

行星保护标准体系研究

刘继忠^{1,2}, 陈 杨^{1,3}, 王 丰¹, 李 洋¹, 徐 航¹, 程 旋¹, 徐孟娇¹

(1. 深空探测实验室, 安徽 合肥 230000; 2. 国家航天局 探月与航天工程中心, 北京 100190;

3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 我国行星探测工程火星取样返回任务属于国际行星保护政策中的 V 类限制性返回任务。需开展严格的行星保护工作, 避免地球和火星之间出现交叉生物污染, 并进而推动取得重大科学发现。依据天问三号任务行星保护设计规范, 结合工程任务特点, 利用系统工程方法论, 进行行星保护工作标准化研究和需求分析, 开展行星保护标准体系顶层设计, 从纵向和横向两个维度构建了天问三号任务行星保护标准体系框架, 制定了天问三号任务行星保护标准规范明细表, 支撑了天问三号任务行星保护标准规范体系化建设。该研究成果和经验对提升我国深空探测行星保护工作的标准化水平具有重要借鉴和实践意义。

关键词: 标准化; 标准体系; 行星保护; 火星取样返回任务; 深空探测

中图分类号: V11

文献标志码: A

Planetary Protection Standards System

LIU Jizhong^{1,2}, CHEN Yang^{1,3}, WANG Feng¹, LI Yang¹, XU Hang¹, CHENG Xuan¹, XU Mengjiao¹

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230000, China; 2. Moon and Aerospace Engineering Center, China National Space Administration, Beijing 100190, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The Mars sample return mission of China will be the Category V “Restricted Earth return” mission, requiring stringent planetary protection measures to prevent cross-contamination between Earth and Mars and to facilitate groundbreaking scientific discoveries. Based on the planetary protection design specification of the TW-3 mission and considering unique characteristics of the mission, this paper introduces systems engineering methodologies to conduct research and requirement analysis of the standardization of planetary protection for

the mission. The top-level design of the planetary protection standards system has been carried out, and a framework for the planetary protection standards system of the mission is constructed from both vertical and horizontal dimensions. Additionally, a detailed list of planetary protection standards is formulated. The work supported the systematic construction of the standardization of planetary protection for the mission. The achievements and experience presented in this paper have significant both referential and practical value for enhancing the standardization level of planetary protection for deep space exploration in China.

Keywords: standardization; standards system; planetary protection; mars sample return mission; deep space exploration

火星作为与地球环境最相似的类地行星, 曾拥有湖泊和海洋、活跃的磁场和更浓厚的二氧化碳大气层, 具有间歇性温暖潮湿的宜居环境, 且与地球上生命首次形成的时间相近, 这些特征使得火星被认为是最有可能存在过生命的地外天体。同时, 考虑到地球上类火星极端环境存在生命体, 而美国好奇号火星探测器在火星盖尔撞击坑检测到有机物表明火星极端环境下有机物仍可能长期存在^[1]。国际空间研究委员会(COSPAR)依据外空条约和火星现状, 将火星取样返回样品列为“限制性地球返回”任务, 有严格行星保护要求。

标准体系建设贯穿于中国太空探索任务的全过程, 从探测器的设计制造到在轨运行, 从科学数据的处理应用、样品的分发分析到国际合作交流, 都发挥了重要支撑作用^[2]。标准体系的建立和完善, 提高了

收稿日期: 2024-07-09

第一作者: 刘继忠, 工学博士, 研究员, 主要从事深空探测技术、航天运载技术、航天控制技术、航天重大工程组织管理等方面研究。E-mail: liujzh@buaa.edu.cn

通信作者: 陈 杨, 高级工程师, 主要研究方向航天系统工程、数字化与智能化技术、行星保护标准化。

E-mail: dsel_chenyang@163.com



论文
拓展
介绍

任务的可靠性、安全性和经济性,规范了任务的实施流程,促进了科学数据和样品的共享应用,推动了国际合作的深入开展。可以说,标准体系建设是保障中国太空探索任务顺利进行、取得成功的重要基础。

我国行星探测工程火星取样返回任务属于 V 类限制性返回任务,需采取行星保护措施,避免人类产品对火星产生污染,同时避免返回样品和地球环境之间的交叉污染。为有效支撑工程任务行星保护工作,需进行行星保护标准化研究,构建和设计适应本次任务特点的标准体系来支撑任务行星保护工作的开展和效果评估,推动取得重大科学发现。

1 行星保护、标准化和技术研究情况

1.1 行星保护发展与重要意义

行星保护(Planetary protection)是指人类太空活动需避免地球与目标天体之间的交叉生物污染,其中避免地球上的生命体污染地外天体,确保不对科学探测带来干扰和误导的行为称为前向污染保护;避免外太空的生命及相关物质危及地球生物圈的行

为称为返向污染保护^[3]。

1967 年,《关于各国探索和利用包括月球和其他天体在内外层空间活动的原则条约》(《外层空间条约》)签署生效,为行星保护提供了法理依据^[4],其中第 9 条款规定了“各缔约国从事研究、探索外层空间(包括月球和其他天体)时,应避免使其遭受有害的污染,以及地球以外的物质使地球环境发生不利变化。如必要,各缔约国应为此目的采取适当的措施”。该条约自 1983 年 12 月 30 日起对中国生效。

COSPAR 受联合国委托,负责制定和颁布行星保护政策,作为各国航天机构制定本国和地区行星保护政策和规范的依据。中国于 1993 年 3 月正式加入该组织。自外太空条约签署以来,行星保护成为一项不可回避的国际责任和义务,美国和欧洲等先进航天国家和地区已开展行星保护研究多年,并在开展的空间探测活动中组织实施。我国作为外太空条约缔约国和 COSPAR 成员国,对太空探测活动采取必要的行星保护措施,是履行条约和政策规定的义务,也是保护人类共同家园和树立负责任大国形象的重要体现。

