



蔡巧言 张旭辉 彭小波 韩鹏鑫 等译

Reusable Booster System Review and Assessment

可重复使用助推器 系统综述与评估

美国科学院国家研究理事会宇航与空间工程部

RBS综合评估委员会 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS



装备科技译著出版基金

可重复使用助推器 系统综述与评估

Reusable Booster System
Review and Assessment

美国科学院国家研究理事会宇航与空间工程部
RBS 综合评估委员会

著

蔡巧言 张旭辉 彭小波 韩鹏鑫 张化照
王 飞 王宁宇 杜朋飞 郭金花 海尔翰

译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2016-134号

图书在版编目(CIP)数据

可重复使用助推器系统综述与评估 / 美国科学院国家研究理事会宇航与空间工程部 RBS 综合评估委员会著; 蔡巧言等译. —北京: 国防工业出版社, 2018.9

书名原文: Reusable Booster System Review and Assessment

ISBN 978-7-118-11690-8

I. ①可... II. ①美... ②蔡... III. ①重复使用运载火箭-系统评价 IV. ①V475.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 186790 号

This is a translation of Reusable Booster System: Review and Assessment, Committee for the Reusable Booster System: Review and Assessment; The National Research Council © 2012 National Academy of Sciences. First published in English by National Academies Press. All rights reserved.

本书简体中文版由 The National Academies Press(NAP)授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 8¼ 字数 142 千字

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 72.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

随着航天技术的发展,近年来为追求低成本、快速响应进出空间的能力,美国、欧洲、俄罗斯的主要航天机构均开展了可重复使用运载器的相关研究,出现了多种基于可重复使用技术的航天运输系统方案,其中美国空军研究实验室提出的可重复使用助推器系统(RBS)方案最引人关注。由于一次性运载火箭目前仍是航天发射任务的主力,可重复使用运载器尚处在研发攻关阶段,RBS的技术方案可行性、远期大规模发展应用的风险、全寿命周期的成本和效益规律均需要进行系统的评估,以便为未来航天运输技术发展路线图的确定提供技术参考和决策建议。美国科学院国家研究理事会(NRC)的宇航与空间工程部在2012年成立了专门的第三方评估委员会对RBS相关技术和方案进行了长达数月的独立审查和系统评估,本书原著给出了评估委员会的完整评估情况和结果。

在这篇针对RBS的全面独立技术评估报告中,参与评估的专家以第三方的视角从市场需求、技术风险、项目管理、运营成本控制等方面对RBS进行了权威的评价,涵盖了项目的工程需求、技术风险、发展路线图、全寿命周期成本估算、以往类似型号的研制经验、降低关键系统风险的途径和措施等诸多方面,对国内类似的可重复使用运载系统方案论证、项目研制、风险评估等均有重要的指导意义和参考价值。

译者长期从事可重复使用运载器相关技术的研究和跟踪探索,对国内外与RBS类似的研究计划和项目有全面的了解。整个翻译团队对原著进行了系统的整理和全面的消化,完全遵照原著的客观描述和权威论断,向国内航天界展示了美国航天界权威机构对重大项目进行专家审查和技术评估的完整流程。

译者在对原文进行翻译整理的过程中,得到了中国运载火箭技术研究院研究发展中心相关领导、专家的大力支持和热情帮助,并为本书的顺利出版提供了诸多便利,在此一并致谢。

本书得到了装备科技译著出版基金的资助,在出版过程中,国防工业出版社提供了大力支持,特别是责任编辑提出许多宝贵意见,在此表示由衷的感谢!

