

文章编号:1000-8055(2017)01-0066-09

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.01.010

考虑几何分散性的涡轮盘寿命概率分析

樊 江, 廖祐明, 李 达, 王荣桥, 胡殿印

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对考虑几何分散性的涡轮盘低循环疲劳(LCF)寿命概率分析中几何参数多、几何随机变量难确定、分布特征获取困难、模型需自动更新及计算成本高的问题,提出几何分散性的概率处理方法:采用试验设计方法对涡轮盘结构所有几何参数进行灵敏度分析,筛选出对应力影响较大的关键几何参数作为随机变量,使用 K-S(Kolmogorov-Smirnov)方法确定其分布类型和特征参数,最后建立代理模型进行 Monte Carlo 概率分析。基于此方法,开发出了涡轮盘概率分析系统,在该系统中筛选得到某发动机 GH720Li 涡轮盘内径、外径、盘缘厚度 3 个结构参数作为几何随机变量,完成对 LCF 寿命的概率分析工作得到寿命-可靠度分布曲线。分析结果表明涡轮盘外径对 LCF 寿命有较大影响。

关 键 词: 几何分散性; 可靠性; 涡轮盘; 低循环疲劳; 概率分析系统

中图分类号: V231.95

文献标志码: A

Probabilistic analysis of turbine disk fatigue life considering geometric uncertainties

FAN Jiang, LIAO Hu-ming, LI Da, WANG Rong-qiao, HU Dian-yin

(School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For the issues of a large number of geometric variables, hard to select geometric random variables and determine their probability distributions, rebuilding the finite element model in an automated fashion, and huge numerical computation consumption when conducting the LCF (low cycle fatigue) life prediction considering geometric uncertainties of turbine disk. A geometric uncertainty probabilistic processing method was proposed. First, the design of experiments method was employed to determine key geometric parameters, which would be treated as random variables for LCF prediction. Second, the K-S (Kolmogorov-Smirnov) method was adopted to determine the probability distributions of random variables. Third, a surrogate model was built to conduct Monte Carlo simulation. On this basis, turbine disk probabilistic analysis system was developed. The LCF life probabilistic analysis work of a GH720Li turbine engine disk was completed under the turbine disk probability analysis system, by which three key geometric parameters (inner diameter, outer diameter, rim thickness) and life-reliability curve of the turbine disk were obtained. Analysis results shows that the outer diameter of turbine disk has a strong impact on the LCF life.

Key words: geometry uncertainty; reliability; turbine disk; low cycle fatigue; probabilistic analysis system

收稿日期:2015-04-23

作者简介:樊江(1973—),男,副教授,博士,主要从事发动机结构强度可靠性、多学科优化设计、振动理论等研究。

引用格式:樊江,廖祐明,李达,等.考虑几何分散性的涡轮盘寿命概率分析[J].航空动力学报,2017,32(1):66-74. FAN Jiang, LIAO Hu-ming, LI Da, et al. Probabilistic analysis of turbine disk fatigue life considering geometric uncertainties[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 66-74.

涡轮盘作为航空发动机的限寿件,其结构完整性和可靠性是航空发动机设计的薄弱环节,已成为制约发动机研发的瓶颈^[1].低循环疲劳(low cycle fatigue, LCF)是涡轮盘最主要的失效模式^[2].传统 LCF 分析中将涡轮盘视为确定不变的理想结构进行寿命预测,但在工程实践中,涡轮盘结构由于制造过程中尺寸公差的影响而具有不确定性,在设计优化过程中也往往会有较大的尺寸变化.文献[3-5]研究表明,涡轮盘不同部位对涡轮盘失效风险的贡献度不同,而几何模型的变化也会造成最危险部分发生偏移.文献[6]研究表明几何参数的分散性使得涡轮盘的实际寿命在统计上也呈现分散的特性.传统的寿命预测往往将寿命分散性统一用较大的安全系数进行处理,造成设计保守,不能准确量化疲劳寿命及可靠性.与传统确定性分析不同,概率分析方法考虑工程实际,更精确地将影响应力和强度分布的具有不确定性的基本设计参数处理为随机变量,将概率分析与结构分析有机结合在一起,因此能给出结构安全性的定量描述,即寿命可靠度,从而更真实客观地反映结构的安全水平.同时,在概率分析过程中根据结构应力、强度等对各随机变量的敏感性分析,能够指导设计者有针对性地改善结构设计.因此发展涡轮盘 LCF 寿命概率分析方法对于航空发动机结构完整性和可靠性具有重要意义^[7-8].

针对材料分散性已发展了较为成熟的处理方法^[9-16].几何分散性方面,文献[17-19]将材料参数作为随机变量进行涡轮盘 LCF 寿命概率分析,对几何参数进行设计优化.文献[20]在 ANSYS 平台下利用 APDL 语言建立涡轮盘三维参数化模型,考虑载荷、温度、材料和几何参数随机性进行涡轮盘 LCF 寿命概率分析.几何分散性方面的研究因为涉及参数数目众多、分布特征不确定、分析模型需自动更新及计算成本高等问题较难开展.本文在发展较为成熟的概率分析方法基础上,提出了考虑几何分散性的处理方法,基于此方法开发出了涡轮盘概率分析系统(turbine disk probability analysis system, TDPAS),最后在涡轮盘概率分析系统中完成了对某发动机 GH720Li 涡轮盘 LCF 寿命的可靠性分析.

