

# 低压降调节阀\*

张玉润 祝和云

(浙江大学)

**【提要】** 本文介绍的低压降调节阀是具有特定流量特性的新型阀。在 $\Delta P_R^*$  (定义见后面) 为0.1工作时, 它的安装流量特性为线性或等百分比, 使该阀与被调对象所组成的广义对象静态增益为常数。这样的阀特性是符合线性控制原理要求的。该阀在 $\Delta P_R$  为0.1左右运行时, 可实现流量调节系统的优化控制, 并能较大幅度降低调节阀在运行过程中的节流损耗, 达到节约流体输送过程中动力消耗的目的。

## 一、调节阀低压降比运行的基本思想

### 1. 线性控制系统对调节阀特性的要求

对图1所示控制系统, 其开环静态增益为:

$$K_L = K_C \cdot K_V \cdot K_P \cdot K_M \quad (1)$$

线性控制原理要求 $K_L$ 为常数。对常见的调节系统,  $K_C$ 是恒值, 而 $K_P$ 对大多化工、热工对象则呈线性与指数型[5]; 若测量变送为线性变送, 则 $K_M$ 也为恒值。为使 $K_L$ 为常数, 则 $K_V \cdot K_P$ 之积应是恒值。按补偿原理可求得 $K_V$ 应呈线性与等百分比。现有常用调节阀的固有特性就是这两种。

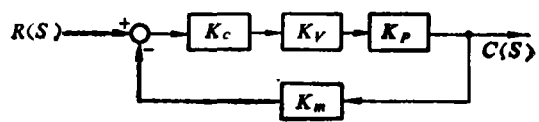


图1 线性控制系统增益框图

$K_C$ 、 $K_V$ 、 $K_P$ 、 $K_M$  分别为调节器比例、调节阀、被调对象、测量变送器的静态增益

### 2. 调节阀安装特性与 $\Delta P_R$ 关系

控制系统要求的调节阀特性, 实质上是安装特性, 而非固有特性。 $\Delta P_R$ 的定义如下:

$$\Delta P_R = \Delta P_{VQ_{max}} / \Delta P_{SQ_{max}} = \Delta P_{VQ_{max}} / (\Delta P_{VQ_{max}} + \Delta P_{EQ_{max}}) \quad (2)$$

式中 $\Delta P_{VQ_{max}}$ 为阀全开满流量时阀的压降;  $\Delta P_{EQ_{max}}$ 为满流量时管路阻力压降;  $\Delta P_{SQ_{max}}$ 为系统总压力降。理论表明, 阀的安装特性 $F\left(\frac{l}{L}\right)$ 、固有特性 $f\left(\frac{l}{L}\right)$ 以及 $\Delta P_R$ 三者的关系为:

$$F\left(\frac{l}{L}\right) = f\left(\frac{l}{L}\right) \sqrt{\frac{1}{(1 - \Delta P_R) f^2\left(\frac{l}{L}\right) + \Delta P_R}} \quad (3)$$

\* 本文于1985年7月收到。

式中  $\left(\frac{l}{L}\right)$  为阀的相对行程。由式 (3) 可知, 当  $\Delta P_R = 1$  时,  $F\left(\frac{l}{L}\right) = f\left(\frac{l}{L}\right)$ ; 当  $0 < \Delta P_R < 1$  时,  $F\left(\frac{l}{L}\right) \neq f\left(\frac{l}{L}\right)$ , 即阀特性畸变。实际系统中,  $\Delta P_R$  总是小于“1”的。计算说明,  $\Delta P_R$  越小,  $F\left(\frac{l}{L}\right)$  越偏离  $f\left(\frac{l}{L}\right)$ , 畸变越严重。为使调节阀有好的安装特性,  $\Delta P_R$  就不能太小。现在自控设计规程规定:  $\Delta P_R$  应大于 0.5~0.6, 至少不小于 0.3。

### 3. 阀的节流损耗压降与 $\Delta P_R$ 的关系

由式 (2) 可以得到:

$$\Delta P_{VQ_{\max}} = \frac{\Delta P_R}{1 - \Delta P_R} \Delta P_{\Sigma Q_{\max}} \quad (4)$$

