

# 基于 CPS 的空中交通系统架构及能力涌现方法

梁晓龙, 张佳强, 祝捷, 刘苹妮

(空军工程大学空管领航学院,西安,710051)

**摘要** 针对现行集中式空中交通系统架构下空域管理、空中交通服务、流量管理、交通管制功能割裂,融合不顺的问题,提出了基于 CPS 的空中交通系统架构,引入了航空器群的运行概念,介绍了系统能力涌现的机制。该架构中每架航空器作为智能个体,在新型网络支撑下实现节点间交互与反馈、激励与响应,进行局部寻优,实现系统整体行为涌现,空中交通系统按需使用、按需服务。提出了系统涉及的自主 4D 航迹生成、规则提取、下一代网络等需要解决的关键技术,给出了若干能力涌现度量参数,并且针对信息流量、时间开销这 2 个测度参数进行了具体分析,验证了所提出空中交通系统运行架构的合理性及有效性。

**关键词** 空中交通系统;CPS;航空器群;能力涌现

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.001

**中图分类号** V37 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0001-07

## Air Traffic Control System Architecture and Ability Emergence Method Based on Cyber-Physical System

LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, ZHU Jie, LIU Pingni

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that different function parts, such as the air space management part, air traffic service part, airflow management part and air traffic regulation part are isolated and the fusion of cooperation is not smooth under conditions of current air traffic control system of centralized architecture, a new air traffic control system architecture based on CPS is proposed, and the concept of routing aircraft swarm is produced and the related key technologies including the 4D trajectory, rule extraction, and next-generation data link are put forward. Its ability emergence mechanism such as information flow and time cost are analyzed, Then the characteristics and advantages of the given air traffic control system operating architecture are elaborated, and its rationality and availability are validated.

**Key words:** Air traffic system; CPS; aircraft swarm; ability emergence

空中交通系统的整体效能取决于系统全要素的集体行为<sup>[1]</sup>,在机场离港抵港协调运行中需要对整

个出入流进行协作调配。从一个航班运行过程来看,从地面等待起飞到目的地降落着陆,整个过程与

收稿日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金(61472443);陕西省科学技术研究发展计划(2013JQ8042)

作者简介:梁晓龙(1981-),男,江苏徐州人,副教授,博士,主要从事航空集群技术、空管智能化技术研究.E-mail:afeu\_lxl@sina.com

**引用格式:**梁晓龙,张佳强,祝捷,等.基于 CPS 的空中交通系统架构及能力涌现方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):1-7. LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, ZHU Jie, et al. Air Traffic Control System Architecture and Ability Emergence Method Based on Cyber-Physical System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 1-7.

其他航班不断进行交互,并且相互影响,单个航班个体行为通过局部交互可以影响整个系统行为,这和集群运行特征极其相似<sup>[2]</sup>。本文结合信息-物理系统(Cyber-Physical System, CPS)理论<sup>[3-4]</sup>与航空器群运行理念<sup>[5-7]</sup>对空中交通管理系统进行架构设计,实现传感器、控制器、物理实体的紧耦合,采用集群智能方法<sup>[8-9]</sup>对运行方案进行优化求解,可以摆脱全局指挥、集中控制弊端。该架构中将每架航空器当作一个智能个体,在网络的紧密支撑下通过节点间交互与反馈、激励与响应,根据节点需求进行局部最优求解,整个系统就会涌现出整体行为并收敛到一个有效的运行状态,实现空中交通系统的能力涌现,真正使空中交通由信息化转向智能化,实现空中交通按需服务、空中交通系统按能使用,从而解决空中交通复杂问题,实现空中交通系统高效智能运行。

