

卫星在轨推进剂补加量测量方法精度研究

李亚菲¹, 吴凡¹, 刘建彪¹, 默朝明¹, 景育²

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘要: 卫星在轨推进剂补加量的精确测量技术是在轨补加任务的关键技术之一。本文结合型号攻关结果, 提出 2 种在轨推进剂补加量测量方法数学模型, 分别是压力-体积-温度(PVT)法和超声波流量计法。首先, PVT 法是一种通过补加前后受体卫星贮箱剩余量反算补加量的间接测量方法, 而超声波流量计法是利用超声波顺逆流相位差进行测量的直接测量方法; 其次, 在推进剂补加量测量模型的基础上, 进一步通过取变分的手段提出 2 种模型的精度分析解析模型, 解析的精度分析模型不仅可用于定性分析影响测量精度的因素, 还可量化评价各个因素对测量精度的影响; 最后, 利用现有在研单机的精度水平及精度分析解析模型分析了 2 种方法的测量精度, 验证了方法的有效性。

关键词: 补加量测量; 压力-体积-温度(PVT); 超声波流量计; 变分; 精度分析

中图分类号: V 419

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2023.02.019

Research on the Accuracy of Measurement Methods for On-orbit Satellite Propellant Refueling Quantity

LI Yafei¹, WU Fan¹, LIU Jianbiao¹, MO Chaoming¹, JING Yu²

(1. Shanghai Aerospace System Engineering Research Institute, Shanghai, 201109, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: The accurate measurement of on-orbit satellite propellant refueling quantity is one of the key technologies for on-orbit refueling missions. In this paper, based on engineering practice, two mathematical models for the measurement of on-orbit satellite propellant refueling quantity are proposed, i.e., the pressure-volume-temperature (PVT) method and the ultrasonic flowmeter method. The PVT method is an indirect measurement method relying on the remaining amount of the tank before and after on-orbit refueling, while the ultrasonic flowmeter method is a direct measurement method relying on the forward and reverse current phase difference. Based on the propellant refueling quantity models, two analytical models for the accuracy analyses of the two measurement methods are put forward by means of variation. The analytical models can be used not only to qualitatively analyze the factors affecting the measurement accuracy but also to quantitatively evaluate the effect of each factor on the measurement accuracy. Finally, the measurement accuracy of these two methods is quantitatively analyzed by means of the accuracy level and the analytical models for accuracy analysis. The results demonstrate the effectiveness of the methods.

Key words: measurement of refueling quantity; pressure-volume-temperature (PVT); ultrasonic flowmeter; variation; accuracy analysis

0 引言

在轨补加可类比于现在的“空中加油”, 通过为空间飞行器在轨补加燃料及氧化剂, 可提高飞行器的机动能力, 延长飞行器使用寿命, 增强飞行器的

应用效能。推进剂在轨补加量精确测量是在轨补加任务的关键技术之一^[1-5]。

美国从 20 世纪 80 年代开始开展推进剂在轨补加技术的研究, 并于 2007 年实施了基于肼介质的单

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-05-18

作者简介: 李亚菲(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为推进总体技术、轨道设计及轨道控制技术。

组元在轨补加集成试验^[6]。2013年,在各国技术的支持下,RRM项目针对不具备专门在轨燃料加注接口的卫星,采用直接传输推进剂的方式,实现燃料加注^[7]。国内相关专业研究所和各高校相继开展了在轨补加技术研究工作,已完成天宫二号推进剂在轨补加技术研制和试验验证工作,共执行3次推进剂补加试验,总补加量超过700 kg。针对卫星基于真实推进剂的在轨加注,目前还未开展在轨试验,国内尚处于地面攻关或研制阶段,关于卫星的在轨补加任务设计也在初步研究中^[8]。

卫星推进系统,其贮箱一般为表面张力类型,贮箱的类型一定程度上会限制在轨补加量的测量方案。针对卫星推进剂补加,文献[9]提出一种基于理想气体状态方程的压力-体积-温度(Pressure-Volume-Temperature, PVT)法,没有建立解析的测量模型及测量精度分析模型。PVT法属于一种通过补加前后贮箱推进剂质量来间接反算补加量的测量方式。文献[10]提出一种基于超声波流量计的补加量测量方法,采用时差法,文中未给出测量精度分析模型。超声波流量计测量属于一种直接测量模式,其作为一种非接触式测量方式以其固有的优点在石油、医药、水资源管理等领域有着广泛的应用,应用的方法有时差法和相位差法。文献[11-14]利用超声波流量计及时差法来测量流体流量,文献[15]利用相位差法测量海水中的声速。关于相位差法,文献[16-18]分析了几种计算相位的方法,可作为在轨超声波流量计技术攻关的参考。文献[19]将工业应用中国产的超声波流量计与美国ORE公司的测量结果进行比对。目前基于真实推进剂的超声波流量计还没有在轨应用案例。

