



基于 ABAQUS 的复合材料垂直轴潮流能叶片有限元建模与分析

李俊雄^{1,2}, 王遵^{2*}, 马秋成¹, 张亚新², 彭超义², 邓航²

(1. 湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)



李俊雄

摘要: 为了探究复合材料铺层结构对潮流能叶片力学结构特性的影响,选择纤维增强复合材料进行潮流能叶片的设计研究,旨在设计出结构性能更加优越的潮流能复合材料叶片。为潮流能叶片设计了2种不同形式的复合材料铺层结构方案,一种方案叶片前缘铺层纤维不连续,另一种方案保证叶片前缘的铺层纤维连续;并利用 ABAQUS 软件建立其有限元模型,分别对潮流能叶片在额定流速工况和极限流速工况下2种铺层结构方案叶片的力学结构特性进行数值模拟仿真分析,探究2种铺层方案对叶片结构性能的影响。结果表明,叶片前缘铺层纤维的连续性可以提高叶片前缘的抗冲击性,从而有效地避免工作中叶片前缘铺层失效的情况,而且可以显著提高复合材料叶片的强度和刚度。研究成果可为以后潮流能叶片及同类型复合材料叶片的研制提供技术参考。

关键词: 潮流能叶片;复合材料;有限元建模;铺层结构;壳单元

中图分类号: TG156 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)04-0385-06

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0083

李俊雄,王遵,马秋成,等.基于 ABAQUS 的复合材料垂直轴潮流能叶片有限元建模与分析[J].排灌机械工程学报,2022,40(4):385-390.

LI Junxiong, WANG Zun, MA Qiucheng, et al. Finite element modeling and analysis of vertical axis composite tidal current energy blade based on ABAQUS[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2022,40(4):385-390.(in Chinese)

Finite element modeling and analysis of vertical axis composite tidal current energy blade based on ABAQUS

LI Junxiong^{1,2}, WANG Zun^{2*}, MA Qiucheng¹, ZHANG Yaxin², PENG Chaoyi², DENG Hang²

(1. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China; 2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: In order to explore the influence of composite laminate structure on the mechanical structures characteristics of tidal current energy blades, the fiber-reinforced composite was selected to design the tidal current energy blades to get a kind of composite tidal current energy blade with better structure and performance. Two different composite lamination schemes were designed for tidal current energy blades and the finite element model was established by ABAQUS. In one scheme, the laminated fibers at the leading edge of the blade were discontinuous, and in the other scheme, the laminated fibers at the leading edge of the blade were continuous. The mechanical structure characteristics of the two layered structure schemes of the tidal current energy blade under the normal working condition and the extreme working condition were numerically simulated and analyzed to explore the influence of the two layered schemes on the structural performance of the blades. The results show that the continuity of

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-11-19; 网络出版时间: 2022-04-20

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220420.1114.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1501202)

第一作者简介: 李俊雄(1994—),男,山西临汾人,硕士研究生(972965237@qq.com),主要从事数字化设计与制造研究。

通信作者简介: 王遵(1980—),男,江苏泰兴人,教授级高级工程师(wangzun1@csrzc.com),主要从事复合材料设计研究。

blade leading edge ply fiber can improve the impact resistance of blade leading edge and effectively avoid the failure of blade leading edge ply in operation. Moreover, the strength and stiffness of composite blades can be significantly improved. The results can give a technical suggestion for the development of tidal current energy blades in the future.

Key words: tidal current energy blade; composite; finite element modeling; lamination structure; shell elements

自复合材料凭借其比强度和比模量高的优良特性问世以来,引起了特种领域研究人员的关注与重视,且已发展成为国防、航空、海洋等特种领域的关键材料^[1].复合材料的出现使研究人员设计出高强度的潮流能叶片成为可能^[2-4].

