



# 基于多活性代理的高性能人工系统总体设计方法研究

唐堂, 胡进\*, 贾丽娟, 王越

北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081

\* 通信作者. E-mail: bithj@bit.edu.cn

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-09-24; 接受日期: 2019-10-25; 网络出版日期: 2019-12-16

国家自然科学基金(批准号: 61421001)资助项目

**摘要** 面对充满动态未知强对抗挑战的复杂应用环境, 人工系统的构建需要科学系统性地设计新方法. 本文以多活性代理理论为指导, 以自组织机理机能活性的存在为前提, 结合系统功能要求及约束的上界, 将多活性代理系统服务功能活性度作为各层次研发运筹的依据, 提出了基于多活性代理的高性能人工系统总体设计方法, 并针对对抗矛盾动态加剧的情况展开了应对分析, 最后以高摧毁率对抗入侵流的对空末端防御系统的设计分析为例, 验证了所提出设计方法的有效性.

**关键词** 人工系统, 多活性代理系统, 系统架构, 活性度, 末端防御系统

## 1 引言

由相互作用、相互依赖的若干组分交织而成, 具有特定功能的有机整体被称为系统. 子系统的数量、种类、结构的复杂程度, 决定了系统的复杂度. 在发展的过程中, 相关系统都是以低级向高级、简单向复杂的规律逐步演化发展的. 基于 Descartes 提倡的还原论<sup>[1]</sup>的传统研究方法无法有效诠释系统复杂的本质, 因而“复杂系统”这一概念一经提出, 就引起了广泛关注, 并掀起了研究浪潮.

以 Prigogine 等<sup>[2]</sup>提出的耗散结构理论为基础, 基于耗散自组织理论的复杂系统研究方法已经开展了一系列研究并发展成为一个体系. Prigogine 提出的耗散自组织理论表明只有在不断与外界交换物质与能量的开放系统, 才可能使系统远离平衡态形成新的序. Haken<sup>[3]</sup>提出的协同学通过类比的方法, 从不同事物中找到共性, 抓住系统演化的主要矛盾, 研究了系统从无序到有序运动的规律和特征, 旨在探寻系统的自组织普适原理. Jantsch<sup>[4]</sup>提出的自组织的宇宙理论总结了一种可包罗万象的进化统一范式——自组织范式, 将耗散自组织理论推广, 并强调了事物间相互作用形成自组织运动的过程. Qian 等<sup>[5]</sup>提出的开放复杂巨系统概念是对一大类极端复杂系统的定义, 提出定性和定量综合集

**引用格式:** 唐堂, 胡进, 贾丽娟, 等. 基于多活性代理的高性能人工系统总体设计方法研究. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 1545–1558, doi: 10.1360/SSI-2019-0108  
Tang T, Hu J, Jia L J, et al. A general design method for artificial system based on multi-living agent theory (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 1545–1558, doi: 10.1360/SSI-2019-0108

成的方法论、定性和定量综合集成讨论厅体系, 通过人介入的方式解决复杂系统问题, 而不单纯依靠系统的自组织机理, 是目前科技水平下解决复杂巨系统问题的新方法和新机制. Wang<sup>[6]</sup> 在基础性耗散自组织理论基础上提出了多活性代理理论和方法, 引入人主导的他组织, 并用活性度对系统的功能进行定量表征, 将系统理论延伸到应用基础和应用层次, 形成较为实用的系统理论, 是一种研究设计新型人工系统的新方法.

人工系统设计学是一门建立在系统理论基础上的应用学科, 人类在实践过程中根据需求, 对实践对象由系统总体角度进行设计落实, 从而得到更好的效果以及更高的成功概率. 在人工系统设计学领域, 近些年有着许多的研究与进展, 然而复杂人工系统设计方法仍是一个复杂且难以解决的问题. 文献<sup>[7]</sup> 提出了一种设计思想与系统思想相结合的复杂系统设计与管理架构. 文献<sup>[8~10]</sup> 提出了复杂人工系统设计中的风险评估及功能错误检测方法, 这是人工系统设计中重要的一部分, 然而却没有形成成熟的系统设计理论与方法. 基于模型的系统工程 (model-based system engineering, MBSE) 使用建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动<sup>[11~13]</sup>, 可以很好地进行系统设计过程中的建模仿真工作. 上述理论与方法分别从顶层思维、评估方法以及建模仿真方面对人工系统的设计进行了研究, 然而却难以将各自的理论与方法紧密结合, 直接用于人工系统的设计. 多活性代理理论从顶层的规律哲理分析, 结合系统理论、控制理论、复杂理论等基础理论, 通过对基础思维的引导, 提出具体解决复杂人工系统问题的方法, 并将其延伸到应用基础层以及应用层, 形成一套完备且自洽的系统理论与方法. 多活性代理理论将人工系统的服务功能进行代理化, 以活性度<sup>[14]</sup> 表征人工系统的功能实现能力以及生命力, 可以很好地应用于人工系统设计上, 目前已在航天测控<sup>[15~17]</sup>、智慧城市<sup>[18]</sup>、入侵检测<sup>[19]</sup> 及其他领域<sup>[20~24]</sup> 有着一定的应用研究.

本文以多活性代理理论为指导, 将系统的自组织机理机能活性的存在作为基础, 结合系统的功能需求以及约束条件, 将多活性代理系统的功能活性度作为各个层次的研发依据, 提出了基于多活性代理理论的新高性能人工系统总体设计方法, 该方法可令系统在动态复杂、强约束、强对抗的环境中, 保持良好的功能特性. 本文以末端防御系统为例, 利用多活性代理理论对其进行总体设计及分析.

## 2 基于多活性代理的人工系统设计理论

### 2.1 人工系统存在机理、设计思维及其活性表征

随着社会发展, 人类的需求越来越高, 而系统所处的对抗环境越来越复杂, 固有系统的自组织机能并不能满足随需求及环境的变化而持续满足总体的需求, 因而需要通过人工系统的设计方法, 构建新的高性能人工系统, 以持续满足人类的需求. 人工系统是以人为主导形成、为人服务的系统. 因而人工系统的自组织机能是根据人的需求所设置的, 系统的服务功能通过其自组织运行而体现. 当生存环境发生变化, 该系统服务功能的需求衰退或消亡时, 该系统也将随之而衰退、消亡, 因此所有人工系统的寿命都是有限的.

人工系统的设计以人类的服务需求为“目的”, 是一个面向未来将“目的”具体化的过程. 深挖“目的”, 将其转化至系统“要求”以及所需满足的“条件”, 进一步物化至人工系统的实现. 这是多层次、多剖面复杂矛盾下的对立统一过程, 其中蕴含需求与约束、获得与付出等多种对立统一关系<sup>[25]</sup>, 此处不展开论述.

