铁道科技图书出版基金资助出版

铁路轨道结构数值分析方法

雷 晓 燕 编著

中 国 铁 道 出 版 社
1998年·北京

需要全本请访问 www.ertongbook.com

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书介绍了国内外学者近 20 年来运用现代计算技术在铁路轨道结构数值分析方面所做的工作。主要内容包括:各种车辆- 轨道系统计算模型;轮轨相互作用、局部接触应力问题;铁路道床应力分析及应用;材料参数反分析及其应用;无缝线路稳定性分析;轨道结构设计的计算机方法和轨道结构空间自由振动分析;作者开发的轨道结构振动分析程序 FEMTB 等。

本书可作为工科院校铁道工程专业本科生选修教材及研究生教材,也可作为土木、交通、水利专业工程技术人员和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铁路轨道结构数值分析方法/雷晓燕编著 .—北京:中国铁道出版社,1998.8

ISBN 7-113-03042-4

Ⅰ.铁… Ⅱ.雷… Ⅲ.轨道(铁路)-结构-计算方法 Ⅳ.U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 16517 号

书　　名:铁路轨道结构数值分析方法

著作责任者:雷晓燕

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)

责任编辑:江新锡

封面设计:赵敬宇

印　　刷:北京兴顺印刷厂

开　　本:850× 1168 1/32 印张:8.75 字数:230 千

版　　本:1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷

印　　数:1— 册

书　　号:ISBN7-113-03042-4/TU·580

定　　价:25.00 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　　言

《铁路轨道结构数值分析方法》是雷晓燕教授为实现我国铁路轨道结构现代化，适应今后客运高速化、货运重载化需要而编写的一本专著。

书中主要内容包括各种车辆——轨道系统计算模型；轮轨相互作用、局部接触应力以及考虑蠕滑效应的轮轨接触应力问题；铁路碎石道床的本构关系，无拉应力计算模型，半解析法，随机有限元法在道床分析中的应用以及道床截面形状优化设计；材料参数反分析和材料参数识别法在轨道基础中的应用；一般结构稳定性问题和无缝线路温度臌曲失稳过程的有限元分析；轨道结构设计的计算机方法和轨道结构空间自由振动分析等。

书中内容多取自国内外学者近一二十年来在轨道结构数值分析方面所进行的工作，反映了该领域内的最新研究成果，因而具有一定的先进性。例如，将轨道结构处理成空间问题，建立力学分析模型，用计算机方法分析、设计和评价轨道结构；对轨道结构进行损伤分析和寿命预测；用有限元法分析无缝线路温度臌曲失稳以及各种车辆——轨道系统计算模型等，都是近年来国内外专家学者提出的新方法。此外，本书还有相当一部分内容取自作者近年来的研究成果。例如，作者对道床本构关系的研究，建立了碎石道床的非线性弹性关系，从而为深入研究道床的变形规律提供了可能。又如，作者提出的道床力学分析无拉应力计算模型，使有限元分析能更真实地反映道床的实际受力情况。再如，道床应力的半解析法是作者利用轨道结构的断面形状和边界支承条件沿轨道纵向不变的特点，将未知场函数沿该方向用解析函数表示，而在另一方向则仍用一般有限元法表示，从而达到将三维问题化成二维问题、大大简化计算的目的。作者还提出了用反分析法识别轨道结构参数以

及用接触摩擦单元模拟轮轨相互作用的新观点和新方法。所有这些,都充分反映了本书的时代特色和创新精神。

本书论证充分,推导严密,逻辑性强,具有较高的理论水平。更值得提出的是,作者知识面广,文风严谨,叙述问题深入浅出,对阅读中可能涉及的一些必要知识,均在各章中作了补充介绍。各章之间既有联系,又相对独立,读者可以通篇阅读,也可以选择感兴趣的专题进行学习。书中介绍的理论和数值分析方法,大部分都已程序化,并附有实际应用的例子。这样,既可以说明理论的正确性,又可以说明理论的可操作性,因而具有实际应用的价值和进一步发展的前景。

