

基于胞腔排除双种群遗传算法的泵站优化调度

廖莉, 张承慧, 林家恒, 李洪斌

(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 泵站优化调度是保证整个水工业系统高效运行的关键因素之一. 在提出用指数曲线精确拟合水泵性能曲线的基础上, 以泵群轴功率最小作为目标函数, 以供水指标和水泵高效区为约束条件, 建立了泵站优化调度问题的数学模型. 结合实际工程水泵切换次数最少的要求, 提出了一种工程实用的胞腔排除双种群遗传算法进行模型求解. 该算法借助胞腔和胞腔排除得到的有效胞腔作为水泵并联运行的有效组合方案, 并在各有效胞腔内采取全局搜索与局部搜索相结合的双种群搜索策略得到各泵负荷分配的优化解, 同时给出了符合工程实际的计算机最优调度方案选择方法. 实验结果表明: 与传统遗传算法相比, 胞腔排除双种群遗传算法可快捷、有效地获得泵站最优调度方案和多个有效调度方案.

关键词: 优化调度; 遗传算法; 胞腔排除; 双种群; 泵站

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Optimal scheduling of water-supply pumping stations based on cell excluding double population genetic algorithm

LIAO Li, ZHANG Cheng-hui, LIN Jia-heng, LI Hong-bin

(School of Control Science & Engineering, Shandong University, Shandong Jinan 250061, China)

Abstract: The optimal scheduling of pumping stations is the key to realizing efficient operation of water industry system. An optimal scheduling model of water-supply pumping stations based on approximation of exponent curves was proposed. The shaft horsepower of the pumps was used as the objective function, and both water supply target and high-efficiency area of pumps were taken as the constrained conditions. With the proposed model, solutions based on the cell excluding and variable population genetic algorithm (CEDPGA) were obtained. The CEDPGA not only got valid cells by cell exclude, which were possible parallel schemes and satisfied engineering requirement on lower switching frequency, but also gained optimal load distribution of the working pumps, which has higher precision. The simulation results showed that the CEDPGA is more effective than the conventional GA.

Key words: optimal scheduling; genetic algorithm; cell excluding; double population; water-supply pumping station

1 引言 (Introduction)

目前我国水泵的实际应用水平仍普遍低于国际水平, 供水行业水泵运行的效率普遍偏低, 节能潜力巨大, 深入研究泵站的优化调度问题, 对于节约能源、保障安全供水, 具有重要的现实意义和巨大的经济效益. 泵站的优化调度问题是在优化并联运行水泵组合方案和优化各运行水泵间负荷分配的同时, 满足供水指标、调速比、水泵高效运行区等约束条件, 并充分考虑水泵机组切换、启动所造成的损耗及设备冲击等因素, 尽量使水泵的切换次数最少. 泵站优化调度问题的常见建模方法有两种^[1]: 第一种取泵群轴功率最小为目标函数, 模型较复杂, 用基于梯度的传统优化方法不易求解; 第二种取满足扬程指标时的实际流量与所需流量之差的平方作为目标函

数, 约束条件少, 求解简便, 但与实际并联工况差别较大. 文献[1]对第二种方法作了改进, 并提出最小切泵次数控制策略, 符合工程实际, 但尚未充分发挥节能降耗的潜力. 本文在第一种建模方式的基础上, 提出水泵切换次数最少的约束条件, 同时为提高解的精度, 采用了指数曲线准确地拟合水泵性能曲线. 因此, 本文数学模型不仅充分考虑了能耗最低和实际工程的要求, 还具有较高的精度. 虽然模型略复杂一些, 但采用近年来受到广泛关注的遗传算法 (genetic algorithm, 简称 GA) 来求解可以使计算过程变得非常简单.

针对传统 GA 在进行大空间搜索时存在计算效率低、收敛速度慢的缺点, 本文借助胞腔这一用于分析非线性动力系统全局动态特性的有效数值方法^[2],

提出了胞腔排除双种群遗传算法,并用于泵站优化调度问题模型求解.仿真实验表明,该算法计算简便、符合工程实际,能迅速、准确地获得泵站最优调度方案.

