

DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.14.021

# 基于人群-结构耦合振动大跨连廊人致振动 舒适度评估\*

惠晓丽<sup>1</sup>, 朱前坤<sup>1,2</sup>, 张琼<sup>1</sup>, 蒲兴龙<sup>1</sup>

(1 兰州理工大学防震减灾研究所, 兰州 730050;

2 兰州理工大学西部土木工程防灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

[摘要] 基于人-结构耦合振动,对某钢结构连廊的人致振动舒适度进行评估,并对其产生的过量振动进行减振控制。为了考虑人-结构耦合作用,将单自由度体系的人体动力学模型与傅立叶级数人行荷载模型组合代表单个行人荷载。利用 ANSYS 建立大跨钢结构连廊的有限元模型,并采用 APDL 编程将行人荷载分别以定点加载、单步移动加载及人群同步移动加载等不同工况加载于有限元模型中,对比分析不同工况下考虑人-结构耦合振动前后连廊的加速度响应,同时以峰值加速度作为指标评估该钢结构连廊的振动舒适度,并选用单个调谐质量阻尼器(TMD)对连廊的过量振动进行减振控制。结果表明:对大跨连廊结构进行人致振动舒适度评估时,应考虑人群-结构耦合振动;TMD 能有效控制大跨连廊结构的人致过量振动。

[关键词] 大跨连廊; 人体动力学模型; 振动舒适度; 人致振动; 振动控制

中图分类号: TU391 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2020)14-0120-06

[引用本文] 惠晓丽,朱前坤,张琼,等.基于人群-结构耦合振动大跨连廊人致振动舒适度评估[J].建筑结构,2020,50(14):120-125,109. HUI Xiaoli, ZHU Qiankun, ZHANG Qiong, et al. Evaluation on human-induced vibration comfort of large-span corridors based on population-structure coupled vibration [J]. Building Structure, 2020, 50(14): 120-125, 109.

## Evaluation on human-induced vibration comfort of large-span corridors based on population-structure coupled vibration

HUI Xiaoli<sup>1</sup>, ZHU Qiankun<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiong<sup>1</sup>, PU Xinglong<sup>1</sup>

(1 Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2 Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the human-structure coupled vibration, the human-induced vibration comfort of a steel structure corridor was evaluated and the excessive vibration generated was controlled. In order to consider the human-structure coupled effect, the human body dynamic model of the single-degree-of-freedom system and the Fourier series pedestrian load model were combined to represent a single pedestrian load. The finite element model of the long-span steel structure corridor was established by using ANSYS, programming APDL was used to load the pedestrian load into the finite element model in different working conditions such as fixed-point loading, single-step moving loading and crowd synchronous moving loading, the acceleration responses between with and without considering the human-structure coupled vibration were contrasted and analyzed. At the same time, the peak acceleration was taken as the index to evaluate the vibration comfort of the steel structure corridor, and a single tuned mass damper (TMD) was selected to control the excessive vibration of the corridor. The results show that the population-structure coupling vibration should be considered when evaluating the human-induced vibration comfort of the large-span corridor structure; TMD can effectively control the human-induced excessive vibration of the large-span corridor structure.

**Keywords:** large-span corridor; human body dynamic model; vibration comfort; human-induced vibration; vibration control

### 0 概述

由于现代建筑对其自身的空间使用功能及其外观造型的要求越来越高,因此,在一些建筑工程项目中,经常采用连廊结构连接两幢建筑物。连廊的跨度少则几米,多则几十米。随着连廊结构自身跨度

的不断增大,其自振频率不断降低,阻尼不断减小,这就使得连廊对人行荷载也会更加敏感,更易遭受人致振动问题<sup>[1-2]</sup>,轻则使作用在连廊上的行人产

\* 国家自然科学基金资助项目(51508257,51668042,51868046)。通讯作者:朱前坤,博士,教授,硕士生导师,Email: zhuqk@lut.cn。

生不舒适感,重则会发生人致共振问题,影响连廊的安全使用。因此该类连廊在人行荷载作用下的竖向振动问题也日渐突出,人致振动舒适度问题也不容忽视。因此研究大跨度连廊结构的人致振动舒适度以及减振控制问题很有必要。

