

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.047

基于调谐质量阻尼器的输电塔风振控制研究

刘强¹, 郑曦¹, 张秋晗², 余传运³

(1. 徐州供电公司, 江苏 徐州 220005; 2. 徐州送变电有限公司, 江苏 徐州 220005;

3. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘 要:输电塔在风载作用下会产生强烈振动响应, 因此对输电塔的振动控制具有重要意义。建立输电塔多质点简化模型, 进一步提出使用调谐质量阻尼器对输电塔的振动进行抑制。考虑调谐质量阻尼器的减振特点和输电塔响应特点, 对调谐质量阻尼器的参数进行优化, 以获得输电塔最佳减振效果。结果表明: 调谐质量阻尼器对输电塔的振动控制效果良好。塔顶加速度响应有明显下降, 塔身主材应力也得到较好的优化, 同时也发现 0° 风向角各响应量减振效果均大于 90° 风向角。

关键词:输电塔; 动力学特性; 风致振动; 振动控制; 参数优化

中图分类号: TM75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0255-07

Research on Wind Load-induced Vibration Control of Transmission Towers Based on Tuned Mass Dampers

LIU Qiang¹, ZHENG Xi¹, ZHANG Qiuhan², YU Chuanyun³

(1. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 220005, China;

2. Xuzhou Power Transmission and Transformation Co., Ltd., Xuzhou 220005, China;

3. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 21189, China)

Abstract: Transmission towers have strong vibration under wind load, and the control over transmission towers' vibration is of great significance. In this paper, the simplified multi-particle model of transmission tower is established, and the application of tuned mass dampers for suppressing the vibration of the transmission tower is proposed. Taking characteristics of tuned mass damper and response characteristics of transmission tower into consideration, the research aims to optimizing parameters of tuned mass damper, to obtain the optimal vibration reducing effect on the transmission towers. The finite element analysis show that the tuned mass damper has a good control effect on the vibration control of the transmission tower. The acceleration response at the top of the tower is significantly reduced, and the stress of the main material of the tower body is also well optimized, and it is also found that the damping effect of each response at the 0° wind angle is greater than that at the 90° wind angle.

Keywords: transmission towers; dynamic properties; wind-induced vibration response; vibration control; parameter optimization

0 引言

输电塔作为电力传输的关键基础设施, 因其结构高大、柔性强且暴露于开阔环境中等特点, 因而能承受较大风荷载^[1]。风致振动(如低风速下的涡激振动(VIV)和强风环境下的宽带抖振)可能导致构件疲劳损伤、使用寿命缩短, 甚至引发灾难性破坏, 进而威胁电网的可靠性与安全性^[2]。而传统振动控制方法(如结构加固)往往面临成本高、结构质量增加及效果有限等问题, 对于空间结构复杂的特高压(UHV)和超高压(EHV)输电塔而言, 这些问题会显得尤为突出^[3-7]。由于输

电塔-线体系具有高度柔性特征, 在风荷载作用下会表现出极强的动力响应, 因此, 对输电塔-线体系风致振动响应的控制具有重要意义。被动控制因结构简单、成本低、维护方便且无需外部能量支持等优势, 得到了广泛应用^[8]。

目前, 用于上述控制目的的装置种类多样, 包括磁流变(MR)阻尼器、碰撞调谐质量阻尼器(PTMD)、黏弹性阻尼器(VE)、调谐液柱阻尼器(TLCD)以及摩擦阻尼器等^[9-13]。调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)是一种常用的被动控制装置, 由质量块、弹簧系统和阻尼系统组成。当主体结构受激励产生振动时, 调谐质量阻尼器

基金项目: 国网江苏省有限公司科技资助项目(J2023053)

第一作者简介: 刘强(1980—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 本科, 从事输变电工程施工建设与研究工作, liuqiang_xzgdgs@163.com。