若一个确定的流体输送控制系统, 在满流量 (或稳定的正常流量) 时其  $\Delta P_{\Sigma Q_{\max}}$  是恒值, 则式 (4) 表明,  $\Delta P_R$  决定了阀的节流损耗压降, 进而影响整个流体输送动力消耗。调查表明, 我国泵类耗电占发电量的 21% [3], 一个年处理 350 万吨原油的常减压车间, 如果调节阀的损耗压力从现有水平下降  $1 \text{ kgf/cm}^2$ , 则全年可节电 144 万度 [4]。显然, 调节阀应在低的  $\Delta P_R$  下工作。

图 2 示出  $\Delta P_{VQ_{\max}} \sim \Delta P_R$  曲线。

### 4. 调节阀低压力降比运行原则的确立

从上述可知, 若  $\Delta P_R$  高, 则阀的安装特性好, 对调节品质有利, 但阀的节流损耗大, 噪音大, 易漏渗, 使用期短; 反之, 若  $\Delta P_R$  低, 则能减少节流损耗。例如,  $\Delta P_R$  由 0.3 降为 0.1, 阀的节流损耗降为原有的  $\frac{1}{3}$  左右, 但不利于调节品质。

要使调节阀在低压降比  $\Delta P_R$  下工作, 同时又能满足线性控制系统所要求的阀安装特性, 现有调节阀是达不到的。按调节阀特性畸变规律, 可按照阀在低的  $\Delta P_R$  下工作所需要的安装特性来设计阀的固有特性, 使阀在该  $\Delta P_R$  下工作畸变后得到所要求的安装特性。这样的阀在低的  $\Delta P_R$  下工作后, 在节能与确保优良的调节品质方面能取得一致, 所以这种低压降调节阀的研制是必要的。

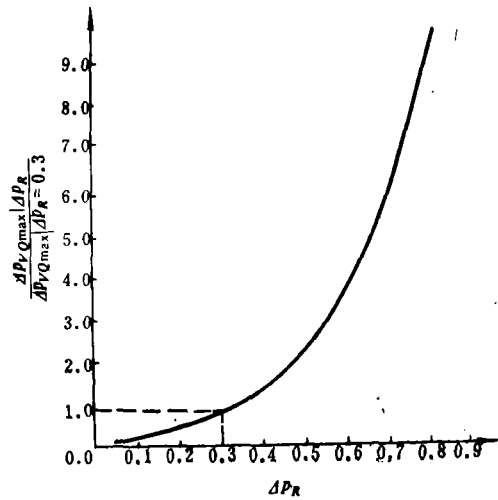


图 2  $\Delta P_{VQ_{\max}} \sim \Delta P_R$  曲线

## 二、低压降调节阀

根据线性控制原理对调节阀的安装特性要求是:

线性: 
$$F_l\left(\frac{l}{L}\right) = \left(1 - \frac{1}{R'}\right) + \frac{1}{R'}\left(\frac{l}{L}\right) \quad (5)$$

等百分比: 
$$F_2\left(\frac{l}{L}\right) = R' \left(\frac{l}{L}\right)^{-1} \quad (6)$$

式中  $R'$  为调节阀最大安装流量对最小安装流量之比。按式 (3), 实现式 (5)、(6) 的阀固有特性是:

$$f_1\left(\frac{l}{L}\right) = F_1\left(\frac{l}{L}\right) \sqrt{\frac{\Delta P_R}{1 - (1 - \Delta P_R) F_1^2\left(\frac{l}{L}\right)}} \quad (7)$$

$$f_2\left(\frac{l}{L}\right) = F_2\left(\frac{l}{L}\right) \sqrt{\frac{\Delta P_R}{1 - (1 - \Delta P_R) F_2^2\left(\frac{l}{L}\right)}} \quad (8)$$

由上可知, 低压降调节阀的研制是可行的。

## 2. 低压降调节阀有关参数的确定

综合式 (5~8) 可知,  $f_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)$  是决定于  $F_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)$ 、 $R'$ 、 $\frac{l}{L}$  等的参数。现在已知  $F_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)$  分别是线性与等百分比函数;  $R'$  按工程需要取为 10;  $\frac{l}{L}$  在“0~1”取值;  $\Delta P_R$  的取值应考虑以下 3 个方面: 1) 节能。图 2 说明,  $\Delta P_R$  应小; 而由  $d(\Delta P_{VQ_{\max}})/d(\Delta P_R) = \frac{1}{(1 - \Delta P_R)^2} \cdot \Delta P_{VQ_{\max}} = K \Delta P_{\Sigma Q_{\max}}$  所得到的  $K \sim \Delta P_R$  的对应值(列于表 1) 可知,  $\Delta P_R$  由大变小时,  $K$  下降的速率变小, 表明  $\Delta P_R$  值不必小于 0.1;

