引文格式:刘鹏基,安毅,程欣,等. 基于人致振动的悬挑钢结构旋转楼梯舒适度研究[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):937-946.

LIU Pengji, AN Yi, CHENG Xin, et al. Comfort study of cantilevered steel structure spiral staircase based on human-induced vibration[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(5): 937-946.

基于人致振动的悬挑钢结构旋转楼梯舒适度研究

刘鹏基[1],安 毅[1],程 欣[1],郑礼刚[2],杨 乐[2],李海旺[1]

(1. 太原理工大学 土木工程学院,山西 太原;2. 山西潇河建筑产业有限公司,山西 太原)

摘 要:**【目的】**悬挑钢结构旋转楼梯的结构特性使其对人致振动敏感,易发生舒适度问题,需进行舒适度研究。**【方法】**以山西潇河国际会展中心一悬挑旋转楼梯为研究对象,进行现场人致振动试验。通过结构的加速度响应,得到不同人群激励下楼梯振动响应的幅值特性,分析人群步频和密度对楼梯振动的影响;通过解析模态分解和随机减量技术识别结构自振频率,并结合峰值加速度、均方根值加速度和等效正弦峰值加速度三个指标进行了舒适度评价。**【结果】**结果表明,人群下行与集中于楼梯外侧会引起楼梯较大振动响应;楼梯振动响应水平随人群步频的增大而增大,在人群步频接近楼梯自振频率时,振动响应水平随加载时间的增大会显著增大;识别结构前三阶自振频率分别为3.34 Hz、5.77 Hz和10.63 Hz;将实测自振频率和加速度指标与规范限值比较,表明该楼梯满足舒适度要求。

关键词:悬挑钢结构;旋转楼梯;人致振动;舒适度;动力特性

中图分类号:TU393 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240656 **文章编号**:1007-9432(2026)05-0937-10

Comfort Study of Cantilevered Steel Structure Spiral Staircase Based on Human-induced Vibration

LIU Pengji[1], AN Yi[1], CHENG Xin[1], ZHENG Ligang[2], YANG Le[2], LI Haiwang[1]

(1. *College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China*;
2. *Shanxi Xiaohe Construction Industry Co., LTD, Taiyuan, China*)

Abstract:**【Purposes】** The structural characteristics of cantilevered steel spiral staircases make them sensitive to human-induced vibrations, which may lead to comfort issues and thus necessitate comfort research. **【Methods】** A cantilevered spiral staircase at the Xiaohe International Convention and Exhibition Center in Shanxi was selected as the subject of study, and on-site human-induced vibration tests were conducted. Through the acceleration response of the structure, the amplitude characteristics of the stair vibration response with different crowd excitations were obtained, and the impact of crowd step frequency and density on stair vibration was analyzed. The natural frequencies of the structure were identified by using analytical modal decomposition and stochastic reduction techniques, and comfort evaluations were conducted with three indicators: peak acceleration, root mean

收稿日期:2024-08-23;**修回日期**:2024-10-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978437)

第一作者:刘鹏基,硕士研究生,(E-mail)dp0606lpj@163.com

通信作者:安毅,博士,讲师,主要从事结构健康监测研究,(E-mail)aytnt@126.com

square (RMS) acceleration, and equivalent static peak acceleration.【**Results**】The results indicate that when crowds descend and concentrate on the outer side of the stairs, they cause significant vibration responses. The level of stair vibration response increases with the crowd step frequency, and it significantly increases with loading time when the crowd step frequency approaches the natural frequency of the stairs. The first three natural frequencies of the structure are identified as 3.34, 5.77, and 10.63 Hz. Comparing the measured natural frequencies and acceleration indicators with the regulatory limits shows that the staircase meets the comfort requirements.

Keywords: cantilevered steel structure; spiral staircase; human-induced vibration; comfort level; dynamic characteristics

悬挑钢结构旋转楼梯,通过将踏步面积在空间上进行折叠,从而有效节省占地面积,在满足楼梯基本功能之外,可实现消防疏散和交通缓冲等功能,且造型新颖美观,近年来广泛应用于大型商业综合体、体育场馆和会展场馆等大型公共建筑[1]。由于大跨悬挑钢结构旋转楼梯的大悬挑及空间向上的复杂结构布置属性,其自振频率较低,对人致振动更为敏感,也易产生共振等问题[2]。

人致振动可引起大跨轻柔工程结构的振动,严重时可引发结构振动舒适度问题[3],国内外学者对人致振动问题开展了广泛研究。在理论研究方面,张尧和宋志刚[4]通过试验与结果分析,研究楼梯踏步高宽比对人行荷载的影响,提出上下楼梯人致荷载模型;韦欣欣[5]通过修正后的社会力模型,模拟随机人群,以准确施加人群步行荷载。在有限元分析和试验研究方面,谭潜等[6]采用有限元软件,以模态分析和时程分析方法对大跨度长悬挑楼盖的人致振动响应进行分析,评价结构振动舒适度;卢宇杰等[7]通过试验进行人致振动下悬挂楼盖的舒适度研究,分析行人数量、体重和步频等对结构振动的影响,初步评估该楼盖满足舒适度要求。Li等[8]通过现场实测结合理论分析得到悬索桥人致振动的仿真结果。上述学者通过对长悬挑楼盖、悬挂楼盖和悬索桥等轻柔结构进行人致振动研究,得到不同人致荷载对结构振动的影响并进行结构舒适度评价。悬挑钢结构旋转楼梯自振频率较低,对人致振动敏感,故有必要对悬挑钢结构旋转楼梯进行人致振动下的结构响应研究。

