

# 电阻应变计敏感栅结构参数对其测量精度的影响

王崇武<sup>1</sup>, 艾延廷<sup>1</sup>, 李成刚<sup>2</sup>, 宋瑞如<sup>1</sup>, 张岩松<sup>2</sup>, 王 志<sup>1</sup>

(1. 辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

**摘要:** 为了提高电阻应变计测量精度, 建立了“简支梁-过渡层-基底-栅丝”结构的 3 维有限元模型, 利用数值模拟方法研究了敏感栅结构参数对测量精度的影响; 提出横向效应长度比参数, 统一了栅丝长度、间距、弯数 3 种结构参数, 建立了测量误差与横向效应长度比的函数关系, 基于此函数关系推导出结构参数优化公式, 并利用优化公式完成了敏感栅结构参数组合设计。结果表明: 栅丝直径越小, 测量误差越小; 栅丝长度、间距、弯数、长宽比存在最优值; 测量误差与横向效应长度比成分段线性函数关系, 且当横向效应长度比为 6.15% 时测量误差最小; 利用函数关系式可以快速估算出给定敏感栅结构参数的应变计测量误差, 估算结果与有限元计算结果的相对误差不超过 4%; 利用优化公式设计出的参数组合的测量误差不超过 0.06%, 且较单独优化的最优值参数组合的减小 0.1% 左右。

**关键词:** 电阻应变计; 敏感栅; 测量精度; 有限元法; 长宽比; 横向效应长度比; 航空发动机

中图分类号: V214

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.05.020

## Influences of Sensitive Grid Structural Parameters of Resistance Strain Gauge on its Measurement Accuracy

WANG Chong-wu<sup>1</sup>, AI Yan-ting<sup>1</sup>, LI Cheng-gang<sup>2</sup>, SONG Rui-ru<sup>1</sup>, ZHANG Yan-song<sup>2</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>

(1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Measurement and Test Technology for Aviation Propulsion System, Shenyang 110136, China; 2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of strain gauges, a three-dimensional finite element model consists of simply supported beam, transition layer, substrate and grid wire was established, and the influence of the structural parameters of the sensitive grid on measurement accuracy was numerical investigated. A parameter called transverse effect length ratio which covers the impact of grid length, spacing and number of bends was proposed. The correlation of measurement error and the lateral effect length ratio was established. Based on the correlation, the structural parameter optimization formula was derived to complete the design of the structural parameters combination of sensitive grid. The results show that the smaller the diameter of the grid wire, the smaller the measurement error. Measurement error orientated optimal values can be found individually for the length, spacing, number of bends and aspect ratio of the grid wire. The relationship between the measurement error and the lateral effect length ratio is piecewise linear, and the measurement error reaches minimum when the lateral effect length ratio is 6.15%. The measurement error of the strain gauge with a given set of structural parameters can be quickly estimated by using the relationship. The relative error between the result of estimation and the finite element calculation is less than 4%. The measurement error of the strain gauge using parameter combination derived from the optimization formula is not more than 0.06%, which is about 0.1% better than that derived from individually optimized parameter combination.

**Key words:** resistance strain gauges; sensitive grid; measurement accuracy; finite element method; aspect ratio; lateral effect length ratio; aeroengine

## 0 引言

电阻应变计安装方便、测量灵敏度高、量程范围

大、频率响应快, 广泛应用于航空航天结构静力学及其疲劳试验<sup>[1]</sup>。高温应变计测试技术作为研保条件与航空发动机研制密切相关, 在高温、高压、高转速的

收稿日期: 2020-06-17 基金项目: 国家自然科学基金(51975124、11702177)资助

作者简介: 王崇武(1995), 男, 硕士, 从事航空发动机强度、振动与噪声测试工作; E-mail: 13940084989@163.com。

引用格式: 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 Chong-wu, AI Yan-ting, LI Cheng-gang, et al. Influences of sensitive grid structural parameters of resistance strain gauge on its measurement accuracy[J]. Aeroengine, 2022, 48(5): 167-172.

