

自适应多重 TMD 在大跨楼板结构减振中的应用*

王梁坤¹, 施卫星¹, 张全伍², 周颖¹

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系 上海,200092) (2. 上海路博减振科技股份有限公司 上海,200092)

摘要 多重调谐质量阻尼器(multiple tuned mass damper,简称 MTMD)常被用于大跨楼板结构的竖向振动舒适度控制中。为改善目前工程中使用的 MTMD 对频率调谐敏感和难以调频的缺点,提出了一种自适应多重调谐质量阻尼器(adaptive-passive MTMD,简称 AP-MTMD)减振系统。该系统中的每个自适应调谐质量阻尼器(tuned mass damper,简称 TMD)均具有可变质量的构造,以及由加速度传感器、控制电路板和驱动装置组成的伺服控制系统。环境激励下,控制电路板采集置于主结构上加速度传感器的信号,通过基于小波变换(wavelet transformation,简称 WT)的频率识别方法识别得主结构的主导自振频率,然后自发地启动驱动装置改变 TMD 的质量以调谐自身频率至所识别得到的主结构频率。以某大跨楼板结构为例进行分析,首先,通过现场实测修正有限元模型;其次,根据修正前的结构模型设计了一套自适应多重 TMD 系统,验证了其频率自适应调节的鲁棒性;最后,通过施加若干种人行荷载,对比了启动调节前后的 MTMD 系统对修正后模型的减振效果。结果表明,自适应多重 TMD 能够自发地调谐自身频率,提高对楼板结构人致振动的减振效果。

关键词 楼板结构; 自适应多重调谐质量阻尼器; 小波变换; 现场实测; 响应评估
中图分类号 TU311.3; TU317; TH122

引言

随着社会经济的发展和建造技术的提高,大跨楼板结构越来越多地应用于体育场馆和火车站等结构中^[1-2]。然而,大跨楼板结构由于跨度较大,阻尼比较小,且自振频率接近行人的步频,可能由于共振引起竖向的振动舒适度问题^[3]。

TMD 由质量块、弹簧和阻尼器组成,是较为传统的振动控制装置^[4]。MTMD 系统由多个不同频率的 TMD 组成,常被用于大跨楼板结构的振动控制中。徐若天等^[5]进行了步行荷载作用下大跨楼盖 MTMD 的参数优化。马斐等^[6]进行了人群荷载激励下大跨钢楼盖加设 MTMD 的减振控制分析。韩建平^[7]进行了基于概率性人行荷载模型的楼板结构振动分析。陈鑫等^[8-9]进行了大跨楼板结构 MTMD 系统混合优化设计和随机人群激励下火车站大跨楼盖减振设计与分析。吕西林等^[10]进行了上海世博文化中心加设 MTMD 减振的分析与实测。然而,结构设计频率与实际频率可能存在偏差,且在结构正常使用过程中,可能由于累计损伤、使用荷载改变等发生频率的变化,这些都会造成被动式 TMD 及 MT-

MD 系统的频率失调,使其减振效果大幅降低^[11]。
为此,笔者提出了一种 AP-MTMD 系统,适用于大跨楼板结构的竖向振动控制中。

1 自适应多重 TMD 系统

1.1 自适应变质量 TMD

AP-MTMD 系统中,每个自适应 TMD 的设计图与模型图如图 1 所示。由图可见,TMD 质量块中开有一环形箱体,作为其可变质量部分;相应的底座中也有一环形箱体,作为供 TMD 调节质量的储备部分。可变质量的形式可为水、沙子和砂石等。伺服控制系统中的驱动装置由两部分组成:一个放置于底部箱体中的泵,用来将底座箱体中的质量泵入顶部箱体,即增加 TMD 的质量;一个插于顶部箱体底部孔洞中的电磁阀,用来将顶部箱体中的质量排入底部箱体中,即减少 TMD 的质量。安装于主结构上的加速度传感器可读取主结构放置该自适应 TMD 位置处的竖向加速度响应,控制电路板用于接收加速度传感器的信号并进行小波变换,以识别主结构该处位置的自振频率,并根据自适应调节算

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701101);国家自然科学基金资助项目(51678449)
收稿日期:2018-07-12;修回日期:2018-11-30

