

# 粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用研究

张 铭<sup>1</sup>, 李崇浩<sup>2</sup>, 范子武<sup>1</sup>, 马震坤<sup>3</sup>, 尹 黛<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院水工所, 江苏 南京 210029; 2. 南方电网电力调度通讯中心, 广东 广州 510623; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 曼彻斯特大学, 英国 曼彻斯特)

**摘 要:** 针对 PSO 算法易陷入局部最优和后期收敛速度慢的缺陷, 引入进化遗传算法中的“变异”算子并采用自适应的权重因子, 以改进其全局优化能力和搜索效率。引入粒子矩阵, 通过对粒子在多维空间中最优位置的搜索来实现逐时段的优化计算, 并将该算法应用于金沙江复杂梯级水电能源系统中长期优化调度计算中。计算结果表明, 智能优化方法在复杂系统全局优化问题上较常规数学优化算法有更优越的优化性能, 从而为解决复杂水电能源非线性动力系统的优化计算问题提供了一种新的有效的方法。

**关键词:** 改进粒子群算法; 中长期优化调度; 变异算子; 粒子矩阵; 梯级水库系统

## Application of Improved Particle Swarm Algorithm on the Optimal Operation of Cascade Hydropower Stations

Zhang Ming<sup>1</sup>, Li Chonghao<sup>2</sup>, Fan Ziwu<sup>1</sup>, Ma Zhenkun<sup>3</sup>, Yin Dai<sup>4</sup>

(1. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu 210029; 2. Power Dispatch Communication Center, Southern Power Grid of China, Guangzhou Guangdong 510623; 3. Hydrology and Water Resources Institute, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098; 4. The University of Manchester, Manchester UK)

**Abstract:** An intelligence optimization algorithm based on improved PSO was introduced to the overall optimization of complex hydroelectric energy nonlinear dynamic system, and the mutation operator of the genetic algorithm was introduced and the adaptive weighting factor was adopted to improve the optimization capability and search efficiency. A particulate matrix was also introduced for achieving the step-by-step optimal calculation through searching the optimal position in the multi-dimensional of the particles. The algorithm was used in the middle and long term optimal operation analysis of cascade hydropower system in Jinsha River. The case study shows that the IPSO method has more superior optimization performance than the conventional mathematical optimization algorithm, and is a effective way for the optimization calculation of complex hydroelectric energy nonlinear dynamic system.

**Key Words:** improved particle swarm optimization (IPSO); middle and long-term optimal operation; mutation operator; particle matrix; cascade hydropower system

中图分类号: O224; TV697.12

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2010)12-0060-05

## 0 引言

流域大规模水电能源系统联合优化调度, 不仅要考虑梯级水库之间的水力电力联系和水库调蓄与梯级补偿调节作用, 还要兼顾发电、防洪、生态、航运及电网安全等众多目标, 表现出大规模、动态、非凸、高维、非线性等复杂特征, 优化过程求解规模庞大, 解空间复杂, 快速准确求解极其困难, 历

来是电力系统运行中的一个难题。在此问题上, 国内外学者曾采用动态规划及其改进算法、大系统分

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 水利部公益性行业科研专项 (200901067); 水利部“948”项目(200808); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-008-03); 南京水利科学研究院青年科研基金(Y10808)

作者简介: 张铭(1978—), 男, 河南内乡人, 工程师, 博士, 主要从事水库群联合优化调度、水工水力学和风险分析等研究。

解协调解法、POA 算法以及遗传算法等进行研究,但都有各自的局限性<sup>[1-3]</sup>。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种基于集群智能的新型优化算法,由 Kennedy 和 Eberhart 于 20 世纪 90 年代首先提出<sup>[4]</sup>,具有简便易行、依赖的参数少、收敛速度快等特点,已被广泛应用到函数优化、神经网络训练以及整数优化等问题的求解中。近年来,该算法发展很快,已成为国际演化计算界的研究热点。在水库调度领域,文献 [5] 应用 PSO 算法计算了单个水库的优化调度问题,文献 [6] 将该算法应用于梯级水库群短期优化调度,均取得了较好的效果。然而,PSO 算法存在易陷入局部最优解、后期收敛速度慢等不足。本文结合复杂梯级水电站群中长期联合优化调度问题的实际,在对基本 PSO 算法进行合理改进的基础上,应用粒子群算法进行优化计算研究。

