

# PQ 阀控液压系统动态特性模拟

张新未, 张 宏

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**为解决橡胶密炼机液压系统的控制能力问题,针对电液比例压力流量复合控制阀(简称 PQ 阀)进行了研究。集压力比例调节、流量比例调节于一体的 PQ 阀是现代橡胶密炼机液压控制系统的重要组成部分,其性能的优劣将对炼胶质量有直接影响。在探讨 PQ 阀的结构特点及其工作原理的基础上,绘制了与系统相对应的功率键合图,建立了描述 PQ 阀控液压系统动态响应特性的数学模型,并运用仿真软件 Matlab 中的 Simulink 模块对 PQ 阀控液压系统进行动态特性模拟,最后对仿真结果进行分析,分析结果为提高 PQ 阀的控制能力提供有效的理论依据。

**关键词:** PQ 阀;功率键合图;状态方程;动态特性模拟

中图分类号:TH137.52

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)01-0047-04

## Simulation of dynamic performance of the PQ valve-controlled hydraulic system

ZHANG Xin-wei, ZHANG Hong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In order to solve the problems in the control capacity of the hydraulic systems of rubber internal mixers, the proportional pressure/flow hydraulic valve (PQ valve) was investigated. The PQ valve, which is able to adjust both pressure and flow simultaneously, and to a large extent, decides the quality of the rubber products, was considered as an indispensable constituent of the hydraulic control system of modern rubber internal mixers. After the analysis of the structure and the operation principle of the PQ valve, the mathematical model to the dynamic performance of the PQ valve-controlled hydraulic system was established, the way of drawing the power bond graph and that of carrying out dynamic performance simulation with the aid of Matlab/Simulink were presented, and finally the results of the dynamic simulation was evaluated. The experimental results show the theoretical basis helping to improve the control capacity of the PQ valve.

**Key words:** PQ valve; power bond graph; equation of state; dynamic performance simulation

## 0 引 言

橡胶密炼机及其上下辅机是现代橡胶工业的主要炼胶设备,至今已有近百年的发展历史。当前绝大多数的橡胶都是由橡胶密炼机炼制的。橡胶是各行各业发展不可或缺的产品,不同行业对橡胶的性能、形状、纹理、色泽和寿命等有着不同的需求。因此混炼生产线应具有高度的适应性以满足多元化的市场需求。橡胶混炼技术正发生着日新月异的变化。运用超声波技

术对橡胶混炼全过程进行实时监控是当前较新的、可灵活有效地控制橡胶混炼速率和质量的方式之一<sup>[1]</sup>。通过建立相应的热力学和流变方程,可对橡胶密炼机混炼过程的各个方面进行较为准确的描述,从而为合理设置混炼过程的各项参数提供理论依据<sup>[2]</sup>。我国的橡胶密炼机生产厂家在对国际橡胶密炼机技术进行引进和吸收的基础上,对自己的橡胶密炼机产品进行了大量的技术改进和创新,如采用了各种构型的转子(销钉转子、同步转子、可调距转子)、液压上顶栓、液压力式转子端面密封、PID 温度自动控制系统、计算机全

自动监控等。目前我国生产大型橡胶密炼机的公司主要有大连冰山橡塑机械公司和益阳橡胶塑料机械公司等,其产品已经实现系列化。

电液比例压力流量复合控制阀又称 PQ 阀,它将压力控制和流量控制有机地结合在同一阀块内,最大限度地简化了阀块结构和体积。PQ 阀既可实现对输出流量进行比例控制,又能实现系统压力的比例调节,被广泛地应用于塑料机械、冶金、炼胶等行业,可满足特殊工艺要求,实施效果明显<sup>[3,4]</sup>。

新型的集压力、流量比例调节于一体的 PQ 阀具有复合度高、性能稳定、能耗低等特点。在液压系统中采用 PQ 阀可以大大降低系统成本,同时便于安装和调试。PQ 阀不仅在性能上可与由若干传统液压元件(如溢流阀、减压阀、节流阀等)构成的复杂系统相媲美,而且价格也可以被国内市场接受。PQ 阀用来对橡胶密炼机上顶栓输出压力和移动速度进行比例控制。采用 PQ 阀控液压系统,生产者可对混炼室内部压强进行灵活设定,进而确保了炼胶质量,满足了产品多元化的需求。

现有市场上的 PQ 阀普遍存在动态响应稳定性不足的缺点。即在混炼过程中当对 PQ 阀进行比例流量调节或比例压力调节时,由于液压系统内部固有的液容性元件和液感性元件的作用,系统不能迅速达到调定状态,或者输出量经过剧烈震荡后才稳定在调定值上。当采用 PQ 阀时,液压系统的控制性能对 PQ 阀的动态响应稳定性的要求较为严格。

