

3 种构造形式调谐质量阻尼器性能

吴思远^{1,2,3,4}, 廖旭钊⁵, 荣坤杰⁶, 王俊杰⁵, 孔伟明^{2,4}, 傅知春⁴, 鲁正¹

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122; 4. 智性科技南通有限公司, 江苏 南通 226000;

5. 广东省建筑设计研究院, 广东 广州 510010; 6. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250062)

摘要: 提出了 3 种平面内自由运动的调谐质量阻尼器 (TMD) 构造形式, 即十字形 (CTMD)、X 形 (XTMD) 和旋风形 (TTMD), 通过有限元模型对比分析了 3 种 TMD 刚度变化、模态和简谐激励振动响应。根据分析结果可知, 当 TMD 激励方向与弹簧垂直时, 弹簧出力表现出非线性行为; 相比于其他构造形式, TTMD 减振效果更为稳定, 效率更高。当质量比大于 3% 时, TTMD 抑振效果更为显著。

关键词: 调谐质量阻尼器; 十字形调谐质量阻尼器; X 形调谐质量阻尼器; 旋风形调谐质量阻尼器; 力学行为; 动力特性
中图分类号: O328 **文献标志码:** A

Performance of Tuned Mass Damper of Three Structures

WU Siyuan^{1,2,3,4}, LIAO Xuzhao⁵, RONG Kunjie⁶,
WANG Junjie⁵, KONG Weiming^{2,4}, FU Zhichun⁴,
LU Zheng¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200122, China; 4. Zhixing Technology Nantong Co., Ltd., Nantong 226000, China; 5. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, China; 6. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper proposes three types of tuned mass damper (TMD), i.e., cross shaped mass damper (CTMD), X shaped mass damper (XTMD), and tourbillion shaped mass damper (TTMD) with free motion in the plane. The stiffness changes, modal, and vibration responses under harmonic excitation of the three TMDs are compared and analyzed using the finite element model. The analysis results indicate that when the excitation direction of a TMD is perpendicular

to the spring, the spring force exhibits a nonlinear behavior, and compared with other TMDs, TTMD has a better robustness and higher utilization efficiency. When the mass ratio is greater than 3%, the vibration suppression of TTMD is more significant.

Keywords: tuned mass damper (TMD); cross-type tuned mass damper (CTMD); X-type tuned mass damper (XTMD); tourbillion-type tuned mass damper (TTMD); mechanical behavior; dynamic properties

调谐质量阻尼器 (tuned mass damper, TMD) 是一种能够有效降低结构振动响应的被动控制技术, 因其概念简单, 力学模型明确, 便于设计安装等特点, 被广泛应用于结构风致振动、人致振动和设备振动控制, 并尝试探索在非平稳随机地震动作用下的应用有效性。TMD 最优参数的取值方法和应用场景已有相关研究^[1-3], 但实体装置构型往往与理论分析模型有所出入, 故针对 TMD 实际构造形式和连接布置的力学行为和动力特性需开展进一步研究。

现有 TMD 构造形式根据连接位置可分为悬吊式和立式。悬吊式 TMD 采用吊索连接形成单摆, 用以控制高层建筑水平风致振动, 亦可增强结构抗震性能; 立式 TMD 采用竖向弹簧支撑, 用以控制人行桥竖向人致振动, 增强结构舒适度。Glanville 等^[4]提出了一种立式十字形布置变质量 TMD, 实现了平面内多向摆动及频率可变性。Alexander 等^[5]探索了十字形 TMD 的力学行为, 但仅把质量块作为质点, 未考虑质量块实际构型及连接影响。Li 等^[6]将相似双向 TMD 用于风电机组地震响应控制。Mohammadi-Ghazi 等^[7]和 He 等^[8]分别提出了自适应构型 TMD 和立式正交扭摆, 同时实现对平动和扭转控制。Maurer 公司公开

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金 (52308509); 中国博士后科学基金 (2023M742096)

第一作者: 吴思远, 工学博士, 主要研究方向为结构抗震。E-mail: siyuan_wu1992@tongji.edu.cn

通信作者: 廖旭钊, 高级工程师, 主要研究方向为复杂结构设计。E-mail: 715128129@qq.com



论文
拓展
介绍

展示了紧凑型双摆式 TMD, 节省了布置空间。Ishikawa 等^[9]提出了一种长冲程悬吊式多级摆 TMD, 用以减小高层结构长周期长持时地震作用, 根据振动台试验和模拟结果, 位移响应可减小约 30%。Song 等^[10]提出一种管道用环形布置调谐质量阻尼器, 用以减小海洋平台管道流体激励, 减振效率超过 17%。Baruah 等^[11]提出了一种折纸形 TMD, 通过折叠/展开实现变刚度的调节。Jahangiri 等^[12]提出一种三维非线性 TMD 的构想, 用于海上风电机组减振, 当质量比 (TMD 质量/主结构质量) 为 1.5% 时, 减振率超过 12%。Ma 等^[13]提出了一种正负刚度组合的四边形构造 TMD, 解决了传统 TMD 低频减振中因刚度重量比过大而导致的非线性频率失调问题, 实现了更为广泛频带的振动抑制。

