

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209309

提升高温应变计寿命及精度的结构优化方法研究^{*}

艾延廷, 刘明, 张凤玲, 张旭, 赵亚芝

(沈阳航空航天大学航空发动机学院 沈阳 110136)

摘要: 高温应变电测技术广泛应用于航空发动机热端部件应力状态测量, 如何将高温应变计的各部分结构参数进行合理搭配, 以提高应变计灵敏度及使用寿命, 在工程中具有十分重要的价值。首先, 针对影响高温应变计测量误差与疲劳寿命这两个目标, 分别建立简支梁-测量误差模型与悬臂梁-疲劳寿命模型; 然后, 经有限元分析得到各个参数变化对应变计测量误差以及疲劳寿命的影响规律, 进而筛选出待优化的参数; 接着, 采用遗传算法与响应面法相结合对高温应变计进行优化; 最后, 通过试验对最终优化结果进行验证。结果表明, 单参数分析法能直观反映各个参数对应变计灵敏度与寿命的影响规律, 基于响应面模型和多目标遗传算法的优化, 可得出高温应变计栅丝直径、栅丝长度、栅丝间距、栅丝弯数、基底厚度 5 个参数的最佳参数组合; 优化后的测量误差为 0.255%, 疲劳寿命达到 2.3846×10^7 次循环; 试验验证结果表明, 多目标优化后测量误差降低了 89.2%, 疲劳寿命提升了 10.14%。

关键词: 高温应变计; Miner 累计损伤理论; 响应面模型; 遗传算法; 多目标优化

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

Research on the structural optimization method to improve the service life and accuracy of high temperature strain gauge

Ai Yanting, Liu Ming, Zhang Fengling, Zhang Xu, Zhao Yazhi

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

Abstract: The high temperature strain electric measurement technology has been widely used in the stress state measurement of the hot end parts of aeroengines. How to rationally match the structural parameters of the high temperature strain gauge to improve the sensitivity and service life of the strain gauge is of great importance in engineering. Firstly, a simple beam-measurement error model and a cantilever beam-fatigue life model are formulated for two objectives of affecting the measurement error and fatigue life of the high temperature strain gauge. Secondly, the influence rule of each parameter variation on strain gauge measurement error and fatigue life is analyzed by finite element analysis, and the parameters to be optimized are selected. Then, the genetic algorithm combined with response surface method is used to optimize the high temperature strain gauge. Finally, the optimization results are evaluated by experiments. Results show that the single-parameter analysis method can directly reflect the influence of each parameter on the sensitivity and life of strain gauge. Based on the optimization of response surface model and the multi-objective genetic algorithm, the optimal parameter combination of five parameters of high temperature strain gauge including grid wire diameter, grid wire length, grid wire spacing, grid wire bending number and base thickness can be obtained. The optimized measurement error is 0.255% and the fatigue life is 2.3846×10^7 cycles. Experimental results show that the measurement error is reduced by 89.2% and the fatigue life is increased by 10.14% after multi-objective optimization.

Keywords: high temperature strain gauge; Miner's cumulative damage theory; response surface model; genetic algorithm; multi-objective optimization

0 引言

电阻应变计作为应力分析最常用的敏感元件之一^[1],具有使用方便、量程大、灵敏度高、频率响应快等特点,一直广泛用于应变测量。航空航天武器装备的测试难点,主要在于其普遍工作在高温、高压、高转速、重油、强振动环境下^[2]。电阻应变计使用时需要将其粘贴到待测物体表面,在这种严苛的工作环境下进行应力应变测量十分困难^[3]。目前,国内电阻应变计的最高工作温度不超过 1 000℃,并且误差大,使用寿命短,这导致许多工况下部件的力学行为测量存在困难,且成本高,所以进行高温电阻应变计灵敏度和寿命研究具有重要意义。

电阻应变计作为精密的传感元件,其加工、粘贴工艺等会对测得的指示应变产生一定的影响,甚至有时与真实应变相差过大,无法判断其测得应变的可信程度^[4]。而且在上述恶劣环境下,对航空航天工作设备可靠性的评估不光要考虑测量误差,应变计疲劳寿命也十分重要^[5]。目前,国内外技术人员已经对电阻应变计做了大量的研究。王彪等^[6]基于剪滞理论建立了 MEMS 应变传感器的力学分析模型,推导出基体和传感器上的应变分布、粘结层中的剪力分布及应变传递率,并进行了仿真分析。易晖等^[7]将应变计使用中横向效应产生的误差进行了修正,并在工程实践中应用。尹福炎^[8]研究阐述了应变计应变传递机理并仿真计算分析了胶层蠕变对应变传递的影响。王文瑞等^[9]针对自主研发的自由框架丝栅式高温应变片,建立标定装置,提出可行的标定方法。韦铁平等^[10]通过改变应变计长径比得到其对应应变计测量误差的影响。Zike 等^[11]针对金属粘贴式应变计建立了二维三维模型,研究了基底材料弹性模量的改变对测量误差的影响。胡玉梅等^[12]建立了应变计三维悬臂梁模型,研究了丝式应变计中敏感栅结构参数变化对应应变计测量误差的影响。许艺青等^[13]研究了箔式应变计敏感栅结构参数变化以及粘接层各参数变化对测量误差的影响,并进行了正交试验优化。Oi 等^[14]针对应变计在工程应用中的疲劳断裂问题进行了研究,得出影响应变计疲劳寿命的主要因素是载荷循环次数,而振动频率对其影响不大。Rohrbach 等^[15]研究表明应变计疲劳失效的表现形式为灵敏度变化以及零点漂移。王瑞金^[16]基于断裂力学理论,探究了应变计在循环载荷下灵敏度与裂纹尺寸变化的关系,证明了应变计在动态应变测试中灵敏度变化率达到 1% 时疲劳失效。宋瑞如等^[17]对高温应变计结构参数、工艺参数对疲劳寿命的影响规律做出了详细论述,基于正交试验法对应应变计疲劳寿命进行了优化。梁伟等^[18]研究了应变计排布位置对柱式力传感器输出的影响,建立了力传感器输出模型,对传感器的研制有一定指导作用。