1 LCF 寿命概率分析方法

LCF 寿命概率分析方法在确定性分析方法的基础上进一步考虑结构疲劳寿命相关参数的不确定性,以概率的方法对其进行随机化处理.其中

首要问题是确定与结构疲劳寿命相关的关键随机参数,研究其分布规律;然后对随机参数进行大量抽样,并完成相应的有限元计算来保证概率分析所得结构疲劳寿命分布数据的可靠性.如何建立自动的抽样分析过程,在保证精度的前提下兼顾计算效率是概率分析要解决的另一个问题;而在考虑几何参数不确定性的概率分析中,需要着重考虑变化的几何模型在自动分析过程中的顺利传递.

概括起来,结构疲劳寿命概率分析过程主要分为 3 部分:

其一,确定随机输入,主要是筛选出分散性大且对寿命影响显著的设计参数,并确定它们的分布类型并获取相应分布特征参数;

其二,确定随机输出,主要是在试验数据的支持下,根据所得材料循环应力-应变、应变-寿命关系建立涡轮盘结构 LCF 寿命概率模型;

其三,概率分析计算方法,随机输入通过概率分析计算方法在保证精度的同时兼顾计算效率得到随机输出值,进而得到疲劳寿命分布曲线.

结合结构疲劳寿命概率分析方法的特点,本文发展了考虑几何分散性影响的涡轮盘 LCF 寿命概率分析方法,图 1 为其总体思路.

1.1 几何分散性处理方法

几何分散性给结构疲劳寿命概率分析带来的主要困难是如何确定重要的几何随机变量及其分布特征,以及如何实现变化的几何模型在自动分析过程中进行传递,这其中包括几何模型自身的更新及从几何模型向网格模型的变化.本文从 3 个方面进行了处理.

1.1.1 参数化模型

考虑几何分散性带来的模型变化,在进行概率分析迭代计算时,要求模型能够根据抽样得到的几何参数样本值自动更新生成新的几何模型,这就需要采用参数化建模技术对模型进行拓扑结构分析并进行参数化建模,其建模要求是模型各基本几何元素之间需要定义完整的尺寸约束、拓扑约束和工程约束,保证建模软件在求解该约束问题时能够得到有限解,使得模型在相应尺寸参数改变时能够成功地完成模型更新,同时整体拓扑保持不变.

1.1.2 网格重构实现

几何参数作为随机变量处理后,对其进行抽样引起几何模型形状的改变使得有限元迭代计算

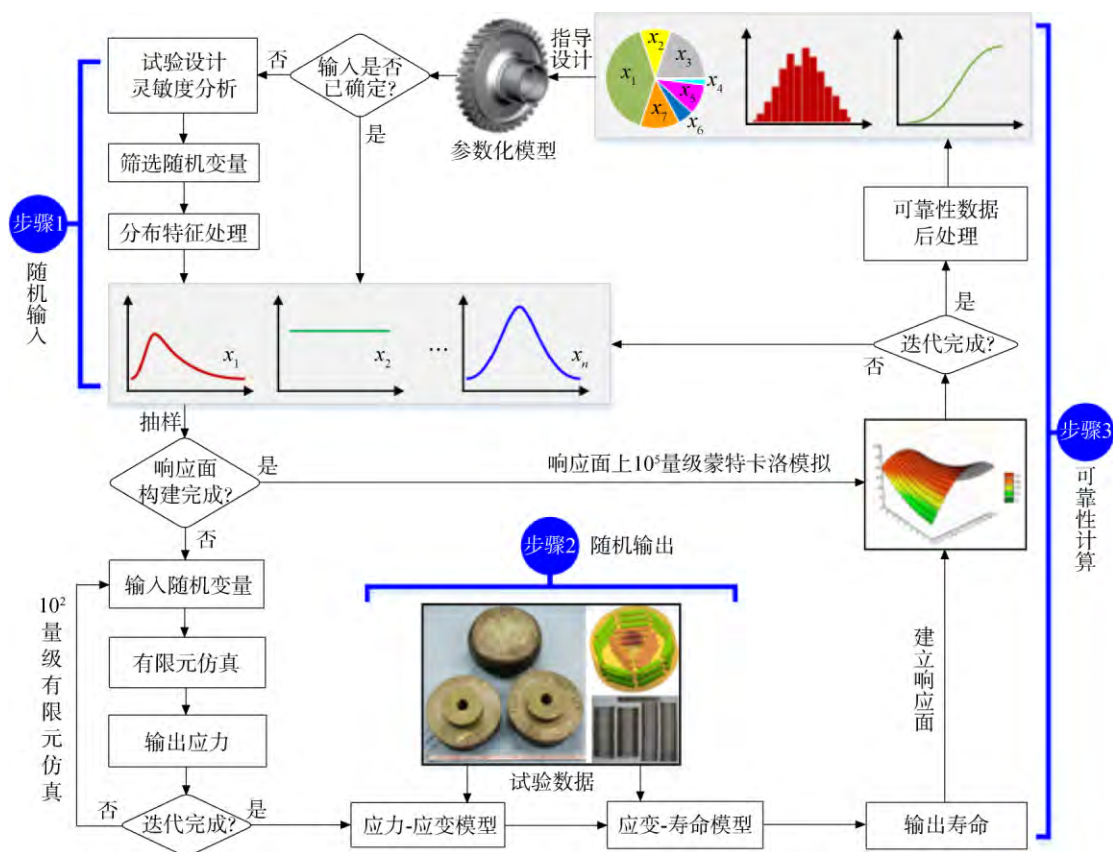


图 1 涡轮盘 LCF 寿命概率分析方法总体思路

Fig. 1 Probabilistic analysis general idea for LCF life of turbine disk

中需要网格模型能够稳健地进行自动重构. 本文采用分块划分策略, 将复杂模型划分成简单的组成元素进行网格划分, 以保证模型尺寸变化时网格重构的稳健性. 并将网格划分策略编制成有限元分析程序可直接调用的脚本文件 (本文中采用 ANSYS 作为有限元求解器, 利用 APDL 语言编制网格重分命令流), 较好地满足了概率分析迭代计算过程中尺寸抽样所带来的网格重构需求.

