

# 地理信息技术应用下的无人机云端管理系统发展

谭均铭<sup>1,2</sup>, 廖小罕<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100190; 3. 天津中科无人机应用研究院, 天津 301800;  
4. 中国科学院无人机应用与管控研究中心, 北京 100101)

**摘要:** 日益增长的无人机飞行需求与有限的低空空域之间的矛盾愈发激烈, 世界各国都在推进无人机管控政策和技术手段研究, 即便在最自由的美国G类非管制空域, 管理当局也在制定更为严格的无人机管控措施。无人机云端管理系统作为一种新型的数字化监管手段, 其系统建设框架和技术路线得到了国内外学者和监管部门的广泛关注与研究。地理信息技术作为云端管理系统的应用技术之一, 具体体现在以下几方面: 利用全球导航卫星系统(GNSS)实现无人机精准空间定位; 通过遥感技术(RS)获取影响无人机飞行安全的地理约束要素信息; 基于地理信息系统(GIS)对低空地理空间数据进行组织管理以及构建低空虚拟地理环境等。论文结合团队在无人机低空应用上的研究进展, 指出地理信息技术可以在云端管理和航路规划方面为无人机运行管理提供解决方案。

**关键词:** 无人机; 云端管理系统; 地理信息; 全球导航卫星系统; 遥感技术

随着电子技术和工艺水平发展进步, 无人机在各行各业应用的可行性大大提高, 无人机飞行需求逐年增长。《中国人工智能发展报告2018》表明, 2019年全球民用无人机出货量达到370万架, 预计到2023年, 数量将会翻倍。中国是无人机生产和运行大国, 截至2019年底, 民航局实名登记系统已注册无人机约39.2万架, 无人机商业飞行125万h<sup>[1]</sup>。与此同时, 相关数据显示无人机运行高度在120 m以下的占93.3%, 运行高度在15 m以下的无人机飞行小时数占到了79%<sup>[2]</sup>。无人机的运行集中在与人类活动息息相关的低空空域内, 带来的航空和公共安全问题也日益严峻; 而且目前仍然有许多无人机还没有在实名登记系统中注册, 其中绝大部分是在低空飞行的无人机, 处于监管盲区。

为了保障无人机低空飞行安全, 国内外在无人机监管的政策上进行了一系列的探索研究。美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)规定重量在250 g到25 kg之间的无人机必须进行实名登记, 并且与美国国土安全局、国防部、地方政府和警察机构共同建立无人机管控协作机制, 即使在限制最少的G类非管制空域, 无人机的飞行也需要遵守Part 107规则<sup>[3]</sup>。日本政府在2015年9月对航空法进行修订, 增加了无人机安全运行法规, 所有无人机飞行豁免须经过国土交通部相关部门批准<sup>[4]</sup>。中国在政府层面成立了以国家空管委、空军、海军、民航局、公安部、工信部等为成员单位的无人驾驶航空器管理部级联席工作机制, 组织起草《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见

收稿日期: 2020-10-07; 修订日期: 2021-03-24。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB0503005); 国家自然科学基金项目(41971359, 41771388); 天津科技计划项目智能制造专项(Tianjin-IMP-2018-2)。[**Foundation:** National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB0503005; National Natural Science Foundation of China, No. 41971359 and 41771388; Tianjin Intelligent Manufacturing Project, No. Tianjin-IMP-2018-2.]

**第一作者简介:** 谭均铭(1994—), 男, 广西人, 博士生, 主要从事无人机组网管控、三维地理信息技术和遥感应用研究。

E-mail: tanjm.19b@igsrr.ac.cn

**\*通信作者简介:** 廖小罕(1963—), 男, 贵州人, 博士, 研究员, 主要从事无人机组网遥感应用、无人机航路规划、遥感大数据计算等研究。E-mail: liaoxh@igsrr.ac.cn

**引用格式:** 谭均铭, 廖小罕. 地理信息技术应用下的无人机云端管理系统发展[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1451-1466. [Tan Junming, Liao Xiaohan. Development of unmanned aerial vehicle cloud management system with the application of geographic information technology. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1451-1466.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.09.002

稿》,并在2020年纳入国务院立法工作计划<sup>[5]</sup>。在部委层面,各部门针对无人机管理出台相应的政策和规定,如民航局颁布的《轻小无人机运行规定(试行)》,将无人机按照重量分为7类以便分类管理<sup>[6]</sup>。公安部起草的《中华人民共和国治安管理处罚法(修订公开征求意见稿)》提出了无人机违法飞行处罚的相关细则<sup>[7]</sup>。工信部公示《无人机制造企业规范条件》规定无人机应具备敏感地区飞行限制功能和感知避让能力,并具有唯一产品编码,以推进无人机研发、制造、销售、使用等各环节的监管工作<sup>[8]</sup>。综合来看,现有的规范性文件主要解决轻小型无人机运行安全问题,大量无人机飞行活动仍处于无监管状态<sup>[9]</sup>。

科技发展日新月异,研究建立和发展与政策相适应的监管技术和管理方法,是当前面临的紧迫需求。无人机云端管理系统作为一种新型的数字化监管手段应运而生,得到了世界各个国家和地区的广泛研究。通过近几年的探索实践,多个无人机云端管理系统已经在稳定运行,并应用在低空安全支持等方面,系统建设的必要性也已经得到了各方的肯定。然而,在无人机运行最为频繁的低空空域,涉及地理位置、地形地貌、地表建筑、交通道路、河流水系、高塔电线等影响无人机飞行安全的地理约束要素,现有无人机云端管理系统普遍缺少这些精准实时的地理信息,低空空域资源在系统中仍然无法得到精细化管理和合理利用,无人机飞行处于无“公路”可走的状态,只能依靠飞手个人基于有限的地理信息规划航线,存在严重的运行安全风险和空域使用效率问题。

基于此,本文对国内外云端管理系统的框架和建设路线进行了梳理,结合团队在无人机应用与管控方面的研究工作,探索地理信息技术(包括GNSS、RS、GIS等)在无人机云端管理系统中的支撑作用,具体表现在:充分利用地理信息技术开发无人机云端管理系统,可以提供实时精准的无人机地理位置数据,获取海量动态的地理约束要素信息,基于构建的低空虚拟三维地理环境,对低空空域进行精细化管理,规划无人机安全飞行的低空公共航路,评估无人机运行风险并有序管理无人机飞行。

## 1 国内外无人机云端管理系统框架建设

区别于局部范围内加装无线电设备对无人机

进行探测侦察和欺骗干扰的管控方式,无人机云端管理是结合互联网、云计算、人工智能、移动通信等高新技术手段,对大区域范围内一定数量无人机的位置和飞行状态进行交通管理,并考虑无人机监管方、运营商、用户之间的信息交互,通过数据共享、空域配置、智能决策等方式融入既有的空中交通管理体系,且必要时能对无人机进行干预和控制。无人机云端管理系统对无人机的高效合理运行具有重大意义,已有多个国家和地区的空管部门、科研院所以及无人机企业对无人机云端管理系统的框架进行了研究和建设。

### 1.1 美国UTM

2015年7月美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)举办的无人航空器交通管理大会上首次提出无人驾驶航空器系统交通管理(Unmanned Aircraft System Traffic Management, UTM)理念<sup>[10]</sup>。2017年1月,进一步明确UTM是由NASA负责研究和提供决策建议,由美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)实施的一个400英尺(约120 m)以下超低空空域的非管制无人机空中交通管理系统<sup>[11]</sup>。该系统主要目的是通过确定服务内容、角色/责任、信息架构、数据交换协议、软件功能、基础设施和性能要求等,实现大量无人机同时在超低空飞行而不发生撞击事故。系统将独立于现有运行的空中交通管理系统(Air Traffic Management, ATM),并与之互补。

UTM的几大核心功能和建设目标包括:轻小型无人机注册、低空授权和通知协调能力(Low Altitude Authorization and Notification Capability, LAANC)<sup>[12]</sup>、动态限制和信息共享的UTM试点计划(UTM Pilot Program, UPP)<sup>[13]</sup>、空域批准和远程识别预定服务的飞行信息管理系统(Flight Information Management System, FIMS)及若干自定义的附加服务等。UTM系统架构如图1。

UTM的技术成熟度(Technology Capability Levels, TCL)<sup>[15]</sup>计划分4个阶段测试:

TCL第一阶段旨在实现视距内运行无人机信息共享,满足农业、消防和基础设施监控需求。该阶段主要关注地理围栏、基于飞行高度的航线规则和航线调度等关键技术。该阶段测试已于2015年8月完成,并继续开展附加试验。TCL第二阶段基于第一阶段成果,目的在于实现低人口密度区域内

