

DOI:10.19701/j.jzjg.LS230280

## 深圳某 400m 双塔连体结构 TLD 风振控制可行性研究

崔济东, 陈寅, 廖耘

(广州容柏生建筑设计事务所(普通合伙), 广州 510180)

**摘要:** 深圳某 400m 双塔连体项目结构体系为带伸臂、环桁架加强层的框架-核心筒双塔连体结构, 包含东、西两座塔楼及连接体。受复杂建筑造型、较大风荷载及特殊场地风环境影响, 在 10 年一遇风荷载作用下, 塔楼于东南风来流方向呈现显著的动力响应, 塔楼顶部风振加速度远超规范限值, 导致舒适度不足。为解决此问题, 拟采用调谐液体阻尼器(TLD)对塔楼进行风振控制。通过频谱分析识别结构风致响应的控制振型, 并采用时程法对设置 TLD 结构进行风时程动力响应分析, 结合敏感性分析获得最优 TLD 设计参数。结果表明: 结构基底剪力及东塔顶部风振加速度频谱呈单峰特性, 主要受东塔一阶平动振型控制; 西塔顶部风振加速度频谱则呈双峰特性, 同时受东、西塔一阶平动振型影响。在东塔顶部设置 TLD 可显著降低结构基底剪力及东、西塔的顶部风振加速度; 而西塔顶部设置 TLD 仅能有效降低西塔垂直连接体方向的顶部风振加速度, 对其沿连接体方向及东塔顶部的风振加速度和结构基底剪力均无明显控制效果。东、西塔顶部同时设置 TLD 后, 塔楼的顶部风振加速度得到有效控制, 满足规范限值要求。

**关键词:** 双塔连体结构; 调谐液体阻尼器; 风振加速度; 双振型激励; 频谱分析

中图分类号:TU318<sup>+</sup>.1 文献标志码:A 文章编号:1002-848X(2025)17-0111-09

[引用本文] 崔济东, 陈寅, 廖耘. 深圳某 400m 双塔连体结构 TLD 风振控制可行性研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(17): 111-119. CUI Jidong, CHEN Yin, LIAO Yun. Feasibility investigation of wind-induced vibration control using TLD for a 400-meter twin-tower connected structure in Shenzhen[J]. Building Structure, 2025, 55(17): 111-119.

### Feasibility investigation of wind-induced vibration control using TLD for a 400-meter twin-tower connected structure in Shenzhen

CUI Jidong, CHEN Yin, LIAO Yun

(RBS Architectural Engineering Design Associates, Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** The structural system of a 400m twin-tower linked project in Shenzhen features a frame-core tube configuration with outriggers and belt truss strengthening story, comprising eastern and western towers connected by connective structure. Due to complex architectural geometry, high wind loads, and unique site-specific wind conditions, under 10-year return period wind loads from the southeastern direction, the towers exhibit significant dynamic responses. Wind-induced accelerations at the tower tops substantially exceed code limits, resulting in occupant comfort deficiencies. To address this, tuned liquid dampers (TLDs) were proposed for wind vibration control. Spectrum analysis was employed to identify governing vibration modes of structural wind-induced responses. Time-history analysis was conducted to evaluate wind-induced dynamic responses of the TLDs-equipped structure, with parametric sensitivity analysis subsequently optimizing TLD design parameters. The results demonstrate that the structural base shear and the wind-induced acceleration spectrum at the eastern tower top exhibit a single-peak characteristic, primarily governed by the first translational mode of the eastern tower. The wind-induced acceleration spectrum at the top of the western tower show a double-peak characteristic, influence concurrently by the first translational modes of both the eastern and western towers. TLDs installed atop the eastern tower significantly reduce base shear and wind-induced accelerations at both tower tops. However, TLDs at the top of the western tower only effectively mitigate accelerations perpendicular to the connective structure but show no significant control effect on accelerations along the connective structure direction, the accelerations at the top of the eastern tower, or the structural base shear. Furthermore, when TLDs are installed simultaneously at the tops of both towers, wind-induced accelerations are effectively controlled, ensuring compliance with code-specified limits.

**Keywords:** twin-tower connected structure; tuned liquid damper; wind-induced acceleration; double mode excitation, spectrum analysis

第一作者:崔济东,博士,高级工程师,主要从事结构抗震、减震及振动控制的设计与研究,Email: jidong\_cui@163.com。

## 1 工程概况

项目位于深圳市深圳湾超级总部基地<sup>[1]</sup>,为双塔连体超高层结构,地下3层、地上裙房7层,主要为商业和文化功能区,塔楼分为西塔和东塔,主要包括二大功能区,中低区为办公、高区为酒店或精品办公等,项目的整体建筑效果如图1所示。

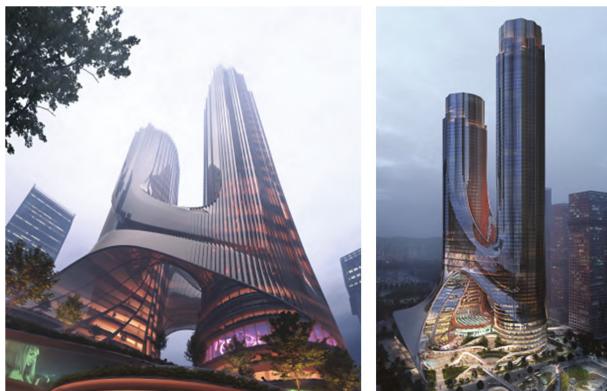


图1 整体建筑效果图

东塔建筑高度393.2m,屋面结构高度359.3m,地上69层,其中6层及以下为裙房部分,7层及以上主要为办公楼,典型层高4.5m,塔楼顶部59~66层为精品酒店,层高4.2m。西塔建筑高度329.0m,低于东塔,屋面结构高度309.8m,地上62层,其中6层及以下为裙房部分,7层及以上为典型办公楼层,层高4.5m,沿塔楼高度范围一共设置6个避难层兼做设备层,层高6.0m。东、西两座塔楼在100m高度处设置2层高的空中连体层,与塔楼的连桥文化层(对应塔楼的20、21层)相连,连接体最大跨度约100m,连体层层高9.0m。