人工系统的“存在”, 依赖于系统服务功能自组织机理的顺利落实, 这需要避免系统自组织机理与环境的不匹配. 然而随着社会发展, 人工系统自身及其所处的对抗环境越来越复杂, 更多复杂矛盾随

之而出现, 要保证人工系统可持续的生存, 需要及时解决这些对立统一矛盾. 在复杂动态环境中, 如“就事论事”地设计系统, 不考虑可持续生命力, 就会导致系统生存周期过短. 因此多活性代理理论在耗散自组织理论的基础上进行了延拓, 将自组织机理延伸为活性自组织机理. 在多代理系统理论基础上, 多活性代理理论以活性度量系统的功能指标, 不仅需考虑当前系统功能的实现, 还需考虑社会技术、对抗环境的发展, 从时间维度上度量系统的生存能力.

人工系统服务功能的实现都有其前提约束条件, 而多活性代理系统正常运行的机理就是全部满足其服务功能实现的充分条件集. 然而充分条件集中可能包含一些不必要的条件, 为了避免因此造成的系统功能冗余, 应将“限制”严格化, 改为满足系统服务功能的充要条件集.

多活性代理系统理论中用活性度  $F(Q, T|R_{前提})$  表征系统功能的发挥程度<sup>[25]</sup>, 其中  $Q$  表示代理空间精确度,  $T$  表示代理任务服务时间域灵敏性,  $R_{前提}$  表示遂行任务的前提条件集. 活性度的定量表达可用系统活性自组织机理充要条件集的满足可能性来表征, 当系统某个遂行任务  $A$  的服务功能必须满足  $N$  个前提条件, 可将其视为这  $N$  个服务单元的串联结构, 利用各服务单元充要条件集可实现概率的连乘表达该任务的活性度

$$F_A(Q, T|R) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdots P_N, \quad (1)$$

其中  $P_k$  为任务  $A$  服务功能的第  $k$  个前提条件的实现概率,  $k \in 1, 2, 3, \dots, N$ .

这种定量表征方法可以避免各个服务功能单元之间复杂的关联关系, 但服务功能单元的拆分需要专业人员的经验、专业知识, 以及可接受的科学近似, 以保证服务单元划分的合理性.

## 2.2 基于多活性代理理论的人工系统设计步骤简述

基于多活性代理理论的人工系统设计方法强调总体思维, 紧抓总体性、系统性的重点问题及矛盾, 工作模式采取自“顶(层)”向“下(具体事物层)”展开, 在阶段性完成后自“下”向“上”综合集成, 反思反馈的思路. 以系统功能活性度  $F(Q, T|R_{前提})$  作为系统构架及服务功能设计等决策的准则. 一个多活性代理系统从无到有的研发, 大致分为以下 6 个步骤:

(1) 通过矛盾感知形成目的. 该阶段需高素质能力的人(团队)从顶层深入分析矛盾, 形成解决矛盾的核心概念, 根据设定的工作环境, 生成具有功能活性自组织机理的目的代理, 并将其初步展开为分代理. 将活性自组织机理延伸形成多层多活性代理, 完成系统建构. 多层次完成目的内涵及技术指标要求的动态功能.

(2) 根据目的形成系统核心要求. 在活性目的代理定性功能基础上, 对功能活性自组织机理进行剖析, 确定定量的系统核心要求, 制定一个科学的定量核心要求. 本阶段是后续工作顺利开展的基础, 核心要求以解决矛盾核心概念为基础, 结合实际环境对系统功能活性实现的充要条件进行定量分析, 得出具体的量化表征.

(3) 设定系统指标体系. 在系统各环节定性的核心要求基础上, 通过活性度的定量分析, 推导出满足系统各代理功能活性自组织机理的定量指标, 形成相应的系统指标体系, 这是后续系统方案设计的基础和依据. 系统指标体系的形成非常复杂, 重要系统功能需求所提出的指标往往非常高, 然而指标间大都蕴含多种矛盾, 外加科技水平的限制, 系统最初的指标体系要根据需求与可实现性折衷形成, 在之后的阶段中不断进行反馈调整.

(4) 形成系统方案. 本步骤要根据系统指标体系, 形成多活性代理系统的具体方案, 包含了多活性代理设计方案、多代理的协商协调, 结合复杂强约束、强对抗环境保证系统整体功能活性. 服务功能的发挥应具有鲁棒性, 以应对环境急变时, 服务功能要求的快速变化, 因而在方案的选取上, 应结合对

表 1 对地攻击弹药摧毁范围

Table 1 Destruction parameter index of ground attack ammunition

Index	Antiaircraft gun	Short-range missile
Attack range	1.5 ~ 0.2 km	4 ~ 0.3 km
Angle of site	15° ~ 70°	15° ~ 40°

抗环境充分考虑系统服务功能的特性, 发挥代理的优势特性、抑制代理的负向特性. 系统方案确定需要多回合的运筹选择, 此过程需要进行建模仿真对实际情况进行模拟. 当结果无法满足要求时, 需对系统指标体系进行必要的反馈调整.

(5) 系统技术设计. 以系统方案为基础, 开始系统的技术规范性设计, 从总体开始, 进行如工作流程、交互协议等的技术规范, 而后对系统分代理进行技术规范性设计. 在此基础上, 进行系统层多代理协调协商设计与测试, 该步骤需要与系统方案相呼应, 无法实现时, 要对方案进行反馈调整.

(6) 样机试制及评估鉴定. 可利用多活性代理方法应用特点, 更高效率地完成本阶段工作, 需结合具体的系统及型号, 本文不展开论述.

下文将结合末端防御系统, 通过定量分析验证基于多活性代理理论的总体设计方法的可行性.

### 3 实例分析: 对空末端防御系统设计分析

#### 3.1 系统背景、核心工作机理与主要性能要求

系统的设计需要紧密结合系统服务功能及其所处对抗环境的特点, 对其中所蕴含的矛盾对立统一关系进行深度剖析. 末端防御系统的任务是保卫包括部队指挥所、重要工厂、桥梁、隧道、港口、码头、舰艇等在内的重要区域, 是我方拦截敌方攻击的最后防线, 因此任务重要且艰巨, 防御针对的目标类型为多种飞行器以及飞行器所携带的常规对地弹药, 如: 制导导弹、火箭弹、制导炸弹等.

末端防御系统所保卫的是重要地区, 因而系统活性度指标要求极高. 系统的防御性能应具有强鲁棒性, 针对敌方多种目标、多种模式的攻击, 拦截成功概率应保持在 85% 以上, 对应的系统功能活性度  $F(Q, T|R_{前视}) \geq 0.85$ . 末端防御系统处于防御体系末端, 从敌方进入打击范围到突围, 所需的时间极短, 对我方的时间敏捷性有着极大的挑战. 然而另一方面, 近距离对我方探测能力以及打击能力都有着极大的提升. 因而如果能把握系统的核心矛盾, 利用矛盾对立统一规律将矛盾向我方有利的方向转换, 就能在系统的设计中取得成功. 这一设计思维应贯彻系统设计的各个阶段, 后文也将在射击代理的设计上具体讨论.

