

# 用于结构减震控制的拉索式惯容系统跨层布置优化研究<sup>\*</sup>

薛松涛<sup>1,2</sup> 康建飞<sup>1</sup> 谢丽宇<sup>1†</sup>

(1. 同济大学 结构防灾减灾工程系, 上海 200092)(2. 日本东北工业大学 建筑系, 仙台 982-8577)

**摘要** 本文提出了一种拉索式惯容系统的跨层布置方法用于结构减震控制. 将地震激励模拟为金井清谱随机激励, 构建统一的状态空间方程, 进行线性系统直接随机分析, 获得系统响应统计量. 利用布置效率确定惯容系统布置位置, 考虑惯容系统整体出力影响惯容系统自身造价及结构柱额外受力, 将惯容系统出力状况作为经济指标. 考虑结构位移响应及加速度响应与结构性能的相关性, 将结构的位移响应及加速度响应作为减震效果指标. 利用设计参数的多目标优化, 获取惯容系统最优参数的帕累托前沿, 指导设计并比较不同布置方法. 最后, 利用一个 10 层的基准结构进行减震效果分析, 验证跨层布置的惯容系统优于一般层间惯容系统.

**关键词** 跨层, 惯容系统, 被动控制, 多目标优化

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-065

## 引言

近年来, 大量的振动控制装置被提出<sup>[1,2]</sup>, 并应用于工程实际. 在这些振动控制装置中, 调谐质量阻尼器(TMD)设计简单, 振动控制机构简洁, 由质量元件、弹簧和阻尼器三个经典机械部件组成. TMD 被证明在控制风荷载引起的结构振动方面十分有效<sup>[3]</sup>, 但是由于其调谐质量的大小受工程实际限制, TMD 对地震激励下的结构振动控制方面效果较差<sup>[4]</sup>. 21 世纪初, 用于类比电路中电容的双端惯性单元概念的提出<sup>[5]</sup>, 为减小阻尼器的重量和尺寸提供了契机, 惯性单元产生的惯性力与两个端子之间的相对加速度成正比, 使得惯性单元能够利用楼层之间的加速度差进行减振. 一种新型的民用结构惯容系统被广泛研究<sup>[6-10]</sup>. 在土木工程中, 早在 1999 年, Arakaki 等人<sup>[11]</sup>就提出并独立实践了类似惯性器的概念, 利用滚珠丝杠机构放大粘性阻尼器的有效输出力, 用于抑制地震引起的振动. 这是惯性阻尼器在土木工程中的首次应用.

针对惯容系统的设计及优化已经有许多学者进行了研究. 对于单自由度结构, Ikago 等人<sup>[6]</sup>基于不动点理论推导出了惯容系统优化设计的简单公式. Pan 等人<sup>[9,12]</sup>考虑单自由度(SDOF)结构固有的

阻尼能力, 提出了一种基于需求的惯容系统优化设计方法, 以最小的控制成本满足性能要求. 对于多自由度结构, Ikago 等人<sup>[7]</sup>研究了安装惯容系统的多自由度结构模态响应并给出了简化设计方法. Taftanidis 等人<sup>[10]</sup>提出了基于惯性放大装置的多目标优化方法.

本文研究了拉索式惯容系统的优化布置, 提出拉索式惯容系统的跨层布置. 第一节概述了拉索式惯容系统的基本组成. 第二节建立安装有拉索式惯容系统的多自由框架结构分析模型. 通过白噪声激励的拓展状态方程及观测方程, 给出利用直接随机分析确定响应方差的方法. 第三节提出惯容系统布置效率指标, 确定惯容系统安装位置. 考虑惯容系统的经济指标及减震效果指标, 将惯容系统多目标优化转化为数学问题. 第四节, 利用一个十层的基准模型进行算例分析, 研究层间布置、跨一层布置及跨两层布置的拉索式惯容系统的减震效率. 分析不同减震指标对三种布置方案的位置及参数优化影响, 并从阻尼需求、惯容质量需求、系统出力大小等多方面探讨拉索式惯容系统跨层布置优势.

