基于随机-区间混合不确定性的风机性能可靠性分析

屈小章^{1,2}, 余江鸿^{1*}, 姚齐水¹, 阳吉初², 吕双艳²

1. 湖南工业大学机械工程学院, 株洲 412007;

2. 湖南联诚轨道装备有限公司, 株洲 412001

* E-mail: hutyjh@hut.edu.cn

收稿日期: 2019-07-11; 接受日期: 2019-10-09; 网络版发表日期: 2020-02-26

湖南省重点研发计划(编号: 2019GK2121)、湖南省自然科学基金面上项目(编号: 22017JJ4025)和湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(编号: 2018GK4018)资助

摘要 针对抑制风机性能失效的工程问题, 基于可靠性分析理论, 将拉丁超立方试验设计、近似模型与计算流体动力学分析技术相结合, 研究了一种基于响应面的风机性能混合不确定性分析方法. 该方法通过引入区间不确定性, 有效地解决了由于缺乏实验样本而导致的知识不确定性建模问题, 极大地扩展了可靠性分析技术在流体机械研究中的适用性. 引入随机和区间不确定性参数对风机系统进行描述, 基于传统的一阶可靠性分析方法, 建立了风机性能的随机-区间混合可靠性分析模型. 采用重整化群湍流模型计算了风机的流量、压力、轴功率、效率等性能参数, 得到了性能函数. 由于计算流体动力学的计算效率较低, 研究了响应面求解混合可靠性模型的有效迭代算法, 并计算了风机性能失效概率区间. 应用该方法对某轨道交通列车风机性能进行研究, 分析了风机全压的失效概率和可靠性指标与不确定参数的灵敏度问题, 甄别了不确定性参数对系统可靠性的影响, 并从可靠性角度提出了提高风机性能可靠性的工程措施.

关键词 风机性能, 可靠性分析, 区间参数, 随机参数, 混合模型

1 引言

风机是以流体为工质进行能量转换的机械, 主要包括风力机、涡轮机械、压缩机、蒸汽轮机等旋转机械, 广泛应用于风力发电、航空航天、铁路、船舶、汽车、环保、钢铁等行业. 在风机的流体分析中, 有许多固有的不确定参数, 如载荷、结构参数和流动性能等. 因此, 准确的不确定性建模和可靠性分析与优

化对提高风机的安全水平具有重要的工程意义. 近年来, 在风机性能可靠性分析和优化方面进行了一系列的研究. 如Lee等人^[1]针对10 kW风力机的噪声问题, 采用遗传算法对旋翼桨叶的截面进行了最优化设计. Bottasso等人^[2]以multi-MW水平轴风力机转子叶片的设计为对象, 研究了一种给定气动外形的风力机转子叶片结构优化方法. Shen等人^[3]采用具有指定尾迹的提升面法作为空气动力性能预测模型, 研究了一种具

引用格式: 屈小章, 余江鸿, 姚齐水, 等. 基于随机-区间混合不确定性的风机性能可靠性分析. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 299–311

Qu X Z, Yu J H, Yao Q S, et al. Random-interval hybrid reliability analysis for fan performance in the presence of epistemic uncertainty (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 299–311, doi: [10.1360/SST-2019-0243](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0243)

有扫掠和二面角三维形状的风力机叶片多目标优化方法. Derakhshan等人^[4]以风力机的扭转角、弦线和桨距角等为参数, 采用人工神经网络(ANN)的近似模型, 基于人工蜂群(ABC)的形状优化算法, 研究了一种叶片形状优化方法. Yu等人^[5]为提高风力机转子叶片的气动性能, 在给定截面流动条件下, 对叶片截面进行二维形状优化, 使升阻比最大化. Shen等人^[6]采用自由尾流模型的升力面法作为气动模型, 应用微遗传算法对非直线风力机叶片进行几何优化, 与二维优化叶片几何结构相比, 采用合理设计的三维叠加线可以显著提高风力机叶片的年产能, 并具有较好的启动性能. Dhert等人^[7]提出了一种基于雷诺平均Navier-Stokes算法、数值优化算法、几何建模器和网格摄动算法的气动外形优化方法. Chan等人^[8]将基于进化的遗传算法(GA)引入计算流体动力学仿真中, 从而在迭代过程中将叶片几何定义与网格生成和适应度函数评价耦合. 利用叶片截面上的三个变量点确定叶片圆弧的几何形状, 并设置遗传算法的目标函数使功率系数最大. Fatehi等人^[9]以一种RISOHYB118型翼型的风力机叶片为研究对象, 选择升阻比作为目标函数, 提出了一种基于遗传算法的腔体形状优化方法. 卢金铃等人^[10]研究基于反问题和三维黏性的流动分析的叶轮优化设计方法. 刘小民和张文斌^[11]基于遗传算法对离心叶轮气动性能进行了多目标优化.

通常采用近似模型拟合少量样本来代替原来连续的大量样本, 从而可以大幅提高计算效率, 如Samad等人^[12]基于多项式响应面、克里金法和径向基神经网络, 将相同训练数据的多个代理模型应用于压缩机叶片形状优化中, 构造了基于全局误差测度的加权平均模型, 在保障优化精度的同时, 显著提高了优化效率. Li等人^[13]在响应面法与均匀试验设计相结合的基础上, 研究了一种改进的二维风力机翼型气动优化技术, 有效地提高了风力机翼型气动性能优化效率. Del Valle Carrasco等人^[14]将翼型的弦、扭等作为设计变量, 建立Kriging函数风力涡轮机叶片性能优化的代理模型, 采用遗传算法和SQP方法进行局部搜索. 虞跨海等人^[15]研究了基于Kriging的航空发动机涡轮叶片的外形优化设计方法. 韩永志^[16]研究了多个近似模型的涡轮叶片多学科优化方法.

