

基于光纤陀螺仪的信号补偿^①

俞成森, 祝华军, 叶 林

(浙江杭钻机械制造股份有限公司, 杭州 310020)

摘 要: 光纤陀螺仪是目前广泛使用的一种惯性仪器, 但在使用过程中仍然会遇到很多问题. 光纤陀螺仪在使用过程中由于光纤陀螺仪内部元器件构造、材料的使用、以及元器件的精度等因素, 会产生一些误差, 如启动温度、零漂、刻度因子等. 同时在使用过程中受外界的环境干扰也会使光纤陀螺仪产生误差, 如受外界振动, 环境温度变化等. 通过分析研究光纤陀螺仪的原理和输出信号, 建立误差补偿模型, 对误差进行补偿分析. 应用分段平均选点法补偿了由于温度变化在信号中产生的线性趋势项, 以及使用平滑滤波算法对光纤陀螺仪输出信号进行处理以补偿外界扰动造成的数据跳变.

关键词: 光纤陀螺仪; 误差分析补偿; 信号处理

Signal Compensation Based on Fiber Optic Gyroscope

YU Cheng-Sen, ZHU Hua-Jun, YE Lin

(Zhejiang Hangzhou Drilling Machine Manufactory Co., Ltd, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The fiber optic gyroscope is an inertial instrument, which is used widely, but there are still many problems in the application of the FOG. The disadvantages of the fiber optic gyroscopes such as such as temperature effect, non-linearity of scale factory and disturbance. This paper analyses the principle and the signal output of the fiber-optic gyroscope. It establishes the compensate model of nonlinearity error and linearity error, uses signal processing algorithm and signal filtering algorithm to compensate variety of error. The signal processing algorithm is proved to be effective through actual experiments.

Key words: Fiber Optic Gyroscope(FOG); errors analysis; signal processing

光纤陀螺仪是在现代国防工业中被广泛使用的一种惯性元器件, 具有非常重要的作用. 近年随着光纤陀螺仪精度的不断提高, 成本下降, 光纤陀螺仪得到越来越广泛的应用. 与其它传统的设备相比, 光纤陀螺仪具有不受外部环境如地球磁场、地形、气候等的影响、快速反应、精度高、在恶劣环境中可靠工作等优势^[1]. 被广泛地应用于国防, 国民经济建设中.

但在实际应用光纤陀螺仪的过程当中还是存在很多问题的, 例如启动温度问题, 因为光纤陀螺仪的核心部件对温度变化比较敏感^[2,3]; 非线性问题, 不仅与各种误差因素有关, 还与光纤陀螺仪的信号调制以及开闭环控制方案有关^[4,5]; 扰动问题, 一些微小的变

化如光纤陀螺仪所在基座的扰动等问题^[6,7]. 这些问题都会对光纤陀螺仪使用精度产生影响.

1 误差分析

本文通过采集光纤陀螺仪输出数据的有效分量, 提取有效数据进行分析如下:

假定光纤陀螺仪敏感轴与当地水平面平行时, 光纤陀螺仪输出的频率信号模型为^[8]:

$$\omega = \omega_0 + D\Omega_{eh} \cos \varphi \quad (1)$$

其中, $\Omega_{eh} = \omega_{ie} \cos A$; ω_0 : 光纤陀螺仪零偏; D: 陀螺标度因数; ω_{ie} : 地球自转角速度; L: 当地纬度值; φ : 光纤陀螺仪敏感轴与地理北向的夹角.

^① 收稿时间:2012-07-04;收到修改稿时间:2012-08-24

对公式(1)两边求全微分得:

$$\delta\omega = \delta\omega_0 + \delta D\omega_{ic} \cos L \cos \varphi - \delta LD\omega_{ic} \sin L \cos \varphi - \delta\varphi D\omega_{ic} \cos L \sin \varphi \quad (2)$$

最后整理得出:

$$\delta\varphi = \frac{\delta\omega_0 - \delta\omega - \delta D\omega_{ic} \cos L \cos \varphi + \delta LD\omega_{ic} \sin L \cos \varphi}{D\omega_{ic} \cos L \sin \varphi} \quad (3)$$

通过光纤陀螺仪数据输出模型分析得出公式(3),再由公式(3)分析可知,对于纬度误差 δL 、光纤陀螺仪标度因数误差 δD 、光纤陀螺仪零偏误差 $\delta\omega_0$ 、外界运动扰动 $\delta\omega$ 都会对使用精度产生影响.同时由于光纤陀螺仪内部元件的特性,外界温度的变化会对光纤陀螺仪的输出信号产生影响,随着温度的变化输出信号当中存在着线性趋势项.