国内外学者对旋转楼梯的研究多集中于结构动力特性和舒适度,包旭范等[9]采用ANSYS对大跨弧形楼梯建立有限元模型进行动力特性研究,得到不同设计方案的楼梯自振频率和振型,为结构设计提供参考。Zhou等[10]提出人行荷载模型和舒适度评价指标,并利用数值分析和现场实测对室内悬挑椭圆形旋转楼梯的人致振动进行分析,验证荷载模型并对结构舒适度进行评价,结果表明该楼梯需严格限制行人数量,且不可跑步和跳跃。杜永峰等[11]通过ANSYS对大跨柔性钢旋转楼梯进行振动模态和动力响应分析,并进行舒适度评估,结果表明该类梯舒适度评估需考虑人-结构相互作用。奚琦等[12]采用MIDAS Gen分析悬挂钢结构螺旋楼梯的结构内力、变形、振动模态和舒适度分析,结果表明该类楼梯的舒适度需由自振频率和实际使用状态下的加速度综合评价。王赞等[13]利用ANSYS对一大跨旋转钢楼梯进行舒适度研究,基于加速度响应的峰值结果分析,认为该楼梯振动不满足舒适度要求,并提出和验证了加设中柱的可行性和有效性。Chen和He[14]通过有限元ABAQUS对多支撑旋转楼梯进行内力和模态分析,结果表明楼梯第一阶自振频率为4.11 Hz,满足行人舒适度要求。杨成栋等[15]使用SAP2000的杆单元简化模型分析大跨度旋转楼梯结构周期振型、内力、变形和舒适度等,并和ABAQUS壳单元计算结果比较,验证杆单元分析结果可靠。

综合上述研究发现,大跨悬挑钢结构旋转楼梯的结构特性使其对人致振动敏感,需进行人致振动下的舒适度研究,从而为结构设计和施工提供参考。本文对山西潇河国际会展中心中间展厅主入口处的大悬挑钢结构旋转楼梯(图1)在人致振动下的加速度响应进行现场实测,识别楼梯结构的自振频率,分析研究人群荷载对楼梯结构振动的影响,对该结构的舒适度进行评价,研究结果可为楼梯结构的运维以及同类结构的设计施工提供参考。

1 工程概况

潇河国际会展中心中间展厅为可同时容纳2 600人参展的大型钢屋盖结构,由于内部楼梯不满足疏散要求,故在会展中心东北角设置室外疏散

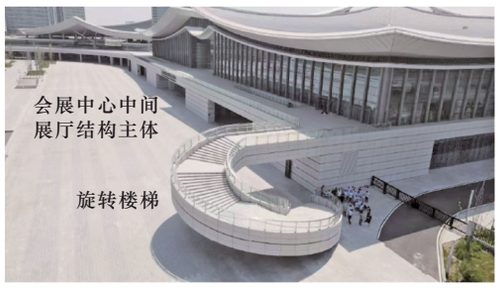


图 1　旋转楼梯外观

Fig. 1　Appearance of the spiral staircase

旋转楼梯（简称楼梯）。该楼梯全部敞开于室外，发生消防事故时，既可作为人员疏散通道，又可供消防人员作业使用。

本楼梯为中部无支撑、无立柱、旋转上升的大跨度双曲线空间悬挑结构，楼梯设计合理使用年限为 50 a，结构安全等级为二级，抗震设防类别为丙类。楼梯结构布置如图 2 所示，楼梯整体平面呈圆形，由一层地面开始旋转 274°后到达二层，其中二层标高为 7.86 m。共设有 3 个休息平台，将楼梯分为 4 个梯段，其中第四梯段通过 12 m 的悬挑平台与会展中心东平台相连。各梯段踏步高度均为 0.15 m，每阶踏步旋转角度为 3.8°。旋转楼梯内径 R_1 为 3.75 m，外径 R_2 为 9.50 m，梯段宽度 5.75 m。楼梯主体结构采用 5 750 mm×900 mm×20 mm 的钢箱梁拼接而成，内部设有多道 16 mm 厚的横隔板。

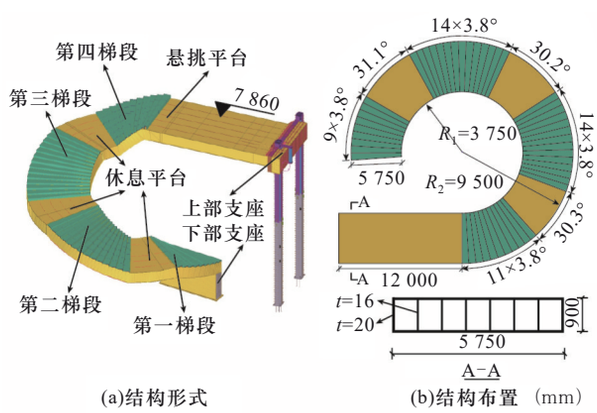


图 2　旋转楼梯结构图

Fig. 2　Spiral staircase structure diagrams

2　实验设计

2.1　加载方案

人群不同激振频率引起的楼梯振幅不同，振幅超过阈值会产生舒适度问题。为了综合考虑服役过程中可能遇到的各种人致振动情况，试验设计了有序队列加载和随机人群分布加载两种加载模式。

2.1.1　有序队列加载

有序队列加载工况为人群按照规定的步行频率及间距一次往复通过楼梯，用于模拟实际服役过程中人群同步频的不利工况。

陈隽等[16]针对中国人的行走特点进行试验研究，结果显示人行走速度为慢速、中速和快速时对应步频分别落在 1.39～2.32 Hz、1.60～2.60 Hz 和 1.59～3.10 Hz，故本次试验选取的步频（用 f 表示）分别为 1、2、2.5 和 3 Hz，可代表由慢速到快速全部情况。通过设置不同排间距考虑人群密度和通过时间对结构振动的影响，本次试验设置了 0.5 和 1 m 两种排间距（用 l 表示），分别对应 0.91 和 0.51 人/m^2 的人群密度。在楼梯结构中，通过一步所跨台阶数表征人群步幅。大跨度旋转楼梯的踏步较宽，楼梯实际服役过程中一步跨一个台阶高度最为适宜，故规定：在不同步频下，人群的步速为一步一台阶。有序队列加载根据步频和排间距的不同分为 8 个工况，分别记为 Y1～Y8，如表 1 所示。