在传统的优化设计中, 由于忽略了设计变量的波动和噪声因素, 使得最优解不可行, 而目标函数的波

动可能会超出事先规定的允许范围. 在安全系数方面, 不确定性因素容易导致过度设计或无法对不确定性因素进行评价, 从而导致安全性的定量设计. 如Ju和Zhang^[17]考虑几何轮廓不确定性, 以升阻比和升力系数最大化为目标函数, 研究了风力机翼型系统稳健优化设计方法. Ning等人^[18]考虑到风的随机性质以及与物理过程和模型选择相关的各种不确定性, 基于不确定性对风力涡轮机进行优化, 研究了稳健的涡轮机设计方法. 倪俊等人^[19]研究了基于Kriging模型和HL-RF的可靠性分析的涡轮叶片造型参数优化设计方法. 贺谦等人^[20]研究了基于6sigma的涡轮叶片的性能多学科优化方法.

虽然难以获得流体载荷等上述参数的精确概率分布, 但根据现有的工程经验和实验数据, 可以很容易地得到它们的变化范围. 对于这些参数, 使用区间变量描述似乎更合适, 这使得对具有认知不确定性的风机性能给出安全可靠分析结果成为可能. 由于风机的结构和载荷参数存在随机和区间的分布, 将混合不确定性分析技术引入到风机性能的可靠性研究中. 目前对随机和区间混合可靠性已经具有一定的研究, 如尼早和邱志平^[21]研究了随机-模糊-区间混合可靠度模型, 并对结构的混合可靠度进行了分析. Jiang等人^[22-26]将概率和区间模型相结合, 研究了多种有效的混合可靠性分析方法, 最后综述了该领域的4个主要研究方向: 不确定性建模、不确定性传播分析、结构可靠性分析和基于可靠性的设计优化. 刘海波等人^[27]针对多故障模式下的不确定性问题, 研究了一种具有概率和区间混合不确定性的系统可靠性分析方法. 区间模型在流体机械的应用已越来越广泛^[28], 本文在计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的基础上, 采用随机参数和区间参数对风机性能的不确定性进行描述, 研究了一种基于响应面的风机性能的随机-区间混合不确定性分析方法(RS-RIHRA).

2 风机性能随机-区间混合不确定性分析方法

2.1 混合不确定性分析

流体机械的分析涉及许多固有的不确定参数, 如载荷、结构参数和流动性能等. 在传统的工程设计中, 风机的性能参数 f 被认为是一个确定的值. 然而, 风机

的性能参数会随着制造过程的偏差以及实际制造过程和服务环境中运行环境的条件而变化. 风机在结构和工作负荷参数运行时的实际性能参数的数学描述可以表示为

$$f_t = f_t(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

其中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为风机结构和载荷的不确定性参数, 其不确定性将导致风机性能参数 f_t 的不确定性, 对于任何参数, 风机性能参数均为相应的有界值. 因此, 由于风机结构和载荷参数 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的不确定性和有界性, 使得风机性能参数 f_t 也是一个不确定的有界量, 可以记录为 f_t^I , 即

$$f_t^I = [f_t^L, f_t^U], \quad (2)$$

式中, f_t^L 是风机流体性能参数的下限; f_t^U 是风机流体性能参数的上限; f_t^I 是由上下边界组成的区间.

在工程中, 如果流体机械的性能参数低于某一临界值, 则不能满足工程应用的要求. 风机流体性能的失效概率 P_s 的解决方案不再是仅具有随机参数的结构可靠性问题, 而是具有区间和随机参数的混合可靠性问题. 对于这些问题, 研究表明^[22,23], 风机失效概率 P_s 将不再是一个确定的值, 而是一个具有上下界限的区间, 即

$$P_s \in P_s^I = [P_s^{\min}, P_s^{\max}], \quad (3)$$

式中, $P_s^{\min}$ 是有可能失效概率值的最小值; $P_s^{\max}$ 是有可能失效概率值的最大值; P_s^I 是失效概率区间.

对于故障随机-区间的求解, 需要进行随机-区间混合可靠度分析.

2.2 随机-区间混合不确定性分析模型

在风机流体性能可靠性分析中, 主要结构参数按概率分布, 而工作荷载按区间分布, 其函数 Z ^[24,25] 可表示为

$$Z = g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}), \quad (4)$$

式中, $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_l)$ 为 l 维概率向量, $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ 为 n 维区间向量.

概率向量是一个非常成熟的概率函数, 不作描述. n 维区间向量是

$$Y_i \in [Y_i^L, Y_i^R], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

式中, Y_i^L, Y_i^R 分别是第 i 个区间的下限和上限.

