

车辆与结构动力 相互作用

◎ 夏 禾 著

科学出版社

692

U270.1
X36

车辆与结构动力相互作用

夏禾 著



A0961297

科学出版社

2002

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。

本书可供科研人员和工程技术人员参考,并可作为相关专业的研究生教材和高等学校的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆与结构动力相互作用/夏禾著. —北京:科学出版社,2002
ISBN 7-03-010032-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004040 号

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>

源海印刷厂 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:720×1000 B5

2002年3月第一次印刷 印张:16½

印数:1—3 000 字数:325 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

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、地下铁道等的车辆)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具有十分重要的理论和实际意义。

目前,国外一些交通发达的国家十分重视结构在车辆荷载作用下的研究工作,主要采取理论分析与数值计算、模型试验和现场测试这几种方法进行研究。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 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共同研究,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线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极有价值的实测结果;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)、国家教委博士点基金(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,作者始终受到陈英俊教授的指导;一些项目是与张弥、许克宾、范俊杰、阎贵平、张鸿儒、刘维宁、G. De Roeck和Y. L. Xu等教授共同完成的;部分内容引入了研究生张楠、于大明、郭微微、张宏杰、王庆波、曲经建、曹艳梅等的研究成果;曹艳梅、张楠、郭微微参与了编写工作。作者在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,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

前言

第一章 绪论	1
1.1 车辆与结构动力相互作用问题的研究历史	1
1.2 车辆与结构动力相互作用问题的研究内容.....	11
1.3 引起车桥系统振动的原因.....	13
1.4 车桥动力相互作用的分析方法.....	15
参考文献	22
第二章 结构动力分析的基本理论和方法	29
2.1 单自由度体系振动分析.....	29
2.2 多自由度体系振动分析.....	46
2.3 逐步积分法.....	57
参考文献	70
第三章 车桥系统的自激激励与随机模拟	71
3.1 轨道不平顺.....	71
3.2 车辆蛇行运动.....	80
3.3 车桥系统随机激励的自回归模型描述.....	84
参考文献	87
第四章 车桥系统的振动性能评价标准	89
4.1 车辆运行安全性标准.....	89
4.2 车辆运行平稳性标准.....	91
4.3 桥梁动力性能评定及标准.....	98
参考文献.....	107
第五章 车桥系统动力相互作用分析	109
5.1 简支梁在移动力作用下的振动	109
5.2 简支梁在移动质量作用下的振动	112
5.3 简支梁在移动车轮加簧上质量作用下的振动	114
5.4 车桥系统动力相互作用分析模型	118
5.5 模型应用中的几个问题	134
5.6 车桥系统随机振动的统计分析	140
5.7 车桥系统动力响应分析实例	143
参考文献.....	149

第六章 风荷载作用下车桥系统的振动	151
6.1 桥梁风荷载	151
6.2 单自由度体系风振分析	162
6.3 风荷载作用下车桥系统振动分析模型	164
6.4 桥上运行车辆的抗风安全性	172
6.5 风荷载作用下车桥系统动力响应分析实例	174
参考文献.....	184
第七章 地震荷载作用下车桥系统的振动	187
7.1 地震波的特性	187
7.2 人工地震波	194
7.3 结构体系地震反应分析	200
7.4 地震荷载作用下车-桥系统动力分析模型.....	206
7.5 地震作用下桥上车辆的运行安全标准	207
7.6 地震作用下车桥系统动力响应分析实例	209
参考文献.....	214
第八章 交通系统引起的环境及周围建筑的振动及控制	216
8.1 概述	216
8.2 环境振动的控制标准	220
8.3 交通荷载引起环境振动的分析方法	227
8.4 交通系统对环境的振动影响	238
8.5 环境振动的控制对策	247
参考文献.....	255

第一章 绪 论

1.1 车辆与结构动力相互作用问题的研究历史

随着行车速度的不断提高,交通密度的不断增加,荷载的不断加重,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)对所通过的结构物产生动力冲击作用,直接影响其工作状态和使用寿命;另一方面,结构的振动又对运行车辆的平稳性和安全性产生影响,使其成为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。

