



# 基于正交试验的应变片敏感栅结构参数的优化

许艺青<sup>1</sup>, 杨晓翔<sup>2,3</sup>, 韦铁平<sup>4</sup>, 姚进辉<sup>5</sup>

(1. 福州大学石油化工学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116; 3. 泉州师范学院, 福建 泉州 362000; 4. 福建工程学院机械与汽车工程系, 福建 福州 350118; 5. 福建省计量科学研究院, 福建 福州 350003)

**摘要:** 电阻应变片作为电阻应变式传感器的重要组成部分, 其结构参数对传感器的测量精度影响较大。基于正交试验法设计试验方案, 建立等强度梁、基底、敏感栅的三维模型, 采用 ANSYS 有限元软件进行模拟分析, 研究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。结果表明: 应变片敏感栅的弹性模量和栅丝厚度越小, 栅丝长度越长, 误差越小, 栅丝间距存在最优值; 栅丝长度对应变传递误差的影响最大, 栅丝间距最小; 当敏感栅材料为康铜, 栅丝厚度 0.003 mm, 栅丝长度 4 mm, 栅丝间距 0.28 mm, 应变传递误差达到最小为 0.19%, 研究结果对传感器和电阻应变片的设计具有理论指导意义。

**关键词:** 电阻应变片; 敏感栅; 正交试验; 有限单元法; 应变传递  
**文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-5124(2018)06-0129-05

## Optimization of strain gauge structure parameters based on orthogonal test

XU Yiqing<sup>1</sup>, YANG Xiaoxiang<sup>2,3</sup>, WEI Tieping<sup>4</sup>, YAO Jinhui<sup>5</sup>

(1. School of Petrochemical Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China; 4. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 5. Fujian Province Institute of Metrology, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** As an important part of the resistance strain sensor, the resistance strain gauge has great influence on the measurement accuracy of the sensor. Based on the orthogonal test method, three-dimensional model of uniform strength beam, base and sensitive grid was built, simulation analysis was carried out by adopting ANSYS finite element software, and the influence of the structure parameters of the resistance strain gauge on the strain transmission error of the sensor was studied. The results show that the smaller the elastic modulus of sensitive grid of strain gauge and the thinner the thickness of grid wire is, the longer the length of grid wire will be, and the smaller the error is and the distance between grid wires is optimal. The influence of grid length on strain transfer error is the greatest and spacing of grid is minimal. When the sensitive grid material is constantan, the grid wire thickness is 0.003 mm, the grid wire length is 4 mm, the spacing between grid wires is 0.28 mm, and the strain transfer error reaches a minimum of 0.19%. The results are of theoretical significance to the design of sensor and resistance strain gauge.

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-12-29

基金项目: 福建省青年自然科学基金(2017J05071); 福建省教育厅科研项目(JAT160318)

作者简介: 许艺青(1991-), 女, 福建漳州市人, 硕士研究生, 专业方向为负荷传感器优化设计。

**Keywords:** resistance strain gauge; sensitive grid; orthogonal test; finite element method; strain transfer

## 0 引言

电阻应变片广泛应用于工程结构、应变测量及制造各种物理量传感器,特别是测力传感器、称重传感器和压力传感器等领域,因此,电阻应变片的测量结果的可靠性和准确性尤为重要<sup>[1]</sup>。Vadivuc-hezhian 等<sup>[2]</sup>和 Subrahmanya 等<sup>[3]</sup>研究胶粘剂材料及其厚度对电阻应变片应变测量的影响,结果表明随着胶结层厚度的增加,应变损失增大。Komurlu 等<sup>[4]</sup>将电阻应变片粘贴在混凝土上,对氰基丙烯酸酯、聚氨酯和环氧树脂胶粘剂进行试验对比,结果表明氰基丙烯酸酯在应变片测量结果中最准确。Zike 等<sup>[5]</sup>建立基体和电阻应变片的三维模型,研究了弹性模量从 1~200 GPa 的基体材料对应变测量的影响,并进行修正。Zhou 等<sup>[6]</sup>提出了一种应变片布置优化的通用框架,并结合案例分析验证了框架的有效性,为结构性能评估的实际应用提供了方便。张佳明等<sup>[7]</sup>建立高温应变片参数高精度标定装置,确定影响高温应变片测量结果的参数,并进行补偿。王文瑞等<sup>[8-9]</sup>自主研制丝式高温应变片,建立简支梁、胶层、敏感栅有限元模型研究敏感栅结构参数对测量精度的影响,结果表明丝式敏感栅越细测量精度越高;高温应变片的敏感栅间距与长度具有精度最优值。胡玉梅等<sup>[10]</sup>建立含应变片的悬臂梁模型,分析了丝式应变片敏感栅不同的直径、栅长、栅丝间距对应变传递误差的影响,结果表明栅长、栅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。尹福炎<sup>[11]</sup>利用有限元法研究了不同敏感栅的材料、厚度和端环长度等对应变片性能的影响。

