

弧形多层悬吊楼盖舒适度分析与振动控制

杨卓颖*

(广州容柏生建筑设计事务所(普通合伙)北京分所,北京 100073)

摘要: 对弧形长悬挑桁架下的三层悬吊楼盖,开展人行荷载作用下的舒适度分析,并针对性采取振动控制措施。采用midas Gen软件建立整体计算模型,结合办公兼连廊的使用功能和悬吊楼盖协同受力的结构特点,设定多人自由行走与单位面积人群行走两种荷载,将其分别作用于悬吊中间层和悬吊三层的三种工况中。对获取的楼盖振动响应进行分析,结果表明:激励荷载的选择、荷载作用的层数及作用人数对楼盖振动峰值的加速度有显著影响。进一步地,针对最不利工况,采用设置多调频质量阻尼器(Multi-TMD)的减振措施,基于DEN HARTOG提出的双自由度有阻尼减振器理论模型,结合感应质量法计算主结构一阶模态质量,得到阻尼器最优参数。最终,对比分析一定总质量的阻尼器,在悬挑端部集中布置与沿弧形悬挑部位均匀布置两种方案。结果表明:两种方案均可有效控制楼盖振动响应,且阻尼器在悬挑端部集中布置的方案其减振效率更高。

关键词: 弧形悬挑;多层悬吊楼盖;人行荷载;振动响应;调频质量阻尼器;阻尼器最优参数

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0101-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240416001

Human Comfort Analysis and Vibration Control for Curved Suspended Multi-Floor System

YANG Zhuoying*

(RBS Structural Engineering Design Associates Beijing Office, Beijing 100073, China)

*Corresponding author: 690759369@qq.com

Abstract: The vibration response of a suspended three-floor system under a long curved cantilevered truss is analyzed and controlled for comfort under the pedestrian loads. Midas Gen software was utilized to establish the global calculation model. Combined with the structural characteristics of the coordinated stress in suspended floor system and the building function, three conditions were selected by applying the free walking by crowd and the walking by the pedestrian stream in unit area on the suspended middle layer and all three suspended three layers. The analysis of the floor system vibration response shows that the selection of the excitation load, the number of the floors and the number of pedestrians have a significant effect on the peak acceleration of the vibration in the floor system. Furthermore, for the most unfavorable working excitation condition, the vibration damping measure of Multi-TMD was adopted. Based on the theoretical model of double degree freedom damper proposed by DEN HARTOG, and applying the induction method to obtain the first-order mode mass of the main structure, the optimal parameters of the damper were deduced. Finally, the two schemes of concentrating the damper at the end of the cantilever part and uniformly arranging the dampers at the curved cantilever part with the same total damper mass were compared. The results show that both schemes control the vibration response of the

收稿日期: 2024-04-16

作者简介:

杨卓颖(1990—),女,学士,工程师,主要从事复杂建筑结构的优化设计等方面的研究。E-mail:690759369@qq.com。(通信作者)

floor system effectively, and the scheme of concentrating the dampers at the end of the cantilever part is more efficient in damping the vibration.

Keywords: curved cantilever; suspended multi-floor system; pedestrian load; vibration response; tuned mass damper; optimum damper parameter

随着建筑效果的多样化发展和新型材料的广泛应用,现代建筑逐渐呈现出刚度弱、质量轻及阻尼低的结构特点。这些结构虽然在静力荷载的作用下其承载和变形能力均能满足设计要求,但其楼盖体系在人行步行时引发的动力荷载激励下,振动响应常无法满足人体可接受的舒适度要求。如英国伦敦千禧桥,由于2000年6月开放日当天大量行人涌入,发生了剧烈振荡从而被迫关闭,最终经研究分析在原结构上安装了87个阻尼器后才得以重新开放^[1]。此次事件造成了严重的负面社会影响,引起了国内外学者的关注。

目前,国内学者越发重视楼盖体系在人行荷载作用下的振动响应,并开展了大量的研究工作。例如,文献[2]分析了图书馆内悬吊报告厅的钢-混凝土组合楼盖(该楼盖的竖向自振频率为12.69 Hz)在单人和多人连续行走荷载的作用下,吊板厚度、钢梁弯曲刚度、吊柱轴向刚度、阻尼比等因素对悬吊楼盖振动响应的影响,得出了振动响应受钢框架刚度与楼板厚度的影响较大、受次梁和吊柱刚度及楼盖阻尼比影响较小的结论。文献[3]研究了竖向自振频率为1.30 Hz的国家跳台滑雪中心,其顶部圆形桁架结构中前端悬挑楼盖在不同密度人群以不同频率行走荷载作用下的振动响应,其中当密度为 $0.25 \text{ 人} \cdot \text{m}^{-2}$ 的人群以1.30 Hz步频同调慢速行走时,楼盖的振动峰值加速度最大约为 $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,通过加大结构刚度的传统方式较难实现减振,因此提出安装电涡流TMD的减振措施,该措施的理论减振效率可达50%以上。文献[4]对某悬挂结构的组合楼盖进行了动力试验,并在楼盖上施加行走、小跑等人致激励,结果表明:悬挂建筑组合楼盖的固有频率接近行走频率,易产生较大响应,因此应加强竖向振动控制;此外,楼盖各点位的振动响应与测点位置的竖向约束有关,约束好且刚度大的点位受激励影响小。文献[5]对巨型钢框架悬挂结构体系开展了动力特性和人致荷载激励现场试验,基于试验结果对悬挂体系楼盖进行舒适度评价,结果表明:桁架层和悬挂层的楼盖舒适度均能满足现行标准要求,悬挂层的结构刚度相较于顶部桁架层的结构刚度偏弱,尤其是处于较低层的楼盖易在人行荷载作用下产生较强烈的振动响应。

