

文章编号:0559-9350(2019)04-0439-09

基于RBF代理模型的调水过程优化研究

高学平, 朱洪涛, 闫晨丹, 孙博闻, 张晨

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 调蓄工程通过泵站调水过程中, 需要通过合理的控制泵站启闭时间来调节水位, 从而不断优化调水过程, 但以往的优化方法效率低而且不易得到最优方案。为解决这一问题, 本文以南水北调东线山东段南四湖下级湖为研究对象, 基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)代理模型建立调水过程优化模型, 得到了调水过程方案参数区间内的最优方案, 并基于实际调水情况求得不同起调水位下的调水过程最优方案。首先根据调水过程方案参数区间自动选取80个调水过程方案样本, 并利用一维二维耦合水动力模型算出每个方案的水位变化过程; 其次采用RBF代理模型建立并验证调水过程方案与最高水位、最低水位的响应关系; 最后基于RBF代理模型, 以泵站工作总时间最短为目标, 考虑水量平衡和水位约束建立优化模型, 采用粒子群算法求解。研究结果表明, 基于RBF代理模型的调水过程最优方案结果与耦合模型计算该方案结果的绝对水深误差不超过0.05 m, 相对水深误差误差不超过0.99%, 模型计算精度高。基于RBF代理模型的调水过程优化模型, 求解得到调水过程参数区间内的最优方案, 解决了传统方法在人为设定有限个方案内得到较优方案的局限性。

关键词: 水动力学; 调水过程优化; RBF代理模型; 粒子群算法; 调蓄工程

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180793

1 研究背景

南水北调东线输水干线总长1466.24 km, 从江苏省扬州附近的长江干流引水, 利用洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖和沿线的运河、淮河以及周边水库等调蓄工程, 采用梯级泵站逐级提水与自流输水结合完成东线调水任务。调蓄工程通过泵站调水的过程中, 不仅要充分利用调蓄工程的调蓄能力, 还需时刻关注水位的变化, 实现安全、稳定调水。武周虎等^[1]基于运动波与惯性波传播规律, 研究了调水出湖泵站开启的必要和充分时间、出湖泵站开启时间差、湖内水位升高速率。高学平等^[2]采用数值模拟的方法, 定量描述了相邻梯级泵站开启临界时间差和临界水位。调蓄工程通过控制泵站启闭时间来调节湖内水位, 从而不断优化调水过程, 其优化过程的通常做法是通过人为不断改变边界条件, 利用一维二维耦合水动力模型求解得到时间-水位关系, 反复试算并比较各方案结果, 得到调水过程较优方案。显然, 该方法依赖主观因素, 其计算工作量大、效率较低, 而且不易得到最优方案。因此, 有必要采用智能优化算法进行调水过程优化研究, 寻求调水过程最优方案。

目前常用的智能优化算法有遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法、神经网络算法等。粒子群优化算法因其运行速度快、结构简单、易于实现, 很好地解决了非线性、全局优化等复杂问题, 在调水工程中取得了广泛的应用^[3-5], 郭旭宁等^[4]、丁咏梅等^[5]均采用粒子群优化算法求解优化调度模型, 实现水量的优化调度。调蓄工程调水过程中, 水量-水位联动关系十分复杂且非线性, 调水过程影响因素众多^[1,2,6]。对于高度非线性复杂的调水工程输水系统, 优化计算过程需要重复调用耦合模

收稿日期: 2018-08-30; 网络首发时间: 2019-04-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190411.1456.001.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAB07B00)

作者简介: 高学平(1962-), 博士, 教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xpgao@tju.edu.cn

通讯作者: 孙博闻(1987-), 博士, 讲师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: bwsun@tju.edu.cn