由上可知,对电阻应变片的研究主要集中在粘贴工艺、胶粘剂材料、丝式应变片结构参数及温度对其性能的影响,对箔式电阻应变片敏感栅几何参数对应变传递的影响研究较少,而且大部分研究都是单一变量。为此,本文建立了等强度梁、基底和箔式敏感栅所组成的测量模型,采用正交试验对电阻应变片敏感栅材料、栅丝厚度、栅长和栅丝间距等因素进行了参数组合设计,利用 ANSYS 有限元软件进行分析,揭示这些因素对应变片性能和应变

传递误差影响,找出最佳组合方案 and 不同参数的影响主次,为电阻应变片的结构设计和应变片的选择提供了依据。

## 1 电阻应变片工作原理

电阻应变片的工作原理是基于金属的应变效应。应变片借助于各种胶粘剂粘贴于试件表面,当试件受力产生变形时,应变片敏感栅也随之发生变形,引起阻值发生相应的变化,再把这一电阻变化转换为电信号变化输出。

电阻应变片主要由基底、敏感栅、覆盖层及引线等组成,其结构如图 1 所示。基底和覆盖层由绝缘材料制成,起保护和固定敏感栅的作用。敏感栅是把应变量转换成电阻变化量的部分,常用的箔材有铜镍合金、镍铬合金、铁铬铝合金和铂铑合金等金属材料,其厚度一般取 1~5  $\mu\text{m}$ ,栅长根据使用目的不同,有 0.2 mm 到几百毫米,栅丝间距由使用条件来选定,一般来说栅丝间距的大小是整数倍的单栅丝宽度。

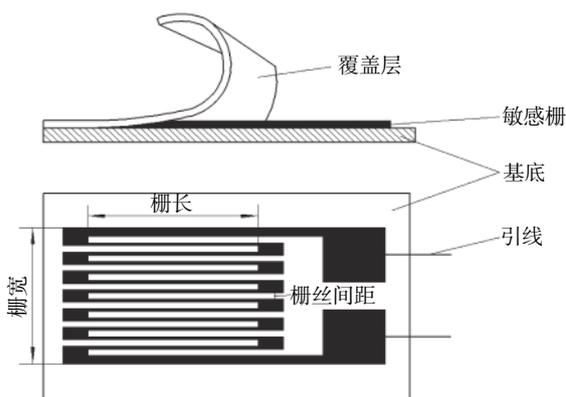


图 1 电阻应变片的典型结构

## 2 有限元模型建立和分析

为了解电阻应变片测量规律,取某型号 120  $\Omega$  的电阻应变片,建立了含等强度梁、敏感栅和基底的三维简化模型,各部分的力学性能如表 1 所示。对等强度梁与应变片粘贴处进行网格加密划分,有限元网格模型如图 2 所示。各部分均采用八节点六面体实体单元 solid185,模拟时将等强度梁左端全约束,在右端施加载荷 50 kN。

表 1 各部分力学性能和几何尺寸<sup>[12]</sup>

组成部分	材料	弹性模量/GPa	泊松比	几何尺寸/mm <sup>3</sup>
等强度梁	40CrNiMoA	210	0.3	250×30×4
敏感栅	康铜	169	0.3	3×2.44×0.003
基底	酚醛树脂	4.82	0.4	6.6×3.4×0.02

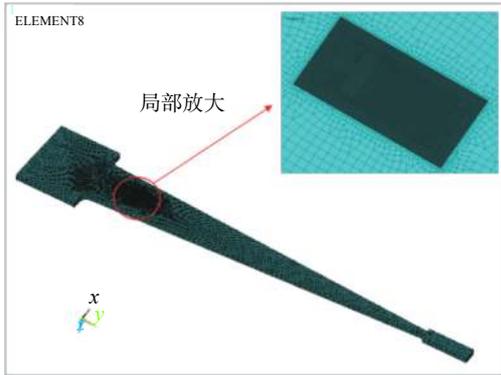


图 2 有限元网格模型

图 3 为等强度梁 y 向(沿梁的轴线方向)应变云图,可以看出,等强度梁最大应变  $8.08 \times 10^{-4}$ , 发生在固定端处,提取等强度梁贴片位置中间 20 个节点的应变  $\epsilon_s$  为  $6.90 \times 10^{-4}$ 。