随着国内外关于潮流能叶片研究的日益广泛,对复合材料潮流能叶片的有限元数值模拟仿真也做了很多研究^[5-7].张理等^[8],王勛成等^[9]以水平轴潮流能水轮机复合材料叶片为例,基于复合材料弯扭耦合理论,采用双向流固耦合方法研究了复合材料叶片的自适应性,结果表明,对称铺层可利用叶片的弯扭耦合特性,使叶片具备自适应性,从而提高水轮机的水动力性能和结构性能.张亮等^[10]基于叶素动量理论和复合材料力学设计开发出了满足 2 m/s 流速要求的复合材料潮流能叶片.有限元分析结果表明,该叶片可满足其服役要求,且具有较高的安全裕度.李志川等^[11]以 100 kW 潮流能水轮机复合材料叶片为研究对象,对复合材料叶片的内部结构(蒙皮、主梁和腹板)进行铺层优化设计,优化后的叶片质量降低了 13.79%.张亮等^[12]针对水平轴潮流能水轮发电机复合材料叶片,提出了箱梁式和腹板式 2 种全复合材料叶片结构.通过 ANSYS 有限元软件对 2 种结构进行分析对比,表明箱梁式叶片的结构更为合理.

文中以垂直轴潮流能叶片为研究对象,设计 2 种不同形式的复合材料铺层方案,基于 ABAQUS 有限元仿真分析软件分别建立有限元仿真模型;对 2 种复合材料潮流能叶片在不同工况条件下的强度设计进行校核,分别提取潮流能叶片在额定流速和极限流速 2 种工况下的强度分析结果.依据有限元仿真分析结果,探究 2 种铺层方案对叶片结构性能的影响,并分析所设计的 2 种复合材料铺层结构的优缺点和适用性,拟为以后同类型复合材料叶片的研究提供依据.

1 复合材料潮流能叶片层合板壳单元理论

单向复合材料中纤维按一个方向排列,纤维方

向称为纵向,用 1 或者 L(Longitudinal)表示,垂直于纤维方向称为横向(也称为基体方向),用 2 或者 T(Transverse)表示,单层材料厚度方向用 3 表示;由于纤维有方向性,所以单层材料表现出不均匀性和各向异性.复合材料潮流能发电叶片采用玻璃纤维增强环氧树脂复合材料(GFRP),属于各向异性材料,在平面应力状态下单层复合材料的应力应变关系为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\gamma_{31} = \gamma_{23} = 0, \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2, \quad (3)$$

式中: S 为柔度矩阵; S_{ij} 为柔度系数,由工程弹性常数得到: $S_{11} = \frac{1}{E_1}$, $S_{22} = \frac{1}{E_2}$, $S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$, $S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_1} = \frac{-\nu_{12}}{E_2}$, $S_{13} = \frac{-\nu_{31}}{E_1}$, $S_{23} = \frac{-\nu_{32}}{E_2}$,其中, E_1, E_2, G_{12} 分别为复合材料单层板展向、径向弹性模量和剪切弹性模量; ν_{ij} 为泊松比.

2 复合材料潮流能叶片设计

2.1 潮流能发电机组三维模型

文中研究的垂直轴潮流能发电机组的三维模型如图 1a 所示;该垂直轴潮流能发电机组由 4 个安装在支架上的叶片组成,单个潮流能叶片沿叶高方向采用等截面对称结构的翼型,翼型截面如图 1b 所示,叶片采用实心结构.叶片的基本参数:叶片展长为 3 m,叶片弦长为 220 mm,叶片厚度为 40 mm,叶轮半径为 3 m,叶片数为 4 个.