恶劣环境下,用于研究涡轮等热端部件的力学行为和使用寿命。随着新材料、新技术的应用,航空发动机和燃气轮机性能不断提高,对高温应力应变的准确测量提出了更高要求<sup>[2]</sup>。应变计组成元件尤其是敏感栅的结构参数在很大程度上影响其测试精度,为此,国内外学者做了大量研究。王彪等<sup>[3]</sup>通过建立电阻应变计的应变传递2维模型,深入分析了胶接层的结构参数对应变传递的影响;尹福严<sup>[4]</sup>通过有限元计算分析,研究了箔式应变计的应变传递机理及胶层蠕变对应变传递灵敏度的影响;Ajovalasit等<sup>[5-6]</sup>在不考虑胶接层影响的前提下,得到了应变计测量值与真实值之间的解析关系式,修正了金属粘贴式电阻应变计的应变灵敏系数;Fuyu等<sup>[7]</sup>通过有限元仿真研究了高精度传感器输出非线性误差的影响因素并计算了误差值,推导了由应变梯度引起的非线性误差的计算公式;Zike等<sup>[8]</sup>建立了金属粘贴式电阻应变计的2维和3维应变传递模型,对不同弹性模量的基底材料对应变测量的影响进行了研究;庄重等<sup>[9]</sup>对应变测试中横向效应引起的误差进行了研究,探讨在应变测量中的横向效应修正问题;王文瑞等<sup>[10]</sup>设计了自由框架丝栅式应变计,并对高温应变测量精度的影响因素进行了研究,获得了丝式应变计结构参数对测量精度的影响规律;胡玉梅等<sup>[11]</sup>建立了含应变计的悬臂梁模型,分析了丝式应变计敏感栅不同直径、栅丝长度、栅丝间距对应变传递的影响,表明栅长、栅丝间距在基体应变传递中具有中间最优值,栅丝直径越小应变传递误差越小;许艺青等<sup>[12]</sup>利用有限元分析,研究了箔式应变计不同的敏感栅材料、厚度、栅丝长宽比、栅丝间距以及粘接层几何参数和力学性能等对应变传递的影响,并利用正交试验法对敏感栅结构进行了优化设计<sup>[13]</sup>。

综上所述可知,目前国内外对电阻应变计的研究主要集中于箔式应变计各元件结构参数以及丝式应变计粘贴工艺、胶层材料对其测量性能的影响方面,而针对丝式应变计敏感栅结构参数对测量精度的影响问题研究较少,且研究的参数相对单一,只能定性确定栅丝长度、栅丝间距等参数与测量误差之间的关系,没有揭示测量误差与敏感栅结构参数的函数关系。

本文为揭示电阻应变计敏感栅结构参数对测量精度的影响规律,建立了3维简化模型,利用ANSYS软件对常温下丝式应变计不同敏感栅结构进行数值模拟。

## 1 应变计有限元建模及理论验证

### 1.1 应变计3维模型建立

电阻应变计主要由敏感栅、粘接剂、基底、覆盖层、引出线组成。敏感栅是应变计的主要组成部分,用于将被测表面的应变转换成电阻的相对变化,敏感栅结构如图1所示。

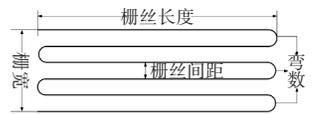


图1 敏感栅结构

为详细研究不同的敏感栅结构参数对应变计测量精度的影响,本文建立了“简支梁-过渡层-基底-敏感栅丝”结构3维有限元模型。应变计组成部分截面如图2所示,模型各部分的几何尺寸及力学性能参数见表1。

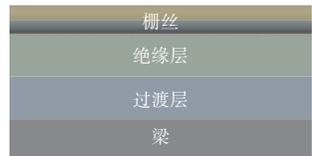


图2 应变计组成部分截面

表1 模型各部分的几何尺寸和力学性能参数

组成	材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	几何尺寸/mm
梁	45钢	7890	209	0.269	300×50×5
过渡层	DD6	2270	231	0.340	20×5×0.03
基底	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2770	300	0.330	20×5×0.03
栅丝	康铜	8900	160	0.310	变化

