

文章编号:1000-6893(2009)11-2119-07

基于 MAS 的舰载机动态调度模型

冯强, 曾声奎, 康锐

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191)

A MAS-based Model for Dynamic Scheduling of Carrier Aircraft

Feng Qiang, Zeng Shengkui, Kang Rui

(Department of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 基于多主体系统(MAS)技术研究了充分考虑舰载机故障与维修影响的实时动态调度模型。通过系统分析舰载机的基本作业流程,建立了3层混合控制的柔性模型架构。充分考虑故障等系统扰动的影响,提出基于合同网协议(CNP)的两级交互协同机制提高主体(Agent)间的协商效率,并尽可能消除重调度的影响。给出 Agent 个体的抽象原则以及开放性式内部结构。深入探讨了基于 MAS 的舰载机动态调度的基本算法。最后,选取舰载机的典型任务,在特定舰载机可靠性维修性水平下对调度过程进行仿真验证,获取了与实际调度过程趋势相符的舰载机出动能力曲线,证明了模型的可行性。

关键词: 动态调度; 多主体系统; 故障; 可靠性; 舰载机

中图分类号: V215.7; O22 **文献标识码:** A

Abstract: A real-time dynamic carrier aircraft task scheduling model is developed based on the multi-agent system (MAS) technology with full consideration of faults and maintenance effect on the operation flow. A flexible three-layer mixed control structure of the model is established through systematic analysis of the basic operation flow of carrier aircraft on a ship. A global-local interactive coordinated mechanism based on contract net protocol (CNP) is proposed which takes into consideration system disturbances (such as failures) to improve the negotiation efficiency among agents and eliminate the effect of the re-scheduling of carrier aircraft. In addition, the abstraction principle and an open internal structure for individual agents is provided, and the basic scheduling arithmetic for carrier aircraft based on MAS is discussed in detail. Finally, the model is validated by the simulation of a typical task of carrier aircraft under certain reliability and maintainability requirements, and a carrier aircraft sortie ability curve is obtained which exhibits the same trend as the actual scheduling process.

Key words: dynamic scheduling; multi-agent system; failure; reliability; carrier aircraft

舰载机调度是指在有限的时间、空间及物资等资源的约束下对舰载机作业流程进行优化,从而实现提高起降能力、保障作战效果等目标。相较于陆基飞机,舰载机作业环境更加复杂恶劣,其调度涉及到多架舰载机、多种资源之间在起降、调运、驻留及维护保障等多个作业阶段的有效协调^[1],隶属运筹学中的动态调度问题。

常用的动态调度方法包括最优化方法(动态规划、混合线性规划等)、启发式方法(优先级/启发式调度规则)以及智能调度方法(专家系统、智能搜索、Multi-agent 方法)等,同时随着问题规模日趋庞大,仿真技术被不断运用^[2-3]。现有飞机调度问题的研究偏重于飞机起降环节的静态规划。最新文献倾向于采用最优化方法或智能搜索方

法。这些方法对飞机着陆问题进行数学抽象,建立问题的目标函数与约束条件。其目标通常是飞机队列着陆时间最短或跑道的利用率最高。约束条件通常是飞机着陆的间隔时间、空中最大等待时间等。在求解时可通过动态规划等最优化算法,也可采用遗传算法、极限优化等智能搜索方法^[4-5]。这些方法虽然取得了一定的效果,但距离舰载机以作战任务为驱动的多阶段、实时、自适应的动态调度需求还存在较大差距。

围绕舰载机的动态调度需求,本文借鉴经典调度问题的一般思想^[6-12],系统分析了舰载机的调度过程,选取在动态调度领域广泛应用的多主体系统(MAS)技术构建了舰载机动态调度模型。着重研究了舰载机动态调度(正常或发生故障扰动情形)中各环节之间的协同机制,及舰载机调度的基本算法,最后以舰载机典型任务为例进行了验证。

1 舰载机动态调度过程

图1显示了作战任务驱动的舰载机基本作业流程,主要涉及了起降、调运、驻留以及维护保养等作业。当舰载机返回后,首先通过飞行后检查确定是否需要维修,当故障程度严重、需更换部件或舰面已无位置时,应调运至机库进行维修,否则可在舰面进行原位维修。如果舰载机无故障且无任务时,优先考虑舰面驻留,即舰面有空间就驻留至舰面,无空间则调运至机库驻存。舰载机的动态调度需要按照一组特定的规则或约束将各类有限资源分配给规划中的各项作业并进行优化。这些资源主要分为3类,即时间、空间及物资。时间资源是指任何作业都要在一定的窗口内完成。空间资源是指舰载机作业中所受到的空间约束,涉及到维修车间、舰面停机区等位置。物资资源是指舰载机作业中涉及到的各类作业设施,以及必要消耗品(如备件、弹药等)。