会产生与主体结构振动方向相反的惯性力,并作用于主体结构,从而在一定程度上衰减并控制主体结构的振动响应。TMD 子系统的固有频率经设计后,与主体结构的主导固有频率相近。当结构在风荷载作用下发生振动时,TMD 质量块会沿着与结构运动相反的方向振动,产生抵消结构振动的惯性力。此外,通过频率匹配,TMD 可借助共振吸收结构振动的大部分能量:弹簧负责储存和释放弹性势能,而阻尼器(如黏性阻尼器)则通过流体摩擦或机械阻力将动能转化为热能,并将其耗散到环境中。因此,TMD 可用于减小主体结构的振动幅值(尤其针对其主导振动模式),进而降低结构的动应力与疲劳损伤。

本文建立输电塔的简化多质点模型,介绍调谐质量阻尼器的减振原理及结构控制的时域分析方法,对调谐质量阻尼器的参数进行优化设计,以获得最优减振效果。

1 TMD 控制分析法

1.1 输电塔串联多质点模型

输电塔是一座复杂的大型空间桁架结构,一般由多种不同截面的角钢或钢管组成,其有限元模型节点多,自由度数目大,计算复杂,难以直接用于优化计算。但考虑到进行结构控制分析时,竖向串联多自由度模型相对简便可行,而且节约计算时间,故根据塔的实际构造建立如图 1 所示的竖向串联多质点模型。

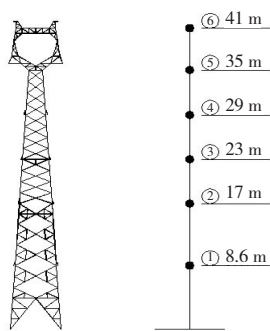


图 1 输电塔多质点模型

将 n 层质量聚集到 n 个质点上,形成质量对角矩阵 $\mathbf{M}$,各层质量如表 1 所示。刚度矩阵的形成采用空间桁架柔度法,即假设作用在第 i 个质点上的单位水平力 $P_i=1$,计算它所引起的各质点水平位移 $\delta_{1i}, \delta_{2i}, \dots, \delta_{ni}$,形成柔度矩阵 δ ,由 $\mathbf{K} =$

δ^{-1} 即可得到刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 。

从表 2 可以看出,二维多质点模型动力分析结果与三维模型的计算结果基本相同,因此可以用二维模型来研究输电塔风振响应控制问题,以便节省计算时间。

表 1 输电塔各层集中质量

编号	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
质量/kg	1 342.50	833.42	559.86	367.95	342.52	731.86

表 2 输电塔多质点模型与有限元模型固有频率对比

振型	y 向平面内振动			x 向平面外振动		
	固有频率/Hz			固有频率/Hz		
	有限元模型	数值模型	y 向误差/%	有限元模型	数值模型	x 向误差/%
1 阶	1.955 3	1.941 4	0.72	2.504 2	2.495 1	0.36
2 阶	7.322 5	7.056 5	3.77	8.820 4	8.619 5	2.33

1.2 TMD 减振时域分析方法

因为输电塔的风振响应以 1 阶振型为主,位移最大位置在输电塔顶部。因此,TMD 应该安置在塔顶,控制第 n 个节点的运动。

顶部安装了 TMD 的 n 自由度输电塔运动方程为

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{x}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{x}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}\} + \{\mathbf{U}(t)\} \quad (1)$$

式中 $\{\mathbf{U}(t)\}$ 为 TMD 控制力向量,其表达式为

$$\{\mathbf{U}(t)\} = \mathbf{C}_T\{\dot{\mathbf{x}}_T\} + \mathbf{K}_T\{\mathbf{x}_T\} \quad (2)$$

TMD 运动方程为

$$\mathbf{M}_T\{\ddot{\mathbf{x}}_T\} + \mathbf{C}_T\{\dot{\mathbf{x}}_T\} + \mathbf{K}_T\{\mathbf{x}_T\} = -\mathbf{M}_T\{\ddot{\mathbf{x}}\} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 分别为输电塔质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\mathbf{x}\}$ 为输电塔位移向量; $\mathbf{M}_T, \mathbf{C}_T, \mathbf{K}_T$ 分别为 TMD 质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\mathbf{x}_T\}$ 为 TMD 位移向量; $\{\mathbf{F}\}$ 为激励载荷。

