

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 2 日 (02.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/134388 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/00 (2019.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/111694
- (22) 国际申请日: 2019 年 10 月 17 日 (17.10.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811615070.2 2018 年 12 月 27 日 (27.12.2018) CN
- (71) 申请人: 浙江大学(ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路
866 号, Zhejiang 310058 (CN)。
- (72) 发明人: 程锦(CHENG, Jin); 中国浙江省杭州市
西湖区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

杨明龙(YANG, Minglong); 中国浙江省杭州市西湖
区余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。 刘
振宇(LIU, Zhenyu); 中国浙江省杭州市西湖区
余杭塘路 866 号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限
公司(HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO.,
LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古
路 147 号黄鸿年科技综合大楼 215 室/刘
静, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: BLADE HIGH-RIGIDITY DESIGN METHOD BASED ON RANDOM ISOGEOMETRIC ANALYSIS

(54) 发明名称: 一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法

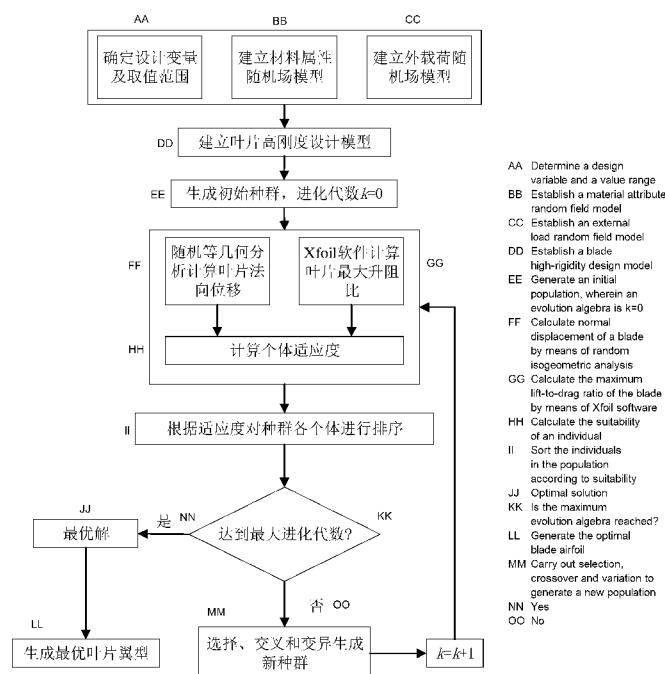


图 1

(57) Abstract: Disclosed is a blade high-rigidity design method based on random isogeometric analysis. The method involves, firstly, according to a manufacturing condition and service environment for a blade, establishing random field models for a material attribute and external load of the blade; and on this basis, establishing, according to a high-rigidity design requirement and a lift-to-drag ratio constraint condition of the blade, an optimal design model for the blade, and solving the model. In a solving process, a random isogeometric analysis method is used to calculate the random displacement of the blade under the influence of the randomness of the

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

material attribute and the external load, and also to calculate the maximum lift-to-drag ratio of a blade airfoil, and then calculate the suitability of an individual in a current population, such that a blade high-rigidity design on the premise of ensuring the lift-to-drag ratio is achieved. In the blade high-rigidity design method provided in the present invention, the randomness of the material attribute and external load of a blade is comprehensively considered, and a random isogeometric analysis method based on a random Krylov subspace base vector discrete scheme is used to calculate the random displacement of the blade, such that highly precise blade random displacement can be efficiently obtained.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法。该方法首先根据叶片的制造情况与服役环境建立其材料属性与外载荷的随机场模型, 在此基础上, 根据叶片的高刚度设计需求和升阻比约束条件建立其优化设计模型, 并对模型进行求解。求解过程中, 采用随机等几何分析方法计算叶片在材料属性及外载荷随机性影响下的随机位移, 同时计算叶片翼型的最大升阻比, 进而计算出当前种群个体的适应度, 从而实现了保证升阻比前提下的叶片高刚度设计。本发明提出的叶片高刚度设计方法综合考虑了叶片材料属性及外载荷的随机性, 采用基于随机 Krylov 子空间基向量离散方案的随机等几何分析方法计算叶片的随机位移, 能高效地获得高精度的叶片随机位移。

一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法

技术领域

本发明涉及海流能发电领域，尤其涉及一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法。

背景技术

海流能发电领域研究的一大热点问题即为叶片的高刚度设计问题。在恶劣天气或是天文大潮等情况下，叶片容易发生变形损坏。为了提升叶片的刚度而不增加叶片重量和成本，必须在保证叶片水动力学性能的前提下优化翼型曲线以提高叶片刚度。因此这是一个水动力学性能约束下的叶片刚度最大化设计问题。

水平轴海流能发电机叶片材料多为复合材料，其材料属性具有明显的随机性。水平轴海流能发电机的服役环境为海洋，海流的冲击载荷也存在着天然的随机性。这些不确定性的存在使得水平轴海流能发电机叶片的响应也必然存在随机性。水平轴海流能发电机叶片的随机响应分析主要有实验法和仿真法。实验法需进行大量实验来模拟随机载荷等不确定性，采集位移等随机响应信息时，无法在叶片全部表面都布置传感器，影响了叶片随机响应信息的准确采集，最终影响实验结果的精度。此外在优化设计过程中，不断变化的叶片尺寸使得实验法需要制造大量的不同尺寸的叶片，成本高昂，不具备可行性。仿真方法借助现有的三维建模及数值计算软件建立水平轴海流能发电机叶片的仿真模型进行分析计算，三维模型可以方便地修改尺寸，从而可以高效而低成本地获得不同尺寸的叶片在随机载荷作用下的结构响应，满足高刚度设计的要求。

叶片仿真分析的难点在于精确地表示叶片材料属性和外载荷的随机性，并对随机位移响应进行离散，其中随机位移响应离散方案的构建是难点。随机位移响应离散方案的构建作为得到叶片随机位移响应表达式的先决条件，决定了最终计算所得叶片随机响应的效率与精度。

发明内容

本发明的目的在于针对现有技术的不足，提供一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法。该方法根据叶片的制造情况与服役环境确定其材料属性与所受外载荷，建立叶片材料属性与外载荷的随机场模型；根据叶片高刚度设计需求建立叶片的优化设计模型，寻找设计模型最优解。优化过程中采用随机等几何分析方法分析目标函数中叶片的随机法向位移，对该叶片材料属性以及外载荷的随机场进行离散，确定随机法向位移的离散方案，得到其随机法向位移的表达式，从而实现了材料与载荷均存在随机不确定性的叶片随机法向位移分析，进而实现了叶片翼型的高刚度设计。

