

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311408

基于响应面法的高温应变计敏感栅结构优化研究*

张凤玲, 张旭, 艾延廷, 赵亚芝

(沈阳航空航天大学航空发动机学院 沈阳 110136)

摘要: 高温应变计是航空发动机重要的研保条件, 为满足其更高的使用要求, 对高温应变计敏感栅结构参数进行了优化。首先, 采用有限元计算方法分析了考虑温度误差后敏感栅栅丝长度、栅丝间距和栅丝弯数对测量误差和疲劳寿命的影响; 然后, 基于响应面法建立了测量误差和疲劳寿命响应面模型, 利用多目标灰狼算法进行了结构参数优化设计, 得到了 Pareto 最优解集; 最后, 根据优化结果制备高温应变计进行了高温振动疲劳试验。研究表明, 不同参数组合的敏感栅结构对高温应变计的性能影响不同。结合高温应变计制备需求与性能对比来评估得到的 Pareto 最优解集, 得到了一个最优敏感栅结构。高温下优化后的应变计疲劳寿命较优化前相比提升了 30.4%, 优化效果显著。

关键词: 高温应变计; 敏感栅; 响应面法; 参数优化; 多目标灰狼算法

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

Sensitive grid structure optimization of high temperature strain gauge based on response surface methodology

Zhang Fengling, Zhang Xu, Ai Yanting, Zhao Yazhi

(School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: High temperature strain gauge is an important research assurance for aero-engines. To meet its higher use requirements, the structural parameters of high temperature strain gauge sensitive grid are optimized. Firstly, the influence of wire length, wire spacing and wire bending number on the measurement error and fatigue life of sensitive grid is analyzed by the finite element method considering the temperature error. Secondly, the response surface model of measurement error and fatigue life is formulated, which is based on response surface methodology. The multi-objective gray wolf algorithm is used to perform the structural parameter optimization, and the Pareto optimal solution set is obtained. Finally, according to the optimization results, a high temperature strain gauge is prepared for high temperature vibration fatigue test. The simulation results show that the sensitive grid structure with different parameter combinations has different effects on the performance of the high temperature strain gauge. The Pareto optimal solution set is evaluated by comparing the production requirements and performance of the high temperature strain gauge, and an optimal sensitive grid structure is obtained. The fatigue life of the optimized strain gauge at high temperature is increased by 30.4% compared with that before optimization, and the optimization effect is remarkable.

Keywords: high temperature strain gauge; sensitive grid; response surface methodology; parameter optimization; multi-objective grey wolf optimizer

0 引言

高温电阻应变计能满足高温、高压及高频振动的试验测试要求, 且灵敏度与精确度高, 输出的电信号容

易实现自动化, 因此适用于航空发动机、燃气轮机等高温环境的应力应变测量^[1]。在高温应变计的制备阶段, 综合考虑测量误差和疲劳寿命, 采用最优化的方法设计敏感栅结构参数, 以提升高温应变计的测试能力十分重要。

收稿日期: 2023-05-09 Received Date: 2023-05-09

* 基金项目: 沈阳航空航天大学博士启动基金(120421004)项目资助

对于应变计的研究,国内外学者已经做了大量的工作。Daniel等^[2]提出了一种新的方法来区分温度和应变对电阻应变计的影响,该方法是将两个由不同的材料制成的应变计以嵌套的形状放置,实际测试证明该方法可以有效区分温度和应变引起的电阻变化。吴东等^[3]分析了高温流场中的飞行器典型部位的应变测量试验,研究了高温应变计稳态及瞬态热输出影响因素及对测量结果的影响。刘梓才等^[4]通过分析热输出的影响因素,对高温应变计在安装试件材料和基底材料线膨胀系数不匹配情况下的热输出测试进行了探索,对各种测试方式下的热输出进行了比较。叶迎西等^[5]对不同升温速率下某型应变片的热输出进行了对比,发现在相同的工作条件下,由于基底和敏感栅温度传导性能不同,不同温度及升温速率下应变计的热输出值相差很大。王文瑞等^[6]通过有限元计算研究了敏感栅直径、长度、间距及胶黏层厚度对测量精度的影响,分析得到了一组最优的结构参数组合,利用自主设计的高温应变计进行试验,得到800℃下的平均测量误差为13.2%,高温应变测量精度提升效果好。许艺青等^[7]基于正交试验法设计试验方案,建立三维模型,采用有限元软件进行模拟分析,得到了敏感栅结构参数对应变传递误差的影响及最优值。宋瑞如等^[8]采用正交试验法,研究了栅丝直径、栅丝长度、敏感栅弯数、栅丝间距对应变计疲劳寿命的影响,得到了寿命最大时的敏感栅结构参数值。孙婧妍等^[9]根据高温应变计自身组成结构的角度进行研究,运用有限元方法模拟分析了影响高温应变计测量可靠性的影响因素,通过优化选型得到了性能优良的参数。艾延廷等^[10]在不考虑温度环境的前提下,以提升测量精度和疲劳寿命为目标对高温应变计进行了优化,得到了最佳参数组合,并在室温下进行试验验证了优化的有效性。Stehlin等^[11]建立了应变计的一维应力应变传递模型,对应变分布进行了分析,并推导出了敏感栅轴向的应变分布公式。Xia等^[12]设计了一种新型应变传感器,通过数值模拟和试验研究对影响传感器测量精度的因素进行了分析,发现被测件的加载速度对测试精度有很大影响。Huang等^[13]对应变计的布置进行了优化研究,提出一种新的通用布置框架,通过案例验证了这种框架的可行性,为结构性能评估提供了有益参考。Oi^[14]分析了应变计失效的原因,发现循环次数是引起疲劳破坏的主要原因,而振动频率对寿命的影响很小。Chr等^[15]研究了应变计的疲劳断裂问题,发现灵敏度变化和零点漂移是应变计疲劳失效的主要表现形式。徐从裕等^[16]提出了一种基于转换系数法的应变零漂消除原理和方法,结果表明该方法在腐蚀疲劳试验条件下可以有效抑制零漂。徐永君等^[17]对不同焊接方式的应变计进行试验研究和数值分析,对比得到了具有很好的应变传递性能和疲劳性能的焊接方式。王凡等^[18]

采用了一种新方法校准高应变率下高温应变计在高温环境下的灵敏度系数,该方法能够简便实现高温应变计在高温、高应变率下的校准且适用范围广。

目前,国内外的研究一方面是从试验测试角度切入,研究应变计各部分结构材料、加载方式等对测量误差和热输出的影响从而进行特定使用环境的校准,以及研究导致疲劳破坏的主要原因和焊接方式对疲劳性能的影响;另一方面是从单因素法切入,研究应变计敏感栅结构参数、工艺参数对测量误差和疲劳寿命的影响,其中涉及有限元计算的研究部分没有考虑温度场的影响。另外,优化相关的研究以单目标为主,不能评估优化目标以外的应变计性能是否下降。

