

基于最小二乘法的光纤陀螺动态寻北算法研究

刘春桐, 吴荣晶, 李洪才, 张正义

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 相比于静态条件下的寻北方案, 动态寻北能够有效抑制光纤陀螺的各种随机误差, 大幅提高寻北快速性和定位精度。常见的动态寻北算法有最小二乘拟合法、数学函数调制解调法和单位函数调制解调法等。在最小二乘拟合法原理的基础上, 利用 Matlab/Simulink 仿真工具建立了两种寻北模型, 并对模型适用性进行了检验。通过建立模型研究了转台转速、采样频率、随机噪声、采样点数及常值漂移对光纤陀螺动态寻北结果的影响。仿真实验结果表明随机漂移噪声是影响寻北精度的关键因素。采样点对寻北结果的影响表明, 采样点数足够多时, 寻北误差趋于稳定, 可以实现残周期采样的寻北从而缩短寻北时间。

关键词: 光纤陀螺; 动态寻北; 最小二乘拟合; Simulink; 建模与仿真

中图分类号: V249.322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)06-0039-04

Dynamic North Seeking Algorithm of FOG Based on Least Square Method

LIU Chun-tong, WU Rong-jing, LI Hong-cai, ZHANG Zheng-yi

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Compared with the north seeking schemes under the static condition, the dynamic north seeking schemes can effectively restrain the random errors of the Fiber Optic Gyroscope (FOG), and greatly improve the accuracy and rapidity. Least square fitting method, mathematical function modulation/demodulation method and unit function modulation/demodulation method are common dynamic north seeking algorithms. In the paper, the principle of least square fitting algorithm is introduced and related formulas are deduced. Two north seeking models are established by Matlab/Simulink simulation tool and the applicability of the model is tested. The effects of rotation speed, sampling frequency, random errors, sampling points and constant drift on the dynamic north seeking result of FOG are studied by the established models. The simulation results show that the random drift noise is the key factor that affects the accuracy of the north seeking, and other factors also restrict the accuracy of the north seeking. The effect of sampling points on the results of the north seeking shows that the north seeking errors tend to be stable when sampling points are enough, and north seeking can be realized with the residual period sampling and north seeking time can be shortened.

Key words: fiber optic gyroscope; dynamic north seeking; least square fitting; Simulink; modeling and simulation

0 引言

光纤陀螺寻北仪通常采用静态寻北方案, 包括二位置方案、四位置方案和多位置方案等^[1-3]。光纤陀螺静态寻北方案是指将光纤陀螺垂直安装在旋转台

上, 转台面与水平面平行, 先静态采集光纤陀螺在初始位置时的输出, 然后依次转动光纤陀螺到指定位置后静止再采样; 当所有位置的数据都采集完成后, 使用相应的寻北算法解算寻北结果^[4]。静态寻北方案需要精确地转到指定位置后再采样, 这对旋转机构提出了很高的要求。为了达到较高的精度需要对多个位置进行数据采集, 这必然使寻北时间延长。

与传统的静态寻北方案相比, 基于连续旋转的动态寻北方案能够通过连续的恒速旋转使陀螺信号受到周期性的调制, 可以有效抑制光纤陀螺的零偏和随机

收稿日期: 2016-06-02

修回日期: 2016-07-05

基金项目: 陕西省自然科学基金(2015JM4128); 国家自然科学基金(41404022)

作者简介: 刘春桐(1972—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 教授, 研究方向为定位定向与基准传递技术。

漂移,提高寻北精度,缩短寻北时间^[5-6]。静态寻北方案主要用于精度要求不高、实时性要求较高的场合,尤其是二位置法;动态寻北方案则用于精度要求高、实时性要求相对宽松的场合。但就总体而言,动态寻北方案能更好地抑制各种误差源对寻北精度的影响,是值得研究和采用的一种较理想的寻北方案。

根据解算方式不同,动态寻北算法主要有最小二乘拟合算法、数学函数调制解调算法和单位函数调制解调算法等。本文主要研究最小二乘拟合算法,利用该方法进行动态寻北时,可以根据精度和实时性要求的不同,灵活调整相关参数,操作简单,系统稳定性好。但是相比于数学函数调制解调算法,该算法较为复杂,寻北实时性较差。本文通过 Simulink 仿真工具建立了寻北模型并进行最小二乘法的寻北解算。

