

团 体 标 准

T/CCTAS XX—2024

梁式桥结构自振频率测试方法

Test method for natural frequency of beam bridge structure

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2024 年 9 月 30 日）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

1 范围1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 仪器与用具 2

 5.1 激励车辆 2

 5.2 跳车激励辅助装置 2

 5.3 拾振传感器 3

 5.4 信号采集及振动测试分析系统 3

 5.5 其他 3

6 测试步骤 3

 6.1 一般规定 3

 6.1.1 技术资料收集 3

 6.1.2 现场调研 3

 6.1.3 传感器布置 3

 6.2 跳车激励试验 4

 6.2.1 极限跳车高度的计算方法 4

 6.2.2 跳车激励 5

 6.3 跑车激励试验 6

 6.4 环境激励试验 6

 6.5 测试过程 6

7 数据分析 7

 7.1 一般规定 7

 7.2 考虑车辆影响的梁式桥自振频率分析方法 8

 7.3 考虑温度影响的梁式桥自振频率分析方法 9

8 测试报告 12

附录 A（规范性） 13

附录 B（规范性） 15

附录 C（资料性） 17

附录 D（资料性） 19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：吉林大学、广西交投集团有限公司、交通运输部公路科学研究所、交通运输部科学研究院、吉林省交通科学研究所、广西壮族自治区高速公路发展中心、广西普力达交通科技有限公司、桂林电子科技大学。

本文件主要起草人：谭国金、王龙林、王华、赵安、周紫君、何昕、王文盛、顾正伟、吴春利、艾永明、宫亚峰、郑传峰、于丽梅、秦绪喜、周培蕾、果晓君、蒋符发、梁健生、唐丽娟、滕煜、黄健、许纪湖、孙希延、纪元法、付文涛、蓝如师。

梁式桥结构自振频率测试方法

1 范围

本文件规定了梁式桥结构自振频率测试方法的仪器与用具、测试步骤、数据分析和测试报告。
本文件适用于公路、市政等梁式桥结构的自振频率测试。

2 规范性引用文件

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。

- JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T H21 公路桥梁技术状况评定标准
- JTG/T J21 公路桥梁承载能力检测评定规程
- JTG/T J21-01 公路桥梁荷载试验规程
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JTG 5120 公路桥涵养护规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

桥梁自振频率 bridge natural frequency
桥梁在单位时间内完成周期性振动的次数。

3.2

跳车激励 vehicle bump excitation
跳车实验中，车辆后轮从一定高度落下，然后停止。

3.3

极限跳车高度 extreme bump height
跳车实验中，车辆后轮所能落下的最大高度。

3.4

跑车激励 moving vehicle excitation
车辆在桥梁上行驶对桥梁所施加强迫激励。

3.5

环境激励 ambient excitation
桥梁结构测试环境中机械振动、地壳微小破裂、风荷载等微小和不规则的随机荷载对桥梁进行的激励。

3.6

采样频率 sampling frequency

单位时间内从连续信号中提取并组成离散信号的采样个数。

3.7

有载频率 vertical loaded frequency
车-桥系统的桥梁测试频率称为桥梁有载频率。

4 基本规定

4.1 对梁式桥结构进行自振频率测试时，宜采用跳车激励、跑车激励和环境激励，各激励方法的适用范围宜根据表 1 确定。

表 1 梁式桥自振频率测试激励方法适用范围

激励方法	适用范围
跳车激励	8 米≤桥梁跨径总长≤30 米的简支梁桥。
跑车激励	30 米<桥梁跨径总长<100 米的简支梁桥、连续梁桥、刚构桥等梁式桥梁。
环境激励	桥梁跨径总长≥100 米的连续梁桥、刚构桥等梁式桥梁。

4.2 采用跳车激励时，应结合桥梁综合情况计算极限跳车高度。
4.3 当车辆和温度对桥梁频率测试产生影响时，应按照本方法第 7 条的规定剔除车辆、温度对梁式桥频率测试的影响。

5 仪器与用具

5.1 激励车辆

激励车辆应符合荷载试验效率要求，达到激励试验所需的重量。跳车激励车辆宜采用单辆载重车，跑车激励宜采用单辆载重车或每个车道横向并列一排的多辆车，单辆载重车总质量不宜超过 35 吨。

5.2 跳车激励辅助装置

用于跳车激励中车辆支撑的辅助装置，其侧视图和俯视图如图 1 所示。跳车辅助装置与桥面应具有足够的接触面积，接触面积尺寸不应小于 1m×0.6m，装置高度 h_0 即为最大跳车高度，可按照本方法 6.2.1 条规定进行计算。该装置宜采用 Q235 钢材焊制，钢板厚度不应小于 20mm，装置表面应进行抗滑处理。

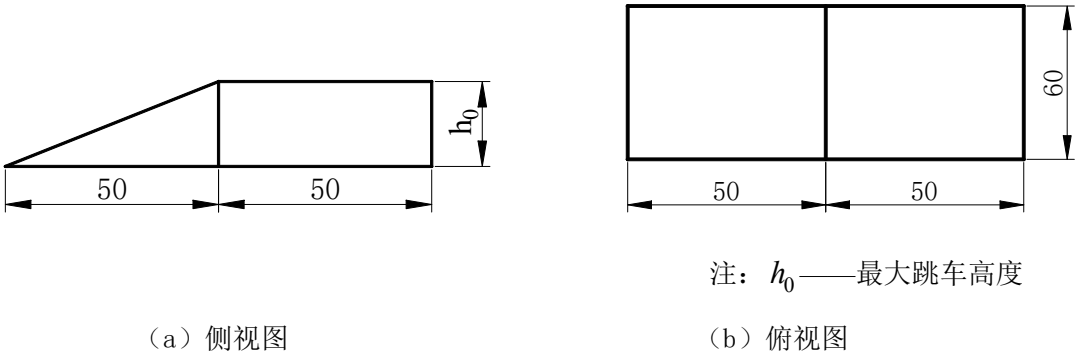


图1 跳车激励辅助装置（单位：cm）

5.3 拾振传感器

梁式桥梁自振频率测试传感器宜选用磁电式拾振传感器或压电式加速度传感器，拾振传感器的技术要求应符合表 2 的规定。

表 2 拾振传感器技术要求

仪器名称	使用范围
磁电式拾振传感器	①测量范围：加速度±0.5g ②频率响应：0.3~20Hz ③可用于跳车激励、跑车激励和环境激励试验
压电式加速度传感器	①测量范围：加速度±100g ②频率响应：0.5~1kHz ③可用于跳车激励、跑车激励，高灵敏度的传感器也可用于环境激励试验