合并可得输电塔 TMD 系统运动方程为

$$\mathbf{M}_s\{\ddot{\mathbf{X}}\} + \mathbf{C}_s\{\dot{\mathbf{X}}\} + \mathbf{K}_s\{\mathbf{X}\} = \{\mathbf{F}_s\} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ 和 $\mathbf{F}_s$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和外载荷矩阵; $\mathbf{M}_s = \text{diag}(\mathbf{M}, \mathbf{M}_T)$; $\{\mathbf{X}\} = [\{\mathbf{x}\}^T, \{\mathbf{x}_T\}^T]^T$; $\{\mathbf{F}_s\} = [\{\mathbf{F}\}^T, \{0\}^T]^T$;

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1n} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ K_{n1} & \cdots & K_{nn} + k_T & -k_T \\ \cdots & \cdots & -k_T & k_T \end{bmatrix};$$

$$C_s = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} + C_T & -C_T \\ \cdots & \cdots & -C_T & C_T \end{bmatrix}^{\circ}$$

可用 Newmark- β 法求解式(4)获得含有调谐质量阻尼器的输电塔风振响应。

2 参数分析

调谐质量阻尼器作为在高层和高耸建筑中应用最广泛的一种控制装置,如何确定它的参数是设计者首先要面临的问题。TIAN 等^[14]建立了最优参数的解析式,然而这些解析式是在假设结构不存在阻尼的情况下得到的,所以这些解析式并不适用于实际存在阻尼的结构。王肇民^[15]以等效阻尼比作为 TMD 的控制效果指标,推导出等效阻尼比与各个参数之间的方程,从而确定 TMD 的最优参数。对于具体结构,可以通过仿真计算得到 TMD 的最优参数,本文在有限元模型中通过时域分析讨论 TMD 对输电塔的风振控制,如图 2 所示。

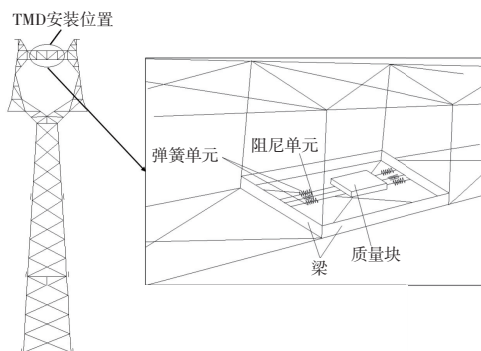


图 2 输电塔上 TMD 安装示意图

调谐质量阻尼器最重要的部件是质量块、弹簧系统、阻尼系统和质量块支撑系统。通过优化质量比、频率比和阻尼比等参数能够较大幅度的提高 TMD 减振效果。根据已有文献,TMD 与主体结构的质量比一般取在 0.005~0.03 之间,TMD 固有频率应略小于被控结构频率,阻尼比在 0.03~0.2 之间^[16-17]。

系统减振评价指标一般为系统的位移和加速度响应方差(或均方值)大小。故定义系统减振率为

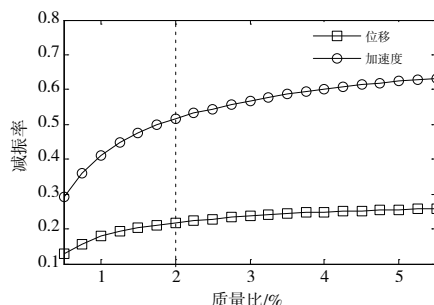
$$\delta = \frac{R_0 - R_1}{R_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_0 为主体结构在无控状态下的响应方差; R_1 为主体结构在有控状态下的响应方差。

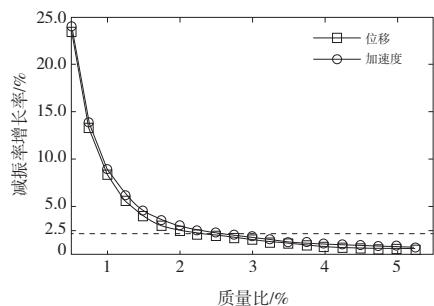
本文通过分别讨论 TMD 系统质量比 μ 、频率比 f 、阻尼比 ξ 对减振率的影响来获得 TMD 最优参数组合。

