

空投型无人子机系统研究与设计

杨新宇, 雷廷万, 钟 昆, 张 翰, 刘 宽

(航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610031)

摘要: 文章围绕对载机平台空投无人子机这一应用场景, 介绍了近几年美国分别基于直升机、有人机和无人机平台对空投型无人子机的相关试验, 分析了其应用场景和发展趋势, 总结整理了美国在空投型无人子机这一领域的设计思路和主要关键技术; 同时, 结合我国战略战术需求及未来使用场景, 文章提出了一种基于无人机载机平台的空投型无人子机的武器系统设计思路; 由无人机系统、地面控制站系统和地面保障系统组成载机平台系统, 在载机平台上挂载空投型无人子机, 设计无人子机投放分离过程, 根据无人子机实时位置和无人子机数据链的作用限制, 任务系统实时计算出所需的任务航向, 并将航线信息转为控制参数发送给载机平台, 完成对载机平台的自动导引飞行, 提高子机平台传感器的探测能力。

关键词: 空投子机; 应用场景; 发展趋势; 关键技术; 系统设计

Research and Design of Airdrop Unmanned Sub-System

YANG Xinyu, LEI Tingwan, ZHONG Kun, ZHANG Han, LIU Kuan

(Chengdu Aircraft Design Institute of Aviation Industry, Chengdu 610031, China)

Abstract: Focusing on the application scenario of airdrop UAV from carrier platform, this paper introduces the relevant tests of airdrop UAV in the United States in recent years based on helicopter, UAV and UAV platform, analyzes its application scenario and development trend, and summarizes the design ideas and main key technologies in the field of airdrop UAV in the United States. At the same time, combined with China's strategic and tactical requirements and future use scenarios, a design idea of air drop unmanned sub-aircraft weapon system based on UAV platform is proposed. The carrier platform system is composed of UAV system, ground control station system and ground support system. The air drop UAV is mounted on the carrier platform. The release separation process of UAV is designed. According to the real-time position of UAV and the limitation of UAV data link, the task system calculates the required task heading in real time. The route information is converted into control parameters and sent to the carrier platform to complete the automatic guided flight to the carrier platform, and the detection ability of the sub platform sensor is improved.

Keywords: air drop machine; application scenarios; development trend; key technologies; system design

0 引言

近年来世界各国反介入/区域拒止能力不断发展。在国土防空领域, 防空作战体系通过构建全域杀伤网络, 正在逐步完善全域感知、全域指控、全域打击的能力^[1]。单一的作战飞机平台在遂行低空低速的侦察或对地打击任务时, 面临着敌方防空作战体系的探测、干扰和攻击, 其单独作战不具备足够的安全性, 或者在具备安全性的前提下不具备对目标侦察、毁伤的有效性。因此, 在今后的一段时间内, 多机间的协同作战将会是主流趋势。

多机间的协同, 其核心主旨是借助不同分工的飞机, 形成分布、广域、弹性的作战能力, 以期对主战装备起到作战能力扩展、作战资源补充、作战任务分担的作用。多机间的协同, 本质上是多机在同一时间, 某一任务区域为达成同一作战意图的作战行动。在多机协同中, 从地面起飞的僚机受制于飞行速度、空域协同、数据融合等问题, 很难快速准确伴随长机完成协同任务^[2]。

载机平台和无人子机实施协同侦察探测的作战方式,

充分发掘和利用无人子机隐蔽性强、可探测性低的特点, 在前期载机平台对目标实施侦察或根据地面情报预先进行任务规划的基础上, 通过无人子机抵近侦察, 实现对目标的精细化成像。侦察信息则通过数据链回传至载机平台地面站, 供情报人员判读。因此, 从载机平台投放的空投型无人子机可以很好地解决多机间协同的问题。

1 美国无人子机系统发展情况

本文将分别结合美军在直升机、有人机、无人机平台上进行的多次发射无人子机的试验, 对美军无人子机的发展进行介绍, 并总结其特点。

1.1 直升机平台空射无人子机

在“多域作战”思想和纵深攻击概念的牵引下, 美国陆军开展了“未来攻击侦察机”FARA项目。FARA项目采用“模块化开放式系统架构”, 以网络为中心思路, 通过攻击直升机和无人机混合编队实现远程精确攻击^[3]。无人子机的定位采用模块化任务负载, 执行侦察、欺骗、干扰、网络中继等任务。

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2022-01-05。

作者简介: 杨新宇(1997-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事机载武器系统设计方向的研究。

引用格式: 杨新宇, 雷廷万, 钟 昆, 等. 空投型无人子机系统研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 138-142, 162.

