

轮轨相互作用丛书

铁路车-线-桥系统动力分析

TIELU CHE-XIAN-QIAO XITONG DONGLI FENXI

潘家英 高芒芒 编著

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

轮轨相互作用丛书

铁路车-线-桥系统动力分析

潘家英 高芒芒 编著

中国铁道出版社

2008年·北京

图书在版编目(CIP)数据

铁路车-线-桥系统动力分析/潘家英,高芒芒编著. —北京:
中国铁道出版社,2008.2
(轮轨相互作用丛书)
ISBN 978-7-113-08160-7

I. 铁… II. ①潘…②高… III. 铁路桥-结构动力分析
IV. U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 020883 号

书 名: 铁路车-线-桥系统动力分析
作 者: 潘家英 高芒芒 编著

责任编辑: 徐 艳
封面设计: 薛小卉
责任校对: 张玉华
责任印制: 李 佳

电话: 51873065
电子信箱: xy810@eyou.com

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街 8 号
邮政编码: 100054)

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
版 次: 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷
开 本: 850 mm×1 168 mm 1/32 印张: 7.625 字数: 196 千
印 数: 1~1500 册
书 号: ISBN 978-7-113-08160-7/TU·912
定 价: 30.00 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,请与本社读者服务部调换。

电话:市电(010)63549495 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

中国铁道出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了铁路车-线-桥系统动力问题的分析理论、方法及其在当前普通铁路桥梁,中、高速客运专线铁路桥梁中的应用实践。全书共分十一章,第一章至第三章对车-线-桥动力问题的特点、试验研究及理论研究概况进行了介绍;第四章至第六章阐述了车辆、桥梁、线路结构的理论模型及其运动方程;第七章至第八章介绍了轮轨间相互作用理论及车-线-桥耦合振动方程的建立、求解方法;第九章介绍了不同跨度、不同类型桥梁的车-线-桥耦合振动分析算例,包括梁桥、高速铁路大跨度斜拉桥及大跨度桥梁梁端伸缩装置等;第十章对车-线-桥系统的动力性能评估指标进行了分类归纳和总结,并对国内外有关规范的规定进行介绍;第十一章对车-线-桥系统动力问题的研究作了展望。

本书内容包含了作者多年来的研究成果,所附公式、数据参考方便。可供铁路、公路桥梁专业科研、设计及工程技术人员阅读参考,也可作为相关专业本科生、研究生的教材。

中国铁道出版社

北京·100045

前言

列车-线路-桥梁动力问题的研究是为了适应我国国民经济飞速发展的需求而开展的。经济的发展需要更快捷的交通运输,特别是对于中国这样一个人口众多的发展中国家,铁路是最经济便捷、清洁环保的交通工具。大力提高列车运行速度,发展高速铁路具有重要的经济意义及战略意义。而在世界各国已建和计划修建的高速铁路中,桥梁结构均占有相当大的比例。如何在高速列车行车的过程中确保列车的走行安全性、乘客的乘坐舒适性、货物的完整性及桥梁结构本身的安全性等已成为当务之急。当前正在大力发展的城际铁路及城市轻轨交通也亟需解决列车走行安全性、乘客乘坐舒适性问题。因此,研究列车-线路-桥梁动力问题势在必行。

作者自 20 世纪 80 年代起在程庆国院士主持下开展列车-线路-桥梁动力问题的研究课题,并在美籍朱光汉教授的协助下共同培养这一研究方向的博士生及研究人员,开展理论与试验研究。期间,许慰平、杨岳民、辛学忠、李永强、王贵春、张方银、王勋文、王永刚、李子春、高岩、周佳、张卫东、阴存欣等都做了大量工作,本书内容也包含了他们的工作成果。书中内容还基于许多科研课题的成果,而这些课题得以开展是与铁道部科技司及国家自然科学基金的大力支持是分不开的,在此一并表示感谢!另外要特别感谢李永强研究员对本书的完成所提供的多方面支持!

