文章编号:1673-5005(2010)03-0162-03

基于模拟退火的相位测量轮廓术随机相移误差校正

任旭虎¹, 杨磊¹, 屈波²

(1. 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061; 2. 东营职业学院, 山东 东营 257091)

摘要:建立任意步长的随机相移误差校正模型,采用模拟退火算法完成随机相移误差的优化估计,利用最小二乘法推导出求解截断相位的新算法,并给出计算机模拟和不同算法的试验结果。仿真结果表明,所提出的算法能准确地优化出随机相移误差,提高了测量精度。

关键词:相移算法; 相位测量轮廓术; 相位误差; 模拟退火算法

中图分类号:O 436.1 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.03.033

Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry based on simulated annealing

REN Xu-hu¹, YANG Lei¹, QU Bo²

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. Dongying Vocational College, Dongying 257091, China)

Abstract: A correction model of the random phase shifting error on the basis of random step length was established. The simulated annealing algorithm was adopted in the optimization estimation of random phase shifting error. A new algorithm of truncation phase calculation was derived by least square method. The computer simulated results and the experimental results were presented. The simulation results show that this algorithm can optimize the random phase shifting error accurately and improve the measurement accuracy.

Key words: phase shifting algorithm; phase-measuring profilometry; phase error; simulated annealing algorithm

在三维面形测量中,相位测量轮廓术是一种重要的方法^[1],在这种方法中相移误差对测量结果的准确性有较大的影响。现有很多的算法能克服线性相移误差所带来的影响,但要解决相移过程中的随机相移误差问题还存在一定的困难。In - Bok Kong等^[2-3]从同一干涉图中诸像素相移量相等这一认识出发,提出求解各干涉图相移量的方法,其算法是通过交替求解相位分布和相移量来进行的一种迭代算法,虽然可以解决随机相移误差问题,但迭代次数较多,计算量较大。王立无等^[4]通过近似处理可以直接求解相移过程中存在的随机相移误差,能大大减少迭代次数和计算量。为进一步提高精度,笔者提出一种新的随机相移误差的优化估计方法,在任

意步长相移的基础上,对测量得到的三维物体变形光栅图像进行处理,建立随机相移误差校正模型,采用模拟退火算法完成随机相移误差的优化估计,然后利用最小二乘法推导出包含随机相移误差的截断相位求解方法。

1 相位测量轮廓术随机相移误差校正模型

以任意步长的五步算法为例说明随机相移校正模型的建立过程^[4]。假设五步算法中各幅相移变形条纹图的光强可表示为 $I_i(m, n) = a + b \cos(\varphi + \Delta_i)$ 其中 $i = 0, 1, 2, 3, 4$ 表示条纹图序号, $I_i(m, n)$ 表示对应条纹图中各相移点的光强, a, b, φ, Δ_i 分别

收稿日期:2009-06-20

基金项目:国家油气重大专项课题(2008ZX05006)

作者简介:任旭虎(1973-),男(汉族),山西闻喜人,副教授,博士,主要从事油气田生产过程智能监控技术、石油专用物理模拟实验设备研制、石油装备检测技术与故障诊断方面的教学和科研工作。

表示背景光强、条纹的对比度、被物体高度调制的条纹相位和相应的名义相移,考虑随机相移误差,光栅条纹图的光强可表示为

$$\begin{cases} I_0 = a + b\cos(\varphi - 2\Delta), \\ I_1 = a + b\cos(\varphi - \Delta + e_1), \\ I_2 = a + b\cos(\varphi + e_2), \\ I_3 = a + b\cos(\varphi + \Delta + e_3), \\ I_4 = a + b\cos(\varphi + 2\Delta + e_4). \end{cases} \quad (1)$$

式中, e_1, e_2, e_3, e_4 分别表示相移过程中实际相移量和理论相移量的误差。对式(1)进行处理,约去 a, b 和 φ , 得到

$$\begin{cases} \Delta I_1 = I_1 - I_0 = b\cos(\varphi - \Delta + e_1) - b\cos(\varphi - 2\Delta), \\ \Delta I_2 = I_2 - I_0 = b\cos(\varphi + e_2) - b\cos(\varphi - 2\Delta), \\ \Delta I_3 = I_3 - I_0 = b\cos(\varphi + \Delta + e_3) - b\cos(\varphi - 2\Delta), \\ \Delta I_4 = I_4 - I_0 = b\cos(\varphi + 2\Delta + e_4) - b\cos(\varphi - 2\Delta). \end{cases} \quad (2)$$