在项目实施上,攻击直升机并不进入敌方防空火力范围,而是由直升机空中发射的“空中发射效应单元”(ALE)执行任务。ALE进入敌防空圈执行侦察任务,获取相关战场信息,然后由敌防空圈外的直升机发射远程制导弹药摧毁目标。

2020年3月,美国陆军在UH-60“黑鹰”直升机上进行了前射艾利尔埃(Area-I)公司“发射管整合空射无人系统”(ALTIUS)的演示。2020年5月,美国陆军再次基于“黑鹰”直升机空射ALTIUS无人机,进一步演示了空中发射无人机概念^[4]。

在试验中,ALTIUS-600从UH-60“黑鹰”直升机短翼下的发射筒中弹出,机翼展开,后螺旋桨启动,然后ALTIUS-600在到达任务区后,在“黑鹰”直升机的控制和指挥下飞行,并通过数据链将侦察图像实时回传。

1.2 有人机平台投放无人机

2013年,美国军方为P-8A具备对抗潜艇的高战斗力创造了条件。为了解决P-8A磁异常探测器(MAD)不能在高空使用,导致潜艇定位不足的问题,美国海军研究办公室批准BAE公司开发一种“无人瞄准航空系统”(UTAS)微型无人机,可直接从P-8A发射。UTAS微型无人机如图3所示。UAV可以装备MAD寻找潜艇,UTAS可以自动将目标数据返回到P-8A^[5]。

配备UTAS的P-8A可以直接投放高空鱼雷,在GPS系统的引导下攻击敌方水面舰艇或潜艇,而无需接近敌方防空武器的射程然后开火,这大大提高了机组人员的生存和突袭能力。

2015年9月,美国DARPA启动了小精灵项目的研究。项目计划通过C-130运输机和B-52/B-1轰炸机等大型飞机平台投放无人机群。在敌方防御区边缘远程识别目标后,编队协同进入防御边界,在短距离内对某些目标执行敌情探测、电子攻击和空间定位等作战任务。任务完成后,离开敌方防御区,用C-130运输机回收机群^[6]。

“小精灵”项目的关键技术包括:空中发射回收技术;协作技术;低成本耐磨无人机机身设计和发射平台的低成本改装技术。

2016年10月,美国国防部长战略办公室计划并实施了无人机“蜂群”战术演习的空中发射。2017年1月,3架F/A-18F“超级大黄蜂”战斗机在Ma0.6下,连续投放103架“灰山鹑”无人机。无人机“蜂群”在地面站指挥下,通过机间通信与合作,成功完成了集体决策、自主修正和自适应编队飞行^[7]。

1.3 无人机平台投放无人机

2020年9月,美国通用原子公司在MQ-9“死神”无人机上开展了“雀鹰”小型无人机挂载试验。该无人机挂载于MQ-9无人机机翼通用挂架下,投放分离后旋转90度展开。

“雀鹰”无人机可扩展MQ-9无人机的传感器探测范围,也可用于实施电子战、迷惑和干扰敌方防空,还可发

展为巡航导弹,完成硬摧毁任务^[8]。

2021年3月,美国空军的XQ-58A“女武神”隐形无人机首次从其内埋武器舱发射了ALTIUS-600小型无人机系统。ALTIUS-600可以配合XQ-58A遂行摄像、情报收集甚至执行杀伤任务^[9]。