由于列车-线路-桥梁动力问题涉及到列车、线路、桥梁三大系统,问题本身具有相当大的复杂性与随机性,该学科目前还处在发展过程中,许多问题还需要进一步作深入的研究。书中所介绍的只是作者的一些初步成果和心得体会。由于成书较晚,书中收集了一些最近的研究实例及国内外最新的规范规定,以反映技术的

新进展。由于作者水平有限,不足之处恳请批评指正。

本书是轮轨相互作用丛书首批规划九个分册中的一个分册。早在 20 世纪 90 年代,在丛书主编谭立成研究员与程庆国院士的积极筹划下决定编写本分册,后因 1999 年程庆国院士的去世使本分册的编写工作未能及时开展。其后,谭立成主编曾多次对作者进行鼓励与催促,但由于多种主、客观原因,本分册的撰写工作迟至今日才告完成,而谭立成主编已于一年多前驾鹤西去,未能看到本分册的出版,实为一大憾事。谨以此书纪念程庆国院士及谭立成研究员。

作者

2007 年岁末

目 录

第一章 列车过桥动力问题概述.....	1
第一节 列车过桥所产生的动力问题.....	1
第二节 列车过桥动力作用的影响因素.....	2
第三节 列车过桥动力问题研究.....	7
第二章 列车过桥动力作用的试验研究.....	9
第一节 模型试验.....	9
第二节 实型试验	18
第三章 列车过桥动力作用的理论研究	36
第一节 车-桥动力问题早期理论研究	36
第二节 车-桥动力问题现代理论研究	46
第三节 车-桥系统动力分析基本原理	54
第四章 车辆模型	61
第一节 概述	61
第二节 车辆运动平衡方程	66
第五章 桥梁模型	73
第一节 桥梁建模	74
第二节 桥梁典型单元力学特性矩阵	76
第三节 桥梁运动方程	96
第六章 线路模型	97
第一节 轨道不平顺	97
第二节 线路模型.....	101

第七章 轮轨相互作用	116
第一节 引言	116
第二节 轮轨关系的建立	117
第八章 车-线-桥耦合方程的建立及其求解	135
第一节 车-线-桥耦合方程的建立	135
第二节 车-线-桥系统方程求解的数值积分方法	137
第三节 车-线-桥系统耦合振动分析程序设计	142
第九章 车-线-桥耦合振动分析算例	144
第一节 铺设弹性轨枕涵洞的车-线-桥分析	144
第二节 简支梁桥的分析	150
第三节 高速铁路预应力混凝土斜拉桥车-桥耦合 振动分析	151
第四节 大跨度铁路钢斜拉桥车-桥动力分析	156
第五节 铁路悬索桥方案车-桥动力分析	162
第六节 大跨度铁路桥梁端伸缩装置方案行车 动力分析	168
第十章 车-线-桥系统的动力性能评估	176
第一节 桥梁自振频率	176
第二节 桥梁变形限值	181
第三节 桥梁振动响应	190
第四节 车辆振动响应	194
第十一章 车-线-桥系统动力研究展望	207
附录一 三角形单元刚度、质量矩阵	211
附录二 矩形单元刚度、质量矩阵	220
参考文献	226

第一章 列车过桥动力问题概述

第一节 列车过桥所产生的动力问题

与公路桥梁相比,铁路桥梁的活载在整个桥梁设计荷载中占有很大的比例。据不完全统计,中小跨度混凝土公路桥的活载与总荷载之比约为 7%~10%,大跨度混凝土公路桥的活载与总荷载之比约为 4%~6%;而中小跨度混凝土铁路桥的活载与总荷载之比可达 40%~50%,大跨度混凝土铁路桥的活载与总荷载之比可达 25%~35%,对于自重较轻的钢桥,铁路活载所占的比重就更大。故活载在铁路桥梁设计中的重要性可见一斑。铁路桥梁活载与公路桥梁活载的不同之处不仅在于它在总荷载中所占的比重,还在于它独特的有轨线路、车辆结构、编组形式和比公路行车高得多的车速。尤其是近几十年来铁路车速不断提高,使这一特点更为明显。目前公路线路的车速一般在 40~100 km/h 之间,常速铁路的车速为 100~120 km/h,中速铁路的车速为 120~160 km/h,准高速或快速铁路的车速为 160~200 km/h,高速铁路的车速为 200~400 km/h,特高速铁路的车速则在 400 km/h 以上^[154]。这些特点决定了列车过桥动力问题必然成为铁路桥梁设计要面对的重要问题,尤其是在列车不断进行大提速的当代中国,对车-桥振动的研究具有更重要的现实意义。

