

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.010

基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计

李恒¹, 严文凯¹, 陈逸豪¹, 张驰¹, 廖正雄¹, 苏亮^{1,2}, 姜胜强^{1,2}

(1.湘潭大学机械设计与力学学院,湖南湘潭 411105; 2.复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心,湖南湘潭 411105)

摘要: 针对四旋翼无人机机身轻量化需求,以小型四旋翼无人机机身结构为研究对象,基于质量最小原则对四旋翼无人机机身结构进行轻量化设计。选用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料,利用 Inspire 软件分别对不同优化目标下的机身模型的形状控制进行了拓扑优化计算,依照质量最小原则,得到了基于形状控制为辐射状的小型四旋翼机身的关键结构特征。然后对拓扑优化的最优结果进行了几何重构及强度校核,得到适合于 3D 打印的结构,相对于初始结构实现了 54% 减重,且多工况下机身模型的应力、位移、安全系数都符合设计要求,接着通过切片软件设置层厚、模型摆放位置等参数对机身的三维数据进行前处理,最后通过 3D 打印机实现轻量化模型熔融沉积成型(FDM)快速制造。该研究结果为四旋翼无人机机身结构的设计提供一种新的设计思路,为实现低成本、轻量化的四旋翼无人机结构提供一条新的途径。

关键词: 四旋翼无人机;轻量化;拓扑优化;增材制造;熔融沉积成型

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0060-07

Lightweight Design of Four-rotor UAV Fuselage based on Topology Optimization

Li Heng¹, Yan Wenkai¹, Chen Yihao¹, Zhang Chi¹, Liao Zhengxiong¹, Su Liang^{1,2}, Jiang Shengqiang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan 411105, China)

Abstract : Taking the small four-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) fuselage structure as the research object, aiming at the lightweight requirements of the four-rotor UAV fuselage, the lightweight design of the four-rotor UAV fuselage structure was carried out based on the principle of mass minimum. The acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS) material was selected and the software Inspire was used to calculate the topology optimization of the shape control of the fuselage model under different optimization objectives. According to the principle of mass minimum, the key structural characteristics of the small four-rotor fuselage with radial shape control were obtained. Then, geometric reconstruction and strength check were carried out for the optimal results of topology optimization to obtain a structure suitable for 3D printing. Compared with the initial structure, 54% weight reduction was achieved, and the stress, displacement and safety factor of the fuselage model under multiple working conditions met the design requirements. Then, 3D data of the fuselage were preprocessed by setting parameters such as layer thickness and model placement position through slicing software. Finally, the lightweight model fused deposition modeling (FDM) rapid manufacturing was realized through 3D printer. The research results provide a new design idea for the design of the four-rotor UAV fuselage structure, and a new way to achieve low-cost and lightweight four-rotor UAV structure.

Keywords : four-rotor UAV ; lightweight ; topology optimization ; additive manufacturing ; fused deposition modeling

四旋翼无人机具有构造简单、价格低廉的特点,随着科学技术的发展,四旋翼无人机的应用场景越来越广泛,具有较好发展前景^[1]。四旋翼无人

机机身作为无人机的主要承力部件,其结构设计是否合理将影响无人机有效载荷高低和续航时间长短。目前,无人机结构设计方法仍主要依靠设计人

基金项目: 湖南省教育厅教学改革研究项目(HNJG-2022-0587),湖南省学位与研究生教学改革研究重点项目(2022JGZD033)

通信作者: 苏亮,硕士,高级实验师,主要从事机械设计制造、创新创业教育研究

收稿日期: 2022-12-01

引用格式: 李恒,严文凯,陈逸豪,等.基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计[J].工程塑料应用,2023,51(2):60-66.

Li Heng, Yan Wenkai, Chen Yihao, et al. Lightweight design of four-rotor UAV fuselage based on topology optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 60-66.