2.1 0°风向角最优参数分析

质量比优化:令频率比为 1.00,阻尼比为 0.1,计算得到图 3 所示塔顶位移和加速度减振率随质量比优化曲线。由图 3 可知,位移和加速度减振率随质量比增加而增加。但在质量比大于 2% 时,减振率增长已经非常缓慢,增长率小于 2.5%,继续增大质量比反而会对结构造成不利影响,故最佳质量比取为 2%。



(a) 质量比-减振率曲线



(b) 质量比-减振率增长率曲线

图 3 0°风向角质量比优化曲线

频率比优化:令质量比为 2%,阻尼比为 0.1,计算得到图 4 所示塔顶位移和加速度减振率随频率比优化曲线。由图 4 可知,塔顶位移减振率最大值在频率比为 0.90 时达到最大;塔顶加速度减振率在频率比为 0.95 时达到最大,比频率比为 0.90 时增大 2.01 个百分点,而位移减振率比频率比为 0.90 时仅仅减小 0.90 个百分点,故最佳频率比选为 0.95。

阻尼比优化:令质量比为 2%,频率比为 0.95,计算得到图 5 所示塔顶位移和加速度减振率随阻尼比变化曲线。由图 5 可知,位移和加速度减振率均在阻尼比为 0.12 时达到最大,故最佳阻尼比选为 0.12。

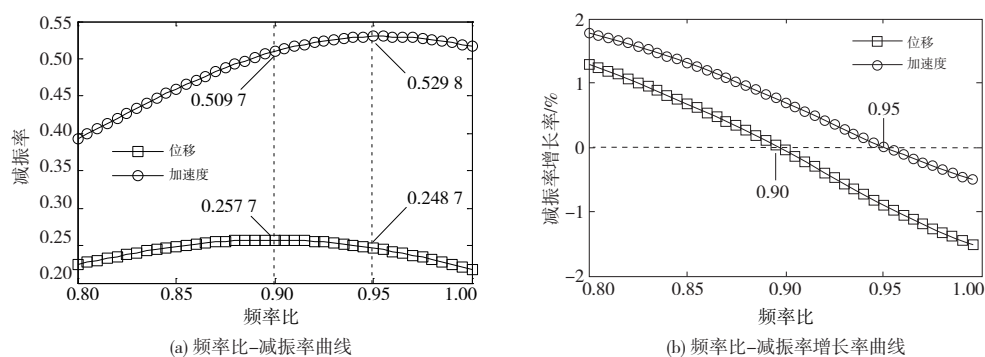


图4 0°风向角频率比优化曲线

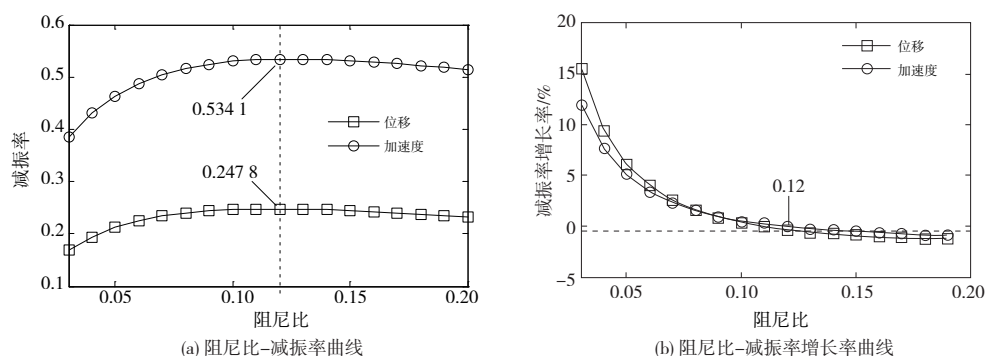


图5 0°风向角阻尼比优化曲线

0°风向角情况下调谐质量阻尼器的最佳参数组合为: $\mu=0.02$; $f_{\text{opt}}=0.95$; $\xi_{\text{opt}}=0.12$ 。安装 TMD 前后塔顶位移加速度、塔身最大应力响应及其功

