



国防科技著作精品译丛



Springer

Autonomous and Autonomic Systems:
With Applications to NASA Intelligent
Spacecraft Operations and Exploration Systems

自主系统及其在NASA智能 航天器操作和探测系统中的应用

【美】Walt Truskowski, Harold L. Hallock, Christopher Rouff,
Jay Karlin, James Rash, Mike Hinchey, Roy Sterritt 著
余培军 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

自主系统及其在 NASA 智能航天器操作和探测 系统中的应用

**Autonomous and Autonomic Systems: With Applications
to NASA Intelligent Spacecraft Operations and Exploration
Systems**

[美] Walt Truszkowski, Harold L. Hallock,
Christopher Rouff, Jay Karlin, James Rash,
Mike Hinchey, Roy Sterritt 著
余培军 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2010 -113 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自主系统及其在 NASA 智能航天器操作和探测系统中的应用 / (美) 特鲁什科夫斯基 (Truskowski, W.) 等著; 余培军译. — 北京: 国防工业出版社, 2012. 3

书名原文: Autonomous and Autonomic Systems: With Applications to NASA Intelligent Spacecraft Operations and Exploration Systems

ISBN 978-7-118-07709-4

I. ①自… II. ①特… ②余… III. ①航天器-自动
检测系统 IV. ①V448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第266780号

Translation from the English language edition:

Autonomous and Autonomic Systems: With Applications to NASA Intelligent Spacecraft Operations and Exploration Systems by Truskowski et al; ISBN 978-1-84628-232-4

Copyright © 2009 Springer-Verlag London, United Kingdom as a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

版权所有, 侵权必究。

自主系统及其在 NASA 智能航天器操作和探测系统中的应用

[美] Walt Truskowski, Harold L. Hallock, Christopher Rouff,
Jay Karlin, James Rash, Mike Hinchey, Roy Sterritt 著 余培军 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京奥鑫印刷厂

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 16 1/2

字 数 272 千字

版印次 2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

随着航天任务复杂度的增加,特别是长时间、超远距离的科学探测任务或多航天器协作任务,对任务操作自动化、自主决策提出了迫切需求。Autonomous and Autonomic Systems:with Applications to NASA Intelligent Spacecraft Operations and Exploration Systems 一书由美国航空航天局的 Walt Truszkowski、Lou Hallock 等著。

本书总结了 NASA 戈达德空间飞行中心多年的任务经验以及人工智能在航天任务中应用的研究成果,探讨了自主控制涉及的核心技术、设计方法、工作模式以及在未来任务中的应用等问题,是一本不可多得的实用教材;对于提高我国航天任务自主控制水平,节约任务操作成本有着较好的借鉴意义。

本书可供从事航天任务设计和测控管理领域的研究人员和工程人员参考,也可作为大专院校相关专业的高年级本科生和研究生的参考教材。

本书在翻译和成稿过程中,得到西安卫星测控中心的领导和许多同志的帮助,在此表示感谢。其中,李建成、董卫华、辛蕾、方海舰、李淑兰、安源、冯军华翻译了第 1 章 ~ 第 7 章,韩民章、王宝华、李少敏、王晓辉翻译了第 8 章 ~ 第 11 章及附录;李建成完成全书的统稿。

由于译者水平有限,书中难免出现纰漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

2012 年 2 月

原版前言

经过多年努力, NASA 任务的飞行和地面系统已经具备了自主技术, 用于增加任务回传的科学数据、执行新的科学研究、降低任务成本等。早在 20 世纪 90 年代, NASA 戈达德空间飞行中心的研究人员就开始致力于人工智能技术在地面控制系统和航天器中的应用研究。通过对专家系统的开发和试验, 使地面系统软件操作实现了自动化, 并减少了航天器操作人员的数量。智能体技术和自主系统理念研究应运而生, 用以提高未来太空任务自主管理能力以及恶劣环境下的生存能力。

