

附加不同形式调谐质量惯容系统的高耸烟囱 轻量化减震控制

张 力^{1,2}, 张瑞甫^{1,2}, 薛松涛^{2,3}, 谢丽宇²

(1. 同济大学土木工程学院土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学土木工程学院结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 3. 日本东北工业大学建筑系, 仙台 982-8577)

摘要: 附加调谐质量阻尼器是烟囱结构的一种传统减震控制方法, 然而其通常需要较大的附加质量及额外的安装空间, 这为施工安装带来不便。本文提出附加调谐质量惯容系统(TMIS)控制高耸烟囱的地震响应, 以利用惯容元件的表观质量效果实现轻量化减震目标。同时, 考虑烟囱高阶模态对其地震响应不容忽视的影响, 提出沿烟囱高度布置的分布式 TMIS 以实现多模态控制效果。建立了基于两种不同惯容子系统的 TMIS 力学模型及相应的附加分布式 TMIS 烟囱运动方程。以金井清谱为随机地震激励输入, 并基于改进的定点理论提出了分布式 TMIS 的部分设计参数简化假设, 提出了基于需求的分布式 TMIS 烟囱结构多模态优化设计方法。通过实例验证了所建议设计方法的有效性, 并对比检验了分布式 TMIS 的轻量化及多模态控制效果, 通过参数分析检验了所采用的改进定点理论简化的合理性。结果表明: 所建议的设计方法可以按照预定目标发挥两种分布式 TMIS 的减震性能, 两种分布式 TMIS 均显示了明显的轻量化减震效果。

关键词: 减震; 惯容; 烟囱; 多模态控制; 调谐

中图分类号: TU352.1; TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)03-0464-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.03.011

引 言

烟囱结构是工业建筑中排放烟气的重要构筑物, 其安全性对于生产生活及社会经济具有重要意义^[1]。然而, 过去数十年间的震害调查表明, 作为一种高耸细长型结构, 烟囱在地震作用下极易发生破坏, 直接或间接造成了巨大的经济损失^[2-4]。针对高耸结构的抗震性能提升问题, 已有学者建议了如附加拉索阻尼器^[5]、黏滞阻尼器^[6]及调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, TMD)^[7]等减震方案, 而对于烟囱这类高耸特种结构而言, 使用 TMD 的减震方案更为常见。Brownjohn 等^[8]基于实时性能监测系统的监测数据验证了顶部附加 TMD 的 183 m 烟囱结构的减震有效性。Longarini 等^[9]则通过有限元模拟分析了顶部悬挂 TMD 烟囱结构的减震性能提升效果。Elias 等^[10]建议了沿烟囱高度方向分布式布置 TMD 的减震方案, 以应对高耸烟囱的高阶模态在结构地震响应中比重较大的问题。其分析结果表明, 对比单个 TMD 烟囱减震结构, 附加分布式

TMD 的烟囱减震效果更佳。尽管相关研究已证明附加 TMD 可有效抑制烟囱地震响应, 但是 TMD 所需要的调谐质量往往较大, 从施工安装及检修更换的角度而言往往会带来不便。

近年来, 具有表观质量放大效果的惯容减震技术受到了学者们的重点关注^[11-14]。惯容元件是一种两端点的加速度相关型控制元件, 其通过相关机制可将装置两端点间的运动转化为数千倍于装置自身物理质量的表观质量^[14-16]。相较于惯容装置的表观质量, 其自身的物理质量可忽略不计。以惯容为核心控制元件的减震装置称为惯容系统, 可从惯性、刚度及阻尼三个方面对结构的动力特性进行灵活调整, 具有表观质量放大及阻尼增效等特征^[16-18]。通过将惯容系统引入调谐减震装置, 利用惯容的表观质量效果替代部分调谐质量的功能而不增加减震装置的附加物理质量, 从而提供了一种轻量化的减震方式^[19]。Garrido 等^[20]通过将 TMD 中的阻尼元件替换为惯容系统, 提出了旋转惯性双调谐质量阻尼器 (Rotational Inertia Double Tuned Mass Damper, RIDTMD), 并通过分析表明同等质量情况下

收稿日期: 2022-08-30; **修订日期:** 2022-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978525); 政府间国际科技创新合作重点专项 (2021YFE0112200); 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项 (2020EEEEVL0401, 2019EEVL03)。

RIDTMD的减震效果优于经典的TMD。Marian等^[21]将接地的惯容与TMD相连,提出了调谐质量阻尼惯容器(Tuned Mass Damper Inerter, TMDI)以实现轻量化减震。需要指出的是,TMDI中惯容接地的做法使得惯容元件退化为绝对加速度相关的普通质量元件,相当于舍弃了惯容两端点惯性特征的重要特点,其力学原理与TMD没有本质的区别,且接地的安装形式具有一定的局限性^[19]。在Garrido等^[20]关于RIDTMD的研究中未明确该装置的轻量化特点,张瑞甫等^[19]在RIDTMD的基础上结合不同的惯容系统提出具有轻量化特性的广义调谐质量惯容系统(Tuned Mass Inerter System, TMIS),并结合单自由度体系提出了基于需求的设计方法。杨涵等^[22]将TMIS用于烟囱结构的风振控制,分析表明TMIS相较于经典的TMD具有更高的减振效率。但该研究并未考虑烟囱的高阶模态影响。Zhang等^[23]考虑了烟囱的高阶模态影响,将TMIS用于烟囱结构地震响应的多模态减震设计。然而,以上研究仅采用单一形式的TMIS,未对比不同形式TMIS的减震性能,且地震激励采用简单的白噪声假设,未考虑场地影响。

针对以上问题,本文建议在烟囱上附加分布式TMIS以实现其地震响应的轻量化多模态减震控制。采用具有不同力学拓扑形式的混联型惯容子系统的调谐质量惯容系统(TMIS),建立了附加分布式TMIS烟囱减震结构的运动方程。为实现轻量化减震效果,以随机均方意义下调谐质量最小化为目标,提出了基于需求的不同形式TMIS烟囱减震结构轻量化优化控制设计流程。以某烟囱结构为算例,对比分析了不同力学拓扑形式下TMIS的轻量化减震效果,验证了所建议设计方法轻量化及多模态控制的有效性。

1 理论基础

1.1 调谐质量惯容系统(TMIS)力学模型

作为惯容系统中的核心部件,惯容元件的力学模型示意图可见图1,其出力 F_m 与两端点间的相对加速度成正比,表示为:

$$F_m = m_m(\ddot{u}_1 - \ddot{u}_2) \quad (1)$$

式中 m_m 为惯容系数(或表观质量),其量纲同质量; \ddot{u}_1 和 \ddot{u}_2 分别表示惯容元件的左端点和右端点加速度。

得益于惯容元件的表观质量效果,其可在不显著增大主体结构物理质量的前提下改变结构惯性特征,吸收结构振动能量。基于此特征,惯容系统可结

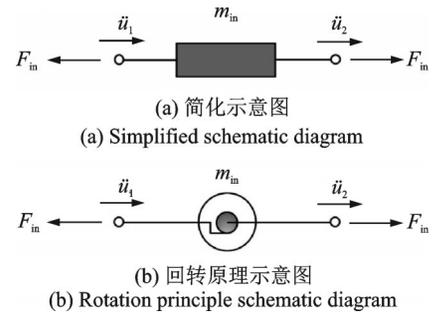


图1 惯容元件的力学模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the mechanical model of inerter element

合传统的调谐质量减震装置使用,利用其表观质量放大特性显著降低调谐质量的需求,从而达到轻量化减震目的。采用惯容子系统替换经典TMD中的阻尼元件,图2给出了基于两类混联型惯容子系统的调谐质量惯容系统(TMIS)的力学模型。其中, k_t 为调谐弹簧的刚度; m_t 为调谐质量; c_d 和 k_s 分别为惯容子系统中阻尼元件的阻尼系数和弹簧刚度; x_0 和 x_t 分别为TMIS的左端点和调谐质量的绝对位移; x_s 为惯容子系统中弹簧左端点的绝对位移。不同于经典TMD中的阻尼元件,图2所示TMIS中的混联型惯容子系统同时具备能量吸收及耗散效果,进而提供高效的减震控制效果。

