[文章编号] 1003－4684(2026)01-0006-06

风力机叶片建模优化及等几何分析可行性研究

汪 泉，夏 威，徐唐杰

（湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 以 NURBS 基函数作为设计形函数，通过等几何分析方法能实现叶片建模与结构有限元分析无缝衔接，克服了传统方法在几何模型向分析模型转换过程中因网格划分所引入的几何误差问题。为提高基于 NURBS 曲线的叶片建模效率，摒弃传统手动调整控制点拟合目标翼型的方法，提出一种通过遗传算法自动调整控制点的实验方法。结果表明，在满足曲率光滑连续性及气动性能的同时，叶片的 NURBS 建模效率提高，建模时间由 137 s 降至 19 s。叶片等几何分析结果误差较小，对比有限元分析结果的最大误差为 5.64%，验证了其用于等几何分析的可行性，对后续风力机叶片的一体化设计与优化具有重要意义。

[关键词] 曲率连续性；NURBS 曲线；等几何分析；叶片建模；遗传算法

[中图分类号] TK83 [文献标识码] A

非均匀有理 B 样条(non-uniform rational b-splines，NURBS)因其强大的几何表达能力和与 CAD 系统的天然兼容性，已成为一种先进的曲线曲面建模方法，相比传统的网格建模，能更好地控制表面曲面率，提升建模质量。基于 NURBS 的 CAD 软件建模，能简化网格并提升其质量，实现 CAD 与 CAE(computer aided engineering)的紧密结合，缩短了模型的分析时间，从源头上减少了分析误差。Nguyen[1]使用多项式样条在分层网格上对薄壳进行几何分析，实现了模型的 C^1 连续性。张萌等[2]通过给定的离散点坐标来计算叶片对应位置上的翼型模型信息，结合有限元软件分析了叶片的静强度和模态等，为叶片的建模优化提供重要参考。张为民[3]利用 NURBS 定义了叶片模型的数据，实现了叶片的参数化设计，为结构分析提供了基础。汪泉[4]等将翼型泛函集成理论与叶片截面刚度矩阵计算模型相结合，提出了中等厚度翼型风力机气动性能与结构刚度特性一体化设计方法，实现了叶片的气动性能与叶片截面刚度特性同时提高。Nejadkkhaki[5]基于启发式搜索算法为 20 kW 叶片数据中的每个点找到扭转角度，结合 Navier-stokes 方程和 CFD 验证了模型的正确性。刘宏亮[6]探讨了基于等几何分析的结构优化发展方向(主要包括形状优化、拓扑优化和尺寸优化等)，并说明了等几何优化的方法。杨书益[7]等对基于 NURBS 建模的风力机叶片进行等几何分析，在保证计算结果精度的条件下，节约了大量计算时间，提高了求解的效率。Jahanbin[8]提出了一种新思路，将等几何分析和样条维分解共同应用于求解线性弹性的随机边值问题中。薛亚强[9]利用 NURBS 软件在基于等几何分析的基础上对三维椭圆内部声场建模及分析，对比等几何分析结果和解析后认为等几何分析具有良好收敛性和计算精度。

传统 NURBS 叶片建模在输入控制点坐标时，是通过手动调整控制点坐标使 NURBS 曲线与目标叶素尽可能拟合，此过程耗时显著，效率偏低。为提升等几何分析效率，需缩短叶片 NURBS 建模时间。本研究旨在提高建模效率、评估曲率连续性影响，并为等几何分析提供工程实用案例。而在等几何分析相关的文献中，基于 NURBS 建模的风力机叶片表面曲率是否连续的问题较少涉及，而翼型的表面曲率连续性与翼型表面流体的分离和失速密切相关，因此分析 NURBS 建模的叶片表面曲率连续性及气动性能，也同样具有研究价值。本文以 NREL5MW 风力机叶片为例，提出了一种通过算法编程实现控制点坐标的自动调整的 NURBS 建模方式，并对比新叶片与原始叶片表面曲率连续性及气动性能，从而验证 NURBS 叶片建模实现等几何

