

河南省工程建设标准

DB XXX-2024

城市桥梁结构车桥耦合无损检测技术标准

The standard for non-destructive testing
technology of urban bridge
structure-vehicle-bridge coupling
(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

河南省住房和城乡建设厅 发布

前 言

根据河南省住房和城乡建设厅《关于印发 2022 年工程建设标准编制计划的通知》（豫建科〔2023〕4 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，总结河南省城市桥梁检测评定的实践经验，参考有关国家标准和地方标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共有 7 个章节和 2 个附录，主要包括：总则，术语和符号，基本规定，检测设备，桥梁结构动力响应分析、检测方法，桥梁结构损伤评定。

本标准由河南省住房和城乡建设厅负责管理，由中国建筑第七工程局有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国建筑第七工程局有限公司（地址：河南省郑州市经开十五大街 267 号，邮编 450000）。

主 编 单 位

参 编 单 位

目 次

1 总 则	- 1 -
2 术语和符号	- 2 -
2.1 术语	- 2 -
2.2 符号	- 2 -
3 基本规定	- 4 -
3.1 一般规定	- 4 -
3.2 检测评定程序	- 4 -
4 检测设备	- 6 -
4.1 一般规定	- 6 -
4.2 技术性能指标	- 6 -
5 桥梁结构动力响应分析	- 8 -
5.1 一般规定	- 8 -
5.2 车桥耦合动力方程	- 8 -
5.3 车桥耦合动力方程解析法	- 9 -
5.4 数值分析法	- 10 -
6 检测方法	- 11 -
6.1 一般规定	- 11 -
6.2 间接方法	- 11 -
6.3 直接方法	- 11 -
7 桥梁结构损伤评定	- 12 -
附录 A 桥梁结构信息数据采集记录表	- 13 -
附录 B 车桥耦合桥梁结构损伤检测信息数据采集记录表	- 14 -
本标准用词说明	- 15 -
引用标准名录	- 16 -

1 总 则

1.0.1 本标准规定了城市桥梁结构车桥耦合无损检测的术语和定义、基本规定、检测设备、桥梁结构动力响应分析、检测方法和损伤评定。

1.0.2 本标准适用于河南省行政区域内除钢-混凝土组（混）合结构桥梁外的新建和运营的中小跨径城市桥梁的结构损伤检测与评定。

1.0.3 城市桥梁检测除应符合本标准外，尚应符合国家、行业和河南省现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 动位移 dynamic displacement

在振动、波动或其他动态运动中，物体的位置随时间发生的变化量。

2.1.2 基频 fundamental frequency

桥梁多模态分析中的第一阶频率。

2.1.3 动力响应 dynamic response

结构在动载荷作用下所引起的结构运动、变形和应力。

2.1.4 移动荷载 moving load

大小、方向一定，位置连续变化的荷载。

2.1.5 挠度 deflection

结构或构件在荷载作用下产生的竖向位移。

2.1.6 车桥耦合 Vehicle-Bridge Coupling

指车辆通过桥梁时与桥梁结构之间发生的相互作用，包括动力学效应和结构响应。

2.2 符号

m ——梁体单位长度的质量；

E ——弹性模量；

I ——转动惯量；

U_{bv} ——梁体竖向位移；

g ——重力加速度；

δ ——迪克拉函数；

u_{vv} ——车体竖向位移；

u_{cv} ——车桥接触点竖向位移；

ω_{dn} ——驱车频率；

ω_v ——车体频率；

ω_{bn} ——简支梁模态频率。

3 基本规定

3.1 一般规定

- 3.1.1 从事城市桥梁结构损伤检测机构应具有相应的检测资质，承担检测的人员应经过专业培训并具有相应的资质。
- 3.1.2 检测设备应有出厂合格证书，计量器具应检定或校准合格，并在有效期内使用。
- 3.1.3 桥梁结构无损检测前应开展桥梁结构动力响应分析，并制定检测方案。
- 3.1.4 桥梁现场检测应符合国家有关安全生产的规定。
- 3.1.5 检测情况应及时记录。
- 3.1.6 检测试验宜在封闭或半封闭交通状态下实施。
- 3.1.7 检测试验应在气温平稳的时段进行。
- 3.1.8 检测试验不宜在 6 级以上的强风下进行。
- 3.1.9 检测试验不应在冲击、振动、强磁场等干扰测试效果的时段内进行。
- 3.1.10 分析桥梁结构动力特性时，宜采用空间模型进行计算。异型桥梁宜考虑其空间力学效应。

