

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.048

一种基于操纵杆的中型无人直升机飞行操纵技术设计与实现

孙飞, 刘佳晖, 祖家奎, 桑可可, 姚志豪

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106)

摘要:为满足中型无人直升机在植保领域的控制要求,减轻操纵人员负担,提升操纵效率,提出一种基于操纵杆的无人直升机飞行操纵技术。针对无人直升机对象特性复杂、稳定性差、操纵难度大的问题,以杆操纵为主、自动控制为辅,详细设计了操纵杆通道定义,并对杆数据进行了工程化处理,使输入量光滑连续。设计中型无人直升机接入操纵杆控制时对应的控制律,保障操纵杆控制的稳定性和安全性。考虑实际使用中所需的控制功能,重点研究基于操纵杆的人工增稳模式和GPS混控模式。试飞验证表明:该方法能稳定准确地操控中型无人直升机完成目标动作。

关键词:无人直升机;杆数据处理;操纵杆控制方案

中图分类号:V249 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)02-0248-06

A Joystick Based Design and Implementation of Medium-sized Unmanned Helicopter Flight Control Technology

SUN Fei, LIU Jiahui, ZU Jiakui, SANG Keke, YAO Zhihao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To meet the control requirements of medium-sized unmanned helicopters in the field of plant protection, and reduce the burden on operators and improve control efficiency, a joystick based unmanned helicopter flight control technology is proposed. As to complex characteristics, poor stability and great difficulty in control of unmanned helicopter objects, the joystick channel definition was designed in detail with stick control as the main control and automatic control as the auxiliary. The joystick data was processed in an engineering manner to ensure smooth and continuous input. The corresponding control law was designed when the medium-sized unmanned helicopter was connected to the joystick control, assuring the stability and safety of the joystick control. Considering the control functions required in practical use, study was focused on the manual stabilization mode and GPS hybrid control mode based on the joystick. The final flight test verification shows that the proposed method can stably and accurately control a medium-sized unmanned helicopter to complete the target action.

Keywords: unmanned helicopter; rod data processing; joystick control scheme

0 引言

无人直升机(unmanned aerial helicopter, UAH)是一种旋翼类无人机,通过旋翼产生向上的升力,并通过改变桨距角得到升力的水平分力,借此控制直升机在水平面上运动^[1]。相较于固定翼飞机,无人直升机拥有垂直起降、空中悬停、低空飞行等独特的能力。近年来,无人直升机正处于高速发展时期^[2]。无人直升机具有可垂直起降、载荷大以及续航时间长等优点,在农业植保等领域有着非常广泛的应用^[3]。其可以进一步提升栽种效率,提高产量,顺应了农业自动化、智慧化的潮流^[4]。而无人直升机在执行农药喷洒等任务时,对速度和高度的要求都不高,但低空环境下的地效影响和气流扰动对直升机的操纵特性和运动

特性提出的需求则更高^[5]。

在我国西北和东北地区,农田区域广泛,许多作物的种植面积都达到千亩级别,故大载荷的植保类无人直升机有着广泛的市场。然而,由于农药喷洒对轨迹要求较高,并且需要经常改变直升机的飞行轨迹和姿态,所以设计基于操纵杆的控制方案极其重要。在之前的研究中^[6],操纵杆的控制技术都是针对小型无人直升机的,起飞质量一般在100 kg以下,通过纯手动的方式操纵对操纵人员的要求较高,且极易出现安全事故。因此,寻找一种优秀的操纵杆控制算法能提升无人直升机的飞行品质、操纵特性和运动特性,更好地服务于农业植保领域^[7-8]。

鉴于此,本文提出了一种基于操纵杆的无人直升机控制技术,旨在将杆操纵、姿态操纵、速度

第一作者简介:孙飞(1998—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为飞行控制,sunfsrr@163.com。

操纵、位置操纵等有机结合起来,从而改善无人直升机的飞行品质,减轻操纵人员的负担。

1 杆操纵实现方法

1.1 对象简述

本文的应用对象是一款中型植保无人直升机,型号 DWK700,如图 1 所示。此款无人直升机主要应用于播种、施肥、飞防等农用场合,最大载荷质量 260 kg,最大起飞质量 700 kg。本文将先展开研究操纵杆的控制模式和功能定义,再给出各个通道的控制律设计,最后再制定操纵杆的不同控制方案。



图 1 DWK700 型植保无人直升机

1.2 功能设计

以杆操纵为主、自动控制为辅的飞行控制技术,要求操纵杆应具备以下几个功能:

1) 装配调试,此功能主要用于无人直升机总装和设备安装,在无人直升机机上系统上电后,飞手通过操纵杆测试舵机响应,标定中立位置,进行发动机启动测试等;

2) 操纵检查,此功能主要在无人直升机起飞前对其操纵机构进行校验和核查,无人直升机操纵机构的连接状态需要进行动态检查,故需要在正式起飞前通过操纵杆各通道的操纵来检查无人直升机操纵机构是否符合预期指令;

3) 发动机控制,此功能主要用于发动机的人工启动、暖车、额定、停车等工作状态的实现和切换;

4) 飞行控制,此功能主要用于无人直升机的起降和空中飞行的操纵以及飞行控制模式的切换。

1.3 操纵杆通道定义

本文选用的操纵杆是 Futaba 公司的一款遥控器,型号为 T14SG。基于操纵杆所需的功能要求,设计了不同通道的定义和功能,如表 1 所示。

表 1 主控通道操纵杆杆量不同模式下所对应指令

通道	定义	功能
开关量 SF	发动机有效性指令	两态:0—发动机停车,1—发动机启动
开关量 SE	发动机模态指令	三态:0—停车,1—启动暖车,2—额定
开关量 SG	操纵杆解锁指令	两态:0—杆锁使能关,1—杆锁使能开
开关量 SC	人工操控模式指令	三态:0—增稳人工,1—GPS 人工,2—平面混控
开关量 SD	飞行高度控制模式	两态:0—断开高度,1—接入高度
滑动杆 J1	横向滑动杆	负责滚转通道的操纵
滑动杆 J2	纵向滑动杆	负责俯仰通道的操纵
滑动杆 J3	总距滑动杆	负责高度通道的操纵
滑动杆 J4	尾桨滑动杆	负责航向通道的操纵

1.4 操纵杆指令处理

首先要对操纵杆输入的信号进行前置处理,以保证控制的连续性和准确性,进而保证整个飞行过程的安全性。对操纵杆指令的前置处理主要包括捕获校准、信号整定、指令线性软化和死区控制。

1) 捕获校准

操纵杆输出的信号为 PWM 信号,在捕获 PWM 信号时,由于硬件电路本身的滤波和可能存在的干扰等,使得接收设备捕获的值与实际值产

生一定的偏差,故需对捕获的值进行校准。

这种偏差是固定的,只需在飞控程序中对该偏差值进行固定补偿,即可得到准确值。

2) 信号整定

信号整定的目的是将捕获而来的 PWM 值转换为无量纲的值以用于控制律解算。

假设操纵杆所输出的脉宽范围在 $P_{\min} \sim P_{\max}$,而目标是将其转化为 $-100 \sim 100$ 的无量纲值,整定公式如下:

$$X_{\text{val}}[i] = \frac{100 \cdot [Y_{\text{chn}}[i] - (P_{\max} - P_{\min})/2]}{(P_{\max} - P_{\min})/2} \quad (1)$$

该比例项的作用主要用于位置的跟踪。

2.3 航向控制律设计

DWK700 型植保无人直升机是常规的单旋翼带尾桨式结构,这种结构下的主旋翼旋转,会使得机身产生反转矩。尾桨的作用就是抵消反转矩,并控制直升机航向^[12]。其控制结构如图 4 所示。

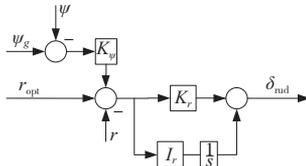


图 4 航向通道控制结构图

航向通道控制律结构表达式如下:

$$\begin{cases} \delta_{rud} = K_r \cdot (r_g - r) + I_r \cdot \int (r_g - r) dt \\ r_g = K_\psi \cdot (\psi_g - \psi) + r_{opt} \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ_{rud} 为尾桨距; ψ_g 为偏航角; r_g 为偏航角速率。在植保直升机工作的过程中,以保持航向为主,控制结构由对偏航角的比例控制和对偏航角速率的比例积分控制构成。对偏航角的比例控制依然是为了提升航向通道的稳定性,有效提升无人直升机对航向控制的跟踪能力。

高度通道的控制律设计与航向控制律类似,不再展开叙述。

3 控制模式设计

植保型无人直升机操纵控制方案设计的关键在于如何将操纵杆为核心的控制技术应用于这一领域。其目的主要在于:降低操纵人员的负担,提升飞行任务效率以及降低飞行成本。本文将操纵杆的控制方案设计分为增稳人工模式和 GPS 混控模式。