随着建筑形式复杂多样性的发展,出现了弧形多层悬吊楼盖这种特殊结构体系,针对弧形多层悬吊楼盖结构的舒适度问题,尤其是当其具备复杂的使用功能需求

和大空间的建筑特点时,在项目初设阶段应对悬吊结构体系在人行荷载作用下的振动响应进行预判和减振控制分析,针对此问题尚缺乏相关研究及工程实践。

本文将以成都独角兽岛园区项目为例,针对弧形长悬挑桁架下多层悬吊楼盖,分析其在多种工况人行荷载作用下的振动响应,并针对不满足舒适度评价标准的最不利工况提出改善措施,可为类似结构的舒适度研究提供参考。

1 工程概况

本项目是由两侧编号为W2(F1~F7)、W3(F1~F6)的椭圆环形钢筋混凝土框架-核心筒结构与中间编号为W1的顶部椭圆形钢桁架(F8、F9)悬吊钢-混凝土组合楼盖(F6~F8)组成的连体混合结构。悬吊楼盖(F6、F7)两端采用钢梁端部铰接和板端设缝的方式与主体结构柔性连接,荷载可通过顶部椭圆形钢桁架传递至W2、W3与W1交叠的钢筋混凝土框架柱和核心筒处。建筑效果如图1所示,结构体系示意如图2所示,图2a)为结构体系平面图,图2b)为顶部环形钢桁架与悬吊楼盖三维图。悬吊区与主体结构连接及传力路径如图3所示。

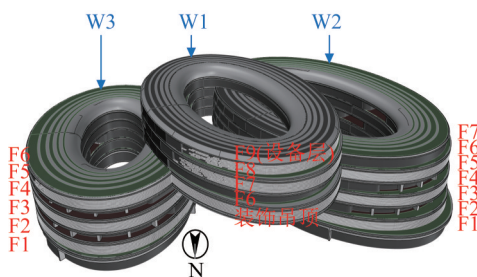


图1 建筑效果

Fig. 1 Architectural rendering

2 楼盖动力特性分析

建立地上整体模型,采用midas Gen有限元软件中多重Ritz向量法进行动力特性分析。

分析前将模型的竖向构件底端完全嵌固,梁端铰接节点调整为固接(在人行荷载作用下,梁端节点所产生的应力较小,不足以使梁端发生铰接假定中的转动变形),楼板上偏移至板顶与梁顶齐平,楼盖中的板单元划分为边长为1 m的矩形网格。楼盖阻尼比取0.03(板厚120 mm,钢-混凝土组合楼盖形式,考虑楼盖的建筑面层和筒装已完成的状态),楼板弹性模量按C30强度等级混凝土的弹

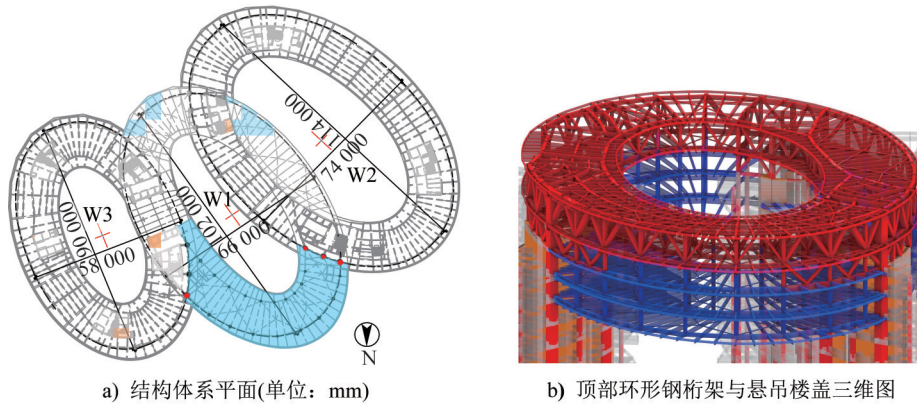


图2 结构体系示意

Fig. 2 Schematic of structural system

注:图中橘色区域为核心筒;红色为框架柱;蓝色为悬吊楼盖。

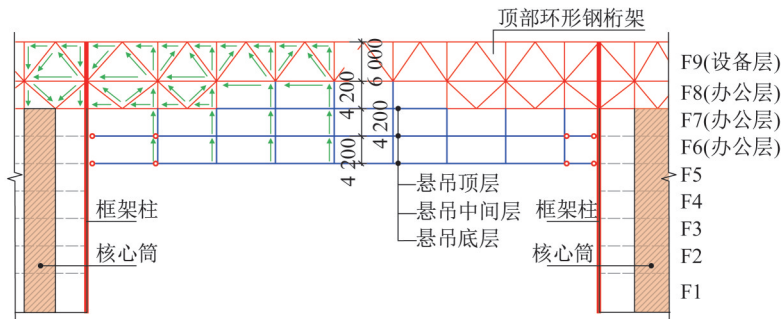


图3 悬吊区与主体连接及传力路径(单位:mm)

Fig. 3 Connection and force transfer path of suspended floors and structural main body (unit:mm)

