

doi:10.3788/gzxb20144311.1112003

光电转台复合精密角度测量理论

袁辉^{1,2}, 刘朝晖¹, 梁冬生^{1,2}, 刘夫成^{1,2}, 董强^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100864)

摘 要:针对传统编码器测角系统分辨率低、量化噪音大和测速误差高等缺点,提出一种基于光纤陀螺和编码器的融合测角算法。首先,在一个滑动窗口利用编码器角度值和光纤陀螺速率积分值的差值信号,通过最小二乘法实时地估计出光纤陀螺的速率漂移;其次,使用补偿后的角速度信号和编码器角度信号,通过一定融合算法进行角度估计;最后,对所提算法进行数学仿真和实验验证。仿真和实验结果显示:测角准确度的仿真值和实验值分别由 1.2"和 1.1"提高到 0.17"和 0.76",角速度测量准确度的实验值从 $0.002^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $0.001^\circ \cdot \text{s}^{-1}$,在避免光纤陀螺角速度漂移问题的同时有效提高了系统的角度和角速度测量准确度。

关键词:光纤陀螺仪;角编码器;角度测量;角速度;转台

中图分类号:V241.5; TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)11-1112003-6

Research on Combined Precision Angle Measurement Theory of Optical Rotation Platform

YUAN Hui^{1,2}, LIU Zhao-hui¹, LIANG Dong-sheng^{1,2}, LIU Fu-cheng^{1,2}, DONG Qiang^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10084, China)

Abstract: As the conventional angular measuring system which uses rotary encoders has the shortcomings of low resolution, large quantization noise and low angular velocity accuracy, a sensor fusion angle measurement method based on fiber optic gyroscope and rotary encoder was proposed. First, the encoder angle signal and the fiber optic gyro rate integration value were subtracted in a sliding window, and the rate drift of fiber optic gyroscope was estimated utilize least square method from the deviation signal. Secondly, the angle was estimated using the compensated angular velocity signal and the encoder signal through a certain combination algorithm. Finally, mathematical simulation and experimental verification were conducted for the proposed method. The results show that the simulation value and experimental value of angle measurement accuracy are improved from 1.2" and 1.1" to 0.17" and 0.76", respectively. The angular velocity measurement accuracy are also improved from $0.002^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ to $0.001^\circ \cdot \text{s}^{-1}$. The proposed method effectively improves the angle and angular velocity measurement accuracy, while avoiding the rate drift problem of fiber optic gyroscope.

Key words: Fiber optic gyroscope; Angular encoders; Angle measurement; Angular velocity; Turntable

OCIS Codes: 120.4640; 350.4600; 060.2370

0 引言

在光电转台,工业机器人的控制系统中,旋转编码器和圆感应同步器是最常用的角度传感器。高分辨率

的编码器被安装在转台的旋转轴上用以确定系统轴系间的角度关系^[1]。虽然编码器本身的静态误差可能很小,但是由于转台机械结构的传动等引起的误差仍会使编码器的准确度降低^[2-3]。在高动态的转台控制系统

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA04070702)资助

第一作者:袁辉(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为光纤陀螺精密侧角、惯性仪器技术及应用。Email:yuanhui@opt.cn

导师:刘朝晖(1965-),男,研究员,主要研究方向为光学工程。Email:lzh@opt.ac.cn

收稿日期:2014-04-16;录用日期:2014-06-13

<http://www.photon.ac.cn>

中,要求知道转台各轴系间的角度和角速度信息,若编码器的角度值被用来估计角速度或角加速度,估计的过程会造成随机误差的放大.低速旋转时,在若干个采样间隔中可能没有编码器计数,这种情况下,速度估计变得尤为灵敏,速度误差比例将显著增大^[4]. 这些问题通常需要复杂的滤波估计算法,或者选择更高分辨率的角编码器.复杂的滤波估计算法开发难度大,会显著增加系统软件的复杂程度,同时算法延时还会造成系统带宽下降;而使用更高准确度分辨率的编码器会带来不可忽略的成本问题,还会受到编码器位数、体积的限制^[5].

