

# 双层公路钢桁梁桥 车-桥耦合振动研究

刘世忠 耿少波 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

# 双层公路钢桁梁桥 车-桥耦合振动研究

刘世忠 耿少波 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

双层公路钢桁梁桥车-桥耦合振动研究/刘世忠,耿少波著. —武汉:武汉大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-307-20180-4

I. 双… II. ①刘… ②耿… III. 公路桥—钢桁架桥—车桥耦合振动—研究 IV. U448.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 097141 号

责任编辑:李晶      责任校对:邓瑶      装帧设计:吴极

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

开本:720×1000 1/16      印张:11.5      字数:212千字

版次:2018年8月第1版      2018年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-20180-4      定价:80.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前 言

随着中国桥梁设计及施工技术水平的快速发展与车辆生产工艺的大幅提升,桥梁结构轻型化与交通高速重载化趋势日益增强,公路桥梁车-桥动力相互作用问题愈显突出,已成为桥梁设计、施工、运营与养护全寿命阶段必须加以考虑与解决的问题。

双层钢桁梁桥占地面积小,可以充分发挥桥位之利,通行能力强,能有效地缓解日益增长的交通压力,已成为中国公路钢桥的一种发展方向与趋势。双层钢桥在力学行为上表现为空间性强、受力复杂,而且由于车道多,车流的随机性强,使得桥梁上、下层各杆件的动力响应极为复杂,动力耦合效应也更为明显。在长期运营中,桥面平整度会持续变差,从而使得车辆自身振动越发剧烈,桥梁结构也会产生更大的动力响应,桥梁结构的安全性与使用寿命都将面临更为严峻的挑战。本书采用理论分析与有限元数值模拟的方法对双层公路钢桁梁桥的车-桥耦合振动问题进行了系统分析与研究,主要研究内容、研究方法与研究成果如下:

(1) 系统阐述了车-桥耦合振动问题的产生,古典研究方法的理论、发展以及国内外研究现状,在分析总结现有车-桥耦合研究成果的基础上,结合双层公路钢桥的受力特点,提出了本书的研究目的与研究意义。

(2) 针对现有公路桥梁车-桥耦合振动响应问题分析的复杂性,结合分离法原理与车辆动力学理论,提出了一种基于 ANSYS 有限元软件平台的公路桥梁车-桥耦合振动响应数值分析方法,通过与相关文献算例结果的对比及实桥动载试验验证了方法的正确性与可靠性。

(3) 采用 UIDL 与 APDL 语言联合编程,依托 ANSYS 软件开发了公路桥梁车-桥耦合振动响应分析模块 VBCVA。该模块只需输入桥梁模型、车道信息与车辆(车流)信息,即可计算出任意结构体系桥梁各位置的挠度冲击系数及其时程响应与各杆件的内力冲击系数及其时程响应。该模块采用图形用户界面(GUI)方式接收用户的输入,操作简便直观,便于工程人员掌握与应用。

(4) 以国内首座双层公路钢桁梁桥(三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥)——东江大桥为工程背景,利用大型通用有限元软件 ANSYS 建立其三维有限元模型,对其动力特性进行计算。对比实桥动载试验测试结果与有限元分析结果,两者相差较小,从而验证了有限元模型的可靠性,表明所建立的有限元模型能较好地反映实际桥梁的动力特性,有限元建模过程中的单元选取、边界施加和相关假定与实际较为相符,可应用其进行类似双层钢桥的有限元建模与计算分析工作,为进一步开展双层公路钢桁梁桥车-桥耦合振动分析研究提供有限元模型基准。

(5) 以东江大桥为工程依托,设计了双层公路简支钢桁梁桥,应用已开发的车-桥耦合振动分析模块 VBCVA,对其车-桥耦合振动响应进行了分析计算,系统地研究了单双层加载模式、车辆数量、车辆速度、车辆质量、桥面不平度等级与桥梁阻尼比等参数独立变化时,桥梁主梁各控制位置处杆件内力与节点挠度时程变化动力响应与冲击系数变化规律,为双层钢桥的设计提供了一定的参考与借鉴。

本书由刘世忠主笔,负责全书的体系安排,组织撰写以及审稿、定稿工作。第1章、第2章、第3章、第5章与第6章由刘世忠撰写,第4章由耿少波撰写。在本书撰写过程中,参考了大量相关的书籍、论文、报纸杂志、网站的资料,已尽可能地在参考文献中列出,但全书难免有遗漏,敬请谅解。

