

气体性质对气动增压器性能的影响

申智帅, 刘 锋, 魏彦祥
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 气动增压器的动作频率是一个重要的性能参数。当气动增压器结构确定后, 频率直接决定推进剂流量等参数。同时, 气动增压器的动作频率体现在推进剂出口管路压力的波动上, 对出口压力的稳定性有很大影响。研究气动增压器的动作频率, 有助于合理选择频率参数, 以及气动增压器结构参数和性能参数的匹配。为了研究增压气体性质对气动增压器工作性能的影响, 建立了数学模型, 利用 AMESim 软件对气液活塞的工作过程进行了仿真。仿真结果与试验数据对比, 一致性较好。

关键词: 气动增压器; 气体性质; 动作频率; AMESim 仿真

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 05-0050-05

Influences of gas properties on pneumo-pump performance

SHEN Zhi-shuai, LIU Feng, WEI Yan-xiang
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: The motion frequency is an important performance parameter of pneumo-pump. When the structure of the pneumo-pump is fixed, its frequency determines the flow rate of propellant and has a great influence on the outlet pressure. Therefore, the research of the operating frequency contributes to selecting a rational frequency parameter and matching the structural parameter and performance parameter of pneumo-pump. In order to explore the influences of gas properties on pneumo-pump performance, a mathematical model was set up and the working process of hydraulic pistons was simulated with AMESim. A comparison between simulation results and test data was made. The comparison results show that they are in good agreement.

Keywords: pneumo-pump; gas property; motion frequency; AMESim simulation

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-04-25

基金项目: 国家 863 项目(2012AA702302)

作者简介: 申智帅 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程

0 引言

国防科工局的技术合作项目气动增压器技术, 可以满足航天器总体对空间推进系统提出的轨控发动机比冲性能高和多次起动的要求, 并适应空间推进系统的轻质、小体积的发展趋势。其工作原理是利用气动增压器通过消耗有限的高压气体能量, 从低压贮箱将推进剂增压后, 提供高压推进剂进入发动机, 实现发动机高室压工作, 提高发动机的比冲性能。

气动增压式液体火箭发动机推进系统具有一系列泵压式系统和挤压式系统所不具备的优点: 与泵压式 (涡轮泵式) 系统相比, 其质量轻、结构简单、没有起动次数限制; 与挤压式系统相比, 其贮箱压力低, 发动机比冲性能高, 体积小, 质量轻, 可靠性方面占有优势。同时气动增压器可以高精度保持推进剂的混合比, 提高推进剂的利用效率, 使贮箱容积减小, 最终使整个推进系统的结构质量减轻。可以说气动增压式火箭推进系统兼顾了传统泵压式系统和挤压式系统的优点。气动增压器的应用改变了传统的泵压和挤压模式, 是液体推进系统的一项重大创新, 由此产生了第 3 种液体推进模式—气动增压式空间推进系统。

气动增压器动作频率是气动增压器的一个重要性能参数, 直接影响推进剂的流量。针对气动增压器的动作频率参数, 进行了多轮气动增压器液流试验, 气体性质对气动增压器动作频率性能的试验数据与仿真计算结果基本一致。

1 工作原理

气动增压器主要包括气动分配器、两组气动气压缸、换向阀和单向阀等。

气动增压器的工作原理^[2]如下: 增压气体进入气动分配器中, 通过气动分配器的调节, 依次向气动气压缸气体活塞的 4 个气腔供气, 作用在气体活塞上的高压气体推动活塞运动。气体活塞与氧化剂活塞、燃料活塞刚性连接, 通过移动产生出口压力; 推进剂通过活塞运动增压后, 通过阀门的开关, 输出高压推进剂, 同时消耗部分增

压气体。气动增压器往复运动, 可连续不断地输出高压推进剂。刚性连接可以保证推进剂的精确混合比。工作原理图如图 1 所示。

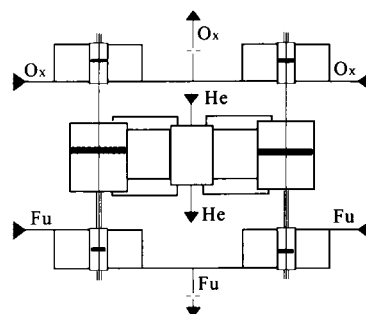


图 1 气动增压器工作原理简图

Fig. 1 Schematic of pneumo-pump working principle

气动增压器工作一个周期的时间包括气动分配器活塞运动时间、气动气压缸活塞运动时间和气体管路充填时间。通过分析, 气动分配器内活塞行程短, 腔体直径小, 在气动增压器运行过程中时间很短, 对气动增压器工作周期的影响很小; 气体管路很短, 气体充填所需时间短, 对气动增压器工作周期的影响很小。因此, 气动增压器的工作周期主要是由气液活塞的运动时间决定的, 可以近似认为气动气压缸活塞运动的时间即为气动增压器的工作周期时间。