## 1 拉索式惯容系统的基本组成

如图 1 所示, 该拉索式惯容系统由电涡流阻尼

2019-09-05 收到第 1 稿, 2019-11-18 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51778490), 上海市自然科学基金面上项目(20ZR1461800), 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金项目(2017B030314068)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn

单元、旋转导体盘惯容单元及弹性拉索调谐单元组成。

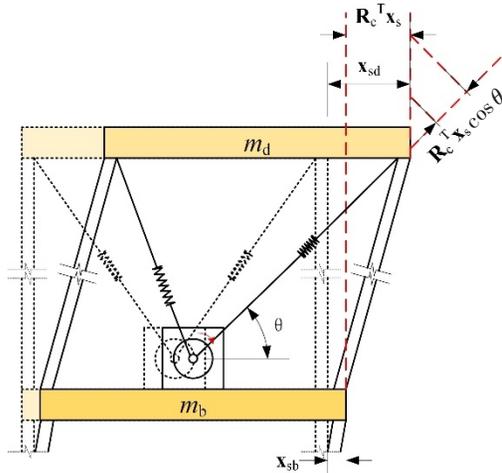


图 1 拉索式惯容系统示意图

Fig.1 Cable-bracing inertial system

在电涡流阻尼单元工作时,导体盘绕轴承转动,切割永磁铁静磁场的磁感线,在导体内产生涡电流,从而在与运动方向相反的方向发生磁性制动力,即电涡流阻尼力。如图 2 所示,旋转导体盘惯容单元是利用拉索平动位移向导体盘转动位移转换时的放大机制获取惯容效应的单元。弹性拉索调谐单元由刚性拉索及调谐弹簧串联组成,通过调整弹簧刚度实现惯容系统的调谐。

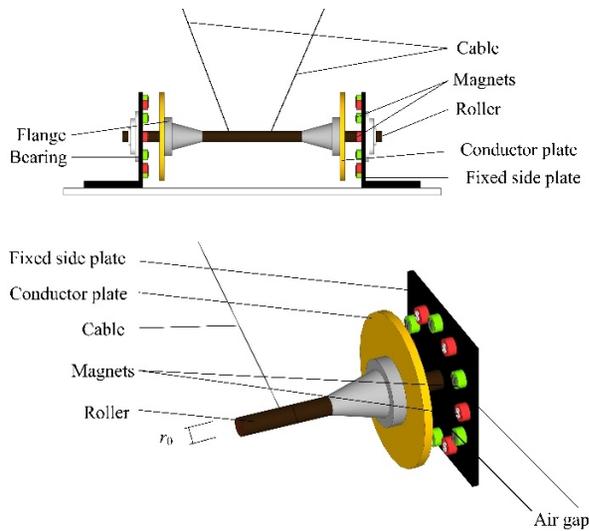


图 2 电涡流阻尼单元示意图

Fig.2 The eddy current damping element

## 2 布置拉索式惯容系统的多层结构模型

考虑一个  $n$  自由度的多层框架结构,布置了拉索式惯容系统。如图 3 所示,第  $i_b$  层和第  $i_d$  层分别为

惯容阻尼单元安装层和拉索端部锚固层 ( $i_d - i_b \geq 1$ )。

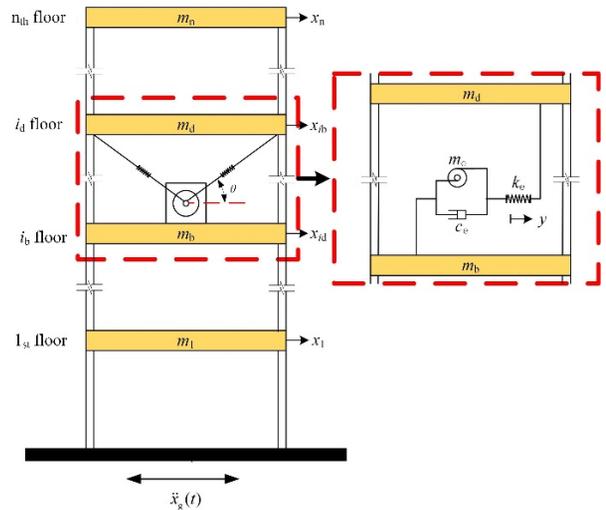


图 3 布置拉索式惯容系统的多层结构示意图

Fig.3 Multi-story structure equipped with cable-bracing inertial system

拉索式惯容系统以倾斜角度  $\theta$  直接安装于结构中时,其对上下层的水平方向控制力可通过下式计算:

$$f_d(t) = k_d y(t) \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$f_b(t) = m_d \left( \mathbf{R}_c^T \ddot{\mathbf{x}}_s(t) \cos^2 \theta + \ddot{y}(t) \cos^2 \theta \right) + c_d \left( \mathbf{R}_c^T \dot{\mathbf{x}}_s(t) \cos^2 \theta + \dot{y}(t) \cos^2 \theta \right) \quad (2)$$

其中,  $k_d$  为弹簧刚度,  $m_d$  为惯容质量,  $c_d$  为电涡流阻尼系数,  $y(t)$  为弹簧单元相对于  $i_d$  层的水平位移。  $\mathbf{x}_s(t)$  为结构各层位移矢量,  $\mathbf{R}_c^T$  为第  $i_b$  层和第  $i_d$  层相对位移关于各层位移矢量的转换矩阵。

根据 (1)、(2) 两式可知,拉索式惯容系统的水平控制力与其安装方式(如安装角度  $\theta$  等)密切相关,故定义安装效率系数  $\beta$ 。采用拉索斜向倾角为  $\theta$  的直接安装方式时,  $\beta = \cos^2 \theta$ 。引入等效设计参数,  $k_e = \beta k_d$ ,  $m_e = \beta m_d$ ,  $c_e = \beta c_d$ , 水平方向控制力方程可写为:

$$f_d(t) = k_e y(t) \quad (3)$$

$$f_b(t) = m_e \left( \mathbf{R}_c^T \ddot{\mathbf{x}}_s(t) + \ddot{y}(t) \right) + c_e \left( \mathbf{R}_c^T \dot{\mathbf{x}}_s(t) + \dot{y}(t) \right) \quad (4)$$

布置拉索式惯容系统的多层框架结构动力方程可表达为:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{M}_s + \mathbf{R}_c m_e \mathbf{R}_c^T) \ddot{\mathbf{x}}_s(t) + (\mathbf{R}_c m_e) \ddot{y}(t) + \\ & (\mathbf{C}_s + \mathbf{R}_c c_e \mathbf{R}_c^T) \dot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{R}_c c_e \dot{y}(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t) \\ & = -\mathbf{M}_s \mathbf{R}_s \ddot{\mathbf{x}}_g(t) \end{aligned} \quad (5)$$



$$J_E(i_b) = \frac{1}{\min_{\substack{r_{dmin} \leq r_d \leq r_{dmax} \\ \zeta_{dmin} \leq \zeta_d \leq \zeta_{dmax} \\ \mu_{min} \leq \mu \leq \mu_{max}}} (J_{H_2})} \quad (17)$$

其中,  $r_{dmin}, \zeta_{dmin}, \mu_{min}$  分别为设计变量  $r_d, \zeta_d, \mu$  的下界,  $r_{dmax}, \zeta_{dmax}, \mu_{max}$  分别为设计变量  $r_d, \zeta_d, \mu$  的上界. 由于减震效果  $J_{H_2}$  中权重因子  $\rho_i$  的不同定义, 布置效率指标  $J_E$  也存在相应的不同定义.

依据布置效率指标  $J_E$  可初步确定惯容系统布置方式, 进一步将拉索式惯容系统的优化问题表述为下面的数学优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } [J_{H_2}, J_{f_d}] \\ & \text{subject to } r_{dmin} \leq r_d \leq r_{dmax} \\ & \quad \zeta_{dmin} \leq \zeta_d \leq \zeta_{dmax} \\ & \quad \mu_{min} \leq \mu \leq \mu_{max} \end{aligned} \quad (18)$$

### 4 十层框架结构算例分析

以日本隔震协会(JSSI)提供的十层基准结构进行算例分析. 该基准结构的参数信息及无阻尼基本周期如表 1-2 所示.

