

# 基于多活性代理的复杂信息系统研究

王越<sup>①</sup>, 陶然<sup>①\*</sup>, 李炳照<sup>②</sup>

① 北京理工大学信息科学技术学院电子工程系, 北京 100081

② 北京理工大学理学院数学系, 北京 100081

\*E-mail: [rantaobit@bit.edu.cn](mailto:rantaobit@bit.edu.cn)

收稿日期: 2008-04-21; 接受日期: 2008-08-18

国家部委基础研究基金资助项目(批准号: A2220060039)

**摘要** 文中在系统理论指导下分析了信息系统(特别是在激烈对抗环境下, 需要多种功能动态运筹发挥作用的复杂信息系统)的特点, 提出了基于多活性代理的复杂信息系统研究方法. 首先, 给出了多活性代理方法的基本描述, 初步得到了代理的“活性”表征及丧失的定性定量描述与分析, 并从系统功能发挥剖面给出了多活性代理的基本动力学表征; 其次, 从系统自组织功能剖面给出了活性自组织机理的两集合模型; 再次, 给出了信息安全与对抗领域多活性代理复杂信息系统构建的功能模型, 以及在此模型基础上多活性代理的 3 层次协商、协调模型; 分析了基于 Swarm 群体结构的多活性代理复杂信息系统的 3 层次机理模型; 最后, 通过 2 个具体实例说明了如何利用多活性代理方法分析信息安全对抗领域复杂信息系统. 多活性代理理论的提出将衔接应用基础层和应用层研究, 对信息安全与对抗领域复杂信息系统的构建和分析提供基本的研究方法 with 理论支持.

## 关键词

复杂信息系统  
多活性代理  
自组织机理  
协商协调模型  
Swarm 群体

在人类历史进化的长河中, 相关事物是由低级到高级, 由简单到复杂逐渐演化的, 所谓“复杂”可以概括为在多种条件下、多层次、多种相互交织动态作用关系(含非线性及未知机理关系)的存在, 甚至“关系”难于分解为众多简单关系的组合. 现今, 人类社会中具有复杂性的事物和系统已普遍存在, 人类为了理性认识和表征事物的整体性以及内在机理, 在 20 世纪 30 年代提出了“系统”的概念, 并掀起了“系统”研究的高潮<sup>[1-6]</sup>, 这说明了开展“系统”研究的现实性和必然性. 同时, “信息”也是人类最常用词之一, 但对 Shannon 信息定义的扩充却有多种说法, 定量、广义、全面本质地描述“信息”近期是不可能的, 有待长期研究, 我们认为信息是客观事物运动状态的表征和描述, 其中, “表征”是客观存在的, 而“描述”是人为的, 随着信息时代的到来与发展, 很有必要进一步深入研究信息系统.

帮助人们获取信息、存储信息、传输信息、交换信息、处理信息、管理利用信息的系统称为信息系统,是以信息服务于人的工具.而复杂信息系统则是指在强挑战、强约束条件下,具有多种功能动态运筹,且具有良好嵌入特性的信息系统,复杂信息系统在现代社会中起着非常重要的作用,社会离不开它们(不可能允许例如银行的用户信息系统失灵、民航售票系统出错,哪怕错误持续几分钟也会对社会产生重击,国家级及时处于对抗环境下的国防信息系统具有更大的重要性).由此,要求信息系统在强约束条件、强挑战环境下(如高安全性要求)发挥多种先进功能,是复杂信息系统设计和构建中一个不可回避的基本问题,由此可以用“活性”概念来表征系统的正常发挥功能和系统存在.

本文的结构安排如下,第 1 部分在描述现有复杂系统方面的研究成果基础上,提出了多活性代理方法及其在系统功能方面的基本描述;第 2 部分从复杂信息系统的功能发挥剖面给出了多活性代理的定性定量描述,提出了活性代理的基本动力学表征和活性的感知保持方法;第 3 部分从复杂信息系统自组织机理剖面提出了活性自组织的概念,以及在此概念基础上的系统功能条件集到自组织机理集合的两集合模型;第 4 部分提出了复杂信息系统构建的初步的、可裁剪的模型,并针对此模型提出了多活性代理复杂信息系统中多活性代理间的 3 层次协商协调机制;第 5 部分借助于 Swarm 群体结构模型,结合多活性代理的基本概念,提出了基于 Swarm 群体的多活性代理构成系统的 3 层次机理模型;第 6 部分通过 2 个具体的实例说明了如何在实际中应用多活性代理理论来分析复杂信息系统,以及采取何种措施来保持系统的“活性”;最后进行小结.

## 1 多活性代理

### 1.1 多活性代理方法的提出

在众多科学家努力下,系统科学已经取得了一些重要成果,如普里高津<sup>[2]</sup>的耗散自组织理论、哈肯<sup>[3]</sup>的协同学(证明了不具有生命的系统也有自组织机制)、詹奇<sup>[4]</sup>的自组织宇宙观,这些系统理论由物理基础层进行了普适性论述,高度概括了系统动态发展的规律,对复杂信息系统的构建研究具有重要的指导意义.但在应用基础层和应用层对复杂信息系统进行研究时运用这些高度概括的系统理论困难较大,而且也不直接,例如对于表征系统动态运动、进化、衰亡的本质特征来说,很难直接用“通过涨落达到新的有序”、“大小宇宙共同进化”等抽象理论来直接表达.针对这一问题,我国著名科学家钱学森等人<sup>[5]</sup>于 20 世纪 80 年代末,把对系统的研究加以拓广,提炼出开放的复杂巨系统的概念,并总结概括了处理开放的复杂巨系统的方法论,在这个方法论基础上,形成了“从定性到定量的综合集成研讨厅体系”的构思,把复杂系统的研究推上了一个新的台阶.

作为复杂系统研究的重要工具,多代理及其相关的理论方法在生物群落分析、生产管理、网络服务等多个领域有着成功的应用,虽然各个研究领域对代理的含义赋予不同的意义,但是本质上都是针对系统的复杂性这一重要特性来进行分析和研究的.如针对系统的复杂性问题,Santan Fe 研究所(SFI)的 Holland<sup>[6]</sup>从注重代理的主体性及其与环境之间的相互影响和作用出发,提出了复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)理论, CAS 理论是一种基于遗传算

法的刺激反应模型, CAS 理论建模着重刻画的是通过个体微观代理之间的相互作用和交互, 涌现出系统宏观行为, 比如特定民意模型中, 通过公民代理间的相互作用以及与环境代理的交互, 得到宏观上热点地区特定民意的走势. 除了上述 CAS 理论以外, 在复杂系统的研究中也有一部分学者针对经济、物理、生物等系统的复杂性特点提出了基于混沌、现代集合论、Boole 代数以及形式逻辑、系统动力学等理论的复杂系统的表征和研究, 并且都在各自的领域取得了一定的成果.

而对于本文所指的复杂信息系统来说, 其不但是由多个层次的“代理”组成的一个系统(或者说是一个“社会”), 而且在其发挥作用过程中人也起到了非常重要的作用, 因此在这类系统的分析构建过程中如何分析和研究单个代理、多代理之间、人与代理之间的协商、协调就显得尤为重要和突出. 针对这些问题, 文献[7,8]给出了信息系统中各类知识的表达、语言交流等方面的探讨, 而文献[9~12]深入研究了以人为主的人机结合分布式信息系统的建模、设计以及控制等方面的问题, 并就人机结合系统中各个代理之间的协作、分类以及如何解决协商过程中的冲突建立了模型. 这些研究结果为我们研究信息安全对抗领域复杂信息系统的分析和构建提供了一定的思路. 在上述理论的指导下, 本文利用系统的“活性”这一本质特征来研究分析复杂信息系统, 将系统理论的自组织机理扩展为活性自组织机理, 据此形成活性代理的概念, 并进一步表征多活性代理表征复杂信息系统的生存演化, 以及在强烈对抗环境中如何避免双刃剑的负面作用. 以下就从系统功能层次对活性代理的概念作基本描述.