表 1

2) 低压降调节阀特性的可实现性。按式 (7) 或式 (8) 设计柱塞形阀, 实践说明:  $\Delta P_R$  小, 阀芯“根切”就严重, 不能实现所设计的阀特性, 所以,  $\Delta P_R$

$\Delta P_R$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$K$	1.11	1.23	1.56	2.04	2.78	4.00	6.25	11.11

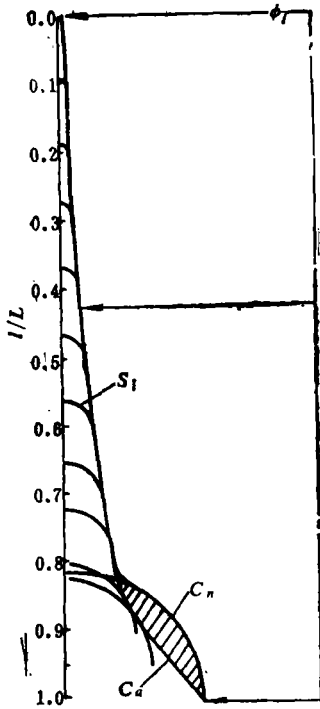
不能太小; 3) 实际系统可实现的  $\Delta P_R$  最小值。  $\Delta P_R$  虽定义为压力降之比, 但其实质是反映阀阻力与系统阻力之比。显然, 这种阻力比不可能是无穷小, 而是具有一定值, 一般在 0.05~0.1 左右。综上所述, 故取  $\Delta P_R$  为 0.1 作为低压降调节阀系列的设计参数。

在已知上述各参数后, 可计算  $f_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)^\ominus$ , 并将它按各规格阀的额定流量系数值转换成对应于阀不同行程  $l$  的流量系数  $C_V$  值。这样, 就可据此计算低压降调节阀的阀芯轮廓尺寸了。

## 3. 低压降调节阀的实现

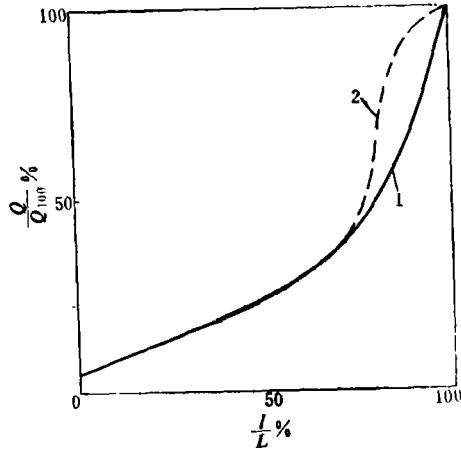
本文介绍的低压降调节阀是柱塞形阀, 其阀芯轮廓按 [2] 有关公式计算。计算结果表明: 阀芯存在“根切”。“根切”的阀芯轮廓曲面与阀的固有特性如图 3(a、b) 所示。由图可见, “根切”后阀特性偏离了设计特性, 由此可估计, 并不能得到按  $\Delta P_R = 0.1$  设计的确切的阀安装特性。为此, 必须改善“根切”。

$\ominus f_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)$  与  $F_{1,2}\left(\frac{l}{L}\right)$  皆为相对值。



$S_l$ —等流截面线  $C_a$ —理论计算阀芯轮廓曲线  $C_n$ —存在“根切”的阀芯轮廓曲线  $\phi_l$ —阀芯直径

图 3 (a) 存在“根切”的阀芯轮廓



1—理论固有特性 2—“根切”后的固有特性

图 3 (b) 存在“根切”的阀特性

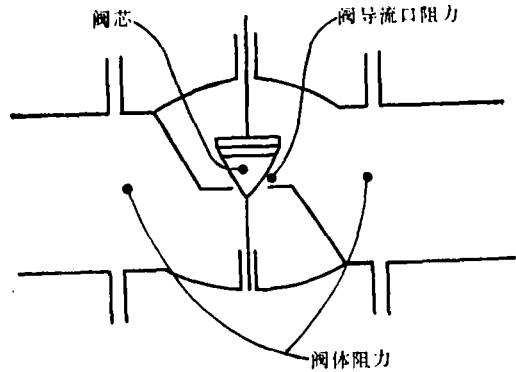


图 4 调节阀阻力组成示意图

产生“根切”的原因：在设计条件下，阀在某一行程范围内，它的导流口流量系数  $C_p$  对该阀的流量系数  $C_v$  的变化率不满足要求。显然，设计特性所确定的变化率较大，因而，使  $\partial C_p / \partial C_v$  要求值下降是改善“根切”的出发点。