[收稿日期] 2024－04－16

[第一作者] 汪 泉(1984－)，男，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为机械系统优化设计、风力发电机叶片关键技术、机器人技术。

[通信作者] 夏 威(1998－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为风力发电机叶片关键技术。

分析的可行性。

1　叶片 NURBS 建模优化

结合遗传算法优化传统 NURBS 建模可以很好地解决传统建模手动调整控制点坐标耗时长的问题。图 1 为遗传算法优化 NURBS 建模流程，其建模过程如下：运用积累弦长参数化法从已知的叶素数据坐标中提取每个叶素一定数目的控制点，并从中均匀提取部分坐标作为父代种群输入 NURBS 曲线。计算当前种群的适应度（即拟合度），若达到预设的收敛精度或最大迭代次数，则输出最优控制点；否则，进行选择、交叉、变异操作，生成新一代种群，并重复此过程。

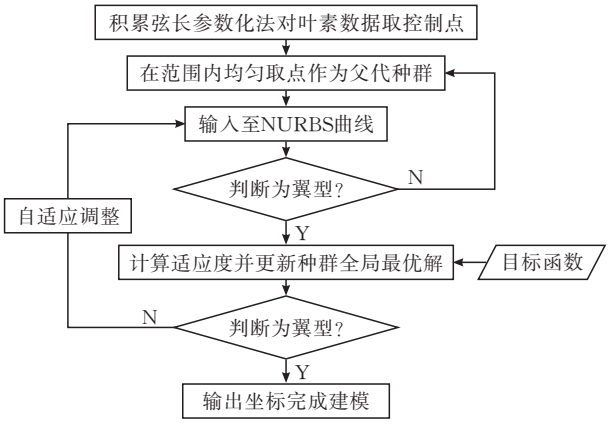


图 1　遗传算法优化 NURBS 建模流程

1.1　目标函数

以得到的 NURBS 曲线与目标翼型之间的拟合度最大值 $f(x)$ 作为目标函数：

$$f(x)=\max\left(1-\sqrt{\left(\frac{\sum(y-y^*)^2}{\sum y^2}\right)}\right) \tag{1}$$

式中：$f(x)$ 为无量纲拟合度指标；y 为 NURBS 曲线各点纵坐标值；y^* 为目标翼型各点纵坐标值；$f(x)$ 越接近 1，说明曲线拟合得越好。

1.2　设计变量

NURBS 曲线特性由控制点所决定。已知目标翼型的数据，通过积累弦长参数化法反求出目标翼型的 200 个控制点，从 200 个控制点中均匀取 16 个控制点纵坐标值作为设计变量。设计变量控制范围：

$$y_n-0.05\leqslant y_n\leqslant y_n+0.05,\ n=1,2,\cdots,16$$

1.3　优化结果及对比分析

采用遗传算法得到拟合翼型，相关参数为：种群大小为 30，杂交率为 0.7，选择率为 0.5，最大迭代次数为 50。表 1 列出了通过自动和手动调整控制点生成翼型的收敛数据。对比结果显示，自动与手动优化方法得到的拟合翼型在几何轮廓上差异微小。

表 1　翼型收敛数据对比

生成翼型方式	标准偏差		最小残差	最大残差	拟合度	时间/s
	上翼面	下翼面				
手动调整控制点	7.566×10^{-4}	7.651×10^{-4}	-1.05×10^{-3}	2.402×10^{-3}	0.9884	137
自动调整控制点	6.116×10^{-4}	6.994×10^{-4}	-1.345×10^{-3}	1.143×10^{-3}	0.9903	19

