

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.055

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摆式电涡流 TMD-钢框架结构的 耦合计算方法与减震分析

潘毅^{1a,1b}, 包韵雷^{1a}, 国巍², 陈业宏³

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要:摆式电涡流 TMD 作为一种新型阻尼器,多用于人致振动和风振控制,较少应用抗震工程,也缺乏较好的计算方法。为研究摆式电涡流 TMD 的减震性能及合理的质量比 μ_m ,根据摆式电涡流 TMD 的力学特性,提出一种基于联合仿真的耦合计算方法,根据现行建筑抗震设计规范,分别建立了 5、10、20 层钢框架结构模型,设计了 5 组不同 μ_m 的摆式电涡流 TMD,并采用提出的耦合计算方法,对摆式电涡流 TMD-钢框架结构模型进行了动力时程分析,得到了罕遇地震作用下结构的层位移、层间位移角、层剪力和层加速度与 μ_m 的关系曲线,并与无 TMD 结构的地震响应进行了对比。研究表明:提出的耦合计算方法可行且有效,摆式电涡流 TMD 可有效降低钢框架结构的地震响应,当 μ_m 为 3% 时较为合理。其中,20 层钢框架结构的层位移、层间位移角、层剪力和层加速度分别减小 26.5%、20.9%、4.3%、7.3%。

关键词:调谐质量阻尼器;耦合计算方法;钢框架结构;质量比;减震分析

中图分类号: TU313; TU391 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2020)04-0084-10

Coupling calculation method and seismic analysis of pendulum eddy current TMD-steel frame structures

Pan Yi^{1a,1b}, Bao Yunlei^{1a}, Guo Wei², Chen Yehong³

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Pendulum eddy current TMD as a new type of damper is often used in the control of human-induced vibration and wind-induced vibration, but seldom used in seismic engineering. And there is still a lack of effective calculation methods. In this paper, a coupling calculation method based on joint simulation

收稿日期: 2020-02-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802205); 四川省科技计划(2019YJ0222); 科技部资助项目(KY201801005)

作者简介: 潘毅(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震与加固研究, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

国巍(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guowei@csu.edu.cn.

Received: 2020-02-19

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0802205); Sichuan Science and Technology Program (No. 2019YJ0222); Ministry of Science and Technology of China (No. KY201801005)

Author brief: Pan Yi (1977-), professor, doctoral supervisor, main research interests: engineering structural seismic and reinforcement, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

Guo Wei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: guowei@scu.edu.cn.

is proposed to investigate the damping performance and reasonable value of mass ratio. A numerical model is established for 5-story, 10-story and 20-story steel frame structures along with five groups of pendulum eddy current TMDs with different mass ratios, which conform to the current Seismic design code for buildings and mechanical properties of pendulum eddy current TMD. A dynamic time-history analysis is performed on the numerical model by using coupling calculation method. The analysis yields a series of curves of story drift, interstory drift ratio, story shear force, and story acceleration versus mass ratio under rare earthquakes. The analysis results are compared to the results of the control model that has no pendulum eddy current TMD. The comparison shows the feasibility of the proposed coupling calculation method and that pendulum eddy current TMD can effectively reduce the seismic response of the steel frame, with a 26.5% reduction for story drift, 20.9% for interstory drift ratio, 4.3% for story shear force, and 7.3% for story acceleration of a 20-story steel frame structure when the reasonable mass ratio is recommended to be 3%.

Keywords: tuned mass damper (TMD); coupling calculation method; steel frame structure; mass ratio; seismic analysis

调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, 简称 TMD) 作为一种被动式吸能减振装置, 在结构减振领域得到广泛应用。TMD 由于性能稳定、结构简单、易于调节自身刚度、便于安装等特点, 可以满足结构任意水平方向和不同频段的振动控制需要, 多应用于楼盖的人致振动控制与桥梁、高层建筑的风致振动控制中^[1-4]。李爱群等^[5]在 MTMD 减震机理的基础上提出了考虑人体舒适度的大跨楼盖 MTMD 设计方法, 可以降低大跨楼盖的振动, 提高舒适度。Fujino 等^[6]将 TMD 应用到东京湾跨海大桥的风振控制中, 实测结果表明了 TMD 能够有效抑制其低阶涡激振动。徐怀兵等^[7]将 TMD 应用于高层建筑风振控制中, 通过设置主被动可切换的混合 TMD, 有效控制了结构动力响应。相比于在人致荷载和风荷载控制中的应用, TMD 应用于建筑结构减震的研究还比较少。叶献国等^[8]将 TMD 应用于混凝土巨型框架结构的减震设计中, 并进行了缩尺模型的振动台试验, 结果表明 TMD 有较好的减震效果。秦丽等^[9]提出了一种变摩擦 TMD, 解决了常摩擦 TMD 控制效果不稳定的问题, 有效降低了结构的地震响应。传统的 TMD 大多采用液体黏滞阻尼器作为阻尼单元, 存在易渗漏、阻尼参数不易调节、后期维护困难等不足^[10], 而摆式电涡流 TMD 是一种采用电磁阻尼作为阻尼单元的新型 TMD, 具有不依靠液体黏滞力耗能、不需要复杂机械连接、阻尼系数易于调节、制造安装与后期维护方便等优点^[11]。Bae 等^[12]、Bourquin 等^[13]、Lu 等^[14-15]、汪志

