

某大悬挑观景平台舒适度分析与减振控振设计

梅世强*, 刘毅, 王焜, 罗杰, 李碧远

(云南建投钢结构股份有限公司, 昆明 650501)

摘要: 针对室外观景平台在人行致振下的舒适度问题,通过系统梳理国内外类似工程的舒适度评价方法与标准,给出了以自振频率及加速度响应为评价指标的参考数值和分析方法,归纳出观景平台舒适度分析与评价的6个基本步骤;对某大悬挑钢结构观景平台工程,首先通过自振频率分析初步评估,发现其竖向振动频率未满足舒适度要求,进一步采用竖向加速度响应进行评估,设计了观景平台的三种交通级别和对应的舒适度等级,确定了各交通等级对应的人致加载模式,采用加速度响应作为控制指标进行舒适度评价,对不满足舒适度要求的情况制定了设置反向拉索、增大结构刚度与设置TMD三种减振控振方案。三种方案均有效控制了该观景平台的竖向加速度响应,其中设置反向拉索的减振控振方案效率最高,减振效率达78%;增大结构刚度的方案其减振效率为54%,但成本较高;设置TMD的减振控振方案不仅减振效率高,且在材料、施工等成本方面与工程预算协调度更好,采用1t质量块就能达到79%的减振效率。

关键词: 室外观景平台; 舒适度评价标准; 人行致振; 交通级别; 舒适度等级; 减振控振

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0110-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240415001

Comfort Analysis and Vibration Control Design of a Large Cantilevered Viewing Platform

MEI Shiqiang*, LIU Yi, WANG Kun, LUO Jie, LI Biyuan

(YCIH Steel Structure Co., Ltd., Kunming 650501, China)

*Corresponding author: 283173562@qq.com

Abstract: Aiming at the comfort problem of outdoor viewing platform under pedestrian vibration, this paper reviews the comfort level evaluation methods and standards of similar projects at home and abroad, presents the reference value and analysis method of natural vibration frequency and acceleration response as the evaluation index of viewing platform, and summarizes six basic steps of viewing platform comfort level analysis and evaluation. In the engineering practice of a large cantilevered steel structure viewing platform, the natural vibration frequency was first used to evaluate the vertical vibration frequency of the platform, revealing that the platform did not meet the comfort requirements. The vertical acceleration response was further used to evaluate, three traffic levels and corresponding comfort levels of the viewing platform were designed, and the corresponding human-induced loading modes for each traffic level were formulated. Acceleration response was used as the control index to evaluate the comfort level. For cases that did not meet the comfort level requirements, three vibration reduction and control schemes, namely reverse cable, increasing structural stiffness and tuned mass dampers (TMD), were developed. The three schemes all effectively controlled the vertical acceleration response of the viewing platform, among which the reverse cable had the highest efficiency and the vibration reduction efficiency reached 78%. The vibration reduction efficiency of the method of increasing structural stiffness was 54%, but the cost was high. The vibration reduction efficiency of TMD was well coordinated

收稿日期: 2024-04-15

作者简介:

梅世强(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事建筑钢结构方面的研究。E-mail:283173562@qq.com。(通信作者)

刘毅(1987—),女,硕士,高级工程师,主要从事建筑钢结构方面的研究。

with the cost, and the vibration reduction efficiency of a 1.0 tons mass block can reach 79%.

Keywords: outdoor viewing platform; comfort evaluation standard; human-induced vibration; traffic level; comfort level; vibration reduction and control

随着社会经济的快速发展,满足人民对美好生活的向往,已成为当今社会的主要核心导向。一些造型新颖、空间使用功能多元化的异形结构逐渐应用于工程实践中,这些建筑多为具有长悬臂、大悬挑、大跨度、不规则平立面等特征的钢结构建筑。钢结构相对混凝土结构,具有强度高、自重轻的特点,舒适度问题是此类型建筑敏感且突出的问题。在工程实践中,房屋建筑工程多以建筑楼盖为对象,应重点控制其舒适度^[1-2];市政桥梁工程多以人行天桥(连廊)为对象,需重点对结构的舒适度进行控制^[3-4]。可见,不同工程类型的控制指标存在差异;进一步而言,实际工程中,若同一类工程本质一致(主要供人使用,且无机械、车辆荷载工况),仅因设计资质、设计单位不同,往往会采用不同的设计参照标准,最终设计结果也存在差异。此外,我国现行规范针对观景平台类建筑物的舒适度问题也有不够完善的地方,现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)^[3]没有对加速度的限定进行规定;《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]仅针对不同使用功能的结构进行峰值加速度限制;《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》(CJJ 69—201X)^[5]仅针对舒适度等级进行加速度的分级控制,没有根据实际使用情境设定行人交通级别。本文以某景区大悬挑观景平台项目为依托,针对现行不同行业规范中的舒适度性能控制指标开展对比分析,可为相关工程的舒适度设计提供参考。

1 舒适度评价方法和标准

本工程为景区内的室外观景平台,目前国内尚无针对该类平台的专属舒适度控制标准,可参照设计的标准有:《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]中的连廊和室内天桥设计、《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)^[3]。标准[3]发布时间较长,且仅规定了结构竖向自振频率不应小于3 Hz,明显无法满足当前的工程设计需求,目前国内外解决该问题的通用做法是避开人行敏感频率和控制结构加速度响应^[4]。

1.1 舒适度评价方法

国际标准 ISO10137: 2007^[6]将人体受振动的影响划分成5个等级:低于人的感觉阈值;基本阈值影响;感受到侵犯、不安、恐惧;行动受到影响;可能受伤或者有健康风险。德国标准 EN03-08^[7]则进一步关联加速度范

围,将舒适度等级明确划分为四级。国内学者娄宇等^[2]基于国外研究成果,通过峰值加速度对人体振动舒适度进行量化划分:峰值加速度低于 $12.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 时,人体无感觉;位于 $12.5\sim 90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间时,人体可感知到振动;位于 $90\sim 150 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间时,人体可明显感知振动;位于 $150\sim 800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 之间时,人体感觉不舒服;超过 $800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 时,人体难以忍受。综合来看,加速度已成为国内外学者普遍认可的舒适度评价核心量化指标。