由分析可知光纤陀螺仪在使用过程中会受到各种误差因素的干扰,其中包含了线性误差和非线性误差.由于光纤陀螺仪零偏误差可以在使用对称、多位测量的方法来补偿^[9],纬度误差只要确定某个地理位置的纬度就可以定量补偿.所以下文将着重分析由于外界温度变化引起的线性误差的补偿以及由于标度因数、外界扰动等引起的非线性误差的补偿.

2 去趋势项

在光纤陀螺仪使用过程当中,由于温度的变换,会使的输出信号中存在线性趋势项.对于此类线性误差的补偿,本文在参考平均选点法的基础上加以改进,使用应用分段平均选点法来去除其中的线性趋势项.平均选点算法的原理是^[10]:将 n 个数据 M_i , ($i=1, 2, 3, \dots, n$)分为两组,前 n_1 个数据为第一组,后 n_2 个数据为第二组,一般取值 $n_1=n_2=n/2$. (n 为偶数),或 $n_1=(n+1)/2$,尽量使 $n_1=n_2$,两组数据的平均值分别为:

$$P_1 = (1/n_1) \sum_{i=1}^{n_1} M_i \quad (4)$$

$$P_2 = (1/n_2) \sum_{i=n_1+1}^{n_2} M_i \quad (5)$$

于是得到回归直线斜率为:

$$K = (P_2 - P_1) / (n/2) \quad (6)$$

然后用原始数据减去 Kt ,即可得出平均选点估计后的数据,其中 t 为时间.

考虑到光纤陀螺仪输出中采样点多,对同一数据

段中,各段数据线性趋势项系数 K 不一样,所以改进后的方法重点在于把采集到的数据分成多段,然后分别去掉每段的线性趋势项,分段方法可按采样点的数量而定,可以采用每 1500 个点左右分一个段.

平均选点算法有以下特点:一、平均选点算法估计的指标函数是偏差的代数和为零;二、平均选点算法估计是无偏估计;三、平均选点算法估计是一致性估计;四、平均选点算法估计的残差服从零均值正态分布.

3 平滑滤波

在光纤陀螺仪工作的过程当中,输出的数据经常会产生一些跳变的点,形成脉冲信号.是由各种因素造成的,环境中偶然的干扰都会造成信号突变,如光纤陀螺仪所在的工作载体受到周围环境中的风动、振动、人员或者车辆的经过都会造成数据的跳变.抑或是光纤陀螺仪自身元器件或者是输出数据本身就存在漂移等.这些原因都会使陀螺数据产生异点,影响信号的稳定性,会造成很多问题,会造成回归方程的偏差及时间序列的非平稳性,增加数据分析难度.所以在数据分析中,必须进行异点的检测和剔除,对数据进行平滑处理是非常必要的.

下面主要对光纤陀螺仪自身的标度因数的不稳定性 and 外界扰动造成的非线性误差的补偿,即对输出信号进行滤波、平滑,数据异点的检测和剔除.

平滑处理在科学研究中广泛使用,它可以减少测量中统计误差带来的影响,当数据有陡然变化的那些测量段.本文采用五点二次平滑公式^[9].

公式如下:

一组原始数据 X_i , 其中 $i=0, 1, 2, \dots, n$. 用五点二次平滑公式得到新的数据来代替原始数据.新数据为 Y_i :

$$Y_i = (-3X_{i-2} + 12X_{i-1} + 17X_i + 12X_{i+1} - 3X_{i+2}) / 35, i \geq 2 \quad (7)$$

而当 $i=0, 1, n-1, n$ 时

$$Y_0 = (31X_0 + 9X_1 - 3X_2 - 5X_3 + 3X_4) / 35 \quad (8)$$

$$Y_1 = (9X_0 + 13X_1 + 12X_2 + 6X_3 - 5X_4) / 35 \quad (9)$$

$$Y_{n-1} = (-5X_{n-4} + 6X_{n-3} + 12X_{n-2} + 13X_{n-1} + 9X_n) / 35 \quad (10)$$

$$Y_n = (3X_{n-4} - 5X_{n-3} - 3X_{n-2} + 9X_{n-1} + 31X_n) / 35 \quad (11)$$

以上是五点二次平滑公式.通过实际测试证明,通过使用平滑滤波之后较好的剔除了异点,同时也保持了原有数据,信号没有失真.

4 实验数据和结果分析

本文中用来实际测试的光纤陀螺仪为开环的干涉光纤陀螺仪, 零偏稳定性为 $0.08^\circ/\text{h}$, 零偏重复性为 $0.08^\circ/\text{h}$, 标度因数为 $34000\text{LSB}/^\circ/\text{s}$, 输出数据波特率为 38400.

4.1 首先进行线性误差的补偿

下面使用上述改进平均选点法对光纤陀螺仪在某一个位置输出信号进行采集和线性趋势项分析得出:

采用普通平均选点法来进行去趋势项时, 得出的线性趋势项 $K=0.000356$, 由图 1 所示, 其中横坐标代表采样时间, 纵坐标代表趋势项的值. 而采用了每段的线性趋势项有正有负, 不是单调的趋势, 存在不同的线性趋势项, 分别是 0.000135 、 -0.000287 、 0.000354 、 -0.000433 、 0.000609 、 -0.000568 , 由图 2 所示. 从图形上分析可以看出, 图 1 使用的是经典的平均选点法, 这使得在采集的过程中的线性趋势项始终是固定不变的. 而在图 2 中采用的是改进的平均选点法, 分析可知在同一段的数据采集过程当中, 采用改进型的平均选点避免了单一的趋势, 这样能够更好去除光纤陀螺仪信号中的线性趋势项. 提高了光纤陀螺仪在温度变化的环境中的鲁棒性.

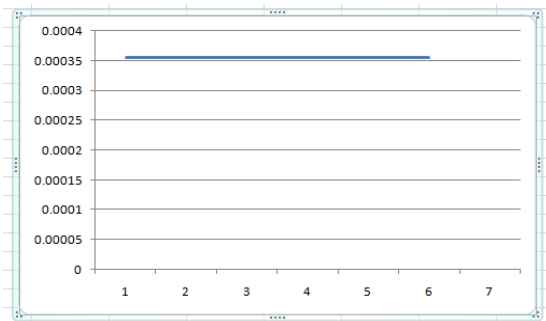


图 1 平均选点法

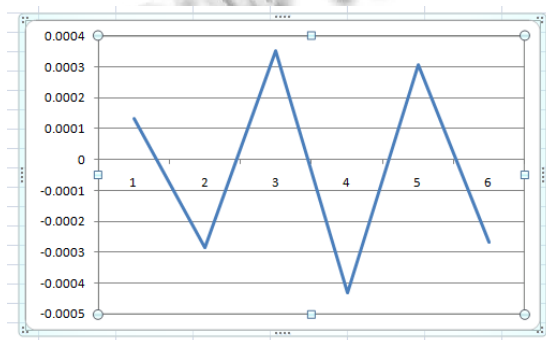


图 2 改进平均选点法

4.2 下面应用上面提出的算法对光纤陀螺仪标度因数和扰动造成的非线性误差进行分析补偿.

通过采集光纤陀螺仪的输出信号上述所提出的信号平滑滤波之后取得了较好的效果.

图 3 所示是光纤陀螺仪输出的原始信号, 横坐标表示采集的光纤陀螺仪输出数据的数量, 纵坐标代表每个数据的数值. 从图形 3 可以看出原始信号当中存在多出异点, 信号上沿值达到 780, 下沿值达到 -560, 严重地干扰了信号, 使光纤陀螺仪输出值产生偏差, 信号失真. 图 4 所示是经过平滑滤波之后的输出信号, 从图 4 中可以看出算法较好的过滤了原始数据中的奇点, 平滑之后的信号值基本处于 -200 和 380 之间, 对数据上沿和下沿的异点都予以处理, 且保留了原有数据的有用信息.

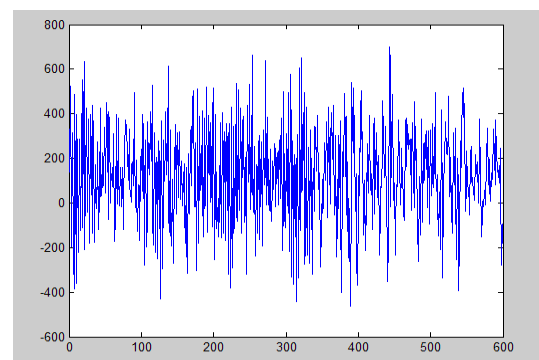


图 3 光纤陀螺仪原始输出信号图

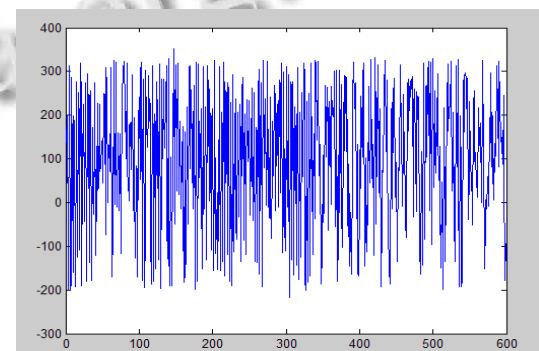


图 4 经过平滑滤波后的输出信号图

表 1 是处理前后的均值和方差的对比, 经过平滑滤波处理后的数据方差大幅度减小, 增加了信号的可信度, 对外界的随机振动干扰和标度因数漂移起到了良好的平滑作用, 该算法是切实可行的.

表1 处理前后均值方差值

	均值	方差
平滑前	236.2571	2.8653
平滑后	228.4733	0.8335

5 结语

本文从光纤陀螺仪的工作原理、信号输出特点,针对使用中的一些产生误差的关键因素进行分析.在经典的平均选点法的基础上,采用改进的平均选点法对由温度变化引起的线性趋势项的补偿,提高了光纤陀螺仪对使用环境温度变化的适应性.同时还对由外界的一些扰动干扰和光纤陀螺仪标度因数的漂移产生的非线性误差进行补偿,通过并不复杂的平滑滤波算法对信号进行处理.经过实际测试证明本文提出的方法,能够有效的消除线性趋势项以及消除非线性误差带来的数据异点.数据方差大幅减小,提高了光纤陀螺仪信号的稳定性,经分析算法切实可行.

参考文献

- 张旭,周鹏辉.光纤陀螺仪及其在航空领域的应用前景.黑龙江科技信息,2012,(17):105-106.

- 孟照魁,崔佳涛,章博,杜新政.高精度光纤陀螺温度实验研究.宇航学报,2007,(3):72-75.
- 王新国,李家垒,许化龙.光纤陀螺温度和标度因数非线性误差建模研究.系统仿真学报,2007,(9):29-31.
- Yu HC, Wang W, Huang L. Improved performance of scale factor linearity in close-loop IFOG. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007,15(4):449-451.
- 孙海峰.基于LabVIEW的光纤陀螺仪标度因数非线性测试及补偿.兵工自动化,2009,6(4):82-84.
- 孙谦.寻北误差控制技术与方位保持温控技术研究.北京:北京理工大学,2008.
- 黄宗升.旋转式激光陀螺寻北仪的研究.长沙:国防科技大学,2010.
- 赵友,朱志刚.光纤陀螺仪在稳定平台上的应用.导弹与航天运载技术,2011,(5):33-35.
- 石仕杰,吴文启.小波变换滤波在光纤陀螺水平多位置寻北中的应用研究.导航与控制,2010,(4):5-8.
- 孙晓刚,戴景民,褚载祥.平均选点法在多波长辐射测温中的应用.佳木斯工学院学报,1998,(1):51-5.

(上接第220页)

表2 各种检索方法的查准

	颜色特征	纹理特征	形状特征	智能选取特征
查准率	0.56	0.34	0.45	0.78

参考文献

- 周明全,耿国华,韦娜.基于内容图像检索技术.北京:清华大学出版社.
- 何金国.数字图像处理实训教程.北京:清华大学出版社.
- 张弘,曹晓光,谢凤英.数字图像处理与分析.北京:机械工业出版社,2007.
- 章毓晋.基于内容的视觉信息检索.北京:科学出版社,2003. 84-102.
- 王开.Visual C++数字图像获取处理及实践应用.北京:北京人民邮电出版社,2003.
- 刘宁钟,杨静宇.综合利用目标区域颜色纹理特征的彩色图像检索.计算机工程与应用,2003,39(32):187-203.
- 张建东,苏鸿根.基于内容的图像检索关键技术研究.计算机工程,2004,30(14):119-121.

- 王积分,张兴荣.计算机图像识别.北京:中国铁道出版社,1988.
- Pietikainen M, Ojala T. Rotation-invariant texture classification using feature distributions. Pattern Recognition, 2000,33:44-252.
- Sing S, Sharma M. Texture Analysis Experiments with Meastex and vistex Benchmarks. Proc International Conference on Advances in Pattern Recognition, 2001.
- Zhang, Lu G. Shape-based image retrieval using generic Fourier descriptor. Signal Processing: Image Communication, 2002,17(10):825-848.
- Zhang, Lu G. Improving Retrieval Performance of Zernike Moment Descriptor on Affined Shape. Proc. of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2002, 1: 205-208.
- Zhang D. Automated biometrics-technologies and systems. Holland: Kluwer Academic Publishers, 2000.