

阀门定位器气动传动系统建模与 MATLAB 仿真分析

□ 杨菲¹ □ 杨德伟²

1. 兰州理工大学 机电工程学院 兰州 730050

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院 兰州 730050

摘要:针对阀门定位器的比例阀-气缸-阀杆系统进行研究,并有针对性地建立了数学模型,利用 Simulink 对控制系统进行了模拟仿真,对比验证了数学模型的正确性。对仿真曲线的分析,得到对系统动态响应有影响的因素,并对改善系统动态响应特性提出理论分析,为进一步提高系统精度提供理论支持。

关键词:调节阀 Simulink 动态响应 压力控制系统 建模

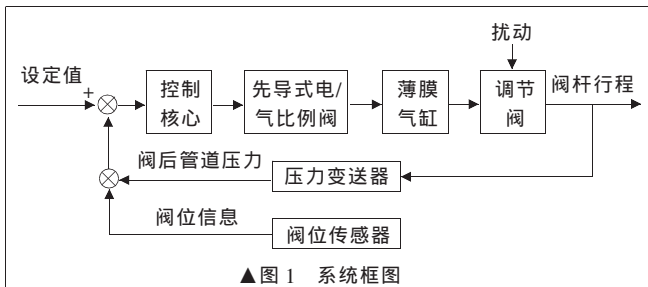
中图分类号:TP214

文献标志码:A

文章编号:1000-4998(2016)01-0022-04

阀门定位器是调节阀控制系统中的核心部件,它与调节阀、传感器等一起构成一个闭环控制回路。阀门静态特性和动态特性的不同直接影响了阀门的质量特性,特别是具有流量调节作用的调节阀。阀门定位器的使用有助于克服流体介质的扰动和阀门填料的摩擦力,可提高系统控制精度,同时增加控制的灵活性。

设计的调节阀自动调节系统基本结构如图 1 所示,控制核心是 MSP430 系列单片机,I/P 转换采用先导式电/气比例阀,反馈回路采用阀位反馈和阀后压力反馈的双反馈形式,在硬件上提高了系统的控制精度。



▲图 1 系统框图

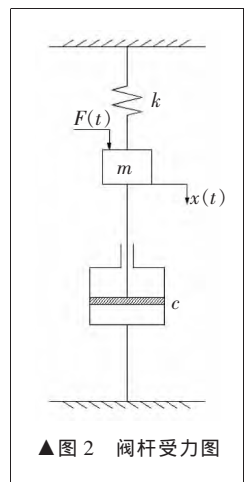
为研究本次设计改进对调节阀动态特性的影响,笔者依据调节阀、薄膜气缸和先导式电/气比例阀的物理结构及基本原理,对本系统进行数学建模和仿真,分析影响系统动态特性的因素,为降低流体介质对调节过程的扰动和实现调节阀的精度控制奠定理论基础。

1 数学模型的建立

1.1 调节阀调节对象的数学模型

调节阀阀杆的运动可认为是在气动力激励条件下的弹簧阻尼机构的运动,等效图如图 2 所示,将阀杆及其附件视为一个质量为 m 的质块(将弹簧质量计入其

中),设阀杆位移为 $x(t)$,气动力为 $F(t)$,系统等效刚度为 k ,系统阻尼系数为 c ,摩擦因数为 f (动摩擦因数为 f_d ,静摩擦因数为 f_s)。在对模型进行物理分析前,先进行假设:①假设本系统的各个部分均处于特定的温度和湿度环境下;②假设各金属构件均为理想刚体。根据假设及等效图,由牛顿第二定律得到调节阀阀芯的力平衡方程为:



▲图 2 阀杆受力图

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) - F_m - F_R \quad (1)$$

式中: F_R 为负载扰动力,包括系统扰动摩擦力和重力等; F_m 为摩擦力。

当系统静态时,按照阀门密封性要求,阀门静摩擦力由出厂时填料类型及填料量的多少确定,可视为常量,决定了阀门死区(阀门调节的不灵敏区)大小及动态工作范围。负载扰动力相对于静摩擦力可忽略不计,但影响系统稳定性,在建模时可不予考虑,所以式(1)微分方程可改写为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) - F_m \quad (2)$$

