

俄罗斯空间站推进剂补加程序分析

江铭伟

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 补加程序是推进剂补加系统的关键技术之一, 而目前也仅有俄罗斯有成功应用的经验。根据目前获取的资料, 经过计算、仿真和论证, 对俄罗斯空间站的补加系统进行了研究, 分析了 ATV 对空间站进行推进剂补加的程序, 初步得到了俄罗斯空间站推进剂补加的特点, 可作为目前我国空间站方案论证期间补加程序的参考。

关键词: 空间站; 推进剂补加系统; 燃料补加程序

中图分类号: V476-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0008-05

Analysis of propellant refueling program for Russian Space Station

JIANG Ming-wei

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: The refueling program is one of the key technologies of propellant refueling system, for which only Russians has succeeded in application until now. The refueling system of Russian Space Station was researched on the basis of material on hand, calculation, simulation and argumentation. The propellant refueling program of ATV for space station was analyzed in this paper. The propellant refueling program of Russian Space Station was preliminarily obtained, which can be used as a reference during the scheme argumentation of refueling program for Chinese space station.

Keywords: space station; propellant refueling system; refueling program

0 引言

空间站的运行轨道一般在 300~500 km, 受空气阻尼作用, 每天轨道衰减 100 m 左右, 必须定期进行轨道提升和轨道维持, 消耗大量的推进剂。发射空间站时一次性带足推进剂是不现实

的, 通过货运飞船对空间站定期进行补加, 是目前实现空间站长期在轨工作的必要手段。在空间站的补加领域, 苏联(俄罗斯)无疑是最成功的代表, 上个世纪, 苏联独自发射了礼炮 1 号~7 号与和平号的空间站, 并成功完成了多次推进剂补加。目前国际空间站涉及补加的舱段均由俄罗斯独立完成, 欧洲的 ATV 的补加模块则是全部购

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-01-25

作者简介: 江铭伟 (1976—), 男, 高级工程师, 研究领域为空间飞行器推进系统

买俄罗斯的产品。

由于俄罗斯对推进剂补加的技术资料控制较严，难以详细了解其补加系统方案。本文根据前期获取的资料，进行了整理和计算分析，对俄罗斯的推进/补加方案和补加程序进行了分析，希望对我国空间站的补加研究有一定的借鉴作用。

1 俄罗斯空间站补加系统

苏联首先在礼炮 6 和 7 号空间站上实现了推进剂的在轨补加，后续建成的和平号和国际空间站均采用了基本相同的补加方案。1986 年发射的和平号，原设计运营时间为 5 年，但实际工作达 15 年之久，致使上世纪 80 年代末已装配、测试完成的和平号-2，也失去了飞行试验的机会^[1]。礼炮号或和平号-2 等地面装配好却没有发射的空间站只有分解，部分产品卖给了其他国家，在博物馆展出或作研究用。这些产品和飞行产品的状态一致。图 1 是补加手控操作面板，而且应该是礼炮 6 和 7 号的补加手控操作面板，因为礼炮 6 和 7 号空间站上有 6 只膜盒贮箱，而和平号只有 4 只贮箱。图 1 所示的系统组成和管路连接关系能够比较清晰的反映俄罗斯的补加系统原理，和平号和国际空间站也继承了这个补加系统。目前在佛罗里达的科学与发现博物馆中，公开展览的还有一块补加操作面板，它是原和平号的备份空间站上的产品。

结合其他资料进行分析，礼炮 6 号空间站推进及补加系统的主要特点为：

- 1) 推进系统属双组元恒压挤压推进系统；
- 2) 金属膜盒式贮箱 6 只，容积约 230 L，按氧燃分组，每种组元分为主备 2 组，贮箱前后均采用自锁阀并联电爆阀进行管理；
- 3) 增压氮气瓶（12 只）分为 4 组，4 路气体成“井”字形，每路有高压自锁阀和减压阀；
- 4) 轨控发动机 2 台为再生冷却双向摇摆，单台推力 3 090 N；
- 5) 增压气体采用自身“回用”的方案，在增压气路上接入串有压气机的旁路，以便将已降压并进入贮箱气腔的增压气体再压回到高压气瓶

