

基于 AMESim 的先导膜片式 电磁阀动态特性仿真

徐登伟, 尤裕荣, 袁洪滨, 赵双龙
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了先导膜片式电磁阀的结构及工作原理, 建立了其多物理过程耦合的数学模型, 利用 AMESim 软件建立了先导式电磁阀动态仿真模型, 研究了节流孔、工作压力、弹簧刚度及弹簧力对先导膜片式电磁阀动态响应的影响。结果表明: 节流孔对响应时间的影响因素较大, 随着节流孔的增大, 阀门的打开响应时间越长, 关闭响应时间越短。该分析方法可应用于先导式电磁阀的设计和分析, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 先导膜片式电磁阀; 动态特性; AMESim; 仿真

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 04-0041-05

AMESim-based simulation analysis on dynamic characteristics of pilot-operated diaphragm solenoid valve

XU Dengwei, YOU Yurong, YUAN Hongbin, ZHAO Shuanglong
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The mechanical structure and working principle of a pilot-operated diaphragm solenoid valve are introduced. A mathematical model for coupling of multi-physical processes is set up. The AMESim-based dynamic simulation model of the pilot-operated solenoid valve is built. The influences of throttling orifice, work pressure, spring stiffness and spring force on the dynamic response characteristics of the pilot-operated diaphragm solenoid valve are analyzed. The results show that throttling orifice has a great influence on the response time of the pilot-operated diaphragm solenoid valve, and the opening response time prolongs and the close response time decreases with increase of the throttling orifice. The method in this paper can be applied to the design and analysis of pilot-operated solenoid valve, and has a certain value in engineering application.

Keywords: pilot-operated diaphragm solenoid valve; dynamic characteristic; AMESim; simulation

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2015-10-11

基金项目: 基础科研项目(JCKY2016203C050)

作者简介: 徐登伟 (1985—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

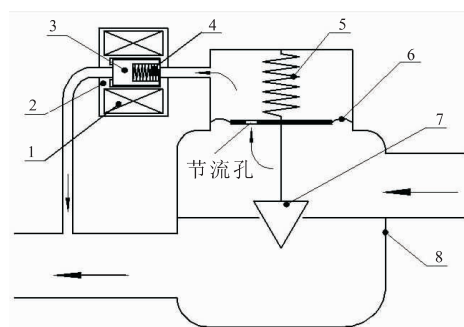
0 引言

电磁阀作为开关执行元件,控制流体的通断,是一种低成本、低能耗、快响应、自动化的产品,在航天、航空、石化、汽车等行业大量应用。随着科技的发展,工业规模的扩大,工业生产呈现大容量、高参数的趋势,对电磁阀的工作压力要求愈来愈高,对通径要求愈来愈大。国内外在高压、大通径时,一般采用先导阀的结构,应用导阀带动主阀,从而巧妙的利用介质力来工作,实现大流量。根据结构形式的不同,先导式电磁阀可分为膜片式结构和活塞式结构。由于膜片承压能力有限,与活塞式结构相比,膜片式结构工作压力相对较低,但膜片式电磁阀具有感压元件有效面积大、体积小、重量轻等优点,适用压力相对较低,流量较大的工作场合。

本文以研发的先导膜片式电磁阀为研究对象,介绍了其结构及工作原理,建立了包含气体流动、机械运动和电磁力变化等物理过程的数学模型,并利用 AMESim 软件对先导膜片式电磁阀进行了动态仿真。

