科学通报 2012 年 第 57 卷 第 15 期：1290 ~ 1299
评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

无人系统的自主性评价方法

王越超, 刘金国*

中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016
* 联系人, E-mail: liujinguo@sia.cn

2011-12-08 收稿, 2012-02-16 接受
国家安全重大基础研究(61381)和中国科学院优秀博士论文、院长奖获得者科研启动专项资金资助

摘要 未来不管在军事领域还是民用领域, 用于陆、海、空、天的无人系统将发挥巨大作用. 要实现无人系统的自主作业能力, 对自主性进行评价非常关键. 针对无人系统的自主性评价问题, 本文首先对自主性基本概念、自主性评价的意义进行论述, 然后对现有评价方法进行综述和分析, 旨在基于关键技术和技术成熟度两个方面的分析, 采用一种普适性的评价模型"蛛网模型"对自主性进行评价. 这种模型通过确定不同类型无人系统评价模型中纬线和经线的数量/数值, 可综合处理经线的互耦合、高维度、多样性等因素, 对无人系统自主性评价有一定参考意义.

关键词
无人系统
自主性
评价
等级
蛛网模型

近年来, 无人系统在战场、空间、深海等危险和遥远领域的成功应用, 激发了人们的研究热情. 无人系统包括深空探测器、航天器、无人机、无人地面车辆、无人船舰、无人潜器、无人值守弹药、无人传感器等[1~7]. 无人系统在现代作战和国家安全领域中不仅能够执行情报侦察、战场监视、目标指示任务, 而且还在电子干扰、防空压制、空中对抗、对地攻击等方面大显身手, 成为重要的战斗力量并最终有望部分代替有人系统, 作为未来作战和攻防的主力. 当前各国均很重视无人系统的开发、研制、试验、批产与装备, 赋予其更多的使命, 并将其列为面向未来的重要装备.

由于无人系统工作的环境多是危险或遥远的环境, 这些环境具有操作或控制人员不可达、不能去或不愿去的特征, 提高无人系统的自主性, 使之具有自主感知、自主规划与自主行为能力是无人系统发展的重要趋势. 很多机构都致力于研究各种评价方法和标准, 包括无人系统政策制定者和决策者、无人系统研制者和无人系统用户, 几乎涉及到一个产品全寿命周期的所有部门和单位[5~7].

在自主性评价研究方面, 以美国 Huang 等人[6~8]为代表的学者对无人系统的自主性水平框架进行了较为系统的研究; 此外, 美国在无人平台的标准[5,9]、无人机自主控制等级的发展路线图[10~12]、不同自主性等级的任务规划[13]等方面的研究成果位于世界前列. 近年来, 国外欧洲、日本等国家或地区的学者对无人系统或机器人系统的自主控制等级进行了深入的研究[14~20]. 随着无人系统自主控制研究热潮在国外的兴起, 无人系统的自主控制也引起了我国学者的关注, 有关自主控制等级[21~28]、自主控制和自主能力[29~36]、自主性相关问题[21,37~39]等方面的文章不断发表. 国内学术界至少在 2005 年第 2 次中俄无人机学术研讨会就有专家关注无人机的自主控制等级[21], 此后 2007 年第一届中国导航、制导与控制学术会议[22], 2009 年中国自动化大会暨两化融合高峰会议[31], 2010 年第四届中国导航、制导与控制学术会议[28], 2010 World Congress on Intelligent Control and Automation[38]等都有关于自主控制和自主性方面的研究工作发表. 此外, 国内学者组织召开了多个与自主控制和自主性有关的专题讨论会, 如 2009 年 8 月

英文版见: Wang Y C, Liu J G. Evaluation methods for the autonomy of unmanned systems. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5183-2

中国科学院沈阳自动化研究所主办了“移动机器人/无人系统自主行为”高层论坛, 2010 年 8 月中国自动化学会智能自动化专业委员会主办“自主系统智能控制”专题研讨会, 2010 年 10 月第四届中国导航、制导与控制学术会议上开展了“无人机先进控制技术”的专题讨论会, 这些讨论会极其丰富地展示和交流了我国在自主性研究领域的最新研究成果.

现有研究表明, 对无人系统的自主性进行有效的评价或者制定相关的标准, 具有技术引领作用. 为此, 本文首先对自主性基本概念、自主性评价的意义进行论述, 然后对现有评价方法进行综述和分析; 最后, 旨在基于决定自主性的关键技术和技术成熟度两个方面的分析, 采用一种普适性方面的评价模型——“蛛网模型”对自主性进行评价, 供同行共同商酌.

1 自主性的定义

自主性(autonomy)或自主(autonomous)是一个应用很广泛的词, 很多领域都有关于自主与自主性的描述. 可是, 由于针对对象的不同, 各个领域对于自主与自主性的描述各不相同. 由此, 本文主要讨论自主性在无人系统中的定义.

人们在研究无人系统的过程中发现, 无人系统之所以能够无需操作者的参与, 其关键原因就在于它能够进行自我管理, 也就是说它具有一定的自主能力. 因此, 在对无人系统进行研究的时候, 应该把明确自主性内涵放在首位. 在很多相关研究中都涉及了自主性的定义, 但以美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)无人系统自主性等级工作组(Autonomy Levels for Unmanned Systems, ALFUS)提出的定义比较全面和规范. 该工作组于 2003 年 7 月成立, 由美国国防部、商业部、运输部、能源部以及他们的客户组成. 他们对自主性做出如下定义[6]:

“自主性是无人系统拥有感知、观察、分析、交流、计划、制定决策和行动的能力, 并且完成人类通过人机交互布置给它的任务. 自主性可以根据任务的复杂性、环境的困难性和为了完成任务进行的人—机交互程度等因素来区分其等级, 进而表示出无人系统自我管理的状态和质量.”