此外,人体对振动级别的接受度并非固定,受个体差异、人群活跃度、周围环境及振动感受预期的影响较大。为此,ISO10137:2007^[6]提出:人行通道设计需在其使用寿命内明确设计环境,该环境需基于通道上允许出现的人群交通量级,并推荐以下四种场景级别:(1)单人通过通道,其余人员站立于跨中;(2)日常大概率出现的平均人流为8~15人,具体取决于通道的长度与宽度;(3)人流规模明显超过15人;(4)偶尔举办大型节日活动或舞蹈类比赛等特殊场景。

1.2 自振频率评价标准

关于自振频率的评价标准,文献[4-7]总结了国外关于结构自振频率的限值规定,如表1所示,仅Eurocode 5和EN03-08对天桥横向自振频率进行了限制。我国现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)^[3]和《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]均要求结构自振频率不宜小于3 Hz,文献[1]规定室内人行天桥和连廊的横向自振频率限值为1.2 Hz。《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》(CJJ 69—201X)^[5]规定竖向频率应大于3 Hz,横向自振频率大于1.2 Hz时可不进行人致振动舒适度验算。

表1 自振频率控制标准^[4,7]

Table 1 Natural vibration frequency control standards^[4,7]

标准	竖向频率 限值/Hz	横向频率 限值/Hz
CEB(1993)	1.6~2.4、3.5~4.5	—
SIA 160(1989)		—
BS 5400(1978)	5	—
OHBC(1991)		—
Eurocode 5	3.5	2.5
Bro 2004		—
EN03-08	1.25~4.6	0.5~1.2

当前,随着大跨度、长悬臂钢结构工程的日益增多,仅通过控制结构自振频率已愈发难以满足舒适度需求,因此行业逐步转向控制结构振动响应,此举可避免因严格限制自振频率而被迫加大结构刚度,进而减少材料浪费。从最新研究成果^[8-9]可知,其多以标准EN03-08^[7]的设计控制方法为参考,具体流程分为六步:第一步,估算结构自振频率;第二步,检查自振频率是否满足舒适度限值要求;第三步,评估建筑物设计使用环境,涵盖人群交通量等级与舒适度等级;第四步,估算结构阻尼比参数,并确定动力荷载加载模式;第五步,计算各设计环境对应的加速度响应限值;第六步,检查计算得到的最大加速度响应是否满足限值要求。

1.3 加速度评价标准

针对结构加速度响应的舒适度评价,国际标准ISO 2631-1:1997^[10]与ISO 10137:2007^[6]均采用加权均方根加速度和振动计量值 V_{DV} 作为核心评价指标:当峰值加速度与均方根加速度 a_{rms} 比值超过6或9时,表明均方根加速度 a_{rms} 不适用,进而采用运行均方根或基于四次方根的振动剂量值 V_{DV} 以判别结构是否满足舒适度要求;标准ISO2631-1:1997^[10]中给出了均方根加速度 a_{rms} 的等效算法 a_w 、运行均方根 $a_w(t_0)$ 及振动计量值 V_{DV} 的计算方法,如式(1)~(3)所示:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$a_w(t_0) = \left\{ \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$V_{DV} = \left\{ \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right] \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中: $a_w(t)$ 为瞬时频率加权加速度; t 为时刻; τ 为运行平均积分时长; T 加速度积分时长; a_{rms} 按加权均方根加速度 a_w 等效计算。标准ISO2631-1:1997^[10]中认为实测时段 T 内的峰值加速度 a_{MTVV} 、 V_{DV} 值与均方根加速度 a_{rms} 之比超过关系式(4)~(6)时,需要采用附加评价方法来评估健康或舒适度。

$$\frac{a_{MTVV}}{a_w} = 1.5 \quad (4)$$

$$\frac{V_{DV}}{a_w T^{1/4}} = 1.75 \quad (5)$$

$$a_{MTVV} = \max [a_w(t_0)] \quad (6)$$

德国人行天桥设计指南EN03-08^[7]推荐,当采用单自由度体系法(SDOF)、有限单元法与反应谱法时,应采用峰值加速度作为舒适度的评价指标。

英国标准BS 6472-1:2008^[11]则仅推荐振动计量值

V_{DV} ,并明确认定该参数是评估振动的最佳参数,且该标准中振动剂量值 V_{DV} 的计算方法与上述基本相同。

《机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分:一般要求》(GB/T 13441.1—2007)^[12]认为:根据实践经验,采用均方根法评价舒适度低估了峰值加速度对建筑的影响。

我国《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[13]规定:以计权加速度评判建筑物内人体舒适度及疲劳-工效降低问题,以振动计量值 V_{DV} 评判车辆振动对建筑物内人体舒适性的影响;并指出,相较于相对均方根加速度, V_{DV} 对峰值加速度更敏感,且能考虑振动暴露时间的影响。

《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]规定:针对以有节奏运动为主的楼盖,采用有效最大加速度评价舒适度;对于其他建筑楼盖、室内天桥及连廊,均采用最大加速度评价舒适度;当采用反应谱法计算加速度并作为评价标准时,以10s加速度均方根为依据。

相较于建筑室内楼板、连廊等,室外建筑受人群流动变化的影响通常更大;相较于基于4次均方根计权加速度的 V_{DV} ,最大加速度响应更能直接反映振动强度,更利于保障结构使用舒适性。结合相关文献[1-3,5,7-9,11,14-15],峰值加速度不仅易于现场测量,还是振动工程领域应用最广泛的舒适度评价参数。

1.4 人-结构相互作用影响

文献[15]针对行人行走方式、行走速度对人行桥结构振动响应的影响开展研究,结果表明:(1)行人以跳跃、跑步等方式行走时,结构加速度响应略大于正常行走工况的结构加速度;(2)当行人行走频率接近结构自振频率时,易引发共振,此时结构出现最大加速度响应;(3)对影响人行桥振动的参数(质量、刚度、阻尼、跨度、步频、步速)进行敏感性分析发现,结构刚度与阻尼的敏感性显著高于其他参数的敏感性。

文献[16]通过人群荷载下的看台结构振动响应试验研究表明:人群不同活动姿态对结构振动响应的影响存在差异,站姿对结构前三阶自振频率的影响表现为:第一阶减小约14%,第二阶增加6%,第三阶增加16.3%;坐姿则使前三阶自振频率分别降低21%、10%、11%,可见坐姿比站姿对结构振动响应的影响更显著。

文献[17]针对轻质大跨度钢桥,开展行人-结构竖向动力耦合效应试验研究,发现:考虑人-结构耦合效应时,人行桥自振频率略有减小,阻尼比显著增加;且随着同步行走人数增多,结构自振频率与阻尼比的变化率逐渐降低。

