



数据加载失败，请稍后重试！

铁路科技图书出版基金资助出版

轨道力学与工程新方法

雷晓燕 著

中 国 铁 道 出 版 社

2002年·北京

NEW METHODS IN RAILROAD TRACK MECHANICS & TECHNOLOGY

Xiaoyan Lei

*Department of Civil Engineering ,
East China Jiaotong University ,
330013 , Nanchang , P . R . CHINA*

China Railway Publishing House
2002 Beijing

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书系统地论述和总结了国内外学者近 10 年来应用新理论和新方法在轨道力学与轨道工程领域内所进行的研究工作。主要内容包括轨道结构分析内容及其界限值,车辆—轨道耦合系统竖向和空间振动模型以及求解其动力方程的数值算法,轨道不平顺功率谱及数值模拟,轨道过渡段竖向振动仿真,无缝线路稳定性分析,轨道结构可靠性分析,轮轨噪声研究方法以及钢轨打磨原理及其应用。书中内容取材新颖,跟踪学术前沿。同时注重联系实际,增加信息量。期望把国内外学者在本领域内的最新研究成果和发展动向介绍给读者。本书可作为工院校道路与铁道工程专业本科生、研究生和工程技术人员的教材和参考书,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

轨道力学与工程新方法/雷晓燕著. —北京:中国铁道出版社,2002.3

ISBN 7-113-04590-1

I. 轨… II. 雷… III. ①轨道力学—研究②轨道(铁路)—铁路工程—研究 IV. U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 013808 号

书 名:轨道力学与工程新方法

作 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 编辑部电话:(市)010-51873661,(路)021-73661

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:215 千

版 本:2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~1 500 册

书 号:ISBN 7-113-04590-1/TU·694

定 价:25.00 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:(市)010—51873169,(路)021—73169

序 言

雷晓燕是一位将数值分析法应用于轨道工程领域中颇有成就的中年学者。1984年他获原上海铁道大学铁道工程专业硕士学位,1989年获清华大学固体力学博士学位,研究方向为计算固体力学。因而他既有扎实的理论基础,又有一定的专业知识,两者结合,相得益彰,为他致力于轨道工程的数值方法的研究奠定了良好的基础。后来在1991年和1994年两次赴奥地利因斯布鲁克大学进行合作研究,2001年以客座研究员的身份赴日本九州工业大学从事科学研究,加强了与国际间的合作和交流,为他提升科学研究和学术水平,拓宽视野创造了良好的条件。

他的第一部专著是《铁路轨道结构数值分析方法》,1998年由铁道出版社出版。时隔仅三年,他又写出了《轨道力学与工程新方法》。在这本专著中,他用创新的思路、创新的理论和创新的方法,结合轨道工程的实际问题进行分析,并获得了指导和解决这些实际问题的数据和结果,这无疑将把轨道工程的理论和学术水平提升到一个新的高度。

这本专著所列的内容都是当前发展快速和高速铁路中必须解决的实际问题,而且需要有新的方法来解决。例如,轨道过渡段刚度、无缝线路稳定性、工程结构可靠性分析、轮轨噪声及钢轨打磨等问题都是铁路建设中迫切要求解决的实际问题。作者在分析这些问题时,不用传统的方法,而是采用了本书提出的新理论和新方法。例如,应用迭代法求解车辆—轨道耦合系统动力方程,具有容易处理非线性和编程简单的突出优点;再如用有限元来分析无缝线路稳定性,可以考虑线路的几何非线性变形;还有在结构可靠性分析中,用随机有限元分析道床应力;对于轮轨噪声提出了比较完整的研究流程图和严密的理论计算方法等等;而且对各有关问题

的分析,都附有实例。所有这些,对从事轨道工程教学、研究、设计和管理的人员来讲,是有很大的帮助和参考价值的。

理论指导实践,理论服务于实践,百花园中又多了一朵鲜花,让这本专著为正在发展中的我国铁路建设作出应有的贡献!

