arXiv:2303.00678v1 [cs.HC] 1 Mar 2023

# 利用虚拟现实塑造人类重返月球：设计研究的关键要点

Tommy Nilsson 欧洲航天局（ESA）德国科隆 tommy.nilsson@esa.int

Flavie Rometsch 欧洲航天局（ESA）荷兰诺德韦克 flavie.rometsch@esa.int

Leonie Becker 德国航空航天中心（DLR）德国不伦瑞克 leonie.becker@dlr.de

Florian Dufresne 法国国立高等工艺学校 法国拉瓦尔 florian.dufresne@ensam.eu

Paul de Medeiros 欧洲航天局（ESA）德国科隆 hello@pauldemedeiros.nl

Enrico Guerra 欧洲航天局（ESA） 科隆，德国 enricoguerra@outlook.com

Andrea E. M. Casini 德国航空航天中心（DLR） 科隆，德国 andrea.casini@dlr.de

Anna Vock 米兰理工大学 米兰，意大利 annalea.vock@mail.polimi.it

Florian Gaeremynck 欧洲航天局（ESA） 科隆，德国 florian.gaeremynck@gmail.com

Aidan Cowley 欧洲航天局（ESA） 科隆，德国 aidan.cowley@esa.int

## 摘要

人们对月球探测重燃兴趣，预示着新一代设计方案即将问世，以支持在月球上的载人作业。传统上，航天系统设计依赖于模拟研究中的原型部署，但这种方法耗费大量资源，因此在很大程度上无法采用人机交互（HCI）中成熟的以用户为中心的设计（UCD）方法。本文探讨了利用虚拟现实（VR）在实验室环境中模拟研究，从而将以用户为中心的设计引入这一由工程主导领域的可行性。基于欧洲大型物流着陆器的持续研发工作，我们在虚拟现实中重现了一个预期的月球作业场景，并邀请一组宇航员和航天专家（n=20）对其进行评估。定性研究发现表明，虚拟现实有助于开展以用户为中心的设计，能够支持高效的情境访谈，并改善项目团队协调。最后，我们提出了未来的发展方向，以进一步发挥虚拟现实在月球系统设计中的作用。

**ACM计算机分类系统（CCS）概念**

• **以人为中心的计算 → 虚拟现实**；**人机交互（HCI）**。

允许免费制作本作品的部分或全部内容的数字或纸质副本，用于个人或课堂用途，但不得为营利或商业利益而制作或传播副本，且副本须附有本声明及首页上的完整引文。本作品中第三方组件的版权必须得到尊重。如需用于其他用途，请联系版权所有者/作者。*CHI '23，2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡 © 2023年版权所有，归版权所有者/作者所有。ACM ISBN 978-1-4503-9421-5/23/04。https://doi.org/10.1145/3544548.3580718

## 关键词

虚拟现实、人因、人体工程学、以用户为中心的设计、人机交互研究、太空系统工程、月球着陆器

**ACM参考文献格式：**

Tommy Nilsson、Flavie Rometsch、Leonie Becker、Florian Dufresne、Paul de Medeiros、Enrico Guerra、Andrea E. M. Casini、Anna Vock、Florian Gaere- mynck 和 Aidan Cowley。2023年。利用虚拟现实塑造人类重返月球：设计研究的关键启示。载于《*2023*年 *CHI*计算机系统人因会议论文集（*CHI '23*）》，*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡。ACM，纽约州纽约市，16页。https://doi.org/10.1145/3544548.3580718

## 1 引言

自阿波罗计划宇航员最后一次踏上月球以来，已经过去了50年。如今，一项前所未有的国际合作正致力于在美国国家航空航天局主导的阿耳忒弥斯计划框架下，将人类送回月球表面。首次载人着陆计划于2025年进行，长期目标包括在本世纪末前建立永久性月球基地 [83]。这一计划的规模和雄心均超越阿波罗计划，人类重启探月事业能否成功，将取决于是否能设计出可靠、安全且有效的技术，以支持未来的乘组及其舱外活动。相应地，开发新方法以推进技术成熟度等级较低的解决方案，从而服务于月球上的载人及机器人作业，已被描述为阿耳忒弥斯计划的一项关键目标 [92]。

设计此类解决方案时，需要考虑各种环境、运行和人因因素带来的挑战与限制；这些因素可能与既有的地面可用性和人体工程学考量大相径庭。这些因素包括

月球重力较低、尘埃缓解、舱外活动宇航服导致的视野和运动范围受限、身心疲劳、热学与大气状况、冗余能力有限，以及极端照明条件（例如漆黑的阴影）等； [29, 61], 而这一切都发生在任务标准往往含糊不清、运行场景仍大多尚未明确的背景下 [2]。

尤其是照明条件，已成为设计和筹备活动中一个突出的考量因素。值得注意的是，月球自转轴的倾斜使月球南极呈现出独特的环境：高海拔区域几乎持续受到照明，而极低的太阳高度角则会同时使低洼区域完全照不到阳光。事实上，能够获得持续光照（从而利用太阳能），以及永久阴影区中保存的水冰，是月球南极区域被选为下一次载人着陆可能地点，并随后建造基地营地的关键因素 [83]。

为了在设计和开发过程中考虑此类月球环境，工程团队通常会在类比环境中对原型进行实验性部署和实地研究，例如利用大型洞穴系统模拟月球上的昏暗照明条件 [77], ，或利用中性浮力池模拟月球重力 [6]。

这些经典方法取得的成效不一，因其后勤工作复杂、成本高昂而受到批评，通常导致实验部署频率较低，测试对象数量也有限 [15]。这类障碍使得成熟的以用户为中心的设计（UCD）方法难以广泛采纳，例如快速原型设计和参与式设计；而这些方法在其他人机交互领域已得到成功应用。因此，空间系统开发项目往往面临灵活性不足、频繁延误以及预算严重超支等问题 [35]。

为此，本文探讨利用虚拟现实模拟实地研究的潜力，以便对早期月面原型开展快速且节省资源的以用户为中心的评估。尽管虚拟现实以相对低廉的成本交互式模拟假设性概念与环境的能力，已在多个领域引起广泛关注 [37, 91], ，但其在模拟独特月球环境并促进相关设计方案评估方面的适用性仍未得到探索。

因此，我们的研究旨在了解基于虚拟现实的实地研究在何种程度上能够支持月球系统设计中的以用户为中心的人机交互方法，并探究其优势与不足。通过阐明这种方法能够合理回答和无法合理回答的设计问题类型，我们希望为负责任地运用虚拟现实改进该领域正在进行及未来的设计项目奠定基础。

为此，我们在虚拟现实中创建了月球南极区域的交互式模拟，用于评估欧洲大型物流着陆器（EL3）的设计概念；该着陆器是一种正在开发中的自主月球着陆器，由欧洲航天局（ESA）领导的国际联盟负责研发 [27]。我们与EL3开发团队密切合作，构建了一个合理的运行场景，并邀请包括宇航员、工程师、宇航员教员、项目经理和科学家在内的载人航天专家对其进行了评估。

他们的定性反思表明，在月球表面系统设计与开发的早期阶段，虚拟现实有助于采用以用户为中心的方法开展运行绩效和人因研究，从而显著拓展了以用户为中心的设计方法在这一传统上由工程主导的学科中的适用潜力。通过突出未来月球运行的系统性特征，我们发现，基于虚拟现实的情境尤其适合促使人们反思更广泛的人机生态系统中的协同与摩擦。此外，虚拟现实相对易于使用，有利于通过促进基于模型的系统工程方法来协调项目团队并提升其敏捷性。基于这些发现，我们迈出了探索虚拟现实作为设计工具、塑造人类向月球及更远区域拓展之潜力的第一步。

## 2 贡献声明

我们的工作贡献主要有三方面：(1) 我们提出将虚拟现实模拟实地研究作为空间系统设计中的一种新方法论。据我们所知，为确定其有效性，我们展示了以用户为中心的设计方法在概念阶段月面系统开发中的首个有据可查的应用。(2) 我们通过探讨沉浸式设计情境和推测性演绎在促进人机生态系统的情境化整体评估，以及支持设计项目团队协调方面的潜在用途，拓展了相关讨论。(3) 我们针对用于模拟月球环境（如低重力）的虚拟现实界面提出了一系列建议，其中包括如何利用混合现实技术提高未来设计研究的有效性。

## 3 相关工作

与我们的工作相关的人机交互和虚拟现实出版物种类繁多。本文重点关注三个主题：(1) 空间系统设计中的人机交互研究方法；(2) 通过模拟实地研究评估太空设计概念的传统方法；(3) 虚拟现实在弥合这两者之间鸿沟方面的潜在用途。

### 3.1 太空系统设计中的人机交互

自太空时代曙光初现以来，航空航天工程与人机交互便密不可分。沿着这一思路所开展的工作，催生了多种解决方案，涵盖支持宇航员身心健康的计算机界面 [67]，以及远程机器人控制机制 [80]。值得一提的是，人机交互领域的一些重要理念，例如人机共生 [18], ，在现代航天服设计的整个发展过程中得到了运用，以提升舱外活动期间人的绩效和安全性 [22] ，并助力塑造了许多相关解决方案，包括帮助人类适应低重力环境的外骨骼 [70, 86] ，以及改善空间定向能力的增强现实界面 [45]。

然而，此类系统的开发传统上一直由工程主导，主要以功利性

指标为指导，例如技术可行性和乘员安全。相比之下，人们对采用人机交互设计方法的关注相对较少[1]，即更直接地让最终用户和其他利益相关者参与设计过程 [87]。

新太空公司 [93]，（如 SpaceX）的持续涌现，以及随之而来的太空准入民主化，促使一些学者提出，现在正是人机交互在未来太空系统[67]的开发中发挥更核心作用的时候。正如 Trotta 等人所阐述的，人机交互社区如今拥有独特的机会，可以“为如何思考和设计太空中的未来界面贡献新的视角与知识” [87]。

早期为应对这一挑战所做的努力，通常采用各种以用户为中心的设计方法，旨在让非工程师参与未来太空解决方案的创意构思。例如，在一系列 CHI研讨会中，Pataranutaporn等人邀请来自不同学科的学者共同探讨人机交互为太空设计带来的可能性。由此产生了大量新颖的情景和应用案例，聚焦太空人机交互研究中的新兴利益相关者，例如太空游客[67, 68]。类似方法也被用于构想假想月球定居点 [16, 90], ，甚至共同构思太空食品与饮食的未来 [63]。与我们的研究更为接近的是，Rometsch等人组织了一系列航空航天专家小组头脑风暴会议，以确定未来运往月球表面的补给货物的潜在卸载方案[73]。

然而，除了创意构思之外，以用户为中心的设计在现实解决方案的原型制作和评估中的应用仍然十分有限。尽管已有一些面向载人太空探索的软件工具以用户为中心的方式进行开发 [8, 69]，，但在物理界面设计过程中采用此类方法已被证明更加复杂。例如，Sumini等人开发了一种受海马启发的假肢尾巴，旨在增强低重力条件下的身体运动 [86]。为评估其有效性，必须在低重力飞行期间进行测试。在此案例中，相对较低的原型开发成本使作者能够安排一系列此类原型部署，从而实现以用户为中心的迭代设计流程。

相比之下，目前许多致力于为月球开发更为复杂解决方案的航天机构，例如月球着陆器或月球车，都必须面对更大的限制。正如下一节将详细说明的那样，评估所需的高昂财务和后勤负担，加上必须在具有代表性的环境和运行情境中评估此类解决方案的要求，极大地阻碍了人机交互方法论（尤其是以用户为中心的设计）在月球系统开发传统方法中的采纳。