文献[18]基于虚拟激励法构建人致荷载MSD模型

并附加于人行桥结构中,通过数值模拟分析人-桥相互作用对TMD减振效果的影响规律,结果显示:当人群密度从 $0.25 \text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$ 增至 $1.25 \text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,TMD减振率下降37.19%。文献[19]总结国外用于人-结构耦合作用分析的SMD模型参数(SMD为单或双自由度弹簧-质量阻尼器振子),发现各参数取值范围广、离散性高,因此建议开展大量不同工况下的现场实测研究,以获取更全面、精确的行人SMD模型参数。

2 观景平台舒适度分析实例

2.1 工程概况

某景区拟规划一处依山势起伏而建的观景平台,平台主体呈心形设计,平面尺寸如图1a)所示,总宽度为31.98 m,总长度为30.169 m。上下最大悬挑尺寸为13.142 m,左右最大悬挑尺寸为13.990 m。立面尺寸如图1b)所示,塔楼总高度为33.332 m,平台距离底面21.5 m。四周观景平台标准断面如图1c)所示,中间瀑布水渠深度为0.35 m,镜面水池深为0.1 m,宽度为2.35 m,外侧镜面环带宽为2 m,内侧人行步道宽为1.8 m。

结构采用钢桁架结构,三维模型如图2所示,该结构由中部电梯井桁架、连廊桁架与心形环桁架三部分组成。靠近山体侧采用桁架接地,并通过在主塔桁架与环桁架之间设置拉索(上拉索8根、下拉索4根)以有效控制结构变形、保障结构舒适度。结构主要构件截面如表2所示,钢材材质均为Q355B钢,拉索材质为钢芯1570钢丝绳。

2.2 结构自振频率及舒适度初步判定

如图1所示,该结构恒载参数如下:内圈观景平台铺装荷载 $3.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,中间镜面水池及瀑布水渠荷载 $5.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,外环镜面装饰恒载 $1.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,栏杆线荷载 $2.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。活荷载向转化为质量的取值如表3所示,国内外各规范取值原则存在差异。由无阻尼单自由度结构自振频率计算公式(7)可知:结构质量与自振频率呈负相关,质量越大则自振频率越小,结构越难满足舒适度要求。因此,本文针对人群荷载,分别按 $0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0.35 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 三种取值计算结构自振频率,以开展舒适度频率限值判定。

$$f = \sqrt{k/m} \quad (7)$$

式中: f 为结构自振频率; k 为结构刚度; m 为结构质量。

本工程采用midas Gen有限元分析软件进行舒适度计算,计算模型如图2所示。自振频率计算结果如表4所示,结构代表振型如图3所示。

由表4可知:(1) $3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 荷载工况下结构自振频率最小,活荷载对结构舒适度存在不利影响;因此本文基于安全性考虑,将 $3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 活荷载转化为等效质量,且活载组合系数取0.5;(2) 对比表1中的自振频率限值与结构计

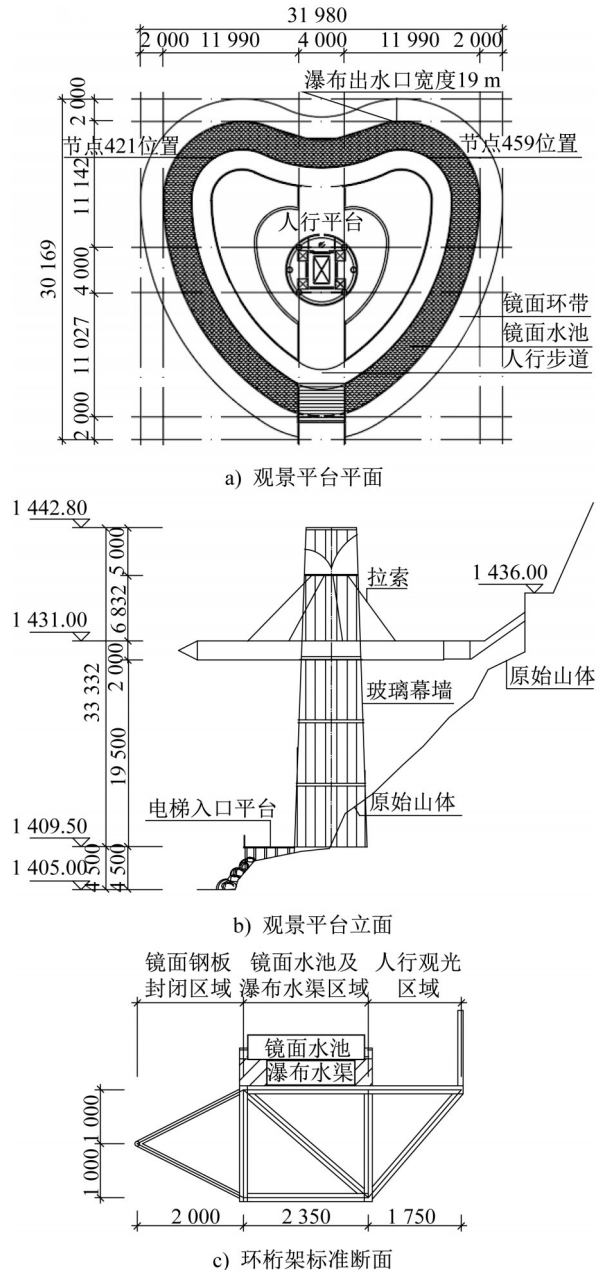


图1 观景平台示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic of viewing platform (unit: mm)

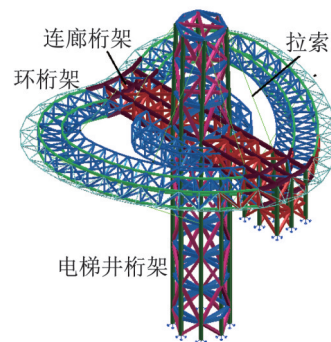


图2 观景平台三维模型

Fig. 2 3D model of viewing platform

表2 结构主要截面

Table 2 Main cross-section of the structure

部位	构件名称	截面/mm	材料用量/t
主塔桁架	钢柱	Ø400×20	314.2
	钢梁	矩 400×200×12	
	支撑	矩 250×250×14	
连廊桁架	弦杆	矩 400×250×16	
	腹杆	矩 250×250×14	
环桁架	弦杆	矩 150×150×12	
	腹杆	矩 150×150×12	
	环带杆	Ø89×7	
拉索	—	Ø56	

