

# 人行桥舒适度分析理论计算与试验分析

许超

同纳检测认证集团有限公司 上海 200331

**【摘要】**：以昆山市玉龙桥钢结构系杆拱人行天桥为研究对象，采用 Midas civil 建立有限元模型开展自振特性与人致振动舒适度理论计算，结合现场动力测试获取桥梁自振频率、人致振动加速度及非机动车通行振动响应，将理论结果与实测数据进行对比分析。研究可为同类型人行桥的舒适度设计与评定提供参考。

**【关键词】**：人行桥；舒适度；人致振动；自振特性；理论计算；现场试验

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.012

## 1 引言

随着城市人行桥向大跨度、轻柔化方向发展，人致振动引发的舒适度问题日益突出。人行桥在行人行走、跳跃等动力荷载作用下易产生显著振动，不仅影响通行体验，还可能引发行人恐慌。目前，国内外针对人行桥舒适度已形成较为完善的评价体系，国内以《城市桥梁检测与评定技术规范》《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》为核心依据，欧洲采用 EN03-2007 指南进行评定。

现有研究多集中于理论建模与数值分析，现场实测与理论对比的系统性研究相对不足。本文以玉龙桥人行天桥为工程背景，开展全流程舒适度分析，通过有限元理论计算与现场动力试验对比，明确桥梁振动特性与舒适度水平，为桥梁运营管理与加固优化提供依据。

## 2 概况

玉龙桥位于江苏省苏州市昆山市环城滨江绿道（二期），为南北向跨越越河的钢结构系杆拱人行天桥。桥梁全长 98.9m，主桥单跨跨径 65m，桥面宽度由南侧 8m 渐变至北侧 14m，整体为变宽钢系杆拱结构形式。

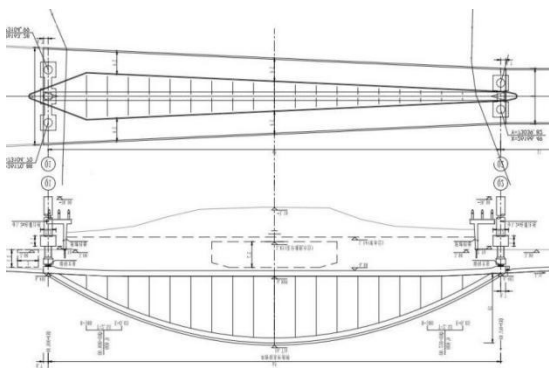


图 2-1 总体布置图

## 3 检测依据与评价标准

### 3.1 检测依据

本次理论计算与试验分析遵循以下规范与资料：

1. 《城市桥梁检测与评定技术规范》（CJJ/T 233-2015）

2. 《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》（JGJ/T 441-2019）
3. 《人行玻璃栈道及悬索桥技术规程》（DB13（J）/T 264-2018）
4. 《建筑振动荷载标准》（GB/T 51228-2017）
5. 《Design of Footbridge Guideline》（EN03-2007）
6. 玉龙桥设计图纸、竣工资料等

### 3.2 舒适度评价标准

自振频率限值：竖向最低自振频率 $\geq 3\text{Hz}$ ，横向最低自振频率 $\geq 1.2\text{Hz}$ ；

振动加速度限值：国内标准 $\leq 500\text{mm/s}^2$ ，欧洲 EN03-2007 限值为  $1000\sim 2500\text{mm/s}^2$ 。

## 4 桥梁舒适度理论计算

### 4.1 有限元模型建立

基于桥梁设计图纸，采用 Midas civil 软件建立空间有限元模型。其中，吊杆采用桁架单元模拟，拱肋与主梁采用梁单元模拟，二期恒荷载以质量形式施加于模型。全桥模型共计 360 个单元，边界条件与实际结构一致，保证计算精度。

