

文章编号:1671-1637(2013)06-0090-09

基于多 Agent 技术的飞机协同飞行建模与仿真

叶博嘉^{1,2}, 胡明华^{1,2}, 田 勇^{1,3}

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 国家空管飞行流量管理技术重点实验室, 江苏 南京 210016; 3. 乔治梅森大学 空中交通运输系统研究中心, 弗吉尼亚 费尔法克斯 22030)

摘要:应用多 Agent 建模与仿真技术,研究了飞机 Agent 在空中走廊中的飞行风险。根据空中走廊内飞机 Agent 的飞行目标、主要功能和内部结构,分析了飞机 Agent 的推理规则和协同状态,提出了协同飞行的交互结构,利用混合式仿真方法进行仿真试验。仿真结果表明:当大型飞机的最大、最小巡航速度分别为 $880, 620 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 中型飞机的最大、最小巡航速度分别为 $790, 525 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 且 2 种机型加速度的最大值、最小值均分别为 $0.608, -0.780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,空中走廊中飞机的飞行状态可以划分为 4 种典型工况;第 1 种工况下,飞机的速度始终为 $745.17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 总飞行时间为 708 s ;第 2 种工况下,飞机根据前方飞机调整自身飞行速度,飞机初始速度为 $658 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 最大速度为 $778 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 总飞行时间为 648 s ;第 3 种工况下,飞机为避免飞行冲突变更空中走廊中的飞行线路,总飞行时间为 744 s ;第 4 种工况下,飞机因安全问题脱离空中走廊,总飞行时间为 66 s 。提出的模型可满足实际要求。

关键词:航空运输;协同飞行;建模与仿真;多 Agent 技术;空中走廊

中图分类号: V355.2

文献标志码: A

Modeling and simulation of collaborative flight based on multi-agent technique

YE Bo-jia^{1,2}, HU Ming-hua^{1,2}, TIAN Yong^{1,3}

(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. National Key Laboratory of Air Traffic Flow Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Center for Air Transportation Systems Research, George Mason University, Fairfax 22030, Virginia, USA)

Abstract: The flight risk of aircraft agent flying in air corridor was studied by using multi-agent modeling and simulation technique. According to the flight aim, main function and interior structure of aircraft agent in air corridor, the inference rule and collaborative state were analyzed, the interactive structure of collaborative flight was put out, and simulation experiment was carried out by using hybrid simulation method. Simulation result shows that when the maximum and minimum cruising speeds of large-sized aircraft are $880, 620 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively, the maximum and minimum cruising speeds of medium-sized aircraft are $790, 525 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively, and the maximum and minimum accelerations of the two aircrafts are 0.608 and $-0.780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, the aircraft flight state in air corridor can be divided into four typical conditions. Under condition 1, aircraft speed is always $745.17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, and the total flight time is 708 s . Under condition 2, aircraft adjusts its

收稿日期:2013-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(61104159)

作者简介:叶博嘉(1983-),男,江苏南京人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中交通管理研究。

导师简介:胡明华(1962-),男,湖南益阳人,南京航空航天大学教授。

speed according to the leading aircraft, the initial and maximum speeds are $658, 778 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, and the total flight time is 648 s. Under condition 3, aircraft changes its flight line in air corridor in order to avoid flight conflict, and the total flight time is 744 s. Under condition 4, aircraft breaks away from air corridor for safety problem, and the total flight time is 66 s. The proposed model can meet the actual requirement. 1 tab, 19 figs, 24 refs.

Key words: air transportation; collaborative flight; modeling and simulation; mulit-agent technique; air corridor

Author resumes: YE Bo-jia (1983-), male, doctoral student, +86-25-52112039, yebojia2010@gmail.com; HU Ming-hua (1962-), male, professor, +86-25-84896650, minghuahu@263.net.

0 引言

空中走廊由美国联邦航空局(FAA)在下一代空中交通系统运行概念中正式提出^[1],是一种近似管道型的新型空域结构。飞机在空中走廊中需沿着相同方向飞行,自身负责安全飞行间隔的保障。设计良好的空中走廊可以降低空域复杂性,提高空域容量,降低管制员工作负荷^[2-4]。现有的空中交通管制服务主要由管制员根据雷达屏幕识别飞机的位置、类型和号码,通过发送指令调整飞机的安全间隔。当航路发生拥挤时,管制员需要依靠同步语音技术与受影响飞机的飞行员进行一对一沟通,非常耗时、低效,同时也为管制员工作增加了额外沉重的负担。在空中走廊中,飞机安装了先进的空地数据链通信工具、广播式自动相关监视(ADS-B)设备和机载显示系统等,可根据实时采集到的动态广播信息,自动调整与前方飞机的间隔,避免冲突发生,在保障安全的同时提高航路运行效率。现阶段关于空中走廊的研究,主要集中在完善其运行概念和拓扑结构^[5-7],关于飞机在空中走廊内协同飞行方面的研究较少。

Hexmoor 等设计了塔台管制员辅助决策 Agent 系统,协助航班的降落和冲突避让,管制员 Agent 负责提出建议措施并发出相关指令^[8]; Nitschke 通过定义航路、进近和塔台管制员 Agent 的相互协作,实现冲突探测与解脱,保障航班预计飞行时间^[9]; Callantine 建立了基于机组行为追踪系统的管制员 Agent 系统,研究了如何实现复杂系统中的自动化管制,并评估了新型空中交通管理运行体系^[10]; Nguyen 等探索了管制员与飞机的多 Agent 协商技术在空中交通管制中的应用前景,建立了重新分配管制员职责和工作负荷的框架^[11]; Hill 等研究了自由飞行概念下的分布式空中交通控制系统,由飞机 Agent 通过满意决策理论自行解决空中交通探测与冲突问题^[12]; Agogino 等将定位点 Agent