在已有 TMD 构造形式研究的基础上, 本文提出 3 种立式平面内自由运动的 TMD, 即十字形调谐质

量阻尼器 (cross-type tuned mass damper, CTMD)、X 形调谐质量阻尼器 (X-type tuned mass damper, XTMD) 和旋涡形调谐质量阻尼器 (tourbillon-type tuned mass damper, TTMD)。通过有限元模拟, 研究其力学行为和动力特性。

1 构造形式及模拟方法

CTMD、XTMD 和 TTMD 构造形式如图 1 所示, 其中 XTMD 构型为 CTMD 构型绕质量块 (mass) 质心正向旋转 45°, TTMD 构型为 XTMD 构型中弹簧与质量块错位连接。结合某工程实际需求, TMD 整体布置空间为边长 4.5 m 的方形区域, 质量块设计域为边长 1.5 m 的方形区域, TMD 质量为 7 t。除与弹簧连接点固定外, 内部尺寸可根据需求优化。弹簧 1 和弹簧 3 刚度为 $83 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 弹簧 2 和弹簧 4 刚度为 $53 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, TMD 阻尼比取 6%。

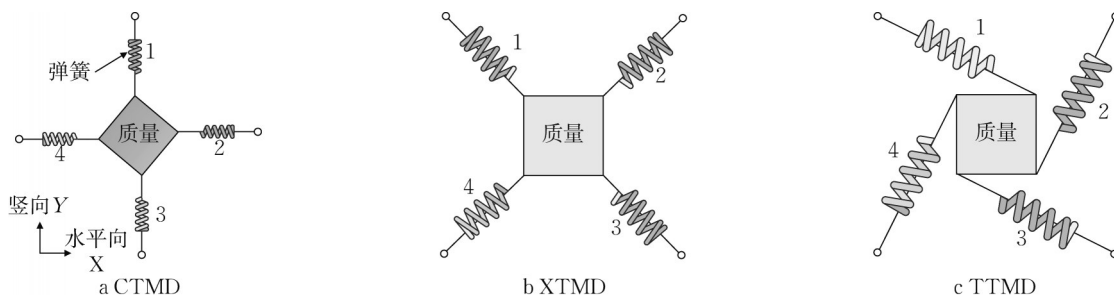


图 1 构造形式

Fig. 1 Structure diagram

本研究基于 ANSYS 通用有限元软件进行数值模拟, 其中, 质量块采用集中质量进行离散处理, 几何形状采用 Beam188 刚性杆构建, 模拟方法如图 2 所示。弹簧采用轴向线性弹簧单元 Combine14, 在有限元分析过程中考虑了几何大变形的影响。

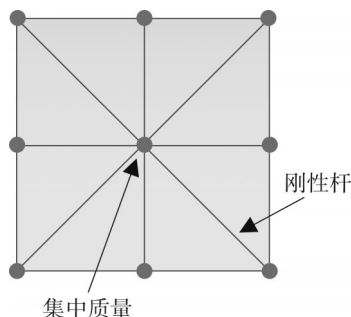


图 2 质量块模拟方法

Fig. 2 Simulation method of mass block

2 刚度变化

分别沿与 X 轴正向夹角为 0° 、 30° 、 45° 和 90° 方向静力拉伸得到的 TMD 力-位移曲线, 如图 3 所示, 图例中数字表示弹簧编号, 具体见图 1。通过图 3 可知, 当拉伸方向与弹簧垂直时, 垂直向弹簧表现出非线性行为, 如图 4 所示。结合典型建筑结构前两阶平动特性, 在选取 TMD 布置形式时, 0° 和 90° 向应选取 XTMD 或 TTMD, 各弹簧出力更为均衡。

3 模态分析

3.1 自由振动

自由振动法初始预拉位移设置为 300 mm。自由振动加速度衰减时程曲线和功率谱如图 5 所示, 图 5 中峰值频率如表 1 所示。从功率谱中可以看出, CTMD 沿 0°

