

基于多 Agent 的多机场终端区 空中交通智能仿真系统设计

张钧翔 胡明华

南京航空航天大学, 民航学院, 江苏南京, 210016

摘要: 本文采用分布式人工智能 Multi-Agent 理论和方法, 探讨多机场终端区空中交通运行的模式, 以及航班、管制员与机场等多部门之间的协同工作模式。设计了多 Agent 的仿真系统模型, 给出了航班 Agent、管制员 Agent 和机场管制区 Agent 等关键智能 Agent 的具体设计模型, 构建了基于多 Agent 的多机场终端区空中交通智能仿真系统的整体框架和运行体系。为复现多机场终端区实际运行状况, 实现多机场终端区空中交通智能仿真奠定了基础。

关键词: 多机场终端区; 系统仿真; Agent; 人工智能; 空中交通

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2009)02-0090-09

Design of the Air Traffic Intelligent Simulation System for the Airport with Multi-terminal Areas Based on Multi-Agents

ZHANG Jun-xiang HU Ming-hua

College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and
Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: The air traffic operation mode was discussed by applying the distributed artificial intelligence multi-agent theories and methods at the airport with multi-terminal areas, and the working mode of the multi-sector synergies among the aircrafts, controllers, airport and so on, was studied. A multi-agent system simulation model was designed, and the specific

收稿日期: 2008-08-03.

基金项目: 国家 863 重点课题: 2006AA12A105.

作者简介: 张钧翔 (1984-), 男, 陕西人, 南京航空航天大学民航学院硕士生, 研究方向: 多机场终端区空中交通容量评估系统。

design mode of some intelligent agents, such as: flight agent, controller agent and airport control area agent were presented. As a whole framework and operational system of the multi-airport terminal area, the air traffic intelligent simulation system is based on the structures of the multi-agents. And finally, a foundation for reviewing the actual operation conditions of the multi-airport terminal area and realizing the air traffic intelligent simulation of the multi-airport terminal area has be laid.

Key words: Airport with-terminal areas, system simulation, agents, artificial intelligence, air traffic

0 前 言

随着我国民航事业的不断发展和众多机场设施的大规模建设, 枢纽机场由原有的单机场终端区逐步向多机场终端区进行转变。为实现终端区内多机场间的一体化运行, 应对整个多机场终端区实施协同式流量管理策略, 协调各个机场间的容量因素和相互影响, 以确保最大限度的利用整个大终端内的空域资源, 减少总延误, 按照公平合理的原则实现终端区内的资源调配。作为流量管理的基础, 容量评估仿真系统在国内外都以取得了广泛的应用, 如: TAAM、SIMMOD、ASMES 等^[1]。但是, 随着民航业的发展和科学技术的进步, 为了更好的实现多机场终端区内航班无干扰的自主飞行, 基于人工智能的仿真评估系统将在未来得到进一步的研究开发和使用。

将 Agent 技术应用于空中交通管理是 (Air traffic management, ATM) 一个新的方向, 是实现 ATM 自动化、智能化的迫切需求。在国外 Agent 在 ATM 中的研究与应用已经取得了一定的成绩, 早在 2001 年澳大利亚的空管研究者就已经成功将 Agent 应用在悉尼的空中交通管制系统中。近年来, 针对具体 Agent 应用于实际 ATM 方面的理论改进^{[2],[3]}和单个独立的 Agent 模型改进^{[4],[5]}方面已成为现在的热点。在国内, 关于 Agent 在空管领域的应用研究主要在南京航空航天大学和中国民航大学开展, 并在多 Agent 多级战略流量管理模型中的应用研究以及终端区协同管理问题^{[6]-[8]}等方面取得进展。但是, 对于完整的多机场终端区的航班运行仿真, 这仍是个新的课题。本文将

多 Agent 系统的理论与方法引入到传统的容量评估仿真系统中, 研究多机场终端区的空中交通运行方式, 构建完整的基于多 Agent 的终端区智能仿真运行系统, 设计航班 Agent、管制员 Agent、机场管制区 Agent 和流量管理 Agent 等智能体的结构模型, 给出了彼此之间的协作关系, 为今后终端区的智能化运行提供了技术支持和理论基础。