### 4.2 自振特性计算

通过模态分析得到桥梁自振特性，核心结果如下：

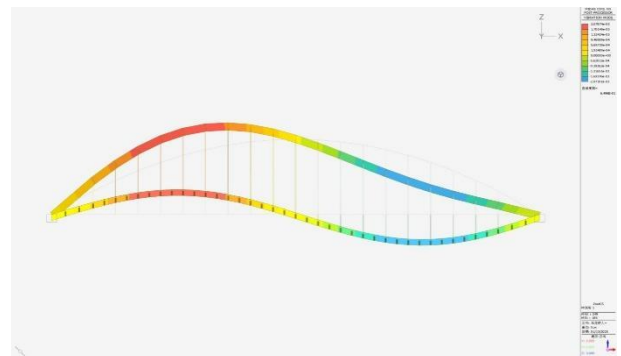


图 4-1 竖向 1 阶振型图（1.539Hz）

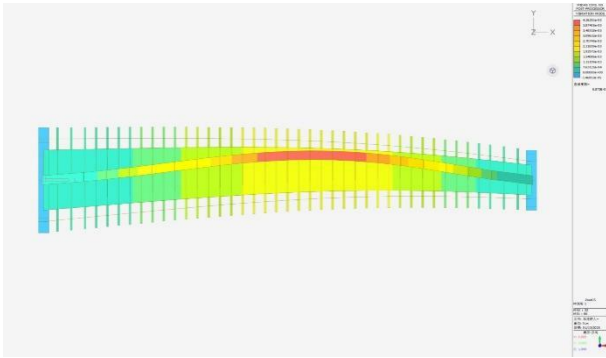


图 4-2 横向 1 阶振型图 (1.703Hz)

竖向基频低于规范限值 3Hz，不满足舒适度频率要求；横向基频高于 1.2Hz，满足要求。

### 4.3 人致振动舒适度计算

依据《建筑振动荷载标准》计算人行振动荷载，公式为：

$$F_v(t) = F_b \cos(2\pi ft) \gamma^\Psi$$

式中：单个行人振动荷载  $F_b = 280N$ ；人群密度取 1.5 人/m<sup>2</sup>，等效人群密度  $\gamma = 0.11/m^2$ ；荷载折减系数  $\Psi$  按频率取值。

对竖向 1~3 阶振型进行时程分析，得到加速度峰值：1 阶加速度：1844mm/s<sup>2</sup>；2 阶加速度：828mm/s<sup>2</sup>；3 阶加速度：810mm/s<sup>2</sup>

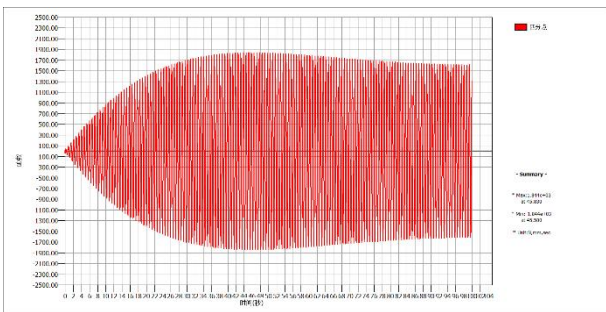


图 4-3 1 阶加速度时程分析计算图 (1.53Hz)

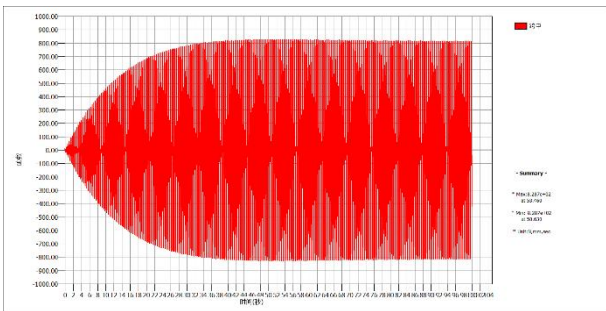


图 4-4 2 阶加速度时程分析计算图 (2.65Hz)

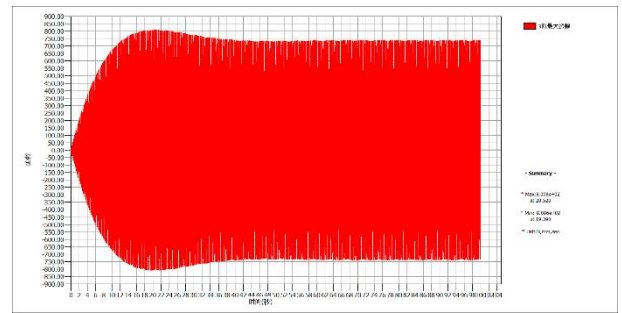


图 4-5 3 阶加速度时程分析计算图 (3.99Hz)