## 1.2 多活性代理的基本描述

代理及多代理的概念虽然极不统一, 但是我们认为复杂信息系统可以从系统功能层面进一步分解为各个层次的分代理, 而代理的活性可从系统功能发挥剖面来进行表述. 由此, 信息安全与对抗领域中多活性代理可以基本表述为, 处于强对抗环境下动态生存的信息系统是由人及其各个功能层次上的代理所组成的, 某系统功能层次上代理活性丧失意味着系统功能的丧失; 系统内某些活性代理受损代表部分功能受损或预示某些功能将发生问题; 复杂信息系统中多活性代理间协商表征高层次的自组织机理, 其结果的异常代表系统自组织机理出现异常; 在协商模型的构建过程中可预先设置异常处理模式, 这些措施代表信息系统自组织机理的某些修复功能及体现人机结合思想.

同时, 本文所指的“活性代理”除上述人机结合以及从功能发挥层面上的活性等特性以外, 还具备以下独有特性: ①从系统层次来看, 活性代理遵循耗散自组织原理所具有的与环境的物质能量信息交互以及初步的系统生存消亡特征; ②从任务完成效率和生存对抗的角度来说, 活性代理具有功能层次上“加入”和“退出”的有效机制, 即多活性代理之间的协商协调机制能更好服务于人; ③从活性代理的功能来看, 强调活性代理的“活性”可以在一定程度上避免信息安全与对抗领域中信息系统双刃剑效应的负面效应.

将“活性”嵌入多代理表征复杂信息系统这一研究方法, 对于在激烈对抗环境下工作的信息系统功能发挥、避免失效甚至起到负面作用来说是非常现实和重要的, 即通过“活性”来研究对抗环境中信息系统的存亡问题. 然而, 活性代理“活性”的定性定量描述是一个新的领域性困难问题, 其理论体系将随着对复杂信息系统研究的深入而逐步完善. 在现阶段, 我们认为信

息安全对抗领域复杂信息系统的功能发挥剖面 and 自组织机理剖面是研究分析复杂信息系统的  
关键因素, 因此本文在如下的第 2 和第 3 部分分别从系统功能层次剖面、系统自组织机理剖面  
来研究多活性代理复杂信息系统的描述和表征.

## 2 系统功能层次活性代理“活性”的定性定量描述

### 2.1 系统功能层次多活性代理“活性”的描述

信息系统处于激烈安全对抗环境中时, 其功能的正常发挥是信息系统极重要指标, 系统  
功能的丧失甚至产生反向功能都可用系统的“活性”集中表征(更突出对抗胜负存亡概念), 多活  
性代理复杂信息系统的运行和发挥作用过程中, 系统功能丧失可以分为如下几种原因和类型:

◆ 从系统功能丧失的时空域分类: 在时间维上有暂时丧失、阶段性丧失、永久性丧失; 在  
空间维中有各层次上的功能丧失. 重要信息系统在重要功能剖面阶段性活性丧失都往往是不  
允许的.

◆ 从系统生存基础概念意义上分类: 系统生存的基本条件是其开放耗散特性, 开放条件  
的破坏、物质能量信息流的截断和内部熵增加可影响系统自组织功能的形成, 从而从基础上破  
坏系统的“活性”, 是根本性丧失.

◆ 从系统功能存在前提条件的消亡可导致的各种功能丧失意义上分类: 针对系统“功能”  
支持的充要条件中, 任何环节破坏或消失都有可能导导致功能的丧失. 而多个环节永久活性丧  
失常表征这类系统处在消亡过程.

◆ 其他因各代理具体“环境”因素的变化所引起各代理影响“活性”存在的一些约束关系破  
坏(时空)导致功能的丧失.

在多活性代理复杂信息系统的分析和构建过程中, 可以利用为活性代理理论来指导复杂  
信息分析与设计, 使构建的信息系统更好地发挥作用. 而对于具体的复杂信息系统构建来说,  
只有定性和定量相结合, 努力有效地应用新原理、新方法, 并逐次递推地建立有效的活性构建  
模型来分析它, 才能使其发挥更好的作用. 以下就活性代理的动力学表征给出初步的论述.

### 2.2 活性代理功能和结构的分析

#### 2.2.1 活性代理的基本动力学表征

严格意义上, 活性代理的功能和结构动力学表征应该是考虑“活性”含义下各种约束条件  
的一组多个时间、空间维的偏微分方程组或差分方程组, 其一般来说是非线性的, 但在实际复  
杂信息系统的构建和分析过程中很难求得上述方程组的解析解, 只能采用近似方法和递推逼  
近来描述. 本文在分析和构建过程中首先强调关系表征, 结合基本工作过程, 提出如下六元关  
系组来定量表征活性代理(living agent)的动力学特征(各因素皆为时间函数):

$$LA_t(Q_t, S_t, \delta, \sigma, S_o, C_t), \quad (1)$$

其中  $Q_t$  为活性代理  $LA_t$  在  $t$  时刻的状态集合;  $S_t=S_t(S_N \times S_A)$  为活性代理  $LA_t$  在  $t$  时刻输入流集合,  
其中  $S_N$  是正常输入控制流, 而  $S_A$  为攻击方欲达攻击目标而形成的可混入正常输入流的输入攻  
击流;  $S_o$  为活性代理  $LA$  的输出流集合;  $C_t=C_t(C_N \times C_A)$  为活性代理  $LA_t$  在  $t$  时刻的环境流集合, 其

中包括正常控制参数及支持条件流  $C_N$  与攻击方企图改变代理状态的干扰控制流  $C_A$ ;  $\delta$  为活性代理 LA 的参数到活性代理的状态集合的一个映射关系, 用来表征活性代理在不同时刻的状态变化, 具体可以表示为

$$\delta: C_t \times S_t \times C \rightarrow Q_{t+1}. \quad (2)$$

$\sigma$  是活性代理的参数到输出流之间的映射关系, 用来表征代理的输出流变化状态序列, 具体可以表示为

$$\sigma: Q_t \times S_t \times C \rightarrow S_o. \quad (3)$$

在研究具体问题时, 上述各关系(包括 Descartes 集合中具体元素选取规律、各映射的具体形式和规律以及后面章节所涉及的关系)、集合内的运算和映射的确定是非常复杂和困难的工作, 这类问题也是科学家和技术专家们共同关注的复杂性问题之一, 也是正在艰苦研究尚未取得根本突破的难题, 在本文中无法详细讨论, 只能简要概述(以后将逐步介绍作者研究组所做工作以取得同行帮评). 对于多活性代理 LA 来说, 在自身的初始条件和环境信息流的作用下可对输入信息流通过映射进行动态的演化, 活性代理功能的动态演化过程可通过图 1 来表示.

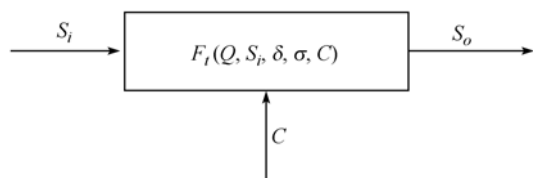


图 1 活性代理动力学表征

概括起来, 基本困难有 3 类, 第 1 类难题是不知对系统如何描述(即无从下手); 第 2 类为具体“关系”不够全、数据和信息不完备及问题本征性质形成了不确定性问题(包括概率性、模糊性、粗糙性和混沌性不确定问题, 甚至几种不确定问题的结合); 第 3 类是“关系”复杂、参数众多, 无法得到解析解, 另外对于非线性

不能忽略的系统, 其  $S_o$  会随  $S_t$  及  $C$  的特征及参数不同而驻留到不同“吸引子”域中, 仿真初始结果无法归纳理解, 常需要结合实际条件逐次修改模型逼近的办法. 对于常见的第 2 类难题将概率与粗糙集相结合, 模糊集与粗糙集相结合可能进一步解决不确定性问题, 例如活性自组织机理的界定、活性功能的分析等, 当然还可以结合复杂格子、时态、动态逻辑等基础上的自动机原理、元胞自动机理论<sup>[13]</sup>、单序列复杂性分析、汉语自然语言语义学(句义)、自然语言逻辑学等前沿领域的研究成果来定义活性代理 LA 的状态集合  $Q$ , 映射  $\delta, \sigma$ , 以及系统的输入输出信息流.