率请如图 6 所示,输电塔塔顶位移和加速度减振率以及塔身主材最大应力减振率如表 3 所示。

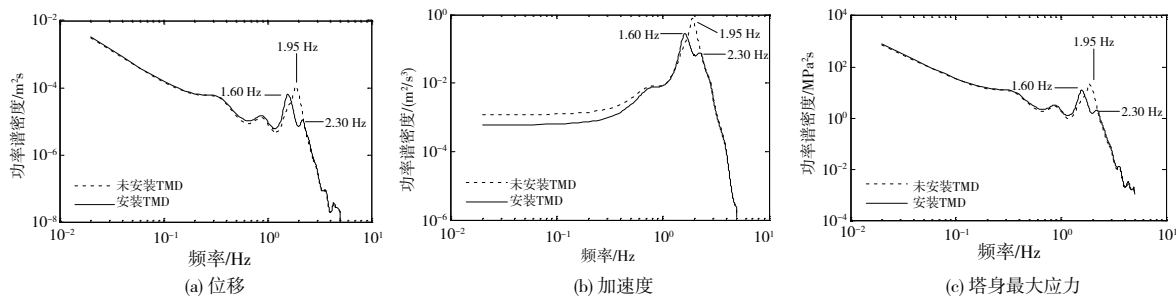


图6 0°风向角下安装 TMD 前后塔顶位移、加速度、塔身最大应力响应及其功率谱

表3 0°风向角输电塔减振率

0°风振响应	安装 TMD 前	安装 TMD 后
塔顶位移 (方差)/m	$9.707\ 3 \times 10^{-5}$	$7.193\ 1 \times 10^{-5}$
塔顶加速度 (方差)/(m/s ²)	0.286 6	0.134 7
塔身最大应力 (方差)/MPa	21.583 4	16.176 0

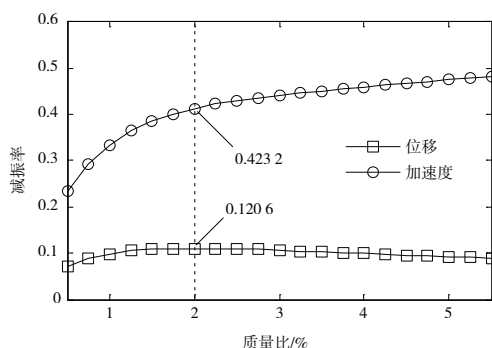
由图 6 和表 3 可得,0°风向角下输电塔塔顶位移减振率可达 25.9%,加速度减振率可达

53.0%。由于塔身应力响应特点与塔顶位移一致,所以应力减振率与塔顶位移减振率相近,达到 25.1%。由各响应功率谱可知,输电塔未安装 TMD 时各响应量共振频率点为 1.95 Hz,安装 TMD 后共振点分散分别为 1.60 Hz 和 2.30 Hz,两共振点响应峰值小于减振之前。调谐质量阻尼器的减振特点是将原来较大的共振峰值转化为两个较小的共振峰值响应,从而达到减振的目的。

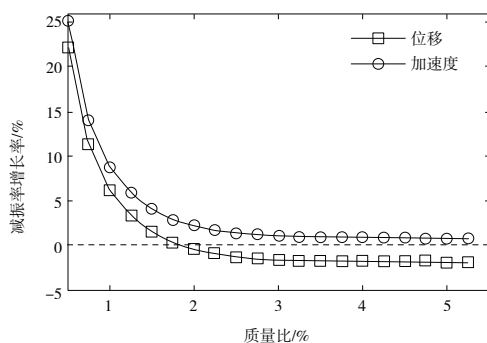
2.2 90°风向角最优参数分析

质量比优化:令频率比为 1.00,阻尼比为

0.10, 计算得到图 7 所示塔顶位移和加速度减振率随质量比变化曲线。由图 7 可知, 位移减振率在质量比为 2% 达到最大, 其后随质量比增加略微减小。加速度减振率随质量比增加而增加, 但在质量比大于 2% 时, 减振率增长已经非常缓慢, 增长率小于 2.50%, 故 90° 风向角 TMD 最佳质量比同样取为 2%。