1 光纤陀螺动态寻北原理

虽然光纤陀螺寻北解算的方式各有不同,但其基本原理都是通过敏感地球自转角速率 ω_{ie} 在地理坐标系中的水平分量 ω_{ie}^b , 解算出载体纵轴向与真北的夹角或直接确定北向所在的方位^[7], 实现自主定向。

动态寻北算法是指在寻北过程中,陀螺随转台从初始位置开始,以 Ω 恒速绕垂直轴连续转动,并实时地对陀螺输出值进行采样;然后根据不同的算法直接解算出地球自转角速率北向分量所在的位置或解算出载体纵轴与地理北向的初始夹角^[8-9]。其原理如图1所示。

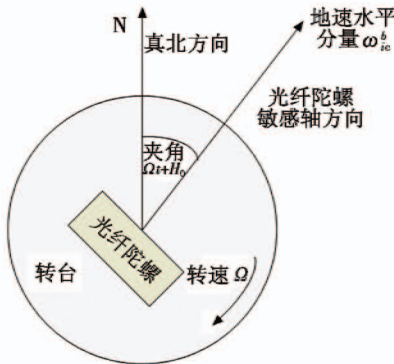


图1 光纤陀螺动态寻北原理示意图

Fig. 1 Dynamic north seeking principle of FOG

$$\begin{cases} \hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2) + \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - n \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i) + \sum_{i=1}^n \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i)}{n \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i + 2 \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - n (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2} \\ \hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - n \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i) + \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \omega_{outi} (n \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2) + \sum_{i=1}^n \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i - \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i)}{n \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i + 2 \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - n (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2} \\ \hat{\varepsilon}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i - \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i) + \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i - \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i) + \sum_{i=1}^n \omega_{outi} (\sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2)}{n \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i + 2 \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i - (\sum_{i=1}^n \cos \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i)^2 \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - n (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2} \end{cases} \quad (8)$$

2 最小二乘拟合算法

当光纤陀螺随转台以恒定角速率 Ω 转动时,地球自转角速率水平分量在载体纵轴上的投影为

$$\omega_{ie}^b = \omega_{ie} [\cos L \cos \theta \cos(2\pi f t_i + H_0) + \sin \theta \sin L] \quad (1)$$

式中: $\omega_{ie} = 15.041\ 08$ ($^\circ$)/h 为地球自转角速率; L 为载体所在的地理纬度值; H_0 为载体纵轴与地理北向的初始夹角; θ 为俯仰角; 转台角速率 $\Omega = 2\pi f$, f 为转台的旋转频率。

由于陀螺本身漂移、数据采集电路热噪声(高频噪声)等多种因素的存在,其实际输出含有多项随机误差^[10]。因此,理论上光纤陀螺的动态实际输出模型可表达为

$$\omega_{outi}(t_i) = K\omega_{ie} [\cos L \cos \theta \cos(2\pi f t_i + H_0) + \sin \theta \sin L] + \varepsilon_0 + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: K 为光纤陀螺的标度因数; ε_0 为陀螺的常值零偏; ε_i 为陀螺包含白噪声在内的随机漂移项。

在理想的实验条件下,可将光纤陀螺固定在已调平的转台上,即 $\theta = 0^\circ$, 而转台以恒定的角速率 Ω 转动时,光纤陀螺的输出模型可简化为

$$\omega_{outi}(t_i) = K\omega_{ie} \cos L \cos(\Omega t_i + H_0) + \varepsilon_0 + \varepsilon_i \quad (3)$$

将式(3)展开得到

$$\omega_{outi}(t_i) = K\omega_{ie} \cos L \cos \Omega t_i \cos H_0 - K\omega_{ie} \cos L \sin \Omega t_i \sin H_0 + \varepsilon_0 + \varepsilon_i \quad (4)$$

令 $\theta_i = \Omega t_i$, $A = K\omega_{ie} \cos L \cos H_0$, $B = -K\omega_{ie} \cos L \sin H_0$, 且暂不考虑常值漂移项的影响,则有

$$\omega_{outi}(t_i) = A \cos \alpha_i + B \sin \alpha_i + \varepsilon_i \quad (5)$$

对式(5)进行最小二乘参数估计,可以求出 A 和 B 的估计值分别为

$$\begin{cases} \hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \omega_{outi} \cos \theta_i - \sum_{i=1}^n \omega_{outi} \sin \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2} \\ \hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \omega_{outi} \sin \theta_i - \sum_{i=1}^n \omega_{outi} \cos \theta_i \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