针对以上问题,本文建立稳态温度场下的有限元计算模型,以敏感栅的栅丝长度、栅丝间距和栅丝弯数为参数变量,测量误差和疲劳寿命为目标函数,通过响应面法建立多目标优化模型,利用多目标灰狼优化(multi-objective grey wolf optimizer, MOWGO)算法得到最优参数组合,针对优化后的高温应变计进行有限元计算并设计高温振动疲劳试验以验证优化方法的有效性。

1 理论基础

1.1 热输出

应变计的热输出是指试件能够自由膨胀且不受外力作用,由温度变化引起的应变^[19]。敏感栅的电阻温度效应以及被测试件与敏感栅之间线膨胀系数差异是组成高温应变计热输出的主要因素,表示为:

$$\varepsilon_t = (\beta_s - \beta_g) \Delta T + \frac{\alpha \Delta T}{K} \quad (1)$$

式中: α 为敏感栅材料的电阻温度系数; K 为灵敏度系数; β_s 为被测件材料线膨胀系数; β_g 为敏感栅材料线膨胀系数; ΔT 为温度的变化值。

式(1)是在高温应变计的覆盖层、基底和过渡层受热时不产生热胀冷缩的基础上推导出的,与试验测试记录的热输出数值相差甚远。本文在高温稳态有限元计算中考虑的热输出为覆盖层、基底、过渡层、被测件和敏感栅本身等共同在热膨胀作用下敏感栅产生的误差应变。

1.2 疲劳寿命估算理论

本文用名义应力法与线性损伤理论结合有限元方法估算敏感栅的疲劳寿命^[8]。根据线性疲劳累积损伤理论,在循环载荷作用下,疲劳损伤线性累积且各应力不相关。当累积损伤达到一定极限值时,会发生疲劳破坏。在*i*个应力水平下分别经过*n_i*次应力循环有:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中:*D*为疲劳损伤度;*N_i*为造成破坏时的循环数。

当 $D=1$ 时,材料发生疲劳破坏,令:

$$P(s) = \frac{n_i}{N} \quad (3)$$

材料的 $S-N$ 指数函数为:

$$Ne^{ms} = C \quad (4)$$

式中: m 和 C 为材料相关常数。

联立式(2)~(4)可得发生疲劳破坏时的循环次数为:

$$N = \frac{1}{\int_0^\infty \frac{P(s)e^{ms}}{C} ds} \quad (5)$$

1.3 响应面法

响应面法是通过近似构造一个显示多项式来表达隐式功能函数,如果响应面模型有效且拟合精度较高,响应面模型可以反映出实际系统的特征,二阶响应面函数多项式为:

$$\hat{y}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{j < i}^n \alpha_{ji} x_j x_i \quad (6)$$

式中: n 为设计变量的数量; α_0 为偏移项; α_i 为线性偏移; α_{ii} 为二阶偏移项; α_{ji} 为交互系数。

2 研究对象及优化目标

本文研究的金属丝式高温应变计如图1所示,采用喷涂的方法将敏感栅固定。敏感栅是应变计最核心的元件,敏感栅的形状与尺寸直接影响到应变计的测量误差,且研究表明动态测试中应变计的疲劳主要发生在敏感栅和引线部分,敏感栅结构示意图如图2所示,材料为特制的铂钨合金。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。

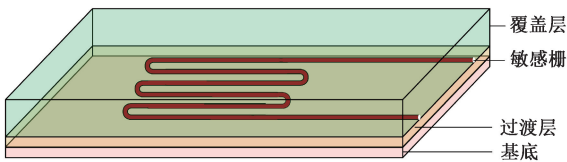


图1 高温应变计结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of high temperature strain gauge

在进行高温稳态有限元计算过程中,首先需要考虑覆盖层、基底、过渡层、被测件和敏感栅本身等共同在热膨胀作用下敏感栅产生的误差应变,然后计算施加载荷后敏感栅的应变值,最后做差消除其影响。根据我国航空发动机测试的使用需求,本文仿真计算的温度场设为 $1\ 000^\circ\text{C}$,为应用于航空发动机测试中的高温应变计提供实际参考。

研究敏感栅结构参数对测量误差的影响时,由于被测件形变传递给敏感栅产生的应变与被测件的真实应变

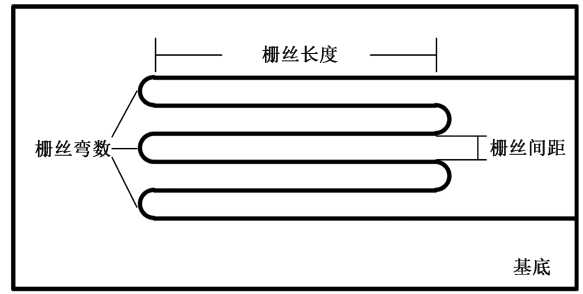


图2 敏感栅结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of sensitive grid

并不一致,本文把这种差异称为测量误差^[20],在考虑误差应变后,测量误差的计算公式表示为:

$$\delta = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \times 100\% \quad (7)$$

式中: ε_1 为简支梁加载后敏感栅产生的应变值; ε_2 为敏感栅产生的误差应变值; ε_3 为简支梁的应变值。 ε_1 和 ε_2 是加载前后敏感栅全部轴向路径的应变平均值。

测量误差模型是基于应变测量加载试验系统建立的,高温应变计位于简支梁中心位置,在梁上施加对称且垂直向下的力载荷,测量误差计算模型贴片区域沿敏感栅轴向的简支梁应变云图如图3所示。

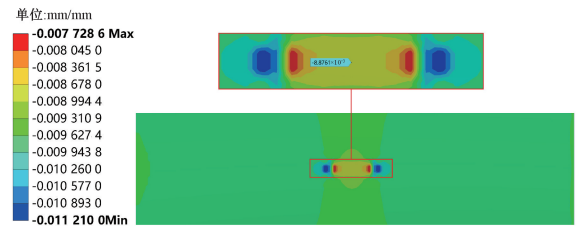


图3 贴片区域简支梁应变云图

Fig. 3 Strain cloud diagram of simply supported beam in patch area

研究敏感栅结构参数对疲劳寿命的影响时,疲劳寿命计算模型中的高温应变计中心在距离悬臂梁固定端 $17.5\ \text{mm}$,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,使减去误差应变后的差值约为 $500\ \mu\varepsilon$,根据疲劳寿命估算流程,得到疲劳寿命计算模型的敏感栅寿命云图如图4所示。

