

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.02.014

水电站水库优化调度的改进混沌遗传算法

吴学文¹, 索丽生², 王志坚¹

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对水电站水库优化调度问题, 提出了将改进遗传算法和混沌优化相耦合的改进混沌遗传算法。该算法将混沌变量映射到优化变量的取值范围中, 对混沌变量进行编码, 表示成染色体, 然后对其进行选择、交叉和变异, 通过增加混沌扰动, 不断进化收敛得到最优解。实例计算并与其他方法比较表明, 该算法在求解水电站优化调度这样的复杂非线性优化问题时, 搜索效率高, 收敛性能好, 能以较快的速度收敛于全局最优解, 为水电站水库优化调度模型求解提供了一种新方法。

关键词: 混沌遗传算法; 水电站; 水库调度; 混沌扰动

中图分类号: TV697.1⁺1 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2010)02-0053-05

Improved chaotic genetic algorithm for optimal operation of hydropower reservoirs // WU Xue-wen¹, SUO Li-sheng², WANG Zhi-jian¹ (1. College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As for the optimal operation of hydropower reservoirs, an improved chaotic genetic algorithm (ICGA) was proposed based on the coupling of the improved genetic algorithm and the chaotic optimization algorithm. In ICGA, the chaos variables were mapped to the area of the optimized variables and encoded as the gene on the chromosome. After the chromosomes were selected, crossed and mutated, some disturbance was added to assure the best solutions. The calculated results of a case and a comparison with those of other methods show that the proposed ICGA is of high efficiency of searching ratio and good convergence in solving complex nonlinear problems of the optimal operation of hydropower stations. It is fast and accurate, and it provides a new approach to find the global solution to the optimal operation of hydropower reservoirs.

Key words: chaotic genetic algorithm; hydropower station; optimal operation of reservoirs; chaotic disturbance

水电站水库优化调度是一个具有复杂约束条件的非线性优化问题, 国内外不同的学者采用了不同的方法进行研究, 取得了较多成果^[1-2]。其中较常用的方法有动态规划方法(DP)^[3-5]、逐次优化法(POA)^[6]、大系统递阶法^[7]、粒子群算法(PSO)^[8]、遗传算法(GA)^[9-11]等。但这些方法也存在明显缺陷: DP法占用计算机内存多, 计算速度慢, 存在维数灾问题; POA法易陷入局部的最优, 使计算速度大幅度降低; 大系统递阶法需增加协调因子, 计算比较复杂, 收敛速度慢; PSO算法存在精度不高和易陷入局部最优点的不足; GA算法存在接近全局最优时不易收敛、不容易处理复杂约束条件、搜索效率低等不足。近年来有学者研究了混沌优化算法在水电站水库调度中的应用问题^[12-14], 该算法具有参数简单、稳定性好、全局优化等优点, 但存在以初值作为初始最优解、迭代效率有待提高、优化过程需要较大的混沌序列长度、程序运行时间长等局限性。因此, 有必

要研究应用更加有效的全局优化算法。唐巍等^[15]将混沌融入遗传算法, 提出了混沌遗传算法, 对复杂函数优化进行了仿真研究, 验证了其有效性。王文川等^[16]研究了混沌与遗传算法的结合, 结果表明其算法比传统遗传算法具有更好的性能, 但其采用的是基本遗传算法。笔者将改进的遗传算法和混沌优化相耦合, 增加混沌扰动算子, 将 2 种算法优势互补, 开发了改进的混沌遗传算法(ICGA), 并探讨其在水电站水库中长期优化调度中的应用。

1 改进混沌遗传算法的基本思想

1.1 混沌优化算法

混沌优化算法(COA)是近年来随着混沌学科的发展而提出的一种新的优化算法。其基本思想是把混沌变量映射到优化变量的取值空间, 构造混沌变量序列, 充分利用混沌变量在混沌运动中所具有的遍历性、随机性、规律性来寻找全局最优解。李兵

等^[7]、骆晨钟等^[8]提出了一类类似于载波的方法,将混沌映射产生的混沌变量引入到优化变量中,将混沌运动的遍历范围转换到优化变量的定义域,利用混沌变量进行优化搜索。由于混沌运动具有遍历性、随机性、规律性等特点,使得搜索更有效。水电站水库优化调度的混沌优化算法求解过程为:以水库水位作为决策变量,由 Logistic 方程生成 n 个混沌序列,并将其放大到各阶段水库水位的取值范围,然后利用混沌优化的机制进行迭代搜索,直到满足最大迭代次数或者误差精度要求,输出最优解。

