

21 09-123

# 日本数字调速阀静动态性能的研究

Analysis and Study to Static and Dynamic Characteristics  
for a Digital Speed Control Valve Made in Japan

贾鹏光  
Jia Pengguang

吕伟华  
Lu Weihua

(重庆大学资环综合利用研究中心, 重庆, 630044) (重庆大学机械工程一系, 重庆, 630044)

摘要 介绍了近年来日本数字阀的研究情况。分析了日本东京计器公司生产的一种新型数字调速阀的结构和工作原理, 并在此基础上, 对该阀进行了静动态特性的理论分析、数字仿真和实验研究。

关键词 数字调速阀; 静动态特性; 理论分析; 数字仿真

中国图书资料分类法分类号 TH 137

ABSTRACT In this paper, researches of digital valves in Japan in recent years are briefly described. The operation principles and the structure of a new digital speed control valve are analysed. This new valve is made by Japanese Tokyokeiki company. Based on these investigations, theoretical analysis, digital simulation and experimental study are emphasized to the valve's static and dynamic characteristics.

KEYWORDS digital speed control valve; static and dynamic characteristics; theoretical analysis; digital simulation

## 0 引 言

随着计算机技术在各工业领域中的普遍应用, 液压元件及控制系统也向着数字化方向发展。其中, 数字阀的发展尤其迅速, 已形成数字式流量阀、数字式压力阀、数字式方向流量阀以及位移式数字阀等几个大类, 它们各具特色。

国外早在50年代末就开始了数字阀的研制工作, 但在1975年以前都只停留在实验室阶段。1976年日本首先将数字阀作为商品推向市场, 并获得了成功。在1981年的第10届流体动力博览会上, 日本东京计器公司首次展出了该公司生产的第1代数字调速阀。此后, 美国的Sperry vickers公司、日本的油研公司、丰兴公司、内田公司等推出了各种规格的数字阀, 这些数字阀均已达到商品化水平。走在数字阀研制前列的仍然是日本东京计器公司, 该公司在80年代至90年代已相继推出了第2代、第3代数字阀, 现正在进行第4代数字阀——光液数字阀的研制工作。本文着重研究日本东京计器公司生产的结构新颖, 通用性广的第3代数字调

速阀。

## 1 结构及工作原理

图1给出了日本东京计器公司的产品 D-FG-03-EX-130-100-20型数字调速阀的基本结构及工作原理图。该阀由定差减压阀、节流阀、定值减压阀组成。控制部分主要有：驱动器、步进电机、大、小齿轮、偏心轮，另外还可配一台计算机。计算机或驱动器发出信号控制步进电机，而步进电机又通过一对减速齿轮放大力矩，借助于偏心轮直接推动节流阀芯移动，从而启闭阀口。主油路上压力油  $p_1$  经定差减压阀后压力变为  $p_2$ ，再经节流阀后进入负载，负载压力为  $p_3$ ；控制油路上的压力油  $p_4$  经定值减压阀后压力变成  $p_A$ 、 $p_B$ ，它们作用在节流阀芯两端，产生了一个向左的推力，从而克服部分液动力，减小步进电机的驱动力矩。定差减压阀阀芯内有一通孔，两端分别设置了不同孔径的螺钉阻尼孔，节流阀芯内的通孔是压力反馈通道，在通道上也有固定阻尼孔，它们的作用都在于改善调速阀的静态性能，提高调速精度。将调速阀中的定差减压阀阀芯更换成溢流阀阀芯并打开阀体上的溢流回油孔后，该阀就可作为数字式溢流节流阀使用。另外，该阀还配备有不同类型的控制器，可实现正反转、调速、变频计数、中断等多种控制。该阀的主要工作参数为：额定压力 21 MPa， $Q_{max} = 130 L/min$ ， $Q_{min} = 1.2 L/min$ ，压力范围：2~21 MPa，磁滞、重复精度：1.3 L/min 以下。

