

一种在轨补加用浮动断接器设计

马海涛, 陈 健, 魏 青, 唐妹芳
(上海空间推进研究所, 上海 200233)

摘 要: 对国外的在轨补加用浮动断接器的研究进展进行了总结, 在此基础上, 提出了一种在轨补加用浮动断接器的设计方案。通过对浮动断接器方案的选择和初步设计, 确定了其工作方式、关键技术及解决途径, 并进行了初步的原理验证和性能检测。结果表明, 浮动断接器原理可行, 方案合理, 通过进一步的结构优化, 可应用于在轨补加。

关键词: 在轨补加; 浮动断接器; 传输

中图分类号: V43-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 04-0045-05

Design of floating coupling for on-orbit resupply

MA Hai-tao, CHEN Jian, WEI Qing, TANG Mei-fang
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

Abstract: The research evolution of floating coupling on board used in on-orbit resupply is summarized, based on which a design scheme of floating coupling used in on-orbit resupply is proposed. The working mode, key technique and solutions were determined by selection of schemes and design of the prototype. The scheme was verified and performances of the prototype were tested. The result shows that the design of the floating coupling is reasonable and suitable for on-orbit resupply.

Keywords: on-orbit resupply; floating coupling; transfer

0 引言

从上世纪 90 年代以来, 发射长期在轨的载人近地空间站已成为当今世界各大国在航天领域中争相追逐的目标。研制和发射载人的近地空间站并不等于它可以长期在空间在轨运行。如果要达到这个目标, 首先必须解决空间站推进系统能够持续工作的基本条件——推进剂及增压气体的

补给。推进剂目前大部分是消耗量大、有毒、易燃、易爆的液体, 而增压气体是高压、易漏的气体, 能否安全地、可靠地进行在轨补加成为各国空间站研制的关键技术之一。

浮动断接器也称“在轨补加接头”, 是在轨补加的关键技术之一。其主要作用是随着两飞行器(如空间站与货运飞船)的对接和分离, 依据一定要求来实现液路和气路的连通和断开, 从而实现两飞行器之间的燃料、氧化剂和气体的传输。

收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2010-12-14

作者简介: 马海涛 (1979—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

1 浮动断接器的功能要求

在货运飞船与空间站对接时,浮动断接器的主动与被动部分可能出现不同的轴度,为了补偿这个偏差,浮动断接器的主动部分一般设有不同轴度的补偿器。因此,根据空间飞行器以及其工作环境的特点,浮动断接器必须具有如下的功能:

- 1) 具有“浮动”适应对接后可能产生的相对位置(角度和径向)偏差的能力;
- 2) 具有小的反作用力,不能影响对接机构的对接和分离;
- 3) 具有自动锁紧/解锁的能力;
- 4) 具有位置显示的能力。

2 国外的研制情况

浮动断接器有两类方案:无源方案和有源方案。

无源方案:本身不具备自动插合能力,即本身没有执行机构,所有的主动位移的产生均依靠两个对接飞行器的移动得到,这就意味着,必须在飞行器完成对接的同时也完成浮动断接器的对接,这会给对接机构的分离带来额外的干扰力,可能影响运输飞船分离姿态。

有源方案:本身具备主动移动功能,即自带执行机构,可以实现一端接头的推出和回缩。由于浮动断接器自身具备了执行功能,可以在对接机构完成对接后(或分离前)进行自身的对接和分离,这样对对接机构的影响降到最低。但同时由于不能依靠对接结构进行锁紧/解锁,因此自身必须具备锁紧/解锁功能。要产生浮动断接器的直线运动,有多种方式。但由于空间环境和资源的限制,一般采用两种方式:一种是美国的电机驱动方式,另一种是俄罗斯的气动驱动方式。

气动驱动:利用气体的压力驱动活塞运动,这在工业上应用十分广泛,技术相对成熟,但需要提供额外的气源,在一定程度上,增加了系统的负担。

电机驱动:利用蜗轮蜗杆将旋转运动转换为直线运动,同样在工业上广泛应用,但对于电功率需求较大,并且体积、重量也相对较大。但是,若同时控制多个浮动断接器的对接,其体积和重量平均下来还是有一定的优势。

2.1 俄罗斯

在上世纪80年代左右,在轨补加技术在苏联的“礼炮”空间站成功进行了应用,后经过二十多年的发展,俄罗斯(前苏联)在此领域取得了国际领先地位。在90年代初,美国也开始进行在轨补加技术的研究,并取得了一定的成果。