两座塔楼建筑平面基本对称,整体呈椭圆形,轮廓为锯齿状,平面长、短轴尺寸分别约64.53m,两座塔楼外框柱沿平面周边各布置10根,柱距约16~17m。

结构体系为带伸臂、环桁架加强层的框架-核心筒双塔连体结构,主要由塔楼外框架、核心筒、加强层、连接体桁架、幕墙结构五个部分组成,项目的整体结构体系如图2所示。其中东、西两座塔楼采用框架-核心筒体系,双层连接体桁架采用钢结构。东、西塔典型结构平面布置如图3所示。

项目结构设计基准期为50年,结构安全等级为一级,抗震设防类别为乙类,抗震设防烈度为7度,抗震措施设防烈度为8度,设计基本地震加速度0.10g,设计地震分组为第一组,基本风压为0.75kPa(50年一遇),风荷载由风洞试验确定。

深圳地区为亚热带海洋性气候,常年主导风向为东南偏东风,每年遭遇台风4~5次,基本风压较

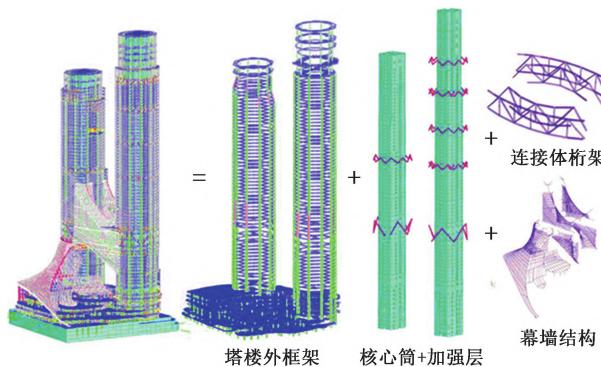


图2 塔楼结构体系

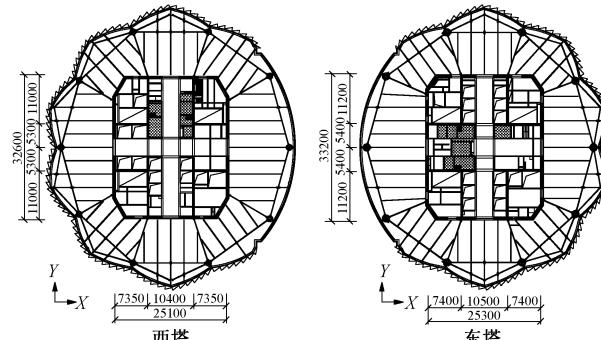


图3 东、西塔典型结构平面布置

大,显著高于国内多数沿海城市,且项目面向深圳湾,周边风场环境复杂,结构自身又为复杂的多塔连体结构,存在不同振型下塔楼相互作用等特点,这些因素使得本项目的结构抗风设计与风振控制设计存在一定特殊性,需重点考虑。

## 2 风洞试验

项目基地一侧临近深圳湾,周边高楼林立,如图4所示。由于建筑造型较为复杂,周边环境复杂,塔楼之间存在风荷载干扰效应,风荷载是主要控制性荷载。为确保塔楼的设计安全可靠、经济合理及保证风洞试验结果的合理性及安全性,项目委托了两个风洞实验室,进行独立试验,并互相校验。图5给出了结构主轴与风向角的定义及风洞试验给出的10年一遇风荷载及1.5%阻尼比条件下各风向角下结构顶层的最大风振加速度结果<sup>[2]</sup>。



图4 项目所在地周边地貌

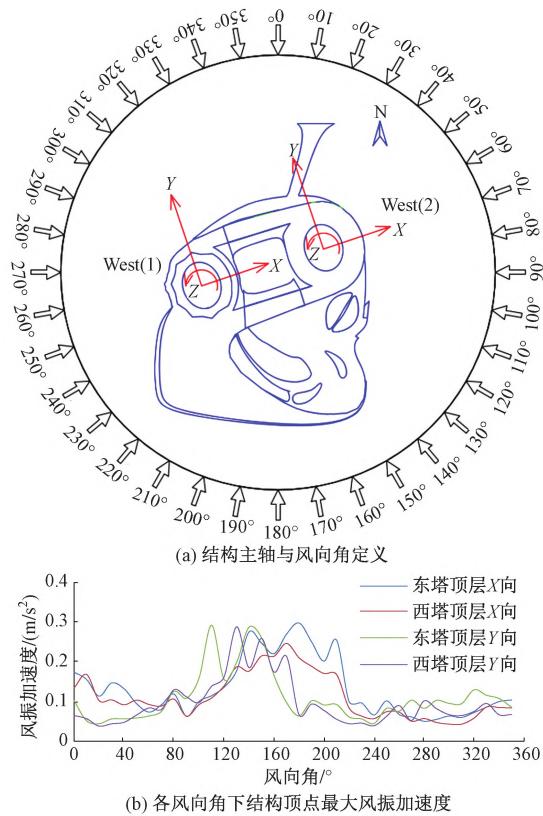


图 5 结构主轴与风向角定义及各风向角下结构顶层最大风振加速度

由图 5 可见,项目的最不利风向集中在东南向及南向(最大风振加速度大致出现在  $100^{\circ} \sim 220^{\circ}$  风向角范围,其余范围风向角下风振加速度均低于  $0.2 \text{m/s}^2$ ),其中在  $140^{\circ}$  风向角附近,两塔风振加速度均较大,东塔顶层  $X$ 、 $Y$  向最大风振加速度分别为  $0.295$ 、 $0.291 \text{m/s}^2$ ,西塔顶层  $X$ 、 $Y$  向最大风振加速度分别为  $0.245$ 、 $0.289 \text{m/s}^2$ ,均超过《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)<sup>[3]</sup>(简称《高规》)规定的办公类高层建筑的顶点风振加速度限值  $0.25 \text{m/s}^2$ ,不满足该规范要求。

经分析,最不利风向集中在东南向及南向,主要是由尾流激励的横风向风振引起。如图 4 所示,当风沿东南向吹时,最先经过高  $400\text{m}$  的塔楼 B,引起塔楼 B 发生横向风振,当风绕过塔楼 B 后发生了变化,变成了忽强忽弱的脉动风,这个脉动风的节奏正好跟本项目的自振周期接近,引起显著风振。