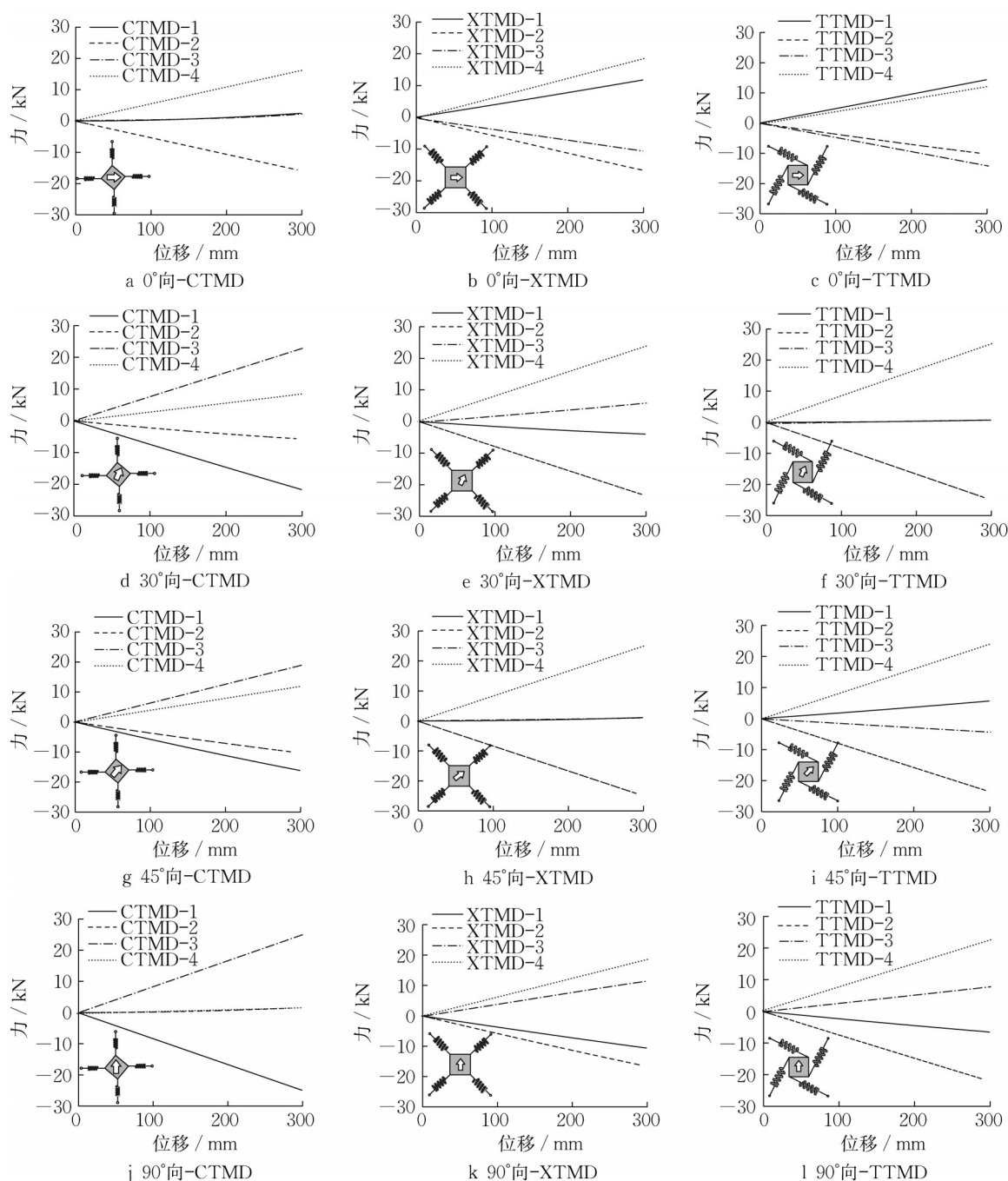


图3 单向拉伸TMD力-位移曲线

Fig. 3 Force-displacement of TMD under uniaxial tension

和90°向自由振动时只有1个峰值,表明CTMD仅对单一频率起控制作用,而XTMD和TTMD在功率谱中出现2个峰值,可对两阶频率起控制作用。因构型改变,导致TMD多频控制能力显现。

图6为各向自由振动TMD质心运动轨迹,从运动轨迹可以看出,当TMD运动方向与弹簧连接方向平行时,因另一侧弹簧出力较小,故运动轨迹为单向运动;当运动方向与弹簧连接方向夹角越大,TMD释放后双向抖动越明显,抖动的出现即形成了图6

