

· 联合资助方经验交流 ·

基于重大工程问题目标驱动模式 探索科学问题研究的实践思考

——以航天先进制造技术研究联合基金项目典型成果为例

李阿艳¹ 穆京京² 崔万照^{1*} 李琪¹ 贺永宁³ 王飞鹏⁴

1. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 西安 710100
2. 中国航天科技集团有限公司 研究发展部, 北京 100048
3. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049
4. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044

[摘要] 2015年国家自然科学基金委员会和中国航天科技集团公司共同设立了“航天先进制造技术研究联合基金”。本文从课题负责人的角度,以航天先进制造技术研究联合基金的典型成果为例,深入分析了基金开展过程中从航天重大工程提炼科学问题的创新理念,探讨了科学问题属性的内涵和从工程应用到科学问题的梳理。提出了基于重大工程问题目标驱动的技术创新实践模式,从课题角度展示了航天先进制造技术研究联合基金的具体实施成效,为工程类研究所和高校开展联合基金提供可借鉴的思路。

[关键词] 航天先进制造技术研究联合基金;基础研究;工程应用;科学问题;微放电

2015年国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)与中国航天科技集团有限公司设立“航天先进制造技术研究联合基金”(以下简称航天联合基金)^[1],对推动航天科技领域提升原始创新能力和培养高水平人才发挥了重要作用。回顾第一期航天联合基金实施成效,解决了一大批前沿科学问题,为高等院校、科研院所和航天系统单位开展广泛合作提供了平台,取得的应用基础研究成果对于航天重点型号工程任务的实施提供了支撑,为促进基础研究、应用基础研究和技术创新融合发展提供了源动力。

2016年西安空间无线电技术研究所《空间大功率微波器件抑制微放电表面处理技术》(批准号:U1537211)获航天联合基金第一期重点项目支持。该课题面向国家重大工程需求及其技术瓶颈背后的基础问题,联合西安交通大学和重庆大学发挥优势攻关,将工程问题与科学问题深入结合,探索出工程问题与科学问题相统一的创新理论模式,取得应



崔万照 博士,研究员,博士生导师,享受国务院政府特殊津贴,航天科技集团有限公司卫星通信方向学术技术带头人,入选国防科技卓越青年科学基金、陕西省高层次人才特殊支持计划科技创新领军人才,现任中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室副主任。主要研究方向为航天器大功率微波技术。获航天贡献奖、陕西国防工业十大创新标兵、中国电子学会优秀科技工作者、中国航天基金奖等;获省部级一等奖1项、二等奖3项;授权与受理发明专利70余项,发表论文200余篇,出版专著和译著8部。



李阿艳 中国空间技术研究院西安分院空间微波技术重点实验室综合管理办公室工程师,主要从事重点实验室基金项目管理工作。

收稿日期:2021-06-22;修回日期:2021-07-09

* 通信作者,Email:cuiwanzhao@126.com

本文受到国家自然科学基金项目(U1537211)的资助。

用基础研究的突破以及人才培养等一系列成果。课题作为航天联合基金“航天电子产品高可靠制造技术”典型阶段成果进行了介绍^[2]。

自然科学基金委基于科学属性分类给出了“鼓励探索、突出原创；聚焦前沿、独辟蹊径；需求牵引、突破瓶颈；共性导向、交叉融通”四种资助导向类型^[3]，为科研人员开展基础研究工作明确了方向。其中“需求牵引、突破瓶颈”科学问题属性旨在通过解决“卡脖子”技术背后的核心科学问题，促使基础研究成果走向应用，其科学问题源于国家重大需求，具有鲜明的需求导向、问题导向和目标导向特征^[3]。这对于工程单位开展基础研究工作具有重要的指导意义。

