

文章编号: 1001-0920(2004)05-0582-04

城市水工业系统泵站优化调度问题建模方法研究

张承慧¹, 夏东伟¹, 李洪斌¹, 李少远²

(1 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 针对常用泵站效率优化模型的不足, 提出一种符合水泵并联运行特性的最小流量偏差模型. 对比研究了用于城市水工业系统泵站优化调度的最小流量偏差模型和最小轴功率模型, 结合大量仿真实验, 较系统地总结了二者的特点及其适用范围. 研究表明: 流量偏差优化模型比最小轴功率优化模型在工程实用性方面具有更大的优势, 因而具有广阔的应用前景.

关键词: 水工业系统; 优化调度; 数学模型; 流量偏差; 最优化方法

中图分类号: TP278

文献标识码: A

On optimal scheduling modeling of urban water industry system

ZHANG Cheng-hui¹, XIA Dong-wei¹, LI Hong-bin¹, LI Shao-yuan²

(1 School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2 Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: ZHANG Cheng-hui, E-mail: zchui@sdu.edu.cn)

Abstract To remedy the defects of optimal scheduling model for water supplying pumping stations, an improved model based on flow difference minimization is presented, which satisfies the parallel characteristics of pumping stations. Optimal scheduling models of water supplying pumping stations are analyzed, based on least flow difference and least shaft power respectively. The simulation results show that the optimal model based on least flow difference is better than the optimal model based on least shaft power in engineering practicality.

Key words: water industry system; optimal scheduling; mathematic model; flow difference; optimization method

1 引 言

城市水工业系统的优化调度问题一般分为两级: 一级寻优是根据管网用水量决定各泵站的最佳出水流量和压力; 二级寻优则是根据一级寻优的结果决定泵站的最佳运行组合及调速比, 使泵站耗能最少或运行费用最低. 目前国内外研究一级寻优的较多, 而且成果主要集中在用水量预测和管网优化方面^[1,2], 而对二级寻优方面的研究则较少, 为此本文主要研究二级寻优问题.

城市水工业系统泵站优化调度问题的建模方法主要有两类: 最常用的一类是轴功率法, 即采用流量

-轴功率曲线拟合方程式求得轴功率, 并以此最小为目标函数优化求解^[2~4]; 另一类是 Cohen 提出的以实际流量与所需流量之差的平方最小为目标函数的流量偏差法^[5]. 但 Cohen 模型在计算流量时与水泵实际并联特性差别较大^[6]. 本文改进了 Cohen 模型, 使其在物理意义上严格符合水泵的实际并联特性. 通过系统地对比和总结两类优化模型的特点及其适用范围, 得出流量偏差优化模型更为简便实用的结果, 这对研究水厂优化运行建模问题具有重要的参考意义.

收稿日期: 2003-05-05; 修回日期: 2003-10-09.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA 412130); 山东省自然科学基金资助项目(Y2001G01).

作者简介: 张承慧(1963—), 男, 山东陵县人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事参数估计及智能控制等研究; 夏东伟(1962—), 男, 山东郓城人, 教授, 博士生, 从事电力电子及运动控制技术等研究.

2 城市水工业系统泵站优化调度模型

2.1 优化问题及其约束条件分析

水泵是水工业系统的关键设备, 其性能主要由流量-扬程($Q-H$)、流量-轴功率($Q-N$)和流量-效率($Q-\eta$)这3条曲线描述。水泵的 $Q-H$ 和 $Q-N$ 曲线可分别表示为

$$H = H_x - dQ^2, \quad (1)$$

$$N = a + bQ + cQ^2, \quad (2)$$

其中: H_x, d, a, b, c 为拟合参数。

调速泵的比率为

$$\frac{Q}{Q_0} = S, \frac{H}{H_0} = S^2, \frac{N}{N_0} = S^3, \quad (3)$$

其中: $S = n/n_0$ 为调速比, Q_0, H_0, N_0 和 Q, H, N 分别为额定转速 n_0 和 n 转速下的流量、扬程和功率。

由式(1)~(3)可得调速时水泵的性能曲线

$$H = S^2 H_x - dQ^2, \quad (4)$$

$$N = aS^3 + bS^2Q + cSQ^2. \quad (5)$$

泵站优化运行的关键是使各并联水泵运行在高效区, 同时要考虑一些约束条件, 以满足工艺要求。假设水厂配置了 n 台水泵(其中 m 台调速泵), 给水指标为 (Q_e, H_e) , 则泵站优化运行的约束条件主要有:

1) 扬程及总流量约束。水泵并联运行时, 其出口扬程应相等, 总流量 Q_e 为各泵流量 Q_i 之和, 即

$$H_1 = H_2 = \dots = H_n = H_e, \quad (6)$$

$$Q_e = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (7)$$

2) 调速比约束。为稳定工作和防止汽蚀, 水泵的转速不宜过低或过高, 即 $S_{\min} \leq S_i \leq 1$ 。

3) 高效区流量约束。如图1所示, 高效区为额定转速和最低转速条件下对应的 $Q-H$ 曲线与相似工况抛物线 OCA_i 及 QDB_i 围成的扇环区域 $ABDC_i$ 。在相似工况抛物线上, 水泵的效率相同, 应有

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

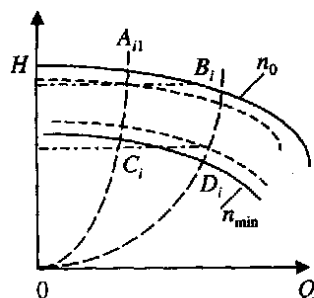


图1 调速泵的高效区

其中 $Q_{\min i}$ 和 $Q_{\max i}$ 是水泵高效区边界上的点。对于恒速泵, 有

$$Q_{\min i} = Q_{A_i}, Q_{\max i} = Q_{B_i}, \quad i = m+1, m+2, \dots, n. \quad (9)$$

假设第 i 台泵提供的扬程 $H_i (H_e)$ 为已知, 则该泵的高效区可用最小流量 $Q_{\min i}$ 和最大流量 $Q_{\max i}$ 表示为

$$Q_{\min i} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_i}{H_{A_i}}} Q_{A_i}, & H_i \geq H_{C_i}; \\ \sqrt{\frac{S_{\min i}^2 H_{x_i} - H_i}{d_i}}, & H_i < H_{C_i}; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

$$Q_{\max i} = \begin{cases} \sqrt{\frac{H_{x_i} - H_i}{d_i}}, & H_i \geq H_{B_i}; \\ \sqrt{\frac{H_i}{H_{B_i}}} Q_{B_i}, & H_i < H_{B_i}; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

由图2及约束条件(1)~(3)可知, 对于调速泵, 给定扬程 H_e , 其高效区可简化为仅由调速比 S_i 表示, 即

$$\alpha \leq S_i \leq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (12)$$

$$\alpha = \max\{S_{\min i}, \sqrt{H_e/H_{A_i}}\}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (13)$$

$$\beta_i = \min\{1, \sqrt{H_e/H_{B_i}}\}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (14)$$

式(12)~(14)巧妙地用调速比实现了流量的约束, 将约束条件(2), (3)合为一体, 减少了约束条件的数量, 从而简化了模型的求解过程。

2.2 基于最小轴功率的优化模型

基于最小轴功率的水厂优化调度问题建模, 一般取泵群机组的总轴功率最小为目标函数, 即

$$\begin{aligned} & \min_{K_i, S_i} \left[\sum_{i=1}^m K_i (aS_i^3 + bS_i^2Q_i + cSQ_i^2) + \sum_{i=m+1}^n K_i \mu_i (a_i + bQ_i + cQ_i^2) \right] = \\ & \min_{K_i, S_i} \left[\sum_{i=1}^m K_i \left[aS_i^3 + bS_i^2 \sqrt{\frac{S_i^2 H_{x_i} - H_e}{d_i}} + cS_i \frac{S_i^2 H_{x_i} - H_e}{d_i} \right] + \sum_{i=m+1}^n K_i \mu_i \left(a_i + b_i \sqrt{\frac{H_{x_i} - H_e}{d_i}} + c_i \frac{H_{x_i} - H_e}{d_i} \right) \right], \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \max \{ & S_{\min i}, \sqrt{H_e/H_{A_i}} \} \leq S_i \leq \\ \min \{ & 1, \sqrt{H_e/H_{B_i}} \}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Q_e = & \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^m K_i \sqrt{\frac{S_i^2 H_{X_i} - H_e}{d_i}} + \\ & \sum_{i=m+1}^n K_i \mu_i \sqrt{\frac{H_{X_i} - H_e}{d_i}}. \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $K = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]$,

$$K_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

$$S = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_m], \quad (19)$$

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & Q_{A_i} \leq \sqrt{\frac{H_{X_i} - H_e}{S_{X_i}}} \leq Q_{B_i}, \\ 0, & \text{其他}, \\ & i = m+1, m+2, \dots, n. \end{cases} \quad (20)$$

式中: K 为状态因子, K_i 表示第 i 泵的工作状态, 状态 1 表示工作, 状态 0 表示不工作; S 为调速因子; μ_i 为恒速泵的高效区流量约束因子, 若恒速泵在高效区内, 则 $\mu_i = 1$, 否则为 0.

