

## 智能化空管技术与展望

杨红雨<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2\*</sup>, 武喜萍<sup>1,2</sup>, 余静<sup>1,2</sup>

(1.四川大学 视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川 成都 610065;

2.四川大学 国家空管自动化系统技术重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:**航空运输业在世界经济和社会发展中发挥着重要的推动作用。国际民用航空组织统计显示全球空中交通流量大约每15年增加一倍,因此,现有空中交通航行系统的运行能力已经接近饱和。现有的空管自动化系统能自动获取和处理空管信息,经过监视数据融合、飞行数据处理、气象及航行情报处理、告警处理等形成空管综合态势,以供管制员指挥使用,但其仅具备有限的决策支持能力,空管智能化程度较低,不能较好地适应未来空管发展的需要。为了适应未来航空业的快速发展,解决空中交通安全、空域拥挤、航班延误等问题,各国致力于开展解决未来空中交通问题的新技术研究。欧盟在2004年提出“单一欧洲天空空中交通管理研究”,拟重新规划欧洲空域以满足空中交通需求,提高空管系统效能,该研究的关键技术涵盖空中交通管理的4个关键领域:高效的机场运行、高级空中交通服务、优化的空中交通网络服务和可靠的空管基础设施。美国在2005年提出了“下一代航空运输系统”,其核心技术包括广播式自动相关监视、数据通信、航路自动化系统现代化、终端自动化系统现代化更新、NAS语音系统和系统广域信息管理。2012年,ICAO推出了航空系统组块升级(ASBU)计划,以运行改进为核心,以现有空管技术和新技术应用为手段,提出了机场运行、全球互用的系统和数据、最佳容量和灵活飞行、高效的飞行轨迹4个性能提升领域,每个领域由多条提升路径组成,并根据实现阶段分布在4个组块中,构成52个模块。中国民航也正在实施或规划大量ASBU中的内容以应对中国航空的快速发展。但是,现有空管系统及其未来规划重点在基础设施建设,未涉及太多智能化应用。近年来,在深度学习、高性能计算和大数据的支撑下,人工智能技术在各行业得到快速应用,计算机视觉、语音识别、自然语言处理等技术取得突破性进展并迅速产业化。人工智能技术可以促进空管一些关键技术的发展,提升安全水平,提高管制工作效率,降低管制员工作负荷。以深度学习为代表的人工智能强调在大量先验知识的基础上做出判断和决策,与空中交通管理运行决策过程相契合,人工智能的快速发展产生的巨大效益使智能化空管成为一种必然。因此,在空管技术及人工智能技术基础上,作者提出智能化空管的概念,设计了智能化空管系统总体框架。智能化空管系统总体框架包括感知层、网络层、平台层、应用层和可视化层。感知层的各类通信、导航、监视、气象、无线、图像采集、射频识别等设施为空管运行提供基础设施保障。网络层采用专线网络、卫星通信网、新兴的互联网、移动网络等传输信息。智能化空管平台层采用广域信息管理,云计算、智能化大数据挖掘等技术实现信息存储、共享、挖掘等。应用层研究人工智能化技术在管制指挥、空域管理、空中交通流量管理、飞行服务、通航、无人机空管保障中的应用。可视化层通过空管门户、虚拟化可视、空管智能化UI、移动空管应用等方式提供高效快捷的智能化交互。围绕智能化空管概念和总体框架,需要重点研究智能化空管数据处理、智能化辅助决策、空管语音识别和空管指挥机器人等关键技术。智能化空管数据处理研究各类空管数据的获取、处理、传输、交互、智能化挖掘等技术;智能化辅助决策研究智能化冲突管理、智能化空中交通流量管理、智能化规划管理、智能化进离场排序、智能化机场运行等智能化空管应用;针对地空通话在空中交通管制中的重要作用,研究空管语音识别在自动应答机长、空管指挥安全监控中的应用;利用人工智能技术使机器具备空管的感知、规划、推理、行动等能力进行空中交通管理。智能化空管系统总体框架和关键技术为智能化空管系统开发提供理论基础与技术支持。

**关键词:**空中交通管理;人工智能;深度学习;强化学习;空管机器人

中图分类号:V355

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)04-0012-10

收稿日期:2018-06-19

基金项目:国家空管委科研资助项目(GKG201403004);国家重大科学仪器设备开发专项资助(2013YQ490879)

作者简介:杨红雨(1967—),女,教授,博士。研究方向:空管信息智能处理技术;视觉合成。E-mail: yanghongyu@scu.edu.cn

\*通信联系人 E-mail: boyang@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-07-11 13:22:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20180711.1322.005.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

## Research and Prospect of Intellectualized Air Traffic Management Technology

YANG Hongyu<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>1,2\*</sup>, WU Xiping<sup>1,2</sup>, YU Jing<sup>1,2</sup>

