

# 光纤陀螺动态寻北转位控制系统设计

周璐, 任磊, 谭新洪, 刘晴晴, 杜建邦

(宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854)

**摘要:** 针对光纤陀螺动态寻北仪实际应用中存在的转位误差以及高频测量噪声问题, 对寻北仪转位机构引入低通滤波和反馈回路, 设计出了一种新的转位控制系统, 有效地减小了由于光纤陀螺和转位机构的误差带来的系统误差, 从而提高了动态寻北仪的寻北精度; 实验结果表明, 相同条件下该控制系统能有效缩短寻北时间, 提高定位精度至 4", 具有较好工程实用前景。

**关键词:** 光纤陀螺; 动态寻北; 转位控制

## Transposition Control System Design of Dynamic North-seeking with Fiber Optic Gyroscope

Zhou Lu, Ren Lei, Tan Xinhong, Liu Qingqing, Du Jianbang

(State Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China)

**Abstract:** An effective transposition control system design is provided to reduce the system error from fiber optic gyroscope (FOG) and turntable and improves the accuracy of dynamic north-seeker focusing on the transposition error and high-frequency measurement noise of dynamic north-seeker with FOG in practice application, which can be reduced by adding low pass filter (LPF) and feedback circuit. The experimental results show that it has a good engineering application value for the control system for shorter time of seeking north and higher orientation accuracy of 4" comparing to the original system on the same condition.

**Keywords:** FOG; dynamic north-seeking; transposition control

### 0 引言

寻北仪通过测量地球自转角速度分量, 经过计算分析可以得出载体的北向信息。寻北仪可以在没有任何外界信息条件下, 利用成本相对较低的惯性传感器快速精确确定陆基运载体上当地垂线和真北方向<sup>[1]</sup>。影响寻北仪精度的误差有很多: 陀螺的漂移、陀螺仪平台调平误差、转位误差、基座振动误差及地磁场产生的多位置寻北误差等<sup>[2]</sup>。传统的二位置寻北法<sup>[3]</sup>和多位置寻北法可有效消除陀螺常值零偏的影响, 但算法对陀螺随机漂移误差的抑制效果并不明显, 而惯性器件误差是产生多位置寻北误差的主要原因<sup>[4]</sup>。

为进一步提高寻北仪精度, 近年来采用连续旋转方法的动态光纤陀螺寻北仪有了一定的研究进展。动态寻北是指在寻北过程中将光纤陀螺绕转台的垂直中心轴作连续恒速旋转, 根据陀螺在水平或倾斜面内的输出信号解算出初始方位角<sup>[5]</sup>。动态寻北的优点在于它变静态测量为动态测量, 通过转台连续的转动使陀螺的零偏和随机漂移受到周期性调制, 通过积分可以消除, 大幅提高了寻北的快速性和寻北精度<sup>[6]</sup>。缺点是动态寻北方案中转位误差将直接影响寻北算法的精度, 它和陀螺输出的高频噪声一起, 实际上是增大了系统的测量噪声。

本文通过对寻北仪转位机构引入低通滤波和反馈回路, 设计出了一种新的动态控制方法, 有效地避免了传统动态寻

北方法中由于转位误差和陀螺本身的误差带来的寻北误差, 从而提高了寻北仪的寻北精度。本文以单轴光纤陀螺寻北仪为例。

### 1 动态寻北仪系统组成及工作原理

如图 1 所示, 光纤陀螺垂直安装于转台上, 转台平面平行于水平面, 陀螺的敏感轴平行于转台平面。假设陀螺敏感轴与真北方向的夹角为  $\theta$ , 所在位置的地理纬度为  $\varphi$ , 利用力矩电机驱动转台做转速为  $\omega$  的连续恒速旋转。