为实现上述目的，本发明采用的技术方案是：一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法，该方法包括以下步骤：

1) 叶片翼型参数化，根据翼型设计规则确定叶片设计参数及其取值范围。

2) 采用随机场描述考虑空间相关不确定性的叶片材料属性及外载荷，根据叶片的高刚度设计需求给出叶片翼型优化设计目标函数和约束函数表达式，建立叶片的高刚度设计模型：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x}) \geq R_{L/D|ori}; \\ \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{x}$ 为叶片的设计向量，包括多个叶片设计参数； $\mathbf{r} = \{E(\theta), F(\theta)\}$ 为随机场向量，其两个分量 $E(\theta)$ 和 $F(\theta)$ 分别表征存在空间相关不确定性的叶片材料属性和外载荷的随机场， θ 为随机场中的样本集合； $f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = [\mu(\mathbf{U}(\theta)), \sigma(\mathbf{U}(\theta))]$ 为表征叶片刚度的目标函数， $\mathbf{U}(\theta)$ 为叶片在随机材料属性与随机外载荷共同作用下的随机法向位移， $\mu(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的平均值， $\sigma(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的标准差； $g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x})$ 为叶片翼型的最大升阻比，与 $\mathbf{r}$ 无关； $R_{L/D|ori}$ 为叶片初始翼型的最大升阻比； $\mathbf{x}_{\min}$ 为叶片设计向量取值的下限， $\mathbf{x}_{\max}$ 为设计向量取值的上限。

3) 应用随机等几何分析方法计算得到在随机材料属性与随机外载荷共同作用下的叶片随机法向位移，用于表征高刚度设计模型中的叶片刚度，进而计算得到叶片高刚度设计模型的最优解，得到优化后的叶片翼型。

进一步地，步骤3)中，采用遗传算法求解叶片高刚度设计模型的最优解，具体包括以下子步骤：

3.1) 生成初始种群，进化代数 $k=0$ ；

3.2) 应用随机等几何分析方法计算当前代种群中各个体所对应叶片的随机法向位移；

3.3) 计算当前代种群中各个体所对应叶片翼型的最大升阻比；

3.4) 根据叶片随机法向位移以及翼型的最大升阻比计算叶片高刚度设计模型中目标函数与约束函数值，从而获得当前代种群中所有个体的适应度；

3.5) 根据适应度对当前代种群中的所有个体进行排序；

3.6) 判断是否到达最大进化代数，是，则导出最优解，否则进行选择、交叉和变异等遗传操作，生成新种群，进化代数 $k=k+1$ ，返回步骤3.2)；

3.7) 根据最优解获得叶片最优翼型的设计参数值。

进一步地，步骤3.2)中，采用随机等几何分析方法来计算考虑叶片材料及外载荷空间相

关随机不确定性的叶片随机法向位移，包括以下步骤：

- a) 建立叶片 T 样条参数化三维模型，设置边界条件。
- b) 对叶片的材料属性以及外载荷的随机场进行离散，具体包括以下子步骤：
 - b.1) 对随机场协方差函数进行特征分解，得到第二类 Fredholm 积分方程；
 - b.2) 应用 T 样条基函数表示随机场协方差函数的特征函数，得到随机场协方差函数的 T 样条基函数表达式；
 - b.3) 应用伽辽金方法求解第二类 Fredholm 积分方程，求得随机场协方差函数的一系列特征值以及 b.2) 表达式中待定系数的值；
 - b.4) 应用 Karhunen-Loève 展开得到叶片材料属性以及外载荷随机场的离散型表达式，将随机场离散为随机变量、系数以及 T 样条基函数的乘积；
 - b.5) 根据实际情况确定 Karhunen-Loève 展开的保留项数；
 - b.6) 计算得到随机刚度矩阵以及材料属性随机场均值处的刚度矩阵，计算得到随机载荷向量以及外载荷随机场均值处的载荷向量。
- c) 对叶片的随机法向位移进行离散，具体包括以下子步骤：
 - c.1) 构建叶片的系统平衡方程的随机 Krylov 子空间；
 - c.2) 为了降低子空间复杂度，采用材料属性随机场均值处的刚度矩阵的逆矩阵作为降复杂度因子，在系统平衡方程的左右两侧分别乘以降复杂度因子，实现对随机 Krylov 子空间的预处理；
 - c.3) 计算得到叶片的材料属性以及外载荷的随机场均处于均值时的叶片位移；
 - c.4) 计算随机 Krylov 子空间基向量，应用基向量离散叶片的随机法向位移，获得叶片的位移表达式；
 - c.5) 根据实际情况确定随机 Krylov 子空间基向量离散方案的保留项数。
 - c.6) 计算随机 Krylov 子空间基向量离散方案的误差；
 - c.7) 施加布勃诺夫-伽辽金条件，使误差达到最小，保证随机 Krylov 子空间基向量离散方案的精度。根据布勃诺夫-伽辽金条件的弱形式或强形式，计算得到 c.4) 表达式中的待定系数向量；
 - c.8) 得到叶片的随机法向位移。

进一步地，基于随机 Krylov 子空间基向量离散的随机法向位移 $U(\theta)$ 的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}(\theta) = & a_1 \left(\bar{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_0^{-1} \sum_{i=1}^{M_2} \eta_i \mathbf{F}_i \right) + a_2 \left(\mathbf{K}_0^{-1} \sum_{i=1}^{M_1} \xi_i \mathbf{K}_i \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^2 \sum_{i_1=1}^{M_1} \sum_{i_2=1}^{M_2} \xi_{i_1} \eta_{i_2} \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right) + \\
& a_3 \left((\mathbf{K}_0^{-1})^2 \sum_{i_1, i_2=1}^{M_1} \xi_{i_2} \xi_{i_1} \mathbf{K}_{i_2} \mathbf{K}_{i_1} \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^3 \sum_{i_1, i_2=1}^{M_1} \sum_{i_3=1}^{M_2} \xi_{i_2} \xi_{i_1} \eta_{i_3} \mathbf{K}_{i_3} \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right) + \dots + \\
& a_m \left((\mathbf{K}_0^{-1})^{m-1} \sum_{i_1, \dots, i_{m-1}=1}^{M_1} \xi_{i_1} \dots \xi_{i_{m-1}} \mathbf{K}_{i_{m-1}} \dots \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^m \sum_{i_1, \dots, i_{m-1}=1}^{M_1} \sum_{i_m=1}^{M_2} \xi_{i_1} \dots \xi_{i_{m-1}} \eta_{i_m} \mathbf{K}_{i_m} \dots \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right)
\end{aligned}$$