目前,国内外对应变计的研究一方面集中在胶层蠕变、材料弹性模量、横向效应、敏感栅结构参数、胶层材料、激励方法等对应变计测量误差的影响^[6-13]。另一方面集中在动态测试中加载方式、载荷循环次数等对应变计疲劳失效的影响^[14-17]。一些学者会针对不同工作环境研制特定的应变计,但往往缺少普适性^[18]。一部分国内外学者对应变计敏感栅的结构参数进行了单目标优化,但忽略了对其他目标的影响,有一定局限性^[13,17]。现今,鲜有同时考虑测量误差与疲劳寿命这两个应变计关键性能参数的多目标优化研究。此外,栅丝结构参数中栅丝弯数不能量化,只能取值为特定的整数,这也是应变计研究中的一大难点。

为了解决以上问题,本文分别建立起丝式高温应变计测量误差模型与疲劳寿命模型,通过仿真对比筛选出影响应变计性能的关键参数:栅丝直径、长度、间距、弯数以及基底厚度。然后,建立了应变计关键参数与测量误差、疲劳寿命的二阶响应面近似模型。然后,将应变计测量误差与疲劳寿命分别进行归一化处理,并根据线性加权法进行多目标优化的处理。由于弯数只能为正奇数,所以采用遗传算法定义弯数的取值条件后,与二阶响应面近似模型结合起来进行应变计测量误差和疲劳寿命多目标优化。最后通过有限元分析与高温应变计静、动态试验验证了该优化方法的有效性。通过这种优化方法可以避免单用响应面法优化时弯数选择的局限性,为今后丝式高温应变计多目标优化提供了方法,对丝式高温应变计的研制有着一定的指导作用。

1 理论分析

1.1 响应面法

响应面法是由 Box 等^[19]提出的一种综合试验设计的优化方法。响应面法可以通过有限次的试验设计,拟合出设计变量与输出变量之间的变化关系。本文数据拟合采用的二阶多项式近似模型的基函数^[20]为:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: β 为未知函数; k 为设计变量的数量; Y 表示试验预测响应值; β_0 β_i β_{ii} 分别是偏移项、线性偏移以及二阶偏移项; β_{ij} 为交互系数。上述参数可通过最小二乘法拟合得出。

1.2 疲劳寿命理论

应变计疲劳破坏的主要影响因素为载荷循环次数,可以基于 Miner 累计损伤理论^[21]估算应变计的疲劳寿命。

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

(2)

式中: n_i 为第 i 级应力水平下的应力循环数; N_i 表示在应力 s_i 作用下导致破坏的循环数。

$D=1$ 时达到疲劳破坏, 令:

$$P(s) = \frac{n_i}{N}$$

(3)

应变计敏感栅材料的 S-N^[22] 指数函数为:

$$e^{ms} N = C$$

(4)

式中: m 、 C 是与材料有关的常数。

联立式(2)~(4), 得到发生疲劳破坏时的总循环次数为:

$$N = \frac{1}{\int_0^\infty \frac{P(s)e^{ms}}{C} ds}$$

(5)

应变计疲劳失效的循环次数通常大于 10^5 , 属于高周疲劳。在有限元中对悬臂梁模型进行计算与分析, 得到敏感栅应力载荷谱, 根据名义应力法^[23], 结合线性累计损伤理论和材料应力循环曲线, 利用有限元疲劳分析方法计算疲劳寿命。

2 高温应变计有限元模型的建立

2.1 测量误差简支梁三维模型的建立

高温丝式应变计主要由敏感栅、基底、过渡层、覆盖层、引出线构成。敏感栅作为电阻应变测量的关键部分, 其结构参数对应变测量的影响很大, 图 1 为敏感栅结构示意图。

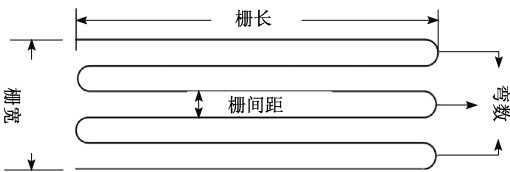


图 1 敏感栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensitive gate structure

为研究高温丝式应变计结构参数与工艺参数对应变计测量误差的影响, 建立简支梁-过渡层-基底-栅丝-覆盖层误差计算模型, 模型中将栅丝完全嵌入覆盖层中, 模拟高温条件下覆盖层采用喷涂方式固定和保护栅丝, 如图 2 所示。各部分材料参数如表 1 所示。

在有限元模型中, 将应变计粘贴在简支梁中心位置等应变区, 分别在距离梁的两端 50 mm 处施加竖直向下的力载荷 500 N, 各个部分均为绑定约束。由于栅丝结构承受弯矩, 本身也出现拉压现象, 所以栅丝部分采用梁单元网格划分, 并且采用梁单元可以更加方便地提取栅

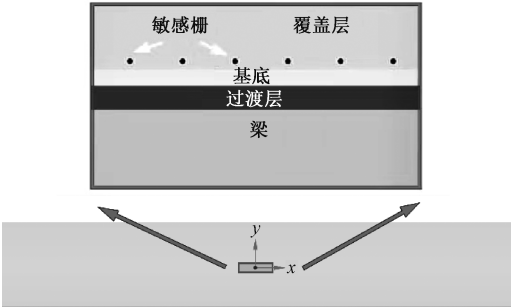


图 2 应变计模型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strain gauge model structure

表 1 应变片模型材料及参数

Table 1 Materials and parameters of the strain gauge model

组成结构	材料	密度 /(g·cm ³)	弹性模量 /GPa	泊松比
覆盖层	Al ₂ O ₃	3.96	68.5	0.22
敏感栅	PtW8	21.25	220.0	0.36
基底	Al ₂ O ₃	3.96	68.5	0.22
过渡层	NiAl	8.50	185.0	0.30
梁	DZ125L	8.35	133.0	0.40

丝应变。其余结构采用六面体网格划分, 并在栅丝附近进行网格加密, 如图 3 所示。

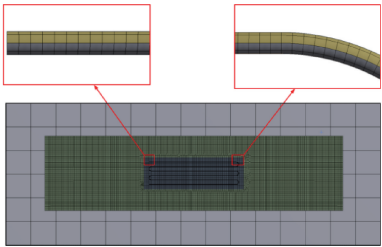


图 3 应变计模型局部网格划分

Fig. 3 Local meshing of the strain gauge model

改变网格数量从 135 668~250 584, 计算对比应变计输出应变的变化情况。如表 2 所示, 当网格数量达到 185 666 后, 输出应变相对误差率仅有 0.44%, 为了节约计算时间, 采用序号 2 网格划分方法。

