

车辆与结构动力相互作用

Dynamic Interaction of Vehicles and Structures

(第二版)

夏 禾 张 楠 著



科学出版社

www.sciencep.com

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

车辆与结构动力 相互作用

(第二版)

夏 禾 张 楠 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较全面地介绍移动荷载作用下车辆-结构动力相互作用的研究历史和发展现状、车辆-结构动力相互作用分析的理论与方法、车桥系统的自激激励与随机模拟、车桥系统的振动控制标准、风与地震荷载作用下车桥系统的振动、交通系统对环境及周围建筑的振动影响,以及交通车辆(铁路列车、地铁和轻轨列车等)与结构动力相互作用研究在桥梁、隧道、环境工程中的应用。重点介绍车辆与结构动力相互作用的分析理论、分析方法及其工程应用。

本书作为教育部学位管理与研究生教育司推荐的研究生教学用书出版,可作为高等学校研究生教材和大学的教学参考书,并可供相关科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆与结构动力相互作用/夏禾,张楠著. —2版. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015534-3

I. 车… II. ①夏…②张… III. 铁路车辆-结构动力分析
N. U270.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第048402号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:柏连海

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005年8月第 二 版 印张: 26 3/4

2005年8月第二次印刷 字数: 524 000

印数: 3 001—6 000

定价: 55.00 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 010-62137026(BA06)

第二版前言

本书第一版出版三年多来,我国轨道交通事业获得了高速的发展,车辆与结构的动力相互作用问题更加受到人们的重视。在铁路方面,设计时速 200km 的秦沈客运专线已经建成通车,时速 300km 的京津、郑西、武广等客运专线、时速 350km 的京沪高速铁路及时速 200km 的客货混运铁路线正在进行规划设计;几条铁路干线正在进行速度目标客车 200km/h、货车 120km/h 的提速改造,25t 轴重列车、大秦线万吨运煤列车等重载列车的开行也正在进行技术准备。在这些工程的实施过程中,需要对高速、重载列车作用下的桥梁如京沪高速铁路南京长江大桥、济南黄河大桥、武汉天兴洲大桥以及各种常用跨度的简支梁和连续梁桥进行动力设计,而通过列车与桥梁耦合动力分析确定车辆与桥梁的动力特性已经成为一项必不可少的重要工作。在城市轨道交通方面,总长超过 1000km 的地下铁道、城市轻轨以及磁悬浮铁路、直线电机铁路系统等轨道交通的规划和建设正在北京、上海、重庆、广州等大城市全面展开,而轨道交通车辆与结构的动力相互作用分析在城市轨道交通的减振降噪方面也发挥着重要的作用。目前,《车辆与结构动力相互作用》一书已被许多高等院校选作博士和硕士研究生教材使用,并被很多科研人员和工程技术人员作为开展本领域研究和工程设计工作的重要参考书目之一。

三年来,在继续完成本书第一版前言所列科研资助项目的同时,作者又新获得了国家自然科学基金(50478059)、北京市自然科学基金(8042017)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20040004022)以及比利时-中国科技合作基金(BIL04/17)、北京交通大学科技基金(2004SZ005)等项目的资助,使车辆与结构动力相互作用的研究得到了进一步的发展,取得了许多新的研究成果。作者希望能及时地将这些新的研究成果补充到本书的内容中去,以满足读者的需要。

恰逢此时,承蒙读者的厚爱和有关专家的支持,本书被教育部学位管理与研究生教育司推荐为研究生教学用书,使我们有机会将此书正式作为研究生教材再版。

作为研究生教材,应具有内容的系统性并体现学科发展的前沿性。本书第二版在 2002 年出版的第一版的基础上,根据作者近年来承担国家、铁道部、教育部和北京市等一系列相关研究项目所取得的最新研究成果,进行了较多的补充和修订:第二章补充了连续分布参数梁体系的动力分析;第四章结合新的《铁路桥梁检定规范》、《京沪高速铁路设计暂行规定》、《时速 200km 客货混运铁路设计暂行规定》等的颁布实施,补充和修改了有关桥梁振动评价标准的内容;第五章增加了车桥系统