## 3.2 经典实地研究

通常，创新的月球与行星探测方案会在所谓的模拟环境中进行测试和评估。撒丁岛洞穴 [6] 或冰岛火山沙原 [38] 与月球环境拥有一些重要的共同特征，包括地形特征或地质组成。除了这类自然形成的模拟环境外，人们还通过人工手段模拟了某些月球环境。例如，低重力飞行和中性浮力池被用于复现月球的部分重力水平（0.17g），而真空舱则被用于模拟月球大气的缺失 [11]。

除了模拟相关环境条件外，模拟研究的另一项核心目的，是在未来任务场景的背景下评估设计方案 [2]。这通常需要研究这些方案与任务架构中其他关键操作概念和要素之间的协同作用，包括人际通信、数据收集与分发系统、科学程序、后勤工作流程以及远程监控 [88]。

航天机构越来越多地利用这类类比现场试验，为月球探测设计可靠的解决方案 [3, 57, 65]。例如，2019 年，欧洲航天局在加那利群岛的兰萨罗特岛干旱的火山地貌中开展了一次实地考察，以评估若干用于在月球表面采集和储存地质样本的原型工具 [76]。例如，在其中一项测试中，一组专家比较了两种不同手推车的功能和机动性，旨在找到各项性能之间的最佳平衡 [32]。

在 2019 年的另一项研究中，两名宇航员在大西洋进行了一系列水下太空行走，旨在评估一种原型便携式车辆，该车辆专为在月球重力条件下撤离失能宇航员而设计 [33]（见图 1）。因此，未来的乘组成员得以评估相关系统的（相互）操作性和人体工程学，以及使用这些系统可能带来的风险。这包括在模拟月球重力的配重条件下，穿戴模拟舱外活动手套和能够再现宇航服受限视野的代表性头盔时，与滑轮系统、把手、运动系统及其他工具接口等相关部件交互所涉及的人体工程学和机械方面的问题 [31], ；这一切都以崎岖不平、遍布沙石的海床为背景 [11]。

尽管通过此类研究收集到的反馈有助于推动潜在月球表面解决方案的迭代式集成设计与开发流程，但依赖模拟环境也并非没有缺点。主要问题在于，可选环境通常局限于单一方面，只有少数模拟环境能够同时复现多种月球条件（例如，海床试验只能模拟地质和重力条件，却无法模拟照明条件 [11]）。由于一种模拟环境无法模拟月球任务的所有不同方面，因此通常需要多种模拟环境和人工试验台。此外，这类模拟试验活动需要大量准备和规划时间，耗费大量资源。通常，这类试验也只允许少数参与者参加，从而限制了每年实际可开展的设计评估数量。

这些限制因素历来使相关设计项目倾向于采用相对僵化的*V*模型 方法，在任何实验性部署和通过模拟测试进行评估之前，就已开展大量开发工作

[1]我们对这一术语的使用依据 de Haan 的研究。他将人机交互设计方法定义为“以人为本、富有创造性的方法，用于构思和构建用户界面” [21]。

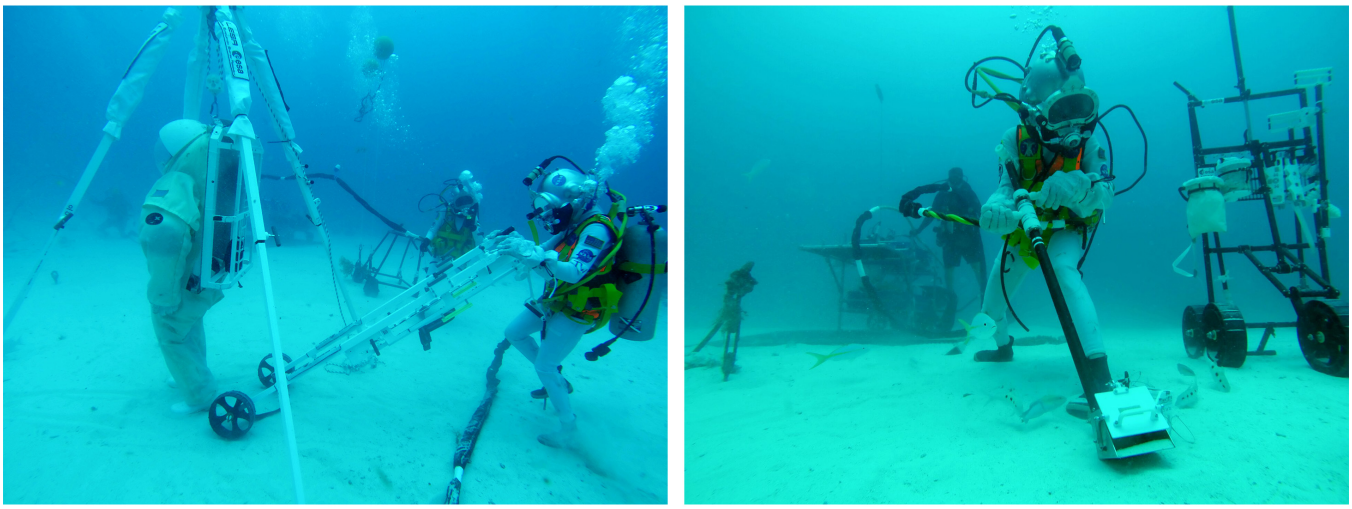

**图 1：一名宇航员使用为月球重力环境下撤离而设计的便携式车辆，模拟救援一名失去行动能力的队员。该宇航服模拟器在水下的重量，相当于宇航员在月球上穿着舱外活动服的重量 [31]（左）。一名宇航员在类比研究中进行模拟舱外活动 [32]（右）。**

活动 [11]。与人机交互领域的典型设计项目相比，航天系统工程中的开发团队与最终用户之间的互动相当有限，而且往往要到开发周期的后期才会发生。因此，当运行场景在V模型设计周期结束时部署并接受评估时，通常已没有多少机会影响设计。这会导致反馈循环更长、设计迭代更慢，给项目带来额外的资金和时间成本。

在下一节中，我们将论证，在项目生命周期的早期阶段更多地采用基于虚拟现实的设计实践，或许能够缓解其中一些局限。

## 3.3 虚拟现实中的设计研究

航空航天业在推广虚拟现实技术方面一直走在前沿。值得一提的是，美国国家航空航天局率先在 1993 [55] 执行维修任务时，使用这一工具对哈勃太空望远镜飞行团队进行训练。此案例清楚地展现了使用虚拟现实的益处：它缩短了舱外活动训练时间，进而降低了项目成本。

然而，直到 21 世纪，虚拟现实和虚拟化才开始逐渐在空间系统开发相关的设计实践中占据一席之地。此后，虚拟环境便被用于多种用途，例如帮助防止国际空间站哥伦布舱内发生错位和数据流错误 [12],，协助进行一般性的卫星组装故障排查 [39]，或分析更换哥伦布舱段舱室过滤器的流程 [44]。

虚拟现实技术也曾用于验证与确认项目阶段，例如猎户座月球飞船的组装方案和维护评审 [1]，或收集宇航员的反馈，以对月球门户空间站舱段进行人体工学评估 [42]。不过，这类应用仍然少见，在需要进行更系统的用户评估时，虚拟现实通常不如模拟实地研究受重视。

如今，引领虚拟现实设计流程采纳的反而是与太空无关的领域。事实上，虚拟现实已成功用于研究人与多种原型技术的交互，包括自动驾驶汽车 [85], 医疗保健解决方案 [56] 和复杂的机器人系统 [60]。此类研究表明，虚拟现实模拟能够收集广泛且相关的用户反馈，涉及可用性 [25], 人因与人体工程学 [95], 安全性 [84] 和可接受性 [36]等主题。通过在项目生命周期的早期阶段收集此类反馈，开发团队得以更好地预见潜在问题，降低整体生产流程的风险，从而减少开发和制造成本 [4, 39, 48]。

与以传统实体原型为核心的研究相比，虚拟现实能够快速迭代设计概念，不受数量、尺寸或形状的限制，也不受实验室空间限制 [49]。同样，有证据表明，在促进空间评估 [46] 和激发创造性和灵活思维 [52]方面，虚拟现实优于以二维形式体验的数字模型。

虚拟现实的另一个近期备受人机交互社区关注的方面，是它能够将设计概念嵌入真实情境中。例如，Mäkelä等人通过模拟信息显示屏在公共空间中的布置，评估了其应用效果。他们发现，为用户提供模拟自然场景的情境，虚拟现实能够带来比在实验室环境中原本可能实现的体验更为真实的体验 [58]。借鉴基于场景的设计或设计虚构等成熟的人机交互方法，Simeone 等人也遵循了类似的思路，认为拓展

此类“推测性演绎”至虚拟现实中，将使用户能够以“最贴近设想的真实形态”[81]体验设计构想。基于对沉浸式设计虚构的探索，McVeigh 等人也表达了类似观点，认为虚拟现实尤其适合为推测性体验中具身且情境丰富的方面制作原型 [59]。

鉴于虚拟现实能够让潜在用户沉浸于情境丰富的体验中，而且适用于设计早期阶段，我们可以认为，虚拟现实特别适合支持未来月球表面解决方案的开发。然而，在空间系统开发中，虚拟现实赋能的设计流程距离成为标准化方法仍有很长的路要走。因此，我们有机会让载人航天兜一圈，充分利用它曾助力开创的虚拟现实技术。作为回报，虚拟现实或许能让这个传统上由工程主导的领域更多地应用以用户为中心的设计方法，并享有上述方法带来的所有益处。

正如下一节所述，我们将构建一个以未来月球着陆器为核心的虚拟现实场景，并邀请专家用户对其进行评估，希望借此进一步探讨虚拟现实作为这一独特领域设计工具的可行性与有效性。

## 4 方法论

为了探索在载人月球探索背景下，利用虚拟现实促进以用户为中心的设计方法的潜力，我们开展了一项模拟实地研究，重点关注基于虚拟现实的月球作业场景。具体而言，我们创建了一个虚拟模型，展示 EL3 月球着陆器及其潜在货物卸载系统的预期配置，并配以货物容器、运输车、舱外航天服和用于攀登着陆器的梯子的三维模型（见图 2）。我们还制作了月球南极区域的虚拟复刻场景，作为逼真的背景。随后，我们将这些素材整合到一个交互式模拟中，用以呈现月球表面的货物接收与卸载程序。最后，我们借鉴了既有的人机交互方法，例如基于场景的设计 [14], , 邀请一组相关领域的专家沉浸于这一虚拟现实场景中，并对模拟的设计方案进行批判性评估。本节余下部分将详细阐述这些步骤。

### 4.1 EL3

能否在月球上实现持续的人类驻留，很大程度上取决于能否开发出可靠的后勤解决方案，将乘员补给品及其他形式的货物送至月球表面。近年来，世界各地的许多公共和私营利益相关方都开始应对这一挑战，由此涌现出各种设计概念，范围从重 325 千克的轻型 Astrobotic Peregrine 着陆器 [17]到高达 100 吨的 SpaceX 星舰载人着陆系统 [78]。

顺应这一趋势，欧洲航天局正与业界和学界合作伙伴共同设计欧洲大型物流着陆器（EL3）。这是一种自主月球着陆器，能够向月球运送各类乘员补给载荷，计划于2028年至2029年间择机首次发射。投入使用后，EL3预计将成为欧洲实现月球可持续载人探索的基石 [13, 41, 51]。

初步任务需求规格制定阶段完成并获得资金后（预计将于 2022年底完成），工业实施阶段将随之启动 [27]。随后，EL3 的首次设计评审计划于 2023 [13]第一季度开始。

