

自调频调谐质量阻尼器及其减振性能试验

施卫星¹, 王梁坤¹, 王洪涛², 单伽程¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市房地产科学研究院, 上海 200031)

摘要: 为了改善调谐质量阻尼器(TMD)对频率调谐敏感和使用过程中 TMD 的频率难以调节的缺陷,利用可调节质量的箱体代替 TMD 的质量块,并附加上伺服控制系统和驱动装置,即为自调频 TMD. 在特定的外界激励作用下,伺服控制系统能够自发地启动驱动装置改变 TMD 的质量,调节 TMD 频率至控制结构频率附近. 通过对比自振频率偏离 TMD 频率的单自由度简支桥梁模型,在 TMD 启动变频率调节前、后两种情况下的自由振动和受迫振动,以等效阻尼比、加速度峰值和均方根值等作为评价指标,测试了该自调频 TMD 对原 TMD 的改良效果. 结果表明:变频率调节有较好的收敛性,且相比启动变频率调节前,启动后能提高模型结构的等效阻尼比;多种人行荷载工况下,相比启动变频率调节前,启动后均能提高减振率.

关键词: 自调频调谐质量阻尼器; 被动控制; 自由衰减试验; 受迫振动试验; 响应评估

中图分类号: TU352.1; TU317

文献标志码: A

Experimental Study of Effect of Controlling Vibration of Self-Adjustable Tuned Mass Damper

SHI Weixing¹, WANG Liangkun¹, WANG Hongtao², SHAN Jiayang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Real Estate Science Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: In order to solve the problem of mistuning of tuned mass damper (TMD) and overcome the difficulty to adjust the frequency of TMD during normal using, a self-adjusting TMD was proposed. The self-adjustable TMD was generated by a tank instead of solid mass, using a servo control system to start the drive to change the mass of (TMD) and spontaneously adjust the frequency of TMD to main structure near the natural frequency of vibration, under the special harmonic excitation. The vibration reduction effects with or

without this self-adjustable device under freedom vibration and forced vibration were set to investigate the effect on improving the previous TMD based on the equivalent damping ratio, the peak value of acceleration, and root-mean-square. The results indicate that the self-adjustable TMD has a good convergence and could increase the equivalent damping ratio of the structure. The self-adjustable TMD has good vibration tuned effects for the various excitation conditions.

Key words: self-adjustable TMD; passive control; freedom vibration test; forced vibration test; response evaluation

调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)是一种结构振动控制装置. 传统的被动式 TMD 由质量、弹簧和阻尼 3 个单元组成. 结构的振动引起 TMD 的振动时, TMD 会对结构施加一个反向的惯性力以控制结构的振动,并通过阻尼装置消耗振动能量. 理论和实践表明,当调整 TMD 频率与结构自振频率相近时, TMD 能起到较好的减振效果^[1]. 由于被动式 TMD 装置简单、经济可靠,在实际工程中得到大量应用. 但被动式 TMD 存在对频率调谐敏感的缺点,当 TMD 频率偏离最优频率时,减振效果会减小^[2].

结构在正常使用过程中产生的累积损伤和使用功能的变化等均会导致结构的自振特性发生变化,另外,设计时结构的自振频率计算值与其实际自振频率间也可能存在差异^[3],这些因素都会使结构自振频率偏离 TMD 的控制频率,从而降低 TMD 的减振效果. 目前在工程中大量使用的传统被动式 TMD 均无法实现对其自振频率的自动调节. 因此,实现 TMD 的自调频控制,使其能根据主体结构自振频率的变化自动调节自身的振动频率,以达到最优的减振效果,是非常有实际工程意义的.

为改善传统 TMD 对频率调谐敏感的缺陷,目

收稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51408435)

第一作者: 施卫星(1962—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为工程结构抗震及结构振动控制. E-mail: swxtgk@126.com

通讯作者: 王梁坤(1993—),男,硕士生,主要研究方向为结构振动控制. E-mail: 1630634@tongji.edu.cn

前已经有几种新型的 TMD. 赵金赛等^[4]通过变刚度驱动系统改变 TMD 的固有频率,可在多个频率上控制被控结构的振动. Nagarajaiah 等^[5]研发出一种基于短时傅里叶变换的自适应被动控制 TMD 系统,来控制风振下的结构响应. Berardengo 等^[6]利用记忆合金和电涡流阻尼研发出一种自适应 TMD. Feudo 等^[7]研发出一种可变刚度和电涡流阻尼的新型 TMD.

本文所提出的自调频 TMD (self-adjustable tuned mass damper, SATMD),是一种新型的被动 TMD,是对传统被动式 TMD 的改进. 通过附加伺服控制系统和驱动装置,有规律地调节 TMD 质量块的质量来调整 TMD 自振频率接近主结构的自振频率,以提高其减振效果. 文中主要通过自调频控制原理推导和模型试验的方法对自调频 TMD 调节质量的可行性、可靠性和有效性进行论证.