利用三角函数公式对式(2)进行整理后,再对 $\Delta I_2/\Delta I_1, \Delta I_3/\Delta I_1, \Delta I_4/\Delta I_1$ 进行整理,得

$$\begin{aligned} [\Delta I_1 \cos e_2 - \Delta I_1 \cos(2\Delta) - \Delta I_2 \cos(\Delta - e_1) + \Delta I_2 \cos(2\Delta)] \cos \varphi = & [\Delta I_2 \sin(\Delta - e_1) - \Delta I_2 \sin(2\Delta) + \Delta I_1 \sin e_2 + \Delta I_1 \sin(2\Delta)] \sin \varphi, \quad (3) \\ [\Delta I_1 \cos(\Delta + e_3) - \Delta I_1 \cos(2\Delta) - \Delta I_3 \cos(\Delta - e_1) + \Delta I_3 \cos(2\Delta)] \cos \varphi = & [\Delta I_3 \sin(\Delta - e_1) - \Delta I_3 \sin(2\Delta) + \Delta I_1 \sin(e_3 + \Delta) + \Delta I_1 \sin(2\Delta)] \sin \varphi, \quad (4) \end{aligned}$$

$$[\Delta I_1 \cos(2\Delta + e_4) - \Delta I_1 \cos(2\Delta) - \Delta I_4 \cos(\Delta - e_1) + \Delta I_4 \cos(2\Delta)] \cos \varphi = [\Delta I_4 \sin(\Delta - e_1) - \Delta I_4 \sin(2\Delta) + \Delta I_1 \sin(e_4 + 2\Delta) + \Delta I_1 \sin(2\Delta)] \sin \varphi. \quad (5)$$

对式(3)~(5)进行整理,消去 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$, 然后整理出只包含随机相移误差 $e_1 \sim e_4$ 的目标方程:

$$f_1 = \Delta I_1 [\sin(e_2 + 2\Delta) + \sin(\Delta + e_3 - e_2) - \sin(3\Delta + e_3)] + \Delta I_2 [\sin(3\Delta + e_3) + \sin(-e_1 - \Delta) - \sin(2\Delta - e_1 + e_3)] + \Delta I_3 [\sin(\Delta - e_1 + e_2) + \sin((\Delta + e_1)) - \sin(2\Delta + e_2)] = 0, \quad (6)$$

$$f_2 = \Delta I_1 [\sin(e_2 + 2\Delta) + \sin(\Delta + e_4 - e_2) - \sin(4\Delta + e_4)] + \Delta I_2 [\sin(4\Delta + e_4) - \sin(e_1 + \Delta) - \sin(3\Delta - e_1 + e_4)] + \Delta I_4 [\sin(\Delta - e_1 + e_2) + \sin((\Delta + e_1)) - \sin(2\Delta + e_2)] = 0. \quad (7)$$

根据调制度或者相位导数偏差质量图,选择变形光栅某一有效区域,得到模拟退火校正优化算法所要求的代价函数

$$f = \sum_m \sum_n f_1^2 + f_2^2. \quad (8)$$

式中, m 和 n 分别表示计算区域的像素点数,一般可选 20 ~ 50。

将优化随机相移误差代入式(2),并以 $b\cos \varphi, b\sin \varphi$ 展开归项,可求出 $b\cos \varphi, b\sin \varphi$ 的最小二乘解,因此各点的相位分布为

$$\varphi = \arctan \frac{-b\cos \varphi}{b\sin \varphi}. \quad (9)$$

2 基于模拟退火的随机相移误差校正

模拟退火算法^[5-7]是模仿液体结晶过程的最优化算法。液体结晶主要经历以下过程:①在高温下,粒子能量较高,可以自由运动和重新排序;②随着温度的下降,粒子能量减弱,运动减少;③粒子最终进入平衡态,固化为具有最小能量的晶体。

对应于液体冷却过程,模拟退火算法主要有两个操作,一个为用于设定温度下降幅度的冷却流程,另一个为在每个温度下搜索最优解(准平衡态)的随机松弛过程。在给定温度 T 下,模拟退火算法接受从一个状态 $f(s)$ 到另一个状态 $f(s+1)$ 的概率为

$$P(s \Rightarrow s+1) = \begin{cases} 1, & f(s) \geq f(s+1); \\ \exp\left(\frac{f(s) - f(s+1)}{T}\right), & \text{其他}. \end{cases} \quad (10)$$