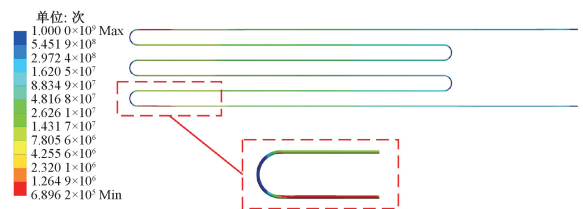


图4 敏感栅寿命云图

Fig. 4 Lifetime cloud diagram of the sensitive grid

3 敏感栅结构参数对测量误差及疲劳寿命的影响研究

根据制备工艺的极限尺寸及相关工程需求确定了 3 个结构参数的范围,采用控制变量法研究不同参数组合对高温应变计性能的影响。为确保敏感栅整体不脱离涂层,在每个结构参数取值范围的中值附近分别设置了 3 组对照参数。

3.1 敏感栅结构参数对测量误差影响研究

1) 栅丝长度对测量误差影响研究

保持其他参数不变,设置栅丝间距 0.35、0.40、0.45 mm 与栅丝弯数 3、5、7 弯作为对照,研究栅丝长度在 5~11 mm 变化时对测量误差的影响,如图 5 所示。

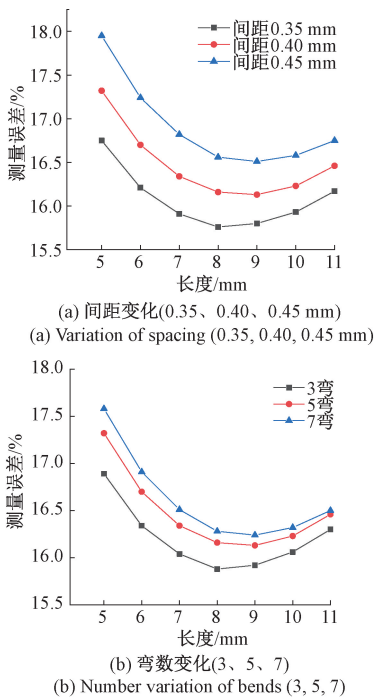


图 5 栅丝长度对测量误差影响

Fig. 5 Effect of grid wire length on measurement error

由图 5(a)可知,随着栅丝长度的增加,测量误差先减小后增大,栅丝长度存在使测量误差最小的最优值。栅丝间距为 0.35 mm 时,栅长最优值为 8 mm;栅丝间距为 0.40 和 0.45 mm 时,栅长最优值为 9 mm。

由图 5(b)可知,随着栅丝长度的增加,测量误差先减小后增大,栅丝长度存在使测量误差最小的最优值。栅丝弯数为 3 弯时,栅长最优值为 8 mm;栅丝间距为 5 弯和 7 弯时,栅长最优值为 9 mm。可见,栅丝间距和栅丝弯数影响了栅丝长度从小到大变化中对测量误差的最优值。

2) 栅丝间距对测量误差影响研究

保持其他参数不变,设置栅丝长度 7、8、9 mm 与栅丝弯数 3、5、7 弯作为对照,研究栅丝间距在 0.30~0.60 mm 变化时对测量误差的影响,如图 6 所示。

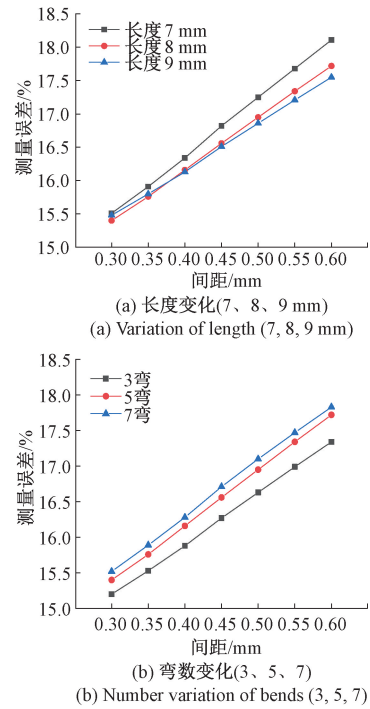


图 6 栅丝间距对测量误差影响

Fig. 6 Effect of grid wire spacing on measurement error

由图 6(a)和(b)可知,随着栅丝间距的增加,测量误差不断增大,栅丝长度影响了栅丝间距变化导致的测量误差增大速度。

3) 栅丝弯数对测量误差影响研究

保持其他参数不变,设置栅丝长度 7、8、9 mm 与栅丝间距 0.30、0.35、0.40 mm 作为对照,研究栅丝弯数在 1~11 弯变化时对测量误差的影响,如图 7 所示。

由图 7(a)和(b)可知,随着栅丝弯数的增加,测量误差变化为先增大后趋于平缓,且有减小的趋势。栅丝长度影响了栅丝弯数变化导致的测量误差增大速度。

3.2 敏感栅结构参数对疲劳寿命影响研究

1) 栅丝长度对疲劳寿命影响研究

设置栅丝间距 0.35、0.40、0.45 mm 与栅丝弯数 3、5、7 弯作为对照,研究栅丝长度在 5~11 mm 变化时对疲劳寿命的影响,如图 8 所示。由图 8(a)和(b)可知,随着栅丝长度的增加,疲劳寿命先降低后升高,栅丝长度达到 10 mm 后,疲劳寿命变化不明显。