2 泵站优化调度问题的数学建模 (Modeling for optimal scheduling problem of water-supply pumping stations)

2.1 水泵性能曲线拟合 (Approximation of pump characteristic curve)

准确描述水泵的性能曲线是建立泵站优化调度问题数学模型的重要前提.在额定转速下,可对水泵的基本性能曲线进行拟合.其中水泵的流量-扬程 (Q_N-H_N) 曲线,通常拟合为二次抛物线形式^[3],考虑到泵内流场十分复杂,二次抛物线难以描述泵内的流动损失,因此,本文提出指数曲线拟合方法,其形式为

$$H_N = c - ae^{bQ_N}. \quad (1)$$

水泵的流量-功率 (Q_N-P_N) 曲线通常能以相当高的精度拟合为

$$P_N = d_0 + d_1 Q_N + d_2 Q_N^2. \quad (2)$$

根据水泵相似律^[3],有

$$\frac{Q}{Q_N} = S, \quad \frac{H}{H_N} = S^2, \quad \frac{P}{P_N} = S^3. \quad (3)$$

其中: Q_N, H_N 和 P_N 为基本性能曲线上的点, $S = \frac{n}{n_N}$ 为调速比, n 为实际转速, n_N 为额定转速.

于是,由式(1)~(3)可得,在不同转速下,水泵的性能曲线为

$Q-H$ 曲线:

$$H = cS^2 - aS^2 e^{(bQ/S)}. \quad (4)$$

$Q-P$ 曲线:

$$P = d_0 S^3 + d_1 Q S^2 + d_2 Q^2 S. \quad (5)$$

以上关系式无疑是泵站优化调度问题准确建模的重要基础.

2.2 数学模型 (Model)

泵站的优化调度问题包括优化水泵并联运行方案和优化各运行水泵间的负荷分配,同时,为了满足泵的高效运行和要求的工艺,必须考虑一些约束条件.

假设泵站共配置了 n 台水泵,其中有 m 台为调速泵,其余为恒速泵.

定义状态因子 $W, W = [W_1, W_2, W_3, \dots, W_n]$, 其中 W_i , 当 $1 \leq i \leq m$ 时为第 i 台调速泵的工作状

态(1——工作, 0——不工作); 当 $m+1 \leq i \leq n$ 时为第 i 台恒速泵的工作状态(1——工作, 0——不工作).

定义调速因子 $S, S = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ \dots \ S_m]$, 其中 $S_i, i = 1, 2, \dots, m$ 表示第 i 台调速泵的调速比.

2.2.1 约束条件 (Constrained conditions)

① 供水指标约束. 水泵并联时, 各台泵的出口扬程 H 应相等, 并联总流量为各泵流量之和, 因此当 m 台水泵并联时, 由式(4)有

$$Q = \sum_{i=1}^m \left[W_i \frac{S_i}{b_i} \ln \left(\frac{c_i S_i^2 - H_i}{a_i S_i^2} \right) \right] + \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H_i}{a_i} \right) \right], \quad (6)$$

$$H = H_1 = H_2 = \dots = H_n. \quad (7)$$

② 单台泵流量约束. 为了满足水泵高效运行的需要, 应当有

$$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

其中, $Q_{i\min}, Q_{i\max}$ 是水泵高效区边界上的点. 推导如下: 设 A, B 点分别是第 i 台水泵基本性能曲线上高效段的左、右端点(这两点的流量、扬程值为常数, 可查水泵手册得到); E, F 点分别是该泵在最低转速下性能曲线高效段的左、右端点, 则恒速泵的高效区就是曲线 AB , 调速泵的高效区是由曲线 AB 、曲线 EF 和相似工况抛物线 OA, OB 所围成的扇环区域, 如图1所示.

则相似工况抛物线 OA 为

$$H_i = \frac{H_{iA}}{Q_{iA}^2} Q_i^2. \quad (9)$$

相似工况抛物线 OB 为

$$H_i = \frac{H_{iB}}{Q_{iB}^2} Q_i^2. \quad (10)$$

于是, 由式(4)、(9)和(10)可得

$$Q_{i\min} = \begin{cases} \max \left\{ \frac{S_{i\min}}{b_i} \ln \left(\frac{c_i S_{i\min}^2 - H_i}{a_i S_{i\min}^2} \right), \sqrt{\frac{H_i}{H_{iA}}} \times Q_{iA} \right\}, & i = 1, 2, \dots, m, \\ Q_{iA}, & i = m+1, m+2, \dots, n, \end{cases} \quad (11)$$

$$Q_{i\max} = \begin{cases} \min \left\{ \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H_i}{a_i} \right), \sqrt{\frac{H_i}{H_{iB}}} \times Q_{iB} \right\}, & i = 1, 2, \dots, m, \\ Q_{iB}, & i = m+1, m+2, \dots, n. \end{cases} \quad (12)$$