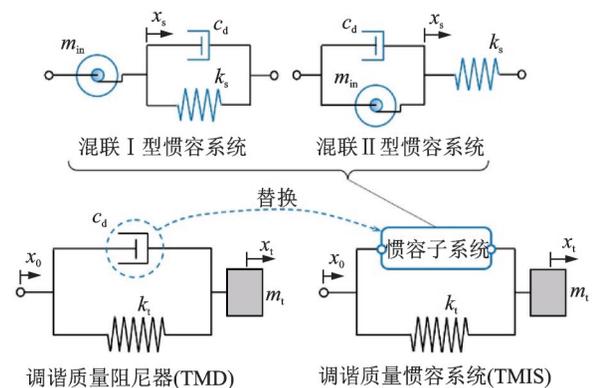


图2 调谐质量惯容系统(TMIS)力学模型

Fig. 2 Mechanical model of Tuned Mass Inerter System (TMIS)

图2中TMIS的总出力 F_t 为:

$$F_t = F_s + k_s(x_t - x_0) \quad (2)$$

式中 F_s 为惯容子系统的出力,对于混联 I 型惯容系统(SPIS-I)表示为:

$$F_s = c_d(\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_s(x_t - x_s) = m_m(\ddot{x}_s - \ddot{x}_0) \quad (3)$$

对于混联 II 型惯容系统(SPIS-II)表示为:

$$F_s = k_s(x_t - x_s) = c_d(\dot{x}_s - \dot{x}_0) + m_m(\ddot{x}_s - \ddot{x}_0) \quad (4)$$

1.2 附加分布式TMIS烟囱结构运动方程

本文通过在烟囱上附加TMIS以达到轻量化减

震性能提升的目的,考虑到地震作用下高耸烟囱的高阶模态对其动力响应的影响不容忽视,进而建议沿烟囱高度方向布置分布式 TMIS 以达到多模态控制效果。拟采用 n 个 TMIS 控制烟囱结构的前 n 阶模态,基于两类不同惯容子系统的分布式 TMIS 烟囱减震结构力学模型可见图 3。图 3 中 D_1 和 D_N 分别为烟囱底部和顶部的截面直径, H 为烟囱高度。针对烟囱主体结构,本研究采用集中质量模型模拟其动力行为,其示意图如图 3(b) 所示。结构的质量矩阵 M_p^s 及刚度矩阵 K_p^s 通过二维梁单元的单元质量矩阵 M_p^e

及刚度矩阵 K_p^e 进行叠加获得。同时为简化计算,采用静力缩聚方法对烟囱结构的转动自由度 θ_j 进行缩减而仅保留平动自由度,进而得到缩聚后的结构质量矩阵 M_p 及刚度矩阵 K_p 。结构的阻尼矩阵 C_p 则通过瑞利法获得。烟囱原结构的运动方程表示为:

$$M_p \ddot{x} + C_p \dot{x} + K_p x = -M_p \tau_p \ddot{x}_g \quad (5)$$

式中 $x = \{x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N\}^T$ 为烟囱的节点位移矢量; \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为对应节点的速度和加速度矢量; $\tau_p = \{1 \ 1 \ \dots \ 1\}^T$ 为影响系数矢量; \ddot{x}_g 为地面运动加速度。

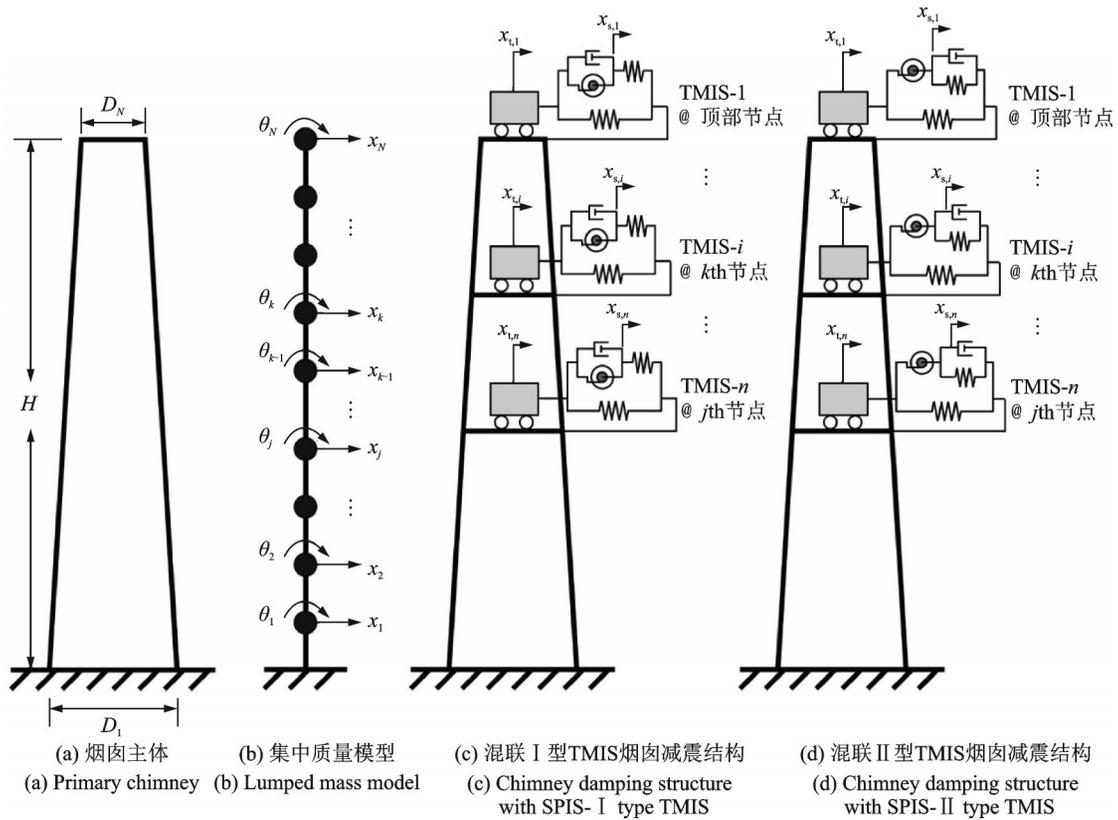


图3 附加两类分布式 TMIS 烟囱减震结构力学模型

Fig. 3 Mechanical models of chimneys damping structure with two kinds of distributed TMISs

需要指出的是,尽管以下分析是基于二维结构进行的,但相关分析方法与结果是适用于实际的三维烟囱结构的。在 TMIS 装置的实际应用中,相关参数应根据最不利方向的二维分析结果获得,调谐质量块应为围绕烟囱外筒壁设置的质量环,弹簧、阻尼及惯容部件则应均匀分布于质量环与烟囱外筒壁之间。考虑分布式 TMIS 烟囱减震结构的动力平衡,可求得结构运动方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -M_g \tau \ddot{x}_g \quad (6)$$

式中 M , C 和 K 分别为分布式 TMIS 烟囱减震结构的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{X} , \dot{X} 和 X 分别为烟囱减震结构的加速度、速度和位移矢量; M_g 为对应于地面运动等效惯性的质量矩阵; τ 为烟囱减震结构影响系数矢量。

对于分布式 TMIS 烟囱减震结构,以上矩阵及矢量可分别表示为:

$$M = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_{I1} \end{bmatrix}_{(N+2n) \times (N+2n)} \quad (7)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_p + C_{111} & C_{112} \\ C_{121} & C_{122} \end{bmatrix}_{(N+2n) \times (N+2n)} \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_p + K_{111} & K_{112} \\ K_{121} & K_{122} \end{bmatrix}_{(N+2n) \times (N+2n)} \quad (9)$$

$$M_g = \begin{bmatrix} M_p & 0 \\ 0 & M_T \end{bmatrix}_{(N+2n) \times (N+2n)} \quad (10)$$

$$X = \{x_1 \ \dots \ x_N \ x_{t,1} \ x_{s,1} \ \dots \ x_{s,n} \ x_{t,n}\} \quad (11)$$

$$\tau = \{\tau_p \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0\}^T \quad (12)$$