其中 $f(s)$ 为代价函数。可见,模拟退火算法不但进行局部搜索,而且可以以一定的概率“爬山”到代价更高的解答,以防止搜索进程陷入局部极小解。这样,经过无限次转换,最终达到平衡态(全局最优解)。

在实际应用中,为了在有限时间内完成搜索,一个完整的模拟退火算法需要起始温度、温度下降函数、给定温度下解的扰动和转移机制、给定温度下达到准平衡态的判定准则、模拟退火终止准则。模拟退火随机误差优化算法实现步骤和关键参数如下所述。

先选定一个较高的起始温度 T_0 ,选初始解 $s_0 = (e_1, e_2, e_3, e_4) = (0, 0, 0, 0)$, $s_i = s_0, i = 0$,在此温度下,由随机扰动产生新解 $s(i+1)' = s(i)' + cR$,其中 R 为取值在 $(-1, 1)$ 之间的随机列向量, $c = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ 为扰动系数向量,且 c 随着程序的运行而动态变化。它们被赋予较大的初值,然后按如下策略变化,即新解若被连续拒绝多次, c 缩小至 $1/5$ 。这就保证了所求的解不会在最小值两侧振荡,从而较快地收敛于最小值。新解被接受概率按照式(10)处理,如果新解的代价小于原来的解答,新解肯定被接受;如果新解的代价大于原来的解答,它并

不一定被抛弃,而是有一定的概率被接受,其中代价函数采用式(8)。这就保证了该算法能跳出局部最优解,找到全局最优解。

当接受新解的次数超过一个预设的值 $L(T)$ 时,认为已达到此温度下的准平衡态,按照所选的降温函数 $T_{N+1} = T_N / (1 + T_N)$ 降低温度,然后搜索新温度下的准平衡态。重复这一过程,直到达到下式所选用的模拟退火终止准则:

$$|f(i+1) - f(i)| < \delta. \tag{11}$$

其中 δ 为一个预先选定的小值(δ 值的选取要参照被测量的大小以及实际应用要求精度)。这样,就得到了使代价函数值最小的参量组合,最后优化得到的 e 即为所求的随机相移误差。求出随机相移误差后,将随机相移误差带入到相位的校正求解公式得到最终结果。

3 数值模拟结果分析

随机相移误差将导致相位计算的随机误差,而误差性质具有统计稳定性。这里用计算机生成一个平面上的球冠形物体,基于相位测量轮廓术的测量原理,用本文算法与 Schwider, Stoilov^[8] 五步算法恢复的结果进行比较。试验中随机相移误差值 e_1, e_2, e_3, e_4 分别被设定为 $0.022 8\pi, -0.084 8\pi, -0.062 8\pi, 0.015 7\pi$, 经模拟退火优化出的结果分别为 $0.022 1\pi, -0.083 9\pi, -0.060 2\pi, 0.015 7\pi$ 。多次仿真结果表明,利用模拟退火算法可以优化出随机相移误差,但当随机相移误差较大时,会出现收敛速度慢的现象,可调整模拟退火的相关参数,如初温、温度下降方式、马尔科夫链长等。利用本文中提出的方法和 Stoilov^[8]、Schwider 方法恢复物体三维形貌。3 种算法恢复出的三维形貌和某一剖面图形如图 1~6 所示。

图 1 Stoilov 算法恢复物体图

Fig.1 Object restoration graph of Stoilov algorithm

从图 1~6 中可以看出,新算法比传统的 Schwider, Stoilov 算法能更好地恢复物体面形。新算法、Schwider 和 Stoilov 算法恢复物体面形的误差均方值分别为 $7.067 9 \times 10^{-16}, 3.107 3 \times 10^{-14}, 4.520 2 \times$

10^{-14} 。从数据上分析,新算法的误差小于传统算法。数据模拟结果表明,该算法能准确地优化出随机相移误差,解决了求解截断相位时随机相移误差的影响问题,提高了测量精度。

图 2 Stoilov 算法物体中间剖面图

Fig.2 Object middle profile graph of Stoilov algorithm

图 3 新算法恢复物体图

Fig.3 Object restoration graph of new algorithm

图 4 新算法物体中间剖面图

Fig.4 Object middle profile graph of new algorithm

图 5 Schwider 算法恢复物体图

Fig.5 Object restoration graph of Schwider algorithm

图 6 Schwider 算法物体中间剖面图

Fig.6 Object middle profile graph of Schwider algorithm

(下转第 169 页)