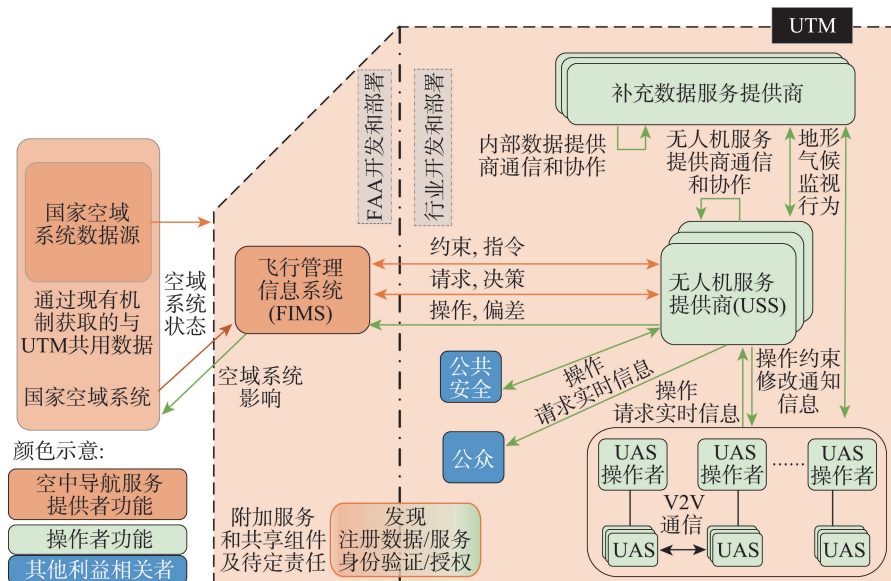
图1 UTM系统架构图<sup>[14]</sup>

Fig.1 Framework of the UTM system

超视距运行无人机的跟踪操作。该阶段测试已于2016年4月在FAA和NASA的6个无人机基地完成,试验最多时有20架无人机被允许同时飞行,验证了UTM在人烟稀少地区超视距飞行时可动态调整空域可用性和应急管理的关键技术。TCL第三阶段于2018年1月进行常态超视距运行测试,包括空中机对机(Vehicle-to-Vehicle, V2V)防撞,规避静态障碍物。该测试在人口密度较大的地区进行,系统对合作和不合作的无人机具备跟踪能力。TCL的最后一个阶段也已于2019年6月在内华达州完成,并于同年8月在得克萨斯州进行实际飞行验证,实现了城市复杂超视距跟踪和定位,规避动态障碍物等功能的验证,以满足在高密度的城市地区完成如新闻采集和送货等操作需求,以及大规模的应急需求。

NASA技术研发测试的结果将转交给FAA进行进一步测试,以达到可实际运行的空域融合。目前,美国的UTM架构中,无人机云系统服务提供商为轻小型无人机提供高效的通报和批准服务(LAANC)功能已较为成熟,具备LAANC资质的云系统服务商包括AirMap等18家公司,主要包括3类通报和授权服务:①近实时自动批准授权,主要针对在某些特定管制空域内设定的网格限高地图,自动批准低于限制高度的飞行计划;②远程协调批准授权,主要针对在管控区内进行超过限制高度的飞行,用户需要将飞行计划请求递交到FAA进行人

工批准,周期为1~30 d;③娱乐飞行豁免权,主要针对无飞行执照的爱好者的飞行请求,需在相关网站实名注册无人机信息并粘贴在无人机机身上,在非管制区域飞行,飞行高度不能超过400英尺(约120 m)<sup>[16]</sup>。

## 1.2 欧洲U-Space

U-Space是欧洲单一天空空管研究计划(The Single European Sky ATM Research, SESAR)联合执行体(Joint Undertaking, JU)于2017年6月制定的无人机云端交通管理系统蓝图,旨在通过设计一系列依赖于高度数字化和自动化的服务和特定流程,在保证大量无人机飞行中的自身安全和地面安全的前提下,合理有效地使用各个等级的空域<sup>[17]</sup>。U-Space的核心元素是一系列确保无人机在所有等级的空域中安全和高效运行的联合管控服务和相关功能,这些服务由不同的U-Space服务提供商(U-space Service Provider, USP)提供,但服务提供商需要在无缝和安全的互操作环境中及时准确地进行数据交换,以确保具有完全相同的态势感知,从战略或战术角度对空域交通流量风险进行管控或消解。U-Space框架内的服务将通过与ATM的适当接口来应对无人机运行数量和种类的增长趋势,最终整个空域将演变成一个全面集成的支持有人机和无人机协同运行的环境<sup>[18]</sup>。

基于以上初步设计,欧洲各国和相关组织给出了U-Space具体的解决方案。如瑞士U-Space框架<sup>[19]</sup>



基于高度自动化的分布式云环境构建,由一组联合的(去中心化)参与者来组织、协调和管理,通过一系列标准化应用程序编程接口(Application Programming Interface, APIs)交换信息。该系统基本框架如图2所示。

随着时间的推移和技术进步,U-space提供的服务类型将随着无人机自动化水平的提高而增多,并将主要通过数字信息和数据交换实现更高级的环境交互方式(包括有人驾驶和无人驾驶飞机)。SESAR将U-Space的服务发展分为4个阶段<sup>[17]</sup>:U-Space第一阶段U1为基础服务,主要提供无人机电子注册、电子识别和电子围栏服务;第二阶段U2为初始服务,主要为无人机运行管控提供支持,包括飞行计划、飞行审批、追踪、动态空域信息以及与ATM程序接口建设;第三阶段U3为高级服务,旨在支持人口稠密地区进行复杂环境的无人机飞行,包括容量管理、冲突监测和辅助避让;第四阶段U4为全面服务,旨在实现U-Space和无人机系统的高自动化、高连通性和高数字化,并能为有人机提供特别的服务接口。

截至2019年底,SESAR研发的无人机云端管理系统已经基本实现U1级别的基础服务,如地理围栏和电子识别等,但由于缺乏相关标准规范,在服务性能和兼容性上存在一定差异。对于U2级别的初始服务,尽管当前先进技术支持部分如追踪、飞行计划和通信等方面服务,但在数据连接和互操

作方面仍然表现欠佳<sup>[16]</sup>。

### 1.3 新加坡 uTM-UAS

2017年11月,新加坡交通运输部(Ministry of Transport, MOT)和新加坡民航局(Civil Aviation Authority of Singapore, CAAS)联合发布了一份关于研发国家无人机交通管理系统的立项征求建议书,目的是在保障无人机对空和对地安全的前提下,使得无人机在新加坡人口稠密的城市环境中得到广泛的创新应用。该项目旨在为无人机运行的各种能力和技术发展提供建议,包括如导航能力、感知和避让技术、无人机编队管理和无人机交通管理的解决方案等,这些技术和能力将支持无人机超视距的操作,有助于提高当前无人机应用行业的生产力和效益,如应急搜救、建筑结构检查、地面交通监视等<sup>[20]</sup>。基于此,Mohamed Salleh等<sup>[21]</sup>提出了针对在新加坡城市区域内运行的无人机交通管理的uTM-UAS无人机云端管理系统框架(图3)。

该系统主要从战术和战略角度对城市空域管理、飞行管理和风险管理等功能进行设计。战术层面的功能强调当前短期内的管控,城市空域管理包括空域可达性设置、近期交通流量预测等;飞行管理包括手动路线规划、飞行目的上报、飞行监控等;风险管理包括预警、冲突消解建议等。战略层面的功能重视整体的统筹规划,具体表现为城市空域管理包括空域结构设计、地理围栏设计、需求和容量等指标分析等;飞行管理包括自动路径规划、飞行