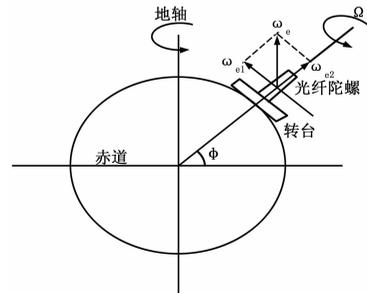


图 1 寻北仪与地球的位置关系

定义坐标  $X, Y, Z$  的方向分别指向东、北、天, 若安装 3 个光纤陀螺使其分别敏感地球自转角速度在这 3 个方向投影, 则初始时刻这 3 个陀螺的输出数学模型为 ( $k$  为光纤陀螺的标度因数):

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \sin\theta + \varepsilon(t) \\ k\omega_e \cos\varphi \cos\theta + \varepsilon(t) \\ k\omega_e \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (1)$$

当进行动态寻北时, 陀螺绕转台垂直轴以恒定的转速旋转, 旋转过程中陀螺的动态输出为<sup>[7]</sup>:

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-03-20。

基金项目: 总装预研基金项目。

作者简介: 周璐 (1983-), 女, 湖北荆州市人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事惯性导航技术方向的研究。

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \sin\theta + \varepsilon(t) \\ k\omega_e \cos\varphi \cos\theta + \varepsilon(t) \\ k\omega_e \sin\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \sin(\alpha + \theta) + \varepsilon(t)(\cos\alpha + \sin\alpha) \\ k\omega_e \cos\varphi \cos(\alpha + \theta) + \varepsilon(t)(\cos\alpha - \sin\alpha) \\ k\omega_e \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为陀螺在某一时刻相对初始位置所旋转的角度,  $\alpha = 2\pi f t_i$ ,  $\varepsilon(t)$  为陀螺的漂移, 包括随机漂移和零偏。

从式 (2) 可以看出, 在旋转过程中光纤陀螺的漂移受到周期调制。在本文所述的寻北系统中, 安装一只光纤陀螺使其敏感地球自转角速度在转台水平面的投影: 北向速度  $\omega_{e1}$ , 则陀螺的输出为

$$Y(t_i) = k\omega_e \cos\varphi \cos(2\pi f t_i + \theta) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

设  $f_s$  为采样频率,  $N_i$  为采样点数,  $t_i = N_i / f_s$ , 代入式 (3), 得

$$Y(t_i) = k\omega_e \cos\varphi \cos(2\pi N_i f / f_s + \theta) + \varepsilon(t) \quad (4)$$

整理得到

$$Y(t_i) = \begin{pmatrix} \cos 2\pi N_i f / f_s & -\sin 2\pi N_i f / f_s & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \cos\theta \\ k\omega_e \cos\varphi \sin\theta \\ \varepsilon(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

设在一个周期内的采样点数为  $N$ , 当转台的旋转速率和采样输出频率固定时, 式 (5) 可展开得

$$\begin{pmatrix} Y(t_1) \\ Y(t_2) \\ \vdots \\ Y(t_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\pi f / f_s * 1 & -\sin 2\pi f / f_s * 1 & 1 \\ \cos 2\pi f / f_s * 2 & -\sin 2\pi f / f_s * 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos 2\pi f / f_s * N & -\sin 2\pi f / f_s * N & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \cos\theta \\ k\omega_e \cos\varphi \sin\theta \\ \varepsilon(t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{令 } \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y(t_1) \\ Y(t_2) \\ \vdots \\ Y(t_N) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos 2\pi f / f_s * 1 & -\sin 2\pi f / f_s * 1 & 1 \\ \cos 2\pi f / f_s * 2 & -\sin 2\pi f / f_s * 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos 2\pi f / f_s * N & -\sin 2\pi f / f_s * N & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} k\omega_e \cos\varphi \cos\theta \\ k\omega_e \cos\varphi \sin\theta \\ \varepsilon(t) \end{pmatrix}, \text{ 则有 } \mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \text{ 根据最小二乘法可得}$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,  $x_1 = k\omega_e \cos\varphi \cos\theta$ ,  $x_2 = k\omega_e \cos\varphi \sin\theta$ , 即寻北方位角为  $\theta = \arctan(x_2 / x_1)$  (8)