1 多机场终端区空中交通仿真系统体系结构

多机场终端区由于机场数量和航班数量的增多, 航班和管制员间的交互变得更加复杂, 不同管制扇区和机场由于信息交互不畅造成了更加严重的航班冲突。为了解决这一问题, 本文引入了 Agent 协作技术, 以实现整个系统的实时通信、辅助决策与航班的自主飞行。根据 Agent 的特性和终端区空中交通的结构和运行特点, 本文研究并提出了基于多 Agent 多机场终端区空中交通仿真系统的体系结构 (如图 1 所示), 系统由以下各类 Agent 组成。

1.1 管制员 Agent (Controller agent: CA)

管制员智能 Agent 是航班正常运行过程中的关键部分, 肩负着航班仿真安全飞行的重责。其主要功能及其属性如下:

1) 通过通信服务 Agent 与航班 Agent、机场管制区 Agent 和流量管理 Agent 进行交互作用, 接收来自数据管理 Agent 的自身相关信息, 并将航班指令信息通过通信服务 Agent 发送给相应航班 Agent;

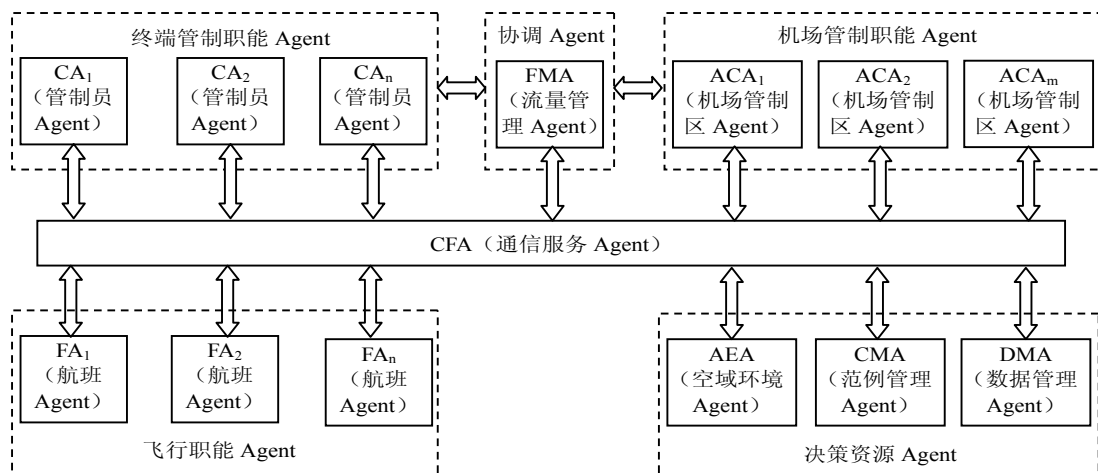


图 1 多机场终端区空中交通智能仿真系统体系结构

Fig. 1 Air traffic intelligent simulation system's architecture of the airport with multi-terminal areas

2) 对管制空域内所有航班进行冲突探测。根据航班 Agent 执行的飞行任务及各个航班间的相对位置等执行冲突解脱算法, 结合范例管理 Agent 给出冲突解决方案, 调整相关航班的下一步飞行动作。

1.2 航班 Agent (Flight agent: FA)

航班 Agent 在没有管制员的管制下能够依据导航设备及飞行任务进行自主飞行。自主飞行程序包括航线飞行、定点等待和航迹引导飞行。航班在没有接收到任何流控信息时将根据读入的航班信息进行自主飞行。其具有的功能属性如下:

1) 仿真系统运行初始化。通过信息服务 Agent 从数据管理 Agent 中读取航班信息 (包含航班的飞行任务、起降机场、预计起飞、预计离场时间、机型、航班性能数据、航班航线及航班飞行速度等)。

2) 在每个航班 Agent 的系统周期内向数据管理 Agent 更新发送航班 Agent 各自所处航班的飞行轨迹信息 (位置和高度)。

3) 与通信服务 Agent 进行交互作用。根据管制员智能 Agent 和流量管理智能 Agent 的指令信息及时调整自身的飞行状态, 按指令飞行。

1.3 机场管制区 Agent (Airport control area agent: ACA)

扩大终端区包含多个机场, 在构建仿真系统时为

每个机场构建一个机场管制区智能 Agent, 负责本机场区域内的航班队列安排, 并对进离场航班空域使用进行优化分配。机场管制区智能 Agent 的功能属性如下:

1) 与通信服务 Agent 进行交互作用, 接收来自数据管理 Agent 的自身相关信息, 并及时指令信息发送给所需的管制员 Agent;