从上面的描述可以容易地看到, 对于多活性代理的动力学表征来说非常关键的一点就是各个活性代理对环境信息的感知和处理. 这也是活性代理活性发挥的非常重要的一点, 下面就对代理活性的自我感知和保持作进一步论述.

### 2.2.2 代理活性的自感知和保持

#### A. 活性代理活性感知的基本方法.

活性代理的“活性”特性是由其工作状态时的动力学演化所表征的, 因此研究代理的活性和发挥功能, 避免产生负面功能就转为对“代理”正常状态序列的动态检测问题. 又因为活性

代理的主要功能是保持正常服务功能和避免发生负面作用, 因此对图 1 的输入输出流进行检测可达到综合感知的目的, 其前提条件是预知正常输出流  $S_{oN}$  的数据结构, 当然一切感知检测的进行都需要具有一定的前提条件和先验信息.

#### B. 活性代理重要分项的自我感知.

活性代理自我感知的重要特征项可以表示为对  $S_i, Q, \delta, \sigma, C$  的感知, 多层次信息系统攻击在初始阶段往往需要以遵守信息系统规则的形式进行攻击(所谓“共道”攻击行为, 为后续攻击破坏服务(“逆道”攻击)), 这类“共道”前奏攻击的感知是困难的, 也是需要长期进行研究的课题.

#### C. 活性代理对“干扰”和“攻击”的处理.

活性代理对“干扰”和“攻击”的处理方式初步看来有 2 种: 第 1 种是以直接消除后效为目的, 如输入流为  $S_i = S_i(S_N \times S_A)$ , 则  $\sigma$  映射对此输入流的输出为  $\sigma(S_i) = \sigma(S_{iN} + S_{iA}) = \sigma(S_{iN})$ , 用以消除干扰效果, 或者对“干扰”不响应也可滤除干扰, 即存在滤波算子  $R$  满足  $R(S_{iN} + S_{iA}) = S_{iN}$ ; 第 2 种方式是对待“干扰”和“攻击”进行有限度的“容忍”以达到对攻击方系统性特点和后效加以掌握的目的, 然后更加全面深入采取“反其道而行之相反相成”的有效措施以达到全面对抗效果. 在具体的信息系统构建过程中如何采取这 2 种方式, 达到最优的效果也是复杂信息系统构建中的一个研究课题.

### 3 代理的自组织机理和活性自组织特性表征

在上述从系统功能发挥剖面上活性代理的基本描述基础上, 本章从代理自组织机理剖面来进一步描述多活性代理的活性, 主要从 2 个方面来论述, 第 1 个方面是将系统理论的“自组织”扩充为“活性自组织”, 并以此为基本概念来表征“活性代理”的活性功能; 第 2 个方面是以“任何事物的存在和运动都是相对的和有条件的”概念为基础, 建立由条件集合和代理自组织机理集合所组成的 2 层次“代理”活性自组织模型, 以条件集合状态为基础分析“代理”发挥功能的活性.

#### 3.1 自组织机理的基于关系概念的简要概述

我们认为开放耗散前提下系统呈现自组织机理是系统层面一些重要“关系”相互作用的结果, 这些结果是以一组关系来表达, 又由于任何相互作用都是有条件的, 因此我们简要地研究基于条件的自组织机理(一组关系), 多为非线性关系. 设  $R_1, R_2, \dots, R_n$  为自组织的广义条件(广义条件包括自组织机理集合元素间的运算以及所需要的各种条件)集合, 它们交织相互作用形成系统自组织机理关系, 可表示如下:

$$\begin{aligned} R'_I(r_{I1}, \dots, r_{Is}, t, T_I) &= R_I(R_1 \times \dots \times R_n, t, T_I), \\ R'_{II}(r_{II1}, \dots, r_{IIs}, t, T_{II}) &= R_{II}(R_1 \times \dots \times R_n, t, T_{II}), \\ &\vdots \\ R'_M(r_{M1}, \dots, r_{Ms}, t, T_M) &= R_M(R_1 \times \dots \times R_n, t, T_M), \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $R'_I$  为 I 剖面自组织机理集合, 由关系元  $r_{I1}, r_{I2}, \dots, r_{Is}$  所组成;  $R'_M$  为 M 剖面自组织机理集合, 由关系元  $r_{M1}, r_{M2}, \dots, r_{Ms}$  所组成,  $R_I$  为 I 剖面的由条件关系形成 I 剖面自组织机理的函数,  $R_M$  为 M 剖面条件关系, 它们由条件关系元  $R_1, R_2, \dots, R_n$  的 Descartes 乘积算子所组成,

其中  $t$  为时间变量,  $T$  为某参考时间. 上述函数可能是复杂的运算, 具体函数形式要视具体的系统而定. 如某活性代理  $LA_i$  在输出特性剖面的自组织特性的形成可用条件集合元素之间的 Descartes 所形成的函数来表示为

$$\sigma_i = R'_i(Q_i \times S_i \times C_i \times t_i, T) = R_i(Q_i, S_i, C_i, t_i, T).$$

活性代理结构状态的自组织特性可表示为

$$\delta: Q_t \times S_t \times C \rightarrow Q_{t+1}. \tag{5}$$

### 3.2 活性自组织机理的两集合模型

为了进一步阐述 3.1 小节内容和在自组织机理基础上提出活性自组织机理, 我们提出活性自组织机理的两集合模型如图 2 所示. 在图 2 中, 条件集合由许多对活性自组织机理起重要作用的前提条件组成, 在条件集合中的运算表示了条件间的相互作用, 作用的效应后叙. 自组织机理集合是由众多组成自组织机理的元素所组成的, 集合中的运算表示某复杂自组织机理是由数个子自组织机理因子联合作用所形成的. 由条件集合元素直接到自组织机理集合元素的映射表示带条件建立自组织机理; 条件集合中元算先行运算, 然后运算结果映射到自组织机理集合, 在自组织机理集合中再一次进行运算, 运算结果最后形成自组织机理的各个特征, 这意味一个复杂的自组织机理特征是由数个子特征所合成的, 子特征是自组织机理集合中运算前的元素, 现在我们利用上述概念结合公式(4)得出带前提条件的自组织机理集合(包括表征具体自组织特征的集合元素)的推导框架作为 3.1 小节内容的延伸和补充.

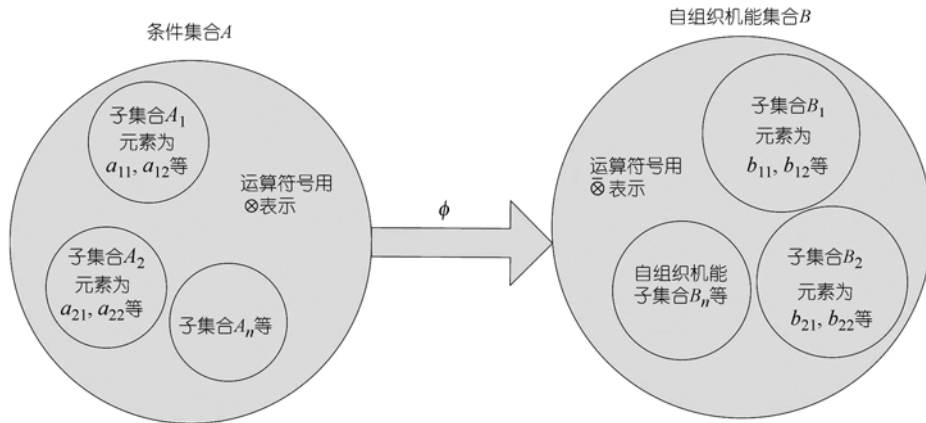


图 2 条件集合到自组织机理集合的两集合模型

设  $t$  时刻剖面 I 的条件集合及其中的运算  $\otimes$  表示为  $[r_{1CSI}, r_{2CSI}, \dots, r_{nCSI}, \otimes]$ , 其中  $r_{1CSI}, r_{2CSI}, \dots, r_{nCSI}$  为条件集合中的元素,  $t$  是时间; 设  $t$  时刻剖面 I 的自组织机理集合及其中的运算  $\bar{\otimes}$  表示为  $[r'_{1CSI}, r'_{2CSI}, \dots, r'_{nCSI}, \bar{\otimes}]$ , 其中  $r'_{1CSI}, r'_{2CSI}, \dots, r'_{nCSI}$  为自组织机理集合中的元素,  $t$  是时间. 对于这 2 个集合内部及其 2 个集合之间的运算关系可以定义为:

◆ 在条件集合内部运算  $\otimes$  的结果为

$$r_{mCSI} \otimes r_{nCSI} = r_{mnCSI}. \tag{6}$$

当  $r_{mCSI} = r_{nCSI}$  时,

$$r_{mCSI} \otimes r_{mCSI} = r_{mCSI} \quad (7)$$

◆ 在自组织机理集合内部运算  $\bar{\otimes}$  的结果为

$$r'_{xSOMI} \bar{\otimes} r'_{ySOMI} = r'_{xySOMI} \quad (8)$$

当  $r'_{xSOMI} = r'_{ySOMI}$  时,

$$r'_{xSOMI} \bar{\otimes} r'_{ySOMI} = r'_{xSOMI} \quad (9)$$

其中  $r'_{xySOMI}$  是公式(4)中的元素, 即为 I 剖面自组织机理的某一特征, 也是自组织集合中的一个元素.