表 1 行星保护任务类别划分

Tab.1 Planetary protection categories in COSPAR planetary protection policy

类别	定义	任务形式	目标天体
I	对目标星球探索的直接目标不是了解生命的起源或化学演化的过程,对以这些星球为目标星球的轨道飞行器或着陆器,不需要实施行星保护要求。	飞越、环绕、着陆	木卫一、未分化的小行星
II	对星球探索的目标是为了了解生命的起源或化学演化的过程,但由航天器造成的污染机会非常小,不会对未来的探索计划造成危害。	飞越、环绕、着陆	彗星、月球、金星、木星、土星、天王星、海王星及其卫星(木卫二、土卫二除外),冥王星及其卫星和柯伊伯带天体
III	明确任务目标是对目标星球的生命起源或化学演化的过程进行探索,或者科学家认为航天器会造成污染的机会较大,从而危害未来生物学实验。	飞越、环绕	火星、木卫二、土卫二
IV	明确任务目的是对目标星球的生命起源或化学演化的过程进行探索,或者科学家认为航天器会造成污染的机会较大,从而危害未来生物学实验。	着陆	火星、木卫二、土卫二
V	所有执行返回任务的航天器。	采样返回地球	非限制返回:月球、彗星等其他非限制返回天体; 限制返回:火星、木卫二土卫二、其他待定天体

1.2 行星保护任务分类与要求

在 COSPAR 最新国际行星保护政策^[5]中,将无人深空探测任务的行星保护分为 5 类(见表 1),其中对于 IV 类火星探测任务,按照任务目标中是否包含生命探测,以及探测区域是否涉及“火星特殊区域”,还特别划分了 IVa、IVb 和 IVc 等 3 个子类:

(1)IVa:着陆系统没有携带探测火星生命存在的仪器。任务形式为着陆、探测。

(2)IVb:着陆系统设计用来探测火星生命存在。任务形式为着陆、探测。

(3)IVc:任务探测火星特殊区域,即使不包含生

命探测设备。火星特殊区域包括那些微生物可能繁殖复制的地区以及存在火星生命可能的地带。任务形式为着陆、探测。

不同类别任务对于行星保护措施要求不同,见表 2,分化的小行星经历了加热和融化等过程,导致重元素和轻元素分离,进而导致小行星内部形成不同的层^[6]。未分化的小行星未经历过该过程,在组成上更加均匀。

可看到,对于火星无人探测任务,其采样返回任务明确为 V 类限制性返回,需开展一系列复杂严格的前向和返回保护措施,而通过建设行星保护标准化能力能够为具体落实对应措施提供指导和依据。

表 2 不同等级行星保护分类对应措施要求		
Tab.2 Requirements for 5categories in COSPAR planetary protection policy		
等级	重点关注	典型保护措施
I	不关注	无
II	记录受控撞击概率和污染控制措施	简要记录:行星保护计划、发射前报告、发射后报告、与天体相遇后的报告、任务终止后报告。
III	限定撞击概率和被污染微生物*控制	详细记录(在II类任务措施基础上增加):污染控制、含有机物的设备。 任务实施过程:轨迹偏转、洁净间、微生物负荷减缓。
IV	限定非正常撞击概率,限定微生物负荷(主动控制)	详细记录(在II类任务措施基础上增加):污染概率分析计划、微生物减缓计划、微生物评估计划、含有机物的设备。 任务实施过程:轨迹偏转、洁净间、微生物负荷减缓、部分接触硬件净化、生物防护罩、微生物负荷监测。
V	对限制返回:不得撞击地球或月球,净化返回硬件,不得污染样品	目标天体保护:取决于目标天体和任务形式,同上。 返回保护: (1)限制返回: ①详细记录(在II类任务措施基础上增加):污染概率分析计划、微生物减缓计划、微生物评估计划。②任务实施过程:轨迹偏转、净化或密封返回地球的硬件、持续监测项目进展、相关研究活动。 (2)非限制返回:无。

注: *微生物负荷指在行星保护活动中,被测试的单位材料、产品或航天器上承载芽孢总数。

1.3 行星保护标准化发展情况

COSPAR 开展相关研究,制定的《行星保护政策》作为目前各国开展行星保护的首要规范性文件^[7-9],针对火星^[10]、木卫二^[11]、土卫二^[12]探测任务也积极开展研讨以针对性更新政策。美欧等国都宣称将在规划和执行太空任务时遵循COSPAR行星保护政策和相应的实施指南。同时,国内外都在积极推动行星保护标准化的研究和建设,国外主要以美国国家航空航天局(NASA)、欧洲航天局(ESA)和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)为主要代表。

(1)国外主要航天机构标准化情况^[13-17]

如图 1a 所示 NASA 设立行星保护办公室和行星保护官,专门负责行星保护规范制定。同时如图 1b 构建了行星保护标准文件体系,由一系列指令、流程规范、技术标准、操作手册等文件构成,为美探测任务行星保护工作的管理和开展提供了支撑。

如图 1c 所示,ESA 建立了行星保护管理层级,其行星保护标准规范由下设的行星保护办公室负责,同时该办公室监督各项任务研制过程中行星保护执行情况。欧洲行星保护标准规范体系如图 1d 所示,

由行星保护工作组(PPWG)主导建立,组员包括来自 ESA、各成员国以及国际行星保护专家,有效支撑了 ESA 深空探测任务的开展。

如图 1e 所示 JAXA 建立了行星保护标准化工作机制,如设立行星保护标准化工作组、研究组和行星保护审查委员会等实现行星保护标准化研究和标准制定的协同,其标准规范文件体系如图 1f 所示,支撑了其探测任务行星保护工作的开展。

可看到,国外主要航天机构十分重视行星保护标准化工作,且着力构建标准体系以强化引领和管理标准化能力。标准体系主要从管理和技术两个方面进行建设,而各机构按照自身实际建设相关内容。

(2)我国行星保护标准化工作情况^[18-19]

基于国家行星保护研究项目的支持,为提升我国深空探测领域行星保护技术管理水平打下了良好的基础。另外,我国在太空活动中采纳COSPAR量化的行星保护标准^[20];在探月系列和天问一号任务中积极开展前向行星保护工作,积累了扎实工程经验。随着我国深空探测事业的深入,特别是推进实施火星取样返回任务,亟需建立符合我国国情和国际要求的行星保护标准规范体系,以满足任务需求。

因此,行星保护标准化的首要问题应立足于工程任务,综合考虑任务特点、实际需要以及我国未来行星探测需求开展顶层设计,并结合行星保护技术研究成果,建设行星保护标准体系。

