至 1999 年末, 我国年通过总重大于 $25 \text{ Mt} \cdot \text{km}/\text{km}$ 的线路约占正线延展的 58.3%, 其中通过总重大于 $50 \text{ Mt} \cdot \text{km}/\text{km}$ 的线路约占正线延展的 23.1%。作为全国路网平均通过总重, 可称世界之首。2000 年铁路实行了第三次大范围提速, 在 10 月 21 日开始实施的新运行图, 最高时速超过 $120 \text{ km}/\text{h}$ 的线路近万公里, 约占正线延展的 12%; 最高时速达到或超过 $160 \text{ km}/\text{h}$ 的区段有沪宁、京秦、广深、京津。值得一提的是, 除广深线外, 时速超过 $120 \text{ km}/\text{h}$ 的区段基本都是重载区段。

客运快速和货运重载对线路设备的结构及修

理的适应性产生了许多新的课题。客运快速要求轨道结构较高的平顺性,而货运重载又使轨道结构产生剧烈的变形,因此,在结构强化和修理优化方面都需做出艰巨的努力。

范俊杰教授是我国铁路资深专家,不仅在理论上有很高的造诣,而且经常深入现场,解决了大量的实际问题。《现代铁路轨道》一书是他集多年科研和教学的经验写成的,起点较高,内容丰富,对具有一定基础知识和理论水平的技术人员和研究人员,无疑是一本好的教材。希望本书在提高科研和现场技术人员的水平,解决现场实际问题方面发挥作用,同时为领导部门的决策提供帮助。

2000年11月

前 言

随着我国国民经济与铁路事业的蓬勃发展,工务设备日益更新,科技含量日益加大,工作任务也日渐繁重。为迎接工务部门面临的机遇与挑战,有关部门认为,工务工程技术人员的科技知识需要更新,基础理论需要加强,创新意识需要提高,工务管理与技术人员的技术理论再教育工作已刻不容缓。

作者长期从事铁路轨道方面的教学与科研工作,并多年为现场工程技术人员讲学。在与现场工程技术人员的接触中,深为他们刻苦钻研和求知若渴的精神所感动,也略知他们的困难与需求。因此,总想从理论与实践的结合点上切入,为他们写一些既满足现场实际工作需求又有一定理论水平,既立足于目前的技术与理论高度又能对学科今后的发展趋势有所论述的技术资料,以期为工务工程技术人员的知识更新工作作一点贡献。然而,由于这一工作的难度及本人水平与时间所限,拖至今日,才在各级领导及现场工程技术人员的鼓励下,历经四个月完成此书。当我停笔合卷时,感慨良多,既为了却多年心愿而欣慰,也为该书能否满足需求而忐忑。水平所限,错漏难免,敬请读者指正。

该书的理论起点是大学本科毕业后的轨道知识水平。因此,凡在大学本科学习中应掌握的内容,本书多未重述,以节省篇幅,请读者谅解。正因如此,本书除适合工程技术人员和科研人员阅读外,也可作为大学工程硕士研究生及其他研究生的参考教材。

范俊杰

2000年9月

目 录

第一章 绪 论.....	1
第二章 高速铁路轨道.....	5
第一节 高速与快速铁路荷载特点.....	5
一、垂直荷载	5
二、横向水平荷载	8
三、冲击力.....	10
四、振动荷载.....	11
五、纵向荷载.....	12
第二节 高速轨道结构类型	13
第三节 高速铁路轨道结构	14
一、有碴轨道.....	14
二、高速铁路钢轨的波形磨耗.....	29
三、道 床.....	31
四、无碴轨道.....	35
第四节 高速铁路线路参数的计算与分析	51
一、最小曲线半径.....	51
二、缓和曲线.....	59
三、夹直线与圆曲线最小长度.....	61
四、线路纵坡与竖曲线半径.....	63
第三章 跨区间无缝线路	67
第一节 概 述	67
一、普通无缝线路.....	68
二、区间无缝线路.....	68

