

doi: 10.7690/bgzdh.2023.09.001

系留多旋翼无人机模拟训练系统设计与实现

王伟¹, 薛松², 廖士楠¹, 吕卫强¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司无人机事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 北京未尔锐创科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 为满足操作手对系留多旋翼无人机及其搭载任务载荷操作的模拟训练需求, 对系留多旋翼无人机模拟训练系统进行设计与实现。该系统由飞行模拟计算机系统、便携式操控终端模拟器和教官中控台构成, 提出基于系留线缆的系留多旋翼无人机及其空气动力学、飞行场景、想定战场环境及场景目标等模拟仿真模型。从系统架构优化、通信链路协议、实装设备原位替代等方面进行设计实现。结果表明: 该系统结构完整、安全性好, 配置精简、灵活、方便, 成本低, 适用于野战训练。

关键词: 系留多旋翼无人机; 旋翼空气动力学; 模拟训练系统

中图分类号: E926; V279 **文献标志码:** A

Design and Implementation of Simulation Training System for Tethered Multi-rotor UAV

Wang Wei¹, Xue Song², Liao Shinan¹, LYU Weiqiang¹

(1. Department of UAV, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. VIRE Technologies, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to meet the operator's requirements of simulation training for the tethered multi-rotor UAV and its mission load, a tethered multi-rotor UAV simulation training system is designed and implemented. The system consists of a flight simulation computer system, a portable control terminal simulator and an instructor console. We propose a tethered multi-rotor UAV based on a rope and a simulation model of its aerodynamics, flight scene, scenario battlefield environment and scene objectives. The realization of the system is described from the aspects of system architecture optimization, the protocol of communication link, and replacement of real equipment. The results show that the system has complete structure, good security, simplified configuration, flexibility, convenience, low cost, and is suitable for field training.

Keywords: tethered multi-rotor UAV; rotor aerodynamics; simulation training system

0 引言

系留多旋翼无人机采用地面电源, 通过系留线缆, 通常以高压电的形式向多旋翼无人机输送电能, 使得无人机不受动力能源的限制, 可长时间持续在空中悬停飞行。鉴于这一特点, 多旋翼无人机越来越多地应用在抗震救灾、安全监控、通信中继、无线电侦测、战场侦察监视、目标探测指引等众多的民用、军事领域。

由于多旋翼无人机空气动力学特性复杂, 使得操作员的操作任务复杂、多变。相对多旋翼无人机, 系留多旋翼无人机在高空飞行时还会受到系留线缆拉力干扰。缆绳的拉力会随着无人机平台位置的变化而改变^[1], 给操作手操控无人机带来挑战。此外, 针对如突风干扰、备电自降、飞行传感器失常等突发事故, 更需要操作手具有坚实的培训基础和熟练的操控技能。

系留多旋翼无人机模拟训练系统(以下简称模拟训练系统)用于操作员在室内进行多旋翼无人机日常升空、悬停和降落等常规飞行操作和在突发、应急情况下的应急操作、处置等模拟训练, 以及用于操作员对无人机搭载的任务载荷, 如光电设备的操控和信息处理操作的模拟训练, 是提高部队战斗力训练、培训的有力工具。

1 模拟训练系统总体设计

1.1 系统主要功能性能要求

1) 操作员进行操控多旋翼无人机的训练功能。

模拟训练系统可模拟在实战条件下, 训练多旋翼无人机的操作员熟练掌握从系统准备、无人机起飞、到达预定高度、悬停执行任务、返航降落等作战过程的各种操作。

2) 操作员进行操控光电设备载荷的训练功能。

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-10

作者简介: 王伟(1966—), 男, 四川人。

模拟训练系统可模拟在实战条件下，训练多旋翼无人机搭载的光电设备载荷的操作员熟练掌握无人机悬停飞行过程中，执行光电设备侦察监视任务的各种操作。

3) 科目设置功能。

模拟训练系统可根据训练、培训任务和考核的要求，设置系统全面、可组合配置的训练、考核科目，供教官选择、配置。

4) 考评功能。

通过教官中控台，教官可对被训练操作员的训练情况进行实时监控和考评，并能定性、定量评定操作员的训练效果和成绩。

1.2 系统组成

系留多旋翼无人机模拟训练系统由飞行模拟计算机系统、便携式操控终端模拟器、教官中控台、电源适配器和模拟仿真软件等组成，如图 1 所示。便携式操控终端模拟器设计和实际便携式操控终端有相同功能。

