



中国基础研究报告

总主编 杨卫

近空间飞行器的 关键基础科学问题

近空间飞行器的关键基础科学问题项目组 编

Key Basic Scientific Problems on
Near-Space Vehicles

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

总主编 杨 卫

近空间飞行器的 关键基础科学问题

Key Basic Scientific Problems on
Near-Space Vehicles

近空间飞行器的关键基础科学问题项目组 编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

近空间飞行器的关键基础科学问题 / 近空间飞行器的关键基础科学问题项目组编. —杭州: 浙江大学出版社, 2020.4

ISBN 978-7-308-19774-8

I. 近… II. ①近… III. ①高超音速飞行器—研究
IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第264206号

近空间飞行器的关键基础科学问题

近空间飞行器的关键基础科学问题项目组 编

-
- 丛书统筹** 国家自然科学基金委员会科学传播中心
唐隆华 张志旻 齐昆鹏
- 策划编辑** 徐有智 许佳颖
- 责任编辑** 金佩雯
- 责任校对** 汪淑芳 蔡晓欢
- 封面设计** 程 晨
- 出版发行** 浙江大学出版社
(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
- 排 版** 杭州隆盛图文制作有限公司
- 印 刷** 浙江海虹彩色印务有限公司
- 开 本** 710mm×1000mm 1/16
- 印 张** 10
- 字 数** 138千
- 版 印 次** 2020年4月第1版 2020年4月第1次印刷
- 书 号** ISBN 978-7-308-19774-8
- 定 价** 98.00元
-

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式 (0571) 889225591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

“中国基础研究报告”
编辑委员会

主 编 杨 卫

副主编 高瑞平 韩 宇

委 员

王长锐	王岐东	冯雪莲
杨列勋	杨俊林	邹立尧
张兆田	张香平	陈拥军
周延泽	孙瑞娟	郭建泉
唐隆华	董国轩	韩智勇
黎 明		

总序

合抱之木生于毫末，九层之台起于垒土。基础研究是实现创新驱动发展的根本途径，其发展水平是衡量一个国家科学技术总体水平和综合国力的重要标志。步入新世纪以来，我国基础研究整体实力持续增强。在投入产出方面，全社会基础研究投入从2001年的52.2亿元增长到2016年的822.9亿元，增长了14.8倍，年均增幅20.2%；同期，SCI收录的中国科技论文从不足4万篇增加到32.4万篇，论文发表数量全球排名从第六位跃升至第二位。在产出质量方面，我国在2016年有9个学科的论文被引用次数跻身世界前两位，其中材料科学领域论文被引用次数排在世界首位；近两年，处于世界前1%的高被引国际论文数量和进入本学科前1%的国际热点论文数量双双位居世界排名第三位，其国际热点论文占全球总量的25.1%。在人才培养方面，2016年我国共175人（内地136人）入选汤森路透集团全球“高被引科学家”名单，入选人数位列全球第四，成为亚洲国家中入选人数最多的国家。

与此同时，也必须清醒认识到，我国基础研究还面临着诸多挑战。一是基础研究投入与发达国家相比还有较大差距——在我国的科学研究与试验发展（R&D）经费中，用于基础研究的仅占5%左右，与发达国家15%~20%的投入占比相去甚远。二是源头创新动力不足，具有世界影响

力的重大原创成果较少——大多数的科研项目都属于跟踪式、模仿式的研究，缺少真正开创性、引领性的研究工作。三是学科发展不均衡，部分学科同国际水平差距明显——我国各学科领域加权的影响力指数（FWCI值）在2016年刚达到0.94，仍低于1.0的世界平均值。

中国对基础研究高度重视，在“十三五”规划中，确立了科技创新在全面创新中的引领地位，提出了加强基础研究的战略部署。习近平总书记在2016年全国科技创新大会上提出建设世界科技强国的宏伟蓝图，并在2017年10月18日中国共产党第十九次全国代表大会上强调“要瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破”。国家自然科学基金委员会作为我国支持基础研究的主渠道之一，经过30多年的探索，逐步建立了包括研究、人才、工具、融合四个系列的资助格局，着力推进基础前沿研究，促进科研人才成长，加强创新研究团队建设，加深区域合作交流，推动学科交叉融合。2016年，中国发表的科学论文近七成受到国家自然科学基金资助，全球发表的科学论文中每9篇就有1篇得到国家自然科学基金资助。进入新时代，面向建设世界科技强国的战略目标，国家自然科学基金委员会将着力加强前瞻部署，提升资助效率，力争到2050年，循序实现与主要创新型国家总量并行、贡献并行以至源头并行的战略目标。

