

大跨钢楼盖人群荷载激励下减振控制分析*

马 斐^{1,2}, 张志强^{2,3}, 李爱群^{2,3}

(1. 上海建筑设计研究院江苏分公司 无锡, 214071) (2. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

(3. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 南京, 210096)

摘要 在人群荷载激励作用下,大跨钢楼盖极易产生影响正常使用的振动。采用两种不同的人群荷载模型,考虑不同人员密度、不同步行频率情况,计算分析了某火车站高架候车大厅大跨度钢结构楼盖在人群步行荷载激励下的振动情况并进行了振动控制。计算结果表明在楼盖指定钢梁跨中安置 TMD-粘滞流体阻尼器消能减振装置后,有效地削减了该楼盖的振动响应。采用人群全部同步模型时,所有工况下平均减振率为 16.86%,在共振工况下减振率达 38%以上;采用步频服从正态分布模型时,不同人群密度条件下减振率在 15.50%~15.80%之间,验证了步频服从正态分布模型具有一定的准确性,为实际工程设计提供了理论依据。

关键词 大跨度钢结构楼盖; 人群荷载; 正态分布; 振动控制; 调频质量阻尼器(TMD)

中图分类号 TU352.1

引 言

随着我国高速铁路建设的发展,近几年建成了一系列普遍采用大跨度的钢结构作为楼盖的“站桥合一”结构形式的火车站,火车站的楼盖体系跨度大、自重大、阻尼小、荷载大,导致了楼盖结构体系竖向振动频率较低。由于大跨度火车站站房具有结构跨度大、人群密集、人流复杂的特点,而且每人步行相位差、步频、步幅、身体质量、起步时间均不相同,所以人群中每个人的行走很难实现完全的协调,人群荷载的模拟十分复杂。当人行荷载频率与楼盖结构体系基频接近时,在人的行走和跳跃激励下有可能产生较大振动进而影响工作环境,造成工作效率下降,引起人们身体和心理上的困扰和不安^[1]。

针对我国“站桥合一”站房结构,在正常使用状态下常有大量的人群荷载作用在上面,尤其春运等客流高峰期人流众多,无序流动,并且伴有跺脚、跳跃等激励作用。大量人群活动会引起站房结构楼盖较大的振动,因此应首先确定人群活动荷载的力学模型,从而计算大跨钢楼盖在人群荷载激励下的振动响应情况,并进行减振控制。

我国建筑结构设计规范在人群荷载作用下大跨楼盖振动方面没有明确的规定,仅在《城市人行天桥

与人行地道技术规范》(GJJ69—95)^[2]规定:“为避免共振,减少行人不安全感,天桥上部结构竖向自振频率不应小于 3 Hz”。规范是通过限制结构的动力挠度和建议结构固有频率取值来保证的。而一些大跨度结构动力特性现场测试结果表明,大跨结构的竖向自振频率较低^[3-4],恰处于人行步频范围之内。如果通过增大结构构件的截面尺寸以增加结构刚度、提高结构自振频率以避开人行走的激励频率的方法,对于超大跨度的钢结构楼盖而言,可能是不现实的,即使能做到也很不经济^[5]。也有学者提出在楼盖的适当位置粘贴阻尼材料,以此提高结构阻尼比,但这需要试验进行验证,另外从工期和经济角度考虑,不宜采用;通过外加装置来提供干扰力、增加结构阻尼来削减结构的振动反应。最后一种方法即是通过在楼盖的适当位置添加合适的消能减振装置,对楼板因人行运动而引起的共振效应进行减振。

1 人群荷载模拟

1.1 单人行荷载模拟

人步行激励荷载取(international association for bridge and structural engineering,简称 IAB-SE)^[6]的公式如下

* 国家自然科学基金资助项目(51278106);江苏省建设厅资助项目(JS2010JH14)
收稿日期:2011-09-07;修改稿收到日期:2011-12-30

$$F_p(t) = P \left[1 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i \sin(2i\pi f_s t - \Phi_i) \right] \quad (1)$$