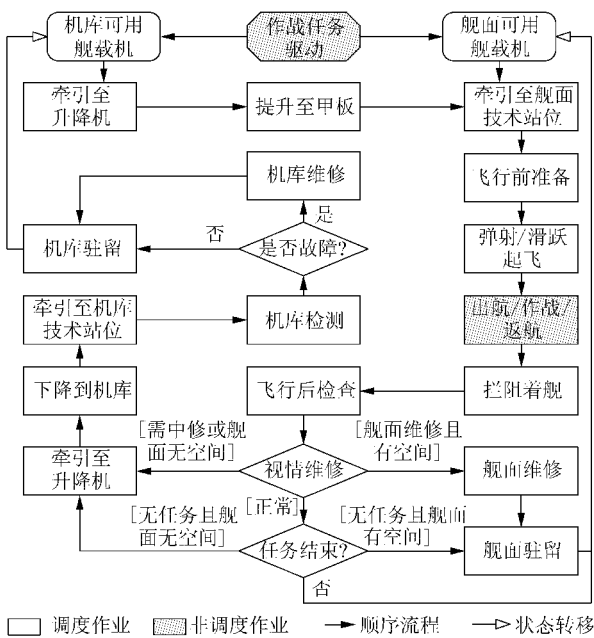


图1 舰载机作业的基本流程

Fig. 1 Basic operation flow of carrier aircraft

舰载机调度的理想目标是在实现效用(作业效果、消耗资源)最大化的同时,尽可能消除作业过程中各类故障、排队等现象所带来的影响。但由于作业过程中包含了较多的不确定性,如作战任务的随机性(包括防空、反舰、袭地等多种任务),作业环节的多态性(如着舰作业可能发生导引着舰、复飞、逃逸、拦阻网着舰等),舰载机或作业设施发生故障的随机性等。因此,通常只能获取可行方案,而难以获取最优方案。为此,对舰载

机的动态调度提出了如下要求:①动态响应能力,即强调对动态/随机环境变化的响应能力;②自适应能力,即要求调度具有较好的鲁棒性,当系统出现扰动(如故障或排队)时,无需频繁的重调度即可完成调度任务。

2 基于MAS的舰载机动态调度模型

基于MAS的调度方法通过一组自治主体(Agent)之间的有效协调解决复杂的动态调度问题,在动态调度领域得到了广泛的应用^[3]。其优点是能够描述动态调度中的大量交互行为,且调度过程由Agent间的协商、协作完成,具有较高实时性^[6-8],这与舰载机的动态调度需求是一致的。在任一领域中应用MAS技术都必须解决以下几个密切相关的问题,即:Agent个体的抽象机制,多个Agent之间协同模式,及MAS的体系结构^[13]。本文将从舰载机调度的实际需求出发,结合上述问题对基于MAS的舰载机动态调度模型进行详细论述。

2.1 模型整体架构

相较于一般动态调度问题,舰载机动态调度的任务输入具有更高的随机性,并且调度过程的故障与修复问题更加尖锐(与作战效果直接相关,同时由于舰载机/作业设施的可靠性要低于简单设备,故障发生的可能性更高)。

舰载机动态调度需要在多阶段的作业决策中考虑上述问题。为保证模型具有足够的柔性和求解收敛速度,提出了3层混合控制结构的MAS模型(如图2所示),从而避免使用单纯的递阶结构或分布式结构的不足(前者存在过于刚性的问题,后者存在难以收敛的问题)。

模型整体表现为递阶形式,但是允许Agent在与父、子节点协商的同时,与其他兄弟节点进行交互,从而使系统具备一定全局优化能力的同时,又能较好地协调各Agent之间的行为。

系统协调Agent是整个系统的核心,负责将实时的作战任务解析为一组作业任务并进行分发。影响任务集生成的主要因素是作战类型(如防空)与出动强度(如连续出击)等。

作业管理Agent与系统协调Agent共同组成控制层,是保证模型求解收敛速度的关键。在全局目标的驱动下,通过控制执行层的Agent,力争获得局部作业利益最大化。主要由起飞作业管理、着舰作业管理、升降作业管理、牵引作业管理