表 1 模型的参数信息

Table 1 Specifications of the analytical model

Storey	Primary structure		
	mass[t]	stiffness[kN/m]	height[m]
10	875	158550	4
9	649	180110	4
8	656	220250	4
7	660	244790	4
6	667	291890	4
5	670	306160	4
4	676	328260	4
3	680	383020	4
2	682	383550	4
1	700	279960	6

表 2 模型的无阻尼基本周期

Table 2 Undamped fundamental period of the model

Mode	Periods/s	Angular frequency
1	2.01	3.13
2	0.76	8.27
3	0.46	13.7

利用最不利的地震功率谱(地震谱达到峰值时的圆频率与结构第一模态频率一致)进行优化分析. 地震动功率谱曲线如图 4 所示, 金井清谱达到峰值的圆频率为 3.13.

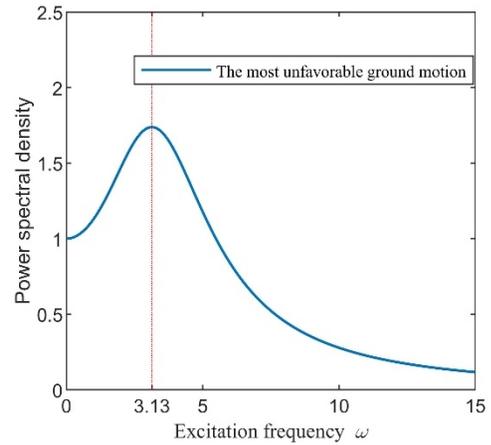


图 4 地震动输入功率谱

Fig.4 Seismic input power spectra

充分利用拉索式惯容系统的安装便易性, 拉索式惯容系统可采用的布置方式有: 跨一层及跨两层安装 ( $i_d - i_b = 2, i_d - i_b = 3$ ). 在设计时, 选取有效的变量区间, 阻尼比  $\zeta_d$  取值范围定义为  $\zeta_d \in [0, 1]$ , 质量比  $\mu$  取值范围定义为  $\mu \in [0, 5]$ , 频率比  $r_d$  取值范围定义为  $r_d \in [0, 3]$ .

不同的减震效果指标及惯容系统安装方式的布置效率如图 5~7 所示.

惯容系统三类布置效率分布较为相近, 均为惯容单元安置于底层时最佳. 综合指标及位移指标下, 随着跨越层数的增加减震效率增加, 在加速度指标下, 跨两层布置最优减震效率略次于跨一层布置.

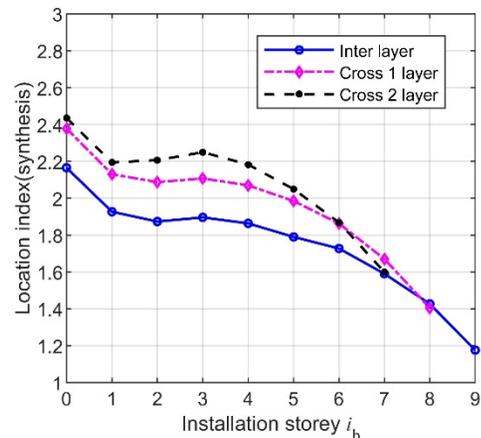


图 5 惯容系统布置效率示意图(综合指标)

Fig.5 Layout efficiency of inerter system (comprehensive index)

依据布置效率指标, 初步确定拉索式惯容系统下层安装位置均为底层, 利用式(18), 选取综合减震指标, 进行多目标优化. 由于减震效果指标与经济指标之间相互冲突, 不存在同时满足两者最优的

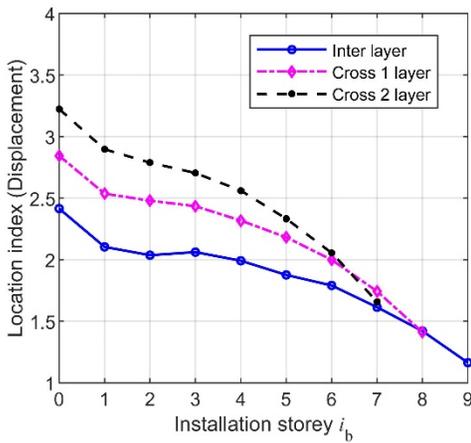


图6 惯容系统布置效率示意图(位移指标)

Fig.6 Layout efficiency of inerter system (displacement index)