由于行人荷载是引起连廊结构振动的主要根源,所以要研究大跨连廊结构的人致振动问题并对其进行动力特性分析,进而评估结构的振动舒适度,首先应该建立合理的行人荷载模型<sup>[3]</sup>。由于行人本身不仅是一个复杂的生物系统和动力系统,而且当行人作用在结构时,不同时刻行人的步行位置及作用力大小不断变化,这就使得行人荷载变得极其复杂<sup>[3]</sup>。许多研究表明,在采用有限元模拟方式求解结构的动力响应时,若只是将行人荷载简化为移动的集中荷载,而忽略了行人与结构之间的耦合作用,这就会导致模拟出的动力响应与实测值之间存在一定的差别,且结构的振动响应被高估,从而导致振动舒适度的评估结果不精确<sup>[4-5]</sup>。Baker 等<sup>[6]</sup>、朱前坤等<sup>[7]</sup>的研究结果均已经表明:行人与结构之间的相互作用对结构的动力响应有着较为显著的影响,当行人作用在结构上时,振动系统的阻尼会相应增加,结构的动力响应也相应减小。为了能够在有限元仿真模拟中获得真实的人致振动响应,从而精确地评估结构的振动舒适度,国外学者<sup>[8-9]</sup>将行人等效为具有刚度-质量-阻尼(SMD)的单自由度体系模拟人体动力学模型,从而考虑行人-结构的相互作用;研究结果表明:采用有限元仿真的结果与实测结果基本一致。基于上述分析结果,为了考虑人-结构的耦合振动,本文将单自由度体系的人体动力学模型与傅立叶级数人行荷载模型组合代表单个行人模型。并以某钢结构连廊为工程实例,在研究钢结构连廊竖向振动的同时,也考虑人群-结构耦合振动对结构动力响应的影响。

## 1 人体动力学模型

### 1.1 人体动力学模型参数

本文采用具有刚度-质量-阻尼的单自由度体系模拟人体动力学模型,用以考虑人与结构之间的相互作用<sup>[10]</sup>,如图 1 所示,其中  $m_p$ 、 $k_p$  和  $c_p$  分别为行人的质量、刚度和阻尼,  $F_p$  为行人荷载,  $u_p$  为行人的竖向位移,  $u$  为连廊的竖向位移。

Silva 和 Pimentel<sup>[11]</sup> 等通过试验研究提出单自由度人体动力学模型中行人的质量、

刚度和阻尼可用行人的实际质量和步频表示:

$$m_p = 97.082 + 0.275M - 37.518f_p \quad (1)$$

$$c_p = 29.041m_p^{0.883} \quad (2)$$

$$k_p = 30\,351.744 - 50.261c_p + 0.035c_p^2 \quad (3)$$

式中:  $M$  为行人的实际质量;  $f_p$  为行人的行走步频。

### 1.2 单人步行荷载模型

本文将单自由度体系的人体动力学模型与傅立叶级数人行荷载模型组合代表单个行人模型。其中傅立叶级数人行荷载模型如(4)式所示<sup>[12]</sup>。但是相对于谐波产生的动力响应而言,行人自重所产生的动力响应可忽略不计<sup>[13]</sup>,因此傅立叶级数人行荷载可写成式(5)<sup>[14]</sup>:

$$F_p = G + G \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2\pi f_p t - \theta_i) \quad (4)$$

$$F_p = G \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin(2\pi f_p t - \theta_i) \quad (5)$$

式中:  $G$  为行人的重量, N;  $f_p$  为行人的行走步频, Hz;  $t$  为时间, s;  $n$  为模型中考虑的荷载总谐波数;  $\theta_i$  为相位角,一般取 0;  $\alpha_i$  为动载因子,动载因子一般取前三阶<sup>[8]</sup>,如式(6)~(8)所示:

$$\alpha_1(f_p) = -0.27f_p^3 + 1.32f_p^2 - 1.76f_p + 0.76 \quad (6)$$

$$\alpha_2 = 0.07 \quad (7)$$

$$\alpha_3 = 0.06 \quad (8)$$

在 ANSYS 有限元软件中,采用 APDL 编程实现单人单步移动加载的模拟。当不考虑人-结构耦合振动时,只需要直接将单个行人荷载的竖向分量按时间顺序移动加载到人行走在结构上的落脚点对应的有限元网格点(加载点)上,这样即可模拟出单人行走在不考虑人-结构耦合振动时的整个过程。当考虑人-结构耦合振动时,要在 ANSYS 中模拟出人体动力学模型,其中人体的质量  $m_p$  用 Mass21 单元来模拟,人体的动力特性用 Combin14 单元来模拟,人体的刚度  $k_p$  和阻尼  $c_p$  可通过定义实常数来实现;利用生死单元法实现人体动力学模型对结构的作用过程,即激活加载点处的人体动力学模型,杀死不加载点处的人体动力学模型,同时将行人荷载的竖向分量按时间顺序移动加载到人行走在结构上的落脚点对应的有限元的网格点(加载点)上,用此种组合加载的方法即可模拟出单人行走在考虑人-结构的耦合振动时的整个过程。

