



光栅干涉位移传感器信息解算方法研究

祖凯旋 赵锐 石云波 张旭 陈玉楠 沈富明 刘豪

Research on information solution method of grating interference displacement sensor

ZU Kaixuan, ZHAO Rui, SHI Yunbo, ZHANG Xu, CHEN Yunan, SHEN Fuming, LIU Hao

引用本文:

祖凯旋, 赵锐, 石云波, 等. 光栅干涉位移传感器信息解算方法研究[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 446–452. DOI: 10.5768/JAO202445.0208001

ZU Kaixuan, ZHAO Rui, SHI Yunbo, et al. Research on information solution method of grating interference displacement sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 446–452. DOI: 10.5768/JAO202445.0208001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于叠栅的Bragg光纤光栅综合方法的研究

Study of Bragg grating synthesis methods based on superimposed fiber grating

应用光学. 2019, 40(4): 699–703 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0408001>

光纤布拉格光栅柔性传感器研究进展

Research progress of flexible sensor of fiber Bragg grating

应用光学. 2021, 42(5): 932–940 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508002>

基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

保偏光纤光栅应变传感器的研究

Study on polarization maintaining fiber Bragg grating strain sensor

应用光学. 2018, 39(6): 942–946 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0608001>

基于紫外刻写相移光栅的温度应力同时测量传感器

Simultaneous measurement sensor of temperature and stress based on UV lithography phase-shifted grating

应用光学. 2021, 42(1): 200–206 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108002>

基于光栅应变传感器的纳米测量机探针设计

Probe design of nanometer measuring machine based on grating strain sensor

应用光学. 2017, 38(3): 506–513 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0308001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 02-0446-07

光栅干涉位移传感器信息解算方法研究

祖凯旋, 赵锐, 石云波, 张旭, 陈玉楠, 沈富明, 刘豪

(中北大学 仪器科学与动态测试省部共建国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 面向光栅干涉式位移传感器信号高精度解算的需求, 提出了一种基于椭圆拟合补偿及反正切算法的位移解算改进方法。采用傅里叶变换及标准化椭圆参数拟合法对信号误差估计, 通过构建线性误差补偿模型对带误差信号进行正交补偿, 结合反正切算法对信号进行线性化处理, 实现高精度位移解算读出。Matlab 仿真结果表明, 该方法对信号正交补偿效果显著, 线性化处理算法解算位移最大相对误差小于 0.2%。为提高光栅干涉式传感器位移解算精度提供了有效途径和方法。

关键词: 光栅; 位移; 正交补偿; 椭圆拟合; 反正切; 线性化处理

中图分类号: TN29; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0208001

Research on information solution method of grating interference displacement sensor

ZU Kaixuan, ZHAO Rui, SHI Yunbo, ZHANG Xu, CHEN Yunan, SHEN Fuming, LIU Hao

(State Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the increasing demand for signal high-precision solution methods of grating interferometric displacement sensors, an improved method of displacement solution based on ellipse fitting compensation and arctangent algorithm was proposed. The estimation of signal error parameters was realized by Fourier transform and normalized elliptic parameter fitting method, the orthogonal compensation of the signal with errors was carried out by constructing a linear error compensation model, and the signal was linearized with the arctangent algorithm to finally achieve high-precision displacement solution readout. The simulation results of Matlab show that this method is highly effective for the signal orthogonal compensation effects, and the maximum relative error of displacement solution for linearization is less than 0.2%, which provides an effective way and method to improve the displacement solution precision of grating interferometric sensors.