由上述的解算原理可以看出, 在对数据进行实时处理过程中的样本值为陀螺在实际位置的输出量值, 而在对采集的数据进行拟合时把各个样本看成是陀螺在指令位置的输出量值, 由于转台在定位过程中很难保证指令位置和实际位置的完全重合, 存在一定的偏差, 这个误差定义为转位误差, 会对最终的

寻北精度产生影响。

对于动态寻北仪来说, 寻北的精度与转台的稳定性和转速的大小直接有关系。转速太大时, 寻北快速性好, 但动态寻北解算的重复性和精度都会降低, 不能满足实际应用的精度需求; 转速太小时, 寻北的稳定性好, 但寻北响应缓慢, 不能满足工程上的实时性要求<sup>[8]</sup>。

## 2 动态寻北仪转位控制系统结构

### 2.1 控制系统结构

动态寻北仪转位控制系统主要由一个固连于转台的光纤陀螺、接口电路、寻北计算机、电机驱动电路及转位机构等部分组成, 结构如图 2 所示。

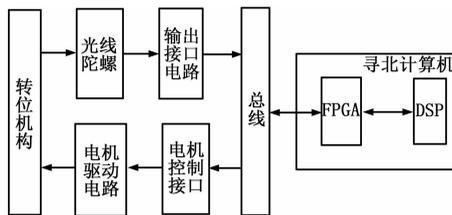


图 2 寻北系统结构图

陀螺的敏感轴方向与转台的旋转轴垂直, 转台调整为水平面。当寻北计算机给出初始信号使电机驱动转台开始旋转后, 固连于转台的光纤陀螺输出速率信号, DSP 将当前工作状态下陀螺输出的速率信息发送给 FPGA 分频, 根据 FPGA 分频后的转速, 计算机产生对应的控制信号控制驱动板动作实现电机转速驱动控制。

FPGA 作为 DSP 的协处理器, 可以看作是 DSP 外围存储器映射的 I/O 器件, 主要负责数据采集、通讯、系统控制和其它接口电路实现。DSP 作为主控制器通过地址总线、数据总线和控制总线访问 FPGA 以取得方位角解算需要的光纤陀螺传感器信息。

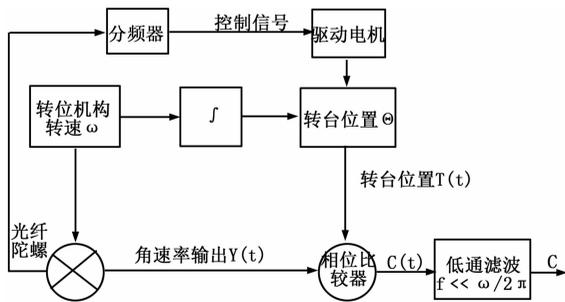


图 3 寻北系统的工作原理图

从式 (3) 可以看出, 当计算机对驱动电机发出控制信号后, 转台以一定速率匀速旋转, 陀螺的输出为一正弦曲线。而转台位置则通过计算机发出控制指令的时刻开始进行速率积分计算, 积分后也为一正弦曲线, 当系统存在转位误差时, 两曲线便会有相位差。

工作原理如图 3 所示。将转台的转速积分后得到的转台位置信息引入到光纤陀螺的输出回路中, 和光纤陀螺的速率输出作相位比较, 通过相位比较器计算出两者的相位差, 再通过低通滤波器 LPF 滤波后输出后进行寻北解算。其中, 转

