

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231016002

一种用于锅炉钢结构的新型钢缆-阻尼限位器 减震性能振动台试验研究*

蒋雨衡, 段立平, 岳峰, 赵金城

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 为克服现有锅炉-钢结构限位器的缺点, 特提出了一种新型钢缆-阻尼限位器, 此限位器具有非线性刚度, 且可以通过阻尼器进行耗能, 从而提升支撑结构的抗震性能。为了研究该限位器阻尼系数与安装位置对目标结构地震响应的影响, 设计了缩尺锅炉钢结构模型并进行了振动台试验。原模型为某锅炉厂的锅炉-钢结构, 采用了1:25的缩尺比例并对原型结构进行了必要的简化, 以便测试钢缆-阻尼限位器的抗震效果。为了探究限位器阻尼系数以及安装方案对结构抗震性能的影响, 选取峰值加速度为1.0g的Kobe波作为地震动输入, 对装配了不同参数限位器的模型和在不同位置装配了限位器的模型进行了试验; 作为对比, 选取峰值加速度为0.2g的Kobe波作为地震动输入, 对未装配限位器的模型进行了试验。在对它们的结构动力特性和结构响应进行了对比研究后, 发现: (1) 该限位器对减震有积极作用; (2) 阻尼系数对结构地震响应影响显著, 并且存在一个最优阻尼参数值使得限位器兼具性能优势与经济性; (3) 布置于底层的限位器的减震效果更优。

关键词: 锅炉-钢结构; 振动台试验; 钢缆-阻尼限位器; 减震效果; 抗震性能

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0198-09

Study of the Seismic Performance of a Novel Cable-damper Stopper Designed for Boiler Steel Structures Based on Shaking Table Tests

JIANG Yuheng, DUAN Liping, YUE Feng, ZHAO Jincheng

(School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the limitations of existing stoppers designed for boiler-steel structures, this paper proposes a novel cable-damping stopper. This stopper features nonlinear stiffness and dissipates energy through a damper, thereby enhancing the seismic performance of the supporting structure. To investigate the effects of the damping coefficient and installation position of the stopper on the seismic response of the target structure, a scaled-down boiler steel structure model was designed and subjected to shaking table tests. The prototype model was based on a boiler-steel structure from a boiler plant, scaled down to 1 : 25, with necessary simplifications to facilitate the evaluation of the seismic effectiveness of the cable-damper stopper. To explore the influence of the damping coefficient and installation scheme on structural seismic performance, experiments were conducted using the Kobe wave

* 收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078292)资助

作者简介: 蒋雨衡(1997—), 男, 博士研究生。主要从事特种钢结构抗震研究。E-mail: jerryjj@sjtu.edu.cn

通信作者: 赵金城(1965—), 男, 教授, 博士。主要从事钢结构抗火、抗震、智能建造方面研究。

E-mail: zhao_jcr@hotmail.com

with a peak ground acceleration of 1.0g, on models equipped with stoppers of different parameters and at various positions. In contrast, for the scaled model without the stoppers, a peak ground acceleration of 0.2g was selected. A comparative study of structural dynamic characteristics and seismic responses revealed that: (1) the stopper significantly improved the seismic resistance of the scaled model. (2) The damping coefficient had a substantial impact on the seismic response, with an optimal damping coefficient that provided both effectiveness and economic efficiency. (3) Stoppers installed at lower levels demonstrated superior seismic resistance effects.

Keywords: boiler steel structure; shaking table test; cable-damper stopper; seismic performance; seismic resistance

0 引言

电力是现今人民生活中必不可少的一种能源^[1],而燃煤发电是我国最主要发电方式之一。作为生命线工程的重要组成部分,煤电站在灾后抢险以及灾后重建中发挥着巨大作用^[2]。然而,煤电厂因地震灾害而破坏的案例屡见不鲜^[3-5],因此,提升煤电站抗震性能,保证其各设备在地震灾害后正常运转成为一项重要议题^[6]。

煤电厂可以被视为一种悬吊式结构^[7],主要由支撑结构、吊杆、炉体和限位器四部分组成^[8-9]。其中,限位器作为直接横向连接炉体和支撑结构的构件,在提升结构抗震性能方面起到十分重要的作用^[10-12]。限位器主要有三种形式^[13-14],而在实际工程中,限位器主要以金属阻尼器的形式出现,但其缺点也很明显。其过大的刚度破坏了悬吊结构体系在抗震方面的优越性,并且其耗能主要依靠金属塑性变形,使其在地震中成为一次性消耗品。

为了同时达到限制炉体相对位移和耗能的目的,本文提出了一种钢缆-阻尼限位器。该限位器可以为整体结构提供非线性刚度和阻尼。非线性刚度使得限位器不仅可以在炉体发生大幅晃动时提供足够的反力,还可以允许炉体发生小幅晃动而不向支撑结构传导大荷载,从而不会破坏悬吊结构的抗震优越性。为了研究钢缆-阻尼限位器布置方案对结构抗震性能的影响,本文以实际工程为原型,按1:25缩尺比例进行了振动台模型的制作,安装钢缆-阻尼限位器后进行了振动台试验,重点关注了在不同阻尼系数和布置方案下,结构响应的差异。根据不同工况实验数据的分析及对比,最终证明了钢缆-阻尼限位器的有效性,同时确认了最优安装方案,为日后的应用提出了设计建议。

