



北京航空航天大学  
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

# 第二十四届“冯如杯”学生创意大 赛项目论文

## 轻型空天往返无人运输机

——基于 RBCC 和磁悬浮加速轨道技术

2014年3月

## 摘要

随着中国空间站体系的建设,未来以空间站为基础的的长期航天任务需要一个与空间站相配套的供给体系提供物资支持。目前投入使用的空地往返飞行器只有航天飞机,但是航天飞机具有对发射条件要求高,动力系统复杂,成本高等缺陷,因而对于安全、稳定、低成本的空天往返飞行器研究成为科研热点。针对空天往返无人运输系统为空间站提供定期物资运输和进行短时间空间探测实验的任务要求,本项目旨在提出一套能可靠实现跨大气飞行、低成本安全投射和良好气动特性的轻型空天往返飞行器设计方案。通过研究当前国际国内空天往返飞行器领域的主要研究成果和被广泛接受的设计方案,查阅相关技术的资料后,本文提出了一种独特的固体火箭-超燃冲压组合推进模型。主要在采用 RBCC 实现跨大气飞行,磁悬浮加速轨道投射达到必要点火速度,机身与发动机高度一体化设计三个方面提出创新性的思路。结合 RBCC 技术的研究成果及发展趋势和磁悬浮技术的应用成熟度分析,所提方案在未来具有较强的可行性。

**关键字:**空天往返运输系统, RBCC, 固体火箭-超燃冲压组合, 磁悬浮投射

## 目录

引言.....	1
一 项目背景.....	1
二 项目内容.....	2
（一）火箭基超燃冲压组合发动机（RBCC） .....	2
1.超燃冲压发动机.....	2
2.RBCC 介绍.....	2
3.固体火箭超燃冲压推进模型.....	2
（二）磁悬浮发射轨道.....	4
1.其他投射方式.....	4
2.磁悬浮投射方式.....	4
3.相对优势.....	5
（三）飞行器外形参考方案.....	6
1.气动布局.....	6
2.防热布局.....	7
三 可行性分析.....	7
（一）RBCC 可行性分析.....	7
（二）磁悬浮投射可行性分析.....	7
四 创意度分析.....	8
五 应用前景.....	8
参考文献.....	9

## 引言

随着深空探测和太空资源开发的不断深入，太空空间站体系不断发展完善，使得以空间站为基础的长期航天任务执行成为未来太空任务的主要部分。为适应长期任务的需要，构建一个可与空间站相配套，提供必要物资支持的供给体系成为当前航天相关领域的研究重点。各国都在这个空天往返飞行器领域做了许多研究，但大都鲜有成果。本项目主要的创意来源是美国空军实验室和波音公司联合研制的 X51A 高超声速飞行器。美国 20 世纪 60 年代提出的将火箭推进方式与其他航空推进方式相结合的一系列先进推进系统模型 RBCC(Rocket Based Combined Cycle)。在这一系列模型中，最适合空天尺度下的飞行器的当属火箭基超燃冲压组合方案。X51A 的成功试飞验证了自由飞行、超燃冲压发动机驱动的飞行器的可行性。结合当前航天器推进技术的不断发展的情况，空天往返飞行器在大气内使用航空超燃冲压推进，在大气外采用火箭推进的方案在未来具有很强的可实现性。但采用超燃冲压推进的 X51A 在投射方面存在缺陷。X51A 采用超音速飞机携带投射的方式，由于运载器挂在超音速飞机机翼一端，直接造成飞机在气动和质量上的不对称，容易造成飞机失稳。同时，由于投放的地方就在飞机近旁，很容易受到飞机周身气流的影响，这种影响在空天运载器发动机启动伊始的不稳定状态非常危险。因此，空天飞行器的超音速投射方式在安全方面存在隐患。

参考日趋成熟的磁悬浮列车技术和初步研究的磁悬浮弹射发射卫星技术，提出了针对轻型空天飞行器的磁悬浮投射方式。综合这两个主要方面的创意，提出了固体火箭-超燃冲压组合推进的轻型空天往返运输机方案。

