

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514542

高温应变计结构优化及疲劳寿命可靠性分析*

张凤玲, 赵亚芝, 李仁杰, 张旭, 曲春雨

(沈阳航空航天大学航空发动机学院 沈阳 110136)

摘要: 高温应变计是测量航空发动机热端部件应变的精密传感器, 其敏感栅结构直接影响测量精度与疲劳寿命。为降低高温应变计的测量误差并提高其疲劳寿命, 提出了一种结构参数优化方法及疲劳寿命可靠性评估方法。首先, 将敏感栅的长度、间距及弯数作为优化变量, 以测量误差与疲劳寿命为优化目标, 建立了多目标优化模型, 并采用多目标灰狼优化算法 (MOGWO) 进行迭代寻优求解。基于优化后的结构参数组合制备了高温应变计试样, 并在 1 000°C 条件下进行了振动疲劳试验, 获取了有效的疲劳寿命数据, 验证了优化方法的有效性。针对试验数据因材料性能分散性及制造误差所导致的小样本、分散性及右偏态问题, 提出了一套适用于高温应变计的小样本疲劳寿命可靠性分析方法。为了对比正态分布、对数正态分布与三参数威布尔分布的拟合程度, 结合 K-S 检验法与回归检验法, 确定三参数威布尔分布对试验数据的拟合程度最高。然后, 采用 Bootstrap 法估计了三参数威布尔分布的参数置信区间, 最终建立了可靠性与疲劳寿命的量化关系。结果表明, 优化后的敏感栅结构测量误差降低了 5.3%, 疲劳寿命提高了 22.4%。研究结果为高温环境下应变计的设计与寿命可靠性评估提供了完整的理论与实验依据。

关键词: 高温应变计; 多目标灰狼优化算法; 疲劳寿命; 可靠性; 三参数威布尔分布

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Structural optimization and fatigue life reliability analysis of high-temperature strain gauges

Zhang Fengling, Zhao Yazhi, Li Renjie, Zhang Xu, Qu Chunyu

(School of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: High temperature strain gauges are precision sensors for measuring the strain of hot end components in aeroengines, and the structure of their sensitive grids directly affects the measurement accuracy and fatigue life. To reduce the measurement error of high temperature strain gauges and improve their fatigue life, a structural parameter optimization method and a fatigue life reliability assessment method are proposed. Firstly, the length, spacing and number of bends of the sensitive grid are taken as optimization variables, and the measurement error and fatigue life are taken as optimization objectives to establish a multi-objective optimization model. The multi-objective grey wolf optimization algorithm (MOGWO) is used for iterative optimization and solution. Based on the optimized structural parameter combination, high temperature strain gauge samples were prepared and vibration fatigue tests were conducted at 1 000°C to obtain effective fatigue life data, verifying the effectiveness of the optimization method. In view of the small sample size, dispersion and right skewed distribution of the test data caused by the dispersion of material properties and manufacturing errors, a set of small sample fatigue life reliability analysis methods suitable for high temperature strain gauges is proposed. To compare the fitting performance of normal distribution, lognormal distribution and three-parameter Weibull distribution, the K-S test method and regression test method are combined to determine that the three-parameter Weibull distribution has the highest fitting degree for the test data. Then, the Bootstrap method is used to estimate the confidence intervals of the parameters of the three-parameter Weibull distribution, and the quantitative relationship between reliability and fatigue life is finally established. The results show that the measurement error of the optimized sensitive grid structure is reduced by 5.3%, and the fatigue life is increased by 22.4%. The research results provide a comprehensive theoretical method and experimental basis for the design and life reliability assessment of strain

收稿日期: 2025-09-29 Received Date: 2025-09-29

* 基金项目: 辽宁省科技厅基金 (2025JH2/101800122) 项目资助

gauges in high temperature environments.

Keywords: high temperature strain gauge; multi-objective grey wolf optimization algorithm; fatigue life; reliability; three-parameter weibull distribution

0 引 言

高温应变测量技术是研究航空发动机热端部件力学行为和使用寿命时非常重要的途径,动态测试中的高温应变计在经过长时间的工作后,测量误差往往会逐渐增大导致测量结果不准确,严重时甚至出现完全断裂的现象,使测试过程无法进行,这是由于应变计产生疲劳破坏从而导致了测量失效。

目前,很多学者从试验测试角度出发,研究了应变计疲劳破坏的主要原因以及各种相关因素对疲劳性能的影响。Oi^[1]对动态测试中应变计的失效原因进行了分析,发现引起应变计产生疲劳破坏的主要原因是循环次数,振动频率对寿命的影响相对很小;Rohrbach等^[2]针对应变计的疲劳断裂问题展开了研究,研究结果表明,应变计疲劳失效的主要表现形式是灵敏度变化及零点漂移;王瑞金^[3]通过推导,建立了应变计所承受的载荷、疲劳寿命与灵敏度变化量之间的关系式。依据此式,在已知载荷大小及允许的灵敏度变化情况下,可对应变计的疲劳寿命进行预测。同时,还提出将1%的灵敏度变化率作为应变计疲劳失效的判定标准,并经过了试验验证。张建伟等^[4]研究了应变计在试验中不同粘贴位置下的疲劳寿命,进而确定了使用寿命较长的粘贴位置,不仅可保障试验的顺利开展,还能提升试验效率。宋瑞如等^[5]研究了应变计敏感栅的结构参数对其振动特性及疲劳寿命的影响。研究发现,敏感栅的长度、间距及弯数减小,会使结构的谐响应振幅持续增大;各结构参数中,栅丝直径的影响则最为显著,而长度对寿命的影响程度最小。

为提高应变计的性能,很多学者对应变计的结构参数进行了研究。许艺青等^[6]研究了电阻应变片敏感栅结构参数对传感器应变传递误差的影响,并正交试验法设计了试验方案,得到了应变传递误差最小的结构参数组合。艾延廷等^[7]通过有限元分析了各结构参数变化对应变计测量误差以及疲劳寿命的影响规律,为提高应变计精度及寿命,利用遗传算法对高温应变计的各结构参数进行合理搭配,得到了优化后的结构参数组合。张凤玲等^[8]研究了不同参数组合的敏感栅结构对应变计性能的影响,并基于响应面法对高温应变计敏感栅结构参数进行了优化设计,优化效果显著。

在现有的各种优化算法中,多目标灰狼优化算法(multi-objective grey wolf optimization algorithm, MOGWO)

应用非常广泛。多目标灰狼优化算法在灰狼算法(grey wolf optimization algorithm, GWO)常规搜索模式的基础上,增加了随机搜索模式,存储与领导选择机制,由经典的单目标 GWO 扩展到多目标类型。赵彬荐等^[9]针对高强度钢辊弯成形质量问题,以偏差角和纵弓高度为优化目标,基于有限元仿真与 Box-Behnken 响应面法建模,采用改进的 MOGWO 算法优化工艺参数,有效提升了成形质量。周晓燕等^[10]将多目标灰狼算法与解析法结合,以悬浮力脉动和转矩为目标,优化无轴承永磁同步电机结构参数,显著改善了电机性能,验证了该算法在多目标优化中的有效性。刘颖明等^[11]以 5 MW Barge 型漂浮式风电机组为对象,基于含调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)的动力学模型,采用 MOGWO 优化 TMD 刚度与阻尼参数,兼顾塔顶和塔基控制目标,减振效果优于灰狼算法、遗传算法。潘楚光等^[12]基于螺旋理论构建拟人机械手运动学模型,以可操作性和端部刚度为优化目标,通过 MOGWO 求解多目标模型实现对连杆长度的优化。黄诚等^[13]以质子交换膜燃料电池系统为对象,采用 MOGWO 优化气体压力、温度及湿度等多运行参数,兼顾输出功率和系统效率双重目标,优化效果优于传统 GWO 算法,显著提升系统综合性能。