“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两套丛书正是在这样的背景下应运而生的。这两套丛书以“科学、基础、前沿”为定位，以“共享基础研究创新成果，传播科学基金资助绩效，引领关键领域前沿突破”为宗旨，紧密围绕我国基础研究动态，把握科技前沿脉搏，以科学基金各类资助项目的研究成果为基础，选取优秀创新成果汇总整理后出版。其中“中国基础研究前沿”丛书主要展示基金资助项目产生的重要原创成果，体现科学前沿突破和前瞻引领；“中国基础研究报告”丛书主要展示重大资助项目结题报告的核心内容，体现对科学基金优先资助领域资助成果的

系统梳理和战略展望。通过该系列丛书的出版，我们不仅期望能全面系统地展示基金资助项目的立项背景、科学意义、学科布局、前沿突破以及对后续研究工作的战略展望，更期望能够提炼创新思路，促进学科融合，引领相关学科研究领域的持续发展，推动原创发现。

积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉。希望“中国基础研究前沿”和“中国基础研究报告”两套丛书能够成为我国基础研究的“史书”记载，为今后的研究者提供丰富的科研素材和创新源泉，对推动我国基础研究发展和世界科技强国建设起到积极的促进作用。



第七届国家自然科学基金委员会党组书记、主任

中国科学院院士

2017年12月于北京

前 言

“近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划（以下简称本重大研究计划）是我国第一个系统性的高超声速基础研究计划，从 2007 年立项实施，到 2016 年顺利结题，历时九年，共资助项目 173 项，资助总经费 1.9 亿元。本重大研究计划从国家重大需求和学科发展出发，聚焦近空间飞行环境下的空气动力学、先进推进的理论和方法、超轻质材料 / 结构及热环境预测与防热、高超声速飞行器智能自主控制理论和方法等四个核心科学问题，通过顶层设计、主动引导、重点布局、动态调整、集成创新、促进交叉等方法 and 手段，开展了系统性基础研究。

本重大研究计划在学科前沿领域创新理论和方法、技术方法的源头创新等方面取得了系统性的创新研究成果。评估专家组认为，本重大研究计划实施后，我国在近空间高超声速飞行器研究领域构建了具有中国特色的高超声速飞行器的基础研究框架，全面提升了核心科学问题的研究能力，填补了多项理论与技术方法的空白，有力支撑了国家重大工程关键技术的突破，综合研究水平已跻身国际前列，实现了跨越式发展。同时，本重大研究计划为我国高超声速飞行器研究凝聚、培养了一批优秀人才和创新团队，他们中的一部分已经成长为我国高超声速飞行器基础研究和关键技术攻关的中坚力量。

本重大研究计划结束三年来，近空间高超声速飞行器技术的战略性、革命性、颠覆性得到了更大的共识，获得了世界各大强国以及有着强国梦想的国家前所未有的重视。近空间高超声速飞行器技术研究进展空前迅猛，已经从关键技术研究转向武器装备研发，呈现出加速转化、加速部署的态势。我国多项关键技术取得突破，系列飞行试验取得成功，引起世人关注，不仅呈现出加速发展的态势，而且从跟跑跻身于领跑行列。这得益于综合国力的不断提升，得益于广大科研工作者的不懈努力，更得益于基础研究的系统性布局，彰显了本重大基础研究的战略性、前瞻性和关键性贡献。美国《航空周刊》称本重大研究计划为协调有效、举国发力的高超声速科研计划，不仅具有惊人的深度、广度，而且在相对较短的时间里就取得了多到令人眩晕的重大成就。