1.4 行星保护技术研究情况

行星保护通过定性定量的技术手段支撑行星保护措施地开展,保障行星保护标准规范的科学性、规范性和权威性。行星保护技术的不断创新和发展,使得行星保护标准规范得到持续完善,提升了标准化水平。

1.4.1 国外行星保护技术研究情况^[21-37]

(1)洁净环境控制技术

NASA 与 ESA 针对 AIT 和发射场对行星保护关键单机/分系统的高等级洁净环境控制要求,采用相关技术维持高等级洁净度。通常选用 70% 异丙醇溶液作为标准的清洁剂按指定频率进行清洁。采用监测技术和报警阈值设置,对温度湿度气压等环境参数进行监测。ESA 还研制专用可移动式洁净环境,建立局部高洁净环境。

(2)微生物控制和清洁技术

对飞行器进行微生物污染防控和清洁灭菌,以杀灭和控制表面芽孢数量。NASA 针对本技术开展了长期的研究和实践。目前,该类技术主要有干热消毒、气相过氧化氢、电离辐射、低温等离子体、臭氧灭菌、物理

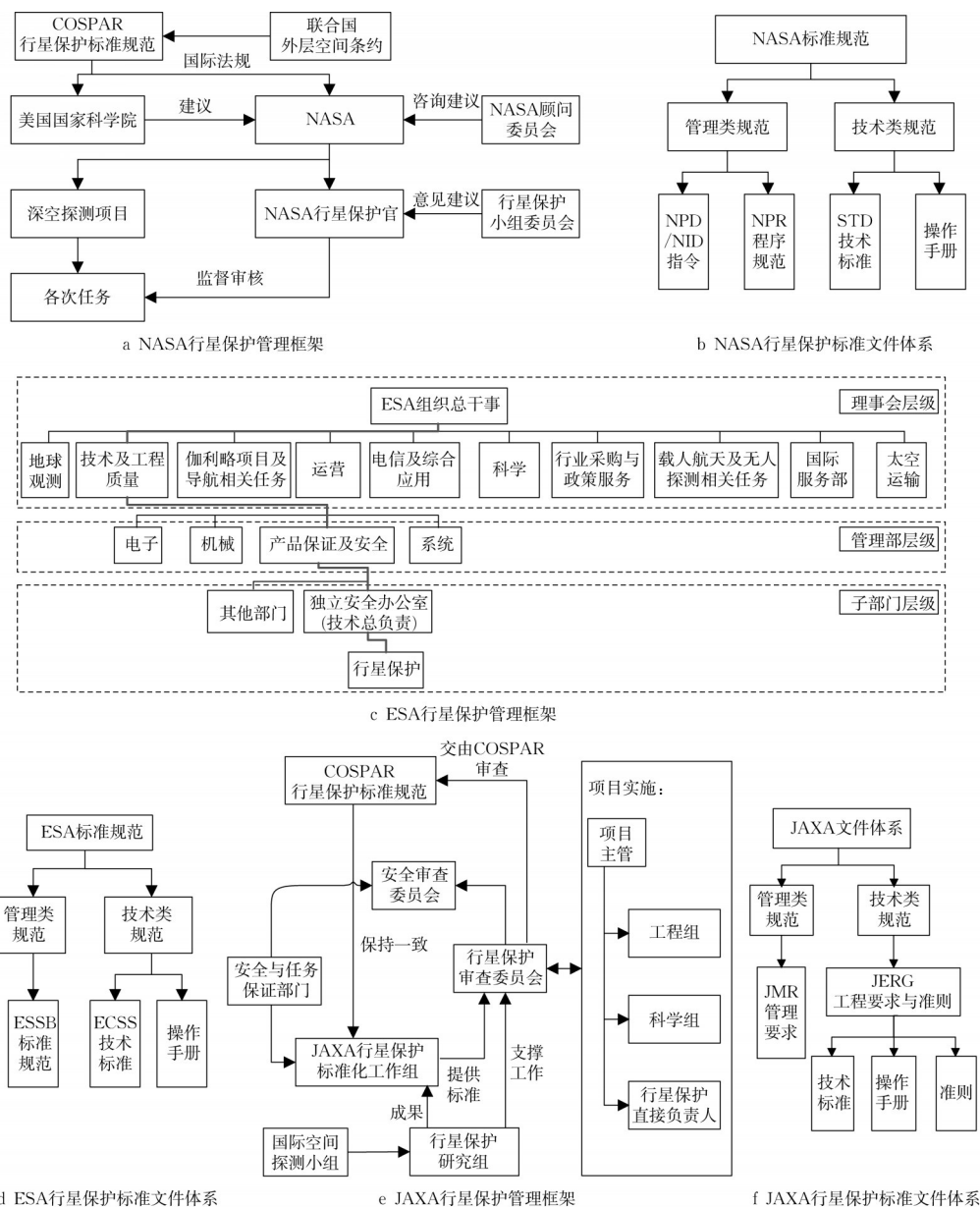


Fig.1 Framework of planetary protection management and standards system at NASA, ESA and JAXA

擦拭清洁、环氧乙烷等。

(3)二次污染防控技术

本技术用于避免飞行器硬件或设备在处理后再受到微生物等污染物的污染。二次污染需要覆盖任务全过程,并针对不同情况具体进行不同技术处理。NASA 采取了多种防护技术和手段:针对存储和运输过程,采用如 Tyvek 膜等特殊材质对目标器件进行多层包装,并使用充填洁净氮气的高洁净度运输箱运输;使用测试件或洁净气流吹扫等避免污染;针对有机污染,使用特殊涂层、吸附材料等技术进行防控;进行洁净环境维持和异丙醇擦拭等开展发射场阶段的防护;采用特殊材质或物理原理制造防护罩进行生物屏蔽,实现整器或

组件的污染物隔离。

(4)微生物总量评估技术

利用技术手段开展微生物总量的检测和评估。目前NASA和ESA开发了多种微生物检测和鉴定技术,如热激培养法、ATP生物荧光法、实时定量技术PCR(qPCR)、高通量测序和宏基因组学方法等,对探测器部件和太空飞行器中的微生物进行检测和分类。

