

# 基于微型 TLD 的吸热塔气弹模型减振试验研究

朱社州, 李旭, 王君鹏

(山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

**摘要:**吸热塔近年来应用广泛。作为典型的高耸结构,在风荷载作用下,极易发生大幅振动。该文以一座高 228.5 m 的光热电站吸热塔为背景,设计并制作了一种可用于小比例模型风洞试验的微型调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)。基于气弹模型试验方法,研究了 TLD 对吸热塔风致振动的抑制效果。首先,制作了吸热塔 1:200 全气弹模型,并分析了相应的 TLD 最优控制参数。然后,采用多容器的方式设计制作了用于该模型的微型 TLD。详细测试了吸热塔模型受控前后的风致响应,包括顶部加速度、位移和基底剪力、弯矩。研究结果表明,在设计风速(33 m/s)范围内,该吸热塔会发生明显涡激振动,而 TLD 可以显著减小结构在横风向、顺风向的风致响应。安装 TLD 后,在涡激区内,吸热塔横风向顶部加速度和位移峰值可分别减小 56.3%、53.5%,底部剪力和弯矩峰值可分别减少 58.7%、56.5%;在设计风速下,横风向顶部加速度和位移峰值可分别减小 48.4%、40.3%,底部剪力和弯矩峰值可分别减少 65.4%、45.5%。

**关键词:**吸热塔;涡激振动;气弹模型;振动控制;调谐液体阻尼器

**中图分类号:**TU972.8

**文献标志码:**A

## Research on vibration damping tests of a solar tower aero-elastic model based on miniature TLD

ZHU Shezhou, LI Xu, WANG Junpeng

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

**Abstract:** As a typical slender structure, solar towers, which have been widely applied in recent years, are highly prone to significant vibrations under wind loads. Based on a 228.5 m-high solar tower, the wind-induced vibration control performance of Tuned Liquid Dampers (TLDs) was studied by wind tunnel tests. Firstly, a 1:200 full aeroelastic test model of the solar tower was designed and fabricated, and the corresponding optimal parameters of the TLD were analyzed. Then, a miniature and multi-container TLD was designed for the aero-elastic test model, and wind tunnel tests for the model, both with and without the miniature TLD, were conducted respectively. Wind-induced responses of the tower, including top acceleration, displacement, base shear force and moment were measured. It was found that significant vortex-induced vibrations occurred within the range of the design wind speed (33 m/s). The results showed that wind-induced responses of the tower could be significantly suppressed by the TLD both in the cross-wind direction and the along-wind direction. With the installation of the TLD, the peak values of the top acceleration and displacement in the cross-wind could be reduced by 56.3% and 53.5%, respectively, and the corresponding reduction ratios for the base shear force and moment were 58.7% and 56.5%. At the design wind speed, the peak crosswind top acceleration and displacement were reduced by 48.4% and

收稿日期:2024-05-16; 修回日期:2025-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52308501);湖南省区域联合基金项目(2025JJ70090)

作者简介:朱社州(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事工程结构设计研究。E-mail:zhushzhou@sdepci.com

通信作者:李旭(1977—),男,高级工程师,硕士,主要从事工程结构设计研究。E-mail:lixu@sdepci.com

40.3%, respectively, and the peak base shear force and bending moment were reduced by 65.4% and 45.5%.

**Key words:** solar tower; vortex-induced vibration; aero-elastic test model; vibration control; tuned liquid damper

## 0 引言

太阳能吸热塔作为清洁能源发电结构,目前在全世界已广泛用于发电,是我国实现能源变革的重要动力。太阳能吸热塔作为一种风敏感的高耸结构,具有阻尼小、频率高等特点。当吸热塔涡振风速低于设计风速时,容易发生涡激共振。而其顶部的集热器对振动幅值有严格要求。因此,对于吸热塔振动控制的研究具有重要的工程意义。近年来,随着我国对于绿色发展的重视,关于吸热塔的研究也越来越多。李寿英等<sup>[1]</sup>提出了可实现低阻尼比的吸热塔气弹模型优化设计方法;邢国雷等<sup>[2]</sup>基于气弹模型研究了某 100 MW 吸热塔的风振特性;顾洪波等<sup>[3]</sup>运用 CFD 对吸热塔结构进行数值风洞模拟;刘敏等<sup>[4-5]</sup>系统研究了吸热塔的风振特性以及 TMD 对吸热塔的振动控制。

调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)是一种被动调谐减振控制系统,是降低土木工程结构不良动态响应的最有效手段之一。VANDIVER 等<sup>[6]</sup>发现海洋平台上固定的储油罐对平台振动具有减缓效果,证实了 TLD 在振动控制中的潜力。随后,SATO<sup>[7]</sup>提出了利用 TLD 控制建筑结构振动的概念。SUN 等<sup>[8]</sup>最早利用浅水波动理论来模拟水箱内水的振荡效应。FUJINO 等<sup>[9]</sup>通过多个水箱,研究了 TLD 结构体系的减振。GEORGAKIS 等<sup>[10]</sup>模拟了带有 TLD 的风力机受风激振动的响应情况。李宏男等<sup>[11]</sup>通过振动台试验对 TLD 的结构模型相互作用进行了研究。珠海金山大厦<sup>[12]</sup>在顶部设置了 TLD,成功地将振动加速度减小了 50%,使其满足了舒适度要求。孙连杨等<sup>[13]</sup>分析了内置竖向挡板 TLD 系统对高层建筑风致响应的控制效率。孟庆恩等<sup>[14]</sup>研究了内置垂直格栅矩形 TLD 水箱,在外加水平激励下液体的晃动特征和液体晃动的力学性能数值模拟。

本文基于气弹模型试验,研究了 TLD 对吸热塔风致振动的抑制。首先,建立了吸热塔有限元模型,获得了结构的固有频率、振型等参数,并据此设计制作了吸热塔气弹模型;然后,设计并制作了一款微型 TLD,对微型 TLD 中液体的固有频率和晃动阻尼比进行了识别,并与理论值进行了比较;最后,进行了气弹模型风洞试验,分析了吸热塔的风致响应特性,系统地研究了 TLD 对吸热塔的减振效果。

