

# 水泵调速节能技术应用分析

梁相钦 宛如意

## 引言

供水系统是由管网、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。如图1所示,在系统图中,配电系统的线路损耗、联轴器的传动损耗较小;电机启动/制动器的损耗更是忽略不计;变压器的损耗一般不大,电机的损耗在低负载时损耗较大,一般达到50%额定负载以上时,损耗较小且稳定;作为可选的调速设备本身存在着一定的损耗;管路系统的损耗由管路摩阻和局部水头损失组成。以上这些损耗在系统中客观存在且变化不大,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。显然,对于供水系统的运行目标就是: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。

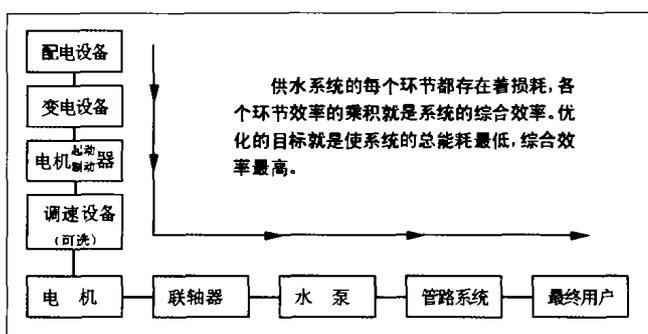


图1 供水系统组成

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,以期满足供水服务要求,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。

## 水泵调速节能原理分析

调速水泵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,使超出高效区的工况点回到高效区范围内,

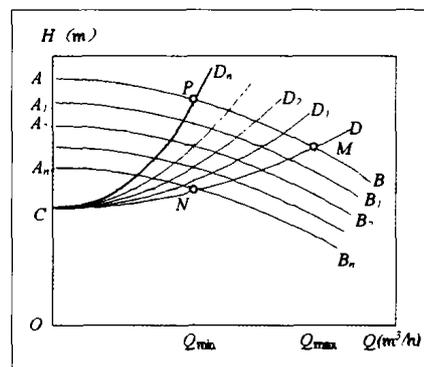


图2 调速适应流量的变化

水泵运行效率因此而增高。(2)在满足服务压力的前提下,水泵因为调速而使水泵供水压力变低,减小电能消耗。下面以单台水泵的运行工况为例,分别从供水量的变化和吸水井水位的变化来分析调速的节能原理,图2和图3中  $AB$  为全速泵的特性曲线,  $A_k B_k$  ( $k=1 \sim n$ ) 为调速泵的特性曲线簇,  $CD$  为系统的管路特性曲线,  $C_k D_k$  ( $k=1 \sim n$ ) 为管阻发生变化形成的管路特性曲线簇,  $C_k$  ( $k=1 \sim n$ ) 为几何扬程。

当需水量发生变化,流量从  $Q_{max}$  减少到  $Q_{min}$  时,如果采取关小出口阀门的办法来控制流量,水泵工作点在全速泵特性曲线  $AB$  上由  $M$  滑动到  $P$  点,而管网所需扬程将沿管路特性曲线  $CD$  曲线由  $M$  滑动到  $N$  点,出口阀门前后压力差值就是  $P$ 、 $N$  这两点纵坐标的差值  $\Delta H$ ,  $\Delta H Q_{min}$  就是损失的能量,它白白地浪费在阀门的阻力上。而采用调速技术时,当用水量从  $Q_{max}$  变动到  $Q_{min}$  的过程中,水泵转速随流量从额定转速  $n_e$  降到  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ ,水泵的  $Q-H$  特性曲线  $AB$  也相应变化为  $A_1 B_1, A_2 B_2, A_3 B_3, \dots, A_n B_n$ ,水泵特性曲线簇与管路特性曲线  $CD$  相交得到轨迹  $MN$ ,这样就使得水泵的工

作点沿管路特性曲线  $CD$  滑动到  $N$  点, 使其扬程处能与系统阻力相适应, 保持管网末梢的服务压力恒定。

如图 3 所示, 当吸水井水位发生变化, 从  $h_{\min}$  上

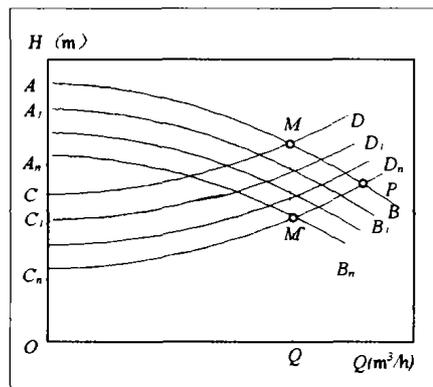


图 3 调速适应吸水井水位的变化

升到  $h_{\max}$  时, 水泵的几何扬程则从  $C$  降到  $C_n$ , 管网的管路特性曲线  $CD$  也相应变化为  $C_1D_1$ 、 $C_2D_2$ 、 $C_3D_3$ ... 直至  $C_nD_n$ , 全速泵