由于专业知识和语言水平有限,书中难免还有一些内容的翻译不尽如人意,恳请从事该领域研究的专家、学者们不吝赐教,欢迎读者对此书提出宝贵意见。

译者
2018.6

原著者简介

应美国空军空天司令部的要求,美国科学院国家研究理事会(NRC)宇航与空间工程部成立专门的 RBS 综合评估委员会对 RBS 相关技术和方案进行独立审查和评估,本书是评估委员会给出的结论和建议。评估委员会是由与当前 RBS 研究活动无关的专家组成,这些评估委员会的成员均是航天运载器设计、运营、研究、技术发展及应用、航天系统操作、成本分析等方面的知名专家。该评估委员会共有成员 15 名工作人员 6 名,分别来自美国及欧洲的大学、国家实验室、美国航天局、欧洲航天局、美国国防部等部门以及美国航空航天学会(AIAA)等专业的学术机构。

可重复使用助推器系统评估委员会 成员

DAVID M. VAN WIE: 约翰霍普金斯大学应用物理实验室, 主席。

EDWARD H. BOCK: 洛克希德·马丁太空系统公司(已退休)。

YVONNE C. BRILL: 国际海事卫星组织(荣誉退休教授)。

ALLAN V. BURMAN: 杰佛逊咨询集团公司。

DAVID C. BYERS: 顾问。

LEONARD H. CAVENY: 卡夫尼科技有限责任公司。

ROBERT S. DICKMAN: 美国航空航天学会(AIAA)。

MARK K. JACOBS: 顾问。

THOMAS J. LEE: 李和合伙人有限责任公司。

C. KUMAR N. PATEL: Pranalytica 公司。

DIANE ROUSSEL-DUPRE: 洛斯阿拉莫斯国家实验室。

ROBERT L. SACKHEIM: NASA 马歇尔航天飞行中心(已退休)。

POL D. SPANOS: 莱斯大学。

MITCHELL L. R. WALKER: 乔治亚理工学院。

BEN T. ZINN: 乔治亚理工学院。

工作人员

JOHN F. WENDT: 高级策划专员, 研究主任。

AMANDA R. THIBAUT: 研究合作人。

CATHERINE A. GRUBER: 编辑。

TERRI BAKER: 高级策划助理(截至 2012 年 3 月 30 日)。

RODNEY HOWARD: 高级策划助理(始于 2012 年 4 月 1 日)。

MICHAEL H. MOLONEY: 航空与空间工程部, 主任。

宇航与空间工程部 成员

LESTER L. LYLES: 莱尔斯集团, 主席。
AMY L. BUHRIG: 波音公司, 副主席。
ELLA M. ATKINS: 密歇根大学。
INDERJIT CHOPRA: 马里兰大学帕克分校。
JOHN - PAUL B. CLARKE: 乔治亚理工学院。
RAVI B. DEO: EMBR。
VIJAY K. DHIR: 加州大学洛杉矶分校。
EARL H. DOWELL: 杜克大学。
MICA R. ENDSLEY: 萨科技公司。
DAVID GOLDSTON: 自然资源保护委员会。
R. JOHN HANSMAN, JR.: 麻省理工学院。
JOHN B. HAYHURST: 波音公司 (已退休)。
WILLIAM L. JOHNSON: 加州理工学院。
RICHARD KOHRS: 独立顾问, 德克萨斯州, 迪克逊。
IVETT LEYVA: 空军研究实验室, 爱德华空军基地。
ELAINE S. ORAN: 海军研究实验室。
HELEN L. REED: 德州农工大学。
ELI RESHOTKO: 凯斯西储大学。
EDMOND SOLIDAY: 联合航空公司 (已退休)。

工作人员

MICHAEL H. MOLONEY: 主任。
CARMELA J. CHAMBERLAIN: 行政协调员。
TANJA PILZAK: 经理, 策划实施。
CELESTE A. NAYLOR: 信息管理合作人。
CHRISTINA O. SHIPMAN: 财政专员。
SANDRA WILSON: 财政助理。

