

# 离心泵运行调节能耗分析

袁建平<sup>1</sup>, 张改成<sup>2</sup>, 陈翔<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2 中国核工业集团公司五零四厂, 甘肃 兰州 730065)

**摘要:** 详细介绍了离心泵的节流调节、分流调节、串并联调节和变速调节等主要运行调节方式的调节原理、调节方法、调节范围. 分析了其水力损耗、运行效率、总的优缺点以及适用场合. 节流调节、分流调节的流量可连续调节, 但后者能量损失相对较大, 常用于安全可靠有要求的场合; 串并联运行调节不能实现流量的连续变化, 但调节范围宽, 理论上没有额外水力损耗; 变速调节是, 只要转速可连续变化, 流量就可以连续变化, 除泵内损失外, 系统无额外的水力损失, 节能效果明显.

**关键词:** 离心泵; 运行调节; 能耗; 节能

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005 - 6254(2006)05 - 0044 - 04

## Operation adjusting methods for energy consumption of centrifugal pump

YUAN Jian-ping<sup>1</sup>, ZHANG Gai-cheng<sup>2</sup>, CHEN Xiang<sup>2</sup>

(1. Fluid Machinery Engineering Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. No. 504 Factory, CNNC, Lanzhou, Gansu 730065, China)

**Abstract:** The principles of adjustment method for centrifugal pumps operation, including throttling adjustment, flow dividing adjustment, adjustment through coupling pumps in series or in parallel, and rotating speed adjustment are introduced. The hydraulic consumptions, operation efficiency, advantages and disadvantages, and applied conditions are discussed. There are two flow rate adjusting methods: that flow rate can be continuously changed throttling adjustment and flow dividing adjustment, and the latter has larger energy consumption and is always applied to the sites where running safety and reliability must be considered. The adjustment method through coupling pumps in series or in parallel can't continuously change flow ratio, but the adjustment range is very wide and there is no additional hydraulic loss in theory. The method of rotating speed adjustment changes the flow ratio continuously if the rotating speed changes continuously. The method don't cause additional hydraulic loss except the loss inside pump.

**Key words:** centrifugal pump; operation adjusting; energy consumption; energy conservation

我国是能源消费大国, 能源利用率不高. 1981 ~ 2002 年期间我国能源利用效率在 34% 左右, 比发达国家低约 10%; GDP 能耗比世界平均水平高 2 倍多; 主要工业产品的单耗比国外高出 30% 以上<sup>[1]</sup>.

据统计, 全国风机、水泵装机总容量约 35 000 MW, 耗电量约占总耗能的 40% 左右; 其中, 水泵耗

能约占 20%, 在石油和化工工业中高达 59% 和 26%. 据估计, 提高风机和水泵系统运行效率的节能潜力可达 300 ~ 500 亿 kW · h/年, 相当于 6 ~ 10 个装机容量为 1 000 MW 级的大型火力发电厂的年发电总量<sup>[2]</sup>. 离心泵是应用最广泛的泵, 节能潜力巨大. 由于离心泵装置系统具有很大的节能潜力, 采用

收稿日期: 2006 - 02 - 20

基金项目: 江苏省科技发展计划项目 (BM2002805)

作者简介: 袁建平 (1970 - ), 男, 江苏金坛人, 副研究员, 主要从事流体机械设计与研究.

张改成 (1971 - ), 男, 甘肃武都人, 高级工程师, 主要从事化工设备方面的研究.

合适的运行调节方式,提高离心泵的运行效率,能够在短期内实现节能的目的.

### 1 离心泵运行调节方式

离心泵的运行调节方式主要有非变速调节和变速调节两大类,非调速调节方式主要有节流、分流、泵的串并联和汽蚀调节等;调速调节包括液力偶合器调速、调压调速、变极调速、串接调速、直流电机调速、变频调速等<sup>[3]</sup>.

离心泵的运行工况点是由泵的特性曲线 ( $H - Q$  曲线)和管路系统特性曲线共同决定的,因此,改变任何一个特性曲线都可达到流量调节的目的.

