

自适应 TMD 减振性能试验*

王梁坤¹, 施卫星¹, 王洪涛², 鲁正¹

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系 上海, 200092) (2. 上海市房地产科学研究院 上海, 200031)

摘要 为改善目前工程中应用的调谐质量阻尼器(tuned mass damper, 简称 TMD)对频率敏感和频率难以调节的缺点,提出了一种自适应 TMD,由可变质量块、弹簧、伺服控制系统、驱动系统和阻尼器组成。其中,伺服控制系统由一个加速度传感器和一块单片机电路板组成。在环境激励下,单片机电路板接收位于主结构上的加速度传感器传来的信号,利用短时傅里叶变换识别得到主结构的第 1 阶自振频率,并自发启动驱动装置改变 TMD 的质量,以调节 TMD 的频率与识别得到的主结构频率一致。通过人行桥模型试验验证了自适应 TMD 的可行性、可靠性和有效性。试验结果表明,自适应 TMD 能准确识别模型结构的竖向一阶自振频率,并通过调节质量重新调谐自身频率,与识别得到的频率相同。自由衰减振动试验和受迫振动试验表明,与启动调节前的失调 TMD 相比,启动调节后的谐调 TMD 能够提高模型结构的等效阻尼比,降低其加速度响应峰值和均方根值。

关键词 自适应调谐质量阻尼器; 被动控制; 短时傅里叶变换; 模型试验; 响应评估

中图分类号 TU311.3; TU317; TH12

引言

调谐质量阻尼器是结构振动控制领域中较为传统的被动式振动控制装置^[1]。TMD 一般由质量块、弹簧和阻尼器组成。结构振动引起 TMD 振动时, TMD 会给结构一个反向的惯性力,并通过阻尼器消耗振动能量。当 TMD 的频率调谐与结构的自振频率一致时, TMD 能达到最佳的振动控制效果^[2-3]。然而,传统的 TMD 具有对频率调谐敏感的缺点,且工程中应用的 TMD 难以调节频率^[4]。有限元软件的结构频率分析结果可能与实际频率存在差异,且结构在正常使用过程中,由于损伤累积和使用功能变化等原因会造成频率改变。当 TMD 的频率偏离结构频率时,其减振效果会大大削弱。这就要求 TMD 具有一定的自适应能力。

针对这一问题,学者们提出了不同的改进方法。王梁坤等^[5-6]提出了一种自适应 TMD,根据 TMD 与结构间的加速度比值调节 TMD 的频率。涂建维等^[7]提出了一种基于磁流变弹性体的调频 TMD 减振装置并进行了数值模拟。Sun 等^[8-9]提出了一种半主动可变刚度和阻尼的用于抗震的 TMD,以及一种可变频率的半主动 TMD。Nagar-

ajiah 等^[10]提出了一种可变刚度的智能 TMD。杨永春等^[11]提出了一种新型的 TMD 自适应变频方法。

笔者提出了一种自适应 TMD,适用于人行桥的竖向振动控制。自适应 TMD 由可变质量块、弹簧、伺服控制系统、驱动系统和阻尼器组成,属于自适应被动控制型。通过短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,简称 STFT)识别得到结构的自振频率,自发地启动驱动装置调节 TMD 的频率与结构频率一致。自适应 TMD 并不需要实时调节,只需在选定的时段进行调节即可。调节结束后,自适应 TMD 的使用与被动 TMD 相同。笔者通过人行桥模型试验验证了自适应 TMD 的可行性、可靠性以及有效性。

1 自适应 TMD 原理与设计

1.1 结构频率识别原理

自适应 TMD 的伺服控制系统由一个加速度传感器和一块单片机电路板组成。由于人行桥大多为竖向一阶频率占主导的简支梁桥^[5],因此可将加速

* 国家自然科学基金资助项目(51478361)

收稿日期:2017-11-28;修回日期:2018-01-16

度传感器置于结构的跨中位置。需要调节时,在环境激励下,单片机电路板接收来自加速度传感器一段预置时间间隔的加速度信号,通过内置在单片机电路板的 STFT 算法,识别得到结构的一阶竖向自振频率,换算得需调节的质量后,启动驱动装置完成 TMD 质量的调节。