该系统的有效作战条件为目标飞行器活动在 2500 m 高度以下, 速度在 500 m/s 以下, 距离在 20 km 以内, 各种对地攻击弹药摧毁范围如表 1 所示.

为保证系统服务功能的鲁棒性, 可假定敌方采用全方位多批次密集攻击的强打击手段, 我方防御系统必须敏捷掌握敌人入侵流动态信息及态势, 并迅速协同全系统各分子系统进行有机协同工作, 形成对敌入侵流强有力的打击, 完成我方防御任务. 参考已有案例对末端防御系统进行总体设计, 将系统功能初步展开, 并对其自组织机理进行分析.

火力系统方面, 敌方对我方目标进行强打击的机理是基于弹药爆炸力的爆轰效应, 我方采用“相反相成”原理, 结合近程防御有利条件, 利用高密度对空弹药流对各种入侵飞行目标实施毁灭性打击.

进一步考虑要进行有效对敌打击, 我方末端防御系统需具有准确、敏捷感知入侵信息, 以及破解对方信息对抗手段的能力, 快速进行防御行动决策以及各分系统协同高效反击摧毁的能力, 另外必须

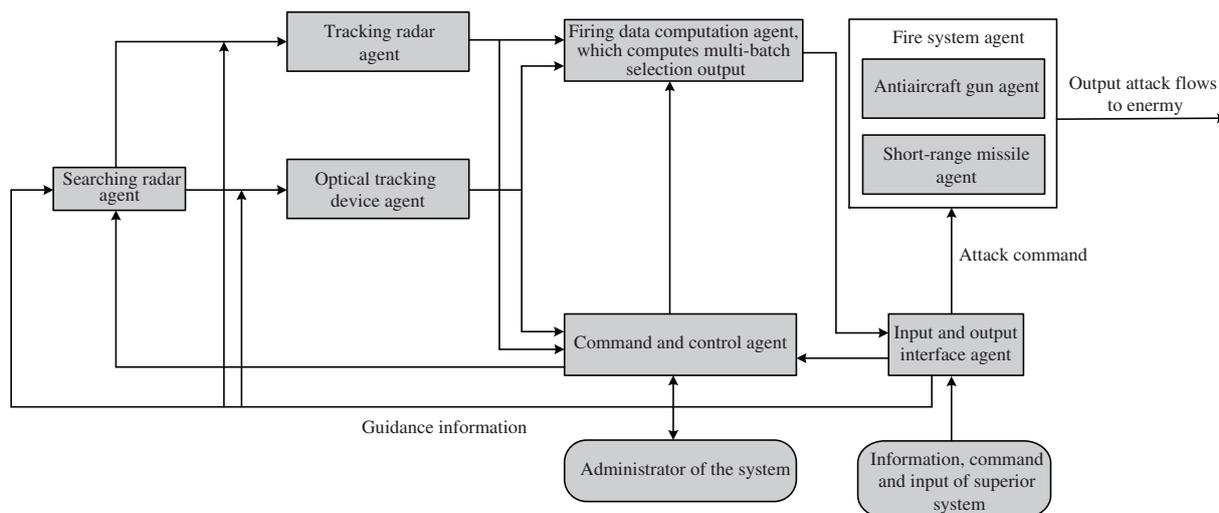


图 1 基于多活性代理的末端防御系统架构

Figure 1 The framework of terminal defense system based on MLA

高度重视的是复杂动态的对抗工作环境,在该环境下工作,系统需具有强鲁棒性.因此,我方系统必定是功能先进、结构科学,具应变性的现代化系统,故研发总体设计采用多活性代理系统理论方法是符合客观实际、科学合理的.展开至系统层、代理级、分代理级,以及子代理级功能设计中,多涉及强对抗前提条件,敏捷响应因素,高准确度、高精度度因素.因此,以服务功能活性度  $F(Q, T|R_{\text{前提}})$  作为思考运筹以及设计指标是合理可行的.

依照上述论述,结合相关专业技术知识进行系统的架构设计,基于多活性代理的末端防御系统设计架构如图 1 所示.

本小节分析了系统顶层的矛盾,并据此生成系统的主要“目的”,将“目的”延展至多种功能需求,进一步将系统划分为各个功能子代理.3.2 小节将结合实际环境对系统各个代理功能活性进行分析,提出定量指标需求.

### 3.2 多活性代理系统总体指标分析

$F(Q, T|R_{\text{前提}})$  在本实例中是表达本系统击毁全部敌方入侵流可能性的概率值,它是由多活性代理系统结构特征集(如  $Q, T$  表征系统精准性特征、时间域敏捷性特征)、任务特征集、任务前提特征集、工作环境特征集等多因素交织形成的完成任务可能性的定量表达.用  $F(Q, T|R_{\text{前提}})$  作为多活性代理系统任务总体指标,进一步可展开为系统指标体系,其要点如下:

- (1) 将前提条件集  $R_{\text{前提}}$  强化提升为充分必要条件集;
- (2) 由充要条件内涵可认定,多活性代理系统运行状态与充要条件存在状态同构;
- (3) 将完备充要条件集分解为多个单因素元,由其全体构成系统充要条件集;
- (4) 将系统视作各个单因元素形成的串联结构,采用各单因素元存在可能性的连乘值来表征系统充要条件集存在可能性.在研发设计中,发挥专家专业基础知识、实践经验,按照任务性质要求与可能性进行分析,并可在研发过程及时返回综合调整环节.

根据 3.1 小节的分析,将末端防御系统的充要条件集用上述方法进行分解,得到的主要单因素元

表 2 单因素元概率表达含义  
Table 2 The definition of probability of unit condition

Symbol	Expression
$P_1$	Effectual shooting probability
$P_2$	Kill probability
$P_3$	Detection probability
$P_4$	Successful convert probability from detection to tracking
$P_5$	Anti interference probability of searching
$P_6$	Anti interference probability of tracking
$P_7$	Correct computation probability of firing data
$P_8$	Correct command execution probability of firing system
$P_9$	Correct administrator command receiving probability of firing system
$P_{10}$	Others

概率表达如表 2 所示.

充要前提条件集中, 单因素元的连乘结构有着易于分析计算以及容易理解等优点, 然而系统充要前提的定量表征值会随着单因素数目增大而快速下降, 并且比各主要因素单元中最低值还低. 现代多功能高性能系统, 在一般情况下结构较为复杂, 运行制约充要条件数也比较多, 这增加了系统设计的难度, 为了使复杂系统充要前提条件集的定量表征值达到要求, 应该尽可能地提高较易提高的单因素元的生存概率, 将容错性留给复杂且己方难以完全掌控的环节.

