

泵站并行机组优化操作

徐苏龙 沈 堃 鄢烈祥

(武汉理工大学化学工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:对变频调速的泵站并行机组建立了经济运行的混合整数非线性规划数学模型,并用列队竞争算法进行了求解。优化计算结果表明,泵站实施优化调度能有效节能,产生较明显的经济效益。

关键词:供水泵站;混合整数非线性规划;列队竞争算法

中图分类号:TQ02

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0185-03

Optimal operation of water-supply pump stations

XU Su-long, SHEN Kun, YAN Lie-xiang

(School of Chemical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The mathematic model of the optimal operation for the pump stations with the variable speed pumps is established. The mixed integer nonlinear program problem is solved by using line-up competition algorithm. The calculation results show that the optimal operation of the pump stations is an efficient method to save energy.

Key words: water-supply pump station; mixed-integer nonlinear programmer; line-up competition algorithm

供水泵站在水资源调配和工农业供水等方面起着十分重要的作用,泵站在为国民经济服务的同时,也消耗大量的能量,其能量的消耗主要体现在泵站机组上。降低泵站的能量消耗是提高泵站效益的主要措施,这就要求对泵站进行实时调度,根据流量和压头的需求随时调整泵站运行方式,使泵站在高效益的状态下工作。

对具有变频调速的水泵机组,各个泵的运行状态和转速需根据整个泵站系统的优化来确定。另外,在实际运行中由于总流量的需求经常变化,需要有效的优化计算方法来确定各机组的运行状态和最优转速。笔者建立了泵站并行机组的优化操作模型,并对优化模型进行求解,为泵站系统的优化操作提供决策支持。

1 水泵特性方程

1.1 水泵特性方程

水泵的特性方程包括:功率-流量[$N-Q$]、扬程-流量[$H-Q$]、效率-流量[$\eta-Q$]等,它们可用试验数据拟合得到,其表达式如下^[1]。

功率-流量[$N-Q$]曲线方程:

$$N = d_0 + d_1 Q + d_2 Q^2 \quad (1)$$

扬程-流量[$H-Q$]曲线方程:

$$H = a - bQ^2 \quad (2)$$

效率-流量[$\eta-Q$]曲线方程:

$$\eta = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 \quad (3)$$

式(1)、式(2)、式(3)中, $d_0, d_1, d_2, a, b, a_0, a_1, a_2$ 表示各自的拟合系数。

由泵的相似定律^[2]

$$\frac{Q}{Q'} = S, \frac{H}{H'} = S^2, \frac{N}{N'} = S^3$$

其中 S 为转速比, Q', H' 和 N' 为基本性能曲线上的点,即额定转速下的流量,扬程和功率,为额定转速, Q, H 和 N 为调速后的实际流量,扬程,功率和转速。

在不同转速下水泵的性能方程可转化为:

扬程-流量[$H-Q$]

$$H = aS^2 - bQ^2 \quad (4)$$

功率-流量[$N-Q$]

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

1.2 变频调速的范围

为了使设备安全运行,避免引起水泵气蚀和电机超载,一般离心泵不允许增速运行^[3]。通常所讲的离心泵运行中的变频调速技术都是使泵降速运行以适应新的工作状况。但是泵转速的降低应有一个允许的范围,即转速调节的幅度问题。根据文献^[4]

的报道,当转数比 $S \geq 0.7$ 时,即可保证离心泵在高效区下运转。故本工作中的变频调速范围取为 $S \in [0.7, 1]$ 。

2 供水泵站优化数学模型的建立

2.1 目标函数

泵站优化的目的是在满足所要求流量和扬程的前提下,使能耗达到最少,同时也要考虑各水泵运行在高效区。假设泵站的出口扬程和流量已给定,且并联运行水泵的台数 m 为已知,则优化问题可描述如下:寻求并联机组各个泵的运行状态(开或关)和水泵的转速比 S_i ,使总的综合效率最高,即消耗的总功率最小。于是,目标函数可表达为:

$$F = \min \sum_{i=1}^m y_i N_i = \min \sum_{i=1}^m y_i (d_{0i} S_i^3 + d_{1i} S_i^2 Q_i + d_{2i} S_i Q_i) \quad (6)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, m$, Q_i, S_i 分别为第 i 台水泵的流量、转数比, $d_{ji} (j = 0, 1, 2)$ 表示流量-功率拟合方程的系数, $y_i = 1, 0$ 表示为第 i 台水泵开、关 2 种状态。