## 1 吸热塔气弹试验模型的设计

### 1.1 工程背景

该吸热塔高为 228.5 m,圆形截面,其外径从底部的 27 m 变化到顶部的 19.2 m。0~185 m 高度范围内为混凝土结构,壁厚从底部 0.7 m,变化到顶部 0.6 m;185~228.5 m 高度范围内为钢结构,该部分为吸热装置;结构的基阶频率为 0.31 Hz。吸热塔示意图见图 1。

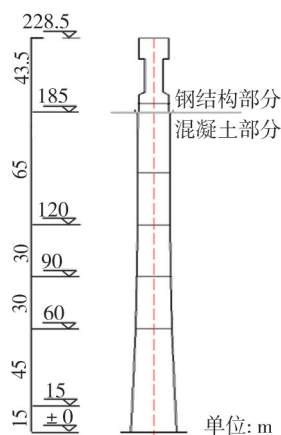


图 1 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram

## 1.2 气弹模型

### 1.2.1 相似系数与动力特性分析

本试验在湖南大学 HD-2 风洞进行。据风洞阻塞率的要求,确定模型与原型间的几何缩尺比  $1/n$  为  $1/200$ ,风速比  $1/m$  初步拟定为  $1/6$ ,最终风速比待模型制作完成后,根据模型实测频率与原型结构频率的比值进行调整。各参量的目标相似比见表 1。

为获得结构动力特性参数,分别建立了原型与模型的空间有限元分析模型,见图 2。需要说明的是,为排除储液杯质量对后续 TLD 减振试验的调谐影响,气弹模型动力特性测试时,吸热塔顶部安装无水 TLD。因此,为保持一致性,采用 ANSYS 进行结构动力特性分析时,储液杯简化为 MSA21 单元置于有限元模型顶部。原型与模型的前 2 阶振型对比,可以看出两者吻合较好,尤其是基阶振型,证实了模型设计的合理性,见图 3。

表 1 吸热塔气弹模型相似系数

Table 1 Similarity coefficient of air-elastic model of solar tower

参数	相似比	目标值	实际值	参数	相似比	目标值	实际值
长度	$1/n$	1:200	1:200	频率	$n/m$	33.33	32.73
密度	1	1	1	加速度	$n/m^2$	5.56	5.36
速度	$1/m$	1/6	1/6.11	阻尼比	1	1	1
单位长度质量	$1/n^2$	$1/4 \times 10^4$	$1/4 \times 10^4$	抗弯刚度	$1/(m^2 n^4)$	$1/5.76 \times 10^{10}$	$1/5.97 \times 10^{10}$
质量	$1/n^3$	$1/8 \times 10^6$	$1/8 \times 10^6$	力	$1/(m^2 n^2)$	$1/1.44 \times 10^6$	$1/1.49 \times 10^6$
单位长度质量惯性矩	$1/n^4$	$1/1.6 \times 10^9$	$1/1.6 \times 10^9$	弯矩	$1/(m^2 n^3)$	$1/2.88 \times 10^6$	$1/2.99 \times 10^8$

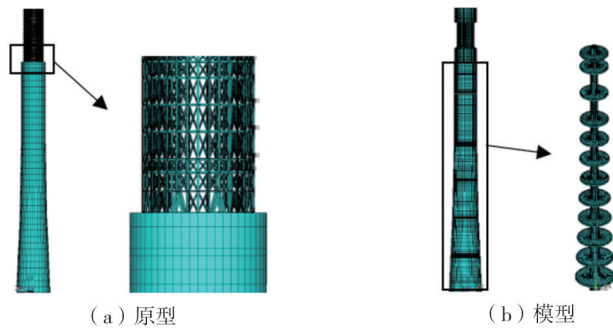


图 2 有限元建模

Fig. 2 Finite element modeling

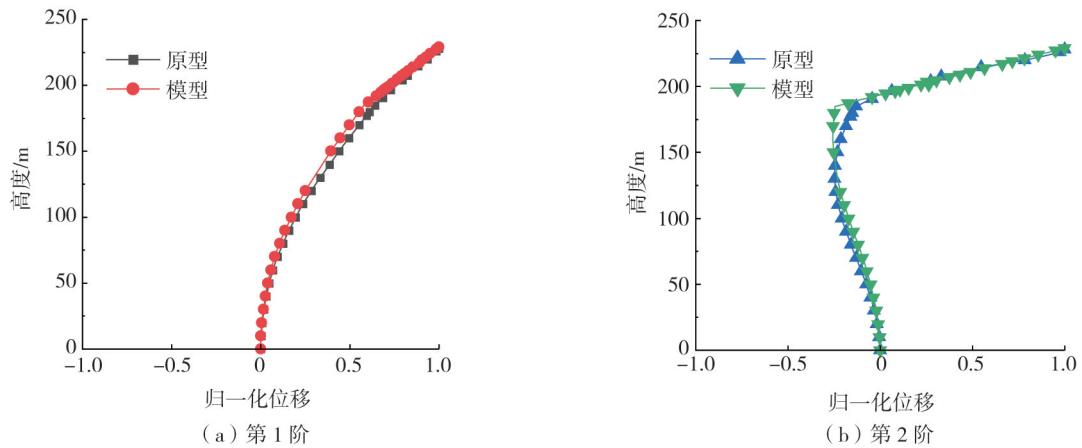


图 3 振型

Fig. 3 Mode of vibration

### 1.2.2 模型的制作与动力特性参数识别

参考 LI 等<sup>[15]</sup>对吸热塔气弹模型的研究,本模型采用铝合金材料,由底座、芯梁、圆盘、外衣和螺钉五个部分构成。为了避免增加模型刚度,外衣沿高度进行分段,相邻层间设有 2 mm 的间隙。试验模型的上部钢结构设计为空心,以便为安装微型 TLD 预留空间。制作完成的试验模型照片见图 4。

