

宽适应性高超声速空天动力技术发展分析

Development Analysis of Hypersonic Aerospace Power Technology with Wide Adaptability

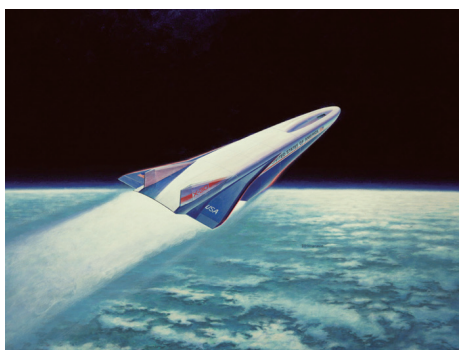
董芃呈 韩玉琪 刘金超 / 中国航发研究院

基于军事及经济战略需求，宽适应性高超声速空天飞行器的研制备受重视，而高性能动力技术是其核心。基于成熟研究基础的组合动力技术发展日趋深入，依靠创新概念的预冷技术亦初露锋芒，形成交互促进的格局。

宽适应性高超声速空天飞行器在具备高超声速飞行能力的同时，基本能适应目前机场起降及保障条件、能够在自地面至临近空间乃至地球轨道的极宽范围内工作，可用于高速运输或入轨运载。满足这一大跨度高性能需求的动力技术是其研制的核心，在相关研究过程中均以吸气式高超声速动力技术为重点，主要包括组合动力技术和预先冷却技术等，未来发展战略与趋势已初现端倪。

高超声速飞行器凸显动力技术核心地位

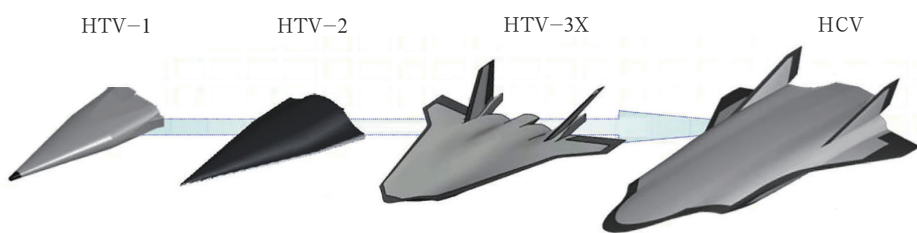
宽适应性的高超声速空天飞行器的研制是包括动力系统在内的各方面技术优化集成的过程。其中，动力系统的尺寸及气流捕获量在飞行器中占据更大份额，飞行器与动力装置间的耦合更为紧密，新燃料的应用显著影响飞行器构型和冷却设计，使得动力技术的重要性与牵引性更为显著。由相关研究可以看出，宽适应性的高性能动力技术是高超声速空天飞行器的核心关键，是实现空天飞行器优越性能及良好任务适应能力的前提。