1 自调频 TMD 原理分析

1.1 调节思路

当由于各种因素使 TMD 的控制频率偏离结构的自振频率时, TMD 的减振效果减弱. 加速度是评估 TMD 减振效果的重要指标,而且容易测得. 故本文利用采集得到的 TMD 质量块与结构的加速度,并控制它们的比值大于某个限值的方法来实现变频率调节. 当加速度比值大于该限值时,认为 TMD 与结构频率相近,不需要开启变频率调节;当加速度比值小于该限值时,认为 TMD 已经起不到良好的减振效果,需要开启变频率调节,然后启动驱动装置调整 TMD 质量块箱体中的质量,以达到控制 TMD 频率与结构频率相近的目的.

为满足上述要求,自调频 TMD 由可调节质量的箱体、弹簧、阻尼装置、伺服控制系统和驱动装置组成. 其中,伺服控制系统由 2 个加速度传感器和单片机电路板组成. 2 个加速度传感器分别测得结构和 TMD 质量块的加速度信号,单片机电路板根据预先设置于内的加速度比值限值和调节算法,有规律地启动驱动装置,改变 TMD 质量块的质量. 本文提出的自调频 TMD 主要应用于人行桥、大跨楼板等的舒适度控制上. 文献[8]指出,人致振动引起的舒适度问题通常不会引起结构的疲劳破坏和安全性问题. 因此,可仅考虑主结构处于线性状态时的动力特性,且可认为其在正常使用过程中发生的频率变化是缓慢而微小的.

本文提出的调节方法不需要实时调节,只需在选定的时段(比如刚为结构安装 TMD 时和正常使用一段时间后等)进行调节即可. 调节结束后,自调频 TMD 的使用与传统 TMD 无异. 因此,它是一种新型的被动式 TMD,能够确保 TMD 的质量与刚度的解耦分离,确保 TMD 的鲁棒性,且装置简单,需电量小,工程中易于实施.

1.2 调节方法

在单片机的程序中,首先将第一次测得的加速度比值与限值进行对比,若大于限值,则不启动变频率调节;若小于限值,则启动调节.

程序无法根据加速度比值判断 TMD 频率高于或者低于结构频率,也就是无法判断应该往 TMD 质量块的箱体中增加质量还是减小质量. 因此,程序中设置为先试探性地启动驱动装置往 TMD 质量块的箱体中增加质量,经过一段时间后,再测得加速度比值与第一个比值进行比较,如果第二个加速度比值比第一个值大,则说明调整方向正确,此后每隔一段时间都往 TMD 质量块的箱体中增加相同质量,并将测得的加速度比值与控制目标进行比较,直至高于控制目标后结束调整;如果第二个加速度比值比第一个小,则说明调整方向不正确,接下来每隔一段时间都从 TMD 质量块的箱体中减小质量,并将测得的加速度比值与控制目标进行比较,直至高于控制目标后结束调整. 每次调整的质量和间隔的时间都是恒定的值,设置间隔时间的目的是使驱动装置在该段时间内完成该次质量的调节,而对算法的稳定性没有影响.

自调频 TMD 的变频率调节并不是实时进行的,而是仅在选定的时段进行. 由于在舒适度控制问题中,结构的频率变化是缓慢而微小的,因此,作为一种新型的被动式 TMD,自调频 TMD 既能够满足工程使用过程中 TMD 可调谐的需求,又能避免实时控制中存在的时滞问题.

1.3 加速度比值式推导

根据此调节方法,为推导出合适的加速度比值限值,以单自由度结构为例进行试验. 安装 TMD 的单自由度结构计算简图如图 1 所示.

由结构动力学知识,易得在外部激励的作用下,结构的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_p \\ \ddot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_p + c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_p \\ \dot{u}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_p \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u} \quad (1)$$

式中: m_p 、 k_p 和 c_p 分别为结构的质量、刚度和阻尼; m_s 、 k_s 和 c_s 分别为 TMD 的质量、刚度和阻尼; u_p 、 \dot{u}_p 和 \ddot{u}_p 分别为结构的位移、速度和加速度; u_s 、 \dot{u}_s 和 \ddot{u}_s 分别为 TMD 的位移、速度和加速度; \ddot{u} 为外部激励。