## 1 优化调度数学模型

梯级水电站的中长期联合优化调度一般是研究在以年为周期的时段内,在满足梯级水电站各种约束的条件下实现各水电站的最优蓄放水次序和出力。一般说来,水电系统中长期优化调度主要采用的下述两大类最优准则:用水一定下,总发电量或发电总效益最大准则;负荷过程一定下,调度期末水电系统蓄能最大准则。本文以第一类准则,即发电量最大目标作为研究应用的优化准则。

### 1.1 目标函数

根据第一类优化准则,在已知各梯级水库的调度期初始水位和调度期内各时段来水过程一定条件下求解各电站的最优出力过程,使得调度期内在满足防洪、航运等其他约束目标的条件下总的发电量最大。据此建立目标函数

$$E^* = \text{Max} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T K_i Q_{i,j} H_{i,j} \Delta t \quad (1)$$

式中,  $K_i$  为第  $i$  个水电站的出力系数;  $Q_{i,j}$  为第  $i$  个水电站在时段  $j$  内的平均发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_{i,j}$  为第  $i$  个水电站在时段  $j$  内的平均发电水头,  $\text{m}$ ;  $\Delta t$  为时段长度,  $\text{s}$ 。

### 1.2 约束条件

#### (1) 水位约束

$$Z_{i,\min} \leq Z_{i,j} \leq Z_{i,\max} \quad (2)$$

式中,  $Z_{i,j}$  为第  $i$  个水电站在  $j$  时段的平均水位,  $\text{m}$ ;  $Z_{i,\min}$ 、 $Z_{i,\max}$  为第  $i$  个水电站调度期内各时段允许的最低和最高库水位。

#### (2) 出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,j} \leq P_{i,\max} \quad (3)$$

即,出力  $P$  约束为各个电厂预想出力及机组最大、最小出力限制。

#### (3) 流量约束

$$Q_{i,\min} \leq Q_{i,j} \leq Q_{i,\max} \quad (4)$$

即,流量约束为机组最小、最大过流能力限制;下游航道最小流量限制;河道生态需水量限制等。

#### (4) 水库水量平衡方程

$$V_{i,j+1} = V_{i,j} + (I_{i,j} - Q_{i,j} - q_{i,j}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中,  $V_{i,j}$ 、 $V_{i,j+1}$  分别为第  $i$  个水电厂第  $j$  时段初、末的蓄水量;  $I_{i,j}$ 、 $Q_{i,j}$  分别为第  $i$  个水电厂在  $j$  时段的平均入库流量和平均发电流量;  $q_{i,j}$  则为第  $i$  个水电厂在  $j$  时段的平均弃水流量。

#### (5) 梯级水库间的水流联系

$$I_{i,j} = Q_{i-1,j-\tau_i} + i_{i,j} \quad (6)$$

式中,  $Q_{i-1,j-\tau_i}$  表示上游水电厂的出库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ; 其中  $\tau_i$  为第  $i-1$  个水电厂到第  $i$  个水电厂的水流滞后时间,  $\text{s}$ ;  $i_{i,j}$  为第  $i$  个水电厂在时段  $j$  的区间入流,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

#### (6) 梯级水库群总保证出力约束

$$\sum_{i=1}^N P_{ij} = P_j \quad (7)$$

## 2 基于变异算子的改进 PSO 算法

限于篇幅,本文不对粒子群优化算法 (PSO) 的基本原理作详细介绍,可参阅文献 [6]。PSO 算法核心运算公式

$$V_{i,d}(k+1) = w \times V_{i,d}(k) + c_1 \times \text{Rand}() \times (x_{p,d} - x_{i,d}) + c_2 \times \text{Rand}() \times (x_{g,d} - x_{i,d}) \quad (8)$$

$$x_{i,d}(k+1) = x_{i,d}(k) + V_{i,d}(k+1) \quad (9)$$

式中,  $w$  为惯性权重;  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,其取值根据经验确定,通常取  $c_1 = c_2 = 2$ ;  $\text{Rand}()$  为  $[0, 1]$  上的随机数;  $V_{i,d}$  为粒子  $i$  在  $d$  维空间上的速度,  $V_{i,d} \in [-V_{i,\max}, V_{i,\max}]$ , 当粒子速度低于  $-V_{i,\max}$  时,则取值为  $-V_{i,\max}$ ;  $x_{i,d}$  为粒子  $i$  在  $d$  维空间的坐标。

