

文章编号: 1007-2861(2009)01-0032-05

模拟退火遗传算法的泵站优化运行

魏新华, 郭加宏

(上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘要: 针对泵站在不同流量扬程要求时,水泵运行组合不合理,导致泵站运行效率低的问题,提出以泵站总功率最小为目标函数的优化运行数学模型. 此模型以水泵扬程、总供水量和调速泵的调速率为约束条件,利用模拟退火遗传算法确定并联运行泵的台数、调速泵的调速率及泵的流量分配,实现泵站的优化运行. 该算法引入了不可行度对每代种群做初始选择,并利用不可行度取代传统的惩罚函数,平衡目标函数最优化和满足约束条件这两方面的要求. 最后通过实例验证了本算法在求解泵站优化调度问题方面的可行性.

关键词: 遗传算法;模拟退火;泵站;优化

中图分类号: TP 271⁺.2

文献标志码: A

Optimization of Pumping Station with Simulated Annealing and Genetic Algorithm

WEI Xin-hua, GUO Jia-hong

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To cope with the problem of low efficiency of pump station due to unreasonable combination of the pumps, a mathematic model for optimizing the combination is proposed leading to minimal power consumption. The constraining conditions in the model are the pump head, total water supply and rotation speed of the pumps. A simulated annealing-genetic algorithm is used to determine the number of pumps in operation, the rotation speed and the flow rate of each pump when the pump station is in an optimal state. The infeasibility degree is introduced into the algorithm to choose a suitable result from every population and to balance the demand between the target function and the constraining conditions. The result of an example shows feasibility of the present algorithm for pump station optimization.

Key words: genetic algorithms (GA); simulated annealing (SA); pumping station; optimization

泵站在水资源调配、工农业生产用水以及城市居民生活用水等方面起到关键作用,泵站在为国民经济服务的同时,也消耗大量能量. 据统计,泵的耗电量约占全国总发电量的 1/5,耗油量也相当可观.

因而,降低泵站能量消耗对于节约能源具有极其重要的意义. 城市供水和排污等领域中使用的泵站,由于所需流量往往在不同的时间段有很大的差别,定速泵不可能在所有流量下均工作于高效区域,因此

收稿日期:2007-09-14

基金项目:上海市重点学科建设资助项目(Y0103)

通信作者:郭加宏(1966~),男,副研究员,研究方向为流体机械. E-mail:jhguo@mail.shu.edu.cn

在这些泵站中只采用定速泵,水泵往往会工作于非高效区,使得整个泵站的运行效率很低.近年来,随着控制技术的进步,调速泵越来越多地被安装于各类泵站.调速泵能在很大流量范围内运行于水泵高效区,也使得泵站运行效率得到了很大的提升.因此,使用调速泵,优化调速泵站的运行,对于提高效率、降低能耗具有理论和实际意义.

泵站优化运行的方法很多,如线性规划、非线性规划、动态规划法及遗传算法等.泵站消耗能量的数学模型一般为非线性模型,将目标函数分段线性化,用线性规划技术处理难以得到满意的最优解^[1].非线性规划法难以实现且难得到全局最优解^[2].动态规划法是建立在最优化原理上的,即前一级决策中非优而被丢弃的决策绝不会在后一级构成最优决策,这减少了算法的计算量.上海交通大学的洪波等^[3]把动态规划法用在火电厂并联运行给水泵站优化运行问题的研究中,证明了此方法在实际应用中能取得较满意的节能效果.但是,动态规划法需要将状态变量按时间离散化,离散点越多,精度越高,但占用计算机内存就越大,计算时间也越长^[4].所以无论是线性规划、非线性规划还是动态规划法都难以完全满足泵站系统优化要求.