型, 计算量大且十分耗时, 因此亟需寻求高效的方法以提高工作效率。

近年来基于代理模型(Surrogate Model)的优化策略受到国内外学者的普遍关注, 提高了系统的优化效率^[7-9]。代理模型是通过数学模型逼近一组输入变量(独立变量)与输出变量(响应变量)的方法, 通过寻求输入输出变量间响应关系, 可代替真实系统快速给出所求解, 目前在流体动力学方面应用十分广泛, 已实现机翼、车头、进出水口等的体型优化^[9-12]。对于非线性复杂问题, 径向基函数(Radial Basis Function, RBF)代理模型具有结构简单、运算稳定、处理高阶非线性数学问题能力强等特点, 是较为常用的代理模型^[9]。Broad等^[13]建立了基于RBF代理模型的水资源配置模型, 实现了基于风险的水资源优化配置。显然, 该RBF代理模型在调水工程方面具有很好的应用前景。

本文以南四湖下级湖为研究对象, 基于RBF代理模型建立调水过程优化模型, 以泵站工作总时间最短为目标, 考虑水量平衡和水位约束, 研究下级湖优化调水过程。将调水过程方案优化结果与耦合模型计算该方案结果进行对比分析, 验证求解方法的可行性, 在保证计算精度的前提下提高优化效率, 得到调水过程最优方案。

2 研究区域与研究思路

2.1 研究区域 南四湖是南水北调东线输水干线上的重要调蓄湖泊, 湖腰兴建的二级坝枢纽工程将南四湖分为上、下级湖。二级坝闸以下为下级湖, 南北长 58 km, 湖底高程 30.80 m, 死水位 31.30m, 正常蓄水位 31.80 m, 调水时调蓄水位按 33.30 m控制。南四湖下级湖包含 3 个泵站、1 个城市用水分水口, 其中韩庄泵站与蔺家坝泵站为调入泵站, 提水进入下级湖, 泵站设计流量分别为 125 m³/s 和 75 m³/s; 二级坝泵站为调出泵站, 提水由下级湖进入上级湖, 泵站设计流量为 125 m³/s; 枣庄市薛城区分水口由潘庄引河分水至城区(图 1)。

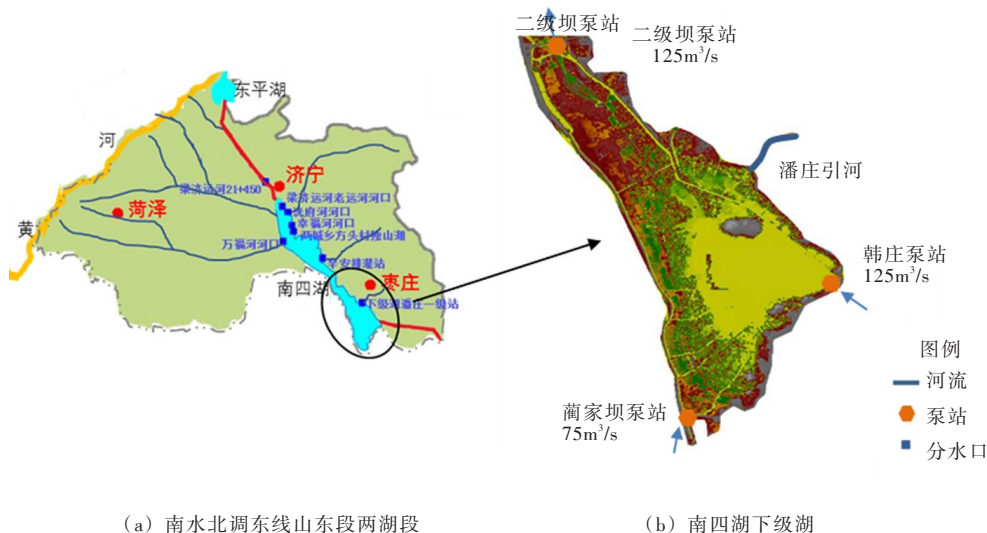


图 1 南水北调东线两湖段及南四湖下级湖示意图

根据《山东省水资源综合利用中长期规划》(2016), 近期规划年 2020 水平年 95%保证率调水, 调入下级湖水量 23.59 亿 m³, 调出下级湖水量 15.05 亿 m³, 枣庄市薛城区分水 2000 万 m³, 调水期为汛期末 10 月 1 日至翌年 5 月 31 日, 共 243 d。根据《南水北调东线第一期工程可行性研究总报告》(2015), 二级坝泵站泵前最低运行水位 30.58 m, 泵站前池进口底高程 27.80 m, 进水闸底高程 27.30 m。

