

流体输送设备的调速节流的节能效果分析

沈阳电缆厂 高明常

流体输送设备系指风机、水泵、煤气排送机等,排送其他流体并随工艺需要而调节流量的设备也具有相近的运行特性。

一、拖动流体输送设备电机运行的特点

1. 容量大、持续负荷、耗电量大,在运行中潜在着电能浪费与节约的较大波动范围。

2. 各流体输送设备运行特性基本相似。

3. 用能负荷变化的幅度较大,要求流体输送设备的实供功率相应随着变化。当流体流量减低时,设法使拖动流体输送设备耗电量也随之大幅度降低。

每年由流体输送设备消耗的能源十分巨大。当前能源是制约国民经济发展的主要因素。开发与节约并重,近期以节约为主,因此,节约这些设备运行时的能量消耗具有重要意义。

二、流体输送设备调速节流,是当前发展的趋势,是节电的重大技术措施。阀控是我国动力系统当前应用最多的流量调节方法,阀控的主要缺点是:

1. 增加输送能量损失。

2. 使流体输送设备增加无用的耗能扬程(压力),从而消耗功率。

流体输送设备调速节流比调阀节流有明显的节电效果,因而在一些先进国家已应用较多。原因是:

1. 流体输送设备负荷系减转矩性负荷,其转矩与转速的平方成正比,流量与转速成正比关系。而流体输送设备电动机的输出功率则与转速的三次方成正比。

由流体输送设备(如水泵)运行关系式

$$\frac{Q}{Q_H} = \frac{N}{N_H} \quad \frac{H}{H_H} = \left(\frac{N}{N_H}\right)^2$$

$$\frac{P}{P_H} = \left(\frac{N}{N_H}\right)^3 = \left(\frac{Q}{Q_H}\right)^3 \quad (1)$$

式中 Q 、 Q_H ——分别为某工况下与额定工况下流量

N 、 N_H ——分别为某工况下与额定工况下转速

H 、 H_H ——分别为某工况下与额定工况下扬程(压力)

P 、 P_H ——分别为某工况下与额定工况下轴功率

由公式(1)可得

$$\frac{Q}{Q_H} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_H}} \quad (2)$$

从(2)式可知当流量变化时,流体输送设备输出功率可随三次方根变化,因此,调速节流是重大节电技术措施。

2. 图1是供水泵与用水装置特性曲线,图中:

①、②——水泵运行在不同转速下扬

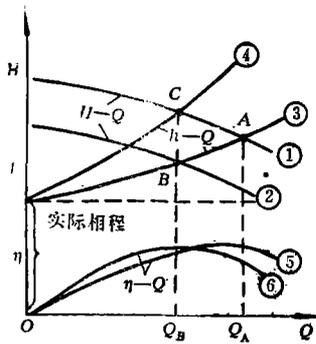


图 1 供水泵与用水装置特性曲线

程与流量($H-Q$)曲线。

- ③、④——用水装置(阀控节流)两种状态下压力损失与流量($h-Q$)曲线。
- ⑤、⑥——水泵运行在不同转速下电机效率与流量($\eta-Q$)曲线。

现对特性曲线分析如下

(一) $H-Q$ 与 $h-Q$ 曲线各交点处, 如A、B、C分别为水泵运行的工况点, 电机运行在额定工况点时效率最高。

(二) 实际扬程水平线以上, ③、④曲线以下范围, 分别是用水装置(阀控)在两种状态下, 当不同流量时的压力损失。

(三) 调速控制比调阀控制有明显的节电效果。当使水泵转速调低时, 流量由 Q_A 到 Q_B (用水装置状态不变即阀门开度不变), 则 $H-Q$ 曲线由①变到②, 工作点就由A移到B。这时电机的轴功率由

$$P_A = \frac{H_A Q_A r}{102 \eta_A} \text{ 变到 } P_B = \frac{H_B Q_B r}{102 \eta_B} \quad (3)$$

