

# 水泵调速及其控制技术的应用研究

梁相钦 宛如意

(深圳市水务(集团)有限公司,深圳 518031)

**摘要** 对供水系统的能耗进行分析,阐明水泵采用变频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** 变频调速 水泵组合 优化策略 生产决策支持 工业以太网

## 1 供水系统能耗分析与变频调速的应用

供水系统由管网、水泵、电机及其配套电气设备等环节组成,每个环节都存在着损耗。其中只有水泵的效率变化范围很大,其运行工况包括高效率运行、低效率运行、不稳定运行和汽蚀运行。而供水系统的运行目标是:使水泵保持高效率运行,缩短低效率运行时间,避免不稳定运行,禁止在汽蚀状态下运行。提高水泵运行效率是降低供水系统能耗的关键。

城市供水系统的供水量变化大,必须进行流量调节。目前采用水泵调速技术通过改变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,已被供水行业所接受,并已得到广泛应用。由于交流电机的转速与电源频率基本成正比,因此通过改变交流电机的电源频率是水泵调速的最佳途径之一。变频调速由于其具有调速平滑、调速范围宽、机械特性好、保护功能齐全、控制灵活、运行平稳、安全可靠等优点,不但比传统的直流电机调速优越,而且也比调压调速、变极调速、串级调速、液力耦合调速等调速方式优越。其技术核心是以微电子技术控制大功率快速可关断功率元件(如 GTO、GTR、IGBT、IPM),形成所需要的输出波形(期望的频率与振幅)。通过控制软件的应用,交流变频设备能准确地判断电机负载的变化,采用矢量控制(VC)和先进的直接转矩控制(DTC)方式,使输出频率、电流与电压关系得到优化,可以在保证负载驱动所需转矩的同时,尽量减少电机的电耗和发热,提高电机运行效率。近 20 年来,我国供水行业大量使用变频调速,然而如何有效地利用调速技术节能降耗,仍是摆在我们面前需要研究的主要问题。

## 2 曲线拟合与优化模型建立

水泵调速的节能主要体现在两方面:①水泵调速后,使水泵高效区范围由线成面,扩大了高效区范围,使超出高效区的工况点回到高效区范围内,水泵效率因此而提高。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,水泵因为调速减少电能消耗。

要充分有效地挖掘节能潜力,精确地控制水泵转速,就必须通过曲线拟合,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试验数据,为了从中找出规律,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  $Q \sim H$ 、 $Q \sim N$  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)和式(2)所示,管路特性曲线方程如式(3)所示。

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

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

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

式中  $a_i$ 、 $b_i$ ——水泵特征系数;

$K_{Pi}$ ——管路沿程摩阻系数；  
 $K_{Mi}$ ——局部水头损失系数；  
 $h_i$ ——静扬程，MPa。

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。

### 2.2.1 目标函数

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

式中  $N_{duty}$ ——某一工况下的最小能耗，kW；

$M$ ——泵站内装配水泵的总台数；

$N_{i,j}$ ——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  $i$  种型号第  $j$  台水泵停机， $\omega_{i,j} = 1$  表示第  $i$  种型号第  $j$  台水泵运行。

### 2.2.2 约束条件

(1) 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：

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

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

式中  $Q_{duty}$ ——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， $m^3/h$ 。

(2) 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：

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

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

(3) 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：

$$H = \mathcal{A}(Q) = h_i + \sum_{i=0}^m K_{Pi} Q^i + \sum_{i=0}^m K_{Mi} Q^i \quad (9)$$

(4) 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：

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

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

式中  $\alpha_i$ ——第  $i$  种型号高效区左临界曲线系数；

$\beta_i$ ——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：根据管路中最不利用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  $Q_{i,j}$ ，定速泵  $Q_{i,j}$  为一固定的点，而调速泵的  $Q_{i,j}$  变化范围则很宽，在单泵高效范围约束条件下，适当调整目标效率，可缩小调速泵的  $Q_{i,j}$  备选范围；再由水泵并联运行条件选择泵的组合（即调速泵和定速泵台数）可得到状态函数  $\omega_{i,j}$ ，对于定速泵，可用  $N_{i,j} = \varphi_i(Q_{i,j})$  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  $N_{i,j}$ ，计算各组合的功率，得出功率最低组合，即最优组合。

## 3 优化策略应用实例

为了叙述方便，下面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和系统管路特性曲线方程简化为二次曲线。

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

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

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

式中  $K$ ——水泵调速比例；

$H_0$ ——在吸水井水位为零时的水泵静扬程；

$h$ ——水泵吸水井水位。

在图 1 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

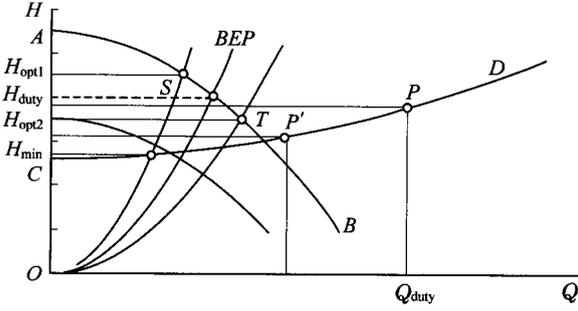


图1 水泵特性曲线与供水系统管路特性曲线

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  $H_{min} = \alpha(H_0 - h)(\alpha - \gamma)$ 。