作者雷晓燕教授早年毕业于上海铁道学院(现改制为上海铁道大学),分别获工学学士和工学硕士学位,以后又赴清华大学深造,获工学博士学位。参加工作后,长期从事铁路轨道力学及轨道工程的教学和科学研究工作,现任华东交通大学教授兼副校长。他学有专长,作风踏实,先后主持和承担过国家自然科学基金项目、中奥合作科研项目、铁道部科技发展计划项目、科学基金项目和青年教师基金项目等,曾两度赴奥地利参加国际合作科研项目,取得了丰硕成果,并在国内外有影响的刊物上发表过 60 余篇高水平的学术论文,受到各方面专家学者的好评和上级政府的嘉奖,被评为铁道部有突出贡献的中青年专家。我与雷教授师生谊、忘年交,相知甚深。他勤奋好学,才思敏捷,对所研究的课题,均能旁征博引,反复推敲,然后归纳整理,提出自己的真知灼见,这是非常难能可贵的。当然,在铁路轨道学科的研究领域中,有突出贡献的中青年专家并非仅雷教授一人,但无疑他是其中的佼佼者。我现在已经年近 90,虽从教多年,愧无建树,所幸身逢盛世,喜见"芳林陈枝催新枝,流水后浪推前浪",人才辈出,誉满中外,相信他们一定能够充分发挥自己的聪明才智,承前启后,继往开来,完成老一辈专家学者们梦寐以求的铁路轨道现代化这一伟大事业。

是为序。

上海铁道大学教授　童大埙

1998 年 1 月于上海

前　　言

我国铁路经过近 49 年的发展，特别是改革开放 20 年的发展，取得了令人瞩目的成就。据俄罗斯出版的《铁路运输》1997 年第十期的报导，截止到 1996 年底，中国铁路营业里程 5.6 万 km，位于美、俄、加、印之后居第五位。其中我国铁路电气化里程 10100km，在俄、德、法、日、波、印、南非之后，居第八位。1995 年～1996 年，我国铁路运营状况名列世界前茅，尤其客运周转量居各国之首，达 3543 亿人 km，货物周转量仅次于美国为 12836 亿 t·km，而货运量 15.9 亿 t，居世界首位。客运量达 10.2 亿人次，居世界第五位。1992 年标志我国现代化铁路建设里程碑的大秦铁路胜利开通，1997 年全国铁路全面提速，1998 年在 1997 年提速的基础上还要进一步提高速度。国家已将铁路列入优先发展的行业，京沪高速铁路建设指日可待，一个新的铁路建设高潮正在兴起。作为一名铁路科技人员和教育工作者，我感到由衷的高兴。

与此同时，我们也必须看到，与发达国家相比我们还有很大的差距。我国的铁路里程仅为美国的三分之一，承担的货运量却居世界首位。人均铁路占有量更低。作为铁路行车基础的轨道结构一直是处于满负荷工作状态，不能适应经济发展的需要。当前，铁路正在向高速、重载、大运量方向发展，新材料、新工艺、新技术、新方法不断被应用到铁路建设中。传统的轨道结构型式正在逐步被现代轨道结构取代。科技进步对铁路的发展作用越来越大。

轨道是一种有别于其它土木结构的特殊结构物，表现在结构的组合性、散体性及荷载的不确定性上。这些特点决定了轨道结构的复杂程度。随着铁路现代化进程的加快、列车速度的进一步提高，轴重和运量的增大，轨道结构更趋复杂。经典的分析方法难以满足工程的要求，取而代之的是数值分析方法得到了越来越广泛的应用。1982 年我在上海铁道学院（现上海铁道大学）攻读硕士学位，师从我国轨道力学

