

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.014

## 减震结构粘滞阻尼器参数优化分析

孙传智<sup>1</sup>, 李爱群<sup>1</sup>, 缪长青<sup>1</sup>, 黎少华<sup>1</sup>, 乔燕<sup>2</sup>

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

2. 宿迁学院 建筑工程系, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:**研究了基于响应面法进行减震结构非线性粘滞阻尼器参数优化设计的方法,该方法包括试验设计、有限元分析、响应面函数拟合和参数优化。以一榀钢筋混凝土框架结构非线性粘滞阻尼器参数优化为例,以所有粘滞阻尼器提供的阻尼力之和最小为优化目标函数,层间最大位移限值作为约束条件,建立粘滞阻尼器参数优化的数学模型,然后运用非线性规划优化方法进行参数优化。算例研究结果表明:基于响应面法进行粘滞阻尼器参数优化,既能保证结构层间位移小于限值,又能降低建造成本。

**关键词:**粘滞阻尼器;响应面法;参数优化;阻尼力;结构

**中图分类号:**TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)01-0080-06

## Parameter Optimization Analysis of Viscous Dampers for Dissipation Structure

Sun Chuazhi<sup>1</sup>, Li Aiqun<sup>1</sup>, Miao Changqing<sup>1</sup>, Li Shaohua<sup>1</sup>, Qiao Yan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Concrete and Prestressed Concrete Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. Department of Architecture Engineering, Suqian College, Suqian 223800, Jiangsu, P. R. China)

**Abstract:** The design method of parameter optimization of nonlinear viscous dampers for dissipation structure was analyzed based on response surface methods. The method included experimental design, finite element analysis, fitting the response surface function and parameter optimization. Taking a reinforced concrete frame structure for an instance, the mathematical model of parameter optimization of viscous dampers for dissipation structure was established by taking the minimum all damping force as objective function and taking the interlayer maximum displacement less than limits as constraints, and then the damper parameters were optimized using the method of nonlinear programming optimization. The results show that the method of parameter optimization of viscous dampers based on response surface method can ensure the structural displacement is less than limit and the construction cost can be reduced.

**Key words:** viscous dampers; response surface methods; parameter optimization; damping force; structure

粘滞阻尼器是目前高层建筑结构振动控制中应用较多的结构被动控制装置之一。在进行粘滞阻尼器减震设计时,可以通过调整阻尼系数和速度指数

取得不同的参数组合达到同样的减震效果,但是不同的参数取值,阻尼器提供的阻尼力相差较大,从而与其连接的柱内力影响较大,同时阻尼器本身也

**收稿日期:**2012-05-21

**基金项目:**国家“863 计划”项目(2006AA04Z416);国家自然科学基金资助项目(50538020、51078080);国家杰出青年基金项目(50725828);江苏省高校自然科学研究项目(10KJB58005)

**作者简介:**孙传智(1976-),男,博士生,主要从事工程结构减震及可靠度研究,(E-mail)schzh\_xzh@163.com。

李爱群(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)aiqunli@seu.edu.cn。

会出现磨损或损坏,致使减震设计存在不能达到减震要求的隐患<sup>[1]</sup>。同时粘滞阻尼器的价格主要取决于阻尼力大小,因此在进行粘滞阻尼器减震结构设计时通过粘滞阻尼器参数优化分析,既能保证结构安全,又能尽量降低建造成本,这对于粘滞阻尼器的使用推广尤为重要。目前已对粘弹性阻尼器的参数优化进行了诸多研究<sup>[2-5]</sup>,而粘滞阻尼器参数优化研究还比较少,目前多依靠经验和试算来确定粘滞阻尼器参数,工作量大。响应面分析方法是一种基于试验设计理论的近似方法,最早由 Box 等<sup>[7]</sup>提出,其基本思想是对样本点处的函数响应计算值或试验值,用回归分析法构造一个具有明确表达形式的多项式来表达隐式功能函数。近年来,响应面分析方法已被应用到结构的可靠度评估、模型修正和结构优化<sup>[8-12]</sup>等方面,其中武和全等<sup>[12]</sup>将响应面法与试验设计、有限元分析计算等结合起来,对 S 型薄壁梁的结构进行抗撞性优化设计。笔者将响应面法与有限元分析相结合,构造参数优化目标函数和约束条件,求得非线性粘滞阻尼器参数最优解。算例应用表明该方法在减震设计过程中具有较强的实用性和有效性。

