

文章编号 1004-924X(2019)08-1719-08

新型圆光栅测角误差补偿方法及其应用

于连栋^{*}, 鲍文慧, 赵会宁, 贾华坤, 张 润

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在实际工业应用中,环境温度变化是便携关节式坐标测量机中旋转轴系测角精度的主要误差源。为了消除环境温度对旋转轴系测角精度的影响,本文提出了一种新型圆光栅测角误差补偿方法,即建立含有环境温度影响因子的圆光栅测角误差补偿模型。利用谐波方法建立在特定温度下的圆光栅测角误差补偿模型,利用多项式方法建立谐波系数与环境温度之间的函数关系。最后,以 14 °C 下的实验数据为验证数据,分别代入到传统谐波误差补偿模型和本文提出的模型中。实验结果表明,相对于传统谐波误差补偿模型,使用本文提出的模型补偿后圆光栅的测角精度提高 4 倍左右,修正后的残差峰峰值在 2" 以内,能够有效地补偿 10~40 °C 下圆光栅的测角误差。

关键词:精密测量;圆光栅测角;测角误差;谐波补偿;多项式

中图分类号: TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1719

Application and novel angle measurement error compensation method of circular gratings

YU Lian-dong^{*}, BAO Wen-hui, ZHAO Hui-ning, JIA Hua-kun, ZHANG Run

(College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

^{*} Corresponding author, E-mail: liandongyu@hfut.edu.cn

Abstract: In practical industrial applications, ambient temperature change is the main source of error in the angular accuracy of the rotating shaft in Portable Articulated Coordinate Measurement Instruments Machines (PACMM). To eliminate this error, this paper proposes a new method to establish a circular grating angle measurement error compensation model with ambient temperature influence factors. First, the harmonic method is used to establish the compensation model of angle measurement error of circular gratings at a specific temperature. Second, the polynomial method is used to establish the functional relationship between the harmonic coefficient and the ambient temperature. Finally, the experimental data at 14 °C is used as the verification data that are substituted into both the traditional harmonic error compensation model and the model proposed by this paper. The experimental results show that compared with the traditional harmonic error compensation model, the accuracy of the compensation model proposed by this paper is improved by a factor of approximately four, and the corrected residual peak value is within 2"; this value can

收稿日期: 2019-03-20; **修订日期:** 2019-04-10.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ220893); 111 计划项目(No. B12019); 国家自然科学基金资助项目(No. 51875165); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51805139)

effectively compensate the angular error of the circular grating at 10 to 40 °C.

Key words: precision measurement; circular grating angle measurement; angle measurement error; harmonic compensation; polynomial

1 引言

便携关节式坐标测量机作为一种非正交式坐标测量仪器,具有测量范围大、测量灵活、便携性好、质量轻等优点,已广泛应用于汽车制造、飞机装配、模具制造等领域。通常情况下,便携关节式坐标测量机由 5~7 个旋转关节、基座、测量臂通过串联方式连接而成,每个旋转关节上均安装有圆光栅编码器,用于测量每个旋转关节的旋转角度,并通过坐标转换求得测头的空间三维坐标,每个旋转关节的测角精度直接影响便携关节式坐标测量机的测量精度^[1-2]。因此,如何进一步提高旋转关节的测角精度成为研究焦点。

为了提高旋转关节的测角精度,国内外学者主要采用以下 3 种方法开展研究:(1)使用光电自准直仪结合高精度多面棱体检测旋转关节的测角误差,并利用数学方法修正测角误差;(2)运用多数头自校准的方法修正旋转关节的测角误差;(3)从圆光栅传感器的测角原理角度出发,对其安装偏心进行消除。部分学者分别采用谐波分析^[3]、径向基函数网络^[4]、样条插值^[5]、自适应差分进化-傅里叶神经网络^[6]、稀疏分解^[7]等不同数学方法修正圆光栅安装偏心引起的旋转关节的测角误差。也有学者采用 EDA(Equal Division Averaged)^[8]、FPD(Prime Factor Division)^[9]、TDR(Time-measurement Dynamic Reversal)^[10]和其他自标定方法^[11-14]修正旋转关节的测角误差。近年来,一些学者依据圆光栅传感器的测角原理,实现圆光栅安装偏心和径向误差运动实时测量,以达到提高旋转关节测角精度的目的^[15-16]。方法(1)常在标准温度 20 °C 下对旋转关节的测角误差进行修正,尚未考虑环境温度对旋转关节测角精度的影响;方法(2)能够实时修正旋转关节的测角误差,但需要布置多个读数头且成本较高;方法(3)实时