③ 调速比约束. 为了稳定工作和防止汽蚀, 通常水泵具有最低运行速度限制. 不失一般性, 取调速比上限为 1, 则 $S_i \in [S_{i\min}, 1]$.

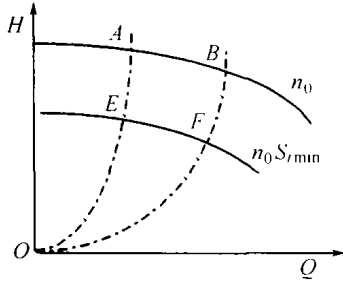


图 1 调速泵的高效区

Fig. 1 High efficiency region of adjusting speed pump

2.2.2 优化问题建模 (Modeling for optimal problem)

泵站优化调度的目的是在满足所要求流量和扬程的前提下, 充分利用各泵的高效工作段, 使耗能最少, 因此, 本文把水泵机组总的轴功率最小作为目标函数. 考虑到泵群的控制一般是靠调速和台数切换来进行的, 与整个水网相比, 这些动作的过渡过程时间很短, 可认为瞬时完成, 因此可看作是静态优化问题. 则优化问题可描述为: 假设泵站共配置了 n 台水泵, 其中有 m 台为调速泵, 其余为恒速泵, 并且泵站的供水指标即出口扬程 H 和流量 Q 已给定, 寻求水泵的并联运行组合方案 W 及各并联调速泵的调速比 S_i , 使并联后的水泵特性经过 $Q-H$ 平面上的给定点 (Q, H) 并使消耗的轴功率最小. 于是, 由式 (4) ~ (12) 可得优化问题的数学模型为

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{i=1}^m [W_i (d_{0i} S_i^3 + d_{1i} Q_i S_i^2 + d_{2i} Q_i^2 S_i)] + \\ & \sum_{i=m+1}^n [W_i (d_{0i} + d_{1i} Q_i + d_{2i} Q_i^2)], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } Q = & \sum_{i=1}^m \left[W_i \frac{S_i}{b_i} \ln \left(\frac{c_i S_i^2 - H}{a_i S_i^2} \right) \right] + \\ & \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right) \right], \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} \max \left\{ \frac{S_{i\min}}{b_i} \ln \left(\frac{c_i S_{i\min}^2 - H}{a_i S_{i\min}^2} \right), \sqrt{\frac{H}{H_{iA}}} Q_{iA} \right\} \leq Q_i \leq \\ \min \left\{ \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right), \sqrt{\frac{H}{H_{iB}}} Q_{iB} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (13b)$$

$$Q_{iA} \leq Q_i \leq Q_{iB}, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, n. \quad (13c)$$

$$S_i \in \{S_{i\min}, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (13d)$$

$$W_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13e)$$

其中: W_i 为第 i 台水泵的工作状态, $Q_i, S_i, a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, \dots, n), d_j (j = 0, 1, 2)$ 分别为第 i 台水泵的流量、调速比和基本性能曲线拟合得到的定常系数.

显然, 此模型是一个既有离散变量 (水泵并联组合状态), 又有连续变量 (水泵转速), 且带有等式约束和不等式约束的非线性多峰函数复杂优化问题, 如果采用传统的基于梯度优化方法来求解是非常繁琐的. 而遗传算法作为一种高效、实用的自适应并行优化方法, 通过模拟自然界生命进化机制来达到全局寻优目的, 它不要求优化问题的目标函数具有连续性、可微性、单峰性等假设, 只要求被优化的问题是可计算的, 尤其适合解决传统优化方法难于解决的问题. 因此, 本文采用遗传算法来求解泵站优化调度问题的数学模型. 为了提高算法的搜索速度和精度, 本文对传统遗传算法进行了改进.