本书描述了此项研究结果, 主要阐述了“无人值守”或“无人照料”条件下能够进行任务操作。此外, 本书旨在分析证明: 在 NASA 未来太空任务中,“软件理念”对自主和自主性技术日益需要。本书对 NASA 软件设计理念的成果提供了部分文献资料。对于未来任务的硬件支持, 以及轨道姿态确定、星上资源分配、规划和调度等方面复杂的软件方面, 本书没有提及 (尽管我们参考了这些技术, 并把参考文献提供给感兴趣的读者)。

本书分为背景介绍、技术分析和应用前景三部分。

第一部分: 第 1 章介绍了自主和自动化系统, 在本书中如何定义, 以及未来太空任务应用它们的原因。第 2 章提供了地面和飞行软件概况及各支持部分的功能。第 3 章讨论了飞行自主技术的前提以及过去 30 多年的发展。第 4 章对第 3 章地面系统进行对照说明。

第二部分: 第 5 章过渡到开发自主太空任务所需的核心技术, 例如, 规划工具、协作语言、诠释工具、学习技术、感知技术, 以及以上技术的确认和证明。第 6 章讨论了基于智能技术的自主航天器设计。第 7 章讨论了协作航天器所需技术, 包括协作航天器的需求、合作自主模式、合作任务管理和协作航天器核心技术。第 8 章描述了自主系统及其形成, 未来自主系统对自主状态需求原因, 以及未来任务自主化的作用。

第三部分从第 9 章开始, 讨论了航天器星座、星座中航天器之间的协作、控制多协作航天器所遇到的困难, 以及星座多智能体范例。第 10 章对“群”技术进行了全面评述, 讨论了它在特定任务中的应用, 并提出基于群的任务软件开发。第 11 章举例说明已在计划和规划阶段可能的未来 NASA 任务, 并对本书所讨论的新任务和促使新任务成功的其他技术进行了可能性应用测试。

附录提供了读者可能感兴趣的补充信息, 帮助他们了解航天器姿态和轨道确定以及控制知识。在此, 一些关于地面和飞行软件间的智能通信操作方案、缩略语列表和术语表也给出了详细介绍。置于文末的参考文献, 是本书涉及的一些代表性著作, 但并不完全。

四类读者能够从中受益: 第一类读者, 对航天器知识感兴趣, 期望对地面和航天系统以及相关技术方向有一个总体认识; 第二类读者, 对当前飞行或地面系统的开发有一定的了解, 期望对自主系统在未来任务中所扮演角色有一个总体认识; 第三类读者, 对自主或自主技术比较熟悉, 并对其在地面和空间系统的应用有浓厚兴趣; 第四类读者, 希望能从本书中找到进行新科学研究方法的科学家, 本书能帮助他们理解有助于实现目标的技术问题。

有的读者可能已对本书所提及背景资料有一定了解, 不妨跳过一些章节。第一类读者可以阅读本书全部内容。第二类读者可以跳过第 2 章 ~ 第 4 章, 如果对自主运行的历史演变感兴趣, 可以阅读第 3、4 章。第三类读者可以跳过第 5 章进行阅读, 尽管他们可能对第 6 章 ~ 第 8 章所著内容已非常熟悉, 但还能从中找到人工智能技术在太空飞行领域应用的相关知识。

希望本书带给读者的不仅是未来自主太空任务开发方面有用的背景知识, 还能给予他们洞察现有技术的差距、满足先进任务需求的能力, 并能够启发新思维, 促进未来任务中关键技术的研究。

MD, USA	Walt Truskowski
MD, USA	Lou Hallock
VA, USA	Christopher Rouff
MD, USA	Jay Karlin
MD, USA	James Rash
Limerick, Ireland	Mike Hinchey
Belfast, Northern Ireland	Roy Sterritt