此外,由于材料性能分散性、制造误差、载荷波动等因素,高温应变计的疲劳寿命往往呈现明显的小样本、高分散性、右偏态等特征,基于传统的正态分布或对数正态分布在拟合此类数据时常表现出局限性。三参数威布尔分布因其形状参数灵活,能更好地描述右偏数据,适用于小样本等优势,近年来广泛应用于疲劳寿命可靠性分析中。全昌彪等^[14]通过 U 型缺口试样模拟航空发动机离心叶轮的应力集中效应,采用三参数威布尔分布拟合疲劳寿命数据,并结合一阶可靠性理论进行修正。结果表明,修正后的模型显著提高了预测精度,大多数数据点落在 ± 1.5 倍分散带内,且 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验验证了威布尔分布的良好拟合性。胡述伟等^[15]以两种热处理状态的 Zr-4 铝合金为对象,采用概率权重矩法估计三参数威布尔分布参数,构建 R-S-N 曲线。与传统 Basquin 模型相比,威布尔分布模型在决定系数和显著性上均表现更优,尤其在高可靠度区间预测更为准确。蔡文斌等^[16]对比了基于正态分布的 Basquin 模型与三参数威布尔分布模型在 HL 和 HY 型抽油杆疲劳寿命预测中的表现。结果表明,威布尔分布模型的平均预测误差远低于 Basquin 模型, K-S 检验也显示威布尔分布拟合程度更高。王珏等^[17]通过 Kriging 代理模型和拉丁超立方抽

样,分析了音叉式整体叶盘在随机转速、密度、弹性模量下的低周疲劳寿命分布。结果表明,其寿命分布呈右偏态,近似威布尔分布,进一步通过累积失效概率曲线得到了高可靠度下的疲劳寿命。上述研究表明,三参数威布尔分布在多种材料和结构的疲劳寿命可靠性分析中均表现出优越的适应性和预测精度,尤其适用于小样本、高可靠性要求的工程场景。

综上,首先建立了高温应变计的有限元分析模型,以计算测量误差与疲劳寿命。随后,采用 MOGWO 对结构参数进行优化,以获得 Pareto 最优解集。然后,根据优化结果制备高温应变计并进行高温振动疲劳试验,获取疲劳寿命数据。最后,针对试验数据的小样本、高分散性、右偏态特性,采用三参数威布尔分布进行可靠性分析,显著提升小样本条件下寿命预测的准确性与可靠性。为高温应变计的优化设计与可靠性评估提供了一套完整的方法支持。

1 有限元分析

丝式高温应变计一般采用喷涂的方法安装于试件上。敏感栅的结构直接影响到应变计的测量误差与疲劳寿命,在动态测试中,应变计的疲劳破坏主要发生在敏感栅和引线部分。在考虑到敏感栅结构加工的难度后,选择栅丝长度、栅丝间距和栅丝弯数作为优化参数,以测量误差与疲劳寿命作为优化目标。

敏感栅在高温环境下会因受热膨胀而产生热应变,这会导致热输出误差。在有限元分析中,通过计算“仅有温度场”与“温度场和机械载荷”耦合作用下敏感栅的平均应变,并将二者相减,以分离热应变,得到机械载荷引起的应变。

利用 ANSYS Workbench 中的 Steady-State Thermal 模块和 Static Structural 模块进行热力耦合计算。为评估高温应变计的测量误差,需建立其工作状态下的有限元模型。航空发动机热端部件的实际应变场多为复杂多轴应力状态,为更真实地模拟应变计在此类环境下的响应,本研究采用简支梁模型。

测量误差模型中的高温应变计位于简支梁中心位置,在距离梁中心对称两端 100 mm 的位置施加对称且垂直向下的力载荷 F ,大小设为 4 kN。同时,对该模型施加高温(1 000℃)边界条件,从而进行温度场与应力场共同作用下的测量误差分析。测量误差模型如图 1 所示。

得到的未施加温度场和施加温度场后的测量误差模型应变云图分别如图 2 和 3 所示,由图 2 和 3 可知在施加温度场前后简支梁中心位置的应变值。

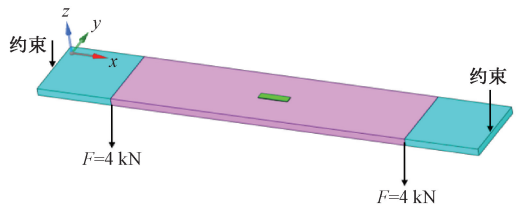


图 1 测量误差模型示意图

Fig. 1 Diagram of measurement error model

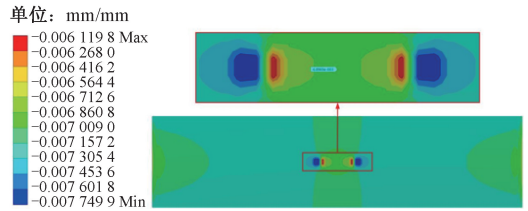


图 2 未施加温度场测量误差模型应变云图

Fig. 2 Strain cloud map of measurement error model without temperature field applied

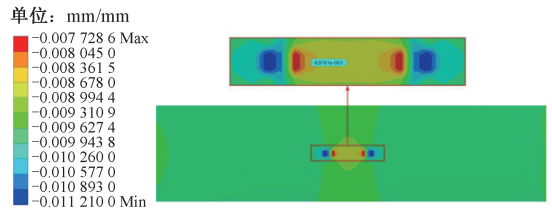


图 3 施加温度场后测量误差模型应变云图

Fig. 3 Strain cloud map of measurement error model after applying temperature field

疲劳寿命计算模型如图 4 所示,高温应变计安装在距离悬臂梁固定端一段距离位置。对模型施加加速度载荷,通过调整载荷改变敏感栅应变大小,使减去热输出影响后的净机械应变幅值约为 $500 \mu\epsilon$ 。该应变水平的选取基于航空发动机热端部件典型的动态应变范围,目的是模拟实际工况并确保疲劳失效发生于敏感栅结构的高周疲劳区。

