

铁路桥梁 动力学

DYNAMICS
OF RAILWAY
BRIDGES

[捷] Ladislav Frýba 著

齐法琳 孙 宁 等/译

黎国清 王 澜 校订



科学出版社

www.sciencep.com

铁路桥梁动力学

〔捷〕 Ladislav Frýba 著

齐法琳 孙 宁 等译

黎国清 王 澜 校订

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共 14 章。书中主要论述了铁路桥梁的基本动力学特性(固有频率和阻尼)以及列车速度、轨道不平顺等参数对桥梁动力特性的影响。本书除了介绍车辆对桥梁的竖向力影响外,还对水平力(纵向、横向)的影响进行了详细叙述。书中相应章节还对起动力、制动力、横向冲击、离心力以及车辆的蛇行运动也进行了阐述并引入了薄壁梁的理论模型。

此外,本书还用较大篇幅介绍了直接影响桥梁结构疲劳、寿命、检测周期以及养护维修工作的运营荷载。本书最后讨论了桥上无缝线路温度力,介绍了一些计算桥梁和无缝线路伸缩长度的方法。

本书可供铁路工程师、科研人员参考,也可以作为相关专业本科生和研究生的教学用书。

The Chinese edition is an approved translation of the work published by and the copyright of Ladislav Frýba.

版权所有,翻印必究

图书在版编目(CIP)数据

铁路桥梁动力学/[捷]Ladislav Frýba 著;齐法琳等译.

—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019129-8

I. 铁… II. ①L… ②齐… III. 铁路桥—构造动力学
IV. U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088249 号

责任编辑:王 彦/ 责任校对:赵 燕
责任印制:吕春珉 /封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)
2007 年 7 月 第一次印刷 印张: 18
印数: 1—2 000 字数: 329 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62147541(BZ08)

作者简历



Ladislav Frýba 教授,工学博士,自然科学博士,荣誉博士

出生年月:

1929 年 5 月 30 日,捷克塞米利县

教育经历:

1948~1953 年,捷克布拉格技术大学,土木工程系

1954~1957 年,布拉格交通研究院,研究生,指导老师 Koloušek 教授

学位:

1953 年, 硕士工程师
1959 年, 自然科学博士
1966 年, 工学博士
1993 年, 教授, 土木工程系, 捷克技术大学, 布拉格
2004 年, 荣誉博士, 交通系, Pardubice 大学

工作经历:

1953 年, 国家规划局, 布拉格, 公务员
1953~1954 年, 铁路技术大学, 布拉格, 助教
1954~1971 年, 交通研究所, 布拉格, 助理研究员, 研究员
1972~1984 年, 铁路研究所, 布拉格, 主任研究员, 桥梁部负责人
1984 年至今, 理论和应用力学研究所, 捷克科学院

教学活动:

在捷克和斯洛伐克的 VŠDS, Sv ČVUT, PTI 大学短期授课
在德国, 英国, 荷兰, 瑞士, 加拿大, 日本, 中国台湾, 德国国家材料检测与研究
中心(BAM), 柏林等国家和城市讲学
指导 6 位研究生和 6 位助理研究员

学术论文和出版物:

198 篇科学论文, 关于结构动力学, 包括 8 种文字(捷克文, 英文, 法文, 德文,
俄文, 斯洛伐克文, 波兰文, 日文)
6 本专著, 其中 5 本与他人合作, 1 本国际交流文集
下列 2 本著名书籍由布拉格科学出版社与伦敦 Thomas Telford 出版社联合发行
L. Frýba: “移动荷载作用下固体和结构的振动”, 第 3 版, 1999
L. Frýba: “铁路桥梁动力学”, 第 2 版, 1996
82 份研究报告
18 本专著审核
30 篇论文
两本杂志主编: “Stahlbau”(钢结构), “铁路桥梁和钢结构”(捷克和斯洛伐克
发行刊物)

科研活动:

承担 3 个资助项目 GA、AS、CR

共同承担 2 个资助项目 GA、CR

负责 2 个国际合作项目 MŠMT、KONTAKT

47 次桥梁荷载现场测试

190 次捷克和国外讲学

373 次为多种杂志审核学术论文

捷克 73 6209 号标准和 2 本国际铁道联盟 UIC778.1

UIC774.1 技术规范的作者

1967~2001 年 6 个 UIC 和 ERRI 专业委员会的成员和主席(UIC 国际铁道联盟, ORE 研究和试验办公室, ERRI 欧洲铁道研究所), 1967~2001 年