2.2 潮流能发电机组工作原理

图 2 为垂直轴潮流能发电机组工作原理图.如图所示,潮流能发电机组叶片绕坐标原点作逆时针圆周运动, v_w 为水流的大小和方向, ω 为发电机组的旋转角速度, R 为发电机组叶轮半径(叶片中心到旋转轴轴心的横向距离), ω_R 为叶轮旋转时叶片周围的流体域相对于叶片的切向速度.在 t 时刻,流体

域相对于叶片的切向速度 ω_R 与水流速度 $v_{水}$ 的夹角为 90° , 图中的 v_R 为两者的合速度, 即流体域对于叶片的相对运动速度; 流体域与叶片的相对运动使得叶片受到升力 L 的作用, 升力 L 的方向与流体域相对叶片的相对运动速度方向垂直, 与此同时在运动中叶片也受到流体阻力 D_r 的作用, 如图 2 所示; 叶片在旋转 1 周的过程中, 升力 L 和阻力 D_r 的大小和方向在不停地随着角度的变化而变化, 共同推动着叶片进行旋转运动。

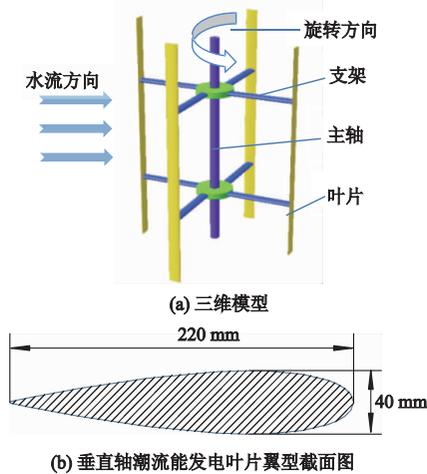


图 1 垂直轴潮流能发电机组模型
Fig.1 Model of vertical axis tidal current energy generator set

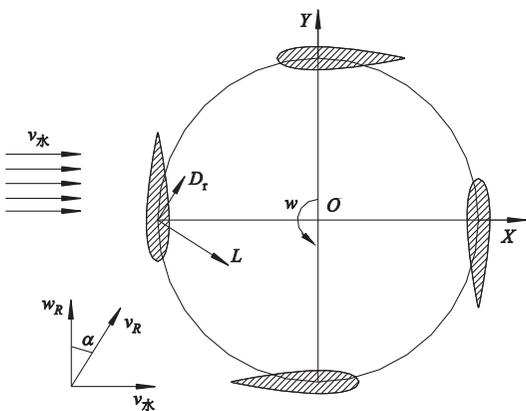


图 2 垂直轴潮流能发电机组工作原理图
Fig.2 Working principle diagram of vertical axis tidal current energy generator set

2.3 复合材料潮流能叶片铺层方案设计

图 3 为叶片 2 种复合材料铺层结构设计方案, 铺层方案 1 的结构形式如图 3a 所示, 叶片的叶高方向为纤维铺设方向, 即纤维 0° 角方向, 沿叶片的几何中面将叶片分为上下 2 部分, 然后以叶片的几何中面 MS (mid surface) 为基础面分别向叶片的压力面 PS (pressure side) 和负压面 SS (suction side) 铺设

预浸料; 铺层方案 2 的结构形式如图 3b 所示, 将叶片分为内外 2 个部分, 内部实体采用与方案 1 相同的铺层方式, 外部实体的铺层以内部实体的外廓曲面 S_1 为基础面向叶片的外廓曲面 S_2 铺设预浸料, 外部实体的铺层要将内部实体的铺层包裹起来, 保证叶片前缘增强纤维的连续性。

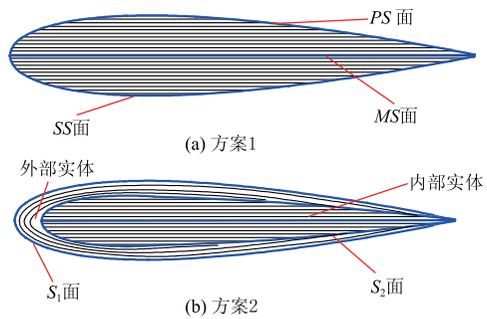


图 3 复合材料潮流能叶片铺层设计方案
Fig.3 Layup design scheme for composite tidal current energy blade

2.4 复合材料潮流能叶片铺层结构设计

依据复合材料层合板设计准则, 选用标准铺层角度 $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 和 90° , 铺层坐标系 X 轴方向为叶片叶高方向, Y 轴方向为叶片弦长方向, Z 轴方向为叶片厚度即铺层堆栈方向. 图 4 为进行复合材料铺层结构设计准备的潮流能叶片几何外形曲面, 坐标系为铺层结构设计坐标系。