昊等^[16]已对摆式电涡流 TMD 的减振性能和阻尼比等设计参数进行了试验研究, 并在人行桥的人致振动控制和拱桥刚性吊杆、高耸结构、高层建筑的风振控制等领域得到了应用^[17-20]。

目前, 在摆式电涡流 TMD 的研究中, 存在几个不足: 1) 较少对其抗震性能及工程应用进行研究, 即使采取振动台试验, 但受限于试验条件, 也往往采用缩尺模型, 不能完全反映工程结构抗震性能的真实情况, 得不到摆式电涡流 TMD 的实际减震性能。2) 多数研究是基于其自身的设计参数, 进行的单个 TMD 研究, 鲜有将摆式电涡流 TMD 与工程结构进行联合计算分析, 且结构多为简化模型, 未考虑结构抗震的实际需求。3) 摆式电涡流 TMD 具有阻尼时变的特性, 现有分析软件难以完成摆式电涡流 TMD 与结构的耦合计算, 也缺乏有效的计算方法。针对上述情况, 笔者提出一种基于联合仿真的耦合计算方法, 以模拟摆式电涡流 TMD 阻尼的时变过程, 并建立摆式电涡流 TMD-钢框架结构模型, 计算其在罕遇地震作用下的结构响应, 分析层位移、层间位移角、层剪力、层加速度随 TMD 质量比的变化规律, 并与无摆式电涡流 TMD 的钢框架结构进行比较, 分析摆式电涡流 TMD 质量比对钢框架结构减震性能的影响, 并给出合理的 TMD 质量比建议。

1 摆式电涡流 TMD 的组成

摆式电涡流阻尼器一般放置于结构的顶层, 其组成部件由下至上分别为导磁钢板、永磁体、导体

板、调谐质量块、吊索,如图1所示。导磁钢板固定于屋面结构板,其上放置若干永磁体,可充分利用钢的导磁性,使磁感线向此处汇集,磁感应强度得以加强,且磁泄露量减小。永磁体置于导磁钢板上表面,用于产生磁场,永磁体的充磁方向为上下充磁,相邻永磁体充磁方向相反。导体板采用铜为材料,用于产生电涡流及电磁阻尼,当地震时结构振动,导体板随着调谐质量块一起振动,其切割磁感线产生电涡流,形成阻碍导体板与永磁体二者相对运动的电磁阻尼力。调谐质量块用于提供摆式电涡流 TMD 的质量,采用铁为材料,同样利用铁的导磁性,使磁感线向此处汇集,磁感应强度得以加强,且磁泄露量减小。吊索下方连接调谐质量块,上方固定于支架上,材料采用预应力钢绞线,保证其能承担质量块摆动时产生的拉力。

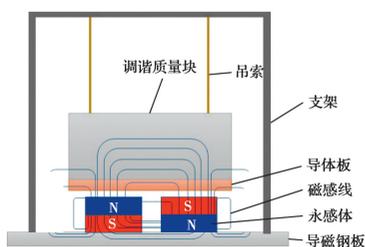


图1 摆式电涡流 TMD 的组成

Fig.1 Composition of pendulum eddy current TMD

当发生地震时,永磁体与导体板(连同调谐质量块)产生相对运动,其切割磁感线的同时产生电磁阻尼力,阻碍其与结构的相对运动,从而减小结构响应。因质量块的运动受到电磁阻尼的阻碍,随即产生电磁能,导体板发热,使地震能量以热能的方式耗散。

2 基于联合仿真的耦合计算方法

由于现有分析软件难以独立完成摆式电涡流 TMD 与结构相互作用的耦合分析,本文提出一种基于联合仿真的耦合计算方法,将有限元分析软件集成到其他软件平台中,处理该类复杂系统的耦合计算。

2.1 耦合计算方法的建立

以摆式电涡流 TMD-钢框架结构模型为例,耦合计算方法采用 OpenSEES (Open System for Earthquake Engineering Simulation) 作为服务器 (server) 建立框架结构子系统,并采用 Matlab 作为

