刘洁,豆嘉伟,冯兆伟,等.板式 TMD 对考虑消防水箱动力特性的结构振动控制影响研究[J].地震工程学报,2026,48(1):103-113.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240525001

LIU Jie,DOU Jiawei,FENG Zhaowei,et al.Influence of plate-type TMD on structural vibration control considering the dynamic characteristics of fire water tanks[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(1):103-113.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240525001

板式 TMD 对考虑消防水箱动力特性的结构振动控制影响研究

刘 洁[1],豆嘉伟[1],冯兆伟[2],黄健飞[3]

(1. 郑州航空工业管理学院土木与环境学院,河南 郑州 450015;
2. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330000;
3. 北方工业大学土木工程学院,北京 100144)

摘要:结构减振技术的进步使得该技术更易于在工程结构的新建和改造中使用。利用板式调谐质量阻尼器(TMD)减振装置安装简便、节省空间、易于维护、成本低廉等特点,在设置有消防水箱的建筑物顶层楼板上安装多个该装置,开展结构减振研究。基于动力学理论以及 SAP2000 有限元分析,首先研究单个 TMD 参数对结构减振效果的影响规律;然后,将单个 TMD 分散布置,研究多个板式 TMD 的减振效果。结果表明:该方案充分利用板式 TMD 和消防水箱在地震过程中的动力特性,有效减小建筑物的振动,且对原结构和消防水箱的改动较小。研究为新建建筑和现有老旧结构抗震性能的提升提供了一种新的解决方案。

关键词:消防水箱;TMD;地震激励;减振设计

中图分类号:TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)01-0103-11

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240525001

Influence of plate-type TMD on structural vibration control considering the dynamic characteristics of fire water tanks

LIU Jie[1], DOU Jiawei[1], FENG Zhaowei[2], HUANG Jianfei[3]

(*1.College of Civil Engineering and Environment, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, Henan, China;*
2.College of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330000, Jiangxi, China;
3.College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Advancements in structural vibration reduction technology have rendered its implementation in both new and retrofitted engineering structures more viable. In particular, plate-type tuned mass dampers (TMDs) offer advantages such as easy installation, space efficiency, low maintenance, and cost-effectiveness. This study installs multiple plate-type TMDs on the top floor slab of a building equipped with a fire water tank to investigate the efficacy of structural

收稿日期:2024-05-25

基金项目:河南省青年骨干教师项目(2021GGJS115);河南省科技厅科技攻关项目(242102320025);研究生教育创新计划项目(2025CX185)

第一作者简介:刘 洁(1981-),女,博士,副教授,主要从事结构减振、防灾减灾方向的研究。E-mail:liujie@zua.edu.cn。

vibration control. Employing a foundation in dynamic theory and finite element analysis using SAP2000, the influence of individual TMD parameters on vibration reduction is initially examined. Subsequently, a single TMD was dispersed to study the vibration control effect of multiple plate-type TMDs. The findings indicate that the proposed method effectively utilizes the dynamic characteristics of both the plate-type TMDs and the fire water tank during seismic events, thereby significantly reducing structural vibration with minimal modification to the original structure and the fire water tank. This study proposes a novel solution for enhancing the seismic resistance of new and existing structures through the implementation of vibration control design.

Keywords: fire water tank; tuned mass damper (TMD); seismic excitation; vibration reduction design

0 引言

随着科学技术的进步与时代发展,结构防灾减灾技术在近年来取得了显著进展。为保障结构的安全性及可靠性,多种新技术与研究成果已被广泛应用于工程实践[1-3]。调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper,TLD)与调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper,TMD)均是当前土木工程中常用的被动减振装置。TLD 的减振机制表现为:当结构受到外界激励时,容器内液体产生晃动并形成波浪,由此产生的液体对容器的动压力为结构提供了减振力。TLD 所提供的控制力由两部分组成:一部分是液体随容器所在结构层一起运动所产生的惯性力;另一部分是波浪对容器壁的动压力。TMD 通常由质量块、弹簧、阻尼器三部分组成,通过调节质量或刚度使 TMD 的自振频率接近主体结构的基本频率,从而衰减并控制主体结构的振动响应[4]。

随着 TMD 的广泛应用,其减振技术也取得了诸多新突破。与传统 TMD 装置不同,Roozbahan 等[5]提出了一种新型双刚度无源调谐质量阻尼器。该装置由两根弹簧组成:一根主弹簧正常连接,另一根为次级弹簧,其末端可在附属于结构的腔室内移动。装置性能主要取决于质量块的质量、主次弹簧的刚度以及运动室的长度。研究采用 Mouth Brooding Fish 算法对该阻尼器进行了优化设计。徐伟等[6]提出一种新型形状记忆合金弹簧调谐质量阻尼器,建立了安装该阻尼器的单层框架结构动力学模型,并开展振动台试验。试验结果表明,当质量比为 2%时,该阻尼器在不同地震波作用下均表现出良好的减振性能。何慧慧[7]针对高耸结构 TMD 减振控制装置开展优化研究,提出新型并串联组合橡胶弹性元件,应用于 TMD 控制装置,并进行了力学性能试验与有限元模拟分析。结果显示,启动控制系统后,结构的加速度、速度及位移响应相较于无控状态均显著降低。研究还指出,采用附加橡胶支座虽可提升竖向减振效果,但对水平方向减振能力的改善有限。李书进等[8]基于空腔楼盖体系在近年工程中的广泛应用,结合 TMD 减振思想,提出一种可置入空腔楼板内部、沿弧线方向滚动的碰撞调谐质量阻尼器。与普通滚动式调谐质量阻尼器相比,该装置增加了碰撞减振机制,利用碰撞有效扩展了质量阻尼器的工作频率范围,从而克服传统 TMD 控制频带窄、鲁棒性较差的问题。

多重调谐质量阻尼器(Multiple Tuned Mass Damper,MTMD)是由多个具有不同频率、不同阻尼比和不同质量的调谐质量阻尼器所组成的动力吸振系统。在宽带激励作用下,MTMD 对结构振动的控制效率在一定条件下优于单调谐质量阻尼器。关宇[9]针对最大悬挑长度为 35.2 m 的大跨度悬挑连廊在人致激励下的舒适度问题,对比了 TMD 与 MTMD 的减振性能。分析表明:单频 TMD 的控制频带较窄,而采用分布频率的 MTMD 减振方案在保证经济性的同时,对多种频率的激励荷载均表现出更优异的减振效果,有效提高了结构的舒适度。

