

# 应用键图与状态空间理论对分配器 调压阀动特性的分析与研究

王 政 邦

(西北农学院农机系)

分配器的调压阀是非线性元件,用线性化方法分析其动特性将产生较大的误差。本文试图用键图理论与状态空间理论分析调压阀的动特性,且试图研究键图理论与电子计算机在农机方面应用的效果与方法。对农机液压部件的静特性过去研究较多,且均用线性化的传递函数方法,局限性大、要求线性化、单输入单输出、变量及其各阶导数的初值为零。用现代控制论的状态空间分析法,可方便地考虑一些非线性因素,可以是多个输入与输出,结合电子计算机可方便地打印出任一变量随时间变化的计算结果,初始值也不限于零。又采用键图建立数学模型,比之用高阶微分方程式传递函数方便快捷。

## 一、研究对象

分配器的结构(见图1),其工作过程(见图2),在正常工作时,安全阀和回油

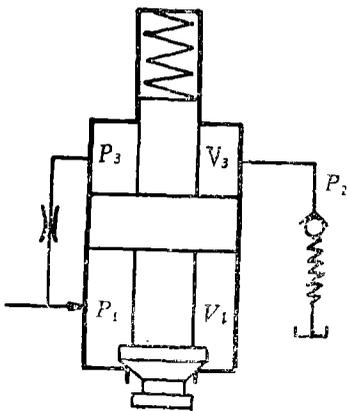


图 1

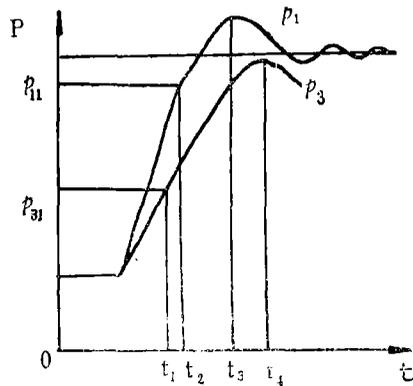


图 2

阀都关闭着,系统维持某一压力,因故压力急增时,回油阀下腔及管道中的油液被压缩,压力 $P_1$ 直线上升,由于回油阀阻尼孔及上腔容积的滞后作用,上腔压力 $P_3$ 的上升速

度低于 $P_1$ 的上升速度,当 $P_3$ 升到安全阀开启压力 $P_{31}$ 时(即 $t_1$ 时),安全阀开启。随着流经安全阀流量的加大,压差 $\Delta P_{13} = P_3 - P_1$ 也加大,当压差增加到足以打开回油阀时( $t_2$ ),回油阀开启。在回油阀口尚不够大时,不足以把泵的流量全部卸掉,压力 $P_1$ 还继续上升,直到把流量全部卸出时( $t_3$ ), $P_1$ 升到最高值。回油阀芯借助惯性继续上升,因此 $P_1$ 下降,回油阀上腔的油继续受到压缩,所以 $P_3$ 仍在上升,直到 $\Delta P_{13}$ 小得使回油阀芯被弹簧压下一些时( $t_4$ ),如果阀是稳定的,则经短期振荡后稳定在调定的压力下溢流。

研究中考虑的因素有:回油阀的泄漏,油液的可压缩性,阀芯的惯性,管道的弹性,阀口及小孔液阻以及弹簧的弹性力和稳态液动力等。忽略压力脉动及管中液流的惯性。同时认为粘度为恒值,油的体积弹性模量 $\beta_e$ 不受压力和温度变化的影响,外漏阻尼系数不受瞬时温升的影响,液容液阻液感都以集中参数考虑。

## 二、建立功率键合图

根据结构图1,按照功率流传输过程的拓扑网络方法,画出其功率键合图3。图中半箭头表示功率流向,键上的油压 $p$ 、流量 $q$ 、力 $F$ 和速度 $v$ 表示功率的两个变量即力变量和流变量。图中0结点表示其周围各键上的变量相等,流变量之和为零。图中1结点表示其周围各键上的流变量相等而力变量之和为零。图中TF表示变换器,下标A为转换比值。 $R$ 为阻尼元, $C$ 为容积元, $I$ 为惯性元, $S_i$ 为输入力源, $S_r$ 为输入流源。

