

基于性能曲面拟合的泵站优化调度分析

龙新平, 朱劲木, 刘梅清, 周龙才

(武汉大学 动力机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 本文基于曲面拟合构造了装置效率、叶片角度与装置扬程和流量的连续函数关系, 可以迅速准确地确定某一装置扬程和流量所对应的装置效率等参数。由于不需要反复插值计算, 可以大大提高寻优计算的速度和精度。进而本文利用动态规划建立了泵站优化调度模型, 可用于考虑时间因素、具有多种型号泵且能调角或调速运行的泵站优化调度。为了检验本方法, 特对某泵站进行了优化调度。结果表明, 优化后的方案比现有运行方案要节省大量电费。

关键词: 泵站; 优化调度; 曲面拟合; 动态规划

中图分类号: S277.1 **文献标识码:** A

随着国民经济的发展, 水资源短缺和分布不合理的现象越来越严重。为此, 兴建了许多大、中型跨流域调水工程和一般供水工程。作为工程的核心部分, 这些供水泵站长年运行, 其能耗和运行费用的大小对这些调水和供水工程具有重要的影响, 因此泵站优化调度的研究具有很重要的意义。泵站优化调度有多种方式, 如可以在满足总供水量的前提下, 确定各供水时段的最优流量分配, 并确定各时段最优的开机组合及最优的单机流量或叶片角度; 也可以是满足实时流量要求, 确定最优的开机组合及相应的流量。前者为考虑时间因素的问题, 而后者为不考虑时间因素的问题, 后者实质上是前者的子问题。对泵站的优化调度问题, 有不少学者进行了研究。文献[1~3]用分解协调方法分析了泵站具有多型号水泵机组的优化调度问题, 文献[4]利用遗传算法进行了泵站优化调度研究。在进行泵站优化调度研究时, 首先要对机组的性能进行分析和处理。目前通行的做法是, 先拟合水泵在不同角度的性能曲线, 并求出水泵在不同装置扬程下的流量和装置效率关系曲线, 再将这一组曲线方程储存在计算机内。在以后的寻优过程中, 要多次调用上述曲线方程组进行反复的插值计算, 以确定给定装置扬程和优选的流量对应的装置效率和叶片角度。这种做法不仅需要大量的计算机内存, 也影响计算速度和精度。基于上述考虑, 本文首先进行水泵动力特性的曲面拟合, 构造出装置效率 η_{sy} 和叶片角度 α 关于装置扬程 H_{sy} 和流量 Q 在给定域内的一一对应的连续函数关系式。任给一组 (H_{sy}, Q) 就可以利用该函数关系方便地找到对应的 η_{sy} 和 α , 不需进行插值计算, 大大减少了计算工作量, 并提高了计算精度。在此基础上, 引入分解协调法建立了可用于泵站具有不同型号泵并考虑时间因素的优化调度问题的模型, 并以广东某泵站为算例进行了分析比较。

1 水泵动力特性的曲面拟合

在泵站内部, 机组的运行成本主要包括主机和辅机的电费、设备及工程的折旧费、行政管理费、大修及维修费以及人工工资等。设每台机组每小时的运行费为 K (千元), 用来表示除主机电费以外的各种费用, 则一台水泵机组运行时间 t (h) 以后, 其运行成本为

收稿日期: 2003-11-07

作者简介: 龙新平 (1967-), 男, 湖北监利人, 副教授, 主要研究方向为: 流体机械及工程、泵及泵装置的优化运行等。

$$F = \frac{p_r \rho g Q H_{st} t}{1000 \eta_{st}} + Kt (\text{千元}) \quad (1)$$

式中： p_r 为电价(千元/kWh)； ρ 为水体密度， $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ； Q 为该机组的流量(m^3/s)； H_{st} 为该机组的站扬程(m)； η_{st} 为该机组的站效率。

泵的总运行成本是由各个机组的运行成本所构成的。由式(1)可知，要求单台机组的运行成本，必须知道单泵的站效率。当进出水池的水力损失很小可以忽略不计时，可认为机组的站扬程 H_{st} 等于机组的净扬程 H_{sy} ，单泵的装置效率 η_{sy} 等于单泵的站效率 η_{st} ，而单泵的装置效率为

$$\eta_{sy} = \eta_{pi} \eta_{pu} \eta_{mo} \eta_{tr} \quad (2)$$

式中： η_{pi} 、 η_{pu} 、 η_{mo} 、 η_{tr} 分别为管道(或流道)、泵、电动机和传动装置的效率。

当一台泵的转速给定之后，其装置效率是装置扬程 H_{sy} (也称净扬程)和流量的函数，给定装置扬程和流量，可以找到唯一确定的单泵装置效率，写成数学表达式为 $\eta_{sy} = f(H_{sy}, Q)$ 。对于全调节水泵， η_{sy} 应为连续函数。为此，本文采用曲面拟合的方法来确定该表达式。下面以全调节轴流泵为例来说明，对采用变频调节的泵，其方法是完全一样的。