中TTMD和XTMD沿0°和90°向自由振动释放时功率谱的双峰现象。

3.2 Wilson-Ritz 向量法

3.2.1 振型

通过 Wilson-Ritz 向量法分析,发现3种构型TMD频率一致,其模态振型如图7所示。从图7中可以看出CTMD分别沿0°和90°向平动,XTMD沿弹簧1-3和2-4方向平动,TTMD沿平行于弹簧1和弹簧2方向平动。

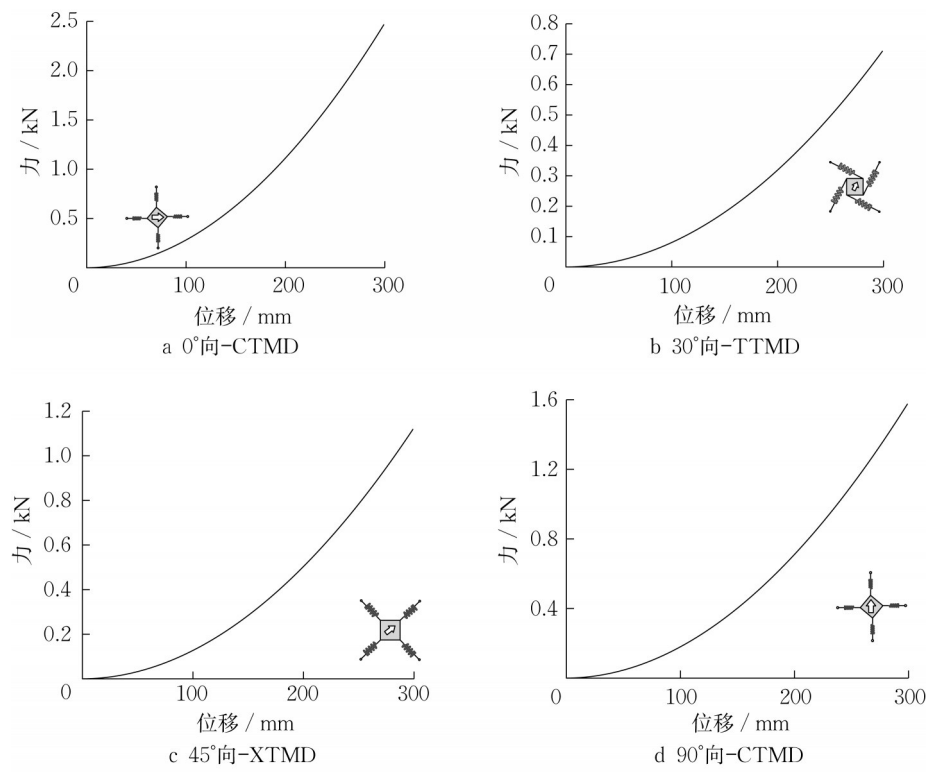


图4 弹簧出力非线性行为
Fig. 4 Nonlinear behavior of spring

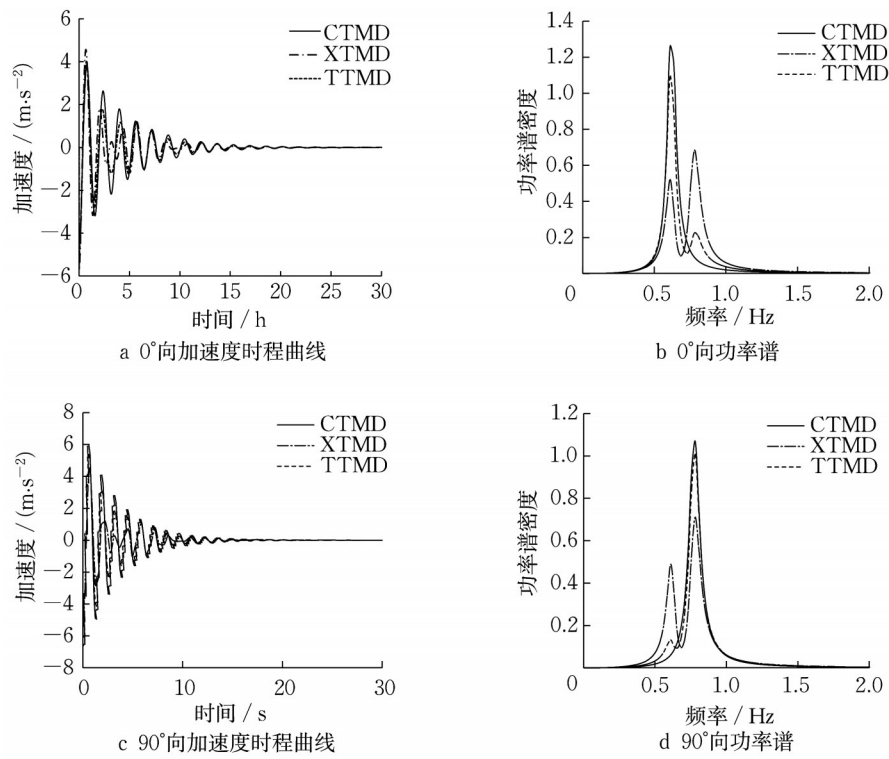


图5 自由振动
Fig. 5 Free vibration

3.2.2 质量影响

TMD 质量变化(3~11 t)对频率的影响如图 8

所示。从图 8 中可以看出, Wilson-Ritz 向量法计算频率与前述自由振动法所得主控频率一致。同时,

表1 TMD峰值频率
Tab. 1 Peak frequency of TMD

方向	频率/Hz		
	CTMD	XTMD	TTMD
0°	0.610	0.610/0.781	0.610/0.781
90°	0.781	0.610/0.781	0.610/0.781

随着TMD质量的增大,频率变化逐渐减小,以7 t为例,TMD质量变化1 t所致频率偏差小于8%。通过分析发现,在本文质量块设计域为 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 情况下,任意质量偏置,对模态变化的影响均可忽略,由此验证了集中质量模拟方法的可行性。