表 2 网格无关性验证

Table 2 Grid independence evaluation

序号	网格数	节点数	输出应变
1	135 668	809 130	-8.653 6
2	185 666	1 158 823	-8.623 2
3	250 584	1 586 521	-8.584 6

2.2 测量误差模型验证

简支梁中部为纯弯曲,弯矩为:

$$M = F \times L = 500 \times 0.05 = 25 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$
 (6)

应变计粘贴位置应力为:

$$\sigma = \frac{M \times y}{b \times h^3} = \frac{25 \times 2.5 \times 10^{-3}}{\frac{0.05 \times 0.005^3}{12}} = 1.2 \times 10^8 \text{ Pa}$$
 (7)

应变计粘贴位置应变值为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1.2 \times 10^8}{133 \times 10^9} = 9.0226 \times 10^{-4}$$
 (8)

在式(6)~(8)中, E 为简支梁弹性模量; L 为加载点到两端的距离; F 为竖直向下的力载荷; y 为梁中部截面形心到梁上表面距离; b 为梁宽度; h 为梁厚度。

如图4所示,仿真中简支梁中心处的应变为 8.6193×10^{-4} ,理论计算值为 9.0226×10^{-4} ,仿真计算值与理论计算值相对误差为 4.47%,这说明粘贴应变片对梁中心应变几乎没有影响。

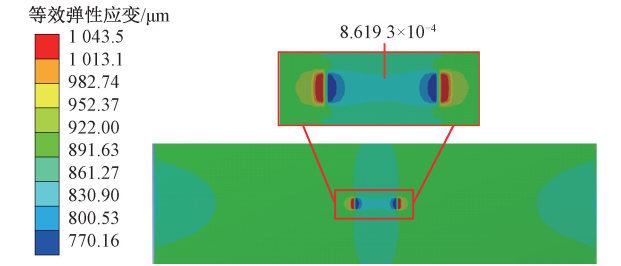


图4 简支梁应变云图

Fig. 4 Strain nephogram of simply supported beam

采用梁单元划分网格后,栅丝应变集中在轴向,沿着栅丝轴向建立路径提取整个栅丝应变的平均值做为应变计输出的指示应变。梁上贴片处的中心应变作为真实应变,将指示应变与真实应变的差异称为测量误差。计算公式如式(9)所示。

$$\delta = \frac{\varepsilon_{\text{栅丝}} - \varepsilon_{\text{梁}}}{\varepsilon_{\text{梁}}} \times 100\%$$
 (9)

通过改变5组栅丝结构参数,分析测量相对误差,如表3所示。

表3 仿真计算结果与贴片处应变对比表

Table 3 Strain comparison between simulation calculation results and patch

结构参数/mm	敏感栅应变/ $\times 10^{-4}$	梁应变/ $\times 10^{-4}$	相对误差 $\delta/\%$
$L=6; S=0.35$	8.561 9	8.617 9	0.65
$L=6; S=0.40$	8.537 8	8.617 9	0.93
$L=8; S=0.45$	8.593 8	8.617 9	0.28
$L=9; S=0.45$	8.521 4	8.617 9	1.12

通过表3可以得出,栅丝的输出应变与梁贴片处中心应变相对误差在1%左右,表明该模型中应变计能够比较准确地反映被测基体应变,可用于下一步研究。

2.3 应变计疲劳寿命仿真模型的建立

由于应变计疲劳寿命的定义是疲劳断裂前的载荷循环次数,且疲劳断裂位置主要集中在敏感栅^[24],所以区别于测量误差仿真模型,建立悬臂梁^[25]-过渡层-基底-栅丝-覆盖层疲劳寿命测量模型。敏感栅材料 S-N^[26] 曲线如图5所示。

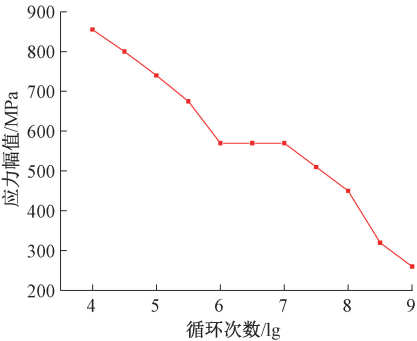


图5 材料 S-N 曲线

Fig. 5 Material S-N curve

在有限元模型中,将应变计粘贴在距离悬臂梁固定端 15 mm 处,整个模型施加加速度载荷,通过调整载荷大小使栅丝应变达到工程所用的 1 000 微应变左右。将栅丝最大应力提取出来结合材料 S-N 曲线与式(5)得出栅丝疲劳寿命,即为应变计疲劳寿命。悬臂梁示意图如图6所示。

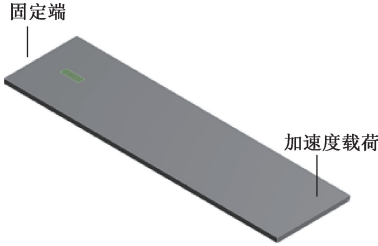


图6 悬臂梁模型加载图

Fig. 6 Model loading diagram of cantilever beam

改变网格数量从 85 562~146 658,对比应变计敏感栅疲劳寿命的变化情况。如表4所示,当网格数量达到 146 658 后,输出应变相对误差率仅有 0.49%,为了节约计算时间,采用序号2 网格划分方法。

表4 网格无关性验证

Table 4 Grid independence evaluation

序号	网格数	节点数	疲劳寿命
1	85 562	504 546	2.1586×10^7 次循环
2	112 564	689 554	2.2036×10^7 次循环
3	146 658	905 458	2.2144×10^7 次循环

3 结构参数与工艺参数对应变计测量误差及寿命的影响

3.1 敏感栅结构参数的影响

敏感栅作为应变计输出应变的核心结构,其结构参数的改变对应变计的影响很大。利用控制变量法改变应变计敏感栅结构参数,分析各参数改变对应变计测量误差以及疲劳寿命的影响规律。

