

基于 AMESim 的往复作动活塞缸性能仿真研究

赵双龙, 袁洪滨, 王运卯, 赵文华
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了某介质联合供应系统, 对其中的关键部件——往复作动活塞缸的工作原理进行了说明。建立该系统的仿真模型, 模拟了不同介质时活塞缸的工作性能。仿真分析了出口负载、气瓶压力、泵出口压力对活塞缸性能的影响。仿真结果表明该系统可以正常工作, 但需要在使用过程中正确匹配气瓶压力和泵出口压力。

关键词: 联合供应系统; 往复作动活塞缸; 性能仿真

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0036-05

Performance simulation of reciprocating piston actuator based on AMESim

ZHAO Shuang-long, YUAN Hong-bin, WANG Yun-mao, ZHAO Wen-hua
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A combined feed system is introduced. The working principle of the reciprocating piston actuator which is the key component of the system is described. A simulation model of the system was established. The performance of the actuator was simulated when the mediums were liquid and gas. The influence of outlet load, gas cylinder pressure and pressure at pump outlet on performance of the piston actuator are analyzed. The result shows the system works reliably, but the pressure of gas cylinder and the pressure at pump outlet need to be matched in the process of application.

Keywords: combined feed system; reciprocating piston actuator; performance simulation

0 引言

液压/气动系统工作介质的供应方式常见的有泵压式和挤压式两种, 而采用泵压、挤压的联合供应系统可以充分结合泵压和挤压供应方式各自

的优点, 使其既可实现试验机构连续工作, 又可适应脉冲式工作、变工况工作和多次重复工作等。往复作动活塞缸是该联合供应试验系统的关键部件, 其工作性能直接影响到整个系统的工作性能。AMESim 仿真软件可方便对作动、增压等系统性能进行研究^[1-3]。本文基于 AMESim 仿真软

收稿日期: 2012-06-16; 修回日期: 2012-07-27

作者简介: 赵双龙 (1981—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门技术

件, 建立了联合供应系统的仿真模型, 对其增压、启动、停止等性能以及影响因素进行了仿真研究, 得到了往复作动活塞缸的工作特性。

1 系统工作原理

联合供应试验系统的工作原理如图 1 所示。为实现工作介质的联合供应, 设计、研制了一种可往复作动的活塞缸, 活塞缸主要设置了如下两个功能:

- 1) 采用高压气体挤压活塞缸 A 腔方案。达到挤压供应的目的。
- 2) 采用机械行程自动控制方案。活塞缸头部的二位三通换向阀可根据活塞行程即 A 腔容积的变化, 自动切换截止阀控制腔的通道, 在活塞缸工作过程中, 当液腔即 A 腔充满时, 换向阀将截止阀的控制腔接通低压, 截止阀关闭, 此时供应系统切换至挤压状态; 当活塞缸 A 腔排空时, 换向阀将截止阀的控制腔接通高压, 截止阀打开, 此时供应系统切换至泵压状态, 同时, 活塞缸 A 腔开始充填介质, 直到介质充满时再开始一个新的循环。换向阀通过感应活塞缸 A 腔容积的变化, 控制截止阀打开和关闭, 不需要外部再提供控制系统及能源即可实现泵压和挤压的切换。