客户端(client)建立摆式电涡流 TMD 子系统,通过 socket 程序关联,建立起耦合时变系统。耦合计算方法的流程见图2。

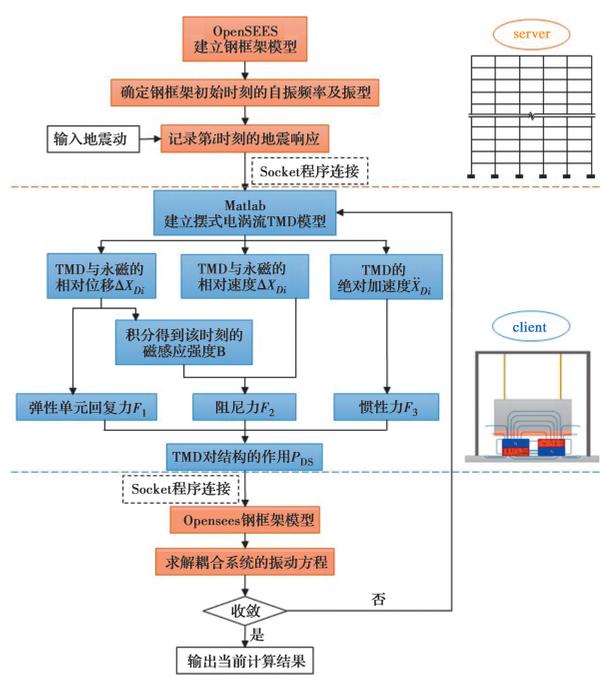


图2 耦合计算方法的流程

Fig.2 Flow for coupling calculation method

该耦合时变系统动力学方程可表述为两部分。摆式电涡流 TMD 子系统为

$$\mathbf{M}_D \ddot{\mathbf{X}}_D + \mathbf{C}_D \dot{\mathbf{X}}_D + \mathbf{K}_D \mathbf{X}_D = \mathbf{P}_{SD} \quad (1)$$

钢框架结构子系统为

$$\mathbf{M}_S \ddot{\mathbf{X}}_S + \mathbf{C}_S \dot{\mathbf{X}}_S + \mathbf{K}_S \mathbf{X}_S = \mathbf{P}_{DS} + \mathbf{P}_{GS} \quad (2)$$

式中:下标 D、S、G 分别为摆式电涡流 TMD、钢框架结构和地面; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 为质量、阻尼和刚度矩阵; \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 为广义位移、速度和加速度矩阵; \mathbf{P}_{SD} 和 \mathbf{P}_{DS} 为摆式电涡流 TMD 和钢框架结构之间的作用力与反作用力; \mathbf{P}_{GS} 为钢框架结构受到的地震作用。

2.2 摆式电涡流 TMD 的力学模型

采用 Matlab 建立摆式电涡流 TMD 的力学模型,包括质量单元、刚度单元、阻尼单元。其中,质量单元和刚度单元简化为单摆模型,如图3所示,其切线方向的力平衡方程为

$$F_\tau = m_D a_\tau = m_D g \sin \varphi \quad (3)$$

法线方向的力平衡方程为

$$F_n = m_D a_n = m_D g \cos \varphi = m_D v^2 / L \quad (4)$$

式中: F_τ 为重力的切向分量; F_n 为重力的法向分量; m_D 为摆式电涡流 TMD 的质量; a_τ 为切向加速度; φ

为摆角; a_n 为法向加速度; v 为摆动速度; L 为摆长。

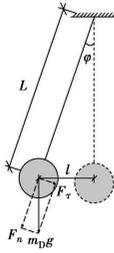


图3 摆式电涡流 TMD 的计算模型

Fig.3 Pendulum eddy current TMD Computational Model

地震过程中 φ 较小,且刚度单元回复力仅有重力的切向分量,即摆式电涡流 TMD 的初始刚度 k_D 为

$$k_D = m_D g \sin \varphi / l = m_D g / L \quad (5)$$

式中: l 为水平向振幅。

可得摆式电涡流 TMD 的摆长为

$$L = g / (2\pi f_D)^2 \quad (6)$$

式中: f_D 为摆式电涡流 TMD 自振频率。

摆式电涡流 TMD 的阻尼由感应电流产生,受磁感应强度 B 影响,故采用分子电流模型模拟阻尼单元,如图 4 所示。

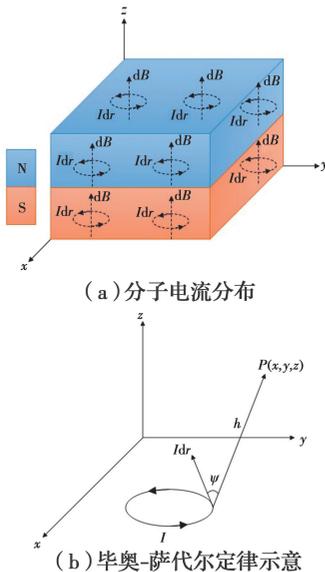


图4 分子电流模型^[16]

Fig.4 Magnetic induction intensity

在摆动过程中,永磁体与导磁板的间距为

$$h = h_0 + L \times (1 - \sqrt{1 - l^2 / L^2}) \quad (7)$$

式中: h_0 为初始间距。

由毕奥-萨伐尔定律和对永磁体进行体积积分得到导体板处的磁场强度 B 和摆式电涡流 TMD 的

阻尼系数 C_D ,如式(8)、式(9)所示

$$B = \int dB = \oint_L \frac{\mu_0 I \vec{dr} \times \vec{h}}{4\pi h^3} = \oint_L \frac{\mu_0 I dr \sin \psi}{4\pi h^2} \quad (8)$$

$$C_D = \sigma \times \int_V B^2 dV \quad (9)$$

式中: μ_0 为空气的导磁率; $I dr$ 为永磁体中的环流微元; ψ 为环流微元与导磁板任意一点 P 位置矢量的夹角; σ 为导磁板的导电率; V 为永磁体体积。