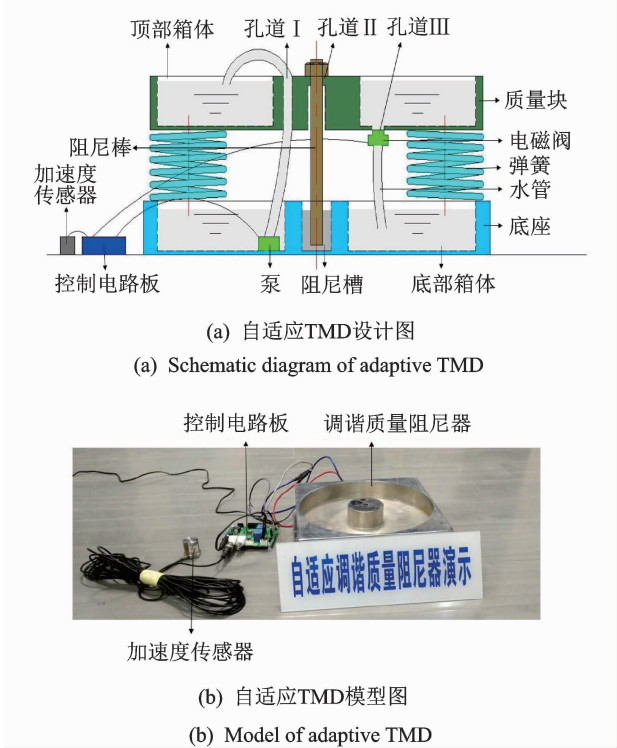


图 1 自适应 TMD 模型设计图

Fig. 1 Design model of adaptive-passive TMD

法启动驱动装置调节 TMD 的质量以调谐其频率。

1.2 小波变换

文献[2]提出了一种基于加速度比值算法来调节频率的自调频 TMD。然而,该算法只适用于可简化为单自由度体系的主结构,对于模式密集型的大跨楼板结构是不适用的,因此,需要寻求一种适用于大跨楼板结构的调节算法。

小波变换继承和发展了短时傅里叶变换局部化的思想,同时又克服了其窗口大小不随频率变化等缺点,能够提供一个随频率改变的时频窗口,具有高频处时间细分、低频处频率细分以及自动适应时频信号分析需求等优点^[12-14]。因此,AP-MTMD 系统采用小波变换作为频率识别方法。

小波变换利用一簇基函数分解时域信号 $x(t)$, 具有多尺度分析的特点。给定函数 $\Psi(t)$ 可写作

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

其中: a 为尺度系数; b 为时间转换系数; $\Psi_{a,b}(t)$ 为对 $\Psi(t)$ 进行变换后的函数。

对于不同的系数 a 和 b , 可以得到不同的小波基函数 $\Psi_{a,b}(t)$ 。信号 $x(t)$ 的小波变换可写为

$$\Psi_{a,b}^*(t) = \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \tag{3}$$

其中: $\Psi_{a,b}^*(t)$ 为 $\Psi_{a,b}(t)$ 的共轭函数。

式(3)中每项小波系数可写为

$$|WT_x(a,b)| = \left| \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \right| \tag{4}$$

环境激励下,在利用小波变换得到预设时长信号的时频分布图后,计算每一时间间隔的 1 阶自振频率,求平均值作为所识别得到的主结构自振频率。

1.3 自适应调节算法

环境激励下,启动自适应调节后,AP-MTMD 系统中每一个自适应 TMD 的加速度传感器测得其所在位置处的主结构竖向加速度响应。控制电路板接收加速度信号后,通过小波变换算法识别出结构的自振频率 ω_1 。控制电路板的程序中预先预置 TMD 的刚度系数 k_s 和初始质量 m_0 作为每次自适应调节的参考值。在某次调节中,控制电路板可算得谐调 TMD 的质量为

$$m_1 = k_s / \omega_1^2 \tag{5}$$

需进行调节的质量值为

$$\Delta m = m_1 - m_0 \tag{6}$$

当 $\Delta m > 0$ 时,控制电路板会启动泵将底部箱体中的相应质量泵入顶部箱体中,即增大 TMD 质量,减小其频率;当 $\Delta m < 0$ 时,则打开电磁阀,排出顶部箱体中的相应质量至底部箱体,即减小 TMD 质量,增大其频率。每次自适应调节结束后,控制电路板中会将此次计算得到的 m_1 数值赋值给 m_0 ,作为下次调节时的初始值。

在振动舒适度问题中,可认为主结构频率的变化缓慢而微小,因此并不需要实时调节 AP-MTMD 系统。AP-MTMD 系统每次调节的时间间隔可人为设定。调节结束后的自适应 TMD 与一般的被动式 TMD 相同。因此,AP-MTMD 系统能够解决目前应用于大跨楼板结构的传统 TMD 及 MTMD 频率易失调的问题,可避免实时控制中存在的时滞问题,具有装置简单易行、所需外界能量小等优点。