致谢

本报告事先以草稿形式由不同的专家审查,这些评论人是依照国家研究会(NRC)下属的报告评估委员会认可的程序,为获得不同的观点和专业的专家意见而选择的。这种独立评论的目的是为了提供公正和有判断力的意见,可以帮助协会出版的报告尽可能地合理,确保报告满足客观性、有依据以及对研究任务的体现程度等机构标准。为保护审议程序的完整性,评论意见和草稿手稿都是保密的。我们想对以下人员为报告做出的评论而表示感谢:

Brian Cantwell: 斯坦福大学。

John Casani: 喷气推进实验室。

Natalie W. Crawford: 兰德公司。

Robert L. Crippen: 美国海军(已退役)和聚硫橡胶推进公司(已退休)。

David E. Crow: 康涅狄格大学(已退休)。

Joseph Hamaker: 千禧国际集团有限责任公司。

Debra Facktor Lepore: 史蒂文斯理工学院。

Lester L. Lyles: 美国空军(已退役)和莱尔斯集团。

Alan Wilhite: 乔治亚理工学院。

尽管以上列出的评论人提出了很多建设性的意见和建议,但他们并没被要求给出结论或签署推荐信,也没在本报告发表之前看到过报告的最终版本。本报告的评论在国家史密森尼学会空天博物馆 John D. Anderson 的监督下进行。受国家研究理事会指定,他负责确保对本报告的检查都是按照制度程序不受影响而独立做出的,所有的评论意见都是经过谨慎思考的。本报告的最终内容则完全取决于作者委员会和审查制度。

目录

概述.....	001
第 1 章 项目背景.....	007
1.1 国家安全方面的航天载荷发射需求	007
1.2 可重复使用助推器系统的实现方式及潜在的优势	008
1.3 潜在的新型一次性运载器	009
1.4 NRC 对 RBS 的评估.....	010
1.5 评估报告的框架	011
第 2 章 美国空军对 EELV 型运载器的需求和实现方案	012
2.1 综述	012
2.2 RBS 研制安排及预期的成本概述	014
2.3 RBS 技术途径综述	016
2.3.1 RBS 飞行器的操作流程和基础设施.....	017
2.3.2 研究与开发飞行器.....	021
2.3.3 RBS 地面研发.....	022
2.4 附加的项目级(纲领性)考虑	023
2.4.1 外部计划考虑.....	023
2.4.2 工业基础.....	023
2.5 与 RBS 类似的可重复使用运载器	024
第 3 章 RBS 方案的技术评估	026
3.1 主要部分的技术成熟度评估	026
3.2 主推进系统	028
3.2.1 碳氢燃料助推器发动机风险评估.....	032
3.2.2 碳氢燃料助推器发动机的风险消除.....	038
3.3 火箭动力反推 RTLS 机动	041
3.3.1 气动风险评估.....	042

3.3.2	热防护/热控的风险评估	043
3.3.3	推进剂管理	043
3.3.4	火箭动力 RTLS 机动风险的降低	044
3.4	IVHM 结构	045
3.5	RBS 的自适应制导控制	046
3.6	第二个风险区域	049
3.6.1	结构	050
3.6.2	能源、液体加热及作动器研发	052
3.6.3	组装和制造	052
3.6.4	上面级研发	053
3.7	运营操作与基本设施	054
3.7.1	航区安全	056
3.7.2	发射操作流程练习	057
3.7.3	航天器的处理过程	057
3.7.4	发射飞行器的处理流程选择	058
3.7.5	助推器和上面级的发射处理流程	059
3.7.6	助推器/上面级的组装和测试	059
3.7.7	RBS 的运输和发射台的安装	060
3.7.8	湿态合练 WDR	060
3.7.9	有效载荷总装	061
3.7.10	推进剂加注和发射倒计时	061
3.7.11	排风管和噪声抑制系统	061
3.7.12	飞行终止	062
3.7.13	助推器着陆与安全保持	062
3.7.14	飞行后助推器的检测、维护和存储	062
3.7.15	助推器在仓库内的维护	063
3.8	RBS 风险评估总结及降低风险的努力	063
第 4 章	成本评估	066
4.1	基本构型飞行器的成本建模方法和评估结果	067
4.2	对基本方案成本模型的评估	071
4.2.1	飞行器	071
4.2.2	发动机	074
4.2.3	配套设施成本	075
4.2.4	操作成本	076