当列车通过桥梁结构时由于机车车辆进桥前就已具有的初始振动、轮轨间的蛇行运动、快速移动荷载对线桥结构所产生的动力作用及线桥结构自身的变形与振动等,使整个车-线-桥结构体系在竖向、横向和纵向 3 个方向产生振动,并导致一系列动力问题的产生,如因线桥结构的振动、冲击及疲劳影响轨道结构稳定及桥梁使用寿命,因车体振动过剧而影响旅客乘坐舒适性、货物的破损率及车辆运行的安全性等。故自 1825 年英国修建第一条铁路并在

19 世纪中下叶欧美发生多起铁路桥梁因车致振动而破坏的事件以来,人们就一直在研究列车通过线桥结构的动力作用问题。对于常见的桥梁结构,由于列车正常行驶过桥时车-线-桥结构体系的纵向振动问题并不突出,故通常只研究该体系的竖向和横向振动问题,纵向则主要研究列车制动等对线桥结构的影响。

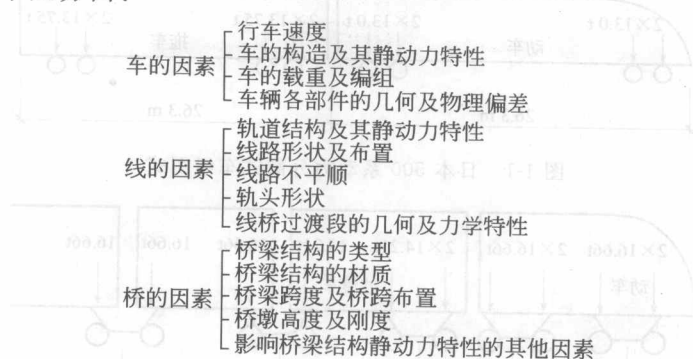
车-线-桥结构体系的竖向振动最直接的影响是使结构的变形和应力比静态时增大,由此导致结构强度和行车安全问题。在以往的桥梁设计中,一般只考虑列车动力作用对桥梁强度方面的影响,动载增大效应往往用在静活载上乘以一个冲击系数的办法来解决。但在行车速度提高后,在桥梁设计中仅仅考虑动载作用下的强度问题是远远不够的,还必须考虑桥上线路稳定性、桥上列车走行安全性及乘坐舒适度等问题。桥面过大的振动加速度及车线间过大的轮轨力将会造成道砟的塌陷及线路结构的损坏;桥头过大的梁端折角会造成轮重的突然减载,诱发脱轨事故,影响行车安全;车体的振动加速度、振幅及振动频率则影响旅客的乘坐舒适度及货物的破损率。

车-线-桥结构体系的横向振动对行车安全与行车质量的影响也是不容忽视的。首先,体系的横向振动较大会使司机和旅客感到不适,还将造成货物的破损并威胁行车安全。例如在设计轻型墩桥、高墩桥及大跨度桥的场合,由于这类桥梁的横向刚度较小,车-线-桥结构体系的横向振动往往成为设计的控制因素。因此,现代铁路桥梁设计的概念已开始由静态强度设计转向动态刚度设计,并对桥梁线型、刚度及结构细节等提出了更高的要求。

第二节 列车过桥动力作用的影响因素

由于列车过桥动力问题涉及到机车车辆、轨道线路及桥梁结构三大部分,其中每一部分本身都是一个复杂的系统,而且这三者之间互相影响,且其相互关系随列车的行进而发生变化,因而具有时变性。影响列车过桥动力作用的因素大致可分

以下几方面：



行车速度对列车过桥动力影响的影响是显而易见的,速度为零的列车即为静荷载,不会产生动力作用。在桥梁动载试验时往往以 5 km/h 车速的测试结果作为准静态值就是基于这个道理,列车提速导致车-桥体系动力作用的加剧也早被工程实践所证明。