此时 F_m 指的是静摩擦力。

对式(2)进行拉氏变换(即拉普拉斯变换是实变函数和复变函数间的一种函数变换),同时,在动态工作范围内不考虑静摩擦力的前提下,将 F_m 并入死区内; $F(t)$ 等于气动执行器输出压强 $P_1(t)$ 与阀杆等效截面积 A 的比值,则系统开环传递函数可近似写为:

$$G_1 = \frac{X(s)}{P_1(s)} = \frac{A}{ms^2 + cs + k} = \frac{A/m}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3)$$

1.2 气动执行器数学模型

收稿日期:2015年9月

薄膜气缸可以等效为一个气动阻容环节,当输入压力信号发生变化后,其输出压力也随之发生变化,其充放气过程频率的快慢取决于气动阻容环节的时间常数 T_2 。微分方程为:

$$T_2 \frac{d(\Delta p_2)}{dt} + \Delta p_2 = \Delta p_3 \quad (4)$$

通过分析,气动执行器是一个具有纯滞后的惯性环节,传递函数可近似表示为:

$$G_2 = \frac{p_2(s)}{p_3(s)} = \frac{K}{T_2 s + 1} e^{-\tau s} \quad (5)$$

式中: p_2 为气动执行器输出压强; p_3 为气动执行器输入压强,即先导式电/气比例阀输出压强; T_2 为气动阻容环节的时间常数, $T_2 = RC$, 其中 R 为气路气阻, C 为气路气容; K 为放大因数; τ 为时间常数; s 为拉氏因子。

1.3 先导式电/气比例阀数学模型

由于气体的流动状态复杂,为了更好地分析和研究气动系统的特性,简化模型如图3所示。在以下的分析中,作如下假设:工作介质为理想气体,系统泄露忽略不计,气源压力、大气压力及环境均恒定不变,气腔内外没有热交换。

1.3.1 阀芯的力平衡方程

对比例阀主阀芯进行充气 and 排气两种状态下的受力分析(图3),可得系统动力学微分方程如下:

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + k(x_0 + x_1) = P_1 A_1 - P_0 A_0 - F_m \quad (6)$$

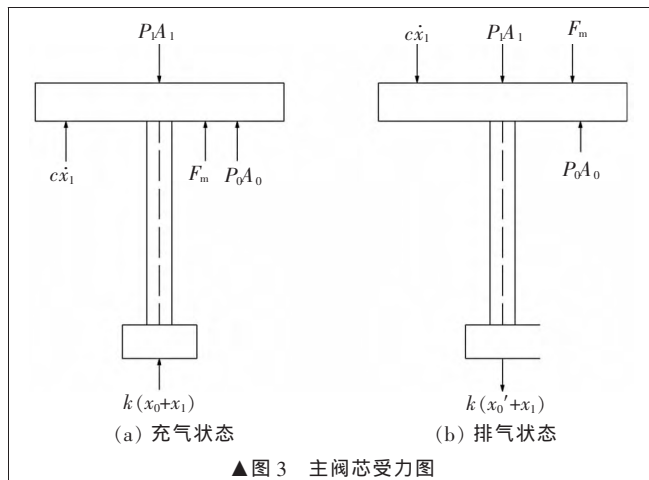
式中: A_1 为主阀芯顶部有效截面积; A_0 为主阀芯底部有效截面积; k 为系统等效刚度; P_1 为先导腔压力; P_0 为比例阀输出压力; x_1 为弹簧压缩量; x_0 为弹簧预压缩量; c 为系统阻尼系数。

1.3.2 流量连续性方程

根据质量守恒定律,流入容腔的气体质量流量等于容腔的质量变化率,即:

$$G = \frac{d}{dt}(\rho V) \quad (7)$$

式中: G 为气缸的气体质量流量; ρ 为气体密度; V 为气



▲图3 主阀芯受力图

缸的体积。

根据理想气体的状态方程,可得气体压强和气体密度之间的关系为:

$$PM = \rho RT \quad (8)$$

式中: T 为理想气体温度; R 为理想气体常数; M 为摩尔质量; P 为气体压强。

根据热力学第一定律,对密闭气罐而言:

$$c_p G T - P \frac{dV}{dt} + \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(c_v \rho V T) \quad (9)$$

式中: $c_p G T$ 为气体介质的内能; $P \frac{dV}{dt}$ 为单位时间内气体体积变化所作的功; $\frac{dQ}{dt}$ 为单位时间内气体通过罐壁与外界进行的热交换; c_p 为比定压热容; c_v 为比定容热容。

