

# 基于TMD的车致箱梁振动控制模型试验研究\*

罗 锐<sup>1,2</sup>, 陈 鹏<sup>1,2</sup>, 姜 兴<sup>1,2</sup>, 王鹏生<sup>3</sup>, 李 琼<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心 南昌, 330013)

(2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室 南昌, 330013)

(3. 中铁六院中铁西安勘察设计研究院有限公司 西安, 710000)

**摘要** 为研究调谐质量阻尼器(tuned mass damper, 简称TMD)在控制轨道箱梁结构振动中的应用,以高速动车组和CRTS-II型板式无砟轨道-箱梁结构为原型,设计制作了几何相似比为10:1的车-轨-桥耦合振动缩尺模型系统,分析了TMD在不同质量比、不同位置以及不同安装数量等工况下对箱梁顶板和翼板的减振效果。结果表明:TMD质量比为0.02时减振效果优于质量比为0.01时的减振效果,在考虑结构安全及经济性的条件下,可优先选择质量比更大的TMD;不同TMD安装位置对箱梁各部件的减振效果不同,安装TMD的板件处振动响应得到了明显抑制;安装2个TMD对箱梁结构的减振效果优于安装1个TMD,其减振范围也有所提升。研究结论可为高架轨道箱梁结构的减振设计提供参考。

**关键词** 车桥耦合振动系统;调谐质量阻尼器;缩尺模型;模型试验;振动控制

**中图分类号** U25;TH122

## 引 言

高架轨道中列车荷载激励引起的桥梁结构振动与噪声问题日愈突出,不仅影响列车运行的平稳性及安全性,而且对桥梁本身的运营状态及工作寿命也有极大的危害<sup>[1-3]</sup>。TMD作为一种有效的被动控制装置,具有安装便捷、构造简单及维护方便的特点,已广泛应用于土木结构振动控制中,尤其是高层建筑、高耸结构及大跨桥梁等大型建筑的振动控制<sup>[4,5]</sup>。项海帆等<sup>[6]</sup>基于半经验和半解析非线性气动模型,进行了TMD对涡激共振的阻尼效果的参数优化分析,得出TMD参数的最优计算公式。肖新标等<sup>[7]</sup>将列车简化成移动简谐力模型,探讨了列车过桥时桥梁的振动形态幅频特性,揭示了移动荷载作用下TMD对桥梁振动及其控制的特点。Chen等<sup>[8]</sup>以Timoshenko梁为研究对象,研究了移动作用下附加TMD后的振动控制效果。Clark<sup>[9]</sup>提出多重调谐质量阻尼器的概念,使TMD的控制效果更加稳定。Si等<sup>[10]</sup>研制了浮式风机机舱平台TMD,对TMD参数进行优化,并通过理论分析验证了该装置的减振效果。Colherinhas等<sup>[11]</sup>开发了一种悬吊

式TMD,通过数值计算证明其对风机塔架结构具有良好的减振效果。顾萍等<sup>[12]</sup>通过车桥TMD耦合振动仿真程序,发现多重调谐质量阻尼器集中放置在桥梁跨中截面附近可以有效减少跨中横向振动幅值,且减振效果与安装数量成正比。罗锐等<sup>[13]</sup>利用基准有限元模型对TMD控制简支箱梁桥的振动进行研究,结果表明,TMD对于抑制桥梁竖向共振有很好的效果。李喜梅等<sup>[14]</sup>在ANSYS中利用APDL语言建立车桥耦合振动模型,并对不同车重、车速和路面等级下的桥梁竖向加速度振动响应进行分析,确定了相应的TMD参数。刘纲等<sup>[15]</sup>基于结构动力学原理,给出了风机及被动预应力调谐质量阻尼装置体系的简化力学计算模型,推导了体系的最优频率比、阻尼比及质量比。王梁坤等<sup>[16]</sup>通过现场实测修正有限元模型,并根据修正前的结构模型设计了一套自适应多重TMD系统,通过施加若干种人行荷载,对比了启动调节前后的多重TMD系统对修正后模型的减振效果。