当高准确度的角速率陀螺仪(如微机械陀螺,光纤陀螺,激光陀螺等)出现以后,直接进行高准确度的角速率测量变得非常有吸引力^[6].特别是光学陀螺仪,具有很高的带宽和角速度测量准确度,可很轻易达到极高的角分辨率.然而,速率陀螺也存在明显缺点,它们的输出不仅受到不相关随机噪音的影响,还受到时变扰动(随机漂移)的影响.使用陀螺仪的角速度进行角度估计时,随机速率漂移在积分中会造成角度误差随时间积累,不利于长时测角应用^[7-8].

为减小光纤陀螺随机漂移对角度估计误差的影响,通常需把陀螺与其他不受漂移影响的传感器结合起来使用.类似的问题也出现在其他使用惯性传感器的应用中,如文献[9]中利用线加速度计和编码器进行速度估计,文献[10]利用 Kalman 滤波融合了加速度计和编码器的信号,文献[11]中使用星敏感器修正陀螺漂移,文献[12]中使用光学跟踪与光纤陀螺结合的方法抑制光纤陀螺漂移的影响.相对于光纤陀螺,角编码器的角度误差不会随时间积累,可以用来实时修正光纤陀螺的随机漂移,而光纤陀螺仪反过来可以增加编码器的分辨率,提高编码器的测量准确度,同时又可以系统提供高准确度的角速度信息.本文把速率光纤陀螺仪和编码器结合起来,通过一定的算法弥补单个传感器各自的缺点,实现高准确度的角度和角速度测量.

1 算法的基本理论

1.1 算法思想

针对编码器、圆感应同步器等测角传感器分辨率有限、准确度低和光纤陀螺的随机漂移问题,利用短时间内光纤陀螺显著的准确度水平弥补角编码器分辨率的不足,同时利用编码器信号优秀的重复性和无误差积累的特点解决光纤陀螺随机漂移问题.

首先,在一个滑动窗内分析编码器角度输出与陀螺角速率信号的积分值,用低阶多项式拟合积分值和编码器的差值信号,并对拟合结果求导估计出速率信号的漂移,得到去除漂移的角速度输出信号.其次,对

去除漂移后的角速度进行积分并把积分结果传递至角度偏差补偿算法,来消除积分角速率信号和编码器信号之间残余的低频偏移,从而得到准确的角度估计值.算法的基本框图如图 1.

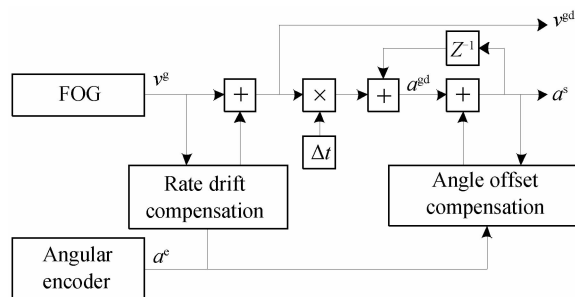


图 1 角速度和角度估计原理框图

Fig. 1 Angle velocity and angle estimation schematic diagram

1.2 漂移估计和消除

漂移估计是为了消除光纤陀螺信号中明显的速率随机波动,因其固有的随机性,漂移在长时间内没有一个确定的估计值.在没有外部参考信息的情况下,短时间无法确切知道光纤陀螺速率漂移的大小和方向.但是,根据光纤陀螺速率信号的特性,在短时间内,光纤陀螺的随机漂移具有一定的相关性,可借助外部参考信息通过曲线拟合的方法估计出光纤陀螺仪漂移的大小和方向,并对光纤陀螺输出的角速率信号进行补偿.

以一定长度的滑动窗口对陀螺的角速率信号进行积分,并与该窗口内编码器的输出相减,所得的差值信号就包含了估计陀螺仪在该窗口时间内漂移所需的信息.然后对该差值信号进行加权最小二乘多项式拟合.把拟合结果的一阶倒数作为陀螺仪角速率信号在该时间段的估计值.最后,该窗口内陀螺仪角速率信号减去漂移估计值,即消除了陀螺仪的速率漂移.具体的计算过程为:

对于陀螺的角速率信号,在时间点 k 处,向前取 N 个采样点作为一个窗口长度,对应的陀螺角速率信号为

$$v_k^g = [v_{k-N}^g, v_{k-N+1}^g, \dots, v_k^g] \quad (1)$$

对应的编码器角度输出为

$$a_k^e = [a_{k-N}^e, a_{k-N+1}^e, \dots, a_k^e] \quad (2)$$

滑动窗口内陀螺仪角速率信号的积分值可表示为

$$a_k^g = [a_{k-N}^g, a_{k-N+1}^g, \dots, a_k^g] \quad (3)$$

式中

$$a_{k-i}^g = \Delta t \sum_{j=k-N}^{k-i} v_j^g, i = N, N-1, \dots, 0 \quad (4)$$

陀螺积分角度和编码器角度差值可表示为

$$e_k^n = a_k^g - a_k^e = [e_{k,N}^n, e_{k,N-1}^n, \dots, e_{k,0}^n] \quad (5)$$

为了估计陀螺仪速率漂移,对差值信号进行加权最小二乘多项式拟合.所拟合多项式可表示为

$$p_k^n(t, \mathbf{c}) = c_{k,0} + c_{k,1}t + \dots + c_{k,n}t^n \quad (6)$$

加权最小二乘法是进行曲线拟合常用的一种方

法,它是通过最小化误差的方法寻找一组数据的最佳函数匹配.进行加权最小二乘拟合误差的目标函数可表示为

$$E = \sum_{i=0}^N w_i (p_k^n(t, \mathbf{c}_k) - e_{k,i}^a)^2 \quad (7)$$

将式(7)对 $c_{k,i}$ 求导并令倒数为零,可求得误差平方和最小时的系数 $c_{k,i}$.权系数的选择是为了克服观测测量方差不一致而引入的,与观测测量方差成反比.对于方差不变的观测测量权系数可选为常量1,这里需要拟合的信号中包含陀螺仪速率积分信号和编码器信号的误差,其方差可表示为

$$\begin{aligned} \text{Var}(e_{k,i}^a) &= \text{Var}(a_{k-i}^e - \Delta t \sum_{j=k-N}^{k-i} v_j^g) = \text{Var}(a_{k-i}^e) + \\ &\Delta t^2 \sum_{j=k-N}^{k-i} \text{Var}(v_j^g) \quad i=N, N-1, \dots, 0 \end{aligned} \quad (8)$$

假定陀螺仪角速率信号和编码器角度信号的方差均为常量,分别为 $(\sigma^g)^2$ 和 $(\sigma^e)^2$,则式(8)可简化为

$$\begin{aligned} \text{Var}(e_{k,i}^a) &= (\sigma^e)^2 + \Delta t^2 (\sigma^g)^2 (N-i+1) \\ i &= N, N-1, \dots, 0. \end{aligned} \quad (9)$$

因此,有 $w_i = 1/\text{Var}(e_{k,i}^a)$.

根据陀螺仪角速率漂移的特性,使用高阶多项式对误差信号进行拟合并不能显著改善率漂移的估计效果,因此选择二阶多项式进行拟合.

$$E = \sum_{i=0}^N w_i (c_{k,0} + c_{k,1}t + c_{k,2}t^2 - e_{k,i}^a)^2 \quad (10)$$

分别令式(10)对 $c_{k,0}, c_{k,1}, c_{k,2}$ 的导数为零,可求得 $c_{k,0}, c_{k,1}, c_{k,2}$,则所拟合多项式为

$$p_k^2(t, \mathbf{c}_k) = c_{k,0} + c_{k,1}t + c_{k,2}t^2 \quad (11)$$

对拟合结果求一阶倒数,可得

$$\frac{dp_k^2(t, \mathbf{c}_k)}{dt} = c_{k,1} + 2c_{k,2}t \quad (12)$$

角速率漂移的估计值可表示为

$$\mathbf{d}_k = c_{k,1} + 2c_{k,2}[\Delta t, 2\Delta t, \dots, (N+1)\Delta t]^T \quad (13)$$

则消除漂移后的角速率为

$$\mathbf{v}_k^{\text{gd}} = \mathbf{v}_k^g + \mathbf{d}_k \quad (14)$$

即, $\mathbf{v}_k^{\text{gd}} = [v_{k-N}^{\text{gd}}, v_{k-N+1}^{\text{gd}}, \dots, v_k^{\text{gd}}]$

消除漂移后的角速率信号可直接用于控制系统或者积分进行角度估计.

