

一个空战实例中的混合对策问题

徐心和¹ 石鸿雁²

(1 东北大学 人工智能与机器人研究所, 辽宁, 沈阳市 110004

2 沈阳工业大学 数学教研室, 辽宁, 沈阳市 110023)

摘要: 由事件对策和微分对策联合构成的混合对策 (Hybrid Game) 还是一个崭新的概念。为了引起人们对于这一颇具研究前景方向的了解与重视, 本文给出了一个典型的空战问题 (AFP: Air Fight Problem) 作为研究实例, 分析了问题的构成, 并探讨了解决问题的基本框架与途径, 暴露出一系列需要解决的关键技术, 为对策论 (博弈论) 的发展提出了新的研究课题, 也会为作战模拟理论与应用研究创造良好的支撑条件。

关键词: 空战问题 (AFP); 二人零和对策; 微分对策; 事件对策; 混合对策; 机器博弈; 作战模拟

Case study: Air Fight Problem and Hybrid Game

Xinhe XU¹ Hongyan SHI²

(1 Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Northeastern University, Shenyang 110004

2 Dept. of Mathematics, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The Hybrid Game which consists of the differential game and event game is a brand new concept in game theory. In order to understand and emphasize the hopeful research direction of hybrid game, a case study: air fight problem (AFP) is designed and analyzed. The basic frame and method to solve this kind of problem is investigated as well as a series of key technologies are emerged. The research work in this direction must promote and support the development of game theory and war gaming application.

Key words: AFP(Air Fight Problem); Two-player-zero-sum game; Differential game; Event game; Hybrid game; Computer game; War simulation

1. 引言

对系统进行建模与分析是为了研究如何实现系统的控制与优化。在通常的控制系统中, 可能有多个变量需要控制, 但实施决策与控制行为的是一个智能主体。

目前广泛开展的多智能体系统 (Multi-agent system) 和多机器人系统 (Multi-robot system) 的研究, 虽然每个智能体都有本身的决策与控制, 但是由于它们的总体目标是一致的, 可以在一个统一的目标下实现任务的分解与协调, 仍然可以转化为一个统一的规划、优化与控制问题, 仍然是服从于一个统一的决策主体。

本文所介绍的一个空战问题 (AFP-Air Fight Problem) 是对策问题的一个实例, 它和前面提到的控制与决策问题密切相关, 但又存在很大的区别。AFP 问题的特点与意义主要表现在以下几个方面:

- 1) 决策主体由 1 个变为 2 个;
- 2) 2 个决策主体的根本利益是相互冲突的, 常常表现为二人零和问题;
- 3) 空战问题已经由控制与决策问题演变为动态对策问题 (Dynamic game);
- 4) 目前的对策论 (博弈论) 还无法全面描述和求解此类动态对策问题; [1-3]

5) 随着战争的现代化、智能化和无人化,“人在回路中”的决策系统必然会逐渐被“无人在回路中”的决策系统所代替,如导弹拦截。因此 AFP 问题的研究有着很好的理论意义与应用前景。

当然 AFP 系统的完全计算机实现还需要一段较长的时间,但人们有理由相信,它是不远的将来。还记得在上个世纪 80 年代,当中国开始提出 CIMS 的时候,人们普遍认为 CIMS 距离我们还十分遥远。曾几何时,“CIMS 向我们走来”,“CIMS 就在我们的身边”成为事实。当然 CIMS 还是单一决策主体的“管控一体化”问题。

为了描述和解决这种空战问题,必须面对一类“追-逃问题”(Pursue-escape problem),“拦截问题”(??)等,显然微分对策(Differential Game - DG)应该是最为有力的工具[4,5]。除了需要处理此类连续变量动态系统(CVDS- Continuous variable dynamic system)问题之外,AFP 还需要面对一系列策略选择的问题,就像下象棋一样需要处理“着法生成”和“着法选择”的问题 [6],这时事件对策(Event Game - EG)就应该是最为有力的工具,因为这是一类离散事件动态系统(DEDS- Discrete event dynamic system)的问题。[7]

对应于混合动态系统(Hybrid Dynamic System - HDS, 亦称混杂系统)是由连续变量动态系统(CVDS)和离散事件动态系统(DEDS)共同组成的系统 [8],那就有理由将由微分对策(DG)和事件对策(EG)共同组成的对策系统定义为混合对策(Hybrid Game - HG)。显然,混合对策是混合(动态)系统的自然延伸。