(a) NASP X-30



(b) HYPER-X X-43A



(c) FALCON HTV 及 HCV 发展路线

几种美国高超声速飞行器

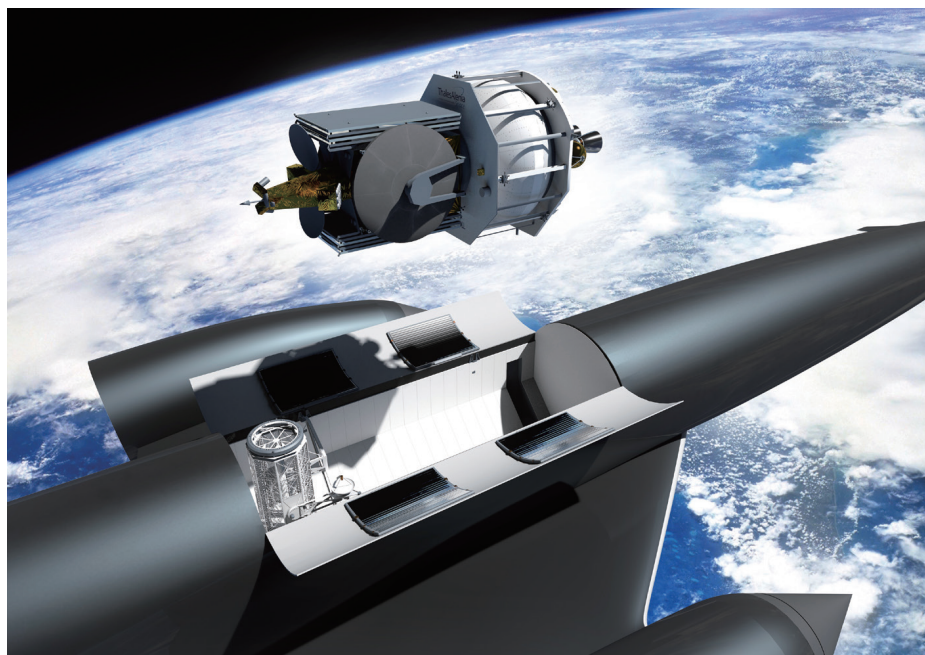
美国宽适应性高超声速计划

长期以来，美国十分重视围绕宽适应性高超声速空天飞行器的各项战略、前沿技术研究，开展了国家空天飞机 (NASP)、高超声速试验 (HYPER-X)、先进空间运输 (ASTP)、本土兵力部署与投送 (FALCON) 等计划。

其中，NASP 计划对高超声速空

天飞行器进行了启发性的宏观论证及关键技术研究，但因进度及预算等问题于 1995 财年终止，美国国防科学委员会 (DSB) 的评审认为，超燃冲压发动机、高超声速流场分析和控制、先进材料和涂层等技术的成熟度较低、不确定性较大，是计划的关键瓶颈。Hyper-X 计划在方

案设计上大量采用成熟技术以降低飞行试验技术风险，重点关注热防护问题和超燃冲压发动机，验证机 X-43A 成功开展飞行试验，积累了大量相关试验数据。ASTP 计划着重在动力方面开展双模态超燃冲压发动机地面试验，研究了采用变循环技术的新颖 TBCC 推进系统，即革新涡轮加速器（Revolutionary Turbine Accelerator, RTA），将空天飞行器的动力选择延伸至宽适应性组合动力领域。FALCON 计划采用循序渐进的发展策略，计划通过系列飞行验证机 HTV-1、HTV-2、HTV-3X 的研制与验证，发展以先进 TBCC 推进系统为动力的高超声速飞行器（HCV）所需的关键技术。2010 年 4 月，HTV-2 进行了首次 9min 的无动力滑翔飞行试验，在高超声速条件下收集了大量试验数据。洛克希德-马丁（洛马）

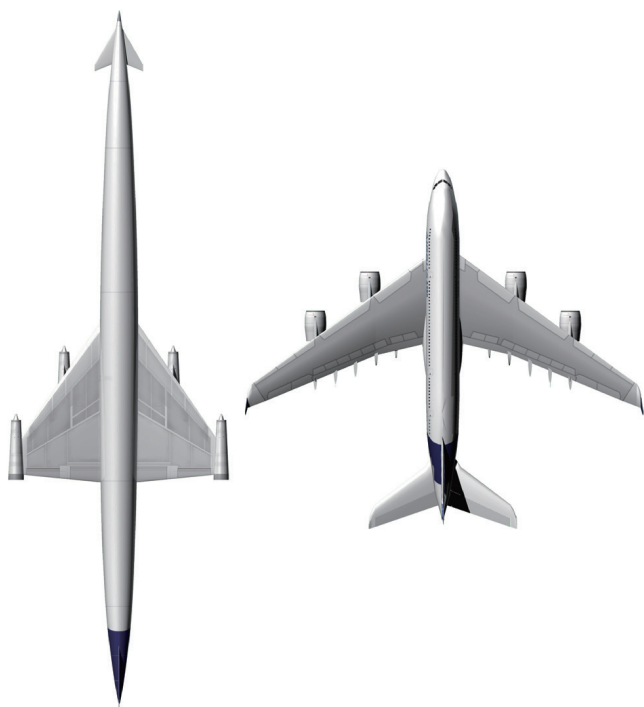


SKYLON 可重复使用入轨器

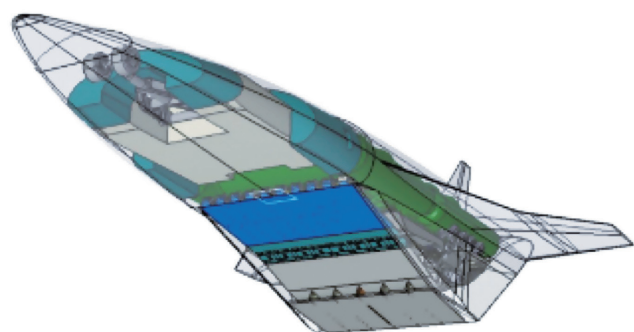
公司延续 FALCON 计划，发展下一代马赫数 (Ma) 为 6 的高超声速飞机 SR-72，预期于 2030 年形成装备。