共振理论及分析实例;第六章补充了列车平均风作为横向移动荷载对桥梁的动力作用;新增加了第八章铰接式列车车桥系统动力相互作用分析,并介绍了在布鲁塞尔—巴黎高速铁路线上进行的桥梁动力试验;新增加了第九章考虑轮轨滚动接触机理的车桥系统分析模型,并介绍了秦沈客运专线桥梁综合动力试验;原第八章改为第十章,补充了一些新的环境振动控制标准及运行列车对周围建筑物振动影响的试验等内容。在各章的参考文献部分还相应地补充了各国学者近几年在车辆与结构动力相互作用研究领域新发表的论著,使本书的参考文献总数达到 500 多篇,更便于读者追踪本领域的研究进展和发展方向。

全书的统编及第一、二、三章内容的补充和修订工作由夏禾负责;第四、五章内容的补充修订及第八、九章的撰写由张楠负责;郭薇薇负责第六章,韩艳负责第七章,曹艳梅负责第十章内容的补充和修订工作;曹艳梅、郭薇薇、战家旺、卢建、姚锦宝参与了文字整理工作。

由于作者水平有限,书中仍难免有缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

夏 禾

2004 年 12 月于北京交通大学

第一版前言

随着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,交通车辆(铁路、公路、地下铁道等)与结构(桥梁、隧道、房屋建筑等)的动力相互作用越来越受到人们的重视。一方面,移动车辆对结构物的动力冲击作用对结构的工作状态和使用寿命产生直接影响;另一方面,结构上运行车辆的平稳性和安全性又是评价结构动力设计参数合理与否的重要考虑因素。因此,对车辆-结构动力相互作用系统进行综合研究,以便对结构的动力性能和结构上(中)车辆的走行性作出动力分析和评估,确定它们在各种状态下的使用可靠性,是合理进行铁路、公路、城市轻轨、地铁等结构设计的工程实际需要,对于承受移动荷载的交通土建工程结构物的发展和设计建造具有十分重要的理论和实际意义。

目前,多数交通发达的国家都十分重视车辆与结构动力相互作用问题的研究工作,主要采取理论分析与数值计算、模型试验和现场实测等几种方法进行研究。研究成果极大地促进了这些国家交通土建结构工程的发展。

在国内,研究工作者先后建立了多种系统分析模型,对车辆-结构系统的动力响应问题进行了深入的研究,已经结合工程实际取得了许多有益的研究成果。可以说,国内在车辆-结构系统动力相互作用模型的建立和计算分析方法的研究方面,已经走在世界的前列。

作者从 20 世纪 80 年代初在陈英俊教授的指导下开始从事车桥系统相互作用和结构动力可靠性理论的研究。20 年来,先后主持和参加国家及省部级的科研项目 30 余项,研究范围涉及本领域的各个方面:1982~1984 年,将车辆简化为一系悬挂系统模型,将桥梁简化为模态模型,利用模态综合法建立了可考虑桥墩及基础影响的车-桥-墩体系动力相互作用问题分析模型,研究了列车荷载作用下高桥墩的动力响应及其对桥上列车运行稳定性的影响,并在成昆线上进行了四座高墩桥梁的动力试验,验证了系统分析模型的正确性;1985~1988 年,采用理论计算和现场试验相结合的方法研究了刚梁柔拱组合系桥的振动问题;1989~1990 年,与比利时 Leuven 大学合作研究时间序列分析模型在结构动力参数识别、车桥系统随机激励的人工模拟方法中的应用;1990~1994 年,研究了脉动风与列车荷载同时作用下刚梁柔拱组合系桥的动力响应及其使用可靠度、列车-斜拉桥系统在风荷载作用下的动力响应问题;1995 年,建立了列车-轨道-桥梁-墩台系统分析模型并计算了系统的振动响应,分析了地震作用下车桥系统的动力响应;1995~1996 年,研

