

# 车辆荷载作用下钢结构厂房微振动反应的数值模拟及 TMD 减振控制研究

李 兵<sup>1</sup>, 刘广蒴<sup>1</sup>, 裴晓丹<sup>2</sup>, 赵维新<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;  
2. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

**摘 要** 目的 使用 TMD 减小车辆荷载作用下钢结构厂房产生的振动响应, 进而保证厂房内精密仪器正常使用并延长其使用寿命。方法 基于 Midas Gen 软件建立钢结构厂房, 考虑时速 40 km/h、60 km/h 的 5t 卡车及时速 60 km/h 的 5 t 卡车与火车共同作用下的三种工况, 对钢结构厂房进行激励。结果 TMD 的质量比宜选择 0.05, 设置于响应最大处。三种车辆荷载激励下的平均加速度减小幅度可达到 45.81%, 平均速度减小幅度可达到 20.88%。结论 TMD 的质量比越大, 对于钢结构厂房竖向振动的减振效果越好; 且随着质量比的增大, 减振率上升程度趋近于平缓。TMD 放置于响应最大处的厂房减振效果要好于放置于靠近激励处。TMD 的刚度越大, 厂房竖向振动的微振动控制效果越好; 随着 TMD 的刚度增大, 减振率上升程度趋近于平缓。

**关键词** TMD; 减振; 钢结构厂房; 车辆荷载

中图分类号 TU352.1 文献标志码 A

## Numerical Simulation of Micro-vibration Response of Steel Structure Workshop under Vehicle Load and TMD Vibration Control

LI Bing<sup>1</sup>, LIU Guangshuo<sup>1</sup>, PEI Xiaodan<sup>2</sup>, ZHAO Weixin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Construction Third Engineering, The First Construction Engineering Co. Ltd., Wuhan, China, 430040)

**Abstract:** The purpose of this study is to use TMD (Tuned Mass Damper) to reduce the vibration response of steel structure factories under vehicle loading, thus ensuring the normal operation of precision instruments inside the factory and extending their service life. The method involves using Midas Gen software to model the steel structure factory considering three scenarios; the effect of a

收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52027811)

作者简介: 李兵(1974—), 男, 教授, 博士, 主要从事地铁施工监测及工程结构抗震等方面研究。

5-ton truck at speeds of 40 km/h and 60 km/h, and the combined effect of a 5-ton truck and a train at a speed of 60 km/h. The steel structure factory is then subjected to excitations. The results show that a TMD with a mass ratio of 0.05 placed at the location of the maximum response is recommended. The average acceleration reduction under the three vehicle loading excitations can reach 45.81%, and the average velocity reduction can reach 20.88%. In conclusion, a higher mass ratio of TMD has a better vibration reduction effect on the vertical vibration of the steel structure factory. Moreover, as the mass ratio increases, the rate of vibration reduction tends to flatten. Placing the TMD at the location of the maximum response provides better vibration reduction than placing it near the excitation source. A higher stiffness of the TMD leads to better control of micro-vibration in the vertical direction of the factory. As the stiffness of the TMD increases, the rate of vibration reduction also tends to flatten.

**Key words:** TMD; vibration reduction; steel structure factory building; vehicle load

高新技术产业的飞速发展带动了各类电子设备工艺上的进步完善,精密仪器的加工精确度可达到纳米级。为保证精密仪器的正常运行,对于精密仪器的使用环境有着更高规格的要求<sup>[1-2]</sup>。微振动是影响精密设备及仪器正常运行的振动幅值较低的环境振动。精密仪器厂房周边车辆行驶引起的环境振动会降低精密仪器在使用时的精确度,严重时会影响精密仪器的使用寿命。目前对于结构的振动控制大多使用隔振支座、耗能构件以及隔振沟等方法,由于微振动的振动强度低、振动频带宽,上述方法难以达到理想的控制效果。

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)是一种被动控制装置,能够有效地控制交通环境激发的微振动。TMD的工作机理是当结构受到外部激励作用产生振动时,带动TMD系统一起振动,TMD系统相对运动产生的惯性力反作用到结构上,从而减小结构振动反应<sup>[3]</sup>。国外学者提出了TMD的最优设计方法,以TMD的控制效果为优化目标,求得TMD的质量、刚度和阻尼的最佳参数,进而减小结构的振动响应<sup>[4-11]</sup>。吕西林<sup>[12]</sup>、操礼行等<sup>[13]</sup>使用TMD对结构进行微振动控制,通过时程分析方法模拟了随机人行荷载激励。王明珠等<sup>[14]</sup>进行了现场振动测试,分析了TMD安装后对结构的减振效果。邓亚虹<sup>[15]</sup>、孙亮明等<sup>[16]</sup>通过模拟与现