本实例系统总体指标体系设计方法如下:

完成系统任务活性度“定量”讨论以及确定, 由歼敌角度考虑, 如果  $F(Q, T|R_{充要}) = 0.85$ , 则意味着歼敌可达 85%, 此时可认为是完胜. 若从我方保卫目标角度考虑, 此时我方仍有 15% 概率受攻击伤亡. 对于例如高级指挥所、重要军事设施等非常重要的目标来说, 这个伤亡概率是不够安全的, 仍应提高. 因此在设计本系统时, 应考虑系统对普适性的需求, 对于高需求场合, 应可在一般运行模式的基础上, 通过调整“调控参数”提高活性度使之不低于 0.9. 即此时  $F(Q, T|R_{充要}) \geq 0.9$ .

敌方空袭进攻, 具很多主动优势. 防御方的核心措施是通过高效射击摧毁空中入侵流, 这点应该贯彻整个防御行动中. 首先应在复杂动态不确定环境中对射击概率  $P_{射击}$  进行建模分析设计, 从而实施高射击概率策略, 射击环节所处环境较为复杂多变, 因而稍稍放松对其指标要求, 假定射击概率  $P_1 = 0.96$ . 假定对一目标全程射击, 最终摧毁的概率为  $P_2 = 0.96$ ; 采用信息前沿科技, 利用末端防御近距离的物理条件, 以及系统结构中并联上级目标信息支持等综合措施, 可假定搜索抗干扰概率  $P_5 = 0.99$ , 以及在抗干扰成功情况下搜索发现目标概率  $P_3 = 0.99$ ; 末端防御系统近距离的工作环境, 可以保证雷达探测代理高天线增益以及高精度窄波束 (即活性度中高精准度因素  $Q$  值比较高), 外加近距离高准确度的光电跟踪器并联备用, 可假定跟踪抗干扰概率  $P_6 = 0.99$ ; 在以上  $P_5$  和  $P_6$  高科技技术支持下, 加上先进目标截获、跟踪模式技术支持下, 可假定目标截获转跟踪概率  $P_4 = 0.9999$ ; 在现代计算技术以及微电子设计制造技术支持下, 设计诸元正确计算概率  $P_7 = 0.9999$ ; 在快速精确的跟踪能力加持下, 可假定火力系统正确执行指令概率  $P_8 = 0.999$ ; 在实际情况下, 火控系统正确接收执行指挥员以及上级指令概率可保证在 99.99%, 即  $P_9 = 0.9999$ ; 而  $P_{10}$  代表了其他次要因素不对系统性能造成影响的概率, 因为其余次要矛盾基本不会对系统性能造成影响, 因而可以令  $P_{10} = 1$ , 在之后的计算中将不再考虑  $P_{10}$  的影响.

上述工作完成后,应将已分析设定的系统功能活性度  $F(Q, T | R_{前提})$  指标按照多活性代理系统架构分解分配到各分、子代理,以及专门从事多代理间正常工作协调及应变协调的管控代理进行设计落实,形成具体方案。“落实”除包括直接落实各充要条件外,还应包括落实所包括的系统性  $Q, T$  因素的分解指标.举例来说,若系统精准度指标  $Q$  为 2 豪弧,系统敏捷度  $T$  为 4~5 s,那么主要分解致跟踪雷达、光电跟踪器、火力系统之标校,以及跟踪进度、多目标间转化进度等,同时以上代理在管控代理管理下,共同完成自搜索发现目标至完成射击弹丸出膛一共所需时间最低要求为 6 s,则时间敏捷度为 6 s.此外,对操控人员的熟练度、各分队的指挥员严格操作的精确度敏捷度都有要求,这样连同研发设计人员才能构成高效防御系统有机整体.然而高要求的指标体系及代理间相互蕴含的矛盾,加之技术上的局限,具体方案的生成落实需要进行建模仿真分析,根据结果开展多回合的反馈决策.3.3 小节将对末端防御系统进行建模分析,并详细论述如何根据结果对系统指标以及系统方案进行调整.

### 3.3 系统方案建模分析

根据式 (1),本系统的任务活性度可定量表征为各单因素元可实现概率的连乘,即

$$F(Q, T | R_{前提}) = \prod_{i=1}^9 P_i, \quad (2)$$

其中有效射击概率  $P_1$  的取值与多因素关联且具有随机性,较为复杂且对鲁棒性需求很高,故而本文以其为例,展开深入分析.

火力系统具有小口径高炮以及近程低空导弹两种配置.现代战争中,由于导弹较高炮而言射程更远、单发摧毁效率更高,因而在防空体系中,高炮的地位很大一部分被导弹所取代.然而在末端防御系统中,结合系统本身近距离的环境、饱和进攻的敌方入侵流、高鲁棒性的射击性能需求进行分析,虽然导弹的单发摧毁率高,但其成本也高,且一次弹架发射完后再次装填至可用状态耗时较长,火力持续性难以应对多批次的持续饱和攻击.而其射程远这一优势在末端防御系统近距离的防御范围中也无法发挥作用.

反观小口径高炮,其工作机理如下:计算代理接收雷达测出的目标方位角、高低角和距离,结合目标信息与高炮自身性能预测出弹道交汇点,而后高炮瞄准预测位置进行连续射击.当目标所处距离较远,长弹道距离决定了长弹丸飞行时间,进而导致小口径高炮这种闭环无导引的火力系统预测目标点不准,进而降低摧毁概率.然而在末端防御系统中,这一劣势被极大地掩盖了,在近距离范围内,计算代理对高速目标短时间的轨迹预测准确度高,进而高炮射击摧毁概率更高.此外,高炮弹幕攻击的特性极大增强了对目标位置误差的鲁棒性.对于敌方连续饱和攻击的特点,小口径高炮根据“相反相成”的原理,同样利用连续高密度的饱和炮击对其进行摧毁,针对对方的攻击特性,高炮可长时间连续工作、准备时间短、造价低的优势得以完美体现.

综上,结合末端防御系统近程特性以及敌方持续饱和攻击流特性,小口径高炮与导弹相比,综合  $Q, T$  因素分析,其功能活性度  $F(Q, T | R_{前提})$  明显更高.因此选用高性能小口径高炮作为末端防御体系中的主力.以事实为例,航空母舰的对空末端防控体系中火力系统大多为多管小口径高射速高炮,而反导导弹多用于远中程区域防空体系中.因此,系统中的射击代理由高性能小口径高炮组成.先进小口径高炮近程射击时,其射速高、弹丸存速高,并且进行多管射击.8管的高炮可产生 15 发/秒/管  $\times$  8 管 = 9600 发/分钟的密集弹丸流,外加跟踪瞄准高精度支持 ( $Q$  因素),可以保障摧毁概率达到  $P_2 = 0.96$  的指标.

