

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111046

分布式多重调谐冲击阻尼器减震控制研究*

鲁正^{1,2}, 周梦瑶², 马乃寅²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为提高颗粒阻尼器对高层结构多模态控制性能, 将颗粒阻尼技术与多重调谐质量阻尼器(MTMD)结合, 提出了多重调谐冲击阻尼器(MTID), 基于一个20层非线性Benchmark结构验证了多目标优化设计的MTID相对于单个调谐冲击阻尼器(STMD)的减震优越性, 并研究了采用不同布置准则的分布式MTID的减震性能。结果表明: 优化设计的MTID在减小主体结构动力响应、非线性变形和塑性损伤等方面均具有更优异的控制性能; 基于主体结构的模态特性确定MTID系统中TID的安装位置非常有效, 将各个TID均安装于振型幅值最大的楼层可获得最优的振动控制性能。

关键词: 颗粒阻尼器; 多重调谐冲击阻尼器; 振动控制; 多模态控制

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1228-05

Study on Vibration Reduction Control of Distributed Multi-tuned Impact Dampers

LU Zheng^{1,2}, ZHOU Mengyao², MA Naiyin²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To improve the multi-mode control performance of particle dampers for high-rise structures, a type of multiple tuned impact damper (MTID) is proposed by combining particle damper with multiple tuned mass damper (MTMD). The superiority of the multi-objective optimal MTID over the single tuned mass damper (STID) is verified, and the performance of various distributed MTID systems is investigated. The results show that the optimal MTID performs better in reducing dynamic responses, nonlinear deformation and plastic damage of the structure as compared to STID. It is very effective to determine the location of TIDs in MTID system based on the modal characteristics of the structure, and the optimal vibration control performance can be obtained when each TID is attached to the floor with the largest mode amplitude.

Keywords: particle damper; multiple tuned impact damper; vibration control; multi-mode control

* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51922080, 52178296)、上海市优秀学术带头人计划(20XD1423900)、中央高校基本科研业务费专项(11080)资助

作者简介: 鲁正(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构振动控制和工程结构抗震研究。

E-mail: luzheng111@tongji.edu.cn

引言

在应用于结构振动控制的多种装置中,调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)由于其力学原理清晰、对原结构改动小以及减振效果显著等特点,在高层、超高层建筑结构中得到了广泛应用。然而,TMD系统仍存在减振频带较窄、耐久性差等缺点。近年来部分学者将具有高度非线性和鲁棒性的颗粒阻尼技术引入TMD,提出了颗粒调谐质量阻尼器(Particle Tuned Mass Damper, PTMD),为拓宽TMD的有效减振频带提供了新思路。

PTMD兼具TMD和颗粒阻尼的优点,其优良性能已在众学者的研究中得到验证。B. Yao等^[1]和S. Li等^[2]发现相比于传统颗粒阻尼器,PTMD对微振动的控制性能明显提升。K. J. Rong等^[3]提出了一种改进方法模拟PTMD对多自由度系统的减震控制。王宝顺等^[4]提出了将并联式单向单颗粒阻尼器与TMD结合的减振体系。此外,PTMD被应用于智利圣地亚哥市Parque Araucano大厦,并在2010年智利地震中充分发挥减震性能,所控建筑未发生任何结构性损坏。

然而,即使PTMD的减振频带比TMD更宽,却仍难以覆盖结构多模态振动频率,导致其对受高阶模态影响较大的结构加速度响应控制效果不够理想。因此,为进一步放松PTMD的调谐条件,提升其对结构加速度的控制性能,本文提出了多重调谐冲击阻尼器(Multiple Tuned Impact Damper, MTID),系统分析了MTID与单个调谐冲击阻尼器(Single Tuned Impact Damper, STID)对结构的减震效果,并对采用不同布置准则的MTID系统进行了对比研究。

1 MTID数学模型

主体结构附加MTID的计算模型如图1所示,其中MTID包含 n 个TID,每个TID包含一个质量为 m_{ci} 的腔体和质量为 m_{pi} 的颗粒,控制方程如下:

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{U} + C\dot{U} + KU &= -\ddot{u}_g ME + \sum_{i=1}^n \Phi_i F_{ci} \\ m_{ci}\ddot{u}_{ci} + c_{ci}\dot{y}_{ci} + k_{ci}y_{ci} &= c_{pi}H(y_{pi}, \dot{y}_{pi}) + k_{pi}G(y_{pi}) \\ m_{pi}\ddot{u}_{pi} + c_{pi}H(y_{pi}, \dot{y}_{pi}) + k_{pi}G(y_{pi}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

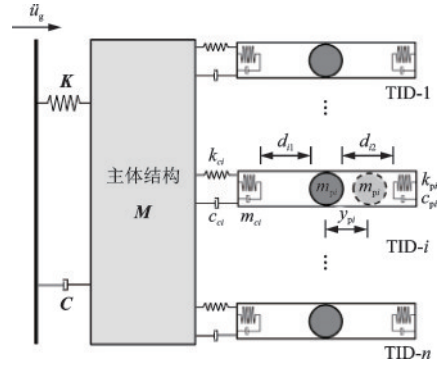


图1 主体结构附加MTID的力学模型

Fig.1 Mechanical model of the structure with MTID

式中, U, \dot{U}, \ddot{U} 分别为主体结构的位移、速度和加速度; M, K, C 分别为结构的质量、刚度和阻尼矩阵; \ddot{u}_g 为地面加速度; E 为地震力位置向量; Φ_i 和 F_{ci} 分别为MTID中第 i 个TID的位置向量和非线性控制力; \ddot{u}_{ci} 和 \ddot{u}_{pi} 分别为第 i 个TID腔体和颗粒的加速度; y_{ci} 和 \dot{y}_{ci} 分别为腔体与结构间的相对位移与相对速度; $c_{ci} = 2\xi_{ci}m_{ci}\omega_{ci}$ 和 $k_{ci} = m_{ci}\omega_{ci}^2 = \lambda^2 m_{pi}\omega_{ci}^2$,分别为腔体与结构间的阻尼和刚度系数, ξ_{ci} 和 ω_{ci} 分别为腔体的阻尼比和固有频率; λ 为颗粒与腔体间的刚性碰撞系数; c_{pi} 和 k_{pi} 用于模拟颗粒与腔体间的相互作用; y_{pi} 和 \dot{y}_{pi} 表征颗粒与腔体间的相对运动; $H(y_{pi}, \dot{y}_{pi})$ 和 $G(y_{pi})$ 分别为颗粒和腔体碰撞的非线性阻尼与非线性刚度函数^[3]。

2 优化设计的MTID与STID性能对比

本节基于20层非线性Benchmark结构对STID与MTID的减震性能进行了对比分析,该结构前4阶自振频率分别为:0.261、0.753、1.30、1.83 Hz,对应振型如图2所示。基于模态分析结果,MTID系统设置4个TID,分别安装于前4阶振型幅值最大处,即结构顶层,并分别与结构前4阶自振频率调频。MTID系统其余的设计参数通过基于多元宇宙优化算法的多目标优化设计方法^[5]得到(表1),其中, μ_{ci} 和 μ_{pi} 分别表示第 i 个TID腔体和颗粒的质量比; ξ_{ci} 和 ξ_{pi} 分别为第 i 个TID腔体和颗粒的阻尼比; d_i 为第 i 个TID的腔体净距。

