

挤压式供应系统气瓶压力仿真

王 堃¹, 李纯飞², 董 苑²

(1. 海装西安局, 陕西 西安 710089; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 以挤压式液体火箭发动机为研究对象, 对发动机推进剂供应系统工作过程进行了理论分析, 利用 AMESim 软件建立了仿真平台, 计算了发动机工作过程气瓶压力。将仿真计算结果与试车数据进行对比, 结果表明仿真计算结果与试车数据一致性较好, 验证了仿真模型建模思路的正确性, 为气瓶压力计算提供了一种方法。

关键词: 液体火箭发动机; 推进剂供应系统; 气瓶压力; 仿真模型; AMESim

中图分类号: V434+.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 02-0063-04

Simulation of gas pressure inside high pressure vessel of pressure-fed propellant feed system

WANG Kun¹, LI Chun-fei², DONG Yuan²

(1. Xi'an Military Representative Bureau of Naval Equipment Department, Xi'an 710089, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Taking the gas pressure-fed liquid rocket engine with high pressure vessel as a study object, the working process of propellant feed system in the engine was analyzed theoretically. An emulator was established with AMESim. With the emulator, the gas pressure in the vessel was computed while the engine was working. The calculated result was compared with the data obtained in the test. The compared results indicate that the trend curve of the calculated result can maintain consistency with the test date. It verified the correctness of the way to establish the emulator. The method can be used to calculate the gas pressure in high pressure vessel.

Keywords: liquid rocket engine; propellant feed system; gas pressure inside high pressure vessel; simulation model; AMESim

0 引言

推进剂供应系统是液体火箭发动机的重要组

成部分, 用于将推进剂从贮箱输送到推力室, 按其工作方式一般分为挤压式供应系统和泵压式供应系统两大类。挤压式供应系统结构简单, 常用于小推力、短时间工作及多次启动的发动机, 如

收稿日期: 2012-12-14; 修回日期: 2013-01-15

基金项目: 0901 工程项目(2005AA722062)

作者简介: 王堃 (1983—), 男, 工程师, 研究领域为导弹发动机总体设计

空间飞行器及导弹姿态控制发动机。按挤压气体的供应方式,挤压式供应系统可分为气体蓄压器(高压气瓶)挤压式、火药蓄压器挤压式及液体蓄压器挤压式3类,其中高压气瓶挤压式供应系统最常用。

对于采用高压气瓶挤压式供应系统,气瓶压力常用于判断发动机工作状态,通过对比气瓶压力实测数据与气瓶压力理论计算结果,可直观、准确地判断发动机是否正常工作。由于液体火箭发动机工作过程非常复杂,影响因素众多,气瓶压力理论计算困难、计算量大。本文依据模块化建模思想,采用仿真平台 AMESim,建立了发动机供应系统仿真模型,对发动机供应系统工作过程进行了模拟计算,获得了气瓶压力仿真计算结果。将仿真计算结果与试车实测数据进行了对比、分析,结果表明仿真计算结果与试验数据具有很好的一致性,验证了仿真模型和计算方法的有效性、准确性,为发动机工作过程气瓶压力计算提供了一种方法。建模及计算以恒压式系统为研究对象。

1 系统模型建立

1.1 发动机工作原理简述

发动机工作时,推力室控制阀门打开,推进剂从贮箱进入推力室,分解或燃烧,转化为高压气体,产生推力。发动机工作过程中,随着推进剂不断被消耗,高压气体不断进入贮箱,以维持推进剂供应压力,气瓶压力不断下降。

1.2 供应系统工作过程分析

为便于分析,将供应系统简化为图1所示系统,分为高压气腔(高压气腔)、贮箱气腔(低压气腔)及液腔三部分,并假定发动机工作正常、低压气腔压力和温度恒定。

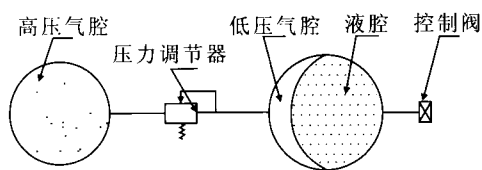


图1 供应系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of propellant feed system

考虑到贮箱及低压气路管路容积恒定,贮箱内挤压气体体积增量等于贮箱内推进剂体积耗量,即有关系式(1)和(2):

$$\Delta V_2 = \Delta V_3 \quad (1)$$

$$q_{v2} = q_{v3} \quad (2)$$

根据质量守恒定律,贮箱内挤压气体质量增量等于高压气瓶内气体质量变化量,即:

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 \quad (3)$$

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (4)$$

将挤压气体近似为完全气体,根据完全气体状态方程,有:

$$\Delta m_2 = p_2 \cdot \Delta V_2 / (R \cdot T_2) \quad (5)$$

由关系式(5)可推导出关系式(6):

$$q_{m2} = p_2 \cdot q_{v2} / (R \cdot T_2) \quad (6)$$

根据关系式(1)~(6)以及质量与密度关系,可推导出气瓶耗气质量流量与推进剂供应质量流量的关系式,见关系式(7)

$$q_{m1} = q_{m3} \cdot p_2 / (R \cdot T_2 \cdot \rho_3) \quad (7)$$

上述关系式中: Δm_1 , q_{m1} 分别为高压气腔气体耗量、气体质量流量; ΔV_2 , q_{v2} , Δm_2 , q_{m2} , p_2 , T_2 分别为低压气腔气体体积增量、气体体积流量、气体质量增量、气体质量流量、气体压强及气体温度; ΔV_3 , q_{v3} , q_{m3} , ρ_3 分别为推进剂体积耗量、推进剂体积流量、推进剂质量流量及推进剂密度; R 为挤压气体常数。

因此,发动机工作过程中,若推进剂质量流量和低压腔气体状态确定,即可计算出相应时刻高压气瓶耗气流量,对时间积分,即可获得任意时刻气体耗量,进而可计算获得高压气瓶压力数据。

1.3 气体质量流量计算

根据关系式(7),结合发动机工作指令,可对发动机工作过程气瓶气体质量流量进行计算,涉及的参数主要有推进剂质量流量及密度、低压腔气体状态。

发动机工作包括稳态工作和脉冲工作,通常工作持续时间不小于1s的为稳态工作,工作时

间在1 s以内的为脉冲工作。对于稳态工作,推进剂质量流量取为设计值;对于脉冲工作,推进剂质量流量取为设计值的1.3倍。若发动机工作过程中,实际工况偏离设计工况较大,应根据实际试车情况进行相应调整。

发动工作过程中压力调节器出口压力及推进剂密度相对稳定,对计算结果影响很小。为便于计算,可将低压气腔气体压力及推进剂密度视为恒定值。若发动机工作过程中低压腔气体压力变化较大,可对其分段处理。

在大流量、长稳态工作过程中,高压气瓶气体温度及低压腔内气体温度均存在较大温降,此时气体温度不宜作为恒定值处理,可取为该工作时段气体温度均值或对计算结果进行修正处理。

1.4 仿真模型建立

根据发动机工作原理及供应系统工作过程分析结果,基于关系式(7),利用AMESim软件提供的标准元件库,建立如图2所示供应系统仿真模型,由气体子模型、气瓶子模型、质量/能量输入子模型及数值信号子模型组成。气体子模型中,设置气体比热容和比热比等参数;气瓶子模型中,设置高压气体初始体积和温度等参数;数值信号子模型中,设置各时刻气体质量流量及热流。

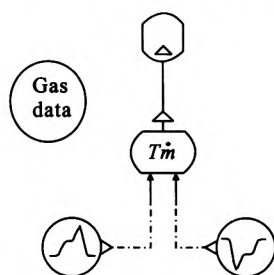


图2 仿真模型图

Fig. 2 Simulation model

2 仿真计算及结果分析

2.1 参数设置

计算各时刻气体质量流量后,将计算结果设置到仿真模型中,并将气体物性参数、状态参数等设置到模型中,即可完成参数设置。

2.2 仿真计算

仿真模型参数设置完成后,即可进行仿真计算。仿真初始条件为:发动机处于待工作状态,即低压气腔已完成建压并达到压力平衡,推进剂已供应至各推力室控制阀前。

仿真计算结果见图3~图5。图3为气瓶压力曲线,图4和图5为气瓶耗气质量流量。

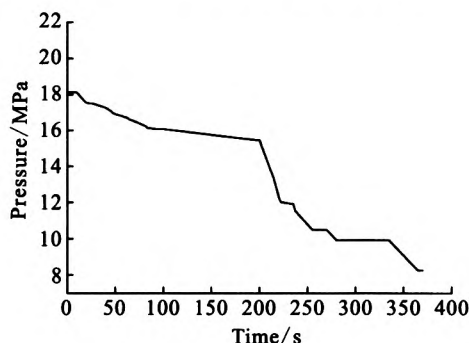


图3 气瓶压力曲线

Fig. 3 Curve of gas pressure in vessel

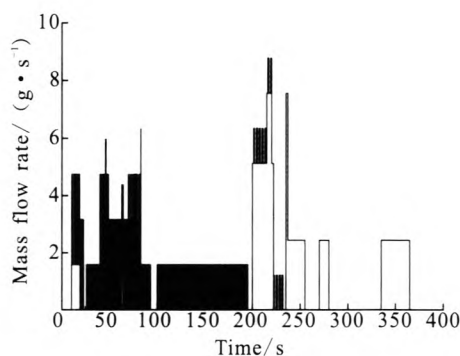


图4 气瓶耗气质量流量(0~400 s)