利用自由振动衰减法从水平加速度响应中识别出弹性试验模型的固有频率、振型和固有阻尼等结构参数。由得到的加速度时程响应信号频谱分析可知,模型的振动主要集中在第1阶模态上,其他模态的振动比较微弱。加速度响应时程曲线及其对应的频谱密度(power spectral density, PSD)曲线见图5和图6。由图可知,模型1阶阻尼比为0.5%左右,低于目标值0.7%;模型第1阶振动频率为10.156 Hz,略低于设计目标值10.332 Hz,但二者间的误差可通过调整风速比进行修正,因此,模型完全可满足试验要求。

根据模型实测频率与原型结构频率之间的比值 $\lambda_f$ ,代入 $\lambda_f = n/m$ ,可计算出调整后的风速比 $m$ 为6.11,调整后的各参数最终相似比见表1。

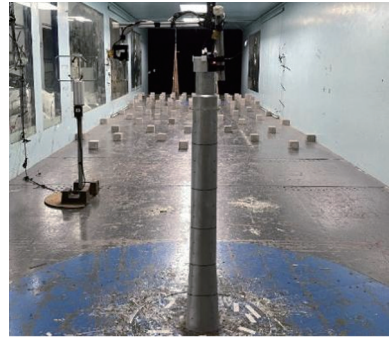


图4 试验模型照片

Fig. 4 Test model photograph

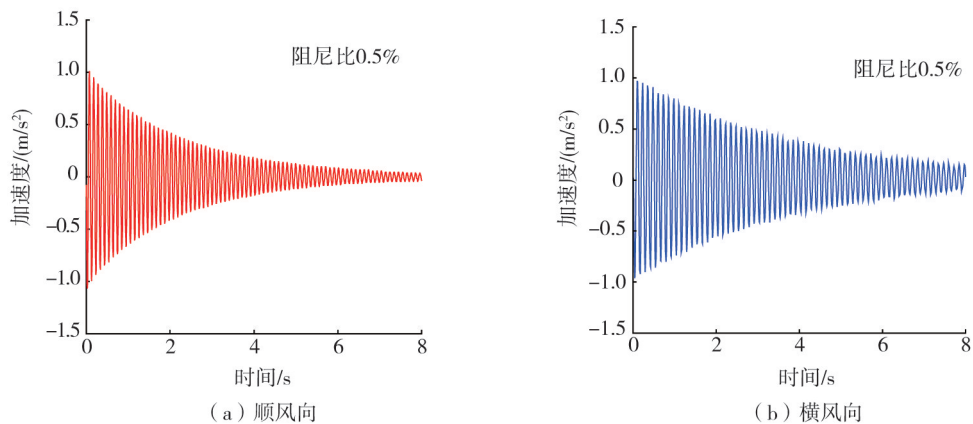


图5 加速度响应的衰减时程曲线

Fig. 5 Decay time history curves of acceleration response

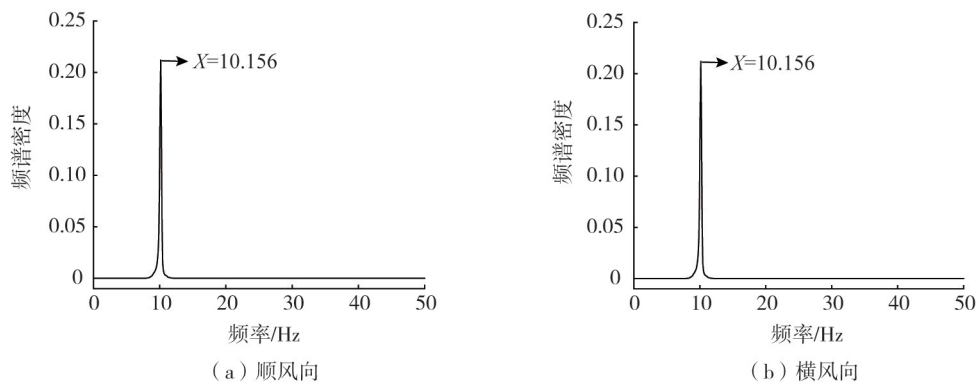


图6 功率谱密度曲线

Fig. 6 Power spectral density curve

## 2 微型 TLD 设计

### 2.1 TLD 理论模型

液体在 TLD 中的运动状态与其深度和容器尺寸密切相关。根据液深比  $H/D$  ( $H$  为液深,  $D$  为容器内径) 的取值, TLD 大致可分为深水 ( $H/D > 1/8$ ) 和浅水 ( $H/D < 1/8$ ) 这 2 种。吸热塔为高耸结构, 其振动以第 1 阶模态为主, 此时 TLD 内液体的 1 阶反对称振动对结构的振动减振起主要作用。根据 GRAHAM<sup>[16]</sup> 提出的集中质量法, 当液体的高阶晃动模态可以忽略不计时, 理论上可以将液体分为 2 个独立的部分。第一部分为固定刚性质量  $m_0$ , 为液体中未起振部分的质量。第二部分为一组质量-弹簧系统 ( $m_n, k_n$ ), 为液体中的起振部分。起振部分液体的作用与调谐质量阻尼器类似, 对减小结构振动具有重要作用。固定刚性质量  $m_0$  表示相对于容器静止的液体, 这相当于增加了结构的质量。可以将 TLD 等效为如图 7 的等效力学模型。