测量旋转关节的径向误差运动和圆光栅安装偏心,并加以补偿,但尚未有成熟的商业产品。

因此,针对便携关节式坐标测量机的使用环境,本文提出了一种含有环境温度影响因子的圆光栅测角误差修正方法。该方法有效地补偿不同环境温度下旋转关节的测角误差,提高了便携关节式坐标测量机在不同温度下的稳定性。

2 圆光栅测角误差补偿模型

2.1 圆光栅测角误差源分析

便携关节式坐标测量机每个关节的精密测角系统均由旋转轴系、圆光栅盘和读数头构成。影响圆光栅测角精度的误差源主要有:光栅自身刻划引入的误差、读数头电子细分误差、环境温度变化引入误差、安装误差及旋转轴系的晃动误差。其中,光栅自身刻划引入误差、读数头电子细分误差属于系统误差,主要为高频谐波误差,高精度圆光栅的研制使得此类系统误差极小。

环境温度变化使得轴体发生热变形,导致光栅偏心和光栅倾斜度发生变化,对于本文设计的固定机械结构的轴体,其热变形规律可循;同时机械安装方式带来的安装误差包含了安装偏心误差和安装倾斜误差,从而引入了一阶和二阶的低频谐波误差,属于系统误差。偏心造成的误差主要为一阶低频误差,占误差总量 50% 以上,单读数头的典型安装下,偏心误差占到 60% 甚至更多^[17]。光栅倾斜导致光栅旋转时形成的莫尔条纹的明暗变化次数和宽度都发生变化^[18],导致的是二阶谐波误差。

使用过程中,轴承的非重复性跳动会导致高频的偏心运动,引起高阶测角误差,由于轴系晃动程度是随机的,因此引入了随机误差。

2.2 谐波误差补偿模型

通过 2.1 节分析圆光栅测角精度的误差源可

知,所体现的误差具有周期性,均可以利用不同阶次谐波进行表示。因此,圆光栅测角误差模型为:

$$\Delta E(\theta) = f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \sin i\theta + b_i \cos i\theta) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

其中: ΔE 为圆光栅测角误差值, a_0 为常数项, a_i 和 b_i 为各次谐波分量的系数, θ 为采样角度。

2.3 含有温度影响因子的测角误差补偿模型

通常情况下,上述谐波误差补偿模型仅能修正特定温度下的测角误差。对于便携关节式坐标测量机而言,环境温度变化直接导致旋转轴系测角精度下降,进而影响其测量精度。为此,本文提出一种含有温度影响因子的测角误差补偿模型,即利用谐波分析法表示特定温度下测角误差模型,利用多项式法建立谐波分量系数与环境温度之间的函数关系。

将式(1)改写为:

$$\Delta E(\theta, T_h) = f_{a_0}(T_h) +$$

$$\sum_{i=1}^n (f_{a_i}(T_h) \sin \theta + f_{b_i}(T_h) \cos \theta), \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} f_{a_0}(T_h) = P_{a_0}^1 T_h^m + P_{a_0}^2 T_h^{m-1} + \dots + P_{a_0}^{m-1} T_h + P_{a_0}^m \\ f_{a_i}(T_h) = P_{a_i}^1 T_h^m + P_{a_i}^2 T_h^{m-1} + \dots + P_{a_i}^{m-1} T_h + P_{a_i}^m \\ f_{b_i}(T_h) = P_{b_i}^1 T_h^m + P_{b_i}^2 T_h^{m-1} + \dots + P_{b_i}^{m-1} T_h + P_{b_i}^m \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $f(T_h)$ 为以温度 T_h (取值 $10 \sim 40$ °C内)为变量,求得谐波多项式系数的多项式拟合函数, m 为多项式阶数, $P_{a_0}^m$ 表示求得常数 a_0 的多项式系数, $P_{a_i}^m$ 和 $P_{b_i}^m$ 分别表示求得谐波分量系数 a_i 和 b_i 的多项式系数。