内。共配置了 3 台压气机，压气机通过自锁阀进行管理，实现故障情况下的隔离和切换备份。

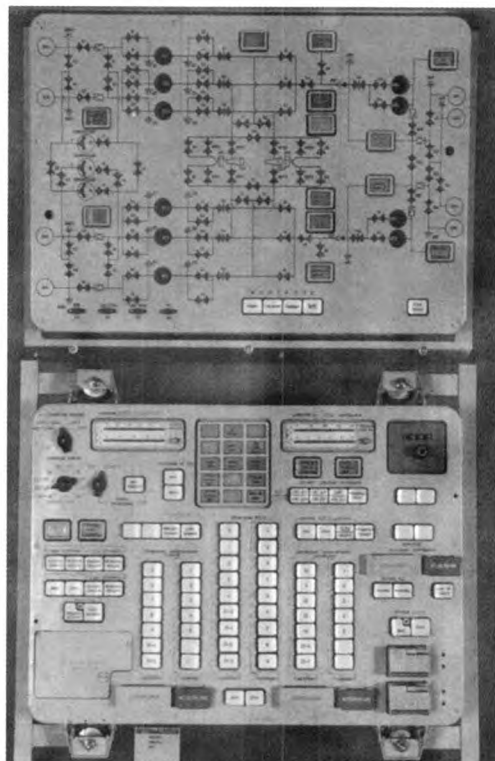


图 1 补加控制面板

Fig. 1 Refueling control board

进步号货运飞船补加系统的主要特点如下：

- 1) 采用了双组元恒压挤压系统；
- 2) 4 只钛合金气瓶，分为 2 组，补加的气密检查和吹除的气源由货船气瓶经减压阀后提供；
- 3) 4 只膜片贮箱，按氧燃分组，在吹除气路的减压阀后再接入减压阀挤压贮箱，因此货船补加的挤压压力较低，约为 0.57 ~ 0.78 MPa。

根据上述信息，进步号货船向礼炮 6 或 7 号空间站补加的系统原理图如图 2 所示。

俄罗斯承担了国际空间站上“曙光号”功能舱（Functional Cargo Block, FGB, 1998 年 11 月 20 日发射成功）和“星辰号”服务舱（Service Module, 2001.07.12 发射成功）。曙光号系统中共有 16 个金属膜盒式贮箱（氧化剂和燃料各 8 个），可加注推进剂 5 760 kg。“星辰号”生命保障服务舱（DOS-8），有 4 只 200 L 左右的金属膜盒式贮箱，可提供约 860 kg 的可用推进剂。星辰号与曙光号对接后，曙光号的轨控发动机不再