三、跨区间无缝线路.....	68
第二节 跨区间无缝线路的结构特点	69
一、跨区间无缝线路两端的结构处理.....	69
二、绝缘接头采用胶接型式.....	72
三、道岔焊成无缝道岔.....	72
四、轨道采用重型轨道结构.....	73
第三节 无缝道岔	73
一、无缝道岔的计算参数.....	75
二、无缝道岔的计算理论.....	79
三、无缝道岔的计算分析	101
四、无缝道岔的试验研究	110
第四节 跨区间无缝线路的设计、铺设和养护维修	114
一、跨区间无缝线路的设计	114
二、跨区间无缝线路的焊接铺设	124
三、跨区间无缝线路的维修养护	131
第四章 重载铁路轨道.....	136
第一节 概 述.....	136
第二节 重载铁路轨道荷载分析.....	136
一、轨道受力与变形的理论分析	137
二、轨道破损分析的经验公式	142
第三节 轮轨接触理论与蠕滑理论简介.....	145
一、轮轨接触理论	146
二、蠕滑理论简介	175
第四节 重载铁路轨道结构.....	184
一、重型轨道结构	184
二、采用强韧的轨道部件	186
第五节 重载与高速铁路轨道的维修特点.....	202
一、重载铁路轨道的维修特点	202
二、高速铁路轨道的维修特点	203

第五章 脱轨分析与防振减噪轨道.....	208
第一节 脱轨分析.....	208
一、曲线脱轨分析	209
二、列车横向振动脱轨	233
第二节 防振减噪轨道.....	237
一、噪声与振动的基本知识	238
二、铁路振动与噪声的控制	249
三、防振减噪轨道	261
参考文献.....	268

第一章 绪 论

自从 1825 年英国采用蒸汽机车进行客货运输以来,全世界已建成 300 多万公里的铁路。它曾经或现在依然是许多国家的主要交通工具。在这 175 年的铁路发展过程中,创造了很多工程建设的奇迹和“之最”;如秘鲁建成了海拔 4 818 m 的世界最高铁路,其中 Galera 车站高出海平面 4 783 m,成为世界上最高的车站。在澳大利亚,有一条线路具有长达 528 km 的直线路段,堪称世界之最。桥隧结构、海底隧道更是创造了各种奇迹,其中也包括中国铁路所作出的重大贡献。然而随着科学技术的进步,世界经济的发展,各国铁路所面临的挑战也越来越严峻,铁路的市场份额不断被其他交通工具占据,经济效益不断滑坡。在这种情况下,各国铁路为扭转铁路运输的被动局面,进行了大量的调查研究,确立了货运发展重载运输,客运发展高速铁路的基本模式,使高速(提速)与重载运输成为铁路发展的两大趋势。国外研究成果表明,在 300 km 以内的近距离,如果铁路的平均速度达不到 100 km/h 就无法与高级路面的汽车运输竞争,在 500 ~ 800 km 的中距离内,列车速度达不到 250 km/h 就无法与飞机竞争。中国铁路近年的提速经验也表明,在中国这块辽阔的土地上,夕发朝至的快速客车是很有竞争力的。铁路没有速度优势就失去了竞争的基础。

提高列车速度涉及到众多技术领域,技术含量较高。许多国家在这方面作了大量的研究工作,我国铁路近年来也进行了研究开发,取得了不少成果。根据目前的研究、发展状况来看,若按列车行车速度来划分铁路等级,可分为四个等级,即普通铁路、快速铁路、高速铁路和超高速铁路(表 1- 1)。也有的文献把铁路划分为普通铁路、高速铁路和磁悬浮铁路。

表 1- 1 按速度划分的铁路类别

铁路类别	最高行车速度	列车类型	相应线路
普通铁路	120 km/h 以下	普通常规列车	既有线路
快速铁路	120 ~ 200 km/h	准高速或提速列车 摆式列车	既有线路或由既有线路 改造的线路
高速铁路	200 ~ 350 km/h	高速列车 高速摆式列车	新建高速线路 既有线改造线路
超高速铁路	350 km/h 以上	磁悬浮列车	特制轨道线路