根据之前的假设和假设气体进入气缸后立即充满全腔,可知 $P \frac{dV}{dt} = 0$, $\frac{dQ}{dt} = 0$, 等式右边为气缸内气体内能的总变化量。又气体比热比 $r = c_p / c_v$, $R = c_p - c_v$, 由式(8)和式(9)得:

$$G = \frac{MV}{rRT} \frac{dP}{dt} \quad (10)$$

1.3.3 先导式电/气比例阀阀口流量方程

假设气体通过阀口时的流动为理想气体通过收缩喷管的一维等熵流动,则通过阀口进/出比例阀的气体质量流量由阀前阀后的压差和阀口的有效面积决定。根据 Sanville 流量公式,气体质量流量 G 表示为:

$$G = c_q A_q p_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \varphi\left(\frac{p}{p_s}\right) = c_q w x_v p_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \varphi\left(\frac{p}{p_s}\right) \quad (11)$$

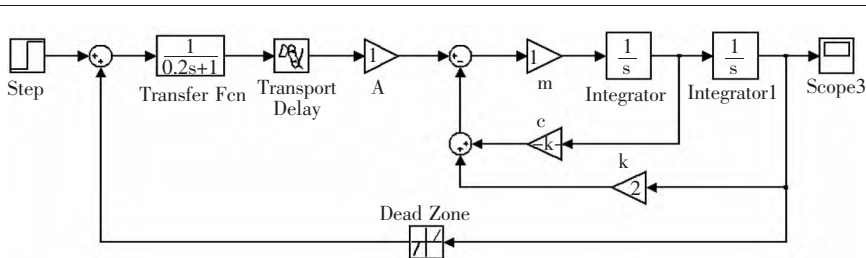
$$\varphi\left(\frac{p}{p_s}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{r}{r-1} \left[\left(\frac{p}{p_s}\right)^{\frac{2}{r}} - \left(\frac{p}{p_s}\right)^{\frac{r+1}{r}} \right]} & 0 \leq \left(\frac{p}{p_s}\right) \leq 1 \\ \left(\frac{2}{r+1}\right)^{\frac{r}{r-1}} \sqrt{\frac{r}{r+1}} & \end{cases} \quad (12)$$

式中: c_q 为流量系数; A_q 为比例阀阀口有效面积; w 为比例阀开口面积梯度; x_v 为主阀芯的位移; p_s 为气源压力; p 为气缸内压力; r 为等熵指数。

2 系统的 MATLAB 仿真

笔者采用仿真工具 MATLAB 的 Simulink 工具包,它能够提供一个动态系统建模、仿真和综合的集成环境,通过直观的鼠标操作,可完成控制框图的搭建。

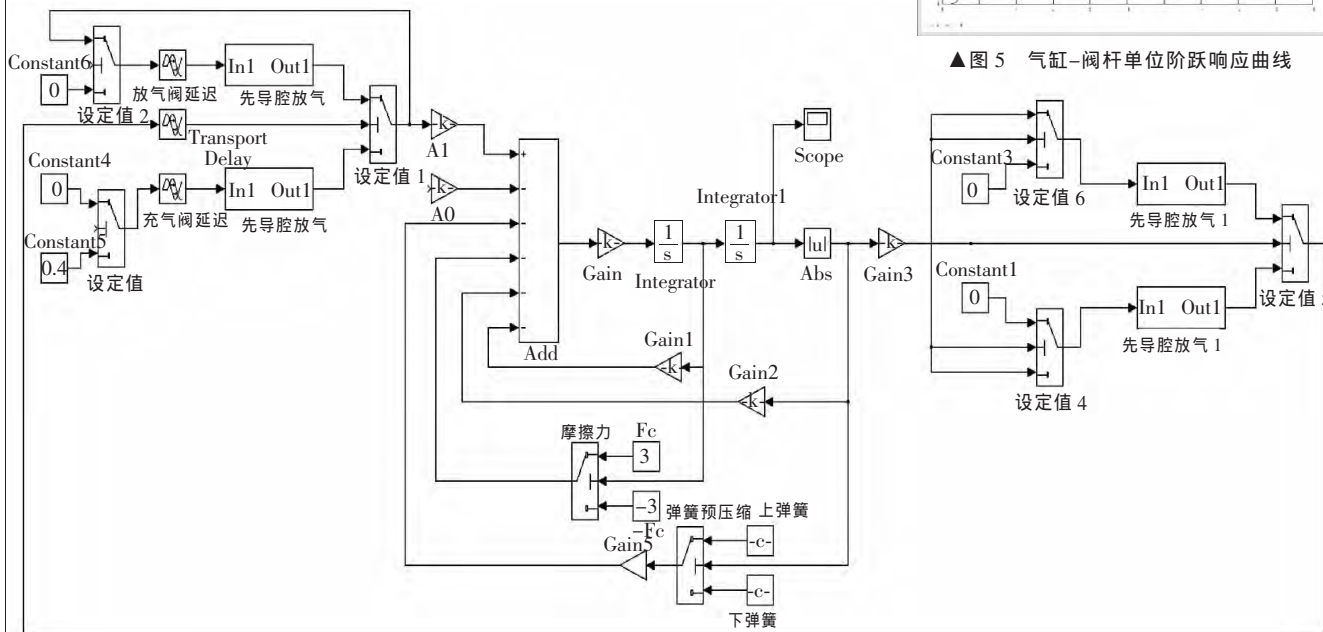
通过上述建立式(3)和式(5)数学模型,在 Simulink 中搭建如图4所示的控制框图,系统单位阶跃函数曲线如图5所示。由图5可见,气缸-阀杆系统的单位阶跃响应曲线在迅速到达稳定后有一定的超调量(或最大偏差),再通过几次小幅振荡,最终达到稳定。