若用调阀控制流量(电机转速不变), 工作点由A移到C, 这时电机轴功率

$$P_C = \frac{H_C Q_C r}{102 \eta_C} \quad (4)$$

式中, r 为重度, η_A 、 η_B 、 η_C 分别为电机

• 12 •

运行在A、B、C工况点时的效率。

比较(3)、(4)两式可得

$$\because Q_B = Q_C, \eta_B > \eta_C, H_C > H_B$$

$\therefore P_B < P_C$, 而 H_C 与 H_B 之差纯属多余的损失, 致使电机增加功率消耗。因此, 调速控制流量时的电机效率 η_B 大于调阀控制流量时的电机效率 η_C 。

3. 调速节流对降低电机铜损失的效果

设电机在两种转速下的铜损分别为 P_{CH} 、 P_C 。铜损系电机运行中主要损失, 其运行特性为

$$\because \frac{P_H}{P} \propto \left(\frac{N_H}{N}\right)^3, \frac{P_{CH}}{P_C} \propto \left(\frac{P_H}{P}\right)^2$$

$$\therefore \frac{P_{CH}}{P_C} \propto \left(\frac{N_H}{N}\right)^5 \propto \left(\frac{Q_H}{Q}\right)^5$$

铜损与电机转速五次方成正比, 也就是与流量五次方成正比。因之流体输送设备在运行中实行调速节流, 可明显降低电机铜损。

三、流体输送设备要采取什么调速方案为宜

流体输送设备调速, 主要有电机调速与液力偶合器调速。

电机调速方案很多, 这里将主要阐述应用较多的感应式电动机调速问题, 它用于流体输送设备的调速节流时具有较好的节能效果。

1. 变极调速

适用于流量按0、50%、100%三级段变化的场合。

变极调速如用于恒功率负荷, 则变极减速后由于转矩增加, 电机负载电流增加, 电机铜损也随之而增加。

当用于恒转矩负荷时, 变极减速后电机输出功率随之减少, 为适应负荷要求必须更换电机, 提高电机容量。因此, 电机

用在恒转矩或恒功率负荷变极调速，只能满足调速要求，无明显节电效果。

流体输送系减转矩负荷，如流体输送设备采用减转矩型变极电机，其调速节流按公式(1)进行，则电机转矩随流量二次方根降低，而电机输出功率随流量三次方根而降低。也就是说变极减速后流量减半，这时电机输出功率仅为变极前的1/8。所以变极电机在流体输送设备上应用，节流特性与电机特性相符。

2. 转子串接电阻调速

这种调速方式，仅适用于绕线式电机，在日本应用较多。就其用在流体输送设备调速性能看，仅次于异步电动机串级调速。但它具有造价低廉，简单易行，运行可靠等优点。

根据公式(1)

$$\text{如当供能流量由 } Q_H \longrightarrow \frac{1}{x} Q_H = Q$$

$$\text{调电机转速由 } N_H \longrightarrow \frac{1}{x} N_H = N$$

这时令 电机输出轴功率为 P_M

电机额定输出轴功率为 P_H

电机转差率为 S

电机转子功率为 P_2

外接电阻消耗功率为 P_{C2}

$$\text{则 } \frac{P_M}{P_H} = \left(\frac{\frac{1}{x} Q_H}{Q_H} \right)^3 = \frac{1}{x^3}$$

$$\therefore P_M = \frac{1}{x^3} P_H \quad (5)$$

$$S = \frac{N_H - N}{N_H} = 1 - \frac{N}{N_H} = 1 - \frac{1}{x} \quad (6)$$

$$1 - S = \left(1 - 1 + \frac{1}{x} \right) = \frac{1}{x} \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{P_M}{1 - S} = \frac{\frac{1}{x^3} P_H}{\frac{1}{x}} = \frac{1}{x^2} P_H \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{C2} &= S P_2 = \left(1 - \frac{1}{x} \right) \frac{1}{x^2} P_H \\ &= \frac{x-1}{x^3} P_H \quad (9) \end{aligned}$$