为了保证误差修正精度和计算效率,本文将谐波阶数和多项式次数分别取 $n=7$ 和 $m=5$,则式(2)改写为:

$$\Delta E(\theta, T_h) = f_{a_0}(T_h) +$$

$$\sum_{i=1}^7 (f_{a_i}(T_h) \sin \theta + f_{b_i}(T_h) \cos \theta) \quad (i = 1, 2, \dots, 7). \quad (4)$$

首先,通过非线性最小二乘法分别求解公式(1)在不同环境温度下的谐波分量系数。其次,在不同环境温度下利用谐波分量系数求解公式(3)的

多项式系数。最后,将已求解的多项式系数代入公式(3),再将公式(3)代入到公式(4)中,即获得了圆光栅测角误差在不同环境温度下的误差模型。

3 参数识别算法

本文采用LM算法作为新型圆光栅测角误差模型参数识别算法,求解上节所述的多项式系数。它作为改进的高斯-牛顿算法,有效地改善 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的病态性,大大增强了该矩阵的主对角线元素。LM算法的具体实施步骤如下:

Step 1:给出参数向量 \mathbf{b} 的初估值 $\mathbf{b}^{(0)}$ 与初始阻尼因子 $\mu = \mu_0^{(0)}$,容许误差 $\epsilon > 0$,并设置迭代次数标志 $flag = 0$;为了调整 μ ,在开始时引入数 $\nu > 1$, $\mu_0^{(0)}$ 可以取得小一些,例如可取 $\mu_0^{(0)} = 0.01$,而 ν 可取2,5或10;

Step 2:计算雅克比矩阵如公式(5),并计算 $\mathbf{Q}(\mathbf{b}^{flag})$;

$$\begin{cases} a_{ij}^{flag} = \frac{\partial f_i}{\partial b_j} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ g_j^{flag} = - \sum_{i=1}^m (y_i - f_i^{flag}) a_{ij}^{flag} (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases}. \quad (5)$$

Step 3:求解线性方程组如公式(6):

$$\begin{cases} (\mathbf{A}^{(flag)T} \mathbf{A}^{(flag)} + \mu_0^{flag} \mathbf{I}) \Delta^{flag} = \mathbf{A}^{(flag)T} (\mathbf{y} - \mathbf{f}) \\ \mathbf{b}^{(flag+1)} = \mathbf{b}^{(flag)} + \Delta^{flag} \end{cases}, \quad (6)$$

并计算 $\mathbf{Q}(\mathbf{b}^{(flag+1)})$;

Step 4:若 $\|\Delta^{flag}\| \leq \epsilon$,则获得参数向量 \mathbf{b} 的最佳估计值 \mathbf{b}^* ;否则,若 $\mathbf{Q}(\mathbf{b}^{(flag+1)}) \leq \mathbf{Q}(\mathbf{b}^{(flag)})$,则以 μ_0^{flag} / ν 代替 μ_0^{flag} ,跳转到Step 3继续执行, $flag = flag + 1$,若 $\mathbf{Q}(\mathbf{b}^{(flag+1)}) > \mathbf{Q}(\mathbf{b}^{(flag)})$,则以 $\nu \mu_0^{flag}$ 代替 μ_0^{flag} ,跳转到Step 3继续执行, $flag = flag + 1$,直到精度满足要求为止。

4 实验

4.1 实验系统

为了验证新型圆光栅测角误差补偿方法的有效性,本课题组搭建了一套在不同环境温度下的

圆光栅测角误差检测系统,如图 1 所示。该系统由 TRIOPTICS GmbH TA 300-115 型号的自准直仪(技术指标:测量精确度为 $\pm 0.05''$ (在全视场任意 $10''$ 内);分辨力为 $0.1''$;重复性为 $\pm 0.03''$)、光栅信号处理模块、中船 6354 所生产 0 级 23 面棱体、恒温箱(变温范围为 $5\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$;控温精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$)、Mercury 3000 系列的 R5725 圆光栅传感器(其旋转精度为 $\pm 3.9''$,栅距为 $20\text{ }\mu\text{m}$)、精密轴系和电机等组成。实验系统的具体操作方式为:将安装有 R5725 圆光栅传感器的精密轴系放置于恒温箱内,再将 0 级 23 面棱体固定到精密轴系上。在数据采集过程中,将恒温箱调整到特定温度下,利用电机驱动精密轴系转动,使光电自准直仪对准 23 面棱体进行瞄准和定位。当多面棱体转过标准角度时,圆光栅传感器和光电自准直仪分别记录测量值,参照《光电轴角编码器校准规范(JJF 1115-2004)》进行数据处理。