## 2 人群-结构耦合振动荷载模型

在大跨度、低频率、低阻尼、纤细轻柔的结构中,一般存在两种行人与结构的相互作用,第一种为行人对结构的阻尼和频率等动力特性的影响;第二种为行人与行人之间的同步性以及行人荷载激励相位

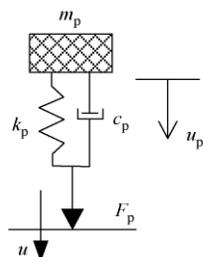


图 1 刚度-质量-阻尼系统

与结构振动相位之间的同步性。当模拟计算人群在结构上行走时的动力响应时,上述两种行人-结构相互作用对计算结果的精确度有着至关重要的影响<sup>[15]</sup>。对于静止的行人,Zheng 和 Brownjohn<sup>[16]</sup>将其视为单自由度体系。对于运动的行人,Ellis 和 Ji<sup>[17-18]</sup>建议将运动的行人视为移动荷载。

当作用在结构上的人群密度比较大,此时如果结构的晃动影响到行人的舒适感和平衡感时,行人会下意识地调整步长和速度,达到与结构同步振动的目的。由于行人都是互不相同的个体,随着结构的晃动,行人各自调整步伐,从而形成同步调行走,产生更大的步行激励,当该步行激励与结构同步振动时,会引发严重的共振现象<sup>[9]</sup>,因此,结构在人群荷载作用下更易引发人致振动舒适度问题。为了能更为直观、精确地研究人群行走作用下大跨结构的振动响应,很有必要采用人群空间变化的移动加载方式来模拟人群在结构上的运动。

在人群激励模型中,由于每个人在行走过程中,各自的步频、步幅和行走方式等均存在一定的差异,不同的行人对结构产生的激励作用也可能会出现相互抵消的现象,因此本文对人群中的每个行人均采用相互独立的单人激励来在模拟,以此来仿真人群激励<sup>[19]</sup>。

在 ANSYS 有限元软件中,人群同步移动加载可看成在同一时刻有  $n$  个( $n$  为人数)单人单步移动加载,按几行几列经过结构。首先在人群的行走区域内,找出每一时刻  $n$  个行人的各自落脚点对应的有限元网格点(加载点),然后按照时间顺序对  $n$  个行人在每一时刻各自对应的网格点(加载点)上同时进行移动加载,这样即可按单人单步移动加载方式模拟出人群同步行走加载的工况。

### 3 TMD 优化模型

当结构出现过量振动时,需要采取一定的减振措施来确保结构能够同时满足安全性和使用性的要求<sup>[3]</sup>。本文将采用单个调谐质量阻尼器(TMD)对钢结构连廊的过量振动进行减振控制。根据文献<sup>[10, 20]</sup>可以计算出 TMD 的刚度、质量和阻尼,如下:

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (9)$$

$$\xi_{\text{dopt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (10)$$

$$k_{\text{opt}} = \alpha_{\text{opt}}^2 \omega_1^2 m_d \quad (11)$$

$$m_d = \mu m_1 \quad (12)$$

$$c_{\text{opt}} = 2\xi_{\text{dopt}} \alpha_{\text{opt}} \omega_1 m_d \quad (13)$$

式中:  $\alpha_{\text{opt}}$  和  $\xi_{\text{dopt}}$  分别为 TMD 与结构控制模态的频率比和阻尼比;  $k_{\text{opt}}, m_d, c_{\text{opt}}$  分别为 TMD 优化后的刚度、质量和阻尼;  $\omega_1$  为结构的一阶频率;  $m_1$  为结构的一阶模态质量;  $\mu$  为 TMD 质量与结构控制模态质量的比。

在 ANSYS 中模拟 TMD 时,TMD 的质量  $m_d$  采用 Mass21 单元模拟,TMD 的动力特性采用 Combin14 单元模拟,TMD 的刚度  $k_{\text{opt}}$  和阻尼  $c_{\text{opt}}$  通过定义实常数来考虑。

## 4 工程算例

### 4.1 工程概况

本节以某钢结构连廊为工程背景。该钢结构连廊主跨为 21.8m,宽度为 2.3m,次梁间距为 2.08m。主次梁均采用强度为 Q235-B 的 H 型钢,主梁截面为 H850×300×16×27,次梁截面为 HN250×125×6.5×9,桥面为 100mm 厚的混凝土板,混凝土强度等级为 C30。