理论计算加速度均超过国内《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019)规定的 500mm/s<sup>2</sup> 限值，满足欧洲规范要求。

## 5 现场舒适度试验

### 5.1 试验内容与仪器

试验项目包括自振特性测试、人致振动加速度测试、非机动车通行振动测试，主要仪器为动态信号分析系统、891-II 与 941B 型振动传感器、钢卷尺等。

### 5.2 自振特性测试

采用环境激励法测试桥梁自振特性，传感器按竖向 8 分点、横向 4 分点布置，以固定参考点结合移动测点法采集数据。

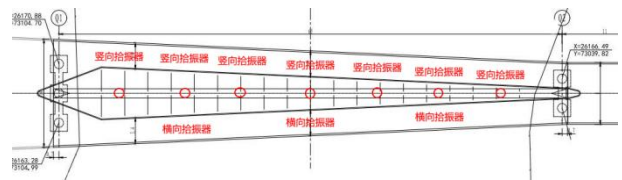


图 5-1 振动传感器布置图

实测自振特性结果：

表 5.1 玉龙桥人行天桥上部结构振动测试结果汇总表

桥名	振型方向	振型阶数	频率实测值 (Hz)	阻尼 (%)
玉龙桥	竖向	1 阶	1.878	1.053
		2 阶	3.176	0.813
		3 阶	4.497	1.446
	横向	1 阶	1.782	0.595

实测竖向基频 1.878Hz < 3Hz，不满足规范；横向基频 1.782Hz > 1.2Hz，满足规范。

### 5.3 人致振动加速度测试

行人步频取实测竖向基频 1.875Hz，测试工况分为单人跳跃、单人行走、多人跳跃、多人行走，测点布置于 L/4 与 3L/4 位置。

表 5.2 人致振动加速度值测试结果 (mm/s<sup>2</sup>)

测试工况	测试位置	步行频率 (Hz)	测试结果	
			单人最大加速度 (mm/s <sup>2</sup> )	多人最大加速度 (mm/s <sup>2</sup> )
玉龙桥单人/多人跳跃	L/4	1.875	260.51	262.57
	3L/4	1.875	202.55	309.64
玉龙桥单人/多人连续行走	连续行走	1.875	232.04	1908.35

			竖向	竖向
玉龙桥单人/多人跳跃	L/4	1.875	260.51	262.57
	3L/4	1.875	202.55	309.64
玉龙桥单人/多人连续行走	连续行走	1.875	232.04	1908.35

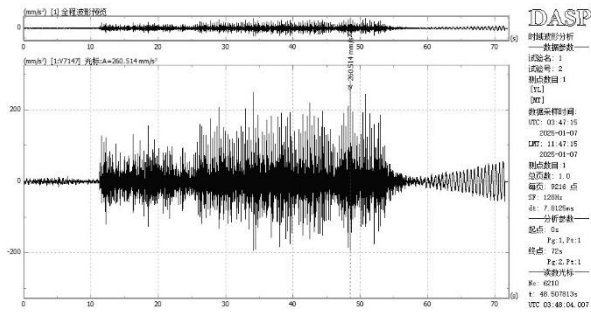


图 5-8 单人跳跃工况竖向加速度时程曲线 (L/4 测点)

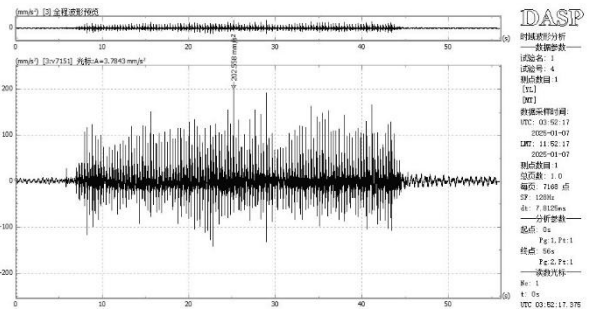


图 5-9 单人跳跃工况竖向加速度时程曲线 (3L/4 测点)

