

引用格式: 郭世杰, 李泽霞, 魏韧, 等. NASA 重大项目预研管理过程研究——以韦布望远镜为例[J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(5): 628–641.

NASA 重大项目预研管理过程研究^{*}

——以韦布望远镜为例

郭世杰¹ 李泽霞^{*,1,2} 魏韧¹ 董璐¹

(1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100190)

摘要: 做好重大科技项目的组织管理是实现抢占科技制高点目标的重要前提条件。本文以美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)系列管理文件为分析对象, 剖析其项目组织管理模式, 并以投资近百亿美元、持续数十年的詹姆斯·韦布太空望远镜项目为例, 对 NASA 重大项目预研管理过程进行分析。NASA 将项目按照成本、风险、是否属于优先事项等分为 3 个类别进行管理, 项目生命周期可以分为从“A 前”(pre-A)到 A、B 直至 F 共 7 个阶段。韦布望远镜从 1995 年进入 NASA 的“A 前阶段”, 由 3 家单位独立开展概念研究; 1999 年 7 月从 3 家单位中遴选 2 家开始“A 阶段”研究; 2002 年 9 月正式选择 1 家单位牵头开展“B 阶段”研究。可供我国借鉴之处包括: 项目组织方应发挥好“总体”角色, 凝聚多方资源、提供长期稳定支持; 新项目的酝酿需充分利用前期项目的科学、技术、管理人才基础; 可利用“赛马制”等分阶段推进重大项目的实施, 以降低不确定性和决策风险等。

关键词: 重大项目; NASA; 预研管理; 詹姆斯·韦布太空望远镜; 组织管理模式

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2024.03.006

Study of NASA's Major Program Pre-research Management Process: Take the James Webb Space Telescope as An Example^{*}

GUO Shijie¹ LI Zexia^{*,1,2} WEI Ren¹ DONG Lu¹

(1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Information Resources Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Effectively organizing and managing major scientific and technological projects is an important prerequisite for achieving the goal of seizing technological heights. This article takes the management documents of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) as the analysis object, analyzes its project organization and management modes, and takes the James Webb Space Telescope (JWST) project, which has invested nearly 10 billion US dollars and lasted for decades,

^{*} 中国科学院文献情报中心青年骨干人才项目“技术威胁预警量化分析方法与应用研究”(E3510402)

^{**} E-mail: lizexia@mail.las.ac.cn; Tel: 010-82626611-6607

as an example to analyze the pre-research management process of NASA's major projects. NASA manages projects into three categories based on cost, risk, and priority. The project lifecycles can be divided into seven stages, from "pre A" to "A" "B", until "F", respectively. JWST entered NASA's Pre-A Phase in 1995, with three independent units conducting conceptual research; In July 1999, 2 out of 3 units were selected to start the Phase A research; In September 2002, one contractor was officially selected to lead the Phase B research. The aspects that can be used for reference include: the project organizer should play a good "overall" role, gather multiple resources, and provide long-term stable support; The preparation of new projects needs to fully utilize the scientific, technological, and management talent foundation of the previous projects; The implementation of major projects can be promoted in stages using "horse racing" to reduce uncertainty and decision-making risks.

Keywords: Major Projects; NASA; Pre-research Management; James Webb Space Telescope; Organization and Management Mode

做好重大科技项目的组织管理,是完成抢占科技制高点任务、实现科技强国建设目标的重要前提条件。我国在早期的重大科技项目管理实践中,形成了举国体制这种“集中力量办大事”的组织方式,成功实施了“两弹一星”等重大项目^[1]。改革开放以来,我国引入国际项目管理通用模式,并与举国体制的部分特点结合,成功实施了“载人航天”“探月工程”等重大项目。2011年以来,中国科学院组织实施的“空间科学先导专项”先后发射了“悟空号”“墨子号”“慧眼号”等科学卫星,实现了空间科学、天文学、卫星工程、航天技术等不同领域的交叉融合,取得了一系列重大成果和突破。

在国际上,美国在涉及跨机构协同合作的重大项目组织方面具有丰富经验。美国哈勃望远镜于1977年获得国会批准立项,1990年发射^[2]。在此基础上,欧美已发射一系列影响深远的著名空间天文望远镜,如詹姆斯·韦布太空望远镜(简称“韦布望远镜”)、盖亚太空望远镜、开普勒太空望远镜等,在长期实践过程中,欧美天文学界、政府空间机构和航天工业界已形成密切合作但分工明确的工作方式,积累制定了体系完整、行之有效的管理制度,能够为我国重大科研项目的组织管理提供重要参考。其中,韦布望远镜从1980年代开

始酝酿,2021年发射运行,历时数十年、耗费近百亿美元,是了解美国重大项目的决策和组织管理过程的经典案例。

本文旨在以美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的项目管理系列文件为分析对象,结合韦布太空望远镜的预研过程,对NASA重大项目的预研管理模式进行分析,并提出值得我国重大科技项目组织管理参考的启示建议。

1 NASA 重大项目组织管理系列文件

1.1 NASA 计划/项目管理系列文件的分类

NASA发布的计划/项目管理系列文件可以分为“NASA政策指令”(NASA Policy Directive, NPD)和“NASA程序要求”(NASA Procedural Requirement, NPR)两类^[3],文件的编号分别以“NPD”和“NPR”开头。其中,《NASA工程与计划/项目管理政策》(NPD 7120.4E)^[4]由NASA总工程师办公室(OCE)负责制定,是NASA计划/项目管理的总体性政策文件。在此基础上,按照“太空飞行”“研究与技术”“信息技术”“基础设施”4个不同领域,NASA相关办公室分别针对不同的任务要求和生命周期制定了相应管理文件,如表1所示。