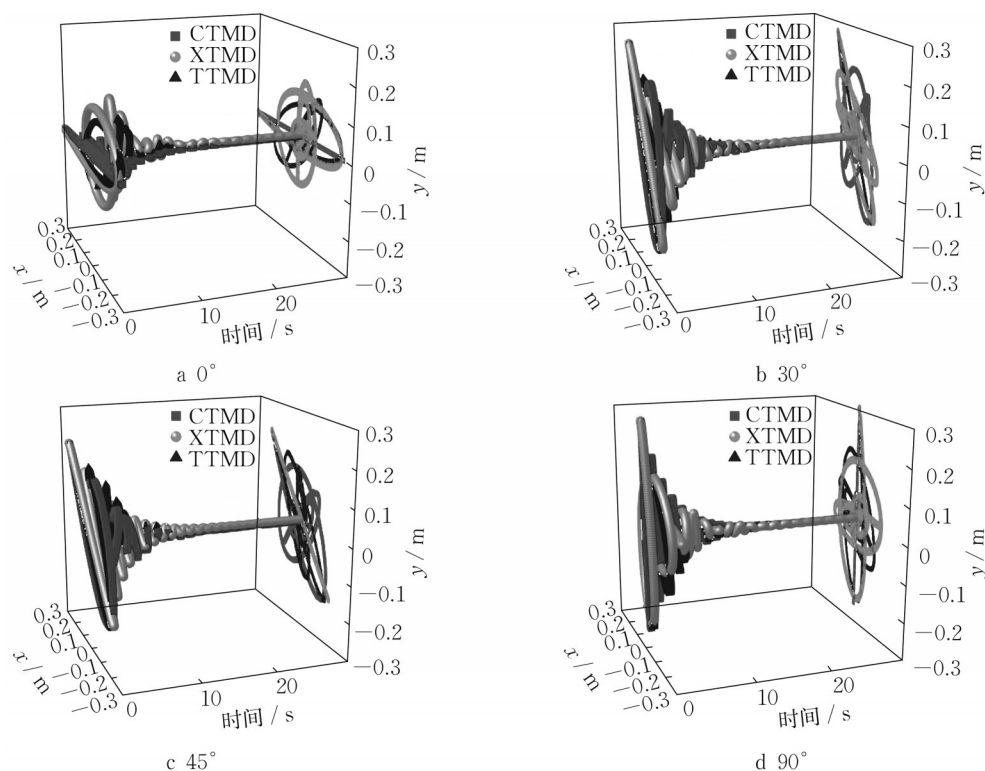


图6 自由振动运动轨迹
Fig. 6 Trajectory of free vibration

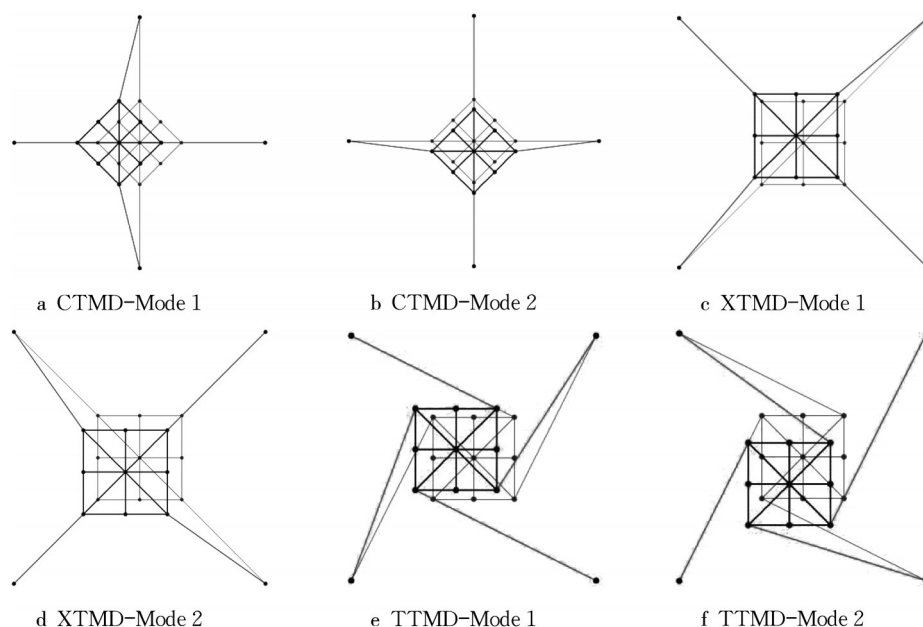


图7 振型
Fig. 7 Mode shape

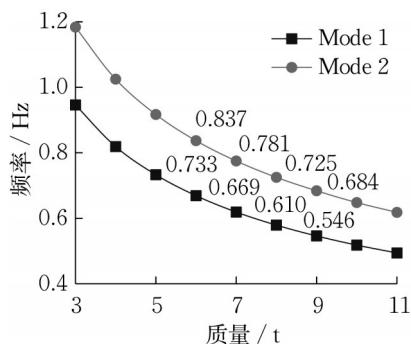


图8 频率随质量的变化

Fig. 8 Frequency versus mass

4 简谐激励下附加TMD结构动力响应

根据以往研究结论,TMD质量越大减振效果越好,但当TMD质量过大时,会影响主结构强度和变形,故该处选取惯用TMD质量比1%、3%和5%,对附加TMD双自由度主结构(0°向和90°向自由度)进行简谐激励下动力响应分析。其中主结构频率、TMD频率和激励频率保持一致,结构阻尼比取5%。无控(UCS)和附加TMD主结构单向简谐激励时程曲线如图9所示,主结构峰值响应及减振率见表2。