气液活塞在运动过程中, 气体活塞的进气腔由增压气体供气, 压力由初始的外界环境压力逐渐升高。放气腔初始压力为增压气体压力, 与外界环境连通后排放到外界环境。

通过分析, 不同性质气体直接影响相同气腔放气的时间。在背压为环境大气压 (0.1 MPa), 放气腔压力超过 0.2 MPa 时, 放气口可达音速, 为音速流动^[4]; 气动增压器放气腔内的气体初始压力为 2.1 MPa, 通过出口节流口的质量流量已由声速截面控制, 通过截流口的质量流量为

$$\dot{m} = \frac{\Gamma(k)}{\sqrt{R_c T_c}} p_c A_e \quad (1)$$

式中: k 为比热比; p_c 和 T_c 为放气腔内的压力和温度; R_c 为气体常数; $\Gamma(k)$ 为比热比函数, 且

$$\Gamma(k) = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}; \quad A_e \text{ 为节流口面积。}$$

放气腔内初始的气体质量为

$$m = \frac{p_c}{R_c T_c} L A_p \quad (2)$$

式中: A_p 为活塞截面积; L 为活塞行程。

气腔放气时间

$$t = \frac{m}{\dot{m}} \frac{A_p \cdot L}{\Gamma(k) \cdot A_c \sqrt{R_c T_c}} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 对于同一活塞, 当气腔压力、温度和外界压力固定的情况下, 影响放气时间的因素主要有气体比热比和气体常数。

在结构相同的气动增压器、相同的液体介质、相同的驱动气体入口压力和出口背压条件下, 研究了气体性质对气动增压器动作频率性能的影响。气动气压缸活塞的运动规律决定了气动增压器的工作频率, 以下主要对气动气压缸的运动过程进行研究。

2 数学模型的建立

气动增压器内的气体活塞在换向阀的控制下进行充、放气, 带动氧化剂和燃料活塞往复运动。气、液腔活塞结构如图 2 所示。压力为 p_g 、温度为 T_g 的高压增压气体, 经过进口进入气体活塞的进气腔, 增压气体驱动气体活塞运动, 气体活塞放气腔的气体由放气口排放到压力为 p_0 、温度为 T_0 的外界环境。气体活塞运动过程, 带动燃料腔活塞和氧化剂腔活塞同步运动, 通过压缩作用提高燃料和氧化剂的出口压力。

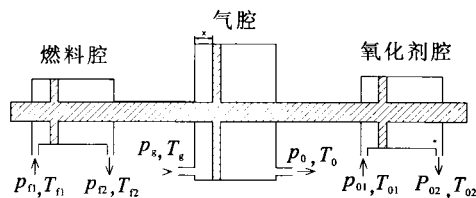


图 2 活塞模型

Fig. 2 Models of pistons

为便于建立气腔的数学模型, 对模型作如下假设:

1) 气体为理想气体。为了从通用的角度考虑这一问题, 采用理想气体进行研究。理想气体状态方程:

$$p = \rho R T \quad (4)$$

2) 容器内的压力、密度和温度是均匀分布的, 且为绝热容腔。

气腔活塞运动方程:

$$M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = (P_1 - P_2) \cdot A - f_D - F_1 \quad (5)$$

式中: f_D 为动摩擦力, $f_D = k_D \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha)$; k_D 为动摩擦力系数; F_1 为负载力; P_1 和 P_2 分别为气腔活塞左、右两侧压力; A 为气腔活塞面积; M 为气腔活塞质量。

气液活塞上的力平衡:

$$p_g^0 A_g = (p_{o2} - p_{o1} + \Delta p_o) A_o + (p_{f2} - p_{f1} + \Delta p_f) A_f \quad (6)$$

式中: A_f 为气动增压器燃料活塞面积; A_o 为气动增压器的氧化剂活塞面积; A_g 为气腔活塞面积; p_g^0 为作用在气腔活塞上的气体压力 ($P_1 - P_2$); p_{o1} 和 p_{o2} 为氧化剂管路进、出口压力; p_{f1} 和 p_{f2} 为燃料管路进、出口压力; Δp_o 为氧化剂管路流阻; Δp_f 为燃料管路流阻。

3 仿真模型

根据上面建立的数学模型, 利用 AMESim 软件对一组气液活塞的一个工作行程进行仿真计算。根据所取得的参数确定气动增压器气液活塞在一个工作行程内的运动时间, 得到气液活塞的动作频率和氧、燃管路出口压力曲线。

