



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2016.02.025

方国华, 曹蓉, 刘芹, 等. 改进遗传算法及其在泵站优化运行中的应用[J]. 2016, 14(2): 142-147.

FANG Guo hua, CAO Rong, LIU Qin, et al. Improved genetic algorithm and its application in the optimal operation for pumping station[J]. 2016, 14(2): 142-147. (in Chinese)

改进遗传算法及其在泵站优化运行中的应用

方国华, 曹蓉, 刘芹, 陈策

(河海大学, 南京 210098)

摘要: 在分析遗传算法基本理论的基础上, 针对泵站优化运行问题的特性, 从控制参数、选择方式、交叉机理和种群设置等方面进行改进, 建立求解高维整型离散决策变量的改进遗传算法。以淮安四站为例进行计算, 比较并分析改进遗传算法和标准遗传算法在泵站优化运行中的适用性, 为泵站优化运行算法的设计和應用提供参考。结果表明: 同时改进适应度和种群的混合改进遗传算法——FFGA&TPGA, 精度高, 计算速度快, 具有收敛一致性, 可用于复杂泵站系统的实时优化调度计算。

关键词: 改进遗传算法; 泵站; 优化运行; 混合改进

中图分类号: TU99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0142-06

Improved genetic algorithm and its application in the optimal operation for pumping station

FANG Guo hua, CAO Rong, LIU Qin, CHEN Ce

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to basic theory of genetic algorithm and the characteristics of optimal operation for pumping station, this paper established an improved genetic algorithm for solving high dimensional discrete integer decision variables through improving the control parameters, selection mode, crossover mechanism and population. The No. 4 Huaian Pumping Station was taken as a study case to compare and analyze the genetic algorithm and improved genetic algorithm applicability to optimal operation for pumping station, which could provide references for the design and application of the pumping algorithm. The results showed that the mixed improved genetic algorithm——FFGA&TPGA, which improved the fitness and population, had high precision, efficiency and uniform convergence. Thus, it had advantages in solving large and complex problems for optimal operation of pumping station.

Key words: improved genetic algorithm; pumping station; optimal operation; mixed improved

泵站优化调度是典型的高维、非线性、多属性、多阶段规划问题, 从国内外优化调度发展历程来看, 求解算法经历了从传统优化算法向智能算法转变, 再到算法集成的过程。在泵站经济运行求解算法

上, 刘超等^[1]提出了基于等微增率的数值解法, 提高了求解速度和精度; 程吉林^[2]、Vilas Nitivattanon^[3]、龚懿^[4]等运用动态规划, 实现了对泵站优化运行最优方案的求解; 针对水泵为非线性模型的特

收稿日期: 2015-06-16 修回日期: 2016-03-15 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1440.011.html>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2012041); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0256)

Fund: Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province(2012041); Innovative Research Program for College Graduates of Jiangsu Province(CXZZ13_0256)

作者简介: 方国华(1964-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划及利用、水利经济等方面的教学与科研工作。E-mail: hhufgh@126.com

通讯作者: 曹蓉(1992-), 女, 江苏盐城人, 主要从事水利水电规划与水利经济研究。E-mail: hhucrong@163.com

点,杨鹏⁵¹采用遗传算法并证明了其具有较好的适用性;冯晓莉⁶¹将遗传算法、基本粒子群算法与模拟退火粒子群算法在大型泵站变角优化运行中的应用进行了比较,计算得出模拟退火粒子群算法更为简单高效;袁尧将 SQP 局部搜索引入遗传算法⁷¹,进一步提高了泵站遗传算法的稳定性,同时,他还在改进启发式信息和信息素更新方式的基础上,提出了求解泵站多机组优化运行的蚁群算法⁸¹,取得了较好的优化结果。

智能算法灵活、数学约束少的优点使其在求解泵站优化运行方案中具有相当的优势。然而,考虑到泵站优化运行要对整型高维离散决策变量进行求解,一般的智能算法需进行调整、改进后才能在泵站优化问题中取得较好的效果。本文针对遗传算法在泵站优化运行中的应用,在分析遗传算法基本理论的基础上,就标准遗传算法的选择、交叉、变异操作和种群设置等方面进行改进,求解泵站优化运行模型,经过计算分析改进遗传算法在泵站优化运行中的表现,为泵站优化运行算法的改进和应用提供参考。

