

# 北斗导航 + GPS 导航的油电混合动力无人机

周琛知

中国广电湖南网络股份有限公司, 湖南 长沙 410003

DOI:10.61369/ME.2026020006

**摘 要 :** 针对纯电动无人机续航短、单一卫星导航可靠性不足的痛点, 结合 2026 年中国商业航天卫星互联网规模化组网的背景, 提出一种融合北斗三号 (BDS-3) 与 GPS 的油电混合动力无人机系统架构。系统以增程式油电混合动力为核心, 构建“北斗 +GPS”双模高精度导航与容错控制体系, 解决长航时能源供给与复杂环境下的导航连续性问题。通过 Doppler 平滑伪距 (DSC) 与载波相位联合的 PPK/RTK 混合定位方案, 实现水平 3-5 cm、垂直 5-8 cm 的动态定位精度, 卫星可用性提升至 99.99%。同时设计双层模糊能量管理策略, 使发动机工作于高效区, 续航较纯电动方案提升 200% 以上。外场试验涵盖城市编队、电力巡检、山区物流等场景, 结果表明, 该系统在信号遮挡、电磁干扰等条件下, 导航连续性与动力可靠性显著优于单系统方案, 可满足低空经济规模化应用的核心需求。

**关 键 词 :** 北斗导航; GPS; 油电混合动力; 增程式电推进; 双模融合定位; 能量管理

## Hybrid Electric Unmanned Aerial Vehicle with BeiDou Navigation + GPS Navigation

Zhou Chenzhi

China Radio and Television Hunan Network Co., Ltd. Changsha, Hunan 410003

**Abstract :** Addressing the pain points of short endurance and insufficient reliability of single satellite navigation in pure electric drones, and in the context of China's large-scale networking of commercial space satellite internet by 2026, a hybrid oil-electric drone system architecture integrating BeiDou-3 (BDS-3) and GPS is proposed. The system, with extended-range oil-electric hybrid power as its core, constructs a "BeiDou + GPS" dual-mode high-precision navigation and fault-tolerant control system to solve the issues of long-duration energy supply and navigation continuity in complex environments. Through a PPK/RTK hybrid positioning scheme combining Doppler-smoothed pseudorange (DSC) and carrier phase, it achieves dynamic positioning accuracy of 3-5 cm horizontally and 5-8 cm vertically, with satellite availability improved to 99.99%. Additionally, a dual-layer fuzzy energy management strategy is designed to operate the engine in the high-efficiency zone, increasing endurance by over 200% compared to pure electric solutions. Field tests covering urban formations, power line inspections, and mountain logistics scenarios demonstrate that the system significantly outperforms single-system solutions in navigation continuity and power reliability under conditions such as signal occlusion and electromagnetic interference, meeting the core requirements for large-scale applications in low-altitude economics.

**Keywords :** BeiDou Navigation; GPS; hybrid fuel-electric system; extended-range electric propulsion; dual-mode fusion positioning; energy management

### 引言

低空经济作为新引擎, 2023 年市场规模已破 5000 亿。无人机是核心载体, 但纯电动方案续航仅 30-60 分钟, 且单一卫星导航在复杂环境下可靠性不足, 难以满足长航时作业与高精度编队需求。2026 年商业航天爆发, 低轨卫星互联网与北斗三号组网, 为无人机提供密集导航信号。结合北斗 +GPS 双模融合与增程式油电混合动力, 可显著提升定位精度与续航, 破解行业痛点。在卫星导航融合领域, 高晓等提出的 GPS/BDS 组合 PPK 定位, 精度可达厘米级; 中国移动 5G+ 北斗网已服务 12 万架次无人机, 动态定位稳定性达 99.99%。但现有研究多聚焦静态场景, 对高机动编队等场景的容错控制研究不足。混合动力方面, 增程式方案使续航提升显著, 如氢-锂混合系统续航超 2 小时。然而, 现有系统多未与双模导航深度耦合, 缺乏基于导航状态的动力自适应调控策略。本文提出一种北斗 +GPS 双模导航油电混合无人机, 实现导航与动力深度融合。其创新在于: 采用联邦强跟踪滤波与 PPK/RTK 混合定位, 确保高机动场景下的精度与实时性; 设计双层模糊能量管理策略, 使动力与导航需求动态匹配。经多场景验证, 可为低空经济规模化提供技术支撑。

