

美国高超声速天地运输系统新概念

A New Concept of the Hypersonic Space and Global Transportation System

战培国 / 中国空气动力研究与发展中心

摘 要: 高超声速天地运输系统是航空航天重点发展领域之一。本文介绍了近期美国研究的一种二级入轨高超声速天地运输系统(HSGTS)新概念;分析了第一、二级的主要设计特征;给出了该设计概念的主要气动力CFD计算结果。

关键词: 天地运输系统;高超声速飞行器;超燃冲压发动机

Keywords: space and global transportation system; hypersonic vehicle; scramjet engine

0 引言

深空探测任务需要将大量的设备载荷运送到近地轨道,设备载荷运送成本大约是每千克5000~10000美元。对运送成本的负担能力制约着高超声速运载器的军事和商业利用。有研究表明,利用完全可重复使用运载系统,只要维护成本足够低、能快速周转以确保高利用率,就可使运送成本降至每千克1000美元以内。

在过去的10年,美国不断进行高超声速运载器的技术和方案概念研究,如未来灵活的太空系统解决方案(FASST)的二级入轨概念。该方案运载器是一个水平起飞一级涡喷动力和二级基于火箭组合循环(RBCC)动力的高超声速飞行器,是最有希望的降低运输成本的设计之一。

近期,美国Astrox公司、莱特-帕特森空军基地航天系统设计和分析组与波音公司合作,采用内转(inward-turning)超燃冲压进气道发展了创新性的RBCC概念,建立起了高超声速天地运输系统新概念(HSGTS)。其目标就是要实现运载器的完全可重复使用、长

寿命、低维护成本、安全高效,最大限度地降低运送成本。

1 高超声速天地运输系统新概念

高超声速天地运输系统(HSGTS)新概念设想是能在地面两地之间快速运输、以及地面向太空快速运输。这个新概念采用一系列能够大幅度降低运送负担成本的技术和功能属性,通过优化设计和技术的逐步成熟,最终实现可负担得起的地地和天地之间的高超声速运送能力。

1.1 基本要求

为了满足未来日常频繁的可负担得起的太空运送能力要求,运载器需要具备以下一些基本的要求。

- 1) 安全。包括非常可靠的失败-安全系统设计和一体化技术,安全中止技术等。
- 2) 经济。包括低研发成本、干重量和燃料消耗,高可重复使用性、可靠性、易维护性、元件寿命和工作效用。
- 3) 性能。包括高发动机比冲、推阻比和升阻比,低重量。
- 4) 灵活性。包括全天候,众多基础

选择,自我运送,大发射窗口,全方位角,大再入横向空间和向下空间。

5) 与后勤和环境限制兼容。包括类似飞机一样的地面操控,飞行运行,空中交通管制集成和领空飞越,可接受的噪声和辐射。

6) 舒适度。包括最低的过载和舒适座舱环境。

1.2 HSGTS概念

最新发展的HSGTS概念是一种完全可重复使用、水平起降、二级入轨运载器(图1 a)。该运载器一、二级动力均采用吸气推进系统,其第二级动力使用低维护、长寿命液体推进剂火箭发动机和低维护性的热防护系统,运载器还集成有飞行器健康管理系统。这些技术和特性的组合选择,主要目的是为了能达到像普通飞机一样工作和高的利用率,因此,相比火箭能够显著降低运营成本。另外,第一级的替代方案可以采用垂直起飞、水平滑翔降落可重复使用的火箭(图1 b)。目前,美国空军实验室正在设计和验证可重复使用的助推器系统(RBS)。

1.3 HSGTS第一级主要设计特征

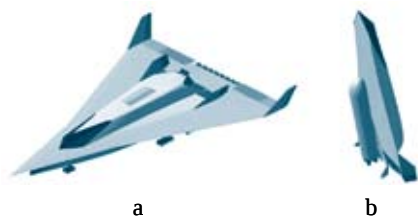


图1 吸气式二级入轨HSGTS新概念

HSGTS第一级(图2)的作用是携带第二级加速飞行到第二级飞行所需的匹配速度马赫数4,然后第一、二级分离,第一级返回地面,第二级加速进入低地球轨道。第一级概念设计是一架使用碳氢燃料涡轮发动机推进的水平起降飞机,设计源自上世纪五六十年代北美航空公司(后并入洛克希德公司)研制的XB-70超声速轰炸机,采用该设计理念的主要原因在技术方面。XB-70是一个马赫数大于3的大型飞机,大的三角机翼上表面平展,既有利于提高升力效率,也有利于与第二级匹配;另外,较大的发动机舱有利于布置起落架、双进气道以及为第二级火箭发动机提供交叉供给的燃料和氧化剂罐,在起飞和通过跨声速飞行区时,第二级的发动机也要工作,提供辅助推力。

