

基于加权最小二乘法的光纤光栅应变传感器 参数敏感性自动优化算法

杜吉龙, 张国岳, 刘菁昊

(北京机械工业自动化研究所有限公司, 北京 100120)

摘要: 常规光纤光栅应变传感器参数优化方法主要依托于麻雀搜索算法, 但此方法忽略了应变传递的影响, 导致传感器灵敏度较低, 无法保证测量精度。为此, 提出基于加权最小二乘法的光纤光栅应变传感器参数敏感性自动优化算法。依据光纤光栅应变传感器的组成结构与工作原理, 充分考虑应变传递系数的变化规律, 计算应变传递损耗, 并采用光传输矩阵计算光纤中心波长的电场振幅, 由此得到传感器敏感场分布, 结合模式耦合理论, 以敏感场分布均匀性和最大电容与最小电容比值最小为目标函数建立参数优化模型, 并采用加权最小二乘法对采样点加权获取优化响应值, 进而得到传感器最优结构参数。对比实验结果表明, 利用所提方法对光纤光栅应变传感器参数进行优化后, 传感器的灵敏度较高, 保证了传感器的测量精度。

关键词: 加权最小二乘法; 光纤光栅应变传感器; 敏感性优化; 灵敏度

中图分类号: TE19

文章编号: 1000-0682(2024)01-0066-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.015

Automatic optimization algorithm for parameter sensitivity of fiber bragg grating strain sensors based on weighted least squares method

DU Jilong, ZHANG Guoyue, LIU Jinghao

(Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The conventional parameter optimization method for fiber Bragg grating strain sensors mainly relies on the sparrow search algorithm, but this method ignores the influence of strain transfer, resulting in low sensor sensitivity and inability to ensure measurement accuracy. Therefore, an automatic optimization algorithm for parameter sensitivity of fiber Bragg grating strain sensors based on weighted least squares method is proposed. Based on the basic structure of the sensor, combined with the direction of strain transfer and engineering, considering the regular changes in strain coefficient, and the strain transfer loss is calculated. Calculate the amplitude of wavelength change using the coefficient of change model. From this, the sensitive field distribution of the sensor is obtained. Combined with the mode coupling theory, a parameter optimization model is established with the objective function of uniformity of the sensitive field distribution and minimizing the ratio of maximum capacitance to minimum capacitance, and the weighted least squares method is used to weight the sampling points to obtain the optimal response values, thereby obtaining the optimal structural parameters of the sensor. Taking a certain fiber optic sensor as the experimental object, the structural parameters were optimized using the design method. The results showed that the sensitivity of the sensor was guaranteed and the measurement accuracy was improved.

Keywords: weighted least squares method; fiber bragg grating strain sensor; sensitivity optimization; optimize sensitivity

收稿日期: 2023-08-29

第一作者: 杜吉龙(1981—), 男, 吉林省吉林市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为厚膜混合集成电路、仪器仪表接口电路、传感器信号处理电路、嵌入式系统等电子电路产品的设计开发和自动控制系统的设计与应用等。E-mail: jacquelinejilong@163.com

0 引言

光纤传感技术被广泛应用于矿山安全监测和
油藏开发等领域。由于长期暴露在高温、高压、腐

蚀和高湿度环境下,光纤光栅传感器在许多实际工程应用中的测量性能逐渐恶化或出现故障。因此,为了保证传感器的测量精度,有必要对其参数进行优化。

文献[1]采用线性补偿方法对传感器输入与输出的非线性曲线进行漂移补偿,使得输出值无限接近理论值,提高传感器灵敏度,由此实现参数优化。但该方法主要依赖于传感器敏感度分布固有的均匀性,当敏感度分布不规律时,此方法则具有较大的局限性;文献[2]采用响应面法建立传感器参数与预测响应值之间的回归定量关系模型,并通过正交试验求取传感器的最佳参数。但该方法具有可调参数多、收敛速度慢等缺陷,导致优化效果不佳。