员的工程经验,设计结果常高于预期的结构强度。这就导致无人机的结构设计结果往往存在大量冗余,增加了设计和制造成本,故有必要探索新的设计方案^[2]。

拓扑优化^[3]是根据给定的负载情况、约束条件和性能指标在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,属于结构优化的一种。1988年Bendsøe等^[4]首次通过均匀化方法设计结构拓扑构型,自此拓扑优化发展突飞猛进。与尺寸优化和形状优化相比,拓扑优化不依赖于初始构型的选择,具有更多的设计自由度,能够获得更大的设计空间,成为结构优化最具发展前景的一个方面,现已在航空航天、汽车制造、建筑设计等技术领域广泛应用^[5-7]。

增材制造(AM)^[8]技术(也称为3D打印技术)是20世纪80年代后期发展起来的新型制造技术。增材制造为复杂拓扑优化构型的制备提供了新途径,使受到传统制造方式的约束而无法实现的复杂构件制造变为可能,可在“设计与制造一体化”的理念下设计轻量化、高性能产品^[9]。

笔者将拓扑优化与熔融沉积成型(FDM)增材制造进行结合以实现无人机的结构与制造一体化^[10-11],通过研究某款四旋翼无人机机身轻量化设计,为拓扑优化与增材制造的结合应用于各行各业提供帮助。

1 相关理论

1.1 拓扑优化理论

结构拓扑优化主要以连续体结构和离散体结构为研究对象。笔者以四旋翼无人机机身作为研究对象,基于连续体结构的优化方法^[12]进行研究。解决该类优化问题的数学建模方法有很多,如变密度、均匀变化、渐进结构优化等方法,目前应用最广泛的是变密度法^[13]。

Inspire软件采用Altair公司先进的Optistruct优化求解器,该求解器可利用变密度法中的固体各向同性材料惩罚模型(SIMP)建立拓扑优化数学模型,运用数学规划法进行变量的迭代计算^[14]。其中,不同的优化目标会导致优化对象的数学模型发生变化。笔者分别以无人机机身的静力刚度最大化和质量最小化为优化目标。以最大化静力刚度为优化目标,以结构设计空间的体积分数为约束条件,采用数学语言描述如下:

$$\text{find } X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}^T \in \Omega,$$

$$\min C(X) = \frac{1}{2} U^T K U \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N V(x_i) \leq V^*, F = KU,$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1, (i = 1, \dots, N) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: X 为设计变量,即经有限元离散后的单元相对密度; Ω 为优化设计变量集合; C 为柔度; U 为结构位移; K 为整体刚度; F 为荷载矩阵; $V(x_i)$ 和 V^* 分别为结构的实际体积关于变量 x_i 的函数和整个优化问题的约束体积分数值; i 为单元数量; x_{\min} 为设计变量的下限值; x_{\max} 为设计变量的上限值。

1.2 基于变密度法的周期性拓扑优化

变密度法的基本理论是假设材料的密度可变,设计变量为单元密度,这样就将拓扑优化的问题转化为如何实现材料的最优化分布的问题,使材料达到最优分布^[15-16]。

根据力学特性分析,确定本无人机机架可进行周期性拓扑优化。为了获得具有周期性的结构拓扑形式,以同一轴线进行周期变化可以分为 m 个子域,其中 m 为子域的数目,记作 $\rho_{i,j}$, i 为子域编号, j 为子域内单元编号^[17]。笔者对本无人机机架进行拆分,分为周期变化的四部分,取其一为 ρ_1 。 ρ_1 子部分亦为作用对称的两部分,取其一记作 $\rho_{1,1}, \rho_{1,2}$,如图1所示。

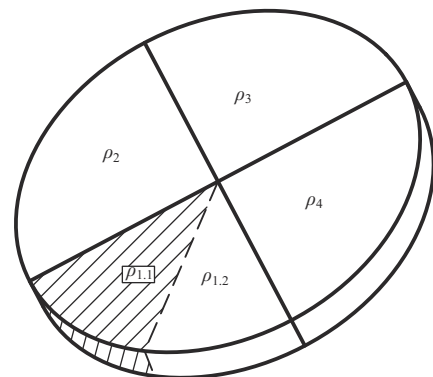


图1 优化域沿中心轴分为 $m=4$ 个子域

基于以上优化理论,借助Inspire软件对无人机结构部件进行拓扑优化^[18],寻找到无人机结构部件在最大设计空间内的最优材料布局,实现提升该结构部件强度性能和轻量化的目的。四旋翼无人机机身丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料轻量化流程如图2所示。