由于混合对策还是一个崭新的概念,为了引起人们对这一颇具前景的研究方向予以关注,本文详细分析了一个典型的空战问题 (AFP),不仅给出了 AFP 的问题和过程描述(第 2 节),而且给出了概括的分析与建模,指出了问题求解的途径(第 3 节);在第 4、5 节中分别给出了应用到的微分对策与事件对策的主要理论根据和许多急待解决的关键技术;最后是本文的结论。

2. 一个空军战斗的实例

2.1 AFP 的问题描述

- 红方:一架重型轰炸机(R1),在两架战斗机(R2,R3)的护送下,前往对方执行战斗任务:设法轰炸对方三个目标(G1 机场、G2 装甲基地、G3 军需仓库)中的一个或多个,并努力保存自己。

- 兰方:三架战斗机(B1, B2, B3)可以随时升空,参加阻击红方战机和保卫目标的任务。即保证目标不被破坏;设法击落对方战机;保证自身安全。(图 1 所示)
- 基本假设:交战双方战机性能和飞行员技能相当;战斗机在 2 对 1 的情况下,多方取胜几率为 0.8;战斗机在 3 对 1 的情况下,多方取胜几率为 1.0;在两机对战的情况下,根据双方姿态与速度关系决定获胜几率;战斗机对阵轰炸机的情况下,战斗机取胜几率为 0.8;双方“飞行员”均为理智的决策者,始终想方设法完成任务,取得胜利。

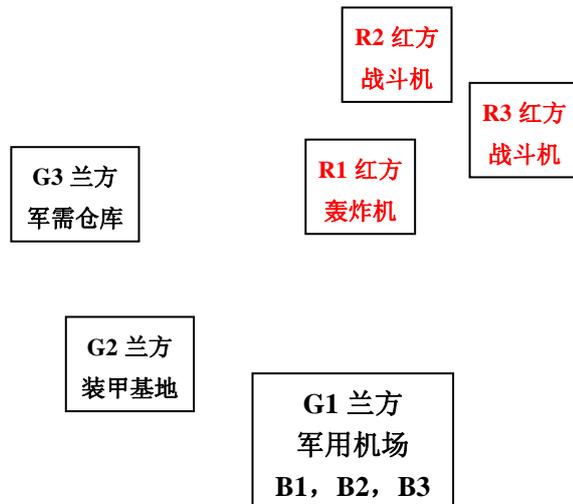


图 1 一个空军作战实例-AFP 问题

2.1 AFP 的过程描述

初始状态：红方 R1、R2、R3 向兰方某一目标快速运动；
 兰方经过探测、判断，发现红方目标、行动与动机，决策后出招布阵；
 红方经过探测、判断，发现兰方目标、行动与动机，决策后出招布阵；
 红兰方“决策者”因为态势的不断变化而“变招”（出招布阵），给本方飞行员下达任务与目标指令；

