

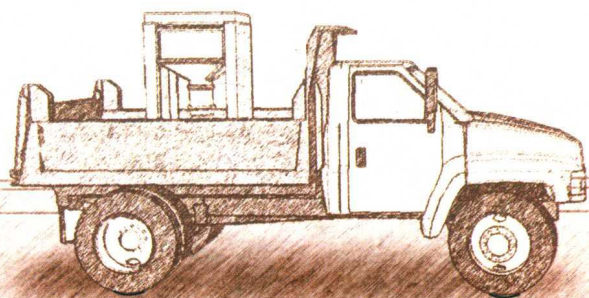


中国建筑工业出版社  
学术著作出版基金项目

# 桥梁冲击振动测试 与快速评估

## 理论、技术与工程应用

张建 吴智深 著



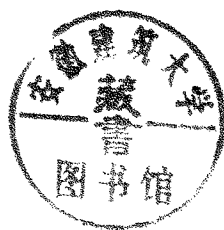
中国建筑工业出版社



中国建筑工业出版社  
学术著作出版基金项目

# 桥梁冲击振动测试与快速评估 ——理论、技术与工程应用

张 建 吴智深 著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

桥梁冲击振动测试与快速评估: 理论与工程应用/张建, 吴智深著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-112-22614-6

I. ①桥… II. ①张… ②吴… III. ①桥梁振动-测试 IV. ①U441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 200172 号

在我国桥梁建设取得世界瞩目成绩的同时, 如何实现其有效维护管理从而保障其安全与长寿命意义重大、日益迫切。本书从资产管理、全寿命周期成本、长期性能、预防性维护等概念讲起, 在具体阐述结构无损检测、健康监测等研究热点与发展趋势的同时, 重点介绍了作者提出并开发的基于冲击振动的桥梁快速测试方法、装置及其系统理论。其特点在于, 通过开发基于冲击振动的软硬件一体化系统进行方便快捷的桥梁测试与评估, 相较于传统的环境振动, 具备揭示结构模态质量、振型缩放与位移柔度等深层次参数的独特优势。该书即包含结构动力学与模态识别等基本理论, 又包含作者最新的研究成果及工程应用实例, 在写法上深入浅出, 层层递进, 理论与实践相结合, 对工程人员、高校师生都具备重要参考价值。

责任编辑: 赵晓菲 朱晓瑜

责任校对: 焦 乐

## 桥梁冲击振动测试与快速评估——理论、技术与工程应用

张 建 吴智深 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

天津翔远印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 $\frac{3}{4}$  字数: 553 千字

2018 年 10 月第一版 2018 年 10 月第一次印刷

定价: 80.00 元

ISBN 978-7-112-22614-6

(32683)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前言 | Preface

我国正处于工业化、信息化、城镇化的快速发展时期，建筑、桥梁、隧道等各类土木基础设施的建设如火如荼。与此同时，土木工程结构在服役期间由于环境侵蚀、材料劣化、地基沉降、日常交通负荷的作用等原因导致结构性能逐渐发生退化，服役期间甚至遭受车辆（船舶）撞击、车辆超荷、危险品泄漏、台风和地震灾害等突发事件的风险。这些原因极大缩短了土木工程结构的寿命，所造成的安全事故又引起了重大生命财产损失。因此，如何维护和管理规模庞大、系统复杂的土木基础设施，在最小化结构维护管理费用的同时保障其服役安全与耐久是国内外迫切需要解决的共同课题。

目前，针对各类基础设施研发出了各种类型的自动化智能化检测设备。在隧道方面，TunConstruct、ROBINSPECT 等系统可进行自动化隧道损伤检测与修复。在道路方面，鹰眼 2000 系列、VOTER 多功能检测车、多功能路况快速检测系统 (CiCS) 等设备已被开发用于检测路面情况。在铁轨方面，日本新干线 Doctor Yellow 和美国 ENSCO CTIV 等均已成功应用于实际的铁轨情况检测当中。现有桥梁的检测仍主要采用传统的人工检测与荷载试验方法，费时费力。针对桥梁构件的自动化检测设备，例如拉索智能检测机器人、针对桥面板监测的探地雷达技术，针对水下桩基础检测的声呐探测等设备已初步应用到实际桥梁检测当中。但是由于桥梁结构复杂，这些设备仅针对桥梁部分构件进行检测，还无法进行桥梁整体结构的性能评估。在桥梁监测方面，国内外众多长大跨桥梁如金门大桥、Humber 大桥、苏通大桥等已安装了各类昂贵的结构健康监测系统，这些系统在应对突发事件如船撞和台风袭击等方面发挥了充分积极作用，但是传感器种类繁多、系统复杂并且难以从海量监测数据中分析得出结构损伤和性能，还无法真正实现结构的“健康”监测。特别的是，现有的健康监测系统规模庞大费用昂贵，还无法应用于广大桥梁，特别是偏远地区维护费用极其有限的中小桥梁。因此，开发桥梁快速测试方法和设备，在实现方便快捷经济的桥梁测试的同时，能够保证可靠的结构参数识别与性能评估，对保障国家公路上为数众多桥梁的安全普查具有重要意义，这正是本书研究的核心及目的所在。