欧洲宽适应性高超声速计划

云霄塔 (SKYLON) 计划由英国航天局 (UKSA)、英国反应发动机



(a) LAPCAT-A2 高超声速飞行器 ($Ma5$) (左) 与空客 A380 (右) 外形对比



(b) ONERA 高超声速飞行器 ($Ma8$)



(c) MBDA 高超声速飞行器 ($Ma8$)

LAPCAT 计划内几种高超声速飞行器概念图

公司 (Reaction Engines Ltd., REL) 共同开展, 计划研制能够大幅降低发射成本、简化基础设施、缩短准备时间的可重复使用入轨器, 采用单级入轨 (SSTO) 方式, 同时能够灵活机动。该计划的核心在于其搭载的“佩刀”(SABRE) 发动机。该型发动机具有火箭发动机及吸气式预冷发动机的组合特征, 具有比冲高、工作范围宽、环境危害小等性能潜力, 其突出性能赋予飞行器良好的任务适应能力。

长期先进推进系统概念与技术 (LAPCAT) 计划是2005年由欧盟委员会资助开展的面向未来高超声速空天飞行器及动力技术的研究计划, 以高性能动力技术为核心, 规划未来高超声速飞机的发展蓝图。该计划研究了速度分别为 $Ma5$ 和 $Ma8$ 的两类高超声速飞机。对于 $Ma5$, 计划围绕起飞质量、燃料消耗、环境因素等方面, 选取了具备较优潜力的 $Ma5$ “弯刀”(Scimitar) 预冷发动机为动力的 LAPCAT-A2 方案作进一步研究。对于 $Ma8$, 法国航空航天研究院 (ONERA) 提出一种基于由

入轨器改型的概念设计, 对机体进行了全新设计和数值模拟, 选取先进 TBCC 作为动力。欧洲导弹集团 (MBDA) 提出一种采用氢燃料动力的非常规布局轴对称式的飞行器构型设计, 内部储存空间充足, 以适应液态氢燃料的特点; 在动力方面, 方案集成了针对氢燃料改型的 GE90 发动机、液体燃料火箭、双模态冲压发动机 3 个动力模块, 以覆盖宽速域工作范围。

从 LAPCAT 计划可以看出, 宽适应性的高超声速空天飞行器的设计将显著区别于传统飞行器, 以适应新型动力、新型燃料带来的改变, 动力技术对飞行器研制的牵引作用在高超声速层面尤为突出。

日本宽适应性高超声速计划

日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 开展了多项针对高超声速飞机、可重复使用入轨器的研制计划, 均以膨胀循环空气涡轮冲压 (ATREX) 发动机为代表的高性能动力技术为其工作重点。JAXA 先后提出两级入轨 (TSTO) 的可重复使用入轨器, 以及 100 座级、 $Ma4.5$ 巡航

的高超声速飞机研制计划, 研究包含了构型、质量、尺寸等的概念设计, 重点是动力系统的论证。动力选型涉及 RBCC、TBCC 及 ATREX 发动机, 研究结论肯定了以液态氢为燃料的 ATREX 发动机的较高性能潜力。

组合动力技术发展日趋深入

各型传统动力装置只能在一定的工作范围内胜任, 难以单独满足未来高超声速空天飞行器在极宽飞行包线内的性能需求, 因而组合不同形式动力模块拓展高效工作范围成为技术及工程上的自然选择。组合动力技术, 特别是涡轮基组合动力技术, 具备覆盖极宽的工作范围的能力, 同时具有较高的技术可实现性, 是各国中近期项目的主要动力选择。由相关研究可以看出, 基于相对成熟技术, 逐步研究、突破、验证和应用, 实现型号的稳步发展及最终装备, 是发展高超声速空天动力技术的有效战略选择。