(1)采用最小二乘法，拟合水泵在不同叶片角时的流量-扬程和流量-效率曲线以及电机的效率曲线。

(2)在最大净扬程 $H_{sy \max}$ 与最小净扬程 $H_{sy \min}$ 之间，选取 n 个点 H_{syi} ($i=1, 2, \dots, n$)。对某个净扬程，采用迭代法求需要扬程曲线 $H = H_{syi} + S_{sy} Q^2$ (S_{sy} 为管道阻力参数)与不同角度水泵性能曲线的交点，并依次求出水泵的效率 η_{pu} ，电机效率 η_{mo} ，管道效率 η_{pi} 和单泵的装置效率 η_{sy} 。

(3)将不同净扬程下，不同叶片角度所对应的单泵装置效率和流量用最小二乘法拟合为

$$\eta_{sy} = \sum_{i=1}^{M_{sy}} A_{sy}^i (Q - \bar{Q}_{sy})^{i-1} \quad (3)$$

式中： A_{sy}^i 为系数， $\bar{Q}_{sy} = \sum_{i=1}^{N_{sy}} Q_i / N_{sy}$ ， N_{sy} 为叶片角度的数量(或该装置扬程下需要扬程曲线与不同叶片角度水泵性能曲线交点的个数)， $M_{sy}-1$ 为拟合多项式的最高次数。

(4)在最大流量 Q_{\max} 与最小流量 Q_{\min} 之间，选取 m 个点 Q_j ($j=1, 2, \dots, m$)。由式(3)反求矩形域内 $n \times m$ 个结点(H_{syi}, Q_j)上的函数值 η_{syo} 。则可将矩形域上的最小二乘曲面拟合为下面的多项式

$$\eta_{sy} = f(H_{sy}, Q) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_{ij} (H_{sy} - \bar{H}_{sy})^{i-1} (Q - \bar{Q})^{j-1} \quad (4)$$

式中： $\bar{H}_{sy} = \sum_{i=1}^n H_{syi} / n$ ； $\bar{Q} = \sum_{j=1}^m Q_j / m$ ； A_{ij} 为二元拟合多项式的系数； $p-1$ 为拟合多项式中 H_{sy} 的最高次数， $p \leq n$ ，且 $p \geq 2$ ； $q-1$ 为拟合多项式中 Q 的最高次数， $q \leq m$ ，且 $q \geq 2$ 。

同理可得叶片角度 α 与装置扬程和流量的函数关系。这样就得到了 α 和 Q 关于 H_{sy} 和 Q 在给定域内的连续函数关系式。在该矩形域内,任给一组 (H_{sy}, Q) , 就对应唯一的一个 α , 该工作点也对应一个唯一的叶片角度 (对调速的机组, 则对应唯一的转速)。

2 优化调度的动态规划法

为了考虑时间因素的影响, 须引入二层的分解-协调模型。第一层将泵站的流量(或总提水量)在各个时段间进行分配, 寻求整个泵站在全部时段的最优; 第二层主要考虑各时段在给定的流量下, 确定合理的开机台数和各运行机组的流量, 并向第一层进行反馈。下面主要介绍第二层模型。第二层模型为:

(1) 阶段变量 阶段变量通常用序列数字 $i = 1, 2, \dots, N$ 来表示。本文采用机组编号作为阶段变量。

(2) 状态变量 多阶段决策过程的演变, 通常是以各阶段所处的状态来描述的, 描述过程状态的变量即为状态变量。本问题选取第 n 阶段至最末阶段 N 的累计流量作为状态变量。

$$S_n = \sum_{j=1}^N Q_j \quad (5)$$

(3) 决策变量 决策变量可以直接选取每台机组的流量 Q_n , 也可以选取叶片角度 α_n , 两者是统一的, 本文采用单台机组的流量作为决策变量。

(4) 系统方程 系统方程即状态转移方程, 表示泵站第 $n+1$ 阶段(即第 $n+1$ 号机组)的状态变量 S_{n+1} 与第 n 阶段(即第 n 号机组)的状态变量 S_n 和决策变量 Q_n 之间的关系。按逆序递推, 系统方程可写成

$$S_{n+1} = S_n - Q_n \quad (6)$$

(5) 目标函数 以泵站的运行成本最小作为目标函数。对运行成本本文暂只考虑主机组的电费, 即:

$$\min F = \sum_{i=1}^N \frac{p_r \rho g Q_i H_{st} t}{1000 \eta_{sti}} \quad (7)$$