表 1 NASA 计划 / 项目管理相关文件

Tab.1 NASA Program/ Project Management Documents

文件名称	文件编号	有效期限	涉及领域	责任办公室
《NASA 工程与计划 / 项目管理政策》 ^[4]	NPD 7120. 4E	2017. 6. 26 ~ 2023. 6. 26	全领域	
《NASA 太空飞行计划和项目管理要求》 ^[5]	NPR 7120. 5F	2021. 8. 3 ~ 2026. 8. 3	太空飞行	NASA 总工程师办公室
《NASA 研究与技术计划和项目管理要求》 ^[6]	NPR 7120. 8A	2018. 9. 14 ~ 2023. 9. 14	研究与技术	
《NASA 信息技术计划和项目管理要求》 ^[7]	NPR 7120. 7A	2020. 8. 17 ~ 2025. 8. 17	信息技术	NASA 首席信息官办公室
《设施项目要求》 ^[8]	NPR 8820. 2H	2022. 9. 27 ~ 2027. 9. 27	基础设施	NASA 战略设施办公室
《环境合规和恢复计划》 ^[9]	NPR 8590. 1A	2011. 7. 18 ~ 2023. 7. 18		NASA 环境管理部

其中,文件 NPR 7120. 5F 指出:在 4 个领域中,“太空飞行计划/项目”往往具有最高的显示度和复杂性,涉及航天器、运载火箭、地面系统、为太空飞行计划/项目开发的仪器设备和相关技术等。NASA 的韦布望远镜、“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划、火星探测计划等均属于“太空飞行计划/项目”。

1.2 NASA 空间“计划”和“项目”的区别

根据文件 NPD 7120. 4E, NASA 的“计划”(Program)是指由 NASA 的一个任务部门(或任务保障办公室)牵头实施的战略性投资活动,它具有明确的体系结构、技术途径、需求、资金水平以及管理体系。而作为比“计划”层级更低的活动,“项目”(Project)具有明确的需求、生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)以及起点与终点,会产生直接满足 NASA 战略需求的新产品或改良产品。

一项“计划”可以生成或指导一个或多个“项目”。只含有一个“项目”的“单项目计划”往往具有较长的开发和运行寿命,并意味着 NASA 投入大量机构资源。文件 NPR 7120. 5F 指出,韦布望远镜属于典型的“单项目计划”。出于该原因,本文不对“计划”和“项目”进行严格区分,统称“项目管理”。

2 NASA 空间项目管理过程

NASA 将其空间项目按照风险、成本和优先级

不同进行分类管理,并将项目的生命周期划分为不同的阶段,在每个阶段的结束和开始关键时期对项目进行评审、做出关键的决策选择。

2.1 NASA 太空飞行项目分类

由于不同规模的太空飞行项目差异较大,因此 NASA 将太空飞行项目按照规模和优先级分为 3 类,分类的考虑条件和分类结果如表 2 所示。

表 2 太空飞行项目的分类条件和结果

Tab.2 Classification Criteria and Results of Space Flight Projects

项目 优先级 ¹⁾	LCC < 3. 65 亿 美元	LCC ≥ 3. 65 亿 美元,且 ≤ 20 亿美元	LCC > 20 亿美元, 含有大量放射性材 料,或是载人航天 项目
高	第 2 类	第 2 类	第 1 类
中等	第 3 类	第 2 类	第 1 类
低	第 3 类	第 2 类	第 1 类

1)“优先级”是进行项目分类的考虑条件,而非结果。

从表 2 可以看出:NASA 对项目分级的标准主要包括项目的成本、优先级、风险因素(是否含有大量放射性物质、是否涉及载人航天飞行等)等。在确定“优先级”方面,《NASA 太空飞行计划和项目管理手册》^[10]指出:对项目优先级的确定是“主观”的,它取决于 NASA 的高级管理层如何评估该项目对 NASA 整体成功的风险,以及项目对 NASA 外部利益相关者的重要性等。

三个类别的项目的管理权限不同。第 1 类太

空飞行项目的决策权由 NASA 局长助理 (Associate Administrator) 负责,也可以由局长助理委托 NASA 任务部主任 (Mission Directorate Associate Administrator) 负责;第 2 和第 3 类项目的决策权均由任务部主任负责。任务部主任可针对项目面临的额外风险,对项目的分类结果提出更改建议;局长助理负责批准最终的项目分类,总工程师办公室负责公布项目的正式名单。

2.2 NASA 太空飞行项目全生命周期管理过程

根据项目所属领域和项目结构等不同, NASA 项目的生命周期定义不同。其中,对“太空飞行”领域的项目,文献^[10]总结了一份概括性的项目生命周期示意图,如图 1 所示。

从图 1 可以看出, NASA 太空飞行项目的生命周期可以分为从“A 前阶段”(pre-A Phase)到“F 阶段”(Phase F)共 7 个阶段。在这 7 个阶段之

间共设置了共 6 个“关键决策点”(从 A 到 F)。

在前 3 个阶段,即图 1 中从“A 前阶段”到“B 阶段”期间的活动,主要涉及概念研究、初样设计和技术完善等,可以看做太空飞行项目的“预研阶段”。它们是项目酝酿发起的关键时期,往往需要考虑巨大的经济和时间成本,或面临技术和路线的不确定性等,这给项目的决策带来了挑战。

2.3 概念研究 (Pre-Phase A) 管理过程

在“A 前阶段”, NASA 任务部主任有权启动一个新项目的概念研究; NASA 任务部或相关的项目办公室在新项目启动前,负责为项目提供概念研究资源。概念研究活动包括设计原型系统、进行可行性分析、开展技术需求及技术成熟度 (Technology Readiness Level, TRL) 分析、进行工程系统评估,以及替代方案分析等。利用上述活动的结果,任务部负责评估项目是否值得继续进行。



