

大跨度连崖结构人行及风致舒适度分析与振动控制研究

乔帅斌*

(甘肃省建筑设计研究院有限公司, 兰州 730030)

摘要: 某实际工程连崖结构采用钢筋混凝土核心筒结合钢桁架的结构形式,核心筒高度近百米,连接体钢桁架跨度达65 m;连崖端通过铅芯橡胶支座与崖壁相连。考虑到人行荷载与风荷载在结构服役期间频繁出现,且该类结构对密集人群荷载及风荷载较为敏感,文中针对该连崖结构的自振特性及其在人群荷载与风荷载作用下的振动响应、影响因素及控制措施开展系统研究。通过自振频率分析与稳态分析完成精准模态识别,同时模拟了人群荷载及风荷载时程函数开展结构振动响应分析。结果表明:连崖结构竖向自振频率较高,横向自振频率偏低,处于人群荷载激励频率区间;楼盖横向峰值加速度满足规范要求。风致楼盖横向振动与人致振动不存在耦合效应,但楼盖横向峰值加速度超出了规范限值,需要开展减振控制研究。分别采用在连接体桁架布置调谐质量阻尼器、核心筒顶部布置调谐液体阻尼器、连崖端支座处布置黏滞阻尼器三种减振方案进行对比。结果表明:调谐液体阻尼器对核心筒顶部风振加速度的控制效果较好,但对桁架风振的控制效果较差;黏滞阻尼器构造布设简便,但风振控制效果一般;调谐质量阻尼器对风致振动的控制效果最优。

关键词: 大跨度连崖结构;模态识别;舒适度分析;振动控制;调谐质量阻尼器;调谐液体阻尼器;黏滞阻尼器

中图分类号: TU312.1, TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0092-08

DOI: 10.13969/j.jzgigz.20250210002

Comfort Analysis and Vibration Control of a Large-Span Cliff Structure Under Pedestrian and Wind-Induced Vibration

QIAO Shuaibin*

(Gansu Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

*Corresponding author: 812582753@qq.com

Abstract: A cliff structure in a practical project adopts a structural system comprising a reinforced concrete core tube and a steel truss. The core tubes are nearly 100 m high, and the connecting steel truss has a span of 65 m. The cliff end is connected to the cliff wall using lead rubber bearings. Considering that pedestrian and wind loads often occur during service and this structural system is sensitive to dense crowd and wind loads, the natural vibration characteristics, vibration responses, influencing factors, and control measures of the structure under crowd and wind loads were investigated in detail. The relevant modes were accurately identified through natural-frequency and steady-state analyses, and structural vibration responses were analyzed by simulating the time-history functions of crowd and wind loads. The analysis results indicated that the vertical vibration frequency of the cliff structure was relatively high, and the lateral natural frequency was low and within the excitation frequency range of crowd loads. The lateral peak acceleration of the floor satisfied the requirements, and there was no coupling effect between the wind-induced lateral vibration of the floor and human-induced vibration. However, the lateral peak acceleration of the floor exceeded the specification limit, indicating that vibration control was required. Three vibration control schemes were adopted, including tuned mass dampers installed on the connecting truss, tuned liquid dampers installed on the top of the core tube, and viscous dampers installed at the cliff-side supports.

收稿日期: 2025-02-10

作者简介:

乔帅斌(1990—),男,硕士,高级工程师,主要从事钢结构方面的技术研究。E-mail:812582753@qq.com。(通信作者)

The comparison results showed that the tuned liquid dampers offered better control over the wind-induced acceleration at the top of the core tube, but were less effective for the truss wind-induced vibration. The viscous dampers were easy to install but provided moderate wind-induced vibration control, whereas tuned mass dampers provided the best control of wind-induced vibration.

Keywords: large-span cliff structure; modal identification; comfort analysis; vibration control; tuned mass damper; tuned liquid damper; viscous damper

连崖结构属于山地建筑结构中的一种^[1],多修建于山地景区,通常具备建筑高度大、连接体跨度大、环境风荷载大、连接体桥面游客密集等特点。连崖结构的连接体跨度较大、宽度受限,一般通过橡胶支座与山体相连,横向、竖向自振频率偏低,在人行激励作用下易产生显著的竖向与水平向振动。同时山地地形条件复杂,风荷载作用突出,结构容易在风场激励下发生振动,因此风振引发的舒适度问题同样值得关注。目前,关于人行荷载诱发振动的研究大多聚焦于大跨度、长悬臂结构;风荷载振动响应研究则以超高层建筑、大跨度屋盖结构为主^[2-5],部分学者已针对大跨度连接体结构在风荷载、人行荷载共同作用下的振动响应开展了研究^[6-7]。但现有针对连崖结构的研究较少,且多集中于受力特点、地震响应等方向,专门研究大跨度连崖结构在人行及风荷载下振动响应与控制的文献较为匮乏。考虑到人行荷载与风荷载在连崖结构使用阶段常同步存在,有必要开展连崖结构在两类荷载共同作用下的舒适度研究,分析人行荷载与风荷载之间是否存在耦合效应,并开展组合荷载条件下的振动控制分析。