2 现场实测与模型修正

2.1 项目概况

下面以一体育馆为例进行分析。首先,对其原始的 Sap2000 有限元模型做自振特性分析;其次,通过现场实测识别其实际自振特性以修正有限元模型。该体育馆分为独立的 4 个区域,下面以区域 1 为例展开分析。该体育馆及区域 1 实测图如图 2 所示,4 个区域的平面尺寸见图 3。

在 Sap2000 中,对体育馆的原始有限元模型进

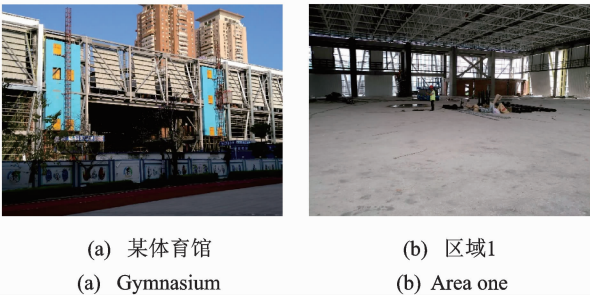


图 2 现场实测图
Fig. 2 In-situ test

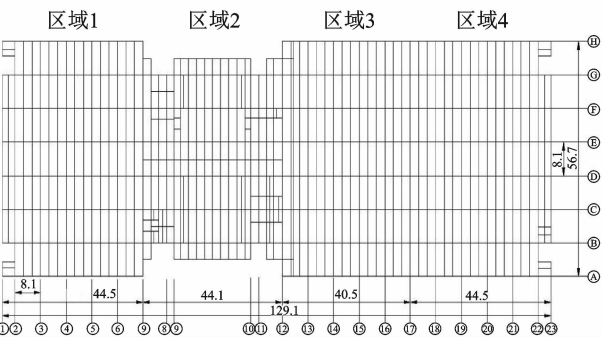


图 3 体育馆平面尺寸图(单位:米)
Fig. 3 Gymnasium plane size (unit:m)

行模态分析。对于区域 1,占主导的是第 9 阶和第 10 阶振型,如图 4 所示。

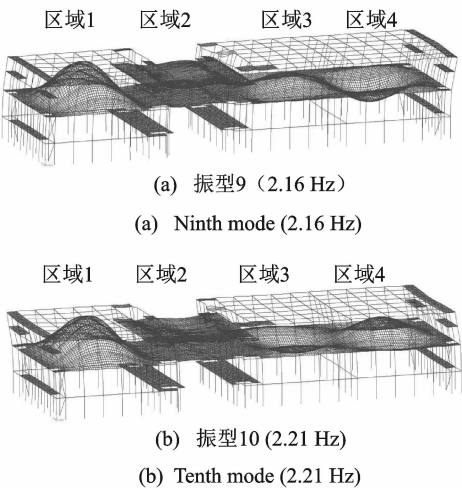


图 4 原始有限元模型振型
Fig. 4 Mode shapes of the original finite element model

该体育馆的总质量约为 14 863.4 t。图 4 中,振型 9 的竖向质量参与系数为 2.05%,振型 10 为 3.63%。因此,就原始的结构有限元模型而言,对于区域 1,应着重控制振型 9 和振型 10,且这两个振型频率相近,均以跨中响应最大。

2.2 现场测试

为了确认原始有限元模型的正确性及便于

MTMD 减振系统设计,笔者对该体育馆进行了现场实测,目的在于以实测频率修正原始的有限元模型。测试方法为在所选测点位置处分别布置一个加速度传感器,环境激励下,得到该测点下的加速度响应。加速度传感器采用灵敏度为 1 V/g 的 KD1100LC 的压电式加速度传感器,测试仪器采用同济大学结构工程与防灾研究所自主研发的 SVSA 数据采集与分析系统。试验期间为避免外界干扰,叫停周围的一切施工和人员走动,采样频率设置为 100 Hz。对于区域 1,本次测试的测点布置如图 5 所示。

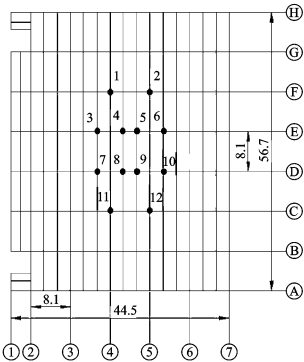


图 5 测点布置图(单位:米)
Fig. 5 Measurement point layout(unit:m)

对所选 12 个测点的加速度信号分别进行快速傅里叶变换以求得该测点的功率谱密度(power spectra density,简称 PSD)图。可以发现,这 12 个测点的 PSD 图较为接近,1 阶频率均为 2.44 Hz。其中,较有代表性的 4 个测点的 PSD 图如图 6 所示。