5.4 信号采集及振动测试分析系统

该系统由计算机、相应软件、信号采集和振动分析仪组成，信号采集及振动测试分析系统频率响应范围为：0~5kHz，其采样频率不低于 1kHz。

5.5 其他

用于梁式桥结构自振频率测试的辅助仪器和用具包括：皮尺、路锥、粉笔、中性笔、记录本、凡士林或黄油。

6 测试步骤

6.1 一般规定

6.1.1 技术资料收集

在桥梁自振频率测试试验前应收集、整理桥梁的技术资料，主要包括：

- a) 桥梁设计文件；
- b) 桥梁施工文件；
- c) 原始荷载试验资料；
- d) 桥梁养护与维修记录；
- e) 历次桥梁技术状况评定资料；
- f) 历次自振频率测试报告。

6.1.2 现场调研

在梁式桥自振频率测试前，应提前进行桥梁环境现场调研并制确定激励车辆行驶路线方案。

6.1.3 传感器布置

- a) 在桥梁自振频率测试前，应对所采用的拾振传感器、信号采集及振动分析系统进行标定。
- b) 拾振传感器的数量应满足所需测试桥梁自振频率阶次的要求，简支梁桥前 5 阶、两等跨连续梁桥前 4 阶和三等跨连续梁桥前 3 阶自振频率拾振传感器布置方案如表 3 至表 5 所示。
- c) 拾振传感器的布置位置应结合桥梁的模态分析进行确定，测点位置不应设置在桥梁的振型节点上，宜布置在振型峰、谷值位置处。桥梁缺少技术资料无法进行模态分析时，拾振传感器布置位置可按照表 2 至表 4 所示的规定进行布置。
- d) 拾振传感器 0 号参考点应布置在振幅较大位置点，一般设置在跨中测点。

表 3 简支梁桥前 5 阶自振频率拾振传感器布置方案

频率阶次	至少需要传感器数量	布置位置
1	1	L/2
2	2	L/4; 3L/4
3	3	L/6; L/2; 5L/6
4	4	L/8; 3L/8; 5L/8; 7L/8
5	5	L/10; 3L/10; L/2; 7L/10; 9L/10
注：L 为简支梁桥的计算跨径。		

表 4 两等跨连续梁桥前 4 阶自振频率拾振传感器布置方案

频率阶次	至少需要传感器数量	布置位置
1	2	L/4; 3L/4
2	4	L/8; 3L/8; 5L/8; 7L/8
3	6	L/12; L/4; 5L/12; 7L/12; 3L/4; 11L/12
4	8	L/16; 3L/16; 5L/16; 7L/16; 9L/16; 11L/16; 13L/16; 15L/16
注：L 为两等跨连续梁桥跨径总长。		

表 5 三等跨连续梁桥前 3 阶自振频率拾振传感器布置方案

频率阶次	至少需要传感器数量	布置位置
1	3	L/6; L/2; 5L/6
2	6	L/12; L/4; 5L/12; 7L/12; 3L/4; 11L/12
3	9	L/18; L/6; 5L/18; 7L/18; L/2; 11L/18; 13L/18; 5L/6; 17L/18
注：L 为两等跨连续梁桥跨径总长。		

d) 可通过耦合剂、固定底座等方式将传感器固定在桥梁牢固、可靠的位置，宜减少传感器到信号采集测试分析系统的距离，安装应与主体结构保持良好接触，无相对振动。

6.2 跳车激励试验

6.2.1 极限跳车高度的计算方法

- a) 假定一个跳车高度 h ，确定跳车过程中车辆和桥梁耦合振动的初始条件；
- b) 分析梁式桥梁各截面动力位移时程响应；
- c) 根据动力位移时程响应确定桥梁各点位移，计算桥梁控制截面弯矩；
- d) 控制截面设计弯矩与截面开裂弯矩相等时，则跳车高度 h 即为极限跳车高度 h_L ，否则增加跳车高度进行迭代计算；
- e) 应根据现行 JTG/T H21 对桥梁技术状况进行评定，结合桥梁技术状况评定等级，按照式（1）确定最大跳车高度；
- f) 确定理论跳车高度后，在不引起桥梁损伤的条件下可提高跳车高度来增大动力响应信噪比和频率测量精度。