在有限元模型中,应变计粘贴在简支梁中部等应变区,在距离梁两端各50 mm处向下施加500 N的载荷。栅丝网格采用sweep扫掠网格划分,其余结构采用六面体网格划分,并在过渡层与梁之间接触处及栅丝附近进行网格加密。各部分之间用bonded绑定接触粘接。有限元模型网格划分如图3所示。

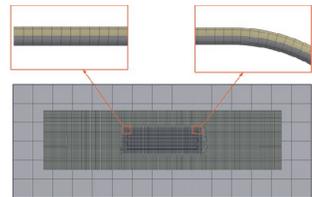


图3 有限元模型网格划分

### 1.2 理论验证

根据材料力学相关知识,简支梁中部为纯弯曲,其弯矩为

$$M = F \cdot l = 500 \times 0.05 = 25 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (1)$$

式中:  $F$  为施加的外载荷, N;  $l$  为加载点到梁端点的距离, m。

贴片处应力为

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{b \cdot h^3} = \frac{25 \times 2.5 \times 10^{-3}}{0.05 \times 0.005^3} = 1.2 \times 10^8 \text{ Pa} \quad (2)$$

式中: $y$ 为梁截面形心至梁上表面的距离,m; $b$ 为简支梁宽度,m; $h$ 为简支梁厚度,m。

贴片处应变值为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1.2 \times 10^8}{209 \times 10^9} = 5.7416 \times 10^{-4} \quad (3)$$

式中: $E$ 为简支梁弹性模量,Pa。

对模型进行求解,简支梁贴片位置沿 $x$ 方向的应变分布如图4所示。图中, $L$ 为栅丝长度。

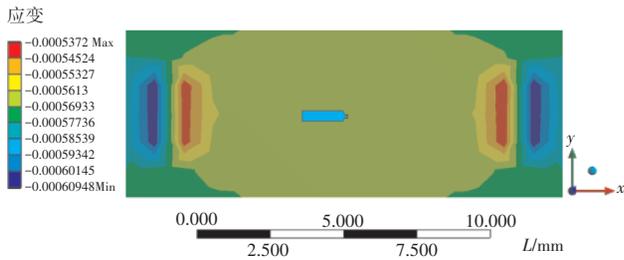


图4 简支梁贴片处应变分布

从图中可见,简支梁在贴片位置的应变仿真值为 $5.6809 \times 10^{-4}$ ,理论计算值为 $5.7416 \times 10^{-4}$ ,二者基本一致,相对误差仅为1.06%,说明贴片后该位置的应变几乎没有受到影响,可对模型做进一步分析。

在建模过程中,将敏感栅丝横截面切割成4等分,然后通过“form new part”合成1个栅丝整体(图3),获得了穿过所有栅丝横截面圆心的1个路径,通过查看整个路径上的节点应变值可以有效地提取栅丝的应变。栅丝路径的应变分布如图5所示。

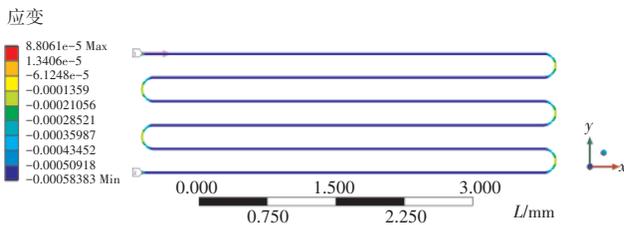


图5 栅丝路径应变分布

提取穿过栅丝横截面圆心路径上所有节点沿 $x$ 方向的应变值,取平均值作为栅丝的输出应变,并与梁贴片处的应变进行比较,得出相对误差 $\delta$ 作为应变计的应变传递误差

$$\delta = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_s$ 为栅丝的输出应变; $\varepsilon_1$ 为贴片处梁的应变。