2) 判断本管制区域内的场面航班间的冲突, 并调配解决, 以保障航班 Agent 的顺利下落;

3) 根据管制规定接收和放飞航班, 结合流量管理 Agent 的信息, 在满足安全间隔空域安全的情况下优化调配航班的进离场队列;

4) 保留下层接口, 为将来构建空地一体联合仿真提供可能。

1.4 终端区流量管理 Agent (Terminal area flow management agent: FMA)

流量管理 Agent 主要是负责监控各个扇区的即时流量信息, 并发布流控信息。其主要功能和属性如下:

1) 与通信服务 Agent 进行交互作用, 接收来自数据管理 Agent 的自身相关的需求反馈信息, 并及时地将改动信息发送给相应的管制员 Agent;

2) 更新信息状态, 掌握各个扇区内即时航班信息及流量信息, 根据扇区管制员工作负荷和扇区容量限制及管制区间的管制移交规定等, 判断各个扇区即

时流量是否饱和,做出战术流量管理策略,指导管制员 Agent 的管制行为;

3) 保留上层接口,为以后实现全国的多级流量管理策略提高基础。

1.5 终端区空域环境 Agent (Terminal area airspace environment agent: AEA)

空域环境智能 Agent 包含空域内重要的基本信息,包括进离场航线、机场、扇区、导航监视以及随机天气、盛行风等初始化信息。其主要的功能属性如下:

1) 空域仿真系统运行初始化,通过通信服务 Agent 从数据管理 Agent 中读入初始的静态信息;

2) 通过通信服务 Agent 与航班 Agent 进行交互作用,接收来自航班 Agent 的相关信息(航班位置信息等),并及时地将改动信息发送给数据管理 Agent;

3) 接收扰动,在系统运行时实时地对初始化信息做出更改。如,在仿真时可以通过临时更改航路信息、导航台性能,机场的某部分跑道开放或关闭以及加入随机天气模型等来动态的影响空域的状态;

4) 将空域、导航台、航路、航班位置等信息视图仿真显示。

1.6 数据管理 Agent (Data management agent: DMA)

数据管理 Agent 主要是利用 Oracle 等大型数据库管理工具建立的为空中交通仿真系统服务的数据库。其主要包括以下几个部分:

1) 智能 Agent 的知识规则数据库,包含管制规则、间隔标准等数据;

2) 空域环境数据库,主要包括航路(线)、扇区、机场、气象和导航台等;

3) 航班数据库,包括起飞、目的机场、飞行任务、航班航线、机型等;

4) 航班性能数据库,包含各类机型的数据性能;

5) 运行结果数据库,主要包括了仿真的结构和结果分析等数据。

1.7 范例管理 Agent (Case management agent: CMA)

范例管理 Agent 是为了在航班运行过程中发生危险情况后,在最短的时间内给管制员 Agent 提供一

个解决危险的参考方案。系统采用了范例推理技术,把当前面临的危险事件作为目标范例,把记忆以前的成功的方案作为范例源,基于范例推理就是由目标范例的提示获得记忆中的源范例,并由源范例来指导目标范例求解。

基于范例推理中的知识表示以范例(Case)为基础,范例的获取比规则的获取相对容易,可以大大简化知识获取的过程。对过去的求解结果进行复用,而不是再次从头推导,可以提高新问题的求解效率和速度,从而可以在紧急情况下先给管制员 Agent 提供一个参考方案,缓解管制员的压力,避免慌乱和盲目操作导致更大的损失。

范例管理 Agent 负责系统范例库的维护和管理工作,接收管制员 Agent 的查询指令,从系统范例库中找到相应的范例,并可以删除和添加范例。当空域结构发生变化时,原有的范例不能继续成立时,可以通过范例管理 Agent 删除。当有管制员认为有很好的参考价值的新的快速管制方案时,可以通过范例管理 Agent 添加到系统范例库中。

1.8 通信服务 Agent (Communication facilitator agent: CFA)

通信服务 Agent 负责处理有关 Agent 通信的信息,其他各个 Agent 只需要保存通信服务 Agent 的地址。每个 Agent 在启动时将自己有关的信息向通信服务 Agent 登记,并在退出时删除自己的信息。在需要其他 Agent 的通信时向通信服务 Agent 询问。各个 Agent 之间的通信都是通过通信服务 Agent 进行,而不必知道其他 Agent 的具体物理地址,因而有利于系统的灵活组织和扩展。