### 4.2 有限元建模

在利用 ANSYS 有限元软件建立该钢结构连廊的有限元模型过程中,采用 Shell 181 单元模拟混凝土板,采用 Beam 188 单元模拟钢梁。为了使有限元模型更加符合实际的钢结构连廊,在建模过程中,采用偏移命令将 Shell 181 单元与 Beam 188 单元的顶面设置在同一水平面上。混凝土板沿长度方向按照 0.693m(2.08/3=0.693m)进行有限元网格划分,沿宽度方向根据不同的工况对网格进行划分。在几何建模过程中,C30 混凝土的弹性模量为  $3.0 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>,Q235-B 钢材的弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>,泊松比为 0.3,同时为了模拟钢结构连廊与两边建筑的铰接连接,将连接处四个节点设置为限制  $X, Y, Z$  三个方向的平动约束。图 2 为该钢结构连廊的有限元模型。

### 4.3 模态分析

在 ANSYS 中采用分块兰索斯法(Block Lanczos)对该钢结构连廊进行模态分析,从而获得该钢结构连廊的振型频率和模态响应,其第 1 阶频率  $f_1 = 5.5$  Hz,且在跨中位置出现最大位移幅值,对应的竖直方向的第一阶模态振型云图的三维视图和正立面视图如图 3 所示。

### 4.4 连廊人致振动分析

在采用 ANSYS 进行仿真模拟时,选用完全法对该钢结构连廊在表 1 所示几种工况下的加速度响应进行计算。对于作用在结构上的人数可根据行走密度定义<sup>[7]</sup>。为了分析该钢结构连廊在人群荷载作用下的振动响应,行走在连廊上的人群密度分别取

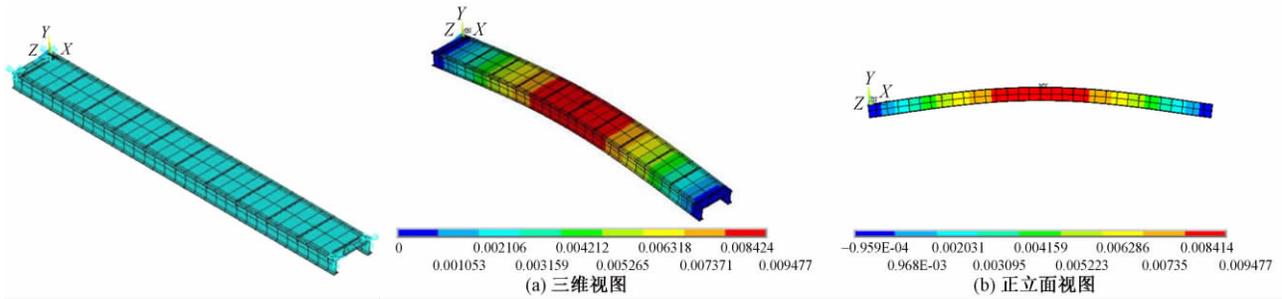


图 2 有限元模型

图 3 第 1 阶振型模态云图( $f_1 = 5.5\text{Hz}$ )

0.156 人/ $\text{m}^2$  和 0.313 人/ $\text{m}^2$ , 对应的人数为 8 人和 16 人。

表 1 振动分析工况

工况编号	是否考虑人-结构耦合振动	加载工况	工况内容
1	否	定点加载	单人以 1.83Hz 的步频在连廊跨中踏步
2	是	单步移动	单人以 1.83Hz 的步频在连廊上行走
3	否	8 人同步移动	8 个人以 1.83Hz 的步频在连廊上行走, 行人 2 按列行走, 每列 4 人, 左右间隔 0.767m, 前后间隔 0.693m
4	是		
5	否	16 人同步移动	16 个人以 1.83Hz 的步频在连廊上行走, 行人 2 按列行走, 每列 8 人, 左右间隔 0.767m, 前后间隔 0.693m
6	是		
7	否	16 人同步移动	16 个人以 1.83Hz 的步频在连廊上行走, 行人 2 按列行走, 每列 8 人, 左右间隔 0.767m, 前后间隔 0.693m
8	是		

由 ANSYS 的模态分析可知, 该连廊的第 1 阶竖向振动频率为 5.5 Hz, 而且当单人作用在该钢结构连廊时, 连廊宽度方向网格划分长度为 1.15m ( $2.3/2 = 1.15\text{m}$ ), 此时结构在第 1 阶模态振型中最大位移幅值对应的节点编号为 146, 而当人群作用在钢结构连廊时, 连廊宽度方向网格划分长度为 0.767m ( $2.3/3 = 0.767\text{m}$ ), 此时结构在第 1 阶模态振型中最大位移幅值对应的节点编号为 156。