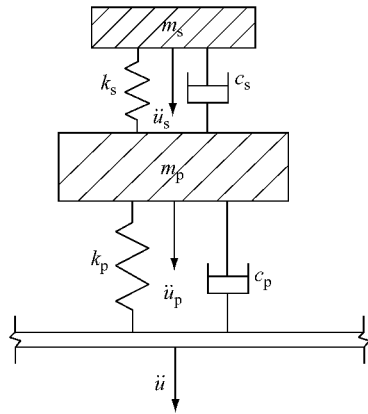


图 1 安装 TMD 的单自由度结构计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of single degree of freedom structure with TMD

为简化表达式,定义参数如下式:

$$\mu = \frac{m_s}{m_p}, \quad \beta = \frac{\omega}{\omega_p}, \quad \gamma = \frac{\omega_s}{\omega_p} \quad (2)$$

$$\zeta_p = \frac{c_p}{2\omega_p m_p}, \quad \zeta_s = \frac{c_s}{2\omega_s m_s} \quad (3)$$

式中: μ 为质量比; β 为激励频率比; ω 为激励频率; ω_p 和 ω_s 分别为结构和 TMD 的角频率; γ 为 TMD 频率比; ζ_p 和 ζ_s 分别为结构和 TMD 的阻尼比。

在考虑稳态解时,将式(2)和(3)代入式(1),可得自调频 TMD 质量块与结构加速度比值的表达式为

$$r = \left| \frac{\ddot{u}_s}{\ddot{u}_p} \right| = \sqrt{\frac{\beta^4 + (2\zeta_s \gamma \beta)^2}{(\gamma^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_s \gamma \beta)^2}} \quad (4)$$

1.4 加速度比值分析

在式(4)中,加速度比值与 TMD 阻尼比、TMD 频率比和激励频率比有关,由于在工程中,TMD 质量比一般取为 0.01,作为一个算例,根据文献[9]中的优化公式,可算得此时 TMD 阻尼比为 0.06。

为了解加速度比值的变化规律,将其对 TMD 频率比求导,容易求得

$$\left. \begin{aligned} \gamma = \beta, & \quad \frac{dr}{d\gamma} = 0 \\ \gamma > \beta, & \quad \frac{dr}{d\gamma} < 0 \\ \gamma < \beta, & \quad \frac{dr}{d\gamma} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

也即当 TMD 频率比等于激励频率比时,加速

度比值取最大值;TMD 频率比小于激励频率比时,加速度比值随着 TMD 频率比的增大而单调递增;TMD 频率比大于激励频率比时,加速度比值随着 TMD 频率比的增大而单调递减。

在 TMD 阻尼比为 0.06 情况下,根据式(4)做出几种不同激励频率比作用下的加速度比值与 TMD 频率比关系,如图 2 所示。

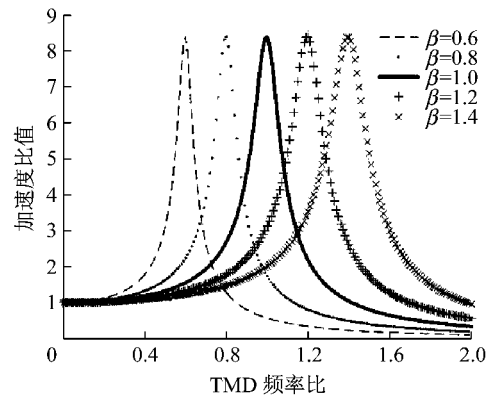


图 2 加速度比值与 TMD 频率比关系图

Fig. 2 r versus TMD frequency ratio at different excitation frequency ratios

本文通过设置加速度比值大于预置限值的方法来使 TMD 的频率接近结构频率。由图 2 可见,当设置激励频率比为 1.0、比值限值为 8 时,伺服控制系统会自动调节 TMD 频率比至(0.98, 1.01)区间内,满足工程中的调谐要求。而当激励频率比不为 1.0 时,比如为 0.6,则当设置限值为 8 时,控制系统会调节 TMD 频率比值在(0.57, 0.59)区间,这显然是不合理的。为保证调节的鲁棒性,需事先测出结构的自振频率,然后人为施加该频率的简谐荷载使激励频率比为 1.0。

由单调性证明可见,只要每次调节的质量足够小,该算法是收敛的。本例中调节的最大误差仅有 2%。针对不同阻尼比的 TMD,可根据式(4)绘制出类似图 2 的关系图,然后根据曲线的变化规律得出合理的加速度比值限值。因此,从理论分析可得,自调频 TMD 调节质量的方法是可行且可靠的。

因此,在每次欲启动变频率调节前,需先测得结构频率,然后人为施加该频率的荷载(如单人按照节拍器指导原地踏步等),使激励频率比等于 1.0。调节结束后,自调频 TMD 的使用与传统的被动式 TMD 相同。式(4)所得的稳态解下的加速度比值表达式仅在启动调节的时间段有效。由于该时段需人为施加简谐激励,因此可认为此时结构处于稳态振动阶段。而当调节结束后,自调频 TMD 的功能已经实现完