EL3 预计将在未来的月球载人表面作业中发挥重要作用，加之其设计尚未经过验证，因此它成为我们研究的理想对象。

在 EL3 项目管理团队和负责工程工作的团队提供的意见指导下，我们构建了一个不拘泥于具体方案的 EL3 构型模型，代表一种通用设计，能够满足 EL3 原始招标邀请书中列出的要求 [13]。最终的 EL3 模型高约 2.8 米，顶部设有一个约 14 米$^2$ 宽的八角形货物甲板。我们尽可能提高模型的细节程度，以便评估和研究整体可用性、运行以及人因方面的挑战与限制；这些问题很可能适用于 EL3 团队自身工作所产生的大多数潜在设计。

在虚拟着陆器顶部，我们设计并实现了一套假设的货物卸载系统：采用带有托架的绞车式滑轮系统，依靠月球重力将货物集装箱从顶部甲板上放下。该货物卸载机构在虚拟现实场景中以动画呈现。这一概念再次根据 EL3 开发团队提供的意见进行完善，以确保我们的虚拟模型具有合理的真实性。有关这一过程的更多详情，请参阅我们的前期研究 [62]。

### 4.2 其他资产

根据现实世界的参考资料，制作了情景所需的若干其他三维资产。

首先，EL3 的设计目标是运载一组特定的圆柱形加压货运集装箱。这些集装箱预计质量约为 350 kg，加压容积约为 0.7 m$^3$。其中 4 个被虚拟复现，并作为情景中的必要组成部分；参与者的任务是取回这些集装箱并搬运它们。这意味着货物集装箱必须包含物理组件，并且能在虚拟现实中进行交互。

其次，为了让用户能够从着陆器顶部检查货物卸载系统，并从中获得可能重要的见解，同时帮助预测潜在情景（例如系统卡住后需要进行维护），我们设计并集成了一架可攀爬梯子。虚拟现实用户可以用运动控制器控制虚拟现实中的手抓住梯级和/或侧栏，并沿梯子向上或向下移动，以模拟攀爬。

第三，加入了一辆静态推车，以引发对集装箱运输潜在方式的有效反射。

为了进一步提升场景的真实感，用户被置于宇航服的三维模型中。具体而言，我们使用了探索舱外机动单元（xEMU）舱外活动服。用户的头部被包裹在 xEMU 头盔内，以准确限制其视野范围 [74]。xEMU 头盔

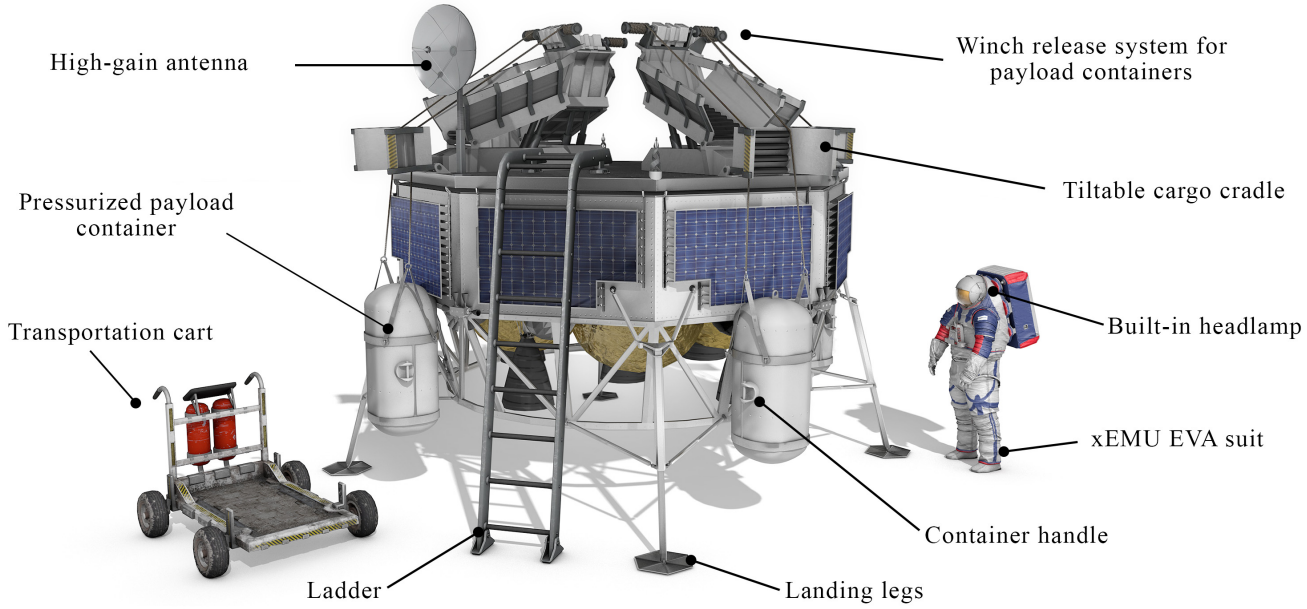


**图 2：EL3 着陆器的非特定配置三维模型，以及相关素材**

还配备了头灯。需要注意的是，用户只能看到躯干和宇航服手套，未包含腿部和靴子，但用户仍投射出完整的全身影子。

所有 3D 模型均采用基于物理的渲染材质进行纹理处理，以准确模拟光线交互，例如眩光和反射。

在我们的场景中，所有素材都仅以视觉方式模拟。我们曾简要考虑为虚拟现实中的视觉模拟对象制作实体模型，以作补充，但最终由于技术难题而放弃，因为要让实体模型遵循月球低重力环境下的规律并不容易。我们将在本文最后的讨论中反思这种做法所带来的局限。

## 4.3 虚拟月球景观

我们根据月球勘测轨道飞行器拍摄的地形图 [82]，，在月球南极沙克尔顿撞击坑附近（89.9°S 0.0°E）虚拟重建了一片面积为 64 $km^2$ 的区域。我们选择这片区域，是因为它已被确定为阿尔忒弥斯首次载人着陆任务的候选着陆点之一 [83]，，因此能够为我们的场景提供足够可信的背景。由于原始地形图的像素比例尺为 100 米，我们使用 3D 建模软件手动添加了较小的细节（例如巨石）。随后，我们使用一组定制的地形着色器，以程序化方式为虚拟月球景观添加纹理。我们还加入了粒子效果，以直观模拟与月球表面接触时产生的月尘羽流。在此过程中，我们组织中的一位月球地质学家提供了协助，以确保场景的真实性。

## 4.4 场景

最后，我们使用虚幻引擎 4 游戏引擎构建了虚拟环境。我们将太阳置于北方，位于地平线上方 1.5° 处，并将其强度设为 1.37 $kW/m^2$，以模拟月球南极的环境条件 [89]。我们禁用了所有形式的间接照明和光散射，以再现因缺乏月球大气而形成的漆黑阴影。

我们将装有四个货物集装箱的 EL3模型放置在虚拟月球景观中央。货物卸载点设在距离着陆器 30 米处，并用一面插在地上的旗帜标示。因此，我们的情景呈现了一个简单但合理的情境：用户需要走近着陆器，取出集装箱，并将其运送到附近的卸载点。场景中还加入了梯子和运输车，以引发关于潜在运行场景的讨论。

虚拟现实体验在一台配备 RTX 2080 图形处理器的台式电脑上运行，帧率流畅。我们使用了 HTC Vive Pro 虚拟现实头显，并搭配一对 HTC Vive 基站和控制器。用户通过控制器触摸板行走和转向，并使用控制器扳机键与虚拟环境中的物体交互（例如抬起货物容器）。用户还可以通过转动头部环顾虚拟环境。这个虚拟现实货物卸载场景由此成为我们与参与者互动的重点。

## 4.5 参与者

鉴于本研究的专业性，我们通过精心挑选相关载人航天领域的专家，并向他们逐一发出私人邀请，招募潜在参与者。共招募了20名参与者（详情见表1）。其中2名宇航员

| 参与者 | 性别 | 职位 | 专业领域 |
|---|---|---|---|
| 宇航员1 | M | 宇航员 | 载人航天，舱外活动 |
| 宇航员2 | M | 宇航员 | 载人航天，舱外活动 |
| 工程师1 | M | 国际空间站运行工程师 | 载人航天运行 |
| 工程师2 | M | 乘员技术和宇航员培训 | 宇航员机器人训练、扩展现实技术 |
| 工程师3 | F | 运行工程师 | 航空航天工程 |
| Engineer 4 | M | 国际空间站地面段工程师 | 载人航天运行、航空电子设备 |
| 工程师 5 | M | 国际空间站地面段工程师 | 载人航天工程、虚拟现实 |
| 教员1 | M | 宇航员教员 | 国际空间站有效载荷专家、扩展现实训练 |
| 教员2 | M | 宇航员教员 / ODF（运行数据文件）经理 | 乘组培训和运行 |
| 教员 3 | F | 哥伦布舱教员和 EUROCOM | 宇航员培训、人因 |
| Instructor 4 | M | 宇航员和地面人员教员 | 载人航天运行 |
| Instructor 5 | M | 宇航员教员和运行工程师 | 有效载荷培训和 EUROCOM |
| 导师6 | M | 国际空间站宇航员教员和EUROCOM | 哥伦布舱运行、天体物理学 |
| Instructor 7 | M | 宇航员教员 | 国际空间站实验培训和运行 |
| 指导员8 | F | 宇航员教员 | 宇航员培训、航空航天工程 |
| Manager 1 | M | 舱外活动和抛物线飞行训练单元经理 | 月球和火星舱外活动训练、模拟环境仿真 |
| 经理 2 | M | 科学与运行经理 | 载人航天、月球科学与扩展现实技术 |
| 科学家1 | M | 国际空间站运行与训练支持科学家 | 天体物理学、行星科学 |
| 科学家2 | M | 研究员 | 用于宇航员模拟训练的仪器开发 |
| Scientist 3 | M | 科学顾问 | 载人航天与月球科学 |

**表1：研究参与者概览，包括性别、职称和（自述的）专长领域**

参与了我们的研究，两人目前都仍在执行任务，迄今累计在太空停留超过700天。他们还曾在国际空间站（ISS）外执行多次舱外活动，总时长超过39小时。本研究中的教员均有开展宇航员培训和制定行动规划的经验。其中数人还在欧洲航天器通信员（EUROCOM）岗位上积极监控宇航员任务活动；该岗位设于国际飞行控制中心，负责与国际空间站乘组直接通信。工程师均有为国际空间站提供技术支持的经验，包括监督其多个舱段的维护工作。科学家均亲身参与过模拟月球和火星任务的模拟实地研究。管理人员目前以行政职务参与相关太空系统开发项目，但也都曾有一线实操经验。值得注意的是，Manager 1 是宇航员舱外活动训练方面的专家，并有使用不同类型航天服的经验。

## 4.6 流程

我们逐一邀请参与者完成虚拟现实场景。每场体验开始时，都会向参与者说明研究目的以及他们需要在虚拟现实中执行的任务，随后请他们填写问卷，提供人口统计信息及以往的虚拟现实体验。接下来，我们会简要演示虚拟现实控制器的使用方法。之后，参与者可以自由探索虚拟环境，并按照自己偏好的方式完成货箱运输任务，只要不偏离EL3着陆点太远即可。根据出声思维法 [30]，我们鼓励参与者在完成任务时说出自己的思考过程。有效载荷容器成功取回并运送后，我们请参与者继续留在虚拟环境中片刻，同时回答一组半结构式访谈问题。这些问题均为开放式问题，旨在鼓励参与者分享反思并评价体验。我们特别询问了月球着陆器的各项特征，例如货物卸载机构、天线布置、货物容器的设计、梯子和运输车。我们还请参与者指出潜在的安全隐患，并提出设计改进建议。对于参与者表现出的任何异常行为或举动，我们也会进一步询问。研究过程不设时间限制。我们希望为每位参与者提供充足或适当的时间，以完成场景任务并回答问题。因此，各场次的总时长差异较大，介于40至80分钟之间。