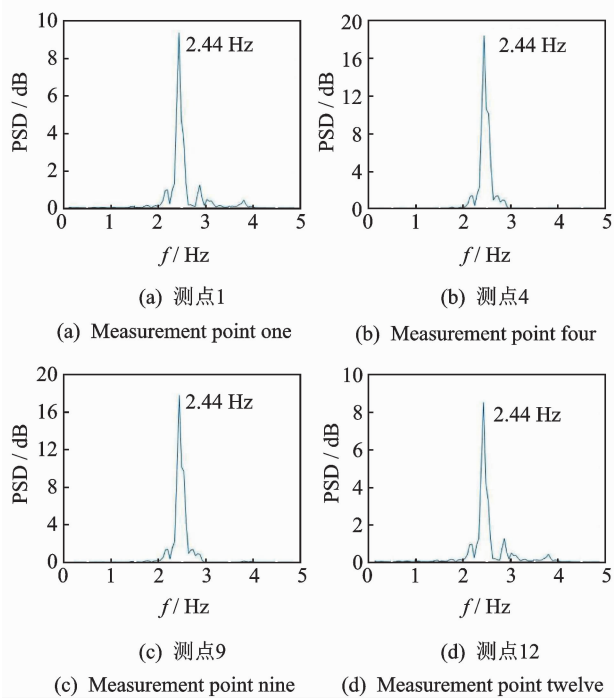


图 6 测点功率谱密度图
Fig. 6 Power spectra density of measurement points

由本次测试可知,区域 1 的主导振型频率应在 2.44 Hz 附近,与图 4 的分析结果有一定偏差。因此,有必要对结构的原始有限元模型进行修正。

2.3 模型修正及比较

本节中,修正的方法为增大结构构件的刚度以提高其自振频率,修正的目标为使区域 1 的主导振型频率约为 2.44 Hz。修正后,模型的第 10 阶振型频率为 2.46 Hz,与实测值仅差 0.82%,如图 7 所示。

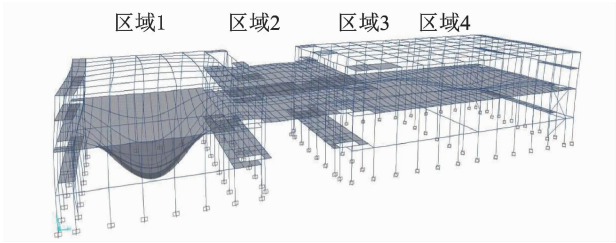


图 7 修正模型的振型图

Fig. 7 Mode shape of the updated finite element model

3 自适应调节及减振率对比

3.1 自适应多重 TMD 设计

传统的被动式 TMD 及 MTMD 均难以调节频率,由 2.2 节可知,实际结构的频率与有限元模型存在差别,且在结构的正常使用过程中,有可能因为主结构的累积损伤、使用功能变化等造成自振频率改变,这些都会引起传统的 TMD 及 MTMD 系统失调,致使其减振效果下降。

为模拟传统 MTMD 的失调效应及验证 AP-MTMD 系统频率自适应调节的鲁棒性,在结构的修正模型中,为其安装根据原始模型设计的频率失调的 MTMD 和 1 组 AP-MTMD。其中,AP-MTMD 的初始参数和 MTMD 相同,只是质量有一个可调节的范围,供其调节频率。

根据图 4 的分析结果,当 TMD 的质量比取为 2% 时,由文献[15]中提及的 TMD 优化公式,TMD 频率比取为 0.98,阻尼比取为 8.57%。针对振型 9 (2.16 Hz),每个 TMD 质量为 750 kg,共 4 个,分别布置在图 5 中 4,5,8 和 9 这 4 个位置上,频率为 2.12 Hz;针对振型 10(2.21 Hz),每个 TMD 质量为 750 kg,共 8 个,分别布置在图 5 中 1,2,3,6,7,10,11 和 12 这 8 个位置上,频率为 2.17 Hz。至于 AP-MTMD 系统,每个自适应 TMD 初始质量亦为 750 kg,可调区间为 500~1 000 kg,即频率可调区间为 1.84~2.60 Hz,其余设计与上述 MTMD 系统相同。自适应 TMD 的可调质量区间由设计者决

定,可通过改变图 1 中顶部箱体及底部箱体的体积,或改变供调节质量的密度等进行调节。

3.2 频率自适应调节

在修正后的模型中,为区域 1 布置上述失调的 MTMD 系统,利用白噪声激励模拟环境激励,根据 1.2 节的小波变换识别频率算法,识别得图 5 中 12 个测点,即 12 个 TMD 所处位置的主导自振频率。其中 4 个测点的小波变换时频分布如图 8 所示。