由式(7)~(9)可将 C_D 看作以 l 为自变量的函数 $f(l)$,在模拟过程中,通过 socket 程序向 OpenSEES 发送指令并求得 l ,利用分子电流模型结合毕奥-萨伐尔定律计算出导体板处的 B ,最后积分得到摆式电涡流 TMD 的 C_D 。至此,可得到摆式电涡流 TMD 的质量单元、刚度单元、阻尼单元,并可在 Matlab 中建立摆式电涡流 TMD 子系统。

3 结构模型设计及地震动记录选取

3.1 结构模型的建立

采用 OpenSEES 建立 5、10、20 层单榀钢框架结构模型,结构顶层放置摆式电涡流 TMD。钢框架结构的抗震设防烈度为 8 度(0.2g),场地类别为 II 类,设计地震分组为第 2 组。柱截面采用 HW428×407×20×35,梁截面采用 HN500×200×10×16。3 个结构模型的第 1 自振周期 T_1 为分别为 0.55、1.08、2.18 s。各楼层的恒荷载和活荷载分别为 23.53、6.60 kN/m,屋面的恒荷载和活荷载分别为 14.85、6.60 kN/m,如图 5 所示。

材料采用 Q345 钢,由 Steel 01 单元模拟。梁柱由 Displacement-Based Beam-Column 单元模拟,阻尼比为 3%,采用 Rayleigh 阻尼。结构进行时程分析时,仅考虑水平地震作用。

3.2 摆式电涡流 TMD 参数设计

在摆式电涡流 TMD 的设计中,质量为控制指标,通过简化摆式电涡流 TMD-钢框架结构模型,得到频率比、阻尼比与质量比的关系,如图 6 所示。

摆式电涡流 TMD-钢框架的运动方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s - c_D (\dot{x}_D - \dot{x}_s) - k_D (x_D - x_s) = \\ -m_s \ddot{x}_G + P(t) \\ m_D \ddot{x}_D + c_D (\dot{x}_D - \dot{x}_s) + k_D (x_D - x_s) = -m_D \ddot{x}_G \end{cases} \quad (10)$$

式中: m 、 c 、 k 为质量、阻尼和刚度; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 为位移、

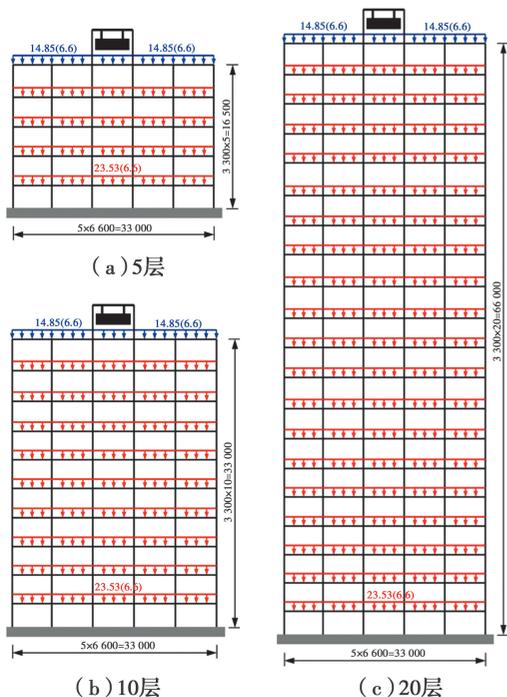


图5 结构模型及荷载分布

Fig. 5 Structural model and load distribution

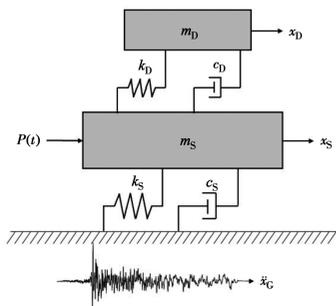


图6 摆式电涡流 TMD-钢框架计算模型

Fig. 6 SDOF structure and TMD computational model

速度和加速度; $P(t)$ 为钢框架结构受到的地震作用。

通过上述方程可求得 x_s 及地震作用 $P(t)$ 的频谱特性 $G(j\omega)$, 用 S_0 表示 $P(t)$ 的频谱密度, 根据 $G(j\omega)$ 求得钢框架结构位移 x_s 的频谱密度, 表示为 $S_1(\omega)$, 最后计算出钢框架结构的振动位移方差为

$$\sigma_x^2 = \frac{S_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega \quad (11)$$