◆ 条件集合到自组织机理集合之间的运算表示为  $\Phi_{mnl}$

$$r_{mCSI} \xrightarrow{\Phi_{mnl}} r'_{xSOMI} \quad (10)$$

其中  $r'$  为自组织集合中的像.

根据上面提到的 2 个集合内部及其 2 个集合之间的运算关系, 上述图 2 中所示的两集合模型可以解释如下:

◆ 若(7)和(9)式同时成立, 则  $r_{mCSI}$  变为  $r_{mCSI}$ ,  $r'_{xySOMI}$  变为  $r'_{xSOMI}$ , 把它们代入到(7)式, 由此可以表示由单一条件元素决定自组织机理集合某一元素, 即 I 剖面自组织机理的某一特征;

◆ 若(6)和(9)式成立, (7)式不成立, 此时(9)式表示了自组织机理集合某一特征(元素)是由数个条件联合决定的情形;

◆ 若(7)和(9)式不成立, (6), (8), (10)式成立, 则此时表示的是最复杂的自组织机理的形成, 此时它是由多个条件和多个自组织机理子特征联合决定一个自组织机理特征的情形.

由以上的讨论, 我们可以得到结论如下: 利用两集合模型, 人们可在普通情形下, 得到一个形成活性代理自组织机理的框架, 但还应进一步讨论强对抗环境下活性自组织的问题.

我们认为活性自组织机理是保证一个代理具有活性特征的机理, 而活性特征是一个活性代理存在并发挥功能的主要特征. 我们仍旧采用上述两集合模型来描述活性自组织机理, 但更注重在整个动态过程中(不是仅一种状态)保持活性自组织机理. 这是很重要的, 因为在严格约束和强对抗环境中, 敌对者总是力图通过改变模型所表示的条件、运算和映射来破坏活性代理的活性自组织机理, 使得活性代理本身消亡、丧失功能, 甚至发挥负面功能(这些可能是暂时的、阶段性和永久性的), 这一切都非常可能发生, 因事物某一种形态的存在都依靠对应的充分必要条件, 改变了充分必要条件就改变了存在的状态.

试举例说明如下: 2.2 小节的六元关系组  $LA_i(Q_i, S_i, \delta, \sigma, S_o, C_i)$  可认为是表征活性自组织机理的侧重结构和功能方面的一般描述. 如讨论代理的输出特性  $S_{oi}$ , 由公式(3)  $\sigma: Q_i \times S_{ii} \times C_i \rightarrow S_{oi}$ ,  $\sigma$  可认为是输出机能  $S_{oi}$  的表达关系式, 即  $S_{oi} = \sigma(Q_i, S_{ii}, C_i)$ , 其中  $Q_i, S_{ii}, C_i$  可以看作是条件  $S_{ii} = S_{iIN} + S_{iIA}$ .

如果攻击输入变得越来越强于正常输入流  $S_{iIN}$ , 而  $\sigma(Q_i, S_{ii}, C_i)$  设法减弱  $S_{iIA}$  的作用, 则输出将按攻击输入而输出, 这样自组织机理变为  $S_{iIA}$  服务, 正常功能灭亡, 体现了起到反向功能作用. 在这种情形下必须采取措施以保持正常功能, 也就是保持活性代理的活性机理. 另



外, 对抗方也将采取反措施以争取胜利. 这样便形成了一个即连续又间断的对抗过程. 用本节提出的两集合模型来说明这一过程如下: 攻击者总是设法在防御方的条件集合中增加负面条件, 同时使条件集合中的运算增强负面条件的作用, 对自组织机理集合中的运算而言, 也力图增强或者保持负面因素在运算后的效应. 防御方反其道而行之, 以保持自己所需的自组织机理为主要目的, 这种双方对抗行为将不断持续就形成了上述过程. 至于正负面条件、运算和映射的选择和研究是非常复杂的动力学问题, 有待更多科学家和专家的参与研究. 但概念性原理性的方法论是: 建模、算法初建、运算、结果分析、反馈修正算法和模型, 得出可用模型和算法并建立数据库, 这一通用解决复杂问题的方法被称为计算科学.

## 4 多活性代理复杂信息系统的功能模型及代理间的协商协调

### 4.1 多活性代理复杂信息系统的功能模型

在对多活性代理复杂信息系统的功能层次剖面和活性自组织机理剖面的分析和表征基础上, 本节初步探讨多活性代理复杂信息系统的模型组成形式. 在此, 提出一种以活性代理方式发挥系统服务功能, 并具有可裁剪、普适性的功能模型, 它同时具有一定现实性. 模型提出的出发点是, 现代信息系统完成服务多需模型框架所列各分功能的协同, 而进一步发挥功能则需要人的介入决策和调控. 层次划分准则为按管理功能划分时, 管理者处上层, 被管理者处下层; 按功能划分时, 初级功能者处下层, 高级再加工功能处上层, 同功能层次前后工序仍算同层次, 一个复杂信息系统的拓扑结构一般由 3 个层次来组成. 我们按照系统功能划分而提出的多活性代理复杂信息系统的结构框架如图 3 所示.

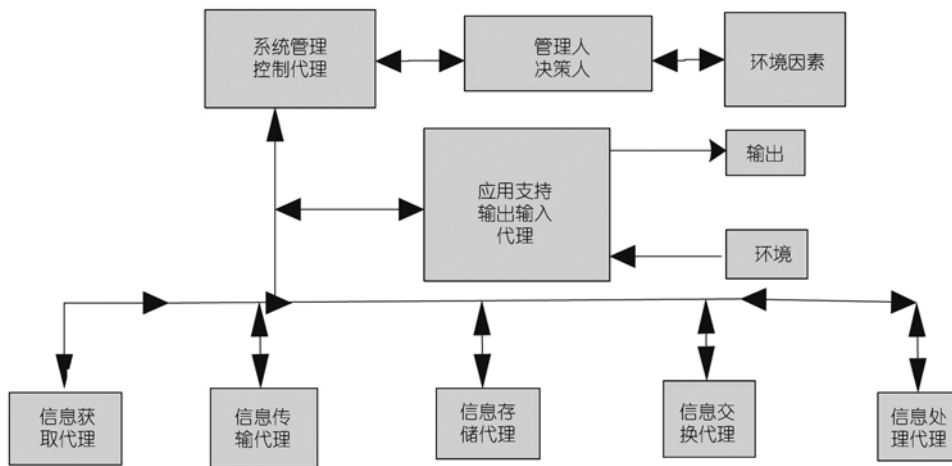


图 3 多活性代理复杂信息系统功能划分的拓扑结构

在此多活性代理复杂信息构建的模型中, 各个代理是由软硬件组成, 可交织形成, 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. 各代理可包含子代理并可以继续分解至软件代理. 模型中多活性代理“活性”的含义现阶段只体现在各个功能代理、代理之间, 及

多活性代理的组成中. 最高层包含系统管理控制代理, 这个代理的主要作用是和人之间的交互, 体现了在多活性代理复杂信息系统构建以及动态发挥作用过程中人机结合的思想. 第 2 层次是应用支持及端口. 第 3 层次包含了 5 个功能子代理, 主要包括信息获取、传输、存储、交换以及信息处理代理, 由这 5 个不同的功能代理可有多种交连协同组合方式, 具体组合形式应以任务需求结合下节的机理模型来构成. 由此可看出对于 3 个层次的多活性代理复杂信息系统来说, 在实际信息系统的设计和构建时具有很大的自由度, 而代理之间协商协调发生矛盾时可通过管理控制代理集中管理.

