基于多活性代理的人工系统架构调整方法

赵志纯¹, 李炳照^{2*}, 胡进¹, 王越¹

1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

2. 北京理工大学数学与统计学院, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: li.bingzhao@bit.edu.cn

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-09-22; 接受日期: 2019-10-23; 网络出版日期: 2019-12-17

国家自然科学基金(批准号: 61421001)资助项目

摘要 在现实动态强对抗强约束的社会环境下, 固化的人工系统架构通常无法满足复杂多变的服务任务需求. 本文根据多活性代理系统理论, 增强管理者的管控作用, 通过替换主代理或增加新的活性代理, 对系统架构进行调整, 使人工系统的活性自组织机理机能发生改变, 使环境对抗矛盾发生转变占据主导地位, 系统功能活性得以保持和提升, 以满足任务需求. 本文首先对多活性代理系统理论进行了简要回顾, 然后提出了基于多活性代理的人工系统架构调整方法, 最后以对抗美制 P2V-7 侦察机入侵的防空系统为实例对所提方法的有效性进行了验证.

关键词 多活性代理系统理论, 人工系统, 活性代理, 系统架构调整, 活性度

1 引言

人类社会是一个开放复杂巨系统^[1], 由人主导设计制造并为人类服务的平台工具体系——人工系统也是一个开放复杂巨系统^[2]. 人工系统是具有系统性质的集合体^[3], 主要强调“人工”与“系统”两个剖面. 人工系统的出现和发展体现着人类的进化和文明的发展, 深刻地体现了人类“认识”和“实践”能力的交融. 具体来说, 人工系统是在人的主导下, 依据突变理论^[4]、正反馈理论^[5]、分岔理论^[6]、混沌理论^[7]、分形理论^[8]及超循环理论^[9]等自组织动力学领域研究内容, 为解决人类社会复杂问题设计和构建的一个复杂系统. 人工系统的研发与服务现已成为人类社会不可或缺的一部分, 并随着社会的进步, 人类文明中科学、技术和工程 3 个领域的发展而不断发展.

系统是由多元素组成的多层次的动态综合体, 是具有自组织进化功能的耗散结构^[3]. 人工系统具有系统的属性, 因此其运动发展规律符合现代耗散自组织系统理论基本原理, 即人工系统是不断发展进化的, 且其进化机理也在不断进化^[10~13]. 为了更好地学习和适应这种发展进化过程, 基于耗散自组织系统理论的“开放的复杂巨系统”及其方法论^[1]和多活性代理 (multi-living agent, MLA) 系统理

引用格式: 赵志纯, 李炳照, 胡进, 等. 基于多活性代理的人工系统架构调整方法. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 1559–1571, doi: 10.1360/SSI-2019-0111
Zhao Z C, Li B Z, Hu J, et al. Artificial system architecture adjustment method based on multi-living agent (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 1559–1571, doi: 10.1360/SSI-2019-0111

图 1 多活性代理系统依照功能划分的拓扑结构

Figure 1 Function topology structure of MLA system

论^[3,14]被应用于复杂系统研究. 多活性代理系统理论从应用基础层和应用层出发, 采用活性度对系统服务功能进行衡量与表征, 为信息领域人工系统的设计和构建提供了理论方法与实践指导. 当人工系统面对复杂动态环境下任务需求时, 管控代理会根据自身自组织机理进行决策, 通过调整参数、调整单代理数量等方式进行局部调整, 以期顺利执行任务. 然而当系统处于强时空强对抗约束条件下, 即超出系统自组织机理应对范围时, 系统原有的固化的系统架构往往无法满足任务需求, 上述仅依靠自组织机理的方式无法解决问题. 根据耗散自组织理论, 只有远离平衡态才能产生新序^[10,11]. 因此针对此种情况, 需要以人为主导的他组织介入, 根据复杂环境和任务需求对系统架构进行调整, 促使系统自组织机理发生改变. 然而现阶段要达成此目的, 主要依赖于管理员在实际应用中的经验积累, 缺乏定性定量相结合的系统应用基础理论的指导. 本文在多活性代理系统理论的指导下, 提出了调整人工系统架构方法, 以活性度为指标, 通过分解和集成的方式对系统进行定性研究与定量分析, 是多活性代理从理论层面面向应用层面的延伸与发展. 具体来讲, 所提方法以突破环境对抗约束为目标, 利用管理者主导的他组织的有效介入, 通过调整系统架构促使人工系统活性自组织机理发生改变, 使得系统功能活性得以保持提升, 从而满足任务需求.

本文结构安排如下, 第 2 节简要表述了多活性代理系统理论, 并对系统的活性表征进行了简要描述. 第 3 节提出了基于多活性代理的人工系统架构调整方法, 实现了多活性代理在应用层面的延拓. 第 4 节以对抗 P2V-7 侦察机入侵的防空系统为实例, 具体描述和展示了该应用模式在实际应用中的实用性及有效性. 最后进行了总结与展望.