各方“飞行员”在指令执行过程中，会根据检测到的态势与状态而不断调整控制变量——“变值”。但追击、拦截、守卫等任务和目标不变。

这一混合对策系统的结构关系可由图 2 进行描述。

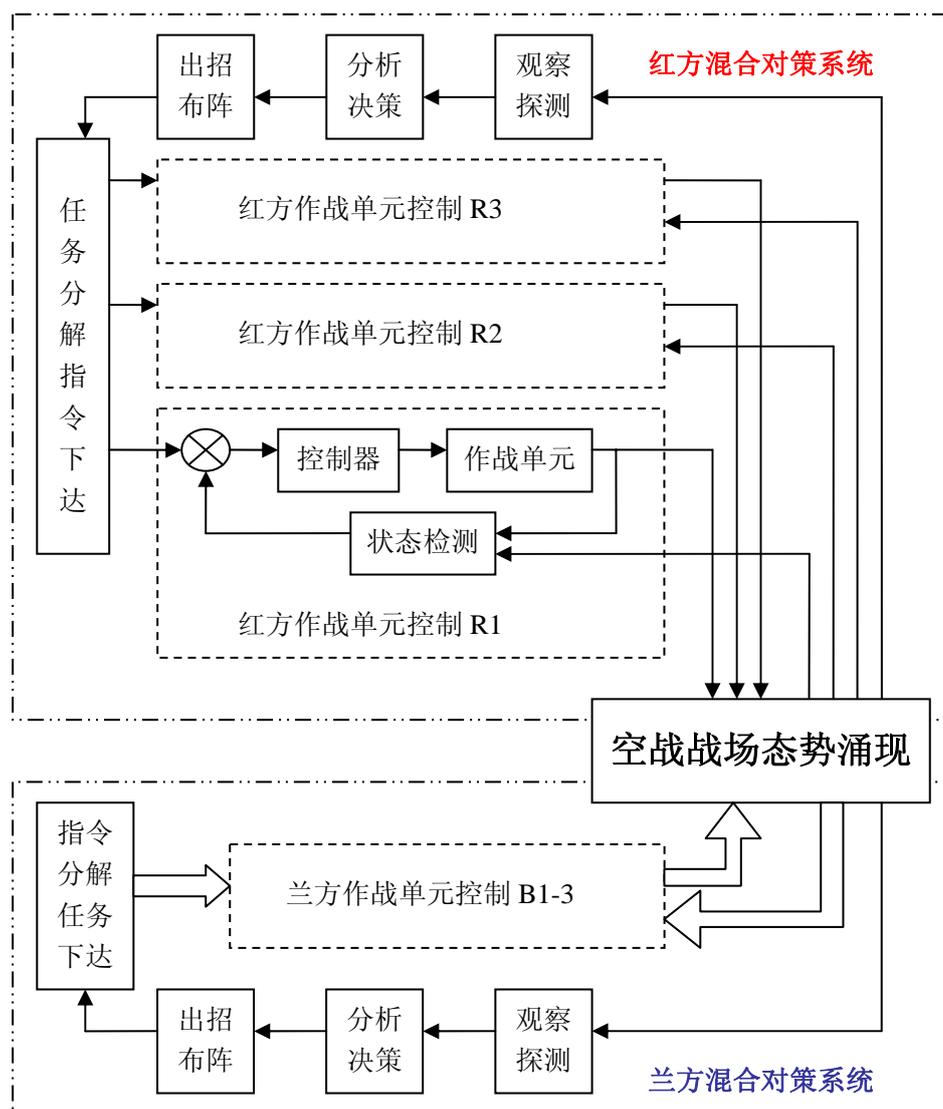


图 2 空战实例混合对策系统框图

这里为了区分两类决策与控制问题，给出了两个新的用词：变招与变值。变招是指混合对策系统外环“决策者”的指挥作用，经过战场态势的观察与探测，进行分析决策，重新排兵布阵，下达指令。而变值则是针对系统内环——作战单元（“飞行员”）的自身控制而言，通过对内部状态和外部态势的检测，追求最优指标，实现闭环控制。显然，变招为顶层决策，变值为底层控制，二者相辅相成，构成一方混合对策系统。

还需要特别指出的是“战场态势涌现”问题。“涌现”是复杂性理论的核心概念之一。“涌现”指的是一个系统的高层次性质和行为不能直接由底层的性质和行为推得。涌现的性

质是由整体的性质而不是由某个个体的性质所支配的。兵力分布、行动、对抗时宏观战场态势的演化是微观特性最终所导致的宏观结果。这是一个复杂系统跨越层次的“涌现”问题，层次间的互动作用，即层次间的“桥梁”是我们所尤为关心的。[9]

3. 系统分析与模型框架

3.1 AFP 系统演化分析

系统的演化包括两个层面，一是“决策者”的“变招”：

- 1) t_0 时刻，初始状态：红方 R1、R2、R3 向兰方目标 G2 运动；
- 2) t_1 时刻，兰方经过探测，发现红方目标与动机，做出决策：B1、B2、B3 同时升空，实行拦截任务；其中 B1、B2 直奔 R1，目的是要击落 R1，而 B3 直奔 R2、R3，干扰和延缓它们的掩护任务；
- 3) t_2 时刻，红方经过探测，发现兰方目标与动机，做出决策：R3 与 B3 对抗，R2 拦截 B1、B2，而轰炸机 R1 改变目标，掉头直奔 G1；
- 4) t_3 时刻，兰方做出新的决策，B2 应对 R2，展开空战，而 B1 追踪 R1，全力保护军用机场 G1 的安全；
- 5) ……

不难看出，决策者的变招是在离散时刻，并假设红兰双方在交替进行，就像棋牌游戏一样。每次变招，都会改变对阵的形势，引起目标性变化和系统结构性变化，表现为“事件触发”的离散事件系统和事件对策的特性。由此可以将空域划分几个局部战区，即将整个系统划分为几个分系统，每个分系统内将是两三个战机的对战问题。