迄今为止，航天事业发展、航天器的更新迭代都离不开微波技术领域的进步。长期以来，受微放电抑制技术的制约，我国航天有效载荷系统中的微波开关、滤波器、多工器等多种微波部件曾一度无法作为载荷搭载上天。微放电效应由于发生规律不明确机理不清晰，抑制方法难以攻克，成为了国内外航天技术领域的工程技术难题，严重影响了航天技术的发展。微放电机理及其抑制技术研究也成为航天器大功率微波部件可靠性研究亟待突破的应用基础问题。2020年北斗三号卫星全球组网成功，全部器件百分之百国产化成为了航天工程自主创新的骄傲。本课题实现了空间大功率微波部件微放电抑制技术的自主可控，为北斗组网奠定了技术基础。

1 背景

1.1 微放电概述

航天器在轨运行中将面临与地面截然不同的空间环境考验。微波部件在真空环境下受到多重空间电磁辐射影响，在一定微波信号作用下使得微波部件中的带电粒子会以一定能量和角度与微波部件表

面碰撞发生二次电子发射。在微波真空管、波导等器件中，在特定条件下材料表面发生二次电子发射并与时谐电磁场的相位变化同步时，即会引发电子谐振倍增乃至雪崩和放电的物理现象，通常称作二次电子倍增效应即微放电(Multipactor)^[4]。

微放电现象一旦发生会造成严重后果，将导致微波功率信号失调、传输功率下降、可引起低气压放电与无源互调，并造成微波部件性能恶化或损坏，对在轨运行的航天器微波部件造成不可逆的危害。

早期我国航天工程研究单位受限于对微放电机理的认知，工程研制中要避开微放电的雷区，只能通过反复测试、调整方案、再加工、再测试的措施，花费了大量人力、物力与财力。在航天工程研制中微波器件微放电现象屡次出现，严重制约了航天产品可靠性。北斗二代试验星L波段三工器在研制过程中发生微放电现象，导致设计方案反复修改。风云二号星在试验阶段发生微放电现象，致使S波段收发多工器波导法兰连接处表面损坏。在航天产品设计阶段，微放电效应及其引发的其他效应对微波部件的损坏见图1^[4]。

微放电不但严重威胁飞行器的在轨安全，也成为制约未来航天微波系统功率容量提升的重要障碍，成为影响航天器装备技术发展的重要瓶颈问题^[5]。我国航天技术发展亟待对微放电开展体系化应用基础研究，厘清发生机理及规律，发展出在航天工程产品设计阶段有效测评的手段，并探索出相应的抑制微放电设计方案及工艺方法，实现对宇航产品微波器件进行微放电测试的能力，从而彻底解决这一工程难题。

