

# 地震动作用下消能构件的动力可靠性分析

杨朋超<sup>1</sup> 薛松涛<sup>1,2</sup> 谢丽宇<sup>1</sup>

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学, 日本仙台 982-8577)

**摘要:** 对地震动作用下消能构件(油阻尼器)的动力可靠性分析, 建议了一种简化的动力可靠度分析方法。首先基于首次超越破坏准则, 采用极值分布描述建立了消能构件动力可靠度的等价功能函数表达, 定义了消能构件响应的安全裕量; 然后采用点估计法计算安全裕量的统计矩, 并结合四阶矩方法求解消能构件的动力可靠度, 最后, 以受到地震动作用的一栋钢结构行政楼的油阻尼器动力可靠度问题为例, 采用建议方法分析了油阻尼器撞击失效的动力可靠性问题, 计算结果表明了建议方法的可行性和适用性。

**关键词:** 油阻尼器; 动力可靠度; 极值分布; 四阶矩方法

**中图分类号:** O324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2016)S1-0114-06

## Dynamic reliability analysis of passive energy dissipation devices subjected to seismic excitations

Yang Pengchao<sup>1</sup> Xue Songtao<sup>1,2</sup> Xie Liyu<sup>1</sup>

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

**Abstract:** A simplified method for the dynamic reliability analysis of passive energy dissipation devices (oil dampers) subjected to seismic excitations is proposed. Firstly, the equivalent performance function of dynamic reliability of passive energy dissipation devices, according to the extreme value distribution description, is established based on the first passage criterion, and the safety margin is defined for the dynamic response of passive energy dissipation devices. Then, the point estimate method (PEM) is suggested for calculating statistical moments of the safety margin, and the failure probability of passive energy dissipation devices is evaluated by the fourth-moment method. At last, the dynamic reliability analysis of the oil damper installed in a steel building, subjected to the seismic excitation is investigated to verify the rationality and applicability of the suggested method.

**Keywords:** oil dampers; dynamic reliability; extreme value distribution; fourth-moment method

**E-mail:** xue@tongji.edu.cn

## 引言

工程结构在地震期间是否安全可靠, 是国内外众多学者和工程人员广泛关注和长期深入研究的问题。为了抑制地震作用下结构的振动, 确保结构震后的工作性态, 自 20 世纪 70 年代以来, 种类众多的消能减震技术相继提出并广泛应用于新建结构或既有结构的抗震加固和改造, 如日本隔震协会 2012 年的统计<sup>[1]</sup>, 共有超过 2600 栋的商业或住宅建筑以及超过 3800 栋的独栋住宅采用了隔震结构体系, 超过 950 栋建筑采用了消能减震控制技术。消能减震技术通过采用隔震构件或耗能构件改变结构的振动特征或增加结构

体系的耗能能力, 减少地震动对结构体系的破坏, 进而增加结构地震期间的存活能力。

地震是一种随机现象, 由于地震发生的时间、地点和传播都具有强烈的不确定性, 地震引起的地面运动具有强烈的随机性<sup>[2]</sup>, 同时, 工程结构自身的材料参数、几何参数及力学模型亦具有一定的不确定性<sup>[3]</sup>, 这就要求消能减震构件在结构设计基准期内应具有良好的变形能力和耗能能力, 而且也应具备一定的富余度, 如我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[4]</sup>及《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)<sup>[5]</sup>中对消能构件的极限位移(速度)应不小于罕遇地震下消能构件最大位移(速度)的 1.2 倍的规定; 对罕遇地震作用下的消能减震结构的消能构件不应丧失功能、不退出工作的性能要求。满足规范设计要求的消能减震结构, 通常认为消能构件在设防地震或罕遇地震的作用下仍然能按设计时期望的工作性能

基金项目: 国家自然科学基金(51478356)

作者简介: 杨朋超, 博士研究生

收稿日期: 2016-07-11

正常工作,然而,2011年3月11日发生的日本东北地区太平洋近海地震,在震后调查中发现,一些隔震结构的隔震垫和消能减震结构的消能构件发生了严重的损伤和破坏,表明了消能构件具有工作极限状态,需要研究消能构件在罕遇地震作用下的动力可靠性问题。

本文以一栋设置了油阻尼器的钢结构行政楼为例,考察了油阻尼器撞击失效的动力可靠性问题。基于首次超越破坏准则,采用极值分布描述建立了油阻尼器动力可靠度的等价功能函数表达,定义了动力响应的安全裕量,最后,结合简洁高效的四阶矩方法求解油阻尼器的动力可靠度。

## 1 311地震中钢结构行政楼的油阻尼器震害案例

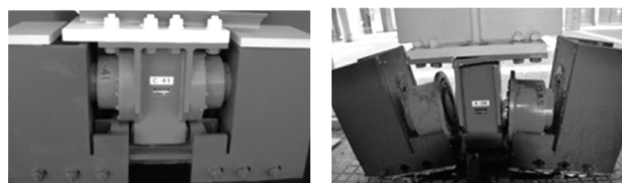
薛松涛等首次报道了在日本3·11地震中一栋8层钢结构行政楼的油阻尼器失效的案例<sup>[6]</sup>。该行政楼位于日本宫城县仙台市,始建于2003年,高34.2m、长48m、宽9.6m,地下一层为钢筋混凝土结构,地上八层为混凝土预制楼板的钢结构,如图1所示。为了提高结构的抗震性能,有2种不同行程共计56个的油阻尼器安装于该栋行政楼,一层的油阻尼器工作行程为16mm(+8mm),三至八层的油阻尼器工作行程为8mm(+5mm),括号内为活塞的缓冲行程,目的是为了



图1 位于日本仙台的油阻尼器钢结构行政楼

Fig.1 Administration building with oil dampers in Sendai City, Japan

避免缸体与支座的碰撞。设置的油阻尼器经历了多次不同强度的地震,通过对监测数据的分析表明了该类油阻尼器具有良好的工作性能和能量耗散能力。然而,2011年3月11日发生的地震,这些阻尼器并没有如设计人员所期望在的地震发生中发挥作用,其中,一层的8组油阻尼器完全破坏,如图2(b)所示,三层、四层油阻尼器的密封材料发生严重的磨损,油液完全泄漏,油阻尼器功能



(a) 完好的油阻尼器 (b) 破坏的油阻尼器

图2 完好及破坏的油阻尼器

Fig.2 Intact and damaged oil dampers

丧失。

文献[7]通过系统识别的方法建立了该结构的近似模型,并对阻尼器破坏的原因进行了重演。基于文献[7]的近似模型,本文引入结构参数的不确定,考察该油阻尼器在311地震中的撞击失效问题。

## 2 油阻尼器撞击失效的动力可靠性问题及等价描述

不失一般性,假定该钢结构的动力响应控制方程如下

$$\mathbf{M}(\Theta_s)\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{F}_s(\Theta_s, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{X}, t) = \mathbf{F}(\Theta_F, t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 分别为结构质量矩阵, $\mathbf{F}_s$ 为结构恢复力矩阵,与结构自身的刚度和阻尼、油阻尼器的附加刚度和阻尼有关; $\ddot{\mathbf{X}}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\mathbf{X}$ 为加速度、速度和位移向量; $\mathbf{F}$ 为地震动激励向量; $\Theta_s$ 为与结构参数有关的向量; $\Theta_F$ 为与地震动激励参数有关的向量,本文只考虑 $\Theta_s$ 的不确定性。

在一定的初始条件下,式(1)的解答存在且唯一,即

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}(\Theta_s, \Theta_F, t) \quad (2)$$

简洁起见,令 $\Theta = \{\Theta_s, \Theta_F\}$ , $\mathbf{X}$ 简写为 $\mathbf{X}(\Theta, t)$ ,则各层油阻尼器的位移响可表示为:

$$X_k(\Theta, t) \quad k \in [1, \dots, 56] \quad (3)$$

采用首次超越破坏准则,在时间区间 $[0, t]$ ,油阻尼器动力位移响应的可靠度问题可描述为

$$R_k(t) = Pr\{X_k(\Theta, \tau) \in \Omega_{\text{safety}}, 0 \leq \tau \leq t\} \quad (4)$$

式中: $\Omega_{\text{safety}}$ 为安全域, $Pr\{\cdot\}$ 为随机事件的概率, $R_k(t)$ 为动力可靠度指标,是时间参数 $t$ 的函数,表示结构在 $t$ 时刻处于安全状态的概率。

具体地,考虑油阻尼器双侧撞击失效问题,取对称双侧限指标,式(4)进一步表示为

$$R_k(t) = Pr\{|X_k(\Theta, \tau)| \leq b, 0 \leq \tau \leq t\} \quad (5)$$

式中: $b$ 为油阻尼器工作行程界限值,第1层取为24mm,其他各层均为13mm。

考虑时间区间 $[0, t]$ 内油阻尼器位移响应的极值,即

$$Y_k(\boldsymbol{\Theta}, t) = \max_{0 \leq \tau \leq t} |X_k(\boldsymbol{\Theta}, \tau)| \quad (6)$$

则式(5)可改写为

$$R(t) = Pr\{Y_k(\boldsymbol{\Theta}, t) \leq b\} \quad (7)$$

其中,对于给定的时间参数  $t$ ,  $Y_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  为一个随机变量,称极值变量,余同。若已知  $Y_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的概率密度分布,则可通简单的数值积分计算结构动力可靠度,式(7)可称为结构动力可靠度的等价极值分布描述。

式(7)的解答涉及结构动力分析,数值模拟方法计算量庞大,工程应用不便;概率密度演化方法<sup>[8-9]</sup>计算精度较高,但对多变量情形,样本点数量较多,计算耗时。本着简洁、高效和精确的原则,本文引入四阶矩方法<sup>[10-12]</sup>求解结构动力可靠度。

### 3 基于等价极值分布描述的油阻尼器撞击失效的动力可靠度分析

据式(7),可定义油阻尼器动力可靠度的等价功能函数表达:

$$Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) = b - Y_k(\boldsymbol{\Theta}, t) \quad (8)$$

其中,  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  可理解为油阻尼器位移响应的安全裕量,对于给定的时间参数  $t$ ,亦为一随机变量。当  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) > 0$ ,油阻尼器处于安全状态;当  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) = 0$ ,油阻尼器与支座接触;当  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) < 0$ ,油阻尼器与支座发生撞击,表示油阻尼器失效。

一般而言,四阶矩方法计算式(8)动力可靠度包含两个步骤:油阻尼器位移响应的安全裕量的统计矩估计,即  $Z(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的前四阶中心统计矩;基于对响应量的分布假设和统计矩,计算油阻尼器的动力可靠度及失效概率。

#### 3.1 油阻尼器位移安全裕量的统计矩估计

点估计法<sup>[13-16]</sup>是随机系统分析的简便且有效的方法之一,可以直接给出安全裕量  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的前四阶中心统计矩。

不失一般性,  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  统计矩计算公式可表示为

$$\mu_{Z_k}(t) = \int_{\Omega_{\boldsymbol{\Theta}}} Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) p_{\boldsymbol{\Theta}}(\boldsymbol{\Theta}) d\boldsymbol{\Theta} \quad (9a)$$

$$M_{l,Z_k}(t) = \int_{\Omega_{\boldsymbol{\Theta}}} [Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) - \mu_{Z_k}(t)]^l p_{\boldsymbol{\Theta}}(\boldsymbol{\Theta}) d\boldsymbol{\Theta}, \quad l \geq 2 \quad (9b)$$

式中:  $p_{\boldsymbol{\Theta}}(\cdot)$  为随机向量  $\boldsymbol{\Theta} = \{\boldsymbol{\Theta}_1, \dots, \boldsymbol{\Theta}_m\}$  的联合概率密度函数;  $m$  为向量阶数;  $\mu_{Z_k}(t)$ 、 $M_{l,Z_k}(t)$  分别为  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的均值和  $l$  阶中心矩;  $\Omega_{\boldsymbol{\Theta}}$  为  $\boldsymbol{\Theta}$  的取值空间。

式(9)涉及高维积分问题,可通过引入函数近似模型<sup>[17-18]</sup>,实现高维积分向一维积分或低维积分的转换,如引入单变量函数近似模型,即

$$Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t) \approx (1 - m)Z_k(\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}}, t) + \sum_{i=1}^m Z_k(\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}_1}, \dots,$$

$$\boldsymbol{\Theta}_i, \dots, \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}_m}, t) = (1 - m)Z_{k,\mu}(t) + \sum_{i=1}^m Z_{k,i}(\boldsymbol{\Theta}_i, t) \quad (10)$$

式中:  $\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}} = (\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}_1}, \dots, \boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}_m})$  为  $\boldsymbol{\Theta}$  的均值点  $Z_{k,\mu}(t)$  为  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的均值响应;  $Z_{k,i}(\boldsymbol{\Theta}_i, t)$  为  $\boldsymbol{\Theta}_i$  的单变量函数,其中除  $\boldsymbol{\Theta}_i$  外其他变量均取均值点。

结合式(9)和式(10),可得到  $Z_k(\boldsymbol{\Theta}, t)$  的前四阶矩,分别为

$$\mu_{Z_k}(t) \approx (1 - m)Z_{k,\mu}(t) + \sum_{i=1}^m \mu_{Z_{k,i}}(t)$$

$$\sigma_{Z_k}^2(t) \approx \sum_{i=1}^m \sigma_{Z_{k,i}}^2(t)$$

$$M_{3,Z_k}(t) \approx \sum_{i=1}^m M_{3,Z_{k,i}}(t)$$

$$M_{4,Z_k}(t) \approx \sum_{i=1}^m M_{4,Z_{k,i}}(t) + 6 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j>i}^m \sigma_{Z_{k,i}}^2(t) \sigma_{Z_{k,j}}^2(t) \quad (11)$$

其中,  $\mu_{Z_{k,i}}(t)$ 、 $\sigma_{Z_{k,i}}^2(t)$ 、 $M_{3,Z_{k,i}}(t)$  及  $M_{4,Z_{k,i}}(t)$  分别为  $Z_{k,i}(\boldsymbol{\Theta}_i, t)$  的均值、方差、三阶中心矩及四阶中心矩,为简化积分运算,可引入标准正态空间的 Gauss-Hermite 积分公式,其各阶统计矩的点估计为

$$\mu_{Z_{k,i}}(t) \approx \sum_{q=1}^p w_q Z_k(T^{-1}(\mathbf{u}_{i,q}), t)$$

$$M_{l,Z_{k,i}}(t) \approx \sum_{q=1}^p w_q [Z_k(T^{-1}(\mathbf{u}_{i,q}), t) - \mu_{Z_{k,i}}(t)]^l, \quad l \geq 2 \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{u}_{i,q} = (u_1, \dots, u_{i-1}, v_q, u_{i+1}, \dots, u_m)$ ,  $T^{-1}(\cdot)$  为逆 Nataf 变换,  $(u_1, \dots, u_m)$  为  $\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\Theta}}$  经 Nataf 变换在标准正态向量空间的映射向量,  $v_q$ 、 $w_q$  为 Gauss-Hermite 积分节点坐标值和权系数,  $p$  为积分节点数,其取值与响应函数的非线性程度有关,一般取  $p \geq 5$ ,表 1 给出了常用的积分节点坐标值及权系数。

表 1 常用的 Gauss-Hermite 积分节点坐标值和权系数

Table 1 Typical integral points  $v_l$  and weights  $w_l$  of Gauss-Hermite

积分节点数 $p$	坐标值 $v_l$	坐标值 $w_l$
5	0	0.5333333
	$\pm 1.3556262$	0.2220759
	$\pm 2.8569700$	0.0112574
7	0	0.4571429
	$\pm 1.1544054$	0.2401232
	$\pm 2.3667594$	0.0307571
	$\pm 3.7504397$	0.0005483

式(11)表达简洁,计算简便,计算量小,在结构随机分析及可靠度分析中得到广泛的应用,相关的研究表明,该方法对多数的工程问题是适用的,满足工程结构对计算精度的要求。

### 3.2 油阻尼器动力可靠性分析的四阶矩方法

获得安全裕量  $Z_k(\Theta, t)$  的前四阶统计矩后,可结合四阶矩方法进行可靠度评估,如,基于 Pearson 分布族四阶矩方法、基于 Lambda 分布四阶矩方法及基于立方正态分布的四阶矩方法<sup>[12]</sup>等,本文采用基于 Edgeworth 展开的四阶矩方法<sup>[10]</sup>,定义  $Z_k(\Theta, t)$  的标准化随机变量,即

$$Z_u(t) = \frac{Z_k(\Theta, t) - u_{Z_k}(t)}{\sigma_{Z_k}(t)} \quad (13)$$

其中,  $Z_u(t)$  为  $Z_k(\Theta, t)$  的标准化随机变量,  $U$  为标准正态随机变量,利用 Edgeworth 展开,  $Z_u(t)$  的概率密度函数可以表示为

$$F(z_u(t)) = \Phi(z_u(t)) - \varphi(z_u(t)) \left[ \frac{1}{6} \alpha_{3,Z}(t) H_2(z_u(t)) + \frac{1}{24} (\alpha_{4,Z}(t) - 3) H_3(z_u(t)) + \frac{1}{72} \alpha_{3,Z}^2(t) H_5(z_u(t)) \right] \quad (14)$$

其中,  $\alpha_{3,Z}(t)$  及  $\alpha_{4,Z}(t)$  为  $Z_k(\Theta, t)$  的偏度系数和峰态系数;  $H_2(\cdot)$ 、 $H_3(\cdot)$  与  $H_5(\cdot)$  为 Hermite 多项式。

结合式(8)及式(14),油阻尼器失效概率为

$$P_f(t) = F(-\beta_2(t)) \quad (15)$$

式中,  $\beta_2(t) = \mu_Z(t)/\sigma_Z(t)$ , 可称为二阶可靠度指标。相应地,可靠度指标  $\beta(t)$  的表达为

$$\beta(t) = -\Phi^{-1}(P_f(t)) \quad (16)$$

式中,  $\Phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态累积分布函数的逆函数。

## 4 油阻尼器撞击失效的动力可靠度分析的数值实现

取2011年3月11日距离该栋结构50m处的地震动观测记录动作为外激励输入量,基于文献[7]的近似模型,并取楼层质量密度为随机变量,假定随机变量相关系数为0.1,表2给随机变量的分布类型及参数。考察第1层、第3层和第4层油阻尼器的撞击失效的动力可靠度问题。

表2 随机变量及其分布参数

Table 2 Random variables and distribution parameters

随机变量	分布类型	均值	变异系数
$\rho_1$ (1~4层)	对数正态	$2.548 \times 10^3$	0.05
$\rho_2$ (5~8层)	对数正态	$2.548 \times 10^3$	0.05

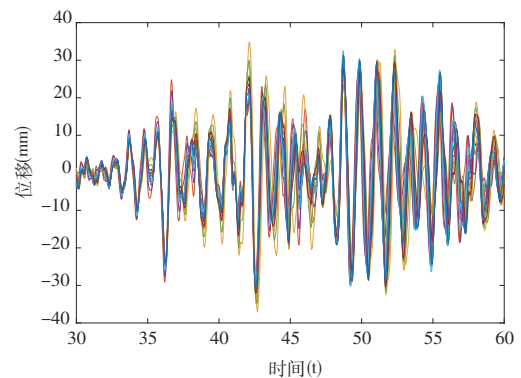
由等价极值分布描述,等价功能函数表达为

$$\begin{cases} Z_1(\rho_1, \rho_2, t) = 24 - Y_1(\rho_1, \rho_2, t) \\ Z_3(\rho_1, \rho_2, t) = 13 - Y_3(\rho_1, \rho_2, t) \\ Z_4(\rho_1, \rho_2, t) = 13 - Y_4(\rho_1, \rho_2, t) \end{cases} \quad (17)$$

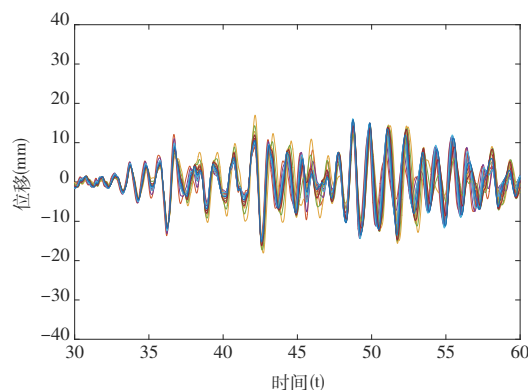
采用本文建议方法计算其动力可靠度,计算步骤如下:

首先,选取区间  $[0, t]$  及积分节点  $p=7$ , 样本总数量为  $2 \times 7 + 1 = 15$  个。

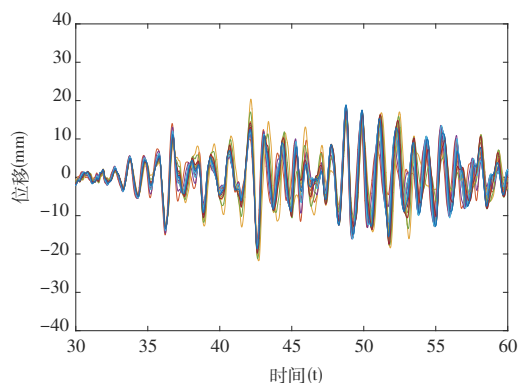
然后,进行样本点的确定性结构动力响应分析,三层油阻尼器的位移响应的样本集合如图3所示;遍历区间  $[0, t]$ , 确定油阻尼器的位移响应的极值,图4给出了样本的油阻尼器位移响应的极值随时间参数  $t$



(a) 第1层油阻尼器位移



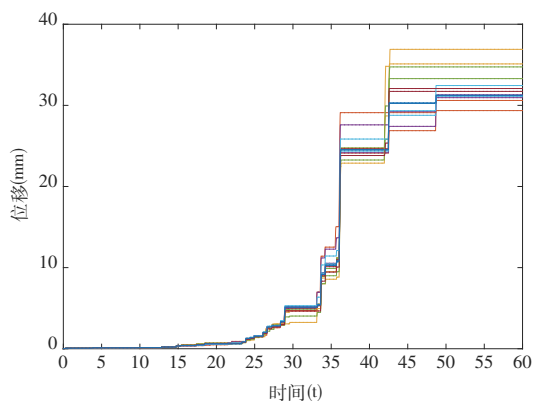
(b) 第3层油阻尼器位移



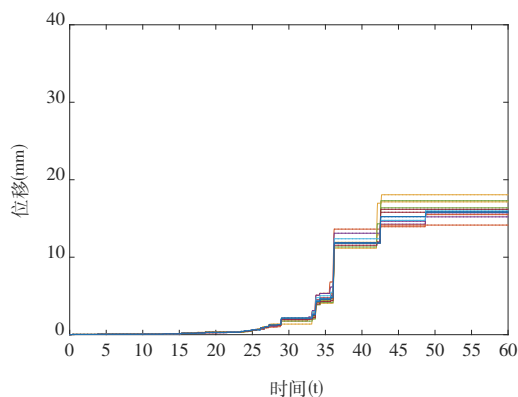
(c) 第4层油阻尼器位移

图3 油阻尼器动力位移响应

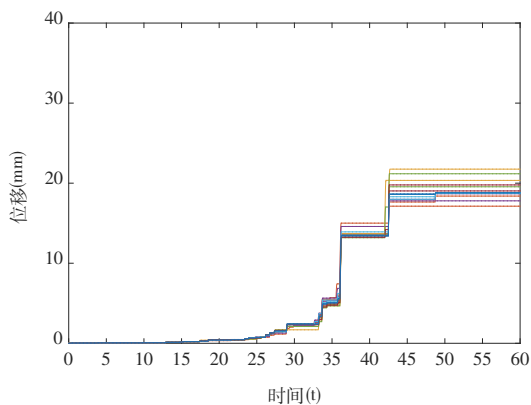
Fig. 3 Dynamic displacement responses of oil dampers



(a) 第 1 层油阻尼器位移响应极值



(b) 第 3 层油阻尼器位移响应极值



(c) 第 4 层油阻尼器位移响应极值

图 4 油阻尼器的位移响应的极值

Fig. 4 Maximum values of dynamic displacement responses of oil dampers

的变化规律,不难看出位移极值是时间参数  $t$  的单调递增函数;随时间增长,质量密度的差异所导致油阻尼器极值响应的差异得到逐步的放大,第 1 层差异最大;同时表明结构层质量评估的精度显著影响油阻尼器位移极值的估计精度。

其次,由式(17)计算样本的等价功能函数响应值,由式(12)及式(11)计算前四阶中心矩。

最后,由式(14)及式(15)计算油阻尼器的失效概率。图 5 给出了建议方法计算的油阻尼器的失效概率

随时间  $t$  的变化规律,其中,36s 左右第 4 层阻尼器率先失效,即,该层油阻尼器最大位移值达到 13mm 的概率为 100%,同时,第 1 层阻尼器失效的概率约为 80%,第 3 层阻尼器则处于安全状态;42 ~ 43s 之间第 1 层与第 3 层油阻尼器相继失效。图 5 计算结果也说明了原结构第 1 层、第 3 层及第 4 层油阻尼器遭到破坏或丧失功能的可能性。

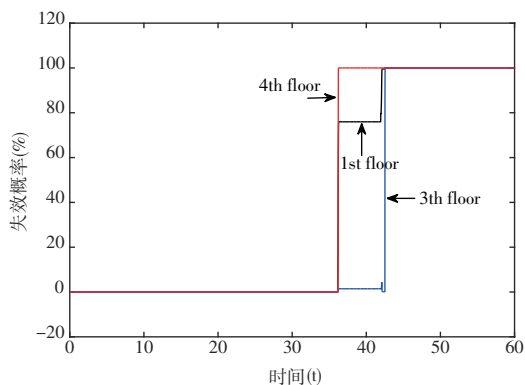


图 5 油阻尼器的失效概率

Fig. 5 Probability of failure of oil dampers

## 5 结论

对地震作用下耗能减震构件的动力可靠性分析,建议了一种简化的动力可靠度分析方法。基于首次超越破坏准则,建立了耗能减震构件动力可靠度的等价功能函数表达,并结合简化四阶矩方法求解耗能减震构件的动力可靠度及相应失效概率,最后,以受到地震作用的一栋钢结构行政楼的油阻尼器动力可靠度问题为例,采用建议方法分析了油阻尼器撞击失效的动力可靠性问题,计算结果表明了建议方法的可行性和适用性。

## 参 考 文 献

- [1] JSSI. Report of response-controlled buildings[R]. Tokyo: Japan Society of Seismic Isolation (JSSI) Investigation Committee, 2012
- [2] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,2006 (Hu Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006(in Chinese))
- [3] 李杰. 随机结构系统——分析与建模[M]. 北京:科学出版社,1996 (Li Jie. Stochastic structural systems—analysis and modeling[M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese))
- [4] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010 (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010(in Chinese))
- [5] JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京:中国

- Gangbing, et al. Study on seismic response control of frame structure using innovative recentring SMA damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6):14-20 (in Chinese))
- [11] 钱辉,李宏男,任文杰,等. 形状记忆合金复合摩擦阻尼器设计及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 58-64 (Qian Hui, Li Hongnan, Ren Wenjie, et al. Experimental investigation of an innovative hybrid shape memory alloys friction damper [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9):58-64 (in Chinese))
- [12] Kari A, Ghassemieh M, Abolmaali S A. A new dual bracing system for improving the seismic behavior of steel structures [J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(12):125020-125033
- [13] Gao N, Jeon J S, Hodgson D E, et al. An innovative seismic bracing system based on a superelastic shape memory alloy ring [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(5):055030
- [14] Bhuiyan M A R, Alam M S. Seismic vulnerability assessment of a multi-span continuous highway bridge fitted with shape memory alloy bars and laminated rubber bearings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(4): 1379-1404
- [15] Andrawes B, DesRoches R. Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic restrainers [J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(3):60-67
- [16] DesRoches R, Delemont M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys [J]. Engineering Structures, 2002, 24(3):325-332
- [17] Li H, Liu M, Ou J. Vibration mitigation of a stay cable with one shape memory alloy damper [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2004, 11(11):21-36
- [18] Wang W, Hong T, Shao L, et al. Cyclic behavior of connections equipped with NiTi shape memory alloy and steel tendons between H-shaped beam to CHS column [J]. Engineering Structures, 2015, 88:37-50

钱 辉(1978-),男,博士,副教授。主要从事结构振动控制方面的研究。

李宏男(1957-),男,博士,教授。主要从事结构健康监测及振动控制方面的研究。

郜新军(1981-),男,博士,讲师。主要从事桥梁振动控制方面的研究。

(上接第 118 页)

- 建筑工业出版社, 2013 (JGJ 297—2013 Technical specification for seismic energy dissipation of building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013 (in Chinese))
- [6] Cao M, Tang H, Funaki N, et al. Study on a real 8F steel building with oil damper damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake [C]// 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal, 2012
- [7] Xie L, Cao M, Funaki N, et al. Performance study of an eight-story steel building equipped with oil dampers damaged during the 2011 Great East Japan Earthquake. part 1: structural identification and damage reasoning [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2015, 14(1):181-188
- [8] 李杰,陈建兵. 随机结构动力反应分析的概率密度演化方法 [J]. 力学学报, 2003, 35(4):437-442 (Li Jie, Chen Jianbing. The probability density evolution method for dynamic response analysis of stochastic structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(4):437-442 (in Chinese))
- [9] Li J, Chen J B. Stochastic dynamics of structures [M]. John Wiley & Sons, 2009
- [10] Zhao Y G, Ono Tetsuro. Moment methods for structural reliability [J]. Structural Safety, 2001, 23:47-75
- [11] Zhao Y G, Ang A H-S. System reliability assessment by method of moments [J]. Journal of structural engineering, 2001, 129(10):1341-1349
- [12] Zhao Y G, Lu Z H. Fourth-moment standardization for structural reliability Assessment [J]. Journal of structural engineering, 2007, 133(7):916-924
- [13] Rosenblueth E. Point estimates for probability moments [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1975, 72(10):3812-3814
- [14] Zhou J H, Nowak A S. Integration formulas to evaluate functions of random variables [J]. Structural Safety, 1988, 5(4):267-284
- [15] Zhao Y G, Ono T. New point-estimates for probability moments [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4):433-436
- [16] 李洪双,吕震宙,袁修开. 基于 Nataf 变换的点估计法 [J]. 科学通报, 2008, 53(6):627-632 (Li Hongshuang, Lu Zhenzhou, Yuan Xiukai. Nataf transformation based point estimate method [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(6):627-632 (in Chinese))
- [17] Rahman S, Xu H. A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(4):393-408
- [18] Xu H, Rahman S. A generalized dimension-reduction method for multidimensional integration in stochastic mechanics [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(12):1992-2019

杨朋超(1988-),男,博士研究生。主要从事结构抗震与振动控制、结构可靠性研究。

薛松涛(1963-),男,博士,教授。主要从事结构抗震与振动控制、结构健康监测研究。

谢丽宇(1978-),男,博士,讲师。主要从事结构抗震与振动控制、结构健康监测研究。