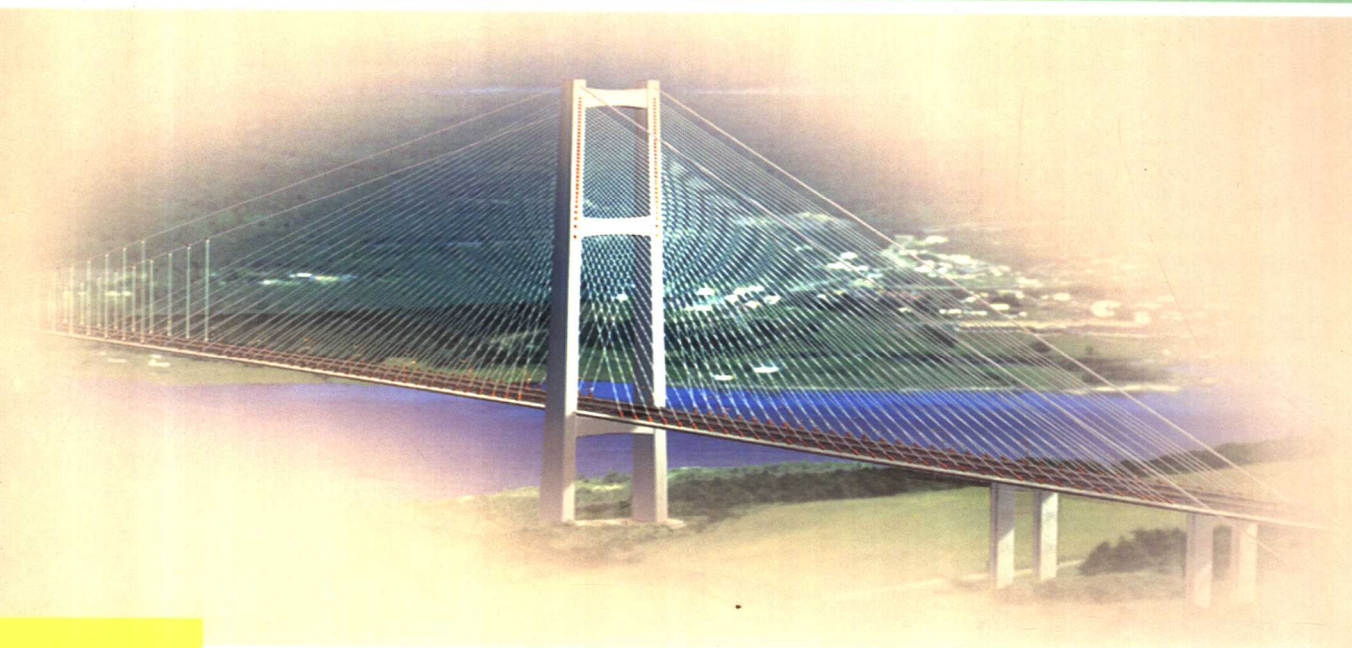




**交通版** 高等学校土木工程专业规划教材  
JIAOTONGBAN GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 桥梁检测 与维修加固

张俊平 周建宾 主编  
蒙 云 主审



人民交通出版社

China Communications Press

**交通版** 高等学校土木工程专业规划教材  
JIAOTONGBAN GAODENG XUOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# ——桥梁检测 与维修加固

Qiaoliang Jiance Yu Weixiu Jiagu

张俊平 周建宾 主编  
蒙 云 主审



人民交通出版社

China Communications Press

## 内 容 提 要

全书共分为九章。第一章绪论,介绍了桥梁检测、维修加固的重要性与必要性;第二章桥梁检测的量测技术,系统地介绍了各种物理参量的测试方法与仪器设备;第三章桥梁检查,介绍了桥梁检查的内容、方法与程序;第四章桥梁静载试验,全面地介绍了桥梁静载试验的方案编制、现场实施、分析评价的要点,并给出了典型试验示例;第五章桥梁动载试验,介绍了桥梁动载试验的测试方法、实施程序与评价方法;第六章无损检测技术,介绍了混凝土强度测试、混凝土缺陷测试的各种方法及相应的测试仪器;第七章桥梁施工控制与长期监测,介绍了桥梁施工控制与长期监测的概念、工作内容与实施要点;第八章误差分析与数据处理,简要介绍了误差分析与数据处理的方法;第九章桥梁维修养护与加固,对桥梁常见病害、桥梁日常养护维修方法、桥梁加固的原则与实施要点做了介绍。