由这个定义可以看出, 自主性即是系统独立于操作者的管理程度和自我管理的能力. 与很多自主性研究中提及的定义相似的是, 可以通过以下四项基本功能实现, 即感知(监督)、定向(诊断)、解决(计划)、行动(执行)[40]. 但因为无人系统应用领域的不同, 它的定义也会有些差别. 文献[41]是从两个维度来定义自主性: 自我指导维、自我管理维; 而文献[42]中, 将自主性定义成一个量值, 可以用其区别自主性等级的不同. 本文比较认同文献[6]中的定义, 并且认为: (1) 无人系统的自主性是指无人系统借助自身的软硬件平台和人机交互作用、针对指定使命、通过态势感知与分析和自主学习与决策, 在最小化人为参与情况下、在动态非结构环境中能够优质高效完成使命的性能; (2) 自主性可由决定上述行为能力的多个关键技术综合评定来确定.

2 自主性评价的意义

提高无人系统的自主性是无人系统发展的一种重要趋势. 研究无人系统的自主性评估方法对于无人系统研究政策制定者、无人系统的研制和设计者以及无人系统用户都有非常重要的意义. 无人系统自主性量化评估方法可以避免在无人系统自主性提法上和性能描述上的模糊性, 提高科学性和可操作性, 利于工程实现和性能逐步提高.

首先, 对规划无人系统制定者和决策者而言, 可以使他们在规划无人系统发展计划和制定引导无人系统产业发展政策时, 科学地量化无人系统的自主能力水平, 指出无人系统自主性从低到高的发展和实现之路, 给这方面工作带来很大便利. 例如, 在美国规划无人机发展的三个路线图中“自主控制等级”(Autonomous Control Levels, ACL)就在这方面起了很好的作用[10~12].

其次, 对无人系统研制者而言, 在研制产品的同时, 甚至之前就应该考虑产品的评估问题, 也就是进行评估方法研究(在可能的或已有的多个方法中用多学科多目标方法评估, 从中优选出一个合适的方法)或由于过去没有方法而直接提出评估方法, 以便衡量产品的性能是否达到了预期的目标. 例如, 美国 DARPA、美国空军和波音公司 X-45 项目团队就曾提出过衡量其自主性的方法[43].

最后, 对无人系统使用者而言, 必须有一套标准或办法, 可以对可能的多个同类产品进行评估, 以确定各个产品的好坏顺序, 或各个产品的某种重要性能的高低顺序. 目前, 有美军编号的无人机几乎都有 ACL, 以表示其自主能力.

3 现有评价方法概述

国外在无人系统的评价方面已开展了大量的研究, 并有明确的应用目标[6~12,40~55]; 国内在这方面已经逐步重视, 现有的研究主要是介绍、分析和跟踪国外的一些研究工作, 有针对性的研究工作则还刚刚起步[21~25,27~28,30,32,33,37,38]. 纵观目前无人系统的自主性评价方法, 主要有以下几种: 等级法、双坐标轴法、三坐标轴法、查表法和公式法等. 下面将分别介绍这些方法的特点和其中有代表性的例子.

3.1 等级法

等级法通常是根据系统的性能将系统的自主性分为不同的级别, 这些级别是明确量化的坐标值如 0~10 或 1~10. 比较典型的是 Sheridan 的自动装置等级 (Levels of Automation, LOA), 最早产生于 1991 年[44], 2000 年又进行了修改[45], 见表 1. 虽然这种方法并不是直接应用于无人系统, 但是无人系统本身大多是一种自动装置, 而且计算机是无人系统自主能力产生的物质基础, 因而这种方法对以后无人系统自主能力量化有一定的参考价值, 但这种方法考虑的因素比较简单, 往往只能反映系统的某个侧面或部分性能.

等级法另一较具代表性的例子是 NASA 对其飞行器系统制定的自主等级. NASA 飞行器系统计划 (Vehicle Systems Program, VSP)高空长航程部(HALE Sector)[46]对美国国防部/空军研究实验室的 ACL 做出分析, 认为 ACL 对于预想中的高空长航程科学任务而言太多而且太细, 于是采用了一种精简的自主等级, 见表 2.

NASA 飞行器系统的自主等级分为 6 个级别, 从最低 0 级的远程遥控到最高 5 级的集团合作, 并且它采用了一个很直观的数据来显示自主性等级的高低, 那就是人在无人机飞行中掌控时间的多少. 掌控时间越少, 说明无人机自主性越高, 能够自我管理的能力也就越高, 这是 NASA 的高空长航时部自主等级最大的特点; 但由于比较简单直观, 不得不忽略一些因素.

表 1 Sheridan 的自动装置等级[44]

等级	定义
1	计算机不提供任何帮助, 人应该做所有的工作
2	计算机提供整套的操作选择(项), 以及(而且)
3	对于少数选项缩小选择的范围, 或者
4	提出一种选择, 并且
5	当人准时执行这个建议, 或者
6	自动执行之前, (应该)允许人在限定的时间内做出决定, 或者
7	立刻自动执行, 然后有必要通知人, 或者
8	只有(如果)当人请求时, 在执行之后, 才(就)通知人, 或者
9	如果是自动决定(的), 在执行之后, 就通知人
10	计算机不受人支配而自主决定并做每一件事情

表 2 NASA 飞行器系统计划高空长航时部的自主等级[46]

等级	名称	描述	特征
0	遥控	仍在回路的遥控飞行(100%人为参与)	遥控飞机
1	简单的自动操作	在操作员监视下, 依靠自控设备辅助来执行任务(80%人为参与)	自动驾驶仪
2	远程操作	执行操作员提前编写的程序任务(50%人为参与)	无人机综合管理预设航路起飞点
3	高度自动化(半自主)	具有对部分态势感知能力, 可自动执行复杂任务, 并对其做出常规决策(20%人为参与)	自动起飞/着陆链路中断后可继续任务
4	完全自主	对本体及环境态势具有广泛的感知能力, 有做全面决策的能力及权限(≤5%人为参与)	自动任务重规划
5	协同操作	数架无人机之间团队协作	合作和协同飞行