4.2.5 成本模型评估小结	077
4.3 RBS 商业运营模式	078
4.3.1 方法和假设	078
4.3.2 结果、敏感性和不确定范围	078
4.3.3 商业发射活动的影响	079
4.4 其他事项及成本估计的可信性	081
第5章 计划的执行	082
5.1 降低系统风险的研制阶段划分方法	083
5.1.1 AG&C 研制阶段	083
5.1.2 IVHM 研制阶段	084
5.1.3 RBS 的 Pathfinder 阶段	084
5.1.4 助推器发动机研制	084
5.1.5 可重复使用助推器技术验证机阶段	085
5.1.6 RBS - Y 飞行器研制及验证阶段	085
5.1.7 RBS 产品生产阶段	086
5.2 项目的计划性	086
5.2.1 风险降低程度的跟踪方法	086
5.2.2 方案调整的思路	086
5.2.3 构型/配置/布局/框架识别和管理	087
5.2.4 成本管理	088
5.3 政府部门的观点/监管	089
5.3.1 独立的技术审查	089
5.3.2 对合同商报告及审查的要求	089
5.3.3 调整授权的方法	090
5.3.4 生产监控的方法	090
5.3.5 操作的方法	090
5.4 采购策略	092
第6章 评估发现与建议	094
附录 A 评估任务陈述	099
附录 B 评估委员会的成员和工作人员简介	100
附录 C 向评估委员会提供支撑材料的单位	106

附录 D 缩略语表..... 107

附录 E 主要的可重复使用运载器发展历史..... 110

附录 F RBS 助推器的操作性设计 116

概述

2011年6月15日美国空军空天司令部发布了新的战略方向、研究任务与目标,以确保美国在太空及网络电磁空间(Cyberspace)的持续主导地位。随后,美国空军研究实验室(AFRL)、空军空间与导弹系统中心、空军第12和14中队、空军空天司令部确定了这一目标所面临的四个长期的关键科学和技术挑战。其中一个挑战是提供全型谱的、成本显著降低的载荷发射能力,可重复使用助推器被认为是能够满足这一挑战的有效方案。

目前空军的中型和重型运载任务由一次性运载器来承担,如联合发射联盟为美国空军提供的Atlas V和Delta IV。由于近期美国国家航空航天局(NASA)航天飞机计划的终止,后续相关子合同需要完全依托一次性运载器的相关发展计划来履行,导致完成上述发射任务的工程实现成本有所增加。美国空军希望通过找到一种有效的航天运载发射方法来控制这种成本的增加,同时保持目前一次性运载器所能达到的高可靠性。

RBS是一个带有自动制导控制系统的无人运载器,由可重复使用第一级(采用碳氢燃料、分级点火的富氧发动机)和一次性使用第二级(液氢液氧发动机)构成。可重复使用的第一级采用返回原场(RTLS)的发射模式,在发射场进行回收、维护和下次发射。美国空军曾经研究过多种RTLS方案,最终推荐采用“二级分离之后进行火箭动力返场机动”的飞行模式。在约30km的高空进行火箭动力返场机动,采用一级配备的两台发动机中的一台点火工作,确保助推器能够获得足够的速度可安全返回到发射场并进行无动力着陆。

美国空军研究实验室一直致力于RBS相关的关键技术研究,包括碳氢助推器和飞行技术。正在开展的“探路者”(Pathfinder)项目就是为了验证火箭动力RTLS的主要关键技术,包括采用缩比飞行样机验证推进剂管理、飞行器控制等技术。