3 遗传算法与胞腔排除 (Genetic algorithm and cell exclude)

3.1 遗传算法简介 (Introduction of genetic algorithm)

Holland 于 20 世纪 60 年代末提出的遗传算法被称为传统 GA^[4], 这种算法具有很强的适应性和较高的鲁棒性, 并在诸多领域的应用中取得了令人满意的效果. 遗传算法在具体应用时, 应当根据不同的优化问题选用不同的编码机制、参数环境及操作策略, 才能取得快速、准确的寻优效果. 本文优化问题的染色体编码采用二进制编码; 在进化过程中, 采用最优保存策略, 保证全局收敛性; 对约束条件, 采用文献[5]提出的模拟精确退火罚函数法, 通过自适应的退火罚因子和不可微精确罚函数使算法逐渐收敛于可行的极值点, 使得算法有较高的求解精度. 根据具体情况, 本文优化问题的目标函数修正为

$$J' = J + \sigma \left[\left| Q - \sum_{i=1}^n W_i Q_i \right| + \sum_{i=1}^n W_i \Delta Q_i \right]. \quad (14)$$

其中

$$\Delta Q_i = \begin{cases} Q_{i\min} - Q_i, & Q_i < Q_{i\min}, \\ 0, & Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max}, \\ Q_i - Q_{i\max}, & Q_i > Q_{i\max}. \end{cases} \quad (14a)$$

罚因子 σ 取为

$$\sigma = \alpha \frac{1}{T}, \quad T = \gamma T, \quad \gamma \in [0, 1]. \quad (14b)$$

其中: α 为初始温度, γ 为温度冷却参数.

本文优化问题遗传算法的基本操作方式为:

- 1) 选择操作采用优先策略,即把目前解群中较好的解直接放入下一代的解群中,这样在各代的解群中总会保留住到目前为止所得到的最好解;
- 2) 交叉操作采用最常用的二进制编码交叉策略;
- 3) 变异操作采用值变异策略.

3.2 胞腔和胞腔排除(Cell and cell exclude)

在 GA 染色体编码时,可将并联运行水泵组合方案 W 作为控制基因段加入各台泵的调速比编码中,但此时 GA 的搜索空间会比水泵并联运行组合方案已知时大大增加(n 台水泵则增大 2^n 倍),寻优时间也随之大大延长.而在泵站的实际运行中,考虑到水泵机组切换、启动所造成的损耗,设备冲击等工程实际问题,不应频繁切换并联运行的水泵机组,所以要求切泵次数尽量少.因此,不妨将 GA 的搜索空间剖分,对不存在优化解的子空间不予搜索,从而大大减小 GA 的计算量.于是,作者引入胞腔的思想,采用胞腔排除(cell exclude)来对 GA 的搜索空间进行降维处理.

胞腔是用于分析非线性动力系统的全局动态行为的一种有效方法,首先给出本文有关的胞腔概念:

定义 1 对式(13)全局优化问题,由状态因子 W 所对应的调速因子 S 的集合称为胞腔 Z .

定义 2 对状态因子 $W_0, W \in \{0,1\}^n$,称 W_0 与 W 之间的海明距离 $f(Z)$ 为胞腔 Z 的胞径.

$$f(Z) = \sum_{i=1}^n |W_{0i} - W_i|. \quad (15)$$

在本文优化问题中,以 W_0 表示当前各水泵的工作状态,则胞径 $f(Z)$ 代表了切泵次数.

定义 3 若胞腔 Z 内含有局部最优解,则称此胞腔为有效胞腔.

其中,有效胞腔是通过胞腔排除的方法获得的.在本文优化问题中,“胞腔排除”的排除准则为:

- 1) 对于供水指标 (Q, H) ,由 W 所决定的并联运行水泵机组在扬程 H 下,总流量应当能满足 Q 的需要.于是,由式(1)、(11)和式(12)可知,有效胞腔应满足

$$\sum_{i=1}^m W_i Q_{i\min} + \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right) \right] \leq Q \leq \sum_{i=1}^m W_i Q_{i\max} + \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right) \right]. \quad (16)$$

