

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.033

卫星并联贮箱均衡排放的研究

朱一骁^{1,2},王申^{1,2},张乾鹏^{1,2},夏勇³(1. 上海空间推进研究所,上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心,上海 201112;
3. 上海卫星工程研究所,上海 201109)

摘要:在双组元卫星推进系统设计过程中,为保证发动机入口混合比满足设计状态,需要通过调节燃料和氧化剂支路的管路流阻来实现,常规方法为通过多次地面水试试验,对各支路安装的节流孔板进行修正。根据某型号卫星的管路布局,基于 AMESim 建立并联贮箱均衡排放的预测模型并在后续的地面水试试验中进行验证。试验验证了仿真模型的可行性,提出了仿真模型的修正参数,修正后的仿真模型可以较为准确地预测该型号后续卫星的孔板尺寸,节约了地面水试试验的时间,可为缩短卫星型号研制周期提供帮助。

关键词:卫星;均衡排放;并联贮箱;AMESim;仿真

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)01-0161-03

Research on Equalizing Expulsion Performance of Parallel Tanks in Satellite

ZHU Yixiao^{1,2}, WANG Shen^{1,2}, ZHANG Qianpeng^{1,2}, XIA Yong³

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China;

3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: In the design process of bipropellant satellite propulsion system, it is necessary to adjust the pipeline flow resistance of the fuel and oxidant branch to ensure that the mixing ratio at the inlet of the engine meets the design state. The conventional method is to correct the throttle orifice installed in each branch through multiple surface water tests. According to the pipeline layout of a certain model satellites, a prediction model of the equalizing expulsion performance of parallel tanks is established based on AMESim, which is verified in the subsequent water test. The test verifies the feasibility of the simulation model, and puts forwards the modified parameters of the model. The modified simulation model can accurately predict the orifice size of the subsequent satellite of themodel, save the surface water test time and help to shorten the development cycle of the satellite model.

Keywords: satellite; equalizing expulsion; parallel tanks; AMESim; simulation

0 引言

国内外大型的推进系统大多采用4只贮箱并联布局的方式,4只贮箱分别为2只氧化剂贮箱和2只燃料贮箱。同种组元的贮箱两两并联,为下游发动机提供推进剂^[1]。由于并联的贮箱上下游压力存在偏差,导致贮箱内的推进剂排放不均衡,进一步导致整星质心产生偏移^[2-3]。因此,推进系统并联贮箱均衡排放具有十分重要的意义。

目前,为保证并联贮箱均衡排放性能,主要是通过配平流阻的方式来实现,做法为在系统交付前进行地面水试试验,通过在贮箱出口各支路设置不同的孔板进行流阻配平来实现^[4-5]。在试验过程中,需要对孔板的孔径进行初步的预估,由于后续的修正工作全部基于孔板初始尺寸进行,因

此孔板加工初始尺寸的准确度直接影响到整个地面水试试验的时间。

随着卫星研制周期的不断缩短,减小地面水试试验的时间成为必需之举。本文以某型号卫星的管路布局为基础,在众多能够进行液压气动系统数值模拟的软件中^[6],选取 AMESim 软件建立并联贮箱均衡排放的预测模型,对孔板初始尺寸进行预测并在后续的地面水试试验中进行验证。

1 系统建模

图1为某型号卫星的推进系统燃料和氧化剂管路的Creo模型示意图。系统包括燃料部分和氧化剂部分,每个部分均有支路和主路。主要由直管、弯管、孔板、三通和自锁阀组成。在数值模拟建模时,为便于计算,对结构模型进行适当简

第一作者简介:朱一骁(1990—),男,江苏淮安人,工程师,博士研究生,研究方向为航空宇航推进理论与工程,498194623@qq.com。

化。其中,自锁阀由于其工作原理,可以近似用孔板进行数值模拟。根据系统原理,使用 AMESim 的液压库和液阻库,分别建立了系统氧化剂支路和燃料支路的 AMESim 数值模拟模型,如图 2 所示。其中,管路直径为 6.4 mm,自锁阀和孔板的初始尺寸为 3.2 mm,初始流量系数 C_q 为 0.7,氧路/燃路的流阻为 (0.1 ± 0.01) MPa。