系统演化的另一个层面就是作战单元“飞行员”的“变值”控制。各方“飞行员”在指令执行过程中，会根据检测到的态势与状态而不断调整控制变量——“变值”。但追击、拦截、守卫等任务和目标不变，属于系统结构不变情况下的连续控制过程。虽然状态的演化也会导致系统的结构性变化，但最终还是通过“变招”实现的。

3.2 AFP 系统建模与求解

从 AFP 系统的演化分析中不难看出，AFP 问题属于由 DEDS 和 CVDS 联合构成的混合动态系统。“变招”属于 DEDS，“变值”属于 CVDS。在事件域中“变招”将要应用事件对策的理论与方法，而在时间域中“变值”将要应用微分对策的相关结果。

这里“变招”的系统演化过程要比棋牌游戏相对复杂，但还是属于同一类问题，因此可以通过“着法生成”、“博弈树展开”、“节点评估”和“博弈树搜索”等进行建模与求解[6]。需要指出的是，这里建立的模型不是一般的数学模型，而是一类图（树）模型，它的求解也不是解方程，而是应用人工智能的方法，就像人们在思考问题一样，根据自身的知识结构和经验，在众多的可行解空间进行推演和搜索，在一定深度内寻求最优解。实践证明，这种求解的方法还是十分有效的。

我们假设“变招”是在离散时间点上瞬时完成的，而在更长的时间里系统则是处于“变值”的演化当中，它属于时间域中的问题，可以用微分方程或差分方程进行描述。由于飞机处于空中格斗，系统的状态将取决于格斗双方的位姿、速度等相对关系，而且受控于双方“飞行员”的“变值”控制技能。如果一方进入另一方的捕捉区[4]，那它被击中的可能性便迅速增加。于是双方都在想方设法地改变自身的控制量，而使本身处于安全并使对方处于危险的地位，这就是微分对策主要研究的问题。

由此看来，在双方排兵布阵之后，就可以将整个空域划分为若干个子空域，亦即若干个战区，在各个战区中双方特定的作战单元将遵循微分对策的规律进行演化，结果必然受制于双方“飞行员”的技巧（控制器算法）的优劣。

系统状态与态势的综合表述，“变招”与“变值”的内在联系，系统“涌现”的分析与

处理，都是尚未解决的基本问题。

4. 事件对策问题及应用

事件对策理论来源于棋牌游戏，立足于博弈论以及离散事件动态系统。[7]

象棋是战争的模拟，既然事件对策理论可以描述和处理象棋的博弈过程，那就有理由应用于战争模型的表述、分析和仿真当中。

事件对策系统是指一类具有两个非合作的智能主体的离散事件动态决策过程。事件对策系统一般都具有以下特点。首先，事件对策系统的状态值在离散时间点上发生变化，系统状态的变化是由事件驱动的。其次，事件是构成事件对策系统的主体，事件集是由两个决策者相互制约的决策过程构成的。另外，事件对策系统分析的目的在于，如何在“策略相互制约”的局势中找到每个智能主体的最佳策略（行动），使得在这一系列事件驱动下，系统达到的状态能够让每个智能主体都能获得尽可能大的盈利(或最大地减少损失)。[7]

一个事件对策系统 E 可以定义为一个七元组，AFP 亦不例外。即

$$E = (P, Q, \Sigma, R, \delta, q_0, F)$$

其中： P 为参战的红方和兰方的“决策者”，他们总是在相机行事，为了自己利益的最大化而根据系统态势选择自己的策略（排兵布阵）；

Q 为系统的有限状态集合；这里关注的系统状态 Q 是系统态势，如宏观战区的划分，红兰双方哪些作战单元归属于这一战区，以便分别评价双方的态势的优劣；

Σ 由双方的策略（调兵遣将）有限子集 Σ_R, Σ_B 构成，它是状态 Q 的函数；双方的策略集 Σ_R, Σ_B 可以这样定义：一部分是任务，如拦截、追击、守卫等，另一部分则是战区 and 对象，到哪一战区对阵哪些对方的作战单元。由此可知，AFP 的策略集会是相当庞大的，当前局面下的分枝因子会数以十计，甚至会高达上百个。[10]

R 为博弈规则，给出参与者的行动顺序、时限、信息披露的内容与方式等博弈规则。尽管双方的决策机制与速度存在差异，但可以认为是交替进行；并且是非完整信息的博弈，因为作战双方是不会将其作战意图轻易暴露的。