本书的研究工作得到了高等学校博士学科点专项科研项目“随机车流作用下双层公路钢桁桥车-桥耦合效应研究(20090205110002)”、国家自然科学基金项目“爆炸作用下钢箱梁缩尺模型响应特征及破坏机理研究(51408558)”的支持。在本书的撰写与出版过程中,得到了山西省高等学校教学改革创新项目(J2017084)与太原科技大学博士启动基金项目(20162010)的资助,并得到太原科技大学贾志绚教授、华北水利水电大学刘世明副教授、内蒙古自治区交通建设工程质量监督局张俊光高级工程师的支持与鼓励,他们对本书提出了许多宝贵的意见与建议,作者在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

著者

2018年5月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	(1)
1.1 车-桥耦合振动研究古典理论 .....	(1)
1.2 车-桥耦合振动研究发展与现状 .....	(9)
1.3 公路桥梁冲击系数研究现状 .....	(17)
1.4 已有研究存在的主要问题 .....	(20)
1.5 研究背景及意义 .....	(21)
1.6 主要研究内容 .....	(23)
<b>2 公路桥梁车-桥耦合振动数值分析方法</b> .....	(25)
2.1 车-桥耦合振动常见数值解法 .....	(25)
2.2 ANSYS 简化车-桥振动模型实现方法 .....	(33)
2.3 基于 ANSYS 的公路桥梁车-桥耦合振动分析方法 .....	(45)
2.4 算例验证 .....	(58)
2.5 本章小结 .....	(72)
<b>3 基于 ANSYS 的公路桥梁车-桥耦合振动分析模块开发</b> .....	(74)
3.1 ANSYS 及其二次开发工具 .....	(74)
3.2 基于 ANSYS 平台的车-桥耦合振动模块开发 .....	(79)
3.3 VBCVA 模块正确性验证 .....	(90)
3.4 本章小结 .....	(98)
<b>4 双层公路钢桁梁桥动力特性分析</b> .....	(100)
4.1 工程概况 .....	(100)
4.2 动载模态试验 .....	(102)
4.3 有限元模态分析 .....	(106)
4.4 本章小结 .....	(111)

<b>5 双层公路钢桁梁桥车-桥耦合振动影响参数分析</b> .....	(112)
5.1 概述 .....	(112)
5.2 单双层加载模式的影响分析 .....	(119)
5.3 车辆数量的影响分析 .....	(123)
5.4 车辆速度的影响分析 .....	(125)
5.5 车辆质量的影响分析 .....	(129)
5.6 桥面不平度的影响分析 .....	(131)
5.7 桥梁阻尼比的影响分析 .....	(134)
5.8 本章小结 .....	(134)
<b>6 结论与展望</b> .....	(136)
<b>附录 A 双轴半车模型匀速通过简支梁的 ANSYS 命令流</b> .....	(139)
<b>附录 B 常见车辆模型示意图与 APDL 宏文件</b> .....	(143)
<b>参考文献</b> .....	(165)

# 1 绪 论

近年来,随着中国交通运输系统在规模与技术水平上的大幅提升,交通高速、重载化以及结构轻型化趋势日益增强,车辆与结构(房屋建筑、隧道与桥梁结构等)相互之间的动力耦合效应问题变得尤为突出。一方面,当高速行驶的重载车辆通过结构物时,在车辆荷载的动力冲击下,不但会引起结构的振动,而且由于车辆荷载的反复作用,结构物易产生疲劳损伤与破坏,将直接影响结构物的工作状态与使用寿命;另一方面,结构物的振动又会反作用于车辆,进一步加剧车辆的振动,影响车辆运行的安全性与平稳性,在一定条件下,会导致车辆构件损坏,载重物品易受到损害,乘客的舒适性也降低,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参考指标。因此,对车辆与结构耦合系统进行科学、系统的综合分析研究,确定它们在各种状态下的耦合动力性能,是合理进行公路、铁路、地铁与城市轻轨等工程结构设计的实际需要,对于承受移动荷载作用的交通土建工程结构物的设计、建造、运营养护与检测均具有十分重要的理论和现实意义(夏禾,2005;李国豪,1996;陈榕峰,2007;蒋培文,2012;李小珍等,2008)。

## 1.1 车-桥耦合振动研究古典理论

对车-桥耦合振动问题的研究起源于铁路桥梁,随着 19 世纪 20 年代中期世界上第一条现代意义的铁路在英国建成,列车与桥梁结构之间的动力相互作用问题便引起了桥梁工程师与科技工作者的广泛关注,至今已有 190 余年的历史。1844 年法国与英国工程师对 Britannia 桥进行了模型试验,从此车-桥耦合作用研究的序幕被正式拉开(米静等,2010;宋一凡,2006)。1847 年,英国 Chester 铁路桥在列车行驶通过时失事,此后桥梁运营阶段的车-桥耦合振动问题也被提出。

