

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.031

基于应力-强度干涉模型的转子系统圆弧端齿连接结构可靠性评估方法

王庆平¹, 刘帅², 张宏建², 崔海涛²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:提出一种基于应力-强度干涉模型的转子系统圆弧端齿连接结构可靠性评估方法。在有限元软件中建立参数化有限元模型,通过有限元计算筛选出应力敏感性较高的部分几何尺寸,同材料参数和载荷一起作为影响应力分布的输入变量,圆弧端齿的最大等效应力为输出变量;为了减少庞大的有限元计算量,使用响应面来获取不同输入变量组合时的输出变量;应用 Monte-carlo 法与响应面法结合求出最大等效应力的分布形式;以服从某种分布的应力与通过拟合样本数据得到的服从某种分布的强度构成应力-强度干涉模型,并求得圆弧端齿连接结构的可靠度。

关键词:圆弧端齿连接结构;可靠性;应力-强度干涉模型;响应面法;Monte-carlo 法

中图分类号:V233 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0146-07

Reliability Assessment Method of Rotor System Curvic Couplings Based on Stress-Strength Interference Model

WANG Qingping¹, LIU Shuai², ZHANG Hongjian², CUI Haitao²

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A stress-strength interference model-based reliability assessment method for rotor system curvic couplings is proposed. A parametric finite element model is established in the finite element software, and by finite element calculations some geometric dimensions with high stress sensitivity are screened out, which are used as input variables affecting stress distribution together with material parameters and loads, while the maximum equivalent force of circular end tooth is the output variable. In order to reduce the huge amount of finite element calculation, the response surface is used to obtain the output variables when different input variables are combined. The Monte-carlo method is applied in combination with the response surface to find out the distribution form of the maximum equivalent force. The stresses obeying a certain distribution and the strengths obeying a certain distribution obtained by fitting the sample data constitute a stress-strength interference model, and the reliability of the curvic couplings is obtained.

Keywords: curvic couplings; reliability; stress-strength interference model; response surface method; Monte-carlo method

0 引言

圆弧端齿结构广泛应用于航空发动机转子部件,用于轴-轴连接、轴-盘连接和盘-盘连接^[1-2],其结构如图 1 所示。圆弧端齿在定心、传递转矩的同时还具有自动定心精度高、热定心特性好、承载能力强、结构紧凑、装拆方便、质量轻等特点,因而广泛应用于现代航空发动机转子系统零部件之间的连接。随着航空发动机性能的不提高,对航空发动机涡轮转子、压气机转子间的连接方式也提出了更高的要求:在保证飞行安全和高可靠