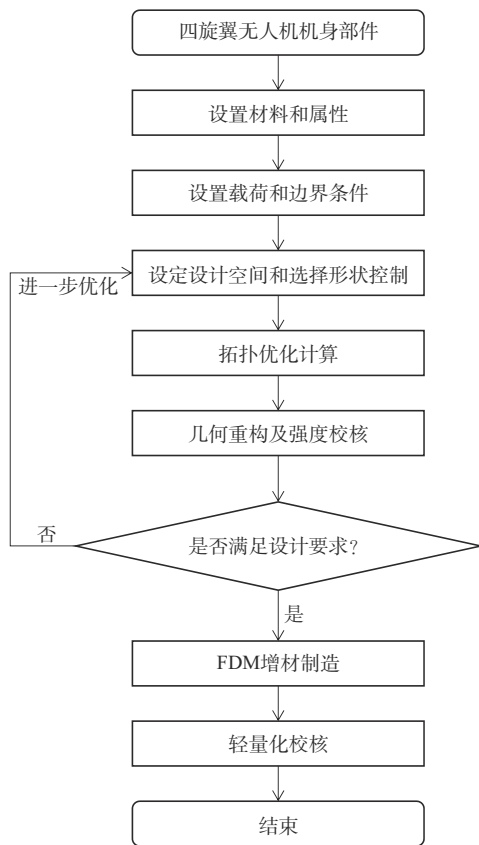


图2 ABS轻量化设计流程

2 无人机机身拓扑优化设计

2.1 材料与属性

选用ABS材料,其拉伸弹性模量2 000 MPa、泊松比0.35、密度1 060 kg/m³、拉伸屈服应力45 MPa,零件原始质量为66.158 g。

2.2 载荷条件与初始强度分析

(1)载荷条件分析。

图3为无人机约束及受载情况。无人机携带了摄像头等有质量的物体,在实际分析无人机结构时,利用“质量点”功能,将摄像头等的质量施加给无人机机身位置5(如图3所示)的下方A点,通过柔性连接器连接,连接器端点A的坐标为(0 mm, 0 mm, -15 mm),质量为0.1 kg。

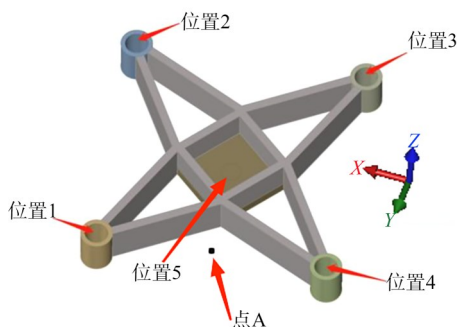


图3 约束及受载情况

共设置五种载荷,分别为 F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 ,其中 F_1, F_2, F_3, F_4 属于载荷工况1,其分别作用于位置1、位置2、位置3、位置4的圆孔内侧面,大小均为20 N,方向均为Z轴正方向。 F_5 属于载荷工况2,其作用于点A,坐标为(0 mm, 0 mm, -15 mm),大小为60 N,方向为Z轴负方向。

(2)初始强度分析结果。

添加上述载荷条件,对四旋翼无人机机身进行初始强度分析,将单位设置为MMGNMS,分析单元尺寸设置为2 mm,计算速度/精度选择更准确,勾选惯性释放和两个载荷工况点击运行进行分析。