2.2 约束条件

考虑到要使水泵在高效区和满足供水需求的条件下运行,有以下约束条件:

(1) 转速比约束。考虑到稳定工作和防止气蚀,水泵的调速比取值范围为 $S_i \in [S_{i\min}, S_{i\max}]$, 由于水泵一般不能在额定转速以上调速,通常取 $S_{i\max} = 1$, 由前面的分析可得: $S_i \in [0.7, 1]$ 。

(2) 总流量约束。对于并行运行的机组,总流量为各泵流量之和:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_m = \sum_{i=1}^m Q_i$$

(3) 单泵流量约束。考虑到水泵运行的高效区,应当有:

$$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max}$$

由 $H_i = a_i S_i^2 - b_i Q_i^2$, 得: $Q_i = S_i \sqrt{\frac{a_i - H_i}{b_i}}$, 由于最终各泵的实际扬程相差不大,为简化计算,令 $H_i = H$ 。

则: $Q_{i\max} = \sqrt{\frac{a_i - H}{b_i}}$, $Q_{i\min} = 0.7 \sqrt{\frac{a_i - H}{b_i}}$ 。代入各自的拟合系数即可得到各自的流量约束。

(4) 扬程约束。水泵并联时,各泵的出口扬程应相等:

$$H = H_1 = H_2 = \dots = H_m. \quad (9)$$

3 优化问题的求解

泵站的优化归结为求解一个混合整数非线性规

划问题。为将带约束的问题转化为无约束的问题,这里采用罚函数法,供水泵站的优化问题的目标函数转变为:

$$F = \min \{ f(Q_i, S_i, y_i) + C(1 - Q - \sum_{i=1}^m Q_i + \sum_{i=1}^m |H - H_i|) \} \quad (10)$$

式中 C 是罚因子。

为将混合整数非线性规划问题转化为非线性规划问题来求解,用下式将连续变量转化为整数变量。

$$y_i = \text{INT}[z_i + 0.5]$$

其中 z_i 是与 y_i 具有相同的边界值的连续变量,模型中的整数变量用上式代替,则混合整数非线性问题就变成了非线性规划问题。

本工作应用列队竞争算法来求解此优化问题,列队竞争算法是一种群体搜索算法,此算法通过多个个体的竞争与协作能够有效地克服陷入局部极小,并能很好地均衡局部搜索与全局搜索,使之快速地搜索到全局最优解。关于列队竞争算法的原理,可参考文献[5]。

4 实例计算

某供水泵站安装有下列 3 种不同型号的离心泵: 4BA-12A、6BA-8A 和 8BA-12 型,每个泵有 2 台。它们的性能数据列于表 1^[6]。

表 1 BA 型离心泵部分性能^[7]

| 型号 | 流量 Q / $L \cdot s^{-1}$ | 扬程 H / m | 额定转 速 n / $r \cdot \min^{-1}$ | 功率 N/kW | | 效率 η / % | 叶轮直 径 D / mm |
|---------|------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------|----------|------------------|------------------------|
| | | | | 轴功率 | 配套 功率 | | |
| 4BA-12A | 16.7 | 31.6 | 2900 | 7.4 | 13 | 70 | 163 |
| | 23.3 | 28.6 | | 8.7 | 76 | | |
| | 30.6 | 23.3 | | 9.5 | 73.5 | | |
| 6BA-8A | 30.6 | 30.5 | 1450 | 12.7 | 22 | 72 | 300 |
| | 38.8 | 28.6 | | 14.8 | 73.6 | | |
| | 47.2 | 25.8 | | 15.7 | 76.0 | | |
| | 55.6 | 21.3 | | 16.7 | 69.5 | | |
| 8BA-12 | 61.1 | 32.0 | 1450 | 24.0 | 40 | 80.0 | 315 |
| | 77.8 | 29.1 | | 26.9 | 82.5 | | |
| | 94.5 | 25.4 | | 29.4 | 80.0 | | |