栅丝全路径应变值变化如图6所示。

随机改变栅丝结构参数(栅丝长度 $L$ 、栅丝间距 $S$ )进行5组仿真计算,得到敏感栅输出应变值与贴片

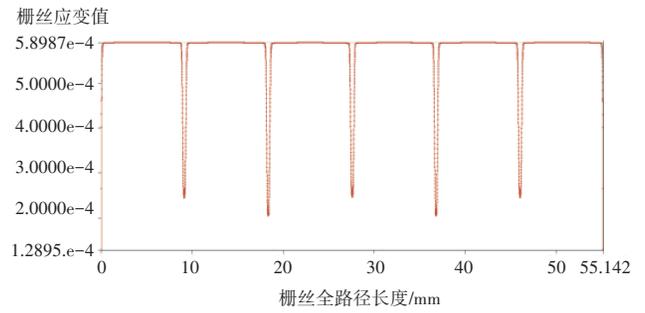


图6 栅丝全路径应变值变化

处梁应变的相对误差 $\sigma$ ,不同栅丝结构参数仿真计算结果见表2。

表2 不同栅丝结构参数仿真计算结果

$L/\text{mm}$	$S/\text{mm}$	$\varepsilon_s/\times 10^{-4}$	$\varepsilon_1/\times 10^{-4}$	$\delta/\%$
6	0.35	5.6438	5.6809	0.65
6	0.40	5.6278	5.6809	0.93
8	0.45	5.6649	5.6809	0.28
9	0.45	5.6755	5.6809	0.10
7	0.50	5.6126	5.6809	1.20

从表中可见,敏感栅丝的输出应变与梁贴片处应变误差较小,约为1%,表明在该有限元模型中应变计可以比较准确地反映被测基体的应变,说明该模型有效,可用于下一步研究。

## 2 敏感栅结构参数对测量精度的影响

### 2.1 栅丝直径对测量精度的影响

栅丝直径 $d$ 越小,测量越准确<sup>[11]</sup>。在有限元模型中,保持栅丝长度、栅丝间距等参数一致,改变栅丝直径进行仿真计算。栅丝直径在0.02~0.04 mm内以 $5 \mu\text{m}$ 为间距变化,应变测量误差随栅丝直径的变化曲线如图7所示。

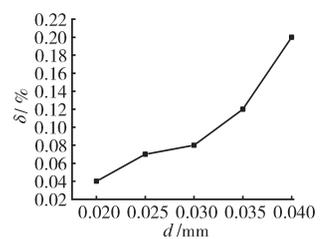


图7 应变测量误差随栅丝直径的变化曲线

从图中可见,随着栅丝直径增大,测量误差也变大。这与已知规律相符,即敏感栅越细,越能均匀且准确地反映被测构件表面的变形,测量误差也就越小。但在实际应用中,栅丝直径过小会导致栅丝强度降低,容易发生断裂;而栅丝直径过大又会使得感应灵敏度降低。所以在选用应变计时应根据实际情况综合考虑。

## 2.2 栅丝长度对测量精度的影响

在测量中敏感栅栅长与被测基体主应变方向一致,因此栅丝的长度尺寸会对误差产生较大影响,决定着应变计的测量精度<sup>[14]</sup>。

在有限元模型中,保持其他结构参数不变,在5~11 mm内以1 mm为间距研究栅丝长度 $L$ 变化时应变计的输出应变,并设置4组不同的栅丝间距 $S$ 作为对照组,5组间距分别为0.30、0.35、0.40、0.45、0.50 mm。测量误差随栅丝长度的变化曲线如图8所示。

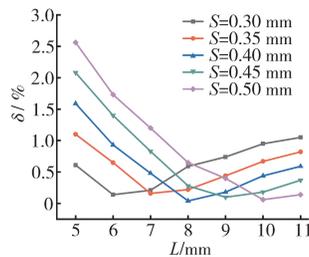


图8 测量误差随栅丝长度的变化曲线

从图中可见,随着栅丝长度的增加,误差先减小后增大,栅丝长度具有中间最优值,且栅丝长度最优值随栅丝间距的增大而增大。

## 2.3 栅丝间距对测量精度的影响

栅丝间距的改变会影响粘接层的应力应变分布以及应变片的横向效应<sup>[15]</sup>,从而改变栅丝的输出应变,进而对测量误差产生影响。

保持其他结构参数不变,在栅丝间距为0.25~0.55 mm内以0.05 mm为间隔对应变计进行仿真计算,并设置栅长为6~10 mm共5个对照组。应变测量误差随栅丝间距的变化曲线如图9所示。