Furtmüller 等[10]为应对低频振动问题,分别采用 TLD 控制摆和 TMD 控制摆机构进行了实验研究。结果表明,通过调整水深等参数,使用 TLD 实现的被动控制效果与同等质量的 TMD 相当。董悦等[11]针对简谐激励下 TLD 对高层结构的减振性能展开研究,建立了 TLD-结构振动台实时子结构实验系统,并完成了一系列正弦激励试验。试验结果显示,当输入荷载频率与 TLD 频率均设定为结构一阶频率时,TLD 对结构的加速度和位移控制效果最佳。Awad 等[12]提出一种兼具灭火功能和调谐液体阻尼器作用的刚性穿孔地板储罐模型。研究结果表明,该储罐可作为等效 TLD 装置,满足一系列激励振幅下的消防规范要求。因此,在高层建筑中,可采用带穿孔地板的水箱同时作为 TLD 装置和消防储水设施。

为了充分利用消防水箱，并解决 TLD 占用空间大、安装费用高等问题，同时结合 TMD 的优点以进一步提升结构的减振能力，盛涛等[13]设计了一种液体质量双调谐阻尼器(Tuned Liquid and Mass Damper，TLMD)模型。该模型用液体替代了传统 TMD 的黏滞阻尼器，由液体构成的 TLD 不仅自身具有减振作用，还为 TMD 提供阻尼，从而形成了有阻尼的 TMD。通过理论与试验，验证了 TLMD 设计方法的可行性与准确性。TLMD 装置中 TMD 与 TLD 的振动频率均接近主体结构的自振频率。模型试验结果表明，TLMD 的减振效果接近 TLD 和 TMD 减振效果之和。

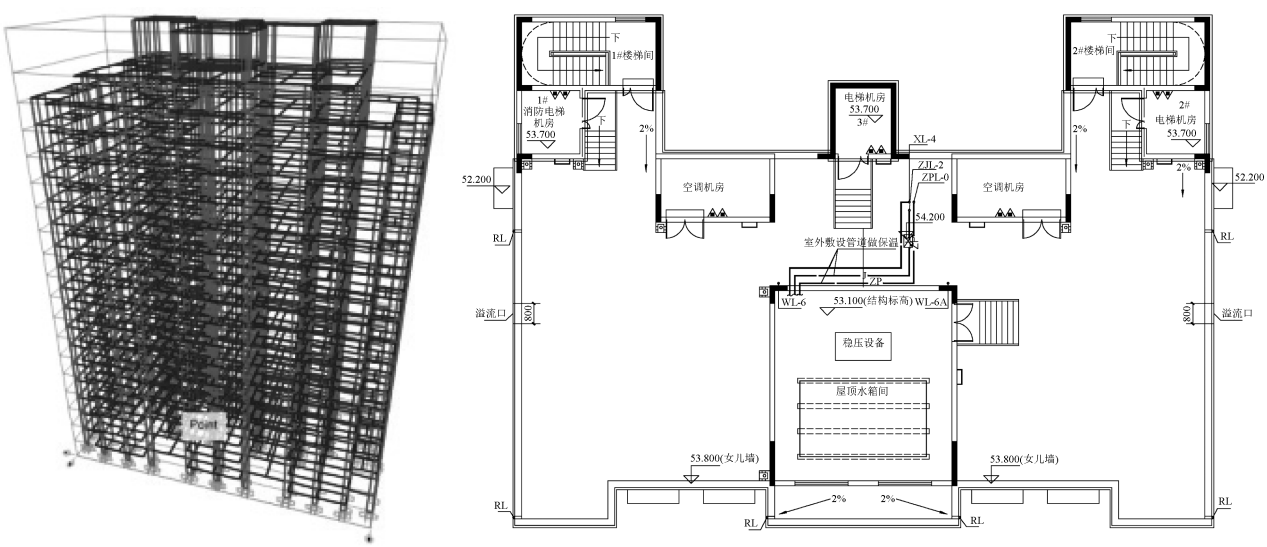
从以上研究可以看出，TMD 的减振优化一直是研究热点。与此同时，学者们在 TLD 研究的基础上，也逐渐关注消防水箱动力特性对结构减振的影响，TLD 与 TMD 的联合减振策略更是备受重视。在上述研究背景下，本文基于团队研发的一种板式 TMD 装置[14]展开减振分析。该装置具有以下特点：箱体内的质量块沿水平方向运动，通过碰撞机制充分发挥 TMD 在碰撞减振方面的优势；平板型质量块可有效减小竖向空间占用，并在与箱体碰撞时提供更大的接触面积。此外，由于板式 TMD 质量较小，可在质量块底部加装滚珠，实现多向滑动并减小与接触面的摩擦力，从而使更多动能参与碰撞减振过程。

本文利用消防水箱作为 TLD 装置，并结合分散布置的多个板式 TMD 构成板式 MTMD 系统，构建了一种 TLD 与 MTMD 协同减振体系。该研究对新建建筑以及现有老旧结构抗震性能的提升提供了一种新途径。

1　装置设计

1.1　装置应用背景

本文的研究对象为河南省某县城棚户区改造项目中的新建工程。该住宅部分结构为地下 2 层、地上 18 层。其中，地下一层的层高 3.30 m，地下二层的层高 4.20 m，地上 1～18 层的层高均为 2.90 m，室内外高差 0.30 m，建筑总高度为 52.565 m。结构总建筑面积为 12 255.92 m^2，总质量为 1 421.837 t。主体结构采用剪力墙结构形式，设计使用年限为 50 年，抗震设防烈度为 6 度。研究借助大型有限元分析软件 SAP2000 建立了结构分析模型，如图 1(a)所示。根据《建筑设计防火规范(GB 50016—2014)》[15]的要求，高层建筑应在顶部设置消防水箱。结合消防水箱的设计需求，拟定水箱尺寸为 4.5 m(长)×2.5 m(宽)×3 m(高)，其平面布置示意如图 1(b)所示。



(a) 住宅模型图　　(b) 水箱层平面布置示意图

图 1　建筑信息

Fig.1　Building information

1.2　装置构造

传统的 TMD 装置通常由弹簧、质量块和阻尼器三部分组成，质量块通过弹簧与阻尼器连接到主体结构。由于传统 TMD 质量块较大，一般需设置轨道约束其运动。本文基于团队已获授权的一种新型减振装置[14]，结合本项目减振需求进行简化，提出一种板式 TMD 装置，其结构如图 2 所示。该装置由一个箱体和一个内部扁平质量块组成，质量块