表 1　有序队列加载工况设计

Table 1　Ordered queue loading scenario design

测试项目	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
l/m	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
f/Hz	1	1	2	2	2.5	2.5	3	3

将 51 名试验人员（平均体重为 60 kg）按照工况规定的排间距分为 17 排，每排 3 人，分别位于楼梯横向跨度的左、中、右位置，队列起始位置为楼梯第一个踏步之下。试验开始后，队列按工况规定的行走频率，从楼梯下部完整行走至二层平台，此段记为上行阶段；再从二层平台向下行走，直至队列最后一排走下楼梯，此段记为下行阶段。至此，完成一个工况下的有序队列加载试验过程。试验实际加载过程如图 3 所示。



图 3　有序队列加载试验

Fig. 3　Ordered queue loading experiment

2.1.2　随机分布人群加载

随机分布人群加载模式为人群随机分布于楼梯结构上，并按不同步频行走。此模式不仅可反映

楼梯实际服役过程中人群步行荷载的工况，其试验数据还可作为后续动力特性识别的样本。

为模拟楼梯真实服役过程中的荷载，对随机分布人群加载试验中各参数的取值应符合一定的概率分布，以保证试验过程中人员的步频、起步相位和初始位置均具有随机性。行人行走频率服从均值为2.0 Hz、标准差为0.2的正态分布，故将50名试验人员进行分组，如表2所示；起步相位指人群在楼板上行走起步时刻，服从均匀分布；人在楼梯上的初始位置，在楼梯投影面积上服从均匀分布；初始行走方向满足0～1分布。试验人员在楼梯上按随机分配的步频、位置、起步相位和行走方向在楼梯上做往复运动，每次试验时长为5 min，共重复3次，分别记为工况R1～R3。试验现场加载过程如图4所示。

表2 随机分布人群加载试验分组

Table 2 Randomly distributed population loading test groupings

试验项目	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
人数	2	12	22	12	2
步频/Hz	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4

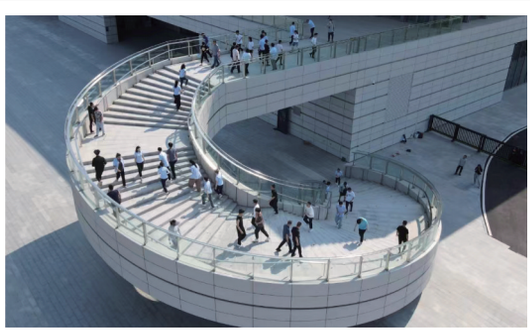


图4 随机人群分布加载试验

Fig. 4 Randomly population distributed loading experiment

2.2 测点布置

试验加速度传感器采用磁电式加速度传感器，频率响应范围0.5～50 Hz，加速度最大量程20 m/s^2，灵敏度0.3 V/(m/s^2)，现场安装如图5所示。测点的科学布置对试验数据的可靠性和有效性具有重要影响，本试验结合有限元分析，提取了前十阶模态，将测点布置于主要振型的节点位置，测点布置见图6。本试验沿楼梯纵向共设置6个测点，两两一组布置于不同高度平台的两端，以考察楼梯的竖向和扭转振动模态。

3 加速度响应分析

3.1 试验加载结果

试验中利用加速度传感器对6个测点在11个工况下的加速度响应进行采集，得到响应时程曲线，其中选取有序队列加载模式的工况Y8和随机人群分布加载模式的工况R1分别绘于图7和图8。

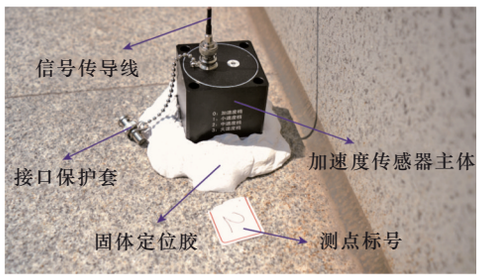


图5 加速度传感器现场安装

Fig. 5 Field installation of accelerometer

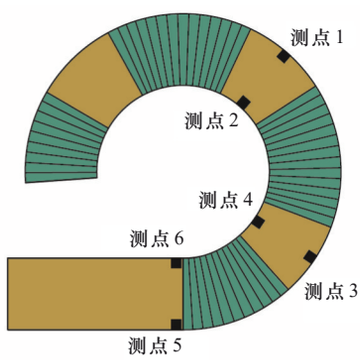


图6 测点布置

Fig. 6 Arrangement of measurement points

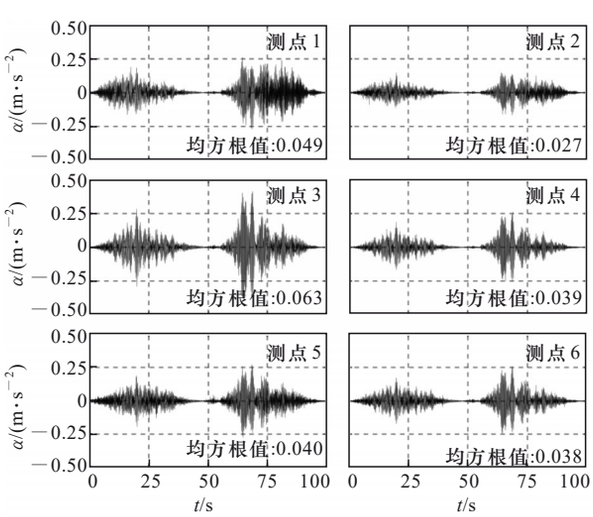


图7 工况Y8各测点的加速度响应时程曲线

Fig. 7 Acceleration time-history curves of measurement points of condition Y8

对有序队列加载各工况试验结果进行分析发现，随着队列的加载各测点时程曲线的波形发展规律相同但幅值大小不同。如图7所示，6个测点的加速度响应均呈现出两段明显的波形，分别对应有序队列加载的上行阶段和下行阶段，中间振动微小段对应队伍调转方向的阶段。各测点下行阶段的振动响应均明显大于上行阶段，这是由人上下楼梯的做功机制不同决定的，下行踏步对楼梯的冲击明显