的工况点向大流量偏移, 落在管路特性曲线簇  $C_kD_k(k=1 \sim n)$  与水泵特性曲线  $AB$  的交点的轨迹  $MP$  上, 此时水泵运行工况点往往偏离高效区, 而且还超过了管网要求的流量和压力, 为不稳定运行状态, 最终回到  $M$  点, 但是扬程的升高转化为管网末梢自由水头的升高。采用调速时, 水泵的几何扬程从  $C$  降到  $C_n$  的过程中, 水泵转速则从额定转速  $n_r$  降到  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ ... 直至  $n_n$ , 水泵的  $Q-H$  特性曲线也相应地由  $AB$  变化为  $A_1B_1$ 、 $A_2B_2$ 、 $A_3B_3$ ... 直至  $A_nB_n$ , 调速水泵特性曲线簇  $A_kB_k$  与管路特性曲线簇  $C_kD_k$  的交点的轨迹为  $MM'$ ,  $M$ 、 $M'$  两点的纵坐标的差值  $\Delta H$  就是采用调速节约的扬程,  $\Delta HQ$  就是节约的能量。

从以上分析可得, 为满足工艺要求和适应运行工况的改变, 采用了水泵调速技术, 可使流量与扬程适应管网系统需水量和吸水井水位的变化, 能够节能。多台水泵运行时, 需选择合适数量的水泵, 使每台水泵都运行在高效区, 提高水泵机组的总体运行效率, 保证供水调度的经济合理, 维持管网末梢压力稳定, 达到节能目的。

### 曲线拟合与优化模型建立

通过节能原理分析, 可知调速能够节能, 并且知道生产工艺发生变化时如何调节转速, 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。

#### 1 曲线拟合

大量的实践证明, 水泵在额定转速下运行, 它的

$Q-H$ 、 $Q-N$  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

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

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

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

其中,  $a_i, b_i$  为水泵特征系数;  $K_{Ri}$  为管路沿程摩阻系数;  $K_{Mi}$  为局部水头损失系数;  $h_r$  为静扬程, 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 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  $(Q_{\text{运}}, H_{\text{运}})$ , 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

$$N_{\text{运}}=\text{Min} \left\{ \sum_{i,j} \omega_{ij} N_{ij} \right\} \quad (4)$$

其中,  $N_{\text{运}}$  为某一工况下的最小能耗, kW;  $M$  为泵站内装配水泵的总台数;  $N_{ij}$  为第  $i$  种型号、第  $j$  台水泵的轴功率, kW;  $\omega_{ij}$  为状态函数,  $\omega_{ij}=0$  表示第  $j$  台水泵停机,  $\omega_{ij}=1$  表示第  $j$  台水泵运行。

##### (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

$$Q_{\text{运}}=\sum_{i,j} \omega_{ij} Q_{ij} \quad (5)$$

$$H_{\text{运}}=H_{ij} \quad (6)$$

其中,  $Q_{\text{运}}$  为某一工况下的供水流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $H_{\text{运}}$  为某一工况下的供水扬程, MPa;  $H_{ij}$  为第  $i$  种型号、第  $j$  台水泵的扬程, MPa;  $Q_{ij}$  为第  $i$  种型号第  $j$  台水泵的工作流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

②第  $i$  种型号、第  $j$  台水泵的扬程与功率,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

$$H=\varphi(Q)=h_0+\sum_{i=0}^m K_{R_i} Q^i+\sum_{i=0}^m K_{M_i} Q^i \quad (9)$$

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

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

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

其中,  $\alpha_i$  为第  $i$  种型号高效区左临界曲线系数;  $\beta_i$  为第  $i$  种型号高效区右临界曲线系数。

### 3 数学模型的求解与算法实现方法

上述数学模型是一个优化目标方程求解的问题,其求解步骤为:一般由调度发出或生产决策支持系统产生供水指令,根据吸水井水位及管路特性曲线方程,求得此时的供水工况  $(Q_{\text{day}}, H_{\text{day}})$  及该供水扬程下每台水泵对应的流量  $Q_{i,j}$ ,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,在单泵效率约束条件下,适当调整目标效率,缩小备选范围;由水泵并联运行约束条件选择泵的组合(即调速泵台数和定数泵台数)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,可据转速  $n_j$  和水泵相似原理求得  $N_{i,j}$ ;通过比较各组合的功率,得出最优组合,即功率最低的组合。