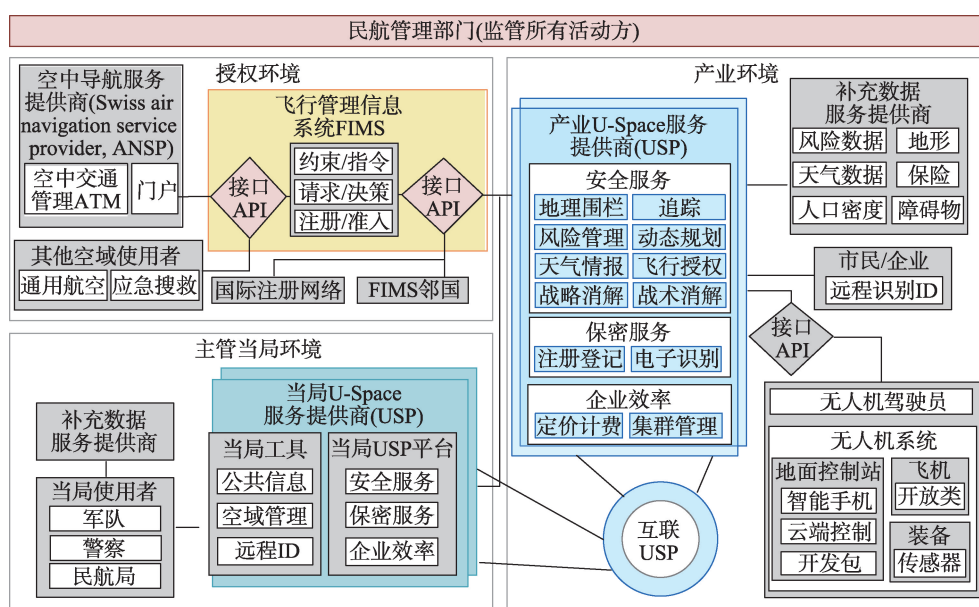


图2 瑞士 U-Space 系统架构图

Fig.2 Framework of the Swiss U-Space system



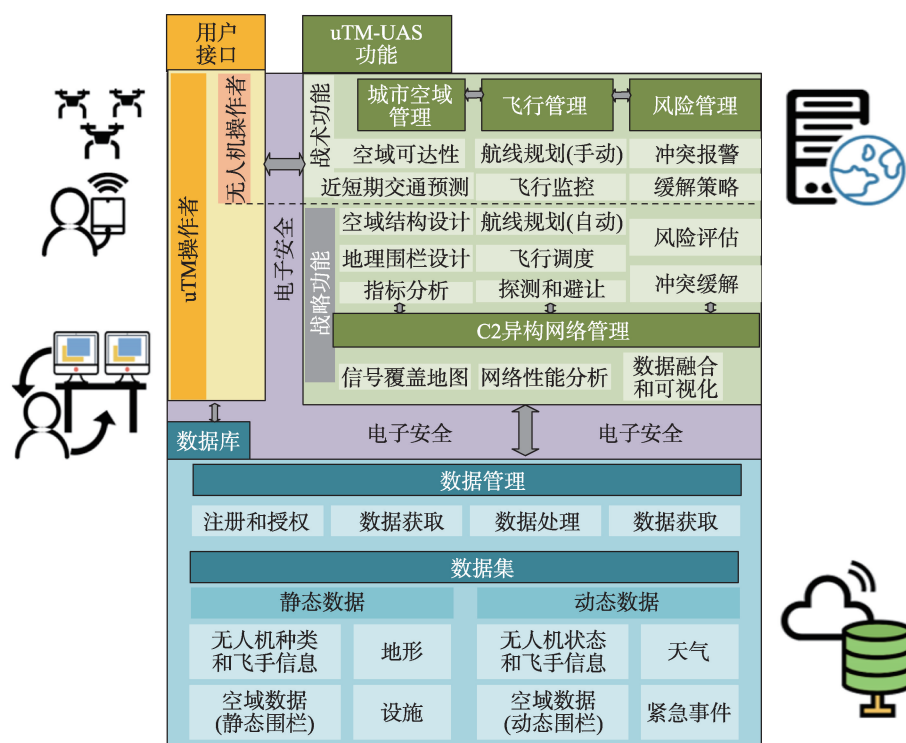


图3 新加坡uTM-UAS系统框架示意图

Fig.3 Framework of the Singapore uTM-UAS system

调度、侦测与回避、飞行授权等;风险管理包括风险评估和风险消解等。

2019年12月,uTM-UAS无人机云端管理系统建设的第二阶段测试完成,试验中测试了距离地面0~300 m(1000英尺)的不同高度LTE(long term evolution)网络信号连通性,试图建立信号延迟、可用性、完整性和连续性等指标与无人机运行时所需性能间定量关系的模型,以此获得城市区域内的信号覆盖地图。2021年3月进行了第二轮测试,旨在测试系统是否满足多平台无人机视距内和超视距运行需求<sup>[22]</sup>。

#### 1.4 中国UOM

中国民用航空局早在2015年12月就提出了无人机云系统的概念<sup>[6]</sup>。并将其定义为基于互联网云技术,面向轻小型民用无人机的管理系统,可向无人机用户提供航行服务、气象服务等,对民用无人机运行数据(包括运营信息、位置、高度和速度等)进行实时监测。通过建设无人机云系统对无人机开展位置监测、飞行申报和审批、预警等工作,可有效提高监管效率。接入系统的无人机即时上传飞行数据,系统对侵入电子围栏的无人机具有报警功能。自2016年以来,民航局陆续批准了11家无人

机云运营商资质,分别是优云、优凯、飞云、北斗云、无忧云、大翼鹰眼、知翼无人机监管平台、沃天宇云、极飞云、拓攻云和中科天网<sup>[23]</sup>。通过建立无人机云数据交换平台,对海量无人机运行数据快速处理、存储、统计和分析<sup>[24]</sup>,并出版《中国无人机运行数据统计报告》,对无人机云数据交换和共享的无人机云系统中的无人机飞行数据进行了统计,以掌握中国无人机运行特征,探索更合适的无人机管理措施和健全无人机监管体制机制<sup>[25]</sup>。

民用无人航空器运行管理系统(Civil UAS Operation Management System, UOM)是于2018年6月在深圳召开的中欧民航合作项目无人机研讨会上提出的一套适用于中国无人机综合监管的云端管理系统技术体系<sup>[26]</sup>,UOM面向国家的集中管理,集成无人机云系统和云交换系统功能,系统框架如图4所示。

UOM的最终目的是融入国家空中交通管制系统ATM,建立无人机适航标准体系,打通用户第三方系统、云服务系统、实名登记系统和国家监管平台等各类子系统之间的数据接口,实现无人机信息共享和流通。该系统具备以下功能:飞行空域配置(静态地理围栏)、飞行计划批准、飞行监管和警报、

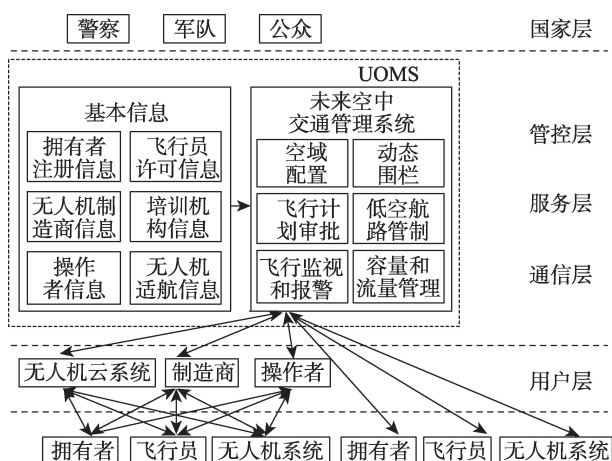


图4 UOM技术架构图

Fig.4 Framework of the UOM

动态地理围栏设置和警报数据推送、低空航路控制、交通承载力和流量管理等。

目前中国已在3个省市进行试点工作以探索UOM框架的技术路线。①在深圳试点无人机交通管控信息服务平台(UAS traffic management information service system, UTMIS),推出在线空域申请和飞行计划申请服务,首次打通空军、民航、公安三方管理系统,实现数据同步联通,三方将按照统一的规则和各自的权责进行协同管理。平台通过网络将用户的需求与管理端连接,一站实现飞行信息报备、飞行申请及信息查询。②在江西赣州开展无人机物流配送应用试点,建设无人机物流末端配送管理各项标准管理体系,满足无人机产业发展和安全管理的需要。③在海南三亚试点通用航空管理与UOM信息共享机制。

### 1.5 企业私有云端管理系统

在中国,除了国家政策框架层面内建设的或得到国家批准运行的管理系统之外,许多无人机企业建设了自己的私有云端管理系统,以方便管理企业自有无人机运行。早在2016年,与中国的无人机云系统建设同步,消费级无人机领域巨头大疆公司也开发了新版无人机飞行安全系统(GEO系统),系统中动态覆盖了全球各类飞行受限制的区域,包含了警示区、限高区、禁飞区等。系统将默认限制无人机在可能引起安全问题的区域起飞或飞行,用户需要准备相关材料申请临时解禁。测绘类无人机制造商飞马机器人公司开发了“飞马云”系统,系统基于云架构双路异步数据链路,向用户提供可视化的历史飞行回放与实时飞行云播,系统还能展示每次

作业任务的地理戳记、航线规划、飞行和航测参数等信息,对作业任务进行全生命周期管理。基于云端对飞行数据开展统计分析以辅助决策。

此外,包括载人无人机制造商亿航公司自主研发的分布式无人机指挥管理系统和物流无人机制造商迅蚁公司研发的云端自动化货运服务UTM系统等,都属于无人机企业自建的私有云端管理系统,系统具备基本的无人机位置和视频信息与地图的融合、任务相关的调度和统计分析功能以及地理围栏的报警功能等。

无人机云端管理系统的研发在各国仍然处于探索阶段。美国是最早提出系统框架的国家,其无人机云端管理系统建设路线是通过申请豁免的方式实现低空无人机的非管制飞行,且已经完成所有阶段技术成熟度的测试,并已于2020年底完成了原型系统研发,移交FAA实施UPP进行进一步的实施部署。欧洲的无人机云端管理系统建设路线是以融合空域为目的,实现无人机和有人机协同运行的空域环境,因此U-Space设计的U1~U3阶段内容较为丰富和全面,但对于与现行有人机融合运行场景的交通管理策略,目前仍停留在概念阶段<sup>[27]</sup>。而新加坡的uTM-UAS系统建设更多是在研究层面,还未上升到国家政策,如南洋理工大学联合NOVA公司以及AGI Onesky公司进行城市UTM的试验,测试了城市场景的低空空域管理和航路规划功能。虽然中国UOM项目立项较晚,仍未形成完整清晰的系统建设体系,但相比于欧美各国受限于法律授权的及时性,中国已经通过出台低层级的管理程序、咨询通告等方式,在无人机登记、无人机云系统、UTMISS等建设方面进行了实践,且中国是无人机应用大国,有众多企业建设的私有无人机管理系统,也为UOM建设提供了宝贵经验。但是,纵观国内外云端管理系统建设路线,都没有将地理信息技术作为重要应用手段进行研究,都没能解决复杂的低空地理环境给无人机飞行安全带来的影响问题。

