

文章编号:1674-8190(2020)04-540-09

基于分解协调移动极值响应面法的多构件 结构动态可靠性分析

马楠¹, 路成²

(1. 中国商飞上海飞机设计研究院 需求工程与型号发展部, 上海 201210)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 多个构件装配而成的复杂结构可靠性分析存在计算流程繁琐、计算效率低的问题。基于极值响应面法、移动最小二乘法和分解协调的策略, 提出分解协调移动极值响应面法(DCMERSM), 对考虑流-热-固耦合作用的航空发动机高压涡轮叶盘径向变形进行动态可靠性分析, 通过对比直接模拟和分解协调极值响应面法(DCERSM), 对 DCMERSM 在建模特性和仿真性能方面的有效性和适用性进行验证。结果表明: DCMERSM 不仅适用于转子机械动态可靠性分析, 同时还可以用于复杂机械多构件结构可靠性分析。

关键词: 动态可靠性; 多构件结构; 分解协调移动极值响应面法; 涡轮叶盘; 流-热-固耦合

中图分类号: V215.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic Reliability Analysis of Multi-component Structures Based on Moving Extremum Response Surface Method-based Decomposed Coordinative Strategy

MA Nan¹, LU Cheng²

(1. Requirement Engineering and Aircraft Development Department, COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The reliability analysis of complex structures assembled from multiple components has the problems of complicated calculation process and low calculation efficiency. The moving extremum response surface method-based decomposed coordinative strategy (DCMERSM) is proposed based on extremum response surface method, moving least squares and decomposition coordinative strategy. The dynamic reliability analysis of the radial deformation of the high-pressure turbine blade disk of the aeroengine considering the effect of fluid-thermal-structural coupling is performed. The direct simulation and decomposed coordinative extremum response surface method (DCERSM) are compared to verify the effectiveness and applicability of the proposed DCMERSM in modeling characteristics and simulation performance. The results show that the DCMERSM is not only suitable for the dynamic reliability analysis of rotor machinery, but also for the reliability analysis of multi-component structures of complex machinery.

Key words: dynamic reliability; multi-component structure; moving extremum response surface method-based decomposed coordinative strategy; turbine blisk; fluid-thermal-structural coupling

收稿日期:2020-05-09; 修回日期:2020-06-09

通信作者:马楠, manan8908@hotmail.com

引用格式:马楠, 路成. 基于分解协调移动极值响应面法的多构件结构动态可靠性分析[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 540-548.

MA Nan, LU Cheng. Dynamic reliability analysis of multi-component structures based on moving extremum response surface method-based decomposed coordinative strategy[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 540-548. (in Chinese)

0 引言

复杂结构通常由多个构件按照一定的规则装配而成,例如航空发动机高压涡轮叶盘是由多个叶片和轮盘组装形成。复杂结构工作过程中,一旦某一构件发生故障,将导致整个结构系统功能失常,甚至造成灾难性后果。因此,有必要开展考虑动态载荷影响下的多构件结构可靠性分析。

关于结构可靠性分析方面,国内外展开了大量研究,大体上可分为直接方法和间接方法两类,其中直接方法包括直接模拟法和近似模拟法,而间接方法主要以代理模型为主。对于结构可靠性分析,直接模拟法中最具有代表性的方法之一为蒙特卡罗(Monte Carlo,简称MC)模拟^[1],近似模拟法主要有二次二阶矩法^[2]、改进一次二阶矩法^[3]、二次二阶矩法^[4]、二次四阶矩法^[5]等。然而,MC模拟在进行结构可靠性分析过程中需要大量的仿真模拟,虽然分析结果具有较高的精度,但是计算负担比较繁重,甚至很难处理具有动态特性的复杂结构可靠性分析问题;近似模拟法是在结构功能函数已知的前提下通过多次多阶求导进行可靠性分析,其计算流程比较繁琐并且分析精度相对较低,对于复杂结构功能函数未知的情况,这类方法并不适用。间接方法即代理模型的出现,例如响应面法^[6]、Kriging模型^[7]、神经网络模型^[8]、支持向量机模型^[9]等,为处理结构概率分析问题提供了可行的思路。此外,Hong S等^[10-13]利用不同的方法对轴承的退化性能、性能监测和剩余寿命进行了分析,并验证了方法的有效性。对于涉及动态特性的复杂结构可靠性分析,代理模型需要建立大量的数学模型,其计算流程相对繁琐,导致其效率不能满足工程需求。

为了克服代理模型在复杂结构动态可靠性计算效率的问题,Zhang C Y等^[14]将传统响应面法与极值策略相结合,提出了极值响应面法,实现机械柔性臂的动态可靠性分析;路成^[15]将极值响应面法用于实现航空发动机转子结构的动态可靠性分析及灵敏度分析;Fei C W等^[16]将极值响应面法与支持向量机模型用于复杂结构动态可靠性分