综上,需要采取抗风减振措施,控制结构的风振加速度,保证结构的舒适度。

### 3 风振加速度控制方案比选

如第 2 节所述,本项目的风振问题主要是由于尾流激励引起,考虑到结构主要为风控,且在 50 年一遇风荷载下位移角已贴限,因此,首先想到解决结构风振问题最直接方案是提高结构的刚度,避开

风的脉动周期。为评估这一方案的可行性,进行了塔楼顶点风振加速度及塔楼频率的敏感性分析,如图 6 所示。由图可见,目前结构一阶周期约  $7.3\text{s}$ ,需将结构周期减小到原周期的  $1/1.3$ ,即  $5.5\text{s}$  以内,即结构刚度需要增大 1.69 倍,才可以勉强将东塔顶点的风振加速度控制在  $0.25 \text{m/s}^2$  以下,经评估,墙柱截面至少增大一倍,对建筑使用影响极大,且经济代价达到几个亿以上,因此,通过提高结构刚度减小风振加速度的方案只存在理论可行性,实际完全不可行。

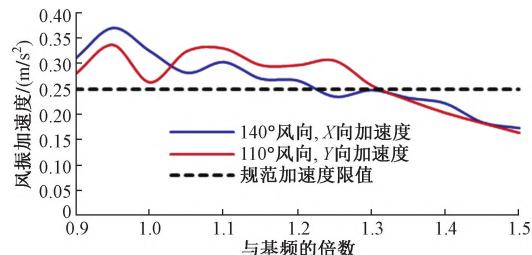


图 6 东塔顶点风振加速度与塔楼频率的敏感性

为此,进一步考虑通过设置阻尼器来耗散或吸收强风输入结构中的能量,以减小主体结构的风振反应。常用的抗风阻尼器包括,调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)<sup>[4]</sup>、调谐液体阻尼器(tuned liquid damper, TLD)<sup>[5]</sup>及黏滞流体阻尼器(viscous fluid damper, VFD)<sup>[6]</sup>,参考相关文献<sup>[7-15]</sup>,对三类阻尼器减振方案的优缺点进行总结,见表 1。

表 1 不同阻尼器减振方案对比

参数	TMD 减振方案	TLD 减振方案	VFD 减振方案
性能	较高	较高, 相同质量下减振效率略低于 TMD, 但灵敏度较高	相对较高, 需考虑施工间隙等因素引起的效率折减
可靠性	较高, 需定期维护	很高, 基本免维护	较高, 需定期维护
安全性	一般, 需采用限位装置	很高, 无需限位装置	高
尺寸	占用竖向高度较大	占用平面面积较大	占用空间最小
重量	较重	较重	很轻
构造	复杂	简单	简单
造价	最高	较低	较低

综合考虑建筑功能影响、阻尼器效率、造价及施工和维护的便利性等因素,最终选定在塔楼顶部设置 TLD 的抗风减振思路。TLD 的基本原理是利用晃动的液体吸收并耗散结构振动能量,通过设计合适的箱体尺寸和液体深度,可将液体晃动频率“调谐”至结构的自振频率<sup>[8]</sup>。由于共振响应,TLD 箱体内液体将开始晃动,振动能量通过结构传递给 TLD,该能量进而由箱体的阻尼装置耗散,TLD 系统的构造<sup>[16]</sup>如图 7 所示。

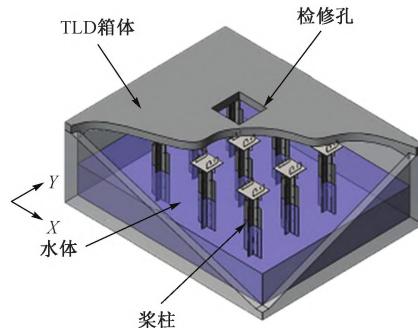


图 7 TLD 构造简图

#### 4 结构动力特性及风致响应控制振型研究

##### 4.1 结构振型分析

由于风致响应和结构自振特性关系紧密,首先采用ETABS软件进行结构的振型分析,研究本项目主要振型的特点,其中结构模型动力分析的荷载工况采用1.0恒+0.5活载。图8给出了本项目前6阶振型,表2给出了主要振型的周期及振型质量参与系数。

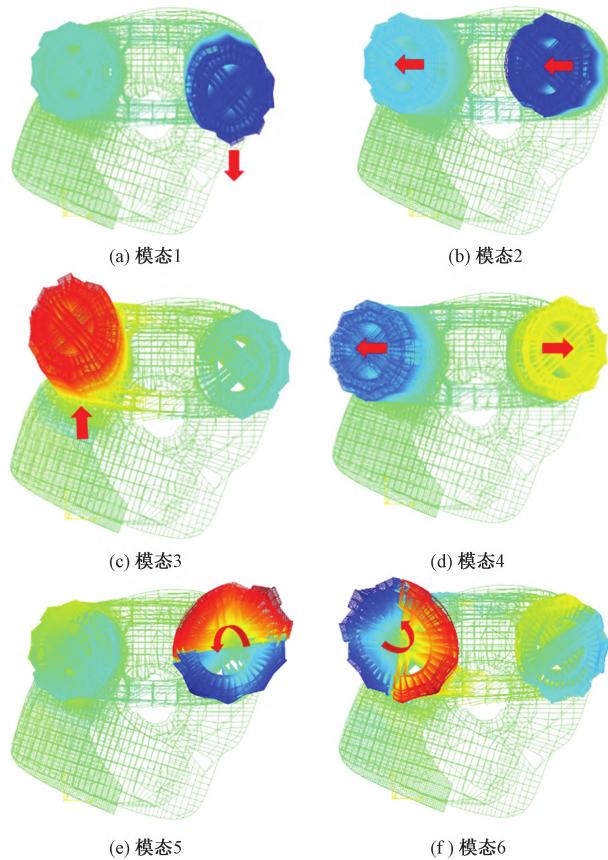


图 8 结构前 6 阶振型

由图8和表2可以看出,第1、2阶振型主要为东塔的一阶平动振型,振型质量参与系数接近50%;第3、4阶振型主要为西塔的一阶平动振型,振型质量参与系数只有6.79%和4.13%,主要原因是第3、4阶振型存在两塔反向振动,在计算振型质量参与系数时振型向量存在反向抵消作用。