## 2 地理信息在无人机云端管理系统中的应用探索

无人机云端管理系统监管对象主要是在离地几百米的低空,甚至超低空运行的无人机,与地形、地表建筑物、机场、军事禁区等敏感地理信息密切相关,作为无人机云端管理系统的支撑技术之一,



地理信息技术在管理系统中的应用具体表现为以下几个方面。

2.1 高精度实时定位和地理围栏

管理系统中的无人机精准位置信息依靠卫星导航定位技术获取(图5)。目前国内外无人机云系统主要通过2种方式获取无人机空间位置:一种是直接传输的方法,在无人机上外挂或内嵌定位模块,通过GPS、北斗等卫星定位系统获取地理坐标数据,集成手机SIM卡,利用蜂窝移动网络将空间位置传输至云系统。这种方法可以保证无人机传回真实可信的位置信息,但会产生额外的通信费用且依赖于空中蜂窝网覆盖。另一种是间接传输的方法,首先将实时飞行的数据通过链路下传到地面控制站,再通过互联网的方式传输到云端。这种方法成本较低,但需要无人机用户开放地面控制站的数据端口,存在GNSS欺骗的风险。同时,为了使GNSS定位精度从米级向厘米级提升,无人机在接收GNSS信号的同时,也接收来自基站的数据,采用差分定位技术,修正自身位置达到更精准的定位结果。张文字等<sup>[28]</sup>提出一种结合GNSS伪距观测值,构建具有实时完好性监测功能的GNSS/INS组合导航定位算法,可满足厘米级精细化无人机管控需求。对于航测无人机,在航测作业任务中需要保持离地飞行高度不变的地形跟随飞行,传统依靠GNSS和气压高度计只能获取绝对飞行高度(海拔高),而通过下视测高雷达往往会出现超出量程的

情况,且成本高。赵小勇等<sup>[29]</sup>采用基于高精度DEM数据生成地形跟随导航曲线高程数据,融合无人机实时GNSS/INS组合导航定位信息,可实现无源地形跟随。电力巡线无人机需要沿高压电力线飞行,其组合导航定位系统容易受电磁干扰而失灵,徐喜梅等<sup>[30]</sup>基于地面遥感影像信息,与无人机实时航拍图像进行匹配,根据地面同名像点反推无人机位置,实现无人机自主精准定位。

对于闯入禁飞区、警示区等范围的无人机,管理系统提供自适应的推送式地理围栏告警服务,对无人机进行实时监管。根据中国民航局规定,地理围栏按照其在水平面上的投影形状主要分为民用机场障碍物限制面、扇形、圆形、多边形等<sup>[31]</sup>。地理围栏模型采用四维空间结构表达,由垂直方向上的高度限制与水平方向上的边界及有效时间组成。Pratyusha等<sup>[32]</sup>建立多边形地理围栏和圆形地理围栏的数学模型进行研究,通过基于改进的R树空间索引的射线相交法判断无人机位置点与地理围栏区域的位置关系;付其喜等<sup>[33]</sup>将空间拓朴理论中的空间关系不变量引入地理围栏与无人机位置的关系描述,降低了各种形状地理围栏几何计算判断算法的复杂度。除此之外,Zhang等<sup>[34]</sup>将地理围栏按照持续性分为静态地理围栏和动态地理围栏。静态地理围栏的边界不随时间改变,如地形、建筑,而动态地理围栏的空间范围在不同时间会发生改变,如临时空中管制、天气等。Stevens等<sup>[35]</sup>提出一种地



注:图例只绘制了电子围栏的形状,无颜色之分。

图5 无人机实时定位和地理围栏显示

Fig.5 UAV real-time positioning and geo-fencing



理围栏自适应尺度变换的方法,基于无人机飞行性能和天气状况变化(如风速)动态调整地理围栏边界;李腾等<sup>[36]</sup>将移动的无人机所在位置的一定空间范围定义为地理围栏,基于航段速度分布规律和航迹随机性进行动态地理围栏规划。

目前各国建设的无人机云端管理系统均具备基本的无人机位置监测和地理围栏报警功能,定义有统一的位置接收传输接口,实现高精度的无人机地理位置数据交换和汇聚,并能动态更新地理围栏进行报警。然而要实现云端管理系统与精准地理围栏数据的有机融合,涉及地理信息保密的问题。当前云端管理系统主要采取隐藏敏感地理围栏信息或是通过对真实坐标进行人为加偏成火星坐标的方式,这无疑给无人机精准管控带来了困难。如何把地理信息用好用足,同时又满足保密要求也应是努力探索的方向。

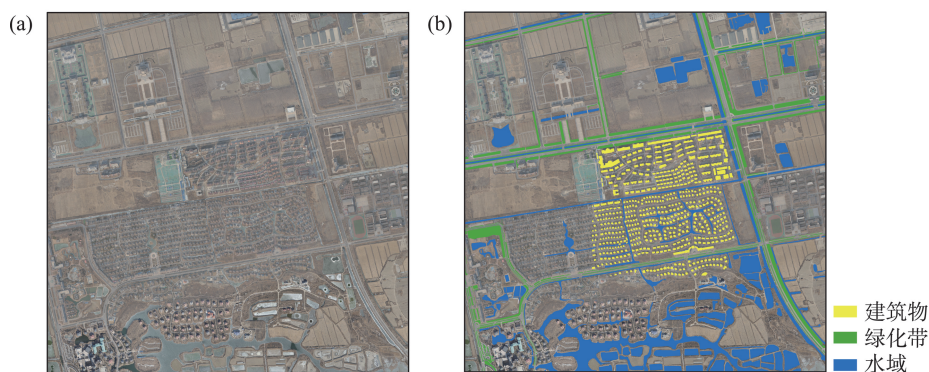
## 2.2 基于遥感的地表约束要素提取

无人机低空飞行受建筑物、道路、水体、绿地、电力杆塔等地表约束要素的影响,精准的约束要素信息可以作为与空域类似的地理围栏边界信息,为无人机云端管理系统中重要功能如无人机冲突报警、飞行航线规划、风险评估等提供准确的数据支持(图6)。基于遥感影像可以对具有明显光谱、形状特征的地物进行分类提取,如雷小奇等<sup>[37]</sup>采用局部灰度一致性的图像分割并结合形状特征的方法对高分辨率遥感影像中的道路进行了提取;吴炜等<sup>[38]</sup>采用一种光谱和形状特征相结合的提取方法,从多尺度分割和矢量化基础上构建的特征基元中选取样本,在整景高分辨率遥感影像中进行建筑物自动识别;张天怡等<sup>[39]</sup>以高分辨率遥感影像为数据源,

提出一种结合多尺度引导滤波特征与核主成分分析特征的提取方法,对多尺度的绿地特征进行降维,输入支持向量机中分类得到绿地结果。对于城市复杂背景下的水体提取,洪亮等<sup>[40]</sup>提出一种整合水体指数和区域模糊C聚类算法的城市水体自动提取算法,降低了其他约束要素的噪音信息,地表水体边界得到了完整保留。

无人机低空飞行的约束要素除了要有语义信息,更需要有全方位立体的几何信息,采用激光点云、倾斜摄影遥感数据可以高效精准地获取地物高程信息。徐文学等<sup>[41]</sup>采用机载激光雷达扫描点云转换的点云特征影像,提出基于多标记点过程的建筑物和树冠目标几何对象的自动提取方法,可以有效提取建筑物及树冠轮廓和高度信息。针对电线杆、路灯、行道树等杆状地物,在车载激光点云数据中存在相互遮掩的问题,李永强等<sup>[42]</sup>通过杆状地物形态特征,使用纵向格网模板初步提取杆状地物点云,并对点云数据进行规则化和剔除噪声点,进一步使用支持向量机进行杆状地物分类。除此之外,使用倾斜摄影测量数据也可以获取约束要素的三维几何和语义信息。季虹良等<sup>[43]</sup>提出一种利用倾斜摄影密集匹配点云高程信息生成深度图像提取建筑物非连通区域,采用多种子点区域生长的快速滤波算法,有效分离出建筑物信息。

在非城市区域,大部分约束要素具有属性长期不变、形状保持一致的特点,但是对于城市场景下,人为因素对地表约束要素影响显著,地理信息时常发生变化。云端管理系统需要建立高频动态地理信息数据刷新机制,包括依靠无人机遥感和传感器提供的实时信息反馈云端管理系统以开展自适应



注:图a为无人机遥感影像,图b为基于遥感影像提取的建筑物、绿化带、水域的矢量边界示意图,均为基于实验结果绘制。

图6 基于遥感数据的地表约束要素提取(天津京津新城区域)

Fig.6 Extraction of surface constraint elements based on remote sensing data

地理信息刷新。张航等<sup>[44]</sup>以无人机为载体,搭载激光雷达、惯性测量单元等载荷设备,使用SLAM方法实时建立点云地图,并进行三维重建,与原始遥感影像匹配,动态更新地理信息。