用 Matlab 将算法编制成计算机程序,根据生产工艺要求(出厂水流量、压力等)和设备参数(水泵、电机、调速装置等)确定出满足工艺要求条件下能耗最低的定速泵和调速泵的组合及调速策略。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,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;由现场自控系统对策略执行控制。

### 优化策略应用实例

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

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

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

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

其中,  $K$  为水泵调速比例;  $H_0$  为在吸水井水位为零时的水泵净扬程;  $h$  为水泵吸水井水位。

在图 4 中,  $AB$  为单台全速泵的  $Q-H$  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  $H_{\text{opt1}}$ 、 $H_{\text{opt2}}$ 。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

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

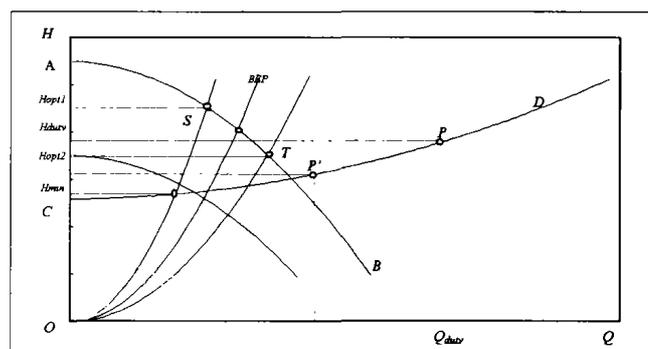


图 4 水泵特性曲线与供水系统管路特性曲线

(1) 当服务扬程  $H_{\text{min}} < H_{\text{day}} < H_{\text{opt2}}$  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  $Q_{\text{day}}=\frac{\sqrt{H_{\text{day}}-H_0+h}}{\sqrt{\gamma}}$

根据水泵高效区左右临界相似工况曲线方程和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

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

(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。

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

由  $N_{duty} = \text{Min} \left[ \sum_{j=1}^M \omega_{ij} N_{ij} \right]$ , 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 净水厂实际运行的两个例子:

采用上述方法, 拟合得到的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

$$H_L = 1.34 \times 10^{-6} \quad H_R = 5.02 \times 10^{-7} Q^2$$

得  $H_{opt1} = 45.12\text{m} \quad H_{opt2} = 35.19\text{m}$

① 当服务扬程为 30m, 清水池水位为 4m 时

$$H_{duty} = 30\text{m} \quad H_{min} = 22.82\text{m}$$

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

所以必须采用全调速运行方式, 服务流量

$$Q_{duty} = 13697.4\text{m}^3/\text{h}$$

调速泵的运行台数  $1.77 < n < 2.89$

取  $n=2$ , 即最佳方式是运行两台调速泵, 调速比为  $k=0.87$ , 转速为 509r/m。

② 当服务扬程为 40m, 清水池水位为 2m 时

$$H_{duty} = 40\text{m} \quad H_{opt1} > H_{duty} > H_{opt2}$$

服务流量  $Q_{duty} = 19444.7\text{m}^3/\text{h}$

水泵全速 (或定速) 运行的单台流量

$$Q_{定} = 7254.5\text{m}^3/\text{h}$$

调速泵的流量调节范围

$$5484.1\text{m}^3/\text{h} < Q_{调} < 7254.5\text{m}^3/\text{h}$$

定速泵和调速泵运行台数的组合

$$mQ_{定} + nQ_{调} = Q_{duty}$$

得到如下组合:  $m=0, n=3$ ;  $m=1, n=2$

即采用全调速方式 (受谐波影响调速机组最多运行台数为 3)

$$Q_{调} = 6481.6\text{m}^3/\text{h}$$

调速泵的调速比  $k=0.973$ , 转速为 569r/m

采用一台定速两台调速的运行方式

$$Q_{调} = 6095.1\text{m}^3/\text{h}$$

调速泵的调速比  $k=0.96$ , 转速为 562r/m

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, 并由现场自控系统 SCADA 对策略执行控制。

### 结束语

以上将交流调速技术与自动控制技术有机结合, 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。这种在生产过程监控系统 (SCADA) 的基础上, 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, 这就是“生产决策支持系统 (MDSS)”。水务行业的市场化急剧发展, 必然推动企业重视成本控制, 水泵调速及其控制技术将有更广泛的发展前景。