STFT 在分析非平稳随机信号中有着较为广泛的应用,故笔者采用 STFT 与环境激励法相结合的方法识别结构的自振频率。环境激励下,加速度传感器测得结构跨中位置一段时间内的竖向加速度信号 $s(\tau)$,输入至单片机电路板内进行傅里叶变换。采集有限长的信号数据时相当于在时域上的截断,频域上就会表现为某一频率能量分散至该频率附近的区域,使频域分析出现误差^[12]。振动信号处理中,海明窗能够加强主瓣,减小旁瓣幅值和高度。为提高频率识别的精度,本研究采用海明窗 $h(\tau)$ 来截取一段有限长的时域信号 $s_i(\tau)$

$$s_i(\tau) = s(\tau)h(\tau - t) \quad (1)$$

如果选取的窗函数在一个很短的时间间隔内是平稳的,在时域上移动窗函数,则在不同时段内得到的有限长时域信号 $s_i(\tau)$ 也是平稳信号^[13]。不同时段信号的频谱 $S_i(\omega)$ 为

$$S_i(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s_i(\tau) d\tau \quad (2)$$

每段时间间隔有不同的频谱特性,这些频谱特性的总和就是所取的有限长时段内的时频分布^[14]。某时刻 t 的频率 ω_t 可以表示为

$$\omega_t = \frac{1}{|s(t)|^2} \int \omega |S_i(\omega)|^2 d\omega \quad (3)$$

在所取加速度信号有限长时段的功率谱曲线中,选取峰值最大的点对应的频率作为结构的一阶竖向自振频率,即通过改变质量使 TMD 达到的频率。

1.2 自适应 TMD 设计原理

图 1 为自适应 TMD 模型图。采用的可调节质量的形式为水,也可为其他液体或者固体。在 TMD 质量块和底座中各做出一环形水箱,以便调节 TMD 的质量。本模型中的驱动装置为一个放置在底座水箱中的水泵,和一个插在质量块水箱底部孔洞中的电磁阀。铁棒用一个螺母固定在质量块的顶部,TMD 的阻尼可通过旋转螺母以调节铁棒与硅油间的接触长度改变。

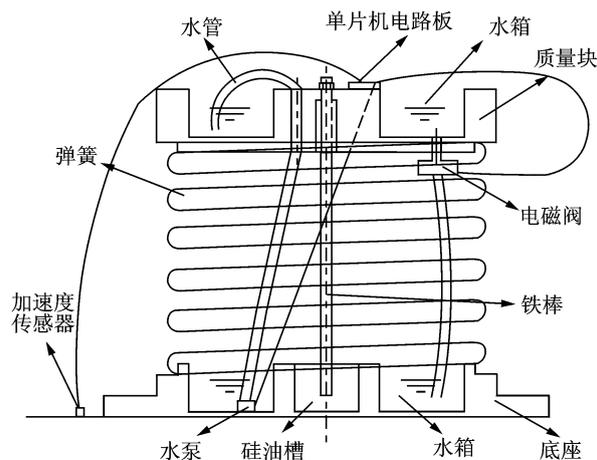


图 1 自适应 TMD 模型图

Fig. 1 Adaptive-passive TMD model design

开启自适应调节后,安装在结构上的加速度传感器测得环境激励下的结构竖向加速度响应。单片机电路板接收加速度信号后通过短时傅里叶变换识别出结构的一阶竖向自振频率 ω_1 。单片机程序中预先预置 TMD 的刚度单元 k 和初始质量 m_0 作为调节时的参考。在该次调节中,程序计算得到谐调 TMD 的质量为

$$m_1 = \frac{k}{\omega_1^2} \quad (4)$$

进而得到需调节的质量为

$$\Delta m = m_1 - m_0 \quad (5)$$

若 $\Delta m > 0$,则启动水泵将底座水箱中相应质量的水泵入质量块水箱中;若 $\Delta m < 0$,则打开电磁阀,排出质量块水箱中相应质量的水。调节完毕后,单片机中自动记录 m_1 的数值,作为下次调节时的初始值。