注:图中绿色箭头为力流方向示意。

性模量乘以1.35动力放大系数进行取值,结构附加质量取附加恒载与10%活载转换的质量之和^[6]。

分析后得到整体模型的一阶模态位于W1椭圆长轴北端的弧形悬吊区,其跨度约58.1 m,弧形段竖向构件挑出距离约22.8 m。整体模型一阶模态振型如图4所示,北端弧形悬吊区主要尺寸如图5所示。图4表明,一阶模态沿弧形段挑出方向(径向)其位移随挑出距离增加而增大。

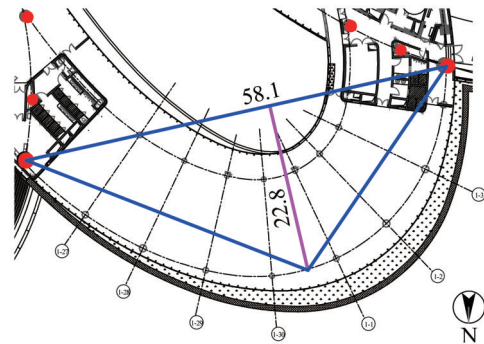


图5 北端弧形悬吊区主要尺寸(单位:m)

Fig. 5 Main dimension of curved suspended area in north end (unit: m)

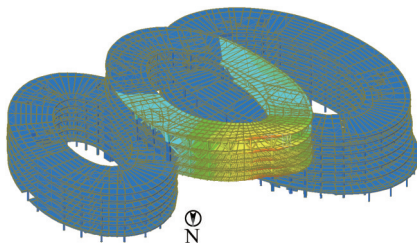


图4 整体模型一阶模态振型

Fig. 4 The first-order vibration mode of the global model

北端弧形悬吊区的一阶振型为竖向扭转联合振动,频率1.90 Hz,处于人行频率1.25~2.30 Hz范围内,此时楼盖易在人行荷载作用下发生共振,应对其进行舒适度评估。

3 激励荷载及工况

3.1 激励荷载

结合北端弧形悬吊楼盖兼具连桥与办公的实际使用功能,设置以下两种激励荷载:第一种是以人群组数和每组人数为变量的多人自由行走荷载;第二种是以人流密度为变量的单位面积人群行走荷载。

多人自由行走荷载的计算公式由《建筑振动荷载标准》(GB/T 51228—2017)第12章^[7]可得:

$$F_v(t) = \sqrt{n} Q \sum_{i=1}^3 [\alpha_i \sin(2i\pi ft - \varphi_i)] \quad (1)$$

式中： n 为每组行人的人数； Q 为单人的体重，取0.75 kN； i 为荷载频率阶数； f 为步行频率，取结构一阶自振频率1.90 Hz； t 为荷载施加时间，单位s； α_i 为第*i*阶荷载的动力因子； φ_i 为第*i*阶荷载的初始相位角；人体舒适度评估中取荷载频率前3阶，如表1所示。

表1 多人自由行走的荷载频率、动力因子和相位角

Table 1 Load frequency, dynamic coefficient and phase angle of the free walking by crowd

荷载频率阶数 <i>i</i>	荷载频率/Hz	动力因子 α_i	相位角 φ_i
1	1.25~2.30	0.37($f-1.00$)	0
2	2.50~4.60	0.10	$\pi/2$
3	3.75~6.90	0.06	$\pi/2$

假设悬吊楼盖有8组人群，共19人自由行走，其中3组人群每组3人行走在弧形悬挑外侧走廊；3组人群每组2人行走在弧形悬挑中部办公区；2组人群每组2人行走在弧形悬挑内侧走廊。人群行走范围均集中在跨中最不利处。多人自由行走的荷载时程曲线如图6所示。选取悬吊楼盖各功能区一阶模态幅值相对较大的点，对其施加激励荷载，其点位分布如图7所示。

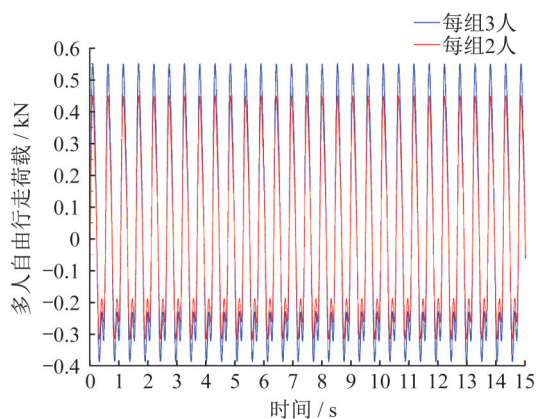


图6 多人自由行走荷载时程曲线

Fig. 6 Load-time curves for free walking by crowd

单位面积人群行走荷载计算公式由《建筑楼盖振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[8]可得：

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

式中： P 为单人行走时产生的竖向力，取0.28 kN； f_s 为步行频率，取结构一阶自振频率1.90 Hz； n' 为等效人群密度； ψ 为折减系数，取值如图8所示。

假设人群保持在舒适距离内且以不同步频行走，其中59人行走在面积为296 m²外侧走廊，人流密度约0.200人·m⁻²；86人行走在面积为690 m²的办公区和内侧走廊，人流密度