表 2 主要振型的周期及振型质量参与系数

模态	周期/s	振型质量参与系数/%			振型特点
		X向	Y向	Z向扭转	
1	7.223	1.60	46.02	7.26	东塔Y向一阶平动
2	6.732	46.76	1.71	0.01	东、西塔X向一阶平动,两塔同向运动,东塔为主
3	5.715	0.04	6.79	39.28	西塔Y向一阶平动,东塔存在轻微Y向平动,两塔反向运动,西塔为主
4	4.926	4.13	0.00	0.03	东、西塔X向一阶平动,两塔反向运动,西塔为主
5	2.468	0.01	0.22	12.42	东塔自身扭转
6	2.231	0.03	1.60	8.46	西塔自身扭转
7	2.153	18.65	2.10	0.40	东、西塔X向二阶平动,两塔同向运动
8	2.101	0.79	12.70	0.53	东、西塔Y向二阶平动,同向运动,东塔为主
9	1.719	3.28	3.81	2.78	东、西塔Y向二阶平动,反向运动,西塔为主

##### 4.2 风致响应频谱分析及控制振型

为评估风致响应的控制振型,并校核结构分析模型,首先进行10年重现期风荷载作用下无控结构的动力时程分析。其中,10年重现期风荷载时程由风洞实验室提供的测压试验原始数据通过同步压力积分获得,提取原始数据中2100s的风荷载时程,包含最大加速度峰值。根据风洞测压试验的原始数据和测压点的从属面积信息,通过同步压力积分计算,按照其作用的从属面积信息,加载到对应高度的楼层结构刚心上。结构模型考虑P-Δ重力二阶效应,结构固有阻尼比1.5%,连梁刚度不折减。10年重现期风振加速度响应较大的140°风向角风荷载作用下,结构的基底剪力及顶点加速度时程结果见图9、10。由图可见,基底剪力与顶点加速度时程均呈现出与风速脉动特性相关的波动特征。

无控结构风致响应结果最大值见表3。由表

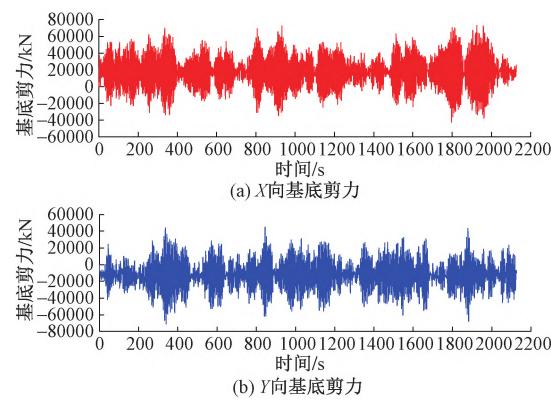


图 9 基底剪力时程

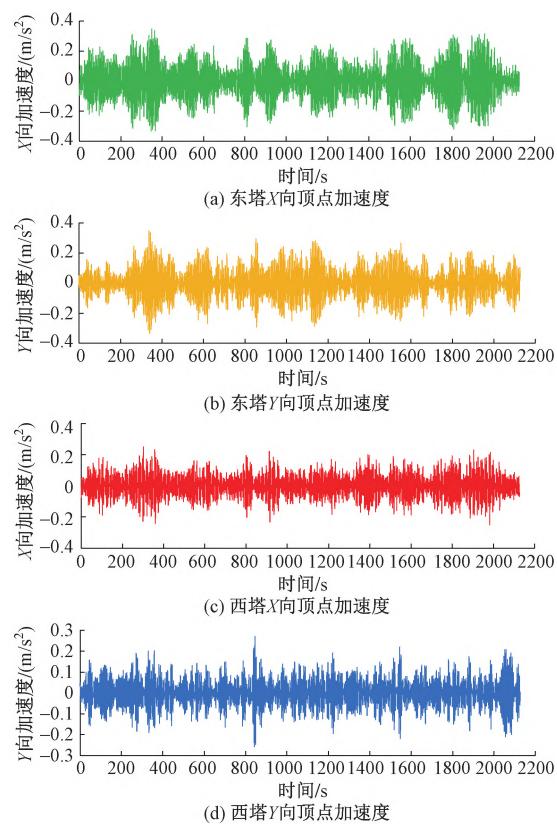


图 10 顶点加速度时程

3 可见: 10 年一遇  $140^{\circ}$  风向角风时程作用下,  $X$ 、 $Y$  向基底剪力最大值均在 70 000kN 左右。东塔顶点最大加速度在  $0.33 \text{ m/s}^2$  左右, 超规范较多; 西塔  $X$ 、 $Y$  向顶点最大加速度分别为  $0.25$ 、 $0.28 \text{ m/s}^2$ 。软件分析的顶点最大加速度响应结果与风洞试验结果基本一致, 表明该模型可用于后续 TLD 减振分析。