## 一 项目背景

随着中国空间站体系的建设，未来长期航天任务的执行可以以空间站为基础。这就需要一个与空间站相配套的供给体系，为长期任务提供必要物资支持。本文就是在这个背景下提出了一种轻型空天运输机设计。

本文这种空天运输机的设计思想包括三点：首先，采用新型火箭冲压组合发动机（RBCC）作为动力来源，实现跨大气层飞行。其次，采用磁悬浮加速轨道作为投射方式，能安全稳定的达到必要点火速度。再者，机身与发动机采取高度

一体化设计，在气动和隔热方面有显著优点。

## 二 项目内容

### （一）火箭基超燃冲压组合发动机（RBCC）

#### 1.超燃冲压发动机

超燃冲压发动机由进气道、燃烧室和尾喷管构成，没有压气机和涡轮等旋转部件，高速迎面气流经进气道减速增压，直接进入燃烧室与燃料混合燃烧，产生高温燃气经尾喷管膨胀加速后喷出，从而产生推力。[1]

冲压发动机相比较涡轮、涡扇等发动机的优点有：结构简单、造价低、易维护、超声速飞行时性能好。特别适宜在大气层或跨大气层中长时超声速或高超声速动力续航飞行。但是，超燃冲压发动机必须在一定的速度下才能点火启动，不能独立完成从起飞到高超声速飞行的全过程。所以，我们必须通过某种手段将飞行器加速到超燃冲压发动机的点火马赫数，直接以超燃冲压模态飞行。

#### 2.RBCC 介绍

RBCC(Rocket Based Combined Cycle)是美国 20 世纪 60 年代提出的，将火箭推进方式与其他航空推进方式相结合的一系列先进推进系统模型。[2]

在这一系列模型中，最适合空天尺度下的飞行器的当属火箭基超燃冲压组合方案。

当前的航空发动机和火箭发动机是相互独立的，在物理和功能上的联系很少。而火箭基超燃冲压组合发动机则是将两种类型的推进单元有机的组合到一起，融为一体，在功能上互为补充。尤其是，超燃冲压发动机只能在大气层和临近空间内工作，火箭发动机可以在整个空天范围内工作。而超燃冲压发动机在大气层内的工作效率以及可控性远远强于火箭发动机。高推重比、低比冲的火箭发动机和低推重比、高比冲的超燃冲压发动机组合在一起，能充分发挥两种推进方式的优势和特色。