台控制信号、相位比较器和滤波器均在寻北计算机软件中实现。

### 2.2 低通滤波及反馈回路

当在图 3 的基础上加上反馈回路, 将相位差通过低通滤波、积分、再反馈到转台的位置信息回路里, 便可校正由于转台的控制信号与陀螺实际输出位置的不同步带来的误差, 从而减小了在转台大转速情况下转位误差对寻北结果产生的影响, 使寻北的精度和实时性均得到了有效保证。

如图 4, 电机驱动转台输出不同的位置信号  $T(t)$  给相位比较器, 转台位置信号是由转台输出速率经过一个积分器得到的正弦信号。转台位置信号  $T(t)$  与光纤陀螺的输出信号  $Y(t)$  通过相位比较器得出两者之间的相位差, 相位比较器输出差分信号  $C(t)$  送至低通滤波器 LPF, 低通滤波器滤波后的信号经过积分器反馈给转台的位置计算形成闭环。而低通滤波器的功能是可以将陀螺的零偏分离出来, 并且较好地抑制了光纤陀螺信号中的高频测量噪声。

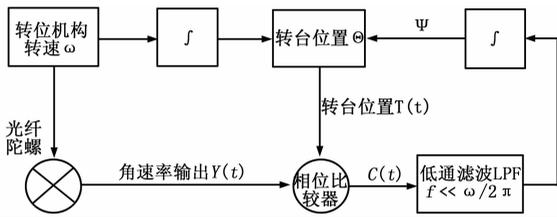


图 4 低通滤波及反馈回路原理图

### 3 控制系统寻北算法

根据直流力矩电机转台的数学模型<sup>[9]</sup>, 对转台机构转速的积分得到转台随时间  $t$  变化的位置为:  $\psi(t)$  为转台的初始相位角,  $\omega$  为转台旋转的角速度

$$T(t) = \omega \sin[\omega t + \psi(t)] \quad (9)$$

陀螺的输出为

$$Y(t) = k\omega_e \cos\varphi \cos(\omega t + \theta) + \varepsilon_0 \quad (10)$$

$$C(t) = K \cdot T(t) \cdot Y(t) = K \cdot \omega \sin(\omega t + \psi(t)) \cdot$$

$$[k\omega_e \cos\varphi \cos(\omega t + \theta) + \varepsilon_0] =$$

$$K \cdot [k\omega_e \cos\varphi \omega \sin(\omega t + \psi(t)) \cos(\omega t + \theta) + \varepsilon_0 \omega \sin(\omega t + \psi(t))] =$$

$$K \cdot \frac{1}{2} k\omega_e \cos\varphi \omega \sin(2\omega t + \psi(t) + \theta) +$$

$$K \cdot \frac{1}{2} k\omega_e \cos\varphi \omega \sin(\psi(t) - \theta) + K \cdot \varepsilon_0 \omega \sin(\omega t + \psi(t)) \quad (11)$$

式中的第一、三项为  $C(t)$  随时间变化的高频分量, 第二项为  $C(t)$  的直流量, 如图 4 所示, 当在  $C(t)$  后加上低通滤波器时, 高频分量被滤掉, 影响便可以忽略, 即

$$C(t) = k_0 \omega_e \cos\varphi \omega \sin(\theta - \psi(t)) \quad (12)$$

将低通滤波器 LPF 滤波后的信号经过积分反馈到转台的位置信息里, 调整对转台速率积分得到的转台位置量, 便可实现反馈量  $\psi(t) = 0$ 。且分频器做  $1/\omega$  的分频, 实现式 (12) 中  $k_0 = 1/\omega$ , 则式 (12) 可以简化为

$$C(t) = \omega_e \cos\varphi \sin\theta \quad (13)$$

将 1 节里的式 (3) 替换成式 (13) 做类似推导, 令

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y(t_1) \\ Y(t_2) \\ \vdots \\ Y(t_N) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sin 2\pi f / f_s * 1 & \cos 2\pi f / f_s * 1 & 1 \\ \sin 2\pi f / f_s * 2 & \cos 2\pi f / f_s * 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin 2\pi f / f_s * N & \cos 2\pi f / f_s * N & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \omega_e \cos\varphi \cos\theta \\ \omega_e \cos\varphi \sin\theta \\ \varepsilon(t) \end{bmatrix},$$