2.2 研究思路 本文以南四湖下级湖为研究对象, 基于 RBF 代理模型建立调水过程优化模型, 优化下级湖调水过程。首先根据调水过程方案参数区间自动选取 80 个调水过程方案样本, 并利用一维二维耦合水动力模型对每个方案计算, 得到不同样本(调水过程方案)的时间-水位关系, 选取二级坝泵站为研究关键点, 选取最高水位和最低水位为研究关键水位; 其次基于 RBF 代理模型利用样本及耦

合模型计算的水位结果，建立并验证调水过程方案与最高水位、最低水位的响应关系；最后基于RBF代理模型建立调水过程优化模型，并采用粒子群算法全局寻优，求解调水过程最优方案。

3 调水过程方案样本选取

根据调水过程方案参数区间自动选取调水过程方案样本，并利用一维二维耦合水动力模型对每个方案计算，得到不同样本的最高水位和最低水位，样本及其水位结果用于RBF代理模型建立与验证。

3.1 一维二维耦合水动力模型 在实际工程中，当对河湖系统进行整体水动力模拟时，最直观有效的方法是对湖泊采用平面二维模型、对河流采用一维模型，最终建立一维二维耦合水动力模型^[14-16]（简称耦合模型）。耦合模型控制方程为连续性方程和动量方程^[17-19]。

一维数学模型控制方程：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2)$$

式中： A 为过水断面面积， m^2 ； Q 为流量， m^3/s ； x 为纵轴坐标， m ； t 为时间， s ； q_1 为单位长度侧向入流量， m^2/s ； v 为纵向流速， m/s ； Z 为水位， m ； $S_f = Q|Q|/K^2$ ， K 为流量模数， m^3/s ； g 为重力加速度， m/s^2 。

二维数学模型控制方程：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \end{cases} \quad (4)$$

式中： u 、 v 为沿 x 、 y 方向的流速， m/s ； h 为水深， m ； q 为汇/源流量， m^3/s ； $\nu_t = Dhu_*$ ， ν_t 为水平涡黏系数， m^2/s ； D 为混合系数，在主航道与深湖区取 $0.11 \sim 0.26$ ，浅湖区取 $0.3 \sim 0.77$ ，湖周区域取 $2.0 \sim 5.0$ ； $u_* = \sqrt{gRJ}$ ， u_* 为摩阻流速， m/s ； R 为水力半径， m ； J 为水力坡度； $c_f = g|V|/(C^2R)$ ， c_f 为河床摩擦系数， s^{-1} ； $|V|$ 为 u 和 v 的合流速， m/s ； C 为谢才系数； f 为科氏系数， s^{-1} 。

对南四湖下级湖建立耦合模型，模型的求解方法、参数率定以及验证详见文献[2]。在计算时，利用耦合模型，输入初始与边界条件，实现南四湖下级湖水动力计算，求得下级湖时间-水位关系。在调水工程中，起调水位、泵站调水流量、泵站开启时间差都影响着水位变化^[1-2,20-21]。因此，选用起调水位、泵站开启时间差、调入时间、调出时间四个参数变量表征调水过程方案，选用二级坝泵站处最高水位、最低水位为调水过程结果，用于调水过程优化研究。

针对耦合模型，给出初始条件起调水位、边界条件调入调出泵站工作的时间-流量关系以及一维河道下游水位过程关系，求解得到研究区域内任一点水位过程。例如，起调水位为 $31.66 m$ ，调入泵站韩庄、蔺家坝泵站从调水第一天起分别以 $100.97 m^3/s$ 和 $60.58 m^3/s$ 流量工作 $169 d$ ，调出泵站二级坝泵站从调水第 20 天起以 $125 m^3/s$ 流量工作 $140 d$ ，潘庄引河等在研究时间域内以定流量不间断分水，引河下游为流量水位条件，通过求解耦合模型得到研究区域内任意一点水位变化，提取二级坝泵站处水位结果，得到最高水位 $33.22 m$ 和最低水位 $30.94 m$ 。