通过Inspire软件进行初始结构强度分析,得到最大米塞斯等效应力、最大位移、最小安全系数见表1。

表1 初始强度分析结果

最大米塞斯应力/MPa	最大位移/mm	最小安全系数
3.081	0.248 9	14.6

2.3 形状控制方案选择

考虑无人机的整体装配要求,指定部件的主体部分为设计空间,中心结构部件和安装部分为非设计空间,如图4所示。

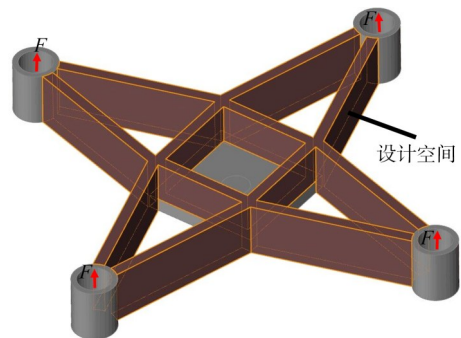


图4 设计空间设置

对无人机机身直接拓扑优化可满足工况要求^[9],但是会使机身的工艺难度增加,这样优化所得的零件实用意义不大。Inspire软件有模块控制功能,通过对现实工艺的模拟,使拓扑优化与实际生产联系起来增加仿真的可靠性。为探索最优形状控制,因此对优化的零件分别以最大刚度和最小质量为优化目标,采用周期对称、单向拔模、双向拔模、辐射、挤出、周期对称+辐射的形状控制方案进行对比分析。UPBox可打印的最小圆柱尺寸为2 mm,因此为提高后期3D打印的成功率,将厚度约束设置为5 mm。质量目标设置为40%,即优化后的质量将逼近原质量的40%。由于优化所得模型可能会出现片体结构或者断层,导致后续仿真无法完

成,因此需要调整软件自带的拓扑滑块增减质量以满足要求,所以优化后的质量可能存在偏差。不同形状控制方案见表2。按表2不同形状控制方案通过Inspire软件进行拓扑优化。拓扑优化结果见表3。由表3的拓扑优化结果可知,以最大刚度为优化目标时,方案4优化后的质量最小,质量为33.756 g;在以最小质量为优化目标时,方案10优化后的质量最小,质量为32.58 g。由表2可知,方案4和方案10的形状控制方案皆为辐射,因此形状控制方案选择

表2 形状控制方案

方案	优化目标	质量目标/%	最小安全系数	形状控制方式
1	最大刚度	40		周期对称
2	最大刚度	40		单向拔模
3	最大刚度	40		双向拔模
4	最大刚度	40		辐射
5	最大刚度	40		挤出
6	最大刚度	40		周期对称+辐射
7	最小质量		2.6	周期对称
8	最小质量		2.6	单向拔模
9	最小质量		2.6	双向拔模
10	最小质量		2.6	辐射
11	最小质量		2.6	挤出
12	最小质量		2.6	周期对称+辐射

表3 形状控制方案优化结果

方案	最大等效应力/MPa	最大位移/mm	最小安全系数(优化后)	优化后的质量/g
1	8.458	0.431 5	5.3	41.846
2	5.595	0.538 1	8.0	40.448
3	6.164	0.153 8	7.3	48.391
4	16.130	0.742 4	2.8	33.756
5	8.041	0.793 5	5.6	35.153
6	7.817	0.649 8	5.8	36.041
7	19.210	0.654 4	2.3	37.020
8	40.070	1.667 8	1.1	35.400
9	18.110	0.522 1	2.4	38.900
10	9.710	0.606 1	4.6	32.580
11	25.290	1.041 0	1.8	34.460
12	11.200	0.677 7	4.0	37.830

表4 拓扑优化方案及优化结果

方案	优化目标	设定参数		最大等效应力/MPa	最大位移/mm	最小安全系数(优化后)	优化后的质量/g	优化前后质量比/%
		质量目标/%	最小安全系数					
1	最大刚度	20		10.990	0.776 1	4.1	32.24	51
2	最大刚度	25		11.440	0.835 9	3.9	32.19	51
3	最大刚度	30		12.980	0.865 9	3.5	31.79	52
4	最大刚度	35		11.380	0.761 0	4.0	33.73	49
5	最大刚度	40		11.100	0.892 6	4.1	33.18	50
6	最大刚度	45		9.598	0.736 1	4.7	34.65	48
7	最小质量		2.5	9.964	0.769 9	4.5	31.92	52
8	最小质量		2.6	9.234	0.644 0	4.4	32.61	51
9	最小质量		2.7	8.418	0.620 0	5.2	33.22	50
10	最小质量		2.8	9.361	0.785 2	4.8	31.30	53
11	最小质量		2.9	7.788	0.755 6	5.6	34.12	48
12	最小质量		3.0	5.428	0.571 3	8.3	41.55	37