则有  $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X}$ , 根据最小二乘法可得

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $x_1' = \omega_e \cos\varphi \cos\theta, x_2' = \omega_e \cos\varphi \sin\theta$ , 即寻北方位角为

$$\theta = \arctan(x_2' / x_1') \quad (15)$$

以上是  $\theta$  的表达式。由式 (13) 可以看出, 若已知当地的纬度信息, 可以直接求出

$$\theta = \arcsin \frac{C}{\omega_e \cos\varphi} \quad (16)$$

其中, 转台的位置解码器精度决定了系统的精度。增益  $k_0$  可以根据实际情况灵活取值, 而不必精确等于  $1/\omega$ 。

除转位误差外, 光纤陀螺的标度因素非线性和不对称度是动态条件下影响其测量精度的主要误差源。但在寻北的解算过程中, 地球自转角速率在转台平面投影值较小, 光纤陀螺工作在其最灵敏的零位置附近, 与标度因素相关的误差得到了极大的抑制。因此, 标度因素非线性和不对称度对寻北结果影响极小<sup>[10]</sup>。

### 4 试验结果比较与分析

按照上述的控制系统寻北算法建立动态寻北系统, 光纤陀螺的输出采样频率为 400 Hz, 转台的调平误差为  $\pm 0.0056^\circ$ 。在计算过程中, 转台的调平误差忽略不计。在常温条件下选取一个完整的周期对 4 个不同初始位置的陀螺进行寻北解算, 每个位置测得 8 组数据, 比较之前未采用上述的控制系统寻北算法时所测得的数据, 其结果如表 1 所示。

表 1 改进前后寻北结果统计

标准方差/(°)	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
改进前	0.112 446	0.049 424	0.180 254	0.059 060
改进后	0.092 194	0.028 154	0.156 257	0.037 666

从表 1 的统计数据可看出, 当采用本文所述的新控制方法后, 光纤陀螺寻北仪寻北的精度有了明显的提高。当选用中低精度的 FOG 作为敏感元件, 采用上述方案寻北时间缩短为 3 min, 精度能达到  $4''$ 。

### 5 结论

在所有的寻北方案中, 动态寻北方案由于其具有静态寻北无法比拟的优势而备受研究者的关注。针对动态寻北的高精

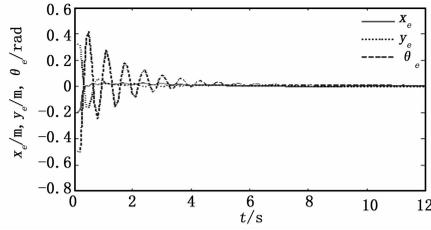


图 6 普通滑模控制误差曲线

进入稳态, 初始跟踪误差很快收敛到零。普通滑模控制误差 6 s 后才逐渐进入稳态, 而且误差曲线振荡严重。

仿真二: 在三维空间内控制 ROV 使其从  $x = 0, y = 3 \text{ m}, z = -2 \text{ m}$  沿期望轨迹到达  $x = 25 \text{ m}, y = 0, z = -15 \text{ m}$ , 平均误差信号为零。

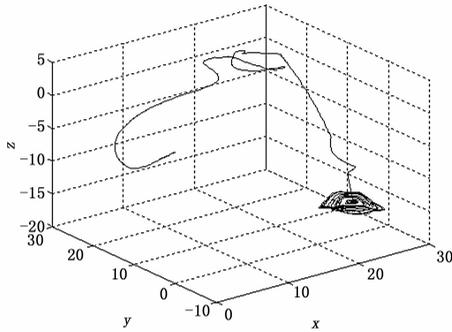


图 7 三维轨迹跟踪曲线

通过三维轨迹跟踪曲线图可以观察到, 系统能够较好的按照规划轨迹, 控制 ROV 到达参考的目标位置。在靠近目标点时有微小振荡但平均误差量趋近零。

### 4 结论

本文通过对 ROV 数学模型的分析, 设计了模糊滑模控制器, 并进行了稳定性分析。计算机仿真结果表明系统能够在干扰未知的情况下, 模糊自适应滑模控制相比普通滑模控制具有更好的全局稳定性和跟踪效果。

(上接第 2437 页)

度和快速性两者兼顾的需求, 本文设计的加入低通滤波回路去校正转台位置的新的转位控制方法, 有效地减小了转位误差和陀螺本身的误差对寻北精度的影响, 在较短时间内显著改善寻北仪的寻北精度, 是值得深入研究的一种较理想的动态寻北控制方法, 尤其是在实际工程应用方面, 本文具有一定的参考价值 and 借鉴意义。

### 参考文献:

[1] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology (2nd Edition) [M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2004: 196 - 197.

[2] 刘宇波, 高立民, 赵天宇. 光纤陀螺寻北仪误差系统分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 9 (36): 570 - 573.

[3] 高茂林, 赵忠, 张钧. 二位置陀螺寻北仪及转位误差分析 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (1): 70 - 71.

### 参考文献:

[1] 晏勇, 马培菀, 等. 深海 ROV 及其作业系统综述 [J]. 机器人, 2005, 27 (1): 82 - 89.

[2] 边宇枢, 高志慧, 等. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. 机械工程学报, 2007, 43 (7): 87 - 92.

[3] 黄海. 遥控潜水器的控制体系结构及作业技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[4] 唐旭东, 庞永杰, 李晔. 水下机器人运动的免疫控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11 (6): 676 - 680.

[5] 朱康武, 顾临怡. 作业型遥控水下运载器的多变量 backstepping 鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28 (10): 1441 - 1446.

[6] 俞建成, 张艾群, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制 [J]. 自动化学报, 2007, 33 (8): 840 - 846.

[7] Soylu S, Buckham B J, Podhorodeski R P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation [J]. Ocean Engineering, 2008, (35): 1647 - 1659.

[8] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, (58): 16 - 26.

[9] Ho H F, Wong Y K, Rad A B. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, (17): 1199 - 1210.

[10] Avila J P J, Donha D C, Adamowski J C. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles [J]. Ocean Engineering, 2013, (60): 81 - 94.

[11] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (3): 407 - 415.

[12] 曹永辉, 石秀华, 许晖. 水下航行器水平面运动的滑模控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25 (4): 337 - 341.

[13] 王一云, 严卫生, 等. 基于滑模变结构控制滤波的水下机器人水平面轨迹跟踪控制 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 382 - 385.

[14] Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller, Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56 (8): 670 - 677.

[4] 王立冬, 王夏霄, 张春熹. 光纤陀螺寻北仪多位置寻北误差分析 [J]. 压电与声光, 2007, 29 (1): 42 - 44.

[5] Pavlath G. Challenges in the development of the IFOG [A]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibition [C]. Austin, Texas, 2003: 11 - 14.

[6] 梁晓鹏. 基于光纤陀螺的寻北仪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 13.

[7] 郑秋丽. 光纤陀螺寻北仪误差分析及补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 18.

[8] 刘东波, 刘建业, 赖际舟. 基于光纤陀螺的单周快速动态寻北算法研究 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (11): 61 - 64.

[9] 于志伟, 曾鸣, 乔大鹏. 采用复合控制的直流力矩电机摩擦补偿 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12 (5): 539 - 544.

[10] 刘东波, 刘建业, 赖际舟. 应用小波变换的光纤陀螺动态寻北 [J]. 应用科学学报, 2008, 26 (1): 95 - 99.