

水泵调速及其优化算法的探讨

Discussion on the Speed Control and Algorithms for Optimization of Water Pumps

深圳市水务(集团)有限公司 梁相钦 宛如意

Liang Xiangqin Wan Ruyi

摘要: 本文对供水系统的能耗进行了分析, 阐明了水泵采用交流调速技术可以有效地改变其运行工况, 通过曲线拟合、建立数学模型和实施实时监控, 实现水泵组合方案和调速策略的优化, 在满足供水流量和压力前提下使供水能耗最低。

关键词: 交流调速系统 水泵组合 优化策略

Abstract: In this article, the energy consumption of the water supply system is analyzed in detail, and the operation conditions of speed variable pumps can be changed in effect is also discussed. It is the most effective ways to implement the optimization of the pump combination and the speed control strategies that we use the computer-based on curve-fitting, set up the mathematical model, and perform the real-time inspection and control. In the case of ensuring water supply flow and pressure in each section, the lift required by each is also discussed. The water supply section can be determined so as to make the energy consumption of the system be the lowest.

Key words: AC speed control system Pump combination Optimize strategy

[中图分类号] TK370

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2005)01-0114-04

1 引言

由于城市的供水系统特点, 日变化系数 K_d 和时变化系数 K_h 都相当大, 供水量变化范围大, 必须调节流量, 采用水泵调速技术通过改变水泵的转速来改变水泵的供水流量和扬程, 以满足供水服务要求, 使系统高效率运行, 已为供水行业所接受, 并在实践中得到了广泛应用。然而对于采用了调速技术的供水系统, 如何有效地利用调速技术节能降耗, 仍是摆在了我们面前要研究的主要问题。

2 曲线拟合与建模

水泵调速的节能主要体现在两个方面:

(1) 水泵调速后, 使水泵高效区范围由线变成面, 扩大了高效区范围, 使越出高效区的工况点回到高效区范围内, 水泵效率因此而增高;

(2) 在满足服务压力的前提下, 为适应运行工况的改

变, 可使流量与扬程跟随管网系统需水量和吸水井水位的变化, 维持管网末梢压力稳定, 减少富余扬程, 水泵因为调速而使水泵供水压力变低, 减小电能消耗。

我们知道了调速能够节能, 但是要有效地充分地挖掘节能潜力, 精确地控制水泵转速, 必须通过曲线拟合、建立数学模型和实施实时监控, 实现水泵组合方案和调速策略的优化, 才能在满足供水流量和压力前提下使供水能耗最低。

2.1 曲线拟合

曲线拟合是指首先获得一组足够数量的实验数据, 为了从中找出规律来, 构造一个近似函数去逼近所求函数, 实际应用得比较多的是线性最小二乘法。大量的实践证明, 水泵在额定转速下运行, 它的 $Q-H$ 、 $Q-P$ 曲线可以用多项式表示, 水泵特性曲线比较容易拟合, 但是系统的管路特性曲线由于管网末梢自由水头和水泵的吸水井水位的变化, 使之表现为一个曲线族。水泵的特性曲线方程如式

(1)、(2)所示, 管路特性曲线方程如式(3)所示。

$$H = f(Q) = \sum_{i=0}^m a_i Q^i \quad (1)$$

$$P = f(Q) = \sum_{i=0}^m b_i Q^i \quad (2)$$

$$H = \varphi(Q) = h_i + \sum_{i=0}^m K_{P_i} Q^i + \sum_{i=0}^m K_{M_i} Q^i \quad (3)$$

其中: a_i, b_i —水泵特征系数;

K_{P_i} —管路沿程摩阻系数;

K_{M_i} —局部水头损失系数;

h_i —静扬程, MPa;

Q —水泵的流量;

P —水泵的轴功率;

H —水泵的扬程。

研究表明, 取 $m=4$ 时, 曲线拟合得到的函数已经具有足够的精度。

2.2 数学模型的建立

水泵组合方案的优化设计实质上就是在满足供水流量和压力前提下使能耗值最小。对于某一供水工况(Q_{duty}, H_{duty}), 不同的运行方案, 泵站的总能耗不同, 能耗最小的运行方案就是泵站在该工况下的最优运行方案。可以建立如下数学模型:

(1) 目标函数

$$P_{duty} = \min \left(\sum_{j=1}^M \omega_{i,j} P_{i,j} \right) \quad (4)$$

其中: P_{duty} —某一工况下的最小能耗, kW

M —泵站内装配水泵的总台数

$P_{i,j}$ —第 i 种型号、第 j 台水泵的轴功率, kW

$\omega_{i,j}$ —状态函数, $\omega_{i,j}=0$ 表示第 j 台水泵停机,

$\omega_{i,j}=1$ 表示第 j 台水泵运行

(2) 约束条件

(a) 水泵并联运行方式约束, 总流量为各泵流量之和, 各泵扬程相等:

$$Q_{duty} = \sum_{i=0}^M \omega_{i,j} Q_{i,j} \quad (5)$$

$$H_{duty} = H_{i,j} \quad (6)$$

其中: Q_{duty} —某一工况下的供水流量, m^3/h

H_{duty} —某一工况下的供水扬程, MPa

$H_{i,j}$ —第 i 种型号、第 j 台水泵的扬程, MPa

$Q_{i,j}$ —第 i 种型号第 j 台水泵的工作流量, m^3/h

(b) 第 i 种型号、第 j 台水泵的扬程与功率关系约束,

即水泵特性曲线方程:

$$H_{i,j} = f_j(Q_{i,j}) = \sum_{k=0}^m a_{i,j} Q_{i,j}^k \quad (7)$$

$$P_{i,j} = f_j(Q_{i,j}) = \sum_{k=0}^m b_{i,j} Q_{i,j}^k \quad (8)$$

(c) 服务工况点必须沿系统的管路特性曲线移动, 即系统的管路特性曲线方程:

$$H = \varphi(Q) = h_i + \sum_{i=0}^m K_{P_i} Q^i + \sum_{i=0}^m K_{M_i} Q^i \quad (9)$$

(d) 单泵效率约束, 设定目标效率范围, 左右临界相似工况曲线方程:

$$H_{i,j} = \alpha_i Q_{i,j}^2 \quad (10)$$

$$H_{i,j} = \beta_i Q_{i,j}^2 \quad (11)$$

其中: α_i —第 i 种型号高效区左临界曲线系数

β_i —第 i 种型号高效区右临界曲线系数

2.3 数学模型的求解

上述数学模型是一个混合型非线性规划问题, 其求解步骤为: 根据管路中最不利水点所要求的水压值、吸水井水位确定管路特性的静扬程 h_i , 再由管路特性曲线方程求得此时的供水工况(Q_{duty}, H_{duty}); 由供水扬程 H_{duty} 和水泵特性曲线方程求取每种水泵对应的流量 $Q_{i,j}$, 定速水泵 $Q_{i,j}$ 为一固定的点, 而调速水泵的流量 $Q_{i,j}$ 变化范围则很宽, 在单泵效率高效范围约束条件下, 适当调整目标效率, 可缩小调速泵的流量 $Q_{i,j}$ 备选范围; 再由水泵并联运行条件选择泵的组合(即调速泵台数和定速泵台数)可得到状态函数 $\omega_{i,j}$, 对于定速泵, 可用 $P_{i,j} = \phi_i(Q_{i,j})$ 直接计算单泵的轴功率; 对于调速泵, 可根据水泵相似原理求得 $P_{i,j}$; 计算各种组合的功率, 得出功率最低组合, 即最优的组合。

3 优化策略应用

为了叙述方便, 下面就以所有水泵型号相同为例来介绍求解方法, 同时将水泵特性曲线方程(式7与式8)和系统管路特性曲线方程(式9)简化为二次曲线。

$$H = A + BQ + CQ^2 \quad (12)$$

$$H = AK^2 + BKQ + CQ^2 \quad (13)$$

$$H = H_0 + \gamma Q^2 - h \quad (14)$$

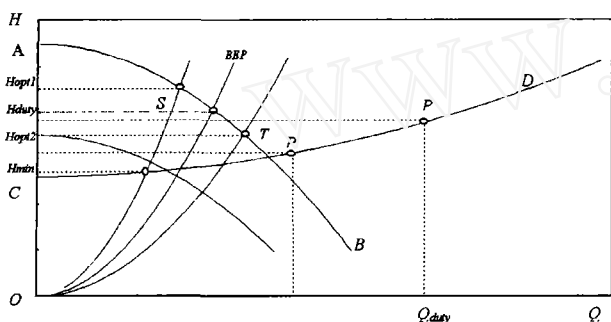
其中: K —水泵调速比例;

H_0 —在吸水井水位为零时的水泵净扬程;

h —水泵吸水井水位;

