

doi: 10.7690/bgzd.2025.09.014

基于十四面晶架的 3D 打印直升机桨叶应用

朱晨帆¹, 赵启兵², 王承志³, 何巍¹, 钱帆¹

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇八研究所, 上海 200011;

2. 芜湖造船厂有限公司, 安徽 芜湖 241081; 3. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对晶架结构, 对 3D 打印桨叶蒙皮的参数化建模方法进行研究。将桨叶蒙皮分为多个小块, 每个小块都由一个晶架结构组成, 通过调整晶架结构的参数, 实现对蒙皮的形状和强度的控制, 以及对蒙皮的厚度、孔洞大小和分布等参数的控制; 设计一种桨叶蒙皮, 并进行了 3D 打印和实验验证。实验结果表明: 该方法可实现高精度的桨叶蒙皮制造, 且具有较好的强度和稳定性。

关键词: 3D 打印; 桨叶蒙皮; 晶架结构; 参数化建模

中图分类号: TP334 **文献标志码:** A

Application of Helicopter Blade 3D Printing Based on Fourteen-sided Crystal Frame

Zhu Chenfan¹, Zhao Qibing², Wang Chengzhi³, He Wei¹, Qian Fan¹

(1. No. 708 Research Institute of China Shipbuilding Corporation Limited, Shanghai 200011, China;

2. Wuhu Shipyard Co., Ltd., Wuhu 241081, China; 3. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the crystal frame structure, the parametric modeling method of 3D printing blade skin was studied. The blade skin is divided into several small blocks, and each small block is composed of a crystal frame structure. The shape and strength of the skin can be controlled by adjusting the parameters of the crystal frame structure, and the thickness, hole size and distribution of the skin can be controlled. A blade skin is designed, and 3D printing and experimental verification are carried out. The experimental results show that this method can realize the manufacture of blade skin with high precision, and has good strength and stability.

Keywords: 3D printing; blade skin; crystal frame structure; parametric modeling

0 引言

轻质晶架结构材料相对于传统材料而言, 具有独特的微结构和高孔隙率, 从而使其具有优异的性能, 如质量轻、强度高、散热效率高、吸收电磁波、设计多功能等。近年来, 这种轻质材料受到越来越多的关注, 并在组织工程、航空航天、船舶制造等行业得到广泛应用。在 3D 打印技术高速发展的今天, 晶架结构的制造变得相对容易。近年来, 国内外开展了大量关于晶架结构性能和参数化建模方面的研究工作。

张钱城等^[1]分析了多种晶架结构的力学性能, 并研究了强化晶架结构力学性能的主要方法; 范华林等^[2]分析了不同 2 维和 2 维胞元材料的拓扑构型特征以及材料的模量与强度; 仲梁维等^[3]建立了由长方体空间衍生的晶架结构模型, 并构建了晶架结构与试件的参数化模型; Cai 等^[4]提出了基于有限元形函数空隙建模的设计方法; Chu 等^[5]建立了一种

晶架结构的设计方法。

为进一步拓展蒙皮—晶架结构的应用领域, 对其在船舶制造、汽车制造、建筑结构等领域的应用进行了探讨。通过对比分析发现, 蒙皮晶架结构在这些领域大有可为, 比如在船舶制造中, 可以有效降低结构质量, 提高船舶的载重和航行速度; 在打造轿车时, 降低油耗的同时还能提高车身结构的刚性和安全性能; 在房屋结构上, 可以实现建筑设计的轻型化, 如降低房屋自重, 提高抗震性能等。

笔者在上述研究的基础上, 以十四面体晶架结构为基础, 采用有限元离散实体模型找到单元关键点的方法, 建立了一种十四面晶架结构的参数化建模方法。该方法可根据设计要求和应用场景, 灵活地调整晶架结构的参数, 如单元尺寸、材料类型、孔隙率等, 从而实现对晶架结构性能的优化设计。并对建立的模型进行拓扑结构和力学性能等进行了验证。

