

双组元统一推进系统优化改进技术进展

袁 磊, 王 申, 刘 涛, 连仁志
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 不断提高推进剂在轨管理效率, 是应用卫星对推进系统的基本要求, 也是推进系统的重要发展方向。推进剂剩余量在轨高精度测量和并联贮箱均衡排放主动控制, 是提高推进剂在轨管理效率的重要技术手段。针对我国 SAST-5000 卫星平台双组元统一推进系统, 开展了气体注入压力激励方法的关键技术攻关, 并取得重要进展。研究表明: 改良型气体注入压力激励法的推进剂剩余量在轨测量精度达到 $-0.68\% \sim 0.66\%$, 并联贮箱均衡排放控制措施将被动调节的不均衡度控制在优于 1.13% , 主动纠偏措施还可进一步提高并联贮箱排放推进剂的同步性。

关键词: 双组元; 统一推进系统; 剩余推进剂测量; 均衡排放

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0008-05

Progress of optimization for bipropellant uniform propulsion system

YUAN Lei, WANG Shen, LIU Tao, LIAN Ren-zhi
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: Application satellites have a great demand on improving the efficiency of on-board management of propellant, which is also the demand of propulsion system development. The high-accuracy on-board gauging of the propellant remaining quantity and equalizing expulsion active control of parallel tanks are the important technological means for improving the on-board management efficiency of propellant. The propellant gauging technology using gas injecting method and the technology for equalizing expulsion of parallel propellant tanks were investigated for Chinese SAST-5000 satellite platform. The research result shows that the on-board gauging precision of gas injecting method is -0.68% to 0.66% , and the equalizing expulsion of parallel propellant tanks is 1.13% . The active correction measures can also improve the synchronization of propellant expulsion of parallel tanks.

Keywords: bipropellant; uniform propulsion system; remaining propellant gauging; equalizing expulsion

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY02)

作者简介: 袁磊 (1977—), 研究员, 研究领域为空间推进系统设计

0 引言

近年来,地球静止轨道(GEO)卫星平台持续呈现大型化发展趋势,在轨寿命15年或更长、电功率10 kW或更高、总湿重5 t或更大,几乎成为这类卫星特别是商业卫星的基础配置^[1-2]。在我国,限于长征三号乙(CZ-3B)运载火箭的整流罩包络和最大同步转移轨道(GTO)运载能力,卫星的大型化受到先天束缚,5.4~5.5 t已达极限,为此使命规划和总体设计常被迫作出妥协。随着新一代大推力运载火箭长征五号(CZ-5)首飞在即,其12.5 t的GTO运载能力,将使一直以来的约束不复存在。可以预见,我国GEO卫星平台的大型化必将驶入快速、蓬勃的发展道路。GEO大型卫星通常为三轴稳定,目前一般采用双组元统一推进系统(UPS),其特点是远地点发动机与姿控发动机共用推进剂供应系统,远地点发动机工作结束后,剩余推进剂可全部用于后续南北和东西位保以及姿态控制。这样既提高了推进剂利用效率,又减少了贮箱和阀门等组件数量,结构质量轻于分离式系统,进而提高有效载荷在整星的质量比。

对商业卫星,用户或营运者对寿命的精确预测特别关注。精确地预测剩余在轨寿命^[3-6],有利于正确合理的决策后继星发射时机,为后继星研制、生产、安排提供可靠依据,确保卫星运行使命的连续性,减少替代星与原卫星在轨的重叠度,既实现服务的无缝链接,又最大程度降低由于卫星替换造成的损失。而推进剂剩余量多少是制约卫星寿命的一个关键因素,因此,不断提高推进剂剩余量在轨测量的精确度,成为双组元统一推进系统持续改进的一个重要方向。

双组元统一推进系统贮箱数量和布置方式有所不同。我国成熟的DFH-3/4卫星平台采用单贮箱方案,即氧化剂和燃料分别用一个贮箱存贮,卫星主结构采用承力筒,在筒内沿轴线串连布置两个贮箱。法国ALCATEL公司也采用这种方案。另一种是双贮箱并联布局,即两个贮箱装载氧化剂,另两个贮箱装载燃料,对角并联平铺布置。美国波音公司BSS601/702平台、欧洲ASTRIUM

公司均采用这种方案。我国四贮箱平铺GEO卫星平台目前尚处研制阶段,还没有经过飞行试验考核。对四贮箱平铺构型的推进系统,需要关注的一个重要问题就是并联贮箱的均衡排放,即尽量控制两个贮箱中的同种推进剂组元均衡消耗。因为若并联工作的贮箱中一个比另一个消耗的快,会造成卫星质心的变化,给卫星控制带来干扰^[7]。因此,不断提高并联贮箱排放过程的同步性,成为双组元统一推进系统持续改进的另外一个重要方向。

我国在研的SAST-5000公用卫星平台采用双组元统一推进系统,四贮箱平铺构型。立项之初,剩余量在轨测量和均衡排放控制被列为整星重大关键技术项目。研制人员在方案阶段开展了关键技术攻关,并取得重要进展。

1 SAST-5000 推进系统及关键技术

SAST-5000是我国新一代大型GEO卫星平台,推进分系统的主要功能是为卫星从GTO到GEO的变轨提供动力,并在卫星寿命期间完成姿态和轨道控制以及离轨机动等任务。采用双组元统一推进系统,四贮箱平铺构型。图1为推进系统功能图。

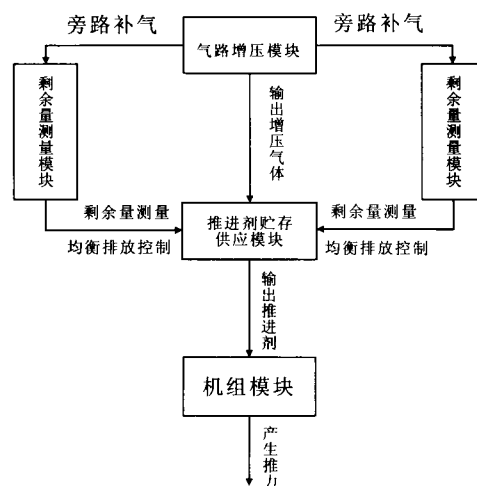


图1 SAST-5000 推进系统功能框图

Fig. 1 Function diagram of SAST-5000 propulsion system

气路增压模块主要作用是在轨道转移阶段,为远地点发动机恒压工作提供维持工作压力所需

的增压气体。推进剂贮存供应模块的作用是贮存、分配和供应发动机工作所需推进剂；机组模块主要包括1台490 N远地点发动机和16台10 NG姿控推力器，分成互相备份的两个分支。推进剂剩余量测量模块主要用于测量贮箱推进剂剩余量，并可根据并联贮箱均衡排放控制的需求，实现对任意单个贮箱的气体激励。

总体对推进剂剩余量在轨测量的精度要求是优于1%，均衡排放控制的精度要求是优于1.5%，这两项指标在国内都是前所未有的。这就要求研制人员必须在继承成熟技术的基础上，对推进系统进行优化改进。为此，针对双组元统一推进系统推进剂剩余量高精度在轨测量、并联贮箱均衡排放精确控制开展了关键技术攻关。

2 推进剂剩余量在轨测量技术进展

目前，我国空间飞行器推进剂剩余量在轨测量主要采用传感器法、热力学参数(PVT)法或记账簿(BK)法。传感器法主要应用在我国921-3推进系统，基本原理是利用拉线式位移传感器的读数反算推进剂剩余量，该方法测量精度适中，但只适用于隔膜式贮箱，对气液混合的表面张力贮箱无效；PVT法只需要利用贮箱遥测压力和温度参数，简单易行，但是精度不高，如果推进系统漏率稍大，则其精度更低；BK法需要记录所有推力器的工作履历，计算并累计推进剂耗量，该方法要求具有充分的推进系统地面试验数据，并要求推力器性能在轨长期稳定，加之姿控推力器以脉冲工作为主，不同脉宽和箱压下脉冲多耗量不同，这进一步制约了BK法的精度；此外，对于多贮箱推进系统，BK法存在明显的缺陷：它只能测量推进剂总的剩余量，而无法得到每个贮箱的剩余量。PVT法和BK法相结合，可以在一定程度上降低剩余量测量的不确定度，但无法从根本上消除或减少PVT法和BK法本身的误差。

气体注入压力激励法属于一种主动激励方法，其基本原理是由高压气瓶给贮箱注入一定量的挤压气体，测量实施激励前、后气瓶、贮箱的压力、温度变化，基于质量守恒和热力学定律计

算贮箱内气体体积，反算推进剂剩余量。气体注入压力激励法虽然需要额外引入一套注气旁路，但构成简单、易于实现，在不大幅增加推进系统干质量和复杂度的前提下，可以获得足够的剩余量测量精度。

此外，利用气体注入压力激励法还可以获得额外增益，即利用其注气系统，选择性地对特定贮箱实施压力激励，可以对并联贮箱排放推进剂的同步性以及氧化剂、燃料消耗的比例实施主动干预和纠正，使推进剂在轨管理效率获得大幅度提升。

气体注入压力激励推进剂测量系统原理图见图2。

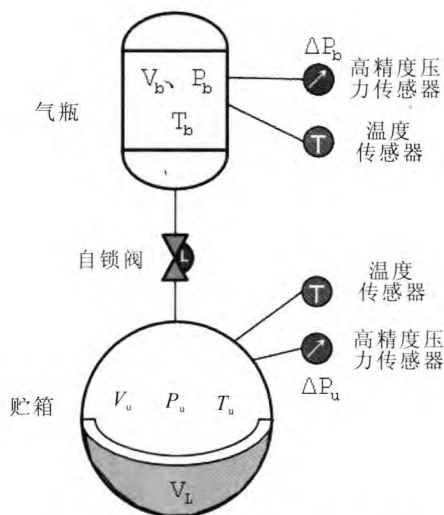


图2 气体注入压力激励法原理图

Fig. 2 Principle of gas injecting method

提出了剩余量测量系统设计方案。波音公司BSS601卫星平台即采用图2所示的激励系统，国内前期原理性验证试验也都是针对类似图2系统开展的，其基本思路是高压气体直接对贮箱进行脉冲式激励。SAST-5000论证过程中，为保证系统工作的安全性，对图2所示系统进行了优化改进，在气瓶和贮箱之间增配气容，并在其上下游设置高压自锁阀，交替工作，实现补气和气体激励的功能。

研究了气体注入压力激励法的计算模型，推导了每一项干扰因素及其对测量误差的影响，并有针对性地提出误差纠正与控制措施。考虑压力

容器弹性变形、非理想气体状态、饱和蒸气压、密度随温度和压力变化等因素,编制了剩余量计算软件。

开展了地面验证试验。硬件系统如图3所示,主要由两个50 L气瓶、一个7 L气容、一个720 L表面张力贮箱和相关控制阀等组成。为精确测量气瓶、气容和贮箱的压力,三者分别设置一个精度为0.01% FS的压力传感器。同时气瓶、气容、贮箱各设置多个精度为0.1℃温度传感器,以精确测量其温度。根据推进剂预算,约80%的推进剂消耗在转移轨道段,静止轨道阶段耗量约20%,因此选择剩余量为20%、10%和5%进行试验,对应工质量分别为135 kg, 85 kg和35 kg。共设置26个工况。



图3 气体注入压力激励法试验系统

Fig. 3 Ground test system for gas injecting method

验证了剩余量测量系统的精度。26轮试验过程中,贮箱激励幅度范围0.001 7~0.050 3 MPa,相当于贮箱压力(1.7 MPa)的0.1%~3%,剩余量测量误差为-0.68%~0.66%,其中误差大于0.5%的有5次,其余21轮次试验测量误差均小于0.5%。

3 并联贮箱均衡排放技术进展

推进剂不均衡排放的本质是并联贮箱的推进剂流量不等。决定流量的因素主要有:一是上下

游压差,二是流阻特性,三是推进剂自身物理特性,如密度等。第三项因素主要由并联贮箱的温度及差异所决定,一般由整星热控保证。而恒压工作模式下,推进剂供应系统中各路贮箱的上下游压差相同,则为调节均衡排放,应重点控制两贮箱及下游组件流阻特性;落压工作模式下,可通过改变贮箱气垫压力,即改变上、下游压差来实现。

分析了并联贮箱均衡排放对整星的影响及影响均衡排放的工程因素。针对转移轨道段和定点长期在轨,对流阻特性差异和贮箱温度差异对均衡排放的影响程度进行了计算,进行了误差链推导,在此基础上提出了贮箱温控、流阻调平等控制措施。

开展了并联贮箱均衡排放的动态仿真。构建了仿真模型,模拟系统气液路流阻特性和恒压、落压流量工况,仿真了并联贮箱的推进剂排放过程,对不同贮箱控温方案、流阻调节方案的效果进行了比较分析,给出了工程化实施建议。

开发了主动纠偏计算软件并开展了数值仿真。并联贮箱排放的不均衡度较大时,可通过气体注入的方法对推进剂剩余量较多的贮箱进行压力激励,改变其上下游压差从而提高其输出流量,进而达到逐步减小两贮箱并联排放不均衡度的目的。其另一个效果是,当非工作状态两贮箱液路连通时,会发生从高压贮箱向低压贮箱的推进剂流动,两贮箱气垫压力逐渐平衡,也使得剩余推进剂量的差异逐渐减小。开发了主动纠偏计算软件,输入贮箱参数,计算不同激励方案的纠偏效果以获取最佳纠偏方案。开展了数值仿真,进一步验证了纠偏计算软件的准确性。

开展了地面验证试验。搭建了地面试验系统(如图4所示),由两个设计容积704 L表面张力贮箱及相关阀门管路组成并联的A、B两个支路,具备不同流量、不同流阻条件下并联贮箱恒压排放、落压排放、增压纠偏排放功能。试验工况包括恒压工况、落压工况、纠偏工况和拉偏工况,其中恒压工况9个,落压工况5个,纠偏工况4个,拉偏工况4个,共计22个工况,覆盖了推进系统实际使用过程中可能发生的各种情况。验

证了均衡排放控制措施的有效性。



图 4 并联贮箱均衡排放试验系统

Fig. 4 Ground test system of equalization expulsion of parallel propellant tanks

全部 22 个工况，试验结果与分析和数值仿真结果吻合。直接验证了仿真计算的准确性、激励软件的精确性、流阻特性要求及流阻调节工程化措施对不均衡排放控制的有效性，以及贮箱激励措施对不均衡排放调节的有效性。按目前的措施及工艺水平，即便不考虑主动纠偏，恒压阶段转移轨道末期的极限不均衡度也可控制在 1.13% 以内。

4 结束语

结合 SAST-5000 卫星平台研制，针对推进剂

剩余量在轨测量技术、并联贮箱均衡排放技术开展了关键技术攻关，并取得重要进展。改良型气体注入压力激励方法将推进剂剩余量在轨测量的精度提高到优于 1%，并联贮箱均衡排放控制措施将被动调节的不均衡度控制在 1.13% 以内，主动纠偏措施的有效性和纠偏控制软件的准确性得到充分验证。采用这两项技术，可以使双组元统一推进系统的性能得到大幅优化和改进，为卫星在轨寿命健康运行提供更加坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 朱贵伟. 全球卫星移动通信产业现状与发展趋势[J]. 国际太空, 2011 (12): 44-48.
- [2] 张桂英, 李力, 陈庆元, 等. 美国军事通信卫星发展趋势分析及启示[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(6): 1-3.
- [3] Yendler B. Review of propellant gauging methods, AIAA 2006-939[R]. USA: AIAA, 2006.
- [4] 袁磊, 王申, 沈斌. 一种推进剂剩余量在轨测量方法研究[J]. 火箭推进, 2013 (5): 87-91.
- [5] 魏延明, 宋涛, 梁军强. 基于并联贮箱结构的卫星推进剂剩余量测量方法[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(4): 25-30.
- [6] 达道安, 张天平. 一种适合我国在轨卫星液体推进剂剩余量测量的技术方案[J]. 推进技术, 1997, 18(6): 98-102.
- [7] 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 (3): 67-71.

(编辑: 王建喜)