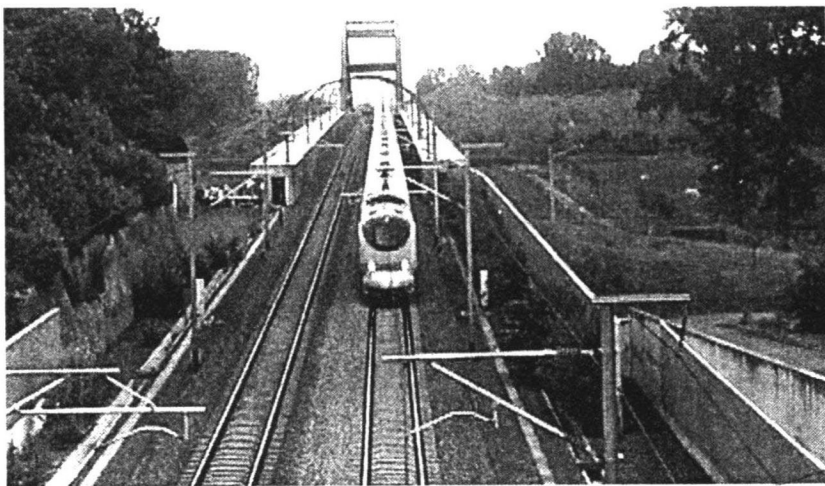


图 1.1 高速运行列车与结构的动力相互作用(比利时)

列车通过铁路桥梁时,引起桥梁的振动。这时,桥梁结构不仅承受静力的作用,还要承受移动荷载(列车以一定速度通过时对桥梁的加载和卸载)以及桥梁和车辆的振动惯性力的作用。列车动力作用引起桥梁上部结构的振动可能使结构构件产生疲劳,降低其强度和稳定性;桥梁振动过大可能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,引起的共振可能会使车桥动力响应加剧,产生意外的破坏。1847年英国的Chester铁路桥由列车通过时的振动引起的折断就是一个典型的例子。每次重大事故的发生总是能够给人们带来一定的经验教训,帮助人们不断改进自己的设计,使之适应客观的规律性。因此,车桥动力相互作用问题已经成为桥梁振动特别是准高速或高速铁路桥梁振动领域中一个重要的研究课题,在国内外都受到了特别的重视。

车辆与结构动力相互作用的研究已经有了一百多年的历史。早在19世纪早期铁路桥梁建设之初,人们就开始研究活载对结构的动力影响。各国学者采用了两类不同的方法研究列车引起的桥梁振动问题:一类以试验为主要手段,另一类则比较重视理论分析。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;但如果只停留在试验阶段,不去揭露其内在规律,结果是为了确定新的动态参数,只能随着桥梁结构类型、跨度、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,故车桥耦合振动研究通常采用试验与理论分析相结合的方法: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。但是,由于车辆荷载作用下的桥梁振动是一个复杂的课题,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很多随机因素的影响,使得体系的力学模型十分复杂。尽管对梁的动力分析早已有了成熟的算法,但由于受到计算手段的限制,在20世纪40年代之前的理论研究中不得不采用种种的近似方法,建立十分简单的桥梁和车辆系统分析模型,例如把桥梁荷载简化成移动的常力或确定性激励,列车的动力状态考虑为平稳移动的质量、孤立的冲击力或是由弹簧和阻尼器所连接的簧上质量。

图1.2可以说明车桥系统动力相互作用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)模型考虑了力的变化,如谐振力或冲击力等荷载。例如在A. N. Krylov和S. Timonshenko^[29,30]等人的研究中,考虑了机车偏心轮对桥梁的冲击作用,并从理论上分析了共振现象的发生机理。

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,R. Willis最先分析了“一个非跳跃质量跨过无质量梁”的近似解^[37],G. G. Stokes则用级数得到了问题的精确解。1934年,英国的C. E. Inglis根据现场实测资料,同