#### 1.1 离心泵节流调节

离心泵节流调节通过管路上的调节阀来改变管路系统的阻力损失,从而改变管路系统特性曲线,实现离心泵运行工况的调节.一般采用出口调节阀的节流调节.

如图 1 所示,  $n_0$  为水泵的  $H - Q$  曲线,  $R_0, R_1$  分别为管路系统特性曲线.  $n_0$  和  $R_0, R_1$  的交点  $A(Q_A, H_A)$  和  $B(Q_B, H_B)$  即是水泵的运行工况点;从  $B$  点作垂线,交  $R_0$  于  $C(Q_B, H_C)$  点.当需减少系统流量,关小出口调节阀,流量从  $Q_A$  减少到  $Q_B$ ;此时,泵全速运行.由于出口调节阀增加了管路系统的阻力损失,管路系统特性变陡,即由  $R_0$  变化到  $R_1$ ,水泵的运行工况点由  $A$  点上滑到  $B$  点,扬程由  $H_A$  上升到  $H_B$ .

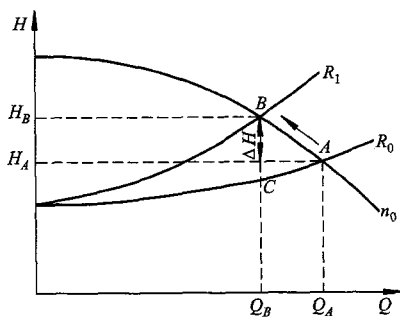


图 1 离心泵的出口节流调节

离心泵节流调节方法简单,系统的流量可以连续变化.

#### 1.2 离心泵分流调节

离心泵分流调节通过把泵输出的部分流量经支管引回到吸水管路或水池来实现离心泵运行工况的调节.节流调节时泵的特性曲线不变;支管和输出管路组成并联管路系统,通过调节支管上的调节阀可改变支管的特性曲线,从而改变并联管路系统的合

成性能曲线.

如图 2 所示,  $n_0$  为泵的  $H - Q$  曲线,  $R_{\text{输}}$  为输出管路特性曲线,  $R_{\text{支}}$  为支管特性曲线,  $R_0$  为输出管路和支管的合成特性曲线.曲线  $n_0$  和  $R_0$  的交点  $A(Q_A, H_A)$  即为水泵运行工况点;过  $A$  点作水平线分别与曲线  $R_{\text{输}}$  和  $R_{\text{支}}$  交于点  $G_1(Q_{G1}, H_A)$  和  $G_2(Q_{G2}, H_A)$ ,  $Q_{G1}$  和  $Q_{G2}$  分别为输出管路和支管流量.改变支管上的调节阀,支管特性曲线变化到  $R'_{\text{支}}$ ,输出管路特性曲线不变,合成管路特性曲线变化为  $R_1$ .同样,曲线  $n_0$  和  $R_1$  的交点  $B(Q_B, H_B)$  即为水泵运行工况点;过  $B$  点作水平线分别与曲线  $R_{\text{输}}$  和  $R_{\text{支}}$  交于点  $G'_1(Q'_{G1}, H_B)$  和  $G'_2(Q'_{G2}, H_B)$ ,  $Q'_{G1}$  和  $Q'_{G2}$  分别为输出管路和支管流量.这样,当系统流量由  $Q_A$  减少到  $Q_B$  时,泵的运行工况点就由  $A$  点沿  $n_0$  上滑到  $B$  点,输出管路的运行点由  $G_1$  沿  $R_{\text{输}}$  上滑到  $G'_1$ ,流量由  $Q_{G1}$  上升到  $Q'_{G1}$ .

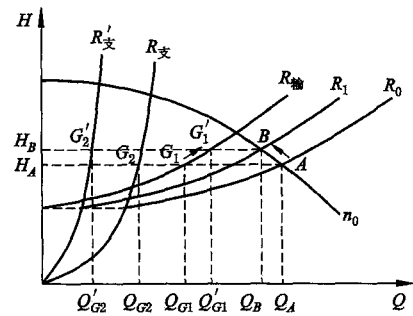


图 2 离心泵的分流调节

离心泵分流调节时,流量可连续变化.