Key words: grating; displacement; orthogonal compensation; ellipse fitting; arctangent; linearization

引言

随着科学技术的发展, 精密仪器制造及微纳器件加工等领域对精密位移检测技术需求不断提升^[1-4]。光学测微法因具有高精度、电磁干扰免疫等特点而受到广泛关注。其中, 光栅干涉式位移检测技术不仅继承了这一系列典型特点, 还具有工作条件宽松、成本较低、易于集成化等优势, 已成为精

密位移测量领域中的重要研究方向^[5-6]。光栅干涉式位移传感器输出为正/余弦信号^[7], 采用常规波形检测手段难以直接获得周期信号携带的位移信息或存在解算精度大幅降低等问题, 针对该问题, 许多研究人员采用相位细分技术构建信号相位与位移之间的线性关系^[8], 实现高精度位移解算。常用的细分技术手段包括: 电阻链法^[9]、锁相信频法^[10]

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金 (52175524); 山西省基础研究计划面上项目 (202103021224206); 山西省“1331 工程”重点学科建设项目

作者简介: 祖凯旋 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事光栅位移传感器设计、加工和测试研究。E-mail: 15234903478@163.com

通信作者: 赵锐 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 MEMS/MOMS 器件设计、加工和测试研究。E-mail: zhaorui@nuc.edu.cn

及反正切算法^[11]。其中, 电阻链法受硬件限制, 仅适用于低倍率细分的场合^[12]; 锁相倍频法具有较高的细分倍率, 但对输入信号频率稳定性要求较高, 同样限制了其应用场景^[13]; 相比之下, 反正切算法不仅具有较高的细分倍率^[14], 且能够适用于非匀速位移信号测量, 但该方法对信号的正交特性要求较高。而在实际情况中, 传感器往往不可避免地受到器件安装误差及电路噪声等因素的影响^[15], 使得输出信号存在一定正交误差, 进而对后续线性化处理产生干扰, 造成测量误差^[16], 因此在对光栅信号线性化处理前需要对其进行正交补偿。

目前针对光栅信号的补偿方法有很多种, 根据实现方式可分为硬件补偿法和软件补偿法, 其中软件补偿法通过数字算法实现信号补偿, 与硬件补偿法相比, 具有成本较低, 且便于针对不同需求做出调整的优点^[17]。毕今朝等人基于布谷鸟搜索算法实现了对信号误差参数辨识补偿^[18]; 朱维斌等人通过粒子群优化算法求解误差参数并进行补偿^[19]; 束名扬等人基于椭圆参数拟合原理, 使用最小二乘结合牛顿迭代法对信号参数拟合估计实现了误差校正^[20]。上述方法在光栅信号误差估计补偿方面具有较好的效果, 但均需要多次迭代运算逼近最优解, 使得处理过程所需运算成本较高。

针对目前光栅干涉式位移传感器输出信号需要经过正交补偿及线性化处理提取位移信息这一问题, 本文采用最小二乘结合拉格朗日乘数法拟合椭圆参数, 通过构建线性正交误差补偿模型对信号进行补偿处理, 并提出一种反正切线性化处理算法实现对位移的解算。

1 光栅信号正交补偿

光栅干涉式位移传感器输出的理想信号为具有90°相位差的等幅正余弦信号, 信号相位随传感器输入位移发生变化, 因此通过解算加载在正交信号中的相位信息, 能够实现对检测位移的线性化表征。在实际情况中, 光栅之间输出信号往往存在高次谐波、直流分量及外界杂波等干扰信号, 需要通过差放及滤波等电路进行调理, 但由于硬件元件误差值以及电源波动等因素, 仍然存在一部分正交及幅值误差, 该误差往往对后续信号的线性化处理造成影响, 使得传感器读出值产生较大偏差, 这里采用一种数字补偿技术对信号误差进行补偿, 设定光栅带误差输出信号模型为

$$\begin{cases} I_{C0} = a \cos(\theta) + \alpha \\ I_{S0} = (1 + k) a \sin(\theta - \delta) + \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 为信号幅值; k 为信号幅值误差; δ 为相位误差; α, β 为直流分量误差。目标信号为 $I_C = a \cos(\theta)$, $I_S = a \sin(\theta)$ 。