1.1.3 几何随机变量筛选及分布特征处理

涡轮盘拓扑结构中几何参数较多, 如果将全部几何参数作为随机变量处理, 巨大的计算成本将难以接受, 更重要的是难以获得全部尺寸的加工实测数据以分析各参数分布特征. 考虑到不同几何参数对应力影响力有差异, 本文采用试验设计方法先对所有几何参数进行灵敏度分析, 筛选得到对应力影响较大的关键几何参数作为随机变量, 而后针对关键几何参数开展成品盘实际加工尺寸测量, 对获得的测量数据进行假设检验, 进而确定关键几何参数的分布类型及特征参数. 图 2 为几何分散性处理方法的实现流程.

由于统计涡轮盘关键几何参数的加工数据通

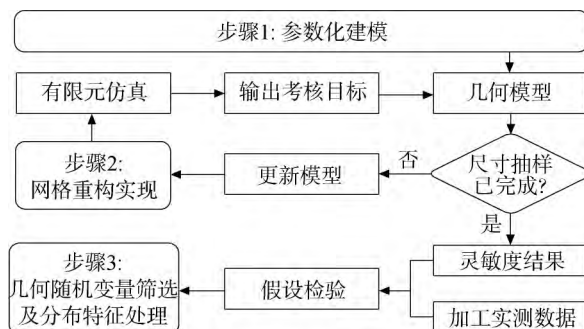


图 2 几何随机变量筛选流程

Fig. 2 Selection process of geometric random variable

常样本量较少, 本文采用适用于样本容量较少情形的 K-S 检验法, K-S 检验法是检验某一样本是否服从假设理论分布函数的方法, K-S 检验法对于小样本来说, 不用数据分组, 使用方便, 不损失数据中的信息, 是一种有效的方法. 其基本思想是以样本数据的实际累计分布与假设的理论分布比较, 计算两个值的大小, 若差值的绝对值在规定的范围内, 则认为该样本服从或者近似服从该假设分布, 下面对 K-S 检验过程进行说明.

假设检验问题: 令 H_0 表示样本值服从某假设理论分布, $F_0(x)$ 表示其理论分布函数; 令 H_1

表示该样本不服从某假设理论分布, $F_n(x)$ 表示一组该随机样本的累计频率函数, 设实际观测值 D 为 $F_0(x)$ 和 $F_n(x)$ 差距的最大值, 即 $D = \max |F_n(x) - F_0(x)|$, 当实际观测值 $D > D(n, a)$ 时,

拒绝 H_0 假设, 反之则接受 H_0 假设. 其中 $D(n, a)$ 是显著性水平为 a 且样本容量为 n 时 D 的拒绝临界值(见表 1^[21]).

表 1 $D(n, a)$ 表^[21]Table 1 $D(n, a)$ table^[21]

显著性 水平 a	拒绝临界值 $D(n, a)$					
	$n=5$	$n=10$	$n=20$	$n=30$	$n=50$	$n>50$
0.400	0.369	0.268	0.192	0.158	0.123	$0.87/\sqrt{n}$
0.200	0.447	0.322	0.232	0.190	0.149	$1.07/\sqrt{n}$
0.100	0.509	0.368	0.264	0.217	0.169	$1.22/\sqrt{n}$
0.050	0.562	0.409	0.294	0.242	0.189	$1.36/\sqrt{n}$
0.040	0.580	0.422	0.304	0.250	0.194	$1.37/\sqrt{n}$
0.010	0.667	0.487	0.352	0.290	0.225	$1.63/\sqrt{n}$

1.2 LCF 寿命概率模型

根据文献[22]中 GH720Li 的 LCF 试验数据以及文献[11-12]中对应力-应变模型及应变-寿命模型的处理方法, 得到 650 °C 下 GH720Li 材料的 Mason-Coffin 寿命概率模型, 如式(1)所示:

$$\frac{\Delta\sigma}{2 \times 10^{5.2671-0.0003\mu_1}} + 10^{0.2102\mu_1} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \times 3.4326 \times 10^{-4}\right)^{6.2723} = \left(10^{\frac{24.1541+3.7741\mu_2}{12.0456+1.7532\mu_2}} - \frac{\sigma_m}{E}\right)(2N_f)^{\frac{-1}{12.0456+1.7532\mu_2}} + \left(10^{\frac{2.4733-0.0834\mu_2}{1.9361+0.0494\mu_2}}\right)(2N_f)^{\frac{-1}{1.9361+0.0494\mu_2}} \quad (1)$$

式(1)中, N_f 为 LCF 寿命; μ_1, μ_2 为两个标准正态变量; E 为弹性模量; 假设涡轮盘载荷为三角波, σ_m 为载荷最大时最大等效应力点应力值; $\Delta\sigma$ 为应力范围.