## 1 粘滞阻尼器计算模型及减震结构非线性分析

### 1.1 粘滞阻尼器计算模型

国内外学者对粘滞阻尼器力学模型进行了大量研究<sup>[13-15]</sup>,美国 Taylor 公司给出的阻尼力通用表达式为:

$$F = C \operatorname{sgn}(\dot{x}) |\dot{x}|^\alpha \quad (1)$$

式中: $\dot{x}$  为阻尼器两端相对速度; $C$  为阻尼系数; $\operatorname{sgn}()$  为符合函数; $\alpha$  为速度指数,变化范围为 0.1~2.0。当  $\alpha=1$  时,阻尼力与速度成线性关系,成为线性粘滞阻尼;当  $\alpha<1$  时,称为非线性粘滞阻尼;当  $\alpha>1$  时,称为超线性粘滞阻尼。 $\alpha<1$  时,阻尼力在速度较小时上升很快,随着速度增加阻尼力增长减慢; $\alpha>1$  时,情况正好相反,阻尼力在速度较小时不大,但在速度较大时增长迅速,Housner 等<sup>[16]</sup>认为对于绝大多数黏滞阻尼器, $\alpha$  介于 0.30~0.75 之间。笔者主要针对非线性粘滞阻尼器进行参数优化,速度指数  $\alpha$  的取值范围为[0.2,0.8]。

### 1.2 减震结构非线性分析

未设置粘滞阻尼器时,原结构的动力平衡方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\} \ddot{x}_{g(t)} \quad (2)$$

式中:[ $M$ ]为原结构质量矩阵;[ $C$ ]为原结构阻尼矩阵,采用 Rayleigh 阻尼;[ $K$ ]为原结构刚度矩阵;[ $I$ ]为地震动作用的位置向量;  $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$  分别为节点的位移向量、速度向量和加速度向量; $\ddot{x}_{g(t)}$  为地震动加速度。当结构采用附加方式设置粘滞阻尼器时,结构的动力平衡方程变为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\} \ddot{x}_{g(t)} - [C_d]\{\dot{x}\} \quad (3)$$

式中 [ $C_d$ ]为阻尼器提供的附加阻尼矩阵。

求解附加粘滞阻尼器减震结构的控制方程时,出于研究目的和提高计算效率的考虑,可以只进行弹性时程分析,采用快速非线性分析法进行分析<sup>[17]</sup>。该方法是一种将模态叠加法和增量法组合使用来快速求解只含有少量非线性单元的分析方法,该方法可在保证计算精度的前提下快速提高计算速度<sup>[18]</sup>,通用有限元软件 SAP2000 可以实现快速非线性分析<sup>[19]</sup>。

## 2 基于响应面法的减震结构粘滞阻尼器参数优化方法

### 2.1 减震结构粘滞阻尼器参数优化数学模型

如前所述,在保证结构安全的前提下,应尽量控制附加阻尼器提供的阻尼力,这样可以降低结构的建造成本,所以在优化设计时以所有粘滞阻尼器提供的阻尼力最小为目标函数,以满足结构正常使用时的层间位移限值作为约束条件,进行粘滞阻尼器的参数优化,具体形式如下:

设计变量:求粘滞阻尼器阻尼系数  $C_{di}$  和速度指数  $\alpha_i$ 。

目标函数:所有粘滞阻尼器提供的阻尼力之和  $\sum F_i$  最小,即  $\min(\sum F_i)$ 。

约束条件:各层层间最大位移小于限值,即  $\max(|\Delta_i|) < [\Delta]$ ,  $[\Delta] = 5 \text{ mm}$ ;速度指数  $\alpha$  满足  $0.2 \leq \alpha_i \leq 0.8$ 。

### 2.2 基于响应面法减震结构粘滞阻尼器参数优化步骤

基于响应面进行减震结构粘滞阻尼器参数优化,首先利用响应面法和有限元分析相结合得到各层层间位移和各阻尼器阻尼力的响应面函数,然后进行参数优化。具体来说分为 6 个步骤:

1) 试验设计。为了确保响应面函数精度,需要以概率论、数理统计和线性代数等为理论基础进行试验设计,常用的试验设计方法有中心复合设计方法和 Box-Behnken 矩阵抽样设计方法。根据影响减

震效果的主要因素,选择粘滞阻尼器阻尼系数和速度指数作为自变量  $x_i (i=1, 2, \dots, L)$ ,各阻尼器所提供的最大阻尼力和层间位移作为因变量  $y_m (m=1, 2, \dots, n)$ ,然后采用 Box-Behnken 矩阵抽样法进行试验设计,确定  $K$  组样本点。

2)有限元计算分析。根据试验设计的样本点参数值,利用有限元分析软件 SAP2000 进行计算,得到  $K$  组层间位移和各阻尼器最大阻尼力变化值  $y_m$ 。

3)参数筛选。在研究的初始阶段有可能考虑了所有的参数,如果参数很多,则需要进行参数筛选。参数筛选主要采用方差分析方法,其基本思想是将总变异平方和分解为试验因素效应与随机误差所引起的变异平方和,由此构造出方差分析的  $F$  检验统计量<sup>[20]</sup>,找出显著性参数。

4)响应面拟合。将  $K$  组自变量及其对应的  $K$  组因变量代入式(4),采用最小二乘法估计多项式系数,得到响应面模型函数。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 \quad (4)$$

式中  $x_i \in [x_i^l, x_i^u]$ ,  $x_i^l$ 、 $x_i^u$  分别为  $x_i$  设计空间的上、下限; $\beta_0$ 、 $\beta_i$ 、 $\beta_{ij}$  和  $\beta_{ii}$  均为待定系数,可通过最小二乘法得到。

5)响应面函数精度检验。为了验证响应面模型是否可靠,需对其进行精度检验,可采用多重拟合系数  $R^2$  进行响应面精度检验,如式(5)所示,式中  $\hat{y}_j$  代表响应面模型计算值,  $y_j$  代表有限元模型计算值,  $\bar{y}$  代表有限元模型计算值的平均值。 $R^2$  判定系数在 0~1 之间取值, $R^2$  值越大,则回归模型就越接近实际情况,如果精度较低则回到第 1)步重新进行试验设计。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^K [\hat{y}_j - y_j]^2}{\sum_{j=1}^K [y_j - \bar{y}]^2} \quad (5)$$

6)粘滞阻尼器参数优化。以层间位移小于限值作为约束条件,所有粘滞阻尼器提供的阻尼力之和最小作为目标函数,建立粘滞阻尼器参数优化数学模型,运用非线性规划优化方法进行参数优化。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例概况

钢筋混凝土框架结构,5层,层高 5 m,跨度 6 m,柱截面为 400 mm×400 mm,梁截面为 250 mm×500 mm。梁柱材料均为 C35 混凝土,每层梁柱节点

处质量为 50 kN,输入地震波为 EL-CENTRO,地面运动加速度峰值为 140 cm/s<sup>2</sup>,层间位移最大限值为 5 mm。有限元模型如图 1 所示。

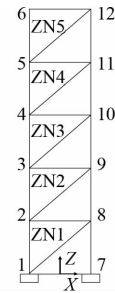


图 1 算例有限元模型

#### 3.2 层间位移和阻尼力之和响应面函数

采用 Box-Behnken 样本抽样法进行试验设计,1~5号阻尼器的阻尼系数为  $x_i (i=1, 3, 5, 7, 9)$ ,速度指数为  $x_i (i=2, 4, 6, 8, 10)$ 。各层层间位移为  $R_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ ,阻尼力之和为  $R_6$ ,得到 165 组样本点。

应用数理统计的  $F$  检验法分析所选参数对特征频率的显著性,计算各参数的统计特征量的显著性水平  $P$  值,当  $P < 0.05$  时,则该参数为显著。表 1 为显著性水平为显著的参数。由表 1 可以看出,参数  $x_1$ 、 $x_4$ 、 $x_6$  和  $x_8$  对所有因变量的影响都显著,参数  $x_2$  和  $x_3$  对因变量  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_6$  的影响显著,参数  $x_7$  除了对因变量  $R_2$  影响不显著外,对其它因变量均显著,参数  $x_9$  仅对因变量  $R_5$  和  $R_6$  影响显著,参数  $x_{10}$  对因变量  $R_3$ 、 $R_5$  和  $R_6$  影响显著。此外,部分交叉项和二次项对该模型的显著性较参数的影响要小,但为了保证精度,在对试验设计计算得到的样本数据进行二次多项式响应面回归时,采用完全二次多项式函数模型。

表 1 显著性检验结果

因变量	显著参数
$R_1$	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_1 x_2, x_5 x_6, x_7 x_8, x_2^2, x_6^2, x_8^2$
$R_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_2 x_4, x_2 x_6, x_3 x_4, x_4 x_8, x_7 x_8, x_4^2, x_8^2$
$R_3$	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_2 x_6, x_5 x_6, x_2^2, x_3^2, x_4^2, x_5^2, x_6^2$
$R_4$	$x_1, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_{10}, x_1 x_2, x_2 x_3, x_2 x_7, x_3 x_4, x_3 x_8, x_7 x_8, x_4^2, x_8^2$
$R_5$	$x_1, x_4, x_7, x_8, x_9, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_1 x_2, x_1 x_5, x_2 x_5, x_2 x_{10}$
$R_6$	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_1 x_2, x_3 x_4, x_5 x_6, x_7 x_8, x_9 x_{10}, x_2^2, x_4^2, x_6^2, x_8^2$

采用完全二次多项式对该样本值进行响应面回归即可获得各层层间位移及各阻尼器阻尼力与各参数之间的响应面函数模型,通过对各响应面模型进

行多重拟合系数  $R^2$  判定,多重拟合系数  $R^2$  分别为 0.984 3、0.975 6、0.986 7、0.962 1、0.951 3 和 0.976 9,均大于 0.95,能够满足参数优化的精度要求。图 2 所示  $R_1$  残差正态分布概率图,各残差点主体部分呈直线,说明误差呈正态分布。以上分析说明模型拟合度好,利用响应面函数模型精确能够反映各层层间位移、粘滞阻尼器阻尼力之和与各阻尼器的阻尼系数、速度指数之间的关系,从而能够保证后续粘滞阻尼器参数优化的精度。

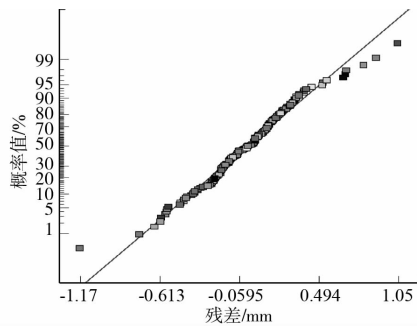


图 2  $R_1$  残差正态分布概率图

### 3.3 粘滞阻尼器参数影响分析

限于篇幅,仅以  $R_1$  为例利用响应面函数分析粘滞阻尼器参数对结构的影响。图 3 和图 4 分别为 1 号阻尼器和 3 号阻尼器对  $R_1$  的影响曲线图,即参数  $x_1$  和  $x_2$ 、 $x_5$  和  $x_6$  对因变量  $R_1$  的影响曲线图,对于 1 号阻尼器对  $R_1$  的影响,从图 3 可以看出,  $R_1$  是随着阻尼系数的增大而减小,随着速度指数的减小而减小。但是,从图 4 可以看出 3 号阻尼器对的  $R_1$  影响关系复杂,在速度指数等于 0.2 时,  $R_1$  随着阻尼系数的增大而减小;在速度指数等于 0.8 时,  $R_1$  随着阻尼系数的增大而增大,反之,在阻尼系数等于 30  $\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$  时,  $R_1$  随着阻尼系数的增大而增大;在阻尼系数等于 150  $\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}$  时,  $R_1$  随着速度指数的增大而减小。说明如果 3 号阻尼器参数选择不合适,有可能使其对  $R_1$  有放大作用。

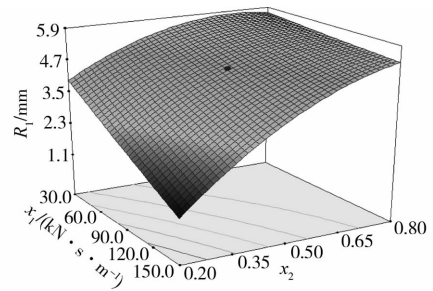


图 3  $x_1$  和  $x_2$  对  $R_1$  的交互影响

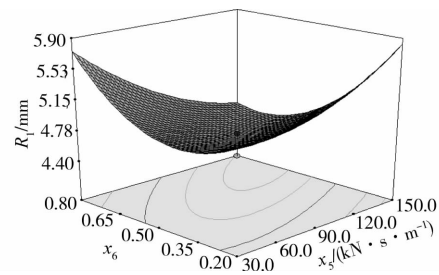


图 4  $x_5$  和  $x_6$  对  $R_1$  的交互影响

由以上分析可知,各阻尼器之间、阻尼器与结构之间的影响关系比较复杂。阻尼器阻尼系数与速度指数的不同取值组合,对减震结构的减震效果有个最优解的问题,需对阻尼器的参数进行优化设计,即能保证结构安全,又使得建造成本最低。

### 3.4 粘滞阻尼器参数优化

当确定了响应面模型函数后,以各阻尼力之和最小为目标函数,各层层间位移和各参数的取值范围作为约束条件,建立参数优化模型,运用非线性规划优化方法进行参数优化,即可得到非线性粘滞阻尼器的优化参数,优化后的非线性粘滞阻尼器的参数如表 2 所示。

通过有限元分析和上文所得的响应面函数可得 1~5 层层间位移和各粘滞阻尼器阻尼力之和,如表 3 所示。响应面函数预测所得的层间位移和各阻尼器阻尼力之和与有限元分析所得的相差较小,能够满足工程精度要求。

表 2 非线性粘滞阻尼器参数优化值

参数	ZN1 阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	ZN1 速度指数	ZN2 阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	ZN2 速度指数	ZN3 阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	ZN3 速度指数	ZN4 阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	ZN4 速度指数	ZN5 阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	ZN5 速度指数
参数优化值	149.874	0.559	75.232	0.237	140.105	0.458	148.813	0.642	30.012	0.671

表 3 响应面函数预测和有限元分析比较

方法	1 层层间位移/ mm	2 层层间位移/ mm	3 层层间位移/ mm	4 层层间位移/ mm	5 层层间位移/ mm	各阻尼器阻尼力之和/ kN
有限元计算	3.950 0	4.210 0	3.970 0	3.650 0	2.650 0	108.650 0
响应面函数预测	3.999 6	4.423 8	3.987 0	3.567 2	2.828 6	108.697 0

图 5、6 为无控结构和减震结构节点 6 的位移时程曲线图和加速度时程曲线图,从图中可以看出,结构由于设置了粘滞阻尼器,取得了较好的减震效果。

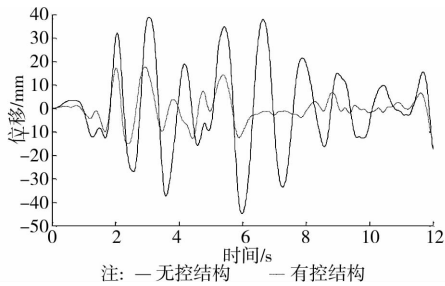


图 5 节点 6 位移时程比较

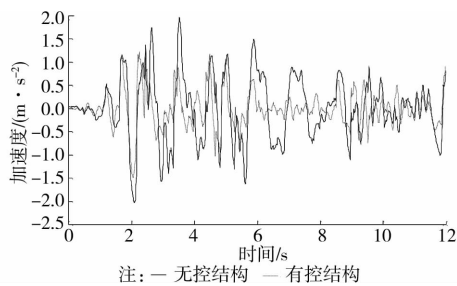


图 6 节点 6 加速度时程比较

对于非线性粘滞阻尼器阻尼系数和速度指数的取值,选择如表 4 所示的 5 种不同方案进行减震效果比较。第 1 种方案是基于响应面法优化结果;第 2 种方案是阻尼系数取值  $150 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ ,速度指数为 0.2;第 3 种方案是阻尼系数取值  $150 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ ,速度指数为 0.8;第 4 种方案是阻尼系数取值  $90 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ ,速度指数为 0.5;第 5 种方案是阻尼系数取值  $30 \text{ kN} \cdot \text{s}/\text{m}$ ,速度指数为 0.2。

表 5 为 5 种不同方案下的参数取值所得的层间位移和各粘滞阻尼器阻尼力之和。可以看出,方案 2 虽然能够满足层间位移限值的要求,但是各阻尼器之和太大,建造成本高;方案 3、4、5 虽然各阻尼器阻尼力之和较小,但是不能满足层间位移限值的要求。

## 4 结 语

1)以一榀钢筋混凝土框架结构为例,进行了基于响应面法的非线性粘滞阻尼器参数优化设计。结果表明采用简单的代数公式能够精确拟合设计变量和响应量之间的复杂关系,把复杂问题显式化,并且响应面函数精度检验表明,响应面函数精度高,能够满足优化精度要求。

表 4 不同粘滞阻尼器参数取值方案

方案	ZN1		ZN2		ZN3		ZN4		ZN5	
	阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	速度指数	阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	速度指数	阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	速度指数	阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	速度指数	阻尼系数/ ( $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	速度指数
1	149.874	0.559	75.232	0.237	140.105	0.458	148.813	0.642	30.012	0.671
2	150	0.2	150	0.2	150	0.2	150	0.2	150	0.2
3	150	0.8	150	0.8	150	0.8	150	0.8	150	0.8
4	90	0.5	90	0.5	90	0.5	90	0.5	90	0.5
5	30	0.2	30	0.2	30	0.2	30	0.2	30	0.2

表 5 不同粘滞阻尼器参数取值时的减震效果比较

方案	1 层层间位移/ mm	2 层层间位移/ mm	3 层层间位移/ mm	4 层层间位移/ mm	5 层层间位移/ mm	各阻尼器阻尼力之和/ kN
1	3.95	4.21	3.97	3.65	2.65	108.65
2	3.01	2.61	1.20	0.52	0.30	269.08
3	5.69	8.14	7.16	5.34	3.11	52.39
4	4.75	6.46	5.47	3.82	2.01	81.20
5	4.91	6.72	5.64	3.84	2.01	77.32

2)选择阻尼系数和速度指数作为自变量,结构层间位移、阻尼力之和作为响应值,进行响应面函数拟合。研究表明层间位移和粘滞阻尼力之和与非线性粘滞阻尼器参数取值呈现复杂的非线性关系。

3)结合响应面函数模型,建立目标函数和约束条件,进行非线性粘滞阻尼器参数优化,得到了粘滞

阻尼器的参数优化值。该方法精度高、计算量小,过程思路清晰,简单易行,避免了凭经验进行参数调整过程中的反复迭代试算。

## 参考文献:

[1] 陈瑜,刘伟庆,陆伟东. 线性与非线性黏滞阻尼支撑减

- 震效果的比较[J]. 南京工业大学学报:自然科学版, 2009, 31(6):45-50.
- Chen Y, Liu W Q, Lu W D. Comparison of seismic-reduced effect between linear and nonlinear viscous damper bracings [J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 31(6):45-50.
- [2] 李正良, 李疏影, 孙毅. 基于遗传算法的阻尼支撑优化分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(3):57-60.
- Li Z L, Li S Y, Sun Y. Optimum analysis of damper braces based on genetic algorithm [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(3):57-60.
- [3] 涂青, 徐赵东, 彭军. 隔减震结构中黏弹性阻尼装置的遗传算法优化分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2009, 39(1):73-77.
- Tu Q, Xu Z D, Peng J. Parametric optimization of viscoelastic device in earthquake isolation and mitigation of structures [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(1):73-77.
- [4] Xu Z D, Shen Y P, Zhao H T. A synthetic optimization analysis method on structures with viscoelastic dampers [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23:683-689.
- [5] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹. 多目标优化方法在输电塔阻尼器布置中的应用[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(10):1755-1760.
- Guo Y, Sun B N, Ye Y. Multi-objective optimization approach for damper distribution of transmission towers [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(10):1755-1760.
- [6] Tandjiria V, Teh C I, Low B K. Reliability analysis of laterally loaded piles using response surface methods [J]. Structural Safety, 2000, 22:335-355.
- [7] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1951, 13(1):1-34.
- [8] Lee S Y, Haldar A. Reliability of frame and shear wall structural systems II: Dynamic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2):233-240.
- [9] Deng L, Cai C S. Bridge model updating using response surface method and genetic algorithm [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(5):553-564.
- [10] Bayramov F, Tasdemir C, Tasdemir M A. Optimisation of steel fiber reinforced concretes by means of statistical response surface method [J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26:665-675.
- [11] 费庆国, 韩晓林, 苏鹤玲. 响应面有限元模型修正的实现与应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2):132-134.
- Fei Q G, Han X L, Su H L. Response surface based finite element model updating and its application [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2010, 30(2):132-134.
- [12] 武和全, 杨家兴, 辛勇. 基于响应面法的 S 型薄壁梁抗撞性优化设计[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(9):1132-1136.
- Wu H Q, Yang J X, Xin Y. Optimal design of S-shaped rail for crashworthiness analysis based on response surface method [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(9):1132-1136.
- [13] Makris N, Constantinou M C. Fractional-derivative Maxwell model for viscous dampers [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(9):2708-2724.
- [14] 叶正强, 李爱群, 程文灏, 等. 采用粘滞流体阻尼器的工程结构减振设计研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4):61-66.
- Ye Z Q, Li A Q, Cheng W R, et al. Study on vibration energy dissipation design of structures with fluid viscous dampers [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4):61-66.
- [15] 叶正强, 李爱群, 徐幼麟. 工程结构粘滞流体阻尼器减振新技术及其应用[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32(3):466-473.
- Ye Z Q, Li A Q, Xu Y L. Fluid viscous damper technology and its engineering application for structural vibration energy dissipation [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(3):466-473.
- [16] Housner G W, Bergman L A. Structural control: past, present and future [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9):73-79.
- [17] 陈学伟, 韩小雷, 毛贵牛, 等. 粘滞阻尼器在连体高层结构中的抗风减振效果[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5):74-80.
- Chen X W, Han X L, Mao G N, et al. Fluid viscous damper technology and its engineering application for structural vibration energy dissipation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5):74-80.
- [18] Wilson E L. Three dimensional dynamic analysis for structures with emphasis on earthquake engineering [M]. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 1997.
- [19] 彭俊生, 罗永坤, 彭地. 结构动力学、抗震计算与 SAP2000 应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [20] 吕栋雷, 曹志耀, 邓宝, 等. 利用方差分析法进行模型验证 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(8):46-48.
- Lyu D L, Cao Z Y, Deng B, et al. Model verification using variance analysis method [J]. Computer Simulation, 2006, 23(8):46-48.