式中：\$\{a_1, a_2, \dots, a_m\}\$ 为系数向量；\$\bar{\mathbf{U}}\$ 为叶片材料属性以及外载荷的随机场均处于均值时的叶片位移；\$\bar{E}\$ 为叶片材料属性随机场的均值，\$M_1\$ 和 \$M_2\$ 分别为叶片材料属性以及外载荷的随机场应用 Karhunen-Loève 展开的保留项数；\$\mathbf{K}_0^{-1}\$ 为降复杂度因子，\$\{\mathbf{K}_{i_1}, \mathbf{K}_{i_2}, \dots, \mathbf{K}_{i_m}\}\$ 为随机刚度矩阵，\$\mathbf{F}_i\$ 为随机载荷向量，\$m\$ 为随机 Krylov 子空间基向量离散方案的保留项数；\$\{\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_m}\}\$ 和 \$\{\eta_{i_1}, \eta_{i_2}, \dots, \eta_{i_m}\}\$ 分别为互不相关的高斯随机变量。

本发明的有益效果是：综合考虑了叶片材料属性及其所受外载荷的随机性，建立二者的随机场进行分析，使叶片位移的计算模型更全面，更符合实际情况。在叶片高刚度设计中利用先进的等几何分析技术来计算叶片在随机不确定性材料及随机外载荷影响下的位移，从原理上消除了三维 CAD 模型转为 CAE 分析模型时产生的近似误差。同时，利用随机 Krylov 子空间基向量将叶片的随机位移进行离散，计算效率高，且随机位移的分析结果更精确。应用遗传算法与随机等几何分析方法相结合，在保证叶片水动力学性能的前提下提高了叶片刚度，实现了叶片的高刚度设计。

附图说明

图 1 为叶片的高刚度设计流程图；

图 2 为叶片的随机等几何分析流程图；

图 3 为水平轴海流能发电机叶片的 T 样条模型图；

图 4 为水平轴海流能发电机叶片的位移均值和标准差分析结果图；

图 5 为优化前后的水平轴海流能发电机叶片翼型对比图。

具体实施方式

以下结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。

图 1 为叶片的高刚度设计流程图，图为叶片随机等几何分析方法的流程图。叶片的高刚度设计方法具体如下：

1) 翼型参数化，根据翼型设计规则确定叶片的初始翼型和设计变量及其取值范围。

选取 NACA 65421 翼型为初始翼型，该翼型在实际海试中表现出了出色的水动力学性能。

将 NACA 65421 的翼型曲线分为 4 段首尾相连的曲线，4 条曲线的起止点分别如表 1 所示。

表 1

曲线	起点	终点
1	后缘	吸力面顶点
2	吸力面顶点	前缘
3	前缘	压力面顶点
4	压力面顶点	后缘

该翼型具有一个锋利的后缘，这会导致叶片加工难度增大而且影响叶片的局部刚度，因此先对其后缘作钝化处理。钝化处理后，每条曲线都由一条三阶 Bezier 曲线来拟合，总共需要 13 个控制点， $\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}\}$ ，每个控制点具有 X 、 Y 两个坐标参数，但是某些点具有相同的 X 或 Y 坐标，如： P_3 、 P_4 和 P_5 点具有相同的 Y 坐标， P_6 、 P_7 和 P_8 具有相同的 X 坐标， P_9 、 P_{10} 和 P_{11} 具有相同的 Y 坐标。因此，最终的翼型结构参数为 17 个，即设计变量为 17 个。这些变量的取值范围如表 2 所示，其中 $X_{i|ori}$ 和 $Y_{i|ori}$ ， $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$ 分别为初始翼型的控制点 P_i 的 X 坐标和 Y 坐标值。

表 2

变量	物理意义	变化范围
Y_1	控制点 P_1 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{1 ori}$
X_2	控制点 P_2 的横坐标	(50%~150%) $X_{2 ori}$
Y_2	控制点 P_2 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{2 ori}$
X_3	控制点 P_3 的横坐标	(50%~150%) $X_{3 ori}$
Y_3	控制点 P_3 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{3 ori}$
X_4	控制点 P_4 的横坐标	(50%~150%) $X_{4 ori}$
X_5	控制点 P_5 的横坐标	(50%~150%) $X_{5 ori}$
Y_6	控制点 P_6 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{6 ori}$
Y_7	控制点 P_7 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{7 ori}$
Y_8	控制点 P_8 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{8 ori}$
X_9	控制点 P_9 的横坐标	(50%~150%) $X_{9 ori}$
Y_9	控制点 P_9 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{9 ori}$
Y_{10}	控制点 P_{10} 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{10 ori}$
Y_{11}	控制点 P_{11} 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{11 ori}$
X_{12}	控制点 P_{12} 的横坐标	(50%~150%) $X_{12 ori}$
Y_{12}	控制点 P_{12} 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{12 ori}$

Y_{13}	控制点 P_{13} 的纵坐标	(50%~150%) $Y_{13 ori}$
----------	-------------------	-------------------------

2) 采用随机场描述考虑空间相关不确定性的叶片材料属性及外载荷, 根据叶片的高刚度设计需求给出叶片翼型优化设计目标函数和约束函数表达式, 建立叶片的高刚度设计模型:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \\ s.t. \quad g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x}) \geq R_{L/D|ori}; \\ \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{x}$ 为设计向量, $\mathbf{x}_{\min}$ 为设计向量的取值下限, $\mathbf{x}_{\max}$ 为设计向量的取值上限, 如表 2 所示; $\mathbf{r} = \{E(\theta), F(\theta)\}$ 为表征叶片材料杨氏模量 $E(\theta)$ 以及海流载荷 $F(\theta)$ 随机性的随机场向量, θ 为随机场中的样本集合;