1.3 角度偏移补偿

速率漂移补偿法在很大程度上抑制了光纤陀螺仪的角速率漂移,对于角速度输出的应用已经足够,但是在进行角度估计时,残余的速率漂移带来的影响仍不可忽视.为了保持陀螺仪角度估计值和编码器输出角度值的一致性,采用频率加权滤波的方法通过一个 IIR 滤波器补偿因陀螺仪角速率漂移引起的角度偏移.该 IIR 滤波器在一个滑动窗内计算系统角度输出与编码器输出的偏差值,并基于该偏差值计算角度修正信号.对于陀螺仪积分角度值来说它是一个高通滤波器,能够抑制陀螺仪低频速率漂移的影响;对于编码器角度

值来说,它是一个低通滤波器,保留了编码器较为准确的低频信息.算法的幅度响应示意如图2.

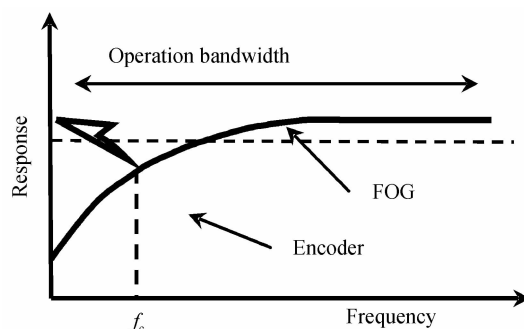


图2 角度偏差补偿算法幅度响应示意图

Fig.2 The amplitude response diagram of offset compensation algorithm

以 M 表示滤波器的阶数,滤波器的递推关系为

$$\mathbf{a}_k^s = [a_{k-M}^s, a_{k-M+1}^s, \dots, a_k^s] \quad (15)$$

$$\mathbf{a}_k^{e*} = [a_{k-M}^e, a_{k-M+1}^e, \dots, a_k^e] \quad (16)$$

$$\mathbf{e}_k^s = \mathbf{a}_k^{e*} - \mathbf{a}_k^s \quad (17)$$

式中, a_k^s 为系统 k 时刻的角度输出值, a_k^e 为 k 时刻编码器的输出值.而 k 时刻根据消除漂移后陀螺速率信号估计的角度值为

$$a_k^{\text{gd}} = v_k^{\text{gd}} \Delta t + a_{k-1}^s \quad (18)$$

对 $k-1$ 时刻的偏差信号 \mathbf{e}_{k-1}^s 的元素求和并乘以系数 γ ,作为 k 时刻陀螺角度值 a_k^{gd} 的修正量,则系统在 k 时刻的角度值可表示为

$$a_k^s = a_k^{\text{gd}} + \gamma \sum_{i=0}^M e_{k-1,i}^s \quad (19)$$

即可实现光纤陀螺仪和编码器精确的角度和角速度估计.

2 算法仿真

2.1 算法参量的选择

算法中有三个可选的参量,漂移估计窗口长度 N , 角度偏差补偿窗口长度 M 和权系数 γ ,对这三个参量进行适当的选择会使算法达到最佳的效果.

2.1.1 漂移估计窗口长度 N 的选择

N 的选择主要是为了抑制光纤陀螺的速率漂移,进行准确的角速率估计. N 的长度与陀螺仪的速率漂移水平和编码器的噪音水平相关.光纤陀螺所敏感的是其敏感轴相对于惯性空间的绝对角速度,在动态相对角度测量时需要对其进行实时地理位置补偿和速度补偿,受到工作环境的限制,这种补偿会有误差,表现为光纤陀螺的动态速率漂移.光纤陀螺仪的静态漂移率用零偏稳定性表征.因此,在进行相对角度测量时,光纤陀螺的动态漂移水平由其动态漂移和零偏稳定性共同决定.