$$h_0 = \varphi h_L \tag{1}$$

式中： h_0 ——最大跳车高度（cm）；
 h_L ——极限跳车高度（cm）；
 φ ——跳车激励高度折减系数，宜按表 6 取值。

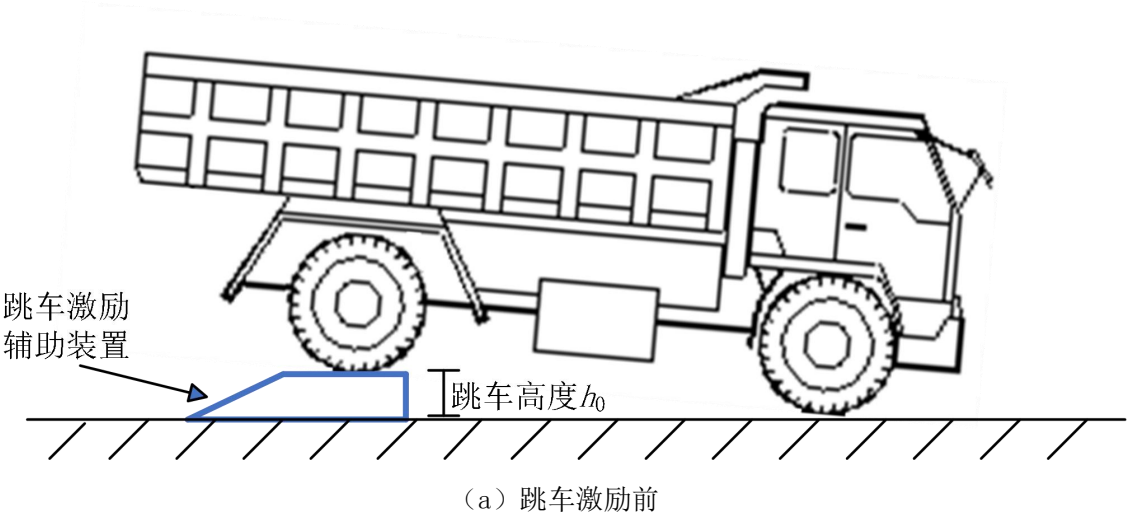
表 6 跳车激励高度折减系数

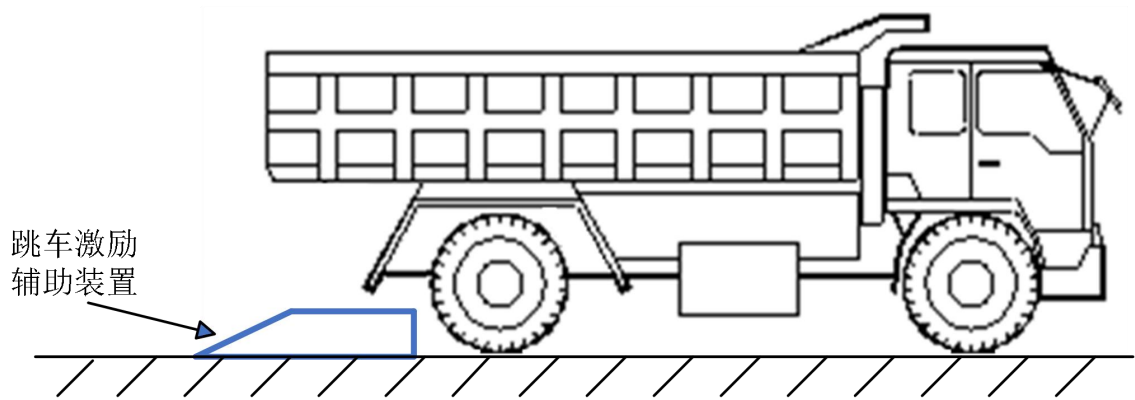
技术状况评定等级	折减系数值
1 类	$\varphi = 1$
2 类	$\varphi = 0.95$
3 类	$\varphi = 0.9$
4 类	$\varphi = 0.85$
5 类	$\varphi = 0.75$

6.2.2 跳车激励

进行跳车激励时，宜采用以下步骤：

- a) 应根据桥梁结构技术资料，采用结构模态参数分析确定桥梁激振点位置；
- b) 根据 6.2.1 条规定计算极限跳车高度，并确定最大跳车高度；
- c) 采用跳车激励时，对于已经开放交通的桥梁，应在桥梁检测测试前一小时封闭交通；
- d) 激励车辆应根据跳车激励方案确定的质量进行配重并记录车辆载重、轴数等信息；
- e) 利用皮尺在桥面测量出跳车激励位置，使用粉笔或滑石笔在相应位置进行标记；
- f) 将跳车辅助装置安装在跳车激励位置处，应与桥面紧密接触；
- g) 激励车辆后轴单侧轮胎行驶至激励辅助装置上，激励车辆应在没有水平速度的情况下，车辆后轮从跳车激励辅助装置上突然落下，车辆后轮与桥面接触后仍保持水平静止。跳车激励过程如图 2 所示。





(b) 跳车激励后
图 2 跳车激励过程

6.3 跑车激励试验

进行跑车激励时，宜采用以下步骤：

- a) 采用跑车激励时应结合桥梁技术资料，进行桥梁结构模态参数分析，确定跑车激励过程的行驶路线；
- b) 跑车激励试验荷载效率可按式（2）计算， η_d 宜取高值，但不应超过 1；

$$\eta_d = \frac{S_d}{S_{l\max}} \tag{2}$$

式中： η_d ——跑车激励试验荷载效率；

S_d ——跑车激励试验控制荷载作用下控制截面的最大内力或变形（不计冲击）；

$S_{l\max}$ ——控制荷载作用下控制截面的最大内力或变形。

- c) 采用跑车激励时，对于已经开放交通的桥梁，应在桥梁检测测试前一小时封闭交通；
- d) 清除桥面的杂物和障碍物，利用皮尺在桥面测量出跑车激励车队的路线，用粉笔或滑石笔进行标记；
- e) 用于跑车激励的车辆配重后记录车辆的实际车重；
- f) 激励车辆应按照不同车速分级激励，车速宜控制在 5km/h 至 80km/h 之间，可按照 5km/h 或 10km/h 逐级递增，亦可在最高车速内分成若干等级。

6.4 环境激励试验

进行环境激励时，宜采用以下步骤：

- a) 环境激励无需任何激励设备，利用桥梁结构测试环境中机械振动、地壳微小破裂、风荷载等微小和不规则的随机荷载引起的微幅振动，对桥梁起到激励作用；
- b) 环境激励时，桥面需无任何交通荷载及桥址附件需无规则振源等情况；
- c) 桥梁动态信号采集时间应不小于 30 分钟。

6.5 测试过程

- 6.5.1 采集分析组试验人员按照拾振传感器布设方案，使用皮尺在桥面上测量出传感器的位置，用粉笔或滑石笔做好标记。
- 6.5.2 将凡士林或黄油作为耦合剂均匀涂抹在拾振传感器与桥梁接触的一面，或采用固定底座将拾振传感器固定在桥梁上。
- 6.5.3 沿桥梁防撞护栏布设连接导线，应对导线进行防护。
- 6.5.4 宜在桥梁上不影响激励车辆通行的一侧，安装信号采集及振动测试分析仪，该位置与各传感器间的距离不宜相差过大。当使用无线传感器时，采集仪应处于与各传感器通视的位置。
- 6.5.5 通过连接导线，将所有拾振传感器与信号采集及振动测试分析仪连接，并将采集仪连接至笔记本电脑。信号采集仪离各拾振传感器位置较远时，可采用中继器连接采集仪与拾振传感器。
- 6.5.6 接通电源后，先对笔记本电脑进行开机，再打开信号采集及振动测试分析仪。安装完毕后，设置采集仪的各项参数等。
- 6.5.7 采样过程中采样点应足够多，采样频率应满足下式所示条件，即采样频率应大于被分析信号中梁式桥梁最高频率的三倍以上。