因此,该文以加权最小二乘法为技术支持,对光纤光栅应变传感器参数敏感性自动优化算法进行研究。

1 光纤光栅应变传感器参数敏感性自动优化算法设计

1.1 传感器敏感场分布计算

光纤光栅应变传感器的参数优化是光纤技术实际应用中需要解决的首要问题^[3]。通过分析光纤光栅应变传感器的内部组成和结构,研究应变传递对控制参数的影响,进而进行参数优化。光纤光栅应变传感器的横截面示意图如图 1 所示。

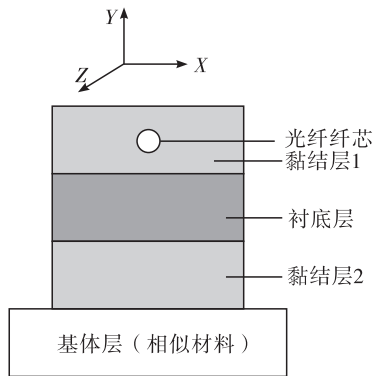


图 1 光纤光栅应变传感器的横截面示意图

在光纤光栅应变传感器中,敏感场分布极不均匀,衬底层越近,灵敏度就越高;相反,黏结层 1 的灵敏度最低。因此,为了获得敏感场的精确分布,首先应分析传感器的应变传递过程。如图 1 所示,传感器本身的参数,即半径和弹性模量是已知的^[4],则传感器的应变传递方向为:基体—黏结层 2—衬底层—黏结层 1—光纤纤芯,此过程的应变传递损耗

可表示为:

$$\alpha_0 = \frac{\mu_0 i_s R_0}{2 (x_0)^{3/2}} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; i_s 为单环载流; R_0 为光纤纤芯半径; x_0 为基体层到光纤纤芯中心的距离。

由于黏结层 1 和黏结层 2 的材质都是胶^[5],因此,两者的力学性能差异并不显著,因此不必考虑黏结层弹性模量差异对应变传递损失的影响。在热平衡状态下应变传递的最大滞止阶遵循 Boltzmann 分布,即:

$$N_e = \alpha_0 \times \exp\left(-\frac{\Delta E_0}{K_e T_1}\right) \quad (2)$$

式中: ΔE_0 为朗德因子; K_e 为随机矢量; T_1 为玻尔兹曼常数。

光纤温度变化矢量随着传感器的长度和流体速度的变化关系如下:

$$M_1 = N_e \left[1 - \exp\left(-\frac{x_1}{v_0 T_2}\right) \right] \quad (3)$$

式中: M_1 为光纤温度变化量; x_1 为传感器长度; v_0 为流体速度; T_2 为介质横向弛豫时间。

第 t 个测试单元敏感度的均值与标准方差分别为:

$$\begin{cases} S_1 = \frac{1}{t} \sum M_1 \times e_0 \\ S_2 = \sum M_1 \times r_0 \times t + S_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_1 和 S_2 分别为敏感度的测试均值与标准方差; e_0 为测试误差; r_0 为与敏感度有关的修正因子。

采用光传输矩阵描述光纤传感器的光束传播^[6],则高斯光束电场的最大振幅可表示为:

$$E_z = \frac{A_t}{w_1} \exp\left(-S_1 - \frac{S_2}{r_c q_0}\right) \quad (5)$$

式中: A_t 为光传输矩阵; w_1 为复光束传输; r_c 为光束拉莫尔频率; q_0 为光束信号的初始相位值。

光束在单模光纤中的传播可描述为:

$$D_1 = -\frac{E_z}{y_1} \sum 2p_0 \quad (6)$$

式中: y_1 为光束反射率; p_0 为折射菲涅尔系数。光束反射率的取值范围主要取决于传感器衬底的弹性模量 E_s 、黏结层 2 的厚度 h_1 和衬底层的厚度 h_2 , 计算公式为:

$$y_1 = \sqrt{\frac{E_s}{h_1 + h_2}} \quad (7)$$

将基体层与黏结层 1 作为传感器的端面 I 与端面 II,则 2 个端面的入射光与反射光的电场平均振

幅为:

$$\begin{cases} A_1 = D_1 \sqrt{\mathbf{R}_i \times \mathbf{E}_i} \\ A_2 = \frac{D_1}{\omega_1} \times \frac{n_0}{u_s} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{R}_i 为变换矩阵; \mathbf{E}_i 为基础矩阵; ω_1 为传感器基体层的曲率半径; n_0 为光纤端的反射率; u_s 为光纤有效折射率。