2021年5月,通用原子航空系统公司表示其正在开发一种新型“空射效应”无人机。无人机有V形尾翼,由螺旋桨推进。其可协助MQ-9或MQ-1C无人机渗透、瓦解和对抗反介入/区域拒止防空力量,使大型飞机远离战术地空导弹的攻击区域,并提高大型飞机的生存能力^[10]。

1.4 美国空投型无人子系统使命能力和关键技术

本文对美国基于直升机、有人机、无人机平台空投无人子系统进行相关分析,总结出其网络化、低成本、可损耗、多功能的特点。在作战使命上,无人子系统既要保证主战平台有效生存,又要实现对敌侦察压制。

为满足这一系列作战使命,无人子系统需要具备三大方面的能力。一是快速编队协同能力,无人子系统从载机平台投放分离之后,子机和载机平台之间需要快速编队组网,具备较高的时效性。对于无人机的机群,需要具备一定的组网能力。二是适用于强对抗、强拒止的作战环境,无人子系统需要代替载机前出,进入危险区域执行侦察任务,然后将侦察数据回传,由载机平台对目标进行打击。三是要求无人子系统有较强的自主性,其需要具备在不受人的干预、非预知环境下自动实现给定任务的能力^[11]。

无人子系统涉及的关键技术主要有:空中发射与回收技术;载机与子机、子机与子机间协同技术;集群无人子系统自动发射策略;小型分布式有效载荷集成;集群自主协同技术等。

2 国内空投型无人子系统定位需求

无人机平台在执行侦察打击任务时,由于存在实战条件限制、地形和天气等各种因素所导致的不利情况,暴露出载机缺乏对小目标抵近侦察、判断目标细节的能力,造成贻误战机或不必要的附加伤害^[12]。而无人子系统从载机平台投放后,可按需对目标进行抵近侦察,并通过数据链将侦察信息回传载机平台和地面站。无人子系统典型应用场景如图1所示。



图1 空投型无人子系统典型应用场景

为了进一步提高在特定作战环境下的近距侦察能力,

结合目前国内无人机的实际应用场景，无人子机应主要协助载机提升三项能力。

1) 提升对隐蔽目标的侦察能力，对于地形、建筑等特殊环境，要求通过无人子机低空悬停、绕飞等方式，多视角协同载机侦察。

2) 提升对人员类目标细节特征获取能力，通过无人子机实现近距侦察，获取人员类目标细节特征，为载机进一步打击提供准确决策依据。

3) 提升环境适应能力，利用投放无人子机的方式弥补载机在有云气象条件下任务执行效果下降的不足。

3 国内空投型无人子机设计思路

根据国内近距侦察的任务需求，本文创新性提出一种不同于美军固定翼无人子机的共轴双旋翼无人子机设计思路。与美军固定翼无人子机相比，这种设计主要针对近距侦察的作战场景，共轴双旋翼无人机能够实现空中高效高稳地悬停，进而对目标进行侦察。

4 国内空投型无人子机详细设计

4.1 载机平台系统组成

载机平台主要由三大系统组成，分别是无人机系统、地面控制站系统和地面保障系统。无人机系统主要包括机体、飞控系统、发动机系统、机电系统、飞机接口及线束、机载链路终端和任务系统^[13-14]。地面控制站系统主要包括指挥控制系统、地面链路终端和情报处理系统。地面保障系统主要包括信息资源保障系统和保障资源。

在载机平台上挂装空投型无人子机，主要涉及到任务系统中任务管理系统和挂载与武器系统的更改^[15]。对于任务管理系统，需要加装子母机通讯终端和子母机通讯天线。对于外挂与武器系统，需要新研无人子机挂架。载机平台系统组成如图 2 所示。

4.2 无人子机系统组成

无人子机系统由用于进行减速及姿态调整的分离减速装置，为无人子机提供保温功能的保护筒和无人子机组成。无人子机系统组成如图 3 所示。

减速分离装置包含减速伞舱、减速伞系统。减速伞舱用于安装、固定减速伞。减速伞系统由一级伞、二级伞和连接分离机构构成，其中连接分离机构包括伞舱盖与伞舱连接分离机构、保护筒与伞舱连接分离机构和无人子机与伞舱连接分离机构。