自从 1964 年 10 月 1 日世界上第一条高速铁路——日本东海道新干线开通以来, 列车的最高运营速度已由 200 km/h 提高到 300 km/h, 试验速度也由法国铁路创造了 515.3 km/h 的世界记录, 在高速行车技术领域有了长足的进展。但是随着列车运行速度的提高, 自有铁路以来就形成的轮轨运行系统日益显现出它的缺陷和不足。首先, 随着行车速度的提高, 轮轨之间的粘着系数要大幅度降低, 从而影响机车的牵引能力。例如, 低速时轮轨之间的粘着系数为 0.2 ~ 0.25, 而当速度达到 160 km/h 时, 粘着系数降到 0.13 左右, 而当速度达到 300 km/h 时, 粘着系数只有 0.03 ~ 0.05。其次, 研究表明, 列车运行时承受的空气阻力与速度的平方成正比, 速度越高, 空气阻力消耗的机车功率也越大。此外, 高速产生的噪声、振动也较严重。因此对轮轨运行系统来说, 应当有一个盈利最高的速度, 这就是所谓的经济速度, 各国提出的经济速度的标准不尽相同: 英国认为经济速度为 230 km/h, 法国认为经济速度应是 280 ~ 300 km/h, 德国提出的经济速度是 270 km/h, 国际铁路联盟则认为经济速度为 270 ~ 300 km/h 较宜。但不管何种标准, 一般认为当 $v > 350$ km/h 时再采用轮轨运行系统就不经济, 这时需采用磁悬浮运行系统。

近 30 多年, 许多国家都投入大量的人力和物力进行磁悬浮列车的研究, 但真正持续下来并达到实用程度的只有日本与德国的磁悬浮列车。简单来说, 磁悬浮列车是利用磁铁相斥(相吸)的原理把列车悬浮起来, 然后再用直线电机原理推动列车前进。目前磁悬

浮列车的发展有两条技术路线:日本的超导电动型磁悬浮技术和德国的常导电磁型磁悬浮技术。超导磁悬浮的悬浮高度可达 10 cm,而常导磁悬浮的悬浮高度仅为 1 cm,超导磁悬浮技术适用范围更大些。美国正在研究永久磁铁的磁悬浮列车,有可能会成为最安全、最便宜的磁悬浮列车。

磁悬浮铁路不但要采用众多的高新技术,而且价格昂贵,即使日本、德国这样的经济发达国家,也迟迟没有建造实际的运营线路,而只建成了一些试验段。日本在 1977 年即建成 7 km 的试验段进行各种试验,于 1979 年创造了行车速度为 517 km/h 的磁悬浮列车世界最高行车记录,工程与试验费用总共耗费 15 ~ 20 亿美元。1996 年日本又建成全长 18.4 km 的山梨试验线,其中有 16 km 隧道,该试验段耗资 28 ~ 30 亿美元。原计划把山梨试验段向两端延伸至 42 km,已规划把该试验段作为计划修建的东京——大阪磁悬浮铁路的一部分。规划中的东京——大阪间磁悬浮铁路全长 500 km,双线,线间距 5.8 m,最小曲线半径为 8000 m,最大线路坡度为 40‰。全线隧道长度占全长的 87%,计划最高行车速度为 550 km/h。德国 1979 年首次在展览会展出磁悬浮列车并进行运营表演。1983 年建成 7 km 长的磁悬浮铁路试验段,1984 年延长至 21.5 km,后拆除。1987 年又建成 31.5 km 长的新的试验段,最高试验速度达到 450 km/h,共耗资 15 亿美元,计划修建柏林——汉堡磁悬浮铁路,全长 293 km,计划速度 430 km/h。日本与德国虽计划修建较长的磁悬浮铁路,但争议较大,目前尚未最后落实。

综上所述,从经济与技术角度看,大多数国家仍主要发展轮轨体系的高速与快速铁路,我国也不例外。当然,对磁悬浮铁路技术进行研究与跟踪也属必要,以便跟上世界研究步伐。但从我国目前技术水平与经济实力来看,距真正修建磁悬浮铁路尚有时日。