究了高速铁路中小跨度桥梁合理结构形式及桥梁支座的动力特性;1996年,对铁路双线简支钢桁梁的动力响应、连续梁桥的动力响应以及双线简支梁桥的空间振动响应进行了分析;1997年开始对列车提速情况下钢板梁桥横向振动问题及加固方案做了大量研究工作,其成果已经用于实际工程;1998年,对随机荷载作用下桥梁的动力行为及车辆的运行安全性进行了评估;1998年以来,与西南交通大学、铁道部科学研究院、长沙铁道学院合作研究了秦沈客运专线桥梁动力特性及列车走行性,研究成果为我国第一条客运专线的桥梁设计提供了重要的动力参数;1999年开始与香港理工大学合作,对当今世界上最长的公铁两用桥——香港青马大桥在强风作用下的列车通行性问题进行了合作研究;作为第一步,已经发表了列车荷载作用下大跨度悬索桥车桥动力相互作用以及强风作用下大跨度悬索桥车桥系统动力响应的研究成果;2000年,组织专家在布鲁塞尔—巴黎之间的高速铁路上进行了高速铁路桥梁动力测试,试验车速高达314km/h,取得了丰富的经验和实测结果;近几年,与比利时Leuven大学合作,通过国际合作项目,建立了列车-轨道-桥梁-基础-土层-建筑物的动力相互作用分析模型和列车-轨道-隧道结构-周围土层-建筑物的动力相互作用分析模型,并结合现场实测的方法,对交通系统引起的环境振动问题进行了深入的研究。

研究工作先后得到了国家自然科学基金(59678026、50078001)、国家教委高等学校博士学科点专项科研基金(200000407)、国家科委“八五”和“九五”科技攻关项目、北京市自然科学基金、铁道部科技研究开发项目,以及比利时-中国科技合作基金(BIL98/09)、香港政府科技发展基金(PolyU5043/01E)等项目的资助。

本书是在作者20年研究成果的基础上经补充、完善而完成的。在20年的研究过程中,始终受到陈英俊教授的指导;一些项目是和张弥、许克宾、范俊杰、闫贵平、张鸿儒、刘维宁、G. De Roeck 和 Y. L. Xu 等教授共同完成的;部分内容引用了研究生张楠、于大明、郭薇薇、张宏杰、王庆波、曲经建、曹艳梅等的研究成果;曹艳梅、张楠、郭薇薇参与了编写工作。作者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有缺点和错误之处,恳请读者批评指正。

夏 禾

2001年12月于北方交通大学

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪 论	1
1.1 车辆与结构动力相互作用研究的历史演进与发展现状	1
1.2 车辆与结构动力相互作用问题的研究内容	16
1.3 引起车桥系统振动的原因	18
1.4 车桥动力相互作用的分析方法	20
参考文献	29
第二章 结构动力分析的基本理论和方法	37
2.1 单自由度体系振动分析	37
2.2 多自由度体系振动分析	57
2.3 分布参数体系振动分析	68
2.4 逐步积分法	78
参考文献	92
第三章 车桥系统的自激激励与随机模拟	93
3.1 轨道不平顺	93
3.2 车辆蛇行运动	106
3.3 车桥系统随机激励的自回归模型描述	109
参考文献	113
第四章 车辆-桥梁系统的振动性能评价标准	115
4.1 车辆运行安全性标准	115
4.2 车辆运行平稳性标准	118
4.3 桥梁动力性能评定及标准	125
参考文献	138
第五章 车桥系统动力相互作用分析	140
5.1 简支梁在移动力作用下的振动	140
5.2 简支梁在移动集中质量作用下的振动	143
5.3 简支梁在移动均布质量作用下的振动	146
5.4 简支梁在移动车轮加簧上质量作用下的振动	149

5.5	车桥系统动力相互作用分析模型	154
5.6	模型应用中的几个问题	171
5.7	车桥系统共振分析	178
5.8	车桥系统随机振动的统计分析	187
5.9	车桥系统动力响应分析实例	190
	参考文献	198
第六章	风荷载作用下车桥系统的振动	199
6.1	风荷载的特性	199
6.2	风荷载的模拟	210
6.3	单自由度体系风振分析	212
6.4	风荷载作用下车桥系统动力分析模型	215
6.5	桥上运行车辆的抗风安全性	225
6.6	风荷载作用下车桥系统动力响应分析实例	227
6.7	车辆移动风压对车桥系统振动的影响	238
	参考文献	249
第七章	地震荷载作用下车桥系统的振动	252
7.1	地震波的特性	252
7.2	人工地震波	260
7.3	结构体系地震反应分析	268
7.4	地震荷载作用下车桥系统动力分析模型	274
7.5	地震作用下桥上车辆的运行安全标准	276
7.6	地震作用下车桥系统动力响应分析实例	284
	参考文献	289
第八章	铰接式列车与桥梁耦合动力分析	291
8.1	铰接式列车概述	291
8.2	铰接式列车车桥耦合系统动力分析模型	294
8.3	高速铁路铰接式列车车桥系统动力响应分析实例	307
	参考文献	319
第九章	考虑轮轨滚动接触机理的车桥耦合动力分析	321
9.1	轮轨接触几何参数	321
9.2	轮轨接触力的确定	328
9.3	考虑轮轨滚动接触机理的车桥系统动力分析方法	335
9.4	秦沈客运专线狗河特大桥车桥系统动力分析	342
9.5	高速铁路大跨度钢桁拱桥车桥系统动力分析	354
	参考文献	359