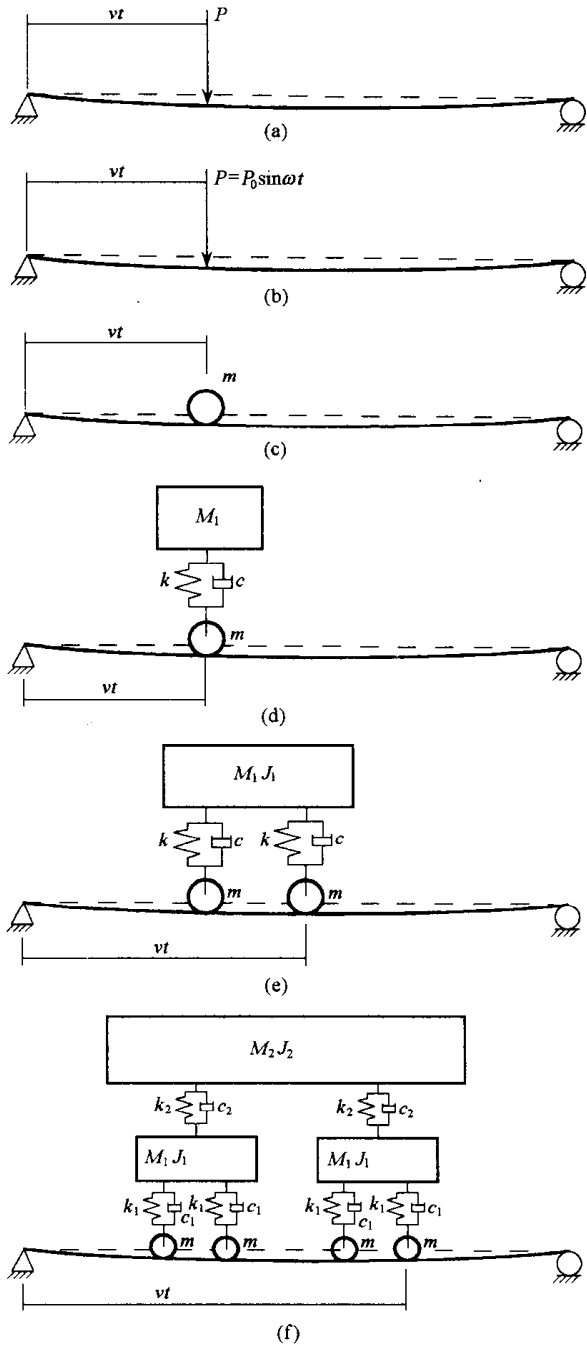


图 1.2 车桥动力相互作用分析模型的演变

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^[19],他所得到的近似理论解与实测资料对照比较接近。1937年,A. 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。1953年,前苏联学者V. M. Muchnikov用积分方程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^[21]。1956年, K. Mise 和 S. 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^[20]。

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, 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, R. K. Wen 假定桥梁动力挠曲线的形状与静力曲线相似, 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^[66]。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, 由此产生的分析计算结果能够得到车桥动力响应某些方面的大概趋向, 但不能全面地反映实际情况。

从 20 世纪 70 年代开始, 车桥动力相互作用分析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转效应, 无法反映车体复杂的运动状况。

L. Flyba 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作用于简支梁时各种模型的解析解; 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。他把桥跨分成长跨梁与短跨梁两种情况进行研究, 分析了车桥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^[12~14]。

近几十年来, 随着电子计算机的广泛应用、计算技术的迅速发展以及高速铁路建设的迫切需要, 在理论研究中已尽可能考虑各种因素, 各国学者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动力方程式, 然后按照实际的车辆和桥梁参数, 在计算机上根据不同的情况和要求进行分析计算, 得出了许多有益的研究成果。

车辆与结构的动力相互作用是一个复杂的课题, 而且许多影响因素具有随机的性质。目前的处理方法多是建立车辆-结构力学模型, 推导运动方程式, 编制计算机程序, 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方法。车桥动力相互作用的计算机仿真已经在日本、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^[97~99]、朱光汉(K. H. Chu)^[4~6, 38~41]、G. Diana^[7~10]等人建立的。

日本从 20 世纪 50 年代末开始, 对高速列车过桥的动力问题作了大量的理论研究、现场测试及模型试验。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采用的电动车组以及正在研制的超高速磁悬浮列车, 对铁路车辆和桥梁的动力相互作用进行了研究。他们的研究表明, 在车速为 200km/h