## 1 空中交通管理现行架构

目前,空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)包含空域管理、空中交通服务、流量管理(Traffic Flow Management, TFM)3部分<sup>[10]</sup>。空域管理包括空域划分和空域规划,空域主要依据高度层规定和空中交通服务区域进行划分,空域规划主要通过未来空中交通流量需求预测进行高度方向、区域设计;空中交通流量管理主要通过战略流量管理、战术流量管理和实时流量管理3个阶段,使得空中交通流最佳的流入或通过相应的区域;空中交通服务主要包括空中交通管制(Air Traffic Control, ATC)、飞行情报服务和告警服务。空中交通管理将空域划分成更小的单元以此减少管制员的工作负荷,并通过监视器结合飞行计划,为航空器提供间隔保障服务,同时,管制员依据服务需求、交通管制和跑道、天气条件,实时预测交通容量。国际民航组织的全球ATM运行概念由战略冲突管理、间隔保障和防止碰撞3层组成,欧控主要致力于空地协同实现空中交通管理<sup>[11-12]</sup>,2种体制从安全运行角度主要分为飞行计划调配、冲突检测、机载冲突检测和避撞等层次,但由于系统独立,还没有形成统一和完整的技术运行体系。

在现行架构下,空中交通管理过于依赖预测和集中式控制,这是系统运行效率低下问题的根源。空中交通管理资源分配主要基于交通负荷预测及每架航空器的4D飞行轨迹预测<sup>[13-15]</sup>,但轨迹预测有大量的误差,包括从风湍流到人为因素影响。风速、风向、飞行员、飞行意图、航空器引导模型、飞行器性能模型、地形模型、动力学模型、起飞时间不确定性、

转接班机到达时间、乘务组值勤表、跑道分配、起飞重量等,同时单个航班的飞行轨迹预测对空管交通管理预测起到非线性全局的影响;空中交通管理中TFM的集中式控制考虑是当前的、局部的,并且与ATC没有完全有效地整合在一起,TFM运行在战略层( $>20$  min),ATC控制回路运行在战术层( $<10\sim 20$  min),前者是战略级的,后者是战术级的,耦合度极低,当战术层施加干预要求航空器保持间隔,管制就取代空中交通管理计划,这样战术级的干预可能反过来致使TFM规划完全失效,导致整个运行管理失效,造成航班延误,见图1。

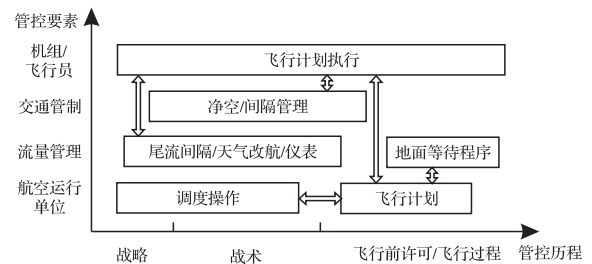


图1 空中交通管控逻辑图

Fig.1 Logical flow chart of air traffic manage and control

## 2 基于CPS理论的架构

### 2.1 基本概念及框架

目前空中交通系统虽然实现了互联互通,但系统间没有做到深度耦合,互操作程度不高,不能充分协调,效能未能充分发挥。若将空中交通信息系统和空中交通物理系统深度融合并进行有效控制,会克服诸多难题。CPS将感知系统、计算系统、通信系统与控制系统集为一体,高度融合计算、控制与通信,物理实体与信息域深度耦合,具体体现在计算进程与物理进程高度融合,实时组织分配信息及资源优化。基于CPS的空中交通管理系统将物理域和信息域深度耦合交联、组件高度集成<sup>[16]</sup>,物理节点具有信息处理和通信能力,人-机-传感器-控制器之间可进行实时信息的传递和处理,如此易于实现大规模动态异构资源的共享和管控,在宏观上可实现交通流量和交通行为的分析与预测,在微观上则能进一步实现“人-机”“机-机”以及“组件-组件”之间的自治协调与协同。空中交通系统在空间和时间上具有多重复杂性,该架构处理空中交通复杂网络有独特的优势,可为航空器个体的自适应、自主协同,系统的高度自治自动化提供基础支撑。