2 系统中核心 Agent 的结构和功能设计

本文将针对航班 Agent、管制员 Agent、机场管制区 Agent 和终端区流量管理 Agent 等核心智能体的内部结构和主要行为能力进行详细的介绍。由于系统内部的协调管理主要发生在终端区流量管理 Agent

和个机场管制区 Agent 之间,所以,本节在第三部分将两种 Agent 结合在一起,重点介绍其结构模型和交互方式。

2.1 航班 Agent (FA) 模型设计

根据 Agent 理论,在本系统中,航班 Agent 是一种智能 Agent,具有复杂的决策判断力,拥有自己的

知识。能够根据自身和相邻航班的运行状况,通过接收管制员 Agent 的管制指令,调整自身的飞行状态,迅速解决飞行冲突,并且能够在没有管制员管制的情况下,依赖导航设备自主飞行。如图 2 所示,航班 Agent 结构具有反应 Agent 和慎思 Agent 两种结构特点。

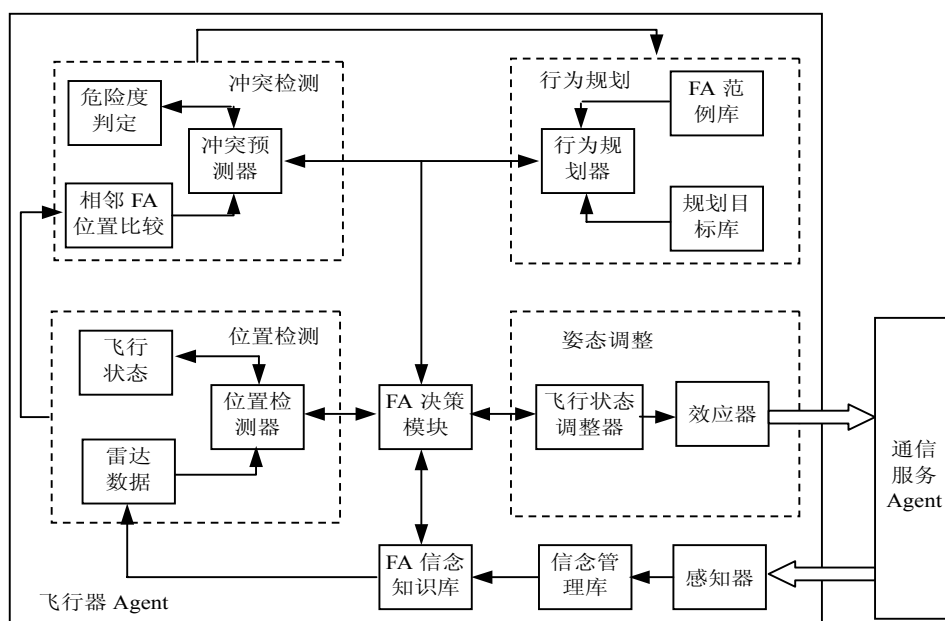


图 2 航班 Agent 的体系模型结构

Fig. 2 Architecture of the flight agent model

2.1.1 航班 Agent 的信念知识库

航班 Agent 信念知识库是航班 Agent 关于自身的一种信念,包括自身的飞行状态信息、所处空域状态信息和相关物理参数。如:机型、速度、航路信息和气象条件等,以及航线上的飞行规则。同时还包括相邻航班 Agent 的 ID 和所属管制员 Agent 的 ID,便于随时获取相关的运行状态信息和管制指令。

2.1.2 航班 Agent 的行为能力

航班 Agent 作为智能仿真系统的核心 Agent,主要具有以下几种行为能力:

- 1) 位置检测与校正;
- 2) 姿态调整;
- 3) 航路自主飞行;
- 4) 冲突检测与解脱;

5) 多 Agent 实时通信。

2.1.3 航班 Agent 的智能化运行流程

航班 Agent 在从初始化开始生成后到到达指定点后消亡之间的运行过程中,不断地通过交互获取管制员 Agent 的管制信息和所处的航路状态信息,动态地调整自身的飞行状态,并沿着预设航路自主飞行。其智能化飞行流程如图 3 所示。

2.2 管制员 Agent (CA) 模型设计

管制员 Agent 是整个智能仿真系统中的核心部分,负责协调与管理其管制扇区内所有航班 Agent 的飞行状态,同时接受流量管制 Agent 和机场管制区 Agent 的指令与信息,并结合自身的管制经验和已有的管制规则实施管制,以保障所有航班 Agent 在整个多机场终端区内自主、安全、合理、高效的运行。创