3.2 检测评定程序

- 3.2.1 城市桥梁结构车桥耦合无损检测包括检测准备、现场实施和结构损伤评定三个阶段。
- 3.2.2 检测准备阶段工作内容应包括：
 - 1 资料准备。
 - 1) 设计资料：设计图纸、变更设计图纸和作为设计依据的其他原始资料等。
 - 2) 施工资料：材料性能试验报告等。
 - 3) 监控资料：监控报告、成桥线形、内力（应力）、索力（杆力）等。
 - 4) 竣工资料：竣工图纸、工程验收报告等。
 - 2 桥梁结构动力响应分析计算。根据成桥资料，采用数值、解析或半解析方法，分析被测桥梁的动力响应参数。

3 方案编制。根据理论计算结果，结合检测内容、现场检测条件、测试车速、保通与安全措施等编制检测方案。

3.2.3 现场实施阶段工作内容应包括：

1 现场调查。主要调查桥梁结构的总体尺寸，主要构件截面尺寸，主要部位的高程，桥面平整度，支座工作状况，材料的物理力学性能等。

2 现场准备。包括检测车辆准备，现场交通组织及试验测试系统安装调试等。

3 预检测。在正式实施检测试验前，先进行预检测试验，测试系统工作状况。

4 检测。按照预定的试验方案进行检测，并记录车辆行驶速度、车辆加速度、桥梁振动信号等检测数据。

3.2.4 结构损伤评定阶段工作内容应包括：

1 测试数据处理。对测试数据进行处理，得到车辆或桥梁的动态响应参数，进一步获取桥梁的响应频率等信息。

2 数据分析。根据理论计算和测试数据对比分析，形成桥梁结构损伤评定标度，给出评定意见。

3 报告编制。检测完成后应形成检测报告。报告主要包括桥梁基本信息、检测时间、车辆型号、车辆行驶速度、检测次数，评定标度等内容。

4 检测设备

4.1 一般规定

4.1.1 检测设备的技术性能应符合相关标准的规定，检测设备应在检定或校准的有效期内，且应定期进行检定或校准。

4.1.2 检测设备功能与技术指标应与检测对象和检测目的相适应。

4.1.3 检测设备应具有高精度，测量数据相对误差不应大于 5%。

4.1.4 检测设备的量程和动态范围应满足检测要求。

4.1.5 检测设备宜选用固定型号或规格。

4.2 技术性能指标

4.2.1 光电编码器技术指标应满足以下要求：

- 1 光电编码器分辨率 ≥ 512 脉冲/旋转
- 2 距离测试精度 $\geq 0.4\%$
- 3 输入电压范围 0~24V。

4.2.2 加速度传感器主要技术指标应满足以下要求：

- 1 输入电压范围：0~24V
- 2 响应频率范围：0~5kHz；
- 3 采样频率 ≥ 1 kHz。

进一步的技术参数如表 4.2.2 所示：

表 4.2.2 加速度传感器技术参数表

类型	量程范围	分辨率	响应频率
磁电式	$\pm 0.5g$	$1\mu g$	0.3~20Hz
应变式	$\pm 0.5g$	$1\mu g$	0~100Hz
压电式	$\pm 100g$	$200\mu g$	0.5~1kHz
伺服式	$\pm 5g$	$10\mu g$	0~100Hz
电容式	$\pm 5g$	$10\mu g$	0~100Hz

注：其它新型加速度传感器参照上述技术指标要求。

4.2.3 激光位移传感器主宜采用 CCD（Charge Coupled Devices）电荷耦合器，其主要技术指标应满足以下要求：

- 1 典型测量精度 $\geq 1mm$ ；

- 2 测量范围 $\geq 0.3\text{m}$;
- 3 分辨率 $\leq 0.1\text{mm}$;
- 4 激光等级: II 类以上
- 5 工作温度范围: $-10\sim+50^{\circ}\text{C}$

