

## 2019 年度国家虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	南京航空航天大学
实 验 教 学 项 目 名 称	多旋翼无人机装配与群体协同 虚拟仿真实验
所 属 课 程 名 称	无人机集群技术
所 属 专 业 代 码	082002
实 验 教 学 项 目 负 责 人 姓 名	雷 磊
实 验 教 学 项 目 负 责 人 电 话	13913828689
有 效 链 接 网 址	<a href="http://uavswarm.nuaa.edu.cn">http://uavswarm.nuaa.edu.cn</a>

教育部高等教育司 制

二〇一九年七月

## 填写说明和要求

- 1.以 Word 文档格式，如实填写各项。
- 2.表格文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
- 3.所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012年）》填写 6 位代码。
- 4.不宜大范围公开或部分群体不宜观看的内容，请特别说明。
- 5.表格各栏目可根据内容进行调整。

## 1. 实验教学项目教学服务团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况					
姓名	雷磊	性别	男	出生年月	1981.8
学历	研究生	学位	博士	电话	025-52117037
专业技术职务	教授	行政职务	副院长	手机	13913828689
院系	电子信息工程学院			电子邮箱	<a href="mailto:leilei@nuaa.edu.cn">leilei@nuaa.edu.cn</a>
地址	南京市江宁区将军大道 29 号			邮编	211106
<p><b>教学研究情况：</b>主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过 5 项）；作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过 10 项）；获得的<b>教学表彰/奖励</b>（不超过 5 项）。</p> <p><b>主持的教学研究课题：</b></p> <p>[1] 2015.10 至今，承担南京航空航天大学电子信息工程实践教育中心（省级高等学校实验教学和实践教育中心）的建设任务，目前担任中心主任。</p> <p>[2] 2018.6 至今，承担南京航空航天大学“无人机智能集群大学生主题创新区”的建设任务，目前担任创新区负责人。</p> <p>[3] 南京航空航天大学教学改革项目，南航—中航工业上电所“慧聚航电”校企协同育人平台建设，2019.6~2021.5，本人为项目负责人。</p> <p>[4] 南京航空航天大学教学改革项目，航空自组织网络协议在线仿真实验的升级与完善，2019.6~2021.5，本人为项目负责人。</p> <p>[5] 南京航空航天大学教学改革重点项目，面向通信网络领域的创新型人才培养方法研究，2012.1~2013.12，本人为项目负责人，结题成绩优秀。</p> <p><b>发表的教学论文：</b></p> <p>[1] 雷磊，蔡圣所. 无线局域网 DCF 饱和吞吐量建模教学设计. 电气电子教学学报, 2015, 37(5): 61-64.</p> <p>[2] 雷磊. 基于 GloMoSim 的模块化无线网络教学方法. 电气电子教学学报, 2009, 31(6): 114-116.</p> <p><b>获得的教学表彰/奖励：</b></p> <p>[1] 指导学生获第五届江苏省“互联网+”大学生创新创业大赛一等奖，库盛科技——空天通信网络仿真的领航者，本人获评优秀指导教师，江苏省教育厅，</p>					

2019.7。

- [2] 江苏高校优秀电子信息类虚拟仿真实验教学项目一等奖，航空自组织网络协议在线仿真实验，本人排名第 1，江苏高校实验室研究会，2018.12。
- [3] 首届江苏省高校微课教学竞赛三等奖，江苏省教育厅，2013.10。
- [4] 南京航空航天大学优秀教学成果一等奖，能力与特色并举，“点—线—网”融合的通信类实践教学体系改革，本人排名第 4，2018.1。
- [5] 首届南京航空航天大学研究性教学竞赛一等奖，2014.5。

**学术研究情况：**近五年来承担的学术研究课题（含课题名称、来源、年限、本人所起作用，不超过 5 项）；在国内外公开发行人物上发表的学术论文（含题目、刊物名称、署名次序与时间，不超过 5 项）；获得的学术研究表彰/奖励（含奖项名称、授予单位、署名次序、时间，不超过 5 项）。

**承担的学术研究课题：**

- [1] 国家自然科学基金面上项目（61572254），无人机自组织网络窄波束定向接入理论与技术研究，2016.1~2019.12，本人为项目负责人。
- [2] 军委装备发展部装备预研重点实验室基金（614210401050117），××××××自组网协议设计与半实物仿真验证。2017.7~2019.12，本人为项目负责人。
- [3] 江苏省重点研发计划项目（BE2017029），无人机自组织网络关键技术研究，2017.6~2020.6，本人为技术负责人。
- [4] 航空科学基金自由探索项目（2016ZC52029），面向射频隐身的无人机自组网信道接入控制技术研究，2016.10~2018.9，本人为项目负责人。
- [5] 南京市产学研合作后补助项目（201722022），无人机蜂群自组织网络节点样机研发，2016.10~2018.12，本人为项目负责人。

**发表的学术论文：**

- [1] **Lei Lei (雷磊)**, Ting Zhang, Liang Zhou, Xiaoming Chen, Chenfei Zhang, and Cheng Luo, “Estimating the Available Medium Access Bandwidth of IEEE 802.11 Ad hoc Networks with Concurrent Transmissions,” IEEE Transactions on Vehicular Technology. vol. 64, no. 2, 2015, pp. 689-701. (SCI 影响因子: 4.432)
- [2] **Lei Lei (雷磊)**, Shengsuo Cai, Xiaoming Chen, and Xiaoqin Song, “Modeling and Analyzing the Optimal Contention Window Size for Distributed Synchronization in Ad Hoc Networks,” IEEE Communications Letters. vol. 21, no. 2, 2017, pp. 390-393. (SCI 影响因子: 2.723)
- [3] **Lei Lei (雷磊)**, Dan Wang, Liang Zhou, Xiaoming Chen, and Shengsuo Cai, “Link

Availability Estimation Based Reliable Routing for Aeronautical Ad hoc Networks,” Ad Hoc Networks. vol. 20, 2014, pp. 53-63. (SCI 影响因子: 3.151)

[4] **Lei Lei (雷磊)**, Ting Zhang, Xiaoqin Song, Shengsuo Cai, Xiaoming Chen, Jinhua Zhou, “Achieving Weighted Fairness in WLAN Mesh Networks: An Analytical Model,” Ad Hoc Networks. vol. 25, 2015, pp. 117-129. (SCI 影响因子: 3.151)

[5] **Lei Lei (雷磊)**, Shengsuo Cai, Cheng Luo, Weiling Cai, and Jinhua Zhou, “A Dynamic TDMA-based MAC Protocol with QoS Guarantees for Fully Connected Ad hoc Networks,” Telecommunication Systems, vol. 60, no. 4, 2015, pp. 43-53. (SCI 影响因子: 1.527)

**获得的学术研究表彰/奖励:**

[1] 江苏省“六大人才高峰”高层次人才，江苏省人力资源和社会保障厅，2019.7。

[2] 江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人，江苏省教育厅，2018.6。

[3] 国防技术发明三等奖，航空自组织网络多模式信道接入技术，工业和信息化部，本人排名第 1，2017.12。

[4] 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师，江苏省教育厅，2014.06。

[5] 国防科学技术进步三等奖，高效比特交织编码调制 OFDM 系统关键技术研究，工业和信息化部，本人排名第 3，2012.12。

**1-2 实验教学项目教学服务团队情况**

**1-2-1 团队主要成员（含负责人，5 人以内）**

序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	雷磊	南京航空航天大学	教授	电子信息工程学院副院长	实验教学总体规划	
2	昂海松	南京航空航天大学	教授	国家级航空工程实验教学示范中心主任	总体设计与持续改进	国家教学名师
3	王成华	南京航空航天大学	教授	国家级电工电子实验教学示范中心主任/图书馆馆长	总体设计与持续改进	国家教学名师
4	郑祥明	南京航空航天大学	副教授	研究生院副院长	实验教学能力培养设计	在线教学服务人员
5	蔡圣所	南京航空航天大学	实验师	无	教学组织与课程管理	在线教学服务人员

1-2-2 团队其他成员						
序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	陆洋	南京航空航天大学	教授	航空学院院长助理	仿真实验程序开发	技术支持人员
2	张莉涓	南京航空航天大学	副研究员	无	实验教学步骤设计	
3	宋晓勤	南京航空航天大学	副教授	无	实验教学步骤设计	在线教学服务人员
4	甘慧	南京航空航天大学	高级实验师	电子信息工程实践教学中心常务副主任	实验教学步骤设计	
5	丁娇	南京航空航天大学	实验师	无	实验教学能力培养设计	
6	邱旦峰	南京航空航天大学	讲师	无	仿真实验程序开发	
7	葛玉蓝	南京航空航天大学	高级实验师	国家级电工电子实验教学示范中心副主任	实验教学能力培养设计	
8	盛守照	南京航空航天大学	教授	无	实验教学步骤设计	
9	张帆	南京恒点信息技术有限公司	工程师	无	UI 效果设计	
10	吕恂昞	南京恒点信息技术有限公司	工程师	无	服务支持	在线教学服务人员
11	赵建	南京恒点信息技术有限公司	工程师	无	技术开发	技术支持人员
12	赵大力	南京恒点信息技术有限公司	工程师	无	3D 模型设计	技术支持人员
13	袁婷	南京恒点信息技术有限公司	工程师	无	3D 模型设计	技术支持人员
14	蒋法成	南京恒点信息技术有限公司	工程师	总经理	服务支持	实验程序总体设计
项目团队总人数：19（人） 高校人员数量：13（人） 企业人员数量：6（人）						

注：1.教学服务团队成员所在单位需如实填写，可与负责人不在同一单位。

2.教学服务团队须有在线教学服务人员和技术支持人员，请在备注中说明。

## 2. 实验教学项目描述

### 2-1 名称

多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验

### 2-2 实验目的

#### (1) 项目建设必要性

1. 无人机集群技术对跨专业人才培养提出了新需求，符合新工科专业建设的发展方向。

无人机按照结构的不同，可分为固定翼、单旋翼和多旋翼三种类型。其中，多旋翼无人机与固定翼无人机相比，具有垂直起降、空中悬停、低空飞行和原地回转等优势；与单旋翼无人机相比，它无需尾桨装置，因而机械结构简单、安全性高、使用成本低。由于具备上述优势，多旋翼无人机在军事和民用领域均获得了广泛的应用。例如在战场区域执行侦察、监视和毁伤评估等各类危险任务，甚至实施无人攻击；或者在民用领域应用于交通巡查、森林防火、农业喷洒等多种场景。

伴随着无线自组网和群体智能等技术的快速发展，研究人员又提出了无人机集群的概念。无人机集群由大量小型化、低成本、灵活性高的无人机节点组成。节点间采用无线自组网技术实现互联，并在群体协同算法的保证下，构建智能化、功能分布化的高抗毁作战体系。研究表明，无人机集群能够突破单架无人机在探测能力、武器载荷等方面受到的限制，在数量规模、协同作战效能、敌我对抗交换成本等方面具有巨大的优势。

近年来，无人机集群成为了中国和美国等军事强国竞相发展的热点。而由上述分析可知，无人机集群技术是“航空和信息”高度交叉融合的科技前沿，涉及飞行器设计与工程（082002）、信息工程（080706）等传统工科专业，对具备实践能力的跨专业人才培养需求非常迫切，符合新工科专业建设的发展方向。相关技术原理是跨专业学科拓展课程《无人机集群技术》，及其先修课程《航空航天概论》、《无人机设计导论》、《通信网络》等的重要教学内容。同时，如何将立德树人融入教学全过程，通过情景体验式的教学方法，不仅使学生理解无人机集群在国防领域的重要价值，而且潜移默化的激发学生投身国防工业的情怀和使命感，也成为了教学面临的重要挑战。

2. 由于无人机集群实验成本高、空域申请难、实验风险大等一系列因素，相关实验教学必须依托虚拟仿真技术展开。

无人机集群技术实验教学面临严重困难。具体包括：①集群节点数量多，实验

成本高。②集群覆盖范围广，空域申请难。根据我国《民用无人机驾驶员管理规定》，操控无人机的重量和飞行高度超过一定范围，驾驶员需要持有无人机执照，而师生均难以达到该要求。同时，我国虽然已经颁布了《民用无人驾驶航空器系统空中交通管理办法》，但无人机集群飞行空域申请标准和办法尚未完全明确。事实上，在高等学校所在的城镇区域，难以找到可用于大规模无人机集群实验的安全空域。③易发坠机等事故，实验风险大。在无人机间通信被干扰、组网协议或群体协同算法设计不合理的情况下，无人机失控将导致严重的安全事故。即使针对单架多旋翼无人机开展装配和PID调参教学实验，也存在着较大风险。在装配失误、PID参数设置不合理、操控不熟练等多种情况下，多旋翼无人机易发坠机事故，危及学生安全。因此，开展无人机集群虚拟仿真实验教学具有极强的必要性和迫切性。

## (2) 学生实验目的

本团队依托南京航空航天大学航空宇航科学与技术国家重点学科、物联网与控制技术江苏高校优势学科、国家级航空工程实验教学示范中心和国家级电工电子实验教学示范中心。团队坚持以学生为中心的实验教学理念，遵照虚拟仿真实验项目“能实不虚，虚实结合”的原则，将科研成果反哺实验教学，自主开发了多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验项目，面向高校和社会免费开放。

本实验项目依据《无人机集群技术》课程大纲及关键知识点，结合无人机集群的军事应用背景，以“装配多旋翼无人机并实现群体协同”为实验任务，构建了基于作战想定的虚拟仿真实验情景。实验旨在培养学生探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力，具体实验目的包括：

1. 通过多旋翼无人机装配与参数调试实验环节，帮助学生掌握多旋翼无人机组成原理、动力学模型、装配要点及PID控制原理，探究实际工程应用需求导向的多旋翼无人机动力装置设计方法，使学生具备根据多旋翼无人机飞行姿态，分析、判断并调节PID参数的能力。

2. 通过无人机集群链路预算与组网实验环节，帮助学生掌握无线电传播特性、无线通信系统链路预算方法、信道接入控制方法及自组织时分多址协议原理，探究无人机集群网络无线信号冲突解决方案，使学生具备从协议栈分层的角度开展无人机集群网络设计的能力。

3. 通过无人机集群协同与自主避障实验环节，帮助学生掌握基于Boid模型的集群运动原则、基于虚拟力场法的无人机集群拓扑控制和自主避障方法，探究虚拟力场参数对无人机集群性能的影响，使学生具备根据工程实际需求，对无人机集群协同性能进行调整的能力。



## 2-3 实验课时

(1) 实验所属课程所占课时：36

(2) 该实验项目所占课时：6

## 2-4 实验原理（简要阐述实验原理，并说明核心要素的仿真度）

### (1) 总体框架

如图1所示，本实验包含3个目标明确，逻辑清晰的环节，共6学时，对应《无人机集群技术》课程大纲的12个关键知识点。实验开始后，学生在虚拟环境中置身于敌我双方对峙的某海岛。学生首先在我方军事基地的装配室完成多旋翼无人机装配与参数调试实验环节，保证无人机平稳飞行。然后在基地的试飞场，完成无人机集群链路预算与组网实验环节，保证无人机与其邻居节点之间可靠的信息传输。最后在随机布设障碍（威胁区域）的海岛上空完成无人机集群协同与自主避障实验环节，无人机协同到达敌方基地上空并进行覆盖。

