

调谐质量惯容系统对高耸脱硫塔风振控制研究*

李阳¹ 张庆华¹ 杨辉² 汪志昊^{1†}

(1.华北水利水电大学 土木与交通学院,郑州 450000)

(2.中建三局集团有限公司,武汉 430064)

摘要 高耸脱硫塔属于圆截面薄壁钢结构,具有柔度大、阻尼小、上部截面突变等特征,在风荷载作用下易发生较为强烈的顺风向和横风向振动.为实现脱硫塔风致振动的有效与轻量化控制,引入调谐质量惯容系统(TMIS),基于推导的脱硫塔-TMIS耦合系统频响函数,分别建立了TMIS对脱硫塔的顺风向和横风向减振参数优化设计方法,并对比分析了TMIS、传统调谐质量阻尼器(TMD)、调谐质量惯容阻尼器(TMDI)对脱硫塔的减振效果.结果表明:以脱硫塔频域响应和 H_∞ 范数为目标优化设计的TMIS对脱硫塔顺风向和横风向风致振动均有较好的控制效果;与顺风向减振相比, TMIS横风向减振具有更好的轻量化效应;与TMD、TMDI相比, TMIS表现出较好的减振优势.

关键词 高耸结构, 风振控制, 调谐质量阻尼器, 调谐质量惯容阻尼器, 调谐质量惯容系统
中图分类号:TU311.3;TU333 **文献标志码**:A

Study on Wind-Induced Vibration Control of a Desulphurization Tower Based on Tuned Mass Inerter System (TMIS)*

Li Yang¹ Zhang Qinghua¹ Yang Hui² Wang Zhihao^{1†}

(1.School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

(2.China Construction Third Engineering Bureau Group Co.,Ltd, Wuhan 430064, China)

Abstract The tall desulphurization tower belongs to the thin-wall steel structure with round section, which has the characteristics of large flexibility, small damping and abrupt change of upper section. Under wind load, the tower is prone to severe vibration in along-wind and across-wind directions. In order to realize efficient and lightweight control of the wind-induced vibration of the tower, a tuned mass inerter system (TMIS) is adopted in this study. Based on the derived frequency response function formula of the desulfurization tower-TMIS coupling system, the optimal design method of the TMIS for both along-wind and across-wind induced vibration control of the tower is established. Finally, the vibration control performance of TMIS on the tower is compared with that of traditional tuned mass damper (TMD) and tuned mass damper inerter (TMDI). The results show that the TMIS optimized with the frequency domain response and H_∞ norm as targets has excellent control performance on vibration mitigation of the tower in both along-wind and across-wind directions. Moreover, the TMIS demonstrates better lightweight effect on vibration control in across-wind direction than that in along-wind direction, and its con-

2022-12-31 收到第 1 稿,2023-03-28 收到修改稿.

* 国家自然科学基金项目(51878274),中建股份科技研发课题(CSCEC-2021-Q-63),河南省高等学校重点科研项目(22A410003), National Natural Science Foundation of China(51878274), Science and Technology Research Project of CSCEC(CSCEC-2021-Q-63), Key Scientific Research Project of Colleges and Universities in Henan Province (22A410003).

† 通信作者 E-mail:wangzhihao@ncwu.edu.cn

control performance is superior over that of the TMD and TMDI.

Key words high-rise structure, wind-induced vibration control, tuned mass damper, tuned mass damper inerter, tuned mass inerter system

引言

大型烟气脱硫塔是石油化工企业的重要设备,属于自立式高耸薄壁钢结构,对风荷载作用较为敏感^[1].脱硫塔底部进行工业废气的脱硫处理,上段设置高耸钢烟囱以提升排烟高度,截面突变进一步削弱了结构上部的刚度和承载力.除常见的顺风向抖振外,脱硫塔在特定风速下易发生更剧烈的横风向涡激共振^[2].鉴于塔顶空间有限,为保证脱硫塔安全稳定运行,降低风致振动对结构安全与疲劳损伤影响,有必要对脱硫塔开展轻量化减振研究^[3-4].

调谐质量阻尼器(TMD)作为一种常见的吸能减振装置,已被广泛用于高耸结构和高层建筑的风振控制^[5,6].陈磊等^[7]对比了某脱排一体式钢塔风振响应的数值模拟和现场实测结果,并设计了TMD减振装置,结果表明TMD可以降低结构的位移和加速度响应,但会增大上部结构的应力.针对某高耸钢烟囱,陈鑫等^[8]开展了基于悬吊式TMD的结构模型减振试验与数值仿真分析,结果表明悬吊式TMD能够增加结构的等效阻尼比,显著降低结构动力响应.为保证减振效果,传统TMD往往需要较大的运动质量,既增加了结构受力负担,又增加了工程成本.惯容(Inerter)具有质量放大效应^[9],与传统阻尼装置组合使用可实现耗能增效^[10].叶昆等^[11]将调谐惯容阻尼器(TID)附加在基础隔震结构的隔震层,研究表明,最优TID能够明显降低隔震层水平位移和上部结构加速度.苏宁等^[12]推导了安装调谐质量惯容阻尼器(TMDI)的高耸烟囱结构的风振响应解析解,分析了惯容器的连接位置对阻尼器减振效果的影响,提出了TMDI参数设计公式.