进一步对基底剪力时程及顶点加速度时程进行频谱分析, 结果如图 11、12 所示。由图 11、12 可

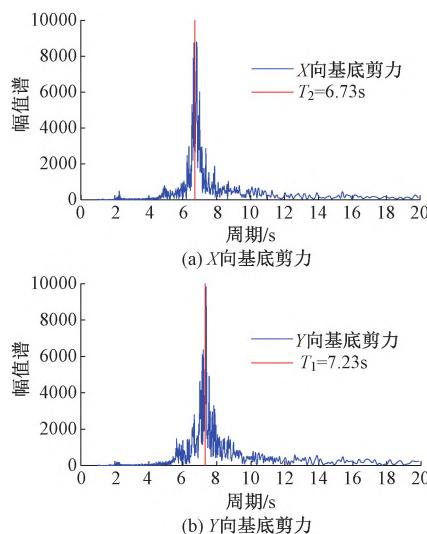


图 11 基底剪力时程频谱

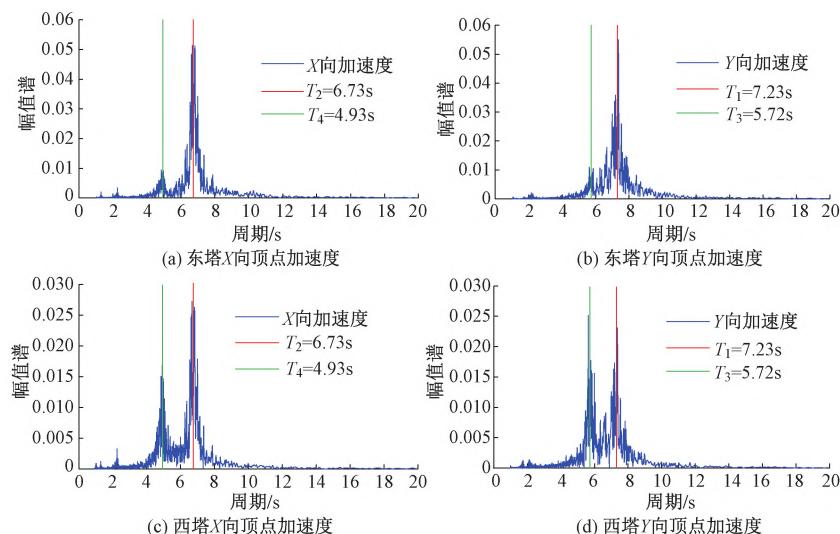


图 12 顶点加速度时程频谱

见: 1) 塔楼的基底剪力频谱为单峰特性, 主要受东塔一阶平动振型控制。2) 东塔  $X$ 、 $Y$  向顶点加速度频谱均为单峰特性, 分别主要受东塔  $X$ 、 $Y$  向一阶平动振型控制。3) 西塔  $X$ 、 $Y$  向顶点加速度频谱均为双峰特性, 即呈现双振型激励特点。其中, 西塔  $X$  向顶点加速度主要受东塔及西塔  $X$  向一阶平动振型影响, 且受东塔  $X$  向振型的影响更大。西塔  $Y$  向顶点加速度频谱为双峰特性, 主要受东塔及西塔  $Y$  向一阶平动振型影响, 其中西塔及东塔  $Y$  向一阶振型的贡献相当。

表 3 无控结构风致响应结果最大值

参数	无控结构	风洞试验
$X$ 向基底剪力/kN	73 430	—
$Y$ 向基底剪力/kN	70 557	—
东塔 $X$ 向顶点加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.33	0.295
东塔 $Y$ 向顶点加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.31	0.291
西塔 $X$ 向顶点加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.25	0.245
西塔 $Y$ 向顶点加速度/( $\text{m/s}^2$ )	0.28	0.290

## 5 TLD 减振设计及分析

### 5.1 TLD 参数计算及模拟方法

Housner<sup>[17]</sup> 通过大量的试验研究与对比, 将水箱晃动过程中引起的晃动压力和脉冲压力分别用两个与箱体联接形式不同的等效质量的振动效应来模拟, 最终得到目前普遍应用于 TLD 研究领域的等效 TMD 模型, 如图 13 所示。其中,  $m_c$  为振荡质量, 又称对流质量;  $K_c$  为等效刚度;  $m_i$  为非振荡质量;  $m = m_c + m_i$ , 为水的总质量;  $h_c$  为振荡质量到水箱底的距离;  $h_i$  为非振荡质量到水箱底的距离;  $h$  为液体深度;  $L$  为矩形水箱振荡方向的尺寸。TLD 的主要参数按式(1)~(3)计算。

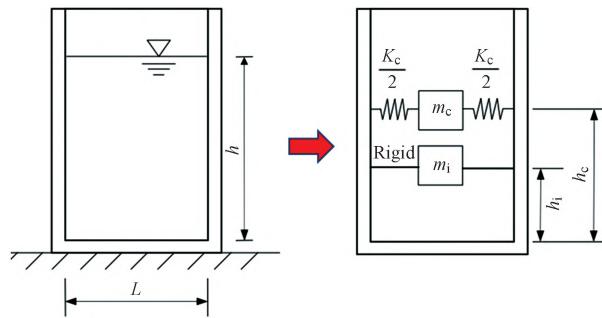


图 13 TLD 等效弹簧-质量系统

$$\frac{m_i}{m} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{L}{h}\right)}{0.866 \frac{L}{h}} \quad (1)$$

$$\frac{m_c}{m} = 0.264 \frac{\tanh\left(3.16 \frac{L}{h}\right)}{\frac{L}{h}} \quad (2)$$

$$K_c = 0.833 \frac{mg}{h} \tanh^2\left(3.16 \frac{L}{h}\right) \quad (3)$$

式中  $g$  为重力加速度。

求得  $m_c$  和  $K_c$  后, TLD 的等效自振周期  $T_c$  根据式(4)计算。

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{m_c}{K_c}} \quad (4)$$

由上述公式可见, TLD 的质量比、等效刚度及等效自振周期均与水箱的水深比  $L/h$  有关。

在舒适度风荷载小幅度晃动激励下, 纯水 TLD 系统的阻尼比较小, 减振目标阻尼需要通过阻尼放大装置提供, 常用的阻尼放大装置包括格栅、密网、桨柱等<sup>[8,10]</sup>, 在上述等效 TMD 模型中, 通过线性黏滞阻尼进行模拟。综上, 在 ETABS 中采用二节点 Link 单元模拟 TLD 的等效弹簧  $K_c$  和线性黏滞阻尼, TLD 的质量则通过节点附加质量指定, 如图 14 所示。