场实测,研究了车辆荷载激励下的振动控制以及车辆速度、振源距离等参数对振动控制效果影响。

TMD减振系统应用在楼盖结构上有良好的微振动控制效果,加设TMD减振系统后能满足人对于振动舒适度的要求。目前,国内外学者对于TMD微振动控制研究主要集中于人致振动响应与舒适度分析<sup>[17-18]</sup>,而对于车辆荷载下的精密厂房TMD微振动控制研究较少。基于此,笔者对车辆荷载作用下钢结构厂房进行TMD微振动控制有限元分析,选取三种车辆荷载工况对钢结构厂房进行激励,在响应最大处和靠近激励处分别放置TMD,得到了不同TMD安装位置对结构减振的影响规律;同时分别改变TMD的质量比和刚度,得到了车辆荷载作用下控制结构微振动规律。

## 1 钢结构厂房微振动反应的数值模拟

### 1.1 有限元模型的验证

某精密设备厂房一层为钢框架结构,二层为双跨双坡的多跨刚架体系,中间柱与斜梁连接选择铰接。厂房长48.0 m,宽48.0 m,占地面积2 304 m<sup>2</sup>。厂房一层层高10 m,二层层高11.5 m,跨度8 m。钢结构厂房二楼放置了精密仪器,由于厂房周围有重型车辆行驶,导致设备产生振动,进而干扰

了精密仪器的正常工作。表1给出了厂房部分构件参数,楼面局部平面布置见图1。

表1 厂房部分构件参数

Table 1 Parameters of some components of the plant

构件编号	截面高度×截面宽度× 腹板厚度×翼缘厚度 /mm	钢材材质
GL1	HN600×200×11×17	Q345B
GL2	HN692×300×13×20	Q345B
GZ	HW498×432×45×70	Q345B

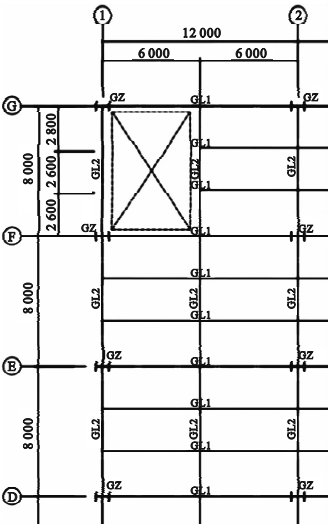


图1 楼面局部平面布置图

Fig. 1 Floor plan of local area

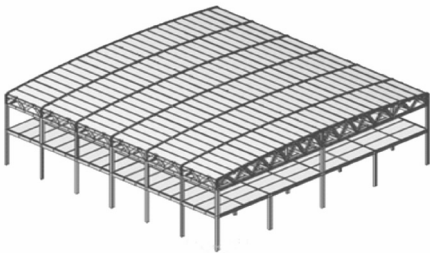
笔者选取3种工况进行分析,其中工况一:场地两侧周边各有两辆满载重约50 t的卡车以40 km/h的速度行驶;工况二:场地两侧周边各有两辆满载重约50 t的卡车以60 km/h的速度行驶;工况三:场地两侧周边各有两辆满载重约50 t的卡车以60 km/h的速度与火车共同行驶。在不同工况下,分析车辆荷载作用下控制结构微振动规律。

根据上述工况,分别采用ABAQUS软件和Midas Gen软件建立两层钢结构厂房三维有限元模型(见图2)。对结构进行动力特性分析,得到了结构的前6阶振型和每个振型相对应的竖向振型参与质量,结果见表2。从表中可看出,Midas Gen软件所得的振型值略大于ABAQUS软件所得结果,两种软件所得的振型十分接近,验证了两种软件所建

立钢结构厂房模型的正确性。



(a) ABAQUS有限元模型



(b) Midas Gen有限元模型

图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

表2 结构前6阶振型频率

Table 2 The first 6 mode frequencies of the structure

模态	ABAQUS 自振 频率/Hz	Midas Gen 频率/Hz	竖向振型 参与质量/%
1	3.79	3.81	10.16
2	3.89	3.91	4.51
3	3.98	4.01	0.34
4	4.04	4.07	0.62
5	4.14	4.18	0.45
6	4.19	4.25	1.06