上述多活性代理复杂信息系统的体系结构对系统的构建和分析具有重要意义, 而多活性代理之间的协商协调机理是系统功能发挥作用的重要基础和条件, 各个活性代理具有特定的“认识”信息能力, 这也是多活性代理复杂信息系统生存发挥作用的基础. 以下就多活性代理各个层次之间的协商协调机制具体分析如下.

#### 4.2 人-机协商协调机理

在信息安全与对抗领域复杂信息系统特别是国防系统中, 有许多问题是不能完全依靠机器来解决的, 而现有的人工智能还没有也不可能达到完全拟人的程度, 由此可看到机器的本质是在人主宰下发挥作用, 机器只能做辅助性的工作, 这主要体现在通过系统管理控制代理, 由它与管理决策人进行协商协调, 管理控制代理在系统运行过程中提供必要信息, 由人按预定领域性预案或特殊应急性策略做出以人为为主的决策, 然后通过活性代理可感知的信息, 使系统响应执行, 这类协商主要是针对重要复杂问题的决策, 它已超出多活性代理自身协商协调能力, 而需要人的介入安排或重新安排代理系统活性发挥(包括最初的按系统功能要求设计系统, 安排系统各个分系统、分代理的功能以及分功能的协调等一些多为事关信息系统整体重要功能的协调), 也是体现了多活性代理复杂信息系统构建的人机结合的重要举措.

#### 4.3 多活性代理系统层次的协商协调运行机理

由于复杂信息系统涉及的节点以及任务的多剖面、多层次的要求, 针对多活性代理复杂信息系统的系统层次代理之间的协商协调机制, 初步建议由管理控制代理对系统整体功能进行集中协商, 须事先设定由多代理共同完成协商协调(含“信息”及“条件”因素), 通过协商协调机制来进行全局性的管理控制. 以管理控制代理为中心进行各个活性代理之间系统总体层次的协商, 在协商过程中取得可行结果后, 由管理控制代理再组织各个分功能代理协调实现, 这种协调协商运行机理多针对各代理重要功能的调整以及各个代理自己无法完成某一特定任务时, 需要其他代理协调协助调整完成, 这也体现了在复杂信息系统中, 多个代理共同完成一个任务, 体现了系统理论的协商协调机理, 也即扩充了自适应复杂系统理论中的自适应范围至群体间的协调.

#### 4.4 多活性代理间的协商协调机理模型

多活性代理复杂信息系统的代理除了在系统层次上和其他代理协商协调来保证复杂信息系统的功能发挥外, 还进行着自身的调节, 由此来进一步提升多活性代理的自适应机理. 多活

性代理自身的活性调整机理是多活性代理进行全系统功能活性调整适应的基础, 进行自身调整的前提是活性自组织机理“支持条件”集合的状态与获得的相关信息, 其中对抗信息尤为重要, 对抗信息中共道对抗信息的获取尤为困难, 应采取各种先进技术与时空域内进行逻辑推理(包括递归过程)以调整保持代理自身的功能。

图 4 给出了活性代理的协调机理模型, 也可以通过环境因素把上述模型推广到代理之间的协调模型。在此模型中涉及信息的感知、信息的认识以及决策演绎、调整等, 其关键要素为: ①在信息安全对抗领域信息感知选择的重点为对抗信息的获取, 而对抗信息是指在信息安全与对抗过程中的重要信息; ②表征各代理正常工作发挥作用的“序”通过状态信息流被感知, 并在此基础上进一步反馈到信息的感知选择代理; ③信息认识是在信息感知后进一步对信息内涵的认识, 对自然语言语句的认识是一个信息认识的重点, “信息”的时间特性认识是另一个重点。

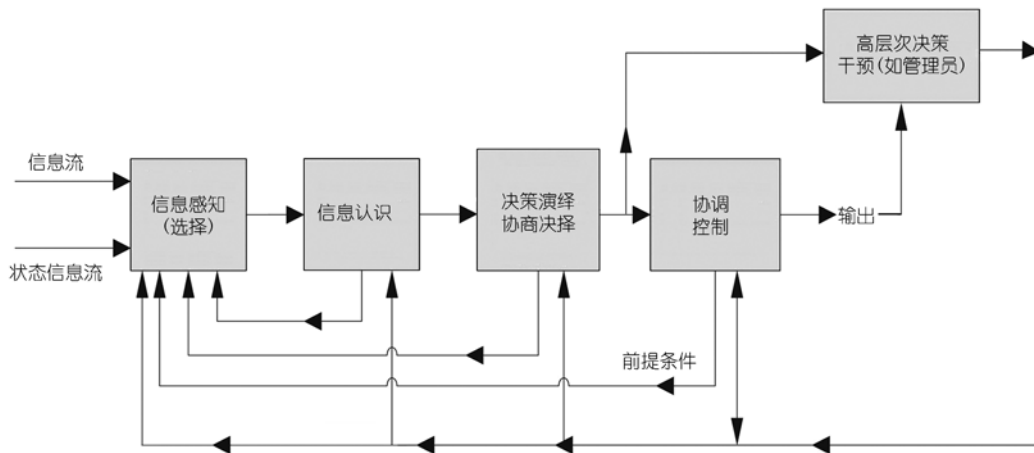


图 4 活性代理的协调机理

综上, 多活性代理之间的协商协调机理可以表述为: 某代理察觉本身重要功能的丧失经自恢复措施失效时, 则与同级代理进行协商, 争取协调支持, 如代替工作、减缓负荷等。如协商规则推理结果发生严重不相容矛盾超出规定域则向相关上级代理报告, 上级代理就下级代理活性自组织功能丧失影响本级后续功能发挥情形进行推理评估, 如无重要影响则可不理, 这体现反其道而行之相反相成原理; 如有影响但本身又无法调整, 包括感知推论对关联代理的干扰攻击, 则向相关同级代理进行协商、协调支持和预警, 以此类推, 直至顶层管理和控制代理, 它有权按趋利避害原则、损失最小原则下达调整指令, 以体现多活性代理总体功能。在以多个节点相互联结形成网络的复杂系统, 可将功能节点认作活性代理以组成系统, 这样可通过“活性”保持和代理间协商协调较大幅度地提高系统功能。

## 5 基于 Swarm 群体概念的系统多活性代理活性机理建模

### 5.1 Swarm 群体概念

近年来, Swarm 群体概念在复杂系统研究中得到了众多科学家的重视, Swarm 表示在由大

量简单的代理所组成系统中, 虽然每个代理的行为规则都是很简单的, 但系统层次上却呈现出复杂的行为, 关于 Swarm 群体及 Swarm 群体智能在复杂系统研究中所取得的部分成果可参考文献[13]. 现有的关于 Swarm 群体的结构模型为进一步研究多活性代理复杂信息系统及其仿真分析实验提供了非常好的思路和研究平台. 因此, 为了更加突出表现多活性代理的机能和利用 Swarm 群体来表征多活性代理复杂信息系统, 我们结合现有的 Swarm 群体结构模型初步提出了基于 Swarm 群体结构的多活性代理复杂信息系统 3 层机理模型.

### 5.2 基于 Swarm 群体结构的 3 层机理模型

图 5 是我们利用多活性代理概念并结合现有的 Swarm 群体结构, 突出多活性代理机能而提出的复杂信息系统体系构成(也可以简化为 2 个层次, 即由活性代理及其支持条件集构成). 本模型由 3 个层次组成, 即由多活性代理间的关系运算形成系统层次上的活性自组织功能(系统层), 而每个活性代理由任务分代理层(代理层)及其支持条件集合(代理或代理活性的条件层)所组成, 各条件集合内演算及其在各代理的映射结果会影响“代理”的活性(丧失活性或者转向反面), 各个层次内的演算有多种方式, 如对复杂不确定性问题可以利用粗糙集理论来进行演算.