1 先导膜片式电磁阀的工作原理

先导膜片式电磁阀结构如图 1 所示。



1-线圈; 2-导阀体; 3-导阀芯; 4-导阀复位弹簧;
5-主阀复位弹簧; 6-膜片; 7-主阀芯组件; 8-主阀体

图 1 先导膜片式电磁阀结构原理示意图

Fig. 1 Structure and principle of pilot-operated diaphragm solenoid valve

该阀主要由主阀体、导阀(电磁阀)、主阀芯、膜片等组成,工作介质一般是空气、氮气、

天然气、水等,与普通电磁阀相比,其优点是主阀的开度与线圈的电磁吸力无关,只与介质压力产生的压差相关,因此,能够满足高压、大流量的要求。

阀工作原理是:当给线圈通电时,线圈产生足够的电磁力克服弹簧和介质压力,驱动导阀芯运动,导阀打开,主阀芯上腔压力迅速下降,并形成上低下高的压差,在介质力的作用下推动主阀芯克服弹簧力向上移动,主阀打开;当线圈断电时,电磁力消失,导阀芯在弹簧力和介质压力作用下复位,并形成密封,导阀关闭,入口压力通过节流孔在主阀芯上腔迅速建压,当压力达到平衡时,主阀芯在复位弹簧力作用下向下运动,最终在介质力和弹簧力的共同作用下与阀座形成密封,主阀关闭。

2 数学模型

先导式电磁阀的动态特性受电磁变化、机械运动、气体流动等因素影响,其数学模型可分为电磁模型、机械运动模型和气路模型。为简化计算作以下假设:

- 1) 忽略衔铁及非工作气隙磁阻;
- 2) 忽略电磁阀及其内部气体与外界环境间的传热过程的影响;
- 3) 流体为理想气体,节流前后温度不变;
- 4) 工作过程中节流截面流量系数不变。

2.1 电磁路模型

电磁铁电路微分方程按(1)式计算^[2-3]:

$$U = iR_w + N_w \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

式中: U 为线圈电压, V; i 为线圈电流, A; R_w 为线圈电阻, Ω ; N_w 为线圈匝数, 匝; t 为通电时间, s; Φ_m 为磁通量, Wb。

根据基尔霍夫磁压定律, 可得出磁路计算的数学模型, 即

$$iN_w = \Phi_\delta R_\delta + H_m L_m \quad (2)$$

式中: Φ_δ 为气隙处的磁通量, Wb; R_δ 为气隙磁阻, Ω ; H_m 为磁场强度, A/m; L_m 为磁路长度, m。

联立方程(1)和(2), 根据麦克斯韦尔电

磁吸力公式, 先导阀电磁衔铁的吸力公式为:

$$F = \frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S} \quad (3)$$

式中: S 为气隙处的磁极面积, m^2 ; μ_0 为真空磁导率, H/m 。

2.2 运动模型

先导式电磁阀的运动模型包括先导阀和主阀 2 部分的运动模型。

2.2.1 先导阀运动模型

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = F_{dx} - F_{dt1} - F_{dy} - F_{df} \quad (4a)$$

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = F_{dt2} + F_{dy} - F_{df} \quad (4b)$$

式中: m_d 为电磁阀衔铁 (衔铁) 质量, kg ; F_{dx} 为电磁吸力, N ; F_{dt1} 为弹簧安装力, N ; F_{dt2} 为弹簧工作力, N ; F_{dy} 为液压不平衡力, N ; F_{df} 为摩擦力, N 。

式 (4a) 为阀芯吸合过程运动件运动方程, 式 (4b) 为阀芯释放过程运动件运动方程。

2.2.2 主阀运动模型

式 (5a) 为主阀芯打开过程运动方程, 式 (5b) 为主阀芯关闭过程运动方程。

$$m_z \frac{dv_z}{dt} = F_{zy1} - F_{zt1} - F_{zf} \quad (5a)$$

$$m_z \frac{dv_z}{dt} = F_{zy2} + F_{zt2} - F_{zf} \quad (5b)$$

式中: m_z 为主阀芯组件质量, kg ; F_{zt1} 为主阀弹簧安装力, N ; F_{zt2} 为主阀弹簧工作力, N ; F_{zy1} 和 F_{zy2} 为液压不平衡力, N ; F_{zf} 为摩擦力, N 。

2.3 气路模型

先导膜片式电磁阀包含 4 个控制腔, 分别为主阀芯上下 2 个腔和导阀芯左右 2 个腔。主阀左右 2 个腔通过膜片上的节流孔连通, 导阀芯上下 2 个腔通过导阀芯上的涡流槽连通。根据能量守恒和质量守恒可得各个控制腔内气体状态变化的微分方程如下:

$$V \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dt} + V \left(\frac{\partial p}{\partial p} \right)_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} - \rho A \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

$$\left[m \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - V \right] \frac{dp}{dt} + m \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} (h_{in} - h_{out}) \quad (7)$$