3.1 基于操纵杆的增稳人工控制模式

增稳控制模式是由操纵杆直接控制姿态的一种控制模式,主要接入姿态增稳回路对飞机姿态进行控制,操纵杆的输出量转换成变距量。操纵杆的纵向、横向和航向通道的杆量对应无人直升机的纵向变距、横向变距和尾桨距量。该控制方案主要用于直升机起飞、降落时垂直起降,高度通道在起降过程中是主控通道。在高度通道的设计上,操纵杆杆量直接对应总距,可以使直升机快速响应操纵杆的指令。而直升机在起飞着陆阶段易受地效影响,为了保证直升机在姿态上的稳定性,横纵向通道接入内环增稳控制。

3.2 基于操纵杆的 GPS 混控模式

GPS 混控模式主要是基于 GPS 位置和速度信号以及航姿和角速率的内外环综合控制。由于本文使用的 T14SG 遥控器使用了特殊的机械结构,纵向杆、横向杆和航向杆松杆后都会自动回中,而总距杆不同于其他 3 个通道,松手后仍可以保持原有位置不变。故将此控制模式再分为平面混控模式和高度程控模式。

平面混控模式的飞行功能定义如表 2 所示,可以分为以下几种情况。

表 2 平面混控模式飞行模式定义

飞行模式	纵向通道	横向通道	航向通道	总距通道
悬停	中立	中立	中立	保持
悬停转向	中立	中立	操纵	保持
前飞	操纵	中立	中立	保持
侧飞	中立	操纵	中立	保持
斜飞	操纵	操纵	中立	保持
自由飞	操纵	操纵	操纵	保持

1) 悬停:控制方式是纵向和横向处于位置保持,航向处于锁向控制。

2) 悬停转向:控制方式是纵向和横向处于位置保持,航向处于航向回转控制,杆量值对应偏航角速率指令值,有正反转且杆量绝对值越大则回转速度越快。

3) 前飞:控制方式是横向处于位置保持,航向处于保持控制;纵向杆量值对应前后飞的速度值,正负杆量对应前飞和后飞。

4) 侧飞:控制方式是纵向处于位置保持,航向处于保持控制,横向杆量值对应左右侧飞的速度值,正负杆量对应右侧飞和左侧飞。

5) 斜飞:控制方式是航向处于(锁向)航向保持控制,纵向和横向杆量值对应前后飞、左右侧飞的速度值,正负杆量对应前后和右左侧飞速度且杆量绝对值越大则速度越快,其中速度均有限制。

6) 自由飞:控制方式是纵向和横向处于纵横向速度控制,航向处于航向角速率控制,杆量值对应速度和偏航角速率指令值,有正负转且杆量绝对值越大则回转速度越快,且速度均有限制。

平面混控模式下,总距通道的操控不影响、不改变纵向/横向/航向 3 个通道的控制,垂向控制处于开环控制,即杆量直接对应总距量。当无人直升机在空中悬停且高度稳定时,可以通过切换至“高度程控模式”或通过地面控制站发送“位置

悬停”指令将垂向的高度保持控制接入(此时飞控软件会自动记录此时定高的总距杆量)。无人直升机处于高度保持时,此时通过切换至“人工模式”或对总距杆量进行操控超出了原来记录的定高总距杆量的死区范围后,垂向控制将解除高度保持控制切换至开环控制。故高度程控模式与平面混控模式的不同主要是将高度通道接入定高控制,其他部分都与平面混控模式相同,不再展开叙述。