该联合供应系统还包括泵、高压气瓶、控制阀和截止阀等组件。

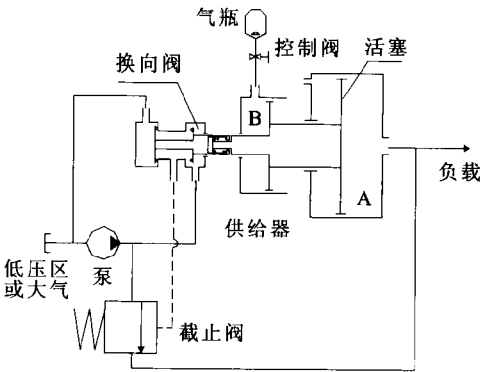


图 1 供应系统工作原理图
Fig. 1 Working principle of feed system

2 活塞缸特性仿真研究

供应系统的工作介质既可以是液体介质, 也可以是气体介质, 考虑气、液仿真模型的差异以及往复作动活塞缸特性的差异。本文分别介绍两种介质活塞缸的工作特性。

2.1 液体介质时活塞缸特性仿真研究

液体介质时供应系统的 AMESim 仿真模型如图 2 所示, 图中截止阀、换向阀、气瓶、活塞缸 A、B 腔等对应图 1 供应系统中的组件, 活塞缸和截止阀中各结构参数设置均按照两组件的实际参数设定。仿真过程中的边界条件如表 1 所示, 其中出口电磁阀在 0~1 s, 3.5~6.5 s 和 7.8~9.8 s 为关闭状态, 以模拟负载关闭和开启过程中活塞缸乃至整个供应系统的工作情况。

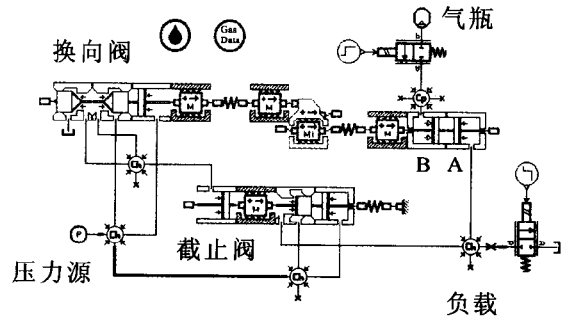


图 2 液体介质时供应系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of feed system for liquid medium

表 1 仿真计算边界条件

Tab. 1 Boundary condition of simulation computation

工作介质	气瓶压力 /MPa	气瓶电磁阀 开启时刻 /s	泵出口压力 /MPa
水	22	0.8	8

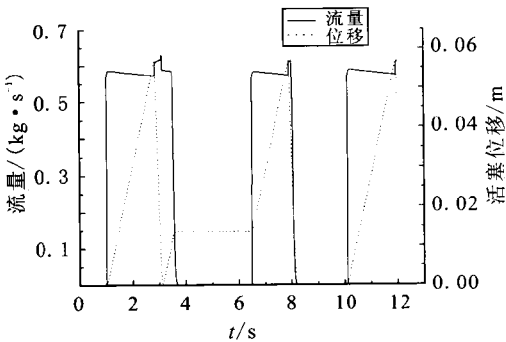
图 3(a)和图 3(b)分别为系统出口流量、活塞缸活塞位移和活塞缸 A 腔压力（同活塞缸出口压力）的仿真结果。从图 3 中可以看出, 出口电磁阀打开后, 由于活塞缸 A 腔已经充满介质并且气瓶控制阀已经开启, 因此整个系统处在挤压工作状态（活塞位移逐渐增大），随着活塞缸活塞向右移动, 活塞缸 A 腔压力基本稳定, 压力略

有下降（从 7.4 MPa 逐渐降低至 7 MPa），活塞的力平衡方程如公式（1）所示，随着活塞的移动，活塞缸 B 腔容积逐渐增大，因此 B 腔气体压力以及气瓶气体压力逐渐下降，导致活塞缸 A 腔压力逐渐降低。

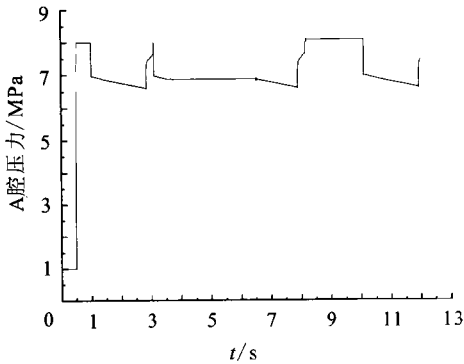
$$p_A S_A = p_B S_B + f \tag{1}$$

式中： p_A 为活塞缸 A 腔介质压力； S_A 为活塞缸 A 腔介质对活塞有效作用面积； p_B 为活塞缸 B 腔气体压力； S_B 为活塞缸 B 腔气体对活塞有效作用面积； f 为活塞摩擦力。