4.2.4 激光测振器技术指标应满足以下要求:

- 1 可同步输出位移, 速度和加速度
- 2 带宽覆盖 $\text{DC}\sim 24\text{MHz}$
- 3 最大振动速度宜达 30m/s ;
- 4 最大振动位移宜达 200 mm ;
- 5 速度分辨率 $\leq 0.01\text{ m/s}$
- 6 工作温度范围: $+5\sim+40^{\circ}\text{C}$

5 桥梁结构动力响应分析

5.1 一般规定

5.1.1 根据设计图纸和竣工资料以及现场调查结果,对桥梁结构的动态响应进行分析,主要分析频率和模态。

5.1.2 分析方法可选用数值方法、解析方法、半解析法等。

5.1.3 数值方法可选用有限元法、有限条分法、有限差分法等。

5.1.4 有限元法动力时程分析可选用 Newmark- β 法、Wilson- θ 法、中心差分法和精细积分法等。

5.2 车桥耦合动力方程

5.2.1 可采用车桥耦合动力分析模型,通过解析车桥耦合动力方程获得桥梁模态参数。

5.2.2 加速度传感器应固定于测量车上,记录车体竖向振动加速度响应。

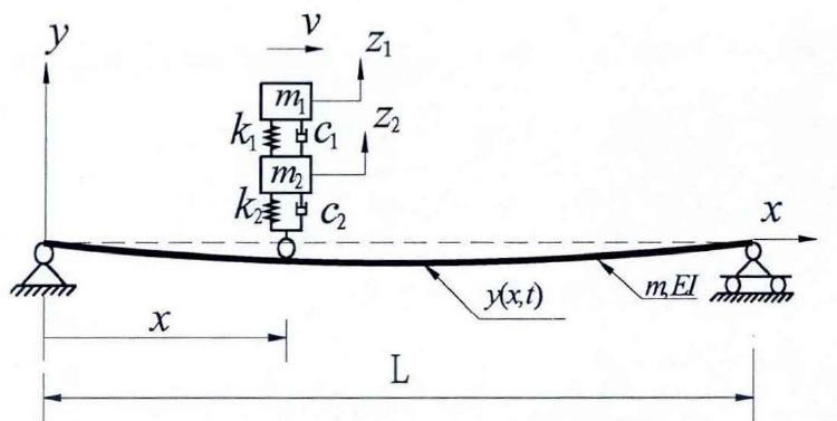


图 5.2.2 车桥耦合分析模型

5.2.3 车桥耦合的振动方程可按式 (5.2.3-1) (5.2.3-2) 计算:

$$m\ddot{u} + EIu''' = [k_v(y_v - u_c) - m_v g]\delta(x - vt) \quad (5.2.3-1)$$

$$m_v \ddot{y}_v + k_v(y_v - u_c) = 0 \quad (5.2.3-2)$$

式中: m ——梁体单位长度的质量, 单位 kg;

E ——弹性模量, 单位 Pa;

I ——转动惯量, 单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

u ——梁体竖向位移, 单位 m ;
 g ——重力加速度, 单位 m/s^2 ;
 δ ——迪克拉函数;
 y_v ——车体竖向位移, 单位 m ;
 u_c ——车桥接触点竖向位移, 单位 m 。

5.3 车桥耦合动力方程解析法

5.3.1 针对车桥耦合动力控制方程 (5.2.3-1) (5.2.3-2), 可选用不同的解析方法。

5.3.2 解析方法可选用如下方法:

1 对简支梁和车体的振动方程进行求解, 获得简支梁的竖向振动位移, 简支梁的竖向振动位移按式 (5.3.2-1) 计算:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta_{stn}}{1-S_n^2} \left[\sin\left(\frac{n\pi vt}{L}\right) - S_n \sin(\omega_{bn}t) \right] \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (5.3.2-1)$$