4 测试验证

本文验证方案分两个过程,操纵杆在姿态增稳模式下进行人工起飞,待直升机起飞至一定高度并稳定悬停后,操纵杆切换至混控模式,验证前飞、侧飞等手动控制方案。

增稳模式人工起飞时的飞行数据曲线如图 5

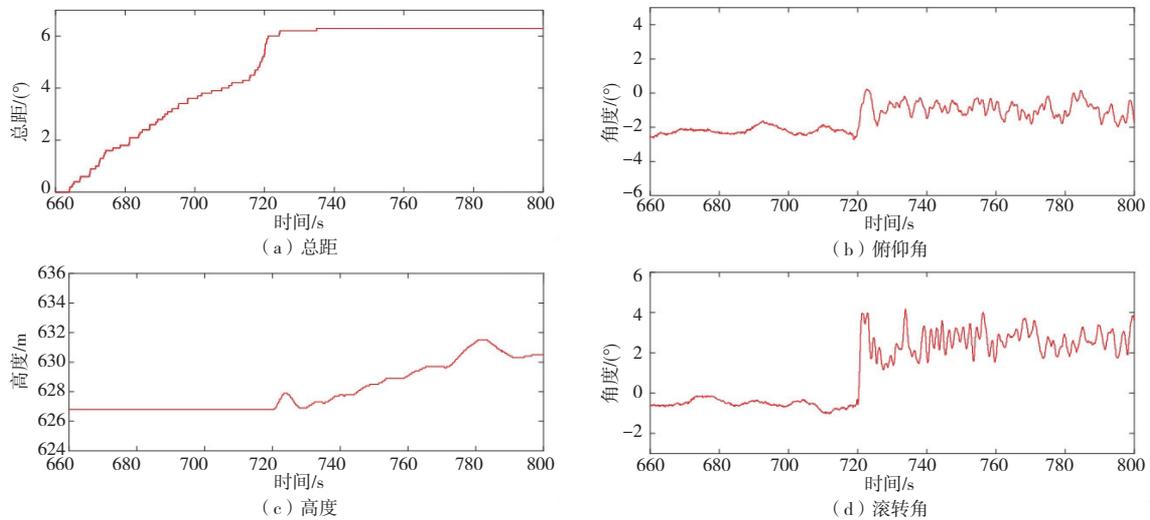


图 5 增稳模式下起飞数据曲线

所示。由于操纵杆杆量直接对应直升机总距,从曲线中可以看出:在总距增加时,无人直升机能快速脱离地面,进行爬升。但从俯仰角和滚转角的响应曲线可以看出:离地时由于地效的影响,直升机产生了一个姿态的突变,也就是漂移现象。这时控制律快速接入保证了姿态的稳定性,总距稳定时直升机的姿态也基本保持稳定。在该方案下,能保证直升机起飞和降落时的安全性。

待飞机悬停稳定后,操纵杆切换成混控模式,混控模式下前飞的飞行数据曲线如图 6 所示,此时杆量的输出量对应飞行的速度量,纵向杆前推时,可以看到纵向变距缓慢增加,直升机调整姿态,俯仰角增加,前飞速度随之增加。当直升机达到目标速度值后,保持当前飞行速度继续前飞,而直升机姿态基本保持稳定。

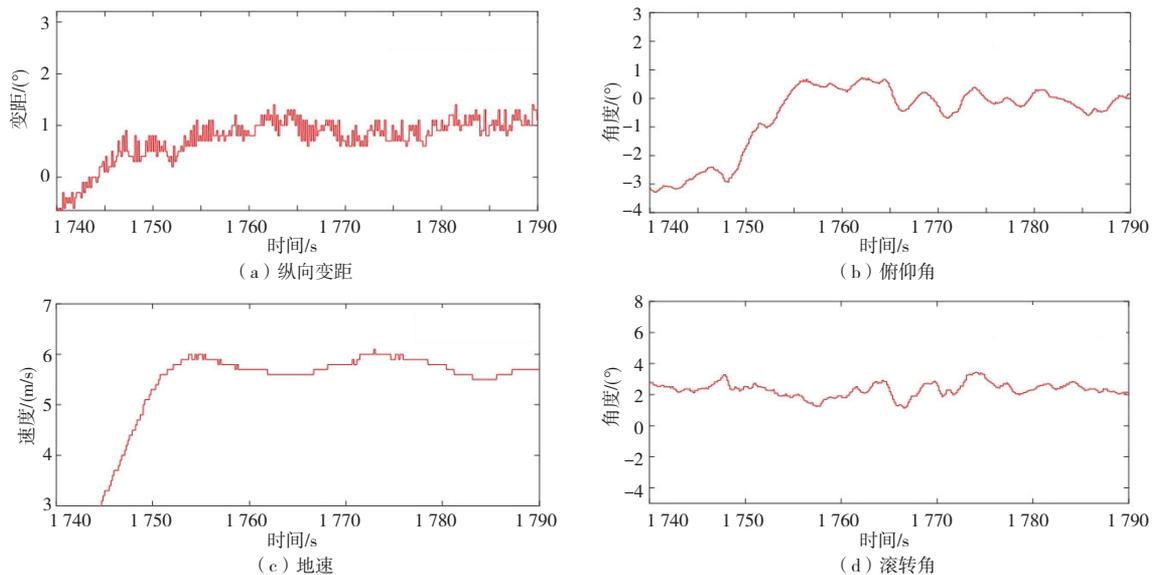


图 6 混控模式下前飞数据曲线

5 结语

本文提出了一种基于操纵杆的无人直升机控制技术并进行了试飞验证,提高了中型植保无人直升机执行飞行任务的可靠性,减轻了操纵人员的负担,具有一定的工程价值,同时填补了中型无人直升机杆操纵数据处理方法的空白。针对植保无人直升机航线控制的具体需求,设计了增稳人工控制模式和 GPS 混控模式,提高了其在遥控过程中的适应性和稳定性,发挥了操纵杆在此领域的应用潜力。