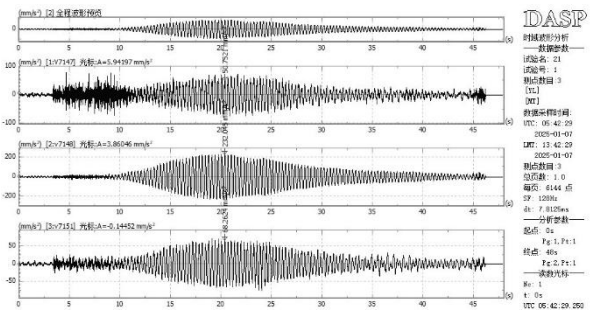


图 5-10 单人行走工况竖向加速度时程曲线

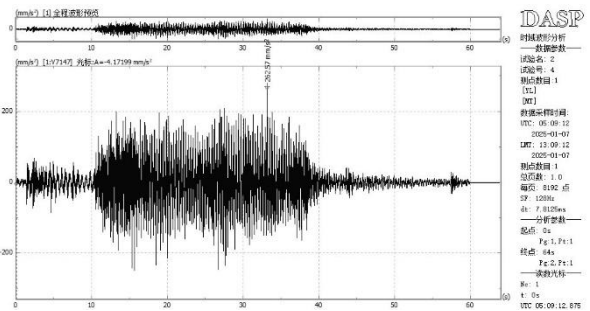


图 5-11 多人跳跃工况竖向加速度时程曲线 (L/4 测点)

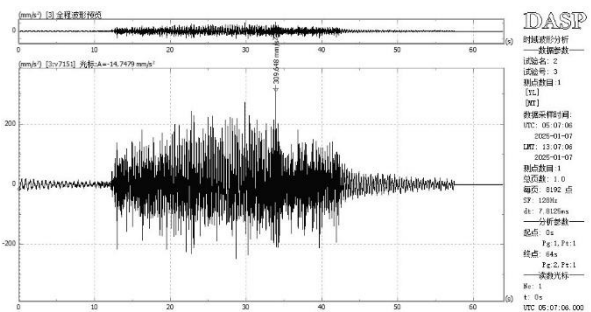


图 5-12 多人跳跃工况竖向加速度时程曲线 (3L/4 测点)

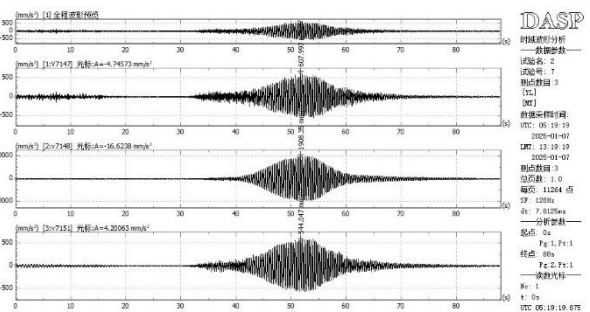


图 5-13 多人行走工况竖向加速度时程曲线

上表列出了测试工况中单人、多人行进顺序,表 5.3 为单人、多人 (15 人) 行人步行频率为 1.875Hz 时各测点的加速度峰值,从表中可看出,单人竖向加速度范围为 202.55mm/s<sup>2</sup>至 265.51mm/s<sup>2</sup>,满足《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019)规定的 500mm/s<sup>2</sup>要求;多人竖向加速度范围为 262.57mm/s<sup>2</sup>至 1908.35mm/s<sup>2</sup>,不满足《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441-2019)规定的 500mm/s<sup>2</sup>要求。

#### 5.4 非机动车通行测试

8 辆电瓶车连续通行测试,最大竖向加速度 65.63mm/s<sup>2</sup>,远小于行人激励响应,对舒适度影响极小。

## 6 理论与试验结果对比分析

### 6.1 自振特性对比

竖向基频:理论 1.539Hz,实测 1.878Hz,实测值高于理论值;横向基频:理论 1.703Hz,实测 1.782Hz,实测值略高。

表明桥梁实际刚度优于理论模型,结构施工质量良好。

### 6.2 振动加速度对比

理论最大加速度 1844mm/s<sup>2</sup>,与多人行走实测值 1908.35mm/s<sup>2</sup>接近;单人激励下实测加速度远小于理论计算值,理论计算偏保守。

### 6.3 舒适度综合评定

1.频率:竖向不达标,横向达标;