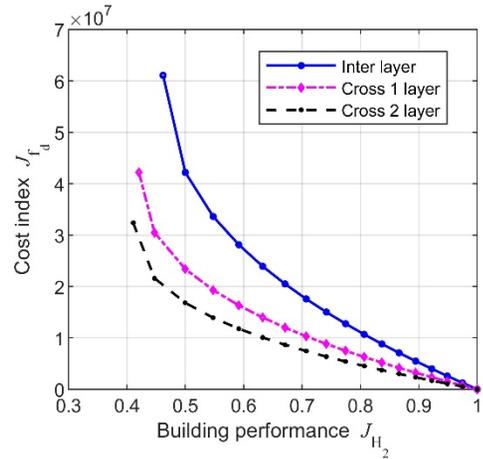


图8 惯容系统的帕累托前沿

Fig.8 Pareto front for the inerter system

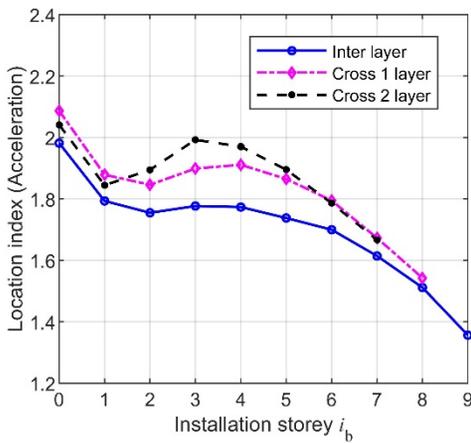


图7 惯容系统布置效率示意图(加速度指标)

Fig.7 Layout efficiency of inerter system (acceleration index)

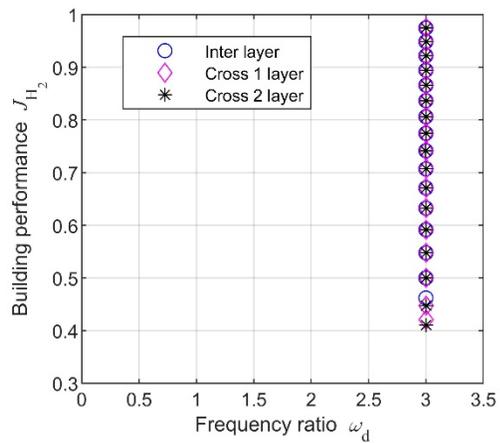


图9 惯容系统帕累托前沿的频率比设计最优值

Fig.9 Design frequency ratio of Pareto optimal solutions

解,因此需要寻求一系列的最优解,使得任一指标在不损害另一指标的前提下达到最优,由这些最优设计点组成的曲线构成帕累托前沿,如图8所示。优化结果显示,层间布置惯容系统的最优减震效果  $J_{H_2} = 0.462$ ,跨一层布置惯容系统的最优减震效果  $J_{H_2} = 0.421$ ,跨两层布置惯容系统的最优减震效果  $J_{H_2} = 0.411$ 。跨一层及跨两层布置的拉索式惯容系统减震效果相近且均优于层间布置惯容系统。由帕累托前沿可知,在相同的减震效果下,层间布置水平控制力远大于跨一层布置及跨两层布置,即跨层布置相较于层间布置将能带来更多的经济效益。