与基于视觉的无人机实时视觉避让策略相比,高精度的地表约束要素提取信息成本会更低,在静态电子围栏的构建中具有重要的数据价值。从前文分析的各国无人机云端管理系统发展的技术路线来看,其中提供的地形/障碍物数据服务强依赖于遥感技术获取的各类地表约束要素数据以及基于地理信息系统的空间数据管理和可视化。同时,依靠遥感技术也可以动态刷新系统中的地理信息。

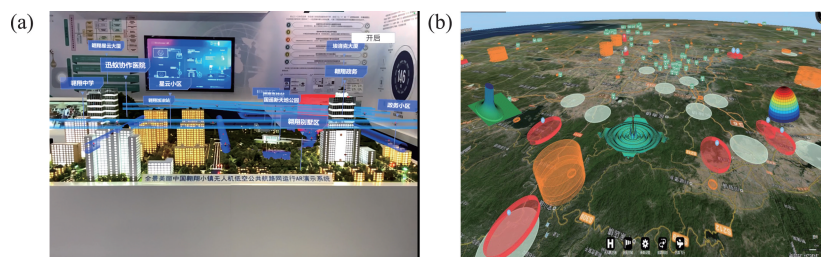
### 2.3 低空虚拟地理环境构建

地图是人类认识地球环境和人类社会信息传递的重要媒介,同时也是无人机云端管理系统中最重要导航介质。伴随GIS的发展,经历了纸质地图、电子地图、互联网地图的发展,进入到三维地图的时代。林晖等<sup>[45]</sup>认为地图不仅将以数字的方式存储于计算机中,更将是能虚拟展示的多尺度,立体三维抽象信息。无人机由于其飞行高度的灵活性,且频繁飞行在人类活动密集的空间,通过三维地图构建的虚拟低空地理环境可以形象表达无人机飞行的复杂环境,如城市三维模型、地形、大气环境、移动通信基站信号分布、空域(禁飞区、限制区、危险区)等信息,直观评估无人机飞行对周围环境的影响。除此之外,低空虚拟地理环境还提供分布式协作平台,通过人与虚拟环境一定程度的协作交互,探索低空虚拟地理环境的改变对无人机管控带来的影响。

低空虚拟地理环境的数据来源主要是多尺度(全球、区域)的三维数据。主要来源包括人工建模、激光点云和倾斜摄影测量建模等。如基于地面与机载激光雷达的大规模三维地形与城市DEM快速

获取,以及基于采用五镜头倾斜相机同步采集地物顶面及侧视的高分辨率纹理,生成真实的三维城市模型。受限于采集、制图、处理等多环节的高昂成本壁垒,通过地图服务商提供周期性刷新的高精度三维地图服务,可以较低成本获取三维数据,有效支撑无人机运行管控及智慧城市相关研究。针对无人机云端管理系统普遍缺少三维地图支撑,中国科学院地理科学与资源研究所通过与三维地图服务商 Airlook 合作,探索在线三维地图服务对精细化云端管理和低空虚拟环境三维可视化方面的支撑作用<sup>[46]</sup>。对于海量三维数据的组织与调度,邓世军等<sup>[47]</sup>采用分层分块的数据组织策略,改进动态分页调度技术,实现了对海量城市三维模型的高效动态调度与管理;张立立等<sup>[48]</sup>介绍了一种开放式可扩展的空间三维模型数据格式,适用于空间三维模型数据的传输、交换与共享,有助于解决多源三维模型跨平台的存储、可视化和互操作问题。

无人机云端管理系统需在构建的低空虚拟地理环境中对如大气环境、信号场等各类非实体的约束要素进行三维符号化表达,以形象展示低空复杂场环境。袁武彬等<sup>[49]</sup>提出一种风场矢量的三维动态可视化方法,结合双线性插值算法构建多尺度动态风矢量场,通过粒子风运动轨迹动态模拟风场变化趋势。奚大平等<sup>[50]</sup>以传统地图的表现理论中的视觉变量为参照,分别研究了点、线、面地理要素顾及地形的三维符号化表达。充分利用虚拟现实(VR)/增强现实(AR)技术增强三维表达上,实现人与虚拟低空地理环境互动,从而使无人机管控具有更高的效率、更丰富的表现手法和更多的信息量(图7)。鲍诗度等<sup>[51]</sup>在创建三维城市模型后,设计人机交互功能和仿真模块,通过佩戴VR设备,在城市场景中沉浸式漫游。李健等<sup>[52]</sup>基于AR技术对城市基础设施进行可视化,通过移动端传感器和摄像头



注:图a、b分别为使用AR增强现实技术、VR虚拟现实表达的 low 空航路复杂地理环境。图b引自文献[62]。

图7 低空虚拟地理环境三维表达

Fig.7 3D representation of low-altitude virtual geographic environment



获取位置、姿态信息,并与空间数据库中相应位置进行匹配,对三维场景进行渲染并与现实实景融合。这种方式同时启发了无人机云端管理系统在低空虚拟地理环境中通过AR技术提高管控效率。

## 2.4 基于地理网格的低空空域资源划分

低空空域作为地球表层系统的组成部分,是无人机飞行活跃的区域,也是地理科学和资源科学的研究领域,通过对地理空间按照一定规则进行分割,构建分级分层的地理网格体系,对空域结构进行表达,实现空域的精细化管理,是无人机云端管理系统科学管理的依据体现(图8)。美国UTM系统中的LAANC服务是基于限高网格,每个网格的经纬度大小为1'。而中国的UTMISS也是基于类似的限高网格,说明了空域管理网格化的必要性。但是目前无人机云端管理系统中的空域网格多以二维组织,附以统一的限飞高度值,无法满足分层空域的情况。金安等<sup>[53]</sup>将低空空域在地理空间中划分为多个三维网格,每个网格中心点采用一定规则的地理信息编码进行存储,便于进行网格计算、模拟、测量和分析;Mohamed Salleh等<sup>[54]</sup>将城市空域扇区设计为由区块、节点和线组成的三维空域网格结构,区块大小由城市通信链路的网络覆盖、GNSS覆盖、风险和安全评估等性能决定,纵向间隔和垂直间隔可根据区块尺寸动态调整;Mohamed Salleh等<sup>[21]</sup>通过对比了基于三维空域网格(AirMatrix)、道路、建筑物等3种空域管理方法,以空域吞吐量和容量为相关指标进行评估,表明基于网格能更高效利用空域。

空域具备时间和空间的属性。苗双喜等<sup>[55]</sup>提出的网格数据模型将时间域和空间域通过统一的时空编码进行关联,加快了空域占用率、冲突检测等方面的检索速度;Da Yang Tana等<sup>[56]</sup>提出空域相

变阈值(APTT)的概念,针对空域属性时空变化的特点,根据无人机密度动态配置空域,并对空域网格进行时空转换;李锋等<sup>[57]</sup>针对低空空域环境特点和防撞告警需要,设计了一种基于球面退化四叉树立体网格模型与面向对象模型相结合的空域网格数据组织模型,以移动对象为预警单元实时动态监测空域运行和防撞告警。

地理网格剖分是地理信息科学领域一个重要的研究方向,在网格化的空域管理技术支撑下,无人机云端管理系统能更好地保障空域运行安全,精细化运用空域资源。

## 2.5 无人机低空公共航路规划

无人机云端管理系统植入低空公共航路(图9),作为低空安全管控和空域资源高效利用的综合解决方案,得到了中国、新加坡等国家的研究。新加坡团队在uTM-UAS系统框架中提出城市上空构建航路的基本构想。中国学者如冯登超<sup>[58-59]</sup>从基于激光点云数据的空中走廊自动构建、三维空中走廊可视化等方面对无人机航路做了较为深入的研究。廖小罕等<sup>[60]</sup>对无人机低空公共航路进行了明确定义,即在有人驾驶航空器最低飞行高度以下,预先规划具有一定宽度专供无人机飞行的公共空中通道。基于地理约束要素网格构建的低空空域环境,采用优化的路径搜索算法在中国范围内规划低空骨干航路、低空主干航路、低空直线航路和低空末端航路等4级航路体系,以满足省际、城际、城镇内和乡村之间的互联互通。徐晨晨等<sup>[61]</sup>基于地理信息技术构建以多源地理空间数据为基础的无人机低空飞行环境,并改进传统蚁群算法以搜索无人机最短路径,得到低空航路。随后,徐晨晨等<sup>[62]</sup>又提出一种城镇化区域低空公共航路网迭代构建的方法,首先基于地面路网生成具有多高度层的一级航