风机流体性能的失效概率为

$$P_s = P_a \{g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0\}. \quad (6)$$

由于区间 Y 在极限状态 $g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0$ 中不再是唯一的曲面, 而是存在两个边界的极限状态带, 分别是

$$\begin{cases} \max_Y g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0, \\ \min_Y g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

因此失效概率 P_s 也存在上下边界, 其可表示为

$$\begin{cases} P_s = P_a \{ \max_Y g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0 \}, \\ P_s = P_a \{ \min_Y g(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \leq 0 \}. \end{cases} \quad (8)$$

通过一次二阶距和求解如下两个优化问题, 即可得上述极限状态的可靠性指标区间为

$$\begin{cases} \beta^L = \min_U \|U\|, \\ \text{s.t. } \min_Y G(\mathbf{U}, \mathbf{Y}) = 0, \\ \beta^R = \min_U \|U\|, \\ \text{s.t. } \max_Y G(\mathbf{U}, \mathbf{Y}) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{U}$ 为概率变量 $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ 转化到 $\mathbf{U}$ 空间内的值, β^L 和 β^R 分别为最小和最大的可靠性指标.

从上式中可得风机性能的最小和最大的失效概率为

$$\begin{cases} P_s^{\min} = \Phi(-\beta^R), \\ P_s^{\max} = \Phi(-\beta^L). \end{cases} \quad (10)$$

在实际工程中, 系统的最大失效概率通常是人们最为关心和重视的指标, 因此, 将以最大失效概率 $P_s^{\max}$ 来度量混合不确定性风机性能的可靠性.

2.3 近似混合不确定性求解方法

从以上分析可以看出, 当采用一阶可靠性方法 (Form) 求解风机性能概率区间混合可靠性问题时, 即求解式 (9) 等两个复杂嵌套优化问题. 在这些优化中, 外层是概率分析, 用来确定最可能的点 (MPP), 内层是区间分析, 用来确定区间域中性能函数的极值. 直接求

解优化问题需要大量CFD的计算, 计算效率非常低. 本文在前期研究的基础上, 提出了一种基于响应面(RS)求解嵌套优化问题的有效算法^[23,24,29-31]. 研究表明, 该方法能有效降低风机性能可靠性分析的计算成本. 该算法是通过一系列迭代实现的. 在每个迭代步骤中建立一个近似混合可靠性问题, 并采用近似模型更新策略保证其收敛性.

为了便于计算, 采用不完全二次多项式^[30,31]建立了每个迭代步骤的性能函数RS模型. 由于RS模型包含间隔和随机变量, 近似的性能函数 $\hat{g}$ 可以表示为

$$\hat{g}(X, Y) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^m c_i Y_i + \sum_{i=1}^n d_i X_i^2 + \sum_{i=1}^m e_i Y_i^2, \quad (11)$$

式中, a_0, b_i, c_i, d_i, e_i 是待定系数.

基于RS模型创建, 当重点分析 β^R 和 $P_s^{\max}$, 式(9)可以转化为近似可靠性问题如下:

$$\begin{cases} \beta^R = \min \|\mathbf{U}\|, \\ \text{s.t. } \max \hat{G}(\mathbf{U}, \mathbf{Y}) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

式中, β^R 是近似可靠性指标的上限. 如果我们集中分析 β^L 和 $P_s^{\min}$, 式(9)可以转化为另一个近似可靠性问题:

$$\begin{cases} \beta^L = \min \|\mathbf{U}\|, \\ \text{s.t. } \max \hat{G}(\mathbf{U}, \mathbf{Y}) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

为了解决混合模型的可靠性问题, 采用了解耦方法^[32]. 其原理是将区间分析引入到寻找最可能失效点的过程中, 对每次迭代进行概率和区间分析. 如果在第 k 步迭代中得到 $U^{(k)}$ 和 $Y^{(k)}$, 则在下一个迭代中使用改进的HL-RF方法^[32]从固定区间变量 $Y^{(k)}$ 中得到 $U^{(k+1)}$, 原理如下:

$$U^{(k+1)} = U^{(k)} + \lambda d^{(k)}, \quad (14)$$

式中, $d^{(k)}$ 是搜索方向, 对它的定义式是

$$d^{(k)} = \frac{\nabla \hat{G}(U^{(k)}, Y^{(k)})(U^{(k)})^T - \hat{G}(U^{(k)}, Y^{(k)})}{\|\nabla \hat{G}(U^{(k)}, Y^{(k)})\|^2} \cdot \nabla \hat{G}(U^{(k)}, Z^{(k)}) - U^{(k)}, \quad (15)$$

式中, $\nabla \hat{G}$ 是 $\hat{G}$ 的梯度, λ 是迭代步长. 当得到 $U^{(k+1)}$, 则可通过区间分析得到 $Y^{(k+1)}$, 它的表达式是

$$\begin{cases} Y^{(k+1)} = \min \hat{G}(U^{(k+1)}, Y^{(k)}), \\ \text{s.t. } Y^L \leq Y^{(k)} \leq Y^R. \end{cases} \quad (16)$$

依据上述方法对风机性能进行下一步的迭代, 直至满足收敛表达式:

$$\begin{cases} \|U^{(k+1)} - U^{(k)}\| / U^{(k)} \leq \zeta_1, \\ \hat{G}(U^{(k+1)}, Y^{(k+1)}) \leq \zeta_2, \end{cases} \quad (17)$$

式中, ζ_1 和 ζ_2 为极小非负实数.