其中: F_p 为行人激励荷载; t 为时间; P 为体重; f_s 为步行频率; α_i 为第 i 阶简谐波动载因子, 文献[5]只取前三阶计算, 其中: $\alpha_1 = 0.4 + 0.25(f_s - 2)$, $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$; Φ_1 为初始相位角, 在 $[0, 2\pi]$ 随机分布, $\Phi_2 = \Phi_3 = \pi/2$ 。

实验研究证明, 一般人的自然行走频率在 2.0 Hz 附近; 偏安全地认为所有人质量相同^[8], 为 70 kg。步频一致时单人步行荷载激励 F_p 与体重 P 的比值时程曲线如图 1 所示。

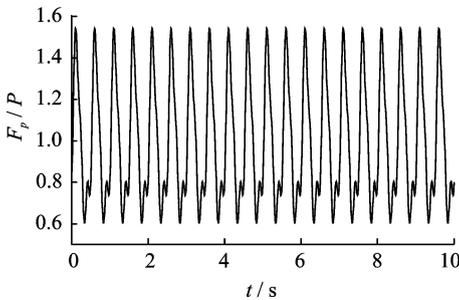


图 1 单人步行荷载激励与体重的比值时程曲线

1.2 人群荷载模拟

正常使用条件下, 大跨楼盖结构往往承受大量人群的同时作用, 因此需要研究大量人群产生的步行力。

限于试验设备的局限性, 对于人群产生的步行力直接测试不易实现, Ebrahimpour 在试验研究中曾试对 4 个人总的步行力进行测量^[9]。实际工程中, 一般都是将单人步行力按照一定的方式叠加得到多人甚至人群步行力。由于行人间步行不一致, 不同人的步行力相互抵消, 按照荷载等效原则, 人数为 n 的人群荷载可折减为 N_p 个步调一致的行人产生的荷载, 二者的比值称为同步调概率

$$p_s = \frac{N_p}{N} \quad (2)$$

其中: N 为人群人数。

1.2.1 人群齐步行走

对于人群齐步行走, 认为所有人步调一致, 可认为有

$$N_p = n \quad (3)$$

其中: n 为人群人数。

已有的实际工程中^[10-11], 通常采用式(3)进行人群荷载的模拟。但该式偏于保守, 计算得到大跨结构竖向振动加速度、位移偏大, 经济性较差。

1.2.2 步频服从正态分布^[12]

对于人群荷载激励仍采用单人激励荷载模型, 在人群荷载输入时, 人群步行频率服从正态分布, $f_{rw} \sim N(2.0, 0.175)$, 概率密度函数如图 2 所示; 人群行进的相位差服从均匀分布 $[0, 2\pi]$ 。笔者采用 MATLAB 编程, 计算得到服从以上分布特性的人群荷载曲线, 模拟人群荷载作用。按上述模拟得到的人群按上述模拟得到的人群步行荷载激励 F_p 与体重 P 的比值时程曲线如图 3 所示。

