

文章编号: 1000-4750(2016)06-0077-08

基于遗传算法的高耸结构环形 TLD 满意优化设计

陈 鑫^{1,2}, 李爱群¹, 徐庆阳³, 张志强¹

(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. 苏州科技学院江苏省结构工程重点实验室, 苏州 215011;
3. 南京审计学院 江苏公共工程审计重点实验室, 南京 211815)

摘 要: 针对高耸结构环形 TLD 的多目标优化设计开展研究。首先, 建立了高耸结构环形 TLD 控制的动力学模型, 并编制了其求解程序。随后, 提出了采用 Sigmoid 函数作为独立满意度函数, 并通过线性加权建立了复合满意度函数。进而, 基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA), 选取环形 TLD 的几何参数作为设计变量, 结构响应和阻尼器行程的复合满意度作为优化目标, 建立了高耸结构环形 TLD 控制的满意优化设计方法。最后, 针对某自立式钢烟囱, 编制程序开展了其在风荷载作用下环形 TLD 减振的优化设计。研究表明, 该方法能够快速有效地得到一组满足工程需要且较为经济的设计参数, 同时该方法对权重系数的敏感度较低, 降低了多目标优化设计时权重系数选择的难度。

关键词: 高耸结构; 环形 TLD; 遗传算法; 满意度函数; 多目标优化

中图分类号: TU318.1; TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.10.0918

SATISFACTION OPTIMUM DESIGN OF RING-SHAPE TLD CONTROL FOR HIGH-RISE STRUCTURE USING GENETIC ALGORITHM

CHEN Xin^{1,2}, LI Ai-qun¹, XU Qing-yang³, ZHANG Zhi-qiang¹

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Structure Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China
3. Nanjing Audit University, Jiangsu Key Laboratory for Public Project Audit, Nanjing 211815, China)

Abstract: A method is proposed for the multi-objective optimization of a ring shape tuned liquid damper (TLD) arranged on high-rise structures. Firstly, the dynamic model for high-rise structures with ring shape TLD is established, and its computation program is then coded. Secondly, the independent desirability functions are constructed by using Sigmoid function, and the composite desirability function is composed of them by using linearly weighing. Then on the basis of Genetic Algorithm (GA), a satisfaction optimal design is performed, in which the geographic parameters of ring shape TLD are defined as the design variables, and the composite desirability considering both the structural response and damper outputs as the optimization objectives. In the end, the method is coded, and the optimum design of the ring shape TLD arranged on a self-standing steel chimney under wind loading is presented. The study indicates that the method is an optimal algorithm that can efficiently obtain a set of design parameters which satisfy both project requirements and economical need. And the method is less sensitive to the value of weight coefficients than the normal optimal methods, so the difficulty of choosing

收稿日期: 2014-10-31; 修改日期: 2015-07-13

项目基金: 国家自然科学基金项目(51408389, 51438002); 江苏省自然科学基金项目(BK20140281); 江苏省高校自然科学基金项目(13KJB560012); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放课题(CPCSME2013-05); 江苏省结构工程重点实验室开放课题(ZD1304)

通讯作者: 陈 鑫(1983—), 男, 江苏盐城人, 副教授, 博士, 从事结构振动控制及智能材料应用研究(E-mail: civil.chenxin@gmail.com).

作者简介: 李爱群(1962—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士, 主要从事结构振动控制、结构健康监测研究(E-mail: aiqunli@seu.edu.cn);

徐庆阳(1980—), 男, 江苏盐城人, 副教授, 博士, 主要从事结构振动控制研究(E-mail: 05098411@163.com);

张志强(1969—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 主要从事结构振动控制研究(E-mail: zzq1969@seu.edu.cn).

weight coefficients is reduced in multi-objective optimization.

Key words: high-rise buildings; ring-shape TLD; GA; desirability functions; multi-objective optimization

近年来, 振动控制技术越来越多地在高耸结构振动控制中得到应用^[1-2], 并取得了显著的控制效果。在对这些减振系统进行设计时, 减振装置的参数、布置数量、位置及方式等参数的选取决定了减振的效率, 因此, 这些参数的优化是系统设计中的关键之一, 引起了国内外学者的重视^[3]。减振效率通常包括多方面的要求(如: 位移、速度、加速度、装置出力、实现成本等), 在优化模型中表现为优化问题存在多个目标, 最终可以归结到数学上多目标决策的范畴。多目标决策最显著的特点为目标间的不可公度和矛盾性^[4]。常用的处理办法是采用权重系数变换法, 但是在实际工程中, 权重数值的选取往往较为困难, 且随着优化目标的增多, 各目标权重数值的选取难度急剧增加, 而适当的权重系数是获得实际工程所需要的设计参数的关键之一。

