

文章编号:1671-251X(2019)10-0095-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018090084

煤矿井下微机电系统陀螺随机误差辨识

丛琳, 王小龙, 燕斌

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)



扫码移动阅读

摘要:针对常用随机误差辨识方法不能揭示潜在的误差源、很难分离出具体随机误差、数据采集时间过长等问题,利用 Allan 方差分析法对煤矿井下微机电系统(MEMS)陀螺随机误差进行辨识。介绍了 Allan 方差分析法原理,利用 Allan 方差分析法对 MEMS 陀螺实测数据进行处理,给出了 Allan 标准差曲线,通过最小二乘拟合得到 MEMS 陀螺的主要随机误差系数。实验结果验证了 Allan 方差分析法用于 MEMS 陀螺随机误差辨识的有效性。

关键词:钻孔测斜;微机电系统陀螺;随机误差;误差辨识;Allan 方差

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Random error identification for MEMS gyro in coal mine underground

CONG Lin, WANG Xiaolong, YAN Bin

(CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at problems of unrevealing potential error source, hardly separating specific random error and long data collection time of common random error identification methods, Allan variance analysis method was used to identify random error of MEMS gyro in coal mine underground. Principle of Allan variance analysis method was introduced. Allan variance analysis method was used to process measured data of MEMS gyro, Allan standard deviation curves were given, and main random error coefficients of MEMS gyro were obtained by least square fitting. The experiment results verify validity of the Allan variance analysis method for random error identification of MEMS gyro.

Key words: borehole clinometer; MEMS gyro; random error; error identification; Allan variance

0 引言

钻孔测斜在煤矿井下瓦斯抽采、水害防治及地质勘探等钻孔施工中必不可少。传统的钻孔测斜仪器使用基于地磁场测量的电子罗盘或磁通门作为核心传感器,但易受外界磁干扰且在套管井中无法测量,已不能满足煤矿井下测量的实际需求^[1]。近年来,随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)飞速发展, MEMS 陀螺以其特有的成本低、功耗低、体积小、抗振性好及不受外界磁干扰等优点,迅速应用于诸多领域,也成为适用于煤矿

井下复杂工况环境的理想传感器,在井下测斜领域具有广阔的发展空间。

影响 MEMS 陀螺精度的误差有确定性误差和随机误差。确定性误差作为系统误差,可通过标定等环节加以消除^[2],而随机误差没有明显规律,是限制 MEMS 陀螺精度的主要因素。因此, MEMS 陀螺随机误差辨识是提高煤矿井下钻孔测斜精度的必要途径。

目前,随机误差辨识方法主要包括样本均值方差法、功率谱密度法、自相关函数法和 Allan 方差分析法等^[3]。样本均值方差法不能揭示潜在的误差

收稿日期:2018-09-30;修回日期:2019-09-22;责任编辑:盛男。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-005)。

作者简介:丛琳(1990—),女,山东威海人,助理研究员,硕士,主要从事物探仪器研发工作, E-mail:644793592@qq.com。

引用格式:丛琳,王小龙,燕斌.煤矿井下微机电系统陀螺随机误差辨识[J].工矿自动化,2019,45(10):95-98.

CONG Lin, WANG Xiaolong, YAN Bin. Random error identification for MEMS gyro in coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 95-98.

源;功率谱密度法通过对样本的自相关函数估值进行傅里叶变换,得到相应的功率谱密度^[4],但很难分离出具体随机误差;自相关函数法的数据采集时间过长,有时甚至超过仪器寿命^[5];Allan 方差分析法可对各种误差源及其对整个噪声统计特性的贡献进行细致的表征和辨识^[6-10],且便于计算,易于分离。本文依据 Allan 方差分析法原理,以 MEMS 陀螺实测数据为例,实现 MEMS 陀螺随机误差辨识,可为改善 MEMS 陀螺性能提供依据。

1 Allan 方差分析法原理

Allan 方差分析法是一种从时域上对信号频域稳定性进行分析的通用方法,也就是将随机误差作为时间序列来处理,描述其均方误差的方法^[11]。

在进行 Allan 方差分析时,将 MEMS 陀螺输出数据等分为若干组,每组的时间长度为相关时间 τ 。对于不同的相关时间 τ ,MEMS 陀螺输出数据的 Allan 方差 $\sigma_A^2(\tau)$ 必然与影响 MEMS 陀螺性能的固定随机过程的统计性质有关^[10]。通过频域推导可得 Allan 方差 $\sigma_A^2(\tau)$ 与影响 MEMS 陀螺性能的随机过程 $\Omega(t)$ 的功率谱密度 $S_\Omega(f)$ 有着唯一的确定性关系:

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_\Omega(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (1)$$

式中 f 为频率。

由式(1)可知,Allan 方差与 MEMS 陀螺总输出噪声功率呈正比,可根据 Allan 方差分析结果对 MEMS 陀螺随机误差进行辨识。

2 MEMS 陀螺 Allan 方差分析

针对煤矿井下高速旋转钻进应用工况,以 ADIS16475-3 型 MEMS 传感器为例进行 Allan 方差分析。ADIS16475-3 型 MEMS 传感器具有三轴 MEMS 陀螺和三轴 MEMS 加速度计,将其安装在钻杆中,可实时感应钻杆运动过程中的角加速度和线加速度,从而进行钻孔倾角、方位角和工具面向角的惯性跟踪。

在室温下,将 ADIS16475-3 型 MEMS 传感器固定在位置转台上,转台经调平后安装在隔振地基上,分别使 MEMS 陀螺 X 轴、Y 轴、Z 轴指向东向,从而消除地球自转角速度对陀螺输出的影响。MEMS 陀螺预热 5 min,以 100 Hz 采样频率采集 MEMS 陀螺输出原始数据,采样时间为 2 h。

根据式(1)计算 MEMS 陀螺 X 轴、Y 轴、Z 轴 Allan 方差,利用 Matlab 绘制 MEMS 陀螺 X 轴、Y 轴、Z 轴输出角速率 ω 及 Allan 标准差 $\sigma_A(\tau)$ 曲

线,分别如图 1—图 3 所示。ADIS16475-3 型 MEMS 传感器数据手册中 MEMS 陀螺 Allan 标准差曲线如图 4 所示。

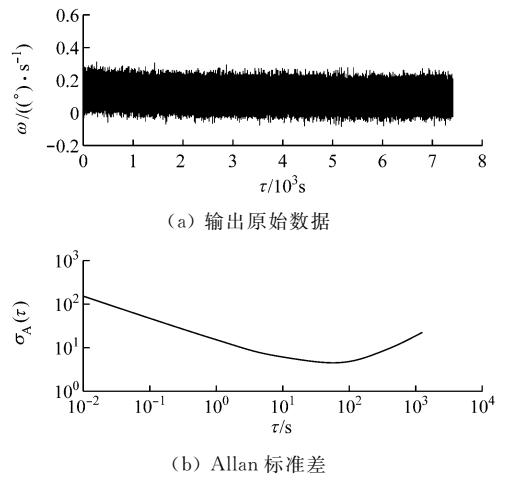


图 1 MEMS 陀螺 X 轴输出原始数据及 Allan 标准差曲线
Fig. 1 MEMS gyro X-axis output raw data and Allan standard deviation curves

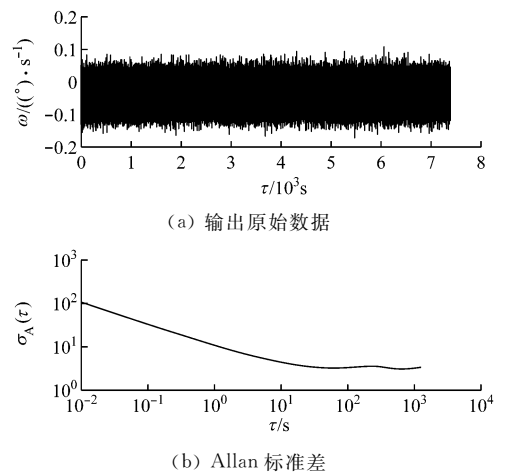


图 2 MEMS 陀螺 Y 轴输出原始数据及 Allan 标准差曲线
Fig. 2 MEMS gyro Y-axis output raw data and Allan standard deviation curves

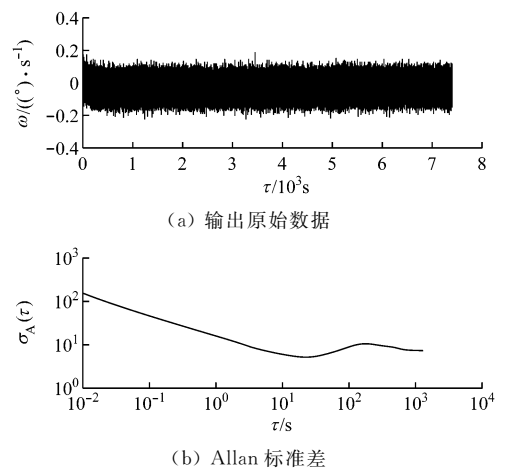


图 3 MEMS 陀螺 Z 轴输出原始数据及 Allan 标准差曲线
Fig. 3 MEMS gyro Z-axis output raw data and Allan standard deviation curves

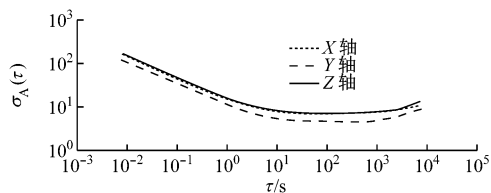


图4 数据手册中 MEMS 陀螺 Allan 标准差曲线

Fig. 4 Allan standard deviation curve of MEMS gyro in data manual

将图 1—图 3 与图 4 对比,可看出根据 MEMS 陀螺 X 轴、Y 轴和 Z 轴输出原始数据所绘制的 Allan 标准差曲线与数据手册中 MEMS 陀螺 Allan 标准差曲线趋势相近,表明了 Allan 方差分析法应用的正确性。

3 MEMS 陀螺随机误差辨识

MEMS 陀螺测试过程中,主要随机误差为量化噪声、角随机游走、零偏不稳定性、速率随机游走和速率斜坡^[12-14],各项随机误差系数分别用 Q, N, B, K, R 表示。不同随机误差在 Allan 标准差曲线中表现为不同斜率的直线,如图 5 所示。

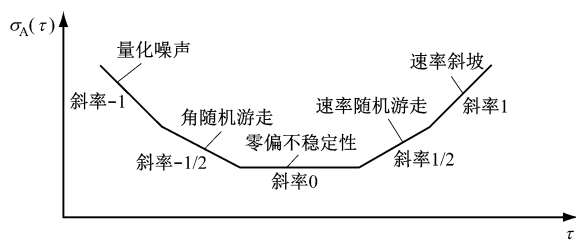


图5 MEMS 陀螺随机误差 Allan 标准差典型分布

Fig. 5 Typical Allan standard deviation distribution of MEMS gyro random error

根据图 5,分析图 1—图 3 中 MEMS 陀螺三轴 Allan 标准差曲线,可看出:① MEMS 陀螺 X 轴 Allan 标准差曲线中,在 $\tau=0.01\sim 20$ s 内,曲线斜率近似为 $-1/2$,随机误差主要表现为角随机游走;在 $\tau=20\sim 100$ s 内,曲线斜率近似为 0,随机误差主要表现为零偏不稳定性;在 $\tau=100\sim 1\ 300$ s 内,随机误差主要表现为速率随机游走和速率斜坡交替出现。② MEMS 陀螺 Y 轴 Allan 标准差曲线中,在 $\tau=0.01\sim 20$ s 内,曲线斜率近似为 $-1/2$,随机误差主要表现为角随机游走;在 $\tau=20\sim 1\ 300$ s 内,曲线斜率近似为 0,随机误差主要表现为零偏不稳定性。③ MEMS 陀螺 Z 轴 Allan 标准差曲线中,在 $\tau=0.01\sim 20$ s 内,曲线斜率近似为 $-1/2$,随机误差主要表现为角随机游走;在 $\tau=20\sim 180$ s 内,随机误差主要表现为速率随机游走和速率斜坡;在 $\tau=180\sim 1\ 300$ s 内,曲线斜率近似为 $-1/2$,随机误差主要表现为角随机游走。

为进一步精确辨识 MEMS 陀螺随机误差,得到

各项随机误差系数,可将各项随机误差表示为正比于相关时间 τ 的 $-2\sim +2$ 次幂的系数表达式^[15]:

$$\sigma^2(\tau) = \sum_{m=-2}^2 A_m \tau^m \quad (2)$$

式中 A_m 为与各随机误差相关的拟合多项式系数, $m=-2, -1, 0, 1, 2$ 分别对应量化噪声、角随机游走、零偏不稳定性、速率随机游走和速率斜坡。

根据式(2),通过最小二乘拟合,即可获得 MEMS 陀螺三轴随机误差系数,见表 1。

表1 MEMS 陀螺三轴随机误差系数

Table 1 MEMS gyro triaxial random error coefficients

随机误差系数	X 轴	Y 轴	Z 轴
$Q/(\mu\text{rad})$	0.138	0.124	0.100
$N/((^\circ) \cdot \text{h}^{-1/2})$	0.242	0.168	0.245
$B/((^\circ) \cdot \text{h}^{-1})$	5.237	4.972	6.058
$K/((^\circ) \cdot \text{h}^{-3/2})$	31.807	8.169	50.568
$R/((^\circ) \cdot \text{h}^{-2})$	76.242	11.068	66.250

从表 1 可看出:① MEMS 陀螺的速率随机游走系数和速率斜坡系数较大,表明速率随机游走和速率斜坡是 MEMS 陀螺的主要随机误差。② 与 ADIS16475-3 型 MEMS 传感器数据手册中的标称值(MEMS 陀螺的角随机游走系数为 $0.3 (^\circ)/\text{h}^{1/2}$ 、零偏不稳定性系数为 $7 (^\circ)/\text{h}$)相比,通过实测数据解算得到的角随机游走系数和零偏不稳定性系数与标称值相近,说明了 Allan 方差分析法辨识 MEMS 陀螺随机误差的有效性和正确性。

4 结语

介绍了 Allan 方差分析法基本原理,利用 Allan 方差分析法对 MEMS 陀螺实测数据进行了处理,给出了 Allan 标准差曲线,通过最小二乘拟合得到 MEMS 陀螺的主要随机误差系数,与数据手册中的标称值相近,验证了 Allan 方差分析法用于 MEMS 陀螺随机误差辨识的有效性。在进一步研究中,可对 Allan 方差分析法进行一定的修正,将 MEMS 陀螺实测数据的分组方式由等分式改为交叠式,以提高 MEMS 陀螺实测数据的利用效果,达到更高的 Allan 方差计算精度。

参考文献(References):

- [1] 张冀冠,丛琳,王小龙. 光纤陀螺在煤矿井下的应用研究[J]. 电子测试, 2016(14):125-126.
ZHANG Jiguan, CONG Lin, WANG Xiaolong. Research on the application of fiber optic gyroscope in coal mine[J]. Electronic Test, 2016(14):125-126.
- [2] 黄磊. 光纤陀螺随机噪声的建模与滤波[J]. 弹箭与制

- 导学报, 2013, 33(6): 27-30.
- HUANG Lei, Modeling and filtering methods of FOG random noise [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 27-30.
- [3] 赵思浩, 陆明泉, 冯振明. MEMS 惯性器件误差系数的 Allan 方差分析方法[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(5): 672-675.
- ZHAO Sihao, LU Mingquan, FENG Zhenming. Allan variance analysis on error coefficients of MEMS inertial components [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010, 40(5): 672-675.
- [4] 高宗余, 方建军, 于丽杰. MEMS 传感器随机误差 Allan 方差分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2863-2868.
- GAO Zongyu, FANG Jianjun, YU Lijie. Allan variance analysis for the stochastic error of MEMS sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2863-2868.
- [5] 张玉莲, 储海荣, 张宏巍, 等. MEMS 陀螺随机误差特性研究及补偿[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 501-510.
- ZHANG Yulian, CHU Hairong, ZHANG Hongwei, et al. Characterists and compensation method of MEMS gyroscope random error[J]. Chinese Optics, 2016, 9(4): 501-510.
- [6] 刘建业, 顾姗姗, 曾庆化, 等. 一种基于模糊控制的时变窗长动态 Allan 方差分析方法: CN201410632773.1 [P]. 2015-03-11.
- [7] 薛学铭. Allan 方差分析测量数据噪声特性的性能研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(6): 131-134.
- XUE Xueming. Study on properties of noise analysis with Allan variance [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(6): 131-134.
- [8] 赵思浩, 陆明泉, 冯振明. 基于一种简化 Allan 方差法的 IMU 误差分析[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(12): 12-14.
- ZHAO Sihao, LU Mingquan, FENG Zhenming. IMU error analysis based on a simplified Allan variance method [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(12): 12-14.
- [9] 耿丹, 许光明. 小型激光陀螺随机误差的 Allan 方差分析[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(1): 12-14.
- GENG Dan, XU Guangming. Random error analysis on small RLG with Allan variance [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(1): 12-14.
- [10] 张红磊. 陀螺随机误差的分析、建模与滤波研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [11] 厉宽宽, 陈允芳, 程敏, 等. MEMS-IMU 随机误差的 Allan 方差分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(6): 102-106.
- LI Kuankuan, CHEN Yunfang, CHENG Min, et al. Allan variance analysis for the stochastic error of MEMS-IMU[J]. GNSS World of China, 2016, 41(6): 102-106.
- [12] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [13] 张谦, 王玮, 王蕾, 等. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺随机误差分析及算法改进[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 65-71.
- ZHANG Qian, WANG Wei, WANG Lei, et al. Research on random errors of fiber optic gyro based on dynamic Allan variance and algorithm improvement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 65-71.
- [14] 董冀, 黄艳辉, 鞠莉娜. MEMS 陀螺随机误差的 Allan 方差辨识方法[J]. 集成电路通讯, 2015, 33(3): 29-33.
- [15] 王新龙, 李娜. MEMS 陀螺随机误差的建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 170-174.
- WANG Xinlong, LI Na. Error modeling and analysis for random drift of MEMS gyroscopes[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 170-174.