为避免正交信号携带不同直流分量对信号线性化处理造成较大的误差干扰, 在进行相位及幅值补偿前需要消除直流分量误差。由于直流分量在信号频谱分析中表示为零频信号, 因此对原始输出信号进行傅里叶变换, 将其零频分量置零并做傅里叶反变换, 能够得到不含直流误差的信号:

$$\begin{cases} I_{C1} = a \cos(\theta) \\ I_{S1} = (1 + k) a \sin(\theta - \delta) \end{cases} \quad (2)$$

通过Matlab构建包含不同直流分量的余弦信号模型, 采用上述方法对该信号进行处理, 结果如图1所示, 图1(a)中分别为所构建的带随机直流分量的余弦信号, 经过频域置零法消除直流分量后得到如图1(b)所示信号, 结果表明该方法对信号中携带的随机直流分量具有较好的消除作用。

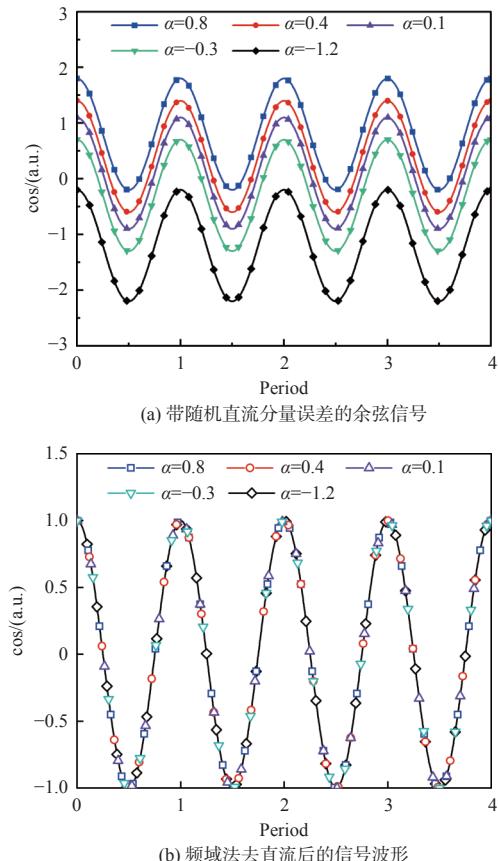


图1 直流分量消除效果图

Fig. 1 Effect diagram of DC component elimination

经过频域置零后的信号仅包含幅值及相位误差, 为消除该误差, 可以通过构建无直流信号与目标信号之间的关系式的方法求取信号误差补偿矩阵, 进一步对矩阵参数进行拟合估计并带入关系

式得到目标补偿结果。该关系式可写为

$$\begin{bmatrix} I_C \\ I_S \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{bmatrix} a \cos(\theta) \\ (1+k) a \sin(\theta - \delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix}$ 为信号误差补偿矩阵; ε 为矩阵系数。为满足上式关系, 令 $\varepsilon_{11} = 1$, 则有 $\varepsilon_{12} = 0$, 利用三角公式求解可得:

$$\begin{cases} \varepsilon_{21} = \tan(\delta) \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{(1+k)\cos(\delta)} \end{cases} \quad (4)$$

则误差补偿矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \tan(\delta) & \frac{1}{(1+k)\cos(\delta)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

为求取补偿矩阵中的未知参量, 采用椭圆拟合的方式对信号幅值及相位误差进行估计, 经整理, 式(2)可以表示为

$$\frac{I_{C1}^2}{a^2} + 2 \frac{\sin(\delta)}{a^2(1+k)} I_{C1} I_{S1} + \frac{I_{S1}^2}{a^2(1+k)^2} - \cos^2(\delta) = 0 \quad (6)$$