为解决权重取值的困难, 本文将引入满意度的概念, 对目标函数进行处理, 降低权重系数对优化结果的影响, 以使数值优化能够更稳定地获得工程所需的设计参数。早在 1978 年, 诺贝尔经济学奖获得者西蒙首先在经济学领域的研究中提出了“令人满意准则”的概念, 并提出了用满意决策代替最优决策的思想^[5]。满意准则的提出把人们从纯理性思维的研究方式带到了一个有限理性的状态, 为人们解决问题提供了崭新的途径。多年来, 国内外众多学者投入到了关于满意度原理的相关研究当中, 并已成功在优化、控制、管理、决策、资源分配等领域取得了较为成功的应用^[6]。在土木工程领域, 满意度的理念亦不同程度地得到了应用: 王光远等^[7]在研究结构多目标优化设计时, 借助模糊数学定义了约束满足度和目标满意度、满足满意解等概念, 并进行了深入系统的探讨; 丁大钧^[8]在开展预应力混凝土梁、板优化配筋的研究过程中, 定义了满意优化解的概念; 任文敏等^[4]将满意度引入到结构振动控制的参数优化中, 并以斜拉桥拉索为例进行了数值模拟的研究。总的来看, 满意度原理在结构振动控制领域虽然有了一定的应用, 但研究仍然处于初步阶段, 并未深入, 有较多的问题需要解决。

在进行高耸结构的振动控制设计时, 某些特殊的情况下, 常规的矩形和圆形调谐液体阻尼器(Tuned Liquid Damper, TLD)无法满足建筑、工艺等

方面的要求, 环形 TLD 成为一些高耸结构振控制的首选^[9-11]。该类阻尼器的力学模型变量较多、并具有较高的非线性, 难以通过数学上严密的理论推导获得减振结构体系的最优闭合解, 因此, 有必要对其数值优化方法开展研究。

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是由美国密歇根大学的 John Henry Holland 教授于 1975 年提出的一类借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法^[12]。早在 20 世纪 90 年代, 它已被引入土木工程领域的结构优化当中^[13-14], 在结构优化设计^[14]、结构健康监测^[15-16]、结构振动控制^[17]等领域均取得了巨大的发展。无论是针对地震作用, 还是针对风荷载的振动控制系统的优化设计, GA 均能够取得不错的效果。

本文将结合满意度和 GA 各自的特点, 针对高耸结构环形 TLD 风振控制的满意优化设计方法开展研究。首先, 根据高耸结构和环形 TLD 的特点, 建立高耸结构环形 TLD 减振体系的动力方程, 进而编制程序进行求解。随后, 引入满意度原理和 GA, 提出采用 Sigmoid 函数作为独立满意度函数, 并采用加权满意度作为复合满意度, 从而建立高耸结构环形 TLD 风振控制的满意优化模型, 提出基于 GA 的风振控制满意优化方法。最后, 以某自立式高耸钢烟囱作为数值算例, 验证该方法的有效性, 并比较研究该方法对权重系数的敏感性。

1 高耸结构环形 TLD 减振体系

多数高耸结构可以采用等效集中质量模型进行模拟, 则安装环形 TLD 后的高耸结构亦可利用集中质量模型进行计算(如图 1)。针对图示模型, 高耸结构环形 TLD 减振的动力方程可表示为^[18]:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{P}(t) - \mathbf{H}\{\mathbf{F}_{\text{RS-TLD}}(t)\} \quad (1)$$

$$\ddot{x}_{dj}(t) + 2\zeta_{Lj}\omega_{Lj}\dot{x}_{dj}(t) + \omega_{Lj}^2x_{dj}(t) = -\{H_j\}^T\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} \quad (2)$$

$$F_{\text{RS-TLD},j} = M_{Lj}\{\ddot{x}_{dj}(t)F_{1j}d'_{1j}[1+k'_jR_{1j}(k'_j\sigma_{1j})] + (1+k'_j{}^2)\ddot{x}_k(t)\} \quad (3)$$

$$\omega_{Lj} = \sqrt{\frac{g_j}{a_j}\sigma_{1j}\tanh\left(\sigma_{1j}\frac{h_j}{a_j}\right)} \quad (4)$$

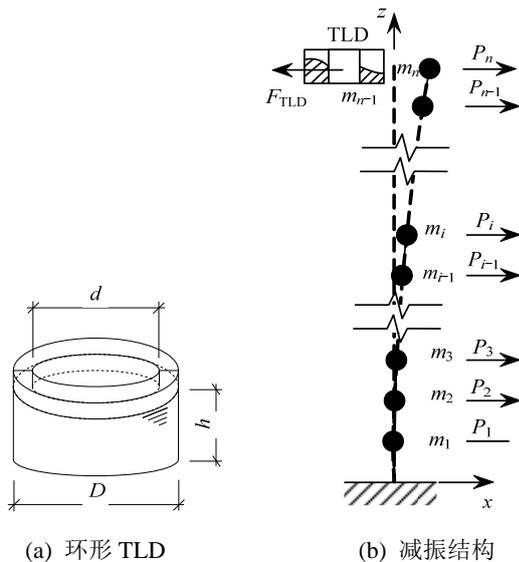
其中： M 、 C 、 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $P(t)$ 为外荷载向量； $x(t)$ 为位移向量。 j 为环形 TLD 编号， $j=1,2,\dots,m$ ； ζ_{Lj} 、 ω_{dj} 和 $F_{RS-TLD,j}$ 分别为第 j 个阻尼器的阻尼系数、圆频率和控制力； \ddot{x}_{dj} 、 \dot{x}_{dj} 和 x_{dj} 分别为第 j 个 TLD 的广义位移、速度和加速度； H 为 TMD 作用位置矩阵； a 为水箱外半径 $D/2$ ； r 为水箱径向坐标；

$$F_{1j} = \frac{1}{h_0 \sigma_{1j}} \tanh(\sigma_{1j} h_0), \quad h_0 = h/a; \quad M_{Lj} \text{ 为第 } j \text{ 个}$$