由于含有非线性约束 (17), 对于轴功率模型 (15) ~ (20), 可采用 0-1 完全枚举法结合约束变尺度法求解, 具体步骤不再赘述.

2.3 基于最小流量偏差的优化模型

基于最小流量偏差的水厂优化调度建模是取实际流量与所需流量之差的平方为目标函数. 即

$$\begin{aligned} \min_{K, S_i} & \left(\sum_{i=1}^n Q_i - Q_e \right)^2 = \\ \min_{K, S_i} & \left[\sum_{i=1}^m \left[K_i \sqrt{\frac{S_i^2 H_{X_i} - H_e}{d_i}} \right] + \right. \\ & \left. \sum_{i=m+1}^n \left[K_i \mu_i \sqrt{\frac{H_{X_i} - H_e}{d_i}} \right] - Q_e \right]^2, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \max \{ & S_{\min i}, \sqrt{H_e/H_{A_i}} \} \leq S_i \leq \\ \min \{ & 1, \sqrt{H_e/H_{B_i}} \}, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (22)$$

其中 K, K_i, S, μ_i 满足式 (18) ~ (20).

显然, 改进模型的目标函数 (21) 和约束条件 (22) 与 Cohen 优化模型有明显的差别^[5], 前者在物理意义上严格符合水泵的实际并联特性, 从而保证了精度. 与轴功率模型相比, 这种建模方法已将总流量约束这一非线性约束隐含在目标函数中, 因此更为简洁实用.

对于流量偏差模型 (21) 和 (22), 可采用 0-1 完全枚举法结合 Wolfe 既约梯度法求解.

3 仿真实验分析

为对比流量偏差模型和轴功率模型的特点和性能, 以两个典型水厂为例, 分别对两种优化模型进行仿真计算. 对于流量偏差模型, 采用 0-1 完全枚举法结合 Wolfe 既约梯度法求解; 对于轴功率模型, 由于含有非线性约束 (17), 采用 0-1 完全枚举法结合约束变尺度法求解. 计算软件采用 Matlab.

例 1 已知某小型水厂配有离心泵 5 台, 各水泵的参数和序号如表 1 所示. 仿真计算选取 10 个给水指标点, 优化结果如表 2 所示.

例 2 已知某中型水厂配有离心泵 5 台, 各水泵的参数和序号如表 3 所示. 仿真计算选取 10 个给水指标点, 优化结果如表 4 所示.

对比表 2 和表 4 中流量偏差模型与轴功率模型求解结果可知:

1) 两种模型条件下, 水泵的并联运行组合即状态因子 K 基本相同 (除表 4 中第 3, 6, 8 组数据);

2) 两类模型的总轴功率随着流量指标的增加而增大, 对同一给水指标, 尽管水泵的并联运行组合方案 K 可能不同, 但两类模型优化结果的总轴功率十分接近;

3) 两类模型求解时间有很大差异, 轴功率模型的求解时间远大于流量偏差模型的求解时间.

4 结 论

研究表明: 改进的流量偏差模型严格符合水泵的实际并联特性, 并具有表达简单、运算速度快的特

表 1 水泵参数 (1) ($m = 1, n = 4$)

序号	型号	H_{X_i}/m	$d_i/(10^6 \text{ s}^2/\text{m}^5)$	$Q_{\min i}/(\text{L}/\text{s})$	$Q_{\max i}/(\text{L}/\text{s})$	轴功率参数		
						a	b	c
1 [#]	8sh-6	107.52	3 507.3	35	85	46 834	0.476 8	1.099×10^{-4}
2 [#]	8sh-6	107.52	3 507.3	35	85	46 834		1.099×10^{-4}
3 [#]	8SA-7A	105.86	2 253	60	140	28 171	0.906 7	-1.25×10^{-3}
4 [#]	8SA-7A	105.86	2 253	60	140	28 171	0.906 7	-1.25×10^{-3}

表 2 流量偏差模型与轴功率模型仿真结果对比(1)