本研究将针对橡胶密炼机中用于控制上顶栓的 PQ 阀控液压系统进行研究,探讨该阀的控制原理,利用仿真软件 MATLAB 中的 Simulink 模块对其分别进行流量调节和压力调节动态模拟,为合理设置控制系统的相关参数,提高橡胶密炼机液压系统的控制能力提供参考依据。

## 1 PQ 阀在橡胶密炼机系统中的应用

PQ 阀既可对输出流量进行比例调节,又可对系统压力进行比例控制。虽然不同的 PQ 阀在大小、外观、性能指标等方面不尽相同,但是基本工作原理是相同的(如图 1 所示)。

由于 PQ 阀同时具有压力阀及流量阀的功能,因此在应用中具有如下特点:

(1) 进行压力调节时,溢流量太少会导致系统压力不稳定。溢流阀工作时要保证适当大的溢流量。当节流阀的通流截面积很小时,在保持所有因素都不变

的情况下,通过节流口的流量会出现周期性脉动,甚至造成断流,这就是节流阻塞现象。节流口的阻塞会使液压系统中执行元件的速度不均匀。因此每个节流阀都有一个能正常工作的最小流量限制,称为节流阀的最小稳定流量<sup>[5]</sup>。

(2) PQ 阀的回油 T 口必须直接与油箱相连,当负载无压力或 PQ 阀不工作时,油液由 T 口直接流回油箱,泵处在卸荷状态,起到节能作用。

(3) 在工程实际应用中,阀中一般都配置有安全阀。当系统压力达到限压压力时,安全阀 RK 就与溢流阀 M 构成先导溢流阀,限制系统的最高压力,起到保护系统的作用。此功能使 PQ 阀控液压系统无需单独设置大规格的系统溢流阀<sup>[6]</sup>。

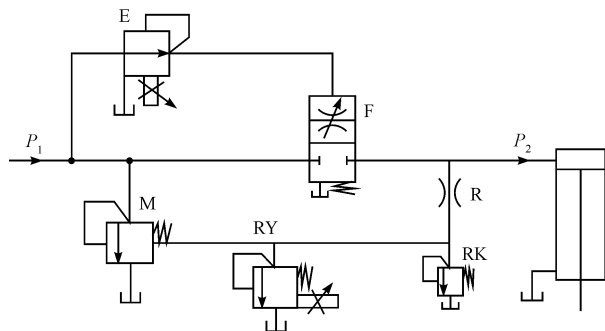


图 1 PQ 阀控液压系统的工作原理

本研究对象是某公司生产的 PQ 阀,其采用电和位置对流量复合反馈的新型原理,最高使用压力 35 MPa,最大流量 650 L/min,压力控制滞环小于  $\pm 1.5\%$ ,重复精度小于 1%,流量控制滞环小于  $\pm 1\%$ ,重复精度小于 1%,具有工作范围广、控制精度高等优点。另外,该阀还可以与计算机相连,构成机、电、液一体化的高性能系统。

## 2 PQ 阀控液压系统数学模型的建立

### 2.1 功率键合图

功率键合图是一种功率流图,其优点一方面在于它对功率流描述上的模块化结构与本身各部分物理结构以及各种动态影响因素之间有直观的一一对应的关系,另一方面在于它与系统的动态响应数学模型(状态方程)之间存在着严格的逻辑上的一致性,即根据功率键合图,并依照一定的规则,可推导出系统的数学模型<sup>[7]</sup>。因此,在为橡胶密炼机 PQ 阀控液压系统建立相关的数学模型、进行动态特性分析之前,首先应当建立与该系统相对应的功率键合图(如图 2 所示)。

### 2.2 状态方程的建立

在建立状态方程之前应首先明确系统中的状态变量。系统的状态方程是一阶微分方程组,且由功率键合图可知,只有储能元件(容性元件  $C$  和感性元件  $I$ ) 中两个变量间才有导数或者积分关系,故应从  $C$  元和  $I$  元各自的变量间取一个变量作为状态变量。系统中  $C$  元和  $I$  元的数量之和为 6,因此有 6 个状态变量,且须针对这 6 个状态变量列出 6 个微分方程来描述系统的动态响应特性。