与惯容需要接地或连接到结构较低位置的TMDI相比,单端连接主结构的惯容减振系统有望在实现惯容元件耗能增效的同时,解决惯容元件连接难题.借鉴Ikago等^[13]研发的调谐黏滞质量阻尼器(TVMD),Garrido等^[14]提出了旋转双调谐质量阻尼器(RIDTMD),李亚峰等^[15]研究了RIDTMD

对某吸热塔的风致振动控制效果,结果表明,相对传统TMD具有明显增效作用.为实现结构的轻量化减振,张瑞甫等^[16,17]提出了由调谐质量、调谐弹簧和惯容子系统组成的调谐质量惯容减振系统(TMIS),其中惯容子系统包括并联连接的惯容元件与阻尼元件,以及与它们串联的刚度元件.

鉴于TMIS的轻量化减振优点,本文以某变截面高耸脱硫塔为研究对象,引入TMIS开展风致振动控制,推导得到脱硫塔-TMIS耦合系统的频响函数表达式;结合脱硫塔顺风向、横风向风振特性,分别以结构频域响应和 H_{∞} 范数为优化目标,建立基于遗传算法的减振参数优化设计方法,并系统对比TMD、TMDI和TMIS对脱硫塔的减振效果.

1 脱硫塔-阻尼器系统

1.1 脱硫塔有限元模型

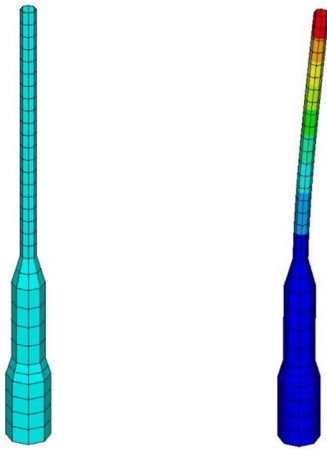
某圆形脱硫塔高85m,主体采用Q235钢结构,自下而上按截面尺寸分为五段,其中第2段和第4段为变径段,分段结构尺寸见表1.

表1 脱硫塔各分段内径与厚度
Table 1 Inner diameter and thickness for each section of the tower

Segment	1	2	3	4	5
Inside diameter/m	7.700	7.700/5.760	5.760	2.700	2.700
Thickness/m	0.020	0.020/0.016	0.016	0.016	0.016
Height/m	12.050	3.320	14.950	5.480	49.200

将该脱硫塔视为支座底面全约束的悬臂梁结构,基于ANSYS软件采用梁单元(Beam 188)建立结构有限元模型,见图1(a).计算得到的脱硫塔前2阶模态振动频率分别为0.908Hz、4.192Hz,其中第1阶振型见图1(b),表现为结构上段的弯曲振动.出于保守考虑,设定脱硫塔前2阶模态阻尼比为0.5%^[18],采用超单元法提取结构质量矩阵 \mathbf{M} 、刚度矩阵 \mathbf{K} 和阻尼矩阵 \mathbf{C} ,构建脱硫塔数值模型进

行后续分析。



(a) 脱硫塔有限元模型 (b) 脱硫塔第1阶振型
(a) Desulfurization tower model (b) The first mode of the tower

图1 脱硫塔有限元模型及其第1阶振型

Fig.1 FE model and of the first mode shape of the desulfurization tower

1.2 脱硫塔—阻尼器系统运动方程

图2给出了安装于塔顶的传统TMD、并联惯容器的双端TMDI和TMIS系统构型及安装位置示意,其中 m_t 、 c_t 、 k_t 分别表示阻尼器运动质量、阻尼系数和刚度系数, m_{in} 表示惯容的虚质量, c_{in} 和 k_{in} 分别表示惯容子系统的阻尼系数和刚度系数。

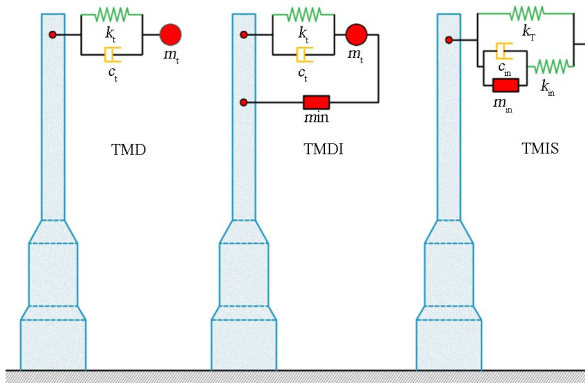


图2 脱硫塔—阻尼器系统模型示意

Fig.2 Desulfurization tower-damper system model

将脱硫塔简化为广义单自由度体系:

$$\begin{aligned} m &= \Phi^T \mathbf{M} \Phi, & c &= \Phi^T \mathbf{C} \Phi \\ k &= \Phi^T \mathbf{K} \Phi \end{aligned} \quad (1)$$

式中, m 、 c 、 k 分别表示脱硫塔的广义质量、广义刚度和广义阻尼; \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别表示脱硫塔的质量、阻尼和刚度矩阵; Φ 为脱硫塔的振型函数,对本文风振响应控制直接取脱硫塔第1阶模态。

脱硫塔—TMD系统、脱硫塔—TMDI系统和脱硫塔—TMIS系统的运动方程分别表示为式(2)、式(3)和式(4):