范围内,桥梁的冲击系数一般不超过目前蒸汽机车的冲击系数^[97]。

松浦章夫对于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^[98],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式,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,编制了计算机模拟程序,通过电算求出了行车条件下桥梁某点的动载挠度和挠矩、桥上某车体的竖向振动加速度、某轮对的轴重减载率等桥梁和车辆的动力响应^[97~99]。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冲击系数的影响(图1.3)。松浦章夫的理论分析表明,若车速超过300km/h,则桥梁的冲击系数将随车速的增加明显地增大。他还以多跨简支梁为研究对象,对桥梁的刚度特性进行了研究,发现当车辆高速通过桥梁时,由于相邻桥跨结构下挠,在桥墩处钢轨表面出现转折角,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结构的共振。

朱光汉、C. L. Dhar 和 V. K. Garg 较早地开展了车桥系统空间振动研

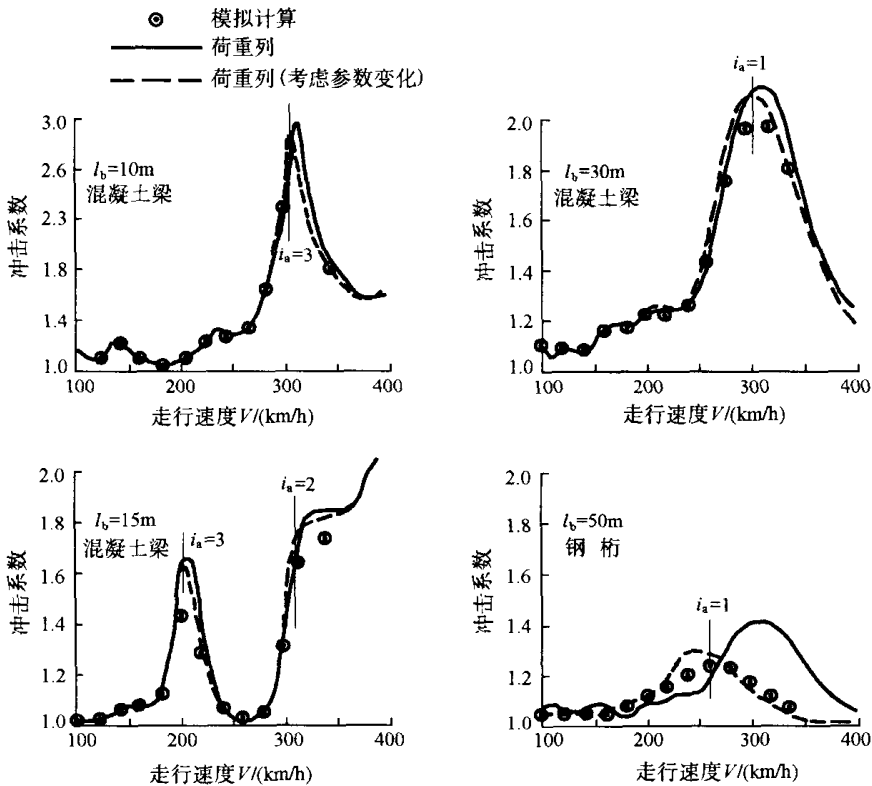


图 1.3 不同跨度桥梁的冲击系数变化规律(松浦章夫)

究^[4~6,38~41]。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。该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(冲击系数)。他们还用随机振动的方法研究了车轮与轨道不平顺对桥梁冲击系数的影响。在解动力方程时,利用计算机模拟轨面不平顺随机函数及采用逐步积分法求解车体和桥梁的振动位移、加速度,对列车过桥时桥梁结构随机振动分析作出了很大的改进,并且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、弯矩和冲击系数(图 1.4)。经过分析对比,提出了在同一杆件内弯矩和轴力的最大值不会同时出现等结论,并认为单个车辆过桥时对桥梁的冲击作用比由多节车辆组成的列车要大。