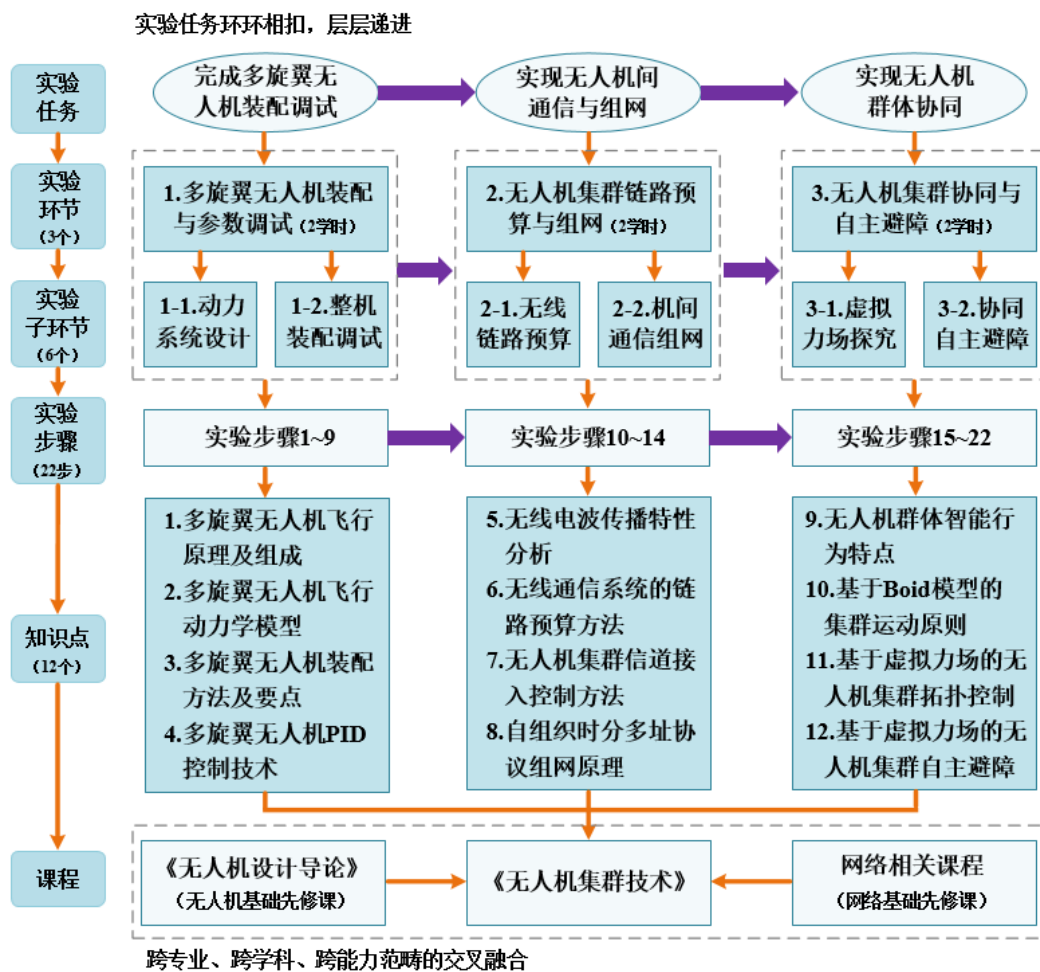


图1 本实验项目总体框架

## (2) 知识点：共 12 个

### 1. 多旋翼无人机飞行原理及组成

多旋翼无人机采用固定桨距或可变桨距的旋翼作为升力系统装置，依靠电机带动旋翼转动。当旋翼桨叶在空中旋转运动时，只要使桨叶上部空气流速较快，静压力则较小，桨叶下部空气流速较慢，静压力较大，即可利用旋翼桨叶上下两边的静压力差，产生向上的升力。当所有旋翼产生的总升力大于或等于旋翼无人机的总重量时，无人机便可以起飞。多旋翼无人机主要由机架、动力装置、飞行控制系统及导航系统组成。

#### 核心要素仿真度：

本实验采用WebGL图形技术、3D仿真技术等手段对多旋翼无人机14种部件进行建模，并且1:1还原了部件功能。具体部件请参考2-6实验材料。

### 2. 多旋翼无人机飞行动力学模型

电动多旋翼无人机的飞行动力主要由电机、螺旋桨、电调及电池组成的动力系统决定，动力系统参数直接影响多旋翼无人机的载重、飞行距离、最大飞行速度以及飞行时间等性能。通过多旋翼无人机飞行动力学模型可以分析动力系统参数对上述性能的影响。

#### 核心要素仿真度：

本实验在虚拟环境中通过编程实现了多旋翼无人机飞行动力学模型。主要包括螺旋桨模型、电机模型、电调模型、电池模型。通过螺旋桨模型可以求解得到转速、转矩与螺旋桨参数的关系；得到转速、转矩后，通过电机模型可求解得到电机所需的等效电压和等效电流；根据等效电压和等效电流，通过电调模型可求解得到电调所需的输入电流、输入电压；基于电调的输入电流和输入电压，通过电池模型可确定电池容量与多旋翼无人机飞行时间的关系。通过上述动力学模型程序软件，可求解得到不同动力参数组合下多旋翼无人机飞行时间、剩余负载、单程飞行距离、最大飞行速度等性能指标。

### 3. 多旋翼无人机装配方法及要点

应该按照合理的流程完成多旋翼无人机装配，避免反复拆卸，保证多旋翼无人机稳固可靠。装配螺旋桨时，需要注意区分正反桨（CCW为正桨，逆时针转动；CW为反桨，顺时针转动），装配错误可能会导致无人机侧翻而无法正常起飞。装配GPS模块时，需要保证GPS的方向与飞控方向保持一致，否则上电后飞控无法解锁或者无法正常飞行。

#### **核心要素仿真度：**

本实验在虚拟仿真环境中1:1还原了多旋翼无人机装配和试飞过程。学生从备件库中取出多旋翼无人机部件，自主完成装配并携带飞机来到试飞场试飞。本实验引导学生开展容错探究式自主学习。装配过程中，如果出现正反螺旋桨位置安装错误，或者没有正确调整GPS模块的安装方向，本项目不会中断学生实验。安装完毕后，在试飞过程中发生无人机侧翻等事故，才会暴露错误。学生通过查阅知识角中的相关资料，自主探究错误原因，并返回装配室调整，直至试飞成功。

#### **4. 多旋翼无人机PID控制技术**

多旋翼无人机飞控系统采用PID（Proportional Integral Derivative，比例、积分、微分）控制算法来实现无人机的姿态和轨迹控制。在没有PID控制系统的情况下，直接用信号驱动电机带动螺旋桨旋转产生控制力，会出现动态响应过快，过慢，控制过冲，或者欠缺的现象。PID控制算法在姿态信息和螺旋桨转速之间建立比例、积分和微分的关系，通过调节各个环节的参数大小，使多旋翼无人机控制系统动态响应迅速、及时，既不过冲也不欠缺。无人机飞行平稳，无抖动。

#### **核心要素仿真度：**

本实验在虚拟环境中对多旋翼无人机PID参数调节过程进行了建模。学生在仿真环境中进行的PID调参过程与真实环境完全一致。学生可调节PID参数的取值，观察多旋翼无人机飞行姿态的变化，最终得到合理的PID参数值。

#### **5. 无线电波传播特性分析**

无人机集群节点间采用视距无线通信方式，因而无线电波传播模型为自由空间传播模型，即天线周围为无限大真空时的电波传播，电波的能量既不会被障碍物所吸收，也不会产生反射、折射、绕射和散射。但由于辐射能量的扩散，电波经过一段传播路径之后能量仍然会受到衰减，这种衰减称为路径损耗，定义为有效发射功率与接收功率之间的差值。自由空间中电波传播损耗LOS(dB)可表示为 $32.45+20\lg f(\text{MHz})+20\lg d(\text{km})$ 。电波损耗只与工作频率 $f$ 和传播距离 $d$ 有关，当传播距离增大一倍时，损耗增加6dB。

#### **核心要素仿真度：**

本实验在虚拟环境中编程实现了无线电自由空间传播模型。在实验过程中，该程序实时计算信号发送无人机和信号接收无人机之间的距离，并进而按照无线电自由空间传播模型计算出无线信号的损耗。

## 6. 无线通信系统的链路预算方法

首先根据无人机通信系统采用的调制和编码方式，在当前通信干扰和噪声条件下，计算出无人机的信号接收门限。然后按照知识点5中的模型，计算出当前发送无人机和接收无人机之间的自由空间损耗。最后再根据无人机通信系统干扰容限的要求，设计出合理的无人机信号发送功率。

### 核心要素仿真度：

本实验首先在虚拟环境中编程实现了真实无人机通信系统的信道编码和调制模型。信道编码方式为turbo码，调制方式分别为BPSK、QPSK或16QAM，并采用OFDM传输体制。根据上述模型，即可得到与不同的调制方式相对应的系统误码率和信噪比关系曲线。在实验中，学生设定无人机信号发送功率并开始测试后，系统即可根据知识点5中的自由空间电波传播模型，实时计算无人机的接收信号功率及干扰和噪声信号功率，获知无人机当前时刻的信噪比；然后根据系统误码率和信噪比关系曲线，得出当前的误码率性能；最后结合仿真随机数种子，计算出当前信号接收成功和失败的概率。

## 7. 无人机集群信道接入控制方法

无人机集群的构建面临大规模节点组网的问题。如何设计灵活、高效、自组织的无人机集群网络协议，为群体协同的实现和集群任务的完成提供可靠支撑，成为了当前该领域的研究热点。信道接入控制（Media Access Control, MAC）处在网络协议栈的底层，它提供冲突避免机制，控制网络节点接入共享无线信道，为上层协议提供可靠的报文传送支持，并能够为不同优先级的数据业务提供服务质量保证。无人机集群信道接入控制方法是影响集群网络性能的关键。

### 核心要素仿真度：

本实验在虚拟环境中编程实现了真实的机间组网信道接入控制方法——自组织时分多址接入协议（Self-organized TDMA, STDMA），请参考知识点8。

## 8. 自组织时分多址协议组网原理

自组织时分多址接入协议用于空中飞机节点自组织组网，实现飞机间的位置识别、防撞和相对导航，目前已被广泛应用于美军的Link16数据链（J链）和民航空中交通管理系统。在该协议中，节点通过侦听邻居节点周期性广播的时隙占用和预约信息，形成时隙状态表，并根据时隙状态表中的时隙占用信息为自身分配时隙。节点在分配到的时隙中广播自身的位置信息，从而达到位置识别、防撞和相对导航的目的。该协议具有灵活、高效、时隙自组织选取和拓扑透明的优势，因而也同时适用于无人机集群网络。

### **核心要素仿真度：**

本实验在虚拟环境中编程实现了STDMA协议。实验要求学生自主设计STDMA协议时帧结构，并针对基于STDMA协议的无人机集群网络性能展开测试和分析。

### **9. 无人机群体智能行为特点**

无人机群体智能行为具有以下特点：①组织结构的分布式，即群体中不存在中心节点，个体仅具备局部的感知、规划和通信能力。②行为主体的简单性，即每个无人机的运动遵循非常简单的规则，仅执行一项或者有限的几项动作。③作用模式的灵活性，即在遇到环境变化时，无人机集群中的个体通过改变自身的行为来适应环境的变化。④系统整体的智能，即每个无人机个体通过感知周围环境信息，进行信息的交换和共享，整个无人机集群按照一定的规则对外部环境变化做出响应，简单的个体行为构成了集群的协同高效，体现出智能的涌现。

### **核心要素仿真度：**

本项目通过仿真开展无人机集群协同与自主避障实验，实验结果均证明无人机群体智能行为符合上述特点。

### **10. 基于Boid模型的集群运动原则**

人们对于集群行为的研究源于1987年Reynolds等人对鸟群飞行行为的模拟仿真。他们提出了著名的Boid集群运动模型：①聚合，即尽量与邻居内的其它个体靠的更近一些，以避免被孤立；②防碰撞，即个体与个体之间不能靠的太近，避免与周围个体发生碰撞；③速度匹配，即努力与周围的个体保持速度上的同步。无人机集群航迹规划可以抽象为Boid集群运动模型，为了实现避障和朝向目标点运动的功能，可以将Boid模型中的三个原则扩展为五个原则，再增加④避障，即个体检测到障碍物时，朝着远离障碍物的方向行进；⑤前进，即每个个体都朝向靠近目标点的方向行进。在无人机集群中，如果每一架无人机都通过网络与邻居交互信息，保证遵循以上五个原则，整个集群就可以协同朝着目标点前进，并在前行过程中实现自主避障。

### **核心要素仿真度：**

本实验在虚拟环境中编程实现了真实的无人机群体协同方法——虚拟力场法，该方法即基于Boid原则，请参考知识点10至12。

### **11. 基于虚拟力场的无人机集群拓扑控制**

无人机集群拓扑控制的目的是保证无人机集群在运动过程中维持拓扑的稳定性。无人机间的相对距离保持在一个合适的大小，不同无人机速度的大小和方向逐

渐趋于一致。基于虚拟力场的无人机集群拓扑控制是通过构造拓扑力来完成上述目标的。根据Boid集群运动模型，如图2所示，可将目标无人机节点的通信范围划分为三个区域：防碰撞区域，速度匹配区域和聚合区域。当邻居节点处于目标无人机节点的防碰撞区域时，会受到远离目标节点的排斥力；当邻居节点处于目标无人机节点的聚合区域时，会受到靠近目标节点的聚合力；当邻居节点处于目标无人机节点的速度匹配区域时，会与目标节点的速度进行速度匹配。

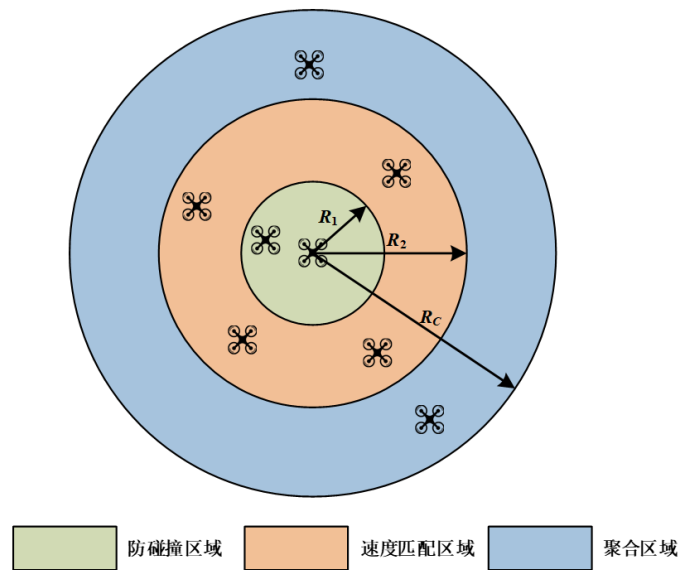


图2 基于虚拟力场的无人机集群拓扑控制

#### 核心要素仿真度：

本实验在虚拟环境中编程实现了基于虚拟力场的无人机集群拓扑控制方法。学生采用控制变量法，通过仿真分析虚拟力场参数取值对无人机集群拓扑控制的影响，确定合理的参数取值。

#### 12. 基于虚拟力场的无人机集群航迹规划

无人机集群航迹规划的目的是根据任务需求，生成一条使无人机集群从起点飞至目标区域的最优路径，使得综合代价最小。基于虚拟力场的无人机集群航迹规划基本思想是构造来自目标点的前进力驱动集群朝向目标点运动，以及远离障碍物的避障力实现飞行过程中的自主实时避障。在该方法的保证下，无人机集群可以自主的从起点飞行至终点，并且能在飞行过程中绕过障碍物和威胁。

#### 核心要素仿真度：

本实验在虚拟环境中编程实现了基于虚拟力场的无人机集群航迹规划方法。学生采用控制变量法，通过仿真分析虚拟力场参数取值对无人机集群航迹规划的影响，确定合理的参数取值。

## 2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

本项目通过建模，为学生提供了虚拟的面积约64平方公里的某海岛、敌我双方军事基地、多旋翼无人机装配室、试飞场，以及14种多旋翼无人机部件，并且1:1还原了模型功能。实验仿真程序和数据均来源于科研中的实际程序和实测数据。



(a) 实验室中真实的多旋翼无人机



(b) 虚拟仿真实验中的多旋翼无人机



(c) 真实的多旋翼无人机装配



(d) 在虚拟仿真实验中完成装配



(e) 真实的多旋翼无人机PID调参



(f) 在虚拟仿真实验中完成PID调参



(g) 真实的多旋翼无人机群体协同测试



(h) 在虚拟仿真实验中完成群体协同测试

图3 通过虚拟仿真技术实现虚实结合

本实验中的多旋翼无人机主要部件及其模型如下表所示。

表1 虚拟仿真环境中的多旋翼无人机部件

部件名	模型图	部件名	模型图	部件名	模型图
遥控器		机臂、起落架、PCB板		电机	
电子调速器		正反螺旋桨		接收机	
飞行控制系统		电池		GPS模块	