传统的列车是由机车和若干辆无动力的车辆组成。机车车辆的种类不同,其构造及静动力特性自然也不同。从国内目前的情况看,蒸汽机车已基本不用,较常见的机车有内燃机车和电力机车,前者如 DF4 货运机车和 DF11 客运机车,后者如 SS4 货运机车和 SS8 客运机车。近年来又出现新的列车形式——动车组。所谓动车组即为自带动力、可两端驾驶、配备现代化设施的列车。动车组有内燃动车组和电动车组(其中又有动力集中式和动力分散式之分)。前者如神州号内燃动车组,后者如先锋号动力分散式、中华之星动力集中式、200 km/h 动力集中式电动车组和我国自行研制的独立式 300 km/h 级高速列车。在货车车辆方面,最常用的是 C62,新近又开发出 120 km/h 新型货车。较多用到的国外车组有德国的 ICE 列车,法国的 TGV 列车和日本的 E2 列车。部分常用列车机车车辆的轴重及车长示意图 1-1~图 1-11。不同种类的列车其动力性能相差很大,如蒸汽机车动轮不平衡重的冲击作用在车-桥动力作用中曾是重要的激振源,但在内燃机车和电力机车中不再存在这种作用。货车的悬挂系统及各种参数与客车的差别很

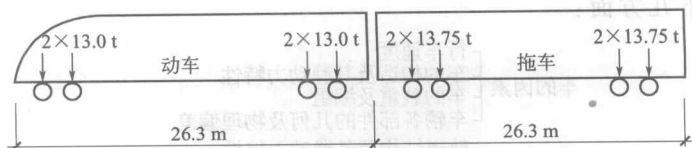


图 1-1 日本 500 系动力分散式车组图式

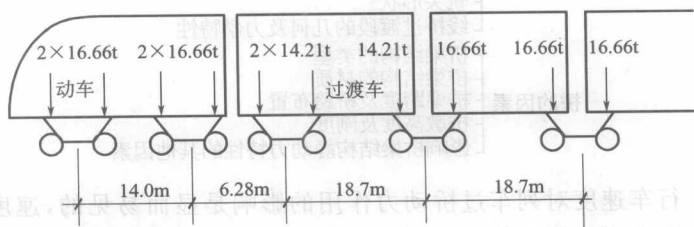


图 1-2 法国 TGV 铰接式车组图式

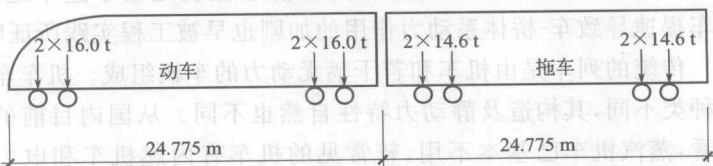


图 1-3 德国 ICE3 动力分散式车组

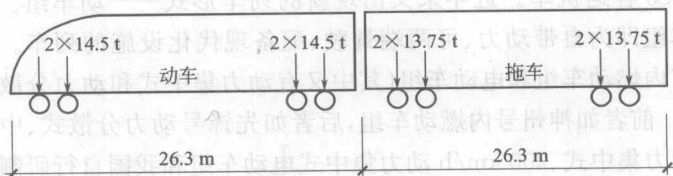


图 1-4 国产 300 km/h 动力分散式车组

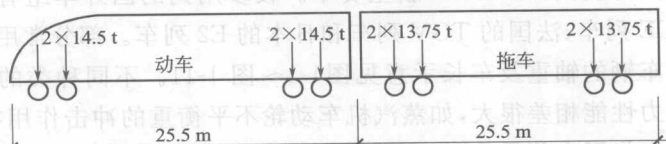


图 1-5 国产“先锋号”动力分散式车组

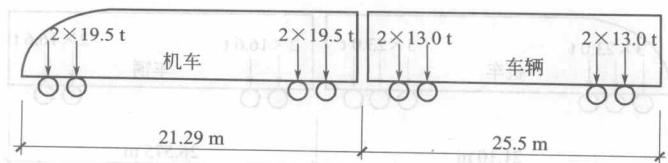


图 1-6 国产“中华之星”动力集中式车组

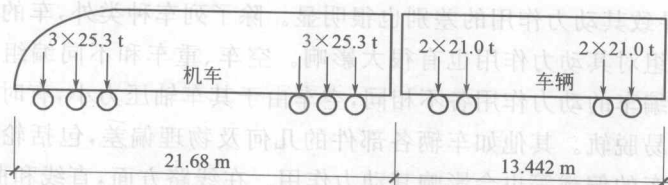


图 1-7 东风 4 型内燃机车牵引 C62 货车

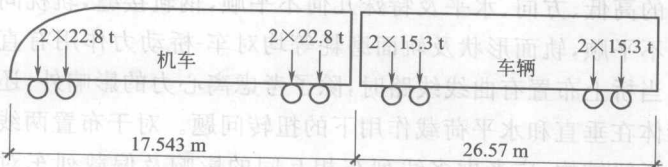


图 1-8 SS8 型电力机车牵引双层客车

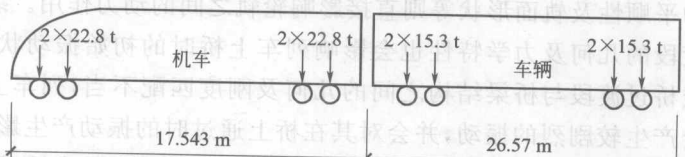