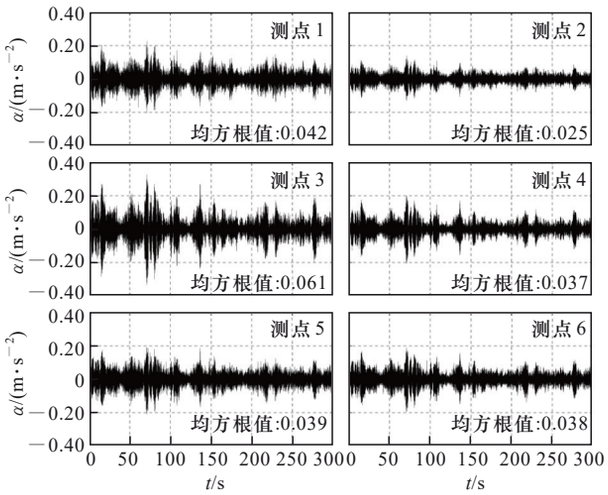


图 8　工况 R_1 各测点的加速度响应时程曲线

Fig. 8　Acceleration time-history curves of measurement points of condition R_1

大于上行踏步，因此下楼梯阶段更易发生舒适度问题。另外观察到，各测点响应达到峰值的时刻与队列行进过程有关，当队伍接近测点时振动响应最大。

由图 7 同一工况下，外弧各测点均方根值对比发现，测点 3 的均方根值为 0.063 大于测点 1 的均方根值 0.049 和测点 5 的均方根值 0.040，且测点 1 和测点 5 振动响应大致处于同一水平。这是由测点与其临近支座之间的距离决定的，测点 3 为楼梯悬挑最远端，距离支座最远，测点 1 和 5 与上下支座的距离接近。同理，楼梯内弧各测点振动响应呈现相同规律，测点 4 和测点 6 的振动响应大致处于同一水平，且明显大于测点 2。另外，通过对比楼梯横向相对设置的两测点可发现，旋转楼梯内弧的振动响应均小于外弧，由于其螺旋上升的结构特性导致内弧的刚度大于外弧，说明楼梯在加载过程中出现了扭转模态。因此在楼梯实际使用过程中，人群集中分布于楼梯外侧的情况会引起楼梯较大振幅，更易产生舒适度问题。

图 8 给出了随机分布人群加载模式下各测点的单次采集的样本时程曲线，时长 300 s。由图可知，各测点响应幅值之间的大小关系同有序队列加载的规律相同，各测点时程曲线表现出随时间的随机分布。通过对该加载模式下各测点的样本进行统计分析，发现样本时程基本符合平稳随机过程。

3.2　振幅指标

3.2.1　指标介绍

为研究结构振动响应的影响因素及其影响机制，需选取合适的振幅指标。从原始时程曲线可发现，加速度响应值中存在个别尖锐的峰值，其主要原因可能是由于信号采集过程中的偶然因素导致，不代表结构实际振动情况，且对功率谱峰值的影响较小，故不能采用加速度响应峰值作为振动响应评价的唯一指标。结合国内外规范要求，本文选取原始时程响应峰值加速度 $a_{\max}$、均方根值加速度（Root Mean Square Acceleration，a_{RMS}）和等效正弦峰值加速度（Equivalent Sinusoidal Peak Acceleration，a_{ESP}）三种峰值加速度指标作为幅值指标对楼梯进行舒适度评价。其中，均方根值加速度 a_{RMS} 为全过程加速度响应值的均方根计算结果，可表征加速度响应时程总体的加速度幅值大小，其计算如式（1）所示：

$$a_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}a_i^2/\mathrm{N}}\ . \tag{1}$$

式中：N 为样本总数；a_i 为第 i 个实测加速度响应值。

某时刻的等效正弦峰值加速度 $a_{\mathrm{ESP}}(t_0)$ 实质上是将该时刻临近时距范围的加速度均方根值等效为该时刻的加速度响应，这个方法称为 ESPA 法。该方法可有效避免原始时程中尖锐峰值对分析结果的影响，同时可完整展示加速度响应的真实波动情况。其计算步骤如下：首先将样本时程响应分割成中心为 t_0，长度为 τ 的多个短时程响应样本；对于每段短时程样本，按式（2）求得 t_0 时刻等效正弦加速度值 $a_{\mathrm{ESP}}(t_0)$；统计样本时程内各点 $a_{\mathrm{ESP}}(t_0)$ 值得到 ESPA 曲线；ESPA 曲线的峰值即为 a_{ESP}（式 3）。

$$a_{\mathrm{ESP}}(t_0)=\sqrt{\frac{2}{\tau}\int_{t_0-\tau/2}^{t_0+\tau/2}a^2(t)\,\mathrm{d}t}\ . \tag{2}$$

$$a_{\mathrm{ESP}}=\max\left\{a_{\mathrm{ESP}}(t_0)\right\}. \tag{3}$$

式中：$t_0\in[\tau/2,T-\tau/2]$，T 为样本总时长；τ 为短时距，短时距样本选取范围为 $[t_0+\tau/2,t_0-\tau/2]$。式（2）中 τ 的取值需根据样本时程的波动特性选取，τ 取值偏大时，ESPA 曲线波动较小，无法体现均方根值随时间变化规律；τ 取值偏小时，ESPA 曲线尖刺过多，不能较好地跟踪幅值水平的平均趋势。通过对比不同时距下的 ESPA 曲线发现，当 τ 为 2 s 时，ESPA 曲线可较好体现加速度响应随时间的变化，且没有尖锐峰值，故本文时距 τ 选取为 2 s。

同一工况下，测点 3 的振动响应幅值最大，故将各工况下测点 3 的 ESPA 曲线与原始加速度时程绘于图 9 中，可以看出，各工况 ESPA 曲线可较好体现加速度幅值水平随时间的变化趋势，均呈现出下行阶段峰值大于上行阶段，下行阶段平均波动幅度大