(1.National Key Lab. of Fundamental Sci. on Synthetic Vision, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2.National Key Lab. of Air Traffic Control Automation System Technol., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Air transport plays an important role in promoting the world economy and social development. The statistics of international civil aviation organization show that global air traffic is approximately doubled every fifteen years, and the existing air traffic navigation system is close to saturation. The existing air traffic management (ATM) systems automatically acquire and process air traffic control information for air traffic controller, through surveillance data fusion, flight data processing, meteorology and aeronautical information processing and safety nets processing. However, the limited decision-making support ability leads to the low intelligent degree of ATM system, which can't meet the need of the future development of ATM. In order to adapt to the rapid development of aviation industry in the future, some countries and organizations are committed to carrying out new technologies to solve the problems of air traffic safety, airspace congestion and flight delays. In 2004, the EU proposed the "Single European Sky ATM Research(SESAR)" program and proposed to plan European airspace to meet air traffic demand and improve the efficiency of ATM system. The key technologies of the program include four key areas of ATM: efficient airport operations, advanced air traffic services, optimized air traffic network services and reliable ATC infrastructure. In 2005, the United States proposed the next generation air transportation system(NEXTGEN), including ADS-B, data communication, en route automation modernization, terminal automation modernization and replacement, NAS voice system and system wide information management. In 2012, ICAO launched the aviation system block upgrade plan (ASBU). The ASBU involved four aviation performance improvement areas, including airport operations, globally interoperable systems and data, optimum capacity and flexible flights and efficient flight path. Each area consists of multiple threads and distributed in four blocks according to the implementation stage. CAAC is also implementing or planning a large number of ASBU modules to cope with the rapid development of Chinese civil aviation. The existing ATM system and its future planning mainly focus on the infrastructure construction, without enough intelligent applications. In recent years, with the support of deep learning, high performance computing and big data, artificial intelligence technology has been rapidly used in various fields. Especially, technologies of computer vision, speech recognition and natural language processing have made breakthrough and rapid industrialization. Artificial intelligence, represented by deep learning, emphasizes that judgment and decision-making based on a large number of prior knowledge, which is consistent with the decision-making process of ATM. Therefore, artificial intelligence technology can promote the development of air traffic control key technologies, improve safety and the efficiency of air traffic control and reduce the workload of air traffic controller. The great benefit of the rapid development of artificial intelligence makes the intellectualized ATM a necessity. In this paper, the concept of intellectualized ATM and the overall framework of intellectualized ATM system were presented. The overall framework of intellectualized ATM includes the perception layer, network layer, platform layer, application layer and visual layer. All kinds of communication, navigation, surveillance, weather, wireless, video capture, radio frequency identification and other facilities of the perception layer offer the infrastructures for ATM. The network layer transmits information by using special line network, satellite communication network, Internet, mobile network and so on. The platform layer achieves information storage, sharing and mining by using of SWIM, cloud computing, intelligent big data mining. Application layer studies the application of artificial intelligence technology in air traffic control, airspace management, air traffic flow management, flight service, general aviation and unmanned aerial vehicle. The visual layer provides efficient and intelligent interaction through the portal, virtual visualization, intelligent UI and mobile applications. The research direction of intellectualized ATM includes intelligent ATM data processing, intelligent decision-making, air traffic control speech recognition and air traffic control robot. The intelligent ATM data processing involves various kinds of ATM data acquisition, processing, transmission, interaction and intelligent mining. Intelligent decision-making focuses on intelligent conflict management, intelligent air traffic flow management, intelligent planning and management, intelligent AMAN and DMAN, intelligent airport operation, etc. In view of the important role of ground-to-air communication in air traffic control, the intelligent simulation pilot and air traffic control safety monitoring based on automatic speech recognition should be studied. The intellectualized ATM system has the capabilities of air traffic control perception, planning, reasoning and action based on artificial intelligence. Thus, the overall framework and key technologies provide the theoretical basis and technical support for the development of intellectualized ATM system.

**Key words:** air traffic management; artificial intelligence; deep learning; reinforcement learning; ATM robot

随着航空事业的快速发展,飞行流量急剧增加,空中交通日益复杂,对飞行安全、效率、空管服务品

质等提出了更高的要求。传统完全依靠人工经验和技巧进行空域规划配置、流量调控和管制指挥的做

法,已不能适应发展的需要,也给空管人员的工作带来很大的负荷和压力,出现“错、忘、漏、低效”现象。空管信息服务也从原来单一地为管制部门服务,扩展到为空管运行管理、机场、航空公司、旅客等提供及时、全面的信息。智能化技术在空管中推广应用,将提供更好的共同态势感知,及智能化、自动化辅助决策手段,大大提高空管的安全性和效率,提升空管服务品质。作者分析空管技术发展现状,提出智能化空管概念,介绍智能化空管总体框架,指出智能化空管技术主要研究发展方向,对智能化空管的科学研究和工程应用具有重要的现实意义。

## 1 空管技术发展现状

伴随着全球经济发展、信息技术和通信技术等科技的进步,空管技术水平不断提升,空管运行概念的研究日益深入。1991年,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)第10次航行大会上通过了新航行系统概念,即通信、导航、监视/空中交通管理(communication navigation surveillance/air traffic management, CNS/ATM)系统。为了指导CNS/ATM系统的实施,ICAO发布了《全球空中航行计划》<sup>[1]</sup>。在实施过程中,各国意识到仅有技术是不够的,需要一个运行概念以指导CNS/ATM的实施。2003年,国际民航组织第11次航行会议上明确了全球空管一体化运行概念,将空中交通管理分为空域组织与管理(airspace organization and management, AOM)、需求和容量平衡(demand capacity balancing, DCB)、机场运行(aerodrome operations, AO)、交通同步(traffic synchronization, TS)、冲突管理(conflict management, CM)、空域用户运行(airspace user operations, AUO)和空管服务提供的管理(service delivery management, SDM)7个部分。《全球空中交通管理运行概念》<sup>[2]</sup>和《空中交通系统全球效能手册》为空中交通管理提供了基本框架。秉承国际民航组织对未来航行系统的构想,2004年欧洲发起了单一欧洲天空空中交通管理研究(single European sky air traffic management research, SESAR),2005年美国推出了下一代航空运输系统(next generation air transportation system, NextGen),2007年中国民航提出了

新一代空中交通管理系统发展总体框架,2012年ICAO推出了航空系统组块升级计划(aviation system block upgrade, ASBU)。

美国下一代航空运输系统(NextGen)的核心技术包括广播式自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)、数据通信(data communications, Data Comm)、航路自动化系统现代化(en route automation modernization, ERAM)、终端自动化系统现代化更新(terminal automation modernization replacement, TAMR)、NAS语音系统(NAS voice system, NVS)和系统广域信息管理(system wide information management, SWIM)等。

欧洲提出的SESAR的目标是重新规划欧洲空域以满足空中交通需求,提高空管系统效能,与2004年相比,2020年空域容量将提升3倍,故减少地面等待和空中延误,既能提高安全性,又对环境的影响减少10%,且使空管服务运行成本降低50%等。SESAR的关键技术涵盖空中交通管理的4个关键领域:高效的机场运行、高级空中交通服务、优化的空中交通网络服务和可靠的空管基础设施。

为了在全球范围内推进新一代空中交通管理系统的实现,ICAO更新了《全球空中航行计划》(第4版),航空系统组块升级计划(ASBU)是其主要组成部分,用于指导各国将新技术合理应用到空管系统现代化建设中。ASBU以运行改进为核心,以现有空管技术和新技术应用为手段,提出了机场运行、全球互用的系统和数据、最佳容量和灵活飞行、高效的飞行轨迹等4个性能提升领域,每个领域由多个提升路径组成,并根据实现阶段分布在4个组块中,共构成52个模块。中国民航已实施了ASBU中的部分内容,并规划了将实施ASBU中的大量内容,开展了ADS-B、陆基增强系统、SWIM、持续下降进近和持续爬升运行等技术的研究。