(5) 返回样品保护技术

采用密封和隔离技术手段确保返回样品不受外部污染和不对地球环境发生污染扩散。NASA 研制了一整套高度密封和防污染的样品容器系统,计划使用多层隔离、机械臂操作技术、生物封装技术和高效过滤技

术等进行防护,并采用在轨钎焊方法“切断与火星的接触链”。同时,研究建设专门的火星样品接收设施(SRF)进行样品的隔离防护和生物安全评估。

1.4.2 我国行星保护技术研究情况^[18-20]

随着深空探测事业的推进,我国行星保护技术的研究进入了崭新阶段。通过国家在行星保护相关项目的支持,我国在行星保护特定微生物检测消杀技术以及二次污染防治技术等技术上取得了一大批成果,为我国的深空探测领域行星保护技术的深入研究提供了支撑作用。

2 火星取样返回任务行星保护标准体系建设需求分析

2.1 任务概况与行星保护要求

我国计划于2030前后发射天问三号探测器,在火星表面开展采样与科学探测,并携带火星土壤和岩石样品返回地球,开展科学研究获得原创性科学发现。本次任务为V类限制性返回任务,其中前向行星保护类别为IVb类,需依据行星保护要求,对着陆探测器、取样机械臂、样品密封罐等接触火星环境和样品的硬件采取严格的清洁消杀、微生物监测和总量评估、污染控制、火箭撞击火星规避等前向保护措施;返向行星保护类别为V类,需对返回地球的探测器硬件和火星样品采取返回地球期间的隔离密封、火星接触链阻断设计、样品返回地球后的双向隔离处理和生物安全评估等返向保护措施,特别是建设类似于高等级生物安全实验室的行星保护实验室,以支撑返回样品的解封存储、双向隔离防护、生物安全评估等一系列安全处置和分析。

为支撑任务实施,切实落实行星保护措施,天问三号任务工程总体制定发布了行星保护设计规范,从总体上规范了本次任务的行星保护要求。同时,任务设立了行星保护系统,将行星保护标准体系建设与顶层标准规范文件制定做为该系统重要的建设内容,以指导任务各系统行星保护措施的落实,支撑工程总体开展行星保护效果评估。

2.2 行星保护标准体系建设需求分析

基于国内外行星保护标准化调研情况和天问三号任务行星保护要求,从综合管理、产品保护和样品保护三个方面开展标准体系需求分析:

(1)综合管理

需重点规范行星保护工作涉及的组织架构、文件规范、产品保证等内容,涵盖行星保护产品保护和

样品保护均需实施的标准规范。

(2)产品保护

需重点规范微生物检测、微生物消减、洁净环境和洁净操作等内容,涵盖探测器、运载火箭等产品的微生物污染防治的方法、流程、操作和评价标准等,主要涉及探测器系统、运载火箭系统、发射场和着陆场系统。

(3)样品保护

需重点规范取样返回后火星样品的隔离防护、样品生物安全评估、样品存储分发等内容,应涵盖返回器密封性要求、样品接收解封流程、样品存储分发以及生物安全评估等核心流程、方式、操作和评价标准等,主要涉及探测器系统、着陆场系统和行星保护系统。

标准体系应覆盖论证与方案设计阶段、初样阶段、正样阶段、发射阶段、在轨运行阶段、末期处置阶段等不同阶段的行星保护工作;应呈现出一定的纵向层次分级,并在横向分布上满足维度要求,以明确不同层级不同维度的标准规范能够被科学合理的归类和索引。

3 火星取样返回任务行星保护标准体系构建与体系设计

为将松散的需求内容和多方面约束转换为统一和层次清晰的标准体系,通过明确构建原则和思路,并结合系统工程的分析方法,逐步分析明确标准体系的结构和内容,完成标准体系的构建和设计。

3.1 行星保护标准体系构建原则与思路

3.1.1 构建原则

(1)针对性与系统性相统一

针对任务实施需求,同时系统性考虑行星探测工程任务未来发展需要,构建内部协调、相互支撑的标准框架,确保标准体系的可操作性和实用性,并预留足够的空间。

(2)继承性与创新性相结合

充分吸收和借鉴我国现有航天标准体系和月球与深空探测体系的有益经验和成果,针对任务需要进行创新和完善,形成与相关标准体系相衔接的标准框架,确保标准的延续性和适用性。

(3)规范性与灵活性相统一

标准体系与天问三号任务行星保护设计规范、COSPAR等顶层行星保护要求保持一致,同时保留一定的灵活性,以适应行星保护工作的发展变化。

3.1.2 构建思路与分析方法

针对天问三号工程任务实际需要,结合系统工程理论,利用改进的切克兰德法^[38-40]和霍尔三维结构法^[41]即“软”和“硬”的系统分析方法论相结合^[42-43]的思路进行标准体系构建分析:首先基于改进的切克兰德法对行星保护标准化内容进行比较学习以分析内容包络;其次,基于内容包络和霍尔三维结构,针对工程任务标准体系构建需求和约束进一步进行优化分析。

基于改进的切克兰德法(见图2)分析标准体系建设内容包括:

(1) 认识问题:收集国内外行星保护标准体系相关信息,阅读相关标准规范文件内容。分析工程任务情况,寻找行星保护标准体系影响因素与结构组成,明确标准体系国内外现状和天问三号任务标准化建设面临的问题。

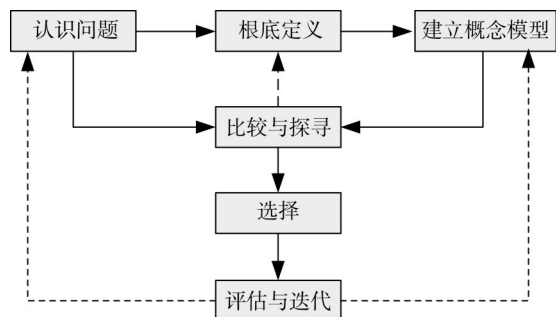


图2 改进的切克兰德分析法

Fig.2 Improved Chekland analysis methodology

(2) 根底定义:梳理天问三号任务标准体系内部关联因素和要素,分解天问三号任务行星保护要求,调研工程总体、探测器系统等行星保护需求和基本观点,筛选和归并相关初步需求。

