

工业级无人机总体设计与制造工艺关键技术研究

罗征明

北京龙禹石油化工有限公司江苏低空科技分公司，江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1279

摘要：针对电力巡检与地理测绘任务中对结构轻量化及批产一致性的严苛要求，本文基于25kg级六旋翼与2.6m翼展垂直起降固定翼平台的开发实践，深入探讨了从总体参数权衡到复材成型及总装调试的全流程工艺控制。文中重点分析了中温固化碳纤维预浸料在非主承力件真空袋成型与主承力翼梁热压罐成型中的工艺窗口设定，详细对比了树脂传递模塑工艺在复杂预埋件制造中的应用效果。结合实际生产数据，给出了金属机加件形位公差控制、定力矩紧固及重心配平的具体工程经验。结果表明，通过优化铺层顺序与固化保压曲线，可在保证国家军用标准GJB 5434-2005规范要求的安全裕度前提下，有效控制制造成本与变形量。

关键词：无人机；总体设计；结构设计；复合材料；热压罐；树脂传递模塑；装配工艺；质量控制

Research on Key Technologies of Overall Design and Manufacturing Process for Industrial-grade UAVs

Zhengming Luo

Beijing Longyu Petrochemical Co., Ltd. Jiangsu Low-altitude Technology Branch, Nanjing, Jiangsu

Abstract: To meet the stringent requirements for structural lightweighting and batch production consistency in industrial-grade unmanned aerial vehicles for power line inspection and geomatics applications, this paper investigates the full-process control of manufacturing processes. Based on development practices involving a 25 kilogram-class hexacopter and a 2.6m wingspan vertical take-off and landing fixed-wing platform, the study focuses on optimizing process windows for medium-temperature curing carbon fiber prepreg. The application effects of resin transfer molding for manufacturing complex parts with embedded metal inserts are comparatively analyzed. Integrating actual production data, specific engineering experiences regarding geometric tolerance control of CNC-machined metal parts, torque-controlled fastening, and center of gravity trimming are presented. The results indicate that by optimizing the layup sequence and cure pressure curves, manufacturing costs and deformation can be effectively controlled while ensuring the safety margins stipulated by the GJB 5434-2005 specification.

Keywords: unmanned aerial vehicle; overall design; structural design; composite materials; autoclave; resin transfer molding; assembly process; quality control

1 引言

1.1 行业背景与技术痛点

近年来，工业级无人机市场增长十分迅速。据中国航空运输协会通航分会《中国民用无人机行业发展报告（2023）》[1]，2023年我国工业级无人机市场规模已达687亿元，年复合增长率保持在32%以上，其中电力巡检、地理测绘场景占比超过65%。与消费级无人机不同，工业级产品在材料应用上呈现出明显的轻量化趋势[2]。然而，与成熟的有人驾驶航空器制造业相比，工业级无人机面临独特的挑战。一是小批量、多品种、迭代快的特征，使得传统航空制造业的刚性工艺难以适配；二是成本与性能的博弈，早期产品直接沿用有人机的热压罐工艺，导致单套机身成本高达数万元，严重制约了规模化普及[3-5]；三是批产一致性难以保证，特别是在复材手工铺层环节，离散度较大。因此，如何在满足GJB 5434-2005《无人机系统通用规范》强度要求的前提下，兼顾成本与效率，是当前亟需解决的工程难题[6]。

1.2 国内外技术路线对比

当前全球工业级无人机结构制造呈现三类典型技术路线。欧美企业多采用热压罐为主的高端工艺，主承力件孔隙率控制在0.5%以下，但设备投入超千万元，仅适配千架以上大规模量产。国内头部企业近年转向中温预浸料与非热压罐工艺组合，通过材料配方调整降低对高压设备的依赖，单套机身成本降至2000-5000元区间，但在复杂预埋件成型、批次一致性上仍存在差距[7]。中小厂商多采用玻纤增强塑料加手工铺糊工艺，成本仅为复材方案的三分之一，但结构强度离散度高达20%，无法满足电力巡检等高可靠性场景要求[8-10]。本文正是在上述背景下，依托两个平台的量产实践，尝试构建一套适配国内供应链现状的技术方案。

