基于智能双重响应面法的涡轮叶盘可靠性灵敏度分析*

张春宜1, 宋鲁凯1, 费成巍2, 郝广平1, 李雪芹3

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院,黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 香港理工大学 机械工程系,香港 999077;
3. 山东交通学院 工程机械学院,山东 济南 250000)

摘 要:为了合理进行整体叶盘多失效模式可靠性分析和准确描述各影响参数的重要程度,将智能 算法与双重响应面方法相结合提出可靠性灵敏度分析的智能双重响应面方法(Intelligent Dual Response Surface Method, IDRSM)。首先,建立IDRSM的数学模型,给出基于IDRSM的可靠性灵敏度分析的流 程。然后,考虑流场和温度场作用,基于IDRSM对整体叶盘径向变形和应力两种失效模式进行可靠性 分析和灵敏度分析。可靠性分析显示:当许用径向变形、许用应力的均值和标准差分别取 3.8mm 和 76μm,690MPa和14MPa时,叶盘综合可靠度为 0.9926。灵敏度分析显示:整体叶盘综合失效概率的主 要影响因素为流速和转速,占叶盘总失效的 92%。通过蒙特卡洛法、响应面法、极值响应面法、智能响 应面法等四种方法比较显示:IDRSM 能在保证计算精度的前提下提高计算效率。实例分析表明该方法在 多失效模式综合可靠性灵敏度分析中的可行性和有效性,也为结构多失效模式可靠性优化开辟了有效 途径。

关键词:可靠性分析;整体叶盘;智能算法;人工神经网络;智能双重响应面法
中图分类号:TB114.3; V234.3 文献标识码: A 文章编号:1001-4055 (2017) 05-1155-10
DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2017. 05. 025

Intelligent Dual Response Surface Method for Reliability Sensitivity Analysis of Turbine Blisk

ZHANG Chun-yi¹, SONG Lu-kai¹, FEI Cheng-wei², HAO Guang-ping¹, LI Xue-qin³

School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
 Department of Mechanical Engineering, The Hongkong Polytechnic University, Hongkong 999077, China;

3. School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250000, China)

Abstract: To reasonably implement reliability analysis and describe the significance of influencing parameters on turbine blisk with multi-failure modes, intelligent dual response surface method (IDRSM) was proposed by integrating intelligent algorithm and dual response surface method. Firstly, the mathematical model of IDRSM was established and the basic principle of multi-objective reliability sensitivity analysis with IDRSM was given. And then, based on the proposed method, the reliability analysis and sensitivity analysis of two failure modes (radial deformation and stress) were completed considering the interaction of flow field and temperature field. From the reliability analysis, the comprehensive reliability of turbine blisk is 0.9926 when the mean and standard deviation of the allowable radial deformation and the allowable stress are 3.8mm and 76µm, 690MPa and 14MPa, respectively. The sensitivity analysis shows that main impact factors influencing turbine blisk failure are gas velocity and rotational speed, accounting for 92% of the total failure probability. Through the compar-

基金项目:国家自然科学基金(51275138);黑龙江省教育厅自然科学基金项目(12531109)。 作者简介:张春宜,男,博士,教授,研究领域为可靠性工程及优化。E-mail:zhangchunyi@hrbust.edu.cn

^{*} 收稿日期: 2016-03-01;修订日期: 2016-03-18。

ison of methods (Monte Carlo method, response surface method, Dual Response Surface Method and IDRSM), it is demonstrated that the proposed IDRSM improves computational efficiency with acceptable computational accuracy. The case study shows the feasibility and effectiveness of this proposed method in multi-failure modes reliability sensitivity analysis, and offers a useful insight into the reliability optimization design of multi-failure mode structure.

Key words: Reliability analysis; Turbine blisk; Intelligent algorithm; Artificial neural network; Intelligent dual response surface method

1 引 言

航空发动机是飞机的心脏,其性能状态直接决 定飞机飞行的安全性和可靠性^[1,2]。整体叶盘是航空 发动机的核心部件之一,也是影响发动机可靠稳 健运行的重要部件^[3]。然而,整体叶盘在工作过程中 总是承受高温、高压、高转速等多种复杂载荷,常 导致径向变形失效、应力失效等多种失效模式^[4,5]。 因此,对其进行合理有效的可靠性分析具有重要 意义^[6,7]。