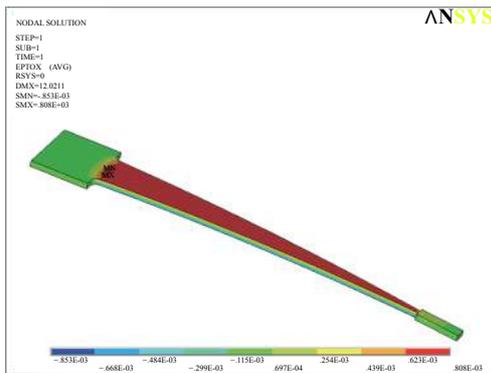


图 3 等强度梁 y 向应变云图

图 4、图 5 分别为敏感栅和基底沿 y 方向(栅丝方向)应变云图,从图 4 可知,敏感栅所受最大应变为  $1.055 \times 10^{-3}$ , 最小应变为  $5.05 \times 10^{-4}$ , 每根栅丝中间受力较均匀,并向两端逐渐递减,两端所受的应变几乎为 0。从图 5 可知,基底在与敏感栅边界交界处发生应变突变,所受最大应变为  $1.018 \times 10^{-3}$ , 最小应变为  $0.105 \times 10^{-3}$ , 基底两端应变几乎为 0。取应变片敏感栅中间 20 个节点 y 向应变的平均值  $\epsilon_n$  为  $6.84 \times 10^{-4}$ , 作为应变片的测量值。

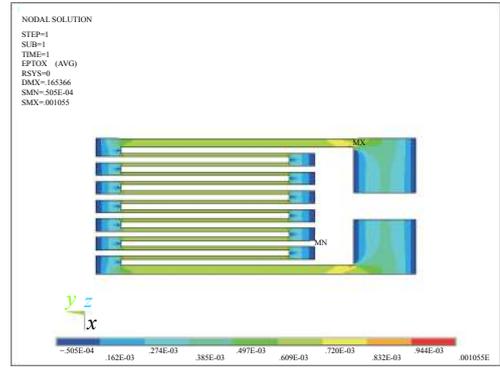


图 4 敏感栅沿 y 轴方向应变云图

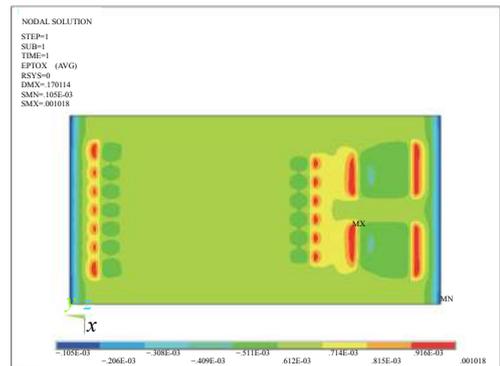


图 5 基底沿 y 轴方向应变云图

由文献[13]可知,等强度梁与敏感栅的应变传递率为

$$\alpha = \left[ 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right] \quad (1)$$

式中:  $k$ ——剪滞系数,  $\frac{1}{k^2} = \frac{nt_g t_m W_g E_g}{W_m G_m}$ ;  
 $t_m$ 、 $W_m$ 、 $G_m$ ——基底厚度、宽度和剪切模量;  
 $t_g$ 、 $W_g$ 、 $E_g$ ——敏感栅厚度、宽度和弹性模量;  
 $n$ ——栅丝数目。

将各部分几何参数带入式(1)可得应变传递率的理论值,有限元应变传递率为敏感栅和等强度梁有限元应变值的比值。理论解与有限元解的对比如表 2 所示,理论解与有限元解应变传递率误差为 0.8%,由于建模时对模型进行简化处理,故有限元结果与理论值存在一定误差,仿真结果与理论值计算基本一致。