(3) 建立概念模型:如图3所示,按照工程任务行星保护综合管理、产品保护和样品保护3条主线与文件管理、组织管理、产品保证、微生物检测、微生物消减、产品保护常规、样品隔离防护和样品生物安全评估8方面主要内容,依据根底定义的输出,建立标准体系系统化模型描述。按照行星保护标准化需求从整体到局部的方式梳理主线和主内容之间的层次结构。

(4) 比较与探寻:将标准体系概念模型和天问三号任务行星保护要求、梳理的标准化问题进行对比,评估适用性和完整性并找出差异,根据结果对根底定义过程进行修正。

(5) 选择:针对对比结果,从天问三号任务要求出发,从对比结果中选择必要的标准规范,明确初步需求项。

(6) 评估与迭代:组织评估,评审初步需求项的合理性,进行迭代完善。

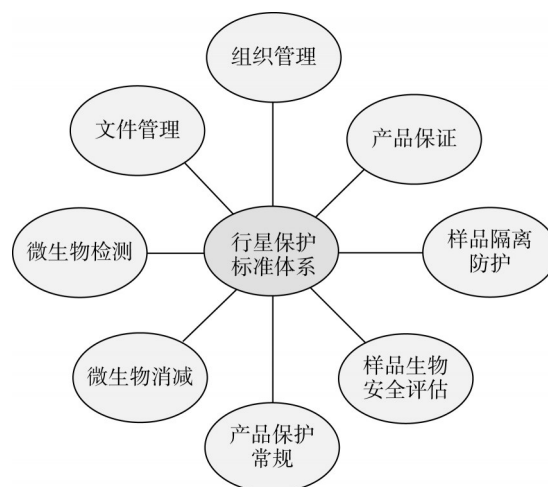


图3 行星保护标准体系建设概念模型

Fig.3 Conceptual model of planetary protection standards system construction

基于本方法的分析,明确了国内外标准体系构成和现状,并针对天问三号任务行星保护要求对比和系统间需求收集,形成初行星保护标准规范需求项。

基于霍尔三维结构分析(见图4)标准体系构建内容

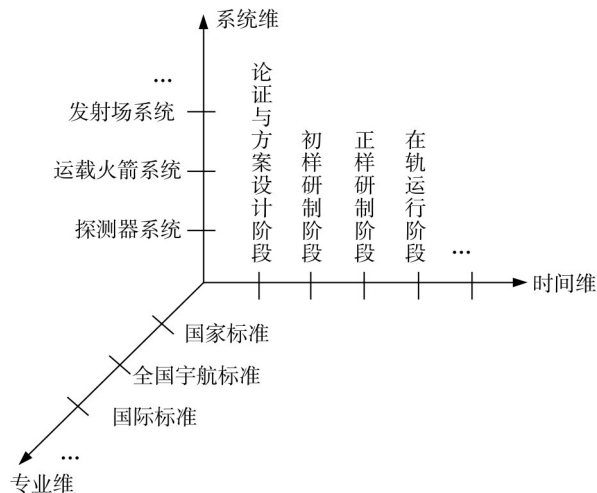


图4 霍尔三维分析结构

Fig.4 Hall three-dimensional analysis structure

(1) 系统维度。按照探测器系统、运载火箭系统、发射场系统、着陆场系统、地面应用系统和行星保护系统对行星保护标准规范需求进行梳理。

(2) 时间维度。按照任务的论证和方案设计阶段、初样阶段、正样阶段、发射实施阶段、在轨运行阶段和末期处置阶段,对行星保护的标准规范需求进行梳理。

(3) 专业维度。按照国家标准、全国宇航标准、国际标准梳理满足任务行星保护要求标准规范需求。同时从任务工程管理、状态管理、文件管理等专业性维度进行需求梳理。

基于初步需求项,从系统维、时间维和专业维度分析标准规范的必要性和优先级,进行进一步优化梳理,以获取标准规范目标需求项。同时按照从通用到专业、从聚合到分解、从概括到详细的树形方式,构建面向天问三号任务的行星保护标准体系结构。

3.2 行星保护标准体系框架结构

根据GB/T 13016有关标准体系层次结构要求,基于天问三号任务行星保护标准体系构建内容研究,设计了标准体系框架结构(见图5),包括3个纵向层级和8个横向标准子系统,并进行编码标记设计和处理。