本模型以调节水量为例,当可调节的质量为其他液体或者固体时,只需相应修改驱动装置、TMD 构造细节和单片机程序中的初始值即可,自适应 TMD 的调节原理都是相同的。由于在振动舒适度问题中,一般不需要考虑安全和结构的疲劳问题,因此结构的频率变化是微小而缓慢的。为避免自适应 TMD 频繁而无意义的自我调节,自适应 TMD 采用的是被动式的控制方式,而非实时控制,可设置开关人为决定何时进行调节。调节结束后的自适应 TMD 与一般的被动式 TMD 相同,因此可避免实时控制中存在的时滞问题,且需电量小。自适应 TMD 的设计流程图如图 2 所示。

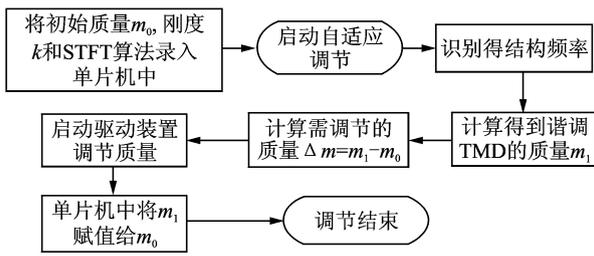


图 2 自适应 TMD 设计流程图

Fig. 2 Design chart of adaptive-passive TMD

2 自适应调节试验

2.1 试验模型

本次试验中, 自适应 TMD 可变质量的形式为水, 驱动装置选为水泵和电磁阀。单片机电路板根据 1.2 节中的控制算法控制水泵向上部质量块水箱加水, 或者控制电磁阀对上部水箱进行泄水, 以此实现上部质量块质量的可调, 达到 TMD 自调节的目的。搭建完成的自适应 TMD 模型图如图 3 所示。



图 3 自适应 TMD 试验模型图

Fig. 3 Adaptive-passive TMD model

图 3 中自适应 TMD 的质量块在没有水时, 总质量为 17.8 kg, 弹簧刚度为 3 050 N/m。质量块水箱盛满水时, 总质量为 22.8 kg, 即该自适应 TMD 的可调频范围为 1.84~2.08 Hz。实际工程中, 可通过扩大水箱的体积或者换用其他密度更大的液体或固体来扩大自适应 TMD 的可调质量范围。

实际工程中, 人行桥竖向自振频率一般在 2 Hz 左右, TMD 质量比一般取为 1% 左右。为模拟实际工程情况, 搭建一质量约为 2 000 kg, 频率约为 2 Hz 的人行桥模型为减振主体结构。试验用的人行桥模型由一块长为 10 m、宽为 4 m、厚度为 60 mm 的钢板搭在 4 个钢凳上构成, 以此作为单自

由度简支桥梁模型。通过改变长边方向相邻钢凳之间的距离来改变桥梁模型的自振频率, 以此模拟结构在使用过程中自振频率发生的变化。

试验中, 自适应 TMD 的初始状态为在质量块水箱中盛放 2.5 kg 的水。利用自由衰减振动法识别自适应 TMD 的初始频率, 利用指数函数拟合其阻尼比。为检验拟合精度, 由 Hilbert 变换做出自由衰减曲线的包络曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 自适应 TMD 的初始频率为 1.95 Hz, 拟合等效阻尼比为 3.63%。本次模型试验中, 自适应 TMD 的质量比约为 1%, 质量比指的是弹簧上部质量块与弹簧、自适应 TMD 底座及桥面板质量总和之比, 可变质量占 12.5%, 则人行桥模型结构质量的最大变化比例约为 0.125%, 如此微小的质量变化对其频率的影响可以忽略。

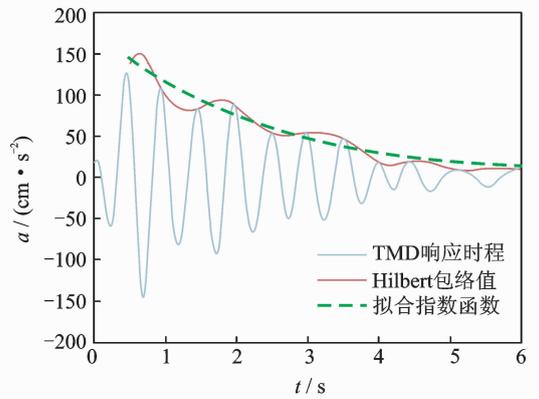


图 4 自适应 TMD 自由振动时程曲线及阻尼比拟合
Fig. 4 Free vibration test and fitted exponential function of adaptive-passive TMD