PSO 算法存在易陷入局部最优和后期收敛速度慢的缺陷,因此必须对原算法作适当的改进处理,以提高搜索效率,并求得全局最优解。在许多进化算法中,变异算子是用来增进种群多样性避免陷入局部最优解的重要措施。因此,基于这种思想,在算法中引入变异算子,使粒子获得新的基因,来保持粒子群的多样性,从而尽可能搜索到解空间中更大的范围,以减少陷入局部极值的可能性。在应用变异算子的过程中,还应考虑后期算法收敛速度降低的问题。

变异算子的引入按下述方法进行:当种群进化到一定程度并依判断陷入局部最优解时,采用变异算子对当前种群局部最优解对应粒子进行变

异,产生相同数目的子代,并用子代粒子取代父代粒子,在保持种总粒子数目不变的同时,使得种群多样化。依此算法求解过程中,采用总迭代代数(算例中取500代)进行控制方法。即,如果当前迭代代数低于最大迭代代数,且前后两次发电量差别在精度范围(算例中取0.05%)之内,则判断认为求解陷入局部最优解;在对局部最优解对应粒子进行变异过程中,采用所有基因位等概率变异的方法进行变异,所有基因码均以5%的概率进行变异。

变异算子定义 $\phi$ 为

$$gBest(d)^* = \phi[gBest(d)] \\ = gBest(d) + U_d(0,1) \frac{f_{gworst}}{f_{gbest} + f_{gworst}} (u_d^{max} - u_d^{min}) \quad (10)$$

式中, $gBest(d)^*$ 表示局部最优解对应的种群最优粒子的第 $d$ 维变量经过变异后的取值; $U_d(0,1)$ 表示 $(0,1)$ 均匀随机分布; $f_{gworst}$ 表示当前种群最劣解的适应度; $f_{gbest}$ 表示当前种群最优解的适应度; $u_d^{min}$ 、 $u_d^{max}$ 表示粒子第 $d$ 维变量最小、最大值; $f_{gworst}/(f_{gbest} + f_{gworst})$ 表示变异算子自适应机制:粒子变异幅度随着进化程度的升高和 $f_{gbest}$ 值的增大而减小。此自适应算子不仅有助于种群跳出局部最优解,还考虑了种群后期收敛速度慢的问题; $(u_d^{max} - u_d^{min})$ 则用以尽力约束变异后粒子取值落在取值范围之内。

此外,惯性权重系数 $w$ 对算法的优化性能有很大的影响,较大的 $w$ 值有利于提高算法的收敛速度,而 $w$ 较小时则有利于提高算法的收敛精度<sup>[7]</sup>。算法开始阶段在大范围搜索,宜采用较大值以提高搜索速度;进入后期小范围精细寻优时,则应采用较小值以改善搜索精度。因此,本文引入自适应调整 $w$ 计算公式

$$w(t) = w_{ini} - \frac{w_{ini} - w_{end}}{\text{MaxNumber}} \cdot t \quad (11)$$

式中, $t$ 为迭代的次数,MaxNumber为最大截止代数。 $w_{ini}$ 与 $w_{end}$ 分别表示开始较大及后期较小取值,应用时可根据求解问题本身实际情况予以赋值。随着迭代的进行,惯性权重系数 $w$ 不断减小,使得算法在初期具有较强的全局收敛能力,而后期则具有较强的局部精细搜索能力<sup>[8]</sup>。改进后的PSO算法简称为“IPSO法”。

### 3 IPSO算法的应用

本文以金沙江流域乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等4座梯级水电站群为研究对象,探讨粒子群算法在其中长期联合优化调度问题上的应用。为了实现PSO的优化求解计算,需要解决以下几个问题。

#### 3.1 适应度函数的确定

根据PSO算法原理,粒子的适应值是衡量粒子飞行位置优劣的指标,也是实现粒子由初始位置不断向最佳位置靠近的动力源。结合梯级总发电量最大这一求解目标,我们以目标函数式(1)作为粒子群的适应度函数。这样,每个粒子每到达一个新的位置上,根据其在多维解空间上的坐标 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ,即可通过目标函数计算粒子在该位置上的发电量 $E(X_i)$ ,即为其适应值;再以此适应值与自身飞行以来的个体极值 $pBest$ 点,以及群体飞行过程的全局极值 $gBest$ 点之间的差距,动态地对粒子飞行的速度进行调整,使之趋向终极最佳点。