2 多活性代理系统理论

根据多活性代理系统理论, 人工系统可以从系统功能层面分解为各个层次的分代理, 代理的活性可通过代理功能的发挥程度来表征^[2,15]. 多活性代理系统理论以“活性代理”为基本元素, 以代理的“活性”表征系统功能的发挥, 通过协商协调达到系统整体功能的最大限度发挥. 多活性代理系统注重人在系统中的主观能动性, 因此此处的协商协调除了包括单个代理以及多代理之间的协商协调之外, 还包括人与代理之间的协商协调.

多活性代理采用多层次分布式构架, 并采用集中与分层管理相结合、人机交互与管控代理相结合的工作模式. 根据多活性代理系统理论, 人工系统按照系统功能, 分层构建多活性代理系统组织架构, 如图 1 所示^[15]. 架构大致可分为 3 层, 最高层是系统管控代理, 可进行人机交互, 实现人与代理之间

图 2 多活性代理的组织架构
Figure 2 The framework of MLA

的协商协调, 完成计算机及人工智能不能完成的功能; 第 2 层是应用支持集端口代理, 实现管控结果输出; 第 3 层是包含信息获取、传输、存储、交换以及信息处理在内的 5 个子代理, 这些代理交织形成, 共同完成任务. 在此人工系统多活性代理架构构建中, 各个代理并不严格按照软硬件的物理结构及软件规范加以结构组成划分. 各代理可依据自身不同层次的约束依赖关系继续分解至最低一级的子代理, 如图 2 所示. 根据多活性代理系统理论, 系统功能的发挥程度用“活性度”予以表征. 在强约束强对抗环境下, 面对复杂多变的任务需求时, 为保持和提升系统活性, 基于多活性代理构建的人工系统架构是可调整的.

活性度的表征与描述^[16]是多活性代理理论的重要研究内容之一, 根据活性自组织机理的充要条件或完备必要条件集丧失的可能性来表征代理“活性”, 可直接用活性代理功能定量分析来表征活性度. 由于代理功能表达活性, 功能低下就表征活性很低, 因此活性代理功能发挥效能的定量表征也划归为“活性度”.

3 基于多活性代理的人工系统架构调整应用模式

本节主要论述如何根据多活性代理系统理论, 调整人工系统组成架构, 提升改进系统服务功能活性, 以突破复杂环境下的对抗约束, 保证重要任务的顺利遂行. 具有固化系统架构的人工系统在强对抗强约束的环境下, 可根据实际任务需求对某个或某些代理进行量变, 进行代理内部或代理间的协商协调, 维持固有的自组织机理, 但无法进行架构调整.

当系统中活性代理内部协商协调和活性代理之间协商协调均不能达到系统功能活性保持的要求, 即量变和质变都无法满足系统的需求, 系统自组织架构机理、机能已经不能满足系统外界环境以及条件变化时, 需要通过人(管理者)的介入结合管控代理, 对多活性代理系统中关键代理进行代理级的功能活性保持调整提升, 包括嵌入新子代理或者按需切换子代理等. 通过对代理级机理功能进行调整、代理间功能进行协调, 多代理系统级功能得到深度调整提升应对严峻挑战, 构建新的系统自组织机能, 实现系统活性的保持和提升, 如图 3 所示. 另外, 所提方法一般可执行步骤总结如下.

(1) 针对实际问题, 明确人工系统架构组成, 根据多活性代理系统理论利用分解与集成的方式对各代理及系统进行活性评估.

(2) 采取定性研究和定量分析相结合的方式对系统依据自组织机理所采取的增加单代理数量、调

图 3 基于多活性代理的人工系统架构调整方法原理图
Figure 3 Artificial system architecture adjustment method based on MLA

整单代理参数设置等活性保持策略进行活性评估, 判断系统自组织机理是否满足需求.

(3) 若得出结论: 上述仅依靠系统自组织机理机能的方式均不能改变双方对抗矛盾的主导地位, 系统活性持续低下无法满足任务需求. 此时, 需依据矛盾对立统一关系“共其道而行之相成相反”原理, 将敌方斗争优势转换为劣势.

(4) 参考我方实际情况及科技水平条件, 针对敌方优势选出新的主代理与辅助代理, 通过分解与集成、定性与定量相结合的方式对系统整体活性度进行评估, 以确认架构调整方案.

(5) 管理员通过管控代理介入系统任务双方对抗过程, 通过替换主代理、增加新代理调整系统架构, 促使矛盾转化自组织机理发生演化, 提升系统活性.