## 三、建立状态方程

根据键合图选取 $C$ 和 $I$ 元上的自变量为状态变量 $V_2$ 、 $V_{11}$ 、 $P_{16}$ 、 $P_{22}$ 、 $x_{14}$ 、 $x_{21}$ ,状态方程的输入量为 $S_r$ 及 $S_i$ ,都是常量。

各元键上状态自变量与其因变量的关系式:

$$\because F = m \frac{dv}{dt} \quad v = \frac{1}{m} \int F dt = \frac{1}{m} P$$

$$\therefore v_i = \frac{1}{m_i} P_i = \frac{1}{I_i} P_i \quad (1)$$

$$F_{14} = \frac{1}{C_{14}} x_{14} \quad (2)$$

$$F_{21} = \frac{1}{C_{21}} x_{21} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{1}{C_2} V_2 \quad (4)$$

$$P_{11} = \frac{1}{C_{11}} V_{11} \quad (5)$$

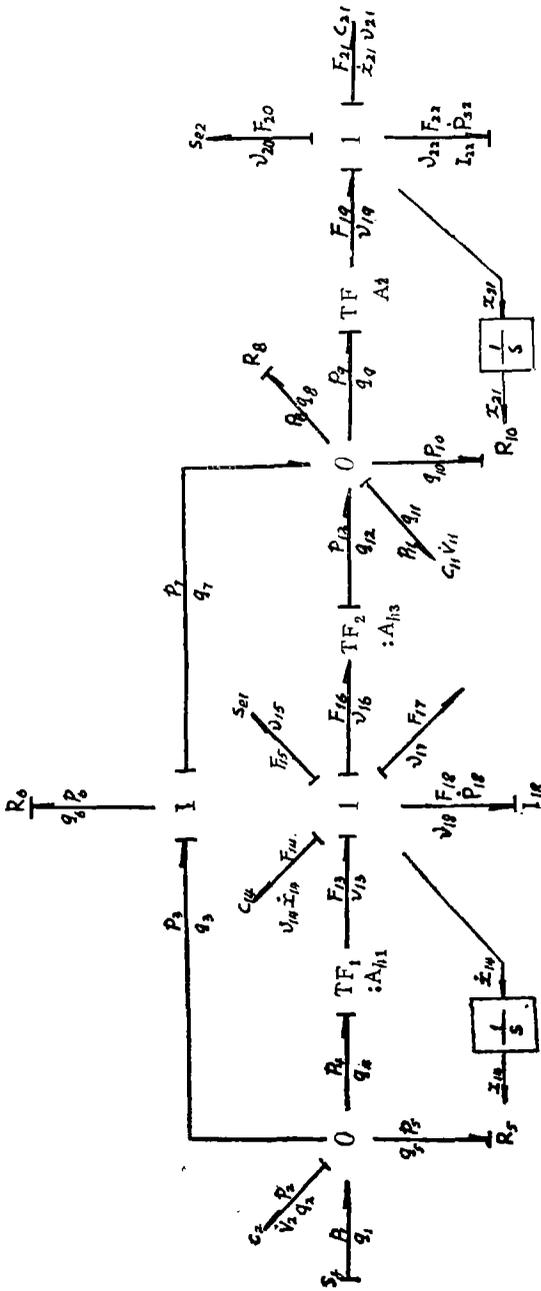


图 3

图中符号说明如下：  
 $R_6, R_{10}$ ——回油阀及安全阀液阻  
 $R_8$ ——回油阀泄漏液阻  
 $C_2$ ——回油阀上腔液容  
 $C_{1.4}$ ——回油阀下腔及管路液容  
 $C_{1.1}$ ——回油阀弹簧柔度  
 $C_{2.1}$ ——安全阀弹簧及稳态液动力柔度  
 $A_{h.1}, A_{h.3}$ ——回油阀上下有效作用面积  
 $I_{1.8}, I_{2.2}$ ——回油阀芯及安全阀芯质量