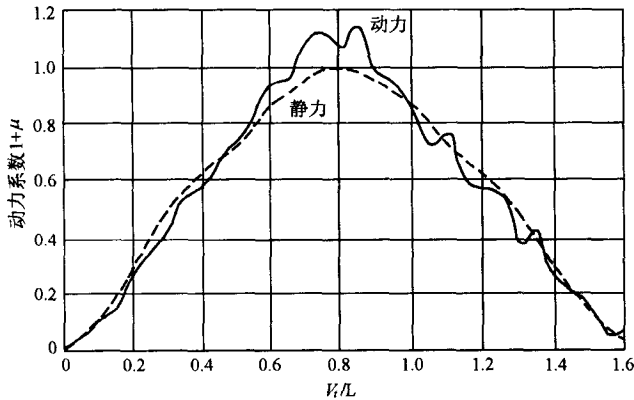


图 1.4 朱光汉的分析结果:桁梁桥跨中挠度动力系数

1982年, M. H. Bhatti 建立了 21 个自由度的两系弹簧的车辆竖向和横向振动分析模型^[1]。该模型将车辆分成一个车体、两个摇枕及两个转向架系统(包括轮轴)。研究工作考虑了车辆弹簧的几何与悬挂非线性,以轨道横向与竖向的不平顺为激励源,采用分离的桥梁、车辆运动微分方程,以轮轨相互作用将这两个运动方程联系起来,采用空间桁架铰接模型,考虑桥门架的剪切刚度,忽略横联的剪切刚度,并假定纵梁与横梁均为轴向受力杆件,研究了跨度为 53.34m 的简支桁梁桥的空间振动响应以及各杆件的冲击系数。

1984年, T. L. Wang 将车辆自由度改为 19 个,用上述 M. H. Bhatti 的模型重新研究了桁梁的振动响应以及各杆件的冲击系数^[31~36]。他与 M. H. Bhatti 均发现空间铰接和空间刚接(忽略杆件的扭转刚度)算出的杆件轴力相差很小。后来, T. L. Wang 在文献[32]中对 M. H. Bhatti 的车辆模型作了改进,建立了 23 个自由度的车辆空间振动分析模型,这一模型主要是对转向架自由度的选取提出了新的观点,并发表了一系列文章。T. L. Wang 等还将他的研究方法应用到公路桥梁的车

桥振动研究中,探讨了公路预应力混凝土桥、连续多片梁桥、斜拉桥等桥式在公路车辆荷载作用下的动力响应。

20世纪80年代后期,随着对车桥体系动力问题的深入研究,人们逐渐认识到已有的分析方法存在欠缺,表现在车桥动力分析尚未考虑桥上线路结构在整个动力体系中的作用。已有的研究基本上都是把轨道结构简化为固结于梁体上的钢轨,即钢轨与梁体具有相同的变形特征,而忽略桥枕、道床的参振作用,这显然与实际情况有较大的出入。此外,对于轮轨相互作用关系,已有的研究也多是通过对力的平衡条件和位移相容条件来考虑的,而从实际轮轨接触关系研究车桥耦合振动的很少,即便是考虑了轮轨接触关系,也大多是考虑轮轨平面接触或假定钢轨本身在振动中不产生变形。

鉴于上述欠缺,1989年,G. Diana对车桥动力相互作用问题进行了深入系统的研究^[7~10]。他综合分析了不同形式的车辆、桥梁、桥上轨道结构的离散方法,建立了考虑轨道弹性、轮轨间相互作用力影响的车-轨-桥动力相互作用系统模型。将列车的每节车厢简化为由7个刚体组成(包括4个轮对,2个转向架以及车体本身),它们之间由弹性元件和阻尼器连接,每节车的车体和转向架各有5个自由度,建立了23个自由度的集中质量车辆模型。

G. Diana将其理论计算结果和米兰-罗马铁路线上的一座钢桁梁铁路桥(在Piacenza附近跨越Po河)的实验结果进行了比较。图1.5(a)是旅客列车通过时桥梁跨中截面理论计算位移时程曲线(虚线)和实测值(实线)的比较,图1.5(b)是相应的车体振动加速度的比较。容易看出,理论计算值同实测值相比,缺少了一些高频成分。