1.2 改进遗传算法

GA 起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究,它通过模拟自然进化过程来搜索最优解,利用某种编码技术,作用于称为染色体的数字串,模拟由这些数字串组成的群体的进化过程。目前 GA 的编码主要有二进制码、格雷码和浮点码。基本遗传算法采用二进制编码,选择算子主要是采用轮盘赌选择,容易出现过早收敛,算法精度、可信度等方面也需要提高。

笔者采用改进的遗传算法(IGA)。在 IGA 中,编码采用浮点码,选择算子设计时采用了最优保留策略和随机联赛,在交叉和变异算子中根据适应值及进化代数来调节个体的交叉概率和变异概率,有效地防止“早熟收敛”,提高算法的搜索效率。水电站水库优化调度的遗传算法求解过程为:设算法的种群大小用 POP 表示,随机选取 POP 组代表水库运行控制过程中的水库水位值序列 $(Z_1^1, Z_2^1, Z_3^1, \dots, Z_T^1)$, $(Z_1^2, Z_2^2, Z_3^2, \dots, Z_T^2)$, \dots , $(Z_1^{\text{POP}}, Z_2^{\text{POP}}, Z_3^{\text{POP}}, \dots, Z_T^{\text{POP}})$, 进行编码并作为母体,按事先给定的目标函数和约束条件进行评价,设定适应度函数,计算所有染色体的适应度值,根据适应度的大小对染色体进行选择、交叉和变异操作,保留适应度高的染色体,舍弃适应度低的染色体,并采用最优保留策略保持种群数的大小,从而得到新的群体。如此反复迭代,直至满足优化收敛指标,输出最优解。

1.3 改进混沌遗传算法

混沌遗传算法(CGA)充分利用了混沌优化的遍历性和遗传算法的反演性,主要是将混沌优化算法与遗传算法集成,利用混沌优化的遍历性特点,弥补遗传算法容易陷入局部最优、收敛速度慢的缺陷,从而得到一种新型高效的优化算法^[9]。

笔者开发的 ICGA 在将混沌优化算法与改进的遗传算法耦合时考虑了 2 种集成方式:第 1 种方式是一方作为附加成分被加入到另一方的搜索中。例如,在遗传算法中引入混沌优化算法,该算法通过混沌映射产生遗传算法的初始种群,然后在遗传算法

的搜索迭代机制基础上通过搜索产生更优的最优个体,引导种群的新一轮进化。第 2 种方式是 2 种算法独立求解,其中一方利用对方的计算结果,但并不直接进入对方的搜索过程中。最常见的做法是,一旦遗传算法搜索到优异的可行解后,马上换用混沌优化算法求解。例如在遗传算法搜索过程中,增加混沌扰动后再进行迭代寻优,在最终得到最优结果时又根据混沌扰动机制,通过若干次混沌扰动进行细搜索,得到更好的搜索结果。

ICGA 的基本思想是:首先采用第 1 集成方式,利用混沌映射得到混沌序列,将其通过载波方式放大到决策变量的取值范围,然后利用实数编码对决策变量进行编码,表示为染色体,并根据改进的遗传算法搜索机制对种群进行选择、交叉、变异操作,得到 1 组满足寻优终止条件的初始最优解,然后利用第 2 集成方式,将此组初始最优解对应的初始最优决策向量增加一个混沌扰动,利用混沌搜索机制进行若干次细搜索,得到问题的最优解。混沌扰动算子可以通过下述方法进行:

将满足寻优终止条件后的初始最优解 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 映射到 $(0, 1)$ 区间,得到初始最优决策向量,记为 δ' ,将混沌映射函数迭代 K 次后得到的 1 组混沌序列(K 为该混沌序列的长度),设 ϵ_k 为该混沌序列中的第 k 个数值($k = 1, 2, \dots, K$),记 δ_k 为由 n 个 ϵ_k 组成的向量,称为混沌向量,则可通过式(1)求解混沌扰动后混沌决策向量 δ_k' :

$$\delta_k' = (1 - \alpha)\delta' + \alpha\delta_k \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (1)$$