对于有效射击概率  $P_{射击}$  可通过随机服务系统模型进行建模分析,随机服务系统模型用于进行分

析计算双方存在的概率. 通过求解对抗方的生存概率, 分析实现降低敌方生存概率的前提条件, 以便实现概率压制对方, 保证我方的胜利. 假设 A, B 为激烈对抗双方, A 方以构成随机到达 B 方服务台的客流表达 A 方行动. 如果 B 方对顾客流在服务完成时间内另有顾客流到达, 则因服务台占用, 等待一定逗留时间之后会导致突防, 此时称 A 方斗争得胜. 因此 B 方服务台对 A 方顾客进行服务是随机现象, 进而可假定被服务的顾客流是参数为  $\lambda$  的泊松流, 其具有平稳性、普通型及无后效性, 参数  $\lambda$  表征的是单位时间内到达服务台的顾客个数. B 方有  $n$  个服务台,  $\bar{t}_{\text{服务}}$  表示 B 方服务台对一个顾客所需的平均服务时间, 其服务时间服从指数分布.  $\bar{t}_{\text{逗留}}$  表示 A 方顾客到达 B 方服务台后的平均逗留时间. 从而, 激烈对抗条件下 A 方与 B 方就构成了有限等待时间的 M/M/C 随机服务系统 [26].

在 M/M/C 系统中, 系统处于各个状态的概率如下:

$P_0$ : 系统中  $n$  个服务台全部处于空闲状态;

$P_1$ : 系统中有 1 个服务台处于服务状态, 剩余  $n - 1$  个服务台处于空闲状态;

...

$P_n$ : 系统中  $n$  个服务台全部处于工作状态;

$P_{n+1}$ : 系统中  $n$  个服务台全部处于工作状态, 且有 1 个顾客处于等待服务状态;

...

$P_{n+s}$ : 系统中  $n$  个服务台全部处于工作状态, 且有  $s$  个顾客处于等待服务状态;

...

在  $\Delta t$  内有多于 1 个顾客出现或服务完成或突围离开的概率为  $o(\Delta t)$ , 可忽略不计.

在  $t + \Delta t$  时刻, 计算系统中有  $k$  个顾客的状态对应的概率  $P_k(t + \Delta t)$ :

若  $k = 0$ , 考虑 0 个顾客出现、0 个顾客被服务完成, 0 个顾客出现、1 个顾客被服务完成, 这两种情况, 则有

$$P_0(t + \Delta t) = [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] P_0(t) + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [\mu\Delta t + o(\Delta t)] P_1(t) + o(\Delta t). \quad (3)$$

若  $1 \leq k \leq n - 1$ , 考虑 0 个顾客出现、0 个顾客被服务完成, 1 个顾客出现、0 个顾客被服务完成, 0 个顾客出现、1 个顾客被服务完成, 这 3 种情况, 则有

$$\begin{aligned} P_k(t + \Delta t) &= [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^k P_k(t) \\ &\quad + [\lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^{k-1} P_{k-1}(t) \\ &\quad + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] C_{k+1}^1 [\mu\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^k P_{k+1}(t) + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (4)$$

若  $k = n$ , 考虑 0 个顾客出现、0 个顾客被服务完成, 1 个顾客出现、0 个顾客被服务完成, 0 个顾客出现、1 个顾客被服务完成、0 个顾客突围离开, 0 个顾客出现、0 个顾客被服务完成、1 个顾客突围离开, 这 4 种情况, 则有

$$\begin{aligned} P_n(t + \Delta t) &= [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^n P_n(t) \\ &\quad + [\lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^{n-1} P_{n-1}(t) \\ &\quad + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] C_n^1 [\mu\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^{n-1} [1 - v\Delta t + o(\Delta t)] P_{n+1}(t) \\ &\quad + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^n [v\Delta t + o(\Delta t)] P_{n+1}(t) + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (5)$$

若  $k = n + s$ , 考虑 0 个顾客出现、0 个顾客被服务完成、0 个顾客突围离开, 1 个顾客出现、0 个顾客被服务完成、0 个顾客突围离开, 0 个顾客出现、1 个顾客被服务完成、0 个顾客突围离开, 0 个顾客出现、1 个顾客被服务完成、0 个顾客突围离开, 0 个顾客

客出现、0 个顾客被服务完成、1 个顾客突围离开,这 4 种情况,则有

$$\begin{aligned}
 &P_{n+s}(t + \Delta t) \\
 &= [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^n [1 - v\Delta t + o(\Delta t)]^s P_{n+s}(t) \\
 &\quad + [\lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^n [1 - v\Delta t + o(\Delta t)]^{s-1} P_{n+s-1}(t) \\
 &\quad + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] C_n^1 [\mu\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^{n-1} [1 - v\Delta t + o(\Delta t)]^{s+1} P_{n+s+1}(t) \\
 &\quad + [1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)] [1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)]^n C_{s+1}^1 [v\Delta t + o(\Delta t)] [1 - v\Delta t + o(\Delta t)]^s P_{n+s+1}(t) + o(\Delta t). \tag{6}
 \end{aligned}$$

根据式 (3) ~ (6), 可以建立状态转移方程如下:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda + \mu) P_1(t) + \lambda P_0(t) + 2\mu P_1(t), \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{n-1}(t)}{dt} &= -[\lambda + (n-1)\mu] P_{n-1}(t) + \lambda P_{n-2}(t) + (n\mu) P_n(t), \\
 \frac{dP_n(t)}{dt} &= -(\lambda + n\mu) P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + (n\mu + v) P_{n+1}(t), \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{n+s}(t)}{dt} &= -(\lambda + n\mu + sv) P_{n+s}(t) + \lambda P_{n+s-1}(t) + [n\mu + (s+1)v] P_{n+s+1}(t), \\
 &\vdots
 \end{aligned} \right. \tag{7}$$

其中  $\mu = 1/\bar{t}_{\text{服务}}$  为服务台的服务频率,  $v = 1/\bar{t}_{\text{逗留}}$  为顾客流的逗留频率.