传统结构可靠性分析已经得到大量研究[8~11]。 Lin等进行了耦合振荡器的可靠性研究,提高了耦合 振荡器的性能和产品质量^[8];Dimitrov等基于有限元 分析技术提出了复合材料结构可靠性分析的模型因 子校正方法,并将其应用于涡轮叶片的可靠性分析 设计中^[9],Hu等在考虑流场条件下,采用逼近结构极 限状态函数的随机混沌多项式法对涡轮叶片进行了 可靠性分析[10];邓建等提出了可靠性分析的多项式 数值逼近方法,通过对理论功能函数分布曲线的数 值分析和结构失效概率的计算,验证了该方法理论 上的可行性及工程上的实用性^[11]。响应面方法(Response Surface Method, RSM)以其高效率高精度的优 势在结构可靠性分析领域得到了广泛的应用[12~17]。 王桂华等利用极值响应面方法对涡轮盘结构进行了 可靠性灵敏度分析,得出了径向变形失效模式下各 输入参量的灵敏度和影响概率,并验证了该方法在 灵敏度分析中的适用性[15];Bai等基于多对象、多学 科响应之间的协同关系,建立了分布协同响应面数 学模型,并将其应用于航空发动机动态装配体可靠 性设计中^[16];Zhai等采用多重响应面法对高压涡轮叶 尖运行间隙进行了可靠性灵敏度分析,并验证了该 方法的可行性和有效性[17]。以上这些方法都是基于 二次多项式函数建立的响应面模型,其可靠性灵敏 度分析结果容易受到多项式函数形式及拟合精度的 影响,限制了RSM对极限状态函数的近似精度。对 于计算量大大增加的复杂结构可靠性灵敏度分析,

基于二次多项式的RSM的计算效率和精度较低,一般满足不了工程设计要求^[18]。

为了解决这一问题,很多学者选用支持向量 机^[19,20]、神经网络^[21,22]等方法拟合响应面,并取得了 良好的研究成果。例如:Fei等将支持向量机响应面 法引入可靠性分析中,在保持计算精度的前提下,减 小了计算工作量^[19,20];吕震宙等将具有高精度非线性 映射能力的神经网络算法与线性加权响应面法相结 合,建立了神经网络响应面模型,并用于复杂结构极 限状态曲面的回归分析,提高了计算精度^[21];Ren等 将具备强泛化能力的正则化训练理论,神经网络算 法与响应面理论相结合,完成了航空发动机压气机 轮盘的可靠性分析,有效地提高了可靠性分析的计 算效率^[22]。以上这些研究采用的响应面方法虽然在 精度和效率方面有所提高,但只考虑了单一的失效 模式下结构的可靠性灵敏度分析,还没有考虑多种 失效模式情况下的整体结构可靠性灵敏度分析。

本文将智能算法的高度非线性映射能力与响应 面法的简化计算能力相结合,提出了一种多失效模 式下结构可靠性灵敏度分析的智能双重响应面法 (Intelligent Dual-Response Surface Method, IDRSM)。 将遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、神经网络算法 (Artificial Neural Network, ANN)与响应面理论相结 合,建立 IDRSM 数学模型,以航空燃气涡轮发动机 的整体叶盘为研究对象,叶盘工作环境相关参数为 输入随机变量,径向变形量及应力值为输出响应, 建立 IDRSM 模型。利用联动抽样技术对该模型进 行联动抽样,完成多失效模式涡轮叶盘可靠性灵敏 度分析。通过与蒙特卡洛法(Monte Carlo Method, MCM), RSM,双重响应面法(Dual Response Surface Method, DRSM)的比较验证了该方法的可行性和有 效性。

2 智能双重响应面法(IDRSM)

2.1 IDRSM的基本思想

为了解决传统响应面方法在多失效模式结构可

靠性灵敏度分析上存在的不足、本文综合运用 ANN 模型、GA,贝叶斯正则化算法(Bayesian Regularization Algorithm, BRA),研究叶盘两种失效模式(径向 变形和应力)可靠性灵敏度分析。在该研究中,用 BP-ANN模型作为两种失效模式极限状态函数的响 应面模型,用GA搜索 BP-ANN的最优初始权值和阀 值,利用 BRA 对 BP-ANN进行训练。将这种方法称 为叶盘两种失效模式可靠性灵敏度分析的 IDRSM。 其基本步骤是:

(1)划分涡轮叶盘的网格,建立叶盘结构有限元 模型(Finite Element Model, FEM)。

(2)选取待建 BP-ANN 模型, 以整体叶盘的相关 运行参数为输入随机变量, 以径向变形和应力为输 出响应;利用有限元模型计算输出响应, 抽取一定数 量的样本作为训练数据, 分别输入径向变形、应力两 种失效模式的 BP-ANN 模型, 确定神经网络的各层 神经元数。