文献 [21] 指出 99.9% 的慢速、中速、快速通过结构时步频分别落在 1.39 ~ 2.32, 1.60 ~ 2.60, 1.59 ~ 3.10Hz, 并且经过研究得出, 行人慢速通过结构时, 振动舒适度程度最高, 快速通过时次之, 中速通过时最低。故加载时为了考虑最不利情况, 本文规定行人以  $f_p = 5.5/3 = 1.83\text{Hz}$  的中速步频通过结构, 步长取为 0.693m, 且通过第 1 阶振型最大位移幅值处 (146 节点或 156 节点)。本文为了简化起见, 每个行人的质量均统一取值为  $M = 70\text{kg}$ , 对应的人体重量为  $G = 700\text{N}$ , 将其代入式 (5), 可得到傅立叶级数的人行荷载。这样即可在 ANSYS 中采用 APDL 编程, 将定点加载、单步移动和人群同步在不考虑人群-结构耦合振动和考虑

人-结构耦合振动情况下的荷载模型加载到该钢结构连廊的有限元模型中, 进而得出结构在不同工况下的振动响应。表 2 列出各工况下的峰值加速度, 并进一步计算出考虑人-结构耦合作用后, 结构峰值加速度的减小率。由于篇幅的限制, 仅列出 8 人和 16 人同步工况下位移峰值点的加速度时程曲线, 如图 4 所示。

表 2 各工况下的峰值加速度

工况编号	是否考虑人-结构耦合振动	加载工况	节点编号	峰值加速度 / ( $\text{m/s}^2$ )	减小率 / %
1	否	定点加载	146	0.050 0	-8.60
2	是			0.054 3	
3	否	单步移动	146	0.035 0	7.14
4	是			0.032 5	
5	否	8 人同步移动	156	0.669 1	68.90
6	是			0.208 1	
7	否	16 人同步移动	156	0.593 5	34.80
8	是			0.386 9	

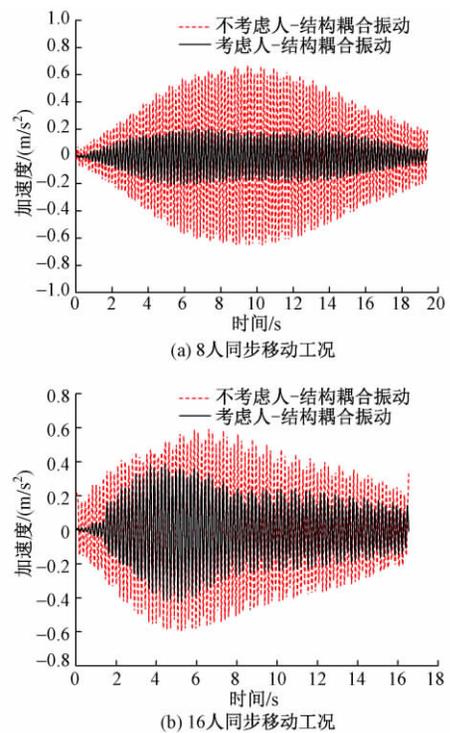


图 4 人群同步移动工况下加速度时程曲线比较

对比各工况下钢结构连廊在行人荷载作用下振动响应的变化,由表2可知,除了定点加载工况之外,其余各工况下,相比于不考虑人-结构耦合振动时的峰值加速度而言,考虑人-结构耦合振动后的峰值加速度均有相应减小,而且在8人同步移动加载工况下减小率达到68.90%,在16人同步移动加载工况下减小率达到34.80%。由上述分析可以看出,对于单个行人作用在结构的工况而言,考虑人-结构耦合作用与否对结构动力响应的影响不明显,但是,当人群作用于结构上时,人群-结构耦合振动对结构动力响应的影响就比较明显。所以在进行人群作用下结构振动响应分析时,考虑人群-结构耦合振动对精确评估振动舒适度具有重要的指导意义。

#### 4.5 振动舒适度评估标准

国内外的一些规范和标准,例如《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)、《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)、国际标准化组织ISO 2631、《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》对人行天桥或连廊的人致振动舒适度问题均制定了相关的限值要求。

综合各规范、标准对振动舒适度的相关评估指标,本文要求连廊的自振频率不小于3Hz,竖向的峰值加速度不大于 $0.15\text{m/s}^2$ ,以此作为判断连廊是否满足振动舒适度要求的标准。由表2可知,除定点加载和单步移动工况之外,其余各工况下该钢结构连廊的峰值加速度均大于规定限值,且该钢结构连

廊的第1阶振动频率 $f_1 = 5.5\text{Hz}$ ,满足限值3Hz要求,但是该基频仍然很小,在行人荷载作用下极易出现人致振动舒适度问题,因此很有必要研究在采取有效的减振控制措施后结构动力响应的变化情况。