所提方法多为深度调整提升功能, 应对的大多是面临严峻挑战需完成重要任务的情况, 因此根据所提方法调整系统架构时要以深刻认识矛盾焦点, 做出有效科学调整决策, 并能够快速实施获得实效为第一准则. 调整后的目标系统应满足可以改变原人工系统系统级的自组织机理, 值得注意的是整个调整过程就是一个有效解决矛盾对立统一的过程. 人(管理者)可以通过管控代理调整系统的自组织机理, 增加或者转换活性代理的主动方, 完成对矛盾的主导, 将敌我双方对抗的机理往有利于我方的方向引导发展. 另外, 所提方法依赖人(管理者)的决策, 其在具体工程实践中的应用往往由于大量不确定因素是困难且具有挑战性的. 在调整人工系统架构时, 需划分系统矛盾双方的前提条件集合以及分析对方薄弱环节对应的矛盾前提条件特征集, 而这些前提条件集和矛盾特征集通常都是复杂多变的. 此外, 系统为了达到预定构建目的所增加的新代理以及改变代理主次关系等新系统自组织机能所带来的成本也是不确定的.

具有固化系统架构的人工系统的自组织机理可满足一般对抗约束下的任务需求. 而在强对抗约束条件下系统自组织机理无法满足任务需求时, 应避免人工系统架构的固化. 进一步地, 可根据所提方法调整系统架构, 以适应和突破强对抗强约束, 保持和提升系统活性, 满足任务需求. 下面我们将通过具体实例的研究和分析, 对所提系统架构调整方法在实际场景中的应用进行具体表述, 并对其有效性进行验证.

4 应用实例分析: 对抗 P2V-7 侦察机入侵的防空系统架构调整

20 世纪 60 年代中期, 台湾地区多次派遣由美国提供的在当时处于技术前沿的如图 4 所示的侦察机 P2V-7 对大陆进行侦察. P2V-7 同时配备喷气发动机和螺旋桨发动机, 两种类型的发动机可以单独

图 4 侦察机 P2V-7 示意图

Figure 4 P2V-7

或同时运行, 具有航时较长、飞行速度变化大的特点, 可通过低空低速飞行规避我方地面防空雷达的有效探测. 因此, 在当时的技术条件下, 如何对入侵的 P2V-7 进行有效打击是一个重大而艰巨的任务.

4.1 系统背景及核心工作机理

本例中对抗体系由我方防空系统和入侵方侦察机 P2V-7 组成, 其中防空系统由基地指挥所、情报引导雷达、对空预警雷达、光电探测设备、歼 5 战斗机群以及小口径高炮群等组成. 从双方的组成和功能来看, 对抗双方均为复杂的人工系统, 因此可根据多活性代理系统理论用各层次的活性代理来表征对抗双方体系的组成.

P2V-7 飞越台湾海峡时, 其飞行高度距离海平面仅 $30 \sim 50$ m; P2V-7 在大陆上空飞行时, 其飞行高度也仅为 300 m 左右. 因此, 在地球曲率以及海杂波 (地杂波) 的影响下, 我方地面远程对空预警雷达难以及时对 (超) 低空飞行的目标 P2V-7 作出预警, 即我方对空预警雷达代理完成任务的活性大大降低. 另外, 入侵方利用夜间入侵使得我方光电探测设备代理活性很低, 几乎丧失. 调整架构前的防空系统采用歼 5 战斗机群为主战代理, 执行对入侵目标打击摧毁的任务. 机载雷达在地杂波严重干扰的情况下, 在基地指挥所代理以及地面情报引导雷达代理的协同作用下, 歼 5 在较低活性下对入侵目标成功跟踪锁定. 此时入侵方 P2V-7 所配备的机载报警装置会发出警报, 并通过关闭喷气发动机仅使用螺旋桨发动机的措施, 使得 P2V-7 以低速进行机动转弯, 以甩脱歼 5 的追踪. 此种情况下, 我方主战代理歼 5 只能重新引导搜索, 以低活性重复上述过程, 直到再次遭到甩脱. 几个回合之后, 歼 5 由于燃料消耗殆尽而彻底丧失活性, 无法完成任务. 此时, 我方根据所提方法调整防空系统架构, 通过主代理和辅助代理之间的相互转化, 将对抗双方矛盾向我方有利的方向发展转化, 使系统满足任务需求. 下面将结合实际环境对系统活性进行定量分析, 以验证所提方法的有效性.

4.2 以歼 5 作为主战代理的防空系统的工作模式及其活性度分析

当台湾利用低空侦察机对地域辽阔的大陆地区进行飞行侦察时, 可进行机动选择的侦察路线太多. 因此尽管中高空不是喷气式歼击机的最佳作战高度, 但综合考量下我方防空系统的主战代理最好的选择还是空军歼击机. 又由于抗击作战环境是低空夜间, 因此相比于飞行速度更快、弹药载荷更多的歼 6, 全天候的主战机型歼 5 更为合适.