2.2 频率自调节验证

本次试验中只在桥面板的跨中处布置一个测点, 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, 采样频率均设置为 100 Hz。

为了模拟自适应 TMD 对主体结构自振频率发生变化时的自调节效果, 调整人行桥模型长边方向相邻钢凳之间的距离, 使其自振频率低于自适应 TMD 的初始自振频率。后续试验中, 将一个质量约为 70 kg 的工作人员在人行桥模型上做人行激励受迫振动试验。为考虑工作人员质量对人

行桥模型自振频率的影响,环境激励下,首先让该工作人员静止站立于桥面板的跨中位置。此时通过快速傅里叶变换,识别得到安装自适应 TMD 后的人行桥模型跨中测点的功率谱如图 5 所示。可见,模型结构实际竖向一阶自振频率为 1.86 Hz,与初始状态的自适应 TMD 的自振频率相差为 4.84%,可明显看出该人行桥模型的竖向振动主要由一阶模态控制。

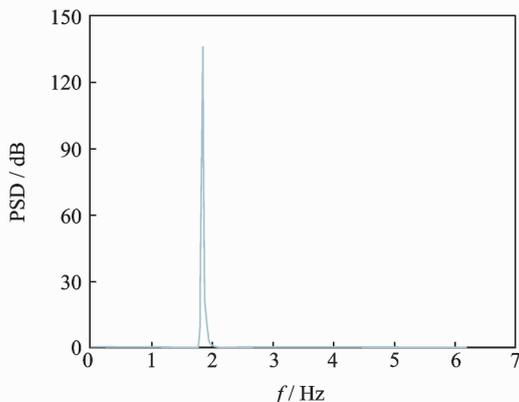


图 5 人行桥模型功率谱图

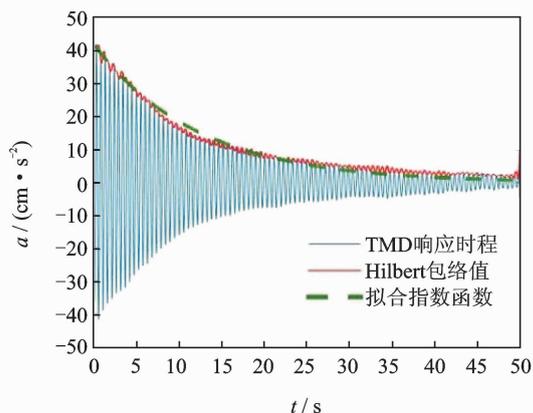
Fig. 5 PSD of ambient vibration test of pedestrian model

启动自适应调节后,放置在底座水箱中的水泵不断往质量块水箱中泵水,一段时间后,水泵不再工作,即自适应调节结束。此时,用自由衰减振动法识别得到调节后的 TMD 的自振频率为 1.87 Hz,与桥梁模型的竖向自振频率相差仅 0.54%。可见,自适应调节是可行而可靠的。

为进一步验证自适应 TMD 的有效性,将自适应调节前频率为 1.95 Hz 的 TMD 称为非谐调 TMD,将自适应调节后频率为 1.87 Hz 的 TMD 称为谐调 TMD。试验思路均为在各种不同激励作用下,对比在无 TMD、非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下 3 种工况下的人行桥模型的加速度响应。

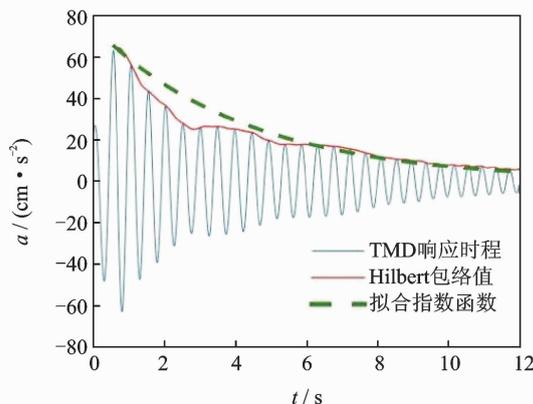
3 自由衰减振动对比试验

自由衰减振动试验采用锤击法进行,每次以固定频率、固定力度轻锤桥面板,使其发生自由衰减振动。锤击一定次数后,结束试验。分别取结构最后的自由衰减段加速度时程曲线分析,以此比较在无 TMD、非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,模型结构的等效阻尼比。图 6 为自由衰减振动对比时程曲线。