于上行阶段，进一步表明下楼梯段的振动更剧烈，更易产生舒适度问题。

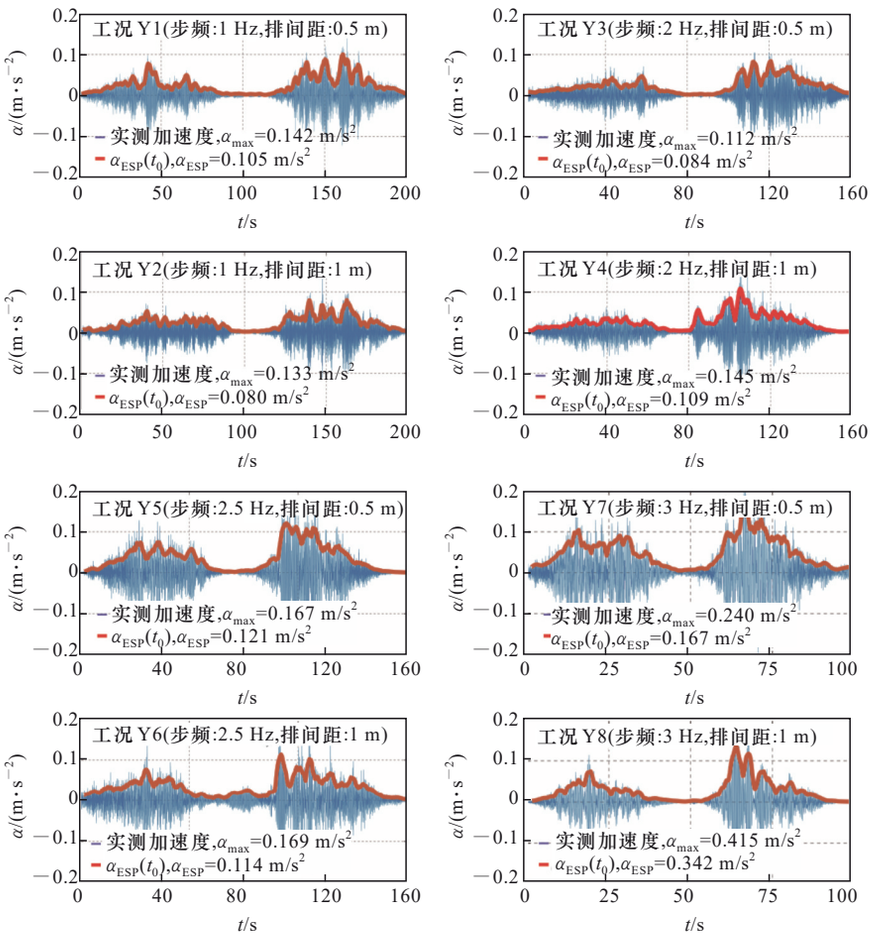


图9 测点3各工况下的加速度时程和ESPA曲线图

Fig. 9 Acceleration time-history and ESPA curves of measurement point 3 with different conditions

3.2.2 指标对比

表3列出了振幅最大处(测点3)有序队列和随机分布加载模式下各工况的a_{max}、a_{RMS}和a_{ESP}。通过代表时程整体加速度响应幅值的a_{RMS}分别对a_{max}和a_{ESP}进行无量纲化，a_{ESP}/a_{RMS}结果在2.69～3.63范围内，a_{max}/a_{RMS}在3.71～5.07范围内，可见a_{ESP}/a_{RMS}离散度更小。通过对比两种指标无量纲化后的离散度，并结合两种指标的计算原理，可得a_{max}和a_{ESP}分别表征结构不同状态的加速度响应值：a_{max}表征了某时刻加速度脉冲的峰值情况，a_{ESP}表征了某一时间段内的平均加速度峰值响应。在所有加载工况中，工况Y8(步频3 Hz，排间距1 m)的三项振幅指标均取得最大值，a_{max}、a_{ESP}和a_{RMS}分别为0.415 m/s^2、0.342 m/s^{2}和0.063 m/s^2，因此工况Y8为最不利加载工况，实际运营时对接近该工况的情况应予以注意。

表3 测点3的a_{max}、a_{RMS}和a_{ESP}

Table 3 Values of a_{max}, a_{RMS}, and a_{ESP} of measurement point 3

工况	a_{max}/m·s^{-2}	a_{ESP}/m·s^{-2}	a_{RMS}/m·s^{-2}	a_{ESP}/a_{RMS}	a_{max}/a_{RMS}
Y1	0.142	0.100	0.021	3.57	5.07
Y2	0.133	0.080	0.019	2.86	4.75
Y3	0.112	0.084	0.020	3.11	4.83
Y4	0.145	0.109	0.022	3.63	3.71
Y5	0.167	0.121	0.029	2.69	4.57
Y6	0.169	0.114	0.027	3.08	4.13
Y7	0.240	0.167	0.039	2.88	4.07
Y8	**0.415**	**0.342**	**0.063**	3.35	5.07
R1	0.334	0.287	0.061	-	-
R2	0.255	0.207	0.048	-	-
R3	0.269	0.197	0.056	-	-

3.3 楼梯振幅影响因素分析

有序队列加载试验设计中，考虑了步频和排间距两个参数对旋转楼梯在人群同步频不利工况下的影响，其中排间距的不同可导致人群荷载密度与加载时长的不同。排间距1 m的人群荷载密度更小，而同时上行阶段和下行阶段的单趟通过时间更长。由于a_{RMS}表征了单次加载过程中全局的平均振