3.2 双坐标轴法

双坐标轴法通常是综合考虑自主性、时间两个因素, 自主性坐标轴上标注有自主性水平等级和内涵, 时间轴上依次标注有自主性发展的年代. 在双坐标法中可以比较清楚的看到, 在特定时间内、特定无人系统所达到的自主性水平. 该方法便于科研人员和政府部门制定研究规划和决策. 比较具有代表性的有美国军方提出的自主控制水平(Autonomous Control Level, ACL), 如图 1[10]. 它将系统的自主控制水平分为: 遥控引导、实时健康诊断、适应故障和飞行条件、飞行器路径重规划、团队协调、团队战术重规划、团队战术目标、分布控制、团队战略目标、完全自主群体等十个等级.

根据自主性的定义, 能够看出自主性即是系统对自我进行管理的能力, 这种能力在程度上也是有强弱之分的. 自主性等级就是量化了自主性的强弱程度, 系统所需的交互信息量和这种量化之间是成反比关系的. 无人系统对外界的交互信息要求的越多, 即对操作员的依赖性越强, 那么它的自主等级也

就越低; 要是无人系统被外界完全控制, 那就变成了遥控系统; 换句话说, 要是无人系统对交互信息要求的很少, 即对来自系统外的依赖越少, 就说明它的自主性比越强, 自主等级也就越高.

无人系统自主能力等级的提出, 最终都是为完成无人系统的作业任务, 如对多无人系统控制的攻击任务做出服务. 现在对 ACL 进行简单分析和介绍[10~12]. 以无人机为例, 具体而言, 在 ACL3 前系统追求的是遥控能力, 从 ACL3 开始对系统追求的是初步的作战能力, 即火力控制能力, 例如: 2000 年出的路线图中给 2005 年研制的 X-45 定了 ACL3 的目标. 而到了 ACL4, 也就达到单个无人系统的火力控制能力的至高水平. 这也是为什么要在工程实现上得在同一个等级上, 与理论研究上可以齐头并进的原因. 另一方面, ACL1-3 开始逐步完善个体的性能, ACL4 表示了个体的最高性能, ACL5-10 表现具体的群体特性(由于没有表明具体意义, 也就导致对 ACL5-10 的理解分歧最大)可以是对地攻击, 也可以是侦察. 但是, ACL 10 追求的无疑就是一种无人战斗机的群体作战方式, 无人系统的最高作战模式就是多无人系统攻击, 而不是单无人系统攻击, 这实际上和有人机作战使用的情况是一样的.

3.3 三坐标轴法

三坐标轴法通常是考虑评价系统自主性的 3 个方面, 然后确定不同方面系统所能达到的等级, 总体水平通过这些等级加权得出. 这种方法的特点是较前面的方法更加全面的考虑了决定系统自主性的多个因素, 但这些因素之间的耦合和独立性难以判别. 比较有代表性的是美国国家标准和技术研究所(NIST)智能系统部 Huang 等人[6~8]正在研究的无人系统自主等级 (Autonomy Levels for Unmanned Systems, ALFUS), 如图 2.

ALFUS 工作组通过 3 个主要因素提出了评定自主性等级模型, 并用之对无人系统的自主性等级做出衡量, 这 3 个主要因素为: 执行任务时所处环境的复杂性、对外界的依赖程度和系统所有处理的任务本身的复杂性. 工作组将这几个影响自主等级的因素分别描述在 3 个轴上, 每条轴都有分别衡量环境复杂性、对外界依赖程度和任务复杂性的一套度量方法. 如图 2 所示, 用三维坐标的方法对无人系统的自主等级做出综合评价. 它的主要思想是, 当对自主等级进行评定的时候, 首先应该分解所要执行的任务, 接着从最底层的子任务开始做起, 并根据模型中对3个因素的度量来为其分配权值, 然后对同一级别的任务将其权值求和再平均. 而自主等级作为在它们上层的任务, 应依次计算直到求得最顶层任务的自主性等级. 但是在实际应用中, 这个模型仍存在着很多不容忽视的问题. 比如, 每个坐标轴上的因素应怎样进行具体的衡量, 而权值又该进行怎样的分配; 其次, 还有一个开放的问题就是如何评估系统自主等级, 可供选择的方案有很多, 其中包括加权求最大值/最小值和加权求平均值等方法, 不同的选择方案也许会产生不同的评价结果.

3.4 查表法

查表法通常是在表格中分别设置系统的性能等

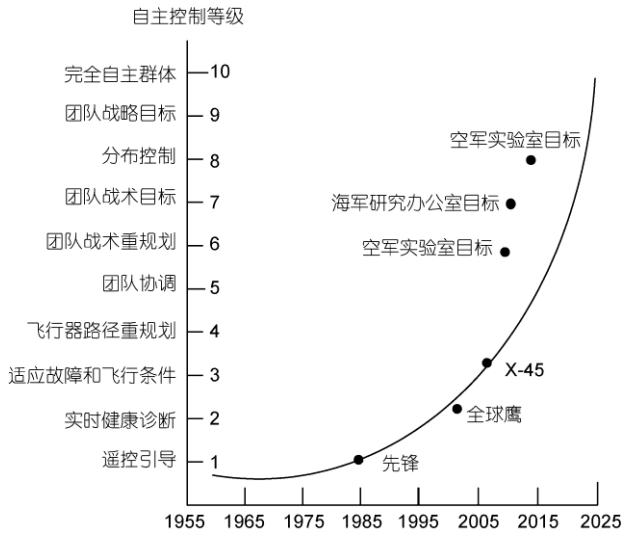

图 1 自主控制水平[10]