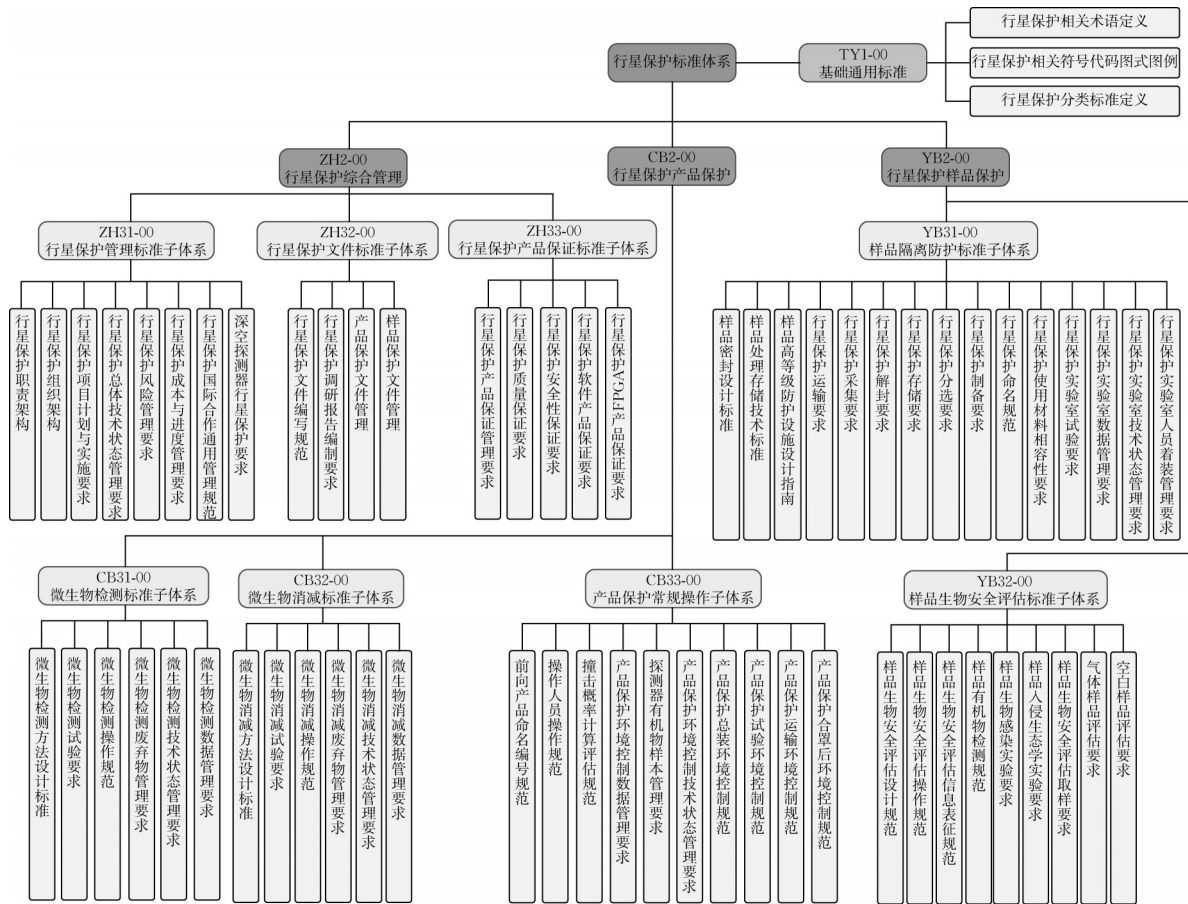


图5 行星保护标准体系框架

Fig.5 Framework of planetary protection standards system

3.2.1 纵向层级划分与设计

将天问三号任务行星保护标准体系划分为基础通用、行业通用和专业通用3个层级,以明确标准体系的层次,支撑体系的聚合和分解。

(1)基础通用层。从天问三号任务行星保护工程总体要求出发,将行星保护整体范围内具有普遍指导意义的、统领行星保护各相关工作要素的标准设计为整个标准体系的第一层,设置为通用标准,如行星保护名称术语、行星保护分类、符号代码图式图例等。

(2)行业通用层。将天问三号任务行星保护包含的三大标准领域划分为行业通用层,立足于工程任务在对应领域范围内实现标准间共性因素的统一协调,包含行星保护综合管理、行星保护产品保护和行星保护样品保护三个独立板块。

(3)专业通用层。将标准子体系等专业通用的标准集合设为第三层。专业通用层是整个标准体系的关键一层,包含专业门类范围内普遍适用的标准,起到“遵上统下”的作用,该层级各专业间标准的范围和界线应明确以避免交叉。

3.2.2 横向标准子体系划分与设计

基于构建研究和分析方法得出的结果,将天问三号任务标准领域在专业通用层从横向上划分为8个标准子系统,实现对细化领域的门类设置和归集。

(1)行星保护管理标准子体系。鉴于任务执行周期长、涉及专业广、与国际合作有交集等特点,在借鉴国外主要航天机构行星保护管理模式基础上,设立本子体系。包括职责架构、组织架构、风险管理要求等一系列内容。

(2)行星保护文件标准子体系。本子体系设立首先为确保任务行星保护类文件规范的一致性,提高工作效率和整体可靠性。其次,确保文件被有序地分类和存储,便于查找和检索。再者,促进项目成员之间的协作,便于项目的交接和继承,降低项目的管理成本。

(3)行星保护产品保证标准子体系。本子体系对行星保护工作涉及到的产品进行进度和质量管控,具体工作包括产品保证管理、质量保证、可靠性保证等。

(4)微生物检测标准子体系。归集专业性标准规范支撑检测监测探测器等产品所处环境中微生物的状态,防止地球微生物造成目标探测天体的污染,避免出现地外生命探测“假阳性”事件。

(5)微生物消减标准子体系。归集专业性标准规范支撑针对探测器等产品进行微生物的消减、控制、洁净处理。

(6)产品保护常规操作子体系。对操作过程和环境监测数据记录进行规范化,在产品总装集成测试等环节约束操作人员的行为规范和洁净环境实施控制,

以减少探测器二次污染概率。同时包括探测器中轨返组合体、运载火箭中末级在规定时间内撞击火星的概率计算,以及产品所使用到有机物样本收集整理等相关标准规范。

(7)样品隔离防护标准子体系。规范并实现地球环境和火星样品之间的双向隔离防护。在避免样品外泄的基础上,防止样品受到地球物质污染,保证样品的安全性、原始性、有效性。标准文件设置涵盖样品返回地球后的全部处理流程。

(8)样品生物安全评估标准子体系。对样品中潜在火星生物风险进行综合评判过程进行标准化处理,支撑评估样品生物安全性。目前,国内外对地外生物安全评估的指导性原则和标准尚处于起步阶段,因此本子体系的建设同时可以填补国际该领域的标准空白。

3.3 行星保护标准体系明细表设计

如表3所示,明细表作为标准框架的具体补充和元数据,明确了每一项标准规范的命名、拟定级别、代号、状态、建议制定或修订时间等重要信息,以便于索引、状态跟踪和修订。

表3 行星保护标准体系明细表示例

Tab.3 Example of detailed list of planetary protection standards system

序号	标准名称	拟定级别	标准代号	现行状态	建议制定/ 修订时间	备注
1	行星保护职责架构	ZH/T ^①		待制定	A ^②	适用于行星保护工作开展的职责架构
2	行星保护组织架构	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作开展的组织架构
3	行星保护项目计划与实施要求	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作的项目计划与实施要求
4	行星保护总体技术状态管理要求	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作的总体技术状态管理要求
5	行星保护风险管理要求	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作的风险管理要求
6	行星保护成本与进度管理要求	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作的成本与进度管理要求
7	行星保护国际合作通用管理规范	ZH/T		待制定	A	适用于行星保护工作中国际合作的通用管理规范
8	深空探测器行星保护要求	GB/T	20221182 —T—469	待发布		TC425 全国宇航技术及其应用标准化技术委员会