俄罗斯在补加技术上研究较早,其技术相对比较成熟。图1是用于货运飞船和轨道站对接的补加接头。其主要的工作特点是:采用插入式结构,主动端较为复杂,被动端简单。由于被动端位于空间站上,长期在轨运行,空间环境恶劣,因此采用简单的结构设计以增加可靠性。

其工作原理:在对接时,依靠气体压力推动插入管,在主动插入管的锥形接头和被动端的锥面导引下插合。在分离时,排空气腔压力,插入管依靠弹簧力自动回缩。通过一个楔型块,实现对接偏差的补偿。密封结构采用双道O形圈密封。补加接头的锁紧采用气动方式,通过气体压力推动锁紧装置锁紧,反之,卸压解锁。

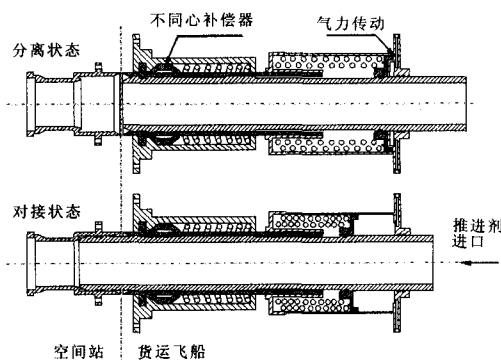


图1 俄罗斯空间站浮动断接器

Fig. 1 Floating coupling of Russia space station

2.2 美国

在80年代末期到90年代初期,美国为了实现利用航天飞机对卫星或空间站进行推进剂补

加, 开始对在轨补加技术进行研究。在补加接头技术上形成了标准的模块, 并将补加接头模块系列化和组合化, 并已完成了地面试验。在补加接头上, 主要包括两大产品, 一个是自动流体接口系统 (Automated Fluid Interface System, 简称 AFIS), 另一个是通用补加接口系统 (Universal Refueling Interface System, 简称 URIS)。

通用补加接口系统工作原理: 在每个独立的接头上不具备锁紧/解锁功能, 而是通过模块上的电机转动进行锁紧/解锁, 其类似于卡口式电灯泡的安装; 利用电机实现一组补加接头 (在一个模块内) 的锁紧/解锁, 其重量和体积可以得到减少。但是, 在需独立控制每付 (或不再同一模块内的) 补加接头的时候, 就必须为每个接头配备一台电机, 增加结构重量。

3 浮动断接器方案

3.1 方案选择

表 1 是各种浮动断接器方案的比较, 通过比较可知: 有源方案的浮动断接器自身具备了执行机构使得其可以在飞行器完成对接后 (或分离前) 自己进行对接 (或分离), 其不对飞行器的对接和分离带来的影响, 并可实现多次尝试。其中, 采用气动驱动方案, 其气体可利用运输飞船推进系统的增压气体, 这样可以不需要独立的一整套供气系统, 对系统资源的影响可相对减少。

综上所述, 浮动断接器采用有源的气动驱动方案是比较适宜的。

表 1 浮动断接器方案比较
Tab. 1 Comparison of floating coupling schemes

	气动驱动	电机驱动
结构简单程度	1	1
对系统资源的影响	3	4
对接机构的依赖程度	1	1
故障情况对对接的影响	无	无
故障情况下能否进行二次尝试	可	可

注: 表中 1 表示最优, 4 表示最劣

3.2 方案设计

补加系统方案如图 2 所示, 浮动断接器的结构如图 3 所示。当需要进行推进剂补加时, 首先对主动端 (货运飞船) 的控制气进口 1 通气 (2 排气), 推动插入管前进。在和被动端 (目标飞行器) 接触后, 由浮动机构对径向偏移和角度偏转进行补偿, 最终使得插入管和被动端的接受管插合。永磁铁提供锁紧力, 确保主动端的插入管不会退出。当完成补加后, 关闭浮动断接器两端的电磁阀, 开启吹除路的电磁阀, 浮动断接器两端电磁阀之间的管路进行吹除。吹除完成后, 从控制气进口 2 进气 (1 排气), 在气体压力的驱动下, 克服摩擦力, 使插入管退出接受管, 最终完成分离。