图 1 NASA 太空飞行项目的生命周期

Fig.1 Life Cycle of NASA’ s Space Flight Programs

“A 前阶段”的所有活动最终都聚焦到“任务概念评议”(Mission Concept Review, MCR)以及“关键决策点 A”上。“任务概念评议”是一个项目在其生命周期中面临的首个主要评议环节,其目标是评估项目概念的可行性以及这一概念是否满足 NASA 相关的需求和目标。

在“关键决策点 A”,该项目需要证明:其已经致力于满足 NASA 需要;提出的任务概念可行;相关规划已经足够成熟,可以进入“A 阶段”(Phase A);任务概念很可能可以按照设想完成。

“A 前阶段”完结后,项目即被授予“策划授权文件”(Formulation Authorization Document, FAD),同时还需形成并批准策划协议,以记录项目策划过程中的规划和资源需求。“A 前阶段”的主要工作节点如图 2 所示。



图 2 NASA 太空飞行项目“A 前阶段”的主要工作节点

Fig.2 Main Work of NASA's Space Flight Program in the Pre A Phase

在“A 前阶段”NASA 将成立项目概念研究办公室,制定管理结构和流程,开展项目概念研究的管理和规划,具体工作如下所示^[10]。

1) 任务部(和项目管理部)负责确定项目关键利益相关者的期望、需求和目标,制定项目的初始需求、限制条件、基础规则和成功标准;会同 NASA “国际和跨部门关系办公室”制定项目合作的计划;负责准备 FAD。

2) 项目开展的技术工作包括:制定可供遴选的项目内容(初始概念、项目结构、运载火箭、运

行概念等);评估各种替代方案,并根据评估结果确定可行的概念;在 MCR 中展示选择后的概念;确定至少低至“项目”层级的初步需求;执行任务概念的轨道碎片评估;评估技术和工程开发需求,并根据预研进展,持续评估技术开发和降低工程风险的需求、NASA 已有资产是否得到正确使用等;根据“任务概念评议”的要求制定技术控制计划等。

3) 项目管理、规划和控制任务包括:制定关于概念设计、日程、风险等方面的关键基础规则和考虑;建立与 NASA 标准一致的高级别“工作分解构架”;为“任务概念评议”制定初步的顶层技术、经费、日程、安全风险列表、风险控制计划以及资源需求;根据预研进展,制定初步的人员和基础设施需求计划,以及包含风险信息的项目日程;制定初步的项目经费范围、项目物流管理计划;根据要求在 NASA 中心管理委员会、计划管理委员会(Program Management Council, PMC)、“关键决策点 A”以及其他论坛和媒体汇报相关计划、进展和成果;根据“任务概念评议”要求制定管理控制计划,并为“A 阶段”制定预研协议等。

2.4 概念和技术开发(Phase A)管理过程

进入“A 阶段”后,项目需要开发出满足 NASA 需求以及项目约束条件(如资源)的可行任务/系统构架。这一阶段的工作成果将用于证实项目的设计和规划已经充分成熟,可以进入“B 阶段”(Phase B),以及项目可在有限的资源水平下以可接受的风险水平实现项目目标。在“A 阶段”中会成立(或扩大)项目研究团队,更新(或全面开发)项目概念,开始技术开发、工程原型、硬件和软件评估等工作。项目还将建立指标体系、探索全方面执行方案。

在“A 阶段”结束时,项目将面临“关键决策点 B”决策,在此之前需要经历“采购战略会议”(Acquisition Strategy Meeting, ASM)、“系统需求评审”(System Requirements Review, SRR)、“系统/任务定义评审”(System Definition Review/Mission Definition Review, SDR/MDR)以及 NASA PMC 评审。其中,SDR 和 MDR 是对同一评议流程的不同称呼,在机器人探索项目该评议环节称为 MDR,在载人飞行项目中称为 SDR。

“A 阶段”的主要工作节点如图 3 所示。

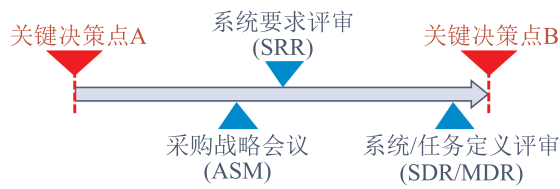


图 3 NASA 太空飞行项目“A 阶段”的主要工作节点

Fig.3 Main Work of NASA's Space Flight Program in the A Phase

在“A 阶段”, NASA 将成立项目办公室,建立管理结构和流程,开展项目管理、规划和控制,具体工作如下所示^[10]。

1) 任务部(和项目管理部)负责制定项目相关需求和限制,负责为“采购战略会议”做准备,并基于“系统要求评审”和开发结果持续更新项目需求;任务部和“国际和跨部门关系办公室”负责制定、启动项目合作活动。

2) 项目进行的技术工作包括:继续完善项目概念、任务和航天器结构及运行概念,并在“系统要求评审”中展示;定义至少低至“系统”层级的需求,在通过“系统要求评审”后需进一步确定“子系统”层级的需求;执行技术开发和工程开发计划;继续评估技术成熟度、降低工程风险的活动需求、NASA 已有资产是否得到正确使用;确定并

开展降低工程风险的行动;根据“系统要求评审”结果更新项目概念、结构以及运行概念,优化相关设计,并在“系统/任务定义评审”中展示;根据相关评审要求制定技术控制计划。

3) “系统要求评审”前的项目管理、规划和控制任务包括:制定关键技术规则和考虑;更新风险列表、措施、资源需求;优化采购策略和基线采购计划;制定/更新人员和基础设施需求和计划;制定包含风险信息的系统层级的项目日程;根据“任务概念评议”结果更新初步项目经费范围等。