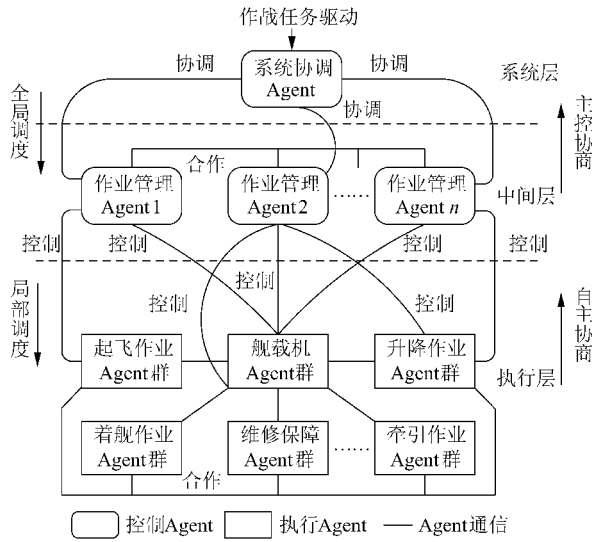


图 2 舰载机动态调度模型总体框架

Fig. 2 Framework of model for dynamic scheduling of carrier aircraft

及维护保障作业管理等几类 Agent 组成。

作业 Agent 与舰载机 Agent, 这两类执行 Agent 负责具体作业的实施。在这一过程中, 正常状态的作业 Agent 相当于服务台, 负责提供各类资源和服务, 舰载机 Agent 或故障状态的作业 Agent 相当于顾客接受服务。

2.2 Agent 的协同机制

Agent 的协同机制描述了一组 Agent 采取联合行动或求解问题时, 如何协调各自的知识、目标、策略和计划, 包括 Agent 协商、协调和协作等内容^[11]。其中协商是指多 Agent 借助通信, 交换彼此目标, 直至 Agent 目标达成一致或未达成协议。协调及协作过程与协商模式基本一致, 其实质是多 Agent 通过内部逻辑规划出动作序列来彼此交互, 协调各自行为, 直至目标完成。

合同网协议 (Contract Net Protocol, CNP) 是最常用的 Agent 协商协议之一, 在调度领域得到了广泛的应用, 它通过规定合同管理者如何公告任务, 潜在的合同方如何投标, 以及管理者如何授权等内容完成协商^[8]。舰载机动态调度模型采用了混合递阶控制方式, 形成了网状的 Agent 拓扑结构, 因此比较适合采用 CNP 协商^[9]。针对舰载机动态调度的特点, 本文在传统 CNP 的基础上提出一种全局-局部(主控协商-自主协商)的交互协商模式, 以便提高协商的效率。

主控协商用于全局调度, 当系统协调 Agent 在作战任务驱动下生成一组调度任务后, 通过主

控协商将任务分发给相应的作业管理 Agent。需要注意, 系统协调 Agent 发布的维修保障任务仅限于预防性维修(例行的检测及维修), 面向故障的维修作业则由随机故障的舰载机/作业设施发布(可能引发重调度, 在下文中详细说明)。

自主协商则用于局部调度, 侧重于单一作业环节的协商过程。作业管理 Agent 获取任务后, 在特定状态的舰载机队列中挑选 Agent, 并由它们按照获取任务时间依次发起公告, 通过谈判选择合适的作业 Agent 对其授权。如在同一时刻获取任务, 则随机选择一个舰载机 Agent 发起谈判。当舰载机与获取授权的作业 Agent 执行完作业任务后, 舰载机 Agent 首先通知当前作业管理 Agent 已完成任务, 然后更新自己的状态, 同时转移至等待下一阶段作业的队列中。另一方面, 作业 Agent 则更改自身的状态为空闲。

限于篇幅, 以相对复杂的、包含舰载机/作业设施故障维修的起飞作业过程为例进行说明。基于 AUML(智能物理 Agent 基金会提出的 Agent 建模语言, 详见文献[14])建立其协作模型如图 3 所示。

