



# 现代轨道 理论研究

雷晓燕 圣小珍 著

XIANDAIGUIDAOLILUNYANJIU

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

# 现代轨道理论研究

雷晓燕 圣小珍 著

中 国 铁 道 出 版 社

2006年·北京

**ADVANCED STUDIES IN  
MODERN TRACK THEORY**

**Xiaoyan Lei  
Xiaozhen Sheng**

**China Railway Publishing House  
2006 Beijing**

## 内 容 简 介

本书是以雷晓燕教授为学科带头人带领的课题组二十余年来关于现代轨道理论与实践研究成果的系统总结。研究内容属现代轨道理论中的前沿问题,涉及高速铁路轨道动力学、现代铁路引起的环境振动、现代铁路引起的环境噪声、现代轨道稳定性及现代轨道中的力学问题等方面。全书共分9章,内容包括:高速铁路轨道动力学、现代轨道稳定性问题、现代轨道中的力学问题、地面列车诱发的环境振动、地下列车诱发的大地振动、高速铁路噪声预测方法、轮轨噪声与控制、统计能量分析基本理论和高架轨道噪声分析的统计能量法。

本书注重内容的严谨与完整,各章之间既有联系又相对独立,读者可通篇阅读也可按专题阅读;注重理论联系实际,增加信息量;期望把作者在本领域内的最新研究成果和发展动向介绍给读者。

本书可作为土木、交通、环境、道路与铁道工程专业本科生、研究生、教师和工程技术人员教材和参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代轨道理论研究/雷晓燕,圣小珍著. —北京:中国铁道出版社,2006.6

ISBN 7-113-04131-0

I. 现... II. ①雷...②圣... III. 轨道(铁路)—理论研究 IV. U213.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 038772 号

书 名: 现代轨道理论研究

作 者: 雷晓燕 圣小珍

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: 江新锡 陈若伟

责任编辑: 江新锡 任军

封面设计: 陈东山

印 刷: 北京市兴顺印刷厂

开 本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 15.5 字数: 390 千

版 本: 2006年9月第1版 2006年9月第1次印刷

印 数: 1~2 000 册

书 号: ISBN 7-113-04131-0/U·1413

定 价: 39.00 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。

编辑部电话:51873018 发行部电话:63545969 51873170



雷晓燕

华东交通大学教授，同济大学、西南交通大学兼职教授，博士生导师，国家“百千万人才工程”第一、二层次人才，江西省主要学科学术和技术带头人，美国机械工程师协会ASME高级会员，中国力学学会理事，江西省铁道学会副理事长，《铁道学报》、《交通运输工程与信息学报》、《铁道科学与工程学报》编委。

1982年和1984年在上海铁道大学先后取得学士和硕士学位，1989年在清华大学取得博士学位。1991-1994年奥地利因斯布鲁克大学访问学者，2001年日本九州工业大学客座研究员。主持国家、省部级科研项目30余项，发表学术论文110余篇，出版学术专著6部，获江西省自然科学一、二等奖，江西省科技进步二、三等奖共五项（均排名第一），通过省部级科研鉴定项目6项。



圣小珍

圣小珍，1982年毕业于南昌水利水电高等专科学校（现南昌工程学院）数学力学师资班，1987年在西南交通大学工程力学与数学系取得硕士学位，2001年在英国南安普敦大学声与振动研究所取得博士学位。1999年至2004年，在南安普敦大学声与振动研究所从事研究工作，研究方向为轮轨噪声、地面和地下列车产生的大地振动和噪声、钢轨表面不平顺的产生和控制。现任英国霍尔赛特工程公司声与振动高级工程师，英国声学学会会员，华东交通大学、南昌工程学院客座教授，西南交通大学牵引动力国家重点实验室客座教授。

## 前 言

从1964年世界上第一条高速铁路建成并投入运营以来,全球投入运营的高速客运专线已有4000 km,另有在建的6000 km。按照我国铁路“十一五”确定的目标,“十一五”期间,我国将新建铁路10000 km,其中客运专线5000 km以上,建成武广、郑西、石太客运专线,开工建设北京至武汉、哈尔滨至大连、天津至秦皇岛客运专线,建成京津、广珠、广深、沪宁、沪杭城际客运铁路……。以此为标志,我国铁路建设的新高潮已经到来。