ORE D 28“铁路桥梁动力学”

ORE D 101“桥梁的制动和启动力, 桥梁与轨道的相互作用”

ORE D 128(主席)“铁路桥梁的轴向力和应力的统计分布”

ERRID 191(主席)“铁路桥梁正交异性桥面板的疲劳”

ERRID 212“行车速度大于 200km/h 的铁路桥梁”

ERRID 216(主席)“混凝土铁路桥梁的疲劳”

1991~2001 年, UIC 桥梁分会委员

交通结构领域专家证人

V ÚŽ, ITAM 科学委员会成员(3 位主席), DF JP UP, VŠDS 大学

教授资格评审委员会主席 DF JP UP, Sv ČVUT

Žilina 大学“应用力学”委员会主席

布拉格、Žilina、柏林、慕尼黑、代尔夫特、魁北克、伍伦贡等大学博士论文评审委员会成员

噪声和振动杂志, 结构杂志, V ÚŽ and VŠDS 论文集的编委成员

捷克及国外科学委员会和学术交流会成员

EURODYN1999 年国际学术交流会大会主席, 布拉格

捷克科学院的项目资助机构主席(技术科学类, 1997~1998 年)

学会职务:

1991 至今, 捷克力学协会主席

1996 至今, 捷克工程院院士

1996~1999 年, 欧洲结构动力学协会主席

推荐者的话

20 世纪 80 年代,王光远院士翻译的克拉夫先生的著作《结构动力学》对我们深刻认识铁路桥梁结构的动力作用有重要的借鉴作用。多年来,我一直期待能够将国外铁路桥梁领域的同行们的动力学方面的专著推荐给我国相关领域的研究者,最近由科学出版社出版的译著《铁路桥梁动力学》,使我的这一愿望成为现实。

铁路桥梁动力学是铁路桥梁研究、设计和检测评估的一门重要的专业基础学科,它具有基础研究的价值和实践指导意义。特别是对高速、重载线路桥梁的动力设计,由于日益采用新材料和新型桥上轨道结构,不仅仅需要动力仿真,更需要从复杂的模型中探索规律性的、有试验支持的一般趋势,这就是铁路桥梁动力学的价值所在。

本书作者 Ladislav Frýba 先生长期在欧洲从事铁路桥梁动力学的研究工作,是国际铁路联盟(UIC)多项相关研究工作的领导者和相应标准的制定者,特别是在铁路桥梁检测方面,他不仅具有扎实的理论功底,还积累了大量的实践经验。其积三十余年研究成果总结的《铁路桥梁动力学》,无疑对专业研究人员迅速了解学科前沿发展趋势,把握正确研究方法将有所启迪,同时对相关专业的师生也是一本不可多得的教材。

与本书著者有着同样工作背景的铁道科学研究院桥梁动力学和桥梁检测方面的研究者们,以其对本学科的深刻理解和准确把握,使本书的译文“信”、“达”,易懂,也将使本书有更多的读者。

相信本译著的出版,对推动和完善我国铁路桥梁的动力设计理论和指导铁路桥梁检测工作的实践均具有较大的参考价值。为此,郑重推荐从事本学科研究的同行们都能仔细研读本书,并相信定能获益良多!

中国工程院院士 方秦汉

2007 年春

译者的话

《铁路桥梁动力学》的著者是捷克桥梁专家 Ladislav Frýba 先生,他是捷克力学学会会长,工程院院士。他在 1996~1999 年间担任欧洲结构动力学协会主席,并且在 1967~2001 年间担任了几届欧洲铁路研究学会委员会成员或主席。Frýba 教授在结构动力行为研究领域素富盛名,曾于 1972 年著《移动荷载作用下固体和结构的振动》一书,《铁路桥梁动力学》是作者的第二本著作,为多年研究成果的结晶。这本书不但系统地解决了铁路桥梁在各种动力荷载作用下的分析理论,还进行了大量试验研究以验证其理论体系,其许多研究成果已被 ORE、ERRI 和 UIC 等引用并被采纳进入多种规范。此书出版后,广受欢迎,1992 年发行第一版后又于 1996 年经补充修订出版第二版。