析,通过案例验证了所研究方法的有效性;Lu C等^[17]基于Kriging模型和极值策略探究提出了极值Kriging模型,用来处理航空发动机低压压气机叶盘径向变形动态概率分析;Song L K等^[18]研究提出了改进神经网络模型用于实现柔性机械的动态可靠性灵敏度评估。上述方法虽然能够有效提高结构动态可靠性分析效率,但是仍然存在以下不足之处:复杂结构动态可靠性分析的精度不能满足工程需求,原因在于最小二乘法本身的限制,导致所建立的模型精度不高;对于涉及多个构件的复杂结构动态可靠性分析,需要针对每个构件建立输出响应与输入变量之间的关系,其分析流程过于复杂。

针对上述研究存在的问题,本文将极值响应面法、移动最小二乘法和分解协调策略有效融合,提出便于处理多构件结构动态可靠性分析的分解协调移动极值响应面法,通过航空发动机高压涡轮叶盘(由叶片和轮盘组成)径向变形动态可靠性分析验证该方法的有效性,通过方法对比,从建模特性和仿真性能两个方面对DCMERSM的适用性进行验证。

1 DCMERSM 原理

1.1 基于 DCMERSM 的多构件结构可靠性分析流程

DCMERSM是基于极值响应面法、移动最小二乘法和分解协调策略发展而来,其中:极值响应面法用来处理多构件结构分析时域变量的动态特性,结合极值选取策略及联动抽样策略获取动态分析时域内的输入样本及输出响应;分解协调策略是将多构件结构分解为单一构件结构,进而将各构件输出响应协调成多构件结构总的输出响应,用以协调多构件结构输出响应之间的关系;移动最小二乘法依据紧支撑域获取有效样本,并结合获取的样本建立多构件结构输出响应与输入变量的关系模型。基于DCMERSM的多构件结构动态可靠性分析流程如图1所示。

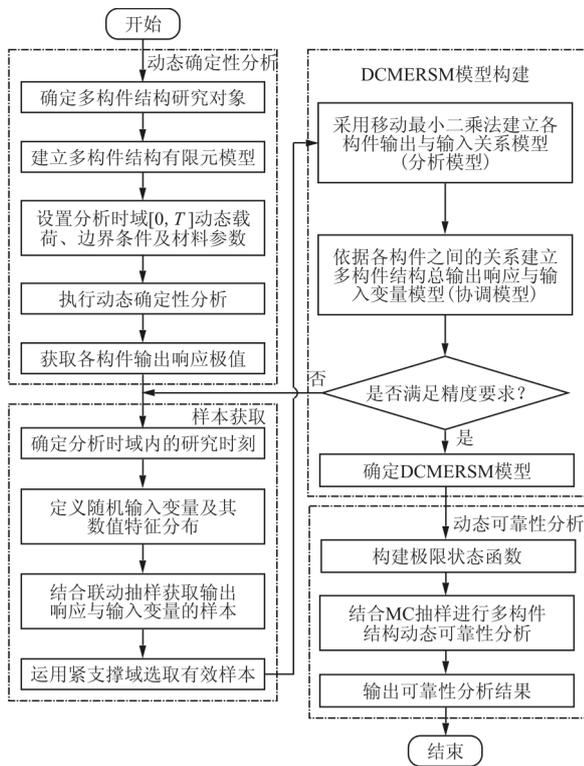


图 1 基于 DCMERSM 的多构件结构动态可靠性分析流程
Fig. 1 Flow chart of dynamic reliability analysis of multi-component structures with DCMERSM

从图 1 可以看出,基于 DCMERSM 的多构件结构动态可靠性分析主要包括动态确定性分析、样本获取、DCMERSM 模型构建和动态可靠性分析 4 个步骤。具体描述为:

(1) 动态确定性分析。针对多构件结构研究对象,建立有限元分析模型,在分析时域 $[0, T]$ 内设置相关的动态载荷、边界条件及材料参数,执行动态确定性分析,获取各构件输出响应的极值。

(2) 样本获取。依据所确定的输出响应极值,确定研究时刻 $t(t \in [0, T])$,定义随机输入变量及数值分布特征,结合联动抽样获取输出响应及输入变量的样本,进而引入紧支撑域获取有效建模样本。其中,联动抽样由拉丁超立方抽样演化而来,其基本原理是针对每组随机输入变量样本,可以同时获取各构件相应的输出响应^[19],结合二维空间说明紧支撑域获取有效样本的原理^[20],具体如图 2 所示,其中: h_{11} 为计算点与第一象限样本点最近距离; h_{12} 为计算点与第二象限样本点最近距离; h_{13} 为计算点与第三象限样本点最近距离; h_{14} 为计算点

与第四象限样本点最近距离; h_p 为计算点与各象限样本点最近距离的最大值; β 为影响系数,用于确保有效样本点数量能够满足建模需求,通常为 $[1.2, 2.5]$ 。