算法是利用滑动窗内陀螺积分角度与编码器角度之间偏差的导数来估计速率漂移,窗口时间长度的选择应在统计意义上使陀螺积分角度漂移至少与编码器的

噪音水平相当。 N 越大,对量化噪音的抑制越好,但同增加算法对低频扰动的灵敏度,还会导致计算量增大。

2.1.2 角度偏移补偿窗长度 M 和偏差权系数 γ 的择

M 和 γ 的选择决定了角度估计值的不确定性。该算法的角度偏移补偿部分主要为了修正编码器随机噪音和陀螺仪残余速率漂移引起的角度误差,相当于一个 IIR 滤波器, M 决定了滤波器的阶数, γ 的选择取决于编码器误差和陀螺仪漂移误差的大小。

在图 2 中, M 的增大会增加截止频率 f_c , γ 的增大会减小幅度响应的斜率,由于残余的扰动随时间变化非常缓慢, M 的阶数的选择性较少,如 $M=1$ 或 $M=2$ 。要保证系统稳定,需 $\gamma < 0.5$,实际上为了取得较好的滤波效果, γ 的取值应远小于 0.5,在 10^{-3} 量级^[2]。

2.2 仿真结果

仿真中设编码器位置误差服从高斯分布,误差标准差(1σ)约为 $1.2''$,光纤陀螺仪动态漂移率为 $\sigma_{vg} = 0.2^\circ/h$,随机游走系数约为 $0.003^\circ/\sqrt{h}$ 。编码器和光纤陀螺仪的采样频率同步为 $f_s = 500$ Hz。算法的参量设置为 $N = 350, M = 2, \gamma = 0.003$ 。假设系统进行如图 3 所示的周期为 5 s 幅度为 20° 的正弦运动。算法的仿真统计结果如图 4。图 5 为对算法速度误差的仿真。图 6 为对算法位置误差补偿效果的仿真。仿真数据的统计结果如表 1。