第十章 交通系统对环境的振动影响及控制	361
10.1 概述.....	361
10.2 环境振动对人生活和工作影响.....	366
10.3 环境振动的控制标准.....	369
10.4 交通荷载引起环境振动的分析方法.....	376
10.5 交通系统对环境的振动影响.....	391
10.6 环境振动的控制对策.....	404
参考文献.....	413

第一章 绪 论

1.1 车辆与结构动力相互作用研究的历史演进与发展现状

近些年来,随着人类社会的飞速发展和科学技术的不断进步,交通运输系统在规模和技术水平上都有了很大的提高。在各种交通系统(铁路、公路、地下铁道等)中,车辆运行速度不断加快,车流密度日益增加,车辆载重也逐渐加大。在这种背景下,车辆与结构(桥梁、隧道、房屋建筑等)的动力相互作用问题越来越受到人们的重视。一方面,高速运行的车辆(图 1.1)会对所通过的结构物产生动力冲击作用,使结构发生振动,直接影响其工作状态和使用寿命;另一方面,结构的振动又会对运行车辆的平稳性和安全性产生影响,使得结构的振动状态成为评价结构动力设计参数合理与否的重要指标。因此,对车辆-结构动力相互作用系统进行综合研究,以便对结构的动力性能和结构上(中)运行车辆的走行性做出动力分析和评估,确定它们在各种状态下的使用可靠性,是合理进行铁路、公路、城市轻轨、地铁等工程结构设计的实际需要,对于承受移动荷载的交通土建工程结构物的设计和建造具有十分重要的理论和实际意义。



图 1.1 高速列车与桥梁的动力相互作用(比利时)

以铁路列车过桥问题为例,当列车通过铁路桥梁时,不可避免地会引起桥梁振动,此时的桥梁结构不仅要承受静力作用,还要承受包括移动荷载(列车以一定速度通过时对桥梁的加载和卸载)以及由于桥梁和车辆振动产生的惯性力等各种动力作用。这些动力作用引起的桥梁振动可能使结构构件产生疲劳,降低其强度和稳定性;桥梁振动过大时,还会对桥上车辆的运行安全性和稳定性产生影响。当列车的动力变化频率与桥跨结构的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,甚至产生意外的破坏。1847年英国的 Chester 铁路桥在列车通过时因振动过大而折断就是一个典型的例子。每一次重大事故的发生都会给人们带来惨重的经验教训,帮助人们不断改进结构的设计,使之适应客观规律。因此,车桥动力相互作用问题一直受到各国桥梁设计工作者的重视。特别是近几十年来,随着高速铁路的出现和大跨度桥梁的发展,车桥动力相互作用问题的研究已成为桥梁振动领域中一个重要的课题。

1.1.1 车辆与结构动力相互作用研究的历史演进

车辆与结构动力相互作用的研究是从 19 世纪早期铁路出现后,人们注意到列车活载对桥梁的动力影响时开始的,至今已有近 200 年的历史。

在 20 世纪 40 年代之前的研究中,各国学者采用了两类侧重点不同的研究方法:一类以试验为主要手段,另一类则侧重于理论分析。

就试验方法而言,由于小比例模型试验难以模拟复杂的轮轨相互作用关系,车桥系统的振动试验往往采用原型试验或现场实测的方法,这样得到的结果能客观而综合地反映桥梁在列车动载作用下的实际工作状况。但如果仅停留在试验阶段,而不去进一步揭露其内在规律,结果往往是为了确定新的动态参数而不得不随着桥梁结构类型、跨度及车辆性能等的不断变化而进行大量的重复试验,这样不仅耗资巨大,而且周期较长。因此,单纯的试验方法往往受到许多限制。