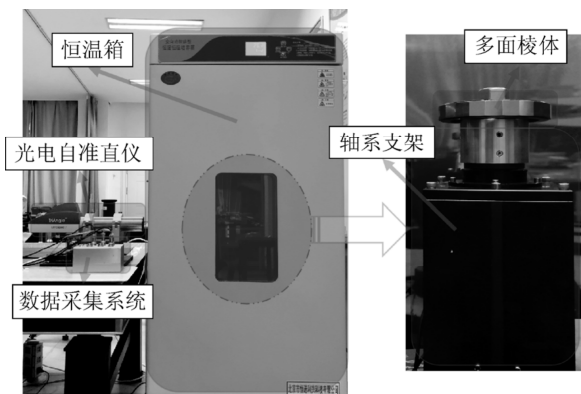


图 1 圆光栅测角误差检测系统

Fig. 1 Detection system for measurement error of circle grating

4.2 新型圆光栅测角误差补偿实验

为了验证新型圆光栅测角误差补偿模型在 $10\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 下的补偿效果。利用图 1 实验系统,分别在恒温箱温度为 $10, 15, 20, 25, 30, 35$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ (测量过程中温度浮动变化 $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$)下采集实验数据,并进行数据处理后绘制出 $10, 15, 20, 25,$

$30, 35$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 下圆光栅传感器的测角误差曲线,如图 2 所示。由图 2 可以看出,在不同温度下圆光栅测角误差明显不同。以 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的圆光栅测角误差为基准,其余温度下测角误差与基准值的差值峰峰值达 $7.4''$ 。因此,仅采用 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下圆光栅传感器测角误差补偿模型难以保证圆光栅传感器在 $10\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 下的测角精度。

首先,采用 2.2 节介绍的谐波误差补偿模型分别求解出 $10, 15, 20, 25, 30, 35$ 和 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 下的谐波分量系数,如表 1 所示。不同温度下圆光栅传感器测角误差补偿后残差均在 $\pm 2''$ 以内,效果如图 3 所示(展示部分温度补偿效果)。其次,运用 2.3 节介绍的多项式法建立每个谐波分量系数与温度之间的关系,并采用 LM 算法分别求解出多项式系数如表 2 所示。最后将每个谐波分量系统与温度之间的函数关系代入公式(4)即可。

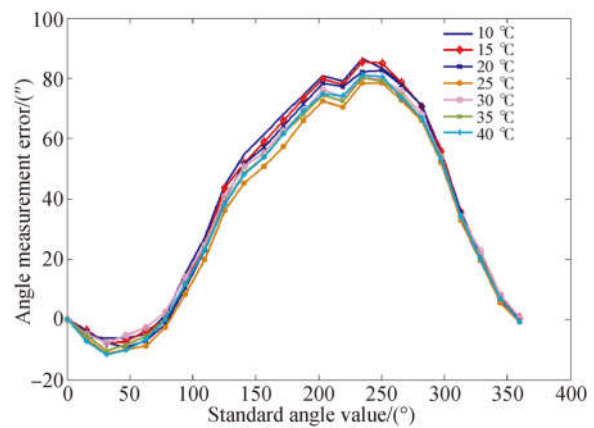


图 2 $10\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的测角误差

Fig. 2 Angle measurement error at 10 to 40 $^\circ\text{C}$

4.3 验证实验

传统的基于谐波分析的圆光栅测角误差补偿模型均在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 下获取数据样本,因此其模型补偿效果受限于温度条件,而本文提出的含有温度影响因子的新型圆光栅测角误差补偿模型可以补偿任意温度下的测角误差。