幅水平，故本节采用 a_{RMS} 作为参数分析的指标。为研究步频和排间距对楼梯振幅的影响，将各测点在不同间距和不同步频下的 a_{RMS} 绘于图 10。

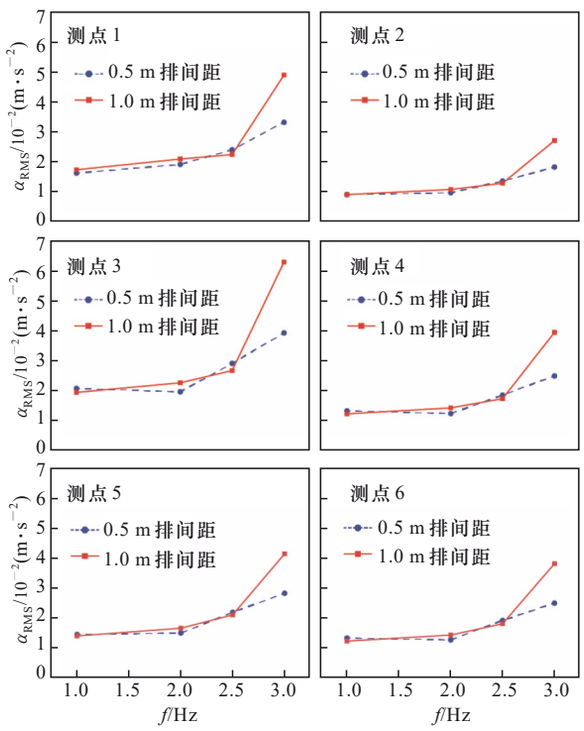


图 10　各测点不同工况下的 a_{RMS}

Fig. 10　Values of a_{RMS} of measurement points

由图 10 可知，各测点的 a_{RMS} 随步频的增加均呈现出增大趋势。步频较低时，随步频增加，a_{RMS} 的增大趋势较缓；当步频接近 3 Hz 时，a_{RMS} 的增大趋势明显变大。当人致振动频率接近楼梯自振频率时，结构振动响应会显著增大，故结构自振频率在 3 Hz 附近。同一测点，步频为 1 Hz、2 Hz 和 2.5 Hz 时，不同排间距下的 a_{RMS} 相差较小，而步频为 3 Hz 时，1 m 排间距的 a_{RMS} 显著大于 0.5 m 排间距的值。这是由于 3 Hz 的加载频率接近楼梯第一阶自振频率，当人群步频远离结构自振频率时，人群密度和加载时间对楼梯振幅水平的影响较小，当人群步频接近楼梯自振频率时，较大的排间距，由于其更长的通过时间导致楼梯共振发展更充分，因而振幅水平更高；较小的排间距，由于其通过时间较短，楼梯未发生充分共振现象，故振幅水平未显著提高。因此在楼梯使用过程中，当人群步频接近楼梯自振频率时，更短的通过时间可显著降低共振响应。

4　自振频率识别

自振频率是结构动力特性的重要组成部分，其现场实测结果可校核设计阶段的有限元模型，同时也是评估结构舒适度水平的一个重要参数。另外，服役前的自振频率作为楼梯初始状态的重要参数，可为运营阶段的服役状态评估和损伤识别提供参考。

4.1　识别方法

本文采用解析模态分解[17]（Analytical Modal Decomposition，AMD）方法，分离特定频率段的加速度响应分量，然后再利用随机减量法（Random Decrement Technique，RDT）得到结构的自振频率。

AMD 是一种时频模态分解方法，其本质上是一个自适应的低通滤波器，利用希尔伯特变换将某一具有特定频率成分的信号进行解析分解，该方法介绍如下。假设一段复杂的信号 $a(t)$ 是由 n 个分量 $a_i(t)$ 组成的，即：

$$a(t)=\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\,. \tag{4}$$

式中：$i=1,2,3\cdots,n$；$a_i(t)$ 的频率随 i 的增大而增大。假设各分量频率分别为 $\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$ 并满足 $\omega_1<\omega_{c1},\ \omega_{c1}<\omega_2<\omega_{c2},\ \cdots,\ \omega_{c(n-1)}<\omega_n<\omega_{cn}$，则分量信号为：

$$\begin{cases}a_1(t)=s_1(t)\\ a_i(t)=s_i(t)-s_{i-1}(t)\\ a_n(t)=x-s_{n-1}(t)\end{cases}. \tag{5}$$

其中，$s_i(t)$ 的计算方法如下式：

$$s_i(t)=\sin(\omega_{ci})H\left[x(t)\cos(\omega_{ci}t)\right]-\cos(\omega_{ci}t)H\left[x(t)\sin(\omega_{ci}t)\right]$$

式中 $H[\cdot]$ 表示 Hilbert 变换。

AMD 得到模态响应分量 $a_i(t)$ 后，将其作为样本，通过随机减量法对各阶自振频率进行识别。随机减量法是通过选取合适幅值阈值 y_0，截取响应信号得到若干样本，当样本个数足够多时，平均后的结果称为随机减量函数 $D(\tau)$，被认为是以初始位移为 y_0、初始速度为 0 的自由振动衰减曲线，对该曲线进行拟合，即可求得结构的自振频率。先由 AMD 方法分解具有特定频率成分的振动响应，相当于一次滤波，过滤多余频率段加速度响应分量；再由 RDT 方法识别自由振动衰减曲线并拟合得到该阶自振频率，可提高识别结果准确定性。自振频率识别技术路线如图 11 所示。