需要全本请访问 www.ertongbook.com

专家童大埙、王午生教授，从事道床应力半解析法研究。1986 年在清华大学攻读固体力学专业博士学位，系统地学习了数值分析方法、理论。毕业后，一直从事铁道工程教学与科研。主持和承担过铁道部数十项科研课题。主要研究方向为轨道结构数值分析方法。从自己的研究经历中，我体会到数值方法是解决工程复杂问题强有力的手段。为了使广大铁路工程技术人员尽快熟悉和掌握数值分析方法的原理和应用，也为了使自己研究的内容系统化，我于 1993 年开始收集资料，阅读文献，系统整理研究笔记。历时 5 年，在铁路科技图书出版基金的资助下、在铁道出版社的大力支持下，本书得于正式出版。

本书的内容主要取自于近 20 年来国内外科学工作者运用现代计算技术在轨道结构数值分析方面所做的工作。总结了轨道结构力学分析中的各种理论模型的建立、求解模型的数值方法及模型参数的选择。对轮轨相互作用、局部接触应力问题，除介绍赫兹理论外，重点叙述轮轨局部接触应力的有限元法。道床是作者研究领域中的一个重要方向，在书中花了较多的笔墨，涉及道床的本构关系、无拉应力计算模型、半解析法、道床极限承载力、随机有限元法以及道床截面形状优化。材料参数反分析，又称材料参数识别法，是近年来工程中研究较热门的课题，书中介绍了工程上常用的三种材料参数识别法，即：直接法、逆解法和对偶边界法，讨论了材料参数识别法在轨道基础中的应用。无缝线路稳定性是铁路现代化进程中需要解决的重要问题之一，这方面的研究仍在进行中。书中介绍了结构稳定性分析的一般方法和铁道部科学研究院周毅研究员所做的工作。轨道结构设计的计算机方法是美国肯塔基大学的研究成果。该方法与众不同的地方在于既可对轨道结构各部分进行力学分析，又能对轨道进行损伤分析。根据损伤分析的结果，可估算轨道的使用寿命及反演道床所需要的厚度。

书中内容力求跟踪学术前沿、紧密联系铁路实际，希望能给读者一些启发。尽管如此，限于编者水平，错误和不当之处还请读者给予指正。

雷 晓 燕

1998.5.15

目　　录

第一章　绪　　论…… 1
§ 1　轨道的组成及其作用 …… 1
§ 2　作用于轨道上的力 …… 4
§ 3　铁路轨道结构数值分析方法简介 …… 8
第二章　车辆- 轨道系统计算模型 …… 10
§ 1　动力有限元基本知识…… 10
§ 2　轨道结构的有限元方程…… 20
§ 3　轨道结构振动分析内容, 机车和车辆计算图式 …… 25
§ 4　不计一、二系弹簧作用车体—轨道模型 …… 29
§ 5　单轮附有簧上质量轨道模型…… 31
§ 6　半车附有二系弹簧质量轨道模型…… 33
§ 7　整车附有二系弹簧质量轨道模型…… 35
§ 8　轨道不平顺的影响…… 37
§ 9　求解振动方程的数值方法…… 42
§ 10　轨道动力学理论模型参数研究 …… 44
第三章　轮轨相互作用、局部接触应力…… 51
§ 1　两弹性体接触的赫兹理论…… 51
§ 2　轮轨局部接触应力的赫兹解…… 54
§ 3　考虑车轮踏面影响轮轨局部接触应力计算…… 56
§ 4　轮轨接触应力的有限元法…… 59
§ 5　轮轨局部接触应力分析实例…… 73
§ 6　考虑蠕滑效应的轮轨相互作用…… 76
第四章　道床应力分析 …… 83
§ 1　用主应力表示的碎石道床应力—应变关系…… 84
§ 2　铁路碎石道床本构关系…… 89