2) 栅丝间距对疲劳寿命影响研究

设置栅丝长度 7、8、9 mm 与栅丝弯数 3、5、7 弯作为

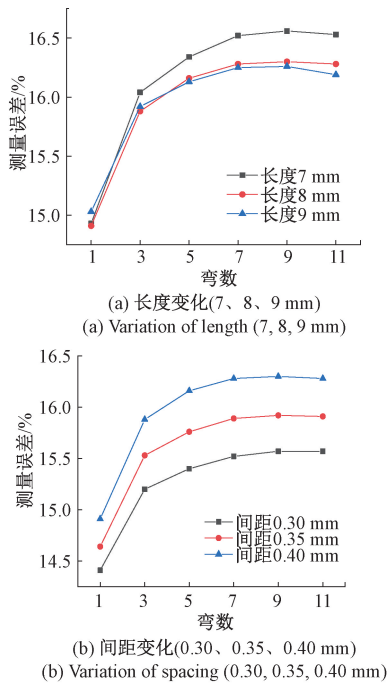


图7 栅丝弯数对测量误差影响

Fig. 7 Effect of grid wire bending number on measurement error

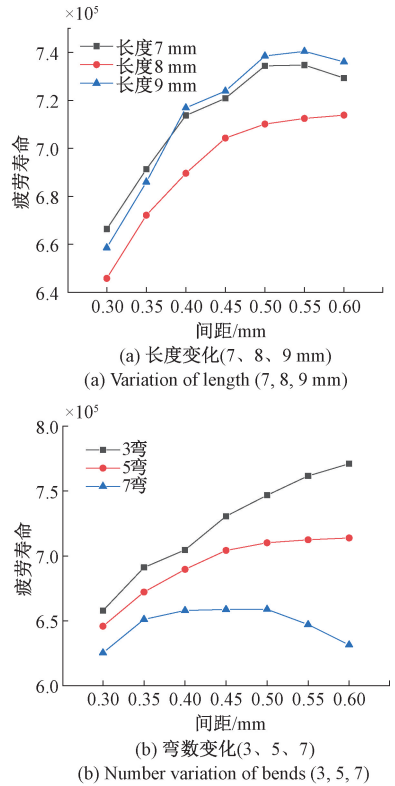


图9 栅丝间距对疲劳寿命影响

Fig. 9 Effect of grid wire spacing on fatigue life

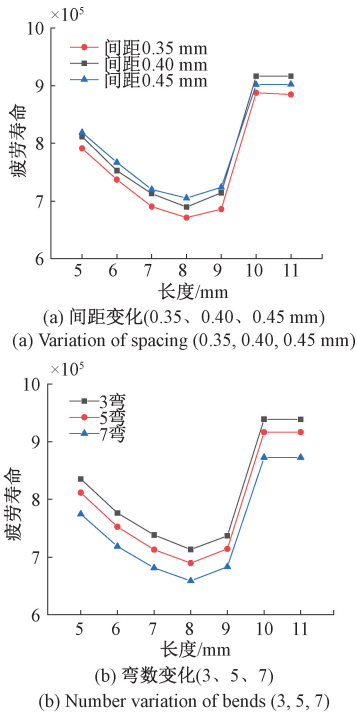


图8 栅丝长度对疲劳寿命影响

Fig. 8 Effect of grid wire length on fatigue life

对照,研究栅丝间距在 0.30~0.60 mm 变化时对疲劳寿命的影响,如图 9 所示。

由图 9(a)可知,栅长为 8 mm 时,随着栅丝间距的增加,疲劳寿命不断升高;栅长为 7 和 9 mm 时,疲劳寿命先

升高后降低,间距为 0.55 mm 时疲劳寿命最高。由图 9(b)可知,弯数为 3 弯和 5 弯时,随着栅丝间距的增加,疲劳寿命不断升高;弯数为 7 弯时,疲劳寿命先升高后降低,间距为 0.5 mm 时疲劳寿命最高。栅丝长度和栅丝弯数影响了栅丝间距导致的疲劳寿命的变化趋势和变化速度。

3) 栅丝弯数对疲劳寿命影响研究

设置栅丝长度 7、8、9 mm 与栅丝间距 0.30、0.35、0.40 mm 作为对照,研究弯数在 1~11 弯变化时对疲劳寿命的影响,如图 10 所示。

由图 10(a)可知,栅长为 7 和 8 mm 时,随着栅丝弯数的增加,疲劳寿命不断降低;栅长为 9 mm 时,随着栅丝弯数的增加,疲劳寿命先升高后降低,3 弯时的疲劳寿命最大,栅丝长度影响了栅丝弯数变化导致的疲劳寿命变化趋势。图 10(b)可知,随着栅丝弯数的增加,疲劳寿命不断降低,栅丝间距影响了栅丝弯数导致的疲劳寿命降低速度。

通过研究敏感栅的 3 个结构参数对测量误差和疲劳寿命的影响关系可知,不同参数组合对高温应变计两个优化目标有不同程度的影响,需要进一步开展优化研究。

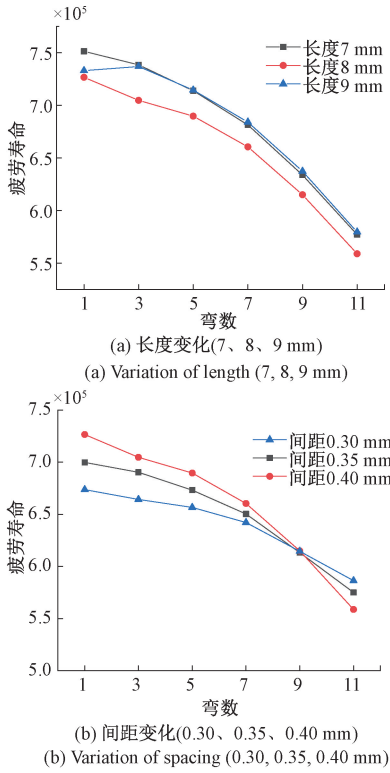


图 10 栅丝弯数对疲劳寿命影响

Fig. 10 Effect of grid wire bending number on fatigue life

4 高温应变计敏感栅结构参数优化设计

4.1 响应面模型设计

本文以敏感栅的栅丝弯数 B 、栅丝长度 L 以及栅丝间距 S 为设计变量,测量误差和疲劳寿命为目标响应函数,采用 BBD(box-behnken design) 试验设计方法进行试验设计,通过响应面法建立测量误差响应面模型和疲劳寿命响应面模型,参数取值范围如表 1 所示。

表 1 参数取值范围
Table 1 Parameter range list

敏感栅参数	取值范围
栅丝弯数 B	3~7
栅丝长度 L/mm	5~11
栅丝间距 S/mm	0.30~0.60

基于 BBD 设计方法得到试验设计方案表,如表 2 所示,依照该方案的试验设计点进行有限元仿真计算,并将计算得到的结果,即测量误差 E 和疲劳寿命 N 填入到相应的列中。

表 2 方案设计和结果

Table 2 Scheme design and results

序号	B	L/mm	S/mm	$E/\%$	$N/(\times 10^5)$
1	3	5	0.45	17.43	8.374 1
2	7	11	0.45	16.79	8.478 1
3	3	8	0.6	17.34	7.71
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	5	8	0.45	16.59	7.059 7
16	5	5	0.3	16.22	7.617 0
17	5	11	0.6	17.6	8.575 5