毕,式(4)也即失去意义。

2 试验模型概况

2.1 自调频 TMD 构造

本试验选用的可变质量块的形式为水,则驱动装置相应地选为水泵和电磁阀.为实现自调频 TMD 的设计思想,本文提出的自调频 TMD 构造如图 3 所示.根据自调频控制的原理,设计 1 个单片机电路板来控制水泵向上部质量块水箱注水,另外设计 1 个电磁阀开关来实现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 自调频的目的。

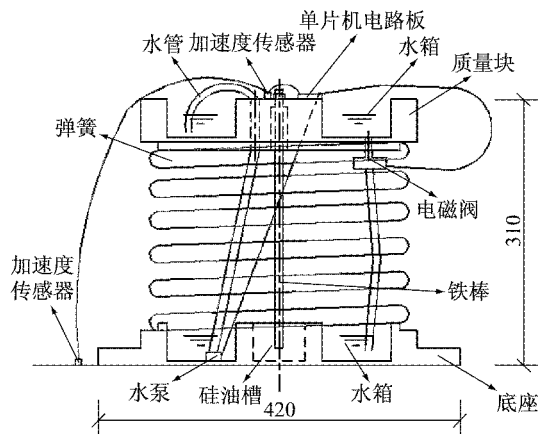


图 3 自调频 TMD 模型设计图(单位:mm)

Fig. 3 Design of SATMD model (unit: mm)

图 3 中,TMD 质量块中预留环形水槽作为可调节质量部分,并打出 2 个孔道,分别作为从下部抽取水和排出水至下部用的水管通道.底座水箱中也对应开环形水槽,以供 TMD 质量块调节质量,并在中间开圆柱形槽体,以盛放硅油.铁棒的上端由螺母固定于质量块的顶部,下端伸入硅油槽中.通过旋转螺母以手动调节铁棒与硅油的接触长度,来调节 TMD 的阻尼比。

伺服控制系统中的单片机电路板采用的单片机为 STC12C2052AD.驱动装置为水泵和电磁阀.水泵放置在 TMD 的底座水箱中,接受单片机的控制将底座水箱中的水泵入 TMD 质量块水箱中,增加 TMD 质量.将电磁阀插于 TMD 质量块底部的孔道口,当电磁阀受单片机控制打开时,水从 TMD 质量块水箱中流入底座水箱中,即减小 TMD 质量块质量,以此改变 TMD 的质量以调节其自振频率.本次试验中每次调整的质量为 0.1 kg,每次调整的间隔时间为 1 s.搭建完成的自调频 TMD 模型如图 4 所示。

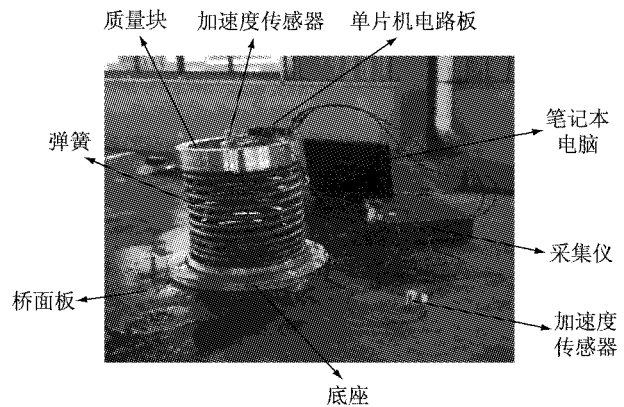


图 4 自调频 TMD 模型图

Fig. 4 Model of SATMD

2.2 简支桥梁模型及 TMD 参数

选取一质量为 2 t,频率约为 2 Hz 的桥梁模型为减振主体结构.试验用的桥梁模型由一块长 9 m、宽 4 m、厚度 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.通过改变长边方向上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。

图 3 中自调频 TMD 的上部质量块在没有水时,总质量为 18 kg,弹簧刚度为 $3\ 160\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.质量块水箱盛满水时,总质量为 22 kg.即该自调频 TMD 的调频范围为 1.91~2.11 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调频 TMD 的可调质量范围.因此,在实际应用中自调频 TMD 调节质量以重新调谐频率的方法是可行的。

试验中,自调频 TMD 的初始状态为在质量块水箱中盛放 2 kg 的水,则其理论初始频率为 2.00 Hz.本次模型试验中,自调频 TMD 的质量比约为 1%,可变质量占 20%,则桥梁模型结构质量的最大变化比例约为 0.2%,如此微小的质量变化对其频率的影响可以忽略。