则可利用下式计算传感器敏感场分布:

$$F_k = \frac{\Delta C_0}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \times \frac{1}{A_1 \times A_2} \quad (9)$$

式中: ΔC_0 为光纤光栅中心波长漂移系数; ε_1 和 ε_2 为光纤光栅应变值的上、下限; F_k 为传感器敏感场分布。

依据光纤光栅应变传感器内部组成结构, 计算应变传递损耗, 并基于光束传播的电场振幅与敏感单元的测试结果, 求取传感器敏感场分布, 为构建传感器参数优化模型提供数据基础。

1.2 光纤光栅应变传感器参数优化模型建立

对于光纤光栅应变传感器, 由于其敏感场分布具有对称性, 因此, 在参数优化过程中, 只需考虑一半的敏感场个数^[7], 并根据模式耦合理论, 建立以敏感场分布的均匀性以及最大电容与最小电容比值最小为目标函数的参数优化模型, 具有计算过程如下。

敏感场分布是否均匀决定了传感器的性能^[8], 为了评估敏感场的均匀程度, 引入如下指标:

$$P_r = \frac{1}{F_k} \left(\sum \sum \left\| \frac{G_1}{G_2} \right\|^2 \right) \quad (10)$$

式中: G_1 为励磁频率; G_2 为弹光效应系数。

采用光纤光栅相对纤芯波长应变衰减常数 β_0 , 计算敏感场的波长偏差, 即:

$$\zeta_1 = \frac{\Delta \lambda_a}{P_r} \sum \frac{\beta_0}{\alpha_1} \quad (11)$$

式中: $\Delta \lambda_a$ 为波长尺度因子; α_1 为敏感场松弛变量。

基于以上公式, 光纤光栅敏感场的波长变化与应变成线性关系^[9], 因此将传感器敏感场分布均匀性最大作为参数优化的设计指标之一, 即:

$$\max P_r = \varphi_1 j_1 + \delta_1 \frac{t_s}{\zeta_1} \quad (12)$$

式中: φ_1 为时间常数; j_1 为与传感器运行工况有关的参数; δ_1 为传感器阻尼效应因子; t_s 为采样时间。

光纤光栅应变传感器参数优化目标函数的指标设计不仅考虑敏感场分布的均匀性, 还需要评估传

感器在测量过程中的测量精度, 以满足测量技术的要求^[10], 即应保证基体与黏结层间的最大电容与最小电容的比值尽量小, 以缩短测量量程, 降低测量电路的设计难度。首先计算传感器的最大电容与最小电容值, 即:

$$\begin{cases} C_{\max} = K_t + \theta_0 \sum \frac{1}{L_x} \\ C_{\min} = K_e \times I_s + \frac{\beta_2}{N_s} \\ K_t = \mu_1 \times \mu_2 \\ K_e = z_1 \times z_2 / m_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_{\max} 和 C_{\min} 分别为传感器最大电容与最小电容; K_t 为光纤光栅周期; θ_0 为光束折射角; L_x 为光束传播路径长度; K_e 为应变灵敏度系数; I_s 为介电常数; β_2 为可调参数; N_s 为缩放因子; μ_1 和 μ_2 分别为传感器的正阻尼向量与负阻尼向量; z_1 和 z_2 分别为中心波长的动量因子与学习因子; m_0 为调整残差。

由此, 将最大电容与最小电容比值最小作为传感器车速优化模型的目标函数之二^[11], 并对其进行简化处理, 计算公式如下:

$$\min A_n = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = d_1 \sum \kappa_1 \quad (14)$$

式中: d_1 为测试区域尺寸; κ_1 为透射光波长。

设为有约束条件的最优化问题, 因此, 对此构造约束条件^[12], 以保证模型成立, 则最终构建的传感器参数优化模型为:

$$G_c = Y_u (\max P_r - \min A_n) = \frac{f_1 \tan \gamma}{v_n (\omega_\alpha + \omega_\beta)} \quad (15)$$