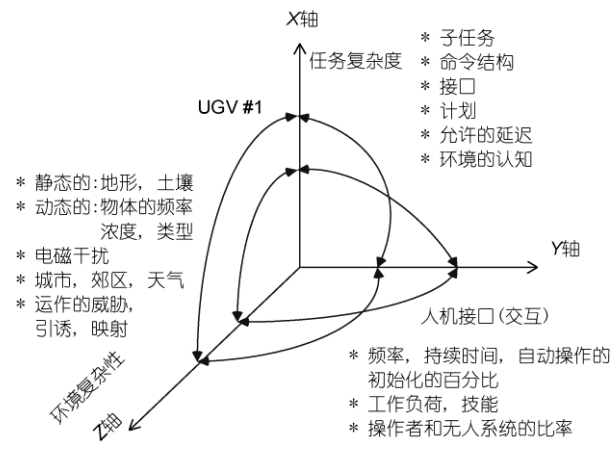

图 2 ALFUS 框架[6]

级刻度、评价参数和评价指标等, 是一种多维评价方法. 这种方法可以比较详细的描述系统各个方面的自主性水平, 但同一系统在不同评价参数下将具有不同的值. 比较有代表性的工作是 Draper 实验室的 3D 智能空间评价方法, 如表 3[52,53]. Draper 实验室已开发了数年的军事机器人系统, 他们迫切需要衡量机器人系统的系统性能以便能够执行各种任务. 海军研究办公室提供了一些作业要求指标, 根据这些指标, Draper 实验室的研究人员从运动控制、任务规划、状态理解 3 个方面, 设置了 4 个等级来评价系统的自主性. 在这里对 Draper 的三维智能空间做简单介绍. 这些标准是德雷伯实验室的研究人员研究出来的. 这份标准包含几个不同的选项, 便于标定. 我们可以从表 3 中看到三维智能空间的概述, 具有两个特点:

(1) 它有 3 个指标, 所以仍然可以使用三轴坐标图表示结果, 这让管理人员很愿意使用.

(2) 它有一个关于标定任务级问题的选项.

三维智能空间表就是利用最简单的方法来评估体系的成功与失败. 首先它建立了一个任务的发展空间, 在对任务深入的分析研究之后, 大量的影响因子可以被确定出来; 然后利用合作、情景意识和未知情况规划 3 个方面分别表示任务的程度, 并在每个方面添加大量的影响因子来判定系统在此方面的等级. 最后把 3 个方面的情况综合起来, 就成了一个理想的系统判定方法.

3.5 公式法

公式法通常是利用一个多变量函数直接计算系统的自主性水平. 这种多变量函数通常有乘积型和加权型两种, 对函数的设计、变量的选择和权值/指数的确定有很高的要求, 通常需要大量的经验和数据作为基础, 并只针对特定的系统. 比较有代表性的是 Curtin 等人[48]的工作, 他们通过如下的公式来定义水下机器人的自主性和智能性:

$$\text{自主性} = C_n\left[\frac{\text{控制量}}{\text{总信息量}}\right]^{-i}\left[\frac{\text{控制时间}}{\text{总任务时间}}\right]^{-j}, \quad (1)$$

$$\text{只能性} = C_x\left[\frac{\text{完成使命时间}}{\text{最大坚持时间}}\right]^{-m}\left[\frac{\text{达到成果}}{\text{期望目标}}\right]^{-n}, \quad (2)$$

式中, C_n 为任务联系指数, C_x 为任务复杂性指数.

这种定义的好处是他们有能力对不同系统的性能进行量化和规范化. 该方法被用于评价多个无人系统之间的避碰性能, 最初开始获得的基准数据正用于这一目的, 后来完成了越来越多的作业任务. 除了相对评估, AUV 的智能和自主性评价在判断系统的法律责任方面也很重要.

纽约州立大学的 Doboli 等人[55]在他们的论文中也提出了一种新的对于自主性判定的计算方法. 他们认为自主的数量和质量取决于人类的输入必须保证系统正确运行在一个广泛变化的空间, 但这项规则在特定地理区域、在一段时间内的时间才能适应.

3.6 经典方法拓展

前面提到的评价方法中, 比较典型且被广泛引用和应用的有 Sheridan 的自动装置等级(Levels of Automation, LOA)、美国军方提出的自主控制水平(Autonomous Control Level, ACL)和 Huang 等人研究的无人系统自主性等级(Autonomy Levels for Unmanned Systems, ALFUS)等.

基于这些评价方法, 国内外研究人员进行了不同程度的深入展开和应用研究. 如杨哲和张汝波在 ALFUS 评价方法的基础上, 提出将环境变化度、任务完成度、系统状态稳定度、人机交互程度 4 个方面的指标来对无人系统的自主等级进行评定; 然后, 将模糊集合论的方法引入其中, 用模糊决策的方法来量化无人系统的自主等级[25]. 基于分析人类的智能活动机理和对美国无人机自主控制等级划分的深入研究, 陈宗基等人提出了无人机自主控制等级的 9 级建议, 从自主功能、自主类别、智能属性和信息互通能力等几个方面, 进一步丰富了自主控制水平的评价等级内涵[28]. Suresh 和 Ghose 对 11 级自主性控制等级(ACL)从单机自主性到团体自主性进行了深入

表 3 三维智能空间图表[52]

等级	动态控制	任务规划	情景感知
1	无, 如雷达一样	无, 如雷达一样	无, 如雷达或传感器一样
2	按命令行进	定点或功能导向	低层次的传感器处理, 例如: 视觉跟随(跟踪模板)
3	能到达航点, 完成基本指令	解读行动目标	进行单传感器的模型匹配
4	能完成复杂动作	可以进行团队合作	集成多传感器融合工作

的研究, 并通过大量的文献对每一级自主性进行详细的解释, 把每一级细分成几个亚层, 并且认为实现无人机的自主性, 通信和信息在其中将起关键作用[20]. 这些工作极大地拓展了自主性评价方法的研究内容和范围.