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-18

第一作者: 朱晨帆(1995—), 男, 江西人, 硕士。

1 十四面体晶架结构的参数化建模

1.1 3D 打印技术

3D 打印技术, 又称立体打印技术, 是一种通过材料层层堆叠, 制造出 3 维实体物体的技术。3D 打印技术自 20 世纪 80 年代问世以来, 在制造、医疗、建筑、艺术等领域已成为重要的创新工具, 取得了令人瞩目的发展。

3D 打印技术的原理是将数字模型文件转换成实物。设计者利用电脑辅助设计软件创建 3 维模型。模型被切割成许多薄层, 3D 打印机将实体物体逐层打印出来, 按照这些层的顺序排列。3D 打印机能够打印塑料、金属、陶瓷、生物材料等多种材质。

3D 打印技术的优势在于能够快速且低成本地制造出形状复杂的物体, 而传统的制作方式往往很难做到这一点。此外, 3D 打印技术在占用较小空间的情况下实现了便携制造, 从而提高了工作效率^[6]。这些优势使得 3D 打印技术广泛应用于无人机领域。

而当前无人机领域的一个追求目标就是提升无人机续航能力, 思路是减轻无人机本身的质量, 降低机体对动力系统的负载, 以此来提升无人机的续航能力^[7]。一种是 3D 打印采用高强度、轻质量的新型复合新材料如碳纤维复合材料^[8]; 第 2 种解决途径就是对无人机结构进行优化^[9], 而晶架结构在无人机轻量化方向上有着明显作用及潜力。

1.2 晶架结构

3D 打印技术的晶架结构是一种在材料科学和工程领域中具有广泛应用的先进结构。晶架结构由重复的单元格组成, 这些单元格可以是简单的几何形状, 如立方体、四面体或八面体, 也可以是更复杂的形状。这些单元格通过 3D 打印技术精确地排列在一起, 形成一个具有特定性能和功能的材料。

3D 打印技术的晶架结构具有以下优势:

1) 轻量化: 由于晶架结构中的空隙, 其密度较低, 因此具有较低的重量, 而轻量化可以降低能耗并提高效率。

2) 定制化: 3D 打印技术允许根据特定的应用需求定制晶架结构, 这意味着可以根据需要调整其力学性能、导热性能和其他功能。

3) 高强度和刚度: 晶架结构的几何形状可以提供高强度和刚度, 同时保持较低的重。这使得它们需要高强度和刚度的应用中非常有用, 如航空航天和汽车零件。

4) 良好的能量吸收性能: 晶架结构可以有效地吸收和分散冲击能量, 因此在防护和安全设备中具有很高的潜力。

5) 可控热膨胀性能: 可通过晶架结构几何参数的调整来达到控制热膨胀系数的目的。这对于在高温环境下工作的零件和设备非常重要。

1.3 十四面体晶架结构的描述

如图 1 所示, 十四面体晶架结构具有 24 个顶点、36 条圆柱棱边和 14 个面, 其中 6 个面为四边形, 10 个面为六边形。该结构是由任意六面体空间结构衍变而来, 晶架的 6 个四边形分别位于所处六面体空间的六个平面上。当多个六面体空间相互连接时, 每个空间内的十四面体晶架也会相互连接, 相连的 2 个晶架共用同一个四边形的圆柱棱边, 称之为晶架的点阵形式, 如图 2 所示。

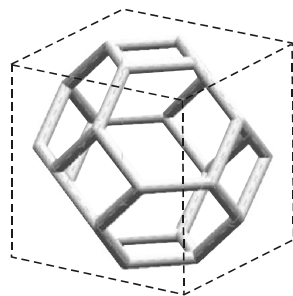


图 1 十四面体晶架

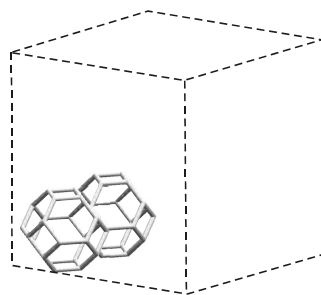


图 2 晶架点阵形式

这种结构的特点是具有高度的对称性, 包括 7 个二面角和 3 个四面角。二面角是指 2 个相邻面之间的夹角, 而四面角是指 4 个相邻面之间的夹角。这些对称性使得十四面体晶架结构在空间中的排列非常紧密。具有高度的对称性和紧密的排列, 使得它在研究晶体结构和性质时具有独特的优势。