当  $t \rightarrow \infty$ , 对任意  $k \geq 0$ , 取  $\frac{dP_k(t)}{dt} = 0$ , 可求得式 (7) 的稳态解:

$$\left\{ \begin{aligned}
 P_k &= \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k P_0, & k = 1, 2, \dots, n, \\
 P_{n+s} &= \frac{\lambda^{n+s}}{n! \mu^n \prod_{m=1}^s (n\mu + mv)} P_0, & s = 1, 2, \dots
 \end{aligned} \right. \tag{8}$$

由式 (8) 可推得

$$P_0 = \left[ \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\lambda^{n+s}}{n! \mu^n \prod_{m=1}^s (n\mu + mv)} \right]^{-1}. \tag{9}$$

令  $\alpha = \lambda \cdot \bar{t}_{\text{服务}}$ ,  $\beta = \bar{t}_{\text{服务}}/\bar{t}_{\text{逗留}}$ , 该随机服务系统中, 等待服务顾客数量的数学期望为

$$m_s = \sum_{s=1}^{\infty} (sP_{n+s}) = \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n + m\beta)} P_0. \tag{10}$$

于是 A 方的顾客流成功突围离去的概率, 即生存概率的计算模型如下:

$$P_{\text{生存}} = \frac{m_s}{\lambda \bar{t}_{\text{逗留}}} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n + m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n + m\beta)}}, \tag{11}$$

表 3 随机服务系统生存概率 ( $n = 1$ )  
 Table 3 The survival probability of random service system ( $n = 1$ )

$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$
0.05	0.05	0.00248205	0.08	0.05	0.00407432	0.1	0.05	0.00518209	0.15	0.05	0.00812626
	0.08	0.00384193		0.08	0.00628637		0.08	0.00797761		0.08	0.0124348
	0.1	0.00470099		0.1	0.00767722		0.1	0.00972964		0.1	0.0151121
	0.15	0.00670032		0.15	0.0108965		0.15	0.0137698		0.15	0.0212262
	0.2	0.00851348		0.2	0.0137968		0.2	0.0173932		0.2	0.026647
	0.25	0.0101668		0.25	0.0164272		0.25	0.0206676		0.25	0.0315013
	0.3	0.0116817		0.3	0.0188265		0.3	0.0236454		0.3	0.0358832
	0.35	0.0130755		0.35	0.0210257		0.35	0.026368		0.35	0.0398648
0.4	0.0143626	0.4	0.0230502	0.4	0.028869	0.4	0.0435033				
0.2	0.05	0.0113443	0.25	0.05	0.0148702	0.3	0.05	0.0187425	0.35	0.05	0.0230049
	0.08	0.0172437		0.08	0.0224371		0.08	0.0280504		0.08	0.0341215
	0.1	0.020876		0.1	0.0270505		0.1	0.033666		0.1	0.0407538
	0.15	0.0290871		0.15	0.0373692		0.15	0.0460885		0.15	0.0552592
	0.2	0.0362817		0.2	0.0463021		0.2	0.0567113		0.2	0.0675102
	0.25	0.0426655		0.25	0.0541556		0.25	0.0659653		0.25	0.0780863
	0.3	0.0483856		0.3	0.0611417		0.3	0.0741388		0.3	0.0873629
	0.35	0.053552		0.35	0.0674144		0.35	0.0814358		0.35	0.0955992
0.4	0.0582492	0.4	0.0730896	0.4	0.0880068	0.4	0.102983				

其中, 根据式 (11) 可计算出不同对抗环境, 即不同参数条件下的生存概率, 如表 3 ~ 5 所示. 由此可得出结论,  $\alpha, \beta$  越小,  $n > 1$  越大,  $P_{生存}$  越小, A 方趋向衰亡. 因此 A 方可通过调整客流到达强度, 即增大  $\lambda$ , 使  $\alpha$  变大, 以提高  $P_{生存}$ . 另一方面, B 方可通过调整服务速度缩短服务时间, 即减小  $\bar{t}_{服务}$ , 或者扩大服务范围增加对方客流逗留时间, 即增大  $\bar{t}_{逗留}$ , 使  $\alpha, \beta$  同时变小, 以降低 A 方生存概率, 对抗突防.

可将敌方饱和和入侵流视为 A 方顾客流, 我方高炮视为服务台, 火力代理的射击概率为

$$P_{射击} = 1 - P_{生存} \tag{12}$$

结合末端防御系统的背景及需求, 设置系统总体参数如下. 初步设定射击代理的工作范围为 20 km (此处假设为有装甲的军舰末端防御系统, 故无需考虑目标在接近我方要地时爆炸残骸等波及的毁伤范围, 针对其他无抗毁伤能力的末端防御系统, 工作范围会因内边界的外扩而减小), 飞行器速度加上弹速为 500 m/s, 则  $\bar{t}_{逗留} = 40$  s.  $\bar{t}_{服务} = 6$  s,  $n = 1$ , 攻击流批次强度  $\lambda = 3/\text{min}$ , 计算可得  $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.15$ . 查表 3 得到  $P_{生存} = 0.0956$ , 由式 (12) 可得  $P_{射击} = 0.9044$ . 达到系统指标中对  $P_1$  的要求.

此时根据式 (2) 得到  $R_{前提}$  的概率表达:

$$P_{R_{前提}} = 0.956 \times 0.96 \times 0.99^3 \times 0.999 \times 0.9999^3 \approx 0.8893. \tag{13}$$

式中  $P_2 \sim P_7$  也需要专业人士根据复杂多因素、多变量环境通过建模仿真等方法对相关功能活性度进行定量分析而得出, 本文由于篇幅限制就不一一分析, 以系统指标的假定值进行计算.

上述计算结果满足 0.85 的基本需求, 但低于 0.9 的高水平要求, 因此需要根据建模分析结果对系统指标进行反馈调整. 射击概率作为串联乘积结构中的最低项, 对系统总体功能活性的下限有着决定

表 4 随机服务系统生存概率 ( $n = 2$ )Table 4 The survival probability of random service system ( $n = 2$ )

$\alpha$	$\beta$	$P_{\text{Living}}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{\text{Living}}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{\text{Living}}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{\text{Living}}$
0.05	0.05	0.0000304313	0.08	0.05	0.0000778563	0.1	0.05	0.000121626	0.15	0.05	0.000273718
	0.08	0.000047922		0.08	0.000122498		0.08	0.000191249		0.08	0.000429722
	0.1	0.0000592803		0.1	0.000151449		0.1	0.000236358		0.1	0.000530548
	0.15	0.0000866754		0.15	0.000221153		0.15	0.000344836		0.15	0.000772262
	0.2	0.00011273		0.2	0.000287296		0.2	0.000447613		0.2	0.00100035
	0.25	0.000137546		0.25	0.000350166		0.25	0.000545168		0.25	0.00121608
	0.3	0.000161213		0.3	0.000410016		0.3	0.000637922		0.3	0.00142054
	0.35	0.000183813		0.35	0.000467073		0.35	0.000726249		0.35	0.00161469
0.4	0.000205418	0.4	0.000521538	0.4	0.000810479	0.4	0.00179936				
0.2	0.05	0.000487214	0.25	0.05	0.000762993	0.3	0.05	0.00110231	0.35	0.05	0.00150681
	0.08	0.000763596		0.08	0.00119363		0.08	0.00172108		0.08	0.00234769
	0.1	0.000941755		0.1	0.00147045		0.1	0.00211765		0.1	0.00288491
	0.15	0.00136746		0.15	0.0021296		0.15	0.00305848		0.15	0.0041545
	0.2	0.00176746		0.2	0.00274621		0.2	0.00393453		0.2	0.00533095
	0.25	0.00214439		0.25	0.00332502		0.25	0.00475357		0.25	0.00642629
	0.3	0.00250046		0.3	0.00386994		0.3	0.00552198		0.3	0.00745023
	0.35	0.00283759		0.35	0.00438432		0.35	0.00624507		0.35	0.00841075
0.4	0.0031574	0.4	0.00487097	0.4	0.00692733	0.4	0.0093145				

性的影响, 因此通过对式 (13) 中的弱项射击概率  $P_{\text{射击}}$  进行分析, 提高整体系统  $R_{\text{前提}}$  的概率表达.