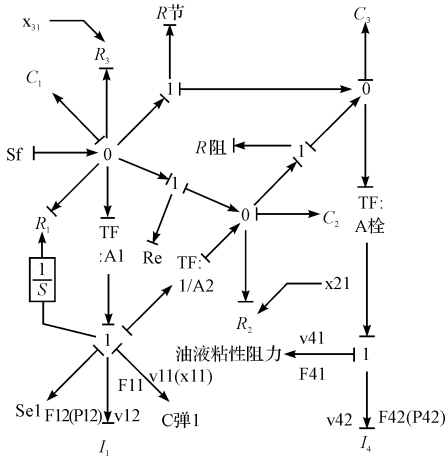


图 2 PQ 阀控液压系统功率键合图

根据以上关于状态变量、系统微分方程和未知参数的讨论可最终确定描述 PQ 阀控液压系统动态响应特性的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{V}_{C1} = 15\,000 - 2\,885V_{C1} - \frac{10\,000}{6.06 - 16.2x_{31}}V_{C1} + \\ 2\,885V_{C2} + \frac{1}{17.2 - 46x_{31}}V_{C3} - 4\,650P_{12} - \\ 115\,000x_{31}\sqrt{V_{C1}}(x_{11} \leq x_{10}) \\ V_{C1} = 15\,000 - 2\,885V_{C1} - \frac{10\,000}{6.06 - 16.2x_{31}}V_{C1} + \\ 2\,885V_{C2} + \frac{1}{17.2 - 46x_{31}}V_{C3} - 4\,650P_{12} - \\ 115\,000x_{31}\sqrt{V_{C1}} - 115\,000(x_{11} - 0.1)\sqrt{V_{C1}}(x_{11} \leq x_{10}) \\ \dot{V}_{C2} = 2\,885V_{C1} - 273\,623V_{C2} + 9.5V_{C3} + \\ 5\,106P_{12} - 115\,000x_{21}\sqrt{V_{C2}} \\ V_{C3} = \frac{10\,000}{6.06 - 16.2x_{31}}V_{C1} + 270\,700V_{C2} + \\ \frac{10\,000}{6.06 - 16.2x_{31}}V_{C3} - 1\,727P_{42} - 19V_{C3} \\ P_{12} = 17\,654V_{C1} - 19\,383V_{C2} - 500x_{11} - 300 \\ x_{11} = 1\,626P_{12} \\ P_{42} = 1\,383V_{C3} - k_{\text{控}}v_{42} \end{cases}$$

### 3 PQ 阀控液压系统的动态特性模拟

液压系统和元件的仿真算法可归结为以下 3 种基本形式:信号流法、基于方程法和能量端口法。Matlab/Simulink 是控制理论与控制工程及计算机仿真的强有力的工具,在系统仿真、分析与设计方面得到了广泛应用<sup>[8-10]</sup>,是利用信号流法对系统进行仿真的软件。

#### 3.1 仿真程序图

采用 Simulink 默认的 ode45 解法器,适用于大多数连续或离散系统。根据 PQ 阀控液压系统状态方程及其相关参数绘制的 Simulink 仿真程序图如图 3 所示。其中,  $x_{21}$  和  $x_{31}$  为系统输入信号,状态输出窗口  $Q$  和  $P$  分别代表 PQ 阀控液压系统的输出流量和输出压力。通过观察  $P$  和  $Q$  在不同输入信号下的响应曲线,可以对该系统的稳定性进行研究。其他状态变量的响应曲线可通过点击相应的状态变量显示窗口来获得。