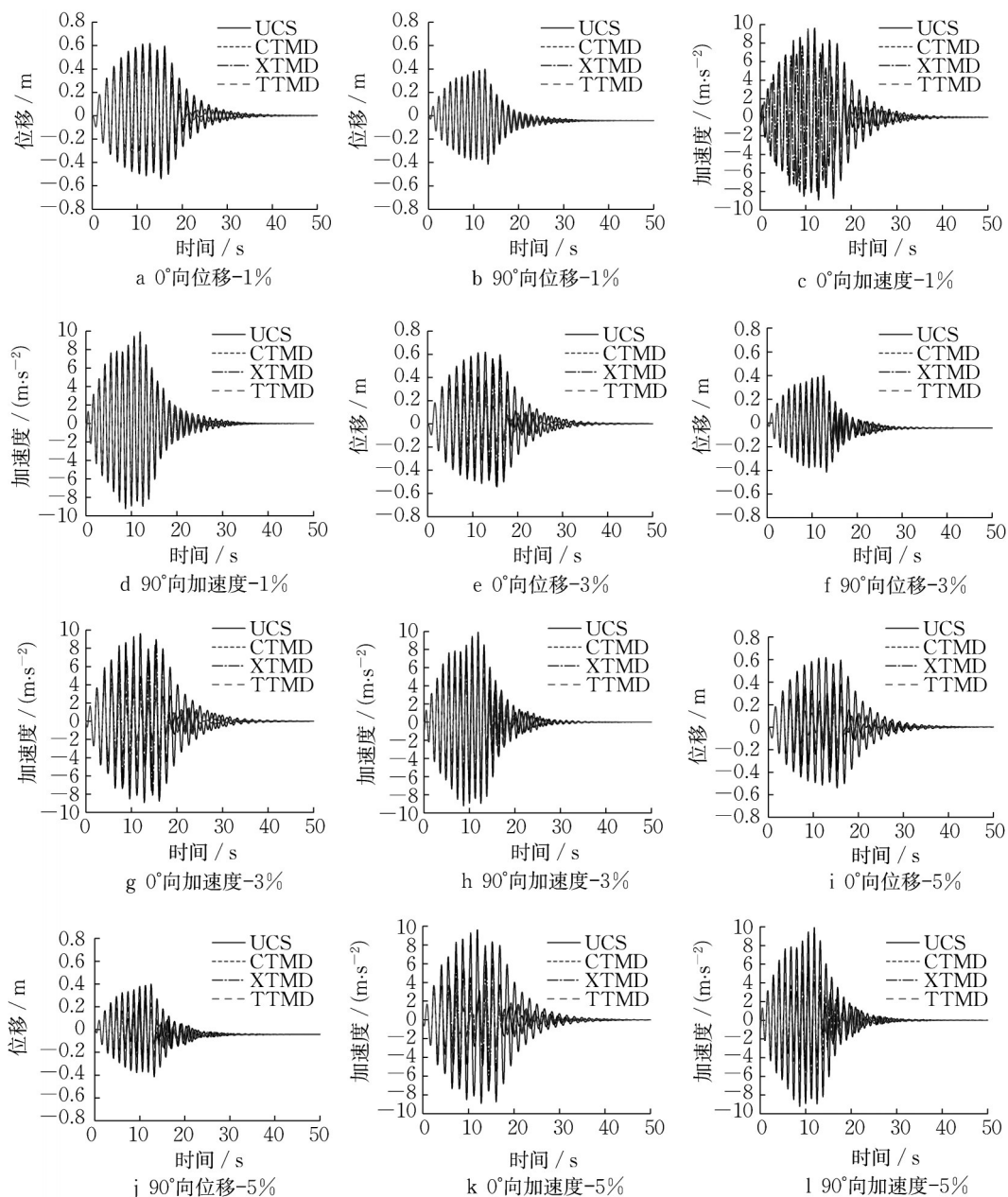


图9 单向简谐激励

Fig. 9 Unidirectional harmonic excitation

表 2 主结构峰值振动响应及减振率
Tab. 2 Peak vibration response and damping rate of main structure

质量比/%	振动响应	方向/(°)	无控制	CTMD 控制		XTMD 控制		TTMD 控制	
				实测值	减振率/%	实测值	减振率/%	实测值	减振率/%
1	位移/m	0	0.62	0.48	22.58	0.56	9.68	0.49	20.97
		90	0.41	0.37	9.76	0.35	14.63	0.36	12.20
	加速度/(m·s ⁻²)	0	9.59	7.38	23.04	9.52	0.73	8.27	13.76
		90	9.91	8.69	12.31	8.49	14.33	8.76	11.60
3	位移/m	0	0.62	0.31	50.00	0.56	9.68	0.32	48.39
		90	0.41	0.35	14.63	0.31	24.39	0.26	36.59
	加速度/(m·s ⁻²)	0	9.59	5.02	47.65	8.95	6.67	5.13	46.51
		90	9.91	8.19	17.36	7.38	25.53	5.90	40.46
5	位移/m	0	0.62	0.25	59.68	0.41	33.87	0.25	59.68
		90	0.41	0.28	31.71	0.25	39.02	0.17	58.54
	加速度/(m·s ⁻²)	0	9.59	3.68	61.63	6.65	30.66	4.34	54.74
		90	9.91	6.58	33.60	5.72	42.05	3.97	59.94

通过分析结果可以看出,整体而言,TTMD 在不同方向和质量比的振动响应中,减振率变化幅度最小,表现出更为稳定高效的减振效率,而 XTMD 减振率起伏差异最大,CTMD 居中。当质量比大于 3% 时,TTMD 对峰值振动响应的抑制具有明显优势。

无控和附加 TMD 结构放大系数随激励频率的变化曲线如图 10 所示,其中质量比取 5%,频率比为结构频率与激励频率的比值。从图 10 中可以看出,增加 TMD 后动力放大系数有所减小,附加 TMD 主结构位移响应(D)和加速度响应(A)放大系数相近,其中 TTMD 控制频域更宽,且整体幅值较低。

