

载人航天出版工程

总主编：周建平
总策划：邓宁丰

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

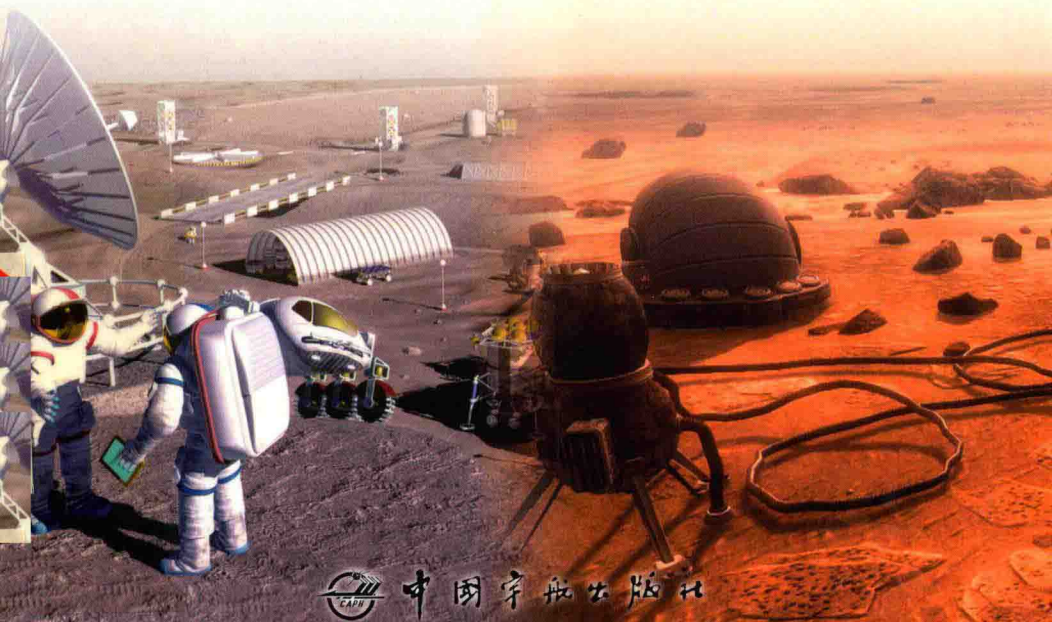
 Springer

面向载人月球及火星探测任务的 原位资源利用技术

Use of Extraterrestrial Resources for
Human Space Missions to Moon or Mars

[美] 唐纳德·拉普 (Donald Rapp) 著

果琳丽 郭世亮 张志贤 等 译
李志杰 李 民



中国宇航出版社



点出版物出版规划项目

面向载人月球及火星探测 任务的原位资源利用技术

Use of Extraterrestrial Resources for
Human Space Missions to Moon or Mars

[美] 唐纳德·拉普 (Donald Rapp)

果琳丽 郭世亮 张志贤 等
李志杰 李 民



中国宇航出版社

· 北 京 ·

Translation from the English language edition:
Use of Extraterrestrial Resources for Human Space Missions to Moon or Mars
by Donald Rapp

Copyright © Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2013

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer – Verlag GmbH

All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行，未经出版者书面许可，不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号：图字：01-2018-2171号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

面向载人月球及火星探测任务的原位资源利用技术 /
(美) 唐纳德·拉普 (Donald Rapp) 著；果琳丽等译
．--北京：中国宇航出版社，2018.4

书名原文：Use of Extraterrestrial Resources
for Human Space Missions to Moon or Mars

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1459 - 6

I. ①面… II. ①唐… ②果… III. ①外太空—资源
利用 IV. ①V11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 061967 号

责任编辑 彭晨光

封面设计 宇星文化

出版
发行
社址

北京市阜成路 8 号
(010)60286808

邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)68371900

(010)60286887

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2018 年 4 月第 1 版

2018 年 4 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 7.375

字数 212 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1459 - 6

定价 148.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自 1992 年立项以来，已经走过了 20 多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了 10 艘神舟飞船和 1 个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

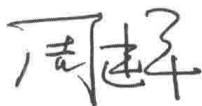
我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程的各专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