作者在与美国 F. Moon 和 A. E. Aktan 教授合作的基础上，历经近十年的持续性研

究，提出并开发了基于冲击振动的桥梁快速测试方法及一体化装置。**基本思想**：一种桥梁快速检测车集成了桥梁冲击系统，传感器布置系统，一体化控制系统，全程数据分析系统，并进行桥梁全面参数的识别（包括深层次参数，柔度），从而实现桥梁的快速测试与评估。**独特优点**：环境振动测试为现有结构健康监测与检测的主要手段。然而现有环境振动测试方法主要输出频率和振型等结构基本参数，还无法直接支持桥梁维护与管理决策。基于环境振动数据的损伤识别算法在一定程度上可以发现和定位甚至定量结构损伤，融合环境振动数据和有限元分析的有限元修正技术也有潜力详细识别和预测结构性能，这些方法在科学研究方面有其重要价值，但它们都还无法广泛应用于桥梁健康诊断的实际工程。作者发现包含冲击力和结构反应的冲击振动测试数据具有独特潜质，它能够估算得出和解析解一致的结构频响函数包括其幅值，而仅包含结构反应的环境振动测试数据仅能输出结构频响函数的形状无法估算其幅值，因此冲击振动测试数据包含更加完备的结构信息，从而有望分析挖掘得出更为真实和详尽的结构特征。在此基础上，作者严格推导识别了结构的位移柔度与应变柔度。柔度是结构刚度的倒数，与结构承载能力性能具有直接对应关系。识别结构位移/应变柔度之后，可以预测结构在任意静载下的变形，能够实现结构安全性能评估。**有益效果**：作者开发的基于冲击振动的桥梁快速测试方法能够得到与解析解一致的频响函数，还能进一步识别结构深层次参数位移柔度。位移柔度在一定程度上反映了结构的刚度信息与承载能力信息。作者开发的桥梁快速测试一体化装置能够实现桥梁的“随到随测，随测随走，高频高效”，大大提高了桥梁快速检测的效率，并降低了成本，有望推广应用于公路网上广大桥梁的快速普查与评估。

**本书共八章，框架如下**：本书第1章围绕资产管理、全生命周期成本、长期性能、预防性维护等概念阐述了土木基础实施维护管理领域的研究热点与发展趋势，总结了现有自动化智能化检测、结构健康监测、基础设施性能评估等技术和方法。在第2章中，详细介绍了作者提出的桥梁快速测试思路、方法与系统开发，以及整体研究思路和框架。从理论上分析了冲击振动相比环境振动带来的优势和潜力；从硬件上开发了适用于工程测试的新型桥梁冲击装置以及传感器自动化布置装置。从第3章开始进入理论介绍。较为系统地总结了基本模态理论，详细地分析了环境振动与冲击振动的本质区别。在这个基础上，第4章介绍了柔度的基本概念以及如何处理冲击振动测试数据进行结构的参数识别，具体包括3种（PolyMAX，CMIF，SSI）结构柔度识别方法。在该部分，模态缩放系数估算是识别结构柔度的关键所在，也是数据处理的核心技术所在。在第5章中，介绍了所开发的适

用于实际工程快速冲击测试的分块测试方法，包括基于边界点测量的多参考点方法、基于相位角概念的单参考点方法，以及基于最小势能原理的无参考点方法。第6章进一步提出了基于长标距应变模态的结构柔度识别方法，并详细推导了改进的 PolyMAX、CMIF、SSI 来识别结构的应变柔度。第7章介绍了基于移动冲击的桥梁快速测试方法，包括非接触式位移测量设备、竖向车轮力测量、基于移动冲击的结构深层次参数识别理论和方法验证。第8章结合实桥的现场测试，充分验证了冲击振动快速测试方法的实效性。最后全书总结并展望了后续工作中需要进一步深入研究的具体问题。

本书内容是作者及指导的学生包括郭双林、夏琪、田永丁、李攀杰、张青青、张博、周立明、程玉瑶、赵文举、倪富陶、于珊珊等知识积累和学术成果的总结。张欣、许德旺、李林波、谈雨晴、谷相玉、谢枝、吴佳佳、张祯楠、蔡德旭等在读博士和硕士为本书图例、文献整理、文字校对等具体工作付出了辛苦劳动，在此向他们表示诚挚的感谢。

