

无人机结构设计中轻量化材料的运用对策研究

袁欣宇, 陈晓红, 田 皓

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114044)

摘 要 无人机结构设计中应用轻量化材料可更好地提升无人机的续航能力、荷载水平和机动性能, 为无人机应用场景的拓展、应用效果的提升奠定良好的基础和保障。通过运用复合材料、轻质合金、工程塑料、新型纳米材料等轻量化材料能减轻无人机自重。在此基础上, 可根据结构特性进行材料选择, 并根据材料特性对结构设计、加工工艺进行优化, 配合材料的协同利用可保障无人机结构设计的科学性、适配性和有效性, 为无人机结构设计的轻量化升级提供技术支撑和材料支持。

关键词 无人机结构设计; 轻量化材料; 消费级无人机

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.002

0 引言

为提升无人机性能, 满足航拍测绘、农业植保、物流运输、应急救援等相应领域的应用需求, 很多无人机生产单位都在不断创新无人机设计。材料作为无人机的物质基础, 对材料的选择和应用成为无人机设计创新的重点。轻量化材料在无人机结构设计中的应用有助于提升无人机的续航能力、有效荷载、飞行速度、机动灵活性, 可根据无人机的应用场景、产品定位进行轻量化材料选择和应用。

1 无人机结构设计中轻量化材料的运用原则

在无人机结构设计中轻量化材料的运用应坚持性能适配原则、成本可控原则和工艺兼容原则。

性能适配原则是指在材料选择的过程中应根据无人机的受力特点, 分析材料的抗拉强度、抗压强度、弹性模量等相应力学性能, 判断轻量化材料应用能否满足无人机飞行过程中的振动荷载、冲击荷载和气动荷载需求。同时, 无人机作为精密度较高的低空飞行设备, 其组成结构复杂, 涉及多种构件的制作, 应根据不同无人机的性能要求以及无人机不同组件的性能要求做好材料选择, 避免结构失效问题。除此之外, 在性能适配分析中还应根据无人机的场景应用特质进行材料选择, 明确不同使用场景下对无人机材料提出的特异性性能要求。如近海区域飞行实验则需要考量空气湿度高的环境特点, 在轻量化材料选择上平衡材料自重及耐腐蚀性。同理, 还需考虑飞行区域的气温、紫外线强度等环境特质, 以性能适配环境为材料选择标准, 做出差异化材料调整。

成本可控原则是指在轻量化材料选择的过程中除

了需要分析其性能、质量能否满足要求以外, 还需从采购成本、加工成本、维护成本等多个维度进行分析, 避免成本过高影响无人机的市场竞争力。无人机生产企业作为市场主体, 关注经济效益无可厚非。故此, 在材料原则上必须结合结构设计图纸分析整体成本及利润空间, 根据材料使用后企业能够获得的经济效益及企业的项目盈利目标确定成本上限。将材料使用成本考量在内才可以保障商品进入市场后的经济效益, 为相关企业的可持续发展打下坚实基础^[1]。

工艺兼容原则是指在轻量化材料选择中必须充分考量现有的加工工艺, 分析两者能否兼容, 能否利用现有加工工艺精准、高效地完成结构制造, 设计人员在轻量化材料选择及结构设计中必须充分考量材料的加工难度, 分析能否实现批量化生产制造, 批量制造的制造精度是否可以得到保障, 结构间能否得到有效衔接, 衔接难度、衔接成本如何。甚至还应分析后续无人机维修保养上的工艺难度和所付出的成本, 保障结构设计的可行性。

2 轻量化材料提升消费级无人机性能的核心路径

2.1 减重降耗, 延长续航

保障无人机的续航能力是十分重要的。目前, 便携性差、续航短仍是消费级无人机面临的主要难点问题, 这是因为传统无人机都是纯铝合金结构, 自重达到了 1.5 kg 以上, 其续航时间往往不达半小时, 在携带上还需要使用专用收纳箱, 便利性不足。为此, 可通过轻量化材料的应用来解决这些痛点问题, 如可通过碳纤维复合材料对机身框架做出调整, 这可以将机身的自重降至 0.8 ~ 1 kg。在此基础之上, 通过气动

结构的优化延长无人机的续航能力,满足用户的长时间、多场景拍摄需求。此外,针对现阶段无人机便捷性不足的问题可通过碳纤维骨架加工程塑料打造折叠式无人机,这样无人机的外出携带就不需要专用收纳箱,可以大幅提高其便捷性^[2]。