设定标准化椭圆曲线表达式为

$$\begin{cases} F(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D = 0 \\ 4AC - B^2 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $4AC - B^2 = 1$ 为标准化椭圆曲线约束条件, 该约束条件能够保证椭圆曲线不会退化为直线或双曲线等其他线形, 同时在一定程度上简化运算。根据系数对应关系能够得出, 幅值误差及相位误差与椭圆曲线表达式系数关系分别为

$$k = \frac{1}{\sqrt{C/A}} - 1 \quad (8)$$

$$\delta = \arcsin \left[\frac{B}{A} \frac{(1+k)}{2} \right] \quad (9)$$

为获取椭圆曲线表达式系数, 采用最小二乘法及拉格朗日乘数法对约束条件下最优椭圆参数进行估计, 对于采样点 (x_i, y_i) , 其估计残差方程表示为

$$\varepsilon_i = Ax_i^2 + Bxy_i + Cy_i^2 + D \quad (10)$$

定义表达式参数向量为 $\alpha = [A, B, C, D]^T$, 变量矩阵为

$$\mathbf{\beta} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

依据最小二乘法原理, 椭圆参数估计问题可以表示为: 满足 $\alpha^T \mathbf{X} \alpha = 1$ 约束条件下求解 $\min \|\mathbf{\beta} \alpha\|^2$, 其中 \mathbf{X} 为常数矩阵:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

为求解最优参数, 进一步构建拉格朗日函数:

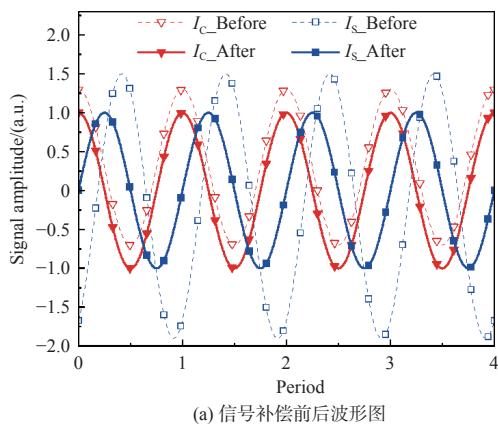
$$L(\beta, \lambda) = \alpha^T \beta^T \beta \alpha - \lambda (\alpha^T \mathbf{X} \alpha - 1) \quad (13)$$

依据拉格朗日乘数法原理, 对上式求偏导并使其为 0 可得:

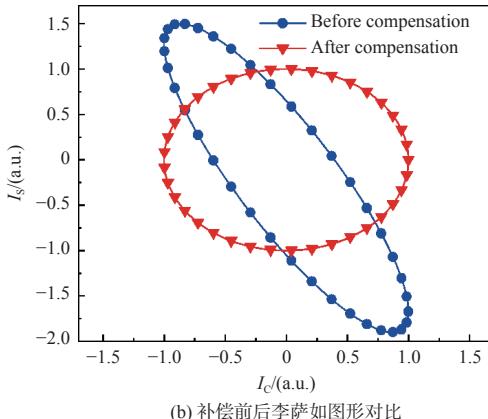
$$\frac{\partial L(\beta, \lambda)}{\partial \alpha} = \beta^T \beta \alpha - \lambda \mathbf{X} \alpha = 0 \quad (14)$$

$$(\beta^T \beta)^{-1} \mathbf{X} \alpha = \lambda^{-1} \alpha \quad (15)$$

通过式(15)可将该问题转换为在求解约束条件下矩阵 $(\beta^T \beta)^{-1} \mathbf{X}$ 特征值与特征向量的问题, 所得特征向量即为椭圆参数最优解, 结合式(8)、式(9)可以得到幅值及相位误差估计值, 带入式(5)得到补偿矩阵, 再通过式(3)进行补偿计算得到目标信号。通过 Matlab 构建带直流分量、幅值及相位误差的正交信号模型, 采用上述方法对带误差信号进行补偿, 其结果如图 2 所示, 根据补偿前后波形及李萨如图形对比可以得出: 带误差信号在经过补偿后, 能够较好地消除直流分量及幅值相位误差, 且补偿后的信号具有良好的正交特性。