A, B, C —系数; γ —系数。

在附图中, AB 为单台全速泵的 $Q \sim H$ 特性曲线, CD 为系统管路特性曲线, 服务工况点 P 为多台水泵组合而成的虚拟水泵特性曲线与管路特性曲线的交点, OS 和 OT 分别为期望的高效区左右临界相似工况曲线。由全速泵特性曲线方程与左右临界相似工况曲线方程联立求解, 得到 AB 高效段左右临界点 S、T 的纵坐标分别为 H_{opt1} 、 H_{opt2} 。由管路特性曲线方程与左临界相似工况曲线方程联立求解得到最小服务扬程为 $H_{min} = \frac{\alpha(H_0 - h)}{\alpha - \gamma}$ 。



附图 水泵特性曲线与供水系统管路特性曲线

(1) 当服务扬程 $H_{min} < H_{duty} < H_{opt2}$ 时, 定速水泵运行在期望的高效区以外, 所以只能采用全调速运行方式, 并且每台水泵的转速相同。根据实测的吸水井水位 h 得到服务工况点 P 所对应的管路特性曲线方程为:

$$H = H_0 + \gamma Q^2 - h$$

$$\text{经计算得到服务流量: } Q_{duty} = \frac{\sqrt{H_{duty} - H_0 + h}}{\sqrt{\gamma}}$$

根据水泵高效区左右临界相似工况曲线方程 $H = \alpha Q^2$ 和 $H = \beta Q^2$ 分别求得临界流量为:

$$Q_L = \sqrt{\frac{H_{duty}}{\alpha}}; \quad Q_R = \sqrt{\frac{H_{duty}}{\beta}}$$

所以, 每台调速泵的流量调节范围为:

$$\sqrt{\frac{H_{duty}}{\alpha}} \leq Q_{调} \leq \sqrt{\frac{H_{duty}}{\beta}}$$

根据相似原理, 得到调速泵的调速范围为:

$$\sqrt{\frac{H_{duty}}{H_{opt1}}} \leq k_{调} \leq \sqrt{\frac{H_{duty}}{H_{opt2}}}$$

$$\text{调速泵的运行台数: } m = \frac{Q_{duty}}{Q_{调}}$$

调速泵的调速比:

$$k = \frac{-BQ_{duty}/n + \sqrt{(B^2 - 4AC) \times (Q_{duty}/n)^2 + 4AH_{duty}}}{2A}$$

(2) 当服务扬程 $H_{opt1} > H_{duty} > H_{opt2}$ 时, 定速水泵运行在期望的高效区内, 那么同样可以求得定速水泵和调速水泵运行台数的最佳组合, 以及调速水泵的运行转速。

$$\text{服务流量: } Q_{duty} = \frac{\sqrt{H_{duty} - H_0 + h}}{\sqrt{\gamma}}$$

由水泵特性曲线方程可得定速泵的流量:

$$Q_{定} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4C(A - H_{duty})}}{2C}$$

调速泵的流量调节范围:

$$\sqrt{\frac{H_{duty}}{\alpha_1}} \leq Q_{调} \leq \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4C(A - H_{duty})}}{2C}$$

定速泵和调速泵运行台数的组合: $mQ_{定} + nQ_{调} = Q_{duty}$ (m 、 n 为自然数, 当然调速泵的运行台数还受谐波影响的限制。)

调速泵的调速比:

$$k = \frac{-BQ_{调}/n + \sqrt{(B^2 - 4AC) \times Q_{调}^2 + 4AH_{duty}}}{2A}$$

由 $N_{duty} = \text{Min} \left(\sum_{j=1}^M \omega_{i,j} N_{i,j} \right)$, 得出能耗最低的组合。

(3) 当服务扬程 $H_{duty} > H_{opt1}$ 或者 $H_{duty} < H_{min}$ 时, 无论如何组合, 水泵均运行在期望的高效区以外。

3 应用案例

上述优化算法应用在某泵站群集散监控系统, 该系统由 SCADA(监控与数据采集系统)与 MDSS(生产决策支持系统)两部分组成。在 MDSS 系统中用 Delphi 语言将算法开发成软件包, 首先建立反映实际系统管路特性和水泵特性的数据库, 拟合出实际的系统管路特性和水泵特性曲线方程; 实时检测电耗、流量、吸水井水位、出厂水压力、机组综合效率等参数; 根据系统的工艺要求(出厂水流量、压力等), 由优化控制算法确定出满足工艺要求条件下最省电的水泵组合及调速策略; 并由 SCADA 系统对策略执行控制。

将交流调速技术与自动控制技术相结合, 实现水泵组合方案和调速策略的优化, 在满足供水流量和压力前提下使供水能耗最低。通过采集生产过程的实时数据, 利用计算机曲线拟合方法, 建立生产运行的数学模型, 模型分析所得的策略优化控制水厂相关设备的运行, 提高水处理效率, 实现预测性的“事前控制”, 从而在保障生产运行安全和优质服务的前提下获取最大的经济效益。