译 序

千百年来，人类对未知世界的探索、对深邃神秘宇宙的探索从未停歇。在浩瀚无垠的宇宙中，人类是否是孤单的存在？人类是否只能是地球的生灵？人类对地外天体的探索是否只能停留在月球时代？带着这些疑问，中国人开展了载人航天工程和深空探测工程实践。经过多年的艰苦奋斗，2017年我们完成了天舟一号和天宫二号的交会对接及在轨补加任务，实现了中国航天员3人乘组在轨30天的中期驻留目标，预计在2022年前后将建成中国首个空间站，保障航天员顺利执行长期在轨飞行任务；与此同时，中国月球探测工程取得显著进展，2018年嫦娥四号月球探测器将在月球背面着陆，2019年嫦娥五号月球探测器将完成月面采样返回任务，2020年将发射火星探测器，预计最终于2021年7月降落火星表面，同时实现巡视探测和环绕探测两大功能。可以想象，在航天员长期在轨飞行和月球/火星探测积累的科学和工程技术基础上，中国人登陆月球及火星的日子还会远吗？

然而，人类登陆月球及以远的地外天体必然是个复杂的巨系统工程，涉及到行星科学、航天医学及航天工程能力建设等多方面的科学和技术知识，以我们现有的工程能力来看，载人深空探测任务的特点必然是系统规模大、技术风险多、任务成本高、研制周期长，因此，美俄等航天强国在重返月球、载人登陆火星的道路上一直表现出犹豫不决、摇摆不定的发展态势，这就更加要求我们必须科学技术原理的基础上去寻求新突破，树立新思维及新观点。

原位资源利用（In Situ Resource Utilization, ISRU）技术是指

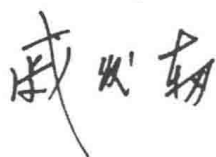
利用月球/火星上的大气、水冰、土壤、矿物等资源来制造人类长期生存所需的氧气、水、食物及推进剂等的技术，如果能够在月球/火星上制造出推进剂并对飞行器进行补给，或者原位制造出人类生存所需的生命保障物质，这将显著减少从地球发射时后勤补给物资的携带量，这项前瞻性、颠覆性技术无疑能显著改变载人深空探测的飞行模式，降低系统规模，减少任务成本。然而航天技术发展到今天，人类对地外资源的成功利用只有太阳能，那么这项前瞻性技术的价值和应用前景究竟怎样？能不能给未来的载人深空探测工程带来革命性的突破呢？

为此，我提议课题组翻译美国喷气推进实验室（JPL）的《面向载人月球及火星探测任务的原位资源利用技术》这本书。此书详细介绍了美国国家航空航天局（NASA）在 ISRU 实践中走过的曲折探索历程，包括对原位资源利用技术的价值探讨、月球/火星原位资源利用技术的原理方法和实验过程，并在结论中指出人类实现载人登陆火星必须突破 ISRU，并对实现 ISRU 的步骤给出建议。希望通过这本书的翻译和出版，能让我国年轻一代的科研人员充分借鉴国外的科学实践经验和教训，为中国载人深空探测任务带来新思想、新观点，并促使我国的工程技术人员更加注重基础研究和原理突破，占领科学技术的制高点。“以工程任务为经，技术基础为纬”，真正推动中国从航天大国走向航天强国。

本书的翻译力图忠实于原著，但原著中作者的观点我们并不完全赞同，例如在分析月球任务 ISRU 的价值时，将月球资源的探测费用一并计入。试想即使不发展 ISRU 技术，我们就会停止对月球资源的勘探吗？显而易见不会，人类迟早会离开地球这个摇篮移居到其他地外天体，而月球是最佳的技术试验场，就像本书中指出火星 ISRU 具有显著价值，那更需极早在月球上开展演练，才能确保载人火星探测任务的成功。因此关于 ISRU 技术的价值和效益，不

