

基于减震比设计方法的惯容减震结构分析

赵志鹏^{1,2}, 张瑞甫², 陈清军^{1,2}, 潘 超³, 王 超²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092;

3. 烟台大学土木工程学院, 山东 264005)

摘 要: 该研究基于能量方法分析了典型惯容系统能量耗散和结构减震控制的特点, 以混联 I 型惯容系统(SPIS-I)为例说明该方法。首先推导出 SPIS-I 在白噪声激励下配置该系统的单自由度结构随机响应解, 然后定义惯容系统耗能系数来衡量其耗能效果和减震性能。基于目标减震比的惯容系统参数设计方法, 在相同目标减震比的设计条件下, 对典型惯容系统进行参数设计, 采用能量方法进行了参数分析。最后, 通过典型算例验证了参数分析所得到的结果。研究表明: 基于相同目标减震比设计的惯容系统, 均能够有效地耗散结构振动能量。当目标减震比较大时, 不同力学模式的惯容系统的耗能效率接近, 受惯容系统力学模式的影响较小; 当目标减震比较小时, 建议采用混联型惯容系统以实现更显著的能量耗散效果。

关键词: 减震; 能量分析; 随机振动; 惯容系统; 响应减震比; 设计方法

中图分类号: TU31

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.S022

ANALYSIS OF STRUCTURES WITH INERTER SYSTEMS BASED ON THE RESPONSE MITIGATION RATIO DESIGN METHOD

ZHAO Zhi-peng^{1,2}, ZHANG Rui-fu², CHEN Qing-jun^{1,2}, PAN Chao³, WANG Chao²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. College of Civil Engineering, Yantai University, Shandong 264005, China)

Abstract: In this study, the characteristics of energy dissipation and vibration mitigation effect of classical inerter systems are studied through the energy analysis method. The series-parallel I inerter system (SPIS-I) is taken as an example to illustrate the method. The stochastic response formula for the single-degree-of-freedom structure with SPIS-I is derived under white noise excitation. The energy dissipation coefficient of the inerter system is defined to measure its energy dissipation and vibration mitigation effects. Using the response mitigation ratio-based design method, classical inerter systems are designed under the same target response mitigation ratio. Parametric analysis is conducted using the energy analysis method. The results obtained by the parametric analysis are verified by classical examples. The research results show that different inerter systems designed under the same target response mitigation ratio can effectively dissipate the structural energy. In the condition of the large target response mitigation ratio, the energy dissipation efficiencies of different inerter systems are similar, which are slightly influenced by the mechanical layout of the inerter system. When the response mitigation ratio is small, it is recommended to use an inerter system of series-parallel layout for more effective energy dissipation.

收稿日期: 2018-05-02; 修改日期: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778489); 上海市浦江人才项目(17PJ1409200); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22120180064)

通讯作者: 张瑞甫(1980—), 男, 陕西人, 副教授, 博士, 博导, 主要从事结构减隔震研究(E-mail: zhangruifu@tongji.edu.cn).

作者简介: 赵志鹏(1994—), 男, 山西人, 博士生, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: zhaozhipeng@tongji.edu.cn);

陈清军(1963—), 男, 浙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工程结构抗震研究(E-mail: chenqj@tongji.edu.cn);

潘 超(1985—), 男, 山东人, 讲师, 博士, 从事工程结构减震控制研究(E-mail: panchao@ytu.edu.cn);

王 超(1995—), 女, 山东人, 硕士生, 从事工程结构减震控制研究(E-mail: wangchao17@tongji.edu.cn).

Key words: vibration control; energy analysis; stochastic analysis; inerter system; response mitigation ratio; design method