性的前提下,单位质量应尽可能轻、占用空间尽可能小,并要求传递功率大、工作平稳性好、齿面精度高、噪声低等^[3-5]。

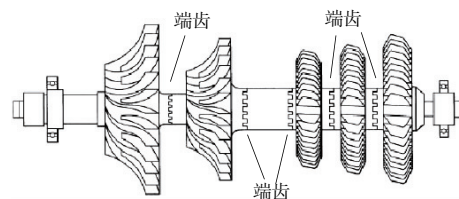


图 1 圆弧端齿连接的航空发动机示意图

国内外学者在圆弧端齿结构的强度及优化方

第一作者简介:王庆平(1988—),男,安徽宿州人,高级工程师,硕士,研究方向为航空发动机结构强度与可靠性,1759955646@qq.com。

面开展了大量的研究工作。RICHARDSON 等^[6-7]对圆弧端齿结构进行了三维与二维分析的对比,研究认为精确计算仍需采用三维模型,但是当研究几何参数变化对应力结果的影响时,二维模型的效率较高;该团队进一步对圆弧端齿三维等效结构开展了光弹测试试验,试验的齿根应力测试结果与有限元结果较为吻合,证明对圆弧端齿结构进行的三维有限元接触分析是合理有效的。YU 等^[8]通过研究发现,由于接触角和表面粗糙度的存在,圆弧端齿会逐渐减小连接的刚度,其粗糙表面对刚度损失的影响更加显著。黄发^[9]针对航空涡轴发动机圆弧端齿结构,以圆弧端齿结构的最大等效应力为优化设计目标,以端齿内径和齿根圆弧半径为设计变量,对圆弧端齿进行了结构优化设计。李爱民等^[10-11]提出了一种基于多轴非线性疲劳损伤理论的微动疲劳寿命模型并建立了基于神经网络-遗传算法的优化分析方法,基于该方法开展了优化设计并进行了端齿微动疲劳寿命预测及模拟件寿命试验研究。罗凯琳^[12]考虑微动损伤的影响,对圆弧端齿结构在实际工作状态下的最大等效应力及微动参数的影响因素进行研究,发展了基于 RBF 神经网络-遗传算法的圆弧端齿优化方法。沈祥等^[13]针对涡轴发动机压气机连接端齿开展了端齿接触状态的影响分析,认为转速是引起端齿连接结构接触状态变化的主要原因,而轴向压紧力会加剧齿面的接触损伤。徐鲁兵等^[14]针对圆弧端齿开设螺栓孔会破坏圆弧端齿齿形结构的完整性和应力集中等问题,建立了带有螺栓预紧的涡轮盘轴圆弧端齿连接转子优化模型,基于 ANSYS 优化平台进行了带螺栓孔的圆弧端齿结构优化设计,改善了圆弧端齿齿根附近的应力分布状态。对复杂环境下工作的圆弧端齿结构的安全性问题进行可靠性研究是十分必要的。然而,目前对于圆弧端齿结构强度可靠性的研究相对较少,且圆弧端齿的几何尺寸、材料性能、零件强度以及载荷等均为影响最大应力的因素,但这些影响因素往往呈随机分布,因此在分析圆弧端齿连接结构可靠度时考虑这些影响因素的随机性和分散性将更加符合实际情况。

基于此,本文提出一种基于应力-强度干涉模型的转子系统圆弧端齿连接结构可靠性评估方法。首先通过有限元计算筛选出应力敏感性较高的部分几何尺寸,其次为了减少庞大的有限元计算量,使用响应面来获取不同输入变量组合时的输出变量,然后应用 Monte-carlo 法与响应面结合

求出最大等效应力的分布形式,最后服从某种分布的应力与通过拟合样本数据得到的服从某种分布的强度构成应力-强度干涉模型,并求得圆弧端齿连接结构的可靠度。

1 圆弧端齿结构有限元分析

1.1 有限元模型

以 ANSYS 有限元分析软件为平台建立某型圆弧端齿连接结构的三维有限元仿真参数化模型。此模型涵盖了几何尺寸、材料性能参数以及载荷的参数化。在所建立的有限元模型中,采用 20 节点六面体实体单元 SOLID186 单元对结构非接触区域进行有限元分网。

为提高计算效率,利用结构和载荷的对称性,从整体结构中取出 1/2 进行分析。为了保证计算精度,设置齿端接触面的划分单元尺寸,在圆弧端齿部分采用较为细密的网格划分,图 2 为 1/2 圆弧端齿模型沿径向的有限元网格划分。

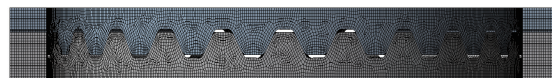


图 2 对称部分模型

在凹齿和凸齿接触啮合的两个齿面进行接触设置,对圆弧端齿接触区域采用 contact174 和 target170 单元建立接触对。选取凹齿为目标面,凸齿为接触面,接触类型为摩擦接触,输入摩擦因数,并设置为对称接触行为,采用增广 Lagrange 法进行求解。

1.2 材料及边界约束

离心叶轮材料为钛合金 TC11,与其连接的燃气涡轮一级盘材料为高温合金 GH4720Li,一般情况下结构局部应力集中区域的应力会进入材料的塑性区,发生塑性变形,因此必须考虑材料的非线性。两种材料不同温度下的力学性能如表 1 所示。

对于圆弧端齿结构所受载荷和约束,选择截面完成对称约束的施加;轴向力和转矩施加在同一个面上;在燃气涡轮端齿端面的位移约束面上施加位移约束,限制其轴向和周向方向的位移为 0。求解分为多载荷步加载,其中第 1 步施加所有边界条件,对于载荷仅施加轴向预紧力和重力,模拟圆弧端齿在非工作状态下的静止装配状态;第 2 步在第 1 步的基础上,将转速、转矩、温度场以及轴向气体力全部施加,模拟端齿工作状态下的受力状态。

表 1 不同温度下两种材料的力学性能

材料	温度/℃	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	线膨胀系数 $\alpha/$ (10^{-6}C^{-1})	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa
TC11	室温	4 480	123	0.33	—	1 032	1 138
	400	4 480	104	0.33	9.7	681	880
GH4720Li	室温	8 060	216	0.28	—	1 211	1 642
	400	8 060	197	0.29	13.5	1 165	1 503