#### 1.3 离心泵的串并联调节

离心泵的串并联调节通过泵的串联或并联方式改变泵的特性曲线,从而实现离心泵运行工况的调节<sup>[4]</sup>.

图 3a 表示的是离心泵串联运行的情况.图中  $R_0$  为管路系统特性曲线,  $n_1$  和  $n_2$  分别是两台不同特性离心泵的性能曲线,  $n_0$  是两台泵的串联合成特性曲线.曲线  $R_0$  与  $n_0, n_1, n_2$  的交点分别为  $A(Q_A, H_A)$ ,  $B(Q_B, H_B)$ ,  $C(Q_C, H_C)$ ;过  $A$  点作垂线,与  $n_1$  和  $n_2$  分别交于  $P_1(Q_A, H_{P1})$  和  $P_2(Q_A, H_{P2})$  点.  $B$  点是  $n_1$  泵单独运行时的工况点,  $C$  点是  $n_2$  泵单独运行时的工况点,  $P_1$  和  $P_2$  是串联运行时,  $n_1$  和  $n_2$  泵的运行工况点.当  $n_1$  泵单独运行时,  $n_1$  泵运行在  $B$  点,若扬程不够,再串联上  $n_2$  泵时,  $n_1$  泵运行点由  $B$  点变化到  $P_1$ ,  $n_2$  泵运行在  $P_2$  点.

图 3b 表示的是离心泵并联运行的情况.图中  $R_0$  为管路系统特性曲线,  $n_1$  和  $n_2$  分别是两台不同特性

离心泵的性能曲线,  $n_0$  是两台泵的并联合成特性曲线. 曲线  $R_0$  与  $n_0$ ,  $n_1$  和  $n_2$  的交点分别为  $A(Q_A, H_A)$ 、 $B(Q_B, H_B)$ 、 $C(Q_C, H_C)$ ; 过  $A$  点作水平线, 与  $n_1$  和  $n_2$  分别交于  $P_1(Q_{P1}, H_A)$  和  $P_2(Q_{P2}, H_A)$  点.  $B$  点是  $n_1$  泵单独运行时的工况点,  $C$  点是  $n_2$  泵单独运行时的工况点,  $P_1$  和  $P_2$  是并联运行时  $n_1$  和  $n_2$  泵的运行工况点. 当  $n_1$  泵单独运行时,  $n_1$  泵运行在  $B$  点, 若流量不够, 再并联上  $n_2$  泵时,  $n_1$  泵运行点由  $B$  点变化到  $P_1$ ,  $n_2$  泵运行在  $P_2$  点.

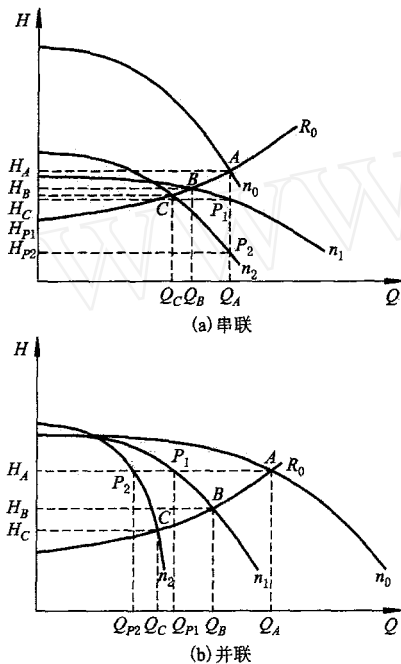


图 3 离心泵的串并联调节

离心泵串并联运行调节时, 运行参数调节是不连续的; 若要实现连续变化, 必须辅以其他调节方式; 可调节范围大.