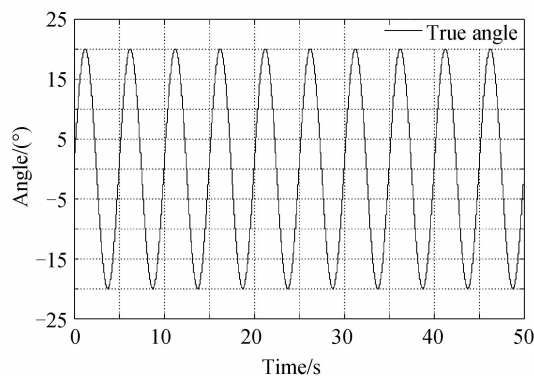


图 3 角位置仿真曲线

Fig. 3 Simulated angle position curve

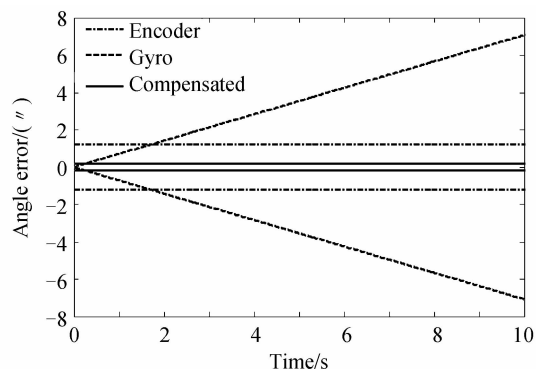


图 4 光纤陀螺和编码器角度误差标准差

Fig. 4 Angle error statistics of gyro and encoder

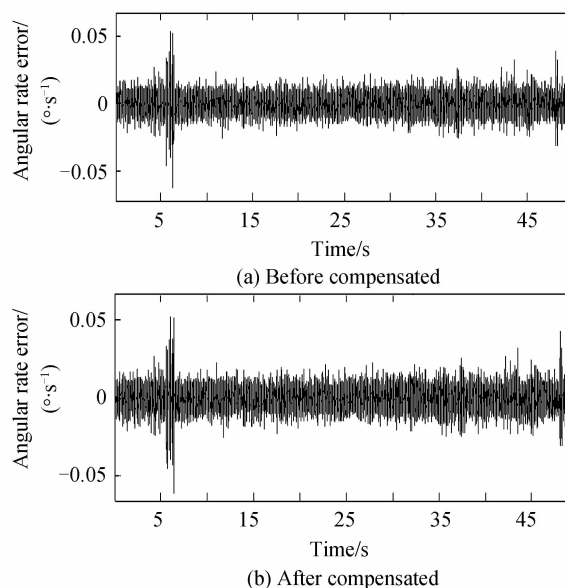


图 5 仿真速度误差

Fig. 5 Simulated angular rate error

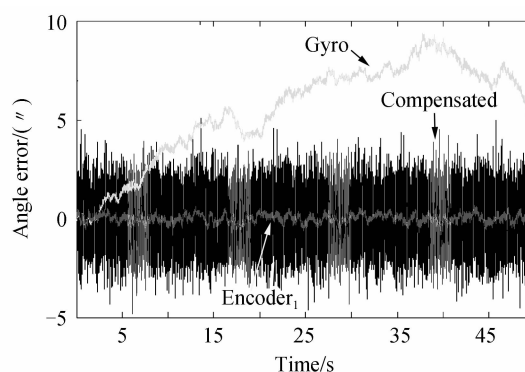


图 6 仿真角误差曲线

Fig. 6 Simulated angle error

表 1 补偿前后仿真数据角速度和角度误差统计
Table 1 Angle and angular rate error statistics of simulated data

	Before compensation	After compensation
Angular velocity error/ $(^\circ \cdot s^{-1})$	Mean	$3.08e-05$
	Standard deviation	$-1.01e-05$
Angle error/ $(")$	Mean	0.0062
	Standard deviation	$-5.70e-05$
	1.20	0.03
	0.17	

可以看出,虽然光纤陀螺的带宽很高(可达几 kHz ~ 几 MHz),零偏稳定性可达 $0.001^\circ/h$ 甚至更高,理论上有着极高的角度分辨率,但实际上由于光纤陀螺的速率漂移和噪音,单独使用光纤陀螺仪的角速度进行角度估计时,角度不确定性随积分时间的增加而增大,无法应用于长时间的角度估计。要想增加光纤陀螺角度估计准确度水平,就必须使用更低噪音和漂移的光纤陀螺。而无论是光学编码器还是感应同步器,其分辨率的提高都依赖于对圆周的物理细分程度,受到加工工

艺水平和编码器体积的限制,同时光学编码器和感应同步器的输出中存在较大的量化噪音,他们的角度分辨率总是有限的.采用本文算法把两者结合起来,达到了互补的效果,在有效利用了两者优点的同时消除了它们各自的缺点,实现了高分辨率低噪音的角度估计值.编码器的角度误差标准差为 $\sigma_e = 1.2''$,光纤陀螺积分角度误差标准差随时间增加,为 $\sigma_{ng} = \sigma_{vg} t / \sqrt{2}$,50 s时间的角度误差标准差约为 $\sigma_{ng} = 7.07''$.从表1中可以看出,处理后得到的角度输出误差标准差约为 $0.17''$,角度误差得到了明显减小.

3 试验验证

3.1 实验装置

为了验证所提方法的有效性,搭建了如图3所示的单轴旋转实验平台.在实验平台的旋转轴上,同时安装了高精度海德汉编码器(Encoder₀),某型号圆感应同步器(Encoder₁)和一个光纤陀螺用于角度和角速度测量.

实验中所使用的各传感器的基本参量为:Encoder₀的角分辨率为29位(约 $0.0024''$),角位置准确度为 $0.18''(1\sigma)$;Encoder₁的角度分辨率为 $0.88''$,角位置准确度为 $1.2''(1\sigma)$;光纤陀螺的角速度分辨率为 $0.02^\circ/h$,零偏稳定性为 $0.1^\circ/h$,角度随机游走系数为 $0.008^\circ/\sqrt{h}$.实验中以位置准确度较高的编码器Encoder₀的输出作为位置参考真值.

实验中,光纤陀螺水平放置,动态漂移主要来自旋转轴和水平面的不平稳性.由外部动态环境引起的速率误差约为 $0.2^\circ/h$,而光纤陀螺本身的静态零偏稳定性为 $0.05^\circ/h$,其速率漂移水平约为 $\sqrt{0.2^2 + 0.05^2} = 0.21^\circ/h$,约合 $0.21''/s$.

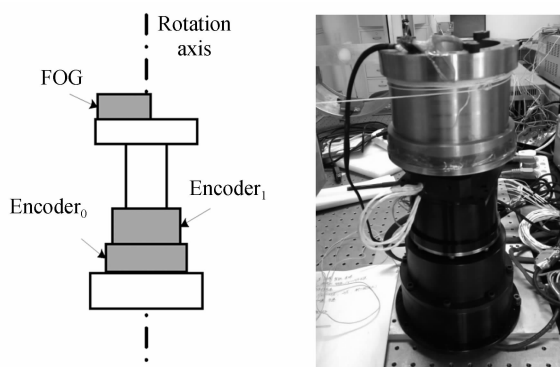


图7 实验装置图
Fig. 7 Experimental configurations

使用准确度和可靠性较高的海德汉编码器作为系统的角度基准,用所提到的方法对光纤陀螺仪的角速率信号和圆感应同步器的角位置信号进行处理.