与管制员的决策机制相结合,提出了 Agent 运行反馈系统,提高了整体运行效率^[13]; 张洪海对机场终端区的协同流量管理进行了系统研究,提出了终端区协同流量管理的控制结构^[14]; 黎新华等构建了空中交通流量管理系统的框架,阐述了系统工作方式与各 Agent 分系统的结构^[15-16]; 戴玲等研究了多 Agent 技术在飞行冲突解脱中的应用,通过对空域资源进行建模,提出了冲突解脱算法,探讨了航路资源的分配^[17]; 王超等提出了基于多 Agent 的空中交通流量管理三级结构,并描述了多 Agent 的内部结构^[18-20]。

本文在上述研究成果的基础上,介绍了空中交通走廊的主要特征,分析了飞机 Agent 在空中走廊内的飞行目标,并提出协同飞行交互体系结构;定义飞机 Agent 在空中走廊中的协调推理规则,建立相关状态转换方程;分析飞机 Agent 在空中走廊中运行时,飞机速度、加速度与飞行间隔和状态间的相互关系。

1 空中走廊

空中走廊为细长管道型航路,飞机可沿相同方向或相同航迹快速通过空中走廊中的平行航路,不在空中走廊中飞行的飞机不能从中穿过。在空中走廊中,空中交通管制单位不需要向飞机提供进入许可和管制服务。与当前的空中航路相比,空中走廊主要有以下 4 个明显特性:可容纳多条平行交通流;可采用先进 CNS 技术改变飞机间隔管理方式,减少飞机间隔标准;可在当天任何时间动态激活或取消空中走廊;可设置在任何高度层,特别是高空空域。

2010 年,美国工程师 Yousefi 等首次对空中走廊的物理结构进行了设计,以基于区域导航的平行航路为基础,提出了可在高空巡航的多层空中走廊^[21-22]。2 条航路的空中走廊单层宽度为 30 km,航路两侧保护区为 7.5 km,航路中心间隔为 15 km。飞机进入空中走廊后,自动管理与前方飞机的间隔,在需要退出

空中走廊时,沿 30° 向外侧切出航路,空中走廊平面结构见图 1。

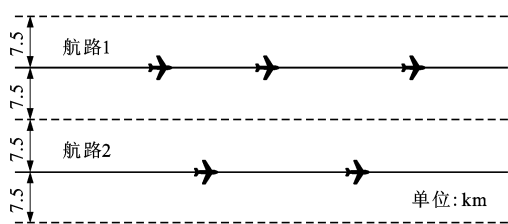


图 1 空中走廊结构

Fig. 1 Air corridor structure

中国尚未提出空中走廊的相关概念,但随着航空运输规模不断的扩大,如何在保障安全运行的同时提升空域容量,减少管制员工作负荷已成为民航业发展的重要目标。提前对空中走廊的运行进行分析和研究,可紧跟航空发达国家的发展动态^[23],为中国空域改革与发展提供宝贵意见。

2 飞机 Agent 模型

基于多 Agent 的飞机协同飞行的核心是建立具有自主性、社会性、主动性等特性的灵活实体,建立完善的协同机制,通过飞机 Agent 间智能化的合作以实现飞机自适应间隔管理,有效分析飞机在空中走廊内的运行状态。

2.1 飞机 Agent 飞行目标

飞机 Agent 在空中交通走廊中的飞行目标,包括采用 ADS-B 技术接受相邻飞机的广播信息,实现对周边空域交通态势的感知;以前方飞机为主要关注目标,通过接受到的状态参数,自动调整与前方飞机的间隔,在保障安全飞行的同时,迅速通过目标空域。

2.2 飞机 Agent 主要功能

设计飞机 Agent 的主要功能,主要包括通信交互、态势显示、运动建模和协调推理 4 部分。

2.2.1 通信交互功能

负责与空中走廊中的飞机 Agent 进行实时、动态的信息交换与共享。通信交互的信息包括飞机的飞行状态数据和协同状态数据 2 类。

2.2.2 态势显示功能

负责显示负责融合实时、动态的 ADS-B 数据、雷达数据等,通过驾驶室内先进的交通信息显示器监视周围的飞机飞行态势,并记录相关飞机的详细运行数据,用于分析推理。

2.2.3 运动建模功能

负责对飞机特征、交通流特征进行研究,提取飞

机及交通流特征参数,建立飞机动力学模型;对空中交通走廊结构特征进行分析,提取结构参数和飞行参数,建立飞机协同飞行环境。

2.2.4 协调推理功能

负责建立具体的协同状态调整方法,以飞机在航路中自动调整间隔为目标,以本机建立的动力学飞行模型为基础,根据动态获得的交互信息,实时调整飞机在空中走廊中的速度与状态。