图 1-9 200 km/h 动力集中式电动车组

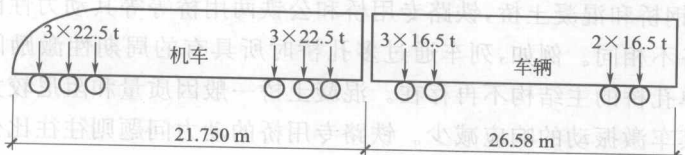


图 1-10 神州号内燃动车组

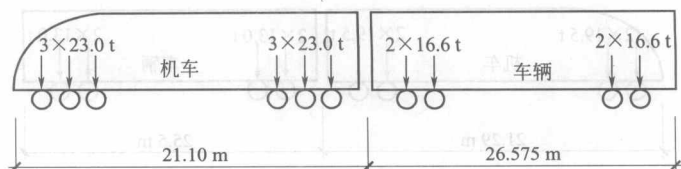


图 1-11 东风₁₁ 型内燃机车牵引准高速客车

大,导致其动力作用的差别也很明显。除了列车种类外,车的载重及编组对其动力作用也有很大影响。空车、重车和不同编组的空重混编车的动力作用各不相同,空车由于其车轴压力小,有时比重车更易脱轨。其他如车辆各部件的几何及物理偏差,包括轮箍不圆及车的偏载等也会影响其动力作用。在线路方面,直线和曲线,单线、双线和多线,有砟线路和无砟线路以及线路的平顺性,包括线路的高低、方向、水平及特殊几何不平顺,钢轨接缝,轨枕间距等动力不平顺,轨面形状及轨面磨耗等均对车-桥动力作用有直接影响。当桥上布置有曲线线路时,除了考虑离心力的影响外,还应考虑梁体在垂直和水平荷载作用下的扭转问题。对于布置两线及多线的桥梁结构,应考虑多线列车相互间的影响及偏载列车对桥梁的影响。桥上线路是否有砟则影响到轨道结构的质量和刚度。线路的平顺性及轨面形状等则直接影响轮轨之间的动力作用。线桥过渡段的几何及力学特性也会影响列车上桥时的初始振动状态,若线桥过渡段与桥梁结构之间的几何及刚度匹配不当,列车上桥时会产生较剧烈的振动,并会对其在桥上通过时的振动产生影响。桥梁结构对车-桥动力作用的影响更是不言而喻的,梁式桥、刚构桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥,大跨度桥和中小跨度桥,单跨桥和多跨桥,钢桥和混凝土桥,铁路专用桥和公铁两用桥等等其动力性能显然各不相同。例如,列车通过多孔桥时所具有的周期性激励问题对单孔桥的主结构不再存在。混凝土桥一般因质量和阻尼较大而使其车激振动的响应减少。铁路专用桥的动力问题则往往比公铁两用桥要严重。

上述各种因素的性质各不相同,有的因素在设计计算时比较

确定(虽然在实际行车时也会有不少变化),有的因素则在设计计算时不易确定。前者如行车速度、车、轨道、桥梁的结构构造及其静动力特性,车的载重及编组等;后者如车辆各部件的几何及物理偏差、车的偏载、多车道车辆的相互对开关系、线路不平顺等。在车速、车、轨、桥的构造及性能,车的载重及编组等一定的假定下,如何考虑线路不平顺等随机因素对车-桥动力作用的影响正是人们所要解决的难题之一。