在本重大研究计划结束后的三年里，在“先进高超声速武器”（AHW）项目基础上，美国海军、空军和陆军重点支持了以“高超声速常规打击武器”（HCSW）、“空射快速响应武器”（ARRW）、“通用型高超声速滑翔体”（C-HGB）、“远程高超声速武器”（LRHW）等项目为代表的潜射/陆射/空射型高超声速助推滑翔导弹武器型号的研制；美国国防高级研究计划局（DARPA）依托“高超声速吸气式武器概念”（HAWC）项目，继续推动高超声速巡航导弹技术验证，涡轮基组合循环发动机（TBCC）地面验证也取得重要进展；洛克希德·马丁公司、波音公司公布了高超声速飞机概念方案及研制计划；为了加强基础研究和转化，美国继续实施“高超声速国际飞行研究试验”（HIFiRE）计划，推出了“高频次、低成本高超声速飞行试验平台”（HyRAX）项目，将编号 X-60A 授予“GO 发射者一号”（GO1）高超声速飞行试验平台，用于低成本、大规模地开展超燃冲压发动机、高温材料和自主控制等一系列高超声速技术的飞行试验。俄罗斯在高超声速武器领域获得了突飞猛进的发展，“匕首”空射高超声速导弹和“先锋”高超声速战略洲际导弹或已列装，进入战斗值班状态，

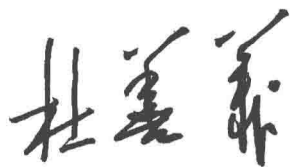
俄罗斯成为世界上第一个正式装备高超声速武器的国家，还在全力以赴加速推进“锆石”高超声速导弹的研制。欧、日等国家和地区继续探索高超声速飞机技术和概念，英国在“佩刀”发动机关键技术突破后开始实施空天飞机研制计划，都可能在高超声速飞行平台领域掀起新的变革。

在这三年里，随着我国高超声速技术的崛起，全球高超声速业界都将目光聚焦中国。除了国外媒体陆续报道我国高超声速飞行器技术取得系列飞行试验成功外，东风-17正式亮相庆祝中华人民共和国成立70周年阅兵式，引起世界轰动；本重大研究计划资助的“凌云”临近空间高超声速通用试飞平台公开亮相，有力支撑了超燃冲压发动机等高超声速关键技术的研发，迄今为止性能最先进的爆轰驱动高超声速激波风洞引起国际同行的广泛关注；高超声速飞行器边界层转捩飞行试验取得圆满成功，“星空-2”高超声速飞行试验验证了新一代乘波体气动外形设计、疏导式热防护、静不稳定控制等先进技术；商业航天公司研发的“天行1号”“重庆两江之星”飞行试验成功，为提高对高超声速飞行的认知和助力技术转化提供了更为广泛的平台；“飞行风洞实验室”具有形成系列化的趋势；中国的可重复使用运载器计划和“腾云”空天飞机工程公开，吸气式组合循环发动机技术通过试验验证；“I-plane”新型高超声速气动布局和耐高温陶瓷基复合材料等基础性与创新性研究成果发表于国内外知名期刊。上述进展，不仅清晰地反映了中国在高超声速技术领域的成果和影响力，而且显示出基础研究能力、自信力和创新力的提升。

高超声速技术是未来空天领域的战略制高点，不仅可以保障国家安全，助力经济发展，变革性地造福民生，而且可引领和带动科技进步，体现科技能力。本重大研究计划的实施和后续发展，基本验证了我们对高超声速技术发展态势的把握。同时我们也深深认识到，高超声速技术刚刚揭开了序幕，广泛和成熟应用还任重道远，基础研究依然是提高对高超声速飞行认识和技术突破的基石，产生原创性成果和实现领跑的战略引擎，注重前

瞻性布局是抢占科技制高点的重要法宝，充分发挥基础研究在创新全链条中的作用是满足国家重大需求的关键，高水平、稳定规模的研究队伍是实现跨越式发展最为重要的保障。十九大报告中指出，要“瞄准世界科技前沿，强化基础研究，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破”。本重大研究计划虽然结束了，但高超声速技术基础研究更需加大力度，在新的起点上有新的需求，才能为航天强国、民族复兴奉献更大的力量。

本书成稿离不开参研本重大研究计划的依托单位天津大学、中国航天空气动力技术研究院、中国科学院大学、北京航空航天大学、中国科学院力学研究所、四川大学、中国空气动力研究与发展中心、国防科技大学、南京航空航天大学、西北工业大学、北京大学、哈尔滨工业大学、清华大学、大连理工大学、武汉科技大学、航天材料及工艺研究所以及全体参研人员的辛勤付出，在此表示衷心感谢。

Handwritten signature in black ink, reading '杜善义' (Du Jianyi).