式中: $\max P_r$ 为传感器敏感场分布的均匀程度指标; $\min A_n$ 为最大、小电容比值指标; Y_u 为对应的约束条件; γ 为光束与光轴平面的夹角; ω_α 和 ω_β 分别为目标函数相应的权重; f_1 和 v_n 分别为传感器结构参数, 即待优化的参数。

上式即为该文构建的光纤光栅应变传感器参数优化模型, 其中 f_1 和 v_n 为需要优化的传感器参数。通过采取适当的方法求解模型, 求得 f_1 和 v_n 的值, 即为最优结构参数。

1.3 基于加权最小二乘法的优化模型求解

对上述参数优化模型进行加权, 使其成为一个没有异方差的新优化模型, 并通过寻找一个函数来模拟模型控制参数的分布, 以确保已知数据与模拟数据之间的差的平方和最小化^[13]。然后实现对模型参数的估计, 模型求解过程如图 2 所示。

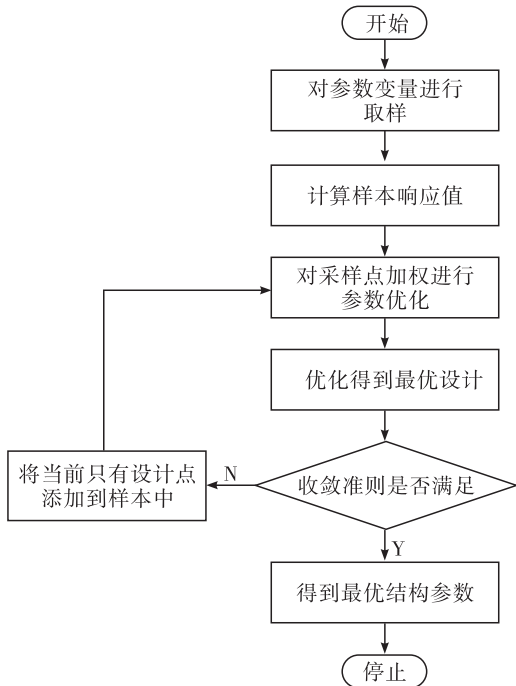


图2 传感器结构参数求解流程图

采用拉丁超立方取样方法对模型控制参数进行取样^[14],如果记采样数据点为 (x, y) ,则模拟后的函数为:

$$y = G_c \times k_r + \sigma_0 \quad (16)$$

式中: G_c 为传感器参数优化模型; k_r 为采样数据的比例系数; σ_0 为模拟数据与已知数据的转换系数。

采样数据与模拟数据之间的差值记为 e_v ,则有:

$$e_v = y \times i_t \quad (17)$$

式中: i_t 为函数阶次。

计算采样样本的响应值,即:

$$C_m = \tau^2 \sum e_v / a_j \quad (18)$$

式中: τ 为样本数据随机分布系数; a_j 为设计分布误差。

结合样本响应值对采样数据进行加权处理^[15],计算公式为:

$$\bar{U} = C_m \cdot |\rho_0|^2 \quad (19)$$

式中: ρ_0 为采样数据拟合矩阵。

则 n 个数据点差值的平方和可表示为:

$$\Omega = \bar{U} \sum (C_{mi} - C_{mj}) \quad (20)$$

式中: C_{mi} 和 C_{mj} 分别为第 i 和第 j 个样本数据的响应值。

在对数据进行加权时,给中间段的数据点分配较大的权重,给采样开始和结束时的采样数据点分配较小的权重,并确定算法是否满足收敛准则,即:

$$\Omega - y_k \leq \psi_0 \quad (21)$$

式中: y_k 为第 k 代最优设计的试验响应值; ψ_0 为预设收敛精度。

若算法满足上述收敛准则,则输出传感器最佳结构参数,即:

$$\begin{cases} f_1 = \Omega \times b_s \\ v_n = \Omega + g_s \times l_0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: f_1 和 v_n 分别为传感器最佳结构参数; b_s 为采样值的平均值; g_s 为线性函数; l_0 为数据点归一化系数。