综上所述,针对桥梁结构振动特定频率附近的减振,大都采用数值模拟的方法对TMD和多重TMD进行研究,得出理论上TMD的最优设计参数

\* 国家自然科学基金资助项目(52178424, 51868023);江西省自然科学基金重点资助项目(20224ACB204018);江西省国家科技奖后备项目培育计划资助项目(20223AEI91004);江西省教育厅资助项目(GJJ2205122);轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室自主课题资助项目(HJGZ2023207)

收稿日期:2023-05-26;修回日期:2023-08-20

以及TMD对桥梁结构的减振效果,但是难以得到试验条件下TMD对桥梁振动控制的影响。笔者基于TMD定点理论,设计并验证了控制2阶模态振动的TMD,以缩尺高架轨道箱梁结构以及模型小车为对象,进行了列车荷载下的箱梁振动控制模型试验研究。

## 1 TMD设计与制作

### 1.1 TMD设计原理

调谐质量阻尼器由弹簧、阻尼及质量块组成,常用于风与地震引起的结构振动,以及车致桥梁的振动控制<sup>[17]</sup>。列车在桥上通过时,箱梁基频模态对箱梁的振动贡献最大,通过对轨道箱梁结构进行模态分析,利用振型贡献率确定轨道箱梁减振受控模态。振型贡献率定义为振动有效质量占总质量的百分比。

### 1.2 TMD制作

文献[18]通过有限元模态分析,得到轨道-箱梁结构的2阶模态等价质量为571.1 kg,并通过现场试验确定轨道-箱梁结构的2阶受控模态频率为55.54 Hz。制作常规弹簧TMD时,质量块选用钢板进行配重,常规弹簧为碳素钢弹簧,单根刚度为 $1.86 \times 10^5$  N/m,共选用4根弹簧。笔者制作了2个常规弹簧TMD,用于质量比为0.01和0.02的减振特性研究。TMD组成元件如图1所示。

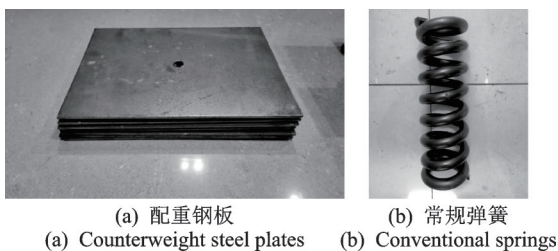


图1 TMD组成元件

Fig.1 Components of TMD

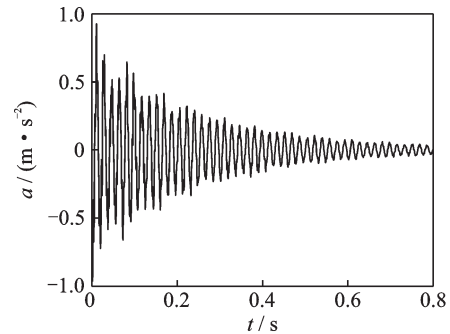
### 1.3 TMD参数测定

TMD在制作过程中容易出现误差,为了保证减振效果,采用锤击法对TMD的自振频率和阻尼比进行测定,并利用加速度传感器拾取质量块的振动信号。TMD参数测定如图2所示。TMD自振特性曲线如图3所示。测定时使用力锤敲击TMD,使其做自由衰减振动,其阻尼比计算式为



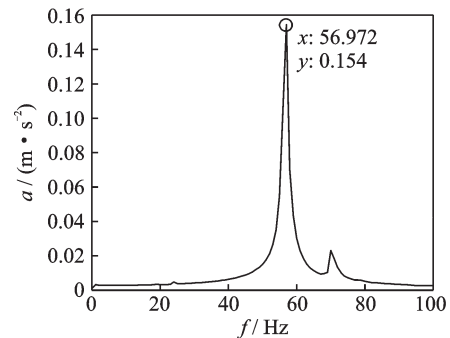
图2 TMD参数测定

Fig.2 Determination of TMD parameters



(a) 加速度时程曲线

(a) Acceleration time history curve



(b) 加速度幅频曲线

(b) Acceleration amplitude-frequency curve

图3 TMD自振特性曲线

Fig.3 TMD natural vibration characteristic curve

$$\phi_i = \ln(C_i/C_{i+1}) \quad (1)$$

$$\xi_i = \phi_i / \sqrt{(2\pi)^2 + \phi_i^2} \quad (2)$$

其中: $C_i$ 为振动加速度幅值; $\phi_i$ 为振动对数衰减率; $\xi_i$ 为阻尼比。

对TMD进行锤击试验后,得到其阻尼比的测定结果见表1。由图3和表1可知,TMD自振频率为56.97 Hz,阻尼比平均值为0.015 5,与控制轨道-箱梁结构2阶自振频率的最优频率相对误差仅为2.57%,可认为TMD减振装置的制作满足精度要求。