4) “系统要求评审”后的项目管理、规划和控制任务包括:根据概念/设计进展,更新关键基础规则和考虑、人员和基础设施需求计划等;执行采购计划;为“B 阶段”提前制定采购计划;完成商业案例分析;针对生命周期成本 < 10 亿美元的项目,制定包含风险信息的子系统层级的项目日程、经费范围;针对生命周期成本 ≥ 10 亿美元的项目,确定带“联合成本和进度置信水平”(Joint Cost and Schedule Confidence Level, JCL)的日程范围和成本上限、下限;为后续阶段制定项目计划,更新“B 阶段”预研协议;制定初步项目计划并在 SDR/MDR 中展示等。

2.5 初样设计和技术完善(Phase B)管理过程

在“B 阶段”,项目主要开展初样设计和技术开发。项目团队需要按照 NASA 相关标准,完成原型机开发、已有硬件和软件的评估、风险降低行动,以及完成初样设计等工作。项目团队需要证实其在预研阶段制定的项目方案、技术、成本以及进度的基准是完善且一致的。

“B 阶段”结束时将面临“关键决策点 C”的选择,在此之前需要经过“初期设计评审”(Preliminary Design Review, PDR)。PDR 的目标是评估项目在预研阶段的方案、技术、成本等的一致

性和完善程度;评估其初期设计是否符合 NASA 的相关要求;确定该项目是否已经足够成熟可以开始“C 阶段”阶段的工作等。

“B 阶段”的主要工作节点如图 4 所示。



图 4 NASA 太空飞行项目“B 阶段”的主要工作节点

Fig.4 Main Work of NASA's Space Flight Program in the B Phase

在“B 阶段”，NASA 将建设完成项目办公室、管理结构和流程,继续进行管理、规划和控制,具体工作如下所示^[10]。

1) 任务部(和项目管理部)负责根据“系统任务定义评审”结果和后续进展,维护项目需求,使其与 NASA 战略目标要求相一致;完成环境规划程序并制定初步的事故预警和应急计划;会同“载人探索与运行部”(Human Exploration and Operations Mission Directorate, HEOMD)协调空间运输、通信、导航能力以及发射服务;会同“国际和跨部门关系办公室”负责完成项目的(对外)合作协议、制定任务基线等。

2) 项目进行的技术工作包括:根据“系统要求评审”结果,继续制定并更新项目概念、任务和航天器结构及运行概念;完成基线设计并在“初步设计评审”中展示;更新任务目标以及“项目级”和“系统级”需求;完善基线需求至“子系统级”;制定初步安全数据包和一次性运载火箭载荷安全流程的可交付成果(如适用);完成初步的轨道碎片评估;执行信息系统风险评估;执行技术和工程开发计划;继续评估技术成熟度、工程风险降低需

求、NASA 已有资产是否得到正确使用等,确定并执行风险降低行动;根据“初步设计评审”要求制定并更新技术控制计划。

3) 项目管理、规划和控制任务包括:随着概念/设计的成熟,确定和优化更新关键基础规则和考虑;为“初步设计评审”做准备,更新风险列表、措施和资源需求,更新人员和基础设施需求计划;开展升级的商业案例分析;完成“未来使用替代方案问卷”;执行采购方案;开始采购“B 阶段”中需要长时间使用的物品;更新告知风险的“子系统”层级的项目日程、项目经费范围;在需要时制定 JCL;更新基线预算和日程安排;在需要时制定“绩效衡量基线”(Performance Measurement Baseline, PMB);对通过“NASA 联邦采购条例补充规定”签订的合同执行“综合基线评审”(Integrated Baseline Review, IBR);根据要求在 NASA 中心管理委员会、生命周期评审、计划管理委员会、“关键决策点 C”以及其他论坛和媒体汇报相关计划、进展和成果等。

3 韦布望远镜的预研管理组织过程

3.1 美各界酝酿“下一代太空望远镜”(1980—1994)

3.1.1 个人探索阶段

韦布望远镜的概念最初是由参与哈勃望远镜的科学家和工程师提出的:1980 年,负责发射哈勃望远镜的 NASA 马歇尔航天飞行中心人员研究了在航天飞机的外部油箱中发射 8 米望远镜的可能性^[11]。1986 年,负责制造哈勃望远镜的珀金埃尔默公司(Perkin Elmer)在一项天文干涉系统技术要求研究中描述了大型太空望远镜的各种先进概念^[12]。美国太空望远镜科学研究所(Space Telescope Science Institute, STScI)是哈勃

望远镜的管理运行中心,该机构的皮埃尔·贝利(Pierre Bely)在 1986 年开始为大型光学红外望远镜研究一种改变游戏规则的方法(即通过冷却方法消除望远镜的热辐射背景),1987 年 1 月于洛杉矶举行的国际光学工程学会(Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE)会议上发表论文讨论了在 130 K 温度下工作的被动式冷却 10 米望远镜^[13]。美国史都华天文台(隶属于亚利桑那大学)的罗杰·安格尔(J. Roger P. Angel)等 1986 年在《自然》杂志发表论文,提出了用 16 米太空望远镜来寻找类地系外行星的方法^[14]。1986 年前后,STScI 时任所长卡多·贾科尼(Riccardo Giacconi)认为,根据哈勃望远镜的经验,太空望远镜从酝酿到最终发射运行需要十几年时间,因此要求科研部门负责人彼得·斯托克曼(Peter Stockman)、副所长加思·伊林沃思(Garth Illingworth)等“思考哈勃望远镜之后的下一个重大任务”^[15]。两人同皮埃尔·贝利等随后在 STScI 内部组建了“下一代太空望远镜”(简称 NGST)任务概念研究团队。1988 年 8 月,加思·伊林沃思在第 20 届国际天文联合会大会上以“下一代:8 到 16 米太空望远镜”为题,讨论了在高地球轨道上 8 米口径、被动冷却、宽带“紫外-可见光-红外”望远镜的概念,并概述了其科学能力。当时由于美国国家科学院正在制定天文与空间领域十年调查报告,1988 年,STScI 团队向该报告起草委员会的“空间紫外光学小组”提交了相关项目建议(包括望远镜的成本估算等)。