1.3 静止装配状态应力分布

由于航空发动机的运行需要克服自身的重力,所以在分析时,重力的考虑不可或缺。载荷仅施加轴向预紧力和重力场,模拟圆弧端齿在非工作状态下的静止装配状态,即发动机在停车时状态,此时不存在转速、转矩、温度场以及轴向气体力。图 3 是非工作状态下凸齿(离心叶轮)和凹齿(燃气涡轮)的应力分布。从图中可以看出,非工作状态下的端齿总体结构应力最大值发生在端齿部分的齿面接触区的边缘,由于只受到轴向预紧力和重力的作用,端齿部分之外的区域应力值较小。从图 3 可以看出,凹齿和凸齿齿面应力集中区域均处于端齿的齿顶倒角与相对应另一齿的齿面相接触的区域,并呈狭小带状分布。齿顶非接触区与齿底非接触区的应力值远小于齿面接触区,尤其是齿面接触区的边缘。虽然有重力的影响,但各个端齿的应力分布近乎相同。凹齿和凸齿啮合在非工作状态下,凹齿的应力值(353.38 MPa)略小于凸齿的应力值(356.26 MPa),并且端齿部分的应力最大值在靠近外径区域。

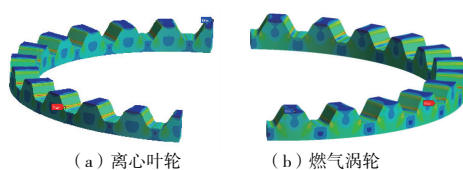


图 3 非工作状态应力

当航空发动机处于工作状态时,依靠圆弧端齿将燃气涡轮产生的转矩传递至离心叶轮。依据其真实的工作状态,将转速、转矩和热载荷全部施加,模拟端齿工作状态下的受力状态。图 4 是端齿结构在工作状态下凸齿和凹齿的应力分布情况,从图 4 中也可以看出,应力集中区域发生在靠近端齿内径的齿根过渡圆弧区域。齿顶非接触区应力值在工作状态下较小,但齿底非接触区的应力值相对于非工作状态而言有较大幅度的增加,在离心叶轮齿面接触区的边缘同样有较高的应力集中现象。凹齿和凸齿在磨削加工成形过程中不

同,凹齿是磨轮的外径磨削齿坯表面加工而成的,而凸齿是磨轮的内径磨削齿坯表面加工而成的,在相同的磨轮齿形参数和磨轮与齿坯位置时,显然用磨轮外径磨削比用内径磨削切去的材料多。因此凹齿比凸齿切削的材料更多,所以即使为同种材料应力也会略有不同。

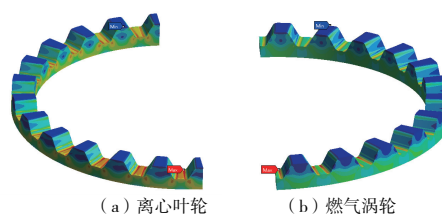


图 4 工作状态应力

2 圆弧端齿结构的可靠性分析

2.1 可靠性评估方法

对于比较复杂结构的非线性有限元分析,计算量将是无法估量的,响应面方法可以较好地解决这一问题。本分析将有限元数值分析与响应面法、Monte-carlo 法相结合,其主要思路是首先根据圆弧端齿的几何尺寸,包括结构的内径 D 、过渡圆弧半径 R 、齿顶高 H_t 、齿根高 H_r 和山形底高 H_g 等,建立有限元模型,通过有限次的有限元数值分析获得拟合响应面所需的输入输出变量的样本点数据,然后在利用多项式响应面法中带交叉项的二次多项式对输入输出变量样本点数据进行拟合回归分析,从而构建输入输出变量间的近似解析表达式。当符合误差要求时,代替有限元模型,再利用 Monte-carlo 法对近似解析表达式进行抽样,分析抽样结果,获得输出变量的统计特性,得到最大等效应力的分布形式。可靠性评估方法技术路线如图 5 所示。