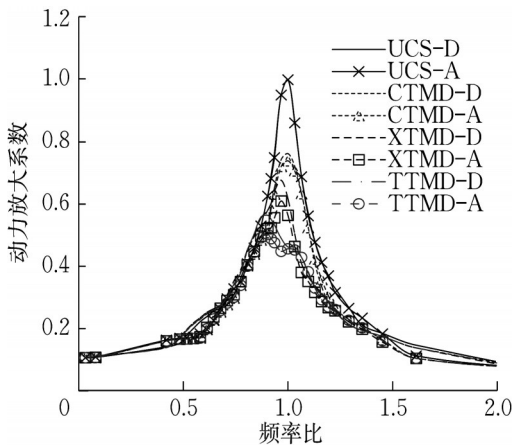


图 10 动力放大系数
Fig. 10 Dynamic amplification factor

5 结论

本文提出平面内自由运动的十字形、X 形和旋风形 TMD,通过有限元模拟对比研究了其力学性能

和动力特性。主要得出以下结论:

(1)当 TMD 激励方向与弹簧垂直时,垂直向刚度出现非线性行为,且随 TMD 行程的增大,非线性逐渐显著。

(2)根据模态分析可知,3 种 TMD 各向主控频率一致。根据自由振动所得功率谱可知,沿 0°和 90°方向,CTMD 仅对单一频率起控制作用,而 XTMD 和 TTMD 可对两阶频率起控制作用,扩展了控制频域。

(3)根据简谐激励下附加 TMD 结构动力响应分析可知,相比于 CTMD 和 XTMD,TTMD 减振效果更为稳定。当质量比大于 3% 时,TTMD 整体减振效果更优,动力放大系数更小。质量比为 1%、3% 和 5% 时,TTMD 最小减振率分别为 11.60%、36.59% 和 54.74%,均大于其他 2 种构型。

作者贡献声明:

吴思远:研究方案制定,模型搭建,数据分析,论文撰写。
廖旭钊:项目负责人,方案设计。
荣坤杰:课题负责人,论文审定。
王俊杰:模型分析。
孔伟明:方案指导。
傅知春:产品深化。
鲁正:课题指导。

参考文献:

[1] 李春祥, 韩兵康, 杜冬. 结构的多重双重调谐质量阻尼器控制策略[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 25.
LI Chunxiang, HAN Bingkang, DU Dong. Control strategy of multiple double tuned mass dampers for structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 25.
[2] 何浩祥, 吕永伟, 韩恩圳. 基于参数识别的双向偏心结构

- TMD优化布置[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(2): 301.
- HE Haoxiang, LÜ Yongwei, HAN Enzhen. Optimal placement of tuned mass damper (TMD) for structures with bi-directional eccentricity based on parameter identification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 301.
- [3] 杨维青, 华旭刚, 温青, 等. 杠杆式调谐质量阻尼器对双吊索尾流致振的减振优化[J]. 振动工程学报, 2021, 34(4): 819.
- YANG Weiqing, HUA Xugang, WEN Qing, *et al.* Optimization of vibration reduction for wake-induced vibrations of double suspension cables using lever-type tuned mass damper [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(4): 819.
- [4] GLANVILLE M J, GEORGIU P N. Design and installation of an adjustable mass-tuned mass damper [C/CD]// 7th Australasian Wind Engineering Workshop on Wind Engineering. Auckland: Springer, 1998.
- [5] ALEXANDER N A, SCHILDER F. Exploring the performance of a nonlinear tuned mass damper [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1): 445.
- [6] LI W, ZHANG Q, YANG Z, *et al.* Seismic vibration mitigation of wind turbine tower using bi-directional tuned mass dampers [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 19(3): 8822611.
- [7] MOHAMMADI-GHAZI R, GHORBANI-TANHA A K, RAHIMIAN A M. Adaptive configuration tuned mass damper for mitigation of rotational vibrations [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(8): 934.
- [8] HE H, WANG W, XU H. Multidimensional seismic control by tuned mass damper with poles and torsional pendulums [J]. Shock and Vibration, 2017, 3(6): 1.
- [9] ISHIKAWA Y, MASEKI R, AONO S, *et al.* Development and analysis of long stroke tuned mass damper for earthquakes [J]. Japan Architectural Review, 2019, 2(3): 1.
- [10] SONG J, WANG T, CHEN W, *et al.* Vibration control of marine top tensioned riser with a single tuned mass damper [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(10): 785.
- [11] BARUAH A C, SYCHTERZ A C. Origami enabled pill-bug inspired tuned-mass dampers [C/CD]// Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021. Singapore: Springer, 2022.
- [12] JAHANGIRI V, SUN C. A novel three dimensional nonlinear tuned mass damper and its application in floating offshore wind turbines [J]. Ocean Engineering, 2020, 250(2): 110703.
- [13] MA W S, YU J J, YANG Y Q. Design and application of double-parallelograms-based tuned mass damper for low-frequency vibration absorption [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2022, 144(5): 051005.