阻尼器中液体总质量； $J_1\left(\sigma_{1j} \frac{r}{a}\right)$ 、 $Y_1\left(\sigma_{1j} \frac{r}{a}\right)$ 分别为第一类和第二类一阶贝塞尔函数； R_{1j}^l 和 d'_{1j} 为计算参数； x_k 为第 j 个水箱安装处结构节点 k 的位移； σ_{1j} 为 $J_1'(\sigma_{1j})Y_1(k'_j \sigma_{1j}) - J_1'(k'_j \sigma_{1j})Y_1'(\sigma_{1j}) = 0$ 的解； k'_j 为圆环截面内外径的比值。当仅在顶部设置一个 TLD 时， $j=1$ 。水的波高可由下式求得^[12]：

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{g} \frac{\sigma_n}{\tanh\left(\sigma_n \frac{h}{a}\right)} x_{d,n}(t) - \frac{a}{g} x_k(t) \quad (5)$$

针对所建立的减振体系编制程序进行时域求解：在计算环形 TLD 出力相关参数时，采用 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno)秩 2 的拟牛顿法来处理其中的非线性方程；计算结构体系时域响应时，采用 Newmark- β 法进行求解。



(a) 环形 TLD (b) 减振结构
图 1 高耸结构环形 TLD 减振体系分析模型
Fig.1 Analyze model of high-rise structures with ring shape TLD

2 基于遗传算法的满意优化设计方法

2.1 遗传算法的基本原理

遗传算法是以种群中的所有个体为对象，模拟生物界遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算方法。它的基本遗传操作主要包括选择、交叉和变异三个算子，算法的基本步骤如图 2 所示。

- 1) 在优化问题的参数空间内，随机生成若干个由二进制或十进制编码的个体；
- 2) 评估当前种群中个体目标函数的适应度，并按照最优到最劣的顺序对个体进行排列；
- 3) 生成新的子代个体，常用的方式有：a) 两个父代个体通过交叉形成子代个体；b) 父代个体通过变异形成子代个体；c) 优良父代个体直接复制到子代个体中；
- 4) 将新种群作为当前种群，进行下一步迭代，重复第 2)、3)步，直至达到设定的停止条件；
- 5) 从当前种群中选取最优，返回结果。

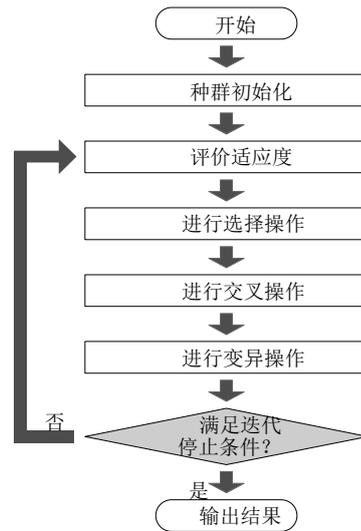


图 2 遗传算法基本计算流程
Fig.2 Flow chart of genetic algorithm

2.2 满意度基本原理

满意度是衡量人们在某一标准下对其选择满意程度的一种度量，任何能表示解的质量的量都可以用来表示满意度。满意问题求解步骤如图 3 所示，基本遵循一个从实际问题出发在回到实际问题过程，包括问题识别、模型建立、满意度设计、求解和评价等：

- 1) 问题的识别是指对满意问题的认知和归纳，从而决定满意问题推理的具体方式；
- 2) 模型建立包括模型的选择和建立两方面的

内容,是指采用适当的建模方法对问题进行描述,可以使用一些人工智能的方法,必要时还需添加模型修正的步骤;

3) 满意度设计是满意问题处理过程中的一个重要环节,针对不同的问题通常选用不同满意度函数,在选定满意度函数后,可根据问题的特点选择特定的方法得到不同的复合满意度(如平均满意度、组合满意度、幂级满意度等);