辐射。形状控制如图5所示。

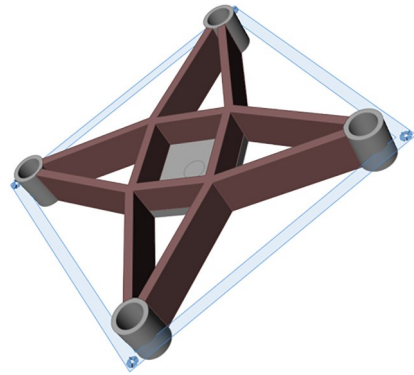


图5 形状控制

2.4 拓扑优化方案选择

为探索最优设计结果,基于表3的优化结果选择形状控制方案为辐射,分别以最大刚度和最小质量作为优化目标制定优化方案。

以最大刚度为优化目标时,其质量目标分别设定为20%,25%,30%,35%,40%,45%;以最小质量作为优化目标时,其最小安全系数分别设定为2.5,2.6,2.7,2.8,2.9,3.0。

以辐射为形状控制方式、厚度约束为5 mm,采用不同质量目标和最小安全系数的优化方案,通过Inspire软件进行拓扑优化,相应的优化结果列于表4。

由表4的分析结果可以看出,以最小质量为优化目标的轻量化设计效果较以最大刚度为优化目标整体较好,其中方案10优化后的结构质量最轻即31.30 g,且最大等效应力、最大位移和最小安全系数均满足使用要求(ABS材料屈服应力为45 MPa,最大变形位移小于0.8 mm,最小安全系数大于2.5)。由于手动拟合存在不可避免的误差,在保证满足相

关条件的情况下易导致设定参数一致的优化质量存在一定的差异,如表2中的方案10与表4中的方案8。基于方案10优化后的结构形状如图6所示。

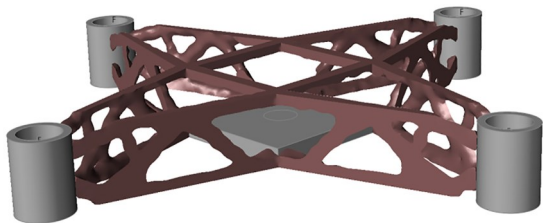


图6 优化后结构

2.5 几何重构

基于方案10的优化结果,利用PolyNURBS工具与几何工具进行几何重构,采用手动拟合的方式,考虑到四旋翼无人机机身的对称性,并且分析得出其优化模型关于三个面对称,因此先设置好对称面,并将其面设置为剖面,然后对剖面模型进行PolyNURBS包覆。包覆过程如图7所示。

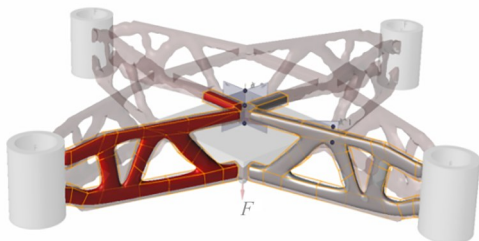


图7 手动几何重构

包覆完成后通过控制面上的点、线、面以及使用几何工具对重构结果进行微调。最后使用PolyNURBS镜像工具对优化结果进行几何重构,并搭配桥接命令连接成整体,如图8所示。