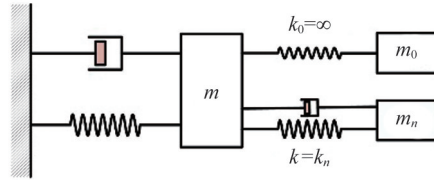


图 7 等效力学模型

Fig. 7 Equivalent mechanical model

弹簧振子质量  $m_n$  和固定质量  $m_0$  占总质量  $m$  的百分比完全由液深比决定,分别按式(1)~式(3)计算:

$$\frac{m_n}{m} = \frac{2 \tanh\left(\frac{1.84H}{R}\right)}{1.84(1.84^2 - 1) \frac{H}{R}} \quad (1)$$

$$\frac{m_0}{m} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m_n}{m} \quad (2)$$

$$m = \rho \pi R^2 H \quad (3)$$

晃动液体的角频率  $\omega$  可由 ABRAMSON<sup>[17]</sup> 提出的理论计算,如式(4)所示:

$$\omega^2 = \frac{1.84}{R} g \tanh\left(\frac{1.84 H}{R}\right) \quad (4)$$

由式(4)可知,TLD 的晃动频率由  $H/R$  和  $R$  这 2 个参数决定。如果在微型 TLD 中以水为液体,则微型 TLD 的理论晃动阻尼比  $\xi_L$ <sup>[17]</sup> 为

$$\xi_L = \frac{2.89}{\pi} \nu^{0.5} R^{-3/4} g^{-1/4} \left[ 1 + \frac{0.318}{\sinh(1.84H/R)} \left( \frac{1-(H/R)}{\cosh(1.84H/R)} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中  $\nu$  为水的运动黏度。

将 TLD 简化为图 7 所示模型后,根据 Den Hartog 理论优化 TLD 的设计参数<sup>[18]</sup>,优化过程类似于调谐质量阻尼器,在此不再详细说明。优化后可得到针对第 1 阶模态 TLD 的弹簧振子的最优频率比和阻尼比,分别如式(6)、式(7)所示:

$$\lambda_{1opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (6)$$

$$\xi_{1opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (7)$$

式中  $\mu$  为弹簧振子质量比。

## 2.2 微型 TLD 设计与制作

在进行微型 TLD 设计时,首先要确定所需的微型 TLD 的性能指标,包括减振效果、尺寸和质量等。这些指标通常由原型结构的特性以及所需的振动控制要求确定。由于吸热塔结构在风荷载作用下的振动以 1 阶模态为主,故微型 TLD 的减振目标按照吸热塔的第 1 阶模态参数确定。根据吸热塔气弹模型,设计相应的微型 TLD,用于后续的吸热塔减振风洞试验研究。设计流程见图 8。

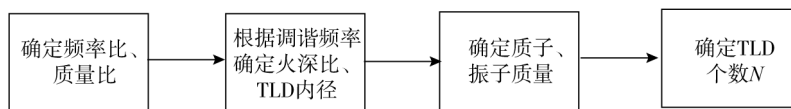


图 8 微型 TLD 设计流程

Fig. 8 Design flow of miniature TLD

由有限元计算结果可知,原型吸热塔的第 1 阶模态质量为 5 702 t,根据质量相似比,可得到模型的第 1 阶模态质量为 712.75 g。取质量比  $\mu$  为 1%,则微型 TLD 内液体质量  $m_L$  约为 7.1 g。

由式(6)、式(7)可知,对应质量比  $\mu$  为 1%,微型 TLD 的最优调谐频率比和阻尼比分别为 0.99 和 6.10%。已知吸热塔气弹模型固有频率为 10.156 Hz,故微型 TLD 的目标频率和阻尼比分别为 10.05、6.10%,其表达式为

$$\begin{cases} f_{\text{TLD}} = \alpha_{\text{opt}} f_m \\ \xi_{\text{TLD}} = \xi_{\text{opt}} \end{cases} \quad (8)$$

其中,首先应保证的是 TLD 液体自振频率与结构自振频率的调谐。通常,实现 TLD 液体频率调谐的方法有 2 种:一是保持 TLD 储液杯尺寸不变,通过改变液体深度进行频率调节,该方法适用于浅水 TLD;二是保持液体的水深比不变,通过改变储液杯内直径进行频率调节,该方法适用于储液杯内液体较深的情况。显然,对于小比例模型风洞试验的微型 TLD 而言,调节水深比难以实现其频率的精确调节,选用深水型 TLD,通过改变容器内径实现频率的调谐更合适。

圆柱型 TLD 在不同水深比  $H/D$  下液体 1 阶频率  $f$  随储液杯内径  $D$  的变化规律见图 9。由图可知,液体自振频率随储液杯内直径的变化接近线性,这说明调节储液杯内径  $D$  进行液体频率调谐是简单可行的。同时,可以发现当液体水深比  $H/D > 0.4$  后,液体频率  $f$  随储液杯内径  $D$  变化的曲线十分接近,此时继续增大水深比来调节液体频率的效果十分有限。

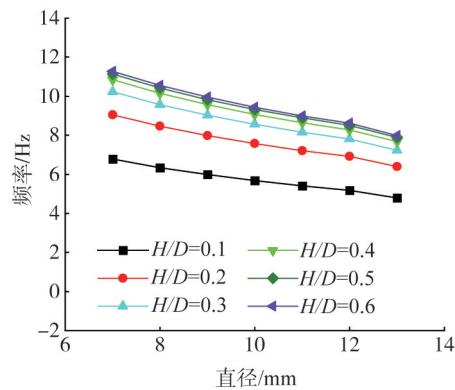


图 9 不同水深比  $H/D$  下液体自振频率  $f$  随储液杯内径  $D$  的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of liquid natural frequency  $f$  with the inner diameter  $D$  of the storage cup under different water depth ratios  $H/D$

基于上述分析,综合考虑 TLD 液体质量及吸热塔气弹模型内 TLD 安装空间,本文最终选取  $H/D = 0.6$ ,将其代入式(4)可确定 TLD 储液杯的内径为

$$D = 2 \times \frac{1.84g \times \tanh(1.84H/R)}{\omega^2} = 0.009 \text{ m} \quad (9)$$

单个储液杯内液体质量为

$$m_1 = \frac{\pi D^2 H}{4} \rho_{\text{液}} = 0.344 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (10)$$