2.4 近似混合不确定性分析流程

综上所述, 风机性能混合可靠性分析的具体过程如下:

(1) 根据不确定参数信息, 确定了流体力学结构的随机参数 $\mathbf{X}$ 和区间参数 $\mathbf{Y}$;

(2) 选择初始迭代点 $X^{(0)} = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})$ 和 $Y^{(0)} = (Y_1^C, Y_2^C, \dots, Y_n^C)$, 并设置 $t=0$;

(3) 以 $(\mathbf{X}^{(t)}, \mathbf{Y}^{(t)})$ 为采样中心, 通过拉丁超立方试验设计选择采样点. 通过调用CFD分析建立了风机性能函数的RS模型. 初始采样中心 $(\mathbf{X}^{(0)}, \mathbf{Y}^{(0)})$ 设置为 $(\mu_X, \mathbf{Y}^C)$;

(4) 建立了方程(12)的近似可靠度问题, 采用方程(14)~(17)所示的解耦方法求解最优解 (x, y) ;

(5) 检查收敛. 如果 $\|\mathbf{X}^{(t+1)} - \mathbf{X}^{(t)}\| / \mathbf{X}^{(t)} \leq \varepsilon_3$ (ε_3 是一个较小的设置值), 到步骤(6); 否则, 设置 $t=t+1$, 进入步骤(3);

(6) 最大可靠性指标 β^R 和相应的最小失效概率通过 $P_s^{\max} = \Phi(-\beta^R)$ 得到.

算法流程如图1所示. β^R 和 $P_s^{\max}$ 也通过类似的过程来解决, 只需将区间分析从最大化问题改为最小化问题.

3 风机性能试验及结果对比

3.1 试验结果及分析

为了保证可靠性分析的准确性, 建立了风机性能试验方法. 主要设备包括进出口管道、连接管道、节流锥、压力测量仪表、导流器、试验管道等. 采用U

图 1 (网络版彩图)基于响应面的随机-区间混合不确定性分析(RS-RIHRA)流程

Figure 1 (Color online) Flow chart of probabilistic-interval hybrid reliability analysis based on response surface.

型管、微压计和皮托管测量风机管路的静压和动压, 通过节流锥调节流量. 采用DJYC电机运转试验机对风机的轴功率进行了测试, 测试结果准确. 风机流体速度由PA×1000数字转速表测量, 精度为±1%. 风机的转速由工业变频器调节, 其输出电压为400 V, 输出频率为10~300 Hz, 最大测试功率为75 K, 功率采用电测量法

测试, 测试设备采用Fluck-43B电能质量分析仪, 其频率、电压、电流分别为10~15 kHz, 5~1250 V和50~1250 kA^[28]. 风机性能试验装置如图2所示.

为了分析工艺制造误差给风机性能带来不确定性的问题, 采用3台样机进行试验, 结果如图3所示, 样机1全压效率最高, 样机3全压效率最低, 在流量5.4 m³/s处,

图2 (网络版彩图) 风机性能测试装置

Figure 2 (Color online) Turbomachinery fluid dynamics test device.

图3 (网络版彩图) 全压效率与流量的关系曲线

Figure 3 (Color online) Curve of full pressure efficiency and flow rate.

最大差值为2%, 在工况点处相差1.1%。

通过样机性能试验对比分析, 不同的样机性能包括全压、流量等试验结果有所不同, 经现场工艺参数的测量分析可知, 样机1和设计要求最接近, 性能参数也最接近设计的要求。

3.2 计算模型及结果对比

采用CFD方法对风机性能进行数值分析。流体动力学计算领域中控制方程的数值求解仍然存在着封闭方程的问题, 这就需要引入湍流模型。重整化群(renormalization group, RNG)模型由N-S方程推导而来, 已广泛应用于许多复杂流场的计算, 取得了令人满意的结果。该模型可以通过调节湍流的涡黏性和壁面分离来考虑旋转效应的影响。它能有效地模拟湍流分离流动, 非常适用于动静干涉的研究。RNG模型^[33]在形式上与

标准模型相似:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &+ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (18)$$

式中, k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率, G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能项, G_b 为浮力引起的湍流动能 k 的产生项, Y_M 为可压缩湍流脉动对总膨胀率的影响, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数。 σ_k 和 σ_ε 是湍流动能 k 和耗散率 ε 对应的Prandtl数, S_k 和 S_ε 分别是用户定义的源项。

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (19)$$

当流体不可压缩且不考虑用户定义的源项时, $G_b=0$, $Y_M=0$, $S_k=0$, $S_\varepsilon=0$, RNG k - ε 模型可表达为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$,

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad \eta =$$

$$(2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}, \quad E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \eta_0 = 4.377, \quad \beta = 0.012,$$

风机流量 $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 叶轮转速 2930 r/min , 叶轮叶片数12, 后导叶数18, 轮毂比0.72, 整个流体域的网格数约为290万个^[34], 如图4所示。标准大气压下马赫数为0.044, 雷诺数 Re 为63045。

通过上述建立的风机流场分析模型, 计算得到风机性能结果如表1所示。

图5给出了计算结果和样机1试验结果的比较, 可以分析出试验结果的压力系数比计算结果稍大一些, 最大偏差为0.5%, 在误差允许的范围内。因此该流体计算模型的精度可满足风机性能可靠性分析的要求。

图 4 (网络版彩图)风机的非结构网格模型. (a) 总体网格图; (b) 叶轮叶片和后导叶局部放大图

Figure 4 (Color online) Unstructured mesh model of fluid machineries. (a) Overall grid diagram; (b) partial enlargement of impeller vane and rear guide vane.