1.2 国内外研究概况

由于微放电产生的影响及危害巨大，国内外宇航工程师们将其作为空间技术领域的热点基础问题，开展了广泛的研究。

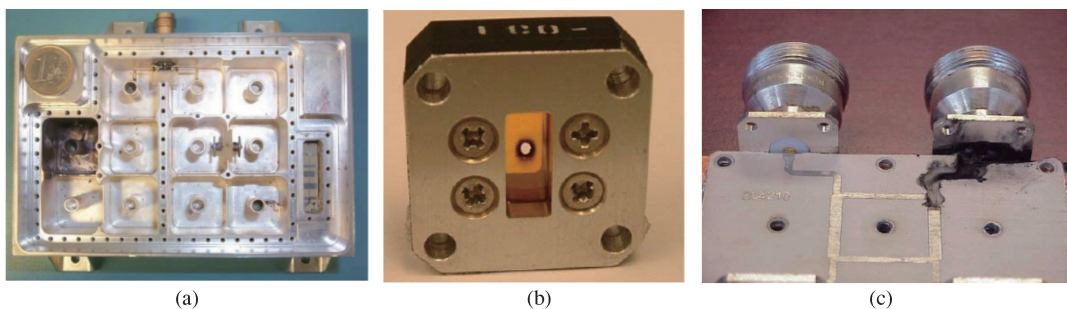


图1 微放电效应对微波部件的损坏

(a)同轴滤波器内腔损坏,(b)波导膜片损坏,(c)微带电路损坏

国外宇航工业发展迅速,其对于微放电问题认识也更加深入。自上世纪早期,美国、欧洲和俄罗斯等国针对航天器载荷研制的需求已持续开展航天器大功率微波部件微放电效应的研究。NASA 和 ESA 等国际宇航组织最早形成了行业规范。到 20 世纪 90 年代,国外多家大学和宇航公司开展了微放电效应精确建模和仿真预测研究,已经建立了平板、矩形波导等典型结构微波部件的微放电模型,开发了 Multipactor Calculator、FEST3D、MEST、MultiP、TRAK-RF 等微放电仿真软件。目前 ESA、NASA 和俄罗斯宇航局已经具备了典型结构微波部件微放电准确预测的能力^[6, 7]。

与国外相比,我国开展微放电研究起步较晚。多年来,国内知名高校与航天科研院所持续跟踪,积累了丰富的微放电理论基础与工程实践经验。近年来,课题组结合微放电形成的微观物理机理以及实际微波部件电磁分布计算,以自由电子为研究对象,提出了空间大功率微波部件微放电效应三维电磁粒子数值模拟方法,填补了该技术空白^[8]。

随着高分专项、北斗导航、深空探测等一大批航天重大工程的实施推进,对于空间大功率微波部件微放电抑制技术突破需求尤为迫切。由于微放电抑制等技术涉及军事用途,美国、欧洲、俄罗斯等国家对其核心技术均采取技术封锁。在此背景下,国家自然科学基金委员会 2015 年“航天先进制造技术研究联合基金项目指南”将“表面工程及薄膜制备技术基础”作为重点方向,支持开展空间大功率微波器抑制真空微放电表面处理技术研究^[9]。该项目的实施

促进了空间大功率微波部件微放电抑制技术领域应用基础研究的发展,目前研究成果已突破了欧美对该领域的技术封锁,实现了微放电抑制技术自主可控,达到了国际先进水平。

2 从工程应用到科学问题的探索

2.1 重大工程目标驱动实践分析

重大工程目标驱动是以国家重大工程建设中存在的“卡脖子”工程问题为着眼点,通过分析工程问题的瓶颈技术难点梳理出科学问题,以其为目标驱动开展应用基础研究,掌握科学问题机理与规律以及对技术问题解决及工程瓶颈突破具有实际指导意义的基础研究创新模式。科学问题是对客观规律探究认识的基础研究,当基础研究与应用目标结合时便成为具有对国家战略和经济发展导向的应用基础研究,其具有重要的科学意义和工程应用价值。

该课题创新理论路线如图 2 所示,即从北斗导航、高分辨率对地观测、载人与深空探测等航天重大工程中制约空间微波器件向大功率、小型化发展的卡脖子问题出发,以微放电机理及抑制技术科学问题研究为目标驱动,开展微放电应用基础研究。在课题研究实践中将科学问题、技术问题、工程问题统一融合,通过应用基础研究科学问题的探索,突破了微放电抑制难点的技术问题,攻克了制约大功率微波部件向更高频段发展的工程问题瓶颈,获得了下一代空间大功率微波器件的微放电抑制新的解决途径。图 3 为课题创新问题流程简图。