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} > 3f_M \quad (3)$$

式中： f_s 为采样频率；

Δt 为采样时间间隔；

f_M 为分析信号的最大频率值。

- 6.5.8 信号采集及振动测试分析仪设置完毕后，对测试通道进行清零处理。
- 6.5.9 正式测试前应进行预采样，宜在测试信号无明显干扰条件下开展测试实验。仪器设备调试正常后，应进行不少于 15min 的稳定观测。
- 6.5.10 测试人员和仪器设备准备就绪后，对桥梁进行激励。
- 6.5.11 每个激励工况测试次数不少于 3 次。当单次实测频率结果超过频率测试均值 5% 时，应剔除该组试验数据，并进行补充试验予以替换。
- 6.5.12 在梁式桥结构自振频率测试时，应记录测试环境温度。

7 数据分析

7.1 一般规定

- 7.1.1 采集桥梁动力响应数据后，可使用信号采集及振动测试分析系统内置的分析软件进行桥梁自振频率分析。
- 7.1.2 在梁式桥自振频率测试时，激励车辆和温度会对桥梁自振频率测试结果产生影响。在测试过程中，应采集激励车辆和环境温度信息，按照本方法 7.2 条和 7.3 条规定剔除车辆和温度作用对桥梁自振频率测试的影响。

7.1.3 对梁式桥梁自振频率测试的影响，车辆和温度耦合作用不显著，可依次剔除车辆和温度对桥梁自振频率测试的影响。

7.1.4 应考虑温度引起材料弹性模量变化对简支梁桥和连续梁桥自振频率测试的影响。应考虑温度引起材料弹性模量变化和结构次内力对刚构桥自振频率测试的影响。

7.1.5 可分别剔除温度导致的梁式桥梁材料弹性模量变化和结构次内力对梁式桥频率测试的影响。

7.2 考虑车辆影响的梁式桥自振频率分析方法

7.2.1 采用跳车激励或跑车激励方法进行梁式桥梁自振频率测试时，应考虑激励车辆对自振频率测试的影响。

7.2.2 分析激励车辆对桥梁自振频率的影响时，应主要考虑轮胎刚度、车辆位置等参数的影响。

7.2.3 测试频率前应对桥梁进行模态分析，得到桥梁结构的模态振型函数。

7.2.4 确定激励车辆后，应先测试得到车辆轮胎刚度数据。

7.2.5 根据车辆轮胎刚度，对 1/4 车-桥耦合系统有载频率和固有频率关系进行分析。

7.2.6 采用激励车辆为两轴加载车辆时，可将激励车辆单个轮胎简化为 1/4 车-桥耦合振动模型，并进行动力分析。

7.2.7 1/4 车辆模型可将车辆、轮胎转换为质量块，并作用于桥梁上的一点，简化结果如图 3（a）所示，图中 m_b 为车辆质量， m_s 为轮胎质量， k_b 为悬架刚度， k_t 为轮胎刚度。

7.2.8 当激励车辆轮胎刚度较大时，应将轮胎与桥面接触的弹簧单元简化为如图 3（b）所示的刚性连接。

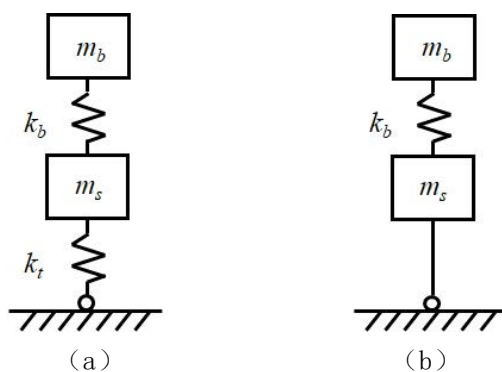


图 3 1/4 车辆简化模型

7.2.9 当激励车辆为三轴车时，应按照附录 B 中的步骤将加载车等效转化为两轴加载车进行分析。

7.2.10 不考虑激励车辆轮胎刚度

不考虑激励车辆轮胎刚度时，采用桥梁频率测试试验得到桥梁的有载频率 $\hat{\omega}_n$ ，则剔除车辆影响后的桥梁第 n 阶固有频率 ω_n 可按照式（4）计算。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{-4B_0B_1\hat{\omega}_n^2 - 4B_0^2\hat{\omega}_n^4}{4B_0s_n m_b \hat{\omega}_n^2 + 4B_0s_n k_b}} \quad (4)$$

式中： $B_0 = -\omega_n^2 s_n m_b - \left[(s_n + \Phi_n^2(x=a_1) m_s) k_b + \omega_n^2 s_n m_b + m_b k_b \Phi_n^2(x=a_1) \right]$;

$$B_1 = - \left[(s_n + \Phi_n^2(x=a_1) m_s) k_b + m_b k_b \Phi_n^2(x=a_1) \right]$$

$s_n = \int_0^l m \Phi_n^2(x) dx$ ， m 为桥梁单位长度质量， l 为桥梁长度；

Φ_n 为桥梁第 n 阶振型；

$x = a_1$ 为车辆激振位置距梁端的距离；

m_b 为车辆总质量；

m_s 为车辆轮胎的质量；

k_b 为车辆悬架刚度。

7.2.11 考虑激励车辆轮胎刚度

a) 激励车辆轮胎刚度对桥梁自振频率测试影响较大时，应考虑汽车轮胎刚度对桥梁自振频率测试的影响。

b) 考虑激振车辆轮胎刚度时，采用桥梁频率测试试验得到桥梁的有载频率 $\hat{\omega}_n$ ，可按照式（5）计算得到剔除车辆影响的桥梁第 n 阶固有频率 ω_n 。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{m_b m_s s_n \hat{\omega}_n^6 - (m_b k_b s_n + m_s k_b s_n + m_b k_t s_n + m_b m_s k_t \Phi_n^2(x=a_1)) \hat{\omega}_n^4}{s_n [m_b m_s \hat{\omega}_n^4 - (m_s k_b + m_b k_b + m_b k_t) \hat{\omega}_n^2] + k_b k_t} + \frac{[k_b k_t (m_b + m_s) \Phi_n^2(x=a_1) + k_b k_t s_n] \hat{\omega}_n^2}{s_n [m_b m_s \hat{\omega}_n^4 - (m_s k_b + m_b k_b + m_s k_t) \hat{\omega}_n^2 + k_b k_t]}} \quad (5)$$