1 泵站优化运行模型

以泵站开机运行总耗电费用最少为目标函数,各台水泵机组各时段的叶片安放角或转速为决策变量,规定时段内的抽水量为约束条件,建立泵站优化运行数学模型。其中,考虑峰谷电价和实际操作情况,将泵站内 SJ 台水泵机组优化运行时长统一划分为 SN 个时段。

目标函数:

$$\min f = \sum_{j=1}^{SJ} \sum_{i=1}^{SN} \rho \times g \times Q_{ij}(\theta_{ij}, n_{ij}) \times H \times \Delta T_i \times P_i / (\eta_{eij} \times \eta_{mot} \times \eta_{tr} \times \eta_j(n_{ij})) \quad (1)$$

总水量约束:

$$\sum_{j=1}^{SJ} \sum_{i=1}^{SN} Q_{ij}(\theta_{ij}, n_{ij}) \Delta T_i \geq W_e \quad (2)$$

功率约束:

$$N_{ij}(\theta_{ij}, n_{ij}) \leq N_0 \quad (3)$$

式中: f 为泵站运行总电费(元); $Q_{ij}(\theta_{ij}, n_{ij})$ 为第 j 台机组在第 i 时段的流量(m^3/s),对于叶片可调式水泵,在扬程、转速一定时,其为叶片安放角 θ_{ij} 的函数,对于变频变速水泵,在扬程、叶片安放角一定时,其为转速 n_{ij} 的函数; SN 为分割的运行时段(个); SJ 为泵站内可运行机组的台数(台); H 为平均扬程(m); ΔT_i 为第 i 时段划分的时间间隔长度(h); P_i 为第 i 时段的分时电价(元/(kW·h)); W_e 为管理部门下达的提水总量(m^3); η_{eij} 、 η_{mot} 、 η_{tr} 分别为装置效率、电动机效率和传动效率, η_{eij} 与第 j 台机组第 i 时段的流量、扬程有关,电动机效率 η_{mot} 在负荷

大于 60% 时,可以认为基本不变,直接连接机组的传动效率 η_{tr} 为 1; $\eta_j(n_{ij})$ 为变频变速水泵变频装置的效率,是频率(转速 n_{ij}) 的函数; $N_{ij}(\theta_{ij}, n_{ij})$ 为第 j 台机组在 i 阶段对应扬程、叶片安放角 θ_{ij} (或转速 n_{ij}) 的实际功率(kW),应小于电动机额定功率 N_0 。

2 改进遗传算法

2.1 遗传算法基本理论

遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA) 是 20 世纪 60 年代美国 Michigan 大学 John H. Holland 教授提出的一种智能算法,起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究,是一种鲁棒性很强的随机搜索算法(Random Searching Algorithms)。

标准遗传算法(又称简单遗传算法, Simple Genetic Algorithm, 简称 SGA)¹⁹¹, 借鉴自然界生物体的自然选择(Natural Selection)和杂交(Crossover)的自然进化(Natural Evolution), 基本流程见图 1。

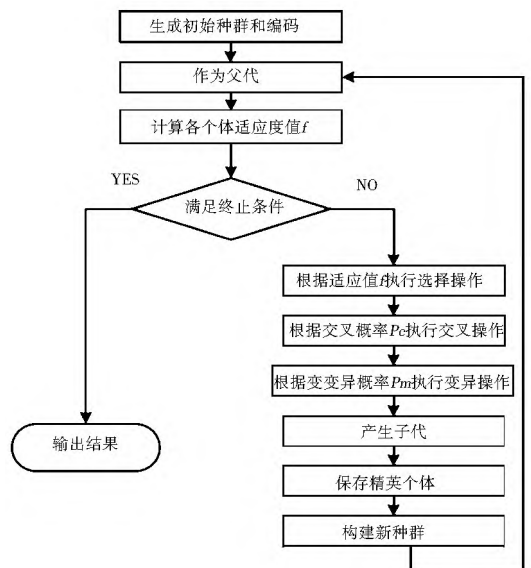


图 1 SGA 计算流程图

Fig. 1 Flow chart of SGA

标准遗传算法起初并非针对泵站优化问题设计,虽然程序简单,结构明了,但求解结果随机性大、精度差,易出现早熟和局部收敛等问题。因此,考虑到泵站优化运行问题高维、非线性、具有整型离散变量的特点,有必要探索相适应的改进遗传算法(Improved GA, IGA)。