第三节 列车过桥动力问题研究

在长达一个多世纪的时间里,由于行车速度不高及计算技术的限制,车-桥动力问题的研究内容主要局限于求得桥跨结构在竖向振动下的应力或挠度冲击系数,即其目标是研究桥梁在中、低速列车荷载下的强度问题,研究结果主要是给桥梁的静态设计提供一个荷载放大系数。自 20 世纪 60 年代以来由于有限单元法的问世、电子计算机在工程中的广泛应用及测试技术的进步,给车-桥系统的动力相互作用研究提供了强大的手段,研究工作取得了长足的进展。尤其是随着高速、重载列车的出现及桥梁向长大跨度方向的发展,仅仅求出冲击系数已不能满足桥梁设计的要求,为了确保高速、重载列车行车的安全与舒适,车-桥动力作用研究的内容逐渐增加。除了冲击系数,人们开始对桥梁挠度、梁端转角的限值及横向振动等问题进行研究。

长期以来车-桥横向振动问题一直研究较少。一方面是因为影响横向振动的因素不够直观,另一方面从强度的观点看横向振动引起结构的内力、应力均较小,且对于中小跨度桥梁来说,其横向刚度一般不成问题,故对横向动力问题往往只是用在桥上施加横向摇摆力的简化办法处理。但随着桥梁结构向高墩、大跨度方向发展,如何合理确定桥墩刚度、桥梁宽跨比等横向刚度已成为必须解决的问题。这就要求对车-桥横向振动问题进行更为深入细致的研究。

事实上,列车过桥时桥梁的振动是一种空间振动,在电算技术

及理论分析方法有了显著改进的今天,车-桥动力响应问题的研究已向系统化、综合化的方向发展,即已趋向于对车、线、桥组成的综合动力体系进行整体研究,并对车-线-桥各部分的动力特性作出综合评价,从而为桥梁的动态设计提供依据。此外,车-线-桥的振动还会造成噪音及对邻近建筑振动的影响等环境问题,在一定场合(例如附近有高精度仪表设备生产企业或研究部门等)也是需要认真解决的。这时所需研究的对象除车-线-桥外,还将包含周围地基及建筑物,其力学体系将更为庞大和复杂。

在研究方法方面,早期的研究仅限于较为粗糙的现场实测及简单的理论分析。在利用计算机后已逐步建立起具有较高精度的力学模型,并可在计算机上实现大量的参数分析,得出有关规律。同时进行桥梁现场试验及模型试验,取得必要的实例数据,并将这数种不同方式所得结果在实践中互相验证,互相对照,以检验理论模型的正确性,从而逐步摸索车-线-桥动力响应的规律,得出有用的结论。日本和国际铁路联盟等都曾采用这些研究方法对车-线-桥动力响应问题进行比较深入的研究与试验。我国目前的研究工作也已向着这个方向进行。

第二章 列车过桥动力作用的试验研究

试验研究是车-桥动力作用研究最早采用的手段,通过试验能最直接地得到车-桥动力作用的定量结果。该类试验可分为模型试验和实型试验两大部分,后者又有现场实测和试验台实测等不同方式。

第一节 模型试验

与实型试验相比,模型试验具有节省人力、物力等优点,且因其往往在室内进行,故具有较好的测试条件。尤其对于一些新体系新结构,如尚未修建的高速铁路桥梁、特大跨度桥梁等,显然无法预先在实际结构上进行试验,这时可通过模型试验在一定程度上解决一些设计所提出的问题,并对理论分析的结果起一定的校验作用。再有,在列车通过铁路桥梁的现场动力试验中,由于动力响应受到许多因素的影响,故其结果往往与特定的试验条件有密切关系,较难适应于一般规律的研究。而模型试验可以较容易地控制试验条件,改变试验参数,故在对一般规律及特定影响的研究方面具有一定的优越性。但由于存在着轮轨接触关系等一些较难模拟的问题,因而使它在研究车-桥振动尤其是车-桥横向振动等方面受到一定的限制。1844年英国和法国工程师对英国著名的Britannia桥进行的模型试验被认为是桥梁在移动荷载下的动力性能进行的最早研究^[105]。其后模型试验在欧洲、前苏联及日本等国家陆续开展并取得一定成果。

进行车-桥动力模型试验要经过模型设计、加工制造与安装、加载测试及测试数据整理与分析等步骤。与静力模型相比,动力模型的设计中要考虑的因素更多。如在控制结构振动性能的变量方面,除了静力模型中所考虑的长度及力外,还要将时间作为基本物理量来考虑。模型总体设计主要由试验目的及试验条件所决