3.1.2 通过研讨会凝聚共识

1989 年 9 月 13 至 15 日,为了推动项目立项工作,在 STScI 所长卡多·贾科尼建议下,STScI 组织召开了一次关于哈勃望远镜后续任务的研讨会,名为“下一代:哈勃望远镜的 10 米级紫外-

可见光-红外继任者”。这次研讨会得到了哈勃望远镜首席科学家、NASA“紫外线可见光和引力天体物理部”负责人爱德华·威勒(Edward J. Weiler)的大力支持^[15]。研讨会吸引了来自 NASA 各中心、航天工业部门(含部分 NASA 承包商)的参与,他们都带来了独特的经验。会议还讨论了与欧洲航天局的合作,包括当时欧美关于哈勃望远镜的合作等。这种国际合作的政治价值得到了美国国家科学院的认可。该研讨会的成果以《下一代太空望远镜》为题在 1989 年公开出版^[16]。

3.1.3 NGST 被美国科学院推荐实施

在美国天文学界的努力下,发展 NGST 的想法逐渐得到大多数天文学家支持,被列入影响力巨大的美国十年调查报告子报告的推荐项目。此前,在 1988 年出版的《二十一世纪的空间科学:1995 年至 2015 年的当务之急》^[17]中,美国国家研究理事会(National Research Council, NRC)的空间科学委员会(Space Science Board)就指出,在天文学和天体物理学的重大科学问题牵引下,考虑到以哈勃望远镜为代表的空间天文学发展情况,NASA 应当在未来 20 年着重发展高分辨率干涉测量和高通量仪器;建议开展多项新的地基和天基天文观测项目,其中包括一台 8~16 米口径的红外波段太空望远镜。但是该报告并没有对项目进行详细论证。

1988 年,STScI 的 NGST 概念研究团队向负责起草“十年调查报告”的美国国家研究理事会天文学和天体物理学小组提交了关于 6 米太空望远镜的成本核算结果,建议 1998 年发射 NGST 并运行到 2009 年结束,预计成本 20 亿美元。天文学和天体物理学小组报告接受了这一建议,在其 1991 年出版的《十年调查报告工作文件:天文学和天体物理学小组报告》^[18]中予以支持。

3.1.4 NGST 因哈勃望远镜故障遭搁置

遗憾的是,由于哈勃望远镜 1990 年 4 月发射后不久出现的球差问题(主镜的形状被磨错,导致成像模糊),美国国家科学院重新考虑了大型太空望远镜的风险和成本因素,因此在 1991 年出版的十年调查总报告《天文学和天体物理学十年发现》^[19]中并未将大型天基望远镜作为推荐项目。这份由时任美国天文学会主席约翰·巴赫恰勒(John Bahcall)领导撰写的影响力巨大的报告在摘要中指出:“大型任务对于解决某些基本科学问题至关重要,但它们的发展可能需要 20 年的时间。中型和小型任务可以更快地应对不断变化的科学优先事项和新的技术或工具突破。在决定新设备计划的最终建议之前,委员会考虑了最近发现的哈勃太空望远镜问题的影响”。最终,该报告仅推荐了成本较低、主镜口径仅为 85 厘米的“空间红外望远镜”(Space Infrared Telescope Facility, SIRTf)项目。该项目得到 NASA 立项,于 2003 年成功发射^[20]并被更名为“斯皮策太空望远镜”(Spitzer Space Telescope, SST),2020 年正式退役。

3.1.5 NGST 被纳入 NASA 技术开发计划

1990—1992 年,尽管遇到了哈勃望远镜球差问题的挫折,但 STScI 和 NASA 在投入大量精力用于修复哈勃望远镜的同时,仍然一直在研究大型太空望远镜的概念。这期间 STScI 研究团队的一项关键活动是推动将 NGST 纳入 NASA 的“21 世纪天文技术”(Astrotech 21)计划^[15],NASA 当时正在就该计划的制定咨询美国国家研究理事会下属的天文调查委员会(Astronomy Survey Committee, ASC)^[21],因此 STScI 可发挥积极作用。1993 年,在“太空望远镜研究所委员会”要求和 NASA 支持下,由 20 余所顶尖大学组成的美国“天文学研

究大学协会”(Association of Universities for Research in Astronomy, AURA)成立了“哈勃望远镜和更远”委员会,以对紫外—光学—红外天文学的未来任务进行广泛的研究。该委员会经过两年半时间的复杂和广泛的调研,于 1996 年 5 月发布了报告《探索和寻找起源:紫外—光学—红外空间天文学的愿景》^[22],建议之一是“NASA 应该开发一个孔径为 4 米或更大的太空望远镜,优化 1-5 微米波长范围内的成像和光谱观测。”与此同时,NGST 概念也得到了 NASA 领导者的认可。1995 年 12 月,委员会主席艾伦·德雷斯勒向时任 NASA 局长丹·戈尔丁(Dan Goldin)介绍了关于 NGST 的想法,得到了后者的强烈支持^[23]。丹·戈尔丁当时正在调整美国宇航局的科学计划,推行“更快、更好、更便宜”的战略,此外,NASA 正在研制中的斯皮策太空望远镜也已经验证了铍金属镜面的关键技术^[15]。

3.2 NASA 组织开展“A 前阶段”预研(1995—1998)

1995 年底,在美国天文学界建议和 NASA 领导层(特别是 NASA 时任局长)的支持下,NASA 开始组织对“大口径被动冷却望远镜”的概念研究^[24]。在这一概念研究基础上,NASA 成立了“下一代太空望远镜”(NGST)项目“特设科学工作组”,后来将 NGST 更名为“詹姆斯·韦布望远镜”。因此,1995 年可视为韦布望远镜进入 NASA “A 前阶段”研究的起始时间。