#### 3.2 约束条件的处理

梯级水电系统联合调度优化问题包含了众多的约束条件,包括库容约束、流量约束、出力约束以及其他各种约束条件。在本文应用的金沙江梯级水库群联合优化调度的粒子群智能优化调度中,这些约束条件是通过粒子的运动约束来表达和实现的,因为粒子群是根据一定的运动机制在解空间中不断飞行来寻优的,通过对粒子的运动方式和范围进行限制,可以实现原问题的各种约束条件。

(1) 库容约束。库容约束与水位约束是等价的约束条件,原问题的每一个解(各水库在调度期内各时段的库容或水位),在PSO中就是粒子在每个空间维的坐标值,因此可以直接通过对粒子位置的取值范围进行限定来实现约束。

(2) 出力约束。出力约束包含了电站保证出力、装机容量、最小出力等限制约束条件。在IPSO中,出力约束可以通过惩罚函数的方式来实现,即当各电站出力值低于其保证出力或最小出力约束时,给适应值加上一个负的惩罚项,惩罚值的大小与越限量成正相关关系。最低或保证出力约束在式(12)等式右边第二项中予以考虑。系统总保证出力约束在计算过程中也采用类似惩罚函数予以满足。另外,当计算出力值超出电站装机容量时,将自动取相应装机最大值,此调度策略可能由于“无益”耗水而将在方案优选过程中被自动淘汰。

(3) 流量约束。流量约束反映了各电站的综合利用要求及机组过流能力等限制条件。在IPSO中,流量约束也可以通过惩罚函数的方式来实现,即当流量值超出约束范围时,给适应值加上一个负的惩罚项,惩罚值的大小与越限量成正相关关系。考虑出力及流量约束条件后的目标函数

$$\text{Max}E = E^* - \sum_{i=1}^K \beta_i \Delta p_{st,i}^2 - \sum_{i=1}^K \lambda_i \Delta q_{st,i}^2 \quad (12)$$

式中, $E^*$ 为原目标函数值; $K$ 为流量越限的电站数;

$\beta_i > 0$ ,  $\lambda_i > 0$ , 均为惩罚系数;  $\Delta p_{st,i}$ 、 $\Delta q_{st,i}$  分别为出力、流量越限量。在实际应用中, 通过调节  $\lambda_i$  的取值满足流量等条件约束。

(4) 其他约束。其他约束条件包括水库水量平衡方程和梯级电站的水流联系等, 这些约束条件都可以在适应值计算函数式中实现。

### 3.3 模型的求解

梯级水电站中长期优化调度是一个动态、多阶段的序贯决策问题, 因此应用 PSO 算法关键要解决如何实现多阶段连续寻优计算。由于粒子群是在多维解空间中寻优飞行的, 因此可将优化调度的时间维作为粒子的空间维: 设优化调度时段数为  $n$ , 则可以确定  $n$  为粒子群的空间维数。这样, 把  $n$  个时段的最优调度决策转化为粒子在  $n$  个空间维上最优位置的确定, 并且按空间维顺序进行, 即可以实现调度期多阶段过程的计算。由于粒子表示的是待求问题的一个解, 对由  $m$  个水电站组成的梯级系统, 粒子的空间坐标 以及其在各个空间维的速度, 实际上分别都是一个  $m \times n$  维的矩阵 ( $X_{ij}$ ) 和 ( $V_{ij}$ ):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

各个空间维上的坐标  $X_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ), 表示了各水电站在各个阶段的调度决策后的状态值。以矩阵粒子描述多库系统优化调度的优化解 (由多条调度轨迹组成), 可由图 1 描述。