## 2 车-轨-桥耦合振动缩尺模型系统

### 2.1 轨道-桥梁结构模型

以CRTS-II型板式无砟轨道箱梁结构为原型,

表1 TMD阻尼比的测定结果

序号	$a/(m \cdot s^{-2})$	$\phi_i$	$\xi_i$
1	0.493 1	—	—
2	0.443 8	0.105 3	0.016 8
3	0.396 6	0.112 4	0.017 9
4	0.352 6	0.117 6	0.018 7
5	0.312 2	0.080 7	0.012 8
6	0.288 0	0.080 7	0.012 8
7	0.268 9	0.068 6	0.010 9
8	0.231 7	0.148 9	0.023 7
9	0.194 8	0.173 5	0.027 6
10	0.179 1	0.084 0	0.013 4
平均值	—	—	0.015 5

按照 10:1 的几何相似比,设计制作 3.2 m 无砟轨道箱梁结构缩尺模型。模型结构从上至下分别由钢轨、扣件、轨道板、CA 砂浆、底座板、箱梁和支座组成。轨道-桥梁结构模型如图 4 所示,其参数及制作过程参见文献[19]。

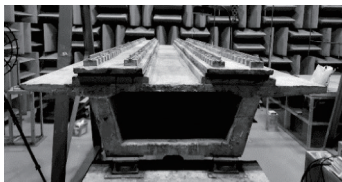


图4 轨道-桥梁结构模型

Fig.4 Model of track-bridge structure

## 2.2 车辆模型

由于模型相对较短,采用 10:1 整车缩尺模型加载难度大,因此笔者选用 10:1 转向架模型进行加载。转向架模型由构架和 2 个轮对组成,以 CRH3 原型转向架质量计算模型转向架的理论质量,对转向架缩尺试验模型进行配重。配重前后的转向架模型如图 5 所示。



(a) 配重前 (b) 配重后  
(a) Before counterweight (b) After counterweight

图5 配重前后的转向架模型

Fig.5 Model of bogie before and after counterweight

## 2.3 车-轨-桥模型试验系统

该系统由车辆-轨道-箱梁试验模型和加载系统

组成,桥梁试验模型包括加速区、测试区以及减速区。测试时以电机为动力源,通过钢丝绳牵引转向架进行加载,使用调压调速器控制车辆速度,使车辆匀速通过测试区,车速大小为 1.78 m/s。车-轨-桥模型试验系统如图 6 所示。文献[20]通过现场试验和有限元仿真相结合的方法,对移动荷载作用下轨道-箱梁结构的加速度响应进行了对比分析,两者得出的结果均在试验误差允许范围内,验证了设计制作的车-轨-桥耦合振动缩尺模型试验系统的可靠性,可将其用于复杂工况下的车-轨-桥耦合振动分析。

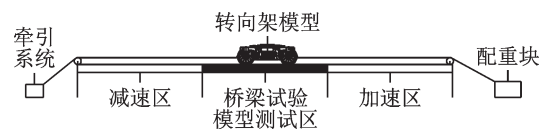


图6 车-轨-桥模型试验系统

Fig.6 Vehicle-rail-bridge model test system

## 3 模型试验

### 3.1 测试仪器

测试仪器主要包括:DATaRec4DIC24 数据采集仪,用于数据采集与分析;振动加速度传感器,用于拾取结构动态响应;电脑以及连接线。数据采集仪与加速度传感器如图 7 所示。



图7 数据采集仪与加速度传感器

Fig.7 Data acquisition instrument and acceleration sensor

### 3.2 TMD减振工况设置与测点布置

为研究 TMD 对车致桥梁振动的减振效果,保持列车运行速度为 1.78 m/s 且轴重不变。TMD 减振工况如表 2 所示。

表2 TMD减振工况

编号	工况
1	未减振
2	TMD 减振 (质量比为 0.01, 安装位置:翼板)
3	TMD 减振 (质量比为 0.02, 安装位置:翼板)
4	TMD 减振 (质量比为 0.01, 安装位置:顶板)
5	TMD 减振 (翼板+顶板)
6	TMD 减振 (翼板+翼板)