基于CPS的空中交通系统由嵌入式服务/应用程序、通信网络、软件系统、计算资源、航空器平台、空域控制人员(飞行员、管制员)等要素组成,与现行

空中交通系统要素相似,其特点主要体现在物理实体-信息-物理实体的耦合程度及控制服务层次上。基于 CPS 架构下的空中交通系统可以划分为监视感知、网络、计算、控制和服务 5 个层次,见图 2。

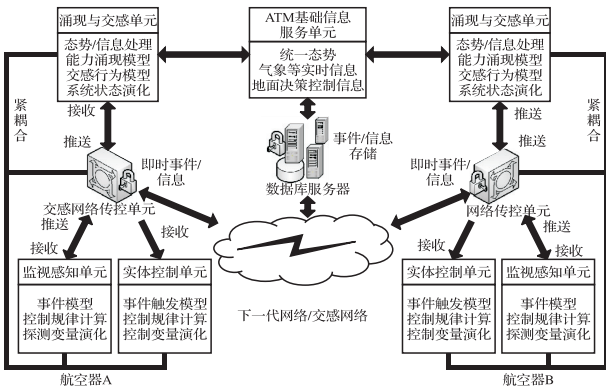


图 2 基于 CPS 的空中交通系统架构

Fig. 2 Air traffic system frame based on CPS

**监视感知层:**主要由雷达、机载探测、机载分发广播系统、设备监控等传感器单元组成,负责对交通态势、航空器状态、交通设施状态等空中交通要素进行信息感知,感知的原始数据经汇集节点融合后按需分发及上报信息中心,空中交通信息感知是通信、计算、控制和服务的基础。

**网络层:**由空空数据链路、空地数据链、网络管控单元组成,负责航空器空中组网、并网、退网,拓扑、路由管理及链路控制,将感知层原始信息有效传输分发,通信节点具有有限智能信息处理能力,实现信息可靠、有效传输是通信层的关键问题。

**计算层:**由于基于 CPS 的空中交通系统中“人机”、“机-机”以及“组件-组件”之间交互信息量大,并存在实时的交互与反馈、激励与响应,对信息的分析、处理、分发速度提出较高要求,要求系统对节点计算资源进行有效整合,并进行分布式处理。

**控制层:**现有空中交通系统对交通物理系统主要采用集中式控制,控制模式固定、灵活性差,整体效率低下,采用基于集群智能的分散式控制,可有效提高系统运行效率。

**服务层:**为交通管理、交通管制、运营商、机组等不同类型用户提供交通信息服务与应用接口,系统依据不同用户做到按需服务、按能使用。

该框架下,ATC 与 TFM 是高度自动融合,所有航空器飞行可以委托给系统指挥控制,因而,管制员不会因为保持间隔和计划管理对航空器进行战术上的干预,只需进行特情处置。航空器根据自身需求,依据态势变化自动生成 4D 航迹,通报邻居并上报群首进行动态“存储/托管”,自然集成进国家空管系统,像管制员一样融入“存储/托管/飞行”回路。

## 2.2 航空器群概念

航空器虽然有空间、时间及机动 3 个行为约束,但在固定时间区间内,航空器在空间域上是接近的,就像一群航空器飞行一样,所以可以定义在空间上接近,在时间参数上一致的,速度、航向相近的航空器属于一个群。群内成员通过航空通信网络进行群内通信,并对群成员飞行状态进行监视,群与群之间相互连接。在空中交通系统中,每个群可以当作一个节点被实时标绘并跟踪,由此,航空器群就可以独立于地面 ATC 或接受 ATC 委托对群内成员进行间隔服务等。

基于上述认识,可以定义一个规模为  $n$  的群,有群首 1 名,群成员  $n - 1$  名。群内成员相互接收邻居状态信息并共享态势信息,群内存在一个最小监视性能标准和一个连通的网络图。群内指定一架航空器作为群首,群首代表整个群成员与 ATM 进行关联,从 ATM 角度来看,与群首联系等效于与群内每一个成员联系。航空器群通信控制与网络层次结构见图 3,群与群之间主要通过群首进行通信控制,群首负责具体与 ATC、TFM 进行通信协同。航空器群运行需要研究以下几个问题:群规模与风险、效益之间的关系;群首选择与职责;航空器群运行下对 ATM 系统贡献度。