### 3 敏感栅结构参数对应变传递的影响

#### 3.1 正交试验设计及结果

由工程经验可知,应变片的性能特性,不仅与所用的箔材材料、胶粘剂和制作工艺等有关,而且还与应变片敏感栅结构的几何形状密切相关。在设

表2 理论解与有限元解对比表

等强度梁有限元应变值	敏感栅有限元应变值	理论应变传递率	有限元应变传递率	理论解与有限元解应变传递率误差
$6.9 \times 10^{-4}$	$6.84 \times 10^{-4}$	99.9%	99.1%	0.8%

计箔式应变片时通常考虑敏感栅的材料、箔栅厚度、栅长和栅宽等。因此,本文基于有限元法,结合正交试验,综合分析以上参数对电阻应变片应变传递的影响。

选择如下4个影响因素:箔栅材料(A),栅丝厚度(B),栅长(C),栅丝间距(D)。每个因素取3个水平,如表3所示。

为便于描述,A的3个水平分别用 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 表示,以此类推。

若全面试验则有81个水平组合,如 $A_1B_1C_1D_1$ 、 $A_1B_1C_1D_2$ 、 $A_1B_1C_1D_3$ 等,全面试验要求的试验太多,因此采用正交试验,采用 $L_9(3^4)$ 正交表,按4因素3水平安排试验,从而选择最佳的敏感栅结构参数,试验模拟结果如表4所示。

表3 正交因素及水平<sup>[13]</sup>

因素水平	敏感栅材料		栅丝厚度/mm	栅长/mm	栅丝间距/mm
	材料	弹性模量			
1	康铜	169 GPa	0.003	1	0.056
2	铁铬铝合金	180 GPa	0.005	3	0.112
3	镍铬铝合金	206 GPa	0.01	4	0.28

表4 正交试验设计及结果<sup>1)</sup>

试验号	A	B	C	D	A	B	C	D	有限元应变传递率误差/%	
					弹性模量/GPa	栅丝厚度/mm	栅丝长度/mm	栅丝间距/mm		
1	1	1	1	1	169	0.003	1	0.056	26.17	
2	1	2	2	2	169	0.005	3	0.112	4.24	
3	1	3	3	3	169	0.01	4	0.28	5.94	
4	2	1	2	3	180	0.003	3	0.28	2.83	
5	2	2	3	1	180	0.005	4	0.056	0.57	
6	2	3	1	2	180	0.01	1	0.112	54.03	
7	3	1	3	2	206	0.003	4	0.112	4.10	
8	3	2	1	3	206	0.005	1	0.28	34.37	
9	3	3	2	1	206	0.01	3	0.056	28.29	
					$T_1/\%$	36.35	33.10	114.57	55.02	160.54
					$T_2/\%$	57.43	39.18	35.36	62.38	
					$T_3/\%$	66.76	88.26	10.61	43.14	
					$M_1/\%$	12.12	11.03	38.19	18.34	
					$M_2/\%$	19.14	13.06	11.79	20.79	
					$M_3/\%$	22.25	29.42	3.54	14.38	
					$R/\%$	10.14	18.39	34.65	6.41	

注:1) $T_i$ 表示的是同一水平下3次实验的误差之和; $M_i$ 表示的是 $T_i$ 在3次实验的误差平均值; $R$ 是3个误差平均值的极差。

### 3.2 试验结果分析

9次试验模拟结果中以第5组的误差最小,达

到0.57%,相应的水平组合为弹性模量180 GPa、栅丝厚度0.005 mm、栅丝长度4 mm、栅丝间距0.056 mm

是当前最好的水平搭配。

将4个因素的平均误差绘在同一张图上,如图6所示。可以看出,敏感栅的弹性模量越小,误差越小,以弹性模量169 GPa为最好;箔栅厚度越小,误差越小,以厚度0.003 mm为最好;栅丝长度越长,误差越小,以栅长4 mm为最佳。栅丝间距为0.28 mm时,误差最低。