## 2-6 实验材料（或预设参数等）

### （1）动力系统设计

在动力系统设计实验子环节，学生首先针对多旋翼无人机部件展开学习。然后，系统随机生成动力系统设计任务，学生线下计算并选择合理的动力装置。系统根据学生的选择计算出动力性能指标。各参数的预设值如下表所示。

表2 多旋翼无人机动力装置预设参数

序号	参数	预设值
1	轴距大小	450/500mm
2	电机型号	360/530/880KV
3	螺旋桨型号	1040/1240/1345
4	电调型号	15/40/50A
5	电池型号	4S-2200/4S-3300/4S-5300mAh

### （2）无线链路预算

在无线链路预算实验子环节，系统随机生成无线链路预算任务，学生根据给定的通信系统和信道参数，线下计算满足要求的无人机最小信号发送功率，并进行仿真测试。各参数的预设值或预设范围如下表所示。



表 3 无人机集群无线链路预算预设参数

序号	参数	预设值/预设值范围
1	信道编码	Turbo 码
2	传输体制	OFDM
3	传播模型	自由空间传播
4	传输误码率	$10^{-5}$
5	发射天线增益	0 dB
6	接收天线增益	0 dB
7	发端损耗	1 dB
8	收端损耗	1 dB
9	调制方式	BPSK/QPSK/16QAM
10	信道传输速率	9.2/18.4/36.8 Mbps
11	接收机解调门限	5/7/10 dB
12	接收机噪声谱密度	-169.7/-167.5/-165.4 dBm/Hz
13	干扰容限	10/15/20 dB
14	通信频率	0.5/1.0/1.5 GHz
15	通信距离	300~900 m

### (3) 机间通信组网

在机间通信组网实验子环节，学生完成无人机集群自组织时分多址组网协议时帧结构设计，并对网络性能进行测试。相关参数的预设值或预设范围如下表所示。

表 4 无人机集群组网协议时帧结构设计预设参数

序号	报文报告率 $u$	时帧时隙数 $S_L$	时隙选择窗口调整因子 $k$
1	4	100/112/120	0.2~0.8
2	5	125/140/150	0.2~0.8
3	6	150/168/180	0.2~0.8
4	7	175/196/210	0.2~0.8
5	8	200/224/240	0.2~0.8
6	9	225/252/270	0.2~0.8
7	10	250/270/280	0.2~0.8

#### (4) 协同自主避障

在协同自主避障子环节，学生采用控制变量法，逐步分析各类虚拟力场参数取值对无人机集群性能的影响，自主探究使得无人机集群协同性能最优的参数联合设计方案。相关参数的预设范围如下表所示。

表 5 无人机集群协同自主避障预设参数

序号	参数	预设值/预设值范围
1	节点数量	1~500
2	随机数种子	任意正整数
3	前进力权重因子	0.0~1.0
4	避障力权重因子	0.0~1.0
5	聚合力权重因子	0.0~1.0
6	排斥力权重因子	0.0~1.0
7	速度匹配范围	150~300m
8	排斥力范围	0~150m

#### 2-7 实验教学方法（举例说明采用的教学方法的使用目的、实施过程与实施效果）

如图4所示，本实验坚持以学生为中心的教学理念。教师引导学生开展自主学习，通过线上讨论和线下交流的方式为学生释疑，并鼓励学生互动研讨、协作互助。在实验教学过程中，本实验综合采用了任务驱动式、情景体验式和容错探究式教学方法。下面结合例子，分别阐述以上三种实验教学方法的使用目的，实施过程与实施效果。

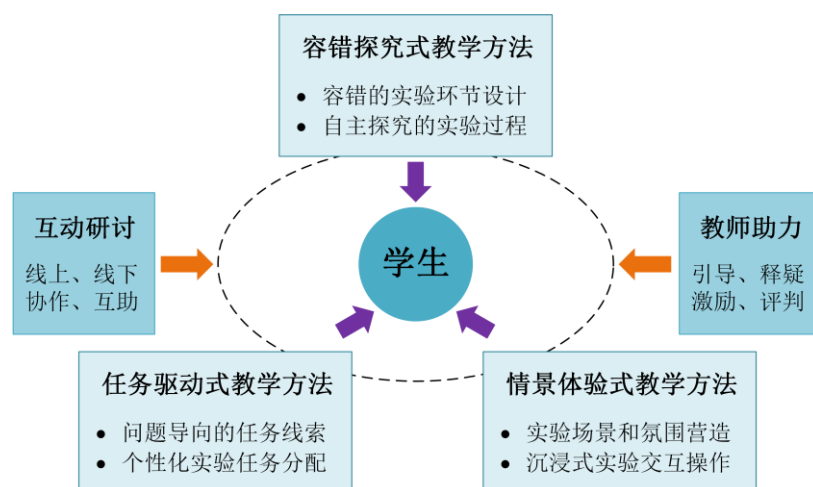


图4 以学生为中心的实验教学方法

### (1) 任务驱动式教学方法

**1. 使用目的：**本实验采用任务驱动式教学方法，实验内容围绕问题导向的任务线索展开，即“装配多旋翼无人机并实现群体协同”。学生开展实验的过程，就是完成任务的过程。实验考核指标来源于任务要求达到的性能指标，学生完成任务的质量是实验成绩评定的主要依据。

**2. 实施过程：**如图5所示，本实验将上述任务分解成若干个目标具体明确，逻辑关系清晰的子任务。学生首先完成多旋翼无人机的装配和调试，保证无人机能够平稳飞行；然后构建无人机间无线通信网络，保证无人机与其邻居节点之间可靠的信息传输，最后在此基础上实现无人机群体协同与避障。本实验进一步设计了与实验子任务相对应的实验环节和实验步骤，对应关系分别如图1和图9所示。值得注意的是，本实验的关键实验环节按照“一人一题、一次一题、一题多解”的原则设计，即不同学生开展实验，或学生多次开展实验，实验任务的关键参数或场景配置随机给定。这些环节的实验结果总体具有一致性，但解决方案或参数取值并不唯一。例如，多旋翼无人机动力系统设计 and 无线链路预算的任务参数随机给定，在实现无人机集群协同避障的任务中，虚拟力场参数的有效取值不唯一。

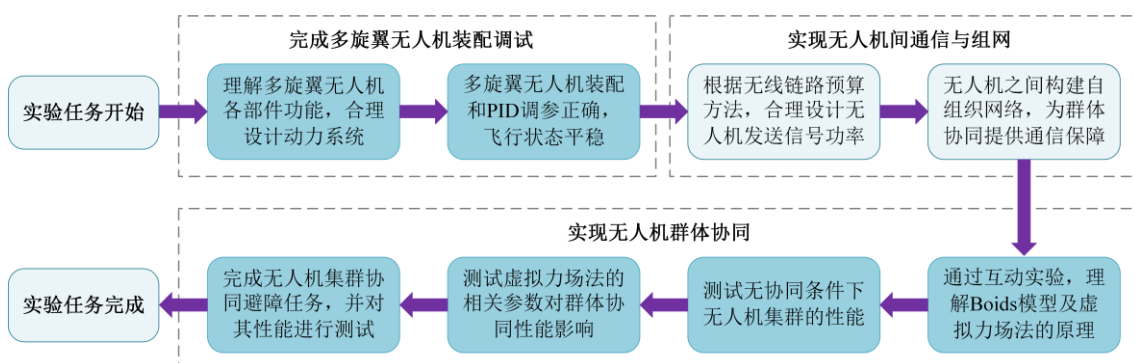


图5 本实验的任务流程

**3. 实施效果：**采用任务驱动式教学方法的目的是使得学生将课堂上所学的理论知识与具体问题相联系，从而调动学生参与实验的积极性和主动性。该教学方法充分激发了学生的实验热情和创造力，有效提升了学生自主学习的能力。同时，合理设计实验任务，也为后续容错探究式实验教学方法的开展提供了基础。

### (2) 情景体验式教学方法

**1. 使用目的：**在本实验中，学生面对“装配多旋翼无人机并实现群体协同”这样一个相对抽象的实验任务，难以迅速正确理解实验目的、教学内容及考核指标。针对上述问题，本实验充分发挥虚拟仿真教学的优势，设计了基于多旋翼无人机集群作战想定的虚拟仿真实验情景，开展情景体验式教学。

**2. 实施过程：**实验开始后，学生在虚拟环境中置身于敌我双方对峙的某海岛。如图6所示，学生首先进入岛上我方军事基地内的装配室，完成多旋翼无人机动力系统设计和装配；然后来到基地内的试飞场，完成多旋翼无人机PID调参和组网测试；最后在随机布设障碍（威胁区域）的海岛上空完成群体协同与避障实验。成功避障的多旋翼无人机协同到达敌方基地上空并进行覆盖。



(a) 我方军事基地



(b) 多旋翼无人机装配室



(c) 多旋翼无人机试飞场



(d) 敌我双方对峙的某海岛

图6 基于作战想定的虚拟仿真实验情景

**3. 实施效果：**通过以上基于作战想定的实验情景体验，学生很容易掌握实验目的和教学内容，理解实验考核指标设计的内涵。例如，多旋翼无人机集群的作战能力与无人机数量直接相关。通过以上情景体验式教学，学生就能够迅速理解为什么要把成功避障，到达敌方基地上空的无人机节点数量作为实验考核指标。因此，情景体验式教学是本实验教学目标达成的重要方法。

### (3) 容错探究式教学方法

**1. 使用目的：**本实验采用的最重要的教学方法是容错探究式教学方法。“探究”是指在实验过程中，通过引导，激发学生积极主动地去探索问题，寻求问题的答案，让学生在探究学习的过程中形成对知识的自主构建。“容错”是指在学生实验探究的过程中，当出现操作和参数设置等方面的偏差或错误时，本实验允许学生的探究活动继续进行。学生最终发现实验结果错误或不理想后，再通过反复实验去

探索问题、发现问题和解决问题。

**2. 实施过程：**本实验的各个环节均支持学生开展容错探究。例如，在多旋翼无人机装配与参数调试实验环节，如果学生把正反螺旋桨位置装错了，本实验并不会中断学生实验操作。如图7所示，学生可以继续完成实验并试飞。在试飞过程中，飞机发生侧翻，学生才发现错误。学生进而自主探究多旋翼无人机飞行原理知识点，理解多旋翼无人机的翼型设计方法，返回装配室重新安装螺旋桨，再次试飞成功。



(a) 学生安装正反螺旋桨位置错误

(b) 试飞时无人机发生侧翻

图7 容错探究式教学方法例一：多旋翼无人机装配

再例，在无人机集群协同与自主避障实验环节，如果虚拟力场参数设置不合理，则旋翼无人机集群协同避障效果差，甚至完全无法避障。但是，如图8所示，无论学生如何设置参数，本实验都能通过仿真实验程序，实时计算无人机在虚拟力场作用下的实时飞行轨迹，并向学生展示。无论学生得到的是理想的，还是不理想的实验结果后，本实验都要求学生采用控制变量法，自主探究虚拟力场参数对无人机集群协同避障效果的影响。



(a) 无人机集群避障效果差

(b) 无人机集群协同效能低

图8 容错探究式教学方法例二：无人机集群协同避障

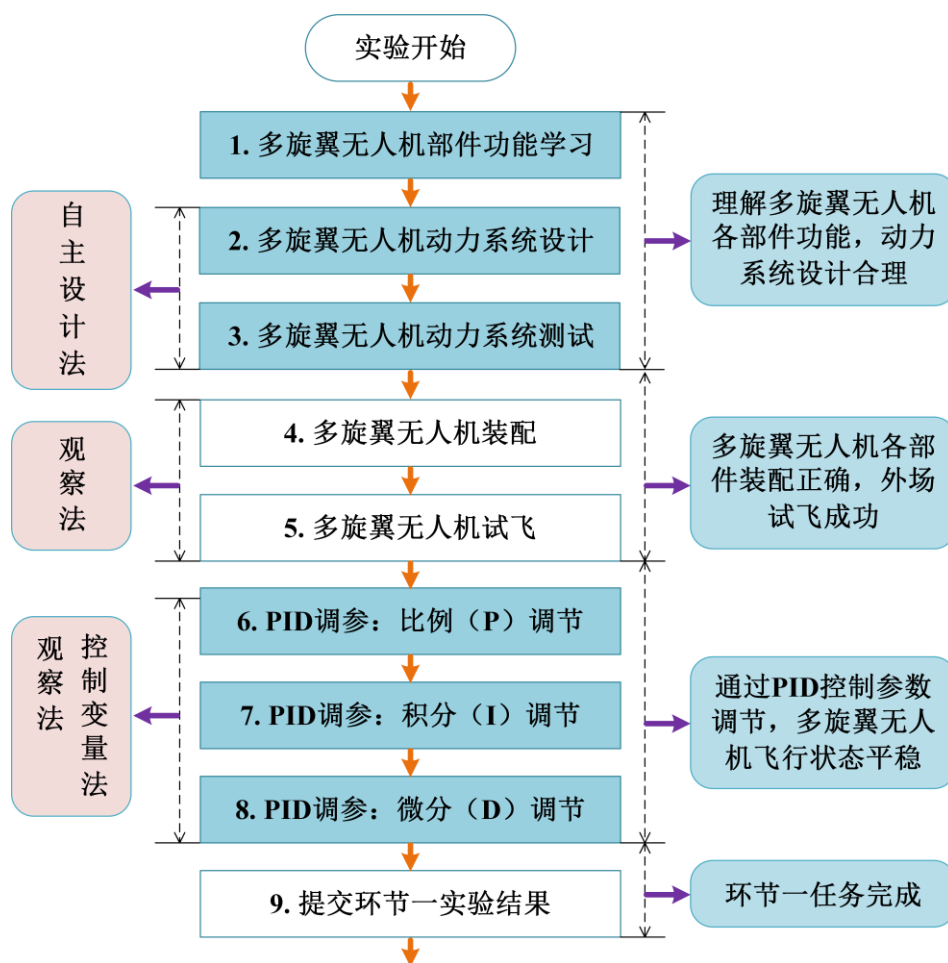
**3. 实施效果：**综合上述，本实验通过容错探究式的实验教学过程，不仅使学生掌握了实验相关的知识点，还培养了学生探究性的思维方式，提升了学生分析问题和解决问题的能力。同时，学生体验到自主探究的价值和乐趣后，产生了一种成就感，学习积极性高涨，实验教学效果明显。

## 2-8 实验方法与步骤要求（学生交互性操作步骤应不少于 10 步）

### （1）实验方法描述：

本项目综合采用了自主设计法、控制变量法、观察法和类比法等实验方法，培养学生探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力。

如图9所示，自主设计法主要应用于多旋翼无人机动力系统设计、无人机发送信号功率设计、自组织时分多址协议时帧结构设计等实验步骤，充分调动学生在实验过程中自主探究的积极性和主动性。控制变量法主要应用于多旋翼无人机PID调参、无人机集群虚拟力场参数联合设计相关的实验步骤。该方法可以有效帮助学生逐个了解关键参数对系统性能的影响，最终帮助学生建立对系统性能整体性的认知。观察法普遍应用于本实验的多个实验步骤。类比法主要用于基于Boid模型的虚拟力合成原理探究。虚拟力场法将Boid模型对无人机集群节点运动的影响类比为力对物体运动的影响。本实验步骤要求学生探究目标无人机节点处在不同区域时虚拟力场的变化情况，观察基于平行四边形法则的虚拟力合成过程。通过科普化的类比，降低学生理解虚拟力场法的难度。