§ 3 道床应力的有限元分析 …… 109
§ 4 无拉应力计算模型 …… 115
§ 5 道床应力的半解析法分析 …… 117
§ 6 道床极限承载力的有限元分析 …… 125
§ 7 随机有限元法在道床分析中的应用 …… 133
§ 8 道床截面形状优化 …… 138
第五章 材料参数反分析及其应用 …… 145
§ 1 直 接 法 …… 146
§ 2 逆 解 法 …… 148
§ 3 对偶边界解法 …… 149
§ 4 算例 …… 154
第六章 无缝线路稳定性分析 …… 160
§ 1 结构稳定性分析的有限元法 …… 161
§ 2 无缝线路温度臌曲失稳过程的有限元分析 …… 165
第七章 轨道空间结构设计分析计算机方法 …… 174
§ 1 轨道结构设计的计算机方法 …… 174
§ 2 轨道结构空间自由振动分析 …… 187
第八章 轨道结构振动分析程序 FEMTB …… 197
§ 1 轨道结构振动分析程序 FEMTB 使用说明 …… 197
§ 2 输入数据及算例 …… 203
§ 3 轨道结构振动分析实例 …… 208
附录 轨道结构振动分析 FEMTB 源程序 …… 214
参考文献 …… 269

第一章　绪　　论

铁路运输是当前我国国民经济发展的薄弱环节。提高铁路运输能力是我们面临的一项刻不容缓的任务。目前我国铁路担负着全国 60% 以上的运输任务,占有举足轻重的位置。提高铁路运输能力是解决这一薄弱环节的重要途径之一。

轨道是铁路的主要技术装备之一,是行车的基础。随着铁路运输不断向高速、重载、大运量和高密度方向发展,轨道结构的负担越来越重,养护维修工作量越来越大。结果是,运量与运能之间失去平衡,出现养护维修赶不上轨道破坏的局面,危及行车的平稳和安全。解决这一矛盾的根本措施,在于设计一种能在规定运营条件下,最大限度地多工作,少维修的轨道结构。这种轨道结构必须完全适应运营条件的要求,而轨道结构力学分析则是达到这一目的不可缺少的手段。

本章将扼要介绍铁路轨道的组成,作用于轨道上的力,以及轨道结构数值分析方法的主要内容。

§ 1　轨道的组成及其作用

铁路轨道由钢轨、轨枕、联结零件、道床、防爬设备及道岔等主要部件组成,它的作用是引导机车车辆运行,直接承受由车轮传来的巨大压力,并将其传布给路基或桥隧建筑物。轨道必须坚固稳定,并具有正确的几何形位,也就是说,轨道各部分应有正确的几何形状、相对位置和基本尺寸,以确保机车车辆的安全运行[1]。

钢轨是轨道的主要部件,用于引导机车车辆行驶,并将所承受的荷载传布于轨枕、道床及路基。同时,为车轮的滚动提供阻力为最小的接触面。钢轨按每米大致的质量(kg/m)区分类型。重型钢轨适用于运量大、速度高和行驶重载车辆的铁路;轻型钢轨则适用

于运量较小的铁路和站线。

轨枕是轨道结构的重要部件,一般横向铺设在钢轨下的道床面上,承受来自钢轨的压力并将其传递给道床。同时利用扣件有效地保持轨道的几何形位。轨枕主要有木枕和混凝土枕两类。

联结零件是联结钢轨或联结钢轨和轨枕的部件。前者称接头联结零件,后者称中间联结零件,或扣件。其作用是长期有效地保证钢轨与钢轨或钢轨与轨枕间的可靠联结,尽可能地保持钢轨的连续性与整体性,阻止钢轨相对于轨枕的纵横向移动,确保轨距正常,并在机车车辆的动力作用下,充分发挥缓冲减振性能,延缓线路残余变形的积累。

防爬设备能有效地防止钢轨与轨枕之间发生纵向的相对移动,制止轨道爬行。

道床是轨枕的基础,在其上面以规定的间隔布置一定数量的轨枕,用以增加轨道的弹性和纵、横向移动的阻力,并便于排水和校正轨道的平面和纵断面。主要材料有碎石和筛选卵石等。