航空器群概念在 CPS 架构下运行,空中交通系统具有高效的监视感知能力和海量数据处理能力,同时具备有效的自主控制能力。从信息流来看,监视感知信息获取到控制实施过程中产生的信息流量和时间开销均可大大优化;同时遵循的规则加事件驱动的决策方式,弥补目前空中交通系统集中控制方式的不足,提高空中交通系统的决策控制效率。

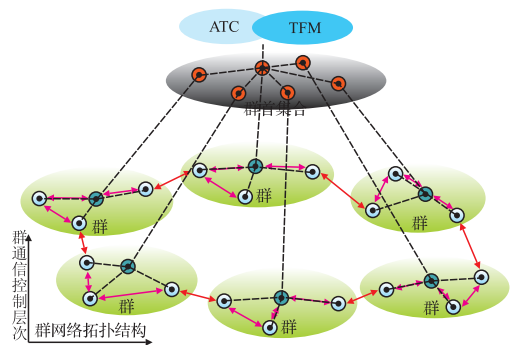


图 3 航空器群通信控制与网络层次结构图

Fig.3 Aircraft swarm communication control and network topological structure

## 2.3 系统涌现基本机制

### 2.3.1 交感机制

系统中航空器个体以“直接/间接感知”方式从周围的邻居和环境获得信息,继而据此做出决策



和响应行为,这种响应行为反过来又影响到环境和其他航空器个体行为,即交感机制本质特征是“激励与响应、交互与反馈”。航空器个体通过机载传感器和通信网获得监视感知信息,通过预置的行为规则、条件触发及逻辑结构模型实现行为决策。空中交通系统在没有集中控制、全局模型的情况下,通过航空器个体的交互与反馈、激励与响应等交感行为,自发地从个体无序运行到整体有序运行,涌现出整体行为并收敛到一个有效的运行状态,实现空中交通系统的能力涌现。

### 2.3.2 集群机制

集群有分布式、鲁棒性、可激发性、自组织性等特点。群中相互合作的个体是分布式的,因而它更能够实时适应当前运行环境;个体只需感知局部信息,不需直接拥有全局信息,并且它们的能力或遵循的行为规则非常简单,集群系统的实现相对容易;集群系统可以通过分布式通信的方式实现信息的传输与合作,随着个体数目的增加,通信开销的增幅较小;通过个体的简单交互涌现出复杂的行为组织,这种现象是自发产生的,是自适应的。集群智能产生的涌现行为很大一部分原因是个体因争夺资源而相互作用,在自然界,集群智能在解决优化问题有惊人的效率,蚂蚁通过信息素寻找实物就是一个证明。空中交通系统和自然系统存在几个明显相同的特征,都可以通过社会个体的简单交感,达到整体能力的涌现。从系统复杂性来看,集群智能方法非常适合解决空中交通系统运行问题,航空器群主要通过全面的态势感知、航空器自主控制,依靠个体在满足所有约束的情况下,利用自身业务运行规则寻求最优解,自主生成4D航迹到达最终目的地。

现在的航空器座舱已经为飞行员提供了周边交通态势监视信息,但主要还是依赖于管制员来保持相邻航空器的飞行间隔。通过交通信息服务系统及自相关监视系统,航空器可以接收来自地面传感系统及其他航空器广播的位置状态,来自相关监视系统广播的位置报告可以视为“电子信息素”,飞行员可以通过监视交通态势及群首协调自主调整飞行计划,这些为交感机制与集群机制的实现提供了很好的基础。