本书经过近三年时间的编写、修改和校对，但不足之处仍很多，恳请读者与专家同仁不吝赐教、批评指正。

张 建

2018 年秋于南京



# 符号列表

<p><math>A</math> 截面面积</p> <p><math>A_1</math> 恒载系数</p> <p><math>A_2</math> 活载系数</p> <p><math>A_{pqr}</math> 自由度 <math>p</math> 对自由度 <math>q</math> 的第 <math>r</math> 阶留数系数</p> <p><math>a_0, a_n, b_n</math> 傅里叶级数的系数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>a</math> 小波变换的尺度因子</p> <p><math>[A(\omega)]</math> 右矩阵和左矩阵分式模型的分母矩阵多项式</p> <p><math>[A_r]</math> 第 <math>r</math> 阶留数矩阵</p> <p><math>[a_k]</math> 有理分式模型中的分母系数矩阵</p> <p><math>[A_c]</math> 伴随矩阵</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>b</math> 小波变换的平移因子</p> <p><math>[B_r]</math> 右矩阵和左矩阵分式模型的分子系数矩阵</p> <p><math>[B(\omega)]</math> 右矩阵和左矩阵分式模型的分子矩阵多项式</p> <p><math>[b_k]</math> 有理分式模型中的分子系数矩阵</p> <p><math>C</math> 承载能力(LRFR)</p> <p><math>\text{COH}_{pq}(\omega)</math> 自由度 <math>p</math> 对自由度 <math>q</math> 的常相干函数</p> <p><math>C_{\text{oi}k}(T)</math> 互相关函数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>C_r</math> 第 <math>r</math> 阶模态阻尼</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>C_\omega</math> 固有频率的稳定阈值</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>C_\xi</math> 阻尼比的稳定阈值</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>C_l</math> 模态参与系数的稳定阈值</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>c</math> 单自由度结构的阻尼</p> <p><math>c_n(t)</math> 第 <math>n</math> 阶特征模态函数</p> <p><math>[C]</math> 阻尼矩阵</p> <p><math>[C_r]</math> 模态阻尼矩阵</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>D</math> 恒载系数</p> <p><math>DC</math> 结构上的附属装置产生的静载效应</p> <p><math>DW</math> 路面及公共设施产生的静载效应</p> <p><math>df</math> 频率分辨率</p> <p><math>\{d\}</math> 位移向量</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>E</math> 弹性模量</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>EI</math> 截面抗弯刚度</p> <p><math>[E_0^{LS}(\theta)]</math> 误差函数矩阵</p> <p><math>eH_r(\omega)</math> 增强频响函数</p> <p><math>eH_r^s(\omega_i)</math> 应变增强频响函数</p> <p><math>F(s)</math> 函数 <math>f(t)</math> 的拉普拉斯变换</p>	<p><math>[F^e]</math> 应变柔度矩阵</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_{ij}</math> 自由度 <math>i</math> 对自由度 <math>j</math> 的位移柔度系数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_{ij}^e</math> 自由度 <math>i</math> 对自由度 <math>j</math> 的应变柔度系数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_k(\sigma)</math> 白噪声激励力</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_N</math> 奈奎斯特频率</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_{\text{oi}q}^0, f_{\text{p}q}^0</math> 转角位移柔度系数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_R</math> 以 LRFD 规范中的容许应力</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>f_s</math> 采样频率</p> <p><math>[F^{s,e}]</math> 对称的应变柔度矩阵</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>\{f\}</math> 荷载向量</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>\{f(t)\}</math> 输入力</p> <p><math>GX_p X_p(\omega)</math> 自由度 <math>p</math> 处响应的自功率谱密度函数</p> <p><math>GF_q F_q(\omega)</math> 自由度 <math>q</math> 处输入力的自功率谱密度函数</p> <p><math>GX_p F_q(\omega)</math> 互功率谱密度函数</p> <p><math>[GXX(\omega)]</math> 响应的自功率谱密度函数矩阵</p> <p><math>[GFF(\omega)]</math> 输入的自功率谱密度函数矩阵</p> <p><math>[GXF(\omega)]</math> 输入和响应的互功率谱密度函数矩阵</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H(t)</math> 函数 <math>h(t)</math> 的希尔伯特-黄变换</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H^d(\omega)</math> 单自由度结构的位移频响函数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H^d(s)</math> 单自由度结构的位移传递函数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H_{pq}^d(\omega)</math> 自由度 <math>p</math> 对自由度 <math>q</math> 的位移频响函数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H_R^d(\omega)</math> 位移频响函数实部</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>H_I^d(\omega)</math> 位移频响函数虚部</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>{}^R_r H_{\text{m}q}^e(\omega)</math> 应变频响函数的第 <math>r</math> 阶实部分量</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>{}^I_r H_{\text{m}q}^e(\omega)</math> 应变频响函数的第 <math>r</math> 阶虚部分量</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>h(t)</math> 单位脉冲响应函数</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>h_m</math> 中性轴高度</p> <p><math>[H^a(\omega)]</math> 加速度频响函数矩阵</p> <p><math> H^d(\omega) </math> 位移频响函数幅值</p> <p><math>[\tilde{H}^d(\omega)]</math> 模态测试时获取的位移频响函数矩阵</p> <p><math>[H^e(\omega)]</math> 应变频响函数矩阵</p> <p><math>[\tilde{H}^e(\omega)]</math> 模态测试时获取的应变频响函数矩阵</p> <p><math>[H^v(\omega)]</math> 速度频响函数矩阵</p> <p><math>\{H_{:q}(\omega)\}</math> 频响函数矩阵 <math>[H(\omega)]</math> 中的第 <math>q</math> 列</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>I</math> 截面惯性矩</p> <p style="padding-left: 2em;"><math>IM</math> 动力荷载容许值</p>
--	--