考虑常值漂移误差项的影响,则有

$$\omega_{outi}(t_i) = A \cos \alpha_i + B \sin \alpha_i + \varepsilon_0 + \varepsilon_i \quad (7)$$

对式(7)进行最小二乘参数估计,可以求出 A , B 和 ε_0 的估计值为

由式(6)和式(8)可知,考虑常值漂移时,最小二乘拟合算法的复杂程度会增加很多,但是可以得到常值漂移值。得到 \hat{A} 和 \hat{B} 后根据它们的符号可以判断出初始夹角的方位。以真北方向为起点顺时针为正,逆时针为负,则初始夹角的方位范围为 $[-180^\circ, +180^\circ]$ 。方位角 H_0 为

$$H_0 = \begin{cases} \arctan\left(-\frac{\hat{B}}{\hat{A}}\right) & \hat{A} > 0 \text{ 且 } \hat{B} > 0 \\ \arctan\left(-\frac{\hat{B}}{\hat{A}}\right) & \hat{A} > 0 \text{ 且 } \hat{B} < 0 \\ \arctan\left(-\frac{\hat{B}}{\hat{A}}\right) + 180 & \hat{A} < 0 \text{ 且 } \hat{B} < 0 \\ \arctan\left(-\frac{\hat{B}}{\hat{A}}\right) - 180 & \hat{A} < 0 \text{ 且 } \hat{B} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

3 基于 Simulink 的寻北模型建模

由式(3)可知,转台连续恒速旋转时光纤陀螺的理论输出是正弦响应。可以用正弦信源模块模拟光纤陀螺的理论输出,改变模块参数可以改变转台的转速 Ω 和初始方位角 H_0 。通过正弦输出信号叠加高斯噪声模拟陀螺的随机漂移噪声,输出信号可以模拟实际光纤陀螺的输出。模拟的输出信号叠加常值可以模拟常值漂移,通过采样率转换模块改变数据采样频率,光纤陀螺输出模型如图 2 所示。

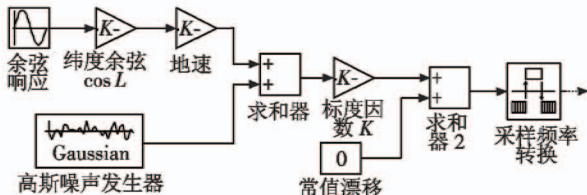


图 2 光纤陀螺输出模型图
Fig. 2 Output model of FOG

根据式(6)和式(8),通过 Simulink 建立最小二乘解算模型,由于篇幅原因这里不再列出模型。

4 仿真实验

根据上文中所建立的寻北解算模型,对光纤陀螺寻北解算进行相关研究。初始仿真参数设置如下:载体纵轴与真北方向初始夹角为 $+45^\circ$,地球自转角速度设为 $15^\circ/\text{h}$,纬度设为北纬 30° ,标度因数取 1191,随机漂移噪声均值为 0,方差为 $1 \times 10^{-10} (\text{mV})^2$,常值漂移为 0,采样频率为 1 Hz,转台转速为 $0.1^\circ/\text{s}$ 。

4.1 转台转速对寻北结果的影响

转台转速分别设置为 $0.1^\circ/\text{s}, 0.5^\circ/\text{s}, 1^\circ/\text{s}$,

$2^\circ/\text{s}, 3^\circ/\text{s}, 4^\circ/\text{s}, 5^\circ/\text{s}$ 和 $10^\circ/\text{s}$,转台旋转一周采样完毕,其他参数不变。根据仿真结果绘制不同转速下寻北误差的曲线图,如图 3 所示。

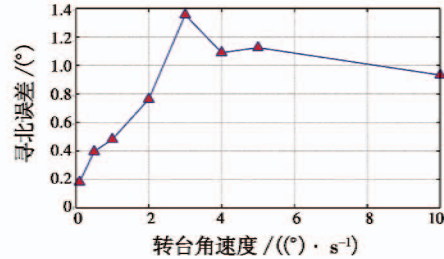


图 3 不同转速下的寻北误差

Fig. 3 North seeking error under different rotation speeds

由图 3 可知,随着转台转速的提高,寻北误差有上升的趋势,应该使转台低速旋转。但是转速降低必然会增加寻北时间,例如当转速为 $0.1^\circ/\text{s}$ 时,采样一周寻北时间超过 1 h,因此应该综合考虑寻北时间和精度要求确定转台转速。由图可以确定转台转速在 $1 \sim 2^\circ/\text{s}$ 之间比较合适,寻北时间可以控制在 6 min 左右。