4 普适性评价方法初探

无人系统自主能力量化评估方法非常重要, 但进行研究时, 由于技术上的差距和文化上的不同, 以及其他原因, 例如技术保密等, 可能会导致我们的理解和方法制定者所要表达的意思上的差距. 实际上, 这个问题早就存在, 尤其当介绍国外的技术方法, 特别是先进方法时. 另外, 各研究单位或机构对评估方法的考虑不同, 可能同一个词在不同的方法中有不同的含义. 因此, 要提出一种有效的普适性方法, 非常具有挑战性. 这个问题的克服, 需要国内外同仁的共同努力.

4.1 蛛网评价模型

评定无人系统的自主等级, 实际上是关心无人系统在完成某项任务的过程中所表现的自主能力. 因此, 在不同的任务中无人系统的自主等级是不同的, 即无人系统的自主等级是相对的, 而不是绝对的. 为描述这种动态特性, 我们拟采用蛛网模型. 本文的蛛网模型不同于经济领域的蛛网模型. 它是从一个原点, 往外辐射出几条轴, 每条轴代表一个评价项目, 这些项目是决定无人系统自主性的关键技术; 每个项目都有 9 个等级(1~9), 这些级别为技术成熟程度. 对一个系统, 在每个评价技术上都有一个对应级别, 最后把每条轴上的对应点连接起来, 即构成蛛网的纬线, 就能评价这个无人系统的自主性, 如图 3(a). 假如一个无人机系统, 假如对它的评价项目(关键技术)只有导航、感知、决策、协同和交互, 而它导航的自主级别是 3, 感知的自主级别是 2, 决策的自主级别是 2, 协同的自主级别是 3, 交互的自主级别是 1, 那么它的蛛网自主评价模型就可以建立成图 3(b)的情形.

利用图 3 的方法, 可以建立适应于不同类型的无人系统(无人机、无人潜器、无人船舰、无人地面车辆、军用机器人、军用卫星、星球探测机器人、无人值守弹药、无人传感器等)的蛛网型自主性评价模型, 根据经验或实验数据确定不同类型无人系统评价模型中纬线的数量/数值. 针对无人系统在陆、海、空、天

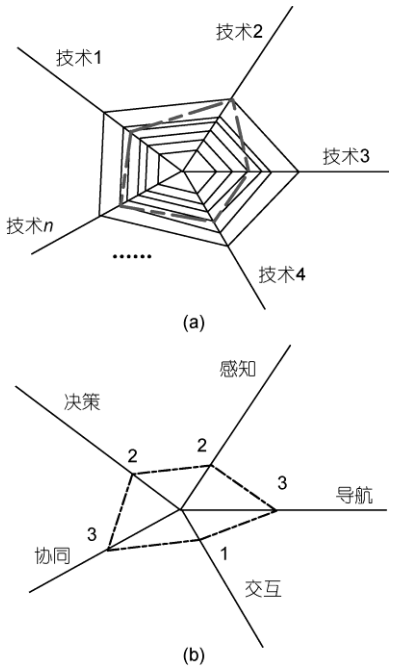

图 3 自主性评价的蛛网模型

等不同环境中工作条件变化特点, 在评价模型设计研究中需正确处理经线的互耦合、高维度、多样性等复杂因素, 研究适应模型设计的动态优化理论和方法. 可以通过数值仿真结果与模型试验对照研究来修正模型的变量设置.

4.2 模型中的关键技术

决定无人系统自主性的关键技术是无人系统发展的基础. 无人系统涉及的学科专业或技术领域很多, 大致可以划分为两个层次或两种类型的技术: 一是支撑无人系统发展的共性技术; 二是为无人系统特殊应用的专门技术. 它们共同推动了无人系统的发展及其应用.

一些无人自主系统的共性技术和专门技术得到了研究人员的广泛关注, 如: 感知技术[54,56]、人机交互[45]、信息和通讯技术[20]、路径规划技术[32,57,58]、多平台协同技术[15,35,36,50,59,60]、移动与运动控制技术[17,61,62]、自主能源[39]、任务规划[13,16,63]、自主飞行控制技术[31,34,64,65]等. 文献[1]对多种无人作战系统所需要的关键技术进行了较全面的概括. 文献[43]认为规划与决策、传感与理解、检测与诊断、网络化与协同、人机交互等为无人系统自主性的共性关键技术. 文献[66]认为, 智能软件、感知、导航、通信、能源、存活能力等均是自主性中比较有挑战的关键技术.

文献[4]认为地面无人系统自主性的关键技术主要有感知技术、导航技术、规划技术、学习适应、动力能源、人机交互、行为与技能、维护保养、通信技术等. 文献[2,67]对水面和水下无人系统的关键技术进行了论述, 其中智能规划与决策技术、智能控制技术、水下目标探测与识别(模式识别)技术、传感器和信息处理技术、自主导航技术、能源与推进技术、系统仿真技术、通信与网络技术等可以作为无人水下平台的自主性关键技术, 智能规划与决策技术、无线数据通信技术、动力及自主综合驾控技术、水面目标的探测与自主识别技术、自主导航技术可以作为无人水面平台的自主性关键技术. 文献[33]认为无人机系统自主控制的关键技术包括体系结构、感知与认知、规划与控制、协同与交互等. 研究表明, 几种主要类型无人系统, 如无人陆地系统、无人水下/水面系统、无人飞行系统以及无人卫星系统, 它们的关键技术绝大多数具有共同点.

在自主性评价的蛛网模型中, 关键技术的选取一方面可以借鉴现有关键技术的研究成果; 另一方面需要因事制宜, 可以分别从同一类任务、同一类平台、同一个技术年代三个角度来选取自主性评价蛛网模型中的关键技术, 对平台的自主性进行评价, 如: (1) 针对同一类任务, 可选用平台将具有不同技术成熟程度, 这些平台所具有的自主性会有所差异, 或者针对同一类任务, 在不同的年代, 同一类型平台在技术成熟程度和自主性会有进步和发展. (2) 针对同一类平台, 根据技术的发展, 在不同的年代可达到的技术成熟程度和自主性; (3) 针对同一个年代, 同一类平台针对某类型任务, 个体之间的技术成熟程度差异和自主性差异.

