

一种低成本的小型航天器 商用成品化(COTS)推进装置

编译: 王 鹏

中国航天科技集团公司第六研究院十一所

摘 要: 空间航天器的推进装置, 因一系列的技术要求, 在历史上就趋于专业化。这些技术要求往往不适用于地面系统。这些特殊要求包括: 安全性——推进剂常常是较危险的, 如有毒、有害、易燃或压力高等; 特殊的环境——热环境、机械环境、辐射和失重状态; 可靠性——一旦进入轨道, 就不可能再有机会更换出了故障的装置。推进系统装置可分为两类: 推进剂贮箱和火箭推力器。它们除了应用于空间技术, 在其它方面并无用处。因此“商用成品化”(COTS)的思维似乎不太合适。然而, 通过工程改进推进系统, COTS 在材料和加工方面可降低成本和风险。本文将描述推进装置的典型应用并介绍萨里太空中心是如何使用 COTS 理念的。推进系统的管路是由各种用电子和机械控制的电磁阀、压力传感器、压力调节器、过滤器和温度传感器等构成。它们既可作为空间项目的特殊工程进行研制, 也可采用 COTS 作为航天设备的替代产品, 萨里太空中心侧重于后者。通过有所创新的系统设计, COTS 装置完全可以使用。

关键词: 小型航天器; 低成本; 推进装置

中图分类号: V43

文献标识码: A

文章编号: (2004)01-0040-04

1 引言

星上推力装置传统上应用于大型通讯和科学用航天器。然而本行业的发展趋势是研制小型化、低成本的航天器。小型航天器的主要优势在于它们可以和大型航天器搭载发射, 或者用一枚运载火箭发射多个航天器, 因此可以发挥最佳效益。不足之处是, 这种发射不能将航天器放置到最适宜的轨道上, 或航天器需要与同一火箭上的其它航天器进行分离。因此越来越多的小型航天器需要自推进系统, 以便自身能够完成这些功能。

以往的航天器推进系统非常昂贵。例如商用通讯航天器的远地点推力器耗资 25 万美元, 推进

剂贮箱耗资 40 万美元。使用传统昂贵的航天器推进系统, 小型航天器低成本的优越性大打折扣。

萨里卫星技术有限公司曾经发射了两艘携带自身推进系统的航天器, UoSAT-12 和 SNAP-1, 设计和制造费用使用的是国债, 因此把降低成本摆在了首位。COTS 理念就是附和了这一要求。两次飞行的成功, 使得这一方案继续应用在萨里卫星技术有限公司刚刚承担的商用飞行任务之中。目前四艘航天器 (Alsat-1, UK-DMC, Nigeriasat-1 和 Bilsat) 的推进系统正在建造之中。

2 商用成品化 (COTS)理念

一旦设计按照 COTS 技术来做, 设计的观念

收稿日期: 2003-05-20; 修回日期: 2003-06-29。

作者简介: 王鹏 (1965—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机喷注器制造工艺。

就会改变。大家都认为 COTS 装置用于太空没有可靠性和惯例(或未见报道)。系统的设计必须非常创新,能够提出潜在的故障模式。采用 FMECA(失效模式结果和极限分析)对装置的极限状态和失效后果进行风险评估。要注意的是,要确保用于分析的费用不会使购买已经在太空中被检验过的装置再增加成本。

3 火箭推力器

推力器用于变换航天器的轨道、位置保持和姿态控制。太空中的真空和热环境决定了推力器非地面所用,因此没有可用的 COTS 产品。

大型航天器通常需要高性能发动机,在约 1460℃ 的高温环境中运行。鉴于这样的燃烧温度,燃烧室和喷嘴都是由铂/铑合金来制造,这并不是

一种低成本的技术。

在萨里太空中心(SSC),COTS 理念就是采用 80/20 规则制造推力器,即以 20% 的费用得到 80% 的性能。一个双组元推进剂的推力器正在被开发,它使用过氧化氢和航空煤油(Jet A1)。由于燃烧室温度小于 1000℃,COTS 推进装置的燃烧室和喉部采用镍和铜合金材料。

COTS 推力器所用推进剂的使用也减少了发动机的成本。它甚至低于常规的肼燃料,萨里太空中心的发动机使用的航空级煤油燃料,成本低于每公斤 1 英镑,过氧化氢燃料成本低于每公斤 6 英镑。