当 $x > 1$ 时，电机处于减速运行。根据公式(5)、(6)、(7)、(8)、(9)计算各值列于表1。

表 1 转子串接电阻调速节流各参数计算对比表

$Q = Q_H$ $N = N_H \%$	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
x	1	1.11	1.25	1.43	1.67	2	2.5	3.33	5	10	∞
$S \%$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$P_2 = () P_H$	1	0.81	0.64	0.49	0.36	0.25	0.16	0.09	0.04	0.01	0
$P_M = () P_H$	1	0.74	0.51	0.34	0.22	0.125	0.06	0.03	0.01	0.001	0
$P_{C2} = () P_H$	0	0.09	0.13	0.15	0.14	0.125	0.1	0.06	0.03	0.009	0

根据表1的计算值绘制 Q 与 P_2 、 P_M 、 P_{C2} 特性曲线，如图2。

由表1，图2可以看出

(一) P_M 与 P_{C2} 之和基本等于 P_2 。

(二) P_2 、 P_M 均随 Q 的降低而显著

降低。

(三) P_{C2} 不是随着 N 的降低而反比增加，当转速降至 $70\% N_H$ 时， $P_{C2} = 0.15 P_H$ ，系最大值。当转速降至 $50\% N_H$ 以下时（一般说变速幅度不需这么大）

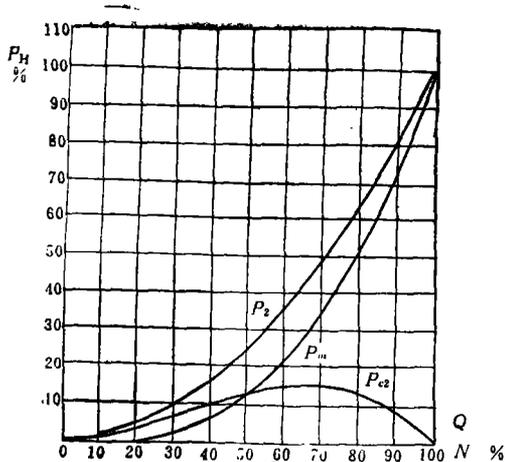


图 2 Q 与 P_2 、 P_M 、 P_{C2} 变化特性曲线

$P_M < P_{C2}$ 是合乎道理的, 但 $P_M + P_{C2} = P_2$ 仍不大于 $1/4 P_H$, 这就是转子串接电阻调速应用在流体输送设备上的一大特点。

3. 液力偶合器调速

液力偶合器调速在国外应用较多, 我国也正在发展之中。

其原理是在主动轴和从动轴上分别装有泵轮和涡轮。当泵轮由电机带动旋转时, 以油为媒质, 将动能传给涡轮形成力矩, 带动从动轴旋转。

用勺管调节叶轮室内的油量, 可以控制从动轴转速变化, 实现无级调速。

主要特点

(一) 不仅绕线式电机能用, 而笼型电机也普遍的能用。

(二) 根据负荷变化, 可实现无级平稳调速。

(三) 可以软性启动。

其运行特性和传动效率与电机转子串接电阻调速相似。其不同点就是电机转子串接电阻调速其转差损失在外接电阻上, 而液力偶合器调速转差损失在偶合器上。

$$S = \frac{N_{主} - N_{从}}{N_{主}} \quad (10)$$

当主动轴, 从动轴转动矩比为 1:1 时, 则

$$\eta = \frac{P_{从}}{P_{主}} = \frac{N_{从}}{N_{主}} \quad (11)$$

$\therefore \eta = \frac{N_{从}}{N_{主}} = 1 - S$, 则液力偶合器转

差损失功率为

$$\begin{aligned} P_T &= P_{主} - P_{从} = \frac{P_{从}}{\eta} - P_{从} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) P_{从} \\ &= \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right) \left(\frac{N_{从}}{N_{大}} \right)^3 P_{大} \\ &= \left[\frac{1 - (1 - S)}{\frac{N_{从}}{N_{主}}} \right] \left(\frac{N_{从}}{N_{大}} \right)^3 P_{大} \end{aligned}$$

当从动轴最大转速时, 接近于主动轴转速。即 $\frac{N_{从}}{N_{主}}$ 与 $\frac{N_{从}}{N_{大}}$ 近似相等。

$$\text{则 } P_T \approx S \left(\frac{N_{从}}{N_{大}} \right)^2 P_{大} = S \left(\frac{Q}{Q_{大}} \right)^2 P_{大} \quad (12)$$