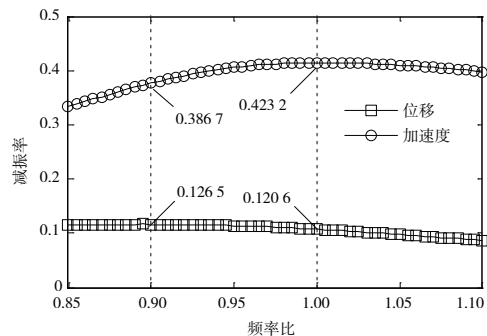
(a) 质量比-减振率曲线



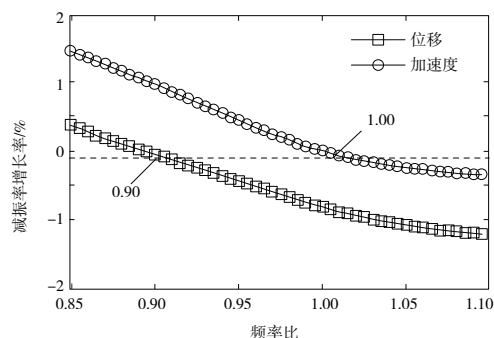
(b) 质量比-减振率增长率曲线

图 7 90° 风向角质量比优化曲线

频率比优化: 令质量比为 2%, 阻尼比为 0.10, 计算得到图 8 所示塔顶位移和加速度减振率随频率比变化曲线。由图 8 可知, 位移减振率在频率比为 0.90 时达到最大, 而加速度减振率还在明显上升。加速度减振率在频率比为 1.00 时达到最大, 比频率比为 0.90 时增加 3.65 个百分点, 而位移减振率比频率比为 0.90 时仅仅减小 0.59 个百分点, 故 90° 风向角 TMD 最佳频率比选为 1.00。



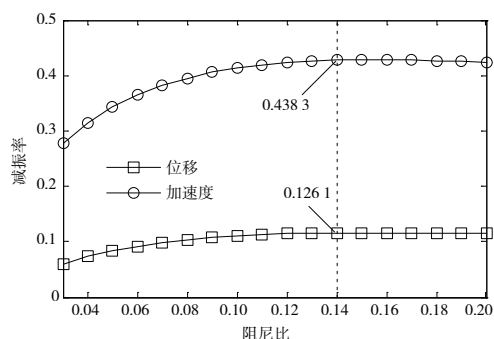
(a) 频率比-减振率曲线



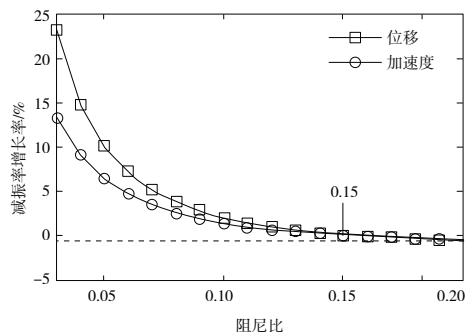
(b) 频率比-减振率增长率曲线

图 8 90° 风向角频率比优化曲线

阻尼比优化: 令质量比为 2%, 频率比为 1.00, 得到图 9 所示塔顶位移和加速度减振率随阻尼比变化曲线。由图 9 可知, 塔顶位移和加速度减振率均在阻尼比为 0.15 时达到最大, 故 90° 风向角 TMD 最佳阻尼比选为 0.15。



(a) 阻尼比-减振率曲线



(b) 阻尼比-减振率增长率曲线

图 9 90° 风向角阻尼比优化曲线

90° 风向角情况下调谐质量阻尼器的最佳参数组合为: $\mu = 0.02$; $f_{\text{opt}} = 1.00$; $\xi_{\text{opt}} = 0.15$ 。安装 TMD 前后塔顶位移、加速度、塔身最大应力响应及其功率谱 (90°) 风向角如图 10 所示, 此时输电塔塔顶位移、加速度、塔身主材最大应力对应减振率数值如表 4 所示。