#### 1.4 离心泵的调速调节

从离心泵的相似定律可推出的比例定律, 即在转速改变时, 性能参数满足:

$$\begin{aligned} Q_1 / Q_2 &= n_1 / n_2 \\ H_1 / H_2 &= (n_1 / n_2)^2 \\ P_1 / P_2 &= (n_1 / n_2)^3 \\ 1 / 2 &= 1 \end{aligned}$$

如图 4 所示,  $R_0$  为管路系统特性曲线,  $n_0$  和  $n_1$  分别是不同转速下离心泵的性能曲线. 曲线  $R_0$  与  $n_0$ 、 $n_1$  的交点分别为  $A(Q_A, H_A)$ 、 $B(Q_B, H_B)$ , 分别是泵在不同转速下的运行工况点. 当降低泵转速时, 泵特性曲线由  $n_0$  变为  $n_1$ , 工况点由  $A$  点沿  $R_0$  下滑到  $B$  点, 流量由  $Q_A$  减少到  $Q_B$ . 若转速可连续变化, 离心泵的调速调节可实现系统流量的连续变化.

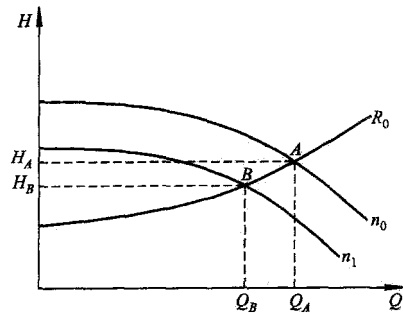


图 4 离心泵的调速调节

## 2 不同运行调节方式的能耗分析

各种调节方式的原理不同, 能量损耗也不一样.

### 2.1 节流调节的水力损耗

如图 1 所示, 当流量从  $Q_A$  减小到  $Q_B$  时, 除出口调节阀外的管道系统要求的压力为  $C$  点的压力  $H_C$ , 而此时泵运行在  $B$  点, 泵出口的压力为  $H_B$ . 因此, 多余的压力损耗在出口调节阀上, 也即

$$H = H_B - H_C$$

因此, 额外损耗在出口调节阀上的无用功率为

$$P = Q_B H = Q_B (H_B - H_C)$$

离心泵出口管路上的调节阀节流调节具有简单、可靠、方便、调节装置的初投资低等特点, 但其能量损失大, 且随调节阀的关小而增大. 过去离心泵普遍采用这种调节方式, 现在出于节能目的, 已逐渐由其他调节方式取代.

### 2.2 分流调节的水力损耗

如图 2 所示, 通过关闭支路上的调节阀, 流量从  $Q_A$  减小到  $Q_B$  时, 离心泵工况点从  $A$  点上升到  $B$  点. 此时, 整个泵装置系统的有用功率为输出管路的水力功率, 即

$$P = Q_{G1} H_B$$

而通过支路回流所做的全为无用功, 即分流调节方式的水力功率损失为

$$P = Q_{G2} H_B$$

一般轴流泵采用这种调节方式, 而离心泵不采用. 这是因为, 这种调节方式比节流调节方式能耗更大, 能耗随分流程度而变化. 但在出于安全可靠考虑场合也采用这种调节方式, 例如锅炉给水泵为防止小流量发生汽蚀设置再循环管就是一种分流调节方式.

### 2.3 泵串并联调节的水力损耗

理论上离心泵串并联运行时, 各泵对流体所做的功均为有用功率, 系统内没有额外水力损耗, 即有

用功率为 (见图 3)

$$P = Q_A H_A = Q_A (H_{P1} + H_{P2}) \quad (\text{串联})$$

$$P = Q_A H_A = (Q_{P1} + Q_{P2}) H_A \quad (\text{并联})$$

但是,当泵串并联装置运行在不稳定工况下,这种调节方式会出现系统内的额外能耗<sup>[4]</sup>。离心泵的串并联运行调节方式不是连续调节,要实现连续调节,必须对其中一台或多台辅助于其他的调节方式,这也就带来其他调节方式的能量损耗。串并联调节方式调节范围宽。