叶片的杨氏模量均值为 $\mu_E = 2 \times 10^8 \text{ Pa}$, 标准差为 $\sigma_E = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$, 协方差函数为指数型:

$$C_{xx}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|}{l_x} - \frac{|y_1 - y_2|}{l_y} - \frac{|z_1 - z_2|}{l_z}\right) \quad \mathbf{x}, \mathbf{x}' \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^3$$

其中, $l_x = l_y = l_z = 3\text{m}$ 分别表示叶片在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向上的相关长度。

叶片所受海流载荷的均值为 $\mu_q = 1 \times 10^3 \text{ N}$, 标准差为 $\sigma_q = 50 \text{ N}$, 协方差函数为指数型:

$$C_{xx}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|}{l_x} - \frac{|y_1 - y_2|}{l_y} - \frac{|z_1 - z_2|}{l_z}\right) \quad \mathbf{x}, \mathbf{x}' \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^3$$

其中, $l_x = l_y = l_z = 3\text{m}$ 分别表示叶片在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向上的相关长度。

$f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = [\mu(\mathbf{U}(\theta)), \sigma(\mathbf{U}(\theta))]$ 为表征叶片刚度的目标函数, $\mu(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的平均值, $\sigma(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的标准差;

$g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x})$ 为叶片翼型的最大升阻比, $R_{L/D|ori}$ 为初始翼型的最大升阻比, 根据 Xfoil 软件分析结果, 其值为 106.1。

3) 遗传算法求解叶片高刚度设计模型, 设置遗传算法最大进化代数 500, 种群规模为 100, 交叉概率为 0.80, 变异概率为 0.10。

3.1) 生成初始种群, 进化代数 $k=0$;

3.2) 应用随机等几何分析方法计算当前代种群中各个体所对应叶片的随机法向位移:

3.2.1) 利用 Rhinoceros 建立叶片 T 样条三维参数化模型, 如图 3 所示。导入 MATLAB 中, 设置边界条件。

3.2.2) 对该叶片材料属性以及外载荷的随机场进行离散, 具体包括以下子步骤:

3.2.2.1) 随机场协方差函数的 T 样条基函数表示形式

对随机场的协方差函数进行谱分解，将协方差函数由其特征值和对应的特征函数表示。由于 T 样条基函数为希尔伯特空间中的一组完备基，特征函数可以应用 T 样条基函数表示。应用 T 样条基函数的随机场协方差函数表示形式存在待定系数，需要进一步求解得到。

3.2.2.2) 伽辽金方法求解协方差函数的特征值以及待定系数

叶片材料属性以及外载荷随机场的协方差函数的特征值与特征函数可以通过第二类 Fredholm 积分方程来求得，但该方程仅在少数简单的随机场模型中可以求得解析解，其余情况只能应用伽辽金法求得数值解。应用伽辽金法要求截断误差正交于 T 样条基函数的展开空间，该方法最终转为广义特征值问题，求解该方程可得特征值和步骤 3.2.2.1) 中的待定系数。叶片材料属性以及外载荷随机场的协方差函数的特征值计算结果如表 3 所示。

表 3

序号	材料属性随机场协方差函数特征值	外载荷随机场协方差函数特征值
1	4.91e+16	3.07e+07
2	4.87e+16	3.04e+07
3	4.75e+16	2.97e+07
4	4.62e+16	2.89e+07
5	4.48e+16	2.80e+07
6	4.33e+16	2.70e+07

3.2.2.3) Karhunen-Loève 展开离散随机场

应用 Karhunen-Loève 展开得到叶片材料属性以及外载荷随机场的离散型表达式，将随机场离散为随机变量、系数以及 T 样条基函数的乘积，从而将随机场的处置问题简化为随机变量的处置问题。

3.2.2.4) 确定 Karhunen-Loève 展开的保留项数

本例在利用 Karhunen-Loève 展开来表示随机场时保留 4 项级数，以便能通过适当的计算消耗得到较为精确的结果。

3.2.2.5) 计算得到随机刚度矩阵以及材料属性随机场均值处的刚度矩阵，计算得到随机载荷向量以及外载荷随机场均值处的载荷向量。

3.2.3) 对该叶片的随机结构响应进行离散，具体包括以下子步骤：

3.2.3.1) 构建叶片的系统平衡方程的随机 Krylov 子空间；

3.2.3.2) 采用材料属性随机场均值处刚度矩阵的逆矩阵作为降复杂度因子，在系统平衡方程的左右两侧分别乘以降复杂度因子，实现对随机 Krylov 子空间的预处理；

由于随机 Krylov 子空间基向量的个数取决于系统刚度矩阵不同特征值的个数，而随机场

均值处刚度矩阵的逆矩阵具有的不同特征值个数较少，且具有较小的随机性，将其作为降复杂度因子，将系统刚度矩阵转化为具有较少不同特征值个数的矩阵，从而大幅降低子空间复杂度，使得采用较少数目的基向量即可得到较高的计算精度。

3.2.3.3) 计算得到叶片材料属性以及外载荷的随机场均处于均值时的叶片位移；

3.2.3.4) 计算随机 Krylov 子空间基向量，应用基向量离散叶片的随机位移，获得叶片的位移表达式，该表达式中的待定系数需要进一步求解得到。

3.2.3.5) 确定随机 Krylov 子空间基向量离散方案的保留项数

本例在使用随机 Krylov 子空间基向量离散方案来表示叶片的随机位移时，取 3 项基向量，从而通过适当的计算消耗得到较为精确的结果。

3.2.3.6) 计算随机 Krylov 子空间基向量离散方案的误差；

3.2.3.7) 施加布勃诺夫-伽辽金条件，以保证误差最小

施加布勃诺夫-伽辽金条件，可以确保误差达到最小，从而保证随机 Krylov 子空间基向量离散方案的精度。根据布勃诺夫-伽辽金条件，要求误差应正交于预处理 Krylov 子空间的基向量，由此可以计算得到步骤 3.2.3.4) 中的待定系数；