173.
ZHANG Peng, HUANG Jin-quan. SRUKF research on aeroengines for gas path component fault diagnostic[J]. Journal of Aerospace Power, 2008,23(1):169-173.
- [5] 葛哲学,杨拥民,温熙森. 强跟踪 UKF 方法及其在故障辨识中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(8):1670-1674.
GE Zhe-xue, YANG Yong-min, WEN Xi-sen. Strong tracking UKF method and its application in fault identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(8):1670-1674.
- [6] 葛哲学,杨拥民,王兴伟,等. 非线性系统传感器偏差故障的 UKF 递推检测方法[J]. 传感技术学报,2005,18(4):910-913.
GE Zhe-xue, YANG Yong-min, WANG Xing-wei, et al. New UKF-based method for sensor bias fault detection in stochastic nonlinear system[J]. Journal of Translucation Technology, 2005,18(4):910-913.
- [7] 李俊花,孙昭晨,崔莉,等. 基于新息理论的变点检测及其在长输管道泄露监测中的应用[J]. 自动化学报, 2006,32(3):462-469.
LI Jun-hua, SUN Zhao-chen, CUI Li, et al. Detection of abrupt change based on innovation theory and leak detection in pipeline[J]. Acta Automatica Sinica, 2006,32(3):462-469.
- [8] 李炜,李阳,毛海杰. 多序贯概率比检验在管道泄漏检测中的研究[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(4):266-269.
LI Wei, LI Yang, MAO Hai-jie. Multi-sequential probability ratio test in pipeline leak detection[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007,27(4):266-269.
- [9] 贺湘宇,何清华. 基于 NARX 网络模型的挖掘机液压系统故障检测[J]. 机械科学与技术,2008,27(7):937-940.
HE Xiang-yu, HE Qing-hua. Fault detection of excavator hydraulic system based on nonlinear auto-regression with extra inputs model[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008,27(7):937-940.
- [10] BARRATT B, ATKINSON R, ANDERSON R H, et al. Investigation into the use of the CUSUM technique in identifying changes in mean air pollution levels following introduction of a traffic management scheme [J]. Atmospheric Environment, 2007,41(8):1784-1791.
- [11] JURICEK B, SEBORG D, LARIMORE W. Predictive monitoring for abnormal situation management[J]. Journal of Process Control, 2001,11(2):111-128.

(编辑 韩国良)

(上接第 164 页)

参考文献:

- [1] 郝煜栋,赵洋,李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. 光学学报,1999,19(11):1518-1522.
HAO Yu-dong, ZHAO Yang, LI Da-cheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry [J]. Acta Optica Sinica,1999,19(11):1518-1522.
- [2] KONG In-Bok, KIM Seung-Woo. General algorithm of phase shifting interferometry by iterative least-squares fitting[J]. Opt Engng, 1995,34(1):183-187.
- [3] KONG In-Bok, KIM Seung-Woo. Portable inspection of precision surfaces by phase shifting interferometry without automatic suppression of phase shift errors[J]. Opt Engng, 1995,34(5):1400-1404.
- [4] 王立无,苏显渝,周利兵. 相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. 光学学报,2004,24(5):614-618.
WANG Li-wu, SU Xian-yu, ZHOU Li-bing. Correct on algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry[J]. Acta Optica,2004,24(5):614-618.
- [5] 刘怀亮,刘淼. 一种混合遗传模拟退火算法及其應用[J]. 广州大学学报:自然科学版,2005,14(2):503-506.
LIU Huai-liang, LIU Miao. A mixed genetic simulated annealing algorithm and its improvement[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2005,14(2):503-506.
- [6] 杨锋涛,吕晓旭,钟丽云,等. 基于模拟退火的全局相位展开算法[J]. 激光杂志,2006,27(3):25-30.
YANG Feng-tao, LÜ Xiao-xu, ZHONG Li-yun, et al. Global phase unwrapping algorithm based on simulated annealing[J]. Laser Journal, 2006,27(3):25-30.
- [7] 彭震君,钱锋,王学锋,等. 基于模拟退火的相位展开方法[J]. 光学学报,2003,23(7):845-849.
PENG Zhen-jun, QIAN Feng, WANG Xue-feng, et al. Phase unwrapping algorithm based on simulated annealing [J]. Acta Optica Sinica, 2003,23(7):845-849.
- [8] STOILOV G, DRAGOSTINOV T. Phase-stepping interferometry: five frame algorithm with an arbitrary step [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997,28(4):61-69.

(编辑 修荣荣)