2.2 确定最大等效应力的分布形式

1) 随机变量

将 ANSYS Workbench 中静力学分析模块 (static structural) 与可靠性分析模块 (six sigma

analysis) 相连接,从而将静力学分析的结果传递
给可靠性分析模块。进一步考虑圆弧端齿结构所
受的最大应力与变形受到材料属性、工况状态等
参数随机性的影响,所以选取端齿内径、齿根高和
材料的弹性模量、泊松比以及静载荷轴向预紧力
为随机输入变量,选取离心叶轮与燃气涡轮端齿
的最大等效应力作为输出变量。将变量考虑为服
从正态分布规律的随机变量,各变量的分布形式,
如表 2 所示。

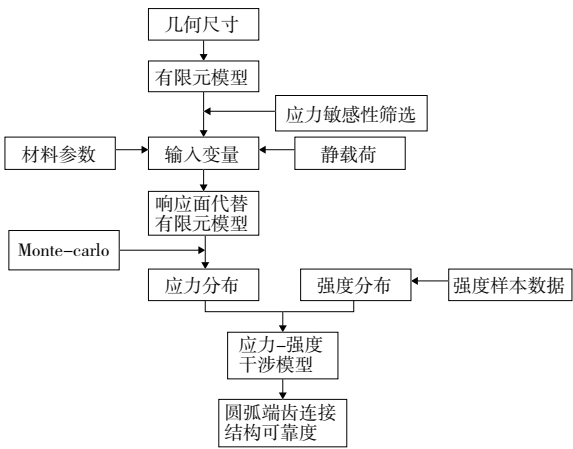


图 5 可靠性评估方法技术路线图

表 2 输入变量及其分布

参数	分布类型	均值	变异系数	标准差
弹性模量 E_1/GPa	正态分布	104	0.02	2.08
弹性模量 E_2/GPa	正态分布	197	0.02	3.94
泊松比 μ_1	正态分布	0.33	0.01	0.003 3
泊松比 μ_2	正态分布	0.29	0.01	0.002 9
端齿内径 D/mm	正态分布	39	0.001	0.039
齿根高 H_f/mm	正态分布	2.07	0.01	0.020 7
预紧力 F/kN	正态分布	57.5	0.02	1.15

2) 产生随机样本

将各随机变量参数化之后输入各随机变量的
分布,在 Ansys Workbench 的设计实验 design of
experiments (SSA) 窗格中设置各个参数的均值
(mean) 和标准差 (standard deviation),对于每一
个服从正态分布的输入变量能产生大量的随机样
本数据。为了得到拟合响应面所需的输入变量与
输出变量试验数据则需要采用中心复合设计法
(CCD 法) 进行实验设计。实验设计需要确定每
个输入变量采样点的数量和位置。实验设计的采
样点如图 6 所示。对 79 组输入变量样本组合数
据进行 79 次有限元循环仿真分析,循环仿真完
成后得到输出参数最大等效应力的样本点数据。