(下转第 120 页)

32 位机,主频 25MHz, RAM 是 4M,可带 480 个 I/O,通过 Field Bus 100 总线及远程 I/O 可带 2500 个 I/O。AC410 通讯功能较强,可通过 MB300 以太网总线与 Advant OCS 系统的监控显示操作站及控制站联网。

● 将现有 MV830/1 及两台专用监控显示器更换为 ABB Advant Windows NT 系统和普通的显示器,该系统硬件选用适合于工业现场使用的普通工业 PC 机,(最后选用的是 Siemens 工控机),以便于维护和更换。操作员站软件选用的是 AdvantCommand for Windows NT 系统。AC410 与 ABB Advant Windows NT 联接使用 MB300 总线,其速度为 10Mbit/s,原系统 MB200 速度仅为 153.6Kbit/s。

ABB Advant Windows NT 新系统不仅支持原有 MV830/1 的各种显示图形,如:过程控制流程图、趋势图、组态显示、报警显示等等,还支持三维立体图形画面,其软件具有强大的三维图形库可以调用,且该图形库可以由用户自行补充。而做图软件为通用的 Windows 界面,作图简单,画面直观且更新时间为 1s。

● 为实现与水厂调度 SCADA 系统使用的 Siemens 上位机联网,在 AC410 处加装一块通讯板 C1532VO3,其通讯速度为 19.2kbit/s。该块通讯板从 AC410 联接到 Siemens PLC S7-300 上加装的 CP341 通讯板,且该板支持 Siemens 3964R 通讯协议。现在通讯距离 $\leq 15\text{m}$ 。通讯数据 < 100 个。如果需要远距离数据传输,需要在两端加入 2 个 Modem 调制解调器,此时通讯距离可达 10km。

4 结束语

此次新开河水厂送水二泵站引进设备的国产化改造,投资近 300 万元、历时两年、分两期工程进行实施与完成。现在已全部完工并交付使用,正在积累运行参数,测算节电数据。实践证明此次引进设备的国产化技术改造,其效果与效益非常良好。证明方案的选择是正确的、改造是成功的,有经验也有教训,初步体会如下:

(1) 改造以前必须对引进的技术设备进行全面的学习、消化,达到完全掌握的程度;

(2) 必须对准备采用的厂家、公司的技术设备有特别深入的调查研究,在选择厂家和技术设备时,一定要选择“大型厂商、知名品牌”成熟的技术、产品;

(3) 在制订技术改造方案阶段必须多方面接触、反复论证比较、制订切实可行的方案;

(4) 作为电气、计算机、自动化与高压变频调速技术设备,其发展之快是异乎寻常的。所以我们在选择该

类技术产品时,一方面要考虑其高可靠性和高稳定性,另一方面还要强调技术的前瞻性、先进性;

(5) 在最终确定技术改造方案和技术设备选型后,同时还要作好改造工程的深入细致、切实可行的实施方案和工程完成后的模拟各种工艺运行工况的调试方案。后两种方案是技术改造方案的落实与结果,在某种意义上决定着技术改造的成与败,切勿忽视。

上述内容是笔者主持该项技术改造工程的经过与体会,整理出来与水工业同仁共同研讨,可能存在不妥之处,恳望批评指正。

参考文献

(略)

作者简介

孙有春(1947-) 男 正高级工程师 毕业于天津理工学院工业电气自动化专业,长期从事企业供电、计算机、自动化、仪器仪表、电机拖动与水泵调速的研究与应用。

(上接第 116 页)

参考文献

[1] 谷晋龙. 水泵调定混合给水系统运行工况分析. 给水排水, 1997(12): 5-8.

[2] 于明, 范书昌. 离心泵并联运行工况点的确定. 水泵技术, 1999(2): 33-35.

[3] 李名锐. 水泵调速机组效率变化与选泵. 哈尔滨建筑大学学报, 1995(6): 58-63.

[4] Van Zyl, J. E.. A Methodology for Improved Operational Optimization of Water Distribution Systems. Ph. D. Thesis, University of Exeter, United Kingdom. (2001)

[5] Ormsbee, L. E., and Lansey, K. E.. Optimal Control of Water Supply Pumping Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 120(2), 237. (1994)

作者简介

梁相钦(1943-) 男 高级工程师 从事冶金自动控制系统调试工作多年,曾任深圳市水务(集团)有限公司水厂厂长、集团总经理、董事长,主要研究方向为水工业自动控制与调速节能、水务运营与投资管理。