遗传算法是一种模拟自然选择和生物进化机制的优化算法.它对搜索空间的要求不高,限制较少,不要求目标函数及约束条件连续、可微.它从多个初值开始,沿多条路径搜索,可实现全局或准全局最优解.由于遗传算法具有以上优点,近年来已被成功地应用到许多优化领域.但是遗传算法仍存在不足之处,其中最为主要的是它的局部搜索能力较差,且容易产生早熟现象^[5].为了克服遗传算法的这种缺陷,研究人员对遗传算法进行了改进,典型的改进方法有自适应变异法、部分替换法、优秀个体保护法、分布式遗传算法等.也有不少学者将遗传算法与其他一些优化方法相结合,以得到更满意的结果.吴凤燕等^[5]将遗传算法与 Rosenbrock 方法结合,弥补了传统遗传算法局部搜索能力较差的缺点,并通过实例证明了这种混合遗传算法比传统遗传算法效果更好.王跃宣等^[6]针对带约束优化问题,提出了退火遗传算法,并通过实例验证了此算法计算结果比较稳定,且精度基本得到了保证.因此,将改进的遗传算法运用于泵站优化将会得到更好、更经济的优化效果.

本研究利用不可行度取代传统的惩罚函数^[7],平衡来自目标函数最优化与满足约束条件这两方面的压力;然后利用遗传算法和模拟退火算法进行优化运算,即进行一定代数的遗传运算,就进行一次退火局部优化,确保了解的精度和稳定性;最后通过实例验证了本算法在求解泵站优化调度问题方面的可行性.

1 优化模型的建立

泵站优化运行的目的是在满足所要求的流量和扬程的前提下,达到耗能最少,可简化为泵站水泵机组总的轴功率最小.由于水泵的控制一般靠调速和台数切换完成,调节的过渡过程很短,可以认为瞬时完成.优化问题可看作静态优化问题,优化问题可描述为在已知泵站机组台数 n (其中有 m 台调速泵,其余为定速泵)、泵站出口扬程 H_0 和流量 Q_0 需求的条件下,确定水泵并联运行台数和调速水泵的转速 k_i ($i=1,2,\dots,m$),使消耗功率最小.根据泵产品的样本资料,利用曲线拟合的方法可得到扬程-流量以及功率-流量的关系式.根据相似定律,在一般情况下,扬程和流量是 2 次曲线的关系,而功率和流量的关系可近似为 3 次曲线关系,如第 i 台调速泵在转速 n_i 下的扬程和功率表达式可表示如下^[8]:

$$H_i = k_i^2 \times H_{xi} - S_{xi} Q_i^2, \quad (1)$$

$$P_i = a_i k_i^3 + b_i k_i^2 Q_i + c_i k_i Q_i^2 + d_i Q_i^3, \quad (2)$$

式中, Q_i 为流量, H_i 为扬程, P_i 为轴功率, H_{xi} 为泵流量为零时的虚扬程, S_{xi} 为泵虚阻耗数, a_i, b_i, c_i 和 d_i 为泵轴功率的拟合系数, k_i 为第 i 台泵的调速率, $k_i = \frac{n_i}{n_{0i}}$ (n_{0i} 和 n_i 分别为第 i 台泵的额定转速和工作转速).

若为定速泵,令式(1)和(2)中的 $k_i = 1$,即可得到定速泵或者调速泵在额定转速下的扬程和功率表达式.

在这里以泵站功率最小为目标,因此优化问题的目标函数为

$$\min P = \min \sum_{i=1}^N P_i. \quad (3)$$

式中, P 为泵站总功率, P_i 为第 i 台泵的功率.

由流量-扬程关系表达式可以看出,扬程的约束可以归结为流量或者调速率的约束.因此,整个模型的约束条件可以归结如下:

总流量约束为

$$\sum_{i=1}^N u_i Q_i = Q_0, \quad (4a)$$

单台泵的约束为

$$k_{i\min} \leq k_i \leq k_{i\max}, \quad (4b)$$

式中, u_i 为第 i 台泵的开启情况, 当 $u_i = 1$ 时为开, 当 $u_i = 0$ 时为关; Q_i 表示第 i 台泵的流量; Q_0 表示泵站的总流量; k_i 表示第 i 台泵的调速率; $k_{i\min}$ 和 $k_{i\max}$ 是第 i 台泵的最小、最大调速率。