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + c_t(\dot{x} - \dot{x}_t) + kx + k_t(x - x_t) = f(t) \\ m_t\ddot{x}_t + c_t(\dot{x}_t - \dot{x}) + k_t(x_t - x) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} + m_{in}\varphi[(\varphi - 1)\ddot{x} - \ddot{x}_t] + c\dot{x} - (c_t + c_{in})\dot{x}_t + kx - (k_t + k_{in})x_t = f(t) \\ m_t(\ddot{x} + \ddot{x}_t) + m_{in}[(1 - \varphi)\ddot{x} - \ddot{x}_t] + (c_t + c_{in})\dot{x}_t + (k_t + k_{in})x_t = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + k_t(x - x_t) + k_{in}(x - x_{in}) = f(t) \\ m_t\ddot{x}_t + m_{in}(\ddot{x}_t - \ddot{x}_{in}) + c_{in}(\dot{x}_t - \dot{x}_{in}) + k_t(x_t - x) = 0 \\ m_{in}(\ddot{x}_{in} - \ddot{x}_t) + c_{in}(\dot{x}_{in} - \dot{x}_t) + k_{in}(x_{in} - x) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, x 、 x_t 、 x_{in} 分别表示脱硫塔、阻尼器实际质量和惯容元件的位移响应; $f(t)$ 表示归一化的广义风荷载; φ 表示TMDI的惯容器连接位置。

鉴于TMD和TMDI减振研究已较为成熟,下面仅对脱硫塔—TMIS系统运动方程及其风振响应开展公式推导与数值分析。

1.3 脱硫塔—TMIS系统风振响应分析

首先定义以下无量纲参数:

$$\begin{aligned} \mu_t &= m_t/m, & \mu_{in} &= m_{in}/m_t \\ \xi_{in} &= c_{in}/(2\sqrt{m_t k_t}) \\ \nu_t &= \omega_t/\omega_0, & \nu_{in} &= k_{in}/k_t \end{aligned} \quad (5)$$

式中, μ_t 、 μ_{in} 分别为TMIS系统的实际质量和惯容的虚质量与主结构广义质量之比; ξ_{in} 为惯容子系统的名义阻尼比; ν_t 表示TMIS和主结构的频率比; ω_0 表示脱硫塔第1阶圆频率; ν_{in} 表示惯容子系统弹簧和调谐弹簧的刚度比。

据此可对式(4)中的质量、刚度和阻尼参数作变量代换:

$$\begin{aligned} m_t &= \mu_t m, & m_{in} &= \mu_{in} \mu_t m \\ c &= 2m\omega_0 \xi_0, & c_{in} &= 2m \xi_{in} \mu_t \nu_{in} \omega_0 \\ k &= m\omega_0^2, & k_t &= \mu_t m (\omega_0 \nu_t)^2 \\ k_{in} &= \nu_{in} \mu_t m (\omega_0 \nu_t)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, ξ_0 表示脱硫塔固有阻尼比。

在顺风向或横风向风荷载下, 脱硫塔-TMIS 系统的运动方程可表示为:

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_1 \mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{X} = [x, x_t, x_{in}]^T$, $\mathbf{F}(t) = [f(t)/m, 0, 0]^T$;

质量、阻尼、刚度矩阵 \mathbf{M}_1 、 \mathbf{C}_1 、 \mathbf{K}_1 分别为:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} \omega_0^2(1 + \mu_t v_t^2 + v_{in} \mu_t v_t^2) & -\mu_t(\omega_0 v_t)^2 & -v_{in} \mu_t(\omega_0 v_t)^2 \\ -\mu_t(\omega_0 v_t)^2 & \mu_t(\omega_0 v_t)^2 & 0 \\ -v_{in} \mu_t(\omega_0 v_t)^2 & 0 & v_{in} \mu_t(\omega_0 v_t)^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 $f(t) = e^{i\omega t}$, 则 $\mathbf{X} = \mathbf{H}(i\omega) \cdot e^{i\omega t}$, 其中 $\mathbf{H}(i\omega) = [H_0(i\omega), H_t(i\omega), H_{in}(i\omega)]^T$, $H_0(i\omega)$ 、 $H_t(i\omega)$ 和 $H_{in}(i\omega)$ 分别表示脱硫塔-TMIS 系统主结构、

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_t + \mu_t \mu_{in} & -\mu_t \mu_{in} \\ 0 & -\mu_t \mu_{in} & \mu_t \mu_{in} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 2\xi_0 \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 & -2\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 \\ 0 & -2\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 & 2\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

TMIS 质量块和惯容单元的频响函数。代入式(7)可得:

$$\mathbf{H}(i\omega) = \frac{1}{m} \cdot [-\omega^2 \mathbf{M}_1 + i\omega \mathbf{C}_1 + \mathbf{K}_1]^{-1} \cdot [1, 0, 0]^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_{11} = -\omega^2 + i2\omega\omega_0\xi_0 + \omega_0^2(1 + \mu_t v_t^2 + v_{in} \mu_t v_t^2) \\ A_{12} = -\mu_t(\omega_0 v_t)^2, & A_{21} = A_{12} \\ A_{13} = -v_{in} \mu_t(\omega_0 v_t)^2, & A_{31} = A_{13} \\ A_{22} = -\omega^2(\mu_{in} + \mu_t \mu_{in}) + i2\omega\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 + \mu_t(\omega_0 v_t)^2 \\ A_{23} = \omega^2 \mu_t \mu_{in} - i2\omega\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0, & A_{32} = A_{23} \\ A_{33} = -\omega^2 \mu_t \mu_{in} + i2\omega\xi_{in} \mu_t v_t \omega_0 + v_{in} \mu_t(\omega_0 v_t)^2 \end{cases} \quad (12)$$