空管是复杂的人在回路系统,管制员依托空管自动化系统进行指挥,飞行员依托飞机自动化系统进行飞行操控,空地协同配合实现安全高效航空运行。根据人与机器的关系可将空管自动化程度分为初级、中级和高级,如表1所示。

表 1 空管自动化程度

Tab. 1 Automation degree of air traffic control

自动化等级	设计理念	特色	管制员负荷	现状
初级	以人为主, 机器为辅信息处理和融合	自动处理和融合雷达数据, 自动处理飞行情报, 自动生成空中态势, 短期冲突告警等	繁忙时高度紧张, 容易出错	已实现
中级	增加决策支持手段	空中交通流量管理, 进离港排序, 空域管理等	负荷减轻, 提升效能	发展中
高级	机器为主, 管制员监控, 高级智能化	管制员、机长行为的一体化自动监视; 机场、空管、航空公司的整体运行协调, 多元化空域, 有人机和无人机的管理等	负荷轻	探索规划中

现有空管技术的自动化程度处于不同等级,例如,信息处理和融合处于自动化初级阶段,进离港排序等决策支持处于自动化中级阶段。

空管自动化的初级阶段以人为主,机器为辅,重点解决空管信息获取与处理问题。空管部门在地面配置了一次和二次监视雷达,在飞机上加装二次雷达应答机,设计和开发出高性能的雷达数据处理系统,实现了程序管制向雷达管制的转变。单雷达系统以其固有的局限性极大地限制了雷达管制效能的提高,因此,采用多雷达联网技术将来自多部雷达的目标位置测量数据进行融合,形成新的、精度更优的目标位置信息。在数据融合中,需要解决航迹校正、航迹关联、航迹数据融合计算等一系列关键技术问题<sup>[3-5]</sup>。多雷达航迹融合算法采用马赛克算法、加权平均法、卡尔曼滤波算法<sup>[6-7]</sup>等。随着自动相关监视(ADS)技术的发展,在多雷达联网的基础上应用ADS技术,可实现空中交通的有效管理。ADS航迹与系统航迹的融合采用优选法、加权平均法等方法。除了监视信息外,空管系统处理的另一类重要信息是飞行计划,将飞行计划与雷达航迹关联便于管制员进行指挥和空管系统的实时监控<sup>[8]</sup>。中期冲突探测与解脱是空中交通管制的重要决策支持工具,是提高空中交通飞行安全和减轻地面管制员工作负荷的一种有效手段,主要有概率型中期冲突探测算法<sup>[9]</sup>和非概率型中期冲突探测算法<sup>[10-11]</sup>,但此类方法在实际应用中还不太成熟。

随着空中交通流量快速增长,在实施空中交通管理的过程中出现了一个新的课题——空中交通流量管理。空中交通流量管理是在空中交通流量接近或达到空中交通管制可用能力时,预先或适时采取适当措施,保障空中交通最佳地流入或通过相应区域,缓解交通拥挤的管理方法。空中交通流量预测是空中交通流量管理的基础。空中交通流量预测根据预测时间长短分为长期预测、中期预测和短期预测。科学、准确的中长期预测是各级航空决策部门制定发展战略、发展规划的依据,短期流量预测是空中交通网络流有序、畅通和高效的保障。国内外一些学者研究了运用趋势预测法、回归模型预测法<sup>[12]</sup>、神经网络预测法<sup>[13-14]</sup>、时间序列法<sup>[15]</sup>、聚类法<sup>[16]</sup>、灰色预测<sup>[17]</sup>等算法进行中长期空中交通流量预测。短期飞行流量预测基于四维航迹预测对空域飞行流量进行预测和统计。空中交通流量管理通过容量和流量匹配实现空中交通供需平衡,国内外一些学者对地面延误程序<sup>[18-20]</sup>、尾随间隔<sup>[21]</sup>、改航<sup>[22-23]</sup>、排序<sup>[24-25]</sup>等飞行流量调配技术进行了研究。在排序算法的理论研究方面,一些学者提出使用遗传算法<sup>[26]</sup>、蚁群算法<sup>[27]</sup>、鱼群算法<sup>[28]</sup>、粒子群算法<sup>[29]</sup>等方法进行优化排序调

度。在系统研发方面,美国使用交通管理咨询工具(traffic management advisor, TMA)进行航班排序管理和跑道分配<sup>[30]</sup>。欧洲主要使用进场管理(arrival management, AMAN)和离场管理(departure management, DMAN)系统<sup>[31-32]</sup>。

飞行量的快速增加造成空域使用紧张问题日益突出,对空域管理水平也不断提高。自20世纪80年代以来,空域管理在空域规划、空域运行管理、空域容量评估等关键技术方面的研究不断深入并得到广泛应用。空域规划对航路网络<sup>[33]</sup>、终端区<sup>[34]</sup>、管制扇区<sup>[35]</sup>等空域进行规划设计;空域运行管理对空域分类、运行性能<sup>[36]</sup>等进行研究;科学、准确的空域容量评估是实施控制交通管理,充分利用空域资源的基础,空域容量评估的方法包括基于计算机仿真模型的评估<sup>[37-38]</sup>、基于历史统计数据评估的评估、基于数学模型的评估和基于管制员工作负荷的容量评估<sup>[39-40]</sup>。

虽然空中交通管制、空中交通流量管理、空域管理理念与方法的发展,以及中期冲突探测与解脱、进离港排序、协同决策等技术为空管人员提供了一定辅助决策支持手段,但空管工作对管制员的依赖程度仍然较高,由于人为的“错、忘、漏、低效”影响航空安全运行的事情不能完全避免。1996年,沙特波音747与哈萨克斯坦伊尔62客机在上升/下降中相撞,致400余人死亡。2002年德瑞边境,瑞士空管员指挥失误致俄罗斯图154客机与美航757货机相撞。2016年10月11日,上海虹桥机场由于管制员指挥失误造成两架飞机险些相撞。因此,飞行规模不断增大带来的运行和管理问题既不能完全依靠人工经验和技巧进行管制指挥、流量调控和空域管理,也不能仅靠管理系统规模的不断扩张来解决,亟需将人工智能技术应用到空中交通管理系统中,机器为主、管制员监控,实现高级智能化,达到空管自动化高级程度,适应日益复杂和大量的飞行任务。