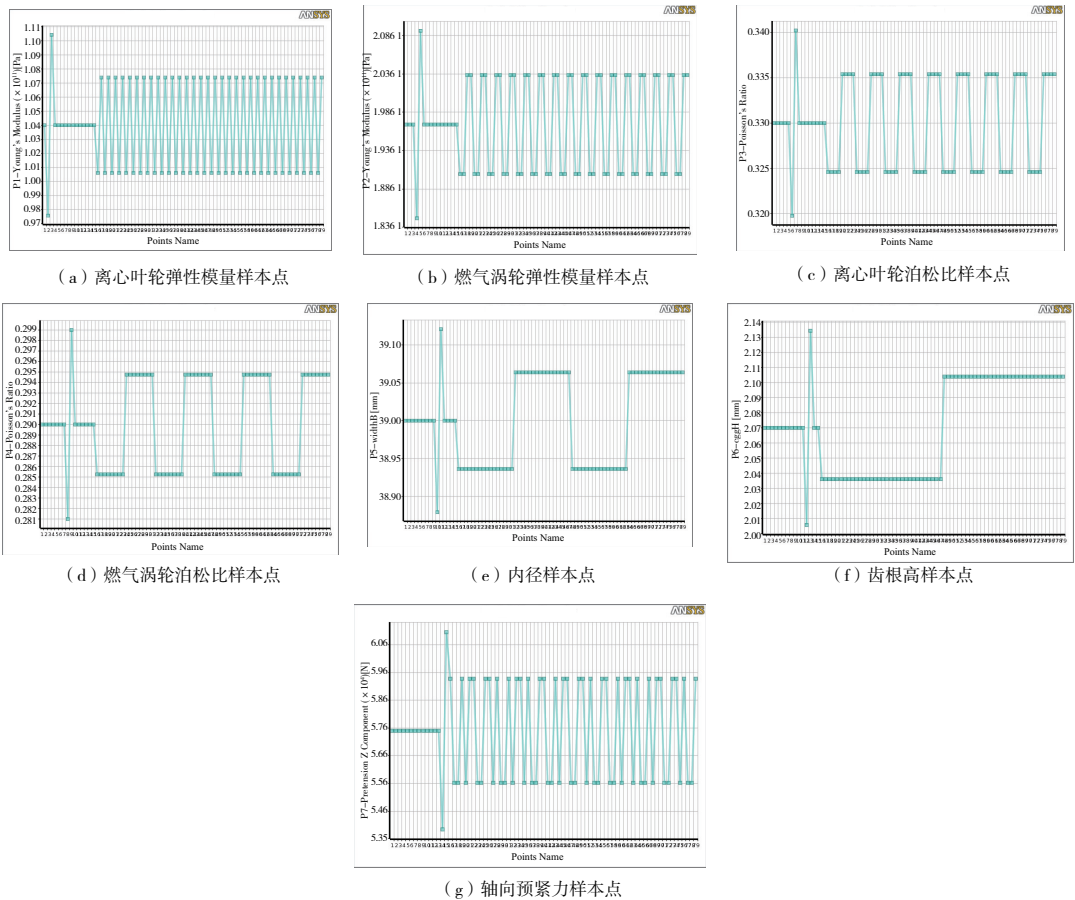


图 6 样本点分布

3) 响应面回归分析

工程中一般采用二阶多项式响应面模型,其数学表达式如下:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: n 为输入变量的维数; a_0 、 a_i 、 a_{ij} 为多项式系数,其数值根据已知设计点信息采用最小二乘法来确定。选择交叉项的二次响应面生成拟合表达式,最大等效应力 $\sigma_{\max}$ 记为 $Y(Y_1, Y_2)$, 则

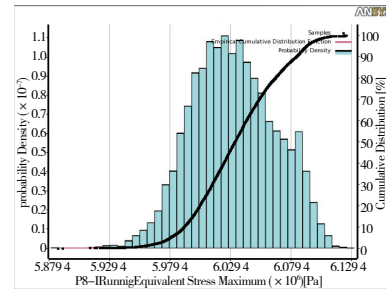
$$\begin{aligned} Y = & a_0 + a_1 E_1 + a_2 E_2 + a_3 \mu_1 + a_4 \mu_2 + a_5 D + a_6 H_r + \\ & a_7 F + a_8 E_1^2 + a_9 E_2^2 + a_{10} \mu_1^2 + a_{11} \mu_2^2 + a_{12} D^2 + a_{13} H_r^2 + a_{14} F^2 + \\ & a_{15} E_1 E_2 + a_{16} E_1 \mu_1 + a_{17} E_1 \mu_2 + a_{18} E_1 D + a_{19} E_1 H_r + \\ & a_{20} E_1 F + a_{21} E_2 \mu_1 + a_{22} E_2 \mu_2 + a_{23} E_2 D + a_{24} E_2 H_r + \\ & a_{25} E_2 F + a_{26} \mu_1 \mu_2 + a_{27} \mu_1 D + a_{28} \mu_1 H_r + a_{29} \mu_1 F + a_{30} \mu_2 D + \\ & a_{31} \mu_2 H_r + a_{32} \mu_2 F + a_{33} D H_r + a_{34} D F + a_{35} H_r F \end{aligned} \quad (2)$$

设 $X_1 = E_1, X_2 = E_2, X_3 = \mu_1, X_4 = \mu_2, X_5 = D, X_6 = H_r, X_7 = F, X_8 = E_1^2, X_9 = E_2^2, X_{10} = \mu_1^2, X_{11} = \mu_2^2, X_{12} = D^2, X_{13} = H_r^2, X_{14} = F^2, X_{15} = E_1 E_2, X_{16} = E_1 \mu_1, X_{17} = E_1 \mu_2, X_{18} = E_1 D, X_{19} = E_1 H_r, X_{20} = E_1 F, X_{21} = E_2 \mu_1, X_{22} = E_2 \mu_2, X_{23} = E_2 D, X_{24} = E_2 H_r, X_{25} = E_2 F, X_{26} = \mu_1 \mu_2, X_{27} = \mu_1 D, X_{28} = \mu_1 H_r, X_{29} = \mu_1 F, X_{30} = \mu_2 D, X_{31} = \mu_2 H_r, X_{32} = \mu_2 F, X_{33} = D H_r, X_{34} = D F, X_{35} = H_r F$ 。