▲图4 气缸-阀杆控制框图



▲图5 气缸-阀杆单位阶跃响应曲线



▲图6 比例阀控制系统框图

再根据式(9)~式(11),搭建如图6所示的控制系统框图,结合图4的控制系统,就可得到阀门定位器的气动传动控制仿真系统。

当负载容器的容积为1.1 L和0.005 L时,比例阀压力响应的仿真曲线如图7所示,与供应商公司提供的样本曲线对比后,证明了本次数学建模基本正确。为下一步阀门定位器控制算法的研究和控制精度的提高奠定了理论基础。

3 结论

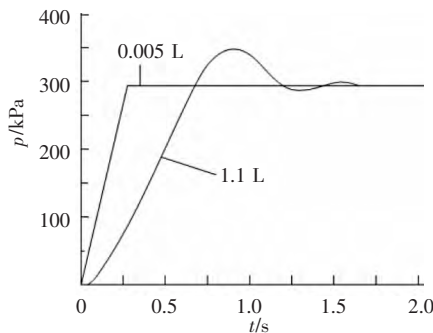
从图5和图7中的曲线可以看出,气缸-阀门系统和比例阀系统都存在死区,分析得知,这主要是由以下原因造成的。

(1) 调节阀出厂时,填料的多少和材料的性质都可以影响静摩擦力的大小,在上述研究过程中,已将静摩擦力并入死区中。

(2) 在研究的过程中,将介质气体假设为理想气体(实际上并不是),这也是造成死区的原因之一。

由数学模型的建立过程和MATLAB仿真曲线可以看出,不同负载容量,影响了比例阀的压力控制系统

响应程度,同时,电/气比例阀输入气压的大小由PWM控制,使曲线会有一定程度的波动。为了提高控制系统的精度和改善



▲图7 不同负载比例阀压力响应曲线

系统动态响应程度,实现系统的快速响应和无超调,研究更好的控制算法和闭环控制的设置是关键,本次气动调节阀阀门定位器的双反馈设计就是为了优化自动调节系统而设置的。因此,本次系统数学模型的建立和仿真过程,为后续的研究工作打下了一定的理论基础。

参考文献

- [1] 张利平. 液压气压传动与控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012.
- [2] 彭光正, 张宏立, 高爽, 等. 基于一次填充法的调压阀流量

特性测量[J].机械工程学报,2007,43(9):57-60.

[3] 王正林.Matlab/Simulink 与控制系统仿真[M].北京:电子工业出版社,2005.

[4] SMC(中国)有限公司.现代实用气动技术[M].北京:机械工业出版社,1998.

[5] Messina A, Giannoccaro N I, Gentile A. Experimenting and Modeling PWM -based Pneumatic Actuators [J]. Mechatronics, 2005, 15(7):859-881.

[6] 董胜,孙永山,王利鹏.MSP430F149 单片机在基于现场总线的智能差压变送器设计中的应用 [J].仪表技术与传感

器,2006(1):48-49.

[7] 时光.智能电-气阀门定位器智能控制策略研究 [D].重庆:重庆大学,2011.

[8] Wang J, Wang D J D, Moore P R, et al. Modelling Study, Analysis and Robust Servo Control of Pneumatic Cylinder Actuator System [J]. Control Theory and Applications, 2001, 148(1): 35-41.