2.3 飞机 Agent 内部结构

飞机 Agent 的内部结构包括通信交互模块、态势显示模块、运动建模模块和协调推理模块,为飞机在空中走廊中运行提供硬件支撑,内部结构见图 2。

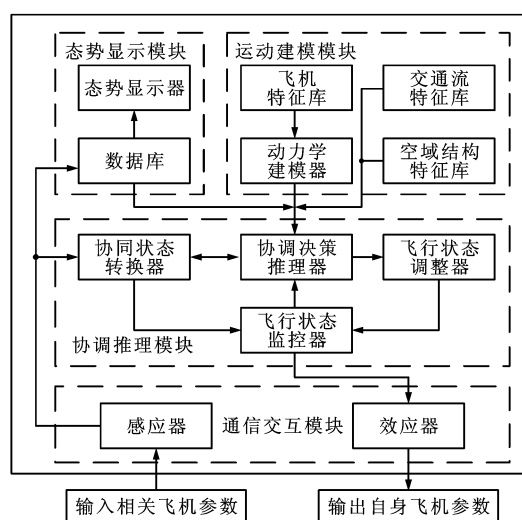


图 2 内部结构

Fig. 2 Interior structure

2.3.1 通信交互模块

包括感应器和效应器,感应器负责实时采集相关飞机的飞行信息,并存入态势显示模块的数据库中。效应器负责发布飞机的运行信息,包括速度、位置、实时运行状态等信息,数据交互采用广播式通信方式。

2.3.2 态势显示模块

包括态势显示器和数据库,态势显示器负责实时显示飞机周围的交通态势,为飞行员提供态势感知。数据库可为态势显示器提供运行数据支撑,为协调决策推理器提供历史数据支撑。

2.3.3 运动建模模块

包括飞机特征库、交通流特征库、空域结构特征库和动力学建模器。飞机结构特征库存储飞机的运行特征信息,交通流特征库存储交通流特征信息,空域结构特征库存储空域协同运行环境信息,动力学建模器根据飞机特征建立飞机运行控制模型,为协调推理提供模型数据支撑。

2.3.4 协调推理模块

包括协调决策推理器、运行状态调整器、协同状态转换器和运行状态监控器。协调决策推理器根据协同决策推理规则,推导飞机 Agent 应执行的动作;运行状态调整器负责执行协调决策推理器推导出的动作;运行状态监视器负责对调整效果进行监视,并发布运行状态信息;协同状态转换器根据协调决策推理规则转换飞机的协同状态。

2.4 交互体系结构

图3为飞机 Agent 在空中走廊协同飞行时的交互体系结构。通信交互模块通过广播式网络发布、采集动态信息,提供给态势显示模块和协调推理模块;态势显示模块动态整合、更新周边空域态势,为协调推理模块提供参考;协调推理模块根据运动建模信息和空域态势更新飞机 Agent 状态,并发布给广播式网络。

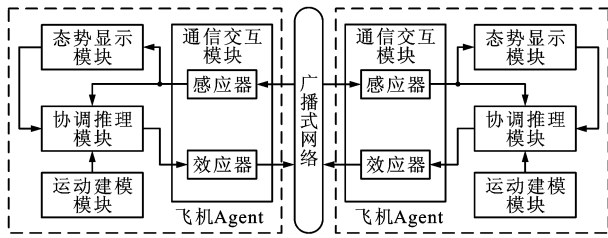


图3 交互结构

Fig.3 Interactive structure

3 推理规则与协同状态

根据建立的飞机 Agent 模型,提出飞机在空中走廊中的飞行规则,并建立相关状态转换方程,为研究飞机在空中走廊中的飞机状态提供支撑。

3.1 协调决策推理规则

(1)当飞机 Agent 前方没有其他飞机或与前方飞机的当前间隔大于距离阈值时,飞机 Agent 将进入目标速度状态。

(2)当飞机 Agent 与前方飞机当前间隔小于距离阈值但大于最小间隔时,如果其当前速度小于前方飞机的平均速度,则飞机 Agent 将进入速度调整状态。

(3)当飞机 Agent 与前方飞机间隔小于距离阈值但大于最小间隔时,如果飞机 Agent 的当前速度大于前方飞机的平均速度,且速度差大于速度阈值时,如果航路变更条件满足,飞机 Agent 进入航路变更状态,否则,飞机 Agent 进入速度调整状态。

(4)当飞机 Agent 与前方飞机当前间隔小于最小间隔,且满足航路变更条件时,飞机 Agent 进入航路

变更状态,否则,飞机 Agent 进入航路脱离状态。

(5)航路变更条件为假设飞机 Agent 沿固定角度变更航路,以当前线路与新航路交点为圆心、当前线路的长度为半径的该圆弧与新航路的交点为飞机的投影位置,如果该投影位置为其前方和后方的飞机的当前间隔大于变更间隔,则称飞机的航路变更条件满足,图4描述了各种间隔间的关系。

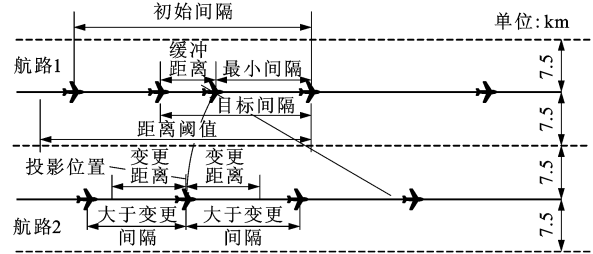


图4 不同间隔的关系

Fig.4 Relations among different spacing distances

推理算法流程见图5。首先,初始化相关环境参数,包括空中走廊结构和飞行标准等;初始化进入空中走廊的飞机队列,包括初始速度和初始间隔等。其次,判断飞机是否全部飞过空中走廊,如果“是”则流程结束;否则根据与前方飞机的间隔,选择目标速度飞行、速度调整、航路变更或航路脱离。最后,更新空中走廊中所有飞机状态信息、仿真时间,重新判断飞机是否全部飞过空中走廊。