至于路基,虽然不属于轨道的组成部分,但是通过钢轨、轨枕和道床传来的机车车辆动荷载,最终还要依靠路基来承受。路基是整个轨道结构的基础,其状态的良好与否,对轨道结构正常工作有直接影响。因此,设计轨道时必须对路基的坚固与稳定,进行综合的考虑。

道岔是机车车辆从一股轨道转入或越过另一股轨道时必不可少的线路设备,在铁路站场布置中应用极为广泛,它是轨道结构的重要组成部分。

由钢轨、轨枕和道床组成的轨道结构是世界各国广泛采用的一种传统型式。百余年来,这种结构型式变化不大,其基本特征是用不同力学性质的材料构筑而成。对这种结构来说,虽然力的传递方式是合理的,建筑费用也是经济的,但就其整体性而言,各组成部分之间的联结不够坚固稳定,使用寿命也很不一致。特别是道床的存在,使传统轨道成为一种很不稳定的结构。在列车荷载的重复作用下,产生较大的下沉,通过一定运量后就会出现各种各样的病

害,必须加以整修。尽管如此,由于这种轨道结构型式具有投资小、弹性好和易于维修等优点,迄今仍被各国铁路作为一般轨道结构的主要结构型式而普遍使用。

随着铁路行车速度、机车车辆轴重和运量的增加以及科学技术的发展,已经出现了一些对传统轨道结构的某一组成部分或其整体进行重大改进或根本改革的新型轨道结构,以适应高速、重载、大运量、高密度铁路运输的需要,达到改善轮轨相互作用和轨道各部分应力应变分布状态,延长设备使用寿命,推迟养护维修周期的目的。

多少年来,钢轨除每米的质量随着机车车辆轴重和行车速度的提高而有所增加外,没有什么重大的改进和根本性的改革。钢轨接头仍然是轨道结构的薄弱环节,世界各国正在努力设法(主要通过铺设无缝线路,即焊接长钢轨线路)尽可能地减少或根本消灭目前依然存在的钢轨接头。

轨道结构中钢轨以下的部分称轨下基础。20 世纪 70 年代,世界各国出现了各种不同类型的新型轨下基础,主要有:

(1)采用新型轨下部件的轨下基础。这种轨下基础保留了传统的碎石道床,而把传统的横向轨枕改变为特殊形状的新型轨下部件。如:荷兰铁路的"之"字型组合混凝土轨枕;奥地利铁路的平面上成双十字形的带翼轨枕;法国铁路的纵向混凝土轨枕等。我国从 1966 年开始试铺的混凝土宽轨枕,原苏联的 4 型钢筋混凝土轨枕板和 8 型钢筋混凝土框架轨枕,也属于这种类型。

(2)采用新型道床的轨下基础。这种轨下基础对传统的碎石道床作了比较重大的改进,主要有如下两种方案:一是将松散的碎石道床更换成混凝土整体结构;二是保留碎石道床,在其间灌入沥青材料将它联成整体,使之整体化。前者称整体道床,后者称沥青道床。整体道床常用于隧道内部,在隧道基底上直接浇筑混凝土,以取代传统的碎石道床。整体道床坚固耐久,外观整洁,基本上能达到少维修的目的;缺点是造价昂贵,施工复杂,一旦出现病害,整治非常困难。沥青道床的沥青材料灌入深度可达碎石道床的表面层,

需要全本请访问 www.ertongbook.com

也可深入碎石道床的全部。沥青道床能增加线路强度，延缓轨道下沉，使维修工作量大大减少，在既有线上施工，能在不中断行车的条件下进行。

(3)综合采用新型轨下部件和新型道床的轨下基础。这种轨下基础从根本上消灭了传统的碎石道床，因而也称无碴轨道，或板式轨道。板式轨道，不仅可以铺设在隧道内或高架桥上，也可铺设在一般的土质路基上。板式轨道用预制的钢筋混凝土板支承钢轨，在桥隧建筑物的基底或路基顶面上，浇筑混凝土基础层，以代替传统的碎石道床。两者间设置可调整的缓冲垫层。板式轨道是从整体道床的基础上发展起来的，既保持了它的优点，又改进了其中的某些固有的缺陷，在高速、重载、大运量、高密度铁路上运用，具有美好的前景。