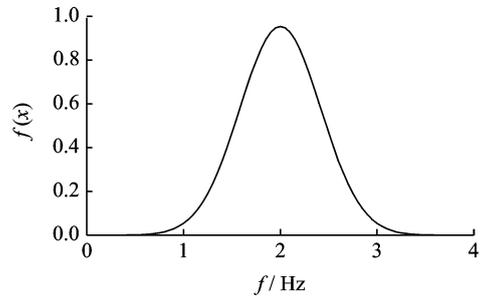


图 2 人群步频正态分布概率密度函数图

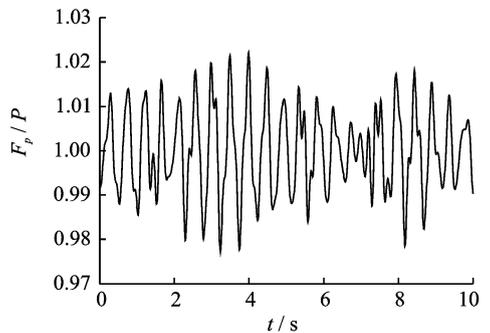


图 3 人群步行荷载与体重的比值时程曲线

2 TMD 消能减振原理

由于结构前 3 阶竖向自振频率处于步行荷载频率范围内, 以及第 4 至第 6 阶竖向自振频率接近步行荷载频率范围, 故决定对该楼盖进行消能减振设计, 采用多个调频多点 TMD-粘滞流体阻尼器消能减振系统。

结构消能减振技术是一种结构控制技术, 结构控制的概念可以简单表述为: 通过对结构施加控制机构, 由控制机构与结构共同承受振动作用, 以调谐和减轻结构的振动反应, 使它在外界干扰作用下的各项反应值(加速度、速度和位移)被控制在允许范围内^[13-14]。

TMD(tuned mass damper)即调频质量阻尼器, 是结构被动减振控制体系的一类, 它由主结构和

附加在结构上的子结构(固体质量和弹簧减振器等)组成。通过调整子结构的自振频率,使其尽量接近主结构的基本频率或激励频率。当主结构受激励而振动时,子结构就会产生一个与结构振动方向相反的惯性力作用在结构上,使主结构的振动反应衰减并受到控制^[15-16]。TMD系统的自振频率取决于弹簧减振器的有效刚度 K_d ,阻尼 C_d 由粘滞阻尼器提供,其值及TMD系统调频质量 M_d 的大小根据计算确定。图4是等效的单质点主结构在外部激励 $P(t)$ 作用下的TMD减振原理示意图,可直观地反应TMD的消能减振设计原理。

附加了TMD的多自由度系统在竖向荷载作用下的动力方程^[17]为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (4)$$

$$\text{其中: } M = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ E^T M_d & M_d \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} C_s & -EC_d \\ 0 & C_d \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} K_s & -EK_d \\ 0 & K_d \end{bmatrix}; x = \begin{Bmatrix} x_s \\ x_d \end{Bmatrix}; F = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

M_s, C_s, K_s 分别为主结构的质量、阻尼和刚度矩阵; M_d, C_d, K_d 为TMD系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{x_d\}$ 为各TMD相对于主结构的位移向量,仅为竖向分量,水平分量为零; E 为TMD作用位置矩阵,其中第 j 列向量 $E_j = [0 \cdots 0, 1, 0 \cdots]^T$ (1在第 i 列)表示第 j 个TMD设置在结构第 i 个节点处,分析时需要按照TMD实际布置进行调整; $f(t)$ 为人行动力荷载时程,曲线可以由IABSE^[4]标准得到。

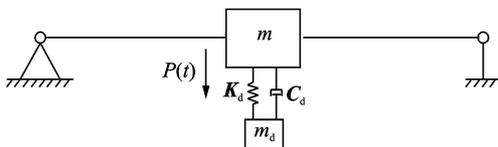


图4 单质点结构的TMD减振原理

3 工程案例

3.1 工程概况

西安火车站北站站房D区主体长为220.8 m,宽为107.62 m,其二层为高架候车大厅,建筑标高为10.000 m,宽度方向上共3跨,跨度分别为43.06,43.06,21.5 m,区域内主要布置有10个进站口、12个候车区以及11条进站通道。由于建筑功能及工艺要求,在3个跨度共107.62 m和长66.5 m的矩形区域范围内布置了12个候车区以及11条进站通道。整个候车大厅的楼面由3.15 m高的钢桁架支承在两侧的柱子上,主梁和次梁均为钢