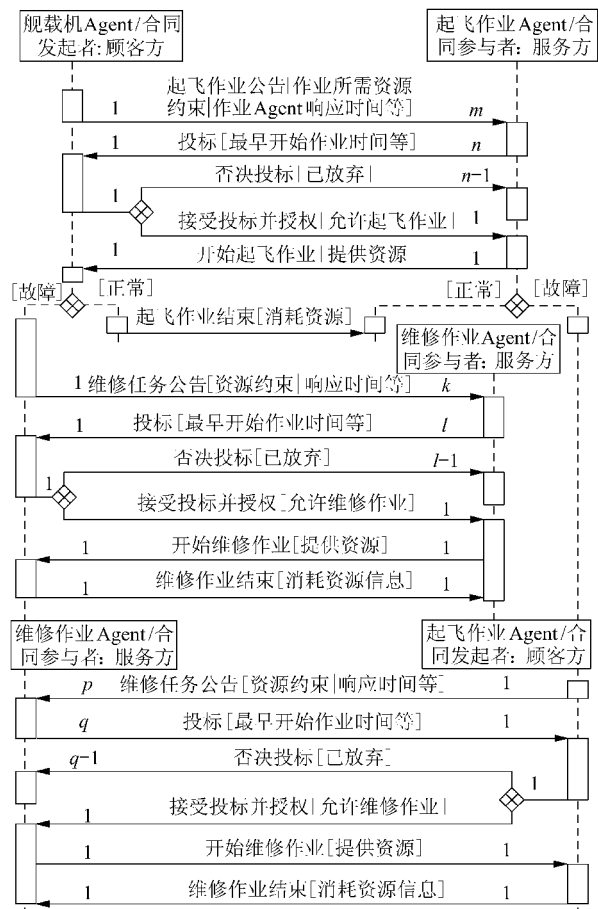


图 3 舰载机调度 Agent 之间的协同机制

Fig. 3 Coordinated mechanism among scheduling agents of carrier aircraft

舰载机与起飞作业 Agent 通过协商订立合同后即可开始作业。期间,舰载机或作业设施均可能发生故障(与其可靠性水平直接相关),一旦故障将与维修保障 Agent 进行协商。

如果舰载机发生故障,即立刻终止作业,将其转移至等待维修的队列,同时发出需要维修的公告,与维修作业 Agent 进行自主协商后进行维修。另一方面,当前作业管理 Agent 获取因舰载机故障终止作业的消息后,将与第一作业顺位的作业管理 Agent(通常是牵引作业管理 Agent)协商,请求重新开始调度。如第一顺位的作业管理 Agent 不具备投标能力,则与维修作业管理 Agent 进行协商,如不能在规定时间内完成维修任务,即向系统协调 Agent 进行汇报作业将延时。

如作业设施发生故障,首先终止当前作业,并向最近的空闲作业 Agent 发出协助请求继续完成作业,如果没有空闲的作业 Agent,则向上汇报作业需延时。另一方面,以合同发起者的身份与维修作业 Agent 进行局部协商后进行维修。

因此,这种全局-局部的交互协商模式能提高协商效率,并较大程度消除重调度的影响。

2.3 Agent 个体抽象及内部结构

Agent 个体是对现实世界中实体的抽象和映射,其抽象原则与 MAS 系统的构建方案密切相关,并且相互影响。一般来说,Agent 所映射的实体分为两类:物理实体或过程实体^[12]。前者对应着现实系统中的实际对象,如舰载机、作业设施等;后者是对某些具有动态特征的过程的模拟,如调度作业的管理。

不同角色 Agent 的内部结构是有所差别的,但在满足自治性、交互性、反应性与主动性等方面的需求是一致的。具备完整心智行为的 Agent 的内部结构通常包括环境分析、信息处理、问题求解、动作规划及通信等功能^[13]。以起飞作业 Agent 为例,其内部结构如图 4 所示。

图 4 中,环境是指与 Agent 具有密不可分联系事物的总和,在本文中指其他 Agent 以及必要的真实作业环境信息(如舰体 6 自由度运动信息、气象条件等,这些信息直接影响到舰载机的起降,进而影响其他作业环节)。Agent 通过环境感知模块获取相应环境信息,并通过感知函数 $see: E \rightarrow Per$ 将环境信息 E 转化为感知集合 Per 。本文中的 Agent 选择通信感知方式,即将环境或其