2 车体竖向加速度按式 (5.3.2-2) 计算:

$$\ddot{y}_v(t) = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta_{stn}}{2(1-S_n^2)} \left[A_1 \cos(\omega_v t) + A_2 \cos(2\omega_{dn}t) + A_3 \cos\left(\omega_{bn} - \frac{n\pi v}{L}\right)t + A_4 \cos\left(\omega_{bn} + \frac{n\pi v}{L}\right)t \right] \quad (5.3.2-2)$$

式中: $\Delta_{stn} = -2m_v g L^3 / (n^4 \pi^4 EI)$, 为静载位移;

$S_n = \omega_{dn} / \omega_{bn}$, 为速度因子;

A_i ——与 S_n 相关的系数参量;

ω_{dn} ——驱车频率, 单位 Hz ;

ω_v ——车体频率, 单位 Hz ;

ω_{bn} ——简支梁模态频率, 单位 Hz , 分别表示为: $\omega_{dn} = \frac{n\pi v}{L}$, $\omega_v =$

$$\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}, \omega_{bn} = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

3 车体加速度响应 $\ddot{y}_v(t)$ 中包含 4 组频率成分, 即车体频率成分 ω_v 、驱车频率成分 ω_{dn} 、桥梁左频移成分 ω_{bln} 和右频移成分 ω_{brn} 。其中, 桥梁模态频率可通过识别的桥梁左、右频移项计算得到, 即 $\omega_{bn} = (\omega_{bln} + \omega_{brn})/2$ 。

式中: $\omega_{bln} = \omega_{bn} - n\pi v/L$

$$\omega_{brn} = \omega_{bn} + n\pi v/L$$

5.3.3 桥梁振型的间接识别可采用下述方法或公式：

1 车体响应中的桥梁频率分量响应按式（5.3.3-1）计算

$$R_{bn} = A_{ln} \cos\left(\omega_{bn} - \frac{\omega_{dn}}{2}\right)t + A_{rn} \cos\left(\omega_{bn} + \frac{\omega_{dn}}{2}\right)t \quad (5.3.3-1)$$

式中： A_{ln} ， A_{rn} 为常数。

2 桥梁频率 ω_{bn} 的瞬时幅值按式（5.3.3-2）计算

$$A_n(t) = A_{mn} \left| \sin\left(\frac{n\pi vt}{L}\right) \right| \quad (5.3.3-2)$$

式中： A_{mn} 为常数参量，表示为：

$$A_{mn} = \sqrt{-4A_{ln}A_{rn}} = \frac{S_n \Delta_{stn} \omega_{bn}^2 \omega_v^2}{(1-S_n^2)|\omega_v^2 - \omega_{bn}^2|} \quad (5.3.3-3)$$

用位置坐标 x 替代式（5.3.3-2）中的 vt ，则

$$A_n\left(\frac{x}{v}\right) = A_{mn} \left| \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right| \quad (5.3.3-4)$$

5.3.4 桥梁频率分量响应的瞬时幅值时程 $A_n(x/v)$ 实际为桥梁振型 $\sin(n\pi x/L)$ 与一个常数参量 A_{mn} 的乘积。可通过滤波技术分离得到桥梁频率分量响应 R_{bn} 。