#### 3.固体火箭超燃冲压推进模型

结合本方案提出的背景：轻型空天运输机，本文设计了一种独特的固体火箭超燃冲压组合推进模型。

该模型有两个工作模态：超燃冲压模态和固体火箭模态。

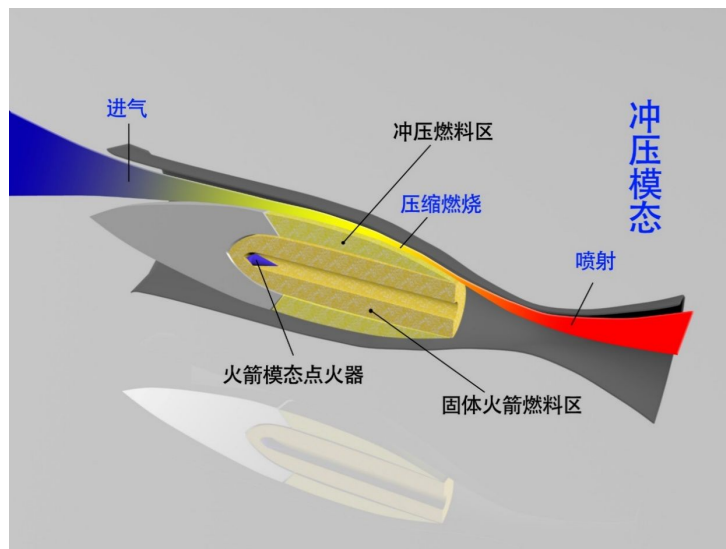


图 2-1 发动机超燃冲压模态

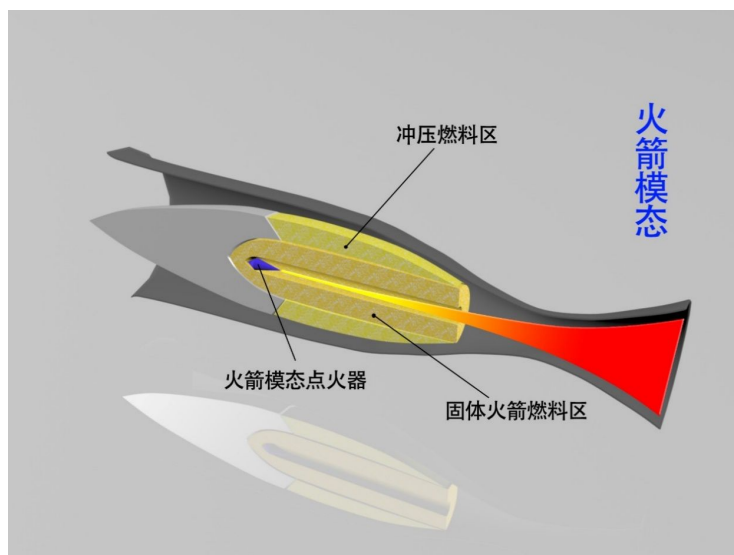


图 2-2 发动机固体火箭模态

两种工作模态的最大区别在于燃料氧化剂来源。

在大气层内，氧气含量高于临界值，发动机依靠进入燃烧室的氧气即可完成正常压缩燃烧工作（如图 2-1）。此时的工作模态即为超燃冲压模态。

而进入临近空间后，氧气含量降低到临界值以下，不足以供给冲压工作模态，发动机内部火箭模态点火器工作，发动机的工作模态转变为火箭模态(如图 2-2)。发动机依靠携带的固体火箭燃料完成从临近空间转移到空间轨道的飞行。

整个结构没有转动结构，也没有复杂活动件，相比较普通航空发动机结构上简单得多，在对重量要求近乎苛刻的空天运载机上极其适合。

## **（二）磁悬浮发射轨道**

### **1.其他投射方式**

根据前文所述，超燃冲压模态有点火马赫数限制。为成功点火，飞行器必须通过外力加速到一定速度。目前，实现这一目的途径主要有：火箭引射和超音速飞机携带。这两种模式都有各自的优缺点。

火箭引射效率高，携带速度高，达到点火速度容易。但是这种方式有两个弊端。首先，火箭引射相当于给飞行器增加了一个火箭模块，直接造成起飞重量大幅度增加。其次，因为该运载机是轻型，载体火箭是小型火箭，而小型火箭的风险以及飞行过程中的震动很容易造成失败或损失。

超音速飞机携带一般是将空天运载器悬挂在超音速飞机的一边机翼下方，驾驶超音速飞机直至点火马赫数附近，然后投放空天运载器。这是目前空天飞机试验最常用的方式，像美国的 X-51A 就是由 B-52 轰炸机携带投放的。这种方式的优点在于可以控制投放速度以及跟踪测试，非常适合试验飞行。但是这种方式的安全性不容乐观，由于空天运载器挂在超音速飞机机翼一端，直接造成飞机在气动和质量上的不对称，容易造成飞机失稳。同时，由于投放的地方就在飞机近旁，很容易受到飞机周身气流的影响，这种影响在空天运载器发动机启动伊始的不稳定状态非常危险。

本文针对这两种投射方式的优缺点设计了一种新型发射方式：磁悬浮加速轨道发射。

### **2.磁悬浮投射方式**

这个发射系统系统的动力原理类似于目前日趋成熟的磁悬浮列车。目前相对成功的磁悬浮列车就是通过类直线电机结构，驱动依靠磁力悬浮在轨道之上的列车前进。由于列车悬浮于轨道之上，因此其只受空气阻力，所以可以使列车时速达到 500km/h 以上。