如图1所示, 我们分别作出泵在额定转速和最低转速(不宜低于额定转速的60%)下的特性曲线, 在额定转速的性能曲线上以最高效率下降 $\Delta\eta$ 为界作出 A, B 两点, 并过 A, B 两点分别作相似抛物线(即等效效率曲线) l_1 和 l_2 , l_1 和 l_2 与最低转速下的性能曲线交于 C, D 两点, 则泵运行时的高效区为 $ABDC$ 围成的区域。因此, 在泵并联运行的扬程为 H_0 (或 H'_0) 时, 调速泵运行的高效区为 EF (或 $E'F'$), 则^[8]

$$Q_{i\min} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_0}{H_{Ai}}} Q_{Ai}, & H_0 \geq H_{Ci}, \\ \sqrt{\frac{k_{i\min}^2 H_{Xi} - H_0}{S_{Xi}}}, & H_0 < H_{Ci}, \end{cases}$$

$$Q_{i\max} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_{Xi} - H_0}{S_{Xi}}}, & H_0 \geq H_{Bi}, \\ \sqrt{\frac{H_0}{H_{Bi}}} Q_{Bi}, & H_0 < H_{Bi}. \end{cases}$$

由相似定律可得, 调速泵最大流量 $Q_{i\max}$ 和最小流量 $Q_{i\min}$ 对应的调速率分别为

$$k_{i\min} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_0}{H_{Ai}}}, & H_0 \geq H_{Ci}, \\ 0.6, & H_0 < H_{Ci}, \end{cases}$$

$$k_{i\max} = \begin{cases} 1, & H_0 \geq H_{Bi}, \\ \sqrt{\frac{H_0}{H_{Bi}}}, & H_0 < H_{Bi}. \end{cases} \quad (5)$$

2 模拟退火遗传算法求解模型

本研究采用模拟退火遗传算法求解上述带约束优化问题。根据式(4)约束条件, 定义解 k_i 的不可行度^[6]为

$$\phi(k_i) = \left[\sum_{j=1}^N u_j Q_j(k_i) - Q_0 \right]^2, \quad (6)$$

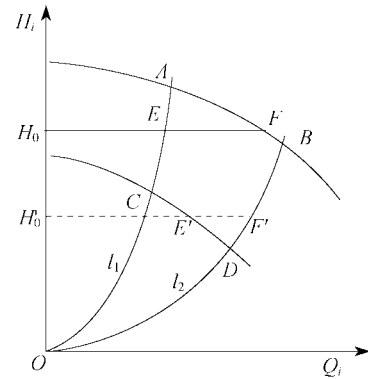


图1 泵运行工况图

Fig. 1 Schematics of running status of the pump

不可行度可以认为是解 k_i 到可行域的距离, k_i 离可行域越远, 不可行度越大, 反之越小; 当 k_i 为可行解时, 不可行度为零。不可行度阈值为

$$\phi_{\text{crit}} = \frac{\sum_{i=1}^N \phi(k_i)}{NT}, \quad (7)$$

式中, T 为退火因子, 随着迭代进行由 T_{start} 变化到 T_{end} ; N 为种群规模。

根据每一个候选解的不可行度与阈值的比较来决定这个解被选择或被拒绝。当一个解的不可行度大于阈值时, 则该解被拒绝, 否则被接受进入遗传操作。为了保证种群规模不变, 被拒绝的解由当前不可行度最小的解替代。

模拟退火遗传算法求解带约束优化问题的基本流程如图2所示, 图中 M 为一正整数, 代表的意思是每隔 M 代进行一次局部优化。

在利用遗传算法和模拟退火算法求解优化问题时, 多数人先用遗传算法搜索可行的最优解, 再利用退火方法对最后解进行局部优化^[6]。但当解决复杂模型的优化问题时, 上述方法可能得不到稳定解。因此, 从计算结果的稳定性、计算精度和收敛速度三方面考虑, 本研究采用两种算法互相交叉运用, 即在进行一定代数的遗传操作之后进行一次退火局部优化。改进方法对较复杂的模型也能得到稳定的计算结果。在提高精度和减少计算时间方面, 通过遗传算法和模拟退火算法不同方式组合来进行优化。另外, 在计算中, 对每一代种群都进行一次不可行度选择。