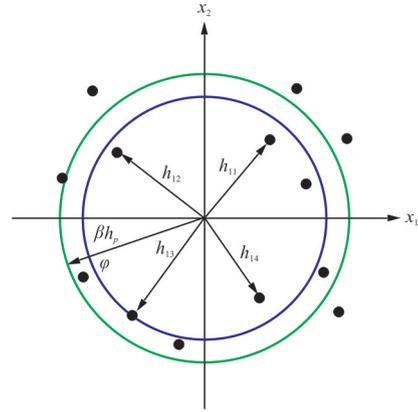


图 2 基于紧支撑域获取有效样本原理图
Fig. 2 Schematic diagram of obtaining effective samples based on local compact support region

(3) DCMERSM 模型构建。结合选取的有效样本,采用移动最小二乘法建立各构件输出响应与输入变量之间的关系模型,即分解模型;依据各构件输出响应之间的关系,建立多构件结构总的输出响应与输入变量关系模型,即协调模型;验证所建立的模型是否满足精度要求,如果不满足需要重新抽取样本,执行后续流程,如果满足则确定所建立的 DCMERSM 模型。

(4) 动态可靠性分析。基于所建立的 DCMERSM 模型,构建多构件结构极限状态函数,运用 MC 抽样实现动态可靠性分析,输出多构件结构可靠性分析结果。

1.2 DCMERSM 数学模型

通过多构件结构层、子结构层、单一构件层和变量层的复杂结构说明 DCMERSM 数学模型,结合分解协调策略将多构件结构依次分解至变量层,其原理如图 3 所示,其中, $f(\cdot)$ 为多构件结构总的输出响应与子构件层输出响应之间的关系, $f^{(z_1)}(\cdot)$ 为第 z_1 个子构件输出响应与对应单一构件层输出响应之间的关系, $f^{(z_1 z_2)}(\cdot)$ 为第 z_2 个单一构件输出响应与对应变层之间的关系。

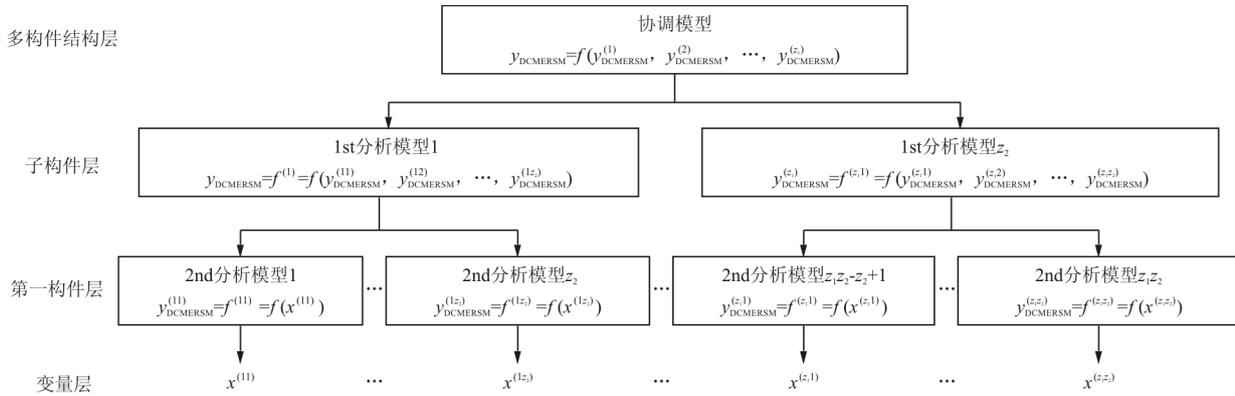


图 3 分解协调策略原理图

Fig. 3 Schematic diagram of decomposed coordinative strategy

四层多构件结构包含 z_1 ($z_1 \in Z$) 个子构件层, 且各子构件层有 z_2 ($z_2 \in Z$) 个单一构件层, 则多构件结构总输出响应为

$$y_{DCMERSM} = f(x) = f[f^{(1)}(x), f^{(2)}(x), \dots, f^{(z_1)}(x)] \quad (1)$$

式(1)可写为

$$y_{DCMERSM} = f(y_{DCMERSM}^{(1)}, y_{DCMERSM}^{(2)}, \dots, y_{DCMERSM}^{(j)}, \dots, y_{DCMERSM}^{(z_1)}) \quad (2)$$

式中: $y_{DCMERSM}^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, z_1$) 为第 j 个子构件 1st 分解模型, 即:

$$y_{DCMERSM}^{(j)} = f^{(j)}(x^{(j)}) = f(y_{DCMERSM}^{(j1)}, y_{DCMERSM}^{(j2)}, \dots, y_{DCMERSM}^{(jk)}, \dots, y_{DCMERSM}^{(z_1 z_2)}) \quad (3)$$