应该仅以某次任务的净利润来评判，而应放到人类文明史发展的长河中来看。任何新技术的研发和前期使用通常都是亏损的，看不见效益的，例如重复使用飞行器中的航天飞机，但发展重复使用技术却是降低航天发射任务成本的必由之路。关于这一点还需要读者以批判性的思维来审视书中的观点。

感谢唐纳德·拉普博士的倾心力著，感谢斯普林格出版社授权翻译出版此书。由于时间仓促，本书翻译中的不妥之处在所难免，敬请同行批评指正！我愿意与大家同学习、共进步！



中国工程院院士

2017 年 12 月

序

从人类进入太空最早的探险活动开始，有远见的人们已经在考虑如何开发利用地外资源，以便最终让人类文明从地球转移到太空成为可能。一篇重要的早期文献（Ash, Dowler and Varsi, 1978）提出在火星上生产火星上升器所用的推进剂，因此原位生产推进剂（ISPP）这一术语被创造出来，并成为几十年来的研究重点。在火星上实现 ISPP 是利用地外天体资源最显而易见的选择，因为它不仅满足了重要的需求，而且相比其他大多数可能的技术更具可行性。

随着时间的推移，有远见的人们不局限于眼前，他们设想着将工业革命和电子革命带到其他行星上去。在其他星球上生产和制造金属物体，制造混凝土建筑块并组装成不同的房屋结构，用当地原料制成电子设备。因此，ISPP 变成一个过时的术语，并被 ISRU 所取代，后者比单纯的原位推进剂生产有着更广泛的应用。

罗伯特·祖布林（Robert Zubrin）是美国著名的火星技术专家，是探索火星的倡导者，也是火星协会（Mars Society）的创始人和总裁。他编写的《进入太空》（*Entering Space*）一书为人类在太空中的定居提供了一个令人深思的路线图。

罗伯特·祖布林考虑寻找“火星表面上过去生命的化石”，以及使用“钻井获取仍可维持火星生命的地下水”，他认为火星探险带来的灵感具有很大的社会价值。他同时提到：“去火星最重要的原因，就是它打开了通向未来之门。作为独特的太阳系的类地行星，火星拥有着不仅可以支持生命，还可以支持发展技术文明所需的所有资源，在火星上建立起我们的第一个立足之地后，将开启人类作为多

星球物种的事业。”

有许多火星爱好者支持罗伯特·祖布林（火星协会的目标是“进一步探索和定居红色星球”）。十多年前，他们相信可以在十年内将人类送到火星，并开始长期定居。每年国际航天发展大会都会接待一些制定火星上长期定居详细计划的未来科学家，火星协会经常将火星定居点描述为“殖民化”历史中的下一步，并警告不要再犯与地球殖民过程中同样的错误，例如，火星协会的俄勒冈分会说：

“当定居点初步建立时，很可能会有几个小型村镇。随着时间的流逝，他们应该散布开。建设中的村镇越分散，他们发展自己文化的可能性就越大。起初，村镇将相互依赖，以共享资源，如食物、水、燃料和空气。一旦火星上建立了更加稳固的基础设施，就应该鼓励人们建立更多的独立村镇。在任何已经发生殖民或扩张的地方，一个不容忽视的重要事项就是法律，在火星上也需要某种形式的法律。从旧西方所采用的制度中，我们可以看到，无论谁执法，都很难完成它的工作。火星上的“治安官”必须是大多数人同意并值得信赖的人。他们不应该由当前对政治感兴趣的社会成员选出，因为这只会助长腐败。相反，应该允许某些志愿者的随机选择制度。对于法律本身，应该设立到位，从言论到隐私，保证每个人的所有基本权利。”

虽然这些热心人已经关注在火星上建立法律和秩序，并花时间为火星表面布局村镇，但这位谦逊的作家只关心安全的往返和费用是否负担得起。

ISRU 的预见是漫无止境的。富于想象力的建议充斥着各种未来主义系统。例如一种沿着月球或火星表面滚动的磨冰机车辆，吸收富含二氧化硅的浮土，将其实时加工成硅，并在车辆经过的路面上铺成绵延数英里的硅太阳能电池地毯。