2.2 强化承载,提升荷载能力

消费级无人机想要拥有更广泛的受众就必须不断提高荷载能力,进而达到功能场景拓展的目标。例如:高清航拍时无人机需搭载重量约 150~200 克的相机,这时很有可能会因无人机机身承载力不足影响操控精度和飞行稳定性,无法实现应用场景的拓展,可通过轻量化材料应用发挥其高强度、低自重的优势,提高无人机的荷载能力。例如:可通过碳纤维增强复合材料配合蜂窝夹层结构,提高无人机的比强度,并在保证自重不变,甚至有所降低的基础之上提高无人机荷载能力,让无人机可以搭载高像素相机或小型传感器。在此基础之上可通过铝合金锻造件对无人机机臂和机身连接部位进行调整,提高其抗拉强度,这样在无人机承载相机时可以有效避免振动荷载导致部件断裂的问题,保障设备的可靠性^[3]。

2.3 环境适配,增强耐候性

环境因素也很有可能会影响无人机的受众范围。消费级无人机的使用场景并不固定,很有可能会面临高温、潮湿、紫外线照射等相应环境问题,这时材料的耐候性提升则显得十分重要,这会直接影响无人机的使用寿命,可通过轻量化材料改性或复合设计来提高无人机的环境适应性。例如:在无人机外壳设计中可通过纳米改性 ABS 工程塑料的应用配合紫外线吸收剂和抗氧剂提高无人机的耐紫外线老化能力。又如:可通过玻璃纤维复合材料配合氟碳涂层来对无人机的机身蒙皮做出调整,使无人机可以满足沿海地带高盐雾的长时间使用需求,避免金属锈蚀风险。

3 无人机结构设计中轻量化材料的应用对策

3.1 基于结构受力特性选择材料

无人机结构相对复杂,不同结构部件的受力特点存在较大差异。在这样的背景下想要保证轻量化材料的应用效果,就必须明确不同部件的受力类型和受力大小,在此基础之上对轻量化材料做出适当选择,达到“材尽其用”的效果^[4]。例如:无人机核心承力部件在材料选择过程中必须充分考量材料的比强度和比刚度,优先选择碳纤维增强复合材料,确保在无人机飞行过程中核心承力部件能够承受气动荷载和弯曲荷载,并有效降低无人机的重量。对于需要承受冲击荷

载的部件,如起落架、机身防护板等,则可选择抗冲击性相对较强的芳纶纤维增强复合材料,或通过高强度铝合金的应用保障无人机结构的抗坠毁能力。非核心承力部件则可优先选择成本较低、加工难度较小的玻璃纤维增强复合材料或工程塑料。而发动机部件、高温区域结构件等特殊部件则需要引入钛合金或纳米陶瓷材料,保障无人机结构整体的可靠性和稳定性。

3.2 结合材料特性对结构设计做出优化

在无人机结构设计优化及调整的过程中还需要根据不同材料的特性对结构设计做出适当调整,最大化发挥材料的性能优势,做好无人机重量与性能的平衡,得出最优解。例如:若选用碳纤维增强复合材料,设计人员需根据材料的力学性能定向设计结构,使结构的受力方向与材料的强度方向一致,进而保障结构的整体承载能力。再例如:为更好减轻无人机结构重量、降低制作成本,可通过空心结构、蜂窝结构、夹层结构等轻量化结构形式的有效应用配合碳纤维增强复合材料做出设计调整,根据无人机不同部位的使用特点和应用需求具体问题具体分析,科学选择结构设计方案,如在尾翼设计中应用蜂窝夹层结构,在保证尾翼刚度的同时减轻结构重量^[5]。

在根据材料特性进行材料选择并优化无人机结构设计以后,还可以根据不同材料的材料特性对其加工成型工艺做出调整。目的在于为零部件的批量化生产及生产精度提升打下坚实基础。一方面,出于产品质量考量,有助于提高无人机的综合性能。另一方面,也是出于企业发展需求考量可以避免材料浪费、成本浪费,并通过提高材料应用效率、质量保障无人机整体性能,树立企业的市场竞争优势^[6]。

3.3 多材料协同运用与性能平衡

在无人机结构设计中不同组件的性能要求存在鲜明差异。即便现阶段可供选用的主流轻量化材料较多,但不同材料仍存在其固有局限性。例如:碳纤维增强复合材料加工难度和材料成本较高、抗冲击性能较低,工程塑料虽然成本较低但容易出现老化变形问题,尺寸稳定性和力学性能无法得到保障等。因此,单一材料往往无法满足复杂的无人机制作需求。这时则需要通过多材料搭配,发挥不同材料优势对结构构件进行设计,然后通过特定的连接手法提升无人机综合性能。

“金属材料+工程塑料”协同设计也是较好的选择,可在承受较大荷载的部位使用金属材料,在非承力部位采用工程塑料,保障结构的轻量化效果。例如在起落架设计中主体可采用高强度合金,而起落架护罩则

可采用PC塑料,既保障承载能力,又降低结构重量。最后,在无人机结构设计中还可引入“复合材料+纳米材料”的复合方案,在复合材料中添加纳米粒子,提升复合材料的力学性能和功能特性,达到结构轻量化的目标。例如:可在碳纤维增强复合材料中添加石墨烯纳米粒子,提高复合材料的强度、降低其重量,提升无人机结构的整体性能。