式中: $y_{DCMERSM}^{(jk)}$ ($k = 1, 2, \dots, z_2$) 为第 k 个单一构件 2nd 分解模型, 即

$$y_{DCMERSM}^{(jk)} = f^{(jk)}(x^{(jk)}) \quad (4)$$

式中: $x^{(jk)}$ 为第 j 个构件所包含的第 k 个单一构件相关的变量, 而 x 为 $x^{(jk)}$ 按照一定顺序的组合。

结合极值响应面法数学模型的形式, 构建多构件结构第 j 个子构件层的第 k 个单一构件的 2nd 分解模型, 其形式可表达为

$$y_{DCMERSM}^{(jk)}(x^{(jk)}) = a^{(jk)} + \sum_{i''=1}^{n''} b_{i''}^{(jk)} x_{i''}^{(jk)} + \sum_{i''=1}^{n''} c_{i''}^{(jk)} (x_{i''}^{(jk)})^2 \quad (5)$$

式中: $i'' = 1, 2, \dots, n''$, n'' 为 2nd 分解模型变量个数; $a^{(jk)}$ 、 $b_{i''}^{(jk)}$ 和 $c_{i''}^{(jk)}$ 分别为多构件结构第 j 个子构件层的第 k 个单一构件的 2nd 分解模型常数项、一次项系数和二次项系数。

同理, 多构件结构第 j 个子构件的 1st 分解模型和多构件结构层协调模型可表达为

$$y_{DCMERSM}^j(x^{(j)}) = a^j + \sum_{i'=1}^{n'} b_{i'}^j x_{i'}^{(j)} + \sum_{i'=1}^{n'} c_{i'}^j [x_{i'}^{(j)}]^2 \quad (6)$$

$$y_{DCMERSM}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (7)$$

式中: $i' = 1, 2, \dots, n'$, n' 为 1st 分解模型变量个数; $i = 1, 2, \dots, n$, n 为协调模型变量个数; $a^{(j)}$ 、 $b_{i'}^j$ 和 $c_{i'}^j$ 分别为多构件结构第 j 个子构件的 1st 分解模型常数项、一次项系数和二次项系数; a 、 b_i 和 c_i 分别为多构件结构协调模型常数项、一次项系数和二次项系数。

为了构建 DCMERSM 模型, 本文结合移动最小二乘法求解式(5)~式(7)相关待定系数, 即先运用联动抽样策略获取足够的样本, 再采用紧支撑域选择 m ($m \geq 2n + 1$) 个有效建模样本, 最后通过式(8)计算相关待定系数。其中, 式(8)仅以求解式(7)中的待定系数为例, 说明分析原理。

$$d = [X^T W(\hat{x}) X]^{-1} X^T W(\hat{x}) Y_{true} \quad (8)$$

式中: d 为待定系数向量; X 为随机输入变量矩阵; $W(\hat{x})$ 为计算点处的加权系数对角矩阵; Y_{true} 为输出响应向量。 d 和 $W(\hat{x})$ 可为

$$d = [a \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n] \quad (9)$$

$$W(\hat{x}) = \text{diag}[\omega(\hat{x} - x_1) \ \omega(\hat{x} - x_2) \ \dots \ \omega(\hat{x} - x_m)] \quad (10)$$

式中: $\omega(\cdot)$ 为计算点与样本点之间的加权系数, 通常选取三次样条函数作为加权函数的形式(如式(11)所示), 原因在于其拟合特性具有一定的优势。

$$w(\hat{x} - x_i) = \begin{cases} \frac{2}{3} - 4\left(\frac{|\hat{x} - x_j|}{\beta h}\right)^2 + 4\left(\frac{|\hat{x} - x_j|}{\beta h}\right)^3 & \left(0 < \frac{|\hat{x} - x_j|}{\beta h} \leq \frac{1}{2}\right) \\ \frac{4}{3}\left(1 - \frac{|\hat{x} - x_j|}{\beta h}\right)^3 & \left(\frac{1}{2} < \frac{|\hat{x} - x_j|}{\beta h} \leq 1\right) \end{cases} \quad (11)$$

基于上述关系,可以构件多构件结构分解模型和协调模型,即多构件结构功能函数(DCMERSM模型)。

1.3 基于 DCMERSM 的动态可靠性分析原理

结合 DCMERSM 数学模型,构建的多构件结构极限状态函数为

$$g_{\text{DCMERSM}}(x) = y_{\text{allow}} - y_{\text{DCMERSM}}(x) \quad (12)$$

式中: y_{allow} 为多构件结构输出响应的许用值。

当 $g_{\text{DCMERSM}}(x) \geq 0$ 时,多构件结构是可靠的;反之则失效。

通过对式(12)进行大量数值模拟,多构件结构失效概率和可靠性概率可以表述为

$$P_f = \int_{R^n} I_F(x) g_{\text{DCMERSM}}(x) dx = E[I_F(x)] = \frac{1}{N} \sum I_F(x) = \frac{N_f}{N} \quad (13)$$

$$P_r = 1 - P_f = \frac{N_r}{N} \quad (14)$$

式中: $I_F(x)$ 为示性函数; N 为样本数量; N_f 为失效样本数量; N_r 为可靠样本数量。

2 基于 DCMERSM 的涡轮叶盘径向变形分析

高压涡轮叶盘(由叶片和轮盘组成)作为航空发动机重要组件之一,其可靠性直接影响整个系统运行的安全性。高压涡轮叶盘在航空发动机运行过程中,往往受到复杂物理载荷的作用,例如流体载荷、热载荷、结构载荷等,且该结构是典型的循环对称结构。