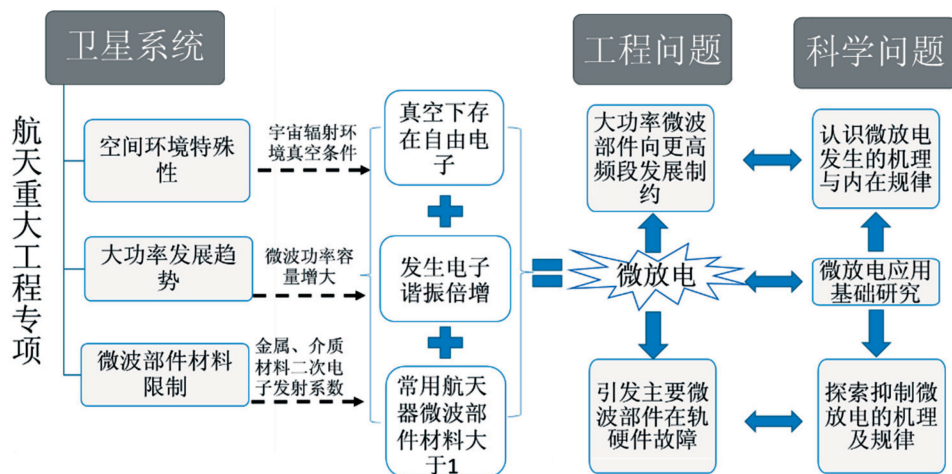


图 2 重大工程目标驱动创新理论路线

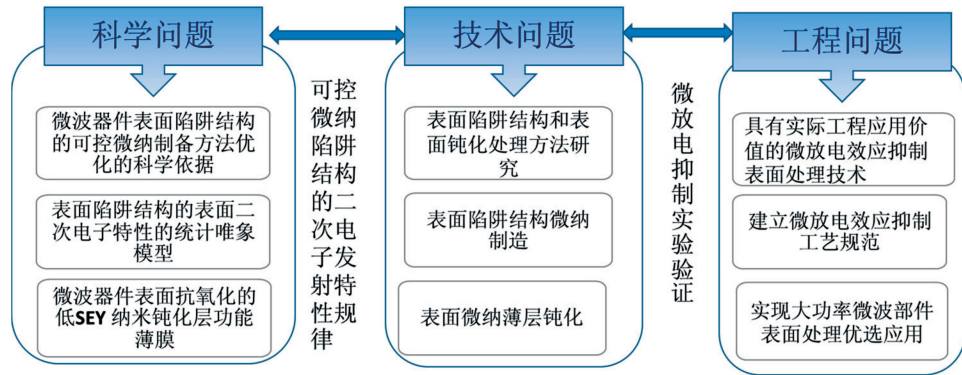


图3 创新问题流程简图

2.2 项目研究成果

通过对微放电效应抑制规律的探索,课题组结合航天工程应用背景,认为目前抑制空间大功率微波部件发生二次电子倍增最有效的途径是通过表面改性,降低表面的二次电子发射系数^[10]。课题着眼于微波器件表面处理方法来抑制微放电,研究了多种适用于空间大功率微波器件的表面微纳陷阱结构制备方法和表面钝化技术,各类表面对于二次电子产额峰值的抑制程度至少在30%以上。设计了多种能够抑制二次电子产额的微纳形貌结构和表面镀层,发展出多种能够有效抑制空间金属表面二次电子产额的方法,能够大幅提高微波器件微放电阈值,这对于提高空间大功率微波器件的抗微放电能力和延长器件寿命有重要意义。

课题组从仿真和微放电实验两方面,系统研究了金属材料表面机械加工及三维微结构对微放电阈值特性的影响规律。对非规则陷阱结构表面的微放电阈值敏感性实验,以C波段阻抗变换器为例对其进行了表面处理(如图4所示)。图5给出了C波段阻抗变换器经直接腐蚀处理后的表面微观三维形貌。经化学腐蚀处理的C波段阻抗变换器微放电阈值超过了10 000 W,相比未处理部件,其微放电阈值提高了6.7 dB以上。其中,应用了陷阱结构工艺处理的铁氧体环行器,其微放电阈值提高8倍以上。课题组优选出了空间大功率微波器件微放电抑制表面处理技术,为解决空间大功率微波器件微放电问题提供了有效的技术途径^[11, 12]。

课题成果打破了国外对微放电抑制的技术封锁,掌握的航天工艺条件下的微放电抑制表面处理技术,保障了一大批重大航天工程航天器的发射,在轨性能稳定,提高了我国航天电子系统可靠性,为北斗导航等航天重大工程中关键部件自主可控奠定了坚实基础。