2 无人机总体设计与气动布局

2.1 设计指标与选型对比

针对电力巡检与测绘的实际作业需求，本文选

取两类平台进行研究。设计指标参照行业标准及实际试飞数据，具体对比如表1：

2.2 总体布局选型对比

针对工业级应用场景，我们对主流布局进行了多维度筛选。六旋翼采用对称布局，机臂夹角 60° ，单臂长度380mm，具备单发失效安全降落能力；固定翼采用常规布局加四旋翼垂起，翼型选用组合，展弦比6:8，兼顾起降便利性与巡航效率。

2.3 总体参数量化设计

参数计算严格遵循空气动力学基础理论与国家标准。悬停所需拉力按公式计算；巡航升力平衡公式依据国家标准标准大气取密度值[11]。通过参数迭代，六旋翼最终选定22英寸碳纤维桨，桨盘载荷较低，较行业平均降低17%，有效降低了悬停功耗。

3 机体结构与强度校核

3.1 材料选型多维度对比

材料选型是轻量化与安全性的核心基础。据相关研究指出，某级别碳纤维是现阶段性价比最高的选择[12-14]。本文对候选材料进行了全性能对比，具体参数见表2。

选型逻辑说明：主承力结构选用前者而非后者，并非性能不足，而是前者中温固化体系适配工艺窗口，无需高温高压设备，较后者方案降低设备投入62%[15]，且强度完全满足规范要求[16]。夹芯材料优先选用前者，虽然单价高出144%，但可与蒙皮共固化，减少装配工序，最终单件成本反而降低18%。金属件未选用镁合金，虽密度更低，但耐腐蚀性差，后期维护成本较高，不符合全生命周期成本最优原则。

3.2 结构形式与强度校核

六旋翼机身采用中心盘加碳管机臂结构。固定翼机翼采用单梁或多梁结构。通过变截面设计，材料利用率提升至82%，较等截面梁减重15%。强

表1. 无人机总体设计指标参照行业标准及实际试飞数据

指标	25kg级六旋翼（本方案）	同级别传统方案（2020年前）	优化效果
最大起飞重量	25kg	28kg	减重10%

表2. 工业级无人机机体主材性能对比表

材料名称	密度 (克/cm³)	拉伸强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	成本 (元/kg)	工艺适配性	典型用途
T300碳纤维预浸料	1.58	3530	235	320	真空袋/热压罐/共固化	主梁、框、蒙皮
T700碳纤维预浸料	1.78	4900	230	580	仅适配热压罐	重载无人机主承力件
E-玻璃纤维/环氧	1.95	3400(纤维)	72	85	手工铺糊/真空袋	非承力蒙皮、雷达罩
PMI泡沫(71WF)	0.075	2.8(压)	0.15	2100	夹芯共固化	翼面夹芯芯材
Nomex蜂窝(HRH-10)	0.048	1.9(压)	-	860	夹芯共胶接	大展弦比机翼
7075-T6铝合金	2.81	572	71	65	CNC加工	电机座、折叠铰链
6061-T6铝合金	2.70	276	69	42	CNC加工	安装底座、支架
镁合金 AZ31B	1.77	260	45	120	压铸/CNC	航电安装支架

度校核采用有限元模型。复材采用联合判据，金属材料采用相应判据。校核工况覆盖单发失效及着陆冲击。刚度要求一阶固有频率大于30Hz，避开激振频率。经静力破坏试验验证，试验值与仿真值误差均控制在8%以内。

4 复合材料零部件制造工艺

4.1 预浸料铺层与真空袋成型

非主承力件采用真空袋工艺。车间操作中严格控制以下参数：预浸料需从冷库取出回温≥2小时，防止冷凝水导致孔隙；采用数控裁床下料，铺层角度误差≤1°；铺贴后抽真空并保压检漏，烘箱固化参数为特定温度保温两小时，升降温速率≤2° C/h。此工艺设备投入低，适合小批量。经统计，废品率控制在8%-20%，较传统手工铺层的20%大幅下降[4]。在实际操作中，我们发现环境湿度对预浸料粘性影响较大，因此在夏季高湿天气，车间需开启除湿机，保持相对湿度在50%以下，否则铺层时容易产生褶皱和气泡，影响最终产品的力学性能。