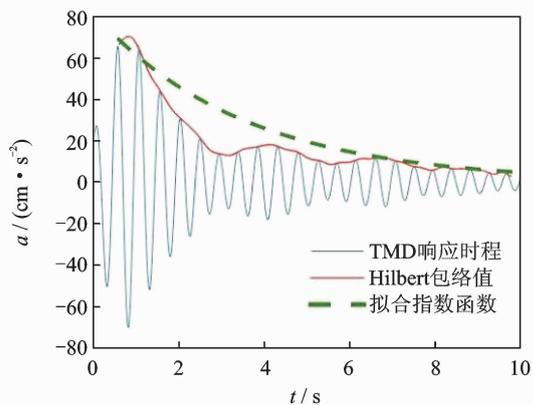
(a) 无 TMD 时结构自由衰减时程曲线

(a) Acceleration response of free vibration test without TMD and fitted exponential function



(b) 非谐调 TMD 作用下结构自由衰减时程曲线

(b) Acceleration response of free vibration test after mistuned TMD installed and fitted exponential function



(c) 谐调 TMD 作用下结构自由衰减时程曲线

(c) Acceleration response of free vibration test after returned TMD installed and fitted exponential function

图 6 自由衰减振动对比时程曲线

Fig. 6 Acceleration response of free vibration test and fitted exponential function

图 6(b)和图 6 (c)中,曲线中间段拟合不佳的原因是结构的阻尼比与其振幅有关,衰减前期振幅大,故阻尼比也大;后期振幅小,阻尼比也小,所以出现两段式的振动时程衰减。图中的指数函数拟合的是整个自由衰减段的等效阻尼比。无 TMD 作用时,模型结构的自由衰减振动拟合等效阻尼比结果为 0.71%。在非谐调 TMD 作用下,自由衰减振动拟合等效阻尼比结果为 1.92%。在谐调 TMD 作用下,自由衰减振动拟合等效阻尼比结果为 2.45%。相对于无 TMD 和非谐调 TMD,谐调 TMD 作用下模型结构的等效阻尼比提高比率分别为 245.07% 和 27.61%。

4 受迫振动对比试验

4.1 踏步激励对比试验

自适应 TMD 主要用于人行桥的振动舒适度控制中。为验证自适应 TMD 对模型结构加速度的控制效果,令一个质量约为 70 kg 的工作人员在节拍器的指导下,在人行桥模型的跨中位置分别以 1.66, 1.86 和 2.06 Hz 3 种不同频率原地踏步,对比在无 TMD、非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下模型结构的加速度响应。踏步激励试验现场如图 7 所示。

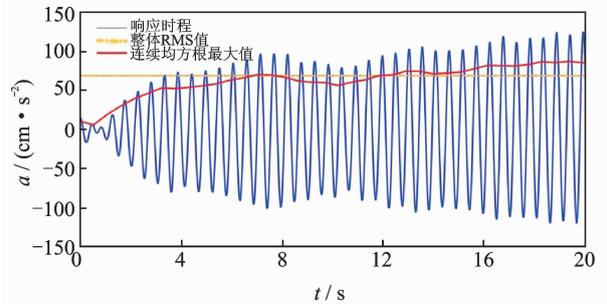


图 7 踏步激励试验现场照片
Fig. 7 Single person tramping test

加速度的峰值和均方根值 (root mean square, 简称 RMS) 常被用为人行桥和大跨楼板等结构人致振动响应的评价指标。文献[15]指出,将 RMS 值作为评估指标时,选取不同的时间步长,所得的均方根值会存在差异。对于人行荷载引起的结构响应,若选择 1 s 或更大的时间步内产生单个脉冲的 RMS 响应估计,可能会忽略该段时间内其余激励步的脉冲^[16]。因此,为了确切反映整个时程内