如图 4 所示的阀，其流量系数  $C_v$ 、导流口流量系数  $C_p$ 、阀体流量系数  $C_b$  三者有如下关系：

$$\frac{1}{C_v^2} = \frac{1}{C_p^2} + \frac{1}{C_b^2} \tag{9}$$

由式 (9) 得：

$$C_p^2 = C_v^2 - C_b^2 \tag{10}$$

将上式对  $C_v$  求导，得：

$$\partial C_p / \partial C_v = C_p^3 / C_v^3 \tag{11}$$

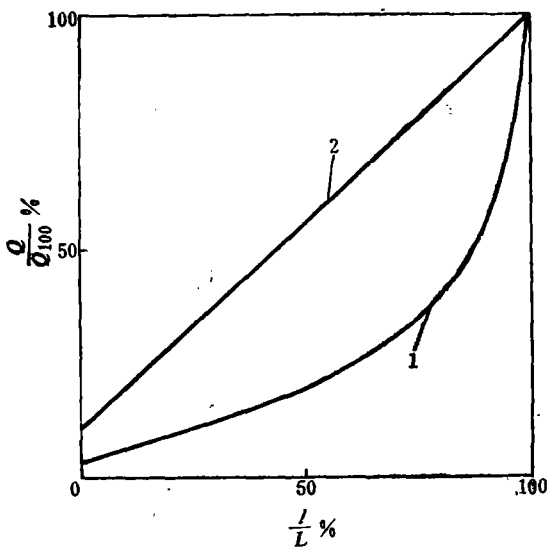
从式 (10) 又可得：

$$C_p^3 = C_v^3 C_b^3 / (C_v^2 - C_b^2)^{3/2} \tag{12}$$

将式 (12) 代入式 (11)，得：

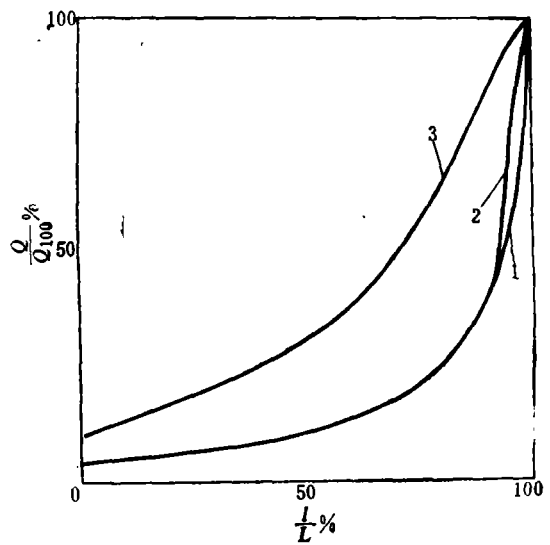
$$\partial C_P / \partial C_V = 1 / \left( 1 - \frac{C_v^2}{C_s^2} \right)^{3/2} \quad (13)$$

由阀的结构可知,  $C_s > C_v$ 。从式 (13) 可见, 若减小  $\frac{C_v}{C_s}$ , 即能导致  $\partial C_P / \partial C_V$  值下降。故降低  $\frac{C_v}{C_s}$  比值, 是改善“根切”的有效措施。实际降低  $\frac{C_v}{C_s}$  值后, 使线性低压降调节阀阀芯无“根切”, 等百分比低压降调节阀阀芯的“根切”点从原有  $\frac{l}{L} = 0.7$  处转移到 0.9 以上, 这样得到的实际低压降调节阀特性是:



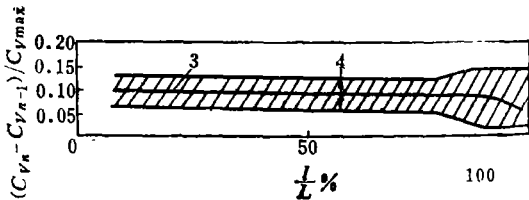
1—固有特性 2—安装特性

图 5 (a) 线性低压降调节阀流量特性



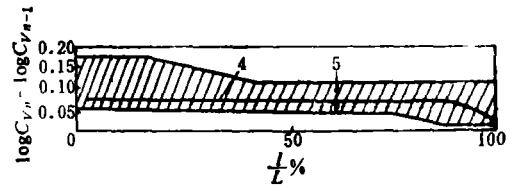
1—固有特性 2—“根切”改善后固有特性 3—安装特性

图 6 (a) 等百分比低压降调节阀流量特性



3—安装特性的斜率偏差曲线 4—偏差允许区间—按IEC标准

图 5 (b) 图 5 (a) 中安装特性的斜率偏差



4—安装特性的斜率偏差 5—偏差允许区间

图 6 (b) 图 6 (a) 中安装特性的斜率偏差

(1) 固有特性

$$f_1\left(\frac{l}{L}\right) = \left[ 0.9 \frac{l}{L} + 0.1 \right] \sqrt{\frac{0.1}{1 - 0.9 \left[ 0.9 \frac{l}{L} + 0.1 \right]^2}} \quad (14)$$

$$f_2\left(\frac{l}{L}\right) = \begin{cases} f\left(\frac{l}{L}\right)_{2.1} = \left[10\left(\frac{l}{L}-1\right)\right] \sqrt{\frac{0.1}{1-0.9\left[10\left(\frac{l}{L}-1\right)\right]^2}} & \frac{l}{L} \leq 0.9 \\ f\left(\frac{l}{L}\right)_{2.2} \approx f\left(\frac{l}{L}\right)_{2.1} + \left(\frac{l}{L}-0.9\right) + 0.38 & \frac{l}{L} > 0.9 \end{cases} \quad (15)$$

(2) 安装特性

$$F_1\left(\frac{l}{L}\right) = 0.9\left(\frac{l}{L}\right) + 0.1 \quad (16)$$

$$F_2\left(\frac{l}{L}\right) = \begin{cases} F\left(\frac{l}{L}\right)_{2.1} = 10\left(\frac{l}{L}-1\right) & \frac{l}{L} \leq 0.9 \\ F\left(\frac{l}{L}\right)_{2.2} = F\left(\frac{l}{L}\right)_{2.1} + \left[6.2\left(\frac{l}{L}-0.9\right) + 0.38\right] \cdot \sqrt{\frac{1}{0.9\left[6.2\left(\frac{l}{L}-0.9\right) + 0.38\right]^2 + 0.1}} & \frac{l}{L} > 0.9 \end{cases} \quad (17)$$

图 5(a)6(a) 为低压降调节阀特性曲线, 图 5(b)6(b) 为该阀的安装特性按 IEC 标准作斜率偏差考核的结果。它完全符合要求。

若把描述本低压降调节阀特性的自变量  $\frac{l}{L}$  相应地转换成调节器输出信号的相对值  $\left(\frac{S_c}{S_0}\right)$ , 则设计本调节阀特性的方法可推广到各种形式的调节阀上去。

### 三、低压降调节阀的应用实例

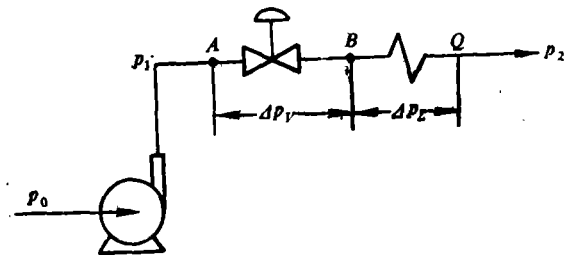
我们研制的低压降调节阀在实验和工业流量控制系统中作了应用, 结果是满意的。

#### 1. 实验流量控制系统

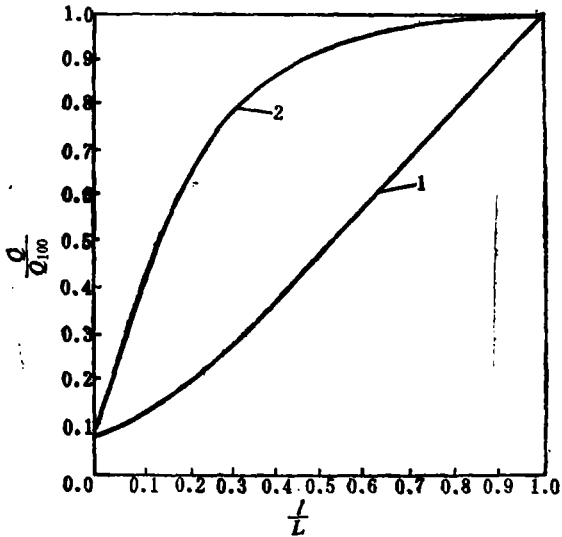
在  $\Delta p_R = 0.1$  时, 使用现有线性阀与线性低压降调节阀在同一系统作运行试验, 如图 7 所示。控制系统采用这两种不同阀时的开环静态增益与闭环调节过程如图 8(a、b、c) 所示。