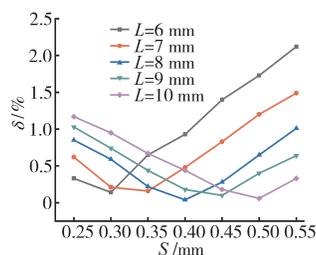


图9 应变测量误差随栅丝间距的变化曲线

从图中可见,测量误差随栅丝间距的增大先减小后增大,栅丝间距具有中间最优值,且间距最优值随着栅丝长度的增加而增大。

## 2.4 栅丝弯数对测量精度的影响

栅丝的弯数 $N$ 影响长宽比,决定了栅丝的数目和排列方式。保持其他结构参数一致,利用仿真计算获得 $N=1、3、5、7、9$ 时栅丝的输出应变,并随机设置4组对照组,5组参数组合的栅长+间距分别为6 mm+0.3 mm、7 mm+0.35 mm、8 mm+0.4 mm、10 mm+0.5 mm、10 mm+0.45 mm,其应变测量误差随栅丝弯数的变化曲线如图10所示。

从图中可见,随着弯数的增加,测量误差先减小

后增大,弯数也有中间最优值,且不同的参数组合具有不同的最优值。在实际应用中丝式应变计多设计为5弯(图1),但5弯并不一定是最佳弯数,可根据实际要求和制作条件灵活设计和选用。

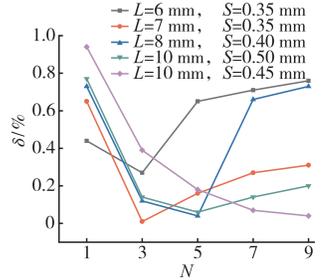


图10 应变测量误差随栅丝弯数的变化曲线

## 2.5 栅丝长宽比对测量精度的影响

栅丝的长度和宽度决定了栅丝的几何尺寸(图1),为此设计了不同的参数组合进行仿真计算,具体结构参数取值见表3。其中,栅丝长度 $L$ 、栅丝间距 $S$ 分别为5组,栅丝弯数 $N$ 为4组,进行 $5 \times 5 \times 4$ 共100组仿真计算。

表3 栅丝不同参数取值

$L/\text{mm}$	$S/\text{mm}$	$N$
6	0.30	3
7	0.35	5
8	0.40	7
9	0.45	9
10	0.50	

应变测量误差随不同栅丝长宽比变化的散点如图11所示。从图中可见,测量误差随栅丝长宽比的增大先减小后增大,长宽比亦有中间最优值,且最佳长宽比随着栅丝弯数的增加而减小。

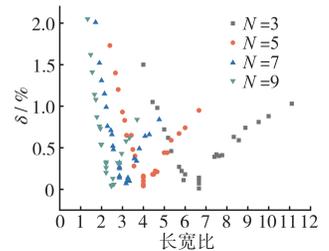


图11 应变测量误差随不同栅丝长宽比变化的散点

## 2.6 栅丝横向效应长度比与测量误差的关系

理想的应变计不存在横向效应,但在实际应用中应变计都存在横向效应,在某些应变测量中,横向效应会使测量结果产生较大误差。敏感栅的弯曲部分是产生横向效应的根源。

通过上述研究可以发现,丝式电阻应变计敏感栅丝的长度、间距、弯数、长宽比皆呈现出“最优值”规律,而这4种参数都是敏感栅尺寸在不同维度的呈现,不同的参数变化实际上是横向效应产生的应变占栅丝输出应变比重的变化。为了统一这种参数变化,在结构层面,本文定义了一种无量纲参数——横向效应长度比 $\eta$ ,即弯曲部分的长度占整个栅丝长度的百分比

$$\eta = \frac{\frac{N}{2} \cdot S \cdot \pi}{2 \times \left( L - \frac{S}{2} \right) + (N - 1) \cdot (L - S) + \frac{N}{2} \cdot S \cdot \pi} \quad (5)$$