表 1 风机性能计算结果

Table 1 Calculation results of fan performance

序号	流量 (m ³ /s)	静压 (Pa)	全压 (Pa)	全压效率	轴功率 (kW)	压力系数
1	4.510	1966.6	2094.8	71.4%	13.2	0.186
2	4.700	1922.2	2061.5	71.9%	13.5	0.183
3	4.935	1768.0	1921.5	72.7%	13.0	0.171
4	5.225	1524.3	1696.4	71.0%	12.5	0.151
5	5.415	1355.3	1540.1	69.3%	12.0	0.137
6	5.643	1131.6	1332.3	65.8%	11.4	0.118

图 5 (网络版彩图)压力与流量系数的关系曲线

Figure 5 (Color online) Curve of pressure and flow coefficient.

4 风机性能不确定性分析结果及分析

4.1 主要技术参数的试验设计

影响风机性能的技术参数有很多, 结合现场工艺实际情况的分析, 对风机性能影响最大的参数有叶片

安装角 β 、轮毂比 v 、导叶的圆弧板半径 R 及叶轮转速 n 。由于这些参数的影响都是相互的, 因此采用拉丁超立方试验设计方法对风机性能进行试验设计, 结果如表2所示。

通过拉丁超立方试验设计选择采样点, 调用CFD分析建立了如下风机性能函数的RS模型:

$$P = -5194081.5 - 14843.9\beta + 1982357.7v - 2344.7R + 3444.3n + 2.1\beta^2 + 440096.5v^2 + 0.021R^2 - 0.587n^2 - 10388.2\beta \cdot v + 1.1\beta \cdot R + 7.47\beta \cdot n - 548.3v \cdot R - 709.1v \cdot n + 0.92R \cdot n,$$

$$\mu = -1185.5 - 3.48\beta - 0.46R + 0.83n + 0.003\beta^2 + 121.7R^2 - 2.04\beta \cdot v + 0.0016\beta \cdot n - 0.132v \cdot R - 0.106v \cdot n + 0.0002R \cdot n.$$

不同的设计参数对风机气动性能均有一定的影响, 其中轮毂比 v 和叶片安装角 β 影响最大。图6是轮毂比对风机全压及效率的影响曲线图, 从图中可以分析出, 轮毂比越大全压效率越低, 轮毂比0.705~0.735之间, 全压效率最大为73.5%, 最小为71.2%。全压随轮毂

表 2 风机性能试验设计结果

Table 2 Results of DOE for fan performance

序号	输入参数				输出参数	
	β	v	R (mm)	n (r/min)	全压 P (Pa)	全压效率 η
1	40.8	0.720	217.3	2930.0	2039.0	71.95%
2	39.36	0.709	214.3	2914.0	1953.9	73.42%
3	39.60	0.731	216.3	2943.3	1808.6	71.66%
4	39.84	0.724	236.3	2911.3	1859.2	72.12%
5	40.08	0.711	222.3	2940.6	2067.5	73.04%
6	40.32	0.714	228.3	2948.6	2096.9	72.76%
7	40.56	0.716	218.3	2930.0	2064.8	72.68%
8	40.80	0.718	220.3	2935.3	2061.2	72.10%
9	41.04	0.729	224.3	2922.0	1995.5	72.25%
10	41.28	0.733	232.3	2927.3	1969.4	71.58%
11	41.52	0.705	234.3	2916.6	2097.9	70.43%
12	41.76	0.720	226.3	2946.0	2148.0	71.03%
13	42.00	0.735	208.3	2919.3	1955.8	69.79%
14	42.24	0.726	230.3	2938.0	2080.2	70.01%
15	42.48	0.707	210.3	2924.6	2205.5	70.13%

图 6 轮毂比对风机性能的影响曲线. (a) 全压效率与轮毂比; (b) 全压与轮毂比

Figure 6 Influence of hub ratio on fan performance. (a) Full pressure efficiency and hub ratio; (b) full pressure and hub ratio.

比先减小后增大, 且当轮毂比为0.73时最低. 在给定轮毂比范围内, 全压最大值为1968 Pa, 最小为1782 Pa. 图7是叶片安装角对风机全压及效率的影响曲线图, 从图中可以分析出, 叶片安装角越大, 全压效率越低, 且在40.5°~42°之间全压效率变化比较明显. 叶片安装角越大, 全压也越大, 变化范围为1911~2183 Pa, 因此叶片安装角对风机全压影响较大.

控制轮毂比和叶片安装角的结构参数变化, 对提高风机的质量具有重要意义. 下面采用混合可靠性分析方法对风机性能质量问题进行进一步的研究.

4.2 结果分析

叶片安装角 β 、轮毂比 v 、导叶的圆弧板半径 R 属于风机的结构参数, 为随机变量; 叶轮转速 n 与电机、风机的制造工艺及现场运行的实际环境存在很大的关系, 因此难于确定其分布类型, 为区间变量, 它们的分布类型及取值如表3所示.