本文参照磁悬浮列车的工作原理设计了一种轻型航天器发射轨道。主要结构如图 2-3 所示。

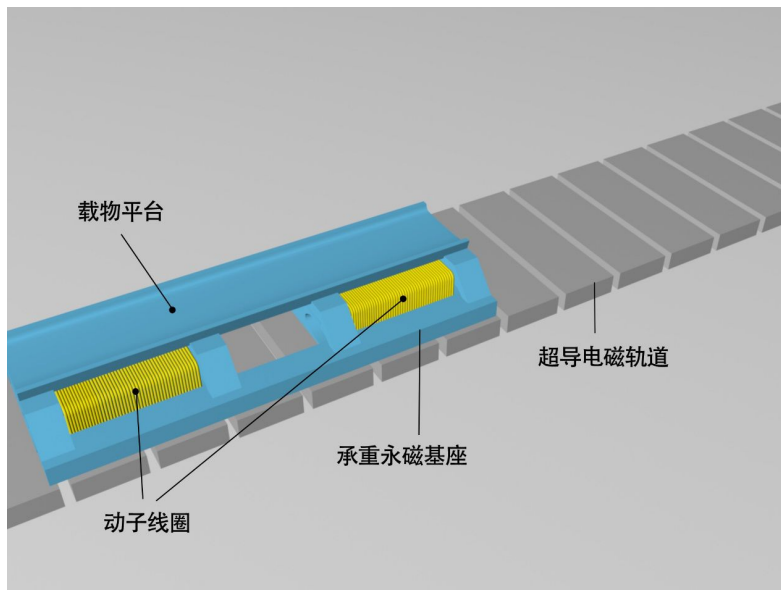


图 2-3 磁悬浮发射轨道结构

磁悬浮发射第一步要实现的是利用电磁力使航天器飘离电磁轨道。该方案中，承重永磁基座和超导电磁轨道构成了一对相斥的磁极，当超导电流足够强，永磁基座在超导电磁轨道的斥力作用下会浮起。

磁悬浮发射第二步是产生推力。因为超导电磁轨道的表面处存在极强的垂直磁场，如果平行于轨道平面放置通电导线，即可产生垂直导线方向的力，这个力可作为发射推力。图中动子线圈的功能即在于此。

### 3.相对优势

磁悬浮轨道发射的优势体现在两方面：安全性和成本。

在安全性方面：磁悬浮发射时飞行器动能是高度可控以及稳定增加的，这一点大大优于火箭投射。同时，磁悬浮发射设施是独立的，不需要改变飞行器的机构或外形，其设施可靠性易于控制。

成本方面：首先，磁悬浮的发射方式是高度可重复的，其基础设施在发射过程中损耗小，短期内可再次发射。其次，这种发射方式的用途可以扩展到其他类型航天器甚至飞行器，因此，其建设成本虽然高，但潜在价值也高。