本书适合于土木工程本科教学使用,也可供从事土木工程建设、管理与养护的工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

桥梁检测与维修加固/张俊平,周建宾主编. —北京:  
人民交通出版社,2006.2  
ISBN 7-114-05907-8

I. 桥... II. ①张...②周... III. ①桥梁结构-检测②桥-维修③桥-加固 IV. ①U446②U445.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第004273号

书 名: 桥梁检测与维修加固

著 作 者: 张俊平 周建宾

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16.75

字 数: 413千

版 次: 2006年4月 第1版

印 次: 2006年4月 第1次印刷

书 号: ISBN7-114-05907-8

印 数: 0001-3000册

定 价: 28.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

编委会

---

主任委员：阎兴华

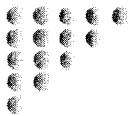
副主任委员：张向东 李幅昌 魏连雨 赵 尘

宗 兰 马芹永 段敬民 黄炳生

委 员：彭大文 林继德 张俊平 刘春原

党星海 刘正保 刘华新 丁海平

秘 书 长：张征宇



随着科学技术的迅猛发展、全球经济一体化趋势的进一步加强以及国力竞争的日趋激烈,作为实施“科教兴国”战略重要战线的高等学校,面临着新的机遇与挑战。高等教育战线按照“巩固、深化、提高、发展”的方针,着力提高高等教育的水平和质量,取得了举世瞩目的成就,实现了改革和发展的历史性跨越。

在这个前所未有的发展时期,高等学校的土木类教材建设也取得了很大成绩,出版了许多优秀教材,但在满足不同层次的院校和不同层次的学生需求方面,还存在较大的差距,部分教材尚未能反映最新颁布的规范内容。为了配合高等学校的教学改革和教材建设,体现高等学校在教材建设上的特色和优势,满足高校及社会对土木类专业教材的多层次要求,适应我国国民经济建设的最新形势,人民交通出版社组织了全国二十余所高等学校编写“交通版高等学校土木工程专业规划教材”,并于2004年9月在重庆召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路,于2004年11月在北京召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,目前这套规划教材已陆续出版。

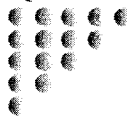
这套教材包括“土木工程概论”、“建筑工程施工”等31门课程,涵盖了土木工程专业的专业基础课和专业课的主要系列课程。这套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例并适当反映本学科领域的新发展,力求通俗易懂、图文并茂;其中对专业基础课要求理论体系完整、严密、适度,兼顾各专业方向,应达到教育部和专业教学指导委员会的规定要求;对专业课要体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,保证知识体系的完整性、准确性、正确性和适应性,专业课教材原则上按课群组划分不同专业方向分别考虑,不在一本教材中体现多专业内容。

反映土木工程领域的最新技术发展、符合我国国情、与现有教材相比具有明显特色是这套教材所力求达到的,在各相关院校及所有编审人员的共同努力下,交通版高等学校土木工程专业规划教材必将对我国高等学校土木工程专业建设起到重要的促进作用。

交通版高等学校土木工程专业规划教材编审委员会

人民交通出版社

2005年8月



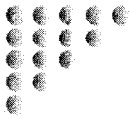
近 20 年来,随着桥梁建设事业的飞速发展,桥梁结构的使用荷载日益增大,同时,大批既有桥梁结构也进入了老化期,为了确保桥梁结构的安全,生产实践中对桥梁检查、检测、养护、维修、加固工作提出了更高的要求,桥梁检测维修由此越发显得重要。另一方面,随着自动化技术的发展,计算机的普及应用,以及新材料、新工艺的推广,测试技术、分析手段、维修加固技术也取得了长足的进步,为桥梁检测与维修加固提供了强有力的支持。基于此,编者根据多年教学体会和工程实践的经验,汲取较为先进成熟的技术成果,参阅借鉴国内外有关教材和参考书,力求编写出一本既适合本科教学、又适用于生产实践需要的桥梁检测与维修加固教材。

本书共 9 章,由张俊平主编,具体分工如下:第一、四、五、七章,张俊平;第二章,梅力彪;第三章,周建宾;第六、八章,李永河;第九章,周建宾、张俊平,全书由张俊平统稿。书中打 \* 者,在教学时可根据学时数及教学对象的需要选讲。在编写过程中,重庆文通学院蒙云教授提出了许多宝贵意见,特致谢忱。