欧洲另外一些国家的研究者也进行了类似的较深入的研究。1985~1991年,M. Olsson采用有限元-模态技术求解车桥动力响应^[23,24];1987年,Tanabe针对日本新干线上的四轴客车建立了31个自由度的车辆模型^[28],该模型中车体和前后

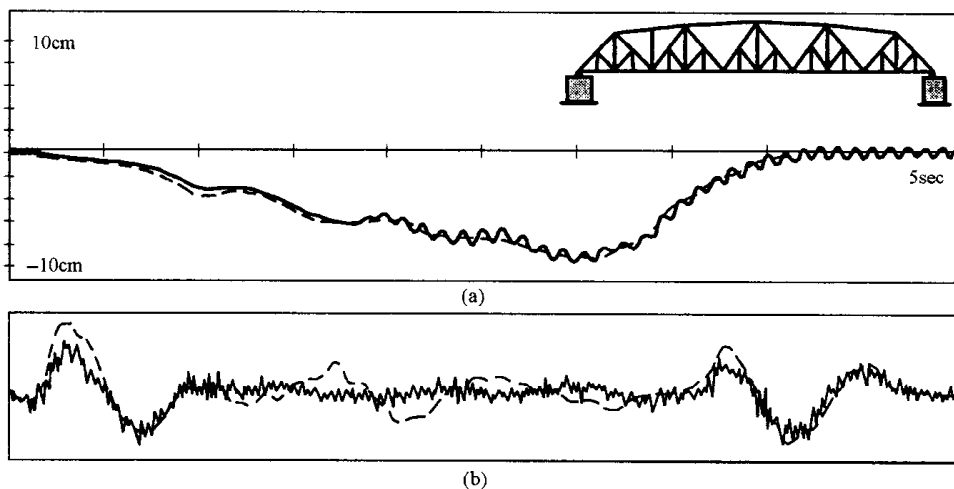


图 1.5 钢桁梁桥的分析结果(G. Diana)

转向架各为 5 个自由度, 4 个轮对各 4 个自由度, 也采用有限元-模态技术进行求解。1993 年, Bogaert 采用简化的车辆模型, 研究高速列车通过肋式拱桥的振动冲击效应, 并给出了冲击系数的简化表达式^[2]。1994~1995 年, Green 和 Cebon 提出了在频域内求解分离的车桥系统方程的新方法, 他们利用模态脉冲响应函数与模态激励力, 采用模态叠加法并结合 FFT 和 IFFT 技术来求解桥梁的动力响应^[15,16]; 1995~1997 年, Y. B. Yang 采用动态凝聚法求解车桥系统的动力响应问题, 由于将所有与车体有关的自由度在单元级进行了凝聚, 使得计算效率大为提高^[54~57]。

前联邦德国学者编制了计算程序, 可用作研究车辆、桥面系、桥梁结构系统的综合振动。他们研究和提出了桥梁和车辆的振动频率同车速、跨度的关系, 以及车厢体挠曲振动、转向架的沉浮及点头振动、车厢体的点头和沉浮振动的频率范围。研究成果已经直接应用于高速铁路桥梁的设计中。

20 世纪 80 年代以前, 国外的研究工作主要是关于车辆荷载作用下桥梁结构竖向振动的分析。在国内, 上海铁道大学的曹雪琴等人除了采用我国定型设计的桥梁和车辆构造参数进行了桁梁桥的竖向振动分析之外, 还研究了列车过桥时单跨箱型钢梁桥的横向弯扭振动。其主要贡献为: 推导了车桥动力相互作用的平衡方程, 其中车辆模型考虑了内燃机车双机联挂过桥的最不利情况, 包括车体、转向架和轮对的横摆、摇头和侧滚共计 54 个自由度; 编制了用逐步积分法求解微分方程组的计算机程序, 根据实测资料找出机车车辆在直线线路上行驶时的车体横向振动加速度作为列车上桥的初始条件; 以车辆蛇行运动作为车桥体系横向振动的自激激励源。通过分析计算, 得到箱型桁梁在车辆荷载作用下空间弯扭振动的振幅、加速度以及车辆在桥上的基本振动规律。