风机应用于轨道列车, 主要对产生热源的仪器和设备进行冷却, 因此对风机的全压 P 及效率 η 具有较高的要求. 由于风机的运行工况环境复杂, 为了保障轨道列车各设备及仪器的正常运行, 风机的全压 P 及工

图 7 叶片安装角对风机性能的影响曲线. (a) 全压效率与叶片安装角; (b) 全压与叶片安装角
Figure 7 Influence of blade installation angle on fan performance. (a) Full pressure efficiency and blade mounting angle; (b) full pressure and blade mounting angle.

表 3 风机不确定参数分布情况^{a)}

Table 3 Distribution of uncertain parameters for fan^{a)}

Variables	Para1	Para2	Distribution
β	40.8	1	Normal
v	0.72	0.02	Normal
R (mm)	217.3	10	Normal
n (r/min)	2910	2950	Interval

a) 正态分布(Normal)中, Para1为均值, Para2为标准差. 区间变量(Interval)中, Para1为变量下界, Para2为变量上界.

作效率 η 必须在一定的范围内, 如果超出了一定的范围, 则可能造成风机流量达不到制冷的要求, 或产生较大颤振问题. 因此风机在大批量的生产时必须严格控制工艺质量, 保障风机的可靠性能满足现场的运行要求. 根据该风机实际工况要求, 风机的全压 P 应满足 [1650 Pa, 2300 Pa], 效率 η 应大于69%, 反之, 则认为该风机失效.

通过对风机不确定参数进行随机和区间度量, 并构建RS模型对风机性能关于不确定参数的函数关系进行近似, 基于响应面的RS-RIHRA对风机性能失效问题进行可靠性求解. 为了验证所提出方法的有效性, 采用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)方法

来求解结构可靠性指标和失效概率区间, 并与基于响应面的RS-RIHRA结果进行对比, 风机性能的失效概率和可靠性指标结果对比如表4所示.

表4采用RS-RIHRA和MCS对风机性能进行可靠性分析, 通过结果对比分析, 两者分析结果非常接近, 因此RS-RIHRA的风机性能不确定性分析方法是有效的.

风机全压最大的失效概率为0.1146, 最大可靠性指标下界 $P_{SL}^{\min}$ 为1.578. 最小压力的最大失效概率 P_{Lower} 为0.0426, 最大可靠性指标下界 $P_{SL}^{\min}$ 为2.028, 当工作压力小于最小要求压力时, 则风机压力不能满足实际工况的要求, 可能产生颤振而失效. 最大压力的最大失效概率 P_{Upper} 为0.0847, 最大可靠性指标下界 $P_{SL}^{\min}$ 为1.724, 当工作压力大于最大要求全压时, 则风机的流量达不到制冷的要求. 风机效率最大的失效概率为0.0431, 最大可靠性指标下界 $P_{SL}^{\min}$ 为2.023. 为了分析主要技术参数的离散型对风机性能的影响, 研究了叶片安装角 β 和轮毂比 v 的不同标准差值对风机全压的影响, 结果如图8和9所示.

从图8和9分析可知, 叶片安装角 β 和轮毂比 v 的离

表 4 风机性能可靠性分析结果及对比

Table 4 Reliability analysis results and comparison of fan performance

Variables	$P_s^{\min}$		$P_s^{\max}$		$P_{SL}^{\min}$		$P_{SL}^{\max}$	
	RS-RIHRA	MCS	RS-RIHRA	MCS	RS-RIHRA	MCS	RS-RIHRA	MCS
P_{Lower}	0.0230	0.022	0.0426	0.065	2.028	1.846	2.172	2.290
P_{Upper}	0.0090	0.0076	0.0847	0.085	1.724	1.722	2.612	2.671
P	0.0516	0.072	0.1146	0.107	1.578	1.612	1.947	1.796
η	0.0149	0.0259	0.0431	0.048	2.023	1.977	2.434	2.227

散型对风机性能具有较大的影响. 随着轮毂比 v 的标准差值增大, 失效概率也越大, 可靠性指标越小. 如果能够将轮毂比 v 的标准差值降低至0.01, 则风机全压的最大失效概率仅为0.0166, 最小的可靠性指标为2.395, 风机性能的可靠性水平具有明显的提高; 反之, 轮毂比 v 的标准差值提高为0.028, 则风机全压的最大失效概率增大为0.2256, 最小的可靠性指标仅为1.212, 风机性能可靠性的水平明显降低, 难以满足实际工程可靠性的要求. 同样, 随着叶片安装角 β 的标准差值增大, 失效概率也增大, 可靠性指标变小. 如果将叶片安装角 β 的标准差值降低至0.2, 则风机全压的最大失效概率仅为0.0761, 最小的可靠性指标为1.774, 风机性能的可靠性水平具有明显的提高; 反之, 叶片安装角 β 的标准差值提高为2.0, 则风机全压的最大失效概率增大为0.2093, 最小的可靠性指标仅为1.256, 风机性能可靠性的水平明显的降低, 难于满足实际工程可靠性的要求.

因此要提高风机性能的可靠性, 应提高叶片安装

角 β 和轮毂比 v 的制造水平, 并在设计时留有足够的安全裕度, 才能使风机性能具有足够的可靠性以满足实际工程运行的要求.