(3)利用遗传算法对两重神经网络模型分别搜寻网络初始权值及阀值。经过遗传算子的自适应搜索,得到网络最优初始权值及阀值,并将寻优结果赋予网络模型。

(4)利用贝叶斯正则化算法对网络进行训练,确 定 BP 网络的权值及阀值。

(5)训练后的双重神经网络即为智能双重响应 面模型。利用MC法对该智能双重响应面联动抽样 后得出输出响应值,然后,基于可靠性分析及灵敏度 分析方法,完成具体可靠性灵敏度分析。基于 IDRSM的叶盘可靠性灵敏度分析的流程图如图1 所示。

2.2 IDRSM的数学模型

神经网络具有高度并行性和强非线性映射能力,能够精确拟合输入自变量与输出响应量之间复杂的函数关系,给提高可靠性分析的效率和精度带来了方便。BP神经网络拓扑模型如图2所示。

针对结构每种失效模式分别建立输入随机变量 x_i与输出响应γ之间的神经网络响应面模型,即

$$\begin{cases} y^{(i)} = f_2^{(i)} \left(\sum_{j=1}^n W_{jk}^{(i)} f_1^{(i)} \left(\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(i)} x_i^{(i)} + b_j^{(i)} \right) + b_k^{(i)} \right) \\ y^{(2)} = f_2^{(2)} \left(\sum_{j=1}^n W_{jk}^{(2)} f_1^{(2)} \left(\sum_{i=1}^m W_{ij}^{(2)} x_i^{(2)} + b_j^{(2)} \right) + b_k^{(2)} \right) \end{cases}$$
(1)

式中 W_{μ} 为输入层神经元j到隐含层神经元k之间的连接权值; b_i 为隐含层第j个阀值; W_{μ} 为隐含层



Fig. 1 Reliability analysis procedure of turbine blisk with IDRSM

神经元*i*到输出层神经元*k*间的连接权值;*b_k*为输出 层阀值;*f*₁(·)为隐含层传递函数;*f*₂(·)为输出层传 递函数;*m*为输入层神经元个数;*n*为隐含层神经元 个数。



Fig. 2 BP artificial neural network topology model

2.3 智能算子设计

在计算效率方面,利用 BP-ANN 构建的 IDRSM 模型大幅提高了可靠度灵敏度的计算效率。然而, 在计算精度方面,由于 BP-ANN 存在逼近精度低及 泛化能力差等问题,导致 IDRSM 模型难以达到复杂 结构可靠性灵敏度分析的精度要求。为了提高 IDRSM 模型的计算精度,本文从利用遗传算子搜寻 初始最优权值和阀值及网络训练算子两个方面加以 改进。

2.3.1 遗传算子设计

遗传算法能够自动获取搜索空间,自适应地调整搜索方向,不需要目标函数可导、连续等限定,并 具有适于并行处理、鲁棒性强等优点^[23]。遗传算法 中初始种群个体由网络权值的实数串组成,每个个 体都包含所有遗传信息。将网络训练误差作为个体 适应值,个体适应值越小,该个体就越优。遗传算子 包括选择、交叉、变异三个算子,各算子的设计如下。

(1)利用基于自适应比例的轮盘赌法完成选择 操作,每个个体被选择的概率如下

$$P_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{f_i}{f_i}\right)}$$
(2)

式中 P_i 是第i个个体被选择的概率, f_i 是第i个个体的适应度值, f_j 是第j个个体的适应度值N为种群个体数。

(2) 交叉操作采用实数交叉法,第*i*个染色体 *a_i* 和第*l*个染色体 *a_i* 在*j*位的交叉操作,即

$$\begin{cases} a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)}(1-r) + a_{ij}^{(k)}r \\ a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)}(1-r) + a_{ij}^{(k)}r \end{cases}$$
(3)

式中k表示第k次迭代, a_{ij} 表示第i个染色体、第 j位的基因, a_{ij} 表示第l个染色体、第j位的基因,r是 [0,1]间的随机数。 (3)选取第i个个体的第j个基因进行变异,即

$$a_{ij}^{(k+1)} = \begin{cases} a_{ij}^{(k)} + (a_{ij}^{(k)} - a_{\max}) \times t(1 - k/K) & (r > 0.5) \\ a_{ij}^{(k)} + (a_{\min} - a_{ij}^{(k)}) \times t(1 - k/K), & (r \le 0.5) \end{cases}$$
(4)