各减震指标下的设计参数如图9~11所示。由图9可知,惯容系统的频率比始终位于设计参数上界,说明在惯容系统设计时需考虑实际工程需要进行频率比选择。

由图10~11所示阻尼比及质量比关系可知,对

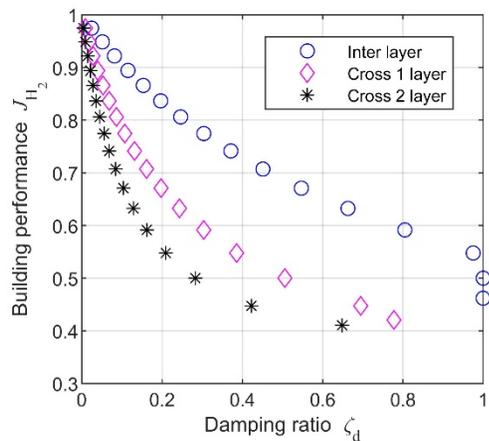


图10 惯容系统帕累托前沿的阻尼比设计最优值

Fig.10 Design damper ratio of Pareto optimal solutions

于同样的减震效果,跨一层布置及跨两层布置的惯容系统需要相对较小阻尼比和质量比,且随着质量比、阻尼比的增加减震效果显著提升。

依据平衡设计的原则,选定设计减震指标利用

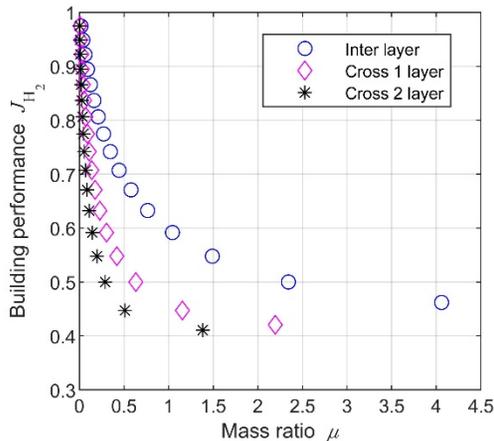


图 11 惯容系统帕累托前沿的质量比设计最优值  
Fig.11 Design mass ratio of Pareto optimal solutions

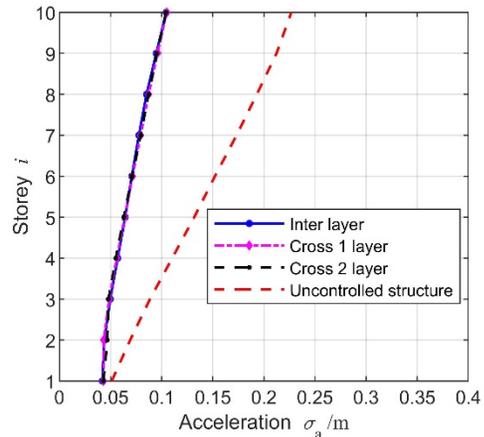


图 13 指定减震指标下的结构加速度响应  
Fig.13 The structural acceleration response against specified  $J_{H_2}$

帕累托前沿便可获得较为经济的设计方案.以减震指标  $J_{H_2} = 0.5$  为例,层间布置、跨一层布置及跨两层布置设计参数如表 3 所示.各层位移及加速度响应如图 12-13 所示.安装惯容系统后,结构响应显著降低,减震效果明显,且三种布置形式的惯容系统减震效果较为接近.

表 3 惯容系统的设计参数 ( $J_{H_2} = 0.5$ )

Table 3 Design parameters of the inerter system ( $J_{H_2} = 0.5$ )

Layout	Frequency ratio	Damper ratio	Mass ratio
Inter layer	3.000	1.000	2.343
Cross 1 layer	3.000	0.506	0.634
Cross 2 layer	3.000	0.283	0.289

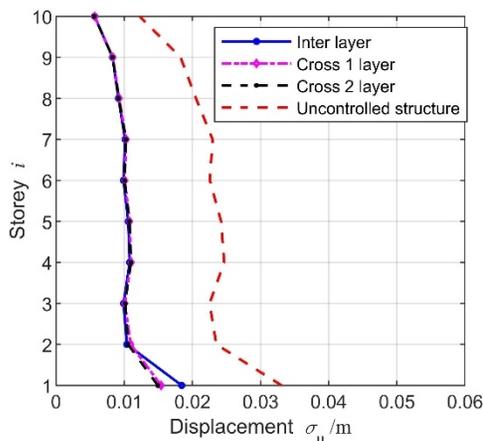


图 12 指定减震指标下的结构位移响应  
Fig.12 The structural displacement response against specified  $J_{H_2}$

## 5 小结

本文研究了拉索式惯容系统的跨层布置,给出拉索式惯容系统在金井清谱随机激励下的参数优

化方法,并验证了拉索式惯容系统通过便捷安装方式实现的跨层布置明显优于各类层间布置惯容系统.通过一个十层基准结构的算例分析,说明拉索式惯容系统的有效性.引入布置效率指标并分析确定惯容系统安装最佳位置为底层.通过多目标优化给出惯容系统的减震指标及经济指标的平衡设计的帕累托前沿.研究了惯容系统的优化参数分布.从最优减震效果、相同减震效果下的经济指标等多个方面论证了跨层布置的拉索式惯容系统优于层间布置惯容系统.

