

基于有限单元法的高拱坝动力优化设计方法及其应用

苏 超¹,余天堂²,姜弘道²

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 利用分布式网络并行平台,建立了并行环境下有约束条件的非线性优化问题的复合形算法,解决了基于有限单元法的高拱坝动力优化设计问题,并对小湾拱坝进行了以主拉应力最小为目标函数的优化设计.

关键词 网络 拱坝优化 并行算法 小湾拱坝

中图分类号 TV642.4⁺6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2002)01-0001-05

我国是地震多发地区,拱坝体型设计中必须考虑地震力的作用.目前高拱坝优化设计理论和设计方法已被工程单位所接受,并不断地应用于工程实践.在拱坝优化设计中考虑地震荷载的影响,对提高拱坝设计质量很有意义.高拱坝的计算方法目前主要有多拱梁法和有限单元法,其中有限单元法由于能够很好地模拟复杂的地质条件、地质构造、多种荷载作用和复杂边界条件,是今后发展的主流方向,但计算时间比多拱梁法要长许多.优化过程是一个不断调整拱坝几何形状、不断进行拱坝应力分析计算比较的过程,工作量非常大,这是基于有限单元法拱坝动力优化研究的难点之一.本文的工作是利用计算机网络技术,解决基于有限单元法的高拱坝动力优化设计问题并应用于小湾拱坝优化设计.

1 优化模型

1.1 双曲薄拱坝的几何描述

拱坝的体型可用几何特征量来描述,图 1、图 2 分别给出了拱冠梁和水平拱圈的几何特征示意图,从中可以看出如果确定了拱冠梁上游面曲线、各高程水平拱圈中心线方程式、左右岸基础开挖边界、拱冠梁厚度随高程变化曲线、左右岸拱端厚度随高程变化曲线、各水平拱圈内厚度变化曲线,那么整个拱坝的体型就完全确定了^[1].

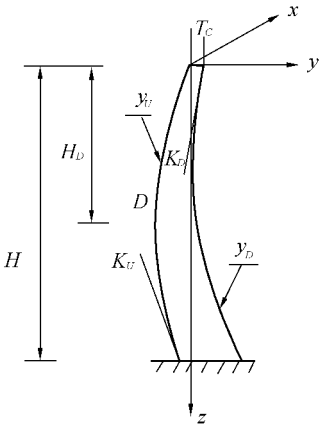


图 1 拱坝拱冠梁几何特征示意图

Fig.1 Geometric characteristics of crown beam

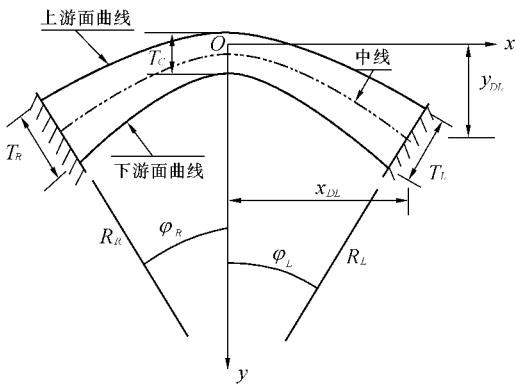


图 2 拱坝水平拱圈几何特征示意图

Fig.2 Geometric characteristics of horizontal arch ring

收稿日期 2000-10-10

基金项目 国家‘九五’科技攻关项目(96-221-04),国家自然科学基金资助项目(59719180)

作者简介 苏超(1960—),男,教授,博士研究生,从事复杂水工结构计算方法及其应用研究.

1.2 优化的目标函数与约束条件

以往的拱坝优化设计是以拱坝体积最小作为优化的目标函数,随着拱坝越来越高,设计人员更重视坝体的质量和坝体的安全度,希望在合理的工程造价范围内,寻找一个具有较大安全储备的拱坝体型.现行的拱坝规范对拱坝的上游面拉应力有较严格的控制,说明该项指标对拱坝至关重要,因此我们以拱坝最大主拉应力为优化目标函数,将拱坝的混凝土方量和坝体的最大压应力等作为约束条件,其数学模型可以表示为

$$\min \sigma_{\max} \quad \sigma_{\min} \geq [\sigma_{\min}] \quad V \leq [V] \quad K_u \leq [K_u] \quad K_d \leq [K_d] \quad \varphi \leq [\varphi]$$

式中: $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ ——坝体的最大主应力、最小主应力; V ——坝体体积; K_u, K_d ——上游倒悬度、下游倒悬度; φ ——拱圈最大中心角; $[\sigma_{\min}], [V], [K_u], [K_d], [\varphi]$ ——坝体的最小主应力、坝体体积、上游倒悬度、下游倒悬度及拱圈最大中心角的允许值.

1.3 计算方法及计算模型

计算采用三维有限元法,分静、动两部分进行,静力计算考虑了静水压力、泥沙压力、岩体的渗透压力、坝体温度影响,动力计算采用振型叠加法,计算时地基作为无质量处理边界固定,库水与坝体的相互作用采用修正 Westergaard 公式折半计算库水附加质量,利用人工生成地震波形成地震荷载.

2 网络并行环境下的优化方法

随着计算机网络技术的不断发展,计算机局域网和 Internet 越来越得到人们的普遍重视,结构分析和优化程序的网络设计已经成为一个重要的发展方向.本文使用 100 M 高速并行局域网,应用程序在 PVM^[2] 平台上设计完成.复合形法是解决有约束条件的非线性优化问题的有效方法之一,它可在全部可行域内寻优,性能稳定、可靠.另外由于它的顶点分布相对独立,具有较好的并行性.文献[3]给出了一种并行环境下的复合形算法,该算法对同构网络和复合形顶点个数为计算机台数的整数倍时有较好的并行效率,本文针对这个问题采用主从式编程模式,设计了具有较好适应性的并行复合形优化算法,设网络中有 P 台计算机工作,主要步骤如下.

a. 复合形顶点数为 K ,产生初始复合形顶点.由主进程负责完成,若 $P > K$,则取复合形顶点数 $K = P$,由初始顶点(人工输入)随机生成其它 $K - 1$ 个顶点,对每个顶点进行可行性检查,若第 $S + 1$ 个顶点不满足约束条件,则求出已满足约束条件的前 S 个可行点的中心:

$$X_c^S = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S X^i \quad (1 < S < K)$$

将第 $S + 1$ 顶点取为

$$X^{S+1} = X_c^S + 0.5(X^{S+1} - X_c^S)$$

再次检查第 $S + 1$ 点,若仍不在可行区域,则重复上式,直至第 $S + 1$ 点可行为止.

K 个点全部可行,进行下一步.

b. 将初始复合形顶点数据发送到每台计算机,从进程启动 P 台计算机同时开始计算 P 个顶点的目标函数值.当其中的某台计算机完成任务后,继续进行第 $P + 1$ 个目标函数的计算,直至所有 K 个初始顶点做好或正在进行计算为止,将计算好的初始复合形顶点值和其目标函数值发送到每台计算机.

c. 当某台计算机完成初始复合形顶点目标函数计算(此时所有初始复合形顶点目标函数或已完成或正在进行计算),在此进程中比较已经计算好的 S 个目标函数值,找出最好点和最坏点(分别用 L 和 H 来标记),计算去掉最坏点后的复合形中心点,即

$$X_c = \frac{1}{S - 1} \sum_{K=1, K \neq H}^S X_K$$

检查 X_c 是否可行,如果可行则转向 d 步,否则利用最好点为起点,中心点为端点随机产生新的可行计算点,转向 e 步.

d. 计算反射点,并检查其可行性.

$$X^R = X_c + \alpha(X_c - X^H)$$

α 称为反射系数(初值一般取 1.3),检查 X^R 的可行性,若满足转向 e 步,否则将反射系数减半,重新检查其可行性,直到可行为止.

e. 计算由 c 步或 d 步形成的新复合形顶点的目标函数,将最好点的目标函数与最坏点的目标函数值相比较,若达到预期的精度,则输出最好点,终止计算 否则,将新的目标函数与最坏点的目标函数值相比较,若 $F(X^R) < F(X^H)$,去掉最坏点,转向 c 步 若 $F(X^R) \geq F(X^H)$,将 α 减半,转向 d 步.

3 小湾拱坝动力优化设计

a. 拱坝基本资料 坝顶高程 1245.0 m,坝底高程 953.0 m,混凝土弹性模量 $E = 2.1 \times 10^4$ MPa,混凝土动弹模 $E = 2.73 \times 10^4$ MPa,混凝土泊松比 $\mu = 0.189$,线膨胀系数 $\alpha = 8.85 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,混凝土容重 $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$. 坝体温度荷载计算值见表 1.

表 1 坝体温度荷载
Table 1 Temperature loads

高程/m	1245	1210	1170	1130	1090	1050	1010	975	953
$T_m/^\circ\text{C}$	-1.26	-0.01	0.42	0.74	0.77	0.79	0.80	0.80	1.30
$T_d/^\circ\text{C}$	0.00	5.58	8.61	9.45	9.65	9.77	9.85	6.24	5.18

表 2 岩体变形模量
Table 2 Deformation moduli of rock body GPa

高程/m	左岸	右岸	高程/m	左岸	右岸
953	18	18	1130	23	17
975	19	21	1170	23	17
1010	26	23	1210	17	17
1050	22	20	1245	17	17
1090	25	17			

b. 建基面附近各高程岩体变形模量 (见表 2).

c. 计算荷载组合. 按水工抗震规范要求,对小湾拱坝进行基本荷载组合计算 正常蓄水位 + 自重 + 泥沙压力 + 温降 + 地震作用,计算时采用静动力荷载分开计算. 动力计算采用人工生成地震波,按规范要求最大峰值加速度取 $0.308 g$,竖向峰值加速度为水平向峰值加速度的 $2/3$. 具体波形见图 3.

d. 优化设计变量和约束条件. 小湾拱坝采用抛物线型双曲拱坝,其设计变量见表 3,上游允许最大倒悬度为 0.3,下游允许最大倒悬度为 0.3,允许最大拱坝中心角为 94.0° . 允许的拱坝混凝土体积为 760 万 m^3 .

e. 小湾拱坝的初始体型和优化的目标函数. 初始体型见表 4,优化的目标函数取上游面坝体最大主拉应

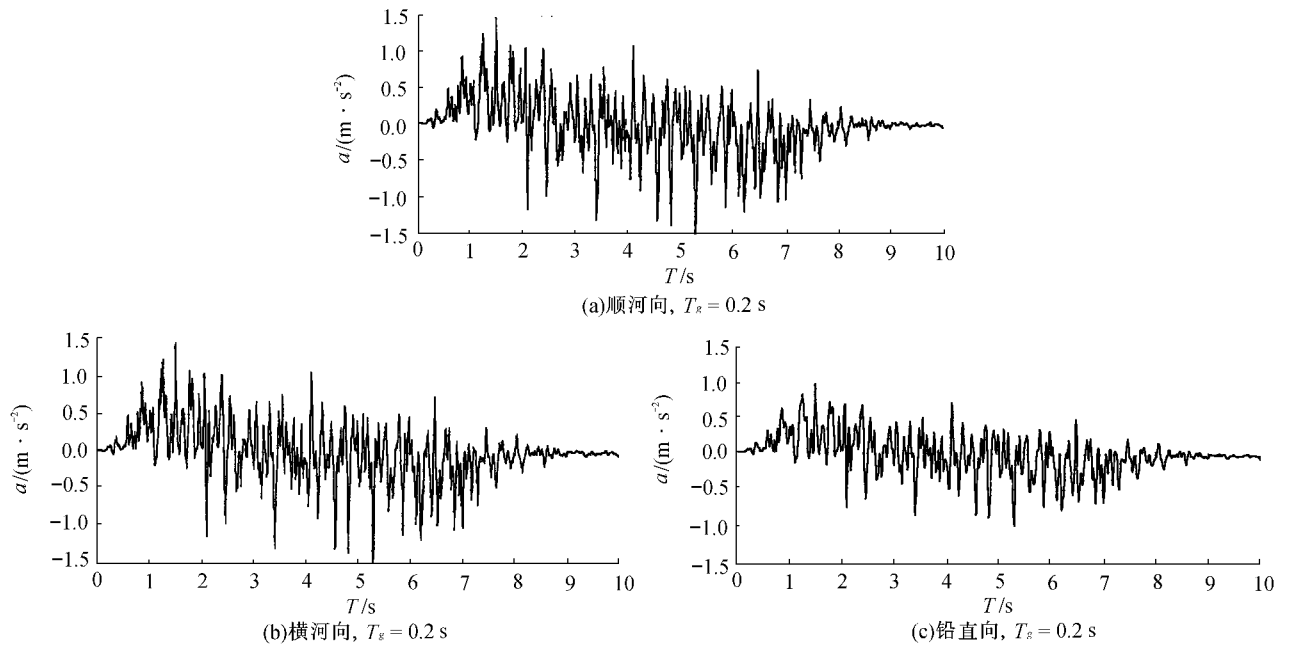


图 3 人工生成地震波
Fig.3 Artificial earthquake wave

表 3 抛物线型坝的设计变量

Table 3 Design variables of parabolic dam						
高程 /m	拱冠 坐标	曲率半径		拱圈厚度		
		左	右	左	拱冠	右
1 245	X_1	X_5	X_9	X_{13}	X_{17}	X_{21}
1 170	X_2	X_6	X_{10}	X_{14}	X_{18}	X_{22}
1 050	X_3	X_7	X_{11}	X_{15}	X_{19}	X_{23}
953	X_4	X_8	X_{12}	X_{16}	X_{20}	X_{24}

表 4 小湾拱坝初始体型参数

Table 4 Shape parameters of Xiaowan arch dam in primary scheme						
高程 /m	拱冠梁		右岸		左岸	
	y_u	T_c	T_{ar}	R_{er}	T_{al}	R_{el}
1 245		12.000	12.000	432.879	12.000	482.83
1 170	- 36.847	39.000	42.000	320.270	43.000	338.597
1 050	- 56.191	63.000	69.500	200.439	68.000	200.043
953	- 38.378	72.912	72.912	148.826	72.912	145.272

力最小.

f. 优化计算结果. 采用并行环境下的优化方法进行小湾拱坝优化计算,网络中共有 3 台计算机参与工作,初始复合形顶点目标函数值计算用时 96 min,整个优化计算用时 518 min. 表 5 给出了设计变量的优化结果. 表 6 给出了优化前后坝体的混凝土方量和坝体上游面主拉应力值. 优化方案与初始设计方案相比,混凝土方量节省了 2.80%,最大主拉应力降低了 10.05%. 表 7 给出了优化方案的前 8 阶自振频率,前 8 阶振型如图 4 所示. 这些结果符合一般规律.

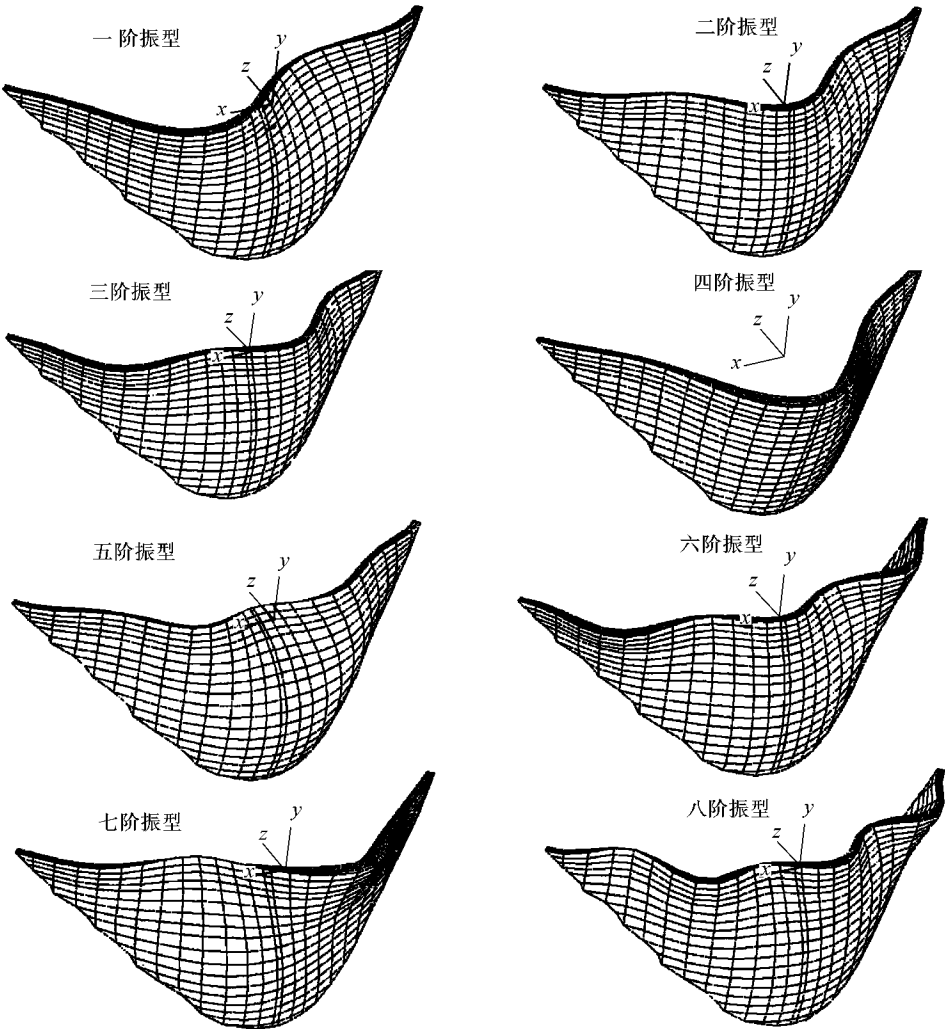


图 4 小湾拱坝较优体型前 8 阶振型示意图

Fig.4 First 8-level vibrating types of optimum shape for Xiaowan arch dam

表 5 小湾拱坝优化方案体型参数

Table 5 Shape parameters of Xiaowan arch dam in optimum scheme

高程 /m	拱冠梁		右岸		左岸	
	y_u	T_c	T_{ar}	R_{er}	T_{al}	R_{el}
1 245		11.756	12.369	460.117	12.296	459.709
1 170	- 34.768	38.587	40.094	330.211	43.218	322.286
1 050	- 54.818	58.947	65.674	190.717	67.976	201.525
953	- 37.534	73.490	68.340	151.541	68.675	139.504

表 6 初始方案与优化方案的比较

Table 6 Comparison between primary scheme and optimum scheme

方案	混凝土方量/万 m ³	最大主拉应力/MPa
初始方案	781.28	5.411 8
优化方案	759.44	4.867 8

表 7 优化方案自振频率

Table 7 Optimum scheme for self-vibrating frequencies

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率/s ⁻¹	1.06	1.16	1.51	1.93	2.25	2.39	2.50	2.84

4 结 论

基于有限元法的高拱坝优化设计研究,由于结构分析具有相对独立和同构性质,利用计算机网络并行环境下的复合形算法可以很好地解决并行算法中的负载平衡问题,取得较好的并行效益,为今后解决大型工程的结构优化计算问题提供了可行的计算环境和计算工具.小湾拱坝的动力优化,在其静力体型模式设计的基础上考虑地震荷载进行优化,符合静力设计、动力校核的设计原则,其结果具有一定的实用价值.

参考文献:

[1] 王德信,许庆春,苏超.高拱坝体型优化设计程序[C].见 姜弘道,赵光恒,向大润,等编.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[A].南京:河海大学出版社,1992.174~191.

[2] 孙家昶,张林波.网络并行计算与分布式编程环境[M].北京:科学出版社,1997.36~40.

[3] 余天堂,姜弘道.并行环境下的复形法[J].河海大学学报,1999,27(力学专集):121~125.

FEM-Based Dynamic Optimum Design Method for High Arch Dams and Its Application

SU Chao¹, YU Tian-tang², JIANG Hong-dao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the distributed network parallel platform, a complex algorithm for solving nonlinear optimization problems under constraint conditions is developed, and a dynamic optimum design for a high arch dam is performed based on FEM. With the minimum principal tensile stress as the objective function, an optimal design for the Xiaowan arch dam is also made.

Key words :network ; optimum design of arch dams ; parallel algorithm ; Xiaowan arch dam