从图 1 可以看出,遗传算法主要涉及编码形式、适应度、选择、交叉、变异和种群构建几个方面。本文结合动态策略和自适应策略等方面的研究成果,提出应用于泵站优化问题的改进方案,对控制参数、选择方式和交叉机理等进行探究,重点分析分别改进适应度、选择交叉和种群构建的单一改进遗传算

法, 以及多改进策略并举的混合改进遗传算法。

2.2 单一改进遗传算法

2.2.1 改进适应度的遗传算法 (Fitness fine-tuned GA, FFGA)

适应度函数代表了种群个体的优劣, 在 SGA 中, 适应度函数是正态分布函数, 优劣个体的差距不明显, 易引起早熟。因此, 针对适应度函数进行设计, 设计思想是: 在 GA 早期进化时期, 对优秀个体的适应度进行压缩以克服优秀个体大量复制、群体丧失多样性而导致早期收敛的问题; 在 GA 进化后期, 多数个体都集中在最优解附近时, 要拉开最优个体与其他较优个体的适应度, 以利于选择操作能做出敏感的选择^[10]。

在 FFGA 中, 适应度值 f 按如下公式进行调整:

$$f(y) = \begin{cases} 1 - 0.5 \times \left(\frac{y-b}{a} \right)^\alpha & y-b < a \text{ 时} \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{y-b}{a} \right)^\beta} & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为有待计算适应度的个体目标函数值; b 为当前最优个体的目标函数值; a 为当前群体所有个体的平均目标函数值; $\alpha = 1.5 - t/T$; t 为当前进化代数; T 为最大进化代数; β 取为 2, 以贬低目标函数较大的个体适应度, 淘汰较差个体。

2.2.2 自适应遗传算法 (Adaptive GA, AGA)

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择直接影响算法的收敛性。SGA 中, P_c 和 P_m 为定值 (本文取 $P_c = 0.7$, $P_m = 0.01$), 完全不考虑种群进化过程的需要。Srinivas^[11] 等提出一种自适应遗传算法 (Adaptive GA, AGA), 交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 能够随适应度自动改变。通过自适应调节, 使高适应度 (较优) 个体对应于较低的 P_c 和 P_m , 保护该解进入下一代, 低适应度 (较差) 个体则对应于较高的 P_c 和 P_m , 促进该解变异。

在 AGA 中, P_c 和 P_m 按如下公式进行自适应调整:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\text{max}} - f)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1} & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{max} 为群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大

的适应度值; f 为要变异个体的适应度值; 文中 $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$, $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$ 。

2.2.3 改进种群的遗传算法

(1) 三种群遗传算法 (Three population GA, TPGA)。

SGA 中种群由父代不断交叉变异产生, 其选择的范围受限于最初的父代以及交叉、变异的机理, 而交叉、变异操作又受限于相关控制参数的率定。因此, 为提高种群多样性和随机性, 从改进种群角度, 提出三种群遗传算法 (Three population GA, TPGA): 在交叉变异产生的种群之外, 每一代中加入一随机产生的新种群, 增加最优解的选择面, 为最优解的产生提供更多渠道。将父代、父代交叉变异产生的子代、随机种群这三个种群中的优秀个体作为一个父代, 进入下一次迭代。

(2) 广度变异遗传算法 (Deep mutation GA, DMGA)。

由于泵站优化的高维、非线性特点, 遗传算法进化后期, 群体逐渐靠近较优解, 较优解在种群迭代过程中大量复制, 始终保持优势, “领导”进化的方向, 很难产生最优解。因此, 在 SGA 算出相对最优解后, 进行“广度”变异^[12], 依靠随机数在相对最优个体 (解) 周围变异, 构建出新种群, 重新进行计算。同时, 采用保留相对最优个体 (解) 直接进入下一次计算的方式, 保证相对最优个体不被破坏。针对整型高维离散决策变量, 本文具体的做法是, 在相对最优个体 15 个基因位中随机选择 5 个基因位, 用随机产生的新基因替代原有基因, 实现广度变异。将广度变异产生的新种群作为初始种群, 重新进行计算, 共如此循环 5 次。通过广度变异, 扩大算法搜索广度, 确保种群的多样性。