火箭基组合动力技术

火箭基组合动力 (RBCC) 是火箭发动机和吸气式发动机的组



(a) 可重复使用入轨器



(b) $Ma4.5$ 高超声速飞机

JAXA 高超声速空天飞行器概念图

表1 典型RBCC工作模式

Ma 范围	工作模式	主要推力来源
Ma 0 ~ 3	引射模式	引射火箭
Ma 3 ~ 10	超燃/亚燃冲压模式	双模式冲压发动机
Ma 10以上	火箭模式	火箭

合。美国在1968年对增压引射火箭冲压型(SERJ) RBCC验证机进行了多次地面试验。20世纪90年代末, NASA联合洛克达因(Rocketdyne)和普惠公司等,在ASTP计划内进一步开展RBCC的设计研制。NASA还设立吸气式火箭综合系统测试(ISTAR)计划,统筹RBCC的研究。JAXA在其可重复使用入轨器的研制中,结合飞行任务对RBCC进行了评估。

研究表明, RBCC发动机结构较为简单,通过引入引射模式和冲压模式(见表1),相较于纯火箭动力,提升了较低速度范围内的比冲,能够覆盖自起飞至入轨的极宽工作范围。在低马赫数时,引射火箭的比冲远低于燃气涡轮发动机,使其飞行器较难搭载较高的入轨载荷,这是RBCC的主要性能劣势之一。对于SSTO入轨器, RBCC是具有较高可实现性的动力选择。但在较低速度范围内,其性能仍远逊于燃气涡轮发动机,使RBCC难以完全满足未来宽适应性空天飞行器较高的综合性需求。

涡轮基组合动力技术

涡轮基组合动力(TBCC)是燃气涡轮发动机和冲压发动机的组合,可以分为并联式和串联式两种。并联式TBCC涡轮和冲压模块分别布置于各自涵道,结构较为简单,但

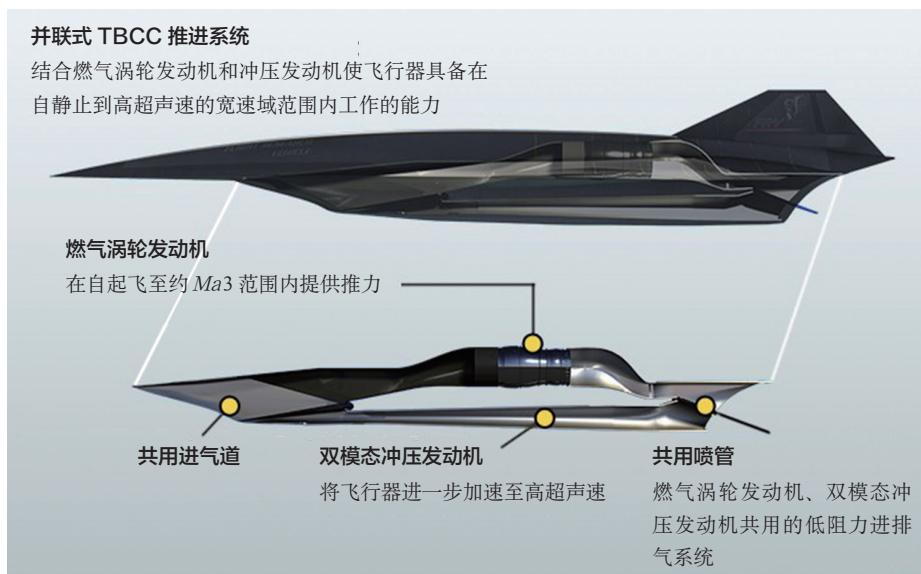
存在相对较大的结构冗余;串联式TBCC两动力模块共用涵道带来了结构质量的改善,但存在高马赫数下涡轮模块热防护等技术难点。

1989—1999年,日本发展了采用串联结构的TBCC HYPR90-C,重点研究了其高温核心机、进排气系统、相关试验设备和方法等,并进

行了高空模拟试验。苏联自20世纪70年代起开展了TBCC Ma4 ~ 4.5地面试验及模型飞行试验。美国在ASTP和FALCON计划中,围绕推进系统分别开展了RTA和“猎鹰”组合循环发动机技术(FaCET)两项先进TBCC研究计划。RTA的研制始于2001年,基于变循环技术,拓展涡轮模块工作速度极限。FaCET计划始于2005年,对TBCC的进排气系统和各部件进行了一体化地面试验,并着重研究模式转换速度区间内的性能特征。洛马公司计划在SR-72高超声速飞机上搭载的并联构型、共用进排气系统的先进TBCC,高性能、技术风险及成本控制、飞行

