

基于博弈理论的拱坝体形多目标优化设计

孙林松¹, 张伟华¹, 谢能刚²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009 2. 安徽工业大学力学系, 安徽 马鞍山 243002)

摘要 以坝体体积、最大主应力、高应力区范围为目标函数, 建立了拱坝体形多目标优化模型. 根据多目标优化设计问题与经济学中博弈问题之间的相似性, 将多目标优化中的各分目标函数看成博弈方, 所有可行解就是博弈策略集, 从而提出了拱坝体形多目标优化设计问题的合作博弈方法. 白鹤滩拱坝体形优化设计结果表明, 该方法比传统的多目标优化方法(如线性加权法和理想点法)更能综合反映各优化目标的要求, 优化结果更加合理, 并具有较高的计算效率.

关键词 拱坝; 多目标优化; 合作博弈

中图分类号 TV642.4

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2006)04-0392-05

经过近 30 年的发展, 拱坝体形优化设计研究已经取得了很大进展, 研究工作也逐步从单目标优化向多目标优化过渡. 文献[1]讨论了拱坝最经济模型与最安全模型的等价性问题, 并建立了兼顾坝的安全性与经济性的双目标优化模型. 文献[2]提出了基于有效点集的双目标优化模型^[1]的几种实用解法. 文献[3]利用模糊理论研究了拱坝双目标优化问题的求解方法, 并建议根据模糊贴近度从非劣解中确定最优解. 文献[4]讨论了拱坝多目标优化问题的柔性建模方法, 并用理想点法求解了拱坝多目标优化问题. 文献[5]建立了静、动力荷载作用下拱坝体形多目标优化模型, 并提出了模糊评价函数解法. 本文根据多目标优化设计问题与经济学中博弈问题之间的相似性, 提出了拱坝体形多目标优化设计问题的博弈方法, 并结合工程实例进行了讨论.

1 拱坝多目标优化设计的数学模型

1.1 多目标优化问题的一般描述

多目标优化设计的数学模型一般可表示为

$$\begin{cases} \min & F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X))^T \\ \text{s. t.} & g_j(X) \leq 0 (j = 1, 2, \dots, p) \\ & h_k(X) = 0 (k = 1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F(X)$ ——目标函数向量, 其元素是 m 个标量分目标函数; X ——由设计变量组成的向量, 在拱坝体形优化设计中一般取描述拱坝形状的几何参数为设计变量; $g_j(X)$ ($j = 1, 2, \dots, p$)——不等式约束函数; $h_k(X)$ ($k = 1, 2, \dots, q$)——等式约束函数, 在拱坝体形优化设计中一般不存在等式约束.

1.2 拱坝优化的多目标函数

拱坝优化设计中的目标函数主要可分为经济性目标与安全性目标 2 类, 其中经济性目标比较简单, 常采用坝体体积作为目标函数. 安全性目标则相对比较复杂, 用得较多的是最大主应力^[6], 但最大主应力反映的只是局部应力状态, 还不能完全反映拱坝的整体安全性. 在同样的应力水平下, 高应力区范围较大的显然比范围较小的更危险, 因此, 可以将高应力区大小作为拱坝的安全性指标. 为了便于不同设计方案之间的比较, 本文取高拉应力区最大深度与相应坝厚的比值(即最大相对深度)为目标函数. 所以, 在拱坝体形优化设计中取如下分目标函数:

$$\begin{cases} f_1(X) = V \\ f_2(X) = \sigma_{\text{tmax}} \\ f_3(X) = \sigma_{\text{cmax}} \\ f_4(X) = d_{\text{max}} \end{cases} \tag{2}$$

式中： V ——拱坝的体积； $\sigma_{\text{tmax}}, \sigma_{\text{cmax}}$ ——坝体最大主拉应力与最大主压应力（取绝对值）； d_{max} ——建基面高拉应力区最大相对深度。