1.3 LCF 寿命概率分析计算方法

为了由随机输入得到可信的随机输出, 需要进行大规模抽样计算, 工程上广泛使用蒙特卡洛抽样方法. 涡轮盘作为航空发动机热端部件对寿命可靠性要求极高, 根据英国国防标准《航空燃气涡轮发动机通用规范》, 将可靠度为 99.87% 的 -3σ 寿命作为安全寿命, 为了达到 99.87% 的可靠度要求, 通常需要进行 10^5 量级以上的抽样计算. 如果直接进行这样大数量级次数的涡轮盘疲劳寿命有限元分析以获取寿命概率分布, 其计算成本显然无法接受. 因此结构可靠性分析中常采用代理模型. 代理模型是用一个较为简单的函数

关系近似替代实际模型的复杂仿真模型, 其有计算量较小, 但计算结果与有限元模型的计算结果相近的优点. 通过进行少量次数(一般在 10^2 量级)的实际有限元仿真计算建立代理模型, 最后在代理模型上进行蒙特卡洛模拟以大幅度提高计算效率, 如图 1 流程所示. 对于涡轮盘 LCF 寿命概率分析问题, 用于进行蒙特卡洛模拟的代理模型必须能够精确地反映出与原准确计算模型的关系, 为了确定最适宜此类问题的高精度代理模型, 本文对工程常用几类代理模型的拟合性能进行分析. 工程上常用的代理模型主要有多项式响应面、Kriging 模型、基于径向基函数的神经网络等^[23], 如表 2 所示.

表 2 代理模型列表

Table 2 Surrogate models list

名称	含义
RBF	基于径向基函数神经网络
RSM-2	2 阶多项式响应面
RSM-4	4 阶多项式响应面
Kriging-1	Gauss 函数 Kriging 模型
Kriging-2	Exponential 函数 Kriging 模型
Kriging-3	Maternlinear 函数 Kriging 模型
Kriging-4	Matern cubic 函数 Kriging 模型

根据涡轮盘 LCF 寿命概率分析的问题特征, 本文选用工程中典型已知函数^[24]作为测试函数, 其形式如式(2), 对上述 7 类代理模型的适用性进行判断:

$$y = \sum_{i=1}^n \left[x_i^2 + \ln \left(\frac{\sum_{k=1}^m x_k}{x_i} \right) + \sin(x_i + x_{i+1}) \right] \quad (2)$$

式中 x_i, x_k 为输入变量, m 为输入变量个数。

并采用以下两种误差检验标准来对各代理模型的拟合性能做出定量的评估:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$e_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}} \quad (4)$$

其中 \hat{y}_i 为利用代理模型得到的预估值; \bar{y} 为所有样本点响应值的平均值; 方差 R^2 为代理模型与真实模型之间的贴合程度, 其值越大, 表示该代理模型的拟合精度越高, 而归一化方均根误差 e_{rms} 表示代理模型预测值与真实值之间的差异程度, 其值越小, 表示该代理模型的拟合精度越高^[25-26]。

用 7 种代理模型分别对式(2)进行拟合, 随机变量数目为 8 个, 采用最优拉丁超立方方法进行抽样, 抽样点从 70 点开始增加, 每增加 10 个抽样点构建一次代理模型, 一直到各代理模型的精度达到稳定为止。误差校验点的数目为抽样点总数的 25%。各代理模型的 R^2 随取样点个数的变化趋势如图 3 所示, 当各代理模型趋于稳定时可以看到: ①从初始取样点开始, RBF 就保持了较高精度, 随着抽样点数的增加 R^2 有微小波动后逐渐收敛于 1; ②RSM-2 和 RSM-4 在取样点数目较少时精度较低, 当取样点数目增加后精度逐渐增加, 精度与 RBF 相当, R^2 收敛于 1; ③4 类 Kriging 模型在取样点较少时精度较高, 随着取样点总数的增多, Kriging 模型出现了过饱和的状况, 其 R^2 值在 0.8~0.9 间振荡并没有收敛。

当各代理模型趋于稳定时, 对其 R^2 和 e_{rms} 进行统计, 得到图 4 所示统计数据, 可以看到 RBF

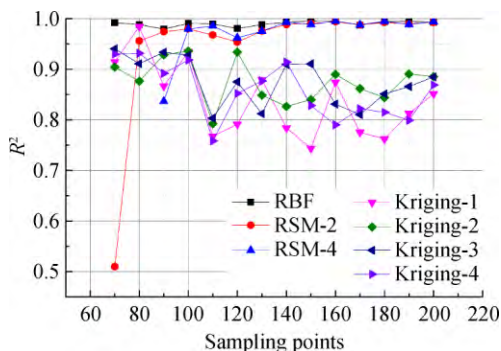


图 3 R^2 随取样点的变化趋势

Fig. 3 R^2 trends with sampling points

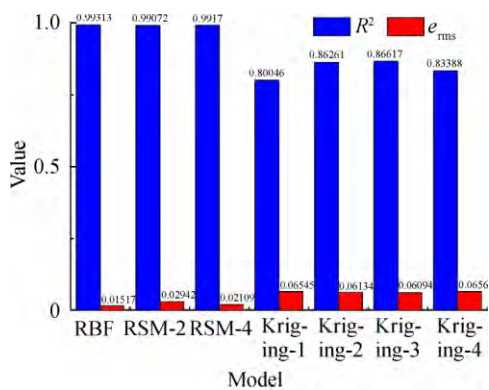


图 4 所有代理模型的 R^2 和 e_{rms} 统计数据

Fig. 4 Statistical data of R^2 and e_{rms} of all surrogate models

的精度最高, R^2 达到 0.99313, e_{rms} 为 0.01517; RSM-4 的精度与 RBF 相当, R^2 达到 0.9917, e_{rms} 为 0.02109; 其次为 RSM-2, R^2 达到 0.99072, e_{rms} 为 0.02942; 而 4 类 Kriging 模型的精度较低。当随机输入变量数目从 8 个开始增至 13 个时得到图 5 所示统计数据, 可以看到: RBF, RSM-2 和 RSM-4 保持着良好的稳定性和精度, 4 类 Kriging 模型随着输入变量的增加, 精度较低且波动较大。