另一方面,单纯利用理论分析来解决这一问题也是很困难的。这是因为,车辆荷载作用下的桥梁振动是一个十分复杂的课题,要想通过理论分析得到符合实际的结果,必须考虑很多因素,包括车体和转向架的质量,阻尼器和弹簧的作用,行车速度,梁跨和墩台的质量、刚度和阻尼,桥上轨道结构的型式,轨道的动力特性,车轮和轨道、轨道和梁之间的动力相互作用关系等,此外还有车轮的不平顺、轨道的几何和动力不平顺以及轮对的蛇行运动等诸多随机因素的影响,这使得体系的力学模型十分复杂。所以,尽管对梁的动力分析早已有了比较成熟的算法,但由于受到计算手段的限制,不得不采用各种各样的近似方法,建立十分简单的桥梁和车辆系统分析模型。例如,把列车荷载简化成移动的常力或确定性简谐激励,把列车的动力状态考虑为平稳移动的质量模型、孤立的冲击力模型或是由弹簧和阻尼器所

连接的簧上质量模型等。利用这些简化模型时,面临的首要问题就是需要对其建模的合理性进行验证,而这又只能通过试验才能解决。

因此,列车与桥梁的动力相互作用问题通常采用理论分析与试验相结合的方法进行研究:用试验结果验证理论模型的正确性,用验证过的、正确的理论模型进行车桥耦合振动的仿真分析,研究结构各参数对振动的影响,分析各种运营条件下列车、桥梁的安全性。

在车桥系统动力相互作用问题研究的长期发展进程中,人们建立了从简单到复杂的各种分析模型。图 1.2 可以说明这些分析模型的演变历史,其中梁的模型都是弹性的连续体,不同的是移动荷载的简化形式:

图 1.2(a)是最早的模型,它只能考虑移动的不变力荷载。

图 1.2(b)模型考虑了力,如谐振力或冲击力等荷载的变化。例如在 Krylov 和 Timonshenko 等人的研究中,用简谐荷载模拟了机车动轮偏心对桥梁的冲击作用,并从理论上分析了共振现象的发生机理^[36,37]。

图 1.2(c)模型的荷载考虑了移动的质量,即考虑了质量的惯性力。1849 年,Willis 最先分析了“一个非跳跃质量跨过无质量梁”的近似解^[44],Stokes 则用级数方法得到了问题的精确解^[81]。1934 年,英国的 Inglis 根据现场实测资料,同时考虑机车车辆和桥梁的质量,将列车荷载简化为移动的周期力和移动的惯性力来进行研究^[25],他所得到的近似理论解与实测数据比较接近。1937 年,Schallenkamp 以这一力学模型为基础,将桥的挠度和车轮的惯性力都展开为 Fourier 级数,然后求系数间的相互关系,分析了单轮过桥问题^[81]。1953 年,前苏联学者 Muchnikov 用积分方程的方法对既考虑桥梁本身质量又考虑活载质量的问题进行了比较严格的分析^[28]。1956 年,Mise 和 Kunii 等对 Inglis 的理论进行了补充和修正,建立了相应的计算方法^[27]。

图 1.2(d)模型用弹簧和阻尼器将簧下和簧上两个质量联接在一起,可以同时考虑两个质量的惯性力及其相互作用。

图 1.2(e)模型已经是比较现代的模型了,簧上质量同时考虑了平动(竖直)和转动两个惯性力,可以较好地模拟一个二轴车或转向架的竖向振动。1960 年,Wen 假定桥梁动力挠曲线的形状与静力挠曲线相似,并考虑路面不平顺的影响,用能量法研究了两轴车辆(汽车)的过桥问题^[81]。按这样的简化模型导出的体系运动方程和分析方法仍然具有很大的局限性,由此得到的分析计算结果能够获得车桥动力响应在某些方面的大概趋势,但不能全面地反映实际情况。

从 20 世纪 70 年代开始,车桥动力相互作用问题的研究突破了传统框架,进入了系统动力学研究阶段。如图 1.2(f)所示,这种模型可分析桥梁的竖向动力学特性,其中有限元法作为一种通用方法起了很重要的作用,但由于没有考虑体系的扭