共轴双旋翼无人子机由旋翼系统、飞控系统、动力系统、机身结构、电气系统、任务载荷及数据链终端等部分组成。共轴双旋翼无人子机组成如图 4 所示。

4.3 载机平台任务系统流程设计

载机平台携带无人子机巡航至目标区域上空，在一定距离外，载机平台使用 EO 等光电侦察设备对目标区域实施侦察，判定目标位置，投放、指引无人子机抵近目标；无人子机接近目标后，选择有利视角，对目标进行近距精细化成像，无人子机侦察信息通过子机数据链回传至载机平台^[16-17]，然后载机平台将数据传至载机平台地面站，供情报人员判读，为进一步打击提供更为详实的决策依据。

无人子机执行任务过程中主要分为挂机阶段、下降展开、任务阶段、回收/自毁阶段。

4.3.1 挂机阶段

无人子机通过挂架悬挂于载机平台。

4.3.2 下降展开阶段

无人子机投放后开伞降落到预定位置，稳定姿态后展开旋翼，脱伞后开始可控动力飞行。

4.3.3 任务阶段

无人子机动力工作且进入可控状态后，无人子机根据指令或任务规划执行任务。

4.3.4 回收阶段

无人子机根据指令或条件自动判断从任务阶段进入回收飞行。

4.3.5 自毁阶段

无人子机根据指令或条件自动判断进入自毁阶段。

无人子机各阶段任务流程如图 5 所示。

无人子机从载机平台投放后，无人子机进入下降展开阶段，经过自动开伞、脱伞和旋翼展开，无人子机与载机

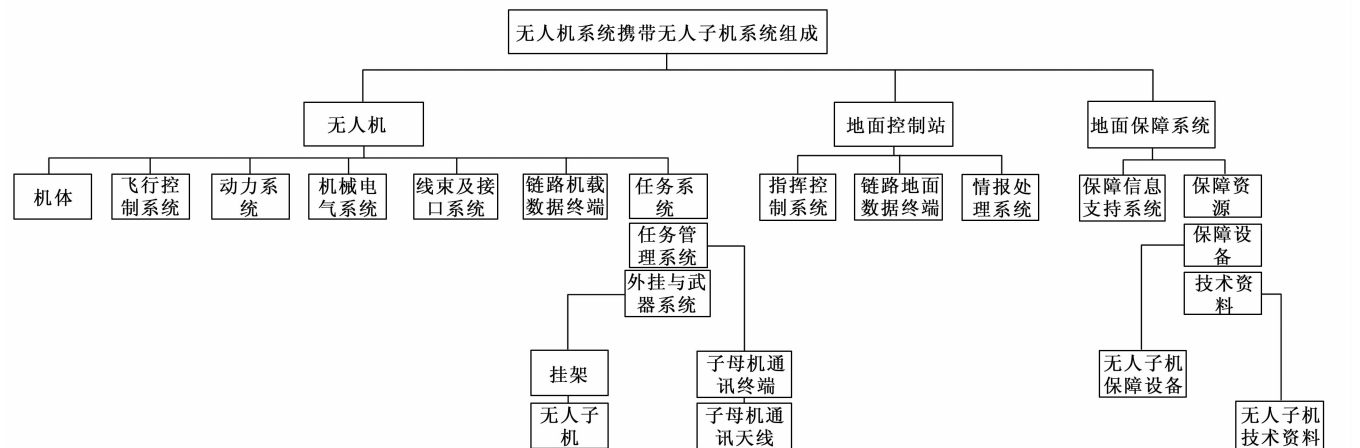


图 2 载机平台系统组成

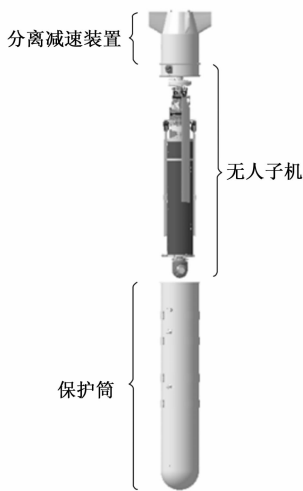
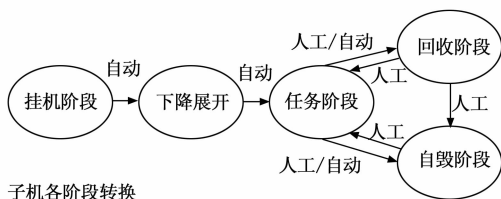