4.3 技术成熟度等级

关于关键技术的评估, 目前国际上有比较实用的方法——技术成熟度等级(Technology Readiness Level, TRL) 可以借鉴; 如图 4, 技术成熟度等级可以非常形象地描述特定技术的成熟程度, 并可简明扼要地表达特定技术的开发状态和技术风险. “Technology Readiness Level”在国外的文献中又以“Technology Maturity Level”出现[68,69], 技术成熟度等级在国内又翻译成技术实用水平、技术就绪水平、技术准备等级等[70], 但它们之间并无太大差异.

技术成熟度等级评价方法最早被 NASA 引入对航天项目的管理, 其后被美、英、欧等国家和地区广泛应用. 文献[70,71]对技术成熟度评估方法的国内外研究现状进行了较全面的论述. 我国学者在技术成熟度等级的研究方面也做了大量的工作, 如钱东等将技术成熟度评估应用于技术成熟度评估方法及其在水下战装备上的应用[72], 陈玉波等[73]将技术成熟度评估方法应用于导弹武器的研发, 朱毅麟[74]建议将该方法应用于航天器的研制.

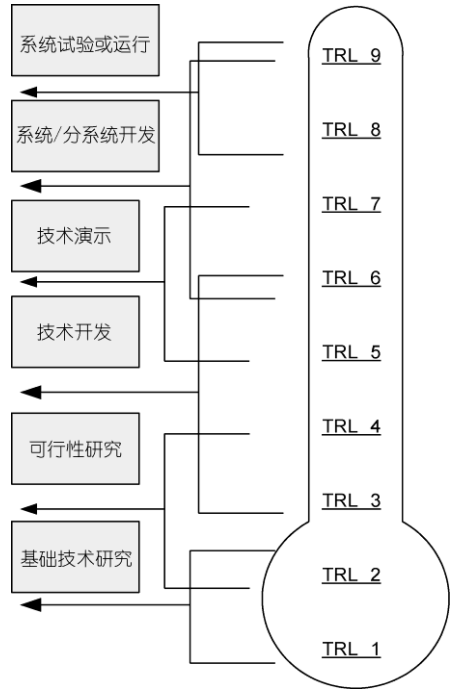

图 4 技术成熟度等级评估示意图
http://esto.nasa.gov/files/TRL_definitions.pdf, 2010

在自主性评价的蛛网模型模型中, 关键技术的技术成熟度评估可以借鉴采用技术成熟度等级(TRL)的评估方法. 对于如何应用技术成熟度等级评估方法, 研究者已进行了深入的研究, 如文献[68,69]给出了比较权威的规定和概述, 文献[72]也给出了比较典型的初步应用示例; 此外, TRL 计算器的软件目前已经发展到 2.2 版本, 可以从美国军方的网站自由获得(https://acc.dau.mil/communitybrowser.aspx?id=25811), 文献[75, 76]详细介绍了 TRL 计算器的使用方法, 限于篇幅在此不再赘述展开.

5 讨论与展望

无人系统在非结构、动态环境下所遇到的自主性问题, 正在成为无人系统的重要研究内容, 也是无人

系统走向科学探测、国防安全、公共安全、社会服务等领域的关键问题. 众多国外权威机构开展了无人系统自主能力量化评估方法研究, 这说明这项研究无论是对基础理论研究, 还是对工程应用研究而言都是非常重要的, 并已得到无人系统研制计划的制定者和决策者、无人系统的研制者和无人系统用户的大力支持. 虽然无人系统自主性的量化评估方法非常重要, 但现有的评价方法在适应性方面还存在很多缺陷, 在通用性方面还有待提高. 无人系统自主性评估方法必须要考虑系统本身和应用目标的多样性、多维性、层次性、主次性, 才可以避免在无人系统自主性提法上和性能描述上的模糊性. 进行研究时, 由于技术上的差距和文化上的不同, 以及其他原因, 例如大部分无人系统的项目均受密级的限制, 可能会增加研究的难度.

本文试图基于对国内外自主性评价的方法的理解, 建立自主性评价的普适性模型. 文中采用的自主性评价多维蛛网模型, 提高了现有评价方法科学性和可操作性, 为无人系统的工程实现和性能逐步提高方面可起一定参考作用. 我国在这方面的工作才刚刚起步, 需要有关部门和单位的长期稳定的支持. 作者认为, 在不久的将来, 随着自主理论和技术的发展, 无人系统在使用范围上将有较大的突破, 且更加规范化和智能化.

致谢 感谢封锡盛院士和徐红丽副研究员对本文的建议.