HSGTS第一级的动力推进采用8个通用电气(GE)公司为NASA设计的创新性涡轮加速器(RTA)发动机,同时,还将研究推力补偿技术,如质量注入预压缩机冷却(MIPCC)、燃烧室后注入氧化剂等。MIPCC技术在发动机压缩机前进气道注入水,使常规超声速涡轮发动机满足马赫数4以上速度的使用需要。

HSGTS第一级长53.3m(175ft),总重量300t(662000lb),其中137.6t(302000lb)是涡喷发动机的碳氢燃料,16.4t(36000lb)是为第二级提供补偿动力需要的液氢和氧推进剂。第一级的材料主要采用常规高温金属、陶瓷

或高温复合材料,主要目的不是为了热防护,而是增强耐久性和易维护性。HSGTS两级总重量554t,起飞速度为338km/h(210mile/h)。

1.4 HSGTS第二级主要设计特征

HSGTS第二级(图3)是达到马赫数4后与第一级分离,加速飞向低地球轨道的飞行器。第二级采用两台顶置RBCC发动机,该发动机是一种双模态超燃冲压发动机,分别使用甲烷、液态氢和氧为燃料。发动机采用了先进的三维内转流道,因而避免了典型TBCC(基于涡轮组合循环)发动机复杂的多个吸气式发动机与流道的集成问题。

顶置发动机设计避开了复杂的发动机热防护问题的技术挑战,很好地解决了第二级再入大气无动力飞行时的热管理问题。同航天飞机一样,第二级将以大迎角再入大气层返回机场,将RBCC发动机流道设计于几近真空的飞行器上表面,避免了大热载荷的影响。

由于第二级在高超声速区飞行,

与第一级相比,超燃冲压发动机较小,因此需要相对较小的进气道捕获面积,容易设计获得大的进气道捕获面积。与飞行器前端面积比,其优点是较小的超燃冲压发动机喷管面积有利于降低跨声速阻力,并使第二级获得较高的高超声速推阻比,有效增加比冲,降低燃料消耗。

第二级设计的另一个优点是采用平底,便于与第一级机翼进行气动力优化。第二级设计的最大挑战是保形低温推进剂容器的设计,它需要最大限度地利用机体提供的空间,需要精确设计和估算其重量,这也是概念设计后期需要做的工作。

HSGTS第二级长48m(158ft),总重量253t(558000lb)。其中:0.91t(20000lb)为运送的载荷;71.7t(158000lb)为超燃冲压发动机马赫数4~10需要的液态甲烷燃料;16.3t(36000lb)液氢和98.5t(217000lb)液态氧(LOX)为从马赫数10到轨道所需的燃料。第二级制造材