图 3 无人机系统



图 4 共轴双旋翼无人机组成



子机各阶段转换

图 5 无人机任务流程

平台通过数据链建立无线通信, 上传当前工作状态和参数^[18-19]。地面站接收子机信号并控制飞行, 无人机进入动力飞行阶段, 后续自动进入任务阶段。

无人机的飞行模式主要包含: 目标跟飞、目标绕飞、航路点导航飞行、悬停飞行和手动控制飞行。无人机飞行模式切换如图 6 所示。

目标跟飞是无人机根据载机平台共享的目标信息或子机本身侦察的目标信息, 与目标保持一定的距离并跟踪飞行。目标绕飞是无人机根据载机平台共享的目标信息或子机本身侦察的目标信息, 与目标保持一定的距离并绕行飞行。航路点导航飞行时无人机根据预先加载给任务机的规划, 按照航路点进行飞行, 子机到点后返回到点状态, 载机任务机再向子机发送下一航点位置信息。悬停飞行是指无人机在当前位置保持悬停飞行。手动控制飞行

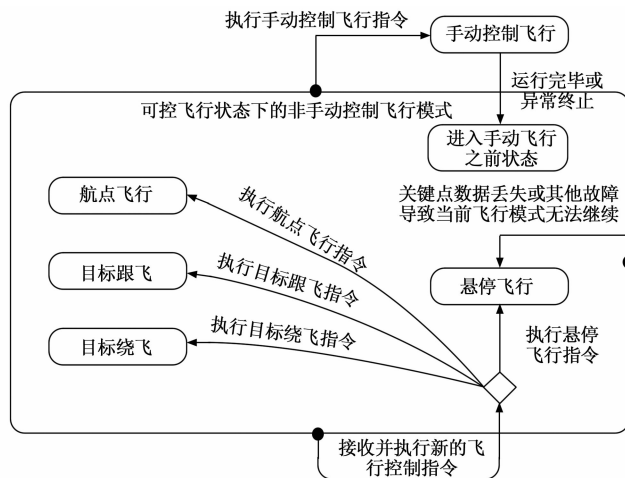


图 6 子机飞行模式切换

是指无人机根据地面人员操控指令进行飞行。

当无人机进入任务阶段后, 地面站对子机携带的 EO 进行控制, 首先载机任务机将接收到的地面站控制指令和参数发送给数传端机, 端机再通过无线信号发送给无人机^[20-21]。子机载荷根据指令进行响应, 并将响应后的状态和 EO 视频信息回传给地面站。

若无人机需要回收, 载机将回收点坐标转发给无人机, 无人机确认回收点状态信息并将其回传给地面站, 无人机进入回收阶段并朝目标点飞行; 若无人机不需要回收, 则载机不向无人机转发回收点坐标。若无人机剩余电量只满足飞往当前回收点时, 无人机自动进入回收阶段。当地面人员发出子机进入自毁指令时, 无人机进入人工自毁阶段。若无人机剩余电量减小到一定门限, 子机自动进入自毁阶段, 地面人员也可以发出指令, 中止子机的自毁。

4.4 无人机投放分离过程设计

无人机投放后需要经历 3 次分离过程。第一次分离过程中, 舱盖分离, 一级减速伞打开, 对无人机进行减速及调速姿态。一级减速伞展开后, 牵引二级减速伞打开, 进一步对子机进行减速。子机判断满足二级伞开伞条件后, 发出指令点爆连接分离机构, 保护筒和无人机分离, 子机空中起桨。最后, 无人机与二级减速伞分离, 子机进入自主飞行阶段。无人机投放分离过程如图 7 所示。