图 2 所示为手动和自动调整控制点拟合 NACA64-618 翼型几何型线收敛效果。

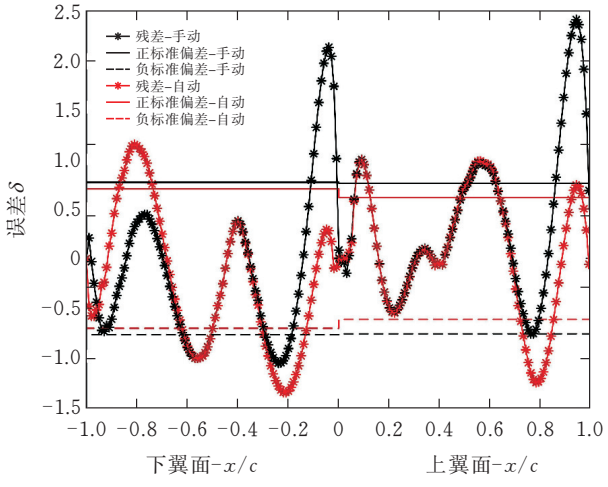


图 2　手动和自动调整控制点拟合 NACA64-618 翼型几何型线收敛效果

由图 2 可见，自动调整控制点所得拟合翼型与手动调整控制所得拟合翼型数据并无太大误差，其中拟合度相对误差为 −0.192%（以手动调整结果为基准）。但手动调整控制点拟合翼型在拟合度上略优于自动，这是因为在自动调整控制点拟合翼型中，所得控制点满足迭代终止条件后便输出控制点生成翼型，导致结果不收敛的情况。实验数据表明，自动优化方法在保持高拟合度（0.9903）的同时，将建模时间从 137 s 大幅缩短至 19 s（表 1），显著提升效率。

2　翼型表面曲率及气动性能分析

2.1　NUBRS 拟合翼型表面曲率

为研究 NURBS 拟合翼型的表面曲率分布情况，以及对气动性能的影响，以 NREL5MW 叶片 31 个叶素中的 NACA64-618 翼型为原始翼型，通

过 NUBRS 拟合翼型，并与原始翼型表面曲率进行对比，验证基于 NURBS 曲线拟合翼型的可行性。程江涛[10]等对相对厚度为 21%的四种风力机翼型进行研究，发现翼型表面曲率分布的连续性影响翼型的压力分布，进而影响风力机的气动性能。表面光滑连续是翼型设计的基本准则，绝大部分翼型设计都满足曲线连续要求，但即便翼型轮廓看起来是光滑连续的，也无法保证其表面曲率的连续性，更不能确保翼曲率变化的光滑性。

翼型型线的表面曲率

$$C = 1/R = \frac{y''}{[1+y'^2]^{3/2}} \tag{2}$$

变化率

$$C' = \frac{y'''[1+y'^2]-3y'y''^2}{[1+y'^2]^{5/2}} \tag{3}$$

图 3 所示为原始翼型和 NUBRS 曲线拟合翼型在吸力面和压力面的表面曲率分布，其中横坐标为弦长位置，纵坐标为翼型表面曲率。

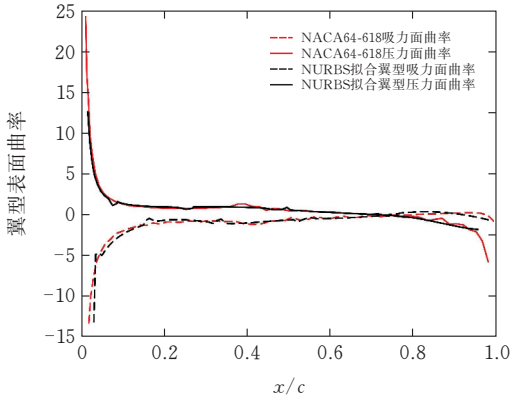


图 3 原始翼型和 NUBRS 曲线拟合翼型的表面曲率分布

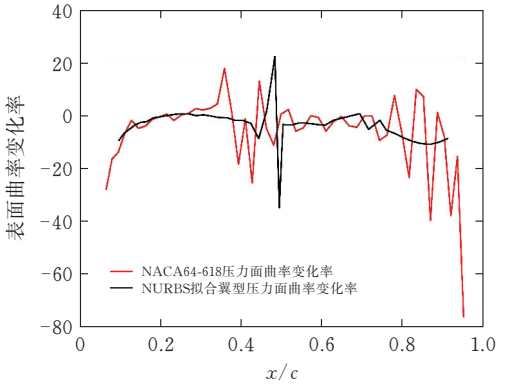
观察到原始翼型的表面曲率有许多小幅波动，而基于 NURBS 的翼型在弦长 0.5 附近有明显的突出与凹陷，其原因在于 NURBS 的坐标生成与其节点矢量有关，弦长 0.5 处的坐标点过于密集，相邻坐标之间差值过小，而该差值在曲率计算公式中处于分母位置，导致计算结果被放大，进而产生明显的凹凸现象，可通过节点矢量调整来缓解此现象[11]。