美国国家航空航天局（NASA）并不是铁板一块的组织，其内

部一个 ISRU 爱好者的骨干组织正在不断寻求获得 NASA 更大的支持，以进一步发展 ISRU。自 20 世纪 90 年代以来，爱好者们为 ISRU 的研发制定了精心的计划，包括生产更加基础的物质（用于推进剂生产、生命支持）以及更加雄心勃勃的物质（用于复杂零件和设备的原位加工与组装、原位制造和修理）。

NASA 的 ISRU 爱好者的做法似乎是基于这样一个观点：如果这个过程是利用地外资源而不是从地球带来的资源，那么这个过程本身就是值得的。虽然他们发表了许多报告、宣传文件和项目计划书，但我无法找到任何详细的经济分析的内容，将开发和实施 ISRU 以及勘探资源的成本与因 ISRU 节约的成本做比较。因此，他们所考虑使用的这些工序，在许多情况下，我认为是不切实际的，而且与实现成本相比没有什么回报。

为了对 NASA 的 ISRU 管理人员做到公平合理，必须指出的是 NASA 管理层的领导者多年来极度摇摆不定，导致其制定的方案和政策始于极大的狂欢，结束于毫无征兆¹。预算升升降降，且难以实现年度连续性。NASA 的技术主题已经从“前所未有的”转变为“震撼世界的”“革命性的”“改变游戏规则”的²。它的重点一直是寻求令人难以置信的突破，因此，那些工程上用来改进实用系统的项目迟迟得不到资助，这反过来迫使远见者的关注超出近期可得的前景。值得注意的是项目经理往往会对此持谨慎观望态度，因此在项目计划中，ISRU 往往会被贬低为次要优先事项。在这种环境下，在出现新技术机遇的时候，NASA 的 ISRU 经理们都倾向于向 NASA 总部提出远远超过合理预期的资金水平，以期获得所要求的一小部分。然而不可避免地，长远的计划如此野心勃勃，以至于现实与计划

¹ 这让人注意到 NASA 项目的六个阶段：1) 狂热；2) 极大的期望；3) 大规模的幻灭；4) 追查有罪者；5) 惩罚无辜者；6) 非参与者的晋升。

² 结果是 NASA 技术发展规划经常被打乱，因为规则频繁发生变化。

之间的分歧变得越来越大。2005 年，NASA 的空间探索愿景（Vision for Space Exploration）公布时，ISRU 爱好者提出了以验证月球和火星上的 ISRU 为目标的全面机器人和载人先行者探测计划，均未获得资金资助，也没有任何理由相信他们会被资助。就像 ISRU 这样的计划，基本上都被认为是虚构和幻想的。当所有 NASA 部门转而执行登月任务时，有关火星 ISRU 的少量的工作也被取消了，新的资金仅用于月球 ISRU 研究。

不幸的是，任何形式的月球 ISRU 似乎都没有太大的经济意义。而且，实施月球 ISRU 所涉及的技术挑战是巨大的。至少在短时期内，没有一个月球 ISRU 计划具有实际的经济优势，相反地，从地球上提供资源却更好、更便宜、更简单。相比之下，某些形式的火星 ISRU 对载人登火星任务来说却有着后勤保障和经济效益上的优势。然而火星 ISRU 从未获得比最低限度更多的资金资助，过去七年中的资助金额基本为零，大量资金都投入到了月球 ISRU。

在本书中，回顾了可用于月球和火星 ISRU 的资源以及已经提出实施的技术；讨论了如何在载人任务中实施 ISRU，并且考虑在有限数据的情况下，对有 ISRU 和没有 ISRU 的任务进行了比较。正如人们所期待的，载人任务中最有可能且最具可行效益的 ISRU 是提供飞行器返回地球所需的上升器推进剂。不幸的是，在这方面月球任务却有很大的困难。从月壤中生产氧气的方法，没有一个在经济上是可行的，从月球阴影坑中提取水冰的方法也是不可行的，而且从月球阴影坑中探测水冰的成本过高。除了这些障碍之外，任务计划要求在月球上使用长期可贮存的供月球着陆器上升器用的推进剂，从而消除对氧气（ISRU 所生产）作为上升器推进剂的任何需求。如果这还不够，基于安全考虑，要求月球着陆器在下降时保留上升推进剂，以便在异常情况下回到“中止轨道”。然而，NASA 在过去几年中花费数千万美元，为月球上的 ISRU 研发了复杂的生产氧气的