桁架。可见楼盖跨度较大,阻尼较小,又因候车大厅的特殊性质,人群密集,人行荷载工况较多,人行荷载较大。结构图见图5。

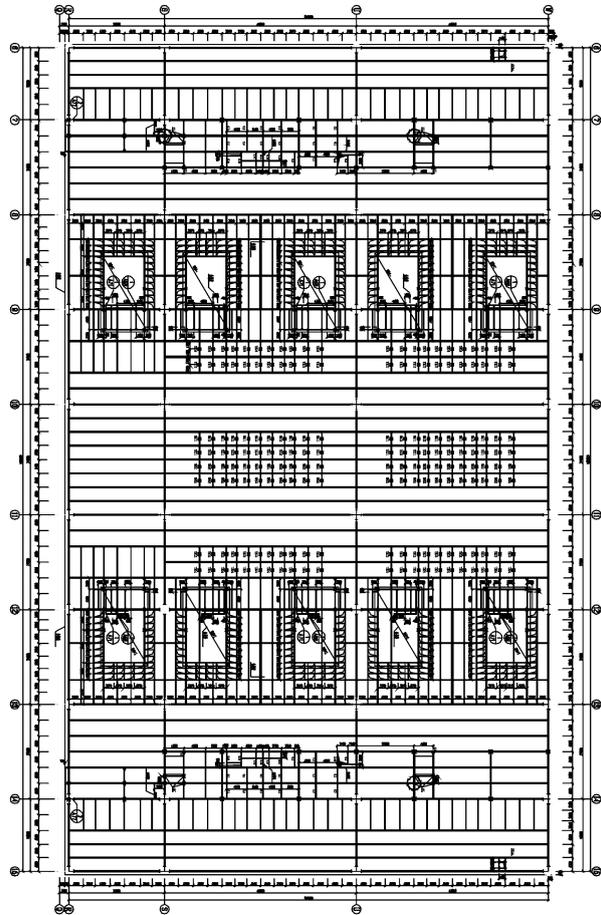


图5 楼盖D区结构图(长度方向中部黑点处为TMD)

3.2 结构自振特性分析

采用有限元程序SAP2000对该结构楼盖进行自振特性分析。由于西安北站站房结构形式复杂,结构自振周期非常密集。而与计算相关的主要是目标楼盖的振型,故对站房整体结构模态分析结果进行筛选,选择出楼盖需要减震的竖向振型,其频率如表1所示,楼盖前三阶振型图如图6所示。

表1 楼盖竖向振型频率

模态数	1	2	3	4	5	6
f/Hz	2.25	2.31	2.32	2.52	2.60	2.62

3.3 分析工况定义

分析时根据进站通道口的分布,同时考虑结构的对称性,将荷载布置区域分为5块。实际运营时,不是所有的进站口同时进站。考虑到篇幅,仅对3

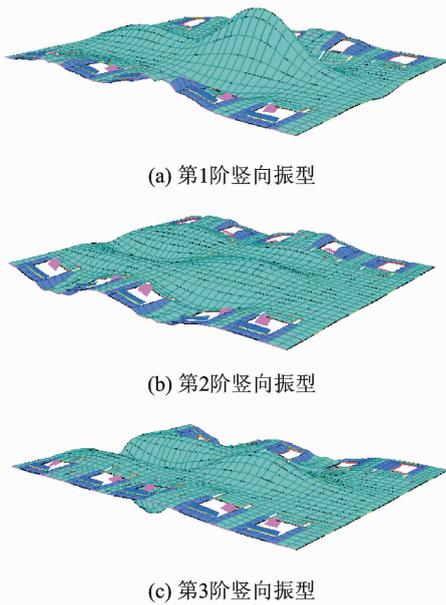


图 6 楼盖竖向振型

区(楼盖跨中区域)施加人群荷载。将 3 区划分为 18 块,分别添加人群荷载曲线。分析时考虑实际情况,人群密度取 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 及 1.5 人/ m^2 6 种工况,所对应的步频分别取 3.1,2.5,2.3,2.0,1.7 和 1.5 Hz,以模拟楼盖结果实际所受人群荷载^[18]。定义分析工况如表 2 所示。其中,工况 1 中,采用同步人数为 n 、起步相位不同的人群荷载模型;工况 2 中,采用人群步频服从正态分布的荷载模型。