## 3 关键技术

### 3.1 自主4D航迹生成技术

4D航迹是航空器结合空域数据、气象信息、航空器性能数据、飞行计划及管制员意图,精确预测并描述飞行关键点和时间的运动轨迹。基于航迹运行

的定义是:在航迹运行的航路点上,通过使用“控制航空器到达航路点的时间”,即控制航空器到达特定航路点的“时间窗”。美国下一代空中运输系统(NGATS)、“单一欧洲天空”<sup>[17-18]</sup>将4D航迹作为制定计划和系统运行的基础,计划中的各种航迹将在系统各参与者之间共享,自动管理系统将实时地分析、调整这些航迹,并通过数据链传输到航空器的飞行管理系统FMS。

从目前4D航迹流程上看,主要是由运行中心生成,通过数据链上传,由航空器执行。该方法存在2方面的问题,首先,预测本质上存在不确定性,而对整个交通流量的预测不仅仅是单个航空器的飞行轨迹预测,每个轨迹不确定性对系统全局起到非线性影响;其次,整个空中交通系统还是集中控制,无法发挥航空器个体自主能力,无法达到整个系统自主有序。为了实现空中交通系统的整体能力涌现,必须实现航空器自主4D航迹生成,航空器通过态势感知,在满足所有约束的情况下,根据业务运行规则寻求最优解(4D航迹),通过自主控制到达最终目的地。航空器一旦生成运行解(4D航迹),即时分发给群内其他成员并上报群首,并依此作为航空器群的组网、退网、并网的依据。该4D航迹一旦运行,它将作为新的空域约束立即共享给其他空域用户,后续用户将其作为约束进行飞行规划,这样可以充分发挥空域使用的灵活性并且提高整个空中交通运行效率,此方法从规划优化算法求解的角度来看,属于不断降维处理,十分有利于模型的求解。

### 3.2 规则提取

空中交通系统具有时空多变性、决策目标多重性、航空器能力有限性、决策时间随机性以及决策状态不确定性等问题,使得航空器群决策问题异常复杂。对此,在通信网络的支持下,各节点在分层决策策略的控制下,分别完成局部决策、区域决策和全局决策,以此形成空中交通系统决策行为涌现。

事件驱动规则是空中交通系统决策的主要途径,可有效支持航空器群交互机制与交互行为,事件是群内航空器控制信息的一种抽象,系统通过对环境及航空器自身变化产生的感知,及时对监视感知信息做出反应,整个系统激励响应过程均是由事件驱动的。

航空器群规则的抽象与提取是航空器群运行认知决策的前提,为航空器群自组织运行的理论基础。规则一部分可以依据现有飞行规则、法规标准,另外一部分决策规则需要通过数据挖掘及仿真评估得到。规则提取重要的一步是进行规则认知反馈,由环境认知、态势评估和4D航迹制定3个部分构

成<sup>[19]</sup>。对外界环境的认知通过监视感知信息与数据库等先验知识比对,实现对现实运行环境的态势评估;通过评估值、目标和飞行的知识对态势评估模型进行认知,制定 4D 航迹。在识别认知中,随着空中运行环境的不断变化,知识会做出相应的调整,从而引起对态势评估的动态变化;通过知识结构对态势进行评估,指导 4D 航迹的制定;而飞行计划执行反过来又会作用于空中运行环境,对其产生影响,这是一个不断交互的循环过程,同时要快速对决策进行判断、查错和纠正。通过规则提取与规则认知反馈形成规则最终的确定。在航空器集群运行过程中,空中运行环境具有非预知时变、高动态时敏特性,通过规则集的支持,可以保证航空器群“智能节点-宏观决策”“非智能节点-应激决策”的混合模式决策的实时性及有效性。