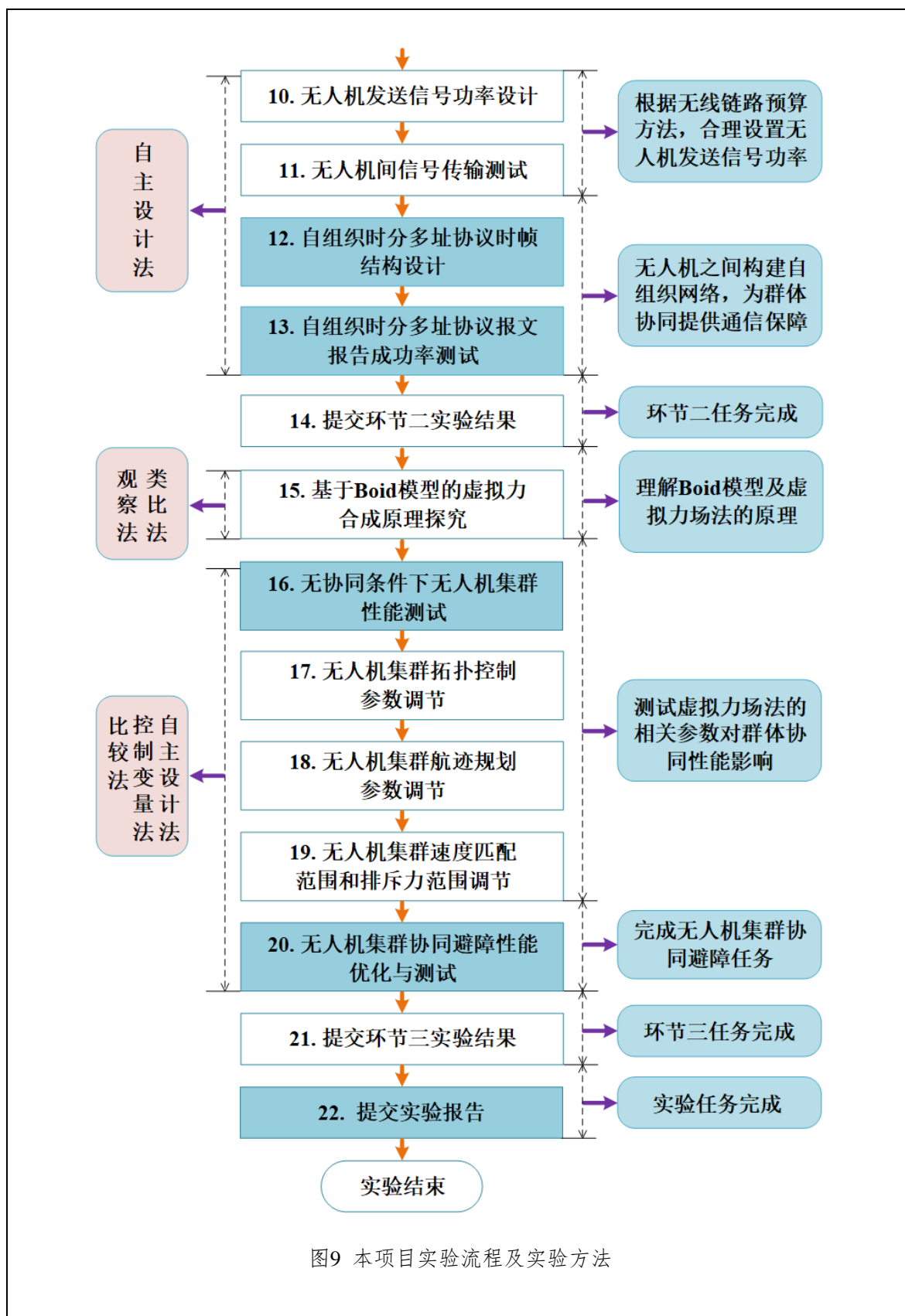


图9 本项目实验流程及实验方法

## (2) 学生交互性操作步骤说明

下面结合虚拟仿真实验界面，介绍本项目的操作步骤、实验方法和实验要求。

### 开始实验：

如图10所示，在浏览器中输入本实验项目的网址(<http://uavswarm.nuaa.edu.cn>)，即可打开本实验项目，在线完成所有实验操作。

如图11所示，进入实验前，学生先依照新手引导熟悉实验界面功能。然后进入图12所示的实验界面，学生查看实验简介，并通过在线知识角(图13)中的文献和视频资料，对本实验相关知识点进行自主学习。实验过程中，学生可以随时打开实验步骤引导。遇到任何困难，可以随时与课程顾问老师联系。



图10 本实验项目网站



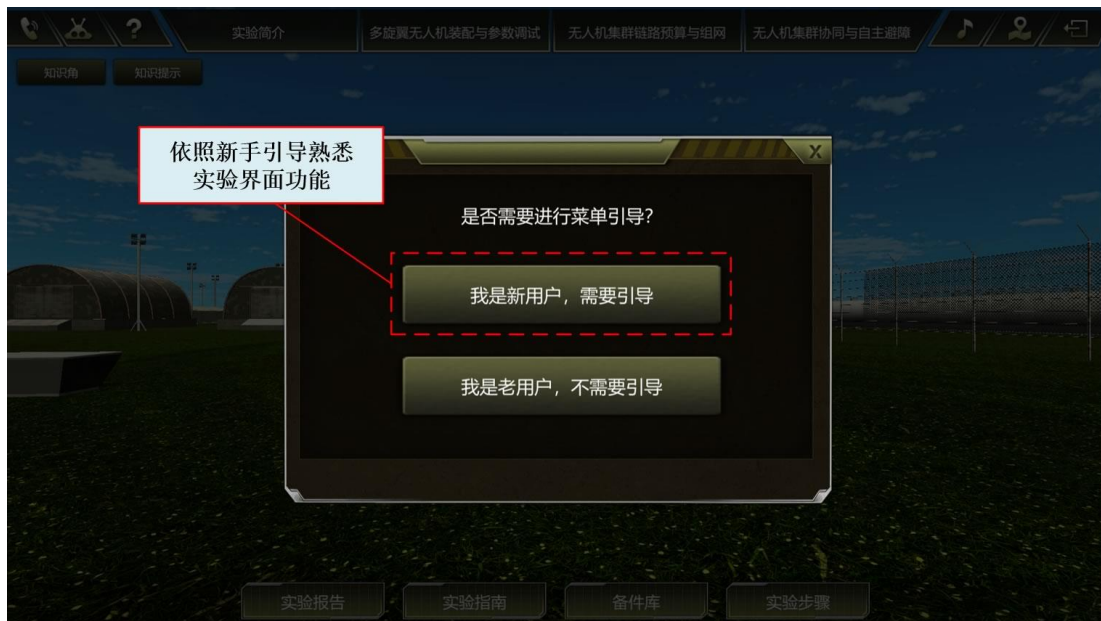


图11 依照新手引导熟悉实验界面功能



图12 进入实验界面



图13 本项目在线知识角

学生交互性操作步骤数量：22

### 环节一：多旋翼无人机装配与参数调试

本实验环节包括“动力系统设计”和“整机装配调试”两个子环节，对应实验步骤1至9。通过该实验环节，使学生掌握多旋翼无人机组成原理、动力学模型、装配要点及PID控制原理；要求学生探究实际工程应用需求导向的多旋翼无人机动力装置设计方法，使学生具备根据多旋翼无人机飞行姿态，分析、判断并调节PID参数的能力。

如图14所示，在实验环节菜单栏，点击“多旋翼无人机装配与参数调试”选项，展开该实验环节的下拉菜单。在下拉菜单中，分别点击“动力系统设计”和“整机装配调试”选项，即可进入相应的实验子环节。



图14 多旋翼无人机装配与参数调试实验环节

### 步骤 1. 多旋翼无人机部件功能学习

在图 15 所示的装配操作台上（或右侧清单中）点击多旋翼无人机各个部件，观察并学习部件功能，结束后保存退出。

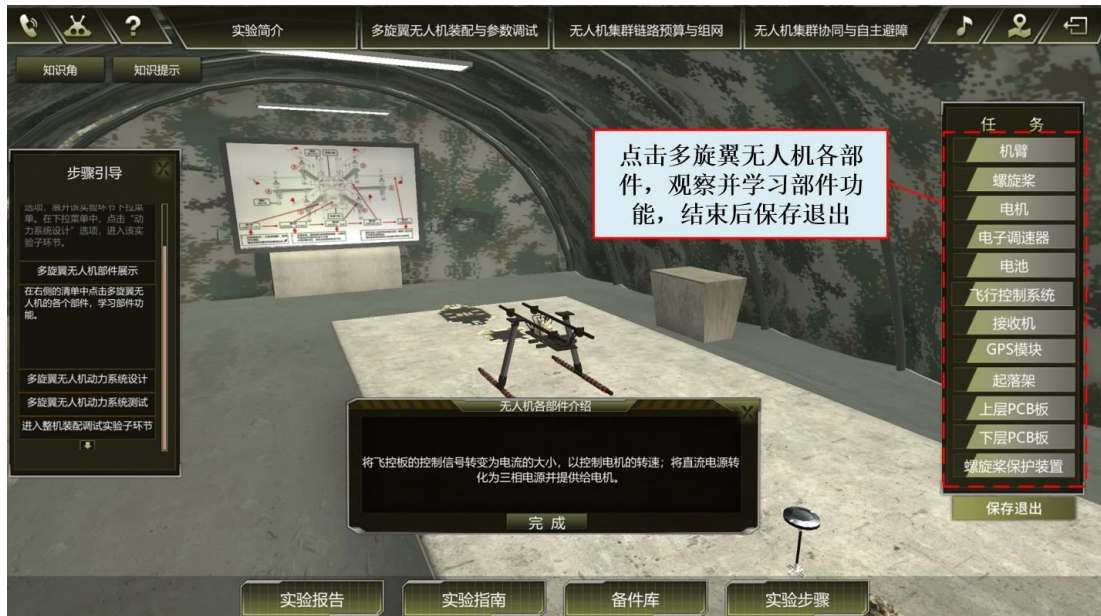


图15 多旋翼无人机部件学习

## 步骤 2. 多旋翼无人机动力系统设计

如图 16 所示，本步骤随机生成动力系统设计任务。如图 17 所示，学生线下计算并点击下拉菜单选择合理的动力装置，点击确定结束。

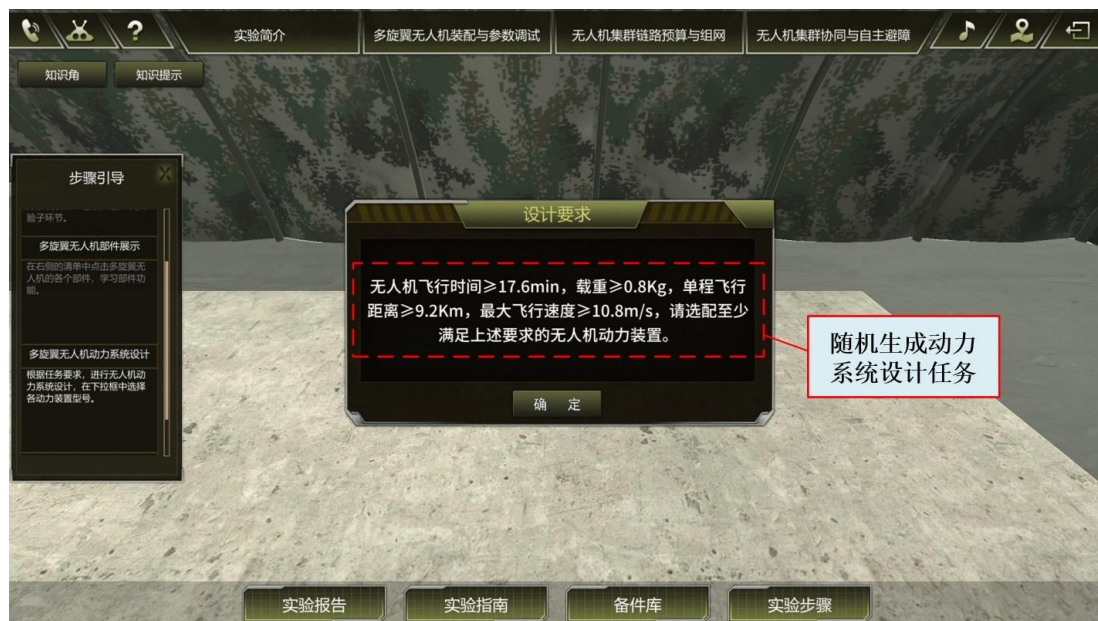


图16 随机生成动力系统设计任务



图17 多旋翼无人机动力装置选配

### 步骤 3. 多旋翼无人机动力系统测试

如图 18 所示，系统对学生不合理的设计进行提示，并根据学生的选择计算出动力性能指标，学生自主判断是否理想满足设计要求。点击“保存退出”按钮保存当前动力装置组合及性能参数，继续后续实验。

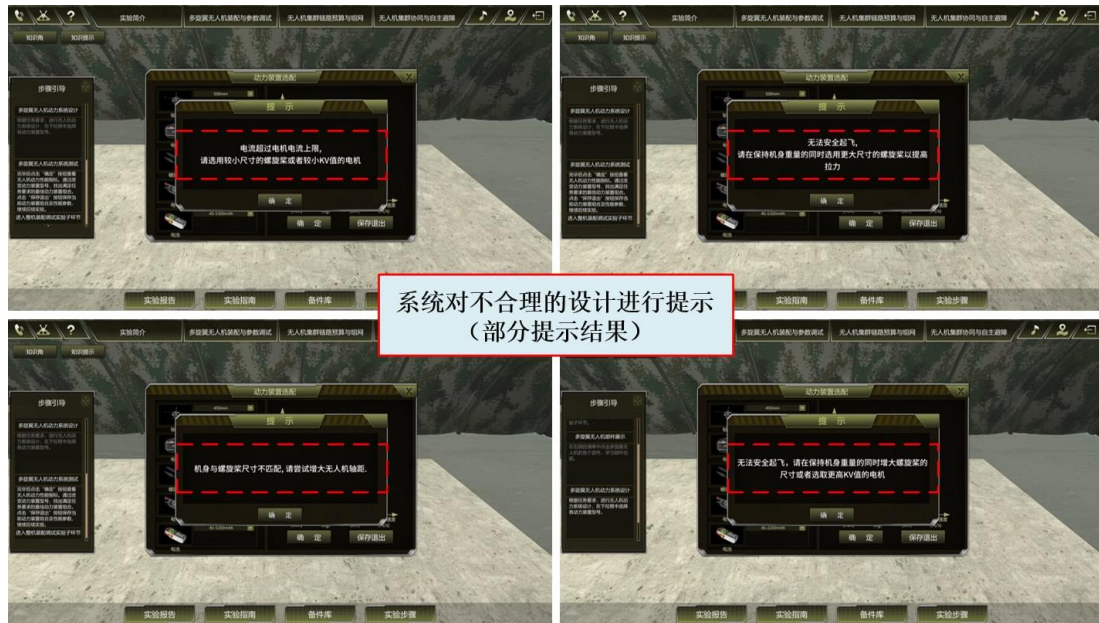


图18 系统对不合理的设计进行提示



图19 系统根据学生的选择计算动力性能指标

#### 步骤 4. 多旋翼无人机装配

点击备件库，查看多旋翼无人机所有部件。如图 20 所示，学生首先用鼠标左键点击起落架，拖动并放置到安装台，然后取出多旋翼无人机的其他部件，逐个拖动到正确的安装位置（蓝色半透明立方体为安装位置提示），完成装配。安装过程中可通过键盘的 W（前进）、A（向左）、S（向后）、D（向右）、空格（跳跃）按键在装配室内移动。



图20 放置多旋翼无人机起落架



图21 安装多旋翼无人机其他部件

本项目引导学生开展容错探究式自主学习。装配过程中，如果出现正反螺旋桨位置安装错误，或者没有正确调整 GPS 模块的安装方向，本项目不会中断学生实验。安装完毕后，在试飞过程中发生无人机侧翻等事故，才会暴露错误。正反螺旋桨的正确安装位置和 GPS 模块的方向调整方法分别如图 22，图 23 和图 24 所示。