表 2 振动分析结果

工况	行人密度/ (人· m^{-2})	步频/ (Hz)	减振前/ ($m \cdot s^{-2}$)	减振后/ ($m \cdot s^{-2}$)	减振率/ %
1a	0.2	3.1	0.041 61	0.039 45	5.19
1b	0.4	2.5	0.118 04	0.072 78	38.34
1c	0.6	2.3	0.221 01	0.144 26	34.73
1d	0.8	2.0	0.173 51	0.144 53	16.70
1e	1.0	1.7	0.112 82	0.109 13	3.27
1f	1.5	1.5	0.154 12	0.149 60	2.93
2a	0.2	频率 服从 正态 分布	0.016 45	0.013 86	15.74
2b	0.4		0.032 94	0.027 78	15.66
2c	0.6		0.041 12	0.034 67	15.69
2d	0.8		0.065 78	0.055 44	15.72
2e	1.0		0.082 15	0.069 17	15.80
2f	1.5		0.123 44	0.104 02	15.73

3.4 消能减振装置的布置

经过多次循环优化计算,楼盖共布置 176 套减振装置,具体布置如图 4 所示。每套减振装置由粘滞阻尼器和调频质量阻尼器组成,包括 4 个弹簧减

振器、1 个粘滞阻尼器和若干连接件、万向铰等。减振装置参数见表 3,表中的参数均根据反复优化计算结果而来。

表 3 TMD 系统参数

减振系统 编号	弹簧刚度/ ($N \cdot m^{-1}$) (单根 弹簧)	质量 块质量/ kg	调频 频率/ Hz	阻尼器参数	
				阻尼 指数	阻尼 系数/ ($N \cdot s \cdot m^{-1}$)
TMD ₁	19 719	500	2.0	1	C=3 000
TMD ₂	35 938	500	2.7		
TMD ₃	47 375	500	3.1		
TMD ₄	26 038	500	2.3		

4 舒适度评价标准

研究表明,人的生理和心理不舒适感主要受加速度控制,对于加速度控制指标主要包括最大加速度峰值法(a_{max})、均方根加速度法(a_{rms})和振动计量法(a_{vdr})。对于大跨钢楼盖楼的竖向振动,本文采用加速度峰值控制指标。

人的感觉是一个非常难以进行定量测量的问题,Lipper^[19]认为不同的人对相同的振动环境会有不一样的反应,而且同一人在不同时刻对同一振动环境也会有不同的反应。此外,人们对振动反应还受到环境嘈杂程度的影响,在舞厅等嘈杂环境中人们对振动忍受力就高于办公室等安静场所。由于这种不同人之间的差异、单人对振动反应的差异以及环境的影响,关于振动舒适度评价的问题是通过大量测试者在振动环境下进行反应测试而定性划分的舒适度评价标准,舒适度的评价标准建立比较困难,所以国际上也有许多不同的标准。表 4 列举了国外相关的加速度峰值控制标准。

表 4 相关加速度控制标准

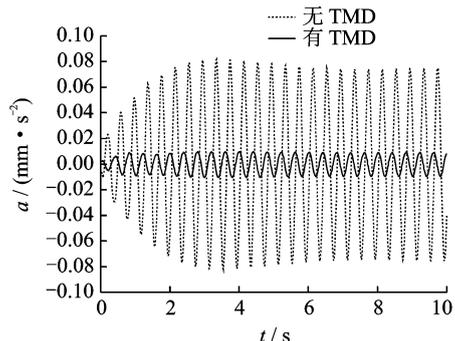
规范	控制指标
欧洲规范 EN1990 Eurocode ^[20]	人行桥任意位置的竖向振动加速度峰值应小于 $0.7 m/s^2$
英国规范 BS5400 ^[21]	竖向加速度峰值小于 $0.2\sqrt{f}$ 和 $0.7 m/s^2$, f 为桥面竖向自振频率
Bachmann ^[22]	$0.010 m/s^2$,舒适度限值 $0.055 m/s^2$, 忍受界限 $0.180 m/s^2$
美国标准 AISC-11 ^[8]	住宅及办公室、商场、室外人行天桥 竖向振动峰值加速度限值分别为 $0.05, 0.15$ 和 $0.5 m/s^2$
德国规范 EN03 ^[23]	人行桥竖向 $0.50 m/s^2$, 侧向 $0.10 m/s^2$