1) 敏感栅栅丝直径对应变计的影响

栅丝直径的变化直接带来的是其阻值的变化,对应变计测量误差会产生一定的影响;直径的变化也会影响测量部件到栅丝的应力应变传递,从而改变应变计的疲劳寿命。

在有限元模型中,保持栅丝长度、间距、弯数不变,改变栅丝直径进行计算。栅丝直径以 0.005 mm 为间距从 0.02~0.04 mm 变化,分别计算测量误差与疲劳寿命的变化规律,如图 7 所示。

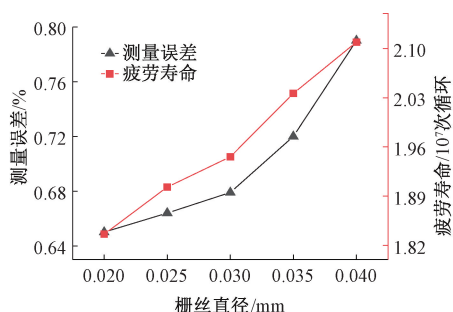


图7 栅丝直径变化对应变计性能的影响

Fig. 7 Influence of grid wire diameter change on strain gauge performance

由图 7 可知,测量误差随栅丝直径增大而增大,疲劳寿命随栅丝直径的增大而提高。

2) 敏感栅栅丝长度对应变计的影响

应变计栅长方向与被测基体主要应力应变方向一致,所以栅丝长度的改变必然会对应变计测量误差与疲劳寿命产生影响。

在有限元模型中,保持直径、间距、弯数不变,改变栅丝长度进行计算。栅丝长度在 6~11 mm 变化,分别计算测量误差与疲劳寿命的变化规律,如图 8 所示。

由图 8 可知,测量误差在栅长 6~9 mm 范围内逐渐减小,在 10~11 mm 范围内逐渐增大,在 9~10 mm 存在中间最优值。疲劳寿命在栅长 6~8 mm 范围内逐渐减小,在 8~11 mm 范围内逐渐增大。

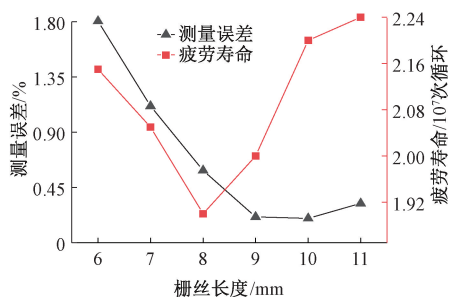


图8 栅丝长度变化对应变计性能的影响

Fig. 8 Influence of grid length variation on strain gauge performance

3) 敏感栅栅丝间距对应变计的影响

栅丝间距变化是应变计产生横向效应的原因,进而影响栅丝输出应变与应力应变传递,最终对应变计测量误差与疲劳寿命产生影响。

在有限元模型中,保持栅丝直径、长度、弯数不变,改变栅丝间距进行计算。栅丝间距在 0.30~0.60 mm 之间变化,分别计算测量误差与疲劳寿命的变化规律,如图 9 所示。深入分析是否合理。

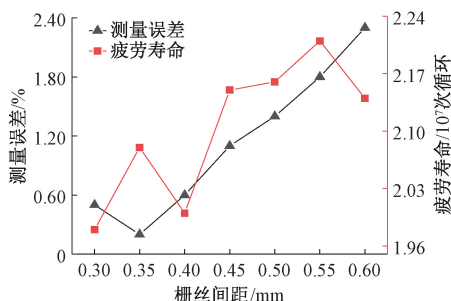


图9 栅丝间距变化对应变计性能的影响

Fig. 9 Influence of grid wire spacing variation on strain gauge performance

由图 9 可知,测量误差在栅丝间距 0.35 mm 处存在最优值,在 0.35~0.60 mm 范围内随间距增加误差越来越大。疲劳寿命在 0.55 mm 处存在最优值。

4) 敏感栅栅丝弯数对应变计的影响

栅丝弯数的改变决定了敏感栅在基体上的排列方式与接触面积,进而影响应变计测量误差与疲劳寿命。

在有限元模型中,保持栅丝直径、长度、间距不变,改变栅丝弯数进行计算。栅丝弯数在 1~11 弯之间变化,分别计算测量误差与疲劳寿命的变化规律,如图 10 所示。

由图 10 可知,测量误差在栅丝弯数为 3 时存在最优值,在 3~11 弯范围内测量误差随弯数增加而增大。疲劳寿命随栅丝弯数增加一直呈现下降趋势。

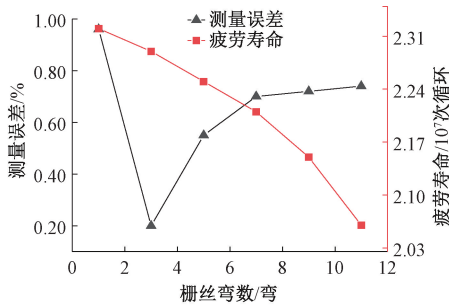


图 10 栅丝弯数变化对应变计性能的影响

Fig. 10 Influence of mesh line bending times on strain gauge performance

3.2 应变计粘贴工艺参数的影响

1) 过渡层厚度对应变计的影响

过渡层厚度直接影响到应力应变传递情况,通过改变其厚度计算测量误差与疲劳寿命的变化规律。保持其他参数不变情况下,改变过渡层厚度从 0.03~0.09 mm 之间变化,结果如图 11 所示。

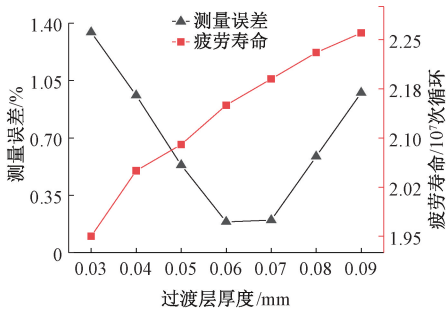


图 11 过渡层厚度变化对应变计性能的影响

Fig. 11 Influence of transition layer thickness change on strain gauge performance