图 8 的时频图中,红线表示每一时刻的 1 阶频率,对整个时段内红线求和,即得每个自适应 TMD 识别得到的结构该处位置的主导自振频率。上述 12 个测点识别的自振频率如图 9 所示。

由图 9 可见,跨中区域的 4 个测点识别得到的自振频率与图 7 的分析结果相同,均为 2.46 Hz,周围 8 个测点频率均在 2.46 Hz 附近,则 AP-MTMD 系统中的每个自适应 TMD 将通过改变自身质量,以调谐至其所识别得到的频率。

3.3 减振率对比分析

为验证在不同工况的人行荷载作用下,频率自适应调节后的 AP-MTMD 系统相对于无 MTMD 工况和失调 MTMD 工况在结构加速度响应减振效果上的改进,参照文献[2]的加载方法,基于傅里叶级数展开的确定性人行荷载 $F(t)$ 可按下式计算得到

$$F(t) = G[1 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi f_i t - \varphi_i)] \quad (7)$$

其中: G 为单人的体质量,以下取为 700 N; i 为人行荷载展开的级数; A 为每级荷载的系数; φ 为每级荷载的相位角; f_i 为荷载的基频; t 为时间。

根据文献[2],针对步行、跑步和跳跃荷载,一般取前 3 级叠加即可,不同荷载不同级数的 A 和 φ 按文献[2]取值。

根据文献[9],在修正后的模型中,对于无 MTMD、附加失调 MTMD 和附加 AP-MTMD 这 3 种情况,本节共施加步行荷载、跑步荷载和跳跃荷载 3 大类人行荷载。其中:步行荷载又可分为基频为 1.7 Hz 的慢走荷载、基频为 2.0 Hz 的普速荷载和基频为 2.3 Hz 的快走荷载;跑步荷载又可分为基频为 2.5 Hz 的慢跑荷载和基频为 3.2 Hz 的快跑荷载;跳跃荷载只有基频为 2.1 Hz 这一种。这些人行荷载均在楼板的跨中区域沿横轴方向布置两排行人,每排 10 人。下面将这 6 小类人行荷载依次标记为工况 1~6。

从上述人行荷载可见,工况 4 的基频 2.5 Hz 与区域 1 的竖向主导自振频率 2.46 Hz 较为接近,因此结构的响应最大。工况 4 中,测点 1,4,9,12 的加速度响应对比如图 10 所示。以加速度峰值和整体