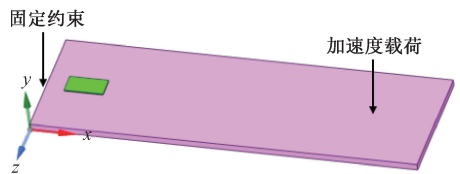


图 4 疲劳寿命模型示意图

Fig. 4 Diagram of fatigue life model

得到的敏感栅寿命云图如图 5 所示,可以看出敏感栅的疲劳破坏危险点发生在靠近弯环的栅丝直线段位置。

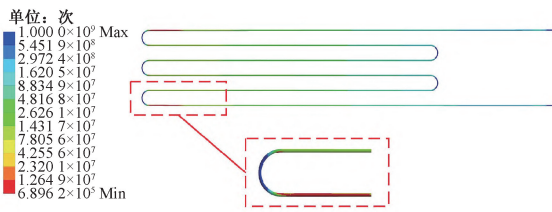


图 5 敏感栅寿命云图

Fig. 5 Lifetime cloud map of the sensitive grid

2 基于 MOGWO 的结构优化

为实现降低测量误差和提高疲劳寿命两个目标,建立了以二者为优化目标的多目标优化模型,并采用 MOGWO 算法对所建立的模型进行迭代寻优。多目标优化问题的求解,就是在可行解里找出那些不被其他解支配的解(即非支配解),所有非支配解组成的集合被叫做 Pareto 前沿。

2.1 MOGWO 算法

MOGWO 算法通过引入外部存档和基于拥挤距离的领导选择机制,能够高效逼近问题的 Pareto 最优解集,并保证解集的分布性,适用于解决此类非线性的多目标优化问题^[18]。

存档机制负责动态存储和更新迭代过程中发现的所有非支配解(Pareto 最优解),以此逼近真实 Pareto 前沿。该存档设有容量上限,并通过基于拥挤距离或网格密度的策略维护解的分布性与多样性,避免收敛于局部最优。

领导选择机制则用于在存档中为灰狼个体选择领导者(α, β, δ 狼)。该机制优先从解空间中最稀疏的区域选择领导者,通常采用轮盘赌法,以拥挤距离或网格密度为选择概率,促进算法在探索与开发之间的平衡,确保种群向全局 Pareto 前沿均匀收敛。

MOGWO 优化求解过程简述为:1),初始化灰狼种群,并基于第 1 节建立的测量误差与疲劳寿命有限元模型计算每个个体的目标函数值;2)根据 Pareto 支配关系更新外部存档,并依据存档中解的拥挤距离选择 α, β, δ 领导狼;3)狼群根据领导狼的位置更新自身位置,进行新一代的搜索,此过程迭代进行,直至达到最大迭代次数,最终输出 Pareto 最优解集。

2.2 优化变量

将应变计敏感栅的 3 个结构参数,即栅丝长度、栅丝间距和栅丝弯数作为待优化参数,建立了最小测量误差和最大疲劳寿命的多目标优化模型。首先设置设计变量的取值范围及间隔,如表 1 所示。

采用 BBD (Box-Behnken design) 实验设计为 3 个优化变量设计了仿真方案。随后,通过有限元仿真对每组

表 1 优化变量取值范围

Table 1 Optimize the range of variable values

优化变量	取值范围	取值间隔
栅丝弯数 X_1	3~7	2
栅丝长度 X_2/mm	5~11	1
栅丝间距 X_3/mm	0.30~0.60	0.05

方案进行热-力耦合计算,得到对应的测量误差与疲劳寿命。最后,利用 Design-Expert 软件对仿真结果进行二阶多项式回归分析,拟合出关于测量误差 \hat{y}_1 和疲劳寿命 \hat{y}_2 的近似拟合数学模型如式(1)、(2)所示。

$$\hat{y}_1 = -0.108 8X_1^2 + 0.766 3X_2^2 - 0.008 8X_3^2 - 0.137 5X_1X_2 + 0.042 5X_1X_3 - 0.437 5X_2X_3 + 0.225X_1 - 0.58X_2 + 1.2X_3 + 16.59 \quad (1)$$

$$\hat{y}_2 = -0.026 6X_1^2 + 1.48X_2^2 - 0.319 2X_3^2 - 0.086 8X_1X_2 - 0.267 6X_1X_3 - 0.124 0X_2X_3 - 0.409 5X_1 + 0.357 4X_2 + 0.251 5X_3 + 7.06 \quad (2)$$

2.3 优化结果分析

利用 MATLAB 软件,采用 MOGWO 算法对得到的测量误差 \hat{y}_1 和疲劳寿命 \hat{y}_2 数学模型进行求解。设置灰狼种群大小 $GreyWolves = 500$,最大迭代次数 $MaxIt = 500$,存档大小 $ArchiveSize = 200$,网格膨胀因子 $alpha = 0.1$,每一维网格数量为 $nGrid = 10$,选择领导压力因子 $beta = 4$,删除压力 $gamma = 2$ 。通过 MOGWO 算法得到了 Pareto 最优解集,并绘制出 Pareto 最优前沿图,即 Pareto 最优解对应的测量误差和疲劳寿命的函数值,如图 6 所示。

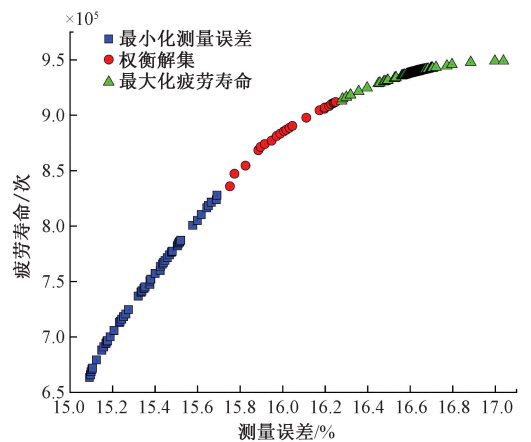


图 6 Pareto 最优前沿图

Fig. 6 Pareto optimal frontier chart

该 Pareto 最优前沿图展示了测量误差与疲劳寿命之间的关系。图 6 中方形线段区域对应的解倾向于最小化测量误差,适用于对测量精度有极高要求的场景;三角形线段区域对应的解则倾向于最大化疲劳寿命,适用于要

求长期可靠性的工况;圆形线段区域为权衡解集,同时考虑了减小测量误差和提高疲劳寿命,是寻求平衡最优解的合理区域。从该圆形权衡区域选取了最终的栅丝结构参数组合,并通过仿真计算,对比优化前后高温应变计的性能。优化前后的结构参数取值及其性能对比如表2所示。经过优化,测量误差降低了5.3%,疲劳寿命提高了22.4%。

表2 优化前后对比表

Table 2 Comparison table before and after optimization

参数	优化前	优化后
栅丝弯数	7	3
栅丝长度/mm	5	10
栅丝间距/mm	0.35	0.40
测量误差/%	16.95	16.05
疲劳寿命/次	7.7033×10^5	9.4288×10^5

3 高温应变计振动疲劳试验

根据优化后得到的最优敏感栅结构参数,进行高温应变计的制备。通过高温振动疲劳试验来验证高温应变计的疲劳寿命。

3.1 试验系统设计

为进行高温振动疲劳试验,自主设计了一套试验装置,试验系统组成如图7所示,主要包括信号发生器、功率放大器、激振台、高温炉、惠斯通电桥、信号放大器、滤波器、信号采集仪和计算机。试验时,由信号发生器产生激励信号,经功率放大器放大后驱动激振台产生机械振动。待测梁通过夹具固定于高温炉内,应变计通过外部测量导线以半桥形式接入惠斯通电桥,将机械应变转换为电信号。该信号经信号放大器放大后,通过一个低通滤波器(截止频率200 Hz)以滤除高频电磁噪声及电源干扰,确保应变信号的信噪比与稳定性。处理后的信号由信号采集仪转换为数字信号并记录,最终传输至计算机。