整体而言，NURBS 拟合翼型的曲率分布曲线更为平滑连续（图 4），同时在几何上保持了与原始翼型的高度一致性。

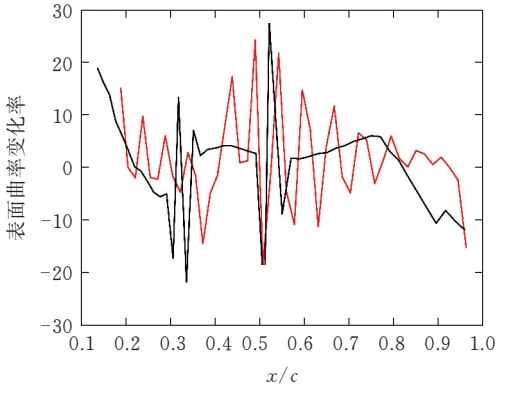
图 4 为在压力面和吸力面上原始翼型和 NURBS 拟合翼型的表面曲率变化情况。

2.2 翼型气动性能对比分析

采用 X-FOIL 软件分析基于 NURBS 拟合的翼型的气动性能。在雷诺数 $Re=1\times10^6$ 的工况下，计算其在连续攻角 $-9°\sim20°$ 下的升阻力系数并与



(a)原始翼面表面曲率变化

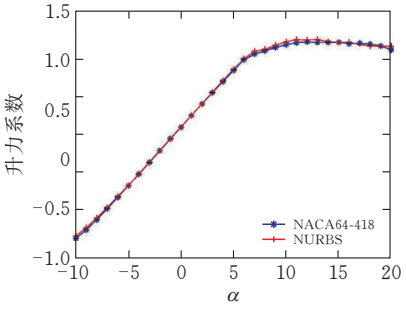


(b)NURBS 拟合翼型的表面曲率

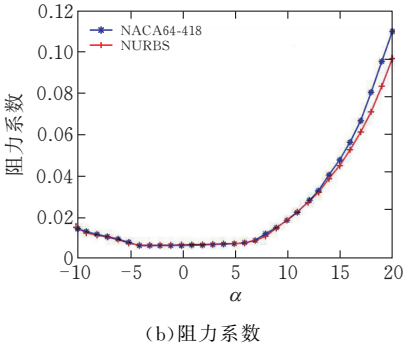
图 4 原始翼型和 NUBRS 拟合翼型的表面曲率变化情况

原始翼型在相同工况下所计算得到的升阻力系数进行对比分析。

图 5 为 NURBS 拟合翼型与 NACA64-618 翼型的升阻力系数计算结果。



(a)升力系数



(b)阻力系数

图 5 多攻角下 NURBS 拟合翼型与 NACA64-618 翼型的升阻力系数

其中：图 5a 为翼型的升力系数，观察到 NURBS 拟合翼型和原始翼型的升力系数相差不大。图 5b 为翼型的阻力系数，在 −9°～7°的攻角下，NURBS 拟合翼型与原始翼型的阻力系数基本吻合；在攻角大于 7°时，NURBS 拟合翼型的阻力系数略低于 NACA64-618 翼型。由于翼型前缘区域对气动性能至关重要，而 NURBS 拟合在该区域取得了良好的几何逼近，这可能是其气动性能与原始翼型高度吻合的重要原因。

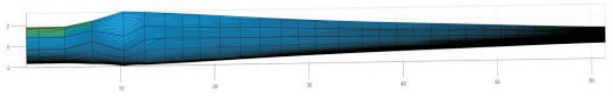
3　基于 NURBS 函数建模的三维叶片表面曲率

陈进等[12]发现二维翼型表面曲率光滑连续与否直接影响翼型的表面压力分布，从而间接影响翼型的气动性能。但三维叶片的曲面光滑连续性研究尚未见系统报道，现基于 NURBS 函数对叶片进行三维建模并分析对比叶片表面曲率分布情况。