(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:

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

经计算得到服务流量:

$$Q_{duty} = \sqrt{\frac{H_{duty} - H_0 + h}{\gamma}}$$

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:

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

调速泵的运行台数:

$$m = \frac{Q_{duty}}{Q_{调}}$$

调速泵的调速比:

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

(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。

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  $N_{duty} = \min\left(\sum_{j=1}^M \omega_{i,j} N_{i,j}\right)$ , 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。

(4) 以下是  $M$  泵站实际运行的两个例子:

采用上述方法, 拟合得到水泵特性曲线方程和系统管路特性曲线方程:

$$H = 55 - 1.38 \times 10^{-4} Q - 2.66 \times 10^{-7} Q^2 \quad (15)$$

$$H = 26.12 + 4.21 \times 10^{-8} Q^2 - h \quad (16)$$

期望的水泵效率为  $\eta \geq 90\%$ , 左右临界相似工况曲线方程:

$$H_L = 1.34 \times 10^{-6} Q^2 \quad (17)$$

$$H_R = 5.02 \times 10^{-7} Q^2 \quad (18)$$

求得:  $H_{opt1} = 45.12 \text{ m}$ ,  $H_{opt2} = 35.19 \text{ m}$ 。

① 当服务扬程为  $30 \text{ m}$ , 清水池水位为  $4 \text{ m}$  时:

$$H_{duty} = 30 \text{ m}$$

$$H_{min} = 22.82 \text{ m}$$

$$H_{min} < H_{duty} < H_{opt2}$$

所以必须采用全调速运行方式,服务流量:

$$Q_{\text{duty}} = 13\,697.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

调速泵的运行台数:

$$1.77 < n < 2.89$$

取  $n = 2$ ,即最佳方式是运行 2 台调速泵,调速比为  $K = 0.87$  转速为  $509 \text{ r/min}$ 。

②当服务扬程为  $40 \text{ m}$ ,清水池水位为  $2 \text{ m}$  时:

$$H_{\text{duty}} = 40 \text{ m}$$

$$H_{\text{opt1}} > H_{\text{duty}} > H_{\text{opt2}}$$

服务流量:  $Q_{\text{duty}} = 19\,444.7 \text{ m}^3/\text{h}$

水泵全速(或定速)运行的单台流量:

$$Q_{\text{定}} = 7\,254.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

调速泵的流量调节范围:

$$5\,484.1 \text{ m}^3/\text{h} < Q_{\text{调}} < 7\,254.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

定速泵和调速泵运行台数的组合:

$$mQ_{\text{定}} + nQ_{\text{调}} = Q_{\text{duty}}$$

得到如下组合:  $m = 0, n = 3$ ;  $m = 1, n = 2$ 。

采用全调速方式(受谐波影响调速机组最多运行台数为 3):

$$Q_{\text{调}} = 6\,481.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

调速泵的调速比  $K = 0.973$  转速为  $569 \text{ r/min}$ 。

采用 1 台定速泵 2 台调速泵的运行方式:

$$Q_{\text{调}} = 6\,095.1 \text{ m}^3/\text{h}$$

调速泵的调速比  $K = 0.96$  转速为  $562 \text{ r/min}$ 。

再比较两种运行方式的消耗功率大小,以确认最优的运行方式。

#### 4 采用控制技术实现优化算法

上述优化算法应用在某泵站群集散监控系统中,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小电耗的水泵组合及调速策略;并由 SCADA 系统对策略执行控制。

SCADA 系统采用工业以太网技术,实现各泵站

的协调、优化和调度运行,通过 10/100 M 工业以太网把各泵站控制器、变频器连接起来,以实现信息的交换、传输、集中监测和控制。采用有线 IP 城域网作为各泵站与控制中心通讯的主要链路,并以无线 GPRS 通讯作为有线通讯方式的备份链路,确保各泵站系统与监控中心通讯的可靠性。各泵站使用 S7-300 系列 PLC,下位可按需要选用 S7-200 系列或分布式 I/O。配有以太网通讯模块的 PLC 可直接链入光纤以太网中,成为以太网节点。甚至最底层的 I/O 采集器和智能仪表也已集成有以太网功能,从而使现场生产层、控制层和管理决策集成为具有统一 TCP/IP 协议的工业以太网,使泵站自控网络具有了管控一体化功能,使得 SCADA 与 MDSS 有机结合,确保生产运行始终处于最佳状态。

#### 5 结论

将变频调速技术与自动控制技术相结合,可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。这种在 SCADA 系统基础上,建立 MDSS 系统,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,能提高水处理效率,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。

#### 参考文献

- 谷晋龙. 水泵调度混合给水系统运行工况分析. 给水排水, 1997, 23(12): 5~8
- 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
- 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
- Van Zyl J E. A Methodology for Improved Operational Optimization of Water Distribution Systems. Ph D Thesis, University of Exeter, United Kingdom, 2001
- Ormsbee L E, Lansey K E. Optimal control of water supply pumping systems. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1994, 120(2): 237

○电话 (0755) 82137988

E-mail: szliangxq@yahoo.com.cn

收稿日期 2004-6-18