6种减振工况布置如图8所示。模型试验时,以箱梁跨中断面为分析对象,在顶板和翼板位置分别布置2个拾振点  $C_1$  和  $C_2$ ,每个测点至少采集30组数据,根据数据完整、无明显畸形的原则,选取20组数据的平均值进行频域分析。

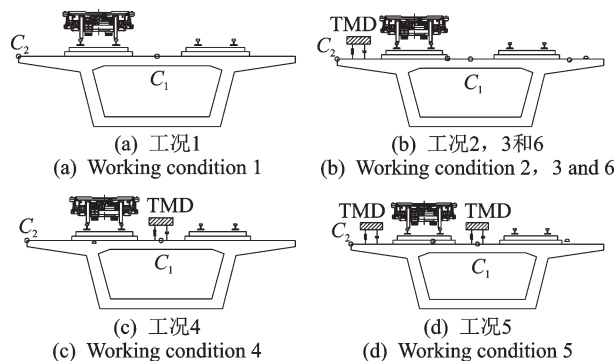


图8 6种减振工况布置

Fig.8 Layout of 6 vibration reduction conditions

## 4 TMD 振动控制分析

### 4.1 不同质量比对振动控制效果影响分析

将TMD用于振动控制研究时,综合考虑振动控制效果、结构安全以及振动控制经济性的要求,TMD质量比取值范围为0.5%~2%。设计2种试验工况,质量比分别为0.01和0.02。TMD不同质量比安装工况如图9所示。拾取各测点在不同工况下的振动响应,TMD不同质量比减振效果如图10所示。

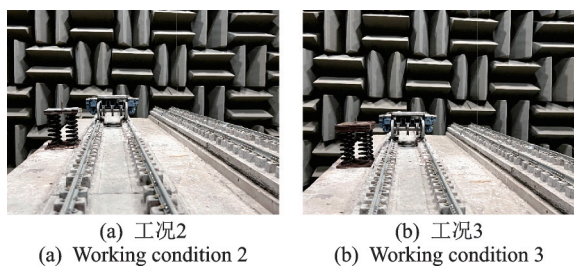


图9 TMD不同质量比安装工况

Fig.9 Installation conditions with different mass ratios of TMD

由图10可知,在50~60 Hz内,顶板与翼板的振动加速度均显著减小,且质量比为0.02时整体减振效果优于质量比为0.01时的减振效果,其他频率范围内变化较小。以翼板为分析对象,频率为57.5 Hz时,加速度响应峰值为0.007 5 m/s<sup>2</sup>。当TMD质量比为0.02时,加速度响应由0.007 5 m/s<sup>2</sup>衰减至0.004 m/s<sup>2</sup>,减振效果为46.4%,而质量比为0.01时减振效果为27%。以顶板作为分析对象,在频率范

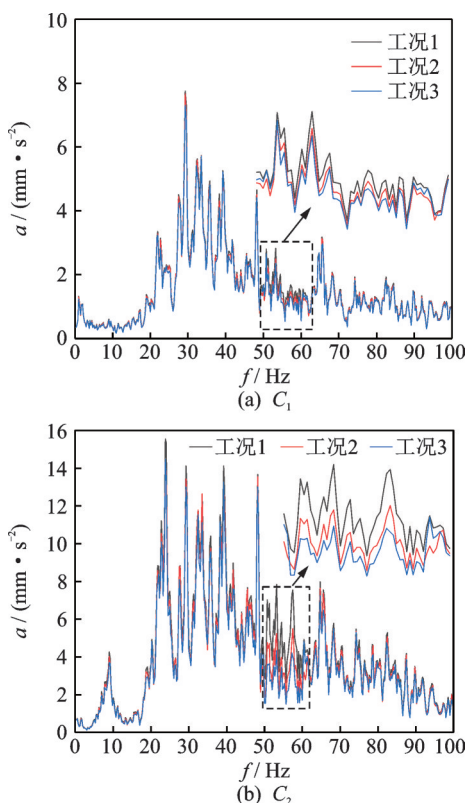


图10 TMD不同质量比减振效果

Fig.10 Vibration reduction effect at different mass ratios TMD

围50~60 Hz内,安装TMD后振动加速度得到了相应的抑制,且质量比为0.02时比0.01时加速度降幅更大,但由于TMD安装于翼板处,顶板整体减振幅度不大。综上可知,TMD不同的质量比对减振效果会产生明显的影响,质量比为0.02时减振效果优于质量比为0.01时的减振效果。