式中 a_{ij} 表示第i个染色体、第j位的基因, a_{ij} 表 示第l个染色体、第j位的基因, a_{max} 表示基因 a_{ij} 的上 界, a_{min} 表示基因 a_{ij} 的下界,k表示第k次迭代,K表 示总迭代次数,r是[0,1]间的随机数。

2.3.2 贝叶斯正则化算子

利用遗传算子对神经网络的初始权值,阀值寻 优后,需要对网络进行训练来提高网络的泛化能 力。针对一般训练算法易陷入局部最优,收敛不成 熟等缺点,采用强泛化能力的BRA作为网络训练算 法。该算法通过改善网络训练性能函数,使网络权 值随训练误差减小而不断减小,最后得到的网络权 值会变得很小。这相当于缩减网络规模,一定程度 上克服拟合问题,达到提高网络泛化能力的目的。 贝叶斯正则化算子的性能函数为

$$\boldsymbol{E} = k_1 \boldsymbol{E}_D + k_2 \boldsymbol{E}_W \tag{5}$$

$$\begin{cases} E_{D} = \frac{1}{2} ||\varepsilon(W^{K} + Z(W^{K+1} - W^{K}))||^{2} + \lambda ||W^{K+1} - W^{K}||^{2} \\ E_{W} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} w_{i}^{2} \end{cases}$$
(6)

式中 k_1 , k_2 为比例系数, w_j 为网络权值, ε 为期 望输出误差函数,W为网络各层的权值阀值向量,K为迭代次数,Z为 ε 的雅克比矩阵, λ 为迭代变量。

3 可靠性分析及灵敏度分析

3.1 可靠性分析

假定整体叶盘的许用最大变形为[u],许用最大 应力为[σ],径向变形和应力的极限状态函数分别为 $g_1(X)$ 和 $g_2(X)$,则

$$\begin{cases} g_1(X) = u - [u] \\ g_2(X) = \sigma - [\sigma] \end{cases}$$
(7)

式中**u**为计算得出的径向变形值,**o**为计算得出的应力值。

利用极限状态函数可表示结构的两种失效状态 模式: $g_1(X) \leq 0$ 是径向变形失效状态, $g_2(X) \leq 0$ 是应 力失效状态。综合考虑径向变形失效和应力失效两 种失效模式的条件下,整体叶盘结构的综合极限状 态函数为 $g_0(X)$,则仅当 $g_1(X) \geq 0$ 且 $g_2(X) \geq 0$ 时, $g_0(X) \geq 0$ 。

设输入变量的均值和方差矩阵为: $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n], \sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n], 则$

$$\begin{cases} E[g_i(X)] = \boldsymbol{\mu}_{g_i}(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \cdots, \boldsymbol{\mu}_n, \boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \cdots, \boldsymbol{\sigma}_n) \\ D[g_i(X)] = D_{g_i}(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \cdots, \boldsymbol{\mu}_n, \boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \cdots, \boldsymbol{\sigma}_n) \end{cases}$$
(8)

输出响应可靠依据即可靠度为

$$\boldsymbol{R}_{i} = \boldsymbol{\Phi}(\frac{\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{g}_{i}}}{\sqrt{\boldsymbol{D}_{\boldsymbol{g}_{i}}}}) \tag{9}$$

式中,*i*=0,1,2,*i*=0表示总可靠度,*i*=1表示径向 变形失效模式下的可靠度,*i*=2表示应力失效模式下 的可靠度。

3.2 灵敏度分析

灵敏度反映出随机变量的变化对失效概率的 影响程度。利用蒙特卡罗数字模拟法计算得到失效 概率

$$\boldsymbol{P}_{i} = 1 - \boldsymbol{\Phi} \left(\frac{\boldsymbol{\mu}_{g_{i}}}{\sqrt{\boldsymbol{D}_{g_{i}}}} \right)$$
(10)

式中 P_i 表示第 i个失效模式下的失效概率,i=1为径向变形失效模式,i=2为应力失效模式,i=0为综 合考虑两种失效模式, μ_s 为极限状态函数的均值矩 阵, D_s 为极限状态函数的方差矩阵, $\Phi(\cdot)$ 为标准正 态分布函数。

随机变量均值矩阵对失效概率的灵敏度为

$$\left(\frac{\partial \boldsymbol{P}_{i}}{\partial \boldsymbol{\mu}}\right)_{m} = \boldsymbol{E}\left(\frac{\lambda_{i}(\boldsymbol{\mu}_{mn} - \boldsymbol{\bar{\mu}}_{m})}{\boldsymbol{\bar{\sigma}}_{m}^{2}}\right)$$
(11)