(6) 约束条件。根据机组特性, 水泵叶片角度(或水泵转速)等参数都受到一定的限制。分别为
泵站流量的约束

$$Q_{st} = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (8)$$

机组台数的约束

$$0 \leq n \leq N \quad (9)$$

单泵流量的约束

$$Q_{\min j} \leq Q_j \leq Q_{\max j} \quad (10)$$

单泵扬程的约束

$$H_{\min j} \quad H_j \quad H_{\max j} \quad (11)$$

单泵功率的约束

$$N_j \quad N_{\max j} \quad (12)$$

单泵叶片角度的约束

$$\min j \quad j \quad \max j \quad (13)$$

进水池水位的约束

$$W_{\min in} \quad W_{L in} \quad (14)$$

另外还有状态约束

$$0 \leq S_n \leq (1 + \alpha) Q_c, \quad \text{且} \quad S_n \leq \sum_{j=n}^N Q_{\max j} \quad (15)$$

上述式中, Q_{st} 为泵的总流量, $Q_{\min j}$, $Q_{\max j}$ 和 Q_j 分别为该时段第 j 台运行机组的最小、最大和实际工作流量; $H_{\min j}$, $H_{\max j}$ 和 H_j 分别为该时段第 j 台运行机组的最小、最大和实际工作扬程; $\min j$, $\max j$ 和 j 分别为该时段第 j 台运行机组的最小、最大和实际叶片角度; $N_{\max j}$ 和 N_j 分别为该时段第 j 台运行机组的最大和实际功率; $W_{L in}$, $W_{\min in}$ 分别为泵站进水池水位及其最低水位; n 为实际开机台数, N 为泵站机组总台数; α 为松弛系数, 可取 $0 \leq \alpha \leq 0.1$ 。

(7) 递推方程 最小费用函数为

$$F^*(S_n) = \min_{Q_j \in q_j} \left\{ \sum_{j=n}^N L(S_j, Q_j) \right\}, \quad j = n, \dots, N \quad (16)$$

上式表示对由任一阶段 $n(n=1, \dots, N)$ 上的任一可行状态 S_n 开始的过程余留部分, 使用可行决策序列 Q_j , $j=n, \dots, N$ 所得到的最小总费用。根据最优化原理可以得到下列各阶段的择优计算方程

$$\begin{cases} F_N^*(S_N) = \min_{Q_N \in q_N} \{L_N(S_N, Q_N)\}, & n = N \\ F_n^*(S_n) = \min_{Q_n \in q_n} \{L_n(S_n, Q_n) + F_{n+1}^*(S_{n+1})\}, & n = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $L_n(S_n, Q_n)$ 为某阶段的费用函数, $F_n^*(S_n)$ 为某阶段的最小费用函数。

第一层模型以时段为阶段变量, 以第 n 阶段至最末阶段 N 的累计提水量作为状态变量, 选取各时段的提水流量 Q_n 作为决策变量。其系统方程的形式与第二层模型相同, 但其阶段变量和状态变量不同。相应的目标函数为各时段各机组总的主机费用最小。

3 算例及分析

为了检验上述方法, 特对某泵站进行了优化调度分析。

3.1 泵站概况和现有运行方案 某泵站总装机台数为 6 台, 其中 5 台工作, 1 台备用。泵站采用

2. 4ZLQ20-9.5型立式机械全调节轴流泵，泵轴与电机轴刚性连接。电动机采用双速异步电机，额定转速分别为高速213r/min、低速186r/min。泵站总设计流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ ，单泵设计流量为 $20\text{m}^3/\text{s}$ 。泵站最高净扬程 $H_{\text{st,max}}=10.05\text{m}$ ，设计净扬程 $H_{\text{st,d}}=8.30\text{m}$ ，最小净扬程 $H_{\text{st,min}}=2.60\text{m}$ 。该泵站的进、出水池水位和电价是随时间变化的。某典型日该泵站的现有运行方案如表1所示。