1 人群与风荷载模型及舒适度评价标准

1.1 人群荷载模型

人群时程激励参照我国《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[8](以下简称《楼盖舒适度标准》),并参考法国规范^[9],按照下列公式计算:

$$p_1(t) = P_b r' \psi \cos(2\pi \bar{f}_{s1} t) \quad (1)$$

$$p_2(t) = P_b r' \psi \cos(2\pi \bar{f}_{s2} t) \quad (2)$$

$$p_L(t) = P_{bL} r' \phi_L \cos(2\pi \bar{f}_{sL} t) \quad (3)$$

当人群密度小于 $1.0 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, $r' = \frac{N_p}{A} = \frac{10.8 \sqrt{\xi N}}{A}$;

当人群密度不小于 $1.0 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, $r' = \frac{N_p}{A} = \frac{1.85 \sqrt{N}}{A}$ 。

式中: r' 为等效人群密度; $p_1(t)$ 为第一阶竖向人群荷载频率对应的单位面积人群竖向荷载; $p_2(t)$ 为第二阶竖向人群荷载频率对应的单位面积人群竖向荷载; $p_L(t)$ 为单位面积的人群横向荷载; P_b 为连廊和室内天桥上单个行人行走时产生的竖向作用力,可取 0.28 kN ; P_{bL} 为连廊和室内天桥上单个行人行走时产生的横向作用力,可取 0.035 kN ; $\bar{f}_{s1}$ 为第一阶竖向人群荷载频率; $\bar{f}_{s2}$ 为第二阶竖向人群荷载

频率; $\bar{f}_{sL}$ 为横向人群荷载频率; ψ 为竖向荷载折减系数; ϕ_L 为横向荷载折减系数; N 为行人总数量; N_p 为等效人数,即考虑人群行走步频相位角差异带来的抵消效应,将总人数 N 的人群行走等效为 N_p 个步频一致的行人同时作用于结构; ξ 为阻尼比; A 为连廊或栈桥的桥面面积。

1.2 风荷载模型

风荷载包含平均风和脉动风,平均风的长周期可达 10 min 左右,可视为静力荷载;脉动风周期一般为几秒至几十秒,会诱发结构振动。采用线性滤波法,通过 MATLAB 软件生成兼顾时间、空间相关性的脉动风速时程,舒适度分析取重现期 10 年的模拟风速,模拟风速时长为 120 s ,时间步长为 0.1 s ,Davenport 谱数学表达式见式(4)^[10],模拟得到的风速谱与 Davenport 谱拟合效果较好(图1)。

$$\frac{n S_v(n)}{\bar{v}_{10}^2} = \frac{4 k x^2}{n (1 + x^2)^{\frac{3}{4}}} \quad (4)$$

式中: $x = \frac{1}{\bar{v}_{10}} \frac{200 n}{\bar{v}_{10}}$; $S_v(n)$ 为脉动风速功率谱; k 为地面粗糙度系数; $\bar{v}_{10}$ 为 10 m 标准高度处的平均风速; n 为脉动风频率。

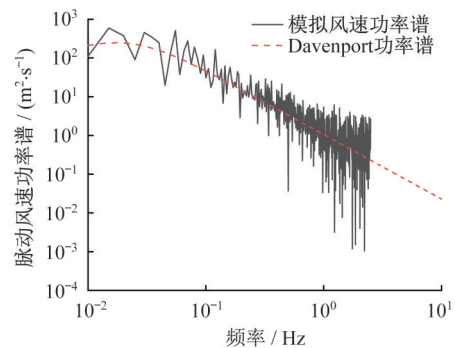


图1 模拟风速功率谱与 Davenport 功率谱

Fig. 1 Simulated wind speed power spectrum and Davenport power spectrum

1.3 结构体系及舒适度评价标准

以某实际工程观光电梯及栈桥为例,结构体系采用钢筋混凝土核心筒结合钢桁架形式。钢筋混凝土核心筒部分高度接近百米,周围三边设置钢框架;连接栈桥采用钢桁架-框架支撑结构,并在对应核心筒 13 层位置设置

通高主桁架。主桁架一端支承于核心筒,另一端通过铅芯橡胶支座连接山体崖壁,跨度达65 m,主要构件截面信息见表1。主桁架上承、下挂钢框架并设置竖向支撑用于支承外侧幕墙,最上层桥面为人行栈桥(图2)。

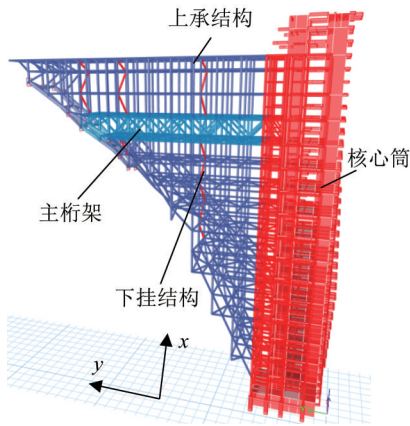


图2 结构体系构成

Fig. 2 Structural system composition

表1 主桁架构件截面信息

Table 1 Section information of main truss members

构件名称	截面类型	截面尺寸/mm	钢材牌号
上、下弦杆		H350×350×16×22	
竖腹杆	焊接H型钢	H350×350×10×14	Q355B
斜腹杆		H350×350×12×18	

《楼盖舒适度标准》第4.2.4条对连廊横向自振频率及峰值加速度限值作出了要求,该项目按不封闭连廊选取峰值加速度限值,即竖向峰值加速度限值为 $0.50\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 、横向峰值加速度限值为 $0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