参考文献

1 林聪榕, 张玉强. 智能化无人作战系统. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008
2 蒋新松. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000
3 Antsaklis P J, Passino K M, Wang S J. An introduction to autonomous control systems. IEEE Contr Syst Mag, 1991, 11: 5–13
4 Research Council of the National Academies. Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles. Washington DC: The National Academic Press, 2002
5 ASTM F2541-06, Standard Guide for Unmanned Undersea Vehicles (UUV) Autonomy and Control, 2006
6 Huang H M, Albus J, Messinan E, et al. Specifying autonomy levels for unmanned systems: Interim report. In: Gerhart G R, Shoemaker C M, Gage D W, eds. Proceedings of the 2004 SPIE Defense and Security Symposium Conference. Orlando: Unmanned Ground Vehicle Tcehnology VI Press, 2004. 386–397
7 Huang H M, Pavek K, Novak B, et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS). In: Association for Unmanned Vehicle Systems International, eds. Proceedings of the AUVSI's Unmanned System North America Conference. Baltimore: Arlington Va Press, 2005. 849–863
8 Huang H M. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) framework: Safety and application issues. In: Messina E, Madhavan R, eds. Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. Washington DC, USA. ACM New York: NY USA Press, 2007. 48–53
9 ASTM E2521-07, Standard Terminology for Urban Search and Rescue Robotic Operations, 2007
10 Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2000–2025. Technical Report. Department of Defense, Washington DC, 2001
11 Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aerial Vehicles Roadmap 2002–2027. Technical Report. Department of Defense, Washington DC, 2002
12 Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aircraft System Roadmap 2005–2030. Technical Report. Department of Defense, Washington DC, 2005
13 Brent A, Rosemary D P, Robert J S. Mission planning system for vehicles with varying levels of autonomy. US Patent, US7765038B2, 2010-7-27
14 Satoshi K, Koichi N, James K, et al. Low-level autonomy of the humanoid robots H6 & H7. In: Jarvis R A, Zelinsky A, eds. Robotics Research STAR 6. Heidelberg: Springer, 2003. 83–97
15 Jeremi G, Simon L. Embedding heterogeneous levels of decisional autonomy in multi-robot systems. In: Alami R, Chatila R, Asama H, eds. Distributed Autonomous Robotic Systems 6. Heidelberg: Springer, 2007. 263–272
16 Hervé A, Frederic D, Magali B, et al. Goal driven planning and adaptivity for AUVs. In: Proceedings of the First Workshop on Control Architectures of Robots, Montpellier. 2006. 191–197

17 Broten G S, Collier J A, Giesbrecht J L, et al. Architecture for autonomy: Implementation and usage on the raptor UGV. Technical Report. Defence R&D Canada-Suffield, 2006

18 Protti M, Barzan R. UAV autonomy – Which level is desirable? – Which level is acceptable? Alenia aeronautica viewpoint. In: Proceedings of the AVT-SCI Joint Symposium, France. 2007.1–12

19 Fil M. The test and evaluation of unmanned and autonomous systems. Int Test Eval Assoc J, 2008, 29: 388–395

20 Suresh M, Ghose D. Role of information and communication in redefining unmanned aerial vehicle autonomous control levels. P I Mech Eng G-J Aer, 2010, 224: 171–197

21 高劲松, 陈哨东, 杨慧. UAV 自主性研究. 见: 中国航空学会. 第二次中俄无人机学术研讨会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005. 97–102

22 高劲松, 丁全心, 邹庆元. 国外无人机自主能力量化评估方法初步分析. 见: 第一届中国导航、制导与控制学术会议文集. 2007, 722–726

23 陈海, 王新民, 赵凯瑞. 无人作战飞机自主控制分级递阶控制结构. 航空学报, 2008, 28(增刊): 224–228

24 高劲松, 余菲, 季晓光. 无人机自主控制等级的研究现状. 电光与控制, 2009, 16: 51–54

25 杨哲, 张汝波. 无人系统自主等级模糊评价方法. 小型微型计算机系统, 2009, 30: 2043–2047

26 Chen H, Wang X M, Li Y. A Survey of autonomous control for UAV. In: Deng H P, Wang L Z, Wang F L, et al., eds. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2009, 267–271

27 高劲松, 王朝阳, 陈哨东. 对美国无人机自主控制等级的研究. 航空科学技术, 2010, 2: 40–43

28 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究. 航空学报, 2011, 32: 1075–1083

29 周锐, 李惠峰, 陈宗基. 无人战术飞行器的自主控制. 控制与决策, 2001, 16: 344–346

30 王英勋, 蔡志浩. 无人机的自主飞行控制. 航空制造技术, 2009, 8: 26–31

31 王越超, 齐俊桐, 韩建达. 旋翼飞行机器人自主控制研究进展. 见: 中国自动化学会. 2009 中国自动化大会, 2009. 11. 1-3, 杭州: 浙江大学出版社, 2009. 88–95

32 Wang Y C, Liu J G, Li B. A-B autonomy of a shape-shifting robot 'AMOEBA-I' for USAR. In: Behnam M, ed. Climbing and Walking Robots. Croatia: InTech, 2010. 425–444

33 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势. 国防科学技术大学学报, 2010, 32: 115–120

34 任敏, 霍霄华. 基于异步双精度滚动窗口的无人机实时航迹规划方法. 中国科学: 信息科学, 2010, 40: 561–568

35 张祥银, 段海滨, 余亚翔. 基于微分进化的多 UAV 紧密编队滚动时域控制. 中国科学: 信息科学, 2010, 40: 569–582

36 段海滨, 刘森琪. 空中/地面机器人异构协同技术研究: 现状和展望. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1029–1036

37 邹启杰, 张汝波. 无人系统可变自主性研究. 小型微型计算机系统, 2009, 30: 2254–2258

38 吴立珍, 牛轶峰, 朱华勇, 等. 无人机自主性能建模与分类方法研究. In: Meng Q H, Max H K, Jia L, et al., eds. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. New York: IEEEXplore Press, 2010. 2284–2288

39 王越超, 刘金国. 机器人的仿生自主供能. 10000 个科学难题(信息科学卷). 北京: 科学出版社, 2011. 692–693

40 Huntsberger T, Aghazarian H, Castano A, et al. Intelligent autonomy for unmanned sea surface and underwater vehicles. In: Association for Unmanned Vehicle Systems International (AUVSI), eds. Proceedings of the AUVSI Unmanned Systems, 2008 Jun 10-12, San Diego, California. New York: Curran Associates, Inc Press, 2009. 111–123

41 Nickles M, Rovatsos M, Weiss G. Autonomy 2003. Heidelberg: Springer, 2004. 17–19

42 Reed N E. A user controlled approach to adjustable autonomy. In: Proceedings of the 38th International Conference on System Sciences, 2005 Jan 3-6, Hawaii. Washington DC: IEEE Computer Society Press, 2005, 295–304