1 试验设计

1.1 原型结构介绍

本文选取的原型结构为中国某地煤电厂,如图1所示。该煤电厂为单向对称结构,共7层,长宽高分别为43.6、36、70.4 m,炉体由数百根吊杆悬吊于支撑结构顶层大板梁上。原型结构由Q235钢制成,总重约8 594吨,支撑结构与炉体的质量比为3:8。

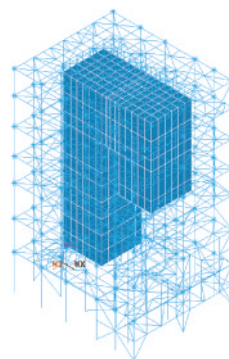


图1 原型结构简图

Fig.1 Schematic diagram of the prototype structure

1.2 振动台试验模型

本试验在上海交通大学振动台实验室进行,限于振动台尺寸(2 m × 2 m)和台面最大负载(5 t),选取1/25的几何相似比进行缩尺设计,缩尺模型采用与原型结构一致的Q235钢制作,通过配重块调整材料密度,试验模型的各项相似比列于表1。

由于原型结构过于复杂且本文旨在研究钢缆-阻尼限位器对结构抗震性能的影响,因此只需保证缩尺模型的动力特性与原结构相似即可。考虑到本试验主要场景为单向地震,因此需要保证施加地

表 1 缩尺比例

Table 1 Scale factors

类型	物理量	关系式	相似系数
材料特性	弹性模量 E	$S_E = E_m/E_p$	1
	密度 ρ	$S_\rho = \rho_m/\rho_p$	5
几何特性	长度 L	$S_L = L_m/L_p$	1/25
	面积 A	$S_A = S_L^2$	1/625
物理特性	应变 ϵ	$S_\epsilon = \epsilon_m/\epsilon_p$	1
	应力 σ	$S_\sigma = \sigma_m/\sigma_p$	1/25
动力特性	质量 m	$S_m = S_\rho S_L^3$	1/3125
	刚度 K	$S_k = S_E S_L^4/S_L^3$	1/25
	频率 f	$S_f = \sqrt{S_k/S_m}$	$5\sqrt{5}$
	时间、固有周期 T	$S_t = 1/S_f$	$\frac{1}{5\sqrt{5}}$
	速度 v	$S_v = S_L/S_t$	$1/\sqrt{5}$
	加速度 a	$S_a = S_L/S_t^2$	5

震方向缩尺模型的动力特性与原结构一致,即结构固有频率的相似,这就要求缩尺模型的整体刚度与质量与原结构严格相似。

为减小制作与安装难度,试验模型被简化为一个三层结构。经计算后,支撑结构长宽高分别为 1.744、1.44、2.82 m,质量为 750 kg,炉体长宽高分别为 0.744、0.44、2.134 m,质量为 2 000 kg。

试验模型 BIM 和制作完成的结构模型如图 2 所示。为更好研究限位器的性能,模型宜在试验中处于弹性范围内,因此在不改变结构动力特性的情况下,对结点进行了加固。由于一阶固有频率对结构动力响应的影响最大,因此本试验主要对试验模型和原模型的一阶固有频率进行比较。基于 Ansys 计算结果,原模型一阶固有频率为 1.30 Hz,经相似比调整后,试验模型一阶固有频率应为 14.50 Hz,实际白噪声测试所得结果如图 3 所示,一阶固有频率

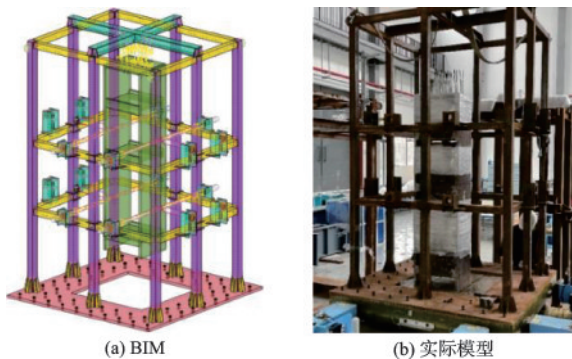


图 2 试验模型

Fig.2 Experimental model

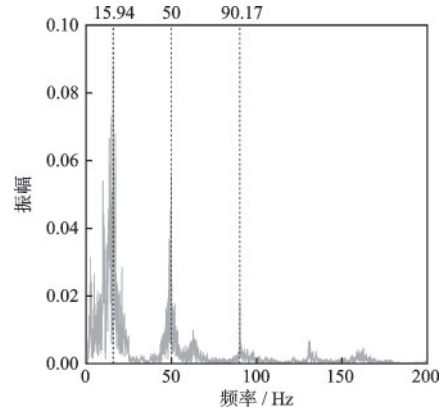


图 3 白噪声扫频结果

Fig.3 Result of the white noise sweep frequency

为 15.94 Hz,误差为 9.93%,主要由加工误差造成,且结构变柔未发现高阶振型参与度增大的问题,因此可以接受。

1.3 钢缆-阻尼限位器介绍

本文提出的钢缆-阻尼限位器由三部分组成,分别为钢缆、阻尼器和钢块,如图 4 所示。其中钢缆两端通过螺栓连接在结构上,主要起限位以及复位阻尼器的作用;阻尼器尾部通过螺栓与柱相连,头部搭接在钢缆中间位置,是主要耗能装置;钢块附着于炉体侧面,正对阻尼器的头部,可以将炉体的撞击转化为集中荷载作用在钢缆跨中位置。