我国目前正在进行高速铁路建设和既有铁路提速改造,列车对线路、桥梁的动力效应更加明显,其动力作用引起桥梁上部结构的振动会使结构构件产生疲劳,降低其强度和稳定性,而桥梁振动过大将会对桥上车辆的运行安全和稳定性产生影响;当列车的动力变化频率与桥跨结构自振频率相等或接近时,引起的共振会使车桥动力响应加剧,甚至可能会产生意外的破坏。因此,桥梁动力问题以及大跨度桥梁的动力设计和试验已经成为一个重要的研究领域,在国内外都受到了特别的重视。在此把《铁路桥梁动力学》介绍给专业研究技术人员和高等院校相关专业的师生,旨在共同加深对铁路桥梁动力行为理论和实践的理解,积极推动我国铁路事业的发展。

本书共 14 章。中文版序、自序、目录、第十章至十四章的译者为齐法琳(铁道部基础设施检测中心),第一章的译者为孙宁(铁道科学研究院咨询公司),第二章的译者为柯在田(铁道科学研究院铁道建筑研究所),第三、四章的译者为高芒芒(铁道科学研究院研发中心),第五章的译者为吴敬朴(铁道科学研究院研发中心),第六章的译者为高岩(铁道科学研究院铁道建筑研究所),第七章的译者为刘增杰(铁道部工程管理中心),第八、九章的译者为张焱(铁道部基础设施检测中心)。译稿的校对和统稿由齐法琳和张焱共同完成。终稿的校订为黎国清(铁道部基础设施检测中心)和王澜(铁道科学研究院研发中心)。译稿定稿前,还请 Ladislav Frýba 先生作了最后的确认。

限于译者的专业知识和英语水平,译文中不足之处在所难免,敬请各位读者批评与指正。

在本著作的翻译过程中,科学出版社的王彦和本书作者 Ladislav Frýba 先生

均给予了高度的关心和支持,谨在此表示衷心的感谢。

特别应该感谢的是,中国工程院院士、著名桥梁专家方秦汉先生,阅读本书后欣然提笔撰写了富有哲理的“推荐者的话”,更使本书增色。

译 者

2007 年 3 月

中文版序

运量的不断增加影响着桥梁的动力特性。乘客的数量、运送货物的重量以及运行的车辆速度都在近年来有较大增长。这样,桥梁就会产生更大的应力,更多的裂纹,结构的寿命因此而降低。

这就是写作《铁路桥梁动力学》的原因,这本书是作者在本领域多年理论和试验成果的总结。捷克国家基金项目以及欧洲铁路研究所(ERRI)和国际铁路联盟(UIC)的试验研究办公室(ORE)的研究项目是本书一部分内容的来源。

近年来,欧洲和远东地区建立了几条高速铁路线,开始进行高速交通运输(最高速度 500km/h)。这些线路上的桥梁产生重要的动应力,同时伴随着疲劳现象。而更重要的是这些线路所在国的温度有很大的不同。这就是在本书中详细研究高速列车作用下桥梁的动应力、桥梁的疲劳评估和桥上无缝线路的温度力等问题的原因。

本书有助于更好地理解高速列车作用下桥梁的动力行为,并对如何在不同的气候条件下,修建安全可靠的高速铁路桥梁提供指导。本书可供结构工程专业的学生使用。

最后,我要感谢我的前辈和同事们,是他们帮助我出版了这本书。特别要感谢译者齐法琳及其同事们,是他们通过对结构和桥梁工程问题的理解,将英文认真地翻译成中文,还要感谢科学出版社,正是由于他们的帮助,《铁路桥梁动力学》中译本才得以出版。

Prof. Ing. Ladislav Frýba, Dr. Sc., Dr. h. c.,
捷克共和国工程院院士

序

多年来,作者一直关注着作用于结构上的移动荷载并在《移动荷载作用下固体和结构的振动》(*Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*, Academia Publishers, Prague, and Noordhoff International Publishing, Groningen, 1972)^[68]一书中讨论了这一主题。