$[F^d]$	位移柔度矩阵, 刚度矩阵的逆矩阵	$i$	虚数符号 $i^2 = -1$
$[I]$	单位矩阵	$r_n(t)$	第 $n$ 阶残差
$[J]$	Jacobian 矩阵	$RF^{LFR}$	分级系数
$k$	单自由度结构的刚度系数	$RF^{LFR}$	检算评定因子
$k_r$	第 $r$ 阶模态刚度	$[S]$	奇异值矩阵
$[K]$	刚度矩阵	$s_1(\omega)$	第一奇异值
$[K^e]$	单元刚度矩阵	$t, \Delta t$	时间, 采样时间间隔
$[K_r]$	模态刚度矩阵	$[U]$	左奇异矩阵
$L$	活载效应	$\{u_1(\omega)\}$	第一左奇异向量
$l$	单元长度	$ULSCC_m$	ULS 曲率差指标
$\Delta l$	正向伸缩变形量	$[V]$	右奇异矩阵
$l_m$	长标距长度	$\{v_1(\omega)\}$	第一右奇异向量
$I^{e-LS}(\theta)$	应变频响函数的线性误差函数	$W_f(a, b_x, b_y)$	三维连续小波变换
$I^{LS}(\theta)$	标量的误差函数	$\omega$	频率变量
$[L]$	模态参与系数矩阵	$\omega_d$	第 $r$ 阶有阻尼固有频率
$\{l_r\}$	第 $r$ 阶模态参与系数向量	$\omega_0$	单自由度结构的固有圆频率
$M(x)$	弯矩	$\omega_r$	第 $r$ 阶无阻尼固有频率
$\bar{M}_0$	虚梁边界处的弯矩	$\omega_0(\omega)$	误差向量的加权函数
$MAC_{cdr}$	两种振型 $\{\varphi_c\}$ 和 $\{\varphi_d\}$ 的第 $r$ 阶模态保证准则	$X(\omega)$	函数 $x(t)$ 的傅里叶变换
$MSC_{mr}$	第 $r$ 阶振型差损伤指标	$x(t)$	动位移
$MSCC_{mr}$	第 $r$ 阶振型曲率差损伤指标	$\dot{x}(t)$	速度
$MSCSC_{mr}$	第 $r$ 阶振型曲率平方差指标	$\ddot{x}(t)$	加速度
$m$	单自由度结构的质量	$x_0$	初始位移
$m_r$	第 $r$ 阶模态质量	$\dot{x}_0$	初始速度
$\bar{m}$	单位长度质量	$\ddot{x}_0$	初始加速度
$[M]$	质量矩阵	$\{X\}, [\phi]$	位移实振型矩阵
$[M^e]$	单元质量矩阵	$y(x)$	实梁的挠度分布
$[M_r]$	模态质量矩阵	$y_0$	实梁边界处的挠度
$N, n$	模态阶次	$y''(x)$	曲率
$N_{avg}$	为平均次数	$Z$	抗力检算系数
$N_0$	输出点数	$Z_1$	通过检测评定方式确定的承载能力检算系数
$N_0$	模态测试时的输出个数	$Z_2$	通过荷载试验方式确定的承载能力检算系数
$N_i$	输入点数	$\xi_c$	承载能力恶化系数
$N_s$	离散频率点数, 又称为谱线数	$\xi_s$	钢筋的截面折减系数
$O(\eta_r^j)$	正交性指标函数	$\xi_c$	配筋混凝土结构的截面折减系数
$P$	除静载以为的永久荷载	$\xi_q$	活荷载影响系数
$P_0$	简谐荷载幅值	$\zeta$	结构校验系数
$p$	多项式阶次	$\gamma_{DC}$	结构构件及附属装置 LRFD 荷载系数
$Q_r$	第 $r$ 阶模态缩放系数	$\gamma_{DW}$	路面及公共实施 LRFD 荷载系数



$\bar{Q}_0$	虚梁边界处的剪力	$\gamma_P$	除静载以为的永久荷载 LRFD 荷载系数
$\bar{q}(x)$	虚梁上的荷载分布	$\gamma_L$	评估活载系数
$\{q(t)\}$	广义坐标向量	$\varphi_c$	状态系数
R	抗力组合效应	$\varphi_s$	系统系数
$R_d$	动力放大系数	$\varphi$ LRFD	抗力系数
$R_n$	名义构件抗力	$\mathcal{L}_{or}^r$	幅值比
S	荷载组合效应	$\Theta_k$	环境激励力的强度
$S_e$	实测值(应变或位移)	$\psi_{a,b}(x)$	小波基函数
$S_s$	理论值(应变或位移)	$\psi_{a,b_x,b_y}(x,y)$	二维连续小波变换
$s$	拉普拉斯变量	$\beta$	频率比 $\beta=\omega/\omega_0$
$\xi$	单自由度结构的阻尼比	$\theta_{ij}$	振型向量 $\{\phi_i\}$ 和 $\{\phi_j\}$ 之间的夹角
$\delta(t)$	单位脉冲荷载	$\ \{\varphi_r\}\ $	振型向量 $\{\phi_r\}$ 的范数
$\theta(\omega)$	位移频响函数相位	$\eta$	荷载试验校验系数
$\rho$	质量密度	$\epsilon(x)$	正应变
$\{\phi_r\}$	第 $r$ 阶位移实振型向量	$\theta_0$	实梁边界处的转角
$[\Psi]$	复振型矩阵	$\theta(x)$	实梁的转角分布
$\{\psi_r\}$	第 $r$ 阶复振型向量	$\phi_{or}^0$	节点 $o$ 的第 $r$ 阶转角位移振型系数
$[\Lambda]$	系统极点矩阵	$\phi_{pr}^0$	节点 $p$ 的第 $r$ 阶转角位移振型系数
$\lambda_r$	第 $r$ 阶系统极点	$\phi_{qr}^v$	节点 $q$ 的第 $r$ 阶竖向位移振型系数
$\xi_r$	第 $r$ 阶阻尼比	$\{\phi_r^e\}$	第 $r$ 阶长标距应变振型向量
$\{\bar{\phi}_r\}$	质量归一化的位移振型	$\psi_{mr}^e$	长标距应变振型系数
$\{\Psi_{p_i}\}$	复振型矩阵 $[\Psi]$ 中的第 $p$ 行	$[\Psi^e]$	复模态的应变振型矩阵
$\{\Psi_{:q}\}$	复振型矩阵 $[\Psi]$ 中的第 $q$ 列	$\{\varphi_r^e\}$	第 $r$ 阶应变振型
$\{\psi_{drv,r}\}$	驱动点处的复振型向量	$\theta_o\theta_p$	节点 $o$ 和节点 $p$ 的转角位移
$\Omega_r(\omega)$	基函数	$\dagger$	伪逆运算符
$\{\epsilon_{o_i}^{NLS}(\omega,\theta)\}$	非线性的误差函数向量	$*$	共轭运算符
$\{\epsilon_{o_i}^{LS}(\omega,\theta)\}$	线性的误差函数向量	T	矩阵转置运算符
$[\Delta]$	特征值矩阵	H	矩阵共轭转置运算符
$\Delta_r$	第 $r$ 阶特征值	F	傅里叶变换运算符
$\alpha_r^B$	子结构 B 的第 $r$ 阶位移振型的调整系数	$F^{-1}$	傅里叶逆变换运算符
$\beta_r^B$	子结构 B 的第 $r$ 阶模态参与系数的调整系数	L	拉普拉斯变换运算符
$\mu_r^B$	子结构 B 的第 $r$ 阶位移振型的缩放系数	$\otimes$	Kronecker 乘积运算符
$\eta_r^B$	子结构 B 的第 $r$ 阶位移振型的方向系数	$\det(\cdot)$	矩阵的行列式运算符
$\Pi_p(\eta_r^i)$	势能关于振型方向系数的函数	$tr(\cdot)$	矩阵的迹运算符