## 2 智能化空管概念

### 2.1 以深度学习为代表的人工智能

人工智能(artificial intelligence, AI)是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术及应用系统的一门多学科交叉的技术科学。在深度学习的推动下,人工智能取得了飞速发展。目前,深度学习成功应用于计算机视觉、语音识别、自然语言处理、人机博弈等多个领域。

2012年,深度学习算法AlexNet赢得了图像分类竞赛ILSVRC(ImageNet large scale visual recognition challenge)冠军,Google Inception Net网络获得2014年冠军,ResNet网络获得2015年冠军,这些卷积神经网络

络结构使深度学习技术在计算机视觉领域取得了突破性成就。深度学习能够更加智能、自动地提取复杂特征,在语音识别、语音合成、语言模型和机器翻译等领域都实现了巨大的技术突破。

深度学习在人机博弈上的突破使得深度学习被大众熟知。2016年,谷歌DeepMind研发的围棋对战程序AlphaGo战胜了人类围棋冠军。AlphaGo中使用了策略网络(policy net)、估值网络(value net)和蒙特卡罗树搜索等技术,其中,估值网络通过有监督的深度学习实现,策略网络通过深度强化学习实现<sup>[41]</sup>。2017年,AlphaGoZero仅使用纯粹的深度强化学习技术和蒙特卡罗树搜索,在很短的时间内击败了AlphaGo,证实了强化学习的强大能力<sup>[42]</sup>。强化学习可以在复杂的、不确定的环境中学习如何实现既定目标,可以广泛应用到需要做一系列决策的场景中,如机器人控制<sup>[43]</sup>、地面交通信号灯控制<sup>[44-45]</sup>等。国内外一些学者研究了强化学习在滑出时间预测<sup>[46-47]</sup>、地面等待<sup>[48]</sup>、空中交通流量管理<sup>[49-50]</sup>等空中交通领域的应用。

## 2.2 智能化空管定义

智能化是指使对象具备灵敏准确的感知功能、正确的思维与判断能力,以及行之有效的执行功能而进行的工作,是信息化的最新阶段。

智能化空管是指适应现在和未来的航空运行概念和程序,充分利用先进的通信、导航、监视、气象分析、网络互联、物联网和信息处理技术,形成整体一致共享的空管运行态势感知,具有智能化的空管全过程预测预判分析、管控和服务能力手段,以全面提高空管管理、运行、指挥和服务智能化水平,并具有环境友好性。智能化空管的内涵体现在空域管理、飞行流量管理、管制指挥、飞行服务和支撑保障体系等领域的信息化,坚持安全第一,优化管理运行业务流程,提高空管运行效率和服务质量,达到“智能化决策、精细化管理、敏捷性运行、预防性安全、个性化服务”的智能化水平。

## 3 智能化空管系统总体框架

智能化空管系统感知层获取信息,网络层传输信息,平台层实现信息存储、信息交换、信息处理等,应用层涵盖管制指挥、空域管理、流量管理、飞行服务、低空/通航、无人机空管保障等空管应用,可视化层提供高效快捷的智能化交互。通过分层原则实现基础平台和空管应用的灵活可扩充,智能化空管系统总体框架如图1所示。

智能化空管框架的具体组成如下:

1) 感知层。感知层为空管安全高效发展提供基础保障,主要包括各类通信、导航、监视、气象、无线、

图像采集、射频识别等设施设备。

根据传输信息对象的不同,空管通信分为语音通信和数据通信。语音通信包括:甚高频语音通信、高频语音通信、卫星语音通信等。随着飞行数的激增,语音信息交换频率增加且受到人员语言表达能力等方面的限制,语音通信不易实现航空数据的采集、传输、处理、共享和管理,阻碍了空中交通管理系统自动化的进一步发展。完善语音通信的覆盖,实施数据链通信和地面IP网络技术,推进航空移动通信,提高空管通信保障能力。

导航系统为航空器在远洋/荒漠区域飞行、航路/终端区域飞行和进近着陆区域飞行提供导航信息,确保航空器安全、有序飞行。远洋/荒漠飞行主要依靠星基导航系统和自主导航系统提供导航服务保障。航路/终端区导航由陆基导航系统、星基导航系统和自主导航系统提供空天地立体的导航服务保障。进近着陆导航使用仪表着陆系统、微波着陆系统、卫星导航等保障安全着陆。完善陆基导航设施布局,推进星基导航和无线等新技术的应用,提高空管导航保障能力。

空管监视设备主要有雷达、自动相关监视系统、多点定位监视系统等。雷达包括一次雷达、二次雷达、场面监视雷达、低空监视雷达等。自动相关监视主要包括合同式自动相关监视(automatic dependent surveillance-contract, ADS-C)和广播式自动相关监视(ADS-B)。其中,ADS-C是点对点监视,多用于洋区和荒漠地区的远程监视;ADS-B为广播式监视,使飞机主动广播自身位置,具有更加广泛的应用前景<sup>[51]</sup>。多点定位监视系统实时监视机场场面和周围地区的活动目标。各类监视手段都有各自的适用范围,优化监视基础设施布局,提高新技术的应用水平,最大化地利用各类监视技术保证航空器飞行安全。

利用各类气象传感器、气象卫星、气象雷达设备等采集地面和空中气象信息,进行航空危险天气检测,为空管气象保障提供信息源。

空管基础设施利用卫星技术、数据链技术、计算机联网等技术,使用无线、探头、射频识别等新的技术是空中交通管理实现高度自动化、智能化的前提,是保证空中交通安全有序,减轻工作负荷的有效手段。

2) 网络层。网络层是传输融合各类空管信息的基础,空管运行信息除了通过传统的空管基础通信网、空管业务数据传输网和地空通信网等进行传输,还可以使用新兴的互联网、移动网络等向公众发布信息。