4.2　识别结果

图 12 给出了由工况 R1 测点 3 的加速度时程识别结构一阶自振频率的过程，由功率谱确定 AMD 截止频率（图 12a）；分解得到一阶模态加速度响应

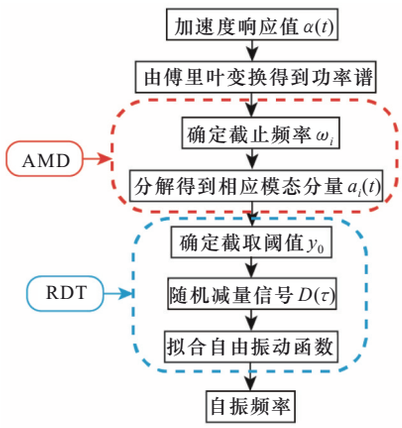


图11 自振频率识别方法

Fig. 11 Identification method for natural frequency

分量，其与原始时程的对比如图12(b)所示，可以看出一阶模态响应能量占比较大；用不同截取幅值对该模态分量运用随机减量法，识别得到楼梯一阶自振频率随振幅的变化情况，如图12(c)所示，该工况实测楼梯一阶自振频率为3.35 Hz。对工况R1—R3各测点的18个振动响应样本，按照上述步骤对楼梯前三阶自振频率进行识别，取平均值作为该阶模态的识别结果，前三阶自振频率分别为3.34 Hz、5.77 Hz和10.63 Hz，如图13所示。有序队列加载结果显示，在步频为3 Hz时的加速度响应值显著增大，接近共振现象，这与识别结果f_1为3.34 Hz的结果一致。

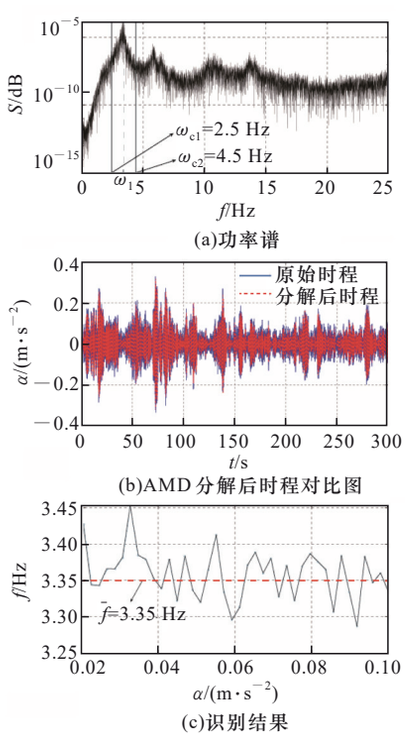


图12 自振频率识别过程

Fig. 12 Process of natural frequency identification

对楼梯建立有限元模型进行模态分析，并与实测结果进行比较。有限元模型中，钢材材料密度取为7 800 kg/m^3，弹性模量为2.06×10^5 MPa，泊松比为0.3。本楼梯为曲板式楼梯，模型整体采用板单元，上下支座处设置为刚性连接，模型如图14(a)所示。提取前3阶模态，分别列于图14(b)—(d)，其中第1阶振型自振频率为3.20 Hz，以竖向振动为主；第2阶振型自振频率为5.51 Hz，以扭转振动为主；第3阶振型自振频率为10.20 Hz，以竖向振动和扭转振动为主。将模型计算的自振频率结果与实测结果进行比较，如表4所示。通过对比发现，实测前

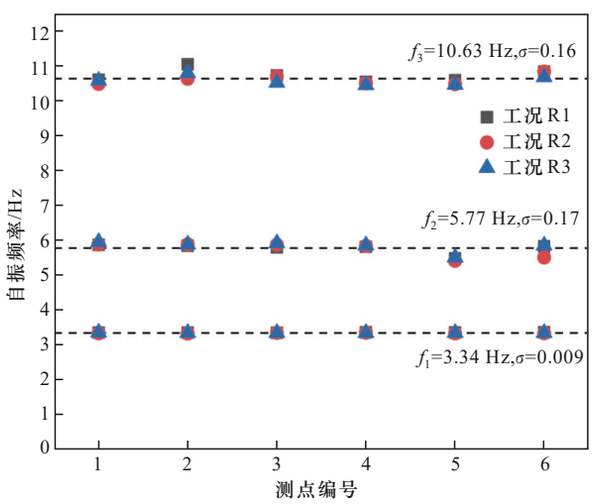


图13 自振频率识别结果

Fig. 13 Natural frequency identification results

三阶自振频率均略大于有限元结果，误差在5%以内，表明建立的有限元模型较为可靠。

表4 自振频率对比

Table 4 Natural frequency comparison

自振频率	f(有限元模拟)/Hz	f(实测识别)/Hz	误差/%
1阶	3.20	3.34	4.19
2阶	5.51	5.77	4.51
3阶	10.20	10.63	4.05

5 舒适度评价

关于大跨悬挑钢结构旋转楼梯的舒适度评价准则的选取，本文参考了人行天桥和楼盖结构，并结合国内外规范，使用避开敏感频率法和限制动力响应值法对该楼梯进行舒适度评价。

大跨悬挑钢结构旋转楼梯的振动频率限值参考《城市人行天桥与人行地道技术规范》CJJ69—95[18]中的规定，结构第一阶竖向自振频率不宜低于3 Hz。实测第一阶自振频率为3.34 Hz，大于规范限值，满足舒适度要求。

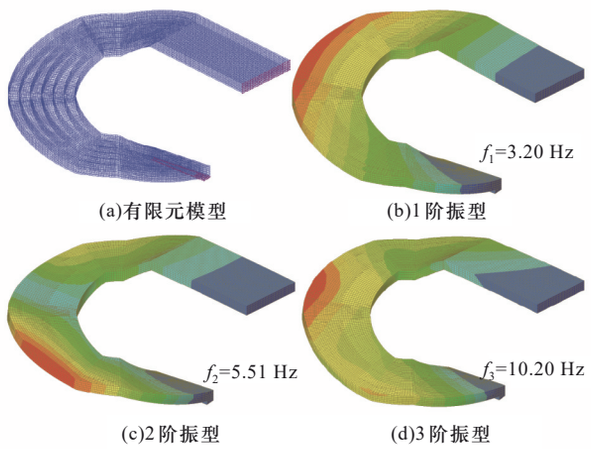


图 14　有限元模型及模态分析

Fig. 14　Finite element model and modal analysis

限制动力响应值法指通过结构的最大振动响应评估结构舒适度的方法，不同规范采用不同的加速度峰值指标进行评价。例如《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》JGJ/T441- 2019[19]规定不封闭连廊的振动峰值加速度 a_{max} 限值为 0.5 m/s^2；《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ99-2015[20]规定楼盖竖向自振频率为 2 Hz～4 Hz 时，a_{RMS} 限值应在 0.22 m/s^2～0.15 m/s^2 之间线性插值选取；美国钢结构协会的《Steel Design Guide Series 11：Floor Vibrations Due to Human Activity》[21]中规定了不同自振频率下 a_{ESP} 的限值。将各指标限值与现场实测结果列于表 5，通过对比发现，实测结果均小于规范限值，说明该旋转楼梯在正常使用过程中的加速度响应值满足舒适度要求。