参与者的回答以笔记、音频录音和问卷答复的形式记录下来。随后，我们的三位研究人员分别对该数据集进行编码，并通过讨论处理任何不一致之处，最终综合形成定性主题分析 [10]。我们特别关注参与者提出的相关设计反思，以及虚拟现实模拟中有助于引出这些反思的具体方面。

## 5 研究发现

所有参与者此前都有使用虚拟现实的经验。其中只有三人将自己的经验描述为非常有限或有限（工程师3、教员4和指导员8），其余参与者则认为自己的经验水平为中等至非常高（根据自我报告的5分制评分）。研究期间，没有参与者报告出现头晕或晕动症等不适。同样，没有参与者在熟悉虚拟现实控制器或完成场景时遇到任何明显困难。

总的来说，虚拟现实场景被认为具有很高的可及性，参与者经常将其描述为"简单明了"（工程师 5）、"相当逼真"（教员 3）或"有趣且身临其境"（宇航员1）。正如本节后文所详述的那样，这并未妨碍参与者提出诸多批判性反思，并指出与所呈现的月球表面解决方案相关的潜在设计问题。

### 5.1 光照与阴影

月球南极独特的照明条件及其对未来乘员运行的影响，或许是参与者叙述中最持续、最反复出现的主题。太阳位于月球地平线附近，使每个表面物体和地形特征都投下狭长的阴影，将大部分环境笼罩在一片漆黑之中。正如参与者明确指出的，这使得即便是行走等最基本的任务也明显更加困难。例如，科学家2认为，黑暗区域缺乏视觉线索，使他更难判断自己的行走速度。同样，工程师 5 指出，他在虚拟现实中的自身影子深暗得足以遮挡其中的任何地形，这带来了被巨石或其他障碍物绊倒的风险。当参与者朝背离太阳的方向行走，从而使影子投向自身的运动方向时，这一问题尤其紧迫。通过引发参与者对严重阴影影响的种种思考，可以清楚看出，虚拟现实环境成功生成了一种非直觉性的认知负荷，其原因在于这种体验与人们在地球上对阴影的正常经验形成了反差。

尽管我们的参与者通常会通过在行走时格外谨慎来应对这一问题，Manager 1 更进一步。他没有沿直线路径接近 EL3 着陆点，而是绕道而行，不断扫描地形中被照亮的区域，以尽量减少进入阴影区域的时间。当被要求进一步说明其做法背后的原因时，他提到头盔灯光强度有限是首要因素：

**Manager 1：**"如你所见，这里有这些岩石，例如……如果你撞上它，可能会摔倒，或者损坏你的宇航服。所以我试着在有光的地方绕行。我不认为宇航员会在完全的阴影中工作。通常，他们会……在空间站进行舱外活动时，头盔上会装有灯。这种灯需要比我这里的灯更强大。"

尽管 xEMU 航天服内置的头盔灯通常被认为很有帮助，但大多数参与者都赞同经理1的观点

即要充分支持未来宇航员开展月球舱外活动，就确实需要对其进行改进。很快便 स्पष्ट显，这并不只是光照强度有限的问题，同样也是光束角度过窄的问题。正如教员5所指出的，在尝试于月球阴影中工作时，他的整个视野都会缩小到头盔灯发出的光锥大小。教员2也表达了同样的担忧，认为可行的头盔灯因此需要"更加分散"，以尽可能覆盖更大的区域。

我们场景中的其他几个设计概念同样因需要更好的照明而被提及。例如，Scientist 3 和 Instructor 4 认为，EL3 着陆支腿很容易成为在其附近工作的任何人的绊倒隐患。同样，Engineer 4 指出，照明条件不佳会导致有效载荷容器及其他关键设备一旦放错位置便难以找到。Engineer 2 也表达了同样的担忧，他认为所有移动设备，尤其是运输车，都需要配备人工光源。添加 LED 灯条或其他形式的灯带，经常被提及为解决此类问题的潜在方案。与此同时，宇航员1 警告不要过度使用这类人工照明，认为这会导致更高的能耗和更多的维护需求。相反，他建议宇航员最好配备少量便携式泛光灯，可随身携带并手动摆放，以应对各种照明情况。Instructor 7 则建议在诸如 EL3 梯子等关键位置贴上反光胶带，作为另一种节能替代方案。

尽管这些解决方案或许有助于缓解月球阴影中漆黑一片的问题，但月球没有大气层，刺眼的阳光因此更加令人难以应对，成为更棘手的障碍。太阳接近地平线、处于视线高度时，参与者常常发现自己正对着太阳，因而多次提到可能被强光刺盲、导致短暂视力受损的风险。宇航员2结合自己参与真实舱外活动的经验，将这种情况比作坐在一辆挡风玻璃很脏的汽车里，迎面驶来的汽车突然亮起车灯。正如他所解释的，这不仅会让驾驶员看不见，也会使挡风玻璃"亮得一片模糊"。

许多参与者还发现，EL3上的铝制和金属部件反射的阳光也造成了问题。工程师2指出，可以借鉴现有航天器的解决方案，采用防眩光涂层或许能有效缓解这一问题。

**工程师2：**"如果可以选择在某些部位覆盖哑光材料，那就很好。比如我们在自动转移飞行器 *[自动转移飞行器]*上使用的白色纺织材料，有助于热控制。或者也可以像联盟号那样使用反光较弱的黑色涂层。"

其他参与者主张为宇航员头盔配备强效遮阳面罩，不过，考虑到宇航员会频繁穿梭于阴影区域和受光区域之间，这种方案的实用性并不显而易见。和他之前的宇航员2一样，Instructor 5 用驾驶汽车的类比来更好地解释这个问题。在阳光明媚的日子开车时，他

认为，驾驶者或许戴一副太阳镜会更舒服。但一旦驶入黑暗的隧道，驾驶者就不得不摘下太阳镜，并花上宝贵的片刻时间来适应新的光线环境。

我们的虚拟现实场景中出现了多种情况，显示这种突然的变化令人担忧。例如，阳光几乎以零度角照射，导致EL3有一半被遮挡。当参与者试图爬上着陆器的阴暗一侧时，许多人报告说，他们刚爬到梯子顶端、眺望货物甲板，阳光就会直射到脸上。从漆黑一片骤然转为令人目眩的强光，变化之快、时机之敏感，使参与者认为，未来的设计工作必须将这一点纳入考量。

我们的虚拟现实模拟所呈现的明暗强烈对比，也证明是可用于直观呈现温差的有效工具。凭借自身的专业知识，所有参与者都了解月球表面的极端温度波动：受光照的物体温度可高达120摄氏度，而处于阴影中的物体温度则会低于零下200摄氏度。工程师3借此机会思考EL3着陆飞行器上散热器和冷却系统的理想布置位置，并推测液体循环系统或许能有效平衡飞行器各处的温差。同样，科学家1提醒，不要长时间待在阴影中，因为低温会给敏感货物（例如生物材料）带来难以承受的压力。为解决这一问题，工程师2提议通过脐带缆将货物集装箱连接到外部电源，使每个集装箱都配备主动温度调节机制。

另一个密切相关且引发多次反思的话题是太阳能发电。观察虚拟现实中的受光表面时，参与者经常猜测太阳能电池板在着陆器上的理想安装位置和角度。例如，Manager 1提出，EL3可能会意外降落在阴影中。他认为，为应对此类突发情况，应允许将太阳能电池板安装在运输车上，以便机组人员将其移至阳光下，为任务关键设备充电。

## 5.2 尺寸与人体工程学

但吸引参与者注意的并不只有模拟光线的表现。能够借助沉浸式三维技术，以交互方式体验原型，也引发了他们对原型尺寸及人体工程学适用性的诸多思考。在与货物集装箱互动时，这一点或许体现得最为明显。大多数参与者表示，如果需要将容器运送较长距离（例如从EL3着陆点运到居住舱），他们会使用运输车；但他们也认同，短距离搬运（例如从推车搬到气闸舱）有时仍不可避免。然而，在虚拟现实中花了一些时间搬动和检查这些容器后，大多数参与者对它们在真实环境中的可行性表示怀疑。首先，容器把手似乎并未按照舱外活动的需求进行设计。正如宇航员2所指出的，舱外活动期间穿戴的厚重航天服手套，常常会让原本简单的任务变得“真的很棘手”。用相对较小的把手提起货物容器，就是最直接的例子。宇航员1也表达了同样的担忧，并指出所有舱外活动接口都需要设计得更大一些，才能适应宇航员的操作：

**宇航员1：** “我们在穿着宇航服时用手做的所有事情都需要做得很大。手套很笨重，灵活性很差，几乎没有灵活性。这实际上是任何舱外活动最令人担忧的问题之一：你能有多灵活。所以，如果你想提供帮助，设计出更有利于提高效率和速度的方案……在这种情况下，我希望有一个把手，一个又大又粗的把手，让我在进行舱外活动时可以使用。看到这些东西时，我觉得它们都不是舱外活动接口。”

虽然我们的虚拟现实场景在本质上纯粹是视觉体验，但这并未阻止参与者尝试推断物体的质量，也没有阻止他们推测质量可能对物体的可操作性产生何种影响。例如，许多参与者指出，单手提起容器的重量会改变宇航员的重心，可能使他们失去平衡。Manager 1想出了另一种方法：同时抓起两个容器，每只手各拿一个，并认为这样会让自己站得更稳。不过，他也承认，尽管月球重力较小，两个容器加起来可能还是太重，难以搬运。其他人则经常尝试用双手将一个容器举在身体前方。虽然这种做法似乎解决了他们对平衡受影响的担忧，却也带来了另一个问题。正如工程师1亲身发现的那样，尝试以这种方式搬运容器，结果会在一定程度上挡住视线：

**工程师1：** “当我抓住这些侧面的把手时……我的手自然会像这样 *[将容器竖直举在身体前方]*，然后它就在我面前了……看到了吗？但现在它挡住了我的部分视线。”

科学家2和教员2都明确指出，携带设备时保持视野清晰应当是首要设计考量，并表示如果未能满足这一要求，可能会导致态势感知能力下降、绊倒风险增加。大多数参与者也得出了同样的认识，因此开始寻找可能的应对办法。再次有人提出，重新设计容器把手是最容易实现的解决方案。正如宇航员2所解释的，对于便携式设备，理想情况下“每个表面都应有一个把手”，这样宇航员就能从各个方向抓取设备。从这个意义上说，增加把手数量能够为用户提供更多选择，从而提升人体工学灵活性。

此外，还提出了几种替代方案。例如，科学家1提出了一种连接机构，使宇航员能够将容器直接挂在宇航服上。另一方面，Instructor 5 和工程师3建议给每个容器装上轮子，并指出，像旋转式行李箱一样，拖动货物集装箱会比搬运它们更轻松。

货物容器的形状也受到了一些批评。导师6发现，容器的圆柱形容易使其滚动，而不是放下后稳稳停住。工程师2也有类似的看法。在尝试将多个容器叠放在推车上但未能成功后，他建议采用矩形，这样容器更容易整齐排列，可能有助于储存和运输。