表 1 不同温度下傅里叶级数展开式系数

Tab. 1 Fourier series expansion coefficients at different temperatures

环境温度/°C	10	15	19	25	30	35	40
a_0	0.000 193 80	0.000 191 05	0.000 184 28	0.000 167 32	0.000 184 02	0.000 176 71	0.000 175 98
a_1	-0.000 143 79	-0.000 149 70	-0.000 151 04	-0.000 148 08	-0.000 140 02	-0.000 143 41	-0.000 146 47
b_1	-0.000 179 65	-0.000 172 94	-0.000 170 35	-0.000 158 23	-0.000 162 90	-0.000 162 74	-0.000 166 14
a_2	-0.000 009 17	-0.000 009 35	-0.000 010 45	-0.000 010 25	-0.000 010 17	-0.000 011 73	-0.000 011 40
b_2	-0.000 021 08	-0.000 021 01	-0.000 019 38	-0.000 021 01	-0.000 023 11	-0.000 022 13	-0.000 022 11
a_3	0.000 018 28	0.000 017 15	0.000 018 32	0.000 014 03	0.000 013 43	0.000 013 41	0.000 010 57
b_3	0.000 003 71	0.000 004 45	0.000 003 53	0.000 004 81	0.000 002 15	0.000 002 98	0.000 004 06
a_4	0.000 006 53	0.000 004 85	0.000 007 25	0.000 005 43	0.000 003 93	0.000 004 17	0.000 003 23
b_4	0.000 000 33	-0.000 001 51	-0.000 000 40	0.000 000 28	-0.000 000 80	0.000 000 38	0.000 001 28
a_5	-0.000 003 14	-0.000 003 80	-0.000 002 95	-0.000 003 58	-0.000 004 91	-0.000 002 56	-0.000 002 16
b_5	0.000 000 79	0.000 000 50	0.000 001 31	0.000 001 29	0.000 001 70	0.000 000 91	0.000 001 35
a_6	-0.000 001 03	0.000 002 71	0.000 003 65	0.000 003 27	0.000 001 34	0.000 002 54	0.000 002 14
b_6	0.000 002 54	0.000 003 97	-0.000 000 19	0.000 003 07	0.000 001 23	0.000 003 22	0.000 003 84
a_7	-0.000 005 93	-0.000 001 91	-0.000 001 94	-0.000 004 05	-0.000 003 29	-0.000 002 86	-0.000 004 39
b_7	-0.000 002 50	-0.000 002 07	-0.000 001 66	-0.000 000 81	-0.000 001 25	-0.000 000 64	-0.000 000 98