飞行模拟计算机系统包括飞行模拟计算机、飞行虚拟显示屏和音响系统。飞行虚拟显示屏用于显示从操作手视角观察的无人机飞行状态的虚拟景

象。教官中控台包括导控计算机和导控显示屏。导控显示屏显示教官导控参数设置和导控状态。通过切换，导控显示屏还能同步显示便携式操控终端模拟器显示的操作手操作过程和内容，包括在便携式操控终端模拟器上显示的无人机搭载的光电设备探测的视频图像等动态信息。音响系统用于模拟产生多旋翼无人机在起飞、悬停和降落过程中无人机产生的声音效果。

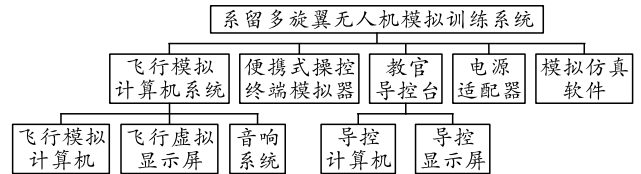


图 1 模拟训练系统组成框图

1.3 模拟训练系统原理

图 2 为模拟训练系统原理概略。教官根据训练教学任务通过教官中控台选择训练科目，设置飞行海拔高度、搭载的任务载荷(如光电设备)型号以及飞行气象、天候、无人机飞行背景环境(第三视角)、任务载荷光电设备观察的想定战场场景和目标(第一视角)等初始状态，并将上述命令和数据发送给飞行模拟计算机。