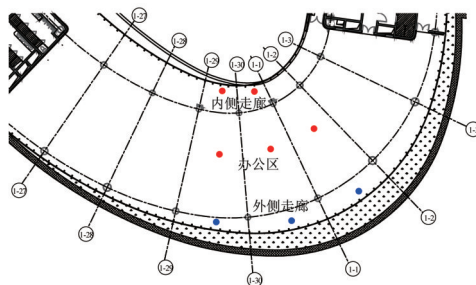


图7 多人自由行走激励点位分布

Fig. 7 Distribution of the excitation points for free walking by crowd

注：图中蓝点为每组3人激励点位；红点为每组2人激励点位。

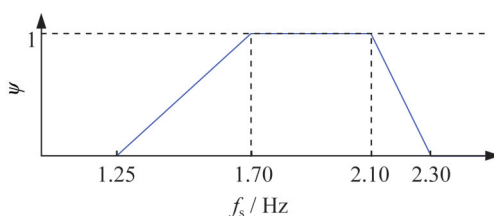


图8 折减系数 ψ

Fig. 8 Reduction coefficient ψ

约0.125人·m⁻²。

当人流密度小于1人·m⁻²时，等效人群密度 $n' = 10.8 \sqrt{\xi n} / S$ 。其中 ξ 为楼盖阻尼比，取0.03； n 为面积*S*内行走的人群总数。单位面积人群行走的荷载时程曲线如图9所示。悬吊楼盖单位面积人群行走荷载分区示意如图10所示。

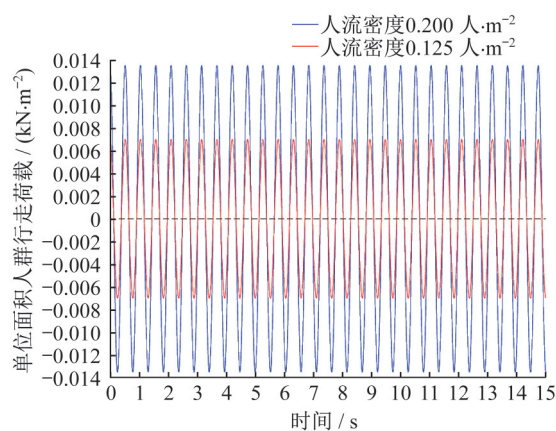


图9 单位面积人群行走荷载时程曲线

Fig. 9 Load-time curves for walking by the pedestrian stream in unit area

3.2 激励工况

经计算，弧形悬吊的各层楼盖动力特性接近，在相同荷载激励下，不同悬吊层的同一点位峰值加速度基本相当，任意一层楼盖的振动响应可表征其他层情况，因此，设

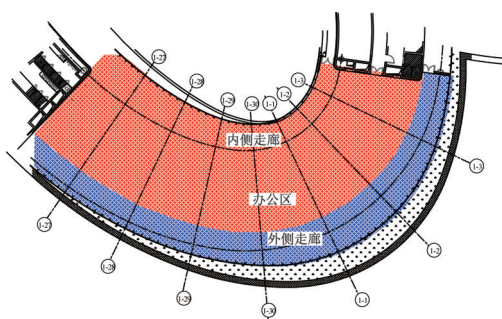


图10 单位面积人群行走荷载分布

Fig. 10 Distribution for walking load by the pedestrian stream in unit area

注:图中蓝色区为外侧走廊,人流密度 $0.200 \text{人}\cdot\text{m}^{-2}$;红色区为办公区和内侧走廊,人流密度 $0.125 \text{人}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

定激励工况1为在单独一层(选取中间层)施加多人自由行走荷载;工况2为在三层均施加多人自由行走荷载;工况3为在三层均施加单位面积人群行走荷载,如图11所示。

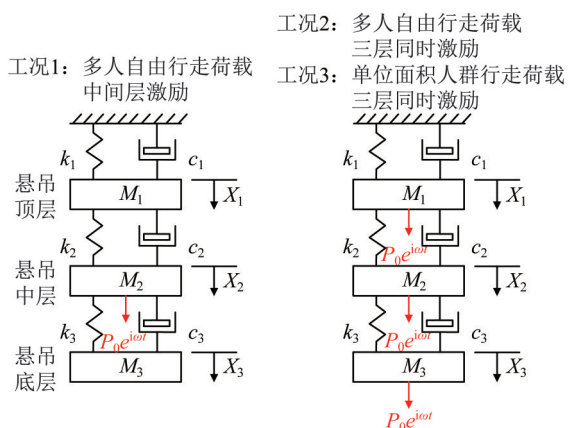


图11 激励工况示意

Fig. 11 Schematic of excitation loadcases

4 舒适度评价标准及振动响应分析

4.1 舒适度评价标准

人对所处环境振动的感知主要与振动响应的强度相关,而衡量振动强度的因素较多,因此各国对舒适度的评价标准不同,我国对楼盖的舒适度评价主要在于确定振动峰值的加速度限值。对北端弧形悬吊楼盖进行舒适度评估时,依据现行舒适度标准^[8],办公区峰值加速度限值为 $0.050 \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,内、外侧走廊峰值加速度限值为 $0.150 \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