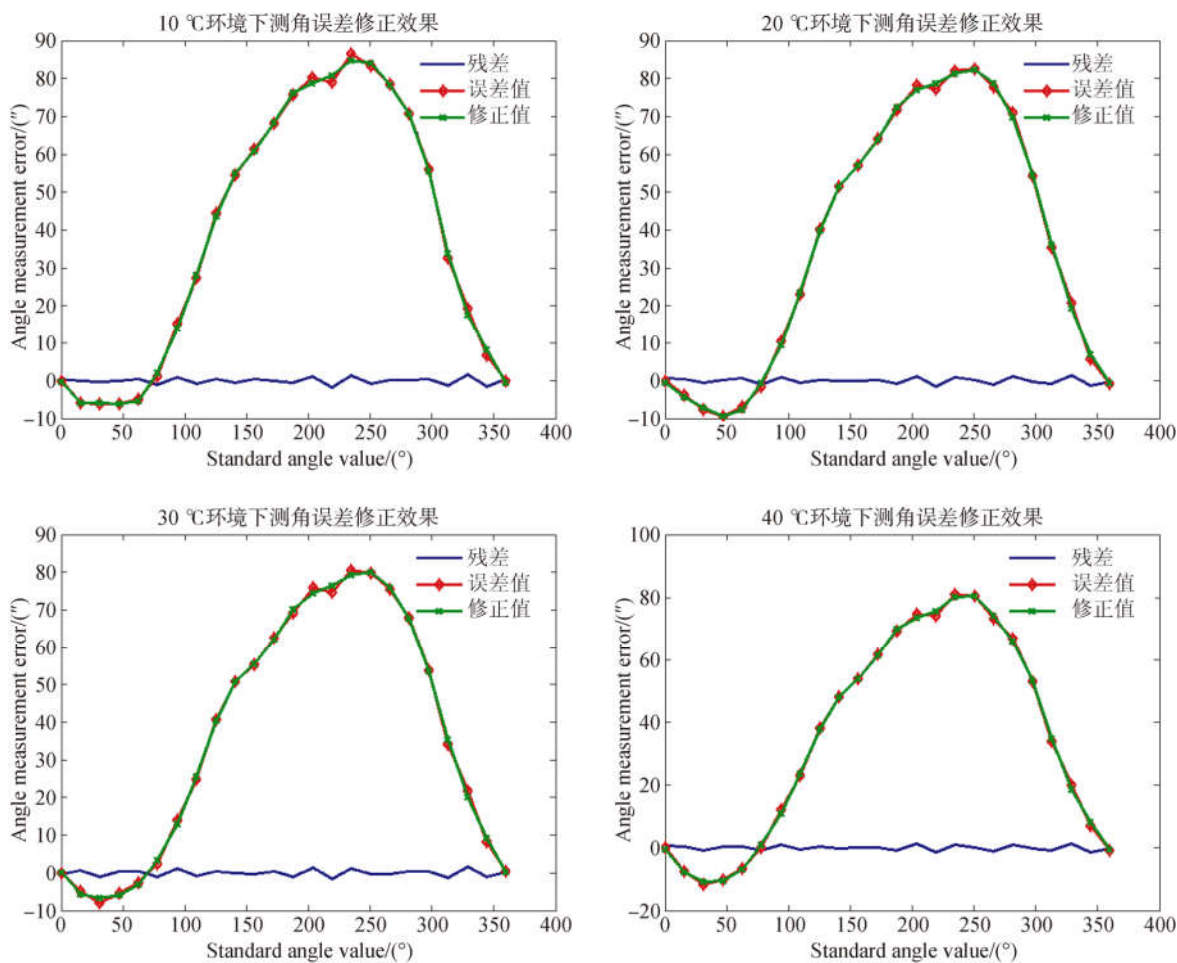


图 3 部分温度下圆光栅测角误差的补偿效果

Fig. 3 Compensation effect of angle error of circular grating at different temperatures

表 2 不同温度下多项式展开式系数

Tab. 2 Polynomial expansion coefficients at different temperatures

序号	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
1	0.000 000 000 1	-0.000 000 012 1	0.000 000 622 0	-0.000 015 060 1	0.000 169 632 7	-0.000 515 177 5
2	0.000 000 0000	-0.000 000 004 7	0.000 000 219 4	-0.000 004 719 1	0.000 045 886 8	-0.000 307 077 2
3	0.000 000 000 0	0.000 000 000 3	-0.000 000 028 3	0.000 000 892 6	-0.000 010 455 3	-0.000 139 559 7
4	0.000 000 000 0	-0.000 000 001 6	0.000 000 078 1	-0.000 001 755 0	0.000 018 513 2	-0.000 082 414 6
5	0.000 000 000 0	0.000 000 002 9	-0.000 000 138 3	0.000 003 149 0	-0.000 033 554 6	0.000 112 803 9
6	0.000 000 000 0	0.000 000 002 6	-0.000 000 122 1	0.000 002 681 3	-0.000 027 898 3	0.000 128 155 1
7	0.000 000 000 0	0.000 000 000 4	-0.000 000 021 6	0.000 000 521 0	-0.000 005 713 1	0.000 026 873 4
8	0.000 000 000 0	0.000 000 003 4	-0.000 000 168 8	0.000 003 946 6	-0.000 043 565 6	0.000 186 944 9
9	0.000 000 000 0	0.000 000 002 2	-0.000 000 109 8	0.000 002 663 1	-0.000 030 626 4	0.000 132 108 9
10	0.000 000 000 0	0.000 000 002 7	-0.000 000 129 2	0.000 002 952 2	-0.000 031 902 1	0.000 126 659 4
11	0.000 000 000 0	0.000 000 000 0	-0.000 000 000 6	0.000 000 070 7	-0.000 001 315 9	0.000 007 933 1
12	0.000 000 000 0	0.000 000 001 2	-0.000 000 051 3	0.000 000 985 9	-0.000 007 673 2	0.000 016 719 8
13	0.000 000 000 0	-0.000 000 002 0	0.000 000 101 5	-0.000 002 391 9	0.000 026 425 6	-0.000 106 264 4
14	0.000 000 000 0	-0.000 000 000 7	0.000 000 046 7	-0.000 001 407 0	0.000 019 602 7	-0.000 103 681 1
15	0.000 000 000 0	0.000 000 000 6	-0.000 000 028 3	0.000 000 657 2	-0.000 007 082 1	0.000 025 829 8