2.加速度：单人通行舒适，多人密集通行舒适度不足；

## 7 玉龙桥舒适度分析结论

1.玉龙桥实测自振频率高于理论计算值，结构实际刚度优于设计模型；

2.竖向基频不满足规范 $\geq 3\text{Hz}$ 要求，横向基频满足要求，竖向刚度不足是舒适度短板；

3.理论计算加速度均超标，单人实测加速度达标，多人连续行走加速度超标，密集人群通行是舒适度控制工况；

4.该桥满足欧洲舒适度规范要求，按国内严格标准需进行减振优化。

## 8 人行天桥舒适度设计共性问题与试验优化建议

### 8.1 人行天桥舒适度设计普遍存在的问题

当前城市人行天桥结构形式日趋多样，景观化、大跨度、轻柔化已成为主流设计趋势。在工程实践中，设计方普遍优先关注结构形式创新与景观效果，强调桥梁与城市空间、滨水环境、道路风貌的融合度，而对结构动力特性、人致振动舒适度的验算与控制相对疏忽。

一方面，大跨度钢结构人行桥自身刚度较小，竖向自振频率易落入行人步行敏感频率区间（1.5~3.0Hz），在密集人群通行时易引发明显振动；另一方面，设计阶段多依赖数值模拟，缺少实测反馈，导致部分桥梁虽满足强度与稳定性要求，却在运营阶段出现振动偏大、行人不适感强烈等问题。本次玉龙桥实测竖向基频仅 1.878Hz，未达到 3Hz 规范限值，正是此类问题的典型体现。

### 8.2 多人行进效应试验控制与最大响应获取建议

多人连续行走是激发人行桥最大振动加速度的控制性工况，为在现场试验中理想控制多人行进效应、稳定获取结构真实最大响应加速度，保证试验结果可靠、可比、可重复，提出以下试验控制建议：

激励频率精准锁定

以桥梁实测竖向基频作为统一行进步频，使用节拍器同步节奏，使多人行走频率与结构自振频率接近，最大限度激发共

振效应，避免因步频散乱导致激励能量分散、响应偏小。

#### 1.人群位置与振型匹配

结合结构竖向 1 阶振型，将测试人员集中布置于 L/4、L/2、3L/4 等振型位移峰值区域，使人群荷载作用位置与结构最大振动位置一致，提高激励效率，确保测得真实峰值加速度。

#### 2.行进动作高度统一

多人保持相同步幅、同步启停、匀速直线往返行走，禁止中途变速、停顿或分散，延长稳态激励时长，保证数据采集系统捕获完整、稳定的加速度时程曲线。

#### 3.人数与密度分级控制

按模型理论设置测试人数，在试验过程中人员梯度分配，可设置 5 人、10 人、15 人等配置，最终达到最大相应所需要的人群效应，明确人数—加速度响应关系，确定产生最大响应的合理人数，避免人数过少激励不足或过多超出实际运营场景。

#### 4.环境干扰严格排除

选择无风、无设备振动、无无关行人干扰的时段开展试验，以多人行走为唯一激励源，提升测试数据的纯净度与可信度。

### 8.3 舒适度设计优化方向

#### 1.设计阶段强化动力验算

除了桥梁自身承载能力极限及正常使用工况外，将竖向自振频率、人致振动加速度纳入核心控制指标，优先保证竖向基频 $\geq 3\text{Hz}$ ，从源头避开行人敏感频率区。

#### 2.景观效果与结构刚度兼顾

在满足建筑美学与城市景观要求的前提下，合理优化截面、增设加劲构件或采用 TMD 等减振措施，平衡美观与使用舒适度，对于竖向频率较小的桥梁增加管理措施。

#### 3.理论计算与现场实测结合

在结构模型上应尽力贴合桥梁实际运营状况，考虑结构刚度修正及附加荷载的准确性，桥梁竣工后开展动力实测，用实测数据修正有限元模型，形成“设计—计算—实测—优化”闭环，提升后续同类桥梁舒适度设计水平。

## 参考文献：

- [1] CJJ/T 233-2015,城市桥梁检测与评定技术规范[S].
- [2] JGJ/T 441-2019,建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].
- [3] GB/T 51228-2017,建筑振动荷载标准[S].
- [4] EN03-2007,Design of Footbridge Guideline[S].
- [5] 王磊,等.大跨度人行桥人致振动舒适度分析[J].土木工程学报,2020.