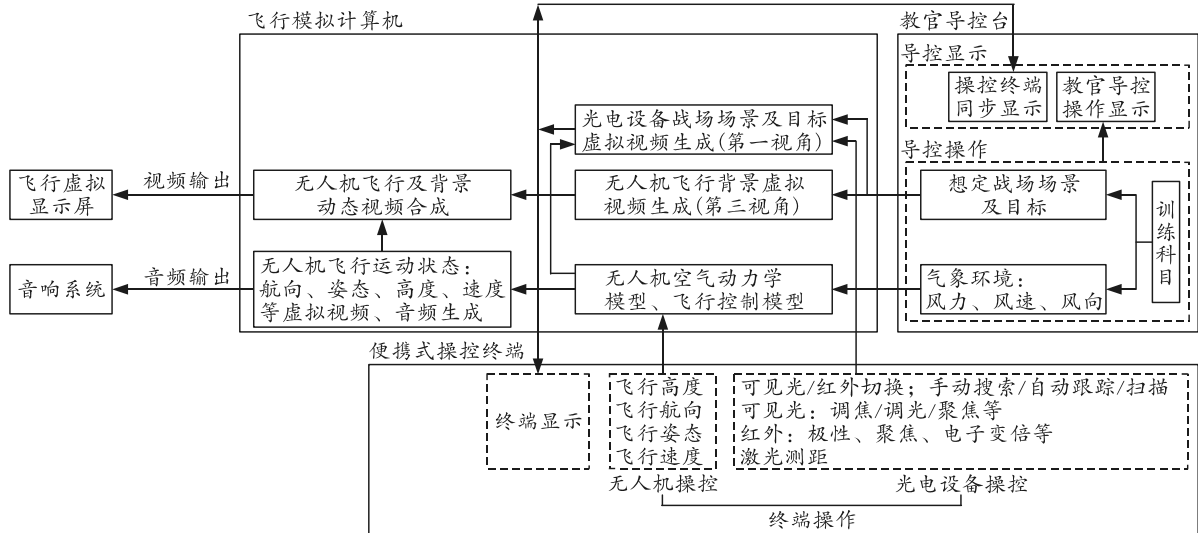


图 2 模拟训练系统原理概略

操作手根据教官下达(设置)的训练科目的要求，通过便携式操控终端模拟器进行飞行高度、航向、姿态、速度和悬停时间等飞行任务规划，操控无人机按要求飞行。同时，操作手通过便携式操控终端模拟器的光电设备操控软件，操控光电设备实现可见光/红外切换、手动搜索、自动跟踪和激光测距等功能。操控终端模拟器将产生的控制命令、参数实时同步地发送到飞行模拟计算机上。

飞行模拟计算机根据教官中控台、便携式操控终端模拟器发送的命令、数据，按照多旋翼无人机空气动力学模型、飞行控制模型解算出无人机的航向、姿态、高度、速度、加速度等参数，计算生成无人机飞行状态的动态 3 维模型。该 3 维模型与飞行模拟计算机计算生成的飞行背景虚拟视频叠加合成，输出到虚拟显示屏上动态显示。同时，将飞行模拟计算机计算生成的音频输出到音响系统同步

播放。

飞行模拟计算机按照教官导控台设置、发送的想定的战场场景和场景中目标运动轨迹、特性以及操控终端模拟器发送的对光电设备操控命令、数据，结合根据模型计算产生的无人机的飞行运动状态，如飞行姿态、速度等，计算产生光电设备观察的想定战场场景和场景目标(第一视角)视景，输出给操控终端模拟器显示并同步输出至教官导控台供导控显示屏显示。

如图 3，模拟训练系统的模拟计算机系统、教官导控台和便携式操控终端模拟器通过以太网进行通信。模拟系统输入市电 220 VAC，经滤波、稳压供飞行模拟计算机、虚拟显示屏、音响系统和教官导控台使用，并经 AC/DC 电源转换器输出 24 VDC 电源供便携式操控终端模拟器使用，如图 4 所示。

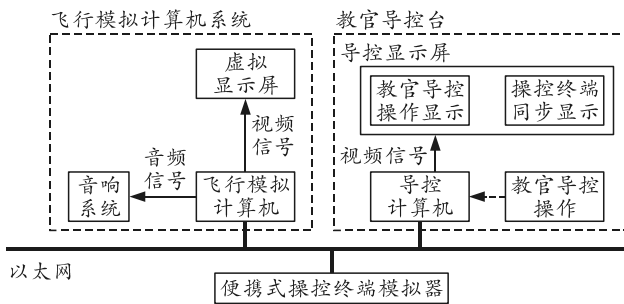


图 3 模拟训练系统通信及信息流框图

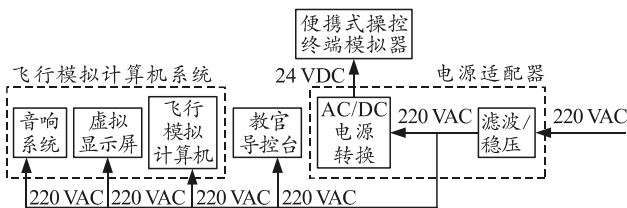


图 4 模拟训练系统配电框图

2 模拟训练系统的模拟仿真设计

2.1 系留多旋翼无人机及其空气动力学仿真设计

系留多旋翼无人机及其空气动力学模型包括旋翼空气动力学、重力和质量特性、飞行运动方程、动力和飞行控制、飞行导航传感器输出和大气环境等模拟仿真模型，如图 5 所示。

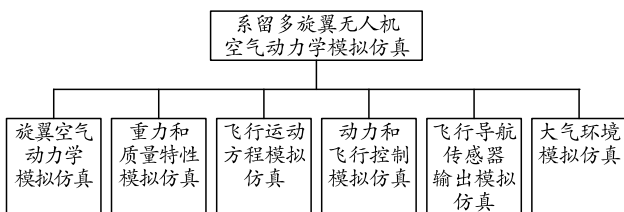


图 5 系留多旋翼无人机空气动力学模拟仿真功能

旋翼空气动力学模型以 CGCS2000 坐标系为

间基准，建立地面、机体、航迹、速度等坐标系。针对系留多旋翼无人机的特殊性，建立了系留线缆空气动力学模型。将旋翼气动模型、机身气动模型和系留线缆气动模型计算的力和力矩转换、叠加，形成旋翼空气动力学模型。