图 5 (网络版彩图) 歼 5 追击 P2V-7 几何模型示意图

入侵方的 P2V-7 具有优异的低空侦察性能, 机载侦察设备性能先进齐全, 航时较长. P2V-7 机尾对后方向装载针对歼 5 火控雷达瞄准跟踪态的报警设备, 可接收歼 5 雷达信号从而发出警报, 具有较高的活性度. 另外, 在地杂波的掩护下, 歼 5 雷达难以对低空飞行的 P2V-7 进行有效探测, 即活性较低. 同时, 在地球曲率的影响下, 远程警戒雷达代理和引导雷达代理的作用距离将会从数百公里降低至几十公里的范围, 具有较低的活性度. 综上, 入侵方使用 P2V-7 执行侦察任务具有与我方防空系统的对抗保证条件, 系统活性的具体定量分析见后述.

4.2.1 建模分析

通过任务分析,以歼 5 作为主战代理对 P2V-7 进行拦截打击可分为机载雷达跟踪锁定和成功锁定后炮弹发射两个阶段,下面分别对这两个阶段进行建模分析.

(1) 跟踪锁定阶段. P2V-7 的正常飞行速度为 200 m/s , 在发现被我方歼 5 锁定后, 其报警装置会发出警报, 关闭喷气发动机仅使用螺旋桨发动机, 在短时间内速度降为 $v_P = 80 \text{ m/s}$, 然后以侧向加速度 a_P 做小半径机动转弯 (短时间内可看作匀速圆周运动). 歼 5 的飞行速度为 $v_J = 250 \text{ m/s}$, 发现目标机动转弯后, 也随之以侧向加速度 a_J 同向机动转弯. 假定在 t_0 时刻, P2V-7 (位于 P_0 点) 被歼 5 (位于 J_0 点) 捕获锁定, 此时两者相距 L , 如图 5 所示. 经过短时间 Δt 后, 即在 $t = t_0 + \Delta t$ 时刻, P2V-7 运动至 P 点. O_P 和 O_J 分别表示 P2V-7 和歼 5 做匀速圆周运动的轨迹中心, R_P 和 R_J 则分别表示两者的轨迹半径.

考虑到人体对向心力的承受范围,可假定侧向加速度 a 的取值范围为 $[2g, 3g]$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度). 于是,根据匀速圆周运动规律可得歼 5 机动转弯轨迹半径的最小值和 P2V-7 机动转弯轨迹半径的最大值分别为 $\min\{R_J\} = \frac{v_J^2}{\max\{a_J\}} = \frac{250^2}{3g} = 2125.9 \text{ m}$ 和 $\max\{R_P\} = \frac{v_P^2}{\min\{a_P\}} = \frac{80^2}{2g} \approx 326.5 \text{ m}$. 这表明由于歼 5 速度较快,即使侧向加速度取最大值而 P2V-7 的侧向加速度取最小值,其转弯轨迹半径依然远远大于 P2V-7 的轨道半径. 因此在短时间 Δt 内,歼 5 的运动可近似看作直线匀速运动. 假定经过短时间 Δt ,歼 5 匀速直线运动至 J 点, P2-V7 作匀速圆周运动至 P 点,转过的角度为 $\theta = \omega_P \cdot \Delta t$ ($\Delta t \geq 0$),如图 5 所示. 从而根据圆内几何关系有

$$P_0 P = 2R_P \cdot \sin\left(\frac{\omega_P \cdot \Delta t}{2}\right), \quad \Delta t \geq 0. \quad (1)$$

以 J_0 点为坐标原点, 歼 5 和 P2V-7 的运动方向为 X 轴建立平面直角坐标系, 设 $t = t_0 + \Delta t$ 时刻 P2V-7 所处位置 P 点坐标为 (x, y) , 于是式 (1) 可表述为

$$\sqrt{(x-L)^2 + y^2} = 2R_P \cdot \sin\left(\frac{\omega_P \cdot \Delta t}{2}\right). \quad (2)$$

又由于 P 在圆 O_P 上, 因此 (x, y) 满足以下方程:

$$(x-L)^2 + (y-R_P)^2 = R_P^2. \quad (3)$$

联立式 (2) 和 (3), 求解可得 P 点坐标为

$$\begin{cases} x = L + R_P \sin(\omega_P \cdot \Delta t), \\ y = 2R_P \sin^2\left(\frac{\omega_P \cdot \Delta t}{2}\right), \end{cases} \quad \Delta t \geq 0. \quad (4)$$