#### 2. 工业流量控制系统

低压降调节阀分别在两个点作工业运行考核: 炼油厂的气体分离车间与石油化工厂的 C<sub>4</sub> 车间中二个流量控制系统。原系统分别采用现有阀特性为线性与等百分比、 $D_s$  25、双座阀。在  $\Delta p_R$  分别为 0.15、0.30 下运行。新系统均改用低压降调节阀, 其安装特性为线性、 $D_s$  32、双座阀, 同时相应切削原有离心泵的叶轮直径, 使它们分别在  $\Delta p_R$  为 0.09、0.10 下运行。在调节阀控制相同输送流量下, 新的流量控制系



$p_0$ 、 $p_1$  分别为泵的输入、输出压力  $p_2$  为工艺静压  
图 7 流量输送系统示意图



1—使用线性低压降调节阀 2—使用现有线性阀

图 8 (a) 使用现有线性阀与线性低压降调节阀时开环增益 ( $\Delta P_R = 0.1, K_c = 1$ )

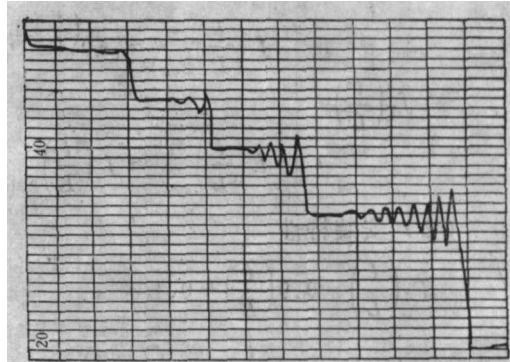


图 8 (b) 使用现有线性阀的调节过程

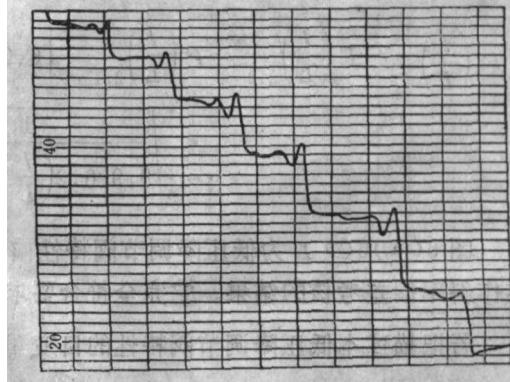


图 8 (c) 使用线性低压降调节阀的调节过程

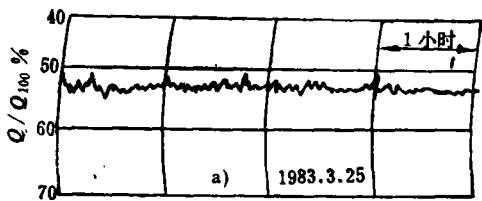


图 9 (a) 试验点 1, 使用原阀的流量记录曲线

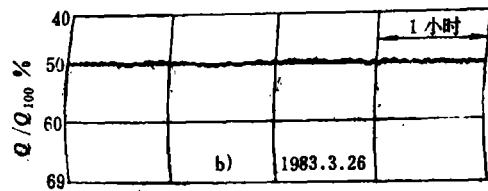


图 9 (b) 试验点 1, 使用新阀的流量记录曲线

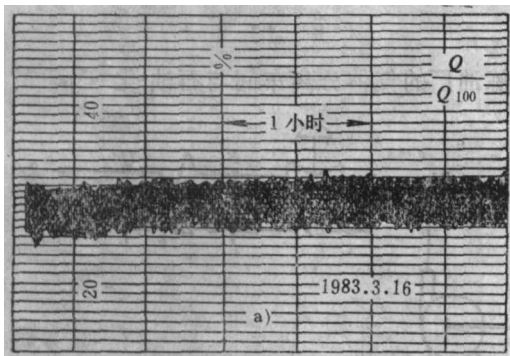


图 10 (a) 试验点 2, 使用原阀的流量记录曲线

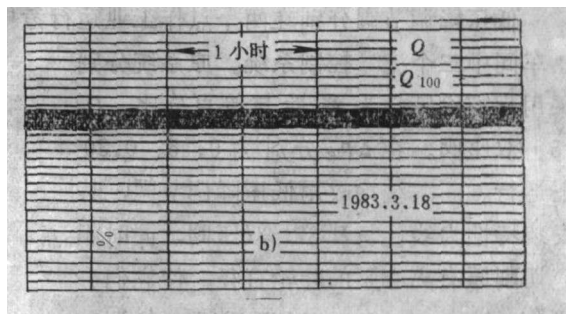


图 10 (b) 试验点 2, 使用新阀的流量记录曲线

统显著地降低了调节阀的节流损耗压力降,从而降低了系统的动力消耗。实际测得,如一台 55kW 瓦的电机-泵,原系统输送正常流量时消耗功率 52kW,而新系统在输送同样流量与相同工况下只消耗了 42kW,同时新系统比原系统还显著提高了调节品质。图 9(a、b)和图 10(a、b)分别为上述两个工业试点原来与新的流量控制系统的流量记录曲线。

综合实验与工业考核的结果可以得出:应用低压降调节阀在  $\Delta p_R = 0.1$  左右运行可比通常在  $\Delta p_R = 0.3$  左右运行的系统节约动力消耗约 15% 左右,并且还显著地改善了调节品质。

## 四、讨论与结论

### 1. 低压降调节阀的适应性

实际应用中,  $\Delta p_R$  不一定为 0.1,因而会存在低压降调节阀使用时  $\Delta p_R$  值在多大范围内能满足线性控制原理对阀特性要求的问题。