为了验证新型圆光栅测角误差补偿模型在 10~40 °C 下的误差修正效果,随机选择了在 14 °C 下进行扩展实验,验证补偿模型的泛化能力和适用性。分别将传统的基于谐波分析的误差补偿模型记为 ΔE_t (谐波误差模型中谐波分量系数在 20 °C 下获得) 和 2.3 节中所介绍含有温度影响因子的新型测角误差补偿模型记为 ΔE_n 。首先,将图 1 所示实验系统的恒温箱温度设置为 14 °C,放置 2 h 后采集实验数据,获得测角误差记为 ΔE_0 ;其次,分别将 14 °C 下的角度数据代入到 ΔE_t 和 ΔE_n 中,得到测角误差修正值为 ΔE_{t1} 和 ΔE_{n1} ;最后,将测角误差 ΔE_0 , ΔE_{t1} 及 ΔE_0 与 ΔE_{t1} 之差和测角误差 ΔE_0 , ΔE_{n1} 及 ΔE_0 与 ΔE_{n1} 之差分别绘制成图,如图 4 和 5 所示。采用模型 ΔE_t 和 ΔE_n 修正后测角误差如图 6 所示。由图 6 可知,采用 ΔE_t 修正后的测角误差极值为 7.72"、标准差为 2.19",而采用 ΔE_n 修正后的测角误差极值为 1.81"、标准差为 0.95"。相比于 ΔE_t ,采用 ΔE_n 修正后的测角误差极值提高 4.26 倍、标准差提高 2.30 倍。由此可见,采用新型圆光栅测角误差补偿模型,能够显著提高 10~40 °C 下的圆光栅测角精度。

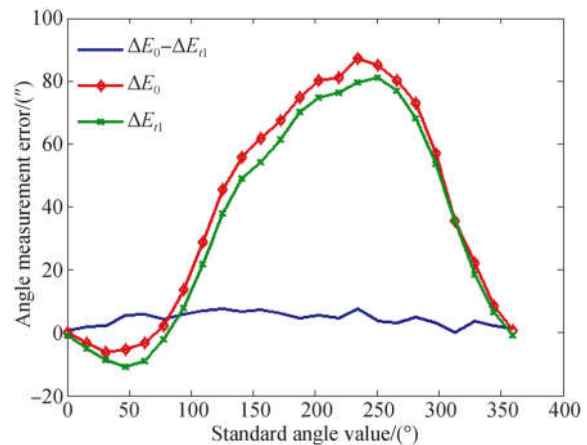


图 4 在 14 °C 下传统方法的补偿效果

Fig. 4 Compensation effect with traditional method at 14 °C

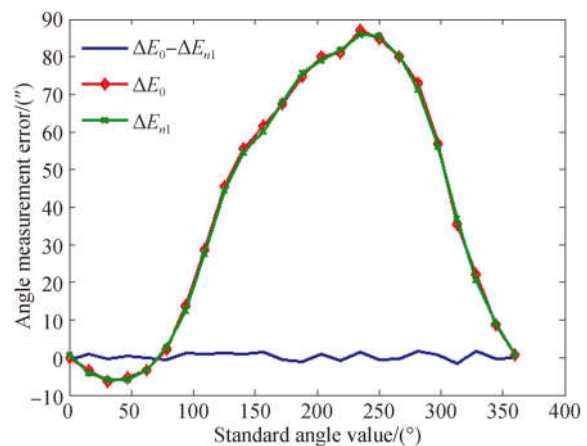


图 5 在 14 °C 下新方法的补偿效果

Fig. 5 Compensation effect with proposed method at 14 °C

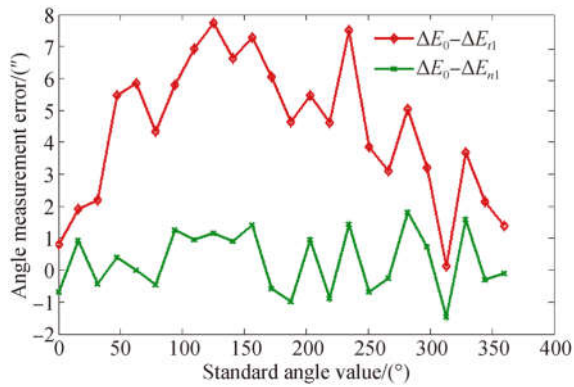


图 6 传统方法与新方法的残差对比

Fig. 6 Comparison of residual error between traditional and proposed methods

参考文献:

- [1] 汪平平. 柔性坐标测量机精度理论及应用技术研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.
WANG PING P. *Research on Precision Theory and Application Technology of Flexible Coordinate Measuring Machine* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] 赵会宁. 便携关节式坐标测量机性能指标评价方法研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2018.
ZHAO H N. *Research on Performance Index Evaluation Method of Portable Articulated Coordinate Measuring Machine* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(9):2446-2451.
WANG X J. Correction of angle measuring errors of large telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2446-2451. (in Chinese)
- [4] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):598-604.
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
- [5] 卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9):2299-2305.
LU R SH, LI W H, LAO D B, *et al.*. Angular error compensation for laser tracker [J]. *Opt. Preci-*

5 结 论

本文基于便携关节式坐标测量机的实际工业需求,在分析现有圆光栅测角误差补偿方法的基础上,提出了一种新型圆光栅测角误差补偿模型,即在谐波误差补偿模型基础上加入了温度影响因子,将测角位置、环境温度代入模型中,即可获得当前状态下的测角误差,从而修正任意温度下的圆光栅测角误差。实验结果表明:经新型圆光栅测角误差补偿模型修正后,残差极值在 $2''$ 以内,标准差减小至 $1''$,其结果远优于传统方法在非常温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 状态下的补偿效果,显著地提高了 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的圆光栅测角精度。

- sion Eng.*, 2014, 22(9): 2299-2305. (in Chinese)
- [6] DENG F, CHEN J, WANG Y, *et al.*. Measurement and calibration method for an optical encoder based on adaptive differential evolution-Fourier neural networks [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5):055007.
- [7] 王福全, 王珏, 谢志江, 等. 精密转台角分度误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(8):2165-2172.
WANG F Q, WANG J, XIE ZH J, *et al.*. Compensation of angular indexing error for precision turntable [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2165-2172. (in Chinese)
- [8] KIM J A, KIM J W, KANG C S, *et al.*. Calibration of angle artifacts and instruments using a high precision angle generator [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(3):367-371.
- [9] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M, *et al.*. The new PTB angle comparator [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7): 1059-1066.
- [10] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, *et al.*. On-axis self-calibration of angle encoders [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1):529-534.
- [11] CRAMER P G. Self-compensating angular encoder; US, US201113108277 [P]. 2011-11-17.
- [12] JIAO Y, DONG Z, DING Y, *et al.*. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10):105013.

- [13] GECKELER R D, LINK A, KRAUSE M, *et al.*. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5):055003.
- [14] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11):2459-2464.
- FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, *et al.*. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2459-2464. (in Chinese)
- [15] HOPP D, PRUSS C, OSTEN W. Device and method for optically compensating for the measuring track decentralization in rotation angle sensors; US, EP201013395436[P]. 2012-07-05.
- [16] LI X, YE G, LIU H, *et al.*. A novel optical rotary encoder with eccentricity self-detection ability [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(11):115005.
- [17] 李万红. 激光跟踪仪高精度测角误差补偿技术研究 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2010.
- LI W H. *Research on High Accuracy Angular Error Compensation Technology for Laser Tracker*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [18] CHEN X J, WANG ZH H, WANG ZH B, *et al.*. Angle measurement error and compensation for pitched rotation of circular grating [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 2011, 18(3): 11-15.

作者简介:



于连栋(1969—),男,山东临沂人,教授,博士生导师,1993年、1999年、2003年于合肥工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事坐标测量技术、现代测试精度理论研究、微纳米测量技术的研究。E-mail: liandongyu@hfut.edu.cn



鲍文慧(1993—),女,河北唐山人,硕士研究生,20016年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事大尺寸测量方面的研究。E-mail: bwh1993@mail.hfut.edu.cn