通过阻尼弹簧与箱体内壁相连。与传统 TMD 相比,板式 TMD 受箱体空间限制而采用较小质量块,省去了轨道结构,代之以滚珠支承,实现多方向自由移动,使质量块能够沿激励相反方向在任意水平方向上滑动,从而达到减振效果。为便于研究装置减振性能,仅在 X 方向施加荷载,并对板式 TMD 模型作进一步简化,仅考虑质量块与两侧单弹簧的连接形式。针对该装置,本文研究了在考虑消防水箱动力特性条件下,结构振动控制的影响。

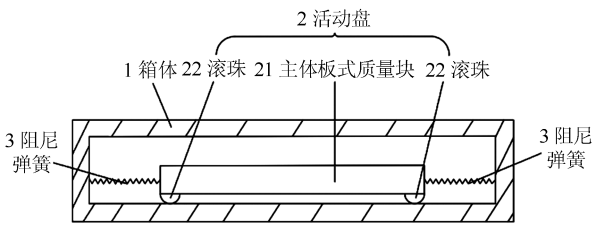


图 2 板式 TMD 装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of plate-type TMD device

1.3 装置减振原理

1.3.1 消防水箱 TLD 减振原理

采取 Housner[16-17] 提出的集中质量法作为理论基础,对消防水箱进行数值建模。Housner 教授通过大量研究,将由容器运动引起的水的惯性力以及波浪对容器壁的动压力,分别模拟为两个与箱体连接方式不同的等效质量的振动效应,最终建立了在 TLD 研究领域得到广泛应用的简化模型,如图 3 所示。图中:h 为液体深度;L 为矩形水箱沿外荷载方向的边长;M_1 为振荡质量,与箱体弹性连接;M_2 为脉冲质量,与箱体固接;K 为等效弹簧刚度。

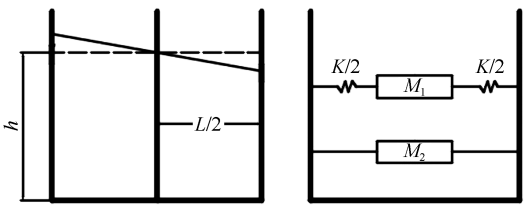


图 3 水箱的等效动力系统

Fig.3 Equivalent dynamic system of water tank

当水箱为矩形时,其理论计算公式为:

$$M_1 = 0.83M \frac{\tanh \dfrac{3.2h}{L}}{\dfrac{3.2h}{L}} \tag{1}$$

$$M_2 = M \frac{\tanh \dfrac{0.85L}{h}}{\dfrac{0.85L}{h}} \tag{2}$$

$$K = \frac{12ghM_1^2}{ML^2} \tag{3}$$

式中:M 为液体总质量;g 为重力加速度。

该建筑物消防水箱的长度 L 为 4.5 m;箱中水的深度 h 为 2.66 m,质量 M 为 30 t;重力加速度 g 取 9.8 m/s^2。基于集中质量法理论,将消防水箱简化为调谐液体阻尼器(TLD)。

根据式(1)~(3),可计算出振荡质量 M_1、脉冲质量 M_2 和等效刚度 K,其中单侧等效刚度值为 $K/2$ 的对应数值(表 1)。

1.3.2 TMD 原理

TMD通常由质量块、弹簧与阻尼器三部分组成,其减振原理是通过调整质量或刚度改变子结构的自振频率,使其接近于主体结构的基频,从而减小并控制主体结构的振动响应。TMD 的减振效果主要取决于质量块的大小、位移以及系统的阻尼比。根据相关研究[18],TMD 的质量比通常取 0.005~0.03,且在频率比为 1 时减振效果最优。TMD 装置的减振设计原理可由式(4)~(8)表示。

表 1 TLD 水箱数据

Table 1 TLD water tank data

长(L)/m	宽(B)/m	水深(h)/m	振荡质量(M_1)/kg	脉冲质量(M_2)/kg	单侧等效刚度($K/2$)/(kN/m)
4.5	2.5	2.66	12 578	17 422	40

最优频率比:

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{1}{1+\mu} \tag{4}$$

最优阻尼比:

$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \tag{5}$$

TMD 最优质量:

$$m_{\text{opt}} = \mu M \tag{6}$$

TMD 最优阻尼系数:

$$C_{\text{opt}} = 2m_{\text{opt}}\omega_1\zeta_{\text{opt}} \tag{7}$$

TMD 最优弹簧刚度:

$$k_{\text{opt}} = m_{\text{opt}}\delta_{\text{opt}}^2\omega_1^2 \tag{8}$$

式中:μ 为 TMD 质量与主结构质量之比;ω_1 为主结构刚度与质量比值的平方根;M 为主结构质量与计算振型的动力参与系数的乘积。

2　板式 TMD 对考虑消防水箱动力特性结构的减振研究

2.1　减振仿真设计

根据第 1.3.2 节中所述的 TMD 设计原理，在对结构进行减振仿真设计前，需先开展模态分析，获取结构自振频率，并以此为依据进行 TMD 装置的参数设计。

2.1.1　模态分析

通过对该结构进行模态分析，得出了高层建筑结构的主要振动周期。由于 X 方向高阶振型的模态参与质量占比较低，此处仅列出前两阶频率及其模态参与质量比（表 2）。

由表 2 数据可知，X 方向一阶周期的模态参与质量占比约为68.8%，二阶周期与一阶周期较为接近，其模态参与质量约占 5.17%，前两阶模态的累计参与质量占比约达 73.9%。因此，选取一阶周期 1.523 s作为调谐质量阻尼器（TMD）的设计参数。根据 TMD 理论，当 TMD 的频率接近结构频率时，可达到较佳的减振效果。

表 2　结构前 2 阶周期及频率

Table 2　First two natural periods and frequencies of the structure

分步编号 阶数	周期/s	频率/s^{-1}	圆频率 /(rad/s)	模态参与质量比/%	
				U_X	U_X 总和
1	1.523	0.656	4.125	0.688	0.688
2	1.513	0.661	4.154	0.051 7	0.739

注：U_X 表示结构的 X 方向

2.1.2　参数设置

为便于多个板式 TMD 的设计，本文首先以单个 TMD 为对象进行减振设计与参数分析，再将其按不同数量和质量分散布置，以研究其减振效果。本文将考虑动力特性的消防水箱兼作 TLD 使用，下文均以 TLD 代称。根据表 1 结果，TLD 的震荡质量为 12.5 t，单侧弹簧刚度为 40 kN/m，TMD 装置布置于水箱下方。