是如序。

上海同济大学土木建筑学院
铁道建筑系教授 王午生
2002.1.15

前 言

进入 21 世纪,我国铁路迎来了历史性的机遇。世界上许多著名经济学家都预测未来 10 年中国经济将继续实现持续、健康和快速发展。铁路作为国家优先发展的行业,必定在这种大趋势下有一个大发展。我国铁路科技发展“十五”计划和 2015 年长期规划纲要确定的目标是:“十五”期间,推广最高时速 160 km 相关技术,主要繁忙干线旅客列车最高运行速度 160 km/h,其他线路 120 km/h,形成覆盖我国主要城市的快速客运网;时速 200 km 客运专线成套技术装备研制成功并投入运用,建成京沈快速客运通道;高速铁路配套技术取得突破,开工建设京沪高速铁路……。为了适应铁路发展的需要,必须加强技术创新,全面提高技术装备水平。依靠科技进步,在工务工程中广泛采用新设计、新技术、新工艺和现代化的管理方法。

然而,作为铁路行车基础的轨道结构是一个十分复杂的系统。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。在荷载的反复作用下,钢轨会出现裂纹、疲劳和折断,轨道会发生沉降。由于轮轨之间的相互作用,铁路将产生滚动噪声;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,导致动荷载增加,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,又会发生损伤;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。另外,由于各种各样不利因素的组合导致列车脱轨的事故也时有发生,而对于产生事故的原因和预测至今还未有成熟的理论。这一切都说明,传统的轨道力学和结构分析方法不能适应现代铁路轨道结构的需要,轨道力学与轨道工程需要理论创新,需要方法

创新。可喜的是,进入 80 年代以来,由于计算机和数值方法的迅猛发展,新理论和新方法不断被应用于轨道力学与轨道工程中,使大量过去无法求解的复杂问题成为可能。尽快地将这些最新研究成果介绍给读者是作者撰写该书的目的和动力。

本书总结了国内外学者近 10 年来应用新理论和新方法在轨道力学与轨道工程领域内所做的工作,其中相当部分内容属作者的研究成果。全书共分十章,内容包括:轨道结构分析内容及其界限值,车辆—轨道耦合系统竖向振动模型,轨道不平顺功率谱及数值模拟,求解车辆—轨道耦合系统动力方程的数值算法,轨道过渡段竖向振动仿真分析,车辆—轨道耦合系统空间振动模型,无缝线路稳定性分析,轨道结构可靠性分析,轮轨噪声研究方法与进展及钢轨打磨原理及其应用。

第一章介绍了轨道结构的分析内容,安全性、平稳性与列车噪声声界限值及高速铁路轨道维修管理标准,这是设计和检算轨道结构是否安全可靠的准则。

第二章简要介绍了动力有限元法的基本知识和轨道结构的广义梁单元。详细讨论了车辆—轨道系统各种简化计算模型,包括:不计一、二系弹簧作用车辆—轨道模型,单轮附有簧上质量车体模型,半车附有二系弹簧质量车体模型,整车附有二系弹簧质量车体模型以及车辆与轨道计算参数。

第三章给出了国内外轨道不平顺功率谱函数,介绍了三角级数法和周期图法两种常用的轨道不平顺数值模拟技术。

第四章论述了求解车辆—轨道耦合系统动力方程的数值算法,介绍了中心差分和 Newmark 两类直接积分法的基本原理和数值计算步骤,给出了用迭代法求解车辆—轨道耦合系统的算法。读者将看到,迭代法具有容易处理非线性问题和程序设计简单的突出优点。

第五章介绍了用整车附有二系弹簧质量车体模型分析轨道过渡段竖向振动、线路随机不平顺对车辆—轨道结构动力响应以及钢轨接头对轮轨作用力的影响等实际问题。

第六章讨论了车辆—轨道耦合系统空间振动模型及其算法。在建立整车运动方程时,考虑了蠕滑、重力刚度和重力角刚度的影响。

第七章包括结构稳定性分析的有限元法和无缝线路温度臃曲失稳过程的有限元分析两部分内容。在这一章中,推导了将无缝线路离散成梁单元并考虑几何非线性时各刚度矩阵的显式表达式。