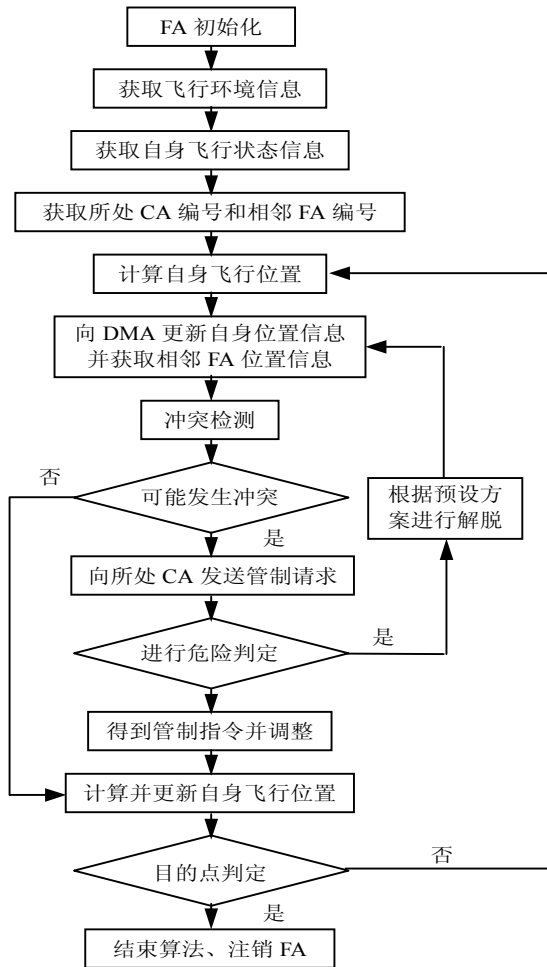


图 3 航班 Agent 的算法流程

Fig.3 Algorithm flow of the flight agent

建一组科学而智能化的管制员 Agent 是建设智能化仿真系统的关键。此外，通过分析现实中管制员的管制过程，可知管制员 Agent 应在正常管制职能之外具有处理紧急情况的能力，并能够通过具体问题进行的分析和学习，或跟其他管制员 Agent 进行交流，不断丰富自身知识经验，以提高自身的管制能力。所以，管制员 Agent 还应具有自主学习功能，其结构如图 4 所示。

2.2.1 管制员 Agent 的信念知识库

管制员 Agent 的信念知识库主要是管制员对自身管制区内的扇区特征和自身的管制能力的一种信念。它包括扇区内的航路情况和气象条件，以及各航路上的航班 Agent 的状态信息；而管制能力主要是指管制员 Agent 在已知本扇区的特征和流量状态时，所具有的对不同航班的实际管制架数；此外还有预设好的管制规则，如飞行间隔标准、移交准则等。本文把冲突解脱的方案和范例也看作管制规则来获取。