应用最小二乘法拟合得到关于测量误差和疲劳寿命的响应面模型 $\hat{y}_1(x)$ 和 $\hat{y}_2(x)$:

$$\hat{y}_1(x) = 16.59 + 0.225 0x_1 - 0.580 0x_2 + 1.20x_3 - 0.137 5x_1x_2 + 0.042 5x_1x_3 - 0.437 5x_2x_3 - 0.108 8x_1^2 + 0.766 3x_2^2 - 0.008 8x_3^2 \quad (8)$$

$$\hat{y}_2(x) = 7.06 - 0.409 5x_1 + 0.357 4x_2 + 0.251 5x_3 - 0.086 8x_1x_2 - 0.267 6x_1x_3 - 0.124 0x_2x_3 - 0.026 6x_1^2 + 1.48x_2^2 - 0.319 2x_3^2 \quad (9)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 分别为栅丝的弯数、长度和间距。

4.2 响应面模型评价

为了考察响应面模型能否应用到后面的优化设计中,需要检验模型的有效性。模型中各个因素的重要性通过 F 值和 P 值用来衡量,因素影响越大则 F 值越大, P 值越小。根据统计学中假设检验的相关理论, $P < 0.05$ 时,表明模型有效,分析结果如表 3、4 所示。由表 3 可知,测量误差模型有效,模型中线性作用均显著,交互作用显著项为 BL 和 LS ,平方项显著项为 L^2 。

表 3 测量误差模型方差分析

Table 3 Variance analysis of measurement error model

类型	平方和	均值	F 值	P 值
模型	17.91	1.99	220.78	< 0.000 1
B	0.405 0	0.405 0	44.93	0.000 3
L	2.69	2.69	298.55	< 0.000 1
S	11.47	11.47	1 272.65	< 0.000 1
BL	0.075 6	0.075 6	8.39	0.023 1
BS	0.007 2	0.007 2	0.801 5	0.400 4
LS	0.765 6	0.765 6	84.93	< 0.000 1
B^2	0.049 8	0.049 8	5.52	0.051 1
L^2	2.47	2.47	274.25	< 0.000 1
S^2	0.000 3	0.000 3	0.035 8	0.855 4

由表 4 可知,疲劳寿命模型有效,模型中线性作用均显著,交互作用显著项为 *BS* 和 *LS*,平方项显著项为 L^2 和 S^2 。

表 4 疲劳寿命模型方差分析

Table 4 Variance analysis of fatigue life model

类型	平方和	均值	F 值	P 值
模型	12.72	1.41	129.90	< 0.000 1
<i>B</i>	1.34	1.34	123.30	< 0.000 1
<i>L</i>	1.02	1.02	93.95	< 0.000 1
<i>S</i>	0.506 1	0.506 1	46.52	0.000 2
<i>BL</i>	0.030 1	0.030 1	2.77	0.140 0
<i>BS</i>	0.286 4	0.286 4	26.33	0.001 4
<i>LS</i>	0.061 5	0.061 5	5.65	0.049 1
B^2	0.003 0	0.003 0	0.2728	0.617 6
L^2	9.22	9.22	847.39	< 0.000 1
S^2	0.429 1	0.429 1	39.44	0.000 4

通过复相关系数 R-Squared 以及修正的复相关系数 Adj-R-Squared 对响应面模型的拟合程度进行判定^[21],两个系数的取值范围是(0, 1),越接近 1 意味着拟合精度越高,越接近真实的系统。如表 5 所示,两个响应面模型的复相关系数和修正的复相关系数都接近 1,说明拟合精度高。

表 5 复相关系数和修正的复相关系数

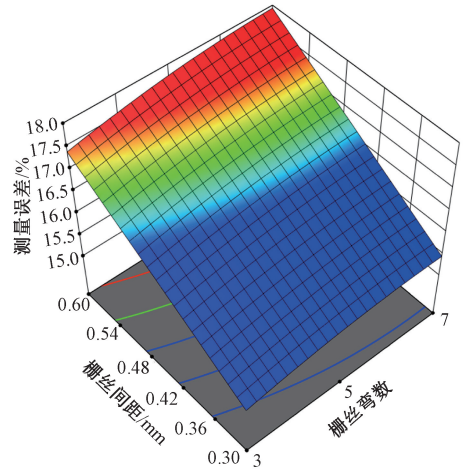
Table 5 R-Squared and Adj-R-Squared of RSM models

目标模型	测量误差	疲劳寿命
R-Squared	0.996 5	0.994 0
Adj-R-Squared	0.992 0	0.986 4

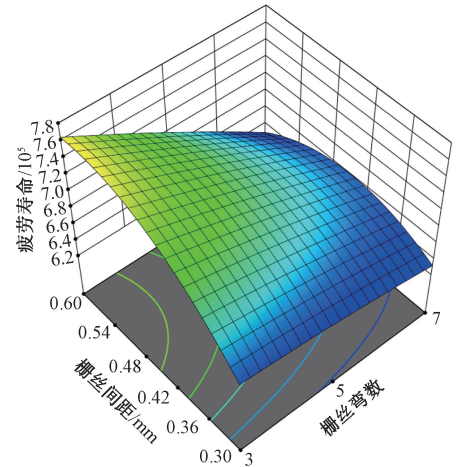
4.3 响应曲面分析

响应面法可以根据测量误差响应面模型和疲劳寿命响应面模型做出 3 个敏感栅结构参数间交互作用的三维立体响应曲面,在其中某个结构参数固定在其取值范围中点的情况下,考查另外两个结构参数的交互作用对测量误差和疲劳寿命的影响^[22],如图 11 所示,曲面越陡说明影响越显著。

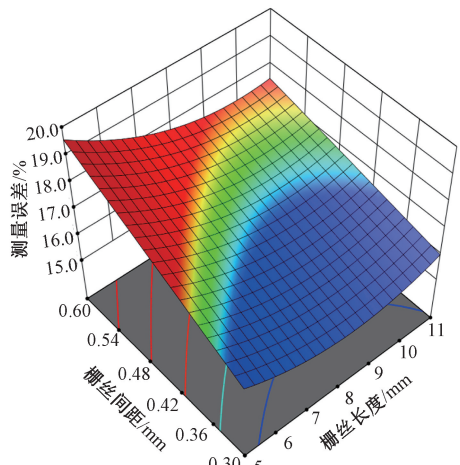
图 11(a)、(c)、(e)分别为栅丝间距、栅丝弯数、栅丝长度之间交互作用对测量误差的影响,可以看出栅丝间距与栅丝长度对测量误差的交互作用最强,栅丝间距与栅丝弯数对测量误差的交互作用最弱。图 11(b)、(d)、(f)分别为栅丝间距、栅丝弯数、栅丝长度之间交互作用对疲劳寿命的影响,可以看出栅丝间距与栅丝弯数对疲劳寿命的交互作用最强,栅丝长度与栅丝弯数对测量误差的交互作用最弱。