2019年11月于哈尔滨

目 录

第1章	
项目概况	01

1.1 项目介绍	01
1.2 研究情况	12
1.3 取得的重大进展	14

第2章	
国内外研究情况	25

2.1 国外近空间飞行器技术发展动态和趋势	26
2.2 国外近空间高超声速基础研究情况	35
2.3 我国近空间高超声速飞行器发展情况	42

第3章

重大研究成果 47

- 3.1 高超声速流动的转捩和湍流研究 47
- 3.2 可变体飞行器气动原理与变形结构力学研究 50
- 3.3 超声速流中判定物面流动分离边界的多种途径研究及延续研究 55
- 3.4 中低近空间尖头体气动加热特性预测及高热流控制的探索 57
- 3.5 三维可压缩非定常分离的理论和数值模拟研究 60
- 3.6 碳氢燃料超声速燃烧室火焰稳定机理实验研究 63
- 3.7 碳氢燃料超声速燃烧机理构建和实验验证 65
- 3.8 超声速气流中缓燃与爆震的传播、相互转化机理及其应用研究 68
- 3.9 高超声速气流新概念压缩系统研究 73
- 3.10 主动冷却陶瓷基复合材料及其结构研究 80
- 3.11 近空间高超声速飞行器自主协调控制研究 81
- 3.12 高超声速飞行器建模与精细姿态控制研究 84
- 3.13 近空间高超声速飞行器飞行姿态/气动力耦合机理与协调控制研究 86
- 3.14 高超声速气动伺服弹性理论与试验研究、高超声速飞行器颤振抑制与试验研究 89
- 3.15 高超声速飞行器的非线性耦合动力学与热弹性颤振控制（培育项目）、高超声速流中壁板的热弹性气动颤振及其主动控制（延续项目） 90
- 3.16 高温环境下热防护涂层力学性能测试及失效机理研究 95
- 3.17 超高温陶瓷基复合材料设计制备和烧蚀机理 97
- 3.18 热冲击条件下超高温陶瓷 ZrB_2-SiC 的强韧化机制研究 100

3.19	面向近空间飞行器多功能超轻质结构设计优化理论	102
3.20	超高温、高导热、非烧蚀C/C复合材料制备技术及防热和热响应机制研究	105
3.21	近空间高超声速飞行器材料/结构一体化、防/隔热一体化研究、超高温氧化环境下高温热防护材料与结构的多参量实验集成方法和技术研究	108

第4章

展 望	111
-----	-----

4.1	国内存在的不足和战略需求	111
4.2	深入研究的设想和建议	116

参考文献	121
------	-----

成果附录	125
------	-----

附录1	代表性论文目录	125
附录2	代表性发明专利	138
附录3	获得国家科学技术奖励项目	141

索 引	143
-----	-----

第 1 章 项目概况

1.1 项目介绍

近空间一般是指 20~100km 的空域，其大气密度变化剧烈。很长一段时间内，这个具有“特殊”大气环境特征的空域在空天飞行器的发展中被忽略，或由于其特殊科学问题的“高难度”而使科学家们被迫放弃深入探索。现代科技的发展表明，如果充分利用这个空域“稀薄”的空气提供飞行器气动升力和吸气式发动机的“氧化剂”，可以减缓气动阻力和气动加热，使得高效、可靠的大气层内高超声速飞行成为可能。也正是这层“稀薄”的空气带来的诸多困难，为人类认知能力和技术实现带来艰巨的挑战。

近空间飞行器是指能充分利用近空间环境特征、稳定运行于近空间的各类飞行器，是实现快速远程输送、精确打击、远程实时侦察、持久高空监视、情报搜集和通信中继等任务最为有效的手段，其特殊的战略价值已受到世界各国的重视。因此，近空间飞行器的发展涉及国家安全与和平利用空间，是目前国际竞相争夺空间技术的焦点之一，是综合国力的体现。近空间高超声速飞行技术已成为 21 世纪国际空天技术竞争的战略制高点，许多发达国家都将其列为国家的重要战略目标。