基于第 1.3.2 节所述 TMD 设计原理，并结合水箱实际尺寸，按结构总质量与 TMD 质量比为 0.007 的比例对该 TMD 装置进行设计，确定其质量为 10 t。依据表 2 拟定弹簧刚度为 85 kN/m，阻尼系统为 0.01 kN/(m/s)。以该工程实例为背景，针对单个 TMD 设置 3 种不同工况：(1)工况一：将建筑物顶层消防水箱视为恒载；(2)工况二：考虑消防水箱的动力特性，将其视为调谐液体阻尼器（TLD）；(3)工况三：在工况二基础上加装单个 TMD 进行减振（TLD-TMD）。由于项目位于中部地区，选取地震荷载作为外部激励，并对其进行动力响应分析。选取 ARRAY06-1.TH 地震波进行动力计算，其基本参数如表 3 所列。

表 3　地震波数据

Table 3　Seismic wave data

名称	峰值加速/gal	持续时间/s	卓越周期/s
ARRAY06-1.TH	305.92	10	0.02

2.2　3 种工况下的时程分析

利用有限元软件 SAP2000 对结构施加地震波 ARRAY06-1.TH，进行动力时程分析。软件采用 Newmark 法进行时间积分，分析所得结构响应如图 4 和图 5 所示。记录各工况下顶点的峰值位移、峰值加速度及均方根（Root Mean Square，RMS）值，结果汇总于表 3。将工况二和工况三的结果分别与工况一进行对比，计算减振率并记录于表 4。下文所涉及的减振率均以工况一为基准计算得出。

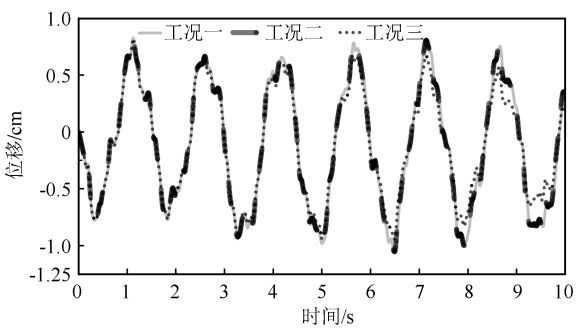


图 4　各工况下位移时程曲线

Fig.4　Displacement time-history curves under various working conditions

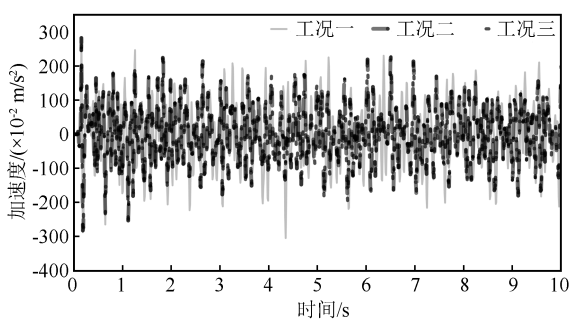


图 5　各工况下加速度时程曲线

Fig.5　Acceleration time-history curves under various working conditions

表 4 各工况下位移和加速度的峰值及均方根值

Table 4 Peak and RMS values of displacement and acceleration under various working conditions

工况	顶点峰值位移/cm	位移 *RMS* /cm	顶点峰值加速度/(m/s²)	加速度 *RMS*/(m/s²)
一	1.045	0.552 4	3.036	0.903 3
二	1.054	0.550 7	2.817	0.837 5
三	0.945 6	0.490 9	2.817	0.836 8

均方根值按式(9)计算：

$$X_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}X_i^2}{N}}=\sqrt{\frac{X_1^2+X_2^2+\cdots+X_N^2}{N}} \tag{9}$$

由图 4 所示的位移时程曲线可知，3 种工况下顶点位移随时间的变化趋势基本一致。在地震响应持续一段时间后，工况三对结构位移的控制效果最为显著。具体时间阶段分析如下：(1)在 0～2.5 s 期间，3 种工况下的结构位移响应基本一致，控制效果差异不明显。这是由于质量块初始位移和速度较小，减振装置尚未充分发挥作用。(2)在 2.5～5.5 s 阶段，工况二与工况一的结构位移响应仍较为接近，而工况三的结构位移略有降低，减振效果初步显现，表明工况三下 TLD-TMD 联合系统开始发挥作用，且其启动早于工况二中的单一 TLD 装置。(3)在 5.5～10 s 阶段，工况二与工况一的响应依然基本一致，而工况三的结构顶点位移出现明显减小。尤其在9.5 s时刻，工况三的顶点位移为－0.598 cm，相较于工况一的－0.796 cm，减振效果达到 24.9%，说明在该时段内 TLD-TMD 联合系统表现出显著的减振作用。

根据图 5 所示的加速度时程曲线，3 种工况在前 1.2 s 左右对结构加速度的控制效果差异不明显；而在后期阶段，工况二和工况三均表现出对结构加速度的良好控制。在约 3.88 s 时刻，工况一的加速度为 2.026 m/s²，而工况二和工况三的加速度分别降至 0.496 m/s² 和 0.494 m/s²，控制效果显著。然而，从整体加速度时程响应来看，工况二与工况三之间的控制效果差异不大。

根据表 4 和表 5 的数据可知：工况二在结构加速度控制方面具有较明显的改善效果，但对位移的控制作用并不显著。具体而言，采用 TLD 后，结构的峰值加速度减振率达到 7.21%，RMS 减振率为 7.28%；而峰值位移则略有增大，位移峰值和 RMS 值的减振率均较低。结果表明，在保证消防水箱使用功能的前提下，合理设计其动力特性可对结构减振产生一定的积极作用。

表 5 各工况位移和加速度减振率

Table 5 Vibration reduction rates of displacement and acceleration under various working conditions

工况	峰值位移减振率/%	位移 RMS 减振率/%	峰值加速减振率/%	加速度 RMS 减振率/%
二	－0.86	0.308	7.21	7.28
三	9.51	11.13	7.21	7.36

工况三和工况二在加速度控制方面效果接近，但在位移控制方面工况三显著优于工况二：工况三(TLD-TMD)的峰值位移减振率达到 9.51%，RMS 减振率值达到 11.13%。由此可见，TLD-TMD 联合减振方案能有效抑制结构振动。

2.3 TMD 参数分析

在消防水箱水位高度不变(即 TLD 参数保持不变)的条件下，根据 TMD 的设计原理及相关研究[19]，其减振效果主要受 TMD 质量、弹簧刚度与弹簧阻尼的影响。因此，本文重点考察这三个参数对结构减振效果的影响。