当烟囱附加的分布式 TMIS 中采用混联 I 型惯

容子系统时,式(7)~(10)中相关的分块矩阵可分别表示为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} m_{in,1} + m_{t,1} & -m_{in,1} & \cdots & 0 & 0 \\ -m_{in,1} & m_{in,1} & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \\ 0 & \cdots & & m_{in,n} + m_{t,n} & -m_{in,n} \\ 0 & \cdots & & -m_{in,n} & m_{in,n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (13)$$

$$C_{111} = [\chi_1 \ \chi_2 \ \cdots \ \chi_n] \cdot \text{diag}\{c_{d,1} \ c_{d,2} \ \cdots \ c_{d,n}\} \cdot [\chi_1 \ \chi_2 \ \cdots \ \chi_n]^T \quad (14)$$

$$C_{112} = [0_{N \times 1} \ \chi_1 \ 0_{N \times 1} \ \chi_2 \ \cdots \ 0_{N \times 1} \ \chi_n] \cdot \text{diag}\{0 \ -c_{d,1} \ 0 \ -c_{d,2} \ \cdots \ 0 \ -c_{d,n}\}, C_{121} = C_{112}^T \quad (15)$$

$$C_{122} = \text{diag}\{0 \ c_{d,1} \ 0 \ c_{d,2} \ \cdots \ 0 \ c_{d,n}\} \quad (16)$$

$$K_{111} = [\chi_1 \ \chi_2 \ \cdots \ \chi_n] \cdot \text{diag}\{k_{t,1} + k_{s,1} \ k_{t,2} + k_{s,2} \ \cdots \ k_{t,n} + k_{s,n}\} \cdot [\chi_1 \ \chi_2 \ \cdots \ \chi_n]^T \quad (17)$$

$$K_{112} = [\chi_1 \ \chi_1 \ \chi_2 \ \chi_2 \ \cdots \ \chi_n \ \chi_n] \cdot \text{diag}\{-k_{t,1} \ -k_{s,1} \ -k_{t,2} \ -k_{s,2} \ \cdots \ -k_{t,n} \ -k_{s,n}\}, K_{121} = K_{112}^T \quad (18)$$

$$K_{122} = \text{diag}\{k_{t,1} \ k_{s,1} \ k_{t,2} \ k_{s,2} \ \cdots \ k_{t,n} \ k_{s,n}\} \quad (19)$$

$$M_T = \text{diag}\{m_{t,1} \ 0 \ m_{t,2} \ 0 \ \cdots \ m_{t,n} \ 0\} \quad (20)$$

式(14)~(18)中的列向量 χ_i 表示烟囱上第*i*个TMIS的位置指示向量,其第*i*个元素为1,其余元素均为0。 χ_n 表示第*n*个TMIS的位置指示向量,*n*为附加的TMIS总个数。

根据图3(c)和(d)可知,分布式TMIS烟囱减震结构中混联I型惯容子系统与混联II型惯容子系统的力学拓扑形式仅阻尼元件的相对位置发生了变化,其余力学元件位置均相同。因此,分布式混联II型TMIS烟囱减震结构的 M, K 及 M_g 矩阵与分布式混联I型TMIS烟囱减震结构相同,可根据式(13)及式(17)~(20)分别计算相应的分块矩阵,而其对应的 C 矩阵中的分块矩阵可分别表示为:

$$C_{111} = 0_{N \times N} \quad (21)$$

$$C_{112} = 0_{N \times 2n}, C_{121} = C_{112}^T \quad (22)$$

$$C_{122} = \begin{bmatrix} c_{d,1} & c_{d,1} & \cdots & 0 & 0 \\ c_{d,1} & c_{d,1} & & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \\ 0 & \cdots & & c_{d,n} & c_{d,n} \\ 0 & \cdots & & c_{d,n} & c_{d,n} \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (23)$$

1.3 结构体系响应计算

本文考虑地面激励的随机特性进行烟囱减震结构的优化设计,随机地震动激励采用经典的金井清谱^[24],其功率谱密度函数表示为:

$$S_g(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega^2 \omega_g^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega^2 \omega_g^2} S_0 \quad (24)$$

式中 ω 为激励频率; ω_g 和 ζ_g 分别表示结构场地的频率和阻尼比; S_0 表示基岩白噪声激励的谱强度。对于硬土场地, ω_g 和 ζ_g 可分别取15 rad/s和0.6;而对于软土场地, ω_g 和 ζ_g 则可分别取5 rad/s和0.2。

式(24)的状态空间形式可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_q = A_q x_q + E_q u \\ \ddot{x}_g = C_q x_q \end{cases} \quad (25)$$

式中 u 表示零均值的基岩高斯白噪声时程; x_q 为状态向量; A_q, E_q 和 C_q 为状态矩阵,可分别表示为:

$$A_q = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$E_q = [0 \ 1]^T \quad (27)$$

$$C_q = [-\omega_g^2 \ -2\zeta_g \omega_g] \quad (28)$$

为方便求解结构的随机响应,重写式(6)获得分布式TMIS烟囱减震结构的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_s = A_s x_s + E_s \ddot{x}_g \\ z_s = C_s x_s \end{cases} \quad (29)$$

式中 $x_s = [X^T \ \dot{X}^T]^T$ 为烟囱减震结构位移及速度的状态矢量; z_s 为烟囱减震结构位移响应的输出矢量; A_s, E_s 和 C_s 为相关的结构状态矩阵,可分别根据以下公式求得:

$$A_s = \begin{bmatrix} 0_{N+2n} & I_{N+2n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$E_s = \begin{bmatrix} 0_{(N+2n) \times 1} \\ -M^{-1}M_g \tau \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$C_s = [I_{N+2n} \ 0_{N+2n}] \quad (32)$$

将式(25)与(29)结合,可得到考虑金井清谱的烟囱减震结构的扩展状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Eu \\ z = C_z x \end{cases} \quad (33)$$

式中 $x = [x_s^T \ x_q^T]^T$ 为状态矢量; z 为响应输出矢量; A, E 和 C_z 为结构状态矩阵,可分别表示为:

$$A = \begin{bmatrix} A_s & E_s C_q \\ 0_{2 \times (N+2n)} & A_q \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0_{(N+2n) \times 1} \\ E_q \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$C_z = \begin{bmatrix} C_s & 0_{(N+2n) \times 2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

于是,结构响应输出矢量 z 的协方差矩阵 K_z 可表示为:

$$K_z = C_z P C_z^T \quad (37)$$

式中 矩阵 P 为状态协方差矩阵,可通过求解下式的李雅普诺夫方程获得:

$$AP + PA + 2\pi S_0 E E^T = 0 \quad (38)$$

协方差矩阵 K_z 中包含烟囱减震结构所有节点的位移随机响应,其第 j 个对角线元素的平方根即结构第 j 个节点位移响应的均方根 $\sigma_{z,j}$,表示为:

$$\sigma_{z,j} = \mathbf{n}_j^T K_z \mathbf{n}_j \quad (39)$$

式中 \mathbf{n}_j 为第 j 个元素为 1、其余元素为 0 的位置向量。

2 减震控制设计方法

2.1 设计参数

对于采用分布式 TMIS 进行多模态控制的烟囱减震结构,需要确定所布置的 TMIS 的位置。本文建议根据模态分析所得的结构振型确定 TMIS 的布置位置,布置原则为:(1)所控制的结构每阶模态均对应单个不同的 TMIS;(2)控制结构第 i 阶模态的第 i 个 TMIS 应布置于结构第 i 阶振型幅值最大或较大的节点上;(3)为避免单个位置的减震装置较重,用于控制不同阶结构模态的 TMIS 不布置于同一位置,即根据不同阶模态振型最大幅值所确定的位置若相同,则对应控制更高阶模态的 TMIS 应布置于振型幅值仅次于其最大幅值的节点。

在确定分布式 TMIS 的布置位置之后,还需确定所布置各 TMIS 的设计参数。为方便使用,定义第 i 个 TMIS 的无量纲化参数:

$$\begin{aligned} \mu_{t,i} &= \frac{m_{t,i}}{M_{\text{eq},i}}, \mu_{\text{in},i} = \frac{m_{\text{in},i}}{m_{t,i}}, \lambda_{s,i} = \frac{\omega_{s,i}}{\omega_{t,i}}, \\ \lambda_{t,i} &= \frac{\omega_{t,i}}{\omega_i}, \zeta_{d,i} = \frac{c_{d,i}}{2\sqrt{m_{t,i}k_{t,i}}} \end{aligned} \quad (40)$$