在风荷载作用下, 脱硫塔-TMIS 系统主结构的均方位移响应可表示为:

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S_x(i\omega) d\omega} = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_0(i\omega)|^2 S_F(i\omega) d\omega} \quad (13)$$

式中, ω_1 、 ω_2 表示积分频率范围, 在结构 1 阶频率附近进行积分求解; $S_x(i\omega)$ 为结构响应谱, 采用计算效率较高的虚拟激励法^[19] 求解; $S_F(i\omega)$ 为结构外荷载谱, 可由风速谱得到。

2 阻尼器参数设计

2.1 TMD 与 TMDI 参数取值

TMD 最优频率比和最优阻尼比, 采用 Den Hartog^[20] 给出的经典不动点法公式计算:

$$\beta = \frac{1}{1 + \mu_t} \quad (14)$$

$$\xi_t = \sqrt{3\mu_t/8(1 + \mu_t)} \quad (15)$$

式中, $\beta = \omega_t/\omega_0$ 表示 TMD 与主结构的频率之比;

$\xi_t = c_t/(2m_t \omega_t)$ 表示 TMD 阻尼比。

TMDI 采用文献经验公式^[12] 进行参数设计:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{1 + \mu_t + \mu_s(1 - \varphi)^2} \cdot \frac{1}{1 + (\mu_t + \mu_s)(1 - \varphi)^2}} \quad (16)$$

$$\xi_t = \frac{1}{4} \left[\sqrt{\frac{\mu_t + \mu_s(1 - \varphi)^2}{1 + \mu_t + \mu_s(1 - \varphi)^2}} + \sqrt{\frac{(\mu_t + \mu_s)(1 - \varphi)^2}{1 + (\mu_t + \mu_s)(1 - \varphi)^2}} \right] \quad (17)$$

其中, TMDI 惯容具体连接位置 φ 根据惯容起增强作用的判定条件^[12] 确定:

$$\mu_s \cdot (1 - \varphi)^2 / \mu_t \geq 1 \quad (18)$$

式中, $\mu_s = m_{in}/m$, 设定惯容惯性质量比 $\mu_s = 20\%$ 。以连接处的振型值表示惯容器连接位置, 即 $\varphi = \Phi(z)$ 。结合脱硫塔模型参数, 确定安装于脱硫塔第 27 号单元, 即距塔顶约 12m 处, 此时 $\Phi(z) = 0.7064$ 。

2.2 TMIS 顺风向减振参数优化

对于脱硫塔顺风向减振, 以脉动风荷载作用下结构顶部频域位移响应 σ_x 最小为振动控制优化目标, 首先确定 TMIS 的实际模态质量比 $\mu_{t,lim}$, 然后采用遗传算法对 μ_{in} 、 ξ_{in} 、 v_t 、 v_{in} 4 个参数进行寻优, 分析频域减振率随 TMIS 质量比的变化规律, 最后以确定的频域位移响应 $\sigma_{x,lim}$ 为目标, 寻求满足该减振效果的 TMIS 最小质量比及其余 4 个参数, 以开展与 TMD、TMDI 的时域减振效果对比。

其中,遗传算法的控制参数设置如下:最大进化代数设置为150代,种群规模900,交叉概率0.8,变异概率0.05,新生成种群比例为0.25,计算精度为 1×10^{-9} .

2.3 TMIS 横风向减振参数优化

对于脱硫塔横风向减振,结合式(11)脱硫塔-TMIS系统的频响函数,基于 H_∞ 优化指标,同样采用遗传算法对TMIS进行参数优化:

$$G(i\omega) = \sup_{\omega} \tau_{\max} [H_0(i\omega)] \quad (19)$$

式中, $G(i\omega)$ 表示脱硫塔-TMIS系统的 H_∞ 范数, τ_{\max} 表示最大奇异值.

综上,总结得到的TMIS对脱硫塔顺风向、横风向减振参数优化流程图见图3.