助推 - 滑翔式机动飞行技术和高超声速巡航技术是美、俄等国近十

年来重点发展的技术方向，采用主动段压低弹道、高升阻比外形和特殊防隔热设计等技术手段，实现在近空间区域的长时间高马赫数（Mach number, Ma ）飞行。在助推-滑翔式机动飞行技术方面，以美国国防高级研究计划局（DARPA）和美国空军联合支持的 HTV-2 项目以及美国陆军支持的先进高超声速武器（AHW）等为代表性项目，针对助推滑翔高超声速飞行器技术展开研究。HTV-2 分别在 2010 年和 2011 年完成两次试飞，均以失败告终。在高超声速巡航技术方面，20 世纪 90 年代中期，美国国家航空航天局（NASA）提出的“先进高超声速吸气式推进计划”（Hyper-X），其目的是研究并验证可用于高超声速飞机和可重复使用天地往返系统的超燃冲压发动机技术。Hyper-X 计划的 X-51A 已经有两次成功的飞行，但还只是一个动力系统验证。同时，美国空军和海军也部署了 HyTech、HyFly 计划。俄罗斯以“白杨-M”导弹作为对抗美国导弹防御系统的有效手段；同时正在研制一种名为“鹰”（IGLA）的高超声速试验飞行器，飞行马赫数为 6~14，使用氢燃料发动机，主要用来研究高超声速试验飞行器的机体/推进一体化和飞行动力学等重大技术问题。

发展近空间高超声速技术的战略需求，来自于国家利益保障、国家安全、国民经济可持续发展的需求牵引以及科学探索和技术推动的要求。我国在近空间飞行器领域特别是相关的基础研究方面起步较晚，且技术积累较为薄弱。2006 年，国务院从国家战略布局出发，颁布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要》（2006—2020 年），明确提出国防科技为维护国家安全提供保障；在 18 个基础科学问题之一“航空航天重大力学问题”中提出，重点研究高超声速推进系统及超高速碰撞力学问题、可压缩湍流理论、高温气体热力学、新材料结构力学等科学问题；同时设立了与近空间飞行器技术密切相关的多个国家级重大专项或科技工程项目。

2001 年，中国科学院数学物理学部和技术科学部的八位院士针对空天飞行器的作用、地位以及国内外形势，进行了深入调研，在《21 世纪我国

空天安全面临的严峻形势和当前应采取的对策》建议书中指出，对基础研究重视不够严重制约了我国自主创新和取得应对未来空天安全所需的技术储备的能力。国家自然科学基金委员会数理科学部牵头，于2002年及时启动了“空天飞行器的若干重大基础问题”重大研究计划。这是我国首次在国家层面设立的有关空天飞行器基础研究的计划，旨在引导和聚集各方力量，对具有国家战略需求和原始创新思想的空天飞行器的核心问题开展研究，为引导我国未来空天飞行器的研制奠定技术创新的基础。

随着上述计划的实施，近空间高超声速飞行器技术在空天飞行器未来发展的核心作用和战略作用愈发突出，国家重大需求愈发强烈。国家自然科学基金委员会数理科学部于2006年组织召开了“临近空间飞行器的发展趋势和重大基础科学问题研讨会”，得到了中国人民解放军总装备部、国防科工委、航天航空部门、中国科学院和高等院校等相关部门及专家的积极响应与高度重视，认真研讨了近空间飞行器的需求背景、发展状况、核心基础科学问题和关键技术。国家自然科学基金委员会明确“基础研究要为国家重大需求服务”的指导思想，基于“重大研究计划”这种体现“坚持服务国家目标与鼓励自由探索相结合”的资助方式，于2007年启动了“近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划（以下简称本重大研究计划），并于2015年底顺利结项。

1.1.1 总体布局

近空间高超声速技术将给未来国家安全和国民日常生活带来革命性影响，成为21世纪国际空天技术竞争的战略制高点，许多国家都将其作为国家战略目标。本重大研究计划是“空天飞行器的若干重大基础问题”重大研究计划的延伸和升华，主要针对近空间飞行器的关键基础问题开展研究，着重解决近空间飞行器研究中的基础性、战略性和前瞻性科学问题。