原版致谢

本书的编辑出版离不开许多专家学者的支持,在此对他们的贡献表示衷心的感谢。本书使用了 NASA 戈达德中心智能体研究方面的大量资料内容,一并表达谢意。

首先向来自 NASA 戈达德空间飞行中心的下列专家表达我们的敬意,他们为飞行软件部分提供了宝贵的信息和素材,他们是 Joe Hennessy、Elaine Shell、Dave McComas、Barbara Scott、Bruce Love、Gary Welter、Mike Tilley、Dan Berry 和 Glenn Cammarata。

在本书编写过程中,弗吉尼亚理工大学 George Hagerman 博士提供了自持续行星探测概念方面的内容,宾夕法尼亚州立大学(大湖区)Walter Cedeño 博士提供了群智能技术方面的资料,NASA 戈达德 Steve Tompkins 提供了 NASA 未来任务方面的信息,加州大学伯克利分校的 Jonathan Sprinkle 博士和 Mike Eklund 博士贡献了该校 UUV 研究方面的资料,波士顿查尔斯河分析公司的 Subrata Das 博士和他的同事提供了人工智能技术方面的信息。在此对上述专家的帮助表示特别感谢。同时我们不会忘记戈达德中心的 Jide Odubiyi 博士对智能体研究的支持以及对 AFLOAT 系统开发做出的卓越贡献。

本书离不开 NASA 戈达德中心智能体工作组在智能体概念试验台(ACT)演示验证系统和航天器星座方面的研究,以及 NASA 航天操作管理办公室项目提供的资金支持。我们也要感谢 ANTS 项目组的 Mike Riley、Steve Curtis、Pam Clark 和 Cynthia Cheung 博士,感谢他们对多智能

体的独到见解。

自主系统方面的研究还通过计算机科学研究学院和软件过程技术中心得到了阿尔斯特大学方面的支持, 以及北爱尔兰工业发展局通过欧盟 PeaceII 卓越项目中心计划提供的资金帮助。

群技术相关内容由美国宇航局安全与任务保障办公室的软件质量保障计划, 美国宇航局独立核定与复审机构的群技术形式化方法研究项目及戈达德中心的软件工程实验室提供支持。

目录

第 1 部分	背景	1
第 1 章	绪论	2
1.1	新空间任务的发展方向	4
1.2	自动、自治和自主	8
1.3	应用自治技术降低任务成本	12
1.4	智能体技术	15
1.5	小结	21
第 2 章	飞行和地面软件概述	22
2.1	地面系统软件	22
2.2	飞行控制软件	28
2.3	飞行控制系统与地面实施情况	31
第 3 章	飞行控制自主化的演进	33
3.1	飞行控制自主化的动因	34
3.2	飞行自主能力发展简史	48
3.3	当前飞行自动化/自主水平	59

第 4 章 地面自主化演进过程	61
4.1 基于智能体的飞行操作联合体	61
4.2 “熄灯”型地面操作系统	70
4.3 智能体概念试验台	72
第 2 部分 技术	82
第 5 章 自主与自治系统开发的关键技术	83
5.1 计划技术	84
5.2 协作语言	90
5.3 基于局部信息的推理	91
5.4 学习型推理技术	93
5.5 执行技术	95
5.6 感知技术	95
5.7 测试技术	97
第 6 章 自主智能型航天器设计构想	101
6.1 高级设计特性	101
6.2 远程智能体的功能	105
6.3 航天器使能技术	110
6.4 人工智能方法	112
6.5 设计远程智能体的优势	118
6.6 远程智能体任务类型	122
第 7 章 自主协作	129
7.1 空间任务对自主协作的需求	130
7.2 自主协作的通用模型	131
7.3 航天器任务管理	138
7.4 自主协作型航天器任务	140
7.5 自主协作举例: 虚拟平台	145
7.6 自主协作举例	148