分析模型如图 3 所示。模型包括两个液体活塞和一个气体活塞 (中间), 活塞之间刚性连接。仿真模型与图 2 的活塞模型一致, 各活塞的尺寸根据实际数值给定。

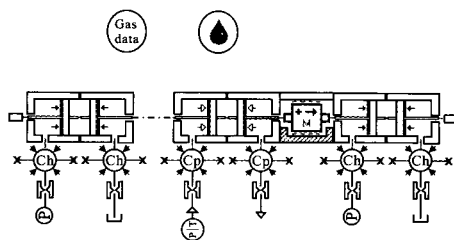


图 3 活塞组分析模型

Fig. 3 Analysis model of a set of pistons

边界条件的给定: 对于液体活塞, 进口处给定压力入口边界条件, 压力值由试验得到的数值确定, 出口处给定质量流量边界条件, 通过节流孔板来进行控制; 对于气体活塞, 入口给定压力入口边界条件, 根据试验数据给定入口处的增压气体压力和温度, 出口根据实际情况给定出口节流口面积。氮气、空气和氦气分别作为增压气体进行仿真, 所用节流孔板根据试验值给定。

气体活塞左侧进气腔的初始条件为大气压力和温度, 右侧放气腔的初始条件为增压气体压力和温度。

4 计算结果分析

氮气、空气和氦气分别作为增压气体进行仿真, 并与相应的试验结果对比。

仿真参数如下: 气腔直径 83 mm, 杆直径 12 mm, 活塞行程 44 mm, 进气、放气节流口面积 113 mm²; 氧化剂腔直径 44 mm, 燃料腔直径 40 mm; 氮气试验时, 氧、燃管路出口节流孔板直径为 3.21 mm 和 2.87 mm; 空气和氮气试验时, 氧、燃管路出口节流孔板直径为 2.27 mm 和 2.03 mm。液体采用水, 增压气体压力和氧、燃管路入口压力采用试验结果的数据。

氮气作为增压气体, 试验得到的气动增压器基本性能曲线如图 4 所示, 气动增压器动作频率为 10.5 Hz。

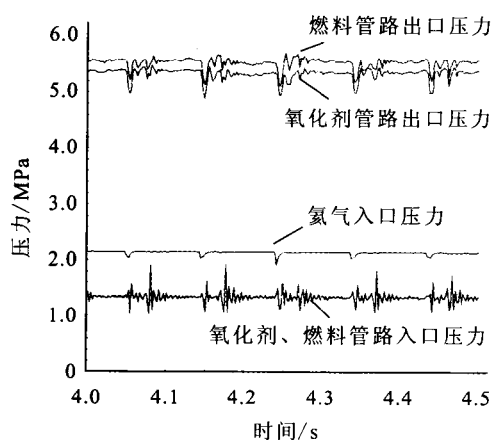


图 4 性能曲线(氮气)

Fig. 4 Performance curves of pneumo-pump with helium

计算出的活塞位移曲线如图 5 所示。从图中可以得到, 由给定的条件计算出活塞在给定行程内运动时间为 0.096 s, 即计算频率为 10.4 Hz。

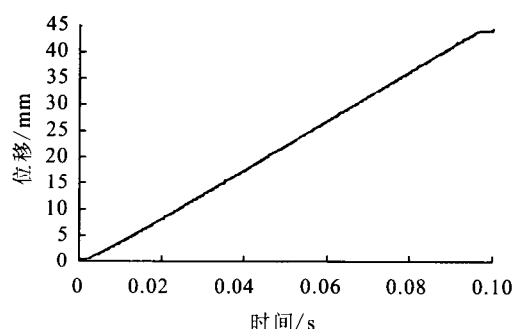


图 5 活塞位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of piston

利用 AMESim 软件按照试验条件 (液体管路入口压力 1.37 MPa, 氮气压力 2.1 MPa) 进行仿真计算, 气动增压器出口脉动频率约 10.3 Hz。

用空气作增压气体试验得到的气动增压器性能曲线见图 6, 气动增压器动作频率约为 5.4 Hz。

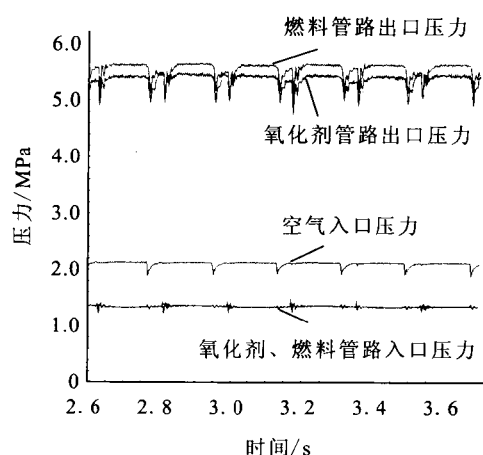


图 6 性能曲线(空气)