各状态变量的函数关系式及状态方程式

$$\dot{v}_2 = q_1 - q_3 - q_4 - q_5 = S_f - \frac{\pi d_0^4}{128\mu l_0} \left( \frac{1}{C_2} V_2 - \frac{1}{C_{11}} V_{11} \right) - \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_1^2) \frac{1}{m_1} P_{18} = c_1 \pi d_1 \sin \alpha_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_2} V_2} \cdot x_{14} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} = q_7 - q_8 - q_9 - q_{10} + q_{12} = & \frac{\pi d_0^4}{128\mu l_0} \left( \frac{1}{C_2} V_2 - \frac{1}{C_{11}} V_{11} \right) \\ & - \frac{\pi D_3 \delta^3}{12\mu l_3} \frac{1}{C_{11}} V_{11} - \frac{\pi d_2^2}{4} \frac{1}{m_2} P_{22} - c_2 \pi d_2 \sin \alpha_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{C_{11}} V_{11}} \\ & \cdot x_{21} + \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_3^2) \frac{1}{m_1} P_{18} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{18} = F_{13} - F_{14} - F_{16} - F_{17} - F_{15} = & \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_1^2) \frac{1}{C_2} V_2 - \frac{\pi}{4} \\ & (D_0^2 - D_3^2) \frac{1}{C_{11}} V_{11} - k_1 x_{14} - \frac{Bm}{m_1} P_{18} - S_{.1} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{22} = F_{19} - F_{20} - F_{21} = & \frac{\pi d_2^2}{4} \frac{1}{C_{11}} V_{11} - S_{e2} - k_2 x_{21} - c_2 c_v \pi \cdot \sin 2\alpha_2 \cdot \\ & d_2 \frac{1}{C_{11}} V_{11} x_{21} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\dot{x}_{14} = \frac{1}{m_1} P_{18} \quad (10)$$

$$\dot{x}_{21} = \frac{1}{m_2} P_{22} \quad (11)$$

为了用电子计算机求解上述方程,

$$\begin{aligned} \text{令 } V_2 = Y_1 & \quad V_{11} = Y_2 & \quad P_{18} = Y_3 & \quad P_{22} = Y_4 \\ x_{14} = Y_5 & \quad x_{21} = Y_6 & \quad S_{.1} = u_1 & \quad S_{.2} = u_2 \\ S_f = u_3 & & & \end{aligned}$$

则上述6个一阶微分方程可写成矩阵形式

$$\dot{Y} = AY + Bu$$

$$\text{式中 } \dot{Y} = \{ \dot{Y}_1 \dot{Y}_2 \dot{Y}_3 \dot{Y}_4 \dot{Y}_5 \dot{Y}_6 \}^T$$

$$Y = \{ Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5 Y_6 \}^T$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{61} & \dots & a_{66} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$u_1 = [u_3 \ 0 \ u_1 \ u_2 \ 0 \ 0]^T$$

输出方程

$$p_1 = p_2 = \frac{1}{C_2} V_2 = \frac{\beta_e}{V_1} Y_1$$

$$p_3 = p_{11} = \frac{1}{C_{11}} V_{11} = \frac{\beta_e}{V_3} Y_2$$

$$x_{11} = Y_6$$

$$x_{14} = Y_5$$

#### 四、求解与分析

分配器实物的计算数据

回油阀芯中部直径	$D_0 = 3.0\text{cm}$
回油阀溢流口直径	$D_1 = 2.0\text{cm}$
回油阀上导向部直径	$D_3 = 1.8\text{cm}$
回油阀上导向部长度	$l_3 = 1.0\text{cm}$
回油阀阻尼孔直径	$d_0 = 0.25\text{cm}$
回油阀下腔总容积	$V_1 = 60 + 40 = 100\text{cm}^3$
回油阀芯及1/3弹簧质量	$m_1 = 1.4 \times 10^{-4} \text{ (kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm)}$
回油阀弹簧刚度	$k_1 = 2.5\text{kgf/cm}$
回油阀弹簧预压力	$S_{.1} = 4.7\text{kgf}$
回油阀口出流角度	$\alpha_1 = 46^\circ$
回油阀上腔总容积	$V_3 = 5\text{cm}^3$
安全阀及弹簧质量	$m_2 = 8 \times 10^{-6} \text{ (kgf}\cdot\text{s}^2/\text{cm)}$
安全阀弹簧刚度	$k_2 = 29\text{kgf/cm}$
安全阀出油口直径	$d_2 = 0.4\text{cm}$