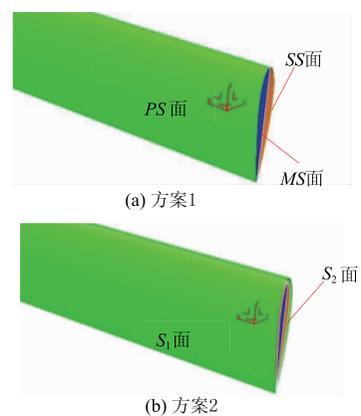


图 4 复合材料潮流能叶片几何外形曲面
Fig.4 Geometry surface of composite tidal current energy blade

复合材料潮流能叶片铺层设计方案 1: 复合材料单向预浸料厚度为 0.26 mm , 叶片整体最大厚度 40 mm , 因此铺层设计数量为 138 层, 叶片几何中面 MS 两侧分别对称铺设 69 层, 叶片前缘到叶片后缘铺层数量随叶片厚度先逐渐增大再逐渐减小, 以得到叶片的外形结构。

复合材料潮流能叶片铺层设计方案 2: 选用厚

度为 0.26 mm 的单向预浸料,叶片内部实体采用与铺层方案 1 相同的铺层方式,铺层数量设计为 90 层,沿中面两侧分别对称铺设 45 层;叶片外部实体设置铺层数量为 23 层,从叶片内部实体外表表面 S_1 到叶片外表表面 S_2 铺层面积先逐层递减再逐层增大,以得到叶片的外形结构.2 种铺层方案中各角度铺层所占比例不同,如表 1 所示.

表 1 复合材料叶片铺层组中各角度铺层比例
Tab.1 Layup angle ratio of composite tidal current energy blade

角度	方案 1		方案 2	
	铺层数量	比例	铺层数量	比例
0°	76	55.0%	63	55.8%
45°	26	18.8%	20	17.7%
-45°	24	17.4%	20	17.7%
90°	12	8.8%	10	8.8%
总计	138	100.0%	113	100.0%

3 复合材料潮流能叶片有限元模型

在 ABAQUS 中完成潮流能复合材料叶片连续壳单元(continuum shell)模型的创建.叶片选用的玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的性能参数:拉伸模量 E_x, E_y, E_z 分别为 43.0, 6.7, 6.7 GPa;剪切模量 G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} 分别为 5.0, 4.1, 4.1 GPa;泊松比 $\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ 分别为 0.366, 0.217, 0.217;密度 ρ 为 1.8×10^{-9} kg/mm³;厚度 t 为 0.26 mm.

复合材料潮流能叶片有限元模型的材料模型选择使用层材料(Lamina)并设置相关材料属性参数,网格单元类型选择使用八节点六面体单元 SC8R 和六节点楔形单元 SC6R,对划分好的面网格划分叶片实体网格单元.图 5,6 分别为铺层方案 1 和方案 2 对应的复合材料潮流能叶片有限元模型以及部分单元的铺层信息,图中 P001—P011 为铺层编号, t 为所选复合材料单向预浸料的厚度, φ 为单向预浸料的铺设角度.

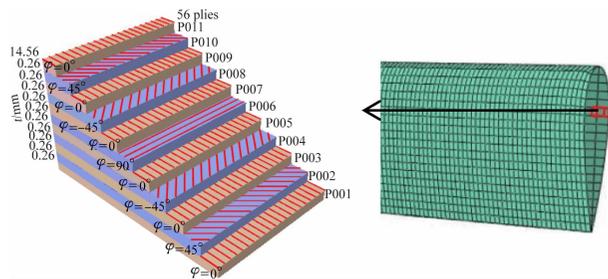


图 5 铺层方案 1 复合材料叶片有限元模型
Fig.5 Layup scheme 1 finite element model of composite tidal current energy blade