在线性控制系统中,过渡过程为  $e:1 \sim 10:1$  的衰减是工程允许的,它们所对应的系统环路增益  $K_L$  之比为 1.6 倍,因在常见的控制系统中,式  $K_L = K_c K_v K_p K_m$  中的  $K_c$ 、 $K_m$ 、 $K_p$  是固定的,故  $K_L$  的变化反映了  $K_v$  的变化。求解低压降调节阀在阀全行程范围内工作并满足  $K_L$  变化小于 1.6 倍的  $K_v \sim \Delta p_R$  的关系,得  $\Delta p_R = 0.07 \sim 0.15$  为该阀最佳运行的适用区。

证明:

$$K_v = F' \left( \frac{l}{L} \right) = \frac{f' \left( \frac{l}{L} \right) \left[ \Delta p_R + (1 - \Delta p_R) f^2 \left( \frac{l}{L} \right) \right] - (1 - \Delta p_R) f^2 \left( \frac{l}{L} \right) f' \left( \frac{l}{L} \right)}{\left[ \Delta p_R + (1 - \Delta p_R) f^2 \left( \frac{l}{L} \right) \right]^{3/2}}$$

$$= \frac{f' \left( \frac{l}{L} \right) \Delta p_R}{\left[ \Delta p_R + (1 - \Delta p_R) f^2 \left( \frac{l}{L} \right) \right]^{3/2}} \quad (18)$$

应用已知  $f \left( \frac{l}{L} \right)$  的设计条件,则线性低压降调节阀在  $\Delta p_R < 0.1$  工作时,有

$$K_v \Big|_{\frac{l}{L} = 0} = K_{v_{\max}} = \left[ \sqrt{0.1} \times \left( 1 - \frac{1}{R'} \right) \times \Delta p_R \right] / \left[ (1 - F^2(0)) \times \Delta p_R + 0.1 F^2(0) \right] \quad (19)$$

$$K_v \Big|_{\frac{l}{L} = 1} = K_{v_{\min}} = \left[ \sqrt{0.1} \times \left( 1 - \frac{1}{R'} \right) \times \Delta p_R \right] / \left[ (1 - F^2(1)) \times \Delta p_R + 0.1 F^2(1) \right] \quad (20)$$

按  $K_{v_{\max}}/K_{v_{\min}} = 1.6$ ,联立式 (19) 和式 (20),解得  $\Delta p_R = 0.07$ 。应用类似的算法,在  $\Delta p_R > 0.1$  时,解得  $\Delta p_R = 0.15$ 。不难证明,  $\Delta p_R$  这一变化范围也适合于低压降的等百分比阀。