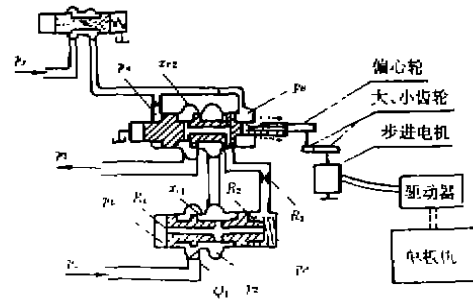


图1 数字调速阀结构及原理

## 2 静态特性

### 2.1 静态方程的建立

#### 2.1.1 定差减压阀阀芯力平衡方程

当忽略摩擦阻力，则有：

$$p_2 \cdot A_n = p_u \cdot A_n + K_{s1} \cdot (x_{s10} - x_{s1}) - 2C_{d1} \cdot W_1 \cdot x_{s1} \cdot (p_1 - p_2) \cos \theta \quad (1)$$

式中  $p_2$ ——经过定差减压阀后的油液压力 Pa

$p_u$ ——定差减压阀芯右端油压 Pa

$K_{s1}$ ——定差减压阀弹簧刚度 N/m

$x_{s10}$ ——定差减压阀弹簧予压缩量 m

$x_{s1}$ ——定差减压阀开口量 m

$A_n$ ——定差减压阀芯端面积  $m^2$

$C_{d1}$ ——减压阀的流量系数

$W_1$ ——定差减压阀口面积梯度 m

$p_1$ ——调速阀进口油压 Pa

#### 2.1.2 定差减压阀的流量方程

$$Q_1 = C_{d1} \cdot W_1 \cdot x_{s1} \cdot \sqrt{2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho} \quad (2)$$

式中  $Q_1$ ——经过定差减压阀的流量 L/min  
 $\rho$ ——油液密度 kg/m<sup>3</sup>

2.1.3 阻尼孔  $R_2, R_3$  的流量连续性方程：

$$C_d \cdot A_{R2} \cdot \sqrt{2 \cdot p_2 - p_H} / \rho = C_d \cdot A_{R3} \cdot \sqrt{2 \cdot (p_H - p_3) / \rho} \quad (3)$$

式中  $C_d$ ——螺钉阻尼孔  $R_2, R_3$  的流量系数

$A_{R2}$ ——阻尼孔  $R_2$  的面积 m<sup>2</sup>

$A_{R3}$ ——阻尼孔  $R_3$  的面积 m<sup>2</sup>

$p_3$ ——负载压力 Pa

2.1.4 节流阀的流量方程

$$Q_{n1} = C_{d2} \cdot W_2 \cdot x_{r2} \cdot \sqrt{2 \cdot (p_2 - p_3) / \rho} \quad (4)$$

式中  $Q_{n1}$ ——通过节流阀的流量 L/min

$C_{d2}$ ——节流阀的流量系数

$W_2$ ——节流阀口面积梯度 m

$x_{r2}$ ——节流阀开口量 m

2.1.5 调速阀流量方程

$$Q_1 = Q_{n1} + Q_{n2} \quad (5)$$

式中  $Q_{n2}$ ——通过阻尼孔  $R_2$  的流量 L/min

2.1.6 节流阀开口量方程

$$x_{r2} = \sqrt{R^2 - e^2 \cdot \sin^2(K \cdot \theta_m)} + e \cdot [1 - \cos(K \cdot \theta_m)] - R \quad (6)$$

式中  $R$ ——偏心轮半径 m

$e$ ——偏心轮偏心距 m

$K$ ——大、小齿轮齿数比

$\theta_m$ ——步进电机转角(与脉冲数成正比)

2.1.7 节流阀阀芯力平衡方程

$$p_A \cdot A_A + K_{s2} \cdot (x_{r20} + x_{r2}) + F_{L2} = p_B \cdot A_B + F \quad (7)$$

式中  $p_A$ ——节流阀芯左端油压 Pa

$p_B$ ——节流阀芯右端油压 Pa

$A_A$ ——节流阀芯左端面积 m<sup>2</sup>

$A_B$ ——节流阀芯右端面积 m<sup>2</sup>

$K_{s2}$ ——节流阀弹簧刚度 N/m

$x_{r20}$ ——节流阀弹簧予压缩量 m

$F_{L2}$ ——节流阀芯的稳态液动力 N

$F$ ——节流阀芯驱动力 N

2.2 流量稳定精度和最大控制流量

由上面的方程可推得：

$$p_H = \frac{p_2 - p_3}{1 + A_{R3}^2 / A_{R2}^2} + p_3 \quad (8)$$

$$p_2 - p_3 = \frac{K_{s1} \cdot (x_{r10} - x_{r1})}{\frac{A_{n3}^2 \cdot A_R}{A_{n2}^2 + A_{n3}^2} + \frac{2 \cdot \cos\theta \cdot \left( C_{s2} \cdot W_2 \cdot x_{r2} + C_s \cdot A_{n2} \cdot \frac{A_{n3}^2}{A_{n2}^2 + A_{n3}^2} \right)^2}{C_{s1} \cdot W_1 \cdot x_{r1}}} \quad (9)$$