第八章介绍了结构可靠度的基本概念和基本理论,结合工程问题阐述了结构可靠度分析方法。本章还介绍了随机有限元法及其在道床应力分析中的应用。

第九章反映了目前轮轨噪声研究方法和进展的最新情况。介绍了噪声的基本知识、轮轨噪声研究流程图、轮轨相互作用、噪声辐射理论及轮轨噪声的理论计算和预测。

第十章详细介绍了国外广泛采用的两类钢轨打磨方法。重点论述了“预防性打磨(又称外形打磨)”方法的原理、适用范围和优缺点。

书中内容取材力求新颖、跟踪学术前沿,尽可能地把国内外学者在本领域内的最新研究成果和发展动向介绍给读者。同时注重联系实际,增加信息量。书中还提供了理论分析所需的各类典型机车、车辆和轨道结构各部件的计算参数以及满足安全性和舒适性要求的动力响应的允许值,这些数据都是从事铁道工程教学、科研和设计工作的技术人员必不可少的。期望该书对读者能有一些启发和帮助。尽管如此,限于作者水平,错误和不当之处还请读者批评指正。

雷晓燕

2002.1

主 要 符 号

- $\mathbf{a}^e$ ——单元结点位移向量
 $\mathbf{a}_1, \dot{\mathbf{a}}_1, \ddot{\mathbf{a}}_1$ ——下部结构结点位移、速度和加速度向量
 $\mathbf{a}_u, \dot{\mathbf{a}}_u, \ddot{\mathbf{a}}_u$ ——上部结构结点位移、速度和加速度向量
 A_v, A_a, A_g ——粗糙度系数
 A_n ——第 n 阶车轮模态的径向导纳
 A_{WR}, A_{WA} ——车轮径向、横向振动辐射面积
 b ——轮对两滚动圆间距离之半
 b_1 ——轴箱弹簧横向间距之半
 b_2 ——中央弹簧横向间距之半
 b_3 ——中央弹簧垂直减振器横向间距之半
 b_4 ——中央纵向弹簧及纵向减振器横向间距之半
 $\mathbf{b}$ ——作用于单元的体积力向量
 B_n ——第 n 阶车轮模态的横向导纳
 $\mathbf{B}$ ——应变矩阵
 c_{x1}, c_{y1} ——轨下垫层和枕下道床的等效阻尼系数
 c_l ——钢轨纵向波速
 C_{y1} ——每根车轴轴箱弹簧悬挂横向阻尼系数
 C_{z1} ——每根车轴的垂直阻尼系数
 C_{x2} ——每台转向架中央弹簧装置的纵向阻尼系数
 C_{y2} ——每台转向架中央弹簧装置的横向阻尼系数
 C_{z2} ——每台转向架中央弹簧装置的垂直阻尼系数
 $C_{\phi 1}$ ——转向架构架相对于每一车轴的摇头角阻尼
 $C_{\phi 2}$ ——每台转向架中央弹簧装置的摇头角阻尼

- C_g ——轮对的重力角刚度
 $C_{\varphi 1}$ ——每台转向架轴箱弹簧装置侧滚角阻尼
 $C_{\varphi 2}$ ——每台转向架中央弹簧装置侧滚角阻尼
 c^e ——单元阻尼矩阵
 c_b^e ——单元比例阻尼矩阵
 c_D^e ——由支承引起的单元阻尼矩阵
 C_1 ——下部结构的阻尼矩阵
 C_u ——上部结构的阻尼矩阵
 D ——弹性矩阵
 E ——弹性模量
 f ——空间频率
 f_{11}, f_{22} ——纵向、横向蠕滑系数
 f ——单元内任意一点的位移向量
 F_l, F_r ——左、右轮轨竖向接触力
 F^e ——单元结点力向量
 F_e^e ——广义梁单元弹性力向量,
 G ——轮轨接触挠度系数
 h_1 ——车体重心到中央弹簧上平面的高度
 h_2 ——车体重心到中央弹簧横向减振器的高度
 h_3 ——中央弹簧上平面到转向架构架重心的高度
 h_4 ——转向架构架重心到车轴中心线的高度
 h_5 ——转向架构架重心到中央弹簧横向减振器的高度
 H_i ——轮轨横向接触力
 $H(k)$ ——接触区滤波函数
 I ——声强
 I ——单位矩阵
 $J_{w\psi}$ ——每一轮对的摇头转动惯量
 $J_{t\psi}$ ——构架的摇头转动惯量