他 Agent 的信息在 Agent 网络中广播,Agent 通过接收模块即可获取相应信息。信息处理模块的重点是对感知集合进行处理,将影响 Agent 内部状态的信息传递至行为规划与决策模块,将需要告知其他 Agent 的信息继续广播。行为规划与决策模块收到信息处理模块传递来的任务信息之后,首先对任务进行评价,并将任务及承诺进行存储,然后通过通信模块与其他 Agent 交互。一旦获得授权,则通过决策与行为模块对存储在承诺表中的任务进行规划,生成相应动作序列并通过动作执行模块执行。反之,清除任务。

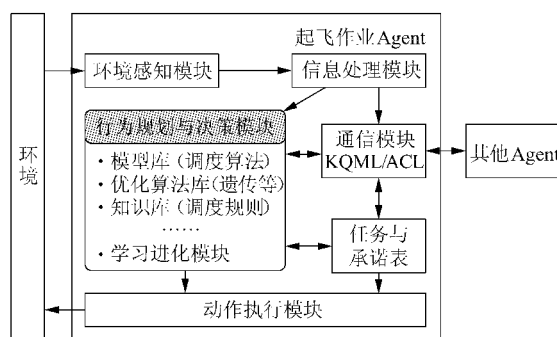


图 4 调度 Agent 内部结构示意图

Fig. 4 Structure of scheduling agent

其中,最关键的模块是行为规划与决策模块。本文为其设计了分层的模块化结构,其核心为模型库(基本调度算法),在此基础上,应包含必要的优化算法库,如遗传算法、蚁群算法。如果是采用基于知识的启发式调度,则模块中需包含相应的调度规则。如果需赋予模块更高的心智,还需为其增加学习进化模块。这种分层的模块结构具有更好的开放性与灵活性,能够较好地满足动态调度的需求。

此外,其他类别 Agent(如作业管理 Agent 或舰载机 Agent)所采用的内部结构也与图 4 类似,主要差别在于行为规划与决策模块所封装的模型库、算法库、知识库的不同。

3 基本调度算法

基于 MAS 的舰载机动态调度过程由多阶段的局部调度组成。各阶段局部调度均基于 CNP 谈判开展,过程基本一致,算法如下。

步骤 1 舰载机 Agent 公布初始报价 PR_i 。

舰载机给出的初始报价 $PR_i = (a_i | R_T/R_B/R_M)$,其中, a_i 为作业 Agent 回应的最后期限,

R_T, R_B 和 R_M 分别为完成任务所需的时间、空间及物资约束。时间约束 R_T 如式(1)所示。式(1)的含义是最迟开始作业时间,目的是一旦作业已延时,尽可能缩短延时时间。

$$R_T = \max[(T_s + a_i), (T_d - T_p)] \quad (1)$$

式中: T_s 为舰载机做出初始报价的时刻; T_d 为最迟作业结束时间; T_p 为平均预期作业时间。

空间约束 R_B 如式(2)所示,即在固定作业或移动作业路径上不与其他对象占用的空间发生干涉现象。

$$R_B = (x, y, z | \text{Path}, v) \quad (2)$$

式中: x, y 和 z 分别为舰载机的体积参数的不同侧面,即机长、翼展(含机翼折叠后数据)和机高;Path 为作业路径; v 为舰载机牵引移动速度。

物资约束 R_M 表示作业过程中消耗的物资。

步骤 2 作业 Agent 投标,给出反报价 PR_i 。

作业 Agent 首先评估自身是否能够满足资源约束条件,然后给出反报价 $PR_i = (a_i | T_s, M_c)$,其中, a_i 为承诺等待时间; T_s 为最早开始作业时间,由作业 Agent 对任务进行评估后生成; M_c 为消耗物资信息。若作业 Agent 不满足 R_T, R_B, R_M 任一约束或尚处于占用状态,则放弃投标。

步骤 3 舰载机 Agent 评估反报价并授权。

舰载机 Agent 评估所有返回的作业 Agent 投标,按式(3)选择最优的作业 Agent 进行授权。即考虑作业 Agent 的最早开始作业时间、作业能力及作业效率。