若不改变其他功能活性度,  $P_{\text{射击}}$  需提升至 0.9675 以上才可满足系统 0.9 的总体要求. 已知当  $n = 1$ , 即系统设计采用单台防御设备时, 射击概率为 0.954, 不满足系统需求. 在敌方入侵流特性不变的情况下, 若想提高射击功能活性度, 我方可采取的方法有 3 种:

(1) 缩短  $\bar{t}_{\text{服务}}$  以减小  $\alpha$  与  $\beta$ . 我方能够缩短  $\bar{t}_{\text{服务}}$  的方法主要是提升小口径高炮的射速、存速抑或准确度, 这需对该型号小口径高炮的性能进行提升, 然而一般情况下, 由于复杂、强对抗的环境因素, 当前的高炮性能已难以提升, 即便可以提升, 性价比也会很低. 因此本方法不作为首选.

(2) 增加  $\bar{t}_{\text{逗留}}$  以减小  $\beta$ . 我方能够增加  $\bar{t}_{\text{逗留}}$  的主要方法是增加末端防御系统的服务范围, 该服务范围属于系统总体参数, 每一功能活性度都与其相关 (如探测、跟踪代理的雷达、光学探测性能会因服务范围的增大而降低), 一旦改变会影响所有环节的指标, 因而在非绝对必要的情况下, 不会使用该方法.

(3) 增大  $n$ . 增加  $n$  的方法就是增加服务台 (即小口径高炮) 的个数, 这会增加系统构建、运维成本, 同时会加大管控代理对火力代理协同控制的难度. 然而与前两种方法相比, 该方法性价比最高, 并且从技术上的可实现性更强.

综上所述, 我们选用增加小口径高炮数量的方法来提升射击功能的活性度. 当  $n = 2$ , 系统设计采用两台防御设备,  $\alpha, \beta$  取值不变时, 射击概率变为 0.997, 完全满足了射击性能的需求. 因此为保证高射击概率, 设计该防御系统时, 至少要保证两台防御设备的部署.

经过这轮分析, 射击代理的方案设计将小口径高炮数量改为 2 台. 之后, 将当前射击功能的各项性能指标反馈至系统总体指标, 这提升了系统总体的指标, 也可以为其余环节适当舒缓压力, 降低难以

表 5 随机服务系统生存概率 ( $n = 3$ )  
 Table 5 The survival probability of random service system ( $n = 3$ )

$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$	$\alpha$	$\beta$	$P_{Living}$
0.05	0.05	3.35608E-7	0.08	0.05	1.36063E-6	0.1	0.05	2.63965E-6	0.15	0.05	8.76339E-6
	0.08	5.31408E-7		0.08	2.1536E-6		0.08	4.17691E-6		0.08	1.38572E-5
	0.1	6.59707E-7		0.1	2.67287E-6		0.1	5.18314E-6		0.1	1.71878E-5
	0.15	9.7291E-7		0.15	3.93946E-6		0.15	7.63612E-6		0.15	2.52951E-5
	0.2	1.27578E-6		0.2	5.16291E-6		0.2	1.00038E-5		0.2	3.31051E-5
	0.25	1.56885E-6		0.25	6.34554E-6		0.25	1.22908E-5		0.25	4.06357E-5
	0.3	1.85259E-6		0.3	7.48946E-6		0.3	1.45015E-5		0.3	4.79032E-5
	0.35	2.12747E-6		0.35	8.59667E-6		0.35	1.66401E-5		0.35	5.49224E-5
0.4	2.39391E-6	0.4	9.66898E-6	0.4	1.871E-5	0.4	6.17069E-5				
0.2	0.05	0.000204442	0.25	0.05	0.0000393206	0.3	0.05	0.0000669459	0.35	0.05	0.000104802
	0.08	0.000032304		0.08	0.0000620824		0.08	0.000105613		0.08	0.000165191
	0.1	0.0000400492		0.1	0.0000769291		0.1	0.000130801		0.1	0.000204476
	0.15	0.0000588742		0.15	0.000112957		0.15	0.000191823		0.15	0.000299483
	0.2	0.0000769721		0.2	0.00014752		0.2	0.000250234		0.2	0.000390216
	0.25	0.00009439		0.25	0.00018072		0.25	0.000306229		0.25	0.000477016
	0.3	0.000111171		0.3	0.000212648		0.3	0.000359982		0.3	0.000560183
	0.35	0.000127352		0.35	0.000243387		0.35	0.000411646		0.35	0.000639979
0.4	0.00014297	0.4	0.000273011	0.4	0.000461357	0.4	0.000716639				

达到要求的环节的需求指标. 而后进行下一轮方案决策, 直至系统总体方案最终确定.

在方案确定之后, 就开始系统的技术设计阶段以及样机试制、评估鉴定阶段, 这两个阶段需要紧密结合多活性代理方法, 并且与之前的步骤进行多次的反馈. 因为涉及具体的技术与型号, 故不在本文展开详细讨论.

#### 4 总结与展望

本文针对动态未知强对立挑战的复杂运行环境, 提出了基于多活性代理理论的系统总体设计方法. 采取由“顶”向“下”展开, 而后自“下”向“上”综合集成反思反馈的思路, 以自组织机理机能活性的存在为基础, 按照新生系统功能要求以及约束, 以系统服务功能活性度  $F(Q, T|R_{前境})$  为依据, 对多活性代理系统进行目的确定、定性要求、量化指标体系、决定方案、技术设计、样机试制一系列的运筹策划. 本文中对末端防御系统进行了实例分析, 验证了基于多活性代理总体设计方法的有效性.

随着社会的发展、技术的进步, 人类对新型人工系统的需求将会越来越高, 而系统所处环境中的约束、对抗也会越来越多、越来越复杂, 因而高效、实用的人工系统设计方法是人类社会发展中的不可或缺的. 多活性代理理论作为一种针对强约束、强对抗动态环境的人工系统研发设计方法, 在当前社会发展环境下, 有着很强的实用性以及广泛的应用前景, 然多活性代理理论虽然可以作为方法论指导人工系统设计, 在实践过程中也需要借助现有模型、算法等问题进行求解. 在之后的研究中, 我们将提出一系列在人工系统设计、调整中的模式与方法, 为人工系统设计者提供一些切实可行的系统活性度提升方法. 可以将人工智能算法与多活性代理理论相结合, 进行人工系统设计中的参数、模型选择.