3) 平台层。构建面向智能空管的信息服务平台,主要包括信息存储、信息处理、信息交换、服务调度、应用集成、空管大数据挖掘等。应用系统广域信息管

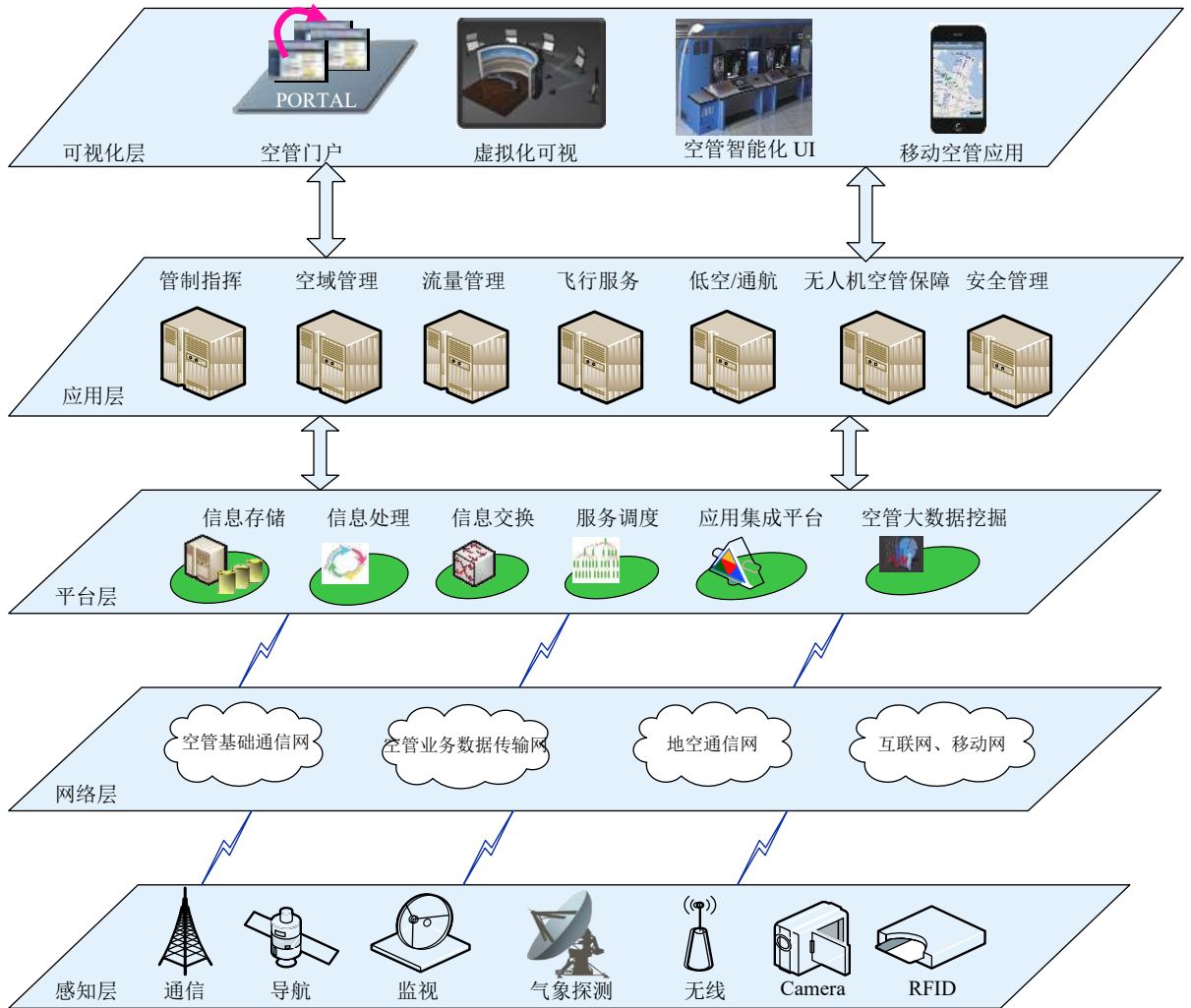


图1 智能化空管总体框架

Fig. 1 Architecture of intellectualized air traffic management

理(SWIM)创建基于标准数据模型和基于互联网协议的航空网,最大限度地提高互用性。研究云计算、智能化大数据挖掘等技术在空管信息服务中的应用,为智能化空管应用层提供支撑。

4)应用层。包括管制指挥、空域管理、流量管理、飞行服务、低空/通航、无人机空管保障等。研究聚类<sup>[52]</sup>、强化学习、深度学习等机器学习技术在空管运行中的应用,提高应用层智能化水平。

5)可视化层。对空管自动化系统用户界面的智能化进行提升,通过空管门户、虚拟化可视、空管智能化UI、移动空管应用等新方式为空管、机场、航空公司、旅客等各类用户提供高效快捷的智能化交互。

## 4 智能化空管主要研究方向展望

### 4.1 智能化空管数据处理

随着空管业务和技术的迅猛发展,数据类型繁多、体量巨大、时效性强的各类空管数据急剧膨胀,

如何收集、存储、分析和挖掘这些大规模的数据是智能化空管的一个研究方向。

综合利用航空通信、导航、监视、气象等领域的新技术为空中交通管理提供更完善的基础设施保障。研究机载数据、文本数据、音频数据、视频数据等空管大数据全面、即时、不间断的收集。

使用云计算技术,将空管信息的处理与服务应用由云计算平台处理完成,实现高效的数据处理、传输、交互,提高空管系统的安全性和可靠性,降低数据管理的复杂性和重复性。

使用深度学习、聚类分析等数据挖掘方法从监视、飞行计划、天气、空域、空管设施设备、文本、音频、视频、空管业务操作等数据中充分挖掘出空管决策支持信息,进行航迹预测、安全监控、空管系统效能评估等空管应用。

### 4.2 智能化辅助决策

研究基于深度学习、强化学习等人工智能方法

的态势感知、智能推理、决策支持等技术,为空管运行中的冲突管理、空中交通流量管理、规划管理、进离场排序、机场运行等提供决策支持。

#### 1) 智能化冲突管理

冲突管理是一套能够对交通流和航空器间隔的管理方式加以完善的完整系统,包括使用地面工具协助管制员评估交通状况和确定合适的间隔,从而把航空器高效、安全地汇聚在一起并保持一定间隔,以及使用机载工具确保飞行机组能够遵循间隔管理指令。研究使用先进的数据计算、人工智能技术高效准确地进行冲突探测,为管制员提供决策支持。