安全阀出油管长度	$l_2 = 4.5\text{cm}$
安全阀口出流角度	$\alpha_2 = 20^\circ$
安全阀有效作用面积	$A_2 = 0.126\text{cm}^2$
回油阀下有效作用面积	$A_{b1} = 4\text{cm}$
回油阀流量系数	$c_1 = 0.61$
回油阀粘性系数	$B_m = 1.6 \times 10^{-3} (\text{kgf}\cdot\text{s}) / \text{cm}$
安全阀流量系数	$c_2 = 0.8$
安全阀流速系数	$c_{v2} = 0.98$
油液动力粘性系数	$\mu = 3 \times 10^{-7} (\text{kgf}\cdot\text{s}) / \text{cm}^2$
油液密度	$\rho = 0.88 \times 10^{-6} (\text{kgf}\cdot\text{s}^2) / \text{cm}^4$
油源供油量	$S_r = 800\text{cm}^3/\text{s}$

状态方程各系数的表达式

$$a_{11} = - \frac{\pi d_0^4 \beta_c}{128 \mu l_0 V_1}$$

$$a_{12} = \frac{\pi d_0^4 \beta_c}{128 \mu l_0 V_3}$$

$$a_{13} = - \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_1^2) \frac{1}{m_1}$$

$$a_{15} = - c_1 x d_1 \cdot \sin \alpha_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{C_2}} V_2$$

$$a_{21} = a_{11}$$

$$a_{22} = - \left( \frac{\pi d_0^4}{128 \mu l_0} + \frac{\pi D_3 \delta^3}{12 \mu l_3} \right) \frac{\beta_c}{V_3}$$

$$a_{23} = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_3^2) \frac{1}{m_1}$$

$$a_{24} = - \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{m_2}$$

$$a_{26} = - c_2 \pi d_2 \sin \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\frac{\beta_c}{V_3}} V_{11}$$

$$a_{31} = \frac{1}{4} (D_0^2 - D_1^2) \frac{1}{C_2}$$

$$a_{32} = - \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_3^2) \frac{1}{C_{11}}$$

$$a_{33} = \frac{-B_m}{m_1}$$

$$a_{35} = -k_1$$

$$a_{42} = \frac{\pi d_2^2}{4} \frac{1}{C_{11}}$$

$$a_{46} = - \left( k_2 + c_2 c_{v2} \sin 2\alpha \cdot \frac{\beta_c}{V_3} \right)$$

$$a_{53} = \frac{1}{m_1}$$

$$a_{64} = \frac{1}{m_2}$$

$$a_{14} = a_{16} = a_{25} = a_{34} = a_{36} = a_{41} = a_{43} = a_{44} = a_{45} = a_{51} = a_{52} = a_{54} = a_{55} = a_{66} = a_{61} = a_{62} = a_{63} = a_{65} = a_{65} = 0$$

$u_2$  ——安全阀弹簧调定值17.5 kgf

$u_1$  ——回油阀弹簧调定值4.7 kgf

$u_3$  ——为泵的供油量，以阶跃信号的方式输入，使其经历一过渡过程而达到新的平衡，通过系统表现出的过渡过程品质确定其动特性。

初始条件(取  $t = 0$ )，在  $t = t_0$  时  $Y_1 = 1$   $Y_2 = 0.05$   $Y_3 = Y_4 = Y_5 = Y_6 = 0$ 。

由于状态方程是非线性的，用定步长龙格——库塔数值解法，定计算步长0.1毫秒，每5步输出一个数据，共输出100个数据。将有关数据代入状态方程，编制程序上计算机计算，可求得  $P_1(t)$ ， $P_3(t)$ ， $x_1(t)$ ， $x_2(t)$ 的输出值(如图4所示)。

