

洪绍文, 王子琦. 基于成本—效益指标的隔震支座参数优化[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 67–73. [HONG Shaowen, WANG Ziqi. Optimization of Isolation Bearing Parameters Based on Cost-Effectiveness Index[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 67–73]

基于成本—效益指标的隔震支座参数优化

洪绍文^{1,2,3}, 王子琦^{1,2,3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405;
3. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405)

摘要: 根据建筑结构隔震设计的特点, 研究了基于成本—效益指标的隔震支座参数优化问题, 提出了以结构整体成本—效益指标为目标函数的隔震支座参数优化方法, 从而在隔震设计中同时考虑结构的初始造价和地震损失成本。采用无导数信赖域的优化算法进行隔震支座参数优化, 主要约束为基于首次超越失效准则的结构动力可靠度。最后通过一个隔震支座设计实例, 分别采用文中提出的优化设计方法和传统隔震设计方法进行设计并对比结果, 最后讨论了结构期望损失成本对优化设计的影响, 从而验证提出方法的可行性。

关键词: 成本—效益分析; 隔震支座参数优化; 无导数信赖域优化算法; 结构动力可靠度

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)04-0067-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.012

Optimization of Isolation Bearing Parameters Based on Cost-Effectiveness Index

HONG Shaowen^{1,2,3}, WANG Ziqi^{1,2,3}

(1. *Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;*
2. *Key Laboratory of Earthquake Resistance Earthquake Mitigation and Structural Safety Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;* 3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Advanced Technology, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China*)

Abstract: According to the characteristics of seismic isolation design of building structure, this paper studies the parameter optimisation problem of seismic isolation bearing based on a cost-effectiveness index, and proposes the optimisation method of seismic isolation bearing parameter with the overall cost-effectiveness index as the objective function. Therefore, the initial cost and the cost of earthquake loss are taken into account in the seismic isolation design. In this paper, a derivative-free trust-region optimisation algorithm is used to optimise the

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808149); 广东省教育厅创新团队项目(2016KCXTD016)。

作者简介: 洪绍文(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构抗震数值分析研究。

E-mail: hongshaowen@e.gzhu.edu.cn.

通信作者: 王子琦(1989-), 男, 助理研究员, 主要从事结构随机振动研究。

E-mail: ziqidwang@yahoo.com.

parameters of isolation bearings. The primary constraint is the structural dynamic reliability based on the first transcendental failure criterion. Finally, through an example of isolation bearing design, the optimal design method proposed in this paper and the traditional isolation design method are used to design and compare the results. The effect of expected loss cost of structure on the optimal design is also discussed in this paper, to verify the feasibility of the proposed method.

Keywords: Cost-effectiveness; Optimization of isolation bearing parameters; Derivate-free trust-region optimization algorithm; Structural dynamic reliability

0 前言

随着隔震技术的发展,越来越多的学者注意到工程的经济性问题,并大力推动了基于“成本—效益”准则的优化方法的应用。本文提出以成本—效益指标为优化目标的隔震支座参数优化方法,可以在满足结构隔震性能要求的情况下,体现结构的经济效益。成本—效益分析是通过比较工程项目的全部成本和总效益来评估工程项目价值的一种方法,该方法可将成本—效益分析运用于工程项目的计划决策之中,以寻求在投资决策上以最小成本获取最大效益。对工程项目进行成本—效益分析后,通常以成本—效益指标来体现项目效益与总投入间的关系^[1-3]。本文所讨论的成本—效益指标由结构的初始造价和全生命周期内结构的预期损伤投入所构成。