根据以上计算与分析过程,在算法满足收敛准则条件下,结合线性函数,即可得到光纤光栅传感器的最优结构参数。至此,完成基于加权最小二乘法的光纤光栅应变传感器参数敏感性自动优化算法的设计。

2 实验论证分析

为了考察该文设计的方法的实际应用效果,利用 fsn41n 型号光纤光栅应变传感器进行参数优化实际测试,并引入其他方法进行对比,根据实验结果分析该文方法的优化性能。

2.1 实验准备

实验采用 fsn41n 型号光纤光栅应变传感器作为研究对象,其 x 向、 y 向和 z 向的测量范围分别为 62 mm、70 mm 和 55 mm,极板宽度为 15 mm,绝缘外壳壁厚为 1.5 mm,绝缘外壳的介电常数为 3.2,流型介质的介电常数为 2.5。考虑到安装隔离电极可能会降低传感器的电容,所以在传感器参数的优化设计中,低校准时使用空场,高校准时使用细砂,以补偿电容。光纤光栅应变传感器的其他技术参数如表 1 所示。

表1 光纤光栅应变传感器技术参数

指标	参数	指标	参数
波长范围/nm	1525 ~ 1585	通道数	32
波长精度/pm	± 0.5	每通道可测点数	360
全通道同步采集频率/Hz	100	光纤传输距离/km	35
量程/ $\mu\epsilon$	± 2000	分辨率/ $\mu\epsilon$	0.1
测量标距/mm	20	光栅反射率/%	$\geq 75\%$
单芯光纤可串联数量/只	24	环境温度分辨率/ $^{\circ}\text{C}$	0.02
导线应力量程/kN	0 ~ 360	导线应力分辨率/KN	0.020

利用有限元分析软件对光纤光栅应变传感器进行建模。该结构的基底由金属材料 302 不锈钢制成,弹性模量为 205 GPa,泊松比为 0.36。根据传感器的整体形状将模型划分为四面体网格,以获得传感器的反射光谱,如图 3 所示。

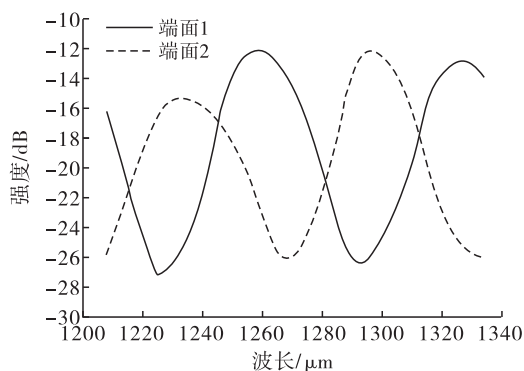


图3 传感器反射光谱图

为保证传感器应变传递系数变化的规律性,设定衬底弹性模量的临界值为 1.0×10^{11} GPa,黏结层2与衬底的厚度分别为0.5 mm和1.0 mm。以传感器敏感场分布的均匀性 P_r 作为目标函数,采用该方法对结构参数进行优化。

2.2 实验说明

由于实际应用场景中受多径、衍射、障碍物等因素的影响,系统的实验误差值较大。因此,传感器的每个节点都被赋予一定的权值,并使用加权最小二乘法来估计未知节点的敏感场。采用 MATLAB 对该文算法在二维空间内的参数优化结果进行仿真比较,并引入文献[1]线性补偿(方法1)、文献[2]响应面法作为该文的对比方法,对基于不同方法进程参数优化后的灵敏度进行对比分析。

2.3 传感器灵敏度对比实验分析

基于 fsn41n 型号光纤光栅应变传感器的典型参数,根据不同端面的反射光谱图,采用以上3种方法对传感器参数进行优化,并统计优化后传感器的灵敏度值,结果如图4所示。

