

国防颠覆性技术在航天领域的发展应用研究

栾恩杰¹, 孙棕檀², 李辉², 贾平²

(1. 国家国防科技工业局, 北京 100048; 2. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

摘要: 本文从国防颠覆性技术入手, 进行定性遴选, 聚焦重大国防颠覆性技术并建立指标评价体系, 对重大国防颠覆性技术进行定量分析。并以此为基础, 重点关注能在航天领域中产生巨大影响的重大国防颠覆性技术。这些在航天领域的颠覆性技术有望极大地提升航天系统的效能、大幅降低研制成本, 推动航天技术水平的跨越式提升。

关键词: 颠覆性技术; 航天; 效能; 成本

中图分类号: V19 **文献标识码:** A

Prospects for the Promotion and Application of Defense Disruptive Technology in Developing the Space Industry

Luan Enjie¹, Sun Zongtan², Li Hui², Jia Ping²

(1. State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC, Beijing 100048, China;

2. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper starts by making a qualitative selection of defense disruptive technologies. It considers the features of various defense disruptive technologies and establishes an index evaluation system to carry out a quantitative analysis of the major ones. Based on this, this paper identifies major defense disruptive technologies that can have a huge impact on the space industry. These are expected to greatly improve the efficiency of the space industry, significantly reduce research cost, and lead to a considerable improvement in the current level of space technology.

Keywords: disruptive technologies; space; efficiency; cost

一、颠覆性技术概述

颠覆性技术是一种另辟蹊径、改变原有技术路线, 对原有技术体系和应用系统产生颠覆性效果的技术。从技术属性来讲, 颠覆性技术有三种产生途径: 一是基于新原理、新发现的原始创新; 二是基

于现有技术的集成创新与应用; 三是科学原理与成熟技术的转移与创新应用。

颠覆性技术强调的是效果, 即这种技术的作用效应是颠覆性的。因此, 颠覆性技术不一定是全新的技术, 也可能是一种新应用, 只是最终实现了颠覆性的效果。航天活动本身虽然具有一定的技术引

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-09-25

通讯作者: 栾恩杰, 中国工程院, 院士, 主要研究方向为控制系统工程; E-mail: pepsijian@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“引发产业变革的重大颠覆性技术预测研究”(2016-ZD-12)

本刊网址: www.enginsci.cn

领与带动作用,但更多地是由众多科学和技术融合而成,生物、信息、制造、能源、材料等众多科学和技术的突破均具有航天应用潜力,需要从提升系统整体性能的角度去评价航天颠覆性技术。

结合颠覆性技术的一般定义,航天颠覆性技术定义为:可极大提升航天系统效能、或大幅降低研制成本,将对航天产业、空间科学研究乃至军事航天领域产生重要影响的变革性技术。

二、国防颠覆性技术的定性遴选与定量分析

(一) 国防颠覆性技术的定性遴选

本文采取情报调研、问卷调查、研讨与访谈的方式,确定出当前发展中的 12 项重大国防颠覆性技术。

通过查阅、梳理、分析国内外 2009 年以来各类研究报告近 50 篇 [1~3],梳理出 50 项国防颠覆性技术;并设计涵盖这 50 项技术的调查问卷,将问卷发放给各位专家,由专家进行评判、取舍和补充。共发放问卷 82 份、收回问卷 75 份,经过分析、统计,遴选出 25 项技术。最后采取会议交流、专家研讨与访谈、内部研讨的方式进行技术聚焦、深度分析、综合集成,遴选出 12 项重大国防颠覆性技术。

这 12 项重大国防颠覆性技术分别为:量子技术、太赫兹技术、石墨烯技术、负折射率材料技术、无人自主技术、赛博空间技术、超高能含能材料技术、脑机接口技术、增材制造技术、定向能武器技术、空间攻防对抗技术、高超声速飞行器技术。

(二) 国防颠覆性技术的定量分析

在定性遴选的基础上建立国防颠覆性技术指标评价体系,对颠覆性技术进行量化研究。

1. 国防颠覆性技术指标体系的构成

国防颠覆性技术指标体系由一级指标、二级指标和指标权重组成。

将技术基础(B)、技术范式(F)、技术性能(P)、技术应用(S)、技术制约(R)作为颠覆性技术指标评价体系的一级指标。技术基础指标表征技术的投入与研发,技术范式指标表征技术产生与实现途径,技术性能指标表征技术的特性,技术应用指标表征技术应用的范围和影响,技术制约指标表征技术实现的可能性。若将 T (technology) 作为对某项