2.3.1 质量对结构地震响应的影响

保持水箱位置及 TLD 参数(包括消防水箱尺寸、含水质量与水位高度)不变，调整 TMD 装置的设计参数(表 6)。

通过SAP2000软件对各种工况进行分析，得到结构顶点位移和加速度减振率随 TMD 质量参数变化的趋势，如图 6 所示。各工况下顶点的峰值位移、峰值加速度及均方根值记录于表 7，相应减振率计算结果如表 8 所列。

表 6 不同质量块参数下 TLD-TMD 设计工况

Table 6 Design conditions of TLD-TMD under various mass block parameters

工况	长/m	宽/m	高/m	质量块/t	弹簧刚度/(kN/m)	弹簧阻尼/(kN·s/m)
1	4.5	2.5	3	6.5	85	0.01
2	4.5	2.5	3	8	85	0.01
3	4.5	2.5	3	10	85	0.01
4	4.5	2.5	3	12.2	85	0.01
5	4.5	2.5	3	14.3	85	0.01

根据图 6 所示，随着质量块质量的增加，结构峰值位移减振率呈现先上升后下降的趋势，且在 8～

10 t 范围内增幅较为显著；当质量块质量为 10 t 时，减振效果最佳，此时位移峰值减振率达到9.51%。在此过程中，结构峰值加速度的控制效果趋于稳定，未发生明显变化。

根据表 7 和表 8 的数据可知，当 TMD 质量块为6.5 t 时，结构顶点的峰值位移略有增大，此时位移 RMS 减振率为 0.81%；随着 TMD 质量的进一步增加，位移峰值减振率与位移 RMS 减振率均逐渐提高，在质量块达到 10 t 时达到最大值，位移峰值减振率为 9.5%，位移 RMS 减振率为 11.12%。此后若继续增加质量，位移减振率转为下降趋势，减振效果逐渐减弱。

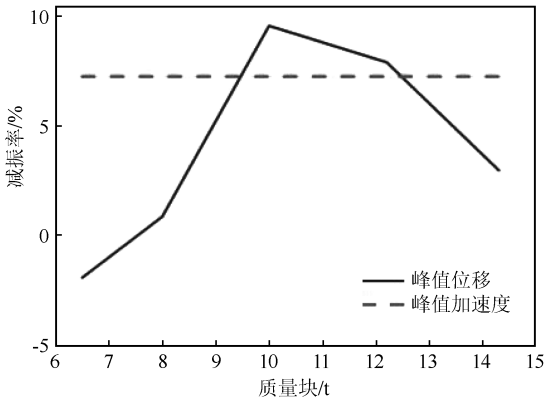


图 6　质量块参数对控制效果影响

Fig.6　Influence of mass block parameters on the structural control effect

表 7　不同质量参数下各工况的顶点位移和加速度的峰值及均方根值

Table 7　Peak and RMS values of top displacement and acceleration under various working conditions for different mass parameters

工况	顶点峰值位移/cm	位移 *RMS* /cm	顶点峰值加速度/(m/s²)	加速度 *RMS*/(m/s²)
1	1.065	0.547 9	2.817	0.837 8
2	1.036	0.534 4	2.817	0.837 5
3	0.945 6	0.491 0	2.817	0.836 8
4	0.962 8	0.521 4	2.817	0.837 4
5	1.014	0.541 5	2.817	0.837 7

表 8　不同质量块参数下各工况的位移和加速度减振率

Table 8　Vibration reduction rates of displacement and acceleration under various working conditions for different mass block parameters

工况	峰值位移减振率/%	位移 RMS 减振率/%	峰值加速减振率/%	加速度 RMS 减振率/%
1	−1.91	0.81	7.21	7.25
2	0.86	3.26	7.21	7.29
3	9.51	11.12	7.21	7.36
4	7.86	5.61	7.21	7.29
5	2.96	1.97	7.21	7.26

由上可知，TMD 质量块对结构减振效果具有显著影响。随着质量增加，位移减振效果逐渐增加至顶峰，但随着质量块进一步加大，峰值位移减振率降低。其原因在于，在弹簧刚度与阻尼等参数保持不变的情况下，改变质量将影响 TMD 的自振频率，从而降低其与结构频率的匹配程度，削弱控制效率。此外，过大的质量还会对结构施加较大的附加荷载，产生不利影响。因此，针对本结构，建议将 TMD 质量块设定在 10 t 左右为宜。

2.3.2　弹簧刚度对结构地震响应的影响

采用单一变量控制法研究弹簧刚度对结构减振效果的影响。保持装置位置不变，并根据质量块参数分析结果，将质量块固定为 10 t，其余尺寸参数保持不变。装置的具体设计参数如表9所列，用于分析弹簧刚度对减振性能的影响。各工况下结构顶点位移和加速度的峰值及均方根值记录于表 10，相应减振率计算结果如表 11 所列。结构位移和加速度峰值减振率随弹簧刚度的变化趋势如图 7 所示。

表 9　不同刚度参数下 TLD-TMD 的设计工况

Table 9　Design conditions of TLD-TMD under various stiffness parameters

工况	长/m	宽/m	高/m	质量块/t	弹簧刚度/(kN/m)	弹簧阻尼/(kN·s/m)
1	4.5	2.5	3	10	135	0.01
2	4.5	2.5	3	10	110	0.01
3	4.5	2.5	3	10	85	0.01
4	4.5	2.5	3	10	70	0.01
5	4.5	2.5	3	10	60	0.01

根据图 7 可以看出，随着弹簧刚度的增加，结构峰值位移减振率总体呈现先上升后下降的趋势，在刚度为 70～85 kN/m 范围内，位移减振率增幅较为显著；当刚度达到 85 kN/m 后，继续提高刚度则减振效果逐渐减弱。在此过程中，峰值加速度的减振效果未发生显著变化。

由表 10 和表 11 可知：当弹簧刚度从 60 kN/m 开始增加时，初期对结构位移峰值的减振效果并不明显，反而会使峰值位移略微增大；随着弹簧刚度的进一步增加，峰值位移减振率与位移 RMS 减振率

逐渐提高,在刚度达到 85 kN/m 时,峰值位移减振率达到最大值(9.5%),位移 RMS 减振率达到 11.12%。然而,当弹簧刚度超过85 kN/m并继续增大时,减振率开始下降,减振效果逐渐减弱。