限于编者水平和时间,谨请读者批评指正,以使本书在教学实践与生产实践中日臻完善。

编者  
2006 年 3 月

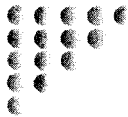
# 目录 MU LU



<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 桥梁检测与维修加固的意义.....	1
第二节 桥梁检测的工作内容.....	3
第三节 桥梁养护维修加固.....	4
<b>第二章 桥梁检测的量测技术</b> .....	5
第一节 概述.....	5
第二节 应变测试仪器与技术.....	7
第三节 变形测试仪器与技术.....	20
第四节 振动测试仪器与技术.....	25
*第五节 其他物理参数测试仪器与技术.....	32
<b>第三章 桥梁检查</b> .....	35
第一节 桥梁检查的分类与程序.....	35
第二节 桥梁检查内容与方法.....	40
*第三节 桥梁检查评价与分类方法.....	48
*第四节 桥梁管理系统简介.....	55
<b>第四章 桥梁静载试验</b> .....	57
第一节 静载试验的方法与程序.....	57
第二节 桥梁结构静载试验的方案设计.....	59
第三节 试验现场组织.....	65
*第四节 桥梁桩基础静载试验.....	67
第五节 静载试验数据整理分析.....	73
*第六节 静载试验实例.....	81
<b>第五章 桥梁动载试验</b> .....	98
第一节 动载试验的方法与程序.....	98
第二节 桥梁结构动力响应的测试.....	100
第三节 动测数据分析与评价.....	110

<b>第六章 无损检测技术</b> .....	117
第一节 概述.....	117
第二节 回弹法测混凝土强度.....	120
第三节 混凝土超声检测技术基础.....	128
第四节 超声-回弹综合法检测混凝土强度.....	131
* 第五节 超声法检测混凝土缺陷.....	134
* 第六节 混凝土钻孔灌注桩完整性检测.....	144
* 第七节 钢结构探伤.....	153
* 第八节 局部破损检测方法简介.....	157
* 第九节 无损检测实例.....	161
<b>*第七章 桥梁施工控制与长期监测</b> .....	170
第一节 桥梁施工控制的基本概念.....	170
第二节 桥梁施工控制的工作内容.....	172
第三节 桥梁施工控制的理论与方法简介.....	175
第四节 桥梁结构长期监测与健康诊断技术.....	183
<b>*第八章 误差分析与数据处理</b> .....	188
第一节 测定值的误差.....	188
第二节 测定结果的误差估计.....	190
第三节 试验曲线与经验公式.....	196
第四节 回归分析方法.....	198
<b>第九章 桥梁养护维修与加固</b> .....	203
第一节 桥梁常见病害.....	203
第二节 桥梁日常养护维修的内容与方法.....	211
第三节 常用桥梁加固技术简介.....	225
<b>附表 1 回弹法测区混凝土强度换算表</b> .....	243
<b>附表 2.1 超声-回弹综合法测区混凝土强度换算表(卵石)</b> .....	249
<b>附表 2.2 超声-回弹综合法测区混凝土强度换算表(碎石)</b> .....	253
<b>参考文献</b> .....	257





## 第一节 桥梁检测与维修加固的意义

在科学技术发展过程中,科学试验起着非常重要的作用。从土木工程设计计算理论的演变历史来看,每一种理论体系的建立和发展,一般都和大量的科学试验、生产实践密切联系。试验研究在推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题等方面往往起到了重要的作用。

在桥梁工程的发展中,桥梁试验也起到了同样重要的作用。大量的试验研究成为促进桥梁结构设计计算理论、设计方法不断发展的推动力之一。桥梁试验是对桥梁原型结构或桥梁模型结构直接进行的科学试验,包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等一系列工作。桥梁原型试验也称之为桥梁检测,其目的是通过试验,掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态,判定桥梁结构的承载能力和使用性能,检验设计与施工质量。桥梁模型试验的目的是研究结构的受力行为,探索结构的内在规律,为设计施工服务。随着交通事业的蓬勃发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,桥梁检测试验技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。桥梁试验的任务主要包括以下几个方面。