协调推理规则中术语定义如下:飞机 Agent 的初始速度为飞机进入空中走廊时的初始巡航速度;初始间隔为飞机进入空中走廊时与前方飞机的纵向距离间隔;距离阈值为固定的距离间隔插值,用来为飞机动作调整提供决策参考;目标间隔为飞机巡航时所保持的最佳纵向间隔距离,具体值等于最小间隔加上缓冲间隔;当前间隔为飞机在当前时刻与前方飞机的纵向间隔距离;最小间隔为保证相邻飞机安全变更航路时的最小纵向间隔距离;变更距离为保证飞机安全变更航路时的最小纵向间隔距离;目标速度为飞机在当前时刻不受其他飞机影响时的最佳巡航速度;当前速度为飞机在当前高度层和当前时刻的速度;平均速度为取前几个时间段的平均速度,为后机动作调整提供参考;速度阈值为固定的速度差值,为相邻后机动作调整提供决策参考。

3.2 协同运行状态

定义飞机 Agent 模型在空中走廊中飞行的5种运行状态分别为目标速度状态、速度调整状态、航路变更状态、航路脱离状态和锁定状态。

3.2.1 目标速度状态

目标速度状态指飞机 Agent 不考虑前方飞机

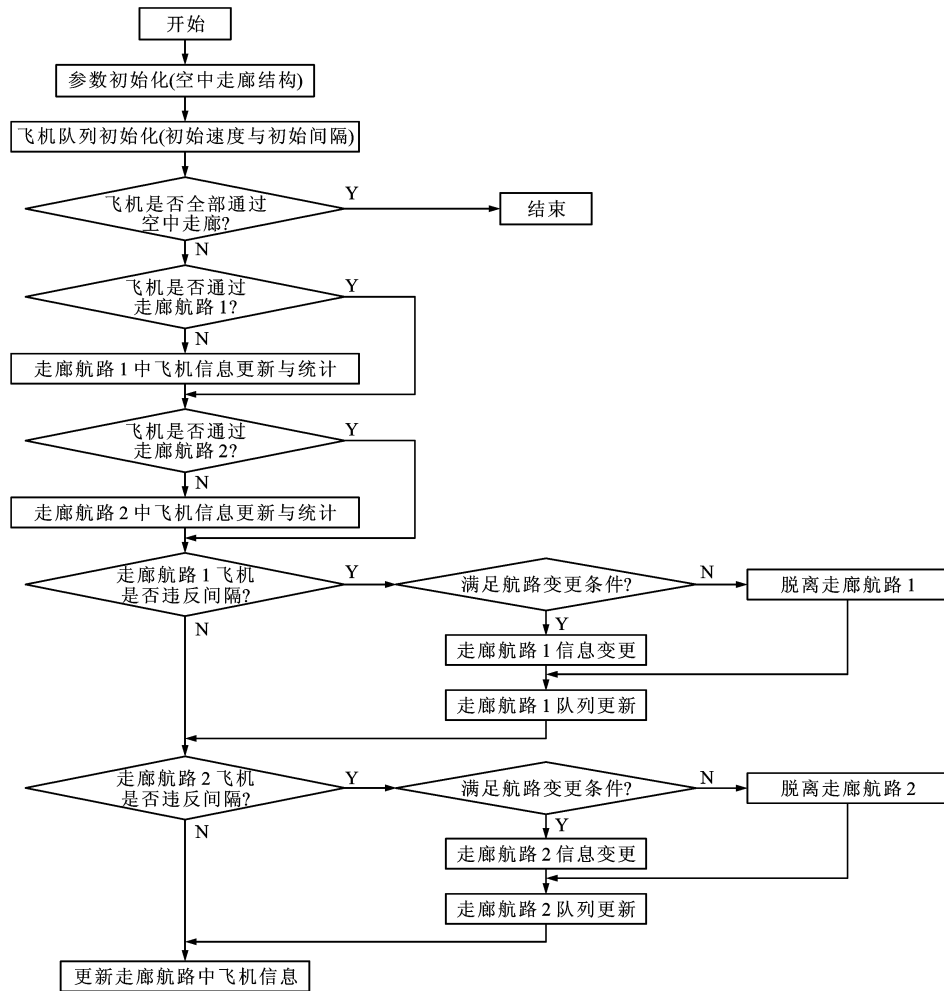


图5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flow

产生的影响,仅根据其目标速度在航路中飞行。令 T 为飞机的响应延迟时间,当飞机 Agent 为航路队列中最前端飞机或与前方飞机的当前间隔大于距离阈值时,即有

$$A_i(t) = C_1 \Delta V_{g,i}(t - T) \quad (1)$$

$$V_i(t + \Delta t) = V_i(t) + \Delta t A_i(t) \quad (2)$$

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t V_i(t) \quad (3)$$

式中: $A_i(t)$ 为飞机 i 在时刻 t 的加速度; $\Delta V_{g,i}(t - T)$ 为飞机 i 在时刻 t 与目标速度的差值,正值为飞机目标速度大于当前速度,飞机需要加速到达目标速度; C_1 为与速度差值相关的参数,用于控制加速度变化率; $V_i(t + \Delta t)$ 为飞机 i 在时刻 $t + \Delta t$ 的速度; Δt 为仿真时间步长; $V_i(t)$ 为飞机 i 在时刻 t 的速度; $X_i(t + \Delta t)$ 为飞机 i 在时刻 $t + \Delta t$ 的纵向位置; $X_i(t)$ 为飞机 i 在时刻 t 的纵向位置。