若在 t 时刻, 机载雷达通过旋转 α 角成功锁定目标, 即 P 点落在直线 JP 上, 则以下几何关系成立:

$$\frac{2R_P \sin^2\left(\frac{\omega_P \cdot \Delta t}{2}\right)}{L + R_P \sin(\omega_P \cdot \Delta t) - v_J \cdot \Delta t} = \tan \alpha \quad (5)$$

$$\Rightarrow \alpha = \arctan\left(\frac{2R_P \sin^2\left(\frac{\omega_P \cdot \Delta t}{2}\right)}{L + R_P \sin(\omega_P \cdot \Delta t) - v_J \cdot \Delta t}\right) \triangleq \varphi(\Delta t), \quad \Delta t \geq 0. \quad (6)$$

由歼 5 的机载雷达的作用角度范围, 可知 α 的取值范围为 $(-15^\circ, 15^\circ)$. 由式 (6) 可知, $\alpha = \varphi(\Delta t)$ 在 $\alpha \in (-15^\circ, 15^\circ)$ 对应的定义域内是单调递增的, 因此 φ 存在反函数:

$$0 \leq \Delta t = \varphi^{-1}(\alpha), \quad \alpha \in (-15^\circ, 15^\circ), \quad (7)$$

且 φ^{-1} 在 $\alpha \in (-15^\circ, 15^\circ)$ 上也是单调递增的. 于是通过求解式 (7), 可求得歼 5 能够成功锁定目标的有效作用时间区间, 记为 $[0, \Delta t_0]$ ($\Delta t_0 = \varphi^{-1}(15^\circ)$). 这意味着当 $\Delta t \geq \Delta t_0$ 时, 追踪锁定失败, 目标 P2V-7 成功脱离我方歼击机雷达作用范围, 甩脱歼 5 的追踪.

(2) 成功锁定后炮弹发射阶段. 若歼 5 在上述跟踪阶段在有效时间 $[0, \Delta t_0]$ 内成功锁定目标, 下一步将向目标发射炮弹. 受到当时技术条件的限制, 炮弹发射方向偏离瞄准方向不能超过 2° . 另外, 需要注意的是炮弹的有效射程为 400 m, 这就意味着歼 5 发射炮弹时, 两者的距离不能超过 400 m, 即

$$JP = \sqrt{(x - v_J \cdot \Delta t)^2 + y^2} \leq 400, \quad \Delta t \in [0, \Delta t_0], \quad (8)$$

通过求解上式我们可得到歼 5 能够成功射击目标的有效时间 Δt . 下面我们将代入具体参数值, 对系统活性进行定量分析.

4.2.2 定量分析

根据实际情况, 设初始时刻歼 5 和 P2V-7 的距离 L 取值范围为 $\{1, 2, 3, 4\}$ km, 两者的侧向加速度 a_P 和 a_J 均取值 2g, 其他相关运动参数如表 1 所示. 下面利用 Matlab 根据上述模型进行仿真实验.

(1) 跟踪锁定阶段. 通过对 (7) 进行数值求解, 得到参数在不同 L 取值下歼 5 成功锁定目标的有效作用时间 Δt 与旋转角度 α 之间的关系, 如图 6 所示. 由图 6 可看出, 歼 5 成功锁定目标的有效

表 1 歼 5 和 P2V-7 的运动参数
Table 1 Motion parameters of J-5 and P2V-7

	Linear velocity v (m/s)	Angular velocity ω (rad/s)	Radius of trajectory R (m)
J-5	250	0.0784	3188.8
P2V-7	80	0.2450	326.5

图 6 (网络版彩图) 歼 5 成功锁定目标所需时间 Δt 与旋转角 α 之间的关系
Figure 6 (Color online) The relationship between the required time Δt for J-5 successfully tracking target and rotation angle α

图 7 (网络版彩图) 歼 5 对 P2V-7 成功打击的截击雷达的有效作用角度 α
Figure 7 (Color online) The effective rotation angle α of the interception radar J-5 shooting P2V-7

作用时间 Δt 随着旋转角 α 的增加而增加, 这与 $\Delta t = \varphi^{-1}(\alpha)$ 是单调递增的相符合. 另外, 还可看出歼 5 与目标 P2V-7 的初始距离越大, 歼 5 可用于跟踪锁定的有效时间越长.

(2) 成功锁定后炮弹发射阶段. 通过求解 (8), 得到在参数 L 不同取值下歼 5 能够对目标成功打击的有效作用时间 Δt . 进一步地, 根据 (6) 可求得在参数 L 不同取值下歼 5 能够对目标成功打击的截击雷达的有效作用角度 α 的范围, 如图 7 所示. 从图 7 可看出, 歼 5 与目标 P2V-7 的初始距离 L 越大, 歼 5 与目标 P2V-7 之间的距离越远, 越不利于炮弹发射, 这与实际情况相符合.