储液杯总个数为

$$n_{\text{总}} = \frac{m_L}{m_1} = 20.6 \text{ 个} \quad (11)$$

为便于制作,储液杯个数取 20 个,此时对应的液体质量  $m_L$  约为 7 g, TLD 最终设计参数见表 2。为保证储液杯具有足够的刚度,并便于观察和识别杯内液体的运动,分别采用聚碳酸酯管材和板材制做竖直杯壁和杯底,液体主要成分为水,水中添加少量的润滑剂,以降低水的表面张力。

表 2 试验用 TLD 设计参数

Table 2 Design parameters of test TLD

TLD 直径/mm	TLD 储液杯数量/个	液体质量/g	安装高度/m
9	20	7	1.14

### 3 风洞试验概况

#### 3.1 风场模拟

湖南大学 HD-2 边界层风洞高速试验段断面尺寸为宽 3.0 m,高 2.5 m,长 17 m,最大风速为 58 m/s。本模

型风洞试验紊流流场按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[19]</sup>规定的 A 类地貌模拟,风速  $U$  和紊流强度  $I$  沿高度分别按式(12)、式(13)变化:

$$U = U_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \tag{12}$$

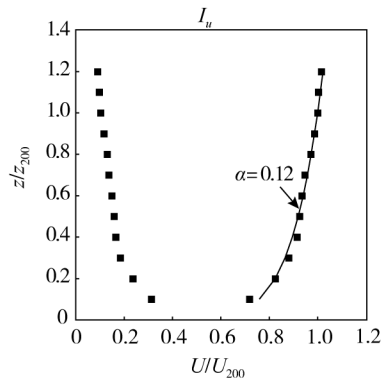
$$I(z) = I_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^{-\alpha} \tag{13}$$

式中,  $z$  为计算风高度;  $U$  为 10 m 高度处风速;  $\alpha=0.12$  为地貌指数, 10 m 高度处的名义湍流度  $I_{10}$  取 0.12。

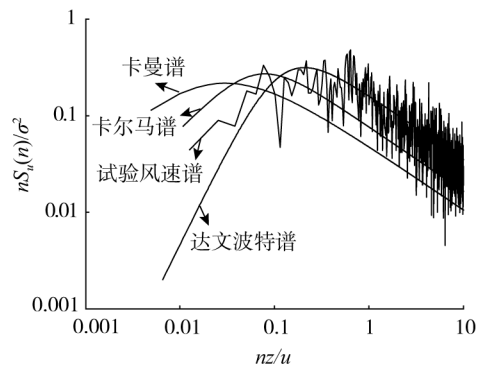
为了满足风速和紊流度剖面的要求,采用“尖劈+粗糙元”的方法模拟相应的风场,见图 10。实测的风速和紊流强度沿高度的变化曲线见图 11(a), 1 m 高度处的实测风谱曲线见图 11(b), 实测风谱形状与 Davenport 目标谱形状基本一致,调试风场完全满足试验要求<sup>[20]</sup>。



图 10 吸热塔模型风场布置照片  
Fig. 10 Photos of wind field layout of solar tower model



(a) 平均风速和湍流度剖面模拟



(b) 1.0 m 高度处的风速谱

图 11 风场特性测试

Fig. 11 Wind field characteristic tests

### 3.2 无 TLD 吸热塔气弹模型试验

吸热塔的阻尼比设置为 0.7%。模型(含 TLD 储液杯)通过底座固定于天平上,天平再固定于风洞试验转盘上。加速度计和位移计的布置图见图 12、图 13。测试风速为风洞内高度 1.0 m 高度处 3~13 m/s 间的多个试验风速,仅测试 0° 风向角。每次测试同步记录模型顶部加速度、位移、基底力以及实时风速。响应采样频率为 200 Hz,每个风速下采集时长为 60 s。



图 12 模型顶部加速度传感器布置  
Fig. 12 Acceleration sensor layout at the top of the model

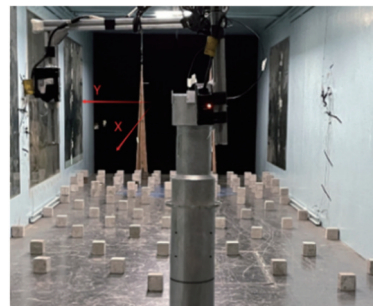


图 13 激光位移计及坐标轴示意图  
Fig. 13 Laser displacement meter and coordinate axis diagram

### 3.3 安装微型 TLD 吸热塔气弹模型试验

TLD 对气弹模型的减振效果测试中,试验风速、风向角均与未安装 TLD 的试验工况完全一样,即 0° 风向角下 3~13 m/s 间的多个风速,测点及测试仪器均相同。TLD 安装于模型顶部 1.14 m 高处。安装 TLD 后的模型见图 14。



图14 TLD安装

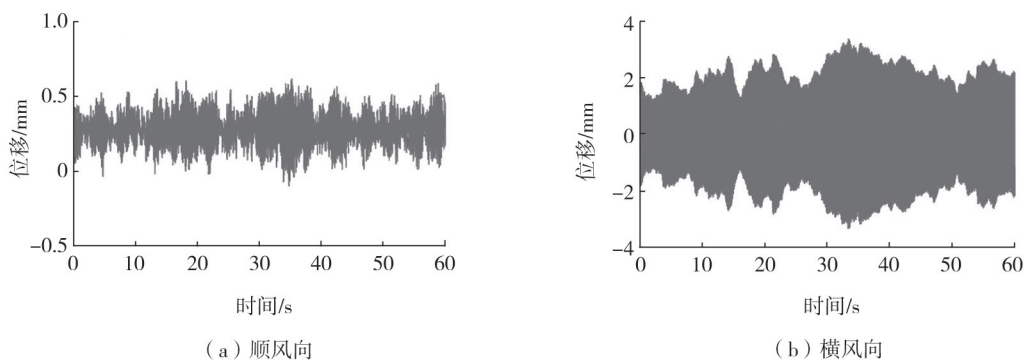
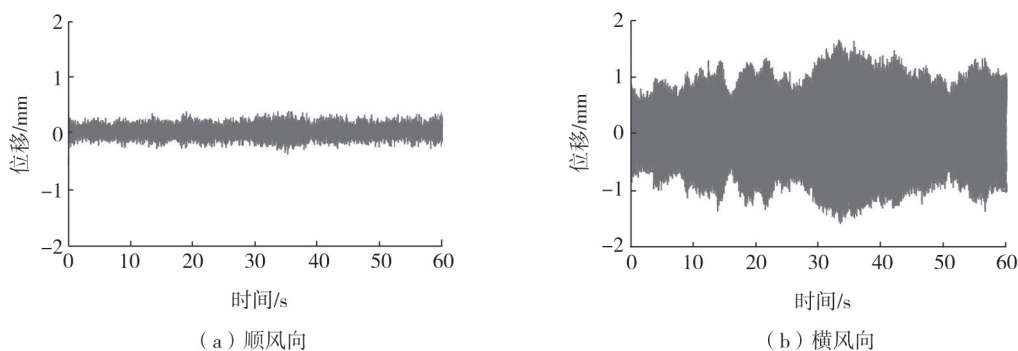
Fig. 14 TLD installation