2 连崖结构自振特性及模态识别

对整体结构自振频率进行分析,质量源取1.0倍恒荷载叠加0.5倍活荷载。前三阶振型依次为核心筒 x 向平动、整体结构 y 向平动、整体结构扭转(橡胶支座端平动)。该连崖结构模态分布密集,借助振型质量参与系数判别竖向、横向主导自振模态。为了进一步明确外部激励荷载的频率与结构共振的对应关系,采用Sap2000软件对整体结构进行稳态分析,以频率为变量考察结构响应在频率上的分布情况;在最不利激励点施加荷载完成稳态分析,实现精准模态识别,捕捉结构共振对应的自振频率。稳态分析结果显示,结构第一阶横向、竖向振动频率分别为 0.87 Hz 、 5.70 Hz (图3),分别对应整体结构第三阶、第十一阶振型;稳态分析结果与振型质量参与系数的判断结论保持一致(图4)。

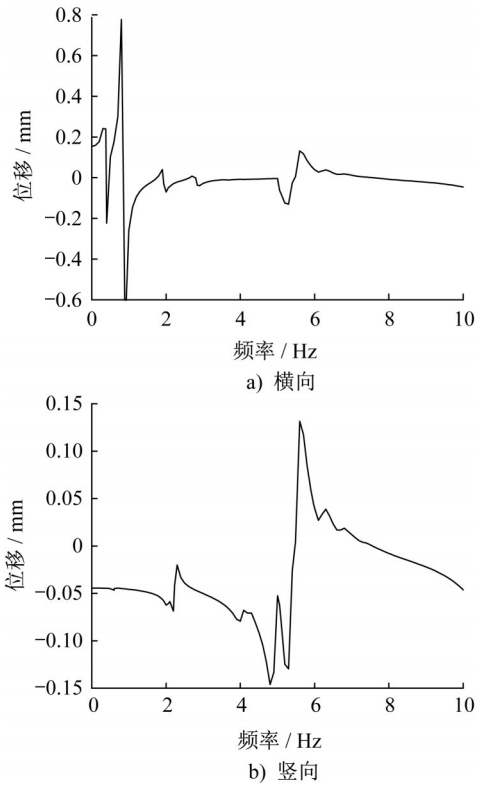


图3 横向与竖向稳态分析

Fig. 3 Lateral and vertical steady state analysis

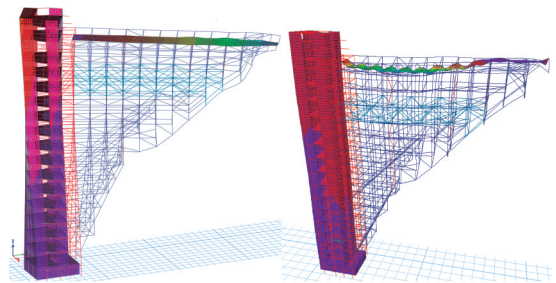


图4 结构第一阶横向(左图)、竖向(右图)振动模态

Fig. 4 First order lateral(left) and vertical(right)

vibration modes of structure

3 人群及风荷载作用下结构动力响应、舒适度评价及振动控制

3.1 人致振动舒适度

栈桥第一阶横向自振频率为 0.87 Hz ,不满足《楼盖舒适度标准》第4.2.4条“连廊和室内天桥第一阶横向自振频率不宜小于 1.2 Hz ”的要求,栈桥第一阶竖向自振频率为 5.70 Hz ,满足规范要求,因此分别对横向及竖向的峰值加速度开展计算。

栈桥使用过程中,结合景区观光拥挤工况,取人群密度为 $2\text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$ 。横向人群时程激励按《楼盖舒适度标准》第9.2.2条取值,采用面荷载形式,荷载施加范围覆盖全部栈桥桥面;荷载时程时长为 120 s ,积分步长为 0.005 s ;钢-混凝土组合楼盖阻尼比取为 0.01 。该工程

栈桥桥面面积为 432 m^2 , 等效人群数 N_p 为 54.4。结构第一阶竖向频率为 5.70 Hz , 据此构建人群竖向荷载函数, 取 $5.70 \text{ Hz}/2$ 为 2.85 Hz , $5.70 \text{ Hz}/3$ 为 1.9 Hz , 设置两组竖向荷载频率组合: 第一组取 $\bar{f}_{s1}$ 为 2.5 Hz , $\bar{f}_{s2}$ 为 5.0 Hz ; 第二组取 $\bar{f}_{s1}$ 为 1.9 Hz , $\bar{f}_{s2}$ 为 3.8 Hz 。计算表明第一组人群竖向荷载起控制作用。相关研究表明, 人群密度超过 $2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 时人员行动受限、动力效应会显著减弱^[11], 人群荷载频率较难达到 2.5 Hz ; 本文偏保守按照人群密度为 $2 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 、激励频率为 2.5 Hz 开展计算。由图 5 可知, 结构未产生共振; 加载初期竖向峰值加速度超过 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 后续稳定至 $0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 均未超出规范限值。横向人群荷载频率取 0.87 Hz , 与结构横向自振频率一致, 出现明显共振效应(图 6), 但横向峰值加速度仅为 $0.038 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 小于 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 规范限值, 满足《楼盖舒适度标准》第 4.2.4 条要求。