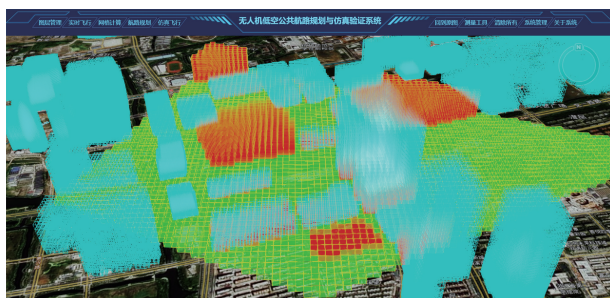


图8 基于地理网格的低空空域资源管理

Fig.8 Low-altitude airspace resource management based on geographic grid



图9 无人机低空航路示意图

Fig.9 Schematic diagram of UAV low-altitude route



路网,利用地表正约束要素生成二级航路网,规避地表负约束要素构建三级航路网,最后通过仿真飞行和实际飞行测试生成四级航路和五级航路网。低空公共航路规划充分利用了地理信息技术所提供的如地表约束要素提取、复杂低空地理环境构建等,是地理信息技术在无人机云端管理系统中支撑作用的综合体现。

中国在无人机云端管理系统的科学研究方面率先探索了地理信息科学相关技术全方面应用。2016年国家遥感中心无人机应用专家组与中国科学院地理科学与资源研究所联合开展了无人机云端管理研究,并开发了中科院无人机云端管理系统V1.0版本——“如来天网”RUNET系统。2017年3月26日“如来天网”成功投入测试运行<sup>[63]</sup>。2018年在“如来天网”的基础上开发了“中科天网”,并于2019年4月获得民航局正式批准试运行,成为中国11个无人机云系统中的一员<sup>[64]</sup>。针对其他云系统共同缺失遥感地理信息应用和低空公共航路网规划,“中科天网”系统创新性地提出依托中科院野外科学台站的无人机空港布局方案、植入低空公共航路规划,基于全息三维地图进行系统设计与构建,并提供在线遥感计算平台,充分利用遥感和地理信息技术助力无人机管理。

### 3 结论与展望

本文研究了世界各国无人机云端管理系统的建设框架,对地理信息技术在无人机云端管理系统中的应用进行了探索。目前无人机云端管理系统的研发在各国均处于起步阶段,且研究人员多为空管和自动化专业背景。鉴于无人机最为频繁的运行区域在几百米的低空空域内,受到地形地貌、建筑物、信号覆盖、气象条件等地理要素的影响,这就需要空域管理、航空运行与地理科学等多学科的交叉与融合,未来云端管理系统技术发展涉及地理信息技术主要研究方向包括:①定位——无人机位置时空精准信息;②避障——地形地貌和城乡建筑布局;③通信——移动通信基站优化分布;④避险——人口分布和地面路网布局;⑤禁入——国防和公共安全禁区;⑥出路——低空公共航路规划与构建。展望未来,地理信息技术可在以下几方面发挥重要支撑作用:

#### (1) 遥感技术提取地表约束要素构建地理围栏

地理围栏的构建是基于遥感提取的地理约束要素,并根据约束要素的净空边界及其空间风险分布进行评价和定标,其对时间的时效性和空间的精准性有较高要求。传统遥感信息提取地物目标的方法是基于遥感图像的光谱信息,因为通常有同物异谱或异物同谱的现象,因此信息提取结果的精度不够高。基于多源、多尺度遥感数据为典型的约束要素建立样本库,以加大遥感影像中的信息量,通过采用非监督分类、聚类分析等机器学习方法,以及多种指标信息对地物进行分类(如纹理信息、光谱信息等),提高约束要素的识别精度。采用无人机实现遥感动态观测,可以动态提取地表约束要素信息,并更新地理围栏。

#### (2) 低空地理环境研究的虚实结合

通过虚拟现实技术以逼真的表达方式对低空地理环境进行重建与仿真预测,可以对低空地理环境如建筑物、道路等进行三维场景重建,并对气候环境和信号环境如风场、电磁场进行三维可视化仿真,通过数值模拟预测其变化趋势,直观展示无人机飞行的复杂低空地理环境,并且可以在其中融入实际飞行的无人机轨迹,促进人们从不同的时空维度对无人机管控的理解和感知。此外,无人机云端管控是数字化的监管手段,其中规划的地理围栏、空域、航路以及未来无人机交通的基础设施都是虚拟的,通过增强现实技术在实际场景中嵌入虚拟对象,将为无人机云端管理系统带来全新的建设体验和研究方法。

#### (3) 低空公共航路网规划

纵观当下各类交通方式,交通资源的组织和合理管控是基于路网建设实现的。无人机低空航路网与风险、空域容量、飞行经济性等无人机飞行管控关键内容存在紧密关系。无人机低空公共航路网规划和构建技术,充分利用地理信息技术手段,在立体空域上考虑分层管理和资源优化调度,辅以航路交通规则,将会有效推动低空空域资源精细化管理,并助力无人机安全管控。

现代地理科学已经与计算技术、互联网技术、空间技术等深度融合并从中受益,衍生出地理信息、遥感等分支学科,有力地支撑和扩展了地理科学的研究和应用领域。科学和技术最终要为社会管理服务,发挥地理信息和遥感技术在无人机管控中的优势,是解决国家重大需求、面向世界科技前沿的举措,地理科学研究人员应该抓住这一契机,

拓宽地理科学应用范围,推动地理科学发展。

致谢:感谢中国民航管理干部学院伊群教授在本文撰写过程中提供的宝贵意见。

## 参考文献(References)

- [1] 中国民航局. 2020年全国民航工作会议召开 [EB/OL]. 2020-01-06 [2020-10-01]. [http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202001/t20200106\\_200171.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202001/t20200106_200171.html). [Civil Aviation Administration of China. 2020 national civil aviation work conference held. 2020-01-06 [2020-10-01]. [http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202001/t20200106\\_200171.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202001/t20200106_200171.html). ]
- [2] 柏艺琴. 2019年无人机云数据统计报告 [EB/OL]. 2020-07-13 [2020-10-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/1euKvsiY4FAjD1AXf5hbQw>. [Bai Yiqin. 2019 UAV cloud data statistics report. 2020-07-13 [2020-10-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/1euKvsiY4FAjD1AXf5hbQw>. ]
- [3] Federal Aviation Administration. Aircraft registration: Unmanned aircraft (UA) [EB/OL]. 2019-02-25 [2020-10-01]. [https://www.faa.gov/licenses\\_certificates/aircraft\\_certification/aircraft\\_registry/UA/](https://www.faa.gov/licenses_certificates/aircraft_certification/aircraft_registry/UA/).
- [4] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Flight rules for UAVs (Drones, radio-controlled air vehicles, etc.) [EB/OL]. 2015-10-17 [2020-10-01]. [http://www.mlit.go.jp/koku/koku\\_tk10\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html).
- [5] 中国民航局. 关于征求《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例(征求意见稿)》意见的通知 [EB/OL]. 2018-01-26 [2020-11-17]. [http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126\\_48853.html](http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126_48853.html). [Civil Aviation Administration of China. Notice on soliciting opinions on the "interim regulations on flight management of unmanned aircraft (Draft for comment)". 2018-01-26 [2020-11-17]. [http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126\\_48853.html](http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201801/t20180126_48853.html). ]
- [6] 中国民用航空局. 轻小无人机运行规定(试行) [EB/OL]. 2015-12-29 [2020-11-17]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113\\_26519.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113_26519.html). [Civil Aviation Administration of China. Regulations on the operation of light and small UAVs (Trial). 2015-12-29 [2020-11-17]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113\\_26519.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/201601/t20160113_26519.html). ]
- [7] 中华人民共和国公安部. 公安部关于《中华人民共和国治安管理处罚法(修订公开征求意见稿)》公开征求意见的公告 [EB/OL]. 2017-01-16 [2020-10-01]. <http://www.mps.gov.cn/n2254536/n4904355/c5604357/content.html>. [The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Announcement of the ministry of public security on public consultation on the public security administration punishment law of the People's Republic of China (Revised draft for public comment). 2017-01-16 [2020-10-01]. <http://www.mps.gov.cn/n2254536/n4904355/c5604357/content.html>. ]
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于《无人机制造企业规范条件》的公示 [EB/OL]. 2018-11-23 [2020-10-01]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057593/c6508654/content.html>. [Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Announcement on the "Regulations for UAV manufacturing enterprises". 2018-11-23 [2020-10-01]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057593/c6508654/content.html>. ]
- [9] 刘菲, 吕人力. 民用无人机运行管理立法分析与建议 [J]. 科技导报, 2020, 38(16): 15-28. [Liu Fei, Lv Renli. The legislation for unmanned aircraft operation and suggestions for improvement. Science & Technology Review, 2020, 38(16): 15-28. ]
- [10] National Aeronautics and Space Administration. NASA UTM 2015: The next era of aviation [EB/OL]. 2015-07-28 [2020-10-01]. <https://utm.arc.nasa.gov/utm2015.shtml>.
- [11] Federal Aviation Administration. UAS traffic management (UTM): Research transition team plan [EB/OL]. 2017-01-30 [2020-10-01]. [https://www.faa.gov/uas/research\\_development/traffic\\_management/media/FAA\\_NASA\\_UAS\\_Traffic\\_Management\\_Research\\_Plan.pdf](https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management/media/FAA_NASA_UAS_Traffic_Management_Research_Plan.pdf).
- [12] Federal Aviation Administration. UAS data exchange (LAANC) [EB/OL]. 2019-11-01 [2020-10-01]. [https://www.faa.gov/uas/programs\\_partnerships/data\\_exchange/](https://www.faa.gov/uas/programs_partnerships/data_exchange/).
- [13] Federal Aviation Administration. UTM pilot program [EB/OL]. 2019-05-09 [2020-10-01]. [https://www.faa.gov/uas/research\\_development/traffic\\_management/utm\\_pilot\\_program/](https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management/utm_pilot_program/).
- [14] Federal Aviation Administration. Unmanned aircraft systems (UAS) traffic management (UTM) concept of operations [EB/OL]. 2018-05-18 [2020-10-01]. <https://utm.arc.nasa.gov/docs/2018-UTM-ConOps-v1.0.pdf>.
- [15] National Aeronautics and Space Administration. What is NASA doing to test the technologies? [EB/OL]. 2019-11-01 [2020-10-01]. <https://utm.arc.nasa.gov/index.shtml>.
- [16] SESAR. Supporting safe and secure drone operations in Europe [EB/OL]. 2020-03-09 [2020-10-01]. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/U-space%20Drone%20Operations%20Europe.pdf>.
- [17] The Single European Sky ATM Research Joint Undertaking. U-space blueprint [EB/OL]. 2017-06-09 [2020-10-01]. <https://www.sesarju.eu/u-space-blueprint>.