## 4 试验结果

### 4.1 原型结构的响应

通过吸热塔气弹模型试验,可发现实际结构在 10 m 高度处风速为 27.9 m/s 左右时会产生显著的涡振现象。对应原型 27.9 m/s(临界风速)和 33 m/s(设计风速)来流风速下,吸热塔模型(含有微型 TLD 储液杯)顶部顺、横风向的加速度和位移响应时程曲线,见图 15~图 18。由图可知,临界风速下响应远大于设计风速,且结构风振响应主要由横风向控制,即使在设计风速下。

按表 1 中的相似系数可将模型试验测得的加速度、位移响应、基底弯矩及剪力换算到原型结构。

图15 模型顶部位移时程( $U=27.9$  m/s)Fig. 15 Displacement time history at the top of the model ( $U=27.9$  m/s)图16 模型顶部加速度时程( $U=27.9$  m/s)Fig. 16 Acceleration time history at the top of the model ( $U=27.9$  m/s)

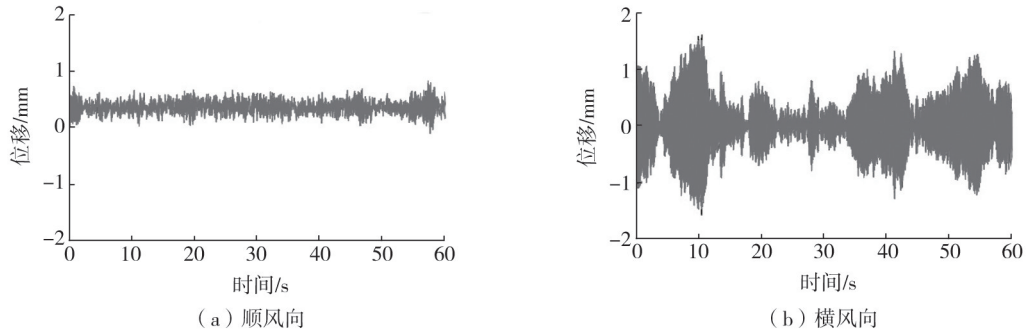


图 17 模型顶部的位移时程 ( $U=33.0 \text{ m/s}$ )

Fig. 17 Displacement time history at the top of the model ( $U=33.0 \text{ m/s}$ )

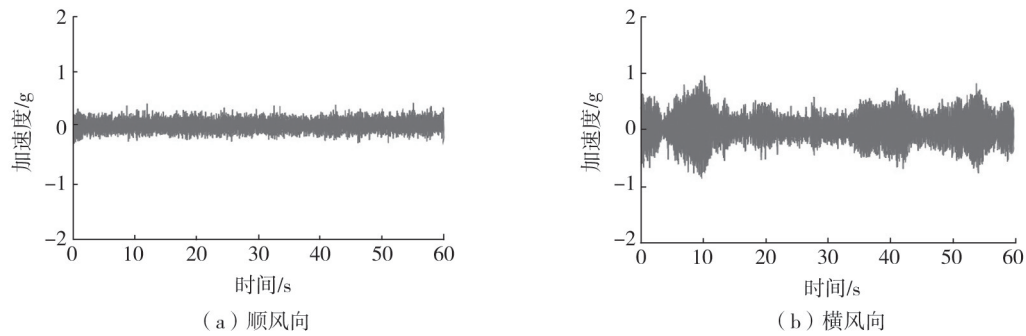


图 18 模型顶部的加速度时程 ( $U=33.0 \text{ m/s}$ )

Fig. 18 Acceleration time history at the top of the model ( $U=33.0 \text{ m/s}$ )

### 4.2 TLD 减振试验结果与对比

安装微型 TLD 前后,换算至原型后的吸热塔风致响应对比见图 19~图 22。由图可知,微型 TLD 对吸热塔结构的减振效果显著,尤其是对横风向,在涡振风速区间明显能抑制振动。

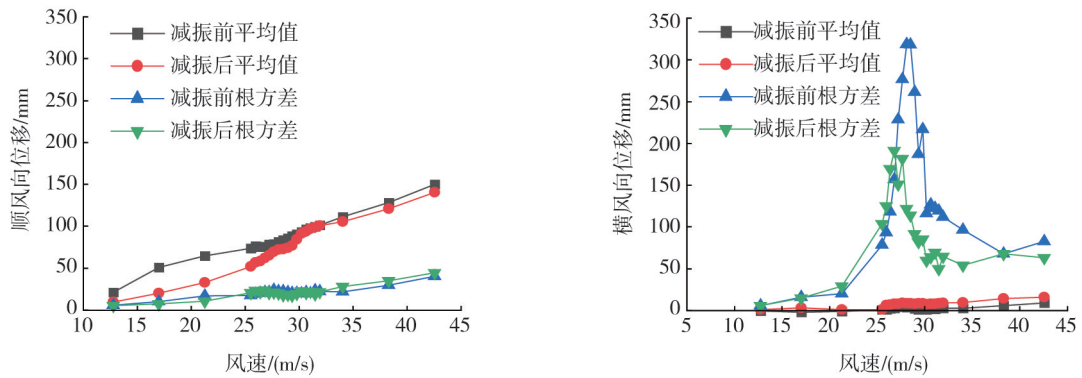


图 19 安装 TLD 前后位移响应对比 (原型)