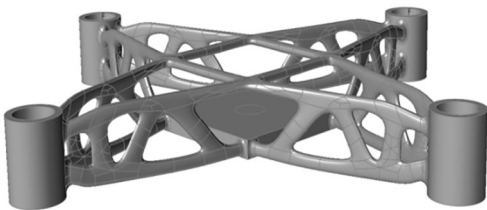


图8 最终几何重构模型

2.6 强度校核

对四旋翼无人机机身部件结构轻量化设计结果进行强度校核,设置分析单元尺寸为2 mm,计算速度/精度选择更加准确,勾选惯性释放和两个载荷工况,点击运行进行分析^[20]。强度校核分析的结果列于表5。将表1的初始强度分析结果与表5优化后的强度校核分析结果进行比较,不难发现优化后零件的强度性能有所下降,但均满足使用要求,并

且其质量得到优化,与初始模型相比避免了结构强度存在大量冗余的情况。

表5 强度校核分析结果

最大米塞斯等效应力/MPa	最大位移/mm	最小安全系数(优化后)
17.28	0.797 5	2.6

通过拓扑优化、几何重构后无人机机身的质量为30.651 g,相对于未拓扑优化的质量66.158 g,质量减轻了54%。

3 FDM增材制造

上述的拓扑优化设计基于FDM工艺,因此笔者采用太尔时代的UPBox+打印机^[21],打印材料为自备的ABS,打印软件采用UPStudio3.2.6,分别以原始模型、轻量化设计输出模型,以及以原始模型为主模型、轻量化设计输出为子模型(子模型置于主模型内部)的结合模型展开3D打印制作。

将优化模型的STL文件导入软件UPStudio3.2.6中,根据模型特点进行合理摆放,需要能够提高打印件强度、满足打印要求,并且容易进行后处理,考虑到优化模型的圆孔轴线应垂直于打印平台,以避免分层出现阶梯效应,故选择摆放位置如图9所示。

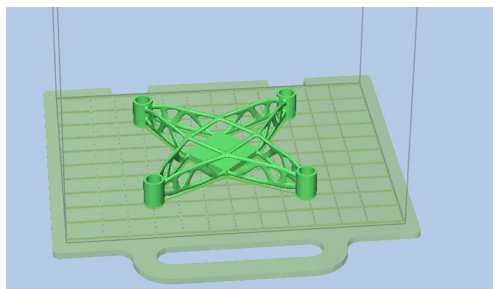


图9 优化模型摆放位置

根据受力分析,因整体受力点较多,选定层厚为0.20 mm,最大层厚0.20 mm,调整比例1.00,保证其表面的光洁度。

为满足其强度要求,轮廓设置为1,原始模型采用100%的填充密度和20%的支撑密度,设置填充角度为45°,角度增长为90°,合理设置其打印角度,提高打印件的强度。

打印参数设置如下:轮廓速度参数为36 mm/s,填充轮廓速度为46 mm/s,顶部速度为46 mm/s,底部速度为46 mm/s,内填充速度为46 mm/s,密度支撑速度为50 mm/s,支撑填充速度为50 mm/s,适当降低打印速度,保证打印件具有良好的表面光洁度^[22]。

模型打印完成后再对模型进行后处理以降低其表面的粗糙度,包括去除支撑、砂纸打磨等。由于FDM的工艺特点^[23],处理后模型的质量如图10所示。



图10 经过后处理的模型

4 轻量化校核

四旋翼无人机机身部件在优化前的质量为66.158 g,轻量化再设计之后质量为30.651 g,实现了54%的减重,且最大米塞斯等效应力17.28 MPa,小于ABS材料屈服应力45 MPa,最大位移为0.797 5 mm以及最小安全系数为2.6,强度不超过材料的屈服应力,满足实际的强度需求。图11为四旋翼无人机机身设计前结构,图12为四旋翼无人机机身ABS轻量化后结构。