当考虑单一失效模式即*i*≠0时

$$\lambda_{i} = \begin{cases} 1 & y_{in} \ge [y_{i}] \\ 0 & y_{in} < [y_{i}] \end{cases}$$
(12)

当综合考虑两种失效模式即 i=0 时

$$\lambda_{i} = \begin{cases} 1 & y_{in} \ge [y_{in}] \\ 0 & y_{in} < [y_{in}] \end{cases}$$
(13)

在式(12)~式(14)中, $E(\cdot)$ 表示取均值, μ_{mn} 表示第m个输入变量对应的第n个数据, $\bar{\mu}_m$ 表示第m个输入变量的均值, $\bar{\sigma}_m^2$ 表示第m个输入变量的方差; y_i 为第i种失效模式下第n个输出响应, $[y_i]$ 第i种失效模式下的许用值, $[y_i]$ 第i种失效模式下的许用值。

4 算 例

航空燃气涡轮发动机工作环境非常复杂,其整体叶盘结构不仅受到主燃烧室高温气流的影响,而且还受到自身转速的影响。因此,将流体流动和结构响应系统中的基本变量同时耦合求解非常困难和 复杂。为了在反应真实的工作状况下简化计算,本 例采用流场-结构分析的方法对叶盘进行确定性分析,即将流固耦合分析模块分解为流场分析和结构 分析两个子模块,并在子模块间建立载荷传递,依次 进行确定性分析。

4.1 整体叶盘的流场-结构分析

4.1.1 已知条件

以某航空发动机的整体叶盘结构为例,如图3所示。在考虑流体对整体叶盘的作用下,将温度作为稳态温度,对其进行确定性分析。叶盘选用某镍基高温合金材料,设定进口流速为160m/s,进口压力为6×10⁵Pa,温度为1150K,叶盘的转速为1168rad/s。



Fig. 3 Structure model of blisk

4.1.2 叶盘的流场分析

选用流场模型直径为 1.2m,高为 2m 的圆柱区 域。将叶盘的圆柱区域流场进行网格划分,如图 4 所 示。整个叶盘流场的单元数为 582039,节点数为 817007。结合有限元体积法及标准 k- ε 湍流模型^[24] 对整体叶盘进行流场模拟分析,得到叶盘流固交界 面静压分布,如图 5 所示。



Fig. 4 Flow field grid of blisk



Fig. 5 Static pressure distribution of blisk surface

4.1.3 叶盘的结构分析

利用有限元分析软件的接口,将得到的流固交 界面的压力数据传递到固体界面即叶盘结构的表 面,进行结构分析^[25]。叶盘网格模型如图6所示,整 个叶盘的单元数为34308,节点数为67973。在叶盘 结构分析中,首先将流体压力载荷导入叶盘流固交 界面,以加入流体压力载荷。然后,在流体压力和离 心力作用下,对叶盘进行径向变形和应力分析,得到 径向变形和应力分布云图,如图7所示。由图7可 知:叶盘的径向变形最大位置在叶尖部位,应力最大 位置在轮盘根部。



Fig. 6 Grid model of blisk



Fig. 7 Distribution of blisk deformation and stress

4.2 叶盘的可靠性灵敏度分析

在加工和实际使用中,航空发动机叶盘材料参数和工作条件都存在不确定性,将整体叶盘进口流速v,材料密度ρ和转速ω作为输入随机变量,并假设各随机变量服从正态分布且相互独立。随机变量的选取见表1^[19]。

Table 1 Distributions of random variables

Random variables	<i>v</i> /(m/s)	$ ho/(kg/m^3)$	$\omega/(\text{rad/s})$
Mean	160	8560	1168
Variance	3.2	171.2	23.36
Distribution	Gauss normal	Gauss normal	Gauss normal

将整体叶盘的最大径向变形、最大应力位置作为计算点。利用中心复合抽样技术对输入随机变量进行抽样,对每个抽样点进行流固耦合分析,得到最大径向变形,最大应力的输出响应值,对得出的样本进行归一化处理,处理后的数据作为神经网络训练样本。神经网络结构选用'3-3-1',输入层至隐含层、隐含层至输出层传递函数分别选用'tansig', 'purelin',训练函数选用'trainbr',建立 BP-ANN模型;取粒子维数v=16,种群粒子数N=40,经过50次迭代后,种群最优个体适应值变化曲线如图8所示,神经网络训练状态曲线如图9所示。