此外,我们计划将 MBSE 与多活性代理理论相结合,用于多活性代理系统的建模仿真。

## 参考文献

- 1 Descartes R. Discourse on the method of rightly conducting the reason, and seeking truth in the sciences. *Ann Neurosci*, 2009, 16: 57–61
- 2 Prigogine I, Stengers I. *Order Out of Chaos*. New York: Bantam, 1984
- 3 Haken H. Synergetics. *IEEE Circ Dev Mag*, 1977, 28: 412–414
- 4 Jantsch E. *The Self-organizing Universe*. Oxford: Pergamon Press, 1980
- 5 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]
- 6 Wang Y. A novel method of constructing complex information system — multi-living agent method. *Eng Sci*, 2006, 8: 29–32 [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]
- 7 Vinnakota T. A conceptual framework for complex system design and design management. In: *Proceedings of IEEE Systems Conference, Orlando, 2016*
- 8 Mekdeci B, Ross A M, Rhodes D H, et al. Pliability and viable systems: maintaining value under changing conditions. *IEEE Syst J*, 2015, 9: 1173–1184
- 9 Kurtoglu T, Tumer I Y. A graph-based fault identification and propagation framework for functional design of complex systems. *J Mech Des*, 2008, 130: 051401
- 10 Orojloo H, Azgomi M A. A method for evaluating the consequence propagation of security attacks in cyber-physical systems. *Future Gener Comput Syst*, 2017, 67: 57–71
- 11 Estefan J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies. *Jet Propul*, 2008, 25: 1–70
- 12 Mazeika D, Morkevicius A, Aleksandraviciene A. MBSE driven approach for defining problem domain. In: *Proceedings of the 11th System of Systems Engineering Conference, Kongsberg, 2016*
- 13 Zhu J, Yang H, Gao Y H, et al. Summary of model based system engineering. *Aeroengine*, 2016, 42: 12–16 [朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述. *航空发动机*, 2016, 42: 12–16]
- 14 Liu S H, Shan T, Tao R, et al. Liveness evaluation of multi-living agent system. *J Syst Eng Electron*, 2013, 24: 435–444
- 15 Du S Y, Hu J, Jia L J, et al. Multi-satellite TT&C scheduling method based on multi-living agent theory. *J Spacecr TT&C Technol*, 2012, 31: 11–14 [杜世勇, 胡进, 贾丽娟, 等. 基于多活性代理的多星测控调度方法. *飞行器测控学报*, 2012, 31: 11–14]
- 16 Dang Q, Li W P, Bai D M, et al. Construction of centralized monitoring systems for TT&C equipment with MLA theory. *J Spacecr TT&C Technol*, 2015, 34: 459–468 [党琦, 李卫平, 白大明, 等. 用 MLA 理论构建航天测控设备集中监视系统. *飞行器测控学报*, 2015, 34: 459–468]
- 17 Wang Y, Wu J G, Hu J, et al. Multi-living agent system oriented quantitative method and planning based on complex multi-stage tasks. *Trans Beijing Inst Technol*, 2018, 281: 47–52 [王越, 吴建光, 胡进, 等. 面向复杂多阶段任务的多活性代理系统活性度量量化策划方法. *北京理工大学学报*, 2018, 281: 47–52]
- 18 Li B, Liu C, Ke Y W. The study of intelligent community based on MLA method. *Manage Technol SME*, 2016, 8: 139–140 [李滨, 刘超, 柯贻文. 基于多活性代理方法的智慧社区研究. *中小企业管理与科技*, 2016, 8: 139–140]
- 19 Wang Y, Tao R, Zhang H. Research on distributed intrusion detection system based on multi-living agent. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 1067–1077 [王越, 陶然, 张昊. 基于多活性代理的分布式入侵检测系统构建分析研究. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40: 613–623]
- 20 Ru L J, Zhen Q. Simple analysis of urban emergency interaction system based on MLA. *Inform Sys Eng*, 2010, 3: 139–140 [茹丽君, 镇勤. 基于多活性代理的城市应急联动系统的简单分析. *信息系统工程*, 2010, 3: 139–140]
- 21 Zhang Y Z. Analysis of detection system for “low, slow and small” target based on multi-living-agent. *Commun Technol Guangxi*, 2012, 2: 35–37 [张云佐. 基于多活性代理的“低慢小”目标探测系统浅析. *广西通信技术*, 2012, 2: 35–37]
- 22 Zheng D Y, Xiong K H. Research of integrated business management platform based on multi-living agent. *Microcomput Appl*, 2012, 31: 90–92 [郑德勇, 熊开宏. 基于多活性代理的铁道综合业务管理平台研究. *微型机与应用*, 2012,

- 31: 90–92]
- 23 Zhong D, Chen C. The study and application of “trinity system” based on multi-living agent method. In: Proceedings of International Conference on Information Technology and Management Science, 2016
- 24 Li B, Liu C. Analysis of on intelligent community based on multi-living agent. *J Comput Commun*, 2017, 5: 49–56
- 25 Wang Y. *System Theory and Artificial System Design*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019 [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]
- 26 Jaiswal N K. *Military Operations Research: Quantitative Decision Making*. Berlin: Springer, 2012

## A general design method for artificial system based on multi-living agent theory

Tang TANG, Jin HU\*, Lijuan JIA & Yue WANG

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

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

**Abstract** The construction of an artificial system in the complex environment involves serious confrontations and tight constraints, which is why a new general design method is needed. This paper proposes a total design method to improve the performance of the artificial system based on multi-living agent system theory. Under the guidelines of the multi-living agent system theory, the proposed method takes the existence of the self-organizing mechanism and function as a premise. Considering the strict performance requirements and constraints of the newborn system, the functional living degree is used to make research and development decisions in layers. To verify the validity of the proposed method, we construct a terminal defense system and analyze performance improvement with system modeling.

**Keywords** artificial system, multi-living agent system, system architecture, living degree, terminal defense system



**Tang TANG** was born in 1992. He is currently a Ph.D. student enrolled in the School of Information and Electronics at Beijing Institute of Technology. He received his M.S. degree from Beijing Institute of Technology in 2015. His research interests include distributed signal processing and information system theory and technology.



**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.



**Lijuan JIA** received her Ph.D. degree in electric and electronic engineering from Kyushu University, Japan, in 2002. From 2002 to 2005, she was a lecturer at the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kyushu University, Japan. Since 2005, she has been an associate professor of the School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology. From 2013 to 2014, she was a visiting scholar at the Department of Electrical Engineering, University of California, Los Angeles, USA. Her research interests include multi-agent system theory, distributed adaptive networks, and statistical signal processing.



**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 academican 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.