其中
$$\alpha = 1 - \left(\frac{k-1}{k}\right)^m \quad (2)$$

式中: α 为 $(0, 1)$ 区间的某个数值,可通过采用自适应选取,在搜索初期 α 较大,随着搜索进行,逐渐接近最优,选用较小的 α ,以便在 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 所在小范围内搜索; m 为正整数,根据目标函数的个数确定,一般大于或等于 2; k 为混沌映射迭代次数。

2 ICGA 计算步骤

ICGA 求解水电站水库优化调度步骤如下:

步骤 1 划分水电站水库调度期时段,确定优化变量及其范围。将调度期划分为 T 个时段,选择各时段的水库水位值作为优化变量,确定各时段水库水位值的取值范围 $[a_i, b_i]$ 。

步骤 2 参数设定。确定变量的个数,确定遗传算法的群体规模 M 、遗传算法的终止迭代次数 N 、最大交叉概率 p_{c_max} 、最小交叉概率 p_{c_min} 、最大变异概率 p_{m_max} 和最小变异概率 p_{m_min} 。

步骤3 目标函数处理。当某个染色体对应的决策变量不满足约束条件时,将其适应度值取为接近于零的某个较小数值。直至概率搜索出来的染色体均能满足约束条件。

步骤4 初始化种群。Logistic映射如式(3):

$$\varepsilon_{i+1j} = \mu \varepsilon_{ij} (1 - \varepsilon_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

式中: μ 为控制参量。设 $0 < \varepsilon_{1j} < 1, \mu = 4$ 时,系统完全处于混沌状态,具有混沌运动的所有特征,因此可作为优化算法中的混沌变量迭代方程。

选取 n 个不同初值,利用式(3)进行迭代,得到 n 个轨迹不同的混沌变量序列,将此混沌序列按式(4)放大到优化变量取值范围,作为初始种群。

$$x_{ij} = a_i + (b_i - a_i) \varepsilon_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

式中: a_i 和 b_i 分别为混沌变量 x_{ij} 的下限和上限。

步骤5 编码。选择浮点码对变量进行编码。

步骤6 选择、交叉和变异运算。采用随机联赛选择算子,交叉算子采用算术交叉,变异算子采用均匀变异,同时在交叉和变异运算中根据适应度值和进化代数来调节个体的交叉概率和变异概率。

步骤7 适应度值计算。选择适当的适应度函数计算适应度值。

步骤8 最优保留策略。将适应度值从大到小进行排序,选择种群中适应度最优的10%的染色体直接带入下一代群体。再次对全部种群进行选择、交叉和变异运算,计算新的适应度值并按大小进行排序,用上一代保留的10%的染色体替换种群中适应度值最差的10%的染色体,得到新的种群。

步骤9 初始最优解。种群重新排序,求适应度值的最大值与平均值的差值。如果此差值在设定的允许误差内,或迭代次数达到设定最大值,则寻优结束,输出初始最优解;否则转入步骤8。

步骤10 混沌扰动。对初始最优解对应的初始最优决策向量增加混沌扰动,混沌映射函数仍然采用Logistic映射,混沌序列长度为 K ,得到 K 组混沌扰动后的混沌决策向量。

步骤11 细搜索优化。将混沌扰动后的 K 组混沌决策向量放大到优化变量的取值范围,计算比较其相应的适应度值,适应度值最大的即为最优解,其对应的决策变量为最优决策变量。输出最优解。