3.1　叶片的三维建模

叶片由多个叶素组合生成。依据 NREL5MW 叶片，将其沿展向分为 31 个叶素，其翼型主要包括：NACA64-618，DU91-W-210，DU91-W2-250，DU97-W-300，DUW-350，DUW-405，其余部分采用插值过渡翼型。基于弦长扭角数据及 NACA64-618，DU91-W-210，DU91-W2-250，DU97-W-300，DUW-350，DUW-405 翼型数据，利用软件 MATLAB 编写程序求解其余叶素数据，进而生成风力机叶片。

图 6a、b 分别为原始叶片及基于 NURBS 函数建模的叶片。由图可见，基于 NURBS 建模的叶片与原始叶片在外形上相差无几。



(a)原始叶片



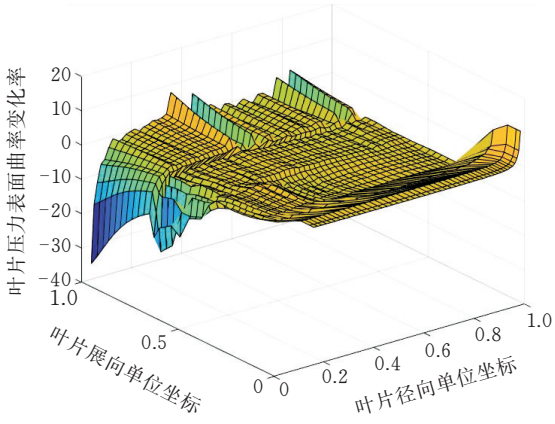
(b)基于 NURBS 函数叶片

图 6　原始叶片和基于 NURBS 函数建模叶片

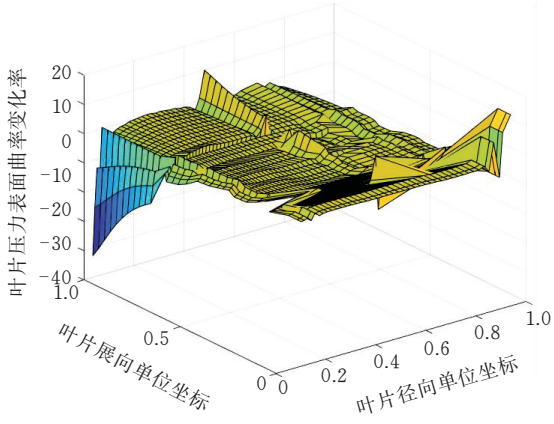
3.2　叶片表面曲率及对比分析

已有研究表明，在不损失翼型拟合度的情况下，较大的曲率变化会影响翼型的表面压力分布，从而影响翼型的气动性能[13]。对于基于翼型叶素生成的叶片而言，叶片的表面连续性同样影响着叶片的气动性能，因此对基于 NURBS 函数生成的叶片及原始叶片进行分析，对比叶片的表面曲率连续性，并讨论说明 NURBS 函数生成叶片的优劣。

图 7a 和 b 分别为原始叶片和 NURBS 叶片的压力面曲率变化率。由图看出 NURBS 叶片曲率变化率略好于原始叶片。结合 2.2 节中的阻力系数分析，曲率变化率更平滑可能有助于改善失速后的气动性能，具体表现为失速后的阻力系数减小，实验中 NURBS 翼型相比原始翼型的曲率变化率更好，其阻力系数在失速后比原始翼型更好，验证了压力面曲率变化率对叶片气动性能的影响。