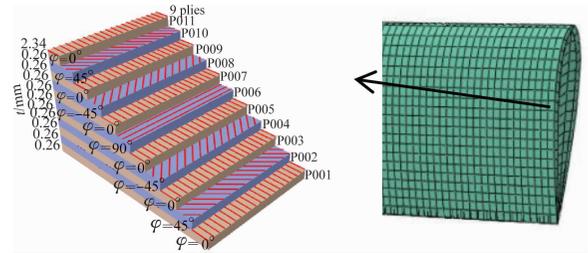


图 6 铺层方案 2 复合材料叶片有限元模型
Fig.6 Layup scheme 2 finite element model of composite tidal current energy blade

4 复合材料潮流能叶片刚度、强度计算校核

表 2 为潮流能发电机组在额定流速工况和极限流速工况下的工况参数.

表 2 发电机组工况表
Tab.2 Working conditions of generator sets

工况	$v/(m \cdot s^{-1})$	$n/(r \cdot min^{-1})$	P/kW	$T/(kN \cdot m)$
额定流速	1.7	20	507	370
极限流速	2.3	31	900	700

4.1 网格无关性验证

选取叶片刚度和强度计算校核中的叶片总体变形量 U 与最大等效应力 M_{max} 作无关性检验.铺层设计方案 1,2 对 A,B,C,D 这 4 种网格数量 N 进行无关性检验,得出的结果如表 3,4 所示.

表 3 铺层方案 1 网格无关性检验结果
Tab.3 Grid independence verification results of layup scheme 1

类型	N	额定流速		极限流速	
		U/mm	M_{max}/MPa	U/mm	M_{max}/MPa
A	6 142	115.2	458.3	143.03	559.1
B	8 263	122.3	465.3	149.70	568.3
C	10 080	132.1	471.7	160.07	574.0
D	12 410	133.4	470.8	161.35	575.0

表 4 铺层方案 2 网格无关性检验结果
Tab.4 Grid independence verification results of layup scheme 2

类型	N	额定流速		极限流速	
		U/mm	M_{max}/MPa	U/mm	M_{max}/MPa
A	14 832	50.87	352.3	59.10	433.5
B	17 450	53.35	359.8	61.47	442.7
C	19 908	61.23	371.6	74.51	452.3
D	22 100	60.45	370.9	75.20	453.4

由表 3,4 可知,对方案 1 而言,1 万的网格数量已达到网格无关,故方案 1 的计算网格数选取 1 万.对方案 2 而言,2 万的网格数量已达到网格无关,故

方案2的计算网格数选取2万。

4.2 叶片刚度校核

图7,8分别为叶片在工作中的总体变形仿真结果,叶片变形主要为X方向即叶片厚度方向的弯曲变形,最大变形均出现在叶片两端的位置,最小变形位置在叶片与支架连接处。

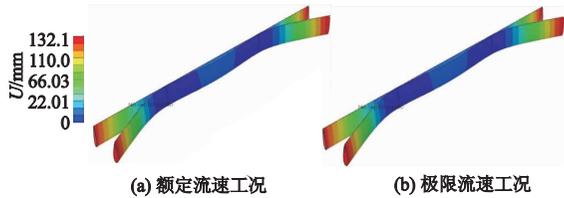


图7 铺层方案1叶片总体变形云图
Fig.7 Deformation diagram of composite tidal current energy blade of the first layup design scheme

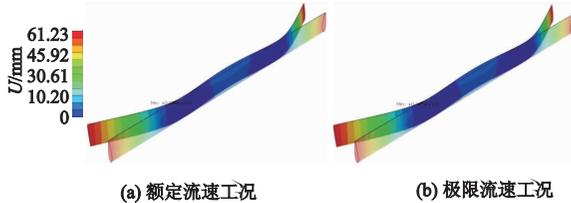


图8 铺层方案2叶片总体变形云图
Fig.8 Deformation diagram of composite tidal current energy blade of the second layup design scheme