ICGA算法计算流程见图1。

3 水电站水库优化调度模型

3.1 目标函数

以发电量最大为寻优准则,在电力系统稳态运

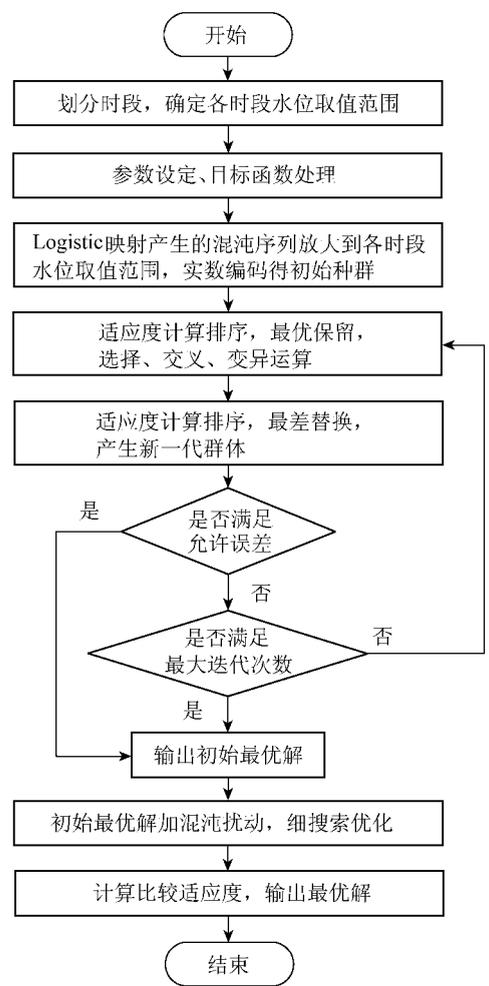


图1 ICGA算法计算流程

行的条件下用一个年周期内发电量最大作为水电站水库优化调度模型目标函数,即

$$\max E = \sum_{t=1}^T A Q_t H_t M_t \quad (5)$$

式中: E 为水电站的年发电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; A 为水电站的综合出力系数; Q_t 为水电站在 t 时段的发电流量, m^3/s ; H_t 为水电站在 t 时段的平均发电净水头, m ; T 为水电站调度年内计算总时段(本文计算时段为月, $T=12$ 月); M_t 为第 t 时段的小时数。

3.2 约束条件

a. 水库的水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + (q_t - Q_t - S_t) K_t \quad (6)$$

b. 水库的蓄水量约束:

$$V_{t, \min} \leq V_t \leq V_{t, \max} \quad (7)$$

c. 水库的下泄流量约束:

$$Q_{t, \min} \leq Q_t \leq Q_{t, \max} \quad (8)$$

d. 水电站的出力约束:

$$N_{t, \min} \leq A Q_t H_t \leq N_{t, \max} \quad (9)$$

式中: V_{t+1} 为水电站第 t 时段末的水库蓄水量, m^3 ; V_t 为水电站第 t 时段初的水库蓄水量, m^3 ; q_t 为水

电站第 t 时段平均入库流量 m^3/s ; Q_t 为水电站在 t 时段的发电流量 m^3/s ; S_t 为水电站在 t 时段的弃水流量 m^3/s ; K_t 为时段长度换算系数; $V_{t, \min}$ 为水电站第 t 时段允许水库最小蓄水量 m^3 ; $V_{t, \max}$ 为水电站第 t 时段允许水库最大蓄水量 m^3 ; $Q_{t, \min}$ 为水电站第 t 时段的最小下泄流量 m^3/s ; $Q_{t, \max}$ 为水电站第 t 时段的最大下泄流量 m^3/s ; $N_{t, \min}$ 为水电站允许的最小出力限制, 一般为保证出力 kW ; $N_{t, \max}$ 为水电站允许的最大出力限制, 一般为装机容量 kW 。

4 实例计算

选用某水电站资料进行实例计算。已知该水电站水库的水位~库容关系曲线和下游水位~流量关系曲线, 水库总库容为 8.96 亿 m^3 , 调节库容为 4.45 亿 m^3 , 正常蓄水位为 977.0 m, 死水位为 948.0 m, 防洪限制水位为 966.0 m。电站综合出力系数取 8.3, 保证出力为 185 MW, 装机容量为 1080 MW, 最大过水能力为 1000 m^3/s 。采用多年平均入库径流资料, 利用前述模型及算法进行优化调度计算, 根据水库控制运用条件, 7 月份作为汛期, 月初水位需降至死水位, 其他月份的水位在死水位与正常蓄水位之间变动。模型中 Logistic 映射初值取值范围为 [0.51, 0.74], 控制参量 $\mu = 4$, 混沌序列的长度为 1000, 模型的初始种群取 1000, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.1, 允许误差为 1.0×10^{-8} , 最大迭代次数为 200, 利用 MATLAB 软件编程计算, 结果见表 1。