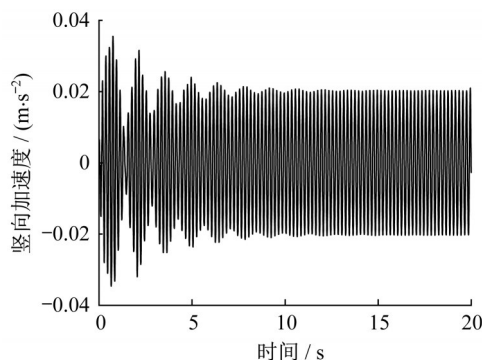


图 5 人行激励下顶部节点 z 向加速度时程

Fig. 5 z -direction acceleration time-history of top joint under pedestrian excitation

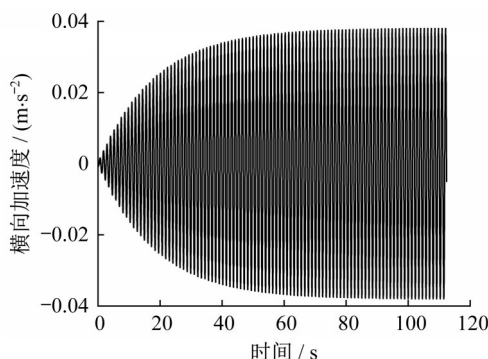


图 6 人行激励下顶部节点 x 向加速度时程

Fig. 6 x -direction acceleration time-history of top joint under pedestrian excitation

3.2 人致振动竖向加速度影响因素分析

3.2.1 上承及下挂结构影响分析

前述计算得到人群荷载诱发的楼面竖向加速度整体水平不高。为研究上承、下挂结构对舒适度的影响, 建立对比模型: 仅保留核心筒与主桁架, 将上承、下挂结构以

附加荷载形式施加于主桁架。

该简化模型第一阶竖向自振频率为 5.24 Hz ; 人群竖向荷载频率取两组频率组合: 第一组取 $\bar{f}_{s1}$ 为 2.5 Hz , $\bar{f}_{s2}$ 为 5.0 Hz , 第二组取 $\bar{f}_{s1}$ 为 1.75 Hz , $\bar{f}_{s2}$ 为 3.5 Hz 。第一组起控制作用。人行激励下结构未产生明显共振响应(图 7), 加载初期竖向峰值加速度大于 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 后期稳定至 $0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。与包含上承、下挂结构的整体结构相比, 该简化模型加速度偏大。说明上承与下挂结构能够提高整体竖向刚度, 对改善振动舒适度具有积极作用。

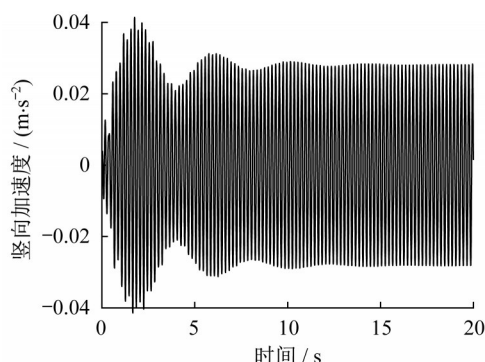


图 7 人行激励下顶部节点 z 向加速度时程(上承、下挂结构不代入模型)

Fig. 7 z -direction acceleration time-history of top joint under pedestrian excitation (the top and bottom hanging structures are not included in the model)

3.2.2 桁架跨度影响分析

保持上述条件不变的前提下, 将桁架跨度加长 6 m , 此时结构第一阶竖向自振频率为 4.15 Hz ; 人群荷载激励频率取 $\bar{f}_{s1}$ 为 2.075 Hz , $\bar{f}_{s2}$ 为 4.150 Hz 。人致激励下, 结构产生明显共振响应, 最大竖向峰值加速度为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 超出了规范限值(图 8)。由此可见桁架跨度对竖向舒适度影响显著; 当人群密集且结构竖向自振频率接近 4 Hz 时, 应当提高桁架竖向刚度或采取其他减振措施。

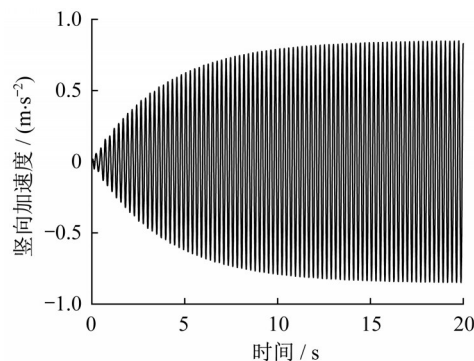


图 8 人行激励下顶部节点 z 向加速度时程(增加桁架跨度)
Fig. 8 z -direction acceleration time-history of top joint under pedestrian excitation (increasing truss span)

3.3 风致振动及人致-风致振动耦合效应分析

基于1.2节得到的脉动风速时程,结合风荷载体型系数与节点受风荷载面积换算得到风压时程,沿 x 风向角开展风荷载非线性时程分析。该工程为钢筋混凝土核心筒-钢桁架组合体系,核心筒外围为钢框架柱,结构对风荷载较为敏感。已有实测研究表明,钢结构实际阻尼与振幅相关,小振幅状态下阻尼会低于规范推荐数值;若计算阻尼比取值偏大,会低估实际加速度响应,因此舒适度计算阻尼比取0.01。选取人行栈桥跨中193号节点,提取风荷载作用下 x 向的加速度时程曲线(图9);同时考虑人行荷载与风荷载, x 、 z 向的加速度时程曲线如图10、11所示。