式中： $s_n = \int_0^l m \Phi_n^2(x) dx$ ， m 为桥梁单位长度质量， l 为桥梁长度；

Φ_n 为桥梁第 n 阶振型；

$x = a_1$ 为车辆激振位置距梁端的距离；

m_b 为车辆总质量；

m_s 为车辆轮胎的质量；

k_b 为车辆悬架刚度；

k_t 为车辆轮胎刚度。

7.3 考虑温度影响的梁式桥自振频率分析方法

7.3.1 一般条件下温度影响剔除方法

在剔除温度对桥梁自振频率测试的影响时，可根据桥梁结构的技术资料分别建立基准温度条件和实测环境条件下的有限元模型，分析得到两种温度条件下的桥梁频率值，则剔除温度影响的桥梁自振频率可按式（6）进行计算。其中，有限元模型弹性模量与温度间的关系如式（7）所示。

$$\omega = \omega_T \frac{\omega_0}{\omega_{FEM}} \quad (6)$$

式中： ω 为测试桥梁剔除温度影响后的自振频率值；

ω_T 为桥梁自振频率的实测值；

ω_0 为有限元模型在基准温度条件下的自振频率值；

ω_{FEM} 为有限元模型在实测环境温度条件下的自振频率值；

$$E(x, y, z) = E_{20} \{1 - \theta_E [T(x, y, z) - 20]\} \quad (7)$$

式中： E_{20} 为桥梁混凝土在温度 20℃ 时的弹性模量值；

θ_E 为弹性模量的温变系数，温度不大于 100℃ 时 $\theta_E = -4.5 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ，温度大于 100℃ 时 $\theta_E = -1.4 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ；

$T(x, y, z)$ 为笛卡尔坐标位置处的桥梁温度。

7.3.2 无次内力梁式桥梁温度影响剔除方法

a) 简支梁桥频率测试剔除温度影响方法

简支梁宜按照式 (8) 所示的基准温度和环境温度条件下桥梁频率比关系来计算剔除温度影响后的桥梁自振频率值。

$$\omega = \omega_T \sqrt{\frac{I}{I_T}} \quad (8)$$

式中： ω 为剔除温度影响后的桥梁自振频率；

ω_T 为实际测试得到的桥梁自振频率；

I 为截面惯性矩；

I_T 为温度 T 条件下的截面惯性矩，可按式 (9) 进行计算。

$$I_T = I - \theta_E \cdot \int_A T(x, y, z) y^2 dA \quad (9)$$

式中： θ_E 为弹性模量的温变系数；

T 为测试时桥梁温度值。

b) 连续梁桥频率测试剔除温度影响方法

- 1) 按式 (7) 分析连续梁桥构在测试温度和基准温度作用下的结构弹性模量并构建连续梁桥有限元模型，得到两种温度条件下的桥梁自振频率。
- 2) 计算连续梁桥基准温度和测试温度有限元模型的频率比。
- 3) 连续梁桥实测频率与有限元模型频率比的乘积为剔除温度影响后的连续梁桥频率值。

7.3.3 有次内力梁式桥梁温度影响剔除方法

a) 门式刚构桥频率测试剔除温度影响方法

- 1) 剔除温度作用对刚构桥测试频率的影响，应先分析温度作用产生的主梁次内力 N_{cr} ，按照式 (10) 计算。

$$N_{cr} = \frac{E_0 I_T \pi^2}{L^2} \quad (10)$$

式中： E_0 为基准温度条件下桥梁弹性模量；

π 为圆周率；

L 为刚构桥计算跨径；

I_T 为温度作用下的截面惯性矩，应按式（9）进行计算。

- 2) 温度作用导致单跨刚构桥材料弹性模量变化对测试频率的影响与简支梁桥相同，应按照式（8）计算剔除由温度引起材料弹性模量变化对频率的影响。
- 3) 剔除温度作用导致刚构桥产生次内力对测试频率的影响，应按照式（11）计算。

$$\omega = \omega_T k^*(T) \quad (11)$$

式中： ω 为剔除温度影响后的桥梁自振频率；

ω_T 为实际测试得到的桥梁自振频率；

$k^*(T)$ 为温度作用引起主梁轴向次内力 N_{cr} 对桥梁频率的影响系数，按式（12）进行计算。

$$k^*(T) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{N}{N_{cr}}}} \quad (12)$$

式中： N 为温度作用下刚构桥主梁轴向力；

N_{cr} 为温度作用引起主梁轴向次内力。

- 4) 剔除温度作用导致材料弹性模量变化和结构次内力对刚构桥频率测试影响，应按照式（13）进行计算。

$$\omega = \omega_T k^*(T) \sqrt{\frac{I}{I_T}} \quad (13)$$

式中： ω 为剔除温度影响后的桥梁自振频率；

ω_T 为实际测试得到的桥梁自振频率；

$k^*(T)$ 为温度作用引起主梁轴向次内力的影响系数，按式（12）计算；

I 为基准温度条件下的截面惯性矩；

I_T 为测试温度 T 条件下的截面惯性矩，按式（9）计算。

b) 多跨刚构桥频率测试剔除温度影响方法

- 1) 对于结构复杂的多跨刚构桥，应先分析温度导致材料弹性模量变化对频率测试的影响，分别建立基准温度和测试温度条件下有限元模型，计算得到两种温度条件下的频率值，按式（14）剔除温度导致弹性模量变化对频率测试的影响。

