

创建“3C模式”专业竞赛，培养航天创新人才

成果总结报告

清华大学 国防科学技术大学
中国科学院空间应用工程与技术中心

二〇一六年五月

目 录

一、成果背景及解决的问题	1
二、主要实践方法	2
1、借鉴国际深空轨迹优化竞赛，创办全国空间轨道设计竞赛	2
2、以挑战性赛题为牵引，创新专业竞赛组织形式	3
3、以增强学术影响力为抓手，打造航天高端学术交流平台	5
4、以竞赛成果为纽带，深化我国航天领域产学研合作	6
5、形成“3C”合力，推进我国航天创新人才培养	8
三、成果创新点	11
四、推广应用成果及贡献	12
1、竞赛得到航天领域和高等教育界的充分认可	12
2、显著推动了国内航天人才培养工作	12
3、显著推进了我国航天轨道基础科学研究	14
4、显著提升了国际竞赛成绩，扩大了国际交流渠道	15

一、成果背景及解决的问题

自上世纪 90 年代以来，我国航天事业蓬勃发展，特别是进入新世纪，随着载人航天、探月工程等国家重大工程的陆续实施，我国先后取得“神舟五号”载人太空飞行、“嫦娥一号”月球探测、“神舟七号”出舱活动等一系列重大工程突破，中国航天正处在由航天大国向航天强国迈进的历史时期。

航天事业的蓬勃发展带来旺盛的人才需求，但与快速发展的工程技术相比，我国航天人才培养工作相对滞后，特别是航天任务规划、深空探测等**前瞻性研究领域创新人才缺口较大**。同时，航天任务规划等方向因其在国防科技应用上的敏感性，公开、大规模的学术交流较少，**国际学术交流尤为不足**。此外，受教育与科研体制制约，我国航天领域产学研在联合育人、协同创新上缺乏有效合作，特别是**院校教育与用人单位需求脱节**。

在此背景下，我们借鉴国际深空轨迹优化竞赛（Global Trajectory Optimization Competition, GTOC），立足我国国情，于 2008 年发起并创办全国空间轨道设计竞赛（Chinese Trajectory Optimization Competition, CTOC），并在举办过程逐渐凝练形成竞赛“3C 模式”。竞赛迄今已举办 7 届，有效激发了广大研究生创新热情，促进了中国航天高层次学术交流，深化了产学研三方合作，有力推动了基础研究和创新人才培养工作，在国内外取得广泛而积极的社会影响。

二、主要实践方法

1、借鉴国际深空轨迹优化竞赛，创办全国空间轨道设计竞赛

轨道是航天任务核心要素之一，轨道设计创新对航天任务有直接引领作用。上世纪 90 年代以来，随着世界范围内的航天技术迅猛发展，特别是第二次深空探测热潮的兴起，轨道设计创新需求日益迫切。

为探索新型轨道设计理论与方法，欧空局于 2005 年发起了国际深空轨迹优化竞赛。竞赛题目以欧洲和美国规划的未来深空探测任务为背景，采用通信赛形式，参赛者来自从业多年的专业航天科研团队，包括美国喷气推进实验室、法国空间研究中心、德国宇航中心等，推动了国际航天任务轨道设计的科研水平进步，引发了世界范围的研究热潮。

我国以清华大学、国防科技大学等为代表的高校，也组队参加了 GTOC，2008 年前最好成绩为第 10 名。针对差距，我们对 GTOC 开展了深入跟踪研究，并在核心期刊发表了《从国际深空探测大赛看理论力学教学及力学竞赛》等一系列教改研究论文，从教育教学改革角度对竞赛进行了深入思考。在此基础上，我们立足中国国情，于 2008 年发起全国空间轨道设计竞赛。竞赛每年举办 1 届，至今已成功举办了 7 届。

与 GTOC 不同，CTOC 的参赛主体不再是专业科研机构，面向研究生创新培养，以赛促学，以赛促研，逐步形成“3C 模式”：以设计挑战性赛题（Challenge）为牵引，以促进高水平学术交流（Communication）为主要手段，以深化产学研合作（Cooperation）