轨道箱梁结构安装TMD之后,其振动系统将变成2个自由度系统,相应的振动微分方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1 x_1 + k(x_1 - x_2) = F_1 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_1 - x_2) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $m_1$ 为桥梁系统的质量单元参数; $k_1$ 为桥梁弹簧刚度; $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 分别为桥梁质量单元的振动位移、振动速度及振动加速度; $F_1$ 为外部激励幅值; $\omega$ 为外部激励圆频率; $m_2$ 为TMD的质量单元参数; $c$ 为TMD阻尼系数; $k_2$ 为TMD弹簧刚度; $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ 分别为TMD质量单元的振动位移、振动速度及振动加速度。

作用在主振动系统上的外部激励为  $F(t) = F_1 e^{i\omega t}$ ,主振动系统与附加振动系统的位移分别为  $x_1 = X_1 e^{i(\omega t - \varphi)}$  和  $x_2 = X_2 e^{i(\omega t - \varphi)}$ ,其中: $X_1$ 和  $X_2$ 为  $x_1$ 和  $x_2$ 的实量振幅。

$$\begin{cases} X_1 = F_1 \sqrt{\frac{(K_2 - \omega_2^2 m_2)^2 + \omega^2 c^2}{[(k_1 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - \omega^2 k_2 m_2]^2 + \omega^2 c^2 (k_1 - \omega^2 m_1 - \omega^2 m_2)^2}} \\ X_2 = F_1 \sqrt{\frac{K_2^2 + \omega^2 c^2}{[(k_1 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - \omega^2 k_2 m_2]^2 + \omega^2 c^2 (k_1 - \omega^2 m_1 - \omega^2 m_2)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $\omega_1, \omega_2$  分别为主振动系统和 TMD 的固有频率。

将式(4)写成无量纲形式,则对应系统的响应位移与主系统的静挠度之比为

$$\begin{cases} \frac{X_1}{x_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\alpha^2\lambda^2]^2 + (2\zeta\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2}} \\ \frac{X_2}{x_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\alpha^2\lambda^2]^2 + (2\zeta\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2}} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $x_{st} = F_1/K_1$ , 为主振动系统的静变形； $\mu = m_2/m_1$ , 为 TMD 质量单元与主振动系统的质量比； $\alpha = \omega_2/\omega_1$ , 为 TMD 与主振动系统的固有频率比； $\lambda = \omega/\omega_1$ , 为外部激励频率与主振动系统的频率比； $\zeta = c/2m_2\omega_1$ , 为阻尼比参数。

$X_1/X_{st}$  和  $X_2/X_{st}$  分别为对应系统的响应位移与主系统的静挠度之比, 反映出对应系统的振动幅值大小。由式(5)可以看出, 当质量比  $\mu$  越大时, 桥梁振动响应幅值会相应减小。

#### 4.2 不同位置对振动控制效果影响分析

为了研究 TMD 安装在箱梁同一截面的不同位置对箱梁结构振动的控制效果, 取质量比为 0.01, 测试时列车速度与轴重保持不变, 拾取各测点在不同工况下的振动响应。TMD 不同位置减振效果如图 11 所示。

由图 11 可知, TMD 安装在顶板时, 顶板处减振效果优于 TMD 安装在翼板处的效果, 且在 50~60 Hz 频率范围内, 加速度响应得到明显抑制。当频率为 53 Hz 时, 加速度响应由  $0.0028 \text{ m/s}^2$  衰减至  $0.0022 \text{ m/s}^2$ , 减振效果为 21.4%; 当频率为 54 Hz 时, 加速度响应由  $0.0016 \text{ m/s}^2$  衰减至  $0.0012 \text{ m/s}^2$ , 减振效果为 25%; 当频率为 55 Hz 时, 加速度响应由  $0.0014 \text{ m/s}^2$  衰减至  $0.0011 \text{ m/s}^2$ , 减振效果为 21.4%。此外, TMD 安装在顶板位置时, 翼板处加速度响应无明显变化。