上述 4 个目标函数的量纲不同,数值大小也相差甚远,因此对其作规格化处理,取

$$\begin{cases} f_1(X) = V/[V] \\ f_2(X) = \sigma_{\text{tmax}}/[\sigma_{\text{t}}] \\ f_3(X) = \sigma_{\text{cmax}}/[\sigma_{\text{c}}] \\ f_4(X) = d_{\text{max}}/[d] \end{cases} \tag{3}$$

式中 $[V], [\sigma_{\text{t}}], [\sigma_{\text{c}}]$ 和 $[d]$ 为相应变量的容许最大值,可根据设计规范或参照初始设计方案确定。

2 多目标优化的博弈论方法

2.1 多目标优化问题的一般解法

对于多目标优化问题,目前已提出不少解法,如评价函数法、分层序列法以及约束法。评价函数法中常用的有线性加权法和理想点法等^[7]。

线性加权法把式(1)中各个分目标函数 $f_i(X)$ 分别乘以权系数 w_i 再求和,得到评价函数

$$E(X) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(X) \tag{4}$$

这样,就把多目标优化问题转化为单目标优化问题

$$\begin{cases} \min & E(X) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(X) \\ \text{s. t.} & g_j(X) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, p) \\ & h_k(X) = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots, q) \end{cases} \tag{5}$$

理想点法先求解 m 个单目标优化问题

$$\begin{cases} \min & f_i(X) \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \\ \text{s. t.} & g_j(X) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, p) \\ & h_k(X) = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots, q) \end{cases} \tag{6}$$

设最优解及相应目标函数值为 $X_i^*, f_i^* = f_i(X_i^*) (i = 1, 2, \cdots, m)$ 。在目标函数空间,称点 $(f_1^*, f_2^*, \cdots, f_m^*)$ 为理想点,一般来说,由于各分目标之间相互冲突,并不能达到理想点,定义设计点到理想点的距离为评价函数,即

$$E(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^m [f_i(X) - f_i^*]^2} \tag{7}$$

求单目标优化问题

$$\begin{cases} \min & E(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^m [f_i(X) - f_i^*]^2} \\ \text{s. t.} & g_j(X) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, p) \\ & h_k(X) = 0 \quad (k = 1, 2, \cdots, q) \end{cases} \tag{8}$$

的最优解,记为 $\bar{X}$,即作为原问题式(1)的解。

2.2 多目标优化的合作博弈模型与 Nash 仲裁解法

博弈论是解决利益冲突问题的有效方法,可以分为合作博弈与非合作博弈 2 类^[8]。在非合作博弈中,各博弈方通过独立行动确定所采取的策略使自己的收益达到最大化,其结果可能对其他博弈方不利。在合作博

弈中,各博弈方组成联盟,通过协商,共同确定所要采取的策略,其结果对各博弈方来说不一定是其最优结果,但一定是可以接受的相对较优的结果,即合作博弈结果是一个 Pareto 最优解.

多目标优化问题式(1)可看成一个合作博弈问题,这里的博弈方就是各个分目标 f_i ,所有可行设计方案构成博弈策略集 S .若各分目标函数采用式(3)所示规格化形式,则 $f_i(X)$ 的最大值为 1,即博弈方 f_i 所能接受的最坏结果是 1,所以可定义 f_i 的收益函数为 $u_i(X) = 1 - f_i(X)$,博弈方 f_i 参与博弈的目的就是要尽可能增大其收益 $u_i(X)$.因此,该合作博弈问题可记为 $B(S; u_1, u_2, \cdots, u_m)$.