现场实测法是车-桥耦合作用问题研究早期所采用的主要方式,但试验研究费工费时,所得结果是对所有影响因素的综合反映,不能形成严密的理论体系,

于是工程师们开始从理论上研究车-桥耦合振动。古典理论是指主要起源于 20 世纪 50 年代以前的车-桥相互作用的研究方法与理论,由于当时的计算理论与手段落后,完整的车-桥耦合计算模型未能构建,古典理论主要研究在不考虑或只简单考虑车与桥两者之间耦合作用关系下的简支梁桥的竖向振动问题,且过多的假设与简化被引入计算模型,其求解方法基本是解析解或半解析解(曹雪琴等,1987;李小珍,强士中,2002;Biggs J M,1964;Fryba L,1972;林海,肖盛燮,1998)。

车-桥相互耦合作用古典理论主要包括以下 4 大类求解计算模型。

### 1.1.1 匀速移动常量力作用车-桥模型

俄国学者 Krylov A N(1905)忽略行驶车辆自身的惯性力作用(车辆的质量效应),将移动车辆荷载等效为移动常量力,建立了简支梁桥在匀速移动常量力作用下的车-桥振动模型,避免了复杂变系数微分方程的求解,对于车、桥质量比相对较小的情况(例如较大跨度的公路桥梁),可以给出桥梁结构动力响应的近似解。但后续瑞士 EMPA 实验室进一步研究发现只有当常量力移动速度超过 200m/s 时,车桥共振现象才有可能出现,这与实际车辆的行驶状况差别较大,因此采用不考虑车辆质量效应的匀速移动常量力作用车-桥模型进行桥梁结构振动计算是不合理的,但是该理论对早期桥梁结构车-桥动力效应评定还是做出了很大的贡献(Cantieni R,1983;1992)。

图 1.1 为常量力  $F$  以匀速  $v$  通过等截面简支梁车-桥作用模型(简支梁跨径为  $l$ ,主梁抗弯刚度为  $EI$ ),假设桥梁的运动满足小变形理论且在弹性范围内,桥梁质量均匀分布(即单位长度梁的质量  $m$  为常数),不计桥梁的阻尼。初始时刻  $t=0$  时,常量力  $F$  位于左边支座处;时刻  $t$  时,常量力  $F$  将移动到距左边支座  $vt$  处。

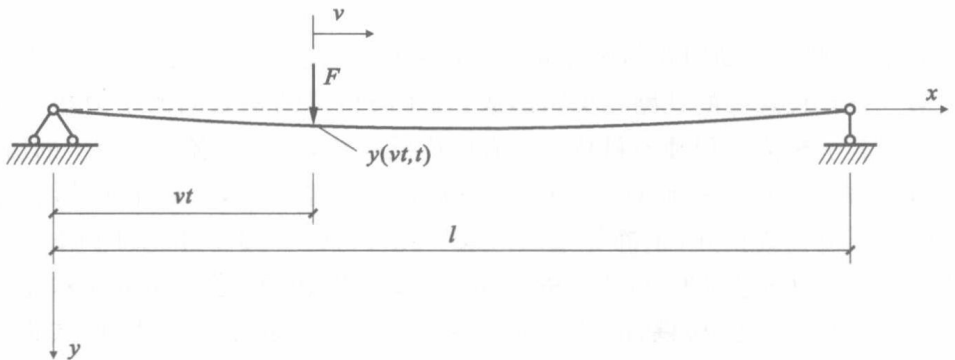


图 1.1 匀速移动常量力通过简支梁模型

按照图 1.1 所示的坐标系,简支梁在外荷载  $F(x, t)$  作用下的强迫振动微分方程可用下式表示:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (1.1)$$

可采用振型分解法(即数学上的分离迭代法)对偏微分方程(1.1)进行求解。振型分解法的基本思路是将结构的几何坐标变换成振型(广义)坐标,然后利用振型正交特性对振动方程进行解耦,最后通过假定合理振型函数以求得桥梁结构的动力响应。对于一维的线弹性简支梁桥,其振型变换表达式为:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.2)$$

式中,  $q_i(t)$  为时间  $t$  的函数,是振型(广义)坐标;  $\phi_i(x)$  为主振型函数。

依据振型正交特性,把式(1.2)代入式(1.1)中,经化简后可获得解耦的强迫振动方程:

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = Q_i(t) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.3)$$

式中,  $\omega_i^2 = \frac{EI \int_0^l \left[ \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} \right]^2 dx}{\bar{m} \int_0^l \phi_i^2(x) dx}$ , 为简支梁的各阶固有频率;  $Q_i(t) =$

$\frac{\int_0^l F(x, t) \phi_i(x) dx}{\bar{m} \int_0^l \phi_i^2(x) dx}$ , 为广义激励力。

对于等截面的简支梁,振型函数可以假定为三角函数,即:

$$\phi_i(x) = \sin \frac{i\pi x}{l} \quad (1.4)$$

故对于匀速移动的常量力  $F$ , 广义激励力为:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= \frac{\int_0^l F \delta(x - vt) \phi_i(x) dx}{\bar{m} \int_0^l \phi_i^2(x) dx} = \frac{\int_0^l F \delta(x - vt) \sin \frac{i\pi x}{l} dx}{\bar{m} \int_0^l \sin^2 \frac{i\pi x}{l} dx} \\ &= \frac{2F}{\bar{m}l} \sin \frac{i\pi vt}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中,  $\delta$  为 Dirac 函数, 满足条件  $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - \eta) f(x) dx = f(\eta)$ 。

于是,式(1.3)可以写成如下形式:

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{2F}{\bar{m}l} \sin \frac{i\pi vt}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.6)$$

当初始条件为静止时,可得到式(1.6)的解为:

$$q_i(t) = \frac{2F}{m\omega_i^2} \frac{1}{1 - \frac{\Omega_i^2}{\omega_i^2}} \left( \sin\Omega_i t - \frac{\Omega_i}{\omega_i} \sin\omega_i t \right) \quad (1.7)$$

式中,  $\Omega_i = \frac{i\pi v}{l}$ , 为常量移动力广义扰动频率;  $\omega_i = \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$ , 为简支梁固有角频率。

综合式(1.2)与式(1.7),可得简支梁桥的竖向动力响应为:

$$y(x,t) = \frac{2F}{ml} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2 - \Omega_i^2} \left( \sin\Omega_i t - \frac{\Omega_i}{\omega_i} \sin\omega_i t \right) \sin \frac{i\pi x}{l} \quad (1.8)$$

式中,括号内的前一项表示桥梁结构在车辆移动力作用下的强迫振动,后一项则表示桥梁结构自身的自由振动。

### 1.1.2 匀速移动简谐力作用车-桥模型

由于完全忽略车体质量惯性效应的移动力作用车-桥模型不能真实地反映车-桥振动现象,因此迫切需要建立更为合理的车-桥作用模型。各国学者与工程师在后续研究中发现列车过桥驱动轮对桥梁结构的锤击作用力与汽车行驶过桥的车体振动惯性力一般按照简谐波规律变化。在匀速移动常量力作用车-桥模型的基础上, Timoshenko S P(1922)将车辆作用力当作简谐荷载,提出了匀速移动简谐力作用车-桥模型,研究了匀速移动简谐力作用下简支梁桥的竖向振动响应问题。尽管把运动车辆惯性力等效为随时间变化的简谐波荷载形式仍然是一种近似考虑,但它在一定程度上反映了车辆荷载作用的某些特性,对现代车-桥耦合作用理论的形成产生了积极的影响。

图 1.2 为简谐力  $F\cos\omega_p t$  以匀速  $v$  移动通过等截面简支梁车-桥作用模型,假设桥梁的运动满足小变形理论且在弹性范围内,桥梁质量沿桥纵向分布均匀(即单位长度梁的质量  $\bar{m}$  为常数),不计桥梁结构自身阻尼的影响。设初始时刻  $t=0$  时,简谐力  $F\cos\omega_p t$  位于简支梁左边固定铰支座处;任意时刻  $t$  时,简谐力  $F\cos\omega_p t$  将移动到距简支梁左端  $vt$  处。

此时,广义扰动力为:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= \frac{\int_0^l F\cos\omega_p t \delta(x-vt) \phi_i(x) dx}{\bar{m} \int_0^l \phi_i^2(x) dx} = \frac{\int_0^l F\cos\omega_p t \delta(x-vt) \sin \frac{i\pi x}{l} dx}{\bar{m} \int_0^l \sin^2 \frac{i\pi x}{l} dx} \\ &= \frac{2F}{ml} \cos\omega_p t \sin \frac{i\pi vt}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (1.9)$$