4.2 采样频率对寻北结果的影响

转台旋转一周采样结束,改变采样频率,观察不同转速下采样频率对寻北结果的影响。设置采样频率分别为 1 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 50 Hz 和 100 Hz,观察转速为 $1^\circ/\text{s}, 2^\circ/\text{s}, 3^\circ/\text{s}$ 和 $4^\circ/\text{s}$ 时不同频率对寻北结果的影响。绘制各转速下不同采样频率的寻北误差曲线如图 4 所示。

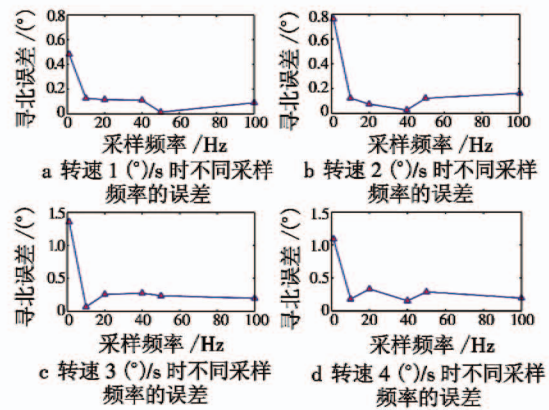


图 4 不同转速下采样频率对寻北结果的影响

Fig. 4 Influence of sampling frequency on north seeking result

由图 4 可知,不同转速下,随着采样频率的增加寻北误差有下降趋势。但是采样频率变大,数据计算量也会增加,相应的硬件成本会增加。由图可以确定采样频率在 40 ~ 50 Hz 之间时,寻北误差较小,数据计算量也不大。

4.3 随机漂移噪声对寻北结果的影响

在初始仿真参数设置下改变随机漂移噪声的方差。

分别设置高斯噪声的方差为 $10^{-8}, 10^{-9}, 10^{-10}, 10^{-11}$ 和 10^{-12} , 方差的单位为 $(mV)^2$, 比较不同噪声参数下的寻北结果。不同噪声参数下光纤陀螺的输出如图 5 所示。由图 5 可知, 噪声系数较大时, 周期信号完全被噪声淹没。

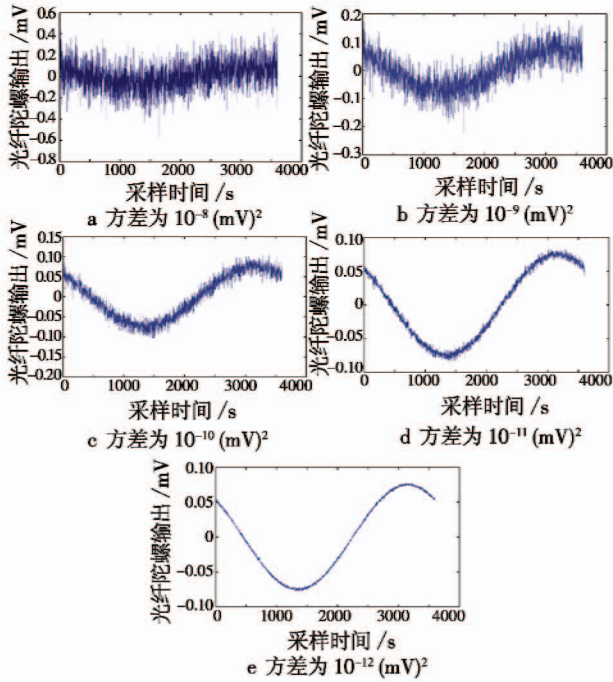


图 5 不同噪声参数下光纤陀螺的输出

Fig. 5 Output of FOG under different noise parameters

各转速在不同噪声系数下的寻北误差曲线如图 6 所示。

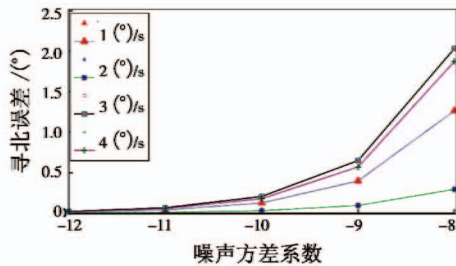


图 6 不同噪声参数下寻北误差图

Fig. 6 North seeking errors under different noise parameters

由图 6 可知, 噪声系数减少一个数量级, 寻北误差大大减小。可见随机漂移是影响寻北误差的关键因素, 由图 6 可以看出, 当转速为 $2 (^\circ)/s$ 时, 寻北误差比较小。因此, 在进行最小二乘法寻北解算时, 应该先对采样数据进行滤波去噪处理。