# 目录 | Contents

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 结构维护管理的必要性 .....	1
1.1.1 桥梁结构维护管理压力大 .....	1
1.1.2 结构维护管理费用不足 .....	3
1.2 结构维护管理的概念与手段 .....	5
1.2.1 资产管理与全寿命周期成本 .....	5
1.2.2 长期性能与预防性维护 .....	7
1.2.3 桥梁管理系统 .....	9
1.3 各国性能评估规范现状及发展趋势 .....	10
1.3.1 桥梁评估规范 .....	10
1.3.2 桥梁一般检查 .....	12
1.3.3 技术状况评定 .....	13
1.3.4 承载能力评定 .....	18
1.4 桥梁检测技术 .....	24
1.4.1 目视检查与无损检测 .....	25
1.4.2 桥梁无损检测技术 .....	26
1.5 自动化检测技术及发展趋势 .....	27
1.5.1 隧道自动化检测技术 .....	27
1.5.2 道路自动化检测技术 .....	29
1.5.3 铁轨自动化检测技术 .....	31
1.5.4 桥梁自动化检测技术 .....	32
1.6 结构健康监测技术及发展趋势 .....	35
1.6.1 结构健康监测概述 .....	35
1.6.2 结构健康监测研究现状 .....	36
1.6.3 结构健康监测技术融入结构性能评估规范的趋势 .....	45
1.7 桥梁测试与性能评定的智能化、自动化与信息化趋势 .....	47
1.7.1 智能化、自动化与信息化趋势 .....	47
1.7.2 桥梁快速测试与评估 .....	49
<b>第 2 章 桥梁快速测试与评估总体思路</b> .....	53
2.1 冲击振动与桥梁快速评估 .....	53
2.2 冲击振动的理论优势 .....	56

2.2.1	结构位移频响应函数计算方法	58
2.2.2	位移频响应函数幅值的缩放关系	60
2.3	冲击振动的理论框架	61
2.4	冲击荷载产生装置开发	62
2.4.1	落锤激振装置开发	63
2.4.2	移动冲击装置	64
2.5	桥梁响应监测设备开发	67
2.5.1	自动化加速度计安装	67
2.5.2	光纤传感测应变技术	70
2.5.3	非接触式位移测量	71
2.6	桥梁快速测试系统的软硬件一体化	73
<b>第3章 振动测试与结构识别基本理论</b>		<b>77</b>
3.1	常用的数学变换方法	77
3.1.1	拉普拉斯变换	77
3.1.2	傅里叶变换	78
3.1.3	小波变换	83
3.1.4	希尔伯特-黄变换	86
3.2	单自由度结构动力分析与参数识别	88
3.2.1	单位脉冲响应函数与杜哈曼积分	90
3.2.2	单自由度结构的传递函数和频响应函数	93
3.2.3	单自由度结构参数识别基本原理	96
3.3	多自由度结构动力分析	101
3.3.1	结构特性矩阵	101
3.3.2	无阻尼自由振动	106
3.3.3	结构动力响应计算	108
3.4	多自由度结构模态分析	111
3.4.1	多自由度结构的位移频响应函数	111
3.4.2	实模态系统频响应函数计算	112
3.4.3	复模态系统频响应函数计算	113
3.4.4	单位脉冲响应函数和频响应函数的关系	118
3.4.5	方法示例与验证	119
3.5	无限自由度结构模态分析	124
3.6	冲击振动下的频响应函数估计	128
3.6.1	单点输入作用下的频响应函数估计	129
3.6.2	多点输入作用下的频响应函数估计	131
3.6.3	相干函数	134
3.6.4	模态保证准则	135
3.7	场地频谱分析	135