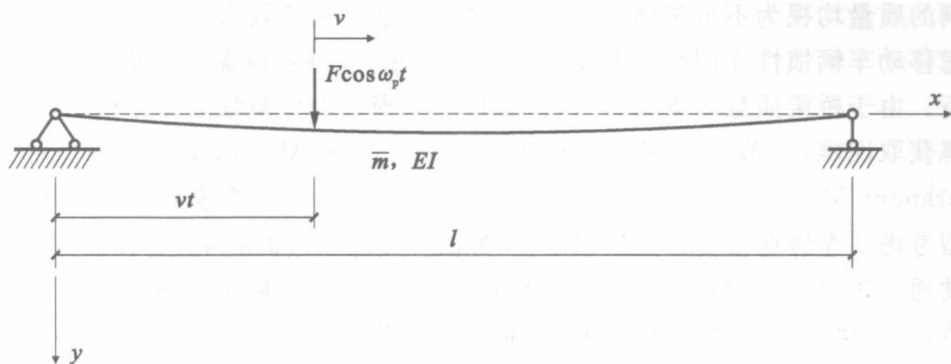


图 1.2 匀速移动简谐力通过简支梁模型

则简支梁桥各振型经解耦后的强迫振动方程为:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) &= \frac{2F}{\bar{m}l} \cos \omega_p t \sin \frac{i\pi vt}{l} \\ &= \frac{F}{\bar{m}l} [\sin(\omega_p + \Omega_i)t - \sin(\omega_p - \Omega_i)t] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中,  $\Omega_i = \frac{i\pi v}{l}$ , 为车辆移动简谐荷载与速度相关的各阶广义扰动频率;  $\omega_p$  为车辆简谐荷载的扰动频率;  $\omega_i = \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}$ , 为简支梁桥的各阶自振频率。

方程(1.10)的解可以通过把右边两个正弦函数的解相加而获得, 即为:

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \frac{F}{\bar{m}l} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\omega_i^2 - (\omega_p + \Omega_i)^2} \left[ \sin(\omega_p + \Omega_i)t - \frac{\omega_p + \Omega_i}{\omega_i} \sin \omega_i t \right] - \right. \\ &\left. \frac{1}{\omega_i^2 - (\omega_p - \Omega_i)^2} \left[ \sin(\omega_p - \Omega_i)t - \frac{\omega_p - \Omega_i}{\omega_i} \sin \omega_i t \right] \right\} \sin \frac{i\pi x}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (1.11)$$

在实际车桥相互作用时, 考虑车辆惯性的移动简谐荷载  $F \cos \omega_p t$  与考虑车辆重力的移动常量力会同时作用于桥梁结构上, 此时简支梁强迫振动方程的全解可以由式(1.8)与式(1.11)相加而得到。

### 1.1.3 匀速滚动质量作用车-桥模型

随着车-桥耦合作用研究的深入, 工程技术人员发现车-桥振动系统中车辆与桥梁结构的质量效应对桥梁结构振动影响显著, 采用前述忽略桥梁质量的两类车-桥模型计算结果与实际差别明显。Schallenkamp A(1937)将桥梁与移动

车辆的质量均视为不可忽略的因素,通过将移动车辆等效为滚动质量的方式,在考虑移动车辆惯性作用影响基础上对简支梁的车-桥强迫振动问题进行了深入探析。由于桥梁质量因素的引入,桥梁振动方程成为变系数微分方程,此方程解析解获取困难,一般可采用数值法进行求解。后来 Muchnikov V M(1964)和 Ryazanova M Ya(1958)通过解积分方程获得了解答。匀速滚动质量作用车-桥模型考虑了车体质量与桥梁质量对车-桥耦合振动效应的影响,更能体现出车辆行驶通过桥梁时车-桥振动的真实状况,但是由于其忽略了车辆系统自身的振动特性(车辆自身为弹簧-质量振动体系),所以其计算结果与实际车辆过桥测试结果相比存在一定的差别。

图 1.3 为滚动质量  $m_v$  在简支梁上匀速通过的模型(不计桥梁结构的阻尼影响)。假定在滚动过程中,质量无跳起现象,即始终与桥梁表面保持密贴接触状态。初始时刻  $t=0$  时,质量  $m_v$  位于左边支座位置处;时刻  $t$  时,质量  $m_v$  将移动到距左边支座  $vt$  位置处。