对于合作博弈问题,Nash 给出了“仲裁解法”^[9].引入一个“仲裁者”,其收益取决于各方博弈的结果,当博弈方 f_i 的收益增大而其余博弈方收益不变时,“仲裁者”的收益 $C(X)$ 随着 $u_i(X)$ 的增大而增大,而且当 2 个博弈方完全相同时,它们对“仲裁者”收益的影响也完全相同.因此,可定义 $C(X)$ 为各博弈方收益函数的乘积,即

$$C(X) = \prod_{i=1}^m u_i(X) = \prod_{i=1}^m [1 - f_i(X)]$$

(9)

则合作博弈问题 $B(S; u_1, u_2, \cdots, u_m)$ 的解为

$$\sigma(B) = \{X \in \arg \max_{X \in S} \prod_{i=1}^m [1 - f_i(X)]\}$$

(10)

3 工程算例

拟建白鹤滩拱坝高 277 m,坝顶高程 827 m,正常蓄水位 820.0 m,采用抛物线体形,初始设计方案及基本资料由设计部门提供.本文在优化过程中计算荷载组合为“正常蓄水位 + 分缝自重 + 温降”,结构分析方法采用有限单元法,坝体沿高度方向分 8 层单元,沿厚度方向分 6 层单元.参照初始设计方案的分析结果(表 2),在优化过程中主要约束条件为 坝体体积 $V \leq 700$ 万 m^3 ,最大主拉应力 $\sigma_{\text{tmax}} \leq 9.0$ MPa,最大主压应力 $\sigma_{\text{cmax}} \leq 17.5$ MPa,主拉应力大于 1.0 MPa 区域的最大相对深度 $d_{\text{max}} \leq 0.40$,分缝自重作用下最大拉应力 $\sigma'_{\text{tmax}} \leq 0.50$ MPa,上游倒悬度 $K_u \leq 0.30$,下游倒悬度 $K_d \leq 0.25$.

表 1 和表 2 分别列出了不同优化方法所得结果中的拱坝主要体形参数及各分目标函数值.其中 线性加权法的权系数取值为 $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = \frac{1}{4}$ 在理想点法中,通过求解各单目标优化问题得到理想点 $(V^*, \sigma_{\text{tmax}}^*, \sigma_{\text{cmax}}^*, d_{\text{max}}^*) = (611.27 \text{ m}^3, 4.29 \text{ MPa}, 11.93 \text{ MPa}, 0.3225)$.

表 1 多目标优化拱坝主要体形参数

Table 1 Main shape parameters of arch dam by multi-objective optimization

方 法	体积/ 万 m^3	拱冠梁 顶厚/m	拱冠梁 底厚/m	最大拱端 厚度/m	最大中心 角/(°)	上游倒 悬度	下游倒 悬度
线性加权法	699.40	16.321	78.415	84.912	99.164	0.299	-0.111
理想点法	643.72	14.862	74.716	84.980	94.327	0.244	0.164
合作博弈法	670.17	15.638	76.476	84.282	96.708	0.296	0.020

表 2 多目标优化目标函数值

Table 2 Value of objective functions
by multi-objective optimization

方 法	$V/\text{万 m}^3$	$\sigma_{\text{tmax}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{cmax}}/\text{MPa}$	d_{max}
线性加权法	699.40	4.41	12.05	0.3242
理想点法	643.72	6.13	12.31	0.3767
合作博弈法	670.17	5.29	12.13	0.3523
初始设计	679.94	8.58	17.03	0.3921

从表 2 可以看出 线性加权法虽然各目标函数的权值相同,但优化结果表明坝体体积目标近似为最大容许值,并没有显示出优化效果.理想点法和合作博弈法的计算结果中各目标函数均得到了优化,参照文献[10],将设计质量指标 Q 定义为

$$Q = \frac{V}{V^*} + \frac{\sigma_{\text{tmax}}}{\sigma_{\text{tmax}}^*} + \frac{\sigma_{\text{cmax}}}{\sigma_{\text{cmax}}^*} + \frac{d_{\text{max}}}{d_{\text{max}}^*}$$

(11)

则理想点法和合作博弈法优化结果的设计质量指标分别为 4.683 和 4.440.这表明,合作博弈法的优化结果优于理想点法的优化结果.另外,理想点法还必须先求解各单目标优化问题,其工作量也远大于合作博弈法的工作量.

图 1 给出了不同设计方案的拱冠梁断面.可以看出,与初始设计相比,优化设计方案的拱冠梁上游凸点位置提高了,并且更倾向上游侧.这些变化有助于减小梁向拉应力,改善坝体应力状态.限于篇幅,这里只给

出合作博弈法优化方案的体形参数及主要应力等值线,如表 3 和图 2~图 4 所示.

表 3 博弈优化方案拱坝体形参数

Table 3 Shape parameters of arch dam by optimal design based on game theory								
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	左岸	右岸
827.00	0.000	15.638	17.068	17.450	48.538	48.170	322.419	234.237
780.00	-22.018	35.136	39.416	35.241	47.652	44.636	298.259	250.309
740.00	-34.276	44.415	48.933	51.247	50.377	41.045	245.776	273.350
690.00	-41.911	50.622	51.844	58.035	48.742	42.233	226.129	247.236
640.00	-41.789	55.453	66.092	65.551	44.545	44.094	213.754	205.344
600.00	-36.673	61.653	76.996	72.399	41.589	38.162	185.601	207.682
570.00	-30.192	69.327	76.089	77.491	34.468	31.213	178.707	203.521
550.00	-24.713	76.476	84.103	84.282	17.530	13.444	163.446	216.391

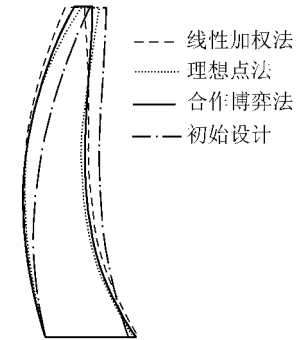


图 1 拱冠梁剖面对比
Fig.1 Comparison of profiles of crown beams

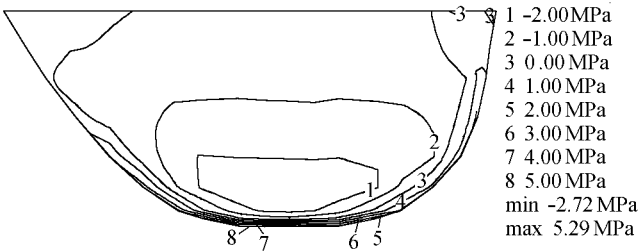


图 2 博弈优化方案上游面第 1 主应力等值线
Fig.2 Contours of principal stress σ_1 on upstream surface of arch dam by optimal design based on game theory

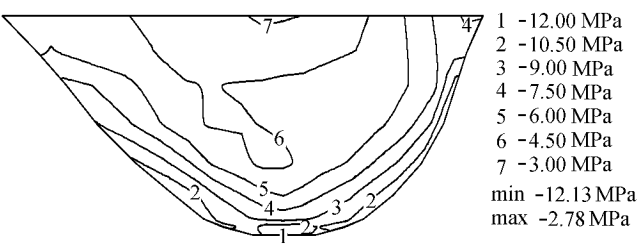


图 3 博弈优化方案下游面第 3 主应力等值线
Fig.3 Contours of principal stress σ_3 on downstream surface of arch dam by optimal design based on game theory

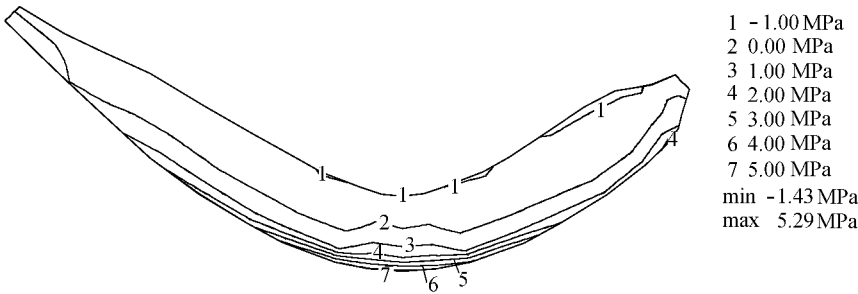


图 4 博弈优化方案建基面第 1 主应力等值线
Fig.4 Contours of principal stress σ_1 on base of arch dam by optimal design based on game theory

4 结 语

本文以拱坝坝体体积、最大主应力、高拉应力区深度等为目标函数建立了拱坝体形多目标优化设计模型,并提出了合作博弈解法.在白鹤滩拱坝体形优化中的应用表明,与传统的多目标优化方法(如线性加权法和理想点法)相比,博弈论方法能更好地综合反映各优化目标的要求,优化结果更加合理.

参考文献:

[1] 厉易生.拱坝优化设计的 SET 模型[J].水利学报,1986,17(10) 37-42.
[2] 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) 10-13.
[3] 孙文俊,孙林松,王德信,等.拱坝体形的两目标优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(3) 39-43.
[4] 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.
[5] 谢能刚,孙林松,王德信.静力与动力荷载下高拱坝体形多目标优化设计[J].水利学报,2001,32(10) 3-11.

[6] 孙林松,王德信,裴开国.以应力为目标的拱坝体形优化设计[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(1):57-60.

[7] 魏权龄,王日爽,徐兵.数学规划引论[M].北京:北京航空航天大学出版社,1991:440-443.

[8] 王则柯,李杰.博弈论教程[M].北京:中国人民大学出版社,2004:28-32.

[9] NASH J. The bargaining problem[J]. Econometrica, 1950, 18: 155-162.

[10] SPALLINO R, RIZZO S. Multi-objective discrete optimization of laminated structures[J]. Mechanics Research Communications, 2002, 29: 17-25.

Multi-objective optimization for shape design of arch dams based on game theory

SUN Lin-song¹, ZHANG Wei-hua¹, XIE Neng-gang²

(1. College of Water Conservancy & Hydraulic Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China ;
2. Department of Mechanics, Anhui University of Technology, Maanshan 234002, China)

Abstract A multi-objective optimization model for shape design of arch dams was developed with the dam volume, maximal principal stresses and maximal relative depth of large tensile stress region taken as objective functions. Based on the similarity between multi-objective optimization and game problems in economics, each objective function was taken as a game player, and all the feasible solutions constituted the game strategy set. Consequently, a cooperative game method for multi-objective optimization of the shape of arch dams was worked out. A case study of shape optimization of the Baihetan arch dam demonstrates that, compared with other multi-objective optimization methods, including the linear weighting method and utopia point method, the present method is of high efficiency of calculation and can comprehensively reflect the requirement of each objective to be optimized, and that the optimized result is reasonable.

Key words arch dam ; multi-objective optimization ; cooperative game

+++++

2006 年《水资源保护》征订启事

双月刊 8 元/期 全年 48 元
邮发代码 28 - 298 每逢单月 30 日出版

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是由环境水利研究会与河海大学共同主办的以技术性为主,兼顾学术性和管理性的技术性期刊.本刊 1985 年创刊,是全国唯一的水资源保护方面的专业性期刊,国内外公开发行.本刊主要刊登与水资源保护有关的科技政策、综述、研究探讨、工程技术及措施、成果推广及经验交流,专题讲座、国外动态、书刊评介、科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制以及水环境监测仪器研制等方面的文章.近几年本刊重点关注与水有关的生态环境和生态城市建设领域中的研究方向,新增水处理技术、清洁生产、防治技术、环境工程、生态环境、城市水环境治理等内容.

主要读者对象 全国从事水资源保护工作的水利界、环保界、相关科研设计单位,有关工程技术、科研人员、管理干部以及大专院校的师生.

本刊热忱欢迎新、老订户订阅.订阅方式 邮局订购,亦可直接与编辑部联系邮汇或信汇,款到后即开具正式发票.

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号 联系电话 :(025)83786642 传真 :(025)83786642
电子信箱 bh@hhu.edu.cn 网络地址 http://kkb.hhu.edu.cn 开户行 南京工行宁海路分理处
银行账号 4301011409001024513 收款单位 河海大学(请注明订阅《水资源保护》)