1.2 钢结构厂房的微振动反应分析

《电子工业仪器防微振工程技术规范》(GB51076—2015)规定,长路径激光设备、加工精度0.1 μm的超精密加工及检测装置在1~100 Hz内容许振动速度不应超过3 μm/s。在三种工况下,得到了距离车辆7.5 m固定点处的X、Y、Z三向加速度时程曲线,其中工况二下,加速度时程曲线如图3所示。将选取的三种工况下加速度曲线数值输入Midas Gen软件中,对结构进行激励,得到了三种工况下结构振动响应最大处的速度时程曲线(见图4)。

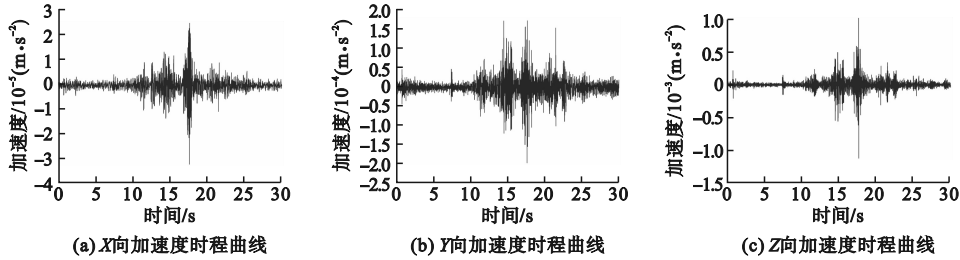


图3 不同方向加速度时程曲线

Fig. 3 Time history curves of acceleration in different directions

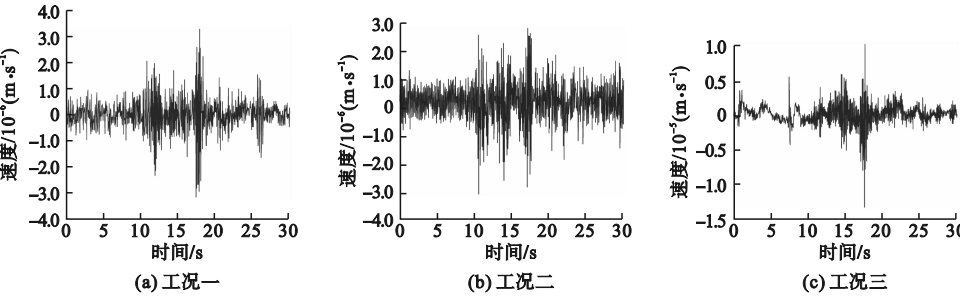


图4 三种工况下速度时程曲线

Fig. 4 Speed time-history curves of three working conditions

从图4可以看出,三种工况下最大振动速度均超过了精密仪器装置的容许速度限值 $3\text{ }\mu\text{m/s}$ 。为了保证精密仪器的正常运行,减小车辆荷载激起的微振动,可重新选择钢结构厂房的梁柱部件,重新设计钢结构厂房,优化厂房使其达到规范要求以内。但此方法耗时耗力,明显不适用于已建钢结构厂房,故此选择在钢结构厂房上安装TMD控制微振动。可在现有的钢结构厂房结构上设置TMD,将TMD安装于钢结构厂房的二层楼板上,使最大振动速度降低至 $3\text{ }\mu\text{m/s}$ 内,分析不同车辆荷载下的微振动变化规律。

2 TMD微振动的控制研究

2.1 TMD参数优化

2.1.1 TMD参数选择

TMD参数的选择很大程度上影响着结构的微振动控制效果,根据结构的模态质量、自振频率等参数可推导出TMD的最优参数。笔者采用J. P. D. Hartog提出的TMD的最优参数<sup>[19]</sup>,TMD的质量比 $\mu$ 取值一般

在 $0.01\sim0.05$ ,TMD的弹簧刚度 $k_{\text{TMD}}$ 、阻尼 $c_{\text{TMD}}$ 的关系如下:

$$\eta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}} \tag{1}$$

$$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{2}$$

$$m_{\text{TMD}} = \mu M \tag{3}$$

$$k_{\text{TMD}} = (2\pi f_{\text{TMD}} \eta_{\text{opt}})^2 m_{\text{TMD}} \tag{4}$$

$$c_{\text{TMD}} = 4\pi f_{\text{TMD}} \eta_{\text{opt}} m_{\text{TMD}} \xi_{\text{opt}} \tag{5}$$