从上述分析结果可以看出,弹簧刚度对减振效果具有一定影响。随着弹簧刚度的增加,减振效果总体呈现先增强后减弱的趋势,并在 85 kN/m 时达到最佳减振效果。这是由于在其他参数保持不变的情况下,刚度的调整会改变装置的频率,从而影响其控制性能。因此,在本设计条件下,当 TMD 质量保持为 10 t 时,建议将弹簧刚度设置在 85 kN/m 附近。

同时,当 TMD 质量为 10 t、弹簧刚度为 85 kN/m 时,通过 SAP2000 进行模态分析模拟得到其周期为 1.52 s,与结构的一阶周期 1.523 s 接近。此时 TMD 装置取得了较好的减振效果,进一步验证了前文所述的结论:当 TMD 的频率与结构频率相近时,可达到较理想的减振效果。

2.3.3 弹簧阻尼对结构地震响应的影响

分析弹簧阻尼对结构地震响应的影响时,保持该装置位置不变,并基于 2.2.1 和 2.2.2 节所得最优参数,对弹簧阻尼参数进行调整,具体设置如表 12 所列。结构位移和加速度峰值的减振率随弹簧阻尼的变化如图 8 所示。各工况下结构的顶点峰值位移、峰值加速度及相应的均方根值记录于表 13,同时列出了相应工况的减振率(表 14)。

由图 8 可知,随着弹簧阻尼的增加,峰值位移减振率逐渐降低,而峰值加速度减振率基本维持不变。

通过表 13 和表 14 可知:随着弹簧阻尼的增加,结构的位移峰值减振率与位移 RMS 减振率均呈下降趋势。在此过程中,峰值位移减振率从 9.51%降至 6%,位移 RMS 减振率从 11.12%降低到 7.59%;而加速度 RMS 减振率仅有微小增加,可忽略不计。因此,根据分析结果,弹簧阻尼参数设置为 0.01 kN/(m/s)时减振效果较好,建议以此作为设计取值。

2.4 多个板式 TMD 对减振效果分析

考虑到板式 TMD 安装空间有限,且在老旧建筑改造中应尽量减少人力与物力的投入,因此宜采用质量较小的TMD,以实现安装便捷、占用空间小

表 10 不同刚度参数下各工况顶点位移和加速度峰值及均方根值

Table 10 Peak and RMS values of top displacement and acceleration under various working conditions for different stiffness parameters

工况	顶点峰值位移/cm	位移 *RMS*/cm	顶点峰值加速度/(m/s²)	加速度 *RMS*/(m/s²)
1	1.068	0.546 8	2.817	0.837 8
2	1.047	0.537 1	2.817	0.837 6
3	0.945 6	0.491	2.817	0.836 8
4	0.976 9	0.525 2	2.817	0.837 4
5	1.023	0.543 6	2.817	0.837 7

表 11 不同刚度参数下各工况的位移和加速度减振率

Table 11 Vibration reduction rates of displacement and acceleration under various working conditions for different stiffness parameters

工况	峰值位移减振率/%	位移 RMS 减振率/%	峰值加速减振率/%	加速度 RMS 减振率/%
1	−2.2	1.01	7.21	7.23
2	−0.19	2.77	7.21	7.27
3	9.51	11.12	7.21	7.36
4	6.51	4.92	7.21	7.30
5	2.1	1.60	7.21	7.27

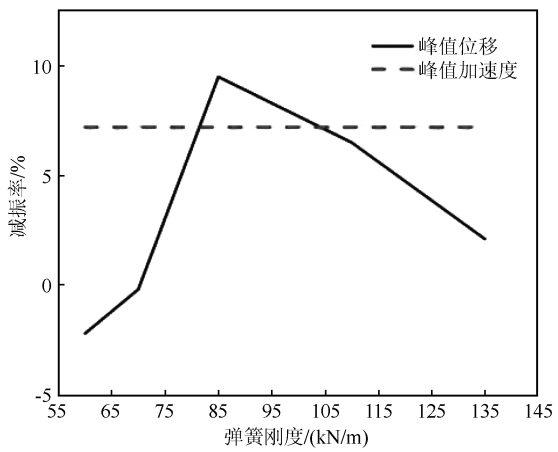


图 7 弹簧刚度参数对减振效果影响

Fig.7 Influence of spring stiffness parameters on vibration reduction effect

表 12 不同阻尼参数下 TLD-TMD 的设计工况

Table 12 Design conditions of TLD-TMD under various damping parameters

工况	长/m	宽/m	高/m	质量块/t	弹簧刚度/(kN/m)	弹簧阻尼/(kN·s/m)
1	4.5	2.5	3	10	85	0.01
2	4.5	2.5	3	10	85	0.1
3	4.5	2.5	3	10	85	1
4	4.5	2.5	3	10	85	1.5
5	4.5	2.5	3	10	85	2

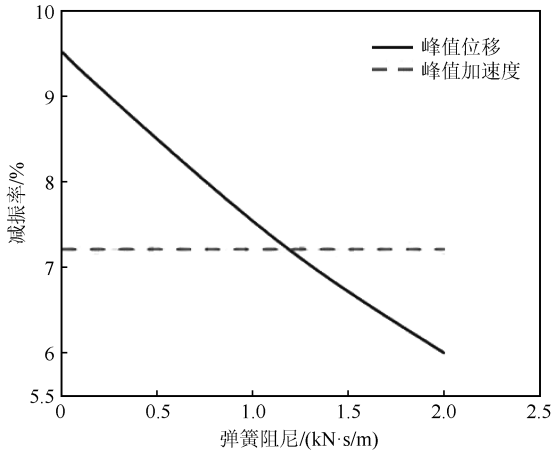


图 8　弹簧阻尼参数对减振效果影响

Fig.8　Influence of spring damping parameters on vibration reduction effect

表 13　不同阻尼参数下峰值位移和峰值加速度及均方根值

Table 13　Peak displacement, peak acceleration, and RMS values under different damping parameters

工况	顶点峰值位移/cm	位移 *RMS* /cm	顶点峰值加速度 /(m/s²)	加速 *RMS* /(m/s²)
1	0.945 6	0.491 0	2.817	0.836 9
2	0.947 8	0.492 2	2.817	0.836 7
3	0.966 6	0.502 3	2.817	0.835 0
4	0.974 9	0.506 7	2.817	0.834 0
5	0.982 1	0.510 5	2.817	0.833 1

表 14　不同阻尼参数下各工况的位移和加速度减振率

Table 14　Vibration reduction rates of displacement and acceleration under various working conditions for different damping parameters