2.1 涡轮叶盘径向变形动态确定性分析

为了减轻计算负担,选取 1/48 涡轮叶盘(包含 1 个叶片和 1/48 轮盘)作为分析对象,建立其有限元模型以及流场有限元模型,如图 4 所示,可以看出:高压涡轮叶盘有限元模型和流场有限元模型由四面体单元组成,其中,叶片有限元模型包括 75 097 节点和 48 551 单元,轮盘有限元模型包括

57 213 节点和 33 885 单元,流场有限元模型包括 472 930 节点和 338 917 单元。

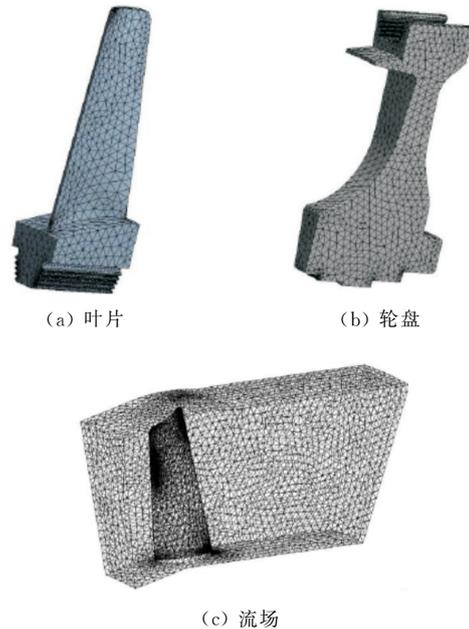


图 4 涡轮叶盘及流场有限元模型

Fig. 4 Finite models of turbine blisk and flow field

基于建立的有限元模型,考虑流-热-固耦合的影响,在分析时域[0 s, 215 s]设置相关的载荷及材料参数,即选取 GH4133 作为高压涡轮叶盘材料,进口压力为 2×10^6 Pa,出口压力为 5.88×10^5 Pa。此外,高压涡轮叶盘进口流速、燃气温度和转速随时间变化曲线如图 5 所示。

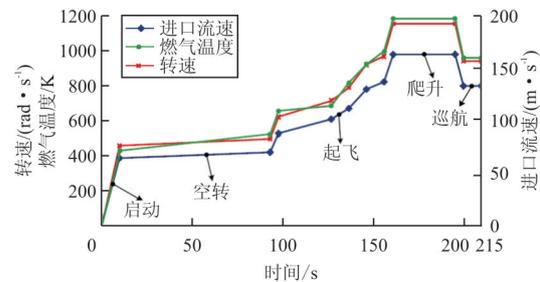


图 5 进口流速、燃气温度和转速随时间变化曲线

Fig. 5 Changing curves of inlet velocity, gas temperature and rotational speed with time

运用紧密耦合方法实现高压涡轮叶盘径向变形

动态确定性分析,得到叶片和轮盘径向变形随时间变化曲线如图 6 所示,可以看出:高压涡轮叶盘径向变形最大值出现在爬升阶段,即[165 s,200 s]。

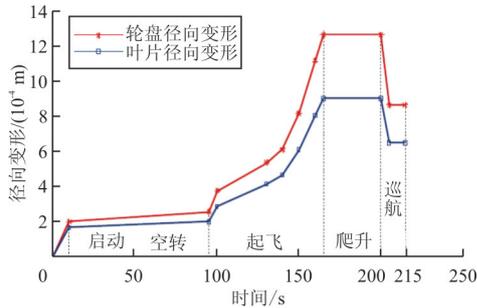


图 6 涡轮叶片和轮盘径向变形随时间变化曲线
Fig. 6 Changing curves of turbine blade and disk radial deformation

选取某一时刻 $t(t \in [165 \text{ s}, 200 \text{ s}])$ 作为研究时刻,此时涡轮叶片和轮盘径向变形分布云图如图 7 所示。