表3 转化为质量的活荷载取值

Table 3 Values of live loads converted to mass

标准	活荷载
JGJ/T 441—2019 ^[1]	0.35 kN·m ⁻²
CJJ 69—202X ^[5]	仅铝合金结构考虑人群荷载的1/3质量
EN03-08 ^[7]	超过桥面模态质量5%考虑

表4 结构自振频率

Table 4 Natural vibration frequency of structure

振型	自振频率/Hz			方向
	0 kN·m ⁻²	0.35 kN·m ⁻²	3 kN·m ⁻²	
1	1.414 9	1.411 1	1.383 1	横向
2	2.079 1	2.075 4	2.048 1	竖向
3	2.457 8	2.453 2	2.418 8	竖向
4	3.841 4	3.836 0	3.796 0	竖向
5	4.588 6	4.582 7	4.538 9	竖向
6	5.247 5	5.234 3	5.136 6	纵向

注:表中纵、横向是相对中间廊道定义的,沿廊道方向为纵向,垂直于廊道方向为横向。

算结果,结构自振频率评价结果如表5所示:结构水平向振动频率大于1.2 Hz满足EN03-08,我国相关文献[3,5]大于1.2 Hz的要求,未满足Eurocode 5大于2.5 Hz的要求;(3) 竖向振动前两阶频率均未满足表1及我国相关文献[3,5]大于3 Hz的要求,需进一步验算结构最大加速度响应以判定其舒适度水平。

2.3 结构峰值加速度响应校核

针对结构峰值加速度响应的舒适度验算评价标准,本文采用文献[7]提出的方法评估建筑环境,据此定义5

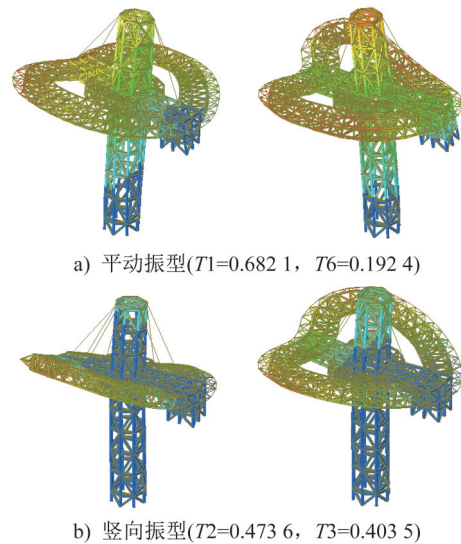


图3 结构主要振型

Fig. 3 Main vibration modes of the structure

注: T*: *表示振型对应的周期,单位:s

表5 自振频率评价^[1,3-5,7]Table 5 Natural vibration frequency evaluation^[1,3-5,7]

标准	竖向第一自振频率	竖向第二自振频率	横向自振频率
CEB(1993)			—
SIA 160(1989)	不满足	不满足	—
BS 5400(1978)			—
OHBDC(1991)	不满足	不满足	—
Eurocode 5			不满足
Bro 2004	不满足	不满足	—
EN03-08	不满足	不满足	满足
CJJ 69—95	不满足	不满足	—
JGJ/T 441—2019	不满足	不满足	满足
CJJ 69—202X	不满足	不满足	满足

种不同交通等级;同时参照文献[5]的分类方式,定义3种舒适度等级,具体如表6所示。

本文交通等级与之对应的舒适度等级设计如表7所示,当黄金周超过TC3级别交通等级时,需要采取人员限流措施。

根据文献[20]研究成果,采用固定位置集中加载(如原地踏步)替代行人移动作用对人行桥的激振,既可简化计算求解过程,又能使分析结果略偏安全;同时,结合国内外现有研究成果^[6,21-24]可知,主流人行致振荷载模型一般可表达为傅里叶级数形式的周期函数(式8):

$$F(t) = Q \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n [\alpha_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)] \right\} \quad (8)$$

表6 人流交通等级与舒适度等级

Table 6 Pedestrian traffic level and comfort level

人流交通等级 ^[7]			
交通等级	密度 d (F 为行人数量)	行人特征描述	
TC1	一组 $15F$ $d=15F/(BL)$	非常稀少的行人 (B 为桥宽, L 为桥长)	
TC2	$0.2 F \cdot m^{-2}$	稀少的行人,舒适自由行走	
TC3	$0.5 F \cdot m^{-2}$	不受限制行走, 超越前人间歇性受限	
TC4	$1.0 F \cdot m^{-2}$	自由移动受限,步行阻塞	
TC5	$1.5 F \cdot m^{-2}$	不舒适的行走,开始拥挤	
舒适度等级 ^[5]			
舒适度等级	舒适度评价	竖向峰值加速度 限值/($m \cdot s^{-2}$)	侧向峰值加速度 限值/($m \cdot s^{-2}$)
CL1	最佳	$[0, 0.25f^{0.78})$	$[0, 0.1)$
CL2	合格	$[0.25f^{0.78},$ $\min(0.5f^{0.78}, 0.7))$	$[0.1, 0.15f^{0.5})$
CL3	不合格	$[\min(0.5f^{0.78},$ $0.7), \infty)$	$[0.15f^{0.5}, \infty)$

表7 交通等级与舒适度等级适用环境设计

Table 7 Suitable environment design for traffic level and comfort level

设计环境	环境描述	交通等级	发生时期	舒适度等级
1	日常	TC2	经常	CL1
2	周末、小长假	TC3	不经常	CL2
3	黄金周	TC4	黄金周长假	CL2

式中: Q 为参与人群的静载; α_i 为第*i*阶分量的动力荷载系数; f_L 为往复荷载频率; i 为谐振荷载阶数。

对比《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]、《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》(CJJ 69—201X)^[5]、EN03-08^[7]、《建筑振动荷载标准》(GB/T 51228—2017)^[25]可将人行致振荷载统一如式(9)所示:

$$P(t) = F \cos(2\pi f_s t) n' \psi \quad (9)$$

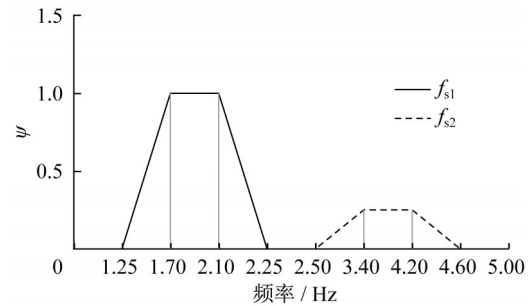
式中: F 为行人数量; f_s 为步频,近似按照平台相应自振频率; n' 为加载面上的等效人群数量; ψ 为考虑步频接近基频变化范围临界值的概率而引入的折减系数。各参数取值如表8所示,折减系数取值如图4所示。