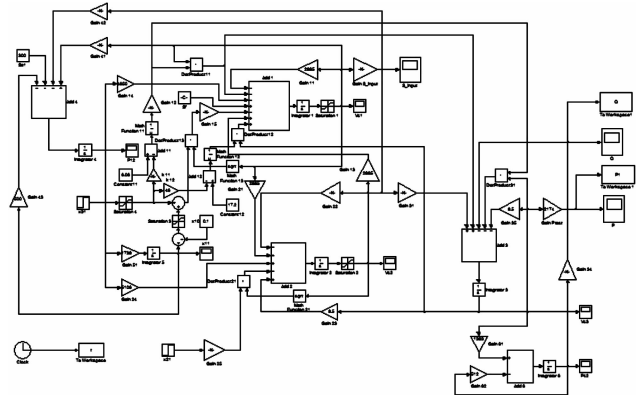


图 3 Simulink 仿真程序图

#### 3.2 流量调节的动态特性模拟及分析

进行流量调节动态模拟时,首先向比例溢流阀 RY 输入一个恒定的电信号,使阀芯位置固定,然后向比例减压阀 E 的主阀芯输入阶跃电信号。

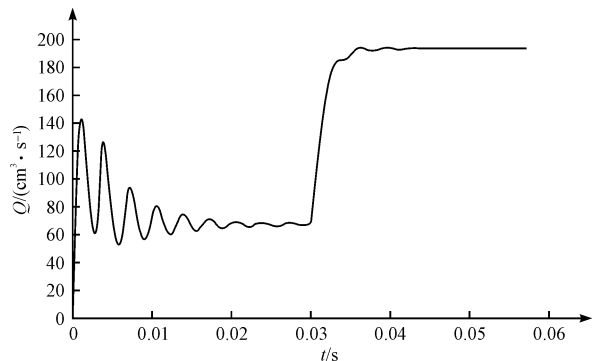


图 4 流量调节动态仿真结果

在 PQ 阀控液压系统流量调节过程中,在由静止

状态过渡到某指定工作状态时振荡剧烈,稳定性较差,最大百分比超调量为 107.43%;当由某一工作状态过渡到另一工作状态时稳定性良好,最大百分比超调量为 0.77%。同时,两个不同工作状态下系统的稳态输出值,表明:PQ 阀控液压系统的流量调节功能,即在将比例溢流阀 RY 的阀芯位置固定时,若增大比例减压阀 E 的阀口开度,则作用于溢流阀 F 并使其开口大小改变的油液压力增大,节流阀 F 的液阻随之减小,系统输出流量增加。

### 3.3 压力调节的动态特性模拟及分析

进行压力调节时,首先向比例减压阀 E 主阀芯输入一个恒定的电信号,使阀芯位置固定,然后向比例溢流阀 RY 的阀芯输入阶跃电信号,则阀芯位置随之产生瞬时变化。

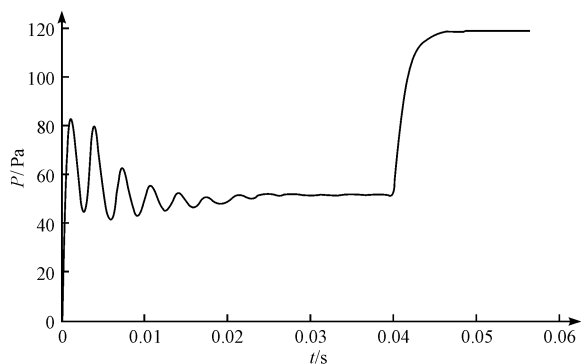


图 5 压力调节动态仿真结果

在 PQ 阀控液压系统压力调节过程中,在由静止状态过渡到某指定工作状态时振荡剧烈,稳定性较差,最大百分比超调量为 60.64%;当由某一工作状态过渡到另一工作状态时稳定性良好,最大百分比超调量为 0.07%。两个不同工作状态下系统的稳态输出值,表明:PQ 阀控液压系统的压力调节功能,即在将比例减压阀 E 的主阀芯位置固定时,若减小比例溢流阀 RY 的阀口开度,则溢流损失减少,系统输出压力增大。

## 4 结束语

对 PQ 阀控液压系统进行动态特模拟,旨在探索该系统的动态特性,了解影响系统动态响应特性的参数,为提高其控制性能提供理论依据。在系统参数优化过程中,本研究采用了 Matlab/Simulink 模拟软件,

通过反复模拟,找出影响系统动态响应稳定性的参数,并进行合理调整。系统在接收外部信号、从静止状态过渡到某一工作状态过程中会产生较强的振荡。其根本原因是 PQ 阀控液压系统内部存在储能元件(如弹簧),可以储存和释放能量。因此系统总是要经过一定的响应时间后才能达到平衡状态。经过优化的 PQ 阀控液压系统对橡胶密炼机上顶栓的控制能力大大提升,可使其更快、更稳定地响应外部输入电信号,实现了提高炼胶质量、提升产品竞争力的目的。不仅如此,橡胶工业是工业领域的重要组成部分之一,制胶能力的提升必将带动其他相关产业(如汽车工业)的发展,进而对整个国民经济产生积极影响。

### 参考文献(References):

- [1] CHENG Chin-Chi. Real-time diagnosis of melting and mixing processes in internal mixer by ultrasound[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010 (210): 675-683.
- [2] CAMPANELLI J R, GURER C, ROSE T L, et al. Dispersion, temperature and torque models for an internal mixer[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 44 (7): 1247-1257.
- [3] 陈家素,张治宇. 数字式比例压力流量复合阀及其应用[J]. *液压与气动*, 1997(2): 21-22.
- [4] 刘安治. PQ 阀在冶金液压系统中的应用[J]. *江苏冶金*, 2003, 31(5): 14-16.
- [5] 章宏甲,黄 谊. *液压传动*[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [6] 吴根茂. *新编实用电液比例技术*[M]. 杭州:浙江大学出版, 2006.
- [7] 刘能宏,田树军. *液压系统动态特性数字仿真*[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1993.
- [8] 王正林,王胜开,陈国顺,等. *Matlab/Simulink 与控制系统仿真*[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [9] 杨坤全,陈淑梅,陈小梅. 基于电流变效应的汽车 ABS 的 MATLAB/Simulink 仿真[J]. *机电工程技术*, 2009, 38(2): 13-15.
- [10] 杨 甫,许伯强,杨桂兰. 变频器供电下异步电动机转子断条故障仿真研究[J]. *机电工程技术*, 2009, 38(1): 67-69.

[编辑:李 辉]