(1)确定新建桥梁结构的承载能力和使用性能。对于重要的桥梁结构,在建成竣工后,需要通过桥梁检测考察该桥的施工质量与结构性能,判定桥梁结构的实际承载能力,为竣工验收、投入运营提供科学的依据。对于新型或复杂的桥梁结构,通过系统的桥梁静动载试验或长期监测,可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,探索结构受力行为的一般规律,为充实和发展桥梁结构设计计算理论积累资料。

(2)评估既有桥梁的使用性能与承载能力。对于既有桥梁结构在运营期间,因受水害、地震等自然灾害而损伤,或因设计施工不当而产生严重缺陷,或因使用荷载大幅度增长、严重超过设计荷载等级,通常通过桥梁检测来评估既有桥梁的使用性能与承载能力,为既有桥梁采取养护、加固、改建或限载对策提供科学的依据。这对于缺乏完整技术资料的既有桥梁更为必要。

(3)研究结构(构件)的受力行为,总结结构受力行为的一般规律。随着桥梁工程的不断发展,新结构、新材料、新工艺的推广应用,原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为

了修改、完善既有的规范、规程,指导设计与施工,就需要进行大量的研究性试验。

在实际工作中,桥梁试验的种类很多,按照试验的目的与要求分类,可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论和经验公式,或验证某一结构理论体系中的科学假设判断的可靠性。研究性试验一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数,试验结构的设计与数量均应根据具体研究目的的需要确定。根据实际情况,研究性试验一般多采用模型结构,在专门的试验室内进行,利用特定的加载装置,以消除或减少外界因素的干扰,同时突出所要研究的主要影响因素。通过系统的模型试验,对测试资料数据加以分析论证,从而揭示出具有普遍意义的规律。生产鉴定性试验也称为桥梁检测,具有直接服务于生产实践的意义,一般以原型结构作为试验对象,在现场进行试验,根据一定的规范、标准的要求,按照有关设计文件,通过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件,检验设计、施工质量,提出桥梁养护、加固、改建、限载对策,有效地保证桥梁结构的安全使用。桥梁检测包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在桥梁试验中,原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利影响因素,如对一些大型桥梁进行多因素的研究性试验,有时是难以实现的。因此,结合原型桥梁进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效手段,可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系,探索结构行为的普遍规律,推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

根据试验荷载作用的性质,桥梁试验可分为静荷载试验和动荷载试验。桥梁静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量,从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是利用某种激振方法激起桥梁结构的振动,测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量,从而判断桥梁结构的整体刚度与行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同,是两种性质的试验,但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。

就试验对结构产生的后果来说,桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下,原型结构的破坏试验,不论在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题,特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的,因此,鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下,为了达到预定的试验目的,往往需要进行破坏性试验,以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料,此时多以模型结构为对象,在实验室内进行,以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测、分析,从而总结出具有普遍意义的规律,推广应用于原型结构。

按试验持续时间的长短,可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法,只有那些必须进行长期观测的影响因素,如混凝土结构的收缩和徐变性能、桥梁基础的沉降等,才采用长期试验方法。此外,对于大型桥梁结构或新型桥梁结构常常采用长期观测或组织定期检测,以积累这些结构长期使用性能的资料。

总之,结合具体的试验目的及时间情况,可选用一种或几种试验方法来检验桥梁结构的性能。在选择时应力求节约成本,一般能用模型代替的,就不搞大规模的原型试验,通过非破坏性试验可以达到试验目的的,就不做破坏性试验。

在桥梁使用过程中,由于自然界各种因素的影响、荷载的反复作用特别是超载车辆的作用,桥梁结构会产生各种损伤或局部破坏。随着桥梁服役时间的增长,损伤也会越来越严重,为保障桥梁的安全运营,延长其使用寿命,就要在检测评估的基础上,对于那些承载能力不足、

使用性能较差或耐久性能不满足要求的结构或构件,进行有针对性地维修加固。桥梁维修加固可分为一般性维修和结构性加固。一般性维修如桥面铺装层的维修、油漆涂装更新、裂缝封闭与灌浆处理、支座更换等是桥梁养护的日常内容,按维修规模又可分为小修、中修、大修,其主要目的是保证桥梁结构的使用性能或耐久性不受大的影响。结构性加固如提高地基基础承载力和上部结构承载能力等,以弥补桥梁结构先天缺陷、灾后桥梁结构承载能力恢复或满足新的使用条件下的功能要求。桥梁加固涉及的内容十分广泛,包含了桥梁实际状况的检测鉴定、加固理论与加固技术,以及加固方案的比较选择与投资效益的优化等方面。可以说,桥梁检查检测与桥梁维修加固的关系密不可分,是一个问题的两个方面。