第 8 章 自主系统	153
8.1 自主系统概述	153
8.2 研究进展	159
8.3 研究与技术转化问题	164
第 3 部分 应用	166
第 9 章 航天器星座自治	167
9.1 概述	167
9.2 星座简介	170
9.3 星座的优点	171
9.4 自治技术在星座中的应用	172
9.5 空间星座中的智能体	176
9.6 系统实现途径	179
第 10 章 空间任务中的群技术	183
10.1 群技术简介	184
10.2 NASA 群技术研究	185
10.3 群技术的其他应用	191
10.4 群任务中的自主能力	192
10.5 群技术的软件开发	193
10.6 未来的群概念	196
第 11 章 结束语	197
11.1 采用自治及自主技术的驱动因素	197
11.2 自治和自主系统的可靠性	198
11.3 未来的任务	199
11.4 未来 NASA 任务的自主和自治系统	202
附录 A 姿态轨道确定与控制	204
附录 B 运行场景与智能体的交互	207
B.1 星载远程智能体的交互场景	207

B.2	天地对话场景	210
B.3	地天对话场景	212
B.4	航天器星座交互场景	214
B.5	基于智能体的卫星星座控制场景	217
B.6	场景	218
附录 C 缩略语		220
附录 D 术语		223
参考文献		232

第 1 部分 背 景

为了探索未知世界、进行新的科学研究以及观测新的现象, NASA 必须开发出日益复杂的航天任务。高灵敏度的新仪器不断被研发出来, 这些设备收集海量数据的能力与日俱增。这些新的科学研究经常需要多个航天器协同工作对现象进行观测。同时, 日益复杂的新任务也需要地面系统具备与之相当的能力, 要求保持航天任务成本和建立可控制保障系统的压力也在相应提高。

在航天器设计领域中, 为支持新科学研究而采用的新范例给任务操作带来了新的概念。长期存在的国家投入资金的竞争以及对任务操作成本的关注, 促使 NASA 选择运用自适应操作技术, 并在某些航天项目^[176,195] 中几乎采用星上完全自主控制。在 NASA 新的太空探索伊始, 就强调了人和机器探索相结合的思路。当有人参与到探索任务中时, 在任务设定和设计之初, 就必须在收益、成本、风险以及可行性方面对人工管理太空资产的方式进行仔细评估。

风险是支持使用无人航天器的一个主要因素: 在两次举世瞩目的航天飞机灾难中的人员损失, 延迟了人类探索的步伐, 并且使在尽可能情况下采用自动化和机器人技术的思路更加引起关注。在可以预见的未来, 用人去完成一定类型探索任务已经变得完全不可行。例如, 对于小行星带的探索, 就提出了自主纳米技术群 (ANTS) 任务概念, 将在第 10 章进行讨论。使用微型的无人航天器, 对小行星带进行探索。对于一个类似任务的探索项目, 如果有人类参与, 费用之大会令人却步, 并且辐射等诸多因素也会给航天员带来不可接受的风险。

此外, 还存在许多航天任务因为各种因素是人类无法胜任的, 如超远

距离而导致的超长周期任务。卡西尼任务花费了 7 年时间才抵达“土卫六”(土星最重要的一颗卫星)就是其中一例。而另一个实例,就是用来帮助确定宇宙起源的破晓任务,该任务还包括使用高度计测量太阳系中两颗最古老的天体 Ceres 和 Vesta 的表面。

越来越多的无人航天任务绝对有必要被设计为自主控制系统。例如,由于航天器和地面控制人员之间存在巨大的无线电传输时间延迟,航天器接收到从地球传送来的命令再进行动作时,航天器上情况可能已经发生变化。因此,几乎完全的自主决策是必要的。再则,在持续数月的火星车操作任务中,当地球和火星处于太阳的相对方向时,从接受指示到做出响应,大约有 40 min (地球时间) 的双向延迟。

