

[文章编号] 1002-8412(2015)06-0058-06

DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2015.06.010

## 基于能量控制指标的粘滞阻尼器参数优化

王立宪<sup>1,2</sup>, 刘屹阳<sup>1</sup>, 狄生奎<sup>1,2</sup>, 项长生<sup>1,2</sup> (1. 兰州理工大学, 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学, 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**[摘要]** 对一座安装液体粘滞阻尼器的钢管混凝土拱桥进行阻尼器参数优化。随机时域激励采用基于物理模型的随机 Fourier 谱来合成, 同时基于能量耗散和结构控制指标, 构造出 4 个评价函数作为优化设计的目标函数。对比两个考虑能量的评价函数组合与传统的控制评价函数, 最终得到阻尼器的优化参数。分析结果表明: 优化后的阻尼器参数对钢管混凝土拱桥在多种地震波激励下均具有良好的减震效果, 引入能量耗散指标后, 评价函数可以避免传统优化指标极端取值的缺点, 最终优化结果更具经济性和实用价值。

**[关键词]** 随机激励; 液体粘滞阻尼器; 能量耗散; 参数优化

**[中图分类号]** TU313 **[文献标识码]** A

### Parameter Optimization of Viscous Damper Based on Energy and Control Indexes

Wang Li-xian<sup>1,2</sup>, Liu Qi-yang<sup>1</sup>, Di Sheng-kui<sup>1,2</sup>, Xiang Chang-sheng<sup>1,2</sup> (1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The damper parameter of a concrete-filled steel tube arch bridge is optimized. Random Fourier spectrum based on physical model is used to synthesis the random time-domain excitation. Four evaluation functions are constructed as optimization of the objective functions based on energy dissipation and structural control indexes. Comparing two energy evaluation function combinations and traditional control evaluation functions, the damper optimization parameters are obtained. The result shows that optimized damper parameters of concrete-filled steel tubular arch bridge under various seismic waves have high damping effect. After introducing the energy dissipation indexes, the extreme value disadvantages of the traditional target are avoided by evaluation functions, the final optimization results could be more economical and practical.

**Keywords:** random excitation; fluid viscous damper; energy dissipation; parameter optimization

**E-mail:** wanglxian@lut.cn

由于地震发生的不确定性和巨大的破坏性, 消能减震装置和振动控制系统在桥梁减震方面得到迅速的发展。其中减震效果较为理想的主动控制装置, 因其系统布置形式的复杂和较高的造价, 在应用的广泛性方面不如粘滞阻尼器这种基本的消能减震装置。在震害高发区, 设置液体粘滞阻尼器, 可作为桥梁抗震的第二道防线, 并能预防可能出现的罕遇

荷载, 同时具有较好的经济性<sup>[1]</sup>。在随机地震研究方面, 基于频域方法的随机振动分析被欧洲桥梁规范采用<sup>[2]</sup>, 国内学者林家浩教授提出的虚拟激励法 (PEM)<sup>[3]</sup> 使随机振动分析的计算效率和工程实用性大为提高。但对含有非线性粘滞阻尼单元的结构进行随机振动研究时, 基于功率谱的频域方法很难精确地了解每一时刻的结构动力状态。一般的非线性粘滞阻尼单元的参数优化根据现行规范<sup>[4]</sup>, 通常只考虑最大层间位移角、最大位移和最大加速度等控制指标<sup>[5]</sup>, 对于能量耗散指标和控制指标组合的研究相对较少。

**[收稿日期]** 2015-03-10

**[基金项目]** 甘肃省科技计划资助(148RJZA012)  
甘肃省科技支撑项目(0708GKCA002)

本文采用基于物理模型的随机 Fourier 谱来合成地震加速度时程作为随机时域激励,用于对一座钢管混凝土拱桥进行非线性粘滞阻尼单元的参数优化。同时,对两个考虑能量的评价函数组合与传统的控制评价函数进行对比,并研究各评价函数参数与粘滞阻尼单元参数的相关性。最后引入天然地震波,用于对优化参数进行检验,优化过程可作为桥梁消能减震装置的设计参考。

## 1 液体粘滞阻尼器方程和随机地震动的合成

### 1.1 基于 Maxwell 的液体粘滞阻尼器基本方程

液体粘滞阻尼器在有限元软件中采用基于 Maxwell 的粘弹性模型,由非线性阻尼和弹簧组成,二者以串联形式连接。整个阻尼单元的非线性力-变形关系由下式表达:

$$f = kd_k = C\dot{d}_c^\alpha \quad (1)$$

式中,  $k$  为弹簧常数;  $C$  为阻尼系数;  $\alpha$  为阻尼指数;  $d_k$  和  $\dot{d}_c$  则是阻尼器的变形和变形速度。 $\alpha$  的上下限分别为 0.2 和 2,  $\alpha = 1$  时则为线性阻尼单元,速度指数过小可能引起非线性分析结果的不收敛。

在正弦波  $u = u_0 \sin \omega_0 t$  作用下,非线性粘滞阻尼器循环一周的耗能为:

$$W_d = \int_0^T P \dot{u} dt \quad (2)$$

式中,  $T$  为正弦波振动周期;  $P$  为阻尼器出力。积分后可得:

$$W_d = 4 \cdot 2^\alpha \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} C u_0^{1+\alpha} \omega_0^\alpha \quad (3)$$

$\Gamma$  为 Gamma 函数。周期循环中,阻尼器最大出力:

$$P_{\max} = C u_0^\alpha \omega_0^\alpha \quad (4)$$

$$\text{令 } \lambda = 4 \cdot 2^\alpha \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (5)$$

将式(4),(5)代入式(3)中,则阻尼器在正弦波下循环一周的能量简化为:

$$W_d = \lambda P_{\max} u_0 \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  为关于速度指数  $\alpha$  的函数。

### 1.2 基于 Fourier 谱的地震动合成

地震动随机过程可以表示为具有随机相角的三角级数叠加<sup>[6]</sup>

$$x(t) = \sum_{j=1}^{N-1} A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j) \quad (7)$$

其中,  $x(t)$  为具有零均值的随机过程;  $N$  是频率分量的总数;  $A_j$ 、 $\omega_j$  分别为第  $j$  个频率分量的幅值和频率;  $\varphi_j$  则是地震动时程的相位谱值。

根据李杰等<sup>[7]</sup>提出的物理模型,随机地震动的 Fourier 函数为:

$$F(X, \omega) = \frac{2\omega_0^2 \zeta \omega_0 \omega_i}{\omega_0^2 - 2\omega^2 \zeta \omega_0 \omega_i} \cdot F_0(S_g, \omega) \quad (8)$$

式中,  $F$  为输出 Fourier 谱;  $F_0$  为输入 Fourier 谱;  $\omega_0$ 、 $\zeta$  和  $S_g$  分别为场地基本频率、等效阻尼比以及输入的地震动幅值。

根据 Fourier 系数与 Fourier 积分的关系<sup>[8]</sup>,且  $d\omega \approx \Delta\omega$ ,

$$A(\omega_j) = \frac{1}{2\pi} F(\omega) |_{\omega=\omega_j} d\omega \quad (9)$$

式(7)在时域内可转换为:

$$x(t) = 2 \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{\Delta\omega}{2\pi} F(\omega) |_{\omega=\omega_j} \cdot \cos(\omega_j t + \varphi_j) \right) \right] \quad (10)$$

式(10)中三角函数叠加效率较低,可使用快速 Fourier 变换(FFT)完成。

$$F_x(S_g, \omega) = \left[ \frac{1 + 4\zeta^2 (\omega^2/\omega_0^2)}{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\zeta^2 (\omega^2/\omega_0^2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} F_g(S, \omega) \quad (11)$$

通过对式(11)的地面运动绝对加速度 Fourier 谱进行逆变换,最终得到地面运动绝对加速度时程。

## 2 评价函数的构造

### 2.1 评价函数的参数

对于阻尼器减震效果优化的评价函数参数,基于控制目的和规范要求,通常使用最大加速度控制指标和最大位移控制指标,这两个指标的权重系数根据李宏男等<sup>[9]</sup>的优化结果,建议取值为 3:2。在其他参数方面,乌兰等<sup>[10]</sup>采用的性能指标为标准差,乔峰等<sup>[11]</sup>取时域均方值作为目标函数的参数。因此,控制参数方面,在时域均方值的基础上,选取时域内的均方根值(RMS)作为函数的性能参数:

$$J_{a,\max} = \frac{\max[abs(a_0)] - \max[abs(a_c)]}{\max[abs(a_0)]} \quad (12)$$

$$J_{a,RMS} = \frac{RMS[abs(a_0)] - RMS[abs(a_c)]}{RMS[abs(a_0)]} \quad (13)$$

$$J_{u,\max} = \frac{\max[abs(u_0)] - \max[abs(u_c)]}{\max[abs(u_0)]} \quad (14)$$

$$J_{u,RMS} = \frac{RMS[abs(u_0)] - RMS[abs(u_c)]}{RMS[abs(u_0)]} \quad (15)$$

其中:  $J_{a,max}$  和  $J_{u,max}$  为最大加速度和最大位移控制指标,  $J_{a,RMS}$  和  $J_{u,RMS}$  为加速度和位移的均方根值控制指标;  $a_0$  和  $u_0$  为无控状态下桥梁加速度和位移,  $a_c$  和  $u_c$  是安装液体粘滞阻尼器后桥梁的加速度和位移; RMS 表示取时域内的均方根值。

在结构能量特性方面,能量反应方程可以很好地反应桥梁结构在强震下的塑性损伤积累,并同时考虑地震动特性引起的能量变化,可以同时结合桥梁结构自身和地震运动的特点。多自由度体系相对能量方程为:

$$E = E_k + E_d + E_h + E_s \quad (16)$$

其中,  $E$  为输入的总能量;  $E_k$  和  $E_s$  分别为结构动能和弹性应变能;  $E_d$  和  $E_h$  则是结构的阻尼和滞回耗能。结构动能和结构弹性应变能相互转化,不涉及能量耗散,结构滞回耗能则与自身特性有关。对于液体粘滞阻尼器的能量耗散效果,通过结构阻尼耗能与输入的总能量之比来反映,作为非线性粘滞阻尼单元的能量耗散率。

$$J_E = \frac{E_d}{E} = \frac{\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\dot{x}\} dt}{-\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\delta\} \ddot{x}_g dt} \quad (17)$$

式(17)中,  $J_E$  为非线性粘滞阻尼单元的能量耗散率;  $\{\dot{x}\}$ 、 $[M]$  分别为结构的速度和质量矩阵;  $\{\delta\}$  是列向量。

### 2.2 基于能量耗散和结构控制指标的评价函数

单纯地加强位移控制在一些工况下可能会引起加速度控制指标的减小,影响桥梁的舒适度。因此,在满足位移控制指标的基础上加入加速度控制指标,使用 3:2 的权重系数进行组合。而在实际工程中,同时满足加速度、位移和能量控制指标的参数往

往是不存在的,通过使用加权系数进行组合,以建立符合实际应用的控制指标评价函数。在引入非线性粘滞阻尼单元能量耗散率后,根据周丽萍等<sup>[12]</sup>的建议,能量耗散指标的权重系数取 0.4,控制指标总的权重系数为 0.6。因此,构造的 4 个结构评价函数如下:

$$f_{c,RMS} = \max\{0.6J_{a,RMS} + 0.4J_{u,RMS}\} \quad (18)$$

$$f_{c,max} = \max\{0.6J_{a,max} + 0.4J_{u,max}\} \quad (19)$$

$$f_{ce,RMS} = \max\{0.36J_{a,RMS} + 0.24J_{u,RMS} + 0.4J_E\} \quad (20)$$

$$f_{ce,max} = \max\{0.36J_{a,max} + 0.24J_{u,max} + 0.4J_E\} \quad (21)$$

其中,  $f_{c,RMS}$  和  $f_{c,max}$  为基于控制指标的均方根值和最大值评价函数;  $f_{ce,RMS}$  和  $f_{ce,max}$  则为综合考虑能量和控制指标后的均方根值和最大值评价函数。

## 3 算例分析

### 3.1 工程概况和有限元模型

本文计算实例为一座三跨下承式钢管混凝土系杆拱桥,跨径组合 51m + 80m + 51m。矢跨比 1/5,拱轴系数 1.167,采用悬链线型拱轴线。拱肋中跨、边跨的钢管截面分别为 900mm × 14mm 和 750mm × 12mm,内填 C50 微膨胀混凝土,钢管间的连接采用钢腹板和加劲构造。拱脚水平推力由系杆平衡,桥面系采用加劲纵梁和吊杆横梁。拱肋中跨、边跨的一字哑铃型钢管横撑数量分别为 3 根和 2 根。由于横桥向左右对称,研究对象选取单幅桥。

有限元模型使用 SAP2000 建立,用 Frame 框架单元模拟拱肋、横撑、吊杆、横梁以及加劲纵梁,Shell 单元模拟桥面板,Cable 索单元建立系杆,粘滞阻尼器由 Damp 非线性连接模拟。拱肋单元与桥墩之间设置刚性连接,桥墩底部完全固结,边跨约束竖向位移。全桥有限元模型见图 1 所示。



图 1 全桥有限元模型

Fig.1 Bridge finite element model

随机地震作用下钢管混凝土拱桥上液体粘滞阻尼器的安装,参照工程经验<sup>[13]</sup>,在每孔钢管拱端部的主梁底部设置 2 个液体粘滞阻尼器,连接钢管拱

系梁梁底和桥墩,每幅桥共设置 8 个。采用基于子空间迭代的特征向量法对结构前 50 阶自振频率进行分析,结果显示:由于桥梁刚度较大,振型分析显

示 UX 方向振型质量积累大于 UY 方向,阻尼器主要抑制顺桥向振动,其布置方向与顺桥向成 30°角。

### 3.2 液体粘滞阻尼器参数优化

随机地震动加速度时程采用基于物理模型的随机 Fourier 谱来合成,具体工程所处场地为 IV 类,采用的基本随机变量分布参数<sup>[7]</sup>见表 1 所示。考虑到涉及计算量过大,在获得足够多的桥梁振型之后,SAP2000 中的非线性时程分析工况使用振型叠加法进行。输出时段数 1750,输出时段大小为 0.02,最终获得桥梁在 35s 内的时程响应。

表 1 场地随机变量分布参数

Tab.1 Site random variable distribution parameters

IV 类场地	参数均值	变异系数 $x_i$
地震动幅值 $S_g$	0.35	0.50
场地基本频率 $\omega_0$	9.00	0.42
等效阻尼比 $\zeta$	0.85	0.35

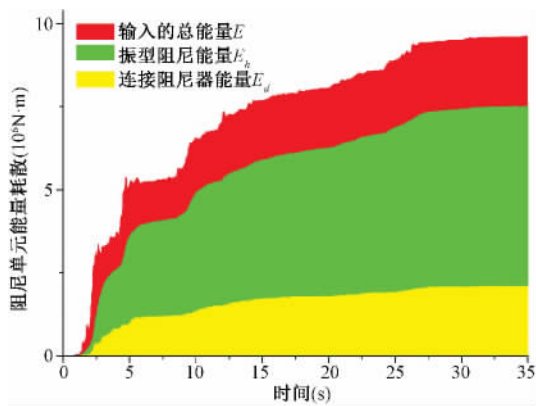


图 2 总能量结构图

Fig.2 Structure of total energy

图 2 为桥梁结构总的能量构成。由于动能和弹性应变能相互转换,能量构成主要由输入的总能量、振型阻尼能量和连接阻尼器耗能来体现。由于连结滞回的能量误差较小,予以忽略。根据阻尼器的能量耗散,优化参数主要体现连接阻尼器耗能和输入的总能量之比。

液体粘滞阻尼器速度指数优化方面,在保持阻尼系数 C 不变的情况下,调整速度指数  $\alpha$  (范围为 0.1 ~ 1),考察各参数与速度指数的相关性,最终获得 4 个评价函数的优化结果。

图 3 为不同速度指数下非线性粘滞阻尼单元的能量耗散。由图 3 可知,阻尼器能量耗散随着速度

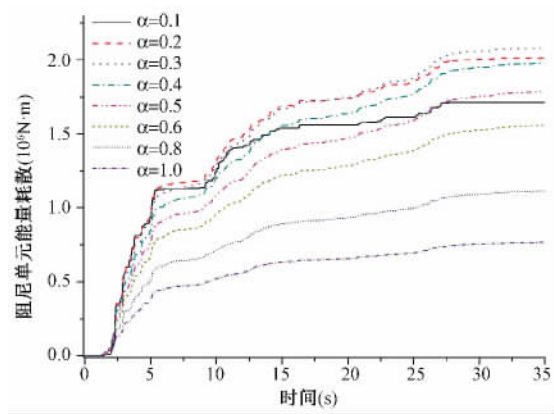


图 3 不同速度指数下的阻尼单元能量耗散

Fig.3 Damping element energy dissipation

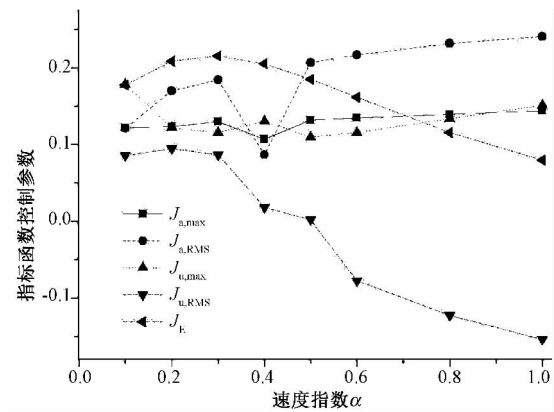


图 4 不同速度指数下的评价参数

Fig.4 Evaluation parameters and speed indexes

指数  $\alpha$  增大出现先增大后减小的趋势,在  $\alpha = 0.3$  时达到峰值;随着  $\alpha$  的减小和增大,阻尼器能量耗散开始减小,在  $\alpha = 0.1$  和  $\alpha = 0.5$  时,阻尼器能量耗散为  $\alpha = 0.3$  时的 89.43%。图 4 是不同速度指数下的各评价参数值。由图 4 可知,桥梁位移均方根值和能量控制指标在  $\alpha$  处于 0.2 ~ 0.3 之间达到峰值,之后随  $\alpha$  的增大而减小;最大位移和加速度控制指标相对平稳,加速度均方根值在  $\alpha = 0.4$  处出现负峰值,起到放大结构响应的作。

表 2 为不同速度指数下的评价函数值。包含能量参数的评价函数  $f_{ce,RMS}$  和  $f_{ce,max}$ ,在  $\alpha = 0.3$  处达到最大值,体现出速度指数的优化结果。而完全基于控制目标的评价函数  $f_{c,RMS}$  极值出现在  $\alpha$  的最小值处,该函数选择的速度指数单纯地达到最大的控制效果,但在经济成本上和实际应用中均不合理。根据速度指数优化的结果,选择  $\alpha = 0.3$  作为阻尼系数的优化基础。阻尼系数 C 的取值在 500 ~ 5000kN

·(s/m)<sup>0.3</sup>之间。

表 2 不同速度指数下的目标函数

Tab.2 Objective functions under different speed indexes

速度指数 $\alpha$	$J_E$	$f_{c,RMS}$	$f_{c,max}$	$f_{ce,RMS}$	$f_{ce,max}$
0.1	0.1777	0.1443	0.1069	0.1577	0.1353
0.2	0.2088	0.1229	0.1499	0.1572	0.1675
0.3	0.2156	0.1241	0.1453	0.1607	0.1734
0.4	0.2052	0.1165	0.0591	0.1520	0.1175
0.5	0.1853	0.1232	0.1247	0.1480	0.1490
0.6	0.1616	0.1270	0.0991	0.1409	0.1241
0.8	0.1156	0.1372	0.0899	0.1286	0.1002
1.0	0.0796	0.1420	0.0829	0.1201	0.0816

图 5 为不同阻尼系数下非线性粘滞阻尼单元的能量耗散。由图 5 可知:在  $C = 500 \sim 3000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^{0.3}$  时阻尼单元能量耗散随阻尼系数的增大而增大,并在  $C = 3000$  处达到峰值。随着阻尼系数  $C$  的进一步增大,阻尼单元能量耗散开始减小。图 6 是不同阻尼系数下的各评价参数值。可以观察到:桥梁位移均方根值和能量控制参数在  $C = 3000$  时达到峰值,之后随  $C$  的增大而减小;最大位移控制指标与  $C$  呈正相关,加速度均方根值与之相反;最大加速度控制指标较为平稳。

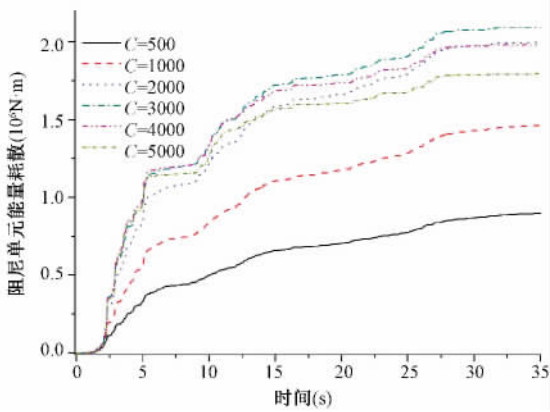


图 5 不同阻尼系数下的阻尼单元能量耗散  
Fig.5 Damping element energy dissipation

表 3 为不同阻尼系数下的评价函数值。根据考虑能量耗散的  $f_{ce,RMS}$  和  $f_{ce,max}$  以及基于最大控制效果的  $f_{c,max}$  目标函数,选择  $C = 3000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^{0.3}$  为最终优化结果。同样,基于控制目标的均方根值函数在  $C$  的最大值处达到峰值,结果没有收敛。根据

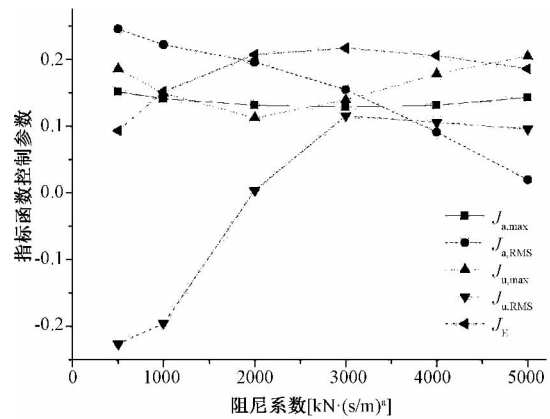


图 6 不同阻尼系数下的评价参数

Fig.6 Evaluation parameters and damping coefficient

评价函数的优化结果,选择的非线性液体粘滞阻尼器参数为  $\alpha = 0.3, C = 3000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^{0.3}$ 。

表 3 不同阻尼系数下的目标函数

Tab.3 Objective functions under different damping coefficients

阻尼系数 $C$ $\text{kN} \cdot (\text{s/m})^{0.3}$	$J_E$	$f_{c,RMS}$	$f_{c,max}$	$f_{ce,RMS}$	$f_{ce,max}$
500	0.0930	0.1650	0.0568	0.1362	0.0713
1000	0.1515	0.1443	0.0547	0.1472	0.0934
2000	0.2071	0.1237	0.1188	0.1571	0.1541
3000	0.2170	0.1328	0.1390	0.1765	0.1702
4000	0.2056	0.1501	0.0968	0.1723	0.1403
5000	0.1861	0.1674	0.0498	0.1749	0.1043

### 3.3 优化结果验证

对于优化结果的验证,选用 4 条天然地震波和一条人工合成的 8 度波进行检验,以评价最终的桥梁减震控制效果。表 4 为钢管混凝土拱桥在不同地震波下的阻尼器减震效果,可以看出:经过优化后的非线性粘滞阻尼器在 5 种地震波下均取得较好的减震效果,平均阻尼单元能量耗散达到 22.39%。同时,时域内桥梁的加速度和位移包络值方差平均减小 9.37% 和 13.83%,最大位移和加速度的平均控制率分别达到 29.62% 和 21.66%,桥梁的安全储备得到一定的增强。相对于最大加速度控制指标,优化后的阻尼器更侧重于控制能量耗散和最大位移。在获取最佳的优化参数组合后,最终的阻尼器规格,则需要在考虑阻尼器出力、最大冲程和最小安全系数的基础上,进行综合性的选取。



表 4 不同地震波下的阻尼器减震效果(%)  
Tab. 4 Damping effect under different seismic waves(%)

地震波	$J_{a,max}$	$J_{u,max}$	$J_{a,RMS}$	$J_{u,RMS}$	$J_E$	加速度包络 方差控制率	位移包络 方差控制率
Loma Prieta	11.62	21.49	12.16	31.06	28.44	9.78	19.00
Northridge	8.58	12.05	10.11	23.28	21.92	3.36	8.94
San Fernando	17.65	26.66	20.77	30.05	19.80	3.74	9.80
Taft	22.24	35.48	17.16	36.51	19.68	13.10	18.27
人工波	9.81	12.62	11.73	27.20	22.12	7.67	22.37

#### 4 结语

在钢管混凝土拱桥液体粘滞阻尼器参数优化的过程中,对同时考虑能量耗散和控制指标的目标函数与阻尼器参数之间的相关性进行研究,得到以下结论:

(1) 在钢管混凝土拱桥的非线性粘滞阻尼器耗能方面,能量耗散参数随速度指数的减小表现出先增大后减小的趋势,在速度指数为 0.3 时能量耗散达到峰值。

(2) 综合考虑能量和控制指标的评价函数得到的阻尼器优化参数,该钢管混凝土拱桥在多种地震波下的最大位移和加速度的平均控制率达到 29.62% 和 21.66%,体现出较为理想的减震效果。

(3) 完全基于控制指标的评价函数会出现不收敛的情况,极值点处的取值会导致桥梁的地震反应放大,过小的速度指数和过大的阻尼系数均不符合经济价值和实际应用情况。引入能量耗散指标后,得到的优化参数更为合理。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈永祁,杜亦欣. 液体粘滞阻尼器在结构工程中的最新进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(3): 65~72  
Chen Yong-qi, Du Yi-xin. Latest Development of the Fluid Viscous Damper in Civil Engineering [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(3): 65~72 (in Chinese)
- [2] European Committee for Standardization. Eurocode 8: Structures in Seismic Regions-Design part2: Bridge [S]. Brussels, 1995
- [3] 林家浩,张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004  
Lin Jiao-hao, Zhang Ya-hui. Random Vibration of the

- Pseudo-excitation Method [M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)
- [4] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范 [S]  
GB50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings [S] (in Chinese)
- [5] 燕乐纬,陈洋洋,王龙,等. 基于相对适应度遗传算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 195-200  
Yan Le-wei, Chen Yang-yang, Wang Long, et al. Optimum Installation of Viscous Dampers in Tall Buildings Based on Relative Fitness Genetic Algorithm [J]. Vibration and Shock, 2014, 33(6): 195~200 (in Chinese)
- [6] 艾晓秋,李杰. 基于随机 Fourier 谱的地震动合成研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 7~12  
Ai Xiao-qiu, Li Jie. Synthesis Method of Non-stationary Ground Motion Based on Random Fourier Spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2): 7~12 (in Chinese)
- [7] 李杰,艾晓秋. 基于物理的随机地震动模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 21~27  
Li Jie, Ai Xiao-qiu. Study on Random Model of Earthquake Ground Motion Based on Physical Process [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 21~27 (in Chinese)
- [8] 戴诗亮. 随机振动试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004  
Dai Shi-liang. Random Vibration Testing Technique [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese)
- [9] 李宏男,曲激婷. 基于遗传算法的位移型与速度型阻尼器位置优化比较研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 252~257  
Li Hong-nan, Qu Ji-ting. Comparison of Optimal

(下转第 77 页)

- University, 2008( in Chinese)
- [ 5 ] 张建民, 谢定义. 饱和沙土动力学本构理论研究进展 [J]. 力学进展, 1994, 24( 2) : 187 ~ 201  
Zhang Jian-min, Xie Ding-Yi. Constitutive Theory Research Progress of Saturated Sandy Soil Dynamics [J]. Advances in Mechanics, 1994, 24( 2) : 187 ~ 201 ( in Chinese)
- [ 6 ] Tian S, Wang X, Song K, Ou J. Testing Method on Substructure Techniques for Shaking Table [ A ]. ANCER Annual Meeting [C]. Korea. 2005
- [ 7 ] Cai Y X, Gould P L, Desai C S. Nonlinear Analysis of 3D Seismic Interaction of Soil-Pile-Structure Systems and Application [J]. Engineering Structures, 2000, 22( 2) : 191 ~ 199
- [ 8 ] Maheshwaria B K, Trumana K Z, EI Naggar M H, Gould P L. Three-Dimensional Nonlinear Analysis for Seismic Soil-Pile-Structure Interaction [ J ]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2004, 24( 4) : 343 ~ 356
- [ 9 ] 熊辉, 吕西林, 黄靓. 考虑土-结构相互作用效应的三维桩基结构动力有限元分析 [J]. 计算力学学报, 2007, 24( 6) : 756 ~ 762  
Xiong Hui, Lv Xi-lin, Huang Liang. A Dynamic FE Analysis Considering the SSI Effect on 3D Pile-supported Structures [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24( 6) : 756 ~ 762
- [10] Nazmy A S, Abdel-Ghaffar A M. Non-linear Earthquake-response Analysis of Long-span Cable-stayed Bridges: Applications [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1990, 19( 1) : 63 ~ 76
- [11] Nazmy A S, Abdel-Ghaffar A M. Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable-stayed Bridges [ J ]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21( 1) : 1 ~ 20

[作者简介] 张常明(1979 ~), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事防灾减灾与桥梁工程研究

(上接第 63 页)

- Placement of Displacement-based and Velocity-based Dampers Using Genetic Algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27( 2) : 252 ~ 257. ( in Chinese)
- [10] 乌兰, 李爱群, 沈顺高. 基于遗传算法的偏心结构粘滞阻尼器优化布置研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36( 2) : 1 ~ 7  
Wu Lan, Li Ai-qun, Shen Shun-gao. Optimal Distribution of Viscous Damper for Eccentric Structure by Genetic Algorithm [ J ]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36( 2) : 1 ~ 7( in Chinese)
- [11] 乔峰, 滕军, 幸厚冰. 基于极点配置算法的黏滞阻尼器优化设计 [J]. 土木工程学报, 2012, 45( 2) : 162 ~ 167  
Qiao Feng, Teng Jun, Xing Hou-bing. Optimal Design of Viscous Dampers Based on the Pole Assignment Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45( 2) : 162 ~ 167( in Chinese)
- [12] 周丽萍, 董小风, 徐斌. 基于能量和控制效果指标的黏滞阻尼器优化设计 [J]. 工业建筑, 2014, 44( 1) : 34 ~ 37  
Zhou Li-ping, Dong Xiao-feng, Xu Bing. Optimization Design of Viscous Dampers Based on Energy and Control Effect Indexes [J]. Industrial Construction, 2014, 44( 1) : 34 ~ 37( in Chinese)
- [13] 陈永祁. 桥梁工程液体粘滞阻尼器设计与施工 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012  
Chen Yong-qi. Design and Construction of Fluid Viscous Dampers in Bridge Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012( in Chinese)

[作者简介] 王立宪(1977 ~), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事结构健康监测研究