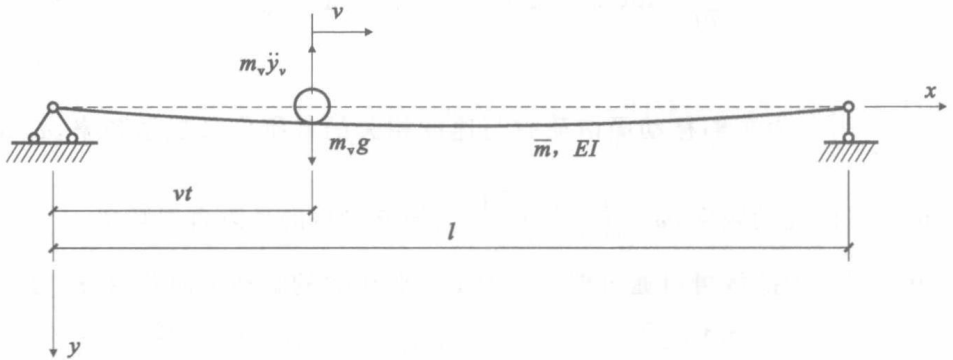


图 1.3 匀速滚动质量通过简支梁模型

任意时刻  $t$ ,滚动质量对梁的作用力等于其重力减去质量的惯性力,即为:

$$F(t) = m_v g - m_v \ddot{y}_v = m_v g - m_v \ddot{y}(x, t) \quad (1.12)$$

令  $y(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ , 则  $\ddot{y}(x, t) = \sum_{i=1}^n \ddot{q}_i(t) \phi_i(x)$ , 将其代入式(1.12)中,可得:

$$F(t) = m_v g - m_v \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \ddot{q}_i(t) \quad (1.13)$$

于是广义扰动力可以表达为:

$$\begin{aligned}
 Q_i &= \frac{\int_0^l F(t)\delta(x-ut)\phi_i(x)dx}{\bar{m}\int_0^l \phi_i^2(x)dx} = \frac{2F(t)\phi_i(ut)}{\bar{m}l} \\
 &= \frac{2m_v}{\bar{m}l} \left[ g - \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi ut}{l} \ddot{q}_j(t) \right] \sin \frac{i\pi ut}{l} \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1.14)
 \end{aligned}$$

将式(1.14)代入式(1.3)中,可得各阶振型的无阻尼强迫振动方程为:

$$\begin{aligned}
 \ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) &= \frac{2F(t)\phi_i(ut)}{\bar{m}l} \\
 &= \frac{2m_v}{\bar{m}l} \left[ g - \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi ut}{l} \ddot{q}_j(t) \right] \sin \frac{i\pi ut}{l} \quad (i=1,2,3,\dots,n)
 \end{aligned} \quad (1.15)$$

经整理后可以得到:

$$\begin{aligned}
 \ddot{q}_i(t) + \left( \frac{2m_v}{\bar{m}l} \sin \frac{i\pi ut}{l} \right) \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi ut}{l} \ddot{q}_j(t) + \omega_i^2 q_i(t) &= \frac{2m_v g}{\bar{m}l} \sin \frac{i\pi ut}{l} \\
 (i=1,2,3,\dots,n)
 \end{aligned} \quad (1.16)$$

式(1.16)为二阶变系数非齐次微分方程组,其解析解通常难以求得,一般采用数值算法利用计算机程序对其进行数值求解。

#### 1.1.4 匀速移动弹簧-质量作用车-桥模型

随着车-桥作用理论研究的深入发展,工程师们逐渐认识到只有全面考虑车辆自身振动性能的车桥模型才能较真实地反映实际车-桥振动现象。Biggs J M(1954)通过建立弹簧-质量车辆动力模型,系统分析了简支梁桥的车-桥振动响应(Inglis C E,1934)。匀速移动弹簧-质量作用车-桥模型不仅能够获得桥梁结构的动力响应,而且也能较全面地反映车体自身的振动规律,车、桥相互耦合作用的振动机理得到了充分诠释。弹簧-质量车桥模型首次揭示了车辆模型准确性对车-桥振动影响的重要性,对车-桥耦合振动理论的发展与完善具有重要的指导作用,是现代车-桥耦合振动理论的原型。

由于匀速移动的弹簧-质量系统通过桥梁时的耦合振动机理复杂,影响因素众多,难以进行直接求解,通常引入下列假设以获得其近似解。

(1)图 1.4(a)为弹簧-质量车-桥耦合系统,桥梁为等截面简支梁桥,主梁单位长度质量为  $\bar{m}$ ,主梁的抗弯刚度为  $EI$ 。

(2)如图 1.4(b)所示,车辆模型由车体质量  $M_{vs}$  与车轮轴部分质量  $M_{vu}$  组成。跳动的车体质量  $M_{vs}$  由刚度为  $k_v$  的弹簧(车辆悬架)支承着,且假定车轮轴