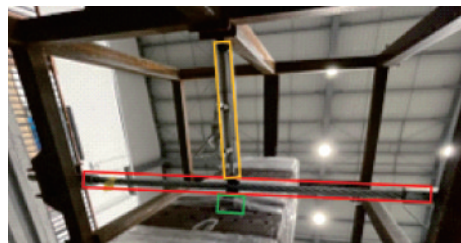


图 4 试验采用限位器

Fig.4 Stopper used in the experiment

1.4 阻尼器性能参数

本文计划采用的阻尼器为线性粘滞阻尼器,选取的阻尼系数为 20 000~40 000 N·s/m,间隔 5 000 N·s/m。对应滞回曲线如图 5 所示。测试时加载速度为 0.3 m/s,各滞回曲线均取最后一圈。可以观察到,试验安装阻尼器不是标准的线性粘滞阻尼器,但考虑到实际工艺的限制,可以认为此阻尼器满足设计要求。

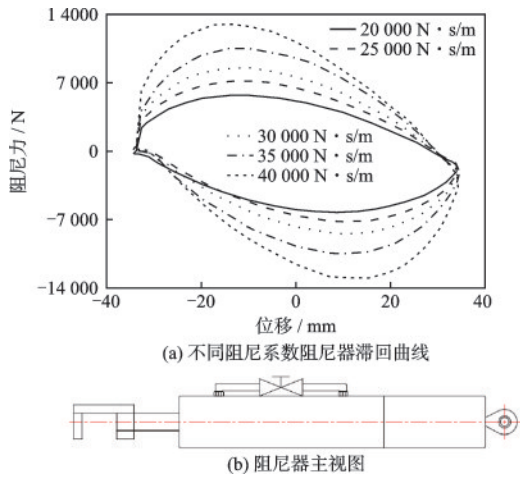


图5 阻尼器及其滞回曲线
Fig.5 Damper and its hysteresis hoops

2 试验方案

2.1 测点布置

为采集数据,本文采用拉线式位移传感器(东华5G203)与单向加速度传感器(东华1A202E)来记录试验过程中重要节点的地震响应数据,如图6所示。位移传感器共计12个,加速度传感器共计12个,安装位置列于表2,同一位置均对称布置。

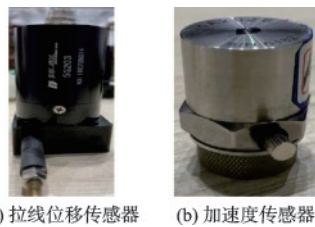


图6 位移和加速度测量装置
Fig.6 Displacement and acceleration measurement devices

表2 传感器布置

Table 2 Sensor arrangement		
位置	拉线式位移传感器	加速度传感器
振动台面	D1&D2	A1&A2
一层	D3&D4	A3&A4
二层	D5&D6	A5&A6
顶层	D7&D8	A7&A8
炉顶	D9&D10	A9&A10
钢缆跨中	D11&D12	A11&A12

2.2 输入地震动及加载工况

由于试验模型具有良好的对称性,因此本试验

采用单向地震输入。本试验采用Kobe波,其加速度时程曲线和频域图像如图7所示。从频域图像观察到,Kobe波的能量集中在模型一阶固有频率附近,对结构的破坏大,因此选取此地震波可以更加充分验证限位器的减震效果。为探究限位器安装方案对结构动力响应的影响,共进行了17种工况,列于表3,各工况对应的试验模型如图8所示。

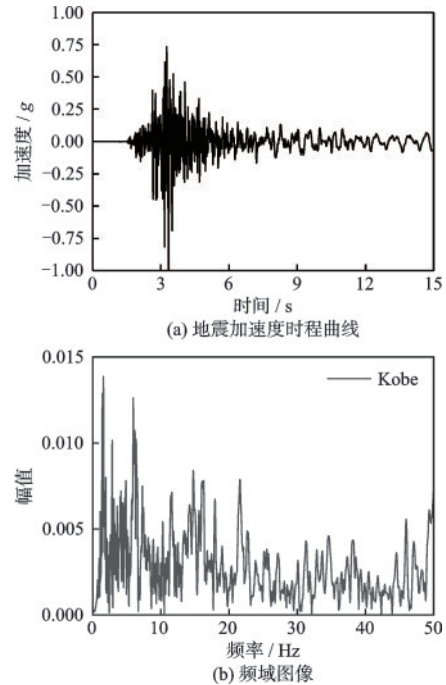


图7 Kobe波信息
Fig.7 Information of the Kobe wave

表3 工况表

Table 3 Operating conditions		
序号	描述	限位器
1~4	一层布置	阻尼 20 000~35 000 N·s/m
5~8	二层布置	阻尼 20 000~35 000 N·s/m
9~12	双层布置- 一层固定阻尼	阻尼 20 000~35 000 N·s/m
13~16	双层布置- 二层固定阻尼	阻尼 25 000~40 000 N·s/m
17	无保护	Kobe波-0.2g