为重要依托，培养航天领域高层次创新人才。

2、以挑战性赛题为牵引，创新专业竞赛组织形式

以高度挑战性竞赛题目为牵引，突破传统专业竞赛组织形式，赋予研究生更加广阔的创新空间，有效调动了广大研究生参赛积极性和创新热情。

(1) 结合国家任务需求，设计有高度挑战性的竞赛题目

爱因斯坦认为：“提出问题往往比解决问题更重要……新问题的提出需要创造性的想象力，往往标志着科学的真正进步。”从第一届起，CTOC 就将赛题命制作为竞赛组织的核心工作，依托上一届冠军队（发起单位），深入分析我国未来 5-10 年航天任务需求，赛题紧密结合学科前沿，切合研究生能力、难度又足够大，创新空间广阔、评价标准又是客观唯一。

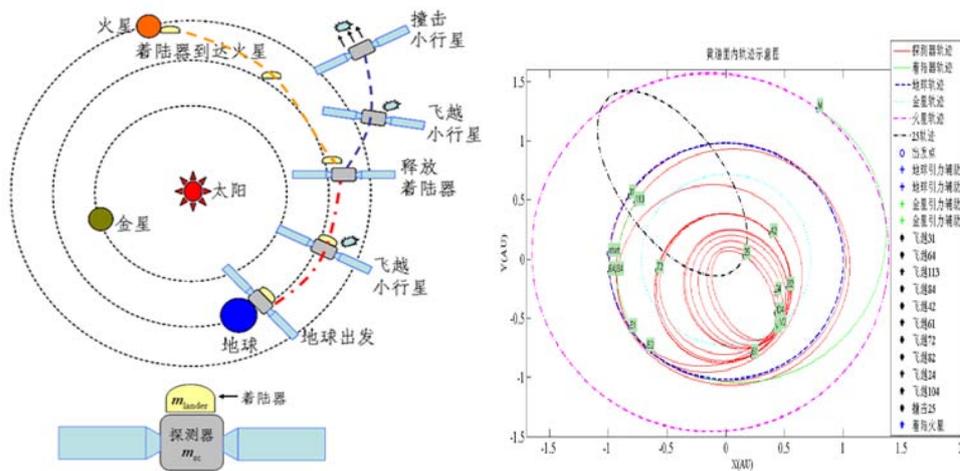


图 1 第二届赛题示意图和最优设计方案图

如 2010 年第二届赛题为“火星与多目标小行星探测”，探测器自带一个着陆器着陆火星，飞行期间择机近地观测小天体，并在探测任务结束后选择一个小天体进行撞击实验。赛题仅限定探测器地球出发

质量为 1500 kg，飞行时间窗口为 2015-2020 年，探测和撞击小天体从 168 个目标天体库中自选。竞赛标准客观，即着陆器质量尽可能大、近地观测小天体数目尽可能多、撞击小天体动能尽可能大，三个单项指标加权后最优者胜出。冠军团队采用了新型电推进方式，并创造性地利用地球和金星引力辅助飞行，使得着陆器质量达到 800 kg、观测小天体数量达到 11 个、撞击动能达到 $2.67e6 \text{ kg}\cdot\text{km}^2/\text{s}^2$ 。

(2) 服务创新需求，突破传统专业竞赛组织形式

在挑战性赛题牵引和保证下，突破传统学科竞赛组织形式，CTOC 成为必须依托团队协作才能完成的全开放式新型专业竞赛。

◆团队协作。竞赛题目专业难度很大、综合性强，必须通过团队协作才能完成理论分析、方案设计、算法实现、仿真验证全过程。为进一步促进创新，竞赛不限定队员人数和成分，鼓励跨单位、跨年级、跨学历层次组队。

◆时间开放。创新需要时间保证。竞赛求解过程既需要深入的理论研究以确定合理的技术路线，又需要测算、比较以寻求性能优异的算法，实现过程更要反复迭代优化。因此 CTOC 采取开放式竞赛时间，2 个月内完成即可，给予参赛队充分的创新时间裕度。

◆资源开放。竞赛题目前沿性强，完全无现成的解决方案。竞赛不限定参赛资源，从理论突破到技术路线创新，从引入先进算法到采取新兴仿真工具，给予参赛队充分的创新空间，甚至允许请专家“外援”作指导。同时，组织单位和命题方还通过竞赛题目发布、竞赛网站等途径提供该领域最新理论成果、通用算法和工具等资源。