式中 $\mu_{t,i}, \mu_{\text{in},i}, \lambda_{s,i}, \lambda_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 分别为第 i 个 TMIS 的调谐质量比、惯质比、内部频率比、名义自振频率比和名义阻尼比; $\omega_{s,i} = \sqrt{k_{s,i}/m_{\text{in},i}}$ 为惯容子系统的名义频率; $\omega_{t,i} = \sqrt{k_{t,i}/m_{t,i}}$ 为第 i 个 TMIS 的名义频率; ω_i 为烟囱结构第 i 阶自振频率; $M_{\text{eq},i} = \mathbf{f}_{\text{nor},i}^T \mathbf{M}_p \mathbf{f}_{\text{nor},i}$ 为结构第 i 阶模态质量; $\mathbf{f}_{\text{nor},i}$ 为归一化的结构第 i 阶振型,可通过令第 i 个 TMIS 安装节点的振型幅值为单位 1 确定。

由图 3 可知,针对所安装的分布式 TMIS,需要确定的设计参数数目为 $5n$ 。为简化优化设计的计

算过程,本文建议采用改进的定点理论^[25]确定 TMIS 的部分优化设计参数。于是,对于分布式混联 I 型 TMIS,其部分设计参数可表示为:

$$\mu_{\text{in},i} = \frac{\mu_{t,i} - 1 + \sqrt{\mu_{t,i}^2 + 6\mu_{t,i} + 1}}{2(1 + \mu_{t,i})} \quad (41)$$

$$\lambda_{s,i} = \sqrt{\frac{2(1 + \mu_{t,i})}{1 + 3\mu_{t,i} + \sqrt{\mu_{t,i}^2 + 6\mu_{t,i} + 1}}} \quad (42)$$

$$\lambda_{t,i} = \sqrt{\frac{1 + 3\mu_{t,i} + \sqrt{\mu_{t,i}^2 + 6\mu_{t,i} + 1}}{(1 + \mu_{t,i})^2(1 + \mu_{t,i} + \sqrt{\mu_{t,i}^2 + 6\mu_{t,i} + 1})}} \quad (43)$$

根据改进的定点理论,分布式混联 II 型 TMIS 的部分设计参数可表示为:

$$\mu_{\text{in},i} = \frac{2\mu_{t,i}}{(1 + 2\mu_{t,i})^2} \quad (44)$$

$$\lambda_{s,i} = 1 + 2\mu_{t,i} \quad (45)$$

$$\lambda_{t,i} = \sqrt{\frac{1}{(1 + \mu_{t,i})(1 + 2\mu_{t,i})}} \quad (46)$$

根据式(41)~(46)确定第 i 个 TMIS 的 $\mu_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 数值之后,则可求解其所有参数。为进一步简化优化设计,假定附加分布式 TMIS 的调谐质量比 $\mu_{t,i}$ 及名义阻尼比 $\zeta_{d,i}$ 的参数分布与烟囱原结构安装节点的位移响应成正比,即

$$\mu_{t,i} = \psi_i^\beta \tilde{\mu}_i, \zeta_{d,i} = \psi_i^\beta \tilde{\zeta}_d \quad (47)$$

式中 $\tilde{\mu}_i$ 和 $\tilde{\zeta}_d$ 分别为广义的调谐质量和阻尼比; β 为参数相关指数(可通过试算确定,建议取值范围为 1~5); ψ_i 为关于烟囱顶部节点位移的归一化位移参数,可表示为:

$$\psi_i = \frac{\sigma_{z0,i}}{\sigma_{z0,N}} \quad (48)$$

式中 $\sigma_{z0,i}$ 和 $\sigma_{z0,N}$ 分别为烟囱原结构中安装第 i 个 TMIS 的节点的位移均方根响应和结构顶部位移均方根响应。

基于上述假设,分布式 TMIS 的设计参数获取简化为求解 $\tilde{\mu}_i$ 和 $\tilde{\zeta}_d$ 的数值,记待求解参数集为 $\varphi = \{\tilde{\mu}_i, \tilde{\zeta}_d\}$ 。

2.2 优化设计策略

考虑到地震作用下高耸烟囱结构的破坏与其位移响应联系密切^[26],同时,参考基于性能需求的设计思想,本文以烟囱的顶部位移作为性能目标。定义位移减震比 γ_D 作为性能指标,表示为:

$$\gamma_D = \frac{\sigma_{z,N}}{\sigma_{z0,N}} \quad (49)$$

式中 $\sigma_{z,N}$ 为附加分布式 TMIS 烟囱减震结构的顶

部位移均方根响应。

如前所述,基于惯容系统的表观质量效果,本文所建议的 TMIS 具有轻量化减震特性。为充分发挥 TMIS 的轻量化减震控制优势,本文在实现烟囱位移性能需求的条件下,以减震装置附加质量最小作为优化目标,记目标函数为 $J(\varphi) = \tilde{\mu}_i$ 。于是,根据附加分布式 TMIS 的轻量化设计原则,烟囱减震结构的优化问题可表述为:

$$\begin{aligned} &\varphi = \arg \min J(\varphi), \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \gamma_D(\varphi) \leq \gamma_{D,\text{lim}} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (50)$$

式中 $\gamma_{D,\text{lim}}$ 为烟囱位移减震比需求;下标“max”和“min”分别为待求解参数取值的上限和下限。

式(50)描述了一个非线性约束的单目标多变量优化问题,本文采用 MATLAB 的内置函数“fmincon”求解该问题,优化算法采用序列二次规划方法(Sequential Quadratic Programming, SQP)。

根据 2.1 节介绍的分布式 TMIS 设计参数简化及本节得到的优化设计公式,可总结得到分布式 TMIS 烟囱减震结构的设计方法。设计流程可见图 4,主要设计步骤为:

(1)对烟囱原结构进行模态分析,确定附加分布式 TMIS 的布置位置及参数分布模式,并根据性能需求确定性能目标;

(2)针对附加 TMIS 所采用的惯容子系统,确定相应的参数简化公式,并根据式(50)建立优化设计方程;

(3)求解优化设计方程,获取设计参数;

(4)采用动力时程分析检验分布式 TMIS 烟囱减震结构性能及多模态控制效果。若满足要求则完成设计,否则修改参数相关指数 β 的取值或改变参数分布模式(如采用等质量比分布模式),重复(1)~(3)步直至满足性能需求。

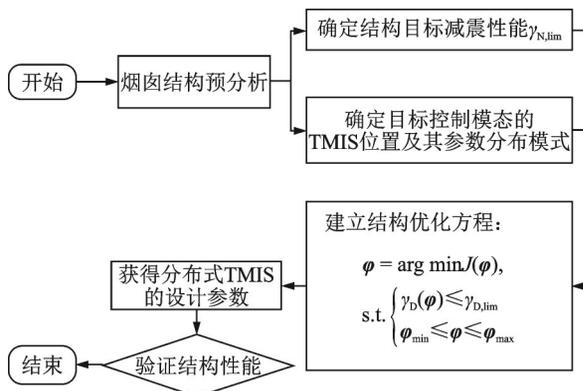


图 4 分布式 TMIS 参数优化设计流程图

Fig.4 Optimal design flowchart of the parameters of distributed TMIS

3 算例分析

3.1 烟囱结构模型概况

为说明所建议的多模态优化设计方法并检验分布式 TMIS 的轻量化多模态减震效果,针对某烟囱结构进行减震设计以提升其结构性能。某 300 m 高钢筋混凝土烟囱结构,其混凝土弹性模量和密度分别取为 $2.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 和 2400 kg/m^3 ,结构阻尼比取为 0.05。依据结构特征,将烟囱分为 24 个长度为 12.5 m 的等效梁单元进行数值模拟,相关尺寸信息如表 1 所示。

表 1 烟囱结构的尺寸信息

Tab. 1 Information of sizes of the chimney structure

编号	截面高度 H/m	筒壁外侧直径 D/m	筒壁内侧直径 d/m	截面厚度 t/m
24	300.0	21.2	20.4	0.4
23	287.5	21.2	20.4	0.4
22	275.0	21.2	20.4	0.4
21	262.5	21.2	20.4	0.4
20	250.0	21.2	20.4	0.4
19	237.5	21.2	20.4	0.4
18	225.0	21.2	20.4	0.4
17	212.5	21.2	20.4	0.4
16	200.0	21.2	20.4	0.4
15	187.5	21.2	20.4	0.4
14	175.0	21.2	20.0	0.6
13	162.5	22.1	20.9	0.6
12	150.0	23.0	21.7	0.65
11	137.5	23.9	22.6	0.65
10	125.0	24.8	23.5	0.65
9	112.5	25.7	24.3	0.7
8	100.0	26.6	25.2	0.7
7	87.5	27.5	26.1	0.7
6	75.0	28.4	26.9	0.75
5	62.5	29.3	27.8	0.75
4	50.0	30.2	28.7	0.75
3	37.5	31.1	29.5	0.8
2	25.0	32.0	30.4	0.8
1	12.5	32.9	31.3	0.8
0	0	33.8	32.2	0.8