活塞运动至最大位移后换向阀将截止阀控制腔切换至高压，截止阀开启，泵通过截止阀向负载供应介质，供应系统切换至泵压工作状态，同时介质开始充填活塞缸的 A 腔即活塞向左移动，在泵压工作期间，活塞缸 A 腔压力与泵出口压力基本一致，约 8 MPa。从图中可以看出，整个联合供应系统工作正常，挤压工作时间约 1.7 s，泵压工作时间约 0.22 s。



(a) 系统出口流量和活塞缸活塞位移仿真曲线



(b) 活塞缸 A 腔压力仿真曲线

图 3 液体介质时活塞缸仿真结果

Fig. 3 Simulation result of piston actuator for liquid medium

从仿真结果还可以看出，当系统在挤压工作状态停止时（图 3(a) 中 3.5 s 时刻），活塞缸活塞处于静止状态，此时活塞缸 A 腔压力（即关闭压力）与活塞缸 B 腔气体压力、活塞的摩擦力等因素有关，当系统再次启动时活塞缸从停止时的状态继续工作直至换向阀自动切换至泵压系统工作；而如果系统在泵压状态工作时停止（图 3(a) 中 7.8 s 时刻），则泵压系统仍然会继续工作，直至活塞缸 A 腔充填完毕，换向阀切换，关闭泵压系统，而在下一次启动时该联合系统会从挤压系统开始新的工作循环。上述仿真结果表明该联合供应系统启动、停止过程工作正常，挤压、泵压系统切换正常。

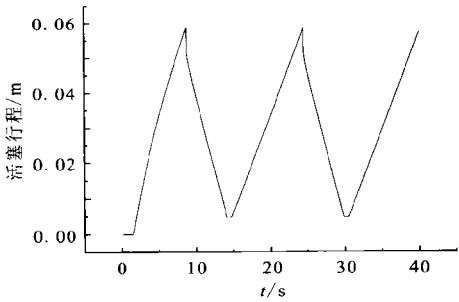
2.2 气体介质时活塞缸特性仿真研究

利用 AMESim 软件建立供应系统为气体介质时的仿真模型，仿真过程部分边界条件见表 2。

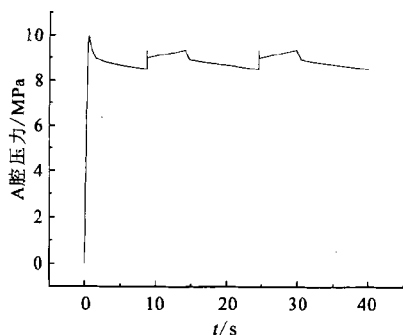
表 2 仿真计算的边界条件

Tab. 2 Boundary condition of simulation computation				
工作 介质	气瓶 压力/MPa	气源压 力/MPa	入口限流 圈/mm	出口限流 圈/mm
空气	28	23	$D=1.0$	$D=1.0$

活塞缸气体介质时活塞的行程以及 A 腔压力的仿真结果分别如图 4 所示。从仿真结果可以看出联合供应系统挤压工作时间约 8 s，泵压工作时间约 6.6 s，工作周期显著大于液体介质时的工作周期，这主要与气体介质的可压缩性有关。活塞缸 A 腔压力 8.5~9.5 MPa，与液体介质时类似，挤压工作期间 A 腔压力略低，并随着活塞的移动逐渐降低。



(a) 活塞缸活塞行程仿真曲线



(b) 活塞缸 A 腔压力仿真曲线

图4 气体介质时活塞缸仿真结果

Fig. 4 Simulation result of piston actuator for gas medium

泵压工作期间 A 腔压力略高, 并随 A 腔充填结束压力略有增加, 这同样与活塞缸 B 腔气体压力以及活塞的摩擦力等因素有关。仿真结果表明联合供应系统在工作介质为气体时工作正常。