3.2 调水过程方案样本选取 采用最优拉丁超立方设计(Optimal Latin hypercube design, Opt LHD)在调水过程方案参数区间内自动选样，调水过程方案由起调水位、泵站开启时间差、调入时间、调出

时间四个参数构成，列于表1。下级湖调水期为非汛期共243 d，假定调入泵站从调水期第一天开始调水且两泵站同时启闭，泵站开启时间差为调入泵站与调出泵站开启时间间隔，且泵站开启时间差与调出时间之和不大于243 d。构建RBF代理模型至少需要 $2a+1$ 个建立样本， a 为输入变量个数，参考姚拴宝等^[10]、邱亚松等^[22]研究中样本数量的选取，考虑提高代理模型精度及减少耦合模型计算时间，本文选取60个建立样本，并额外选取20个验证样本，每个样本代表一种调水过程方案，基于选好的样本采用耦合模型计算得到二级坝泵站处最高、最低水位。

表1 调水过程方案参数区间

参数变量	下限	上限
起调水位 W_0 /m	31.2	31.9
泵站开启时间差 ΔT /d	0	30
调入时间 T_{λ} /d	136	243
调出时间 $T_{\text{出}}$ /d	140	243

4 基于RBF代理模型的调水过程优化模型

根据样本及其水位结果建立并验证RBF代理模型，形成调水过程方案与最高水位、最低水位的响应关系；基于RBF代理模型建立调水过程方案优化模型，并采用粒子群算法全局寻优，得到调水过程最优方案。

4.1 RBF代理模型 RBF代理模型是一种多变量空间差值方法，可以表示为径向对称基函数的线性加权和形式^[9]：

$$W_{RBF}(x) = \sum_{i=1}^N w_i \phi(r) \quad (5)$$

式中： x 为输入变量，即样本点(调水过程方案)； W 为输出变量，即水位结果； w 为权重系数矢量； $\phi(r)$ 为径向函数； r 为待测点 x 与第 i 个样本点 x_i 之间的欧氏距离， $r = (x - x_i)^T (x - x_i)$ 。径向函数选用高斯函数， $\phi(r, c) = \exp\left(-\frac{r^2}{c^2}\right)$ ，式中 c 为形状系数，影响着代理模型的近似精度， c 的最佳取值由样本数量和散布特性确定^[9,23]，本文参考相关研究 $c = 1.133$ 。

采用RBF代理模型建立调水过程方案与最高、最低水位之间的响应关系。利用60个建立样本及其最高、最低水位，建立RBF代理模型；利用20个验证样本对RBF代理模型进行精度评估。本文选用的精度检验指标有以下几种参数：复相关系数 R^2 、平均相对误差 R_{avg} 、最大相对误差 R_{max} 、均方根误差 $RMSE$ 。

RBF代理模型验证样本的近似值结果与耦合模型的模拟值结果相关性分析如图2和图3所示，最高水位近似值与模拟值的 R^2 为0.9591，最低水位近似值与模拟值的 R^2 为0.9690，近似值与模拟值相关性较好。采用水深值对验证样本的结果进行相对误差分析，水深的 R_{avg} 不超过0.0298， R_{max} 不超过0.0693， $RMSE$ 不超过0.1290。RBF代理模型精度参数列于表2，其计算结果与模拟值相比，相关性较高，相对水深误差较小，为避免重复调用耦合模型，可采用代理模型方法计算调水过程水位结果。