部分质量  $M_{vu}$  与桥面始终保持不分离密贴接触状态。

(3) 桥梁与车辆模型的阻尼均采用仅与速度成正比的黏性阻尼模型。

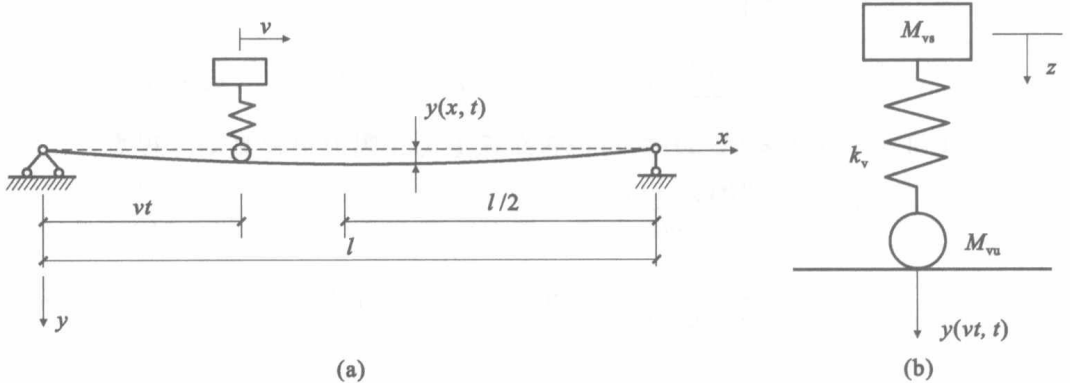


图 1.4 匀速移动弹簧-质量系统通过简支梁模型

(a) 弹簧-质量车-桥耦合模型; (b) 车辆振动模型

匀速移动弹簧-质量系统通过简支梁模型如图 1.4 所示, 车辆对简支梁的作用力可以表示为:

$$F(t) = M_{vu}(g - \ddot{y}_v) + [k_v(z - y_v) + M_{vs}g] \quad (1.17)$$

式中,  $z$  为簧上质量  $M_{vs}$  的绝对位移(由静力平衡位置算起);  $y_v$  为簧下质量  $M_{vu}$  的竖向位移(等于相应位置处梁的挠度);  $k_v$  为车辆悬挂系统的刚度;  $g$  为重力加速度。

式(1.17)中的第一项与式(1.12)相同, 第二项是汽车车体(簧上质量)项。

令  $y(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x)$ , 则  $\ddot{y}(x, t) = \sum_{i=1}^n \ddot{q}_i(t) \phi_i(x)$ , 将其代入式(1.17)中, 可得:

$$F(t) = M_{vu} \left[ g - \sum_{i=1}^n \ddot{q}_i(t) \sin \frac{i\pi vt}{l} \right] + k_v \left[ z(t) - \sum_{i=1}^n q_i(t) \sin \frac{i\pi vt}{l} \right] + M_{vs}g \quad (1.18)$$

于是, 相应的广义扰动力为:

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= \frac{\int_0^l F(t) \delta(x - vt) \phi_i(x) dx}{\bar{m} \int_0^l \phi_i^2(x) dx} = \frac{2F(t) \phi_i(vt)}{\bar{m}l} \\ &= \left[ \frac{2M_{vu}}{\bar{m}l} \left( g - \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi vt}{l} \ddot{q}_j(t) \right) + \right. \end{aligned}$$

$$\frac{2k_v}{ml} \left( z - \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi vt}{l} \ddot{q}_j(t) \right) + \frac{2M_{vs}g}{ml} \left] \sin \frac{i\pi vt}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1.19)$$

则各阶振型的解耦强迫振动微分方程为:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + \frac{2M_{vu}}{ml} \sin \frac{i\pi vt}{l} \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi vt}{l} \ddot{q}_j(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \\ \left[ \frac{2(M_{vu} + M_{vs})}{ml} g + \frac{2k_v}{ml} \left( z - \sum_{j=1}^n \sin \frac{j\pi vt}{l} \ddot{q}_j(t) \right) \right] \sin \frac{i\pi vt}{l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (1.20)$$

对应于桥梁结构的每一阶振型,通过式(1.20)均可建立一个微分方程,且方程之间相互耦合。考虑簧上质量  $M_{vs}$  的竖向振动,其动力平衡微分方程为:

$$M_{vs} \ddot{z}(t) + k_v \left[ z(t) - \sum_{i=1}^n q_i(t) \sin \frac{i\pi vt}{l} \right] = 0 \quad (1.21)$$