《铁路桥梁动力学》一书代表了作者的这一兴趣在铁路桥梁振动应用这个领域的延续。它是作者在解决不同的研究问题、科学问题及应用问题过程中,为国际铁路联盟(UIC)试验研究办公室(现在的欧洲铁路研究所(ERRI))所进行国际科研项目 ORE D 23、D 101 及 D 128 的过程中的理论和试验工作的结晶。

本书总结了作者对桥梁动力学的理论贡献,同时还总结了作者在捷克和斯洛伐克共和国以及国外所进行的许多桥梁试验的结果。本书分 14 章,系统介绍了铁路桥梁及在桥上通过的铁路车辆。本书总结了铁路桥梁的基本动力学特征(固有频率和阻尼),并描述了车辆速度、轨道不平顺等最重要的参数的影响。书中除了叙述车辆对桥梁的竖向力影响外,还讨论了车辆对桥梁的水平纵向和水平横向的影响。

本书尤其注重对行车荷载和铁路桥梁对荷载的响应的介绍。这些响应因素主要影响桥梁的疲劳、寿命、安全、养护维修及铁路运输的经济性。

桥上无缝线路的温度力问题在第 14 章讨论。这是一个静态的问题,但是对乘客的乘车环境和生态学均非常重要。

据预测,采用轮轨技术的列车运行的最高运行速度为 500km/h。但是,包括磁悬浮列车在内的高速铁路的进一步发展会使列车运行速度更高,非常有意思的是,可供这种具有气垫减震器的磁悬浮列车运行的结构也可使用参考文献^[68]和本书中提到的方法进行研究^[12,124,126,170]。

尽管本书讨论的范围很广,但是也还有一些不可能包括的内容,比如桥梁动力学中的风荷载^[114]和地震^[150]等问题(这些问题在中欧地区并不是很重要);还有一些是噪声^[161](由通过桥梁的车辆产生的噪声)等边缘学科问题。本书还有一个未包含的内容就是计算机程序,因为这些程序同所使用的相关硬件有关。

出版本书的目的就是提供有充分根据的铁路桥梁动力行为的调查,以及提供从许多桥梁上获得的丰富的试验数据并描述成功地应用于该领域的方法。本书适用于土木工程师和铁道工程师,也适用于关注列车通过时桥梁特性问题的科学家和学生们。

总之,我要感谢我所有的前辈和当前的同事们,同时还要感谢布拉格科学出版社和伦敦托马斯·特尔福德出版社,正是由于他们的帮助我的书才得以出版。

Ladislav Frýba

• vii •

主要符号表

a	常数 轴距 裂缝长度 运动的加速度或减速度
b	常数 阻尼常数或静摩擦常数 每年运营荷载的增量 线、桥相对位移
b_i	计算黏着系数
c	运动速度 常数 裂缝宽度
c_1, c_2	纵波或横波的传播速度
d	常数 轨枕间距
d_n	轴距
f	频率
f_g	均布活载作用下的挠度
f_j	固有频率
$\overline{f_j}$	有载桥梁固有频率
$f(x, t)$	单位长度荷载
$f(x, t)$	概率密度
$\dot{f}(x, t)$	随机函数 $f(x, t)$ 减掉均值后的函数
$g=9.81\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	重力加速度
$g_1(x)$	梁的初始挠度
$g_2(x)$	梁的初始速度
h	高差 板厚
k	常数 弹簧刚度

	Wöhler 疲劳曲线斜率
l	桥跨
	长度
m	质量
	系数
m_i	长度之比
n	每年应力循环数
	连续梁孔数
n_i	第 i 级应力循环数
n_T	每年列车数
p	水平横向均布荷载
q	广义位移
	纵向荷载
	桥上线路数
r	车轮、曲率、惯量半径
	连续梁的跨度比
$r(x)$	轨道不平顺
s	幅值
	辅助变量
	标准差
t	时间
	温度
$u(x, t)$	沿 x 轴方向的位移
$u(t)$	表示力的运动函数
v	速度 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
$v(x, t)$	沿 y 轴方向的位移
v_{st}	自重引起的跨中静挠度
v_0	在跨中力 F 作用下跨中挠度
$\text{var}(\tau)$	时间函数
$w(x, t)$	沿 z 轴方向的位移
$w(x, y, t)$	板的挠度
x	坐标
y	坐标
	竖向不平顺
z	坐标
	横向不平顺