3.2.2 速度调整状态

速度调整状态指飞机 Agent 根据前方飞机的位置、速度调整自身的加速度、速度,以控制与前方

飞机的间隔,实现自动间隔管理

$$A_i(t) = C_1 \Delta V_i(t - T) + C_2 [S_i(t) - D] + \sigma N(\Delta t) \quad (4)$$

式中: $\Delta V_i(t - T)$ 为飞机 i 在时刻 t 与其前方飞机的速度差; $S_i(t)$ 为飞机 i 在时刻 t 与其前方飞机的间隔值; D 为飞机的目标间隔; $N(\Delta t)$ 为以 Δt 为均值,服从正态分布的随机误差; C_2 为与飞机间隔相关的参数; σ 为与随机误差相关的参数,与 C_1 共同用以控制加速度变化率。

3.2.3 航路变更状态

航路变更状态指飞机变更其航路以避免与前方飞机间隔过小或超越前方飞机。此时,飞机以固定倾斜角向相邻航路转弯,当飞机航向与原航路成 30° 时,飞机恢复直线运动直到接近目标航路,其后以反方向倾斜角进行转向,最终切入目标航路。在航路变更状态下,加速度始终保持为 0,飞机速度保持不变。

3.2.4 航路脱离状态

航路脱离状态指飞机为避免冲突,必须脱离其飞行航路。此时,飞机以固定倾斜角向航路外侧进行转弯,当飞机航向与原航路成 30° 时,飞机延直线飞行直到脱离航路。在航路脱离状态下,加速度始终保持为 0,飞机速度保持不变。

3.2.5 锁定状态

锁定状态指飞机 Agent 被锁定,从而影响自身与相关飞机向航路变更状态和航路脱离状态进行转变,飞机 Agent 锁定状态与其他状态以组合形式出现。在锁定状态下,加速度始终保持为 0,飞机速度保持不变。

4 计算结果分析

本文采用 C++ 编程语言构建基于多 Agent 的飞机协同飞行仿真环境,利用混合式仿真方法对飞机 Agent 的协同状况进行仿真研究^[24]。

假设有大型和中型 2 种不同类型的飞机 1 000 架,由左向右依次飞过长度为 148 km 的单层空中走廊。大型飞机的最大巡航速度为 $880 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最小巡航速度分别为 $620 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;中型飞机的最大巡航速度为 $790 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最小巡航速度为 $525 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。2 种机型加速度的最大值均为 $0.608 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最小值均为 $-0.780 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在空中走廊运行飞机的机型、速度和初始间隔都为随机变量,2 种机型随机产生,比例为 1:1。飞机的初始速度相互独立,大型飞机初始速度服从均值为 $740 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、标准差为 $37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的正态分布;中型飞机初始速度服从均值为 $648 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、标准差为 $37 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的正态分布。飞机由左侧入口进入空中走廊时,与前方飞机的间隔距离为随机变量,等于最小间隔加上随机缓冲间隔,随机缓冲间隔服从参数为 4 km 的指数分布。其他关键试验参数初始值见表 1。飞机状态取整数 1~5,分别代表目标速度状态、速度调整状态、航路变更状态、航路脱离状态和锁定状态。

图 6、7 为在航路中始终保持目标速度状态运行的飞机 Agent 运行样本(工况 1)。飞机在开始仿真时间时进入航路,始终保持 $745.17 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的巡航速度,在仿真时间 708 s 时飞离目标航路。该飞机是航路中首架飞机,间隔距离表示该飞机与航路出口的距离间隔,该距离由 148 km 呈线性递减趋势直至 0。

图 8~11 显示了在航路中以速度调整状态为主的飞机运行样本(工况 2)。飞机在仿真时间 714 s 时进入航路,保持速度调整状态直到仿真时间 1 362 s,

表 1 关键参数初始值

Tab. 1 Initial values of key parameters

变量	初始值
速度差参数/ h^{-1}	0.002
间隔差参数/ h^{-2}	0.06
随机误差/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-3})$	0.005
距离阈值/km	26
缓冲距离/km	4
最小间隔/km	10
变更距离/km	12
速度阈值/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	200

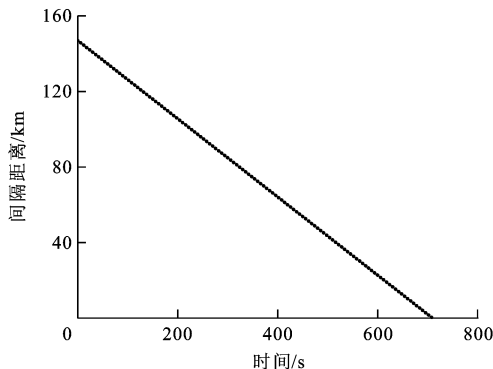


图 6 工况 1 下的间隔距离

Fig. 6 Spacing distance under condition 1

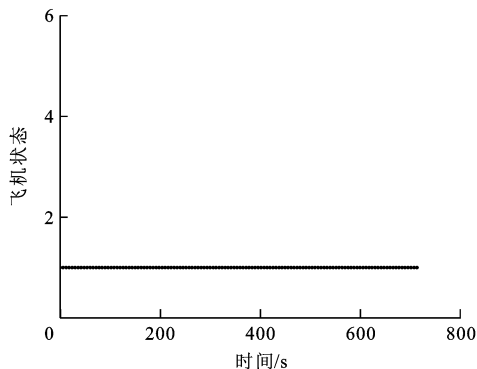


图 7 工况 1 下的协同状态

Fig. 7 Collaborative state under condition 1

在前方飞机飞离航路后,其状态转变为目标速度状态,直到仿真时间 1 428 s 时飞离航路。其中,加速的跳跃和间隔距离的剧减都是由于状态的改变而引起。当飞机状态由速度调整状态变为目标速度状态时,飞机运行方式改为按其目标速度飞行,而与前方飞机的距离间隔则转变为与航路出口的距离间隔。飞机初始速度为 $658 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最大速度达到 $778 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图 12~15 显示了在航路中进行航路变更的飞机运行样本(工况 3)。飞机在仿真时间 1 248 s 时