### 3.3 下一代网络

航空器群的运行机理和现有空中交通运行方式有很大区别,任务变化较多,根据其性质的不同,可以划分为多个类型或层次,各类型任务产生的平台间信息流各不相同,交互行为各有自己的特点,因而航空器群不同类型任务对网络的功能、性能有不同需求。需要利用节点的存储和计算能力提升网络的传输与服务性能,需要设计新的航空器节点行为模型、服务行为模型、网络业务流量模型、网络拓扑模型等。如各层次任务对网络交互实时性需求就有明显的差异,最主要的是在“子群”运行时共享气象、航空情报数据,提供间隔服务时要求网络具备高传输带宽、低传输时延和高时间同步的特点,需重点研究交互业务类型、抽象节点任务及角色属性、交互行为、交互方法及交互服务,构建适应集群多层次任务、多交互行为模式和多类型数据特点的交互网络体系架构;设计适应交互网络管控策略,实现面向交互业务的多种交互方法与手段;建立集群内高速可靠交互信息传输机制,构建满足群内节点交互的信息分发模型,实现按任务、角色、权限的高效信息分发服务,为最终实现航空器群整体性涌现提供必要的基础技术支持。

可以将航空器群交互网络分为应用层、控制层、智能自组织层、交互网络管控层、交互网络链路层、交互网络物理层 6 个逻辑层,应用层主要为群内成员进行气象服务、间隔服务、态势服务、信息查询检索服务等;控制层主要对航空器群行为进行调控,解决预先飞行计划/动态飞行指令、空中交通信息解释与执行等行为调控问题;航空器群智能自组织层主要解决航空器群系统的聚集、涌现、资源优化配置、自主任务决策、自主 4D 航迹规划等;航空器群交互

网络链路层和物理层,主要解决航空器群交互信息高效、可靠传输问题,具体见图 4。

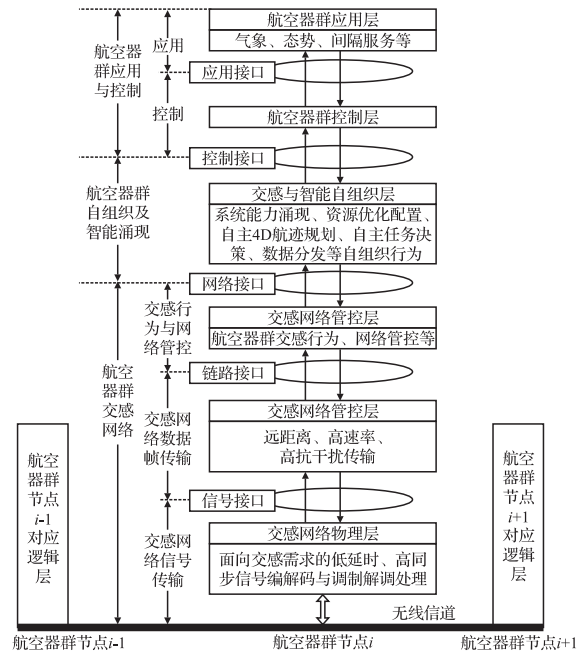


图 4 航空器群网络概念框架

Fig.4 Aircraft swarm network concept frame

## 4 系统能力涌现分析

空中交通管理问题是个多目标优化问题,需要同时考虑到经济、安全和容量等优化目标。基于 CPS 的空中交通系统架构下,将每个航空器作为智能体组成航空器群,群与群之间组成一个社会交互的网络,可以将多目标的优化问题借鉴集群智能算法进行模拟求解,提高系统的运行效率,并且形成空中交通管理自组织机制,考虑到系统博弈性的出现,引入交通管制人工指令性的他组织机制,形成自下而上与自上而下相结合的管控机制,最终形成空中交通系统整体能力涌现。

空中交通系统能力是系统的内在属性,不能直接测量,必须借助其在特定外部环境条件下的多次行为的统计结果进行表征,选取合适的性能测度参数作为评价能力涌现的客观依据。可以选取任务-航空器分配关系、决策实体-航空器控制关系、决策实体间关系、决策实体间信息交互关系等要素进行性能测度,以此来定量评价系统能力涌现程度。考虑到文章篇幅,本文以决策实体间信息交互关系<sup>[20]</sup>对系统能力涌现进行分析评估,具体参数见文献。