对方差 σ_x^2 求极值: $\frac{d\sigma_x^2}{d\xi} = 0$, ξ 为钢框架阻尼比,

得到摆式电涡流 TMD 的频率比、阻尼比与质量比的关系为

$$\mu_f = \frac{\sqrt{1 + \mu_m/2}}{1 + \mu_m} \quad (12)$$

$$\mu_\xi = \sqrt{\frac{\mu_m(1 + 3\mu_m/4)}{4(1 + \mu_m)(1 + \mu_m/2)}} \quad (13)$$

式中: μ_f 为摆式电涡流 TMD 振动频率与钢框架结构一阶自振频率之比; μ_m 为摆式电涡流 TMD 质量与钢框架结构质量之比; μ_ξ 为摆式电涡流 TMD 提供的附加阻尼比。

根据式(12)和式(13)分别设计了 5 组摆式电涡流 TMD 模型, 具体参数如表 1 所示。

表 1 摆式电涡流 TMD 参数

Table 1 Design parameters of pendulum eddy current TMD

序号	$\mu_m / \%$	$\mu_f / \%$	$\mu_\xi / \%$
1	1	99.3	5.0
2	2	98.5	7.0
3	3	97.8	8.6
4	4	97.1	9.9
5	5	96.4	11.0

3.3 地震动记录的选取

按照《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011—2010)中有关地震动选取的要求, 从太平洋地震工程研究中心地震波数据库中选取了 11 条实际记录, 相关参数见表 2, 其加速度反应谱与规范反应谱的对比如图 7 所示。由图 7 可以看出, 平均反应谱分别在 3 个结构的 T_1 处与设计反应谱可较好地吻合。

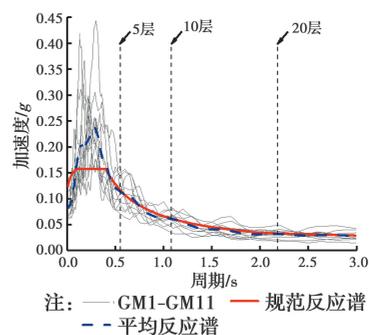


图7 加速度反应谱对比

Fig. 7 Comparison of response spectra

4 结构减震性能分析

将所选的 11 条地震动基于 PGA 调幅到《建筑结构抗震设计规范》(GB 50011—2010)中规定的罕遇地震加速度最大值, 并分别对 5、10、20 层摆式电涡流 TMD-钢框架结构进行动力时程分析, 以得到不同质量比 μ_m 的结构地震响应。

表 2 地震动记录参数

Table 2 Parameters of ground motion records

序号	NGA	地震动名称	震级	台站	分量	持时/s	PGA/g
GM1	163	Imperial Valley	6.5	Calipatria Fire Station	H-CAL225	39.635	0.257
GM2	1619	Duzce	7.1	Mudurnu	MDR000	28.825	0.444
GM3	1626	Sitka	7.7	Sitka Observatory	212V5090	55.095	0.312
GM4	2111	Denali	7.9	R109 (temp)	R109-90	73.000	0.260
GM5	2752	Chi-Chi	6.2	CHY101	CHY101E	90.000	0.203
GM6	5836	El Mayor-Cucapah	7.2	Meloland Geot. Array	EMO270	87.495	0.419
GM7	5990	El Mayor-Cucapah	7.2	El Centro Array #7	E07090	273.000	0.323
GM8	6879	Darfield	7.0	ADCS	ADCSN42W	150.000	0.256
GM9	6896	Darfield	7.0	DORC	DORCN20W	61.950	0.203
GM10	6933	Darfield	7.0	MAYC	MAYCN14E	54.250	0.287
GM11	8597	El Mayor-Cucapah	7.2	Sam W. Stewart	CISWSHNE	200.010	0.306

4.1 层位移和层间位移角

将不同 μ_m 、不同层数结构在罕遇地震作用下的层位移和层间位移角进行对比,如图 8 和图 9 所示。比较 5、10、20 层结构的时程分析结果可知,最大位移均出现在结构顶层,最大层间位移角均出现在各结构的中低部,且在不同质量比下的变化趋势相似,说明摆式电涡流 TMD 的设置并未改变框架结构剪切变形的特点。同时,结构在设置摆式电涡流 TMD 后,其位移响应显著降低。