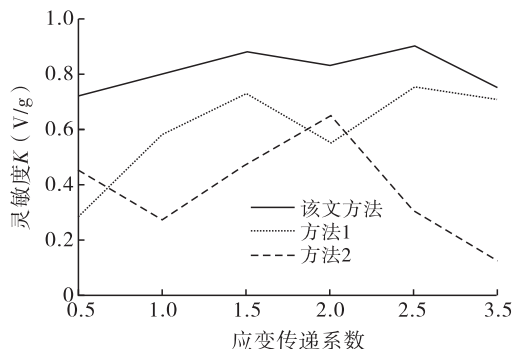


图4 参数优化后传感器灵敏度结果对比

由图4可知,分别采用方法1、方法2与该文方法对传感器参数进行优化,经过该文方法优化后的传感器灵敏度在不同应变传递系数下,均要高于对比方法,始终保持在0.65 V/g以上。方法1对于传感器参数的优化,主要注重的是磁场的均匀性与稳

定性,而未考虑到敏感场分布的均匀性对传感器敏感度的影响;方法2优化后传感器灵敏度偏低的原因是在正向阻尼与负向阻尼的作用下,会产生大量干扰信号,而此方法未针对干扰因素进行消除处理,导致传感器灵敏度下降。即利用该文提出的方法对光纤光栅应变传感器进行参数优化,能够有效提高传感器灵敏度,保证传感器的测量精度。

2.4 传感器失真度对比实验分析

在上述实验基础上,为体现该文方法在传感器参数优化方面的优越性能,采用失真度指标 Q 作为评估不同方法的优化效果,优化后的失真度 Q 越低,表明传感器的灵敏度越高,优化效果越好,结果如图5所示。

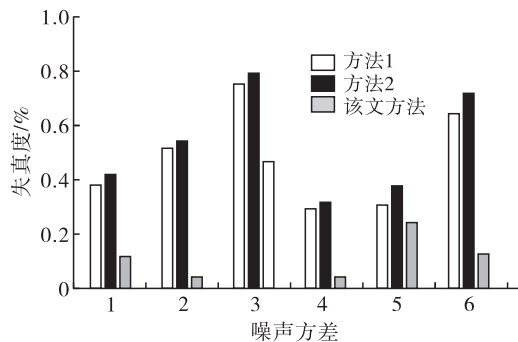


图5 传感器失真度结果对比

分析图5可知,与其他2种方法相比,该文方法优化后的光纤光栅应变传感器的失真度最低,在不同噪声方差条件下,均控制在0.5%以下。由此可以说明利用该文方法对传感器参数进行优化,能够提高传感器的灵敏度。

3 结语

该文根据光纤光栅应变传感器的运行原理与基本构成,计算了敏感场分布,以此为依据,构建了以敏感场分布均匀性与电容差最小为目标的参数优化模型,并引入加权最小二乘法求得传感器最佳结构参数。并在仿真实验中验证了该文方法的可行性,表明了该文提出的优化方法能够得到可靠的传感器结构参数,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 樊鹏辉,杨光永,程满,等. 基于线性补偿的测距传感器结构设计与参数优化[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(02): 82-85.
- [2] 孙启国,孙奥,李照威. 基于响应面法的油气润滑 ECT 传感器优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 250-255.

(下转第97页)