综合前述对各代理模型的分析, 并结合涡轮盘 LCF 寿命概率分析对精度和效率的要求, 在样本点数目充足的条件下, 本文采用 RSM-2 构建蒙特卡洛模拟所用的代理模型。

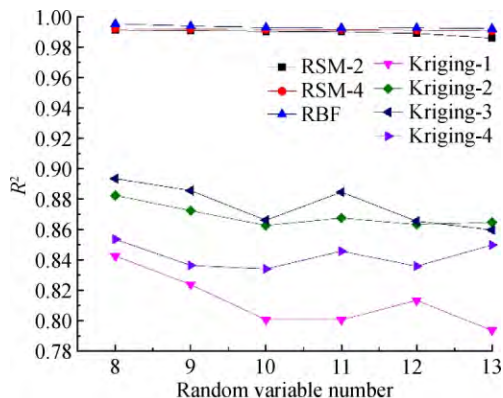


图 5 各类代理模型的 R^2 与随机变量数目关系

Fig. 5 Relationship between R^2 and random variable number of all surrogate models

2 涡轮盘寿命概率分析实例

基于上述涡轮盘 LCF 寿命概率分析方法及文献[18]所建立的概率设计体系, 开发出了涡轮盘概率分析系统(图 6), 在该系统中完成了对某发动机 GH720Li 涡轮盘 LCF 寿命的概率分析工作。

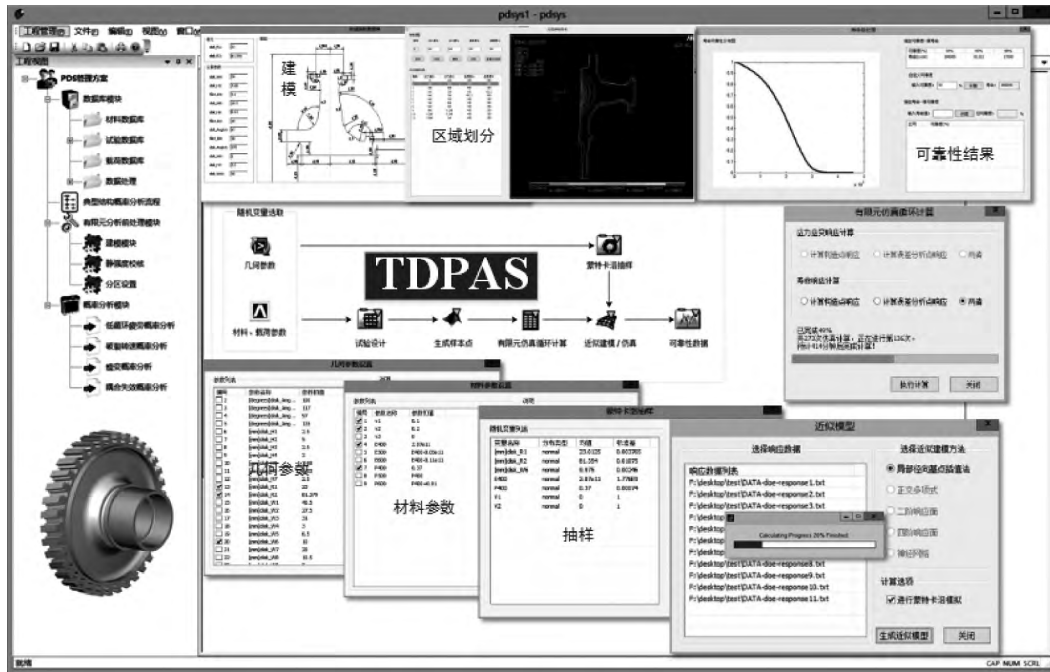


图 6 涡轮盘概率分析系统

Fig. 6 Turbine disk probability analysis system

采用 1.1 节介绍的方法对几何参数的分散性进行处理. 首先, 对三维建模软件 UG 进行二次开发, 在涡轮盘概率分析系统中形成满足几何参数随机化规范的参数化建模工具, 并建立某发动机 GH720Li 涡轮盘参数化模型. 图 7 所示为该涡轮盘参数化示意图 (共计 41 个参数, 图中未全列出) 及该盘 1/37 扇区实体模型.

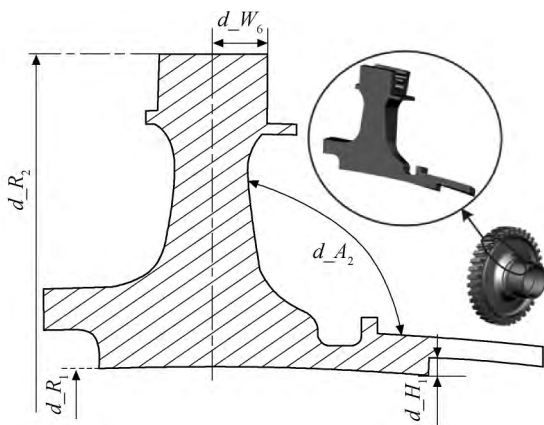


图 7 某型涡轮盘拓扑几何参数

Fig. 7 Topology geometry parameters of a turbine disk

为保证计算效率和精度, 将所有 41 个参数分为 4 组, 采用最优拉丁超立方方法进行抽样, 各几何参数的范围根据公差给至原值附近 $\pm 0.1\%$ 区间, 每组抽样 156 次. 以盘体最大等效应力 (σ_1)、盘心最大周向应力 (σ_c) 与幅板最大径向应力 (σ_r) 作为考核目标进行分析. 图 8 所示为第 1 组几何参

数对盘体最大等效应力、盘心最大周向应力与幅板最大径向应力响应的灵敏度对比数据, 其中 (+) 代表该变量对于目标响应为正相关灵敏度, (-) 代表该变量对于目标响应为负相关灵敏度, 下同.