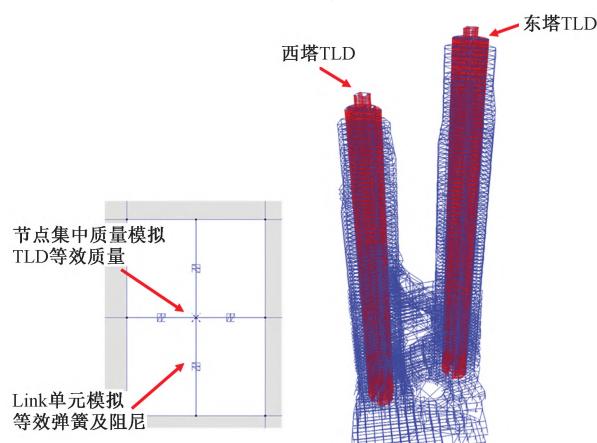


图 14 TLD 的模拟

## 5.2 TLD 减振敏感性分析

### 5.2.1 仅东塔顶设置 TLD 减振分析

参考 TMD 最优参数理论<sup>[18-20]</sup>, 初估东塔 TLD 参数, 其中目标振荡质量  $m_c$  取控制振型广义质量的 0.8% (约 600t), TLD 阻尼系数通过 TMD 最优阻尼比理论反算, 结合图 11、12 分析的控制振型 ( $X$  向一阶平动 6.732s,  $Y$  向一阶平动 7.223s), 使 TLD 的自振周期等于塔楼控制振型的周期, 根据式(4)计算 TLD 的等效刚度  $K_c$ 。以上述初估的振荡质量  $m_c$  及等效刚度  $K_c$  作为初始迭代参数 (初始迭代步刚度系数及质量系数为 1.0), 进行等效刚度和振荡质量的敏感性分析, 结果如表 4、5 所示。表中,  $V_x$  和  $V_y$  分别为塔楼  $X$  向和  $Y$  向的基底剪力,  $A_{xE}$  和  $A_{yE}$  分别为东塔顶  $X$  向和  $Y$  向的加速度,  $A_{xW}$  和  $A_{yW}$  分别为西塔顶  $X$  向和  $Y$  向的加速度。

表 4 东塔 TLD 等效刚度  $K_c$  敏感性分析结果

参数	无控方案	刚度系数 1.0	刚度系数 0.9	刚度系数 1.1(最优)	刚度系数 1.2	刚度系数 1.4
$V_x$	73 430	59 460	60 532	<b>63 495</b>	60 992	62 776
$V_y$	70 557	62 457	74 107	<b>57 898</b>	66 659	70 300
$A_{xE}$	0.33	0.25	0.27	<b>0.26</b>	0.25	0.28
$A_{yE}$	0.31	0.27	0.31	<b>0.26</b>	0.30	0.32
$A_{xW}$	0.25	0.21	0.20	<b>0.21</b>	0.22	0.21
$A_{yW}$	0.28	0.26	0.29	<b>0.25</b>	0.27	0.26

表 5 东塔 TLD 震荡质量  $m_c$  敏感性分析结果

参数	无控方案	质量系数 1.0	质量系数 0.9	质量系数 1.1(最优)	质量系数 1.2	质量系数 1.4
$V_x$	73 430	63 495	63 844	<b>62 814</b>	63 036	64 200
$V_y$	70 557	57 898	59 923	<b>57 920</b>	58 915	59 833
$A_{xE}$	0.33	0.26	0.27	<b>0.25</b>	0.26	0.27
$A_{yE}$	0.31	0.26	0.27	<b>0.25</b>	0.26	0.27
$A_{xW}$	0.25	0.21	0.21	<b>0.21</b>	0.21	0.22
$A_{yW}$	0.28	0.25	0.25	<b>0.25</b>	0.25	0.25

由表 4、5 中结果可见, 当刚度系数及质量系数均为 1.1 时, TLD 对各指标的减振率最优, 进一步参考最终的目标振荡质量  $m_c$  及等效刚度  $K_c$ , 结合式(1)~(3), 设计东塔的 TLD 方案为 4 个尺寸为  $12\text{m} \times 12.7\text{m} \times 1.3\text{m}$  的矩形水箱, 总水量 792t, 振荡质量约为 640t, 最终减振效率如表 6 所示。

由表 6 可知: 1) 仅东塔设置 TLD (尺寸  $17.9\text{m} \times 17.9\text{m} \times 2.9\text{m}$ ), 可使各塔顶点加速度控制在  $0.25\text{m}/\text{s}^2$  以下, 其中对东塔顶点加速度的减振率接近 20%, 西塔顶点加速度的减振率为 11%~16%; 2) 东塔设置 TLD 能一定程度降低西塔的顶点加速度, 尤其是降低西塔  $X$  向(沿连接体方向)加速度; 3) 东塔设置 TLD 可降低结构的基底剪力,  $X$ 、 $Y$  向基底剪

表 6 东塔最优 TLD 方案减振结果

参数	无控结构	东塔设 TLD
X 向基底剪力/kN	73 430	62 814(14%)
Y 向基底剪力/kN	70 557	57 920(18%)
东塔 X 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.33	0.25(24%)
东塔 Y 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.31	0.25(19%)
西塔 X 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.25	0.21(16%)
西塔 Y 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.28	0.25(11%)

注:括号中的数表示减振效率,按照“减振效率=(无控结果-有控结果)/无控结果”计算得到,余同。

力分别降低 14%、18%。

### 5.2.2 仅西塔顶设置 TLD 减振分析

参考 TMD 最优参数理论,初估西塔 TLD 参数,其中 TLD 目标振荡质量  $m_e$  取控制振型广义质量的 0.8%(约 400t),TLD 阻尼系数通过 TMD 最优阻尼比理论反算,结合前述分析的控制振型(X 向一阶平动 4.93s, Y 向一阶平动 5.7s),使 TLD 的自振周期等于塔楼控制振型的周期,根据式(4)计算 TLD 的等效刚度  $K_e$ 。以上述初估的振荡质量  $m_e$  及等效刚度  $K_e$  作为迭代参数(初始迭代步刚度系数及质量系数为 1.0),进行 TLD 等效刚度和振荡质量的敏感性分析,结果如表 7、8 所示。

表 7 西塔 TLD 等效刚度  $K_e$  敏感性分析结果

参数	无控方案	刚度系数 1.0(最优)	刚度系数 0.7	刚度系数 0.8	刚度系数 0.9	刚度系数 1.1
$V_x$	73 430	<b>71 827</b>	70 362	71 266	71 491	71 660
$V_y$	70 557	<b>73 719</b>	72 116	74 033	73 639	73 978
$A_{xE}$	0.33	<b>0.34</b>	0.34	0.34	0.34	0.34
$A_{yE}$	0.31	<b>0.29</b>	0.31	0.3	0.3	0.31
$A_{xW}$	0.25	<b>0.23</b>	0.23	0.23	0.23	0.23
$A_{yW}$	0.28	<b>0.23</b>	0.27	0.27	0.25	0.26