注:①ZH/T指任务级综合管理板块推荐标准;②A指未来3年内能完成制修订的标准。

目前,天问三号任务行星保护标准体系明细表共包含66项标准规范,其中65项为基于本次任务新增,新增项占比98.5%。从基础通用层看,共3项,占比约4.5%,全部为新增项。从行业通用层板块看,综合管理板块17项,占比25.8%,收录1项,其余为新增项;产品保护22项,占比33.3%,全部为新增项;样品保护24项,占比36.4%,全部为新增项。从制定或修订时间安排看,有52项为3年内计划制定完毕,占比78.8%;剩余为3年内计划启动制定,全部为样品保护类标准规范项。

4 思考与展望

4.1 现有成果思考

天问三号任务充分继承我国月球与深空探测有益

经验,扎实推进行星保护技术研究,有序开展各项任务行星保护工作,稳步构建行星保护标准规范体系。由于火星可能存在过生命,我国天问三号任务实施火星取样返回后的工程意义、技术意义和科学意义十分重要。因此,标准规范体系还应针对任务工程目标、技术目标和科学目标做更多的思考与论证,进一步补充完善标准规范体系内容。另一方面,行星保护是一项复杂的系统工程^[3],涉及的关键环节多且专业程度高。在具体制定标准规范文件时,也会遇到新问题。因此,需开展行星保护相关研究和基于任务实施过程的实践,及时修订完善标准体系,使之具备科学合理的行星保护标准化建设指导能力。

4.2 未来建设展望

首先要面向工程任务实施,持续开展行星保护标

准化研究。随着任务深入开展,各系统在落实行星保护工作的同时,会出现各种各样新的标准规范需求,需要在行星保护管理和标准化两个层次上建立工作机制,不断完善标准体系,及时制定发布标准规范,满足各系统的实际需求;其次,未来需要持续跟踪国际上行星保护领域的最新研究进展,深化我国行星保护技术研究,促进产出先进丰富的成果引领行星保护技术发展方向,为我国培养一大批行星保护专业技术人才,并不断丰富标准体系的范围和支撑标准的制定。同时,充分吸收任务各系统在任务实施过程中有益的经验总结,不断充实完善标准体系;最后,需要紧跟标准规范明细的制定计划,推进标准规范文件的制定和落地。

5 结语

行星保护标准体系建设对于确保我国行星探测工程火星取样返回任务圆满成功、实现科学重大发现具有重要的支撑作用。面向工程任务顺利实施,需要以更开阔的视野、更前瞻的思路,持续开展行星保护技术研究,不断完善行星保护标准体系的整体架构,注重标准体系的系统性、先进性和适用性,为未来更为复杂、更具挑战的深空探测任务奠定坚实基础。进一步将立足任务,借鉴国际经验,积极开展国际交流合作,加快中国行星保护标准体系的国际化步伐,为人类和平利用太空、推进文明进步贡献中国智慧和方案。

作者贡献声明:

刘继忠:任务总师,研究思路指导,论文审阅,论文撰写与修改;
陈 杨:研究方案实施,论文框架构建,论文撰写与修改;
王 丰:资料收集与处理,图表绘制,论文撰写与修改;
李 洋:技术指导,论文审阅;
徐 航:技术研究,论文绘图;
程 旋:学术指导,论文审阅;
徐孟娇:学术指导,论文审阅与指导。

参考文献:

- [1] VOUSEN P. NASA Curiosity rover hits organic pay dirt on Mars [J]. *Science*, 2018, 360: 1054
- [2] 康焱,李思,泉浩方,等. 月球与深空探测标准体系分析及架构设计研究[J]. *标准科学*, 2018(5): 41
KANG Yan, LI Si, QUAN Haofang, *et al.* Research on analysis method and framework design of the moon and deep space exploration standards system[J]. *Standard Science*, 2018(5): 41
- [3] 徐侃彦,马玲玲,印红,等. 火星无人探测与行星保护[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(1): 9.
XU Kanyan, MA Lingling, YIN Hong, *et al.* Mars robotic exploration and planetary protection [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 9.
- [4] 徐冲,辛冰牧,吴斌,等. 国际行星保护政策解读与技术前瞻[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(1): 16.
XU Chong, XIN Bingmu, WU Bin, *et al.* Overview of policy and technology developments of international planetary protection [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 16.
- [5] COSPAR. COSPAR policy on planetary protection (approved on 3 June 2021) [S]. [S.l.]: COSPAR, 2021.
- [6] MCCOY T J, MITTLEFEHLDT D W, WILSON L. Asteroid differentiation[D]. Tucson: University of Arizona Press, 2006.
- [7] COUSTENIS A, KMINEK G, HEDMAN N, *et al.* The COSPAR panel on planetary protection role, structure and activities [J]. *Space Research Today*, 2019, 205: 14
- [8] FISK L A. Planetary protection: the cospar perspective [EB/OL]. [2024-7-9]. https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/ssbsite/documents/webpage/ssb_180773.pdf
- [9] HEDMAN N. The COSPAR planetary protection policy: Ensuring the sustainability of scientific investigations in space [C]// *Proceedings of the 2nd Global Partnership Workshop on Space Exploration and Innovation*, United Nations. Haikou: United Nations Office for Outer Space Affairs and China National Space Administration United Nations, 2022: 21-24.
- [10] OLSSON-FRANCIS K, DORAN P T, ILYIN V, *et al.* The COSPAR Planetary Protection Policy for robotic missions to Mars: A review of current scientific knowledge and future perspectives[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, 36: 27.
- [11] BERNARD D E, ABELSON R D, JOHANNESSEN J R, *et al.* Europa planetary protection for Juno Jupiter orbiter[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 52(3): 547.
- [12] STERNS P M, TENNEN L I. Lacuna in the updated planetary protection policy and international law[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2019, 23: 10.
- [13] 张轶男,彭兢,邹乐洋,等. 国际行星保护发展综述[J]. *深空探测学报*, 2019, 6(1): 3
ZHANG Yinan, PENG Jing, ZOU Leyang, *et al.* An overview of planetary protection development [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(1): 3.
- [14] MCKAIG J, CARO T, BURTON D, *et al.* Chapter 10: planetary protection—history, science, and the future [J]. *Astrobiology*, 2024, 24(S1): 202.
- [15] Division on Engineering, Physical Sciences of National Academies of Sciences. Review and assessment of planetary protection policy development processes[M]. Washington D C: National Academies Press, 2018.
- [16] KMINEK G, FELLOUS J L, RETTBERG P, *et al.* The international planetary protection handbook [J]. *Space Research Today*, 2019, 205: 1.
- [17] CAVANAUGH C P, TRAUBERMAN J, LINDBERGH R, *et al.* International perspective on planetary protection policies (presentation) [R]. Washington D C: Institute for Defense Analyses, 2022.