2.3 混合改进遗传算法 (Mix advanced GA, MAGA)

上述几种单一改进遗传算法分别应用不同的改进策略, 在计算速度、精度和收敛性等方面改进效果各不相同。单一的改进策略通常难以保证算法在各方面均表现优秀, 因此为充分发挥不同策略的优点, 进一步提高算法的寻优效率和精度, 保证算法的实用性, 可将上述几种分别针对适应度、交叉概率、变异概率和种群进行单一改进的方案综合起来, 构建同时改进参数控制、选择操作、交叉与变异机理、种群构成的混合改进遗传算法 (Mix advanced GA, MAGA)。

通过两种或多种改进方案并举, 在充分发挥各方案原有优势的基础上, 弥补单一改进遗传算法存

在的一些不足,使算法程序更稳定高效。例如,将改进交叉变异操作的自适应算法 AGA 和种群改进算法 TPGA 结合,建立 AGA & TPGA 算法;或将改进适应度的 FFGA 和改进种群的 TPGA 结合,建立 FFGA & TPGA 算法,使具有针对性的“优选”和随机性的“多选”相混合,实现又好又快地在更广的范围里搜寻并产生最优解。

3 算例分析

淮安四站建成于 2009 年,与淮安一、二、三站共同组成南水北调东线工程京杭运河输水线的第二梯级泵站。淮安四站安装了 4 台套 2900ZLQ34-6-01 型液压全调节轴流泵(1 台为备用机组),扬程范围为 2~5.5 m,设计扬程 4.18 m,设计总流量为 100 m³/s,设计叶片安放角 $\theta = 0^\circ$,调节范围为 $[-4^\circ, 4^\circ]$ 。电动机额定功率 $N_0 = 2500$ kW,取电动机效

率 $\eta_{\text{mot}} = 0.94$,直联传动效率 $\eta_{\text{int}} = 1$ 。

3.1 建立模型

泵站运行条件:设计日均扬程 4.18 m 下,要求泵站满负荷运行,提水量大于 864×10^6 m³/d。根据泵站优化运行数学模型式(1)~式(3),建立淮安四站日优化运行模型。

淮安四站为叶片可调式泵站,4 台机组中 1 台为备用机组,则有 3 台机组参与泵站日优化运行。考虑液压全调节的特点、对应扬程的功率约束、运行管理习惯、模型精度及优化工作量,将叶片安放角 θ_j 离散为 $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 以及关机。

采用基于最小二乘法的多项式-马尔科夫组合模型^[13]对淮安四站装置性能曲线图进行数据拟合,确定泵站的扬程-流量关系,具体的装置性能曲线拟合公式见表 1。

表 1 淮安四站装置性能曲线拟合公式

Tab. 1 Fitting formula for device performance curve of the No. 4 Huaian Pump Station

叶片角度($^\circ$)	$Q(H)$	$\eta(Q)$
-4	$35.8574 - 0.3508H - 0.31313H^2$	$71.6179 - 10.0151Q + 0.76674Q^2 - 0.014326Q^3$
-2	$37.8068 + 0.3124H - 0.4112H^2$	$117.8796 - 13.9382Q + 0.80152Q^2 - 0.01268Q^3$
0	$39.2298 + 0.7158H - 0.45944H^2$	$283.3248 - 30.9636Q + 1.32979Q^2 - 0.01755Q^3$
2	$39.6817 + 1.8224H - 0.60418H^2$	$492.1055 - 50.1326Q + 1.86561Q^2 - 0.02203Q^3$
4	$38.89652 + 3.1012H - 0.73718H^2$	$638.2597 - 63.1376Q + 2.20158Q^2 - 0.02448Q^3$