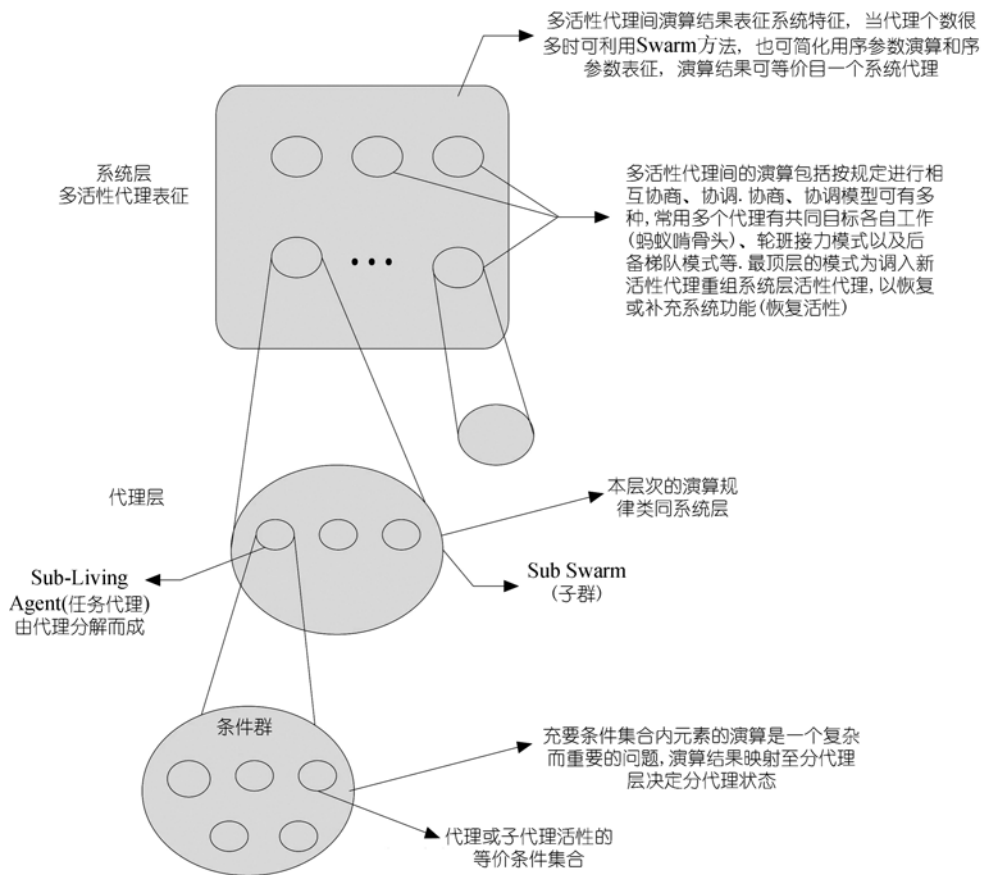


图 5 多活性代理复杂信息系统基于 Swarm 结构的三层次活性机理模型

## 6 实例分析

### 6.1 局部地区(如县、区)通信系统建构研究

对于局部地区的通信信息系统构建来说, 在顶层设计的思路除了考虑平时用来满足用户的需求以外, 也应当考虑在突发应急事件(如断电)时的一些特殊服务. 因此, 总体上系统可简化为由系统层代理及其代理的条件集合 2 个层次组成, 系统骨干层代理由光纤电信网与移动通信网代理组成, 而应急备用代理则由小功率短波电台组成. 其构成的体系结构如图 6 所示.

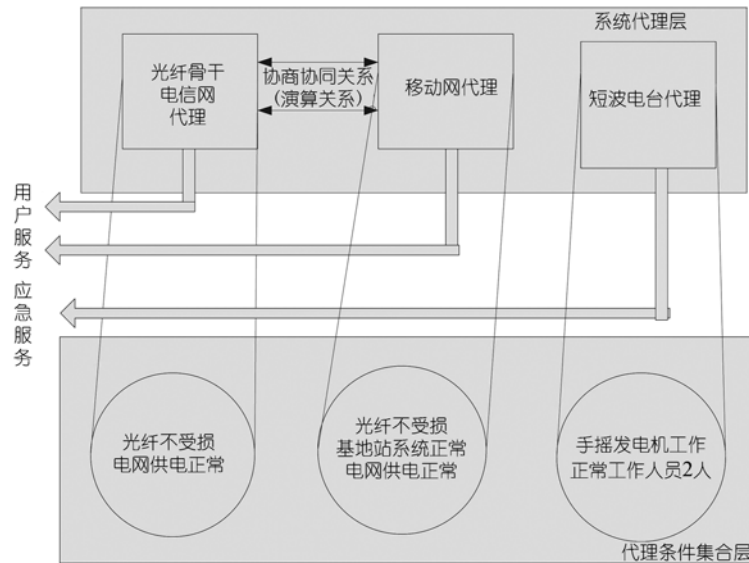


图 6 局部地区通信系统的体系结构

小型短波电台价格便宜, 操作简单并且自带天线, 灵敏度高, 通信距离远(电离层反射), 供电可由一个人摇手摇发电机即可工作, 不需要电网供电, 因此在电网被破坏、油料短缺、光纤网络被破坏等突发事件下可以发挥巨大的通信优势. 如地震灾区电网突发故障, 则光纤骨干网和移动网活性丧失而无法执行任务, 此时短波电台可应急完成任务, 这体现了代理间的替补关系, 说明了复杂环境下构建信息系统, 各个代理并非一致要求先进、复杂, 应根据具体系统考虑系统的活性存在问题. 如在四川汶川特大地震中, 若震中地区构建了短波小型电台的应急代理, 则可能在断电、断移动通讯的条件下可以更早的获得震中的有关信息!

### 6.2 防空系统对抗侦察机入侵案例分析

#### 6.2.1 对抗双方概况

本例中对抗体系由防空方和入侵方组成, 其中防空方由歼击机基地组成(包括基地指挥所、情报引导雷达、歼击机机群); 入侵方由地空远程通信指挥系统及喷气-螺旋桨 2 种动力低空侦察机组成. 从双方的组成和功能来看, 双方都是一个较复杂的系统, 为此可以利用活性代理及分解为子系统的多活性代理来表征双方对抗体系的组成, 具体如图 7 所示.

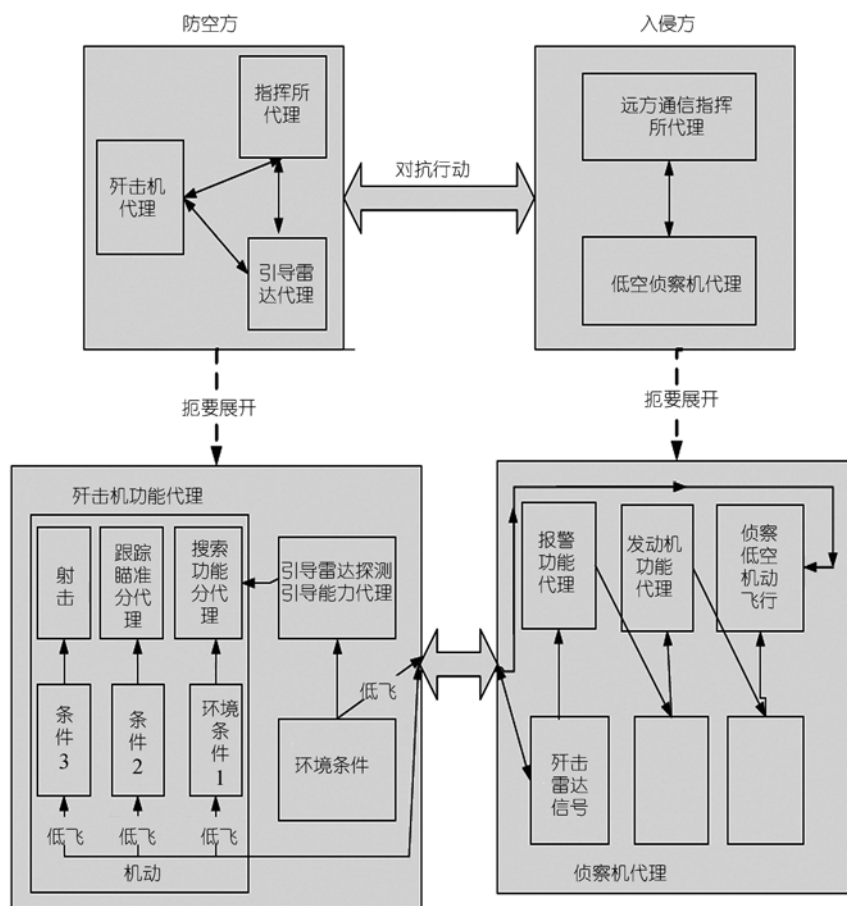


图 7 攻防双方多活性代理体系构成

在对抗过程的第 1 阶段中侦察机夜间入侵防空方, 利用破坏防空方系统当时工作条件使其完成任务的活性很低(几乎丧失)从而斗争取胜; 第 2 阶段中, 防空方调整自己的防空体系结构, 加入新的活性代理而取胜. 具体分析如下.