系留线缆受到侧风风阻和旋翼下洗流空气阻力，阻力公式：

$$F = 1C_p S V^2 / 2。$$

式中： C_p 为阻力系数； V 为风速。由于系留线缆在无人机下方近似抛物线状态，当计算侧风阻力时， S 为系留线缆在垂直方向的投影面积；当计算下洗流风阻时， S 为系留线缆在水平面的投影面积。结合系留线缆的连接位置计算系留线缆对机体产生的力和力矩。

$$\begin{bmatrix} F_{x,T} \\ F_{y,T} \\ F_{z,T} \\ M_{x,T} \\ M_{y,T} \\ M_{z,T} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho V^2 A_F \begin{bmatrix} -C_{DF} \\ C_{LF} \\ C_{SF} \\ C_{M_{x,T}} \cdot I_F \\ C_{M_{y,T}} \cdot I_F \\ C_{M_{z,T}} \cdot I_F + \delta M_{z,F} \end{bmatrix}。$$

重力模块仿真由无人机机体(包括/不包括载荷)重力和无人机升降过程系留线缆长度变化产生的附加重力仿真组成。质量特性主要用于计算无人机(包括/不包括载荷)全机的重量、重心和转动惯量的变化，分析这些变化对无人机飞行性能 and 对其操控性能的影响。

飞行运动方程采用六自由度飞行动力学方程，通过对质心运动、姿态四元数、经纬高、攻角侧滑角等的解算，模拟计算无人机在受到气动力和力矩、发动机作用力和力矩、重力和重力矩时的运动响应，计算出无人机飞行的线速度、线加速度和角速度、角加速度以及无人机的位置、姿态、航向等状态参数。

动力仿真模型主要以电机的电动势平衡方程、功率平衡方程和转矩平衡方程计算，模拟旋翼电机的工作特性和状态，包括电机输出扭矩、功率、转速和角加速度等。飞行控制仿真模型包括姿态控制、高度控制、升降速度稳定控制等仿真模块，可以根据飞控指令调整电机转速、扭矩等，具有对旋翼无人机姿态保持、航向控制、高度稳定、升降速度稳定和空速保持的功能。

飞行导航传感器输出仿真模型包括北斗 RTK

定位、测向、测姿的仿真功能,陀螺和加速度计、磁罗盘、空气压力计的仿真功能,大气数据系统仿真功能。

大气环境仿真模型包括静止大气模型、大气扰动模型、风模型等,以模拟无人机飞行的自然大气环境及其对无人机运动和工作状态的影响。大气环境仿真模型可模拟海拔 5 000 m 升限下不同大气气压、温度、空气密度。可模拟静止大气、均值风、阵风等风场模型。

2.2 多旋翼无人机飞行场景的模拟仿真

多旋翼无人机飞行场景的模拟仿真设计采用 UE 引擎实现对图形的渲染功能。引擎由底层模块、内核模块、资源模块、中间模块和用户层构成,主要包括场景管理渲染、实体动作绘制、特殊效果渲染、光照材质处理等子功能。设计了从操作手视角观察多旋翼无人机起飞、升空、悬停、降落等飞行全过程的飞行场景模拟仿真。可模拟黎明、中午、黄昏、夜晚等时间光照的场景效果;具有对气象模拟仿真功能,可模拟风、云、雾、雨、雪等气象条件下的场景效果。

为增强模拟训练的现场体验感,运用系统中的音频引擎,设计了运用音响模拟仿真多旋翼无人机升空、悬停、降落过程中声音功能,并实现了对无人机起降过程和升空高度变化时音量远近、大小的模拟。