前文指出,加速度比值的最大值与 TMD 的阻尼比有关.本试验中的自调频 TMD 通过调节铁棒与硅油的接触长度来调节其阻尼比.为测得自调频 TMD 的阻尼比和实际初始自振频率,试验中采用自由衰减振动法,即给 TMD 一个竖向的初始位移,然后突然释放,通过用指数函数 $y = Ae^{-2\pi f t / \zeta}$ 拟合自由衰减响应的包络值来求得其等效阻尼比^[10].式中: y 表示曲线纵轴数值, A 为函数与纵轴交点值, f 为识别频率, ζ 为拟合阻尼比, t 为时间.通过反复调节铁棒与硅油的接触长度,每次调节完均进行自由衰减

振动试验识别 TMD 的等效阻尼比,如此反复,直到调节至 TMD 的等效阻尼比为 0.06 为止.其自由振动响应时程及指数函数拟合识别阻尼比如图 5 所示.为了验证拟合精度,由 Hilbert 变换作出其响应包络图.由快速傅里叶变换识别得,自调频 TMD 的实际初始频率为 2.02 Hz.

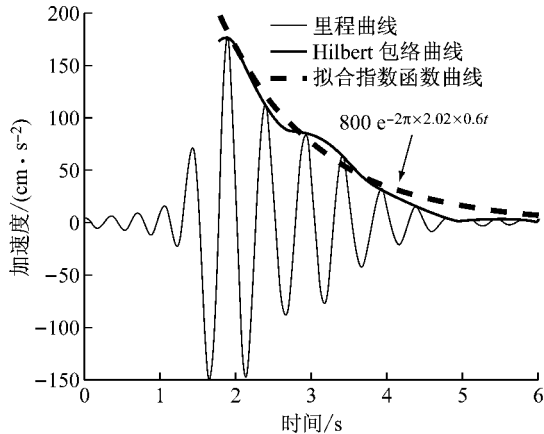


图 5 自调频 TMD 自由振动测试时程及阻尼比拟合
Fig. 5 Free vibration test and fitted exponential function of SATMD

由于此时自调频 TMD 的等效阻尼比为 0.06,所以根据式(4)和图 2,加速度比值限值设为 8.

3 自调频 TMD 减振模型及验证

3.1 自调频 TMD 减振模型建立

全部试验中共布置 2 个测点,一个加速度传感器布置在桥面板的跨中点处,记为 TP1 测点;另一个加速度传感器放在自调频 TMD 质量块上,记为 TP2 测点.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,传感器采用灵敏度为 $1 \text{ V} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 KD1100LC 压电式加速度传感器.为测得试验模型的自振特性,首先进行环境振动测试,测试期间,为避免干扰,叫停周围的一切施工和人员走动,采样频率均为 100 Hz.

为了体现本文所提出的自调频 TMD 对主体结构基本频率发生变化时的减振调谐效果,调整桥梁模型长边方向上相邻钢凳之间的距离,使其自振频率约为 1.9 Hz,与自调频 TMD 的自振频率相差约为 6%.将自调频 TMD 减振装置放置于桥面板跨中位置后的试验结构模型如图 6 所示.

一个重力约为 750 N 的工作人员在桥梁模型上做受迫振动试验.为考虑工作人员重量对桥梁模型

自振频率的影响,在环境激励下,首先让该工作人员静止站立于桥面板的跨中位置.此时,测得安装上自调频 TMD 后的桥梁模型跨中测点的功率谱如图 7 所示.

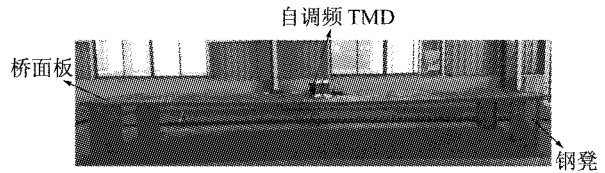


图 6 自调频 TMD 减振试验模型图

Fig. 6 Test model

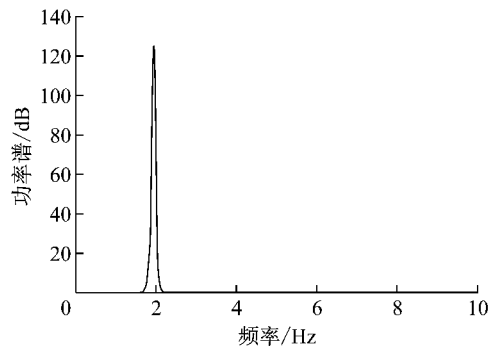


图 7 环境振动测试测点 TP1 功率谱

Fig. 7 PSD of ambient vibration test of TP1

由图 7 得,调整后的桥梁模型实际竖向一阶自振频率为 1.91 Hz,与初始状态的自调频 TMD 的自振频率相差为 5.8%.另外,桥梁模型的高阶竖向模态相对于一阶模态的振动能量较低.因此,可判断该桥梁模型竖向振动主要由一阶模态控制.

