

# 地面无人系统自主性评估技术

阎岩

(中国运载火箭技术研究院研发中心, 北京 100076)

**摘要:** 对地面无人系统自主性评估相关技术进行了总结, 从自主性概念、自主性评估技术的发展和度量等方面进行了分析, 讨论了自主性评估体系涉及的相关环节和评估要素等问题, 概括了自主性评估的意义和自主性评估在无人系统全寿命周期的应用, 总结了当前国内外重要的无人系统自主性评估等级参考标准, 提出了自主性评估研究的后续发展方向和研究要点。

**关键词:** 无人系统, 自主性, 等级, 评估

## 0 引言

地面无人系统, 是能够依靠自身携带的传感器感知理解外界环境, 根据任务需要实时决策执行, 以自主/半自主方式进行作业, 在已知/未知地面环境中具有一定自我学习和适应能力的智能设备<sup>[1]</sup>。从这一表述中可以看出, 地面无人系统区别于其它自动化设备的最典型特征就是它具有相当程度的“自主性”, 在一定程度上能够“无需”操作人员的干预, 实现类似于人类的自我管理。

目前在全球范围内, 无论是地面无人系统的基础技术、系统开发、生产配套, 还是技术转化和应用经验, 美国都处于世界领先地位。在国家层面上, 美国率先发布了发展路线图, 从战略高度对整个无人系统在未来 25 年的发展进行了统筹规划。与此同时, 地面无人系统的研究得到了包括美国国防部高级研究计划局 (DAPRA)、美国国家标准技术研究所 (NIST)、卡耐基梅隆大学、斯坦福大学、麻省理工学院以及通用动力、微软、Foster Miller、iRobot 等众多知名高校和公司在内的全球范围的密切关注和积极推动。

但是, 相对于原型系统研究的飞速发展, 对自主性测试和评估问题的关注并不充分, 研究相对滞后。2003 年, 美国 NIST 整合了多个部门和领域的需求, 成立了无人系统自主级别框架工作组 (ALFUS 工作组), 将自主性等级描述和相关评价问题推向了深入应用。

## 1 自主性概念

对自主性的定义, 相关研究中多有涉及: Terry<sup>[2]</sup>等提出自主系统拥有观察、分析、交流、计划和行动的能力, 并且能够完成人类通过人机交互布置给它的任务。自主性是系统自我管理的能力, 也是独立于操作者的管理程度, 通过观察、定向、解决、行动四项基本功能实现。Jeffery<sup>[3]</sup>等将自主性从自我管理能力和自我指导能力两个维度进行分解, 提出了可调节的自主等级模型。Reed<sup>[4]</sup>等将自主性定义为一个量值, 用来区别不同的自主性等级。Sean<sup>[5]</sup>等利用联合意图理论在智能控制框架中创建了可调节自主性模块, 并从系统计算能力、传感器保真度、人机接口的知识传递等角度对自主性进行了分析。

出于规范化和完备性考虑, 本文采用 ALFUS 无人系统自主性级别工作组给出的定义<sup>[6]</sup>, 即: 自主性是无人系统自我管理水平和自我管理质量的量度; 是无人系统在预定任务目标实现过程中感知、理解、分析、交流、规划及决策制定与执行的能力。尽管无人系统具备一定程度的感知、理解、分析、交流、规划及决策制定与执行能力, 但是受到现有技术水平和条件限制, 让无人系统完全脱离人的监督和操作, 具有完全的自主并不现实<sup>[7]</sup>。因此, 探索自主性度量与评估的途径和方法对无人系统的研究应用具有重要价值。

## 2 自主性评估意义和作用

### 2.1 自主性评估的意义

(1) 自主性评估是开展无人系统发展战略研究和项目论证的有效手段。通过自主性评估, 可以正确分析无人系统研究中存在的薄弱环节, 为无人系统自主性水平发展战略目标和发展方向提供保障。建立无人

系统自主性评估的框架和体系，利用定性和定量相结合的评估方法，分析系统在不同任务要求下的性能水平，促进新型地面无人系统的加速发展，为智能系统发展战略研究和项目论证提供决策支持。