国外人行桥设计规范竖向加速度限制较高,并且没有区分不同的使用环境,因此这里采用美国 AISC-11 标准作为加速度控制指标。

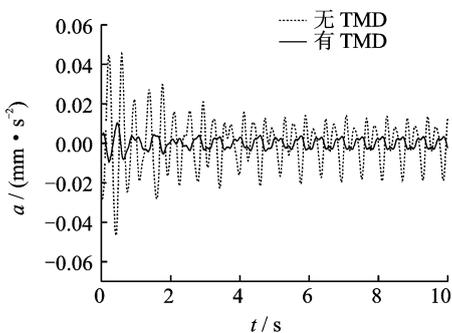
5 减振前后动力分析及结果对比分析

按照人群荷载模拟和工况定义方案,通过有限元软件 SAP2000 对结构进行全面的动力分析,分析结果参见表 4。

图 7 给出了部分工况下,大跨楼盖跨中某节点的加速度时程曲线;图 8 给出了部分工况减振前后,大跨楼盖峰值加速度云图;图 9 给出了加速度功率谱密度分布图。



(a) 工况1b(0.4人/m²、2.5 Hz)减振前后对比



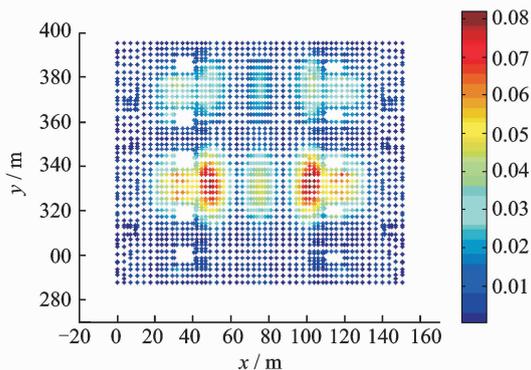
(b) 工况1e(1.0人/m²、1.7 Hz)减振前后对比

图 7 楼盖某节点加速度时程对比

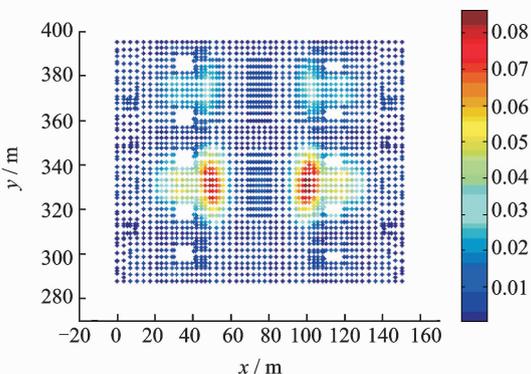
表 2 和图 7~9 表明:

1) 采用行人全部同步、起步相位随机荷载模型,在 0.6,0.8,和 1.5 人/m² 人群密度条件下,楼盖竖向振动加速度超过 AISC-11 标准关于商用楼盖竖向加速度 0.15 m/s² 的限制,因此需要对该大跨度钢楼盖进行人群荷载激励下的减振设计,以保证使用条件下人体舒适度要求。

2) 采用行人全部同步、起步相位随机荷载模型在 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 和 1.5 人/m² 人群密度条