由图 11 可知,测量误差随过渡层厚度的增加先减小后增大,在 0.06~0.07 mm 左右存在最优值。疲劳寿命随过渡层厚度增加呈上升趋势。

2) 基底厚度对应变计的影响

保持其他参数不变,改变基底厚度在 0.03~0.09 mm 之间变化,结果如图 12 所示。

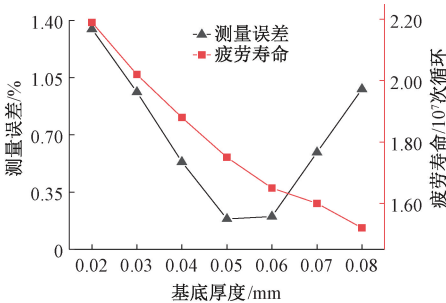


图 12 基底厚度变化对应变计性能的影响

Fig. 12 Influence of substrate thickness change on strain gauge performance

由图 12 可知,测量误差随基底厚度的增加先减小后增大,在 0.05~0.06 mm 左右存在最优值。疲劳寿命随过渡层厚度增加呈现下降趋势。

3) 覆盖层厚度对应变计的影响

保持其他参数不变,改变基底厚度在 0.1~0.5 mm 之间变化,结果如图 13 所示。

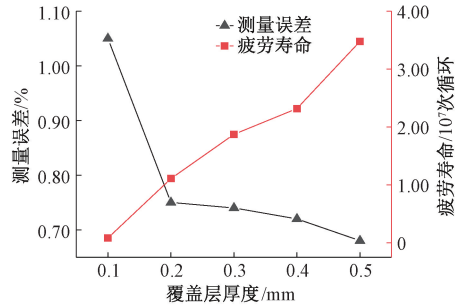


图 13 覆盖层厚度变化对应变计性能的影响

Fig. 13 Influence of overburden thickness change on strain gauge performance

由图 13 可知,测量误差随覆盖层厚度的增加而减小,疲劳寿命随覆盖层厚度增加而提高。

本文利用控制变量法计算分析影响应变计测量误差与疲劳寿命的参数,得到各个参数对单个目标(测量误差、疲劳寿命)的影响,为测量误差与寿命趋势分析提供直观的参考。但以单个目标来对应变计进行优化研究存在一定的局限性,需要使用多目标优化方法实现应变计各个参数(结构参数、工艺参数)的合理搭配,以降低应变计测量误差,同时提升应变计疲劳寿命。

4 高温应变计多目标优化

由第 3 章的分析可知,高温应变计的参数优化并不能只考虑单个参数或单个目标,一定是多个参数共同决定的结果。本章将对高温应变计进行多参数多目标优化,利用响应面法建立关于测量误差与疲劳寿命的二阶响应面近似方程,将获得的近似方程带入到遗传算法中进行寻优。在实际应用中,由于粘贴工艺限制,过渡层厚度限制在 0.05 mm,涂层总厚度不超过 0.5 mm,覆盖层厚度的选取在保证总厚度不超过 0.5 mm 的前提下尽可能大,本次优化覆盖层厚度定为 0.4 mm。弯数的取值范围只能为正奇数(3、5、7、)。其他参数取值范围为:直径(0.02~0.04 mm)、栅长(7~11 mm)、间距(0.30~0.60 mm)、基底厚度(0.03~0.07 mm)。综合上述分析,选取出待优化的参数如下:栅丝直径、长度、间距、弯数、基底厚度。

4.1 构造响应面

以响应面法为基础,将高温应变计中的栅丝直径 x_1 、栅丝长度 x_2 、栅丝间距 x_3 、栅丝弯数 x_4 以及基底厚度 x_5 设为参数变量,以测量误差 $f_1(x)$ 和疲劳寿命 $f_2(x)$ 为目标函数,利用最小二乘法建立起参数变量与目标函数的二阶响应模型,各因素的取值范围如表 5 所示。

表 5 参数变量取值范围

Table 5 The value range of a parameter variable	
参数变量	取值范围
栅丝直径/mm	0.02~0.04
栅丝长度/mm	7~11
栅丝间距/mm	0.30~0.60
栅丝弯数	3~7
基底厚度/mm	0.03~0.07

4.2 响应面试验结果及分析

为了获得高温应变计最佳参数组合,利用 Design-Expert 软件设计响应面试验方案,并根据试验方案,通过有限元仿真计算,结果如表 6 所示。

表 6 试验方案与部分试验结果

Table 6 Test scheme and partial test results							
序号	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /bend	x_5 /mm	$f_1(x)$ /%	$f_2(x)$ / 10^7
1	0.03	9.00	0.55	3	0.05	0.241	2.026 5
2	0.03	9.00	0.55	5	0.07	0.100	1.935 3
3	0.03	11.00	0.45	3	0.05	1.028	2.163 2
4	0.03	9.00	0.45	5	0.05	0.183	1.976 1
...	...	...	...	...	...	...	...
43	0.03	9.00	0.45	3	0.05	0.286	1.937 6
44	0.03	9.00	0.45	3	0.03	0.222	2.215 8
45	0.03	9.00	0.35	5	0.03	0.294	2.124 3
46	0.03	9.00	0.35	7	0.05	0.949	1.859 8

根据表 6 中得到的试验结果,在 Design-Expert 软件中对目标函数进行回归拟合分析,得到关于测量误差 $f_1(x)$ 和疲劳寿命 $f_2(x)$ 的二阶响应面近似方程,如式 (10)、(11) 所示:

$$\begin{aligned} f_1(x) = & 0.18 - 0.016x_1 - 0.052x_2 - 0.14x_3 - 0.023x_4 + \\ & 0.11x_5 - 0.12x_1x_2 + 0.12x_1x_3 + 0.052x_1x_4 - 0.12x_1x_5 - \\ & 0.77x_2x_3 - 0.28x_2x_4 + 0.75x_2x_5 + 0.27x_3x_4 - 0.77x_3x_5 - \\ & 0.27x_4x_5 + 0.18x_1^2 + 0.34x_2^2 + 0.46x_3^2 + 0.17x_4^2 + 0.37x_5^2 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} f_2(x) = & 1.98 + 0.049x_1 + 0.064x_2 + 8.262 \times 10^{-3}x_3 - \\ & 0.059x_4 - 0.12x_5 + 0.076x_1x_2 + 0.034x_1x_3 - 5.225 \times \\ & 10^{-3}x_1x_4 + 6.75 \times 10^{-3}x_1x_5 - 0.028x_2x_3 + 8 \times 10^{-4}x_2x_4 - \\ & 0.014x_2x_5 - 0.016x_3x_4 + 5 \times 10^{-5}x_3x_5 + 1.35 \times 10^{-3}x_4x_5 + \\ & 0.031x_1^2 + 0.063x_2^2 + 4.402 \times 10^{-3}x_3^2 + 7.26 \times 10^{-3}x_4^2 + \\ & 0.026x_5^2 \end{aligned} \tag{11}$$