Fig. 8 Optimal fitness value curve of blisk

将粒子群优化算法搜寻到的网络初始权值和阀 值赋予网络,经贝叶斯正则化算法训练后,得 BP-ANN响应面模型(智能双重响应面模型)。最大径向 变形和应力的先进响应面权值、阀值分别如式(12), (13)所示。



Fig. 9 Training state curve of neural network

$$\begin{cases} \boldsymbol{w}_{1} = \begin{bmatrix} 0.0006 & -0.4983 & -0.2815 \\ 0.8618 & 0.4096 & -0.0560 \\ -0.3172 & -0.1749 & -0.5759 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{b}_{1} = \begin{bmatrix} 0.1704 \\ 0.2442 \\ -0.0378 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{w}_{2} = \begin{bmatrix} -1.1257 & -0.6454 & -1.1294 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{b}_{2} = \begin{bmatrix} 0.0633 \end{bmatrix} \\ \end{bmatrix} \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{w}_{1} = \begin{bmatrix} -0.0656 & -0.4389 & -0.1009 \\ 0.0620 & 0.0313 & -0.5004 \\ 0.0801 & -0.1930 & -0.5495 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{b}_{1} = \begin{bmatrix} 0.0089 \\ -0.2018 \\ 0.5356 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{w}_{2} = \begin{bmatrix} -0.7743 & -0.8551 & -0.9569 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{b}_{2} = \begin{bmatrix} 0.1279 \end{bmatrix} \end{cases}$$
(15)

利用 MCM 对 IDRSM 模型进行 10000 次联动抽 样,对结果数据作反归一化处理后,得出输出响应 值。整体叶盘的最大径向变形、最大应力仿真抽样、 分布情况及累计分布函数如图 10,图 11 所示。在许 用径向变形、许用应力的均值和标准差分别取 3.8mm 和 76μm,690×MPa 和 14×MPa条件下^[26]可靠性分析 结果如表 2 所示。

由式(11)~式(14),对整体叶盘进行可靠性灵 敏度分析,分析结果如图12和表3所示。



Table 2Results of turbine blisk reliability analysis							
Item	Mean	Standard deviation	Distribution	Failure number	Reliability/%	Time/s	
Maximum Deformation/mm	3.1004	0.24224	Normal	67	99.33	0.147	
Maximum stress/MPa	650.16	34.138	Normal	54	99.46	0.172	
Total failure	-	_	-	74	99.26	0.562	



Fig. 12 Sensitivity analysis result of blisk

Table 3 Sensitivity and impact probability of input random variables

	L_1	$P_{_{1}}/\%$	L_2	$P_{2}/\%$	L	P/%	
v	-7.7×10 ⁻⁴	28	-3.6×10 ⁻⁴	18	-8.9×10 ⁻⁴	37	
ρ	2.7×10 ⁻⁴	10	1.9×10 ⁻⁴	10	1.9×10 ⁻⁴	8	
ω	-1.7×10 ⁻³	62	1.4×10 ⁻³	72	1.3×10 ⁻³	55	

Note: L_1 , L_2 and L are the sensitivities of input variables for radial deformation, stress and overall blisk, respectively; P_1 , P_2 and P denote the influencing probabilities of input variables for radial deformation, stress and overall blisk, respectively.

4.3 有效性验证

为了验证 IDRSM 方法的有效性和可行性,选用 表1中的输入变量,在相同计算条件下,用MCM, RSM, DRSM, IDRSM 方法分别对整体叶盘进行可靠 性分析,在不同模拟次数下,各方法的计算时间和可 靠度分别如表4和表5所示。

4.4 讨论

由图 10,图 11 和表 2 可知:叶盘最大径向变形和 应力都服从正态分布,且它们均值和标准差分别为 3.1004mm 和 0.24224mm, 650.16MPa 和 34.138MPa;

在许用径向变形、许用应力的均值和标准差分别取 3.8mm 和 76µm, 690MPa 和 14MPa 条件下, 叶片径向 变形和应力的可靠度分别为0.9933和0.9946,叶盘的 综合可靠度为0.9926。该可靠度值基本符合工程 实际和满足叶盘设计要求。

Table 4	Computational time of blisk reliability analysis
	with four methods/s

Samples	МСМ	RSM	DRSM	IDRSM
10 ²	3496	1.65	0.96	0.31
10 ³	29212	5.98	0.75	0.43
10^{4}	667985	15.93	2.44	0.79
105	-	80.27	10.33	1.89