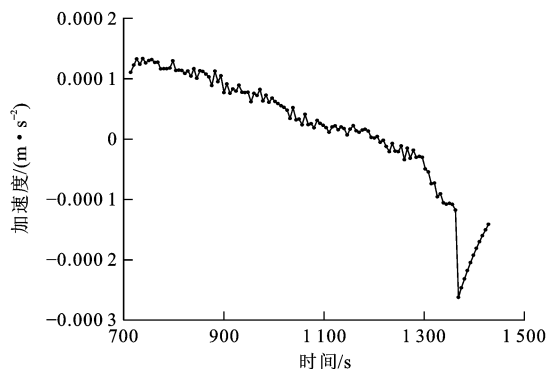


图 8 工况 2 下的飞机加速度

Fig. 8 Aircraft acceleration under condition 2

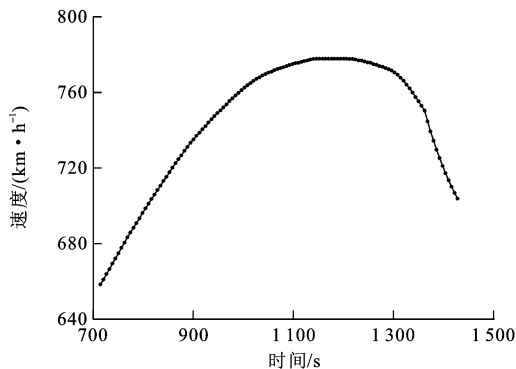


图 9 工况 2 下的飞机速度

Fig. 9 Aircraft speed under condition 2

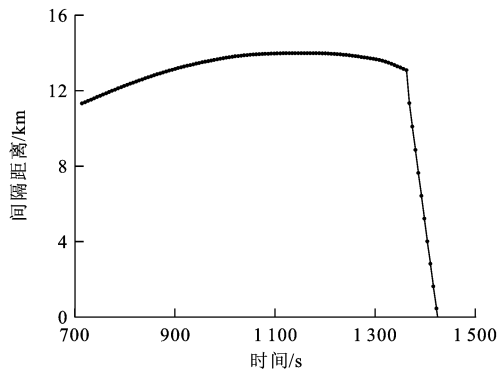


图 10 工况 2 下的间隔距离

Fig. 10 Spacing distance under condition 2

以速度调整状态进入航路,1 284 s 时开始变更航路,1 416 s 时航路变更完毕并恢复速度调整状态,1 944 s 时进入目标速度状态直到 1 992 s 飞出航路。其中,在航路变更阶段,飞机保持匀速飞行;而由于前方的飞机产生变化,其间隔距离产生跳跃。在航路变更结束后,该飞机重新转变为速度调整状态,直到前方飞机飞出航路。随后的运行特征与前例类似。

图 16~19 显示了在航路中进行航路脱离的飞机运行样本(工况 4)。该飞机在仿真时间 5 388 s

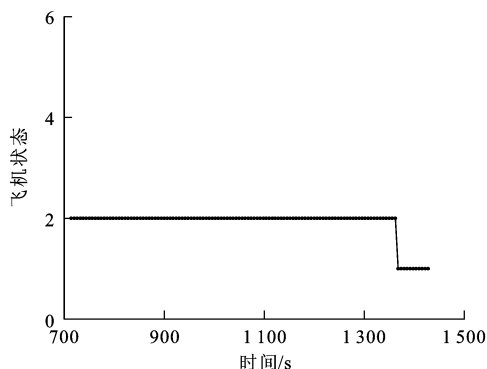


图 11 工况 2 下的协同状态

Fig. 11 Collaborative state under condition 2

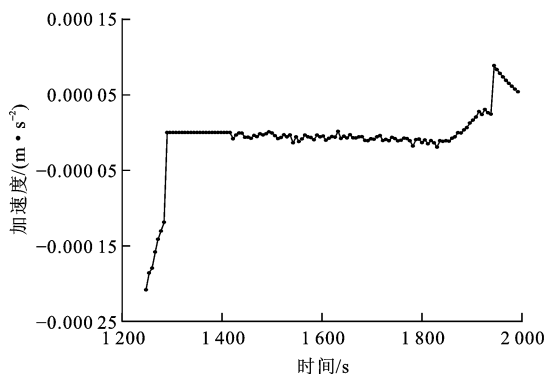


图 12 工况 3 下的飞机加速度

Fig. 12 Aircraft acceleration under condition 3

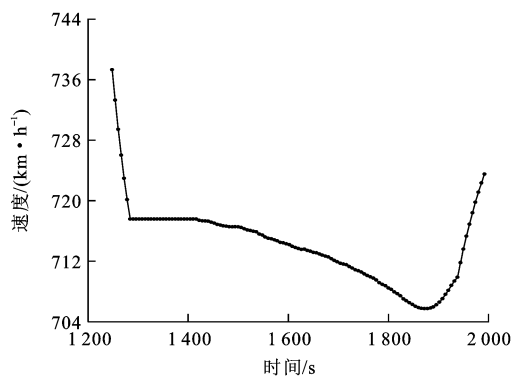


图 13 工况 3 下的飞机速度

Fig. 13 Aircraft speed under condition 3

时以速度调整状态进入航路,5 436 s 时进入航路脱离状态,在 5 502 s 时退出航路。其中,加速度跳跃是由于该飞机转变为航路脱离状态,以匀速运动退出航路引起。在飞机航路脱离过程中,间隔距离保持在其脱离前的距离值,用于统计分析。