(a) 信号补偿前后波形图



(b) 补偿前后李萨如图形对比

图 2 非线性误差信号补偿结果

Fig. 2 Results of compensation for signals with nonlinear errors

2 反正切相位解算原理

由于光栅位移传感器输出的标准信号为正余弦正交信号, 无法直接通过该信号读出位移值, 需要对输出信号进行线性化处理, 本文采用一种基于反正切细分原理的线性化手段, 该方法具有计算精度高、鲁棒性强且易于在算法中实现的优点。经过补偿校准的光栅传感器输出信号模型为

$$\begin{cases} I_S(\theta) = a \sin(\theta) \\ I_C(\theta) = a \cos(\theta) \end{cases} \quad (16)$$

当数据点相位接近 $\pm\pi/2$ 时, 直接通过原始信号构建的正切信号值接近 $\pm\infty$, 在该种情况下通过反正切函数计算其相位值往往会有较大的误差, 因此需要构建新的信号解决该问题。根据正余弦特征信号的正负情况能够将一个周期内的信号均分为如图3所示8个等相位宽的子区间, 进而分区间构建反正切函数能够有效避免数值出现无穷大的情况, 从而减小后续反正切算法误差, 区间划分判别条件如表1所示。

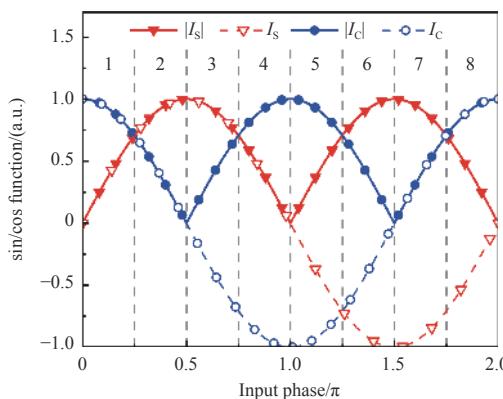


图3 对输出信号相位区间划分结果

Fig. 3 Results of phase interval division of output signals

表1 相位区间划分条件

Table 1 Conditions of phase interval division

Phase interval	I_S	I_C	$ I_S - I_C $	Phase interval	I_S	I_C	$ I_S - I_C $
Interval 1	+	+	-	Interval 5	-	-	-
Interval 2	+	+	+	Interval 6	-	-	+
Interval 3	+	-	+	Interval 7	-	+	+
Interval 4	+	-	-	Interval 8	-	+	-

为获取信号的相位信息, 需要通过反正切函数对输入正余弦信号进行求解, 结合两路正余弦信号的分布特征构造反正切模型:

$$\text{Atan}_{\text{Div}}(\theta) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{|a \sin(\theta)|}{|a \cos(\theta)|}\right) & |I_S(\theta)| \leq |I_C(\theta)| \\ \arctan\left(\frac{|a \cos(\theta)|}{|a \sin(\theta)|}\right) & |I_S(\theta)| > |I_C(\theta)| \end{cases} \quad (17)$$

该信号模型数值直接表示原始信号数据点对应周期中的相角弧度值, 构建结果如图4所示。通过构造反正切函数, 不仅保留了区间划分所实现的8倍细分特性, 同时能够通过计算数据点的反正切值, 实现对该点相位的计算。