序号	H_e/m	$Q_e/(\text{L}/\text{s})$	流量偏差模型				轴功率模型			
			K	S_1	轴功率/kW	优化时间/s	K	S_1	轴功率/kW	优化时间/s
1	62	350	1 1 1 0	0.938 526	313.071	1.85	1 1 1 0	0.938 52	313.071	3.19
2	63	500	1 1 1 0	0.995 792	461.001	1.57	1 1 1 1	0.995 79	461.001	2.96
3	64	450	1 1 1 1	0.858 743	411.496	1.63	1 1 1 1	0.858 74	411.496	2.97
4	66	300	1 1 1 0	0.851 079	275.878	1.63	1 1 1 0	0.851 08	275.878	2.74
5	68	200	1 1 0 0	0.959 037	182.083	1.85	1 1 0 0	0.959 04	182.083	3.24
6	73	320	1 0 1 1	0.938 035	310.964	1.68	1 0 1 1	0.938 03	310.965	2.97
7	75	400	1 1 1 1	0.925 122	393.970	1.68	1 1 1 1	0.925 12	393.970	3.14
8	78	280	1 1 1 0	0.958 745	280.661	1.68	1 1 1 0	0.958 74	280.661	2.81
9	80	300	1 0 1 1	0.991 924	308.556	1.69	1 0 1 1	0.991 92	308.556	2.64
10	82	350	1 1 1 1	0.935 852	368.027	1.68	1 1 1 1	0.935 85	368.028	5.22
平均优化时间/s					1.694		3.188			

表 3 水泵参数(2) ($m = 2, n = 5$)

序号	型号	H_{xi}/m	$d_i/(10^6\text{s}^2/\text{m}^5)$	$Q_{mini}/(\text{L}/\text{s})$	$Q_{maxi}/(\text{L}/\text{s})$	轴功率参数		
						a	b	c
1 [#]	14sh-13	58.156 6	0.127 33	180	440	117.23	0.121 6	1.198×10^{-4}
2 [#]	24sh-13	67.439 1	0.027 24	500	1 100	329.01	0.274 4	-1.18×10^{-4}
3 [#]	14sh-13	58.156 6	0.127 33	180	440	117.23	0.121 6	1.198×10^{-4}
4 [#]	24sh-13	67.439 1	0.027 24	500	1 100	329.01	0.274 4	-1.18×10^{-4}
5 [#]	24sh-13	67.439 1	0.027 24	500	1 100	329.01	0.274 4	-1.18×10^{-4}

表 4 流量偏差模型与轴功率模型仿真结果对比(2)

序号	H_e (m)	Q_e (L/s)	流量偏差模型					轴功率模型				
			K	S_1	S_2	轴功率 (kW)	优化时 间/s	K	S_1	S_2	轴功率 (kW)	优化时 间/s
1	32	300	1 0 0 0 0	0.864 459	—	112.301	0.32	1 0 0 0 0	0.864 46	—	112.302	13.84
2	34	800	0 1 0 0 0	—	0.873 286	320.766	0.82	0 1 0 0 0	—	0.873 29	320.766	9.06
3	34.5	1 500	1 1 0 0 0	0.993 184	0.989 621	660.469	3.35	1 1 1 0 0	0.888 84	0.866 31	660.163	8.13
4	35	1 300	1 1 0 0 0	0.907 740	0.952 893	574.893	3.63	1 1 0 0 0	0.942 93	0.934 95	549.335	11.92
5	35.5	2 500	1 0 1 1 0	0.981 011	—	1 116.11	3.29	1 0 1 1 0	0.962 52	—	1 112.20	11.98
6	36	2 300	1 0 1 1 0	0.966 054	—	1 013.85	3.30	1 1 0 1 0	0.935 64	0.921 40	1 012.11	15.49
7	36.5	3 000	0 1 0 1 1	—	0.919 654	1 351.43	3.41	0 1 0 1 1	—	0.919 65	1 351.43	10.05
8	37	3 200	1 1 0 1 1	0.929 426	0.885 381	1 446.56	6.43	0 1 1 1 1	—	0.856 92	1 459.15	11.32
9	37.5	3 700	1 1 1 1 1	0.913 620	0.942 036	1 693.78	6.32	1 1 1 1 1	0.944 16	0.926 29	1 691.69	15.38
10	38	3 900	1 1 1 1 1	0.997 261	0.995 159	1 821.23	6.09	1 1 1 1 1	0.998 38	0.994 62	1 821.22	10.65
平均优化时间/s					3.696			11.782				

点;轴功率模型含有非线性约束,且约束条件复杂,尤其是拟合参数难以获得,因此其实用价值受限;流量偏差模型在求解结果和精度上与轴功率模型十分接近,尽管有时水泵的并联运行组合方案 K 可能不同,但两类模型优化结果的总轴功率几乎相等。因