表 8 西塔 TLD 震荡质量  $m_e$  敏感性分析结果

参数	无控方案	质量系数 1.0(最优)	质量系数 0.7	质量系数 0.9	质量系数 1.1	质量系数 1.2
$V_x$	73 430	<b>71 827</b>	717 042	71 727	71 825	71 736
$V_y$	70 557	<b>73 719</b>	717 683	73 272	45 693	45 937
$A_{xE}$	0.33	<b>0.34</b>	0.33	0.34	0.34	0.33
$A_{yE}$	0.31	<b>0.29</b>	0.31	0.31	0.3	0.3
$A_{xW}$	0.25	<b>0.23</b>	0.23	0.23	0.23	0.23
$A_{yW}$	0.28	<b>0.23</b>	0.28	0.26	0.25	0.26

由表 7、8 中结果可见,刚度系数及质量系数均为 1.0 时,TLD 对各指标的减振率最优,进一步参考最终的目标振荡质量  $m_e$  及等效刚度  $K_e$ ,结合式(1)~(3),设计西塔最优 TLD 方案为 2 个尺寸 10.5m×12m×2.0m 的水箱,总水量 504t,振荡质量约 368t,最终减振效率如表 9 所示。

由表 9 可知:1)仅西塔设置 2 个 TLD(尺寸 10.5m×12m×2.0m),可将西塔顶部的加速度控制在 0.25m/s<sup>2</sup> 以下,但西塔设置 TLD 仅对西塔 Y 向

顶点加速度有显著降低作用,对西塔 X 向顶点加速度的控制效果较弱;2)西塔设置 TLD 无法降低东塔的顶点加速度,也无法降低结构整体的基底剪力。

表 9 西塔最优 TLD 方案减振结果

参数	无控结构	西塔设 TLD
X 向基底剪力/kN	73 430	71 827(2%)
Y 向基底剪力/kN	70 557	73 719(-4%)
东塔 X 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.33	0.34(-3%)
东塔 Y 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.31	0.29(6%)
西塔 X 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.25	0.23(8%)
西塔 Y 向顶点加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.28	0.23(18%)

### 5.2.3 东、西塔顶同时设置 TLD 减振分析

将前述获得的东塔、西塔的最优 TLD 同时设置在结构上,进行风动力时程响应分析,典型减振前后曲线如图 15 所示,东、西塔同时设置 TLD 的减振效率

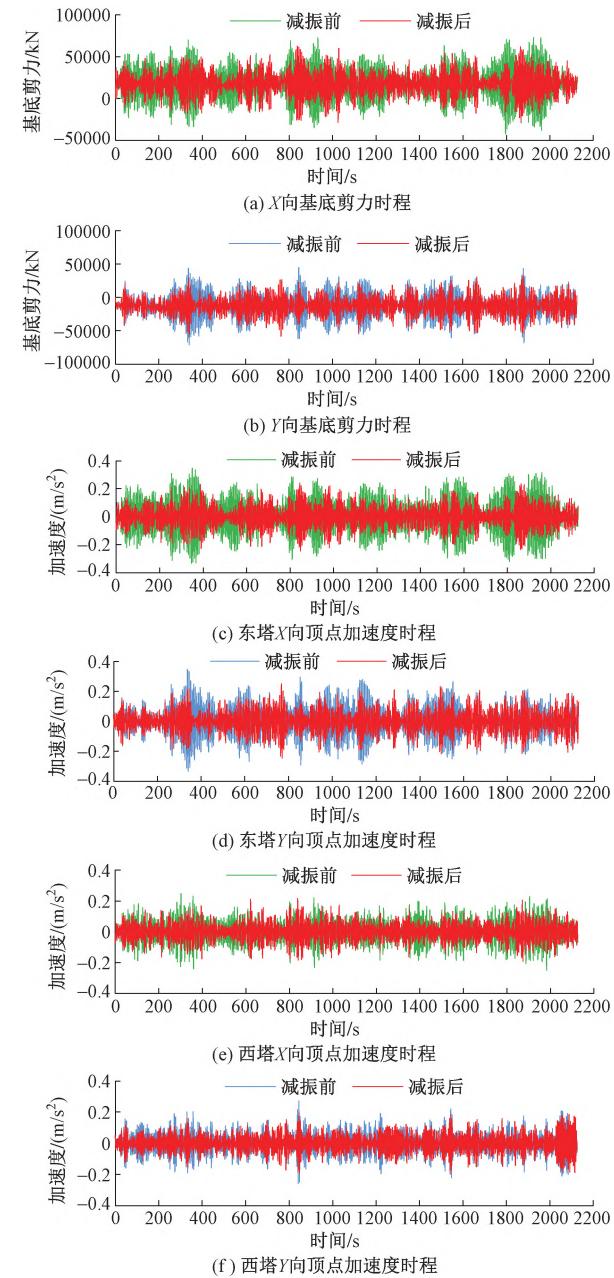


图 15 减振前后典型时程响应

如表 10 所示。结果表明:1)东、西塔顶同时设置 TLD 方案下,西塔顶点加速度可控制在  $0.20\text{m/s}^2$ ,东塔顶点加速度控制在  $0.25\text{m/s}^2$ ,满足《高规》的限值要求。2)双塔同时设置 TLD 情况下,基底剪力减振效率及东塔顶点风振加速度减振效率,与仅东塔设置 TLD 方案基本一致;西塔垂直连接体方向的风振加速度减振效率,高于仅东塔或仅西塔设置 TLD 方案;西塔沿连接体方向的风振加速度减振效率则与仅东塔设置 TLD 方案基本一致。

表 10 东、西塔同时设置 TLD 减振结果

参数	无控方案	仅东塔设 TLD	仅西塔设 TLD	东、西塔同时设 TLD
$V_x$	73 430	62 814(14%)	71 827(2%)	62 391(15%)
$V_y$	70 557	57 920(18%)	73 719(-4%)	58 110(18%)
$A_{xE}$	0.33	0.25(24%)	0.34(-3%)	0.25(24%)
$A_{yE}$	0.31	0.25(19%)	0.29(6%)	0.25(19%)
$A_{xW}$	0.25	0.21(16%)	0.23(8%)	0.22(12%)
$A_{yW}$	0.28	0.25(11%)	0.23(18%)	0.20(29%)