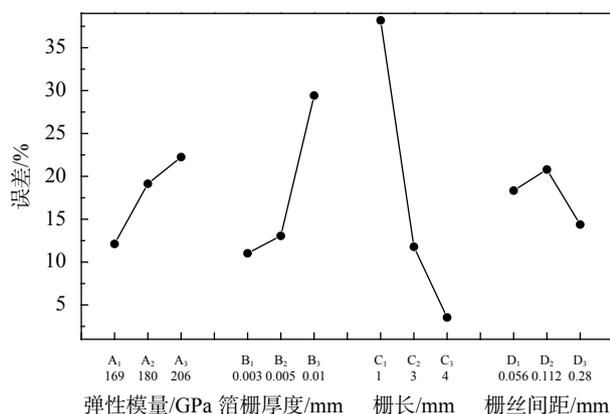


图6 应变传递平均误差与4个因素关系图

图7是4个因素和极差关系图。由图7可知各因素对结果影响大小的依次顺序是:C>B>A>D,即栅丝长度>栅丝厚度>弹性模量>栅丝间距。

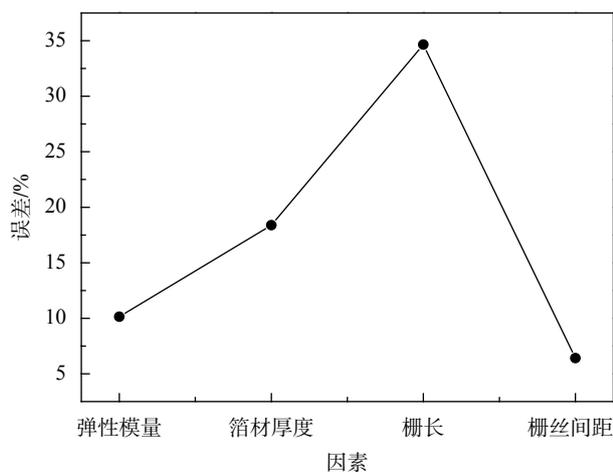


图7 4个因素与极差关系图

通过上述分析,推断出最佳水平组合为A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,即弹性模量169 GPa,栅丝厚度0.003 mm,栅丝长度4 mm,栅丝间距0.28 mm。在9次正交试验中没有包含这个水平组合,因此要追加试验。通过有限元模拟分析,追加最佳水平组合试验的应变传递误差为0.19%,低于上述9次模拟的最好结果0.57%。

#### 4 结束语

采用正交试验对电阻应变片敏感栅结构参数进

行了组合,探讨了其对于应变传递误差的影响,并讨论了各因素的影响主次。所建立的三维模型通过有限单元法模拟出的应变传递率为99.1%,该模型能正确反映应变片的应变传递。得出以下结论:

1)敏感栅的弹性模量和栅丝厚度越小,栅丝长度越长,误差越小,栅丝间距存在最优值。

2)4个因素对应应变传递误差的影响主次的依次顺序是栅丝长度>栅丝厚度>弹性模量>栅丝间距。

3)通过实验分析得出最佳参数组合为弹性模量169 GPa,栅丝厚度0.003 mm,栅丝长度4 mm,栅丝间距0.28 mm,应变传递误差为0.19%。

#### 参考文献

- [1] SUBRAMANYA S B, PRASAD M G A. MEMS and MEMS based strain gauge load cells -A review[C]//Research & Technology in the Coming Decades. IET, 2014.
- [2] VADIVUCHEZHIAN K, SUBRAHMANYA K, CHOCKAPPAN N. Finite element modeling of effect of adhesive layer and carrier thickness used for strain gauge mounting[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1119: 828-832.
- [3] SUBRAHMANYA K, VADIVUCHEZHIAN K, CHOCKAPPAN N. Experimental verification of effect of adhesive layer thickness used for strain gauge mounting[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1119(3):789-793.
- [4] KOOMURLU E, CIHANGIR F, KESIMAL A, et al. Effect of adhesive type on the measurement of modulus of elasticity using electrical resistance strain gauges[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2016, 41(2):433-441.
- [5] ZIKE S, MIKKLSEN L P. Correction of gauge factor for strain gauges used in polymer composite testing[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(3):393-403.
- [6] ZHOU K, WU Z Y. Strain gauge placement optimization for structural performance assessment[J]. Engineering Structures, 2017, 141(15):184-197.
- [7] 张佳明,王文瑞,聂帅. 高温电阻应变片特性参数标定实验研究[J]. 中国测试, 2014, 40(5):25-28.
- [8] 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(3):439-444.
- [9] 王文瑞,王刚,胡挺,等. 高温应变栅丝蠕变对应变测量精度影响与补偿[J]. 北京科技大学学报, 2017, 39(1):88-95.
- [10] 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.
- [11] 尹福炎. 箔式应变片结构模型与有限元分析[J]. 衡器, 2009, 38(5):47-50.
- [12] 耿汉生. 应变胶性能与应变计的工作特性[J]. 传感器用技术, 1990(4):43-46.
- [13] 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.

(编辑:李妮)