式中: $\eta_{\text{opt}}$ 为TMD与结构模态的最优频率比; $\xi_{\text{opt}}$ 为TMD的最优阻尼比; $m_{\text{TMD}}$ 为TMD的质量; $\mu$ 为TMD与结构模态的质量比; $M$ 为主体结构振动模态质量; $f_{\text{TMD}}$ 为控制频率; $k_{\text{TMD}}$ 为TMD的弹簧刚度; $c_{\text{TMD}}$ 为TMD的阻尼。

2.1.2 TMD参数确定

由表2可知,结构前6阶竖向自振频率,第一模态与第二模态的竖向振型参与质量远高于其他模态的竖向振型参与质量。未安装TMD时厂房结构的竖向振动由第一模态振型主导,且选取的荷载工况的激励频率接近于第一模态自振频率,故选取 $3.8\text{ Hz}$ 作为控制频率,对应的振动模态质量为 $26\text{ t}$ 。质量

比 $\mu$ 取0.01、0.02、0.03、0.04、0.05,计算每一组质量比所对应的TMD的弹簧刚度与阻尼数值,结果见表3。

表3 TMD 各项参数数值

Table 3 TMD parameter values		
质量比	弹簧刚度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	阻尼/ ( $(\text{kN}\cdot\text{s})\cdot\text{m}^{-2}$ )
0.01	145.1	0.8
0.02	290.2	2.1
0.03	418.8	3.8
0.04	545.8	5.8
0.05	671.5	8.1

2.2 TMD 质量比

在Midas Gen软件中输入3种车辆荷载工况的振动波对钢结构厂房进行激励。3种工况的振动响应最大处均在钢结构厂房的2层楼板处,3种工况的竖向位移最大处距离十分接近,可近似看作一处(A1点),A1点位于1轴与D轴交汇处向左平移4.5m,可将3种工况下,不

同TMD安置处均选择为A1点。  
改变TMD的质量比,分析在车辆荷载作用下TMD质量比变化对微振动控制效果的影响。依据表3中TMD参数,安装5次不同质量比的TMD于钢结构厂房楼板上A1点处。三种工况下平均速度减小幅度曲线如图5所示,与未安装TMD时进行对比分析,三种工况下速度时程曲线如图6所示。

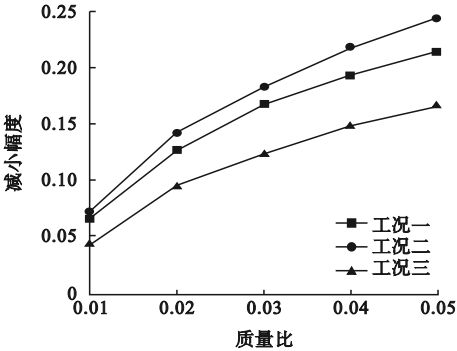


图5 A1处平均速度减小幅度曲线  
Fig.5 A1 average velocity decrease amplitude curves

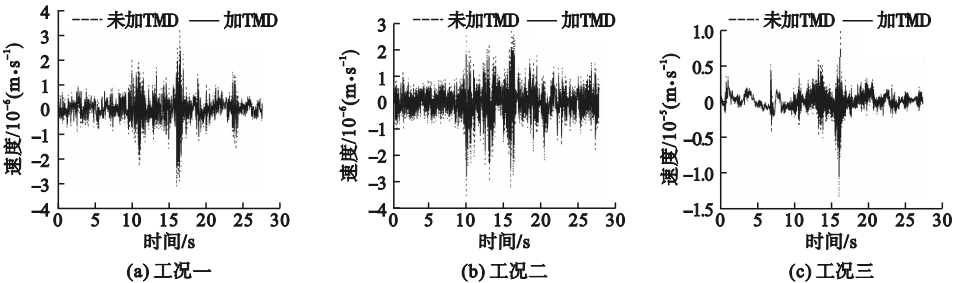


图6 A1处速度时程曲线

Fig.6 A1 velocity time history curves comparison chart

从图5和图6可以看出,楼板安装TMD后,随着TMD质量比的增大,振动速度逐渐减小,但振动速度降低幅度也逐步减小。当TMD质量比取0.05时,在工况三下,最大振动速度由13.33  $\mu\text{m/s}$ 下降至10.05  $\mu\text{m/s}$ ;在工况二下,最大振动速度由3.52  $\mu\text{m/s}$ 下降至2.81  $\mu\text{m/s}$ ;在工况一下,最大振动速度由3.24  $\mu\text{m/s}$ 下降至2.38  $\mu\text{m/s}$ 。三种工况下,最大振动速度和平均速度均有所降低。在TMD质量比取0.05时,工况一和工况二下,结构的最大振动速度均控制在3  $\mu\text{m/s}$ 以内,满足规范要求。