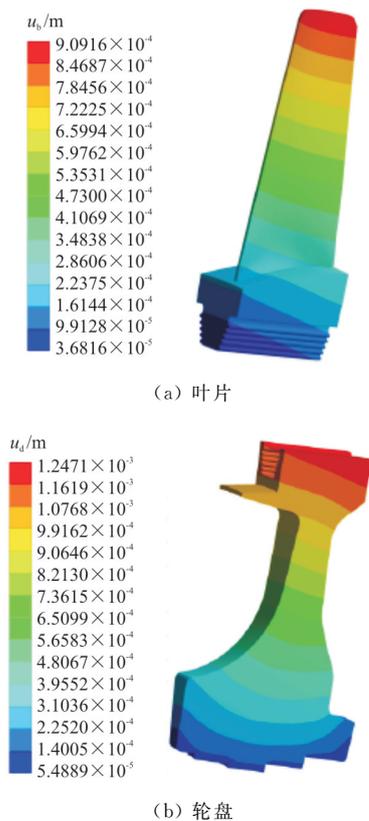


图 7 涡轮叶片和轮盘径向变形分布云图

Fig. 7 Distribution nephograms of turbine blade and disk radial deformation

从图 7 可以看出:径向变形最大值出现在轮盘顶端和叶尖部位。

2.2 涡轮叶盘径向变形 DCMERSM 模型分析

考虑高压涡轮叶盘在运行过程中材料参数和载荷条件具有随机性,选取进口流速 v 、出口压力 p_{out} 、燃气温度 t_{gas} 、转速 ω 和密度 ρ 作为随机输入变量,假设相关变量服从正态分布且相互独立,其数值特征如表 1 所示。

表 1 随机输入变量数值特征

Table 1 Numerical features of random input variables

输入变量	均值	标准差
$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	160	8
p_{out} / Pa	588 000	58 800
t_{gas} / K	1 200	72
$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	1 168	58.4
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 560	770.4

基于随机输入变量的数值特征,获取 100 组输入样本,结合动态确定性分析计算高压涡轮叶片和轮盘的径向变形,构成 100 组样本数据。其中,80 组样本作为训练样本,结合紧支撑域获取 40 组有效建模样本,剩余 20 组数据作为训练样本用以验证所构建模型的精度。

结合 1.2 节相关原理,构建高压涡轮叶盘的分解模型,即高压涡轮叶片和轮盘径向变形的数学模型,如式(15)~式(16)所示,式中: $y_{DCMERSM}^{(1)}$ 为高压涡轮轮盘径向变形的分解模型; $y_{DCMERSM}^{(2)}$ 为高压涡轮叶片径向变形的分解模型。

由于高压涡轮叶片和轮盘径向变形呈现加和关系,因此高压涡轮叶盘径向变形的协调模型如式(17)所示。

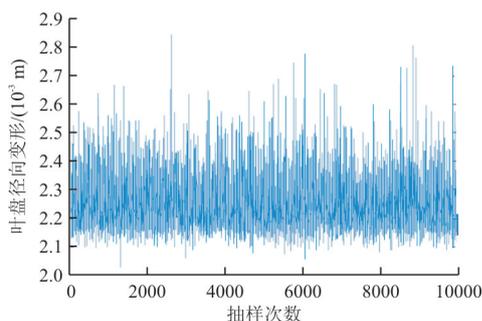
$$\begin{aligned}
 \mathcal{Y}_{\text{DCMERSM}}^{(1)}(v, P_{\text{out}}, t_{\text{gas}}, \omega, \rho) = & 0.1027 - 2.2893 \times 10^{-5}v - 1.2247 \times 10^{-7}p_{\text{out}} - 1.6318 \times 10^{-5}t_{\text{gas}} + \\
 & 9.9256 \times 10^{-6}\omega - 5.0399 \times 10^{-7}\rho + 7.1571 \times 10^{-8}v^2 + \\
 & 1.0321 \times 10^{-13}p_{\text{out}}^2 + 9.5684 \times 10^{-10}t_{\text{gas}}^2 - 3.9256 \times 10^{-9}\omega^2 + \\
 & 3.9020 \times 10^{-10}\rho^2
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{Y}_{\text{DCMERSM}}^{(2)}(v, P_{\text{out}}, t_{\text{gas}}, \omega, \rho) = & 5.6359 \times 10^{-2} - 1.4830 \times 10^{-5}v - 1.0319 \times 10^{-7}p_{\text{out}} - 6.2832 \times 10^{-6}t_{\text{gas}} + \\
 & 8.3739 \times 10^{-6}\omega - 4.0306 \times 10^{-6}\rho + 4.8597 \times 10^{-8}v^2 + \\
 & 8.7029 \times 10^{-14}p_{\text{out}}^2 + 3.6806 \times 10^{-10}t_{\text{gas}}^2 - 3.2735 \times 10^{-9}\omega^2 + \\
 & 1.7725 \times 10^{-9}\rho^2
 \end{aligned} \quad (16)$$

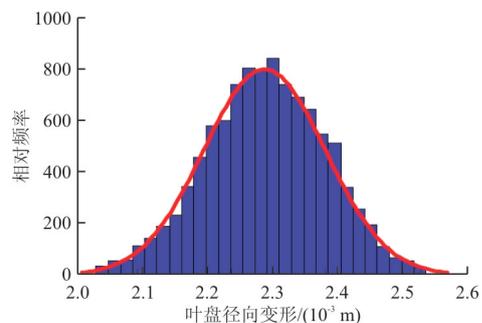
$$\mathcal{Y}_{\text{DCMERSM}}(v, p_{\text{out}}, t_{\text{gas}}, \omega, \rho) = \mathcal{Y}_{\text{DCMERSM}}^{(1)}(v, p_{\text{out}}, t_{\text{gas}}, \omega, \rho) + \mathcal{Y}_{\text{DCMERSM}}^{(2)}(v, p_{\text{out}}, t_{\text{gas}}, \omega, \rho) \quad (17)$$