2.3 对想定战场环境及场景目标的模拟仿真设计

模拟仿真系统设计了从无人机视角(如光电设备载荷视角)对想定战场环境场景的模拟仿真。想定战场环境包括城市、丘陵/平原、高原/山区、山区丛林、海边港口、海岛等场景类,每个场景采用厘米单位按真实比例建模,场景覆盖面积不小于 10 km×10 km。

对想定战场环境场景中的目标按运动属性设计为固定、静止、运动类目标。通过教官中控台任务规划软件可设定目标的运动路径/航迹、运动方向、运动速度等运动参数、特性。运动过程中根据场景设置对目标有遮蔽等效果。目标类型设计有敌方/我方士兵、越野车、卡车、装甲车、自行火炮、无人机、直升机、舰艇等。想定战场场景和目标按光学属性设计为可见光和红外 2 种类型。

3 便携式操控终端模拟器的模拟仿真设计

对便携式操控终端模拟器的设计采用与实装配

套的便携式操控终端,以实现实装操作和模拟训练操作的无缝转换和原位替代。与实装便携式操控终端相同,便携式操控终端模拟器具有操控多旋翼无人机和操控光电设备载荷的功能。除具有实装便携式操控终端的所有功能外,还设计了将操控终端模拟器产生的控制命令、参数同步实时发送到飞行模拟计算机,以及将终端显示的操作界面同步实时发送到教官中控台供教官对操控正确性进行评估的功能。

4 教官中控台的设计

教官中控台用于教官在实施训练时对训练任务规划、命令下达及对训练的过程监督、效果评估。教官中控台设计了教官能够对模拟系统进行系统初始状态值(如飞行高度、起降海拔高度、搭载任务载荷型号等)、飞行气象环境、飞行天候、无人机飞行场景、想定战场环境场景及场景目标进行设置;设计了对无人机的故障类型(如断系、断浆、备用电池电量不足、飞行传感器失效等故障)、发生故障概率值预先设置的功能,模拟训练系统的故障能够按设定的条件和概率随机模拟产生。

此外,教官中控台还设计了对操作手操作效果进行定性、定量评估的功能,能够对操作手操作便携式操控终端模拟器命令、顺序的正确性和手动操控无人机的起飞、升空、悬停和降落的稳定性,以及在飞行过程中对飞行姿态、航向、高度、升降速度操控的准确性进行定量评估。

5 系留多旋翼无人机模拟训练系统的实现

5.1 模拟训练系统架构的优化

从图 2 可以看到,飞行模拟计算机的功能主要用于系留多旋翼无人机空气动力学模型和飞行控制模型、飞行场景、想定战场环境及场景目标等功能的仿真模拟计算。除了与便携式操控终端模拟器、教官中控台进行数据通信,向飞行虚拟显示屏、音响系统输出合成叠加的模拟视频、音频信号外,飞行模拟计算机并无人机交互功能。一方面,随着计算机技术飞速发展,当今计算机一般采用多核多线程架构,运算处理性能强大;另一方面,教官中控台主要用于教官选择训练科目、设置训练环境状态和对训练过程监督、评估,需要的运算处理量较小。经综合分析评估,在增强计算机性能的基础上,飞行模拟计算机除了完成上述模拟仿真计算功能外,还可以兼顾完成教官中控台的计算处理、人机交互

功能:因此,可以将教官中控台计算机的功能合并到飞行模拟计算机上。采用计算机双屏显示功能,将飞行模拟计算机的显示屏和键盘等人机交互设备用作教官中控台信息显示、人机交互,专门输出1路HDMI高清多媒体接口信号用于驱动飞行虚拟显示屏的显示。合二为一后,模拟训练系统的数据信息通信也简化为只有飞行模拟计算机和便携式操控终端模拟器间的数据信息通信。飞行模拟计算机和飞行虚拟显示屏主要技术性能参数如表1所示。