过去, NASA 的任务都是针对携带单个或几个相关仪器的独立航天器进行设计。航天器将其原始数据发送回特定的地面控制系统中,并由特定工作人员完成航天器的控制以及故障排除。许多新的太空任务不是异常复杂,就是有很长的时间延迟,或者要求对任务进行快速响应。对于此类任务,基于人的手工控制会存在很多问题或根本无法适应。最终,用于任务操作的星载软件变得越来越复杂,从而产生对软件开发技术需求日渐增多的问题。

在参与这些太空任务的过程中, NASA 一直致力于研究和开发任务操作所需的新型软件技术,自治控制和自动控制技术就是其中的两项研究成果。自治控制技术使航天器可以根据内部需求完成操作,很少或根本不需要人工提示。自治控制学是建立在自主控制技术基础之上,使航天器具备了一种被称为“自我认识”的能力。这些技术使探索新行星或深空环境的任务,在没有地面技术人员持续、实时的操作情况下,能够顺利完成。

最近的火星机器人任务中,需要不断地从控制中心获取输入和命令来使火星车每次移动几英寸的距离;这种方法,可以确保地面控制人员能及时获得周围环境的变化,为火星车提供适当的指示。由于地球和火星之间的单向通信需要 20 min,这使地面控制中心从接收到火星车的最新视频或传感器信息到发出下一条指令至少需要 40 min。在火星上或其他更远距离的机器人移动时需非常谨慎,因为它一旦翻倒或卡住,就会造成整个任务终止或使得作用严重受限。从火星上接收到新图像再把行动指令传输给机器人往往也需要几小时。时延后果非常严重,且不可避免,它对使用机器人进行太空探索产生很大的局限性。

如果这些任务能够改用自动化技术进行操作,则会有更多的探索任务能够顺利完成。这是由于飞行器能够独立、迅速地对环境做出反应,且在

通信方面没有时延,或者等待技术人员重新计算或讨论下一步的动作。直到今天,航天器和机器人没有足够强大的计算能力来实现所需要的自主。用于航天任务的防辐射微处理器的处理能力有了很大提高,这意味着自主控制技术是有可能在未来航天器上使用的,使其具有比过去更多的能力。

本书讨论航天和地面系统软件以及能够实现任务自主控制的技术基础。本章通过给出当前或近期的几个航天任务实例,阐明新的科学研究和探索中所面临的挑战。同时,还描述无论操作还是成本层面都必须在任务中实施自主控制的原因。本章还概述自主控制和自主控制技术的定义、相互之间的关系,以及两者与简单自动化之间区别。

1.1 新空间任务的发展方向

在 NASA 规划中的许多太空任务中,将会使用多个航天器去完成科学研究和探索的目标。在进行新的科学研究和探索时,使用多航天器和高级机器人的任务,搭载功能更加强大的设备,将对通信、协调以及地面操作领域带来巨大的挑战。功能更加强大的星载设备将产生更多要下传到控制中心的数据。多航天器任务协同观测也将意味着更加复杂的任务操作。类似任务操作成本的控制将是一个严峻的挑战,而最有可能的方案就是采取几个人员以流水线的方式完成对航天器的操作。

下面提到的已发射或将要发射的航天器任务说明了 NASA 规划中的任务类型。

1.1.1 新千年计划之空间技术 5 号

新千年计划之空间技术 5 号是 2006 年 3 月发射的一个为期 90 天的技术任务,目标是:在增加航天器功能的同时,检验减少其重量、大小和成本的可行性。任务所完成的科学研究是绘制地球内部磁气圈的磁场强度和方向。为了完成此任务,共使用了一组 3 颗 25 kg 级的卫星(图 1-1)。每个微卫星都载有用来测量地球磁气圈的磁力计,3 颗卫星从地球周围的不同方向同时进行测量。这项研究的成果可以使科学家能够确定出太阳风和其他现象对地球磁场的影响。

空间技术 5 号被设计成可以独立受控且能与地面直接通信的卫星系统。在为期一周的“无人值守”操作中,微卫星根据预先编制的控制命令进行“自主化”飞行,以测试是否能够通过星上控制来取代地面控制。在