因此使用 COTS 的材料、制造工艺和推进剂,萨里卫星技术有限公司正努力制造一种具有行业标准发动机 80% 性能的火箭发动机,但成本只是它的 20%。

4 推进剂贮箱

航天器的推进剂贮箱与地面的压力容器不同,往往使用非常薄的材料(一般是钛合金)来制造,其安全压力参数值小于 $x \cdot 1.5$ (地面用压力容器通常的爆裂参数值大于 $x4$),况且在失重环境下要求内部装置做到获取液体推进剂并输送到贮箱出口。因此,太空推进剂贮箱以往没有列为 COTS 产品。然而,通过再次使用 COTS 体系所用

的材料和制造工艺,成本将大幅消减。

尺寸相对较小的贮箱可以用成品不锈钢制造。贮箱内部含有一块海绵状物,使液体丁烷与出口隔开(只允许蒸汽从贮箱口逸出)。这种海绵状物是用波纹盘(商用成品铝网丝构成)冲压做成的。

在非常小的航天器上(纳米卫星),因推进系统的尺寸较小,完全可以采用新颖的 COTS 方案。萨里卫星技术有限公司的 SNAP-1 航天器是一个 6.5 kg 的纳米卫星,只需要贮存在 65 cm³ 容积里的 32.6 克丁烷推进剂。不需要专门的贮箱,它的推进剂贮存在成型的钛合金管子中。这种管子通常用在“空中客车”飞机上。

5 高压气体贮箱

小型航天器有一个特征,即对体积有比重量更多的限制要求,而不像大的航天器那样。因此在有些任务中,COTS 高压贮箱往往以重量换体积。例如,萨里卫星技术有限公司的 Rapideye 系列卫星计划用专门的运载火箭发射,相对于运载火箭来说,没有重量上的限制。在这种情况下,优先考虑的是要减少航天器的成本。航天器有一个冷气推进系统,储存高压、压缩氮气。在这方面,正在考虑采用 COTS 贮箱。标准的 SCUBA 潜入贮箱就是其一。如要选择的话,许多航空/航天用贮箱,都能够满足要求。

6 阀和传感器

推进系统的管路由以下几种典型的装置构成:

- 压力调节器
- 电磁阀
- 加注泄出阀
- 压力传感器
- 过滤器

有许多专门供应商提供航天级的硬件产品,然而以上器件都不是商业产品,因此成本很高。很多情况下,同样的器件以较低的价格提供给航天应用,主要区别在于减少测试和相关的文字工作。

在 SNAP-1 推进部件中央顶部有一个压力传

感器。这个器件是与 Formula 发动机油压传感器同一批生产的。在筛选过程中,将器件暴露在比航天器上更恶劣的热和振动环境中。这项花费只占航天档次传感器成本的 10% 左右。传感器使用未经飞行鉴定,仅提供诊断性遥测。因此在这种情况下,使用非航天档次传感器是可以接受的,在轨飞行也证明这是可行的。在高度为 650 km 的 LEO 航天器中,这种器件一直正常使用了近两年的时间。在建造 DMC 系列星座中,同样的器件被选用于萨里卫星技术有限公司以外的 4 个推进系统。

允许这种“低”标准的器件用于系统,设计者必须有足够的能力来处理任何器件出现的故障。也可以执行 FMECA (失败模式结果和危险性分析) 规定,然而这往往不能进行可靠性分析或演算。在这时候,基于经验的工程判断是必须的。

一个创新设计的例子是 UoSAT-12 航天器的一氧化二氮推进系统。该系统采用一个压力开关输出闭环反馈来控制一个电磁阀,以调节下游压力。压力开关选用工业标准的转换器。在试验过程中,系统工作正常,但是由于很迟才安装到航天器上,压力开关没来得及进行装置或航天器级的振动试验。在发射过程中,压力开关没有工作,估计是发射过程中由于振动而损坏。但由于系统的创新设计,电磁阀具备后续操作模式。通过航天器上计算机发出的预先制定的脉冲信号,电磁阀被启动来调节下游的压力,使下游压力被调节到适当的数值。因此整个系统的性能未受影响。

推进系统和所有其它航天器系统使用的温度传感器(LM135 型),都是 COTS 产品。在多次萨里卫星技术有限公司的飞行任务中,都表现良好。

7 推进系统电子驱动设备

推进系统最主要的成本之一就是驱动和控制电子设备。萨里卫星技术有限公司在航天器上使用 COTS 产品的电路组件由来已久。所有 20 个在轨航天器采用的都是这一思路。