综上所述, TMD 安装在顶板时, 对顶板位置减振明显, 减振效果最大约为 25%, 而翼板位置减振效果不明显; TMD 安装在翼板时, 翼板处的减振效果明显优于 TMD 安装于顶板时的效果。

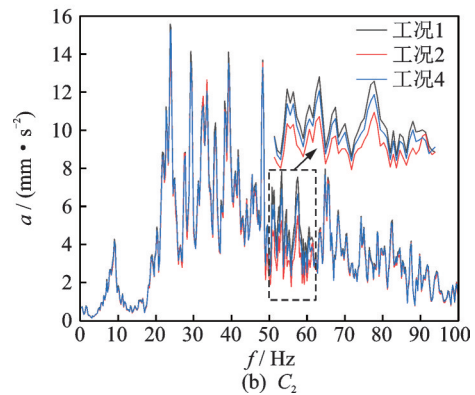
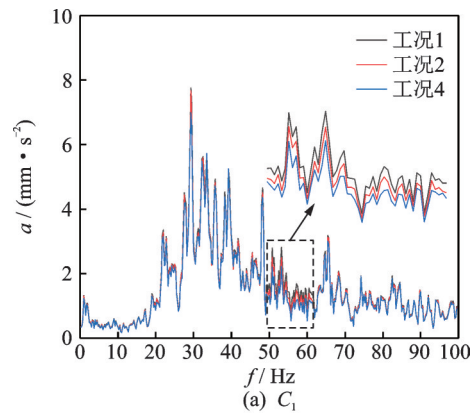


图 11 TMD 不同位置减振效果

Fig.11 Vibration reduction effect at different positions of TMD

#### 4.3 不同安装数量对振动控制效果影响分析

为了研究 TMD 不同安装数量对箱梁结构振动控制效果的影响, 设计 2 种试验工况: ①将 2 个 TMD 分别安装于顶板和翼板; ②2 个 TMD 均安装于翼板。TMD 不同数量安装工况如图 12 所示。拾取各测点在不同工况下的振动响应, TMD 不同数量减振效果如图 13 所示。