国防颠覆性技术的评价,则初步建立 T 的函数并做简化,即 $T=f(B, F, P, S, R)$ 。

针对 5 个一级指标 B, F, P, S, R , 设立了 18 个二级指标 B_i, F_j, P_k, S_l, R_m , 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6; j=1, 2, 3; k=1, 2, 3, 4, 5; l=1, 2; m=1, 2$ 。每个二级指标均可量化打分,如表 1 所示。

对指标权重进行初步设计,给定权重范围。技术基础指标为宏观层面指标,主观性较强,权重可调低;技术范式指标权重可降低;技术性能为最核心指标,权重可调高;技术应用指标是对未来情况的预测,权重可降低。最终指标权重设置见表 2。

最终对某项颠覆性技术一级指标中的每项二级指标逐项加权求和,再将 5 个一级指标得分相加,构成某项颠覆性技术的得分,如下:

$$\begin{aligned} T &= f(B, F, P, S, R) \\ &= \sum(B_i W_{Bi}, F_j W_{Fj}, P_k W_{Pk}, S_l W_{Sl}, R_m W_{Rm}) \\ &= \sum B_i W_{Bi} + \sum F_j W_{Fj} + \sum P_k W_{Pk} + \sum S_l W_{Sl} + \sum R_m W_{Rm} \\ &(i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, 3; k=1, 2, 3, 4, 5; \\ & \quad l=1, 2; m=1, 2) \end{aligned}$$

2. 国防颠覆性技术指标体系的验证

使用该指标评价体系对发展中的 12 项重大国防颠覆性技术和 5 项典型非颠覆性技术进行得分计算。将计算结果进行对比。以验证指标体系的敏感性与合理性。

12 项重大国防颠覆性技术的得分主要分布在 2~5 分,脑机接口技术得分最高,为 4.607 分,空间攻防对抗技术得分最低,为 2.537 分(5 分为满分)。

5 项典型非颠覆性技术为海水制油技术、铝燃烧室技术、核热火箭技术、制导枪弹技术、自适应变循环发动机技术。使用指标评价体系对这 5 项技术进行了得分计算,得分分别为 2.68、2.93、1.87、2.06、3.05。

5 项典型非颠覆性技术和 12 项重大国防颠覆性技术得分如图 1 所示。

“颠覆性技术”和“非颠覆性技术”得分相对集中,体现了指标体系的敏感性;“颠覆性技术”得分相对较高,总体表明指标评价体系具有一定的合理性。

当前的 12 项重大国防颠覆性技术中得分最高的为脑机接口技术,世界各国都非常重视该技术,技术应用前景明朗且应用领域广泛;发展中的 12 项重大国防颠覆性技术中得分较低的空间攻防对

表 1 颠覆性技术指标评价体系二级指标

一级指标	二级指标	二级指标含义
技术基础(B)	国家战略政策(B ₁)	该项技术在国家层面或各军种发布的技术战略规划、技术愿景、技术路线图等中出现的频次
	智库战略政策(B ₂)	该项技术在知名智库或咨询机构发布的技术文件报告中出现的频次
	商业战略政策(B ₃)	该项技术在新闻媒体、商业机构发布的颠覆性技术文件报告中出现的频次
	研究机构数量(B ₄)	开展该项技术的国有研发机构数量
	产业公司数量(B ₅)	开展该项技术的国防军工公司与商业公司数量
	大学数量(B ₆)	开展该项技术的大学数量
技术范式(F)	新科学原理(F ₁)	该项技术采用的全新科学原理的新颖性
	已有原理应用(F ₂)	该项技术已有科学原理再应用的可行性
	技术集成(F ₃)	该项技术的技术集成效果
技术性能(P)	火力要素(P ₁)	火力要素相比原有技术, 关键核心指标的提升率
	机动要素(P ₂)	机动要素相比原有技术, 关键核心指标的提升率
	信息要素(P ₃)	信息要素相比原有技术, 关键核心指标的提升率
	生物/脑要素(P ₄)	生物/脑要素相比原有技术, 关键核心指标的提升率
	共性要素(P ₅)	共性技术相比原有技术, 关键核心指标的提升率
技术应用(S)	军事应用(S ₁)	该项技术潜在的军事应用领域数量
	民用商用(S ₂)	该项技术潜在的非军事应用领域数量
技术制约(R)	技术可能性(R ₁)	该项技术实现的可能性与目前的制约因素
	技术速率(R ₂)	该项技术实现的速率或预期需要年限