在“A 前阶段”,NASA 为来自学术界和工业界的 3 个独立概念研究团队提供了资金支持,这 3 个团队分别来自美国汤普森·拉莫·伍尔德里奇公司(Thompson Ramo Wooldridge Inc., TRW)、洛克西德·马丁公司(Lockheed Martin)、NASA 戈达德太空飞行中心。1996 年,这 3 个公司分别向

NASA 提交了研究报告,这些报告的公开情况如表 3 所示。

尽管 3 个团队向 NASA 提交的报告难以公开获取,但是 STScI 的赫维·斯托克曼(Hervey S. Stockman)在 1997 年发表的专著^[26]中对这 3 个研究团队的概念研究情况进行了简介。在这 3 份概念研究结果基础上,1997 年, NASA 评估认为这一项目概念是可行的^[28],于当年成立“特设科学工作组”负责专门推进 NGST 项目,为 NGST 制定了一个 2.5 年的规划^[29],将其纳入 NASA 空间科学办公室的“天文起源搜索”(Astronomical Search for Origins, ASO)计划框架进行进一步支持^[30]。

3.3 NASA 组织开展“A 阶段”预研(1999—2001)

1998 年 8 月, NASA 戈达德太空飞行中心的研究团队领衔发布报告《NGST:在星系年轻时造访它们》^[31],首次提出了可实现的 NGST 尺寸设计方案。这一详细信息使 NASA 得以面向工业界发布提案征集公告。1999 年 7 月 7 日,经过提案征集遴选, NASA 选择 2 家公司——洛克西德·马丁公司、TRW 公司开展 NGST 的“A 阶段”任务研究^[28]。

3.3.1 洛克西德·马丁公司开展的 Phase A 研究

2000 年 7 月,洛克西德·马丁公司的研究人员在美国太平洋天文学会举办的“NGST 科学与技术博览会”上发表论文《洛克希德·马丁团队的 NGST 参考架构》^[32],指出当前该公司正在作为 NASA 的“A 阶段”研究合同主要承包商之一,并

对其最新设计的望远镜架构进行了介绍。该论文提出了比概念研究阶段更加详尽的望远镜架构设计方案,将单镜面主镜改为 24 个拼接式镜面,并认为该方案可以满足 NASA 要求的 7.5 亿美元总成本(1996 财年)的限制。

3.3.2 TRW 公司开展的 Phase A 研究

2000 年 7 月 28 日, TRW 公司的研究人员在 SPIE 举办的会议上发表论文《TRW/Ball 公司:下一代太空望远镜(NGST)》^[33]。该论文在介绍 TRW 团队设计的望远镜方案基础上,简要讨论了观测波段、轨道选择的科学意义和价值等。

3.4 NASA 组织开展“B 阶段”预研(2002—2008)

2002 年 9 月 11 日,根据两份“A 阶段”研究结果, NASA 正式选择 TRW 公司领导开展“B 阶段”(Phase B)研究,对 NGST 进行详细设计,并检验设计方案的性能、成本等。TRW 公司作为建造 NGST 的“主承包商”,当年获得了 NASA 价值 8.248 亿美元的合同^[34]。同年,NGST 被更名为“詹姆斯·韦布太空望远镜”。同年底, TRW 公司被诺斯罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumman)收购。

2003 年 6 月 6 日, NASA 授予 AURA 管理韦布望远镜科学与运行控制中心的合同,合同价值 1.622 亿美元。该合同用于准备韦布望远镜科学计划所需的产品和服务;开发地面系统;提供科学和工程支持;提供集成和测试支持;开展教育和公众宣传;在韦布望远镜发射和调试期间执行飞行和科学操作等^[35]。

表 3 “A 前阶段”3 个团队的研究报告名称及公开情况

Tab.3 Research Report Names and Information of the Three Teams in the Pre-A Phase

机构	年代	向 NASA 提交的报告名称	公开情况
TRW 公司	1996	The TRW-led NGST Study Team’s Design Concept	仅摘要 ^[25]
洛克西德·马丁公司	1996	Lockheed Martin NGST Final Study Report, LMMS / P086946	非公开 ^[26]
NASA 戈达德太空飞行中心	1996	总报告名称不详,分报告: Optical System Design for the Next Generation Space Telescope	分报告可下载全文 ^[27]

2006 年 1 月,韦布望远镜所有关键部件都达到了 6 级技术成熟度,意味着这些部件原型已经在热真空室中成功测试。2007 年 12 月 3 日,韦布望远镜成功完成光学元件设计评审,其光学望远镜元件的所有子系统均通过了初步设计审查。在评审中,项目团队还提出了韦布望远镜的最终组装和验证计划。2008 年 3 月,该项目成功完成了 Phase B 阶段最关键的 PDR,4 月通过了“非倡导者审查”(Non-Advocate Review, NAR)^[36]。

通过这些审查 NASA 得出的结论是韦布望远镜的设计已经达到了进入“C 阶段”(Phase C)所需的成熟度,可开始对望远镜部件进行详细的设计、采购、测试和组装。至此,韦布望远镜结束了预研阶段,正式进入了建造阶段^[37]。

4 总结与启示

本文以 NASA 关于空间项目管理的政策和规章制度文件为分析对象,对 NASA“太空飞行”领域项目的分类、生命周期和预研阶段管理过程进行了介绍。在此基础上,通过分析承担韦布望远镜预研任务的美国公司提交的合同报告、公开发表的论文资料等,综述了韦布望远镜的预研管理过程。根据上述分析,可得出启示如下。

1) 重大项目的组织需要发挥好“总体”角色,凝聚多方资源、提供长期稳定支持。

韦布望远镜的前身项目 NGST 自 1986 年前后就由天文学界发起,但直到 1995 年 NASA 选择 3 家机构分别独立开展可行性研究后,才获得实质性进展。其原因在于,美国天文学界不具备凝聚美国航空航天工业集团(包括负责制造韦布望远镜航天器的 TRW 公司等)的组织能力;也无法单独筹集研制韦布望远镜的巨额经费。此外,在韦布望远镜项目早期, NASA 最初是通过“先