δ 为状态转移函数。表示在参与者行动事件的作用下状态演化规律。故有：

$$\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q;$$

q_0 为系统的初始状态；

F 为参与者的收益集，它是与系统当前的状态 q_k 相关联的。故有 $F(q_k) = \{F_R(q_k), F_B(q_k)\}$ 。它是可以根据各战区的态势评价敌我双方的收益，以便进一步选择策略，排兵布阵。

招法生成的遍历性，各种阵势收益评估的科学性，双方着法的不对称性，以及象棋搜索算法的可用性等都是首先需要解决的关键问题。

5. 微分对策问题及应用

自 20 世纪 50 年代初以来，由于制导系统拦截飞行器的引入、人造卫星的发射和航天中有关机动追击问题的需要，美国著名的 Rand 公司在空军资助下，以美国数学家 Issacs 博士为首的组织开展了对抗双方都能自由决策行动的理论追逃问题研究。他们把现代控制理论中的一些概念、原理与方法引入到对策论中，取得了突破性的成果，形成了微分对策(differential game)的最初研究成果。1971 年,美国科学家 Friedman 采用了两个近似离散对策序列精确定

义了微分对策,建立了微分对策值与鞍点存在性理论,从而奠定了微分对策理论的数学基础。

微分对策是研究两个决策人的控制作用同时施加于一个由微分方程描述的运动系统时实现各自最优目标的对策过程理论。系统模型可由(4-1)式描述。[4]

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(X, t) + B_R(t)u_R(t) + B_B(t)u_B(t), & X(0) &= X_0 \\ Y &= C(X, t)X + D_R(t)u_R(t) + D_B(t)u_B(t) \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中状态向量 X 是由对阵双方作战单元状态向量合成的增广向量, 而 u_R, u_B 分别为该对阵空域红方和兰方作战单元的控制向量。而维数相配的各系数矩阵(下标 R 为红方, B 为兰方)则要根据作战单元的动力学与输出关系建立系统模型。

微分对策的最优策略所应满足的必要条件, 可以像最优控制理论中的极大值原理那样导出。微分对策实质上是一种双方的最优控制问题。微分对策还可推广到由差分方程描述的离散时间动态系统。微分对策理论是控制论和对策论的重要分支, 在军事对策和经济学研究领域具有非常广泛而重要的应用。

显然, 微分对策系统的建模既和飞行动力学密切相关, 又更为复杂和难以建立, 如何通过数值方法求解双方最优控制, 寻找微分对策值与鞍点, 以及存在性理论等都是具有挑战性的研究课题[11]。除了定量微分对策和非合作微分对策, 还有定性微分对策和多人合作微分对策(如 2 对 1 或 3 对 1) 都还有大量的关键技术难以解决。

6. 结语

本文通过一个空战实例介绍了混合对策问题的内容与处理方法, 揭示了一类复杂系统的运行机制。从中也不难看出, 混合对策问题的存在具有普遍性, 混合对策问题的解决将使人类智能决策的水平出现飞跃, 具有重要的理论意义与应用前景。混合对策问题的解决将很大程度上取决于事件对策和微分对策理论的成熟和发展。由于这两种对策的理论基础与处理方法存在巨大的差异, 故为混合对策建立统一的理论框架则具有更大的挑战性。而利用计算机技术探讨此类问题的求解将是颇具前景的。尤其会为作战模拟理论与应用研究创造良好的支撑条件。

参考文献

- [1] Gibbons R.A. Primer in Game Theory[M]. Princeton: Princeton University Press, 1992.
- [2] 李光久. 博弈论基础教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 谢政. 对策论. 国防科技大学出版社[M]. 长沙: 2004, 3
- [4] 张嗣瀛. 微分对策[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] 黄琳, 年晓红. 微分对策理论及其应用研究的新进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 128-133
- [6] 徐心和, 王骄. 中国象棋计算机博弈关键技术分析[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(6): 961-969
- [7] 徐心和, 郑新颖. 棋牌游戏与事件对策[J]. 控制与决策. (待发表):
- [8] 徐心和, 混杂系统的存在与研究[J], 基础自动化, 1996, No.1, 1-5
- [9] 胡晓峰, 罗批, 司光亚, 张国春等. 战争复杂系统建模与仿真[M], 国防大学出版社, 北京, 2005.5
- [10] 梁志峰. 大战略集博弈的适应性均衡及其求法[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 7(6): pp82-86
- [11] Nash, J.F. Equilibrium Points in N-person Games[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1950, 36: pp48-49.