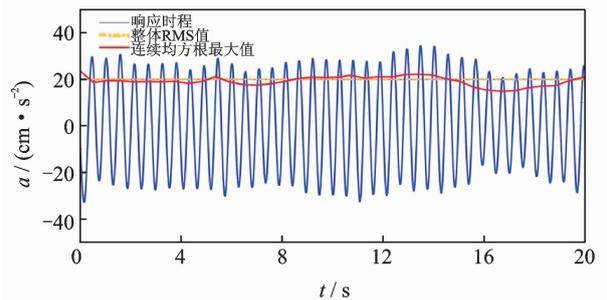
的加速度响应,笔者对实测得到的结构加速度响应进行了连续均方根响应计算,此处人行桥的自振频率为 1.86 Hz。图 8 为单人踏步激励对比时程曲线。

由图 8 可见,在某些时间段内,连续均方根响应计算值明显高于整体均方根值。整体均方根值用于评估结构整个时程内的振动响应时有一定局限性,可能会在某些时段低估结构的振动响应,而连续均方根响应计算值比整体均方根值更能全面、真实地反映结构的瞬态振动响应。



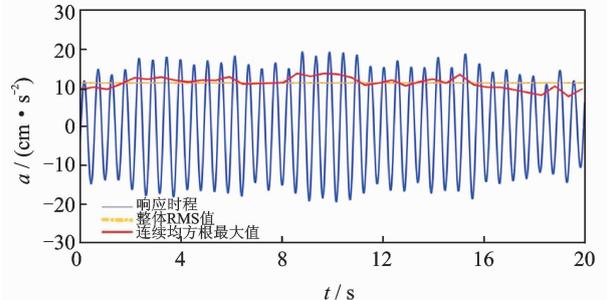
(a) 无TMD时结构加速度时程曲线

(a) Response of bridge under tramping excitation without TMD



(b) 非谐调TMD作用下结构加速度时程曲线

(b) Response of bridge under tramping excitation with mistuned TMD



(c) 谐调TMD作用下结构加速度时程曲线

(c) Response of bridge under tramping excitation with retuned TMD

图 8 单人踏步激励对比时程曲线

Fig. 8 Response of bridge under single person tramping

对比图8的3种评估指标可见:在无TMD时,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为130.96,68.71和89.65 cm/s²;在非谐调TMD作用下,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为35.54,19.97和24.16 cm/s²;而在谐调TMD作用下,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为19.36,11.30和13.73 cm/s²。3种指标下,谐调TMD相对于无TMD和非谐调TMD的改良率分别为85.22%,83.55%,84.68%和46.84%,43.42%,43.17%。

4.2 步行激励对比试验

为进一步验证自适应TMD的减振效果,令该工作人员分别以1.66,1.86和2.06 Hz 3种频率在节拍器的指导下,从人行桥模型的一端走到另一端,再返回行走,反复两次。加速度信号的处理方法与4.1节相同。

图9为单人以1.86 Hz频率的步行荷载激励下,模型结构的加速度响应曲线。

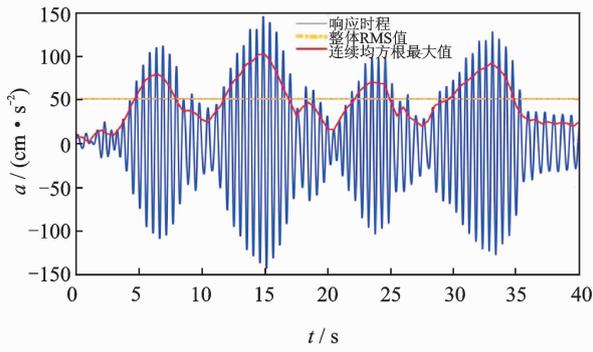
可见,在无TMD时,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为145.71,51.10和102.30 cm/s²;在非谐调TMD作用下,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为47.42,21.29和32.38 cm/s²;而在谐调TMD作用下,模型结构加速度响应的峰值、整体均方根值、连续均方根响应计算最大值依次为25.66,7.67和18.76 cm/s²。3种指标下,谐调TMD相对于无TMD和非谐调TMD的改良率分别为82.39%,84.99%,81.66%和46.84%,45.89%,42.06%。

表1为单人踏步激励试验和单人步行激励试验中,无TMD、非谐调TMD和谐调TMD作用下,模型结构的加速度响应的各项评估指标数值。可见,经过自适应调节后的谐调TMD在各个工况下,相对于无TMD时和调节前的非谐调TMD作用下,各项加速度评估指标均有明显下降。