2.2.2 管制员 Agent 的行为能力

结合实际管制经验知道管制员 Agent 的主要行为能力有以下几个方面：

- 1) 冲突检测；
- 2) 冲突解脱；
- 3) 指令发布；
- 4) 紧急事件处理；

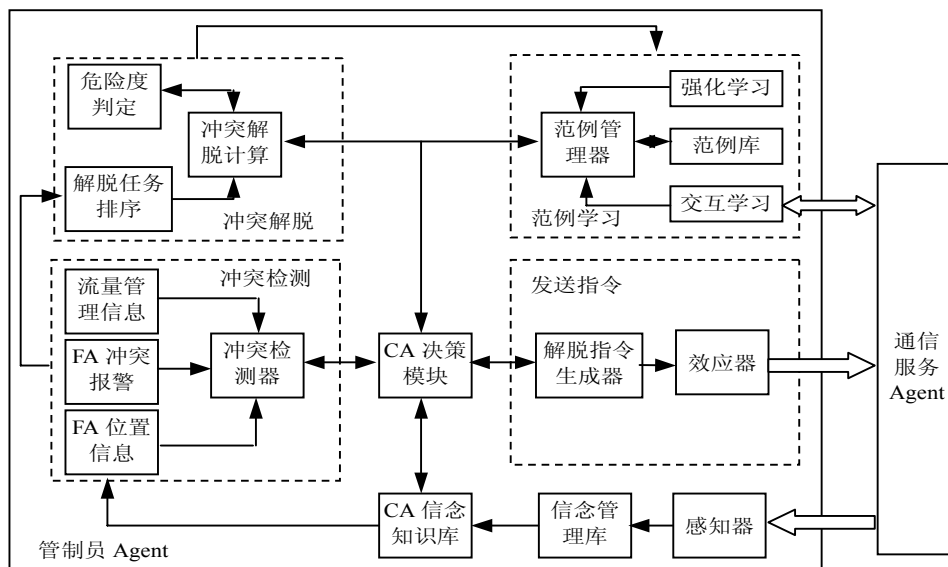


图 4 管制员 Agent 的体系结构模型

Fig.4 Architecture model of the controller agent

- 5) 信息交互;
- 6) 范例学习。

2.2.3 管制员 Agent 的智能化运行流程

管制员 Agent 从系统启动后开始初始化,到系统结束前将不断进行智能化管制控制,不断接收航班 Agent 的冲突解脱请求和其他相关各种信息,进行冲突解脱计算,将所得的解脱管制指令通过通信服务 Agent 发送给相应的航班 Agent。其智能化管制流程如图 5 所示,其中核心的按照危险程度划分的冲突解脱算法如图 6 所示。

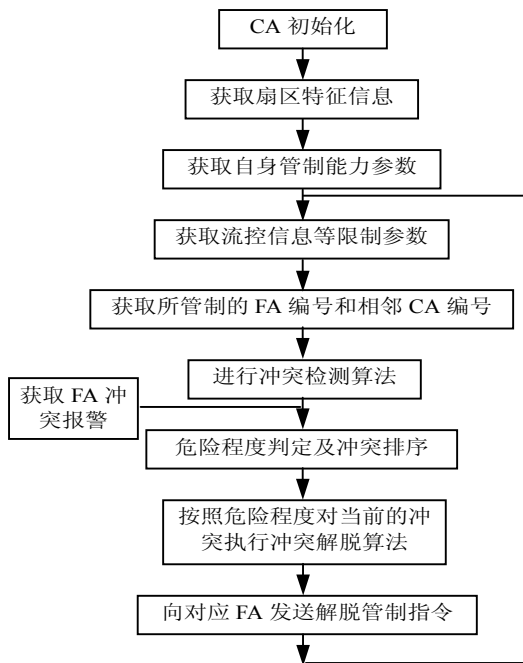


图 5 管制员 Agent 的主算法流程

Fig. 5 Main-algorithm flow of the controller agent

2.3 机场管制区 Agent(PA)和流量管理 Agent(FMA)模型设计

考虑到多机场终端区的特性,本文在多 Agent 智能化仿真系统中设计了多个机场管制区 Agent,每个机场管制区 Agent 负责各自的航班起降,是航班 Agent 的生成点和消亡点。机场管制区 Agent 可根据自身的起降容量和整个终端区的流量管制信息,相互间协调、控制各自航班的起降时间,得以做到合理的航班运行和空域资源的最大化利用。每个机场管制区 Agent 通过收集所处管制区内的航班流量信息,再结

合自身现有的运行条件,利用智能预测方法,预测本机场下一时间段的流量信息,然后将该信息传递给流量管理 Agent,由流量管理 Agent 进行分析处理,得到具体的流控信息,并将这些信息发送到相应的管制员手中,为实现整个多机场终端区的智能化管制提供依据。

在这一过程中,流量管理 Agent 负责接收和分析下级各机场管制区 Agent 所发送的流量信息,并将处理结果转化为流控指令发送到相应的管制员 Agent 手中。同时,作为本系统中最主要的协作管理 Agent 和在将来的三级流量管理系统中的基层的流量管理部门,流量管理 Agent 应保留有与其他空域的流量管理 Agent 和上层流量管理中心 Agent 交互的通信接口,以为今后实现全国流量管理智能化系统提供可能。