4.2 基于RBF代理模型的调水过程优化模型 本文研究南四湖下级湖调水过程最优方案。引入RBF

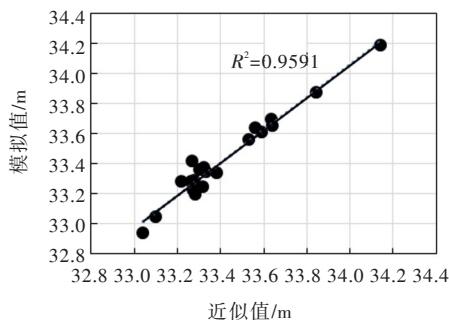


图2 最高水位近似值与模拟值相关性分析

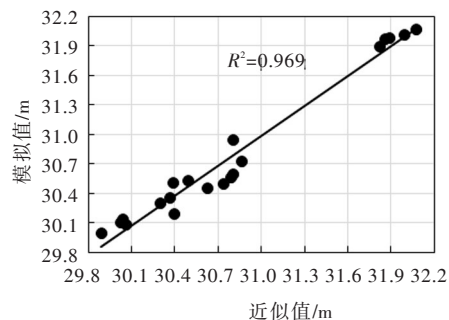


图3 最低水位近似值与模拟值相关性分析

代理模型方法，并与优化算法结合，快速求得调水过程最优方案，解决传统方法在人为设定有限个方案内得到较优方案的局限性。

鉴于泵站运行需消耗大量能源，本文以泵站工作总时间最短为目标函数，同时考虑水量平衡、安全水位、研究时间域约束，基于RBF代理模型构建调水过程优化模型。

目标函数：

泵站工作总时间最短，即：

$$\min f = T_{\text{入}} + T_{\text{出}} \quad (6)$$

约束条件：

水量平衡约束，湖泊在每一时刻均应满足水量平衡约束，即：

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{分}} + Q_{\text{损}} \quad (7)$$

水位约束，最高水位低于南四湖下级湖调水期最高蓄水位，最低水位高于泵站最低运行水位约束，即：

$$30.58 \leq W_{(t)} \leq 33.30 \quad (8)$$

泵站工作时间约束，泵站开启时间差与调出泵站工作时间不超过研究时间域，即：

$$\Delta T + T_{\text{出}} \leq 243 \quad (9)$$

式中： $T_{\text{入}}$ 为调入泵站工作时间， $T_{\text{出}}$ 为调出泵站工作时间， ΔT 为调出泵站与调入泵站开启时间差，d； $Q_{\text{入}}$ 为入南四湖下级湖水量， $Q_{\text{出}}$ 为出下级湖入上级湖水量， $Q_{\text{分}}$ 包括枣庄市薛城区及江苏省部分分水， $Q_{\text{损}}$ 包括调水期内蒸发渗漏等损失水量， m^3 ； $W_{(t)}$ 为 t 时刻二级坝泵站泵前水位。

4.3 粒子群优化算法 优化模型的求解采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。粒子群优化算法来源于模拟鸟类觅食行为的规律性，采用粒子在解空间中追随最优粒子进行搜索^[3,24]。空间中每个粒子都有自己的位置，第 i 个粒子位置表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ，飞行的速度表示为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。在粒子群每一次迭代中，粒子需要找到两个极值^[3]：

(1)个体极值 p_{best} ，即粒子本身所找到的最优解，位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ；

(2)全局极值 g_{best} ，即群体所找到的最优解，位置为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。

在找到这两个极值后，粒子的第 d 维($1 \leq d \leq D$)速度 v_{id} 和位置 x_{id} 根据如下方程进行更新：

$$v_{id} = \omega \cdot v_{id} + c_1 \cdot \text{rand}(\cdot) \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot \text{Rand}(\cdot) \cdot (p_{gd} - x_{id}) \quad (10)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (11)$$

式中： ω 为惯性权重， c_1 和 c_2 为加速常数， $\text{rand}(\cdot)$ 和 $\text{Rand}(\cdot)$ 为两个在 $[0, 1]$ 范围里变化的随机值。

采用粒子群优化算法求解优化模型，算法参数设置见表3。最大迭代次数数值越大，越能保证解的收敛性但影响运算速度；粒子个数一般取20~40，对于比较难的问题可以取100~200；惯性权重系数建议取值0.4~1.4，该值越大越有利于进行大范围的全局搜索，越小越有利于进行小范围的局部搜索，加速常数一般为 $2^{[25-26]}$ 。结合赖宇阳^[25]、安伟刚等^[26]优化求解问题参数设置，本文最大迭代次数为100，粒子个数为100，惯性权重采用0.9，加速常数 c_1 和 c_2 均为2，优化完成共搜索 10^4 个方案。