铁路运营条件的改变，对钢轨联结零件也提出了更为严格的要求，除了要最大限度地保持钢轨的连续性与整体性外，还要在机车车辆的动力作用下充分发挥缓冲减振性能，延缓线路残余变形的积累。传统的不分开式扣件联结方式已完全被分开式代替。钢轨的扣压件已经从普通的道钉、螺纹道钉、扣板等刚性扣压件过渡到弹片和弹条等弹性扣压件，并在钢轨与轨下基础之间插入弹性很高的橡胶垫层，以提高整个轨道结构的缓冲减振性能。为了减少扣件的维修养护工作量，增加扣压件的扣压能力，有些国家研制了一些新型的无螺栓弹性扣件，其中比较有代表性的为英国的潘德罗尔(Pandrol)扣件及瑞士的费斯特(Fist)扣件。扣件的轨距调整方式也从分级调整向无级调整过渡，并提高调整轨距和轨面标高幅度。

§ 2　作用于轨道上的力

行驶中的机车车辆作用于轨道上的力是非常复杂的。大体上可分为垂直于轨面的竖直力、垂直于钢轨的横向力和平行于钢轨的纵向力三类。这些力或由于机车车辆与轨道之间的相互作用，或由于轨道本身温度变化或其它原因而产生。在这些力的作用下，轨

道产生各种各样的应力和变形。在轨道各组成部分中,特别是钢轨,除基本应力外,还必须考虑局部应力的影响。进行轨道结构振动分析,首先要确定作用于轨道上的力。

2.1 竖直力

竖直力的主要组成部分是车轮的轮重。轮重是机车车辆静止时同一个轮对的左右两个车轮对称地作用于平直轨道上的轮载,其值可从各型机车车辆构造性能表中查取。列车行驶过程中,车辆实际作用于轨道上的竖直力称车轮的动轮载。动轮载超出静轮载部分称静轮载的动力附加值。动轮载随机车车辆和轨道的构造及其状态以及运动形态的改变而变动,规律十分复杂。当圆顺的车轮在平顺的轨道上行驶时,轮载的动力附加值一般不超过 20%;但在钢轨接头、轨道单独不平顺处和车轮有扁瘢、偏心等冲击作用的情况下,有时可达数倍之多。

产生轮载动力附加值的原因是多方面的,有属于机车车辆构造及其状态方面的,有属于轨道构造及其状态方面的,也有属于机车车辆在轨道上的运动形态方面的。

属于机车车辆构造及其状态方面的有:

(1)蒸汽机车蒸汽机工作时的蒸汽压力,传动机构(活塞、摇杆和曲拐等)运动时的惯性力以及过量平衡锤的离心力。这些力对电力机车和内燃机车来说,是不存在的。

(2)车轮踏面上因制动或其他原因被擦伤而形成扁瘢。有扁瘢的车轮每转动一周要撞击钢轨一次,产生具有冲击性质的轮载,使动力附加值增加。

(3)车轮轮箍和轮心因圆周不同心而形成偏心。有偏心的车轮在行驶过程中对钢轨施加冲击力,犹似蒸汽机车的过量平衡锤那样,使动力附加值增加。

属于轨道构造及其状态方面的有:

(1)机车车辆通过曲线轨道时,因未被平衡的外轨超高而产生的轮载偏载,使一股钢轨上的轮载增加,另一股钢轨上的轮载减

小。

(2)机车车辆通过钢轨接头时,由于轨缝、错牙和折角的影响而产生的冲击附加力。

(3)机车车辆通过钢轨顶面有类似擦伤那样的短波长单独不平顺时,产生与扁瘢车轮完全相同的冲击性轮载,使动力附加值增加。

(4)机车车辆通过轨道不平顺时,由于簧上结构(轮对弹簧装置以上部分)和簧下部分(轮对弹簧装置以下的部分)作复杂的空间振动,使作用于轨道上的动轮载有所增加。

属于机车车辆在轨道上运动形态方面的有:

(1)机车车辆在平直轨道上因蛇行运动使同一轮对上左右两轮滚动圆半径不同而引起的轮载偏载。

(2)机车车辆通过曲线轨道时,作用于转向架上的横向力,使同一轮对上左右两车轮的轮载偏载。

上述各力的竖向分力,即作用于轨道上的竖直力或动轮载,在机车车辆运行过程中是时刻变化着的。它们有时存在,有时消失,有时互相叠加,有时相互抵消,具有高度随机的性质。其中,有些力可以应用比较精确的公式进行计算,有些只能借助实测资料约略估算。最后组合而成的最大竖直力,即最大动轮载有时可超过静轮载一倍以上。它们随行车速度的提高而迅速增加,并和它成复杂的函数关系。

2.2 横向水平力

在轮轨接触点上,除作用着垂直于轨面的竖向力外,还存在着车轮轮缘作用于轨头侧面上的横向水平力。产生横向水平力的原因有:

(1)机车车辆在直线轨道上运行时,因车辆蛇行运动使车轮轮缘时而接触钢轨,时而离开钢轨,由此而产生往复周期性的横向水平力。

(2)机车车辆在有方向不平顺的轨道上运行时(方向错乱,接

头死弯,道岔上尖轨,辙叉翼轨和护轨等处所),因车轮轮缘或车轮内侧面冲击钢轨而引起的横向水平力。

(3)机车车辆通过有未被平衡外轨超高的曲线轨道时,因离心力与向心力不能相互抵消而引起的横向水平力。

(4)机车车辆通过曲线轨道时,因车架或转向架转向,使车轮轮缘作用于钢轨侧面上的横向水平力。

前两项牵涉的因素很多,理论分析比较复杂,常用经验公式或借助实测资料进行估算。第三项可用离心力与向心力之差的简单公式来求得。第四项为产生横向水平力的最主要原因,其绝对值也往往比其他各项为大,常用近似的计算方法求取。

2.3 纵向水平力

在机车车辆作用下和环境条件的影响下,轨道上产生纵向水平力,其中主要有:

(1)爬行力。轨道爬行的原因十分复杂,其中最基本和决定性的是钢轨在动荷作用下的波浪形挠曲。当中间扣件(主要是道钉)扣着力不足时,轨底将在垫板上顺着行车方向滑动,并往往带动一部分轨枕一起移动,产生与行车方向一致的爬行。在大坡道上,由于列车的加速和制动,也会产生相应的爬行。为防止轨道爬行,通常需要在每股钢轨上安装一定数量的防爬器。这样,虽然轨道的爬行能有效地防止,但钢轨内部将无可避免地会出现相当于这个爬行力的纵向水平力。在我国,广泛采用穿销式防爬器。这种防爬器的能力很大,相当于好几根轨枕的纵向移动阻力。因此,常和几根轨枕联系起来,成为一组防爬设备。如果每根轨枕的纵向阻力为 R,每组防爬设备,包括一对防爬器和 n 根轨枕,则在沿线均匀布置,爬行力线性分布的前提下,每一根钢轨所承受的最大爬行力为

$$\max P \leq \frac{Rn}{2} \tag{1.1}$$

(2)坡道上列车重力的纵向分力,随坡度的大小而异。

(3)制动力。行驶列车停车或减速时,因操纵制动闸瓦对车轮施加强大的压力而在轮轨接触点上产生制止列车前进的力称制动力。制动力可表示为闸瓦压力与摩擦系数的乘积。由于闸瓦压力随机车车辆的构造性能不同而异,摩擦系数又随闸瓦压力,制动过程中列车瞬时速度而变化,计算方法非常繁琐。制动时,钢轨的纵向应力可达 9.8MPa。