(a)原始叶片压力面曲率变化率



(b)基于 NURBS 函数叶片压力面曲率变化率

图 7　原始叶片和基于 NURBS 函数叶片的压力面曲率变化率效果

4　叶片的等几何分析

为说明基于 NURBS 建模叶片等几何分析的可行性，对风力机叶片进行等几何分析。为专注于验证等几何分析方法本身的精度与可行性，本研究将叶片材料简化为各向同性线性弹性材料，忽略复合材料的各向异性特性。此简化适用于方法验证阶段。材料参数为：弹性模量 1×10^5 MPa，泊松比0.3，密度 7.8×10^3 kg/m^3。风力机叶片在工作时会受到风力叶片挥舞方向、拍打方向的载荷以及叶片扭矩耦合的影响，因此选取风力机叶片挥舞方向受载这一工况为例，对风力机叶片进行等几何分析。约束

条件为叶根截面完全固定(所有自由度约束);载荷条件为在叶片尖端施加一个沿挥舞方向(X 向)的单位强制位移(1 mm),以产生可预测的变形场用于方法验证。叶片考虑为狄利克雷位移边界条件,给定单位载荷 1 mm,用于验证等几何分析方法的精度,非实际运行工况(图 8)。

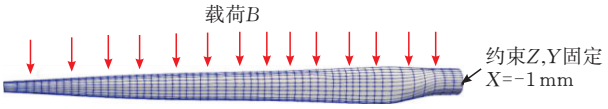


图 8 叶片约束及施加载荷

如图 9 所示,在该载荷作用下,其最大位移为 3.710 22 mm,最小位移为 0.013 582 mm。

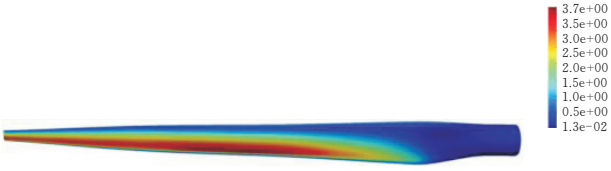


图 9 叶片等几何分析结果

为验证叶片等几何分析位移结果,将叶片模型导入 Ansys Workbench 中进行有限元分析,得到位移结果如图 10 所示。叶片在载荷的作用下最大位移为 3.5121 mm,最小位移为 0.0108 mm,等几何分析结果与有限元分析结果的最大误差为 5.64%,符合工程误差允许范围,验证了等几何分析的可行性。

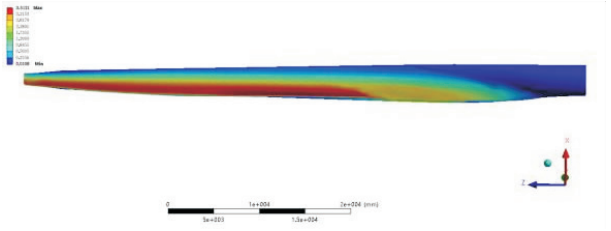


图 10 叶片有限元分析结果

5 结论

1)通过遗传算法程序对叶片 NURBS 建模进行优化,使得在生成 NURBS 曲线拟合翼型时将传统手动调整控制点优化为程序自动调整控制点,建模时间由 137 s 降至 19 s,大大提高了建模效率,从而提高了后续几何分析的效率。

2)分析了基于 NURBS 曲线所生成的翼型及叶片表面曲率连续性,发现翼型拟合效果对叶片气动性能的影响,略大于翼型曲率变化率光滑程度对其的影响,在保证不损失翼型拟合度和保证曲率变化率光滑的情况下,叶片气动性能会略有提升。因此,基于 NURBS 建模的叶片在建模效率以及气动性能上均略优于初始叶片,适用于等几何分析,且分析结果合理。

3)将等几何分析结果与传统有限元分析结果进行对比,结果表明最大误差为 5.64%,符合误差范围,验证了基于 NURBS 建模的叶片用于等几何分析的可行性。

[参 考 文 献]

[1] NGUYEN-THANH N, KIENDL J, et al. Rotation free iosgeometric thin shell analysis using PHT-splines [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Eng, 2011, 200 (47/48): 3410-3421.

[2] 张萌, 姚立权. 风力机叶片三维建模与力学特性分析 [J]. 机械设计与制造, 2022(06):172-175.

[3] 张为民,郝小忠,何磊.基于 NURBS 的涡轮叶片参数化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2013, 42(08): 4.