4.5 载机平台与无人机关键技术

4.5.1 载机平台与无人机的协同

基于数据链实现载机平台和子机间的自动协同。在本设计中, 根据无人机实时位置和无人机数据链的作用限制, 任务系统实时计算出所需的任务航向, 并将航线信息转为控制参数发送给载机平台, 完成对载机平台的自动导引飞行。在后续设计中, 除了考虑单个载机平台和单个无人机的协同, 还需要考虑载机平台与载机平台之间、载机平台和多个子机之间的协同, 即完成从独立平台间的

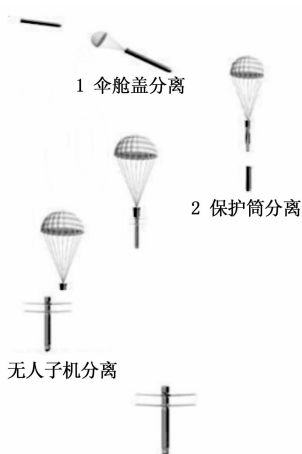


图 7 无人机投放分离过程

协同组网到分布式平台间的协同组网。

4.5.2 无人子机多阶段的机构分离技术

无人子机前后需要经过 3 次分离过程，两次降落伞展开并脱伞的过程，以及无人子机空中起控的过程，相比于美国从载机平台上空射无人子机的设计，本设计对于无人子机的分离控制提出了较高的要求。但本设计带来的优点也是显而易见的，采用载机平台重力投放、降落伞伞降的减速方式，发射后，与牢固安装的机翼相比，无人机受载机平台产生的废气和载机相对运动速度的影响较小。

4.5.3 高效高稳悬停无人侦察子机技术

对于遂行高精度侦察的无人子机平台，要求无人子机任务载荷能够快速稳定地跟踪目标，其悬停稳定性是完成任务的关键技术，这里无人子机采用了共轴双旋翼技术，以满足悬停稳定性的要求。影响载荷侦察精度的因素主要有两个，一是无人子机位置漂移，二是系统的姿态控制。为了保证无人子机平台的位置、姿态稳定性，需要严格控制其俯仰、方位角速率误差，将俯仰、方位姿态稳定控制限幅速率限定在一个合适的范围，以保证任务载荷快速稳定跟踪目标。

4.5.4 目标定位及识别技术

目标观测需要实现对目标区域的高精度定位识别。当无人子机处于识别模式时，要实时跟踪目标，仅依靠载机本身的跟踪能力难度较大，还需要依赖载机本身的移动特性。同时，需采用关键点检测技术、图像预处理技术、图像特征提取技术、图像对比识别技术、ERR 识别效果评测、3D 模型生成技术等技术手段，加强无人子机目标识别的能力。

4.5.5 无人子机隐蔽安全性设计技术

无人子机隐蔽技术包括光电隐蔽、降噪控制、反电磁探测等技术。对于共轴双旋翼无人子机，要实现近距隐蔽侦察的目标，其降噪控制十分关键。降噪控制可以从两个方面进行考虑：1) 通过技术改进将共轴双旋翼无人子机本身的噪声降低；2) 提高子机平台传感器的探测能力，使无人子机能够在更远的距离上探测目标，从而使无人子机更

不容易被敌方发现。在现有技术状态下，要解决因噪声带来的共轴双旋翼无人子机隐蔽问题，需要综合评估子机传感器能力和噪声程度，得出一个最小隐蔽探测距离，无人子机应该在此距离外探测目标。

4.5.6 无线数传技术

为了实现无人子机系统与地面平台之间的数据交换，必须选择无线电数据传输模块作为它们之间的数据传输桥梁，完成无人机飞行控制系统设置的传输以及遥控和地面平台控制命令的上传。鉴于机体的载荷限制和尺寸要求，选择 NRF24L01 作为数据传输模块。工作频段为 2.4 GHz，数据传输范围可达 100~200 m，数据传输速率为 1 MB/s，完全满足本阶段设计要求。微控制器通过串行 USART 端口读取数据传输模块的信息，另一端连接到地面平台，无人机位置信息通过数据传输模块传输到地面控制中心。