$$\min[(T_s + T_p), M_c] \quad (3)$$

步骤 4 执行作业过程。

获得授权的作业 Agent 可执行作业任务,在这一过程中应考虑舰载机/作业设施发生故障的影响。当对象的可靠度为 R 时,可以认为对象按照 $1-R$ 的概率发生故障。这种故障规律可由舰载机 Agent/作业 Agent 内置的生命周期规则(LCR)模拟。若正常结束作业,则由舰载机 Agent 统计总消耗 C (包括实际作业时间 T_r 及所消耗物资 M_c),并在作业结束时反馈给作业 Agent。一旦发生舰载机故障,则停止当前作业,并转入维修作业协商过程。如果是作业设施发生故障则向其他空闲作业 Agent 请求协作后,转入维修协商过程。设舰载机和作业设施的可靠度分别为 R_1 和 R_2 ,生命周期规则为 LCR_1 和 LCR_2 ,则调度基本算法如下:

```

If  $LCR_1 \in (0, R_1]$  and  $LCR_2 \in (0, R_2]$  Then
  Carrier Aircraft Agent is normal
  Process Agent is normal
   $C = (T_r, M_c)$ 
Else
  Stop Current Process
  If  $LCR_1 \in (0, 1 - R_1]$ 
    Call Maintain_cooperate Process
  Else
    Call Neighborhood_cooperate Process
    Call Maintain_cooperate Process
  End
End

```

4 示 例

以舰载机作战的典型任务模式连续出击为例。设作战想定为昼间(10 h)持续出击 70 攻击架次,每次出动 6 或 8 架次,中间间隔约为 30 min。舰载机调度的主要目标是提高其起降能力,本例中采用单位时间出动架次 S_g 来考察舰载机出动能力, $S_g = S_F / T_{real}$,其中, S_F 为出动成功变量,初值为 0,每成功出动一架次(由 Agent 交互确定), $S_F = S_F + 1$, T_{real} 为实际调度时间。

连续出击模式下包含多批次的调度。出动舰载机可分为 3 种类型,初期优先出动舰面舰载机,中后期则出动机库内舰载机,同时部分舰载机需再次出动。

舰载机在不同阶段作业设施上(提供服务的人、设备、物资的综合体)消耗的作业时间示意如表 1 所示。

需注意 3 类出动的舰载机包含的作业阶段不同,是表 1 各任务阶段部分或全部的组合,如:机库内舰载机的任务集是{1~5, 8};舰面舰载机的任务集是{3~5, 8};再次出动舰载机则必须考虑着舰环节的调度,如未入库按舰面舰载机处理,如入库则按机库内舰载机处理。其中,牵引作业时间与舰载机至技术站位的路径密切相关,采用作业路径/牵引速度(Path/ v)衡量,维修作业则取决于故障对象的平均修复时间(MTTR),着舰作业最为复杂,其作业时间为随机量(Rand),由 Agent 根据作业状态(导引着舰|复飞|逃逸|拦阻)判断给出。

设调度过程中无新任务到达,调度过程中舰载机与作业设施的可靠度 R 分别为 0.8 与 0.9。MTTR 分别为 106.8 min 及 40 min。

表1 舰载机不同阶段作业时间示意图

Table 1 Operation time of carrier aircraft in various phases

编号	任务阶段	作业设施	数量	作业时间/min
1	机库内牵引	机库牵引车	5	Path/v
2	升降机提升	升降机	3	10
3	舰面牵引	舰面牵引车	5	Path/v
4	飞行前准备	后勤及弹药保障组	4	25
5	弹射起飞	蒸汽弹射器	4	12
6	着舰作业	导引/拦阻装置	1	Rand
7	升降机下降	升降机	3	10
8	维修作业	维修保障组	3	MTTR

为获取稳定的仿真结果,可基于目标的方差与均值的稳定精度确定仿真次数,如式(4)所示。

$$\frac{|E(G_z) - E(G_{z-b})|}{E(G_{z-b})} < \alpha \frac{\sigma_{G_z}^2 - \sigma_{G_{z-b}}^2}{\sigma_{G_{z-b}}^2} < \alpha \quad (4)$$

式中: G 为目标; S_g ; z 为仿真次数; α 和 b 的默认值是0.01和100。

基于开源的Agent开发平台JADE(Java Agent Development Framework)对上述模型进行实现,并利用MATLAB工具对结果数据进行处理,给出相应曲线,最终的仿真结果如图5所示。当调度结束时,单位时间出动架次为7.3312,方差为0.7324。仿真结果表明单位时间出动架次在第2批次调度达到最高。这是由于在调度早期优先出动舰面舰载机时,还可同时对机库内舰载机执行前几个阶段的作业。