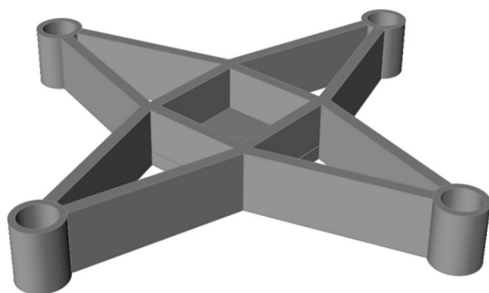


图11 四旋翼无人机机身设计前结构

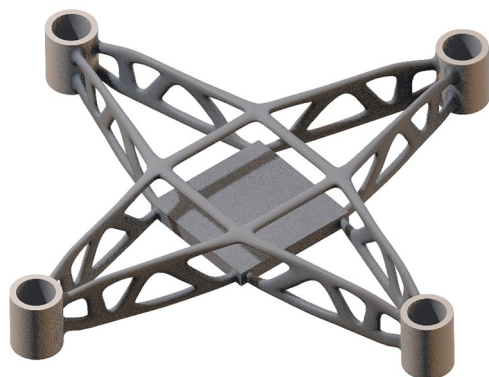


图12 四旋翼无人机机身ABS轻量化后结构

研究结果为四旋翼无人机机架结构的设计提供一种新的设计思路,为实现低成本、轻量化的四旋翼无人机结构设计提供一条新的途径,并且减重效果显著,同时可以通过3D打印机实现四旋翼无人机机身FDM快速制造。根据《民用无人驾驶航空器实名制登记管理规定》,250 g以上无人机必须登记注册。通过对四旋翼无人机机架轻量化处理,在总质量不超过250 g情况下,可获得安全性、稳定性更高及配置更全面的产品,使无人机产品走入千家万户,在市场中有片立足之地。

5 结论

针对四旋翼无人机机身轻量化需求,对其机身进行了轻量化设计,在满足无人机机身使用性能的基础上进行拓扑优化,基于优化方案以最小质量为优化目标,采用形状控制方案为辐射,最小安全系数为2.8,厚度约束为5 mm,在经过几何重构,得到适合于FDM增材制造技术实现轻量化的优化模型,相对于原始模型实现了54%的减重,效果显著,最后通过FDM增材制造技术快速制造无人机产品,以较少的材料实现了更佳的性能。研究结果为拓扑优化和增材制造结合实现设计与制造一体化提供了新的思路。

参考文献

- [1] 李光. 无人机的发展现状与趋势[J]. 现代工业经济和信
息化, 2021, 11(3):12-13, 16.
Li Guang. Status and trend of UAV development[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(3):12-13, 16.
- [2] Qu Jiaqi, Dong Yihao, Gu Xuechen, et al. Integrated frame topology optimization design of small quadrotor UAV[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2 292. DOI: 10.1088/1742-6596/2292/1/012016.
- [3] Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(6):1 031-1 055.
- [4] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2):197-224.
- [5] 张青松, 贾山, 陈金宝, 等. 组合体无人机单体机翼构型设计与拓扑优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.26.044.
Zhang Qingsong, Jia Shan, Chen Jinbao, et al. Configuration design and topology optimization of a single wing for the hybrid unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.26.044.
- [6] 彭显昌, 蔡文奇, 林志斌, 等. 电动汽车变速箱壳体静动态分析及拓扑优化设计[J]. 机械传动, 2021, 45(7):74-81.
Peng Xianchang, Cai Wenqi, Lin Zhibin, et al. Static and dynamic