### 6.2.2 第 1 阶段防空方对抗失败原因分析

由于本例中双方“代理”展开“分代理”间为串行顺序工作, 对于防空方来说其串行关系为: 引导雷达功能代理→歼击机雷达搜索功能代理→雷达跟踪及瞄准功能代理→机炮射击功能代理. 防空方对抗效能侧度(即系统序参数)用击毁入侵侦察机概率表示:

$$P_{\text{down}} = P_{\text{steer}} \cdot P_{\text{search}} \cdot P_{\text{track}} \cdot P_{\text{fire}} \quad (11)$$

对应串行独立工作各代理序参数, 分代理间功能运算为乘法(Subswarm 间运算), 各个分代理的功能序参数由内含对立因素的条件密切关联(环境因素, 包括  $E_A$ ), 而  $E_A$  的形成是由入侵侦察机的对抗行为所构成的, 由此双方形成“对抗”过程.

对于上述串行中的各个概率可以分别表示为:

1) 引导  $P_{\text{steer}}$  特性(不同“条件”下概率值).  $P_{\text{steer}}=0.8$  的引导距离  $R_{\text{max}}=0.8 \times 4.1 \left( \sqrt[3]{h_1} + \sqrt[3]{h_2} \right)$ , 其中,  $h_1$  为侦察机飞行高度,  $h_2$  为引导雷达架设高度(地面雷达约 2 m), 根据上述公式, 可以得到侦察机飞行不同高度时的  $R_{\text{max}}$ .

侦察机飞行高度为:

1000 m 高度时  $R_{\text{max}} \approx 108$  km;

300 m 高度时  $R_{\text{max}} \approx 62$  km;

200 m 高度时  $R_{\text{max}} \approx 51$  km;

100 m 高度时  $R_{\text{max}} \approx 37$  km.

由此可以得到侦察机飞行高度和引导距离的关系如图 8 所示. 由上述不同高度下的引导距离可以看到当入侵侦察机低飞时, 引导雷达引导距离很近, 在一次对抗过程中只能引导一次或者使得歼击机起飞后失去引导, 从而可以引起对抗失败(因为各代理为串行工作关系).

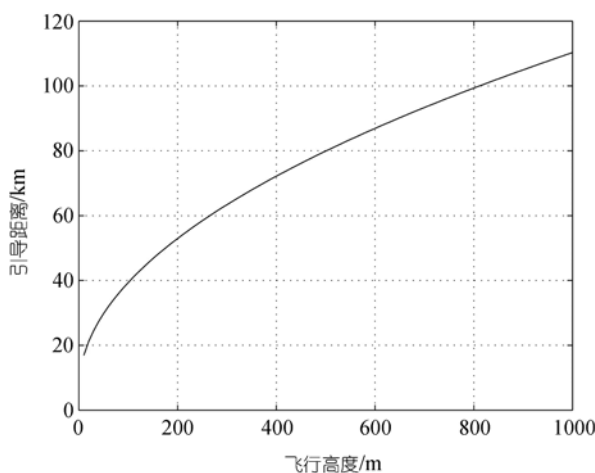


图 8 飞行高度和引导距离关系

2) 搜索  $P_{\text{search}}$  特性(不同“条件”下概率值). 歼击机雷达搜索概率遵从如下的规律:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{search}}}{dt} = -\beta_1 \left[ 1 - \lambda \left( \frac{y_0 - y}{y_0} \right) \right], \\ \frac{dy}{dt} = -k_1 P_{\text{search}}, \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\beta_1, k_1, \lambda$  为歼击机雷达的相关参数;  $y$  为侦察机飞行高度值. 解上述微分方程, 可以得到  $P_{\text{search}}$  和  $y$  的关系如图 9 所示. 从图中可以看到飞行高度越低, 地面杂波越强,  $P_{\text{search}}$  下降, 当侦察机侦察到歼击雷达信号时便开始降低飞行高度导致歼击机搜索失败, 从而对抗也将失败.

3) 跟踪  $P_{\text{track}}$  特性(不同“条件”下概率值). 跟踪雷达的跟踪概率  $P_{\text{track}}$  遵从如下的规律:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{track}}}{dt} = -\beta_2 \left[ 1 - \lambda \left( \frac{z_0 - z}{z_0} \right) \right] z, \\ \frac{dy}{dz} = -k_2 P_{\text{track}}, \end{cases} \quad (13)$$

其中  $\beta_2$ ,  $k_2$ ,  $\lambda$  为跟踪雷达的相关参数;  $z$  为侦察机机动飞行转弯半径, 歼击机跟踪瞄准侦察机越精确, 则侦察机越加速减少转弯半径以破坏被跟踪.

#### 4) 射毁概率 $P_{\text{down}}$ 特性

$$P_{\text{down}} = 1 - k_3 e^{-r}, \quad (14)$$

其中,  $k_3$  正比于歼击机的射击距离. 实际上, 由于侦察机的转弯半径很小,  $P_{\text{down}}$  很低(约 0.1), 相当于“活性”的丧失(各代理及总代理), 一个歼击基地在夜间又不可能组织多机多次对抗.

由此可以得到上述防空系统在对抗过程中由于各个分代理的活性丧失, 从而导致整个防空系统丧失功能活性, 对抗过程结果是以失败告终的, 由此可以推论出在夜间增加数量效果也不会很大, 因单次成功概率很低.

### 6.2.3 第 2 阶段增强上述防空系统活性的举措

分析上述防空系统对抗失败的原因是对方破坏了歼击机等发挥功能的条件, 导致活性丧失而失败. 因上述防空系统中的多代理是串行结构, 因此无法在本身层次上进行协商协调解决(按多活性代理的设计方法应尽力避免这种结构), 除非通过采用新技术改进雷达低空性能和采用机动能力强的导弹, 这些都是非作战时可实现的措施. 在此情形下, 只有调整防空系统的结构, 增加新的活性代理, 提高防空系统的作战活性是明智之举——即加入地面小高炮群(不止一个, 在重点区域附近), 它可在 4 km 距离内有效击毁入侵侦察机, 为使侦察机进入小高炮杀伤范围, 需改变歼击机代理的功能为驱逐入侵侦察机进入小高炮群杀伤空域进行有效杀伤(歼击机的功能虽降低, 但避免了歼击机非常小的  $P_{\text{track}}$ ,  $P_{\text{down}}$  值的同时, 整个防空系统功能却有效提高), 这是一种利用多活性代理理论对多活性代理系统顶层结构进行调整重组的措施. 在顶层的构思中, 防空一方是双层次利用“反其道而行之相反相成”对抗辩证原理, 即总体上利用小高炮反对侦察机低空机动的优势(侦察机利用当时歼击机低空信息获取及攻击能力差的弱点); 第 2 个层次是改变了歼击机的空中攻击功能以保证对抗成功.