$$\omega = \omega_T C_E \quad (14)$$

式中： ω 为多跨刚构桥剔除温度导致弹性模量变化对测试频率影响后的自振频率值；

ω_T 为多跨刚构桥自振频率的实测值；

C_E 为多跨刚构桥有限元模型在基准温度和测试温度条件下的频率比，按式（15）计算。

$$C_E = \frac{\omega_{E0}}{\omega_{ET}} \quad (15)$$

式中： ω_{E0} 为多跨刚构桥有限元模型在基准温度条件下的自振频率值；

ω_{ET} 为多跨刚构桥有限元模型在测试温度条件下的自振频率值。

- 2) 分别建立多跨刚构桥有结构次内力和无结构次内力的有限元模型，计算得到两种条件下的频率值，按式（16）剔除温度引起结构次内力对频率测试的影响。

$$\omega = \omega_T C_N \quad (16)$$

式中： ω 为多跨刚构桥剔除温度导致弹性模量变化对测试频率影响后的自振频率值；

ω_T 为多跨刚构桥自振频率的实测值；

C_N 为多跨刚构桥有限元模型在无结构次内力和有结构次内力条件下的频率比，按式（17）计算。

$$C_N = \frac{\omega_{N0}}{\omega_{NT}} \quad (17)$$

式中： ω_{N0} 为多跨刚构桥有限元模型在无结构次内力条件下的自振频率值；

ω_{NT} 为多跨刚构桥有限元模型在有结构次内力条件下的自振频率值。

- 3) 剔除温度作用导致材料弹性模量变化和结构次内力对多跨刚构桥频率测试的影响，应按照式（18）进行计算。

$$\omega = \omega_T C_E C_N \quad (18)$$

式中： ω 为剔除温度影响后的桥梁自振频率；

ω_T 为实际测试得到的桥梁自振频率；

C_E 为温度作用引起材料弹性模量变化的影响系数，按式（15）计算；

C_N 为温度作用引起结构次内力的影响系数，按式（17）计算；

8 测试报告

测试报告应包括如下技术内容：

- （1）桥梁工程概况信息、结构形式、检测日期、环境条件。
- （2）检测依据、检测方法、检测仪器设备及检定或校准情况。
- （3）激励方法和测试过程的现场记录。
- （4）桥梁动力响应数据和记录，计算分析图、表。
- （5）剔除车辆、温度影响的桥梁固有频率分析结果。
- （6）测试结果及结论。

附录 A（规范性）

表 A. 1 梁式桥结构自振频率测试记录表

委托编号：第 页 共 页

桥梁名称		委托单位		委托日期	
桥梁建成时间		技术状况等级		试验日期	
桥梁结构形式		跨径组成		桥梁桩号	
激励方法		激励车辆车重		环境温度	
检测依据					
设备名称/型号					
序号	测试工况		频率实测结果		

表 A.2 梁式桥结构自振频率剔除车辆和温度影响计算表

第 页 共 页

桥梁名称		委托单位		委托日期	
桥梁建成时间		技术状况等级		试验日期	
桥梁结构形式		跨径组成		桥梁桩号	
激励方法		激励车辆车重		环境温度	
检测依据					
设备名称/型号					
序号	频率实测结果	车辆影响修正	温度影响修正	固有频率结果	

附录 B（规范性）

当激励车辆为三轴加载车时，应将激励车辆等效转化为两轴车。三轴车简化图如图 B.1 所示，三轴加载车具体参数如表 B.1 所示。等效转化后的两轴车简化图如图 B.2 所示，与原三轴车参数关系如表 B.2 所示。

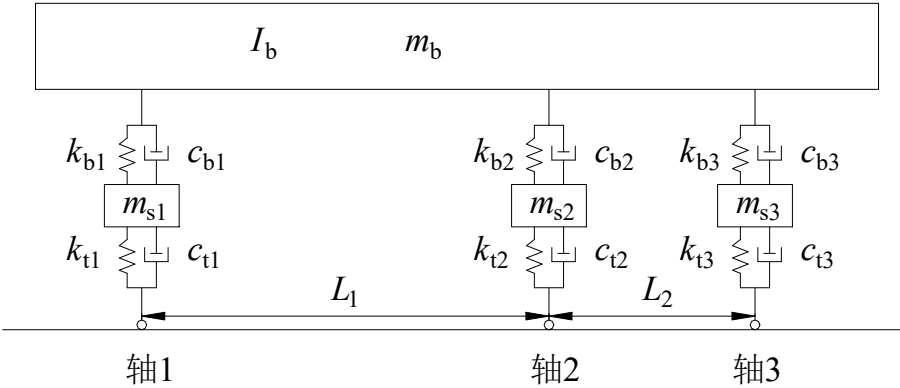


图 B.1 三轴加载车简化图

表 B.1 三轴车主要参数表

车辆参数	车轴编号		
	1	2	3
轮胎质量	m_{s1}	m_{s2}	m_{s3}
轮胎刚度	k_{t1}	k_{t2}	k_{t3}
轮胎阻尼系数	c_{t1}	c_{t2}	c_{t3}
悬架刚度	k_{b1}	k_{b2}	k_{b3}
悬架阻尼系数	c_{b1}	c_{b2}	c_{b3}
轴距	轴 1 至轴 2 的轴距 L_1		轴 2 至轴 3 的轴距 L_2
车体质量	m_b		
车体俯仰转动惯量	I_b		

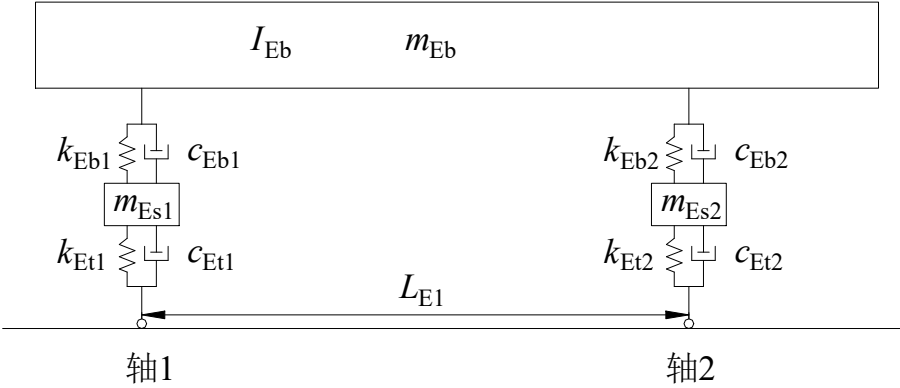


图 B.2 三轴加载车等效转化两轴车简化图

表 B.2 等效两轴车主要参数表

车辆参数	车轴编号	
	1	2
轮胎质量	$m_{Es1} = m_{s1}$	$m_{Es2} = m_{s2} + m_{s3}$
轮胎刚度	$k_{Et1} = k_{t1}$	$k_{Et2} = k_{t2} + k_{t3}$
轮胎阻尼系数	$c_{Et1} = c_{t1}$	$c_{Et2} = c_{t2} + c_{t3}$
悬架刚度	$k_{Eb1} = k_{b1}$	$k_{Eb2} = k_{b2} + k_{b3}$
悬架阻尼系数	$c_{Eb1} = c_{b1}$	$c_{Eb2} = c_{b2} + c_{b3}$
轴距	轴 1 至轴 2 的轴距 $L_{E1} = L_1 + \frac{L_2}{2}$	
车体质量	$m_{Eb} = m_b$	
车体俯仰转动惯量	$I_{Eb} = I_b$	