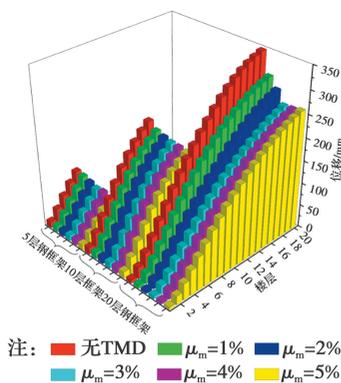


图 8 不同质量比下的层位移

Fig. 8 Story drift under different mass ratios

顶层位移和最大层间位移角见表 3。由表 3 可知,当 μ_m 为 1% 时,结构顶层位移分别减小 2.0%、

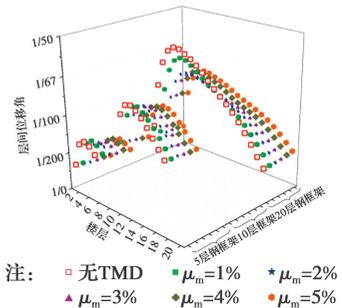


图 9 不同质量比下的层间位移角

Fig. 9 Interstory drift ratio under different mass ratios

6.3%、13.2%,最大层间位移角分别减小 3.4%、4.9%、9.0%,随着 μ_m 继续增大,顶层位移减小率分别维持在 10.2%、11.0%、25.9% 左右,最大层间位移角减小率分别维持在 17.5%、20.7%、27.4% 左右。总体来看,结构高度越高,减震效果越明显。其中,当结构层数为 20 层时, μ_m 为 3% 时的顶层位移相较于 μ_m 为 1% 时减小 15.2%,但 μ_m 为 5% 时的顶层位移相较于 μ_m 为 3% 时反而增大了 1.6%,这是由于 μ_m 的增大引起了水平地震作用的增大,且摆式电涡流 TMD 设置在结构顶层,鞭梢效应进一步增大了结构的位移响应,导致其减震效果并未随着 μ_m 的增大而发生明显变化,由此可见 μ_m 并非越大越好。

表 3 顶层位移和最大层间位移角

Table 3 Top story drift and maximum interstory drift ratios

μ_m	顶层位移/mm			最大层间位移角		
	5层	10层	20层	5层	10层	20层
无 TMD	98	224	348	1/141	1/98	1/61
1%	96	210	302	1/146	1/108	1/67
2%	93	205	281	1/160	1/110	1/80
3%	90	201	256	1/170	1/120	1/84
4%	88	200	257	1/166	1/124	1/82
5%	86	197	260	1/177	1/127	1/84

4.2 层剪力

将不同 μ_m 、不同层数结构在罕遇地震作用下的层剪力进行对比,如图 10 所示。由图 10 可知,当结构高度较低时,摆式电涡流 TMD 对层剪力的减震效果并不明显,随着结构高度的增加,减震效果逐渐明显。这是由于摆式电涡流 TMD 的电磁阻尼力需要通过永磁体与导体板(连同调谐质量块)的相对运动产生,其相对运动又是由结构响应导致的。换言之,结构响应越大,相对运动越显著,产生的电磁阻尼力也就越大。因此,楼层数较少的结构相较于楼层数较多的结构,其层剪力的减震效果也就越不明显。随着 μ_m 的增加,各结构的减震效果逐渐增大。其中,当结构层数为 20 层时, μ_m 为 3% 时的顶层剪力相较于 μ_m 为 1% 时减小了 2.7%,而 μ_m 为 5% 时的顶层剪力相较于 $\mu_m = 3%$ 时仅减小 1.7%,也进一步验证了前面的结论。同时,当以层剪力为减震指标时,需考虑摆式电涡流 TMD 的质量过大带来的影响。

不同 μ_m 下的基底剪力见表 4。由表 4 可知, $\mu_m = 1%$ 时,基底剪力分别减小 0.7%、1.3%、2.8%,但 μ_m 大于 3% 后,基底剪力减小率维持在 3.7%、2.2%、6.0% 左右,减小趋势不明显。这也是由于水平地震作用的增大和鞭梢效应的共同作用,导致了 μ_m 的增大对层剪力的减震效果并不明显。

4.3 层加速度

不同 μ_m 、不同层数结构的层加速度对比见图 11。由图 11 可知,最大加速度均出现在结构顶层。

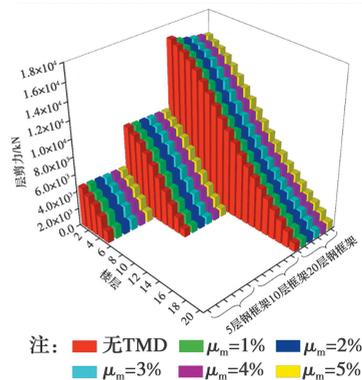


图 10 不同质量比下的层剪力

Fig. 10 Story shear under different mass ratios

其中,无摆式电涡流 TMD 的结构层加速度最大,说明摆式电涡流 TMD 能够控制结构加速度响应,且随着 μ_m 的增大,加速度响应逐渐减小,但对比层位移和层间位移角,其对于加速度的减震效果并不明显。将同一 μ_m 、不同层数结构在罕遇地震作用下的层加速度变化趋势进行对比可知,随着楼层数的增加,结构高阶振型的质量参与系数逐渐增大,导致楼层数较多的结构相较于楼层数较少的结构,其加速度并非逐层增加。但基于结构一阶振型设计的摆式电涡流 TMD 仍能对各个振型的加速度加以控制,使结构的层加速度响应变化趋势与原结构仍保持一致,并随着 μ_m 的增大逐渐减小。

表 4 不同质量比下的基底剪力

Table 4 Base shear force under different mass ratios

μ_m	基底剪力/kN		
	5层	10层	20层
无 TMD	4 650	9 095	16 696
1%	4 617	8 979	16 229
2%	4 572	8 937	15 970
3%	4 513	8 924	15 830
4%	4 471	8 886	15 683
5%	4 455	8 869	15 549