$J_{c\psi}$ ——车体的摇头转动惯量
 $J_{w\varphi}$ ——每一轮对的侧滚转动惯量
 $J_{t\varphi}$ ——构架的侧滚转动惯量
 $J_{c\varphi}$ ——车体的侧滚转动惯量
 k_c ——扣件刚度
 k_p ——轨枕弹性垫板刚度
 k_{pc} ——钢轨扣压件刚度
 k_b ——道床刚度
 k_s ——路基刚度
 k_{bs} ——道床—路基刚度
 k_{RV} ——钢轨弯曲波数
 k_{x1}, k_{y1} ——轨下垫层和枕下道床的等效弹性系数
 K_{x1} ——每一轮对的纵向定位刚度
 K_{y1} ——每一轮对的横向定位刚度
 K_{z1} ——每一轮对轴箱弹簧的垂直刚度
 K_{x2} ——每台转向架中央弹簧的纵向刚度
 K_{y2} ——每台转向架中央弹簧的横向刚度
 K_{z2} ——每台转向架中央弹簧的垂直刚度
 $K_{\psi1}$ ——每一轮对的摇头角刚度
 $K_{\psi2}$ ——每台转向架中央弹簧的摇头角刚度
 $K_{\varphi1}$ ——每台转向架轴箱弹簧侧滚角刚度
 $K_{\varphi2}$ ——每台转向架中央弹簧侧滚角刚度
 K_g ——轮对的重力刚度
 k^e ——广义单元刚度矩阵
 k_b^e ——梁单元刚度矩阵
 k_e^e ——由支承弹性能产生的单元刚度矩阵
 K_l ——下部结构的刚度矩阵
 K_u ——上部结构的刚度矩阵

$\mathbf{K}_N$ ——大位移矩阵
 $\mathbf{K}_R$ ——约束刚度矩阵
 l_1 ——转向架轴距之半
 l_2 ——车辆定距之半
 l_i, m_i, n_i ——方向余弦分量
 L_{dn} ——一昼夜连续声级
 L_{eq} ——等效连续声级
 L_I ——声强级
 L_p ——声压级
 $L_{\bar{w}}$ ——声功率级
 M_c ——车体质量
 M_t ——每台转向架构架质量
 M_w ——每一轮对质量
 $\mathbf{m}^e$ ——广义梁单元协调质量矩阵
 $\mathbf{m}_b^e$ ——梁单元协调质量矩阵
 $\mathbf{m}_p^e$ ——考虑轨枕和道碴质量的集中质量矩阵
 $\mathbf{m}_w^e$ ——由轮对质量引起的单元质量矩阵
 $\mathbf{M}_l$ ——下部结构总质量矩阵
 $\mathbf{M}_u$ ——上部结构总质量矩阵
 $\mathbf{N}$ ——插值函数矩阵
 P ——机车导向车轮与钢轨之间的垂向力
 p_A ——声压
 p_e ——有效声压
 P_d ——车轮的动荷载
 P_{st} ——车轮的静荷载
 P_f ——失效概率
 $\bar{P}$ ——减载和增载侧车轮的平均轮重
 $\mathbf{q}$ ——作用于单元的面力向量