在公式(9)所述的谐振荷载作用下,结构的阻尼系数采用 Rayleigh 阻尼模型^[26]进行计算,如式(10)、(11)所示:

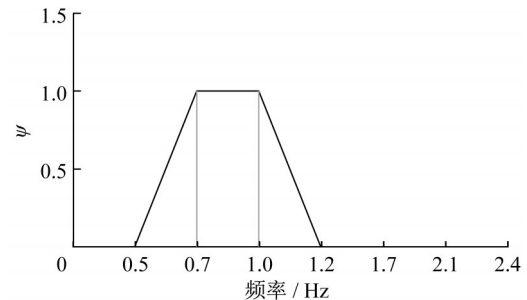
表8 人行致振荷载参数取值

Table 8 Parameter values of pedestrian induced vibration load

F	
竖向($F=280$)	横向($F=35$)
平台等效行人数量 $n'/(1 \cdot m^{-2})$	
TC1~TC3	$n' = \frac{10.8 \sqrt{n \xi}}{S}, \xi = 0.4\%, S$ 为人行通道面积
TC4~TC5	$n' = \frac{1.85 \sqrt{n}}{S}, S$ 为人行通道面积



a) 竖向折减系数



b) 横向折减系数

图4 折减系数取值

Fig. 4 Reduction factor value

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \begin{pmatrix} \omega_m \omega_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: a_0 和 a_1 为比例常数,单位分别为 s^{-1} 和 s ; ξ 为解耦股阻尼比,取0.004; ω_m 为结构基频; ω_n 为对结构动力响应有显著效应的高阶频率,本文分别取第二自振频率和第三自振频率。

综合《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[1]、《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》(CJJ 69—201X)^[5]和EN03-08^[7],本文中观景平台共考虑表9所示的3种加载工况。

根据人行致振工况的作用结果,可以得到:原方案加速度响应的最大点位于距离中间连廊最远的421、459号节点(图1a),其加速度响应时程曲线如图5所示,结果及限值判别如表10所示。

表9 人行致振荷载工况

Table 9 Human-induced load cases

交通等级	竖向人行致振荷载工况(振型2)	竖向人行致振荷载工况(振型3)
TC2	$P_{v_2}(t) = 5.8\cos(4.1\pi t)$	$P_{v_3}(t) = 3\cos(4.84\pi t)$
TC3	$P_{v_2}(t) = 9.2\cos(4.1\pi t)$	$P_{v_3}(t) = 4.6\cos(4.84\pi t)$
TC4	$P_{v_2}(t) = 35\cos(4.1\pi t)$	$P_{v_3}(t) = 17.7\cos(4.84\pi t)$

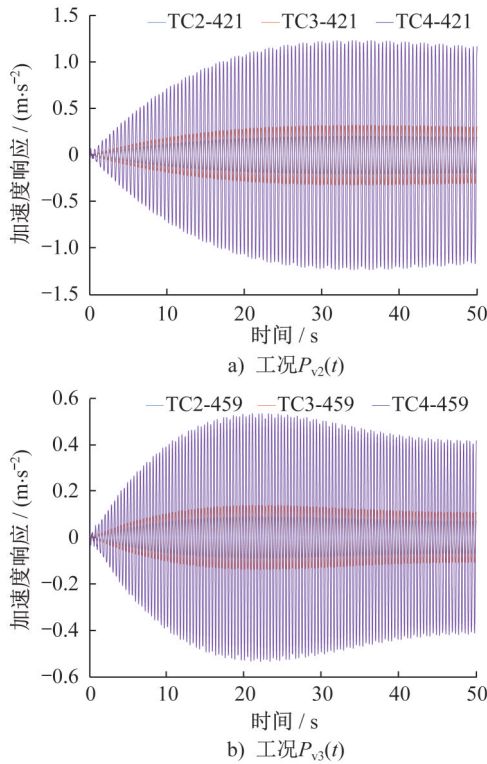


图5 竖向振动加速度时程曲线

Fig. 5 Vertical vibration acceleration time-history curves

由图5可知,对结构舒适度起控制作用的交通等级为TC4,各级荷载的具体判别结果如表10所示。

从表10对舒适度的判定结果可知:仅在交通等级为TC4对应的工况 $P_{v_2}(t)$ 作用下,竖向舒适度不满足要求,其他工况作用下均满足竖向舒适度要求。

3 减振与控振措施

结合观景平台加速度响应和自振特征(振型和频率),本文共采用了三种减振控振措施。

3.1 反向拉索减振

结合观景平台前两阶竖向振型,如图6所示,本文在平台下部设置4根拉索(截面规格与上部拉索一致):一方面可提升结构竖向刚度,另一方面通过反向拉结实现自平衡,有效减小悬挑端的变形与振动。

对应公式(9)中的振幅、频率参数及计算结果如表

表10 观景平台人行致振工况

Table 10 Huwan-induced load cases of viewing platform

竖向人行致振荷载工况 $P_{v_2}(t)$ (振型2)				
交通等级	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	舒适度 级别	加速度限值/ ($m \cdot s^{-2}$)	合格性 判别
TC2	0.21	CL1	(0,0.437]	合格
TC3	0.32	CL2	(0.437,0.7]	合格
TC4	1.23	CL2	(0.437,0.7]	不合格
竖向人行致振荷载工况 $P_{v_3}(t)$ (振型3)				
交通等级	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	舒适度 级别	加速度限值/ (m/s^2)	合格性 判别
TC2	0.09	CL1	(0,0.498]	合格
TC3	0.14	CL2	(0.498,0.7]	合格
TC4	0.534	CL2	(0.498,0.7]	合格