1.4 弹性模量与强度的计算

当 Z 个晶架形成点阵形式时, 其点阵材料的刚度矩阵为^[10-11]:

$$C = G^T R G. \quad (1)$$

式中坐标转换矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & l_1 m_1 & m_1 n_1 & n_1 l_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_i^2 & m_i^2 & n_i^2 & l_i m_i & m_i n_i & n_i l_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_z^2 & m_z^2 & n_z^2 & l_z m_z & m_z n_z & n_z l_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 l_i, m_i, n_i 为杆单元与坐标轴 x, y 和 z 间夹角的余弦值。

对角阵 R 表示为:

$$R = \begin{bmatrix} E_1 A_1 / s_1 & & & & & O \\ & \ddots & & & & \\ & & E_i A_i / s_i & & & \\ & & & \ddots & & \\ O & & & & E_z A_z / s_z & \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: E_i 为杆单元的弹性模量; A_i 为第 i 组杆单元的截面积; s_i 为第 i 组杆单元长度所占有的体积。 A_i 与 s_i 的比值反映了杆单元在材料中的体积分数。

对应杆单元力 f 与宏观应力 σ 对应的关系为:

$$\sigma = (G^T S^{-1}) f, \quad f = S(G^T)^{-1} \sigma \quad (4)$$

对角阵 S 为:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & & & & & O \\ & \ddots & & & & \\ & & s_i & & & \\ & & & \ddots & & \\ O & & & & s_z & \end{bmatrix} \quad (5)$$

当坐标转换矩阵不存在逆矩阵时, 杆力与宏观应力的转换关系表达式为:

$$f = (S R G^{-1}) \sigma \quad (6)$$

1.5 晶架参数化模型的构建

由上述分析可知, 十四面体晶架是由六面体空间衍变而来。根据六面体空间的特性, 选取六面体的顶点 A 以及圆柱棱边的半径 r 为特征参数, 给出六面体顶点 A 与晶架顶点 B 的关系, 设计出十四面体晶架结构。十四面体晶架所在的空间六面体的顶点如图 3 所示。

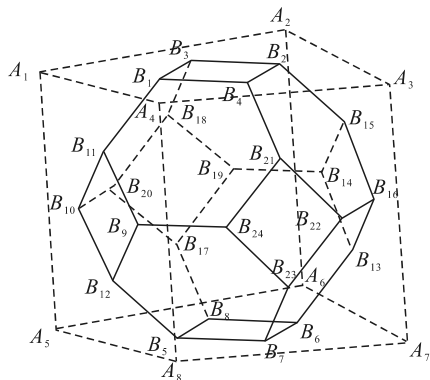


图 3 空间六面体与晶架的关系

其坐标为 $A_i, A_i(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, 8$ 。假设一个面的 4 个顶点为 $[A_1, A_2, A_3, A_4]$, 与之相对的面 4 个顶点为 $[A_5, A_6, A_7, A_8]$, 则其他 4 个面的顶点为 $[A_1, A_4, A_5, A_8], [A_2, A_3, A_6, A_7], [A_3, A_4, A_7, A_8]$ 。处在十四面体晶架的顶点为 $[B_1, B_2, B_3, B_4]$ 与 $[A_1, A_2, A_3, A_4]$ 的关系为:

$$B_1 \begin{pmatrix} xx_1 \\ yy_1 \\ zz_1 \end{pmatrix} = B_1 \begin{pmatrix} \alpha \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + \beta \times (x_1 + x_4) \\ \alpha \times (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) + \beta \times (y_1 + y_4) \\ \alpha \times (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + \beta \times (z_1 + z_4) \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$B_2 \begin{pmatrix} xx_2 \\ yy_2 \\ zz_2 \end{pmatrix} = B_2 \begin{pmatrix} \alpha \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + \beta \times (x_2 + x_3) \\ \alpha \times (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) + \beta \times (y_2 + y_3) \\ \alpha \times (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + \beta \times (z_2 + z_3) \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$B_3 \begin{pmatrix} xx_3 \\ yy_3 \\ zz_3 \end{pmatrix} = B_3 \begin{pmatrix} \alpha \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + \beta \times (x_1 + x_3) \\ \alpha \times (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) + \beta \times (y_1 + y_3) \\ \alpha \times (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + \beta \times (z_1 + z_3) \end{pmatrix}; \quad (9)$$

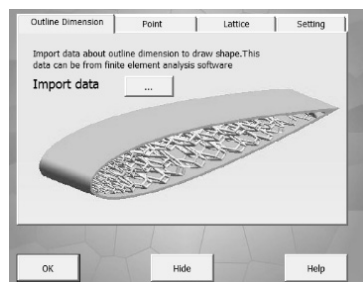
$$B_4 \begin{pmatrix} xx_4 \\ yy_4 \\ zz_4 \end{pmatrix} = B_4 \begin{pmatrix} \alpha \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) + \beta \times (x_1 + x_4) \\ \alpha \times (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) + \beta \times (y_1 + y_4) \\ \alpha \times (z_1 + z_2 + z_3 + z_4) + \beta \times (z_1 + z_4) \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中的 α, β 为晶架顶点与四边形顶点的位置关系。同理可得其他 5 个面所在的四边形的顶点 $[B_5, B_6, B_7, B_8], [B_9, B_{10}, B_{11}, B_{12}], [B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}], [B_{17}, B_{18}, B_{19}, B_{20}], [B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}]$, 连接每个面的 4 个顶点就可得到十四面体的 6 个四边形, 同时连接相邻 2 个面的四边形的顶点就可得到十四面体的线骨架, 根据晶架线骨架生成截面半径为 r 晶架支柱, 进而得到实体模型。

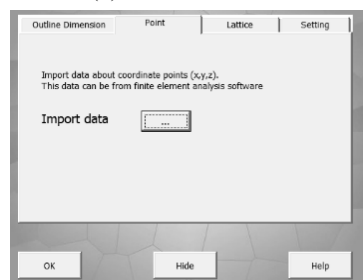
2 蒙皮晶架零件参数化建模方法

CATIA 是法国 Dassault 公司的跨平台的商业 3 维 CAD 设计软件, 在世界航空业界占有重要位置, 是我国航空工业领域主要采用的设计平台^[12]。并且 CATIA P3 V5R21 为重新开发提供了多种设计环境。通过在 VBA 环境中重新开发的名为 Lattice Tool 的工具, 可以快速生成目标模型。Lattice Tool 有 4 个模块, 包括几何形状、数据点离散化、网格和设置参数模块, 根据流程图进行操作。通过这个工具, 原始操作中的 500 或 600 个步骤可以减少到大约 10 个步骤, 从而大大简化人机交互的步骤, 为后续研究节省了时间。图 4 为二次开发 Lattice Tool 的界面。

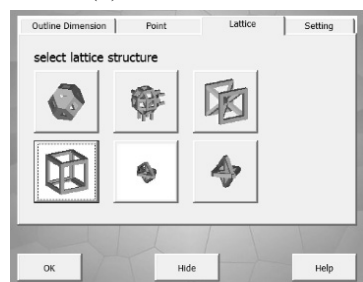
根据计算机几何造型理论, 结合上述十四面体晶架建模过程, 设计了蒙皮—晶架零件的参数化建模方法, 参数化建模流程参考图 5, 主要包括以下 4 个步骤:



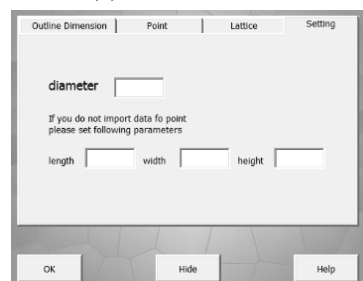
(a) 导入轮廓数据



(b) 导入坐标数据



(c) 选择网络结构



(d) 设置尺寸数据

图4 Lattice Tool 界面

- 1) 首先采用 CATIA 绘制零件的 3 维实体模型。
- 2) 接着采用映射、扫描等方法将零件放入有限元软件中进行离散化,使其生成六面体单元,并控制单元大小及疏密程度,得到零件的六面体单元的 8 个节点坐标值,按照规定的格式输出。
- 3) 将输出的节点坐标值读入到 Matlab 程序中,通过判断分析,得到每个晶架结构所需要的 24 个顶点坐标。
- 4) 再利用 3 维建模软件,根据顶点坐标建立晶架实体模型,并将零件进行抽壳运算操作,得到具有 d 厚度的蒙皮,将其与晶架结构模型进行布尔运算,从而得到蒙皮—晶架结构的零件。

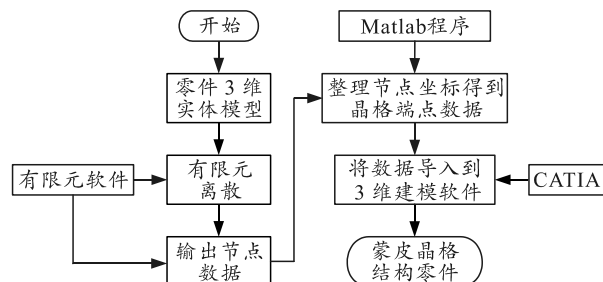


图5 参数化建模流程

选择长方体实体作为实例,其长宽高依次为 50、30、150 mm,如图 6 所示;对长方体模型进行不规则的离散化分,左下角密集一些,共离散了 330 个单元,如图 7 所示;通过提取网格单元节点数据,分别计算对应的十四面体晶架所需要的端点数据并存储;建立每个六面体单元所包含的晶架结构,再离散开来,之后根据晶架与晶架之间的结构端点相互连接,重新构建长方体实体的晶架结构模型;结合长方体实体的蒙皮并与晶架结构模型布尔运算,最终得到填充晶架结构的长方体实体,即蒙皮—晶架结构长方体,如图 8 所示。

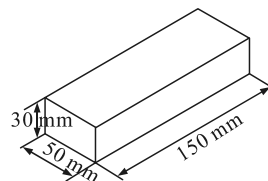


图6 长方体模型

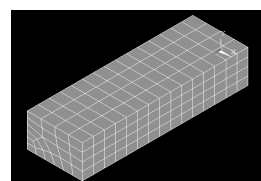
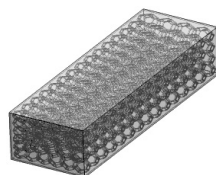
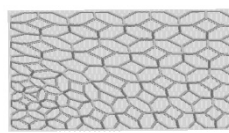


图7 长方体实体离散



(a) 网格分布模型



(b) 网格分布模型

图8 蒙皮晶架结构长方体

3 直升机桨叶的参数化建模与分析

将晶架填入桨叶内部,与传统复合桨叶内部复杂的结构相比,配合蒙皮,使桨叶设计更简洁有效,同时也使桨叶变得更加轻巧。在晶架尺寸上能达到丰富的渐变风格,以满足不同面积桨叶的材质分配要求。为达到相应的桨叶刚度、强度、动力学和疲劳寿命要求,在不同面积实现不同形状的晶架结构。