3.8	模态参数识别算法 .....	140
3.8.1	频域识别法 .....	140
3.8.2	时域识别法 .....	142
3.8.3	时频域识别法和非线性识别法 .....	144
<b>第4章</b>	<b>基于加速度测量的冲击振动数据处理与结构识别理论 .....</b>	<b>146</b>
4.1	冲击振动快速测试思路与位移柔度概念 .....	146
4.2	位移柔度和位移频响函数的关系 .....	148
4.2.1	位移柔度识别公式 .....	148
4.2.2	单参考点频响函数的振型和留数识别 .....	151
4.2.3	多参考点频响函数的振型和留数识别 .....	154
4.2.4	频响函数的参数化模型 .....	155
4.3	质量已知时位移柔度识别 .....	157
4.4	质量未知结构的位移柔度识别——PolyMAX 方法 .....	160
4.4.1	频响函数的误差函数 .....	162
4.4.2	缩减正则方程 .....	164
4.4.3	基本模态参数识别 .....	165
4.4.4	稳定图 .....	166
4.4.5	窄带内的位移柔度识别 .....	168
4.4.6	方法示例与验证 .....	170
4.5	质量未知结构的位移柔度识别——CMIF 方法 .....	174
4.5.1	奇异值分解和位移振型识别 .....	175
4.5.2	增强频响函数 .....	177
4.5.3	固有频率、阻尼比和模态缩放系数识别 .....	180
4.5.4	位移柔度识别 .....	182
4.5.5	方法示例与验证 .....	182
4.6	质量未知结构的位移柔度识别——SSI 方法 .....	188
4.6.1	结构状态空间方程 .....	189
4.6.2	子空间识别技术 .....	191
4.6.3	模态参数识别 .....	195
4.6.4	简支梁桥验证 .....	199
<b>第5章</b>	<b>基于分块冲击振动的位移柔度识别理论 .....</b>	<b>205</b>
5.1	分块冲击振动的工程意义 .....	205
5.2	分块冲击振动测试的子结构融合理论和实施流程 .....	207
5.2.1	子结构融合理论 .....	208
5.2.2	实施流程 .....	212
5.3	基于边界点测量的多参考点分块测试方法 .....	215
5.3.1	基于参考点振型的连续性判别振型方向 .....	215

5.3.2	方法示例与验证	217
5.4	基于相位角概念的单参考点分块测试方法	221
5.4.1	基于单参考点和驱动点间的频响函数的相位曲线判别振型方向	221
5.4.2	方法示例与验证	224
5.4.3	IBS 桥验证	228
5.5	基于最小势能原理的无参考点分块测试方法	234
5.5.1	最小势能原理和振型正交性联合判别法	234
5.5.2	钢桁架模型验证	239
<b>第 6 章</b>	<b>基于结构区域分布应变测量的冲击振动数据处理与结构识别理论</b>	<b>244</b>
6.1	基于冲击振动和区域分布传感的桥梁测试方法	244
6.1.1	结构区域分布传感概念与技术	244
6.1.2	基于区域分布应变测量的冲击振动测试	248
6.2	应变模态理论	248
6.2.1	点式应变模态理论	249
6.2.2	长标距应变模态理论	250
6.2.3	应变频响函数的特征	252
6.2.4	应变频响函数和应变柔度矩阵的关系	254
6.3	质量已知结构的应变柔度识别	255
6.3.1	位移振型和应变振型的质量归一化	256
6.3.2	方法示例与验证	257
6.4	基于改进的 PolyMAX 法的应变柔度识别	258
6.4.1	系统极点、位移模态参与系数和应变振型识别	259
6.4.2	模态缩放系数和应变柔度识别	260
6.4.3	方法示例与验证	260
6.5	基于改进的 CMIF 法的应变柔度识别	265
6.5.1	应变频响函数的奇异值分解和应变振型识别	265
6.5.2	增强频响函数计算和基本模态参数识别	266
6.5.3	应变柔度和位移柔度的同时识别	266
6.5.4	兴隆大桥验证	268
6.6	基于改进的 SSI 法的应变柔度识别	275
6.6.1	子空间方法基本方程改进	275
6.6.2	模态参数识别及应变柔度识别	276
6.6.3	三跨连续梁桥验证	277
6.7	结构损伤识别	282
6.7.1	损伤识别指标概述	282
6.7.2	IBS 桥研究	284
<b>第 7 章</b>	<b>基于移动冲击的桥梁快速测试与识别</b>	<b>291</b>
7.1	基于移动冲击的桥梁快速测试方法与思路	291