### 2. 低压降调节阀两种安装特性是必要的

提出这个问题是针对:以现有常用等百分比阀在低的  $\Delta p_R$  (如 0.05、0.1) 下运行,把



它的安装特性作线性特性使用,从而省去线性低压降调节阀。这是否合理呢?表2和表3分别是我国、美国的等百分比阀在 $\Delta p_R$ 为0.05、0.10运行时的静态增益 $K_V$ 值。从这二表可知,在相对工作流量为0.20~0.90变化时,阀的 $K_{Vmax}$ 对 $K_{Vmin}$ 之比(用 $K_R$ 表示)分别为2.03与2.12。按照优化的4:1衰减到临界的1:1衰减,相应的 $K_{L(1,1)}$ 与 $K_{L(4,1)}$ 之比(用 $K_R^0$ 表示)为2。显然, $K_R > K_R^0$ 。故把现有等百分比阀在 $\Delta p_R = 0.05、0.1$ ,流量为0.20~0.90工作时的安装特性作线性特性使用可能使系统不稳定,甚至造成事故。然而各种优化控制均要求负荷作大的调整,达到操作点的转移,实现优化运行。理论和实践表明,低压降调节阀在 $\Delta p_R$ 为0.07~0.15范围内工作能满足线性控制对阀特性的要求,实现优化控制并大幅度节能,故低压降调节阀的两种特性是必要的。

$$\text{表 2 } f\left(\frac{l}{L}\right) = 30\left(\frac{l}{L} - 1\right)$$

$$\text{当 } \frac{l}{L} = 0.19, \left(\frac{Q}{Q_{100}}\right)_{\text{工作}} = 0.20; \text{ 当 } \frac{l}{L} = 0.82, \left(\frac{Q}{Q_{100}}\right)_{\text{工作}} = 0.90$$

$l/L$	0.10	0.19	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.82	0.90
$K_{Vc}^*$	0.489	0.648	0.954	1.130	1.324	1.373	1.213	0.838	0.584

$$\text{表 3 } f\left(\frac{l}{L}\right) = 50\left(\frac{l}{L} - 1\right)$$

$$\text{当 } \frac{l}{L} = 0.21, \left(\frac{Q}{Q_{100}}\right)_{\text{工作}} = 0.20; \text{ 当 } \frac{l}{L} = 0.78, \left(\frac{Q}{Q_{100}}\right)_{\text{工作}} = 0.90$$

$l/L$	0.10	0.21	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.78	0.90
$K_{Va}^{**}$	0.505	0.751	1.010	1.315	1.526	1.477	1.144	0.802	0.392

\*  $K_{Vc}$ 为 $\Delta p_R = 0.1$ 时该阀的静态增益

\*\*  $K_{Va}$ 为 $\Delta p_R = 0.05$ 时该阀的静态增益。

### 3. 结论

低压降调节阀的成功应用冲破了调节阀在高的 $\Delta p_R$ 下工作的传统规范,开发了调节阀在低的 $\Delta p_R$ 下工作的新概念。它的结构与现有调节阀相同,故制造、使用、维修均方便;它是调节系统新的优良执行器。使用它,实施低 $\Delta p_R$ 运行,既节能,又提高调节品质,这是很有实际意义的。

### 参 考 文 献

- [1] 化工测量及调节仪表编写组, 气动调节仪表, 上海人民出版社, (1975), P.266~77
- [2] J. A. Wiedman, D. W. J. Rowan, Control Valve Plug Design, 《A. S. M. E.》, (1956), Aug, P. 1367~72
- [3] 丁绍曾、朱稚清, 风机水泵变速运行是节能的有效途径, 受国家经委能源局委托调查分析报告, 《电工技术杂志》, (1984), 8, № 8 P.1~17
- [4] 郝希仁, 炼油装置离心泵节能途径, 《炼油设计》, (1980), 5, № 5, P.46~52
- [5] F. G. Shinsky, 方崇智译, 过程控制系统, 化学工业出版社, (1982), P.48~61

## A Control Valve with Low Pressure Drop

Chang, Yu-jen      Zhu, He-yun

(Zhejiang University)

**ABSTRACT:** This paper introduces the control valves with the low pressure drop. They are latest new pattern control valves which have with the especial flow characteristics and distinguish with current control valves in flow characteristics. If they run at  $\Delta p_R$  to be 0.1, their installed flow characteristics are the linear or equal percentage, thus the static gains of the broad sense plants which consists of these control valves and controlled plants become constant. Thereby, these valves flow characteristics conform the requirement of the linear control principle. To using these valves at  $\Delta p_R$  to be 0.1, can perform the optimum control of the flow control system and cut down large quantities of expose of choked flow.