图22 正反螺旋桨的正确安装位置



图23 点击GPS模块调整方向



图24 GPS模块方向调整过程



图25 多旋翼无人机装配即将完成

### 步骤 5. 多旋翼无人机试飞

装配完成后，到试飞场进行试飞。如图 26 和图 27 所示，点击遥控器，展开遥控器面板，打开遥控器开关和控制通道，控制无人机飞行。如果在试飞过程中出现遥控器无法解锁、无人机侧翻等各种事故，则要求学生查阅知识角中的相关资料，自主探究错误原因，并返回装配室调整，直至试飞成功。





图26 展开遥控器面板并解锁遥控器



图27 使用遥控器控制多旋翼无人机飞行



图28 GPS方向设置错误导致遥控器无法解锁



图29 返回装配室调整GPS方向



图30 正反螺旋桨安装错误导致多旋翼无人机侧翻



图31 返回装配室重新安装螺旋桨



图32 多旋翼无人机装配成功

### 步骤 6. PID 调参：比例（P）调节

装配成功后，要求学生进一步对多旋翼无人机 PID 控制参数进行调节。首先对比例（P）参数进行调节，观察多旋翼无人机飞行姿态。如果 P 值过低，多旋翼无人机会左右晃动，甚至发生侧翻；增大 P 值，晃动情况会逐渐减缓；如果 P 值设置过高，多旋翼无人机则开始出现高频抖动；降低 P 值直至抖动消失。



图33 比例（P）参数调节

### 步骤 7. PID 调参：积分 (I) 调节

对积分 (I) 参数进行调节，观察多旋翼无人机飞行姿态。如果多旋翼无人机发生飘移，则需增大 I 值；如果多旋翼无人机高频抖动则应降低 I 值；如果在操控过程中发生无人机回弹现象，则应降低 I 值。



图34 积分 (I) 参数调节

### 步骤 8. PID 调参：微分 (D) 调节

对微分 (D) 参数进行调节，观察无人机飞行姿态。如果无人机姿态调整对于输入指令响应迟缓，应当增大 D 的值；如果无人机高频抖动，则应该降低 D 的值。



图35 微分 (D) 参数调节

通过调节 PID 控制参数，最终使得多旋翼无人机飞行状态平稳。

### 步骤 9. 提交环节一实验结果

如图 36 所示，学生查看并提交环节一的实验结果，系统自动完成评分。



图36 查看并提交本环节实验数据

### 环节二：无人机集群链路预算与组网



图 37 无人机集群链路预算与组网实验环节

本实验环节包括“无线链路预算”和“机间通信组网”两个子环节，对应实验步骤 10 至 14。通过该实验环节，使学生掌握无线电传播特性、无线通信系统链路预算方法、信道接入控制方法及自组织时分多址协议原理；要求学生探究无人机集群网络无线信号冲突解决方案，使学生具备从协议栈分层的角度开展无人机集群网络设计的能力。

如图 37 所示，在实验环节菜单栏，点击“无人机集群链路预算与组网”选项，展开该实验环节的下拉菜单。在下拉菜单中，分别点击“无线链路预算”和“机间通信组网”选项，即可进入相应的实验子环节。

### 步骤 10. 无人机发送信号功率设计

如图 38 所示，本步骤随机生成一组通信系统参数。学生根据给定的参数，采用无线链路预算方法，线下计算满足无人机通信距离要求的最小信号发送功率。



图 38 无人机信号发送功率设计

### 步骤 11. 无人机间信号传输测试

将计算得到的发送功率填入“最小发送功率”输入窗口，点击“功率测试”按钮。如图 39 所示，红色圆圈表示设计任务要求达到的信号传输范围。测试开始后，圆心处的无人机向运动中的邻居无人机发送信号，绿色连线表示信号发送成功，黄色连线表示发送失败。学生通过测试，判断设置的信号发送功率是否能满足通信传输距离要求。点击图 38 中的“保存退出”按钮，记录当前发送功率值。



图 39 无人机间信号传输测试

### 步骤 12. 自组织时分多址协议时帧结构设计

如图 40 所示，本步骤随机生成自组织时分多址接入协议（STDMA）的参数，要求学生根据协议原理，对网络时帧结构进行设计。由网络时帧的总时隙数  $SL$  和系统要求的报文报告率  $u$  确定时隙选择间隔  $NI$ ；根据系统提供的时隙状态表，确定第一个可用传输时隙  $NSTS$ ；再确定后续时隙选择基准  $NTS$ ，时隙选择窗口  $SI$  及实际传输时隙  $ATS$ 。

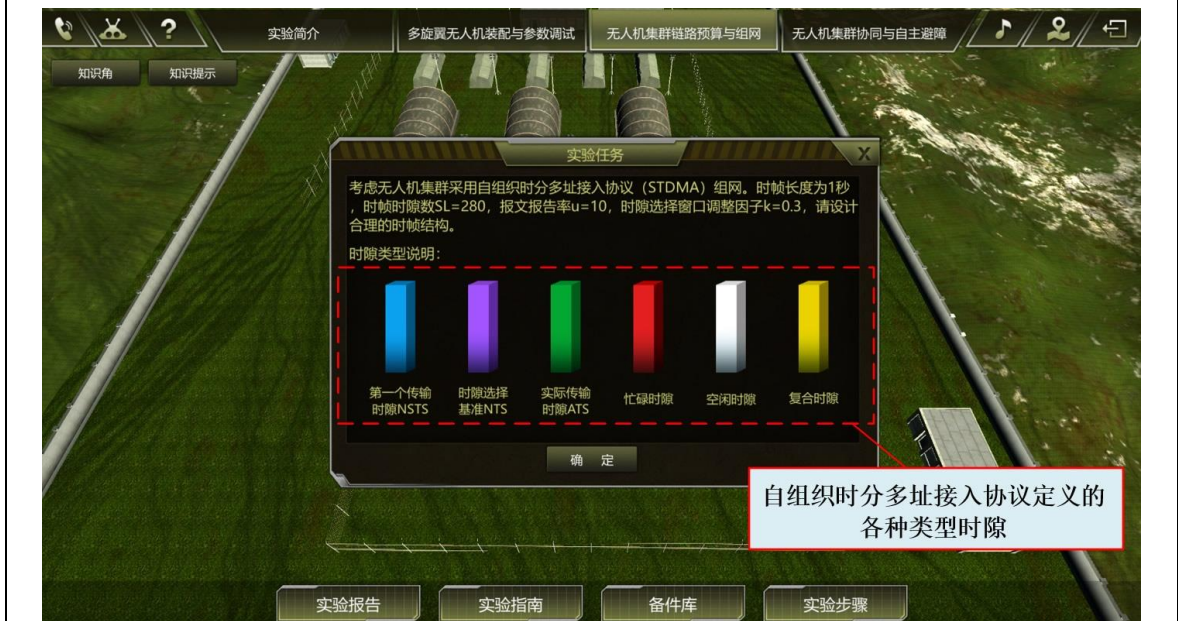


图 40 无人机间信号传输测试



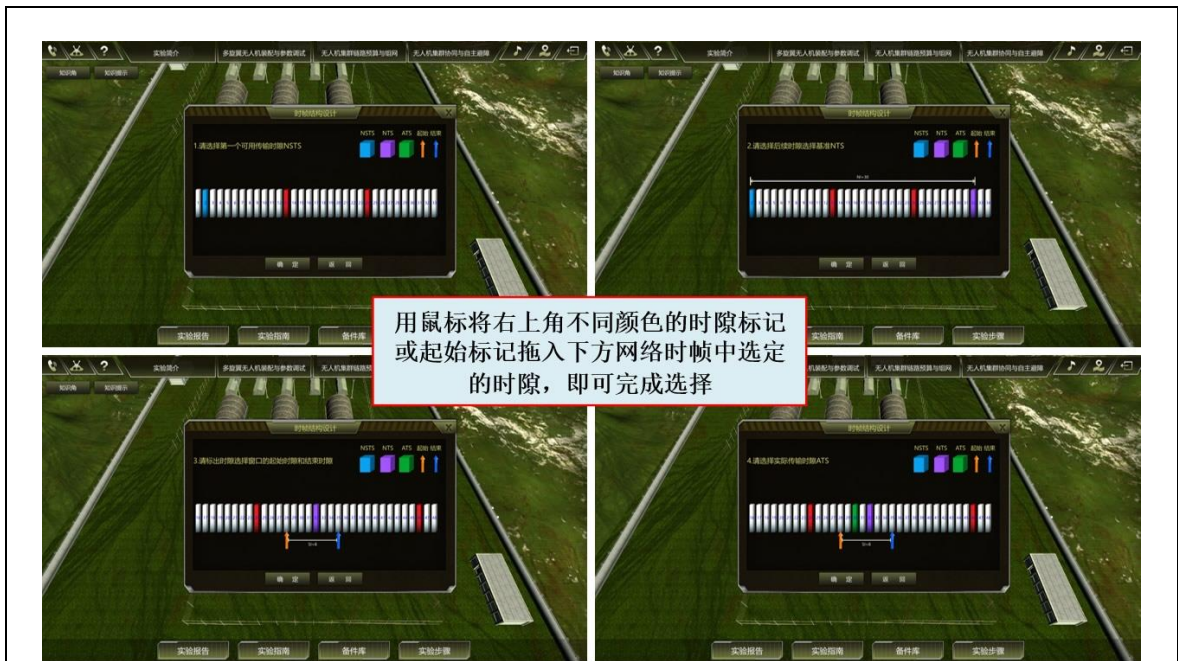


图 41 自组织时分多址接入协议时隙设计

### 步骤 13. 自组织时分多址协议报文报告成功率测试

改变邻居节点度变化范围和随机数种子值，测试不同报文报告率条件下，报文报告成功率随邻居节点度的变化趋势，并分析原因。提交实验结果时，根据分析得出的结论完成多项选择题。

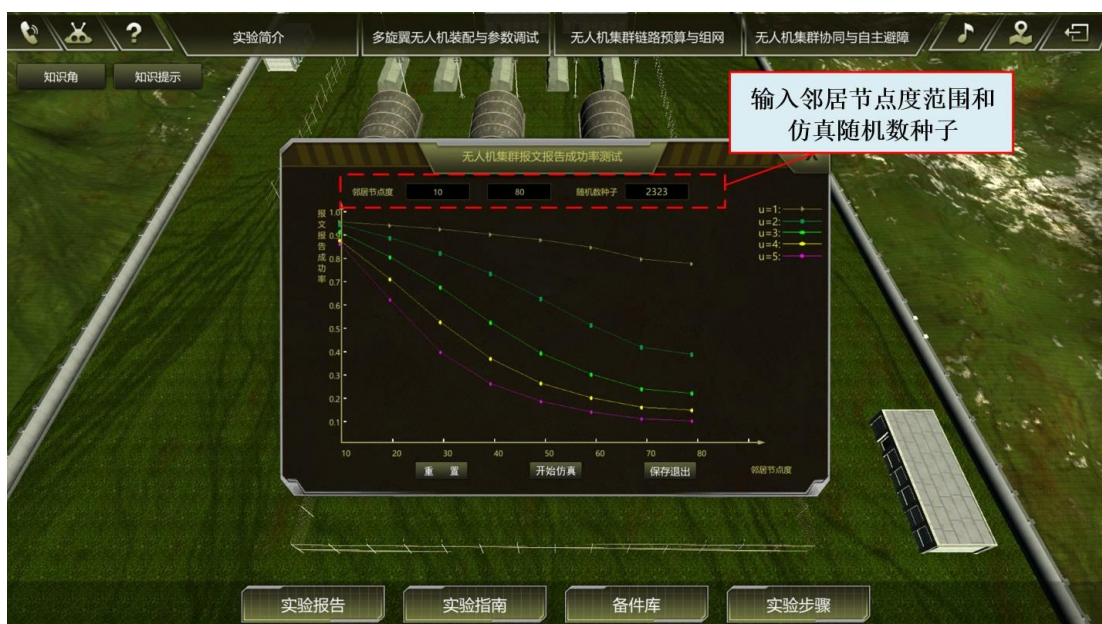


图 42 无人机集群报文报告成功率测试

### 步骤 14. 提交环节二实验结果

如图 43 所示，学生查看并提交环节二的实验结果，系统自动完成评分。



图 43 查看并提交本环节实验结果

### 环节三：无人机集群协同与自主避障



图 44 无人机集群协同与自主避障实验环节

本实验环节包括“虚拟力场探究”和“协同自主避障”两个子环节，对应实验

步骤 15 至 21。通过该实验环节，使学生掌握基于 **Boid** 模型的集群运动原则、基于虚拟力场法的无人机集群拓扑控制和自主避障方法；要求学生探究虚拟力场参数对无人机集群性能的影响，使学生具备根据工程实际需求，对无人机集群协同性能进行调整的能力。

如图 44 所示，在实验环节菜单栏，点击“无人机集群协同与自主避障”选项，展开该实验环节的下拉菜单。在下拉菜单中，分别点击“虚拟力场探究”和“协同自主避障”选项，即可进入相应的实验子环节。

### 步骤 15. 基于 **Boid** 模型的虚拟力合成原理探究

**Boid** 模型给出了集群行为的三条基本规则，防碰撞、速度匹配和聚合。本环节采用虚拟力场法实现基于 **Boid** 模型的群体协同与自主避障。该方法将 **Boid** 模型对无人机集群节点运动的影响类比为力对物体运动的影响。本实验环节要求学生探究目标无人机节点处在不同区域时虚拟力场的变化情况，观察基于平行四边形法则的虚拟力合成过程。通过科普化的类比，降低学生理解虚拟力场法的难度。

学生拖动高亮无人机至另一架无人机的聚合区域、防碰撞区域、速度匹配区域、避障区域和其他区域，观察不同区域的虚拟力场合成情况，理解虚拟力场法的原理。



图 45 聚合区域虚拟力场分析



图 46 防碰撞区域虚拟力场分析



图 47 避障力区域虚拟力场分析

### 步骤16. 无协同条件下无人机集群性能测试

将前进力权重因子设置为大于 0 的任意值，排斥力、聚合力和避障力权重因子，排斥力范围，速度匹配范围均设置为 0，测试无协同条件下无人机集群的性能。

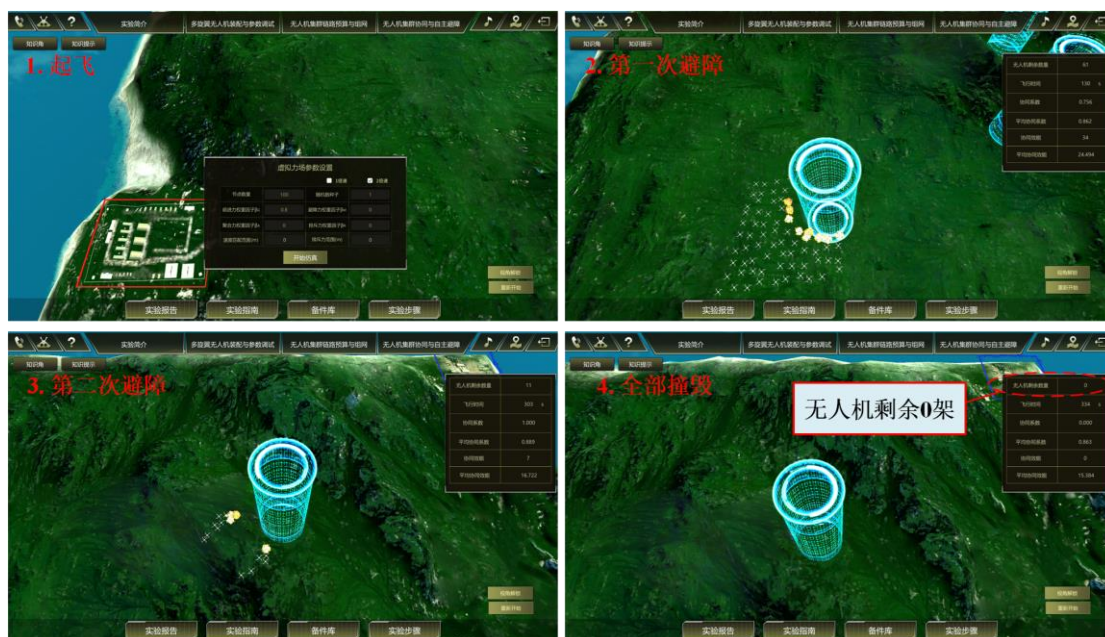


图 48 无协同条件下无人机集群性能测试

**操作示例：**如图 48 所示，我们将初始无人机数量设置为 100 架，将前进力权重因子设置为 0.8，排斥力、聚合力和避障力权重因子，排斥力范围，速度匹配范围均设置为 0。无人机集群从我方基地起飞，在第二次遇到障碍物之后，所有飞机均被撞毁。