在3种不同工况下,TMD取不同质量比时,平均加速度减小幅度曲线如图7所示。

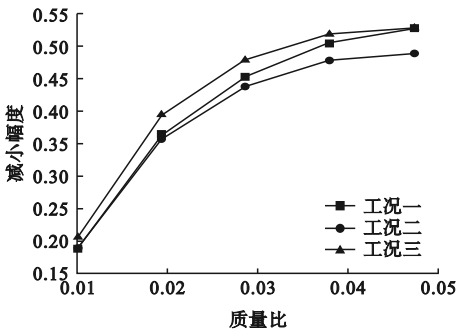


图7 A1处平均加速度减小幅度曲线  
Fig.7 A1 average acceleration decrease amplitude curves



笔者选取质量比为 0.05 的 TMD 安置于 A1 点处,与未安装 TMD 时进行对比,得

到加速度时程曲线如图 8 所示。

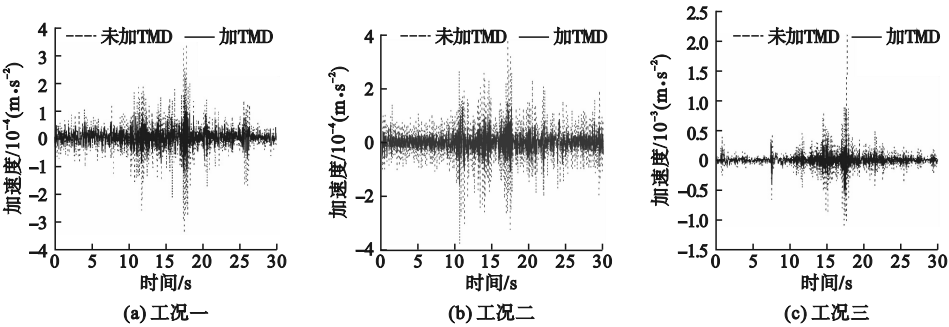


图 8 A1 处加速度时程曲线

Fig. 8 A1 acceleration time history curves of contrast figure

从图 7 和图 8 可以看出,当 TMD 的质量比从 0.01 上升至 0.02 时,3 种工况下加速度减小幅度均在 15% 以上;当 TMD 的质量比从 0.04 上升到 0.05 时,3 种车辆荷载工况的加速度减小幅度均在 3% 以内。对于车辆荷载激发的微振动,在 TMD 质量比较小时,增加 TMD 的质量比,有较好的减振效果,当 TMD 质量比较大时,加速度降低幅度愈发缓慢。在安装 TMD 后,三种工况的平均加速度减小幅度最高可达到 53.16%;质量比从 0.01 上升到 0.05,三种工况的结构加速度降低幅度最高为 34.47%。

TMD 的质量比为 0.05 时,在工况一和工况二下,振动速度均达到了规范要求。TMD 的质量比越大,微振动的控制效果越好,但加速度和速度的降低幅度变得愈发缓慢。

2.3 TMD 安置位置

改变 TMD 的安置位置,分析在不同车辆荷载激励下 TMD 安置位置对微振动控制效果的影响。车辆荷载的振动波是靠近①轴方向传播,在靠近振源位置安置 TMD,为方便安装将 TMD 设置在①轴与①轴的交汇处(A2)。

只改变 TMD 安置位置,将 TMD 安装于 A2 处的减振控制效果与 TMD 安装于 A1 处减振控制效果进行对比分析。质量比取 0.05,A2 处安装 TMD 后最大振动速度结果

见表 4。在 3 种不同工况下,TMD 取不同质量比时平均加速度降低幅度曲线如图 9 所示。工况三下,TMD 质量比为 0.05 时,未安装 TMD 与安装 TMD 的加速度时程曲线如图 10 所示。TMD 设置于 A1 和 A2 处的平均加速度结果见表 5 和表 6。

表 4 A2 处最大振动速度

Table 4 A2 maximum vibration velocity

工况	最大振动速度/( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	
	加 TMD	未加 TMD
一	3.18	3.24
二	3.46	3.52
三	13.11	13.33