4.2.3 矛盾分析以及歼 5 作战模式任务活性度分析

分析依据矛盾对立统一模型实践应用原理, 由破解对方优势前提条件入手分析, 化解对方超低空飞行以及雷达探测距离近这两个主要矛盾. 这两个主要矛盾若放在现在来看, 我们至少有以下 4 种方案予以解决:

- (1) 采用脉冲多普勒 (Doppler) 雷达过滤回波中的地杂波, 并采用机载高性能预警雷达对相关前沿地区进行实时监控;
- (2) 改换机载火控雷达频段破坏 P2V-7 预警接收机报警, 改变最实用的空载火控雷达工作频段;
- (3) 采用先进防御手段, 利用较远距离导弹攻击, 清除近距瞄准时 P2V-7 大角度快速甩脱效应, 利用技术更先进的空投导弹进行距离拉远;
- (4) 采用相控阵雷达天线体制扩大跟踪角度, 减少被甩脱的可能性.

图 8 (网络版彩图) 作战区域示意图

Figure 8 (Color online) Combat area

以上 4 种方案均涉及到众多技术以及执行前提条件,在当时均无法实现,无法满足作战紧急需求.因此不能按照消除和减弱对方对抗优势进行战斗,只能按照原态势进行斗争.在此战况下,建立双方斗争过程数学模型(见 4.2.1 小节),带入各方约束条件(见 4.2.2 小节)后,表明 P2V-7 在开始转弯机动逃避后 3.8 s (当歼 5 跟踪锁定 P2V-7 时两者相距 1 km 时)至 5.8 s (当歼 5 跟踪锁定 P2V-7 时两者相距 2 km 时)后便飞出歼 5 火控雷达角跟踪范围而丢失目标.同时歼 5 与入侵目标之间的距离必须稳定在射程范围之内(< 400 m),才能操作机炮进行有效射击.因此,歼 5 的跟踪-射击任务因时间急促无法进行有效射击,即主战代理丧失活性,导致对抗失败.

4.3 防空系统架构调整及其活性分析

以歼 5 为主战代理的防空系统在双方对抗过程仅仅通过增加活性代理数量或者更改活性代理某些性能指标水平等活性保持策略,并不能改变双方对抗矛盾的主导地位,系统活性度 < 10%. 所以采用歼击机进行拦截的方案是不合理的,需要改变对抗过程的自组织机理.对此,我们采取主动改变系统对抗主代理的措施,将歼 5 作为信息对抗和信息感知代理,歼 5 只追赶不打击敌方侦察机.然后利用单架或多架歼击机与敌方侦察机保持前后相应距离,将敌方侦察机驱赶至我方预设探照灯雷达与高炮阵地区域,如图 8 所示.同时,将原始对抗过程中的攻击代理主体改变为新增的探照灯雷达高炮组,该攻击对抗主体代理在一定有效作战范围内具有火力覆盖广、防空高度低等特点,具有与侦察机等低空慢速飞行器的对抗条件.依据“共其道而行之相成相反”的原理,将入侵方的优势转变为新对抗过程中的劣势,以提高我方整个系统的功能活性,如图 3 所示.

下面我们对架构调整后的防空系统的活性度进行定量分析及计算.当我方歼击机将敌方侦察机 P2V-7 引导驱赶至我方预设作战区域时,通过多代理间功能的协商协调,采用多个小口径高射炮同时发射炮弹的方式对目标进行覆盖打击.假定至少两台高炮同时射击命中目标,才认为目标成功被击中.设单台地面防空小口径高炮成功击中作战区域内目标的概率为 p_0 ,那么 n ($n \geq 2$) 台高炮联合作战成功击中目标的概率为

$$P = 1 - n \times p_0 \times (1 - p_0)^{n-1} - (1 - p_0)^n. \quad (9)$$

图 9 表示的是多台高炮联合作战成功击中目标的概率,当 $p_0 = 0.78$ 时,可看出 5 台高炮联合作战击中目标的概率可高达 0.99,即系统活性度提升至 99%.另外,由图 9 还可看出当增加到 5 台高炮时,成

图 9 (网络版彩图) 高炮联合作战成功击中目标概率

Figure 9 (Color online) The shooting probability of anti-aircraft guns

图 10 有管控代理参与的高炮群联合作战示意图

Figure 10 The combat model of anti-aircraft guns with control agent

功击中目标的概率对于高炮的数量已经有较好的鲁棒性, 即此时增加单个攻击代理高炮的数量对整体系统的活性增益已经不大. 另一方面, 成本会大幅提升, 造成资源浪费. 因此, 此种情况下, 选择 5 台高炮联合作战是比较科学合理的.

上述对抗分析过程是在至少两台高炮同时射击命中目标时, 才被认为实现目标成功被击中的设定中进行的. 根据最低限度的活性保持原则, 当只有一台高炮射击时, 可在降低指标要求的前提下, 通过管控代理进行协商协调, 维持地面防空小口径高炮群构成的联合攻击阵地系统的部分功能, 如图 10 所示. 当系统在故障弱化状态下工作, 即只要求一台以上高炮成功击中目标时, 多台高炮联合作战成功

图 11 (网络版彩图) 活性保持下的高炮联合作战成功击中目标概率

Figure 11 (Color online) The shooting probability of anti-aircraft guns under the living retention situation

击中目标的概率为

$$P = 1 - (1 - p_0)^n. \quad (10)$$

此时成功击中目标的概率如图 11 所示.