式中 $P_{主}$ 、 $P_{从}$ —— 分别为主动轴、从动轴功率

$P_{大}$ —— 从动轴最大转速时功率

$N_{主}$ 、 $N_{从}$ —— 分别为主动轴、从动轴转速

$N_{大}$ —— 从动轴最大转速 (接近主动轴转速)

S —— 液力偶合器转差率

P_T —— 液力偶合器转差损失功率

Q 、 $Q_{大}$ —— 分别为某工况下流量和最大流量

由 (11), (12) 式分析

(一) 用于一般传动调速与电机转子串接电阻调速特性相似, 其效率随 $N_{从}$ 的降低而降低。

(二) 但用于流体输送设备调速时也与电机转子串接电阻调速有共同的效益。并可广泛的在笼型电机上应用。

的单位，当天给予警告，第二天即停止供电或供热，以补偿多用部分；在高峰时超过耗能标准者，将在十五分钟前接到预先通知，之后即停止供能。欧洲有些国家还采取改变劳动时间的办法，尽量利用白天生产，即将时钟拨前1小时的措施。匈牙利报纸称，如匈采用了延长白天工作时间，缩短或不用晚上时间进行生产，每天可省电9000万度，合250万美元。并称目前欧洲除南、苏、瑞士之外，都采用了这种措施。东欧一些国家还对能源价格进行了调整，也推动了节能工作的开展。

五、重视宣传教育，动员全民节能

日本政府非常重视开展全国性的节约燃料运动，利用宣传工具大造声势，掀起全民节能高潮。如举办各种节能活动，其中包括举行一年一度的全国节能大会、全国节能展览会，设有“大臣奖”和“长官奖”两种大奖，借以表彰先进，交流推广节能技术和设备。日本还经常举行全国节能征文比赛和全国范围的节能社会舆论调查，鼓励各界广开言路，论说节能形势，提出节能意见。现日本规定每年二月为

“节能月”，每月一日为“节能日”。英国政府在1978年至1981年的四年中花费二千万英镑支持用户或节能设备制造商的节能技术示范表演。英政府发行多种小册子介绍各种节能知识，免费提供各种影片以宣传节能，还经常开展青少年节能竞赛。东德目前广泛开展节能竞赛，节能突出的单位可被授予“模范节能单位”称号。政府充分利用舆论工具，大力宣传节能，如在电视台最佳时间播放《能源——如何节约》节目，介绍生产、生活中的节能方法。罗马尼亚政府坚持长期节能宣传，经常把节能形势和国家能源开发计划实施情况，向全国人民公布，使人们认识到“开源节流”人人有责。党和政府又多次号召每个党员，每个公民都要做一名节能的“积极、自觉和持之以恒的战士”。报纸、电视上不断开展节能宣传，号召十年内（到1990年）争取达到能源自给自足的目标。各级政府机关和领导以身作则，带头执行节能法令。如总统把自己的“奔驰”牌汽车改成耗油低的国产“达契亚”牌小汽车，产生了很好的影响。

（上接第15页）

（一）在调速过程中，转差功率 SP_c 经可控硅逆变器回馈给电源，是节能效果较好的一项技术措施。

（二）无级平滑调速。

（三）一般电机调速都用在 $0 < S < 0.5$ 范围内，则 S 较小，可使逆变器的容量减小，而达到经济的目的。

综合上述

1. 在动力系统中，流体输送设备调速节流比调阀节流优越得多。节电效果显著，是节能技术发展的必然趋势。

2. 变级调速，转子串联电阻调速，在电力拖动中系属常规性技术，但用于流体输送设备调速是电机特性与输送设备特性的恰当配合应用，且造价低廉，简单易行，具有较大节能效果。

3. 以上各项调速，在额定转速40~100%范围内运行是较佳区，完全适应动力系统调速节流的需要。

4. 流体输送设备多用笼型感应型电机，以采用液力耦合器调速为宜。串级调速可将转差功率反馈给电源，收到调速、节能双重效益。但只能用在绕线式电机。