- analysis and topological optimization of gearbox housing in electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(7):74-81.
- [7] 张鹤志,尹斌,陈怡君,等.基于拓扑优化的钢筋混凝土构件设计方法研究综述[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(5):462-473.
Zhang Huzhi, Yin Bin, Chen Yijun, et al. A review of design methods for reinforced concrete members based on topology optimization[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(5): 462-473.
- [8] 卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
Lu Bingheng. Additive manufacturing technology: Status quo and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1):19-23.
- [9] 朱继宏,周涵,王创,等.面向增材制造的拓扑优化技术发展现状与未来[J].航空制造技术,2020,63(10):24-38.
Zhu Jihong, Zhou Han, Wang Chuang, et al. Status and future of topology optimization for additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10):24-38.
- [10] 谷小军,李城彬,王文龙,等.拓扑优化与增材制造技术的融合及其在民用飞行器设计中的应用[J].航空制造技术,2022,65(14):14-20.
Gu Xiaojun, Li Chengbin, Wang Wenlong, et al. Integration of topology optimization and additive manufacturing technology and its application in civil aircraft structural design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14):14-20.
- [11] 梁雄,杜平,朱丽君,等.面向增材制造的拓扑优化设计模块分析[J].制造技术与机床,2021(5):76-80.
Liang Xiong, Du Ping, Zhu Lijun, et al. Analysis of topology optimization design module for additive manufacturing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(5):76-80.
- [12] 周克民,李俊峰,李霞.结构拓扑优化研究方法综述[J].力学进展,2005(1):69-76.
Zhou Kemin, Li Junfeng, Li Xia. A review on topology optimization of structures[J]. Advances in Mechanics, 2005(1):69-76.
- [13] 王景良,朱天成,朱龙彪,等.连续体结构的变密度拓扑优化方法研究[J].工程设计学报,2022,29(3):279-285.
Wang Jingliang, Zhu Tiancheng, Zhu Longbiao, et al. Research on variable density topology optimization method for continuum structure[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(3): 279-285.
- [14] 赵阳,陈敏超,王震.面向增材制造的索杆结构节点拓扑优化设计[J].建筑结构学报,2019,40(3):58-68.
Zhao Yang, Chen Minchao, Wang Zhen. Additive manufacturing oriented topology optimization of nodes in cable-strut structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3):58-68.
- [15] Bendsoe M P. Optimal shape design as a material distribution problem[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1989, 1(4):193-202.
- [16] 赵海鸣,蒋彬彬,李密.基于拓扑优化与多目标优化的机床底座结构设计[J].机械设计与研究,2018,34(4):100-105.
Zhao Haiming, Jiang Binbin, Li Mi. Structure design of machine tool base based on topology optimization and multi objective optimization[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(4): 100-105.
- [17] 焦洪宇,周奇才,李文军,等.基于变密度法的周期性拓扑优化[J].机械工程学报,2013,49(13):132-138.
Jiao Hongyu, Zhou Qicai, Li Wenjun, et al. Periodic topology optimization using variable density method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13):132-138.
- [18] 罗勇,杜平,朱丽君,等.基于Inspire软件的拓扑优化设计案例分析[J].制造技术与机床,2021(11):31-34.
Luo Yong, Du Ping, Zhu Lijun, et al. A case study of topology optimization design based on Inspire software[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(11):31-34.
- [19] 陈继文,陈清朋,王琛,等.面向熔融沉积成型技术的曳引机壳拓扑结构优化设计[J].中国工程机械学报,2019,17(4):304-310.
Chen Jiwen, Chen Qingpeng, Wang Chen, et al. Topology optimization design of traction machine shell oriented fused deposition modeling technology[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(4):304-310.
- [20] 唐锋,熊建武,胡智清,等.摩托车金属连接件ABS轻量化设计与FDM增材制造[J].工程塑料应用,2022,50(3):86-90, 112.
Tang Feng, Xiong Jianwu, Hu Zhiqing, et al. ABS lightweight design of motorcycle metal connector and FDM additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):86-90, 112.
- [21] 陈继文,陈清朋,胡秀龙,等.面向3D打印的码垛机械手小臂轻量化设计[J].中国工程机械学报,2020,18(1):45-50, 55.
Chen Jiwen, Chen Qingpeng, Hu Xiulong, et al. Lightweight design of small arm for palletizing manipulator facing 3D printing [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(1):45-50, 55.
- [22] 闫存富,乔雪涛,郭晓红,等.基于熔融沉积成型3D打印翘曲变形的工艺参数优化[J].工程塑料应用,2021,49(12):77-80.
Yan Cunfu, Qiao Xuetao, Guo Xiaohong, et al. Optimization of process parameters for 3D printing warpage deformation based on FDM[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12):77-80.
- [23] 朱政红,王珩.熔融沉积快速成型工艺参数优化分析研究[J].机械设计与制造,2021(6):130-133, 138.
Zhu Zhenghong, Wang Heng. Research on optimizing technological parameters of fused deposition rapid prototyping[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6):130-133, 138.