5.3.5 滤波分离技术可采用 EMD、快速傅里叶变换等方法。

5.4 数值分析法

5.4.1 桥梁动力响应分析可通过数学建模完成。模型建立时，需考虑桥梁结构的几何特征、材料性质以及外部载荷等因素。

5.4.2 桥梁建模应采用桥梁实际的几何形状、尺寸和截面性质及物理力学参数，如弹性模量、泊松比、密度等。

5.4.3 根据数值建模方法计算桥梁的动力响应，提取频谱信息，重点计算基频。

6 检测方法

6.1 一般规定

6.1.1 检测车辆应在桥面无任何障碍的情况下匀速通过桥跨结构,使桥梁产生强迫振动。

6.1.2 检测车辆行驶速度宜在 20~40 km/h 之间。

6.1.3 可进行多次重复性测量,检测数据可选用再现性较好的数据平均值作为测试结果。

6.2 间接方法

6.2.1 利用光电编码器、加速度传感器测量车辆在桥梁上行驶中的不同位置的车辆振动信号。

6.2.2 根据车桥耦合振动响应的滤波分离技术,从车辆振动信号中提取和分离桥梁振动信号,如频谱信号等。

6.3 直接方法

6.3.1 利用光电编码器、加速度或速度传感器、激光位移传感器、激光测振仪直接测量车辆在行驶中的桥梁振动信号。

6.3.2 加速度传感器或速度传感器获取车辆的参考位移。激光位移传感器测量车辆到桥面的距离。激光测振仪获取桥梁的振动加速度及桥梁振动位移。

6.3.3 对桥梁振动信号开展频谱分析,得到桥梁振动频谱。

7 桥梁结构损伤评定

7.0.1 根据桥梁结构动力响应的实测频率 f 与理论计算频率 f_s 的比值作为损伤评定指标。

7.0.2 评定标度依据桥梁结构损伤情况、结构整体性能等分为五级，其评定标度见表 7.0.2。

表 7.0.2 桥梁自振频率评定标准

桥梁结构 f/f_s	评定标度	桥梁状况
≥ 1.1	1	桥梁健康，功能完好。
$[1.00, 1.10)$	2	对使用功能无影响
$[0.90, 1.00)$	3	尚能维持正常使用功能
$[0.75, 0.90)$	4	影响桥梁使用功能，或影响承载能力，不能保证正常使用
< 0.75	5	不能正常使用，危及桥梁安全，桥梁处于危险状态

7.0.3 评定标度为 4 级或 5 级的，宜依据《公路桥梁荷载试验规程》进行桥梁动静载试验。

附录 A 桥梁结构信息数据采集记录表

桥梁名称：_____ 所在路名：_____ 所在地名：_____

信息类型	项目	描述
桥梁上部 结构信息 数据	跨号	
	跨长 (m)	
	桥梁结构型式	
	梁断面型式	
	梁数	
	梁高 (m)	
桥梁下部 结构信息 数据	墩台号	
	墩结构形式	
	墩基桩根数	
	墩基桩尺寸	
	支座类型	
	护墩体	
	台结构型式	
	台帽尺寸 (m)	
	翼墙型式	
	翼墙长度 (m)	
	护坡型式	
	调治构造物形式	

调查人员：_____

调查日期：_____

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；

2) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

3) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应按…执行”或“应符合……的规定(或要求)”。

引用标准名录

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- 1 《组合结构通用规范》GB 55004
- 2 《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037
- 3 《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01
- 4 《城市轨道交通桥梁工程施工及验收标准》CJJ/T290
- 5 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ2
- 6 《城市桥梁设计规范》CJJ11
- 7 《城市桥梁检测与评定技术规范》CJJ/T 233
- 8 《公路桥梁承载能力检测评定规程》JTG/T J21
- 9 《桥梁结构检测技术规程》DG/TJ08-2149-2014
- 10 《城市桥梁检测技术规程》DB33/T 1097-2014

河南省工程建设标准

城市桥梁结构车桥耦合无损检测技术标准

DB XXX-2024

条文说明

目 次

1 总 则	- 20 -
3 基本规定	- 21 -
3.1 一般规定	- 21 -
3.2 检测评定程序	- 22 -
4 检测设备	- 23 -
4.1 一般规定	- 23 -
4.2 测试设备技术性能指标	- 23 -
5 桥梁结构动力响应分析	- 24 -
5.1 一般规定	- 24 -
5.2 车桥耦合动力方程	- 24 -
5.3 车桥耦合动力方程解析方法	- 24 -
5.4 数值分析方法	- 25 -
6 检测方法	- 26 -
6.1 一般规定	- 26 -
6.2 间接方法	- 26 -
6.3 直接方法	- 26 -
7 桥梁结构损伤评定	- 27 -

1 总 则

1.0.1 为规范新建和既有城市运营桥梁检测，提高桥梁检测效率，大幅降低桥梁检测费用，准确判断桥梁结构损伤状况，实现城市桥梁精确、高效、低碳、无损以及智能化的检测与评定，制定此标准。