近些年来, 随着桥梁技术的发展, 国内外形成了一股修建大跨度桥梁的热潮, 以悬索桥和斜拉桥为主要形式的大跨度桥梁正在越来越多地被建造, 跨度连续不断地被刷新。对大跨度桥梁在运行列车作用下的动力行为的研究也越来越被人们所重视。G. Diana 假定列车速度为匀速, 对 16 节车辆(每节 120t)组成的列车以 54km/h 通过时大跨度桥梁的变形情况进行了估计, 图 1.6 为计算得到的列车行进到桥跨不同位置时梁的挠度(实、虚线分别表示桥面的两侧)。对于这样一个 3300m 跨度的长跨桥, 梁的最大挠度位置随列车移动而移动, 形成了线路的附加坡度, 使得列车本身总是沿桥跨的上坡行进。

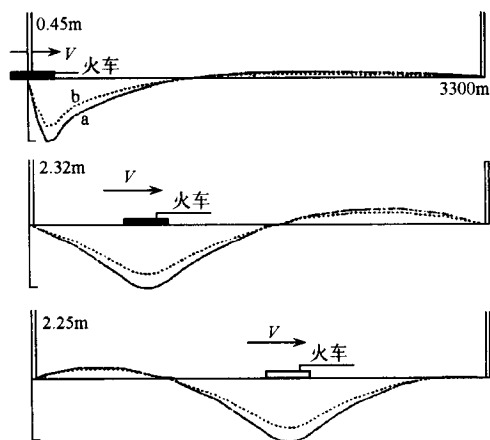


图 1.6 大跨度梁的分析结果(G. Diana)

列车在大跨度桥梁上运行时, 由

于梁的下挠而产生的线路附加坡度,是大跨度桥梁所特有的问题,它将影响列车在桥上的运行速度。伊藤等人对跨度为 500m、1000m、1500m 的三座铁路悬索桥在列车作用下的挠度、线路折角、车辆振动加速度进行了系统分析,最高计算车速为 250km/h,得出了与 G. Diana 相似的结论^[9],见图 1.7。

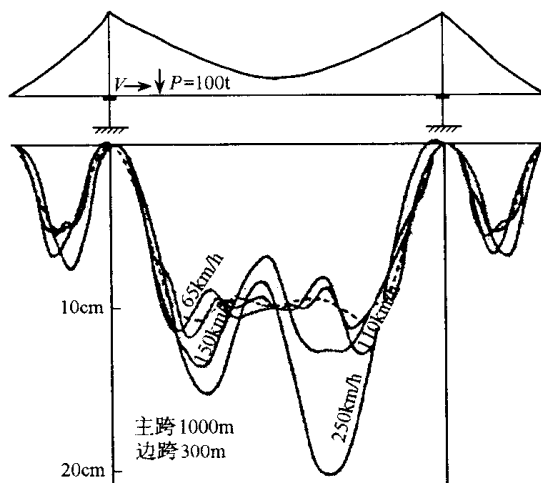


图 1.7 大跨度桥的分析结果(伊藤)

1940 年,在美国发生的 Tacoma 悬索桥因风致振动而倒塌的著名事故,引起了人们对强风作用下大跨度桥梁及桥上车辆的运行安全的高度重视。为了检验大跨度桥梁的列车可通行性,研究桥梁和列车均在风荷载作用下的动力状态是很重要的。平均风(静风)和脉动风都对大跨度桥的使用性能产生不利的影响:平均风的作用增加了桥梁在水平和竖直平面内的整体变形,这些变形可导致轨道弯曲半径过小;脉动风引起桥梁的抖振,都会影响桥上车辆的运行安全。风荷载直接作用于运动着的车体本身,带有横向平均风压的移动车辆会对桥梁结构产生附加的动力作用。西冈隆^[112,113]、G. Diana^[9]等都对此做了较为系统的研究。