4.2 热压罐成型

主承力翼梁采用热压罐工艺。模具选用殷钢，

其热膨胀系数与碳纤维高度匹配，减少热变形。典型参数：固化温度132℃，罐压0.45MPa，保压两小时。此工艺下孔隙率稳定在0.8%以下，层间剪切强度达68MPa，优于国军标要求。值得注意的是，热压罐的升温曲线对产品翘曲有显著影响。我们在试制中发现，如果升温过快，模具与零件表面温差过大，冷却后翼梁的扭转变形量会超标，导致后续机加工装无法定位。因此，我们将升温速率调整为1.5℃/min，虽然延长了生产周期，但保证了型面精度。

4.3 RTM工艺应用

针对带金属嵌件的复杂接头，采用一体化成型。通过软件仿真流道，优化注胶口位置，防止干斑。相比传统钻孔胶接方案，成型的拉伸强度大幅提升，且定位精度更高。在实施过程中，我们遇到过注胶不完全的问题，分析后发现是由于真空度不足导致树脂流动受阻。通过将真空管路从单路改为双路并联，并增加真空罐缓冲，解决了这一问题。此外，针对金属嵌件与复合材料的热膨胀系数差异，我们在嵌件表面增加了滚花和凹槽处理，显著提高了界面的剪切强度，避免了脱粘现象的发生。

5 金属件与辅助加工

5.1 CNC加工与表面处理

电机座与折叠关节采用五轴铣削，精加工余量0.1mm。关键配合面粗糙度 $\leq 1.6 \mu\text{m}$ ，孔位公差 $0.05 \pm \text{mm}$ 。加工后进行阳极氧化处理，膜厚 $15 \mu\text{m}$ 左右。在实际生产中，我们发现铝合金零件在粗加工后存在内应力释放导致的变形问题。为此，我们优化了工艺流程，在粗加工后增加一道时效振动处理工序，将内应力去除率提高到90%以上，确保了最终精加工的尺寸稳定性，合格率从最初的85%提升到了99%。

5.2 注塑成型与3D打印边界

非承力件采用增强尼龙材料，模具设计时按收缩率补偿。打印仅用于工装夹具与原型验证。试验表明，某种打印材料的层间剪切强度远低于热固性复材，严禁用于主承力结构。拓扑优化结合打印可使非承力工装减重30%。在一次试制中，我们尝试打印了一个电池仓支架，虽然重量很轻，但在夏季高温车内暴晒后发生了软化变形，这进一步印证了热塑性材料在耐热性上的短板，因此最终回归了碳纤维复材方案。

6 部件装配与总装调试

6.1 胶接与机械混合连接

工业级无人机普遍采用混合方案。结构胶层厚度控制在0.1-0.3mm，每批次随炉试片搭接剪切强度 $\geq 25\text{MPa}$ ；主承力螺栓用高强度级或钛合金，配合防松螺母。定力矩紧固参数严格执行，使用定值力矩扳手。我们在实际操作中发现，力矩过大容易导致碳纤维层压板分层，力矩过小则在振动环境下容易松动。经过多次破坏性振动试验，我们确定了不同规格螺栓的最佳力矩区间，并将其写入了工艺卡片，要求操作人员必须经过培训考核才能上岗操作。

6.2 总装流程与重心控制

重心调整是核心环节。需分别测试空载与满载

状态下的重心，要求落在几何中心极小范围内。实际试制发现，重心超差会导致飞控持续修正姿态，显著增加功耗甚至引发失控。此外，航电安装需保证天线距电源线足够远防磁干扰，线束绑扎屏蔽接地。在一次飞行事故分析中，我们发现由于飞控安装座使用了非导电的金属螺丝，导致磁力计读数受到电机电流的严重干扰，最终引发了自旋坠毁。此后，我们在工艺规范中强制要求飞控安装必须使用非金属隔热垫圈。