高温振动疲劳试验装置如图8所示,高温炉为圆筒状,炉门中心有矩形开口,被测梁的激振端经此伸出炉外,与外部激振系统连接。激振系统主要由激振台与激振杆构成,激振台固定于减振底座之上,以隔离外部振动干扰;其产生的激励力通过激振杆传递至被测梁。功率放大器就近布置,为激振台提供驱动。测量系统中,电桥及信号调理单元放置于试验台架,通过测量导线与炉内应变计及炉外的数据采集设备相连。

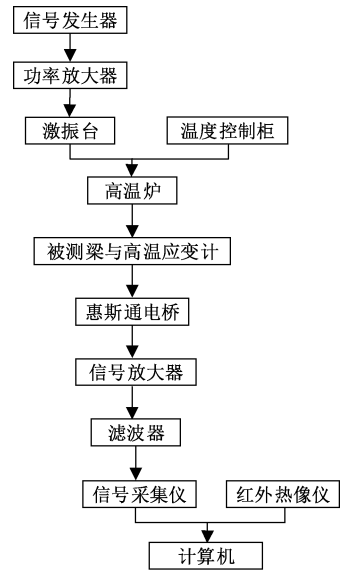


图7 试验系统组成

Fig. 7 Composition diagram of experimental system

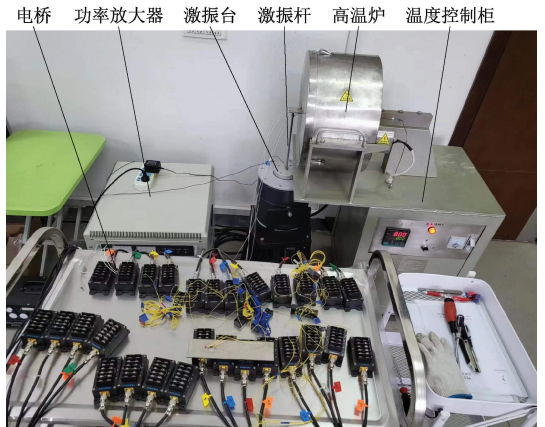


图8 高温振动疲劳试验装置

Fig. 8 Diagram of high temperature vibration fatigue test device

将高温应变计以喷涂的方式安装在被测梁上,与有限元模型位置保持一致。由于被测梁正反两面的应变水平相同,故在被测梁的正反面对应位置安装高温应变计,安装示意图如图9所示。

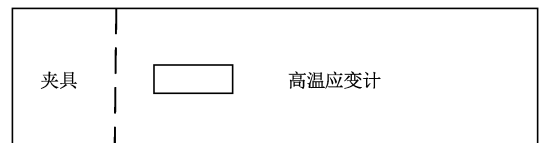


图9 高温应变计安装位置示意图

Fig. 9 Diagram of installation location of high-temperature strain gauge

温度所引起的高温应变计热输出是试验中造成误差的主要因素,所以需要进行温度补偿,本试验选择的补偿方法为工作片补偿法。

将被测梁上安装的两片应变计接入到半桥电桥中,如图 10 所示。两片应变片(R_1 、 R_4)处于相同的温度场中,将它们接入半桥电路的相邻桥臂后,温度引起的电阻变化(ΔR_i)大小相等、方向相同,在电桥的差分输出中作为共模信号被相互抵消,从而实现了有效的温度补偿,使结果不受热输出的影响,得到所需测量的机械应变。这种方法的好处是,工作应变计既参加了工作,又起到了温度补偿的作用。

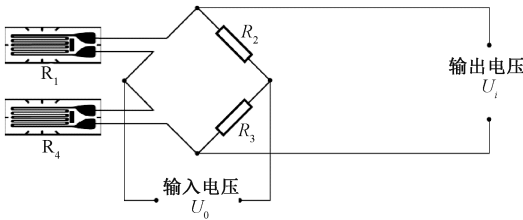


图 10 半桥电路示意图

Fig. 10 Diagram of half bridge circuit

3.2 试验流程

高温振动疲劳试验的温度通过温度控制柜实现升温 and 保温,通过红外线热成像仪辅助监控炉内被测梁的实时温度,如图 11 所示,以确保试验温度为预设的 1 000℃。

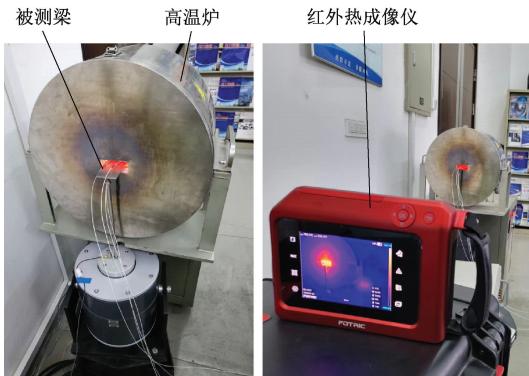


图 11 红外线热成像仪监控温度

Fig. 11 Infrared thermal imaging device monitors temperature

试验前,首先进行扫频试验,得到被测梁在 1 000℃ 下的频率响应特性,确定其一阶固有频率约为 25 Hz。

由于被测梁的一阶固有频率远低于滤波器的截止频率,因此对动态应变信号测量的影响可忽略。按被测梁的一阶固有频率进行激振,通过计算机实时监控高温炉内每片应变计的应变值。应变时域图如图 12 所示,应变幅值约为 500 $\mu\epsilon$ 。应变频域图如图 13 所示。根据应变波形图

判断高温应变计是否发生疲劳破坏,记录高温应变计发生疲劳破坏的循环次数,即高温应变计的疲劳寿命。

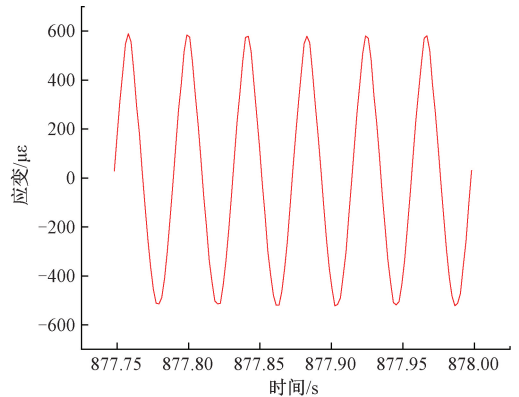


图 12 应变时域图

Fig. 12 Strain time domain diagram

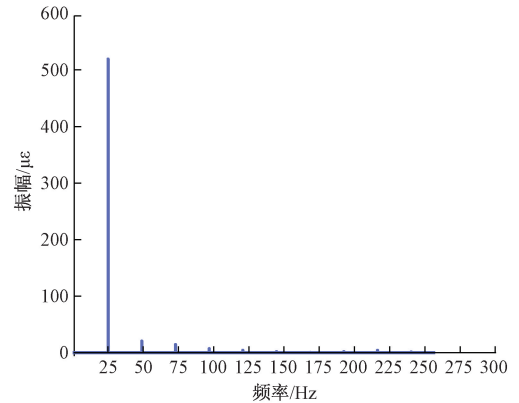


图 13 应变频域图

Fig. 13 Strain frequency domain diagram

3.3 试验结果

在 1 000℃, 500 $\mu\epsilon$ 水平下,对 15 个试件共 30 个高温应变计进行了试验,得到优化后的 30 个应变片的疲劳寿命,如图 14 所示。