通过智能化的手段进行无人机识别,加强无人机感知与规避能力,研究将无人机与有人机纳入共同空域进行管理的方法和措施,使无人机像有人驾驶航空器一样使用整个空域。

#### 2) 智能化空中交通流量管理

随着协同式流量管理的提出,传统的优化模型已很难对复杂系统进行建模,基于多智能体的仿真建模技术在空中交通流量管理领域具有广泛的应用前景。基于大量历史运行数据对大面积航班延误的产生机理、内部规律、影响等进行分析,使用智能化技术建立空中交通流量问题识别模型,对未来空中交通流量发展态势进行推演。使用监督学习、非监督学习、强化学习等人工智能方法建立科学、系统的流量控制策略,对提高空中交通流量管理水平,保障空中交通安全、顺畅、高效运行具有重要实用意义。研究利用协同决策技术、智能仿真技术、智能决策技术为空中交通流量管理提供决策支持是空中交通流量管理的发展方向。

#### 3) 智能化规划管理

空管运行中积累了大量的监视数据、飞行计划数据、气象信息、空域结构信息、空域容量、飞行流量调配措施等历史数据,对这些数据运用大数据技术、深度学习、机器学习等人工智能技术进行处理、训练和应用,为长期性空域规划、空域结构和运行程序优化等规划管理提供有力支撑。

#### 4) 智能化进离场排序

考虑空域状态、飞机性能、气象条件、管制规则等因素,使用深度学习、数据挖掘等方法对运行数据进行分析,并对进离港航班智能排序,既能提高空域利用率,合理分配使用跑道,又能减少进离场延误,降低航空公司和机场运行成本,减轻管制员工作负荷,且提高管制指挥的安全可靠性。

#### 5) 智能化机场运行

机场为航空器运行提供必要的地面设施,运用移动互联网、地理信息系统(geographic information

system, GIS)、智能视频分析、大数据挖掘等技术实现航班运行信息和车辆活动的实时感知、地面资源的智能分配等,充分发挥机场基础设施的作用;通过机场协同决策提升机场运行效率。

### 4.3 空管指挥语音识别

较长时期内空管指挥都是模拟语音为主、数字信息为辅的运行模式。管制员基于连续的管制画面在大脑中形成空中态势,分析航空诸元,通过地空通话安全、高效地指挥飞机。空管语音是空中交通管制的一种重要手段,研究空管指令语音识别、管制指令自然语言理解、管制指令决策输出等,用于自动应答机长、空管指挥安全监控等,具有较大的实用性。

#### 1) 自动应答机长

管制模拟机是空中交通管制员养成和在岗培训的一个重要训练工具。训练过程中由专人模拟多名飞行员与管制员进行管制地空通话,执行虚拟飞行目标的操作,以配合管制员的训练。因此,模拟机长的人员工作负荷大,配合训练效率低。将空管语音识别、自然语言理解、语音合成等技术应用于管制模拟机,使用自动应答机长代替模拟机长,实现管制指令自动应答和虚拟飞行目标的自动操控,可以大幅度减少训练负荷,降低训练成本,提高管制模拟机的训练效率。

#### 2) 空管指挥安全监控

空中交通管制工作对管制员的依赖性极强,近年来,民航出现的不安全事件较大程度上与陆空通话差错有关。Eurocontrol调查显示飞行员的无线电通话80%不够准确,30%的事故因通信错误造成(其中,受机场环境影响高达50%),23%的高度层偏差和40%的跑道入侵事件也与地空通话质量有关。现有空管系统无法接入陆空通话数据,不能及时获得管制指令信息,因此不能检测空管通话差错。空管语音识别和指令解析是解决上述问题的新思路。

运用深度学习为代表的人工智能技术,以空管语音识别<sup>[53-54]</sup>、空管指令理解<sup>[55-56]</sup>为基础,融合空管实时态势智能检测管制指令的不一致、不安全等风险,及时提示管制员进行处置,防止不安全事件发生,可以大幅度减少空管指挥中“人为”不安全风险,降低管制员工作负荷。

### 4.4 空管指挥机器人

利用机器视觉、语音识别、空管信息处理等技术让机器人获得空域态势,具有管制员的感知能力;通过深度学习、强化学习等技术使机器人具备管制规划和推理能力;运用语音控制、语音合成等技术,使机器人具备发布空管指令,填写电子进程单等行动能力。具备了感知、规划、推理、行动等能力的空管指

挥机器人能够代替管制员进行空中交通管制,在必要时或在其提出要求时通知管制员,达到空管自动化的高级阶段。

## 5 结 论

对现有空中交通管理战略规划、空管运行概念、空管关键技术及空管系统进行分析,针对空管智能化趋势,提出空管智能化总体框架以及重点研究的技术内容,可以为加强智能化空管顶层设计,制定空管智能化总体框架及实施路线图提供参考;展望智能化空管主要研究方向,为早日突破智能化空管关键技术,推广应用到空管管制指挥、飞行流量管理、空域管理等实际运行中,提高空管信息处理、决策支持的智能化水平指明方向,最终实现空管运行安全、效率和服务品质的提升。

### 参考文献:

[1] ICAO.Global air navigation plan for CNS/ATM Systems[R]. Montreal:International Civil Aviation Organization,2007.

[2] ICAO.Global air traffic management operational concept[R].Montreal:International Civil Aviation Organization,2005.

[3] Li Yongning,You Zhisheng,Nie Jiansun,et al.A distribution multi-radar tracking and data fusion system[J].*Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*,2004,41(2):305-309.[李永宁,游志胜,聂建荪,等.一种分布式多雷达航迹数据融合系统[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2004,41(2):305-309.]

[4] Liu Jianbo,Wang Yunfeng.Study on the algorithm of distributed radar tracks fusion[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2006,38(6):119-122.[刘健波,王运锋.分布式雷达航迹融合关键技术研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2006,38(6):119-122.]

[5] Bai Songhao.Variable period updating algorithm of multiradar and ADS data fusion[J].*Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2007,7(2):19-23.[白松浩.多雷达与ADS数据融合的可变周期更新算法[J].*交通运输工程学报*,2007,7(2):19-23.]

[6] Zhao Wenbo,Ding Hailong,Qu Chenghua,et al.Study on virtual observation Kalman filter algorithm of multi-radar networking[J].*Journal of System Simulation*,2015,27(4):851-858.[赵温波,丁海龙,曲成华,等.多雷达组网虚拟观测卡尔曼滤波算法研究[J].*系统仿真学报*,2015,27(4):851-858.]

[7] Hu Zhentao,Zhang Jin,Guo Zhen.Unscented Kalman probability hypothesis density filter based on interacting multiple model[J].*Control and Decision*,2016,31(12):2163-2169.[胡振涛,张谨,郭振.基于交互式多模型的不敏卡尔曼概率假设密度滤波算法[J].*控制与决策*,2016,

31(12):2163-2169.]