- 2) 考虑到供水指标变动、切泵次数最少及利用变频调速节能,不应采用只开恒速泵的方案.因此,

状态因子 W 应满足

$$\sum_{i=1}^m W_i \geq 1. \quad (17)$$

- 3) 有效胞腔的胞径应满足 $f(Z) \leq n$.另外,实际工程通常要求切泵次数尽可能少,因此,取胞径 $f(Z)$ 最小,为

$$\min f(z) = \min \sum_{i=1}^n |W_{0i} - W_i|. \quad (18)$$

则胞腔排除的步骤是

Step 1 取胞径 $f(Z)$ 的初值为 $f(Z) = 0$;

Step 2 将胞径为 $f(Z)$ 的 W 的所有可能取值列出,然后逐一检验,同时满足式(16)、(17)的 W 为有效胞腔;

Step 3 判断是否存在胞径为 $f(Z)$ 的有效胞腔.若不存在,则取 $f(Z) = f(Z) + 1$,转 Step 2;否则,找出所有胞径为 $f(Z)$ 的有效胞腔.结束.

显然,对本文优化问题,如果存在胞径为 0 的有效胞腔,则有效胞腔是唯一的.当有效胞腔的胞径 $f(Z) \geq 1$ 时,不必穷举出 W 的所有可能取值就能找到胞径最小的所有有效胞腔,因此胞腔排除的方法非常简便易行.

需要指出的是,如果经过胞腔排除未找到有效胞腔,说明在供水指标给出的扬程下,要求的流量过大或者过小,不能使所有水泵都处于高效运行状态.这时可将排除准则 1) 适当放宽,将式(16)改为式(19),然后再用胞腔排除的方法求取有效胞腔.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m k_i W_i Q_{i\min} + \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right) \right] \leq Q \leq \\ \sum_{i=1}^m u_i W_i Q_{i\max} + \sum_{i=m+1}^n \left[W_i \frac{1}{b_i} \ln \left(\frac{c_i - H}{a_i} \right) \right], \\ 0 < k_i < 1, u_i > 1. \end{cases} \quad (19)$$

其中定常系数 k_i, u_i 的取值要根据水泵稳定运行和防止汽蚀的具体要求而定.通过胞腔排除,可得到并联运行水泵的可能组合方案即有效胞腔.在各有效胞腔内用遗传算法求出各自的局部最优解,可得到各种可能的优化调度方案.

4 胞腔排除双种群遗传算法(Cell exclude double population genetic algorithm)

在传统遗传算法的作用下,虽然各有效胞腔内的个体会逐渐收敛到最优解,但是到了搜索后期收敛速度减慢.为提高搜索速度与精度,本文提出了胞腔排除与有效胞腔内双种群搜索相结合的胞腔排除双种群遗传算法(cell exclude double population genet-

ic algorithm, 简称 CEDPGA).

其中双种群遗传算法(double population genetic algorithm, 简称 DPGA)的基本思想是将全局搜索与局部搜索相结合^[6],它的工作过程由两个不同种群来协调工作:一个种群是工作于全局搜索时期的全局种群,主要任务是寻找可能存在最优点的区域;另一个种群是工作于局部搜索时期的局部种群,主要任务是仔细搜索全局种群划定的区域,找到最优点.因此 DPGA 能使寻优范围局限在含有最优点的较小区域而不用搜索其他无关区域,搜索速度快、计算效率高.在本文双种群遗传算法中,从全局搜索转入局部搜索的标志是 GA 的搜索进入了迟滞期(本文优化问题以最优保存个体的刷新放慢程度来判断),局部搜索的目的是以最优保存个体为中心进行 n 步搜索. DPGA 的流程框图如图 2 所示.

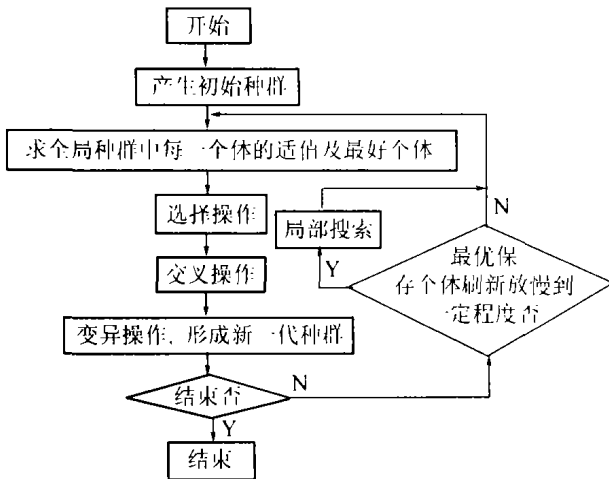


图 2 DPGA 流程框图

Fig. 2 Flowchart of DPGA

因此,胞腔排除双种群遗传算法的主要步骤为:

Step 1 通过胞腔排除找到有效胞腔;

Step 2 调用双种群遗传算法,求出各个有效胞腔内的局部最优解;

Step 3 从各个局部最优解中筛选出全局最优解.