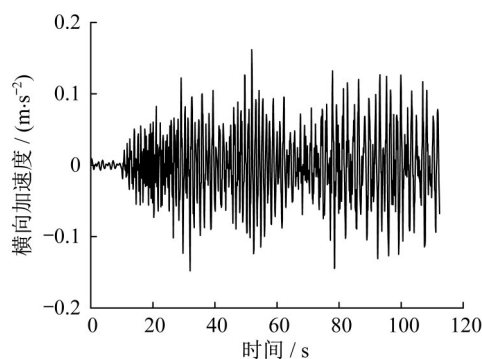


图9 风荷载下顶部节点 x 向加速度时程

Fig. 9 x -direction acceleration time-history of top joint under wind load

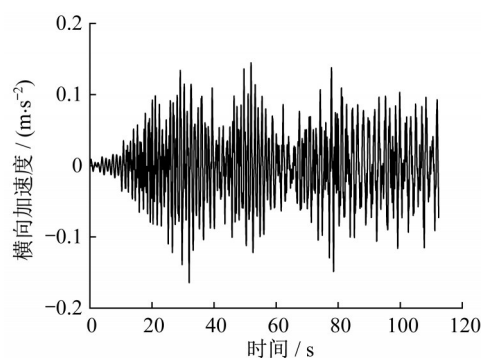


图10 风荷载与人行激励下顶部节点 x 向加速度时程

Fig. 10 x -direction acceleration time-history of top joint under wind load and pedestrian excitation

由图9~11可知:(1)风荷载与人行激励共同作用下的竖向加速度,小于两种荷载单独作用下竖向加速度的代数和,说明竖向振动响应不满足简单叠加关系;(2)风荷载与人群荷载共同作用下,节点的横向峰值加速度为 $0.164 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,同样小于两类荷载单独作用的峰值加速度之和。其原因为风致共振主要由风时程高频分量贡献,风荷载与人群荷载时程之间存在相位差、幅值差;时程结果证明二者不存在耦合效应。

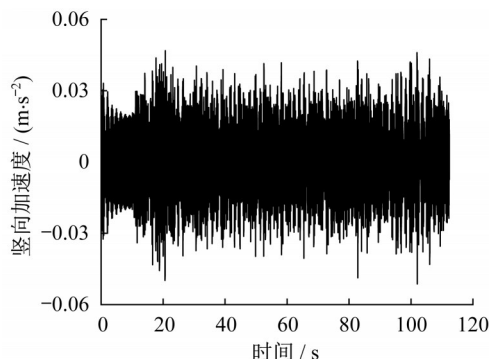


图11 风荷载与人行激励下顶部节点 z 向加速度时程

Fig. 11 z -direction acceleration time-history of top joint under wind load and pedestrian excitation

但由于风荷载单独作用下横向加速度大于规范限值 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,因此有必要开展风致振动的减振控制研究。

3.4 振动控制方案及效果对比

前述分析表明,人行荷载诱发的竖向加速度满足限值要求,风致横向加速度超限,减振控制以抑制横向加速度为主要目标。可选思路包含增大刚度法、调谐质量阻尼器(TMD)减振法、调谐液体阻尼器(TLD)减振法、液体黏滞阻尼器(Damper)减振法^[12-13]。增大刚度法需要减小桁架跨度或增大杆件截面,减振效率低且造价较高。下文对TMD减振法、TLD减振法、Damper减振法三种方案开展对比分析。测点选取核心筒顶部204号节点及栈桥中部193号节点;减振设施布置见图12,图12中三角形表示Damper,圆形表示TMD,方形表示TLD,小黑点表示测点。

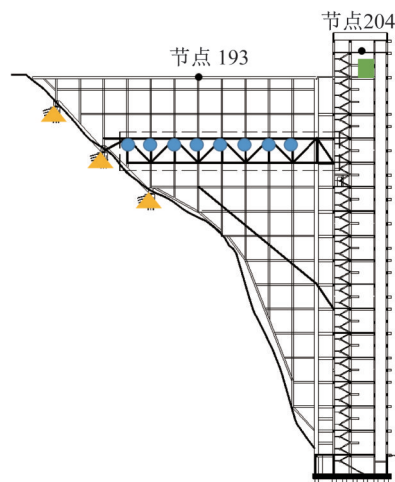


图12 减振设施及测点布置

Fig. 12 Arrangement of vibration reduction facilities and measuring points

为比较方案优劣,定义减振率计算公式如下:

$$\eta = \frac{a - a_t}{a} \quad (5)$$

式中: η 为减振率; a 为无控结构测点峰值加速度; a_t 为受控结构测点峰值加速度。

3.4.1 TMD减振

TMD是一种附加在主体结构上的弹簧阻尼系统,其原理为当附加系统自振频率与主体结构固有频率接近时,在外部激励下附加系统可输出反向惯性力作用于主体结构以达到调谐目的,从而抑制主体结构振动响应。结合连崖结构的空间特点,采用刚度和阻尼侧向布置的悬挂式TMD^[14];根据《建筑结构风振控制技术标准》(JGJ/T 487—2020)^[15]选取相关参数优化式(6)~(7)。TMD主要用于控制钢桁架振动,钢桁架连同上承、下挂钢结构总重约550 t;在主桁架布置16套TMD,单套质量为500 kg, TMD总质量为8 t,与桁架质量比为0.015,阻尼比为0.06,调谐频率与主体第三阶振型(0.87 Hz)接近。

$$\omega_{\text{opt}} = \omega_1 \frac{\sqrt{1 - \mu/2}}{1 + \mu} \quad (6)$$

$$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\mu(1 - \mu/4)}{4(1 + \mu)(1 - \mu/2)}} \quad (7)$$