使用,主要起到存贮推进剂的作用,星辰号负责国际空间站的轨控功能^[2]。星辰号(DOS-8)实际上与和平号(DOS-7)为一个平台的产品,两

者的推进及补加系统基本相同,不同之处在于,为了实现同曙光号的推进剂共用,增加了同曙光号连接的相应的对接管路和阀门。

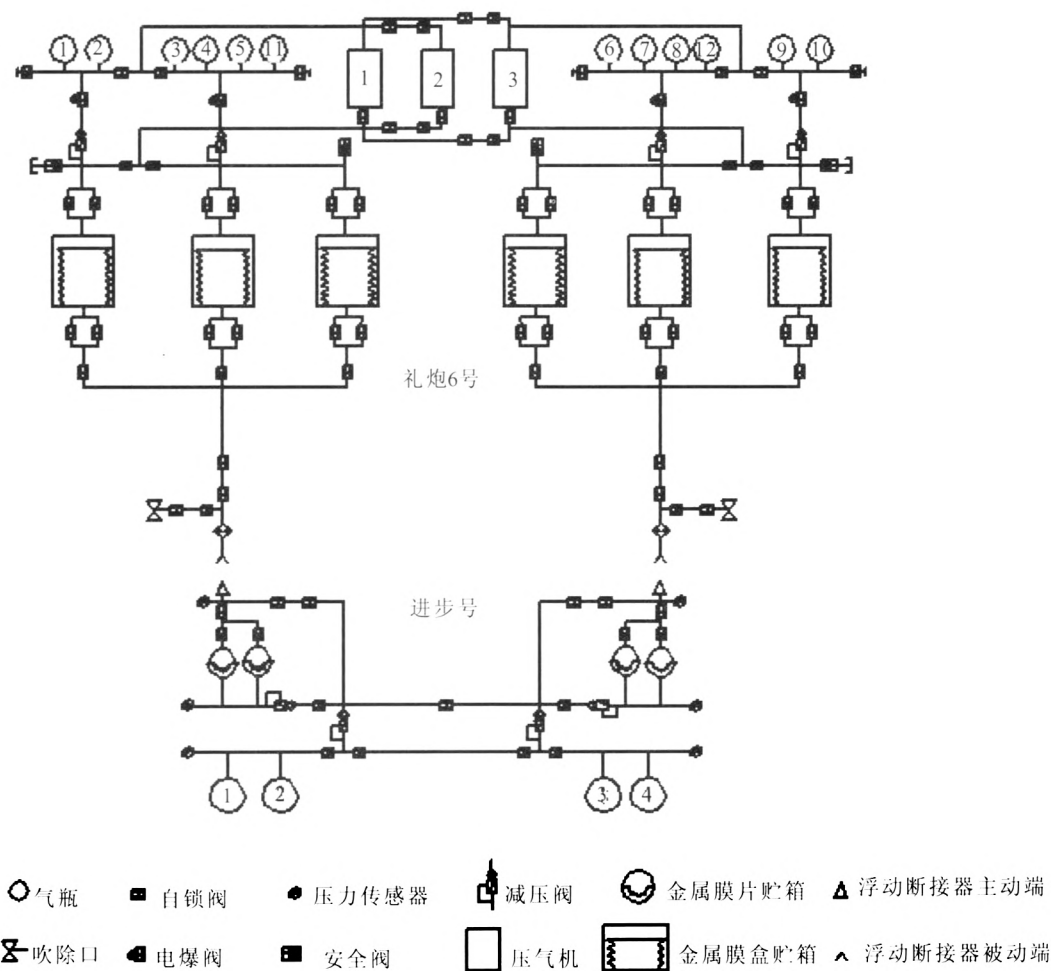


图2 进步号货船向礼炮6号补加

Fig. 2 Refueling for Salyut 6 by Progress

2 俄罗斯补加的基本程序

2.1 进步号货船为和平号补加过程

俄罗斯空间站推进剂补加过程的细节暂时无法从公开发表的俄文资料中获得,但 Harland^[3]对进步号货船向和平号的补加程序有所论述,补加过程主要由以下程序组成:

1) 首先通过货船提供的增压氮气确认补加管路系统的密封性,可以由地面发指令或者由航天员执行,和平号是由航天员完成的。

2) 然后通过压气机将膜盒贮箱的增压氮气(约2 MPa)增压到22 MPa后回抽到气瓶中。由于压气机的功率约为1 kW,对和平号是一个很大的负担,因此压气机仅能在阳照区工作,在几天内断断续续的进行。当膜盒贮箱的增压氮气压力下降到0.3 MPa时,压气机停止工作。

3) 靠货船膜片贮箱 0.8 ± 0.05 MPa的挤压压力将推进剂挤入空间站的膜盒贮箱,先进行氧化剂的补加,补加完成后,对氧化剂管路进行排放,然后进行燃料路的补加和排放。

4) 最后用氮气吹除补加,保证分离时,不

会有腐蚀性推进剂的残留^[4]。

由于压气机的频繁启动和工作, 整个补加过程通常会持续 1 周时间。

2.2 国际空间站的补加过程

向国际空间站进行补加的飞行器主要有进步 M1 货船和 ATV。为了适应国际空间站的补加, 进步 M1 货船相对于进步号货船主要改进有:

1) 货舱内的推进贮箱由 4 只增加到 8 只, 一次可补加量为 1 950 kg, 而进步号仅为 860 kg;