表5为复合材料潮流能叶片刚度。

表5 复合材料潮流能叶片刚度
Tab.5 Composite tidal current energy blade's stiffness

变形量	铺层方案1		铺层方案2	
	额定流速工况	极限流速工况	额定流速工况	极限流速工况
U/mm	132.10	160.07	61.23	74.51
U_x/mm	132.10	160.07	61.22	74.51
U_y/mm	1.15	1.43	0.85	1.08
U_z/mm	4.70	5.80	2.38	2.90

表5中 U 为叶片的总体变形量, U_x 为叶片X方向变形量, U_y 为叶片Y方向变形量, U_z 为叶片Z方向变形量.对比表5中的计算结果,2种铺层设计方案叶片的总体变形表现为X方向的弯曲变形,且铺层方案2的叶片比方案1的叶片的刚度大。

4.3 叶片强度校核

图9,10分别为2种铺层设计方案下叶片在工作中的强度仿真计算结果, M 为叶片的等效应力,从图中叶片等效应力分布云图可以看出,2种铺层方案叶片在不同工况下的应力情况,最大应力均出现在叶片与支架连接处。

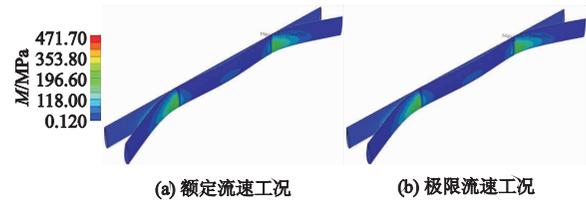


图9 铺层方案1叶片等效应力云图
Fig.9 Von Mises distribution on composite tidal current energy blade of the first layup design scheme

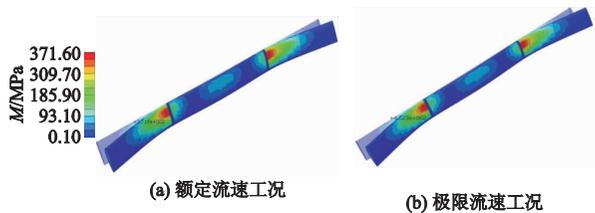


图10 铺层方案2叶片等效应力云图
Fig.10 Von Mises distribution on composite tidal current energy blade of the second layup design scheme

表6为复合材料叶片强度计算结果,表中 s_{11} 为沿叶片纤维方向的应力值, s_{22} 为叶片纤维横向的应力值, s_{12} 为叶片铺层面内剪切应力。

表6 复合材料叶片强度计算结果
Tab.6 Analysis result of composite tidal current energy blade's intensity MPa

应力	安全值	铺层方案1		铺层方案2	
		额定流速工况	极限流速工况	额定流速工况	极限流速工况
$M(\text{Max,Min})$	630	(471.70,0.12)	(574.00,0.16)	(371.60,0.14)	(452.30,0.20)
$s_{11}(\text{Max,Min})$	630	(482.80,0.05)	(587.40,0.05)	(380.00,0.14)	(462.50,0.20)
$s_{22}(\text{Max,Min})$	220	(83.60,0.02)	(101.70,0.03)	(62.40,0.02)	(76.00,0.03)
$s_{12}(\text{Max,Min})$	100	(65.40,0.01)	(79.70,0.01)	(51.00,0.01)	(62.10,0.02)

对比表6中的应力计算结果,复合材料叶片工作中主要受到纤维方向的拉应力,且各方向的最大应力值均小于材料的许用强度值,满足复合材料叶片的强度设计要求.2种工况条件下,铺层方案2叶片在各方向的应力值均要比铺层方案1的叶片在各

方向上的应力值小,且在叶片纤维方向上的应力值相差最大,最大相差21.3%;因而对于相同尺寸的潮流能叶片而言,采用复合材料铺层方案2的叶片与采用铺层方案1的叶片相比较可以将叶片的强度提高20%左右。