惯容是一种具有两端点的惯性力学单元,其出力与单元两端的相对加速度成正比,且具有显著的质量增效作用^[1-4]。1973年,Kawamta等^[5]提出一种基于泵送质量的减震控制系统,这是惯性单元实现机制在土木工程领域的首次应用,然而,并没有使用明确的惯容增效机制。Smith^[6]在机械工程领域也开始了同类研究工作,并且将惯容类比于电容,用英文 Inerter 命名该两端点的惯性原件,在中文中通常称之为惯容。Inoue 和 Ikago 等^[7]开发了可应用于实际工程的惯容装置(tuned viscous mass damper, TVMD),提出了基于定点理论的惯容系统参数的直接设计方法,并将 TVMD 安装于实际建筑中,这是惯容系统在土木工程领域实际工程中的首次应用。惯容系统通常由惯容单元、阻尼单元和刚度单元组成,不同的力学单元可以组合为多种形式的惯容系统^[8-11],一般归纳为三种基本类型:混联 I 型惯容系统(SPIS-I)、混联 II 型惯容系统(SPIS-II)和串联型惯容系统(SIS),其中 SPIS-II 和 TVMD 属于同一种形式。张瑞甫等^[3-4,8,11-13]提出了惯容系统基于性能需求的参数设计理念,并将其应用于多种惯容减震结构的参数优化设计之中。Pan 和 Zhang^[8]分析推导了惯容减震结构动力随机响应的解析解,并从结构响应极值条件的设计准则出发,提出了惯容减震结构的参数设计方法,以满足结构设计的目标减震性能。所推导的惯容减震结构随机响应解析解揭示了惯容系统参数与其减震性能的作用关系,但惯容系统各单元之间力学模式对系统减震性能的作用机理还有待于进一步的研究。

鉴于此,本文基于能量方法对比研究了典型惯容系统力学模式对结构能量耗散和减震性能的影响。首先,以 SPIS-I 为例推导出白噪声激励下配置该系统的单自由度结构随机响应的解析解,建立适用于典型惯容减震结构的能量分析方法;然后,简要介绍基于随机响应减震比的惯容系统参数设计方法;最后,基于相同的目标减震比,对典型力学模式的惯容系统进行设计,通过能量方法分析了不同力学模式惯容系统的能量耗散特点。

1 惯容减震结构理论分析

1.1 运动方程与响应分析

图 1 所示的 SPIS-I 力学模型包括惯容单元、能

量耗散单元和弹簧单元。该惯容系统的出力 F_{in} 由以下公式确定:

$$F_{in} = m_{in}\ddot{u}_{in} = k_d(u_s - u_{in}) + c_d(\dot{u}_s - \dot{u}_{in}) \quad (1)$$

其中: u_s 和 u_{in} 分别是 SPIS-I 系统的变形和惯容单元的变形; m_{in} 、 c_d 和 k_d 分别是惯容单元的表现质量、能量耗散单元的阻尼系数和弹簧刚度。

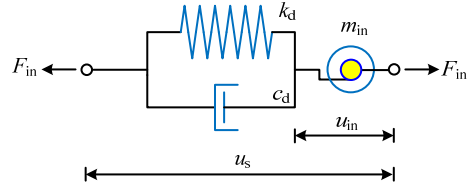


图 1 SPIS-I 的力学模型

Fig.1 Mechanical model of SPIS-I

图 2 为配置 SPIS-I 的单自由度结构力学模型, k 、 c 和 m 分别表示主结构的刚度、阻尼系数和质量; u 表示主结构的位移。配置 SPIS-I 的单自由度结构的运动平衡方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku + m_{in}\ddot{u}_{in} = -m\ddot{u}_g \\ m_{in}\ddot{u}_{in} = k_d(u - u_{in}) + c_d(\dot{u} - \dot{u}_{in}) \end{cases} \quad (2)$$

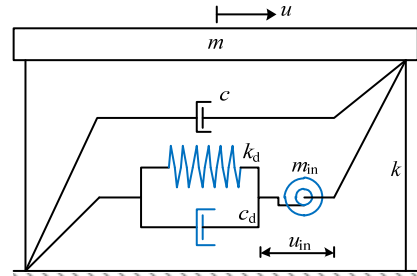


图 2 SPIS-I 型惯容减震结构力学模型

Fig.2 Mechanical model of structure with SPIS-I

$\ddot{u}_g$ 为地面运动加速度。为了使研究的结构具有普遍适用性,定义以下参数:主结构圆频率 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$,固有阻尼比 $\zeta = c/2m\omega_0$;惯质比 $\mu = m_{in}/m$,名义阻尼比 $\xi = c_d/2m\omega_0$ 和附加刚度比 $\kappa = k_d/k$ 。式(2)的拉普拉斯变换形式为:

$$\begin{cases} s^2U(s) + 2\zeta\omega_0sU(s) + \omega_0^2U(s) + \mu s^2U_{in}(s) = -U_g(s) \\ \mu s^2U_{in}(s) = 2\xi\omega_0s[U(s) - U_{in}(s)] + \kappa\omega_0^2[U(s) - U_{in}(s)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s = i\omega$ 且 ω 为外荷载频率; $U(s)$ 、 $U_{in}(s)$ 和 $U_g(s)$ 分别是 $u(t)$ 、 $u_{in}(t)$ 和 $\ddot{u}_g(t)$ 的拉普拉斯变