必须使用梯子爬到 EL3 顶部这一设想，成为另一个需要重点反思的问题。参与者通常认为，需要采取额外的安全措施，以防止宇航员跌落。弹簧钩和登山扣常被认为至关重要。有趣的是，参与本研究的宇航员并没有同样的担忧；相比自身的安全性，他们更担心损坏着陆器上的重要设备。例如，宇航员1提醒要防范在攀爬时意外损坏太阳能电池板的风险，并指出梯子与 EL3 外壳之间的间隙目前太小：

**宇航员1：** “现在我正在看这架梯子，它看起来几乎是垂直 *90* 度。这种角度可能最适合发射构型，但我完全可以想象一种非常简单的设计：把梯子拉到 *60* 度左右，或者类似的角度，只是为了让它远离太阳能电池板。根据我的经验，我们用于舱外活动的加压航天服……真的很难看见自己的脚。 *[开始爬上梯子]*所以在这里，我的脚……我那只穿着大靴子的脚，很有可能会穿过去撞到太阳能电池板。因此，梯子需要离得更远一些，以确保我不会撞到它。”

舱外活动服可能会妨碍宇航员在攀爬时看见自己的脚，这一担忧也由工程师2提出。为了解决这一问题，他建议在梯子顶端安装一组侧视镜，类似于汽车上的侧视镜。

在着陆器顶部作业同样被视为一个问题。狭窄的货物甲板几乎没有可供活动的空间，而且正如 Instructor 5 所指出的，穿着笨重的宇航服转身时，很容易不慎撞倒重要部件。科学家2因此建议在精密仪器（如天线）上方加装一个有机玻璃穹顶，以提供保护。对于是否应采取额外措施保护在 EL3 顶部作业的宇航员，大家意见不一。Instructor 7 认为有必要安装安全栏杆，而科学家2则认为现有的货物托架足以为宇航员提供支撑，让他们可以扶靠。

## 5.3 更宏观的视角

随着研究环节的推进，许多参与者开始将关注点从场景中呈现的单项设计方案，转向思考这些方案在更广泛的月球表面任务背景中可能发挥的作用。通过思索潜在的协同效应与冲突点，工程师2提出，例如，凭借坚固的太阳能电池板，EL3可以改造成充电站，为月球车和其他关键资产供电。

同样，科学家1提出，着陆器或许可以充当临时的“云数据中心”，收集、存储并传输任务相关信息，以帮助协调附近的乘员。

宇航员应在多大程度上、以何种方式参与月球表面作业，也是这一反思主题中反复出现的话题。我们的情境中，货物卸载机构通常会引发这类考量，参与者经常讨论应由谁负责启动卸载程序。例如，Manager 1 认为，鉴于宇航员对周围情况有更强的态势感知能力，应由身处月球表面的宇航员控制这类机构。工程师3也赞同这一观点，并指出这有助于防止事故发生，例如货物容器掉落并砸到一旁的宇航员。

另一方面，科学家2确信，此类任务可以安全地交由地球上的任务控制中心执行。他解释说，这有助于减轻宇航员的工作负担。工程师2也持类似观点，认为宇航员的舱外活动时长受多种因素限制（例如氧气供应有限），因此，代替宇航员启动货物卸载序列，可以为他们节省一些宝贵时间。宇航员2似乎也认同这一立场，并解释说，舱外活动通常都经过预先规划，宇航员自身很少有自主行动的余地。尽管如此，他补充说，还是应该始终准备好备用方案，以应对突发情况：

**宇航员2：** “我们一直都在和地面 *[控制中心]* 协同工作。所以我认为，由地面来掌控这件事是件好事。不过，或许应该有个备用方案。如果发生故障，或者我们必须在月球上自主行动，这种情况可以作为应急预案；届时，我们当然需要能够操作重要设备。但我认为，这种情况永远不会发生。地面会负责这项运行。宇航员不会说‘好吧，我们就把这批货物从*EL3*卸下来，再搬到实验室里去’。相反，这会是一项按计划进行的活动，整个控制中心都会严阵以待，确保不出故障、一切顺利。因此，时间安排会非常精细，就像在国际空间站进行舱外活动一样。”

同样，我们的一些参与者（如教员4）认为，所有危险或对体力要求较高的任务都应交由机器人解决方案执行。Instructor 5 表示赞同，并指出，任何不需要“非常精准操作”的任务都应优先实现自动化。

然而，这些观点远非毫无争议。例如，指导员8和工程师1强调，人类宇航员所具备的意识和批判性思维能带来一定的灵活性，从而更容易根据动态情势调整流程。科学家1指出，机器人解决方案通常经过预编程，只能执行范围狭窄、定义明确的任务，缺乏人类的多面性。他进一步解释说，训练有素的人类宇航员能够执行的任务种类繁多，因此与单独依赖机器人解决方案相比，派遣他们更加经济。指导员8采取了较为审慎的立场，认为宇航员应了解地表作业的方方面面，但其主要职责应是监督，而非直接干预。她认为，只有在别无选择时，才应接管流程的手动控制。

总而言之，虚拟现实有助于引发思考，探讨如何最佳分配职责，以及其他有助于在人类与月球上的机器人系统之间建立高效协作生态的关键因素。

### 5.4 虚拟现实的局限

虽然我们的情景成功引发了与 EL3 及未来月球表面作业相关的多种设计考量，但必须承认，若干技术局限很可能也影响了参与者所发表的意见。

触觉反馈的缺失或许是最显著的限制，这一点在搬举和操作货物集装箱及其他设备时尤为明显。几乎所有参与者都提到了缺乏重量感；正如宇航员2和 Engineer 4 所详述的那样，这使他们无法准确判断物体的质心、惯性和转动动量。例如，教员2认为，这使他无法对某些人体工学因素进行详细评估，例如搬运容器时手臂的理想摆放位置。

另一个密切相关的问题是，我们的虚拟现实模拟无法再现穿着笨重的 xEMU 航天服所带来的行动限制。例如，Scientist 3 坚称玩家行动过于轻松，并不符合现实；而 Instructor 4 和科学家2都认为，只有充分考虑航天服带来的限制，才能恰当地评估攀爬梯子等某些流程。

正如 Instructor 5 总结的那样，视听虚拟现实模拟因此难以有效评估有关物体操作和物理力学的问题。宇航员2重申了这一观点，并指出，虚拟现实的主要优势其实在于能够让用户获得态势感知：

**宇航员2：** “它其实没法让我深入了解事物的运作机制。我是说，这是因为触觉反馈有限。不过，态势感知则是另一回事。它很擅长让宇航员了解自己将置身于怎样的情境中……比如光照，你懂的……我是说，通过 *[虚拟现实模拟]*，我已经能很好地感受到身处 *[月球]*会是什么样子。这是个巨大的优势。所以我不想说它毫无价值，它非常有价值。”

其他参与者也表达了类似看法。Instructor 5 称赞了这样一种机会：将设计方案作为更广泛情境中的组成部分来体验，而不是把它们当作孤立的原型。Instructor 4 认为，这使虚拟现实尤其适用于舱外活动的规划。工程师3也表示赞同，认为虚拟现实有助于可视化机器人操作的时序，并找出可能需要人工干预的环节。

总体而言，可以明确的是，至少部分根植于当代虚拟现实技术的局限性，可能会削弱虚拟现实作为设计工具的可行性。同样重要的是，我们还发现了若干优势，这些优势或许会在即将开展的设计活动中发挥非常有用的作用。下一节将更详细地讨论这些发现。

## 6 讨论

虚拟现实中的交互式模拟能够快速评估和迭代开发新颖的设计概念，同时无需承担通常与现实世界中的原型部署相关的诸多财务、物流或时间成本。在本研究中，我们着手探索虚拟现实赋能的设计流程，将其置于正在推进的月球着陆计划这一独特背景下。我们以 EL3 项目为研究场域，开展了一项由专家参与者组成的模拟实地研究。

传统上，该领域的方法依赖于在现实世界类比场地开展的实地研究。通过重现月球的一些极端环境条件，此类研究已被证明有助于在真实情境下评估设计方案运行绩效的各个方面。此外，经典实地研究也已成功用于评估设计方案与更广泛任务架构的契合程度。

另一方面，此类研究的高度复杂性和资源密集特性，也导致实验性部署的数量和频率往往有限，而且通常只涉及少数参与者，进而造成反馈循环缓慢、项目结构僵化。

我们的研究结果表明，基于虚拟现实的实地研究有望通过支持人机交互领域常见的、更灵活、以用户为中心的设计方法，缓解其中一些问题。与现实世界的类比环境类似，虚拟现实适合重现月球环境条件的某些方面，同时还可在更广泛的任务背景下评估设计概念。虚拟现实不仅能引发可付诸行动的反思，也很适合促进团队协调，从而改善空间系统设计中的整体项目管理流程。下文将进一步阐述这些关键启示，并提出未来研究方向。

### 6.1 虚拟现实支持以用户为中心的设计

我们参与者的定性体验表明，虚拟现实能够引发并唤起人们围绕低技术成熟度等级概念所涉及的人体工程学、安全性和乘组绩效问题的一系列反思。尽管以用户为中心的设计方法已在其他领域（例如汽车 [40]或医疗 [71] 行业）取得巨大成功，但在涉及月球表面解决方案设计的项目中，对模拟实地研究的依赖导致用户研究往往在开发周期的后期开展，频率较低，且参与者人数受限。

虚拟现实之所以可能颠覆这一既有格局，一个有力的理由是，现代虚拟现实引擎几乎能够完全控制光线的表现方式。鉴于独特的月球光照条件势必会影响未来月球载人作业的方方面面，在原型制作和设计活动的早期阶段将这些因素纳入考量至关重要。虚拟现实能够让用户沉浸式、交互式地在各种照明情境下评估设计概念，因此似乎特别适合这一用途。如此一来，基于虚拟现实的实地研究或许能开辟一种新颖且极具资源效率的方法，从月球系统开发的最早阶段起收集可能至关重要的用户反馈。

同样重要的是，也要考虑到虚拟现实在设计评估其他领域应用时面临的一些局限。例如，在虚拟现实中准确模拟物理交互，仍是一项重大的技术挑战 [43]。参与者明确指出，无法感受到月球重力、质量和惯性，以及航天服活动限制，都是其不足之处；有人认为，这可能导致研究未能充分揭示一些潜在的重要设计挑战。尽管第 6.4 节将详述解决其中部分局限的潜在方法，但真实实地研究与模拟实地研究之间的保真度差距似乎永远无法彻底消除。

因此，我们并非意在主张基于虚拟现实的设计探究应取代传统的模拟研究，而是建议在设计早期阶段，当实体原型尚不具备部署和测试的可行性时，以此作为替代方案。我们的研究发现了大量证据，表明这种方法或许有助于为模拟部署制作更完善、更符合用户需求的原型，从而节省整个开发过程中的时间和资源。

回到 Trotta 等人呼吁人机交互社区创新未来太空界面设计这一观点 [87], , 由此我们可以得出结论：虚拟现实有望显著拓展人机交互设计方法的适用范围，使以用户为中心的设计流程能够应用于空间系统设计领域。

## 6.2 虚拟现实促进情境探究

除了适用于在真实环境条件（如光照）下交互式可视化潜在设计方案外，我们的研究还发现，虚拟现实有助于人们思考更广泛的运行情境，包括不同设计概念之间的互操作性，以及它们与潜在任务流程的契合程度。