2.3 涡轮叶盘径向变形动态可靠性分析

基于高压涡轮叶盘径向变形协调模型,构建其极限状态函数,如式(12)所示,结合 MC 抽样对极限状态函数进行 10 000 次抽样模拟,涡轮叶盘径向变形抽样历史和分布直方图如图 8 所示。



(a) 抽样历史



(b) 分布直方图

图 8 涡轮叶盘径向变形抽样历史和分布直方图

Fig. 8 Sampling history and distribution histogram of turbine blisk radial deformation

从图 8 可以看出:高压涡轮叶盘径向变形服从

均值为 2.244×10^{-3} m, 标准差为 1.267×10^{-4} m 的正态分布。因此,当高压涡轮叶盘径向变形许用值为 2.624×10^{-3} m 时,其可靠度为 0.997 7,满足工程需求。

3 DCMERSM 验证

3.1 建模特性

为了验证 DCMERSM 在建模特性方面的优势,结合训练样本,分别运用分解协调极值响应面法(Extremum Response Surface Method-based Decomposed Coordinative Strategy, 简称 DCERSM)和 DCMERSM 建立高压涡轮叶盘径向变形功能函数,其建模时间和预测精度如表 2 所示。

表 2 基于 DCERSM 和 DCMERSM 的建模时间和预测精度

Table 2 Modeling time and prediction accuracy of

DCERSM and DCMERSM

方法	建模时间/s	$E_{\text{av}}/10^{-5}$ m	提高精度/%
DCERSM	1.37	8.746 7	—
DCMERSM	0.52	4.894 9	44.04

从表 2 可以看出:相比于 DCERSM,提出的 DCMERSM 具有较高的建模效率,原因在于 DCMERSM 的建模时间少于 DCERSM 的建模时间,DCMERSM 的平均绝对误差小于 DCERSM 的平均绝对误差值,其预测精度相对于 DCERSM 提高了 44.04%。

基于测试样本,通过绝对误差 E_{ab} 和平均绝对误差 E_{av} 对其预测精度进行研究,其分析结果图 9 所示。

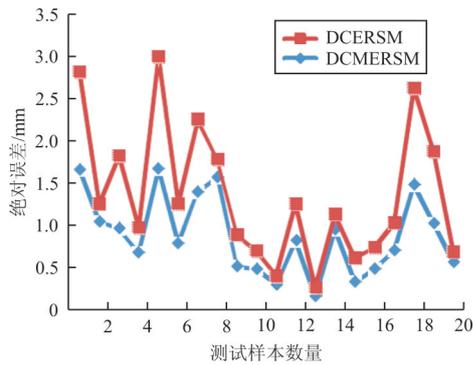


图 9 基于 DCERSM 和 DCMERSM 的绝对误差

Fig.9 Absolute errors of DCERSM and DCMERSM

从图 9 可以看出:DCMERSM 具有较好的鲁棒性,主要是因为 DCMERSM 的绝对误差曲线相较于 DCERSM 波动范围小。

综合建模效率和鲁棒性,本文所提出的 DCMERSM 在建模特性方面具有一定的优势。

3.2 仿真性能

为了进一步验证 DCMERSM 的有效性,通过三种方法(直接模拟、DCERSM 和 DCMERSM)进行对比,结合不同次数(10^2 、 10^3 和 10^4)MC 模拟实现高压涡轮叶盘径向变形动态可靠性分析,从仿真效率和分析精度两个方面进行说明。其中,以直接模拟分析结果作为仿真性能分析评估参考,且所有分析是在相同计算环境下进行的。基于直接模拟、DCERSM 和 DCMERSM 的仿真性能分析结果如表 3~表 4 所示。

表 3 基于直接模拟、DCERSM 和 DCMERSM 的仿真效率

Table 3 Simulation efficiency for direct simulation, DCERSM and DCMERSM

方法	仿真时间/s		
	10^2 次	10^3 次	10^4 次
直接模拟	522 400	5 365 000	—
DCERSM	0.33	0.48	0.67
DCMERSM	0.33	0.48	0.67

从表 3 可以看出:基于代理模型策略(DCERSM 和 DCMERSM)的动态可靠性分析效率远高于直接模拟方法,且随着模拟次数增加,其优势越为明显;此外,DCERSM 和 DCMERSM 的仿真时间相同,是因为本文所采用的建模形式相同,即采用完全二次多项式建立高压涡轮叶盘径向变形