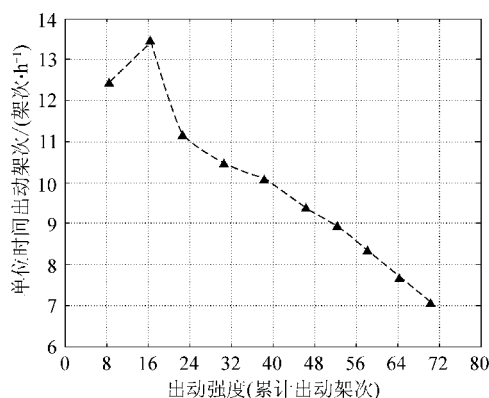


图5 舰载机出动能力曲线

Fig. 5 Curve of carrier aircraft sortie ability

5 结束语

(1) 首次将MAS技术引入到舰载机实时动态调度领域,为该领域问题解决提供了新的技术思路。

(2) 充分考虑了故障与维修对舰载机调度过

程的影响,将复杂舰载机动态调度过程分解为若干个相对独立的多Agent协作过程,扩展了Agent技术对故障及其相关行为的考虑。

(3) 基于MAS模型对舰载机典型任务进行了仿真,给出了舰载机在特定的可靠性与维修能力下的出动能力曲线。该曲线表明在给定条件下,通过舰载机动态调度能够完成任务,且其变化趋势与真实调度过程的趋势相符合,证明了模型的可行性。

参考文献

- [1] 中国航空工业发展研究中心海军装备部飞机办公室. 国外舰载机技术发展: 气动、起降、材料、反潜、直升机预警 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008. Plane Office in Naval Armament Department, Research Center of Chinese Aviation Industry Development. State of the art foreign carrier aircraft: aerodynamic, takeoff and landing, material, antisubmarine, helicopter early-warning [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] Waldemar K. Dynamic scheduling state of the art report [R]. SCIS Technical Report T2002; 28, 2002.
- [3] 钱晓龙, 唐立新, 刘文新, 等. 动态调度的研究方法综述 [J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 141-145. Qian Xiaolong, Tang Lixin, Liu Wenxin, et al. Dynamic scheduling, a survey of research methods [J]. Control and Decision, 2001, 16(2): 141-145. (in Chinese)
- [4] Moser I, Hendtlass T. Solving dynamic single-runway aircraft landing problems with extremal optimisation [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling, 2007: 206-211.
- [5] Malaek S M B, Naderi E. A new scheduling strategy for aircraft landings under dynamic position shifting [C] // Aerospace Conference, 2008: 1-8.
- [6] Kouiss K, Pierreval H, Mebarki N. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1997, 8(1): 41-47.
- [7] Scott J M, Kasin O. Scheduling complex job shops using disjunctive graphs: a cycle elimination procedure [J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(5): 981-994.
- [8] Zhang X D, Wang Q, Li X P. Multi-agent based framework for dynamic scheduling system [C] // Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2007: 3838-3843.
- [9] Saad A, Kawamura K, Biswas G. Performance evaluation of contract net-based heterarchical scheduling for flexible manufacturing systems [J]. Intelligent Autonomous and Soft Computing, 1997, 3(3): 229-248.
- [10] Perugini D, Lambert D, Sterling L, et al. Agent-based global transportation scheduling in military logistics [C] //

- Proceedings of 2004 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent System. 2004: 1278-1279.
- [11] Madureira A, Gomes N, Santos J, et al. Cooperation mechanism for team-work based multi-agent system in dynamic scheduling through meta-heuristics [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. 2007: 233-238.
- [12] Knotts G, Dror M, Hartman B C. Agent-based project scheduling [J]. IIE Transactions, 2000, 32 (5): 387-401.
- [13] Wooldridge M. An introduction to multiagent systems [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [14] Bernhard B, Jorg P M, James O. Agent UML: formalism for specifying multiagent software systems [C] // The First International Workshop on Agent-oriented Software Engineering (AOSE-2000). 2000: 1-12.

作者简介:

冯强(1980—) 男,博士,讲师。主要研究方向:可靠性系统工程、复杂系统建模、性能与可靠性一体化设计等。

Tel:010-82338402

E-mail: yunt@dse. buaa. edu. cn

曾声奎(1965—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:可靠性系统工程、故障预测与健康监控、性能与可靠性一体化设计等

E-mail: zengshengkui@buaa. edu. cn

康锐(1966—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:可靠性系统工程、工程系统工程、故障学、工程事理学等。

E-mail: kangrui@buaa. edu. cn

(编辑:李铁柏,孔琪颖)