3.2 自调频 TMD 模型自调节过程验证

由于已经测得模型结构的自振频率为 1.91 Hz,故首先让工作人员在节拍器的指导下以 1.91 Hz 的频率在桥面板的跨中位置原地踏步,同时启动变频率调节.

调节过程中,可见放置于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,即变频率调节完毕.此时,用自由衰减振动法测得 TMD 的自振频率为 1.93 Hz,与桥梁模型的竖向自振频率相差仅 1.0%.由此可见,自调频 TMD 的自调节过程是可靠而有效的.

将启动变频率调节前,即频率为 2.02 Hz 的 TMD 称为非谐调 TMD;将启动变频率调节后,即频率为 1.93 Hz 的 TMD 称为谐调 TMD.试验思路均为在各个工况下,对比在非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下的桥梁模型结构响应,进一步验证自调频 TMD 的有效性.

4 自由衰减振动试验

试验模型同上节,自由衰减振动试验采用锤击法进行,每次以固定频率、固定力度轻捶桥面板,使其发生自由衰减振动,锤击一定次数后,结束试验。以此比较在非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,模型结构的等效阻尼比。

图 8a 和 b 分别为非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,测得的模型结构的自由振动响应时程及指数函数拟合识别等效阻尼比。

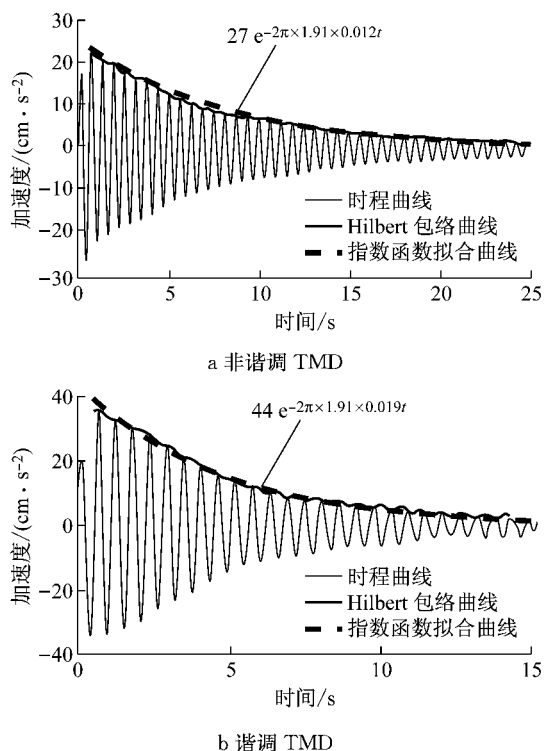


图 8 自由振动测试时程及阻尼比拟合对比图

Fig. 8 Acceleration response of free vibration test and fitted exponential function

从图 8 可见,结构自由振动衰减曲线可由指数函数进行拟合。在非谐调 TMD 作用下,自由衰减振动拟合等效阻尼比结果为 1.2%。在谐调 TMD 作用下,自由衰减振动拟合等效阻尼比结果为 1.9%。相对于非谐调 TMD,谐调 TMD 作用下的模型结构等效阻尼比提高比率为 58.3%。

5 受迫振动试验

由于 TMD 主要用于人行桥和大跨楼板等的竖向舒适度控制中,考虑人行激励的类型和频率,并结合试验场地条件和试验安全,受迫振动试验分为单

人在跨中以不同频率踏步激励和单人以不同频率步行激励 2 个环节。分别对比在非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,结构的加速度响应。

5.1 单人跨中踏步激励测试对比

考虑行人正常的步行、跑步频率范围,并为对比验证在共振频率和其他频率激励作用下,谐调 TMD 的结构控制效果,选定单人分别以 1.7、1.9 和 2.1 Hz 3 种频率在节拍器的严格指导下,在结构的跨中进行有节奏的原地踏步。

加速度的峰值和均方根值(root mean square, RMS)在国际上被普遍用作作为人行桥、楼板等结构人致振动方面的评价指标^[11-12]。文献[13]指出,将均方根值作为评估指标时,选取不同的时间步长,所得的均方根值会存在差异。而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^[14]。因此,为更确切地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 $1/f_s$ 的 RMS 响应计算。其中, f_s 为单人踏步步频,此处取为 1.9 Hz。

当激励频率为共振频率时,结构的响应最大,是工程上应着重控制的工况。图 9a 和 b 分别为非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,单人 1.9 Hz 频率的踏步激励作用下,结构的加速度响应时程图,并对其求整体 RMS 值和连续 0.526 s 的 RMS 值。