4.4 实例总结

歼 5 飞行员根据射击条件对 P2V-7 进行追踪, 在 3.8 s 至 5.8 s 的追踪瞄准过程中, P2V-7 通过机动转弯超出瞄准天线作用范围 ($-15^\circ, 15^\circ$) 甩脱歼 5 的追踪, 导致歼 5 失去射击机会. 因此一次追踪射击概率小于 3%, 一次任务执行计划追踪 2~3 次, 故任务活性度 < 10%, 这表明以歼 5 为主战代理执行任务的方案是失败无效的. 根据多活性代理系统理论, 要想斗争取胜必须改变多活性代理系统对抗核心机理和系统架构服务机能. 有效提升任务活性度的要点就是依据矛盾对立统一关系, 将敌方斗争优势转换为劣势. 在此实例中, 敌方目标 P2V-7 具有飞行高度较低, 机身尾部装载可靠有效的防跟踪报警器的优势, 被跟踪近距离内可通过小半径机动转弯甩脱追踪. 因此参考我方已有防空武器系统特点, 针对敌方优势选出小口径高射炮群联合作战, 可在 3 km 范围内构成小弹幕散布有效摧毁 P2V-7. 通过采用地面雷达探照灯对高炮群进行引导, 该雷达工作频率区别于歼 5 火控雷达工作频率, 且照射角度一般不正对敌方侦察机尾部, 从而有效破坏 P2V-7 尾部报警功能. 探照灯雷达跟踪至小口径高炮群射击范围后, 利用探照灯照亮敌机, 高炮群同时瞄准目标并立即开火射击, 从而实现高概率 (可高达 99% 以上) 击毁敌机. 综上, 敌方对抗优势被化解, 将系统对抗双方矛盾向我方有利的方向发展转化, 基于多活性代理系统理论的与 P2V-7 对抗的体系结构、任务活性度以及功能均有质变提升, 胜利完成了击落 P2V-7 这一历史性任务.

根据该实例可看出, 当原有系统内部活性自组织机理不能满足需求时, 管理员可通过管控代理介入系统任务双方对抗过程, 通过替换主代理或增加新的活性代理调整系统架构, 促使矛盾转化自组织机理发生演化, 实现我方主导地位, 提升系统活性. 但另一方面, 人工的过多干预将降低系统的速度以及精度, 因此这种方式只能作为当时乃至现阶段处理异常情况的补充手段. 从发展中来看, 最终将以

成熟的人工智能技术逐步取代管理员进行干预, 提升系统活性.

5 总结与展望

本文针对强对抗强约束环境下固化的人工系统架构无法满足复杂多变任务需求的问题, 提出了一种基于多活性代理系统理论的人工系统架构调整方法. 所提方法利用管理者的有效介入, 通过替换主代理或增加新的活性代理改变系统架构, 促使系统自组织机理发生改变, 使得系统功能活性得以保持和提升, 从而实现对环境约束的突破, 保证任务的顺利完成. 进一步地, 我们结合实例对抗 P2V-7 侦察机入侵的防空系统, 给出了所提方法在解决实际问题时的详细应用步骤, 并验证了其有效性. 当然, 对于在强约束强对抗环境下人工系统无法顺利完成任务的问题, 即使通过调整人工系统的架构也无法解决问题时, 可根据多活性代理系统理论对人工系统重新进行总体设计或者采取别的解决方案. 这属于多活性代理的其他类应用模式, 有待进一步地研究.