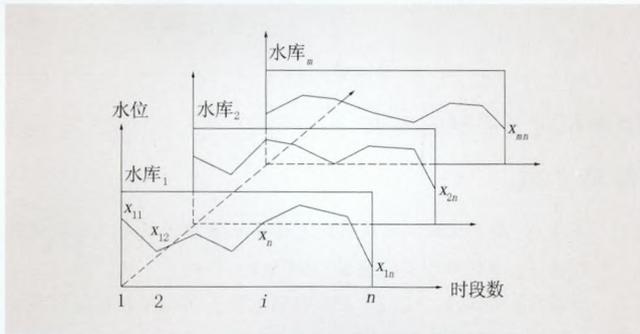


图 1 多库系统优化调度的矩阵粒子示意

乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座水电站为具有季或年调节性能的大型水库。因此, 系统联合调度的智能优化模型的优化解可以用矩阵粒子  $P_z^*$  表示为

$$P_z^* = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ z_{31} & z_{32} & \vdots & z_{3n} \\ z_{41} & z_{42} & \cdots & z_{4n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,  $n$  为调度期内时段数, 调度期以年为单位,

故如果以月为时段单位则  $n=12$ , 以旬为时段单位则  $n=36$ 。矩阵第 1 至第 4 行分别表示了乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 水库的最优库水位过程。

这样, 把系统 4 个有长期调节能力的水库的水位过程用式 (14) 形式的矩阵粒子进行描述, 1 个粒子也就包含了优化问题的 1 组解 (4 水库的水量泄放过程), 按前面介绍的粒子运动约束的方法分别设定各水库的约束条件后, 便可以用适应值函数计算在不同状态 (不同泄放控制过程) 下粒子群的适应值 (系统总发电量)。计算求解时, 只要按照本文设计的 IPSO 算法的实现步骤进行粒子群的寻优计算, 即可实现对系统联合调度模型的求解, 当粒子群最终收敛到某一个最优粒子时, 便说明计算获得了最优结果。

## 4 解算结果

乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 座梯级水电站水库的特性参数如表 1 所示。算例采用从 1959 年到 2001 年共 42 a 的历史径流资料, 以旬为控制时段。

表 1 梯级水电站系统各水库特性参数

水电站	正常蓄水位/m	死水位/m	调节库容/亿 m <sup>3</sup>	库容系数	装机容量/MW	年平均来水量/亿 m <sup>3</sup>
乌东德	950	925	16.6	0.014	7 400	1 200.03
白鹤滩	820	760	100.32	0.078	12 000	1 290.66
溪洛渡	600	540	64.6	0.045	12 600	1 423.16
向家坝	380	370	9.03	0.006 2	6 000	1 447.12

通过应用所建立的梯级水库群联合优化调度模型, 并采用 IPSO 算法进行求解。研究表明<sup>[8]</sup>, 粒子数目小于 15 容易导致局部收敛, 大于 20 时规模的增大对优化效率的提高不显著。因此, 本文计算中将粒子群规模设定为 20, 学习因子取值为  $c_1=c_2=20$ 。

为了比较, 给出了金沙江梯级水库群系统由 IPSO 算法 (方式 1, IPSO) 与按判别式优化算法<sup>[9]</sup> (方式 2, k-CM) 两种方法计算所得各种性能指标的统计结果 (见表 2)。

从表 2 可以看出, 相对于判别式优化方法, 本文 IPSO 算法提高系统多年平均发电量 13.3 亿 kW·h 左右, 而枯水期系统增加发电量 17.2 亿 kW·h 左右。因此, 采用 IPSO 算法, 不仅能显著提高金沙江梯级水库群多年平均发电量; 更为重要的是, 相较于一般的数学规划算法, 该方法能更好地提高水电系统在枯水期的发电量。这对改善电网系统运行质量以及提高梯级水库群系统的运行效益具有重大意义, 从而说明了本文设计的 IPSO 算法的科学性及实

表2 IPSO与k-CM两种算法解算结果对比

水电站	多年平均发电量/亿 kW·h		枯水期发电量/亿 kW·h		丰水期发电量/亿 kW·h		多年平均弃水量/亿 m <sup>3</sup>		水量利用率/%	
	IPSO	k-CM	IPSO	k-CM	IPSO	k-CM	IPSO	k-CM	IPSO	k-CM
乌东德	284.0	288.1	89.8	92.9	194.2	195.2	153.5	151.3	88.1	87.2
白鹤滩	553.5	549.6	204.9	197.4	348.6	352.2	112.8	130.7	92.3	89.7
溪洛渡	629.6	616.8	267.8	255.5	361.8	361.3	107.9	123.2	94.2	91.2
向家坝	315.1	314.4	134.1	133.6	181.0	180.8	138.5	161.9	92.7	88.7
总计	1 782.2	1 768.9	696.6	679.4	1 085.6	1 089.5	512.7	567.1		