3.2.3.8) 得到叶片的随机位移，其法向位移的均值和标准差如图 4 所示。

3.3) 应用 Xfoil 软件计算当前代种群中各个体所对应叶片翼型的最大升阻比；

3.4) 根据叶片随机法向位移以及翼型的最大升阻比计算叶片高刚度设计模型中目标函数与约束函数值，从而获得当前代种群中所有个体的适应度；

3.5) 根据适应度对当前代种群中的所有个体进行排序；

3.6) 判断是否到达最大进化代数，是，则导出最优解，否则进行选择、交叉和变异等遗传操作，生成新种群，进化代数 $k=k+1$ ，返回步骤 3.2)。

3.7) 根据最优解获得叶片最优翼型的设计参数值。

当算法达到终止条件，输出结果方案，优化前后的翼型如图 5 所示。将结果与初始方案进行对比，优化后翼型的最大升阻比为 113.9，大于 106.1 的初始值，优化后翼型的随机法向位移均值的最大值为 $\mu(\mathbf{U}(\theta)_{\text{new}})_{\text{max}} = 16.82\text{mm}$ ，标准差的最大值为 $\sigma(\mathbf{U}(\theta)_{\text{new}})_{\text{max}} = 0.85$ ，而初始翼型的随机法向位移均值的最大值为 $\mu(\mathbf{U}(\theta)_{\text{ori}})_{\text{max}} = 19.31\text{mm}$ ，标准差的最大值为 $\sigma(\mathbf{U}(\theta)_{\text{ori}})_{\text{max}} = 0.93$ 。优化后翼型的保持了初始翼型的水动力学性能，而刚度有了提升并且更加稳健，符合叶片的高刚度设计要求。

权利要求书

1、一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

1) 叶片翼型参数化，根据翼型设计规则确定叶片设计参数及其取值范围。

2) 采用随机场描述考虑空间相关不确定性的叶片材料属性及外载荷，根据叶片的高刚度设计需求给出叶片翼型优化设计目标函数和约束函数表达式，建立叶片的高刚度设计模型：

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x}) \geq R_{L/D|ori}; \\ \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{x}$ 为叶片的设计向量，包括多个叶片设计参数； $\mathbf{r} = \{E(\theta), F(\theta)\}$ 为随机场向量，其两个分量 $E(\theta)$ 和 $F(\theta)$ 分别表征存在空间相关不确定性的叶片材料属性和外载荷的随机场， θ 为随机场中的样本集合； $f(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = [\mu(\mathbf{U}(\theta)), \sigma(\mathbf{U}(\theta))]$ 为表征叶片刚度的目标函数， $\mathbf{U}(\theta)$ 为叶片在随机材料属性与随机外载荷共同作用下的随机法向位移， $\mu(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的平均值， $\sigma(\mathbf{U}(\theta))$ 为叶片随机法向位移的标准差； $g(\mathbf{x}) = R_{L/D|new}(\mathbf{x})$ 为叶片翼型的最大升阻比，与 $\mathbf{r}$ 无关； $R_{L/D|ori}$ 为叶片初始翼型的最大升阻比； $\mathbf{x}_{\min}$ 为叶片设计向量取值的下限， $\mathbf{x}_{\max}$ 为设计向量取值的上限。

3) 应用随机等几何分析方法计算得到在随机材料属性与随机外载荷共同作用下的叶片随机法向位移，用于表征高刚度设计模型中的叶片刚度，进而计算得到叶片高刚度设计模型的最优解，得到优化后的叶片翼型。

2、根据权利要求1所述的一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法，其特征在于，步骤3)中，采用遗传算法求解叶片高刚度设计模型的最优解，具体包括以下子步骤：

3.1) 生成初始种群，进化代数 $k=0$ ；

3.2) 应用随机等几何分析方法计算当前代种群中各个体所对应叶片的随机法向位移；

3.3) 计算当前代种群中各个体所对应叶片翼型的最大升阻比；

3.4) 根据叶片随机法向位移以及翼型的最大升阻比计算叶片高刚度设计模型中目标函数与约束函数值，从而获得当前代种群中所有个体的适应度；

3.5) 根据适应度对当前代种群中的所有个体进行排序；

3.6) 判断是否到达最大进化代数，是，则导出最优解，否则进行选择、交叉和变异等遗传操作，生成新种群，进化代数 $k=k+1$ ，返回步骤3.2)；

3.7) 根据最优解获得叶片最优翼型的设计参数值。

3、根据权利要求2所述的一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法，其特征在于，步骤3.2)中，采用随机等几何分析方法来计算考虑叶片材料及外载荷空间相关随机不确定性的叶片随机法向位移，包括以下步骤：

- a) 建立叶片T样条参数化三维模型，设置边界条件。
- b) 对叶片材料属性以及外载荷的随机场进行离散，具体包括以下子步骤：
 - b.1) 对随机场协方差函数进行特征分解，得到第二类Fredholm积分方程；
 - b.2) 应用T样条基函数表示随机场协方差函数的特征函数，得到随机场协方差函数的T样条基函数表达式；
 - b.3) 应用伽辽金方法求解第二类Fredholm积分方程，求得随机场协方差函数的一系列特征值以及b.2)表达式中待定系数的值；
 - b.4) 应用Karhunen-Loève展开得到叶片材料属性以及外载荷随机场的离散型表达式，将随机场离散为随机变量、系数以及T样条基函数的乘积；
 - b.5) 根据实际情况确定Karhunen-Loève展开的保留项数；
 - b.6) 计算得到随机刚度矩阵以及材料属性随机场均值处的刚度矩阵，计算得到随机载荷向量以及外载荷随机场均值处的载荷向量。
- c) 对叶片的随机法向位移进行离散，具体包括以下子步骤：
 - c.1) 构建叶片的系统平衡方程的随机Krylov子空间；
 - c.2) 为了降低子空间复杂度，采用材料属性随机场均值处的刚度矩阵的逆矩阵作为降复杂度因子，在系统平衡方程的左右两侧分别乘以降复杂度因子，实现对随机Krylov子空间的预处理；
 - c.3) 计算得到叶片材料属性以及外载荷的随机场均处于均值时的叶片位移；
 - c.4) 计算随机Krylov子空间基向量，应用基向量离散叶片的随机法向位移，获得叶片的位移表达式；
 - c.5) 根据实际情况确定随机Krylov子空间基向量离散方案的保留项数。
 - c.6) 计算随机Krylov子空间基向量离散方案的误差；
 - c.7) 施加布勃诺夫-伽辽金条件，使误差达到最小，保证随机Krylov子空间基向量离散方案的精度。根据布勃诺夫-伽辽金条件的弱形式或强形式，计算得到c.4)表达式中的待定系数向量；
 - c.8) 得到叶片的随机法向位移。