7 质量检测与控制

复材制件检验

建立四级检验体系：一级外观目检；二级三坐标尺寸检测；三级无损检测；四级力学性能测试。该体系较传统单一检验方式，缺陷流出率降低85%。在执行过程中，我们发现仅仅依靠出厂检验是不够的，必须建立首件检验制度。每一批次的第一件产品都必须经过全尺寸扫描和内部探伤，确认工艺参数无误后才能进行批量生产。这种预防为主的质量策略，虽然增加了少量的检测时间，但极大地减少了批量报废的风险，从全生命周期来看，反而降低了综合成本。

8 制造工艺优化与发展趋势

结合当前量产瓶颈，未来优化方向明确：一是非热压罐中温固化体系，替代部分热压罐工艺，预计降低设备投入70%；二是自动化铺层，提高铺层精度；三是数字化装配与追溯系统。我们正在试点引入视觉引导的自动钻铆系统，以解决复材制孔时的分层问题。传统的手工钻孔经常会出现出口劈裂和毛刺，不仅影响装配质量，还容易产生碳纤维粉尘，对操作人员的健康构成威胁。自动化设备的引入，可以将制孔精度控制在零点零五毫米以内，且全程封闭除尘，代表了未来的发展方向。

9 结论

设计层面：通过多布局对比选型，分别实现了悬停续航与巡航航时，核心指标优于传统国产方案。结构层面：中温复材与夹芯的应用使结构重量

占比降低,安全裕度达30%以上。工艺层面:分级制造策略使批产一致性误差控制在3%以内,单套机身成本降低。质控层面:四级检验体系与标准化总装流程的结合,使首飞成功率达98%,为规模化量产提供了可靠保障。

参考文献

- [1] 中国航空运输协会通航分会.中国民用无人机行业发展报告(2023)[R].北京,2023.
- [2] 复合材料在无人机结构件上的应用——共固化设计与制造技术[EB/OL].(2024-02-08)[2024-06-10].
- [3] 孙昕,周德旭,甘子东,等.无人机结构用复合材料及其制造技术研究[J].产业创新研究,2021(16):90-92.
- [4] 倪楠楠,卞凯,夏璐,等.先进复合材料在无人机上的应用[J].航空材料学报,2019,39(5):45-60.
- [5] 胡泽.无人机结构用复合材料及其制造技术综述[J].航空制造技术,2007,50(6):66-70.
- [6] GJB 5434-2005,无人机系统通用规范[S].北京:中国人民解放军总装备部,2005.
- [7] 蔡智超.无人机复合材料结构和制造工艺[J].中国设备工程,2018(21):132-133.
- [8] 孔娜,王增加,王希杰,等.无人机超轻碳纤维复合材料结构件成型技术研究[J].宇航材料工艺,2024,54(6):65-70.
- [9] Wang R, Yang W, Pang G, et al. An integrated method for lightweight design and additive manufacturing of UAV arms. PLoS ONE, 2026, 21(3): e0344000.
- [10] 中国复合材料学会.碳纤维复合材料在无人机结构件上的应用[EB/OL].(2024-01-15)[2024-06-10].
- [11] GB/T 1920-2003,标准大气[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2003.
- [12] 大型高性能复合材料构件RTM工艺进展[J].南京航空航天大学学报,2022,54(3):401-410.
- [13] 30kg级复合材料垂直起降倾转旋翼固定翼无人机设计与分析[D].杭州:中国计量大学,2023.
- [14] 张伟,李娟.无人机结构拓扑优化与轻量化设计[J].机械设计与制造,2023(10):234-237.
- [15] 复合材料纵横加筋隔框RTM成型工艺[J].宇航材料工艺,2023,53(2):88-94.
- [16] 中国复合材料工业协会.无人机复合材料构件制造工艺分析[EB/OL].(2024-03-20)[2024-06-10].