作者简介: 周琛知 (1974.08—), 男, 汉族, 湖南长沙人, 工商管理硕士, 工程师, 从事自然语言处理、大模型、智能情报分析与数据挖掘的工作和研究。

一、系统总体设计

（一）设计目标与性能指标

基于低空经济典型应用场景，确定系统核心设计目标：长航时续航、厘米级定位精度、高导航容错性、动力系统高效可靠。具体性能指标如表 1 所示。

表 1 无人机系统核心性能指标

| 指标类别 | 具体指标   | 备注                               |
|------|--------|----------------------------------|
| 导航性能 | 动态定位精度 | 水平 3-5 cm，垂直 5-8 cm（RTK 模式）      |
|      | 卫星可用性  | ≥ 99.99%，双模融合较单系统提升 30%          |
|      | 容错能力   | 单系统失效时，定位精度不低于 0.5 m，续航 ≥ 10 min |
| 动力性能 | 续航时间   | 巡航模式 ≥ 4 h，编队表演模式 ≥ 2 h          |
|      | 动力架构   | 增程式油电混合动力，串联式构型                  |
|      | 能量效率   | 巡航工况燃油消耗率 ≤ 280 g/(kW · h)       |
| 平台性能 | 最大起飞重量 | 40 kg，有效载荷 7 kg                  |
|      | 巡航速度   | 60 km/h，最大速度 120 km/h            |
| 安全性能 | 应急保障   | 自动降落伞、箱式起降，发动机停机时电池续航 ≥ 15 min   |

（二）系统总体架构

系统采用“导航-动力-控制”三位一体的集成架构，核心由双模导航子系统、增程式油电动力子系统、飞控与容错控制子系统三部分组成。双模导航子系统负责位置、速度、时间（PVT）信息获取，由 BDS-3/GPS 双模接收机、RTK 基准站、IMU 惯性测量单元组成，通过融合算法输出高精度、高可靠的导航数据。增程式油电动力子系统作为能量核心，包括航空活塞发动机、ISG 启动/发电一体电机、锂电池组、电机控制器与能量管理单元（EMU），实现燃油化学能到电能的转换与智能调度。飞控与容错控制子系统基于导航状态与动力参数，实现编队协同、路径规划与应急容错，保障飞行安全。

二、双模导航融合技术

（一）导航硬件选型与集成

该无人机系统采用小型化 BDS-3/GPS 双模接收机，支持双频观测，灵敏度 ≤ -165dBm，并配备多阵元抗干扰天线（增益 ≥ 5dBi，重 ≤ 150g），有效抑制电磁干扰与多路径效应。其核心采用“RTK 为主、PPK 为辅”的混合定位架构：在城市编队、电力巡检等场景启用 RTK，实现厘米级实时定位；在山区物流等无基准站场景启用 PPK，通过事后解算保证精度。系统还集成了 MEMS IMU，在卫星信号失锁时可实现 10 秒内误差 ≤ 0.5 米的短时定位续接，确保了复杂环境下导航的高可靠性与连续性。

（二）双模融合算法设计

为提升伪距观测精度，采用 Doppler 平滑伪距算法，公式如下 
$$\bar{P}_k = \omega P_k + (1 - \omega) \left[ \bar{P}_{k-1} + \lambda \int_{t_{k-1}}^{t_k} D(t) dt \right]$$
 其中， $\bar{P}_k$  为第  $k$  历元的平滑伪距， $P_k$  为原始伪距， $\omega$  为平滑因子（取历元倒数）， $\lambda$  为载波波长， $D(t)$  为 Doppler 观测值。该算法使伪距精度从米级提升至分米级，加速载波相位模糊度收敛。

系统采用联邦强跟踪滤波（FSTF）融合 BDS 与 GPS 数据：两个子滤波器分别处理双系统信号，主滤波器通过时变渐消因子实现全局融合与容错，有效应对机动状态下的模型失配。当任一子系统卫星数 < 4 颗或 PDOP > 6 时，自动切换至单系统 +IMU 模式，确保持续导航。仿真验证表明，双模融合下平均可见卫星 25.6 颗，PDOP 均值 1.1，较单系统提升 40%；在遮挡干扰下仍保持厘米级精度，而单系统出现米级误差甚至失锁。

系统采用联邦强跟踪滤波（FSTF）融合 BDS 与 GPS 数据：两个子滤波器分别处理双系统信号，主滤波器通过时变渐消因子实现全局融合与容错，有效应对机动状态下的模型失配。当任一子系统卫星数 < 4 颗或 PDOP > 6 时，自动切换至单系统 +IMU 模式，确保持续导航。仿真验证表明，双模融合下平均可见卫星 25.6 颗，PDOP 均值 1.1，较单系统提升 40%；在遮挡干扰下仍保持厘米级精度，而单系统出现米级误差甚至失锁。