4、根据权利要求3所述的一种基于随机等几何分析的叶片高刚度设计方法，其特征在于，基于随机Krylov子空间基向量离散的随机法向位移 $U(\theta)$ 的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}(\theta) = & a_1 \left(\bar{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_0^{-1} \sum_{i=1}^{M_2} \eta_i \mathbf{F}_i \right) + a_2 \left(\mathbf{K}_0^{-1} \sum_{i=1}^{M_1} \xi_i \mathbf{K}_i \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^2 \sum_{i_1=1}^{M_1} \sum_{i_2=1}^{M_2} \xi_{i_1} \eta_{i_2} \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right) + \\
& a_3 \left((\mathbf{K}_0^{-1})^2 \sum_{i_1, i_2=1}^{M_1} \xi_{i_2} \xi_{i_1} \mathbf{K}_{i_2} \mathbf{K}_{i_1} \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^3 \sum_{i_1, i_2=1}^{M_1} \sum_{i_3=1}^{M_2} \xi_{i_2} \xi_{i_1} \eta_{i_3} \mathbf{K}_{i_3} \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right) + \dots + \\
& a_m \left((\mathbf{K}_0^{-1})^{m-1} \sum_{i_1, \dots, i_{m-1}=1}^{M_1} \xi_{i_1} \dots \xi_{i_{m-1}} \mathbf{K}_{i_{m-1}} \dots \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} + (\mathbf{K}_0^{-1})^m \sum_{i_1, \dots, i_{m-1}=1}^{M_1} \sum_{i_m=1}^{M_2} \xi_{i_1} \dots \xi_{i_{m-1}} \eta_{i_m} \mathbf{K}_{i_m} \dots \mathbf{K}_{i_2} \bar{\mathbf{U}} \right)
\end{aligned}$$

式中：\$\{a_1, a_2, \dots, a_m\}\$ 为系数向量；\$\bar{\mathbf{U}}\$ 为叶片的材料属性以及外载荷的随机场均处于均值时的叶片位移；\$\bar{E}\$ 为叶片材料属性随机场的均值，\$M_1\$ 和 \$M_2\$ 分别为叶片材料属性以及外载荷的随机场应用 Karhunen-Loève 展开的保留项数；\$\mathbf{K}_0^{-1}\$ 为降复杂度因子，\$\{\mathbf{K}_{i_1}, \mathbf{K}_{i_2}, \dots, \mathbf{K}_{i_m}\}\$ 为随机刚度矩阵，\$\mathbf{F}_i\$ 为随机载荷向量，\$m\$ 为随机 Krylov 子空间基向量离散方案的保留项数；\$\{\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_m}\}\$ 和 \$\{\eta_{i_1}, \eta_{i_2}, \dots, \eta_{i_m}\}\$ 分别为互不相关的高斯随机变量。