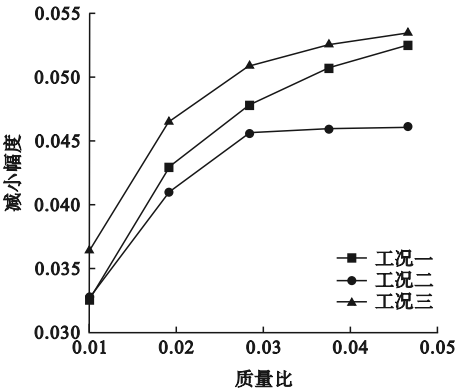


图 9 A2 处平均加速度降低幅度曲线

Fig. 9 A2 average acceleration decrease amplitude curves

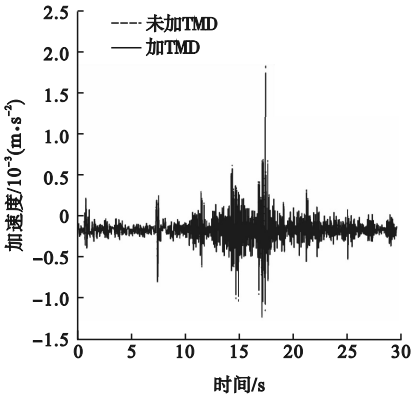


图 10 A2 处加速度时程曲线对比图

Fig. 10 A2 acceleration time history curves of contrast figure

表 5 A1 处平均加速度

Table 5 A1 average acceleration

质量比	平均加速度/( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )		
	工况一	工况二	工况三
0.01	3.885 6	5.388 7	9.841 5
0.02	3.077 3	4.217 3	7.490 9
0.03	2.688 4	3.614 4	6.446 8
0.04	2.497 1	3.275 5	5.959 3
0.05	2.447 3	3.104 3	5.853 8
未加 TMD	4.796 9	6.627 2	12.399

表 6 A2 处平均加速度

Table 6 A2 average acceleration

质量比	平均加速度/( $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )		
	工况一	工况二	工况三
0.01	4.641 1	6.064 1	11.949 3
0.02	4.600 7	6.063 4	11.825 2
0.03	4.578 6	6.063 1	11.771 3
0.04	4.577 0	6.062 9	11.751 0
0.05	4.641 1	6.064 1	11.949 3
未加 TMD	4.796 9	6.627 2	12.399 6

TMD 安置于靠近振源的楼板上 A2 点, TMD 对于车辆荷载激励下产生的微振动控制效果不佳,3 种工况下最大振动速度均超过规范要求的  $3\text{ }\mu\text{m/s}$ 。安装 TMD 在 A2 处的振动速度变化规律与安装于 A1 处一致,但 TMD 安装于 A2 时的速度降低幅度明显小于安装于 A1 时的速度降低幅度。

3 种工况下的加速度降低幅度均在 5.5% 以内。TMD 安置于 A2 时平均加速度较安置于 A1 时下降了约 10%。TMD 安置于 A2 时,当 TMD 的质量比从 0.01 上升至 0.02 时,3 种工况的加速度降低幅度约提高了 1%;TMD 安置于 A1 时,加速度降低幅度远远大于 A2;TMD 安置于 A2 时,当 TMD 质量比从 0.04 上升至 0.05 时,3 种工况的加速度降低幅度提高幅度在 0.2% 以内,安装在 A1 点处加速度降低幅度远远大于 A2。改变 TMD 的安装位置,控制微振动的效果也会有明显的变化。

TMD 安置于不同的位置,控制微振动都有相同的规律,即 TMD 的质量比越大,微振动控制效果越好,但加速度与速度降低幅度逐渐变缓。TMD 安置于结构位移最大处的微振动控制效果要好于 TMD 安置于靠近激励处,TMD 安置于靠近激励处后结构的最大振动速度均超过限值  $3\text{ }\mu\text{m/s}$ ,不满足精密仪器的最大振动速度限制要求。

2.4 TMD 刚度

在表 4 给出的 TMD 参数基础上,选择质量比为 0.02 和 0.05 的 TMD,将 TMD 安装于 A1 点处,改变 TMD 的刚度,分析在车辆荷载激励下,TMD 刚度改变对微振动控制效果的影响。