### (三) 飞行器外形参考方案

#### 1. 气动布局

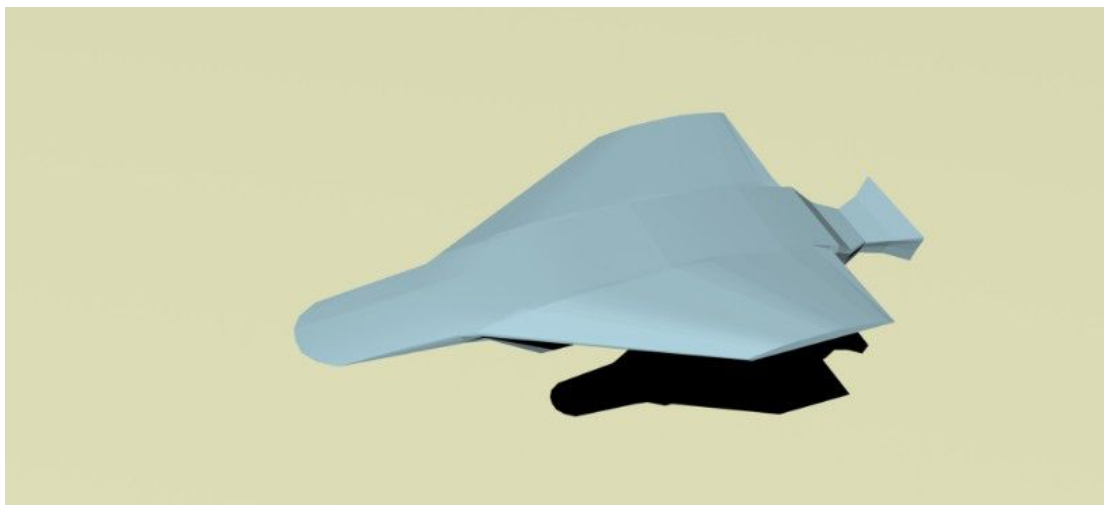


图 2-4 翼面视角

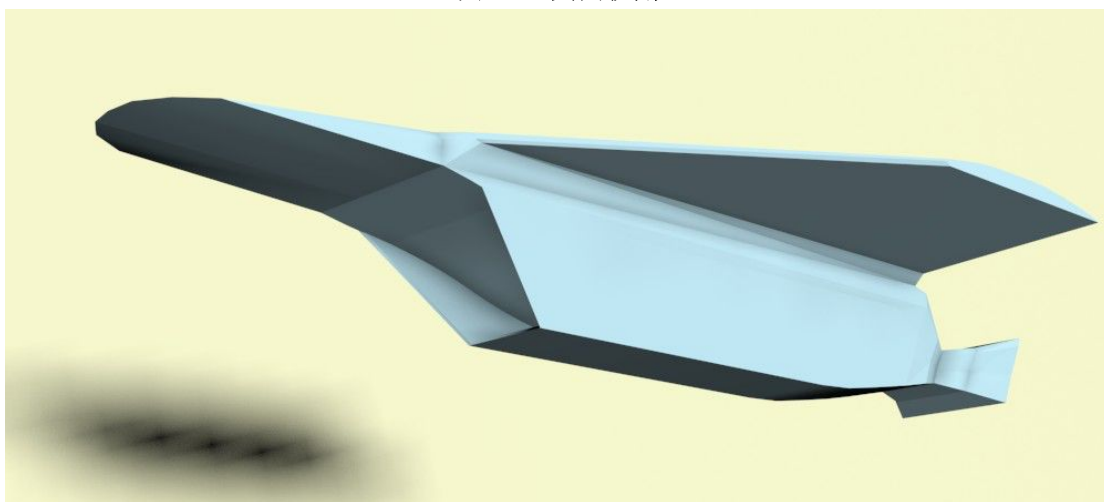


图 2-5 进气道视角

为了实现大马赫数飞行，必须为高超声速飞机选择一种飞行阻力低、强度较高、抗高温特性好的气动布局。轴对称的弹头体的激波阻力相当小，导弹、炮弹、炸弹大都采用这种理想的外形。美国研制的航天飞机全部采用这种气动外形。

但是，对于自主飞行的空天飞机，这种布局则容易出现問題，因为当飞行器以一定迎角飞行时升力太小，低速特性太差，无法满足起飞、机动飞行、着陆的要求。因此，本方案翼面布局采用高超声速飞行的另一种常用布局：大后掠三角翼的无尾式布局。

三角翼布局能更好地满足飞行器起降和机动飞行的要求，但它们的机翼较薄，在高超声速飞行时的高温高压环境下，其结构强度和防热问题是重难点。

## 2.防热布局

影响高超声速飞行摩擦产热量的关键因素是飞行器的迎风面积。因而，减少迎风面积是设计放热布局的关键点。

本方案中，机头薄片化，并将进气道和机头一体设计，迎面气流绝大部分直接进入发动机内加压燃烧而不是冲击机头机身。同时，发动机和机身的一体化使得飞行器的最大截面积大大缩减，并提高了发动机的进气量，发动机推力得到提升。

此外，由于空天运载机的目的是直接进入空间轨道，因而在大气层能飞行的时间相对于真正意义上的空天战斗机要少。根据航天飞机的设计经验，以机身帖附隔热材料作为主要隔热手段。另外，由于机头处非常薄，因而在机头处的材料应当选用极度耐高温高压的材料。