2) 增压气体改为氦气, 补加贮箱的挤压压力也增加到 1.9 ± 0.2 MPa。

国际空间站中, 星辰号和曙光号均具备接受推进剂补加的能力, 但直接与货船对接的星辰号的贮箱仅能接受 860 kg 的推进剂, 曙光号的 16 只贮箱必然需要跨舱接收推进剂的补给。服务舱全长 13.1 m, 曙光号功能舱全长 12.99 m, 补加管路经对接机构穿过星辰号进入曙光号内膜盒贮箱, 需要更大的挤压压力, 这是进步 M1 挤压压力增加的一个原因。

由于 ATV 的补加模块和对接机构均为直接购买俄罗斯的产品, ATV 一次最多能补加的推进量为 860 kg, 包括 306 kg 燃料(UDMH)和 554 kg 氧化剂 (NTO)^[5], 而且 ATV 对接的国际空间站星辰号的推进系统与和平号状态基本相同, 补加过程也是在俄罗斯专家的控制下完成的, 因此这个补加过程基本反应了俄罗斯的补加时序。

ATV 进行补加时, 补加过程也比较清晰。ATV 的补加过程分为 5 步:

1) 电子设备和系统自检, 例如 ATV2 (Kepler) 于 2011 年 2 月 19 日进行。

2) ATV 到国际空间站的补加管路检漏, 例如 ATV2 于 2011 年 3 月 22 日 2: 00 至 9: 00 进行。这个步骤在 ATV 控制中心和莫斯科控制中心的紧密配合下分 3 步进行。首先由 ATV 控制中心将 ATV 及补加系统调整到一个特定的模式; 然后由莫斯科控制中心打开阀门向补加管路中充入 1.9 MPa 的氦气, 综合考虑温度和压力进行判断; 在得到补加管路密封检查正常的信息后, ATV 控制中心将 ATV 调回静态模式。

3) 启动压气机抽气。

4) 推进剂传输。2008 年 6 月 17 日, 不到半小时的时间里, ATV1 将 280 kg 的 UDMH (偏二甲肼) 和 530 kg 的四氧化二氮 (N_2O_4) 转移到国际空间站上俄罗斯的推进剂贮箱内。在补加操作中, 莫斯科控制中心约有 20 人在为国际空间站工作, 30 人在图卢兹的 ATV 自动控制中心监控 ATV 的所有关键功能。

2011 年 5 月 17 日 ATV2 进行了补加贮箱的增压, 5 月 18 日完成了推进剂的补加。

5) 管路吹除。推进剂转移后一天, 莫斯科的 ATV 小组吹除了 ATV 与空间站之间的推进剂传输管路, 以减少与空间站分离时 13 kg 残留推进剂泄漏带来的风险^[6]。

2.3 补加过程一些参数分析

2.3.1 抽气时间

俄罗斯空间站采用 3 套压气机, 同时配套了 4 台减压器和相关的安全阀、压力传感器和过滤器, 整个压气机置于一个充有氮气或空气密封容器内, 由风机实现换热。排气能力为 400 NL/h 或者 40 MPa·L/h, 压气机入口设置减压阀, 将入口压力稳定在 0.2 MPa。

和平号的膜盒贮箱与星辰号相同, 满载状态单个膜盒液腔容积为 200 L 的贮箱, 气腔容积为 85 L, 膜盒贮箱的总容积为 285 L, 挤压压力约为 1.8~2 MPa, 压气机抽气结束时, 贮箱末压为 0.3 MPa。贮箱初始的挤压压力按 2 MPa 考虑, 将贮箱内总容积 285 L 的气体完全抽出的时间为 $(2-0.3) \times 285/40=12.1$ h。

国际空间站上还有 400 L 和 330 L 另外 2 种规格的膜盒贮箱, 对它们抽气的时间还要更长。

2.3.2 补加流速

ATV 补加 280 kg (约为 354 L) 的 UDMH 和 530 kg 的四氧化二氮 (约为 367 L), ATV 的补加平均速率接近为 24 L/min, 约为 0.4 L/s 的流量。

2.3.3 补加管径

利用 AMEsim 软件对图 2 的补加管路系统建模。ATV 和星辰号对接时, 补加管路从 ATV 中部到星辰号尾部, 补加管路长度粗略估计为 6 m。首先对不含阀门的管路进行了仿真计算, 结果表明补加管路内径必须大于 8 mm, 才能保证在半