3.2 实验结果

对实验装置中的海德汉编码器(Encoder₀),感应同步器(Encoder₁),光纤陀螺仪(Fiber Optic

Gyroscope, FOG)以500Hz的频率同步采样.以手推方式使图7所示的实验装置做近似正弦旋转运动,所采集的Encoder₀角位置随时间的变化关系如图8.

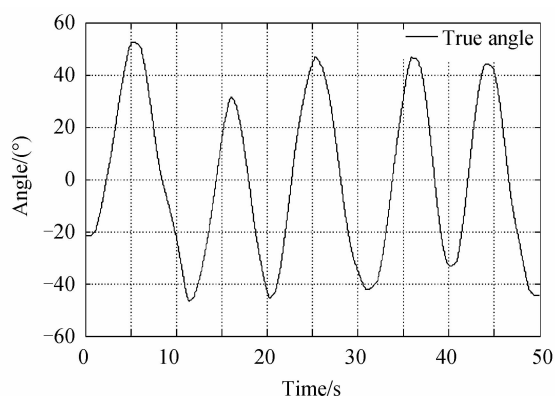


图8 编码器0的角位置变化
Fig. 8 Angle position of encoder₀

对Encoder₁的角位置信号和FOG的角速度信号进行处理.算法各个参量的选择与仿真数据一致,所得到的结果如图9和图10.

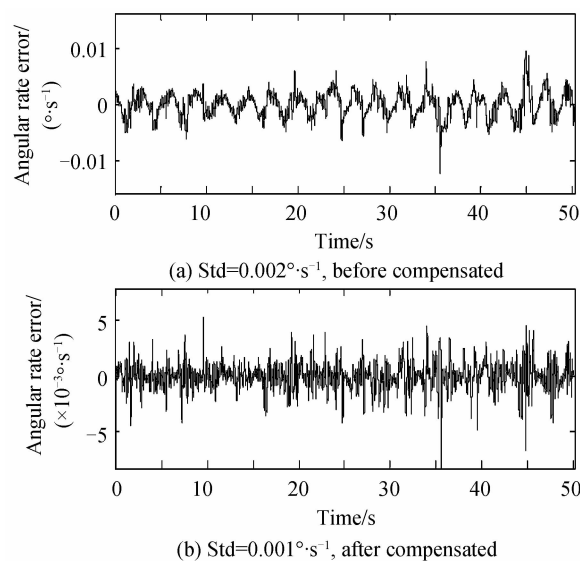


图9 速度误差
Fig. 9 Angular rate error

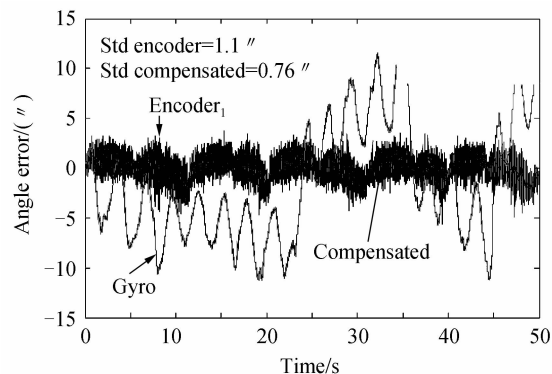


图10 角位置误差
Fig. 10 Angle error

表 2 补偿前后实际数据角速度和角度误差统计
Table 2 Angle and angular rate error statistics of real data

		Before compensation	After compensation
Angular velocity error/($^{\circ} \cdot s^{-1}$)	Mean	$6.06e-05$	$-2.06e-05$
	Standard deviation	0.0022	0.0012
Angle error/($''$)	Mean	$-1.15e-3$	0.08
	Standard deviation	1.11	0.76