4.2 振动响应分析

在每层大跨悬吊楼盖上沿弧形均匀布置6组18个振动加速度提取点,每组中各有一个点位于办公区和内、外侧走廊,编号组及位置如图12所示。

在3.2节工况1、2、3激励荷载的作用下,提取悬吊顶

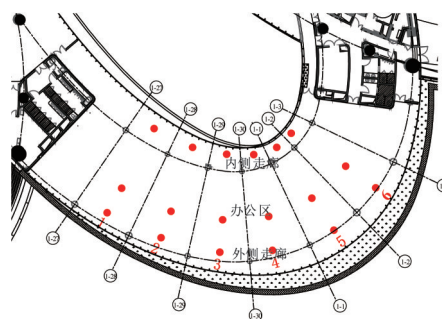


图12 振动响应提取点位编组号及位置

Fig. 12 The number and positions of the chosen vibration response points

层、中间层和底层楼盖中6组点位的振动峰值加速度,如图13所示。

图13中,横坐标为振动加速度提取点的编组号,纵坐标是对应的峰值加速度,红色虚直线为不同功能区的峰值加速度限值。从图中可以看出:弧形悬吊楼盖的振动峰值加速度从支座沿弧线向跨中呈逐渐增大的趋势,在跨中第4编组的提取点位处达到最大值。在弧形悬吊楼盖中,沿内侧走廊向外侧走廊,随着径向挑出距离增大,同一组提取点位的楼盖振动峰值加速度呈逐渐增大的趋势,这与模型一阶模态的位移变化规律一致,这是由于模态位移越大结构对应刚度越弱,结构振动响应也越剧烈。无论荷载在悬吊中层楼盖单独施加激励,还是在三层楼盖同时施加激励,悬吊底层、中层与顶层楼盖对应同一点位的振动峰值加速度均基本相当。

图13中,对比工况1与工况2的计算结果可以看出:对于相同提取点,在三层同时施加激励荷载相比在单独的中间层施加激励荷载所产生的楼盖振动响应峰值可增加2倍以上,这是由于悬吊结构楼盖通过竖向构件串联成整体,具有结构协同受力的特点,对其中一层施加荷载激励,其余层也会产生振动响应,因而当对多层同时施加荷载激励时,任一层楼盖的振动响应会产生振动叠加效应;另一方面,对三层同时施加荷载相比对单层施加荷载,楼盖振动峰值加速度未达到3倍,这是由于悬吊楼盖通过竖向构件传递振动的过程中存在一定的能量耗散。通过对比工况3与工况2的计算结果可以看出,在本文设定的激励荷载下,单位面积人群行走荷载产生的楼盖振动相比多人自由行走荷载产生的楼盖振动更强烈,前者产生的楼盖振动峰值接近后者的2倍。因此在单位面积人群行走荷载的激励下(工况3),相应功能区内更容易超出舒适度评价限值。

提取弧形悬吊楼盖中间层第4编组不同功能区的3个点位在各工况荷载作用下楼盖的峰值加速度结果进行汇总,如表2所示。

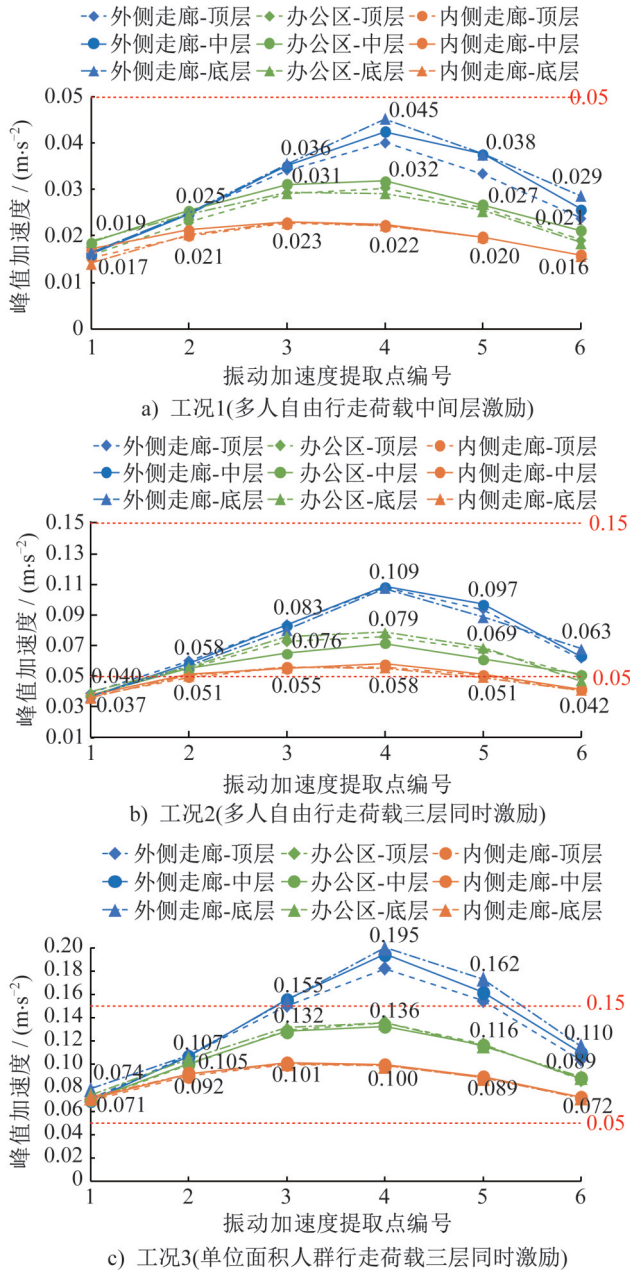


图13 各工况激励荷载作用下楼盖振动峰值加速度

Fig. 13 Vibration peak acceleration of the floors under the excitation loads of different loadcases