表2 典型TBCC工作模式

Ma 范围	工作模式	主要推力来源
Ma 0 ~ 2.5	燃气涡轮	燃气涡轮发动机
Ma 2.5 ~ 3.5	模式转换阶段	燃气涡轮发动机、双模式冲压发动机共同
Ma 3.5以上	超燃、亚燃冲压模式	双模式冲压发动机



洛马公司SR-72采用的TBCC系统

器/动力一体化优化是计划的重点。2011年,美国在高超声速飞机发展路线图中明确提出要使TBCC在2025年形成装备。

研究表明, TBCC结合了燃气涡轮发动机的相对成熟的技术,在性能、技术风险及研制成本等方面体现出综合优势。在此基础上,美、俄等国均期望通过进一步技术突破与优化,早日实现TBCC的装备。TBCC同时存在一定局限性:两个动力模块之间的部件共用性较低,存在一定的结构和质量冗余;受限于两模块的优势工作范围,在模式转换过程中,存在推力难以平稳接续、进排气系统性能恶化等技术难点;在较高马赫数下,对涡扇部件的结构热防护提出了较高要求,发动机循环加热量和循环功受到限制。目前,对于高超声速飞机和TSTO入轨器的第一级, TBCC是具备较强性能竞争力和较高技术可实现性的动力选择。

预先冷却技术初露锋芒

在高马赫数条件下,极高的空气来流滞止温度引起的飞行器及发动机材料、结构、性能等问题是高超声速空天飞行器及动力的主要技术挑战。预先冷却技术通过射流、换热等方式降低发动机进口温度,以拓展工作范围、优化高速性能。多循环耦合预冷发动机进一步采用创新的循环设计,基于低温燃料热沉及高性能换热系统,综合利用及管理燃料化学能、空气来流动能等能量来源,具备较宽的高效工作范围和优越的高速性能潜力。

相关研究表明,将射流预冷技术应用用于TBCC,能够拓展其涡轮模

块的有效工作范围,改善其模式转换过程中推力不足、性能恶化问题。多循环耦合预冷发动机的突出特征是频繁、大量的能量传递与转化;发动机内部采用创新的多路并行设计的压缩放热系统,能够大幅减小压缩功耗和冷却剂消耗,是保障发动机优势性能实现的核心部件。

需要指出的是,预先冷却技术虽已展现出突出的性能潜力,但受到自身技术成熟度及相关产业水平的制约,距大规模应用尚需时日。针对发动机总体和分系统的设计优化、各关键部件的设计制造、系统的可靠性和维修性等,仍需开展大量研究。此外,以合理的成本保障低温燃料的安全便捷供应(包括生产、储运、加注等环节)、广泛建立与之适应的机场设施等,也是预先冷却技术大规模发展应用的前提。

未来宽适应性空天动力发展趋势与战略展望

从宽适应性高超声速空天动力技术的发展可以看出,航空航天技术与产业的深度融合、高性能动力技术对飞行器研制的显著牵引、高可实现性技术与高性能潜力技术研究的交互促进、新兴技术对航空航天产业的跨领域赋能,将成为未来主要的发展趋势与战略选择。

航空航天技术与产业的深度融合

融合首先体现在空天界限的模糊。同型或具有较高技术通用性的不同动力装置,将被搭载于高速运输、航天入轨等多种飞行器,如预冷发动机之于高超声速飞机和SSTO入轨器、TBCC之于高超声速飞机和TSTO入轨器第一级。这种显著的通用性,既源于由各飞行器

分解至动力系统的技术需求的相似性,也是其高昂研制成本导向的必然结果。

应用的融合须基于技术与产业融合的支撑。例如,目前航空领域的变循环技术,是优化TBCC模式转换性能的有效途径;低温燃料,特别是液态氢的应用,对提升高超声速空天动力的性能有着重要意义,而航天领域已积累了燃料储运、保障等方面的研究基础;在能量管理及热防护方面,航空、航天在先进高温材料、换热及冷却、被动及主动热防护等技术上各具特点和优势。航空、航天共性技术融合有助于优化资源和力量配置,助推关键技术突破。