5 结 语

本文首先分析了空中走廊的结构特征,提出飞机 Agent 在空中走廊中内的飞行目标、主要功能和内部结构,建立协同运行规则,提出多 Agent 飞机

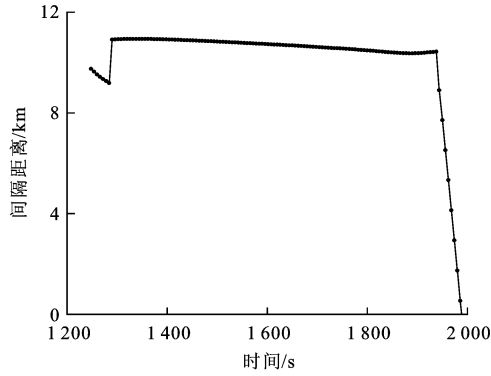


图 14 工况 3 下的间隔距离

Fig. 14 Spacing distance under condition 3

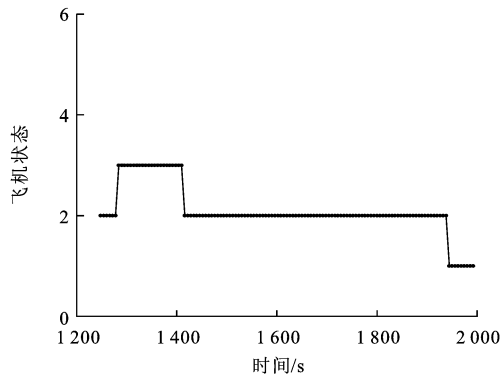


图 15 工况 3 下的协同状态

Fig. 15 Collaborative state under condition 3

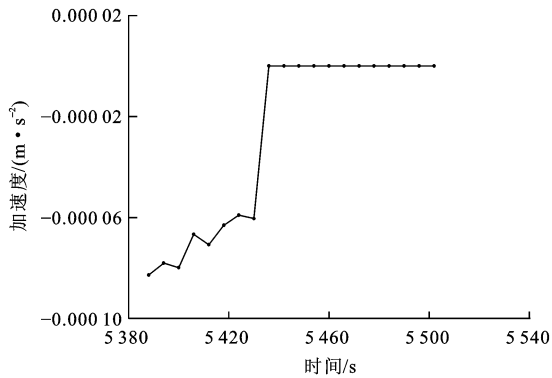


图 16 工况 4 下的飞机加速度

Fig. 16 Aircraft acceleration under condition 4

协同运行交互体系结构。利用混合式仿真方法对飞机 Agent 在空中走廊中的协同状况进行试验。在由传统的空中交通管制方式向未来自动间隔管理模式的变更过程中,先进的通信、监视和导航技术不能完全避免飞机间的飞行冲突;在目标飞机自动调整距离间隔的过程中,存在飞机间隔低于安全规定的风险,必须通过执行航路变更或航路脱离才能实现冲突解脱;飞机在新型空域结构空中走廊中运行时,必须建立完善的运行规则才能保障空域的安全运行。未来的研究可结合飞机动力学模型和实际数

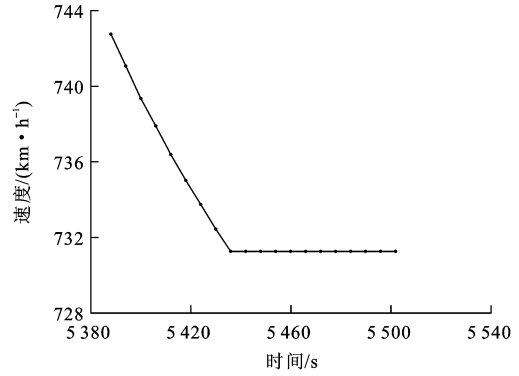


图 17 工况 4 下的飞机速度

Fig. 17 Aircraft speed under condition 4

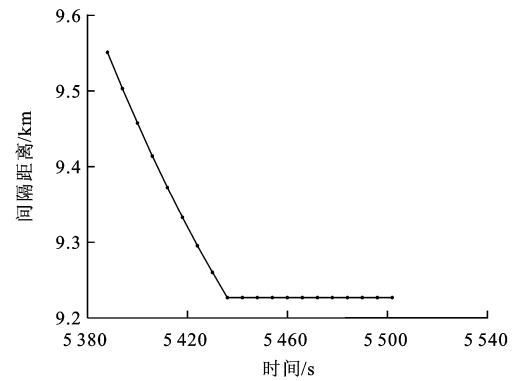


图 18 工况 4 下的间隔距离

Fig. 18 Spacing distance under condition 4

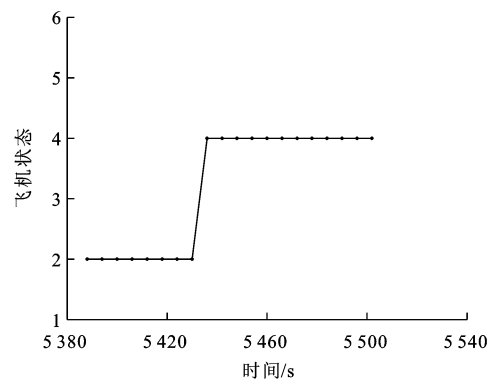


图 19 工况 4 下的协同状态

Fig. 19 Collaborative state under condition 4

据,改进飞机协同状态,深入分析空中走廊的运行效率与安全风险。

参考文献:

References:

- [1] Joint Planning and Development Office. Concept of operations for the next generation air transportation system[R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2007.
- [2] ALIPIO J, CASTRO P, KAING H, et al. Dynamic airspace super sectors (DASS) as high-density highways in the sky for a new US air traffic management system[C]// IEEE. Pro-

- ceedings of the 2003 Systems and Information Engineering Design Symposium. New York: IEEE, 2003: 57-66.
- [3] YOUSEFI A, DONOHUE G. High-volume tube-shape sectors(HTS): a network of high capacity ribbons connecting congested city pairs [C]// IEEE. The 23rd Digital Avionics Systems Conference. New York: IEEE, 2004: 12-21.
- [4] SRIDHAR B, GRABBE S, SHETH K, et al. Initial study of tube networks for flexible airspace utilization [C]// AIAA. 2006 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Washington DC: AIAA, 2006: 237-252.
- [5] HOFFMAN R, PRETE J. Principles of airspace tube design for dynamic airspace configuration [C]// AIAA. 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences. Anchorage: AIAA, 2008: 108-139.
- [6] XUE Min, KOPARDEKAR P. High-capacity tube network design using the hough transform [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(3): 788-795.
- [7] XUE Min, ZELINSKI S J. Complexity analysis of traffic in corridors-in-the-sky [C]// AIAA. 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference. Fort Worth: AIAA, 2000: 110-122.
- [8] HEXMOOR H, HENG T. Air traffic control agents: landing and collision avoidance [C]// AIAA. International Conference in Artificial Intelligence. Las Vegas: AIAA, 2000: 21-35.
- [9] NITSCHKE G. Cooperating air traffic control agents [J]. Applied Artificial Intelligence, 2001, 15(2): 209-235.
- [10] CALLANTINE T J. CATS-based air traffic controller agents [R]. Sacramento: NASA Ames Research Center, 2002.
- [11] NGUYEN M, BRIOT J, DROGOUL A. An application of multi-agent coordination techniques in air traffic management [C]// IEEE. 2003 IEEE/WIC International Conference in Intelligent Agent Technology. Halifax: IEEE, 2003: 622-625.
- [12] HILL J, ARCHIBALD J, STIRLING W, et al. A multi-agent system architecture for distributed air traffic control [C]// AIAA. 2005 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. San Francisco: AIAA, 2005: 1005-1049.
- [13] AGOGINO A, TUMER K. Learning indirect actions in complex domains: action suggestions for air traffic control [J]. Advances in Complex Systems, 2009, 12(4): 493-512.
- [14] 张洪海. 机场终端区协同流量管理关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- ZHANG Hong-hai. The key technologies of collaborative flow management in airport terminal area [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [15] 黎新华, 张兆宁. 基于 Agent 的空中交通流量管理系统结构研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(1): 56-61.
- LI Xin-hua, ZHANG Zhao-ning. Research of the structure of air traffic flow management system based on the agent [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007, 5(1): 56-61. (in Chinese)
- [16] 王万乐. Multi-Agent 系统在飞行冲突探测与解脱中的应用 [J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 9-15.
- WANG Wan-le. Application of multi-agent system in flight conflict detection and resolution [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(3): 9-15. (in Chinese)
- [17] 戴玲, 夏学知. 多 Agent 技术在飞行冲突解脱中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2009, 28(3): 62-64, 89.
- DAI Ling, XIA Xue-zhi. Application of multi-agent in flight conflict resolution [J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 28(3): 62-64, 89. (in Chinese)
- [18] 王超, 徐肖豪. 基于 Agent 的空中交通系统建模与仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(31): 12-14.
- WANG Chao, XU Xiao-hao. Researching on air traffic system using agent-based modeling and simulation [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(31): 12-14. (in Chinese)
- [19] 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: 自然科学版, 2008, 26(1): 125-128.
- WANG Fei, XU Xiao-hao, ZHANG Jing. Air traffic flow collaborate management based on multi-agent [J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2008, 26(1): 125-128. (in Chinese)
- [20] 张钧翔, 胡明华. 基于多 Agent 的多机场终端区空中交通智能仿真系统设计 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(2): 90-98.
- ZHANG Jun-xiang, HU Ming-hua. Design of the air traffic intelligent simulation system for the airport with multi-terminal areas based on multi-agents [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2009, 7(2): 90-98. (in Chinese)
- [21] YOUSEFI A, LARD J, TIMMERMAN J. Nextgen flow corridors initial design, procedures, and display functionalities [C]// IEEE. 29th Digital Avionics Systems Conference. Salt Lake City: IEEE, 2010: 201-219.
- [22] YOUSEFI A, ZADEH A N. Dynamic allocation and benefit assessment of nextgen flow corridors [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 33(2): 297-310.
- [23] 黄卫芳. 美国区域导航航路划设和实施研究 [J]. 空中交通管理, 2011(2): 8-10, 46.
- HUANG Wei-fang. Studies on US RNAV route alignment and implementation [J]. Air Traffic Management, 2011(2): 8-10, 46. (in Chinese)
- [24] STROEVE S, BLOM H, BAKKER G. Systemic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation [J]. Safety Science, 2009, 47(2): 238-249.