### 4.1 信息流量分析

在集中式空管运行模式下,各层级航空器都将所获取的实时态势信息向上级航空器报告,并接收系统自身不掌握的态势信息,从而得到系统的全局

信息。对于一个可以分为  $n$  级完全  $m$  叉树的系统来说,收发信息之和刚好构成完整的系统全局信息,设每个航空器的信息总量为  $Q$ 。因此,集中式控制模式下感知总信息量为:

$$I_c = \frac{m^n - m}{m - 1} Q, m \neq 1 \quad (1)$$

假设航空器群中经过抽象的协作态势信息在其信息总量中所占比例为  $\epsilon$ ,对于航空器群中第  $n$  级航空器来说,信息总量  $D_l$  为:

$$D_l = \frac{\epsilon - n\epsilon^n + (n-1)\epsilon^{n+1}}{(1-\epsilon)^2} mQ, (\epsilon \neq 1) \quad (2)$$

从式(1~2)可以得出,集中式控制模式和航空器群模式在  $m, n$  较小的时候( $\leq 4$ ),具有相当的信息量;当  $m$  和  $n$  都超过一定值时,信息量将快速增长;相比之下,航空器群运行模式所产生的信息量则呈数量级的减少,在  $n$  一定时,  $m$  值越大,信息量随着  $\epsilon$  的增长就越快,而在  $m, \epsilon$  保持不变的情况下,  $n$  值越大,系统总的信息量也越大。

#### 4.2 时间开销分析

系统时间开销是建立一致的全局态势协作信息所用的通信时间,主要包含 2 部分:

1) 在通信的发送端和接收端产生的发送和接收通信延迟;

2) 在一定网络带宽下,信息的传输延迟。

假设  $t_l$  表示信息交互一次的通信延迟,  $b$  表示通信带宽。在集中式控制模式下,航空器之间建立一致的全局协作信息需要经过信息收集和分发 2 个阶段,在具有  $n$  级层次结构的系统中,2 个阶段中各需要  $n-1$  次航空器间通信,集中式运行模式中监视感知的时间开销  $t_c$  为:

$$t_c = 2(m-1)t_l + \frac{2(n^{m-1}-1)Q}{n^{m-1}(n-1)b}, (n \neq 1) \quad (3)$$

而在航空器群运行模式中,建立一致的全局协作态势信息,主要是由各协同群或子群通过不同层次群间传输协作态势信息实现的,航空器群运行模式监视感知的时间开销为:

$$t_s = (2n-3)t_l + \left( \frac{\epsilon^n(2m-1)}{(1-m)(1-m\epsilon)} - \frac{\epsilon^n}{m^{n-2}(m-1)(\epsilon-1)} \right) + \frac{\epsilon^2(m-1) + \epsilon}{m^{n-1}(\epsilon-1)(m\epsilon-1)} \frac{Q}{b} \quad (4)$$

$m\epsilon \neq 1, m \neq 1, \epsilon \neq 1$

从式(3~4)可以得出,集中式运行模式比航空器群运行模式的监视感知通信延迟更大,因为在实时动态协同中,协同信息在不同层次间逐级抽象自下而上传输,传输的层次越多,反而信息量越小。

## 5 结语

基于 CPS 架构的航空器群运行概念为空中交通运行提供了一种新手段,该架构可有效将空管系统关系密切的不同领域、不同功能的子系统综合集成,融合应用电子技术、通信技术、控制技术、交通工程、网络技术等众多科学技术,将交通控制系统、交通信息系统、航空安全控制系统等众多子系统深度耦合成为一个大系统,可以利用航空器群交感、集群等机制,实现系统功能和性能的涌现,为实现空中交通系统按需服务、按能使用的智能化目标奠定基础。