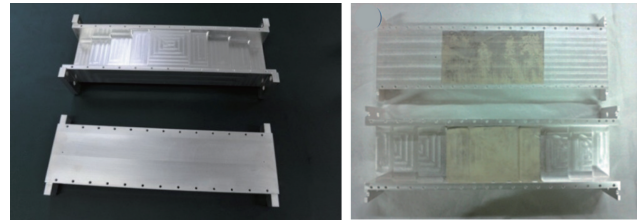


图4 C波段阻抗变换器(a)原始部件;(b)化学腐蚀处理后

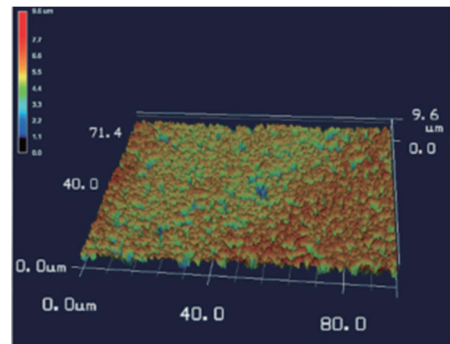


图5 C波段阻抗变换器直接腐蚀处理陷阱表面微观三维形貌

3 航天联合基金产学研合作模式分析

课题开展过程中,充分发挥了航天联合基金的导向作用,将以基础研究为主导的高等院校和以工程研究为主导的科研院所紧密联合,助力高校与科研机构发挥各自优势联合攻关,工校联合优势互补成为打通工程问题与科学问题的关键环节。

西安空间无线电技术研究所航天重大工程实践经验丰富,凭借长期积累的宇航专业经验,在开展重大工程目标牵引应用基础研究方面的优势尤为凸显。研究所作为牵头单位,在工程问题提出、科学问题梳理及研究路线方案制定上总体把控。负责微放电机理分析、数值模拟,材料表面二次电子发射特性、微波器件表面电镀处理和微波器件微放电抑制实验研究等总体研究。西安交通大学主要负责建立陷阱结构表面二次电子发射模型,微波器件金属表

面微纳陷阱结构处理及表面镀膜研究。重庆大学主要负责非规则陷阱结构的表面处理、表征和表面拓扑模型提取及介质材料二次电子发射特性及抑制方法探索研究等。

该模式由工程单位面向航天重大工程应用梳理科学问题提出总体路线设计,通过产学研合作与高校联合开展基础理论探索,将获得的技术手段再转回工程研制中进行测试验证,从而实现工程问题解决的新方法。图6为课题产学研合作模式流程图。

以联合基金合作为契机,2019年11月由课题组在西安组织召开了首届“空间微波特殊效应”专题研讨会。会议邀请到西安交通大学、香港大学、南京理工大学、重庆大学以及航天科研院所近90位代表出席,为该领域学术交流、促进基础研究发展做出了贡献。

4 航天联合基金取得的具体成效

在重大工程问题目标驱动模式下,课题发挥航天联合基金产学研合作模式,对于解决航天重大型号工程的瓶颈短板,促进基础性、前沿性技术发展成效显著。课题推动工程问题与科学问题交融发展,实现了自主可控技术突破,支撑了航天重大工程应用,对于科学机理发展起到了长足的促进作用。图7为本课题成效分析。

4.1 航天重大工程任务的支持

航天联合基金推动工程问题与科学问题交融发展对重大工程任务的支撑成效显著。该课题成果大幅提高了航天器有效载荷系统微波部件产品的设计水平,成果累计应用于百余套大功率微波部件的设计制造,成功在L、C、S、Ku等多个波段实现对微放电抑制的实验验证。