式中: μ 为TMD系统质量(m_t)与主体系统质量的比值; ω_{opt} 为TMD最优自振圆频率; ξ_{opt} 为TMD最优阻尼比; ω_1 为主结构第一阶风振圆频率。

如图13所示,设置TMD后,风荷载作用下钢桁架横向加速度峰值由 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 降低至 $0.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,减振率达50%;人行激励下横向加速度峰值降至接近0, TMD减振效果显著。

3.4.2 TLD减振

TLD减振法利用核心筒顶层消防水箱作为TLD以减小风振响应,依靠水箱内液体晃动与耗能装置耗散振动能量,具有布置便捷、概念清晰、造价低等优点。TLD主要目标是抑制核心筒振动,核心筒自重约2 600 t;顶部布置4个矩形水箱,单台水箱质量为20 t。依据《建筑结构风振控制技术标准》(JGJ/T 487—2020)^[15]第6.2.2条,采用式(8)对水箱尺寸进行估算,取水箱沿风振方向长度为2.5 m、宽度为4 m、水深为2 m;TLD的设计频率与核心筒 x 向平动振型频率0.58 Hz相匹配,频率比约取1。TLD质量参与系数按式(9)计算得到0.32, TLD有效质量为 $0.32 \times 20 \times 4 = 25.6 \text{ t}$,与核心筒质量比约为0.01。已有研究表明, TLD水箱水深 h 与顺向长度比越小,质量参与系数越大,减震效果越好,即采用分布式TLD更优。受本工程核心筒顶部平面尺寸制约,实际减振效果与理论最优水平存在差距。数值建模时,在TLD安装高度设置集中质量点,通过Hook单元与核心筒相

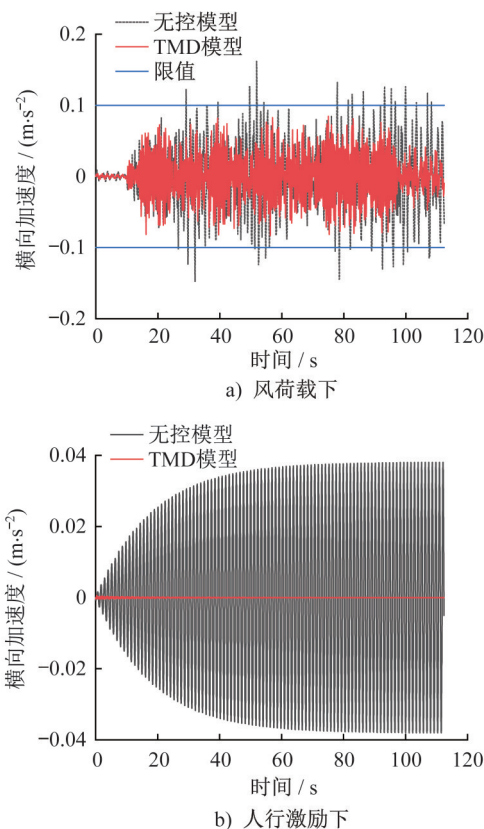


图13 TMD减振效果对比(测点193)

Fig. 13 TMD vibration reduction effect comparison (measurement point 193)

连,等效模拟单摆式TLD。

$$\omega_T = \sqrt{\frac{g\pi}{b} \tanh\left(\frac{h\pi}{b}\right)} \quad (8)$$

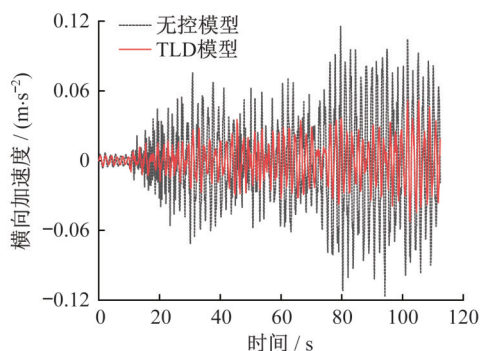
$$\tau_T = \frac{8a}{\pi^3 h} \tanh\left(\frac{\pi h}{b}\right) \quad (9)$$

式中: ω_T 为矩形水箱TLD自振圆频率; τ_T 为矩形水箱TLD质量参与系数; b 为矩形水箱液体振动方向长度; h 为矩形水箱水深。

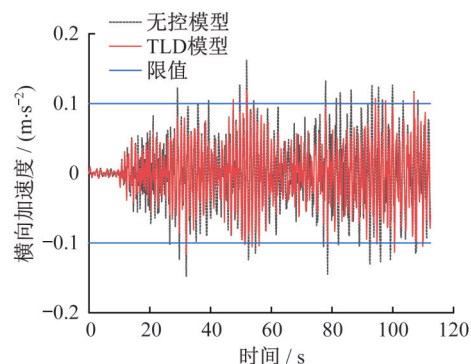
如图14所示,设置TLD后,核心筒顶部204号节点风致横向峰值加速度降至 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,对核心筒风振控制效果较好;但栈桥193号节点风致横向加速度仅降至 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,减振率为25%,人致振动仍然表现出共振趋势。说明布置在核心筒顶部的TLD对大跨度桁架风振的抑制作用有限,原因在于桁架跨度大、受风面积大, TLD偏心布置,对整体桁架的控制效能不足。