的分解和协调模型。

表 4 基于直接模拟、DCERSM 和 DCMERSM 的分析精度

Table 4 Analytical precision for direct simulation, DCERSM and DCMERSM

模拟次数	可靠度		分析精度/%		
	直接模拟	DCERSM	DCMERSM	DCERSM	DCMERSM
10^2	0.990 0	0.970 0	0.990 0	97.98	100
10^3	0.997 0	0.994 0	0.998 0	99.70	99.90
10^4	—	0.995 1	0.997 7	—	—

从表 4 可以看出:DCMERSM 的可靠度与直接模拟分析所获取的基本相近,而 DCMERSM 的分析精度优于 DCERSM 的分析精度。因此,DCMERSM 对于多构件结构动态可靠性分析的仿真性能同样具有一定的优势。

4 结 论

(1) 与 DCERSM 相比,本文提出的 DCMERSM 建模效率提升了 62.04%,预测精度提升了 44.04%;仿真性能方面,DCMERSM 的仿真时间远远小于直接模拟,且 DCMERSM 的仿真精度相比 DCERSM 提高了 1.11%。

(2) 本文得到的可靠性指标可用于实现多构件结构灵敏度分析,即研究输入变量对于输出响应的影响,进而进一步指导其优化设计及运行控制;此外,所提出的 DCMERSM 可应用于航空发动机高压涡轮叶盘径向变形动态可靠性分析,同时也可适用于复杂装备机械多构件结构可靠性分析以及多失效模式的动态概率设计。

参考文献

[1] ALBAN A, DARJI H A, IMAMURA A, et al. Efficient Monte Carlo methods for estimating failure probabilities [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 376-394.

[2] LIU Y, MENG L L, LIU K, et al. Chatter reliability of milling system based on first-order second-moment method [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 81(1/4): 801-809.

[3] XU Z J, ZHENG J J, BIAN X Y, et al. A modified method to calculate reliability index using maximum entropy principle[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 1058-1063.

[4] 白冰, 张清华, 李乔. 结构二次二阶矩可靠度指标的回归分

- 析预测算法[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 219-226.
- BAI Bing, ZHANG Qinghua, LI Qiao. Regression analysis-prediction algorithm for structural second-order second-moment reliability index evaluation [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 219-226. (in Chinese)
- [5] LU Z H, HU D Z, ZHAO Y G. Second-order fourth-moment method for structural reliability[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(4): 1-8.
- [6] BAI Y C, HAN X, JIANG C, et al. A response-surface-based structural reliability analysis method by using non-probability convex model[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(15/16): 3834-3847.
- [7] 孙志礼, 李瑞, 闫玉涛, 等. 一种用于结构可靠性分析的 Kriging 学习函数[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(7): 146-151.
- KONG Zhili, LI Rui, YAN Yutao, et al. A Kriging based learning function for structural reliability analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(7): 146-151. (in Chinese)
- [8] CHOJACZYK A A, TEIXEIRA A P, NEVES L C, et al. Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures[J]. Structural Safety, 2015, 52: 78-89.
- [9] GUO Z W, BAI G C. Application of least squares support vector machine for regression to reliability analysis[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 160-166.
- [10] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital Signal Processing, 2014, 27: 159-166.
- [11] HONG S, WANG B Q, LI G Q, et al. Performance degradation assessment for bearing based on ensemble empirical mode decomposition and Gaussian mixture model[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2014, 136(6): 1-8.
- [12] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 117-123.
- [13] HONG S, ZHOU Z, LU C, et al. Bearing remaining life prediction using Gaussian process regression with composite kernel functions[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(2): 695-704.
- [14] ZHANG C Y, BAI G C. 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.
- [15] 路成. 基于耦合失效多重响应面的结构可靠性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- LU Cheng. Study of structural reliability analysis method based on coupling failure multiple response surface [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] FEI C W, TANG W Z, BAI G C. Nonlinear dynamic probabilistic design of turbine disk-radial deformation using extremum response surface method-based support vector machine of regression[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(2): 220-230.
- [17] LU C, FENG Y W, LIEM R P, et al. Improved Kriging with extremum response surface method for structural dynamic reliability and sensitivity analyses[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 164-175.
- [18] SONG L K, BAI G C, FEI C W, et al. Dynamic neural network method-based improved PSO and BR algorithms for transient probabilistic analysis of flexible mechanism [J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 33: 144-153.
- [19] LU C, FENG Y W, FEI C W, et al. Decomposed-coordinated framework with enhanced extremum Kriging for multi-component dynamic probabilistic failure analyses[J]. IEEE Access, 2019(7): 163287-163300.
- [20] LI X L. Error estimates for the moving least-square approximation and the element-free Galerkin method in n-dimensional spaces [J]. Applied Numerical Mathematics, 2016, 99: 77-97.

作者简介:

马楠(1989—),女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机总体设计,有限元计算和可靠性分析。

路成(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:可靠性分析,维修性工程。

(编辑:丛艳娟)