3 影响因素仿真研究

3.1 负载对活塞缸性能影响的仿真研究

为分析不同负载时活塞缸乃至整个联合供应系统的工作性能, 利用活塞缸液体介质仿真模型对出口限流圈孔径分别为 3 mm、4 mm 和 5 mm 时活塞缸的工作情况进行了仿真, 其中泵出口压力为 8 MPa, 气瓶压力 22 MPa, 仿真结果如图 5 所示。从仿真结果可以看出, 不同的负载也即不同的出口节流圈时, 活塞缸工作正常, 联合供应系统工作周期随节流圈孔径的增大而缩短, 其中泵压工作时间基本相同, 挤压工作时间随着节流圈孔径的增大而减少。

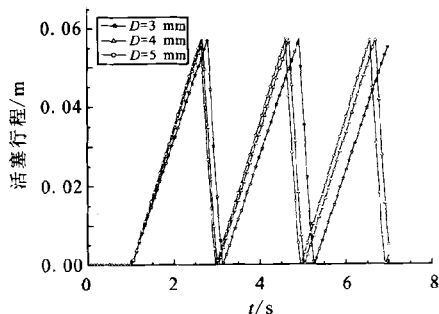
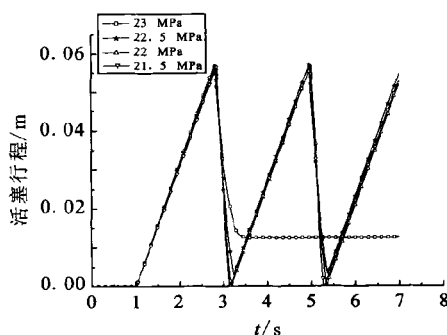


图5 不同出口节流圈时活塞缸活塞位移仿真结果

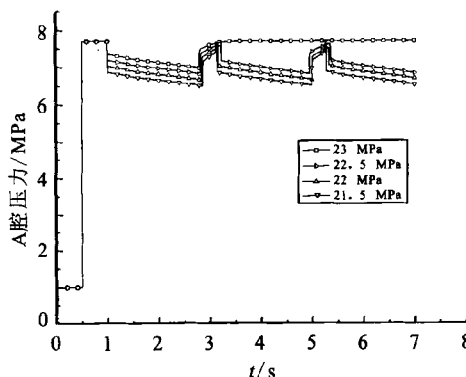
Fig. 5 Simulation results of piston displacement as different outlet throttle rings are adopted

3.2 气瓶压力对活塞缸性能影响的仿真分析

利用活塞缸液体介质仿真模型对气瓶压力分别为 23 MPa, 22.5 MPa, 22 MPa 和 21.5 MPa 时活塞缸的工作情况进行了仿真, 其中泵出口压力恒定为 8 MPa, 仿真结果如图 6 所示。从仿真结果可以看出, 当气瓶压力小于等于 22.5 MPa 时活塞缸工作正常, 但随着气瓶压力的降低, 挤压工作期间活塞缸出口压力也逐渐降低, 与泵压工作期间的出口压力偏差也增大, 即供应系统出口压力波动增大。当气瓶压力为 23 MPa (此时气、液压力比为 $23/8 \approx 2.9$) 或更高时, 挤压系统无法正常工作, 只是泵压系统在工作, 因为随着气瓶压力的升高泵出口压力无法将活塞缸活塞推到最左的位置, 换向阀无法进行正常切换, 导致挤压系统无法正常工作。



(a) 活塞位移仿真结果



(b) A 腔压力仿真结果

图6 不同气瓶压力时活塞缸仿真结果

Fig. 6 Simulation results of piston actuator at different gas pressures

3.3 泵出口压力对活塞缸性能影响的仿真研究

利用活塞缸液体介质仿真模型对泵出口压力

分别为 8 MPa, 7.7 MPa, 7.4 MPa 和 7.2 MPa 时活塞缸的工作情况进行了仿真, 其中气瓶压力恒定为 22 MPa, 仿真结果如图 7 所示。从仿真结果可以看出, 泵出口压力高于 7.7 MPa (此时气、液压力比为 $22/7.7 \approx 2.9$) 时联合供应系统工作正常, 并随着泵出口压力的增加, 泵压工作周期缩短; 随着泵出口压力的降低, 挤压系统无法正常工作, 只是泵压系统在工作, 因为泵出口压力无法将活塞缸活塞推到最左的位置, 换向阀无法进行正常切换, 导致挤压系统无法正常工作。