式中: ρ 为腔内气体的密度, kg/m^3 ; T 为腔内气体的温度, K ; p 为控制腔内气体的压力, Pa ; h 为腔内气体的焓, J ; h_{in} 和 h_{out} 分别为流进和流出控制腔的气体焓, J ; Q_{in} 和 Q_{out} 分别为流入和流出控制腔的气体流量, kg/s ; m 为腔内气体的质量, kg ; x 为主阀芯或导阀芯的位移, m ; V 为控制腔体积, m^3 ; A 为控制腔截面积, m^2 。

阀内各控制腔之间的气体通道以及电磁阀出入口按节流孔进行处理, 流入和流出控制腔的气体质量流量按气体经过节流截面的流量公式计算。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真模型的建立

AMESim 是一种高级建模仿真软件, 具有丰富的模型库, 利用各个模块的组合, 能方便、准确地建立动态系统的计算机模型。先导膜片式电磁阀由导阀和主阀组成, 涉及电、磁、机、气多个领域知识, 本文基于 AMESim 软件建立先导膜片式电磁阀的物理模型, 如图 2 所示。通过调用各个模块的参数, 并利用分析工具, 可以直观清楚的分析出电流、响应时间、位移等各个动态量的变化信息。

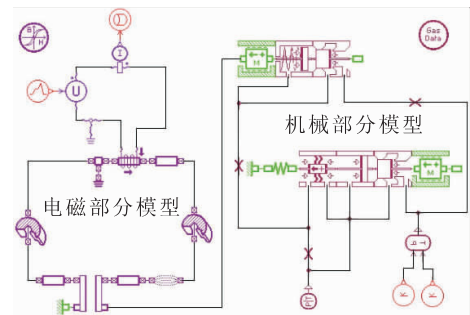


图 2 先导膜片式电磁阀仿真模型

Fig. 2 AMESim-based simulation model of pilot-operated diaphragm solenoid valve

由图 2 可知, 此模型涉及 AMESim 中的气动、电磁、机械、信号等模型库, 根据阀门的结构和研究对象选择合理的子模型, 然后根据具体结构尺寸设置参数, 完成建模后设置仿真参数, 步长设为 0.0001 s , 仿真模式为动态仿真。计算

时，按下表进行参数设置。设置 $t=1\text{ s}$ 时刻线圈电压为 24 V （通电）， 1.4 s 后线圈电压为 0 V （断电），仿真总时间为 3 s 。

表 1 先导膜片式电磁阀主要结构及工况参数

Tab. 1 Main structure and parameters of pilot-operated diaphragm solenoid valve	
名称	数值
通径/mm	13
入口压力/MPa	1.2
出口压力/MPa	0.1
工作电压/V	24
线圈匝数/匝	2 210
线圈电阻/ Ω	74.5

3.2 导阀对响应特性的影响

先导膜片式电磁阀的响应时间由导阀响应时间和主阀芯运动时间两部分组成，因此，提高导阀的响应时间有助于加快阀门的响应。仿真可知导阀打开响应时间 15 ms ，关闭响应时间 43 ms ，关闭比打开时间长，这是由于线圈断电时，电流释放较慢，占用了部分时间，导致关闭时间延长。

由图 3 可知，先导膜片式电磁阀工作初期，主阀自身有一打开、关闭的过程，此时导阀虽未通电动作，但由于主阀膜片上腔无介质压力，介质充填瞬间，膜片下腔压力大于上腔压力，主阀打开；随着介质的充填，膜片上、下腔压力逐渐平衡，主阀芯在复位弹簧力的作用下自动关闭，这种现象只在阀门工作初期才会出现，当阀门正常工作后，该现象就会消失，其持续时间的长短与膜片上腔建压速率密切相关。从仿真曲线可以看出，主阀打开响应时间 136 ms ，关闭响应时间 158 ms ，而导阀打开、关闭的响应时间分别占总响应时间的 11% 和 27% ，相对而言，导阀关闭响应时间对主阀响应时间影响更大一些。通过分析，增大导阀复位弹簧力或增加释放电路的方法，可有效减少导阀的关闭响应时间，从而在一定程度上降低导阀对响应特性的影响。