立项、后要钱”的方式,利用其空间科学办公室的 ASO 计划框架对相关的概念研究进行支持资助,“孵化”和“培育”了韦布望远镜项目概念的逐步成熟,2003 年就向企业授予了制造合同。尽管在后续的制造阶段, NASA 因韦布望远镜预算超标而遭到国会反对,但因韦布望远镜的科学价值等已经得到广泛认可、美国国内企业和欧洲、加拿大已经就望远镜(包括航天器、镜面、关键科学载荷等)的研制取得了实质性进展,导致韦布望远镜项目尽管遭遇曲折也能够不断推进,最终实现了在 2021 年底的发射和运行。因此,我国在组织重大项目时,应加强对跨机构优势力量(如科研院所、高校、企业)的组织,通过前期投资“孵化”和“培育”部分必要技术,持之以恒地推进重大项目实施。

2) 重大项目的实施需要充分利用前期的科学、技术、管理人才基础。

从韦布望远镜的立项论证过程来看,发挥最重要和最关键作用的几个机构(包括天文学界、航天工业部门和 NASA)均是深度参与了哈勃望远镜的设计、制造、管理运行的机构。推动韦布望远镜立项的几位领军人物基本上都是参与哈勃望远镜项目的科学家、工程师、管理者。因此可以说,哈勃望远镜项目为美国培养了重要的太空望远镜科学、技术工程和管理人才,为韦布望远镜的成功打下了重要基础。不仅如此,在哈勃望远镜出现球面像差问题期间,美国国家科学院不再将下一代大口径太空望远镜作为优先推荐项目,导致韦布望远镜的立项论证被短暂搁置。由此能够看出,若哈勃望远镜项目失败,美国决策层也将难以下决心推动其“继任者”实施。因此,我国一方面需要大力做好新的重大项目组织和凝练,同时也需要深入总结分析过往的项目和工作,梳理好相关

的工作基础和优势领域方向。

3) 重大项目的推进需要进行分阶段管理,以降低不确定性和决策风险。

在处理新颖但投资高、技术不确定性强的重大项目时, NASA 的分阶段项目预研管理过程有利于在项目成熟度还不高的时候组织动员科学界和企业积极参与,通过多家单位同时独立开展预研,实现项目方案优中选优、不断成熟,在这一过程中不断降低项目决策风险和技术风险,最终实现项目成功。在不同阶段, NASA 设计的“竞标”团队数量也有所不同:1995 年在“A 前阶段”(Pre-Phase A)选择 3 家机构开展概念研究;1999 年在“A 阶段”(Phase A)选择 2 家公司开展原型设计研究;2002 年进入“B 阶段”(Phase B)才正式选择 1 家公司作为望远镜的“主承包商”,授予其 8.248 亿美元的设计制造合同。我国在组织实施我国重大科研项目时可参照 NASA 相关做法,通过先导专项等对攻坚任务进行预研。对于一些前沿探索的方向,可以开展多条路径实施,再根据进展情况,逐步明确路径选择。

致谢 本文撰写过程中得到了中国科学院科技基础能力局王小伟研究员的帮助,谨致谢忱!

参考文献

- [1] 邵婧婷.探索重大科技项目组织模式 (SHAO Jingting Exploring the Organizational Model of Major Science and Technology Projects) [EB/OL]. (2019-10-16) [2024-02-26]. http://sscp.cssn.cn/xkpd/gggl/201910/t20191016_5015238.html.
- [2] NASA. About Hubble [EB/OL]. (2020-10-13) [2024-02-25]. <https://science.nasa.gov/mission/hubble/overview/about-hubble/>.
- [3] NASA. Policy, Regulations, and Guidance [EB/OL]. (2024-01-29) [2024-02-25]. <https://www.nasa.gov/emd/policy-regulations-and-guidance/>.
- [4] NASA Policy Directive. NASA Engineering and Program / Project Management Policy [EB/OL]. (2017-06-26) [2024-01-02]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPD&c=7120&s=4C>.
- [5] NASA. NASA Space Flight Program and Project Management Requirements w / Change 3 [EB/OL]. (2021-08-03) [2024-01-02]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7120&s=5E>.
- [6] NASA. NASA Research and Technology Program and Project Management Requirements (Revalidated w / change 5) [EB/OL]. (2018-09-04) [2023-12-19]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7120&s=8>.
- [7] NASA. NASA Information Technology Program and Project Management Requirements [EB/OL] (2020-08-17) [2023-12-19]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7120&s=7>.
- [8] NASA. Facility Project Requirements (FPR) (Updated w / Change 1) [EB/OL]. (2022-09-27) [2023-12-19]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=8820&s=2G>.
- [9] NASA. Environmental Compliance and Restoration Program (Revalidated on April 5, 2016 with Change 1) [EB/OL]. (2021-07-18) [2023-12-19]. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=8590&s=1A>.
- [10] NASA. NASA Space Flight Program and Project Management Handbook [EB/OL]. (2022-05-01) [2023-12-19]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220009501>.
- [11] NEIN M E, WARNER J W. A Very Large Space Telescope for Optical / UV Astronomy [J]. SPIE Active Optical Devices and Applications, 1980, 228: 128-135.
- [12] PERKIN E. Final Study Report for Astronomical Interferometric System Technology Requirements (AISTR) Study [EB/OL]. (1986-06-01) [2023-12-18]. https://aspace.library.jhu.edu/repositories/3/archival_objects/55785.
- [13] BELY P Y, BOLTON J F, NEECK S P, et al. Space Ten-meter Telescope (STMT) Structural and Thermal