3、以增强学术影响力为抓手，打造航天高端学术交流平台

(1) 吸引“国家队”加入，增强竞赛在业界学术影响力

轨道设计是航天研制和运营单位均高度关注的核心问题。CTOC以紧扣我国航天重大任务需求的前沿赛题为抓手，在面向广大研究生的基础上，将我国航天研制和运营核心单位这些“国家队”吸引到竞赛中来，充分发挥其技术积淀深厚、工程实践经验丰富等优势，大大提升了竞赛学术水准，显著增强了在业界学术影响力。

一方面，我们通过多种渠道鼓励这些“国家队”参赛。除院校外，共计有 19 家航天研制和运营单位组队参加竞赛，扩大了竞赛辐射面，扩展了创新设计的应用前景。

另一方面，我们先后邀请西安卫星测控中心、北京航天飞行控制中心等共同承办赛事，进一步促进了赛题设计与我国航天重大工程需求的结合，如 2010 年赛题“火星与多目标小行星探测”，直接源于国家正规划论证的我国未来火星探测任务。同时，“国家队”一流的条件和强大的平台资源极大提升了竞赛学术影响力，如第三届联合北京航天飞行控制中心共同承办，使竞赛与中心筹划的“钱学森诞辰 100 周年纪念活动”有机结合，该届竞赛也因此成为航天领域一次高端、前沿交流和研讨的盛会。

(2) 以竞赛为平台，广泛推动航天领域高端学术交流

凭借显著的教育背景、前沿探索的深度和多方参与的广度，CTOC 迅速成为我国航天领域高端学术交流的理想平台，被国内外广泛认可。

竞赛一开始就被航天领域知名专家、教育家寄予厚望。如时任中

国力学学会理事长李家春院士全程参加第一届竞赛活动，亲自为获奖学生颁奖，并寄语：“该项竞赛活动为研究生提供了一个深入的研究和探讨的平台，希望通过此次竞赛活动，为我国深空探测领域选拔和储备后备人才。”我国**航天领域两位国家科技最高奖获得者**，载人航天工程首任总设计师王永志院士、探月工程首任总设计师孙家栋院士，均亲临竞赛研讨会，进一步扩大了竞赛影响，促进了航天学术交流。

CTOC 还成为我国航天领域高端学术研讨的重要载体，如“全国航天飞行动力学技术大会”伴随第五届和第六届 CTOC 颁奖暨研讨会一并召开。同时，在 CTOC 组委会指导和支持下，国防科技大学借助竞赛平台，自 2011 年起每年举办“空天技术国际研究生暑期学校”，迄今共邀请 29 名院士、17 名国际知名专家为研究生开设课程或作专题讲座，暑期学校学生达 611 人。

4、以竞赛成果为纽带，深化我国航天领域产学研合作

竞赛以其前沿赛题和广泛的参与度，取得一系列创新设计思想和设计方案，相当一部分成果被转化、吸收到我国航天任务规划和工程设计中，并由此带动了我国航天领域的联合研究、协作育人，深化了产学研合作。

(1) 竞赛成果助力国家航天任务

在特定主题的带动下，每届竞赛均形成一批与国家重大航天任务密切相关的创新成果，如第二届冠军队提出的借力大行星引力飞行为我国“深空探测”重大专项论证提供了重要参考，第六届竞赛形成的最快飞出太阳系飞行方案直接成为我国“神梭”太阳系外探测新概念

任务论证可选方案之一。国防科技大学通过竞赛形成一系列性能优异的轨道规划算法，有力支撑了我国“神舟八号”与“天宫一号”交会对接任务成功，算法提出者李海阳被国家四部委联合授予“交会对接任务突出贡献者”奖章。

(2) 以竞赛成果为基础孵化了一批重点联合研究项目

围绕竞赛创新设计思想，院校与国家航天研制和运营单位展开了一系列深入合作，并开创了若干前沿研究方向，如深空飞行任务规划、电推进轨迹优化与制导、深空探测非线性轨道理论、限制性 N 体问题延拓理论等均由 CTOC 参赛队率先提出，并被宇航动力学国家重点实验室、航天飞行力学技术国防科技重点实验室等列为开放基金选题，随后成为国内研究热点。

更有部分从竞赛创新成果引申出的产学研合作项目从理论走向工程，如多天体遍历交会研究思想通过竞赛进入我国航天界研究视野后，中国空间技术研究院、北京航天飞行控制中心联合清华大学、国防科技大学、中科院空间应用工程与技术中心，瞄准星座攻防需求，开展了一系列星座遍历交会近地军事应用研究，得到了国家 863-XXX 专题的重点支持。单就国防科技大学为例，近三年国家航天研制和运营单位主动提出联合研究并得到立项的国家 863 项目就达 6 项。