由图12和表3可知:流速和转速是影响叶盘结 构径向变形的主要因素,其影响概率分别为28%、 62%;流速、转速对叶盘应力的影响达到90%以上,而 且转速的影响最大,达到了72%。综合灵敏度分析 结果表明:叶盘失效的总体影响因素为流速和转速, 其影响概率分别为37%和55%。在各变量对叶盘的 灵敏度有"+、-"之分,"+"表示该变量与输出响应为 正相关,而"-"则说明变量可能有抑制输出响应增大

Fable 5Relial	bility degree	of blisk a	analysis	results	with fou	r methods
---------------	---------------	------------	----------	---------	----------	-----------

Samples ——		Methods				Precision/%		
	МСМ	RSM	DRSM	IDRSM	RSM	DRSM	IDRSM	
10 ²	0.99	0.96	0.98	0.99	97.98	98.99	100	
10 ³	0.992	0.978	0.982	0.993	98.59	99.01	99.9	
10^{4}	0.9927	0.9842	0.9903	0.9926	99.14	99.76	99.99	
10 ⁵	-	0.98935	0.99102	0.99267	_	-	-	
10^{4} 10^{5}	0.9927	0.9842 0.98935	0.9903 0.99102	0.9926 0.99267	99.14	99.76 -	99.99	

的作用。综合考虑叶盘的失效情况,流速对叶盘的 失效有一定的抑制作用,而密度及转速的增大会使 叶盘的失效概率增大。

从表4和表5中可以发现,RSM,DRSM,IDRSM 这三种方法的计算时间大大优于MCM。随着仿真次数增加,IDRSM的计算效率逐渐高于RSM和 DRSM。在计算精度方面,IDRSM比DRSM和RSM都 要高,与MCM几乎保持一致。可见,IDRSM是一种 高精度、高效率的可靠性分析方法。

5 结 论

通过研究得出以下结论:

(1)IDRSM具有高计算精度高计算效率,并随着 仿真次数的增加,IDRSM的高计算效率的优势越 显著。

(2)当许用径向变形、许用应力的均值和标准差 分别取 3.8mm 和 76μm,690MPa 和 14MPa时,叶片变 形和应力的可靠度分别为 0.9933 和 0.9946,叶盘的综 合可靠度为 0.9926,基本符合工程实际和满足叶盘设 计要求。

(3)流速和转速是影响叶盘结构径向变形和应 力的主要因素,也是叶盘失效最重要的影响因素。 流速和压力对叶盘的失效有一定的抑制作用,而密 度和转速的增大会使叶盘的失效概率增大。

本文没有考虑镍基合金材料的疲劳蠕变及结构 振动对叶盘可靠度及灵敏度的影响,后续的研究会 将这些影响因素加以考虑。

本文主要从理论角度对叶盘结构的可靠性及灵 敏度分析的方法进行了探讨,在实际应用中的不足 之处需要进一步的发现和解决。

参考文献:

- [1] 孙 闯,何正嘉,张周锁,等.基于状态信息的航空 发动机运行可靠性评估[J].机械工程学报,2013,49 (6):30-37.
- [2] 徐家文,赵建社,朱永伟,等. 航空发动机整体构件 特种加工新技术[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 陈予恕,张华彪. 航空发动机整机动力学研究与进展 [J]. 航空学报, 2011, 32(8):1371-1379.
- [4] 陆山,赵迎春,范婕.考虑应力松弛的涡扇发动机高压涡轮持久寿命可靠性[J].推进技术,2011,32
 (4):491-496. (LU Shan, ZHAO Ying-chun, FAN Jie. Rupture Life Reliability of HP-Turbine for a Turbo-Fan Engine with the Influence of the Stress Relaxation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4):

491-496.)