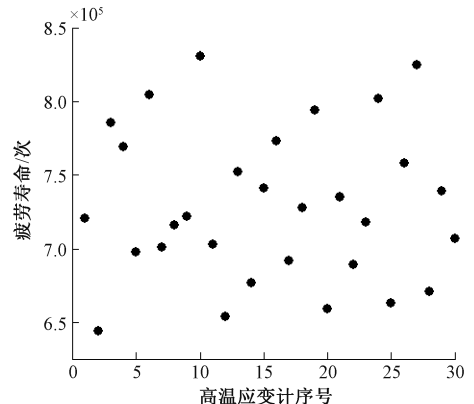


图 14 试验结果

Fig. 14 Experimental result chart

4 疲劳寿命可靠性分析

高温应变计由于各结构的材料性能存在分散性,以及喷涂过程中的制造工艺误差,获得的高温振动疲劳试验数据会出现明显波动。相同材料制成的高温应变计在同一高温试验条件下,试验数据结果也会存在分散性。因此,对优化结构参数后的应变计进行疲劳试验,并对其疲劳寿命数据进行可靠性分析,是评估其实际疲劳寿命的关键步骤。

高温应变计疲劳寿命可靠性分析的流程为:1)获取试验数据并对其进行异常值检验与剔除;2)假设数据分别服从正态分布、对数正态分布及三参数威布尔分布并进行参数估计;3)通过 K-S 检验和回归分析对比不同分布的拟合程度,确定最优分布模型;4)在此基础上,采用 Bootstrap 法确定最优分布参数的置信区间;5)依据确定的分布模型计算给定可靠度下的疲劳寿命。

4.1 异常数据检验与剔除

异常数据处理考虑了试验数据可疑值的舍取,从高温疲劳试验中获得的试验数据经过应变计制备、贴片、试验测试及数据记录等多个步骤,这些因素可能会导致记录的数据在一个范围内波动,因此必须对试验数据进行异常数据检查,找到异常数据后剔除。

根据肖维纳准则和格拉布斯准则两个准则对试验数据进行检验,找到异常数据后剔除。

肖维纳准则^[19]的置信区间为 $(-\omega\sigma, \omega\sigma)$ 。其中, σ 为标准差, ω 是肖维纳系数,为样本量 n 的函数。可通过查表获得,当 $n=30$ 时, $\omega=2.394$ 。由式(3)检验样本值 x_i 是否异常。

$$\xi = |x_i - \bar{x}| > \omega \times \sigma \quad (3)$$

式中: \bar{x} 为样本均值。

格拉布斯准则^[20]以样本符合正态分布为前提,如果某一样本值 x_d 满足式(4),则判定可疑数据 x_d 为异常数据:

$$|x_d - \bar{x}| \geq G(\alpha, n) \times S \quad (4)$$

式中: S 为标准差; $G(\alpha, n)$ 为临界值; α 为显著性水平,通常 $\alpha=0.01$ 或 0.05 。 $G(\alpha, n)$ 可以通过查表获得,当 $n=30, \alpha=0.05$ 时, $G(\alpha, n)=2.745$ 。

若可疑数据 x_d 满足式(4),则为粗大误差,应该将其剔除,否则应该保留。

经两个准则检验,均无异常数据。所以该组数据中不存在统计意义上的异常值,故保留全部30个有效样本进行后续分析。

4.2 不同分布的参数估计

为了确定样本的分布函数形式,需要进行参数估计。

假定高温应变计的疲劳试验数据分别服从3种分布形式,估计每种分布的相关参数。

正态分布需要估计均值 μ 和标准差 σ 。假设样本 x_1, x_2, \dots, x_n 来自总体 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$,则:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

对数正态分布需要估计均值 μ_L 和标准差 σ_L 。假设样本 x_1, x_2, \dots, x_n 来自总体 $X \sim N(\mu_L, \sigma_L^2)$,则:

$$\mu_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (7)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_L)^2} \quad (8)$$

三参数威布尔分布的累积分布函数表示为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (9)$$

利用工程中常用的相关系数法对三参数威布尔分布进行参数估计^[21],首先确定位置参数 γ ,然后再确定其形状参数 β 和尺度参数 α 。

对式(9)进行变化, $Y = \ln(-\ln(1 - F(X)))$, $X = \ln(x - \gamma)$, $A = \ln\alpha^\beta$,这样式(9)就转化为了线性方程,即:

$$Y = BX - A \quad (10)$$

将高温应变计疲劳试验数据从小到大排列,把 $(x_i, F(x_i))$ 换算得到 (X_i, Y_i) , X 和 Y 之间的相关系数为:

$$R(X, Y) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X} \cdot \bar{Y}\right)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2\right)}} \quad (11)$$

令相关系数 $R(X, Y)$ 最大时的 γ 值为最佳估计值。由式(9)可知 $R(X, Y) > 0$,求 $R(X, Y)$ 或 $R^2(X, Y)$ 对 γ 的一阶导数是等价的。为方便计算,选择求解 $R^2(X, Y)$ 对 γ 的一阶导数,可得到超越方程。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_x = \sum_{i=1}^n X_i \\ S_y = \sum_{i=1}^n Y_i \\ S_1 = \sum_{i=1}^n X_i^2 \\ S_2 = \sum_{i=1}^n X_i Y_i \\ (nS_1 - S_x^2) \sum_{i=1}^n \frac{S_y - nY_i}{x_i - \gamma} - \\ (nS_2 S_x S_y) \sum_{i=1}^n \frac{S_x - nX_i}{x_i - \gamma} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

采用二分法求解超越方程式(12),得到位置参数 γ 。通过最小二乘法拟合式(10)即可求出形状参数 β 和尺度参数 α 。得到 3 种分布的参数估计值如表 3 所示。

表 3 3 种分布的参数估计值

Table 3 Parameter estimates for three distributions

分布类型	参数估计
正态分布	$\mu = 7.291 0$
	$\sigma = 0.518 1$
对数正态分布	$\mu_L = 1.984 2$
	$\sigma_L = 0.070 6$
三参数威布尔分布	$\alpha = 1.264 9$
	$\beta = 2.086 9$
	$\gamma = 6.182 4$

在获得 3 种分布的参数估计值后,即确定了各分布函数的完整数学表达式。将参数估计值代入各自的概率密度函数(probability density function, PDF)和累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)公式中,即可计算出每一寿命值 x 对应的概率密度函数值 $f(x)$ 和累积分布函数值 $F(x)$ 。

为直观对比不同分布对试验数据的拟合程度,以估算参数后的分布函数为基础,绘制了理论 PDF 与 CDF 曲线,并与试验数据的经验分布进行比较,如图 15 和 16 所示。

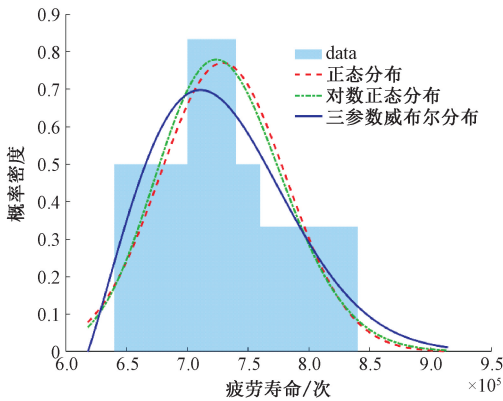


图 15 3 种分布的 PDF

Fig. 15 PDF images of three distributions

从 PDF 图可以看出:数据呈现右偏分布,峰值偏向左侧。为定量描述试验数据的偏斜程度,计算了样本的偏度系数^[22],如式(13)所示。

$$G_1 = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} \times \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (13)$$

式中: n 为样本数量; m_k 为 k 阶样本中心矩。

采用无偏估计方法得到偏度系数为 0.318 3,表明数据呈轻度右偏分布,与图 15 的 PDF 图一致。正态分布对称形状与数据实际分布明显不匹配;对数正态分布虽然能表达右偏特性,但整体拟合不如威布尔分布;威布尔分布通过其三参数(位置、尺度、形状)的灵活性,最好地描述了数据的偏态特性。

图 16 初步展示了 3 种分布对试验数据的拟合情况。初步观察可见,三参数威布尔分布与经验分布的贴合度最高,尤其在尾部区域(高寿命区间)表现更佳。

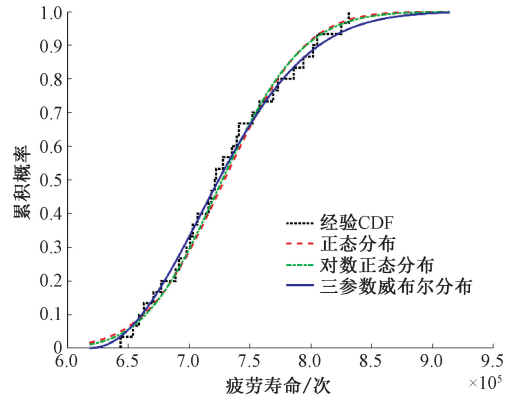


图 16 3 种分布的 CDF

Fig. 16 CDF plots of three distributions

4.3 分布拟合检验

对高温应变计振动疲劳的试验数据进行参数估计后,需要针对总体的分布类型进行假设检验,对比不同分布的拟合程度,确定试验数据符合的分布类型。

1) K-S 检验法

K-S 检验法^[23]是通过比较样本经验分布函数 $F_n(x)$ 与母体分布函数之间的差异来决定是否接受分布假设,这种检验法的特点是在每个点上都考虑 $F_n(x)$ 与母体分布函数之间的差异。

将 n 个试验数据从小到大排列,根据假设的分布计算对应的分布函数值 $F_0(x_i)$,并与经验分布函数值 $F_n(x_i)$ 进行比较。满足式(14)所示条件时接受原假设。

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} |F_n(x_i) - F_0(x_i)| \leq D_{n,\alpha} \quad (14)$$

式中: D_n 为检验统计量;临界值 $D_{n,\alpha}$ 可由 K-S 检验临界值表查得。经验分布函数 $F_n(x)$ 的计算公式为:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1 \\ \frac{i}{n}, & x_i < x \leq x_{i+1} \\ 1, & x > x_n \end{cases} \quad (15)$$

检验统计量 D_n 计算公式为:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ F_0(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F_0(x_i) \right\} \quad (16)$$

经计算后得到 P 值如表 4 所示。

表4 P值对比表

Table 4 Comparison table of P-values

分布类型	K-S 检验 P 值
正态分布	0.959 0
对数正态分布	0.991 3
三参数威布尔分布	0.999 8

P 值是在假设样本来自指定分布的条件下,得到当前检验统计量的概率。其中,三参数威布尔分布的 P 值最大,说明在 K-S 检验下,该分布与试验数据的一致性最高,拟合程度最好。因此,应该选择三参数威布尔分布作为高温应变计疲劳寿命的最优分布模型。

2) 回归检验法

回归检验法^[24-25]是对给定的 n 个试验数据 (x_i, y_i) 应用最小二乘法,拟合出一条回归直线如式(17)所示。

$$y = \hat{A} + \hat{B}x \quad (17)$$

式中: \hat{A} 为截距; \hat{B} 为回归系数。计算公式为:

$$\hat{A} = \bar{y} - \hat{B}\bar{x} \quad (18)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (19)$$

利用相关系数检验法检验 y 与 x 是否线性相关,如式(20)所示。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

若 $|\rho|$ 接近 1, 可认为 y 和 x 线性关系。为了应用回归分析检验法,需要对分布函数进行变换,使自变量与分布函数在直角坐标下呈线性关系。计算后得到 3 种分布的相关系数如表 5 所示。

表5 相关系数 ρ 对比表Table 5 Comparison table of correlation coefficient ρ

分布类型	相关系数 ρ
正态分布	0.979 0
对数正态分布	0.982 0
三参数威布尔分布	0.991 0

根据表 5 中 3 种分布的回归分析结果可知,三参数威布尔分布的相关系数 ρ 最高,明显优于对数正态分布和正态分布。这表明三参数威布尔分布与试验数据具有最佳的线性相关性,其分布回归拟合图如图 17 所示。

由图 17 可知,三参数威布尔分布的回归方程 $y = 2.2544x - 0.4841$ 显示出良好的拟合特性。因此,

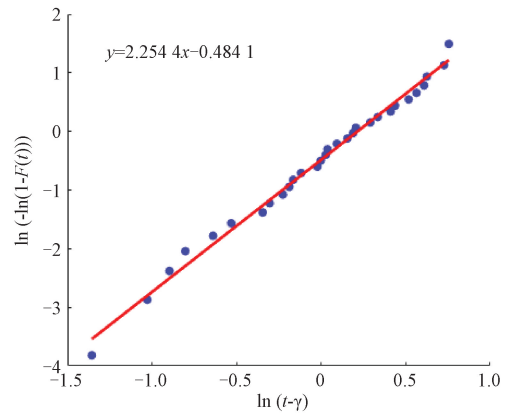


图17 三参数威布尔分布回归拟合图

Fig. 17 Regression fitting plot of three-parameter Weibull distribution

高温应变计的疲劳寿命数据更符合三参数威布尔分布,应该采用该分布进行后续的可靠性分析,以获得更精确的评估结果。

4.4 确定分布函数参数的置信限

设样本 x_1, x_2, \dots, x_n 来自同一分布母体,它们的顺序统计量表示为 $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$, 利用相应方法确定不同分布的置信限。由于三参数威布尔分布已被确定为最优分布模型,本节针对该分布进行参数置信区间的估计。

由于三参数威布尔分布置信限的精确算法实现极为复杂,本研究采用广泛使用的 Bootstrap 法来计算参数的 95% 置信区间,该方法不依赖于严格的分布假设,且被证明在大多数情况下能提供可靠的估计^[26-27]。

Bootstrap 法是一种基于重复抽样的非参数统计方法,核心用途是评估统计估计量的精度与不确定性。

具体地,对 $n=30$ 的疲劳寿命原始样本进行有放回重复抽样,生成了 $B=1000$ 个 Bootstrap 样本。基于每个 Bootstrap 样本,采用与原始样本相同的相关系数法重新估计三参数威布尔分布的位置参数 γ 、尺度参数 α 和形状参数 β , 从而得到 B 组参数估计值序列 $\{\gamma^{*1}, \alpha^{*1}, \beta^{*1}\}, \dots, \{\gamma^{*B}, \alpha^{*B}, \beta^{*B}\}$ 。

各参数 Bootstrap 估计值序列的置信区间可直接通过上述 Bootstrap 统计量序列的样本分位数构造,如式(21)所示。

$$CI_{boot} = [\tilde{\theta}^{*(\alpha/2)}, \tilde{\theta}^{*(1-\alpha/2)}] \quad (21)$$

式中: $\tilde{\theta}^{*(p)}$ 代表将 Bootstrap 统计量序列按从小到大排序后,对应“ p 分位数”估计值,当 $\alpha = 0.05$ 时, $\tilde{\theta}^{*(0.025)}$ 是 2.5% 分位数,为区间下限; $\tilde{\theta}^{*(0.975)}$ 是 97.5% 分位数,为区间上限。

计算得到三参数威布尔分布参数的置信限如表 6 所示。

表 6 三参数威布尔分布参数的置信限
Table 6 Confidence limits for parameters of three-parameter Weibull distribution

置信限	三参数威布尔分布
置信下限	$\alpha = 0.804\ 5$
	$\beta = 1.165\ 1$
	$\gamma = 5.345\ 2$
置信上限	$\alpha = 2.294\ 3$
	$\beta = 4.439\ 5$
	$\gamma = 6.497\ 4$

4.5 一定可靠度下的疲劳寿命

对于高温应变计的疲劳寿命来说,可靠度为应变计在规定的工作温度与应变条件下,达到寿命 x_i 值时未发生破坏的概率,记为 $R(x_i)$,表达式为式(22)。

$$R(x_i) = P(X > x_i) = \int_{x_i}^{\infty} f(x) dx \quad (22)$$

式中: $f(x)$ 为概率密度函数。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (23)$$

由式(22)可知,只要给出某一确定的可靠度数值,就可以根据其反函数求出对应的寿命 x_i 。

根据式(22)和(23)有:

$$R = P(X > x_i) = 1 - P(X < x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (24)$$

若给出某一确定的可靠度数值,可以根据式(24)反求出三参数威布尔分布下的寿命 x_i 。

通过求解三参数威布尔分布不同可靠度下的寿命,得到了三参数威布尔分布的可靠度-寿命函数,并得到了三参数威布尔分布的可靠度-寿命函数曲线,如图 18 所示。

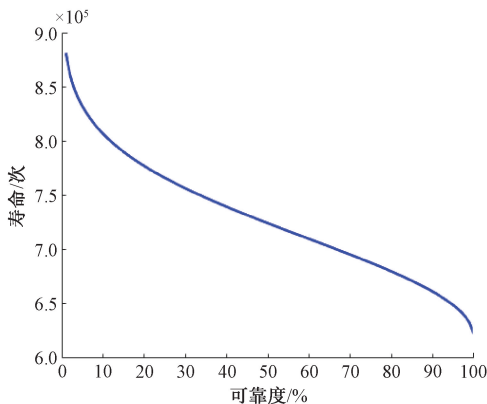


图 18 三参数威布尔分布的可靠度-寿命曲线

Fig. 18 Reliability-lifetime curve of three-parameter Weibull distribution

如图 18 所示,该曲线表示了三参数威布尔分布下可靠度与疲劳寿命间的关系。由三参数威布尔分布可靠度-寿命曲线可知,当可靠度为 95% 时的高温应变计疲劳寿命为 6.48×10^5 次。

5 结 论

针对高温应变计在航空发动机高温环境下的测量误差与疲劳寿命问题,系统开展了基于多目标灰狼优化算法(MOGWO)的敏感栅结构参数优化,进行了高温振动疲劳试验,并结合三参数威布尔分布对疲劳寿命试验数据进行了可靠性分析,主要结论为:

1) 以敏感栅结构参数为优化变量,建立了最小测量误差和最大疲劳寿命为目标的优化模型,并采用 MOGWO 算法进行求解。优化结构参数后的高温应变计测量误差和疲劳寿命显著优于初始设计。

2) 基于优化结果制备应变计,在 $1\ 000\ ^{\circ}\text{C}$ 、 $500\ \mu\text{e}$ 条件下进行振动疲劳试验,获取了 30 个有效寿命数据。试验结果表明,优化后的应变计在高温应变水平下仍有良好的疲劳寿命,证明了优化方法的有效性。

3) 通过对比分析,试验数据最服从三参数威布尔分布,其拟合程度优于正态分布与对数正态分布,为解决高温应变计疲劳寿命数据的小样本、分散性特性提供了有效的分析工具。

4) 基于三参数威布尔分布并采用 Bootstrap 法计算了参数置信区间,最终确定了在 95% 可靠度下,应变计的疲劳寿命为 6.48×10^5 次循环。

参考文献

[1] OI K. Transient response of bonded strain gages [J]. Experimental Mechanics, 1966, 6(9): 463-469.

[2] ROHRBACH C, CZAIIKA N. Ueber das dauer schwingverhalten von dehungsmesstreifen[J]. Materialprüfungs, 1991, 3(4): 37-39.

[3] 王瑞金. 应变片在动态测试中疲劳规律的研究[J]. 机电工程, 2000(4): 66-68.
 WANG R J. The study of the fatigue law in dynamic testing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2000(4): 66-68.

[4] 张建伟, 李正宇, 李青. 应变片测量直线发电机活塞位移的疲劳分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(11): 100-103.
 ZHANG J W, LI ZH Y, LI Q. Fatigue analysis of displacement-strain sensor used in linear alternator[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(11): 100-103.