从20世纪90年代开始,国内就有许多学者对隔震支座的参数优化设计方法和优化算法进行探讨,1998年,李建中^[4]对某连续梁桥采用铅芯橡胶支座(LRB)进行隔震设计,应用可行方向法对桥梁结构的隔震支座进行参数优化,该文中以结构的地震响应的最大值为目标函数,其优化结果的确实现了对隔震支座的优化,使得优化后的地震响应为相对最小值,但是没有考虑工程整体经济效益。在2003年,李刚^[5]基于“成本—效益”准则对隔震结构进行优化设计,该文以结构在全寿命周期内的总造价为优化目标,对结构的主要尺寸以及隔震构件的力学控制参数进行最优化设计,并且讨论三种不同的隔震层造价计算方法,发现目标函数值相差不多。2010年,卜国雄以投资—效

益准则作为性能指标,提出了基于性能的TMD/AMD减振装置的优化设计方法并且提出效—费比这一新的评价指标^[6]。成本—效益指标也被用于核电厂结构的隔震参数优化分析^[7]。上述基于成本—效益指标的研究均表明,以成本—效益指标为目标函数进行隔震优化设计,可以在满足既定功能要求的前提下,使得工程整体的经济效益相比于传统的隔震设计更好。

本文的主要研究内容是基于成本—效益指标对隔震支座参数进行优化,希望在保证结构的隔震设计要求的前提下,以最小的成本获得最好的隔震效果。另外,值得注意的是,在计算结构成本—效益指标时,由于结构总成本包括结构的损伤投入,而损伤投入是关于结构失效概率的函数,为计算该失效概率本文采用了基于响应功率谱的蒙特卡罗模拟方法。文中首先介绍成本—效益指标的概念,提出以该指标为目标函数的优化模型,其后介绍了作为优化模型中约束的动力可靠度的求解方法、优化算法及隔震支座参数优化流程,最后通过数值算例,验证优化算法的正确性以及本文所提的优化方法的可行性。

1 基于成本—效益指标的隔震支座参数优化

1.1 结构的成本—效益指标

本文将隔震支座的橡胶面积和铅芯面积作为设计变量,而上部结构不引入设计变量。隔震建筑结构在全生命周期成本投入的期望可表示为^[6,7]

$$E[C_{iso}(D_r, D_p)] = C_s + C_i(D_r, D_p) + C_d P_{F,X}(D_r, D_p) \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (1)$$

式(1)中, C_s 为结构建造的初始成本; C_i 为隔震装置所需的成本,它是隔震装置中铅芯橡胶面积的函数; D_p 为铅芯直径, D_r 橡胶直径; C_d 为损伤成本,该项主要是考虑结构的重要性和功能;

$P_{F,X}$ 为结构的失效概率; v 为地震发生次数的均值; λ 为结构每年损伤投入的折减率的常数; t_{life} 为结构的寿命周期; $e^{-\lambda t_{life}}$ 将结构在未来时间内的所投入的损失成本,计入目前的总投入成本内, v/λ

$(1-e^{-\lambda t_{life}})$ 项的引入是基于地震动出现次数服从泊松分布的假设。将(1)式同除以 C_s 进行无量纲化, 得出表达式(2)。

式(2)中, $E[\tilde{C}_{iso}(D_r, D_p)]$ 为隔震结构的投

$$E[\tilde{C}_{iso}(D_r, D_p)] = 1 + \mu(D_r, D_p) + \alpha P_{F,X}(D_r, D_p) \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (2)$$

$$E[C_{non}] = C_s + C_f P_{F,X} \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (3)$$

式中 $E[C_{non}]$ 为非隔震结构的投入成本函数。

$$E[\tilde{C}_{non}] = 1 + \alpha P_{F,X} \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (4)$$

式(3)、(4)中 $E[\tilde{C}_{non}]$ 为非隔震结构的投入总成本函数与 C_s 的比值。

为综合评价结构的成本和效益, 引入成本—效益指标, 它定义为采用隔震支座的结构与未采用隔震支座的结构的投入成本比, 即

$$E_{iso/non} = \frac{E[\tilde{C}_{iso}(D_r, D_p)]}{E[\tilde{C}_{non}]} \quad (5)$$