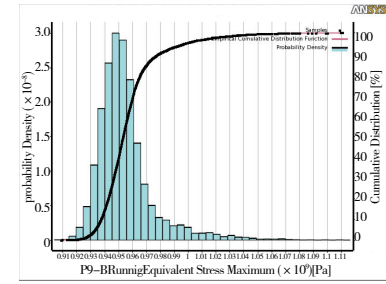
响应面可以从 Ansys Workbench 的 SSA 中直接获得,也可通过 Matlab 等二阶多项式拟合获得,但重要的是需要比较两者的拟合精度,即决定系数 R^2 的大小。SSA 获得的两个端齿响应面决定系数 R^2 分别为 1.000 00 和 0.984 56。

通过线性回归计算分析,设置信水平为 0.05,得到响应面模型。 R^2 用于衡量模型的拟合程度,二者越接近于 1,说明拟合效果越好。通常要求二者均在 0.6 以上。对于 $Y_1, R^2 = 0.79$, 对于 $Y_2, R^2 = 0.53$ 。比较 SSA 获得的两个端齿响应面决定系数,选取 SSA 拟合的响应面模型,该模型具有较好的拟合度。对于燃气涡轮端齿的最大等效应力分布,利用 Monte-carlo 法对应力预测模型中的各随机变量进行抽样,通过响应面获取最大等效应力数

据,两者最大等效应力数据的直方图如图 7 所示。



(a) 离心叶轮



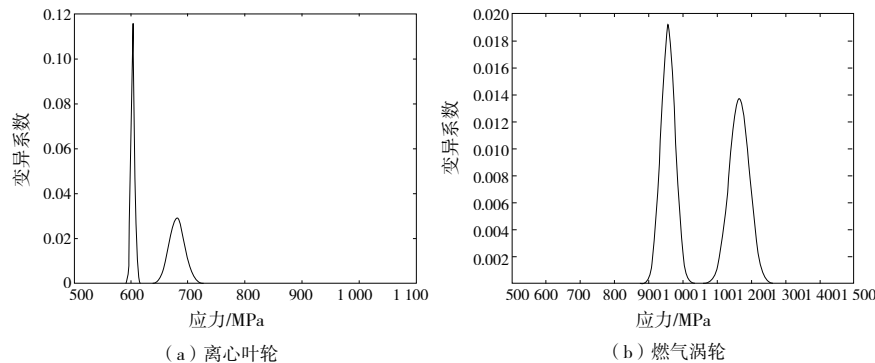
(b) 燃气涡轮

图 7 最大等效应力分布直方图

可以看出,最大等效应力的分布呈正态分布,因此假设圆弧端齿结构最大等效应力服从正态分布,通过数据拟合得到应力的分布函数。 $Y_1 \sim N(603.48 \sim 3.44^2)$, $Y_2 \sim N(957.3 \sim 20.82^2)$ 。

2.3 应力-强度干涉模型

在此分析中,通过对 TC11 和 GH4720Li 强度数据进行统计分析,400 °C 离心叶轮强度服从均值为 681 MPa,变异系数为 0.02,即标准差为 13.62 的正态分布;燃气涡轮强度服从均值为 1 165 MPa,变异系数为 0.025,即标准差为 29.125 的正态分布,与服从正态分布的最大等效应力构成应力-强度干涉模型,形成干涉区,如图 8 所示,其中黄色曲线为最大等效应力正态分布,蓝色曲线为强度正态分布,黑色阴影为干涉区域。由于干涉区域非常小,所以干涉区几乎不可见,说明结构可靠度很高(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。



(a) 离心叶轮

(b) 燃气涡轮

图 8 应力-强度干涉模型

2.4 可靠度分析

对于应力值是某一常数 S_1 , 而强度服从 $\sigma \sim N(681 \sim 13.62^2)$ 正态分布时离心叶轮圆弧端齿的可靠度可以表示为

$$R_1(S_1) = 1 - F_1(S_1) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 13.62} \int_{-\infty}^{S_1} e^{-\frac{(t-681)^2}{2 \times 13.62^2}} dt \quad (3)$$