## 参 考 文 献

- 1 王孝然,申永军,杨绍普.接地式三要素型动力吸振器的  $H_{\infty}$  优化.动力学与控制学报,2016,14(5):448-453 (Wang X R, Shen Y J, Yang S P.  $H_{\infty}$  optimization of the grounded three-element type dynamic vibration absorber. *Journal of Dynamics and Control*, 2016, 14( 5) : 448~453 ( in Chinese))
- 2 郎君,申永军,杨绍普.半主动控制接地式动力吸振器参数优化及性能比较.动力学与控制学报,2019,17(2):168-177(Lang J, Shen Y J, Yang S P. Parameter optimization and performance comparison of semi-active ground-hook control DVAs. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(2):168~177 ( in Chinese))
- 3 McNamara R J. Tuned mass dampers for buildings. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1977, 103(9) : 1785~1798
- 4 Kaynia A M, Veneziano D, Biggs J M. Seismic effectiveness of tuned mass dampers. *ASCE Journal of the Structural Division*, 1981, 107(8):1465-1484
- 5 Chen M Z Q, Papageorgiou C, Scheibe F, et al. The miss-

- ing mechanical circuit element. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2009, 9(1):10~26
- 6 Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(3):453~474
  - 7 Ikago K, Sugimura Y, Saito K, et al. Modal response characteristics of a multiple-degree-of-freedom structure incorporated with tuned viscous mass dampers. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2018, 11(2):375~382
  - 8 Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2014, 38:156~164
  - 9 Pan C, Zhang R F. Design of structure with inerter system based on stochastic response mitigation ratio. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(6):e2169
  - 10 Taflanidis A A, Giaralis A, Patsialis D. Multi-objective optimal design of inerter-based vibration absorbers for earthquake protection of multi-storey building structures. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(14):7754~7784
  - 11 Arakaki T, Kuroda H, Arima F, et al. Development of seismic devices applied to ball screw. Part 1: Basic performance test of RD-series. *AIJ Journal of Technology and Design*, 1999, 5(8):239~244
  - 12 Pan C, Zhang R F, Luo H, et al. Demand-based optimal design of oscillator with parallel-layout viscous inerter damper. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(1):e2051
  - 13 Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1957, 35:309~325
  - 14 Lutes L D, Sarkani S. Stochastic analysis of structural and mechanical vibrations. New Jersey: Prentice Hall, 1997

## STUDY ON OPTIMIZATION OF CROSS-LAYER CABLE-BRACING INERTER SYSTEM FOR STRUCTURAL SEISMIC RESPONSE CONTROL \*

Xue Songtao<sup>1,2</sup> Kang Jianfei<sup>1</sup> Xie Liyu<sup>1†</sup>

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 9828577, Japan)

**Abstract** This paper presents design method for a cross-layer layout of cable-bracing inerter system for structural seismic response control. The seismic excitation was modeled as the Kainai-Tajimi spectrum, a unified state space equation was constructed, and the direct random analysis of the linear system was carried out to obtain the system response statistics. The layout efficiency is used to determine the layout position of the inerter system. Considering the force of inerter system influences the cost of the inerter system and the additional stress on the structural column, the force of inerter system is taken as an economic index. Considering the correlation between the structural displacement response and acceleration response and the structural performance, the structural displacement response and acceleration response are taken as the performance index. Using multi-objective optimization of design parameters, the Pareto front can be obtained to guide design and compare different layout methods. Finally, a 10-story benchmark is used to analyze the damping effect and verify that the cross-layer distributed inerter system is superior to the general inter-layer distributed inerter system.

**Key words** cross-layer, inerter system, passive vibration control, multi-objective optimization

---

Received 5 September 2019, revised 18 November 2019.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (51778490), the Natural Science Foundation of Shanghai (20ZR1461800), Open Research Fund Program of Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering and Application Technology (2017B030314068)

† Corresponding author E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn