

光纤陀螺的角加速度误差分析与实验研究

高鑫^{1,2}, 严吉中¹, 谢良平^{1,2}, 王京献^{1,2}

(1. 西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中航捷锐(北京)光电技术有限公司, 北京 101500)

摘要:角加速度误差是光纤陀螺的一项动态误差,该误差会引起光纤陀螺捷联惯导系统的姿态误差,制约捷联惯性导航系统在高动态应用条件下的精度。针对这种情况,在光纤陀螺闭环控制模型的基础上建立了闭环光纤陀螺的角加速度误差模型,并分析了影响角加速度误差的几项重要因素,包括控制回路总增益及控制周期等;随后给出了减小该误差的方法。基于等效输入原理,通过在反馈阶梯波上叠加斜坡信号,分别在不同条件下对闭环光纤陀螺的角加速度误差进行了测试实验。实验结果表明,不同角加速度和控制回路总增益条件下的角加速度误差测试值与理论计算值基本一致,验证了该误差模型的正确性。

关键词:角加速度误差;动态特性;光纤陀螺;自主测试

中图分类号:U666.1;TN253

文献标识码:A

Analysis and Experimental Research on Angular Acceleration Error of FOG

GAO Xin^{1,2}, YAN Jizhong¹, XIE Liangping^{1,2}, WANG Jingxian^{1,2}

(1. Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Aviation Gyro (Beijing) Photoelectricity Technology Co. Ltd., Beijing 101500, China)

Abstract: As a dynamic error of fiber optic gyroscope (FOG), angular acceleration error will induce attitude error into FOG strap-down inertial navigation system and constrain the performance of the system under severe angular motion. Based on the dynamic model of closed-loop FOG, angular acceleration error model is setup and its determined factors (including the total gain and period of the control loop of the FOG) are analyzed. Correspondingly, the angular acceleration error decrease method is proposed. In order to exam this model, the angular acceleration error of the closed-loop is tested by applying a slope signal to the feedback step-wave of the FOG, based on the equivalent input principal. And the test result under different angular acceleration and total gain of different control loop is in accord with the model.

Key words: angular acceleration error; dynamic characteristics; fiber optic gyroscope; self-test

0 引言

在光纤陀螺捷联惯导系统中,光纤陀螺主要用来敏感载体相对于惯性空间的角运动,以得到载体的空间姿态信息。载体在一些特殊的动态条件下,如摇摆运动、螺旋运动等,将产生角加速度,角加速度会引起光纤陀螺的角速率测量误差,这种角加速度误差是光纤陀螺的一项动态误差,会引起惯导系统的姿态误差^[1]。该项误差制约了光纤陀螺捷联系统在高精度、高动态、大机动应用环境下的精度^[2],因此有必要研究角加速度误差的产生机理和抑制方法。文献[3]通过仿真分析得出,角加速度在存在的条件下,陀螺的输出存在误差,且该误差由功率的波动引起。文献[4]通过转台实验,对比转台实际转速与陀螺输出,验证并得出了存在角加速度情况下陀

螺输出存在误差的结论,并通过多项式拟合法来补偿该项误差。目前,对光纤陀螺角加速度误差的研究还不完善。

针对上述情况,本文基于光纤陀螺的闭环控制模型,计算了系统误差传递函数,从理论上建立了光纤陀螺角加速度误差的模型,并提出了光纤陀螺角加速度误差的影响因素及其改善方法。同时基于等效输入原理^[5-6],通过在反馈阶梯波上叠加斜坡信号的方法,实际测试了光纤陀螺的角加速度误差,对所建立的误差模型进行了验证。

1 光纤陀螺角加速度误差建模

1.1 光纤陀螺的误差传递函数

闭环光纤陀螺通过集成光学调制器进行相位偏置调制与反馈补偿,使光纤陀螺始终工作在相位偏

收稿日期:2012-12-13

基金项目:中航工业集团创新基金资助项目(2009D61812)

作者简介:高鑫(1987-),男,湖北宜昌人,硕士,主要从事高精度光纤陀螺信号处理技术的研究。

置点。相位解调通过前放电路、A/D 转换器及现场可编程门阵列器件(FPGA)芯片实现,而相位反馈补偿则由 FPGA 进行积分运算形成的反馈阶梯波通过 D/A 转换器施加到集成光学调制器实现。光纤陀螺的闭环检测与反馈过程可近似简化为一个线性离散控制模型。闭环控制回路的结构及其参数决定光纤陀螺动态特性。根据光纤陀螺的闭环工作原理,得到闭环光纤陀螺的简化控制模型如图 1 所示^[7-9]。

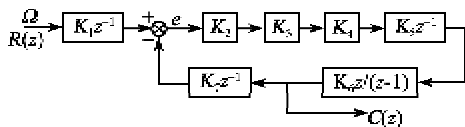


图 1 FOG 简化控制模型框图

在光纤陀螺简化控制模型中,外界转速输入 Ω 导致的 Sagnac 效应和光纤环的延时作用可简化为比例环节 K_1 和纯延时环节 z^{-1} 的乘积;正反两路光束的干涉、光电转换和前置放大电路,均可用比例环节近似等效,分别记为 K_2 、 K_3 、 K_4 ;A/D 采样环节可近似为 K_5 和 z^{-1} 的乘积;一阶积分控制器简化为 K_6 和积分环节 $z/(z-1)$ 的乘积;反馈值通过累加产生阶梯波经 D/A 转换器后施加到集成光学调制器上进行相位补偿,阶梯波积分环节与相位调制差分环节刚好抵消,反馈通道可简化为 K_7 和 z^{-1} 的乘积。补偿后的相位残差用 e 表示。

由简化的离散控制模型可计算得到闭环光纤陀螺的系统传递函数为

$$G(z) = C(z)/R(z) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6}{z^2 - z + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \quad (1)$$

则系统的误差传递函数为

$$G_E(z) = E(z)/R(z) = \frac{K_1(z-1)}{z^2 - z + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \quad (2)$$

1.2 光纤陀螺角加速度误差模型

根据光纤陀螺的误差传递函数可计算出光纤陀螺在不同角运动条件下的测量误差。

当外界转速输入为单位阶跃信号时,光纤陀螺的相位残差为

$$G_E(z) = E(z)/R(z) = \frac{K_1(z-1)}{z^2 - z + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \cdot \frac{z}{z-1} \quad (3)$$

根据终值定理,系统稳定时的相位残差为

$$E_{s1} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot E(z) = 0 \quad (4)$$

由式(4)表明光纤陀螺可无静差地跟踪恒定角运动。

当外界转速输入为单位斜坡信号,亦即光纤陀螺敏感 1 rad/s^2 大小的匀角加速度运动时,光纤陀螺的相位残差为

$$E(z) = G_E(z)R(z) = \frac{K_1(z-1)}{z^2 - z + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \cdot \frac{Tz}{(z-1)^2} \quad (5)$$

式中 T 为控制周期,由光纤环渡越时间决定。根据终值定理,系统的稳态误差为

$$E_{s2} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \cdot E(z) = \frac{K_1 T}{K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \quad (6)$$

由式(4)表明,外界输入恒定角加速度时,光纤陀螺不能完全补偿转动引起的相位差。

从闭环输出看,当外界输入为 1 rad/s^2 的角加速度时,光纤陀螺测量误差为

$$E_{s2_output} = E_{s2} \cdot \frac{1}{K_1} \cdot \frac{K_1}{K_7} = \frac{K_1 T}{K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7^2} (\text{LSB}) \quad (7)$$

式中 1 LSB 为输出值的一个码值,转换为转速,即

$$E_{s2_output} = E_{s2} \cdot \frac{1}{K_1} = \frac{K_1}{K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7} \quad (8)$$

由式(8)可看出,该项误差与光纤陀螺的闭环控制周期和输入角加速度成正比,与环路总增益成反比。控制周期由光纤陀螺敏感线圈的渡越时间决定,一般不能任意更改。而环路总增益则由光功率、前置放大器放大倍数、采样率和积分器软件增益等决定,因此可通过增大环路总增益来减小角加速度误差系数。但考虑到闭环控制器的稳定性,环路的总增益也不能太大^[10],应结合系统对陀螺的测量精度要求配置合适的增益参数。

2 角加速度误差模型验证实验

为了验证上述理论分析结果,我们提出了一种在光纤陀螺^[11-12]信号处理芯片中通过软件进行角加速度响应测试的方法,具体流程如图 2 所示。陀螺在正常工作时,输出值为其敏感到的外界转速速率。为了进行角加速度测试,基于等效输入原理,我们用一个斜坡信号模拟角加速度的输入,即图 2 中叠加的斜坡信号代表等效输入速率,其中斜坡信号的斜率决定角加速度的大小。该等效输入速率与反馈信号叠加,经阶梯波生成器进行累加后通过 D/A 转换电路施加到集成光学调制器上,此时陀螺的输出即为在有角加速度输入情况下的陀螺输出速率。