[5] 宋瑞如, 艾延廷, 李成刚, 等. 应变片敏感栅参数对

- 结构振动及寿命的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2021, 38(1): 1-7.
- SONG R R, AI Y T, LI CH G, et al. Effects of strain gauge sensitive grid parameters on structural vibration and life[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2021, 38(1): 1-7.
- [6] 许艺青, 杨晓翔, 韦铁平, 等. 基于正交试验的应变片敏感栅结构参数的优化[J]. 中国测试, 2018, 44(6): 129-133.
- XU Y Q, YANG X X, WEI T P, et al. Optimization of strain gauge structure parameters based on orthogonal test[J]. China Measurement and Test, 2018, 44(6): 129-133.
- [7] 艾延廷, 刘明, 张凤玲, 等. 提升高温应变计寿命及精度的结构优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 151-161.
- AI Y T, LIU M, ZHANG F L, et al. Research on the structural optimization method to improve the service life and accuracy of high temperature strain gauge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 151-161.
- [8] 张凤玲, 张旭, 艾延廷, 等. 基于响应面法的高温应变计敏感栅结构优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 144-155.
- ZHANG F L, ZHANG X, AI Y T, et al. Sensitive grid structure optimization of high temperature strain gauge based on response surface methodology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 144-155.
- [9] 赵彬荐, 李兆军, 蒋春玲, 等. 基于改进的 MOGWO 高强度钢辊弯成形工艺的多目标优化[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(7): 89-99.
- ZHAO B J, LI ZH J, JIANG CH L, et al. Multi-objective optimization of high strength steel roll bending forming process based on improved MOGWO[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(7): 89-99.
- [10] 周晓燕, 张庭恺, 朱来澳, 等. 基于灰狼算法的无轴承永磁同步电机多目标优化[J]. 微特电机, 2024, 52(1): 31-35, 42.
- ZHOU X Y, ZHANG T K, ZHU L AO, et al. Multi-objective optimization of bearingless permanent magnet synchronous motor based on grey wolf algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52(1): 31-35, 42.
- [11] 刘颖明, 徐雪峰, 王晓东, 等. 基于多目标灰狼算法的漂浮式风电机组浮台内 TMD 参数优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 672-680.
- LIU Y M, XU X F, WANG X D, et al. TMD parameter optimization in floating platform of floating wind turbine based on multi-objective grey wolf optimizer [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(7): 672-680.
- [12] 潘楚光, 谭平, 熊瑞平, 等. 基于 MOGWO 的拟人机械手连杆长度优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(6): 19-23.
- PAN CH G, TAN P, XIONG R P, et al. Optimization of link lengths of anthropomorphic manipulator based on MOGWO [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(6): 19-23.
- [13] 黄诚, 苏建徽, 解宝, 等. 基于改进灰狼算法的 PEMFC 输出功率和系统效率多目标优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2025, 48(1): 37-43.
- HUANG CH, SU J H, XIE B, et al. Multi-objective optimization of PEMFC output power and system efficiency based on improved grey wolf optimizer [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2025, 48(1): 37-43.
- [14] 全昌彪, 廖明夫, 李坚, 等. 基于 Weibull 分布和一阶可靠性修正的钛合金 TA19 疲劳寿命预测[J]. 材料工程, 2025, 53(11): 125-133.
- QUAN CH B, LIAO M F, LI J, et al. Fatigue life prediction of titanium alloy TA19 based on Weibull distribution and first-order reliability correction [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 125-133.
- [15] 胡述伟, 祁童百惠, 郭娜, 等. 基于三参数威布尔分布的铝合金疲劳寿命高准确度预测模型构建方法[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(12): 1-11.
- HU SH W, QI T B H, GUO SH, et al. A method for constructing high-accuracy fatigue life prediction model of zirconium alloy based on three-parameter Weibull distribution[J]. Journal of Chongqing University, 2025, 48(12): 1-11.
- [16] 蔡文斌, 李文, 胥元刚. 基于三参数威布尔分布模型的超高强度抽油杆概率疲劳寿命曲线[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(4): 79-85.
- CAI W B, LI W, XU Y G. Probabilistic fatigue life curve of ultra-high strength sucker rods based on three-parameter Weibull distribution model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(4): 79-85.
- [17] 王珏, 窦唯, 金志磊, 等. 液体火箭发动机涡轮泵音叉式整体叶盘低周疲劳寿命可靠性研究[J]. 推进技术, 2025, 46(5): 283-291.
- WANG J, DOU W, JIN ZH L, et al. Investigation of low-cycle fatigue life and reliability of turbopump tuning fork blisk in liquid rocket engine [J]. Journal of

- Propulsion Technology, 2025, 46(5): 283-291.
- [18] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 106-119.
- [19] 唐兆田. 判别金属材料疲劳试验中异常试验数据的一般方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(1): 77-82. TANG ZH T. General methods for outlier detection in metal fatigue tests [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2017 (1): 77-82.
- [20] ZHOU Y L, JIANG X L, ZHANG M J, et al. Modal parameters identification of bridge by improved stochastic subspace identification method with Grubbs criterion[J]. Measurement and Control, 2021, 54(3/4): 457-464.
- [21] 张剑锋, 徐芳, 张燕, 等. 三参数威布尔分布的参数估计及置信限计算方法[J]. 机械强度, 2024, 46(5): 1136-1142. ZHANG J F, XU F, ZH Y, et al. Parameter estimation and confidence limit calculation method for three-parameter Weibull distribution [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46 (5): 1136-1142.
- [22] 刘鹏飞, 杨文婷, 张茹, 等. Median-of-Means 方法在偏度系数中的应用[J]. 统计研究, 2024, 41(4): 153-160. LIU P F, YANG W T, ZHANG R, et al. Application of Median-of-Means method in skewness coefficient [J]. Statistical Research, 2024, 41(4): 153-160.
- [23] WU H W, YE C J, ZHANG Y J, et al. Research on lifetime distribution and reliability of IGBT module based on accelerated life test and K-S test [J]. International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation, 2019, 11(1): 1-10.
- [24] PARETO A. A new look at the correlation coefficient: Correlation as the difference-sum ratio of SSEs [J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 2023, 52(9): 2852-2859.
- [25] Analytical Methods Committee AMCTB No 87. The correlation between regression coefficients: Combined significance testing for calibration and quantitation of bias[J]. Analytical Methods, 2019, 11 (14): 1845-1848.
- [26] 颜斌, 王斌会, 徐锋. 非正态过程能力指数估计与 Bootstrap 置信区间构建 [J]. 统计与决策, 2020, 36(7): 10-16. YAN B, WANG B H, XU F. Estimation of non-normal

process capability index and construction of Bootstrap confidence interval [J]. Statistics and Decision, 2020, 36(7): 10-16.

- [27] 何燕秋, 王有元, 何俐萍. 基于最大信息熵的长寿命产品可靠度置信区间 Bootstrap 估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(6): 1880-1892. HE Y Q, WANG Y Y, HE L P. Bootstrap estimation method for reliability confidence interval of long-life products based on maximum information entropy [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45 (6): 1880-1892.

作者简介



张凤玲(通信作者), 2000年在天津大学获得学士学位, 2020年在北京航空航天大学获得博士学位。现为沈阳航空航天大学副教授主要研究方向为航空发动机振动控制、高温应变计不确定性研究。

E-mail: fling707@163.com

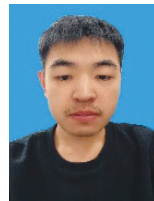
Zhang Fengling (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Tianjin University in 2000, and her Ph. D. degree from Beihang University in 2020. She is currently an associate professor at Shenyang Aerospace University. Her main research interests include vibration control of aeroengine and uncertainty study of high-temperature strain gauges.



赵亚芝, 2012年于常州大学获得硕士学位, 现为沈阳航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为高温应变计测量不确定性研究、高温动态应变计疲劳寿命研究。

E-mail: zhaoyazhi2011@163.com

Zhao Yazhi received her M. Sc. degree from Changzhou University in 2012. She is currently a doctoral candidate at Shenyang Aerospace University. Her main research interests include uncertainty study of high-temperature strain gauge measurement and fatigue life study of high-temperature dynamic strain gauges.



李仁杰, 2024年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 现为沈阳航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为推进系统试验与先进测试技术。

E-mail: lirj7312@163.com

Li Renjie received his B. Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2024. He is currently a master's candidate at Shenyang Aerospace University. His main research interest includes advanced testing technology for propulsion system testing.