4.4 减震率

为定量分析摆式电涡流 TMD 的减震性能,得出 μ_m 的合理取值范围,提出了公式(14)。

$$\zeta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_{ij} - r_{ij}}{R_{ij}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: ζ_j 为减震率; j 为不同的地震响应指标(d 为层

位移, θ 为层间位移角, s 为层剪力, a 为层加速度); i 为楼层; n 为总楼层数; R 为无摆式电涡流 TMD 时的结构地震响应; r 为设置摆式电涡流 TMD 后的结构地震响应。

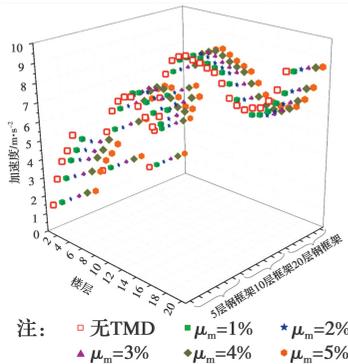


图 11 不同质量比下的层加速度

Fig. 11 Story acceleration under different mass ratios

以 20 层钢框架结构为对象,按式(14),分别对层位移、层间位移角、层剪力、层加速度等 4 个指标分别进行减震率计算,见表 5。由表 5 可知,摆式电涡流 TMD 对层位移和层间位移角的减震效果最好,对层剪力和层加速度的减震效果较差。其中, ζ_d 的平均值在 22.4% 左右, ζ_θ 的平均值在 17.8% 左右。

表 5 不同质量比下 20 层结构的减震率

Table 5 Seismic reduction ratio of twenty story structure under different mass ratios %

μ_m	ζ_d	ζ_θ	ζ_s	ζ_a
1	11.1	9.8	2.5	4.3
2	21.8	17.5	3.6	6.4
3	26.5	20.9	4.3	7.3
4	26.5	20.3	5.0	8.3
5	25.9	20.5	5.4	9.3

从图 12 可知,当 μ_m 小于 3% 时,20 层结构的各减震率随着 μ_m 的增大而逐渐增大,且上升趋势明显。但在 μ_m 大于 3% 后, ζ_s 和 ζ_a 增长放缓,而 ζ_d 和 ζ_θ 的减震率呈下降趋势,这说明摆式电涡流 TMD 的减震性能随着 μ_m 的增大而趋于平缓,甚至降低。这是因为摆式电涡流 TMD 在地震作用下的响应存在滞后性,同时质量的增加会带来水平地震作用的增加以及鞭梢效应的加重,引起结构的地震响应更

加剧烈,降低了摆式电涡流 TMD 的减震效果。

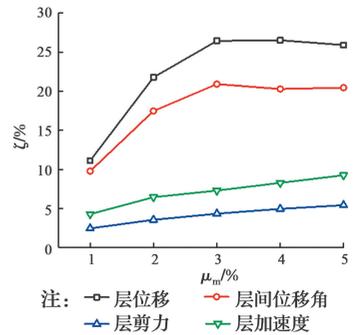


图 12 20 层结构的减震率-质量比关系曲线

Fig. 12 Relationship of Seismic reduction ratio and mass ratios of twenty story structure

5 结论

为研究摆式电涡流 TMD 对建筑结构的减震性能,提出了基于联合仿真的耦合计算方法,建立了 5、10、20 层钢框架结构模型,选取了 11 条地震动记录,比较了不同质量比的摆式电涡流 TMD-钢框架结构在罕遇地震作用下的响应,得到以下结论:

1) 基于联合仿真的耦合计算方法既能模拟钢框架结构在地震作用下的响应,又能模拟摆式电涡流 TMD 阻尼的时变过程,且计算流程简单直观,能够用于摆式电涡流 TMD 与钢框架结构的减震分析。

2) 通过减震分析,摆式电涡流 TMD 能够减小钢框架结构的地震响应,结构越高,减震效果越好,且合理质量比建议为 3%。其中,20 层钢框架结构的层位移、层间位移角、层剪力和层加速度分别减小了 26.5%、20.9%、4.3%、7.3%。摆式电涡流 TMD 对钢框架结构层位移和层间位移角的减震效果较好。

3) 当质量比小于 3% 时,各指标的减震率随着质量比的增大而明显增加;当质量比大于 3% 后,虽层剪力和层加速度的减震率会随着质量比的增大而略微增大,但层位移和层间位移角的减震率会明显减小。建议在摆式电涡流 TMD 的减震设计过程中,宜根据减震指标的不同,选择合适的质量比。

参考文献:

[1] VARELA W D, BATTISTA R C. Control of

- vibrations induced by people walking on large span composite floor decks [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(9): 2485-2494.
- [2] 潘毅, 王双旭, 郭瑞, 等. 行人扶梯荷载作用下悬挑楼盖的振动测试与舒适度评价[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(3): 85-95.
- PAN Y, WANG S X, GUO R, et al. Vibration test and comfort evaluation of cantilever floor under pedestrian-escalator load [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(3): 85-95. (in Chinese)
- [3] 国巍, 曾晨, 潘毅, 等. 基于增量动力分析法的高层建筑-阻尼器系统地震易损性分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(4): 59-68.
- GUO W, ZENG C, PAN Y, et al. IDA based seismic fragility analysis of high-rise building-damper system [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(4): 59-68. (in Chinese)
- [4] 陈政清, 黄智文, 王建辉, 等. 桥梁用 TMD 的基本要求与电涡流 TMD[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(8): 6-10.
- CHEN Z Q, HUANG Z W, WANG J H, et al. Basic requirements of tuned mass damper for bridges and the eddy current TMD [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(8): 6-10. (in Chinese)
- [5] 李爱群, 陈鑫, 张志强. 大跨楼盖结构减振设计与分析[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(6): 160-170.
- LI A Q, CHEN X, ZHANG Z Q. Design and analysis on vibration control of long-span floor structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 160-170. (in Chinese)
- [6] FUJINO Y, YOSHIDA Y. Wind-induced vibration and control of trans-Tokyo bay crossing bridge [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(8): 1012-1025.
- [7] 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): 144-154.
- XU H B, OU J P. Design method for wind-induced vibration control of high-rise buildings with hybrid tuned mass dampers [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 144-154. (in Chinese)
- [8] 叶献国, 蒋庆, 卢文胜, 等. 钢筋混凝土巨型框架结构及附单向 TMD 装置的减震结构振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(2): 1-7.
- YE X G, JIANG Q, LU W S, et al. Shaking table model test analysis of a reinforced concrete mega-frame structure without and with TMD [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(2): 1-7. (in Chinese)
- [9] 秦丽, 彭凌云, 李业学. 变摩擦系数式变摩擦 TMD 及其减震控制效果研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(11): 81-88.
- QIN L, PENG L Y, LI Y X. Study on variable friction TMD with friction coefficient changeable and its seismic control effectiveness [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(11): 81-88. (in Chinese)
- [10] 高剑, 王忠凯, 潘毅, 等. 罕遇地震下石化钢结构减震的关键影响因素[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(1): 92-99.
- GAO J, WANG Z K, PAN Y, et al. Influence factors of vibration reduction in petrochemical steel structure under rare earthquake [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(1): 92-99. (in Chinese)
- [11] WANG Z H, CHEN Z Q, WANG J H. Feasibility study of a large-scale tuned mass damper with eddy current damping mechanism [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 11(3): 391-401.
- [12] BAE J S, HWANG J H, ROH J H, et al. Vibration suppression of a cantilever beam using magnetically tuned-mass-damper [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(26): 5669-5684.
- [13] BOURQUIN F, CARUSO G, PEIGNEY M, et al. Magnetically tuned mass dampers for optimal vibration damping of large structures [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(8): 085009.
- [14] LU Z, HUANG B, ZHANG Q, et al. Experimental and analytical study on vibration control effects of eddy-current tuned mass dampers under seismic excitations [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 421: 153-165.
- [15] LU Z, WANG D C, ZHOU Y. Experimental

- parametric study on wind-induced vibration control of particle tuned mass damper on a benchmark high-rise building [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017, 26(8): e1359.
- [16] 汪志昊, 陈政清. 永磁式电涡流调谐质量阻尼器的研制与性能试验[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(3): 374-379.
- WANG Z H, CHEN Z Q. Development and performance tests of an eddy-current tuned mass damper with permanent magnets [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26(3): 374-379. (in Chinese)
- [17] 汪志昊, 华旭刚, 陈政清, 等. 基于微型永电磁式涡流阻尼 TMD 的人行桥模型减振试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(20): 129-132, 139.
- WANG Z H, HUA X G, CHEN Z Q, et al. Experimental study on vibration control of a model footbridge by a tiny eddy-current tuned mass damper with permanent magnets [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(20): 129-132, 139. (in Chinese)
- [18] 田晴, 赵崇锦, 王忠凯, 等. 新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 38(Sup2): 30-34.
- TIAN Q, ZHAO C J, WANG Z K, et al. Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 38(Sup2): 30-34. (in Chinese)
- [19] 雷旭, 牛华伟, 陈政清, 等. 大跨度钢拱桥吊杆减振的新型电涡流 TMD 开发与应用[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(4): 60-68, 85.
- LEI X, NIU H W, CHEN Z Q, et al. Development and application of a new-type eddy current TMD for vibration control of hangers of long-span steel arch bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(4): 60-68, 85. (in Chinese)
- [20] 宋伟宁, 徐斌. 上海中心大厦新型阻尼器效能与安全研究[J]. *建筑结构*, 2016, 46(1): 1-8.
- SONG W N, XU B. Research on performance and safety of innovated damper for Shanghai Tower [J]. *Building Structure*, 2016, 46(1): 1-8. (in Chinese)

(编辑 胡玲)