- [5] 陆山,高鹏.考虑应力松弛的涡轮盘蠕变-疲劳寿命可靠性分析方法[J].推进技术,2009,30(3): 352-384. (LU Shan, GAO Peng. Reliability Analysis Method for Creep-Fatigue Life of Turbine Discs with Effect of Stress Relaxation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(3): 352-384.)
- [6] 胡殿印,裴 月,王荣桥,等.涡轮盘低循环疲劳的概率设计[J].推进技术,2008,29(4):481-487.
 (HU Dian-yin, PEI Yue, WANG Rong-qiao, et al. Probabilistic Design of Low Cycle Fatigue for Turbine Disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29 (4):481-487.)
- [7] 王大伟,王 伟,冯振宇.基于灰色理论的航空发动机可靠性指标评估方法[J].推进技术,2014,35(7): 874-881. (WANG Da-wei, WANG Wei, FENG Zhenyu. Evaluation Method on Reliability Index of Aero-Engine Based on Gray Theory [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(7): 874-881.)
- [8] Lin Kevin K, Brown Eric Sheabrown, Young LaiSang. Reliability of Coupled Oscillators I: Two-Oscillator Systems[J]. Nonlinear Science, 2009, 19(1): 497-545.
- [9] Dimitrov Nikolay, Hansen Peter Friis, Berggreen Christian. Reliability Analysis of a Composite Wind Turbine Blade Section Using the Model Correction Factor Method: Numerical Study and Validation [J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(1): 17-39.
- [10] Hu Zhen, Li Hai-feng, Du Xiao-qing, et al. Simulation-Based Time-Dependent Reliability Analysis for Composite Hydrokinetic Turbine Blades [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 47(5): 765-781.
- [11] 邓 建,李夕兵,古德生.结构可靠性分析的多项式数值逼近法[J].计算力学学报,2002,19(2):212-216.
- [12] Zhang Chun-yi, Bai Guang-chen. Extremum Response Surface Method of Reliability Analysis on Two- Link Flexible Robot Manipulator [J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(1): 101-107.
- [13] Fei Cheng-wei, Bai Guang-chen. Distributed Collaborative Extremum Response Surface Method for Mechanical Dynamic Assembly Reliability Analysis[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(9): 2414-2422.
- [14] Xiong Fen-fen, Liu Yiu, Xiong Ying, et al. A Double Weighted Stochastic Response Surface Method for Reliability Analysis [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(8): 2573-2580.
- [15] 王桂华,费成巍,白广忱.基于ERSM涡轮盘径向径

向变形的非线性动态可靠性灵敏度分析[J]. 推进技术, 2013, 34(4): 529-536. (Wang Gui-hua, Fei Cheng-wei, Bai Guang-chen. Nonlinear Dynamic Reliability Sensitivity Analysis of Turbine Disk Radical Deformation Based on ERSM [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 529-536.)

- [16] Bai Guang-chen, Fei Cheng-wei. Distributed Collaborative Response Surface Method for Mechanical Dynamic Assembly Reliability Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 38(4): 1160-1168.
- [17] Zhai Xue, Fei Cheng-wei, Zhai Qing-guang, et al. Reliability and Sensitivity Analyses of HPT Blade-Tip Radical Running Clearance Using Multiply Response Surface Model [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(11): 4368-4377.
- [18] 乔红威,吕震宙,赵新攀.基于随机响应面法的可靠 性灵敏度分析及可靠性优化设计[J].计算力学学 报,2010,27(2):207-212.
- [19] Fei Cheng-wei, Bai Guang-chen. Nonlinear Dynamic Reliability Sensitivity Analysis for Turbine Casing Radical Deformation Using Extremum Response Surface Method Based on Support Vector Machine [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2013, 8 (1): 1-8.
- [20] Fei Cheng-wei, Bai Guang-chen. Dynamic Probabilistic Design for Blade Deformation with SVM-ERSM[J].

Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2013, (125): 1-14.

- [21] 吕震宙,杨子政,赵 洁.基于加权线性响应面法的 神经网络可靠性分析方法[J].航空学报,2006,6 (27):1063-1067.
- [22] Ren Yuan, Bai Guang-chen. Network Response Surface Methods for Reliability Analysis [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(1): 25-31.
- [23] Dai Feng-zhi, Kushida Naoki, Shang Li-qiang, et al. A Survey of Genetic Algorithm-Based Face Recognition
 [J]. Artificial Life and Robotics, 2011, 16(2): 271-274.
- [24] Hua Cheng, Fang Chao. Simulation of Fluid-Solid Interaction on Water Ditching of an Airplane by ALE Method
 [J]. Science Direct Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(5): 637-642.
- [25] 张春宜,路 成,费成巍,等. 基于双重极值响应面法的叶盘联动可靠性分析[J]. 推进技术, 2016, 37
 (6). (ZHANG Chun-yi, LU Cheng, FEI Cheng-wei, et al. Linked Reliability Analysis of Aeroengine Blisk with Dual Extreme Response Surface Method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6).)
- [26] 刘大响,曹春晓. 航空发动机设计用材料手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2010.
- [27] 于慧臣,吴学仁. 航空发动机设计用材料数据手册 (第四册)[M]. 北京:航空工业出版社,2010.

(编辑:史亚红)