3.2 算法求解及分析

分别运用标准遗传算法(SGA)和改进遗传算法(IGA)对淮安四站日优化运行模型进行求解,并与动态规划法(DP)求出的最优解进行比较,具体计算结果见表 2。

使用 Matlab 语言编制算法程序,各算法程序独立运行 10 次,若 10 次计算结果一致则该算法具有

收敛一致性,否则采用 10 次运算中最小电费作为该算法的电费最优解。遗传算法选取种群规模 200,最大迭代次数 500 代,采用整数编码、轮盘选择、算数交叉和非均匀变异,不符合水量约束条件的个体用极端个体进行替换,即用最大提水量下的叶片开角进行替代。

各算法的精度和效率对比见图 2。

表 2 安四站日优化运行各算法求解结果

Tab. 2 Calculation of daily operation of the No. 4 Huaian Pump Station by different algorithms

算法	DP	SGA	IGA									
			FFGA	AGA	TPGA	DMGA	MAGA					
							FFGA & AGA	AGA & DMGA	FFGA & TPGA	AGA & TPGA		
精度	电费最优解/元	85 885	86 285	86 735	86 154	86 088	86 088	86 735	86 088	86 088	86 088	86 088
	偏差(%)	—	0.47	0.99	0.31	0.24	0.24	0.99	0.24	0.24	0.24	0.24
效率	平均计算时间/s	90	4	4	15	7	21	13	75	7	16	16
	收敛一致性	一致	不一致	不一致	不一致	不一致	不一致	不一致	不一致	一致	一致	一致

注:(1)根据 2015 年 4 月江苏省物价局公布的峰谷分时电价,一日划分为 5 个运行时段:0 至 8 时(0.3150 元/kW)、8 至 12 时(1.0752 元/kW)、12 至 17 时(0.6451 元/kW)、17 至 21 时(1.0752 元/kW)、21 至 24 时(0.6451 元/kW)。(2)偏差指各算法求得电费最优解与 DP 法求得的最优解的差值。

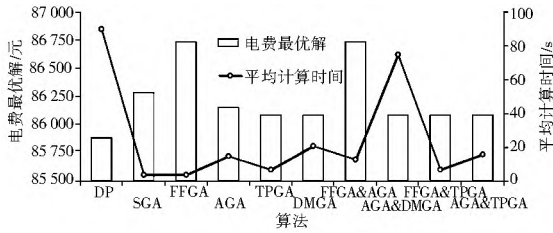


图 2 算法精度和效率分析

Fig. 2 Comparison of different algorithms in the term of efficiency and precision

由表 2 和图 2 可得如下结果。

(1) 与 DP 法求得的最优解相比, SGA 求得的电费高 0.47%, 但计算时间减少了 95.6%, IGA 求得的电费高 0.24% ~ 0.99%, 但计算时间减少了 16.7% ~ 95.5%。因此, 遗传算法比动态规划法求解速度极大提高, 虽然精度稍差, 但偏差可控制在 0.24% ~ 0.47% 左右。

(2) 单一改进遗传算法中, FFGA 求得的电费比 SGA 高, 而 AGA、TPGA 和 DMGA 求得的电费分别比 SGA 少 0.15%、0.23% 和 0.23%, 计算时间仅分别增加 11 s、3 s 和 17 s; 但是这四种单一改进遗传算法均不具有收敛一致性, 同一种算法程序运行 10 次得到的结果有变动。由此可见, 在求解泵站优化运行问题时, AGA、TPGA 和 DMGA 精度较高, 但求解结果表明不具有收敛一致性。

(3) 混合改进遗传算法中, AGA&DMGA、FFGA&TPGA 和 AGA&TPGA 三种算法求得的电费均比 SGA 少 0.23%, 并且 FFGA&TPGA 和 AGA&TPGA 具有收敛一致性, 能收敛到一个稳定的结果; 其中, FFGA&TPGA 的计算速度相对更快, 仅为 7 s, 用时是 SGA 的 1.75 倍、是 DP 法的 0.08 倍, 是精度、效率均优的一种混合改进遗传算法。