图 8 中第 1 组几何参数各符号所代表的含义见表 3 所示. 通过综合对比其余 3 组参数的灵敏度分析结果, 筛选得到该型涡轮盘的 5 个关键几何尺寸, 它们分别为: d_R_1 (轮盘内径)、 d_R_2 (轮盘外径)、 d_A_2 (右侧幅板角度)、 d_W_6 (轮缘厚度)、 d_H_1 (右侧盘心高度), 各参数在模型中的具体位置见图 7 所示参数化模型. 通过测量得到 10 个涡轮盘的轮盘内径 d_R_1 、轮盘外径 d_R_2 及 6 个涡轮盘的轮缘厚度 d_W_6 的加工数据, 最终选择这 3 个几何尺寸作为随机变量, 参与到概率分析的计算中.

一般来说, 如果加工工艺过程稳定, 而且严格按照尺寸公差中心加工, 由概率论知, 机械零件尺寸为随机变量, 且服从正态分布^[27-28]. 因此先假设 d_R_1 、 d_R_2 及 d_W_6 这 3 组几何参数分布分别服从正态分布, 进而对其分布函数类型进行检验. 将 d_R_1 、 d_R_2 及 d_W_6 这 3 组几何尺寸分别进行单样本 K-S 正态分布假设检验, 表 4 所示为其处理结果, 可以看出 3 组数据的实际观测值 D 分别为 $Q\ 206$ 、 $Q\ 203$ 、 $Q\ 401$, 通过查对表 1 数据可知它们分别小于各自显著性水平下的临界拒绝值, 同时近似相伴概率分别为 $Q\ 790$ 、 $Q\ 806$ 、 $Q\ 291$ 均大于显著

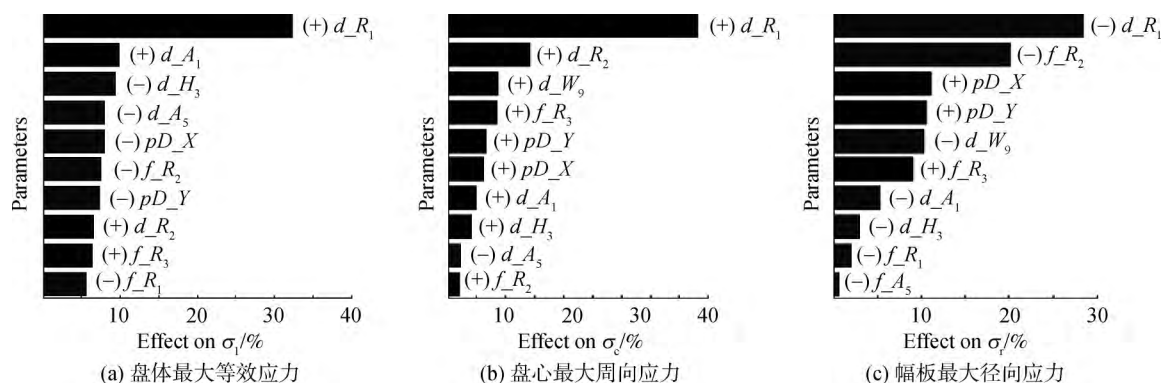


图 8 第 1 组几何参数灵敏度分析数据

Fig. 8 Sensitivity analysis data of the first set of geometry parameters

水平 0.05, 因此可认为这 3 组数据均服从正态分布。

根据文献[29-30]将泊松比 ν 处理为随机变量以及将式(1)中的弹性模量 E 处理为随机变量, 则此次涡轮盘 LCF 寿命概率分析的随机输入变量共计 5 个, 分别为: $E, \nu, d_{R1}, d_{R2}, d_{W6}$, 它们的分布类型及分布特征参数如表 5 所示(注: 此处表 5 中 3 个尺寸参数的数据并非表 4 中的数据, 因表 4 所示数据所对应的结构型号数据丰富

表 3 第 1 组灵敏度分析参数

Table 3 The first set of parameter for sensitivity analysis

符号	几何意义
d_{A1}	盘右侧幅板下沿线角度
d_{A5}	盘左侧幅板上沿线角度
d_{R1}	轮盘内径
d_{R2}	轮盘外径
d_{H3}	盘右侧台阶高度
f_{R1}	圆角 1 半径
f_{R2}	圆角 2 半径
f_{R3}	圆角 3 半径
pD_X	左侧幅板定位点坐标, 决定该线轴向位置
pD_Y	左侧幅板定位点坐标, 决定该线径向位置

表 4 3 组几何参数 K-S 检验结果

Table 4 K-S test results of three sets of geometry parameters

参数	说明	d_{R1}	d_{R2}	d_{W6}
n	样本数	10	10	6
μ	均值	38.1235	152.2656	18.7008
σ	标准差	0.00753	0.021500	0.00492
$D(n, \alpha)$	拒绝临界值	0.206	0.203	0.401
sig	相伴概率值	0.790	0.806	0.291

且加工工艺与本例型号一致, 故采用其统计数据确定分布类型的确定)。

对表 5 所示 5 个随机变量进行 200 次最优拉丁超立方抽样并执行相应的有限元计算, 并对计算所得应力数据根据 1.3 节中建立的概率分析方法进行 2 阶多项式响应面构建, 并在响应面上进行蒙特卡洛模拟, 计算得到涡轮盘 LCF 寿命-可靠度分布曲线如图 9 所示, 并计算得到典型可靠度下对应的寿命, 如表 6 所示。