从表2中可以看出,工况2荷载作用下的办公区和工况3荷载作用下的外侧走廊和办公区均不满足舒适度评价限值的要求,需采取一定的减振措施。以楼盖振动响应的最不利工况,即工况3单位面积人群行走荷载三层同时激励的楼盖振动响应为例,采用设置多调频质量阻尼器(Multi-TMD)的方式控制楼盖的振动响应,使振动峰值加速度满足限值要求。

5 多调频质量阻尼器减振方案

5.1 多调频质量阻尼器布置方案

应用多调频质量阻尼器(TMD)进行振动控制是为

表2 各工况峰值加速度结果汇总

Table 2 Peak acceleration results of different loadcases

荷载工况	功能区	峰值加速度/ (m·s ⁻²)	舒适度评价 限值/(m·s ⁻²)	是否满足 限值要求
工况1	外侧走廊	0.045	0.150	是
	办公区	0.032	0.050	是
	内侧走廊	0.022	0.150	是
工况2	外侧走廊	0.109	0.150	是
	办公区	0.079	0.050	否
工况3	内侧走廊	0.058	0.150	是
	外侧走廊	0.195	0.150	否
	办公区	0.136	0.050	否
	内侧走廊	0.100	0.150	是

减振对象附加阻尼实现被动振动控制的方法。TMD是由弹簧、质量块和阻尼等元素构成的固定在主结构外的附加动力系统。基于DEN HARTOG 双自由度模型^[9],将三层悬吊楼盖简化为悬吊于固定支点包含质量块M、刚度系数K、忽略阻尼的单自由度主结构,承受圆频率 ω 、振幅P的简谐荷载作用。将包含质量块m、刚度系数k和阻尼系数c的TMD附加在主结构下,其中M为主体结构的质量;K为被悬挂的主体结构刚度系数;m和k分别为悬挂在主体结构下的TMD系统中的质量和刚度系数。力学分析如图14所示。

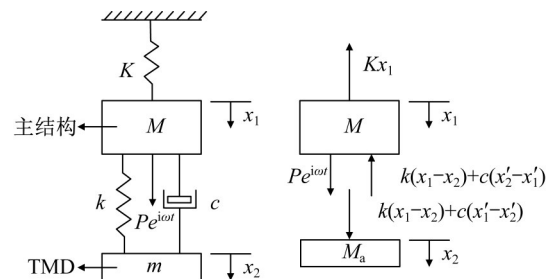


图14 附加TMD的主结构受迫振动示意

Fig. 14 Schematic of the forced vibration for the main structure attached with TMD

注:图中 x_1 和 \dot{x}_1 分别为主体结构的位移和速度; x_2 和 \dot{x}_2 分别为TMD的位移和速度。

基于文献[10]中的质量比法,得到最优频率比 f_{opt} 和最优阻尼比 h_{opt} 列于式(3)。

$$f_{opt} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}}; h_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (3)$$

研究表明,增大质量比 μ 可提升TMD的减振效果,但也会增加结构的附加质量。对于大楼、桥梁和高塔等自身质量大的结构,为避免增加过多的重量,控制质量比 μ 在0.01左右^[11]。质量比 $\mu=0.01$ 时,代入式(3)得 $f_{opt} \approx 1.0; h_{opt} \approx 0.06$ 。

采用感应质量法^[11],在整体模型中模态振幅最大点处施加附加质量 $\Delta m=30$ t后,计算得自振频率 $f'=1.89$ Hz,由原模型自振频率 $f=1.90$ Hz,再根据式(4)得主结构一阶模态质量 $M=2\ 828$ t。

$$M = \frac{\Delta m}{(f/f')^2 - 1} \quad (4)$$

针对4.2节楼盖振动响应的最不利工况,即工况3激励荷载作用下的楼盖振动峰值加速度不满足限值要求的情况,在悬吊层底部利用建筑幕墙的包裹,设置总质量为28 t的TMD系统,分别按以下两种方案布置:方案1是将8个单质量不等的TMD集中布置在弧形中部模态振幅较大处;方案2是将14个单质量均为2 t的TMD沿外弧形由中间向支座均匀分散布置。TMD布置方案如图15所示。按5.1公式计算得TMD参数如表3所示。

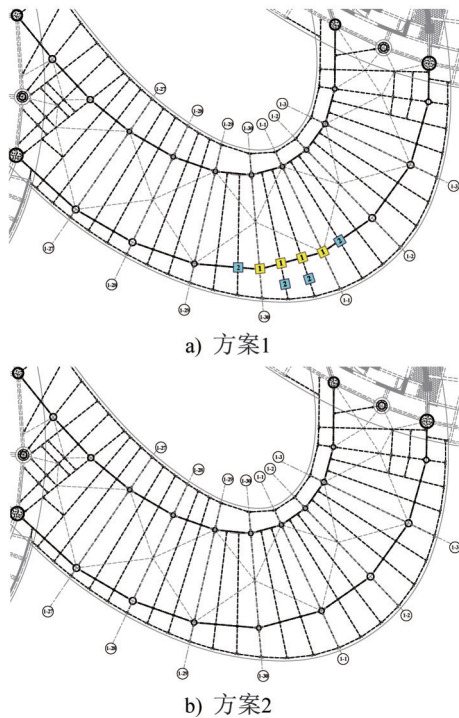


图15 TMD布置方案

Fig. 15 Arrangement of TMD setup

注:图中彩色块代表TMD,黄块编号1,蓝块编号2,绿块编号3。

5.2 多调频质量阻尼器减振结果分析

用midas Gen分别计算原模型和按方案1、方案2设

表3 TMD参数

Table 3 Parameters of TMD

编号	单质量/t	自振频率/Hz	阻尼比h	阻尼系数c/(kN·s·m ⁻¹)	刚度系数k/(kN·m ⁻¹)
1	4	1.9	0.06	5.7	570
2	3	1.9	0.06	4.3	428
3	2	1.9	0.06	2.9	285