目前,我国航空、航天产业格局呈现依行业区分的特点,在各行业内部拥有完整的纵向技术及产业链条,而行业间的交互与融合尚显不足。面向未来需求,在机制层面打通行业界别,横向优化整合航空、航天相关共性技术的研究力量,能够更加有效地支撑高超声速空天动力技术的突破。

高性能动力技术对飞行器研制的显著牵引

高超声速空天动力技术,包含了循环设计、流动机理、先进材料及结构、先进部件、热管理、控制等一系列关键技术,存在极密集的技术难点,是制约飞行器研制成败的关键。高超声速空天飞行器的研制,是多个方面技术相互影响及优化集成的过程,从各国的研究计划可以看出,动力系统和飞行器在热防护及能量管理、材料及结构、气动设计等方面存在相比于一般飞行器更加紧密的耦合关系,且动力系

统在其中扮演着核心角色。以欧洲LAPCAT计划中的“弯刀”发动机为例，高性能动力系统的特点和性能，能够决定性地影响飞行器的设计，体现出鲜明的由被动面向飞行器需求、向动力技术主动推动转变的特征。

在该领域发展过程中，应当充分适应这一趋势，完善以高性能动力技术攻关为核心的研制体系，以有效保障宽适应性空天飞行器及动力的研制工作。

高可实现性技术与高性能潜力技术研究的交互促进

宽适应性空天动力技术是具备极强的牵引性和辐射性的战略技术，涵盖大量较高风险的关键技术。在该领域开展研究，须保证其中各项关键技术的研究进度、应用前景、技术风险、经济成本、综合效用等均有序可控。具有较高可实现性的技术（如组合动力）是对较为成熟技术的集成和再发展，研制进度、技术风险和经济成本都更加可控；在其发展和应用过程中积累的数据、理论、工具、方法、设备及经验，能够成为更先进技术研究的基础。对于具有较高性能潜力的先

进技术（如包含大量新概念与技术的预冷发动机），其阶段性研究成果能够应用于高可实现性型号的改进升级，并在应用过程中实现自身的研究验证。在宏观层面，总结反思较高可实现性技术的发展历程，还能够为起步较晚的高性能潜力技术研究的规划及实施战略形成参考与指导。

立足较为成熟的技术基础开展高可实现性技术研究，同时培育高性能潜力技术的探索创新，并将阶段性成果在前者平台上应用与验证，实现二者的交互促进，将能有效推动宽适应性空天动力技术的跨越发展。

新兴技术对航空航天产业的跨领域赋能

先进技术的研究与应用，从某种角度而言是技术先进性与成本、风险合理性之间折衷的结果，而影响这一最终结果的，除技术自身外，还包括周围及上下游各项技术的发展特征。未来宽适应性空天动力势必受到与之相关领域技术进步的影响，新兴技术对其跨领域的赋能将发挥不可忽视的作用。

例如，以液态氢为代表的低温

燃料在高超声速条件下体现出显著的性能优势，但其应用仍极大地受制于生产、储运、维修保障等方面的技术不足、成本高昂及相关基础设施缺乏。可以预见的是，若低温燃料供应的成本和可靠性随着其技术进步与产业发展得到有效保障，高超声速动力装置的研究与应用将从技术和经济两方面得到推动和刺激。又如，航空发动机为适应工作状态的改变，传统设计上均需预留一定裕度，难以精确控制其性能潜力的发挥。而随着信息化、智能化技术的发展，机械产品基于自主感知、分析和决策，实时、主动适应工作条件并提升性能已逐渐成为可能。可以看出，通过深度融合智能技术，将使航空发动机的综合性能得到进一步提升，以适应更加严苛的技术需求。

重视对航空航天领域之外各项新兴技术发展的调研，积极探索通过跨领域技术融合，实现新兴技术对空天产业的赋能，将能够充分优化先进技术的性能收益、成本和风险的综合效能，促进宽适应性空天动力技术的发展与应用。

结束语

宽适应性高超声速空天动力技术作为极具影响力的战略技术，既具有很强的辐射带动能力，也受到各领域新兴技术及产业发展的显著影响，是科技与工业综合实力的体现之一。未来，宽适应性高超声速空天动力技术的发展与应用将为科技与社会发展提供新动能。

航空动力

（董芃呈，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机总体性能研究）



高可实现性技术与高性能潜力技术研究的交互促进关系