参考文献

- 1 Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new discipline of science—the study of open complex giant system and its methodology. *Chin J Nat*, 1990, 1: 3–10, 64 [钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域 —— 开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, 1: 3–10, 64]
- 2 Wang Y. *System Theory and Artificial System Design*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019. 132–158 [王越. 系统理论与人工系统设计学. 北京: 北京理工大学出版社, 2019. 132–158]
- 3 Liu G, Wang Y, Zhou S Y. An outline of system theory based on artificial system. *Syst Eng Electron*, 1998, 7: 27–31 [刘刚, 王越, 周思永. 基于人工系统的系统理论提纲. 系统工程与电子技术, 1998, 7: 27–31]
- 4 Thom R. *Structural Stability and Morphogenesis*. Sichuan: Sichuan Education Press, 1992. 1–438 [雷内·托姆. 结构稳定性与形态发生学. 四川: 四川教育出版社, 1992. 1–438]
- 5 Prochazka A, Gillard D, Bennett D J. Implications of positive feedback in the control of movement. *J Neurophysiol*, 1997, 77: 3237–3251
- 6 Ma L, Luo Y Q, Li S Y. Bifurcation analysis of a two-species diffusive model. *Appl Math Lett*, 2019, 96: 236–242
- 7 Baker G, McRobie F A, Thompson J M T. Implications of chaos theory for engineering science. *Proc Inst Mech Eng Part C-J Mech Eng Sci*, 1997, 211: 349–363
- 8 Zhao H, Wu Q L. Application study of fractal theory in mechanical transmission. *Chin J Mech Eng*, 2016, 29: 871–879
- 9 Ji F M, Luo L F. A hypercycle theory of proliferation of viruses and resistance to the viruses of transgenic plant. *J Theor Biol*, 2000, 204: 453–465
- 10 Jantsch E. *The Self-organizing Universe*. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1980. 1–343
- 11 Haken H. *Erfolgsgeheimnisse der natur synergetik: die lehre vom zusammenwirken*. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 2013. 50–60 [赫尔曼·哈肯. 协同学: 大自然构成的奥秘. 上海: 上海译文出版社, 2013. 50–60]
- 12 Prigogine I, Stengers I. *Order Out of Chaos*. Shanghai: Shanghai Translation Publishing House, 2005. 70–80 [普里戈金, 斯唐热. 从混沌到有序. 上海: 上海译文出版社, 2005. 70–80]
- 13 Holland J H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House, 2011. 90–100 [约翰·H·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性. 上海: 上海科技教育出版社, 2011. 90–100]
- 14 Wang Y. A novel method of constructing complex information system—multi-living agent method. *Eng Sci*, 2006, 8: 29–32, 57 [王越. 复杂信息系统构建的新方法—多活性代理方法. 中国工程科学, 2006, 8: 29–32, 57]
- 15 Wang Y, Tao R, Li B Z. Using the multi-living agent concept to investigate complex information systems. *Sci China Ser E-Inf Sci*, 2008, 38: 2020–2037 [王越, 陶然, 李炳照. 基于多活性代理的复杂信息系统研究. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2008, 38: 2020–2037]
- 16 Wang Y, Tao R, Li B Z, et al. Multi-living agent methods for the function enhancement of the information system. *Sci Sin Inform*, 2013, 43: 821–841 [王越, 陶然, 李炳照, 等. 信息系统功能增强的多活性代理方法研究. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 821–841]

Artificial system architecture adjustment method based on multi-living agent

Zhichun ZHAO¹, Bingzhao LI^{2*}, Jin HU¹ & Yue WANG¹

1. *School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

2. *School of Mathematics and Statistics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

* Corresponding author. E-mail: li_bingzhao@bit.edu.cn

Abstract In complex dynamic social environments with strong constraints and confrontation, a solidified artificial system architecture often cannot meet complex and varied service task requirements. This paper proposes an artificial system architecture adjustment method based on the multi-living agent (MLA) theory by enhancing the administrators' management and control functions, that is, by replacing the primary multi-living agent or adding new multi-living agents. In this way, the self-organizing mechanism of the artificial system is changed and the principal and subordinate position of the opposite contradiction is changed. The livelihood degree of the system function is maintained or improved and the system function is realized. Specifically, in this paper we briefly review the MLA theory and then present the proposed artificial system architecture adjustment method. In the end, the effectiveness of the proposed method is verified by the air defense system against P2V-7 reconnaissance aircraft.

Keywords multi-living agent system theory, artificial system, multi-living agent, system architecture adjustment, livelihood degree

Zhichun ZHAO was born in 1990. She is currently pursuing her Ph.D. degree at the School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. Her research interests include complex system theory, time-frequency analysis, and radar signal processing.

Bingzhao LI was born in 1975. He received his B.S. degree from Shandong Normal University in 1998, and his M.S. and Ph.D. degrees from Beijing Institute of Technology, in 2001 and 2007, respectively. He is currently a professor at the School of Mathematics and Statistics, Beijing Institute of Technology, Beijing, China. His current research interests include system theory and the mathematical method in signal and image processing.

Jin HU is currently an associate professor of the School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology. He received his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. His research interests are primarily the basic principle and applications of the transformation method for electromagnetic/acoustic waves controlling and related signal processing, as well as information systems.

Yue WANG was born in 1932 in Danyang, China. He received his B.S. degree in radar engineering at Xidian University, Xi'an, China, in 1956. He was the president of the No. 206 Institute of China North Industries Group Corporation, and the president of Beijing Institute of Technology from 1993 to 1997. He is now the honorary president and a professor of Beijing Institute of Technology. He is an academician of both the Chinese Academy of Sciences and the Chinese Academy of Engineering. His research interests include signal processing and information system theory and technology.

He is an academician of both the Chinese Academy of Sciences and the Chinese Academy of Engineering. His research interests include signal processing and information system theory and technology.