选择 COTS 产品电路组件的思路业已确定,它包括富于经验的环境考虑和任何防护要求。推进控制模块尽可能地推进系统包裹起来。它与

航天器通过类似汽车上的控制区域网路(CAN)总线连接。

8 管路工程和接头

推进系统的管路一般全部是焊接成的,这可降低因机械装配而引起泄漏的风险。萨里卫星技术有限公司的思路是综合使用焊接和 COTS 产品机械管路接头。机械零件连接处的密封性能可通过地面测试。这包括子系统的渗漏测试和航天器级的予、过环境测试。

机械管路安装的另一个优点是,典型的 COTS 配件通常通过螺钉装配集成在管路中,因此系统很容易装配,如有必要可将其更换。UoSAT-12 航天器的氮供给系统贮箱和压力传感器就是通过螺钉装配上去的。这个系统在轨道上还没有出现过泄漏。

管路系统焊接结合部采用改良的 COTS 装配件。COTS 的 T 型装配件有两个管口做成能够与管路焊接的形状,另一个则保持原状。通过这一方法,管路部件可以通过焊接、螺钉安装,装配到航天器或附加在某些装置上。

子系统装备完毕后,对所装配的所有结合处进行了最大工作压力 1.5 倍的气压测试,用氦泄漏检测仪检验其密封性。

为了确保机械装配的紧固性,萨里卫星技术有限公司的对策是用金属丝锁紧连接部位,以防止其松动。COTS 管路装配件往往没有用于金属丝锁紧的孔,也不易加工此孔。解决的办法是环绕金属丝进行焊接,既快又可以将焊料作为封堵材料。

用 COTS 管件制造的管路系统,无法保证其内部清洁,通过酸洗可彻底地清除干净。表面质量可多次用低功率放大技术进行检验,以确保管路无材料缺陷。一种高级的扩口工具用来加工喇叭口,用光学方法检测加工质量。采用喇叭口垫圈保证密封性。

9 将来的应用

以上描述的技术理念和应用项目特别适合于低成本的小型航天器、典型的萨里卫星技术有限

公司生产线和许多大学里的项目。在许多这方面的应用上, 体积限制要大于重量限制, 因此较重的、低成本的 COTS 技术理念能够得以采用。

然而低成本也是大型传统的航天器要考虑的。对设计者来说, 采用 COTS 设备可以明显地降低成本。目前采用 COTS 装置还很有限。然而 COTS 装置的使用, 象萨里卫星技术有限公司那样, 将会得到继承, 并逐渐允许在大型航天器上使用。

例如, Polyflex 航天局正在建造冷气推进系统, 用于欧空局 Cryosat 任务。他们使用了 Kulite 公司的传感器——萨里卫星技术有限公司所采用的产品, 只是多做了很多文字论证工作。为了证明可以使用, 对 SNAP-1 航天器的压力传感器进行了更换, 并在轨飞行了 18 个月仍正常地工作着。

10 结论

对于要求特殊的航天推进装置, 如推力器和推进剂贮箱, 没有 COTS 装置可以直接采用。然而推进剂贮箱和推力器可以通过设计, 采用 COTS 的材料和工艺来降低成本。

COTS 阀门和传感器的制造通常采用与航天产品标准很接近的材料和工艺。主要区别在于减

少了很多测试和文字工作, 大大降低了费用。这类装置可使用在性能限制不是非常严格的地方, 而且系统的设计较创新, 完全有能力处理可能出现的故障。

习惯上将接合点进行焊接而不采用 COTS 的管路装配, 但是通过对航天器级子系统的每一个接合点进行仔细确认, 使用机械装配是可行的。还有一个优点就是系统在建造的最后阶段, 对有问题的组件可以马上更换, 而不必进行高成本的重新生产。

参考文献:

[1] Coxhill I, Richardson G, Sweeting M. An Investigation of a Low Cost Bi-propellant Thruster for Small Satellites. 38th Joint Propulsion Conference, Indianapolis, AIAA-2002-4155.

[2] Day M. 30 Years of Commercial Components in Space Selection Techniques Without Formal Qualification. 13th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Utah, SSC99-IIA-2.

(上接第 39 页)

进行测试检验和签收工作。距之不远既是办公区、仓库及实验室所在地, 所有人员及相关支持设施都在这一区域。邻近的一个坚固间则可以为人们面对军火及其他具有危险性的组件装置时提供安全庇护。

6 结束语

为了给用户提供更高的发射保证和发射率, 更多的信息和更强的适应性以及与过去相比更好的膳宿水平, 设计并实际完成了对 Atlas V 靶场工作流程和设备的改进。