Fig. 6 Performance curves of pneumo-pump with air

计算出的活塞位移曲线如图 7 所示。从图中可以得到, 由给定的条件计算出活塞在给定的行程内运动时间为 0.19 s, 即计算频率为 5.3 Hz。

利用 AMESim 软件按照试验条件 (液体管路入口压力 1.37 MPa, 空气压力 2.1 MPa) 进行仿真计算, 气动增压器出口脉动频率约 5.2 Hz。

用氮气作增压气体试验得到的气动增压器性能曲线见图 8, 气动增压器动作频率为 4.16 Hz。

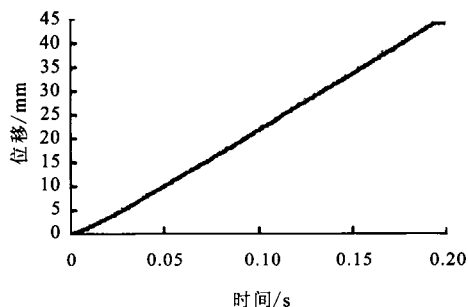


图 7 活塞位移曲线

Fig. 7 Displacement curve of piston

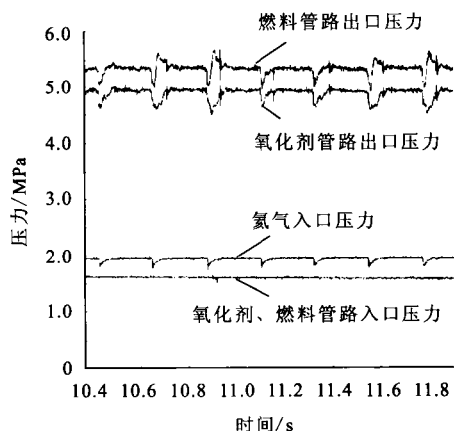


图 8 性能曲线(氮气)

Fig. 8 Performance curves of pneumo-pump with nitrogen

计算出的活塞位移曲线如图 9 所示。从图中可以得到, 由给定的条件计算出活塞在给定的行程内运动时间为 0.22 s, 即计算频率为 4.55 Hz。

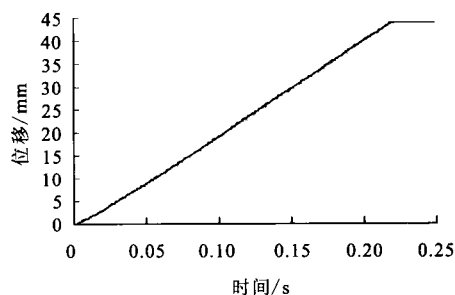


图 9 活塞位移曲线

Fig. 9 Displacement curve of piston

利用 AMESim 软件按照试验条件 (液体管路入口压力 1.37 MPa, 氮气压力 2.1 MPa) 进行仿真计算, 气动增压器出口脉动频率约 5.2 Hz。

5 结论

通过对不同气体对气动增压器性能影响研究, 得出氦气、空气和氮气等不同气体对气动增压器动作频率性能的影响规律。氦气作为增压气体, 气动增压器出口脉动频率约 10.3 Hz。空气和氮气作为增压气体, 气动增压器出口脉动频率基本相同, 约为 5.2 Hz。相同条件下, 空气和氮气作为增压气体, 增压器的动作频率相对于氦气减小了近一半, 推进剂流量也同等减小, 仿真结果与试验结果基本吻合。气体性质影响气体的排气速度, 摩尔质量大的气体排气速度慢, 即影响气动增压器的动作频率和推进剂的输出流量。

参考文献:

- [1] SHNYAKIN V, PEREVERZEV V, SHUL'GA V, et al. Possible ways of increasing RD869 engine performance [C]// The 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Bremen, Germany: IAF, 2003: IAC-03-S.1.10.
- [2] SHNYAKIN V, PEREVERZEV V, KONOKH V, et al. Pneumopump-fed liquid rocket engine test result[C]// The 55th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Vancouver, Canada: IAF, 2004: IAC-04-S.1.10.
- [3] SHNYAKIN V, SHUL'GA V, KONOKH V, et al. Propulsion system of DENPR LV fourth stage ground development results [C]// The 56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Fukuoka, Japan: IAF, 2005: IAC-05-C4.1.04.
- [4] 曹泰岳. 火箭发动机动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.
- [5] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [6] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.

(编辑: 王建喜)