图6 反向拉索

Fig. 6 Reversed cable

11、图7所示,由于第二竖向振型(第三振型)满足舒适度要求,本文后续方案均不进行该振型的舒适度验算。

表11 方案一荷载工况参数及计算结果

Table 11 Load case parameters and calculation results of scheme 1

交通等级	$P_{v_2}(t)$ 振幅 ($f=2.3375\text{ Hz}$)	加速度响 应/($m \cdot s^{-2}$)	加速度限值/ ($m \cdot s^{-2}$)	舒适度 级别
TC2	1.5	0.05	(0,0.45]	CL1
TC3	2.3	0.07	(0.45,0.7]	CL2
TC4	8.8	0.27	(0.45,0.7]	CL2

从表11可以看出,采用反向拉索方案可显著改善观景平台的舒适度,TC4对应的加速度峰值由1.23降低至0.27,满足舒适度限值要求。

3.2 增大截面法

根据公式(7)及图4中的折减系数取值曲线可知:增

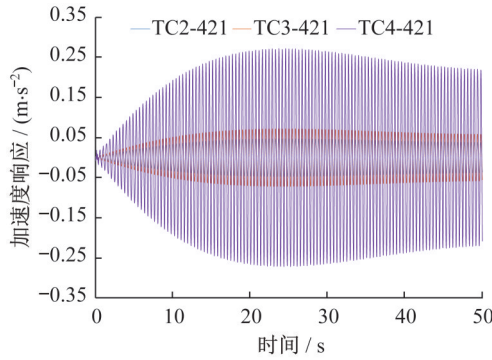


图7 方案一 $P_{v_2}(t)$ 作用下的时程曲线

Fig. 7 Time-history curves under $P_{v_2}(t)$ of scheme 1

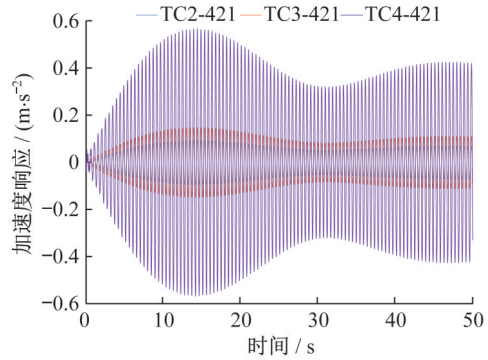


图8 方案二 $P_{v_2}(t)$ 作用下的时程曲线

Fig. 8 Time-history curves under $P_{v_2}(t)$ of scheme 2

加结构刚度或降低结构质量都能使结构的自振频率有所增加,且能降低结构振动响应的效果。结构质量是固有属性,虽可通过配重增加质量,但此方式减振效率较低,还会额外增加结构荷载。因此,本文将增加构件截面以提升结构刚度作为第二个减振方案,其截面变更详情如表12所示;对比可知,方案二(变更截面方案)较原方案增加材料用量54.5 t。

表12 方案二结构主要截面

Table 12 Main sections of the structure of scheme 2

部位	构件名称	截面/mm	材料用量/t
主塔桁架	钢柱	Ø500×20	368.7
	钢梁	矩400×200×14	
	支撑	矩300×300×16	
连廊桁架	弦杆	矩400×250×16	368.7
	腹杆	矩250×250×14	
环桁架	弦杆	矩200×200×14	368.7
	腹杆	矩150×150×12	
	环带杆	Ø152×12	
拉索	上拉索	Ø56	

方案二对应公式(9)的计算荷载参数及计算结果如表13、图8所示,舒适度满足相关要求。

表13 方案二荷载工况参数及计算结果

Table 13 Load case parameters and calculation results of scheme 2

交通级别	$P_{v_2}(t)$ 振幅 ($f=2.1145$ Hz)	加速度响应/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度限值/ ($m \cdot s^{-2}$)	舒适度级别
TC2	1.5	0.09	(0,0.45]	CL1
TC3	2.3	0.15	(0.45,0.7]	CL2
TC4	8.8	0.57	(0.45,0.7]	CL2

3.3 TMD控振法

参照文献[7]的相关建议,本文将在节点421、459设置调谐质量阻尼器(TMD)作为第三减振方案;其中,TMD质量取振型参与质量的0.26%,其相关参数参照文献[18,27-30],采用DEN HARTOG推导的最优参数公式,如式(12)~(14)所示,具体参数取值如表14所示。

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \tag{12}$$

$$\lambda_{opt} = \frac{f_{opt}}{f_s} = \frac{1}{1 + \mu} \tag{13}$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \tag{14}$$

式中: μ 为TMD质量 m_d 与振型参与质量 m_s 之比; f_{opt} 为最优频率比; ξ_{opt} 为最优阻尼比。

根据最优频率比和最优阻尼比可确定TMD的刚度和阻尼系数:

$$k_{opt} = m_d \lambda_{opt}^2 \omega^2 \tag{15}$$

$$C_{opt} = 2m_d \lambda_{opt} \omega \xi_{opt} \tag{16}$$

式中: k_{opt} 为最优刚度; C_{opt} 为最优阻尼系数; ω 为主结构圆频率。

表14 TMD参数取值

Table 14 TMD parameter values

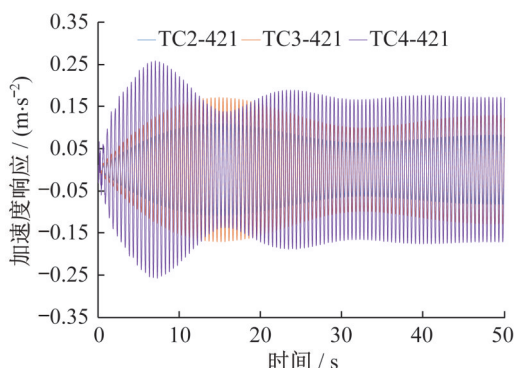
振型参与质量/t	质量比/%	结构基频/ Hz	刚度/ ($kN \cdot m^{-1}$)	阻尼系数/ ($N \cdot s \cdot m^{-1}$)
385	0.26	2.048	46.5	150

本方案设置4个250 kg级调谐质量阻尼器(TMD),其相关参数如表14所示,可有效控制观景平台的加速度响应;该减振方案对应公式(9)的荷载工况参数及计算结果如表15、图9所示,在TC4交通级别荷载作用下,结构最大加速度为 $0.26 m \cdot s^{-2}$,满足CL1舒适度级别对应的加速度限值要求。

