

文章编号: 1002-5855 (2001) 05-0012-05

仿真直动式溢流阀瞬态响应的键合图法

郑红梅

(合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 介绍了用键合图法仿真直动式溢流阀的瞬态响应。将直动式溢流阀接入一个易于反映阀的动态特性的液压系统, 绘出该系统的键合图。根据键合图推导出系统的状态方程, 从而仿真出直动式溢流阀开口瞬时系统的压力和阀芯位移随时间的变化曲线。

关键词 直动式溢流阀; 键合图; 数字仿真; 瞬态响应

中图分类号: TH137.52 **文献标识码:** A

Bond graph method for the emulation of direct-acting spillover valve's transient response

ZHENG Hong-mei

(School of Mechanical and Automobile, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper introduces a bond graph method for emulating the transient response property of direct-acting spillover valve. A hydraulic system with a direct-acting spillover valve is built up. By the concept of bond graph, the system's bond graph model is presented and the system's state equations are derived. Emulating the state equations, the system's pressure and the spool displacement during the time just after the valve spilling are got.

Key words: Direct-acting Spillover Valve; Bond Graph; Emulate; Transient response

1 概述

直动式溢流阀是利用直接作用于阀芯上的弹簧力与阀芯另一端的液压力相平衡的原理控制压力的。该阀弹簧的弹性模量大, 当流量较大时, 阀的开口大, 使弹簧产生较大的变形量, 此时阀所控制的压力随流量的变化较大。在液压系统中, 溢流阀的应用较广, 而其开口瞬时系统压力的波动, 直接影响液压系统工作的稳定性, 所以研究其瞬态响应有重要的意义。

键合图理论是一种对工程系统进行动态分

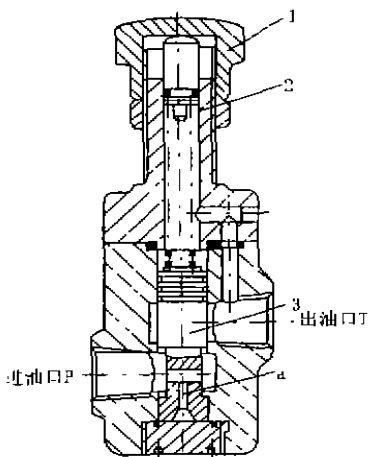
析的方法, 以状态方程作为数学模型的形式, 只要能画出键合图, 即可通过对系统功率的传输、转化、储存和耗散进行描述很容易地得到方程, 建立系统的数学模型, 进而对系统进行描述和分析。该方法广泛地应用于机械、液压和电学等各个学科领域。

2 工作原理

图1为直动式溢流阀。压力油由进口口P上的径向孔和阻尼孔 α 作用于阀芯底部端面上, 当作用于端面上的液压力大于弹簧的调定压力时, 阀芯上移, 阀门打开, 多余油经回油

作者简介: 郑红梅 (1966-), 女, 安徽省长丰县人, 在职博士, 讲师, 从事教学与科研工作。

口 T 回油箱。



1. 调压顶盖 2. 弹簧 3. 阀芯

图1 直动式溢流阀

为研究直动式溢流阀的瞬态响应，将阀接入图2所示的液压系统。定量液压泵（视为流源）供油经二位二通电磁阀及节流阀回油箱。电磁阀开启时，因节流阀液阻小，系统油压小于溢流阀的调定压力，溢流阀不溢流。当电磁阀突然关闭时，系统中的油压将迅速升高，使溢流阀打开溢流，从而达到控制油压的目的。溢流阀开口瞬间的动态响应（系统压力和阀芯位移随时间的变化曲线）也反映了溢流阀的动态特性。