对本文优化问题,当有效胞腔的胞径 $f(Z) = 0$ 时,由于此时的有效胞腔是唯一的,因此得到的最优解就是最优调度方案.当有效胞腔的胞径 $f(Z) \geq 1$ 时,可能会有多个有效胞腔,因此需要从多个备选方案中筛选出最优调度方案,此时除了考虑水泵高效运行和切泵次数最少,还要兼顾变频器的损耗等因素,原则是:1) 应尽量选取同胞径中变频器运行频率不接近工频的方案;2) 如果备选方案的变频器运行频率接近工频,应优先选取运行频率接近工频的调速泵台数较少的方案.

当有效胞腔的胞径 $f(Z) \geq 1$ 时,假设共有 k 个

有效胞腔, $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 定义变频器运行频率接近工频(50 Hz)所对应的电机调速比阈值向量 β , $\beta = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3 \ \dots \ \beta_m]$.

则由待选方案选取最优调度方案的流程框图如图 3 所示.

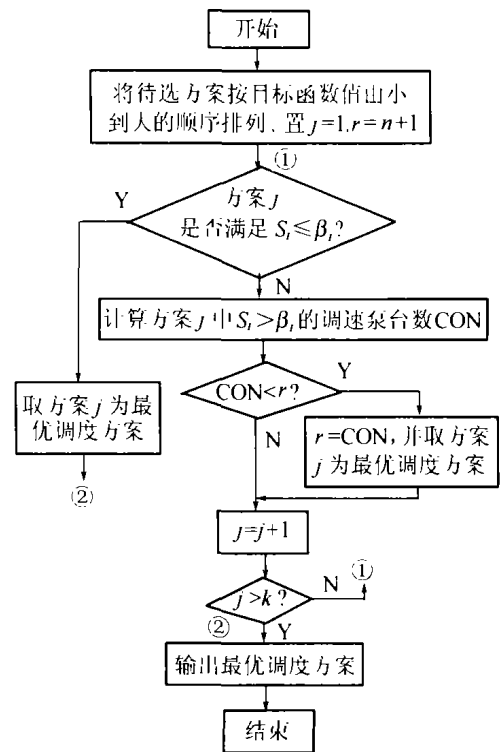


图 3 最优调度方案的选取流程框图

Fig. 3 Flowchart of selection of optimal scheduling scheme

5 仿真实验 (Simulation example)

已知某泵站共有 6 台水泵, 型号分别为 500S59A, 300S58A 和 200S63A 型, 每种型号有调速泵、恒速泵各 1 台, 每台调速泵的调速范围都是 0.7~1, 供水指标要求: 泵站出口总流量 $Q = 2200 \text{ m}^3/\text{h}$, 出口扬程 $H = 46 \text{ m}$. 确定泵站的优化调度方案.

与 W_i 下标变量对应的水泵序号如表 1 所示. 各水泵的规格和性能如表 2 所示^[7]. 仿真实验采用 Boland C++ 语言编程, 并在 486DX-66 PC 机上调试通过.

在各水泵基本性能曲线的高效区及高效区附近, 用最小二乘法将水泵的基本性能曲线拟合为:

1) 500S59A:

$$H = 69.388975 - 1.661942e^{0.001339Q},$$

$$P = -143.203947 + 0.511465Q - 0.000137Q^2;$$

2) 300S58A:

$$H = 56.98576 - 0.5816e^{0.003638Q},$$

$$P = 26.210857 + 0.173987Q - 0.000063Q^2;$$

3) 200S63A:

$$H = 60.441692 - 1.281633e^{0.00897Q},$$

$$P = 5.2 + 0.247778Q - 0.00037Q^2.$$

表1 水泵序号列表

Table 1 Serial number of pumps

	序号	型号
调	1	500S59A
速	2	300S58A
泵	3	200S63A
恒	4	500S59A
速	5	300S58A
泵	6	200S63A

表2 水泵性能列表

Table 2 Characteristic parameters of pumps

水泵 型号	流量 $Q/m^3 \cdot h^{-1}$	扬程 H/m	轴功率 P_N/kW	效率 $\eta/(%)$
500S59A	1500	57	315	74
	1872	49	333	75
	2170	39	320	72
300S58A	529	53	100.5	76
	720	49	118.6	81
	893	42	131	78
200S63A	180	54	37.8	70
	270	46	45.1	75
	324	37	46.6	70

表3 CEDPGA 仿真结果表

Table 3 Simulation results of CEDPGA

方案 序号	胞径 $f(Z)$	状态因子 W	状态因子 S			实际流量 $/m^3 \cdot h^{-1}$	泵群轴功率 $/kW$	最佳适值
			S_1	S_2	S_3			
1	2	[1,0,0,0,1,0]	0.903530			2197.898637	361.247765	364.384289
2		[1,1,0,0,0,0]	0.918823	0.968235		2200.118130	361.345824	361.522124
3		[1,0,1,0,0,0]	0.992941		0.990588	2200.307493	369.644064	370.102974
4		[0,0,1,1,0,0]			0.96	2200.201520	370.583542	370.884295
5		[1,0,0,0,0,1]	0.990588			2197.923835	369.099541	372.198055
运算时间		约 11 s						

为了说明胞腔排除双种群遗传算法的有效性,对本文优化问题,在复制、选择算子及罚因子相同的情况下,分别采用传统 GA 与胞腔排除 + 传统 GA (CEGA)作了对比实验,运算结果如表 4 所示。

胞腔排除双种群遗传算法采用八位二进制编码,每个变量 S_i 的精度取 $\Delta = 0.0012$. 在每个有效胞腔内取种群规模为 $2N = 200$, $P_s = 0.01$, $P_c = 0.4$, $P_m = 0.3$, 罚因子初值(即初始温度)为 1, 温度冷却参数 $\gamma = 0.998$. 结束条件为迭代 200 代. 最优保存个体每保存 20 代就在其邻域的 $(\pm 1/8)$ 定义域内搜索 5 代. 局部搜索取种群规模为 200, $P_s = 0.01$, $P_c = 0.4$, $P_m = 0.25$.

取 $W_0 = [0,0,0,0,0,0]$, $l = 1$, $\beta = [0.96, 0.96, 0.96]$, 运算结果如表 3 所示. 其中方案 1 为最优调度方案.

由表 3 可知, CEDPGA 共获得 5 个有效胞腔, 最优调度方案(方案 1)为 500S59A 型调速泵与 300S58A 型恒速泵并联运行. 其中, 500S59A 型调速泵: $S_1 = 0.903530$, $Q_1 = 1390.154485$, $P_1 = 235.604335$; 300S58A 型恒速泵: $Q_5 = 807.743882$, $P_5 = 125.643431$.

需要指出的是, 尽管表 3 中 5 个方案的泵群轴功率相差不太大, 但这并不意味着可以不加选择地从 5 个方案中任取一个为最优调度方案. 如果加上变频器的损耗等因素, 各方案水泵机组运行的实际功率差别会更大一些, 因此有必要加以选择, 本文的计算机最优调度方案选择方法就是在综合考虑各种因素的基础上提出的。

由表 4 可知, 由于在整个搜索空间内按适值最小寻优, 传统 GA 仅获得表 3 中方案 2 这一优化解; 又因为未用胞腔排除方法作降维处理, 搜索空间相对较大, 所以传统 GA 算法运算时间较长. 而 CEGA

采用胞腔排除 + 传统 GA 的策略,能稳定地得到表 3 中方案 1 这一最优方案,但算法运算时间要比 CEDPGA 略长一些,这是因为 CEDPGA 在搜索后期进行的局部搜索可加快搜索速度,提高搜索精度.如果泵群规模增大,这几种算法的差别会更大,新算法的优势会更明显.