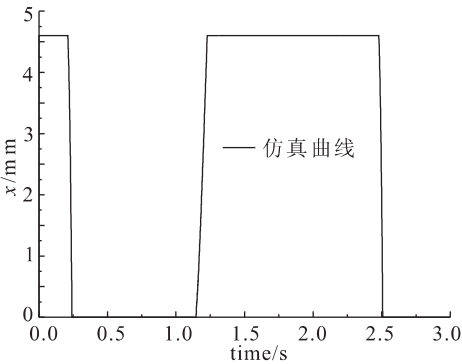


图 3 主阀响应时间曲线
Fig. 3 Curve for response time of leading valve

3.3 节流孔对响应特性的影响

由图 4 可以看出，当节流孔 0.8 mm 时，主阀打开响应时间 63 ms ，关闭响应时间 780 ms ；当节流孔 1.5 mm 时，主阀打开响应时间 228 ms ，关闭响应时间 107.5 ms 。随着节流孔的增大，阀门的打开响应时间越长，关闭响应时间越短。说明当节流孔增大时，膜片上腔通过导阀的泄压速率和节流孔的建压速率越接近，导致阀门打开时间延长。关闭时，膜片上腔建压的速率相应加快，有利于主阀芯的关闭，阀门的关闭时间越短。

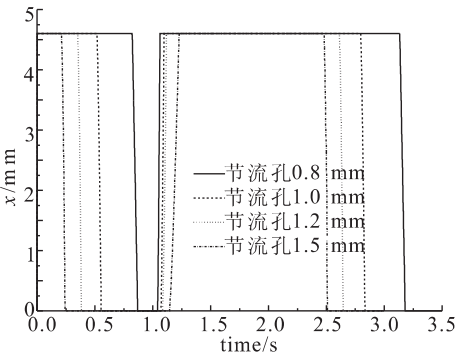


图 4 节流孔对响应特性的影响
Fig. 4 Influence of throttling orifice on response characteristics

3.4 入口压力对响应特性的影响

由图 5 可以看出，当入口压力为 $0.3\sim 1.2\text{ MPa}$ 时，主阀打开响应时间为 $228\sim 234\text{ ms}$ ，关闭响应时间为 $107.5\sim 120\text{ ms}$ ，说明入口压力在一定范围内变化时，对阀门响应时间的影响较小；当入口压力降低至 0.2 MPa 时，膜片上腔泄压速率变慢，

导致打开响应时间增大, 此时主阀打开响应时间 823 ms, 关闭响应时间 180 ms; 说明工作压差较小时, 入口压力的变化对主阀打开响应时间影响较大, 关闭过程由于主阀芯受弹簧力和介质力的共同作用, 特别是在低压工况下, 入口压力的变化对关闭响应时间的影响相对较小。

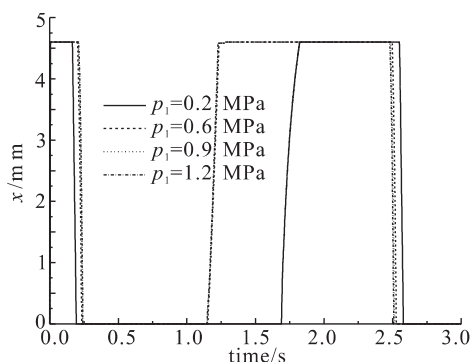


图 5 工作压力对响应特性的影响

Fig. 5 Influence of working pressure on response characteristics

3.5 弹簧刚度对响应特性的影响

由图 6 可以看出, 当弹簧刚度为 2.5 N/mm 时, 主阀打开响应时间 228 ms, 关闭响应时间 107.5 ms; 当弹簧刚度为 7 N/mm 时, 当主阀打开响应时间 1 100 ms, 关闭响应时间 101 ms。随着主阀复位弹簧刚度的增大, 阀门打开响应时间增大, 关闭响应时间几乎保持不变。弹簧刚度的增大导致膜片上腔泄压速率变慢, 致使打开响应时间延长。关闭过程, 由于膜片有效面积较大, 介质作用力远大于弹簧力, 因此, 弹簧刚度的变化对阀门关闭响应时间影响不大。