以模型旋翼桨叶为例进行说明,此为矩形桨叶,翼型为 NACA0015。

3.1 桨叶总体参数

根据模型旋翼实验要求,旋翼共有 2 片桨叶,

考虑到实际应用与 3D 打印的局限, 取桨叶长度 $R=340$ mm。桨叶数据如表 1 所示。

表 1 桨叶数据

桨叶翼型	桨叶长度/mm	桨叶宽度/mm	旋翼转速/(r/min)	桨尖速度/(m/s)	片数	旋翼拉力/N
NACA0015	340	48	3 000	106.8	2	73.6

3.2 桨叶的参数化建模过程

桨叶的参数化建模过程可分成以下步骤:

1) 建立如图 9 所示的矩形桨叶立体模型。

2) 按照要求将 3 维实体模型用扫略的方法进行有限元离散, 其离散的截面如图 10 所示。桨叶的前半部分的网格离散的很密集, 生成的晶架结构数量多, 增加桨叶前端的结构, 使其更好地承受力与力矩, 并使桨叶重心保持在弦向的 1/4 之前; 桨叶中间部分网格比较稀疏, 晶架结构较大, 主要用于支持蒙皮, 保持外形, 也承受力与力矩; 桨叶弦向后段尺寸比较小, 如果生成过于密集的网格, 则不利于晶架生成, 因此可生成多个一层小晶架结构。离散的整体桨叶效果如图 11 所示。

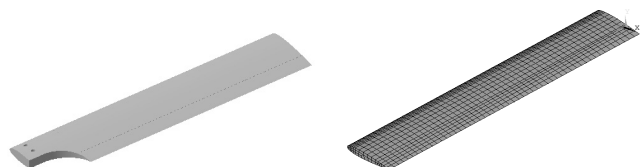


图 9 矩形桨叶 3 维模型 图 10 离散后的桨叶(部分)

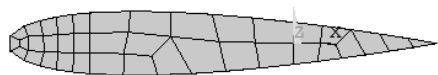


图 11 离散后的剖面

3) 将离散好的单元节点坐标数据生成晶架所需要的端点坐标数据。

4) 在 3 维建模软件中, 生成晶架结构模型, 进行抽壳运算, 生成厚度 0.4 mm 的蒙皮, 进行布尔操作运算, 最终生成填充了晶架结构的矩形桨叶模型, 如图 12 所示, 桨叶截面如图 13 所示。

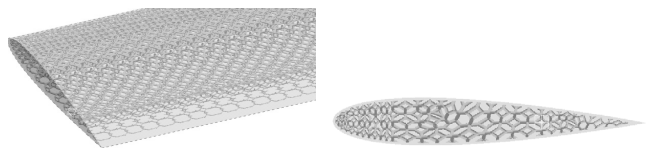


图 12 蒙皮晶架桨叶 图 13 桨叶的截面

3.3 桨叶的力学性能与动力学特性

1) 计算外力与最大力矩。

将填充了晶架结构的矩形桨叶赋予铝合金材料, 计算得出其质量 $m=60$ g, 与传统复合材料相比, 更轻一些。桨叶旋转时由于挥舞运动桨叶会挥舞角 β , 该角度取决于挥舞平面内桨叶拉力, 重力与离心力三者对桨叶根部力矩的平衡。如图 14 所示, 桨叶

一端固支, 绕着轴旋转, 其最大力矩产生在桨叶根部, 此处为危险截面。设桨叶质量为线性分布, 当挥舞角度为 2° 时, 桨叶的拉力为 T , 离心力为:

$$F = \int_0^R m \Omega^2 dr = m \Omega^2 * 0.7R = 1408 \text{ N}. \quad (11)$$

则合力对桨叶根部的力矩为:

$$M = T \times 0.7R - F \times 0.7R \times \sin 2^\circ = 5.82 \text{ N}\cdot\text{m}. \quad (12)$$