表 1 ICGA 算法求解水电站水库优化调度结果

| 月份 | 入库流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 月初库水位/ m | 发电流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 水头/ m | 出力/ $10^4 kW$ | 弃水流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) |
|----|---------------------------------|-------------|---------------------------------|----------|------------------|---------------------------------|
| 1 | 543 | 977.00 | 543.0 | 75.07 | 33.83 | |
| 2 | 637 | 977.00 | 637.0 | 74.81 | 39.55 | |
| 3 | 499 | 977.00 | 499.0 | 75.17 | 31.13 | |
| 4 | 641 | 977.00 | 641.0 | 74.80 | 39.80 | |
| 5 | 427 | 977.00 | 427.0 | 75.35 | 26.70 | |
| 6 | 340 | 977.00 | 528.2 | 60.60 | 26.57 | |
| 7 | 561 | 948.00 | 372.8 | 61.50 | 19.03 | |
| 8 | 1057 | 977.00 | 1000.0 | 60.54 | 50.25 | 159.4 |
| 9 | 1143 | 950.76 | 1000.0 | 47.42 | 39.36 | 143.0 |
| 10 | 546 | 950.76 | 546.0 | 48.82 | 22.13 | |
| 11 | 612 | 950.76 | 509.6 | 62.02 | 26.23 | |
| 12 | 621 | 977.00 | 621.0 | 74.86 | 38.59 | |

为了进行比较, 使用混沌优化算法和改进遗传算法进行求解, 其目标函数和约束条件不变, 混沌优化算法中 Logistic 映射初值、控制参量 μ 、混沌序列的长度、混沌扰动算子等参数, 以及改进遗传算法种群规模、选择算子、交叉算子、变异算子、允许误差、最大迭代次数等参数取值参考混沌遗传算法, 取相

同的数值, 3 种算法结果对比见表 2。

表 2 3 种算法计算结果对比

| 优化方法 | 发电量(亿 $kW \cdot h$) | 计算时间/s |
|------|----------------------|--------|
| COA | 27.8954 | 185 |
| IGA | 26.6071 | 50 |
| ICGA | 28.7010 | 80 |

由表 2 可以看到, 在相同的参数设定情况下, ICGA 计算的年发电量最大, 计算时间也较短, 是最优方法。COA 计算得到的年发电量大于 IGA 计算得到的年发电量, 但需要较大的混沌序列长度, 程序运行时间较长; IGA 虽然是一种随机概率搜索优化方法, 能以较短时间逼近全局最优, 但求解结果不是最优; ICGA 将混沌映射的遍历性特点和 IGA 的寻优机制相耦合, 将具有遍历性的混沌序列放大到优化变量的取值范围, 利用 GA 的搜索机制进行迭代搜索, 能同时搜索解空间中的许多点, 可以在占用少量内存的情况下更加逼近全局最优解。当然, ICGA 由于需要较大的种群数来实现遍历性搜索, 使得其计算时间比 IGA 略长, 但比 COA 计算时间大幅度缩短。因此, ICGA 因其自身特点, 将给水电站水库中长期优化调度提供一种新的模型求解方法。

5 结论

水电站水库优化调度是一个大系统复杂优化问题。笔者通过研究, 提出了求解水电站水库优化调度问题的新方法——ICGA。该算法将水库水位作为优化变量, 将调度期划分为若干时段, 根据已知资料确定各时段水位的取值范围, 利用混沌优化的遍历性特点, 将 Logistic 映射产生的混沌序列放大到优化变量的取值范围, 然后利用遗传算法的优化机制进行选择、交叉和变异运算, 得到初始最优解。对初始最优解对应的优化变量加一混沌扰动, 进行混沌细搜索优化, 得到问题的最优解。ICGA 具有搜索效率高、收敛性能好、能以较快速度收敛于全局最优解等优点, 提高了水电站水库优化调度的效率和效益。当然, 该算法还有需要改进的地方, 即如果优化变量的取值范围太大, 容易造成搜索时间长, 结果偏差大。

参考文献:

[1] 张勇传, 李福生, 熊斯毅, 等. 水电站水库群优化调度方法的研究[J]. 水力发电, 1981, (11): 48-52.
 [2] 畅建霞, 黄强, 王义民. 水电站水库优化调度几种方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2000, 18(3): 19-22.
 [3] ROSSMAN L. Reliability-constrained dynamic programming and randomized release rules in reservoir management[J]. Water Resources Research, 1977, 13(2): 247-255.
 [4] LITTLE J D C. The use of storage water in a hydroelectric system[J]. Operational Research, 1955(3): 187-197.

[5] 梅亚东. 梯级水库优化调度的有后效性动态规划模型及应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 195-198.

[6] 张玉新, 冯尚友. 多目标动态规划逐次迭代算法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988(6): 72-82.