- 出版社, 1993.
 - [27] 罗格利贝格. 热电偶合金手册[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1987.
 - [28] SUSAN D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modeling of distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1919-1929.
 - [29] 滕士雷, 孔喜梅. 基于阶跃温度响应的热电偶时间常数测试系统[J]. 中国测试, 2011, 37(01): 24-27.
 - [30] 查美生, 仲朔平. 用于 10 MW 高温气冷实验堆的高可靠性铠装热电偶测温装置[J]. 工业仪表与自动化装置, 2005(04): 60-61+72.
 - [31] 肖琳, 张立新, 徐丽艳, 等. 专用 K 型铠装热电偶制作工艺的研究[J]. 功能材料, 2005, 36(11): 1725-1727.
 - [32] 陈洁. 压水堆核电站用 K 型铠装热电偶电势稳定性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
 - [33] 高成, 雷鑫, 黄姣英, 等. 基于热管法的 K 型铠装热电偶响应时间测试分析[J]. 仪表技术与传感器, 2021(01): 25-29.
 - [34] 刘浩, 赵化业, 王文革, 等. 热电偶温度传感器响应时间测试及分析[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(06): 48-52.
 - [35] 王志超, 张志杰, 李岩峰, 等. 基于 HHO 算法的铠装热电偶动态补偿方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(02): 139-144.
 - [36] 刘波, 郑伟, 王志远, 等. 铠装热电偶动态响应校准过程数值研究[J]. 计量学报, 2022, 43(12): 1593-1597.
 - [37] 蔡欣男, 柯嫻, 喻峰, 等. 焦炉用铠装热电偶失效原因分析[J]. 金属热处理, 2020, 45(01): 61-64.
 - [38] 张幼林, 严建伟. 锅炉铠装热电偶腐蚀爆管浅析[J]. 锅炉制造, 2022(02): 22-23.
 - [39] 王剑星, 张立新, 肖翔, 等. 铠装热电偶电缆在弯曲加工过程中的断裂原因[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(04): 49-51.
 - [40] 王京慧. 多点铠装热电偶在加氢反应器床层温度测量中的应用[J]. 石油化工自动化, 2009, 045(06): 59-62.
 - [41] 叶丹. 湿热箱用铠装热电偶制作工艺规范[J]. 广东化工, 2019, 46(18): 77-78.
 - [42] 陈清清. K 型热电偶高温测温特性的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
 - [43] 王天资, 任侃, 张磊, 等. 镍铬-镍硅铠装热电偶测温精度影响分析[J]. 测控技术, 2018: 320-323.
 - [44] 刘炜, 丁锡端, 裴炳安. 加氢反应器高温高压多点热电偶国产化研制[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(01): 62-65.
 - [45] 黄继强, 刘瀚璐, 李馨. BDO 加氢反应器和甲醇合成反应器多点热电偶的国产化应用[J]. 石油化工自动化, 2020, 56(01): 62-65.

(上接第70页)

- [3] 苏连成,崔雪.电感式磨粒在线监测传感器结构参数优化[J].燕山大学学报,2021,45(01):51-57+69.
- [4] 唐荣芳,余鹏,庞广富.MEMS微波功率传感器模塑封工艺参数优化设计[J].塑料科技,2022,50(09):105-108.
- [5] 祁佳莉,王康宁,王瑞金,等.一种新型双层热感式微流量传感器及参数优化[J].仪器仪表学报,2022,43(09):149-157.
- [6] 樊鹏辉,杨光永,晏婷,等.激光三角法测距传感器结构设计及参数优化的研究[J].计算机与数字工程,2022,50(09):2074-2078.
- [7] 许铁岩,韦炜,魏鹏鑫,等.燃气轮机转速传感器测量故障分析与优化设计[J].工业仪表与自动化装置,2022(03):79-84.
- [8] 刘圣苻,刘毅力,李佼洁.基于相位补偿法和麻雀搜索算法的PSS2A参数优化[J].国外电子测量技术,2022,41(05):37-45.
- [9] 张晋荣,王莉莉,杨博韬,等.电容层析成像系统传感器场域剖分及参数优化[J].哈尔滨理工大学学报,
- [10] 颜华,张馨,王伊凡.基于RBF神经网络和遗传算法的ERT传感器优化[J].沈阳工业大学学报,2021,43(03):295-300.
- [11] 张宇航,倪智宇.基于MAC法的空间太阳能电站传感器优化配置与参数辨识[J].沈阳航空航天大学学报,2022,39(02):28-38.
- [12] 张行,唐步云,刘彤,等.油气管道柔性测径传感器设计及其结构优化[J].仪器仪表学报,2022,43(12):15-25.
- [13] 吴晓伟,刘宏昭.约束型粒子群的LCC/S磁谐振耦合机构参数优化算法[J].机械科学与技术,2022,41(01):127-133.
- [14] 张鹏,冯卓明,宋清华,等.自激励式磁通门电流传感器参数优化方法研究[J].仪表技术与传感器,2021(12):34-37+101.
- [15] 宁治文,傅军,常扬.MEMS电子罗盘三维补偿线圈参数优化设计[J].传感技术学报,2021,34(07):944-950.