(3) 竞赛直接推动了我国航天领域产学研合作育人

竞赛突出的创新成果使我国航天研制和运营单位看到院校在理论突破、基础研究、前沿设计等方面巨大的创新潜力，开始有针对性地引进竞赛成绩突出的优秀研究生，并有意识地开展与院校的合作培

养。

通过竞赛，每年都有一批优秀研究生脱颖而出，并被用人单位“抢走”或“预订”。如清华大学陈杨，是 2010 年第二届冠军队成员，毕业后被航天科工二院二部引进，工作一年后就担任二院首颗卫星系统总体副主任设计师，并成功运用竞赛时形成的设计方法解决了卫星轨道设计难题；国防科技大学沈红新，是第四届竞赛冠军队成员，博士学位论文选题也是载人登月轨道优化，提出并完善了载人登月全月面到达轨道应急返回方案，2014 年博士毕业被宇航动力学国家重点实验室作为专项人才引进，负责我国载人月球探测轨道方案深化论证工作。

竞赛平台营造的交流与合作氛围，一方面使院校充分了解了用人单位需求，另一方面吸引用人单位积极参与院校教学改革，从而有力推动了合作育人。如国防科技大学根据总装载人航天工程办、西安卫星测控中心等军队航天主管及运营部门意见增设了“空间安全技术”、“深空探测技术”等应用型研究生培养方向；清华大学自 2011 年起新增深空探测研究生培养方向，并为北京航天飞行控制中心、中国卫星海上测控部等单位实施定向培养。

5、形成“3C”合力，推进我国航天创新人才培养

CTOC 以丰富内涵、广泛影响形成全力育人平台，从多层次、多角度促进了我国航天创新人才培养工作。

(1) Challenge→Creativity: 通过竞赛有效锻炼研究生自主研究能力、合作攻关能力

CTOC 开放式竞赛组织形式，使得参赛过程成为研究生迎接挑战、创新成长的过程。

为寻求飞行轨道全局最优解，参赛团队需根据设计需要，不断吸取数学、力学、控制理论、计算机技术、优化算法、人工智能等交叉学科知识，从而有力促进了研究生主动式、主题、快速学习能力提升，并完善了知识结构。同时通过团队协作，有效培养了研究生合作意识。而竞赛主办方筛选、提供的核心背景参考资料以及优质基础公用程序代码，让参赛研究生能够很快切入该主题领域，全面了解该领域前沿进展、发展方向和基本研究方法，使得立足该领域开展创新研究成为可能。

事实上，通过竞赛，研究生经历了熟悉任务背景—分析问题—确定思路—选择技术路线—计算实现—结果分析—寻优迭代—验证—研究报告撰写这一完整的科研训练过程，在短时间内研究能力得到集中训练和大幅提升，为今后开展自主学术研究以及协同攻关、协同创新打下了坚实基础。

(2) Communication→Creativity: 通过高水平学术交流有效扩大研究生学术视野、增强了创新动力

历届竞赛颁奖及研讨会均全面介绍优秀方案、创新设计，以及相关领域最新进展和国家航天任务发展方向。相伴召开的全国性专题学术会议，更是前沿学术思想汇集，从而显著扩大了研究生学术视野。同时，通过竞赛聚集了国内外一流专家学者，为研究生提供了与学术大家近距离学习交流的宝贵机会。

通过竞赛创造的交流平台，研究生对工程需求有了深入、全面的了解，对下一步研究工作有了更加明确的方向。而用人单位的高度关注，更是使研究生深刻认识到自身创新研究的价值，从而显著增强了从业信心和创新动力。如国防科技大学李九人，所在参赛队提出的轨道规划算法成为载人航天论证研究中心某重大预研课题的核心工具，博士学位论文被评为湖南省优秀论文。

(3) Cooperation→Creativity: 通过产学研合作大大增强创新人才培养的针对性

培养方向和课程教学上，近年来院校聚焦用人单位需求，围绕航天轨道设计和任务规划，新增“深空探测”等前沿应用型方向、增开“空间任务分析与设计”等一系列核心课程。

科研能力培养上，竞赛所带动的快速增长的联合研究项目，为联合育人提供了更加理想的创新能力训练和展示平台。

培养形式上，走出了研究生定向培养、修课研究生培养、主任设计师培训等产学研联合育人新路子。

同时，贴近我国航天任务需求的前沿赛题，为航天领域广大研究生提供了高水平学位论文选题参考，是研究生快速切入我国航天用人单位急需技术领域可靠的研究方向“指南”，增强了创新人才培养的针对性。