Fig. 4 Mass flow rate of gas (0~400 s)

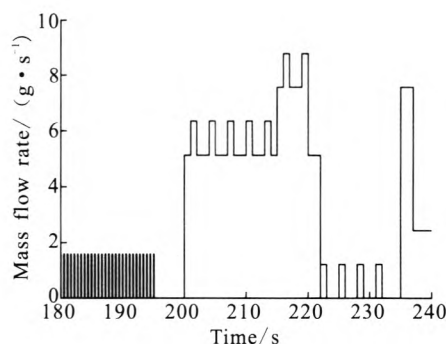


图5 气瓶耗气质量流量(180~240 s)

Fig. 5 Mass flow rate of gas (180~240 s)

2.3 结果分析

由于(7)式以挤压气体为完全气体、挤压气体工作过程为绝热过程、低压腔气体压力及温度恒定等为前提条件,实际条件下气体状态存在变化,并存在热交换等,因此气体质量流量、气瓶压力与仿真计算值存在一定的偏差。另外,采用(7)式进行气体质量流量计算时,将低压腔气体压力及推进剂密度视为恒定值,推进剂质量流量取为额定工况下参数值,均与实际存在一定的偏差,造成计算结果与实际值存在一定偏差。仿真计算结果与试车数据对比见图6,仿真曲线与试车曲线变化趋势基本一致,计算数据与试车数据一致性较好,验证了仿真模型的合理性。

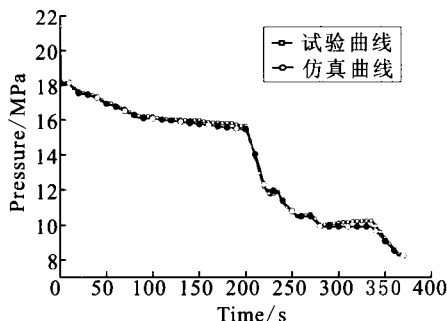


图6 仿真曲线与试车曲线对比

Fig. 6 Pressure curves of simulation and test

3 结论

在对挤压式液体火箭发动机供应系统工作过程理论分析的基础上,采用AMESim仿真平台,建立了供应系统仿真模型,计算了发动机气瓶压力,获得了发动机工作过程中的气瓶压力,对影

响计算结果准确性的因素进行了初步分析,将计算结果与试车数据进行对比,验证了计算方法的合理性,为发动机工作过程气瓶压力计算提供了一种方法。

参考文献:

- [1] 刘国球. 火箭发动机原理 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1993.
- [2] 付永领. 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, 2006.
- [3] 张峥岳, 康乃全. 轨姿控液体火箭发动机水击仿真模拟[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 12-16.
- [4] 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.
- [5] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.
- [6] 晋晓伟, 孙亮, 马键, 等. 推进剂供应系统增压过程仿真[J]. 火箭推进, 2009, 35(3): 30-33.
- [7] 张金容, 陈炜, 张敏贵, 等. 液体火箭上面级发动机系统方案选择及典型系统方案[J]. 导弹与航天运载技术, 2008 (2): 7-12.
- [8] 潘辉, 张黎辉. AMESim 软件在液体火箭发动机系统动态仿真上的应用[J]. 火箭推进, 2011, 37(3): 6-11.
- [9] 肖明杰. 姿控发动机稳态故障效应分析[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 79-83.
- [10] 李淑艳, 肖明杰, 李晓瑾. 新型活塞泵增压轨/姿控发动机系统方案研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(1): 13-16.
- [11] 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(1): 23-25.
- [12] 陈晓琴. 减压阀充填过程动态特性仿真[J]. 导弹与航天运载技术. 2006 (5): 45-49.
- [13] 徐枫. 基于 AMESim 的贮箱增压过程仿真 [J]. 硅谷, 2011 (8): 13.

(编辑: 张永秀)