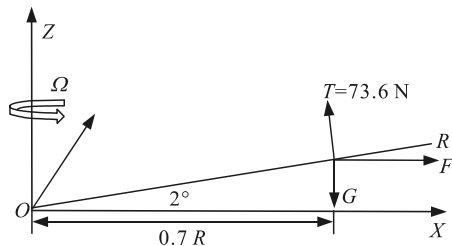


图 14 桨叶受力

2) 桨叶的强度分析。

通过 ANSYS 静力学分析, 进行强度校核。求解后的变形云图, 等效应力与应变云图如图 15—17 所示。

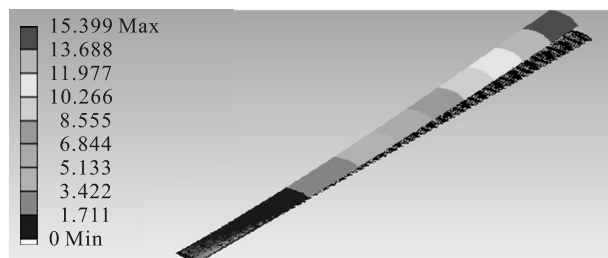


图 15 桨叶变形云

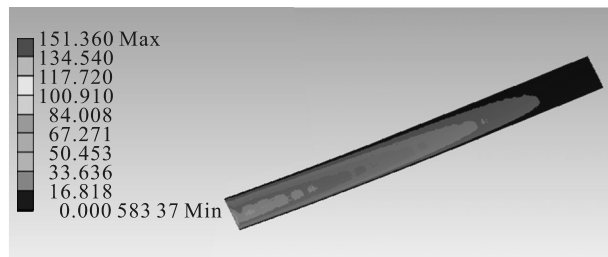


图 16 桨叶应力云

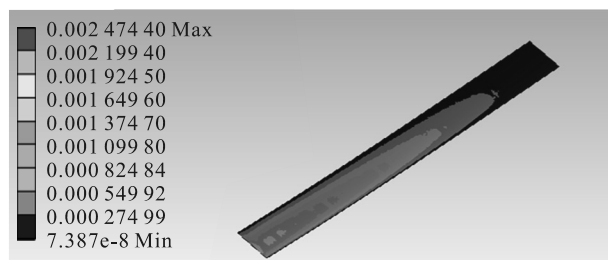


图 17 桨叶应变云

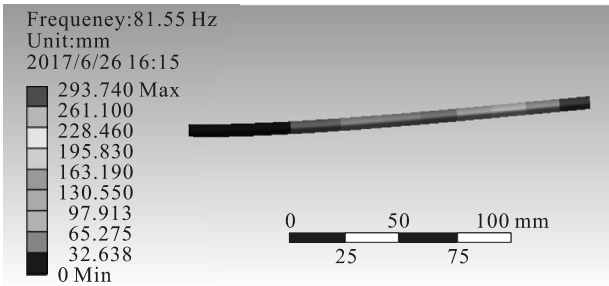
从图 15-17 中可以看出：桨叶的最大变形为 15.399 mm，最大应变为 0.002 474 4 mm，最大应力为 151.36 MPa<278 MPa，危险截面的强度符合要求。

3) 计算桨叶的固有频率。

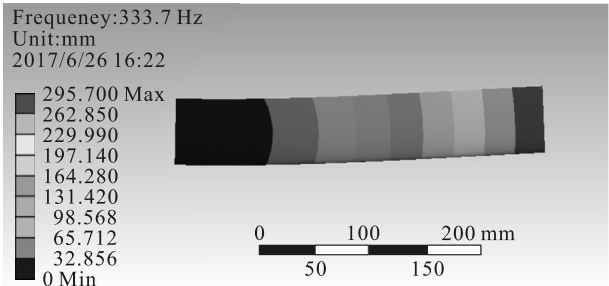
桨叶绕着旋转轴以 3 000 r/min 的速度旋转，计算桨叶的前 6 阶固有频率，其振型如图 18 所示，各阶频率如表 2 所示。