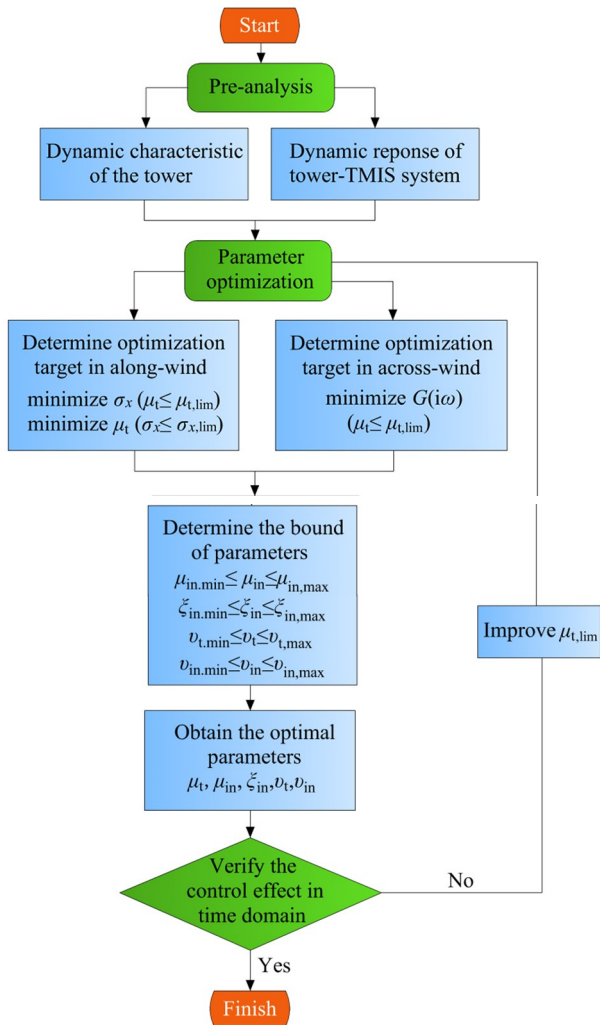


图3 TMIS对脱硫塔减振参数优化流程

Fig.3 Parameter optimization of the TMIS for the desulfurization tower

3 风振控制效果分析

3.1 顺风向减振分析

脱硫塔顺风向风振响应分析采用Davenport风速谱^[21]进行荷载谱的构建和脉动风速时程的模拟:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{2}{3} \frac{y}{(1+y^2)^{4/3}} \quad (20)$$

式中, $S_u(n)$ 为脉动风功率谱; n 为频率; u 为顺风向脉动风速; $y = 1200n/\bar{u}_{10}$ 为无量纲频率, $\bar{u}_{10} = 24.9\text{m/s}$ 为脱硫塔10m高度处的平均风速,由基本风压换算得到; σ_u 为脉动风速均方根.

根据式(14)~式(17)计算得到11组不同质量比的TMD和TMDI设计参数,同时采用遗传算法寻优获得相应的TMIS最优参数.表2给出了0.5%、2%、5%、10%实际质量比下对应的4组TMIS最优参数结果及频域位移减振率.

表2 结构顺风向频域响应最优TMIS参数
Table 2 Optimal parameters of TMIS for along-wind response in frequency domain

μ_t	μ_{in}	ξ_{in}	v_t	v_{in}	$\gamma_{TMIS} / \%$
0.5%	0.0439	0.0137	0.9752	0.0472	46.9
2%	0.0636	0.0144	0.9580	0.0710	56.7
5%	0.0844	0.0175	0.9369	0.1025	60.8
10%	0.1489	0.0485	0.9004	0.2226	62.3

注: $\gamma = 1 - \sigma_{x1}/\sigma_x$

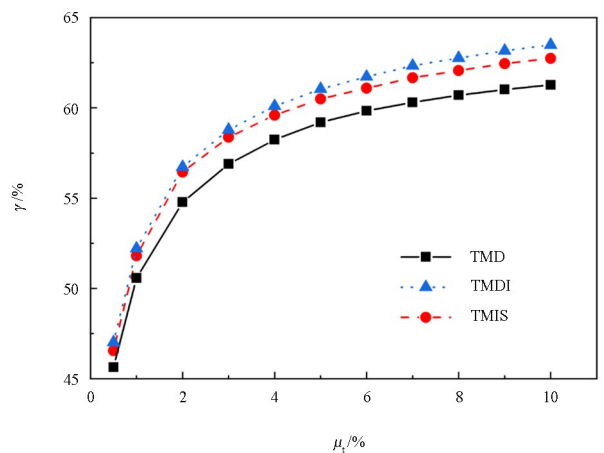


图4 结构频域减振率对比

Fig.4 Comparison of vibration reduction rates in frequency domain

图4对比了TMD、TMDI、TMIS的频域减振率 γ 随质量比的变化规律.由图可知:三种阻尼器的减振率均随实际质量比 μ_t 的增大而提高,当 μ_t 取5%时,TMIS和TMDI的均方位移减振率与

TMD 相比分别提升 2.3% 和 2.9%;当 μ_t 大于 5% 之后,减振率增速放缓.因此,后续时域减振分析各阻尼器质量比 μ_t 均限制在 5% 以内.此外,同质量比下,TMDI 和 TMIS 相较于传统 TMD 均具有明显优势,且质量比越大,其轻量化效应越明显.

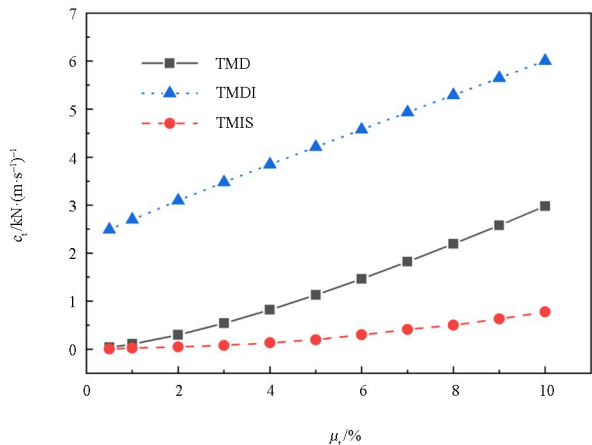


图 5 阻尼器最优阻尼系数取值对比

Fig.5 Comparison of optimal damping coefficients of different dampers

图 5 进一步对比了不同质量比下三种阻尼器的阻尼系数取值,可以看出 TMDI 的最优阻尼系数取值远高于 TMD 和 TMIS.分析可知:TMDI 通过提高两端惯容元件的虚质量以及更大的阻尼来限制结构两端的相对位移,而 TMIS 将惯容子系统与 TMD 刚度元件并联,通过较小的阻尼即可实现对主结构能量的有效耗散.