北斗导航工程研制中成果支撑了多个频段不同类型复杂结构微波部件微放电阈值分析,解决了北斗二代二期试验星L频段三工器微放电抑制问题,对L频段微波开关进行了微放电抑制处理,为我国新一代导航卫星大功率微波部件的研制提供技术支撑。在天链一号中继卫星大功率微波部件研制中,成果提升了多种工艺、多种复杂结构微波部件微放电阈值并有效判定了放电位置。在遥感卫星的大功率微波部件产品的研制中应用于天线馈源、滤波器、环形器及隔离器等微波部件表面处理。课题支撑了通信卫星、导航卫星及遥感卫星的大功率微波部件产品的研制,极大地提升了大功率微波技术领域自主创新能力,对推动我国高性能航天装备和航天器有效载荷技术的跨越式发展具有重大意义。

4.2 科学机理的发展

航天联合基金是促进应用基础研究发展的重要平台,对探索科学问题更加具有针对性。

微放电基础研究作为多学科交叉研究,汇聚了材料表面特性、真空电子学、电磁场与粒子等固体物理和电磁物理多个领域研究,具有明确的应用研究目的。研究内容涉及电子与材料、计算电磁学、材料学、流体力学、电子与电磁场、微波部件设计学与机械加工与制造等多学科范畴。

课题揭示了可控微纳陷阱结构的二次电子发射特性规律,构建了表面陷阱结构的表面二次电子特性的统计唯象模型,发展了微波器件表面抗氧化的低SEY纳米钝化层功能薄膜的科学问题,探索出抑制微放电的机理及规律,为复合陷阱结构表面处理技术发展及多约束条件下金属表面微陷阱结构和介质表面二次电子发射模型突破提供了理论基础和科学依据。课题研究助推了二次电子发射抑制优化和真空物理电子学基础研究。

4.3 科学平台的建设

根据多年来对微放电领域研究的成果积累,课

课题组开发了国内首套具有自主知识产权的微放电仿真与分析平台 MSAT(Multipactor Simulation and Analysis Tools)(图 8)并研制了二次电子发射特性研究平台(图 9)。以上两项科学研究平台的建设,代表了国内微放电研究的目前最高水平。

MSAT 软件通过离子模拟方法计算微波部件内部空间电子随时间演化过程,将两者在源代码无缝连接实现微放电仿真分析,可实现微放电三维仿真与阈值分析,在三维空间成功复现了微放电起始、演变与饱和的完整物理过程。该仿真软件分析精度较高,分析数值与实际微波部件微放电阈值测试结果吻合良好,代表了目前国内微放电数值分析的最高水平^[5]。

研制的二次电子发射特性研究平台是二次电子发射特性实验研究、鲁棒模型验证和优化微放电抑制方法的基础性关键研究平台。平台积累了航天材料二次电子发射特性数据库,为北斗等航天重大工程大功率微波部件的智能化设计提供了依据^[13]。

通过科学平台建设,提高国内空间部件微放电设计水平,解决了多工器、滤波器、微波开关、隔离器、天线馈源等航天工程产品的微放电阈值分析与抑制难题,已为北斗导航卫星、高分辨率对地观测卫星、军民用通信卫星等航天型号任务中上百个微波部件完成微放电数值模拟及测试,为航天重大工程的开展提供了技术支撑。

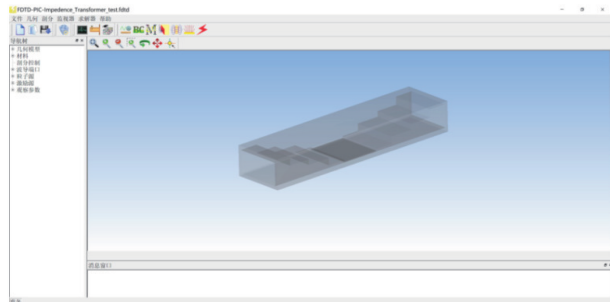


图 8 微放电仿真与分析平台(MSAT)界面



图 9 二次电子发射特性研究平台

4.4 学术成果与人才培养

在航天联合基金项目支持下,课题组结合近年来在大功率微放电效应研究领域的科学理论积累与工程实践成果,作为该领域基础研究成果的重要产出,分别于 2019 年出版了《航天器微波部件微放电分析及其应用》,2020 年出版了《空间微波部件多载波微放电分析》(图 10)两部著作,对航天一线科研人员、高校科技工作者开展大功率微放电技术研究提供了理论支撑。