分析(1)、(8)、(9)可知,由于该调速阀中定差减压阀芯右端油压 $p_H$ 高于负载压力 $p_3$ ,在其它参数不变的情况下,可减小它的弹簧刚度 $K_{s1}$ ,使 $(p_2 - p_3)$ 的值随 $x_{r1}$ 的波动减小,故该阀的流量稳定精度较一般调速阀高。同时,压力油 $p_H$ 对定差减压阀阀芯产生的向左的推力还部分抵消了阀芯所受的液动力,使其弹簧部分摆脱了液动力的束缚,因而该数字调速阀比一般的调速阀的最大控制流量更大。

从(8)和(9)式可以看出,阻尼孔 $R_2$ 、 $R_3$ 的面积大小对 $p_H$ 和 $(p_2 - p_3)$ 的值有很大影响:当 $A_{R2}$ 增大, $A_{R3}$ 减小时, $p_H$ 升高,可适当降低 $K_{s1}$ ,提高流量稳定精度,如果 $A_{R2}$ 过大或 $A_{R3}$ 过小,使 $p_H = p_2$ ,定差减压阀反而不能正常工作;当 $A_{R2}$ 减小, $A_{R3}$ 增大时, $p_H$ 降低,若加大 $K_{s1}$ 或 $x_{r10}$ 以克服液动力、保持最大控制流量,则流量稳定精度降低或阀体结构加大,若 $K_{s1}$ 与 $x_{r10}$ 不变,则最大控制流量减小。因而,只有适当调节 $A_{R2}$ 和 $A_{R3}$ ,才能既保证最大控制流量又满足一定的流量稳定精度。

### 2.3 脉冲——流量特性

由上述方程可导出调速阀控制流量 $Q_1$ 与脉冲数 $n$ 的关系式,作出脉冲流量曲线如图2。

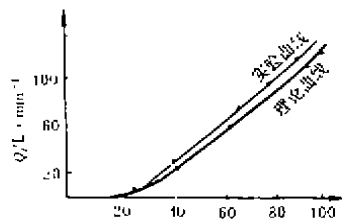


图2 脉冲——流量曲线

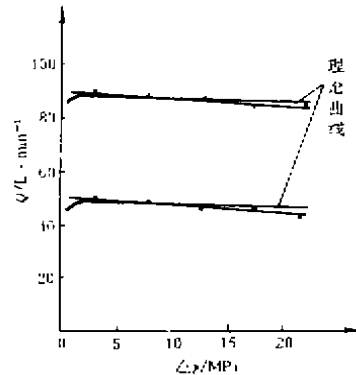


图3 负载——流量曲线

由图可知,理论曲线与实验曲线能很好地吻合,之所以存在脉冲死区,是由于节流阀有负开口量及传动机构中有间隙。图中脉冲数与流量近似为线性关系,使得该阀流量控制简单、方便。

### 2.4 负载——流量特性

由方程导出负载——流量关系式并作出负载流量曲线如图3。

分析上两图可知,在输入信号即流量给定值不变的情况下,当调速阀总压差增大时,控制流量逐渐减小。这是因为随着压差 $(p_1 - p_3)$ 的增加,定差减压阀所受液动力增大,使 $p_2$ 减小,节流阀口工作压差 $(p_2 - p_3)$ 减小,导致了控制流量减小,在大流量、高压差工况下,液动力对节流阀口压差的干扰较大,但总的说来下降值很小,说明该阀控制精度很高。

### 2.5 重复误差和滞环误差

由于数字调速阀的重复误差与滞环误差主要来自步进电机的控制转换机构,而步进电机的重复精度高,滞环也远低于比例电磁铁的滞环,所以该调速阀的滞环误差和重复误差都较小。

图4所示的是实验曲线,由实验数据可得:

最大重复误差:0.8 L/min,  $n = 20$  时,小于 1.3 L/min,

最大滞环误差:1.1 L/min,  $n = 20$  时,小于 1.3L/min.