附录 C（资料性）

跳车激励案例分析

以一座 T 形简支梁桥为例，该桥梁长 20.5m，计算跨径为 20m。主梁高 1.3m，翼缘板宽 1.5m，腹板厚 0.18m，由五片 T 形梁组成。T 形梁横截面如图 C.1 所示。

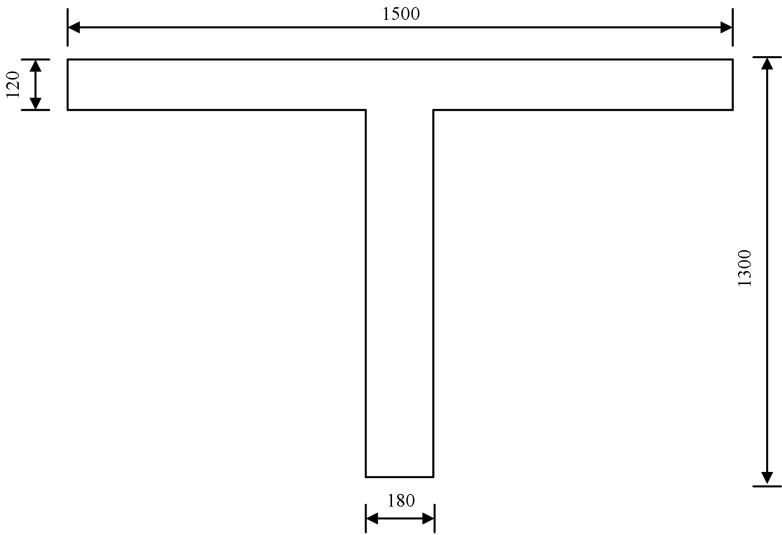


图 C.1 T 形梁横截面尺寸图（单位：mm）

跳车激励加载车辆为两轴车，激励车辆具体参数如表 C.1 所示。

表 C.1 三轴车主要参数表

车辆参数	取值
轮胎质量 m_{s1} 、 m_{s2}	4330kg
车体质量 m_b	3.85×10^4 kg
车体俯仰转动惯量 I_b	2.446×10^5 kg·m ²
轮胎刚度 k_{t1} 、 k_{t2}	4.28×10^5 N/m
轮胎阻尼系数 c_{t1} 、 c_{t2}	0.98×10^4 kg/s
悬架刚度 k_{b1} 、 k_{b2}	2.535×10^5 N/m
悬架阻尼系数 c_{b1} 、 c_{b2}	1.96×10^4 kg/s

计算得到 T 形梁跨中截面位移时程响应曲线如图 C.2 所示。

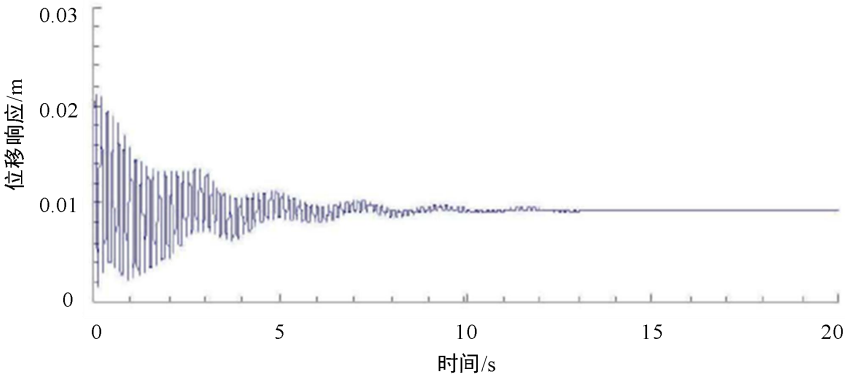


图 C.2 T 形梁跨中截面位移时程响应

根据 6.2.1 条的规定，分别架设跳车高度为 0cm、5cm、10cm、15cm、20cm，并计算各跳车高度作用下 T 形梁跨中截面弯矩。桥梁开裂弯矩计算结果为 $1430\text{kN}\cdot\text{m}$ ，经过迭代计算，当跳车高度为 10cm 时，T 形梁跨中截面弯矩达到了开裂弯矩值。该 T 形简支梁桥为 I 类桥，所以最大跳车高度为 10cm，如图 C.3 所示。