为了检验响应面模型的准确性,对拟合出来的二阶响应面近似方程采用方差分析法进行显著性分析。根据响应面法原理,当模型中的“ $P<0.05$ ”时说明模型显著,本模型中“ $P<0.001$ ”,说明本次响应面模型显著性很好,结果预测精度很高。为了进一步检验近似方程的准确性,还采用了复相关系数 R -Squared 与修正的复相关系数 Adj - R -Squared 这两个指标来衡量该方程对响应值(试验数据)的拟合程度,如表 7 所示。

表 7 回归方程误差的统计评估

Table 7 Statistical evaluation of regression equation error		
目标函数	预测函数	预测结果
测量误差	R -Squared	0.909 2
	Adj - R -Squared	0.836 5
疲劳寿命	R -Squared	0.911 1
	Adj - R -Squared	0.839 9

由表 7 可看出,两个目标函数的复相关系数 R^2 都大于 0.9,并且修正后的复相关系数 R^2 与 R^2 数值相近且都接近 1,说明模型的相关性较好。

4.3 基于遗传算法的多目标优化

在本文应变计各参数优化中,弯数的取值只能为正奇数,响应面在对弯数取最优值时可能取到小数,需要用四舍五入的方式取整。本节利用遗传算法对响应面法得出的二阶近似方程进行优化。

1) 遗传算法原理

遗传算法(GA)^[27]是一种基于生物界规律和自然遗传的搜索算法。群体中的个体被称为一个个染色体。在迭代中染色体的不断更新称为遗传,遗传算法主要通过变异、交叉遗传算子来实现,染色体的优点和缺点通常通过适应度函数来评估。根据适应度值的大小,从父母和后代中选择一定比例的个体作为后代的群体,然后继续迭代计算直到它收敛到全局最佳染色体。适应度作为遗传算法中衡量种群在进化过程中达到最优值的一个概念。为了证明染色体的适应能力,引入测量每条染色体的功能函数,称为适应度函数。

2) 权重分析

多目标优化问题解决的前提是对各个目标所占权重进行权衡。通常多目标优化引入权系数 w_i ,来衡量单个

目标对总目标的重要程度,来将多目标问题转化成单目标问题来解决。多目标优化中线性加权法的表达式为^[28]:

$$F = w \frac{\hat{y}_1}{y_1^*} + (1 - w) \frac{\hat{y}_2}{y_2^*}$$

(12)

式中: $\hat{y}_1$ 和 $\hat{y}_2$ 分别为目标 1 和目标 2 的响应函数, y_1^* 和 y_2^* 分别为归一化之后目标 1 和目标 2 的值。

大多数多目标优化研究都是基于优化方案选定各目标权系数,根据经验与工程要求,(权系数解释)本文研究的权系数选定为 $w_1=0.5$ 、 $w_2=0.5$,即将测量误差与疲劳寿命定位相同的权重,利用遗传算法进行多目标优化。

3) 确立目标函数与求解

把测量误差与疲劳寿命定为目标函数,分别将各参数的取值范围、取值条件等设为约束条件。

根据先前的响应面近似方程与上述约束条件,利用遗传算法寻优后的结果如表 8 所示。在栅丝直径为 0.04 mm、栅丝长度 11 mm、栅丝间距 0.476 mm、弯数 3 弯以及基底厚度为 0.03 mm 时,遗传算法预测值为测量误差:0.255%;疲劳寿命; 2.3846×10^7 次循环。并且经过计算最终权重可达到 0.928,证明了优化结果的可靠性。

表 8 优化前后参数对照表

Table 8 The comparison of parameters before and after optimization

参数变量	优化前	优化后
栅丝直径/mm	0.03	0.04
栅丝长度/mm	8	11
栅丝间距/mm	0.35	0.476
栅丝弯数/bend	5	3
基底厚度/mm	0.05	0.03

4.4 优化结果验证

利用优化后的结构参数与工艺参数制作高温丝式应变计,分别进行简支梁测量误差试验与悬臂梁疲劳寿命试验。

静态灵敏度实验台如图 14 所示,在简支梁等应变位置粘贴正反 8 个应变计。通过施加砝码使梁产生变形,通过激光位移传感器测量简支梁的真实应变。应变计外接电路将电信号传递给数据采集仪等,电脑终端输出值即为测量应变值。应变计试验测量误差同样按式(9)计算,最后将此组试验的各个测量误差取平均值作为该参数下的测量误差。