由图 9 可见,在某些时间段内,连续 0.526 s RMS 值明显高于整体 RMS 值。整体 RMS 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,造成不安全的后果。而连续 0.526 s 的 RMS 值比整体 RMS 值更能全面、真实地反映结构的瞬态振动响应。

对比图 9a 和 b 的 3 种评估指标可见,在非谐调 TMD 作用下,结构加速度响应的峰值、整体 RMS 值、连续 0.526 s 的 RMS 最大值依次为 153.3、77.1、105.3 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。而在谐调 TMD 作用下,结构加速度响应的峰值、整体 RMS 值、连续 0.526 s 的 RMS 最大值依次为 68.7、36.8、52.5 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 。谐调 TMD 相对于非谐调 TMD 的改良率分别为 55.2%、52.3%、50.1%。

5.2 单人步行激励测试对比

为进一步验证谐调 TMD 的减振效果,本工况设置为单人分别以 1.7、1.9 和 2.1 Hz 3 种频率在节拍器的严格指导下,从桥梁的一端走到另一端,再返回行走。数据处理方法相同。

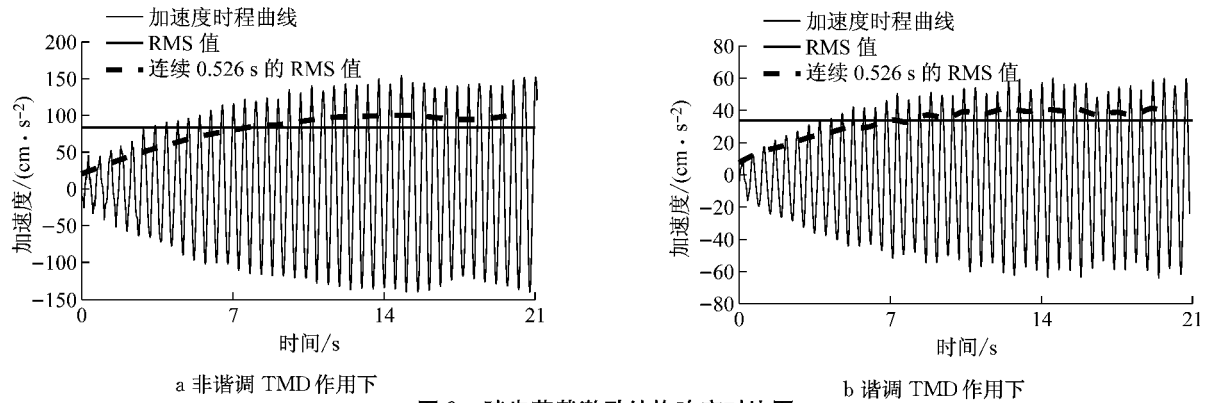


图 9 踏步荷载激励结构响应对比图

Fig. 9 Response of bridge at single person tramping

图 10a 和 b 分别为非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,单人以 1.9 Hz 频率的步行荷载激励下,结

构的加速度响应时程,并对其求整体 RMS 值和连续 0.526 s 的 RMS 值.

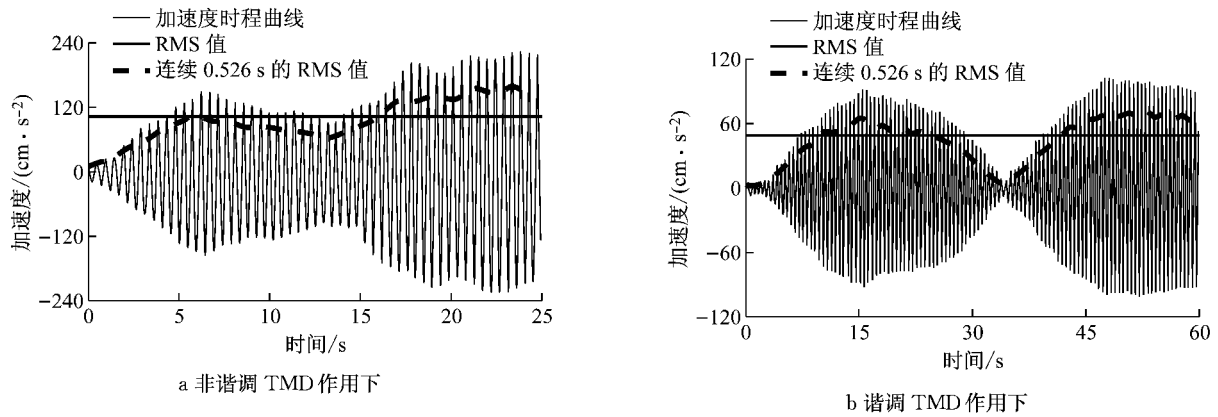


图 10 步行荷载激励结构响应对比图

Fig. 10 Response of bridge at single person walking

对比图 10a 和 b 的 3 种评估指标可见,在非谐调 TMD 作用下,结构加速度响应的峰值、整体 RMS 值、连续 0.526 s 的 RMS 最大值依次为 213.7、98.4、150.8 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$.而在谐调 TMD 作用下,结构加速度响应的峰值、整体 RMS 值、连续 0.526 s 的

RMS 最大值依次为 113.1、54.1、79.1 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$.谐调 TMD 相对于非谐调 TMD 的改良率分别为 47.1%、45.0%、47.5%.表 1 列出了单人踏步激励工况和单人步行激励工况中,非谐调 TMD 和谐调 TMD 作用下,模型结构的各项评估指标数值.