5 结论

本文提出了一种求解流体力学性能问题的随机-区间混合可靠性分析方法. 该方法避免了分析误差概率分布的假设, 有效地扩展了传统可靠性分析在流体力学性能问题中的适用性. 在混合可靠性分析中, 为了显著提高计算效率, 建立了RS模型, 采用RNG $k-\epsilon$ 模型和试验方法, 保证了可靠性分析的准确性. 通过算例分析了一种具有轮毂比、叶片安装角度、半径、转速等不确定性的低速旋转流体机械. 结果表明, 在混合不确定度模型下, 风机性能的可靠性解具有上下边界. 在实际工程分析中, 为了保证性能的安全性, 可采用最小可靠性指标或最大失效概率作为设计的参考值. 不同

图 8 v 的标准差参数对风机全压的影响曲线. (a) 失效概率; (b) 可靠性指标

Figure 8 The influence curve of the standard deviation of v on the total pressure for fan. (a) Failure probability; (b) reliability index.

图 9 β 的标准差参数对风机全压的影响曲线. (a) 失效概率; (b) 可靠性指标

Figure 9 The influence curve of the standard deviation of β on the total pressure for fan. (a) Failure probability; (b) reliability index.

参数对风机性能可靠边界的影响是不同的. 通过对设计参数的敏感性、失效概率和可靠性的分析, 发现提高叶片安装角和轮毂比的不确定性水平可以显著提高风机性能的可靠性. 因此, 在实际应用中有必要对主要参数的不确定度水平进行控制.

本文主要研究了机加工水平下的风机可靠性问题, 影响风机运行不确定性的因素有很多, 后续将继续研究在运行工况下风机性能不确定性的问题, 考虑海拔高度、外界温湿度、干扰风向、强度和电网等对风机性能的影响.

参考文献

- 1 Lee S, Lee S, Ryi J, et al. Design optimization of wind turbine blades for reduction of airfoil self-noise. *J Mech Sci Technol*, 2013, 27: 413–420
- 2 Bottasso C L, Campagnolo F, Croce A, et al. Structural optimization of wind turbine rotor blades by multilevel sectional/multibody/3D-FEM analysis. *Multibody Syst Dyn*, 2014, 32: 87–116
- 3 Shen X, Chen J G, Zhu X C, et al. Multi-objective optimization of wind turbine blades using lifting surface method. *Energy*, 2015, 90: 1111–1121
- 4 Derakhshan S, Tavaziani A, Kasaiean N. Numerical shape optimization of a wind turbine blades using artificial bee colony algorithm. *J Energy Resour Tech*, 2015, 137: 051210
- 5 Yu D O, Lee H M, Kwon O J. Aerodynamic shape optimization of wind turbine rotor blades considering aeroelastic deformation effect. *J Mech Sci Technol*, 2016, 30: 705–718
- 6 Shen X, Yang H, Chen J, et al. Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Convers Manage*, 2016, 119: 266–278
- 7 Dhert T, Ashuri T, Martins J R R A. Aerodynamic shape optimization of wind turbine blades using a Reynolds-averaged Navier-Stokes model and an adjoint method. *Wind Energ*, 2017, 20: 909–926
- 8 Chan C M, Bai H L, He D Q. Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Appl Energy*, 2018, 213: 148–157
- 9 Fatehi M, Nili-Ahmadabadi M, Nematollahi O, et al. Aerodynamic performance improvement of wind turbine blade by cavity shape optimization. *Renew Energy*, 2019, 132: 773–785
- 10 Lu J L, Xi G, Qi D T. Optimization method of meridional channel and blade in 3-D impeller (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2005, 39: 1021–1025 [卢金铃, 席光, 祁大同. 三元叶轮子午流道和叶片的优化方法. 西安交通大学学报, 2005, 39: 1021–1025]
- 11 Liu X M, Zhang W B. Multi-objective automatic optimization design of centrifugal impeller based on genetic algorithm (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2010, 44: 31–35 [刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计. 西安交通大学学报, 2010, 44: 31–35]
- 12 Samad A, Kim K Y, Goel T, et al. Multiple surrogate modeling for axial compressor blade shape optimization. *J Propulsion Power*, 2008, 24: 301–310
- 13 Li J Y, Li R, Gao Y, et al. Aerodynamic optimization of wind turbine airfoils using response surface techniques. *P I Mech Eng A-J Power Energy*, 2010, 224: 827–838
- 14 Del Valle Carrasco A, Valles-Rosales D J, Mendez L C, et al. A site-specific design of a fixed-pitch fixed-speed wind turbine blade for energy optimization using surrogate models. *Renew Energy*, 2016, 88: 112–119
- 15 Yu K H, Wang J S, Yang Q, et al. Multi-disciplinary optimization of turbine cooling blade shape design based on surrogate model (in Chinese). *J Mech Eng*, 2011, 47: 106–112 [虞跨海, 王金生, 杨茜, 等. 基于近似的涡轮冷却叶片外形多学科设计优化. 机械工程学报, 2011, 47: 106–112]
- 16 Han Y Z. Study on multidisciplinary design optimization and approximation technology of turbine blades (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007 [韩永志. 涡轮叶片多学科设计优化及近似技术研究. 硕士学位论文. 西安: 西北工业大学, 2007]
- 17 Ju Y P, Zhang C H. Multi-point robust design optimization of wind turbine airfoil under geometric uncertainty. *P I Mech Eng A-J Power Energy*, 2012, 226: 245–261
- 18 Ning S A, Damiani R, Moriarty P J. Objectives and constraints for wind turbine optimization. *J Sol Energy Eng*, 2014, 136: 303–312
- 19 Ni J, Yu K H, Yue Z F. Multi-disciplinary optimization of turbine blade double-cycle design based on reliability (in Chinese). *J Aerosp Power*, 2009, 24: 2051–2056 [倪俊, 虞跨海, 岳珠峰. 基于可靠性的涡轮叶片双循环多学科设计优化. 航空动力学报, 2009, 24: 2051–2056]
- 20 He Q, Li Y S, Wen Z X, et al. Multi-subject reliability and robust design optimization of turbine blades (in Chinese). *Propul Technol*, 2010, 31:

- 193–197 [贺谦, 李元生, 温志勋, 等. 涡轮叶片多学科可靠性及稳健设计优化. 推进技术, 2010, 31: 193–197]
- 21 Ni Z, Qiu Z P. Probability-fuzzy-improbability mixed reliability analysis of structural system (in Chinese). *J Nanjing Univ Aeronaut Astron*, 2010, 42: 272–277 [尼早, 邱志平. 结构系统概率-模糊-非概率混合可靠性分析. 南京航空航天大学学报, 2010, 42: 272–277]
- 22 Jiang C, Li W X, Han X, et al. Structural reliability analysis based on random distributions with interval parameters. *Comput Struct*, 2011, 89: 2292–2302
- 23 Han X, Jiang C, Liu L X, et al. Response-surface-based structural reliability analysis with random and interval mixed uncertainties. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 1322–1334
- 24 Jiang C, Han X, Li W X, et al. A hybrid reliability approach based on probability and interval for uncertain structures. *J Mech Des*, 2012, 134: 031001
- 25 Jiang C, Lu G Y, Han X, et al. A new reliability analysis method for uncertain structures with random and interval variables. *Int J Mech Mater Des*, 2012, 8: 169–182
- 26 Jiang C, Zheng J, Han X. Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: A review. *Struct Multidisc Optim*, 2018, 57: 2485–2502
- 27 Liu H B, Jiang C, Zheng J, et al. System reliability analysis method with probability-interval mixed uncertainty (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2017, 49: 456–466 [刘海波, 姜潮, 郑静, 等. 含概率-区间混合不确定性的系统可靠性分析方法. 力学学报, 2017, 49: 456–466]
- 28 Qu X Z, Liu G P, Han X, et al. Uncertain optimization of airfoil aerodynamic performance of fan system based on interval (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2017, 47: 955–964 [屈小章, 刘桂萍, 韩旭, 等. 基于区间的风机系统翼型气动性能不确定性优化. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 955–964]
- 29 Du X P. Interval reliability analysis. In: *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Las Vegas: American Society of Mechanical Engineers, 2007
- 30 Jiang C, Long X Y, Han X, et al. Probability-interval hybrid reliability analysis for cracked structures existing epistemic uncertainty. *Eng Fract Mech*, 2013, 112–113: 148–164
- 31 Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems. *Struct Saf*, 1990, 7: 57–66
- 32 Zhang Y L, Der Kiureghian A. Two improved algorithms for reliability analysis. In: Rackwitz R, Augusti G, Borri A, eds. *Reliability and Optimization of Structural Systems*. IFIP—The International Federation for Information Processing. Boston: Springer, 1995. 297–304
- 33 Tu J, Yeoh G H, Liu C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Newton: Butterworth-Heinemann, 2018
- 34 Qu X Z, Han X, Liu G P, et al. Time-varying reliability analysis of fan impeller structure based on aeroelasticity (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 382–394 [屈小章, 韩旭, 刘桂萍, 等. 基于气动弹性的风机叶轮结构时变可靠性分析研究. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 382–394]

Random-interval hybrid reliability analysis for fan performance in the presence of epistemic uncertainty

QU XiaoZhang^{1,2}, YU JiangHong¹, YAO QiShui¹, YANG JiChu² & LÜ ShuangYan²

¹ School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

² Hunan Lince Rail Equipment Co., Ltd. Zhuzhou 412001, China

With the aim of reducing fan performance failure, an effective method of fan reliability analysis based on a hybrid uncertainty model was investigated using a combination of orthogonal test design, an approximation model, and computational fluid dynamics (CFD) simulation and analysis technology. By introducing interval uncertainty, this method can effectively solve the problem of quantifying model uncertainty owing to the lack of experimental samples and can greatly expand the applicability of reliability analysis technology in fluid machinery research. Random and interval uncertainty parameters were introduced to describe the fan system and a mixed random-interval reliability analysis model of fan performance was established based on the traditional first-order reliability analysis method. Using CFD analysis of the renormalization group (RNG) model, the flow, pressure, shaft power, efficiency, and other fan performance parameters were calculated, and the performance function was obtained. Owing to the low efficiency of the CFD calculation, the effective iterative algorithm of response surface to solve hybrid reliability model was studied, and the failure probability interval of fan performance was calculated. The method was used to study the fan performance of a rail transit train, and the failure probability, reliability index, and performance parameter sensitivity and uncertainty were analyzed. The influence of parameter uncertainty on system reliability was determined, and the engineering measures necessary to improve the fan's performance reliability were proposed.

fan performance, reliability analysis, interval parameters, random parameters, hybrid model

doi: [10.1360/SST-2019-0243](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0243)