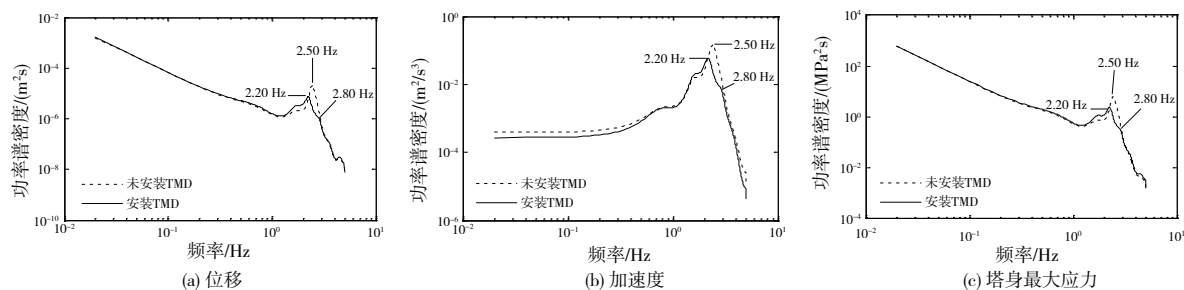


图10 安装 TMD 前后塔顶位移、加速度、塔身最大应力响应及其功率谱 (90°风向角)

表4 90°风向角输电塔减振率(方差)

90°风振响应	安装 TMD 前	安装 TMD 后
塔顶位移/m	2.473×10^{-5}	2.151×10^{-5}
塔顶加速度/(m/s ²)	8.12×10^{-2}	4.54×10^{-2}
最大应力/MPa	9.100 2	7.981 6

由表4和图10可得,90°风向角下输电塔位移减振率可达12.6%,加速度减振率可达43.8%。塔身最大应力减振率与塔顶位移减振率相近,为12.3%。由各响应功率谱可知,输电塔未安装TMD时各响应量共振频率点为2.50 Hz,安装TMD后共振点分散分别为2.20 Hz和2.80 Hz,两共振点响应峰值小于减振之前。调谐质量阻尼器减振特点是将原来较大的共振峰值转化为两个较小的共振峰值响应,从而达到减振的目的。对比0°风向角减振效果,可知0°风向角TMD各响应量减振效果均大于90°风向角。

3 结语

本文首先建立了输电塔简化多质点模型,介绍了调谐质量阻尼器减振机制,并对调谐质量阻尼器进行了参数优化,得到了输电塔在 x 向和 y 向的最优减振效果,具体结论如下。

1) 三维有限元模型和多质点串联模型都能比较准确地反映结构的动力特性,二维多质点模型动力分析结果与三维模型的计算结果基本相同,两者在 x 向和 y 向的前2阶模态基本一致。因此可以用二维模型来研究输电塔风振响应控制问题,以便大大节省计算时间。

2) 调谐质量阻尼器对输电塔的振动控制有较好的控制效果。本文 x 向与 y 向最佳质量比相同,均为2%,这有利于两个方向共用一个质量块。当控制装置的1阶频率与结构的自振频率接近时,控制效果最好。塔身主材应力减振效果与塔顶位移相近,且0°风向角各响应量减振效果均大

于90°风向角。

参考文献:

- [1] ASGARIAN B, DADRAS ESLAMLOU S, ZAGHI A E, et al. Progressive collapse analysis of power transmission towers [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 123: 31-40.
- [2] ROY S, KUNDU C K. State of the art review of wind induced vibration and its control on transmission towers [J]. Structures, 2021, 29: 254-264.
- [3] ZHAO A X, DING J M, SUNA H H. Structural design of Shanghai tower for wind loads [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1759-1767.
- [4] JÚNIOR P A M, RIOS I G, FERREIRA T, et al. Structural analysis and structural optimization of self-supporting truss towers to support a large wind turbine [J]. Iran University of Science & Technology, 2014, 4: 341-359.
- [5] HOLMES J D. Along-wind response of lattice towers: part I - derivation of expressions for gust response factors [J]. Engineering Structures, 1994, 16(4): 287-292.
- [6] HOLMES J D. Along-wind response of lattice towers—II. aerodynamic damping and deflections [J]. Engineering Structures, 1996, 18(7): 483-488.
- [7] DENG H Z, SI R J, HU X Y, et al. Wind tunnel study on wind-induced vibration responses of a UHV transmission tower - line system [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(7): 1175-1185.
- [8] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 72: 241-252.
- [9] WU J R, LI Q S. Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements [J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 979-990.
- [10] ZHOU F H, PANG J, WANG B, et al. Analysis and suppression on tower vibration of permanent magnet