具体来说, 在本例中为了说明如何增加系统的活性, 我们模拟在 100 km×100 km 范围内(以 2 km 划分)最多布局 20 个小高炮群, 每个火炮群有 4 km 毁伤区, 我方歼击机追赶入侵侦察机, 侦察机离任一小高炮群距离为 4 km 时被击毁概率为  $k_0 m/2$ , 小于 4 km 时被击毁概率为  $k_0 m$  ( $m$  是火炮门数,  $k_0$  是固定参数). 由此建立侦察机被击落的概率可以表示为:

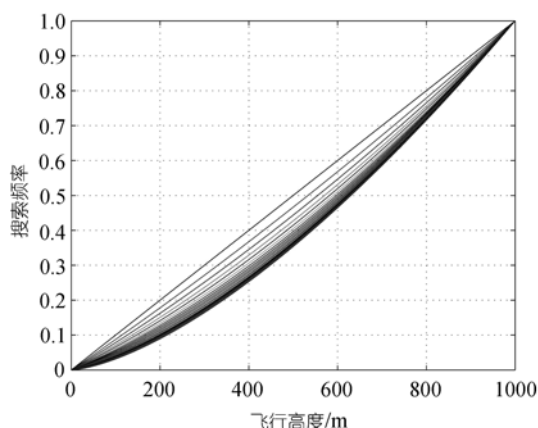


图 9 飞行高度和搜索概率关系



$$f(l) = \begin{cases} k_0 m, & \text{if } l = 4, \\ k_0 m, & \text{if } l < 4, \\ 0, & \text{if } l > 4. \end{cases} \quad (15)$$

$f(l)$ 的值不连续是因为当  $l > 4$  km 时, 小高炮没有所需射击的数据(射表), 因而火控计算机无法计算控制高炮射击的射击诸元而中止射击.  $k_0, m$ 的取值随高炮的新旧类型而定, 对于 20 世纪 60 年代所用的高炮, 单门炮的  $k_0$  为 0.08,  $m$  最多可取 6, 即由 6 门火炮组成一个火炮群, 由此一次点射的摧毁概率可以达到 0.48, 而 2 次点射的摧毁概率可以达到  $1-0.52^2=0.73$ , 实际上对于进入高炮群有效射击区域的侦察机来说, 其不止被一个火炮群攻击, 若被 2 个火炮群攻击, 则其被击毁的概率可以达到  $1-0.27^2 \approx 0.92$ . 在 20 世纪, 我们曾用此种方法击落当时很难对付的低空侦察机, 当然, 由上述分析可以看到, 高炮群的位置分布会对作战效果有一定影响, 因此必须对小高炮群的布局进行合理安排. 本文通过仿真实验来给出了小高炮群的初步排布规律. 通过模拟给出了此区域内小高炮群的分布情形如图 10(遗传算法求解结果)与图 11(粒子群算法求解结果)所示. 通过分析可以知道按照图中小高炮群的布局就可以进一步提高此区域的防空能力, 提高了整个系统的活性.

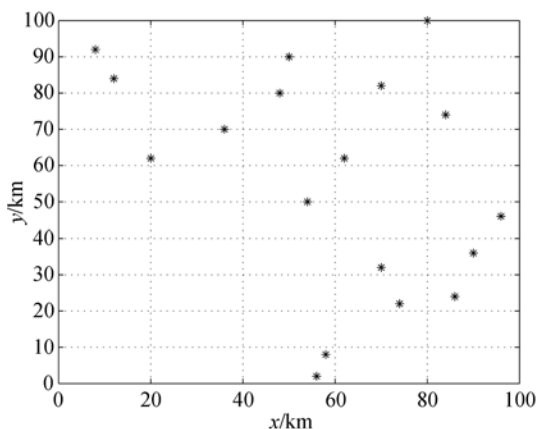


图 10 基于遗传算法的火炮群布局

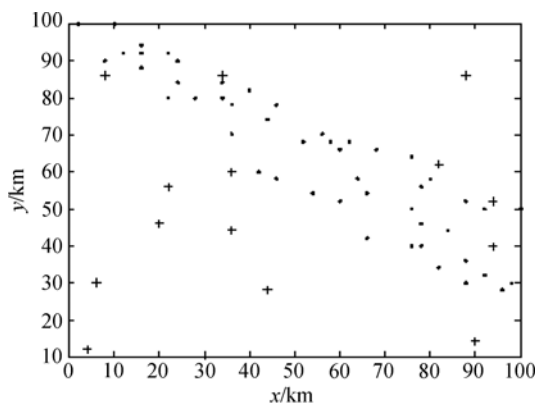


图 11 基于粒子群算法的火炮群布局

由此, 防空体系就转化为如何在此区域内布置小高炮群, 使得入侵侦察机在我方歼击机追赶下进入小高炮火力圈的概率最大. 本文仿真中假定入侵侦察机进入此区域后是按照直线飞行的, 运用经典的遗传算法与粒子群算法分别得到火炮群的合理安排情形.

在本例中歼击机追赶侦察机, 迫使侦察机在所有可能的航线中选择被击落概率最大的那条航线飞行的概率最大, 从多活性代理的理论来看, 歼击机的自组织机理有所删节和缩小, 但形成了新体系的作战功能, 满足了对抗入侵侦察机取胜的性能, 也即增加了系统的活性. 在具体分析综合时的做法是在系统中加入对抗因素, 形成原系统失效的涨落, 然后调整系统形成新的有效系统(或体系), 增强了系统的活性, 体现了“相反相成”、“通过涨落形成新的有序”的原理.

## 7 小结

本文以开放环境复杂信息系统的特点及需求为出发点, 借助多代理(agent)的原理、方法和 技术, 初步提出了多活性代理复杂信息系统构建的基础理论、体系框架和关键技术, 它是在自 组织概念基础上扩充为活性自组织概念并依此建立代理级及多代理(系统级)的功能结构模型 和活性机理模型(都是可裁剪的). 当然, 上述研究工作还是初步的, 进一步的研究工作主要包 括如下 2 个方面: 一方面从多活性代理复杂信息系统构建的基础及应用基础层次来说, 需要进 一步对多活性代理的“活性”表征及系统活性状态的动态演化过程进行描述, 如复杂信息系 统的“序”、“活性”生存条件以及熵值骤变等所引起的系统动态变化趋势分析, 推动和完善多活 性代理方法的理论体系; 另一方面, 进一步研究多活性代理复杂信息系统自组织机理的动态演 化协商协调规律. 本文是强化“分析-综合”、“定性-定量”、“人-机结合”(对抗环境人机结合中“反 其道而行之相反相成”、“共其道而行之相成相反”<sup>2</sup> 规律在组成多活性代理结构时往往有用)、 “任务-危机管理相结合”等方法应用的一种初步尝试, 望得到同行指正.

## 参考文献

- 1 Holland J H. 隐秩序: 适应性造就复杂性. 上海: 上海科技出版社, 2001
- 2 普里高津, 斯唐热. 从混沌到有序. 上海: 上海译文出版社, 2005
- 3 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, 2005
- 4 埃里克·詹奇. 自组织宇宙观. 北京: 中国社会科学出版社, 1992
- 5 钱学森, 戴汝为, 于景元. 一个科学新领域-开放的复杂巨系统及其方法. 自然杂志, 1990, 13(1): 3—10
- 6 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(5): 30—34
- 7 Marsic I, Medl A, Flanagan J. Natural communication with information systems. In: Proceeding of the IEEE, 2000, 88(8): 1354—1366 [\[DOI\]](#)
- 8 Lenat D B, Feigenbaum E A. On the thresholds of knowledge. Artif Intell, 1991, 47(1): 185—230 [\[DOI\]](#)
- 9 Zhang J J, Patel V L, Johnson K A. Designing human-centered distributed information systems. IEEE Intell Syst, 2002, 17(5): 42—47 [\[DOI\]](#)
- 10 Rouseff W B, Cody W J. On the Design of man-machine systems: principles, practices and prospects. Automatica, 1998, 24(2): 227—238
- 11 Jones P M, Chu R W, Mitchell C M. A methodology for human-machine systems research: knowledge engineer- ing, modeling, and simulation. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1995, 25(7): 1025—1038 [\[DOI\]](#)
- 12 Jones P M, Jacobs J L. Cooperative problem solving in human-machine systems: theory, models and intelligent associate systems. IEEE Trans Syst Man Cybern-part C: Appl Rev, 2000, 30(4): 397—407 [\[DOI\]](#)
- 13 Hinchey M, Sterritt R, Rouff C. Swarms and swarm intelligence. Computer, 2007, 40(4): 110—113 [\[DOI\]](#)