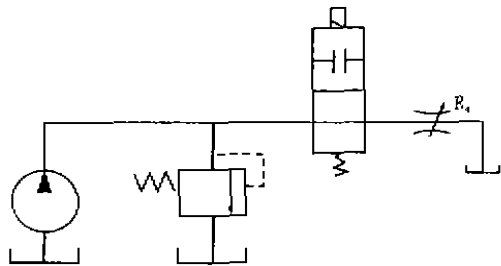


图2 接入溢流阀的系统

应用键合图理论对直动式溢流阀进行数字仿真，可以较方便地描述溢流阀开口瞬间的动态响应，从而为改进溢流阀的设计或控制液压系统提出相应的理论依据。

3 建立键合图

按照键合图理论，描述一个工程系统主要使用容性元件 C （电容器、液压系统的蓄能器、油液的可压缩性和管道的弹性产生的容性）、阻性元件 R （电阻、摩擦力、液阻）、惯性元件 I （电感、液感、机械系统的质量及转动惯量）、势源 S_e （电源、柴油机、可调压的液压泵）、流源 S_f （发电机、定量泵、传动轴）、转换器 MTF 和回转器 MGY。将这些基本元件按照一定的方法相连即可构成系统的键合图。

在键合图理论中，称能量在子系统间流动的地方为通口，每个通口用带半个箭头的线即键表示，每个键对应一个势变量和一个流变量。按键合图理论，物理参量统一归纳为广义变量，即：功率变量势 e 和流 f ，能量变量变位 q 和动量 p 。其相互关系为

$$e = Rf \quad q = Ce \quad p = If$$

根据功率守恒原理，MFT 转换器反映势流比例关系

$$e_1 = me_2 \quad mf_1 = f_2$$

MGY 回转器反映势和流的交叉比例关系

$$e_1 = rf_2 \quad rf_1 = e_2$$

式中 m ——转换模数

r ——回转器模数

组成键合图模型时，势相等各键用“0—”结相连，流相等的各键用“1—”结相连。根据键合图的组成规律及直动式溢流阀的工作原理，绘出图2液压系统的键合图（图3）。

在图3中，流源 S_f 为定量液压泵的供油量， C_1 为管道的弹性及管道内的油液引起的液容， R_2 为泵的泄露液阻， R_3 为溢流阀阀口液阻， R_4 为节流阀液阻， Q_6 为进入阀芯的流量。 $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = S_f$ ， $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p_6$ ，所以，左边第一个结点为“0”结点。

阀芯流量 Q_6 具有的压力 p_6 消耗在阻尼孔 R_1 及作用在阀芯端面 A 上， p_7 为消耗在阻尼孔上的压力降， p_8 为作用在阀芯端面上的压力。 $p_6 = p_7 + p_8$ ； $Q_6 = Q_7 = Q_8$ 。所以左边第二个结点为“1”结点。

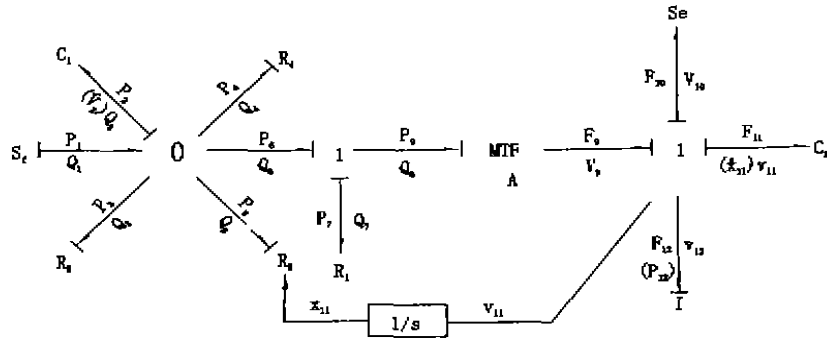


图3 带有直动式溢流阀的液压系统键合图

阀芯相当于 MTF 转换器，它把作用在阀芯端面上的压力 p_8 和流量 Q_8 转换成作用在阀芯上的力 F_9 和阀芯运动的速度 v_9 ，它们之间的转换关系为面积 A ， $A p_8 = F_9$ ， $Q_8 = A v_9$ 。 $F_9 = F_{10} + F_{11} + F_{12}$ ， F_{10} 克服弹簧的预紧力 S_c ， F_{11} 克服因阀芯位移压缩弹簧而增加的弹性力（属容性效应，用 C_2 表示）， F_{12} 使阀芯产生加速度（属感性效应，用 I 表示）。因此最右边的结点也是“1”结点。