#### 参考文献(References):

- [1] 张军. 现代空中交通管理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.  
ZHANG Jun. Air Traffic Management[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.(in Chinese)
- [2] 牛轶峰,肖湘江,柯冠岩.无人机集群作战概念及关键技术分析[J].国防科技,2013,34(5):37-43.  
NIU Yifeng, XIAO Xiangjiang, KE Guanyan. Operation Concept and Key Techniques of Unmanned Aerial Vehicle Swarms[J]. National Defense Science & Technology, 2013, 34(5): 37-43.(in Chinese)
- [3] Syed Hassan Ahmed, Gwanghyeon Kim, Dongkyun Kim. Cyber Physical System: Architecture, Applications and Research Challenges[C]//IFIP Wireless Days, IEEE, 2013: 1-5.
- [4] Stefan Mitsch, André Platzer. Model Plex: Verified Runtime Validation of Verified Cyber-Physical System Models[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 1: 199-214.
- [5] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y. Swarm Intelligence [M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann, 2001.
- [6] Liang Xiaolong, Sun Qiang, Yin Zhonghai, et al. A Study of Aviation Swarm Control and Transportation Mission[C]//The 4th International Conference ICSL. Harbin, 2013: 368-375.
- [7] Sergio Torres. Swarm Theory Applied to Air Traffic Flow Management[J]. Procedia Computer Science, 2012, 12: 463-470.
- [8] 梁晓龙,孙强,尹忠海,等.大规模无人系统集群智能控制方法综述[J].计算机应用研究,2015,32(1):11-16.  
LIANG Xiaolong, SUN Qiang, YIN Zhonghai, et al. Review on Large-Scale Unmanned System Swarm Intelligence Control Method[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1): 11-16.(in Chinese)



- [9] Liguó Weng, Qingshan Liu, Min Xia, et al. Immune Network-Based Swarm Intelligence and its Application to Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Swarm Coordination[J]. *Neurocomputing*, 2014, 125: 134-141.
- [10] 张军. 空地协同的空域监视新技术[M].北京:航空工业出版社,2011.  
ZHANG Jun. Air-Ground Collaborative Airspace Surveillance[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [11] S. Torres, J.K. Klooster, L. Ren, et al. Trajectory Synchronization between Air and Ground Trajectory Predictors[C]//30th Digital Avionics Systems Conference, Seattle, Washington, 2011:16-20.
- [12] Panzarasa P, Jennings N R, Norman T J. Formalizing Collaborative Decision-making and Practical Reasoning in Multi-agent Systems[J]. *Journal of Logic and Computation*, 2002, 12(1):55-117.
- [13] 张琴. 无冲突 4D 航迹生成及其扰动分析研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.  
ZHANG Qin. Research on the Conflict-Free 4D Trajectory Generating and Perturbation Analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.(in Chinese)
- [14] Shih-Yih (Ryan) Young, Kristen M. Jerome. Automated Threat Avoidance with 4-D Trajectory Replanning in Resource-Constrained Cockpits[J]. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2012, 9(3): 68-80.
- [15] D Prot, C Rapine, S Constans, et al. A 4D-sequencing approach for Air Traffic Management[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237:411-425.
- [16] Young-Sik Jeong, Jong Hyuk Park. Adaptive Network-Based Fuzzy Inference Model on CPS for Large Scale Intelligent and Cooperative Surveillance[J]. *Computing*, 2013, 95:977-992.
- [17] Wolfgang Schuster, Washington Ochieng. Performance Requirements of Future Trajectory Prediction and Conflict Detection and Resolution Tools within SESAR and Next Gen: Framework for the Derivation and Discussion[J]. *Journal of Air Transport Management* 2014, 35: 92-101.
- [18] Paolo Dell'Olmo, Guglielmo Lulli. A New Hierarchical Architecture for Air Traffic Management; Optimization of Airway Capacity in A Free Flight Scenario[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144: 179-193.
- [19] 王莉. 基于规则的认知决策体系结构研究[D].武汉:华中科技大学,2009.  
WANG Li. Study on Rules-based Architecture for Cognitive Decision Making [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.(in Chinese)
- [20] 王晓东. 复杂的动态实时强协同协作模型 DReaSCoM 研究与实现[D].长沙:国防科技大学,2001.  
WANG Xiaodong. Research and Implementation of Complex Dynamic Real - Time Cooperation Model DreaSCoM [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001.(in Chinese)

(编辑:徐敏)