基于Z. Lu等^[6]提出的基于性能的STID优化设计方法,将STID安装于结构一阶振型幅值最大的楼层并与结构一阶自振频率调频,同时,STID系统与

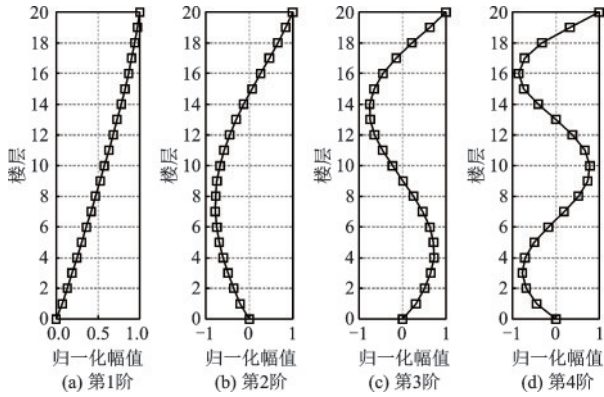


图2 Benchmark结构的前4阶振型

Fig.2 The first four modes of Benchmark structure

MTID系统的质量比保持一致,其余系统参数通过微分演化算法进行优化设计,详细参数见表1。

表1 MTID与STID系统的优化设计参数

Table 1 Optimal design parameters of MTID and STID systems

| | TID- <i>i</i> | $\mu_{ci}/10^{-3}$ | $\mu_{pi}/10^{-3}$ | ξ_{ci} | ξ_{pi} | d_i/m |
|------|---------------|--------------------|--------------------|------------|------------|---------|
| MTID | TID-1 | 7.4 | 1.5 | 0.076 | 0.400 | 0.031 |
| | TID-2 | 7.4 | 1.5 | 0.094 | 0.327 | 0.029 |
| | TID-3 | 7.4 | 1.5 | 0.118 | 0.073 | 0.538 |
| | TID-4 | 7.4 | 1.5 | 0.197 | 0.271 | 0.387 |
| STID | TID | 29.7 | 5.8 | 0.197 | 0.060 | 0.043 |

选用1.5倍幅值的El Centro地震波作为外界激励^[7],受控结构的响应对比如图3所示。附加优化设计的STID或MTID均能有效减小结构位移和加速度响应,二者对结构位移的减震效果较接近,对位移峰值和均方根的减震率均分别为9%和24%左右;但相对于STID,MTID对加速度峰值和均方根的减震率分别从2.12%和9.35%提升到了18.81%和34.46%,提升率分别达到787.26%和268.56%。这是因为该结构的加速度响应主要由高阶模态控制,因此能够实现多模态控制的MTID系统对结构加速度的减震效果显著优于优化设计的STID系统。

此外,两种阻尼系统对结构顶层的均方根响应减震效果明显优于峰值响应。结合图4可知,该现象的原因为:El Centro波作用下结构最大响应出现的时间过早,分别在3.83 s和3.01 s便出现了位移和加速度峰值,而此时阻尼器中颗粒与腔体尚未充分碰撞,减震性能未充分发挥。经较短的启动时间