均方根值 (root mean square, 简称 RMS) 为评价指标, 将所有工况数据及对比汇总于表 1。

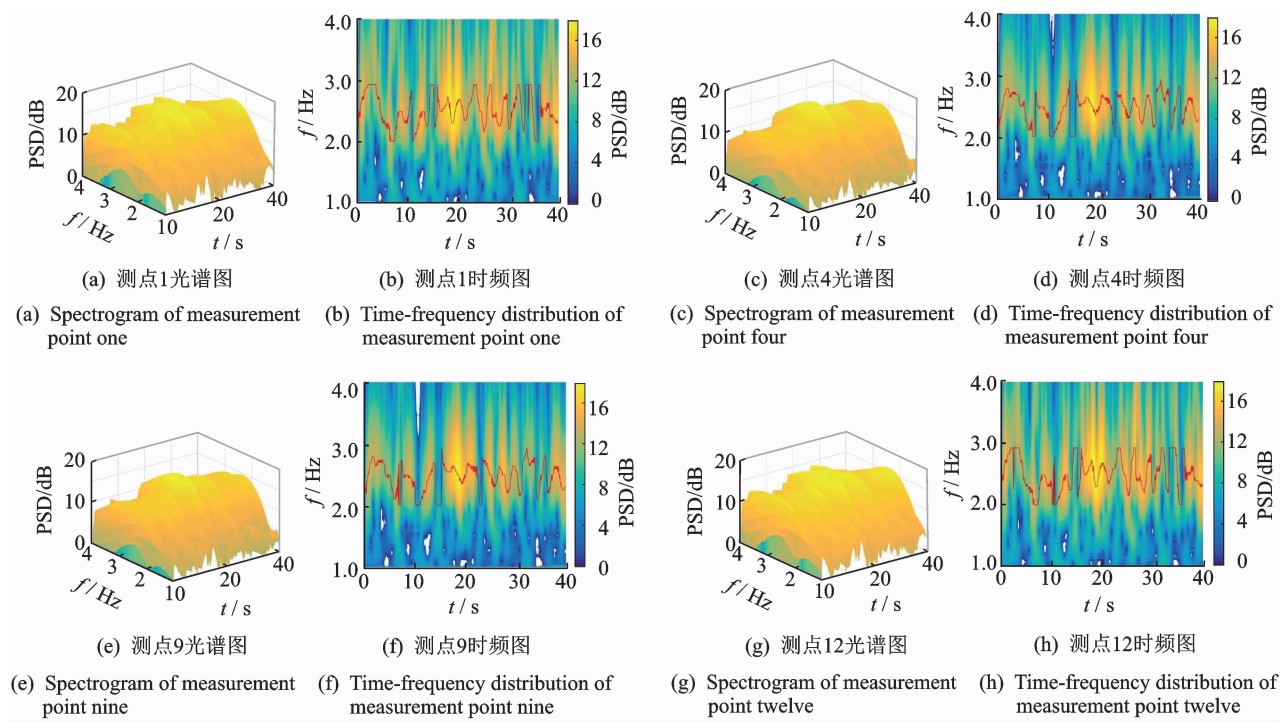


图 8 小波变换时频图

Fig. 8 Spectrogram from the wavelet transformation

表 1 加速度响应汇总及对比表

Tab. 1 Comparisons of the acceleration responses of all cases

工况		1		2		3		4		5		6	
		最大值	RMS	最大值	RMS	最大值	RMS	最大值	RMS	最大值	RMS	最大值	RMS
测点 1/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	无 MTMD	2.72	0.61	3.17	0.90	5.35	2.47	37.10	23.66	12.46	6.44	11.47	5.37
	MTMD	2.63	0.67	3.06	0.94	4.13	1.92	31.86	21.29	12.06	6.02	10.60	5.38
	AP-MTMD	2.67	0.59	3.21	0.93	4.14	2.46	22.10	14.33	12.10	5.88	10.12	5.63
测点 4/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	无 MTMD	2.92	0.57	4.00	1.12	7.03	3.27	55.84	35.66	10.07	2.80	19.08	6.96
	MTMD	2.77	0.55	3.46	1.19	5.30	2.35	43.52	28.85	9.06	2.88	15.75	6.90
	AP-MTMD	2.63	0.55	3.53	1.18	5.81	3.34	30.85	20.37	9.37	3.25	17.65	7.56
测点 9/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	无 MTMD	2.86	0.57	3.93	1.11	6.86	3.23	54.83	35.00	9.60	2.28	18.90	6.96
	MTMD	2.67	0.54	3.48	1.17	5.21	2.32	42.67	28.37	9.02	2.89	15.66	6.87
	AP-MTMD	2.59	0.52	3.56	1.17	5.68	3.30	30.48	20.14	9.24	2.96	17.41	7.63
测点 12/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	无 MTMD	2.72	0.61	3.17	0.90	5.21	2.44	35.20	22.50	12.69	6.21	11.35	5.38
	MTMD	2.51	0.65	3.04	0.92	3.98	1.88	30.36	20.38	12.32	6.14	10.63	5.39
	AP-MTMD	2.56	0.56	3.11	0.91	3.94	2.42	21.60	14.11	11.48	6.14	10.33	5.64
测点 1 减振率/%	无 MTMD	1.84	3.28	-1.26	-3.33	22.62	0.40	40.43	39.43	2.89	8.70	11.77	-4.84
	MTMD	-1.52	11.94	-4.90	1.06	-0.24	-28.12	30.63	32.69	-0.33	2.33	4.53	-4.64
测点 4 减振率/%	无 MTMD	9.93	3.51	11.75	-5.36	17.35	-2.14	44.75	42.88	6.95	-16.07	7.49	-8.62
	MTMD	5.05	0.00	-2.02	0.84	-9.62	-42.13	29.11	29.39	-3.42	-12.85	-12.06	-9.56
测点 9 减振率/%	无 MTMD	9.44	8.77	9.41	-5.40	17.20	-2.17	44.41	42.46	3.75	-29.82	7.88	-9.63
	MTMD	3.00	3.70	-2.30	0.00	-9.02	-42.24	28.57	29.01	-2.43	-2.42	-11.17	-11.06
测点 12 减振率/%	无 MTMD	5.88	8.20	1.89	-1.10	24.38	0.82	38.64	37.29	9.54	1.13	8.99	-4.83
	MTMD	-1.99	13.85	-2.30	1.09	1.01	-28.72	28.85	30.77	6.82	0.00	2.82	-4.64