然而,随着列车行车速度的不断提高,交通密度的日益增加,荷载的逐渐加重,列车与轨道的相互作用也随之加剧。为适应铁路发展的这种变化,世界各国铁路加强技术创新,在铁道工程中广泛采用新技术、新设计、新材料、新工艺和现代化的管理方法,并由此出现了现代铁路轨道的概念。现代铁路轨道是伴随着高速、重载铁路的出现而形成的,现代轨道必须适应客运快速、高速化,货运快捷、重载化的要求。与传统铁路轨道相比,现代轨道具有如下特点:①高标准的路基;②新型的轨下基础;③超长的无缝线路;④轨道养护维修的科学管理;⑤安全运营和铁路与环境的协调。显然,传统的轨道力学和结构分析方法不能适应现代铁路轨道分析和设计的需要。随着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,使得解决大量过去无法求解的和在铁路现代化进程中新出现的各种复杂的问题成为可能。

本书是以雷晓燕教授为学科带头人带领的课题组二十多年来关于现代轨道理论与实践研究成果的系统总结。在过去的20年中,作者带领的课题组先后获得了国家自然科学基金(50268001、50568002)、江西省自然科学基金(0250034、0450012)、中-奥、中-



日和中-英科研合作、教育部“高等学校骨干教师资助计划”(GG-823-10404-1001)、铁道部科技发展计划(98G33A),及江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(020001)等项目的资助,在高速铁路轨道动力学、现代铁路引起的环境振动、现代铁路引起的环境噪声、现代轨道稳定性及现代轨道中的力学问题等五个方面进行了深入和系统的研究,并取得了许多新的研究成果。研究内容均属现代轨道理论中的前沿问题,内容包括:高速铁路轨道动力学、现代轨道稳定性问题、现代轨道中的力学问题、地面列车产生的环境振动、地下列车产生的大地振动、高速铁路噪声预测方法、轮轨噪声与控制、统计能量分析基本理论和高架轨道噪声分析的统计能量法。参加项目研究工作的有:雷晓燕、圣小珍、宗德明、刘林芽、吕绍棣、毛利军、陈水生、刘朝阳、冯青松、罗文俊、赵重芳、熊杰等。

全书共分9章,其中第1、2、3、6、7、8、9章由雷晓燕撰写,第4、5章由圣小珍撰写,全书由雷晓燕统稿。

书中内容取材力求新颖、理论先进,尽可能把作者在本领域内的最新研究成果和国内外最新发展动向介绍给读者。注重理论的严谨与完整,各章之间既有联系又相对独立,读者可通篇阅读也可按专题阅读。注重理论联系实际,增加信息量。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。

作 者

2006年于孔目湖

## Preface

Since its opening of the world's first high-speed railway line in 1964, about 4 000 km of high-speed passenger lines have been put into commercial operations and another 6 000 km are currently under construction. According to the 11th five-year national plan, a total of 1 0000 km of new railways will be built in China, of which 5000 km are passenger lines. During the covered five years, constructions will be completed for passenger lines from Wuhan to Guangzhou, Zhengzhou to Xi'an, Shijiazhuang to Taiyuan, together with inter-city passenger lines such as Beijing to Tianjin, Guangzhou to Zhuhai, Guangzhou to Shenzhen, Shanghai to Nanjing, Shanghai to Hangzhou, and so on. In addition to that, constructions will be commenced for Beijing to Wuhan, Ha'erbin to Dalian and Tianjin to Qinghuangdao passenger lines.

It is well known that interactions between vehicles and railways become fiercer and fiercer as train speeds, operation density and axle loads increase. This has activated technical innovations by railway industries in every country by introducing new technologies, new designs, new material and modern management methods into railway infrastructures and equipment, and cultivated the emerge of the concept of modern railway track. Modern railway tracks are adapted for high-speed and heavy-haul railways in order to meet the requirements of fast and super-fast passenger transportations and heavy-haul freight transportations. In contrast to traditional railway tracks, modern railway tracks exhibit following features: (1) High



standard subgrade; (2) new types of track bed; (3) very long continuously welded rails; (4) scientific management of track maintenances; (5) safe operations and environment protection. It is obvious that traditional railway mechanics and structural analysis methods cannot meet the requirement in analysis and designs of modern railway tracks. Due to the rapid advances in computing technology in the past few ten years, new theories and methods have been continuously developed and applied to railway engineering and many old problems which were impossible to solve in the past, and new ones which have emerged during the modernization of railways, become possible to seek a solution.