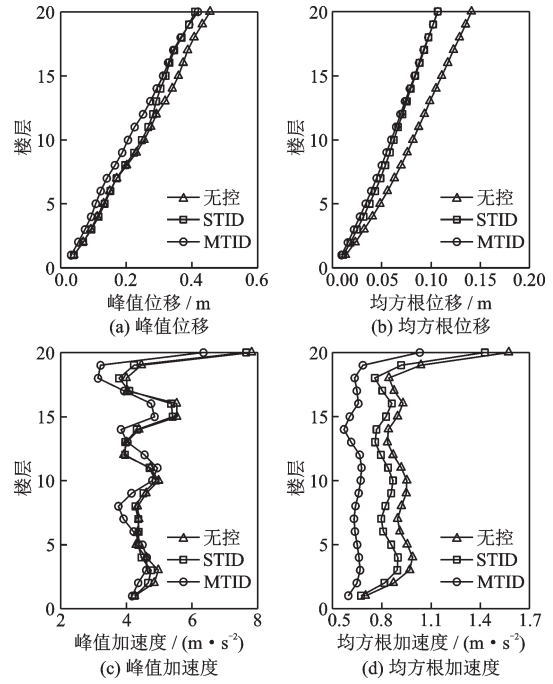


图3 主体结构各层响应对比

Fig.3 Responses of the primary structure

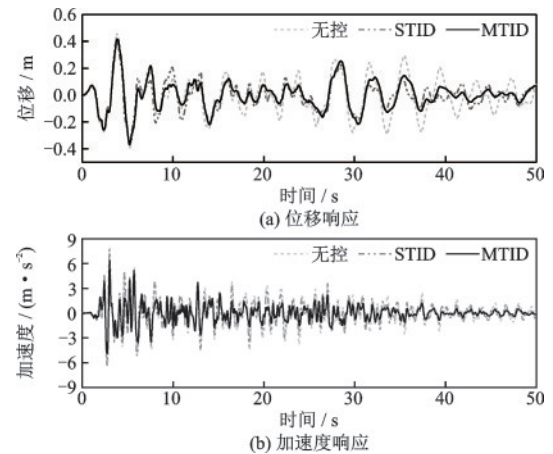


图4 主体结构顶层响应的时程对比

Fig.4 Time-history responses at the top floor of the structure

后,颗粒与腔体充分碰撞,阻尼器的减震性能得以有效发挥,故而对结构均方根响应的减震效果会显著优于峰值响应。

图5给出了STID和MTID控制下结构各层的塑性铰数量及随之产生的塑性耗能,从而进一步对比两种阻尼器减震性能的优劣。由图可得,优化设计的STID控制下结构塑性铰数量从84个减少到68个,仅减少了16个;而优化设计的MTID系统则进一步大幅度地减少了塑性铰数量,主体结构仅在两个楼层产生了共4个塑性铰,表明优化设计的MTID系统可更有效地减少主体结构的塑性耗能。

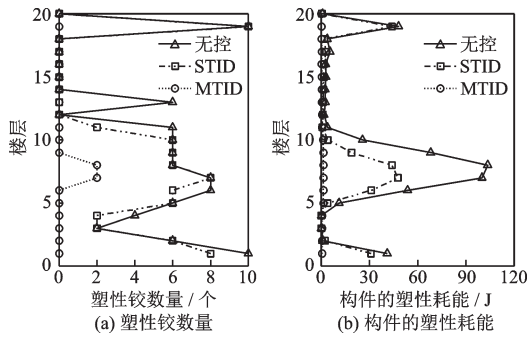


图5 STID与MTID控制下主体结构非线性性能指标
Fig.5 Structural nonlinear performance with STID and MTID

3 分布式MTID减震性能分析

为探究MTID安装位置对其减震性能的影响,分别采用以下三种布置准则:(1)多个TID分别安装于所控模态振型幅值最大位置,相当于前文的MTID;(2)多个TID沿结构高度分散于不同楼层(distributed MTID, d-MTID),且优先将TID安装于所控制模态振幅最大的楼层;若该楼层已安装TID,则下一个TID安装于振幅次之的楼层;(3)将多个TID沿结构高度分散安装于任意楼层(arbitrarily distributed MTID, ad-MTID)。这三种不同布置方式的MTID系统如图6所示,d-MTID和ad-MTID系统最终的优化设计参数见表2。

图7给出了三种MTID控制下结构各层动力响应。由图可知,MTID-top和d-MTID对结构均方根加速度减震效果较为接近,且总体上均优于ad-MTID。而对于峰值加速度响应而言,三种MTID的减震性能各有优劣。表3对比了三种MTID对结

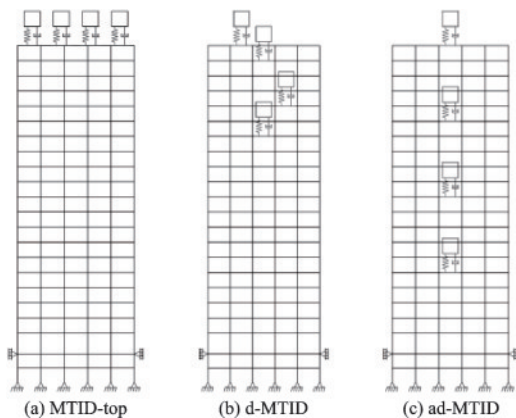


图6 不同布置方式的分布式MTID系统示意
Fig.6 Schematic diagram of various distributed MTID systems

表2 两种分布式MTID系统的优化设计参数

Table 2 Optimal design parameters of distributed MTID systems

| 布置方式 | TID- <i>i</i> | ξ_{ci} | ξ_{pi} | d_i/m |
|---------|---------------|------------|------------|---------|
| d-MTID | TID-1 | 0.075 2 | 0.117 4 | 0.031 7 |
| | TID-2 | 0.009 9 | 0.105 3 | 0.836 2 |
| | TID-3 | 0.054 6 | 0.002 1 | 0.253 6 |
| | TID-4 | 0.050 8 | 0.200 4 | 0.556 5 |
| ad-MTID | TID-1 | 0.122 3 | 0.264 7 | 0.010 0 |
| | TID-2 | 0.197 1 | 0.400 0 | 0.325 5 |
| | TID-3 | 0.197 1 | 0.230 4 | 0.125 1 |
| | TID-4 | 0.054 4 | 0.070 1 | 0.100 9 |