由上面减振结果可以看出,TMDI 也表现出明显的减振增效作用,且同等质量比下减振率超过 TMIS.但 TMDI 较大的阻尼取值、20% 的惯性质量比以及大于 12m 的惯容连接长度,使得工程应用难度较大;而 TMIS 的单端连接方式以及更小的惯性质量更适用于脱硫塔减振,因此时域减振效果对比分析仅在传统 TMD 和 TMIS 之间展开.

以 5% 质量比 TMD 减振后的脱硫塔频域位移响应(σ_x)为目标,控制 TMIS 的质量比最小,采用遗传算法对 TMIS 设计参数寻优,得到 TMIS 的优化参数为 $\mu_{t,min} = 3.3\%$ 、 $\mu_{in} = 0.0717$ 、 $\xi_{in} = 0.0150$ 、 $v_t = 0.9426$ 、 $v_{in} = 0.0805$.

图 6 和图 7 分别给出了 TMIS($\mu_t = 3.3\%$) 和 TMD($\mu_t = 3.3\%$ 、 $\mu_t = 5\%$) 对脱硫塔顶部位移与加速度响应控制效果,其中 TMIS 对位移和加速度 RMS 均方根值减振率分别为 40.7% 和 65.0%,与

TMD($\mu_t = 5\%$) 减振效果基本一致.可见:对应相同的控制目标,与 TMD 相比,TMIS 可实现 34% 的轻量化.

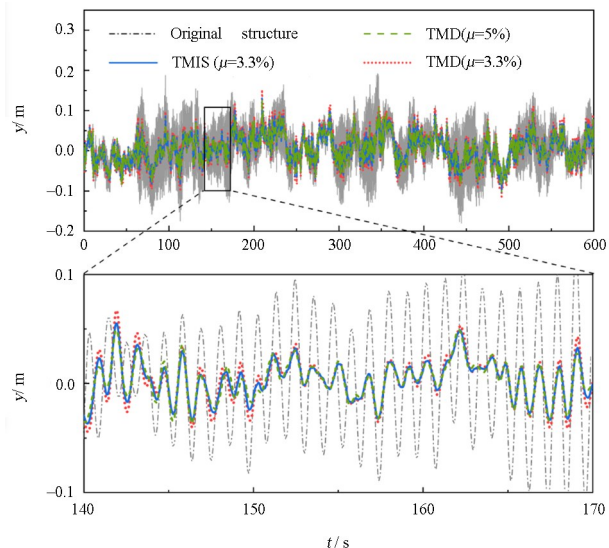


图 6 结构顺风向位移响应对比

Fig.6 Comparison of along-wind displacement response of the tower

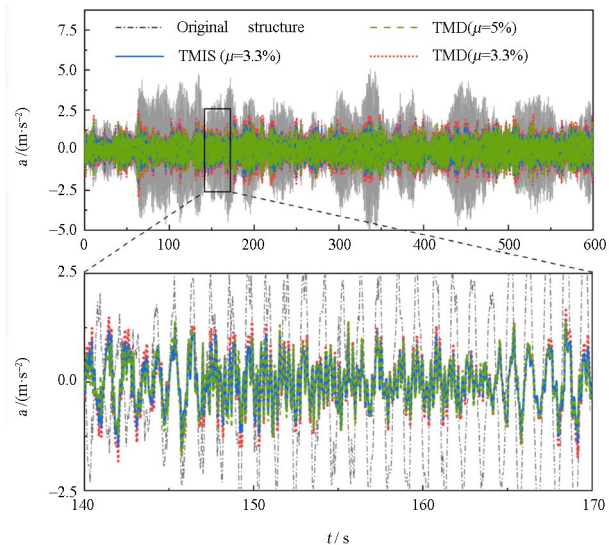


图 7 结构顺风向加速度响应对比

Fig.7 Comparison of along-wind acceleration response of the tower

3.2 横风向减振分析

高耸建筑的横风向荷载主要由涡激励和横风向湍流构成,当发生涡激共振时,湍流对结构振动的影响可以忽略不计^[22],因此本文以涡激力作为横风向计算荷载.首先结合雷诺数和临界风速,对脱硫塔进行涡激共振校核^[18,23]可知:结构可能发生第 1 阶模态涡激共振,且共振锁定区为结构上段,即第 5 段.涡激共振发生时,10m 高度处的风速为 $v_{10} = 11.7\text{m/s}$,在脱硫塔上段施加卢曼正弦

力^[24]:

$$F_v(t) = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 A \mu_L \sin(2\pi n_s t) \quad (21)$$

式中: $F_v(t)$ 为单元所受涡激力; \bar{v} 为该单元平均风速; n_s 为漩涡脱落频率,此处取为结构第1阶振动频率; μ_L 为升力系数,对于圆截面结构取0.25.

为直观体现 TMIS 的控制效果,将无控结构的 H_∞ 范数归一化 [$G(i\omega)=1$], 给出 0.5%、2%、5%、10% 实际质量比下对应的 4 组 TMIS 横风向最优控制参数结果及其最小 H_∞ 范数, 如表 3 所示.