式(5)中, $E_{iso/non}$ 为隔震结构相对于非隔震结构的成本—效益指标, 一个优秀的隔震设计其 $E_{iso/non}$ 值常在 0~1 之间。

1.2 结构优化模型

本文将铅芯直径 D_p 和橡胶直径 D_r 作为设计变量, 而优化目标为在满足约束下使成本—效益指标最小, 优化问题可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find } X = (D_r, D_p) \\ \text{min } E_{iso/non}(D_r, D_p) \\ \text{s.t. } D_p^{min} \leq D_p \leq D_p^{max} \\ D_r^{min} \leq D_r \leq D_r^{max} \\ 0 \leq \xi_{eff}(D_r, D_p) \leq 1 \\ S_2(D_r, D_p) \geq 5 \\ A_b(D_r, D_p) \leq A_{b,lim} \\ d_b(D_r, D_p) \leq d_{b,lim} \\ \beta_e(D_r, D_p) \leq \beta_g \end{array} \right. \quad (6)$$

式(6)中 \mathbf{X} 为隔震支座选取的一组优化参数, D_p^{min} , D_p^{max} , D_r^{min} , D_r^{max} 分别表示隔震支座铅芯和橡胶直径的取值范围的下限和上限; S_2 为隔震支座的第二形状系数, 它主要反映支座的宽高比, 宽高比越小, 支座的形状越细长, 而其等效水平刚度值也越小, 通常细长的支座在竖向荷载作用下

入成本标准化后的函数, μ 为结构的初始成本与隔震装置成本的比值, α 为结构原来的期望损伤投入成本进行标准化后所得出来的系数值, 可用来衡量结构的损伤成本。

容易屈曲, 因此将 S_2 作为约束条件可保证支座具有足够的竖向承载能力; ξ_{eff} 为隔震支座的等效阻尼比, 为防止出现负值和大于 1 时的过阻尼现象, 将其值约束在 0~1 之间; A_b 为隔震支座的面积, 它应大于或等于结构竖向荷载与隔震支座压应力限值的比值。 d_b 为隔震支座的水平剪切变形值, $d_{b,lim}$ 为隔震支座的水平位移极限值, 通常 $d_{b,lim}$ 小于或等于 3 倍的橡胶层总厚度; β_e 为结构实际计算可靠度值, β_g 为给定的结构设计可靠度值^[9]。

2 结构隔震支座参数优化方法

2.1 结构极限状态的定义与失效概率的求解

本文采用最大层间位移角的首次超越破坏来定义极限状态函数, 从而计算结构优化模型中的动力可靠度指标和失效概率, 具体而言, 结构失效定义为在地震动持时内, 结构的(绝对值)最大层间位移角大于或等于给定的极限值^[9], 即

$$\max \{ |\max \theta_k(t)| | t \in [0, T_d] \} | k=1, 2, \dots, N \geq \theta_{lim} \quad (7)$$

$$\theta_k(t) = \frac{\Delta u_k(t)}{h_k} \quad (8)$$

式(7)、(8)中 $\Delta u_k(t)$ 为结构的第 k 层间相对位移时程, h_k 为第 k 楼层层高, $\theta_k(t)$ 为结构的第 k 层间位移角时程, T_d 为地震动的持时, θ_{lim} 为结构最大层间位移角的极限值。 θ_{lim} 可根据《建筑抗震设计规范》进行取值^[10], 混凝土结构通常取为 1/550。

假设地震动输入是一个零均值的高斯平稳随机过程, 结构最大层间位移角的首次超越概率, 即可通过以下方法求得。

对于一个线性结构体系, 当地震动输入为零均值的高斯平稳随机过程, 其位移响应(经过足够长时间)也为零均值的平稳高斯随机过程。令各层间位移角过程为 $[\theta_1(t) \cdots \theta_N(t)]$, 它们可通过傅里叶展开表示为:

$$\theta_k(t) = \sum_{p=1}^n [A_{pk} \cos(\omega_p t) + B_{pk} \sin(\omega_p t)] \quad k=1, \dots, N \quad (9)$$

式(9)中, n 为随机过程的频域离散点总个数,

ω_p 为随机过程的第 p 个频率离散点, $\omega_p = p \cdot \Delta\omega$, A_{pk} 和 B_{pk} 为零均值的高斯随机变量^[11], 当 $p \neq q$

时, 它们统计无关, 即 $E[A_{pk}A_{qk}] = E[B_{pk}B_{qk}] = E[A_{pk}B_{qk}] = 0$ 。在圆频率为 ω_p 时, 有

$$E[A_{pk}A_{pl}] = E[B_{pk}B_{pl}] = \begin{cases} G_{kk}(\omega_p)\Delta\omega & \text{if } k = l \\ \text{Re}[G_{kl}(\omega_p)]\Delta\omega & \text{if } k \neq l \end{cases} \quad (10)$$

$$E[A_{pk}B_{pl}] = -E[B_{pk}B_{pl}] = \begin{cases} 0 & \text{if } k = l \\ -\text{Im}[G_{kl}(\omega_p)]\Delta\omega & \text{if } k \neq l \end{cases} \quad (11)$$

式(10)、(11)中 $G_{kl}(\omega_p)$ 为结构第 k 和 l 层层间位移角的单边互功率谱, $G_{kk}(\omega_p)$ 为结构第 k 层层间位移角的自功率谱。利用线性随机振动理论可直接得到各自功率谱和互功率谱函数, 接着可利用式(9)、(10)和(11)直接模拟各层间位移角过程, 从而利用蒙特卡罗方法求解失效概率。

当 $\theta_k(t)$, $k=1, \dots, N$, 中的任意一个响应值大于 θ_{lim} , 即认定结构失效, 则结构失效概率的蒙特卡罗方法计算式为

$$P_{EX} \cong \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} I(\theta_k^{(j)}(t) \geq \theta_{lim} | k=1, \dots, N) \quad (12)$$

式(12)中, $\theta_k^{(j)}(t)$ 表示第 j 个通过式(9)随机生成的第 k 层位移角过程; $I(\cdot)$ 为结构失效的指示函数, 若任意一层位移角过程在任意时刻超越了 θ_{lim} , 则 $I(\cdot)=1$, 否则 $I(\cdot)=0$ 。

2.2 隔震支座参数优化算法

对于本文所讨论的优化问题, 目标函数 $E_{iso/non}$

及其约束条件涉及最大层间位移角的首次超越概率, 该概率对设计变量的导数难以获得, 因而本文研究采用了无导数信赖域优化算法^[12]。该优化算法的基本思想是: 在设计变量的取值范围内, 先设定一个中心点为 (X_c) , 在半径为 ρ 的区域内随机抽取 M 组样本进行拟约束条件函数并进行优化搜索, 寻找最优值, 然后对其进行判断是否满足所有的条件约束。不满足则调整半径, 继续寻找最优值。如满足, 则进行判断该结果是否满足终止条件。若符合条件则终止计算, 得出最优解, 若不符合, 则更新信赖域的中心点及半径, 重新进行计算^[12-13]。

2.3 隔震支座参数优化流程

在随机地震动激励下, 针对上述优化模型, 隔震支座参数优化设计方法如图 1 所示。简要而言, 方法流程包含:

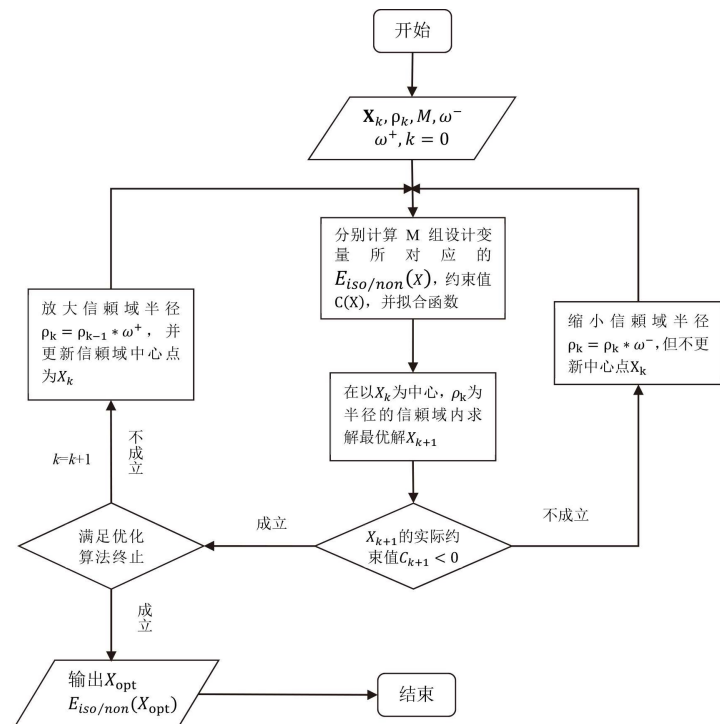


图 1 优化设计流程图

Fig.1 Optimization design flow chart

- (1)给定隔震支座的初始设计参数 $\mathbf{X}_0=(D_r^0, D_p^0,)$ 。
- (2)求解结构的动力可靠度指标/失效概率。
- (3)计算隔震结构的成本—效益指标。
- (4)利用无导数信赖域优化算法不断更新结构的成本—效益指标，直至找到满足各约束条件的极小值。

3 数值算例

为验证本文提出的隔震支座参数优化方法，并测试优化模型能否有效反映经济性，在此引入如图 2 所示的 6 自由度层剪切结构模型作为数值算例。模型中首层为隔震层，采用铅芯橡胶支座进行隔震。结构每层的质量分别为 $m_b=1.8\times10^5$ kg、 $m_2=m_3=m_4=m_5=m_6=1.5\times10^5$ kg。结构每层的剪切刚度分别为 $k_b=1.6\times10^8$ N/m、 $k_2=1.6\times10^8$ N/m、 $k_3=1.6\times10^8$ N/m、 $k_4=1.4\times10^8$ N/m、 $k_5=1.4\times10^8$ N/m、 $k_6=1.4\times10^8$ N/m。

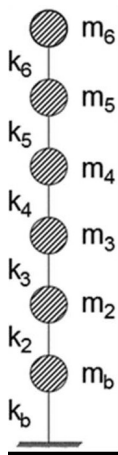


图 2 结构模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of structural model

该模型受到零均值高斯平稳随机地震动激励，地震动功率谱模型采用 Clough–Penzien 模型，模型参数根据建筑物所处的二类场地类别、设计加速度为 0.2 g 所确定^[14]。 v 为 0.10， λ 为 0.05， t_{life} 为 50 年。

3.1 基于成本—效益指标的隔震支座参数优化

针对上述层剪切模型，其优化问题的约束条件参数取值见表 1，优化算法所需初始参数见表 2。

给定优化起始点为 $\mathbf{X}=(0.600\ 0, 0.150\ 0)$ ， $\alpha=0.5$ ，其目标函数值为 $E_{iso/non}=0.593\ 1$ ，按照上述的隔震支座参数优化设计方法，其支座参数的优化结果为 $\mathbf{X}_{opt}=(0.400\ 0, 0.300\ 0)$ ，目标函数值优化为 $E_{iso/non}=0.569\ 2$ ，结构的失效概率为 8.2×10^{-8} ，该结果满足结构优化模型中所有约束。

为了检验以上优化结果的正确性，优化计算过程中 $E_{iso/non}$ 的迭代过程如图 3 所示，图 3 结果中满足约束条件的设计变量对应的 $E_{iso/non}$ 皆小于 0.593 1，且目标函数值整体呈现下降并趋于平稳的趋势，达到了对隔震支座进行参数优化的目的。

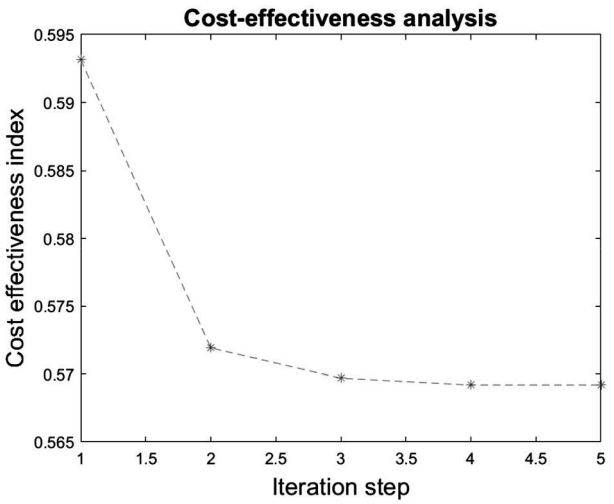


图 3 成本—效益指标迭代示意图

Fig.3 Iteration diagram of cost–effectiveness index

表 1 约束条件的参数取值

Table 1 Parameter values of constraint conditions

$D_p^{min} (m)$	$D_p^{max} (m)$	$D_r^{min} (m)$	$D_r^{max} (m)$	$A_d (m^2)$	$d_{b,lim} (m)$	β_g
0.10	0.60	0.40	0.80	0.1519	0.4200	3.0

表 2 优化算法的初始参数值选取

Table 2 Selection of initial parameters for optimization algorithm

ρ_0	ρ_{min}	ω^+	ω^-	ϵ^*	M	δ
0.15	0.01	1.2	0.8	0.0001	11	100

3.2 传统的隔震设计方法

为考察本文所提的隔震支座参数优化方法与传统方法的区别,在此,采用传统的设计方法对隔震支座进行设计。已知上部结构的总重量和假设橡胶支座长期荷载下的压应力为 15 MPa, $\alpha=0.5$, 以及预计采用 4 个隔震支座, 计算出隔震支座的最小受压面积。由以上的计算结果数据表明, 本算例可采用 4 个 LRB500(G4)隔震支座, 其参数见表 3。

计算的结果显示该隔震结构的失效概率为 2.57×10^{-12} , 成本—效益指标为 0.694 4。

通过两种隔震设计方法的结果对比可知, 本文所提出的隔震支座参数优化设计方法在经济效益上明显优于传统的隔震设计方法。

3.3 结构期望损伤规模对成本—效益分析的影响

结构期望损失规模的选定通常无法规避主观因素, 为此下面通过算例的数据来说明问题^[3,7]。

采用优化设计方法进行隔震设计时, 不同结构损伤规模下的成本—效益指标值迭代过程见图 4。

通过表 4 中结果可以得出, 当结构的损伤规模较小时, 损伤成本对结构总成本贡献较小, 故隔震结构成本投入比非隔震结构大, $E_{\text{iso/non}}$ 大于 1, 此时结构采用隔震技术较不经济; 当结构的损失规模较大时, $E_{\text{iso/non}}$ 为 0~1 之间的值, 此种情况采用隔震结构经济效益较好, 这是由于结构的后期损伤投入占总成本的比例较大, 而采用隔震结构恰好能够极大的降低结构的失效概率, 以减小该部分对总成本的贡献。

表 3 LRB500(G4) 铅芯橡胶支座参数

Table 3 LRB500 (G4) lead rubber bearing parameters

S_2	屈服后刚度/ (kN/mm)	屈服前的刚度/ (kN/mm)	屈服力/kN
5.1	0.784	10.191	63

表 4 不同结构期望损伤规模的成本—效益指标值

Table 4 Cost-effectiveness index value of expected damage scale for different structures

α	$E_{\text{iso/non}}$	
	传统设计方法	优化设计方法
0.01	1.304 5	1.069 3
0.5	0.694 4	0.569 2
1.0	0.470 0	0.385 3
1.5	0.355 1	0.291 2

如果不采用成本—效益指标而采用通常使用的结构响应作为目标函数进行优化设计, 其优化后的结果尽管都能够满足结构的安全性以及功能性要求, 但是无法直接体现出工程整体经济性。

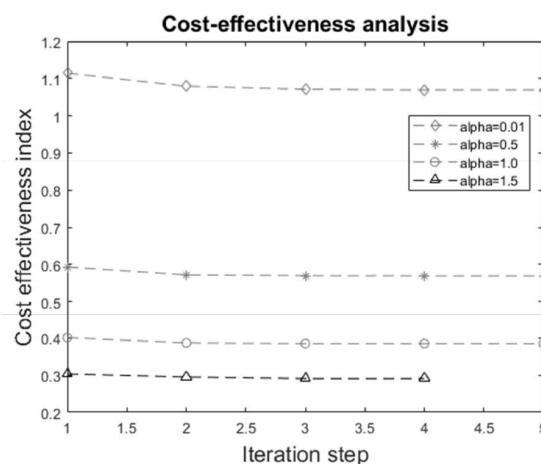


图 4 不同 α 值时的成本—效益指标迭代示意图

Fig.4 An iterative diagram of cost-effectiveness index with different α values

4 结论与展望

采用以成本—效益指标为目标函数的隔震支座参数优化方法, 可在保证结构隔震和抗震性能要求的同时, 使得工程经济效益最大化。

采用本文方法对隔震结构中的铅芯橡胶支座进行参数优化后, 工程整体成本—效益指标优于传统隔震结构设计方法。。

结构的期望损伤成本对基于成本—效益指标的隔震支座参数优化影响较大。对于结构期望损伤成本较大的重要结构, 隔震设计可显著减小失效概率而具有长远的经济性, 成本—效益指标恰可较好反映这一点。

参考文献:

- [1] Quah E, Mishan E. Cost-Benefit Analysis [M]. London: Routledge, 2007.
- [2] Koh H M, Park K S, Song J. Cost-effectiveness evaluation of seismically isolated pool structures considering fluid-structure interaction[C]//ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference. 2002; 83-90.
- [3] Hahm D. Cost-effectiveness evaluation of an MR damper system based on a life-cycle cost concept [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(1): 145-154.
- [4] 李建中, 袁万城. 连续梁桥减、隔震体系的优化设计[J]. 土木工程学报, 1998(3): 47-54.

- [5] 李刚,杨迪雄,程耿东. 基于功能的基础隔震结构一体化优化设计[J]. 应用力学学报,2004,21(1):13-16.
- [6] 卜国雄. 高耸结构基于性能的 TMD/AMD 设计及其动力可靠度分析[D]. 哈尔滨工业大学,2010.
- [7] Park K S,Koh H M,Song J. Cost-effectiveness analysis of seismically isolated pool. structures for the storage of nuclear spent-fuel assemblies [J]. Nuclear Engineering & Design,2004,231(3):259-270.
- [8] 党育,杜永峰,李慧. 基础隔震结构设计及施工指南[M]. 中国水利水电出版社,2006.
- [9] 滕晓飞,谭平,周林丽,等. 隔震剪力墙结构的有害层间位移角研究[J]. 华南地震,2017,37(4):72-78.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] Wang Z,Der Kiureghian A. Tail-Equivalent Linearization of Inelastic Multisupport Structures Subjected to Spatially Varying Stochastic Ground Motion[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE,2016,142(8).
- [12] Gao T,Li J. A derivative-free trust-region algorithm for reliability-based optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2017,55(4):1535-1539.
- [13] Augustin F,Marzouk Y M. NOWPAC:A provably convergent derivative-free nonlinear optimizer with path-augmented constraints[J]. Mathematics,2014.arxiv: 1403.1931.
- [14] Clough R W,Penzien J,Griffin D S. Dynamics of structures[M]. Columbus:McGraw-Hill,1975.