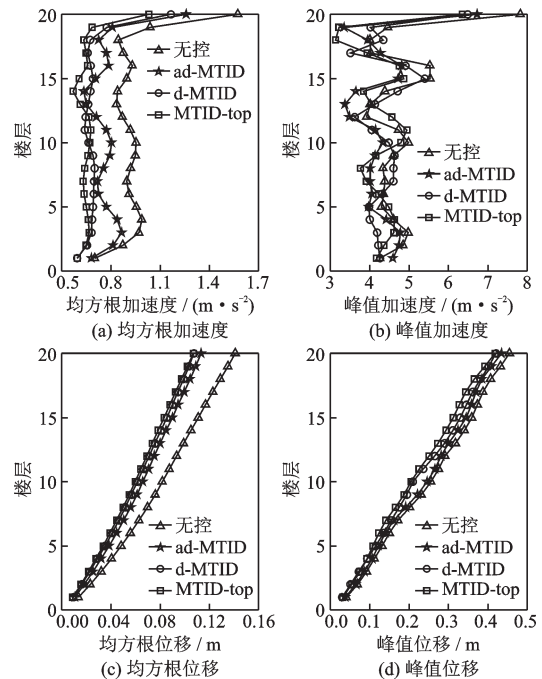


图7 不同布置方式的MTID控制下结构响应对比
Fig.7 Structural responses with various distributed MTIDs

构顶层响应的减震效果。结果表明,与MTID-top相比,d-MTID和ad-MTID的减震效果均出现不同程度地下降。这是因为d-MTID中各TID均安装于最优或次优楼层,而ad-MTID中各TID的位置是任意确定的,仅控制一阶模态的TID安装于最优位

表3 不同布置方式的MTID对结构顶层响应减震效果

Table 3 Damping performance of various distributed MTIDs 单位:%

| 布置方式 | 均方根 加速度 | 峰值 加速度 | 均方根 位移 | 峰值 位移 |
|----------|------------|-----------|-----------|----------|
| MTID-top | 34.46 | 18.81 | 24.06 | 8.04 |
| d-MTID | 26.00 | 17.03 | 23.75 | 7.51 |
| ad-MTID | 20.06 | 13.94 | 19.54 | 4.44 |

置,其余 TID 位置与最优楼层存在较大偏差,故而其加速度减震性能稍差,与 MTID-top 相比均方根加速度减震率下降了 41.79%。

4 结 论

通过分布式多重调谐冲击阻尼器的减震控制研究,得到以下结论:

(1)相比于优化设计的 STID 系统,优化设计的 MTID 系统在减小主体结构动力响应、非线性变形和塑性损伤等方面均具有更优异的控制性能。

(2)根据主体结构的模态特性确定 MTID 系统中 TID 的安装位置非常有效,将各个 TID 均安装于振型幅值最大的楼层可获得最优的振动控制性能。

(3)优化设计的 d-MTID 与 MTID-top 相比减震性能下降幅度很小,故而 MTID 应用于实际工程时可根据安装空间和减震需求灵活选择布置准则。

参考文献:

[1] Yao B, Chen Q, Xiang H Y, et al. Experimental and theoretical investigation on dynamic properties of tuned particle damper[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 80: 122-130.

- [2] Li S, Tang J. On vibration suppression and energy dissipation using tuned mass particle damper[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2017, 139(1): 011008.
- [3] Rong K J, Lu Z. An improved ESM-FEM method for seismic control of particle tuned mass damper in MDOF system[J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107663.
- [4] 王宝顺,何浩祥,闫维明.质量调谐-颗粒阻尼器复合减振体系的力学解析及优化分析[J].工程力学,2021,38(6):191-208.
Wang B S, He H X, Yan W M. Analytical model and optimization analysis of combined damping system with TMD and particle damper[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 191-208. (in Chinese)
- [5] 马乃寅.多重调谐冲击阻尼器的优化设计和性能分析[D].上海:同济大学,2018.
Ma N Y. Optimization design and performance analysis of multiple tuned impact dampers [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [6] Lu Z, Li K, Ouyang Y T, et al. Performance-based optimal design of tuned impact damper for seismically excited nonlinear building [J]. Engineering Structures, 2018, 160: 314-327.
- [7] Ohtori Y, Christenson R E, Spencer B F, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130 (4): 366-385.

(本文责编:赵霞)