#### 4.6 TMD 振动控制

本文采用单个TMD的减振措施对结构在表1各工况下的加速度响应进行控制,目标模态为连廊的一阶模态。从ANSYS中提取出该钢结构连廊的一阶模态质量 $m = 6\,644.05\text{kg}$ ,取质量比 $\mu = 0.02$ ,从而计算得到TMD的频率比和阻尼比分别为: $\alpha_{\text{opt}} = 0.980\,4$ , $\xi_{\text{dopt}} = 0.085\,75$ ,TMD的质量、刚度和阻尼分别为: $m_{\text{d}} = 132.88\text{kg}$ , $k_{\text{opt}} = 152\,528.62\text{N/m}$ , $c_{\text{opt}} = 122.88\text{N}\cdot\text{s/m}$ 。

由于篇幅的限值,图5~8仅列出各工况下结构在不考虑人-结构耦合振动时采用单个TMD减振前后的加速度时程曲线及傅立叶谱曲线的对比,各工况下位移峰值点处峰值加速度如表3所示。由表3可知,在位移峰值节点处安装单个TMD后,在不考虑人-结构耦合振动时,各工况中TMD均对结构的响应起到了很好的减振效果,减振率最高达到68.98%。但采用单个TMD控制装置后,人群同步作用下,在考虑人-结构耦合振动的情况时,减振效果并不明显,甚至在16人同步移动工况下,减振率为负。该结果表明:人群同步作用于连廊结构时,人群-结构耦合振动对结构的动力响应的影响较为明显。

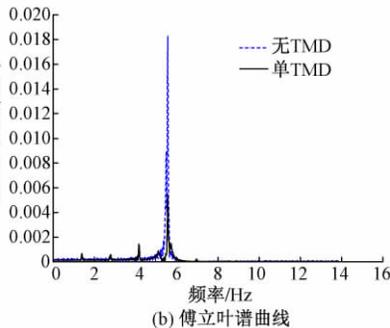
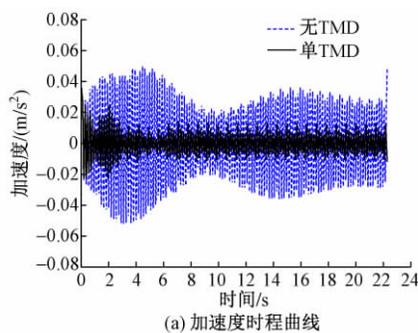


图5 定点加载工况下加速度时程及傅立叶谱曲线比较

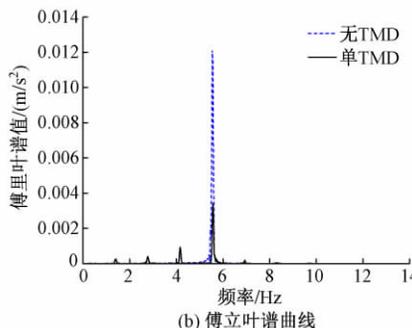
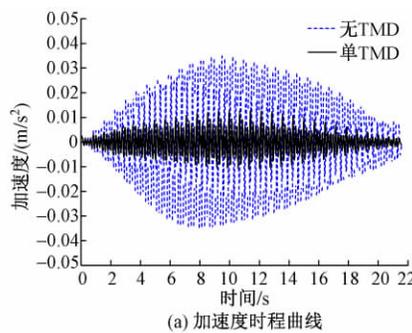


图6 单步移动工况下加速度时程及傅立叶谱曲线比较

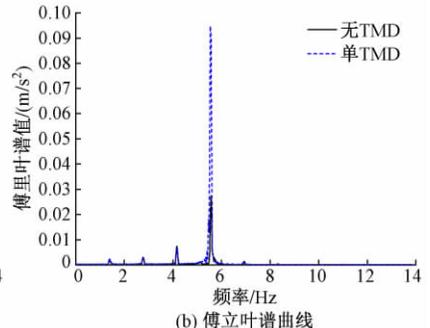
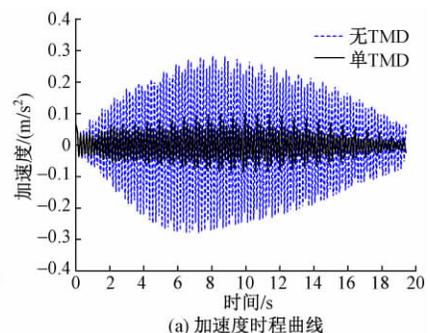


图7 8人同步移动工况下加速度时程及傅立叶谱曲线比较

表 3 各工况下 TMD 减振情况

编号	是否考虑人-结构耦合振动	加载工况	是否采用 TMD	节点编号	峰值加速度 / (m/s <sup>2</sup> )	减振率 / %
1	否	定点加载	否	146	0.050 0 0.035 2	29.60
2	是	定点加载	否	146	0.054 3 0.035 3	35.00
3	否	单步移动	否	146	0.035 0 0.012 8	63.43
4	是	单步移动	否	146	0.032 5 0.017 2	47.08
5	否	8 人同步移动	否	156	0.279 5 0.086 7	68.98
6	是	8 人同步移动	否	156	0.208 1 0.204 6	1.68
7	否	16 人同步移动	否	156	0.593 5 0.215 4	63.71
8	是	16 人同步移动	否	156	0.386 9 0.410 3	-6.04