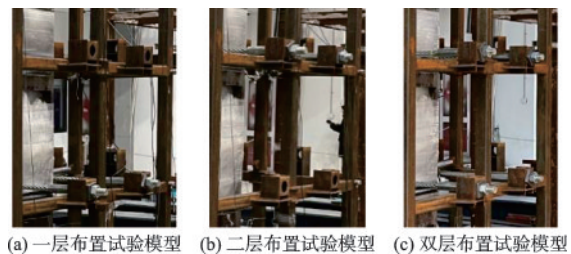


图8 不同工况试验模型
Fig.8 Experimental models under different operating conditions

3 试验结果及其分析

3.1 试验现象

在模拟地震过程中,结构顶层振动较明显,炉体振动相对较小,这是因为第一振型为主要参与振型,而在结构的第一振型中,顶层位移为主要表现形式,炉体位移相对较小。所有工况结束后,结构的固有频率较初始固有频率基本无变化,如图9所示,说明结构在峰值为1.0g的地震下,结构整体并

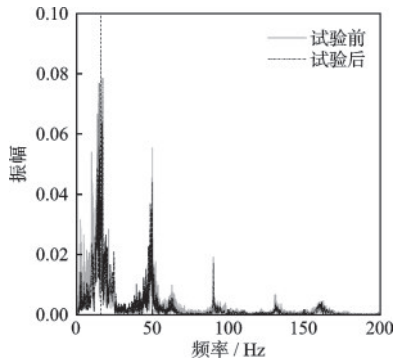


图9 试验前后固有频率对比

Fig.9 Comparison of natural frequencies before and after the experiment

未发生不可逆损伤。

3.2 限位器单层布置结构响应

3.2.1 一层布置

首先进行的是仅在一层布置钢缆-阻尼限位器的工况,不同阻尼下顶层位移时程如图10(a~d)所示,最大层间位移角的对比如图10(e)所示,各层最大加速度对比如图10(f)所示。可以观察到,随着阻尼的增大,顶层位移最大值的变化趋势呈现出先下降、再上升,最后下降的趋势,在阻尼系数为25 000 N·s/m时达到最小值。当阻尼系数为25 000 N·s/m时,除顶层与二层之间的最大层间位移角未显现出明显优势,其余两层的最大层间位移角均为最优。同样,各层最大加速度曲线也在阻尼系数为25 000 N·s/m时最靠图像左侧,为最优工况。

3.2.2 二层布置

接下来进行的是仅在二层布置钢缆-阻尼限位器的工况,不同阻尼下顶层位移时程如图11(a~d)所示,最大层间位移角对比如图11(e)所示,各层最大加速度对比如图11(f)所示。可以观察到,随着阻尼的增大,顶层最大位移在阻尼系数为35 000 N·s/m时最优。综合最大层间位移角与各层最大加速度,可以得出,当阻尼系数为35 000 N·s/m