(a) 工况2e-减振前



(b) 工况2e-减振后

图 8 减振前后的楼盖加速度云图

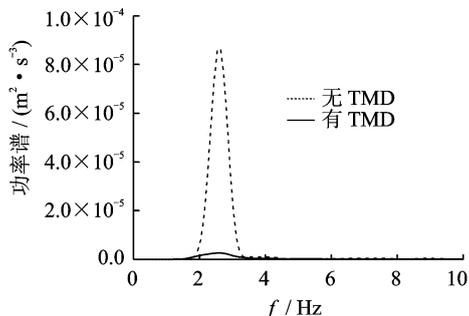


图 9 加速度功率谱密度分布

件下,楼盖振动加速度峰值减振率分别为 5.19%,38.34%,34.73%,16.70%,3.28%,2.93%;平均加速度峰值减振率为 16.86%。

3) 采用步频服从正态分布的荷载模型,在 0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 和 1.5 人/m² 人群密度条件下,楼盖振动加速度峰值减振率分别为 15.74%,15.66%,15.69%,15.72%,15.80%,15.73%;平均加速度峰值减振率为 15.72%。

4) 由图 7 可知,2.5 Hz 工况下,楼盖明显进入共振状态;1.7 Hz 工况下,激励频率远离楼盖竖向振动频率,因此无明显共振现象;与前期动力特性分

析结果一致;验证计算的正确性。

5) 由图8可知,采用步频服从正态分布的荷载模型,1.0人/m²人群密度条件下,TMD布置区域加速度降低效果明显,减振效果较好。

6) 由图9功率谱分布密度可知,楼盖发生了以第一阶模态为主的共振,前几阶局部竖向振动频率在2~3 Hz之间,与前期动力分析结果一致;采用TMD后对其控制模态的振动控制效果显著。

6 结 论

本文采用2种不同荷载模型,对西安火车站北站高架候车大厅进行了人群步行荷载下钢楼盖振动控制分析。

1) 采用行人全部同步、起步相位随机荷载模型的计算结果表明:低密度人群的情况下,由于行人的自由行走,人群的行走频率较高;在高密度人群情况下,行人行走阻塞,人流向前移动速度减缓导致人群行走频率降低,动力作用减少。因此,随着人群密度的增加、步频降低,楼盖动力响应有一个先增加后减少的过程。

2) 采用行人全部同步、起步相位随机荷载模型的计算结果表明:由于该减振方案TMD调频范围较窄,在2.0~2.5 Hz范围内,减振效果较好;在频率大于2.5 Hz和小于2.0 Hz时,减振效果较差;这也证实了调频质量阻尼器减振控制存在有效控制的激励频宽问题,一个子结构,只能对以某个频率为主(卓越频率)的外部激励进行有效减振控制。因此还应对该减振方案进行优化,增大TMD系统调频范围,以取得更优减振效果。

3) 采用步频正态分布模型时,在不同人群密度条件下,减振率在15.50%~15.80%之间,与行人全部同步模型的平均减振率十分接近,验证了步频正态分布模型的正确性。

4) 采用2种不同人群荷载模型,考虑不同人员密度、不同荷载频率情况下,对大跨度楼盖进行了振动分析与减振设计,布置TMD后楼盖振动情况降低明显,但仍应和结构实际振动测试情况进行对比,验证荷载模拟的正确性以及实际减振效果。

参 考 文 献

[1] 黄梦雅. 大跨楼盖人行荷载下的减振控制[D]. 南京:东南大学,2009.