表 15 方案三荷载工况参数及计算结果

Table 15 Load case parameters and calculation results of scheme 3

交通级别	$P_{v2}(t)$ 振幅 ($f=2.048$ Hz)	加速响应/ ($m \cdot s^{-2}$)	加速度限值/ ($m \cdot s^{-2}$)	舒适度级别
TC2	5.8	0.11	(0,0.437]	CL1
TC3	9.2	0.17	(0.437,0.7]	CL2
TC4	35	0.26	(0.437,0.7]	CL2

图 9 方案三 $P_{v2}(t)$ 作用下的时程曲线Fig. 9 Time-history curves under $P_{v2}(t)$ of scheme 3

3.4 三种减振方案对比分析

由表 10 可知,观景平台仅在 TC4 交通级别下其舒适度不满足限值要求,因此本文重点对比三种减振方案在该级别下的减振效果,具体对比结果如表 16 所示。

表 16 减振效果对比

Table 16 Comparison of vibration reduction effect

减振方案	原方案	方案一	方案二	方案三
加速度/($m \cdot s^{-2}$)	1.23	0.27	0.57	0.26
减振效果/%	—	78	54	79

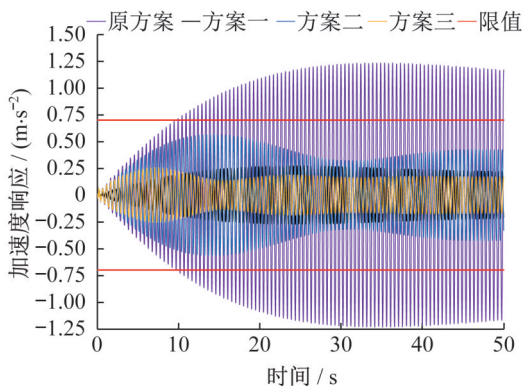


图 10 TC4 交通级别下三种减振方案加速度响应对比
Fig. 10 Comparison of acceleration response in three vibration reduction schemes under TC4 traffic level

三种减振方案均能满足交通级别 TC4 对应设计的舒适度等级。其中方案一的减振效果较好,峰值加速度降幅达 78%,建造成本可控、经济性好,按常规预应力钢结构实施即可,结构性能稳定,但设置反向拉索可能影响观景平台仰视效果;方案二的减振效率仅为 54%(三种方案中最低需要额外增加 54.5 t 钢材,导致材料采购等成本显著上升,整体造价偏高,当舒适度与规范要求偏差较大时,不建议通过增大结构刚度的方法控制结构的舒适度;方案三的减振效率为 79%,减振效果最佳、成本控制较好,虽对 TMD 连接构件会产生一定的附加荷载影响,但本文选用重量较小的 TMD,便于高空安装、检查及维护。基于以上方案的优缺点,本文推荐优先选用方案三,减振效果最好,便于施工安装,综合成本最低;方案一可作为备选方案;方案二在舒适度与规范限值相近情况下可使用,当舒适度偏差较大时,增大结构刚度方案要达到较好的减振效率需要较高的成本,不推荐使用。

4 结论

(1) 目前国内外关于室外观景平台类建筑舒适度没有明确的评价标准,可参考室外人行天桥的相关标准,国内参考规范主要有《城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)》(CJJ 69—201X)和《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)。

(2) 结合目前相关研究成果,本文提出观景平台的人致振动舒适度设计方法,具体流程分六步:第一步估算结构自振频率;第二步检查自振频率是否满足限值要求;第三步开展平台设计使用环境评估,明确人致荷载对应的交通级别与目标舒适度级别;第四步估算结构阻尼比参数,并确定人致荷载加载模式;第五步计算各设计环境下结构的加速度响应范围;第六步检查最大加速度响应是否满足限值要求。

(3) 在活荷载向质量转化时,本文中的工程项目与建筑结构抗震设计存在关键差异:不可简单参照抗震设计中屋面活荷载组合系数取 0 的做法,而需结合平台实际人群交通等级确定系数;为覆盖不利工况,本文采用保守策略,直接按平台设计使用荷载取值。

(4) 对某大悬挑观景平台工程进行舒适度分析和评价时,针对舒适度不满足要求的工况,制定了三种减振方案:方案一为设置反向拉索法,通过增设斜向拉索“自限定”结构振动响应;方案二为增大结构刚度法;方案三为设置调谐质量阻尼器(TMD)法。三种方案在特定要求下(尤其是方案二)可达到控制和改善结构舒适度的效果。