表 3 H_∞ 范数优化下 TMIS 参数

Table 3 TMIS parameters with H_∞ optimization

μ_t	μ_{in}	ξ_{in}	ν_t	ν_{in}	$G(i\omega)$
0.5%	0.0453	0.0192	0.9705	0.0515	0.459
2%	0.0451	0.0104	0.9674	0.0490	0.326
5%	0.0824	0.0130	0.9448	0.0992	0.264
10%	0.1601	0.0427	0.9033	0.1985	0.224

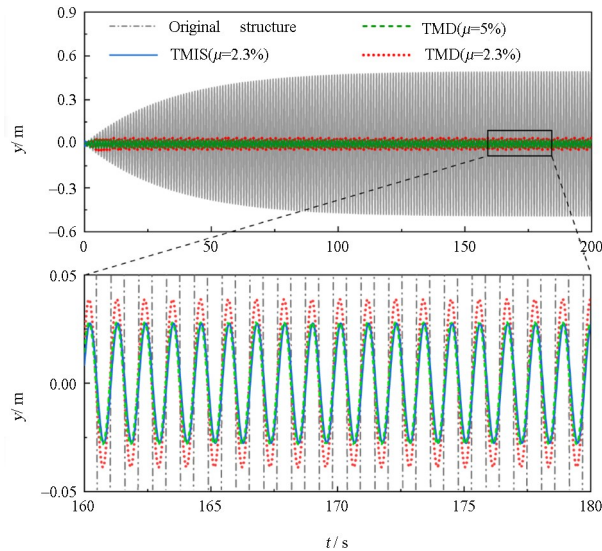


图 8 结构横风向位移响应对比

Fig.8 Comparison of cross-wind displacement response

进行脱硫塔 $TMD(\mu_t = 5\%)$ 横风向时域减振分析, 得到塔顶位移响应振幅为 0.035m, 以 $\mu_t = 5\%$ 为初始值, 间隔 0.1% 逐步减小 TMIS 的实际质量比 μ_t , 进行 H_∞ 优化并验证时域减振效果. 当限制 TMIS 质量比至 2.3%, 其横风向减振效果与 5% 质量比 TMD 基本等效 (减振率误差小于 0.2%). $TMD(\mu_t = 2.3\%、\mu_t = 5\%)$ 及 $TMIS(\mu_t = 2.3\%)$ 对结构减振时域对比分析结果见图 8, 可见等效 TMIS 对脱硫塔的横风向控制效果与 TMD

一致, 位移响应 RMS 均方根值减振率高达 93.5%. 这表明当脱硫塔发生横风向涡激共振时, 基于 H_∞ 优化得到的 TMIS 具有优越的减振效果; 与顺风向风振控制相比, TMIS 横风向风振减振率及轻量化效应进一步提升.

4 结论

(1) 针对高耸脱硫塔顺风向和横风向风致振动的具体特点, 以结构顶部均方根位移响应最小和 H_∞ 范数最小为优化目标, 基于遗传算法建立的 TMIS 参数优化设计方法具有很强的有效性, 对脱硫塔顺风向和横风向风振控制均具有较好的效果.

(2) 脱硫塔在顺风向脉动风荷载作用下, 3.3% 实际质量比的 TMIS 控制效果可实现与 5% 质量比的 TMD 完全等效, 此时结构顶部位移减振率和加速度减振率分别为 40.7% 和 65.0%.

(3) 脱硫塔在横风向涡激力作用下, TMIS 对脱硫塔的减振效果及其轻量化效应更为明显, 2.3% 实际质量比的 TMIS 控制效果与 5% 质量比的 TMD 等效, 此时结构顶部位移减振率高达 93.5%.

(4) 与 TMDI 相比, TMIS 对脱硫塔减振效果略差, 但 TMDI 需要更大的阻尼系数, 且其惯容器两端需要较长的安装距离, 工程应用面临困难. 综合考虑, 仅单端连接于主结构的 TMIS 更适用于脱硫塔风振控制.

参考文献

- [1] 邱雅柔, 唐迪, 包士毅, 等. 风诱导塔振动对塔气动特性影响研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 106—114.
QIU Y R, TANG D, BAO S Y, et al. Study of the wind-induced tower vibrations affect on aerodynamic characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 106—114. (in Chinese)
- [2] 马文勇, 汪冠亚, 袁欣欣, 等. 圆柱结构涡激共振耦合效应及其抗风设计参数 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 74—83, 105.
MA W Y, WANG G Y, YUAN X X, et al. Coupling effect of vortex induced vibration on circular cylinder and its parameters on wind resistance design [J]. China Journal of Highway and Transport,