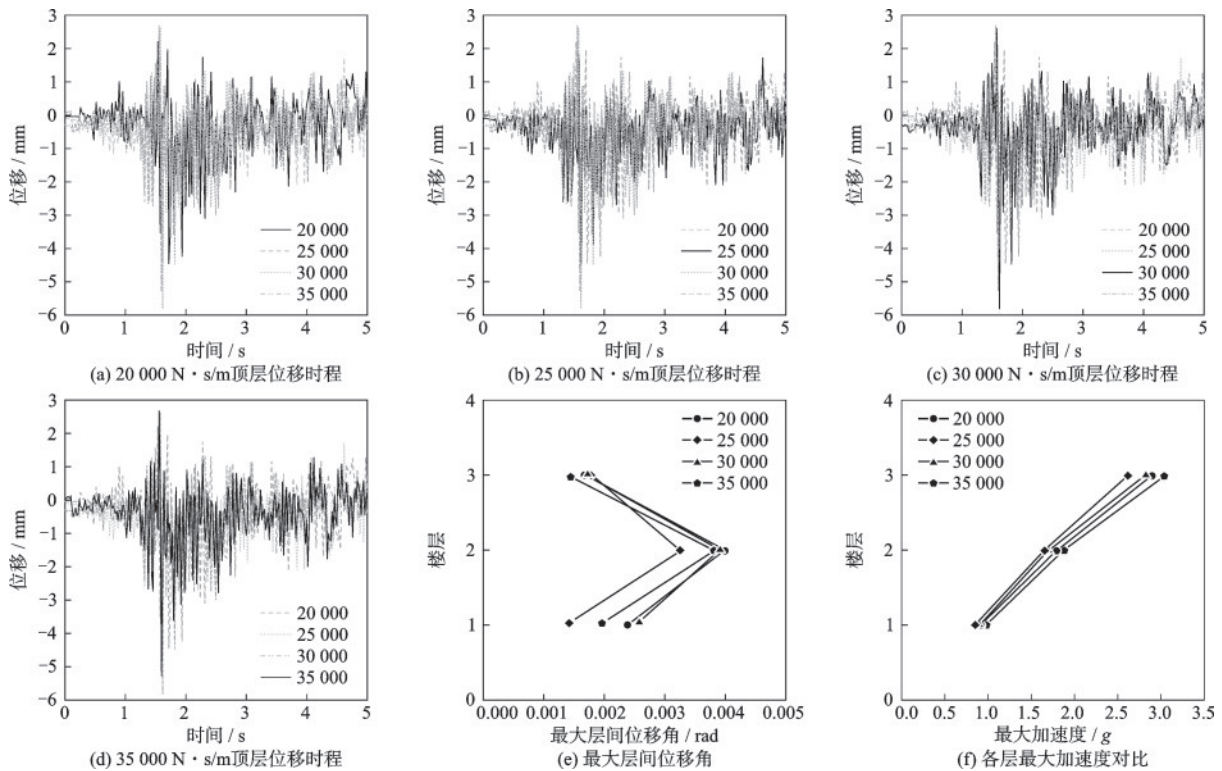


图10 仅一层布置限位器时结构地震响应

Fig.10 Seismic responses of the structure with dampers arranged on a single layer

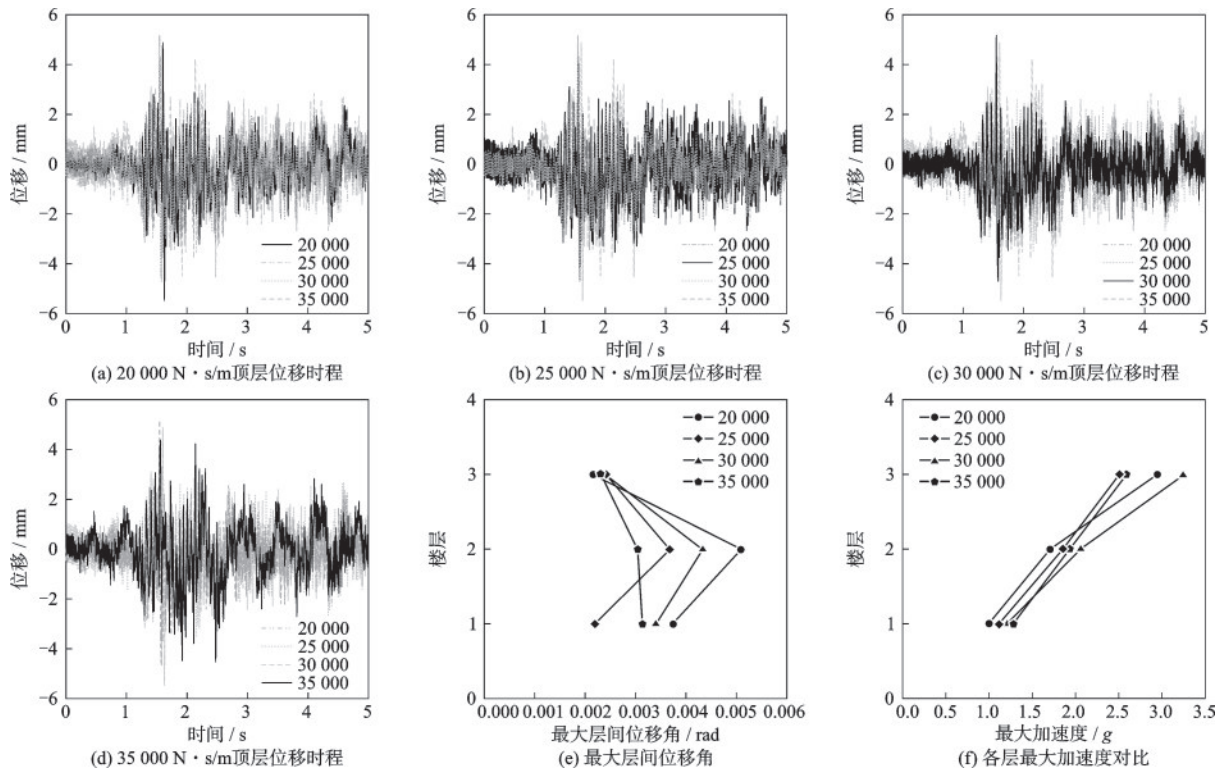


图 11 仅二层布置限位器时结构地震响应

Fig.11 Seismic responses of the structure with dampers arranged on two layers

时,支撑结构最大层间位移角有明显优势,且各层最大加速度均处于较好水平。

3.2.3 讨论

从顶层最大位移看,当一层或二层分别采用最优阻尼系数,即一层 25 000 N·s/m、二层 35 000 N·s/m 时,顶层最大位移分别为 4.46、4.53 mm,一层最优布置略好于二层最优布置。但是考虑到阻尼系数之间的差别,则一层最优布置在效果更好的情况下更经济。从最大层间位移角来看,明显仅一层布置优于仅二层布置,其中一层与三层的最大层间位移角优势最大。从各层最大加速度来看,一层最优布置与二层最优布置效果相当。综上,钢缆-阻尼限位器在较低楼层进行最优布置的效果更好。

3.3 限位器双层布置结构响应

3.3.1 一层固定阻尼

钢缆-阻尼限位器双层布置时,采用的方法为固定某层阻尼系数,更改另一层阻尼。首先进行的是固定一层阻尼系数为 25 000 N·s/m,更改二层的工况。不同阻尼下的顶层位移时程如图 12(a~d)所示,最大层间位移角对比如图 12(e)所示,各层最大加速度对比如图 12(f)所示。