表 5　舒适度评价指标点

Table 5　Comfort evaluation index points　　(m/s^2)

评价指标点	限值	实测值
a_{max}	0.500	0.415
a_{RMS}	0.173	0.102
a_{ESP}	0.500	0.342

6　结论

本文通过有序队列加载和随机人群分布加载两种加载方式，对山西潇河会展中心大跨悬挑旋转楼梯进行人致振动试验，研究人群步频和排间距对楼梯振动的影响，并通过现场实测数据识别结构自振频率，结合加速度指标进行楼梯舒适度评价，得到以下结论：

（1）相比于峰值加速度 a_{max} 和均方根值加速度 a_{RMS}，等效正弦峰值加速度 a_{ESP} 表征了考虑某一时间段时变特性的平均加速度峰值响应，可有效去除原始时程中的尖锐峰值，并具有比峰值加速度更好的稳定性，因此更适合用于舒适度评估。

（2）人群下行引起的楼梯振动响应大于上行，更易引起舒适度问题；旋转楼梯因其内外侧刚度不均匀的结构特点，人群集中于外侧通过易产生较大的振动响应，故楼梯使用过程中应避免上述情况发生。

（3）大跨悬挑钢结构旋转楼梯在一般行人步频（1～3Hz）激励下的加速度响应随着步频的增大而增大，其中人群步频接近楼梯自振频率时，较大排间距工况下的激振时间更长，致使楼梯振动响应显著增大。在实际使用过程中，快速通过楼梯可显著减小人致振动响应。

（4）通过 AMD-RDT 方法识别得到楼梯前三阶竖向自振频率为 3.34 Hz、5.77 Hz 和 10.63 Hz，与有限元模型结果较为接近，表明楼梯结构有限元模型可靠。

（5）采用避开敏感频率法，该楼梯实测第一阶自振频率（3.34 Hz）满足规范要求；通过动力响应进行评估，楼梯在人致动力加载下的峰值响应加速度、均方根响应加速度及等效正弦峰值加速度均小于相应规范的限值，楼梯正常使用过程中满足舒适度要求。

参考文献：

[1]　周彬，任晓崧，吕西林．行人激励作用下室内旋转钢楼梯振动分析[J]．振动与冲击，2012，31(14)：128-132.

[2]　Andrade P，Santos J，Maia L. Numerical methods to predict human induced vibrations on low frequency stairs. Part 1：Literature review，modelling[J]. Structures，2021，34：575-588.

[3]　陈隽．人致荷载研究综述[J]．振动与冲击，2017，36(23)：1-9.

[4]　张尧，宋志刚．考虑不同踏步高宽比的行人上下楼梯荷载试验研究[J]．振动与冲击，2022，41(9)：299-307.

[5]　韦欣欣．人致结构振动计算中随机人群行为的模拟[J]．工程力学，2022，39(S1)：330-335.

[6]　谭潜，罗小峰，徐翔鹏，等．大跨度及长悬挑钢结构人致振动舒适度与 TMD 减振控制分析[J]．建筑结构，2023，53(S2)：894-900.

[7]　卢宇杰，程逸建，程正珲，等．悬挂结构组合楼盖人致振动舒适度试验研究[J]．建筑结构学报，2020，41(S2)：263-269.

[8] Li Y, Yin D S, Wang J H, et al. Framework for calculating the vertical Human-induced vibration of the suspension footbridge under the random pedestrian flow[J]. International Journal of Steel Structures, 2022, 22(5): 1443-1461.
[9] 包旭范,赵慧玲,袁勇,等. 大跨度弧形悬吊楼梯的动力特性研究[J]. 结构工程师,2008,24(3):70-75.
[10] Zhou B, Ren X S, Lu X L. Vibration analysis and evaluation of the indoor spiral steel stair[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163: 36-43.
[11] 杜永峰,陈凯,朱前坤,等. 考虑人-结构动力相互作用螺旋楼梯人致振动舒适度评估[J]. 兰州理工大学学报,2017,43(2):115-120.
[12] 奚琦,王旭,白霜. 外围悬挂的钢结构螺旋楼梯分析与设计[J]. 建筑结构,2020,50(14):62-67.
[13] 王赞,韦振飞,王寒冰,等. 钢结构旋转楼梯的结构设计及舒适度分析[J]. 建筑结构,2013,43(S1):414-417.
[14] Chen T, He H D. Finite element analysis of a steel spiral staircase with multiple supports[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255: 1964-1967.
[15] 杨成栋,黄永强,闫泽升,等. 第十届中国花卉博览会世纪馆大跨度旋转楼梯结构设计与分析[J]. 建筑结构,2023,53(21):28-33.
[16] 陈隽,彭怡欣,王玲. 基于步态分析技术的三向单足落步荷载曲线试验建模[J]. 土木工程学报,2014,47(3):79-87.
[17] Chen G W Z. A signal decomposition theorem with Hilbert transform and its application to narrowband time series with closely spaced frequency components[J]. Mechanical systems and signal processing, 2012(28): 258-279.
[18] CJJ69-1996. 城市人行天桥与人行地道技术规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
[19] JGJ/T441-2019. 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
[20] JGJ99-2015. 高层民用建筑钢结构技术规程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
[21] Murray T M, Auen D E, Ungar E E, et al. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity[M]. Chicago: American Institution of Steel Construction, 2003.

(编辑:贾丽红)