综上所述, 求解泵站优化运行问题时, 遗传算法虽然仅能求得相对最优解, 但十分接近动态规划法的结果, 偏差约为 0.24% ~ 0.47%, 且计算时间比动态规划法大大减少, 速度提高约 90%。几种改进遗传算法中, TPGA、DMGA、AGA&DMGA、FFGA&TPGA 和 AGA&TPGA 比标准遗传算法 (SGA) 求解精度高 0.23%。TPGA 为单一改进遗传算法, 精度高但收敛结果有波动, 需多次计算取最优解。将 TPGA 与其他改进方案相结合, 生成 FFGA&TPGA 和 AGA&TPGA 两种混合改进遗传算法, 虽然算法复杂性和计算时间略有增加, 但提高了收敛性, 一次计算即可求得最优解, 操作性更强。其中, FFGA&TPGA 是同时改进适应度函数和种群构建的混合改进遗传算法, 精度高, 计算速度快, 算法收敛性好, 综合效率高, 更具有适用性。

4 结语

在建立泵站优化运行模型的基础上, 根据遗传算法基本理论, 分别从遗传算法的适应度函数、交叉概率、变异概率、种群等方面进行调整, 构建针对泵站优化运行问题的改进遗传算法。以淮安四站为例, 将改进遗传算法与标准遗传算法、动态规划法比较, 计算结果表明: 遗传算法求解速度快, 与动态规划法的结果相比, 速度提高约 90%, 电费偏差仅为 0.24% ~ 0.47%, 精度较高; 从适应度和种群方面进行调整的改进遗传算法——FFGA&TPGA, 精度高, 计算速度快, 具有收敛一致性, 更适用于求解泵站优化运行问题, 可以用于复杂泵站系统的实时优化调度。

参考文献 (References):

- [1] 刘超, 耿卫明. 泵站经济运行的数值解法[J]. 排灌机械, 2004 (3): 14-17. (LIU Chao, GENG Wei ming. Numerical solution on economical operation for pump station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004(3): 14-17. (in Chinese))
- [2] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站叶片可调单机组日运行优化方法研究[J]. 水利学报, 2010(4): 499-504. (CHENG Ji lin, ZHANG Li hua, ZHANG Ren tian, et al. Study on optimal daily operation of single adjustable blade pump unit in pumping station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010(4): 499-504. (in Chinese))
- [3] Vilas Nitivattananon, Elaine C Sadowski, Rafael G Quimpo. Optimization of water supply operation[J]. Water Resources Planning and Management, 1996, 122(5): 374-384.
- [4] 龚懿, 程吉林, 张仁田, 等. 淮阴三站变频变速优化运行的分解动态规划聚合方法[J]. 农业工程学报, 2011(3): 79-83. (GONG Yi, CHENG Ji lin, ZHANG Ren tian, et al. Optimization on variable speed operation with VFD for No. 3 Huaiyin pumping station based on decomposition dynamic programming aggregation method[J]. Transactions of the CSAE, 2011(3): 79-83. (in Chinese))
- [5] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2001(3): 72-74. (YANG Peng, JI Xiaohua, SHI Wangwang. Genetic algorithm in optimal operation of pumping station[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2001(3): 72-74. (in Chinese))
- [6] 冯晓莉, 仇宝云, 杨兴丽, 等. 大型泵站运行优化方法及其应用[J]. 排灌机械工程学报, 2011(2): 127-132. (FENG Xiaoli, QIU Baoyun, YANG Xingli, et al. Optimal methods and its application of large pumping station operation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011(2): 127-132. (in Chinese))
- [7] 袁尧, 刘超. 基于 SQP 局部搜索遗传算法的泵站优化运行[J]. 农机化研究, 2013(9): 16-19. (YUAN Yao, LIU Chao. Genetic algorithm integrated with sequential quadratic programming for solving