安装 TMD 后,随着 TMD 刚度的增大,振动速度逐渐减小,但振动速度降低幅度变得愈发缓慢。当 TMD 质量比取 0.05 时,刚度增加到原来的 1.1 倍,在工况三下,最大振动速度由  $13.33\text{ }\mu\text{m/s}$  下降至  $10.01\text{ }\mu\text{m/s}$ ;在工况二下,最大振动速度由  $3.52\text{ }\mu\text{m/s}$  下降至  $2.77\text{ }\mu\text{m/s}$ ;在工况一下,最大振动速度由  $3.24\text{ }\mu\text{m/s}$  下降至  $2.34\text{ }\mu\text{m/s}$ 。分析可知,刚度变化不大时,刚度改变对减振速度影响不大。在工况一下,刚度增加到原来的 1.1 倍,速度时程曲线如图 11 所示,改变 TMD 刚度后的加速度降低幅度曲线如图 12 所示。

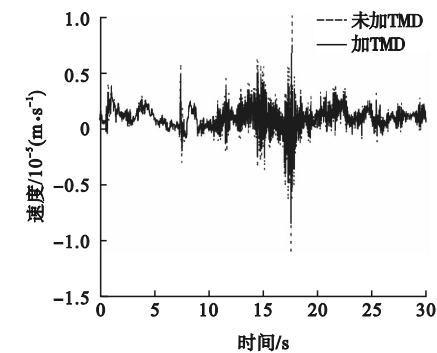


图 11 1.1 倍刚度下速度时程曲线对比图

Fig. 11 1.1 times the speed stiffness curves comparison chart

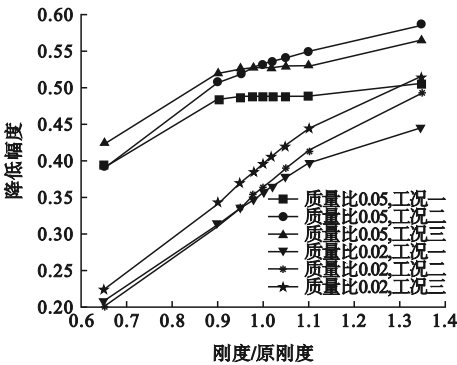


图 12 改变 TMD 刚度后的加速度降低幅度曲线

Fig. 12 Change the TMD stiffness after reduction of the acceleration curves

从图 12 可以看出,当 TMD 质量比取 0.02 和 0.05 时,刚度从原刚度的 65% 变为原刚度的 90%,三种工况下平均加速度降低幅度变化了 10.64%,其中 TMD 的质量比取 0.02 时,工况三的加速度降低幅度变化了 12.01%;刚度从原刚度 110% 变为原刚度的 135%,三种工况下平均加速度降低幅度变化了 4.74%,其中 TMD 的质量比取 0.05 时,工况三的加速度降低幅度变化最小,变化了 1.71%。当 TMD 质量比取 0.02 时,刚度从原刚度参数的 90% 上升到 110%,三种工况的平均加速度降低幅度变化了 9.58%,三种工况的平均加速度降低幅度最高变化了达到 10.31%;当 TMD 的质量比取 0.05 时,刚度从原刚度参数的 90% 上升到 110%,三种工况的平均加速度降低幅度变化了 0.14%,三

种工况的的加速度降低幅度最高变化了达到 0.27%。

TMD 的刚度越大,微振动控制效果越好,但随着 TMD 的刚度增大,加速度降低幅度变化的愈发缓慢;当 TMD 的刚度较小时,增大 TMD 的刚度,加速度降低幅度变化的越快。改变 TMD 的刚度,与改变 TMD 质量比和改变 TMD 安装位置相比,对结构减振程度影响较小。

3 结 论

(1)笔者使用的有限元模拟验证方法是正确的,可适用于其他需要控制微振动的类似工程之中。

(2)当 TMD 质量比为 0.05,不改变 TMD 的刚度,TMD 安置于竖向位移最大处,在工况一和工况二下,最大振动速度满足规范要求;而且在工况二下,平均加速度降低幅度达到 52.79%,平均速度减振率降低幅度达到 24.47%,TMD 对车辆荷载激励下的微振动有很好控制效果。

(3)相对于 TMD 安装于靠近激励处,当 TMD 安装于振动响应最大处时,减振效果较好。当 TMD 质量比较小时,增大 TMD 的质量比,减振率明显提高;当 TMD 质量比较大时,增大 TMD 的质量比对微振动控制效果影响较小。改变 TMD 的刚度与改变 TMD 质量比和安装位置相比,对结构减振影响较小。同种工况下,加速度降低幅度要高于速度降低幅度。