[9] 李东明,孙宝元,张化岚.压电式电气转换装置实验研究 [J].大连理工大学学报,2003,43(6):771-774. ▲

(编辑 平平)

(上接第 21 页)

大回转架的接触表面增加刚度和强度。

参考文献

[1] 董思民,蒋国强,杜涵文.质子治疗装置大回转架支撑驱动系统的运动机理及其分析[J].核技术,2012,35(3):226-230.

[2] K L Johson.接触力学[M].徐秉业,罗学富译.北京:高等教育出版社,1991.

[3] 王和慧,谢可迪,陈一凡,等.大型回转窑筒体结构的力学行为分析[J].机械强度,2010,32(4):606-616.

[4] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M].西安:西北工业大学出版社,1999.

[5] 王和慧,程静,周金水.大型回转窑支承系统的力学行为分析[J].机械强度,2012,34(1):77-85. ▲

(编辑 小前)

世界领先的工业技术贸易展

——汉诺威工业博览会明年 4 月举行

在“产业集成——发现解决方案!”的主题下,2016 汉诺威工业博览会将展示 100 多项全面的工业 4.0 产品——即可以帮助中国企业提高竞争力的 100 种切实可行的解决方案。

汉诺威工业博览会汇集 5 000 家参展企业和来自 100 个国家和地区的 20 万名观众参与,2016 年展会包含五大专业主题展:工业自动化展、数字化工厂展、能源展、工业零部件与分承包技术展、研究与技术展,近 1 000 场的同期论坛、研讨会和圆桌会议等将提供大量有关工业 4.0、增材制造技术、能源效率、轻质材料、预见性维护和技术转让等主题的信息。

自从 2012 年成为合作伙伴国以来,中国已成长为汉诺威工业博览会的第二大展览和参观国,与此同时,中国的劳动力成本逐渐上升,客户变得更有经验。今天,中国制造商需要在极端压力下提高质量和效率,以稳定市场份额。汉诺威工业博览会是世界领先的工业 4.0 展会,来自亚洲、欧洲和美国的所有专家都会参与到其中,制造业数字化是论坛和讲座的第一主题,对于中国企业而言,通往未来工厂之路始于汉诺威。

数字化在能源工业中同样占据重要地位,因为未来要建立完善的能源系统,需要可控制、网络化和智能化的生成和存储技术,以及网络资源。中国是世界上最大的能源消费国和生产国,目前,中国越来越关注能源效率和可持续性,正大力投资可再生能源项目,但是它将继续严重依赖以煤炭为主的传统能源。汉诺威工业博览会将展示各类常规和可再生能源技术,所以中国能源行业的观众一定能在此发现最好的解决方案。

合作伙伴国美国;工业互联网遇见工业 4.0

工业 4.0 还是工业互联网?当德国正津津乐道于工业 4.0 时,美国企业正在探讨工业互联网,两者意义相同吗?是,也不是。工业 4.0 和工业互联网均涉及与机器、数据和人类之间的连接,但方法和目标不同。工业 4.0 侧重于硬件,而工业互联网强调软件;工业 4.0 是德国提出的理念,而工业互联网是一个全球性现象;工业 4.0 仅限于制造业,而工业互联网适用于各行各业。

那么,中国如何融入其中?在 2016 汉诺威工业博览会上,中国参与者将获得与来自世界最大经济体的企业和政治家会面的机会,对比德国与美国的理念和观点,并且展示中国智能制造的愿景。在汉诺威工业博览会上,美国的工业互联网联盟(IIC)首次联手德国机械设备制造业联合会(VDMA)、德国电气和电子制造商协会(ZVEI)以及弗劳恩霍夫协会等德国领先的机构。此外,法国、荷兰、意大利和英国将推出类似的制造业政策。对于中国观众和参展商而言,这是评估各种策略的一个好机会。中国本身作为硬件和软件的生产国,将吸引诸多的关注。

汉诺威工业博览会——领先一步,掌握新技术!

世界领先的工业技术展会——2016 汉诺威工业博览会将于 2016 年 4 月 25-29 日在德国汉诺威举行,包含五大专业主题展:工业自动化展、数字化工厂展、能源展、工业零部件与分承包技术展、研究与技术展,重点关注四大主题板块:工业自动化与信息技术;能源与环保技术;工业供给、生产工艺与服务;研究与发展。美国成为 2016 汉诺威工业博览会官方合作伙伴国。