A	常数
	横截面面积
B	常数
	加速或减速运动参数
	桥梁动刚度
C	常数
C_g	重心(质心)
C_s	挠曲中心
$C_f(x, t)$	随机函数 $f(x, t)$ 的变差系数
$C_{xy}(x_1, t_2)$	随机函数 $x(t)$ 或 $y(t)$ 的协方差
D	常数
	疲劳损伤
	板的弯曲刚度
	标准差
D^2	方差
D_n	无量纲轴距
E	弹性模量
	试验
E_{jn}	常数
$E[f(x, t)]$	随机函数 $f(x, t)$ 的均值
F	力
	车辆重量
	线路频率
$F(t)$	时变力
F_{cfg}	离心力
G	桥的重量
	剪切弹性模量
$G(x, s)$	影响函数或格林函数
$G_{\pi}(\Omega)$	不平顺的功率谱密度(单边)
$H(t)$	水平力
H_y	水平横向力
I	惯性矩
K	弹簧力
	应力强度系数
L	长度
	桥梁寿命

	不平顺长度
	桥梁伸缩长度
L_i	桥梁检查间隔
M	弯矩
	均值
N	水平纵向力
	法向力
	轴数
	应力循环数
N_i	最终应力循环数
N_T	桥梁寿命期内通过列车数
P	概率
S_i	钢轨水平力
$S_{ff}(q_1, q_2, \omega_1, \omega_2)$	随机函数 $f(x, t)$ 的功率谱密度(双边)
T	每年的运营荷载(110^6 t)
	无量纲系数
	固有振动周期
	理论
$T(t)$	张力
$U(x)$	Heaviside 单位函数
$V(x, t)$	变差系数
V_{nm}	第 n 个力与第 m 个力的相关矩阵
W	截面模量
$W(t)$	运动阻力
X_i	桥梁支座下的水平纵向力
Y	水平横向力
Z_i	桥梁支座下的竖向反力
$Z_{nm}^2(z)$	函数
α	速度参数
	角度
	热膨胀系数
β	阻尼参数
γ	置信度系数
	内阻尼系数, 荷载系数
δ	动力系数
$\delta(x)$	迪拉克函数

ε	应变
$\varepsilon=0$ 或 1	
$\varepsilon \ll 1$	无穷小量
$\zeta(t)$	摇头
$\eta(t)$	点头
ϑ	对数衰减阻尼
χ	重量参数
λ_i	无量纲应力幅
λ_j	决定于固有频率的值
λ_T	疲劳加载系数
μ	单位长度梁的质量或单位面积板的质量
	摩擦系数
ν	泊松比($\nu < 1$)
ξ	无量纲长度坐标
$\xi(t)$	滚动
ρ	力臂
$\sigma(x, t)$	应力
$\sigma_v^2(x, t)$	挠度方差
τ	无量纲时间
	辅助时间变量
φ	动态增量
	无量纲参数
	面坐标
	角度
φ_j	相位
ω	圆频率
	力通过时的圆频率
ω_b	有阻尼圆频率
ω_d	阻尼振动的圆频率
ω_j	固有圆频率
Γ	伽马函数
$\Delta\sigma$	应力幅
Δt	轨温与安装温度之差
ΔT	桥梁温度与安装温度之差
Σ	求和
Φ	无量纲摩擦力

$\Phi(x)$	高斯正态分布的分布函数
Ω	正谐力的圆频率 非均匀运动的圆频率 轨道频率

下标

adm	容许值
b	阻尼
cfg	离心
com	比较
cr	临界值
d	阻尼
ev	等价
h	水平
kt	屈服极限
n	标准荷载
w	水平横向
y	水平
F	固端支座
M	活动支座
T	运营
ξ	扭转
φ	扭转

上标

',", IV	关于长度坐标的微分
'	阻尼振动
...	关于时间的微分
—	有载
*	复数量

测量单位

国际单位制(SI)

长度	米(m), 毫米(mm), 千米(km)
力	牛顿(N), 千牛(kN), 兆牛(MN)
质量	千克(kg), 吨(t)