- [18] The Single European Sky ATM Research Joint Undertaking. Initial view on principles for the U-space architecture [EB/OL]. 2019-07-29 [2020-10-01]. <https://www.sesarju.eu/node/3402>.
- [19] The Swiss Federal Office of Civil Aviation. Swiss U-Space concept of operations (ConOps) [EB/OL]. 2019-09-27 [2020-10-01]. <https://www.bazl.admin.ch/bazl/en/home/good-to-know/drones-and-aircraft-models/u-space.html>.
- [20] Civil Aviation Authority of Singapore. MOT and CAAS Issue Call-For-Proposal to Develop Solutions for Innovative UAS Operations in Singapore [EB/OL]. 2017-11-03 [2020-10-01]. <https://www.caas.gov.sg/about-caas/newsroom/Detail/mot-and-caas-issue-call-for-proposal-to-develop-solutions-for-innovative-uas-operations-in-singapore>.
- [21] Mohamed Salleh M F B, Chi W C, Wang Z K, et al. Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations [R/OL]. Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. doi: 10.2514/6.2018-2260.
- [22] sUAS News. Singapore deploys first successful trial UTM system: Creating the foundation for urban air mobility [EB/OL]. 2021-03-16 [2021-03-18]. <https://www.suasnews.com/2021/03/singapore-deploys-first-successful-trial-utm-system-creating-the-foundation-for-urban-air-mobility/>.
- [23] 廖小罕, 许浩. 无人机运行监管技术发展与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020. [Liao Xiaohan, Xu Hao. UAV operational regulation technology development and application. Beijing, China: Science Press, 2020. ]
- [24] 柏艺琴, 陈新锋, 原军锋. 基于大数据的无人机云交换平台统计分析技术研究 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(4): 560-569. [Bai Yiqin, Chen Xinfeng, Yuan Junfeng. Statistical analysis technology of UAS cloud data exchange platform based on big data. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(4): 560-569. ]
- [25] 柏艺琴. 中国无人机运行数据统计报告 [M]. 北京: 中国民航出版社, 2019. [Bai Yiqin. Statistics report on China's UAV operation data. Beijing, China: China Civil Aviation Publishing House, 2019. ]
- [26] Zhang J P. UOMS in China [EB/OL]. 2018-06-06 [2020-10-01]. [https://rpas-regulations.com/wp-content/uploads/2018/06/1.2-Day1\\_0910-1010\\_CAAC-SRI\\_Zhang-Jianping\\_UOMS-EN.pdf](https://rpas-regulations.com/wp-content/uploads/2018/06/1.2-Day1_0910-1010_CAAC-SRI_Zhang-Jianping_UOMS-EN.pdf).
- [27] 张建平, 陈晓, 任家龙. 民用无人机交通管理策略综述 [J]. 航空计算技术, 2017, 47(6): 122-128. [Zhang Jianping, Chen Xiao, Ren Jialong. Review on civil unmanned aircraft traffic management strategies. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(6): 122-128. ]
- [28] 张文宇, 孙蕊. 用于精细化无人机管控的 GNSS/INS 组合导航定位及完好性监测算法 [C]// 第 11 届中国卫星导航年会论文集. 成都, 2020: 82-89. [Zhang Wenyu, Sun Rui. GNSS/INS integration with integrity monitoring for precise UAV flight management // Proceedings of the 11th China satellite navigation annual conference. Chengdu, China, 2020: 82-89. ]
- [29] 赵小勇, 杨恒辉. 一种新的地形跟随飞行方法与关键技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(7): 1983-1985, 1995. [Zhao Xiaoyong, Yang Henghui. Study on key techniques of a new approach to terrain-following flight. Computer Measurement & Control, 2012, 20(7): 1983-1985, 1995. ]
- [30] 徐喜梅, 黄大庆, 徐诚. 利用地面景象信息辅助的无人机自主定位技术 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9): 158-162. [Xu Ximei, Huang Daqing, Xu Cheng. Unmanned aerial vehicle autonomous positioning technology assisted by ground scene information. Computer Measurement & Control, 2018, 26(9): 158-162. ]
- [31] 中国民用航空局. 无人机围栏(MH/T 2008-2017) [EB/OL]. 2017-10-20 [2020-10-01]. <http://pilot.caac.gov.cn/jsp/airmanNews/airmanNewsDetail.jsp?uuid=a070ac6b-5096-4de9-976f-000282f97036&code=UAV#down>. [Civil Aviation Administration of China. UAV fence (MH/T 2008-2017). 2017-10-20 [2020-10-01]. <http://pilot.caac.gov.cn/jsp/airmanNews/airmanNewsDetail.jsp?uuid=a070ac6b-5096-4de9-976f-000282f97036&code=UAV#down>. ]
- [32] Pratyusha P, Naidu V. Geo-fencing for unmanned aerial vehicle [J]. International Journal of Computer Applications, 2013, 975: 8887. <https://research.ijcaonline.org/ncesco2015/number1/ncesco5301.pdf>
- [33] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 自主飞行无人机地理围栏算法设计与实现 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(5): 167-175. [Fu Qixi, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Design and implementation of autonomous flight unmanned aircraft system geo-fence algorithm. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(5): 167-175. ]
- [34] Zhang S Y, Wei D, Huynh M Q, et al. Model predictive control based dynamic geofence system for unmanned aerial vehicles [R/OL]. Grapevine, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2017. doi: 10.2514/6.2017-0675.
- [35] Stevens M N, Atkins E M. Layered geofences in complex airspace environments [R/OL]. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, USA, 2018. doi: 10.2514/6.2018-3348.