### 步骤17. 无人机集群拓扑控制参数调节

将虚拟力场参数中的前进力和避障力权重因子设置为大于 0 的固定值，改变排斥力和聚合力度权重因子（拓扑控制参数），分析它们的相对取值对无人机集群性能的影响，确定合理的取值。

**操作示例：**我们将初始无人机数量设置为 100 架，前进力和避障力权重因子均设置为 0.6，排斥力范围和速度匹配范围分别设置为 100 米和 200 米。将排斥力和聚合力度权重因子分别设置为 0.8 和 0.2，仿真过程和结果如图 49 所示；将排斥力和聚合力度权重因子分别设置为 0.2 和 0.8，仿真过程和结果如图 50 所示。由仿真过程和结果可以得出结论：如果排斥力权重因子相比聚合力度权重因子设置过大，避障效

果好，但无人机集群覆盖范围过大，协同效能低；反之则无人机分布密集，协同效能高，但容易撞毁。



图 49 排斥力权重因子设置过大条件下无人机集群性能测试



图 50 聚力权重因子设置过大条件下无人机集群性能测试

### 步骤18. 无人机集群航迹规划参数调节

将虚拟力场参数中的排斥力和聚合力权重因子设置为大于 0 的固定值，改变前进力和避障力权重因子（航迹规划参数），分析它们的相对取值对无人机集群航迹规划的影响，确定合理的取值。



图 51 前进力权重因子设置过大条件下无人机集群性能测试



图 52 避障力权重因子设置过大条件下无人机集群性能测试

**操作示例：**我们将初始无人机数量设置为 100 架，排斥力和聚合力权重因子均设置为 0.4，排斥力范围和速度匹配范围分别设置为 100 米和 200 米。将前进力和避障力权重因子分别设置为 0.8 和 0.2，仿真过程和结果如图 51 所示；将前进力和避障力权重因子分别设置为 0.2 和 0.8，仿真过程和结果如图 52 所示。由仿真过程和结果可以得出结论：如果前进力权重因子相比避障力权重因子设置过大，避障效果差，但集群飞抵敌方基地上空需要的时间短；反之则避障效果好，但飞抵敌方基地上空需要的时间长。

### 步骤19. 无人机集群速度匹配和排斥力范围调节

将虚拟力场参数中的前进力、排斥力、聚合力 and 避障力权重因子设置为大于 0 的固定值，改变速度匹配范围和排斥力范围，分析它们对无人机集群性能的影响，确定合理的取值。

**操作示例：**我们将初始无人机数量设置为 100 架，排斥力、聚合力、前进力和避障力权重因子分别设置为 0.4、0.6、0.6、0.4，速度匹配范围大于排斥力范围，排斥力范围分别设置为 300 米和 50 米。仿真过程和结果如图 53、54 所示。由仿真过程和结果可以得出结论：排斥力范围设置过大，无人机分布稀疏，协同效能低，避障效果好；反之则无人机集群分布密集，容易撞毁，协同效能高。



图 53 排斥力范围设置过大条件下无人机集群性能测试





图 54 排斥力范围设置过小条件下无人机集群性能测试

### 步骤20. 无人机集群协同避障性能优化与测试

综合实验步骤 16 至 19 的结论，综合设计虚拟力场各参数的取值，保证无人机集群性能最优。

### 步骤21. 提交环节三实验结果

如图 55 所示，学生查看并提交环节三的实验结果，系统自动完成评分。



图 55 提交本环节实验结果

## 步骤22. 提交实验报告

实验完成后，学生在线提交实验报告。系统按照 3 个实验环节各占 30%、30% 和 40% 的比例自动完成实验成绩评定。

### 2-9 实验结果与结论要求

(1) 是否记录每步实验结果：是 否

实验的每个环节结束，系统均会自动记录实验过程数据。实验过程数据是学生实验报告的重要内容和系统自动评分的依据。例如，图 56 中所示为多旋翼无人机装配与参数调试实验环节的多旋翼无人机动力系统设计实验数据记录表。该表格记录了多旋翼无人机动力系统设计要求，学生学习多旋翼无人机部件的情况，学生选择的动力装置，以及相应的多旋翼无人机性能参数。

通过实验过程数据的自动记录，使得学生在撰写实验报告时能全面回顾实验过程，并结合所学知识，针对实验结果数据进行分析，提高学生自主探究的学习能力。



图 56 实验过程数据的自动记录

(2) 实验结果与结论要求：实验报告 心得体会 其他

为了实现实验报告全自动评分，本实验采用客观题的形式考察学生对实验过程及知识点的理解。例如，在机间通信组网实验子环节，本实验要求学生结合实验数据，针对自组织时分多址协议的性能进行分析，探究对报文冲突产生影响的主要因素

素。如图 57 所示，在学生提交该子环节的实验数据时，本实验通过要求学生解答与该分析过程相关的选择题，引导学生开展自主学习，得到正确的分析结论。

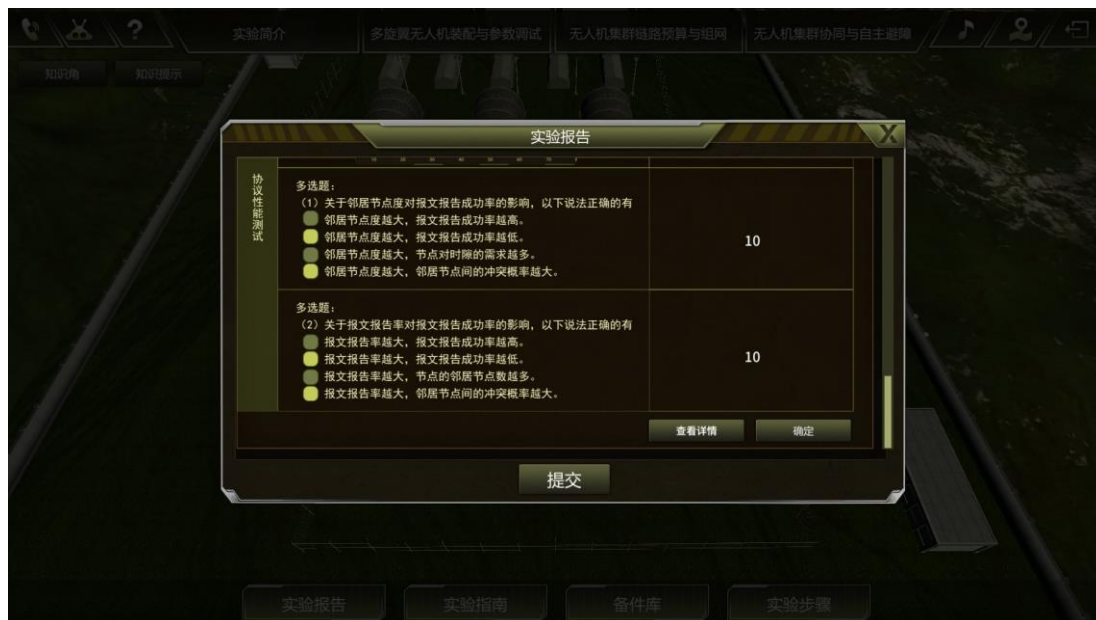


图 57 实验报告中通过客观题考察学生对实验过程和知识点的理解

### (3) 其他描述：

本实验的三个环节都要求学生开展容错探究式的自主学习。例如，学生在“多旋翼无人机装配与参数调试”环节中在开展动力系统设计，调节 PID 参数；在“无人机集群链路预算与组网”环节中设计无人机发送信号功率；在“无人机集群协同与自主避障”环节，研究虚拟力场参数对无人机集群协同性能的影响。实验过程和结果数据的完整记录是开展容错探究的重要保证。对于容错探究式实验，本实验要求学生在实验报告中不仅记录实验最终的结果，还要记录从“错误”到“正确”的探究过程，并通过总结，提升综合分析和解决问题的能力。

## 2-10 考核要求

本实验采用任务驱动式教学方法，实验内容围绕问题导向的任务线索展开，即“装配多旋翼无人机并实现群体协同”。学生开展实验的过程，就是完成任务的过程。实验考核指标来源于任务要求达到的性能指标，学生完成任务的质量是实验成绩评定的主要依据。

本实验针对考核点设计了实验成绩评价模型。以该模型为基础，系统可分别针对学生 3 个实验环节的完成情况进行自动评分，最后再按照 3 个实验环节分别占 30%，30%和 40%的权重计算学生的最终实验成绩。

每个实验环节的实验成绩评价标准如下：

1. “多旋翼无人机装配与参数调试”环节（占总成绩 30%）

序号	考核点	考核标准（按 100 分计算）
1	动力系统设计（50 分）	<p>(1) 无人机部件学习（12 分）：完成所有部件学习+12 分，遗漏一项扣 1 分；</p> <p>(2) 动力装置选配（38 分）：飞行时间达标+10 分，不达标不得分；剩余负载达标+9 分，不达标不得分；单程飞行距离达标+10 分，不达标不得分；最大飞行速度达标+9 分，不达标不得分。</p>
2	整机装配调试（50 分）	<p>(1) 旋翼无人机装配（26 分）：正确完成无人机装配+26 分，GPS 安装错误扣 3 分，螺旋桨安装错误扣 3 分，其余部件安装错误一项扣 2 分；</p> <p>(2) PID 参数调节（24 分）：①参数 P 调节正确+8 分，误差 10%以内+6 分，误差 10%~20%之间+4 分，误差 20%~30%之间+2 分，误差超过 30%不得分；②参数 I、D 评分标准同参数 P。</p>

2. “无人机集群链路预算与组网”环节（占总成绩 30%）

序号	考核点	考核标准（按 100 分计算）
1	无线链路预算（30 分）	<p>计算正确+30 分，误差 5%以内+20 分，误差 5%~10%之间+10 分，误差 10%~15%之间+5 分，误差超过 15%不得分。</p>
2	机间通信网络（70 分）	<p>(1) 正确完成时帧结构设计+40 分，每错误一项扣 8 分；</p> <p>(2) 完成协议性能测试+10 分；</p> <p>(3) 多选题 1，完全正确+10 分，部分正确+5 分，错误不得分；</p> <p>(4) 多选题 2，完全正确+10 分，部分正确+5 分，错误不得分。</p>

3. “无人机集群协同与自主避障”环节（占总成绩 40%）

序号	考核点	考核标准（按 100 分计算）
1	虚拟力场探究（30 分）	完成所有类型虚拟力探究+30 分，遗漏一项扣 6 分。
2	自主协同避障（70 分）	<p>（1）无人机剩余数量性能指标得分： (无人机剩余数量/初始无人机总数量)×30 分；</p> <p>（2）结束时间性能指标得分：初始无人机数量 100 架条件下，到达敌方区域的无人机数量小于 50 架时，不得分，到达敌方区域的无人机数量大于 50 架时，结束时间 750 秒以内+20 分，结束时间 750 秒~800 秒之间+15 分，结束时间 800 秒~850 秒之间+10 分，结束时间 850 秒~900 秒之间+5 分，结束时间 900 秒以上不得分；</p> <p>（3）平均协同系数 0.9 以上+10 分，0.8~0.9 之间+8 分，0.7~0.8 之间+5 分，0.6~0.7 之间+3 分，小于 0.6 不得分；</p> <p>（4）平均协同效能 20 以上+10 分，15~20 之间+8 分，10~15 之间+5 分，5~10 之间+3 分，小于 5 不得分。</p>

2-11 面向学生要求

（1）专业与年级要求

本实验属于南京航空航天大学跨专业学科拓展课程《无人机集群技术》，该课程面向全校工科专业大三至大四的学生任选。

（2）基本知识和能力要求

由于无人机集群技术是“航空和信息”高度交叉融合的科技前沿，因此本课程的教学内容是跨专业、跨学科、跨能力范畴的交叉融合。本课程的先修课包括本实验教学团队开设的国家精品在线开放课程《无人机设计导论》、《航空航天概论》和《通信网络》（或其他网络技术相关课程）。

在实际教学中，本实验不仅应用于《无人机集群技术》课程，相关实验环节还应用于团队开设的上述先修课程的实验教学。值得一提的是，由于本项目的知识角提供了大量文献、视频学习资料，因而上述先修课程的学生通过自主学习，也都能较好的完成本实验所有环节的实验任务。

## 2-12 实验项目应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2018年1月。

(2) 已服务过的本校学生人数：300余人。

(3) 是否纳入到教学计划：是    否

(后附课程教学大纲)

(4) 是否面向社会提供服务：是    否

(5) 社会开放时间：2018年6月起向中国航天科工集团8511所开放，2019年3月起向南京理工大学开放，并提供免费教学服务，已服务人数：310人（后附应用证明）。

### 附：部分校内学生评价

序号	院系	学号	姓名	评价
1	航空学院	011710515	杨彬淇	通过本次实验课程，我对无人机的组装、试飞以及无人机蜂群的作用，形成了一个大概的直观的认识，对无人机有了更浓厚的兴趣。仿真软件使用起来也很流畅，很好地将游戏与授课结合起来。
2	航空学院	011850233	宋凯辰	实验内容采用类似游戏的模式进行教学，生动有趣，掌握知识相对快捷，教学的老师也十分耐心，掌握完成度也很高。

3	机电学院	051830204	陈姝元	实验题材新颖，以前没有接触过，开阔视野，平台也比较完善，有很多功能。学习了无人机性能和组装方面的知识，对无人机有了进一步的了解，增强了对无人机进一步学习的兴趣。
4	民航/飞行学院	071640105	吴雅琪	这个系统帮我更清楚地认识到了无人机的结构，能够自己操作组装无人机很有意思，另外飞行模拟也很有趣。有这样的系统，我对学习知识的兴趣更浓了。
5	民航/飞行学院	071640112	刘柯	这个模拟程序和这次的线上课程，让我对无人机相关知识，特别是无人机装配及参数调试有了更直观清晰的认识。也第一次了解了无人机集群协同和自主避障。直接上手组装无人机并试飞让我更乐于了解和学习其相关知识，学习过程更加愉快。
6	电子信息工程学院	041800701	张千	作为一名大一升大二的学生，在大一对无人机确实没有多少了解，在这个仿真系统中，通过实际的模拟操作，我了解了无人机的构造以及各种参数在无人机飞行中的作用。仿真测试确实激起了我的兴趣，从改变参数中看出参数的影响。
7	电子信息工程学院	041800908	唐焯	界面设计得很精致，能引起我的兴趣。通过实验学习，我对无人机的基础结构、操作方式、参数等有一定的认识，能让人产生兴趣。

8	自动化学院	031810313	单圣强	以类似游戏的方式来组装无人机，学习无人机的知识，令我感到非常的新颖，能够使我学习无人机知识的兴趣大大提高，很喜欢学校开发的这一学习平台。
9	机电学院	051830104	胡琳	这个教学系统能很好地对组装无人机提供场景化的体验，自己动手组装虚拟无人机比老师讲怎么组装更令人印象深刻。
10	民航/飞行学院	071630119	徐向前	这个软件很适合无人机小白的学习，通过自己动手，虚拟模拟组装无人机调试参数设置以及群体协同避障等，让我了解到了无人机更加详细的知识。
11	航空学院	011850231	陈如彤	仿真式的操作体验给了我们类似于实际动手操作的体验，让我们对于无人机集群，无人机参数等有了初步的了解。
12	自动化学院	031720730	陆韬	激发了学生对探索无人机结构的兴趣。
13	自动化学院	SZ1803102	周子寒	关于多旋翼无人机的组装实验，可以帮助学生们更好、更细致地了解多旋翼无人机的组成部件及部件功能。



