

基于图神经网络的微电网群-无人机集群协同调度教学案例库建设与应用

檀杰¹ (通讯作者) 刘艺多¹ 樊华²

1. 西华大学, 中国·四川 成都 610039

2. 昆仑数智科技有限责任公司, 中国·北京 102206

摘要: 随着低空经济的快速发展, 无人机集群在巡检、物流等领域的应用日益广泛, 其对充电设施的依赖性不断增强。微电网群凭借多能互补、灵活调度的优势, 成为支撑无人机集群持续作业的理想供能载体。为此, 本文构建了一个基于图神经网络的微电网群支撑下的无人机集群供能保障与协同调度教学案例库。案例库包含微电网-无人机耦合系统的图论建模、供能可行性分析、供能需求预测及启发式供能调度四个模块。教学实践表明, 该案例库有效提升了研究生在图论建模、智能算法应用及复杂耦合系统分析方面的能力, 为能源-交通交叉领域的研究生培养提供了可借鉴的案例资源。

关键词: 微电网群; 无人机集群; 案例库; 图神经网络; 图论建模

Development and Application of a Teaching Case Library for Coordinated Dispatch of Microgrid Clusters and Drone Swarms Based on Graph Neural Networks

Tan Jie¹ (Corresponding author), Liu Yiduo¹, Fan Hua²

1. Xihua University, China Sichuan Chengdu 610039

2. Kunlun Digital Technology Co.,Ltd, China Beijing 102206

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy, the application of drone swarms in fields such as inspection and logistics is becoming increasingly widespread, and their reliance on charging infrastructure continues to grow. Leveraging the advantages of multi-energy complementarity and flexible dispatch, microgrid clusters have emerged as an ideal power supply platform to support the continuous operation of drone swarms. To this end, this paper constructs a teaching case repository for power supply assurance and collaborative dispatch of drone swarms supported by microgrid clusters, based on graph neural networks. The case repository comprises four modules: graph-theoretic modeling of microgrid-UAV coupled systems, power supply feasibility analysis, power demand forecasting, and heuristic power supply scheduling. Educational practice has demonstrated that this case repository effectively enhances graduate students' capabilities in graph-theoretic modeling, the application of intelligent algorithms, and the analysis of complex coupled systems, providing valuable case resources for the training of graduate students in the energy-transportation interdisciplinary field.

Keywords: Microgrid clusters; Drone swarms; Case repository; Graph neural networks; Graph theory modeling

0 引言

随着低空经济的发展, 无人机集群已广泛应用于设施巡检、物流配送、农业植保等场景^[1]。然而, 无人机续航能力有限, 对充电设施的依赖性日益增强。微电网群凭借多能互补、灵活调度的优势, 成为支撑无人机集群持续作业的理想供能载体^[2]。无人机集群和微电网群在物理结构上呈现网络耦合特征, 在能量流动上存在动态交互关系, 二者构成了“能源-交通”耦合系统, 如图1所示。

对于研究生课程《电网络分析》, 传统教学方法通常先讲授经典图论理论, 包括关联矩阵、回路矩阵、割集矩

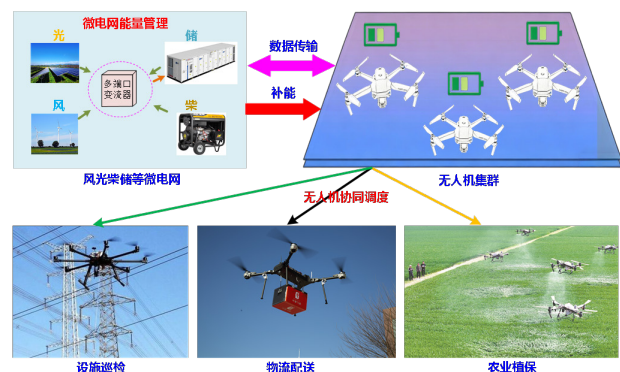


图1 微电网群与无人机集群耦合关系示意图

阵等基本概念, 然后以单一电力网络为例进行图论分析与计算。然而, 该教学方式难以覆盖企业真实场景中的复杂资源分配等问题, 导致学生虽已掌握图论基础知识, 却仍缺乏将图论延伸至图神经网络等前沿工具以应对高维、动态、非线性网络优化问题的能力。此外, 现有教材中缺乏融合新能源、储能、负荷预测等实际因素的综合性案例, 导致学生的工程实践能力与行业需求之间存在明显差距。2015年,《教育部关于加强专业学位研究生案例教学和联合培养基地建设的意见》明确指出, 高校应加强案例教学, 强化专业学位研究生实践能力培养^[9]。因此, 构建面向真实工程场景的高质量教学案例库具有重要的现实意义。

为应对上述教学需求, 本文构建了一个基于图神经网络的微电网群-无人机集群协同调度教学案例库。该案例库从经典图论建模和传统网络流分析入手, 逐步深化至图卷积网络预测及启发式调度, 使学生能够在真实工程问题中掌握从图论建模到智能分析的全链条方法, 从而增强教学内容的先进性与实践性, 培育面向新型电力系统与智慧空域管理的复合型人才。

1 微电网群-无人机集群协同调度教学案例库的建设

该案例库以微电网群与无人机集群协同调度为工程背景, 设计了四个数据互通、逻辑连贯的教学模块。

1.1 模块一: 微电网-无人机耦合系统的图论建模

本模块旨在巩固学生的经典图论知识, 并将其应用于实际耦合系统。给定微电网群拓扑, 包括3个微电网、2个公共连接点、4个无人机充电平台。要求学生首先将系统抽象为有向图, 构建关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵, 并计算拉普拉斯矩阵; 随后采用广度优先搜索算法计算连通分量、节点度及介数中心性, 识别储能节点、充电平台枢纽等关键节点; 最后对比分析并网模式与孤岛模式下的拓扑特征变化。通过本模块练习, 学生能够熟练掌握图论建模工具, 并理解拓扑结构对系统供能可靠性的影响。