3 算例

某泵站并联设置4台200S42型泵, 其中1[#], 2[#]为定速泵, 3[#], 4[#]为调速泵。设泵站流量要求为0.258

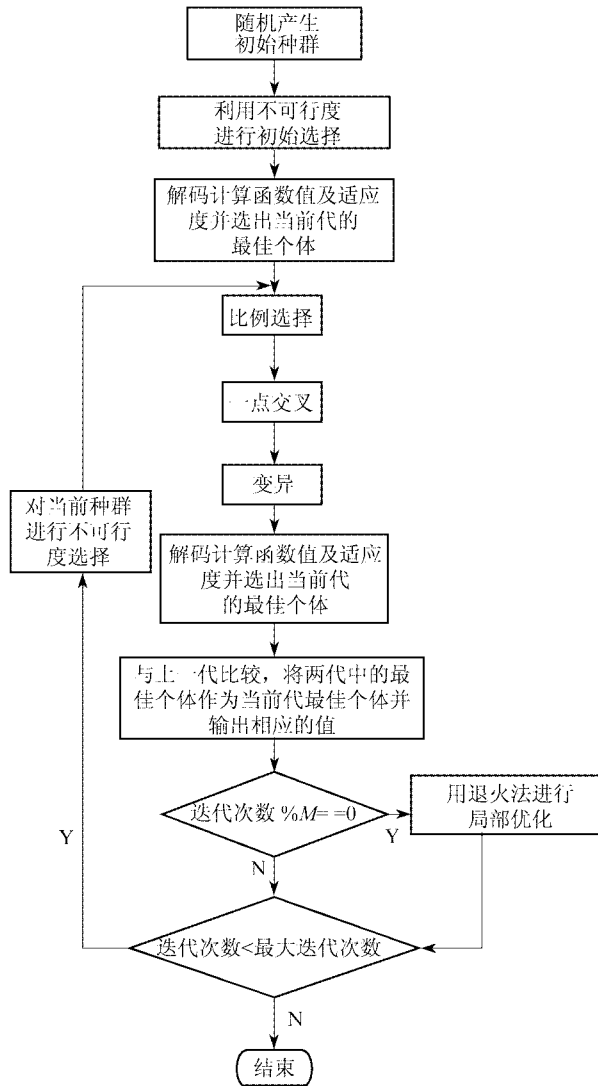


图 2 采用模拟退火遗传算法求解带约束优化问题的基本流程

Fig. 2 Main procedure for solving the constrained optimization problem using the simulated annealing-genetic algorithm

m^3/s 时,泵站装置扬程要求为 40 m,求泵站的运行情况。

由泵产品样本资料拟合得到 200S42 型泵在调速率为 k 时的扬程和功率表达式为^[8]

$$H = 57.3k^2 - 2\,504.09Q^2, \quad (8)$$

$$P = 9.512k^3 + 7.714 \times 10^2 k^2 Q - 7.560 \times 10^3 k Q^2 + 2.948 \times 10^4 Q^3. \quad (9)$$

对该泵站采用模拟退火遗传算法进行优化计算,数学模型如下:

目标函数为

$$\min P = \min(P_1 + P_2 + P_3 + P_4). \quad (10)$$

由 200S42 型号泵的性能曲线图^[10]可以看出,此型号泵的最大效率为 80%,若高效区为 73% ~ 80%,则 $k_{\min} = \sqrt{\frac{H_0}{51.0}}, k_{\max} = 1$,因此该算例的约束条件归纳为

$$\sqrt{\frac{40}{51.0}} \leq k_3, k_4 \leq 1.0, \quad (11)$$

$$k_1 = k_2 = 1.0, \quad (12)$$

$$u_1 Q_1 + u_2 Q_2 + u_3 Q_3 + u_4 Q_4 = 0.258. \quad (13)$$

对每一台泵的 u_i, k_i 进行编码. u_i 是离散变量,可直接采用二进制编码. k_i 是连续变量,需经离散化处理后再采用二进制编码.对于定速泵,每台泵采用 1 位编码,1 表示开启,0 表示停机.对于调速泵,每台泵采用 8 位编码,最高位代表开启状态,最高位为 1 表示调速泵开启,最高位为 0 表示调速泵停用.低 7 位代表调速率,共有 128 种转速状态,0 表示调速泵最低调速率,127 表示调速泵最高调速率,即调速泵的额定转速.因此,4 台泵机组共 18 位编码。