表 2 指标权重设置

指标	B						F		
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	F ₁	F ₂	F ₃
权重	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.08		
指标	P					S		R	
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	S ₁	S ₂	R ₁	R ₂
权重	0.08	0.08	0.12	0.12	0.10	0.05	0.05	0.07	0.07

注: F₁、F₂和F₃共用的权重为0.08。

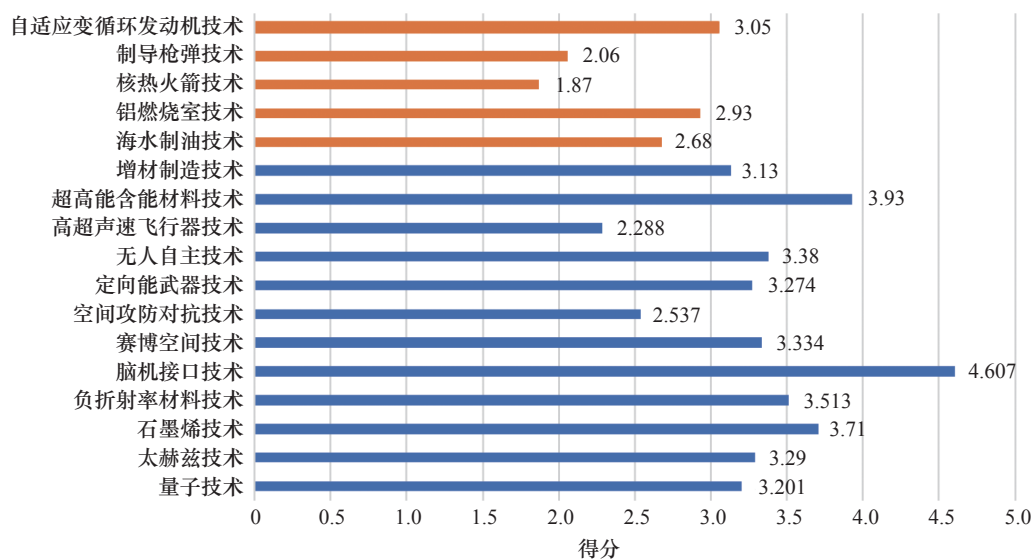


图 1 5 项典型非颠覆性技术和 12 项重大国防颠覆性技术得分

抗技术在“技术性能”指标上得分偏低，影响最终得分；得分最低的高超声速飞行器技术在“技术范式”上得分偏低，技术原理成熟较早（1938年），技术提升速度缓慢，影响最终得分。

三、国防颠覆性技术在航天领域的应用

当前，在发展中的 12 项重大国防颠覆性技术中，量子技术、石墨烯技术、太赫兹技术、增材制造技术和高超声速飞行器技术等航天领域具有可观的应用前景。依据其技术特性，可分为以下三个类别。

（一）以量子技术和石墨烯技术为代表的新发现与新原理应用，有望极大提升航天系统的性能

量子技术是基于量子理论的技术应用，主要包括量子通信、量子计算和量子精密测量。量子通信是利用了量子力学的不确定性、不可克隆原理和纠缠态等特性，其应用主要集中在基于量子密钥分发的量子保密通信和量子隐形传态等方面。当前，基于量子密钥分发的保密通信具有产业化潜力。在航天领域，量子通信可实现星地间可靠、高速地通信，成为全球保密通信体系的重要一环，即利用卫星中转实现超出中继器工作范围的远距离城际间的量子通信。量子计算的本质是应用量子力学的叠加特性，通过保持量子比特序列间的量子力学特性，并加以控制，实现高速并行运算，可在特定算法上表现出极强的加速性能。虽然目前量子比特间的连通性和相干时间不足，但一旦取得突破，会为航天高性能计算提供全新方案。量子精密测量主要是将传统物理原理与量子效应相结合，对特定物理量的测量精度或灵敏度可提高 3~5 个数量级。例如，由陀螺仪、加速度计和采用量子技术的原子钟构成的量子惯性导航系统，或可取代卫星导航和传统的惯性导航。