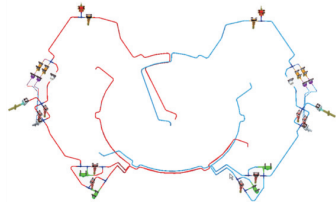


图 1 推进系统模型示意图

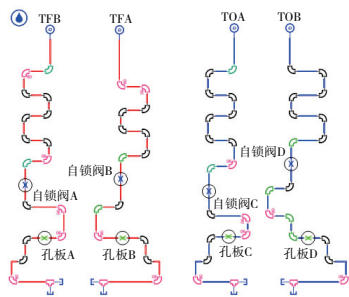


图 2 推进系统建模示意图

2 模型仿真

根据自锁阀产品的测试结果,分别对氧化剂支路(TOA/TOB)和燃料支路(TFA/TFB)的自锁阀模型进行修正,仿真结果与测试数据的对比如表 1 所示。

表 1 各支路自锁阀数据对比表(校准前)

位置	自锁阀尺寸/mm	自锁阀流量系数	数值模拟结果/MPa	产品测试结果/MPa
TFA	3.2	0.7	0.019 5	0.058
TFB	3.2	0.7	0.019 5	0.057
TOA	3.2	0.7	0.032 2	0.059
TOB	3.2	0.7	0.032 2	0.058

根据产品测试结果,对自锁阀尺寸进行修正,保持自锁阀流量系数,修正后的自锁阀尺寸及其仿真结果如表 2 所示。从表中可以看出,自锁阀尺寸经过修正后,仿真结果与产品测试结果吻合。

根据推进系统使用需求,要保证各支路总流阻在 (0.1 ± 0.01) MPa,根据使用需求对各支路孔板尺寸进行预测。

表 2 各支路自锁阀数据对比表(校准后)

位置	自锁阀尺寸/mm	自锁阀流量系数	数值模拟结果/MPa	产品测试结果/MPa	误差/%
TFA	2.44	0.7	0.057 7	0.058	-0.52
TFB	2.45	0.7	0.056 8	0.057	-0.35
TOA	2.75	0.7	0.059 0	0.059	0
TOB	2.76	0.7	0.058 2	0.058	0.34

3 地面水试试验

3.1 试验系统

并联贮箱试验系统原理如图 3—图 4 所示。系统主要包括两个表面张力贮箱及相关阀门管路组成的两个并联贮箱支路,贮箱 TKA 所在支路为 A 支路,贮箱 TKB 所在支路为 B 支路,并联贮箱支路包括贮箱和液路管组件(含大流量自锁阀、液路管和节流孔板)。

球阀 SV5 和 SV7 分别用于双贮箱模拟工质加注和气路增压,球阀 SV6 控制贮箱模拟工质排出,针阀 ZV1 用于调节并联贮箱的排放流量,流量计 MS1 用于测量排放流量,电子秤测量贮箱模拟工质的加注量和剩余量。压力传感器 PT1、PT2 测量贮箱气路的压力,PT3 测量节流孔板三通下游的压力。

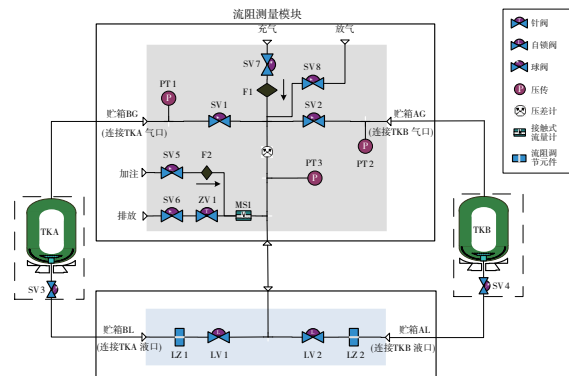


图 3 流阻调节系统图

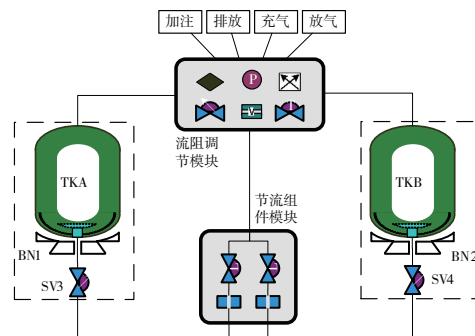


图 4 流阻调节系统原理图

3.2 试验参数

主要试验参数如下:

- 1) 增压气体:氮气,按 GB/T8980—96 要求,增压压力 0.9~1.0 MPa;
- 2) 试验介质:去离子水,按 GB6682—92 要求三级水以上;
- 3) 贮箱:加注量约 95%;
- 4) 流阻调试要求:氧路调试水当量为 45.2 g/s,液路管组件流阻(0.1±0.01) MPa;燃路调试水当量为 35.2 g/s,液路管组件流阻为(0.1±0.01) MPa;并联贮箱支路流阻偏差不大于 0.003 MPa;
- 5) 不均衡排放指标:流阻调节完成后,进行并联贮箱恒压排放测试,单个贮箱加注量大于 200 L 且加注液面应位于贮箱柱段;要求不均衡排放量≤1%单个贮箱容积(内控指标)。若不均衡排放量不满足该指标要求,需重新进行流阻调节。

3.3 试验设备

并联贮箱均衡排放试验产品配套包括表面张力贮箱、自锁阀、节流孔板(图 5)、三通组件等。配套设备包括贮箱停放工装、高精度电子秤、操作台、测控与数据采集系统等。



图 5 节流孔板实物图

3.4 试验流程

试验前完成试验设备的检查准备工作,用氮气对试验管路吹气,吹除多余物,之后进行并联贮箱流阻调节试验。

- 1) 把贮箱下游加注口管路断开,开 SV5,其余全关,对管路进行冲洗后连好管路,水截至贮箱下游球阀 SV3、SV4 处,关 SV5;
- 2) 对贮箱及停放架进行质量称量;
- 3) 通过 SV3、SV4 对贮箱进行加注,单个贮箱加注量 200~670 L;
- 4) 并联贮箱同步排放,过程中为保证液路管组件流阻为(0.1±0.01) MPa,并联贮箱支路流阻偏差≤0.003 MPa的要求,需持续拆卸、修正、安装孔板,直至满足需求。

3.5 试验结果

氧化剂路(TOA/TOB)孔板尺寸为 $\phi 2.6$ mm, TOA 流阻为 0.101 5~0.101 6 MPa, TOB 流阻为 0.101 6~0.101 7 MPa;燃料路(TFA/TFB)孔板尺寸为 $\phi 2.15$ mm, TFA 流阻为 0.101 2~0.101 3 MPa, TFB 流阻为 0.100 9~0.101 0 MPa。

4 误差分析

根据试验测试的各支路流阻,使用仿真模型对孔板尺寸进行计算,基于孔板结构,流量参数选取 0.8~1.0 进行仿真,对比结果如表 4 所示。

表 4 孔板尺寸数据对比表

位置	流量系数	计算尺寸/mm	实测尺寸/mm	流阻/MPa	孔板尺寸误差/%
TFA	0.8	2.614~2.616	2.15	0.101 2~0.101 3	21.58~21.67
	0.9	2.464~2.466			14.60~14.70
	1.0	2.338~2.340			8.74~8.84
TFB	0.8	2.586~2.588	2.60	0.100 9~0.101 0	20.28~20.37
	0.9	2.438~2.440			13.40~13.49
	1.0	2.304~2.316			7.16~7.72
TOA	0.8	3.040~3.042	2.15	0.101 5~0.101 6	16.92~17.00
	0.9	2.866~2.868			10.23~10.31
	1.0	2.720~2.722			4.62~4.69
TOB	0.8	3.098~3.102	2.60	0.101 6~0.101 7	19.15~19.31
	0.9	2.920~2.924			12.31~12.46
	1.0	2.770~2.774			6.54~6.69

考虑到试验过程中孔板修正操作对孔板流量系数的影响,孔板的流量系数在 0.9 左右,仿真误差为 4.62%~14.7%,误差来源主要为:1) 自锁阀阀芯行程有所差异,测试结果存在 10% 左右的误差;2) 测试管路与仿真管路存在加工

误差;3) 测试管路与仿真管路的表面粗糙度存在误差。

通过误差分析,对仿真模型提出两种修正方案,分别为尺寸系数修正(αX)和尺寸常数修正($X+\beta$)。

(下转第 190 页)

模拟出正常工作载荷影响下转轴的位移和应力变化情况,确定了最大应力位置,模拟计算的拉伸强度也符合机械标准,说明半自动吸塑包装机关键构件具有较为良好的静力学模拟性能。

参考文献:

- [1] 张坤平. 基于 PLC 的全自动在线式缠绕包装机控制系统设计[J]. 包装工程,2021,42(17):270-275.
- [2] 杨桂府. 高速小颗粒包装机的设计与实验[J]. 食品工业,2020,41(9):235-238.
- [3] BHATNAGAR A, PATEL R, GUPTA M, et al. Customized sorting and packaging machine [J]. Telecommunication Computing Electronics and Control, 2021, 19(4): 1326-1333.
- [4] 吴强,李国富,林军. 电池包装机凸轮送料机构的稳定性优化[J]. 机械强度,2020,42(5):1153-1160.
- [5] 贺韧,田森,田晶,等. YB25 型卷烟包装机烟包转向机构改进[J]. 食品与机械,2022,38(3):114-117,153.
- [6] 吴晓,陈梓昶,戴鹏飞,等. 一种胶带缠绕机构的设计及力学分析[J]. 机械设计与研究,2021,37(3):194-197.
- [7] 陈宇,武凯,仲太生,等. 计及混合间隙的高速精密机构非线性动态响应分析[J]. 机床与液压,2022,50(8):1-7.
- [8] 刘少鹏,何文雪. 包装生产线自动测量系统设计与实现[J]. 机械制造与自动化,2021,50(2):233-235.

- [9] 王腾辉,陈权,夏文传,等. 基于 ABAQUS 塑性损伤的半灌浆套筒力学性能有限元分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(9):3709-3715.
- [10] 胡青龙. 基于三菱 PLC 控制的全自动分板包装机的设计与实现[J]. 自动化技术与应用,2022,41(1):23-26.
- [11] SUDHAKAR Y N, SELVAKUMAR M, BHAT D K. Investigations on thermo - mechanical properties of organically modified polymer clay nanocomposites for packaging application [J]. Polymers and Polymer Composites, 2021, 29(8): 1191-1199.
- [12] 陆阳,李国富. 自然对流环境下烘道式收缩包装机的传热性能[J]. 机械设计与研究,2021,37(1):205-209,214.
- [13] 孙捷夫,杨巍,潘海. 基于 ADAMS 的供氧传动机构故障诊断与优化[J]. 计算机仿真,2021,38(12):56-60,65.
- [14] 杨忠洋,吴恋恋,刘海军,等. YB48 型硬盒包装机烟支推进器的推烟板结构优化[J]. 烟草科技,2021,54(9):101-107.
- [15] 宋科,曹建福,谭亚丽. 大型龙门式包装机双轴同步控制技术及应用[J]. 现代制造工程,2020(8):147-153,136.

收稿日期:2023-02-01

(上接第 163 页)

基于本文仿真和测试数据,初步得到 $\alpha = 0.87 \sim 0.96$, $\beta = -0.12 \sim -0.32$ 。修正后的仿真模型经该型号后续卫星试验验证,可以较为准确地预测孔板尺寸,后续拟根据其他型号卫星地面试验结果进一步修正,得出具有普适性的修正方程。

5 结语

本文根据某型号卫星的推进系统,基于 AMESim 建立了并联贮箱均衡排放的预测模型,采用自锁阀产品的试验数据进行修正后,应用于后续的地面水试试验。试验验证了仿真模型的可行性并提出了仿真模型的修正参数。修正后的仿真模型可以较为准确地预测该型号后续卫星的孔板尺寸,节约了地面水试试验的时间,可为缩短卫星型号研制周期提供帮助。

参考文献:

- [1] 章玉华. 推进系统并联贮箱均衡排放性能及其控制措施[J]. 火箭推进,2013,39(3):67-71,78.
- [2] 杨俊,何永英,连仁志,等. 双组元落压推进系统应用现状及关键技术[J]. 火箭推进,2016,42(4):21-25,57.
- [3] 胡声超,肖立明,刘畅,等. 上面级并联贮箱推进剂均衡输送技术研究[J]. 导弹与航天运载技术,2019(4):27-31.
- [4] 魏延明,宋涛,梁军强. 基于并联贮箱结构的卫星推进剂剩存量测量方法[J]. 空间控制技术与应用,2010,36(4):25-30.
- [5] 李纯飞,龙春伟,董苑. 某发动机并联贮箱排放均衡性研究[J]. 火箭推进,2018,44(3):76-80,86.
- [6] 罗茂春. 航空发动机控制系统多学科仿真平台[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):94-97.

收稿日期:2022-07-20