料采用高温聚合物复合材料,并将使用耐久低维护热防护系统,如NASA研制的结构集成热防护系统(SITPS)。

2 气动性能及关键技术

基于以上概念设计,重点对第二级飞行器进行了空气动力性能和轨迹数值计算和分析,研究了面临的主要关键技术挑战。

2.1 HSGTS第二级气动性能和轨迹分析

美国Astrox公司利用Cart3D欧拉计算程序,对第二级飞行器飞行马赫数和迎角范围内的无黏气动力特性进行了数值计算研究(图4),计算包括

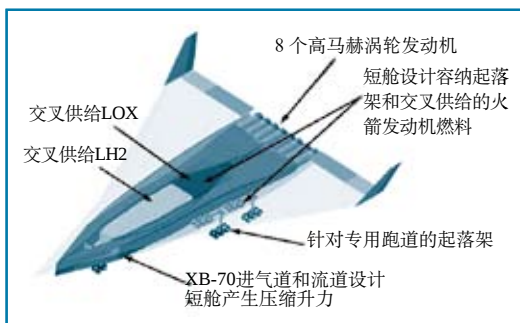


图2 HSGTS第一级概念设计

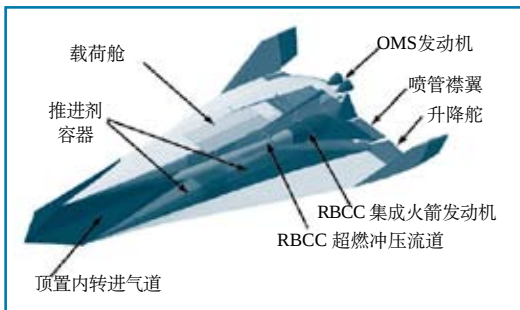


图3 HSGTS 第二级概念设计

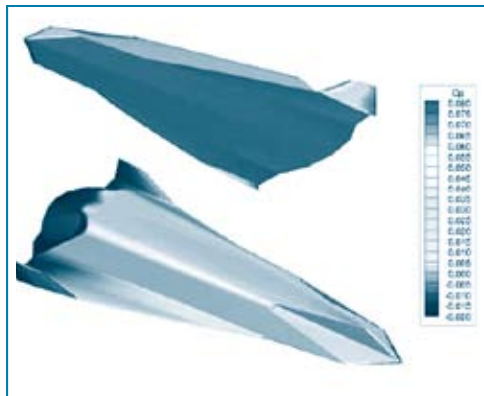
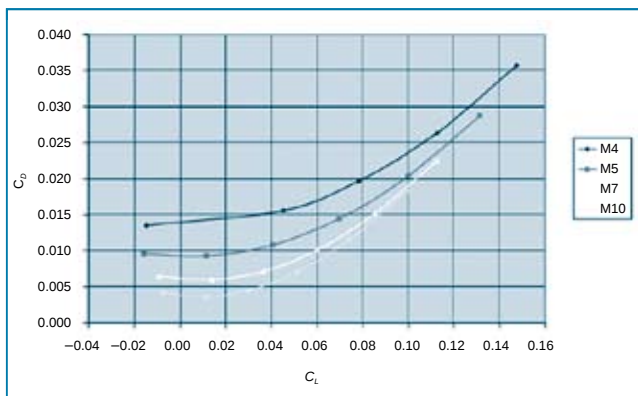


图4 CFD HSGTS
第二级极曲线计算结果(左)

图5 $Ma=10, \alpha=40^\circ$
表面压力分布(右)

有、无空气流经RBCC流道表面,计算了表面压力分布(图5);这些计算都考虑了进气道溢流的影响。波音公司采用van Driest II 平板方法计算了无流道表面摩擦系数。

根据计算获得的气动力数据和动力推进数据,利用三自由度运动方程计算了第二级飞行器轨迹(图6)。计算中马赫数从4到10采用吸气超燃冲压动力,保持2000psf的动压加速,然后采用火箭动力拉起并加速到轨道速度和高度。第二级飞行器设计飞行迎角 40° ,非常接近马赫数4第一、二级分离飞行平衡迎角 3.80° ,分离后,第二级在整个吸气推进飞行阶段,迎角变化范围很小,从 $+0.030^\circ$ 到 -0.30° 。

2.2 HSGTS主要关键技术挑战

如果高超声速技术能够稳定发展并有足够的资金支持,HSGTS能够在未来15~20年取得成功。2004年完成了

氢燃料超燃冲压发动机为动力的X-43A飞行试验,2010年完成了碳氢燃料超燃冲压发动机为动力的X-51A飞行试验,在X-37和HTV-2上进行了高温材料和热防护系统的飞行试验验证研究。目前,发展HSGTS面临以下主要关键技术挑战。

1) 大尺寸超燃冲压发动机。目前,高超声速发动机地面试验试验件长一般4.6~9.1m(15~20ft),实验时间为几毫秒,需要用CFD技术补偿地面试验的不足。发展能用于飞行验证、飞行速度马赫数10以上的大尺寸发动机是主要关键技术挑战。

2) 在低速推进区,特别是跨声速区,需要获得适当的推力。

3) 发展持久、低维护的高性能高温结构材料和热防护系统。持久性和易维护性类似目前航天材料,但要能在2500~50000°F下工作。

4) 发展轻质、高温发动机材料、密封和热管理技术。

5) 发展轻质、长寿命、保形低温推进剂容器。

6) 在现实经济高度不确定度的环境中设计高度集成的飞行器。

3 结束语

进入21世纪以来,美国在积极推进高超声速飞行器发展,高超声速飞行器发展路线图逐步清晰,首先,发展高超声速导弹,在2020年形成全球快速打击能力;然后,发展无人高超声速飞机,在2025年形成全球侦查、战区巡航能力;2030年以后,形成完全可重复使用、负担得起的HSGTS能力,将进入太空的成本降低到目前成本的10%以内。实现这个目标,除了技术问题,还需要有高的利用率做保证,因此,发展HSGTS离不开国际合作。为了提高利用率,HSGTS除了用于进入太空,地球上两地之间的快速运输也将是HSGTS的服务领域。

AST

参考文献

- [1] Kevin G B. The hypersonic space and global transportation system: a concept for routine and affordable access to space[R]. AIAA2011-2295.
- [2] Kothari A. Rocket based combined cycle hypersonic vehicle design for orbital access[R]. AIAA2011-2338.
- [3] Kothari A. A reusable, rocket and airbreathing combined cycle hypersonic vehicle design for access-to-space[R]. AIAA2010-8905.

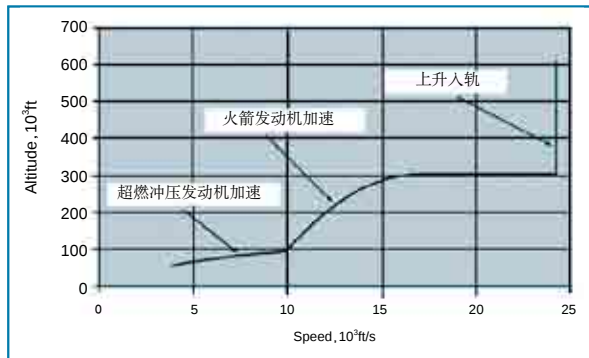


图6 HSGTS 第二级飞行轨迹