7.2	基于微波干涉雷达的桥梁结构响应测量 .....	292
7.2.1	微波干涉雷达系统组成与工作原理 .....	292
7.2.2	消除雷达基点运动的微波干涉雷达桥梁微动快速测试方法 .....	296
7.2.3	方法示例与验证 .....	298
7.3	基于智能轮胎技术的竖向车轮力测量 .....	300
7.4	基于移动冲击的桥梁快速测试理论 .....	302
7.4.1	车桥耦合振动理论 .....	302
7.4.2	等效节点荷载分配理论 .....	304
7.4.3	实施过程 .....	306
7.5	方法示例与验证 .....	307
7.5.1	简支梁结构移动冲击快速测试 .....	307
7.5.2	简支梁桥数值模拟移动冲击实例 .....	310
7.5.3	移动荷载试验影响因素分析 .....	315
<b>第8章</b>	<b>工程应用技巧与实例 .....</b>	<b>317</b>
8.1	冲击振动测试实战技巧 .....	317
8.1.1	传感器选择和振动测试方案 .....	317
8.1.2	传感器安装和现场测试 .....	322
8.1.3	振动信号处理 .....	324
8.2	工程实例一：某预应力混凝土连续箱形梁桥的冲击振动测试 .....	327
8.2.1	桥梁概况及传感器布置图 .....	327
8.2.2	静载测试 .....	328
8.2.3	冲击振动测试 .....	330
8.2.4	柔度识别结果 .....	331
8.3	工程实例二：某三跨简支钢梁桥的分块冲击振动测试 .....	336
8.3.1	实桥概况 .....	336
8.3.2	冲击振动测试 .....	336
8.3.3	数据处理 .....	337
8.3.4	结构柔度集成和挠度预测 .....	343
8.3.5	不同分块方案结果对比 .....	344
8.4	工程实例三：基于计算机视觉的某步行桥冲击振动测试 .....	348
8.4.1	人致冲击荷载测量及结构识别方法 .....	348
8.4.2	实验室简支梁实验验证 .....	352
8.4.3	步行桥现场测试 .....	356
8.5	讨论与展望 .....	360
	<b>参考文献 .....</b>	<b>364</b>
	<b>英汉名词对照表 .....</b>	<b>378</b>



# 第1章

## 概 述

### 1.1 结构维护管理的必要性

#### 1.1.1 桥梁结构维护管理压力大

桥梁结构的安全性、使用性与耐久性是土木工程领域的重要研究问题<sup>[1~3]</sup>。以结构安全为例,我国公路网上在役桥梁约40%服役超过20年,技术等级为三、四类的带病桥梁达30%,危桥数量超过10万座。自2007~2012年间,国内有37座桥梁垮塌,导致180多人丧生,平均每年超过7.4座“夺命桥”,即平均不到两个月就会发生一起事故发生。这些垮塌桥梁中,近六成桥梁还不到20年桥龄。据不完全统计,美国缺陷桥梁占总桥数量的23.78%。其中,结构缺陷桥梁占11.16%;功能性老化桥梁占12.62%。1907年,位于加拿大的圣劳伦斯河上的Quebec Bridge,由于杆件发生失稳突然倒塌。1967年,美国银桥在短短一分钟之内彻底倒塌。1994年,韩国首尔的圣水大桥,位于第五与第六根桥柱间的48m长混凝土桥面板整体塌入落水。2007年1-35W密西西比河大桥突然坍塌,



图 1.1 基础设施当前面临的问题

该桥早在 1990 年被美国联邦政府评为有“结构缺陷”(structurally deficient)桥梁。2014 年,世界杯举办城市巴西贝洛奥里藏特的一处高架桥发生坍塌。这些桥梁坍塌事故的发生严重威胁到生命和财产安全。

众多微小病症会对结构的健康构成威胁造成不同程度的损伤破坏风险(图 1.1)。以广大服役的混凝土桥梁与钢结构桥梁为例,实际工程中桥梁结构的健康问题主要表现为以下几类:①混凝土开裂。在混凝土桥梁结构中,混凝土的开裂是极为普遍难以避免的现象。但是桥梁的破坏和倒塌也都是从裂缝的扩展开始的,有害裂缝给桥梁的强度、刚度带来了不同程度的损害,缩短了结构的寿命,严重地影响了结构的正常使用和耐久性。产生混凝土开裂的原因主要有:混凝土干缩与徐变、钢筋锈蚀膨胀、基础不均匀沉降、急剧的温度变化、超重的外部荷载等。例如,1982 年建成的济南黄河大桥,顶板裂缝 1386 处、底板裂缝 11 处、腹板裂缝 52 处、隔板裂缝 1794 处;于 1988 年建成的重庆石门长江大桥,顶板裂缝 233 处、腹板裂缝 84 处、隔板裂缝 78 处。②腐蚀。钢筋、钢结构锈蚀是影响桥梁结构寿命和安全的一个重要因素。混凝土中钢筋的锈蚀一般为电化学腐蚀。混凝土的“碳化”、大气污染以及混凝土过高的氯离子含量都会降低混凝土中的 pH 值,当钢筋表面的氧化膜破坏后,钢筋就会逐渐被腐蚀。对于以受弯为主的混凝土桥梁来说,钢筋作为受拉构件起到了主要的承载作用,而锈蚀的后果是直接造成钢筋断面面积减小,直接造成结构承载能力下降,并埋下安全隐患。钢结构桥梁暴露在自然环境中,其表面与周围介质水分、盐分等极易发生化学及电化学反应,结构表面的防腐涂层性能较差时,便会破坏涂层使钢铁产生锈蚀。南方的湿热和酸雨,北方的寒冷和冰盐,沿海的盐雾等,都是造成钢桥腐蚀的主要原因。结构腐蚀也会造成严重的安全事故。例如,北京仅使用 20 年的西直门立交桥(已重修),钢筋锈蚀破坏十分明显。1967 年美国东部快乐岬与诺加之间的一座铁桥,在使用 40 年后,塌落于俄亥俄河中,使 46 人丧生。调查表明,倒塌原因系大气腐蚀造成的应力腐蚀开裂。③冻融问题。冻融循环给桥梁带来的损伤破坏是不可逆转的,它的破坏机理为:混凝土凝硬化后遗存的游离水,和通过孔隙渗透进入的水都存留在内部的各种孔隙中。当周围气温下降时,孔隙中的水受冻结冰,体积膨胀,破坏材料的内部结构。冻融随气温反复循环时使内部结构的损伤不断积累,裂缝继续扩张延伸并相互贯通。破坏现象由表层向深层发展,引起混凝土耐久性失效,促使强度下降。西部地区受天气影响极易产生冻融现象,长期反复作用易造成结构产生裂缝。④下挠问题。混凝土桥梁的主梁下挠是较为普遍的现象,主要由混凝土的徐变和预应力的损失引起,尤其发生在大跨径梁式桥梁。梁体下挠往往伴随着梁体横向裂缝或大量的斜裂缝出现,其下挠程度可达相当大的数值。不论是斜裂缝或横向裂缝,都会导致结构的刚度降低,造成严重病害。例如,1995 年的黄石大桥运营 7 年后,主跨跨中挠度累计达 33.5cm,并出现大量主拉应力的斜裂缝与横向裂缝;1997 年的虎门大桥辅航道桥在运营 5 年后,其左幅跨中累计下挠达 22.2cm,远远超过原设计预留值 100mm,2006 年跨中下挠值又增大到 260mm。⑤疲劳开裂。疲劳破坏具有突然性,属于脆性断裂。其破坏过程一般经历三个阶段,即裂纹的萌