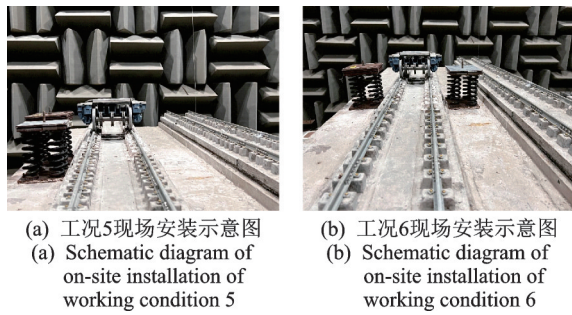


图 12 TMD 不同数量安装工况

Fig.12 Regarding the installation conditions of different quantities of TMD

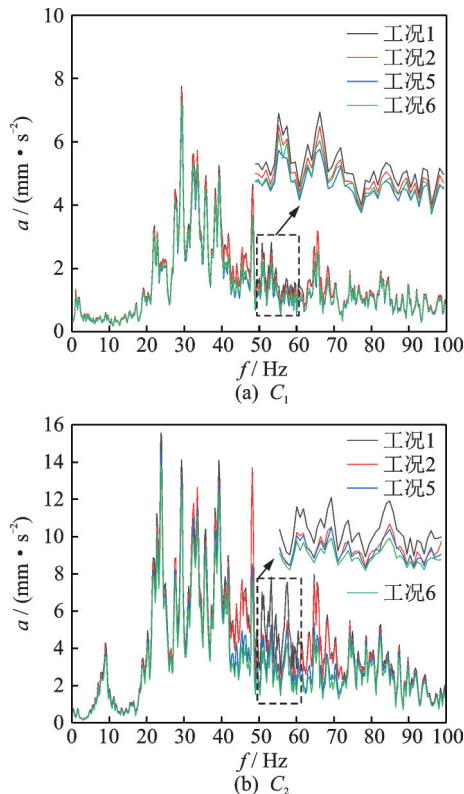


图 13 TMD 不同数量减振效果

Fig.13 Vibration reduction effect of TMD with different mass ratios

由图 13 可知,安装 2 个 TMD 的减振效果明显优于安装 1 个 TMD 的减振效果,且减振频率范围也有所提升。安装 1 个 TMD 时,50~60 Hz 频率范围的减振效果较为显著,而安装 2 个 TMD 时,减振效果显著的频率范围在 40~70 Hz 之间。以翼板作为分析对象,当频率为 48 Hz 时,无减振措施时翼板的振动加速度峰值为 0.013 7 m/s<sup>2</sup>;安装 1 个 TMD 于翼板时,振动加速度为 0.013 5 m/s<sup>2</sup>,无明显减振;安装 2 个 TMD 于顶板和翼板时,加速度幅值降至 0.008 5 m/s<sup>2</sup>,减振效果为 37.7%;2 个 TMD 均安装于翼板时,加速度为 0.007 6 m/s<sup>2</sup>,减振效果为 44.2%。由此可知,安装 2 个 TMD 时翼板处减振频率范围有所提升,且 2 个 TMD 均安装于翼板的减振

效果优于 2 个 TMD 分别安装于顶板和翼板时。以顶板作为分析对象,当 2 个 TMD 分别安装于顶板和翼板时,其顶板处减振效果显著。当频率为 53 Hz 时,顶板加速度响应由 0.002 8 m/s<sup>2</sup> 衰减至 0.001 9 m/s<sup>2</sup>,减振效果为 32.4%;当频率为 65 Hz 时,顶板加速度响应由 0.003 2 m/s<sup>2</sup> 衰减至 0.002 4 m/s<sup>2</sup>,减振效果为 25%。综上所述,安装 2 个 TMD 的减振效果明显优于安装 1 个 TMD,其减振频率由 50~60 Hz 提升至 40~70 Hz。TMD 分别安装于顶板和翼板时,顶板处减振最大可达 32.4%;2 个 TMD 均安装于翼板时,翼板处减振最大可达 44.2%。

## 5 结 论

1) TMD 质量比为 0.02 时减振效果优于质量比为 0.01 时的减振效果,在考虑结构安全以及振动控制经济性的条件下,可优先选择质量比更大的 TMD。不同 TMD 安装位置对箱梁各部件减振效果不同,但在安装 TMD 板件处的振动响应均得到了明显抑制,因此可以在振动响应较大的板件处优先安装 TMD,进行相应的减振降噪。安装 2 个 TMD 对箱梁结构的减振效果明显优于安装 1 个 TMD,其减振范围也有所提升。

2) 在 TMD 设计频率范围内,列车荷载作用下箱梁板件处的振动响应得到了明显抑制。TMD 在振动控制中的应用应根据实际工程条件综合考虑 TMD 的质量比、安装位置及安装数量等条件,以期达到更好的减振效果。

## 参 考 文 献

[1] 李小珍,杨得旺,郑净,等. 轨道交通桥梁减振降噪研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(7): 55-75, 136.  
LI Xiaozhen, YANG Dewang, ZHENG Jing, et al. Review on vibration and noise reduction of rail transit bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 55-75, 136. (in Chinese)

[2] 邓运清. 客运专线简支箱梁综述[J]. 铁道工程学报, 2005(1): 65-71.  
DENG Yunqing. Comprehensive comments on simple-supported box girder on passenger dedicated line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005(1): 65-71. (in Chinese)

[3] WAYE K P. Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives [J] Noise and Health, 2011:240-253.

[4] HEMMATI A, OTERKUS E, BARLTROP N. Fragility reduction of offshore wind turbines using tuned liquid column dampers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125: 105705.