## 第二节 桥梁检测的工作内容

桥梁检测的工作内容比较多,涉及到很多方面。从方法上来讲,分为静载试验、动载试验和无损检测;从时间上来看,分为短期试验和长期试验;从进行时期来看,分为成桥试验和施工阶段监测控制。一般情况下,桥梁检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段、分析总结阶段。

准备规划阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原试验资料、桥梁养护与维修记录等桥梁技术资料的收集;桥梁现状如桥面系、承重结构构件、支座、基础等部位的表现检查;设计内力计算、加载方案制订、量测方案制订、仪器仪表选用等方面,也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说,检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程序,利用适宜的加载设备进行加载,运用各种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标,如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等,并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时,为了使某一加载、观测方案更为完善,可先进行试探性试验,以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是,对于静载试验,应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较,以判断受力后结构行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这在对存在病害的既有桥梁结构进行试验时,尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律,因此,应对它们进行科学地分析处理,去伪存真、去粗存精,综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行计算或判断。这一阶段的工作,直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后,按照相关规范、规程以及检测的目的要求,对检测对象做出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

综上所述,桥梁检测是一门直接服务于工程实践的技术学科,涉及到桥梁的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、数理统计分析、现场试验组织等方面,具有较强的综合性、应用性和复杂性。

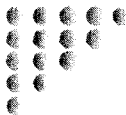
### 第三节 桥梁养护维修加固

随着交通运输事业的发展,交通量增加,荷载等级的提高以及外界环境的影响,桥梁在使用过程中会出现各种各样的病害。从桥梁的承载力、适用性和耐久性方面看,桥梁病害主要表现为承载力不足、桥梁整体或局部变形、材料强度降低和局部损伤、基础变位或不均匀沉降,混凝土桥梁还会产生混凝土的开裂、腐蚀和碳化等病害,这些病害的发生发展直接影响结构的使用性能和桥梁耐久性,严重时直接危及桥梁运营安全。

为了满足桥梁的正常运营要求,尽量保持和延长桥梁的使用寿命,对桥梁结构进行经常性的养护维修是非常必要的。桥梁的养护维修,主要是进行日常检修和对危害桥梁正常运营的部分进行修缮工作,如对桥面铺装层、伸缩缝、防排水设施、桥梁主体结构的各种缺陷进行养护维修。在桥梁使用过程中,进行经常性的维修整治是保证其正常使用的前提和关键。

了解桥梁的病害特征,加强日常养护,并对日常养护中发现可能影响桥梁结构功能和耐久性的病害进行及时维修加固,以免病害发展危及桥梁安全,是管理养护部门的主要职责。桥梁维修的一般原则是贯彻“预防为主,防治结合”的方针,使桥梁经常处于完好的技术状态,达到安全、耐久的目的。如有病害,则通过维修加固及时消除病害,恢复原设计功能。桥梁加固涉及的内容十分广泛,包含了桥梁实际状况的检测鉴定、加固计算与加固技术以及加固方案的比较选择与投资效益的优化等方面。

近 20 年来,随着新结构、新材料、新工艺的飞速发展,桥梁使用荷载的不断增大,以及大批既有桥梁结构进入老化期,桥梁检测工作显得越来越重要,也对桥梁检测提出了更高、更全面的要求,而自动化技术的发展及计算机的普及应用,使得测试技术、分析手段取得了长足的进步,也为桥梁检测工作提供了更好的技术支持。另一方面,随着桥梁服役期的增长,使用养护不当,病桥危桥的数量越来越多,在生产实践需要的推动下,桥梁结构的维修加固改造技术得以迅速发展,正在形成一门新的学科。因此,桥梁检测与维修加固必将进一步地推动桥梁建设事业的发展,并在确保桥梁安全运营、延长桥梁使用寿命方面起到更加重要的作用。



## 第一节 概 述

量测技术、仪器设备、测试元件是桥梁检测的重要技术保障,量测技术的科学性、准确性直接关系到桥梁检测能否达到预期的目的。在桥梁静载、动载试验检测中,量测的内容一般包括以下几个方面:

- (1)作用力的大小,包括试验荷载的大小、一些构件的内力、支座反力的大小。
- (2)结构截面上各种应力的分布状态及其大小。
- (3)结构的各种静态变形,包括水平位移、竖向挠度、相对滑移、转角等。
- (4)结构局部的损坏现象如裂缝的分布、宽度、深度等。
- (5)在动荷载作用下,要测定结构的动应力,或测定结构的自振特性、动挠度、加速度、衰减特性等。

为了测定上述的各项数据,在进行桥梁检测时需要使用相应的检测仪器,并要掌握量测仪器的基本性能和测量方法。

### 一、检测仪器的分类

检测仪器的分类方法很多,较为常用的分类方法有以下几种:

- (1)按仪器的工作原理分为机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器、声学仪器、复合式仪器、伺服式仪器等。
- (2)按仪器的用途分为测力计、应变计、位移计、倾角仪、测振仪等。
- (3)按结果的显示与记录方式分为直读式、自动记录式、模拟式、数字式。
- (4)按照仪器与结构的相对关系分为附着式、接触式、手持式、遥测式等。

### 二、仪器的性能指标

仪器的性能指标一般包括以下几个方面:

- (1)量程(测量范围):仪器的最大测量范围叫做量程。如百分表的量程一般有 50mm 和 100mm,千分表的量程有 3mm 和 5mm。

(2)最小分度值(最小刻度):仪器指示装置的每一最小刻度所代表的数值叫做最小刻度。百分表的最小刻度为0.01mm,千分表的最小刻度为0.001mm。

(3)灵敏度:被测结构的单位变化所引起仪器指示装置的变化数值叫做灵敏度。灵敏度与最小刻度互为倒数。

(4)准确度(精度):仪器指示的数值与被测对象的真实值相符合的程度叫做准确度。

(5)误差:仪器指示的数值与真实值之差叫做仪器的误差。

### 三、桥梁检测对仪器的要求

桥梁检测对仪器的要求包括以下几个方面:

(1)仪器的量程、准确度、灵敏度要根据检测的要求合理选用,对于野外检测仪器还应要求其工作性能稳定、抗干扰能力强。

(2)仪器使用方便,安装快捷,适应性强。

(3)仪器结构简单,经久耐用,无论是外包装还是仪器本身结构,都应具有良好的防护装置,便于运输,不易损坏。

(4)仪器轻巧,自重轻、体积小,便于野外桥梁检测时携带。

(5)仪器的多用途。所使用的仪器应具有多种用途。如应变仪,既可单点测量,也可多点测量,既可测应变又可测位移。

(6)使用安全,包括仪器本身的安全,不易损坏,且不会危及操作人员的人身安全。

量测仪器的某些性能之间经常是互相矛盾的,如精度高的仪器,其量程较小;灵敏度高的,其适应性较差。因此在选用仪器时,应避繁就简,根据试验的要求来选用合适的仪器,灵活运用。目前应用于结构试验中的仪器,以电测类仪器较多,机械式仪器仪表已不能满足多点量测和数据自动采集的要求,从发展的角度看,数字化和集成化量测仪器的应用日益广泛,将给量测和数据处理带来更大的方便。

### 四、仪器的计量标定

为了保证检测数据的准确性,在检测过程中使用的仪器设备事先必须进行计量标定。标定是统一量值、确保计量器具准确的重要措施,是进行标准传递的重要形式,是为生产、科研、生活等提供计量保证的重要条件,也是实行国家监督的一种手段。通过计量标定,对仪器的性能进行评定,确定其是否合格,从而保证检测仪器的量值在规定的误差范围内与国家计量基准的量值保持一致,达到统一量值的目的。仪器的标定可以分为强制标定和非强制标定两类。强制标定的仪器仪表实行定点、定期标定,非强制标定的仪器仪表可由使用单位依法自主自行标定。计量标定具有以下特点:

(1)标定的目的是确保量值准确可信,主要是评定量测仪器的计量性能,确定仪器的误差大小、准确程度、使用寿命、安全性能,确定仪器是否合格,是否可以继续正常使用,是否达到国家计量标准。

(2)标定具有法制性,标定证书在社会上具有法律效力,标定的本身是国家对量测的一种监督,标定结果具有法律效力。

在桥梁检测中,以下常用仪器仪表应定期进行标定:

机械仪器的标定,如百分表、千分表、测力计、回弹仪等。

电子仪器的标定,如超声波仪、应变仪、应变计(应变片)、荷载传感器等。

光学仪器的标定,如精密水准仪,测距仪,激光挠度仪,倾角仪,读数显微镜等。

## 第二节 应变测试仪器与技术

结构在外力的作用下,内部会产生应力,而直接测定结构截面的应力比较困难,目前还没有直接的测试方法,一般的方法是测定应变。目前应用最广泛的应变测试技术是电阻应变测试技术和振弦式应变测试技术,近年来光纤光栅应变测试技术也逐渐发展成熟。

### 一、电阻应变测试技术

电阻应变测试技术是凭借安装在试件上的电阻应变片将力学量(如应变、位移等)转换成电阻变化,并用专门的仪器使其转换为电压、电流或功率输出,从而获得应变读数的测试技术,通常简称为电测技术或电测法,其转换过程如图 2-1 所示。

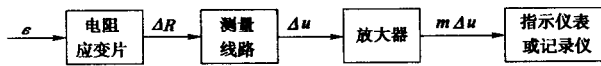


图 2-1 用电阻应变片测量应变的过程

与其他测试方法比较,电阻应变测试技术具有以下优点:

(1)灵敏度高,测量结果比较可靠。目前常用的应变仪和应变片可测得  $1 \times 10^{-6}$  应变,有的甚至可精确到  $0.5 \times 10^{-6}$  应变。

(2)实施简便,测量速度快。易于实现全自动化数据采集、多点同步测量、远距离测量和遥控测试,操作方便,测试方法易于掌握。

(3)应变片标距小、粘贴方便。测试时可不改变结构的原有应力状态,可以测量其他仪表(如机械式应变计)无法安装部位处的应变或结构某个局部的应力,制成大标距时可以测量混凝土结构的应变。

(4)适用范围广。可在高温( $100 \sim 800^\circ\text{C}$ )、低温( $-100 \sim -70^\circ\text{C}$ )、高压、高速、旋转和具有核辐射干扰等特殊条件下成功量测,可用于模型实验,也能直接用于运行中的机械和实体结构各部位的静、动态和瞬态应变测量,可测频带宽。

(5)使用广泛。根据应变原理可以制成不同形式的传感器,用于各种物理、力学参数的量测,易于实现整个测试系统的自动化和电气化。

电阻应变测试技术虽然有很多优点,但也存在不足之处,如贴片工作量大,使用的导线多,抗干扰性能稍差,易受温度和电磁场等的影响,电阻应变片不能重复使用等。

#### (一)电阻应变片

##### 1. 电阻应变片的工作原理

电阻应变片简称应变片或应变计,是电阻应变测试中,将应变转换为电阻变化的传感元件,它的工作原理是基于金属丝的电阻随其机械变形而变化的一种物理特性。如图 2-2 所示,取长度为  $L$ ,直径为  $D$ ,截面积为  $A$ ,电阻率为  $\rho$  的金属丝,则其电阻  $R$  为:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

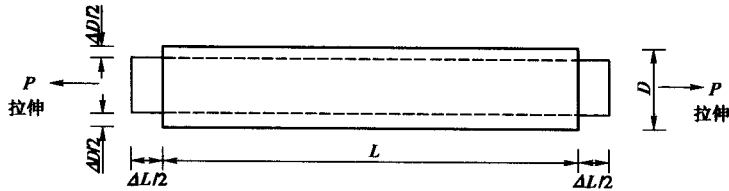


图 2-2 金属丝的应变原理

当金属丝受拉而伸长  $\Delta L$ , 则电阻的变化率为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2-2)$$

而

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 - \frac{\pi}{4} (D - \Delta D)^2}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

略去  $\Delta D^2$  项, 则

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} = 2\varepsilon' = -2\mu\varepsilon \quad (2-3)$$

式中:  $\varepsilon'$ ——电阻丝的横向应变。

由材料力学可知, 在一定范围内  $\varepsilon' = -\mu\varepsilon$ , 将式(2-3)代入式(2-2), 得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon$$

令

$$K_0 = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)$$

则

$$\frac{dR}{R} = K_0\varepsilon \quad (2-4)$$

式中:  $\mu$ ——电阻丝材料的泊松比;