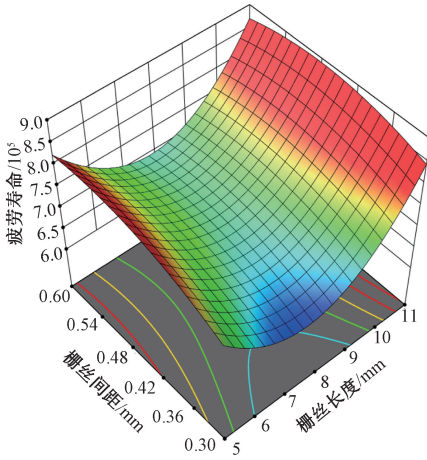
(a) 栅丝间距和栅丝弯数对测量误差的交互影响
(a) Interaction effects of grid wire spacing and grid wire bends on measurement error



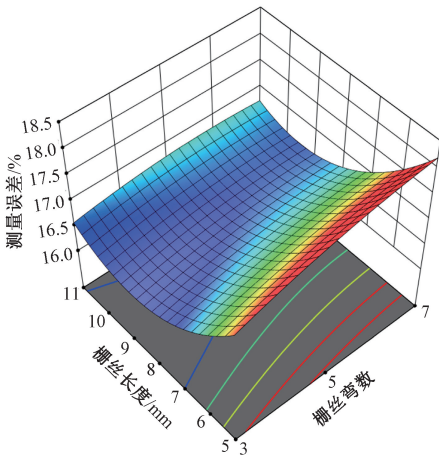
(b) 栅丝间距和栅丝弯数对疲劳寿命的交互影响
(b) Interaction effects of grid wire spacing and grid wire bends on fatigue life



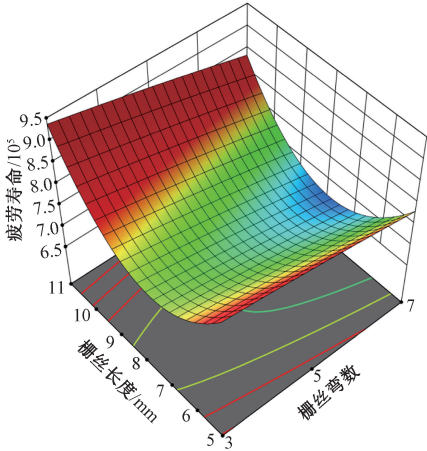
(c) 栅丝间距和栅丝长度对测量误差的交互影响
(c) Interaction effects of grid wire spacing and grid wire length on measurement error



(d) 栅丝间距和栅丝长度对疲劳寿命的交互影响
(d) Interaction effects of grid wire spacing and grid wire length on fatigue life



(e) 栅丝长度和栅丝弯数对测量误差的交互影响
(e) Interaction effects of grid wire length and grid wire spacing on measurement error



(f) 栅丝长度和栅丝弯数对疲劳寿命的交互影响
(f) Interaction effects of grid wire length and grid wire spacing on fatigue life

图 11 栅丝长度、栅丝间距和栅丝弯数对测量误差和疲劳寿命交互影响的响应面

Fig. 11 Response surface of interaction effect of grid wire length, grid wire spacing and grid wire bending on measurement error and fatigue life

4.4 多目标优化

采用 MOGWO 算法^[23]对敏感栅参数进行优化,它的优势在于全局寻优的能力强、稳定性高、参数少、易实现,且提升了解集的精度和广度^[24-26]。

MOGWO 算法是根据灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO)^[27]扩展得到的,后者通过模拟灰狼的社会等级关系和捕食机制完成优化。按照灰狼的社会等级关系, GWO 算法最优解称为 α 狼,第 2 和第 3 最优解依次称为 β 狼和 δ 狼,其他候选解称为 ω 狼。捕猎(优化)过程由 α 、 β 和 δ 狼主导, ω 狼跟随这 3 种狼搜寻猎物位置(全局最优解)。在模拟灰狼捕猎过程中,按如下公式进行位置更新:

$$D = |C \odot X_p(t) - X(t)| \quad (10)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \odot D \quad (11)$$

$$A = 2a \odot r_1 - a \quad (12)$$

$$C = 2r_2 \quad (13)$$

式中: \odot 为 Hadamard 乘积操作; t 为迭代次数; A 和 C 为位置系数向量; X_p 为猎物位置的向量; X 为灰狼位置的向量; a 在迭代过程中由 2 线性递减至 0; r_1 、 r_2 为元素在区间 $[0, 1]$ 中随机取值的随机矢量。

在捕猎过程中,由 α 、 β 、 δ 狼的位置来确定猎物位置, ω 狼在它们的领导下更新自己的位置:

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \odot D_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \odot D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 \odot D_\delta \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} D_\alpha = C_1 \odot X_\alpha - X(t) \\ D_\beta = C_2 \odot X_\beta - X(t) \\ D_\delta = C_3 \odot X_\delta - X(t) \end{cases} \quad (15)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (16)$$

式中: X_α 、 X_β 、 X_δ 为 α 、 β 、 δ 狼的位置; D_α 、 D_β 、 D_δ 分别为 α 、 β 和 δ 狼与其他狼的距离; A_1 、 A_2 、 A_3 和 C_1 、 C_2 、 C_3 为 α 、 β 和 δ 狼对应的位置系数。

在迭代过程中,当 $|A| \leq 1$ 时,倾向于向猎物收敛,即得到优化问题的全局最优解。

MOGWO 算法在 GWO 算法的基础上增加了存档和领导选择机制以实现多目标优化。存档能够存储和检索目前为止得到的非支配 Pareto 最优解,领导选择机制是利用轮盘赌的方法从存档中选择头狼。

利用 MOGWO 算法对测量误差和疲劳寿命响应面模型进行求解,仿真环境为 MATLAB2016b。其中,设置灰狼种群大小 $GreyWolves = 500$,最大迭代次数 $MaxIt = 500$,存档大小 $ArchiveSize = 200$ 。算法得到的 Pareto 最优前沿如图 12 所示,Pareto 最优前沿是 Pareto 最优解集对应的测量误差和疲劳寿命函数值。

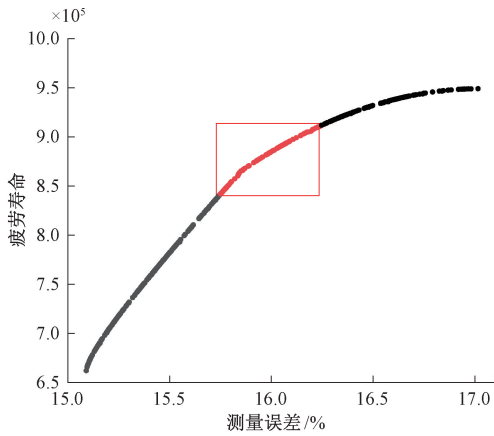


图 12 Pareto 最优前沿
Fig. 12 Pareto optimal front

高温应变计敏感栅在制备过程有诸多限制,弯数应为奇数,需要考虑到加工过程中栅丝间距调整的难度,栅丝长度不宜过长,一般优化方法的结果不能直接用于实际制作,因此更适合根据实际使用需求选择方案。结合 Pareto 最优前沿综合评估测量误差和疲劳寿命的优劣,在图 12 指定区域选择敏感栅参数组合,参数优化前后取值如表 6 所示。仿真计算得到优化前后高温应变计性能对比如图 13 所示,测量误差减小了 5.3%,疲劳寿命提高了 22.4%。