化简整理得到

$$\eta = \frac{\pi}{\frac{2 \times L \cdot \left( 1 + \frac{1}{N} \right)}{S} + (\pi - 2)} \quad (6)$$

从式中可见,  $\eta$  随  $L$  的增加而减小, 随  $S$  的增大而变大, 随  $N$  的增加而变大。

对表 3 中 100 组参数组合求解对应的  $\eta$  值, 利用 Origin 软件绘制出测量误差随横向效应长度比  $\eta$  变化的 100 个散点分布, 如图 12 所示。

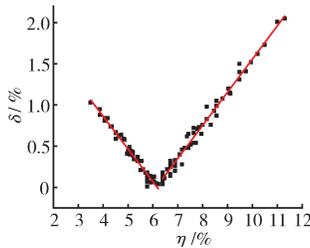


图 12 应变测量误差随横向效应长度比变化散点分布

从图中可见, 二者呈现出比较明显的分段线性关系, 对散点进行函数拟合, 得出测量误差  $\delta$  与横向效应长度比  $\eta$  的关系。

$$\delta = \begin{cases} -0.39716\eta + 2.45183, & \eta \leq 6.15\% \\ 0.4026\eta - 2.4682, & \eta > 6.15\% \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可知, 横向效应长度比存在最优值, 当  $\eta=6.15\%$  时,  $\delta_{\min}=0.009\%$ 。

式(7)给出了测量误差  $\delta$  与栅丝长度  $L$ 、栅丝间距  $S$ 、弯数  $N$  之间的函数关系。为验证此关系式的正确性, 另设计 3 组新参数组合进行仿真计算, 新参数组合见表 4。

关系式求解结果与仿真计算结果对比见表 5。

组合	L/mm	S/mm	N
1	6.0	0.8	5
2	8.5	0.6	5
3	12.0	0.3	3

组合	$\eta$	关系式求解结果/%	仿真计算结果/%	相对误差/%
1	16.41	4.14	4.18	0.96
2	8.94	1.13	1.11	1.80
3	2.91	1.30	1.26	3.17

从表中可见, 关系式求解得到的估算结果与仿真计算结果的误差不超过 4%, 说明此关系式具有良好的普适性, 可根据此公式快速估算出给定敏感栅结构参数的应变计测量误差。

将式(7)中的  $\eta$  最优值 6.15% 代入式(6)并整理

可得参数优化值(取小数点后 4 位)。

$$\frac{2 \times L \cdot (N + 1)}{N \cdot S} = 49.9413 \quad (8)$$

给定式(8)中任意 2 种结构参数, 就可以计算出第 3 种最优参数值。为验证此优化公式的正确性, 随机设计 3 组仿真计算, 结果见表 6。

组合	最优值选择结果			优化公式计算结果		最优值结果	设计结果		误差减小量/%
	L/mm	S/mm	N	L/mm	S/mm		测量误差/%	测量误差/%	
1	7		5	0.35	0.34	0.16	0.06	0.10	
2	0.45	5	9.00		9.30	0.11	0.02	0.09	
3	0.30	3	6.00		5.62	0.13	0.02	0.11	

从表中可见, 根据式(8)计算出的参数组合得到的设计结果测量误差  $\delta \leq 0.06\%$ , 与之前单独优化得出的最优值计算结果相比, 测量误差均减小了 0.1% 左右, 表明此公式对应变计的结构参数优化具有指导意义。

### 3 结论

(1) 本文建立的应变计有限元模型的应变传递误差在 1% 左右, 能够正确反映被测基体的应变情况。

(2) 栅丝直径越小, 测量误差越小; 栅丝长度、间距、弯数、长宽比具有中间最优值; 栅丝长度最优值随间距的增大而增大, 栅丝间距最优值随栅丝长度增加而增大, 长宽比最优值随弯数的增加而减小; 测量误差与横向效应长度比呈分段线性函数关系, 当横向效应长度比为 6.15% 时测量误差最小。