为了解决大宗货物的合理经济运输问题,人们研究、开发了重载运输模式。重载运输模式主要适合于大宗、散装的矿石、石油、煤炭等货物的运营,对一些工业成品及鲜活食品则需发展按客运规

律安排运行图的快速货物运输。不言而喻,承担重载运输的铁路应当称为重载铁路。而重载铁路应符合什么条件?1994年6月国际重载运输理事会对此作了定义。该理事会认为,若一条铁路满足下列条件之二者,就可定义为重载铁路,其轨道结构应按重载铁路要求配置。

1. 经常、定期开行或准备开行总重至少为 5 000 t 的单元或组合列车;
2. 在长度大于 150 km 的线路区段上,年计费货运量至少达 2 000 万 t;
3. 经常、正常开行或准备开行轴重不小于 25 t 的列车。

依据这一定义,我国大同至秦皇岛的大秦铁路等运煤专线属于重载铁路。同时京广、京沪、京哈等一些开行 5 000 t 及列车的提速线路也应属于重载铁路范围。这些线路既有较高速度的旅客列车运行,又开行 5 000 t 及以上的重载列车,线路的负担较重,给维修养护工作带来不少困难。

随着我国经济的发展,航空、公路、水运和管道运输日益显示出强大的竞争力,使中国铁路面临着严峻的考验。然而铁路近年来围绕着提速与重载,采取了一系列技术、经济和服务的改革措施,已经扭亏为盈,正面临着难得的机遇和发展前景。

第二章 高速铁路轨道

轨道结构是直接承受列车荷载的部件,因此任何类型铁路轨道的部件组成都应适应相应的列车荷载,使轨道结构能够提供一个平滑的运行轨面,以保证列车安全、平稳地以规定速度运行。所以在探讨高速与快速轨道结构问题时,首先应了解这种铁路上运行列车的荷载特点,以便针对这些特点确定轨道结构及其相应的线路维修养护方法。

第一节 高速与快速铁路荷载特点

由于列车直接运行在轨道上,因此影响列车荷载的诸多因素也制约着轨道荷载,如列车速度、轴重、性能及走行部分的状态都会影响轨道承受的荷载,而且由于轮轨相互作用的特点,轨道自身的状态也会影响列车的运行品质,进而使轨道承受的荷载发生变化。因此进行轨道设计与检算时就很难像设计桥梁那样能够确定一个固定的“标准活载图式”来进行有关计算。必须针对行车的不同情况与特点综合考虑,以确定各种状态下的荷载特点。

无论何种轨道荷载,按其作用方向可划分为垂直荷载、横向荷载和纵向荷载。

一、垂直荷载

在研究高速与快速铁路的垂直荷载时,首先应把速度因素作为主要环节进行探讨。

我国在 20 世纪 70 年代通过大量的试验研究,提出速度不超过 120 km/h 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。然而随着我国铁路提速工作的普遍展开、时速 200 km 秦沈客运专线的修建、以及京沪高速铁路的研究设计,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,又列出了高速列车的动力附加系数,详见表 2- 1。由于没有进行大量、深入的研究,表列系数仅供设计提速或高速铁路轨道时参考。今后还需根据中国铁路的情况修改、完善。

表 2- 1 轨道设计荷载参数

参 数 类 别	设计最 高速度 (km/h)	轴重 $2P_0(t)$		轮径(mm)		速度动力附加系数		
		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	19.5	14	1 050	840	0.15 ~ 0.22	0.32 ~ 0.41	0.75 ~ 1.00
中速列车	200	23	16	1 050	840	0.15 ~ 0.22	0.32 ~ 0.41	-

根据动力附加系数可求出轨道的设计动荷载为

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

式中 P_j 为列车的静轮重或静轴重。

各国都有不同的计算轨道承受的动轮重(设计轮重)的方法。对高速铁路来说,具有代表性的是日本与德国铁路的计算方法。

日本铁路采用不同情况分类计算的方法:

(1) 常用的正常设计轮重

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

式中 \quad 为速度系数,高速铁路 $\quad = 1.45$,既有铁路 $\quad = 1.3$ 。

(2) 考虑车轮有最长为 75 mm 的扁疤时,设计轮重为

$$P_d = 3P_j$$

(3) 考虑到曲线上作用有横向力时,采用异常情况的设计轮重:

$$P_d = 4P_j$$

德国铁路在考虑设计动荷载与静荷载的关系时,还顾及了列

车荷载的正态分布规律、轨道状态及列车类型,是在大量试验研究基础上考虑较为全面的计算公式:

$$P_d = P_j(1 + t \cdot s) \quad (2-3)$$

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%

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 $s = 0.1$;

轨道状态一般 $s = 0.2$;

轨道状态差 $s = 0.3$ 。

为速度系数

$v \leq 60 \text{ km/h}$ $= 1$;

$v > 60 \text{ km/h}$ $= 1 + \frac{v-60}{380}$ (客车);

$= 1 + \frac{v-60}{180}$ (货车)。

德国公式是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,但对轨道状态对列车荷载的影响却进行了充分的考虑,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的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,相当于速度为250 km/h时德国公式计算值。相比之下德国公式应用范围更广也更加合理一些。

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:该高速路网的允许静轴重为17 t,在 $v = 300 \text{ km/h}$ 时正常维修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 $\lambda = 1$ 。

综上所述,在我国快速与高速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。而在检算既有线轨道结构时,可采用德国公式进行计算。

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脱轨危险性评估的重要数据。通常把轨道承受的水平荷载分为两类分析:一类为用来进行轨道设计、检算及评估列车脱轨危险的横向集中作用力 Q , 另一类为评估轨道横向移动的 2 m 长轨道范围内的位移阻力 S 。

(一) 横向力 Q

根据各自的铁路运营状况,各国规定了不同的横向荷载 Q 的计算方法。

日本:

1. 进行轨道设计时, $Q = 0.8P_j$, P_j 为静轮重;
2. 当轨道承受反复横压作用时,可用下式检算轨道

$$Q = 0.4P_j (\text{或 } 0.6P_j)$$

德国:

$$Q = 0.6P_j$$

可按上式进行轨道的设计、检算。

国际铁路联盟:

暂定为 $Q = 60 \text{ kN}$

中国:

有的文献认为 $Q = 100 \text{ kN}$ 较为保险,但我国未在这方面作出权威规定。参照其他国家的规定, $Q = 0.6P_j$ 较为合适。

上述 Q 值在评价列车脱轨危险性时要与垂直荷载综合评价,即按脱轨系数 Q/P 进行评估。由于列车脱轨涉及的问题较多,本

书将在其他章节专门讨论这一问题。

(二) 轨道横向位移阻力 S

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。显然,S 值应是和轨道结构和部件有关的参数,而且应当通过试验来确定。当前在国内外文獻上广泛引用的经验公式为

$$Q(\text{或 } S) = (10 + P_0/3) \quad (\text{kN}) \quad (2-4)$$

式中 $Q(\text{或 } S)$ ——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;

——系数,机车、客车、动车, = 1; 货车, = 0.85。

货车 值小的原因是考虑了货车尺寸及维修状态具有较大的离散性,为安全计,需降低 值。

但需要指出的是,上述公式是在下列轨道条件下由试验结果推导出来的:

钢轨 46 kg/m 轨;

轨枕 木枕,轨枕间距为 65 cm;

道床 碎石道床。

该公式是由法国试验推导出来的。不难理解,当轨道结构和轨道部件与上述试验轨道条件不符时,至少公式中 系数应当改变,应当考虑轨道结构对 S 值的影响。根据北方交通大学的试验资料并参照国外有关资料,当轨道中钢轨为 60 kg/m 钢轨、轨枕为混凝土枕且轨枕间距不大于 60 cm 时,式(2-4)中的 值取 1.5 较为合适。

根据国内外的试验资料,由于高速列车均为客车,其轴重不大,机车轴重多在 21 t 以下,车辆轴重为 14 t 左右。因此轨道承受的低频荷载与横向水平力大都低于低速货车。北方交通大学曾在京秦快速线路上对轨道结构进行过动力测试,发现货车以 50~60 km/h 速度通过时,其车轮作用在钢轨上的垂直压力平均为 150