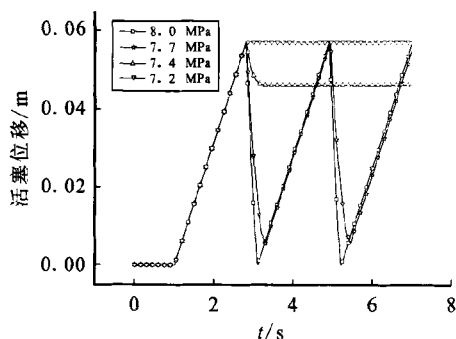


图 7 不同泵出口压力时活塞缸仿真结果

Fig. 7 Simulation result of piston actuator under different pressure at pump outlet

3.4 影响因素仿真研究小结

从影响因素仿真研究可以看出, 在一定负载流量范围内, 活塞缸以及整个联合供应系统可以可靠、正常工作, 流量越大, 系统工作周期越短; 在联合供应系统工作时, 需要匹配好泵出口压力和气瓶压力的关系, 气、液压力比大于 2.9 (根据公式 1, 忽略摩擦力时 $p_B/p_A = S_A/S_B$, 此系数主要由活塞缸 A 腔活塞面积与 B 腔活塞面积比决定, 其次与活塞摩擦力、气瓶大小等因素有关) 即气瓶压力太高时或泵出口压力太低时系统可能无法进行正常切换; 气瓶压力较低时系统虽然能正常工作, 但出口压力波动较大。

4 结束语

对某联合供应系统进行了分析, 重点对活塞缸的性能进行仿真研究, 结果表明活塞缸和整个联合供应系统在液体介质、气体介质时均可以正常工作; 同时, 在系统启动、停止、变工况等条件下也可以正常工作; 在联合供应系统应用过程中, 需要匹配好泵出口压力和气瓶压力的关系。

参考文献:

- [1] 齐海涛, 付永领. 基于 AMESim 的电动静液作动器的仿真分析[J]. 机床与液压, 2007, 35(3): 184-186.
- [2] 晋晓伟, 孙亮, 马键, 等. 推进剂增压系统增压过程仿真[J]. 火箭推进, 2009, 35(3): 30-33.
- [3] 王定军, 袁洪滨, 董苑. 贮箱充填过程仿真和分析[J]. 火箭推进, 2008, 34(2): 23-25.
- [4] 付永领, 祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [5] 赵双龙. 调节阀性能模拟[J]. 火箭推进, 2010, 36(2): 40-42.
- [6] 袁洪滨, 张民庆, 孙彦堂. 基于 AMESim 的直动式电磁阀动态仿真研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 30-35.
- [7] 尤裕荣, 赵双龙, 吴宝元, 等. 基于 AMESim 的冲压发动机燃油调节器动态特性仿真[J]. 火箭推进, 2010, 36(4): 12-15.
- [8] 谢芳, 楚武利, 张皓光. 跨声轴流压气机激波/泄漏涡/边界层分离相互作用的影响[J]. 航空动力学报, 2012, (2): 425-430.
- [9] 赵巍, 赵庆军, 唐菲, 等. 预注冷质的空气涡轮火箭性能分析研究[J]. 工程热物理学报, 2012, (2): 210-213.
- [10] 兰飞强, 王丽娟, 程翔, 等. 一种固冲发动机用流量调节装置设计[J]. 弹箭与制导学报, 2012, (3): 148-151.
- [11] 郑大勇, 张卫红, 石文靓. 未来大推力氢氧发动机方案初步探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2012, (1): 1-6.

(编辑: 王建喜)