表 2 各阶频率

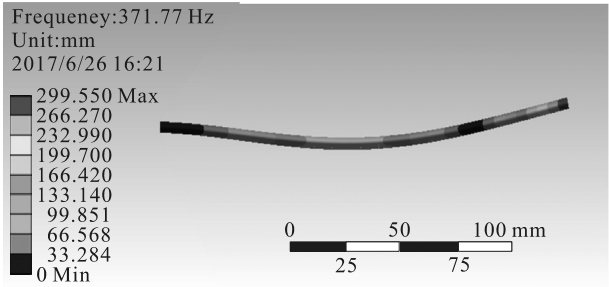
阶数	桨叶长度	桨叶宽度	阶数	桨叶长度	桨叶宽度
1	81.55	1.62	4	687.93	13.75
2	333.70	6.67	5	874.27	17.48
3	371.77	7.44	6	1 326.60	26.53



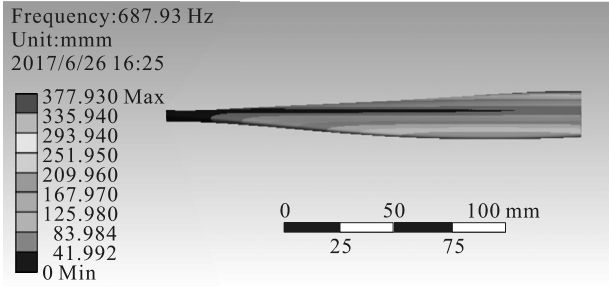
(a) 桨叶挥舞 1 阶振型



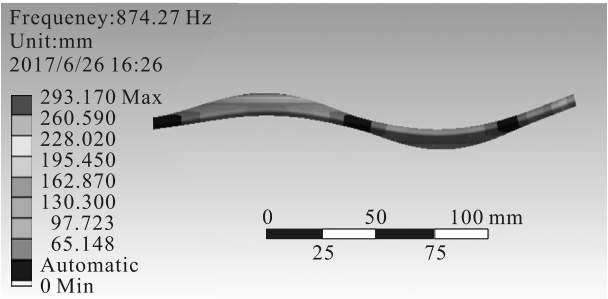
(b) 桨叶摆振 1 阶振型



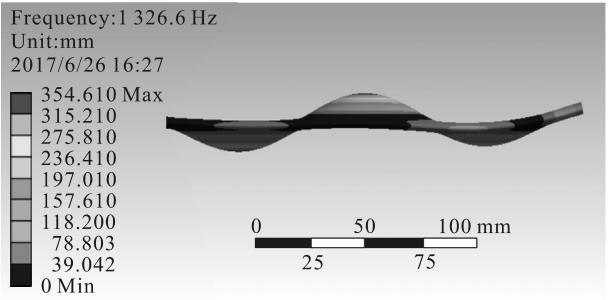
(c) 桨叶挥舞 2 阶振型



(d) 桨叶扭转 1 阶振型



(e) 桨叶挥舞 3 阶振型



(f) 桨叶挥舞 4 阶振型

图 18 桨叶的前 6 阶固有频率

可以看出，在不产生共振的情况下，桨叶的固有频率配置达到了要求。

4 结束语

笔者以十四面体晶架为研究对象，建立了一种蒙皮—晶架结构的参数化建模方法。对十四面体晶架结构进行了详细的分析，以便更好地理解其特性。提出了一种参数化建模方法，通过调整参数，可以实现对蒙皮—晶架结构的灵活设计。该方法具有很高的通用性，可应用于不同类型的直升机桨叶设计。为验证该方法，设计了一个具有蒙皮—晶架结构的 3D 打印桨叶，并进行了有限元分析。结果表明，该桨叶在静强度和动特性方面均满足要求，证明了该方法有效。

笔者提出一种基于十四面体晶架的蒙皮—晶架结构参数化建模方法，并成功应用于 3D 打印桨叶的设计。未来将继续深入研究蒙皮—晶架结构的性能优化设计方法，拓展其在更多直升机上的应用，为轻质高性能材料的发展做出贡献。

参考文献：

[1] 张钱城，卢天健，闻婷. 轻质高弱点阵金属材料的制备及其力学性能强化的研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2): 157-169.

[2] 范华林，杨卫. 轻质高弱点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 146(1): 99-112.