

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.019

基于模糊理论的高拱坝体型多目标优化设计

陈 忠^{1,2}, 谢能刚³, 王 璐³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中天建设集团, 浙江 杭州 310008;
3. 安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:综合考虑静力荷载作用下双曲拱坝的经济性与安全性, 采用坝体体积作为经济目标函数, 坝体最大主拉应力作为拱坝局部区域的安全目标函数, 整体应变能作为拱坝整体安全目标函数, 建立高拱坝体型的三目标优化设计模型。根据模糊数学理论, 计算海明距离、贴近度和关联度, 对这些指标进行加权建立模糊评价函数。以某拟建拱坝为例进行了优化设计, 结果表明, 模糊优化体型在多个目标函数上改善效果较明显。体积方量减少了 25.03 万 m^3 , 占总体积量的 3.63%; 最大主拉应力小了 0.70 MPa, 降低 6.05%; 应变能下降了 0.082 GJ, 下降 2.20%。

关键词:拱坝; 体型优化; 多目标; 模糊优化

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)03-0330-05

双曲拱坝是一个形状复杂的空间壳体, 具有安全、经济等优点, 是水利工程中的主要坝型。随着国内外拱坝技术的迅速发展, 双曲拱坝的体型也趋于多样化, 为了获得比较合理的体型, 需要对拱坝体型进行设计。拱坝体型设计主要采用拱坝优化技术。现有的拱坝优化设计大都采用单目标(主要是经济性目标)优化模式, 随着拱坝建设事业的发展, 拱坝的高度越来越高, 建坝坝址的地形地质条件比较好的已开发, 拟开发的则比较复杂, 所以拱坝的安全性成为重要的设计目标。因此, 为确保高拱坝的安全性与经济性, 应开展拱坝体型多目标优化设计研究。

孙文俊等^[1]选取通常情况下拱坝安全和经济的最具代表性的主要因素——最大拉应力和坝体体积, 以使其最小作为优化设计的目标, 研究了考虑拱坝“体积最小”和“最大拉应力最小”的两目标体型优化设计问题, 即首先采用线性加权的统一目标法寻求非劣解(有效解), 然后利用模糊贴近度的概念从众多非劣解中找出最贴近于理想解的最优解。汪树玉等^[2]提出了以经济性指标(如坝体方量 V)和安全性指标(应力水平 $[\sigma]$ 、强度失效概率 F 和高应力区范围 H)作为优化的多个目标函数的设想, 认为多目标优化采用理想点法, 通过对各分目标的权系数调整, 可提供反映设计者要求的多个解方案。厉易生^[3]提出了拱坝安全和经济双目标优化的两步法, 即:(a)求出有效点集;(b)在有效点集中通过允许应力专题研究、专家评审和图解法 3 种方法选取最优设计方案。谢能刚等^[4]综合考虑拱坝的安全性和经济性, 利用模糊理论提出了拉应力满意度目标函数和多目标优化设计的评价函数, 并以小湾拱坝为例, 进行了体型多目标模糊优化设计。孙扬镛^[5]考虑到拱坝实际工程中约束条件和目标函数常常存在不确定性, 提出了多目标模糊全局优化设计方法, 并应用于拱坝体型设计。

本文首先综合考虑静力荷载作用下双曲拱坝的经济性与安全性, 采用坝体体积作为经济目标函数, 坝体最大主拉应力作为拱坝局部区域的安全目标函数, 整体应变能作为拱坝整体安全目标函数, 建立了高拱坝体型的三目标优化设计模型, 然后根据模糊数学理论, 采用海明距离、贴近度和关联度等指标建立了模糊评价函数, 并对某拟建拱坝进行了多目标优化。

1 拱坝体型多目标优化设计数学模型

1.1 一般描述

拱坝体型多目标优化设计是在类型、材料、布局已定的条件下, 对拱坝几何形状进行优化设计, 本文以描

述拱坝形状的几何特征量作为设计变量,采用表征拱坝经济性和安全性的指标作为多目标函数,约束条件包括几何约束、应力约束、稳定约束和体积约束等.拱坝体型多目标优化设计模型为

求设计变量

使目标函数

约束条件(s.t.)

$X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$

$\min F(X) = (f_1(X), f_2(X), \cdots, f_m(X))$

体积约束

几何约束

应力约束

稳定约束

$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$ (拱坝体积不超过容许值)

$\begin{cases} T_{\min} \leq T \leq T_{\max} & (\text{拱圈厚度不超过容许值}) \\ K_u \leq [K_u] & (\text{上游倒悬度不超过容许值}) \\ K_d \leq [K_d] & (\text{下游倒悬度不超过容许值}) \end{cases}$

$\begin{cases} \sigma_{\max} \leq [\sigma_{\max}] & (\text{最大主拉应力不超过容许值}) \\ \sigma_{\min} \geq [\sigma_{\min}] & (\text{最大主压应力不超过容许值}) \end{cases}$

$\varphi_{\max} \leq [\varphi_{\max}]$ (最大中心角不超过容许值)

(1)

1.2 目标函数

拱坝体型优化设计中的经济性目标,一般采用筑坝总费用指标,主要包括基础开挖费用(基础开挖量)和坝体费用(坝体混凝土方量),如果因体型变化而引起的基础开挖量变化较小,则可直接采用坝体混凝土方量指标.关于拱坝安全性目标的选择,主要有以下几种:(a)最大主拉应力指标^[6];(b)拉应力区的范围^[4];(c)以拱坝安全水平系数为代表的整体安全度指标^[7];(d)抗屈折稳定指标^[8];(e)能量指标^[9].另外还有坝体的超载系数、强度失效概率和大坝位移等^[10].本文的多目标优化设计采用以下 3 个目标:

a. 坝体体积 V 为经济目标,即

$$f_1(X) = V$$

(2)

b. 坝体最大主拉应力为拱坝局部区域的安全目标,即

$$f_2(X) = \max_v(\sigma_1)$$

(3)

c. 坝体结构应变能 U 为拱坝整体安全目标,即

$$f_3(X) = U = \frac{1}{2} \delta^T K \delta$$

(4)

式中 δ ——坝体整体结点位移列阵; K ——整体刚度矩阵.

2 多目标评价函数

在多目标优化设计中,传统的解决方法是借助几何或应用中的直观背景,构造评价函数,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题,然后再利用单目标优化问题的求解方法求出最优解,并将这种解作为多目标优化问题的非劣解.构造评价函数的主要方法有目标法、线性加权和法、理想点法、平方和加权法、分目标乘法、极大极小法和几何平均法等.

由于各目标函数 $f_i(X)$ 可能的最小值 $f_{\min i}$ 受约束条件的影响,而它可能的最大值 $f_{\max i}$ 又受其余目标函数极小点的影响,因此,在约束条件和其他目标的限制下,各目标函数本身具有模糊性,其值在某一区间内变化,这一变化区间是构造各目标函数模糊隶属度的条件.

2.1 各目标函数 $f_i(X)$ 的隶属函数构造过程

a. 求各单目标函数 $f_i(X)$ 的最小值,即对 m 个目标进行单目标优化,解记为 $X_i^* (i = 1, 2, \cdots, m)$.

b. 确定各目标函数的可能最小值和最大值为

$$\begin{cases} f_{\min i} = \min_l f_i(X_l^*) = f_i(X_i^*) \\ f_{\max i} = \max_l f_i(X_l^*) \end{cases} \quad (i, l = 1, 2, \cdots, m)$$

(5)

c. 定义各目标的隶属函数,取线性分布为

$$u_i(X) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \leq f_{\min i} \\ \frac{f_{\max i} - f_i(X)}{f_{\max i} - f_{\min i}} & f_{\min i} < f_i(X) \leq f_{\max i} \\ 0 & f_i(X) > f_{\max i} \end{cases}$$

(6)

此外还有抛物线型和指数型等.

2.2 多目标优化设计的模糊评价函数构造方法

根据模糊数学理论,可得到一些反映优化程度的指标,即海明距离、贴近度和关联度,以此建立的模糊评价函数

$$\max E(X)=\lambda_d(1-d(X))+\lambda_r r(X)+\lambda_\zeta \zeta(X)$$

(7)

式中 $\lambda_d, \lambda_r, \lambda_\zeta$ 为权系数.

海明距离为

$$d(X)=\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m\left|u_i(X)-1\right|$$

(8)

贴近度为

$$r(X)=2 \sum_{i=1}^m \frac{u_i(X)}{m+\sum_{i=1}^m u_i(X)}$$

(9)

关联度为

$$\zeta(X)=\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min _i\left|1-u_i(X)\right|+0.5 \max _i\left|1-u_i(X)\right|}{\left|1-u_i(X)\right|+0.5 \max _i\left|1-u_i(X)\right|}$$

(10)

3 算例分析

某拟建拱坝,体型采用抛物线型,坝底高程 550.0 m,最大坝高 277.0 m. 上游正常蓄水位 820.0 m,坝体混凝土静弹性模量 21 GPa,泊松比 0.167,密度 2.4 t/m³. 结构重分析采用有限单元法,单元形式采用二十结点六面体等参元和十五结点五面体等参元,沿坝厚方向布置 2 层单元,沿坝高方向布置 5 层单元,结点总数 819,单元总数 128,坝体单元总数 80. 设计工况为“正常蓄水位+自重+泥沙压力+温降+下游垫塘水位”. 拱坝的上游面曲线及拱冠梁厚度用三次曲线模拟,其余几何特征量均用拉格朗日插值公式模拟,设计变量 39 个,其分布及初始设计体型取值见文献[9]. 约束条件为:(a)上游倒悬度 $K_u \leq 0.35$;(b)下游倒悬度 $K_d \leq 0.30$;(c)拱圈厚度约束 ;(d)最大中心角 $(\varphi_L+\varphi_R)_{\max } < 100^{\circ}$;(e)主压应力允许值 $[\sigma]_{\min }=-18.0$ MPa. 权系数取

$$\lambda_d=\lambda_r=\lambda_\zeta=\frac{1}{3}.$$

多目标模糊优化体型与初始体型的主要技术参数对比见表 1,体型参数见表 2. 拱冠梁断面形状比较见图 1,初始体型与优化体型上游面、下游面单元应变能对比见图 2 和图 3,上游面主拉应力等值线对比见图 4,下游面主压应力等值线对比见图 5.

表 1 某拟建拱坝主要技术参数比较

Table 1 Comparison of main technical parameters of initial and optimization shapes for an arch dam

体型	体积/ 万 m ³	应变能/ GJ	最大主拉 应力/MPa	最大主压 应力/MPa	最大顺河 向位移/cm	K_u	K_d
初始体型	689.26	3.733	11.57	-13.61	11.04	0.254	0.048
模糊体型	664.23	3.651	10.87	-17.76	10.36	0.176	0.233

表 2 某拟建拱坝模糊优化体型参数

Table 2 Parameters of fuzzy optimization shape for an arch dam

高程/m	拱冠梁参数/m		拱端厚度/m		半中心角/(°)		拱轴线拱冠曲率半径/m	
	上游面坐标		厚度		左岸	右岸	左岸	右岸
827.0	0.000	19.471	22.317	21.029	35.735	49.493	507.193	223.573
780.0	-24.448	35.006	27.631	30.853	49.112	43.135	283.341	263.790
740.0	-38.006	44.232	47.216	47.664	53.261	36.507	221.577	321.548
690.0	-46.966	52.077	52.524	64.876	45.736	52.538	251.244	171.980
640.0	-48.625	57.501	79.614	60.299	54.864	37.468	148.058	259.574
600.0	-45.829	61.307	79.707	83.588	40.030	32.952	196.097	251.773
570.0	-41.894	64.453	77.785	73.938	23.309	24.241	284.720	273.876
550.0	-38.598	66.906	77.885	66.222	19.550	10.946	145.393	267.472

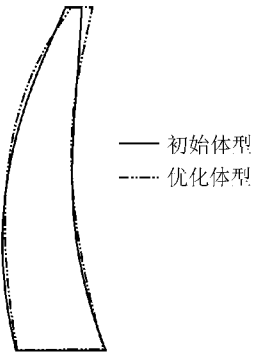


图 1 拱冠梁断面形状

Fig. 1 Cross section of arch crown cantilever

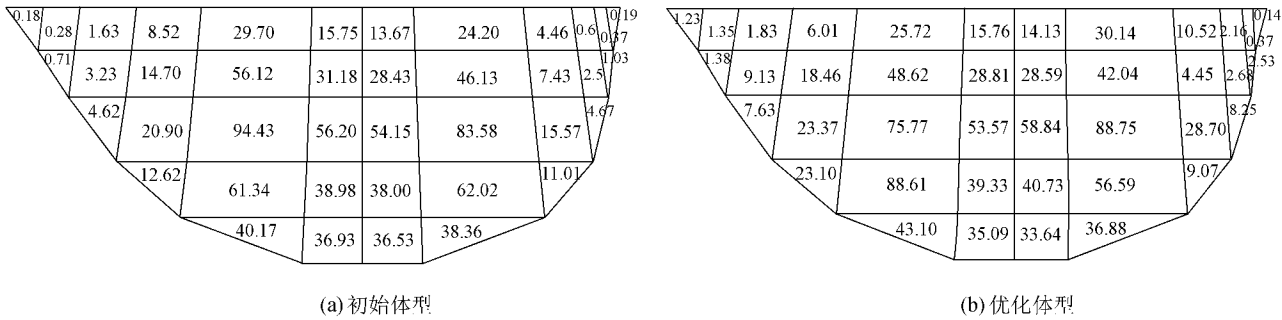


图 2 上游面单元应变能(单位 MJ)
Fig. 2 Unit strain energy on upstream surface (unit :MJ)

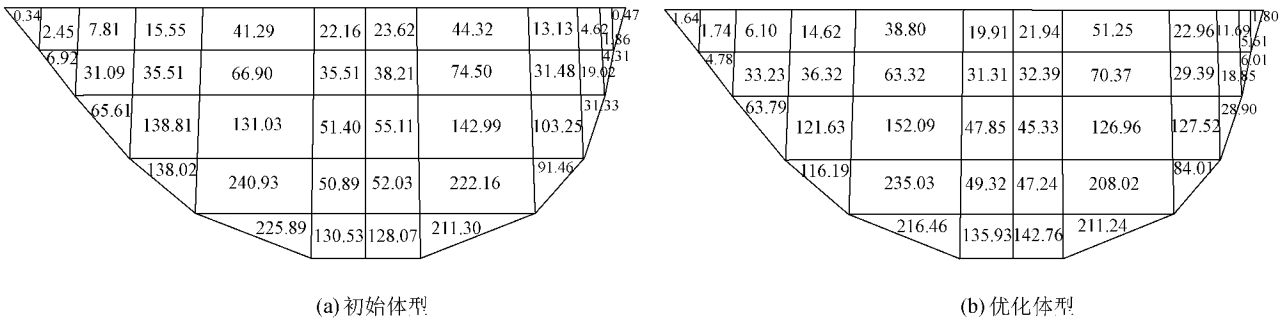


图 3 下游面单元应变能(单位 MJ)
Fig. 3 Unit strain energy on downstream surface (unit :MJ)

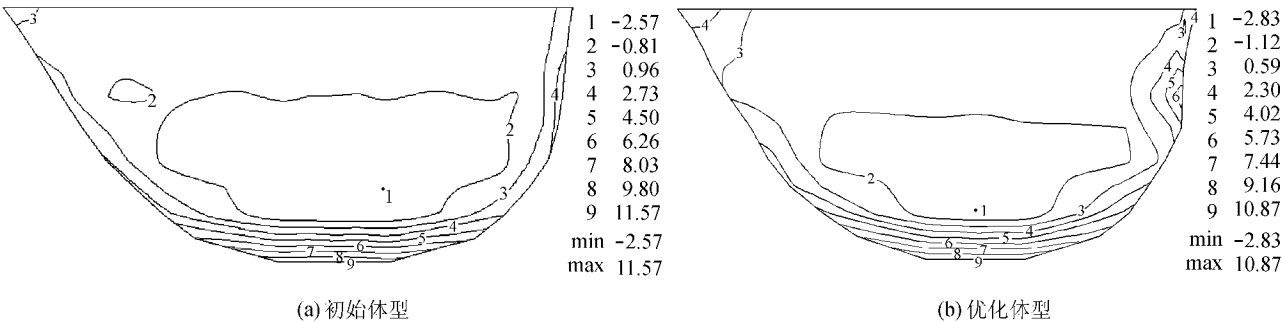


图 4 上游面主拉应力等值线(单位 MPa)
Fig. 4 Contours of principal tensile stress on upstream surface (unit :MPa)

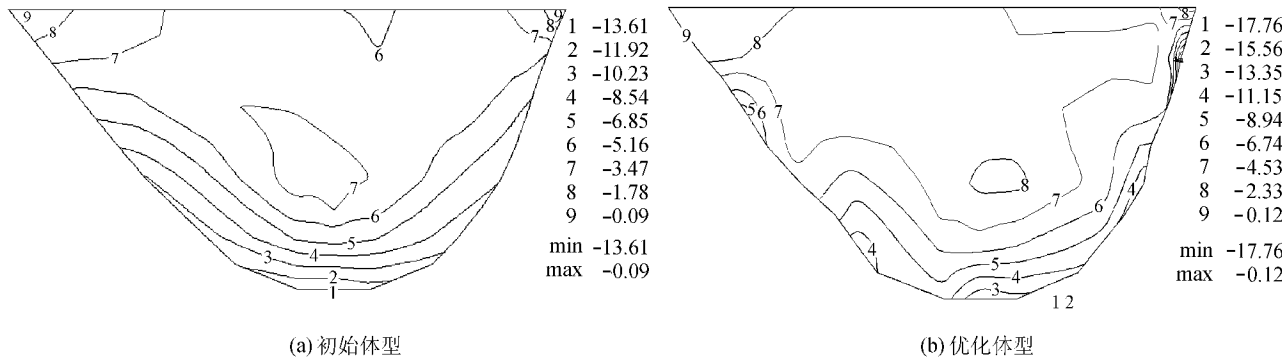


图 5 下游面主压应力等值线(单位 MPa)
Fig. 5 Contours of principal compressive stress on downstream surface (unit :MPa)

4 结 语

本文应用模糊方法对某拟建高拱坝体型进行了多目标优化,建立了多目标优化设计的模糊评价函数,多目标模糊优化结果显示 坝体混凝土方量减少 25.03 万 m^3 坝踵最大主拉应力降低了 0.70 MPa 应变能下降了 0.082 GJ.综合以上结果,基于模糊理论的高拱坝体型多目标优化设计效果比较明显.

参考文献:

- [1] 孙文俊,孙林松,王德信,等.拱坝体型的两目标优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(3):39-43.
- [2] 汪树玉,刘国华,杜王盖,等.拱坝多目标优化的研究与应用[J].水利学报,2001,32(10):48-53.
- [3] 厉易生.双目标优化的有效点集及拱坝双目标优化[J].水力发电,1998(11):10-14.
- [4] 谢能刚,孙林松,王德信.拱坝体型的多目标模糊优化设计[J].计算力学学报,2002,19(2):192-194.
- [5] 孙扬镛.多目标模糊全局优化设计方法和软件[J].水电站设计,1994(2):25-30.
- [6] 金海,林皋,阳明盛.以应力为目标的拱坝体型优化线性规划模型[J].水利水运工程学报,2005(1):8-14.
- [7] 朱伯芳.混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数[J].水利水电技术,2000,31(8):1-3.
- [8] 任青文,王柏乐.关于拱坝柔度系数的讨论[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):1-4.
- [9] 谢能刚,孙林松,赵雷,等.基于应变能的拱坝体型优化设计[J].水利学报,2006,37(11):1342-1348.
- [10] 孙林松,张伟华,谢能刚.基于博弈理论的拱坝体型多目标优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(4):392-396.

Multi-objective shape optimization design of high arch dams based on fuzzy theory

CHEN Zhong^{1,2}, XIE Neng-gang³, WANG-Lu³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Zhongtian Construction Group Co., Hangzhou 310008, China ;

3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract : The economy and safety of double curvature arch dams under the static load were comprehensively considered. The dam volume, the maximum principle tensile stress, and the integral strain energy were regarded as the economic objective function, the local safety objective function, and the integral safety objective function, respectively. On such a basis, a tri-objective optimization design model for high arch dams was established. According to the theories of the fuzzy mathematics, the hamming distance, closeness degree and correlation degree were calculated, and the fuzzy evaluation function was established according to the weight of those indices. An arch dam was considered for its optimization design. The results show that the after the shape optimization design, the dam volume is reduced by $25.03 \times 10^4 \text{ m}^3$, 3.63% of the total volume ; the maximum principle tensile stress is reduced by 0.70 MPa, 6.05% of the total stress ; and the strain energy of the dam is reduced by 0.082 GJ, 2.20% of the total energy. The improvement efficiency of multi-objective functions is obvious.

Key words : arch dam ; shape optimization ; multi-objective ; fuzzy optimization