参考文献

[ 1 ] 钮于蓝,汪洪军,蔡晨光,等.精密实验室素地微振动测试与分析[J].中国测试,2021,47(7):36-41.  
(NIU Yulan,WANG Hongjun,CAI Chenguan,et al. Measurement and analysis of micro vibration in precision laboratory raw land [J]. China measurement & test,2021,47(7):36-41.)  
[ 2 ] 高广运,钟雯,孟园,等.精密仪器厂房微振动实测与数值模拟分析[J].工程地质学报,2020,28(5):1076-1083.  
(GAO Guangyun,ZHONG Wen,MENG Yuan,



- et al. Micro-vibration test and numerical simulation analysis of precision instrument workshop [J]. Journal of engineering geology, 2020, 28(5): 1076 – 1083. )
- [3] 胡振青,蔡琪锐. 大型商业建筑的 TMD 减振控制研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(3): 86 – 96.  
(HU Zhengqing, CAI Qirui. The study of TMD vibration control in large commercial buildings [J]. Progress in steel building structures, 2018, 20(3): 86 – 96. )
- [4] SETARCH M, HANSON R D. Tuned mass dampers for balcony vibration control [J]. Journal of structural engineering, 1992, 118(3): 723 – 740.
- [5] CHOU C C, WU T H, BEATO A R O, et al. Seismic design and tests of a full-scale one-story one-bay steel frame with a dual-core self-centering damper [J]. Engineering structures, 2016, 111: 435 – 450.
- [6] CELEBI M. Comparison of damping in buildings under low-amplitude and strong motions [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1996, 59(2): 309 – 323.
- [7] ROFFEL A J, LOURENCO R, NARASIMHAN S, et al. Adaptive compensation for detuning in pendulum tuned mass dampers [J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(2): 242 – 251.
- [8] QIU C X, ZHU S. High-mode effects on seismic performance of multi-story self-centering damperd steel frames [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 119: 133 – 143.
- [9] LAW S S, WU Z M, CHAN S L. Vibration control study of a suspension footbridge using hybrid slotted bolted connection elements [J]. Engineering structures, 2004, 26(1): 107 – 116.
- [10] CHANG M L, LIN C C, UENG J M, et al. Experimental study on adjustable tuned mass damper to reduce floor vibration due to machinery [J]. Structural control and health monitoring, 2010, 17(5): 532 – 548.
- [11] TAHA A E. Vibration control of a tall benchmark building under wind and earthquake excitation [J]. Practice periodical on structural design and construction, 2021, 26(2).
- [12] 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.  
(Lü 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. )
- [13] 操礼林,曹栋,李爱群. 人行天桥动力特性参数时变性分析及其 TMD 减振控制 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 134 – 142.  
(CAO Lilin, CAO Dong, LI Aiqun. Analysis of time-varying dynamic characteristic parameters of footbridge and TMD vibration control [J]. Journal of building structures, 2020, 41(11): 134 – 142. )
- [14] 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. )
- [15] 邓亚虹,夏唐代,陈敬虞. 车辆荷载作用下隔震沟隔震效率影响因素分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 883 – 887.  
(DENG Yahong, XIA Tangdai, CHEN Jingyu. Analysis of efficiency of vibration isolating groove subjected to vehicle load [J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(5): 883 – 887. )
- [16] 孙亮明,李国豪. 地铁车辆段试车线诱发上盖住宅振动的实测研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51(22): 90 – 96.  
(SUN Liangming, LI Guohao. Study on field measurement of train-induced vibration over-track residence on the testing line of metro depot [J]. Building structure, 2021, 51(22): 90 – 96. )
- [17] 王言泽,施卫星. 大跨人行景观桥的人致振动控制研究 [J]. 结构工程师, 2022, 38(1): 61 – 66.  
(WANG Yanze, SHI Weixing. Research on human induced vibration control of large-span pedestrian landscape bridge [J]. Structural engineers, 2022, 38(1): 61 – 66. )
- [18] 李亚明,贾水钟,朱华,等. 上海天文馆人致振动的 TMD 振动控制分析 [J]. 建筑结构, 2018, 48(3): 42 – 44.  
(LI Yaming, JIA Shuizhong, ZHU Hua, et al. Analysis for human-induced vibration reduction with TMD in Shanghai Planetarium [J]. Building structure, 2018, 48(3): 42 – 44. )
- [19] HARTOG J P D. Mechanical vibrations [M]. New York: Dover Publicatios INC, 2013.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)