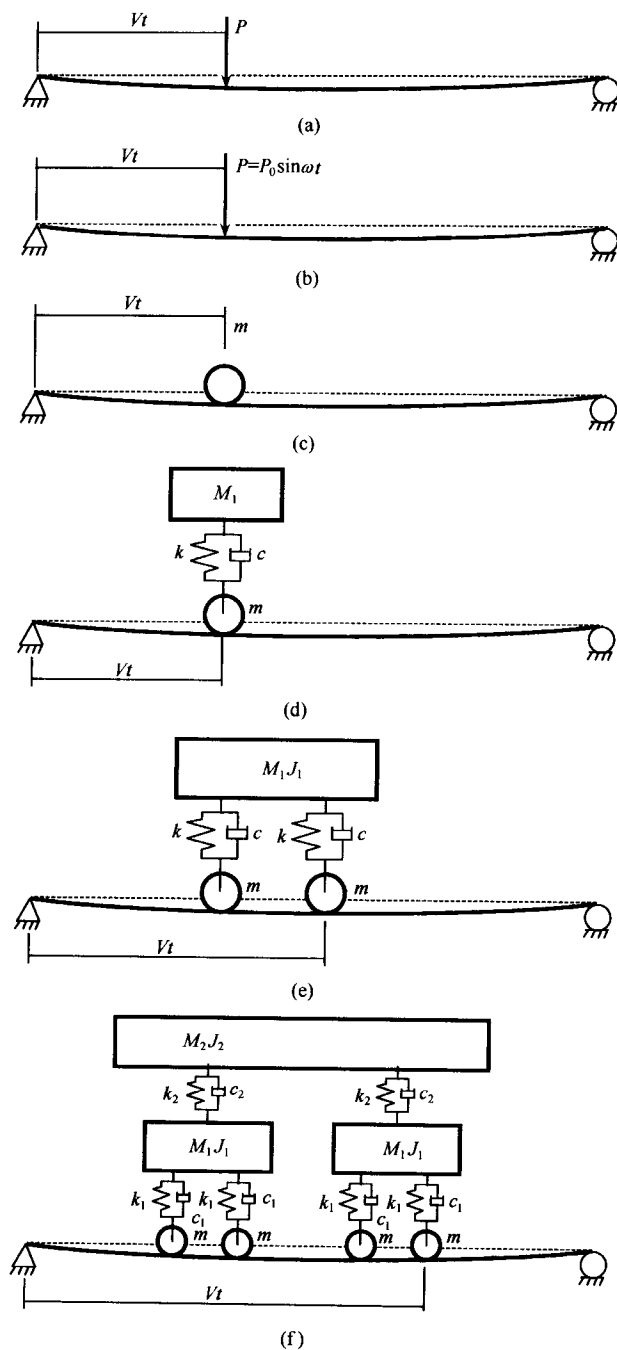


图 1.2 车桥动力相互作用分析模型的演变

转效应,无法反映车体复杂的运动状况。

提到移动荷载作用下桥梁动力响应问题的研究,不能不提到前捷克斯洛伐克科学家 Frýba 教授,他的 2 部专著^[16,18]在国际上影响很大,被认为是研究车桥动力相互作用问题的经典文献。Frýba 把车辆和桥梁作为一个体系,导出了从移动力、移动质量到包括弹簧阻尼器在内的转向架等各种模型作用于简支梁时的解析解。他进一步假定桥跨结构为常截面具有粘滞阻尼性质的简支实体梁,移动车辆为具有四个自由度的质点系,考虑桥上轨道刚度、轨道不平顺、蒸汽机车动轮不平衡质量等影响,建立了力学模型和运动方程。Frýba 还通过理论计算,分析了一座跨度为 19.6m 的单线双层公铁两用钢桥的动力响应,并与原联邦德国铁路(DB)在 1967 年所做的试验结果进行了对比^[18](图 1.3)。他还对跨度为 5~50m 的各种混凝土梁和钢梁在德国 ICE、法国 TGV/Euro-Star 和西班牙 Talgo 三种高速列车以 5~500km/h 速度通过时的动力响应特性进行了详细的研究,用统计方法分析了车桥系统各种参数以及行车速度、车辆上桥初始状态等因素对不同跨度桥梁的动力影响^[15~18]。