小时内完成补加。0.4 L/s 的流量下,补加管路大于 14 mm 时,管路本身产生的沿程流阻很小,更大的管径减少沿程流阻已没有意义。实际上系统的流阻主要取决于阀门流阻和管路局部损失,由于无法获得俄罗斯阀门流阻的数据和详细的管路布局,按系统流阻 60%或 80%为阀门流阻和管路局部损失考虑,ATV 的补加管路内径可能为 12 mm 或 14 mm。

2.4 和平号和国际空间站补加程序的比较

国际空间站的补加程序继承了和平号补加的主要程序,不同之处在于以下 3 个方面。

2.4.1 抽气的时间

完成一只 200 L 贮箱抽气累计需要 12 h,和平号由于功率的限制,只能在阳照区进行,完成贮箱的抽气应在 24 h 以上,4 只贮箱的时间超过 4 天,而国际空间站的桁架式的太阳帆板提供足够的功率,能够实现连续抽气。

2.4.2 补加的时间

对国际空间站补加的进步 M1 或者 ATV 的补加贮箱的挤压压力为 1.9 MPa 左右,远高于进步号货船,因此国际空间站补加的速率更快,所需要的时间很短,从 ATV 的补加来看,860 kg 推进剂传输不超过半小时,估计进步 M1 接近 2 t 推进剂的补加在 1 h 时左右能完成。

2.4.3 补加与抽气的关系

进步号货船向和平号补加的挤压压力为 0.8 MPa,考虑膜片压差约为 0.1 MPa,推进剂补加初期空间站的膜盒贮箱压力为 0.3 MPa,当补加 130 L 推进剂左右时,膜盒贮箱的压力会上升到 0.7 MPa,此时必须要重新启动压气机抽气才能继续补加。因此和平号补加过程中,压气机工作和推进剂传输有交叉,也存在压气机抽气的同时进行推进剂补加的工作模式。但在国际空间站期间,由于挤压压力较高,采用的补加模式是先抽完增压气体,然后进行推进剂传输。

3 结论和评述

在轨补加的概念最早提出于上世纪 60 年代,俄罗斯、美国、欧洲和日本等国家和地区的航天机构发展了多种形式的补加技术,部分也曾开展了工程应用和飞行演示验证,但空间站仍是目前唯一开展工程应用并进行长期补加的平台,所有空间站的补加系统均由俄罗斯负责完成。从礼炮 6 和 7 号到国际空间站,俄罗斯空间站补加系统主要的系统形式和补加方案并未发生大的改动。通过整理目前获取的空间站补加系统的相关资料,分析俄罗斯空间站补加系统方案和补加程序,得到以下结论:

- 1) 俄罗斯空间站补加系统采用的是基于压气机和膜盒贮箱的补加方案,其中压气机采用 3 套的配置,以实现空间站的长寿命和高可靠;
- 2) 补加程序包含:系统自检、管路检漏、压气机抽气、推进剂传输及吹除 5 个主要步骤;
- 3) 货船或 ATV 补加的挤压压力约为 1.9 MPa,平均流量为 0.4 L/s。

参考文献:

- [1] 臧家亮. 空间站及其推进系统[J]. 载人航天, 2003 (2): 29-36.
- [2] KITMACHER G. Reference guide to the international space station[EB/OL]. (2006-08-20) [2010-09-25]. www.nasa.gov/pdf/508318main_ISS_ref_guide_nov2010.
- [3] HARLAND D M. The story of space station MIR [M]. Germany: Springer, 2005.
- [4] PORTREE D F S. MIR hardware HERITAGE[EB/OL]. [2012-04-16]. <http://www.en.wikisource.org/wiki>.
- [5] BAYLE O, HULLIER V-L, GANET M, et al. Influence of the ATV propellant sloshing on the GNC performance, AIAA 2002-4845 [R]. USA: AIAA, 2002.
- [6] LAIN R, VERNE J. Automated transfer vehicle [R]. [S.l.]: ESA, 2005.

(编辑: 马 杰)