表1 自适应TMD减振系统的竖向振动试验性能指标

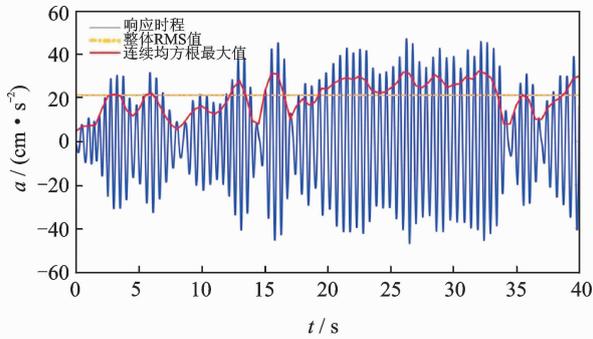
Tab.1 Experimental performance assessment for vertical vibration of structure with adaptive-passive TMD devices

项目	测试工况	单人踏步频率/ Hz			单人步行频率/ Hz			
		1.66	1.86	2.06	1.66	1.86	2.06	
无 TMD	峰值/(cm · s ⁻²)	40.93	130.96	45.86	44.15	145.71	49.25	
	整体均方根值/(cm · s ⁻²)	21.47	68.71	23.92	21.78	51.10	23.69	
	连续均方根响应计算最大值/(cm · s ⁻²)	29.24	89.65	33.06	30.69	102.30	38.21	
非谐调 TMD	峰值/(cm · s ⁻²)	29.68	35.54	34.24	32.36	47.42	38.14	
	整体均方根值/(cm · s ⁻²)	15.35	19.97	18.22	17.36	21.29	19.26	
	连续均方根响应计算最大值/(cm · s ⁻²)	19.28	24.16	23.01	20.97	32.28	24.10	
谐调 TMD	峰值/(cm · s ⁻²)	16.68	19.36	17.24	19.73	25.66	21.26	
	整体均方根值/(cm · s ⁻²)	8.35	11.30	8.97	5.92	7.67	6.27	
	连续均方根响应计算最大值/(cm · s ⁻²)	11.29	13.73	12.08	13.19	18.76	13.88	
改良率/%	峰值	无 TMD	59.25	85.22	62.41	55.31	82.39	56.83
		非谐调 TMD	43.80	46.84	49.65	39.03	46.84	44.26
	整体均方根值	无 TMD	61.11	83.55	62.50	72.82	84.99	73.53
		非谐调 TMD	45.60	43.42	50.77	65.90	45.89	67.45
	连续均方根响应计算最大值	无 TMD	61.39	84.68	63.46	50.51	81.66	63.67
		非谐调 TMD	41.44	43.17	47.50	37.10	42.06	42.41



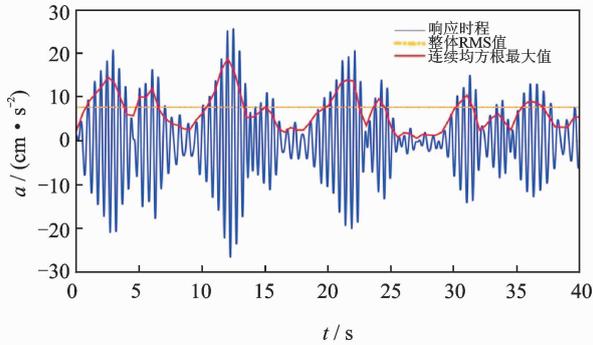
(a) 无TMD时结构加速度时程曲线

(a) Response of bridge under walking loading without TMD



(b) 非谐调TMD作用下结构加速度时程曲线

(b) Response of bridge under walking loading with mistuned TMD



(c) 谐调TMD作用下结构加速度时程曲线

(c) Response of bridge under walking loading with retuned TMD

图 9 单人步行激励对比时程曲线

Fig. 9 Single person walking test

5 结 论

1) 结构的自振频率偏离 TMD 时, 自适应 TMD 能够自发识别出结构的自振频率, 并调节自身频率与结构频率相同, 可行性和可靠性好。

2) 自由衰减振动试验证明, 相对于无 TMD 和非谐调 TMD, 谐调 TMD 能提高结构的等效阻

尼比。

3) 受迫振动试验证明, 相对于无 TMD 和非谐调 TMD, 谐调 TMD 在不同频率、不同类型的人行荷载激励下, 均能降低结构的加速度响应峰值、整体均方根值和连续均方根响应计算最大值。