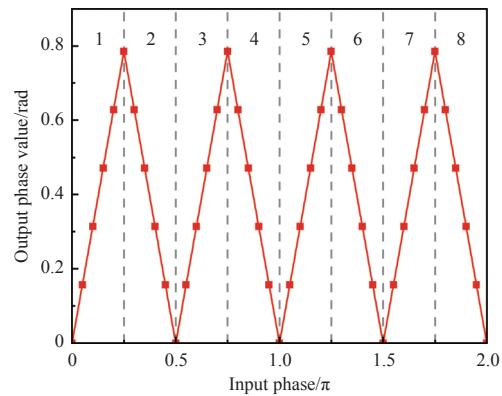


图4 反正切模型

Fig. 4 Model of arctangent

3 线性化处理算法及验证

基于反正切模型的线性化处理算法流程如图5所示。

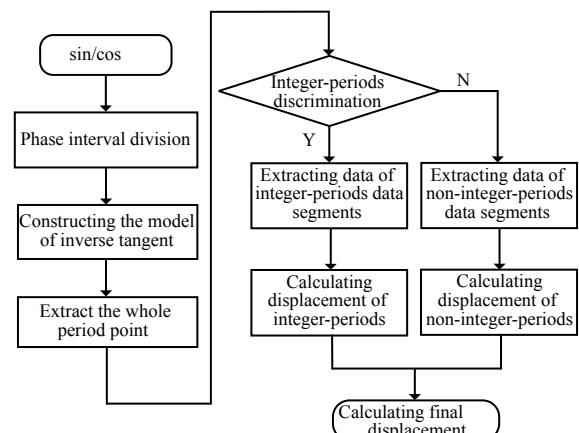


图5 线性化处理算法流程图

Fig. 5 Flow chart of linearization processing algorithm

首先通过判别输入信号过零点实现对整周期点的判别及记录, 考虑到实际情况中, 光栅位移传感器输出的电信号经过ADC采样转换后变为离散信号, 直接寻找零值点往往存在较大的误差, 这里

根据式(18)条件寻找最接近零值的信号点, 并将其近似为零点以便后续处理。

$$\begin{cases} I_S(i-1) \leq I_S(i) \leq I_S(i+1) \\ |I_S(i)| \leq |I_S(i-1)| \\ |I_S(i)| \leq |I_S(i+1)| \end{cases} \quad (18)$$

式中 i 表示采样数据对应数值点。根据所记录整周期点, 能够将采集到的数据分为如图 6 所示整周期数据段及非整周期数据段, 同时统计数据中整周期数 n 。根据光栅干涉式位移传感器原理可知^[21], 整周期数据段对应位移 X_{Int} 与整周期数 n 及入射光波长存在式(19)所示关系, 通过该式可以得到整周期位移量。

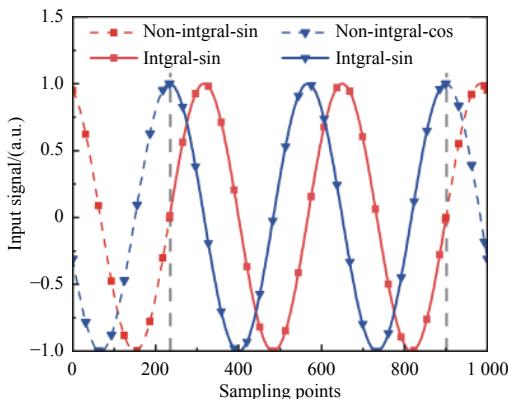


图 6 整周期及非整周期数据段划分结果

Fig. 6 Results of division for integer-period and non-integer-period data segments

$$X_{\text{Int}} = n \times \frac{\lambda}{2} \quad (19)$$

同理, 对于起始及末尾的非整周期数据段, 可以通过计算每个数据段始末数据点对应的相位值, 并计算相位差, 得到其相对整周期的占比, 进而计算非整周期位移值。其中, 在计算始末数据相位时, 首先需要通过表 1 中的判别条件判断数据点对应分区, 随后采用构造的反正切函数计算得到该点对应弧度值, 进一步根据表 2 中各分区对应公式计算得到该点在整周期中的相位值 ϕ , 并由式(20)计算得到非整周期位移值 X_{Div} , 则总位移 X 即为整周期与非整周期位移之和。