参考文献:

- [1] 刘佳晖,祖家奎,陶德臣,等. 基于最小喷洒单元的植保无人作业航线优化分割方法[J]. 计算机系统应用,2022,31(3):340-344.
- [2] 曹国强,章敏. 植保无人机需求分析与展望[J]. 农业与技术,2016,36(21):65-66.
- [3] ZHENG J, GUO Y, ZHOU Y M, et al. Unmanned helicopter trajectory tracking control based on LI adaptive and backstepping method [C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China: IEEE,2018:2940-2946.

- [4] 金礼芬,蒲建,杨文斌,等. 无人机在农业发展中的应用[J]. 智慧农业导刊,2022,2(19):16-17,20.
- [5] 刘剑波. 小型无人直升机操纵机构设计与研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- [6] 刘世隆. 农用植保无人直升机飞行操控技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [7] GOSWAMI R, SANYAL S, SANYAL A N. Compensator design for helicopter stabilization [J]. Procedia Technology,2012,4:74-81.
- [8] VAN BLYENBURGH P. UAVs: an overview [J]. Air & Space Europe,1999,1(5/6):43-47.
- [9] 王小青. 无人直升机建模与控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [10] 刘培强. 小型无人直升机飞行控制软件及仿真系统的开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [11] 余彦霖. 微小型无人直升机航姿融合和控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [12] SURESH S, SUNDARARAJAN N. An on-line learning neural controller for helicopters performing highly nonlinear maneuvers [J]. Applied Soft Computing, 2012,12(1):360-371.

收稿日期:2023-06-28

(上接第 237 页)

- [3] 袁佳泉,李胜,吴益飞,等. 基于模拟退火蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真,2019,36(10):329-333.
- [4] 路浩,陈洋,吴怀宇,等. 受路网和测量约束的变电站巡检机器人路径规划[J]. 中国机械工程,2021,32(16):1972-1982.
- [5] 刘胜,晏齐忠,张志鑫,等. 基于 ACO-PSO 算法的变电站巡检机器人路径规划研究[J]. 浙江电力,2021,40(1):29-35.
- [6] 张凡,蔡涛,刘文达,等. 基于改进 JPS 算法的电站巡检机器人路径规划[J]. 电子测量技术,2020,43(8):10-16.
- [7] 雷蕾,石晨. 基于启发式搜索算法的自动采摘机器人路径规划研究[J]. 农机化研究,2021,43(7):240-244.
- [8] 李国辉. 农业机器人避障路径智能规划研究[J]. 农机化研究,2021,43(3):236-239.
- [9] 薛阳,俞志程,吴海东,等. 基于 IACO-ABC 算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 浙江电力,2019,38(11):10-15.
- [10] 王中玉,曾国辉,黄勃. 基于改进双向 A* 的移动机器人路径规划算法[J]. 传感器与微系统,2020,

- 39(11):141-143,147.
- [11] 绳红强,黄海英,石小锐,等. 基于改进蚁群算法的自动驾驶路径规划研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):203-206.
- [12] 谢林枫,蒋超,孙秋芹,等. 基于 AMC 算法的变电站巡检机器人地图创建与定位[J]. 电力工程技术,2019,38(5):16-23.
- [13] 苏海锋,许道林,李汶江,等. 基于改进蚁群 A* 算法的输电线路路径搜索[J]. 河北大学学报(自然科学版),2017,37(1):92-100.
- [14] 郑敏. 基于势场蚁群算法的变电站巡检机器人路径规划[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [15] 陈莎莎. 基于改乌燕鸥算法的移动音乐机器人路径规划[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):197-202.
- [16] 梁献霞,刘朝英,宋雪玲,等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划研究[J]. 计算机仿真,2018,35(4):291-294,361.
- [17] 李凤玲,陈珊,范兴江,等. 基于萤火虫算法动态未知环境的路径规划[J]. 自动化与仪表,2019,34(6):53-58.
- [18] 刘婷婷. 禁忌搜索算法在无人驾驶路径规划中的应用[D]. 镇江:江苏科技大学,2019.

收稿日期:2023-07-20