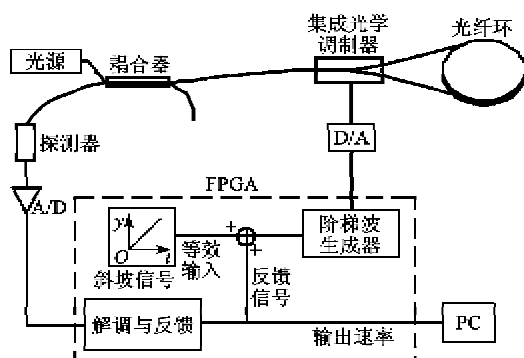


图2 角加速度测试原理框图

在进行角加速度测试时,可通过改变斜坡信号的斜率 k 改变等效角加速度 a ,即 $a=k \times SF$,其中, SF 为标度系数,激励斜坡信号斜率的单位为1 LSB/T。

对某型闭环光纤陀螺的角加速度响应测试曲线如图3所示,具体实验条件如表1所示。将等效输入速率与陀螺输出速率作差,得到陀螺对角加速度的测量误差曲线。由图可见,当输入为匀角加速度时,陀螺的输出不能完全跟踪输入,存在测量误差。在实际测试中,以该测量误差的稳定状态(0.2 ms后的测试误差)作为陀螺对角加速度信号测量的误差。图中输出速率和测量误差曲线的小起伏为陀螺的输出噪声。

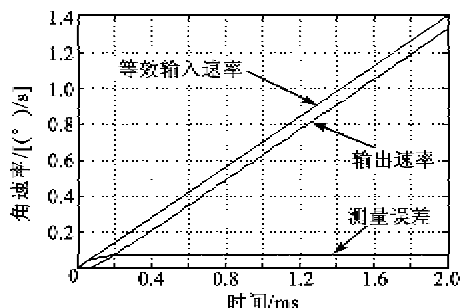


图3 角加速度响应测试曲线

表1 角加速度误差测试结果

角加速度/ [$^{\circ}$]/s 2	环路总 增益	实测稳态 误差/[$^{\circ}$]/s	理论稳态 误差/[$^{\circ}$]/s
701.5	0.031 7	0.145 76	0.143 26
701.5	0.073 4	0.073 33	0.071 63
701.5	0.146 9	0.036 21	0.035 81
1 403.1	0.031 7	0.284 42	0.286 52
1 403.1	0.073 4	0.141 89	0.143 26
1 403.1	0.146 9	0.072 76	0.071 63

为了验证角加速度误差系数的计算公式,分别在不同环路总增益和不同角加速度条件下对陀螺进行了多次测量,测量条件、测量结果和计算结果见表1。被测光纤陀螺的控制周期 $T=7.5 \mu\text{s}$, $SF=$

$5.261\ 64 \times 10^{-3} [^{\circ}/\text{s}]/\text{LSB}$ 。由表可看出实际测试结果与理论计算结果基本一致,验证了理论模型的正确性。

3 结束语

角加速度误差是高精度光纤陀螺捷联惯导系统不可忽略的一项误差。基于闭环光纤陀螺控制模型,建立了光纤陀螺角加速度误差模型,得到了角加速度误差的理论计算公式。同时采用在反馈阶梯波上叠加斜坡激励信号来等效角加速度输入的自主测试方法,在不同条件下对光纤陀螺的角加速度误差进行了实际测试。实验测试结果与理论计算值基本一致,验证了角加速度误差模型的正确性。

参考文献:

- [1] TITTERTON D H, WESTON J L. 捷联惯性导航技术[M]. 2版. 张天光,王秀萍,王丽霞,等,译. 北京:国防工业出版社,2010:231-261.
- [2] 李绪友,张娜,张瑞鹏. 光纤陀螺在摇摆状态下的误差特性分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(4):843-848.
LI Xuyou, ZHANG Na, ZHANG Ruipeng. Error characteristic analysis of FOG on sway base[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 843-848.
- [3] 张延顺,孙枫,孙尧,等. 角加速度对闭环光纤陀螺输出的影响[J]. 弹箭与制导学报,2001,21(4):18-20.
ZHANG Yanshun, SUN Feng, SUN Yao, et al. Effects of angular acceleration on closed-loop IFOG output[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2001, 21(4): 18-20.
- [4] 王庭军,高延滨,李光春. 光纤捷联惯导系统角加速度误差补偿技术[J]. 传感器与微系统,2012,31(5):76-78.
WANG Tingjun, GAO Yanbin, LI Guangchun. Compensation technology of angular acceleration error for FOG SENS[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(5): 76-78.
- [5] 王妍,张春熹. 数字闭环光纤陀螺动态特性测试研究[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(9):818-821.
WANG Yan, ZHANG Chunxi. Investigation of testing dynamic characteristics of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 818-821.
- [6] 宋凝芳,李洪全,李敏,等. 基于等效输入的光纤陀螺带宽自主测试方法[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(1):101-105.
SONG Ningfang, LI Hongquan, LI Min, et al. Self-test method for bandwidth of fiber optical gyroscope based on equivalent input[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(1): 101-105.

(下转第832页)