在该图中，全箭头的控制键表示阀芯的速度 v_{11} 的积分（即阀芯的位移 x_{11} ），它控制阀口液阻 R_3 。

4 建立数学模型

当该液压系统的键合图画出来后，建立系统的数学模型就比较简单了，根据系统的物理性质有

$$Q_2 = V_2 \quad (1)$$

$$v_{11} = \dot{x}_{11} \quad (2)$$

$$F_{12} = \dot{p}_{12} \quad (3)$$

式中， V_2 为油压升高时需补充的油液体积， x_{11} 为阀芯的位移， p_{12} 为阀芯的动量。三者均为系统的状态变量，系统输入变量为 2 个常量 $S_f(Q_1)$ 和 S_c 。

根据各储能元件的特性得

$$v_{12} = p_{12}/I \quad (4)$$

$$F_{11} = x_{11}/C_2 \quad (5)$$

$$p_2 = V_2/C_1 \quad (6)$$

根据键合图的规则，将各状态变量的导数

写成各能量变量及输入变量的函数关系

$$\begin{aligned} \dot{p}_{12} &= F_9 - F_{10} - F_{11} \\ &= A p_2 - A^2 R_{12} v_{12} - S_c - F_{11} \end{aligned} \quad (7)$$

$$x_{11} = v_{11} = p_{12}/I \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= Q_1 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 \\ &= S_f - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) p_2 - A v_{12} \end{aligned} \quad (9)$$

设阀芯搭合量为 y_1 ，即当 $x_{11} < y_1$ 时，无溢流， $R_3 = \infty$ ， $1/R_3 = 0$ ， $Q_5 = 0$ 。

当 $x_{11} > y_1$ 时，阀口打开，才有溢流，由于溢流阀阀口液阻为非线性可变液阻，阀口流量随阀口的压力差和阀芯位移的变化而变化，阀口压差 $\Delta p = p_6 - 0 = p_2$ ，所以

$$\begin{aligned} Q_5 &= \frac{p_2}{R_3} = \frac{V_2}{C_1 \cdot R_3} \\ &= C_d \pi d (x_{11} - y_1) \sqrt{2 \frac{p_2}{\rho}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$R_3 = \frac{\sqrt{\frac{\rho}{2}} \sqrt{\frac{V_2}{C_1}}}{C_d \pi d (x_{11} - y_1)} \quad (11)$$

式中 C_d ——阀口流量系数

ρ ——油液的密度

d ——阀芯端面直径

$$\frac{1}{R_4} = \begin{cases} \text{CONST (调定值)} \\ 0 \quad (\text{电磁阀突然关闭, 不溢流}) \end{cases}$$

电磁阀突然关闭时， R_4 的突然变化体现了系统的输入信号是一个阶跃信号，由此阶跃信号引起的系统动态响应即是直动式溢流阀的瞬态。

根据式(1)~(12)得出状态方程的标

准形式,即系统的数学模型如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{p}_{12} = -\frac{A^2 R_1 p_{12}}{I} - \frac{x_{11}}{C_2} + \frac{AV_2}{C_1} - S_e \\ x_{11} = p_{12}/I \\ \dot{V}_2 = -\frac{Ap_{12}}{I} - \frac{V_2}{R_2 \cdot C_1} + S_f \\ \dot{V}_2 = -\frac{A \cdot p_{12}}{I} - \frac{V_2}{R_2 \cdot C_1} - C_d \pi d \sqrt{\frac{2}{\rho}} (x_{11} - y_1) \sqrt{\frac{V_2}{C_1}} + S_f \end{cases} \quad (\text{当 } x_{11} \leq y_1) \quad (13)$$

$$\dot{V}_2 = -\frac{A \cdot p_{12}}{I} - \frac{V_2}{R_2 \cdot C_1} - C_d \pi d \sqrt{\frac{2}{\rho}} (x_{11} - y_1) \sqrt{\frac{V_2}{C_1}} + S_f \quad (\text{当 } x_{11} > y_1)$$