- Q ——机车导向车轮与钢轨之间的横向力
 Q^e ——单元结点荷载向量
 Q_b^e ——体积力荷载产生的单元等效结点荷载向量
 Q_p^e ——集中荷载产生的单元等效结点荷载向量
 Q_q^e ——分布荷载产生的单元等效结点荷载向量
 Q_l ——下部结构的结点荷载向量
 Q_u ——上部结构的结点荷载向量
 r_0 ——车轮的名义滚动圆半径
 r_{RV} ——钢轨回转半径
 r_{RH} ——钢轨竖向弯曲回转半径
 R ——耗散函数
 R_w, R_R ——车轮和钢轨半径
 $S(f)$ ——轨道不平顺功率谱密度
 $S_v(\omega)$ ——轨道高低不平顺谱
 $S_a(\omega)$ ——轨道方向不平顺谱
 $S_c(\omega)$ ——轨道水平不平顺谱
 $S_g(\omega)$ ——轨距不平顺谱
 $S_{PR}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的在时间 T 上平均的钢轨声压谱
 $S_{PW}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的在时间 T 上平均的车轮声压谱
 $S_{\dot{Y}_{RV}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的在时间 T 上平均的钢轨竖向速度谱
 $S_{\ddot{Y}_{RV}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的在时间 T 上平均的钢轨竖向加速度谱
 $S_{RW}(k)$ ——车轮表面不平顺谱函数
 $S_{RR}(k)$ ——钢轨表面不平顺谱函数
 $S_{\dot{Y}_{WR}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的环向平均的车轮径向速

度谱

$S_{\ddot{Y}_{WR}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的环向平均的车轮径向加

速度谱

$S_{\dot{Y}_{WA}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的环向平均的车轮横向速

度谱

$S_{\ddot{Y}_{WA}}^{AVG}(\omega)$ ——1/3 倍频程表示的环向平均的车轮横向加

速度谱

T ——系统的动能

T ——坐标转换矩阵

U^e ——单元位能

U ——系统总位能

U_B^e ——梁内的应变能

U_R^e ——约束弹簧的应变能

U_σ^e ——初应力产生的能量

v ——列车速度

W ——平稳性指标

$\overline{W}$ ——声功率

$y, z, \theta, \psi, \varphi$ ——车体横摆、沉浮、点头、摇头、侧滚位移

$y_d, z_d, \theta_d, \psi_d, \varphi_d$ ——前转向架构架横摆、沉浮、点头、摇头、侧滚位移

$y_2, z_2, \theta_2, \psi_2, \varphi_2$ ——后转向架构架横摆、沉浮、点头、摇头、侧滚位移

$y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}$ ——第 1、2、3、4 位轮对横摆位移

$z_{w1}, z_{w2}, z_{w3}, z_{w4}$ ——第 1、2、3、4 位轮对竖向位移

$\psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}$ ——第 1、2、3、4 位轮对摇头位移

$\varphi_{w1}, \varphi_{w2}, \varphi_{w3}, \varphi_{w4}$ ——第 1、2、3、4 位轮对侧滚位移

$y_{0e}(x)$ ——原始弹性弯曲

$y_{0p}(x)$ ——原始塑性弯曲

$y_{\Delta T}(x)$ ——升温 ΔT 以后梁的弯曲状态

$\dot{Y}_{WA}$ ——车轮横向运动速度

$\dot{Y}_{RH}$ ——钢轨横向运动速度

$\langle \dot{Y}_{RV}^2 \rangle_T$ ——钢轨竖向振动速度均方值

$\langle \dot{Y}_{WR}^2 \rangle_T, \langle \dot{Y}_{WA}^2 \rangle_T$ ——车轮径向、横向振动速度均方值

Z_{RH} ——钢轨横向阻抗

Z_{RV} ——钢轨竖向阻抗

Z_{RVH} ——作用在钢轨上接触点处的竖向荷载引起钢轨横向运动的阻抗

Z_{WR} ——车轮径向阻抗

Z_{WA} ——车轮横向阻抗

λ ——车轮踏面斜率

$\Delta a, \Delta \varepsilon, \Delta \sigma$ ——增量位移、增量应变、增量应力向量

ΔP ——轮重减载量

Δt_{crit} ——临界时间步长

Δt_m ——时间增量

$\bar{\varepsilon}$ ——平均声能量

ε^e ——单元线性应变向量

ε_N^e ——单元非线性应变向量

β ——可靠指标

ξ_x ——纵向蠕滑率

ξ_y ——横向蠕滑率

$\eta(x_i)$ ——坐标 x_i 处的轨面不平顺样本

η_{RV} ——钢轨竖向振动衰减系数

ρ ——质量密度

σ_{RV} ——钢轨竖向振动辐射系数