工况	峰值位移减振率/%	位移 RMS 减振率/%	峰值加速减振率/%	加速度 RMS 减振率/%
1	9.51	11.12	7.21	7.36
2	9.3	10.90	7.21	7.38
3	7.5	9.07	7.21	7.56
4	6.7	8.27	7.21	7.67
5	6	7.59	7.21	7.78

和易于更换的目的。基于该原则，本文在建筑物顶部分散布置了多个板式 TMD。

在上文单个 TMD 分析的基础上，为保障多个板式 MTMD 的减振效果，保持总质量为 10 t、总刚度为 85 kN/m、周期为 1.52 s，以及阻尼为 0.01 kN·s/m不变，将单个 TMD 拆分为 MTMD 系统，以研究 MTMD 数量对结构减振控制的影响。通过同步减小单个 TMD 的质量和弹簧刚度，使拆分后各 TMD 的频率与原频率基本一致。本文共设置了 4 种工况，其设计参数列于表 15。分散后单个 TMD 的质量与刚度参数对位移及加速度峰值减振效果的影响分析如图 9 所示。各工况下结构顶点位移和加速度峰值及均方根值记录在表 16 中，相应减振率计算结果列于表 17。

表 15　板式 MTMD 设计参数

Table 15　Design parameters of plate-type MTMD

工况	TMD 布置个数	单个质量 /t	弹簧刚度 /(kN/m)	弹簧阻尼 /(kN·s/m)
1	1	10	85	0.01
2	4	2.5	21.25	0.01
3	10	1	8.5	0.01
4	20	0.5	4.25	0.01

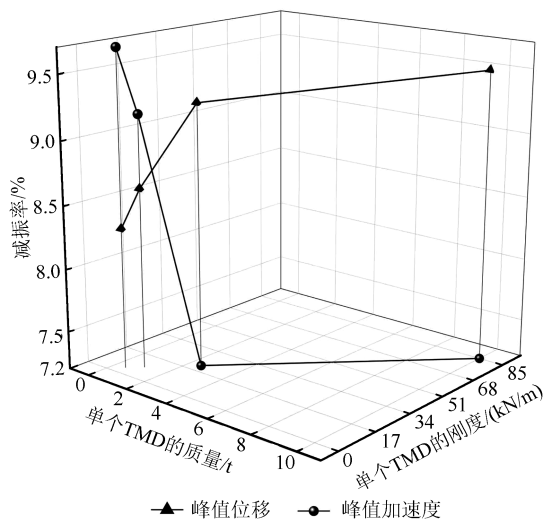


图 9　MTMD 的质量和刚度参数对位移和加速度峰值减振效果的影响

Fig.9　Influence of mass and stiffness parameters of MTMD on the vibration reduction effect for peak displacement and acceleration

表 16　各工况下位移和加速度峰值及均方根值

Table 16　Peak and RMS values of displacement and acceleration under various working conditions

工况	顶点峰值位移/cm	位移 *RMS* /cm	顶点峰值加速度 /(m/s²)	加速度 *RMS* /(m/s²)
1	0.9456	0.4910	2.817	0.8369
2	0.9480	0.4921	2.817	0.8370
3	0.9548	0.4949	2.757	0.8369
4	0.9586	0.4976	2.743	0.8443

表 17　各工况下位移和加速度减振率

Table 17　Vibration reduction rates of displacement and acceleration under various working conditions

工况	峰值位移减振率/%	位移 RMS 减振率/%	峰值加速减振率/%	加速度 RMS 减振率/%
1	9.51	11.12	7.21	7.35
2	9.28	10.92	7.21	7.34
3	8.63	10.41	9.12	7.35
4	8.27	9.92	9.65	6.53

由图 9 可以看出，随着单个 TMD 质量的减小和分散数量的增加，结构的峰值加速度减振率逐渐增大，从 7.21%提高到 9.65%；在此过程中，峰值位移减振率略有降低，从 9.51%下降至 8.27%。在分散数量较少时，两者的变化趋势均不明显；随着分散数量大幅增加，峰值位移与峰值加速度减振效果之间的差异逐渐显著。

由表 16 和表 17 可知，随着单个 TMD 质量的减小和分散数量的增加，加速度峰值的减振效果有所提升。在此过程中，峰值加速度减振率从 7.21%增大至 9.65%，提高了 2.44%；加速度 RMS 减振率整体变化不大，但在分散数量过多时呈下降趋势。与此同时，位移峰值与位移 RMS 减振率均略有降低。因此，MTMD 的分散数量需结合控制目标进行合理设计。

基于工程实践，可根据实际情况选择板式 MTMD 的布置工况，在提升减振效果的同时，降低安装成本，并实现占用空间小、易于更换的应用特点。由于板式 TMD 安装空间有限，附加质量一般较小，该装置主要适用于配有消防水箱的小高层建筑。

3 结论

本文以装有消防水箱的建筑结构为研究对象，结合其动力特性，为便于开展多板式 TMD 研究，首先对单个 TMD 的各项参数进行了优化设计。在保持 TMD 频率不变的前提下，将单个 TMD 分散布置为多个板式 TMD。板式 TMD 安装空间有限，附加质量较小，因此该装置主要适用于配备消防水箱的小高层建筑。基于上述研究，得出如下结论：

(1) 在不改变消防水箱的前提下，于该类结构上加装 TMD 装置。在参数相同的情况下，TLD-TMD 工况对结构位移具有较好的减振效果，而 TLD 和 TLD-TMD 工况对结构加速度的控制效果基本一致。在 TLD 保持不变的条件下，TMD 参数分析表明，其质量、刚度与阻尼均对减振效果具有一定影响。因此，在实际设计中可结合控制目标对这些参数进行合理选取。

(2) 针对本文模型，在 TMD 频率、总质量与总刚度保持不变的前提下，将单个 TMD 分散布置为板式 MTMD 系统。多种布置方式的对比结果表明，随着分散数量的增加，结构峰值加速度的控制效果显著提升，加速度均方根值变化不明显，而位移控制效果则略有降低。因而，在板式 TMD 频率一定的条件下，应结合实际控制目标对分散数量进行合理设计。

(3) 板式 TMD 装置安装便捷，减振性能良好，适用于配置消防水箱的新建或既有建筑。实际应用中可根据消防水箱尺寸、安装空间等因素，合理设计板式 TMD 的分散数量。该装置相较于其他减振措施，具有空间占用小、质量轻、易于更换等优点，在老旧小区改造中具备较高的推广价值。

参考文献(References)

[1] 刘洁，崔宝玉，郭安宁，等.建筑信息模型(BIM)在地震工程领域的研究进展[J].贵州大学学报(自然科学版)，2021，38(2)：67-72.
LIU Jie，CUI Baoyu，GUO Anning，et al.Research progress of BIM in earthquake engineering[J].Journal of Guizhou University (Natural Sciences)，2021，38(2)：67-72.