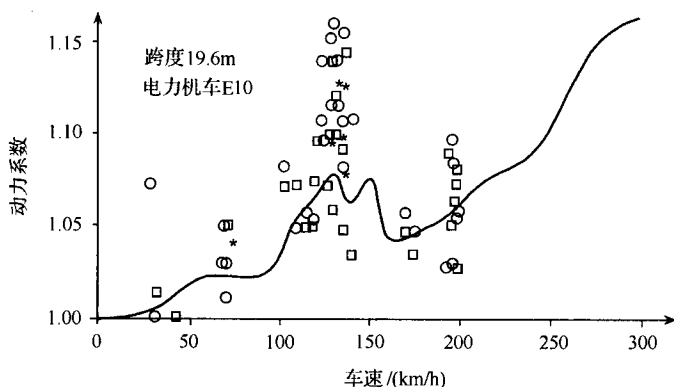


图 1.3 Paar 桥计算动力系数与实测结果的比较(Fryba)

由于车辆与结构的动力相互作用分析是一个十分复杂的课题,而且许多影响因素具有很强的随机性,因此,对整个车桥系统进行精确的理论求解几乎是不可能的。目前的处理方法多是建立车辆-结构系统力学模型,推导运动方程式,编制计算机分析程序,然后按各种参数进行计算,从而得到车辆与结构的动力响应——这就是所谓的计算机仿真分析。

近几十年来,随着计算机的广泛应用、计算技术的迅速发展以及高速铁路建设的迫切需要,各国学者在研究中已尽可能地考虑了各种因素,先后提出了日趋完善的车桥系统动力分析模型,并以不同的方法导出了考虑各种因素相互关系的运动

方程式,然后按照实际的车辆和桥梁参数,根据不同的情况和要求在计算机上进行仿真分析,得出了许多有益的研究成果。车桥系统动力分析的计算机仿真方法已经在日本、法国和其他欧洲国家的高速铁路桥梁设计中得到了广泛的应用。

在国外,比较完善的力学模型和运动方程是由松浦章夫^[116~118]、朱光汉(K. H. Chu)^[6,7,47,48]和 Diana^[10~13]等人建立的。

日本从 20 世纪 50 年代末开始,对高速列车过桥时的动力问题做了大量的理论研究、现场测试及模型试验。例如,日本铁道技术研究所的松浦章夫、伊藤文人、大羊地三等人,结合东海道新干线上所采用的电动车组以及正在研制的超高速磁悬浮列车,通过分析轮轨横向力、轮重减载率、脱轨系数和车体加速度等指标来研究列车走行性,通过确定桥梁挠度和轨道折角的允许限值来保证列车运行的舒适性与安全性要求,并对桥梁的竖向、横向刚度提出了相应的限制标准^[115~118]。

松浦章夫针对具有二系弹簧悬挂装置的四轴车辆建立了包括车体点头和沉浮、2 个转向架点头和沉浮以及 4 个轮对竖向运动总共 10 个自由度的车辆动力学模型[图 1.2(f)],考虑轨道不平顺,用能量法推导出车辆与桥梁相互作用的运动方程,根据日本新干线实际桥梁的频率、阻尼和载重等确定计算参数,编制了计算机分析程序,通过仿真计算求出了行车条件下桥梁某点的动挠度和挠矩、桥上车体的竖向振动加速度、轮对的轴重减载率等桥梁和车辆的动力响应。进一步计算和研究了行车速度、轨道不平顺、车辆弹簧和阻尼、桥梁跨度、列车的轴重排列和车辆连接数等因素对桥梁动力系数的影响问题(图 1.4)。松浦章夫的理论分析表明,若车速超过 300km/h,则桥梁的动力系数将随车速的增加而明显地增大。他还以多跨简支梁为对象,对桥梁的刚度特性进行了研究。研究发现当车辆高速通过桥梁时,由于相邻桥跨结构下挠,使钢轨在桥墩处出现转折角,从而引起车体竖向加速度以及轴重的变化。他还特别研究了车辆与桥梁的共振问题,提出了产生共振的条件:在高速铁路桥梁上,有规则的轴重排列所引起的荷载周期与梁的固有周期的比为整数时就会引起桥梁的共振^[116~118]。