原型样机，但这些办法似乎并不划算。

在火星上使用 ISRU 生产推进剂可能会变得更可行更具经济效益，但是仍有很大的障碍需要克服。与月球不同，似乎确定的是可将氧气（也可能是甲烷）用于火星上升的过程中，确保采用 ISRU 在火星上生产的推进剂满足任务需求。火星上有两种潜在的资源：大气中的 CO_2 和近地表沉积物中的 H_2O 。已经提出了两种仅利用大气中的 CO_2 生产氧气的方案。固态电解在理论上很吸引人，但似乎具有不可逾越的技术挑战；所谓的逆水-气转化（Reverse Water - Gas Shift, RWGS）过程可能是有价值的。不幸的是，NASA 在 1997 年资助祖布林及其同事们做出初步具有创新成果的研究之后，便对这项技术就不再感兴趣了，在之后的十五年不再提供资金，而是在不切实际的月球 ISRU 计划上花了数百万美元。

一个经过深入研究的实用的萨巴蒂尔-电解（Sabatier - Electrolysis）方法可以从 CO_2 和 H_2 中生产 CH_4 和 O_2 。在火星上实现 RWGS 的过程存在的问题是如何获得氢气。NASA 的早期任务计划假设从地球带去氢，但似乎低估了这种技术的难度，更重要的是在火星上贮存氢是非常困难的。有迹象表明，火星上有大量近地表 H_2O ³，在近赤道也是如此。如果这些 H_2O 都是可以获取的，且可以提供大量的氢源，那么这种形式的火星 ISRU 的主要问题不是制备过程，而是近地表 H_2O 的探测，即需要做的是在从轨道上进行远距离近地表观测，使用中子质谱仪确认近地表含有 H_2O 的火星区域。这可能涉及火星气球、飞机或滑翔机、多个着陆器组网飞行或可以临时变轨到低轨的飞行器。这些技术在 NASA 的优先级列表中似乎都不高。

因此，我们得出以下结论：

³ 我们在这里用 H_2O 而不用水来表示，是因为不知道 H_2O 是以水冰还是以矿物质水合物的形式存在。

1) 没有一项月球 ISRU 在经济上是可行的;

2) 火星 RWGS 过程可能是一个可行的选择, 但 NASA 在初步成功的研究成果之后对这项技术不再提供资金支持, 使得该项技术有很大不确定性;

3) 如果可以提供氢源, 火星 ISRU 的萨巴蒂尔电解过程在技术上和经济上都是可行的; 从地球携带氢气并将其贮存在火星上是有问题的, 而且对火星近地表 H_2O 的勘探需要较高的费用;

4) 然而, 火星近地表 H_2O 的勘探似乎是 ISRU 助力人类太空活动的最具成本效益和技术上最具可行性的方法;

5) NASA 研究中心有远见的人似乎是基于这样的假设在继续实践, 那就是如果是 ISRU, 那它一定是有价值的, 因此他们继续追求具有学术价值但似乎没有实用价值的方法。