### 3.实验教学项目相关网络及安全要求描述

#### 3-1 有效链接网址

<http://uavswarm.nuaa.edu.cn>

#### 3-2 网络条件要求

##### (1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）

带宽要求：20M 下行对等带宽。

经测试客户机，带宽在 20M 以上时，能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机，模拟学生在校内校外不同的使用环境，最大限度地还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一：物理连接链路测试。

测试目的：测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况；

测试方法：客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进行 PING 操作。

测试二：网络质量测试。

测试目的：测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况。

测试方法：通过 IP 代理，测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果：

当客户机带宽小于 20M 时，丢包情况严重、网络延时都很高，部分环境延时可以达到 20ms 以上，丢包率超过 5%；

当客户机带宽小于 20M 的时候，在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中，网页打开速度较慢，特别是课件加载卡顿现象也常有发生，访问效果不理想。

基于以上测试结果，我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

##### (2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试，当用户数量在 300 以下时，各项服务均能在 0.2s 内做出响应，服务器负载处于较低水平，课件加载也很快。当用户数达到 2000，服务响应时间维持在 0.8s 以内，但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时，服务响应时间超过 1s，服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果我们认为本虚拟仿真项目服务器的最佳响应并发数为 300。

### 3-3 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10

Deepin15.7（国产 Linux 系统）

(2) 其它计算终端操作系统和版本要求

无

(3) 支持移动端： 是  否

### 3-4 用户非操作系统软件配置要求（如浏览器、特定软件等）

(1) 需要特定插件 是  否

（勾选是请填写）插件名称

插件容量

下载链接

(2) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

学生需在 Windows7、Windows8、Windows10 系统环境下，使用以下浏览器打开：

浏览器类型	支持 WebGL	不支持 WebGL
Mozilla Firefox 52 及以上版本	支持	
Google Chrome 57 及以上版本	支持	
Apple Safari 11 及以上版本	支持	
MS Edge 16 及以上版本	支持	
360 浏览器	基于（Chrome）内核，并且开启极速模式、智能开启硬件加速情况下支持 存在右键划线问题，属于浏览器自身设置原因，关闭浏览器鼠标手势即可	基于（IE）内核，不支持

Google Chrome 浏览器下载地址：[http://dl.hdmoool.com/tools/chrome\\_x64.exe](http://dl.hdmoool.com/tools/chrome_x64.exe)

### 3-5 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

#### (1) 计算机硬件配置要求

##### Web 端用户硬件要求

处理器：Intel (R) Core (TM) i5

主频：2.4GHz

内存：8GB

显卡：NVIDIA GeForce GTX GT740 2G

#### (2) 其它计算终端硬件配置要求

无特殊要求，满足能上网功能即可。

### 3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

#### (1) 计算机特殊外置硬件要求

无

#### (2) 其它计算终端特殊外置硬件要求

无

### 3-7 网络安全

(1) 项目系统是否完成国家信息安全等级保护 是 否

(勾选“是”，请填写) 级

## 4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及 简要说明	本系统是基于 B/S 架构设计的虚拟仿真实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化

部署还可实现自动扩容，无需人为干预。

系统包含实验实训、实验报告、实验指南、数据统计、考试系统、帮助中心、收费系统、安全中心、资源中心、协同服务、学问系统和知识角等功能模块。系统除支持虚拟仿真实验外还可上传视频和其它文档资料，支持系统化课程体系学习。系统可对学生实验、学习数据做详细记录并分析每个学生的学习情况和整体学生知识掌握情况，实验报告系统可对学生提交的实验报告进行自动批阅也可由教师人工批阅或学生相互阅评。

系统用户可分为教师和学生两种角色。教师可发布实验资源、建设实验课程、设置课程共享信息、可查看发布课程的学习情况、可批阅学生实验报告和考试。学生可报名参与课程，可观看报名课程的视频操作课程的实验资源，可查看个人的学习情况，可评价学习课程、参与课程讨论，可参与实验报告互评等。



实验 教学 项目	开发技术	<input checked="" type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input type="checkbox"/> 二维动画 <input checked="" type="checkbox"/> HTML5 其他_____
	开发工具	<input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input type="checkbox"/> SketchUp <input type="checkbox"/> Adobe Flash <input type="checkbox"/> Unreal Development Kit <input type="checkbox"/> Animate CC <input type="checkbox"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input type="checkbox"/> 其他_____
	运行环境	<b>服务器</b> CPU <u>16</u> 核、内存 <u>32</u> GB、磁盘 <u>1000</u> GB、 显存 <u>16</u> GB、GPU 型号 <u>NVIDIA GRID K1</u> <b>操作系统</b> <input type="checkbox"/> Windows Server <input checked="" type="checkbox"/> Linux <input type="checkbox"/> 其他 具体版本__ <b>数据库</b> <input checked="" type="checkbox"/> Mysql <input type="checkbox"/> SQL Server <input type="checkbox"/> Oracle 其他_____ 备注说明 <u>(需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时</u> <u>请说明)</u> _____
	项目品质(如: 单场景模型总 面数、贴图分 辨率、每帧渲 染次数、动作 反馈时间、显 示刷新率、分 辨率等)	单场景模型总面数: 40 万三角面 贴图分辨率: 512×512 每帧渲染次数: 30fps 动作反馈时间: 1/90s 显示刷新率: 60HZ 分辨率: 4K

## 5.实验教学项目特色

(体现虚拟仿真实验项目建设的必要性及先进性、教学方式方法、评价体系及对传统教学的延伸与拓展等方面的特色情况介绍。)

### (1) 实验方案设计思路

无人机集群是航空和信息高度交叉融合的科技前沿，已成为国防领域的研究热点，对具备实践能力的跨专业人才需求非常迫切。然而，无人机集群相关的实验教学却面临着风险高、难度高、成本高的严重困难。针对上述问题，团队以相关科研和教学成果为基础，遵照“能实不虚，虚实结合”的原则，为《无人机集群技术》课程自主研发了多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验项目。

本实验首先坚持以学生为中心的教学理念，实验方案采用了问题导向的设计方法，实验情景吸引力强，有利于调动学生的学习兴趣和积极性。第二，本实验通过环环相扣的3个实验环节，将知识学习和能力提升有机融合，引导学生通过容错探究式的实验过程得到个性化的实验结果，培养学生解决复杂问题的综合能力和探究式的思维方式。第三，本实验的挑战度高，实验知识点源于课堂，但实验内容来源于无人机集群技术领域的前沿，实验仿真程序和模拟数据均来源于科研中的实际程序和实测数据。在实验前，学生需要通过本实验提供的“在线知识角”，对相关领域的知识进行学习。第四，本实验将立德树人融入教学全过程。近年来，无人机集群成为了中国和美国等军事强国竞相发展的热点。目前，中国电科电子科学研究院已经完成了200架无人机组成的集群试飞实验。我们把相关学习资料均收录在实验项目的在线“知识角”中。学生通过自主学习，深入理解无人机集群技术在国防领域的重要价值。然后进一步通过情景体验式的实验教学过程，潜移默化的激发学生投身国防工业的情怀和使命感。

### (2) 教学方法创新

在实验教学过程中，本实验综合采用了任务驱动式、情景体验式和容错探究式教学方法，具体内容已在申报表2-7部分详细举例说明。教学方法的创新性主要表现在以下两个方面。首先，本实验将任务融入情景，使得学生将课堂上所学的理论知识与具体工程任务相联系，并通过虚拟仿真实验情景，迅速掌握实验目的和教学内容，理解实验考核指标设计的内涵。部分关键实验任务按照“一人一题、一次一题、一题多解”的原则设计，实验结果总体具有一致性，但解决方案或参数取值并不唯一。第二，本实验教学项目引导学生开展容错探究式的自主学习过程。实验项目的容错设计为学生开展自主探究学习提供了保证。学生在自主探究学习过程中形成了

对知识的自主构建，培养了探究性的思维方式，极大提升了分析问题和解决问题的能力。同时，学生体验到自主探究的价值和乐趣后，产生了一种成就感，学习积极性高涨，实验教学效果明显。

### （3）评价体系创新

本实验评价体系的主要创新性包括：1. 面向任务的实验成绩评价指标。本实验采用了任务驱动式和情景体验式实验教学方法，因而实验成绩评价模型中的评价指标均来源于实验任务要求达到的性能指标，学生完成任务的质量是实验成绩评定的重要依据。2. 面向学生能力的实验成绩评价方法。针对容错探究式实验教学方法，本实验的成绩评价重点是学生分析问题和解决问题的能力。实验报告中的解决方案或参数取值并不唯一，但实验结果（即实验任务的完成质量）具有一致性。通过实验任务的完成质量，实验成绩评价模型自动对学生能力进行考核。

### （4）传统教学的延伸与拓展

本实验教学项目有效拓展了传统教学手段的深度和广度。具体表现在：1. 拓展了传统实验教学的范围。多旋翼无人机集群节点数量多，外场实验成本高、风险极大。即使针对单架多旋翼无人机开展设计、装配和调参教学实验，也存在较大的风险。在装配失误、参数设置不合理、操控不熟练等多种情况下，多旋翼无人机极易发生坠机事故，危及学生安全。本实验将实际情况下高危的多旋翼无人机装配及群体协同实验以虚拟仿真的方式展现给学生，有效拓展了传统实验教学的范围。2. 拓展了实验教学内容的时代性和先进性。通过虚拟仿真实验的持续建设和改进，实验教学团队可以将无人机集群技术相关的最新研究成果迅速转化为实验教学内容，让学生能够通过实验了解科技最前沿，而这一点是传统实验教学无法达到的。

## 6. 实验教学项目持续建设服务计划

（本实验教学项目今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数）

### （1）项目持续建设与服务计划

本实验计划通过 2~3 年的时间，补充和持续完善现有的实验功能，持续建设计划包括：

1. 增加“无人机集群无线电通信对抗”实验环节。该环节将以现有的三个实验环节为基础，帮助学生掌握电子战环境下无线电通信对抗的基本原理、无线电通信干扰对无人机集群的影响、跳频通信抗干扰的基本原理、基于  $m$  序列的跳频图案设

计方法。该实验环节同样将采用任务驱动式和容错探究式的实验教学方法。学生通过实验设计，保证无人机集群在敌方实施无线电通信干扰的情况下仍然可以完成群体协同。

2. 进一步完善现有的 3 个实验环节。在“多旋翼无人机装配与调试”环节增加六旋翼无人机的装配与调试实验；在“无人机集群链路预算与组网”环节增加基于载波检测信道接入方式的无人机集群组网实验；在“无人机集群协同与自主避障”环节增加多目标区域覆盖等群体协同任务，增大实验的难度与广度。

本项目将持续开放服务。项目被认定后 1 年内面向高校和社会免费开放并提供教学服务，1 年后至 3 年内免费开放服务内容不少于 80%，3 年后免费开放服务内容不少于 50%。

### （2）面向高校的教学推广应用计划

项目团队所在的国家级航空工程实验教学示范中心（项目团队成员昂海松教授为该中心主任）计划在 2019 年底，主办无人机“金课”教学研讨会，会议将邀请北京航空航天大学，南京理工大学，西北工业大学，南昌航空大学等兄弟高校相关专业的老师参加。会议的主题之一就是如何共享、共建“金课”。本团队将总结项目前期在南京理工大学应用的经验，进一步把本项目向更多相关兄弟高校推广，与兄弟高校教师一起共建，力争扩大受益面。

### （3）面向社会的推广应用计划

本项目将继续面向社会推广应用，主要计划包括：

1. 总结目前在航天科工 8511 所推广应用的经验，针对科研院所技术人员学习的需求，开发部分新功能。继续向与无人机集群技术密切相关的中国电科 54 所，中航工业 615 所，中航工业导弹院等单位免费推广，并提供教学服务，力争获得较好的社会效益。

2. 目前，社会上有较多的多旋翼无人机爱好者，他们希望通过学习，掌握多旋翼无人机的相关理论和工程知识，并考取无人机执照。本项目拟面向多旋翼无人机爱好者推广，帮助他们降低学习成本和风险，快速入门。




## 7.知识产权

软件著作权登记情况	
软件著作权登记情况	<input checked="" type="checkbox"/> 已登记      未登记
完成软件著作权登记的，需填写以下内容	
软件名称	多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验软件
是否与项目名称一致	<input checked="" type="checkbox"/> 是      否
著作权人	南京航空航天大学
权利范围	全部
登记号	2019SR0934544

## 8.诚信承诺

本人承诺：所申报的实验教学设计具有原创性，项目所属学校对本实验项目内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验项目的一切资源）享有著作权，保证所申报的项目或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

本人已认真填写、检查申报材料，保证内容真实、准确、有效。

实验教学项目负责人（签字）：

2019 年 8 月 25 日

## 9.附件材料清单

### 1. 政治审查意见（必须提供）

#### 政治审查意见

兹证明我校所申报的国家虚拟仿真实验教学项目《多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验》内容，能够严格遵守国家、地方和部门的法律法规，政治导向正确，政治方向正确、价值取向正确。

本项目团队成员包括：雷磊、昂海松、王成华、郑祥明、蔡圣所、陆洋、张莉涓、宋晓勤、甘慧、丁娇、邱旦峰、葛玉蓝、盛守照、张帆、吕恂旻、赵建、赵大力、袁婷、蒋法成，团队成员均未发现违法违纪行为。

特此证明。

中国共产党南京航空航天大学委员会

2019. 8. 22



## 2. 校外评价意见

### (1) 评价单位一：南京理工大学

## 应用证明


项目名称	多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验
应用单位	南京理工大学
应用起止时间	2019年3月至2019年9月
单位地址与邮编	江苏省南京市玄武区孝陵卫200号, 210094
联系人与电话	赵兆, 13951024187

应用推广情况及产生的社会效益:

2019年3月起, 我校将南京航空航天大学研制的“多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验”项目应用于电光学院电子信息工程专业《电子系统综合设计与实践》课程中多旋翼无人机设计相关的实验教学。至今已有122名学生完成该虚拟仿真实验项目的学习。

该实验包括三个环节。首先通过多旋翼无人机装配与参数调试实验环节, 帮助学生掌握多旋翼无人机组成原理、动力学模型、装配要点及PID控制原理, 使学生具备根据多旋翼无人机飞行姿态, 分析、判断并调节PID参数的能力。然后, 通过无人机集群链路预算与组网实验环节, 帮助学生掌握无线电传播特性、无线通信系统链路预算方法、信道接入控制方法及自组织时分多址协议原理, 使学生具备从协议栈分层的角度开展无人机集群网络设计的能力。最后通过无人机集群协同与自主避障实验环节, 帮助学生掌握基于Boids模型的集群运动原则、基于虚拟力场法的无人机集群拓扑控制和自主避障方法, 探究虚拟力场参数对无人机集群性能的影响。

南京航空航天大学开发的“多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验”坚持以学生为中心的教学理念, 实验方案采用了科技前沿问题导向的设计方法, 实验创新性强, 挑战度高, 有利于培养学生探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力。实验趣味性强, 在线知识角中的学习资料丰富, 教学效果良好。

  
南京理工大学  
(盖章)  
二〇一九年九月十日

(2) 评价单位二：中国航天科工集团八五一—研究所

应用证明

项目名称	多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验
应用单位	中国航天科工集团八五一—研究所
单位地址	南京市秦淮区后标营 35 号
应用起止时间	2018 年 6 月至今
联系人与电话	宋海伟, 15951654869

应用情况及效益:

多旋翼无人机群体协同技术是近年来国际上的研究热点。为满足我单位技术人员在科研工作中学习多旋翼无人机原理和无人机集群技术的需要,南京航空航天大学“多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验”项目向我单位免费开放。

该实验根据多旋翼无人机集群军事应用背景,构建了基于作战想定的虚拟仿真实验情景。实验项目包含 3 个实验环节,即多旋翼无人机装配与调试、无人机集群链路预算与组网、无人机集群协同与自主避障。各个实验环节目标具体明确,逻辑关系清晰。实验人员首先完成多旋翼无人机装配与参数调试实验环节,保证无人机能够平稳飞行;然后完成无人机集群链路预算与组网实验环节,保证无人机与其邻居节点之间可靠的信息传输;最后在随机布设障碍的海岛上空完成无人机集群协同与自主避障。