三、成果创新点

(1) 创办全国空间轨道设计竞赛，填补了我国航天领域开放式专业竞赛空白。

借鉴欧空局于 2005 年发起的面向专业科研机构的国际深空轨迹优化竞赛，以面向研究生创新培养为主要目的，本成果于 2008 年发起并创办了全国空间轨道设计竞赛，填补了我国航天领域开放式专业竞赛空白，至今已持续举办了 7 届，覆盖了航空宇航科学与技术学科主要学位授权单位，得到了航天领域和高等教学届的充分认可。

(2) 探索形成 “3C 模式”，拓展了专业竞赛在研究生创新培养中的积极作用。

创新专业竞赛组织形式，逐步形成了专业竞赛 “3C 模式”：以设计挑战性赛题（Challenge）为牵引，以促进高水平学术交流（Communication）为主要手段，以深化产学研合作（Cooperation）为重要依托。有效拓展了专业竞赛在培养高层次创新人才方面的积极作用，并在国内得到了广泛推广。

(3) 以赛促学、以赛促研、以赛促融合，形成了产学研密切合作的新路。

通过吸引“国家队”加入、以竞赛推动高端学术交流、竞赛成果转化与应用等手段，实现了以赛促学、以赛促研、以赛促融合，走出了我国航天领域联合研究、协作育人的产学研密切合作新路，在培养创新人才、推动基础研究、服务重大工程等方面取得了显著成效。

四、推广应用成果及贡献

1、竞赛得到航天领域和高等教育界的充分认可

自创办之初起,竞赛就得到我国航天领域和高等教育领域的充分认可和广泛支持,仅竞赛核心活动,就得到王永志、孙家栋、李济生、余梦伦等航天领域知名院士的亲自指导和参与,李家春院士、郑晓静院士、戴世强教授等力学大家、教育家一直给予竞赛大力支持和高度评价。同时,以竞赛为载体,“全国航天飞行动力学技术大会”、“钱学森诞辰 100 周年纪念活动”、“全国航天动力学与控制青年学者论坛”等一批航天领域重要学术活动蓬勃开展,有力促进了我国航天领域学术交流和研讨。

所形成的专业竞赛“3C 模式”在国内得到推广。周培源全国大学生力学竞赛是我国影响广泛的基础赛事,2009 年起,借鉴“3C 模式”,新增开放性团体赛。西北工业大学 2015 年借鉴“3C 模式”,发起中国研究生未来飞行器设计大赛,并迅速成为教育部官方赛事之一。围绕竞赛在《力学与实践》等核心期刊发表教育教学改革研究论文 20 余篇。

竞赛相关活动引起国内广泛关注,先后被新华社、中央电视台、人民网、解放军报社等众多媒体广泛报道,百度搜索条目超过 100 万条,推动了航天科学知识普及教育等工作。

2、显著推动了国内航天人才培养工作

竞赛促进了一批拔尖创新人才脱颖而出。清华大学蒋方华通过竞赛提出并完善了变轨全局规划算法和小推力轨迹同伦优化技术,并运

用该全局算法圆满完成了“神舟八号”与“天宫一号”交会对接任务中的远距离导引段变轨策略规划，同伦优化技术发表在本领域顶级期刊 JGCD，入选 ESI 高被引论文。国防科技大学钱山通过竞赛对卫星任务规划展开了深入研究，毕业分配到总装 26 基地后仅一年就解决了某在轨卫星的重大问题，荣立二等功并获得五四青年奖章。据不完全统计，自 2010 年以来，仅清华大学、国防科技大学就有 61 篇学位论文参考竞赛题目进行选题，其中 18 人次获得省级或校级优秀学位论文奖励。