[5] 王明珠,胡卫中,张玲,等. 设置 TMD 的大跨楼盖动

- 力特性及人致振动分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(3): 109-114.
- WANG Mingzhu, HU Weizhong, ZHANG Ling, et al. Dynamic properties and human-induced vibration analysis of long-span floors equipped with TMD [J]. Building Structure, 2021, 51(3): 109-114.(in Chinese)
- [6] 项海帆, 陈艾荣, 顾明. 调质阻尼器(TMD)对桥梁涡激共振的抑制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1994(2): 159-164.
- XIANG Haifan, CHEN Airong, GU Ming. Suppressing the vortex-excited vibration of bridges with tuned mass damper (TMD) [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1994(2): 159-164.(in Chinese)
- [7] 肖新标, 沈火明. 移动荷载作用下的桥梁振动及其TMD控制[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 58-61.
- XIAO Xinbiao, SHEN Huoming. Vibration and the TMD control of bridges under moving loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 58-61.(in Chinese)
- [8] CHEN Y H, CHEN D S. Timoshenko beam with tuned mass dampers to moving loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 167-177.
- [9] CLARK A J. Multiple passive tuned mass damper for reducing earthquake induced building motion [C] // Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: International Association for Earthquake Engineering, 1988: 779-784.
- [10] SI Y L, KARIMI H R, GAO H J. Modelling and optimization of a passive structural control design for a spar-type floating wind turbine [J]. Engineering Structures, 2014, 69: 168-182.
- [11] COLHERINHAS G B, SHZU M A M, AVILA S M, et al. Wind tower vibration controlled by a pendulum TMD using genetic optimization: beam modelling [J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 1623-1628.
- [12] 顾萍, 王森, 吴定俊. TMD抑制既有铁路钢桁梁桥横向振动研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 85-89.
- GU Ping, WANG Miao, WU Dingjun. Damping suppression of lateral vibration of the existing steel truss railway bridges using TMD [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(2): 85-89.(in Chinese)
- [13] 罗锟, 张新亚, 雷晓燕. 基于基准有限元模型的箱梁TMD振动控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 110-117.
- LUO Kun, ZHANG Xinya, LEI Xiaoyan. Research on TMD vibration control of box girder based on reference finite element model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 110-117.(in Chinese)
- [14] 李喜梅, 王新, 母渤海, 等. 车辆荷载作用下双工字钢-混组合连续梁桥振动控制研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 173-183.
- LI Ximei, WANG Xin, MU Bohai, et al. Research on vibration control of twin-I steel concrete composite continuous girder bridge under vehicle load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 173-183.(in Chinese)
- [15] 刘纲, 雷振博, 杨微, 等. 风机塔架PS-TMD被动控制装置机理分析及参数调谐优化研究[J]. 工程力学, 2021, 38(12): 137-146.
- LIU Gang, LEI Zhenbo, YANG Wei, et al. Mechanism analysis and parameter tuning optimization for wind turbine towers with PS-TMD passive control devices [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 137-146.(in Chinese)
- [16] 王梁坤, 施卫星, 张全伍, 等. 自适应多重TMD在大跨楼板结构减振中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 578-584.
- WANG Liangkun, SHI Weixing, ZHANG Quanwu, et al. Adaptive-passive multiple tuned mass damper on large-span floor structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 578-584.(in Chinese)
- [17] 罗锟, 张新亚, 王鹏生, 等. 基于TMD的U型梁结构低频振动控制研究[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(6): 51-58.
- LUO Kun, ZHANG Xinya, WANG Pengsheng, et al. Research on low-frequency vibration control of U-shaped girder structure based on TMD [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6): 51-58.(in Chinese)
- [18] 张新亚, 雷晓燕, 罗锟. TMD控制高架轨道箱梁结构振动的模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 220-226, 233.
- ZHANG Xinya, LEI Xiaoyan, LUO Kun. A model test study on controlling vibration of an elevated track box girder structure with TMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 220-226, 233.(in Chinese)
- [19] 罗锟, 张新亚, 雷晓燕. 高架轨道箱梁结构振动试验模型设计与校验[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 146-158.
- LUO Kun, ZHANG Xinya, LEI Xiaoyan. Design and validation of test model for structural vibration of overpass with track box girder [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 146-158.(in Chinese)
- [20] 罗锟, 姜兴, 王鹏生, 等. 车-轨-桥耦合振动相似试验模型设计与校验[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3841-3850.
- LUO Kun, JIANG Xing, WANG Pengsheng, et al. Design and verification of vehicle-rail-bridge coupling vibration similarity test model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3841-3850.(in Chinese)



**第一作者简介:** 罗锟,男,1978年7月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为轨道交通环境振动与噪声。曾发表《轨道-箱梁耦合振动模型试验设计与验证》(《铁道学报》2023年第45卷第2期)等论文。

E-mail: lk360111@163.com