

光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究

王立辉^{1,2}, 伍雪峰², 孙健², 陆于平¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省电力试验研究院, 江苏 南京 210036)

摘要: 针对光纤电流互感器 (FOCT) 的随机噪声问题, 借鉴光纤陀螺 (FOG) 的性能分析方法, 分析 FOCT 的结构及原理, 系统地探讨 FOCT 随机噪声的种类、噪声误差因素及噪声误差抑制措施。结合 FOCT 噪声所体现出的时域相干性及频域特征, 引入 Allan 方差分析法及建模理论, 辨识并量化 FOCT 的各项噪声误差, 全面地评价 FOCT 性能。Allan 方差分析法及建模理论在 FOCT 数据处理中的应用结果表明, FOCT 输出数据中体现了角度随机游走、偏值不稳定性等不同特征的随机噪声, 同时证明了 Allan 方差噪声建模理论在 FOCT 噪声特征分析方面的可行性。

关键词: 光纤电流互感器; 随机噪声; 功率谱密度; 建模

Research on character and modeling method of noise in fiber optic current transducer (FOCT)

WANG Li-hui^{1,2}, WU Xue-feng², SUN Jian², LU Yu-ping¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Test and Research Institute, Nanjing 210036, China)

Abstract: Focusing on the problem of random noise in fiber optic current transducer (FOCT), this paper discusses systematically the noise category, influencing factors on noise, and methods of restricting noise based on the structure and principle of FOCT by reference of fiber optic gyroscope(FOG). Noise in FOCT shows different time domain coherence and various frequency domain features. According to the character, different types of noise are identified and quantified by introducing Allan variance and modeling theory to FOCT noise analyzing system, and FOCT performance is evaluated comprehensively. Results of Allan variance and modeling theory used in FOCT data processing show that FOCT output data display different random noises such as angle random walk, bias instability, etc. At the same time, the feasibility of Allan variance theory used in analyzing and modeling FOCT noise is proved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007007).

Key words: fiber optic current transducer(FOCT); random noise; power spectrum density; modeling

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0062-05

0 引言

基于 Farady 磁感应原理及数字闭环信号处理技术的光纤电流互感器 (Fiber Optic Current Transducer, FOCT), 克服了电磁式电流互感器、罗斯线圈和磁光玻璃等电子式电流互感器在准确度、动态范围以及直流测量等方面的局限性^[1-2], 不但基波测量准, 而且直流以及各次谐波都能准确测量, 具有动态范围宽、绝缘性能好、测量精度高等优点, 可以满足电能计量、电能质量监测、保护控

制、故障录波以及电网动态观测等领域不断发展的需求, 代表了电流互感器的发展方向。光纤电流互感器具有光纤陀螺仪 (Fiber Optic Gyroscope, FOG) 等光学传感器所共同面临的随机噪声问题, 该问题成为限制光纤电流互感器在电能计量应用的主要要素之一^[3], 光纤电流互感器随机噪声来源于光源相干噪声、光源强度噪声、光电探测器散粒噪声、电子器件热噪声、环境噪声、器件老化等各种因素所导致的时变噪声^[4]。尽管噪声源众多, 但是经过 FOCT 信号处理部分对包含非互易相位的干涉信号进行滤波、转换、信号处理之后, FOCT 输出数据所体现出来的特征主要包括有角度随机游走噪声、偏值不稳定性、速率随机游走噪声、速率斜坡噪声、量化噪声和正弦噪声等, 其中, 角速率随机游走噪

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20100471357); 国家自然科学基金项目 (51007007); 江苏省电力公司 2010 年科技项目

声、偏值不稳定性和速率斜坡噪声含量较大。由于 FOCT 在结构、原理等方面均不同于电磁式电流互感器及有源光电式电流互感器, 因此, 现有的关于电磁式电流互感器及有源光电式电流互感器的噪声分析及建模方法已经不适用于 FOCT。