石墨烯是从石墨材料中剥离出来、只有一个原子层厚度的二维材料（见图 2），兼具半导体和金属属性，其导电与导热性能最强，材料厚度最薄、强度最大，被喻为“新材料之王”。随着制备技术和应用研究的不断发展，石墨烯有望取代硅材料成为下一代电子元器件的基础材料，应用于高性能集成电路和新型纳米电子器件。石墨烯已经深刻地影响了锂离子电池、太阳能电池、传感器等与航天器材密切相关的技术领域，未来或可应用石墨烯材料制

成长达数万米的“太空电梯”缆绳。此外，石墨烯在超新型火箭、碳纤维飞行器外壳等领域也有重要应用。

（二）以太赫兹技术和增材制造技术为代表的创新应用，推动航天分系统与部组件的跨越式进步

太赫兹波是介于微波与红外线之间的一段电磁波段，具有不同于其他波段电磁波的独特特性。20 世纪一直缺乏对太赫兹波有效的探测和产生手段，进入 21 世纪，随着太赫兹波元器件、放大器、功率器件的陆续研制，太赫兹技术将很快地从理论走向应用。

由于波长短于微波，太赫兹雷达能探测到更小的目标，对于当前只在特定频率范围内有效的隐身技术，也能进行有效的反制，这给反隐形技术带来了新的突破。就航天领域而言，由于太赫兹波带宽的优势，以其为载体尤其适合在太空环境中进行大数据的高速传输与通信。太赫兹波在太空中可无损传输，一方面可使卫星之间的通信数据传输速率可达到 25~250 GB/s，即使按照 25 GB/s 计算，也是目前微波带宽的 27 倍；另一方面，由于太赫兹的波束较宽，容易对准，利于卫星天线分系统实现小型化。

增材制造技术是通过逐层增加材料的方式将数字模型制造成三维实体物件的一种创新型制造技术，完全不同于传统减材加工成形的制造理念，可彻底改变传统的制造技术路线。在航天领域，增材制造技术已经得到应用。一是为实现航天器在轨维

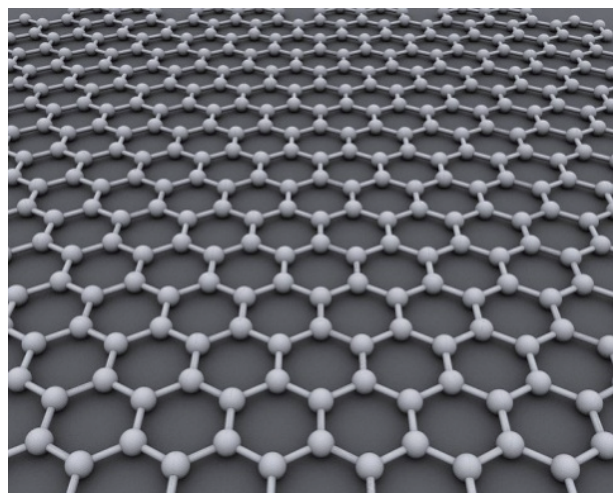


图 2 石墨烯微观结构图

修提供技术手段，有望实现太空原位制造以及建造运载火箭难以运输的大型结构 [4]。例如，可在空间站直接按需制造所需零部件，不用再依赖运载火箭和飞船将地面预制好的零部件运往空间站（见图 3）。未来，增材制造技术还有望成为太空原位制造的主要制造模式，可支持空间站、载人登月、载人登火星等各项载人航天任务。二是为运载火箭与卫星小型零部件的结构制造提供新方法。例如，美国的太空发射系统（SLS）重型火箭在研制过程中，芯级、上面级发动机的喷注器、涡轮泵和排气盖板等结构零部件的制造大量应用了增材制造技术。早在 2014 年，洛克达因公司（Rocketdyne）就成功应用增材制造技术制造了可用于立方星推进的 MPS-120 模块化推进系统，并成功进行了点火试验。