### 2.4 变速调节的水力损耗

如图 4 所示,通过调节泵输入转速,系统流量从  $Q_A$  变化到  $Q_B$ ,运行工况点从 A 点沿  $R_0$  下滑到 B 点,除泵内损失外,系统无额外水力损失,即泵所做的水力功率均为有用功,即

$$P = Q_B H_B$$

离心泵的变速调节能耗小,节能效果明显,且降低转速运行能有效降低泵的汽蚀余量,增加运行可靠性,延长泵及电机的寿命。

### 2.5 各种调节的运行效率

离心泵的运行效率为泵本身的效率与调节装置效率的积,即

$$\eta_j = \eta_p \eta_v$$

式中,  $\eta_j$  为离心泵运行效率,  $\eta_p$  为离心泵效率,  $\eta_v$  为调节装置效率。

(1) 离心泵出口节流调节方式,不但有额外的调节水力损失,而且当流量偏离泵设计工况太大时,离心泵内部损失将增加,泵组效率降低,运行工况偏离高效区。节流调节时任一运行工况点 B (见图 1) 的运行效率  $\eta_j$  为

$$\eta_j = \frac{H_C}{H_B} = \frac{H_B - H}{H_B}$$

(2) 离心泵的分流调节方式也一样,不但有额外的调节水力损失,而且当流量偏离泵设计工况太大,离心泵内部损失将增加,泵组效率降低,运行工况偏离高效区。节流调节时任一运行工况点 B (见图 2) 的运行效率  $\eta_j$  为

$$\eta_j = \frac{Q_{G1}}{H_B} = \frac{Q_{G1}}{Q_{G1} + Q_{G2}}$$

(3) 离心泵的串并联调节方式,若没有辅助其他的调节方式,则运行效率即为离心泵效率的组合。如图 3a 中所示,两泵串联运行在工况点 A 时的运行效率为

$$\eta_j = \frac{H_{P1} + H_{P2}}{H_{P1} / \eta_{P1} + H_{P2} / \eta_{P2}}$$

同样,如图 3b 中所示,两泵并联运行在工况点 A 时的运行效率为

$$\eta_j = \frac{Q_{P1} + Q_{P2}}{Q_{P1} / \eta_{P1} + Q_{P2} / \eta_{P2}}$$

(4) 根据比例定律,在一定的转速变化范围内,离心泵调速调节方式下内部的损失不变,即相似工况点的机组效率不变;但转速偏离额定转速超出一定范围时,对应的工况点不满足比例定律,从而机组效率发生变化。离心泵的变速调节把原来的线性高效区拓宽成为面性高效区。

各种变速调节方法都存在着调速装置效率,如液力偶合器装置和变频器的装置效率。

## 3 结束语

离心泵的运行调节方式很多,其运行原理也不一样。传统上,离心泵的运行调节是通过节流和分流来实现的。这些调节方式存在额外的水力功率损失,且常偏离泵的高效区,其运行效率较低,能量损失严重。但是,节流和分流调节方式具有简单、可靠、方便、调节装置的初投资低等优点,在许多运行工况偏离设计工况不大的场合,仍可获得应用。

离心泵的调速调节方式不引起额外水力损失,节能效果明显,且能改善设备的运行工况,提高系统的安全可靠性,延长设备使用寿命。近年来,变频调速调节方式在我国得到日益广泛的应用,有逐步取代其他调节方式的趋势。离心泵的变频调速调节方式适用于长期连续运行,常常处于低负荷及变负荷运行状态的场合,其节能潜力巨大。

实际应用中,选用合适的离心泵运行调节方式需综合考虑节能、投资、设备可靠性和寿命等因素。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] 戴林. 我国节能领域未来形势 [J]. 变频器世界, 2004 (1): 1 - 4.
- [ 2 ] 世界银行/全球环境基金中国节能促进项目办公室. BMC 初级培训教材 [Z], 2004 (3).
- [ 3 ] 吴民强. 泵与风机节能技术问答 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998: 85 - 92.
- [ 4 ] 高传昌,汪顺生,刘正勇. 大型潜水电泵接力排水系统运行工况研究 [J]. 排灌机械, 2004, 22 (2): 12 - 15, 20.
- [ 5 ] 袁建平,袁寿其,何志霞,等. 不同特性泵串并联系统的性能预测 [J]. 排灌机械, 2004, 22 (6): 1 - 4.
- [ 6 ] 伍年青,盖学辉,于景龙. 不同工况条件下离心泵调速运行的节能分析 [J]. 石油机械, 2000, 28 (7): 40 - 43.

(责任编辑 侯素娟)