3.6 弹簧力对响应特性的影响

由图 7 可以看出, 当弹簧力为 2.5 N 时, 主阀打开响应时间 228 ms, 关闭响应时间 107.5 ms; 当弹簧力为 30 N 时, 当主阀打开响应时间 1080 ms, 关闭响应时间 97 ms。随着主阀复位弹簧力的增大, 阀门打开响应时间增大, 关闭响应时间减小。弹簧力的增大导致膜片上腔泄压速率变慢, 致使打开响应时间延长。当弹簧力增大到一定值时, 主阀芯将无法开启。关闭过程, 由于介质作用力远大于弹簧力, 因此, 弹簧力的变化

对阀门关闭响应时间影响不大。

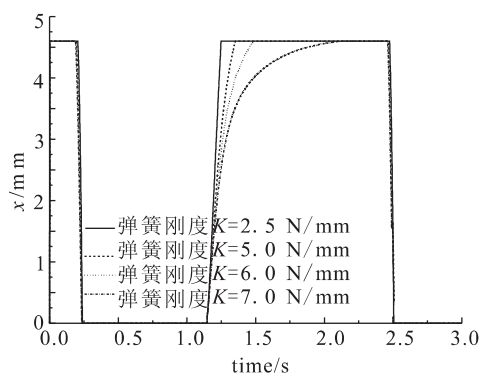


图 6 弹簧刚度对响应特性的影响

Fig. 6 Influence of spring stiffness on response characteristics

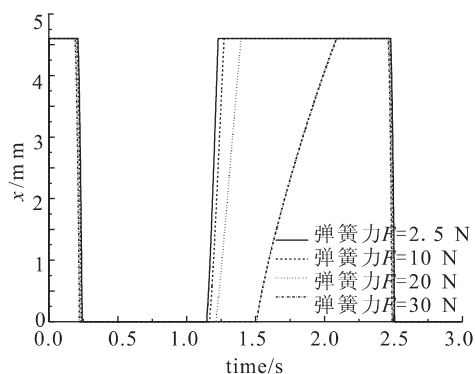


图 7 弹簧力对响应特性的影响

Fig. 7 Influence of spring force on response characteristics

4 结论

通过 AMESim 软件对先导膜片式电磁阀进行仿真, 分析了各参数对其动态特性的影响。先导膜片式电磁阀的响应特性与膜片上腔建压速率密切相关, 节流孔对响应时间的影响因素较大, 随着节流孔的增大, 阀门的打开响应时间越长, 关闭响应时间越短; 入口压力在一定范围内变化时, 对阀门响应时间的影响较小; 随着弹簧刚度、弹簧力的增大, 阀门打开响应时间增大, 关闭响应时间几乎保持不变。因此, 先导膜片式电磁阀设计时需关注导阀阀座孔径与节流孔径的匹配关系, 根据系统需求选择合适的匹配关系。(下转第 56 页)

(上接第 45 页)

参考文献：

- [1] WALLER J M, ROTH T E. Causes and mitigation of fuel valve pilot seal extrusion in space shuttle orbiter primary RCS thrusters. AIAA2004-4149[R]. Fort Lauderdale, Florida: AIAA, 2004.
- [2] 王宝龄. 电磁电器设计基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] 娄路亮, 王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(1): 40-45.
- [4] 陈亮, 梁国柱. 基于 AMESim 的电磁阀工作过程动态特性建模与仿真[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(3): 49-54.
- [5] 戴佳, 黄敏超, 余勇, 等. 电磁阀动态响应特性仿真研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 41-48.
- DAI Jia, HUANG Minchao, YU Yong, et al. Simulation on the dynamic response characteristics of solenoid valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(1): 41-48.
- [6] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.
- [7] 袁洪滨, 张民庆, 孙彦堂. 基于 AMESim 的直动式电磁阀动态特性仿真研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 30-35.
- YUAN Hongbin, ZHANG Minqing, SUN Yantang. AMESim-based simulation analysis of dynamic characteristics of direct-acting solenoid valve[J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(5): 30-35.
- [8] 王秋霞, 樊丁, 彭凯. AMESim 仿真技术在高速电磁阀中的应用[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 702-707.

(编辑：陈红霞)