生、裂纹的缓慢扩展和最后迅速断裂。随着钢桥的老化以及交通荷载作用下产生的累积的应力循环,钢桥中的疲劳开裂是非常普遍的,许多公路和铁路桥梁在运营荷载作用下产生了疲劳裂纹,有时因此而导致脆断。在我国大跨度悬索桥和斜拉桥使用较多的正交异性钢桥面,如果构造不良或焊接工艺不当,在使用过程中因为车辆反复经过引起局部集中应力,易于造成纵肋与面板焊缝以及纵肋与横肋交叉处的疲劳裂缝。例如,虎门大桥的正交异性钢桥面出现面板和纵肋焊接处的疲劳裂缝问题,对该桥的正常通行产生了严重的影响。⑥结构失稳。钢结构桥梁结构的失稳可分为下列几类:a.个别构件的失稳,例如压杆的失稳和梁的侧倾;b.部分结构或整个结构的失稳,例如桥门架或整个拱桥的失稳;c.构件的局部失稳,例如组成压杆的板和板梁腹板的翘曲等,而局部失稳常导致整个体系的失稳。世界上曾经有过不少桥梁因失稳而丧失承载能力的事故。例如,俄罗斯的克夫达敞开式桥由于上弦杆压杆失稳而引起全桥破坏,加拿大的魁北克桥在架设过程中由于悬臂端下弦杆的腹板翘曲而引起破坏,造成严重安全事故。

### 1.1.2 结构维护管理费用不足

规模庞大的基础设施为人们的便利生活提供了良好的基础,但是近年来世界各国普遍出现了基础设施老龄化特征,尤其在发达国家。从美国桥梁建设时间分布图 [图 1.2 (a)] 中可以看出:1920年,罗斯福政府发布“新政策(New Deal policy)”推动美国基础设施建设,同时大量新桥在10年内完成了建设,然而这些桥梁在服役50年后逐步进入老龄化状态。现如今,根据2013年出台的美国基础工程报告数据显示,目前全美基础设施等级评定为D+,全美607380座桥梁平均年龄为42年,其中功能性老化桥梁总数76366座,占12.62%。同时,美国公路网上维护与运营的总投入逐年增加。从日本桥梁建设时间分布图 [图 1.2 (a)] 中可以看出,1950年,经济全面复苏的日本迎来了桥梁工程建设大繁荣时期,这些桥梁直至2010年逐步进入老龄化状态。现如今,根据2013年出台的《日本基础设施、交通、旅游白皮书》数据显示,在日本有记录的近70万座桥梁中(有年代记录的有40万座),有18%已经超过了50年,进入老龄化状态。我国刚刚经过基础设施建设黄金期,桥梁老龄化、病害问题逐步凸显,大部分桥梁的使用年限一般在30年以内,病害问题却大量暴露,绝大部分桥梁因为没有重视耐久性保护措施,致使当前已有一定数量的桥梁发生老化、损伤现象,承载能力明显降低。图 1.2 (a) 中可以看出在2006年开始,危桥数量急剧增多,事故频发。我国的桥梁可能不到30年就要出现维修的高潮。随着时间的推移,混凝土桥梁的耐久性失效将越来越普遍,从而维修费用将逐年增加。

针对大批已进入老龄化的桥梁,国内外特别是发达国家逐渐加大力度进行桥梁维护管养,各国政府对基础设施的更新维护费用逐年增加,对公共设施总投资预算的比例逐年增高。例如:日本政府对公共设施的投资预算在2010年以后投资预算的总额基本不变,但基础设施的维护更新费却大幅度逐年增加,预计到2037年基础设施的维护管理将超过投资预算总额(图 1.2 (b)),预计导致财政赤字<sup>[4]</sup>。欧洲桥梁管理(BRIME)项目的统计