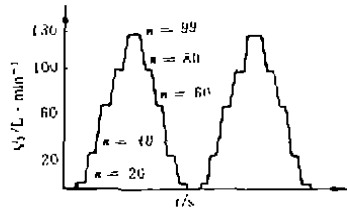


图4 滞环误差、重复误差实验曲线

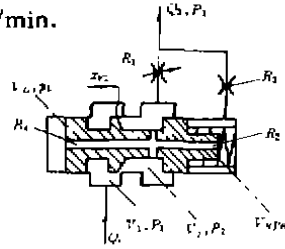


图5 数字调速阀结构、原理简图

### 3 动态特性

#### 3.1 动态线性化增量方程的建立

将图1调速阀的结构、原理图进行简化,如图5所示。

##### 3.1.1 减压阀的流量方程

$$\Delta Q_1 = K_{q1} \Delta x_{r1} + K_{c1} \cdot (\Delta p_1 - \Delta p_2) + \frac{V_1}{K} \cdot \frac{d\Delta p_1}{dt} \tag{10}$$

式中  $K_{q1}$ ——减压阀的流量增益 L/(min·m)

$K_{c1}$ ——减压阀的流量压力系数 L/(min·Pa)

$Q_1$ ——进入调速阀的流量 L/min

$V_1$ ——减压阀前腔容积 L

##### 3.1.2 节流孔道 $R_4$ 的流量方程

$$K_{r4} \cdot (\Delta p_L - \Delta p_2) = -\frac{V_L}{K} \cdot \frac{d\Delta p_L}{dt} + A_n \cdot \frac{d\Delta x_r}{dt} \tag{11}$$

式中  $K_{r4}$ ——固定节流孔  $R_4$  的流量压力系数 L/(min·Pa)

$V_L$ ——减压阀芯左端容积 L

##### 3.1.3 节流孔道 $R_2, R_3$ 的流量连续性方程

$$K_{r2} \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_H) - A_n \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} - \frac{V_H}{K} \cdot \frac{d\Delta p_H}{dt} = K_{r3} \cdot (\Delta p_H - \Delta p_3) \tag{12}$$

式中  $K_{r2}, K_{r3}$ ——螺钉阻尼孔  $R_2, R_3$  流量压力系数 L/(min·Pa)

$V_H$ ——减压阀芯右端容积 L

##### 3.1.4 减压阀芯力平衡方程

$$(\Delta p_H - \Delta p_L) \cdot A_n = m \cdot \frac{d^2 \Delta x_{r1}}{dt^2} + B \frac{d\Delta x_{r1}}{dt} + (K_{s1} + K_s) \Delta x_{r1} \tag{13}$$

式中  $m_n$ ——减压阀芯等效质量 Kg

$B$ ——瞬态液动力阻尼系数 N·s/m

$K_s$ ——稳态液动力刚度系数 N/m

##### 3.1.5 减压阀出口至节流阀进口的流量连续性方程

$$K_{q1} \cdot \Delta x_{r1} + K_{c1} \cdot (\Delta p_1 - \Delta p_2) =$$

$$K_{v2} \cdot \Delta x_{v2} + K_{c2} \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_3) + K_{R2} \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_H) + K_{R4} (\Delta p_L - \Delta p_2) + \frac{V_j}{K} \cdot \frac{d\Delta p_2}{dt} \quad (14)$$

式中  $K_{v2}$ ——节流阀的流量增益  $L/(\text{min} \cdot \text{m})$

$K_{c2}$ ——节流阀的流量压力系数  $L/(\text{min} \cdot \text{Pa})$

### 3.1.6 调速阀出口流量方程

$$\Delta Q_3 = K_{v2} \cdot \Delta x_{v2} + K_{c2} \cdot (\Delta p_2 - \Delta p_3) + K_{R3} \cdot (\Delta p_H - \Delta p_3) \quad (15)$$