在 HCI 领域，早期设计原型的情境化需求已经受到了一定关注。例如，Salovaara 等人指出了 HCI 研究中的一个“盲点”：任何在研究中部署的面向未来的原型，实际上仍然牢牢存在于当下的世界中 [75]。同样，Lindley 等人倡导，应当评估早期设计概念在完全采用后可能呈现的样貌，即“超越其原型化实现”[54], , 从而更好地预见（并规避）围绕其未来使用可能出现的摩擦。

> 应对这一问题的一种常见方式是使用叙事原型，例如情景或设计虚构。正如 Bleecker 所阐述的那样，“关于未来技术的故事，同时也是关于我们想象中围绕它逐渐发展起来的更广泛社会实践的故事。”[7]

这种“宏观图景”视角在模拟实地研究以及面向未来太空解决方案的实验性部署中，传统上也备受重视。正如 Beaton 等人所解释的，这类研究的一个关键目标，是在“人员、通信、硬件、软件和数据产品的组织与流动”这一情境中识别并评估设计要素。 [2]

相应地，通过在虚拟现实中呈现设计情景，我们得以同时展示概念及其情境的沉浸式呈现，使用户能够对其进行探索和考察。这样一来，虚拟现实便有效地为我们的设计评估融入了情境探究的要素 [26]。

这很快便显现出诸多益处，因为我们的研究揭示了所呈现的设计方案之间存在的协同与摩擦实例。例如，便携式货物容器与舱外活动服之间的兼容性问题、宇航员与月球着陆器舱段之间的信息共享，以及任务控制中心与月球表面工作人员之间如何最优分配能力。若只研究原型，而不模拟更广泛的运行情境，这些考量很可能都不会浮现。然而，每一项考量都可能对为未来设计工作提供参考并指引其方向至关重要。

此类情境访谈的价值并不局限于空间系统设计领域。举例而言，先前研究指出，目前缺乏用于评估多设备体验的工具和方法 [24]。因此，本研究的一项贡献在于，为在复杂且依赖情境的人机生态系统设计评估中采用基于虚拟现实的情境提供了实证依据。

## 6.3 虚拟现实为项目团队提供坐标

如前所述，空间系统设计项目以僵化著称，必须应对缓慢的反馈循环，而这会导致与最终用户（例如宇航员）及其他利益相关者之间的协调不畅。通常，人们会通过各种形式的基于模型的系统工程（MBSE）来应对这类问题。MBSE 的核心理念是围绕一组模型来构建工程项目，这些模型通过突出重要的子系统和要素、简化或省略相关性较低的特征，来呈现项目的关键方面 [47]。此类模型既可以呈现社会情境，也可以呈现技术情境，帮助工程师协调并纳入范围广泛且多样的需求，包括灵活性、可持续性、实时能力、适应性、可扩展性、可靠性或可用性 [72]。

通过以数字孪生和数字线程为核心的数字通信，取代僵化、昂贵且缓慢的纸质文档，基于模型的系统工程能够促进多名个人或团队之间快速交换信息与协作，使工程项目从一开始就能开展设计分析活动。

从这个意义上说，以基于模型的系统工程为核心的方法被誉为一种潜在的转变：从经典、高度成熟、线性、僵化且以文档为中心的流程，转向更具协作性、非线性且灵活的数字信息化方法。

然而，当代基于模型的系统工程方法及其相关最佳实践，在不同工程学科之间差异很大；而模型应如何呈现才最理想，也一直是备受讨论的话题 [94]。因此，跨学科团队常常面临这样的困境：培训所需的时间和精力、深入理解基于模型的系统工程建模语言的要求、所采用模型的复杂性，以及现有工具的灵活性有限，令其难以应用。结果是，基于模型的系统工程设计方法尚未得到广泛采纳 [53], , 这一点在载人航天项目中尤为明显；这类项目以必须平衡工程、科学和政治利益而闻名 [94]。

我们认为，我们的工作贡献之一在于，它展示了虚拟现实作为一种可行载体的潜在适用性，

可用于该领域的基于模型的系统工程方法。通过基于模型的系统工程方法构建的系统模型，确实可以从设计早期阶段起借助虚拟现实工具实现虚拟化，使相关利益相关者能够同时审查预期的项目成果。这有助于减轻开发团队的工作负担和压力，同时降低成本超支和项目延期的风险。

此外，我们的工作表明，虚拟现实或许同样有助于解决长期以来备受诟病的基于模型的系统工程互操作性不足问题；在载人航天项目背景下，这一问题已被确定为全面采用基于模型方法的关键要求 [28, 53]。正如我们的研究结果所示，通过虚拟现实场景传达的早期概念模型能够切实用于吸引多元化的利益相关者，从宇航员到工程师和管理人员，建立一种统一的语言，使早期阶段的设计方案、其共同创造及评估能够跨领域、跨学科地被理解和参与。

## 6.4 局限性与未来方向

不同于通常致力于最大限度提升用户行为有效性的基于虚拟现实的训练应用 [79], ，我们的模拟实地研究的首要目标则是引发有效的用户反思。因此可以认为，我们的探究具有现象学性质，领域专家借助自身的个人经验参与其中，这使得我们能够在一定程度上对模拟交互进行抽象和简化。以往的研究似乎支持这一点；例如，Osterlund 等人发现，纯粹的视听模拟能够促使领域专家针对防护服中的航空航天维护运行提出有效且可付诸行动的设计反馈 [66]。

因此，虽然虚拟现实模拟的单一感官特性不太可能影响所呈现研究结果的整体有效性，但我们也发现了若干情况：通过混合现实界面提供更广泛的感官参与，很可能会带来更丰富、更准确的用户反馈。下文将讨论这方面的主要问题，并就开发用于模拟月球表面场景的未来界面提出建议。

- **触觉** - 缺乏触感、重量感和刚度等物理属性，妨碍了参与者评估模拟中操控货物集装箱及其他人造物时涉及的关键人体工程学方面。未来的研究应考虑使用虚拟现实或混合现实工具，为重要的虚拟物体配备真实世界中的实体模型。例如，可以利用光流追踪实体模型，并将虚拟环境叠加其上。先前研究表明，以这种方式将实体模型与视觉虚拟现实界面结合使用，能够显著提升用户感知到的沉浸感 [20, 34]。

- **低重力** - 未来的工作还应探索将虚拟现实模拟与重力卸载系统结合的可能性，以人为降低重力水平——既降低用户所受的重力，也降低前文提到的实体模型所受的重力。此类系统通常设有锚点，可将实体模型固定其上，从而按期望的比例减轻其重量（例如 NASA ARGOS 系统 [64]）。同样，将此类系统应用于用户，也能让他们在四处行走时更真切地体验低重力的感觉。

- **航天服**——准确模拟舱外活动服施加的动作限制，同样有助于提升相关设计反思的有效性。尽管现实训练中已经采用了多种限制动作的方案 [9], ，但这些方案在虚拟现实中的应用仍鲜有探索，这可能是因为其适用范围有限且存在追踪困难。一个过渡性方案或许是在洞穴式自动虚拟环境（洞穴式自动虚拟环境）中使用真实的舱外活动服。不过，鉴于洞穴式自动虚拟环境的沉浸能力不及较新型的虚拟现实头显，我们认为这种做法并不理想。相反，我们建议将虚拟现实护目镜集成到改装后的舱外活动服中，从而兼顾准确的动作限制与视觉沉浸感。采用这种交互界面时，舱外活动手套笨重的特点可能会影响光学手指追踪的精度（即便使用视觉追踪标记也是如此）。因此，模拟涉及精细动作技能的情景，很可能需要配备内置惯性追踪传感器的手套。

- **通信**- 研究参与者经常提到任务控制中心与月球地面工作人员之间通信的重要作用。未来研究若要探索更复杂的月球场景（例如，依赖任务控制中心主动指导的工作流程），可以通过能够模拟相关操作限制的界面来加以完善，例如通信延迟（通常与月球通信时约为 2.5 秒），从而评估这对乘员工作流程可能产生的影响，并探索潜在的解决办法。

- **融合现实**- 归根结底，综合以上各点，若研究优先考虑真实性，或可尝试将混合现实界面与经典实地研究相结合，从而兼得两者的优势。虚拟元素可以增强模拟环境近似月球条件的能力，例如模拟能见度不佳、尘埃或独特的月球地形特征。将真实环境与虚拟环境融合的做法在实践中已展现出潜力。例如，军方飞行员曾在驾驶真实飞机时使用虚拟现实头显，在空中加油期间与计算机生成的加油机进行对接程序训练 [19]。

这绝非相关问题领域的详尽列表，而是对我们研究中最突出显现的问题的概述。其他研究曾指出，例如，多用户虚拟现实界面 [5, 50] 的益处。不过，显而易见的是，解决上述任一问题都将提升整体仿真有效性，从而有助于改进未来基于虚拟现实、针对人类月球（及行星）探索相关设计挑战的研究。

## 7 结论

我们的虚拟实地研究证明，在月球系统开发的早期阶段采用以人为中心的设计方法是可行的。在此类早期设计阶段让最终用户及其他利益相关者参与其中，益处众多，包括节省成本和时间，以及改进项目管理流程。

我们认为，虚拟现实的灵活性，加上其准确模拟月球光照条件的能力，构成了在系统设计早期阶段采纳虚拟现实的一大有力动因。虚拟现实能够同时呈现概念与背景，从而凸显设计方案的互操作性，因此也非常适合用于评估设计概念与关键任务要素之间的协同效应和摩擦。此外，我们的研究结果表明，虚拟现实的视觉特性和易用性，使其有望成为促进开发早期相关团队成员之间沟通的有力工具，进而为传统上僵化的项目结构引入敏捷要素。

基于我们的观察和参与者反馈，我们还总结了与基于虚拟现实的月球环境模拟相关的主要技术局限。针对这些挑战，我们提出了通过更多地利用混合现实界面来应对问题的可能途径。

最后，本研究的一项重要目标，是探索人机交互研究与设计方法在载人月球探索背景下的实用性。尽管人机交互传统上与更贴近日常生活、工作和娱乐的场景相关联，生活、工作和娱乐 [23], 但它完全有能力应对人类重返月球所面临的诸多挑战。唯有跨越学科界限并汇聚各方力量，才能应对这一事业的规模与范围。我们希望通过本文，朝着这一目标迈出第一步。

## 致谢

我们谨向位于科隆的欧洲宇航员中心致谢，感谢他们为我们提供专业参与者，使本研究得以开展。我们尤其感谢 Lionel Ferra 和 XR实验室为我们的工作提供技术资源，感谢 Ludovic Duvet 监督虚拟 EL3模型的开发，也感谢 Hervé Stevenin 分享有关欧洲航天局模拟研究的资料与见解。我们还要感谢匿名的 CHI 审稿人，他们帮助我们更深入地思考这项工作的意义，以及它在人机交互领域中的价值。

## 参考文献

[1] 2017. 洛克希德·马丁借助虚拟现实削减成本——经由卫星——。 https://www.satellitetoday.com/innovation/2017/04/20/lockheed-martin-cutting-costs-virtual-reality/[2] Kara H Beaton、Steven P Chappell、Andrew FJ Abercromby、Matthew J Miller、Shannon E Kobs Nawotniak、Allyson L Brady、Adam H Stevens、Samuel J Payler、Scott S Hughes 和 Darlene SS Lim。2019。利用科学驱动的模拟研究，探讨载人行星探测的舱外活动科学运行概念与能力。《天体生物学》33 (2019)，300–320。第4期。[3] Kara H Beaton、Steven P Chappell、Alex Menzies、Victor Luo、So Young Kim- Castet、Dava Newman、Jeffrey Hoffman、Johannes Norheim、Eswar Ananda- padmanaban、Stewart P Abercrombie、Shannon E Kobs Nawotniak、Andrew F J Abercromby 和 Darlene S S Lim。2020。源自 NASA BASALT研究计划、用于科学驱动探索的任务增强型舱外活动能力。《行星与空间科学》193 (2020)，105003。https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105003