表3 优化算法参数设置

参数	最大迭代次数	粒子个数	惯性权重 ω	加速常数 c_1	加速常数 c_2
参数值	100	100	0.9	2	2

5 优化结果分析

采用耦合模型计算调水过程方案时,需通过人为改变边界条件在有限个调水过程方案中得到较优方案。本文基于RBF代理模型构建了调水过程优化模型,采用粒子群优化算法不断搜索解空间,求解调水过程最优方案;为提高计算效率,引入RBF代理模型方法,基于调水过程方案及其水位结果构建调水过程方案与最高、最低水位响应关系,快速计算得出调水过程方案的水位近似值,避免重复调用耦合模型,提高优化效率。

基于RBF代理模型的调水过程最优方案为起调水位 31.60 m,泵站开启时间差 10.81 d,调入时间 149.92 d,调出时间 140 d,此时最高水位为 33.30 m,最低水位为 30.58 m。将最优方案参数输入到耦合模型并计算,基于RBF代理模型的调水过程最优方案结果与耦合模型计算该方案的结果对比列于表 4。采用水深值对结果进行比较分析,其绝对水深误差不超过 0.05 m,相对水深误差不超过 0.99%,结果十分相近。基于RBF代理模型的调水过程优化模型精度高,且求得调水过程方案参数范围内的最优方案。

表 4 调水过程最优方案结果与耦合模型计算结果对比

	最高水位/m	最大水深			最低水位/m	最小水深		
		数值/m	误差/m	相对误差/%		数值/m	误差/m	相对误差/%
最优方案结果	33.30	5.50	0.05	0.99	30.58	2.78	-0.001	0.04
耦合模型计算值	33.25	5.45			30.58	2.78		

根据《南水北调东线第一期工程可行性研究总报告》(2015),南水北调东线全线汛期 243 d 调水,即当起调水位为 31.8 m 时开始调水,调入调出泵站同时开始工作且工作时间为 243 d,将此方案作为优化计算的初始方案。基于RBF代理模型的调水过程最优方案与初始方案参数均列于表 5,最优方案泵站工作总时间 289.92 d,与初始方案相比总工作时间大大减少。

表 5 调水过程最优方案与初始方案设计参数对比

	起调水位/m	泵站开启时间差/d	调入时间/d	调出时间/d	泵站总工作时间/d
初始方案	31.80	0	243	243	486
最优方案	31.597	10.81	149.92	140	289.92

基于RBF代理模型的调水过程最优方案与初始方案的时间-水位关系见图 4,初始方案最低水位 30.32 m,最高水位 33.20 m,最低水位低于泵站安全运行水位(30.58 m),调水时会危及泵站运行安全。基于RBF代理模型的调水过程最优方案最低水位 30.58 m,出现在 10 月 18 日,最高水位 33.25 m,出现在 3 月 1 日。相比初始方案,最优方案的水位更符合要求的,最高水位更接近防洪限制水位(33.30 m),且出现于调水中期,而后水位下降为汛期准备。以正常控制水位 32.80 m 为界,最优方案从 1 月 16 日到输水结束共 136 d,远多于初始方案从 3 月 20 日到输水结束的 73 d,因此最优方案更充分利用了湖泊的调蓄能力。

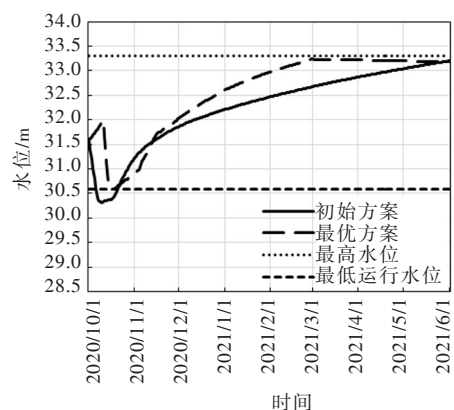


图 4 调水过程最优方案和初始方案时间-水位关系图

在调水过程方案参数中,起调水位为南四湖下级湖汛末水位,在调水时起调水位已知。考虑实际调水情况,采用基于RBF代理模型的调水过程优化模型计算不同起调水位时的调水过程最优方