- Feasibility Study of the Primary Mirror [J]. SPIE Reflective Optics, 1987, 751: 29-36.
- [14] ANGEL J R P, CHENG A Y S, WOOLF N J. A Space Telescope for Infrared Spectroscopy of Earth-like Planets [J]. Nature, 1986, 322 (6077):341-343.
- [15] ILLINGWORTH G. NGST: The Early Days of JWST [J]. STScI Newsletter, 2016, 33(1): 6-10.
- [16] BELY P Y, CHRISTOPHER J B, GARTH D I. The Next Generation Space Telescope [C]. //Space Telescope Science Institute. The Next Generation Space Telescope Conference Proceedings: 1989. Baltimore, MD, United States: Space Telescope Science Institute, 1989: 1-381.
- [17] National Research Council. Space Science in the Twenty-First Century: Imperatives for the Decades 1995 to 2015 [EB/OL]. (1988-12-01) [2023-12-18]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK217830/>.
- [18] National Research Council. Working Papers: Astronomy and Astrophysics Panel Reports [EB/OL]. (1991-11-26) [2023-12-18]. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/1635/working-papers-astronomy-and-astrophysics-panel-reports>.
- [19] National Research Council. The Decade of Discovery in Astronomy and Astrophysics [EB/OL]. (1991-12-14) [2023-12-18]. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/1634/the-decade-of-discovery-in-astronomy-and-astrophysics>
- [20] NASA. Spitzer Space Telescope [EB/OL]. (2024-01-16) [2023-12-18]. <https://science.nasa.gov/mission/spitzer>.
- [21] CUTTS J, NEWTON G. Astrotech 21-a Technology Program for Future Astrophysics Missions [EB/OL]. (1991-5-1) [2023-12-18]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930017854>.
- [22] DRESSLER A, BROWN R A, DAVIDSEN A F, et al. Exploration and the Search for Origins: A Vision for Ultraviolet-Optical-Infrared Space Astronomy (No. NAS 1.15: 112149) [EB/OL]. (1996-05-15) [2023-12-18]. <https://www.stsci.edu/stsci/org/hst-and-beyond-report.pdf>.
- [23] BILLINGS L. The Telescope that Ate Astronomy [J]. Nature 2010, 467 (7319): 1028-30.
- [24] STOCKMAN H S, MATHER J C. The Next Generation Space Telescope [EB/OL]. (2001-01-30) [2023-12-18]. <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/4D643F4BE62976970A4FEBE075190A45/S0074180900226429a.pdf/div-class-title-the-next-generation-space-telescope-div.pdf>.
- [25] LILLIE C. The TRW-led NGST Study Team's Design Concept [EB/OL]. (1996-01-14) [2023-12-18]. <https://aasarchives.blob.core.windows.net/archives/BAAS/v28n4/aas189/abs/S060003.html>.
- [26] STOCKMAN H S. Next Generation Space Telescope-Visiting a Time When Galaxies Were Young [EB/OL]. (1997-06-01) [2023-12-18]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220008138>.
- [27] SOLOMON L H, MARK A K. Optical System Design for the Next Generation Space Telescope. Contractor Report No. NASA-CR-203490 [EB/OL]. (1996-10-17) [2023-12-18]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970011339>.
- [28] Space Telescope Science Institute. The Early History of JWST [EB/OL]. (2022-12-20) [2023-12-18]. <https://www.stsci.edu/jwst/about-jwst/history>.
- [29] STOCKMAN P, MATHER J. Science with NGST: The Origins Initiatives and a Broad IR Program [J]. American Astronomical Society Meeting Abstracts, 1997, 91(1): 54-03.
- [30] FIGER D F, RAUSCHER B J, REGAN M W, et al. Independent Detector Testing Laboratory and the NGST Detector Characterization Project [J]. SPIE IR Space Telescopes and Instruments, 2003, 4850: 981-1000.
- [31] SEERY B D, SMITH E H. NASA's Next-Generation Space Telescope-Visiting a Time When Galaxies were Young [J]. Space Telescopes and Instruments, 1998, 3356: 2-13.

- [32] MARTIN F, LESYNA L, LEROY R J, et al. Lockheed Martin Team's Next Generation Space Telescope (NGST) Reference Architecture [EB/OL]. (2000-07-28) [2023-12-18]. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2000ASPC..207...46M>.
- [33] CROCKER J H, ATKINSON C B, EBBETS D C, et al. TRW/ball: Next Generation Space Telescope (NGST) [EB/OL]. (2000-07-28) [2023-12-18]. <https://www.spiedigitallibrary.org/proceedings/Download?urlId=10.1117%2F12.394044>
- [34] TRW. TRW Selected as Prime Contractor to Build NASA's James Webb Space Telescope [EB/OL]. (2002-09-11) [2023-12-16]. <https://www.defense-aerospace.com/trw-prime-contractor-for-nasa-telescope-sept-11/>.
- [35] NASA Hubble Mission Team. NASA - Webb Spacecraft Science & Operations Center Contract Awarded [EB/OL]. (2003-06-05) [2023-12-16]. <https://science.nasa.gov/missions/hubble/nasa-webb-spacecraft-science-and-operations-center-contract-awarded>.
- [36] MARK C. Status of the James Webb Space Telescope (JWST) [EB/OL]. (2012-09-21) [2023-12-16]. <https://www.spiedigitallibrary.org/proceedings/Download?urlId=10.1117%2F12.926429>
- [37] Space Telescope Science Institute. Mission Timeline-Webb Project History [EB/OL]. (2022-07-12) [2023-12-16]. <https://webbtelescope.org/news/milestones/mission-timeline>.

作者贡献说明

郭世杰:撰写文章初稿,设计文章框架,修改完善论文;

李泽霞:对文章思路、框架、初稿、启示建议提出修改意见;

魏 韧:收集、整理资料;

董 璐:收集、整理资料。