本文在型号攻关研制的基础上,建立了2种在轨补加加注量测量解析模型,即PVT法与基于相位差法的超声波流量计测量法,并在2个测量模型的基础上,通过求取变分,分别提出2种测量模型的精度分析解析模型。最后通过数值仿真量化分析了2种测量模型的相对补加量精度,并对2种测量模型进行对比,验证了方法的有效性。

1 问题描述

推进剂在轨补加任务涉及服务卫星和受体卫星2类卫星。受体卫星的推进剂属于易耗品,尤其对于空间机动类飞行器,推进剂的携带量直接影响

该类飞行器的载荷效能^[20-21]。服务卫星作为一种主动服务卫星,通过在轨补加可以把推进剂从服务卫星贮箱转移到受体卫星贮箱,满足受体卫星的在轨补加需求,如图1所示,过程中需要通过在轨手段测量推进剂补加量,目前可行的在轨补加量测量方法有PVT法和超声波流量计法2种^[22-25]。

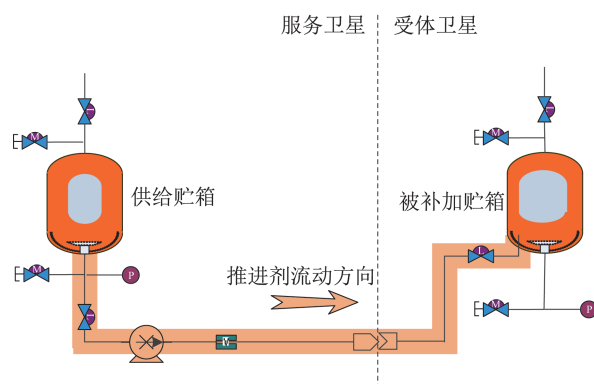


图1 在轨推进剂补加原理

Fig.1 Schematic diagram of the principle for on-orbit propellant replenishment

PVT法是通过补加前后受体卫星贮箱气垫的压力、温度、容积等参数来间接获取推进剂补加量的一种方法。假设被补加贮箱补加开始前贮箱气腔压力、容积、温度分别为 p_0 、 V_0 、 T_0 ,补加结束后被补加贮箱的气腔压力、容积、温度分别为 p_1 、 V_1 、 T_1 ,则推进剂补加量 ΔV 为

$$\Delta V = V_0 \left(1 - \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0} \right) \quad (1)$$

由式(1)可知,PVT法属于间接测量方法,压力及温度参数属于推进系统常规遥测,方法简单易实现,不需要增加额外的配置,如图2所示。

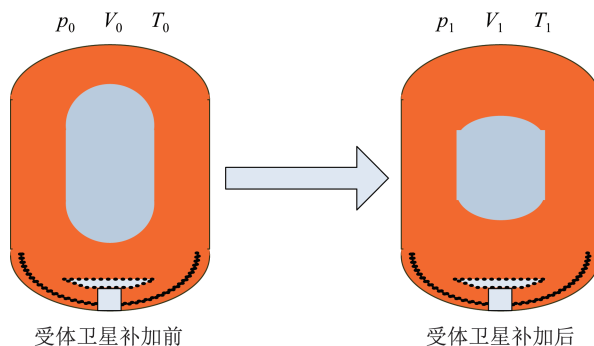


图2 PVT法测量

Fig.2 Schematic diagram of measurement by the PVT measurement method

超声波流量计相位差法补加量测量方法利用超声波在流体中的顺逆流相位差获取瞬时推进剂的补加流量,通过时间的累积获取补加量。这种方法在地面工业应用中较多。卫星的超声波流量计补加量测量方法需要考虑超声波在真实推进剂的传播特性和真空环境等因素。假设推进剂补加体积流量为 q , 超声波在静态推进剂中的流速为 c , 管路直径为 D , 超声波测量的管路长度为 L , 超声波频率为 f , 超声波顺逆流相位差为 $\Delta\varphi$, 流量修正系数为

k_h , 则基于超声波流量计的推进剂补加量测量模型为

$$q = \frac{c^2 \Delta\varphi D^2}{16Lfk_h} \quad (2)$$

相位差法基于超声波流量计的补加量测量属于一种直接测量方法,系统方案中需要增加测量管路、超声波探头及测量单机等。基于超声波流量计的补加量测量取决于超声波在推进剂中的传播速度、顺逆流相位差、管路直径测量、管路长度测量等因素。超声波流量计法如图 3 所示。