机场管制区 Agent 与流量管理 Agent 间的交互关系如图 7 所示。

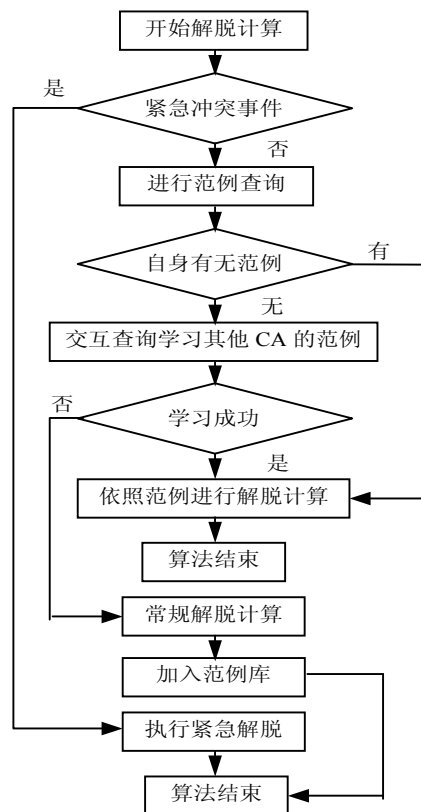


图 6 按照危险程度划分的冲突解脱算法流程

Fig. 6 Conflict-free algorithm flow divided by risk degrees

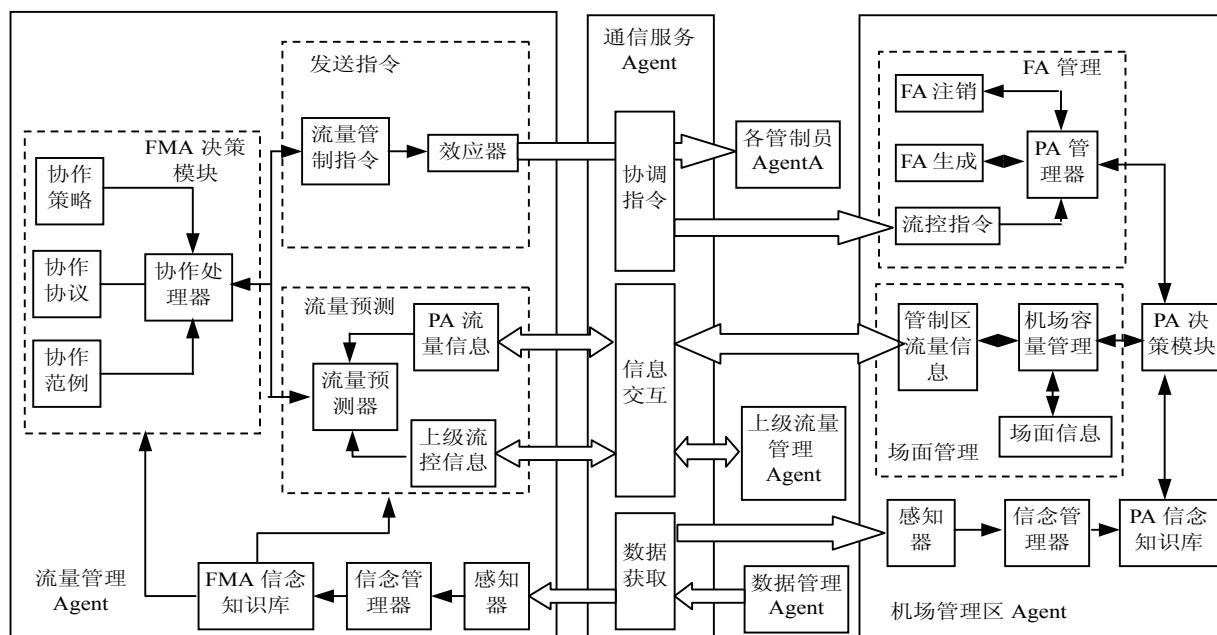


图 7 机场管制区 Agent 与流量管理 Agent 交互体系结构模型

Fig. 7 Architecture of the interaction model between PAs and FA

2.3.1 机场管制区 Agent 和流量管理 Agent 的信念知识库

机场管制区 Agent 的信念主要是指其对自身管制区内空域环境、最大进离港容量等管制能力以及当前管制区内的流量状况的有关信念。而流量管理 Agent 的信念主要包括本管制区域内目前已有的流量状况和预测未来一段时期的流量状况的信息，以及为了达到一体化协同运行所获得的流控要求。