4.4 采样点数对寻北结果的影响

为了研究采样点数对寻北结果的影响, 研究各转速下不同采样点数时的寻北结果。转台旋转一周, 采样完毕。绘制各转速下不同采样点数对应的寻北误差, 如图 7 所示。

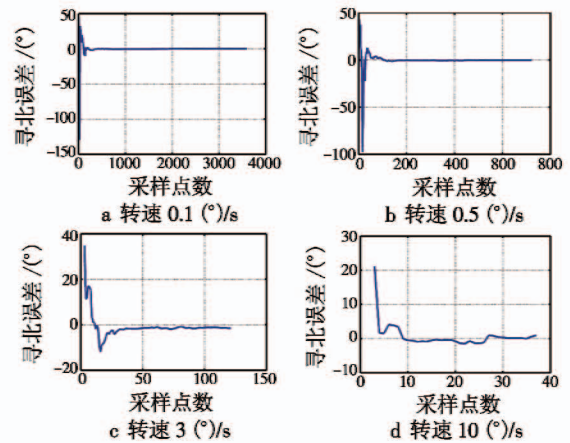


图 7 各转速下采样点数对寻北结果的影响图

Fig. 7 Influence of sampling point quantity on north seeking result

由图 7 可知, 当采样点数达到一定数量时, 寻北误差趋于稳定且接近 0。当转速较低时, 寻北误差在半个周期之前就已经达到稳定, 而转速较大时, 整个周期结束时寻北误差也未达到稳定。因此, 当转速较低时, 可以实现残周期寻北, 即采样时间在一个周期内就可以实现指定精度的寻北, 这样可以保证寻北精度不变的同时缩短寻北时间; 当转速较高时, 可以适当延长采样时间从而提高寻北的精度。

4.5 常值漂移对寻北模型及寻北结果的影响

上述仿真实验中都忽略了常值漂移, 常值漂移设置值为 0。现将常值漂移设置为 $0.121 (^\circ)/h$, 对应光纤陀螺的输出为 $0.04 mV$, 观察采样 10 个周期转速为 $1 (^\circ)/s$ 时的寻北误差, 结果如图 8a 所示。

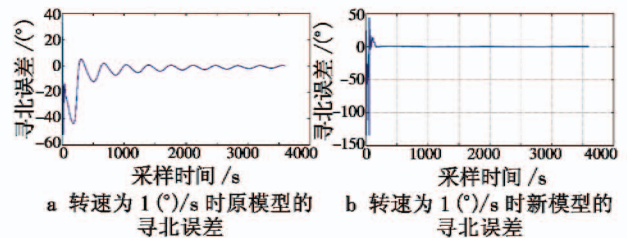


图 8 考虑常值漂移时寻北误差图

Fig. 8 North seeking error with constant drift

由图 8a 可知, 加入常值漂移后, 寻北误差在零值附近发生周期性震荡而不是收敛于常值, 因此该模型不再适用。改用式(8)建立的最小二乘算法模型进行寻北解算, 其他参数不变得到的寻北结果如图 8b 所示。由图 8b 可见, 采用新模型得到的寻北误差再次趋于稳定, 说明该模型适用于加入常值漂移后的寻北解算。此外, 该模型解算得到常值漂移结果为 $0.122 (^\circ)/h$, 与给定的常值漂移值 $0.121 (^\circ)/h$ 相符。以上结果验证了该模型的适用性和正确性, 但是由于该模型相当复杂, 计算量大大增加, 从而增加了寻北时间。

(下转第 87 页)

故障隔离,设置测点 t_8 ,可将故障确定在故障集 $\{fm_3, fm_{12}, fm_{13}, fm_{19}\}$ 中;设置测点 t_{26} ,则可隔离故障 fm_{12} 。故障隔离流程用树状图结构表示,如图6所示。