[4] 汪泉, 陈晓田, 胡梦杰,等. 基于气动性能与刚度特性的风力机翼型优化设计[J]. 中国机械工程 2020, 547 (19): 2283-2289.

[5] NEJADKHAKI H K, SOHRABI A, PURANDARE T P, et al. A variable twist blade for horizontal axis wind turbines:Modeling and analysis[J]. Energy Convers. Manag, 2021, 248: 114771.

[6] 刘宏亮, 祝雪峰, 杨迪雄. 基于等几何分析的结构优化设计研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(03): 248-267.

[7] 汪泉, 杨书益, 朱晓霜. 基于等几何分析的三维风力机叶片数值仿真研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(12): 1613-1618.

[8] JAHANBIN R, RAHMAN S. Stochastic isogeometric analysis in linear elasticity[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Eng, 2020, 364: 112928.

[9] 薛亚强, 靳国永, 叶天贵, 等. 三维声腔模态的等几何计算分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(07): 7.

[10] 程江涛,陈进,王旭东.基于噪声的风力机翼型优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(04): 6.

[11] 陈进,程江涛,SHEN Wenzhong, 等. 基于表面曲率连续性的风力机翼型改进设计研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(04): 8.

[12] 包子恒,刘务,邹强. 基于矩阵表示的 NURBS 曲面逆值 GPU 并行求解算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(12):1948-1957.

[13] 汪泉,王冯云,胡聪,等. 水平轴风力机叶片曲面建模与等几何分析研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(06): 114-120.

Modeling Optimization and Feasibility Study of Isogeometric Analysis for Wind Turbine Blades Based on NURBS

WANG Quan, XIA Wei, XU Tangjie

(*School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Using NURBS basis functions as the design shape functions, isogeometric analysis enables seamless integration of blade modeling and structural finite element analysis, addressing the significant model errors caused by traditional aerodynamic shape modeling methods for wind turbine blades. To improve the efficiency of blade modeling based on NURBS curves, this study replaces the traditional method of manually adjusting control points to fit target airfoils with an experimental approach that employs a genetic algorithm to automatically adjust control points. The results show that while ensuring smooth curvature continuity and aerodynamic performance, the NURBS modeling efficiency for blades increases, with modeling time reduced from 137 seconds to 19 seconds. The isogeometric analysis of the blade yields minimal errors, with a maximum deviation of 5.64% compared to finite element analysis results, verifying its feasibility for isogeometric analysis. This work holds significant importance for the integrated design and optimization of wind turbine blades.

Keywords: curvature continuity; NURBS curve; isogeometric analysis; blade modeling; genetic algorithm

[责任编校: 张　众]

(上接第 5 页)

Reliability Evaluation and Residual Life Prediction of a Lock Differential

LIU Yuanhang[1,2], LIU Wenchao[1,2], LI Fangke[1,2], YOU Dazhang[1,2], XIONG Xin[3]

(1 *School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;

2 *Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engin., Wuhan* 430068, *China*;

3 *Hubei Shi Ruida heavy construction machinery Co., LTD, Xiangyang* 441116, *China*)

Abstract: In order to describe the failure law more accurately, the two-parameter Weibull distribution theory is used to study the service life of a lock differential. First, the historical maintenance data of the differential was analyzed and sorted out, and a Weibull distribution model based on two parameters was established. Second, the fault distribution law of the differential was analyzed and the corresponding parameters of the model were determined. Finally, the goodness of fit test of the model was conducted by Kolmogorov-Smirnov test method. Verify the rationality of using two-parameter Weibull distribution method to evaluate the reliability of differential. On this basis, it is calculated that the average trouble-free service life of the differential is 945 days, the characteristic life is 1581 days, and the median life is 1240 days. Then, the remaining life prediction analysis is carried out by taking four locked differentials running for different times as an example, and the corresponding relationship between the remaining life and reliability and working time is obtained. Therefore, it helps enterprises to carry out reasonable predictive maintenance. This method can serve as a reference for reliability assessment and maintenance decision-making of similar mechanical equipment.

Keywords: lock differential; reliability; two-parameter weibull distribution; kolmogorov-smirnov test; residual life prediction

[责任编校: 张　众]