表 6 参数优化前后取值

Table 6 Value before and after parameter optimization

参数	栅丝弯数	栅丝长度/mm	栅丝间距/mm
优化前	7	5	0.35
优化后	3	10	0.40

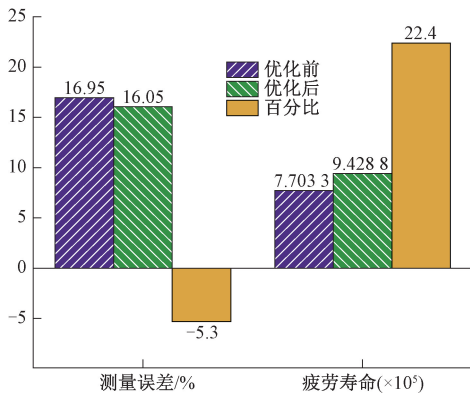


图 13 优化前后仿真结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation results before and after optimization

4.5 高温振动疲劳试验

根据优化得到的敏感栅结构参数进行高温应变计的制备,采用自主设计的高温振动疲劳试验系统进行试验以检验优化的有效性,试验系统如图 14 所示。

电桥功率放大器 减振底座 激振台 被测梁 激振杆 高温炉 温度控制柜



图 14 试验系统

Fig. 14 Diagram of test system

在被测梁的正反面对应位置各粘贴两片高温应变计,高温应变计粘贴位置如图 15 所示。

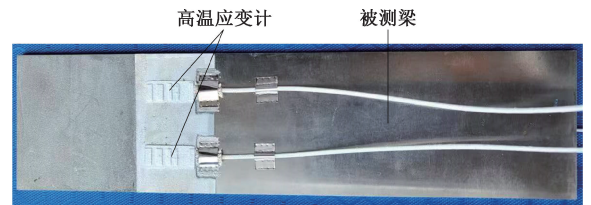


图 15 高温应变计贴片位置

Fig. 15 Placement diagram of high temperature strain gauge

试验中通过工作片补偿法消除热输出的影响,将梁上正反位置对应的高温应变计接入一个电桥,在受温度影响产生应变后,两个应变计具有相同的信号,因此在电桥中相互抵消。当被测梁受激振力且温度变化时,根据电桥基本特性,计算机的读数应变不包含温度变化所引起的应变,只得到所需测量的应变。设置温度控制柜使高温炉内温度为 1 000℃,选择梁的一阶固有频率作为试验的驻留振动频率,调试振动台使应变计输出应变达到 500 με,数据采集系统实时监控,试验中截取的应变时域图如图 16 所示。试验过程中通过使用红外线热成像仪精准监控炉内梁的实时温度,确保试验正常进行,如图 17 所示。

试验时进行校准,以保证结果的准确性。结果表明优化后的高温应变计平均疲劳寿命达到 7.3×10⁵ 次,与优化前的疲劳寿命 5.6×10⁵ 次相比,提升了 30.4%,验证了优化在实际测试中的有效性。

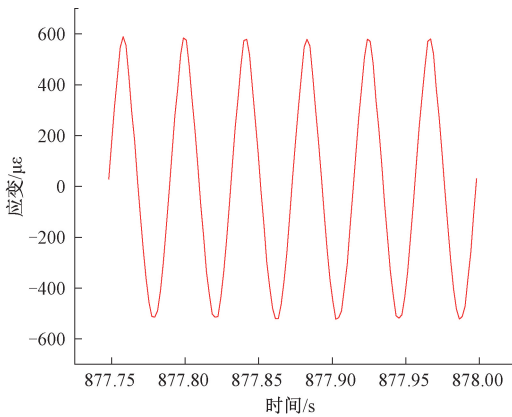


图16 应变时域图

Fig. 16 Time-domain diagram of the strain

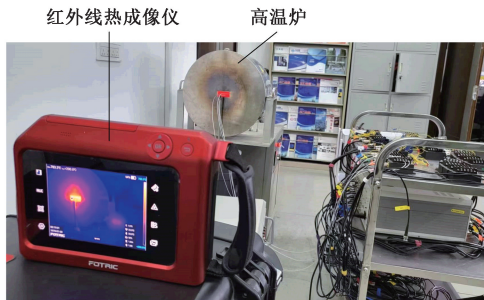


图17 试验监控图

Fig. 17 Monitoring diagram of the test

5 结 论

本文研究了高温应变计敏感栅结构参数对测量误差和疲劳寿命的影响,并进行了多目标优化设计,得到如下结论。

1) 根据测量误差的有限元计算模型,栅丝长度增加,测量误差先减小后增大;栅丝间距增加,测量误差随之增大;随着栅丝弯数的变化,测量误差先增大后趋于平缓,且有减小的趋势。不同的参数组合作用对测量误差的影响较小。

2) 根据疲劳寿命的有限元计算模型,栅丝长度增加,疲劳寿命先降低后升高,长度超过10 mm后变化不明显;栅丝间距增加,疲劳寿命总体呈升高趋势,弯数为7弯时,存在使疲劳寿命达到最高的最优间距;栅丝弯数增加,疲劳寿命不断降低。不同的参数组合对于疲劳寿命的影响较大。

3) 通过对MOGWO算法求解响应面模型得到的Pareto最优解集进行评估,得到的一个最优敏感栅结构为栅丝长度10 mm,栅丝间距0.40 mm,栅丝弯数3弯,有限元计算验证优化后高温应变计的测量误差降低了5.3%,疲劳寿命提高了22.4%。

4) 高温振动疲劳试验试验结果表明优化后的高温应变计平均疲劳寿命在500 $\mu\epsilon$ 水平下达到了 7.3×10^5 次,与优化前相比提升了30.4%,优化效果显著。