根据 1.2 节的建议,建立 24 自由度的集中质量模型以模拟烟囱结构的动力行为。假定烟囱的基础是固定的,忽略土-结构相互作用的影响。考虑本文的主要研究目的是检验 TMIS 的轻量化减震效果,为简化考虑将分析聚焦于烟囱上部结构。关于土-结构相互作用对 TMIS 轻量化减震效果的

影响,有待未来进一步研究。为验证所建立集中质量模型的可靠性,基于表1中的结构尺寸采用ANSYS软件建立烟囱的有限元模型,结构单元采用SHELL63壳单元。烟囱结构的集中质量模型及ANSYS有限元模型 $x-z$ 平面振动经过模态分析后的前三阶自振频率对比如表2所示,前三阶振型对比如图5所示。由对比可知,采用不同建模方式的烟囱结构频率差距较小,振型形状也基本吻合,因而验证了所采用的集中质量简化模型的

可靠性。

表2 不同烟囱模型的自振频率对比

Tab. 2 Comparisons between natural frequencies of different chimney models

模型	自振频率/Hz		
	一阶	二阶	三阶
集中质量模型	0.286	1.085	2.637
ANSYS模型 $x-z$ 平面	0.294	1.099	2.664
误差/%	0.35	1.29	1.02

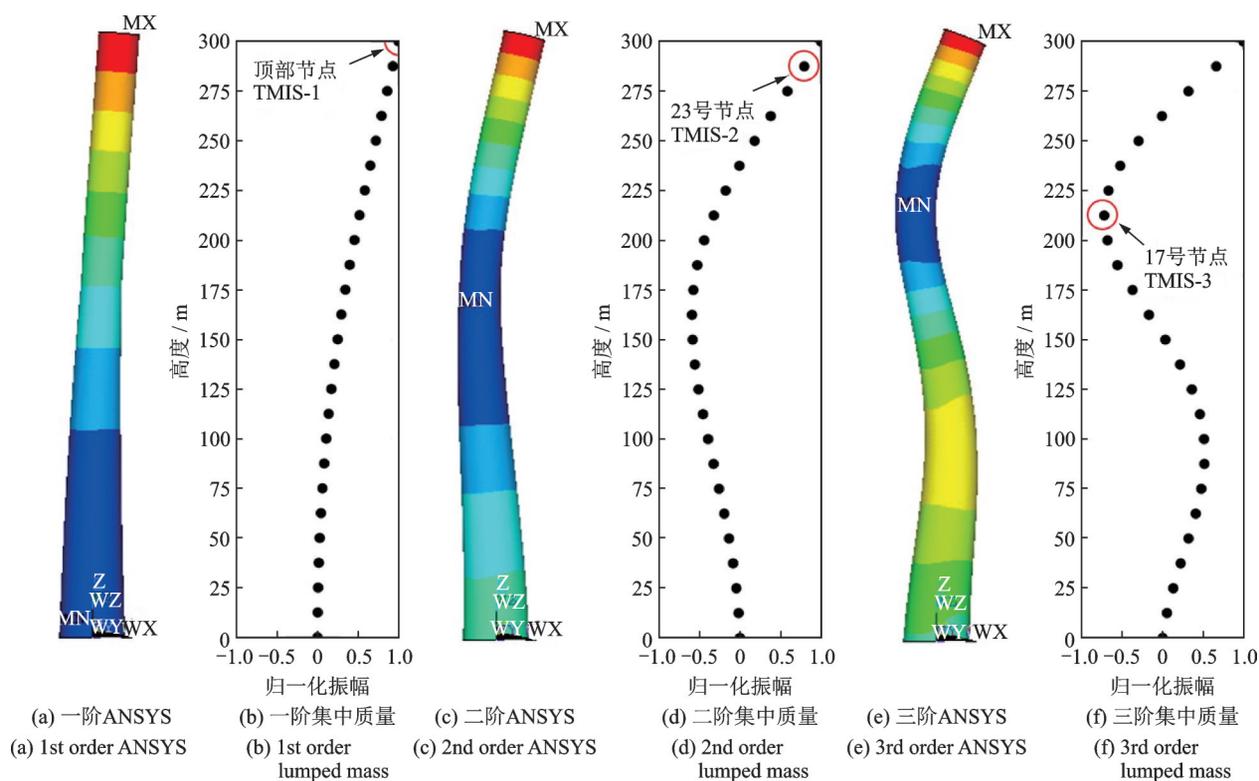


图5 烟囱结构ANSYS有限元模型与集中质量模型振型对比

Fig. 5 Comparisons of modal shapes between the finite element model using ANSYS and lumped mass model of the chimney structure

3.2 附加分布式TMIS烟囱结构减震设计

针对上述烟囱结构,本文采用分布式TMIS控制结构前三阶模态的地震响应,并在后文与仅控制第一阶模态及前两阶模态的烟囱减震结构响应进行对比。依据2.1节所述的分布式TMIS位置确定原则,选定控制一阶模态的TMIS-1布置于烟囱顶部节点,控制二阶模态的TMIS-2布置于23号节点,控制三阶模态的TMIS-3布置于17号节点,具体如图5所示。同时根据模态分析结果,求得前三阶结构模态质量分别为 4.30×10^6 , 7.99×10^6 及 1.06×10^7 kg。针对采用两种不同力学拓扑形式的惯容子系统及不同的场地特征,设定4种不同的设计工况,如表3所示。

根据图4所示的设计流程,采用MATLAB编制程序求解分布式TMIS的设计参数。其中,参数相关

表3 分布式TMIS烟囱减震结构设计工况

Tab. 3 Design cases of the chimney damping structure with distributed TMIS

工况编号	场地条件	TMIS惯容子系统	$\gamma_{D, \text{lim}}$
C-F-I	硬土场地	混联I型	0.75
C-F-II	硬土场地	混联II型	0.75
C-S-I	软土场地	混联I型	0.75
C-S-II	软土场地	混联II型	0.75

指数 β 经试算取为3,参数 $\tilde{\mu}_i$ 取值的上限和下限分别为1和0.01, $\tilde{\zeta}_d$ 取值的上限和下限分别为0.9和0.01。求解式(50)所示的优化问题,可得不同工况下分布式TMIS的设计参数如表4所示。

由表4可知,在相同的位移减震比需求下,采用混联II型惯容子系统的分布式TMIS在软土及硬土场

地条件下的设计参数数值均小于采用混联 I 型惯容子系统的分布式 TMIS 设计参数数值。因此,针对高耸烟囱结构,采用本文参数设计建议的分布式混联 II 型 TMIS 的经济性优于分布式混联 I 型 TMIS。

表 4 不同工况下烟囱减震结构设计参数

Tab. 4 Design parameters of the chimney damping structure under different design cases

工况编号	设计参数	
	$\tilde{\mu}_i$	$\tilde{\zeta}_d$
C-F-I	0.057	0.017
C-F-II	0.048	0.014
C-S-I	0.051	0.015
C-S-II	0.045	0.013

针对表 4 中不同分布式 TMIS 参数的设计工况,分别对应硬土及软土地随机生成 20 条过滤白噪声,并将生成的 20 条样本分别输入到对应设计工况的烟囱原结构及分布式 TMIS 烟囱减震结构进行动力时程分析。分析完成后,分别统计不同工况下烟囱原结构及减震结构的动力响应,根据式(49)分别计算不同工况下结构的位移减震比,并求取 20 条过滤白噪声激励计算结果的均值,与目标性能需求进行对比,结果如表 5 所示。对比显示不同工况下动力时程分析结果的均值与理论需求均相差较小,因而验证了本文所建议设计方法的可靠性。

表 5 烟囱减震结构时程分析结果与需求目标对比

Tab. 5 Comparisons between time-history analysis results and demand target of the chimney damping structure

工况编号	γ_D	
	$\gamma_{D, \text{lim}}$	平均值
C-F-I	0.750	0.751
C-F-II	0.750	0.753
C-S-I	0.750	0.742
C-S-II	0.750	0.745