由上表数据,通过拟和得到如下特性方程。

4BA-12A 型:

$$N_1 = 1.6645 S_1^3 + 0.4484 S_1^2 - 0.0063 Q_1^2 S_1$$

$$H_1 = 35.2701 S_1^2 - 0.0127 Q_1^2$$

6BA-8A 型:

$$N_2 = 2.7876 S_2^3 + 0.4163 Q_2 S_2^2 - 0.0030 Q_2^2 S_2$$

$$H_2 = 34.8304 S_2^2 - 0.0043 Q_2^2$$

8BA-12型:

$$N_3 = 9.8646 S_3^3 + 0.2767 Q_3 S_3^2 - 0.0007 Q_3^2 S_3 \quad (10)$$

$$H_3 = 36.7386 S_3^2 - 0.0013 Q_3^2$$

表2列出了在满足扬程24 m和几种需求流量

的条件下,优化计算与人工凭经验调节的比较。从结果可以看出,流量和扬程都符合要求,各个泵也在它的高效区运行,而且其他结果都在约束范围之内,表明优化的结果是有效的。对比2种运行方式,优化运行的节能是明显的,而且需求流量越大,节能的效果越明显,平均可节能8%左右。

表2 优化运行结果和实际运行结果比较

| 需求流量 | 优化运行 | | | | 实际运行 | | | | 结果比较 |
|------|--------|------------------------|--------|---------|--------|------------------------|--------|---------|---------|
| | 开启的泵型号 | 实际流量/L·s ⁻¹ | 转速比 | 消耗功率/kW | 开启的泵型号 | 实际流量/L·s ⁻¹ | 转速比 | 消耗功率/kW | 节能百分比/% |
| 100 | 1# | 29.789 | 1.000 | 29.80 | 3# | 35.131 | 0.9173 | 31.16 | 6.04 |
| | 6# | 70.211 | 0.9088 | | 6# | 69.293 | 0.9073 | | |
| 140 | 1# | 29.789 | 1.000 | 42.33 | 1# | 20.889 | 0.9152 | 46.39 | 9.60 |
| | 3# | 35.880 | 0.9209 | | 2# | 27.159 | 0.9762 | | |
| | 5# | 74.331 | 0.9213 | | 4# | 35.132 | 0.9173 | | |
| 200 | 1# | 23.086 | 0.9340 | 59.41 | 1# | 24.477 | 0.9514 | 64.78 | 9.04 |
| | 2# | 28.166 | 0.9833 | | 3# | 39.487 | 0.9389 | | |
| | 5# | 71.015 | 0.9120 | | 5# | 83.221 | 0.9478 | | |
| | 6# | 77.733 | 0.9312 | | 6# | 69.293 | 0.9073 | | |
| 240 | 1# | 21.094 | 0.9169 | 72.12 | 1# | 21.911 | 0.9446 | 78.97 | 9.50 |
| | 2# | 25.643 | 0.9577 | | 2# | 27.627 | 0.9934 | | |
| | 4# | 37.631 | 0.9295 | | 4# | 43.647 | 0.9614 | | |
| | 5# | 84.916 | 0.9531 | | 5# | 77.448 | 0.9303 | | |
| | 6# | 70.717 | 0.9112 | | 6# | 87.935 | 0.9637 | | |

5 结语

对具有变速调节技术的泵站并行机组建立了优化操作模型,并给出了泵的特性方程。用列队竞争算法对泵站优化模型进行了求解。对泵站的优化调度与经验调度进行了比较,对比2种调度方式可知,优化调度能使整个泵站系统的综合效率达到最大,产生明显的节能效果。

参考文献

- [1] 廖莉,林家恒,张承慧.[J].中国工程科学,2002,(9):54-55.
- [2] 田家山.水泵及水泵站[M].上海:上海交通大学出版社,1989. 95-98.
- [3] 曹忠辉.[J].流体机械,2002,30(3):35-36.
- [4] 张文渊.[J].北京节能,2002,(6):23-25.
- [5] 鄢烈祥,麻德贤.[J].化工学报,1999,50(5):663-670.
- [6] 黄世桥.化工用离心泵[M].北京:化学工业出版社,1982.356-367. ■

中国石化长城润滑油拓展国际市场

中国石化润滑油分公司在加大品牌整合,保持国内市场稳中有升的同时,坚定实施“走出去”战略,全面开拓海外市场,进一步提升中国石化长城润滑油在国际市场的影响力,相继开发了东南亚、北美、非洲等地的用户,将整合后的长城润滑油产品远销越南、马来西亚、尼日利亚等地,开始在国际市场上扩展长城润滑油的市场占有率,树立起良好的国际市场信誉。