表 1 自调频 TMD 减振系统的竖向振动试验性能指标

Tab. 1 Experimental performance assessment of vertical vibration of structure with SATMD devices

测试工况	频率/Hz	非谐调 TMD 加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$			谐调 TMD 加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$			改良率/%		
		峰值	整体 RMS 值	连续 0.526 s RMS 最大值	峰值	整体 RMS 值	连续 0.526 s RMS 最大值	峰值	整体 RMS 值	连续 0.526 s RMS 最大值
单人踏步	1.7	23.1	7.7	14.7	10.8	4.2	6.9	53.2	45.5	53.1
	1.9	153.3	77.1	105.3	68.7	36.8	52.5	55.2	52.3	50.1
	2.1	38.9	15.1	22.9	23.7	9.1	15.2	39.1	39.7	33.6
单人步行	1.7	35.0	10.9	24.1	15.9	5.7	11.5	54.6	47.7	52.3
	1.9	213.7	98.4	150.8	113.1	54.1	79.1	47.1	45.0	47.5
	2.1	78.4	26.7	52.4	50.6	17.7	34.4	35.5	33.7	34.4

6 结论

由于各种原因会造成结构频率与 TMD 频率之

间产生偏差,致使 TMD 的减振控制效果下降.因此,本文提出了一种新型的被动式的自调频 TMD.通过本文的理论分析和试验结果可得以下结论:

(1) 结构的自振频率偏离 TMD 时,本文提出的

自调频 TMD 能根据自身和结构的振动加速度比值,在特定频率的荷载激励下,自发地调节自身频率至结构自振频率附近,稳定性和收敛性好。

(2) 自由衰减振动试验证明,相对于非谐调 TMD,谐调 TMD 能提高结构的等效阻尼比。

(3) 受迫振动试验证明,相对于非谐调 TMD,谐调 TMD 在不同频率、不同类型的荷载激励下,均能降低结构的加速度响应峰值、整体 RMS 值和连续 RMS 最大值。

总之,自调频 TMD 是对传统的 TMD 调谐敏感缺点的有效改良,可行性、可靠性和有效性好,且构造简单、需电量小、性能稳定,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.
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.
- [2] 陈俊岭, 李哲旭, 黄冬平. 盆式调谐/颗粒阻尼器在风力发电塔振动控制中的实测研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 571.
CHEN Junling, LI Zhexu, HUANG Dongping. Site measurement of basin tuned and particle damper for vibration control in wind turbine tower [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Editions), 2017, 47(3): 571.
- [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.
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.
- [4] 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.
YANG Yongchun, ZHAO Jinsai. Discussion on auto frequency-changeable TMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 71.
- [5] 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.
- [6] BERARDENGO M, CIGADA A, GUANZIROLI F, *et al.* Modelling and control of an adaptive tuned mass damper based on shape memory alloys and eddy currents [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 349:18.
- [7] 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, 329:4068.
- [8] DIAZ I, REYNOLDS P. Acceleration feedback control of human-induced floor vibrations [J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 163.
- [9] RANA R, SOONG T T. 调谐质量阻尼器的参数研究与简化设计[J]. 世界地震工程, 1998, 14(4): 91.
RANA R, SOONG T T. The parameters of the tuned mass damper research and simplify the design [J]. World Earthquake Engineering, 1998, 14(4): 91.
- [10] MAGALHAES F, CUNHA A, CAETANO E, *et al.* Damping estimation using free decays and ambient vibration tests [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(5):1274.
- [11] CASCIATI F, GIULIANO F. Performance of multi-TMD in the towers of suspension bridges [J]. Journal of Vibration and Control, 2009, 15(6):821.
- [12] CASCIATI F, CASCIATI S, FARAVELLI L. A contribution to the modelling of human induced excitation on pedestrian bridges [J]. Structural Safety, 2017, 66(1):51.
- [13] ZIVANOVIC S, PAVIC A. Probabilistic modeling of walking excitation for building floors [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(3):132.
- [14] 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.
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 and Diagnosis, 2016, 36(3): 505.