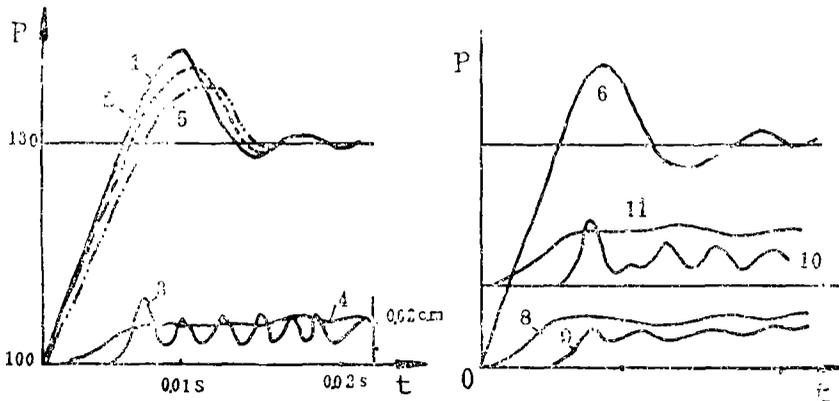


图 4

图中曲线1、2、3、4为 $\beta_c = 5000$ 时 $P_1$ ， $P_3$ ， $x_2$ 和 $x_1$ 的变化曲线。5为实际测定的 $P_1$ 曲线。6、10、11为 $\beta_c = 7000$ 时 $P_1$ ， $x_2$ 和 $x_1$ 曲线，8、9为 $\beta_c = 7000$ 而 $d_2 = 0.1$ 时 $x_2$ 和 $x_1$ 的曲线。由曲线1和计算得 $P_{1max} = 142.4 \text{ kgf/cm}^2$ ， $P_{1\alpha} = 130.5 \text{ kgf/cm}^2$ ，峰值时间 $t_p = 8$ 毫秒，超调为 $\sigma = 9.5\%$ ，超调量为 $\Delta P_1 = 12.4 \text{ kgf/cm}^2$ ，与分配器的实际试验曲线5相比趋向和有关值都较吻合，说明用键图方法建立的分配器数学模型是正确的，同时也可看出，试验中输入信号为实际流量的跃变，作不到理想的阶跃，故曲线5

表现大的滞后,同时计算中未计入泵出口腔的液容,因此计算值的峰值较实测为大。对比曲线1和6可知,增大 $\beta_1$ 值时上升时间将变短。由曲线8、9可知减小安全阀前的节流孔径时,安全阀的工作趋于稳定。由曲线3和10看出安全阀是在振动情况下工作的。

## 结 语

由分析可知,应用键图所建立的数学模型是基本正确的,可用来分析农机有关部件动态特性。也表明利用电子计算机来进行农机液压系的数学仿真计算,研究其动态品质,是科学而经济的一种方法。分析说明农机上大量应用的仿制元件均未进行动态验算,确有进行动态特性分析的必要。计算表明安全阀是不稳定的, $P_1$ 的超调量和上升时间与 $\beta_1$ 和 $d_2$ 有关。在油压变化率大的情况下,回油阀会先期开启。比项工作仅是开始,须进一步改变有关参数作仿真试验。

## 参考文献

1. 陈燕庆:“现代控制工程”,科学出版社,1976。
2. 刘能宏:“键合图和状态空间分析法在液压系统动态特性研究中的应用”,《大连工学院学报》,1981.6。
3. 邓延光:用键合图预测拟用液压控制系统的响应,“液压与气动”,1978.4。
4. 张海平:用键合图状态方程研究液压系统特性,“上海工业大学油印”,1981.7。

An Analysis and Study of Dynamic Characters of  
pressure Regulator Valve of Distributor with The  
Application of Bondgraph And State Space Theory

Wang Zhong-bang

Abstract

The State Equations in the research system were established effectively and simply in this paper with the method of state space analysis and the application of bondgraph. with some non-linear factors taken into consideration, the analytical results were in more coincidence with those actually measured. And it was, therefore, clearly showed that the method used in combination with computers is effective in analysis of dynamic characters of some parts of farm machinery.