5 结束语

随着先进武器装备的发展和作战环境的变化，对无人子机系统提出了新的要求。当下对无人子机的需求极其迫切，不管是城市治安或是可能遇到的局部低烈度战争，乃至大国间的体系化战争，无人子机都能开拓新的作战场景，提供新的解决思路。目前，我国仍处于无人子机应用的初期探索阶段，本文在总结分析美国无人子机应用场景的基础上，提出了一种基于无人机平台空投侦察型无人子机的应用场景，并就无人子机挂载于载机平台，对载机任务系统上进行了相关设计。在空投型无人子机的后续发展中，从无人子机的角度需要考虑任务载荷的有效性、匹配性等问题，从载机平台的角度需要关注无人子机集群场景下的协同、回收等问题。就无人子机而言，其发展不应当局限于自身的各项性能要求，而是应该从整体出发，由载机平台推动，由需求引领，推动无人子机的探索和发展。

参考文献：

- [1] 邓大松, 孙俊, 杨予昊. 基于马赛克战的国土防空作战体系构建研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15 (2): 105-109, 124.
- [2] 王鹏程, 段方, 宋浩田, 等. 美国空射无人机项目综述 [A]. 中国航天电子技术研究院科学技术委员会 2020 年学术年会论文集 [C] // 中国航天电子技术研究院科学技术委员会, 航天电子发展战略研究中心, 2020: 9.
- [3] 何鹏. 美陆军“未来垂直升力”发展简介 [N]. 中国航空报, 2020-12-09 (9).
- [4] 刘谦. 美国陆军“空射效应”技术简析 [N]. 军鹰资讯, 2021-6-27.
- [5] 黄晋一. 军情锐评: “海神之眼”! 美 MQ-4C 无人机可协同 P-8 反潜机监视中俄战舰 [N]. 参考消息, 2018-06-25.
- [6] 黄雷. 美军小精灵无人机群项目发展现状综述 [J]. 飞航导弹, 2018 (7): 44-47.
- [7] 杨中英, 王毓龙, 赖传龙. 无人机蜂群作战发展现状及趋势研究 [J]. 飞航导弹, 2019 (5): 34-38.

(下转第 162 页)

改进的 KNN 预测模型在预测过程中不断地剔除训练样本中异常的或者影响预测准确度的样本,从而修正预测模型,使得预测模型的预测准确率不断自动地提升。因此,实验数据表明在对 20 台风机功率的预测中,误差率越来越低,每台风机的平均误差都小于 15%,满足目前风电功率预测系统的要求。

6 结束语

本文将 K-means 和改进的 KNN 算法应用到风电功率短期预测中,两种算法都是基于相似数据原理,学习方法不需要建立复杂的模型,预测模型简单、思想直观,更适合输入大量的历史样本数据,提高预测的准确率。采用 C/S 架构完成了风电功率预测系统的设计与实现,并以吉林省某风电场的历史数据为例,验证了该模型具有自学习、自修正能力,随着预测次数的增加,系统能够自动提升风电功率的预测准确度。该预测算法虽然具有一定的实用性,但如何取得最优 K 值,仍是下一步需要重点研究的内容。

参考文献:

- [1] 王伟胜,王 铮,董 存,等. 中国短期风电功率预测技术现状与误差分析 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (1): 17-27.
- [2] 彭小圣,熊 磊,文劲宇. 风电集群短期及超短期功率预测精度改进方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (23): 6315-6326, 6596.
- [2] 王彩霞,鲁宗相,乔 颖,等. 基于非参数回归模型的短期风电功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (16): 78-82, 91.
- [4] 谷兴凯,范高峰,王晓蓉,等. 风电功率预测技术综述 [J]. 电网技术, 2007 (S2): 335-338.
- [5] 黄 慧,贾 嵘,董开松. 基于时空相关性的 NAR 动态神经网络风功率超短期组合预测 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (10): 311-316.
- [6] 赵 欣,王爽心. 基于灰色关联和协整理论的风功率组合预测研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38 (5): 1299-1306.
- [7] 修春波,任 晓,李艳晴. 基于卡尔曼滤波的风速序列短期预测方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (2): 253-259.
- [8] 范高峰,王伟胜,刘 纯. 基于神经网络的风电功率短期预测系统 [J]. 电网技术, 2008 (22): 72-76.
- [9] 薛禹胜,陈 宁,王树民,等. 关于利用空间相关性预测风速的评述 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41, (10): 161-169.
- [10] 杨正瓩,冯 勇,熊定方,等. 基于季风特性改进风电功率预测的研究展望 [J]. 智能电网, 2015, 3 (1): 1-7.
- [11] AHMED A, KHALID M. A review on the selected applications of forecasting models in renewable power systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100: 9-21.
- [12] YANG B, ZHONG L, WANG J, et al. State of the art one-stop handbook on wind forecasting technologies: An overview of classifications, methodologies, and analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124628.
- [13] 胡 帅,向 月,沈晓东,等. 计及气象因素和风速空间相关性的风电功率预测模型 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (7): 28-36.
- [14] 吴问足,乔 颖,鲁宗相,等. 风电功率概率预测方法及展望 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (18): 167-175.
- [15] 朱念芳,林善明. 基于邻域 KNN 算法的风电功率短期预测模型 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (16): 20-24.
- [16] 郭晓利,张玉萍,曲朝阳,等. 基于 FKNN 算法的风电功率短期预测 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (15): 1-7.
- [17] 杨 茂,董骏城,齐 玥. 基于近似熵的风电功率可预测性研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37 (10): 2710-2718.
- [18] 周松林,茆美琴,苏建徽. 基于主成分分析与神经网络的风电功率预测 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 128-132.
- [15] 王勇军,李 智,孙山林,等. 轻小型无人机遥感组网飞行的高程安全监测冗余容错算法研究 [J]. 地球信息科学学报, 2019 (4): 542-551.
- [16] 刘丙涛,周 炎,祖家奎. 无人直升机跟踪地面移动目标实时仿真系统设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (1): 22-27.
- [17] 谢 檬,宋 菲. 基于 LabVIEW 的无人机航线控制系统的设计 [J]. 自动化与仪表, 2019, 34 (8): 43-46.
- [18] 王文亮,马 磊,韩 蕾. 无人机综合仿真与测试平台技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 13-17.
- [19] 赵广磊,高儒帅,陈健楠. 具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (9): 2103-2112.
- [20] 卢海松,牛洪海,蔡 丹,等. 大型调相机除盐水无人值守控制系统设计与应用 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (4): 89-93.
- [21] 钟 赞,姚佩阳,张杰勇,等. 有人/无人机协同作战系统 C2 结构和行动计划适应性设计方法 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2019, 20 (3): 38-45, 102.

(上接第 142 页)

- [8] 通用原子公司公布“雀鹰”小型无人机 [EB/OL]. (2020-10-14). [2021-11-23]. <http://3g.163.com/dy/article/FOS-8V4TE0528QLHI.html>.
- [9] 美军成功用无人机投放小型无人机 [EB/OL]. (2021-04-06). [2021-11-23]. <http://www.guancha.cn/military-affairs/2021-04-06-586443.shtml>.
- [10] 周 强,夏明赞. 基于改进 SSD 算法的多无人机检测研究 [J]. 信息技术, 2020, 44 (12): 71-76.
- [11] 沈明松. 基于视觉识别的输电杆塔无人机自动巡检系统设计 [J]. 信息技术, 2020, 44 (9): 148-152.
- [12] 张 亮,方 圆,蔡梦臣,等. 基于能量消耗 MPR 的无人机 OLSR 路由协议评估 [J]. 信息技术, 44 (9): 157-160.
- [13] 利 锋,杨中柱,黄祖胜,等. 结合混合粒子群算法的植保无人机航线设计方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41 (9): 1826-1832.
- [14] 潘 影,张燕杰,武俊喜,等. 基于遥感和无人机数据的草地 NDVI 影响因子多尺度分析 [J]. 草地学报, 2019, 27 (6): 1766-1773.