由于在建立该系统的数学模型时未考虑当阀芯位移为零时,阀套端面给于阀芯的支反力,而且油液的压力不应小于零,所以在仿真过程中还需对该数学模型加3个约束。① $\dot{x}_{11} \geq 0$,否则,令其为0。② $p_2 \geq 0$,否则,令其为0。③若 $x_{11} = 0$ 时, $F_{12} < 0$,令 $F_{12} = 0$ 。

5 数学模型求解

该系统的数学模型是非线性的一阶微分方程组,可用定步长的四阶龙格-库塔法求解,由于在用龙格-库塔法进行仿真计算时要反复用状态方程的标准式(13),为方便编程,将

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + b_{21}u_1 + b_{22}u_2 \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + b_{31}u_1 + b_{32}u_2 \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + C(x_2 - y_1) \sqrt{x_3/c_1} + b_{31}u_1 + b_{32}u_2 \end{cases} \quad \begin{matrix} (x_2 > y_1) \\ (x_2 \leq y_1) \end{matrix} \quad (14)$$

式中 $C = C_d \pi \sqrt{2/\rho}$,其中, \vec{X} 为状态变量向量, \vec{U} 为输入变量向量,A、B为系数矩阵。

选取 x_{11} (阀芯位移)和 p_2 (系统压力, $p_2 = V_2/C_1$)作为输出变量。根据数字仿真的精度要求,选计算步长 $h = 0.0003s$ 。仿真程序用Visual C++编制,其软件框图如图4。

6 算例

按照上述理论和方法,对图1所示的直动式溢流阀进行数字仿真,取其基本参数 $A = \pi d^2/4 = 0.000109m^2$, $I = 6.14 \times 10^2 Ns^2/m$, $R_1 = 3.9 \times 10^{10} Ns/m^5$, $C_2 = 0.00002m^5/N$, $R_2 = 1.47 \times 10^{11} Ns/m^5$, $C_1 = 8.0 \times 10^{-13} m^5/N$, $S_e = Q_1 = 0.00046m^3/s$,溢流阀的调定压力设为 $p_0 = 3MPa$,阀芯的搭合量取为 $y_1 = 0.0014m$,电磁阀关闭前系统压力(节流阀调

式(13)写成矩阵形式。

$$\vec{X} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_{12} \\ x_{11} \\ V_2 \end{Bmatrix} \quad \vec{U} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_e \\ S_f \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A^2 R_1 / I & -1/C_2 & A/C_1 \\ 1/I & 0 & 0 \\ -A/I & 0 & -1/(R_2 C_1) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则状态方程(13)可写成

定压力) $p_4 = 0.6MPa$ 。

溢流阀中弹簧的预紧力 $S_e = p_0 A - (y_1 + y_2)/C_2$,当阀打开后,全溢流开口量 y_2 可根据下式计算: $Q_{max} = Q_1 = C_d \pi d y_2 \sqrt{2\Delta p/\rho}$,溢流阀两端压差 Δp 等于溢流阀的调定压力 p_0 ,即 $\Delta p = p_0 = 3MPa$

由此可得 $y_2 = Q_1 / (C_d \pi d \sqrt{2p_0/\rho})$

溢流阀在开启前处于平衡状态,阀芯被弹簧压在最下端。因此,状态变量 p_{12} 和 x_{11} 的初始值为零, V_2 的初始值为 $p_2 C_1$ 。

图5是由仿真程度计算所得的结果绘制的电磁阀突然关闭后系统压力 p_2 和阀芯位移 x_{11} 随时间变化的曲线,这两条曲线反映了直动式溢流阀的瞬态响应。图6是用压力传感器对系统压力的瞬态响应进行实际测试后获得的记录曲线,经标定后可知,其数值与仿真结果