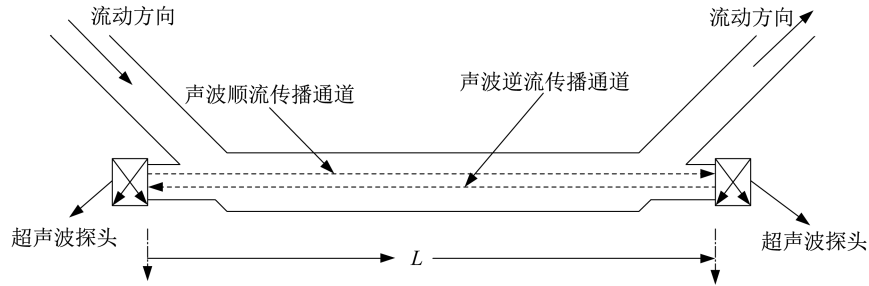


图 3 超声波流量计法测量

Fig. 3 Schematic diagram of measurement by the ultrasonic flowmeter measurement method

在上面 2 种测量数学模型建立的基础之上,下面通过变分手段建立 2 种方法精度分析的解析数学模型,分析 2 种测量方法的精度影响因素。

2 测量精度分析

2.1 PVT 测量法

PVT 法通过补加前后受体卫星贮箱的气垫容积差异来间接测量推进剂补加量,对于这种测量方法精度的评估模型采用取变分的方法,对式(1)取一阶变分

$$\begin{aligned} \delta\Delta V = & \delta\left(V_0\left(1 - \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0}\right)\right) = \\ & \delta V_0\left(1 - \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0}\right) - \frac{\delta p_0 T_1}{p_1 T_0} V_0 - \frac{p_0 \delta T_1}{p_1 T_0} V_0 + \\ & \frac{p_0 T_1}{p_1^2 T_0} V_0 \delta p_1 + \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0^2} V_0 \delta T_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: δV_0 为补加前贮箱初始气垫容积的测量误差; δp_0 为补加前贮箱初始气垫压力的测量及采集误差; δp_1 为补加后贮箱气垫压力的测量及采集误差; δT_0 为补加前贮箱气垫温度的测量及采集误差; δT_1 为补加后贮箱气垫温度的测量及采集误差; δV 为补加

量的绝对测量误差。

基于 PVT 的补加量测量精度主要取决于在轨补加前 δp_0 、 δT_0 的大小,在轨补加后 δp_1 、 δT_1 的大小以及加注开始前受体卫星贮箱气腔体积的测量精度。

本文主要分析压力及温度测量精度对补加量的测量精度影响,所以式(3)中的第一项先不考虑,令 $\delta V_0 = 0$, 定义 $\frac{\delta\Delta V}{\Delta V}$ 为 PVT 法的相对补加量测量精度,则

$$\begin{aligned} \frac{\delta\Delta V}{\Delta V} = & \left[\left(-\frac{\delta p_0 T_1}{p_1 T_0} V_0 - \frac{p_0 \delta T_1}{p_1 T_0} V_0 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{p_0 T_1}{p_1^2 T_0} V_0 \delta p_1 + \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0^2} V_0 \delta T_0 \right) / V_0 \left(1 - \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

通过化简转化为

$$\begin{aligned} \frac{\delta\Delta V}{\Delta V} = & \left[\left(-\frac{\delta p_0 T_1}{p_1 T_0} - \frac{p_0 \delta T_1}{p_1 T_0} + \frac{p_0 T_1}{p_1^2 T_0} \delta p_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0^2} \delta T_0 \right) / \left(1 - \frac{p_0 T_1}{p_1 T_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知 PVT 法相对补加量测量精度主要取决于在轨补加前 δp_0 、 δT_0 的大小,以及在