为流量偏差模型不需要用轴功率的测量值来拟合模型参数,易于工程实现,而且实时性好,所以具有较高的实用价值和广阔的应用前景。

(下转第 588 页)

表 1 交通流量实测数据

车 流 量																																			
一 车 道	24	25	17	12	14	7	16	20	8	8	6	23	5	11	35	15	12	11	9	13	13	4	9	24	11	14	14	6	33	10	6	10	29	25	
	26	27	15	10	20	27	19	25	12	27	23	27	24	16	29	19	24	30	29	27	21	24	9	24	21	26	30	30	21	19	15	27			
	15	14	23	30	17	28	22	22	28	12	20	14	27	23	21	24	15	24	25	22	11	25	24	18	25	24	18	33	30	34	18	37			
	34	32	31	24	40	25	31	30	40	35	33	25	35	38	37	38	38	23	33	34	21	25	34	28	37	32	35	38	36	22	39	21			
	37	35	27	40	39	27	32	28	31	30	34	39	23	22	40	40	32	31	34	24	38	31	40	27	34	21	32	34	20	29	32	18			
	28	40	23	32	29	35	23	35	23	35	24	36	35	34	21	39	36	29	28	33	40	29	39	15	31	28	18	21	17	31	31	41			
	33	36	33	23	30	36	35	36	31	38	15	36	38	27	40	38	24	40	39	26	19	41	38	35	33	15	36	36	40	27	32	18			
	18	21	28	29	27	35	39	25	36	34	20	32	17	21	36	36	34	34	29	38	31	32	40	21	19	13	13	35	36	40	36	25			
二 车 道	21	17	16	10	13	8	10	23	6	6	6	21	4	12	31	17	12	8	12	11	11	4	8	21	10	9	10	7	30	8	3	8	20		
	21	13	8	11	8	20	12	10	13	12	12	18	15	14	9	19	17	10	19	9	21	12	22	7	7	11	22	8	16	10	11	10	10		
	12	12	16	10	12	10	20	8	12	11	18	12	10	16	13	14	9	7	23	18	10	21	23	13	21	15	18	22	24	15	16	34			
	13	22	22	18	16	13	18	27	34	23	13	21	18	14	17	20	25	22	13	22	20	20	16	20	36	13	20	27	32	19	35	15			
	22	22	23	20	15	25	24	27	18	27	20	37	22	20	13	20	25	13	17	17	29	30	19	17	32	16	22	21	18	28	15	13			
	21	24	19	29	15	26	15	22	15	22	13	14	16	34	19	16	28	24	24	29	20	28	35	13	23	19	12	13	12	27	16	34			
	12	20	30	21	17	29	35	24	15	13	14	35	33	14	29	24	22	18	32	14	17	11	17	21	16	15	22	22	29	20	29	15			
	17	17	27	10	12	30	12	21	31	29	17	15	10	16	18	18	17	17	25	14	22	31	15	19	13	11	11	13	18	14	29	17			

可行的 .

需要指出, 由于照度和镜头光圈会影响成像效果, 进而影响 ϵ 的取值, 在选取 ϵ 时应考虑检测系统的使用情况. α 和 β 依赖于环境因素, 通过引入学习机制使 α 和 β 的取值具有自适应能力, 即 ϵ 的选择应具有对环境及系统参数的自适应性 .

参考文献(References):

[1] Shi Y K, Shi Z K. Compression-coded genetic algorithms and it's application in traffic control[A]. *Proc of the 1st Int Conf on Machine Learning and Cybernetics*[C]. Beijing, 2002 906-909

(上接第 585 页)

参考文献(References):

[1] Chatree H, Sastri T. Adaptive forecasting of hourly municipal water consumption[J]. *J of Water Resource Planning and Management*, 1994, 120(6): 888-905

[2] Thomas Walski. Development of water resources planning and management[J]. *J of Water Resources Planning and Management*, 2001, 126(4): 203-205

[3] Pezeshk S, Heiweg O J, Oliver K E. Optimal operation of ground-water supply distribution systems[J]. *J of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(5): 573-586

[4] O m sbee L, L ansey K. Optimal control of water supply pumping system[J]. *J of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(2): 237-253

[5] Cohen G. Optimal control of water supply networks [A]. *Optimization and Control of Dynamic Operational Research Models* [C]. North Holland: Cliffee Press, 1992 128-138

[6] 张承慧. 变频调速系统效率优化控制: 理论及应用[D]. 济南: 山东大学, 2000