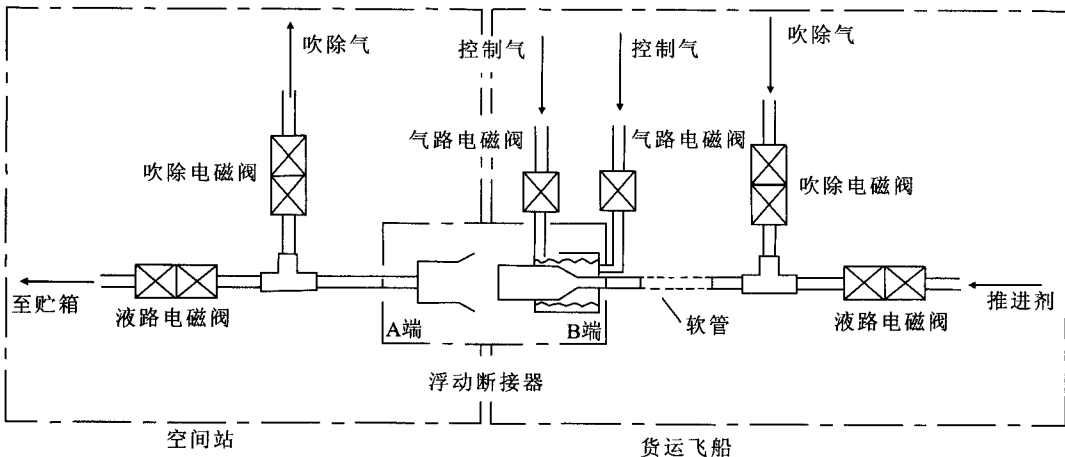


图 2 补加接口原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of resupply interface system

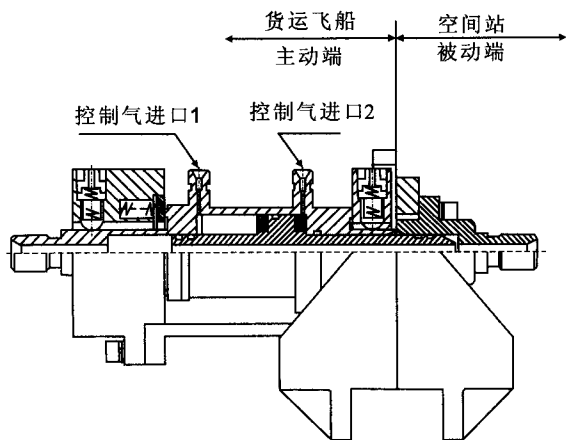


图3 浮动断接器结构示意图

Fig. 3 Structure of floating coupling

浮动断接器方案的主要特点：

- 1) 采用控制气作为驱动气体；
- 2) 位置补偿机构采用径向均匀布置8根弹簧、轴向布置4根弹簧，完成浮动功能；
- 3) 在插入管上安装永磁铁达到自锁功能；
- 4) 具有位置指示功能；
- 5) 被动端结构简单、可靠。

3.3 工作原理

当需要进行推进剂补加时（在完成空间站和货运飞船的对接后），首先对主动端（运输飞船）的控制气进口1进气（2排气），克服永磁力和摩擦阻力，推动插入管前进。在和被动端（空间站）接触后，由浮动机构对径向偏移和角度偏斜进行补偿，最终使得插入管和被动端的接受管插合。此时永磁力和气动力（也可只依靠永磁力）提供锁紧力，确保主动端的插入管不会退出。

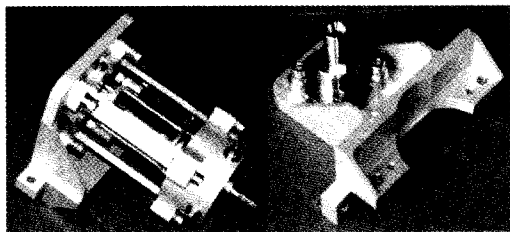


图4 浮动断接器

Fig. 4 Floating coupling

当完成补加后，关闭浮动断接器两端的电磁

阀，开启吹除路的电磁阀，浮动断接器两端电磁阀之间的管路进行吹除。吹除完成后，从控制气进口2通气（1排气），克服永磁力和摩擦阻力，使插入管退出接受管，最终完成分离。浮动断接器的实物外形如图4所示。

3.4 关键技术及解决途径

3.4.1 偏差的补偿

在对接机构完成对接后，浮动断接器的两端不可避免的存在径向偏移和角度偏斜，因此必须采用浮动结构对此进行补偿。其关键点在于结构紧凑、可靠性高两方面。

对于角向偏移的补偿：在被动端，采用了全角 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 锥孔进行导向。