取种群规模为 160,选择概率为 0.02,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.008,温度冷却参数为 0.998.计算所得到的总功率为 123.439 W,总流量为 0.258 m^3/s .每台泵的详细运行情况如表 1 所示。

表 1 退火遗传算法优化计算结果

Table 1 Optimization result of the annealing-genetic algorithm

泵型号	状态函数	转速率	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	轴功率/ kW
定速泵 1 [#]	1	1.000	0.083	38.329
定速泵 2 [#]	1	1.000	0.083	38.329
调速泵 3 [#]	1	0.885	0.044	22.855
调速泵 4 [#]	1	0.893	0.048	23.927

在运算中,每迭代一次就进行一次退火局部优化,当最大迭代数为 26(或大于)时得到最优结果;每 20 代进行一次退火局部优化,当最大迭代数为 465(或大于)时得到最优结果;每 50 代进行一次退火局部优化,当最大迭代数为 97(或大于)时得到最优结果.若在完成遗传迭代之后,再对所得到的全局可行解进行退火局部优化,这时得到的解不稳定。

若 4 台泵均为定速泵,为达到需求流量 0.258 m^3/s ,4 台泵必须都运行.这时泵站总功率为 153.316 kW,总流量为 0.332 m^3/s ,部分流量过剩。

在该算例中,各种结合方式得到的最优结果相

同. 在计算速度方面,显然第3种方式的计算速度最快,第1种结合方式虽然比第2种方式迭代次数少,但由于退火过程比遗传操作过程耗时长,所以这两种方式总的计算速度接近. 因此,在计算中如果每次局部退火过程比遗传操作过程耗时较多时,应考虑在经过多次遗传迭代后,进行一次局部退火过程;反之,则可以在经过较少的遗传迭代后,就进行一次局部退火过程.

另外,对于退火优化过程,初始温度增高或终止温度降低都会使退火遗传算法收敛速度减慢,并且退火优化过程的计算速度也会减慢.

4 结 论

通过实例验证了模拟退火遗传算法在求解泵站优化运行问题方面的可行性. 将遗传算法和退火算法交叉运用,进行一定代数的遗传运算,就进行一次退火局部优化. 该方法能提高复杂优化模型的优化计算精度和稳定性. 在遗传算法和退火算法的结合中,不同的组合方式,算法的收敛速度不同. 由于退火算法耗时较多,因此在选择遗传算法和模拟退火算法的组合方式时,需根据优化模型的复杂程度、遗传算法和模拟退火算法的计算量,优化两者的组合方式,达到减少计算时间的目的.

参考文献:

- [1] 申玮,郭宗楼,刘国华. 直接搜索-模拟退火法在水污染控制系统规划中的应用[J]. 水科学进展,2004,15(4):445-447.
- [2] 何根木,朱荣生,李维斌,等. 泵站优化运行算法[J]. 农机化研究,2004(2):97-99.
- [3] 洪波,杨自奋,高颀. 动态规划法在火电厂给水泵优化运行中的运用[J]. 热力发电,1996(5):25-30.
- [4] 文屹. 中小城市给水泵站的优化[D]. 重庆:重庆大学,2004,6.
- [5] 吴凤燕,张雷,刘冬梅. 混合遗传算法在泵站优化运行中的应用[J]. 水泵技术,2004(6):32-36.
- [6] 王跃宣,吴澄,胡昔祥,等. 求解约束优化问题的退火遗传算法[J]. 高技术通讯,2004,14(7):10-14.
- [7] 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):136-140.
- [8] 汪建华,王本德. 基于遗传算法的取水泵站优化运行[J]. 长江大学学报:自然科学版,2005,2(10):326-328.
- [9] 李敏强. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:26-46.
- [10] 机械电子工业部. 泵类产品样本(第一册)[M]. 北京:机械工业出版社,1999:190.

(编辑:陈海清)