表 2 各区间数据点对应相位值

Table 2 Phase values for data points in each interval

Phase interval	Phase	Phase interval	Phase
Interval 1	ϕ	Interval 5	$\pi + \phi$
Interval 2	$\pi/2 - \phi$	Interval 6	$3\pi/2 - \phi$
Interval 3	$\pi/2 + \phi$	Interval 7	$3\pi/2 + \phi$
Interval 4	$\pi - \phi$	Interval 8	$2\pi - \phi$

$$X_{\text{Div}} = \frac{\lambda}{2} \times \frac{(\phi_1 - \phi_0)}{\pi} \quad (20)$$

$$X = X_{\text{Int}} + X_{\text{Div}} \quad (21)$$

式中: ϕ_1 为非整周期末位数据对应相位值; ϕ_0 为非整周期末位数据对应相位值。

为验证该线性化处理方法的可行性, 利用 Matlab 对建立的算法模型进行编程, 并构建光栅输出的标准正余弦信号模型:

$$\begin{cases} I_S(t) = \sin(2\pi t) \\ I_C(t) = \cos(2\pi t) \end{cases} \quad (22)$$

根据光栅干涉式位移传感器原理, 可以通过无量纲时间量 t 设定光栅信号长度, 令时间序列为 0, 0.001, 0.002, …, 99.999, 100, 给定入射光波长值为 1000 nm, 则设定的光栅信号长度所对应总输入位移量为 0~50 μm, 采用所提出的线性化处理算法对该信号在时间序列下表示的不同位移量进行解算, 并通过下式计算其相对误差 γ :

$$\gamma = \left| \frac{X_{\text{Solve}} - X_{\text{Input}}}{X_{\text{Input}}} \right| \times 100\% \quad (23)$$

式中: X_{Solve} 表示算法解算得到的位移值; X_{Input} 为输入信号所表示的标准位移值。解算结果如图 7 所示, 通过算法解算得到的位移值与设定输入的标准位移值随时间 t 呈现相一致的变化趋势, 其中, 解算位移与标准位移之间相对误差小于 0.2%, 且随着时间 t 增加, 该误差值呈现出近似反比例函数的变化趋势, 当时间 t 增至 40 时, 相对误差降至 0.0096% 以内, 显然, 该算法下的相对误差较小, 可充分满足光栅位移信号求解的高精度需求。

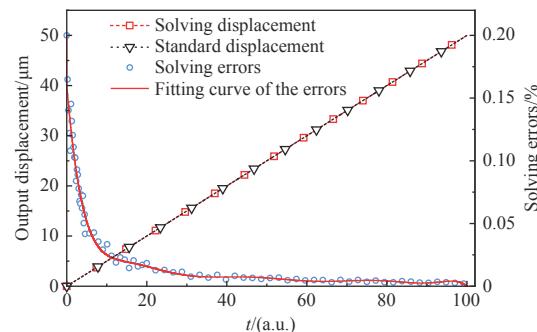


图 7 位移解算结果及解算误差

Fig. 7 Displacement solution results and solution errors

4 结论

本论文利用最小二乘结合拉格朗日乘数法对信号误差进行最优估计, 进一步通过构建线性误差补偿模型实现对信号的正交补偿处理, 最后针

对补偿后的标准信号, 构建反正切函数将信号携带的位移信息转换为相位信息, 通过线性化处理算法实现了对传感器输出信号携带位移信息的高精度解算。经过 Matlab 仿真验证, 位移解算最大相对误差小于 0.2%, 为光栅位移传感器信号高精度提取提供了一种可靠方法。

参考文献:

- [1] SCHUEGRAF K, ABRAHAM M C, BRAND A, et al. Semiconductor logic technology innovation to achieve sub-10 nm manufacturing[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2013, 1(3): 66-75.
- [2] 刘林. 大量程高精度小型化光栅位移测量系统关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
LIU Lin. Research on key technologies of large range, high precision, and miniaturized grating displacement measurement system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [3] 张浩权. 基于FPGA的光栅高精度位移测量系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
ZHANG Haoquan. Design of a high-precision grating displacement measurement system based on FPGA [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [4] 解圳皓. 光谱共焦位移测量光学系统研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2021.
JIE Zhenhao. Research on optical system for spectral confocal displacement measurement [D]. Suzhou: Suzhou University, 2021
- [5] 邸晶晶. 基于衍射光栅的高精度位移测量系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
DI Jingjing. Design of a high-precision displacement measurement system based on diffraction gratings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [6] 吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 39-50.
LYU Qiang, LI Wenhao, BAYAN Heshig, et al. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 39-50.
- [7] LI M, LIANG Z, ZHANG R, et al. Large-scale range diffraction grating displacement sensor based on polarization phase-shifting[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(2): 469-473.
- [8] 王靖琨. 光栅尺相位信号处理系统研究与验证[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
WANG Jingkun. Research and verification of grating ruler phase signal processing system [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [9] 钟媛. 莫尔条纹信号细分方法的研究与应用[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
ZHONG Yuan. Research and application of Moiré fringe signal subdivision method [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [10] 郭瑞. 增量式光电编码器莫尔条纹信号细分方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
GUO Rui. Research on the subdivision method of Moiré fringe signal in incremental photoelectric encoder [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [11] 张岩. 高精度光栅信号细分系统设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
ZHANG Yan. Design of high-precision grating signal subdivision system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [12] 马泽龙. 正余弦编码信号纠偏与细分技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
MA Zelong. Research on correction and subdivision technology of sine and cosine encoding signals [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [13] 李钢. 光栅信号自适应细分方法与误差修正算法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
LI Gang. Research on adaptive subdivision method and error correction algorithm for raster signals [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2018.
- [14] 张传敏, 胡国良, 张涛, 等. 光栅传感器细分技术的研究[J]. *机械设计与制造*, 2017, 319(9): 159-162.
ZHANG Chuanmin, HU Guoliang, ZHANG Tao, et al. Study on subdivision technology of grating sensor[J]. *Machinery Design & Manufacturing*, 2017, 319(9): 159-162.
- [15] 邢前进. 光栅莫尔信号采集与细分技术研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
XING Qianjin. Research on grating Moiré signal acquisition and subdivision technology [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2018.
- [16] 朱维斌, 林瑜, 黄垚, 等. 莫尔信号正弦性误差补偿中的

- 波形建模方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4): 147-155.
- ZHU Weibin, LIN Yu, HUANG Yao, et al. Research on waveform modeling method in Moiré signal sinusoidal error compensation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(4): 147-155.
- [17] 林瑜. 光栅莫尔信号正弦性误差补偿方法研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.
- LIN Yu. Research on compensation method for sinusoidal error of grating Moiré signal [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2020.
- [18] 毕今朝, 蒋佳奇, 张洪博, 等. 光电编码器信号误差补偿技术研究 [J]. *吉林大学学报 (信息科学版)*, 2022, 40(4): 553-558.
- BI Jinchao, JIANG Jiaqi, ZHANG Hongbo, et al. Research on signal error compensation technology of photoelectric encoder [J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2022, 40(4): 553-558.
- [19] ZHU W, LIN Y, HUANG Y, et al. Research on sinusoidal error compensation of Moiré signal using particle swarm optimization [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 14820-14831.
- [20] 束名扬, 陈健. 基于最小二乘法的光栅干涉传感细分误差校正研究 [J]. *机电工程*, 2019, 36(4): 374-377.
- SHU Mingyang, CHEN Jian. Research on subdivision error correction of grating interferometric sensing based on least squares method [J]. *Journal of Mechanical and Electrical Engineering*, 2019, 36(4): 374-377.
- [21] 梁渊鑫. 单层衍射光栅位移传感器的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- LIANG Zhouxin. Design and implementation of a single-layer diffraction grating displacement sensor [D]. Taiyuan: North Central University, 2020.