表 5 随机变量的分布类型及抽样范围

Table 5 Distribution type of random variables and the sampling ranges

随机变量	分布类型	均值 μ	标准差 σ	抽样范围
d_{R1}	正态	23.0275	0.003765	(23, 23.055)
d_{R2}	正态	81.385	0.01075	(81.375, 81.395)
d_{W6}	正态	10.005	0.00246	(9.98, 10.03)
E	正态	2.07×10^{11}	1.776×10^9	$\pm 3\sigma$
ν	正态	0.37	0.00074	$\pm 3\sigma$

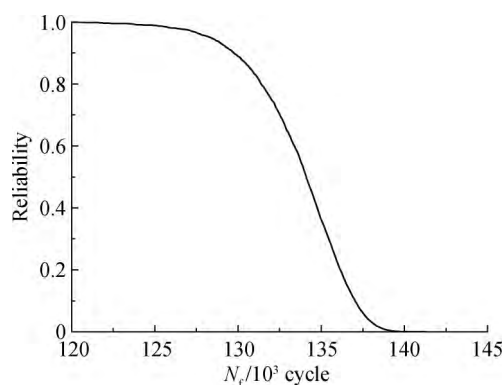


图 9 涡轮盘 LCF 寿命-可靠度分布

Fig. 9 LCF life-reliability distribution of the turbine disk

表6 寿命-可靠度计算结果

Table 6 Calculation results of life-reliability

寿命/cycle	可靠度	寿命/cycle	可靠度
134 098	0.500 000	124 378	0.990 000
129 749	0.900 000	120 747	0.998 700

最后,在响应面上对随机变量进行灵敏度分析,以获得各随机变量对寿命的影响程度,如图10所示在5个随机变量对寿命响应的灵敏度分析结果中,几何参数轮盘外径 d_{R_2} 对寿命有较大的影响。

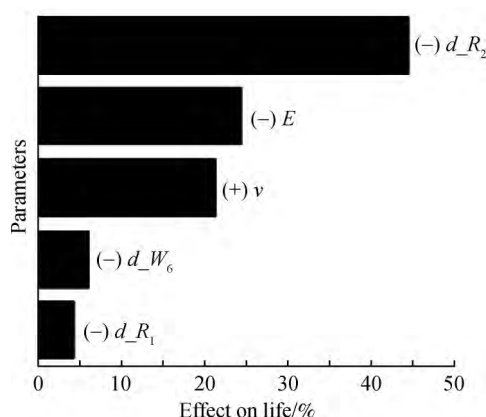


图10 随机变量对寿命的灵敏度

Fig. 10 Sensitivity data of random variables for life

从概率分析结果来看,尽管由加工公差引起的几何分散性较小,但其对寿命依然有一定的影响。通过对几何参数的分散性进行考虑,可以对涡轮盘的结构设计、加工过程提供一定的指导作用,设计过程中可以参考概率分析数据,根据设计需求有针对性地选择最有效的设计参数进行设计的修改;生产加工过程中也可以根据尺寸的灵敏度分析结果,对那些灵敏度极高的关键参数进行严格的公差控制以降低结构寿命的分散性,同时可以适当放宽对性能影响不明显的次要参数的公差控制以降低加工成本及提高加工效率。

3 结 论

1) 提出了几何参数不确定性的概率处理方法,通过对涡轮盘参数化模型中所有几何参数进行灵敏度分析,筛选出对应力影响较大关键几何参数作为随机变量,并对关键几何参数开展涡轮盘实际加工尺寸测量,使用假设检验方法得到涡轮盘内径、外径、盘缘厚度3个几何参数的分布类型为正态分布和分布特征参数。

2) 通过对7类代理模型进行对比判断筛选出涡轮盘 LCF 寿命概率分析适用的高精度代理模型,发展了涡轮盘寿命概率分析方法。

3) 基于所建立的考虑几何分散性的涡轮盘寿命概率分析方法,开发出了涡轮盘概率分析系统,并在该系统中完成了对某发动机 GH720Li 涡轮盘 LCF 寿命的概率分析工作,得到了该型涡轮盘的寿命-可靠度分布曲线,同时给出了影响寿命的关键几何参数。

参考文献:

- [1] 王荣桥,胡殿印,申秀丽,等. 航空发动机典型结构概率设计技术[J]. 航空制造技术,2014(7):26-30.
WANG Rongqiao, HU Dianyin, SHEN Xiuli, et al. Probabilistic design technology on typical structure of aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(7): 26-30. (in Chinese)
- [2] 吕文林,陈俊粤,田德义,等. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告):第2册 轮盘[M]. 北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.
- [3] Millwater H R, Enright M, Fitch S. A convergent probabilistic technique for risk assessment of gas turbine disks subject to metallurgical defects[R]. AIAA-2002-1382, 2002.
- [4] 魏大盛,杨晓光,王延荣. 基于缺陷概率特点的粉末冶金材料寿命预测概率模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 951-957.
WEI Dasheng, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. A probabilistic model for prediction of life based on probabilistic character of defects in PM alloys[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 951-957. (in Chinese)
- [5] 陆山,张鸿,唐俊星,等. 考虑尺寸效应的轮盘应力疲劳概率寿命分析方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2039-2043.
LU Shan, ZHANG Hong, TANG Junxing, et al. Analysis method for the stress fatigue probability life of a disk considering size effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2039-2043. (in Chinese)
- [6] Reuter I, Weiss T, Becker K H. Probabilistic structure-mechanical assessment of rotor discs considering geometry variations[R]. ASME Paper GT2013-94589, 2013.
- [7] Weiss T, Voigt M, Schlums H, et al. Probabilistic finite-element analyses on turbine blades [R]. ASME Paper GT2009-59877, 2009.
- [8] Voigt M, Mucke R, Vogeler K, et al. Probabilistic lifetime analysis for turbine blades based on a combined direct Monte Carlo and response surface approach[R]. ASME Paper GT2004-53439, 2004.
- [9] 赵永翔,王金诺,高庆. 概率循环应力-应变曲线及其估计方法[J]. 机械工程学报, 2000, 36(8): 102-106.
ZHAO Yongxiang, WANG Jinnuo, GAO Qing. Probability-based cyclic stress-strain curves and estimation method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(8): 102-