- [36] 李腾, 汤新民. 基于柔性四维航迹预测的无人机动态围栏规划 [J]. 航空计算技术, 2019, 49(5): 79-84. [Li Teng, Tang Xinmin. UAV dynamic geofence planning method based on flexible four-dimensional trajectory prediction. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(5): 79-84. ]
- [37] 雷小奇, 王卫星, 赖均. 一种基于形状特征进行高分辨率遥感影像道路提取方法 [J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 457-465. [Lei Xiaoqi, Wang Weixing, Lai Jun. A method of road extraction from high-resolution remote sensing images based on shape features. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 457-465. ]
- [38] 吴炜, 骆剑承, 沈占锋, 等. 光谱和形状特征相结合的高分辨率遥感图像的建筑物提取方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(7): 800-805. [Wu Wei, Luo Jiancheng, Shen Zhanfeng, et al. Building extraction from high resolution remote sensing imagery based on spatial-spectral method. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(7): 800-805. ]
- [39] 张天怡, 代沁伶, 徐伟恒, 等. 高分辨率遥感影像城市绿地提取方法研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4): 105-114. [Zhang Tianyi, Dai Qinling, Xu Weiheng, et al. Research on extraction method of urban green space from high-resolution remote sensing image. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2020, 40(4): 105-114. ]
- [40] 洪亮, 黄雅君, 杨昆, 等. 复杂环境下高分二号遥感影像的城市地表水体提取 [J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 871-882. [Hong Liang, Huang Yajun, Yang Kun, et al. Study on urban surface water extraction from heterogeneous environments using GF-2 remotely sensed images. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(5): 871-882. ]
- [41] 徐文学, 杨必胜, 魏征, 等. 多标记点过程的LiDAR点云数据建筑物和树冠提取 [J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 51-58. [Xu Wenxue, Yang Bisheng, Wei Zheng, et al. Building and tree crown extraction from LiDAR point cloud data based on multi-marked point process. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 51-58. ]
- [42] 李永强, 李鹏鹏, 董亚涵, 等. 车载LiDAR点云数据中杆状地物自动提取与分类 [J]. 测绘学报, 2020, 49(6): 724-735. [Li Yongqiang, Li Pengpeng, Dong Yahan, et al. Automatic extraction and classification of pole-like objects from vehicle LiDAR point cloud. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(6): 724-735. ]
- [43] 季虹良, 戴晨光, 张鑫禄, 等. 深度图像分割的城市区域倾斜影像密集匹配点云滤波算法 [J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(5): 491-495. [Ji Hongliang, Dai Chenguang, Zhang Xinlu, et al. Filtering urban point cloud from dense image matching based on depth image segmentation. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(5): 491-495. ]
- [44] 张航, 陈彬, 薛含章, 等. 基于无人机和LIDAR的三维场景建模研究 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 1914-1920. [Zhang Hang, Chen Bin, Xue Hanzhang, et al. Research on 3D scene modeling based on UAV and LIDAR. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1914-1920. ]
- [45] 林琿, 龚建华, 施晶晶. 从地图到地理信息系统与虚拟地理环境: 试论地理学语言的演变 [J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(4): 18-23. [Lin Hui, Gong Jianhua, Shi Jingjing. From maps to GIS and VGE: A discussion on the evolution of the geographic language. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(4): 18-23. ]
- [46] 睿初. Airlook与中科院地理资源所联合发布Airlook-Map, 推动城市三维高精度地图大规模商用 [EB/OL]. 2020-08-13 [2020-10-01]. <https://36kr.com/p/834779514514816>. [Rui Chu. Airlook and the institute of geographical resources of the Chinese academy of sciences jointly released AirlookMap to promote large-scale commercial use of 3D high-precision urban maps. 2020-08-13 [2020-10-01]. <https://36kr.com/p/834779514514816>. ]
- [47] 邓世军, 王永杰, 窦华成, 等. 数据分页技术的海量三维数据模型动态调度 [J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 97-100. [Deng Shijun, Wang Yongjie, Dou Huacheng, et al. Dynamic scheduling of three-dimensional massive model data based on databasepager. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(4): 97-100. ]
- [48] 张立立, 周芹, 冯振华. S3M空间三维模型数据格式的特点和应用 [J]. 北京测绘, 2020, 34(1): 23-26. [Zhang Lili, Zhou Qin, Feng Zhenhua. Advantages and application of spatial 3D model data format. Beijing Surveying and Mapping, 2020, 34(1): 23-26. ]
- [49] 袁武彬, 廖明伟, 廖明, 等. 鄱阳湖区域风场矢量的Web三维动态可视化 [J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(1): 22-26. [Yuan Wubin, Liao Mingwei, Liao Ming, et al. Web 3D dynamic visualization of wind vector field in Poyang Lake area. Geography and Geo-Information Science, 2020, 36(1): 22-26. ]
- [50] 奚大平, 江文萍. 地理要素三维模型的建立及其与地形融合的研究 [J]. 测绘通报, 2011(4): 23-25. [Xi Daping, Jiang Wenping. Research on 3D modeling of geographic features and integrating with terrain model. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(4): 23-25. ]
- [51] 鲍诗度, 陈文懿. 基于虚拟现实技术的公共环境设计系统设计 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(16): 165-169. [Bao Shidu, Chen Wenyi. Design of public environment de-

- sign system based on virtual reality technology. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(16): 165-169. ]
- [52] 李健, 王顺利, 潘华, 等. 基于移动终端的增强现实地下管线可视化技术 [J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2019, 51(3): 115-119. [Li Jian, Wang Shunli, Pan Hua, et al. Visualization technology of underground pipeline based on augmented reality of mobile terminal. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2019, 51(3): 115-119. ]
- [53] 金安, 程承旗. 基于全球剖分网格的空间数据编码方法 [J]. *测绘科学技术学报*, 2013, 30(3): 284-287. [Jin An, Cheng Chengqi. Spatial data coding method based on global subdivision grid. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(3): 284-287. ]
- [54] Mohamed Salleh M F B, Low K H. Concept of operations (ConOps) for traffic management of Unmanned Aircraft Systems (TM-UAS) in urban environment [R/OL]. Grapevine, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2017. doi: 10.2514/6.2017-0223.
- [55] 苗双喜, 程承旗, 任伏虎, 等. 地球剖分型GIS数据模型 [J]. *地理信息世界*, 2020, 27(4): 22-29. [Miao Shuangxi, Cheng Chengqi, Ren Fuhu, et al. A GIS data model based on global subdivision grid. *Geomatics World*, 2020, 27(4): 22-29. ]
- [56] Tan D Y, Chi W C, Mohamed Salleh M F B, et al. Study on impact of separation distance to traffic management for small UAS operations in urban environment [C]// Chen C H, Trappey A C, Peruzzini M, et al. *Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift: Proceedings of the 24th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering*. Clifton, USA: IOS Press, 2017: 39-46.
- [57] 李锋, 万刚, 曹雪峰, 等. 面向低空防撞的虚拟地理环境数据组织及应用 [J]. *信息工程大学学报*, 2015, 16(4): 494-497. [Li Feng, Wan Gang, Cao Xuefeng, et al. Virtual geographic environment data organization and application for the low-altitude collision avoidance. *Journal of Information Engineering University*, 2015, 16(4): 494-497. ]
- [58] 冯登超. 基于激光点云数据的无人驾驶航空器系统空中走廊构建 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(2): 133-141. [Feng Dengchao. Construction of aerial corridor for unmanned aircraft systems in low altitude airspace based on point cloud of laser scanner. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(2): 133-141. ]
- [59] 冯登超. 面向低空安全的三维空中走廊可视化研究综述 [J]. *电子测量技术*, 2018, 41(9): 2-9. [Feng Dengchao. A review on visualization of three-dimensional aerial corridor for low altitude safety. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(9): 2-9. ]
- [60] 廖小罕, 徐晨晨, 岳焕印. 基于地理信息的无人机低空公共航路规划研究 [J]. *无人机*, 2018(2): 45-49. [Liao Xiaohan, Xu chencheng, Yue Huanyin. Research on UAV low-altitude public route planning based on geographic information. *UAV*, 2018(2): 45-49. ]
- [61] 徐晨晨, 廖小罕, 岳焕印, 等. 基于改进蚁群算法的无人机低空公共航路构建方法 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 570-579. [Xu Chenchen, Liao Xiaohan, Yue Huanyin, et al. Construction of a UAV low-altitude public air route based on an improved ant colony algorithm. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(4): 570-579. ]
- [62] 徐晨晨, 叶虎平, 岳焕印, 等. 城镇化区域无人机低空航路网迭代构建的理论体系与技术路径 [J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 917-930. [Xu Chenchen, Ye Huping, Yue Huanyin, et al. Iterative construction of UAV low-altitude air route network in an urbanized region: Theoretical system and technical roadmap. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 917-930. ]
- [63] 中国经济网. 中科院地理资源所成功开展无人机管控系统全国入网测试演练 [EB/OL]. 2017-03-27 [2020-10-01]. [http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201703/27/t20170327\\_21435145.shtml](http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201703/27/t20170327_21435145.shtml). [China Economic Net. The institute of geographical resources of the Chinese academy of sciences successfully carried out a national network access test exercise for drone control systems. 2017-03-27 [2020-10-01]. [http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201703/27/t20170327\\_21435145.shtml](http://www.ce.cn/cysc/newmain/yc/jsxw/201703/27/t20170327_21435145.shtml). ]
- [64] 中国科学院地理科学与资源研究所. “中科天网”无人机综合管理云系统正式获得中国民用航空局批准运行 [EB/OL]. 2019-04-17 [2020-10-01]. [http://www.igsnnr.cas.cn/xwzx/zhxw/201904/t20190417\\_5276493.html](http://www.igsnnr.cas.cn/xwzx/zhxw/201904/t20190417_5276493.html). [Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences. "Zhongke Tianwang" UAV integrated management cloud system was officially approved by the civil aviation administration of China. 2019-04-17 [2020-10-01]. [http://www.igsnnr.cas.cn/xwzx/zhxw/201904/t20190417\\_5276493.html](http://www.igsnnr.cas.cn/xwzx/zhxw/201904/t20190417_5276493.html). ]



## Development of unmanned aerial vehicle cloud management system with the application of geographic information technology

TAN Junming<sup>1,2</sup>, LIAO Xiaohan<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Institute of UAV Application Research, Tianjin and CAS, Tianjin 301800, China; 4. The Research Center for UAV Applications and Regulation, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The conflict between the thriving drone flight demand and the limited low-altitude airspace has become increasingly apparent. Countries of the world are advancing the research on unmanned aerial vehicle (UAV) regulation policies and technical methods. Even in the U.S. Class G airspace that has the least restrictions, the authorities are considering implementing strict UAV regulation. The UAV cloud management system is a new type of digital supervision method, and its framework and technical roadmap have received extensive attention and research from Chinese and international researchers and regulatory authorities. As one of the applications of cloud management system, geographic information technology is specifically advantaged in the following aspects: Using the global navigation satellite system (GNSS) to achieve precise spatial positioning of UAVs; Using remote sensing (RS) technology to obtain information on geographic constraints that affect the flight safety of UAVs; Organize low-altitude geospatial data based on geographic information system (GIS) and construct low-altitude virtual geographic environment, and so on. This article combines the research progress of our team on low-altitude applications of UAVs and points out that geographic information technology can provide solutions for UAV operation management.

**Keywords:** UAV; cloud management system; geographic information; GNSS; RS