1.0.2 本标准适用于河南省行政区域内除钢—混凝土组（混）合结构桥梁外的新建和运营的中小跨径城市桥梁的结构损伤检测与评定。界定本规范的适用地域和工程性质、规模。城市桥梁工程包括高架桥、立交桥、人行天桥等工程。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.3 桥梁结构损伤检测时，应事先制定详细的检测方案。检测方案应包括检测方法、检测频率以及所需的技术和设备等，确保桥梁检测的全面性、系统性和准确性，以便及时发现和评估潜在的结构问题，并为后续的维护和修复工作提供有效的指导。

3.1.4 在执行桥梁现场检测时，应确保检测人员和相关工作人员严格遵循国家安全生产法规，采取必要的安全措施，以保障检测过程中的工作人员、设备和现场环境的安全。

3.1.5 桥梁检测时，应实时、准确地记录所有相关的检测数据、观察结果和评估信息。这包括但不限于检测车辆行驶速度、检测次数等情况。及时记录有助于建立完整的检测档案，为后续的结构安全评估提供可靠依据。

3.1.6 桥梁检测时，为了确保检测的安全性和有效性，应采取措施限制或暂时中断桥梁上的交通流量。封闭状态下可以提供更好的桥梁检测环境，更有利于检测设备检测，确保检测结果的准确性和全面性。

3.1.7 气温的平稳有助于减少外部环境因素对检测结果的影响，确保测试数据的准确性和可靠性。在气温相对平稳的时段进行检测，有利于避免温度变化可能引起的材料膨胀、收缩等现象，从而更准确地评估桥梁结构的实际状况。

3.1.8 强风环境可能对检测过程中使用的设备和工具，以及工作人员的安全带来潜在风险。在风力较大的情况下，可能会影响测量精度，增加误差。

3.1.9 检测设备属弱电设备，设备需要远离电磁干扰源。冲击和振动可能导致测量误差。

3.1.10 实施桥梁结构车桥共振检测时，桥梁通常会由于使用年限、维护状况等原因而存在新旧材料和结构的差异。这些差异可能导致桥梁在面对动力荷载时表现出不同的振动特性和响应。因此，为了更准确地评估桥梁的共振状况，动力分析过程中必须考虑这些材料和结构上的差异，以综合考虑桥梁的整体力学性能，确保检测结果更为准确和可靠。

3.2 检测评定程序

3.2.1 城市桥梁结构车桥共振无损检测技术的执行流程分为三个关键阶段：检测准备、现场实施和结构损伤评定。首先，在检测准备阶段，需要进行充分的准备工作，包括确定检测的具体目标、选定适用的无损检测技术和设备，以及制定详细的检测计划。其次，在现场实施阶段，检测人员将根据事先制定的计划，使用先进的车桥共振无损检测技术在实际桥梁结构上进行检测。最后，在结构损伤评定阶段，通过对检测数据进行详尽的分析和评估，判断桥梁结构与车辆振动之间的耦合关系，以评定结构的健康状况。

4 检测设备

4.1 一般规定

4.1.3 进行检测之前应当对测试设备进行精确的校准。确保测试设备的精确性和可靠性，以提高无损检测的准确度。

4.1.5 进行桥梁结构无损检测时，应优先选择固定型号或规格的设备，以确保测试的标准化和可重复性。

4.2 测试设备技术性能指标

4.2.1 光电编码器主要用于测量车辆行进的位置及行驶速度，一般采用增量式光电编码器。

4.2.2 加速度传感器主要用于测量车辆的竖向振动信号，在间接检测方法中，用于提取桥梁的振动信号；在直接检测方法中，用来计算车辆行进过程中的参考高程。

4.2.3 激光位移传感器主要用于直接检测方法中测量车辆与桥面之间的相对距离，宜采用 CCD（Charge Coupled Devices）电荷耦合器。

4.2.4 激光测振器主要用于直接检测方法中测量桥梁的振动速度，在此基础上分析桥梁的振动位移和加速度。

5 桥梁结构动力响应分析

5.1 一般规定

5.1.1 桥梁结构动态响应分析的过程涵盖了三个主要步骤。首先，需研究设计图纸和竣工资料，以获取有关桥梁结构的详细信息。其次，通过实地调查收集现场数据，包括但不限于结构材料、支座状况和环境条件等，以确保分析的全面性和准确性。最后，利用获得的信息进行频率和模态分析，以评估桥梁的动态响应特性。