可以观察到,随着二层布置阻尼的增大,顶层位移最大值随阻尼的增大单调递减,但阻尼的边际效用是递减的,35 000 N·s/m 工况与 30 000 N·s/m 工况之间的差距不足 1%。从最大层间位移看,除 20 000 N·s/m 工况外,其余三个工况差距不明显,而从各层最大加速度看,最优阻尼系数为 35 000 N·s/m。综上,当一层阻尼系数固定为 25 000 N·s/m 时,二层最优阻尼为 35 000 N·s/m;若考虑经济性,30 000 N·s/m 阻尼系数更加合理。

3.3.2 二层固定阻尼

后续进行的是固定二层阻尼系数为 35 000 N·s/m,更改一层阻尼的工况。不同阻尼下的各层位移时程如图 13(a~d)所示,最大层间位移角对比如图 13(e)所示,各层最大加速度对比如图 13(f)所示。

可以观察到,随着一层布置阻尼的增大,顶层位移最大值呈现出先上升、再下降,最后接近持平的趋势,在阻尼系数为 35 000 N·s/m 时取得最小值,从最大层间位移看,当阻尼系数为 35 000 N·s/m 时,各层的最大层间位移角均为最小值。从各层最大加速度看,35 000 N·s/m 阻尼系数仅一层最大加速度表现相对较差,对结构整体影响不大。综上,当

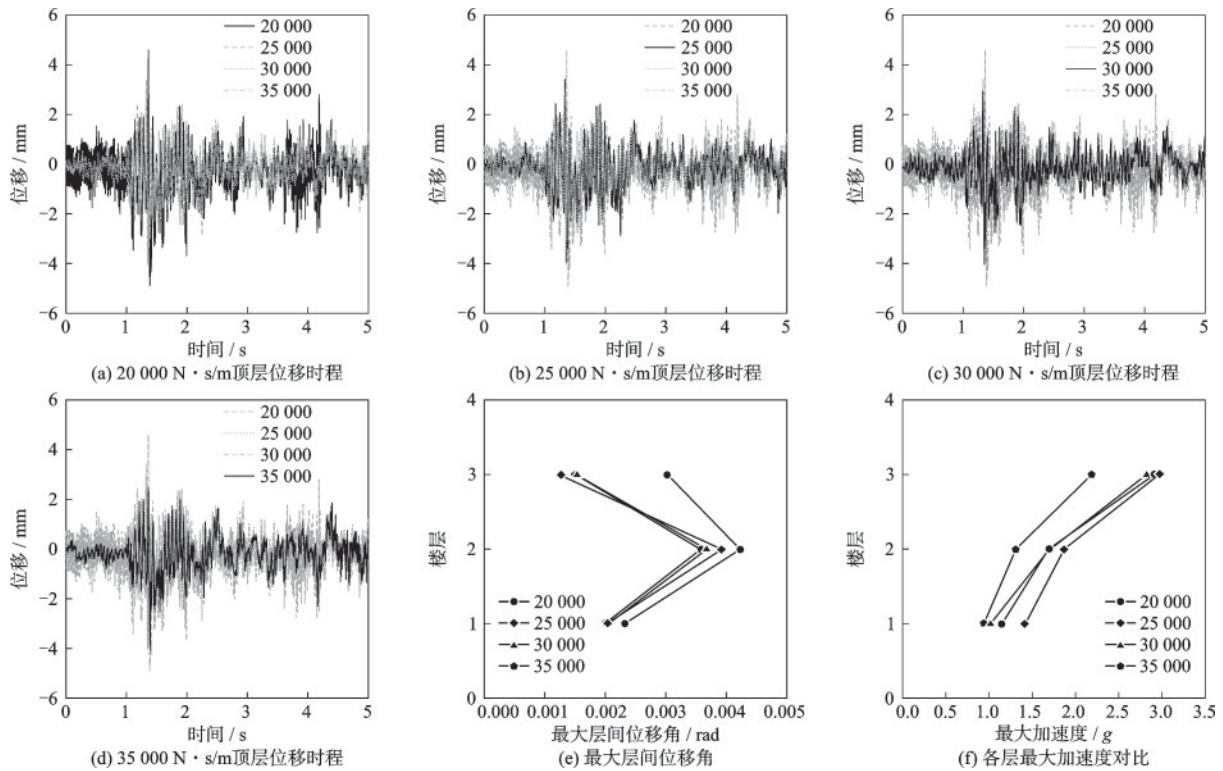


图 12 一层固定阻尼时结构地震响应

Fig.12 Seismic responses of the structure with fixed damping coefficients of dampers installed on a single layer