Fig. 19 Comparison of displacement response before and after TLD installation (prototype)

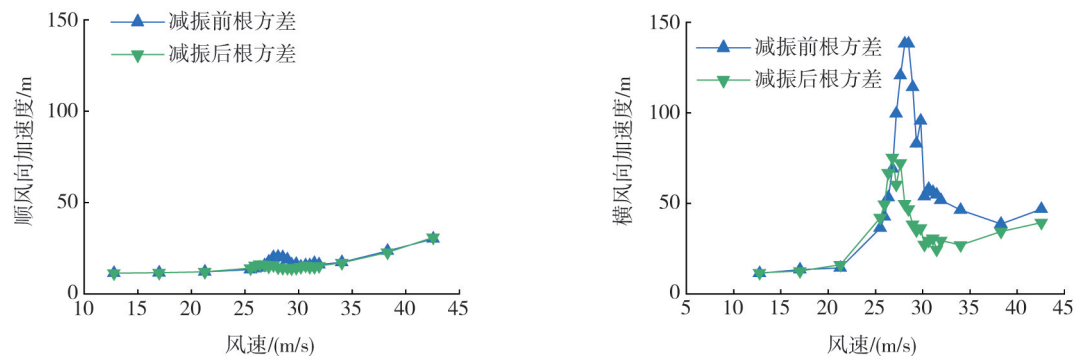


图 20 安装 TLD 前后加速度响应对比 (原型)

Fig. 20 Comparison of acceleration response before and after TLD installation (prototype)

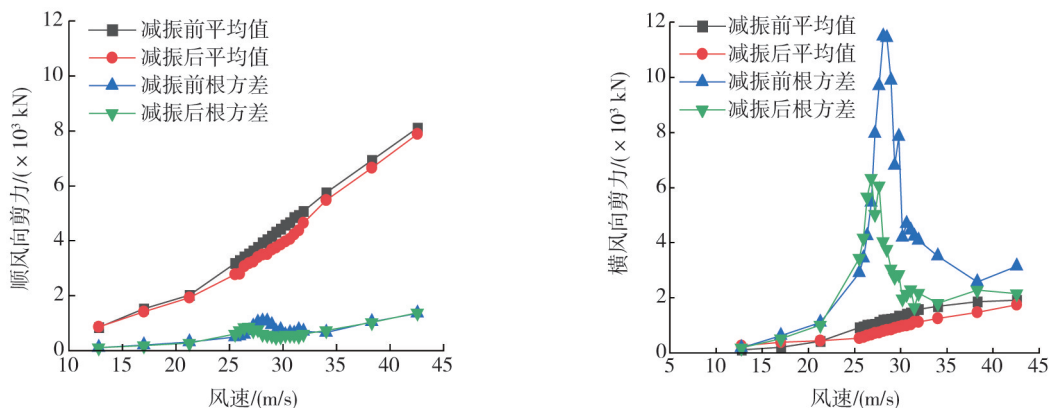


图 21 安装 TLD 前后基底剪力对比(原型)

Fig. 21 Comparison of base shear force before and after TLD installation (prototype)

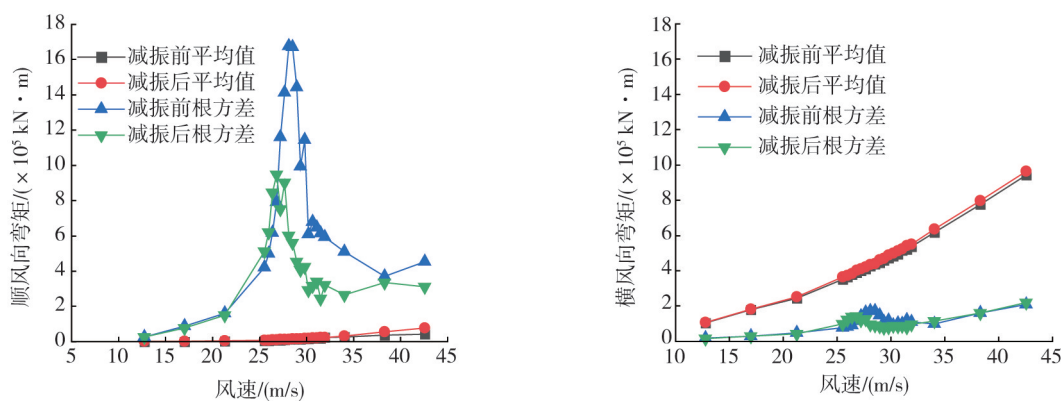


图 22 安装 TLD 前后基底弯矩对比(原型)

Fig. 22 Comparison of base bending moment before and after TLD installation (prototype)

为更直观对比减振效果,表 3 中同时还给出了吸热塔安装微型 TLD 前后临界风速和设计风速下的响应峰值(换算至原型)。通过对比可知,涡振临界风速下,吸热塔横风向顶部位移峰值可减小 53.5%,加速度响应峰值可减小 56.3%,基底剪力和基底弯矩峰值可分别减小 58.7%、56.5%;在设计风速下,吸热塔横风向顶部位移峰值可减小 40.3%,加速度响应峰值可减小 48.4%,基底剪力和基底弯矩峰值可分别减小 65.4%、45.5%。