从测量原理及系统结构等方面来看, FOCT 与光纤陀螺仪有很大的相似性, 都是建立在光波干涉原理基础上的新型的光学传感器, 目前, 光纤陀螺仪的噪声分析方法相对比较成熟^[5], 由于 FOCT 光波传输过程中在偏振态、相位偏移及光程等方面均区别于 FOG, 因此, 对 FOG 的噪声特性及分析方法也不完全适用于 FOCT。本文借鉴 FOG 的性能分析方法, 从理论上系统地分析 FOCT 所包含随机噪声的种类、来源及其特性, 结合噪声的时域及频域特征, 引入噪声分析方法及模型, 为 FOCT 的性能评估提供理论支持。

1 FOCT 原理及噪声特征

1.1 FOCT 原理

光纤电流互感器是建立在 Farady 磁光效应及 Sagnac 效应基础上的光学传感器, 通过闭环反馈系统实时测量光波非互易相位差引起的光波强度变化, 经过信号处理及数据处理之后, 获取与非互易相位成比例关系的被测电流信息。

根据光纤传感头的结构, FOCT 分为反射式 FOCT 及环形 FOCT, 二者虽然结构不尽相同, 但是光波传感原理及信号处理过程类似, 所体现出的噪声特征也基本相同, 本文以反射式 FOCT 为研究对象, 其原理结构如图 1 所示。图 2 为环形 OCT 的结构图。反射式 FOCT 光波传播过程可描述如下^[6]: 光源发出的光经过耦合器后由偏振器起偏, 形成线偏振光; 线偏振光以 45° 角注入保偏光纤, 被平均注入保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输; 当这两束正交模式的光经过 λ/4 波片后, 分别转变为左旋和右旋的圆偏振光, 进入传感光纤; 在传感光纤中由于传输电流产生磁场的法拉第效应, 这两束圆偏振光以不同的速度传输; 在由传感光纤端面的镜面反射后, 两束圆偏振光的偏振模式互换 (即右旋光变为左旋光, 左旋光变为右旋光), 再次穿过传导光纤, 并再次和电流产生的磁场相互作用, 使产生的相位加倍; 两束光再次通过 λ/4 波片后, 恢复为线偏振光, 并在光纤偏振器处发生干涉。

PIN 光电探测器测量的干涉电流信号为:

$$I = I_0 \cdot [1 + \cos(\Phi_s + \Phi_f + \Phi_j)] \quad (1)$$

其中: Φ_s 为 Farady 磁场引起的非互易相移; Φ_f 为

方波偏置相位 $\pm \pi/2$; Φ_j 为实时反馈相位。

在方波的正半周, $\Phi_f = \pi/2$, 干涉仪的输出信号为:

$$I_1 = A[1 - \sin(\Phi_s + \Phi_j)] \quad (2)$$

在方波的负半周, $\Phi_f = -\pi/2$, 干涉仪的输出信号为:

$$I_2 = A[1 + \sin(\Phi_s + \Phi_j)] \quad (3)$$

在 FOCT 的信号处理系统中, 将方波正半周信号和负半周信号相减可得:

$$\Delta I = -2A \sin(\Phi_s + \Phi_j) \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出, 通过闭环反馈使 $\Phi_j = -\Phi_s$ 可以保证 $\Delta I = 0$, 而当 $\Delta I \neq 0$ 时, 使用偏差量 ΔI 作为控制量去控制闭环反馈阶梯波发生器, 改变阶梯波在递增阶段产生的电压增量, 该电压增量与光波相移 Φ_j 满足关系式 (4), 通过闭环反馈控制始终使 $\Phi_s + \Phi_j = 0$, 在数字闭环系统达到平衡时, FOCT 光电探测器检测到的干涉信号为零电平, 阶梯波高度增量对应 FOCT 输出的电流信息。