竞赛推动了航天专业基础课程改革。清华大学 2013 年增设研究生核心课程“深空探测轨道力学”，其中半数内容来源于竞赛主题，特别是基于竞赛创新设计思想与方法所编写的教材《深空探测动力学与控制》，得到 2014 年度国家出版基金资助，并入选国家重点图书出版规划项目；立足竞赛实践，国防科技大学于 2015 年新开设了“航天任务分析与设计”博士生课程、中国科学院大学天文与空间科学学院新开设了“空间任务分析与设计”研究生课程；西北工业大学航天学院研究生课程“航天器轨道力学”引入简化后的竞赛题目作为课程大作业，显著提升了课程教学效果。国防科技大学以第四届竞赛冠军方案为基础，开发了“交会任务规划与演示”等 4 个虚拟仿真实验，有力支撑了力学与航天工程虚拟仿真实验教学中心建设，该中心于 2016 年 1 月入选国家虚拟仿真实验教学示范中心。

竞赛拓宽了航天领域创新人才培养渠道，吸引了国内航天领域产学研几乎所有单位积极参与，迄今共有 50 个大学及科研院所组队参

赛，覆盖了航空宇航科学与技术学科主要学位授权单位，进而推动了一系列人才联合培养计划。仅以清华大学和国防科技大学为例，清华大学通过定向研究生培养方式为西安卫星测控中心、北京航天飞行控制中心等开展了轨道领域人才联合培养，近 5 年输送研究生 16 人；国防科技大学与总装某基地、载人航天工程办等军队航天运营单位签署人才联合培养协议，成为航天五院 508 所、航天八院等单位修课研究生唯一培养单位，并每年为航天一院、四院、六院、十院等单位培训主任设计师超过 150 人。

3、显著推进了我国航天轨道基础科学研究

竞赛促进了青年教师的成长。一批青年骨干教师通过竞赛提升了教学科研能力，如第三/四/六届指导教师、国防科技大学黄海兵被评为“徐芝纶”全国优秀力学教师；清华大学宝音贺西、国防科技大学罗亚中是竞赛组织的核心成员，分别成长为我国航天轨道领域第一个杰青、优青获得者，连续两年进入 Elsevier 中国高被引学者榜单（航天工程全国共 8 人）；清华大学蒋方华 2012 年发表在轨道领域权威期刊 JGCD 的论文入选 ESI 工程学高被引论文（前 1%）。

竞赛显著提升了航天轨道基础研究水平。仅清华大学近 5 年就发表与轨道优化相关的 SCI 论文 40 余篇，其中 JCR 的 Q1 区期刊论文 12 篇。在竞赛推动下，清华大学、国防科技大学在轨道优化基础研究方面均取得一系列重要进展，先后承担国家自然科学基金项目、973 课题共计 19 项，其中杰青 1 项、优青 1 项、重点项目 2 项。竞赛组织委员会还根据我国航天轨道基础研究快速发展需要，正加紧筹办国际

学术期刊。

竞赛形成一批成熟的轨道规划算法与软件，成为我国航天轨道研究领域的重要工具。蒋方华的同伦法轨迹优化工具、高扬的小推力轨迹优化工具、罗亚中的非线性交会优化工具，先后被引进到西安卫星测控中心、中国空间技术研究院等研制单位，并在实际工作中发挥了重要作用。

竞赛还通过产学研合作，推动了我国“嫦娥二号”拓展任务、载人月球探测任务论证、“十三五”深空探测专项立项论证、中科院先导创新项目等一系列重大航天任务。

4、显著提升了国际竞赛成绩，扩大了国际交流渠道

CTOC 显著提升了我国参加 GTOC 的成绩，增强了我国在国际航天领域的学术影响。2010 年前我国参加 GTOC 的最好成绩均在 10 名以外，而 2010 年后稳居前 5 名，2015 年更是获得第二名的历史最好成绩，被国防部网站、中国教育报等广泛报道。

竞赛扩大了我国航天领域开展国际交流的渠道。2010 年前，国内航天轨道方向的研究生只能以出国参会等形式出国交流，且受限很多。随着 CTOC 在国际航天界的积极影响日益扩大，国际一流高校开始陆续接收我国该领域留学生，近三年仅清华大学、国防科技大学就先后派出 32 人次前往美国马里兰大学、亚利桑那大学、佐治亚理工，英国剑桥大学、格拉斯哥大学，意大利米兰理工等航天传统一流高校留学深造。

竞赛还一定程度上扭转了我国航天领域单向交流的局面。近年已

开始有发达国家的学生来华学习或工作，如清华大学 2015 年就接收了 8 名来自美国、法国等博士后或研究生，为下一步开展国际合作打下了良好基础。