- synchronous generator-based wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(3): 65-82.
- [11] WEI C M, MA B, SU T T. Research on the wind-induced vibration coefficient of transmission tower-line system[J]. Physics Procedia, 2012, 24: 149-154.
- [12] DE LIMA D M, LÓPEZ-YÁÑEZ P A, PEREIRA M A. Vibration control device for steel tubular towers of horizontal axis wind turbines [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2019, 16(6): e200.
- [13] QIN L, YUAN J J, LI W. Random wind-induced response analysis of transmission tower-line system[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1813-1821.
- [14] TIAN L, WANG Q, YU Q Q, et al. Wind-induced vibration optimal control for long span transmission tower-line system [J]. The Open Civil Engineering Journal, 2013, 7(1): 159-163.
- [15] 王肇民. 电视塔结构 TMD 风振控制研究与设计[J]. 1994(5): 2-13.
- [16] 胡松. 大跨越输电线路的风振反应分析及振动控制研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [17] 曹枚根, 周福霖, 徐忠根, 等. 大跨越输电塔线体系减震控制分析研究[J]. 2007(14): 45-51.

收稿日期: 2025-10-10

(上接第 231 页)

- [7] 王红莉, 向国菲, 朱雨琪, 等. 基于 PS-RRT 算法的机械臂避障路径规划[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 42-46.
- [8] 崔靖凯, 王凯, 范正奇, 等. 基于改进灰狼算法的冗余机械臂最优轨迹规划[J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1457-1466.
- [9] 李淦, 牛洛第, 陈路, 等. 融合视觉特征增强机制的机器人弱光环境抓取检测[J]. 计算机应用, 2023, 43(8): 2564-2571.
- [10] 贾清玉, 常亮, 杨先一, 等. 面向机械臂操作的视觉信息实时重建方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(4): 1255-1260.
- [11] 李磊磊, 张哲, 杨伊菲, 等. 基于点线视觉/惯性 SLAM 和目标检测的测距方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(3): 237-244.
- [12] 孟月波, 王宙, 韩九强, 等. 虚实坐标智能匹配与自适应三维轨迹规划[J]. 控制工程, 2024, 31(8): 1468-1477.
- [13] 沈微微, 姜晓燕, 张兵, 等. 机器人抓取视觉传感目标精确定位方法[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 763-768.
- [14] 余涛, 熊盛武. 农业场景下移动机器人的双目视觉定位与地图构建方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(12): 185-191.
- [15] 孙茂琳, 秦建军, 曹钰, 等. 面向非结构化坡面的四足机器人位姿优化方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(21): 43-51.
- [16] 张建华, 任宝珍, 赵岩, 等. 基于二分试探的平面冗余机械臂碰撞检测与避障[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 113-122.
- [17] 刁慧, 陈桂, 曹飞虎, 等. 基于碰撞检测的双机械臂避障路径规划[J]. 机床与液压, 2024, 52(15): 43-49.
- [18] 李美强, 马庆禄, 闫浩, 等. 多自由度机械臂关节运动控制研究[J]. 机械强度, 2025, 47(2): 147-158.
- [19] 任金超, 李佳昌, 王平江, 等. 基于双插补轨迹控制的七关节机械臂避障[J]. 工程科学学报, 2023, 45(12): 2085-2094.
- [20] 朱峰刚. 关节速度约束下六轴机械臂空间运动轨迹规划方法[J]. 机械与电子, 2023, 41(3): 44-49.

收稿日期: 2024-06-13