表 6 不同工况下分布式 TMIS 的轻量化指标

Tab. 6 Lightweight indices of distributed TMIS under different design cases

工况编号	分布式 TMD		分布式混联 I 型 TMIS				分布式混联 II 型 TMIS			
	$\tilde{\mu}_i$	γ_D	$\gamma_{D, \text{lim}}$	$\tilde{\mu}_i$	$\tilde{\zeta}_d$	$\alpha_i/\%$	$\gamma_{D, \text{lim}}$	$\tilde{\mu}_i$	$\tilde{\zeta}_d$	$\alpha_i/\%$
C-1	0.04	0.794	0.794	0.028	0.006	30.0	0.794	0.026	0.006	35.0
C-2	0.06	0.773	0.773	0.038	0.010	36.7	0.773	0.034	0.009	43.3
C-3	0.08	0.762	0.762	0.046	0.013	42.5	0.762	0.040	0.011	50.0

基于以上分析结果,以轻量化减震效果更佳分布式混联 II 型 TMIS 为例,进一步分析其多模态减震控制效果。以 C-F-II 工况为标准,在

3.3 附加分布式 TMIS 烟囱结构减震性能分析

以硬土地为例,本节对比传统的分布式 TMD,说明采用不同惯容子系统的两种分布式 TMIS 的轻量化减震效果。对比中,分布式 TMD 同样控制结构前三阶模态的响应,其布置位置及调谐质量比 $\mu_{t,i}$ 的参数分布模式与分布式 TMIS 相同。在分布式 TMIS 的设计中,为简化设计,采用了改进的定点理论以获得部分设计参数。考虑到对比的公平性,分布式 TMD 的名义自振频率比 $\lambda_{t,i}$ 及名义阻尼比 $\zeta_{d,i}$ 通过经典的定点理论^[27]求解,表达式如下:

$$\lambda_{t,i} = \frac{1}{1 + \mu_{t,i}} \quad (51)$$

$$\zeta_{d,i} = \sqrt{\frac{3\mu_{t,i}}{8(1 + \mu_{t,i})}} \quad (52)$$

同时,定义指标 α_t 来评估分布式 TMIS 对调谐质量的轻量化效果,其求解如下式所示:

$$\alpha_t = \frac{\tilde{\mu}_{t, \text{TMD}} - \tilde{\mu}_{t, \text{TMIS}}}{\mu_{t, \text{TMD}}} \times 100\% \quad (53)$$

该指标数值越大,代表分布式 TMIS 的轻量化效果越好。

对于传统的分布式 TMD,取 3 组不同的广义调谐质量比 $\tilde{\mu}_{t, \text{TMD}}$ 作为 3 种设计工况,并根据式(47)的参数分布模式及式(51)和(52)计算分布式 TMD 的其他设计参数,得到硬土地条件下过滤白噪声激励的分布式 TMD 烟囱结构减震比 γ_D 。按照 2.2 节所述的设计方法,以附加分布式 TMD 烟囱减震结构的减震比作为分布式 TMIS 的目标减震比,即 $\gamma_{D(\text{TMD})} = \gamma_{D, \text{lim}(\text{TMIS})}$,进而求解硬土地条件下的 $\tilde{\mu}_{t, \text{TMIS}}$ 数值并计算轻量化指标 α_t ,相关结果如表 6 所示。

由表 6 可知,在相同的目标减震性能下,对比传统的分布式 TMD,采用混联 I 型及混联 II 型惯容子系统的分布式 TMIS 均可有效降低调谐质量需求,达到明显的轻量化减震效果。对比而言,对于烟囱结构的减震控制,分布式混联 II 型 TMIS 的轻量化效果要优于分布式混联 I 型 TMIS。

0.75 的顶部位移目标减震比下,按照 2.2 节的优化设计策略,分别求解前两阶模态控制的烟囱减震结构附加分布式 TMIS 设计参数及单模态控制的

TMIS 设计参数。进行前两阶模态控制时, TMIS 布置于烟囱顶部及 23 号节点, 单模态控制则仅在烟囱顶部节点布置 TMIS。对于进行不同模态控制的烟囱减震结构及烟囱原结构, 分别绘制其顶部结构位移的归一化频响函数曲线, 如图 6 所示。对比烟囱原结构的频响函数曲线, 烟囱减震结构的共振区域峰值数目由于附加的 TMIS 而增加且峰值显著降低。图 6 中, 对于前三阶模态控制的烟囱减震结构, 其第三阶模态控制效果相较前两阶控制效果较差, 这主要是由于 TMIS-3 的参数较小, 但考虑烟囱第三阶模态的模态质量参与系数较小, 设计结果可接受。若要提升高阶模态控制效果, 建议减小 β 取值, 重新进行设计。同时, 对于不同模态控制的烟囱减震结构, 仅有目标模态的频响函数峰值显著降低, 而未控制模态的频响函数曲线与烟囱原结构基本相同。因此, 本文所建议的分布式 TMIS 控制策略可以精准有效地进行烟囱结构的目标模态减震控制。

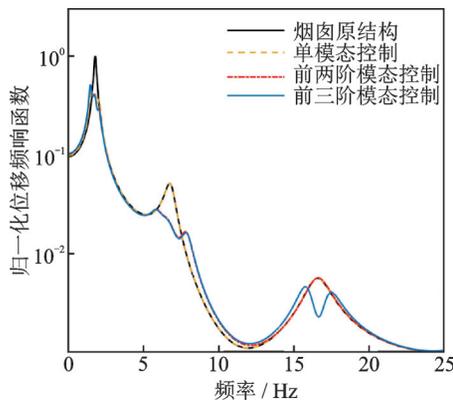


图 6 不同烟囱减震结构的频响函数

Fig. 6 Frequency response functions of different chimney damping structures

为分析不同模态控制下烟囱附加分布式混联 II 型 TMIS 的减震性能, 同样针对以 C-F-II 工况为标准的不同模态控制的烟囱减震结构, 进一步求解不同地震波作用下烟囱减震结构的动力响应。地震波输入采用 7 条典型的强震记录, 分别为 El Centro 波、Taft 波、Imperial Valley 波、Coalinga 波、Kobe 波、Northridge 波以及 Chi-Chi 波。数值积分求解后, 分别统计烟囱原结构及烟囱减震结构的顶部位移、顶部加速度及基底剪力响应, 进而计算不同模态控制烟囱减震结构的顶部位移减震比 γ_D 、顶部加速度减震比 γ_A 及基底剪力减震比 γ_{BS} 。 γ_D 可根据式 (49) 进行计算, γ_A 和 γ_{BS} 则按照下式进行计算:

$$\gamma_A = \frac{\sigma_{z,A}}{\sigma_{z0,A}}, \quad \gamma_{BS} = \frac{\sigma_{z,BS}}{\sigma_{z0,BS}} \quad (54)$$

式中 $\sigma_{z0,A}$ 和 $\sigma_{z,A}$ 分别为烟囱原结构和烟囱减震结构的顶部加速度均方根值; $\sigma_{z0,BS}$ 和 $\sigma_{z,BS}$ 则分别为烟

囱原结构和烟囱减震结构的基底剪力均方根值。

不同地震波作用下, 不同模态控制的烟囱减震结构动力响应对比如图 7~9 所示。分析结果显示, 采用过滤白噪声激励的设计方法得到的分布式 TMIS 设计参数在地震激励下具有一定的适用性, 且所设计的分布式 TMIS 可同时抑制地震激励下结构的位移、加速度及基底剪力响应。由图 7 可知, 在顶部位移目标减震比均为 0.75 的情况下, 采用 TMIS 进行不同模态控制时均可以有效降低烟囱位移响应, 进行前两阶及前三阶模态的多模态控制的烟囱位移减震比较为接近, 而进行单模态控制的烟囱位移减震比则略大于多模态控制的烟囱。而由图 8 和 9 可知, 不同地震波作用下, 采用分布式 TMIS 进行前两阶及前三阶模态控制的烟囱加速度及基底剪力减震比均明显小于单模态控制的加速度及基底剪力减震比, 同时, 前三阶模态控制的烟囱加速度及基底剪力减震比均小于前两阶模态控制的加速度及基底剪力减震比。因此, 对比单模态控制的烟囱减震结构, 采用分布式 TMIS 进行多模态控制的烟囱加速度及基底剪力减震效果更佳。