表 4 传统 GA 与 CE GA 仿真结果表

Table 4 Simulation results of conventional GA and CE GA

	状态因子 W	调速因子 S			运算时间
		S_1	S_2	S_3	
传统 GA	[1,1,0,0,0,0]	0.918823	0.968235		约 28 s
CEGA	[1,0,0,0,1,0]	0.903530			约 17 s

以上仿真实验结果说明,本文所提出的胞腔排除双种群遗传算法 CEDPGA,计算时间短、精度高、与实际工程严格相符,具有较好的实用价值.

6 结论(Conclusion)

1) 本文在提出用指数曲线精确拟合水泵性能曲线的基础上,以水泵总的轴功率最小作为目标函数,以供水指标和水泵的高效区作为约束条件建立了泵站优化调度问题的数学模型.

2) 针对泵站优化调度问题数学模型的复杂性,提出了一种工程实用的胞腔排除双种群遗传算法进行求解.该算法首先采用胞腔排除的方法对搜索空间进行降维处理,与传统基于枚举法的胞腔排除方法不同的是,本文算法以当前泵站运行状态为中心,以逐渐增大胞径的方式进行胞腔排除计算,而不必对所有胞腔逐一检验,大大简化了计算过程并符合实际工程中对水泵切换次数最少的要求.然后在各有效胞腔内采用双种群遗传算法进行计算,具有较高的精度和较快的搜索速度.最后,采用符合实际工程的计算机选择方法得到泵站的最优调度方案.

3) 仿真实验表明,本文提出的胞腔排除双种群遗传算法,操作简单、实用,能够高精度、快捷地同时提供泵站的最优调度方案.

因此,本文的研究成果对实现泵站优化运行、提高经济效益、节约能源有较好的现实意义.

参考文献(References):

- [1] 李洪斌,张承慧,宋军.变频驱动并联水泵变压变流量运行优化调度[J].中国工程科学,2001,3(9):53-59.
(LI Hongbin, ZHANG Chenghui, SONG Jun. Optimal scheduling of variable-pressure variable-flow operation of parallel connected pumps [J]. *Engineering Science*, 2001, 3(9):53-59.)
- [2] 翟海峰,赵明旺.求多峰函数全部全局最优解的胞腔排除法遗传算法[J].控制与决策,1998,13(2):131-155.
(ZHAI Haifeng, ZHAO Mingwang. Annealing accuracy penalty function based nonlinear constrained optimization method with genetic algorithms [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2):131-155.)
- [3] 沙鲁生.水泵与水泵站[M].北京:水力电力出版社,1993.
(SHA Lusheng. *Pump and Pump Stations* [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.)
- [4] GOLDBERG D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* [M]. Boston: Addison-Wesley Publication, 1989.
- [5] 吴志远,邵惠鹤,吴新余.基于遗传算法的退火精确罚函数非线性约束优化方法[J].控制与决策,1998,13(2):21-24.
(WU Zhiyuan, SHAO Huihe, WU Xinyu. A cell exclude genetic algorithm for finding all globally optimal solutions of multimodal function [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2):21-24.)
- [6] 李人厚.智能控制理论和方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,1999.
(LI Renhou. *Intelligent Control Theory and Methods* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999.)
- [7] 李金根主编.给水排水设备[M]//给水排水工程快速设计手册(4).北京:中国建筑工业出版社,1996.
(LI Jingen. Equipments for water and wastewater [M]// *Flash-Design Manual for Water and Wastewater Engineering* (4). Beijing: China Building Industry Press, 1996.)

作者简介:

廖莉 (1971—),女,山东大学控制科学与工程学院讲师.主要研究方向是智能控制理论及其应用技术. E-mail: liaoli@sdu.edu.cn;

张承慧 (1963—),男.2001年于山东大学获理学博士学位,现为山东大学教授,博士生导师,副院长.主要研究方向是参数估计,智能控制及运动控制技术,曾获省科技进步二等奖4项,发表学术论文45篇,出版著作1部. E-mail: zchui@sdu.edu.cn;

林家恒 (1947—),男,教授.主要研究方向是工业过程的建模、优化与控制,模式识别与智能控制等,曾获省部级科技进步奖2项,发表学术论文30篇;

李洪斌 (1977—),男.主要研究兴趣是工业过程的建模、优化与控制等,曾获山东大学校长奖学金,发表学术论文6篇.