3.4.3 Damper减振

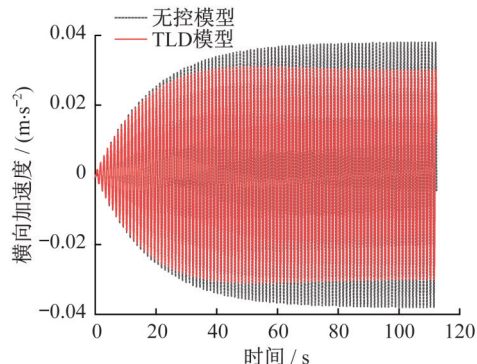
在连崖端铅芯橡胶支座位置增设一定数量的Damper,阻尼系数为 $650 \text{ kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-\alpha}$, α 为速度指数,取0.3。如图15所示,设置Damper后,风荷载作用下钢桁架横向加速度峰值由 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 降低至 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,减振率为25%;人行激励下横向加速度峰值接近0,表明Damper



a) 测点204风荷载下



b) 测点193风荷载下



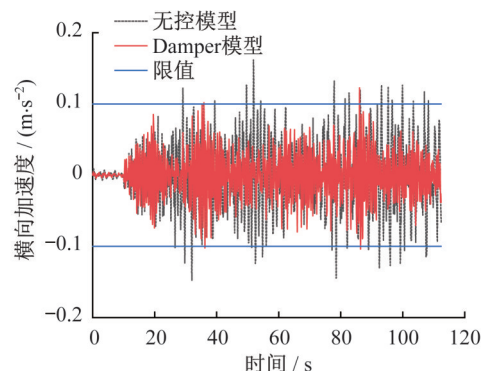
c) 测点193人行激励下

图14 TLD减振效果对比

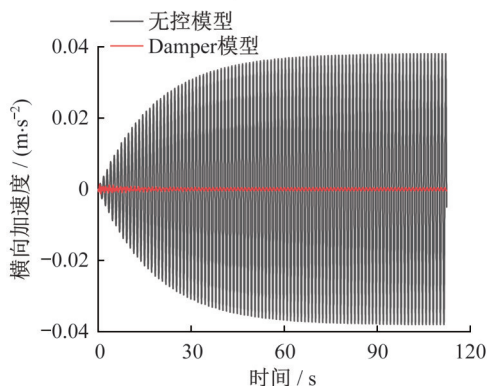
Fig. 14 TLD vibration reduction effect comparison

具备一定减振能力。但支座设置 Damper 会增大连崖端的地震作用,增大支座设计难度,对整体结构抗震性能不利,因此该方案不予推荐。

为深入分析上述方法的减振原理,对无控及三种减振方案的风致横向加速度开展傅里叶变换,得到减振前后横向加速度响应功率谱对比图(图16)。由图可知,TLD主要控制结构第一阶振型(核心筒 x 向平动振型,对应频率为0.58 Hz);TMD主要控制结构第三阶振型(第一阶横向振型,对应频率为0.87 Hz),根据前文稳态分析结果,0.87 Hz为结构的横向振动卓越频率,故TMD综合减振效果优于TLD综合减振效果。但TMD、TLD均难以实现高阶振型的多模态控制。支座处 Damper 同样可以对0.87 Hz振型起到抑制,但受安装位置限制,控制效果弱于TMD的控制效果。



a) 风荷载下



b) 人行激励下

图15 Damper减振效果对比(测点193)

Fig. 15 Damper vibration reduction effect comparison (measurement point 193)

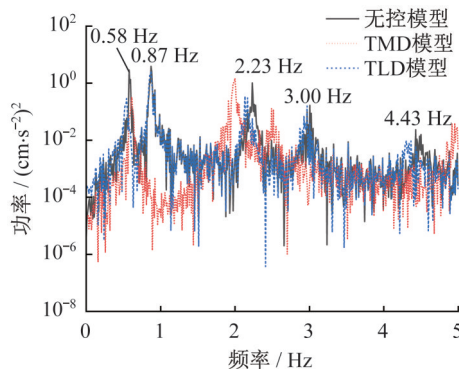


图16 减振前后横向加速度响应功率谱对比

Fig. 16 Comparison of power spectral of transverse acceleration response before and after vibration reduction

根据上述对比分析,TMD对风致振动控制效果最优;TLD布设简单,对核心筒减振效果较好,但对桁架风振控制效果较差;方案三在支座处设置 Damper,设置简便且不会对钢桁架产生附加荷载作用,但整体风振控制效果一般。

4 结论

本文依托实际大跨度连崖工程,开展自振频率与模态识别,建立人群、风荷载时程模型,完成人行与风荷载下动

力响应分析,对比多种减振控制方案,主要结论如下:

(1) 采用稳态分析方法可以精准捕捉连崖结构最不利激励对应的自振频率。上承、下挂附属结构对竖向自振频率的改变有限;桁架跨度对竖向振动特性影响显著。当人员密集工况下桁架竖向自振频率接近4 Hz时,应当专门验算人群荷载下竖向加速度,必要时可提高桁架刚度或者增设减振措施。