上面 6 个方程决定了调速阀的动态特性。

### 3.2 阶跃负载下阀的动态仿真

设节流阀开口量  $x_{v2}$  为定值, 观察阀在负载变化时对输出流量的影响。

选取输入向量  $u_1 = \Delta p_3, u_2 = \Delta Q_3$

输出向量  $y_1 = \Delta p_1, y_2 = \Delta Q_3$

状态变量  $x_1 = \Delta p_1, x_2 = \Delta p_L, x_3 = \Delta p_2$

$x_4 = \Delta p_H, x_5 = \Delta x_{v1}, x_6 = \Delta \dot{x}_{v1}$

根据上面 6 式列出矩阵形式的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K \cdot K_{c1}}{V_1} & 0 & \frac{K \cdot K_{c1}}{V_1} & 0 & -\frac{K \cdot K_{c1}}{V_1} & 0 \\ 0 & \frac{K \cdot K_{R4}}{V_L} & -\frac{K \cdot K_{R4}}{V_L} & 0 & 0 & \frac{K \cdot A_R}{V_L} \\ \frac{K \cdot K_{c1}}{V_j} & -\frac{K \cdot K_{R4}}{V_j} & -\frac{K \cdot (K_{c1} + K_{v2} + K_{R2} - K_{R4})}{V_j} & \frac{K \cdot K_{R2}}{V_j} & \frac{K \cdot K_{c1}}{V_j} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K \cdot K_{R2}}{V_H} & -\frac{K \cdot (K_{R2} + K_{R3})}{V_H} & 0 & -\frac{K \cdot A_H}{V_H} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{A_H}{m_H} & 0 & \frac{A_R}{m_H} & -\frac{K_{c1} + K_{c2}}{m_H} & -\frac{B}{m_H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{K}{V_1} \\ 0 & 0 \\ \frac{K \cdot K_{c2}}{V_j} & 0 \\ \frac{K \cdot K_{R3}}{V_H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

输出方程为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{c2} & K_{c3} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(K_{c2} + K_{c3}) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

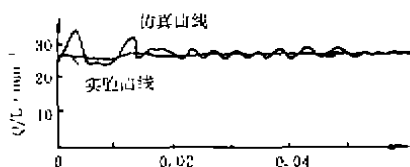


图6 数字阀阶跃/负载响应和仿真曲线

在计算机上用 Basic 语言编程并采用四阶龙格——库塔算法进行仿真,得到图6所示的仿真曲线。

分析仿真结果和实验曲线可知,阀的动态特性很好,即过渡过程时间短,超调量较小,实验测得过渡过程时间约为0.025 s,最大超调量约为12 L/min。由于实验系统中的蓄能器有吸收压力脉动的作用,因而使实验所得的阀的超调量约小于其仿真值,如果进一步优化结构参数,还可获得更好的动态性能。

## 4 结 论

经过对日本 D-FG-03-EX-130-100-20 数字调速阀进行详细的理论分析和实验研究,可以得出如下结论:

由于该数字调速阀采用数字量直接控制,摆脱了常规的模拟控制,因而它具有数字控制的所有优点。除此之外,由于其特殊结构,它还具有如下的一些特点:

1. 静态特性好。由于定差减压阀及反馈通道上的阻尼孔  $R_2$ 、 $R_3$  的配合作用,部分消除了稳态液动力的影响,使该调速阀克服了传统调速阀控制流量小、压力低、流量稳定精度不高的缺点,获得了较高的调速精度,增大了流量控制范围。

2. 动态特性好。由于阀中阻尼孔  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  的设置以及参数的优化,克服了传统流量阀所固有的负载阶跃动态流量瞬时超调,并且获得了较好的稳定性。

3. 控制迅速、可靠。由于步进电机带动偏心轮直接推动节流阀芯移动,减少了控制环节,增加了控制可靠性,提高了响应速度。

4. 一阀两用,通用性强。该阀阀体结构形状和尺寸具有通用性,只需更换定差减压阀阀芯及改变相应的孔道,就可构成溢流节流阀,从而扩大了它的适用范围。

综上所述,日本数字式调速阀结构新颖、合理,具有多种优点,因而是目前国际上具有较高水平的数字液压元件。

## 参 考 文 献

- 1 东京计器油压技术开发部. 油压制御弁展望. 油压与空气, 1983, 25(1): 14~21
- 2 路雨祥. 流量控制的新进展. 浙江大学学报, 1982, 18(1): 25~38