轨补加后 δp_1 、 δT_1 的大小。通过减小 δp_0 、 δT_0 、 δp_1 、 δT_1 的大小来提高相对加量测量精度。

2.2 超声波流量计测量法

超声波流量计属于直接测量补加量的一种方法,对于这种测量方法精度的分析模型本文也采用取变分的方法,对式(2)取一阶变分

$$\delta q = \delta \left(\frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L f k_h} \right) = \frac{2c \Delta \varphi D^2}{16 L f k_h} \delta c + \frac{c^2 \delta(\Delta \varphi) D^2}{16 L f k_h} + \frac{2c^2 \Delta \varphi D \delta D}{16 L f k_h} - \frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L^2 f k_h} \delta L - \frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L f^2 k_h} \delta f \quad (6)$$

式中: δq 为瞬时体积流量的测量误差; δc 为超声速度的测量误差; $\delta(\Delta \varphi)$ 为顺逆流相对相位差的测量误差; δD 为管路直径的测量误差; δL 为管路长度的测量误差; δf 为超声波频率的测量误差。

引入相对补加量测量精度的概念,定义 $\frac{\delta q}{q}$ 为超声波流量计的瞬时相对补加量测量精度,则

$$\frac{\delta q}{q} = \left[\left(\frac{2c \Delta \varphi D^2}{16 L f k_h} \delta c + \frac{c^2 \delta(\Delta \varphi) D^2}{16 L f k_h} + \frac{2c^2 \Delta \varphi D \delta D}{16 L f k_h} - \frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L^2 f k_h} \delta L - \frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L f^2 k_h} \delta f \right) \right] \left/ \left(\frac{c^2 \Delta \varphi D^2}{16 L f k_h} \right) \right. \quad (7)$$

化简后相对补加量测量精度为

$$\frac{\delta q}{q} = \frac{2\delta c}{c} + \frac{\delta(\Delta \varphi)}{\Delta \varphi} + \frac{2\delta D}{D} - \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta f}{f} \quad (8)$$

基于超声波流量计的瞬时相对测量精度主要取决于超声波在推进剂中的速度、顺逆流相位差、管路直径、管路长度、超声波频率等的相对测量精度。通常,超声波在推进剂中的速度、管路直径、管路长度、超声波频率等的相对测量精度属于常值偏差,可通过地面标定去除这些偏差,则通过标定后基于超声波流量计的瞬时相对测量精度主要取决于顺逆流相位差的相对精度。

$$\frac{\delta q_{\text{标}}}{q} = \frac{\delta(\Delta \varphi)}{\Delta \varphi} \quad (9)$$

为了与PVT法的分析模型保持一致,需要把瞬时相对补加量测量转化为相对补加量测量精度分

析模型。由于 $\delta \Delta V = \delta q_{\text{标}} t$, $\Delta V = q t$,则超声波流量计的相对补加量测量精度为

$$\frac{\delta \Delta V}{\Delta V} = \frac{\delta q_{\text{标}}}{q} = \frac{\delta(\Delta \varphi)}{\Delta \varphi} \quad (10)$$

式中: $\delta \Delta V$ 为累计补加量测量误差; ΔV 为累计补加量,则相对补加量测量精度就等价于顺逆流相对相位差的相对测量精度。

3 仿真计算

结合现有在轨补加技术的单机研制水平利用文中的解析公式,量化分析2种在轨补加量测量方法的测量精度,并进行2种方法测量精度的对比分析。

由式(5)可知,PVT法测量的精度主要受限于压力传感器和温度传感器的测量精度,结合现有受体卫星的压力、温度敏感器测量水平以及受体卫星的单贮箱补加量,利用式(5)量化分析PVT法相对补加量测量精度,见表1。

表1 PVT法相对补加量测量精度

Tab.1 Measurement accuracy of relative refueling quantity by the PVT method

参数	参数值
初始贮箱压力/MPa	1.6
补加量/L	25
补加前后贮箱温度/℃	20
压力测量及采集总精度/MPa	0.014 8
温度测量及采集精度/℃	0.6
补加量相对测量总精度(100 L贮箱气垫)/%	6
补加量相对测量总精度(200 L贮箱气垫)/%	15

由式(10)可知,基于相位差的超声波流量计法测量精度主要受限于相位差的测量精度,目前超声波流量计单机的一些基础参数见表2,在此基础上分析了不同相位差测量精度对应的氧化剂和燃料的相对补加量测量精度。

2种方法分析结果表明:

1) 对于PVT法,受体卫星贮箱气垫体积越大,相对补加量测量精度越低;

2) 对于PVT法,压力、温度传感器的测量及采集精度与相对补加量测量精度成正比,如果能在现有基础上将压力、温度传感器的采集精度提高一个数量级,PVT法的相对补加量测量精度量级将与超声波流量计法相当;