在我国,1997 年通车的香港青马大桥是当今世界上最长的公铁两用桥,北方交通大学与香港理工大学合作,正在研究该桥在强风作用下的列车通行性问题。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的研究成果^[51~53]。我国虎门大桥、江阴大桥、芜湖大桥的相继建造,促进了国内大跨度桥梁的研究工作,铁道部科学研究院、石家庄铁道学院等已经在芜湖大桥开始了大跨度斜拉桥的监控试验。

随着高速铁路的建设,地震对行车安全的影响也受到各国学者的重视,研究内容包括地震激励所诱发的车桥系统的振动及行车稳定性、地震动的空间变异性对大跨度桥梁的影响等问题。G. Diana 对列车以 60km/h 通过(线路和桥梁)时发生 400 年一遇地震的情况进行了模拟,结果表明,由于大跨度桥梁的低通滤波效应,桥上的地震作用受到大幅度的衰减。地震发生时,桥梁上运行的车辆在桥梁振动的

频率和振幅的激发下,产生滚摆振动,振幅超过一定限度就会发生脱轨的危险。日本铁道技术研究所针对多跨简支梁桥和大跨度斜拉桥在横向按正弦波激励和随机激励作用下的桥梁上的车辆走行安全性进行了分析,给出了相应的安全界限。北方交通大学夏禾、阎贵平等对地震引起的铁路斜拉桥、高速铁路桥梁的振动及其对列车安全的影响进行了分析,结果表明,这种影响不容忽视。

以上所提到的研究工作,无论是对连续梁桥还是多跨简支梁桥,均未考虑桥墩的作用。在竖向振动分析中,桥墩的竖向刚度远远大于梁的弯曲刚度,墩对振动的影响很小,不考虑其作用是可以的。对于多跨简支梁,由于邻跨而产生的线路折角等影响可以通过调整列车进桥的初始状态来考虑,因此多按单跨梁计算。而在横向振动分析时,特别是在桥墩较高的情况下,由于墩的刚度很小,会影响整个桥梁体系的振动特性,所以墩对振动的影响成为不可忽略的因素。1983年,北方交通大学夏禾和陈英俊采用模态综合法建立了铁路列车和包括桥梁墩台、支座在内的车桥系统动力相互作用分析模型,对高墩桥的振动响应及其对车辆运行稳定性的影响进行了系统的分析,通过现场动力试验验证了分析模型的合理性,并得出许多有益的结论。

20世纪90年代以来,我国铁路加速了其现代化进程,在扩大铁路网建设的同时,把提高既有铁路的客货列车速度、建设快速和高速客运铁路作为重大技术决策予以实施。通过提速,我国铁路客车速度已经从80~100km/h提高到120~180km/h,货车速度从50km/h提高到60~90km/h。

铁路提速后,除需要满足承载能力和耐久性等要求外,列车通过桥梁时的走行性(走行安全性及乘坐舒适度)将是突出的问题。在提速试验过程中,发现中小跨度桥梁普遍存在着横向刚度不足的问题,特别是20~40m上承式钢板梁当空载货车以60~80km/h速度通过时,跨中横向振幅最大达13mm,大大超出《铁路桥梁检定规范》参考限值,严重影响提速列车的运行安全。1996年9月8日和9月27日,货物列车在京山线滦河大桥(32m上承式钢板梁)上两次脱轨,酿成重大事故^[146],这是一个最典型的例子。

为此,铁道部组织北方交通大学、上海铁道大学与铁道部专业设计院以及北京、上海、郑州、沈阳等铁路局合作,通过计算机仿真分析,制定了不同类型桥梁的加固方案和改造措施,并对一些实际桥梁进行了加固,通过试验证明了具有很好的加固效果^[44, 49, 146]。

随着高速铁路等客运专线建设的提上日程,对铁路桥梁在高速列车作用下的动力行为及其对桥上运行列车安全的影响的研究已经和正在成为国内外,特别是我国桥梁研究和设计工作者所共同关注的课题。

列车高速、舒适、安全行驶要求高速铁路桥梁必须具有足够大的刚度和良好的整体性,以防止桥梁出现过大的挠度和振幅,同时必须限制桥梁的预应力徐变上拱和均匀温差引起的结构变形,以保证轨道的高平顺性。一般来说,高速铁路桥梁主