5.2 车桥耦合动力方程

5.2.1 桥梁检测是确保公共安全和基础设施健康的重要环节，通过定期的检测和评估，可以及早发现潜在的结构问题并采取相应的维护措施。为更快速更精确的评估桥梁结构损失状态，引用车桥耦合动力分析模型。通过解析车桥耦合动力方程，可以获得桥梁的频率和模态等关键参数，从而更全面地了解结构的健康状况。

5.2.2 车桥耦合分析模型为单自由度的弹簧-质子模型，车体质量为 m_v ，悬挂弹簧刚度为 k_v ，移动速度为 v ，加速度传感器固定于测量车上，用于记录车体竖向振动加速度响应。

5.3 车桥耦合动力方程解析方法

5.3.2 车体质量远小于梁体质量， m_v 远小于 m_L ，采用模态叠加方法对简支梁和车体的振动方程进行求解，即可获得简支梁的竖向振动位移。令竖向振动位移求解方程中的 $x = vt$ ，可得车桥接触点竖向位移 u_c ，再将其代入简支梁和车体的振动方程，可得到车体竖向加速度响应表达式。

5.3.3 振型是桥梁检测监测的重要参数，常用于桥梁损伤识别。可结合 Hilbert 变换，利用车辆响应间接识别桥梁振型。

5.3.4 在实际测量中车辆参数已知，可得到车体频率，且驱车频率 ω_{dn} 为极小值量，因此可通过滤波技术分离出桥梁频率分量响应 R_{bn} 。

5.3.5 通常情况下，测试车辆过桥采集的数据是有限的、非平稳和非线性的，它们也可能受到车辆本身以及传感器等其他频谱来源的混杂。经验模态分解方法（empirical mode decomposition，简称 EMD），专门用于处理非平稳和非线性数据。可以对数据先进行 EMD，再进行快速傅里叶变换，相较于直接对原始数据进行快速傅里叶变换，可以获得更好的分辨率。

5.4 数值分析方法

5.4.2 桥梁建模过程应当基于实际桥梁的几何形状、尺寸以及截面性质，确保模型与实际结构相符。同时，在建模过程中应保持物理力学参数的一致性，包括但不限于弹性模量、泊松比、密度等重要参数，以确保模型反映出实际桥梁的力学特性。

5.4.3 基频是桥梁振动的主要频率成分，其准确提取有助于评估结构的稳定性和性能状态，为无损检测提供了重要的指标。

6 检测方法

6.1 一般规定

6.1.2 桥面无障碍行车试验的车速根据设计车速、路幅宽度、桥面线形、路况等因素综合考虑,采用测速仪或由实测时程信号在特征部位的起讫时间确定实际车速。

6.1.3 测量数据是与桥面平整度、车一桥耦合振动等相关的随机变量,单次试验的随机性较大,影响评价的客观性,因此每个车速工况通常进行 2~3 次重复试验。

6.2 间接方法

6.2.1 根据车桥耦合振动响应的滤波分离技术,从车辆振动信号中提取和分离桥梁振动信号,集中关注频谱信号。

6.3 直接方法

6.3.2 加速度传感器或速度传感器采集车辆本身的振动,对其进行积分可得到车辆的参考位移。激光位移传感器测量车辆到桥面的距离。激光测振仪测量桥梁的瞬间振动相对速度信号,去除车辆的振动速度,可得桥梁振动的绝对速度;对其进行时间一阶求导可得到桥梁的振动加速度;对其进行一次积分可得到桥梁振动位移。该方法能够实时测量桥梁振动位移、速度和加速度信号。同时,车辆的参考位移减去车辆到桥面的距离,再减去桥梁振动位移,也可得到桥面的纵断面高程。

6.3.3 通过桥梁振动频谱分析,可以有效评估桥梁结构的健康状况,提供有关结构可能存在的问题或损伤的信息,为维护和管理桥梁结构提供科学依据。

7 桥梁结构损伤评定

7.0.2 桥梁自振频率变化不仅能够反映结构损伤情况,而且还能反映结构整体性能和受力体系的改变。通过测试桥梁自振频率的变化,可以分析桥梁结构性能,评价桥梁工作状况。