1.2 模块二: 基于网络流的供能可行性分析

本模块引入网络流理论, 解决给定充电需求下系统能否满足供能的实际问题。给定各节点的功率供应与需求及光伏波动数据。要求学生建立网络流守恒方程, 应用最大流与最小割定理, 求解2台无人机同时充电的供能可行性, 若供能不足则定位割集支路; 同时分析储能节点如何通过充放电调节来维持供需平衡, 并计算所需的最小储能容量。该模块帮助学生将图论工具应用于资源分配与瓶颈分析, 培养其工程优化思维。

1.3 模块三: 基于图卷积网络的供能需求预测

本模块是案例库的前沿核心, 引导学生从经典图论走向图神经网络。根据模块一构建的图结构, 给定历史充电需求数据及节点特征。要求学生理解图卷积网络如何利用拉普拉斯矩阵进行邻域特征聚合^[4]; 在此基础上, 搭建双层图卷积网络模型, 输入节点特征, 输出充电需求概率^[5]; 同时对比标准多层感知机模型, 验证图结构信息对预测精度的提升效果。该模块通过对比分析, 使学生深刻体会到图结构信息对预测任务的重要性。

1.4 模块四: 基于规则的启发式供能调度

本模块将预测结果应用于调度决策, 实现供能调度闭环。给定无人机剩余电量、任务优先级等信息, 要求学生制定无人机充电优先级规则, 设计微电网群功率分配方案, 并在半实物仿真平台上回放调度效果, 与固定优先级规则进行比较分析。学生通过仿真对比, 能够量化评估不同调度策略在供电可靠性、经济性及无人机任务完成率方面的差异, 使学生深刻体会到合理调度策略对系统性能的显著影响。

2 微电网群-无人机集群协同调度教学案例库的教学实践

2.1 课程目标的调整

在引入案例库之前,《电网络分析》第四章的课程目标主要集中于图论基本概念与经典算法的掌握。案例库建成后, 该章课程目标涵盖知识、能力、素养三个层面。其中, 知识层面要求学生掌握图论建模、网络流分析及图卷积网络的基本原理; 能力层面要求学生能够运用图神经网络等工具解决微电网-无人机耦合系统中的供能预测与调度问题; 素养层面要求学生建立能源-交通耦合系统的系统观、培养跨学科创新意识与团队协作能力。

2.2 教学方法的改进

针对传统教学中理论与实践脱节、学生参与度不足等问题, 本案例从教学手段、教学组织与评价方式三个层面进行改进。首先, 建立RT-LAB半实物仿真平台, 将学生设计的模块四调度算法部署至真实控制器中, 与模拟的微电网群和无人机模型进行闭环联调, 使学生能够直观感受调度算法的实际运行效果。其次, 采用小组合作的方式, 将学生分为4-5人小组, 依次完成各模块任务, 形成完整的技术链条, 模拟真实工程研发中的团队协作。最后, 构建多元化评价体系^[8], 将各模块任务的分值及团队合作表现纳入实践成绩, 与期末卷面成绩相结合, 既考察学生对知识点的掌握程度, 也检验其迁移应用与团队协作的能力。

3 教学效果与反馈

目前,共收集有效调查问卷 180 份,调查结果显示,92.6% 的学生对案例库的整体设计表示满意,其中“案例内容真实”的认可度最高,达到 96.7%。通过成绩对比分析,使用案例库后学生的期末综合成绩平均分从 82.3 分提升至 88.7 分,其中基于图论的网络分析题得分率从 68% 提升至 84%。

4 结语

本文围绕微电网群支撑下的无人机集群供能保障与协同调度这一实际工程场景,构建了涵盖图论建模、网络流分析、图卷积网络预测及启发式调度的递进式教学案例库。该案例库已应用于《电网络分析》研究生课程中,教学实践表明该案例有效提升了学生图论应用能力、编程实践能力及跨学科系统思维能力。

案例库仍需持续建设,当前案例数据由仿真生成,后续将引入企业实测数据以增强真实性;半实物仿真平台目前仅支持离线回放,下一步将开发在线实时调度接口,使学生能够体验闭环控制。

参考文献:

[1] 陈林, 缪志强, 王祥科等. 自主飞行器技术及其在低空经济中的应用综述[J]. 机器人, 2025, 47(3): 470-496.

[2] 楼冠男, 王雷, 林达等. 微电网群协同运行关键技术综述[J]. 浙江电力, 2025, 44(6): 3-19.

[3] 教育部. 关于加强专业学位研究生案例教学和联合培养基地建设的意见(教研[2015]1号)[EB/OL]. 2015.

[4] Kipf T N, Welling M. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Learning Representations (ICLR). Toulon, France, 2017.

[5] 孙伟, 朱世睿, 杨建平. 基于图卷积网络的微电网拓扑辨识[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 71-77.

[6] 陈玉林, 张立珍, 王庆宇等. 基于 OBE 理论的地方高校《电网络理论》课程的教学改革与实践[J]. 教育现代化, 2019(95): 26-28.

[7] 王维, 李峰, 李天然. 电气类专业虚拟教研室工程案例库建设探索[J]. 中国电力教育, 2024(7): 73-74.

[8] 余艳梅, 赖华, 杨晓庆. 电子类研究生工程伦理课程案例库建设及教学探索[J]. 教育与研究, 2026, 8(1).

作者简介: 通讯作者: 檀杰(1991.08-), 男, 汉族, 山西省阳泉市, 讲师, 工学博士, 研究方向: 微传感器、光电化学传感器以及智能传感器等。