参考文献

- [1] 芦锦波. 应变电测与传感器技术的新发展及应用[J]. 电子技术与软件工程, 2017(4): 122.
LU J B. New development and application of strain electrical measurement and sensor technology [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017(4): 122.
- [2] DANIEL G, GERRIT D, WALTER L. Simultaneous measurement of strain and temperature with two resistive strain gauges made from different materials[J]. Procedia Manufacturing, 2018(24): 258-263.
- [3] 吴东, 陈德江, 张松贺, 等. 高超声速飞行器典型部位高温应变测量[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(6): 30-33.
WU D, CHEN D J, ZHANG S H, et al. High temperature strain measurement of typical components in hypersonic vehicle [J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(6): 30-33.
- [4] 刘梓才, 喻丹萍, 李锡华, 等. 不同测试方法下高温应变片热输出分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 189-192.
LIU Z C, YU D P, LI X H, et al. Analysis of thermal output of high temperature strain gauge by different measurement methods [J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 189-192.
- [5] 叶迎西, 孙天贺, 艾延廷. 温度对电阻应变片测量精度影响的仿真研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(2): 27-31.
YE Y X, SUN T H, AI Y T. Simulation study of temperature influence on testing precision of strain gauge [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2013, 30(2): 27-31.
- [6] 王文瑞, 张佳明, 聂帅. 高温应变接触式测量精度影响因素研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(3): 439-444.
WANG W R, ZHANG J M, NIE SH. Simulation and experiment on influence factor of contact high temperature strain measurement accuracy [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(3): 439-444.
- [7] 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.
- [8] 宋瑞如, 艾延廷, 李成刚, 等. 敏感栅结构对应变片疲劳性能影响的研究[J]. *滨州学院学报*, 2020, 36(6): 16-23.
- SONG R R, AI Y T, LI CH G, et al. Research on the influence of sensitive grid structure on the fatigue performance of strain gauge [J]. *Journal of Binzhou University*, 2020, 36(6): 16-23.
- [9] 孙婧妍, 丁克勤, 舒安庆, 等. 高温应变片可靠性分析及选型优化[J]. *中国仪器仪表*, 2022(4): 80-84.
- SUN J Y, DING K Q, SHU AN Q, et al. Reliability finite element analysis and selection optimization of high temperature resistance strain gauge [J]. *China Instrumentation*, 2022(4): 80-84.
- [10] 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.
- [11] STEHLIN P. Strain distribution in and around strain gauges [J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1972, 7(3): 228-235.
- [12] XIA Y, ZHU J, WANG K, et al. Design and verification of a strain gauge based load sensor for medium speed dynamic tests with a hydraulic test machine [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016(88): 139-152.
- [13] HUANG W, HE J, WEN G. A novel strain gauge automatic pasting device for a split Hopkinson pressure bar experimental system[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(3): 1-18.
- [14] OI K. Transient response of bonded strain gages [J]. *Experimental Mechanics*, 1966, 6(9): 463-469.
- [15] CHR R, CZAIIKA N. Ueber das dauer schwingverhalten von dehngungsmesstreiffen [J]. *Merterialprüfungs*, 1991, 3(4): 37-39.
- [16] 徐从裕, 余晓芬. 无补偿式应变片在动、静叠加载荷下的应变参数测量 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(9): 902-904.
- XU C Y, YU X F. The measuring of strain parameter with no compensation in dynamic and static pressure condition [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(9): 902-904.
- [17] 徐永君, 唐俊武, 赵清清, 等. 点焊薄片应变传感器的数值分析与实验研究 [J]. *中国测试*, 2009, 35(1): 90-93.
- XU Y J, TANG J W, ZHAO Q Q, et al. Experimental studies and numerical analyses on spot welding flake strain sensors [J]. *China Measurement and Test*, 2009, 35(1): 90-93.
- [18] 王凡, 郭伟国, 吴倩, 等. 高应变率下高温应变计灵敏度系数的校准方法 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(4): 899-909.
- WANG F, GUO W G, WU Q, et al. Calibration method for sensitivity coefficient of high-temperature strain gauges at high strain rate [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(4): 899-909.
- [19] 尹福炎. 再谈“strain gauge”等若干名词术语的译意 [J]. *衡器*, 2017, 46(1): 33-41.
- YIN F Y. Shallowly talking about the explain of some nomenclature such as “strain gauge” [J]. *Weighing Instrument*, 2017, 46(1): 33-41.
- [20] 王崇武, 艾延廷, 李成刚, 等. 电阻应变计敏感栅结构参数对其测量精度的影响 [J]. *航空发动机*, 2022, 48(5): 167-172.
- WANG CH W, AI Y T, LI CH G, et al. Influence of structure parameters of sensitive grid on measuring accuracy of resistance strain gauge [J]. *Aeroengine*, 2022, 48(5): 167-172.
- [21] 季熠, 李彦斌, 杭晓晨, 等. 基于响应面代理模型的雷达天线阵面风载分析 [J]. *工程力学*, 2019, 36(11): 222-229.
- JI Y, LI Y B, HANG X CH, et al. Wind load analysis of radar antenna based on response surface model [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(11): 222-229.
- [22] 艾延廷, 刘海月, 田晶, 等. 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): 876-883.
- AI Y T, LIU H Y, TIAN J, et al. Multi-objective optimization design of bolt connected flange for thin-walled casing [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(4): 876-883.
- [23] 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 Application*, 2016, 47: 106-119.

- [24] 邢怀玺, 吴华, 陈游, 等. 基于多目标灰狼算法的干扰资源多效能优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1990-1998.
XING H X, WU H, CHEN Y, et al. Multi-efficiency optimization method of jamming resource based on multi-objective grey wolf optimizer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(10): 1990-1998.
- [25] 杨洁, 冯程. 机间数据链系统的功率分配控制方法[J]. 电讯技术, 2021, 61(5): 567-573.
YANG J, FENG CH. Power distribution control method for intra-flight data link system [J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(5): 567-573.
- [26] 倪恒欣, 阎春平, 陈建霖, 等. 高速干切滚齿工艺参数的多目标优化与决策方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 832-838.
NI H X, YAN CH P, CHEN J L, et al. Multi-objective optimization and decision-making method of high speed dry gear hobbing processing parameters [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(7): 832-838.
- [27] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.

作者简介



张凤玲, 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。

E-mail: fling707@163.com

Zhang Fengling received her B.Sc. degree from Tianjin

University in 2000 and 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.



张旭, 2019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: zhxu317@163.com

Zhang Xu received his B.Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2019. He is currently a M.Sc. candidate at Shenyang Aerospace University. His main research interests include propulsion system test and advanced test technology.



艾延廷(通信作者), 1986年于沈阳航空工业学院获得学士学位, 1989年于西北工业大学获得硕士学位, 2006年于东北大学获得博士学位, 现为沈阳航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为航空发动机强度振动、故障诊断与先进测试技术。

E-mail: ytai@163.com

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