- 2018, 31(5): 74—83, 105. (in Chinese)
- [3] 陈鑫, 李爱群, 王泳, 等. 自立式高耸结构风振控制方法研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(7): 149—155, 177.
CHEN X, LI A Q, WANG Y, et al. Investigation on techniques for wind-induced vibration control of self-standing high-rise structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(7): 149—155, 177. (in Chinese)
- [4] 傅继阳, 吴玖荣, 徐安. 高层建筑抗风优化设计和风振控制相关问题研究 [J]. 工程力学, 2022, 39(5): 13—33, 43.
FU J Y, WU J R, XU A. Some issues on wind resistant optimization design and on wind-induced vibration control of tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(5): 13—33, 43. (in Chinese)
- [5] KAVYASHREE B G, PATIL S, RAO V S. Review on vibration control in tall buildings: from the perspective of devices and applications [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(4): 1—16.
- [6] 汪志昊, 郜辉, 张新中, 等. 单摆式电涡流 TMD 装置优化设计与模型试验研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 1—7.
WANG Z H, GAO H, ZHANG X Z, et al. Optimization design and model tests for a pendulum eddy-current tuned mass damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(9): 1—7. (in Chinese)
- [7] 陈磊, 宋波, 王希慧, 等. 脱排一体式钢塔设置 TMD 对减轻风致振动的控制研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(S1): 25—35.
CHEN L, SONG B, WANG X H, et al. Study on control of reducing wind-induced vibration by TMD in integrated steel tower [J]. Journal of Buildings Structures, 2020, 41(S1): 25—35. (in Chinese)
- [8] 陈鑫, 李爱群, 张志强, 等. 自立式高耸结构悬吊式 TMD 减振动力试验与分析 [J]. 振动工程学报, 2016, 29(2): 193—200.
CHEN X, LI A Q, ZHANG Z Q, et al. Dynamic experiment and analysis of self-standing high-rise structures with pendulum TMD [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(2): 193—200. (in Chinese)
- [9] 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 R F, CAO Y R, PAN C. Inerter system and its state-of-the-art [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 8—27. (in Chinese)
- [10] MA R S, BI K M, HAO H. Inerter-based structural vibration control: a state-of-the-art review [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112655.
- [11] 叶昆, 舒率. 基于性能需求的基础隔震结构附加调谐惯容阻尼器的优化设计研究 [J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(5): 57—62.
YE K, SHU L. Optimal design of base-isolated structure with supplemental tuned inerter damper based on performance requirement [J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(5): 57—62. (in Chinese)
- [12] 苏宁, 彭士涛, 洪宁宁. 高耸烟囱结构调谐质量惯容阻尼器(TMD)风振控制方法及效果研究 [J]. 工程力学, 2022, 39(11): 143—156.
SU N, PENG S T, HONG N N. The wind-induced vibration control of high-rise chimneys by a tuned mass damper inerter (TMDI) [J]. Engineering Structures, 2022, 39(11): 143—156. (in Chinese)
- [13] IKAGO K, SUGIMURA Y, SAITO K, et al. Modal response characteristics of a multiple degree-of-freedom structure incorporated with tuned viscous mass dampers [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2012, 11(2): 375—382.
- [14] 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(6): 2149—2153.
- [15] 李亚峰, 李寿英, 陈政清. 旋转惯质双调谐质量阻尼器的优化与风振控制研究 [J]. 振动工程学报, 2020, 33(2): 295—303.
LI Y F, LI S Y, CHEN Z Q. Optimization and wind-induced vibration suppression of rotational inertia doubled tuned mass damper [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2): 295—303. (in Chinese)
- [16] 张瑞甫, 曹嫣如, 潘超. 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 R F, CAO Y R, PAN C. Lightweight structural control based on tuned mass inerter system (TMIS) under typical excitation [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 58—71. (in Chinese)
- [17] ZHANG R F, CAO Y R, DAI K S. Response control of wind turbines with ungrounded tuned mass inerter system (TMIS) under wind loads [J]. Wind

- Structures, 2021, 32(6): 573—586.
- [18] 陈鑫, 李爱群, 王泳, 等. 国内外规范自立式高耸结构等效风荷载及响应比较 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 304—311.
CHEN X, LI A Q, WANG Y, et al. Comparative study on equivalent wind loads and dynamic responses of self-standing high-rise structures in different codes [J]. Journal of Buildings Structures, 2014, 35(4): 304—311. (in Chinese)
- [19] 林家浩, 张亚辉, 赵岩. 虚拟激励法在国内外工程界的应用回顾与展望 [J]. 应用数学和力学, 2017, 38(1): 1—32.
LIN J H, ZHANG Y H, ZHAO Y. The pseudo-excitation method and its industrial applications in China and abroad [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2017, 38(1): 1—32. (in Chinese)
- [20] 同长虹, 张小栋. 调谐质量阻尼器参数优化及其应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(2): 146—149, 173.
TONG C H, ZHANG X D. Parameter optimization of toned mass dampers and its application to bridge vibration [J]. Journal of Vibration, Measure & Diagnosis, 2007, 27(2): 146—149, 173. (in Chinese)
- [21] 蒋友宝, 刘志, 贺广零, 等. 考虑脉动风场的 3MW 风机钢塔筒基础底板脱开失效概率 [J]. 工程力学, 2021, 38(5): 199—208.
JIANG Y B, LIU Z, HE G L, et al. Failure probability of foundation slab void for 3 MW wind turbine steel tower considering turbulent wind field [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(5): 199—208. (in Chinese)
- [22] 顾明, 叶丰. 高层建筑风致响应和等效静力风荷载的特征 [J]. 工程力学, 2006, 23(7): 93—98.
GU M, YE F. Characteristics of wind induced responses and equivalent static wind loads of tall buildings [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 93—98. (in Chinese)
- [23] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50009-2012 Load code for design of building structures [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 朱晓升, 丁振宇, 高增梁. 烟气脱硫塔风诱导振动的 TMD 控制研究 [J]. 压力容器, 2013, 30(12): 8—14.
ZHU X S, DING Z Y, GAO Z L. Research on TMD control for flue gas desulfurization towers under wind-induced vibration [J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(12): 8—14. (in Chinese)