表1 现有运行方案

时段	进水池 水位/m	出水池 水位/m	电价/ 元	站流量 /(m^3/s)	运 行 装 置 台 数	装置扬程 /m	单泵流量 /(m^3/s)	转速/ (r/min)	装置效 率(%)	叶片角 度/ $^{\circ}$	电费/ 千元
0:00~ 8:00	0.175	7.786	0.4368	88	5	7.611	17.6	186	75.04	2.79	30.5639
8:00~ 9:00	0.04	6.266	0.7388	35	2	6.266	17.5	186	79.76	-0.69	1.9907
9:00~ 12:00	0.093	6.266	0.6985	35	2	6.173	17.5	186	79.84	-0.87	5.5574
12: 00~	0.244	6.659	0.6353	50	3	6.415	16.67	186	79.29	-1.56	17.6301
19:00 19: 00~	0.887	6.659	0.6985	50	3	5.772	16.67	186	79.89	-2.96	7.4190
22:00 20: 00~	0.52	7.786	0.618	88	5	7.266	17.6	186	77.01	1.67	10.0573
24:00 总和											73.2184

3.2 运行方案的优化及分析 按前述步骤，先进行性能曲面的拟合，再进行动态规划的优化求解。

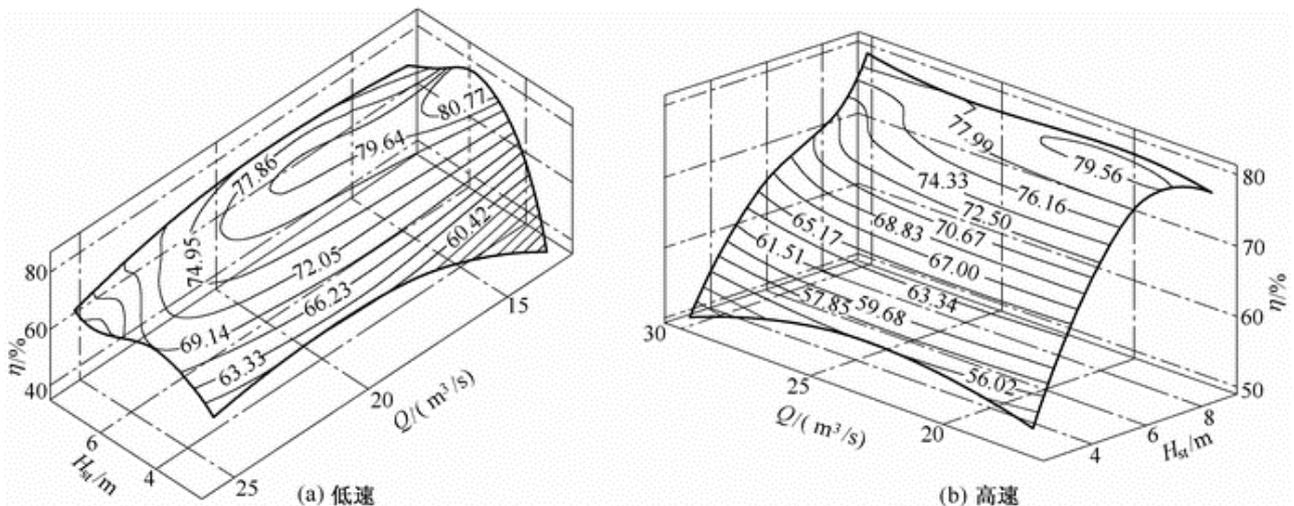


图1 泵站机组不同转速运行，装置效率与装置扬程、流量的关系曲面

(1) 机组在不同转速运行时, 装置效率、叶片角度与装置扬程、流量的关系曲面拟合。依据前述方法, 可拟合出机组在不同转速下的装置效率与装置扬程、流量的关系曲面如图1所示, 而叶片角度与装置扬程、流量的关系曲面因篇幅所限未列出。

(2) 运行方案优化 为了与现有运行方案比较, 假定该泵站全天总提水量与旧方案相同, 为547.2万 m^3 。现采用两种方式进行优化, 第一种方式的各时段时间间隔和泵站流量与现有运行方案相同, 机组运行台数和电费等参数由优化计算给出; 第二种方式各时段采用相等的时间间隔, 各时段流量、机组运行台数和电费等参数均由动态规划计算。本计算采用1、2、3、4、6、8个时段数。第一种优化实际上为满足实时流量要求的优化问题, 不须考虑时间因素, 用一维动态规划即可解决。第二种方法为满足总提水量要求的优化问题, 要考虑时间因素。优化计算后的结果见表2。