## 三 可行性分析

### （一）RBCC 可行性分析

2013 年 5 月份，美国成功进行了 X-51A 的第四次发射实验，飞行速度马赫数 5 左右，飞行时间超过三分钟。X-51A 采用的动力便是 RBCC 模型的一种。这表明 RBCC 在通往实际应用的路上迈出了一大步。

在工程实际中，要将 RBCC 推进系统用于飞行器的飞行操作中还存在很多问题。有许多重要环节都影响其效能最大限度的发挥。所以日前 RBCC 发动机研究急需解决以下关键技术：总体方案和全模态性能分析模型；开展 RBCC 各个模态三维、两相、带化学反应的一体化数值模拟研究；RBCC 燃烧组织及热力喉道控制技术研究；RBCC 发动机各个模态间的模态过渡技术研究；RBCC 实验验证技术研究；超燃冲压发动机技术；飞行器/发动机一体化设计等问题。[3]

### （二）磁悬浮投射可行性分析

高速列车的重量动辄 10 吨量级，而轻型空天飞机重量在百千克量级。而且空天飞机外形的气动效果要远超高速列车。这两点决定了在磁悬浮轨道上加速空天飞机的效果会非常好，同时速度上限肯定远超目前磁悬浮列车的最高速度。而冲压发动机的点火马赫数一般为 3，也就是大约 2000km/h，这在技术上是可行的。

现阶段制约磁悬浮列车投入使用的主要因素是安全性问题，这个安全主要是突发情况下，一般是突然断电下的乘客安全问题，这种安全问题在航天发射上很难出现。经过接近半个世纪的研究，磁悬浮在技术上的成熟度已经很高了，转而应用于航天领域的可行性已经具备。

在国内，已经有学者在磁悬浮弹射发射卫星方面进行研究。像北京航空航天大学宇航学院的杨文将老师已经在这个方向上做了很多工作。

## 四 创意度分析

目前投入实用的空地往返飞行器只有航天飞机，航天飞机作为相对成熟的空天运载器有很多优点，但是航天飞机对发射条件要求高，动力系统复杂，成本高。相对于航天飞机，本文的方案有以下几点优点：

首先，火箭基冲压发动机，相对于采用火箭发射入轨的航天飞机具有结构简单，质量轻的优势，尤其适合对质量要求苛刻的空天往返飞行器。

其次，航天飞机的发射方式是火箭携带发射，两次航天飞机发射事故证明了这种发射方式由于其高度复杂和不稳定性，因而具有强烈的安全隐患。本文设计的磁悬浮投射方式在安全性和可控性方面有很大优势。

再者，本文的方案的应用只在于空天物资运输，不能应用于载人，这种功能的细分使得飞行器内部可以舍弃不必要的载人设备，因而飞行器的空载重量可以进一步减轻，再结合低成本的磁悬浮发射。这种运输机相对于航天飞机在成本方面具有很大优势。

## 五 应用前景

本文设计的背景是为空间站提供物资支援，这是这种空天运载器的直接应用，但不限于此。

空天往返飞行器由于其极强的机动性，覆盖全球的活动范围，往返于空地的纵深，在民用航天和军用航天都有很广泛的应用前景。

在民用航天领域，这种空天运输机由于低成本和可重复使用的特性，其应用会非常广泛。比如它可以作为小型卫星的发射平台，或者其本身就可以进行短期的航天探测。它还可以作为小型的空间实验室，可以进行一些短期的空间实验。

在军用航天领域，空天运输机的高机动性、高纵深、全球覆盖，再改装后可

以作为空天战斗机使用，这和 X-51A 的研制目的类似。当然，由于重量上的苛刻要求，这种空天运输机作为军用探测器或卫星相对于直接作战会更有意义。

随着航空航天技术的持续进步，空天飞机的设计和研制已经成为了各国关注的焦点。希望本文提出的这种空天运输机能为中国未来空天飞机的设计和研制提供一些思路 and 方向。

## 参考文献

[1][3]李旭昌，马岑睿，宋亚飞. 国外高超声速组合推进技术概述[J]. 航天制造技术，2011，（2）

[2]彭小波. 组合循环动力技术在天地往返领域的发展与应用[J]. 导弹与航天运载技术，2013，（1）