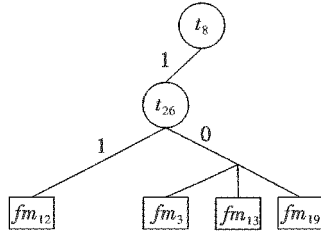


图6 测点优化后诊断树示意图

Fig.6 Schematic diagram of the diagnosis tree after test point optimization

优化结果表明,对于隔离信号标准化板故障 fm_{12} ,只需要设置测点 $[t_8, t_{26}]$,比较优化前的结果,测点少了两个,测试成本由 17.3 降到 6.8,节约成本开销 60.69%。假定每个测试所需时间相同,则故障诊断效率提高 50%。

4 结束语

某型飞机武器发控通道信号种类多,交联关系复杂,故障诊断效率低,通过测点选择研究可有效提高故障诊断效率。仿真结果表明,本文设计的启发式测试优化方案能够在满足系统测试性指标的要求下准确、

快速地找到最佳测点集,对提高故障诊断效率具有一定的现实意义。

参考文献

(上接第42页)

5 结束语

本文通过 Matlab/Simulink 仿真工具建立了最小二乘算法寻北解算模型。仿真实验研究了转台转速、采样频率、随机噪声、采样点数及常值漂移对光纤陀螺动态寻北结果的影响。实验表明,寻北误差随着转台转速增加具有上升趋势,随着采样频率的增加具有下降趋势。结果表明,随机噪声是影响寻北结果的关键因素,在寻北解算前应对采集的数据进行滤波去噪预处理。当采样点数足够多时,寻北误差趋于稳定值并能达到相应寻北精度。对于低转速可以进行残周期采样寻北,采样时间小于 1 个周期即可达到寻北精度从而缩短寻北时间。例如,采样频率为 1 Hz、转速为 0.1 ($^{\circ}$)/s,采样点数达到 500 时即可稳定,采样时间可以缩短到 1/7 个周期。对于较高转速,可以进行多个周期的采样寻北,提高寻北精度。最后验证了本文中 2 个寻北解算模型的适用性,结果表明,新模型适用于加入常值漂移后的寻北解算,并能够准确计算出常值漂移的值。

参考文献

[1] 郭喜庆,黄蕾,刘伟. 基于光纤陀螺零偏稳定性的高精

- [1] 孙隆和. 网络信息环境中的飞机(飞行作战平台)武器火力指挥控制系统[J]. 电光与控制,2010,17(3):1-8.
- [2] YANG C, TIAN S, LONG B. Application of heuristic graph search to test-point selection for analog fault dictionary techniques[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(7):2145-2158.
- [3] 邱静,刘冠军,杨鹏,等. 装备测试性建模与设计技术[M]. 北京:科学出版社,2012:136-148.
- [4] DEB S, DOMACALA C, SHRESTHA R, et al. Model-based testability assessment and directed trouble shooting of shuttle wiring systems[C]//Proc. SPIE 4389, 2001:163-173.
- [5] 朱喜华,李颖晖,李宁,等. 基于改进离散粒子群算法的传感器布局优化设计[J]. 电子学报,2013,41(10):2104-2108.
- [6] 吕晓明,黄考利,连光耀. 基于多信号流图的分层系统测试性建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1151-1155.
- [7] 杨述明,邱静,刘冠军. 面向装备健康管理的可测性指标研究[J]. 国防科技大学学报,2012,34(1):72-77.
- [8] 雷英杰,张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2014:32-46.

度寻北方案[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(3):258-260.

- [2] 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.
- [3] 沈军,缪玲娟,吴军伟,等. 基于 RBF 神经网络的光纤陀螺启动补偿及应用[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):119-124.
- [4] 段苛苛. 基于光纤陀螺的寻北系统关键技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [5] 王彬,翁海娜,刘畅,等. 正交检测技术在光纤陀螺寻北仪中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2013,21(2):164-168.
- [6] 段苛苛,李邓化. 光纤陀螺寻北仪连续旋转寻北方案及算法研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(4):801-806.
- [7] 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.
- [8] 刘宇,王长文,王乐,等. 基于光纤陀螺的残周期正弦拟合快速寻北法[J]. 压电与声光,2015,37(6):1020-1024.
- [9] 任鸿飞,李岁芳,牛振中,等. 旋转调制寻北方法的误差研究[J]. 计算机仿真,2013,30(3):72-75.
- [10] 王超. 光纤陀螺随机漂移的建模、分析和补偿[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.