朱光汉、Dhar 和 Garg 较早地开展了车桥系统空间振动问题研究^[6,7,47,48]。他们把桁梁视为三维空间结构,车体考虑为具有沉浮、点头和侧滚三个自由度的刚体,并将质量简化到桁架的节点处,建立了车辆和桥梁体系的空间计算模型和用矩阵表示的动力方程组。此模型可较好地重现竖直平面内桥梁的动力状态(最大位移和最大加速度),并可评估桥梁的应力状态,即动态超应力系数(动力系数)。他们还用随机振动分析方法研究了车轮与轨道不平顺对桥梁动力系数的影响,利用计算机模拟轨面不平顺随机函数,并用逐步积分法求解车体和桥梁的振动位移和加速度,这是车桥系统随机振动分析方法上的一大进步。文献[6]采用实际桥梁和车辆参数计算了桁梁的挠度、各杆件的轴力、弯矩和动力系数(图 1.5)。经过分析对比,

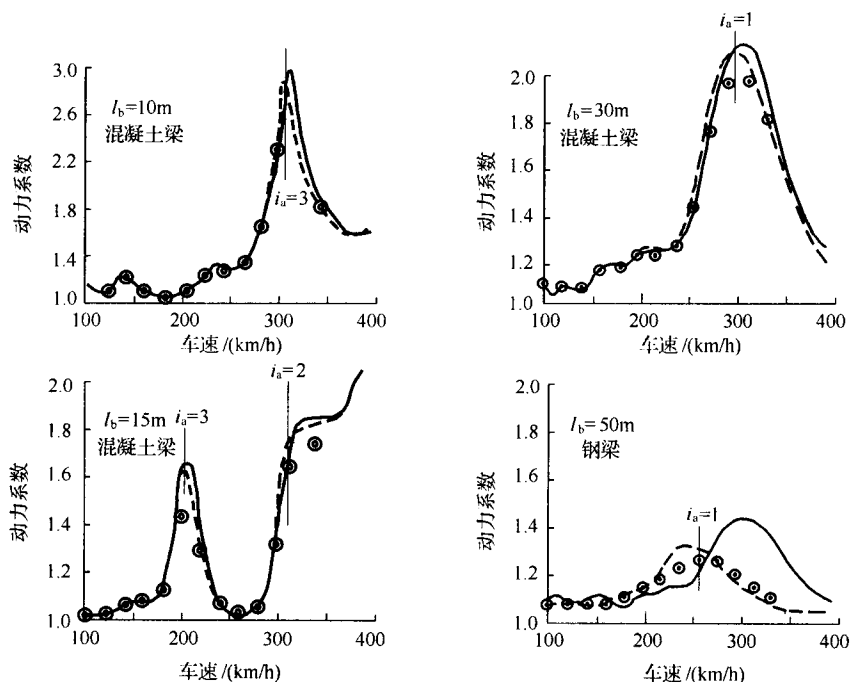


图 1.4 不同跨度桥梁的冲击系数变化规律(松浦章夫)

● 仿真计算
 — 荷载列
 - - 荷载列(考虑参数变化)

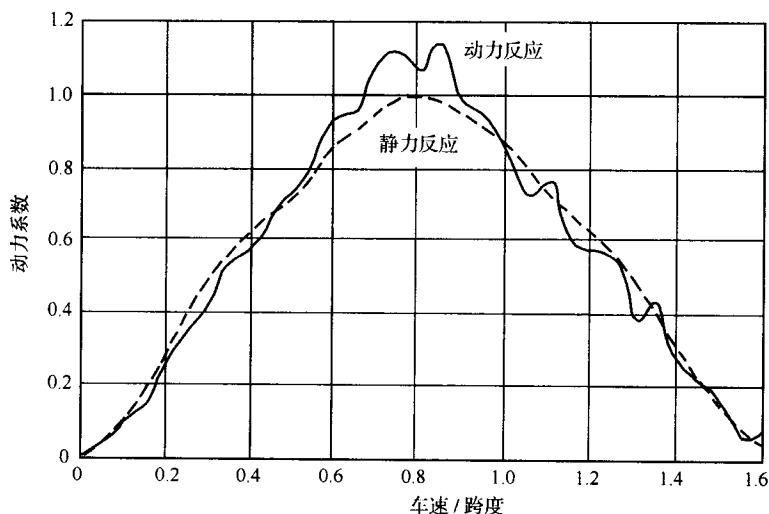


图 1.5 桁梁桥跨中挠度动力系数(朱光汉)