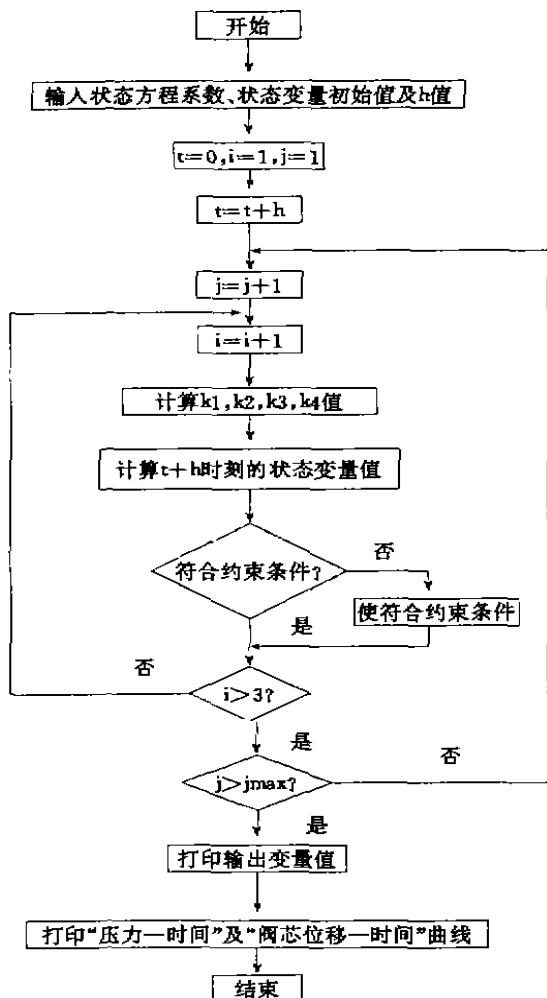


图4 数字仿真程序框图

基本吻合。表明在仿真直动式溢流阀瞬态响应过程中所建立的数学模型的可行性和有效性。在设计和改进直动式溢流阀时，不需要将其制造出来，而利用本文所建立的数学模型进行仿真，即可检验出改进的溢流阀性能是否符合用户的要求，在溢流阀的设计和改进过程中具有

很重要的实际意义。

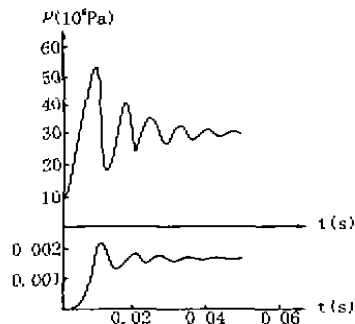


图5 仿真结果

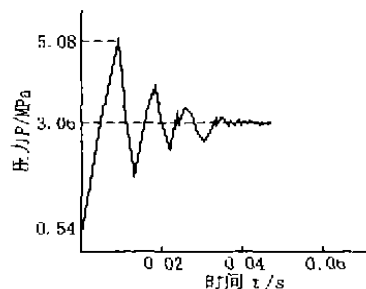


图6 测试结果

参 考 文 献

- [1] 潘亚东. 键合图概论 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990, 15~62.
- [2] 黄玉国. 基于状态方程的液压控制系统的动态特性的数字仿真 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 1996, 31~43.
- [3] 何玉彬, 余安萍. Visual C++ 5.0 编程指南 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998, 17~74.
- [4] 蒋守仁, 赵小勇, 蒋丹青等. 键合图法在液压伺服系统动态特性中的应用 [J]. 合肥工业大学学报, 1995, 18 (2): 104~112.

(收稿日期: 2000.03.20)



本厂是专业生产美标、日标和国标等高中压阀门的企业，座落于浙江省温州三桥工业区。为适应生产和业务发展的需要，经永嘉县人才服务中心批准，诚聘：高级工程师1名，高级管理人员1名，精通英语和网络的销售人员1名。本厂热忱欢迎您的加盟。

浙江远东高中压阀门厂

地址：浙江省温州三桥工业区 邮编：325105 电话：0577—67316771