[4] Leif P Berg 和 Judy M Vance。2017年。虚拟现实在产品设计与制造中的行业应用：一项调查。《虚拟现实》21，1（2017），1–17。[5] Aurora Berni 和 Yuri Borgianni。2020年。虚拟现实在工程与产品设计中的应用：为何、何物、如何、何时以及何地。《电子学》9，7（2020），1064。[6] L. Bessone、F. Sauro 和 H. Stevenin。2015年。利用地面模拟环境开展安全高效的航天飞行操作训练。《太空安全并非偶然》，313–318。https://doi.org/10 1007 978 3 319 15982 9_37。/ - - - - Julian Bleecker。设计虚构：[7] 2022关于设计、科学、事实与虚构的短文。《机器学习与城市：建筑与城市设计中的应用》（2022），561–578。[8] Guy Andre Boy 和 Donald Platt。2013年。用于人类深空探索的态势感知助手。载于《国际人机交互会议》。施普林格，629–636。[9] Jeffrey R Braden 和 David L Akin。2002年。用于中性浮力舱外活动研究的航天服模拟装置的开发与测试。《开发》1（2002），2364。[10] Virginia Braun 和 Victoria Clarke。2006年。在心理学中使用主题分析。《心理学定性研究》3，2（2006），77–101。[11] Dorota Budzyn、Hervé Stevenin、Matthias Maurer、Francesco Sauro 和 Loredana Bessone。2018年。利用欧洲航天局的月球舱外行走模拟，对月球表面地质采样工具进行原型制作。第69届国际宇航大会（IAC），德国不来梅。[12] M Cardano、M Ferrino、M Costa 和 P Giorgi。2009年。用于支持国际空间站加压哥伦布舱内在轨乘员操作和有效载荷维护的虚拟现实/增强现实工具。载于第60届国际宇航大会，韩国大田。12–16。[13] William C Carey、Ludovic Duvet、Nick Gollins、Rogier Schonenborg、Alexander Cropp、Giorgio Cifani、Keith Stephenson、Philipp B Hager、Yannick Le Deuff、Kim Nergaard、Thorsten Graber、Jennifer Reynolds、Giorgio Magistrati、Sandra Mangunsong、Jorge Alves、Francesca McDonald 和 Nadine Boersma。2021年。欧洲月球表面进入计划：EL3任务方案。第72届国际宇航大会（IAC）。[14] John M Carroll。2003年。实现使用：人机交互的基于场景的设计。麻省理工学院出版社。[15] Andrea EM Casini、Petra Mittler、Aidan Cowley、Lukas Schlüter、Marthe Faber、Beate Fischer、Melanie von der Wiesche 和 Matthias Maurer。2020年。欧洲宇航员中心的月球模拟设施开发：LUNA项目。《太空安全工程杂志》7，4（2020），510–518。[16] Andrea E M Casini、Paolo Maggiore、Nicole Viola、Valter Basso、Marinella Ferrino、Jeffrey A Hoffman 和 Aidan Cowley。2018年。通过虚拟现实环境分析用于火星任务支撑技术的月球前哨站。《宇航学报》143（2018），353–361。[17] Donald G Chavers。2016年。美国国家航空航天局着陆器技术项目状态。载于《美国航空航天学会太空2016》。5221。[18] Manfred E Clynes 和 Nathan S Kline。1960年。赛博格与太空。《宇航学》14，9（1960），26–27。[19] Monroe Conner。2015年。《融合现实：让想象变得真实》。[20] Wang Dangxiao、GUO Yuan、LIU Shiyi、Yuru Zhang、Xu Weiliang 和 Xiao Jing。2019年。虚拟现实触觉显示：进展与挑战。《虚拟现实与智能硬件》1，2（2019），136–162。[21] Geert de Haan。2015年。人机交互设计方法：下一步是什么？从以用户为中心到创意设计及更进一步。载于《2015年欧洲认知工效学会议论文集》。1–8。[22] Nicholas De Monchaux。2011年。《宇航服：塑造阿波罗计划》。麻省理工学院出版社。[23] Sebastian Deterding、Miguel Sicart、Lennart Nacke、Kenton O'Hara 和 Dan Dixon。2011年。游戏化：在非游戏情境中使用游戏设计元素。载于《CHI'11计算机系统中的人为因素扩展摘要》。2425–2428。[24] Tao Dong、Elizabeth F Churchill 和 Jeffrey Nichols。2016年。理解多设备体验设计与开发的挑战。载于《2016年ACM交互系统设计会议论文集》。62–72。[25] Tobias Drey、Jan Gugenheimer、Julian Karlbauer、Maximilian Milo 和 Enrico Rukzio。2020年。Vrsketchin：探索虚拟现实中笔与平板交互的三维草图绘制设计空间。载于《2020年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集》，1–14。[26] Sabrina Duda、Carolyn Warburton 和 Nissa Black。2020年。情境研究。载于《国际人机交互会议》。施普林格，33–49。[27] Ludovic Duvet、Alexander Cropp、Philipp Hager、Kim Nergaard、Nick Gollins、Giorgio Cifani、Rogier Schonenborg、William Carey、Florian Renk、Lorenzo Bucci、Sarah Mangunsong、Yannick Le Deuff、Alberto Gonzalez Fernandez、Antonios Tavoularis、Andrea Casini、Gilles Nzokira、Giorgio Magistrati、Davide Rovelli 和 Keith Stephenson。2021年。欧洲月球表面进入计划：EL3。第72届国际宇航大会（IAC）。[28] Harald Eisenmann、Juan Miro 和 Hans Peter de Koning。2009年。用于欧洲航天系统开发的基于模型的系统工程。《INSIGHT》12（2009年12月），47–53。第4期。https://doi.org/10 1002 200912447 。/inst。Dean B Eppler。月球表面作业[29] 1991的照明限制。《NASA STI/Recon技术报告》N 91（1991），23014。