[8] Feng Ziliang,Yang Hongyu,You Zhisheng.Algorithm of association with flight plan and radar dynamic track[J].*Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*,2003,40(1):171-173.[冯子亮,杨红雨,游智胜.飞行计划与雷达航迹关联算法与实现[J].*四川大学学报(自然科学版)*,2003,40(1):171-173.]

[9] Pallottino L,Feron E M,Bicchi A.Conflict resolution problems for air traffic management systems solved with mixed integer programming[J].*Intelligent Transportation Systems*,2002,3(1):3-11.

[10] Ruiz S,Piera M A,Isabel D P.A medium term conflict detection and resolution system for terminal maneuvering area based on spatial data structures and 4D trajectories[J].*Transportation Research Part C(Emerging Technologies)*,2013,26:396-417.

[11] Emami H,Derakhshan F.An overview on conflict detection and resolution methods in air traffic management using multi agent systems[C]//Proceedings of the 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing,AISP 2012.Shiraz:IEEE,2012,293-298.

[12] Zhao Yuhuan,Guo Shuang.Study on forecasting model of air traffic flow considering stochastic factors[J].*Journal of Civil Aviation University of China*,2008,26(4):59-61.[赵玉环,郭爽.考虑随机因素的空中交通流量预测模型研究[J].*中国民航大学学报*,2008,26(4):59-61.]

[13] Cui Deguang,Wu Shuning,Xu Bing.Air traffic flow forecasts based on artificial neural networks combined with regression methods[J].*Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*,2005,45(1):96-99.[崔德光,吴淑宁,徐冰.空中交通流量预测的人工神经网络和回归组合方法[J].*清华大学学报(自然科学版)*,2005,45(1):96-99.]

[14] Wang Shuming,Xia Guoping.Method of flying dynamic real-time forecast based on BP neural network[J].*Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2001,27(6):636-639.[王树明,夏国平.基于BP神经网络的飞行动态实时预测方法[J].*北京航空航天大学学报*,2001,27(6):636-639.]

[15] Zhao Yuhuan,Shi Xinhua.Air traffic flow gray forecast model algorithm based on time series[J].*Journal of China Civil Aviation University*,2007,25(6):54-57.[赵玉环,石新华.基于时间序列的空中交通流量灰预测模型算法[J].*中国民航大学学报*,2007,25(6):54-57.]

[16] Fan Wei,Chen Zengqiang,Yuan Zhuzhi.Flight demand forecasting model based on C-mean clustering algorithm[J].*Information and Control*,2003,12(6):553-560.[樊玮,陈增强,袁著祉.基于C-均值聚类的航班预测模型[J].*信息与控制*,2003,12(6):553-560.]

[17] Wang Shijin,Sui Dong,Hu Bin.Forecasting technology of



- national wide civil aviation traffic[J].*Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010,10(6):95–102.[王世锦,隋东,胡彬.全国民航空中交通量长期预测技术研究[J].*交通运输系统工程与信息*, 2010,10(6):95–102.]
- [18] Vossen Thomas W.Slot trading opportunities in collaborative ground delay programs[J].*Transportation Science*,2006, 40(1):29–43.
- [19] Ball M O,Hoffman R,Mukherjee A.Ground delay program planning under uncertainty based on the ration-by-distance principle[J].*Transportation Science*,2010,44(1):1–14.
- [20] Glover C N,Ball M O.Stochastic optimization models for ground delay program planning with equity-efficiency tradeoffs[J].*Transportation Research Part C(Emerging Technologies)*,2013,33(1):196–202.
- [21] Wang Yao,Grabbe S.Modeling weather impact on airport arrival miles-in-trail restrictions[J].*SAE International Journal of Aerospace*,2013,6(1):247–259.
- [22] Mukherjee A,Hansen M.A dynamic rerouting model for air traffic flow management[J].*Transportation Research Part B(Methodological)*,2009,43(1):159–171.
- [23] Agustin A,Alonso-Ayuso L A,Escudero L F,et al.On air traffic flow management with rerouting.Part II:Stochastic case[J].*European Journal of Operational Research*,2012, 219(1):167–177.
- [24] Hancerliogullari G,Rabadi G,Al-Salem A H,et al.Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem[J].*Journal of Air Transport Manage*,2013,32:39–48.
- [25] Ma Weimin,Xu Bo,Liu Ming,et al.An efficient approximation algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling problem[J].*Mathematical Problems in Engineering*, 2014,2014.
- [26] Xu Xiaohao,Yao Yuan.Application of genetic algorithm to aircraft sequencing in terminal area[J].*Journal of Traffic and Transportation Engineering*,2004,4(3):121–126.[徐肖豪,姚源.遗传算法在终端区飞机排序中的使用[J].*交通运输工程学报*,2004,4(3):121–126.]
- [27] Li Zhirong,Zhang Zhaoning.Prioritizing landing flights based on ACS[J].*Journal of Transportation Engineering and Information*,2006,4(2):66–69.[李志荣,张兆宁.基于蚁群算法的航班着陆排序[J].*交通运输工程与信息学报*,2006, 4(2):66–69.]
- [28] Wang Fei,Xu Xiaohao,Zhang Jin.Mixed artificial fish school algorithm of aircraft sequencing in terminal area[J].*Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008,8(3):68–72.[王飞,徐肖豪,张静.终端区飞机排序的混合人工鱼群算法[J].*交通运输工程学报*,2008,8(3):68–72.]
- [29] Wang Shihao,Yang Hongyu,Wu Xiping,et al.Research on optimization mathematical model of arrival flights scheduling[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2015,47(6):113–120.[王世豪,杨红雨,武喜萍,等.进港航班排序优化数学模型研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2015,47(6):113–120.]
- [30] Robollo J,Brinton C.Brownian motion delay model for the integration of multiple traffic management initiatives[C]// Proceedings of the 11th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar,ATM 2015.Lisbon:Eurocontrol,2015,5–15.
- [31] Zammit-Mangion D,Rydell S,Sabatini R,et al.A case study of arrival and departure managers cooperation for reducing airborne holding times at destination airports[C]//Proceedings of the 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences 2012,ICAS 2012.Brisbane:ICAS, 2012,4411–4420.
- [32] Pina P,De Pablo J M,Mas M.Linking existing on ground,arrival and departure operations[C]//Proceedings of the 6th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar,ATM 2005.Baltimore:Eurocontrol, 2005,692–700.
- [33] Cai Kaiquan,Zhang Jun,Zhou Chi,et al.Using computational intelligence for large scale air route networks design[J].*Applied Soft Computing Journal*,2012,12(9):2790–2800.
- [34] Song Weiwei,Huang Cui.The analysis and research of northeast route network optimization[J].*Applied Mechanics and Materials*,2014,623:295–299.
- [35] Wei Jian,Sciandra V,Hwang I,et al.Design and evaluation of a dynamic sectorization algorithm for terminal airspace[J].*Journal of Guidance,Control,and Dynamics*,2014,37(5): 1539–1555.
- [36] Clarke J P B,Ren Liling,McClain E,et al.Evaluation concepts for operations in metroplex terminal area airspace[J].*Journal of Aircraft*,2012,49(3):758–773.
- [37] Nosedal J,Piera M A,Solis A O,et al.An optimization model to fit airspace demand considering a spatio-temporal analysis of airspace capacity[J].*Transportation Research Part C(Emerging Technologies)*,2015,61:11–28.
- [38] Bodoh D J,Wieland F.Performance experiments with the high level architecture and the total airport and airspace model (TAAM) [C]//Proceedings of the 17th Workshop on Parallel and Distributed Simulation,PADS 2003.Shiraz: IEEE,2003,31–39.
- [39] Majumdar A,Polak J.Estimating capacity of Europe's airspace using a simulation model of air traffic controller workload[J].*Transportation Research Record(Journal of the Transportation Research Board)*,2001(1744):30–43.
- [40] Oktal H.A new approach to air traffic controller workload measurement and modeling[J].*Aircraft Engineering and*