（三）以高超声速飞行器技术为代表的技术集成与创新，为系统级、任务级航天体系架构提供全新技术途径

高超声速飞行器技术是飞行速度超过 5 倍声速的综合系统技术创新，集成了气动、结构、推进、热防护、制导控制等多项技术。以高超声速吸气式发动机或组合式发动机为动力，在大气层、临近空间和跨大气层中实现高超声速、远程飞行的飞行器，是航空航天技术的战略制高点。当高超声速飞行器技术进一步发展并与航天技术结合时，人类长久以来的航空航天飞机梦将得以实现——即从跑道起飞，直接飞向太空。航空航天飞机能水平起降，自由进出大气层，可执行低成本空天运输、快速响应发射或回收卫星、反卫星作战、侦察与监视等多种航空航天任务，开辟了更安全、更可靠、更经济、更快速进入太空的新技术途径与新方式，将为全新航天运输体系的构建创造条件。

四、结语

航天颠覆性技术逐步经历了从“独有”技术到“引领”技术、再到“共享”技术的三个阶段，航天颠覆性技术愈发表现出高度交叉、融合、协同等特征。在新一轮科技革命的大背景下，各行业间技术融合的趋势愈发明显，其他行业的技术进展与突破将会深刻地带动航天颠覆性技术的发展。航天颠覆性技术的发展可充分吸收其他行业的技术突破和

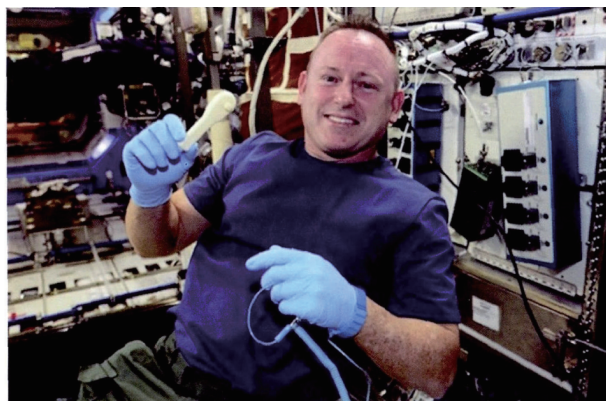


图 3 国际空间站的宇航员展示使用增材制造技术打印出的套筒扳手

科技成果。

通过对以量子技术、太赫兹技术、石墨烯技术、增材制造技术、高超声速飞行器技术为典型代表的航天颠覆性技术的研究发现，航天颠覆性技术对航天领域的影响与推动了涵盖部组件、分系统、系统级等各层级；同时航天颠覆性技术集中在信息、动力、材料制造等几个重点领域，从而使得空间攻防 [5]、航天运输、深空探测等成为未来航天领域取得突破的重大方向。

我国航天科技的整体水平和发展速度与航天强国相比还有一定的差距。因此，提高自主创新能力成为当前一项十分迫切的战略任务。航天颠覆性技术将成为航天科技创新发展的重要突破口，对此类技术进行超前布局，着力攻关，也是提高航天国际竞争力，保持企业可持续发展的重要支撑与保障。

参考文献

- [1] Alan R S. Keeping technology programs alive and running [R]. Washington, DC: U.S. Department of Defense, 2014.
- [2] United States Air Force Global Science and Technology Vision. Global horizons final report [R]. Washington, DC: United States Air Force, 2013.
- [3] Defense Advanced Research Projects Agency. Breakthrough technologies for national security [R]. Arlington: Defense Advanced Research Projects Agency, 2015.
- [4] 贾平, 李辉, 孙棕檀. 国外 3D 打印技术在航天领域的应用分析 [J]. 国际太空, 2015 (4): 31-34.
Jia P, Li H, Sun Z T. Application and analysis of 3D printing technology abroad [J]. Space International, 2015 (4): 31-34.
- [5] 陈建光, 刘海印. 美军分散空间系统体系的最新发展 [J]. 国际太空, 2015 (12): 26-32.
Chen J G, Liu H Y. Latest development in U.S. military disaggregated space architectures [J]. Space International, 2015 (12): 26-32.