(2) 自主性评估为实现无人系统全寿命管理提供技术支持。通过自主性评估，可以实现对地面无人系统全寿命周期不同阶段的管理。对相应的决策环节进行论证，建立自主性评估模型，对系统性能指标进行验证和测试，并与理论设计指标进行对比，优化项目方案，提高地面无人系统研发过程的效率，实现全寿命周期的管理。

(3) 自主性评估为其他复杂智能系统综合性能评估提供借鉴和参考。地面无人系统具备强实时、紧耦合、动态复杂等智能系统特征，其自主性评估不仅涵盖了本体物理属性和传感器部件的功能属性，同时突出了智能系统所特有的任务决策能力。通过“自主性”这一泛化的概念，可以对其他的复杂智能系统的整体效能进行直观的刻画和反映，相关技术可以为其他性能评估提供有益的借鉴和参考。

### 2.1.2 自主性评估在无人系统全寿命周期的应用

地面无人系统全寿命周期可分为方案及论证、研制及开发、运行及维护、回收及退出共四个阶段。自主性评估在各阶段中的应用主要包括：

(1) 方案及论证阶段：评价地面无人系统的设计固有能力和性能，包括无人系统本体的物理性能、传感器部件性能、功能模块性能以及集成系统性能等；确定各因素对无人系统的影响，进行多因素的比较分析；对不同的系统设计备选方案进行评价。

(2) 研制及开发阶段：结合具体的开发环境和平台，对地面无人系统各子系统和集成综合系统进行性能测试，建立评估模型，与设计方案中的预定性能进行对照；评价变更设计方案对各子系统和总体自主性能的影响，为无人系统后续周期提供决策依据。

(3) 运行及维护阶段：通过对地面无人系统的轨迹，实现系统运行状态和效果的评估；实现地面无人系统之间自主性的横向比较；建立可调节的自主性等级模式，实现灵活高效的可变自主性控制方式。

(4) 回收及退出阶段：对无人系统自主性水平衰减情况进行评估，评价无人系统回收和处置方案；为后续无人系统的设计改进和性能评估提供借鉴。

## 3 自主性评估发展

对地面无人系统自主性评估技术的研究始终伴随无人系统的演化发展而不断推进。就总体发展趋势而言，系统的自主性不断提升，评估也从基于本体论和现象学的方法发展到了基于认知和计算方法的综合评估。

在前一类评估方法中，对系统自主水平以及综合性能的评估主要面向系统自身，通过对车辆控制系统运行数据的对比分析，完成性能测试，并作为车辆自主导航、规划和行驶的评判依据。这类评估以系统调试为中心，重点面向无人系统平台的本体物理性能和传感器功能指标。同时，以人工干预程度为概括性数值依据，使自主性水平有了初步的直观表现。采用这一类评估方法的研究计划和项目包括由美国 DARPA 主持资助，众多著名高校、公司和研究单位参与的“战略计算启动计划”、“机器人合作技术联盟 CTA 计划”、“无人系统感知 PerceptOR 项目”和连续三届“Grand Challenge 无人车大挑战赛”项目。

后一类评估方法是随着智能科学以及认知理论的发展而出现的一系列的测评模型与方法。主要包括基于人机交互的启发式计算方法<sup>[8]</sup>、基于特征分析的方法<sup>[9]</sup>、基于代价分析的方法<sup>[10]</sup>、基于成本/收益分析的方法<sup>[11]</sup>、基于轨迹片段分析的方法<sup>[12]</sup>和基于智能体智能行为能力的方法<sup>[13]</sup>等多种性能决策方法。不同方法具有各自的适用范围和侧重点，对地面智能机器人以及其它无人系统的自主性评价技术的发展具有积极的影响，但并没有形成系统的评估体系。

## 4 自主性评估体系

自主性评估体系需要解答评估对象、评估内容、评估方法这三个基础性问题。从一般性原理出发，首

先以观察主体对系统的关注角度对系统自主性架构进行分析,提取有用的系统信息,如:系统组成、传感器配置等;然后建立合适的自主性评估指标体系,明确指标间的关系和权重;之后选用适当的评估方法,围绕自主性评估指标体系进行综合评价;最后将所得评估结果反馈给无人系统以及观察主体,结合评估目的与需求,对评估过程进行必要的调整和处理,并开始新的评估,具体涉及无人系统组成、系统评估指标、系统评估方法和系统评估结果四个要素,包含了评估信息提取、评估指标选择、评估方法选择、评估结果输出和评估结果反馈五个环节:

(1) 评估信息获取:从无人系统出发,对系统结构组成、传感器配置以及自主性支撑架构进行分析,提取自主性评估有效信息作为评估数据。这些评估数据中,既有通过实际测量与测试可得的数据,也有通过计算和系统测试床得到的数据,还有通过部分专家给出的主观评价数据。

(2) 评估指标选择:从无人系统建模、信息处理、任务与行为规划以及系统控制和协调等内在需求出发,建立自主性评估指标体系,全面衡量系统自主性综合水平。事实上,评估指标是系统自主性水平的综合表现形式,与研究任务的需求和研究主体的关注内容相关,因此自主性评估指标的选择具有不定型性,可以针对不同研究对象进行评估指标的调整。

(3) 评估方法选择:为获得评估指标的定性或定量结果,需要采取相应的评估方法,以达到系统评估的直观结果。通常,可以有多种不同的评估方法可以选择,各方法在评估能力的层次、评估结果的精度和评估实施过程的难易程度等方面有所区别,需要根据实际需求和条件进行选择。

(4) 评估结果输出:依据所选择的评估方法,围绕自主性评估指标体系进行系统自主性水平综合评价,得到定性或定量的评估结果,作为自主性水平高低排序或等级划分的依据。

(5) 评估结果反馈:将自主性评价结果反馈给观察主体,根据评估的目的与需求对评估过程进行必要的调整和处理。同时将评价结果反馈给无人系统,对于具有自主性自调节机制的系统,反馈结果可以作为可调节自主性模块的信息输入,通过自调节机制,实现系统的局部或整体自主水平调整,以更好地满足任务需求。

## 5 自主性等级参照

自主性等级的划分可以看作是无人系统自主性强弱的一种等级量化。采用等级参照的方式,能够将系统直观的自主性能与参照等级提供的标准进行对比,得到相应的自主性等级结果。目前,可用于无人系统自主性等级参照的依据主要包括:

(1) ALFUS 分级标准。ALFUS 分级标准将无人系统自主性能级别划分为十个等级,用数字 1~10 表示,另外用第 0 级表示自主性为零,即 100%由人工控制的程度。在十级体系中,1~3 级表征简单环境条件、较低级任务要求、较高人工干预程度;4~6 级表征中等复杂环境条件、中等难度/多功能任务要求、中等人工干预程度;7~9 级表征复杂环境条件、高复杂性/协作性任务要求、较低人工干预程度;第 10 级表征各种极端环境条件、高复杂度任务、趋近于无人工干预的完全自主程度。通过级别划分,直观反映出智能机器人自主性从“人工遥控”到“完全自主”的渐进差别。

(2) ACL 分级方法。该分级方法由美国空军 AFRL 项目组提出,主要作为无人机系统自主程度的衡量标准。由于美国在研的和未来规划的有代表性的无人机均采用 ACL 等级进行定义,因此这一自主性准则得到广泛重视。该分级方法同样将自主性分为十个等级。其中 1~3 级目前技术上已经实现,4~6 级理论研究中已经涉及,7~10 级则是未来发展方向,只适于粗略的分析。需要特别指出的是,从第 5 级开始,ACL 分级开始描述多机协同的自主控制能力,也就是说,ACL5 级以下反映了单机系统最高的自主性水平<sup>[14]</sup>。

(3) NASA Smart 分级方法。该分级方法由美国国家航空宇航局飞行器系统计划提出,共分为 8 个等级,各等级主要从系统与操作人员的交互出发,根据操作人员的干预程度进行级别划分<sup>[15]</sup>。从系统不参与任何辅助或任务执行,完全由操作者完成,到系统和操作人员共同执行分级操作,系统的任务执行级别不断提高。与 ACL 分级相比,NASA Smart 分级较精简,其最高级别第 8 级为系统执行任务,且不显示处理结果给操作者,等同于 ACL 中的第 10 级水平。