表 3 响应峰值对比

Table 3 Comparison of peak response

参数		位移/mm		加速度/ $(\times 10^{-3} g)$		剪力/ $(\times 10^4 \text{ kN})$		弯矩/ $(\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m})$	
		减振前	减振后	减振前	减振后	减振前	减振后	减振前	减振后
临界风速	X	215.7	132.5	88.0	50.5	0.70	0.50	3.63	1.58
	Y	692.4	322.0	316.9	138.5	2.35	0.97	0.92	0.73
设计风速	X	227.6	150.9	79.5	79.6	0.96	0.65	1.67	0.91
	Y	320.9	191.5	214.0	110.5	1.33	0.46	0.95	0.95

## 5 结束语

为了研究微型 TLD 对吸热塔风致响应的抑制效果。本文基于吸热塔 1:200 的气弹模型,在风洞大气边界层内按 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[19]</sup> 的 A 类地貌进行了试验。首先,制作了 228.5 m 高的吸热塔气弹模型,确定了其固有频率、前 2 阶振型和结构阻尼比等结构参数;其次,计算分析了 TLD 的最优设计参数,并设计制作了可用于吸热塔气弹模型的微型 TLD。最后进行了风洞试验,对比研究了微型 TLD 对吸热塔风致振动的抑制效果。

试验结果表明,吸热塔实际结构在 10 m 高度处风速为 27.9 m/s 左右会产生显著的涡振现象。安装 TLD 后,其风致振动可得到良好的控制。在涡振区间内,横风向顶部位移峰值可减小 53.5%,加速度峰值可

减小 56.3%,基底剪力和基底弯峰值可分别减小 58.7%和 56.5%;在设计风速下,吸热塔横风向顶部位移峰值可减小 40.3%,加速度峰值可减小 48.4%,基底剪力和基底弯矩峰值可分别减小 65.4%和 45.5%。

## 参考文献:

- [1] 李寿英,孙北松,刘敏. 太阳能塔气弹模型结构优化研究[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(5): 377-383.  
LI Shouying, SUN Beisong, LIU Min. Structural optimization of the solar tower aero-elastic model[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(5): 377-383. (in Chinese)
- [2] 邢国雷,李寿英,吴迎强,等. 基于气弹模型试验的光热电站吸热塔风致响应研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(6): 148-152, 160.  
XING Guolei, LI Shouying, WU Yingqiang, et al. Research on wind-induced responses of a solar tower in CSP station based on aeroelastic model test[J]. Industrial Construction, 2023, 53(6): 148-152, 160. (in Chinese)
- [3] 顾洪波,俞昊然,陈响荣,等. 某超高吸热塔数值风洞模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(增刊1): 177-182.  
GU Hongbo, YU Haoran, CHEN Xiangrong, et al. Numerical wind tunnel simulation of an ultra-high heat absorption tower[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(Sup. 1): 177-182. (in Chinese)
- [4] LIU M, LI S Y, WU T, et al. Eddy current tuned mass dampers for mitigation of wind-induced responses of the noor-iii solar tower; design, installation and validation[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(12): 05021009.
- [5] 刘敏. 光热电站吸热塔风致振动及其控制措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
LIU Min. Study on wind-induced vibrations of solar tower and its control measurements[D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [6] VANDIVER J K, MITOME S. Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms[J]. Applied Ocean Research, 1979, 1(2): 67-74.
- [7] SATO T. Tuned sloshing damper[J]. Journal of Wind Engineering, 1987, 32: 67-68.
- [8] SUN L M, FUJINO Y, PACHECO B M, et al. Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular tuned liquid damper (TLD) simulation and experimental verification[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1989, 1989(410): 81-92.
- [9] FUJINO Y, SUN L M, PACHECO B M, et al. Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(10): 2017-2030.
- [10] CHEN J L, GEORGAKIS C T. Spherical tuned liquid damper for vibration control in wind turbines[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 21(10): 1875-1885.
- [11] 李宏男,贾影,李晓光,等. 利用 TLD 减小高柔结构多振型地震反应的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(2): 122-128.  
LI Hongnan, JIA Ying, LI Xiaoguang, et al. Study on vibration control using TLDs for multi-mode responses of tall flexible structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, 20(2): 122-128. (in Chinese)
- [12] 贾影,李宏男,李玉成. 高层建筑利用 TLD 减震的实例计算[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 135-140.  
JIA Ying, LI Hongnan, LI Yucheng. An actual computing example for a tall structure using TLD to reduce vibration[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2000, 20(1): 135-140. (in Chinese)
- [13] 孙连杨,吴玖荣,钟文坤,等. 基于 CFD/CSD 耦合分析的内置竖向挡板 TLD 高层建筑风振控制研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(2): 292-301.  
SUN Lianyang, WU Jiurong, ZHONG Wenkun, et al. CFD/CSD coupling numerical simulation on wind-induced vibration control of tall building and TLD system with built-in vertical baffles[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(2): 292-301. (in Chinese)
- [14] 孟庆恩,邓梓泳,吴玖荣,等. 内置垂直格栅矩形 TLD 水箱液体晃动特征的 CFD 数值模拟[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(1): 86-94.  
MENG Qingen, DENG Ziyong, WU Jiurong, et al. CFD Numerical simulation of the liquid sloshing characteristics of a rectangular TLD tank with vertical screens[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2023, 22(1): 86-94. (in Chinese)
- [15] LI S Y, LIU M, LI H X, et al. Effects of structural damping on wind-induced responses of a 243-meter-high solar tower based on a novel elastic test model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 172: 1-11.
- [16] GRAHAM E W, RODRIGUEZ A M. The characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952, 19(3): 381-388.
- [17] ABRAMSON H N. The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology[R]. National Aeronautics and Space Administration, 1966.
- [18] 陈政清,樊伟,李寿英,等. 结构动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.  
CHEN Zhengqing, FAN Wei, LI Shouying, et al. Dynamics of structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2021. (in Chinese)
- [19] 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 the design of building structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [20] 孙瑛,武岳,曹正罡,译. 建筑风洞实验指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
SUN Ying, WU Yue, CAO Zhenggang, Trans. Guidelines for building wind tunnel experiments[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)