4) 自适应 TMD 是传统 TMD 对频率敏感和难以调节频率缺陷的改良, 具有构造简单、电量小和性能稳定的优点, 具有良好的工程应用前景。

参 考 文 献

[1] 徐怀兵, 欧进萍. 设置混合调谐质量阻尼器的高层建筑风振控制实用设计方法[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6):144-154.
 Xu Huaibing, Ou Jinping. Design method for wind-induced vibration control of high-rise buildings with hybrid tuned mass dampers [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6):144-154. (in Chinese)

[2] 赵昕, 丁洁民, 孙华华, 等. 上海中心大厦结构抗风设计[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(7):1-7.
 Zhao Xin, Ding Jiemin, Sun Huahua, et al. Structure design of the Shanghai Tower for the wind loads[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7):1-7. (in Chinese)

[3] 盛涛, 金红亮, 李京, 等. 液体质量双调谐阻尼器 (TLMD) 的设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(8):197-202.
 Sheng Tao, Jin Hongliang, Li Jing, et al. A study on the design method of tuned liquid and mass damper (TLMD)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8):197-202. (in Chinese)

[4] 孙万泉, 李庆斌. 基于形状记忆合金的 TMD 半主动控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(6):164-168.
 Sun Wanquan, Li Qinbin. TMD semi-active control based on shape memory alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6):164-168. (in Chinese)

[5] 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)

[6] Shi Weixing, Wang Liangkun, Lu Zheng. Study on self-adjustable tuned mass damper with variable mass

- [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(3):e2114.
- [7] 涂建维,汪伯潮. 基于磁流变弹性体的调频 TMD 减振装置[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(5):29-34.
Tu Jianwei, Wang Bochao. The frequency adjustable tuned mass damper based on magnetorheological elastomers [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2015, 35(5):29-34. (in Chinese)
- [8] Sun C, Nagarajaiah S. Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, 21:890-906.
- [9] Sun C, Nagarajaiah S, Dick A. Family of smart tuned mass damper with variable frequency under harmonic excitation and ground motions: closed-form evaluation [J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, 13(2):319-341.
- [10] Nagarajaiah S. Adaptive passive, semi-active, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform [J]. *Structural Control and Health Monitoring* 2009;16(7-8):800-841.
- [11] 杨永春,赵金赛. TMD 自适应变频方法研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(12):71-75.
Yang Yongchun, Zhao Jinsai. Discussion on auto frequency-changeable TMD [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(12):71-75. (in Chinese)
- [12] 胡振邦,许睦旬,姜歌东,等. 基于小波降噪和短时傅里叶变换的主轴突加不平衡非平稳信号分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(5):20-23.
Hu Zhenbang, Xu Muxun, Jiang Gedong, et al. Analysis of non-stationary signal of a sudden unbalanced spindle based on wavelet noise reduction and short-time Fourier transformation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(5):20-23. (in Chinese)
- [13] 胡晓依,何庆复,王华胜,等. 基于 STFT 的振动信号解调方法及其在轴承故障检测中的应用[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(2):82-86.
Hu Xiaoyi, He Qinfu, Wang Huasheng, et al. Vibration signal demodulation method based on STFT and its application in rolling bearing fault detections [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2):82-86. (in Chinese)
- [14] 赵学智,叶邦彦,陈统坚. 短时傅里叶变换的时频聚集性度量准则研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(5):948-956.
Zhao Xuezhi, Ye Bangyan, Chen Tongjian. Study on measure rule of time-frequency concentration of short time fourier transform [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(5):948-956. (in Chinese)
- [15] Zivanovic S, Pavic A. Probabilistic modeling of walking excitation for building floors [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2009, 23(3):132-143.
- [16] 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及结构健康监测。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

通信作者简介:施卫星,男,1962年10月生,博士、教授。主要研究方向为工程结构抗震与结构振动控制。

E-mail: swxtgk@126.com