综上所述,对于潮流能叶片及同类型的复合材料叶片,采用铺层方案2所设计的叶片不仅可以保证叶片前缘铺层纤维的连续性,提高叶片前缘的抗冲击性,有效避免工作中叶片前缘铺层失效的情况,而且可以显著提高复合材料叶片的强度和刚度。

5 结 论

对2种铺层设计方案下潮流能叶片不同工况条件下的强度刚度分析计算,结果显示铺层方案2所设计的叶片与铺层方案1所设计的叶片相比较刚度和强度都得到了很大的提升。

1) 设计了2种潮流能叶片实心复合材料铺层设计方案,并使用专业的复合材料设计软件 CATIA CPD 模块完成潮流能叶片的复合材料铺层结构设计。

2) 采用有限元法进行数值模拟仿真分析,实现了潮流能叶片复合材料铺层设计方案的快速调整及优化,有效地缩短了复合材料产品的生产周期,降低了研发成本。

3) 分析对比了2种铺层设计方案的有限元仿真结果,结果表明在复合材料铺层设计中保证叶片前缘增强纤维的连续性可以有效改善叶片的强度、刚度等力学结构性能。

参考文献 (References)

- [1] 张亮,李志川,张学伟,等.垂直轴潮流能水轮机研究与利用现状[J].应用能源技术,2011(9):1-7.
ZHANG Liang, LI Zhichuan, ZHANG Xuewei, et al. The status of research and application of vertical axis tidal turbine[J]. Applied energy technology, 2011(9): 1-7. (in Chinese)
- [2] SONG Ke, WANG Wenquan, YAN Yan. Experimental and numerical analysis of a multilayer composite ocean current turbine blade [J]. Ocean engineering, 2020, 198:1-11.
- [3] XIA Yiqing, KEN Takagi. Load acting on ocean current turbine blades in shear flow [C]//Grand renewable energy proceedings,2018.
- [4] TAKUYA S, HASSAN M. Analysis of large-scale ocean current turbine blades using fluid-structure interaction and blade element momentum theory[J]. Ships and offshore structures, 2018,13(5):1-8.
- [5] DAJANI S, SHEHADEH M, SAQR K M, et al. Numerical study for a marine current turbine blade performance under varying angle of attack [J]. Energy procedia, 2017,119:898-909.
- [6] KATSUTOSHI S, JUNICHIRO M, TSUMORU S, et al. Scale-model experiments for the surface wave influence on a submerged floating ocean-current turbine[J]. Energies, 2017,10(5):1-12.
- [7] 白杨,杜敏,周庆伟,等.潮流能发电装置现状分析[J].海洋开发与管理,2016,33(3):57-63.
BAI Yang, DU Min, ZHOU Qingwei, et al. Proceeding of tidal current energy conversion system[J]. Ocean development and management, 2016, 33(3): 57-63. (in Chinese)
- [8] 张理,李志川.潮流能开发现状、发展趋势及面临的力学问题[J].力学学报,2016,48(5):1019-1032.
ZHANG Li, LI Zhichuan. Development status, trend and the problems of mechanics of tidal current energy [J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanic, 2016,48(5): 1019-1032. (in Chinese)
- [9] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [10] 张亮,何环宇,张学伟,等.垂直轴水轮机单向流固耦合数值研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):80-84.
ZHANG Liang, HE Huanyu, ZHANG Xuewei, et al. One way fluid and structure interaction numerical analysis of vertical axis tidal turbine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2014, 42(5): 80-84. (in Chinese)
- [11] 李志川,张亮,孙科,等.垂直轴潮流水轮机数值模拟研究[J].太阳能,2011,32(9):1321-1326.
LI Zhichuan, ZHANG Liang, SUN Ke, et al. Numerical simulation of vertical axis tidal turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(9): 1321-1326. (in Chinese)
- [12] 张亮,李志川,刘健,等.垂直轴水轮机耦合数值模拟研究[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(S1):228-231.
ZHANG Liang, LI Zhichuan, LIU Jian, et al. Coupled numerical simulation of vertical axis tidal turbine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(S1):228-231. (in Chinese)

(责任编辑 朱漪云)