#### 5.2.4 方案研究阶段建议的最终 TLD 减振方案

对其余主要风向角下结构的风致响应及 TLD 进行研究,总体规律与 5.2.3 节的结果类似,综合考虑建筑空间、TLD 减振效率等因素,最终选定 TLD 方案为:东塔设置 4 个 TLD 叠放,单个尺寸为  $12\text{m} \times 12.7\text{m} \times 1.3\text{m}$ ;西塔设置 2 个 TLD,单个尺寸  $10.5\text{m} \times 12\text{m} \times 2.0\text{m}$ 。最终东、西塔 TLD 概念设计方案如图 16 所示。

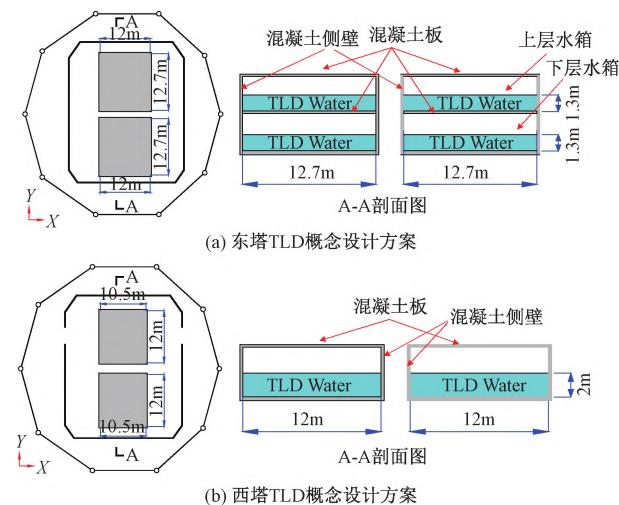


图 16 东、西塔 TLD 概念设计方案

## 6 结论

(1)对于多塔连体结构,连体使得塔楼间存在动力耦合效应,TLD 减振方案设计前,应通过频谱分析等手段,明确结构关键响应(如顶点加速度、基底剪力)的控制振型。

(2)结构的基底剪力及东塔的顶点风振加速度

频谱均呈现单峰特性,主要受东塔一阶平动振型控制;西塔顶部风振加速度频谱则呈现双峰特性,受东、西塔一阶平动振型共同控制。

(3)仅东塔顶设置 TLD 时,可显著降低结构的基底剪力(减振率为 14%~18%),可同时降低东、西塔顶点风振加速度(减振率分别为 20%、10%);仅西塔顶设置 TLD 时,仅能有效降低西塔垂直连接体方向的风振加速度(减振率 18%),对西塔沿连接体方向的风振加速度、东塔顶部的风振加速度和基底剪力均无明显减振效果。因此,控制体量更大的东塔的风致响应是确保整体结构风振舒适度的关键。

(4)东、西塔顶同时设置 TLD(东塔 TLD 总水量约 792t,西塔 TLD 总水量约 504t),理论计算表明,可将东塔顶点加速度控制在  $0.25\text{m/s}^2$ ,西塔顶点加速度控制在  $0.20\text{m/s}^2$  左右,满足规范限值要求。

## 参 考 文 献

- [1] C 塔及相邻地块项目塔楼结构超限设计可行性报告[R]. 深圳:深圳市建筑设计研究总院有限公司,2022.
- [2] 深超 C 塔风振响应及等效静力风荷载研究报告[R]. 北京:中建研科技股份有限公司,2021.
- [3] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 方博,丁孙玮,林东海. 调谐质量阻尼器风振控制的研究进展及应用[J]. 特种结构,2025,42(2):104-110.
- [5] 李黎,张俊勇,唐家祥. 调谐液体阻尼器(TLD)用于风振控制的研究进展[J]. 噪声与振动控制,1997(1):17-21.
- [6] 陈永祁,曹铁柱,马良喆. 液体黏滞阻尼器在超高层结构上的抗震抗风效果和经济分析[J]. 土木工程学报,2012,45(3):58-66.
- [7] 林海,张倩,万腾,等. 中国华润大厦抗风减振设计研究[J]. 建筑结构,2022,52(2):28-33.
- [8] 罗赤宇,林景华,谢一可,等. 粤港澳地区超高层结构抗风设计若干问题[J]. 建筑结构,2020,50(10):12-22.
- [9] 哈敏强,潘浩浩,时磊,等. 宁波绿地中心结构整体稳定性分析和 TLD 风振控制[J]. 建筑结构,2015,45(7):25-31.
- [10] 李建伟,王宁,张崇新,等. 招商银行总部大厦核心筒偏置超高层结构设计与关键技术研究[J]. 建筑结构,2023,53(9):16-24.
- [11] 李治,戴苗,涂建,等. 横琴国际金融中心大厦结构设计难点分析[J]. 建筑结构,2022,52(17):45-51.
- [12] ROFAIL ANTONIOS W, EDDY MARTEN, GENNER DEAN. 高层大厦的经济设计:调谐液体阻尼器[C]//

- the CTBUH 9th World Congress (世界高层都市建筑学会第九届全球会议). 上海, 2012.
- [13] 王森, 陈永祁, 马良喆, 等. 液体黏滞阻尼器在超高层建筑抗风设计中的应用研究 [J]. 建筑结构, 2020, 50(10):44-50.
- [14] 彭程, 陈永祁. 液体粘滞阻尼器和 TMD 应用于高层结构的抗风效果对比 [J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(3):54-61.
- [15] 欧进萍, 王永富. 设置 TMD, TLD 控制系统的高层建筑风振分析与设计方法 [J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2):61-75.
- [16] LEE CHIEN SHEN, SHAYNE LOVE J, HASKETT TREVOR C, et al. Concept design of a parallel-type tuned mass damper-tuned sloshing damper system for building motion control in wind [J]. International Journal of High-rise Buildings, 2021, 10(2):93-97.
- [17] HOUSNER GEORGE W. The dynamic behavior of water tanks [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2):381-38.
- [18] DEN HARTOG J P. Mechanical Vibrations [M]. New York: Courier Dover Publications, 1985.
- [19] 同长虹, 张雷涛. TMD 吸振原理及其参数优化 [J]. 甘肃高师学报, 2004, 9(5):36-39.
- [20] RANA RAHUL, SOONG T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers [J]. Engineering structures, 1998, 20(3):193-204.