43 Committee on Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations, National Research Council. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations. Washington DC: The National Academy of Sciences Press, 2005

44 Sheridan T B. Automation, authority and angst – revisited. In: Human Factors Society, eds. Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting, 1991 Sep 2–6, San Francisco, California. Human Factors & Ergonomics Society Press. 1991, 18–26

45 Parasoraman R, Sheridan T B, Wickens C D. A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE T Syst Man Cy A, 2000, 30: 286–297

46 Larry A Y, Jeffrey A Y, Mark D G. System analysis applied to autonomy: Application to high-altitude long-endurance remotely operated aircraft. In: Proceedings of the AIAA Infotech Aerospace Conference. 2005. 22–31

47 Cleary M, Abramson M, Adams M B, et al. Metrics for embedded collaborative intelligent systems. Technical Report. Charles Stark Draper Laboratory, 2000

48 Curtin T, Crimmins D, Curcio J, et al. Autonomous underwater vehicles: Trends and transformations. Mar Technol Soc J, 2005, 39: 65–75

49 Fleming M, Cohen R. A utility-based theory of initiative in mixed-initiative systems. In: Proceedings of The IJCAI-01 Workshop on Autonomy, Delegation, and Control: Interacting with Autonomous Agents, Seattle, 2001. 58–65

50 Brainov S, Hexmoor H. Quantifying relative autonomy in multiagent interaction. In: Multiagent Systems, Artificial Societies, Simulated Organizations, eds. Proceedings of The IJCAI-01 Workshop on Autonomy, Delegation, and Control: Interacting with Autonomous Agents, 2001 Seattle. 2003, 7: 55–73

51 Barber K, Martin C, Reed N, et al. Dimensions of adjustable autonomy. In: Kowalczyk R, Loke S W, Reed N, et al., eds. Advances in Artificial Intelligence: PRICAI 2000 Workshop Reader. Berlin: Springer, 2011. 353–361

52 Goodrich M A, Crandall J W, Stimpson J R. Neglect tolerant teaming: Issues and dilemmas. In: Alto P, ed. Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments, 2003 Mar 24-26, Stanford, CA, AAAI Press, 2003. 111–119

53 Clough B T. Metrics, schmetrics! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway? In: Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, 2002. 12–20

54 Jochem T M, Pomerleau D A, Thorpe C E. Vision-based neural network road and intersection detection and traversal. In: Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, 1995. 344–349

55 Doboli A, Curiac D, Pescaru D, et al. Cities of the future: Employing wireless sensor networks for efficient decision making in complex environments. Technical Report. State University of New York at Stony Brook, 2008

56 庄严, 陈东, 王伟, 等. 移动机器人基于视觉室外自然场景理解的研究与进展. 自动化学报, 2010, 36: 1–11

57 景兴建, 王越超, 谈大龙. 人工协调场及其在动态不确定环境下机器人运动规划中的应用. 中国科学: 技术科学, 2004, 34: 1021–1036

58 刘金国, 马书根, 王越超, 等. 基于网络的自重构机器人重构路径研究. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2009, 39: 559–568

59 庄严, 顾明伟, 王伟, 等. 基于自主运动状态估计及信息交互的多移动机器人协作定位. 中国科学: 信息科学, 2010, 40: 1351–1362

60 谷丰, 何玉庆, 韩建达, 等. 三维环境中多机器人动态目标主动协作观测方法. 自动化学报, 2010, 36:1443–1453

61 李智卿, 马书根, 李斌, 等. 具有自适应能力的轮-履复合变形移动机器人的移动机构与地面约束关系分析. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 276–291

62 卢振利, 马书根, 李斌, 等. 蛇形机器人步态转换 CPG 控制器. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2007, 37: 1304–1315

63 刘金国, 王越超, 李斌, 等. 一种可重构模块机器人中心构形的选择方法. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2007, 37: 1316–1328

64 段海滨, 邵山, 苏丙未, 等. 基于仿生智能的无人作战飞机控制技术发展新思路. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 853–860

65 宋大雷, 齐俊桐, 韩建达, 等. 旋翼飞行机器人系统建模与主动模型控制理论及实验研究. 自动化学报, 2011, 37: 480–495

66 Bowen D G, MacKenzie S C. Autonomous collaborative unmanned vehicles: Technological drivers and constraints. Technical Report. Defence R&D Canada, 2003

67 徐玉如, 苏玉民, 庞永杰. 海洋空间智能无人运载器技术发展展望. 中国舰船研究, 2006, 1: 1–4

68 John C M. Technology readiness levels: A white paper. Technical Report. Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA, 1995

69 Hobson B. A technology maturity measurement system for the department of national defence: The TML System. Technical Report, Defence R&D Canada-Atlantic, 2006

70 郭道劝. 基于 TRL 的技术成熟度模型及评估研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2010

71 James W B. A suite of tools for technology assessment. In: Proceedings of the AFRL Technology Maturity Conference, 2007 Virginia Beach, VA, 1123–1129

72 钱东, 崔立, 肖昌美. 技术成熟度评估方法及其在水下战装备上的应用. 鱼雷技术, 2006, 14: 1–7

73 陈玉波, 黄玉辉. 导弹武器技术成熟度评估中的 TRL 方法. 科技研究, 2007, 8: 3–4

74 朱毅麟. 开展航天技术成熟度研究. 航天工业管理, 2008, 5: 10–13

75 Caroline P G, Suzanne G, Jeannine S, et al. Using the technology readiness levels scale to support technology management in the DoD's ATD/STO Environments. Technical Report. Carnegie Mellon University, 2002

76 Nolte W L, Kennedy B C, Dziegiel R J J. Technology readiness level calculator. In: NDIA Systems Engineering Conference, 2003. Presentation available from http://lincoln.gsfc.nasa.gov/trl/Nolte2003.pdf