用性。

## 5 结语

本文针对 PSO 算法易于陷入局部最优解和后期搜索速度慢的问题,通过引入进化算法的“变异”算子和采用自适应的惯性权重,充分保证了粒子群的多样性和良好的解空间搜索能力。将优化调度的时间维作为粒子的空间维,引入粒子矩阵,通过对粒子在多维空间中最优位置的搜索来实现逐时段的优化计算,将该算法应用于复杂梯级水电能源系统中长期优化调度问题的研究。实际算例的应用情况表明:基于粒子群算法的梯级水电站群优化调度算法,在求解大规模复杂水电能源优化调度问题上,能显著提高水库群系统多年平均发电量,尤其是系统枯水期发电量,较常规数学规划算法有更优越的优化性能,为解决复杂水电能源非线性动力系统的全局优化计算问题提供了一种有效方法。

## 参考文献:

[1] 梅亚东,熊莹,陈立华.梯级水库综合利用调度的动态规划方

法研究[J].水力发电学报,2007,26(2):1-4.

- [2] 严靖,孙帆,岳超派.基于拉格朗日松弛法的梯级水电优化调度系统[J].控制理论与应用,2007,26(7):13-15.
- [3] 方红远,王浩,程吉林.初始轨迹对逐步优化算法收敛性的影响[J].水利学报,2002(11):27-30.
- [4] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. IEEE International Conf on Neural Networks[C]. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942~1948.
- [5] 张双虎,黄强,吴洪寿,杨菊香.水电站水库优化调度的改进离子群算法[J].水力发电学报,2007,26(1):1-5.
- [6] 李崇浩,纪昌明,缪益平.基于粒子群算法的梯级水电厂短期优化调度研究[J].水力发电学报,2006,25(2):94-98.
- [7] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[A]. IEEE World Congress on Computational Intelligence[C]. IEEE, 1998: 1951~1957.
- [8] 曾建潮,介婧,崔志华.粒子群算法[M].北京:科学出版社,2004.
- [9] 张铭,李承军,袁晓辉,钟琦.大规模混联水电系统长期发电优化调度模型及求解[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(3):45-49.

(责任编辑 陈萍)

(上接第37页)反拱变形较小,在水荷载作用时纵梁跨中挠度大于全现浇结构,但各纵梁之间的挠度差值与全现浇结构相当。在校核水荷载作用时,纵梁的最大拉应力出现在位于渡槽横断对称轴上的中纵梁跨中,满足混凝土拉应力控制要求。

(2) 叠合结构底板在自重作用下基本上处于无应力状态,对于渡槽长期空槽运行状况避免因预应力产生过大反拱变形是有利的。在水荷载作用下,叠合结构与全现浇结构的槽底板受力状态基本相同,但沿跨径方向叠合结构的槽底板受压应力以及沿渡槽横向槽底板顶面局部区域的拉应力均小于全现浇结构。总体上叠合结构槽底板的受力状态优于整体结构。

(3) 叠合结构的渡槽侧墙出现较大的内表面拉应力和横向侧移,在跨中截面与全现浇结构的侧墙内表面竖向正应力趋于一致,最大拉应力满足对混

凝土拉应力控制的要求。

## 参考文献:

- [1] 宋宝生.南水北调中线京石段左岸排水渡槽设计中几个问题的分析[J].水科学与工程技术,2005(1):7-9.
- [2] 赵顺波,李晓克,赵平.大型钢筋混凝土多纵梁渡槽结构设计方法的研究[J].水利学报,1999(4):35-39.
- [3] 季日臣,张永亮,王军玺,等.大型多纵梁矩形渡槽槽身横向结构计算[J].兰州交通大学学报(自然科学版),2004(4):5-8.
- [4] 赵顺波,张利梅,李树瑶.大型预应力混凝土渡槽结构受力性能试验研究[J].水力发电学报,2003,29(1):44-54.
- [5] 赵顺波,张新中.混凝土叠合结构设计原理及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2001:60-72.
- [6] 赵顺波,陈文义,黄和法,等.南水北调预应力混凝土渡槽叠合结构设计研究[J].人民黄河,1999,21(2):35-37.
- [7] SL 191-2008 水工混凝土结构设计规范[S].

(责任编辑 周晓蔚)