- [18] 张文德, 王艳发, 马珺, 等. 航天器AIT厂房环境中嗜极微生物的筛选与鉴定[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 766
ZHANG Wende, WANG Yanfa, MA Jun, *et al.* Characterizing extremotolerant bacteria in the Spacecraft Assembly, Integration, and Test Center [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(4): 766.
- [19] 孙儒馨, 付玉明. 行星保护中微生物快速检测技术研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(4): 147.
SUN Ruxin, FU Yuming. Research progress of rapid microbial monitoring technology in planetary protection [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Sciences), 2021, 46(4): 147.
- [20] 李帅帅, 宋甘雨, 刘红, 等. 行星保护发展现状及我国行星保护政策实施建议[J]. 中国航天, 2021(5): 31.
LI Shuaishuai, SONG Ganyu, LIU Hong, *et al.* Current situation of planetary protection development and China's planetary protection policy implementation suggestions[J]. Aerospace China, 2021(5): 31.
- [21] MOISSE E C. Archaea in artificial environments: their presence in global spacecraft clean rooms and impact on planetary protection[J]. The ISME Journal, 2011, 5(2): 209.
- [22] HENDRICKSON R, URBANIAK C, MINICH J J, *et al.* Clean room microbiome complexity impacts planetary protection bioburden [J]. Microbiome, 2021(9): 1.
- [23] BENARDINI J N, SEASLY E. Planetary protection policy and technology needs to enable future robotic and crewed missions[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2023, 103(3): 683.
- [24] RUMMEL J D, PUGEL D E B. Planetary protection technologies for planetary science instruments, spacecraft, and missions: Report of the NASA Planetary Protection Technology Definition Team (PPTDT)[J]. Life Sciences in Space Research, 2019, 23: 60.
- [25] FRICK A, MOGUL R, STABEKIS P, *et al.* Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(2): 221.
- [26] MCCUBBIN F M, HERD C D K, YADA T, *et al.* Advanced curation of astromaterials for planetary science[J]. Space Science Reviews, 2019, 215: 1.
- [27] SPRY J A, RACE M, KMINEK G, *et al.* Planetary protection knowledge gaps for future Mars human missions: Stepwise progress in identifying and integrating science and technology needs[C]// 48th International Conference on Environmental Systems. Albuquerque: ICSE, 2018: 1-19.
- [28] KIMURA S, ISHIKAWA S, HAYASHI N, *et al.* Bacterial and fungal bioburden reduction on material surfaces using various sterilization techniques suitable for spacecraft decontamination[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1253436.
- [29] GRADINI R, CHEN F, TAN R, *et al.* A summary on cutting edge advancements in sterilization and cleaning technologies in medical, food, and drug industries, and its applicability to spacecraft hardware[J]. Life Sciences in Space Research, 2019, 23: 31.
- [30] BELZ A, CUTTS J, BARENGOLTZ J, *et al.* Planetary protection and contamination control technologies for future space science missions[R]. [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory, 2013.
- [31] PATEL N, DEAN Z, SALINAS Y, *et al.* A Ground Support Biobarrier (GSB) for recontamination prevention[J]. Life Sciences in Space Research, 2019, 23: 22.
- [32] SHALLCROSS G, HOEY W, SOARES C, *et al.* Launch Recontamination: the evaluation of particle adhesion and removal mechanisms in spacecraft payload fairing environments[J]. 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022, 44: 3283.
- [33] European Science Foundation, European Space Sciences Committee, National Academies of Sciences, *et al.* Planetary protection classification of sample return missions from the Martian moons[R]. Washington D C :The National Academies Press, 2019.
- [34] CHAN Q H S, STROUD R, MARTINS Z, *et al.* Concerns of organic contamination for sample return space missions[J]. Space Science Reviews, 2020, 216(4): 56.
- [35] KMINEK G, MEYER M A, BEATY D W, *et al.* Mars sample return (MSR) : Planning for returned sample science [J]. Astrobiology, 2022, 22(S1): 1.
- [36] VISO M. Mars sample receiving facility or facilities? That is the question[J]. Life Sciences in Space Research, 2019, 23: 69.
- [37] BENARDINI J N, MOISSE EICHINGER C. Planetary protection: Scope and future challenges [J]. New Frontiers in Astrobiology, 2022: Doi. org/10.1016/B978-0-12-824162-2.00002-6.
- [38] 杨建梅. 切克兰德软系统方法论[J]. 系统科学学报, 1994 (3): 86.
YANG Jianmei. Chekland soft systems methodology[J]. Journal of Systemic Dialectics, 1994 (3): 86.
- [39] 秦鹏渊, 高玉璞, 李明杰. 基于切克兰德方法论的矿山地质管理分析[J]. 包钢科技, 2018, 44(1): 88.
QIN Pengxuan, GAO Yupu, LI Mingjie. Analysis of mine geological management based on chekland methodology[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2018, 44(1): 88.
- [40] CHECKLAND P, POULTER J. Systems approaches to making change: A practical guide[M]. London: Springer London, 2020.
- [41] LIN Q. Regional Cultural and Creative Product Design Model Research Based on Hall Three-Dimensional Structure[C]//2022 2nd International Conference on Computer Technology and Media Convergence Design (CTMCD 2022). Paris: Atlantis Press, 2022: 458-472.
- [42] DA COSTA JUNIOR J, DIEHL J C, SNELDERS D. A framework for a systems design approach to complex societal problems[J]. Design Science, 2019(5): 2.
- [43] SIRIRAM R. A hybrid (soft and hard) systems approach to project management [J]. SSRG International Journal of Industrial Engineering, 2017, 4(6): 1