(3) 本文提出的横向效应长度比参数可以有效地统一敏感栅的各结构参数, 通过建立测量误差与横向效应长度比的函数关系, 可快速估算出给定敏感栅结构参数的应变计测量误差, 估算结果与仿真计算结果相对误差不超过 4%, 说明关系式具有良好的普适性。

(4) 由测量误差与横向效应长度比的关系式推导出参数优化公式, 根据优化公式设计出的应变计结构参数组合测量误差不超过 0.06%, 且较最优值参数组合降低了 0.1% 左右, 可用于应变计敏感栅结构参数快速优化设计。

#### 参考文献:

[1] 雷一鸣. 电阻应变计应变传递研究及误差分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(32): 8096-8100.  
LEI Yiming. Strain transmit research and aberration analysis of electric resistance strain gauge[J]. Science Technology and Engineering, 2011,

- 11(32):8096-8100.(in Chinese)
- [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 Ningbo, HOU Naixian, ZHANG Chengcheng. Reliability and optimization analysis of strain-gauge application for aeroengine vibration measurements[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(10): 1964-1969.(in Chinese)
- [3] 王彪,刘腾,徐敬龙,等.金属粘贴式电阻应变计应变传递分析[J].中国测试,2016,42(8):1-6.  
WANG Biao, LIU Teng, XU Jinglong, et al. Strain transferring analysis of metallic bonded resistance strain gauges[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(8): 1-6.(in Chinese)
- [4] 尹福炎.箔式应变计结构模型与有限元分析[J].衡器,2009,38(5):47-50.  
YIN Fuyan. Structural model and finite element analysis of foil strain gauge[J]. Weighing Apparatus, 2009, 38(5): 47-50.(in Chinese)
- [5] Ajovalasit A, Zuccarello B. Local reinforcement effect of a strain gauge installation on low modulus materials[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(7): 643-653.
- [6] Ajovalasit A, D'Acquisto L, Frapagane S, et al. Stiffness and reinforcement effect of electrical resistance strain gauges[J]. Strain, 2007, 43(4): 299-305.
- [7] Fuyu W, Fang M. Factors influencing output non-linearity error of a high-precision load sensor and the error calculation[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2001, 37(4): 341-347.
- [8] 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.
- [9] 庄重,张娜.电阻应变测试中横向效应误差分析[J].科技传播,2010(21):160-161.  
ZHUANG Zhong, ZHANG Na. Error analysis of transverse effect in resistance strain test[J]. Public Communication of Science & Technology, 2010(21): 160-161.(in Chinese)
- [10] 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 Wenrui, ZHANG Jiaming, NIE Shuai. Simulation and experiment on influence factor of contact high temperature strain measurement accuracy[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(3): 439-444.(in Chinese)
- [11] 胡玉梅,张方建,邵毅敏,等.应变计敏感栅结构参数对测量精度的影响[J].重庆大学学报,2013,36(12):21-27.  
HU Yumei, ZHANG Fangjian, SHAO Yimin, et al. The influence of sensitive gate structural parameters of strain gauge on measurement accuracy[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(12): 21-27.(in Chinese)
- [12] 许艺青,杨晓翔,韦铁平,等.电阻应变计敏感栅结构参数对应变传递的影响研究[J].机电工程,2018,35(4):352-357.  
XU Yiqing, YANG Xiaoxiang, WEI Tieping, et al. Influence of structural parameters of resistance strain gauge on strain transfer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(4): 352-357.(in Chinese)
- [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 Yiqing, YANG Xiaoxiang, WEI Tieping, et al. Optimization of strain gauge structure parameters based on orthogonal test[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(6): 129-133.(in Chinese)
- [14] 郭弦,于飞,鲁辉.应变片栅长对混凝土表面静态应变测量结果的影响分析[J].电子测量技术,2010,33(1):89-91.  
GUO Xian, YU Fei, LU Hui. Influence of gauge length on exterior strain measure of concrete in static stress[J]. Electronic Measurement Technology, 2010, 33(1): 89-91.(in Chinese)
- [15] 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 Hui, ZHANG Wei. Error due to transverse sensitivity in strain gauges and its correction[J]. Helicopter Technique, 2011(1): 60-63.(in Chinese)

(编辑:刘静)