置TMD后工况3激励荷载作用下的楼盖振动峰值加速度。在模型中TMD的质量通过建立节点并附加节点质量的方式进行模拟,对TMD的刚度和阻尼通过添加弹簧和线性阻尼器的一般连接特性的方式进行模拟,对激励荷载工况采用非线性分析。比较悬吊中间层在4.2节图12中各组提取点的计算结果,如图16所示,结果汇总如表4所示。

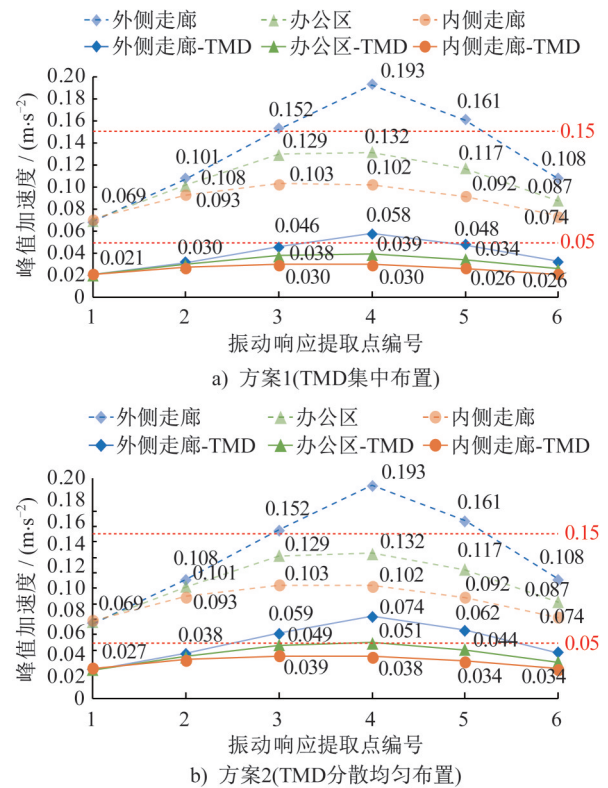


图16 设置TMD前后楼盖振动峰值加速度对比

Fig. 16 Comparisons in the vibration peak acceleration of the floors with or without TMD

上述结果可以看出:通过设置多调频质量阻尼器(Multi-TMD)的方式,并按5.1节中最佳参数法确定TMD的阻尼系数和刚度系数后,可大幅减小楼盖的振动峰值加速度,两种方案的减振率均达到60%以上。方案2对办公区的减振效果虽满足了舒适度要求,但部分提取点振动峰值加速度仍然接近限值。对比方案1与方案2

表明:当TMD总质量一定时,将TMD系统集中布置在模态振幅较大处的减振效率比将TMD沿跨度均匀分散布置的减振效率高,平均减振率可由61.9%(方案2)提高至70.4%(方案1),这是由于在模态振幅较大处,主结构的动能较大,在此处集中布置更多质量的TMD,可吸收并消耗更多的主结构动能,以此提升减振效率。

表4 设置TMD前后楼盖振动峰值加速度结果

Table 4 Results of the vibration peak acceleration of the floors with or without TMD

功能区	编号	楼盖峰值加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)			设置TMD减振率 (设置-未设)/未设	
		未设TMD	设置TMD		方案1	方案2
			方案1	方案2		
外侧走廊	1	0.068	0.021	0.026	69.1%	61.8%
	2	0.108	0.032	0.041	70.4%	62.0%
	3	0.152	0.046	0.059	69.7%	61.2%
	4	0.193	0.058	0.074	69.9%	61.7%
	5	0.161	0.048	0.062	70.2%	61.5%
	6	0.108	0.033	0.042	69.4%	61.1%
办公区	1	0.069	0.021	0.027	69.6%	60.9%
	2	0.101	0.030	0.038	70.3%	62.4%
	3	0.129	0.038	0.049	70.5%	62.0%
	4	0.132	0.039	0.050	70.5%	62.1%
	5	0.117	0.034	0.044	70.9%	62.4%
	6	0.087	0.026	0.034	70.1%	60.9%
内侧走廊	1	0.071	0.021	0.027	70.4%	62.0%
	2	0.093	0.027	0.035	71.0%	62.4%
	3	0.103	0.030	0.039	70.9%	62.1%
	4	0.102	0.030	0.038	70.6%	62.7%
	5	0.092	0.026	0.034	71.7%	63.0%
	6	0.074	0.021	0.027	71.6%	63.5%

6 结论

本文针对具有复杂使用功能的弧形长悬挑桁架下三层悬吊楼盖进行了舒适度分析,针对超出舒适度限值要求的工况,通过采用多调频质量阻尼器控制楼盖的振动响应,得出以下主要结论:

(1) 相比单独对中间层施加激励荷载,同时对三层弧形悬吊楼盖施加激励荷载所产生的楼盖振动峰值加速度增加了2倍以上,最大峰值加速度由 $0.045 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 增大至 $0.109 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。三层同时激励作用下,多人自由行走荷载产生的楼盖最大峰值加速度为 $0.109 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,单位面积人群行走荷载产生的楼盖最大峰值加速度则为 $0.195 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。因此,对于多层悬吊楼盖结构体系,考虑多层楼盖同时施加荷载激励,并根据实际情况确定合理的步行人数或人流密度,可获取更不利的楼盖振动响应工况。