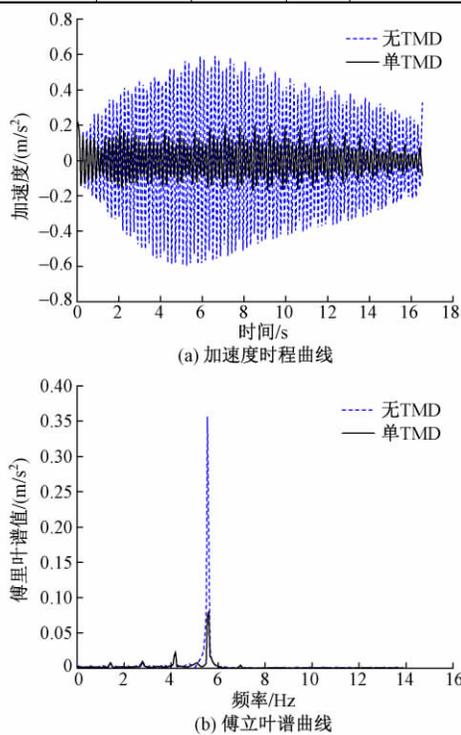


图 8 16 人同步移动工况下加速度时程及傅立叶谱曲线比较

5 结论

(1) 对比不同工况下钢结构连廊在考虑与不考虑人-结构耦合振动前后振动响应的变化,结果表明:当单个行人在结构上行走时,人-结构耦合振动对结构动力响应的影响不是很明显,但是,当人群同步作用于连廊上时,考虑人群-结构耦合振动与否对结构动力响应的影响比较明显。因此,在评估大跨度结构人致振动舒适度时,为了能够获取更加精确的分析结果,考虑人群-结构耦合振动至关重要。

(2) 在行人荷载作用下,当结构产生舒适度问

题时,对结构的过量振动应采取一定的减振措施。本文对该钢结构连廊采用设置单个 TMD 进行振动控制,将 TMD 设置在位移峰值点处,从各工况下的减振率来看,除了在 16 人同步移动工况下,减振率为负,其余工况均有较好的减振效果。

由于人群-结构耦合振动是一个复杂的问题,进一步研究人群荷载作用对结构振动响应的影响及减振控制措施的选取具有更重要的意义。

参 考 文 献

[1] 许立言,陶慕轩,樊健生,等. 大跨度钢-混凝土组合人行天桥舒适度分析[J]. 建筑结构学报, 2016,37(5): 138-145.

[2] 朱前坤,陈凯,张举涛,等. 某梁式钢楼梯在人致激励下的振动舒适度分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(19): 53-57.

[3] 惠晓丽. 激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估与振动控制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.

[4] 李红利,陈政清. 人-桥竖向动力相互作用效应理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 78-87.

[5] CAPRANI C C, QU J, ZIVANOVIC S, et al. Quantification of human-structure interaction [J]. MATEC Web of Conferences, 2015, 24: 7001-7007.

[6] BARKER C, MACKENZIE D. Calibration of the UK National Annex [C]//Proceedings of the third International Conference on Footbridge. Porto, 2008.

[7] 朱前坤,刘路路,杜永峰,等. 考虑行人-结构相互作用的悬挑钢筋桁架楼承板振动控制研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1): 99-108.

[8] DA SILVA F T, BRITO H M B F, PIMENTEL R L. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(12): 1196-1204.

[9] CUNHA A, CAETANO E, RIBEIRO P, et al. Pedestrian-structure interaction in the vertical direction: coupled oscillator-force model for vibration serviceability assessment [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics. Porto, 2014.

[10] 朱前坤,蒲兴龙,惠晓丽,等. 基于人群-结构耦合作用甘肃省体育馆悬挂结构振动舒适度评估及控制[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 46-52.

[11] DA SILVA F T, PIMENTEL R L. Biodynamic walking model for vibration serviceability of footbridges in vertical direction [C]//EURODYN 2011 Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics. Leuven, 2011: 1090-1096.