美国空军空间与导弹系统中心已经确定了一种RBS方案和相关的发展计划,包括1个中等规模的可重复使用助推器验证机、2个全尺寸样机(RBS-Y飞行器)、8个工程应用的RBS,将在范德堡空军基地和卡纳维拉尔角空军基地运营。航空宇航公司联合美国空军空间与导弹系统中心对RBS基本概念方案的

工程运营成本进行了系统分析,结果表明:在执行同样的运载能力的情况下,与一次性运载系统相比 RBS 能够大幅降低全寿命周期的成本。成本估计中采用工业标准模型估计 RBS 各运载级的成本,所需推进系统和地面设施的成本是独立评估的,并基于模型估计操纵运营的成本。

美国空军空天司令部要求国家研究理事会(NRC)的宇航与空间工程部对 RBS 相关技术和方案进行独立审查和评估,以确定将来是否继续在 AFRL 支持下开展 RBS 的相关研究工作,并评估是否需要启动针对 RBS 研发计划的更大规模融资工作。基于评估要求,评估委员会进行了深入的审查,对 RBS 发展规划中的相关标准和假设条件、RBS 商业运营成本分析模型、技术成熟度、RBS 应用相关的核心部分的发展规划等方面进行了系统的评估。评估委员会是由与当前 RBS 研究活动无关的专家组成,这些评估委员会的成员均是航天运载器设计、运营、研究、技术发展及应用、航天系统操作、成本分析等方面的知名专家。评估委员会要求 AFRL 向委员会提交美国空军航天发射需求、RBS 的技术基线、成本模型与评估、技术成熟度等材料用于开展评估审查。同时,评估委员会还从与 RBS 相关的工业部门、RBS 的行业独立性、推进系统供应商等渠道获得评估的部分输入信息作为参考。

基于得到的评估输入条件,经过独立的评估分析、委员会专家的判断评估,评估委员会得到了 6 条主要发现。

发现 1:成本估计的不确定性可能会严重影响 RBS 全寿命周期的成本估计结果。

有几个重要因素导致目前采用的 RBS 成本估计具有明显的不确定性。首先,飞行器研发成本估计使用了 NASA/美国空军成本模型(NAFCOM),这是一个工业界的标准模型,也采用了合理的模型输入,但是这个模型中没有考虑可操作性对飞行器设计的影响。由于 NAFCOM 很大程度上基于历史数据,目前缺少可重复使用系统相关的经验数据,当考虑与确保可操作性所必须具备的飞行器相关特性时,该模型存在很大程度的不确定性。其次,成本预测是基于美国版的俄制碳氢燃料发动机技术,但是研发一个工程可操作的可重复使用发动机的成本风险很难计算。基于美国工业界在研发富氧型分级燃烧(ORSC)碳氢发动机方面的有限经验,与发动机研发相关的成本不确定性是非常严重的。再次,基础设施需求方面的底层细节还不明确,因此与基础设施相关的成本估计也存在一定的不确定性。最后,目前估计出的操作成本是基于“仅需适度的飞行后检查需求”这一前提得出的,这是基于已经研发了一套有效的飞行器综合健康管理系统这一假设,并且要求因飞行任务担保引起的附加成本非常低。

发现 2:RBS 的商业运营方案是不完整的,因为没有对新型的商业发射提供商、单独采用一种运载器进行发射任务的影响及技术风险进行充分考虑,美国空

军需要独立的发射能力以满足其非常有把握地进入太空的需求。上述因素导致的成本不确定性使得 RBS 进行商业运营的方案目前难以闭环。

除了与 RBS 相关的基本成本不确定性,还有三大因素使得 RBS 的商业运营方案不完整并且目前还不能闭环。首先,RBS 的商业运营方案没有考虑新加入航天发射领域的具有竞争性的商业发射提供商,导致目前的运营方案成本估计是基于 RBS 概念与最新的改进型一次性运载火箭(EELV)成本外推结果的对比得到的。考虑到大量的追求新型进入太空发射运输方式的商业实体的出现,未来航天运输可能与现在采用的方式有很大不同。随着全球范围内均在围绕降低发射成本开展激烈竞争,可以预见,最近采用的 EELV 成本很有可能并不是进行 RBS 成本比较的合理基线。