106. (in Chinese)
- [10] 赵永翔, 杨冰, 张卫华. 应变疲劳可靠性理论与方法的新进展[J]. 机械强度, 2005, 27(5): 604-611.
ZHAO Yongxiang, YANG Bing, ZHANG Weihua. New advances of the strain-based fatigue reliability theory and methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(5): 604-611. (in Chinese)
- [11] 高阳. 航空发动机涡轮盘低循环疲劳可靠性分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.
GAO Yang. Reliability analysis of LCF for turbine disks in aeroengines[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [12] 唐俊星, 陆山. 轮盘应变疲劳寿命可靠性分析方法[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 344-347.
TANG Junxing, LU Shan. Reliability analysis method for the strain fatigue life of a disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4): 344-347. (in Chinese)
- [13] 唐俊星, 陆山. 某涡轮盘低循环疲劳概率寿命数值模拟[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 706-710.
TANG Junxing, LU Shan. Numerical simulation of LCF probability life of a turbine disk[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 706-710. (in Chinese)
- [14] 鲁华平. 涡轮盘低周疲劳寿命可靠性分析及试验评估[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
LU Huaping. Low cycle fatigue life of the turbine disk reliability analysis and assessment test[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [15] 鲁华平, 陆山, 唐俊星. 非对称循环疲劳寿命研究及涡轮盘概率寿命分析[J]. 机械强度, 2007, 29(1): 92-96.
LU Huaping, LU Shan, TANG Junxing. Research on the unsymmetrical cyclic fatigue life and reliable life analysis of a turbine disk[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 92-96. (in Chinese)
- [16] 高阳, 白广忱, 张瑛莉. 涡轮盘低循环疲劳寿命的概率分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 804-809.
GAO Yang, BAI Guangchen, ZHANG Yingli. Probability analysis for the low cycle fatigue life of a turbine disk[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 804-809. (in Chinese)
- [17] 裴月, 薛飞, 王荣桥. 涡轮盘低循环疲劳寿命可靠性研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(1): 39-43.
PEI Yue, XUE Fei, WANG Rongqiao. Reliability research for the low cycle fatigue life of a turbine disk[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(1): 39-43. (in Chinese)
- [18] 胡殿印, 裴月, 王荣桥, 等. 涡轮盘结构概率设计体系的研究[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1144-1149.
HU Dianyin, PEI Yue, WANG Rongqiao, et al. Research of probabilistic design system for turbine disk structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1144-1149. (in Chinese)
- [19] 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 Dianyin, PEI Yue, WANG Rongqiao, et al. Probabilistic design of low cycle fatigue for turbine disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(4): 481-487. (in Chinese)
- [20] 高阳, 杨昌军, 白广忱, 等. 涡轮盘低循环疲劳可靠性设计方法[J]. 航空发动机, 2011, 37(1): 4-8.
GAO Yang, YANG Changjun, BAI Guangchen, et al. Reliability design of turbine disk low cycle fatigue[J]. Aero-engine, 2011, 37(1): 4-8. (in Chinese)
- [21] 赵慧. 基于 K-S 检验 copula 分布估计算法中边缘分布的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
ZHAO Hui. Research on marginal distribution in copula estimation of distribution algorithm based on K-S test[J]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册: 上卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [23] 苏子健, 钟毅芳. 系统近似建模技术的研究与比较[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 834-836.
SU Zijian, ZHONG Yifang. Investigation and comparison of approximate modeling of a complex system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 834-836. (in Chinese)
- [24] Jin R, Chen W, Simpson T W. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria[R]. AIAA-2000-4801, 2000.
- [25] Giunta A A. Use of data sampling, surrogate models, and numerical optimization in engineering design[R]. AIAA-2002-0538, 2002.
- [26] Enright M P, Millwater H R. Optimal sampling techniques for zone-based probabilistic fatigue life prediction[R]. AIAA-2002-1383, 2002.
- [27] 钟春生. 如何保证零件尺寸分布中心与公差中心重合的几点思考[J]. 机电工程技术, 2004, 33(2): 79-80.
- [28] 林宋, 侯彦丽. 轴承零件加工尺寸的分布拟合研究[J]. 轴承, 2002(12): 21-24.
LIN Song, HOU Yanli. Fitting of precess dimension distribution for bearing components[J]. Bearing, 2002(12): 21-24. (in Chinese)
- [29] 张利民, 席稳峰, 蒙秦渝. 利用 MTS 引伸计在国产试验机上进行金属材料泊松比测定[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(11): 329-330.
ZHANG Limin, XI Wenfeng, MENG Qinyu. Testing metallic materials-Poisson ratio on domestic testing machine by the MTS strain gauge[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2007, 26(11): 329-330. (in Chinese)
- [30] 冯引利, 曹凤兰, 王卫国, 等. FGH96 亚尺寸粉末冶金盘低循环疲劳寿命可靠性分析及试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 53-57.
FENG Yinli, CAO Fenglan, WANG Weiguo, et al. Reliability analysis on a P/M superalloy sub-scale disk and experimental investigation[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(2): 53-57. (in Chinese)

(编辑: 陈越)