2.3.2 机场管制区 Agent 和流量管理 Agent 的行为能力

机场管制区 Agent 的行为能力主要有：

- 1) 生成 FA；
- 2) 注销 FA；
- 3) 信息交互；
- 4) 场面管理。

流量管理 Agent 的行为能力主要有：

- 1) 信息交互；
- 2) 流量预测；
- 3) 协调处理；
- 4) 发送指令。

2.3.3 机场管制区 Agent 和流量管理 Agent 的智能化运行流程

在系统的协同运行中，流量管理 Agent 起到了协调和控制整个系统内管制员 Agent 和机场管制区 Agent 共同完成管制任务的作用，其通过不断获取机场管制区的流量信息（以及上级流量管理发布的流控信息），分析和处理可能发生的流量拥堵，并将解决方案转化成流控指令下达达到相应的管制员 Agent 或机场管制区 Agent 中，以指导和协调自身管制区内的航班运行情况，达到整个多机场终端区的协同运行。流量管理 Agent 和机场管制区 Agent 的协同运行流程如图 8 所示。

3 结束语

本文采用分布式人工智能的技术方法，探讨了我国多机场终端区航班飞行管制的协同工作模式。论文针对多机场终端区的特殊性和复杂性，简要阐述了空中交通智能仿真系统研究的重要意义，构架了完整的多机场终端区空中交通智能运行仿真系统，并研究了

各个智能 Agent 之间的具体结构模型和协作关系，为复现多机场终端区实际运行状况、建立准确的空中

交通智能仿真系统奠定了理论基础，具有重要的实际意义。

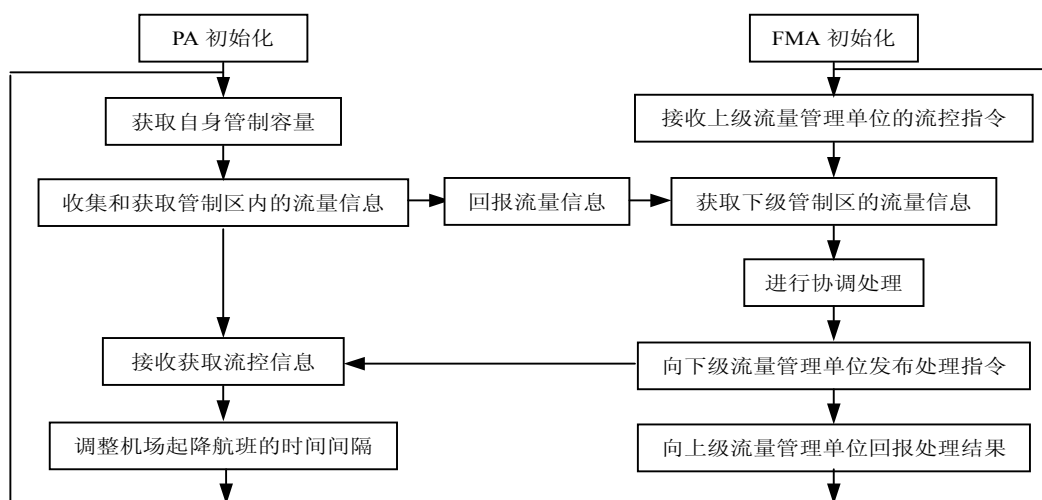


图 8 流量管理 Agent 和机场管制区 Agent 的协同运行算法流程

Fig. 8 Algorithm flow of the cooperative operation between PA and FA

参考文献

[1] 胡明华, 谢兰生, 韩松臣. 空中交通流量管理系统方案初探[J]. 现代电子工程, 2000, (2).

[2] Hoc J. M., Carlier X. Role of a common frame of reference in cognitive cooperation: Sharing tasks between agents in air traffic control [J]. Cognition, Technology & Work, 2002, 4: 37-47.

[3] Pacaux-Lemoine M. P., and Debernard S. Common work space for human-machine cooperation in air traffic control [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10: 571-576.

[4] Callantine Todd J. Air traffic controller agents[C]. Proceedings of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Melbourne, Australia, 2003: 14-18.

[5] Hexmoor Henry and Heng Tim. Air traffic control and alert agent [C]. Proceedings of the Second International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Melbourne, Australia, 2003: 952 - 953.

[6] 黎新华, 张兆宁. 基于 Agent 的空中交通流量管理系统研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5 (1): 56-61.

[7] 王 飞, 徐肖豪, 张 静. 基于 Multi-Agent 的空中交通协同流量管理[J]. 广西师范大学学报, 2008, 3 (26): 125-128.

[8] 张洪海, 胡明华, 陈世林. 基于 Agents 的终端区流量协同管理研究[C]. 第七届全国交通运输领域青年学术会议论文集. 北京: 中国民航出版社, 2007: 528-532.

(中文编辑: 吴继屏)