In the past 20 years, a group of researchers led by Professor Xiaoyan Lei at East China Jiaotong University have endeavored to research into many issues associating with modern railway tracks, including high-speed railway track dynamics, railway induced environmental vibration and noise, stability or buckling of modern railway tracks and mechanics in modern railway tracks. Their research activities have been funded by the National Natural Science Fund of China (No. 50268001 and 50568002), the Natural Science Fund of Jiangxi Province (No. 0250034 and 0450012), the Education Ministry of China (GG-823-10404-1001, via the Funding Plan for Key Teachers in Universities), the Railway Ministry of China (98G33A, via the Science and Technology Development Plan) and Jiangxi Province (No. 020001, via the Training Program for Leading Scientists in Key Subjects). These activities were enriched through cooperation programs between China and Austria, China and Japan, China and UK All the issues they have investigated are cutting-edge problems in railway engineering and results from these research activities are expected to have significant impacts both aca-

demically and in practice. The aim of this book is to summarize these results. There are nine chapters which are: high-speed railway track dynamics; stability of modern railway tracks, ground vibration from surface trains; ground vibration from underground trains; prediction methods for noise from high-speed railways; wheel/rail noise and its control; basic theory of statistical energy analysis; and finally, statistical energy analysis of noise from elevated railroads. Chapters 4 and 5 were written by Dr Sheng and others by Prof. Lei who also assumed the responsibility for compilation of the whole book.

Efforts have been made to present theories rigorously and systematically and equally, to explore their applications in practice. Chapters are relatively independent of each other, so that readers can read chapters of their interest without referring too much to other chapters. The authors are well aware that there are rooms for improvement and comments and criticisms from readers will be highly appreciated. The authors are grateful to those who involved in the research and made contributions; they are Deming Zong, Linya Liu, Shaodi Lu, Lijun Mao, Shuisheng Chen, Zhaoyang Liu, Qingsong Feng, Wenjun Luo, Zhongfang Zhao and Jie Xiong. The authors also thank those who were helpful in writing and publishing this book.

## 本书所用主要符号

- $a_0, b_0$  —— 轮轨接触椭圆的长、短半轴
- $a_i$  —— 第  $i$  个轮对距第一个轮对的距离
- $a^e$  —— 单元结点位移向量
- $a_{m+1}$  ——  $m+1$  荷载步时梁的总位移
- $a_t, \dot{a}_t, \ddot{a}_t$  ——  $t$  时刻的位移、速度、加速度向量
- $a_l, \dot{a}_l, \ddot{a}_l$  —— 下部结构结点位移、速度和加速度向量
- $a_u, \dot{a}_u$  和  $\ddot{a}_u$  —— 车辆的位移、速度和加速度向量
- $A$  —— 钢轨的横截面面积
- $A_b$  —— 声屏障衰减量
- $A_e$  —— 附加衰减
- $A_h$  —— 房屋建筑引起的衰减
- $A_t$  —— 树木引起的衰减
- $A_s$  —— 考虑屏障和地面吸收衰减作用后的声级修正值
- $A_n$  —— 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
- $b$  —— 轨道结构与大地表面接触宽度的一半
- $B_n$  —— 第  $n$  阶车轮模态的横向导纳
- $B$  —— 单元应变矩阵
- $c$  —— 波速、车速
- $c_b$  —— 梁的弯曲波速
- $c_l$  —— 钢轨纵向波速、杆的纵波波速
- $c_p$  —— 相速度
- $c_g$  —— 群速度