4) 求解与评价过程是根据具体问题选择方法对模型求解,并对求解结果进行评估。

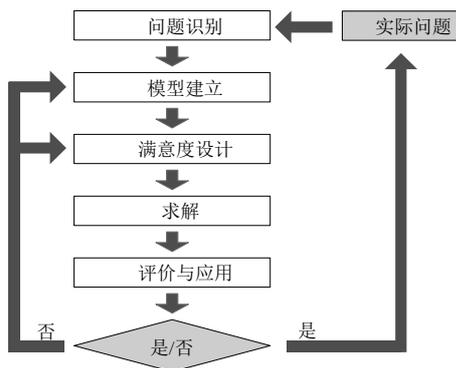


图3 满意问题的一般过程

Fig.3 General flow chart of desirability program

2.3 基于遗传算法的振动控制满意优化设计方法

不同结构振动控制问题的控制要求不同,但无论其具体要求如何,结构振动控制最终归结为对受控系统品质(如受控系统响应、阻尼特性等)以及控制成本的要求^[4]。而这两者随设计变量的变化趋势往往是不一致的,有时甚至是相反的(即更高的控制效果必须提高成本)。因此,这两类目标的权重选取在振动控制优化的过程中显得异常重要,不合理的权重选取有可能导致优化结果在某些方面无法满足实际工程设计的要求。

为此,本节引入满意度的概念,为每个独立目标 f_k 定义单个满意度(即独立满意度)。同时,为解决各目标间的不可公度,根据结构控制的具体要求,定义阈值 f_{k0} 并在独立满意度中体现,从而在保证结果“最优”的前提下,确保优化结果能够满足设计要求。

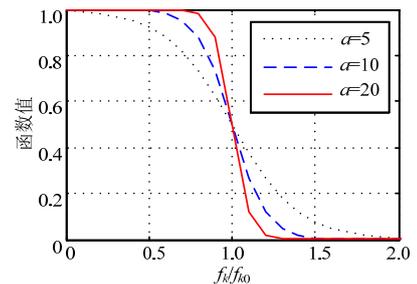
2.3.1 独立满意度

常用的满意度函数主要分为单调增函数和单调减函数,主要类型有:矩形函数、 Γ -函数、正态函数、折线形函数等。针对结构振动控制,考虑实际工程应用,对独立满意度的要求是:若 f_k 越大越好,则对应 $f_k \in (0, \infty)$, 满意度指标取值范围为(0,1)

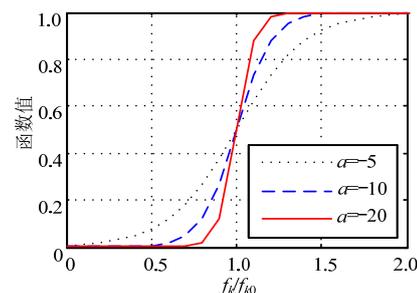
且单调递增,在 $f_k = f_{k0}$ 附近,满意度应快速变化,而当 $f_k > f_{k0}$ 时,已经满足工程要求,故为避免资源浪费,满意度应缓慢变化或基本不变;若 f_k 越小越好,则对应 $f_k \in (0, \infty)$, 满意度指标取值范围为(0,1)且单调递减,在 $f_k = f_{k0}$ 附近,满意度应快速变化,而当 $f_k < f_{k0}$ 时,已经满足工程要求,故为避免资源浪费,满意度应缓慢变化或基本不变。按照上述要求,选取 Sigmoid 函数作适当变形用作独立满意度函数:

$$S_k(x) = \frac{1}{1 + \exp(a(f_k(x) / f_{k0} - b))} \quad (6)$$

其中: $f_k(x)$ 为第 k 个目标函数值; f_{k0} 为第 k 个目标阈值; a 和 b 为调整函数形状的系数。当为最小值问题时, a 取正数;为最大值问题时,取负数。图4给出了不同取值时的满意度函数,其中图4(a)为 $b=1$, a 取正数时的函数值,图4(b)为 $b=1$, a 取负数时的函数值,可见通过调整 a 和 b 的数值,能够达到调节函数形状从而调节优化要求的目的,因此,式(6)所提的满意度函数是一种通用满意度函数。



(a) a 取正数



(b) a 取负数

图4 基于 Sigmoid 函数的满意度函数

Fig.4 Desirability function using Sigmoid function

2.3.2 复合满意度

由多个目标组成的多目标优化问题,其合成满意度称为复合满意度^[4]。得到复合满意度的方法很多,如:线性加权法、理想点法、极大极小法、目标达到法等。本文采用较为方便也是最为常用的线性加权法,则复合满意度可由下式定义:

$$S(x) = \sum_{k=1}^n w_k S_k(x) \quad (7)$$

其中, w_k 为由目标函数重要性不同选取的权重系数。

2.3.3 振动控制优化方法

由上述研究可见, 满意优化本质上是建立了一种对解的评价体系, 它本身并不能在解空间内进行搜索。因此, 用某种搜索算法与满意优化相结合, 由搜索算法在解空间中搜索出解, 再由满意优化模型来评估这些解, 进而指导搜索算法寻找满意度更高的解, 是进行满意优化的重要步骤。这类搜索算法很多, 绝大多数优化方法均可用于此处搜索满意解。本文选取其中应用较广的遗传算法与满意优化相结合, 由复合满意度替代遗传算法中的适应度函数, 利用遗传算法求得满意解, 基本分析流程如图 5 所示。

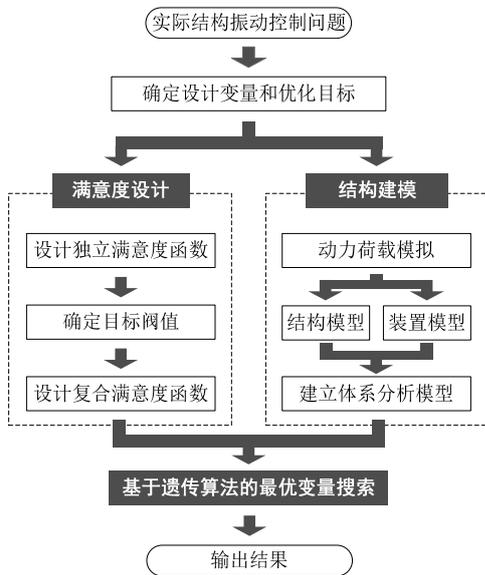


图 5 基于遗传算法的风振控制满意优化方法

Fig.5 Satisfaction optimum design methods of wind-induced vibration control system using GA

图中可见, 基于遗传算法和满意度的风振控制优化设计方法主要包括: 结构建模、满意度设计和变量搜索三个步骤。其中, 满意度设计过程中有三个步骤: 1) 根据实际工程中的设计变量和优化目标, 选择独立满意度函数; 2) 根据工程设计的要, 确定目标阈值; 3) 由独立满意度函数组成复合满意度函数。结构建模主要包括: 动力荷载模拟、结构模型建立、减振装置模型建立, 最终建立减振体系的分析模型。变量搜索采用遗传算法, 基本流程如图 2 所示。

3 数值算例分析

3.1 工程概况

选用某自立式高耸钢烟囱^[19]进行数值模拟的研究, 该烟囱基本结构信息见表 1, 烟囱外径沿高度不变均为 2.3 m, 外筒重 50080 kg, 保温隔热材料重 4954 kg, 内筒重 13592 kg, 其余附属结构合计 9628 kg。所处地区基本风速为 25 m/s, 地面粗糙度系数 0.015, 采用 Davenport 谱模拟风速。具体风荷载模拟方法参见文献[18]。

表 1 钢烟囱截面厚度

Table 1 Section depth of the steel chimney

高度/m	0~5	5~12.5	12.5~20	20~30	30~42.6	42.6~55.2	55.2~90
截面厚度/mm	18	16	14	12	10	8	6

3.2 环形 TLD 优化设计

首先, 建立高耸结构环形 TLD 控制的优化模型, 设计时环形 TLD 主要涉及其几何参数(如内径、外径、液面高度等)与性能参数(如振动频率、阻尼等), 由环形 TLD 的力学模型可知, 几何参数和性能参数的对应具有唯一性, 故本文直接采用几何参数进行优化, 优化模型如下:

$$\begin{cases} \text{求} X & X = [R_i, R_o, \xi_L, h]^T \\ \min & S(X) \\ \text{s.t.} & g_i(X) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, m \\ & g_j(X) = 0, \quad j=1, 2, \dots, m \\ & X_1 \leq X \leq X_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中: X 为设计变量; $S(X)$ 为复合满意度函数; R_i 为水箱内半径; R_o 为水箱外半径; ξ_L 为液体振动阻尼比; $g_j(X) \leq 0$ 为不等式约束条件, $g_j(X) = 0$ 为等式约束条件, 根据结构和环形 TLD 的特点确定。

高耸钢烟囱在风荷载作用下, 主要考虑结构应力对结构安全性的影响, 这与其顶点位移直接相关。而环形 TLD 在应用于钢烟囱时, 对液体振动的波高有一定的要求, 波高过大不但将增加装置的轮廓尺寸, 从而影响迎风面积, 而且可能改变环形 TLD 的振动模型。因此, 定义目标函数如下:

$$f_1(X) = 1 - |x_{n,w}|_{std} / |x_{n,wo}|_{std} \quad (9)$$

$$f_2(X) = |\eta|_{std} / h \quad (10)$$

其中: $|x_{n,wo}|_{std}$ 为风荷载作用下原结构顶点位移方

差; $|x_{n,w}|_{\text{std}}$ 为风荷载作用下环形 TLD 减振结构顶点位移方差; $|\eta|_{\text{std}}$ 为风荷载作用下液体振动波高的方差。可见, $f_1(X)$ 为结构响应控制目标, 数值越大, 满意度越高, 选取 Sigmoid 函数中的参数 $a=-10$, $b=1$; $f_2(X)$ 为减振装置限制目标, 数值越小, 满意度越高, 选取 Sigmoid 函数中的参数 $a=10$, $b=1$ 。

$$S_1 = \frac{1}{1 + \exp(-10(f_1 / f_{10} - 1))} \quad (11)$$

$$S_2 = \frac{1}{1 + \exp(10(f_2 / f_{20} - 1))} \quad (12)$$

其中: S_1 和 S_2 分别为 f_1 和 f_2 的独立满意度函数; f_{10} 和 f_{20} 分别为两个目标函数的阈值。采用线性加权法得到该问题的复合满意度为:

$$S = w_1 S_1 + w_2 S_2 \quad (13)$$

其中, w_1 和 w_2 分别为两个满意度函数的权重系数, 两者之和等于 1。

针对实际工程, 对模型做如下考虑: 1) 水箱设置于烟囱外部, 故水箱内半径大于烟囱外半径, 同时水箱内半径必然小于其外半径; 2) 水箱外径过大将影响烟囱迎风面积, 假定水箱外半径小于烟囱外半径的 1.5 倍; 3) 根据设计经验, 取液体高度小于 1 m; 4) 纯水的阻尼比较小, 考虑在水箱中采取措施增加阻尼比, 取液体阻尼比范围为 0.005~0.09; 5) 考虑算例实际应用时采用 TMD 的模式质量比为 0.1^[19], 故本次优化亦控制模式质量比为 0.1。具体约束数学表达见表 2, 其中, $R_{s,o}$ 为结构外径, m_i 为环形 TLD 液体质量, $M_{s,g}$ 为结构一阶模态质量。

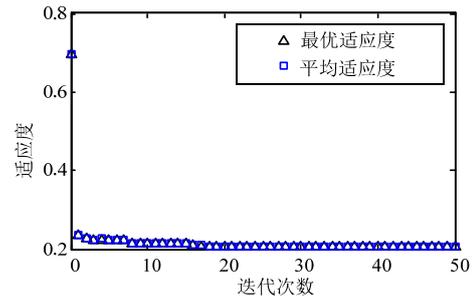
表 2 优化模型约束条件

Table 2 Constraints of the optimization model

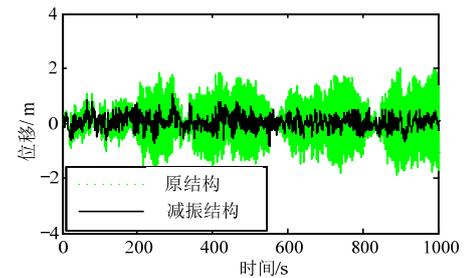
约束类型	表达式
线性约束	$R_o - R_i > 0.01R_{s,o}$
	$R_{s,o} + 0.005 < R_o < 1.5R_{s,o}$
	$R_{s,o} + 0.005 < R_i < 1.5R_{s,o}$
非线性约束	$0.005 < h < 1$
	$0.005 < \xi_L < 0.09$
	$m_i / M_{s,g} \leq 0.1$

取目标函数阈值分别为 0.5 和 0.1(其中前者反映控制效果, 后者反映液体波高), 种群数取 5, 最大迭代次数为 50, 迭代停止条件为 1×10^{-100} , 选择方式采用轮盘赌方法, 遗传迭代过程如图 6(a)所示, 可见采用遗传算法进行高耸结构 TLD 满意优化的收敛较快, 只需 50 次的迭代即能得到最优解。图 6(b)、图 6(c)和图 6(d)分别给出了取最优值时的结

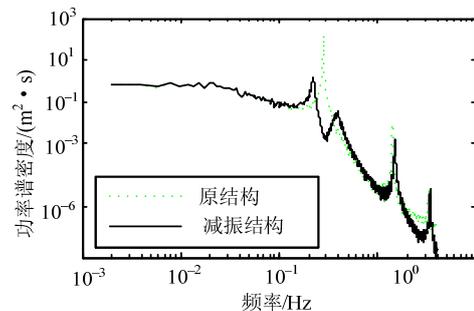
构顶点位移时程、功率谱密度和液体波高时程: 1) 此时, 目标函数 f_1 和 f_2 分别为 0.6820 和 0.1039, 基本满足阈值要求; 2) 通过优化得到的参数计算可知水的阻尼比取到优化限值的上限, 质量比接近上限 0.1, 前者是为了更好地控制水波高度, 后者是为了得到更大的控制力, 均与定性的分析相吻合。采用本文所提出的方法, 能够较好地计算 TLD 参数的满意优化解, 且能够控制相应的目标函数满足工程设计时所设的限值, 由此, 根据工程实际情况, 调整阈值即可得到满意的优化结果, 具有一定的实用性。



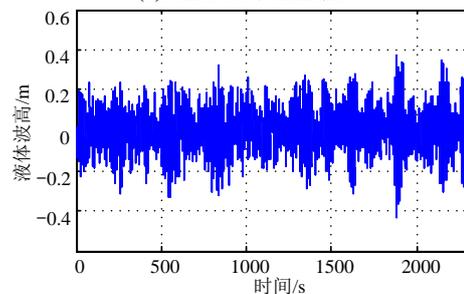
(a) 遗传迭代过程



(b) 位移时程曲线



(c) 位移功率谱密度



(d) 液体波高时程

图 6 环形 TLD 优化设计

Fig.6 Optimum design of ring-shape TLD

3.3 结果变异性分析

为了比较满意优化与常规优化方法的差别，改变权重系数组合，进行优化分析，并对各组优化结果的变异性进行分析。为便于比较，定义目标函数变异系数(Coefficient Variation, CV)为：

$$CV_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (f_{i,j} - \bar{f}_i)^2 / n}{\bar{f}_i}} \quad (14)$$

其中： CV_i 为第 i 目标函数的变异系数；下标 i 和 j 分别代表目标函数编号和权重系数组合编号； $f_{i,j}$ 为第 j 组权重系数组合时，第 i 个目标函数值； n 为权重系数组合的总组数。

图 7 给出了不同权重系数组合下，各优化目标的数值(具体取值见附表 1 和附表 2)，横坐标“19”代表权重系数 $w_1=0.1$ 且 $w_2=0.9$ ，其余横坐标含义类同。可见，随着权重系数的变化，最终优化结果变化较大，因此，需慎重选择权重系数的取值。图 8 给出了采用不同优化方法时，各目标函数的变异系数：1) 对于减振效果，满意优化方法的变异系数为 0.0421 略小于普通优化方法的 0.0566；2) 对于液体波高，满意优化方法的变异系数不到 0.05，远小于普通优化方法的 0.24；可见，满意优化的方法能够在一定程度上提高优化对权重系数的鲁棒性，确保优化结果能够达到设计阈值的要求。

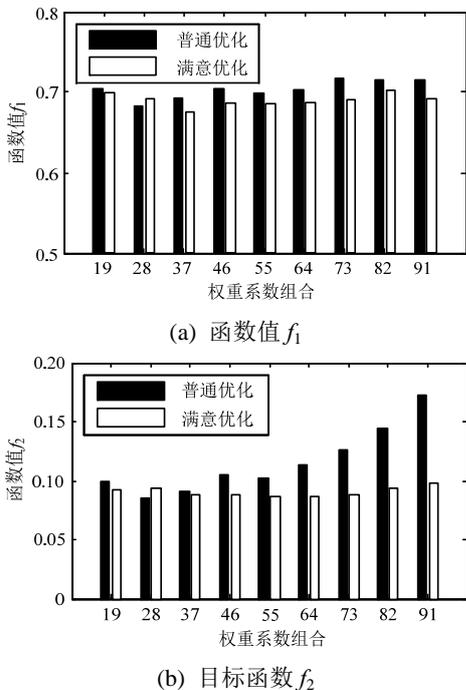


图 7 不同权重系数组合的目标函数值

Fig.7 Optimal results of objective functions with different weight coefficients

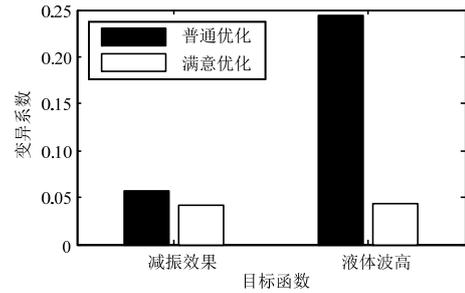


图 8 不同优化方法的目标变异系数

Fig.8 Variation coefficients of the objectives using different optimal methods

4 结论

本文提出了基于遗传算法(GA)的结构减振满意优化设计方法，编制了高耸结构环形 TLD 风振分析程序和基于遗传算法的满意优化设计程序，进而针对高耸结构环形 TLD 风振控制设计问题，开展了该方法的应用研究，结果表明：

(1) 基于遗传算法的减振满意优化设计方法能够应用于高耸结构的风振控制，数值算例表明遗传进化 50 代以上即能得到令人满意的优化结果。

(2) 与普通优化设计方法相比，不同权重组合下，满意优化设计的结果变异系数仅为 0.05，远小于普通优化设计的 0.24，且优化结果始终稳定于工程设计的满意解，一定程度上降低了多目标优化时，权重系数选择的难度。

参考文献：

- [1] 李宏男, 井秦阳, 王立长, 等. 利用浅水水箱作为阻尼器的大连国贸大厦减振控制研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(6): 733—740.
Li Hongnan, Jing Qinyang, Wang Lichang, et al. Wind-induced vibration control of Dalian international trade center using tuned liquid dampers [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(6): 733—740. (in Chinese)
- [2] Lu X L, Chen J R. Parameter optimization and structural design of tuned mass damper for Shanghai centre tower [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011, 20(4SI): 453—471.
- [3] Chung L L, Wu L Y, Yang Csw, et al. Optimal design formulas for viscous tuned mass dampers in wind-excited structures [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2013, 20(3): 320—336.
- [4] 任文敏, 汪正兴. 结构振动控制参数多目标满意优化方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(5): 714—717.
Ren Wenmin, Wang Zhengxing. Multiple objective satisfaction optimization for structural vibration control [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(5): 714—717. (in Chinese)

- [5] 赫伯特·西蒙. 管理决策新科学[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1982: 73—91.
Simon H A. The new science of management decision [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 1982: 73—91. (in Chinese)
- [6] 黄洪钟, 姚新胜, 周仲荣. 满意度原理研究与应用的现状与展望[J]. 控制与决策, 2003, 18(6): 641—645.
Huang Hongzhong, Yao Xinsheng, Zhou Zhongrong. Review of the satisfactory degree theory and its applications [J]. Control and Decision, 2003, 18(6): 641—645. (in Chinese)
- [7] 王光远, 陈树勋. 工程结构系统软设计理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 52—89.
Wang Guangyuan, Chen Shuxun. Theory and applications of soft design in engineering structure and system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 52—89. (in Chinese)
- [8] 丁大钧. 满意优化解[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 529—533.
Ding Dajun. Satisfactory optimum solutions [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 529—533. (in Chinese)
- [9] 陈鑫. 高耸烟囱风振控制理论与试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2012: 13—15.
Chen Xin. Theoretical and experimental study on vibration control of high-rise steel chimneys under wind load [D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 13—15. (in Chinese)
- [10] 瞿伟廉, 李秋胜, 宋波, 等. 圆环形深水TLD对电视塔风振反应控制的试验与研究[J]. 特种结构, 1995, 12(3): 47—50.
Qu Weilian, Li Qiusheng, Song Bo, et al. Experiment and research for controlling wind vibration responses of TV tower with ring-shape deep water TLD [J]. Special Structures, 1995, 12(3): 47—50. (in Chinese)
- [11] 钱稼茹, Warnitchai P, 丁雄. 环形调频液体阻尼器(TLD)的计算模型[J]. 工程力学, 1995, 12(4): 36—46.
Qian Jiaru, Warnitchai P, Ding Xiong. Modelling of liquid sloshing in the annular region for damper application [J]. Engineering Mechanics, 1995, 12(4): 36—46. (in Chinese)
- [12] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975: 141—157.
- [13] Keane A J. Passive vibration control via unusual geometries: the application of genetic algorithm optimization to structural design [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185(3): 441—453.
- [14] Koumoussis V K, Georgiou P G. Genetic algorithms in discrete optimization of steel truss roofs [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1994, 8(3): 309—325.
- [15] Wang G S. Application of hybrid genetic algorithm to system identification [J]. Structural Control & Health Monitoring, 2009, 16(2): 125—153.
- [16] 伊廷华, 李宏男, 顾明. 基于模型缩聚的广州新电视塔传感器优化布置研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 55—61.
Yi Tinghua, Li Hongnan, Gu Ming. Research on optimal sensor placement of Guangzhou New TV Tower based on model reduction [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 55—61. (in Chinese)
- [17] 徐庆阳, 李爱群, 丁幼亮, 等. 基于改进遗传算法的大跨机库柱间消能支撑的位置优化研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 35—43.
Xu Qingyang, Li Aiqun, Ding Youliang, et al. Research on location optimization of energy dissipation braces between columns of long-span hangar based on improved genetic algorithm [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 35—43. (in Chinese)
- [18] 陈鑫, 李爱群, 张志强, 等. 高耸结构环形TLD控制的多目标遗传优化设计[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 73—81.
Chen Xin, Li Aiqun, Zhang Zhiqiang, et al. Optimum design of ring-shape TLD control for high-rise structure using multi-objective genetic algorithm [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 73—81. (in Chinese)
- [19] Pår Tranvik, Göran Alpsten. Dynamic behaviour under wind loading of a 90m steel chimney [R]. Växjö: Alstom Power Sweden AB, 2002. (<http://www.stbk.se/S01041-Report.pdf>, 2014-2-28).

附录:

附表1 满意优化设计结果对比

权重 系数组合	最优变量值				最优 目标值	
	水箱内 半径 R_i	水箱外 半径 R_o	液体 高度 h	液体 阻尼比 ξ_r	$f_1(X)$	$f_2(X)$
19	1.36	1.53	1.00	0.09	0.66	0.09
28	1.27	1.46	0.97	0.09	0.63	0.09
37	1.23	1.42	1.00	0.09	0.58	0.09
46	1.26	1.45	1.00	0.09	0.62	0.09
55	1.21	1.40	1.00	0.09	0.61	0.09
64	1.23	1.42	1.00	0.09	0.62	0.09
73	1.25	1.44	1.00	0.09	0.63	0.09
82	1.38	1.55	1.00	0.09	0.67	0.09
91	1.46	1.62	1.00	0.09	0.63	0.10

附表2 普通优化设计结果对比

权重 系数组合	最优变量值				最优 目标值	
	水箱内 半径 R_i	水箱外 半径 R_o	液体 高度 h	液体 阻尼比 ξ_r	$f_1(X)$	$f_2(X)$
19	1.48	1.64	1.00	0.09	0.67	0.10
28	1.22	1.41	1.00	0.09	0.60	0.08
37	1.29	1.48	1.00	0.09	0.64	0.09
46	1.57	1.72	1.00	0.09	0.67	0.10
55	1.56	1.71	1.00	0.09	0.66	0.10
64	1.61	1.72	1.00	0.09	0.67	0.11
73	1.59	1.72	0.91	0.09	0.72	0.13
82	1.59	1.72	0.84	0.09	0.71	0.14
91	1.55	1.72	0.73	0.09	0.71	0.17