(2) 弧形悬吊结构中,在单位面积人群行走荷载激励下,悬吊楼盖的外侧振动峰值加速度为 $0.193 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,显著强于内侧振动峰值加速度($0.102 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),因此对于挑出距离较大的弧形悬挑,以内侧作为舒适度要求较高的办公区、外侧作为舒适度要求较低的走廊更为合理。

(3) 对于弧形长悬挑多层楼盖采用TMD减振措施时,集中布置TMD的最优减振率为71.7%,平均减振率70.4%;均匀分散布置TMD的最优减振率为63.5%,平均减振率61.9%,在弧形中部悬挑刚度较弱处集中布置TMD的减振效率优于在弧形悬挑处均匀分散布置TMD的减振效率。

参考文献:

- [1] NEWLAND D E. Vibration of the London millennium bridge: Cause and cure[J]. The International Journal of Acoustics and Vibration, 2003, 8(1): 9-14. DOI: 10.20855/ijav.2003.8.1124

- [2] 孔子昂,王坤,周强,等.北航青岛校区图书馆悬挂报告厅舒适度设计及参数分析[J].建筑结构,2022,52(5):141-147. DOI:10.19701/j.jzjg.20200609.
KONG Ziang, WANG Kun, ZHOU Qiang, et al. Comfort design and parameter analysis of hanging lecture hall in library of Beihang Qingdao campus [J]. Building Structure, 2022, 52(5): 141-147. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200609. (in Chinese)
- [3] 朱朵娥,杨霄,马伯涛,等.国家跳台滑雪中心(雪如意)舒适度分析[J].建筑结构,2022,52(18):18-25. DOI:10.19701/j.jzjg.zj220056.
ZHU Duoe, YANG Xiao, MA Botao, et al. Comfort analysis of national ski jumping center (xueruyi) [J]. Building Structure, 2022, 52(18): 18-25. DOI: 10.19701/j.jzjg.zj220056. (in Chinese)
- [4] 卢宇杰,程逸建,程正璋,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(增刊2):263-269. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2020.S2.0029.
LU Yujie, CHENG Yijian, CHENG Zhenghui, et al. Experimental study on vibration serviceability of composite floor in a suspended structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl.2): 263-269. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.S2.0029. (in Chinese)
- [5] 张坤,王静峰,张贝贝,等.巨型钢框架悬挂结构体系组合楼盖板振动性能试验及舒适度分析[J].工业建筑,2022,52(5):90-97. DOI:10.13204/j.gyjzG20072206.
ZHANG Kun, WANG Jingfeng, ZHANG Beibei, et al. Vibration performance test and comfort analysis of composite floor slab of giant steel frame with suspended structure system [J]. Industrial Construction, 2022, 52(5): 90-97. DOI: 10.13204/j.gyjzG20072206. (in Chinese)
- [6] SMITH A L, HICKS S J, DEVINE P J. Design of floors for vibration: a new approach [M]. Revised ed. Berkshire: The Steel Construction Institute, 2009.
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations [M]. 3rd ed. New York and London: McGraw-Hill Book Company, 1947.
- [10] BROCK J E. Theory of the damped dynamic vibration absorber for inertial disturbances [J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(1): 86-92. DOI: 10.1115/1.4009897.
- [11] 背户一登.动力吸振器及其应用[M].任明章,译.北京:机械工业出版社,2013.
KAZUTO Seto. Dynamic vibration absorber and its applications [M]. REN Mingzhang, translated. Beijing: China Machine Press, 2013. (in Chinese)

(上接第51页)

- [10] BÉLAND T, TREMBLAY R, HINES E M, et al. Full-scale cyclic rotation and shear-load testing of double web with top and seat angle beam-column connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(8): 04020164. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002685.
- [11] HASAN M J, AL-DEEN S, ASHRAF M. Behaviour of top-seat double web angle connection produced from austenitic stainless steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 460-479. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.12.015.
- [12] GARLOCK M M, RICLES J M, SAUSE R. Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1615-1625. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1615).
- [13] 蔡小宁,孟少平,孙巍巍,等.顶底角钢连接半刚性钢结构抗震性能数值分析[J].工程力学,2012,29(7):124-129,146. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2010.09.0667.
CAI Xiaoning, MENG Shaoping, SUN Weiwei, et al. Numerical analysis for seismic behavior of semi-rigid steel beam-to-column connection with top-and-seat angles [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(7): 124-129, 146. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.09.0667. (in Chinese)
- [14] 石永久,施刚,王元清.钢结构半刚性端板连接弯矩-转角曲线简化计算方法[J].土木工程学报,2006,39(3):19-23. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.2006.03.003.
SHI Yongjiu, SHI Gang, WANG Yuanqing. A simplified calculation method for moment-rotation curve of semi-rigid end-plate connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 19-23. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.03.003. (in Chinese)
- [15] 李少甫.钢结构的螺栓端板连接[J].建筑结构,1998,28(8):24-26,36. DOI:10.19701/j.jzjg.1998.08.006.
LI Shaofu. Bolted end-plate connection of steel structure [J]. Building Structure, 1998, 28(8): 24-26, 36. DOI: 10.19701/j.jzjg.1998.08.006. (in Chinese)