[Aerospace Technology](#),2011,83(1):35–42.

- [41] Silver D,Huang A,Maddison C J,et al.Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search[J].[Nature](#),529(7587):484–503.
- [42] Silver D,Schrittwieser J,Simonyan K,et al.Mastering the game of Go without human knowledge [J].[Nature](#),550(7676):354–390.
- [43] Martin R,Thomas G,Roland H.Reinforcement learning for robot soccer[J].[Autonomous Robots](#),2009,27(1):55–73.
- [44] Erwin W,Matthijs T J S,Bram B.Traffic flow optimization: A reinforcement learning approach[J].[Engineering Applications of Artificial Intelligence](#),2016,52(1):203–212.
- [45] Zhu Feng,Ukkusuri S V.Accounting for dynamic speed limit control in a stochastic traffic environment:A reinforcement learning approach[J].[Transportation Research Part C\(Emerging Technologies\)](#),2014,41(1):30–47.
- [46] Elizabeth G,Shamsuddin S K.Reinforcement learning for taxi-out time prediction:an improved Q-learning approach[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Computing and Network Communications,CoCoNet 2015.[Piscataway:IEEE](#),2015:757–764.
- [47] Cruciol L B V,Li Weigang.Air holding problem solving by reinforcement learning to reduce the congestion in airspace sectors[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Artificial Intelligence,ICAI 2012.Toronto:AAAI,2012:272–278.
- [48] Leonardo L B V C,Antonio C D A,Li Weigang,et al.Reward functions for learning to control in air traffic flow management[J].[Transportation Research Part C\(Emerging Technologies\)](#),2013,35(1):141–155.
- [49] Crespo A M F,Li Weigang.Agent evaluation function considering airspace dynamic density[C]//Proceedings of the 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology.[Piscataway:IEEE](#),2010:392–396.
- [50] Agogino A K,Tumer K.A multi-agent approach to managing air traffic flow[J].[Autonomous Agents and Multi-Agent Systems](#),2012,24(1):1–25.
- [51] Zhang Jun.New development and application of airspace surveillance technology[J].[Acta Aeronautica et Astronautica Sinica](#),2011,32(1):1–14.[张军.空域监视技术的新进展及应用[J].[航空学报](#),2011,32(1):1–14.]
- [52] Kuhn K D.A methodology for identifying similar days in

air traffic flow management initiative planning[J].[Transportation Research Part C\(Emerging Technologies\)](#),2016,69:1–15.

- [53] Graves A,Jaitly N.Towards end-to-end speech recognition with recurrent neural networks[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning,ICML 2014.Beijing:International Machine Learning Society (IMLS),2014:1764–1772.
- [54] Amodei D,Ananthanarayanan S,Anubhai R,et al.Deep Speech 2:End-to-End Speech Recognition in English and Mandarin[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning,ICML 2016.New York:International Machine Learning Society (IMLS),2016:173–182.
- [55] Guo D,Tur G,Yih W T,et al.Joint semantic utterance classification and slot filling with recursive neural networks[J].[Spoken Language Technology Workshop](#),2015,6(3):554–559.
- [56] Mesnil G,He Xiaodong,Deng Li,et al.Investigation of recurrent-neural-network architectures and learning methods for spoken language understanding[C]//Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Speech Communication Association,Interspeech 2013.Lyon:ISCA,2013:3771–3775.



杨红雨,女,博士,教授,博士生导师。国家空管专家,国务院政府特殊津贴获得者,国家高技术研究发展计划(863计划)信息技术领域专家组专家,第六届中国图象图形学会副理事长,国家空管自动化系统技术重点实验室主任,视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室主任,四川省学术和技术带头人,四川大学图象图形研究所所长,四川大学“985工程”二期“复杂多维信息处理技术”创新平台学术带头人。

长期从事计算机应用技术研究,在空中交通管制核心技术、多传感器信息融合技术、虚实融合的虚拟现实技术等方面有多项重大创新,先后主持了30多项国家863计划、国家自然科学基金项目及军队、省部级重大和重点科技项目,担任中国军民航多项空管重大工程项目总设计师,发表学术论文100余篇。获国家科技进步一等奖1项,国家科技进步二等奖2项,省部级科技进步一等奖3项。

(编辑 赵婧)

引用格式: Yang Hongyu,Yang Bo,Wu Xiping,et al.Research and prospect of intellectualized air traffic management technology[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2018,50(4):12–21.[杨红雨,杨波,武喜萍,等.智能化空管技术与展望[J].[工程科学与技术](#),2018,50(4):12–21.]