$c_{\text{crit}}, c_{\text{min}}$ ——轨道临界速度

$c_1, c_2, c_R$ ——P-波、S-波和瑞利波的波速

$C_g$ ——重力角刚度

$C_{s1}, C_{s2}$ ——车辆一、二系悬挂阻尼

$C_{x1}, C_{y1}$ ——轨下垫层阻尼系数

$C_{y2}$ ——道床阻尼系数

$C_{y3}$ ——路基阻尼系数

$\text{Cov}(E_i', E_j')$ ——随机变量  $E_i', E_j'$  的协方差

$C^e$ ——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

$C_l$ ——下部结构的阻尼矩阵

$C_u$ ——车辆的阻尼矩阵

$D$ ——材料常数矩阵

$D_0$ ——黏弹性材料在一个应变周期中耗散的能量

$D(U)$ ——位移  $U$  的方差

$E$ ——材料的弹性模量

$EI$ ——梁的弯曲刚度

$E_R$ ——一根钢轨单位长度所具有的能量

$E_T$ ——单位轨枕长度所具有的能量

$E_t$ ——切线模量

$E_G$ ——单位长度钢梁翼板所具有的能量

$E(U)$ ——位移  $U$  的期望值

$\langle E_1 \rangle, \langle E_2 \rangle$ ——子系统 1, 2 实际的时间平均能量

$f$ ——频率

$f_{11}, f_{22}$ ——纵向和横向蠕滑系数

$f_u, f_l$ ——上、下截止频率

$f_{1/4}$ ——1/4 波长厚度共振频率

$F_x, F_y$  ——纵向和横向蠕滑力  
 $F_{wi}$  ——轮轨接触力  
 $f(x, t)$  ——  $t$  时刻  $x$  截面处的结点力向量  
 $f_c$  ——接触摩擦单元等效结点荷载向量  
 $F^e$  ——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、地面衰减系数  
 $G'$  ——储能剪切模量  
 $G''$  ——耗能剪切模量  
 $G^*$  ——剪切复模量  
 $G_i, G_w$  ——地面影响系数  
 $\langle G_{12} \rangle$  ——子系统 1, 2 之间平均功率流  
 $G_{ij}$  ——子系统  $i$  传输给子系统  $j$  的功率  
 $G_B, G_{NB}$  ——考虑了和未考虑屏障作用的地面衰减系数  
 $g_n$  ——标准自由落体加速度(又称重力加速度),  $g_n = 9.81 \text{ m/s}^2$   
 $h_j$  ——第  $j$  层土的厚度  
 $H_{\text{eff}}$  ——有效传播高度  
 $H(k)$  ——接触区滤波函数  
 $H_1^{(1)}$  ——一阶第一类汉克尔(Hunkel)函数  
 $H, G$  ——边界元方程系数矩阵  
 $i$  ——虚数  
 $I$  ——单位矩阵  
 $k$  ——波数、轨道等效刚度  
 $k_{Hl}$  ——第  $l$  个轮对与钢轨之间接触弹簧的刚度  
 $k_p$  ——单位长度轨枕垫板刚度  
 $k_{RV}$  ——钢轨弯曲波数  
 $k^e$  ——广义梁单元刚度矩阵  
 $k_b^e$  ——梁单元刚度矩阵

$k_e^e$  —— 由支承弹性性能产生的单元刚度矩阵  
 $k_N^e$  —— 大位移刚度矩阵  
 $k_R^e$  —— 约束刚度矩阵  
 $K$  —— 单位长度钢轨基础刚度  
 $K_f$  —— 低频时的扣件刚度  
 $K_g$  —— 重力刚度  
 $K_{s1}, K_{s2}$  —— 车辆一、二系悬挂刚度  
 $K_{x1}, K_{y1}$  —— 轨下垫层等效弹性系数  
 $K_{y2}$  —— 道床弹性系数  
 $K_{y3}$  —— 路基弹性系数  
 $K_w$  —— 轮轨间赫兹接触刚度  
 $k_C$  —— 接触摩擦单元等效刚度矩阵  
 $K_l$  —— 下部结构刚度矩阵  
 $K_u$  —— 车辆刚度矩阵  
 $K_0, K_1, K_2$  —— 2.5 维有限元方程中的刚度矩阵  
 $\tilde{K}(\beta, \lambda, \omega)$  —— 大地经傅里叶变换后的动力刚度矩阵  
 $l$  —— 单元长度  
 $l_p$  —— 机车长度  
 $l_t$  —— 列车长度  
 $l_{\text{ref}, i}$  —— 第  $i$  个子噪声源的参考列车长度  
 $L_1$  —— 转向架轴距之半  
 $L_2$  —— 车辆定距之半  
 $L_a$  —— 振动加速度级  
 $L_A(t)$  ——  $t$  时刻的 A 声级  
 $L_{\text{dn}}$  —— 昼夜连续声级  
 $L_{\text{eq}}$  —— 等效连续声级  
 $L_{\text{eq}}(h)$  —— 1 h 等效连续声级  
 $L_{\text{max}}$  —— 列车噪声最大声级