(4)纵向摩擦力。列车通过曲线轨道时,因转向架转向使车轮踏面作用于钢轨顶面上的摩擦力的纵向分力,其值可用计算方法求取。

(5)温度力。钢轨受阻力约束,不能随轨温变化而自由伸缩,故在钢轨内产生温度力。

§ 3 铁路轨道结构数值分析方法简介

正如前面所述,轨道结构由钢轨、弹性扣件、垫层、轨枕、道床和路基等材料组成,是个十分复杂的系统。从受力角度看,轨道结构承受的是来自机车和车辆随机的三向动荷载,且列车在运行过程中除轮轨间存在着巨大的接触应力外,还伴随着蠕滑现象。在反复荷载的作用下,钢轨会产生疲劳损伤、折断和裂纹;由于温差的存在,无缝线路会发生失稳,引起胀轨跑道;由于线路的不平顺,列车会发生蛇行运动等等。从材料角度看,钢轨在轮轨接触处,由于存在巨大的接触应力会发生屈服,在制动力和曲线侧向切削力的作用下,又会发生伤损;作为道床组成材料的石碴,是散体材料,连续介质分析方法难以得到正确的结果。这一切都说明,传统的轨道结构分析方法不能适应现代铁路轨道结构的需要。70 年代以来,由于计算机的迅速发展,工程结构数值分析方法越来越广泛地被应用到工程实际中,使工程中大量复杂问题的求解成为可能。

本书综合了国内外学者近 20 年来运用现代计算技术在轨道结构数值分析方面所做的工作。全书共分八章,内容包括绪论,车辆—轨道系统计算模型,轮轨相互作用、局部接触应力,道床应力分析,材料参数反分析及其应用,无缝线路稳定性分析,轨道空间

结构设计分析计算机方法以及轨道结构振动分析程序。

第一章介绍了轨道的组成及其作用,叙述了作用于轨道上的力。

第二章简要介绍了动力有限元基本知识,轨道结构的有限元方程,轨道结构振动分析内容,机车和车辆计算图式。详细讨论了车辆—轨道系统各种简化计算模型,内容包括了不计一、二系弹簧作用车体轨道模型,单轮附有簧上质量轨道模型,半车附有二系弹簧质量轨道模型,整车附有二系弹簧质量轨道模型。论述了轨道不平顺的影响和求解振动方程的数值方法,以及轨道动力学理论模型参数研究。

第三章讨论轮轨局部接触应力,其内容为两弹性体接触的赫兹理论,轮轨局部接触应力的赫兹解,考虑车轮踏面影响轮轨局部接触应力计算,轮轨局部接触应力的有限元法,轮轨局部接触应力分析实例以及考虑蠕滑效应的轮轨接触应力问题。

第四章论述了作为散粒材料的铁路碎石道床的本构关系和道床应力分析的各种数值方法,内容包括道床应力的有限元分析,无拉应力计算模型,道床应力的半解析法分析,道床极限承载力的有限元分析,随机有限元法在道床分析中的应用以及道床截面形状优化设计。

第五章介绍了工程上常用的三种材料参数识别法,即直接法、逆解法和对偶边界法,讨论了材料参数识别法在轨道基础中的应用。

第六章包括结构稳定性分析的有限元法和无缝线路温度臌曲失稳过程的有限元分析两部分内容。

第七章讨论了轨道结构设计的计算机方法和轨道结构空间自由振动分析。

第八章介绍了作者开发的轨道结构振动分析程序 FEMTB,叙述了程序使用方法及如何准备输入数据。为便于读者使用,书中还给出了算例。轨道结构振动分析源程序清单放在附录部分。

本书所包含的内容大多为近年来从事铁道工程研究人员的最新成果,部分内容属于作者的研究成果。

需要全本请访问 www.ertongbook.com