(4) ASB 分类。该方法由美国陆军科学委员会提出,主要用于地面无人系统的自主性等级描述。共分为 11 个等级,从自主性最低的第 0 级到最高的第 10 级,其中第 0 级为“人工远程控制”,相当于 ALFUS 级别中的第 1 级;从第 7 级开始,涉及多机协同工作能力。

## 6 结论

随着各国对地面无人系统技术和典型应用的广泛重视和持续投入,系统自主性评估的研究也将得到进一步发展,领域内更多的研究还值得深入:

(1) 针对系统行为体现出的自主特性,建立各类系统行为能力的规范化描述,解决评估什么的问题。

(2) 建立规范化行为描述与可测数据之间的映射关系,实现评估指标参数化,解决怎么评估的问题。

(3) 建立评估参考基准模型,为系统的自主级别评估提供客观的等级分类,直观反映系统的自主程度,并解决评估是否准确的问题。

此外,对于自主级别的评估可以看作一类多属性决策问题,因此对于决策方法的选择还有待进一步的探索。同时,对于系统态势评估和效能评估一些方法也值得借鉴。

### 参考文献:

- [1]. Connelly J, Hong W S, Mahoney R B, et al. Current challenges in autonomous vehicle development [C].// Unmanned System Technology VIII, Proceedings of SPIE. Orlando: SPIE, 2006:1-7.
- [2]. Terry H, Hrand A, Andres C, et al. Intelligent Autonomy for Unmanned Sea Surface and Underwater Vehicles. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 2008.
- [3]. Jeffery M Bradshaw. KAA: Policy-based Explorations of a Richer Model for Adjustable Autonomy. Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Netherlands, 2005: 214-221.
- [4]. Reed N. E. A User Controlled Approach to Adjustable Autonomy. Proceedings of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2005: 185-193.
- [5]. Sean A L, Jonathan T B, Marcus H H, et al. A Deontic Implementation of Adjustable Autonomy for Command and Control of Robotic Assets. Unmanned Systems Technology VIII, Proceedings of SPIE, 2006: 1-11.
- [6]. Hui-min Huang, James A, Elena M, et al. Specifying Autonomy Levels for Unmanned Systems: Intern Report. Unmanned System Technology VI, Proceedings of SPIE. Orlando: SPIE, 2004: 386-397.
- [7]. Hui-Min Huang, Kerry P, James A, et al. A framework for Autonomy Levels for Unmanned System (ALFUS). Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America, 2005:1-9.
- [8]. Wei Zhou, Jian-Bo Su. Intention Modeling of Web User for Networked Mobile Robot with Bayesian Inference. Proceedings of the fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou. 2005: 18-21.
- [9]. Raia Hadsell, Pierre Sermanet, Jan Ben, et al. Learning Long-Range Vision for Autonomous Off-road Driving. Journal of Field Robots, 2009, 26(2): 120-144.
- [10]. Evans J M. Definitions and Measures of Intelligence in Deep Blue and the Army XUV. Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. Gaithersburg, Maryland, USA: 2007.
- [11]. Hui-Min Huang, Kerry P, James A, et al. A framework for Autonomy Levels for Unmanned System (ALFUS). Proceedings of the AUVSI's Unmanned Systems North America, 2005:1-9.
- [12]. 陈扬. 基于轨迹片段的运动规划方法及其在自主车辆中的应用. 博士论文, 长沙:国防科学技术大学, 2006.
- [13]. Morrow D, Wickens C, Rantanen E, et al. Designing External Aids that Support Older Pilots' Communication. International Journal of Aviation Psychology, 2008, 18(2): 167-182.
- [14]. 牛轶峰, 沈林成, 龙涛. 攻击型无人飞行器自主控制技术研究综述. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 391-395.
- [15]. Larry A Y, Jeffrey A Y, Mark D G. System Analysis Applied to Autonomy: Application to High-altitude Long-endurance Remotely Operated Aircraft. Proceedings of the AIAA Information and Technology of Aerospace Conference. 2005: 22-31.