表6 不同起调水位时的调水过程最优方案

序号	起调水位/m	泵站开启时间差/d	调入时间/d	调出时间/d
1	31.20	22.01	156.94	140
2	31.30	21.18	153.23	140
3	31.40	17.21	153.70	140
4	31.50	13.83	152.77	140
5	31.60	10.73	149.93	140
6	31.70	13.07	166.01	140
7	31.80	18.54	190.39	140
8	31.90	27.84	228.05	140

案。选取低于死水位0.10 m，高于正常蓄水位0.10 m，步长间隔为0.10 m的不同起调水位，计算得到不同起调水位下的调水过程最优方案，列于表6。当起调水位为31.60 m时，此时泵站开启时间差、调入时间天数均最小，分别为10.73 d和149.93 d。当起调水位大于31.60 m时，泵站开启时间差、调入时间天数均有所增加，当起调水位小于31.60 m时，二者天数也会有所增加。同时，当起调水位为31.60 m的最优方案与前文的调水过程最优方案十分接近，由此可见，当起调水位为31.60 m时，此时最适合开始进行调度，且此时的调水过程最优方案的泵站工作总时间最短。

6 结论

采用耦合模型计算调水过程方案时，需通过人为改变边界条件在有限个调水过程方案中得到较优方案。鉴于当前调水过程方案主要依靠主观因素且不易获得最优方案的问题。本文以泵站工作总时间最短为目标，考虑水量平衡和水位约束，基于RBF代理模型构建调水过程优化模型，以南水北调东线山东段南四湖下级湖为研究对象，研究下级湖调水过程最优方案。

(1)本文提出的基于RBF代理模型的调水过程优化模型，首先根据调水过程方案参数区间自动选取多个调水过程方案样本，并利用耦合模型对每个方案计算其水位结果；其次采用RBF代理模型建立并验证调水过程方案与最高水位、最低水位的响应关系；最后采用粒子群优化算法求解基于RBF代理模型的优化模型，得到调水过程最优方案。该方法解决了传统优化方法的局限性，易于得到最优解。

(2)利用所提出的方法研究了南四湖下级湖调水过程，其调水过程最优方案为起调水位31.60 m，调入时间149.92 d，调出时间140 d，泵站开启时间差10.81 d。基于RBF代理模型的调水过程最优方案结果与耦合模型计算该方案结果的绝对水深误差不超过0.05 m，相对水深误差不超过0.99%，结果一致，模型精度高。

(3)基于RBF代理模型的求解的南四湖下级湖调水过程最优方案与初始方案相比，泵站工作总时间由486 d缩短至289.92 d，且更充分利用了湖泊的调蓄能力。考虑实际调水情况，采用基于RBF代理模型的调水过程优化模型，求得不同起调水位下的调水过程最优方案，为实际工程调水提供参考。

参 考 文 献：

- [1] 武周虎, 罗辉, 刘长余, 等. 南水北调南四湖提水泵站开启时间的分析研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 110-115.
- [2] 高学平, 聂晓东, 孙博闻, 等. 调水工程中相邻梯级泵站的开启时间差研究[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1502-1509.
- [3] 张朝龙, 余春日, 江善和, 等. 基于混沌云模型的粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1951-1954.