从试验结果可以看出,文中所采用的算法能够有效降低系统的角速度和角度测量误差.如图 9,漂移补偿前后角速度不确定性由 $0.002^{\circ} \cdot s^{-1}$ 下降到了 $0.001^{\circ} \cdot s^{-1}$.从图 10 可以看出,在没有外部参考的情况下,光纤陀螺积分所得到的角度估计误差存在较大波动,甚至可能发散.而 Encoder₁ 因受到自身分辨率的限制,其角度测量值存在较大噪音,角度不确定度约为 $1.1''$.使用本文算法将 Encoder₁ 和陀螺仪的测量值结合起来能够有效降低陀螺仪漂移和编码器量化噪音的影响,角度测量准确度得到了明显提高,达到了约 $0.76''$.同时也注意到 Encoder₁ 的角度信号包含一定规律的波动,这是圆感应同步器的系统误差^[13].这超出了本文的研究范围,但该系统误差若能去除,系统的角度测量准确度还可能进一步提高.

4 结论

为满足高精度光电转台动态测角系统对测角准确度和测角分辨率的要求,针对传统测角方法角分辨率低、动态测角误差大的缺点,本文将编码器和光纤陀螺结合起来,利用光纤陀螺分辨率高和编码器没有角度漂移的优点,提出了一种编码器角度信号和光纤陀螺角速度信号的融合算法.首先,在一个滑动窗口内将光纤陀螺的积分角度信号与编码器角度信号相减,利用差值信号估计出光纤陀螺的速率漂移;其次,利用光纤陀螺分辨率高和编码器低频噪音低的特点,使用补偿后的角速度信号和编码器角度信号,通过角度偏差补偿算法进行角度估计;最后,对所提算法分别进行了数学仿真和实验验证.仿真和实验的结果均证明,该算法能够有效弥补传统测角方法准确度和分辨率的不足,显著提高光电转台动态测角系统角度和角速度测量准确度,具有一定的工程应用价值.

参考文献

- [1] CHANG Chun, HU Yu, DONG Bin. Investigation and application of photoelectric revolving encoder[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001, **12**: 34-35.
常春, 胡瑜, 董彬. 光电旋转编码器的研究与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2001, **12**: 34-35.
- [2] KUBUS D, WAHL F. A sensor fusion approach to angle and angular rate estimation [C]. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011: 2481-2488.
- [3] LI Yong-gang, DING Jin-wei, LIU Zhong-yu, et al. Analysis of transmission modes and its transmission precision of photoelectric encoder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(11): 3008-3012.
李永刚, 丁金伟, 刘仲宇, 等. 光电编码器的传动方式及其传动准确度分析[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(11): 3008-3012.
- [4] HUANG Fa-jun, WAN Qiu-hua, YANG Shou-wang, et al. Current situation and trend of velocity measurement with photoelectric shaft encoder [J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2013, **50**: 110004.
黄法军, 万秋华, 杨守旺, 等. 光电轴角编码器测速方法现状分析与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, **50**: 110004.
- [5] TANG Tian-jin, CAO Xiang-qun, LIN Bin. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(1): 90-95.
汤天瑾, 曹向群, 林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005, **27**(1): 90-95.
- [6] PAVLATH G A. Fiber optic gyros past, present, and future [C]. SPIE, 2012, **842102**: 1-10.
- [7] 严恭敏, 李四海, 秦永元. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 136-147.
- [8] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 179-210.
- [9] ZHU W H, LAMARCHE T. Velocity estimation by using position and acceleration sensors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, **54**(5): 2706-2715.
- [10] JEON S. State estimation based on kinematic models considering characteristics of sensors[C]. Proceedings of the American Control Conference, 2010: 640-645.
- [11] LEE S, ORTIZ G G, ALEXANDER J W. Star tracker-based acquisition, tracking, and pointing technology for deep-space optical communications [J]. *Inter Planetary Network Progress Report*, 2005: 42-161.
- [12] KAUFMANN J, HAKIMI F, BOROSON D. Using a low-noise interferometric fiberoptic gyro in a pointing, acquisition, and tracking system[C]. SPIE, 2013, **8610**: 86100A.
- [13] REN Shun-qing, ZENG Qing-shuang, CHEN Xi-jun. The angle measuring error separation technology of round inductosyn[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, **21**(4): 92-94.
任顺清, 曾庆双, 陈希军. 圆感应同步器测角误差的分离技术[J]. 中国电机工程学报, 2001, **21**(4): 92-95.