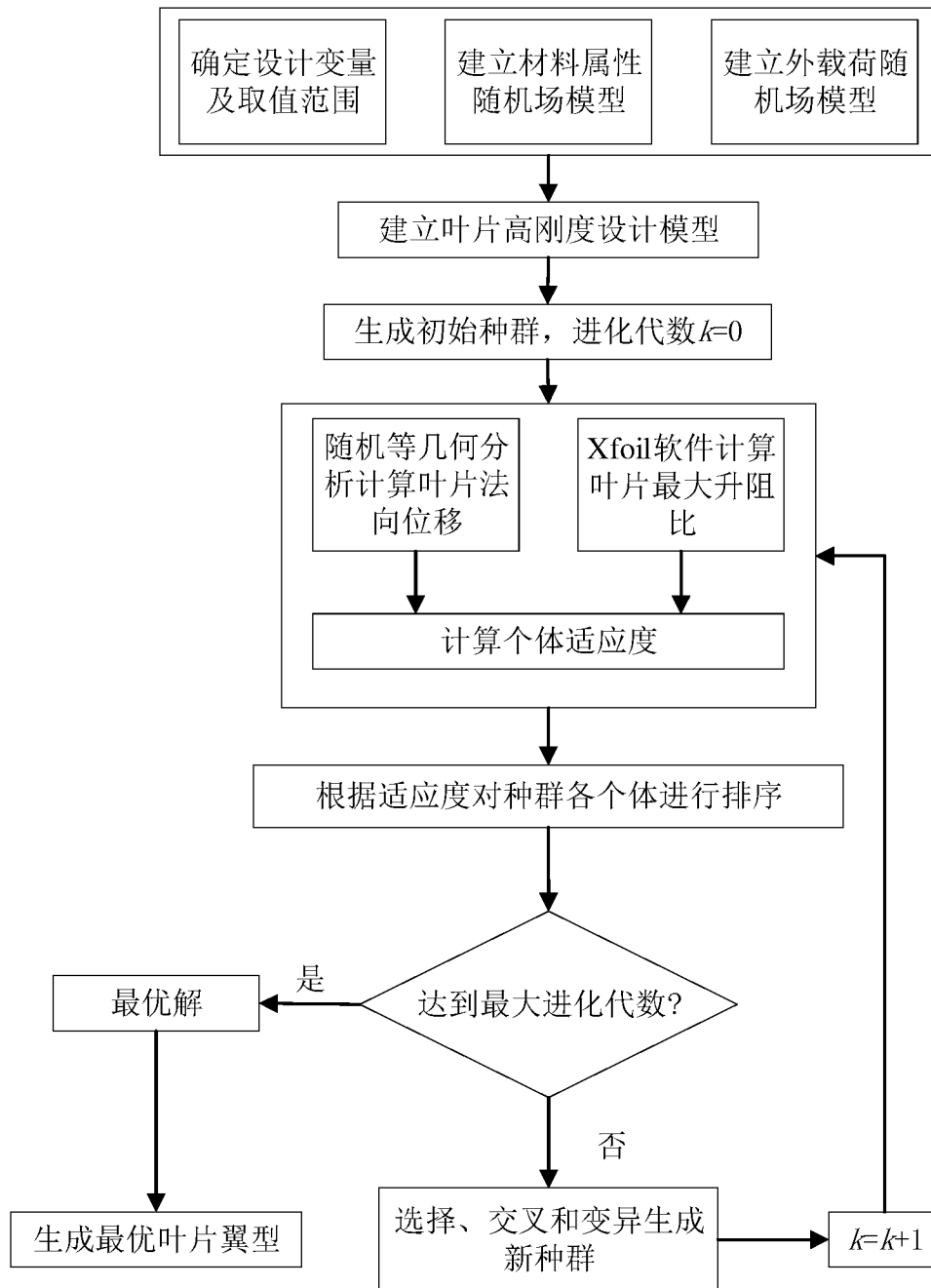


图 1

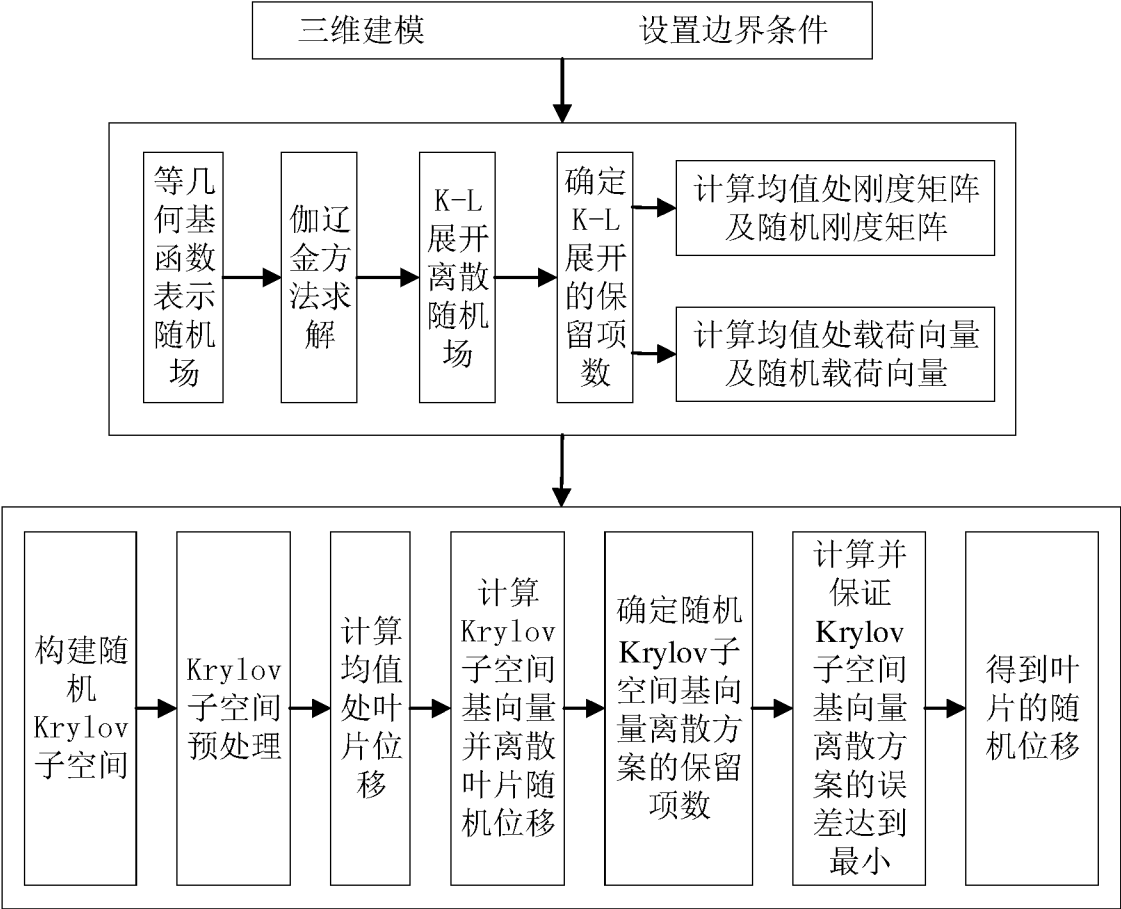


图 2

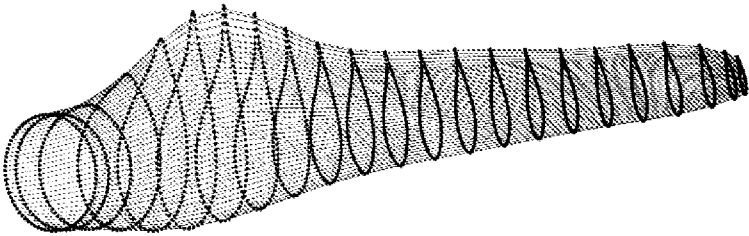


图 3

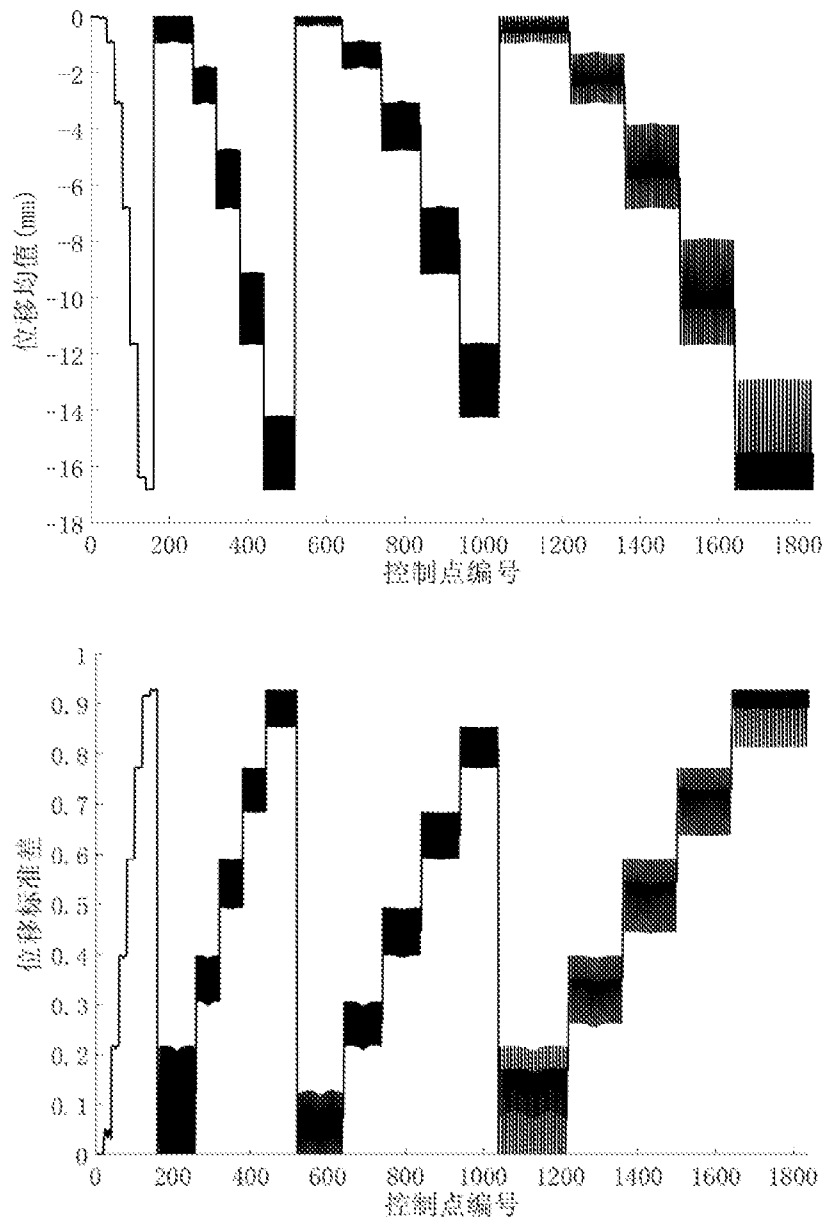


图 4

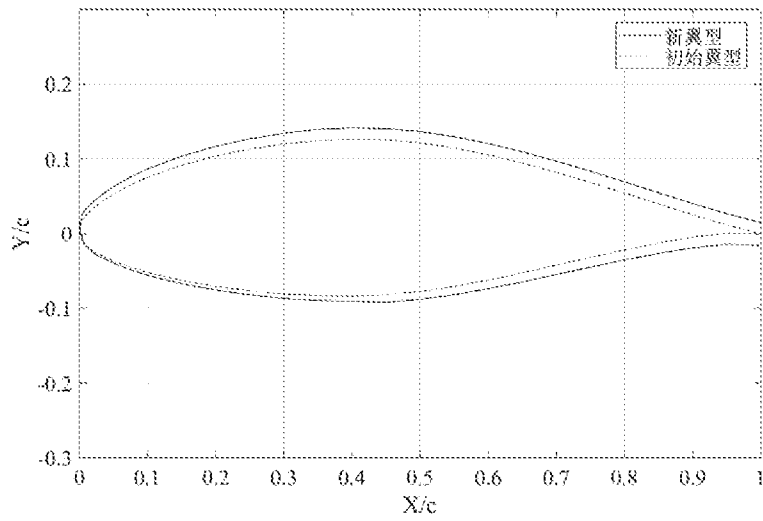


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/111694

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/00(2019.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CNKI, VEN, USTXT, EPTXT, WOTXT: 叶片, 随机, 等几何, 刚度, 材料, 浙江大学, blade, random, geometric, stiffness, material, Zhejiang University

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109766604 A (ZHEJIANG UNIVERSITY) 17 May 2019 (2019-05-17) entire document	1-4
A	CN 107908914 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 13 April 2018 (2018-04-13) description, paragraphs 5-108	1-4
A	CN 102322407 A (CHONGQING UNIVERSITY) 18 January 2012 (2012-01-18) description, paragraphs 13-33	1-4
A	US 2002065636 A1 (YAMAGUCHI, Y. et al.) 30 May 2002 (2002-05-30) entire document	1-4



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 December 2019

Date of mailing of the international search report

19 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/111694

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109766604	A	17 May 2019	None			
CN	107908914	A	13 April 2018	None			
CN	102322407	A	18 January 2012	CN	102322407	B	12 June 2013
US	2002065636	A1	30 May 2002	US	7047167	B2	16 May 2006
				JP	2002070504	A	08 March 2002
				EP	1186747	A3	29 July 2009
				EP	1186747	A2	13 March 2002
				JP	4557397	B2	06 October 2010

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/111694