三、增程式油电混合动力系统设计

（一）动力系统构型与组成

该系统采用串联式增程式电推进构型，发动机仅驱动 ISG 电机发电，与旋翼实现动力解耦，兼顾燃油高能量密度与电池快速响应优势。核心部件包括：额定功率 15kW 的二冲程发动机、峰值功率 20kW 且响应 ≤ 10ms 的 ISG 电机、能量密度 400Wh/kg 的超低温锂电池（-40℃放电保持率 ≥ 80%），以及采用 SiC 器件效率 ≥ 98% 的电机控制器与能量管理单元（EMU）。该构型通过“燃油发电+电池储能”的双能源耦合，为长航时作业提供了高效稳定的动力基础。

（二）动力系统匹配与优化

该系统采用功率匹配与热管理协同优化的设计思路：根据飞行剖面，将发动机额定功率（15kW）设定略高于巡航功率（10kW），确保富余功率为电池充电；电池峰值功率（20kW）则满足起飞、爬升等短时高负载需求。通过仿真优化，确定发动机与 ISG 电机功率配比为 1.25:1，电池容量与燃油能量配比为 1:5，兼顾长续航与应急动力。热管理方面，采用微米级喷嘴精准冷却电机绕组至 105℃ 以内，发动机结合风冷与相变微胶囊蓄热技术，瞬时过载时热点温度降低 23℃。机身采用一体化成型碳纤维材料，空机仅 19kg，有效载荷 7kg。在此基础上，设计基于导航状态与飞行阶段的双层模糊能量管理策略，通过上层能源与下层发动机协同调控，确保发动机始终运行于高效区，同时动态匹配导航系统的可靠性需求，实现动力与导航的深度融合。

1. 上层、下层发动机管理模糊控制

该能量管理策略采用双层模糊控制架构，实现动力与导航的深度协同。上层根据负载功率（巡航 < 11kW/高负载 ≥ 11kW）与电池 SOC（分低、中、高、满四档）制定 8 条规则，动态设定 ISG 电机目标发电功率，例如高负载且 SOC > 90% 时，ISG 输出 9kW 且电池不放电；巡航且 SOC 中位时，ISG 输出 10kW 为电池充电。下层将目标功率转换为发动机转速，以目标与实际转速差值及冷却液温度为输入，通过 Mamdani 模型模糊控制节气门开度，确保发动机平稳运行于高效区。此外，策略具备导航自适应能力：当信号遮挡切换至单系统 +IMU 模式时，EMU 自动降功率保电以延长容错时间；高机动编队场景下，则控制电池持续峰值输出、发动机基础发电，兼顾动力响应与导航可靠性。

## 四、飞控与容错控制集成

该系统采用主从式编队架构，以双模导航与5G+北斗通信为技术核心，实现厘米级高精度协同控制。主无人机负责全局路径规划与编队指令下发，从无人机通过低延迟通信网络实时接收指令，并融合视觉避障技术，将编队间距精准控制在0.5米以内，即使在高密度动态编队中也能有效避免碰撞风险，支持“打咏春拳”等复杂3D空中电影与动态图案表演，极大拓展了无人机的商业应用场景。

安全容错机制构建了三重保障体系：导航失效时，系统毫秒级自动切换至“单系统+IMU”模式，并同步下发编队收缩指令，降低碰撞风险；若双模导航完全失效，则立即启动惯性导航应急返航程序，确保飞行器安全归航。动力容错方面，发动机突发停机时，电池可单独供电续航15分钟以上，并自动触发降落伞缓降；电池低电量时，发动机满功率发电优先保障安全降落。地面监控平台通过5G网络实时回传无人机状态数据，支持远程干预与箱式起降技术，实现从飞行控制到回收的全流程精准管理，为低空经济规模化应用提供了坚实的安全保障。

## 五、外场试验与结果分析

为全面验证系统性能，本研究选取城市编队表演、电力巡检和山区应急物流三个典型场景开展外场试验。试验配置包括10架试验无人机、3座地面基准站、5G通信基站、地面监控平台及第三方定位精度测试仪、燃油消耗仪等设备。其中，城市编队表演试验在城市广场进行，周边高层楼宇密集、电磁干扰较强，组织100架无人机组成“北斗卫星”“无人机表演”等2D图案及“打咏春拳”3D动态效果，重点测试导航精度、编队稳定性与信号连续性。试验结果表明，该系统在复杂城市环境下表现出优异的抗干扰能力与高精度定位性能，为低空经济规模化应用提供了可靠的技术验证支撑。