该观景平台工程桁架上部设有大体量储水水槽,后续可结合水槽流体特性与结构的耦合效应,开展流-固耦合的减振效果专项研究;此外,当前荷载模型研究多

以傅里叶级数理论模型为主,而针对观景平台的实测数据荷载模型较为匮乏,建议开展此类工程的实时数据收集,建立基于实测的荷载模型以提升准确性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑楼盖结构振动舒适度技术标准:JGJ/T 441—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Standard for Human Comfort of the Floor Vibration:JGJ/T 441—2019[S].Beijing: China Architecture & Building Press,2019.(in Chinese)
- [2] 娄宇,吕佐超,黄健.楼板振动舒适度控制的标准研究[J].特种结构,2011,28(3):1-4,8.DOI:10.3969/j.issn.1001-3598.2011.03.001.
LOU Yu, LYU Zuochao, HUANG Jian. Research on control standard of the comfort under floor vibration [J]. Special Structures, 2011, 28(3): 1-4, 8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3598. 2011.03.001. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国建设部.城市人行天桥与人行地道技术规范:CJJ 69—1995[S].北京:中国建筑工业出版社,1995.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical Specifications of Urban Pedestrian Overcrossing and Underpass: CJJ 69—1995[S].Beijing: China Architecture & Building Press, 1995.(in Chinese)
- [4] 陈阶亮,裘新谷.人行桥振动舒适性评价方法及标准研究现状[J].桥梁建设,2010,40(1):75-78.
CHEN Jieliang, QIU Xingu. Current evaluation methods and code researches of vibration comfort of pedestrian bridges[J]. Bridge Construction, 2010, 40(1): 75-78. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿):CJJ 69—201X[S].北京:中国建筑工业出版社,201X.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specifications of Urban Pedestrian Overcrossing and Underpass (Draft for Comment): CJJ 69—201X[S].Beijing: China Architecture & Building Press, 201X. (in Chinese)
- [6] International Organization for Standardization. Bases for Design of Structures-Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations: ISO 10137: 2007 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [7] HICKS S J, FELDMANN M, HEINEMEYER C, et al. Human induced vibration of steel structures-design offootbridges guideline[M].Brussels:RFC Publications, 2007.
- [8] 关宇. MTMD 减振技术在大跨度悬挑连廊设计中的应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(8): 86-89, 77. DOI: 10.19701/j. jzjg. 20220792.
GUAN Yu. Application of MTMD vibration reduction technology in design of a large-span cantilever corridor [J]. Building Structure, 2023, 53(8): 86-89, 77. DOI: 10.19701/j. jzjg. 20220792. (in Chinese)
- [9] 巩同川,刘金栓,张伯英.异形钢箱梁人行连廊振动舒适度分析控制[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 132-136, 152. DOI: 10.19701/j. jzjg. 20201594.
GONG Tongchuan, LIU Jinshuan, ZHANG Boying. Vibration comfort analysis and control of specially shaped steel box girder pedestrian overcrossing[J]. Building Structure, 2023, 53(14): 132-136, 152. DOI: 10.19701/j. jzjg. 20201594. (in Chinese)
- [10] International Organization for Standardization. Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration Part1: General Requirements: ISO 2631-1: 1997 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [11] British Standards Institution. Guide to Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings-Vibration Sources other than Blasting: BS 6472-1: 2008 [S]. London: British Standards Institution, 2008.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价第1部分:一般要求:GB/T 13441.1—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Mechanical Vibration and Shock—Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration: Part 1: General requirements: GB/T 13441.1—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程容许振动标准:GB 50868—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Allowable Vibration of Building Engineering: GB 50868—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [14] 吴波,王晓燕,何力,等.某轻型钢楼梯结构设计及舒适度分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(9): 17-19, 27. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2017.09.004.
WU Bo, WANG Xiaoyan, HE Li, et al. Design and serviceability analysis of a light-weight steel staircase[J]. Building Structure, 2017, 47(9): 17-19, 27. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2017.09.004. (in Chinese)
- [15] 陈得意.人行桥人致振动舒适度研究[D].广州:华南理工大学,2019.
CHEN Deyi. A study on pedestrian-induced vibration comfortability of footbridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 黎峥.基于烦恼率模型的大型体育场看台结构的舒适度研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
LI Zheng. Study on the comfort of the stand structure of large stadium based on the annoyance rate model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

- [17] 朱前坤,马法荣,张琼,等.行人-结构竖向动力耦合效应试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(11):125-133.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0464.
ZHU Qiankun, MA Farong, ZHANG Qiong, et al. Experimental study on vertical dynamic coupling effect of pedestrian-structure[J].Journal of Building Structures, 2020, 41(11):125-133. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0464. (in Chinese)
- [18] 温金龙,李阳,汪志昊,等.基于虚拟激励法的人-桥-MTMD 竖向耦合振动分析及其减振优化设计[J].振动工程学报,2025,38(4):794-802.DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.04.015.
WEN Jinlong, LI Yang, WANG Zhihao, et al. Analysis of human-footbridge-MTMD coupled system and MTMD optimization design based on the pseudo-excitation method[J].Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(4):794-802. DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.04.015. (in Chinese)
- [19] 王彩锋,高世桥,牛少华,等.行人SMD模型参数对人群-结构耦合动力特性的影响[J].振动与冲击,2018,37(3):91-97.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.03.015.
WANG Caifeng, GAO Shiqiao, NIU Shaohua, et al. Influences of pedestrian SMD model parameters on dynamic characteristics of crowd-structure interaction[J].Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(3):91-97. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.03.015. (in Chinese)
- [20] 王智丰,李贤军,易锦,等.大跨胶合木拱桥人致振动及其优化控制[J].土木工程学报,2021,54(4):79-94.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.04.009.
WANG Zhifeng, LI Xianjun, YI Jin, et al. Human-induced vibration and optimal control of long-span glulam arch bridges[J].China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4):79-94. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.04.009. (in Chinese)
- [21] 李兆凡,潘斌,SARKISIAN M.基于概率的步行导致结构振动评估方法[J].建筑结构,2024,54(5):104-110.DOI:10.19701/j.jzjg.LS230098.
LI Zhaofan, PAN Bin, SARKISIAN M. Probability based method for assessment of walking induced floor vibrations[J].Building Structure, 2024, 54(5):104-110. DOI: 10.19701/j.jzjg.LS230098. (in Chinese)
- [22] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012.
- [23] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [24] 陈隽.人致荷载研究综述[J].振动与冲击,2017,36(23):1-9. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.23.001.
CHEN Jun. A review of research on human induced loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23):1-9. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.23.001. (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑振动荷载标准:GB/T 51228—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Building Vibration Load Standard: GB/T 51228—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [26] 克拉夫 R,彭津.结构动力学[M]王光远等,译.第二版(修订版).北京:高等教育出版社,2006:184-185.
KRAFT R, PENG Jin. Structural Dynamics [M]. WANG Guangyuan, et al, translated. 2nd ed (revised version). Beijing: Higher Education Press, 2006:184-185. (in Chinese)
- [27] 韩智凡,汪新.基于最优参数组合的水平结构 MTMD 竖向减振优化设计[J].工业建筑,2024,54(4):46-53. DOI: 10.3724/j.gygzG23061103.
HAN Zhifan, WANG Xin. Vertical vibration reduction optimization design of horizontal structure MTMD based on optimal parameter combination[J].Industrial Construction, 2024, 54(4):46-53. DOI: 10.3724/j.gygzG23061103. (in Chinese)
- [28] 周方圆,吕云辉,张瑞甫,等.基于位移和加速度响应双控与耗能增效的惯容减震结构参数设计方法[J].建筑结构学报,2024,45(1):85-96. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0724.
ZHOU Fangyuan, LYU Yunhui, ZHANG Ruifu, et al. Parameter design method of inertial capacity damping structure based on displacement and acceleration response dual control and energy dissipation enhancement[J].Journal of Building Structures, 2019, 45(1):85-96. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0724. (in Chinese)
- [29] 汪权.建筑结构振动控制理论与计算方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.
WANG Quan. Research on vibration control theory and calculation method of building structure [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [30] 李春祥,杜冬.基于结构加速度响应控制时不同激励下 MTMD 性能的比较研究[J].振动与冲击,2003,22(4):91-93,99. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.
LI Chunxiang, DU Dong. Comparative study on MTMD performance under different excitations based on structural acceleration response control[J].Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(4):91-93,99. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs. (in Chinese)