需要注意的是,在多材料协同运用的过程中应充分考量不同材料之间的兼容性,并对连接方式作出适当调整和优化,通过焊接、铆接、胶接等连接方式的灵活运用避免连接失效问题。例如:在碳纤维增强复合材料和铝合金连接的过程中可采用胶接和铆接的结合方式保障连接强度,避免两种材料之间出现电化学腐蚀等问题^[7]。

4 轻量化材料对消费级无人机产业的推动作用

轻量化材料对于消费级无人机产业的发展会起到至关重要的影响。

首先,轻量化材料的应用可大幅降低消费级无人机的生产成本,这意味着相关企业的利润空间得以拓宽。企业既可以选择树立价格优势,提升自己的市场竞争力,发现下沉市场,让无人机走进千家万户。也可以将节省下来的制造成本应用于技术创新和产品研发当中,开发出更多功能性更强的无人机,为企业的可持续发展、市场竞争力提升提供更多的助力。

其次,轻量化材料的应用可更好地拓宽无人机的应用场景,轻量化材料可以在减轻无人机重量的同时最大程度地提高无人机的性能,使无人机从航拍工具向多用途设备转型,满足不同场景的应用需求。例如:轻量化材料应用以后无人机的荷载能力得以明显提升,可通过铝合金机架加工程塑料药箱满足农业药物喷洒需求,大幅降低农业植保成本。轻量化材料应用后无人机不仅可以应用于航拍植保等相关领域,消费级无人机还可以进入电力巡检领域,可通过轻量化镁合金机架的应用将无人机的重量降至1.2 kg,提高其续航时间达到40分钟,配合红外热成像仪完成高压线路的温度检测。相较于传统的人工检测无人机检测的效率至少提升5倍以上且因电力巡检过程中高压线路可能会经过山区路段,巡检难度较高,而无人机检测则可以较好地填补人员难以抵达的线路巡检盲区,拓展消费级无人机在工业应用的边界。

最后,轻量化材料在无人机结构设计中应用可以推动产业下沉,带动产业链发展。轻量化材料的应用推动了消费级无人机向低成本、易量产的方向发展。

在上游端,国内复合材料厂商可根据消费级无人机轻量化需求推出量产低成本碳纤维布,通过量化生产来降低材料成本。而在下游端,无人机维修服务企业可根据轻量化材料使用后的无人机结构特质推出专用维修工艺,例如碳纤维部件的粘接修复技术,既完善了产业链的服务环节,也为整个产业链的成熟发展打下坚实基础。这不仅仅可以让无人机企业受益,同时无人机的上下游产业也会因此得到发展,进而推动产业链的整体发展。由此可见,轻量化材料对于消费级无人机产业的发展所起到的作用和影响是相对较大的,应结合实际情况具体问题具体分析,对其应用策略方法做出针对性调整,提高应用成效。

5 结束语

在无人机结构设计中轻量化材料的应用可更好地保障无人机的续航能力和整体性能,需引起重视,合理应用复合材料、轻质合金、工程塑料、新型纳米材料等相应轻量化材料。在此基础上,应结合结构受力特性对材料做出精准选择,再根据不同材料的特性对无人机结构设计作出适当调整,并优化加工工艺,还可通过多材料协同运用与性能平衡的方式确保无人机结构设计整体质量。

参考文献:

- [1] 张学铭,曹韦俊,张晓木,等.某无人机大展弦比薄复材机翼结构设计[J].机械制造与自动化,2025,54(05):240-244.
- [2] 潘兴超,孟泉,张晓光,等.“X”型四旋翼重载应急救援无人机结构设计[J].机械研究与应用,2025,38(04):35-38.
- [3] 栾新辉.搭载多自由度机械臂的四旋翼无人机结构设计[J].模具制造,2025,25(07):210-213.
- [4] 付梓轩,余洪伟,吕昊,等.低空经济驱动下物流无人机结构与气动仿真探索[J].中国设备工程,2025(13):8-11.
- [5] 李金芳.水陆空三栖无人机结构与功能实现[D].北京:北京化工大学,2025.
- [6] 段成程.跨介质无人机结构与动力学性能数值分析[D].重庆:重庆交通大学,2025.
- [7] 赵英辉,张靠民,夏海廷,等.垂起固定翼无人机复合材料机翼:电池一体化结构设计[J/OL].航空工程进展,1-10[2025-11-06].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hQtzIo_70oH5miuiZAqnQPoHl8Me9UuVtMeX1UlwuwiFkXl57LFUfhBssrR62BQ-bU8dgr76eIdc1-qVs12Kt_hwDKcW2QiZ5QjzAucyewrxoWlG1rxhyknV78vEnOxlbXFfJrtd-R3RHSILI_F3aiH2N8eF4k93MLhGIQz6o4s2iruwuWQV9Q==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.