作者介绍

唐纳德·拉普在库伯联盟学院获得化学工程学士学位，1956 年获得普林斯顿大学化学工程硕士学位，1960 年 1 月获得伯克利大学化学物理学博士学位。多年来他从事化学物理学研究工作，著作颇丰。他任教于德克萨斯大学，1973 年成为教授（39 岁）。在德克萨斯大学，他出版了关于量子力学、分析力学以及太阳能的教材。1979 年进入加州理工大学喷气推进实验室（JPL），成为动力学与化学系统处（有员工 700 人，其中博士 100 人）的首席技术专家（高级技术人员）。在喷气推进实验室，他是探索新技术的先锋，是发起起源发现计划（Genesis Discovery Project）的项目主管，这项计划的目的是将太阳风的样本运回地球。他的提案在 25 名竞争者中脱颖而出，在“发现 5”（Discovery 5）比赛中赢得了 2.2 亿美元的资助。起源发现计划实施于 2001—2004 年间。1998 年，他在 OMEGA MIDEDEX 计划（1.39 亿美元）中扮演了关键角色。随后，他成为深度撞击计划（Deep Impact Discovery）的项目主管。这项计划的目的是用弹射物去撞击彗星以便对其内部进行研究，为喷气推进实验室带来了 3.2 亿美元的经费。深度撞击计划于 2005 年取得了举世瞩目的成就。他曾是火星探索技术项目的总负责人，同时也是该项目中原位生产推进剂（ISPP）任务的负责人。他完成了一份关于将火星资源转变成用于返回地球的推进剂的具有里程碑意义的报告。2001 年，他完成了《火星技术方案报告》。

在 2001—2002 年间，他在 NASA 工作期间对能量转化技术、能量贮存、光电能量转化技术的评估方面做出杰出贡献。他还领导了

喷气推进实验室完成了关于火星任务中利用地外资源设想的研究工作。2002年,他完成了《NASA空间科学技术蓝图报告》(NASA office of Space Science Technology Blueprint for Harley Thronson, NASA Technology Director),这是一份长达100页的关于未来任务中所需技术的评估报告。

2003—2006年间,他在NASA总部修订和完善了这份技术蓝图报告。

2004年,他担任火星科学实验室探地雷达项目的主管;2004—2006年间,他致力于载人火星和月球探测任务的研究。以这段工作经历为背景,他完成了《载人火星探测任务》(Human Missions to Mars)这部著作,2007年由斯普林格(Springer Praxis)出版社出版,这是一部520页并包含200多幅插图的巨著。

几十年间,他是喷气推进实验室ISRU技术的领导者。在这个岗位上,他领导实施了许多研究实验和分析工作,并在20世纪80年代、90年代和新世纪伊始的这二三十年间,将这些工作汇集成多份报告和出版物。上述这些工作为本书奠定了基础。

荣誉

- 发表的两篇文章以超过500次引用而成为经典引文;
- 《化学物理学报》《物理评论》《美国物理学报》《物理化学学报》的审稿专家,以及其他期刊超过300篇文章的审稿人;
- 《今日物理》和其他期刊的评论专家;
- 一篇文章因超过370次引用而被评选为“经典引文”;
- 入选《西方名人录》;
- 入选《科学技术前沿名人录》;
- 入选《美国名人录》;
- 入选《成就之人》;
- 入选《国际当代成就名人录》;

- 入选《国际专家名人录》;
- 入选《美洲人物》;
- 入选《当代科技名人录》;
- 入选《科技名人录》;
- 入选《加利福尼亚州名人录》;
- 入选《专家名人录》;
- 入选《两千著名美国人》;
- 入选《国际传记词典》;
- 入选《斯特拉斯莫尔名人录》;
- 2002年10月荣获NASA特殊贡献奖;
- 2006年至今,担任《火星日报》杂志副主编。

出版著作

- 《量子力学》(*Quantum Mechanics*), 672页, 1971, 霍尔特·莱因哈特·温斯顿出版社;
- 《统计力学》(*Statistical Mechanics*), 330页, 1972, 霍尔特·莱因哈特·温斯顿出版社, 1977年被翻译成日语, 2012年修订后再版, 亚马逊书店上架;
- 《太阳能》(*Solar Energy*), 516页, 1981, 普林蒂斯霍尔出版社;
- 《载人火星探测任务——探索红色星球的使能技术》(*Human Missions to Mars: Enabling Technologies for Exploring the Red Planet*), 552页, 精装, 16页彩色插图, 2007.10;
- 《气候变化评估——温度、太阳辐射和热平衡》(*Assessing Climate Change: Temperatures, Solar Radiation and Heat Balance*), 丛书: 环境科学领域的实践书籍, 斯普林格出版社, 410页, 130幅图表, 精装, 2008.02, 2010年再版;
- 《气候辩论》(*Climate Debate*), 亚马逊书店上架;