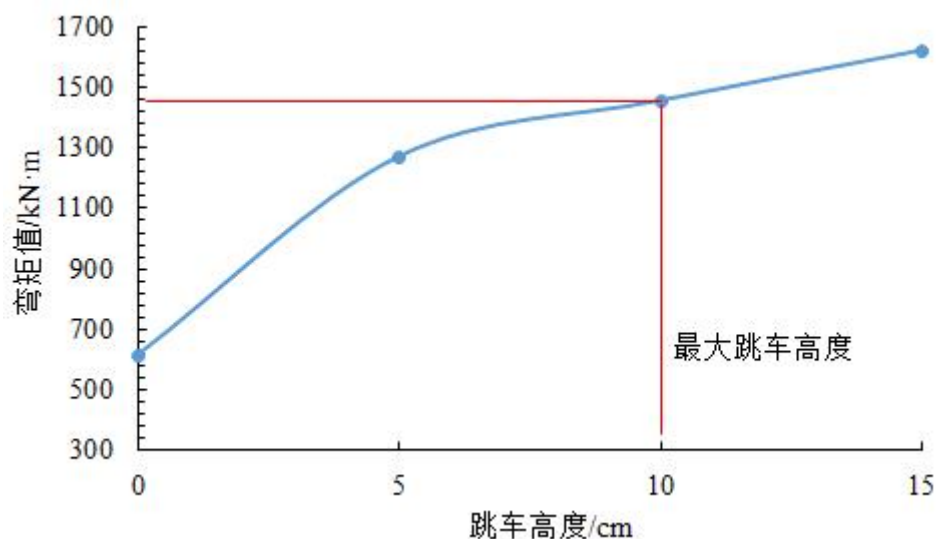


图 C.3 T 形梁跨中截面弯矩与跳车高度关系曲线

附录 D（资料性）

案例分析

D.1 工程概况

以一座简支梁桥为例，计算跨径为 20m，横截面为单箱单室结构。桥梁结构尺寸如图 D.1 和图 D.2 所示。

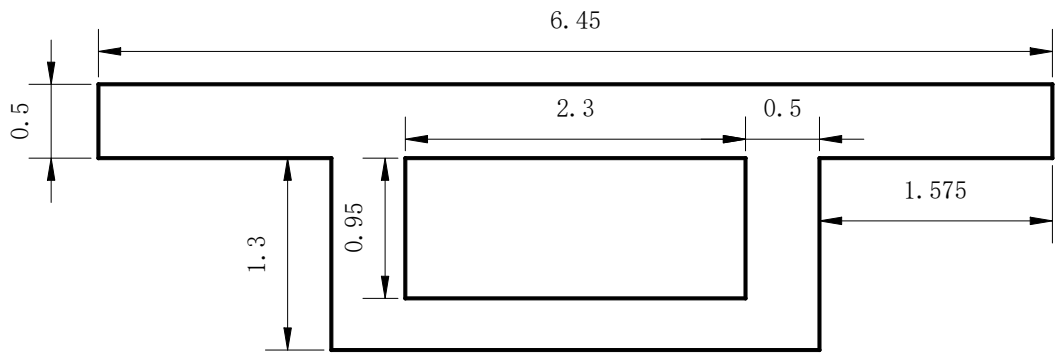


图 D.1 简支梁桥横截面尺寸图（单位：m）

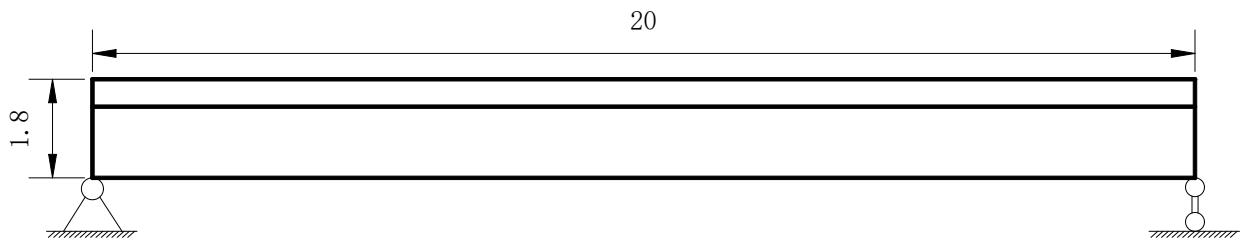


图 D.2 简支梁桥纵向尺寸图（单位：m）

D.2 频率测试

该简支梁桥自振频率测试采用跳车激励，通过 DH5922 数据采集系统采集加速度信号，采样频率为 512Hz。在桥上布置三个加速度传感器，布设位置为 1/4 跨和 3/4 跨。基于 DHDAS 数据分析软件进行采集分析，共进行三次测试。跳车激励现场如图 D.3 所示，激励车辆为两轴加载车，具体参数如表 D.1 所示。



图 D.3 跳车激励

表 D.1 跳车激励车辆参数取值

车辆参数	取值	车辆参数	取值
前轴悬架刚度 k_{t1}	$1.2 \times 10^4 \text{N/m}$	后轴轮胎刚度 k_{t2}	$4.8 \times 10^4 \text{N/m}$
前轴悬架阻尼系数 c_{t1}	$5 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{s/m}$	后轴悬架阻尼系数 c_{t2}	$2 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{s/m}$
前轴轮胎质量 m_{t1}	$3.595 \times 10^2 \text{kg}$	后轴轮胎质量 m_{t2}	$1.138 \times 10^3 \text{kg}$
前轴轮胎刚度 k_{a1}	$2.4 \times 10^6 \text{N/m}$	后轴轮胎刚度 k_{a2}	$8.8 \times 10^6 \text{N/m}$
前轴轮胎阻尼系数 c_{a1}	$6 \times 10^3 \text{N} \cdot \text{s/m}$	后轴轮胎阻尼系数 c_{a2}	$2.4 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{s/m}$
车体质量 m_b	$3.45 \times 10^4 \text{kg}$	车体俯仰转动惯量 I_b	$2.4 \times 10^4 \text{kg} \cdot \text{m}^2$
前、后轴距 L	4.3m		

D.3 数据分析

简支梁桥频率测试采集的加速度响应曲线如图 D.4 所示，

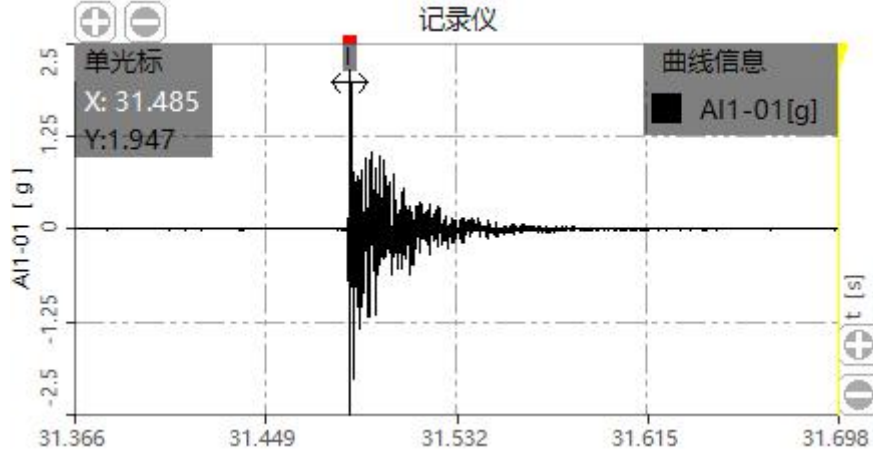


图 D.4 简支梁桥频率测试加速度响应曲线

通过快速傅里叶变换对采集到的加速度数据进行处理，得到桥梁频率。测试环境温度为 19℃，以 0℃ 为基准温度，采用本方法中考虑温度影响的分析方法对实测频率进行分析，得到表 D.1 所示的剔除车辆和温度影响的简支梁桥前两阶自振频率值。

表 D.2 简支梁桥自振频率测试和分析结果

序号	实测频率 (Hz)		剔除车辆影响后 频率值 (Hz)		剔除温度影响后 频率值 (Hz)		剔除车辆和温度影响 后频率值 (Hz)	
	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶
1	4.29	20.45	5.11	20.43	4.42	21.42	5.35	21.42
2	4.38	20.66	5.22	20.64	4.51	21.64	5.46	21.64
3	4.31	20.73	5.13	20.71	4.44	21.71	5.37	21.71