《航天器微波部件微放电分析及其应用》获国家出版基金资助、“十三五”国家重点出版物出版规划、国之重器出版工程项目,入选建国 70 周年百种自然科学优秀图书。该书重点介绍了微放电数值模拟相关概念、理论、方法和最新技术等内容,较为全面地介绍了我国微放电数值模拟研究技术方面取得的突出进展,针对航天器大功率典型微波部件微放电三维数值模拟方法开展了全面的说明和阐述,对于微放电技术基础理论发展具有重要意义。

《空间微波部件多载波微放电分析》入选国之重器出版工程项目。该书结合多载波微放电效应方面的工程实践和研究成果,介绍了多载波微放电的相关概念和理论基础,重点介绍了统计理论、粒子模拟、等效单载波快速计算以及“最坏状态”全局优化等分析方法的最新研究进展,详细阐述了多载波微放电分析、设计及验证环节的解决思路,较为全面地介绍了我国在多载波微放电分析及实验方面的最新成果。

以白春江等^[10]、Cui 等^[14]的研究为代表,该课题在国内外公开发表期刊论文 53 篇、会议论文 9



图 10 出版专著

- (a) 《航天器微波部件微放电分析及其应用》;
- (b) 《空间微波部件多载波微放电分析》

篇;受理、授权发明专利 22 项;荣获省部级一等奖 2 项,二等奖 3 项,研究成果显著。

此外,航天联合基金助推工程科研人员快速成长的平台作用凸显。在联合基金承担期间,课题组多人荣获国家级、省部级人才称号,详见表 1。培养博士后 2 人、在学博士生 2 人,硕士研究生 5 人,人才梯队完整,人才成长迅速。2020 年课题组获得中国航天科技集团有限公司科技创新团队称号。联合基金为培养高水平的基础研究领军人才和团队发挥了巨大作用。

5 结 论

本文从课题负责人的角度深入分析了航天联合基金围绕航天重大工程问题开展前瞻性基础研究的实例,探索了将基础研究与工程问题紧密联系的方法。在实践中,课题充分发挥联合基金的导向作用,由工程中来到工程中去,探索面向航天重大工程深入提炼科学问题的创新工作模式,形成了将工程应用与科学问题密切结合与转换的工作理论。多年来,课题组在立足应用基础研究,解决国家重大工程科学问题,加强成果转化和产学研合作,取得人才培养成果等方面积累了经验,为广大科技工作者在科研工作中探索聚力解决关键科学问题的创新途径打开了思路,为促进我国自主创新能力提升不断努力。

作为国家自然科学基金战略定位中“发挥导向作用”的重要体现,航天联合基金能够整合社会资源,发挥桥梁纽带作用,积聚优秀科研力量,围绕企业迫切需求,聚焦关键领域中的核心科学问题、新兴前沿交叉领域中的重大科学问题开展前瞻性基础研究,培养高水平技术人才,推动自主创新能力的提