表 2 超声波流量计法相对补加量测量精度

Tab. 2 Measurement accuracy of relative refueling quantity by the ultrasonic flowmeter method

参数	参数值
管路直径/mm	6
管路长度/mm	200
四氧化二氮中声速/(m·s ⁻¹)	1 013
甲基肼中声速/(m·s ⁻¹)	1 414
最小流量/(mL·s ⁻¹)	25
四氧化二氮相对测量精度(4°相位精度)/%	0.65
四氧化二氮相对测量精度(8°相位精度)/%	1.30
甲基肼相对测量精度(4°相位精度)/%	1.25
甲基肼相对测量精度(8°相位精度)/%	2.50

3) 对于超声波流量计法,相对补加量测量精度与相对相位差的测量精度成正比,相位差精度越高,相对补加量测量精度就越高;

4) 对于超声波流量计法,相对补加量测量精度与受体卫星贮箱气垫体积大小无关;

5) 基于目前的在轨补加敏感器研制水平,超声波流量计法的测量精度要高于 PVT 法。

4 结束语

补加量测量精度分析是在轨补加技术研究中一个很重要的问题。首先,提出了 2 种可行的在轨补加量测量数学模型,分别是 PVT 法测量模型和超声波流量计法测量模型;其次,通过取变分给出 2 种测量模型的解析的精度分析公式;最后,通过在轨补加技术的工程研制水平量化分析 2 种补加量测量方法的精度。结果表明:PVT 法相对补加量测量精度取决于压力、温度传感器的测量精度和补加初始气垫容积大小,超声波流量计法补加量测量精度取决于相位差的测量精度,超声波流量计的测量精度高于 PVT 法。

参考文献

- [1] 吴文跃. 空间站的在轨推进剂再加注问题[J]. 推进技术, 1988(2): 50-55.
- [2] 鲁宇, 汪小卫, GIORGIO S, 等. 在轨加注站概念研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(1): 1-7.
- [3] 王磊, 厉彦忠, 马原, 等. 液体推进剂在轨加注技术与加注方案[J]. 航空动力学报, 2016, 31(8): 2002-2009.
- [4] 马原, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂在轨加注技术与方

案研究综述[J]. 宇航学报, 2016, 37(3): 245-252.

- [5] 魏延明, 潘海明. 空间机动服务平台在轨补给技术研究[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(2): 18-22.
- [6] 饶大林, 闫指江, 王书廷, 等. 常规推进剂在轨加注技术研究现状与趋势[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(5): 50-54.
- [7] 田甜, 刘海印. 美国航空航天局机器人在轨加注任务简析[J]. 航天系统及技术, 2019(4): 42-47.
- [8] 韩鹏, 李兴龙, 李传江, 等. “多对多”模式下 GEO 卫星在轨加注任务规划[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(2): 8-14.
- [9] 黄立钠, 景育, 朱文杰, 等. 在轨补加技术在小卫星上的应用[J]. 卫星与网络, 2015(12): 72-75.
- [10] 于洋, 丁凤林, 宗光华. 在轨加注用超声波流量计的设计与试验[J]. 中国空间科学技术, 2012, 32(4): 77-83.
- [11] 张俊. 基于 DSP 的超声波流量计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [12] 姜勇. 时差法超声波流量计设计与研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [13] 晁智强, 盛锋, 韩寿松. 时差法超声波流量计误差分析与研究[J]. 液压与气动, 2009(6): 64-67.
- [14] 鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [15] 吴黎杰, 蒋志迪, 张晴月. 基于相位差法海水声速测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 60-66.
- [16] 邹卫华, 师奕兵, 王志刚. 基于 DSP 的相位差测量系统设计[J]. 测控技术, 2007, 26(5): 76-78.
- [17] 饶晓红. 高精度相位差测量系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [18] 叶林, 周弘, 张洪, 等. 相位差的几种测量方法和测量精度分析[J]. 电测与仪表, 2006, 43(4): 11-14.
- [19] 李智录, 杨震, 张东生. 超声波流量计测流精度的实验研究[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1): 69-72.
- [20] 徐广春, 李卫彬. 无损检测超声波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [21] 张恭庆. 变分学讲义[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [22] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [23] 刘晓红. 流体力学与热工学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [24] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] 林书玉. 超声技术的基石: 超声换能器的原理及设计[J]. 物理, 2009, 38(3): 141-147.