由图 10 及表 1 可知:在不同人行激励工况中,相对于无 MTMD 和失调 MTMD 作用下,AP-MT-

MD 均具有更好的控制结构加速度响应效果,且结构跨中位置的响应比周边位置大;人行激励频率越

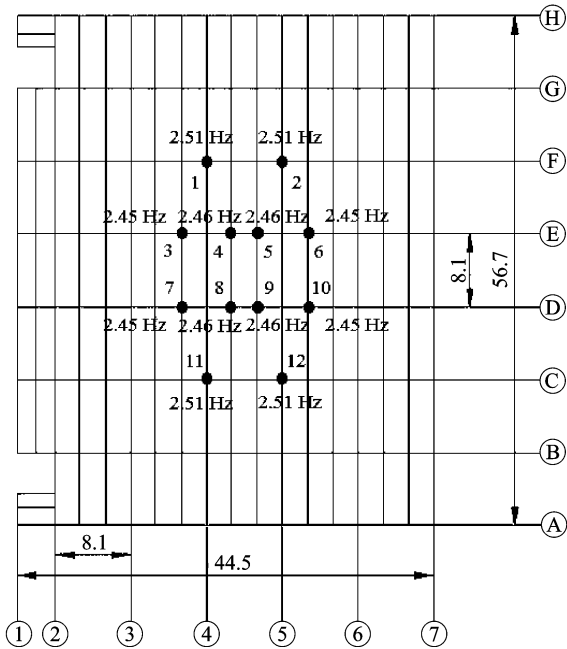


图 9 各测点主导自振频率(单位:米)

Fig. 9 Dominant frequencies of different points(unit:m)

接近于结构的自振频率,结构的响应越大,此时 AP-MTMD 的减振作用也越大。

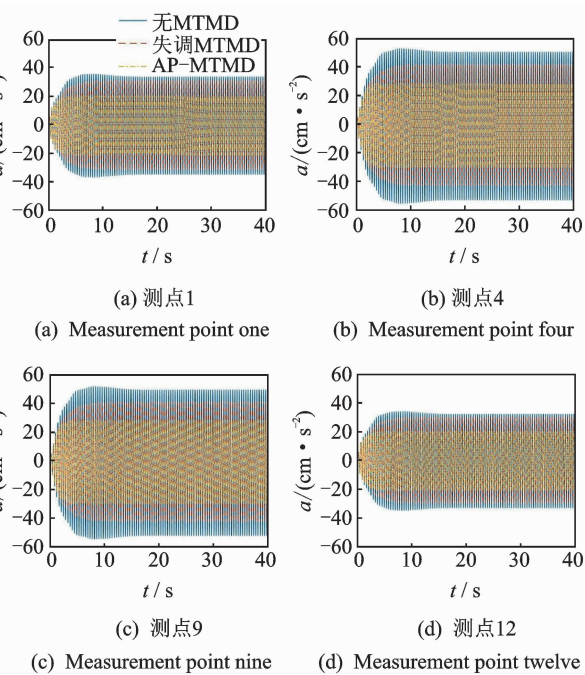


图 10 工况 4 加速度响应对比图

Fig. 10 Comparisons of the acceleration responses in case 4

4 结束语

目前,应用于大跨楼板结构竖向振动控制的 MTMD 系统难以调节频率,当其频率与结构发生偏

差时,减振效果就会大幅下降。为了改善这一弊端,提出了一种自适应多重 TMD 减振系统 (AP-MTMD)。该系统中的每个自适应 TMD 均能利用基于小波变换的频率识别算法识别出其所在位置处结构的主导自振频率,然后通过改变自身质量以调谐频率。以某体育馆大跨楼板结构为例进行了有限元模型分析、现场实测、模型修正以及 AP-MTMD 系统频率自适应调节及减振效果对比,可知:①该大跨楼板的频率与现场实测结果存在偏差,根据实测结果修正了原始模型;②基于小波变换的频率识别算法精度高,与有限元模型分析结果相近;③在多种人行荷载工况下,频率自适应调节后的 AP-MTMD 比失调的 MTMD 具有更好的减振效果。

参 考 文 献

[1] LI Q, FAN J, NIE J, et al. Crowd-induced random vibration of footbridge and vibration control using multiple tuned mass dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(19):4068-4092.