对于应力值是某一常数 S_2 , 强度服从 $\sigma \sim N(1165 \sim 29.125^2)$ 正态分布时燃气涡轮圆弧端齿的可靠度可以表示为

$$R_2(S_2) = 1 - F_2(S_2) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 29.125} \int_{-\infty}^{S_2} e^{-\frac{(t-1165)^2}{2 \times 29.125^2}} dt \quad (4)$$

而彼此连接的圆弧端齿结构属于可靠性模型中的串联模型,故整体可靠度为

$$R = R_1(S_1) R_2(S_2) \quad (5)$$

分析图 8 中的应力-强度分布干涉模型,并放大干涉部分,如图 9 所示。

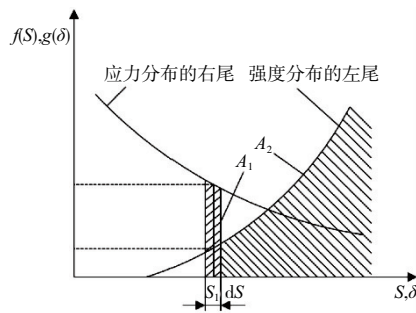


图 9 干涉放大部分

由图 9 可知,应力值 S_1 存在于区间 $[S_1 - dS/2, S_1 + dS/2]$ 内的概率等于面积 A_1 , 即

$$P\left(S_1 - \frac{dS}{2} \leq S_1 \leq S_1 + \frac{dS}{2}\right) = f(S_1) dS = A_1 \quad (6)$$

应力值 S_1 小于强度值 σ 的概率等于阴影区域 A_2 , 并表示为

$$P(\sigma > S) = \int_{S_1}^{\infty} g(\sigma) d\sigma = A_2 \quad (7)$$

上述为两个独立事件分别出现的概率,如果这两个事件同时出现,那么可靠度在应力值为 S_1 时为

$$dR = A_1 A_2 = f(S_1) dS \int_{S_1}^{\infty} g(\sigma) d\sigma \quad (8)$$

结构的可靠度是强度值 σ 大于所有可能的应力值 S 的整个概率,即

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} dR = \int_{-\infty}^{+\infty} f(S) \left[\int_{S_1}^{\infty} g(\sigma) d\sigma \right] dS \quad (9)$$

当圆弧端齿结构强度与最大等效应力服从上述正态分布时,代入应力和强度的分布函数,通过数值积分计算可得结构安全的可靠度为 $R = 99.999\ 988\%$ 。

$$R = R_1 R_2 = 99.999\ 990\% \times 99.999\ 998\% = 99.999\ 988\% \quad (10)$$

3 结语

1) 对圆弧端齿连接结构仅考虑轴向预紧力和重力的静止装配状态及考虑具体工作载荷的工作状态的应力分布情况进行了有限元计算,并与 Ansys APDL 经典界面中的计算结果对比,两者近乎相同,验证了结果的正确性。

2) 确定了输入变量的分布形式,通过实验设计,使用中心复合设计法产生了拟合响应面所需要的 79 组输入变量的组合,代入参数化的有限元模型,循环仿真后得到输出变量,即离心叶轮和燃气涡轮圆弧端齿连接结构的最大等效应力;使用带有交叉项的二阶多项式对响应面进行拟合,在保证精度的前提下,用拟合的响应面代替了有限元模型。

3) 使用蒙特卡罗法与响应面结合,得到了圆弧端齿连接结构最大等效应力的分布形式,即正态分布;对材料 TC11 和 GH4720Li 的强度数据进行统计分析,得到了材料强度的具体分布,并与圆弧端齿的最大等效应力的分布形成了应力-强度干涉模型,基于模型对结构可靠性进行了合理评估。

参考文献:

- [1] JIANG X J, ZHU Y S, HONG J, et al. Investigation into the loosening mechanism of bolt in curvic coupling subjected to transverse loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32: 360-373.
- [2] YUAN S X, ZHANG Y Y, ZHANG Y C, et al. Stress distribution and contact status analysis of a bolted rotor with curvic couplings [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(9): 1815-1829.
- [3] 崔海涛, 李爱民, 温卫东. 圆弧端齿结构微动疲劳试验加载装置的设计及实现 [J]. 中国机械工程, 2016, 27(22): 3020-3024, 3031.
- [4] 陈光. EJ200 发动机高压压气机结构设计改进 [J]. 航空发动机, 2004, 30(2): 1-4, 41.
- [5] 陶峰, 张险峰, 尹明德, 等. 微动损伤的研究综述 [J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(5): 545-551.
- [6] RICHARDSON I J, HYDE T H, BECKER A A, et al. A validation of the three-dimensional finite element contact

- method for use with Curvic couplings[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,2002,216(2):63-75.
- [7] RICHARDSON I J, HYDE T M, BECKER A A, et al. A three-dimensional finite element investigation of the bolt stresses in an aero-engine Curvic coupling under a blade release condition[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,2000,214(4):231-245.
- [8] YU Y, LEE B, CHO Y. Analysis of contact and bending stiffness for Curvic couplings considering contact angle and surface roughness[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering,2019,233(6):1257-1267.
- [9] 黄发.圆弧端齿结构设计方法研究[D].南京:南京航

空航天大学,2013.