由式(1.20)和式(1.21)构成  $n+1$  阶方程组,可借助计算机采用数值法获得车-桥耦合系统的动力响应。

受到早期计算理论与计算方法的限制,车-桥耦合振动古典理论对车辆模型与桥梁模型都做了过多的简化,通常忽略车辆悬架系统特性、桥梁阻尼与桥面平整度等因素的影响,且仅考虑简支梁的竖向动力效应,不能充分考虑车桥之间真实的相互耦联关系,其计算结果与实际车辆行驶过桥试验测试结果偏差较大,不能真实地反映车辆与桥梁结构的实际受力与运动状态。但是车-桥耦合振动古典理论揭示了车-桥耦合相互作用的现象,在一定程度上诠释了车-桥相互作用的机理,初步获得了车-桥耦合振动的影响规律,对早期的桥梁设计与检测工作起到了巨大的指导与推动作用,对后续车-桥耦合振动研究的发展也起着非常重要的指导作用。

## 1.2 车-桥耦合振动研究发展与现状

车辆与桥梁结构的动力耦合相互作用是一个十分复杂的课题,而且许多影响因素具有随机性质,车-桥耦合振动古典理论显然不能全面合理地模拟车-桥耦合振动问题。20世纪六七十年代,随着科学技术的快速发展,具有高速运算功能的电子计算机问世并被广泛应用于工程技术领域,与此同时以数值计算为核心的有限元理论也日渐成熟,这使得车-桥耦合振动研究从车桥系统的力学模型、激励源的模拟到研究方法与数值计算手段等各方面都有了质的飞跃,车-

桥耦合振动的研究逐步摆脱了计算能力与计算理论的限制,步入较为深入、系统的现代车-桥耦合振动研究阶段(杨建荣,2008;王晓臣,2008;章长久,2010;张洁,2007;孙韦,2009;王森,2014;赵雪松,2014)。从20世纪50年代开始,诸多国外与国内桥梁工程技术人员、学者先后建立了多种车-桥振动模型,开展了一系列车-桥振动理论与实践的系统研究工作,为车-桥耦合振动理论的发展作出了重要贡献。

### 1.2.1 国外研究发展与现状

#### (1) 铁路桥梁。

20世纪50年代末期,随着高速铁路开始在日本、西欧等国的兴建,高速运行的列车通过桥梁时的平稳与安全性变得尤为重要,由此对车桥相互作用的动力分析提出了更高的要求,这极大地促进了车-桥系统耦合振动研究的发展。在国外,比较完善的车-桥力学模型和运动方程是由松浦章夫、朱光汉(Chu K H)和Diana G等人建立的。松浦章夫全面综合考虑了车体与车辆双转向系的竖向浮沉和俯仰自由度以及4个轮对各自的竖向运动自由度,形成了10个自由度的多刚体车辆模型,并考虑铁轨的高低起伏影响,基于能量原理推导出了车-桥耦合振动的运动微分方程,采用自编程序实现了车辆过桥全过程的动态数值模拟计算。研究发现,当车速超过300km/h时,桥梁的动力系数将随车速的增加而明显增大。松浦章夫还特别研究了桥梁的共振问题,提出在高速铁路桥梁上,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(夏禾,2005)。

美国伊利诺理工学院朱光汉、Dhar C L和Garg V K将车辆等效为具有竖向位移、俯仰与侧滚自由度的刚性质量块,采取将质量简化到桁梁节点上的方法,建立了车-桥耦合作用的三维分析模型,并将空间车-桥耦合振动方程组表示为矩阵的形式。为了进一步研究轨道表面不平顺对车-桥动力的影响,他们利用计算机自编程序模拟了轨面不平顺空间样本序列,并通过逐步积分法求解车-桥的振动响应,这为车-桥耦合系统的随机振动分析开辟了一条崭新的分析思路(Dhar C L,1978;Wiriychai A et al,1982)。

Bhatti M H(1982)在其博士论文中同时考虑车辆的竖向与横向振动自由度,将空间车辆分成车身、摇枕(2个)与转向系(2个)三大部分,从而形成了具有21个自由度的三维两系弹簧车辆模型,以铁轨的横向蛇行波与竖向不平顺作为车辆激励,推导了桥梁结构与车辆的运动方程,并通过轮轨之间位移与力的耦合关系建立联系,对53.34m跨度的简支梁桥进行了空间车-桥耦合振动分析,研