换。求解式(3), 可得到 $U(s)$ 的解析式。根据随机振动理论, SPIS-I 型惯容减震结构位移响应传递函数 $H_U(i\omega)$ 可以表示为: $H_U(i\omega) = U(s)/U_g(s)|_{s=i\omega}$, 在功率谱为 $S_{a_g}(\omega)$ 的地震作用下, 位移响应均方

$$\sigma_{U,IS}^2 = \frac{\pi S_0}{2\omega_0^3} \cdot \frac{4\zeta^2 \kappa \mu \xi + \xi(\mu^2 + \kappa^2(1+\mu)^2 - \kappa\mu(2+\mu) + 4\zeta^2 + 4\mu\xi^2) + \zeta(\kappa^2\mu^2 + 4\mu\xi^2 + 4\kappa(1+\mu)\xi^2)}{4\zeta^3 \kappa \mu \xi + \mu^2 \xi^2 + \zeta\xi(-2\kappa\mu + \mu^2 + \kappa^2(1+\mu)^2 + 4\zeta^2 + 4\mu\xi^2) + \zeta^2(\kappa^2\mu^2 + 4\mu\xi^2 + 4\kappa(1+\mu)\xi^2)} \quad (4)$$

为了研究惯容系统力学模式对结构减震效果的作用影响, 本节选择能量方法来分析衡量典型惯容系统的耗能效果。根据式(2), 地震作用输入到惯容减震结构的能量最终一部分被结构固有阻尼耗散, 另一部分被惯容系统耗散, 惯容系统的耗能系数定义如下^[14]:

$$\gamma_E = \frac{\text{惯容系统耗能}}{\text{结构总能量}} = \frac{c_d \sigma_{\dot{U}-\dot{U}_m}^2}{c \sigma_U^2 + c_d \sigma_{\dot{U}-\dot{U}_m}^2} \quad (5)$$

式中, $\sigma_{\dot{U}-\dot{U}_m}^2$ 和 σ_U^2 分别为主结构速度响应和惯容系统能量耗散单元速度响应方差。

1.2 随机响应减震比

考虑到配置惯容系统是为了有效降低结构动力响应的目标, 本文选定响应减震比作为参数设计指标, 并基于理论公式给出配置惯容系统的减震结构在白噪声激励下响应减震比 $\gamma_{U,IS}$ 的定义:

$$\gamma_{U,IS} = \sigma_{U,IS} / \sigma_{U,0} \quad (6)$$

式中, $\sigma_{U,0} = \sqrt{\pi S_0 / 2\omega_0^3 \zeta}$ 为未受控单自由度结构位移响应均方根值。

1.3 设计方法

根据式(4)和式(6), 分析 $\gamma_{U,IS}$ 的解析形式, 可以发现, $\gamma_{U,IS}$ 与结构固有频率无关, 仅受到惯容系统参数 μ 、 κ 和 ξ 的影响。因此, 本节提出以 $\gamma_{U,IS}$ 为减震设计目标, 在目标响应减震比 γ_t 与实际响应减震比相同的条件下, 增加 $\sigma_{U,IS}^2$ 对于 κ 和 ξ 的响应极值条件设计方程来求解SPIS-I的三个未知设计参数 μ 、 κ 和 ξ , 该设计方法可以简述为以下的数学形式:

$$\gamma_{U,IS} = \gamma_t, \quad \frac{\partial \sigma_{U,IS}^2}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{U,IS}^2}{\partial \kappa} = 0 \quad (7)$$

式中, $\gamma_t = \frac{\text{性能水准}}{\text{原始结构响应}} \times \frac{1}{\text{抗震能力冗余度}}$, 可以利用数值方法求解该非线性方程。惯容系统的设计流程如下: 主结构初步分析→确定目标响应减震

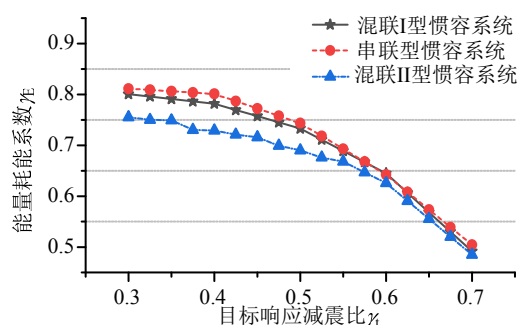
$\sigma_{U,IS}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_U(i\omega)|^2 S_{a_g}(i\omega) d\omega$ 。假定外部激励为白噪声且其功率谱为 S_0 , 位移均方响应可以根据式(4)计算。采用相同的分析方法, 可以方便得到安装SPIS-II和SIS的结构均方响应 $\sigma_{U,IS}^2$ 。

比 $\gamma_t \rightarrow$ 列出设计方程(式(7))→求解设计方程以获得 μ 、 κ 、 $\xi \rightarrow$ 进行结构分析以确定实际响应减震比。为了提供更加简洁实用的设计公式, 文献在不同目标响应减震比的设计条件下, 对具有不同固有阻尼单自由度结构配置的SPIS-I、SPIS-II和SIS进行了参数设计, 给出了 μ 、 ξ 和 κ 关于 $\gamma_{U,IS}$ 和 ζ 的经验拟合公式^[8]。

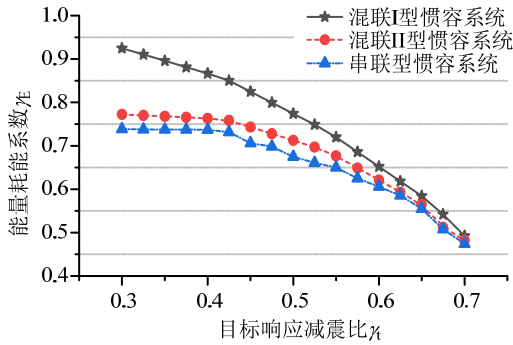
2 惯容减震结构分析

2.1 参数分析

采用基于目标减震比的惯容系统参数设计方法, 在设定目标减震比的前提下, 可以准确便捷地在响应极值条件下得到典型惯容系统的设计参数。为了进一步探究相同目标减震比的前提下, 典型惯容系统力学模式对其综合减震性能, 比如能量耗散效果的影响, 本节采用能量方法对不同典型惯容减震结构进行了分析。采用SPIS-I、SPIS-II和SIS作为减震装置, 近似使用白噪声激励代替地震激励以直接使用半经验-半解析公式来进行设计, 根据式(5)计算耗能系数 γ_E , 图3给出了在 $\zeta = 0.02$ 和 $\zeta = 0.05$ 的计算结果。从图中可以看出, 在相同目标减震比的条件下, 不同惯容系统具有相近的耗能效果, 且不同惯容系统之间耗能效果的差异随着目标减震比的增大而逐渐缩小。总体而言, 混联型惯容系统较串联型惯容系统的耗能效果更明显, 建议优先选用混联型惯容系统进行结构的减震控制。



(a) 结构固有阻尼比为0.02时能量耗散系数变化



(b) 结构固有阻尼比为 0.05 时能量耗散系数变化

图 3 三类型惯容系统能量耗散系数

Fig.3 Results of energy dissipation ratio of structures with three classical inerter systems

2.2 设计案例

假定一单自由度结构^[8], 其质量 $m = 20$ t, 抗侧刚度 $k = 2700$ kN/m, 自振周期 $T = 0.54$ s, 固有阻尼比 $\zeta = 0.02$, 其目标响应减震比 $\gamma_t = 0.60$ 。采用 SPIS-I、SPIS-II 和 SIS 作为减震装置, 设计参数如表 1 所示。设计参数所对应的实际 $\gamma_{U,IS}$ 可根据公式(6)得到。由表 1 可以发现, 采用经验公式设计得到的不同惯容系统所对应的 $\gamma_{U,IS}$ 与目标减震比 γ_t 非常接近, 说明该公式是准确有效的。

表 1 惯容系统设计参数及 $\gamma_{U,IS}$ 结果Table 1 Results of parameters of inerter systems and $\gamma_{U,IS}$

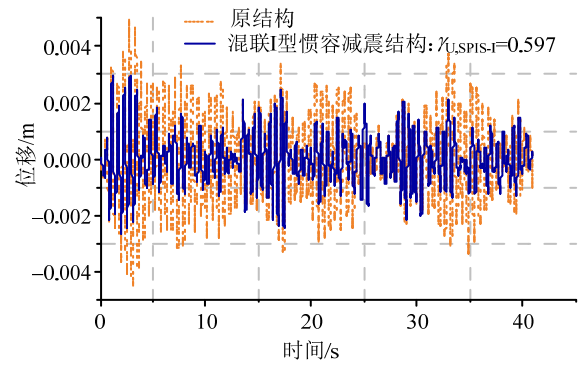
惯容系统	μ	ζ	κ	$\gamma_{U,IS}$
SPIS-I	0.0256	0.0020	0.0250	0.600
SPIS-II	0.0362	0.0144	0.0627	0.602
SIS	0.0257	0.0801	0.0257	0.600

分别采用白噪声、El Centro 南北向地震波以及 Chi-Chi 地震中记录在 E 类场地得到的地震波 TCU117 作为输入激励, 对配置上述惯容系统的减震结构进行了时程分析计算。计算得到的 $\gamma_{U,IS}$ 汇总在表 2 中, SPIS-I 型惯容减震结构的位移时程曲线如图 3(a)~图 3(b)所示。由表 2 和图 4 可得, 不同类型的输入激励下, 典型惯容系统的实际响应减震比均十分接近目标的 0.60, 具有相近的位移减震效果。

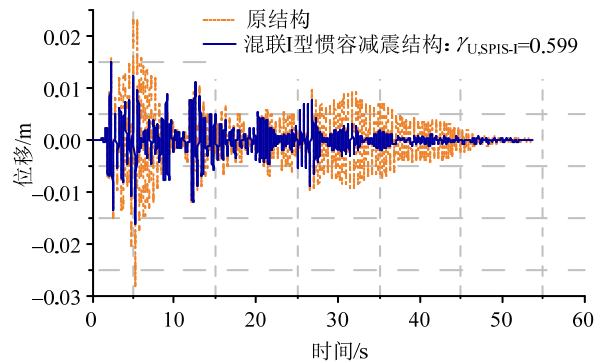
表 2 时程分析结果 $\gamma_{U,IS}$ Table 2 Time history analysis results of $\gamma_{U,IS}$

$\gamma_{U,IS}$	输入激励		
	白噪声	El Centro 波	Chi-Chi 波
SPIS-I	0.597	0.599	0.600
SPIS-II	0.598	0.597	0.597
SIS	0.602	0.587	0.575

假定不同惯容系统的出力均用 F_{IS} 表示, 惯容减震结构时域的能量分析如式(8)所示。



(a) 白噪声



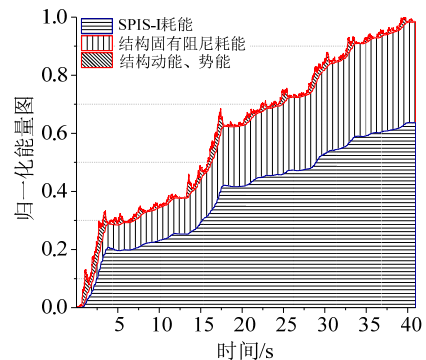
(b) El Centro 地震波

图 4 配置 SPIS-I 的减震结构位移时程响应

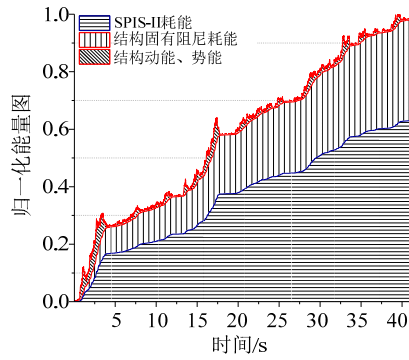
Fig.4 Displacement responses of structures with SPIS-I in time domain

$$\int_0^t m \ddot{u} \dot{u} dt + \int_0^t c \dot{u} \dot{u} dt + \int_0^t k u \dot{u} dt + \int_0^t F_{IS} \dot{u} dt = - \int_0^t m \ddot{u}_g(t) \dot{u} dt \quad (8)$$

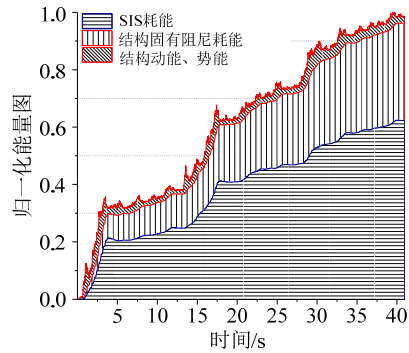
图 5、图 6 分别给出了三种惯容减震结构在白噪声和 El Centro 地震波激励下的归一化能量图。从图中可以发现, 基于目标减震比的设计方法所设计的惯容系统, 均能够有效地耗散结构振动能量, 且减震装置耗能效率接近。结合之前参数分析的研究结果, 当目标减震比较大时, 惯容系统耗能效果受惯容系统力学模式的影响较小。



(a) SPIS-I 减震结构能量图

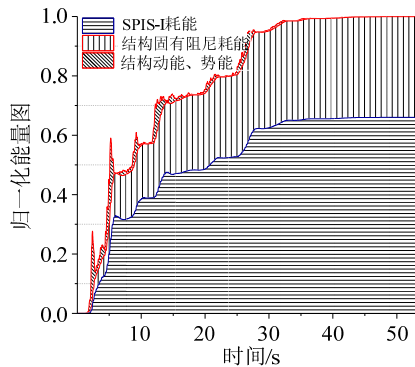


(b) SPIS-II 减震结构能量图

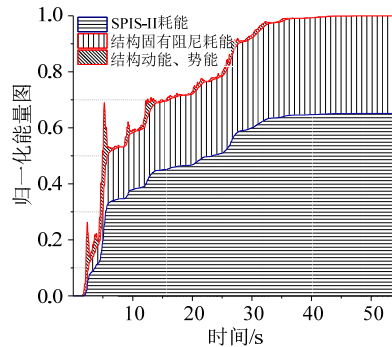


(c) SIS 减震结构能量图

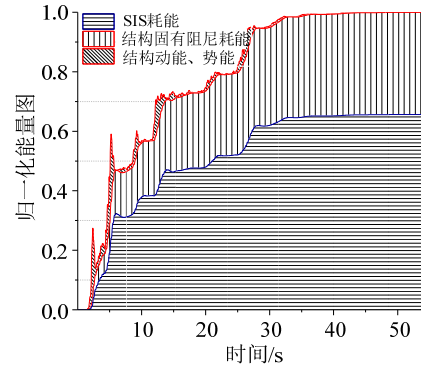
图5 三种惯容减震结构在白噪声激励下的归一化能量图
Fig.5 Normalized energy dissipation curves of structures with three types of inerter systems under the excitation of white noise



(a) SPIS-I 减震结构能量图



(b) SPIS-II 减震结构能量图



(c) SIS 减震结构能量图

图6 三种惯容减震结构在 El Centro 地震波激励下的归一化能量图

Fig.6 Normalized energy dissipation curves of structures with three types of inerter systems under the excitation of El Centro wave

4 结论

(1) 本研究针对惯容减震系统建立了基于随机振动的能量分析方法,定义惯容系统耗能系数来衡量惯容系统的耗能效果和减震性能。

(2) 本文利用基于目标减震比的设计方法设计了一系列惯容减震结构,通过能量方法分析了不同力学模式惯容系统的能量耗散特点,建议优先采用混联型惯容系统进行结构减震控制以实现更有效的能量耗散效果。

(3) 本文基于能量方法的参数研究和时域分析发现,基于相同目标减震比设计的惯容系统,均能够有效耗散结构振动能量;当目标减震比较大时,不同力学模式的惯容系统的耗能效率接近,受惯容系统力学模式的影响较小。

参考文献:

- [1] Zhang R F, Zhao Z P, Dai K. Seismic response mitigation of a wind turbine tower using a tuned parallel inerter mass system [J]. Engineering Structures, 2019, 180: 29—39.
- [2] Chen Q J, Zhao Z P, Zhang R F, et al. Impact of soil-structure interaction on structures with inerter system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 433: 1—15.
- [3] Zhang R F, Zhao Z P, Pan C. Influence of mechanical layout of inerter systems on seismic mitigation of storage tanks [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114: 639—649.
- [4] Pan C, Zhang RF, Luo H, et al. Demand-based optimal design of oscillator with parallel-layout viscous inerter damper [J]. Structural Control and Health Monitoring,

- 2018, 25(1): e2051.
- [5] Kawamata S. Development of a vibration control system of structures by means of mass pumps [R]. Tokyo: Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1973.
- [6] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1648—1662.
- [7] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453—474.
- [8] Pan C, Zhang R F. Design of structure with inerter system based on stochastic response mitigation ratio [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(6): e2169.
- [9] 罗浩, 张瑞甫, 翁大根, 等. 一种旋转黏滞质量阻尼器对结构响应的控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 295—301.
Luo Hao, Zhang Ruifu, Weng Dagen, et al. Study of a series viscous mass damper in the control of structural response [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 295—301. (in Chinese)
- [10] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 62—71.
- [11] 张瑞甫. 储液罐地震响应控制研究[R]. 上海: 同济大学, 2014.
Zhang Ruifu. Seismic response control of storage tank [R]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese)
- [12] 李超, 张瑞甫, 赵志鹏, 等. 调谐黏滞质量阻尼器基于遗传算法的参数优化研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(4): 124—131.
Li Chao, Zhang Ruifu, Zhao Zhipeng, et al. Optimum study of tuned viscous mass dampers based on genetic algorithm [J]. Structural Engineers, 2016, 32(4): 124—131. (in Chinese)
- [13] Luo H, Zhang R F, Weng D G. Mitigation of liquid sloshing in storage tanks by using a hybrid control method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 183—195.
- [14] 克拉夫 R, 彭津 J. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 27—48.
Clough R, Penzien J. Dynamic of structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 27—48. (in Chinese)
- (上接第 117 页)
- [2] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [3] 付长华, 高孟潭, 俞言祥. 用数值模拟方法研究北京盆地对 3 s~10 s 地震动的放大效应[J]. 地震研究, 2015, 38(3): 448—460.
Fu Changhua, Gao Mengtan, Yu Yanxiang. A study on scaling effect induced by Beijing basin on ground motions of period 3 s~10 s using numerical simulation method [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(3): 448—460. (in Chinese)
- [4] 付长华, 高孟潭, 陈鲲. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响[J]. 地震学报, 2012, 34(3): 374—382, 425.
Fu Changhua, Gao Mengtan, Chen Kun. A study on long-period response spectrum of ground motion affected by basin structure of Beijing [J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(3): 374—382, 425. (in Chinese)
- [5] 环文林, 时振梁, 杨玉林. 1730 年北京圆明园地震[J]. 地震研究, 1996, 19(3): 260—266.
Huan Wenlin, Shi Zhenliang, Yang Yulin. 1730 Beijing Yuanmingyuan earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 1996, 19(3): 260—266. (in Chinese)
- [6] Campbell K W, Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra [J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1087—1115.
- [7] Ancheta T D, Darragh R B, Stewart J P, et al. NGA-West2 database [J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 989—1005.
- [8] Xiong C, Lu X Z, Lin X C, et al. Parameter determination and damage assessment for THA-based regional seismic damage prediction of multi-story buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(3): 461—485.
- [9] Xiong C, Lu X Z, Guan H, et al. A nonlinear computational model for regional seismic simulation of tall buildings [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(4): 1047—1069.
- [10] GB/T 18208.4—2011, 地震现场工作 第 4 部分: 灾害直接损失评估[S]. 北京: 地震出版社, 2011.
GB/T 18208.4—2011, Post-earthquake field works-Part 4: Assessment of direct loss [S]. Beijing: Seismological Press, 2011. (in Chinese)
- [11] Zeng X, Lu X Z, Yang T Y, et al. Application of the FEMA-P58 methodology for regional earthquake loss prediction [J]. Natural Hazards, 2016, 83(1): 177—192.