对径向偏移的补偿：在主动端，利用一周向柔性支撑机构，使其具备在径向的移动能力，满足径向偏移的补偿要求。周向柔性支撑机构原理如图5示。

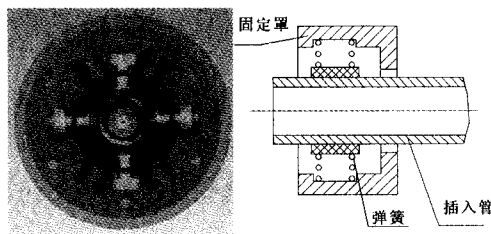


图5 浮动断接器的弹簧悬浮结构示意图

Fig. 5 Structure of suspend springs in floating coupling

3.4.2 气动驱动机构

气动驱动机构是整个浮动断接器中的关键装置，其关键在于：在保障可靠性的前提下，尽可能的减少体积和重量。设计方案是：直接采用活塞原理，利用气体带动插入管前移，其密封采用两道O型圈密封，上游通过电磁阀控制进气或放气。

3.4.3 永磁路的设计

永磁铁在浮动断接器中主要完成两个功能：

- 1) 提供由于位置变化引起的磁场强度变化量。浮动断接器在进行对接的时候，需要对插入管的状态进行位置显示。本方案采用霍尔微动开关，通过感应磁场强度的变化，来对插入管的位置进行显示。因此在设计永磁铁时，将永磁铁固

定在插入管活塞的两侧, 使磁场的变化量较大, 永磁磁场分布图如图 6 所示。通过对霍尔微动开关的试验, 验证了方案设计的合理性。

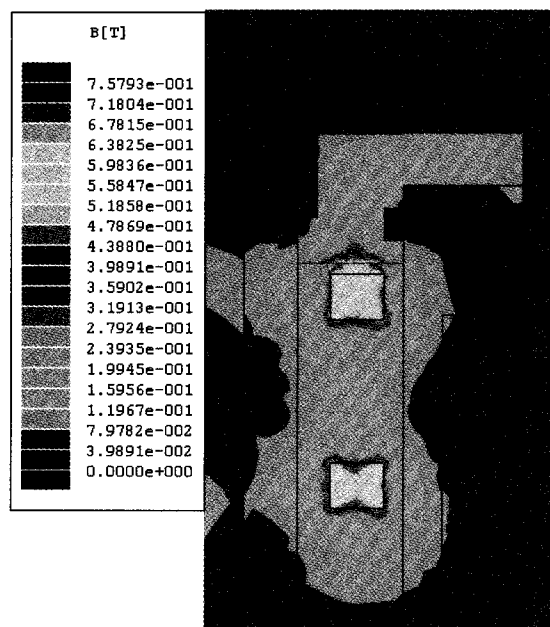


图 6 永磁磁场分布图

Fig. 6 Magnetic field distribution of permanent magnet

2) 具有位置自锁功能。永磁铁采用环形磁铁, 一面为 N 级, 另一面为 S 级, 分布在插入管活塞的两侧, 通过对该磁路进行仿真计算, 得到永磁吸力约为 40 N。经过计算由于加速度产生的冲击力为 9 N, 不会引起插入管的位置变化。通过力学环境试验验证了浮动断接器的位置自锁功能。

3.5 试验验证

该方案的浮动断接器进行了插合试验、漏率检测试验、动作裕度试验, 能够满足有位置及角

度偏差下的插合及回退, 并且在插合下氦气漏率检测, 能够满足小于 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的要求。进行并通过了力学环境、温度环境及寿命试验考核, 初步验证了该浮动断接器方案的可行性。

4 结束语

通过对国外浮动断接器技术的分析, 提出了一种浮动断接器的方案, 并对方案的工作原理进行了阐述。目前, 该方案的产品通过了力学环境试验、温度环境试验及寿命试验的初步考核, 验证了方案设计合理, 密封形式可靠。

参考文献:

- [1] HAMILTON W. Automatic refueling coupling for on-orbit spacecraft servicing, AIAA89-2731[R]. USA: AIAA, 1989.
- [2] STUDENICK R M. Automated fluid interface system (AFIS) for remote satellite refueling, AIAA 90-1884[R]. USA: AIAA, 1990.
- [3] CARDIN J. A standardized spacecraft resupply interface, AIAA 91-1841[R]. USA: AIAA, 1991.
- [4] 刘国强. ANSOFT 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] D K 休泽耳著. 赵元修, 吴守生, 金如山, 等译. 液体推进剂火箭发动机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.
- [6] 刘国球. 液体火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [7] R H 沃林著. 宋学义, 张正义译. 密封件与密封件手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [8] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计 (下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.

(编辑: 陈红霞)