- [2] 中华人民共和国建设部. CJJ69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [3] 沈顺高,刘先明,叶继红,等. 首都机场四机位机库的动力特性测试及理论分析[J]. 东南大学学报:自然科学版,2003,33(1):76-78.
Shen Shungao, Liu Xianming, Ye Jihong, et al. Test and analysis of dynamic characteristic of hangar of capital airport[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(1): 76-78. (in Chinese)
- [4] 孙广俊,李爱群,黄镇,等. 首都机场机库动力特性测试与分析[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(2):158-162.
Sun Guangjun, Li Aiqun, Huang Zhen, et al. Test and analysis of dynamic characteristic of AMECO-A380 maintenance hangar in Beijing capital airport[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 158-162. (in Chinese)
- [5] 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.
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. (in Chinese)
- [6] Allen D E, Onysko D M, Murray T M. Minimizing floor vibration ATC design guide 1 [S]. California: Applied Technology Council, 1999.
- [7] 陈宇. 步行荷载激励下大跨人行桥的振动研究与减振研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [8] Murray T M, Allen D E, Ungar E E. Floor vibration due to human activity. AISC design guide 11 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1997.
- [9] Ebrahimpour A, Fitts L L. Measuring coherency of human-induced rhythmic loads using force plates[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7):829-831.
- [10] 李爱群,张志强,俞剑锋,等. 西安北站站房楼盖振动舒适度减振设计与分析报告[R]. 南京:东南大学土木工程学院,2010.
- [11] 李爱群,张志强,陈鑫,等. 长沙站站房楼盖振动舒适度减振设计与分析报告[R]. 南京:东南大学土木工程学院,2009.
- [12] 张志强,马斐,李爱群,等. 大跨钢结构楼盖人群荷载响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报,2011,27(3):517-523.
Zhang Zhiqiang, Ma Fei, Li Aiqun, et al. Response analysis of large-span steel structure floor Under crowd

- load[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2011,27(3):517-523. (in Chinese)
- [13] 叶正强,李爱群,徐幼麟. 工程结构粘滞流体阻尼器减振新技术及其应用[J]. 东南大学学报:自然科学报, 2002,32(3):466-473.
Ye Zhengqiang, Li Aiqun, Xu Youlin. Fluid viscous damper technology and its engineering application for structural vibration energy dissipation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(3):466-473. (in Chinese)
- [14] 焦常科,李爱群,王浩. 三塔悬索桥地震响应控制[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(2):156-161.
Jiao Changke, Li Aiqun, Wang Hao. Seismic response control for triple-tower suspension bridges[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2):156-161. (in Chinese)
- [15] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社, 1997:211.
- [16] 周星德,明保华. 采用半主动 TMD 的建筑物振动控制研究[J]. 振动、测试与诊断,2006,26(2):116-118.
Zhou Xingde, Ming Baohua. Research on semi-active TMD of building structure vibration control[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2006,26(2):116-118. (in Chinese)
- [17] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京:机械工业出版社,2007:239-241.
- [18] 马斐,张志强,李爱群. 大跨高空连廊人群荷载下 TMD 减振控制分析[J]. 建筑结构,2011,41(4):1399-1403.
Ma Fei, Zhang Zhiqiang, Li Aiqun. Vibration control analysis of large-span corridor under crowd load with TMD[J]. Building Structure, 2011,41(4):1399-1403. (in Chinese)
- [19] Lippert S. Human reactions to vertical vibration [J]. Society of Automotive Engineers Journal, 1947, 55(5):32-34.
- [20] BS EN 1990 Eurocode. Basis of structure design[S]. London: British Standards Institution(BSI), 2002.
- [21] BS5400 British standard specification for loads, steel, concrete and composite bridges, Part 2[S]. London: British Standards Institution (BSI),1978.
- [22] Bachmann H, Pretlove A, Raoner H. Vibration problems in structures [M]. Basel: Birkhauser Verlag, 1955:234.
- [23] RFS2-CT-2007-00033 Hivoss (human induced vibrations of steel structures): design of footbridges guideline EN03 (2007) [S]. Germany: Research Found for Coal & Steel, 2008.



第一作者简介:马斐,男,1987年10月生,硕士。主要研究方向为工程抗震减振。曾发表《大跨钢结构楼盖人群荷载响应分析》(《沈阳建筑大学学报》2011年第27卷第3期)等论文。
E-mail:mafei1006@163.com