A. 主题的分类 G06F 17/00 (2019.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS, CNTXT, CNKI, VEN, USTXT, EPTXT, WOTXT: 叶片, 随机, 等几何, 刚度, 材料, 浙江大学, blade, random, geometric, stiffness, material, Zhejiang University																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109766604 A (浙江大学) 2019年 5月 17日 (2019 - 05 - 17) 全文</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107908914 A (西安交通大学) 2018年 4月 13日 (2018 - 04 - 13) 说明书第5-108段</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102322407 A (重庆大学) 2012年 1月 18日 (2012 - 01 - 18) 说明书第13-33段</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2002065636 A1 (YAMAGUCHI Yoshihiro 等) 2002年 5月 30日 (2002 - 05 - 30) 全文</td> <td>1-4</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 109766604 A (浙江大学) 2019年 5月 17日 (2019 - 05 - 17) 全文	1-4	A	CN 107908914 A (西安交通大学) 2018年 4月 13日 (2018 - 04 - 13) 说明书第5-108段	1-4	A	CN 102322407 A (重庆大学) 2012年 1月 18日 (2012 - 01 - 18) 说明书第13-33段	1-4	A	US 2002065636 A1 (YAMAGUCHI Yoshihiro 等) 2002年 5月 30日 (2002 - 05 - 30) 全文	1-4
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
PX	CN 109766604 A (浙江大学) 2019年 5月 17日 (2019 - 05 - 17) 全文	1-4															
A	CN 107908914 A (西安交通大学) 2018年 4月 13日 (2018 - 04 - 13) 说明书第5-108段	1-4															
A	CN 102322407 A (重庆大学) 2012年 1月 18日 (2012 - 01 - 18) 说明书第13-33段	1-4															
A	US 2002065636 A1 (YAMAGUCHI Yoshihiro 等) 2002年 5月 30日 (2002 - 05 - 30) 全文	1-4															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																	
国际检索实际完成的日期 2019年 12月 30日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 19日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 杨越松 电话号码 86-(20)-28950385															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/111694

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	109766604	A	2019年 5月 17日	无			
CN	107908914	A	2018年 4月 13日	无			
CN	102322407	A	2012年 1月 18日	CN	102322407	B	2013年 6月 12日
US	2002065636	A1	2002年 5月 30日	US	7047167	B2	2006年 5月 16日
				JP	2002070504	A	2002年 3月 8日
				EP	1186747	A3	2009年 7月 29日
				EP	1186747	A2	2002年 3月 13日
				JP	4557397	B2	2010年 10月 6日