在湖北复杂地形开展的电力巡检试验中，无人机沿220kV输电线路完成自主巡检与杆塔缺陷识别，RTK模式下定位精度达水平3.5cm、垂直5.2cm，杆塔定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ ；在甘肃积石山地震灾区无地面基准站、信号弱的条件下，无人机携带5kg医疗物资完成跨山区配送，PPK事后解算定位精度达水平0.8cm、垂直1.1cm，验证了系统在无基站环境下的高精度定位能力与复杂地形

### 参考文献

- [1] 刘建业, 曾庆化, 赵伟. 卫星导航与惯性导航组合原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [2] 高晓, 库新勃, 白皓, 等. 基于GPS/BDS组合系统实现航测无人机动态定位 [J]. 全球定位系统, 2019, 44 (3): 101–107. DOI:10.13442/j.gnss.1008-9268.2019.03.016.
- [3] 中国移动上海产业研究院. 5G+北斗高精度导航网赋能低空经济 [R]. 上海: 中国移动上海产业研究院, 2024.
- [4] 陈忠伟, 张盟, 吴私. 氢-锂混合动力系统在工业无人机中的应用研究 [J]. 电源技术, 2025, 49 (8): 987–992.
- [5] 湖南泰德航空. 增程式电推进系统在低空飞行器中的技术突破 [R]. 长沙: 湖南泰德航空, 2026.
- [6] 北斗卫星导航系统官网. 电力北斗厘米级定位赋能无人机巡检 [EB/OL]. (2023-09-12).
- [7] 央视网. 5G+北斗广域无缝融合定位技术助力亚冬会安防 [EB/OL]. (2025-02-12).
- [8] 天目山实验室. 全球首款百公里级氢动力多旋翼无人机研发报告 [R]. 杭州: 天目山实验室, 2024.
- [9] 中国电力科学研究院. 北斗无人机复杂环境下作业性能检测体系 [R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2024.
- [10] 蓝箭航天. 朱雀三号可回收火箭技术进展 [R]. 湖州: 蓝箭航天, 2026.

适应性。

外场试验验证了双模导航油电混合动力无人机的核心性能。导航方面，城市编队场景双模融合定位精度达水平4.2cm、垂直6.8cm，编队间距误差 $\leq 0.3\text{m}$ 且全程无信号丢失，而单GPS出现三次失锁；电力巡检RTK模式精度达3.5cm/5.2cm，杆塔定位误差 $\leq 0.1\text{m}$ ；山区物流PPK模式精度达0.8cm/1.1cm，满足精准投递。动力方面，巡航续航4.2小时，较纯电动提升210%；高机动模式下续航2.3小时；发动机油耗275g/(kW·h)处于高效区，电池SOC维持在30%–80%健康区间。容错方面，GPS失效时自动切换至BDS+IMU模式，定位精度0.3m并安全收缩编队；发动机停机后电池单独供电18分钟保障返航。结果表明，系统在导航精度、续航与容错方面达到设计指标，可适应低空经济多场景规模化应用需求。

## 六、结论与展望

本文提出并实现了一种融合北斗与GPS的油电混合动力无人机系统，通过双模导航融合算法与增程式动力系统的深度集成，解决了纯电动无人机续航短、单一导航可靠性不足的核心问题。主要结论如下：

采用Doppler平滑伪距与联邦强跟踪滤波的双模融合方案，实现了水平3–5cm、垂直5–8cm的动态定位精度，卫星可用性提升至99.99%，复杂环境下导航连续性显著增强；串联式增程式油电动力架构与双层模糊能量管理策略，使无人机续航较纯电动方案提升200%以上，发动机稳定运行于高效区，能量效率最优；导航–动力–控制三位一体的容错机制，保障了无人机在单系统失效、发动机停机等极端情况下的飞行安全，满足商业表演、工业巡检等场景的高可靠性需求。随着2026年中国低轨卫星互联网的规模化组网，无人机导航精度与覆盖范围将进一步提升。未来研究方向包括：（1）融合北斗短报文通信，实现无地面网络的远程控制；（2）引入氢能增程式动力，降低碳排放，实现绿色飞行；（3）结合AI大模型，实现编队表演创意的自动生成与动力系统的自适应优化，推动无人机技术向更智能、更高效的方向发展。