表2 各种优化方式的结果与现有运行方式的比较

运行方式	电费 /千元	节省的电费 /千元
现有运行方式	73.2184	0
第一种优化方式	71.2115	2.0069
分1个时段	75.19	-1.9716
分2个时段	72.63	0.5884
第二种优化方式	69.36	3.8584
分3个时段	70.6	2.6184
分4个时段	69.32	3.8984
分6个时段	70.11	3.1084
分8个时段		

从表2可以看出: (1) 第一种优化方式比现有运行方案省2.0069千元。这两种方案的不同之处在于0:00~8:00和22:00~24:00时段的机组台数和转速不同, 现有方案均为5台低速机组运行, 而第一种优化方式为4台高速机组运行; (2) 采用第二种优化方式后, 与现有运行方案相比, 仅该典型日一天, 除分1个时段的情况外, 其它方案均可节省电费, 最多可省电费3.8984千元。若全年均按该最优方案运行, 则该泵站一年可以节省电费142.2916万元(按全年运行365d计算), 经济效益十分明显; (3) 对第二种优化方式, 以全天分3~6个时段数运行为宜。其中分3个时段数的计算结果, 不仅电费节省多(仅比最优的6个时段数的结果少0.04千元), 而且时段数较少, 运行操作简单, 是比较理想的运行方案, 其具体细节见表3。

表3 泵站总提水量为547.2万 m^3 , 分3时段运行各机组运行情况

时段	时间间隔	装置扬程 /m	电价/ (元/kWh)	机组 编号	流量 /(m^3/s)	转速 /(r/min)	叶片角 /($^\circ$)	电费 /(千元)	备注
1	24:00~8:00	7.8	0.4368	1	20.9	213	-0.32	34.98	
				2	20.9	213	-0.32		
				3	20.9	213	-0.32		
				4	20.9	213	-0.32		
				5	20.9	213	-0.32		
2	8:00~16:00	6.06	0.6784	1	0	0	0	19.99	不开机
				2	0	0	0		不开机
				3	15.81	186	-3.88		
				4	15.81	186	-3.88		
				5	17.78	186	-0.7		
3	16:00~24:00	6.27	0.6482	1	0	0	0	14.4	不开机
				2	0	0	0		不开机
				3	0	0	0		不开机
				4	18.05	186	0.04		

4 结语

本文对水泵机组的动力特性进行了曲面拟合,建立了装置效率和叶片角度关于装置扬程和流量在给定域内的连续函数关系式。利用该关系式可以方便地确定任一流量和装置扬程对应的装置效率和叶片角度。与目前通行做法相比,不需进行插值计算,大大减少了计算工作量,并提高了计算精度。在此基础上,建立了泵站优化调度的二层分解协调模型。该模型可用于泵站具有不同型号泵并考虑时间因素的优化调度问题。最后以某泵站为例进行了分析比较,结果显示采用本文方法以二种方式优化后的运行方案都比现有运行方案要节省大量电费,其中全天分3个时段数的方案不仅电费省,而且运行操作方便,是较为理想的方案。

参考文献:

- [1] 马文正,丘传忻,贺贵明. 泵站运行的优化调度[J]. 水利学报, 1993, (3): 35-41.
- [2] 程芳,陈守伦. 泵站优化调度的分解协调模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 136-139.
- [3] 汪亚超. 泵站多型号水泵机组运行的优化调度[J]. 中国农村水利水电, 1997, (4): 18-20.
- [4] 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), 2003, 4(3): 72-74.
- [5] 丘传忻. 泵站工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.

Optimized dispatch of pumping stations based on performance curve surface fitting

LONG Xin-ping, ZHU Jin-mu, LIU Mei-qing, ZHOU Long-cai

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The continuum functional relationships among system efficiency, blade angle, static head and flow rate of pumps are established based on the performance curve surface fitting method. According to these functional relationships the pumping station efficiency and other parameters under certain static head and flow rate can be determined quickly and accurately. Since no interpolation is needed, it accelerates the calculation for seeking optimized operation scheme and improves the calculation precision. Furthermore, the optimized dispatch scheme of the pumping station is obtained by adopting the dynamic planning method. This method is suitable to the pumping stations having various types of pumps with adjustable blade angle and rotational speed. An example of application is given. The result shows that the optimized operation scheme not only save a lot of electric power but also accelerate the calculation speed.

Key words: pumping station; optimized dispatch; performance curve surface fitting; dynamic planning