5.2 采用 MAVlink 通信链路协议

MAVLink 协议最早由瑞士苏黎世联邦理工学院计算机视觉与几何实验组于2009年发布,并遵循

GPL 开源协议。MAVLink 协议主要应用在微型飞行器(micro aerial vehicle, MAV)的通信上,协议以消息库的形式定义了参数传输的规则,支持无人固定翼飞行器、无人旋翼飞行器、无人车辆等多种类型的无人装备。MAVLink 协议帧结构如表2^[2]。

表1 飞行模拟计算机系统主要设备技术性能参数

序号	设备	技术性能指标
1	飞行模拟计算机	CPU: Intel i7 第10代,主频3.0 GHz,8核16线程;内存:32 GB DDR4;存储:521 GB SSD + 2TB HDD;显卡:NVIDIA GeForce RTX 3080 Ti 12 GB;显示器:17"LCD,分辨率1920×1080;操作系统:Windows 10 专业版,64位
2	飞行虚拟显示屏	尺寸:60";分辨率:1920×1080;刷新率:60 Hz;信号接口:HDMI

表2 MAVLink 协议帧结构

索引	名称	内容	值	含义
0	STX	数据包起始标志位	0xFE	标识新消息开始
1	LEN	有效载荷长度	0-255	标识该消息包中负载的长度
2	SEQ	数据包序列号	0-255	消息发送序列号,检测丢失包
3	SYS	系统 ID	0-255	发送该包的系统 ID,区分网络中的不同平台
4	COMP	组件 ID	0-255	发送该包的组件 ID,区分系统的不同设备
5	MSG	消息 ID	0-255	定义了有效负载的含义和正确的解码
6 至 n+6	PAYLOAD	消息载荷	0-255 Bytes	负载信息
n+7	CKA	校验位(低8位)		校验位(低8位)
n+8	CKB	校验位(高8位)		校验位(低8位)

模拟训练系统中飞行模拟计算机、教官中控台、便携式操控终端模拟器之间数据通信基于千兆以太网,采用与原装系统中数据通信相同的 MAVlink 通信链路协议。一方面,可提高研制开发效率;另一方面,也提高了模拟训练系统与原装系统的兼容性。

5.3 便携式操控终端原位替代的实现

模拟训练系统中的便携式操控终端模拟器一方面将操作手对无人机、光电设备载荷的操控命令实时发送给飞行模拟计算机;另一方面接收飞行模拟计算机模拟仿真的光电设备载荷采集的战场场景及目标的虚拟视频在终端上实时显示。由于模拟训练系统中数据通信基于以太网,采用与原装系统数据通信相同的 MAVlink 通信链路协议,如果保持 MAVlink 通信协议具体内容与原装系统一致,并使研发的飞行模拟计算机软件满足模拟、执行 MAVlink 通信协议具体内容和要求的功能,则可实现使用原装系统的便携式操控终端原位替代便携式操控终端模拟器。

6 结束语

系留多旋翼无人机模拟训练系统采用虚拟现实

加实装(半实装)模拟方式,模拟操作训练逼真;教官可根据训练目的和目标,灵活选择、组合和设置训练环境、考核科目,训练科目选配灵活、人机交互友好;训练内容全面,覆盖主要作战过程的典型任务剖面;用虚拟视频代替实际无人机的飞行,且系统设计采用220 VAC电源代替了原装系统中1000 VDC等高电压的使用,系统安全性好;经系统架构优化,飞行模拟计算机与教官中控台合二为一,且接口按通用化设计,系统体积小、重量轻,可搬移、携行,可将一般通用(电视)液晶显示屏用作飞行虚拟显示屏,配置精简、灵活、方便,适用于野战训练,成本低,经济实用。经相关改进优化,系统较容易从系留多旋翼无人机模拟训练系统更改为非系留多旋翼无人机模拟训练系统,且系统中搭载的任务载荷可根据需要增减、变更,系统可扩充性好。

参考文献:

- [1] 刘浩浩,张素侠.系留四旋翼无人机串级PID控制研究[J/OL].机械科学与技术. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230166>.
- [2] 郭褚冰,张锴,张永平.基于生物智能的无人集群协同控制[J].指挥与控制学报,2021,7(1):76-82.