该虚拟仿真实验项目有效解决了多旋翼无人机集群测试代价高,风险大的难题。通过基于作战想定的虚拟仿真实验情景,帮助技术人员快速学习和理解多旋翼无人机集群相关知识要点。该项目为我单位技术人员学习及新员工培训提供了重要帮助,我单位已有 188 人完成了该项目的学习。



### 3. 《无人机集群技术》课程大纲

## 南京航空航天大学

### 课程教学大纲

课程编号	042K0040		开课学院	电子信息工程 学院	开课系	信息与通信工程系
课程名称	中文	无人机集群技术		课程类别	学科拓展课	
	英文	Technology of UAV swarms				
课程学时	总学时	理论教学	实验教学	上机	课程设计	
	36	28	8		1.有	√ 2.无

#### 课程简介：

简要描述课程的性质及专业地位，培养目标（理论、能力和技能）

#### 1、开设学期

每年秋季学期，面向全校工科专业大三至大四的学生任选。

#### 2、课程性质

无人机可以在战场区域长航时执行诱饵、侦察、监视、目标指示和毁伤评估等各类危险任务，甚至实施无人攻击，已成为现代战争中的重要作战单元。近年来，无人机在交通监视、森林防火、农业喷洒等民用领域也得到了广泛普及应用，导致无人机产业规模大幅提升，成本迅速下降。同时，伴随着无线自组网和人工智能等技术的快速发展，研究人员提出了无人机集群作战的新概念。

无人机集群由大量小型化、廉价、灵活性高的无人机节点组成。节点间采用无线自组网技术实现互联，并通过人工智能的方法构建群体化、智能化、功能分布化的高抗毁作战体系，突破了单架无人机在探测能力、武器载荷等方面受到的限制。研究表明，无人机集群在数量规模、协同作战效能、敌我对抗交换成本等方面具有巨大的优势，将颠覆性地改变未来战争的作战样式。如图 1-1 所示，无人机集群可以通过多元化的方式快速投送到目标作战区域，协同完成侦察、干扰、攻击等军事任务，实现对热点地区的战役对抗和战略威慑。

近年来，无人机集群成为了中国和美国等军事强国竞相发展的热点。而由上述分析可知，无人机集群技术是“航空和信息”高度交叉融合的科技前沿，涉及飞行器设计与工程（082002）、信息工程（080706）等多个传统工科专业，对具备实践能力的跨专业人才培养需求非常迫切，符合新工科专业建设的发展方向。因此，本课程是一门跨专业、跨学科、跨能力范畴的学科拓展专业课程。

### 3、培养目标

本课程旨在帮助学生掌握无人机集群相关的基础理论知识。课堂和实验教学内容重点围绕无人机集群的概念、无人机集群的组成、无人机集群分布式自组网技术、无人机群体协同与控制技术展开。通过本课程的学习，要求学生掌握无人机集群的概念和基本原理，了解无人机集群的通信与组网方式，掌握经典的无人机群体协同算法，培养探究式的思维方式和解决复杂问题的综合能力，为进一步学习后续课程以及从事相关专业的科学研究、工程技术及管理工作提供必备的理论基础。

前修课程、能力和知识结构要求：

**先修课程：**本课程的先修课包括本实验教学团队开设的国家精品在线开放课程《无人机设计导论》、《航空航天概论》和《通信网络》（或其他网络技术相关课程）。

#### **学生学习本门课程之前所需掌握的主要能力和知识结构：**

- 1、要求学生初步了解无人机的基本组成和飞行原理。
- 2、要求学生掌握基本的无线通信网络原理。

课程结构说明：

对课程的组织结构进行简要说明，即明确课程所述内容由几个大的部分构成，每个部分的教学由哪几个环节或单元组成（如：理论授课、，实验教学，上机实习，课外作业，随堂考试，讨论会，总结报告等）

本课程分为无人机集群的概念与基本架构、无人机的分类和系统组成、无人机集群通信与组网、无人机集群航迹规划、无人机集群编队控制和任务分配、课程配套实验六部分进行讲授：

1、无人机集群的特点与基本架构。主要介绍无人机集群的概念与无人机集群系统的体系架构。该部分内容包括：无人机集群的起源与特点，无人机集群的发展现状，无人机集群的典型应用，无人机集群作战概念，无人机集群系统的基本组成。

2、无人机的分类与多旋翼无人机。主要介绍无人机的分类和多旋翼无人机的设计基础。该部分内容包括：无人机的类型，多旋翼无人机，多旋翼无人机的飞行原理，多旋翼无人机的动力系统模型，多旋翼无人机的飞行控制系统。

3、无人机集群通信与组网。主要介绍无人机集群网络物理层、数据链路层和网络层的基础知识。该部分内容包括：无线链路预算，无线自组织网络，载波检测信道接入控制协议，自组

织时分多址信道接入控制协议，移动 IP 协议，动态源路由技术。

4、无人机集群航迹规划。主要介绍无人机集群航迹规划技术。该部分包括：航迹规划问题模型，单个无人机航迹规划算法，多无人机协同航迹规划算法，Boid 集群运动模型，基于虚拟力场法的无人机集群航迹规划。

5、无人机集群编队控制和任务分配。主要介绍无人机集群编队控制和任务分配的基本方法。该部分包括：无人机集群编队队形设计与调整，无人机集群编队飞行控制策略，基于生物群集行为的无人机集群编队控制，无人机集群任务分配模型，基于粒子群算法的无人机集群任务分配。

6、课程配套实验。采用虚实结合的方法，对课堂教学中涉及的部分重要知识点进行验证和分析。该部分包括：多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验、无人机集群路由协议验证实验。

教学环节包括：课堂教学、虚拟仿真实验、自学、课外作业、讨论等。

课程知识结构说明：

核心知识点（用“\*”标示）和扩展性知识点（用“Δ”标示）

## 第 1 章 概述（3 学时）

### \*1.1 无人机集群的概念

### Δ1.2 自然界中的生物群集行为

### 1.3 无人机集群的发展现状

### 1.4 无人机集群的典型应用

目标及要求：本章主要介绍无人机集群的基本概念。要求学生了解无人机集群技术的起源，理解无人机集群技术是来自于自然界中的生物群集行为。要求学生了解国内外无人机集群技术的最新研究进展，掌握无人机集群技术在军用和民用场景中的典型应用。本章可为后续章节的学习提供基础。

## 第 2 章 多旋翼无人机基本原理（5 学时）

### 2.1 无人机的分类

### 2.2 多旋翼无人机及其系统组成

### \*2.3 多旋翼无人机飞行原理

### 2.4 多旋翼无人机装配流程

### \*2.5 多旋翼无人机动力学模型

### \*2.6 多旋翼无人机飞行控制原理

目标及要求：本章介绍无人机的分类，并重点介绍了多旋翼无人机的基本知识。要求学生掌握无人机的分类方法，重点掌握多旋翼无人机的部件组成和装配流程，理解多旋翼无人机的飞行原理和动力学模型，并掌握多旋翼无人机飞行控制参数的调节方法。

### 第3章 无人机集群系统的组成（2学时）

#### 3.1 无人机集群的特点

#### \*3.2 无人机个体的自主决策性

#### 3.3 无人机集群系统的组成要素

#### Δ3.4 无人机集群协同作战

目标及要求：介绍无人机集群系统的组织架构。要求学生掌握无人机集群的典型特征，理解无人机个体的自主决策性，并结合无人机集群协同作战的概念掌握无人机集群系统的基本组成。

### 第4章 无人机集群关键技术总述（2学时）

#### 4.1 无人机集群通信与组网技术

#### 4.2 无人机集群航迹规划技术

#### 4.3 无人机集群编队控制技术

#### 4.4 无人机集群任务分配技术

目标及要求：本章主要介绍无人机集群涉及到的关键技术。要求学生了解无人机集群通信与组网技术、无人机集群航迹规划技术、无人机集群编队控制技术、无人机集群任务分配技术各自的概念及其在无人机集群系统中的作用。本章可为后续各章节的学习提供线索。

### 第5章 无人机集群通信与组网技术（6学时）

#### \*5.1 无线链路预算

#### 5.2 通信网络体系结构

#### 5.3 无线自组织网络

#### \*5.4 无线自组织网络中的信道接入控制协议

#### \*5.5 无线自组织网络中的路由协议

目标及要求：本章主要介绍无人机集群通信与组网技术。要求学生掌握无线链路预算方法。通过学习通信网络体系结构，要求学生了解无人机集群网络的基本架构。要求学生理解无线自组织网络的概念，并通过学习经典的无线自组织网络信道接入控制协议和路由协议，掌握无人机集群组网的基本方法。



## 第 6 章 无人机集群航迹规划技术（5 学时）

### 6.1 航迹规划问题描述

### \*6.2 无人机航迹规划算法

### 6.3 基于蚁群算法的无人机航迹规划

### 6.4 无人机集群航迹规划

### \*6.5 Boid 集群运动模型

### \*6.6 基于虚拟力场法的无人机集群实时航迹规划

目标及要求：本章主要介绍无人机集群航迹规划技术。要求学生了解航迹规划的概念，经典的无人机航迹规划算法，掌握基于蚁群算法的无人机航迹规划算法。在单个无人机航迹规划概念的基础上，要求学生理解无人机集群航迹规划的概念，重点掌握 Boid 集群运动模型和基于虚拟力场法的无人机集群实时航迹规划算法。

## 第 7 章 无人机集群编队控制和任务分配技术（5 学时）

### 7.1 无人机集群编队队形设计与调整

### \*7.2 无人机集群编队飞行控制策略

### 7.3 基于生物群集行为的无人机集群编队控制

### Δ7.4 无人机集群任务分配模型

### Δ7.5 基于粒子群算法的无人机集群任务分配

目标及要求：本章主要介绍无人机集群编队控制和任务分配技术。要求学生了解无人机集群编队队形设计与调整的基本方法，在学习无人机集群编队飞行控制策略的基础上，掌握基于生物群集行为的无人机集群编队控制算法。要求学生理解无人机集群任务分配模型，掌握基于粒子群算法的无人机集群任务分配方法。

## 第 8 章 课内实验（8 学时，含 6 学时虚拟仿真实验）

### \*8.1 实验一：多旋翼无人机装配与群体协同虚拟仿真实验（6 学时）

#### 环节 1. 多旋翼无人机装配与参数调试（2 学时）

实验方案及作用：登陆课程组自行研发的虚拟仿真在线教学网站，要求学生通过虚拟仿真实验，探究多旋翼无人机装配与参数调试过程。进一步掌握多旋翼无人机组成原理、动力学模型、装配要点及 PID 控制原理，探究实际工程应用需求导向的多旋翼无人机动力装置设计方法，使学生具备根据多旋翼无人机飞行姿态，分析、判断并调节 PID 参数的能力。

## 环节 2. 无人机集群链路预算与组网（2 学时）

实验方案及作用：登陆课程组自行研发的虚拟仿真在线教学网站，要求学生通过虚拟仿真实验，探究无人机集群链路预算与组网原理。进一步掌握无线电传播特性、无线通信系统链路预算方法、信道接入控制方法及自组织时分多址协议原理，探究无人机集群网络无线信号冲突解决方案，使学生具备从协议栈分层的角度开展无人机集群网络设计的能力。

## 环节 3. 无人机集群协同与自主避障（2 学时）

实验方案及作用：登陆课程组自行研发的虚拟仿真在线教学网站，要求学生通过虚拟仿真实验，探究无人机集群协同与自主避障原理。进一步掌握基于 Boid 模型的集群运动原则、基于虚拟力场法的无人机集群拓扑控制和自主避障方法，探究虚拟力场参数对无人机集群性能的影响，使学生具备根据工程实际需求，对无人机集群协同性能进行调整的能力。

## 8.2 实验二：多旋翼无人机集群路由协议验证实验（2 学时）

实施方案及作用：要求学生利用课程组自行研制的多旋翼无人机集群实验系统，在室外环境下，探究动态源路由协议的原理，分析节点动态找路的过程，增强学生对于网络协议在实际系统中实现的理解能力，增强学生的动手操作能力。

### 课程考核形式与要求：

本课程考核的成绩由下列部分组成：

1. 平时成绩（包括作业和课堂表现）占 20%；
2. 课程配套实验（提交实验报告）占 30%
3. 期末考试（闭卷考试）占 50%。各章节大致的分数分配如下：

第 1 章 概述	5%
第 2 章 多旋翼无人机基本原理	5%
第 3 章 无人机集群系统的组成	5%
第 4 章 无人机集群关键技术总述	5%
第 5 章 无人机集群通信与组网技术	10%
第 6 章 无人机集群航迹规划技术	10%
第 7 章 无人机集群编队控制和任务分配技术	10%

课程教授方法说明：

本课程教学难点包括：

- 1、无人机集群通信与组网部分的概念和知识点较为抽象，学生难以深入理解。
- 2、无人机集群涉及到的关键技术包涵多门学科的内容，知识体系较为复杂分散，学生往往智能从局部理解这些技术的原理，而无法从整体上对这些知识点形成完整的知识框架。
- 3、群体智能算法的数学模型较为复杂，要求学生有很高的数学理论基础。
- 4、由于无人机集群实验成本高、空域申请难、实验风险大等一系列因素，相关实验教学必须依托虚拟仿真技术展开。

在授课中采用的应对策略、方法及教学手段包括：

- 1、从自然界中的生物集群现象引入，拉近无人机集群概念与学生日常生活所见之间的距离，激发学生的学习兴趣；
- 2、重视对无人机集群系统的整体框架的介绍，重视构建学生的知识框架，针对部分群体智能算法在某些场合应用的局限性，进行课堂分析讨论，让学生做出自己的判断和评价。突出培养学生掌握问题本质的能力，使其能够做到举一反三；突出培养学生掌握科学分析问题的能力，使其具备基本的科研素质；突出激发学生的创新思维能力，变课堂被动接受为主动思考。
- 3、紧密结合理论授课与课程配套验证实验，通过实验分析使学生对本课程涉及到的方法和协议的细节有进一步的认识和思考。

课程能力培养说明：

《无人机集群技术》课程是跨专业、跨学科、跨能力范畴的交叉融合，能为学生学习后续课程以及从事相关专业的科学研究、工程技术及管理工作提供必备的理论基础。

本课程整体课程知识的掌握有助于学生掌握现代信息基础的重要基础，授课过程中的求证式、启发式的教学方法则有利于充分发挥学生的创造能力。

具体分析如下：

- 1、培养学生理解无人机集群的基本概念，使学生掌握构建无人机集群自主控制的基本方法；
- 2、培养学生针对具体的网络应用场景对群体智能算法改进和涉及的能力。在多目标共存的环境下，启发学生对现有的单目标航迹规划算法进行改进，以适应多目标共存的具体环境；
- 3、培养学生通过数学建模的方法，对无人机集群性能进行定量分析的能力。学习蚁群算法，粒子群算法的理论模型，培养学生将群体智能算法应用于优化问题的分析能力。

先修课程	《无人机设计导论》、《航空航天概论》、《通信网络》（或其他网络技术相关课程）	
使用教材	梁晓龙等著，无人机集群，西北工业大学出版社，2018年9月。	
参考书目与文献	段海滨，邱华鑫著，基于群体智能的无人机集群自主控制，科学出版社，2018年12月	
课程相关主要网站	<a href="http://uavswarm.nuaa.edu.cn">http://uavswarm.nuaa.edu.cn</a>	
课程教学方式	讲课、实验、虚拟仿真实验	
主要适用专业	飞行器设计与工程	信息工程
	自动化	探测制导与控制技术
课程组长意见	教学院长意见	
	(签名):	(签名):
	年 月 日	年 月 日

## 10.申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“国家虚拟仿真实验教学项目”，学校将严格贯彻《教育部高等教育司关于加强国家虚拟仿真实验教学项目持续服务和管理有关工作的通知》（教高司函〔2018〕56号）的要求，承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放，并提供教学服务不少于5年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

（其他需要说明的意见。）

主管校领导（签字）：

（学校公章）

2019年8月22日