$K_0$ ——单电阻丝的灵敏系数。

$K_0$  与两个因数有关, 一个是电阻丝材料的泊松比, 由电阻丝几何尺寸改变引起, 当选定材料后, 泊松比为常数; 另一个是由电阻丝发生单位应变引起的电阻率的变化, 对大多数电阻丝而言也是一个常量。因此可以认为  $K_0$  是一个常数, 通常式(2-4)可写为:

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon \quad (2-5)$$

由此可见, 应变片的电阻变化率与应变值成线性关系。K 通常由一批产品中抽样检验确定, 作为该批产品的灵敏系数。一般取  $K = 2.0$  左右。

## 2. 电阻应变片的构造

电阻应变片的种类繁多, 形式各种各样, 但基本结构差异不大。图 2-3 所示是丝绕式电阻应变片的构造, 由敏感栅、粘合剂、基底、覆盖层和引出线几个主要部分组成。

(1) 敏感栅: 是将应变变换成电阻变化量的敏感元件, 一般由金属或半导体材料如康铜、镍铬合金制成的单丝或栅状体。敏感栅的形状和尺寸直接影响应变片的性能。栅长  $L$  和栅宽  $B$



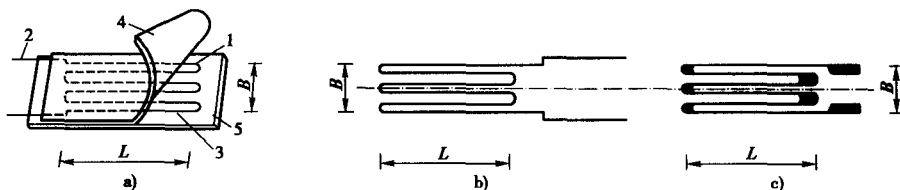


图 2-3 电阻应变片的构造

1-敏感栅;2-引出线;3-粘合剂;4-覆盖层;5-基底

即代表应变片的规格。

(2)基底和覆盖层:主要起到定位和保护电阻丝的作用,同时使电阻丝与被测试件之间绝缘。纸基常用厚度 0.015 ~ 0.02mm 高强度、绝缘性能良好的纸张制作。胶基用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制作。

(3)粘合剂:它是一种具有一定绝缘性能的粘结材料,用于将敏感栅固定在基底上或将应变片粘贴在试件上。

(4)引出线:一般采用镀银、镀锡或镀合金的软铜线制成,在制作应变片时与电阻丝焊接在一起。引出线通过测量导线接入应变仪。

### 3. 电阻应变片的技术指标

(1)几何尺寸:栅长  $L$ (mm)是应变片电阻丝在其轴线方向的长度,栅宽  $B$  是应变片垂直于轴线方向的电阻丝栅外侧间的距离。

(2)电阻值  $R$ :是指在室温条件下不受外力作用时测得应变片的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ )。应变片阻值应与测量电路相适应,一般取 120 $\Omega$ 。

(3)灵敏系数  $K$ :是指应变片安装于被测试件表面,在其轴线方向的单向应力作用下,应变片的电阻相对变化与试件表面上安装应变片区的轴向应变之间的比值:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2-6)$$

式中: $K$ ——应变片灵敏系数;

$\Delta L/L$ ——试件上应变片安装区的轴向应变;

$\Delta R/R$ ——由  $\Delta L/L$  所引起的应变片的电阻相对变化。

应变片包装上标出的灵敏系数是该批产品由抽样标定测得的平均值。

(4)应变极限  $\epsilon_j$ :一般是指温度一定时,在特定材料上指示应变和真实应变的相对误差不超过 10%的应变数值。

(5)最大允许电流  $I_{max}$ :指允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流,一般静态测量时为 25mA,动态时为 75 ~ 100mA。

(6)温度效应:是指温度变化而引起的应变片阻值改变的现象。测试过程中,环境温度的变化、敏感栅通电发热,都能使应变片温度发生变化。

(7)零点漂移和蠕变:零点漂移又简称为零漂,是指已粘贴好的应变片,在温度不变而又无机械应变的条件下,指示应变随时间而变化,用  $\mu\epsilon/h$  表示。引起的原因可能是粘结剂固化程度不良或环境气候变化引起绝缘电阻变化,或者是安装应变片的松弛等。蠕变是指已安装好的应变片,在温度一定并承受一定的机械应变时,指示应变随时间而变化。

(8)疲劳寿命:是指已安装好的应变片,在一定的机械应变、一定的温度下,可以连续工作