- optimal pump scheduling problem [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(9): 16-19. (in Chinese)
- [8] 袁尧, 刘超. 基于蚁群算法的泵站运行优化及投影寻踪选优策略[J]. 农业机械学报, 2013(3): 38-44. (YUAN Yao, LIU Chao. Pump operation optimization and projection pursuit evaluation strategy based on ant colony optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013(3): 38-44. (in Chinese))
- [9] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. MA: Addison Wesley, 1989: 1-83.
- [10] 许义海, 李晓东. 一种快速寻优的新型改进遗传算法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006(2): 36-40. (XU Yi hai, LI Xiaodong. A new improved genetic algorithm to obtain solutions quickly[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006(2): 36-40. (in Chinese))
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. (WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm—theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Communication University Press, 2002. (in Chinese))
- [12] 张忠波, 吴学春, 张双虎, 等. 并行动态规划和改进遗传算法在水库调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2014(4): 21-27. (ZHANG Zhongbo, WU Xuechun, ZHANG Shuanghu, et al. Parallel dynamic programming and improved genetic algorithm and their application to reservoir operation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(4): 21-27. (in Chinese))
- [13] 杜敦萌, 刘芹, 方国华, 等. 基于多项式—马尔科夫的水泵性能曲线拟合[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 1-3. (DU Dunmeng, LIU Qin, FANG Guohua, et al. Pump characteristic curve fitting based on Polynomial Markov[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 1-3. (in Chinese))
- [14] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟. 结合广度搜索的遗传算法在水库调度中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011(5): 85-88. (ZHANG Zhongbo, ZHANG Shuanghu, JIANG Yunzhong. Genetic algorithm based on deep search and its application to reservoir optimal operation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011(5): 85-88. (in Chinese))
- [15] 鄢碧鹏, 杜晓雷, 刘超, 等. 基于遗传算法和神经网络的泵站经济运行研究[J]. 农业机械学报, 2007(1): 80-82. (YAN Bipeng, DU Xiaolei, LIU Chao, et al. Optimal operation of pumping stations based on genetic algorithms and artificial neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007(1): 80-82. (in Chinese))
- [16] 王宏江, 陆桂华. 遗传算法在尔王庄枢纽泵站优化调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2003(3): 50-53, 65. (WANG Hongjiang, LU Guohua. Application of genetic algorithm in optimal operation of pumping stations of Erwangzhuang hydro system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003(3): 50-53, 65. (in Chinese))
- [17] 冯晓莉, 仇宝云, 黄海田. 大型泵站经济运行研究进展[J]. 流体机械, 2006(4): 32-37. (FENG Xiaoli, QIU Baoyun, HUANG Haitian. Research headway on large pump station economical operation[J]. Fluid Machinery, 2006(4): 32-37. (in Chinese))
- [18] 周琪慧, 方国华, 吴学文, 等. 基于遗传投影寻踪模型的泵站运行综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015(5): 985-989. (ZHOU Qihui, FANG Guohua, WU Xuewen, et al. Comprehensive assessment of pump station operation based on genetic projection pursuit model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(5): 985-989. (in Chinese))
- [19] 黄海田, 冯晓莉, 仇宝云. 南水北调东线泵站全站运行效率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2005(3): 11-14, 26. (HUANG Haitian, FENG Xiaoli, QIU Baoyun. Analysis on total station operating efficiency of the eastern route of south to north water transfer project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005(3): 11-14, 26. (in Chinese))
- [20] 计欣. 基于动态规划方法的取水泵站运行调度策略[D]. 上海: 同济大学, 2007. (JI Xin. The operation scheduling strategy of raw water pumping station based on dynamic programming[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))

(上接第 141 页)

- [17] 骆亚生, 李瑞, 田堪良. 非饱和黄土动力特性试验方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1041-1045. (LUO Yasheng, LI Rui, TIAN Kanliang. Research on method of dynamic characteristics tests for unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1041-1045. (in Chinese))
- [18] 骆亚生, 谢定义, 董为民, 等. 不同地区黄土振陷变形特性的对比分析[J]. 陕西水利发电, 2001, 17(1): 4-7. (LUO Yasheng, XIE Dingyi, DONG Weimin, et al. Comparative analysis of the vibration deformation behavior of the loess from the different regions[J]. Journal of Shanxi Water Power, 2001, 17(1): 4-7. (in Chinese))
- [19] 张军, 郑俊杰, 曹文昭, 等. 循环荷载作用下饱和压实黄土动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 321-327. (ZHANG Jun, ZHENG Junjie, CAO Wenzhao, et al. Dynamic characteristics of saturated compacted loess under cyclic loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 321-327. (in Chinese))
- [20] SL 237-1999. 土工试验规程[S]. (SL 237-1999. Rules of geotechnical testing[S]. (in Chinese))