疲劳试验系统如图 15、16 所示。在悬臂梁根部位置正反粘贴 6 个应变计悬臂梁通过夹具固定于振动试验台,通过信号发生器、功率放大器与振动控制设备控制试

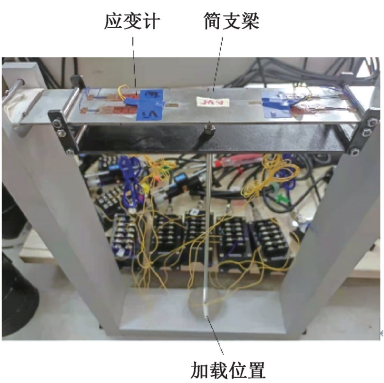


图 14 简支梁试验装置图

Fig. 14 Diagram of simply supported beam test device

验台,采集后的电信号经由滤波器,通过信号采集仪回到电脑终端查看振动数据与波形。

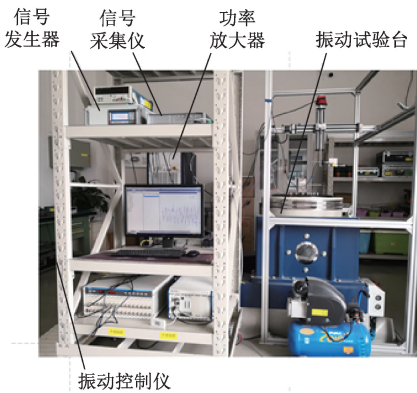


图 15 疲劳寿命试验系统总体图

Fig. 15 Overall system diagram of fatigue life test

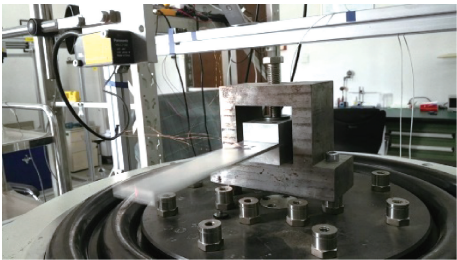


图 16 悬臂梁振动状态图

Fig. 16 Vibrational state diagram of cantilever beam

图 17 为悬臂梁在固定频率下进行振动疲劳试验得到应变计输出应变波形图,通过调整振动台频率使应变达到 1 000 微应变。从振动开始到波形完全断裂的振动次数记为应变计疲劳寿命。试验中时刻观测记录应变计波形知道此组 6 个应变计完全损坏,取平均值作为应变计疲劳寿命。

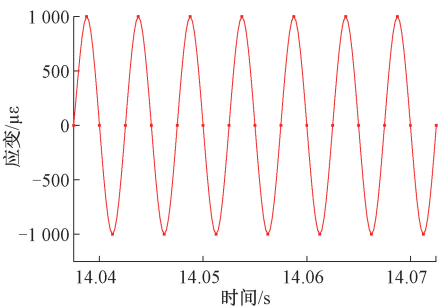


图 17 处理后应变波形图

Fig. 17 The processed vibration waveform

将测得的试验结果与有限元仿真结果对比分析,如表 9 所示。

表 9 有限元结果与试验结果对比表

Table 9 Comparison between finite element results and test results

计算结果	测量误差/%	疲劳寿命
有限元	0.313	2.263×10^7 次循环
试验	0.325	2.2028×10^7 次循环
误差	3.7	2.28%

由表 9 可以看出,有限元结果与试验结果误差小于 5%,证明了有限元模型的准确性。

表 10 为试验结果与优化前的结果比较。由表 10 分析可知,经过多目标优化设计,高温应变计的测量误差由 3%降低为 0.325%的同时,疲劳寿命由 2×10^7 次循环提高为 2.2028×10^7 次循环,优化效果显著。通过静态、动态试验以及有限元分析验证了本文建立的高温应变计优化方法的可行性与可靠性。

表 10 多目标优化前后结果对比表

Table 10 Comparison of results before and after multi-objective optimization

计算结果	测量误差/%	疲劳寿命
优化前	3	2×10^7 次循环
优化后	0.325	2.2028×10^7 次循环
提升率	89.2	+10.14%

据调查研究,当前航空发动机所用丝式高温应变计的设计研制中,研究人员所注重的研制目标有:测量精度、疲劳寿命和一致性。应变计的一致性指的是保证应变计优化前后的整体尺寸差异不能过大。当前工程中所用丝式高温应变计栅丝整体尺寸为 $8 \text{ mm} \times 1.75 \text{ mm}$,优化后的栅丝整体尺寸为 $11 \text{ mm} \times 1.528 \text{ mm}$,与优化前尺寸相当,表明本文优化后应变计整体尺寸与当前标准规格的

应变计整体尺寸相差不大,证明本文的研究对丝式高温应变计的一致性没有影响,符合工程中丝式高温应变计的设计制作要求。

5 结 论

本文针对高温应变计喷涂式粘贴方式,采用“嵌入式”建模方法进行有限元建模。分别通过建立简支梁与悬臂梁模型来对测量误差与疲劳寿命进行计算。利用控制变量法,分别进行了 7 种不同参数变化对测量误差与疲劳寿命的影响规律。并对高温应变计各参数进行多目标优化,结论如下:

1) 测量误差随栅丝直径增大而降低,随栅丝长度增大先降低后升高,随栅丝间距增大先降低后升高,随栅丝弯数增大先减小后增大,随过渡层厚度增加先减小后增大,随基底厚度增加先减小后增大,测量误差随覆盖层厚度增加而减小;疲劳寿命随栅丝直径增大而增大,随栅丝长度增大先减小后增大,在间距 0.55 mm 处最优,随弯数增大呈下降趋势,随过渡层厚度增大呈上升趋势,随基底厚度增大呈下降趋势,随覆盖层厚度增大而增大。

2) 根据 Box-Behnken 试验方法设计的参数组合进行有限元仿真计算,建立 5 个参数变量对两个目标函数的响应面近似模型,经验证后该模型显著性良好,可用于下一步优化计算。基于遗传算法将响应面模型进行多目标优化,优化目标为测量误差最小,疲劳寿命最大,二者权重皆为 0.5。优化后的参数组合:栅丝直径 0.04 mm、栅丝长度 11 mm、栅丝间距 0.476 mm、弯数 3 弯、基底厚度为 0.03 mm。测量误差为 0.255%,疲劳寿命为 2.3846×10^7 次循环。与优化预测结果基本相符,证明了该优化方法对丝式高温应变计多参数多目标优化的可行性。

3) 高温应变计试验与有限元仿真结果误差在 5% 以内,证明了有限元模型的准确性。多目标优化前后测量误差降低了 89.2%,疲劳寿命提升了 10.14%,验证了本文丝式高温应变计优化方法的可行性。对以后高温丝式应变计的设计与制作具有重要价值。

参考文献

[1] 唐文彦. 传感器[M]. 第四版. 北京:机械工业出版社, 2007.

TANG W Y. Sensor[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2007.

[2] 蔡宁泊, 侯乃先, 张成成. 航空发动机振动应力测量的贴片可靠性及优化分析[J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1964-1969.