(下转第 109 页)

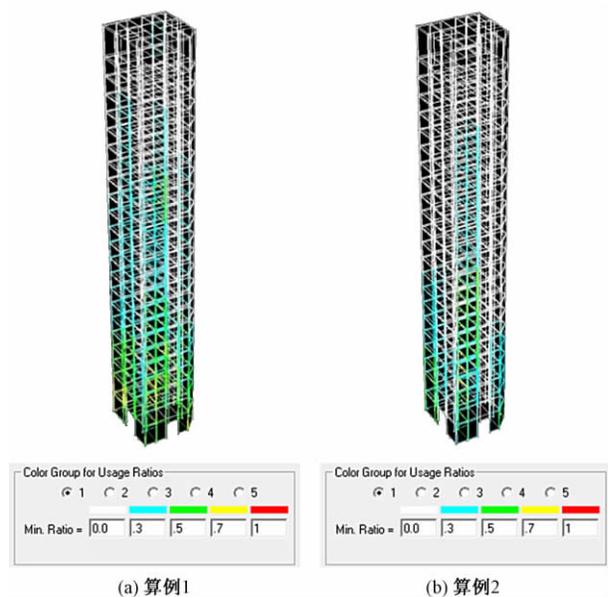


图 13 剪力墙的剪切破坏限制状态云图

参与耗能,使损伤集中在阻尼器上,相比传统框架-核心筒结构,其主体结构构件参与耗能的程度更小,保护了更多结构构件在大震下不发生损伤。

计算结果表明,阻尼器的滞回曲线比较饱满,有效地消耗了地震能量,对结构起到了很好的减震控制效果。

#### 4 结论及建议

(1) 相比于传统框架-核心筒结构,新型框架-核心筒耗能耦联结构能有效耗散地震能量,降低楼层剪力,减小结构地震响应(位移、加速度),表现出优秀的抗震性能。

(2) 新型框架-核心筒耗能耦联结构体系中的阻尼器消耗了大量地震输入到结构的能量,且结构的地震响应越大,所消耗的能量占总输入能量的比重

越大。计算分析表明,该结构体系大震下比中震下具有更好的减震效率。

(3) 本文计算中,新型框架-核心筒耗能耦联结构体系大震下阻尼器消耗的能量约是振型阻尼能量的 2.4 倍,其等效振型阻尼比约为 17%。

(4) 动力弹塑性时程分析结果表明,新型框架-核心筒耗能耦联结构由于阻尼器参与耗能,使损伤集中在阻尼器上,相比于传统框架-核心筒结构,其主体结构构件参与耗能的程度更小,保护了更多结构构件在大震下不发生损伤。

本文未对阻尼器性能、施工安装方式、经济性进行详细研究,如考虑推广应用需对相关产品进行专题研究。框架-核心筒结构一般用于超高层建筑,而超高层结构除了地震以外,往往由风荷载控制。因此,可在风振控制方面,对新型框架-核心筒耗能耦联结构开展深入研究。

#### 参 考 文 献

- [1] WESTERMO B. The dynamics of inter-structural connection to prevent pounding [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1989, 18: 687-699.
- [2] KLEIN R E, CUSANO C, STUKEL J. Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures [J]. *Mechanical Engineering*, 1973, 95(2): 53-53.
- [3] KUNIEDA M. Earthquake prevent design and earthquake proof design for structures [J]. *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1976, 79(689): 86-91.
- [4] 刘博文,徐开,刘畅,等. Perform-3D 在抗震弹塑性分析与结构性能评估中的应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [5] 513-520.
- [17] JI T, ELLIS B R. Floor vibration induced by dance-type loads: verification [J]. *Structural Engineer*, 1994, 3(45): 45-50.
- [18] JI, T, ELLIS B R. Human-structure interaction in vertical vibrations [J]. *Structures & Buildings*, 1997, 122(1): 1-9.
- [19] 张琼,陈凯,杜永峰,等. 基于人体动力学模型钢楼梯振动舒适度及其控制研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(1): 153-160.
- [20] TUBINO F, PICCARDO G. Tuned mass damper optimization for the mitigation of human-induced vibrations of pedestrian bridges [J]. *Meccanica*, 2015, 50(3): 809-824.
- [21] 朱前坤,李宏男,杜永峰,等. 不同行走步速下人行桥振动舒适度量化评估 [J]. *工程力学*, 2016, 33(10): 97-104.

(上接第 125 页)

- [12] RACIC V, PAVIC A, BROWNJOHN J M W. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: literature review [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 326(1): 1-49.
- [13] 袁旭斌,孙利民. 人行桥人致振动特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [14] 张琼,南娜娜,朱前坤,等. 基于行人动力学模型的人-桥竖向动力相互作用 [J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(4): 93-100.
- [15] 李泉,樊健生,聂鑫. 人行荷载作用下大跨楼盖多模态振动控制方法研究 [J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(9): 42-49.
- [16] ZHENG X, BROWNJOHN J M W. Modeling and simulation of human-floor system under vertical vibration [C]//SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. California, 2001: