

# 不同目标函数下的金属阻尼器优化布置研究\*

赵杰, 周同玲, 王桂萱\*, 张睿

(大连大学 土木工程技术研究与开发中心, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 针对不同目标函数下的金属阻尼器优化布置, 在框架结构中分别以层间位移角和层间位移为目标函数, 采用逐层布置法和位置参数法两种优化方法进行消能减震分析, 对比不同目标函数下的金属阻尼器消能减震效果。结果表明: 在相同阻尼器数量下, 两种优化方法的减震效果相差不大, 结构中的金属阻尼器的滞回曲线比较饱满, 消能减震效果较好。

**关键词:** 目标函数; 优化布置; 逐层布置法; 位置参数法; 滞回曲线

**中图分类号:** TV398

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)01-0131-06

## 0 引言

利用结构本身的抗震性能抵御地震作用, 结构很可能不满足安全性的要求而遭到严重破坏。国内外学者开展了许多消能减震技术的研究, 通过在结构上安装消能装置, 减小结构的动力反应。由于消能减震结构具有减震机理明确、减震效果显著且安全可靠等优点, 易于在工程中推广应用, 因此, 近些年来, 众多学者对各种消能装置的试验、理论分析和控制设计方法进行了大量研究, 并取得了诸多成果, 消能减震技术在新建工程和震损建筑减震和加固中的应用形式和范围也越趋广泛。目前, 我国《建筑抗震设计规范》(GB5011—2010) 已经增加了有关消能减震的内容, 位移型和速度型两类被动阻尼器是其中需要重点研究和推广的技术。至今开展结构减震技术研究的国家达 20 多个, 实际应用工程已有很多, 并在一定程度上经受了地震和风振的考验。Kelly 等 (1972) 首先提出金属屈服耗能器, 并进行了金属阻尼器的研究和试验。Skinney 等 (1980) 提出 U 形钢板阻尼器, 并最早将钢阻尼器应用于新西兰政府办公楼这一实际工程中 (Tsai, Hong, 1992)。目前较具特色的软钢阻尼器是三角形软钢阻尼器 (TADAS) 和 X 形软钢阻尼器 (XADAS), 分别由 Whittaker 等 (1991)、Tsai 和 Hong (1992)

研究开发, 是目前应用较多的软钢阻尼器。金属阻尼器具有方便耐用、滞回耗能性能良好的特点, 逐渐得到工程界的广泛认可。

## 1 金属阻尼器力学参数

软钢阻尼器是结构被动控制中耗能减震装置的一种, 在地震或风振时, 软钢阻尼器通过发生塑性屈服滞回变形而耗散输入结构中的能量, 从而达到减震的目的。图 1 为原型试验测得的金属阻尼器滞回曲线 (李钢, 2006)。从图中可以看出, 金属阻尼器具有较大的初始刚度, 屈服后良好的耗能性能, 滞回曲线较为饱满。通过原型试验确

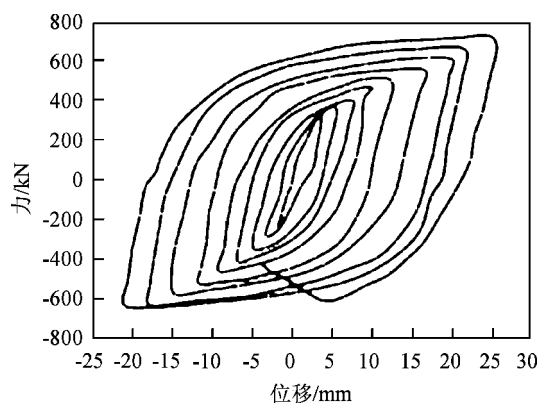


图1 金属阻尼器滞回曲线

Fig. 1 Hysteresis curve of metal dampers

\* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 大连市科技计划项目 (2014E13SF145) 资助.

✉ 通讯作者: 王桂萱 (1960~), 教授, 博士, 主要从事重大设施减震以及防震减灾监测技术等.  
E-mail: tumuxinxi@163.com.

定的金属阻尼器的相关参数：屈服位移为2.2 mm，屈服力为375 kN，初始刚度为170.5 kN/mm。

## 2 优化布置方法

### 2.1 优化布置方法流程

本文采用逐层布置法和位置参数法进行金属阻尼器优化布置研究，以层间位移角和层间位移为目标函数进行消能减震分析，对比分析不同目标函数的消能减震效果。逐层布置法和位置参数法的计算流程如图2所示。

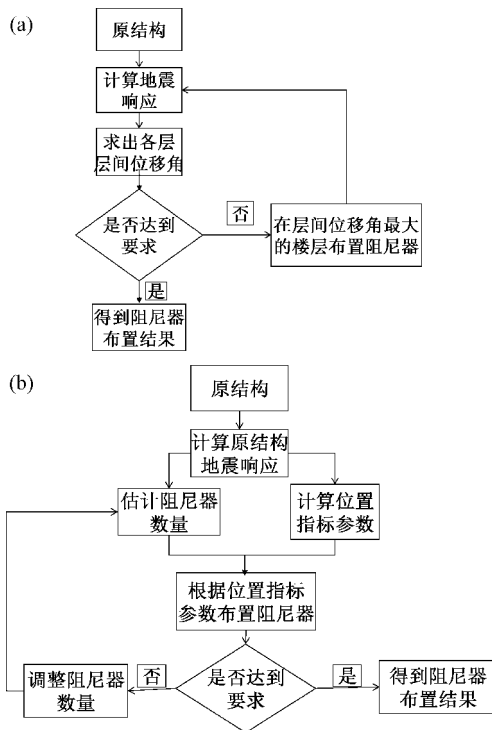


图2 逐层布置法 (a)、位置参数法 (b) 计算流程图  
Fig.2 The calculation flow diagram of sequential search method (a) and weight coefficient method (b)

逐层布置法（顺序搜索法）：对未布置金属阻尼器的结构进行地震响应分析，找出最大层间位移角或层间位移所在楼层，在该楼层布置金属阻尼器。然后对布置了金属阻尼器的结构进行地震响应分析，找出新结构层间变形最大的楼层，继续在该楼层布置软钢阻尼器。不断循环，直到结构变形达到目标值，得到逐层布置方法的布置方案。逐层布置法操作步骤直观、方法明确，同时布置结果能够得到有较好的减震效果，很多国内学者的消能器优化布置的相关研究中都采用这种

方法作为基础对照或者主要优化方法（林宁，2008）。

位置参数法（权系数法）：根据逐层布置法得到的每层层间位移角或者层间位移，确定目标函数，根据目标函数布置金属阻尼器，不断循环，直到结构变形达到目标值，得到位置参数法的布置方案。位置参数法的消能器优化布置效果通常略差于逐层布置方法，但由于其计算快速和布置方便的特点在工程应用中更具优势。位置参数法的目标函数为：

$$\rho_i = \frac{\theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i} \quad (1)$$

其中， $\theta_i$  为层间位移角或层间位移； $n$  为结构的层数。

### 2.2 阻尼器数量初步确定

金属阻尼器数量的确定可以采用能量法初步确定，能量方程为

$$E_{in} = E_e + E_k + E_c + E_h + E_d \quad (2)$$

式中， $E_{in}$  是消能减震结构的总能量； $E_e$ 、 $E_k$  分别是消能减震结构的变形势能、动力势能，且仅是能量转换，不耗能； $E_c$  是消能减震结构的阻尼变减能，只占总能量的很小部分； $E_h$  是消能减震结构的滞回耗能，且较小，接近为0； $E_d$  是阻尼器的消耗能。实际工程设计中，可以假定地震能量全部由消能减震器耗散或吸收，则能量方程为

$$E_{in} \leq E_d \quad (3)$$

式（2）为消能减震体系的能力设计方程，式（3）可近似表达为

$$E_{in} = n \Psi m E_{di} \quad (4)$$

其中， $E_{in}$ 、 $E_{di}$  分别为地震输入结构总能量、单个阻尼器循环一周所耗散的能量，等于滞回曲线包含的面积； $n$  表示阻尼器总数； $\Psi$  表示不同位置阻尼器同时工作的系数，一般可取0.4~0.6，本文 $\Psi$ 取0.4； $m$  表示阻尼器滞回循环数，一般可达200~300次，工程设计中为偏于安全，取 $m=50$ 。由式（2）和式（3）可求得所需阻尼器的数量为

$$n \geq \frac{E_{in}}{\Psi m E_{di}} \quad (5)$$

其中  $E_{in}$  可简化为

$$E_{in} = \frac{1}{2}MS^2. \quad (6)$$

其中,  $M$  表示消能减震结构的总质量;  $S$  表示结构自振周期和所属场地类型所对应的速度反应谱值。

利用办公软件 EXCEL 和 ORIGIN 求出金属阻尼器滞回面积 (查小琴等, 2009),  $E_{di} = 45.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ; 根据结构自振周期和所属场地类型计算出其所对应的速度反应谱值, 根据经验公式 (龚思礼, 2002) 得到结构的自振周期为

$$T = 0.22 + 0.035 H / \sqrt{B}. \quad (7)$$

式中,  $H$  为结构高度,  $B$  为结构的宽度, 故求得  $T = 0.5732$ 。根据结构自振周期和所属场地类型, 由规范给出的加速度反应谱进行转化得到速度反应谱。得到的速度反应谱值  $S = 0.65$ ; 加速度反应谱和速度反应谱如图 3 所示。

由式 (5) 计算所需阻尼器的数量的下限值为

$$n \geq \frac{E_{in}}{\Psi m E_{di}} = 4.4 \quad (8)$$

阻尼器下限值取 5。

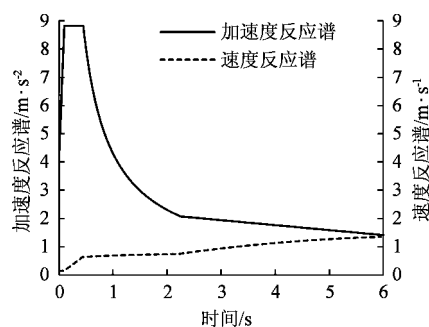


图3 反应谱图

Fig. 3 Response spectrum figure

### 3 工程概况

#### 3.1 工程背景

大连大学附属新华医院住院部为 11 层框架结构 (图 4), 高 49.15 m, 宽 115.6 m。根据《建筑抗震规范》(GB 50011—2010), 该建筑的抗震设防烈度为 VII 度。该结构经设计, 已满足 VII 度设防下的抗震性能目标。为进一步提高医院的抗震

性能, 采取适当的抗震措施后, 验算其结构在 VIII 度大震下是否倒塌。为实现以上目标, 本文进行了结构非线性时程分析, 提出了采用金属屈服阻尼器增强结构抗震性能的措施。此模型梁柱采用杆件单元, 板采用壳单元, 软钢阻尼器采用 Plastic (Wen) 单元模拟 (北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院, 2006), 钢支撑和软钢阻尼器采用 Q235, 支撑截面为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。

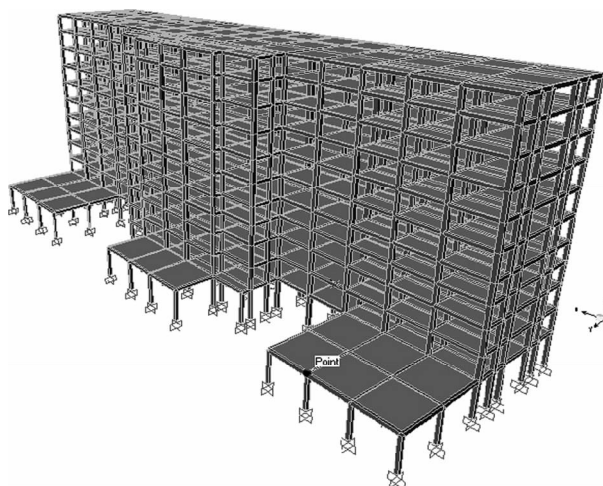


图4 原结构模型

Fig. 4 The primary structure model

#### 3.2 地震波的选取

根据建筑场地类别和设计地震分组选取实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线。选取 2 条天然波 (EL Centro 波和兰州波)、1 条人工波。地震波的时间步长取 0.02 s, 取地震波前 20 s 输入结构中进行时程分析, 地震波如图 6 所示。

### 4 阻尼器优化布置方案及消能减震效果分析

通常根据结构的抗震需要, 应同时在结构的两个主轴方向分别进行阻尼器的布置, 也可仅将阻尼器布置于结构刚度相对较小的结构受力方向。本文为更直观的对比不同阻尼器布置方案的消能减震效果, 设有在两个主轴方向同时布置阻尼器, 又考虑到  $Y$  主轴方向框架结构刚度相对较弱, 在地震作用下,  $Y$  主轴方向的内力与位移比  $X$  主轴方向大, 为更好的体现减震性能, 仅在  $YZ$  平面内设置阻尼器。

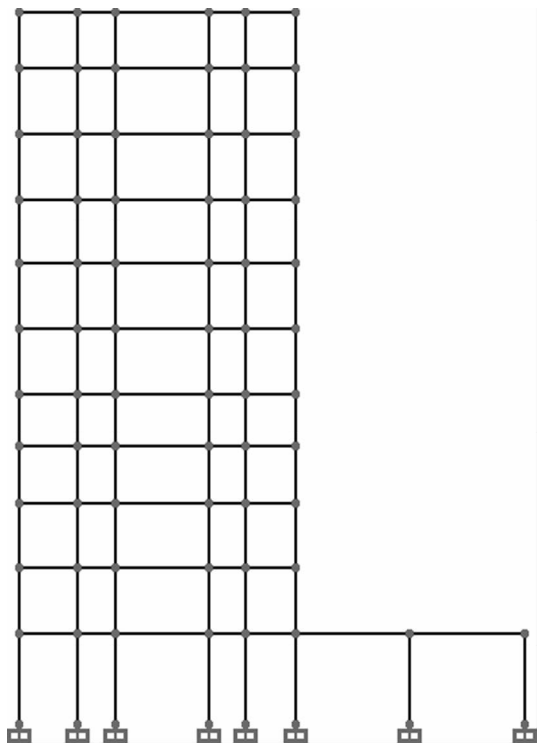


图 5 YZ 立面图  
Fig. 5 YZ elevation

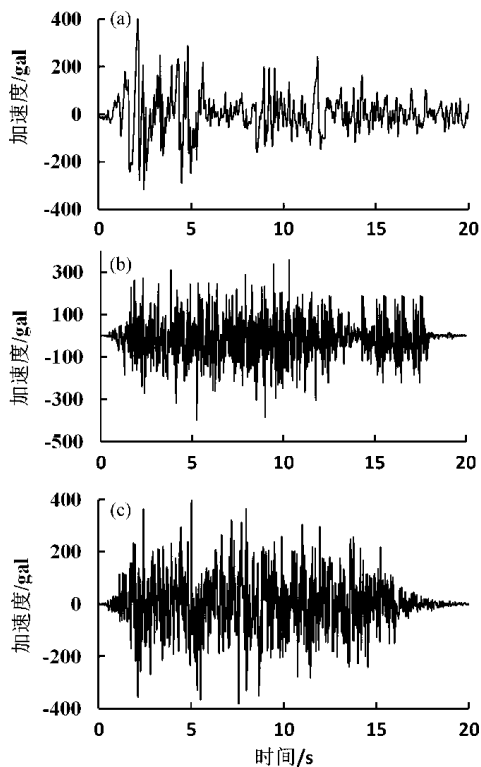


图 6 VIII 度大震作用下地震波  
(a) EL Centro 波; (b) 人工波; (c) 兰州波  
Fig. 6 The seismic wave of VIII degree rare earthquake  
(a) EL Centro wave; (b) artificial wave; (c) Lanzhou wave

4.1 逐层布置法

在结构 Y 向布置相同数量的阻尼器, 以层间位移、层间位移角为目标函数进行软钢阻尼器优化布置, 每次布置 2 个。由于首层层高比其他层的层高很多, 以层间位移为目标函数的布置方案均布置在一层, 本文给出了 3 条地震波作用下的、以层间位移角为目标函数的优化布置方案, 如表 1 所示。

表 1 逐层布置法布置方案

Tab. 1 The arrangement scheme of sequential search method

地震波	布置顺序				
EL Centro 波	8	7	8	3	3
兰州波	3	3	3	3	3
人工波	3	2	2	2	3

根据表 1 布置方案, 进行非线性时程分析, 对比分析不同目标函数的消能减震效果, 其层间位移角对比图及兰州波作用下的金属阻尼器滞回曲线如图 7 所示。

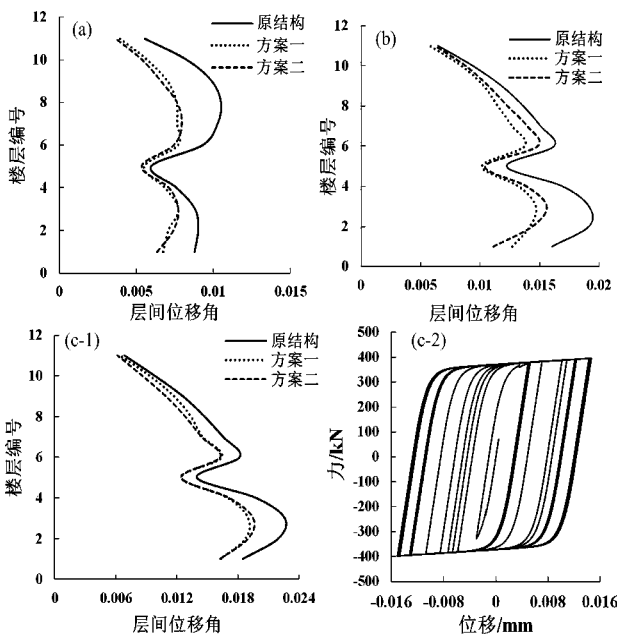


图 7 逐层布置法层间位移角对比  
(a) EL Centro 波; (b) 人工波; (c) 兰州波  
作用下的金属阻尼器滞回曲线

Fig. 7 Comparison of story drift angle of sequential search method

(a) EL Centro wave; (b) artificial wave; (c) hysteresis curve of metallic damper under Lanzhou wave

4.2 位置参数法

根据能量法最终确定的阻尼器总数为 12，分别采用层间位移和层间位移角为目标函数，得到 2 个目标函数的优化布置方案，以及对应布置方案的消能减震效果分析。优化布置方案如表 2 所示。

表 2 位置参数法布置方案										
Tab. 2 The arrangement scheme of weight coefficient method										
地震波	目标函数	布置顺序								
兰州波	层间位移	2	1	2	1	1	1	1	1	0
	层间位移角	1	2	2	1	1	1	1	1	0
EL Centro 波	层间位移	1	1	1	1	1	1	2	1	1
	层间位移角	1	1	1	1	1	1	2	1	1

根据表 2 布置顺序，进行非线性时程分析，对比分析不同目标函数的消能减震效果，其层间位移角对比图及兰州波作用下的金属阻尼器滞回曲线如图 8 所示。

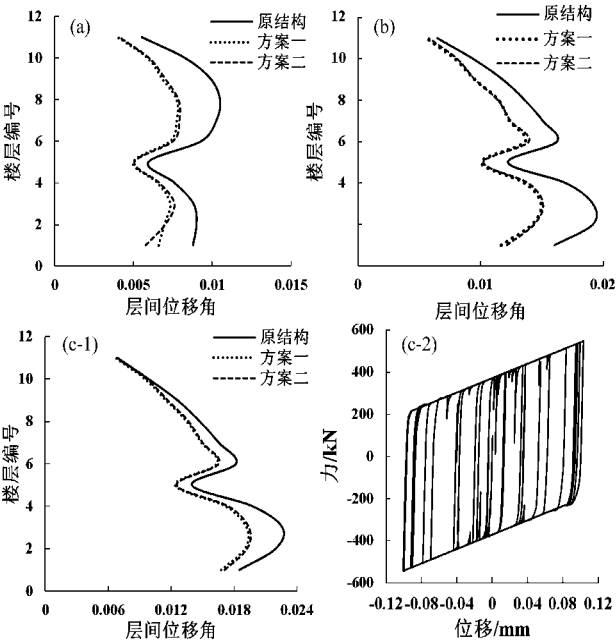


图 8 位置参数法层间位移角对比  
(a) EL Centro 波；(b) 人工波；(c) 兰州波  
作用下的金属阻尼器滞回曲线  
Fig. 8 The comparison of story drift angle  
of weight coefficient method  
(a) EL Centro wave；(b) artificial wave；(c) hysteresis  
curve of metollic damper under Lanzhou wave

5 结论

本文以大连大学附属新华医院为工程背景，采用不同目标函数和优化方法进行软钢阻尼器优化布置研究，在软钢阻尼器数量很少的情况下，不同优化布置方案都有一定的消能减震效果，且层间位移角都满足 1/50 (0.02) 的限值，从两种不同优化布置方法，得到以下结论：

- (1) 采用逐层布置法和位置参数法，以层间位移和层间位移角为目标函数，进行非线性时程分析，两种方案都有一定地消能效果；由于层高变化较高，且首层层高较大，以层间位移为目标函数，对底层的减震效果比以层间位移角为目标函数好，二者消能效果相差不大。
- (2) 结构中金属阻尼器的滞回曲线比较饱满，消能效果比较好。
- (3) 两种优化布置方法较简单，但计算的过程比较繁琐，软钢阻尼器的优化布置方法需要进一步优化。

参考文献：

北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院.  
2006. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社.  
查小琴, 张欣耀, 张亚军等. 2009. 利用常用办公软件 Excel 和 Origin 快速求取滞回环面积的方法[J]. 理化检验(物理分册), 45(8): 486-490.  
龚思礼. 2002. 建筑抗震设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.  
李钢. 2006. 新型金属阻尼器减震结构的试验及理论研究[D]. 大连: 大连理工大学.  
林宁. 2008. 粘弹性阻尼器在框架结构中的优化布置[D]. 成都: 西南交通大学.  
Kelly J M, Skinner R I, Heine A J. 1972. Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures[J]. Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 5(3): 63-88.  
Skinney R I, Kelly J M, Heine A J, et al. 1980. Hysteresis Dampers for the Protection of Structures from Earthquakes[J]. Bulletin of New Zealand and National Society for Earthquake Engineering, 13(1): 22-26.  
Tsai K C, Hong C P. 1992. Steel Triangular Plate Energy Absorber for Earthquake Resistant Buildings[C]. Proceedings of 1st World Congress on Constructional Steel Design. Acapulco, Mexico.  
Whittaker A S, Bertero V V, Thompson C L, et al. 1991. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices[J]. Earthquake Spectra, 7(4): 563-604.  
GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].

## Study of Optimized Arrangement of Metal Dampers under Different Objective Function

ZHAO Jie, ZHOU Tongling, WANG Guixuan, ZHANG Rui

(The R&D Center of the Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China)

### Abstract

Aim at the optimized arrangement of metal dampers under different objective functions, taking the story drift angle and story drift as objective functions in the frame structure, we analyzed the energy dissipation by using sequential search method and weight coefficient method, and compared the energy dissipation of metal dampers under different objective functions. The results show that; under the condition of the same number of the damper, the energy dissipation effect of sequential search method and weight coefficient method that take story drift and story drift angle as objective function is much closed. The hysteretic curves of the metal damper are plumper in the structure, whose energy dissipation effects are better.

**Key words:** objective functions; optimized arrangement; sequential search method; weight coefficient method; hysteretic curves