- [4] 郭旭宁, 雷晓辉, 李云玲, 等. 跨流域水库群最优调供水过程耦合研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 949-958.
- [5] 丁咏梅, 邵东国. 水资源有计划市场配置模型及其应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(4): 438-442.
- [6] 高学平, 闫晨丹, 张岩, 等. 基于BP神经网络的调水工程调蓄水位预测模型[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 8-13.
- [7] 穆雪峰, 姚卫星, 余雄庆, 等. 多学科设计优化中常用代理模型的研究[J]. 计算力学学报, 2005(5): 608-612.
- [8] ELSAYED K, LACOR C. CFD modeling and multi-objective optimization of cyclone geometry using desirability function, artificial neural networks and genetic algorithms[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(8): 5680-5704.
- [9] 龙腾, 刘建, WANG G Gary, 等. 基于计算试验设计与代理模型的飞行器近似优化策略探讨[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 79-105.
- [10] 姚拴宝, 郭迪龙, 孙振旭, 等. 基于Kriging代理模型的高速列车头型多目标优化设计[J]. 中国科学(技术科学), 2013, 43(2): 186-200.
- [11] GAO X, TIAN Y, SUN B, et al. Multi-objective optimization design of bidirectional flow passage components using RSM and NSGA II: A case study of inlet/outlet diffusion segment in pumped storage power station[J]. Renewable Energy, 2018, 115.
- [12] 高学平, 李建国, 孙博闻, 等. 利用多岛遗传算法的侧式进/出水口体型优化研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 186-194.
- [13] BROAD D R, DANDY G C, MAIER H R. A systematic approach to determining metamodel scope for risk-based optimization and its application to water distribution system design[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 69: 382-395.
- [14] 王智勇, 陈永灿, 朱德军, 等. 一维-二维耦合的河湖系统整体水动力模型[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 516-522.
- [15] 陈文龙, 宋利祥, 邢领航, 等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 848-855.
- [16] 姜晓明, 李丹勋, 王兴奎. 基于黎曼近似解的溃堤洪水一维-二维耦合数学模型[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 214-221.
- [17] HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS 2D Modeling User's Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [18] CASULLI V. A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 60(4): 391-408.
- [19] HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual Version 5.0[M]. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, 2016.
- [20] 宋月清, 林仁. 水泵启动过程中泵站前池水位降落值的分析[J]. 水利学报, 1999(5): 71-76.
- [21] 张万台, 路明利, 吴秀云, 等. 引滦工程尔王庄暗渠泵站经济运行方案研究[J]. 水利学报, 2004(8): 94-97.
- [22] 邱亚松, 白俊强, 华俊. 基于本征正交分解和代理模型的流场预测方法[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1249-1260.
- [23] 李响, 王晓鹏. 径向基代理模型中形状参数对精度的影响[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 688-692.
- [24] 胡旺, GARY G Yen, 张鑫. 基于Pareto熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025-1050.
- [25] 赖宇阳. Isight参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [26] 安伟刚, 李为吉. 改进的粒子群优化算法及其工程应用[J]. 机械科学与技术, 2005(4): 415-417.

Study on optimization of water transfer process based on RBF surrogate model

GAO Xueping, ZHU Hongtao, YAN Chendan, SUN Bowen, ZHANG Chen

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In the water transfer process of the regulating and storage project through the pump station, the water level needs to be adjusted through reasonable control of the opening and closing time of the pump station, so as to constantly optimize the water transfer process. However, previous optimization methods are inefficient and difficult to obtain an optimal solution. In order to solve this problem, this paper takes the Lower Nansi Lake in Shandong reach of the eastern route of South-to-North Water Transfer Project as the research object, and establishes the optimization model of water transfer process based on RBF (Radial Basis Function) surrogate model to study the optimal water transfer process of the Lower Nansi Lake. The method is used to obtain the optimal scheme within the parameter range of the water transfer process, and the optimal scheme for the water transfer process under different starting water levels is obtained based on the actual water transfer situation. Firstly, 80 samples of the water transfer process are selected automatically according to the parameter interval of the water transfer process scheme, and the water level of each scheme is calculated using the 1D-2D coupled hydrodynamic model. Secondly, the RBF surrogate model is adopted to establish and verify the relationship between the water transfer process scheme and the response of the highest and lowest water levels. Finally, based on the RBF surrogate model, taking the shortest working time of the pump station as the objective, the optimization model was established considering water balance and water level constraints, and particle swarm optimization was adopted to solve the problem. The research results show that the absolute depth error is no more than 0.05m and the relative depth error is no more than 0.99% compared with the calculation results of the scheme water level and the coupled model in the optimized water transfer process, and the optimization model of water transfer process based on RBF surrogate model has high accuracy. Based on this model, the optimal solution within the parameter interval of the water transfer process is obtained, which solves the limitation of the traditional method to obtain the optimal solution within a limited number of artificially set schemes.

Keywords: hydrodynamics; optimization of water transfer process; RBF surrogate model; particle swarm optimization; storage engineering

(责任编辑: 李福田)