[2] 肖扬海.计算机辅助设计在高层建筑抗震结构中的应用[J].工程抗震与加固改造，2023，45(3)：194.
XIAO Yanghai.Application of computer aided design in seismic structure of high-rise building[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2023，45(3)：194.

[3] 徐满清，鹿守山，盛国君，等.TMD 减振技术在超高层建筑及大跨度桥梁中的应用[J].南昌工程学院学报，2020，39(4)：32-36.
XU Manqing，LU Shoushan，SHENG Guojun，et al.Application of TMD vibration control technology in high-rise building and long span bridge structure[J].Journal of Nanchang Institute of Technology，2020，39(4)：32-36.

[4] 任晓亮.TLD 和 TMD 减震的优化设计方法及应用[D].合肥：合肥工业大学，2010.
REN Xiaoliang.Optimal design method and application of TLD and TMD shock absorption[D].Hefei：Hefei University of Technology，2010.

[5] ROOZBAHAN M，TURAN G.An improved passive tuned mass damper assisted by dual stiffness[J].Structures，2023，50：1598-1607.

[6] 徐伟，黄斌，朱培林，等.一种新型 SMA 弹簧调谐质量阻尼器减震研究[J].武汉理工大学学报，2022，44(9)：43-48.
XU Wei，HUANG Bin，ZHU Peilin，et al.Study on damping of a new SMA spring tuned mass damper[J].Journal of Wuhan University of Technology，2022，44(9)：43-48.

[7] 何慧慧.高耸结构 TMD 减振控制装置优化研究[D].广州：广州大学，2020.
HE Huihui.Research on optimization of TMD vibration reduction control device for high-rise structures[D].Guangzhou：Guangzhou University，2020.

[8] 李书进，孙磊，余桓，等.滚动碰撞式调制质量阻尼器减振性能试验研究[J].振动工程学报，2020，33(5)：861-868.
LI Shujin，SUN Lei，YU Huan，et al.Experimental study on the vibration control performance of a pounding tuned rotary mass damper[J].Journal of Vibration Engineering，2020，33(5)：861-868.

[9] 关宇.MTMD 减振技术在大跨度悬挑连廊设计中的应用[J].建筑结构，2023，53(8)：86-89.
GUAN Yu.Application of MTMD vibration reduction technol-

ogy in design of a large-span cantilever corridor[J]. Building Structure, 2023, 53(8): 86-89.

[10] FURTMÜLLER T, JOAS G, ADAM C. Control of pendulum oscillations by tuned liquid dampers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 114: 103753.

[11] 董悦，唐贞云，刘豪. 简谐激励下 TLD 对高层结构减震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报，2022，54(4)：92-100.
DONG Yue, TANG Zhenyun, LIU Hao. Seismic performance of TLD controlled high-rise structures subjected to harmonic excitation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 92-100.

[12] AWAD B N, TAIT M J, LOVE J S. Numerical modelling of dual function tanks for fire suppression and tuned liquid damper applications[J]. Engineering Structures, 2024, 299: 117080.

[13] 盛涛，金红亮，李京，等. 液体质量双调谐阻尼器(TLMD)的设计方法研究[J]. 振动与冲击，2017，36(8)：197-202.
SHENG Tao, JIN Hongliang, LI Jing, et al. A study on the design method of tuned liquid and mass damper (TLMD)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 197-202.

[14] 刘洁，陈然，闫祥梅，等. 一种减震装置：CN111502059A[P]. 2020-08-07.
LIU Jie, CHEN Ran, YAN Xiangmei, et al. A shock-absorbing device: CN111502059A[P]. 2020-08-07.

[15] 公安部天津消防研究所，公安部四川消防研究所. 建筑设计防火规范：GB 50016—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014.
Tianjin Fire Science and Research Institute, MPS, Sichuan Fire Science and Research Institute, MPS. Code for fire protection design of buildings (GB 50016—2014)[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[16] HOUSNER G W. Dynamic pressures on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1957, 47(1): 15-35.

[17] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 381-387.

[18] 胡争锋. 调谐质量阻尼器 TMD 基本原理及减振效果评价[R/OL]. 北京：盈建科技术期刊，2023，[2024，6] https://www.yjk.cn/article/1766.
HU Zhengfeng. The basic principle and vibration reduction effect evaluation of TMD of tuned mass damper[R/OL]. Beijing: Yingjianke Technical Journal, 2023, [2024, 6] https://www.yjk.cn/article/1766/.

[19] 林均岐，王云剑. 调谐质量阻尼器的优化分析[J]. 地震工程与工程振动，1996，16(1)：116-121.
LIN Junqi, WANG Yunjian. Optimal analysis of tuned mass dampers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(1): 116-121.

（本文编辑：张向红）

（上接第 79 页）

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for surface meteorological observation—air temperature and humidity: GB/T 35226—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[34] 王名才. 大气科学常用公式[M]. 北京：气象出版社，1994.
WANG Mingcai. Commonly used formulas in atmospheric science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1994.

[35] 张志富，希爽. 关于露点温度计算的探讨[J]. 干旱区研究，2011，28(2)：275-281.
ZHANG Zhifu, XI Shuang. Study on calculation of dew-point temperature[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 275-281.

[36] 张博，崔惠萍，裴强强，等. 不同开放环境下北石窟洞窟温湿度变化特征[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(增刊 1)：2834-2840.
ZHANG Bo, CUI Huiping, PEI Qiangqiang, et al. Variation characteristics of temperature and humidity in northern grottoes under different opening environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (Suppl01): 2834-2840.

[37] VRIES D A D. Simultaneous transfer of heat and moisture in porousmedia [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(5): 909-916.

[38] LUIKOV A V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies[J]. Advances in Heat Transfer, 1964, 16(1): 123-184.

[39] WU J H, WU D X, WANG W, et al. Research on thermal storage and release capacity of freezing sandy soil with phase change[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114638.

[40] ZHU F Y, ZHOU Y S, ZHU S P. Experimental study on moisture migration in soil during coupled heat storage and release processes[J]. Energy and Buildings, 2021, 242: 110986.

（本文编辑：任　栋）