[2] 王梁坤,施卫星,王洪涛,等. 自适应 TMD 减振性能试验[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(4): 781-788. WANG Liangkun, SHI Weixing, WANG Hongtao, et al. An adaptive-passive tuned mass damper system [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2019, 39(4):781-788. (in Chinese)

[3] 操礼林,李爱群,张志强,等. 大跨组合楼盖人致振动分析与实测研究[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(6):922-928. CAO Lilin, LI Aiqun, ZHANG Zhiqiang, et al. Human-induced vibration analysis and measurement of long-span composite floors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6):922-928. (in Chinese)

[4] 王梁坤,施卫星,严俊,等. 自调频 TMD 及其减振效果的数值模拟[J]. 结构工程师, 2017, 33(4): 149-155. WANG Liangkun, SHI Weixing, YAN Jun, et al. The semi-adaptive tuned mass damper and the numerical simulation of its effect on controlling vibration [J]. Structural Engineers, 2017, 33(4):149-155. (in Chinese)

[5] 徐若天,陈隽,刘伟. 步行荷载下大跨楼盖 MTMD 控制参数优化方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(9): 100-106. XU Ruotian, CHEN Jun, LIU Wei. Optimal design of multiple tuned mass dampers applied in reducing floor vibration induced by pedestrian's walking loads [J].

- Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9):100-106. (in Chinese)
- [6] 马斐, 张志强, 李爱群. 大跨钢楼盖人群荷载激励下减振控制分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3): 514-520.
- MA Fei, ZHANG Zhiqiang, LI Aiqun. Vibration control analysis of large-span steel structure floor under crowd load [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3):514-520. (in Chinese)
- [7] 韩建平, 王洪涛, 刘云帅. 基于概率性人行荷载模型的楼板结构振动分析[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 81-87.
- HAN Jianping, WANG Hongtao, LIU Yunshuai. Vibration signal demodulation method based on STFT and its application in rolling bearing fault detections [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2):81-87. (in Chinese)
- [8] 陈鑫, 李爱群, 张志强, 等. 考虑舒适度的大跨楼盖 MTMD 系统混合优化设计[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5): 827-836.
- CHEN Xin, LI Aiqun, ZHANG Zhiqiang, et al. Hybrid optimization of the multiple tuned mass dampers in long-span floor for human comfort [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5): 827-836. (in Chinese)
- [9] 陈鑫, 李爱群, 张志强, 等. 随机人群荷载下大型火车站大跨楼盖减振设计与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 543-547.
- CHEN Xin, LI Aiqun, ZHANG Zhiqiang, et al. Design and analysis on vibration control of long-span floor in large station room under stochastic crowd-induced excitation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 543-547. (in Chinese)
- [10] 吕西林, 丁鲲, 施卫星, 等. 上海世博文化中心 TMD 减轻人致振动分析与实测研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 32-37.
- Lǚ Xilin, DING Kun, SHI Weixing, et al. Analysis and field test for human-induced vibration reduction with TMD in Shanghai EXPO culture center [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2):32-37. (in Chinese)
- [11] 施卫星, 王梁坤, 严俊, 等. 改进的自调频单摆式 TMD 的减振性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):40-45.
- SHI Weixing, WANG Liangkun, YAN Jun, et al. Performance of semi-adaptive pendulum-type tuned mass damper [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(2):40-45. (in Chinese)
- [12] 朱前坤, 刘路路, 杜永峰, 等. 基于连续行走的人行荷载模型参数实验[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4):709-716.
- ZHU Qiankun, LIU Lulu, DU Yongfeng, et al. Experimental investigation on parameters of human induced loading models based on continuous walking [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 709-716. (in Chinese)
- [13] 盛涛, 张顺宝. 拟合 D-V-A 联合谱及各项峰值的人造地震动[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 942-947.
- SHENG Tao, ZHANG Shunbao. An artificial earthquake ground motion's generation method for matching combined D-V-A spectrum and target peak values [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 942-947. (in Chinese)
- [14] 刘景良, 郑锦仰, 郑文婷, 等. 基于改进同步挤压小波变换识别信号瞬时频率[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 814-821.
- LIU Jingliang, ZHENG Jinyang, ZHANG Wenting, et al. Instantaneous frequency identification of signals based on improved synchrosqueezing wavelet transform [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4):814-821. (in Chinese)
- [15] 王洪涛, 施卫星, 韩建平, 等. 钢连桥人致振动及 TMD 减振效应实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(3): 505-511.
- WANG Hongtao, SHI Weixing, HAN Jianping, et al. Analysis and in-situ test of human-induced vibration for the steel footbridge with and without TMD devices [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3):505-511. (in Chinese)



第一作者简介:王梁坤,男,1993 年 10 月生,博士生。主要研究方向为结构振动控制。曾发表《Study on self-adjustable tuned mass damper with variable mass》(《Structural Control and Health Monitoring》2018, Vol. 25, No. 3)等论文。
E-mail: wangliangkun@tongji.edu.cn