[7] 黄强, 颜竹丘. 应用大系统递阶控制理论解梯级水电站水库群长期最优调度[J]. 水电能源科学, 1993, 11(2): 80-87.

[8] 王少波, 解建仓, 汪妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 12-15.

[9] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 275-280.

[10] 钟登华, 熊开智, 成立芹, 等. 遗传算法的改进及其在水库优化调度中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 22-26.

[11] AHMED J A, SARMA A K. Genetic Algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir [J]. Water Resources Management, 2005, 19: 145-161.

[12] 梁伟, 陈守伦, 何春元, 等. 基于混沌优化算法的梯级水

电站水库优化调度[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 63-66.

[13] 邱林, 田景环, 段春青, 等. 混沌优化算法在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 17-19.

[14] 刘起方, 马光文, 刘群英, 等. 对分插值与混沌嵌套搜索算法在梯级水库联合优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 140-150.

[15] 唐巍, 郭镇明, 唐嘉亨, 等. 复杂函数优化的混沌遗传算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(5): 1-5.

[16] 王文川, 程春田, 徐冬梅. 基于混沌遗传算法的水电站优化调度模型及应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 7-11.

[17] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.

[18] 骆晨钟, 邵惠鹤. 用混沌搜索求解非线性约束优化问题[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(8): 54-57.

[19] 姚俊峰, 梅焯, 彭小奇, 等. 混沌遗传算法及其应用[J]. 系统工程, 2001, 19(1): 70-74.

(收稿日期 2009-08-16 编辑 高建群)

(上接第 13 页)

压强等水力特性参数的时空演化规律, 分析出现空蚀危险的区域和时刻. 针对阀门后突扩体顶板和升坎凸弧处出现较低负压问题, 提出一系列的体型方案, 分析了体型参数对流速、流态、压强分布的影响. 分析结果表明, 方案 3 的顶板压强最大, 升坎凸弧处方案 8 的压强最大. 数值模拟对阀门体型优化具有方案变化快、经济省的优点, 是物理模型试验研究的有力补充手段.

参考文献:

[1] 李云, 胡亚安, 宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 11(2): 232-239.

[2] 阎诗武. 船闸廊道输水阀门振动研究进展[J]. 水利水电工程学报, 1998(2): 109-118.

[3] 周华兴. 高水头船闸阀门空化问题的研究[J]. 水运工程, 1993(11): 28-33.

[4] 王玲玲, 高飞. 三峡永久船闸输水系统输水特性研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 96-99.

[5] 王玲玲, 戴会超, 王琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 100-103.

[6] 戴会超, 王玲玲. 三峡永久船闸阀门段廊道水力学数值模拟[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 88-92.

[7] 马峥, 张计光, 陈红勋, 等. 三峡永久船闸输水廊道水动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(2): 175-181.

[8] 王智娟, 江耀祖, 吴英卓, 等. 银盘船闸阀门段体型优化三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 91-93.

(收稿日期 2009-05-21 编辑 高建群)

(上接第 52 页)

在施工程序上, 下游堆石区填筑超前于上游, 并设定预沉降期, 待“增模区”沉降基本稳定后再填筑高程 426.50 m 以上的堆石区. 宜兴抽水蓄能电站上水库主坝运行 2 年多来的安全监测结果表明坝体变形微小, 应力变形性状良好, 大坝稳定安全, 取得了显著的经济效益, 也促进了工程技术进步. 2009 年 5 月专家组对“宜兴抽水蓄能电站上水库建设关键技术研究”项目研究成果的鉴定意见认为下游堆石区的优化是该项目研究成果的主要创新点之一, 对此给予了充分肯定. 本工程下游堆石区优化的经验在类似工程中具有推广应用价值.

参考文献:

[1] 曹克明, 汪易森, 徐建军, 等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 129-134.

[2] 刘斯宏, 肖贡元, 杨建州, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 772-776.

[3] 肖贡元. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝堆石料的特殊研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 49-51.

[4] 国家电力监管委员会大坝安全监察中心. 江苏宜兴抽水蓄能电站上水库水工建筑物安全监测资料分析报告[R]. 杭州: 国家电力监管委员会大坝安全监察中心, 2009.

[5] 肖贡元, 傅方明. 江苏宜兴抽水蓄能电站上库主坝设计特点[J]. 水力发电, 2009, 35(2): 49-53.

(收稿日期 2009-07-10 编辑 高建群)