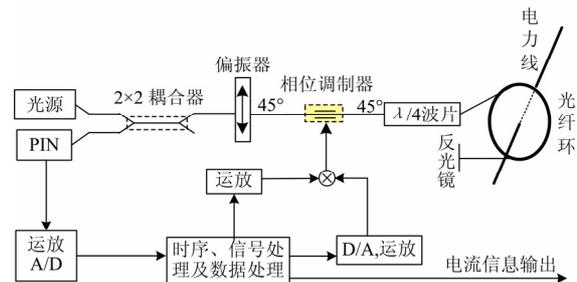


图 1 反射式 FOCT 的结构图

Fig.1 Structure of FOCT with reflection mirror

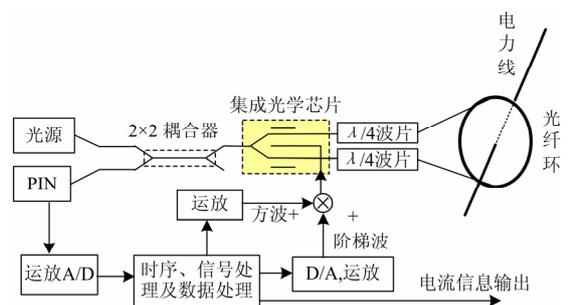


图 2 环形 FOCT 的结构图

Fig.2 Structure of FOCT with fiber loop

1.2 FOCT 噪声特征

实际系统中, FOCT 受温度、湿度、电磁干扰、光电器件老化、机械形变等众多因素及各种寄生效应的影响, FOCT 输出数据中包含了探测器散粒噪声、光源相对强度噪声、光纤热相位噪声、电路噪声和环境噪声, 这些噪声是时变的, 互相耦合且没

有准确的统计特性^[11-12], FOCT 噪声影响到 FOCT 在电力系统控制、保护、测量和计量等方面的精度和可靠性。以 Allan 方差为理论基础, 根据电力系统对 FOCT 性能的要求, FOCT 数据的噪声特征主要体现为如下几类。

(1) 角度随机游走噪声 (Angle Random Walk, ARW)

角度随机游走噪声体现了 FOCT 的极限精度, 是衡量 IFOG 噪声水平的重要指标。FOCT 中光电探测器 (PIN) 光子散粒噪声导致 FOCT 的 Farady 相移测量存在不确定性, 使电流测量存在一个极限, 散粒噪声还引起 PIN 前置放大器电流-电压反馈阻抗上的电流随机涨落, 电流随机涨落引起 FOCT 的伪 Farady 相移, 影响 IFOG 最小偏置稳定性, 决定了 FOCT 精度。ARW 是积分宽带速率功率谱密度的结果, 该噪声主要源于光电探测器散粒噪声、放大器噪声、电子器件热噪声和一些相关时间比采样时间短的高频噪声, ARW 的带宽一般小于 10 Hz。通过系统设计可以消除相关时间比采样时间短的高频噪声, 选用优质的光源、光电探测器等光电器件, 以及提高环境温度的稳定性也可有效抑制 ARW^[6]。

(2) 偏值不稳定性噪声 (Bias Instability, BI)

偏值不稳定性噪声体现了 FOCT 的偏置低频波动。BI 来源于 FOCT 中放电组件、等离子体放电、电路噪声、环境噪声以及其他可能产生随机闪烁的部件, 对 FOCT 进行可靠性设计并采取相应的滤波方法可抑制 BI。

(3) 速率随机游走噪声 (Rate Random Walk, RRW)

速率随机游走噪声代表了长相关时间的指数相关噪声的极限情况。RRW 是电流变化引起的相位值功率谱密度积分的结果, 该噪声伴随于谐振器的长期效应, 由白噪声通过积分器后产生的。降低晶振的老化效应可以抑制 RRW。

(4) 速率斜坡噪声 (Rate Ramp, RR)

速率斜坡在本质上是一种确定误差, 而不是随机误差。RR 是 FOCT 光源强度呈现极慢的单调变化并持续时间较长而引起的, 外界环境温度变化也引起 RR。保证光电器件以及 FOCT 工作环境的长期稳定性, 或者通过建立数学模型按确定误差补偿的方法进行补偿, 可以降低 RR。

(5) 量化噪声 (Quantization Noise, QN)

量化噪声代表了 FOCT 对电流信息的最小分辨率。FOCT 进行电流测量时, 干涉信号的采样值由 A/D 转换为数字量送入 FPGA (或者 DSP) 进行信号处理, 在测量间隔时间内, FOCT 测量的电流感应

电磁场相位并不是量化步长的整数倍, 信号的幅值随时间进行整量化, 便出现了量化误差。在采样速度要求很快的应用环境里, 会引起较大的 QN, 提高采集系统的精度、缩短初始采样时间可以减小 QN。

(6) 正弦噪声 (Sinusoidal Noise, SN)

正弦噪声是一种系统性误差, 其功率谱密度由几个不同频率表征。高频噪声是由于激光放电过程中等离子体振荡而产生的, 低频噪声是由于环境的周期性变化而引起测试平台的低速运动而引起的。当正弦噪声具有多峰值的正弦式波形时, 功率谱密度图更容易表现出 SN^[10]。

2 FOCT 随机噪声分析模型

Allan 方差法采用时频分析技术, 在时域上对 FOCT 数据的频域稳定性进行计算^[5,7], 分析 FOCT 随机噪声的特性, 并在双对数坐标图上利用曲线的斜率来分离和辨识各项随机误差的模型及其参数。Allan 方差定义为^[5,7]:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left(\bar{E}_{k+m}(\tau) - \bar{E}_k(\tau) \right)^2 \right\rangle \quad (5)$$

其中, $\langle \rangle$ 代表整体平均; 平均电流

$$\bar{E}_{k+m}(\tau) = \frac{w_{k+2m} - w_{k+m}}{\tau}; \quad \text{平均电流}$$

$$\bar{E}_k(\tau) = \frac{w_{k+m} - w_k}{\tau}; \quad \text{相关时间 } \tau = m \cdot \tau_0, \tau_0 \text{ 为最}$$

小采样周期; w_k 为 $k\tau_0$ 时刻所累计的电流量值。

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left(\bar{E}_{k+m}(\tau) - \bar{E}_k(\tau) \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{2\tau^2} \left\langle \left(w_{k+2m} + w_k - 2w_{k+m} \right)^2 \right\rangle \quad (6)$$

Allan 方差可以表示为:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2m)} \sum_{k=1}^{N-2m} \left(w_{k+2m} + w_k - 2w_{k+m} \right)^2 \quad (7)$$

FOCT 原始数据中, Allan 方差与噪声的功率谱密度 (PSD) $S_E(f)$ 之间存在式 (8) 量值关系:

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_E(f) \cdot F(f) df = 4 \int_0^\infty S_E(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (8)$$

式 (8) 表明, 当随机噪声通过传递函数 $F(f)$ 的滤波器时, Allan 方差与随机噪声的总能量成正比, 滤波器的带通取决于相关时间 τ , 通过调节相关时间 τ (即调节滤波器的带通) 可以检测不同类型的随机过程, Allan 方差估计的可信度随独立组数的增加

而提高^[9]。

FOCT 中不同类型的随机噪声误差项出现在不同的相关时间 τ 域, 不同类型的噪声所体现出的功率谱密度及与相关时间 τ 的函数关系均不相同, 假设各噪声误差项具有统计意义上的独立性, 可得综合的 Allan 方差 $\sigma_{\text{total}}^2(\tau)$ 为^[11]:

$$\sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n \quad (9)$$

其中, $A_n (n = -2, -1, 0, 1, 2)$ 分别对应于量化噪声、角度随机游走、偏值稳定性、角速率随机游走及速率斜坡各项噪声相关的拟合多项式系数。

$$\sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n = \frac{3Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2\ln 2}{\pi} B^2 + \frac{K^2}{3} \tau + \frac{R^2}{2} \tau^2 \quad (10)$$

式(10)中: Q 为量化噪声系数; N 为角度随机游走系数; B 为偏值不稳定性系数; K 为速率随机游走系数; R 为速率斜坡系数。

每种类型的噪声误差在 Allan 方差-相关时间双对数图上对应不同的斜率, 量化噪声、角度随机游走、偏值不稳定性、速率随机游走及速率斜坡对应的双对数函数的斜率分别为 -1、-0.5、0、0.5、1。

Allan 方差分析法在 FOCT 噪声分析及建模过程中的计算步骤为:

(1) 存储采样间隔时间为 t_0 的 n 个样本数据 $I_i (i = 1, 2, \dots, n)$;

(2) 对 n 个初始样本的连续数据进行二次采样, 采样时间为 $\tau = kt_0$, 分别取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0 (k < n/2)$, 按式(11)求出每一时间长度为 τ 的数组平均值

$$\bar{I}(\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k-1} I_i(t_0) \quad (11)$$

(3) 相邻数组平均值之差的随机变量集合 M 为:

$$M = \{I_{p+1}(\tau) - I_p(\tau), p = 1, \dots, n-k\} \quad (12)$$

(4) 求随机变量集合 M 的方差:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(n-k-1)} \sum_{p=1}^{n-k-1} [I_{p+2}(\tau) - 2I_{p+1}(\tau) + I_p(\tau)]^2 \quad (13)$$

(5) 选取不同的 τ , 得到 $\tau \sim \sigma(\tau)$ 的对应关系。

3 仿真与实验

选取 A、B 两种型号的 FOCT, 充分预热之后, 录取 FOCT 稳定工作状态下的输出数据, 应用 Allan 方差分析模型对该型号 FOCT 的随机噪声特性进行性能评估, 测试数据曲线及双对数评估曲线分别如图 3、图 4 所示。由图 3 中 Allan 方差分析模型中对不同类型噪声的辨识和估计结果可以看出, A 型号 FOCT 的角度随机游走、偏值不稳定性噪声是最主要的误差源, 速率随机游走及速率斜坡噪声则非常微弱。由图 4 中 Allan 方差分析模型中对不同类型噪声的辨识和估计结果可以看出, B 型号 FOCT 的量化噪声、角度随机游走、速率随机游走噪声是最主要的误差源, 偏值不稳定性、速率斜坡噪声的影响则非常微弱。

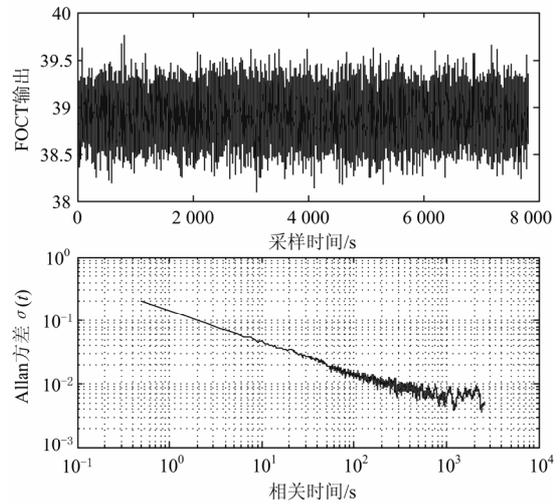


图 3 A 型号 FOCT 输出数据及其 Allan 方差曲线
Fig.3 Data curve and Allan variance log-log curve of A type FOCT

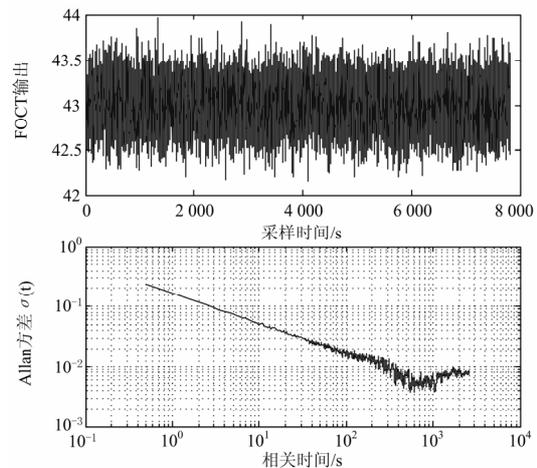


图 4 B 型号 FOCT 输出数据及其 Allan 方差曲线
Fig.4 Data curve and Allan variance log-log curve of B type FOCT

4 结论

FOCT 提高了电力系统控制、保护、测量和计量的准确性、实时性，增强了系统的可靠性，由于其具有一系列的优点，成为当前的研究热点。FOCT 系统测量原理涉及到电磁学、导波光学、相干光学、信号处理及数据处理等相关学科，复杂结构导致 FOCT 输出数据中包含了多种类型的寄生噪声。根据噪声的功率频谱特性及相干时间，分析 FOCT 主要类别的噪声特性，并依据功率谱密度函数建立 FOCT 噪声误差分析模型。试验结果表明，Allan 方差分析方法及建模技术能有效地分离并辨识影响 FOCT 精度的几项主要随机噪声的类型，通过分析曲线可以估算出相应的噪声误差量值，可以从整体上对 FOCT 的性能作出全面的评估，另外，通过分析不同类别的噪声量值，又可以完成 FOCT 噪声误差的误差源定位，既有利于提高 FOCT 研发过程中的性能，又有利于 FOCT 工程应用中的故障辨识与定位。

参考文献

[1] 王立辉, 杨志新, 殷明慧, 等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1890-1895.
WANG Li-hui, YANG Zhi-xin, YIN Ming-hui, et al. Simulation and test of dynamic performances of digital closed-loop fiber optic current transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1890-1895.

[2] 郭志忠. 电子式互感器评述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 1-5.
GUO Zhi-zhong. Review of electronic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 1-5.

[3] 李静, 杨以涵, 于文斌, 等. 电能计量系统发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 130-134.
LI Jing, YANG Yi-han, YU Wen-bin, et al. Review of electric energy metering system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 130-134.

[4] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20 (2): 267-276.

[5] IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyross[S]. Gyro and Accelerometer Panel of the IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE Std

952-1997.

[6] IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros[S]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, IEEE Std 647-2006.

[7] Klaus Bohnert, Philippe Gabus. Fiber optic current sensor for electrowinning of metals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25 (11): 3602-3609.

[8] Allan D W, Barnes J A. A modified Allan variance with increased oscillator characterization ability[C]. //Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium. 1981, 5: 470-475.

[9] HOWE D A. The total deviation approach to long-term characterization of frequency stability[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47 (5): 1102-1110.

[10] 周海波, 刘建业, 赖际舟. 干涉型光纤陀螺随机噪声的分析研究[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(11): 73-76.
ZHOU Hai-bo, LIU Jian-ye, LAI Ji-zhou. Research on IFOG random noise[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25 (11): 73-76.

[11] 马大千, 刘君, 李岩松, 等. 直流光电互感器信号检测技术的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 80-82.
MA Da-qian, LIU Jun, LI Yan-song, et al. Simulation research of the signal detection of DC optical current transducer[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 80-82.

[12] 韩军良, 葛升民, 沈毅. 基于总方差方法的光纤陀螺随机误差特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (5): 708-711.
HAN Jun-liang, GE Sheng-min, SHEN Yi. Research on the random error properties of FOG based on total variance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39 (5): 708-711.

收稿日期: 2010-01-10

作者简介:

王立辉 (1979-), 男, 博士, 主要研究方向为光纤陀螺及其捷联惯导系统、光纤电流传感器及光学电压传感器等。
E-mail: wlhseu@163.com

伍雪峰 (1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、智能监测等;

孙健 (1978-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力计量等。