$L_p$  —— 声压级  
 $L_s$  —— 振动位移级  
 $L_v$  —— 振动速度水平, 或振动速度级  
 $L_{\bar{w}}$  —— 声功率级  
 $m$  —— 单位长度的轨道质量  
 $m_0$  —— 轮对质量  
 $m_B$  —— 单位长度道碴质量  
 $m_d, m_p$  ——  $1/4$  轨枕间道碴质量、轨枕质量  
 $m_{eq}$  —— 轨道等效冲击质量  
 $m_R$  —— 单位长度钢轨(两股)的质量  
 $m_t$  —— 轨枕质量  
 $m_w$  —— 车轮质量  
 $M_i (i=1, 2)$  —— 梁单元中第  $i$  个结点的弯矩  
 $M_c, J_c$  —— 车体的质量与转动惯量  
 $M_t, J_t$  —— 转向架的质量与转动惯量  
 $M_{wi} (i=1, 2, 3, 4)$  —— 第  $i$  个车轮的质量  
 $M_i(\theta)$  —— 结点  $i$  的扭转约束阻力矩  
 $M_T, M_G, M_R$  —— 单位长度的轨枕、钢板梁和钢轨的质量  
 $M_l^e$  —— 广义梁单元质量矩阵  
 $M_b^e$  —— 梁单元协调质量矩阵  
 $M_p^e$  —— 考虑轨枕和道碴质量的集中质量矩阵  
 $M$  —— 2.5 维有限元方程中的质量矩阵  
 $M_l$  —— 下部结构总质量矩阵  
 $M_u$  —— 车辆的质量矩阵  
 $n$  —— 大地的土层数  
 $n(f)$  —— 模态密度  
 $n_1, n_2$  —— 子系统 I, 2 的模态密度  
 $n_R, n_T, n_G$  —— 钢轨、轨枕和钢梁模态密度



$N$  —— 一列列车的车辆数、方程的维数

$N(f)$  —— 模态数

$P$  —— 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

$p(x)$  —— 概率密度函数

$p_x(x, y), p_y(x, y), p_z(x, y)$  —— 大地表面单位面积所受到的作用力在  $x, y$  和  $z$  方向的分量

$P_l(t)$  —— 第  $l$  个轮对与钢轨之间的作用力

$\tilde{P}_l(\Omega)$  —— 定义为  $P_l(t) = \tilde{P}_l(\Omega)e^{i\Omega t}$

$P_u(x, y, f), P_v(x, y, f)$  和  $P_w(x, y, f)$  —— 大地表面  $(x, y)$  处, 频率为  $f$  时的纵向、横向和垂向位移功率谱

$P_z(\beta)$  —— 钢轨垂向不平顺的功率谱密度

$\langle p^2 \rangle_T$  —— 路旁均方声压

$\tilde{P}^*$  —— 面力格林函数矩阵

$q(x, t)$  ——  $t$  时刻  $x$ -截面处的结点位移列向量

$q_{xi}(u)$  —— 结点  $i$  沿钢轨轴向的约束阻力

$q_{yi}(v)$  —— 结点  $i$  沿钢轨横向的约束阻力

$Q_i^e$  —— 集中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

$Q_u$  —— 车辆的等效荷载向量

$\tilde{Q}(\beta, \lambda, \omega)$  —— 大地经傅里叶变换后的动力柔度矩阵

$r_{RV}$  —— 钢轨惯性半径

$r_{RH}$  —— 钢轨横向弯曲惯性半径

$R$  —— 破坏比

$R_d$  —— 钢轨的动压力

- $R_W, R_R$ ——车轮和钢轨半径  
 $S(f)$ ——轨道不平顺功率谱密度  
 $SEL$ ——暴露声级  
 $SEL_{ref,i}$ ——第  $i$  个子噪声源的参考暴露声级  
 $SEL_{ref,i}^m$ ——第  $i$  个子噪声源的修正参考暴露声级  
 $S_{PR}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的在时间  $T$  上平均的钢轨声压谱  
 $S_{PW}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的在时间  $T$  上平均的车轮声压谱  
 $S_{Y_{RV}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的在时间  $T$  上平均的钢轨竖向速度功率谱  
 $S_{Y_{RV}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的在时间  $T$  上平均的钢轨竖向加速度功率谱  
 $S_{RW}(k)$ ——车轮表面不平顺功率谱函数  
 $S_{RR}(k)$ ——钢轨表面不平顺功率谱函数  
 $S_{rough}(k)$ ——用 1/3 倍频程表示的车轮和钢轨表面不平顺功率谱之和  
 $S_{Y_{WR}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的环向平均的车轮径向速度功率谱  
 $S_{Y_{WR}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的环向平均的车轮径向加速度功率谱  
 $S_{Y_{WA}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的环向平均的车轮横向速度功率谱  
 $S_{Y_{WA}}^{AVG}(\omega)$ ——用 1/3 倍频程表示的环向平均的车轮横向加速度功率谱  
 $S_p(f; \Omega)$ ——轮载谱  
 $S_u(x, y, f), S_v(x, y, f)$  和  $S_w(x, y, f)$ ——大地表面  $(x, y)$  处、频率为  $f$  时的纵向、横向和垂向位移谱  
 $S_u^0(x, y, f; \Omega), S_v^0(x, y, f; \Omega)$  和  $S_w^0(x, y, f; \Omega)$ ——由振幅为单