其次,RBS 运营方案没有充分考虑单独采用单一的运载器发射任务供应商的影响及技术风险。目前的运营方案假设 RBS 获得了承担美国空军全部发射任务的资格,并单独由一家供应商来研制 RBS,并没有充分考虑这种采用单一运载能力提供方的成本风险。另外,目前的运营方案中没有考虑在飞行器研发阶段保留竞争关系可带来的成本收益。因为商业发射市场目前正在快速变化,未来将主要随成本因素的驱动发展,不考虑竞争关系在其中的角色和影响是当前 RBS 运营方案的一项弱点。

最后,RBS 运营方案假设获得了美国空军全部发射任务的资质,但是美国空军目前保留了自身具有一定的独立发射能力,以确保其非常有把握地进入太空的需求。在这种需求下,需要研发并保持第二种航天发射系统的能力,RBS 运营方案在其获得美国空军全部发射任务订单方面的估计过于乐观。

这些因素的最终结果就是与 RBS 商业运营方案相关的不确定性非常高,导致目前这一商业运营模式的方案不可能闭环。

发现 3:可重复使用依然是以降低成本实现全新的全型谱运载能力及更大运载能力适应性的重要途径。

为了在显著降低发射成本的基础上形成全型谱的运载能力,美国空军空天司令部已经确定了一个长期的科技发展目标,可重复使用性仍然是实现这一目标的可行途径之一。除了降低成本外,具有较强鲁棒性(任务适应性)的可重复使用系统可能还会有附加的效益,包括按需补充卫星、布置分布式星座、快速部署、可以在多用途防御发射基地发射的强适应操作响应、空军人员工程操作的可操作性等。

发现 4:RBS 对美国空军产生的最大影响是对发射任务的操作响应比目前一次性运载系统更为快速及时,但是目前还没有发现能够驱动该技术发展的明显需求。

目前的 RBS 运营方案是基于满足当前 EELV 运载发射资质下开展按需发

射的假设前提下展开的。在这一假设下,由于缺乏对 RBS 的操作应用需求,那些满足提高可操作性、降低操作成本所必须的技术所处的优先级将会有所降低。可重复使用系统的真正价值在于设计特性、技术的发展,以及由此引起的美国空军操作模式的改变。

发现 5:在开展大规模研发之前需要进行持续应用研究和先进技术研发的技术领域已经明确。包括可重复使用富氧型分级燃烧碳氢燃料发动机技术、火箭动力 RTLS 操作、飞行器健康管理系统、自适应制导控制能力。

发现 6:明确了进行 RBS 商业运营的不确定性和需要进一步降低的技术风险,美国空军空天司令部在工程应用型 RBS 研制方面进行大规模投资还为时尚早。

评估委员会认为目前 RBS 开展商业运营的方案还不闭环,进行 RBS 大规模研发的条件还不成熟。同时,委员会充分认可对未来运载系统所需技术开展持续研究和先进技术开发。委员会做出了如下 6 项建议。

建议 1:发射的快速响应能力将是任何一种可重复使用运载系统的一个重要特征。为了处理/应对这种目前已经意识到的技术断层,空军应该在目前一次性运载器“遂行发射”(launch-on-schedule)需求之外建立特殊的快速响应应用目标,以推动技术发展。

评估委员会认为,快速响应特性应该是研发可重复使用运载系统及其配套支持技术时应当考虑的主要因素。目前,除了“遂行发射”的任务模式需求外没有其他工程型的快速响应需求。由于这些需求会牵引飞行器和技术发展的新方向,空军非常有必要定义标准的快速响应的任务目标,以便为技术研发活动提供聚焦的攻关目标。