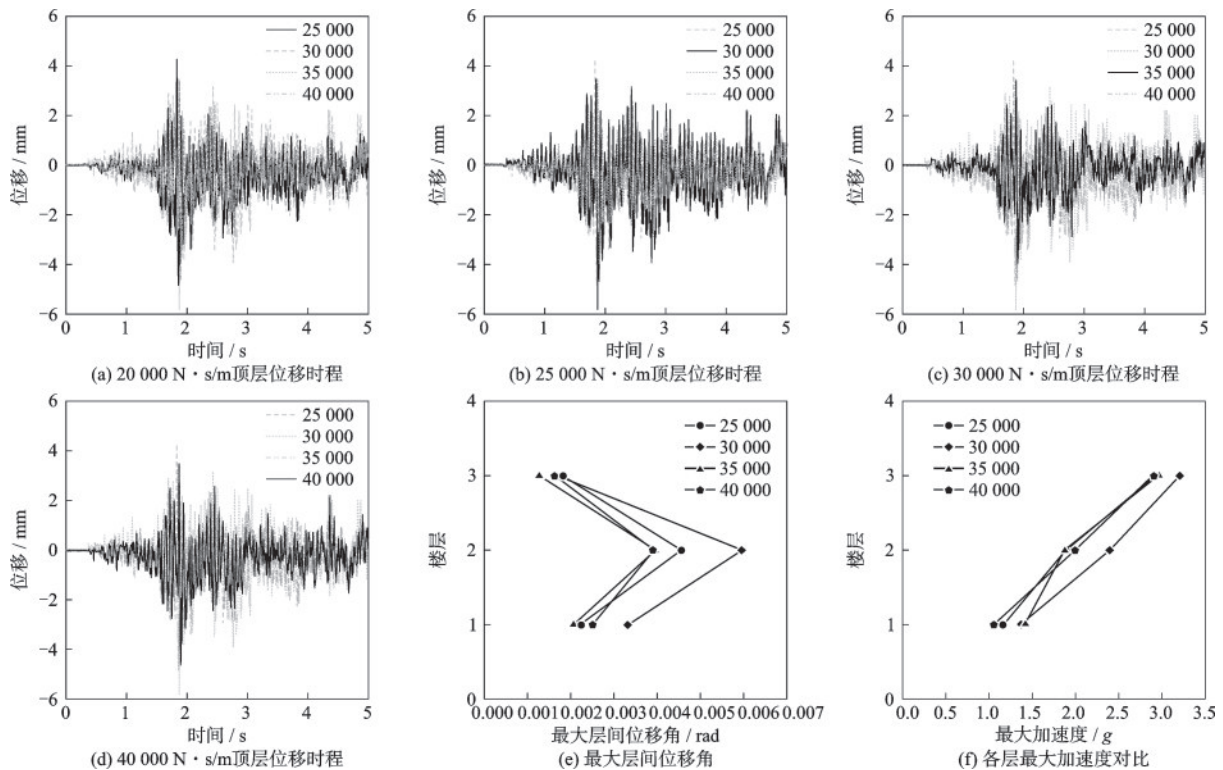


图 13 二层固定阻尼时结构地震响应

Fig.13 Seismic responses of the structure with fixed damping coefficients of dampers installed on two layers

二层固定阻尼系数为 35 000 N·s/m 时,一层最优阻尼为 35 000 N·s/m。

3.3.3 讨论
与仅单层布置的工况对比,双层布置的工况对

结构地震响应优化明显。较最优单层布置时顶层位移最大值 4.46 mm, 最优双层布置时顶层位移最大值为 3.96 mm, 减少了 11.21%。但是考虑到双层布置的花费是单层布置的两倍, 而减震效果相对提升有限, 因此从经济的角度考虑, 可以仅采用单层最优布置。

3.4 无保护结构响应

从安全角度出发, 结构无保护时, 仅模拟了峰值为 0.2g 的 Kobe 波地震, 结构顶层位移时程曲线

如图 14(a), 各层最大加速度如图 14(b), 放大系数对比如图 14(c)。

在无保护工况下, 结构顶层位移最大值超过 1 mm, 结构顶层加速度达 0.75g。由于地震峰值不同, 因此仅从放大系数进行比较以判断限位器的有效性。无保护时, 结构顶层的加速度放大系数达到 3.75 倍, 而有保护的各个工况中, 所有放大系数均小于 3.25 倍, 最小的放大系数可达 2.19 倍。因此, 此限位器可以明显减小结构的放大系数, 减小幅度可达 47.8%。

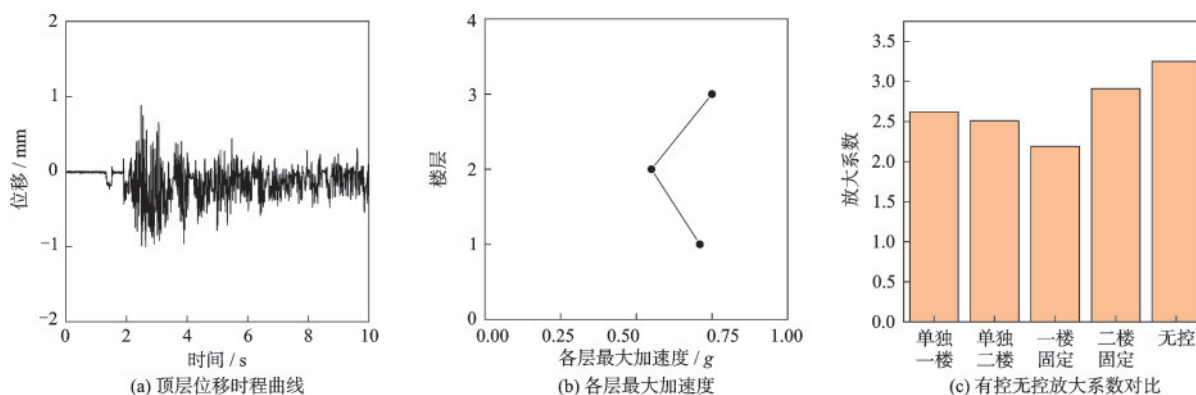


图 14 无保护时结构地震响应及对比

Fig.14 Seismic responses of the unprotected structure and comparisons

4 结 论

本文针对安装了钢缆-阻尼限位器的锅炉钢结构进行了振动台试验, 探究不同限位器阻尼以及不同限位器安装方案对结构地震响应的影响, 并得出了以下结论:

(1) 从放大系数的角度出发, 钢缆-阻尼限位器可大幅减小结构地震响应, 最大减幅可达 47.8%。

(2) 单层安装限位器时, 对比安装在一楼与二楼的试验结果, 一层安装时顶层位移最优值小于二层安装时顶层位移最优值, 且此时一层限位器阻尼小于二层限位器阻尼, 因此单层安装限位器时, 安装在较低楼层对结构地震响应改善更有效。

(3) 双层安装限位器时, 较单层安装, 支撑结构地震响应有改善, 但考虑到成本增加幅度, 改善效果有限。

参考文献:

[1] 王明君, 唐廷轩, 何军. 220 kV 变压器-套管体系抗震

性能的数值模拟分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(3): 526-534.

Wang M J, Tang T X, He J. Numerical simulation and analysis of seismic performance of high voltage transformer-bushing systems [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 526-534. (in Chinese)

[2] 王健泽, 刘恺, 李昂, 等. 基于振动台试验的火电厂主厂房减隔震体系抗震性能研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(增2): 227-232, 264.

Wang J Z, Liu K, Li A, et al. Shaking table study of a large-scale thermal power plant building equipped with innovative damping and isolation techniques [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup2): 227-232, 264. (in Chinese)

[3] 于永清, 李光范, 李鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 5-10.

Yu Y Q, Li G F, Li P, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan Earthquake [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 5-10. (in Chinese)

[4] Fujita S. Seismic damage of mechanical structures by the 2011 Great East Japan Earthquake [C] // The Pro-

- ceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon: Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica, 2012:24-28.
- [5] Wang J Z, Dai K S, Yin Y X, et al. Seismic performance-based design and risk analysis of thermal power plant building with consideration of vertical and mass irregularities[J]. *Engineering Structures*, 2018, 164(1): 141-154.
- [6] 张士炼, 纪金豹, 郝晓敏, 等. 大型火电厂煤斗悬吊减震结构振动台试验研究[J]. *电力建设*, 2009, 30(8): 73-76.
Zhang S L, Ji J B, Hao X M, et al. Shaking table test on suspended damping structure of coal bucket in large thermal power plant[J]. *Electric Power Construction*, 2009, 30(8):73-76. (in Chinese)
- [7] 李树楨, 尹之潜, 李云林. 悬吊锅炉-构架体系的地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1993, 13(4):89-100.
Li S Z, Yin Z Q, Li Y L. Analysis of earthquake response for suspended boiler framework system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1993, 13(4):89-100. (in Chinese)
- [8] Jiang Y H, Duan L P, Zhao J C. An iterative method based on a 3-dof model for optimal seismic design of coal-fired thermal power plant[J]. *ASME. Journal of Pressure and Vessel Technology*, 2023, 145(3): 034502.
- [9] 赵咏梅. 电站锅炉钢结构地震力计算方法研究[J]. *电站系统工程*, 2004, 16(3):10-11.
Zhao Y M. Steel structure of electric station boiler earthquake force calculate method investigate [J]. *Boiler Manufacturing*, 2004, 16(3):10-11. (in Chinese)
- [10] 沈祖炎, 孙飞飞. 关于钢结构抗震设计方法的讨论与建议[J]. *建筑结构*, 2009, 39(11): 115-122.
Shen Z Y, Sun F F. Discussion and recommendation on seismic design for steel structures[J]. *Building Structure*, 2009, 39(11): 115-122. (in Chinese)
- [11] 邹昀, 吕西林, 钱江. 上海环球金融中心大厦结构抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(6):74-80, 107.
Zou J, Lyu X L, Qian J. Study on seismic behavior of Shanghai world financial center tower [J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(6): 74-80, 107. (in Chinese)
- [12] 王伟, 李富源, 鞠硕华. 安装摩擦阻尼器锅炉钢构架的强震反应分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(8): 1063-1065, 1079.
Wang W, Li F Y, Ju S H. Strong seismic analysis of boiler steel structures equipped with friction damper[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(8):1063-1065, 1079. (in Chinese)
- [13] Aida K, Owa Y, Suzuki K, et al. Evaluation of aseismic reliability of actual boiler structures and a study on design of seismic ties based on proof tests using a large scaled shaking table [J]. *ASME. Journal of Pressure and Vessel Technology*, 2004, 126(1): 46-52.
- [14] 刘广义. 地震作用下电厂锅炉构架的振动控制研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.
Liu G Y. Study on vibration control of boiler frame of coal-burning power plant subject to earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)