CAI N B, HOU N X, ZHANG CH CH. Reliability and optimization analysis of strain-gauge application for

- aeroengine vibration measurements [J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(10): 1964-1969.
- [3] 崔云先, 张子超, 丁万昱, 等. NiCr 高温薄膜电阻应变计制备及耐高温性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1548-1555.
- CUI Y X, ZHANG Z CH, DING W Y, et al. Preparation and high temperature resistance of NiCr high temperature film resistance strain gauge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1548-1555.
- [4] MITTMANN H U, CZAICA N, CZICHOS H. A new device for simultaneous measurement of friction force, normal force and friction coefficient [J]. Wear, 1975, 31(1): 179-184.
- [5] LI L, MAHMOODIAN M, LI C Q. Prediction of fatigue failure of corrosion affected riveted connections in steel structures [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(11): 1524-1538.
- [6] 王彪, 李昂, 孙洋, 等. 表面粘贴式 MEMS 应变传感器的应变传递分析 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2606-2612.
- WANG B, LI ANG, SUN Y, et al. Strain transfer analysis of surface bonded MEMS strain sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2606-2612.
- [7] 易晖, 张卫. 应变计横向效应对应变测量的影响与修正 [J]. 直升机技术, 2011(1): 60-63.
- YI H, ZHANG W. Influence and correction of transverse effect of strain gauge on strain measurement [J]. Helicopter Technology, 2011(1): 60-63.
- [8] 尹福炎. 箔式应变计结构模型与有限元分析 [J]. 外文翻译, 2009, 38(5): 47-50.
- YIN F Y. Structural model and finite element analysis of foil strain gauge [J]. Translation, 2009, 38(5): 47-50.
- [9] 王文瑞, 张佳明, 闫晓强, 等. 高温应变片关键参数标定方法 [J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1645-1650.
- WANG W R, ZHANG J M, YAN X Q, et al. Calibration method of key parameters of high temperature strain gauge [J]. Journal of Engineering Science, 2015, 37(12): 1645-1650.
- [10] 韦铁平, 杨晓翔, 姚进辉. 柱式负荷传感器的长径比对端部效应的影响 [J]. 应用力学学报, 2015, 32(6): 1038-1043.
- WEI T P, YANG X X, YAO J H. Influence of length-diameter ratio on end effect of column load sensor [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(6): 1038-1043.
- [11] ZIKE S, MIKKELSEN L P. Correction of gauge factor for strain gauges used in polymer composite testing [J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(3): 393-403.
- [12] 胡玉梅, 张方建, 邵毅敏, 等. 应变片敏感栅结构参数对测量精度的影响 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2013, 36(12): 21-27.
- HU Y M, ZHANG F J, SHAO Y M, et al. Influence of structural parameters of strain gage-sensitive grid on measurement accuracy [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(12): 21-27.
- [13] 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 structural parameters of strain gauge sensitive grid based on orthogonal test [J]. China Measurement and Testing, 2018, 44(6): 129-133.
- [14] OI K. Transient response of bonded strain gages [M]. Beijing: Experimental Mechanics, 1986.
- [15] ROHRBACH, CHR, CZAICA N. Ueber das dauer schwingverhalten von dehungsmeßstreifen [J]. Merterialprüfungs, 1991, 3(4): 37-39.
- [16] 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, 17(4): 66-68.
- WANG R J. Study on fatigue law of strain gauge in dynamic test [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2000, 17(4): 66-68.
- [17] 宋瑞如, 艾延廷, 李成刚, 等. 敏感栅结构参数对应变片疲劳性能影响的研究 [J]. 滨州学院学报, 2020, 36(6): 1-8.
- SONG R R, AI Y T, LI CH G, et al. Effect of structural parameters of sensitive grid on fatigue performance of strain gauge [J]. Journal of Binzhou University, 2020, 36(6): 1-8.
- [18] 梁伟, 韦铁平, 杨晓翔, 等. 应变片排布位置对柱式力传感器输出影响 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 132-143.
- LIANG W, WEI T P, YANG X X, et al. Effect of strain gauge position on the output of column force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 132-143.

- 132-143.
- [19] BOX G, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[J]. Journal of the Royal Statistical Methodology, 1951(1): 1-45.
- [20] 郭勤涛, 张令弥, 费庆国. 用于确定性计算仿真的响应面法及其试验设计研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 55-61.
- GUO Q T, ZHANG L M, FEI Q G. Response surface methodology and experimental design for deterministic computational simulation [J]. Journal of Aviation, 2005, 26(1): 55-61.
- [21] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [22] 沈成康. 断裂力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- SHEN CH K. Fracture mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [23] 雷冬. 疲劳寿命预测若干方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- LEI D. Research on several methods of fatigue life prediction [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [24] MORETON D N. An introduction to measurements using strain gauges karl hoffmann [J]. Strain, 2001, 37(3): 127.
- [25] 单一男, 马智锦, 曾旭, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 1-9.
- SHAN Y N, MA ZH J, ZENG X, et al. Research on structural deformation estimation method based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 1-9.
- [26] 魏国前, 岳旭东, 党章, 等. 结合 S-N 曲线和断裂力学的焊接结构疲劳寿命分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 23-27.
- WEI G Q, YUE X D, DANG ZH, et al. Fatigue life analysis of welded structures based on S-N curve and fracture mechanics [J]. Journal of Welding, 2017, 38(2): 23-27.
- [27] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence[M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 1992.

- [28] 艾延廷, 刘海月, 田晶. 薄壁机匣螺栓连接结构多目标优化设计[J]. 推进技术, 2019, 40(4): 1-8.

AI Y T, LIU H Y, TIAN J. Multi-objective optimization design of bolt connected flange for thin-walled casing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(4): 1-8.

作者简介



艾延廷, 1986 年于沈阳航空工业学院获得工学学士学位, 1989 年于西北工业大学获得工学硕士学位, 2006 年于东北大学获得工学博士学位。现为沈阳航空航天大学教授。

E-mail: ytai@163.com

Ai Yanting received his B.Sc. degree in engineering from Shenyang Institute of Aeronautical Engineering in 1986, received his M.Sc. degree in engineering from Northwestern Polytechnical University in 1989, and received his Ph.D. degree in engineering from Northeastern University in 2006. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Shenyang Aerospace University. His main research interests include aeroengine structural strength and vibration, fault diagnosis and advanced testing technology.



刘明, 2019 年于沈阳航空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, 主要研究方向为与推进系统试验先进测试技术。

E-mail: 906549843@qq.com

Liu Ming received his B.Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2019. He is currently a master student at Shenyang Aerospace University. His research interest is the advanced testing technology for propulsion system testing.



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、高温动态应变计疲劳寿命研究。

E-mail: fling707@163.com

Zhang Fengling (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Tianjin University in 2000 and received her Ph.D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2020. She is currently an associate professor at Shenyang University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests are aeroengine vibration control and fatigue life of high temperature dynamic strain gauge.