(2) 风荷载与人行激励共同产生的振动加速度小于两类荷载单独作用下加速度的代数和;二者不存在耦合效应。其机理为风振共振主要来自风时程高频分量,风荷载时程与人行荷载时程存在相位差与幅值差。

(3) 对比三种减振方案,桁架位置布置TMD的风振控制效果最优,但会对连接桁架引入附加质量荷载;核心筒顶部布置TLD方案简便,可有效抑制核心筒风振,但对大跨度桁架减振效果有限;连崖支座处安装Damper方案便捷,但会改变结构地震响应,使得支座受力条件恶化,选用时需谨慎评估。

(4) 连崖结构体系属于多点约束结构体系,减振效果取决于阻尼装置的布设位置,以及调谐频率在风振功率谱中的贡献占比。TMD、TLD均较难实现高阶振型多模态控制;受布置空间限制,TLD质量参与系数通常小于1,整体减振效果弱于TMD的减振效果。

参考文献:

- [1] 李英民,姬淑艳,唐洋洋,等.山地建筑结构特殊问题与研究进展[J].建筑结构,2019,49(19):76-82.DOI:10.19701/j.jzjg.2019.19.009.
LI Yingmin, JI Shuyan, TANG Yangyang, et al. Special problems and research progress of structure on a slope [J]. Building Structure, 2019, 49(19): 76-82. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.19.009. (in Chinese)
- [2] 朱鸣,张志强,柯长华,等.大跨度钢结构楼盖竖向振动舒适度的研究[J].建筑结构,2008,38(1):72-76.DOI:10.19701/j.jzjg.2008.01.017.
ZHU Ming, ZHANG Zhiqiang, KE Changhua, et al. Study on improving people's comfortableness on large-span steel floor structures [J]. Building Structure, 2008, 38(1): 72-76. DOI: 10.19701/j.jzjg.2008.01.017. (in Chinese)
- [3] 赵中伟,陈志华,王小盾,等.天津于家堡交通枢纽站房网壳风振响应分析[J].建筑结构,2014,44(19):12-15,94.DOI:10.19701/j.jzjg.2014.19.003.
ZHAO Zhongwei, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, et al. Wind-induced response analysis on lattice shells of Yujiapu transportation junction station [J]. Building Structure, 2014, 44(19): 12-15, 94. DOI: 10.19701/j.jzjg.2014.19.00. (in Chinese)
- [4] 章少华,张锡治,丁永君,等.长悬挑结构楼盖人致振动舒适度分析[J].建筑结构,2022,52(24):39-43,81.DOI:10.19701/j.jzjg.LS210315.

- ZHANG Shaohua, ZHANG Xizhi, DING Yongjun, et al. Analysis on vibration comfort of long cantilevered structure floor [J]. Building Structure, 2022, 52(24): 39-43, 81. DOI: 10.19701/j.jzjg.LS210315. (in Chinese)
- [5] 李治,戴苗,涂建,等.横琴国际金融中心大厦结构设计难点分析[J].建筑结构,2022,52(17):45-51,84.DOI:10.19701/j.jzjg.LS210033.
LI Zhi, DAI Miao, TU Jian, et al. Analysis of structural design difficulties of Hengqin International Financial Center building [J]. Building Structure, 2022, 52(17): 45-51, 84. DOI: 10.19701/j.jzjg.LS210033. (in Chinese)
- [6] 夏亮,张明山,李本悦,等.风场水平空间相关性对长悬臂钢连廊风致效应的影响[J].建筑钢结构进展,2020,22(6):113-119.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.06.013.
XIA Liang, ZHANG Mingshan, LI Benyue, et al. The influence of turbulent transverse space correlation on wind-induced response of long cantilever steel corridors [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(6): 113-119. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.06.013. (in Chinese)
- [7] 陈凯,符龙彪,何连华,等.连体高层空中连廊的风致振动分析方法[J].建筑结构,2015,45(2):57-62,94.DOI:10.19701/j.jzjg.2015.02.013.
CHEN Kai, FU Longbiao, HE Lianhua, et al. Wind-induced vibration analysis method of the skybrige in connected tall buildings [J]. Building Structure, 2015, 45(2): 57-62, 94. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.02.013. (in Chinese)
- [8] JGJ/T 441—2019 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[S].
JGJ/T 441—2019 Technical standard for human comfort of the floor vibration[S]. (in Chinese)
- [9] SETRA 2006 Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading[S].
- [10] 黄本才,汪丛军.结构抗风分析原理及应用[M].2版.上海:同济大学出版社,2008.
HUANG Bencai, WANG Congjun. Principle and application of wind resistance analysis of structures [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 刘枫,秦格,马明,等.人行悬索桥人致振动分析与实测研究[J].建筑钢结构学报,2023,44(9):72-82.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0371.
LIU Feng, QIN Ge, MA Ming, et al. Analysis and test of human induced vibration of pedestrian suspension bridge [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 72-82. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0371. (in Chinese)
- [12] 刘永臻.世茂深港国际中心天环结构振动舒适度设计[J].建筑钢结构进展,2022,24(4):74-81.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.010.
LIU Yongcan. Vibration serviceability design of the skywalk in Shimao Shengang international center [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(4): 74-81. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.010. (in Chinese)