[30] K Anders Ericsson 和 Herbert A Simon。1980年。作为数据的口头报告。《心理学评论》87（1980），215。第3期。[31] 欧洲航天局。2021年。上下一致——月球救援装置在水下进行测试。https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/As_above_so_below_lunar_rescue_device_tested_underwater [32] 欧洲航天局。2021年。为月球打造工具包。https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Building_a_toolkit_for_the_Moon[33] 欧洲航天局。2021年。水下月球漫步。https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/07/Moon_walking_underwater [34] Daniel Fitzgerald 和 Hiroshi Ishii。2018年。Mediate：面向混合现实的空间实体交互界面。载于《2018年CHI计算机系统中的人为因素会议扩展摘要》。1–6。[35] Jeff Foust。2021年。月球航天服无法及时赶上2024年着陆任务。https://spacenews.com/lunar-spacesuits-wont-be-ready-in-time-for-2024-landing/#:~:text=InfurtherdelaystoArtemis。[36] Stephanie G Fussell 和 Dothang Truong。2021年。利用虚拟现实进行动态学习：扩展技术接受模型。《虚拟现实》（2021），1–19。[37] Stefania Garassini 和 Maria Grazia Mattei。1994年。晚间演讲：虚拟现实的现状。《人类与机器视觉》（1994），385–388。[38] Martin Gasser、Christa M. Feucht、Árni B. Stefánsson 和 Michael Chalmer Dunn。2019年。冰岛西部用于月球和火星研究的熔岩管类比测试场。2019年EPSC-DPS联合会议，2019年9月15日至20日在瑞士日内瓦举行，编号EPSC-DPS2019-182。[39] Jie Geng、Ying Li、Ranran Wang、Zili Wang、Chuan Lv 和 Dong Zhou。2017年。一种基于虚拟维护的卫星组装与故障排查评估方法。《宇航学报》138（2017），434–453。[40] David Goedicke、Jamy Li、Vanessa Evers 和 Wendy Ju。2018年。Vr-oom：虚拟现实道路驾驶模拟。载于《2018年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集》，1–11。[41] Nick Gollins、Shahrzad Timman、Max Braun 和 Markus Landgraf。2020年。利用欧洲大型后勤着陆器打造欧洲月球探测能力。欧洲地球科学联盟大会。[42] 泰雷兹集团。2021年。欧洲航天局宇航员 Alexander Gerst 和 Luca Parmitano 使用虚拟化身，检查月球“门户”未来居住舱的住宿条件。https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/esa-astronauts-alexander-gerst-and-luca-parmitano-use-their-avatars-check-out [43] Zhenyi He、Fengyuan Zhu 和 Ken Perlin。2017年。Physhare：在虚拟现实中共享物理交互。第30届ACM用户界面软件与技术研讨会附加出版物，17–19。[44] Kaj Helin。2017年。面向AIT、AIV和运行的增强现实。《航天工程与技术最终展示日》。[45] Kaj Helin、Timo Kuula、Carlo Vizzi、Jaakko Karjalainen 和 Alla Vovk。2018年。用于支持宇航员手动操作的增强现实系统用户体验。《机器人学与人工智能前沿》5（2018），106。[46] Sebastian Hubenschmid、Jonathan Wieland、Daniel Immanuel Fink、Andrea Batch、Johannes Zagermann、Niklas Elmqvist 和 Harald Reiterer。2022年。ReLive：连接原位与非原位视觉分析，以分析混合现实用户研究。载于《CHI计算机系统中的人为因素会议》，1–20。[47] Lvar Jacobson 和 James Grady Booc Rumbaugh。1999年。《统一建模语言参考手册》。Addison-Wesley Longman。[48] Jason Jerald。2015年。《虚拟现实之书：以人为中心的虚拟现实设计》。Morgan & Claypool。[49] Hans-Christian Jetter、Roman Rädle、Tiare Feuchtner、Christoph Anthes、Judith Friedl 和 Clemens Nylandsted Klokmose。2020年。“在虚拟现实中，一切皆有可能！”：在虚拟现实中绘制和模拟具备空间感知能力的交互空间。载于《2020年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集》，1–16。[50] Wiesław Kopeć、Cezary Biele、Monika Kornacka、Grzegorz Pochwatko、Anna Jaskulska、Kinga Skorupska、Julia Paluch、Piotr Gago、Barbara Karpowicz、Marcin Niewiński等。2021年。人机交互前沿领域的人机协作、交互与自动化参与式设计图景（PDL 2021）。载于《人机交互——INTERACT 2021：第18届IFIP TC 13国际会议，意大利巴里，2021年8月30日至9月3日，论文集，第V部分》。施普林格，564–569。[51] Markus Landgraf、Ludovic Duvet、Alexander Cropp、Gustavo Alvarez、Grzegorz Ambroszkiewicz、Massimiliano Bottacini、Pierre Brunner、Lorenzo Bucci、William Carey、Andrea Emanuele Maria Casini等。2022年。欧洲自主登月：欧洲大型后勤着陆器。载于《国际宇航大会论文集》，IAC。[52] Jee Hyun Lee、Eun Kyoung Yang 和 Zhong Yuan Sun。2019年。在虚拟现实设计环境中设计能够激发创造力的认知行为。载于《2019年创造力与认知会议论文集》，604–611。[53] Louise Lindblad、Marco Witzmann 和 Simon vanden Bussche。2016年。基于模型的系统工程：从网页浏览器实现工业实践。SECESA。https://www.valispace.com/wp-content/uploads/2021/02/Lindblad-SECESA-2016-Valispace-web-browser-engineering.pdf [54] Joseph Lindley、Paul Coulton 和 Miriam Sturdee。2017年。采用的影响。《2017年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集》系统，265 277 10 1145 3025453 3025742 – 。[55] 1995 https://doi.org/ 。/ 。R Bowen Loftin 和 P Kenney。1995年。哈勃太空望远镜飞行团队训练。《IEEE计算机图形与应用》15，5（1995），31–37。[56] Keith R Lohse、Courtney G E Hilderman、Katharine L Cheung、Sandy Tatla 和 H F Machiel der Loos。2014年。卒中后成人的虚拟现实疗法：一项系统综述与荟萃分析，探讨虚拟环境和商业游戏在疗法中的应用。《PloS one》9（2014），e93318。第3期。[57] Richard Léveillé。2010年。半个世纪的地面类比研究：从月球上的陨石坑到在火星上寻找生命。《行星与空间科学》58 3 2010 631 638 4 10 1016 2009 04 001（），– 。第。https://doi.org/ 。/J.PSS. 。[58] Ville Mäkelä、Rivu Radiah、Saleh Alsherif、Mohamed Khamis、Chong Xiao、Lisa Borchert、Albrecht Schmidt 和 Florian Alt。2020年。虚拟实地研究：在虚拟现实中对公共显示屏开展研究。载于《2020年CHI计算机系统人因会议论文集》。1–15。[59] Joshua McVeigh-Schultz、Max Kreminski、Keshav Prasad、Perry Hoberman 和 Scott S Fisher。2018年。沉浸式设计虚构：利用虚拟现实在虚拟故事世界中构建推测性界面和交互仪式的原型。载于《2018年交互式系统设计会议论文集》。817–829。[60] Nadine E Miner 和 Sharon A Stansfield。1994年。用于机器人控制和操作员培训的交互式虚拟现实仿真系统。载于《1994年IEEE机器人与自动化国际会议论文集》，1428–1435。[61] Thomas P Moore。1989年。美国太空飞行经验。舱外活动中的体力消耗与代谢需求：过去、现在与未来。载于美国国家航空航天局约翰逊航天中心，《长期太空飞行运动处方》研讨会。[62] Tommy Nilsson、Flavie Rometsch、Andrea Emanuele Maria Casini、Enrico Guerra、Leonie Becker、Andreas Treuer、Paul de Medeiros、Hanjo Schnellbaecher、Anna Vock 和 Aidan Cowley。2022年。利用虚拟现实设计和评估月球着陆器：EL3案例研究。载于《CHI计算机系统人因会议扩展摘要》。1–7。[63] Marianna Obrist、Yunwen Tu、Lining Yao 和 Carlos Velasco。2019年。太空食品体验：为未来太空旅行场景设计乘客的饮食体验。《计算机科学前沿》1（2019），3。[64] Sophie Orr、James Casler、Jesse Rhoades 和 Pablo de León。2022年。利用NASA主动响应重力卸载系统（ARGOS）研究模拟低重力条件下行走、跑步和跳跃的影响。《宇航学报》（2022）。[65] Gordon R. Osinski、Richard Léveillé、Alain Berinstain、Martin Lebeuf 和 Matthew Bamsey。2006年。火星和月球的地面模拟环境：加拿大的作用。《加拿大地球科学》33（2006），175–188。第4期。[66] Jeffrey Osterlund 和 Brad Lawrence。2012年。虚拟现实：载人航天训练中的虚拟化身。《宇航学报》71（2012），139–150。[67] Pat Pataranutaporn、Valentina Sumini、Ariel Ekblaw、Melodie Yashar、Sandra Häuplik-Meusburger、Susanna Testa、Marianna Obrist、Dorit Donoviel、Joseph Paradiso 和 Pattie Maes。2021年。SpaceCHI：为太空探索设计人机交互系统。载于《2021年CHI计算机系统人因会议扩展摘要》。1–6。[68] Pat Pataranutaporn、Valentina Sumini、Melodie Yashar、Susanna Testa、Marianna Obrist、Scott Davidoff、Amber M Paul、Dorit Donoviel、Jimmy Wu、Sands A Fish 等。2022年。SpaceCHI 2.0：推进太空探索的人机交互系统。载于《CHI计算机系统人因会议扩展摘要》。1–7。[69] Donald Platt、Patrick Millot 和 Guy Andre Boy。2014年。面向载人深空风险缓解的协同探索协调工具参与式设计。载于《工程心理学与认知工效学国际会议》。施普林格，363–374。[70] Allison P Porter、Barnaba Marchesini、Irina Potryasilova、Enrico Rossetto 和 Dava J Newman。2020年。用于先进航天服和行星探索的软体外骨骼膝部原型。载于《2020年IEEE航空航天会议》。IEEE，1–13。[71] Anke Verena Reinschluessel、Joern Teuber、Marc Herrlich、Jeffrey Bissel、Melanie van Eikeren、Johannes Ganser、Felicia Koeller、Fenja Kollasch、Thomas Mildner、Luca Raimondo 等。2017年。用于在手术室中浏览医学影像的非接触式交互技术的虚拟现实用户中心设计与评估。载于《2017年CHI计算机系统人因会议扩展论文集》，2001–2009。[72] D Rhodes。2008年。通过协作研究应对系统工程挑战。SEARI——系统工程发展研究倡议（2008）。[73] Flavie Rometsch、Tommy Nilsson、Paul de Medeiros、Andreas Treuer、Aidan Cowley、Andrea Emanuele Maria Casini、Ludovic Duvet、Anna Vock、Leonie Becker、Hanjo Schnellbächer 等。2022年。迈向月球表面解决方案概念化的以人为中心的框架。载于《国际宇航大会论文集》，IAC。[74] Amy Ross、Richard Rhodes 和 Shane McFarland。2018年。NASA先进舱外活动航天服压力服2018年状态与发展计划。[75] Antti Salovaara、Antti Oulasvirta 和 Giulio Jacucci。2017年。原型评估与可能的未来问题。《2017年CHI计算机系统人因会议论文集》

计算系统中的人为因素，2064–2077。https://doi.org/10.1145/ 3025453.3025658[76] Francesco Sauro、M Massironi、Riccardo Pozzobon、H Hiesinger、Nicolas Mangold、Jesús Martínez-Frías、Charles Cockell 和 Loredana Bessone。2018年。欧洲航天局PANGAEA和PANGAEA eXtension测试模拟环境。 https://www.researchgate.net/project/PANGAEA-Planetary-ANalogue-Geological-and-Astrobiological-Exercise-for-Astronauts [77] Francesco Sauro、Samuel J Payler、Matteo Massironi、Riccardo Pozzobon、Harald Hiesinger、Nicolas Mangold、Charles S Cockell、Jesus Martínez Frias、Kåre Kullerud、Leonardo Turchi 等。2023年。训练宇航员开展行星表面科学探索：欧洲航天局PANGAEA计划。《宇航学报》204（2023），222–238。[78] Erik Seedhouse。2022年。星舰。载于*SpaceX*。施普林格，171–188。[79] Emily Shaw、Tessa Roper、Tommy Nilsson、Glyn Lawson、Sue V G Cobb 和 Daniel Miller。2019年。热度升高：探索多感官虚拟环境中的用户火灾疏散行为。《*2019*年*CHI*计算机系统人因会议论文集》，1–13。[80] Thomas B Sheridan。1992年。遥操作机器人技术、自动化与人类监督控制。麻省理工学院出版社。[81] Adalberto L Simeone、Robbe Cools、Stan Depuydt、João Maria Gomes、Piet Goris、Joseph Grocott、Augusto Esteves 和 Kathrin Gerling。2022年。沉浸式推测性演绎：利用虚拟现实让未来情景和技术变得栩栩如生。载于*CHI*计算机系统人因会议。1–20。[82] David E Smith、Maria T Zuber、Gregory A Neumann、Erwan Mazarico、Frank G Lemoine、James W Head III、Paul G Lucey、Oded Aharonson、Mark S Robinson、Xiaoli Sun 等。2017年。月球轨道器激光高度计在月球轨道运行七年后的结果总结。《伊卡洛斯》283（2017），70–91。[83] Marshall Smith、Douglas Craig、Nicole Herrmann、Erin Mahoney、Jonathan Krezel、Nate McIntyre 和 Kandyce Goodliff。2020年。阿耳忒弥斯计划：NASA重返月球、让人类再次登月的活动概览。《*2020*年*IEEE*航空航天会议》，1 10 10 1109 47225 2020 9172323 – 。https://doi.org/ 。/AERO 。 。[84] Lior Somin、Zachary McKendrick、Patrick Finn 和 Ehud Sharlin。2021年。Breach-Mob：利用虚拟现实检测物理环境中的漏洞。《第*27*届*ACM*虚拟现实软件与技术研讨会论文集》，1–6。[85] Daniele Sportillo、Alexis Paljic、Mehdi Boukhris、Philippe Fuchs、Luciano Ojeda 和 Vincent Roussarie。2017年。用于半自动驾驶模拟的沉浸式虚拟现实系统：现实与六自由度之间的比较

基于控制器的交互。第九届国际计算机与自动化工程会议论文集，6–10。[86] Valentina Sumini、Manuel Muccillo、Jamie Milliken、Ariel Ekblaw 和 Joseph Paradiso。2020年。SpaceHuman：用于太空探索的软体机器人假肢。载于*2020*年*CHI*计算机系统人因会议扩展摘要集。1–8。[87] Roberto Trotta、Daniel Hajas、José Eliel Camargo-Molina、Robert Cobden、Emanuela Maggioni、Marianna Obrist 等。2020年。通过多感官隐喻体验传播宇宙学。（2020）。[88] Leonardo Turchi、S. J. Payler、Francesco Sauro、Riccardo Pozzobon、Matteo Massironi 和 Loredana Bessone。2021年。电子野外记录簿：支持宇航员培训和载人行星探测期间分布式野外科学作业的系统。《行星与空间科学》197（3，2021）。https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105164[89] Benjamin Vanoutryve、Diego De Rosa、Richard Fisackerly、Berengere Houdou、James Carpenter、Christian Philippe、Alain Pradier、Aliac Jojaghaian、Sylvie Es- pinasse 和 Bruno Gardini。2010年。基于辉夜号数据对月球南极附近照明和通信条件的分析。国际行星探测器研讨会论文集，巴塞罗那。[90] Anna Vock 和 Tommy Nilsson。2022年。月球熔岩管综合前哨站设计。载于国际宇航大会论文集，*IAC*。[91] Marcel Walch、Julian Frommel、Katja Rogers、Felix Schüssel、Philipp Hock、David Dobbelstein 和 Michael Weber。2017年。从玩家体验角度评估虚拟现实驾驶模拟。*2017*年*CHI*计算机系统人因会议扩展摘要集，2982–2989。[92] Renee Weber、Barbara Cohen 和 Samuel Lawrence。2021年。《阿尔忒弥斯三号科学定义团队报告》。https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/artemis-iii-science-definition-report-12042020c.pdf [93] Matthew Weinzierl。2018年。太空：最终的经济前沿。《经济展望杂志》32，2（2018），173–92。[94] Jamie Whitehouse、Alberto González Fernández、Elaheh Maleki 和 Anh Toan Bui Long。2021年。欧洲航天局的基于模型的系统工程：欧洲航天局任务与活动中的基于模型的系统工程现状。载于*2021*年基于模型的系统工程会议，*https://indico. esa. int/event/386/timetable*。[95] Carolin Wienrich、Nina Döllinger、Simon Kock、Kristina Schindler 和 Ole Traupe。2018年。评估虚拟现实中的用户体验——对不同测量方法的比较。国际设计、用户体验与可用性会议，573–589。