- [10] 李爱民,崔海涛,温卫东,等.航空圆弧端齿的齿根双圆弧结构设计及优化[J].推进技术,2016,37(1):146-155.
- [11] 李爱民.圆弧端齿结构设计方法与微动疲劳寿命预测模型研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [12] 罗凯琳.考虑微动损伤影响的圆弧端齿优化设计方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [13] 沈祥,曹鹏.涡轴发动机端齿连接结构接触状态分析[J].航空发动机,2017,43(4):35-40.
- [14] 徐鲁兵,廖明夫,吕延军.某动力涡轮转子连接圆弧端齿的优化设计[J].机械科学与技术,2023,42(6):969-977.

收稿日期:2022-05-26

(上接第130页)

定性,以确保机器人在越过障碍物时不会发生形变或失稳;底盘应该具有足够的灵活性和适应性,以适应不同高度和形状的障碍物。

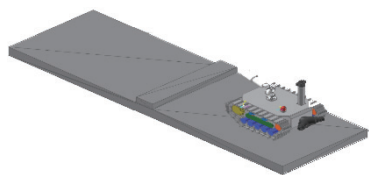


图7 消防机器人越障仿真模型

从图8可以分析出,2s以后履带底盘整体跃上台阶垂直面,此时力矩达到700Nm;在3s左右履带底盘整体翻越上障碍物,消防机器人成功翻越最高障碍物高度300mm;4s时履带底盘整体已经着陆。根据仿真结果来看,该消防机器人最大越障高度超过240mm,因此能够满足越障设计指标。

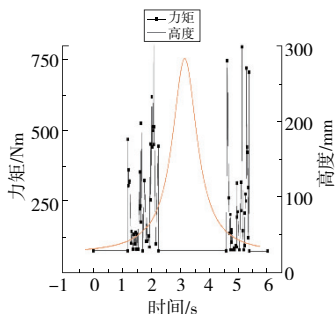


图8 消防机器人越障位移图

3 结语

本文围绕履带中所包含的四轮一带、驱动装

置等组成部分进行分析,确定履带各结构尺寸及相关参数,并对其所涉及的理论依据及计算公式进行了论述,从而为消防机器人三维建模及仿真条件奠定了理论基础。针对消防机器人实际工作环境中的恶劣情况,车体采用了独立悬挂和装甲车前脸设计,提高了整体的悬挂性能和稳定性,解决了消防机器人越障和涉水阻力的问题。在底盘上加装可升降云台,方便对不同高度中有害气体的监测,提高消防官兵进入火场的安全性。

本文通过确定消防机器人的主要技术指标,结合消防履带车辆常见路况,基于仿真软件Recurdyn在虚拟环境下设置路面、坡面和障碍物来对设计参数进行分析和验证,对消防机器人行走装置的地形通过能力进行了评价,证明了设计的合理性,对下一步工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] 姜涛,郭安福,李进,等.轮足混合式消防机器人的结构设计与分析[J].制造业自动化,2021,43(9):151-156.
- [2] 张响亮,张华,熊根,等.基于RecurDyn的履带式消防机器人设计与爬梯运动学仿真[J].机械传动,2020,44(6):89-95.
- [3] 刘海燕.履带行走机构的计算与选型设计[J].采矿技术,2013,13(4):90-93.
- [4] 刘满禄,王亚翔,张俊俊,等.履带机器人越障能力优化[J].制造业自动化,2018,40(5):24-27,76.
- [5] 刘好,谢锐,张拓.小型山地履带底盘设计与仿真分析[J].机械设计,2020,37(6):115-122.
- [6] 陈安成,穆希辉,杜峰坡,等.基于RecurDyn的小型履带车的建模与仿真[J].机械设计,2013,30(10):36-39.

收稿日期:2023-05-19