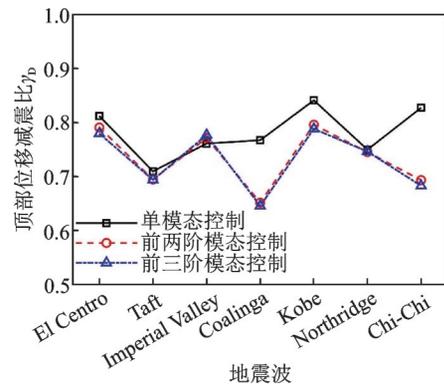


图 7 地震波作用下不同模态烟囱减震结构顶部位移减震比
Fig. 7 Top displacement damping ratios of the chimney damping structure in different modes under seismic wave inputs

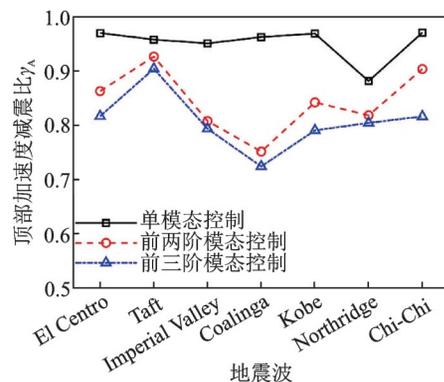


图 8 地震波作用下不同模态烟囱减震结构顶部加速度减震比
Fig. 8 Top acceleration damping ratios of the chimney damping structure in different modes under seismic wave inputs

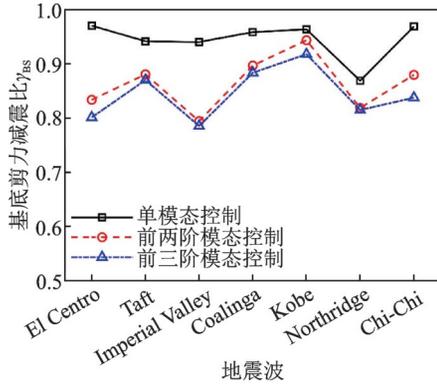


图 9 地震波作用下不同模态烟囱减震结构基底剪力减震比

Fig.9 Base shear force damping ratios of the chimney damping structure in different modes under seismic wave inputs

3.4 改进定点理论的简化设计合理性检验

在 2.1 节中,为简化设计过程,采用改进的定点理论以提前确定分布式 TMIS 的部分参数设计关系,进而减少优化过程的计算量。由于定点理论是基于结构阻尼比为零的假设进行推导的,本节考虑了结构的固有阻尼进行参数分析,以检验该理论在本文所建议设计方法中使用的合理性。

本文采用改进的定点理论确定分布式 TMIS 的惯质比 $\mu_{in,i}$ 、内部频率比 $\lambda_{s,i}$ 和名义自振频率比 $\lambda_{t,i}$,余下的调谐质量比 $\mu_{t,i}$ 和名义阻尼比 $\zeta_{d,i}$ 分别通过设定位移目标减震比 $\gamma_{D,lim}$ 并求解优化公式获得。于是,以本文所建议设计方法获得的参数为基准,在 $\mu_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 的数值不变,而分别改变 $\mu_{in,i}$, $\lambda_{s,i}$ 和 $\lambda_{t,i}$ 数值的情况下,计算改变后数值对应的顶部位移减震比 γ_D ,并求得其与目标减震比的比值 $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$ 。以该数值的大小来衡量 γ_D 与 $\gamma_{D,lim}$ 的相对偏离程度,从而说明采用改进的定点理论进行简化的合理性。

以 C-F-II 工况为例,将该工况获得的设计参数作为基准,并采用左下标“opt”的进行标记,在改变 $\mu_{in,i/opt}\mu_{in,i}$, $\lambda_{s,i/opt}\lambda_{s,i}$ 和 $\lambda_{t,i/opt}\lambda_{t,i}$ 数值,而 $\mu_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 数值不变的情况下进行参数分析,结果如图 10 所示。图 10(a)中, $\lambda_{s,i/opt}\lambda_{s,i}$ 和 $\lambda_{t,i/opt}\lambda_{t,i}$ 的数值分别在 0.5~1.5 范围内变化, $\mu_{in,i}$, $\mu_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 的数值为 C-F-II 工况的设计参数数值不变,进而求解 $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$ 数值并绘制其等高线图。相应地,在图 10(b)中, $\mu_{in,i/opt}\mu_{in,i}$ 和 $\lambda_{t,i/opt}\lambda_{t,i}$ 的数值分别在 0.5~1.5 范围内改变,分布式 TMIS 的其余设计参数数值不变,进而绘制 $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$ 的等高线图;在图 10(c)中, $\mu_{in,i/opt}\mu_{in,i}$ 和 $\lambda_{s,i/opt}\lambda_{s,i}$ 的数值分别在 0.5~1.5 范围内改变,其余设计参数数值不变,绘制 $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$ 的等高线图。同时,在图 10(a)~(c)中,采用红色正三角标注了 C-F-II 工况的设计参数数值,黑色倒三角则表示等高线 $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$

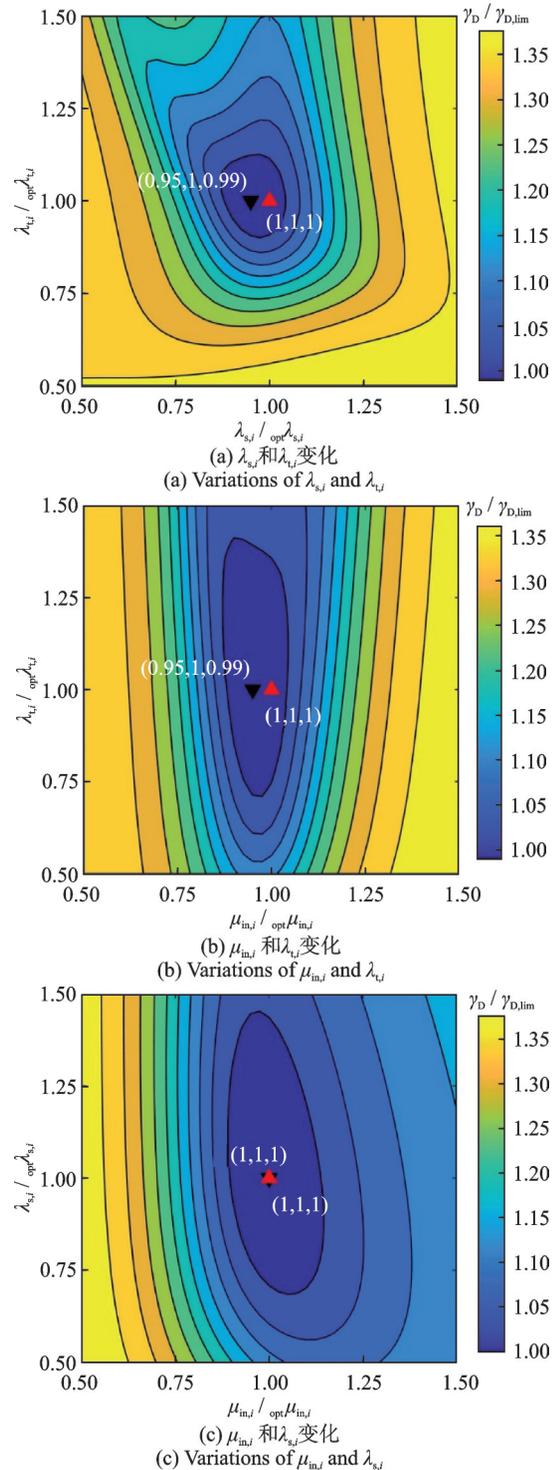


图 10 设计参数偏离的位移减震比偏离程度等值线图

Fig.10 Contours of deviation degrees of displacement damping ratio under deviating of design parameters

数值的最小值。由图 10(a)~(c)可知, $\gamma_D/\gamma_{D,lim}$ 的大部分数值均大于 1,最小值为 0.99,且取最小响应值时的横/纵坐标数值与设计参数对应的横/纵坐标数值接近。从而说明了基于改进的定点理论假设求得的设计参数数值对应的减震比与固定 $\mu_{t,i}$ 和 $\zeta_{d,i}$ 参数情况下的最小减震比接近,同时,基于改进的定点理论假设所求得的设计参数数值与最优参数基本接近。因此,验证了本文基于改进的定点理论进行的简化设计是合理的。

4 结 论

本文针对高耸烟囱结构附加分布式 TMIS 的轻量化多模态减震控制系统,提出了基于需求的多模态优化设计方法,通过实例验证了优化设计方法的有效性,并得到以下结论:

(1)在相同的减震性能指标下,对比传统的分布式 TMD,本文采用的两类分布式 TMIS 均可显著降低调谐质量需求,有效实现烟囱结构轻量化减震控制。其中,采用混联 II 型惯容子系统的 TMIS 轻量化减震效果更佳。分布式 TMIS 的轻量化减震有助于减少调谐减震装置的占用空间,方便施工安装,降低成本。

(2)针对所采用的分布式 TMIS,本文所建议的多模态优化设计方法可有效实现目标减震性能,并达到多模态控制效果。同时,在进行多模态控制时,所建议的设计方法仅控制目标模态响应,而不涉及无关模态,可达到目标模态的精准控制。

(3)在相同的位移减震性能指标下,进行更多阶模态控制的烟囱附加 TMIS 减震结构可以更好地抑制地震激励下的结构加速度及基底剪力响应,从而显示了多模态控制的优势。

(4)本文所建议的优化设计方法中基于改进点理论简化考虑的零固有阻尼假设,对于考虑了固有阻尼的烟囱减震结构同样适用。

(5)本文所建议的分布式 TMIS 进行烟囱结构的轻量化多模态控制理论可扩展至其他类型的高耸结构,相关的分析研究有待进一步展开。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 烟囱设计规范: GB 50051—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of chimneys: GB 50051—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [2] Kilic S A, Sozen M A. Evaluation of effect of August 17, 1999, Marmara earthquake on two tall reinforced concrete chimneys[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 357-364.
- [3] Perrone D, Calvi P M, Nascimbene R, et al. Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy earthquake[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(10): 5655-5677.
- [4] Zembaty Z. On the reliability of tower-shaped structures under seismic excitations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1987, 15(6): 761-775.
- [5] Dai Kaoshan, Fang Chao, Zhang Songhan, et al. Conceptual design and numerical study on a cable-based energy dissipating system for the vibration reduction of tower-like structures[J]. Engineering Structures, 2021, 237: 112034.
- [6] 陈鑫, 李爱群, 王洪, 等. 自立式高耸钢结构黏滞阻尼减振技术及其设计方法[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(6): 78-84.
Chen Xin, Li Aiqun, Wang Hong, et al. Viscous damping technology and design method for self-standing high-rise steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(6): 78-84.
- [7] 贺辉, 谭平, 刘彦辉, 等. 圆形高耸结构两级变阻尼 TMD 风振控制[J]. 振动工程学报, 2020, 33(3): 503-508.
He Hui, Tan Ping, Liu Yanhui, et al. Wind-induced vibration control of circular section high-rise structures employing TMD with two-stage damping level[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(3): 503-508.
- [8] Brownjohn J M W, Carden E P, Goddard C R, et al. Real-time performance monitoring of tuned mass damper system for a 183 m reinforced concrete chimney[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(3): 169-179.
- [9] Longarini N, Zucca M. A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 290-296.
- [10] Elias S, Matsagar V, Datta T K. Effectiveness of distributed tuned mass dampers for multi-mode control of chimney under earthquakes[J]. Engineering Structures, 2016, 124: 1-16.
- [11] 刘良坤, 谭平, 闫维明, 等. 一种新型惯容减震器的设计及减震效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 156-163.
Liu Liangkun, Tan Ping, Yan Weiming, et al. Design of a novel inerter damper and its aseismic effect under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 156-163.
- [12] 潘超, 张瑞甫, 王超, 等. 单自由度混联 II 型惯容减震体系的随机地震响应与参数设计[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 129-137.
Pan Chao, Zhang Ruifu, Wang Chao, et al. Stochastic seismic response and design of structural system with series-parallel-II inerter system[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 129-137.
- [13] 赵祥昇, 李春祥, 曹黎媛. 结构-NFVD-TTMDI 的控制性能[J]. 振动工程学报, 2022, 35(1): 55-63.
Zhao Xiangsheng, Li Chunxiang, Cao Liyuan. Control performance of structure-NFVD-TTMDI[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(1): 55-63.
- [14] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453-474.
- [15] Pan Chao, Zhang Ruifu, Luo Hao, et al. Demand-based optimal design of oscillator with parallel-layout viscous

- inertor damper[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2018, 25(1): e2051.
- [16] 张瑞甫,曹嫣如,潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. *工程力学*, 2019, 36(10): 8-27.
Zhang Ruifu, Cao Yanru, Pan Chao. Inertor system and its state-of-the-art[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 8-27.
- [17] Zhang Ruifu, Zhao Zhipeng, Pan Chao, et al. Damping enhancement principle of inertor system [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(5): e2523.
- [18] Pan Chao, Zhang Ruifu. Design of structure with inertor system based on stochastic response mitigation ratio[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(6): e2169.
- [19] 张瑞甫,曹嫣如,潘超,等. 典型激励下调谐质量惯容系统 TMIS 的轻量化结构控制[J]. *工程力学*, 2022, 39(9): 58-71.
Zhang Ruifu, Cao Yanru, Pan Chao, et al. Lightweight structural control based on Tuned Mass Inertor System (TMIS) under typical excitation [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(9): 58-71.
- [20] Garrido H, Curadelli O, Ambrosini D. Improvement of tuned mass damper by using rotational inertia through tuned viscous mass damper[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 2149-2153.
- [21] Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel Tuned Mass-Damper-Inertor (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 38: 156-164.
- [22] 杨涵,刘仰昭,戴靠山,等. 高耸烟囱风致振动的 TPIMS 减振数值分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(9): 290-298.
Yang Han, Liu Yangzhao, Dai Kaoshan, et al. Numerical analysis of TPIMS for reducing wind-induced vibration of high-rise chimney [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(9): 290-298.
- [23] Zhang Li, Xue Songtao, Zhang Ruifu, et al. Simplified multimode control of seismic response of high-rise chimneys using distributed Tuned Mass Inertor Systems (TMIS)[J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111550.
- [24] Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground [J]. *Transaction of the Architectural Institute of Japan*, 1957, 35(2): 309-325.
- [25] Barredo E, Blanco A, Colin J, et al. Closed-form solutions for the optimal design of inertor-based dynamic vibration absorbers [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 144: 41-53.
- [26] Wilson J L. Earthquake response of tall reinforced concrete chimneys [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(1): 11-24.
- [27] Hartog J P D. *Mechanical Vibrations* [M]. Fourth edition. New York: McGraw-Hill, Dover, 1956.

Lightweight seismic control of high-rise chimneys with different kinds of tuned mass inertor systems

ZHANG Li^{1,2}, ZHANG Rui-fu^{1,2}, XUE Song-tao^{2,3}, XIE Li-yu²

(1.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.Department of Disaster Mitigation for Structures, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3.Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

Abstract: The additional tuning mass damper is a traditional control technique for the chimney, but it usually requires a large additional tuning mass and auxiliary installation space, which brings inconvenience to the construction and installation. This study proposes utilizing the additional tuned mass inertor system (TMIS) to reduce seismic responses of the chimney. The apparent mass effect of the inertor is employed to achieve the goal of lightweight control. Meanwhile, considering that the influence of high-order modes of the high-rise chimney on its seismic responses cannot be ignored, the distributed TMISs arranged along the height of the chimney are proposed to achieve the multimode control effect. Mechanical models of the TMISs based on two different inertor subsystems are established, and the equations of motion for the chimney with corresponding additional distributed TMISs are established. Taking Kanai-Tajimi's spectrum as the random seismic excitation input and based on the extended fixed-point theory, the simplified assumptions for part of the design parameters of distributed TMISs are proposed. The demand-oriented multimode optimization design method for the chimney with distributed TMISs is presented. The effectiveness of the proposed design method is verified by a design case. The lightweight and multimode control effects of additional distributed TMISs are examined by comparative analyses. The rationality of the simplification based on the extended fixed-point theory is verified through parameter analysis. The results show that the proposed design method can achieve the expected target performance using the two distributed TMISs. Both the two distributed TMISs behave obvious lightweight control effect.

Key words: seismic reduction; inertor; chimney; multimode control; tune

作者简介:张 力(1993—),男,博士研究生。电话:(021) 65982390; E-mail: zhangli24@tongji.edu.cn。

通讯作者:张瑞甫(1980—),男,博士,副教授。电话:(021) 65983701; E-mail: zhangruifu@tongji.edu.cn。