升^[15, 16],为支撑航天强国和世界一流军队建设做出新的贡献。

参 考 文 献

- [1] 国家国防科技工业局. 航天先进制造技术研究联合基金设立. (2014-12-05)/[2021-05-15]. <http://cheos.org.cn/n112/n117/c446204/content.html>.
- [2] 黎明, 师宏耕, 赖一楠, 等. 航天先进制造技术研究联合基金管理工作综述. 机械工程学报, 2018, 54(9): 1—8.
- [3] 李静海. 大力提升源头创新能力构建面向新时代的自然科学基金体系. (2018-11-15)/[2021-05-15]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab440/info74585.htm>.
- [4] 崔万照, 李韵, 张洪太, 等. 航天器微波部件微放电分析及其应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2019, 3: 1—15.
- [5] 王新波, 崔万照, 张洪太, 等. 空间微波部件多载波微放电分析. 北京: 北京理工大学出版社, 2020, 6: 1.
- [6] 曹桂明, 聂莹, 王积勤. 微波部件微放电效应综述. 宇航计测技术, 2005, 25(4): 36—40.
- [7] 张娜, 崔万照, 胡天存, 等. 微放电效应研究进展. 空间电子技术, 2011, 8(1): 38—43.
- [8] 李韵, 崔万照, 张洪太, 等. 星载大功率复杂微波部件微放电效应数值模拟. 中国空间科学技术, 2017, 37(2): 73—80.
- [9] 国家自然科学基金委员会. 关于发布“航天先进制造技术研究联合基金”2015 年度项目指南的通告(2015-6-18)/[2021-05-15]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab442/info61425.htm>.
- [10] 白春江, 封国宝, 崔万照, 等. 铝阳极氧化的多孔结构抑制二次电子发射的研究. 物理学报, 2018, 67(3): 217—224.
- [11] Ye M, Feng P, Wang D, et al. Secondary electron yield suppression using millimeter-scale pillar array and explanation of the abnormal yield-energy curve. Chinese Physics B, 2019, 28(7): 483—489.
- [12] 贺永宁, 王丹, 叶鸣, 等. 铝合金镀银表面粗糙化处理方法及其 SEY 抑制机理. 表面技术, 2018, 47(5): 1—8.
- [13] 张娜, 曹猛, 崔万照, 等. 高性能多功能超高真空金属二次电子发射特性测试平台. 真空科学与技术学报, 2014, 34(5): 554—558.
- [14] Cui WZ, Li Y, Yang J, et al. An efficient multipaction suppression method in microwave components for space application. Chinese Physics B, 2016, 25(6): 068401.
- [15] 朱蔚彤, 孟宪平. 国家自然科学基金联合基金设立与资助管理机制探讨. 中国科学基金, 2012, 26(1): 34—37.
- [16] 雷蓉, 刘佳, 刘权, 等. 2019 年度国家自然科学基金联合基金项目申请、评审与资助工作综述. 中国科学基金, 2020, 35(5): 609—614.

表 1 联合基金推动人才成长情况

获得人才项目/称号名称	获得时间	人次
国防科技卓越青年科学基金	2020	1
国家万人计划青年拔尖人才	2020	1
陕西省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领军人才	2017	1
陕西省“高层次人才特殊支持计划”青年拔尖人才	2020	1
中国航天科技集团公司青年拔尖人才项目	2019	2
中国空间技术研究院杰出青年人才项目	2018	3

Thoughts on Exploring Scientific Issues Based on the Goal-driven Model in Important Engineering Issues—Take the Typical Results of the Aerospace Advanced Manufacturing Joint Fund Project as An Example

Li Ayan¹ Mu Jingjing² Cui Wanzhao^{1*} Li Qi¹ He Yongning³ Wang Feipeng⁴

1. *National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave ,
China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100*

2. *China Aerospace Technology Group Ltd Research and Development Department ,Beijing 100048*

3. *Electronics and Information Engineering , Xi'an JiaotongUniversity, Xi'an 710049*

4. *Transmission and Distribution Equipment and System Security with the State Key
Laboratory of New Technologies , Chongqing University 400044*

Abstract In 2015, the National Natural Science Foundation of China and China Aerospace Science and Technology Corporation established a project named “Aerospace Advanced Manufacturing Joint Fund”. This paper takes the typical results of the Aerospace Advanced Manufacturing Joint Fund project as an example, and makes deep analysis on innovation concepts, scientific issues, and understanding from scientific research to engineering applications. This paper provides a novel technical mode for scientific issues. The conclusions of the paper provide guides for institutes and universities to perform cooperation by Joint Funds.

Keywords Aerospace Advanced Manufacturing Joint Fund; basic research; engineering application; scientific issues; multipactor

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: cuiwanzhao@126.com