建议 2:与 RBS 研发进程上的任何官方决定无关,空军需要在以下主要领域开展技术研发工作:可重复使用富氧/分级燃烧碳氢燃料发动机技术、火箭动力返回原场(RTLS)操作、飞行器健康管理系统、自适应制导控制能力。这些技术必须成熟才能够支撑未来在 RBS 发展方面做出合理的决定,而且其中大部分技术也可以用于相关的运载系统概念中。

需要在这四个技术区域开展持续的研发,从而当 RBS 项目的大量投资通过审查并开始执行时,项目这四方面所需要的技术可以达到一定的技术成熟度。针对这四个领域的技术研究投入应当持续并且与 RBS 项目研究计划的决策相独立。因为除了火箭动力 RTLS 的技术之外,其他技术的应用范围远超出了 RBS 项目本身,这些技术的成熟对美国空军除 RBS 计划外的先进火箭推进系统、系统可靠性、飞行器自主化等方面都有很有益的支撑。

建议 3:AFRL 目前开展的 Pathfinder 项目正在用一个小规模的缩比飞行器验证 RTLS 机动飞行过程的主要技术方面。为了增大 Pathfinder 的成功概率,

AFRL 应该研发和飞行多个 Pathfinder 试验飞行器。另外,在确定出下一代航天发射的最优系统之前,RBS 多种概念间的竞争和对比将会持续。

RBS 进行 RTLS 任务时的火箭动力返回机动还没有验证过,因此通过这一方式实现可重复使用很明显会带来风险。基于这一风险以及由此带来的新任务模式的参数分布空间,Pathfinder 计划应该采用一种发展模式,该模式下陆续设计并飞行验证多个飞行器。尽管这种方法在近期会增加成本,但如果将来某一天高性能的解决方案真正能够实现可重复使用时,其带来的长期收益将会远远超出初期的投入成本。

建议 4:在 Pathfinder 试验飞行活动成功完成,并且与可重复使用富氧型分级燃烧碳氢燃料发动机技术、火箭动力 RTLS 操作、飞行器健康管理系统、自适应制导控制系统相关的关键技术风险得到充分降低之后,才能为 RBS 的下一步发展方向做出决策。

由于目前对主要技术的研究线条较粗并且不够成熟,RTLS 模式下火箭动力机动中也存在一定的风险,是否决定继续推进 RBS 计划的发展取决于 Pathfinder 项目的成功完成和主要技术风险的适度降低。评估委员会认为这种模式将会推迟 RBS 性能的实现。但是,推迟做出继续推进 RBS 计划的决定将会带来附带的好处——为新加入的商业运载发射服务提供商提供了更清晰、明确的商业运营环境。

建议 5:在 Pathfinder 试验飞行活动成功完成后,AFRL 应当重新评估 RBS 商业运营的可能性,同时考虑以下因素:新的具有竞争实力的商业发射提供商、采用单一发射运载器来源的潜在影响,空军需要独立掌控能够满足其十分有把握地进入空间的需求。

建议 6:在开展 RBS 项目工程研制时,从技术研发到验证、样机、飞行产品各个阶段,只有上一阶段工作成功完成并进行充分评估之后才能做出是否开展下一阶段工作的决定。

是否开展下一步工作的决策节点将是后续阶段是否可以正常开展的分支点,这些节点上应该对能够支撑下一阶段工作的相关技术具有足够充分的理解和认知。是否推动从 Pathfinder 和碳氢燃料发动机技术风险降低到中等规模验证机、从验证机到 RBS - Y 样机的决策节点应该被视为是研制流程决策路线图的第一步。由于研发新的空间运输能力需要相关的成本,而且其运营方式也存在一定的技术不确定性,构建任何未来可用的 RBS 计划都是很谨慎的选择,因此是否决定推进开展下一阶段的研究很大程度上依赖于前一阶段相关研究工作的成功完成。

今天,美国正处在一个十分重要的空间运输模式转型过程当中,从一直由政府研发和控制运载器的模式切换到基于服务的新型航天发射模式,在这种新模式