

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210176

全角半球谐振陀螺控制回路的动态特性研究^{*}

南方伯^{1,2}, 郜中星^{1,2}, 徐睿东^{1,2}, 张勇刚¹, 吴军伟³

(1. 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院 哈尔滨 150001; 2. 青岛哈尔滨工程大学创新发展中心 青岛 266000;
3. 北京理工导航控制科技股份有限公司 北京 102206)

摘要:全角半球谐振陀螺是一种高精度、高可靠性、长寿命的速率积分陀螺。针对全角半球谐振陀螺闭环控制回路的系统带宽问题,分析了全角半球谐振陀螺的工作原理,分别建立了全角半球谐振陀螺的输入-输出控制回路模型和扰动-输出控制回路模型。利用SIMULINK工具箱对两种模型进行了搭建和仿真研究,分析了两种控制回路的动态特性,最后进行了全角半球谐振陀螺的转台实验。仿真结果显示:外界输入角速度超过 $532.8^{\circ}/\text{s}$ 后,扰动信号导致的输出量波动达到最大且保持恒定,此时控制回路的带宽为1.48 Hz。仿真和实验结果表明:全角半球谐振陀螺控制回路的带宽过低会导致扰动信号引起椭圆参数的波动,控制效果变差,且扰动信号频率与外界输入转速成正比,当外界输入转速超越控制回路截止频率的对应转速后,椭圆参数的波动幅值趋于稳定。本文的研究成果为全角半球谐振陀螺的动态性能分析提供了理论基础。

关键词:全角半球谐振陀螺;系统带宽;输入-输出控制;扰动-输出控制;动态特性

中图分类号: TH721 V241.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on dynamic characteristics of whole-angle hemispherical resonator gyroscope control circuit

Nan Fangbo^{1,2}, Gao Zhongxing^{1,2}, Xu Ruidong^{1,2}, Zhang Yonggang¹, Wu Junwei³

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
2. Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China;
3. Beijing Navigation Control Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: The whole-angle hemispherical resonator gyro (HRG) is a typical rate integrating gyroscope with the advantages of high precision, high reliability, and long life. The system bandwidth of the whole-angle HRG closed-loop control circuit is studied. The working principle of the whole-angle HRG is analyzed. The input-output control circuit model and the disturbance-output control circuit model are established respectively. Two models are formulated and simulated by Simulink program simulation. The dynamic characteristics of two control circuits are discussed. Finally, the experiment of the whole-angle HRG is carried out. Simulation results show that when the input angular velocity exceeds $532.8^{\circ}/\text{s}$, the parameter output fluctuation caused by the disturbance signal reaches the maximum and remains constant, which corresponding to the bandwidth of the control circuit is 1.48 Hz. The simulation and experiment results indicate that the low bandwidth of the whole-angle HRG control circuit can lead to the fluctuation of the ellipse parameters caused by the disturbance signal and deteriorates the control effect. In addition, the frequency of the disturbance signal is proportional to the input angular velocity. The fluctuation tends to be stable when the input angular velocity exceeds the angular velocity with respect to the cut-off frequency of the closed-loop control circuit. The research results in this paper provide a theoretical basis for the dynamic performance analysis of the whole-angle HRG.

Keywords: whole-angle HRG; system bandwidth; input-output control; disturbance-output control; dynamic characteristics

0 引言

半球谐振陀螺是一种基于科里奥利效应的固体波动陀螺,具有精度高、可靠性强和寿命长等优点,可以广泛应用于航空航天飞行器、水面舰艇、水下无人潜器、无人机等运载器的导航定位系统^[1]。

半球谐振陀螺的控制模式可以分为全角模式(whole angle, WA)和力平衡模式(force to rebalance, FTR)。力平衡模式为速率模式,在力平衡模式下,对半球谐振子施加静电力将驻波振型固定在某一角度,利用施加的静电力与载体旋转角速度成正比这一特性,可以由静电力得到角速度。但由于力平衡模式下静电力的效率较低,能够跟踪锁定的输入角速率范围有限,因此难以满足高动态环境的应用需求。全角模式为速率积分模式,在全角模式下,驻波旋转时不进行控制,处于自由进动的状态。此时半球谐振子的驻波方位角与载体实际转动角度成正比,即可通过敏感驻波进动的角度进而得到载体转动的角度^[2]。理想状态下,由于不施加控制力,全角模式相较于力平衡模式具有近似无限的带宽和动态范围,能够更好地满足高动态应用场景的需求,因此具有更广阔的发展前景。

在半球谐振陀螺生产装配的过程中,加工误差的存在会引入:阻尼各向异性,刚度各向异性,质量分布不均匀等误差因素,从而极大地影响陀螺的性能^[3],需要通过控制回路对上述误差进行补偿和抑制。因此,建立全角半球谐振陀螺控制回路模型并进行动态特性分析,对提升全角半球谐振陀螺性能具有重要意义。目前,国内外学者对于抑制各类误差因素的影响进行了一系列的研究^[4-5]。张勇猛等^[6]提出了一种基于电阻热耗散的全角半球谐振陀螺阻尼修调技术,利用电阻的等效阻尼效应来降低控制过程中阻尼各向异性的影响。王奇等^[7]针对全角半球谐振陀螺品质因数各向异性导致的驻波漂移问题,提出了一种驻波漂移参数辨识及补偿方法,通过主动驱动驻波旋转补偿驻波漂移,但在实际应用的过程中,存在补偿后残余漂移进入“死区”,多次补偿效果不明显的问题。

在实际应用过程中,分析控制系统中的各类参数对陀螺性能的影响并进一步优化陀螺控制系统是非常重要的技术^[8-12]。王鹏^[13]分析了蜂巢式微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)振动陀螺的工作原理,并设计了一种基于静电修调的模式匹配闭环控制回路,并对理论模型进行了验证。邓卫斌等^[14]为提高 MEMS 陀螺的鲁棒性和测量精度,建立了一种自适应滑模控制模型,验证了该种模型的收敛性和稳定性,实现了快速稳定地跟随输入信号的目的。郜中星等^[15]针对比

例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制下振动陀螺椭圆参数控制精度与收敛快速性难以提升的问题,提出了一种离散滑模控制方法,该控制方法降低了陀螺椭圆参数误差,提升了系统的鲁棒性和收敛快速性。

本文针对全角半球谐振陀螺控制回路的动态特性开展研究。首先分析了全角半球谐振陀螺的工作原理;然后建立了全角半球谐振陀螺的输入-输出控制回路模型和扰动-输出控制回路模型并分别对两种模型进行了系统仿真和动态特性分析;最后进行了全角半球谐振陀螺的转台实验,并对实验结果进行了总结,验证模型与分析的正确性。

1 全角半球谐振陀螺工作原理

1.1 半球谐振子动力学模型

理想情况下,如图 1 所示,全角模式下半球谐振子的运动轨迹可以看作一个广义二自由度振动系统。

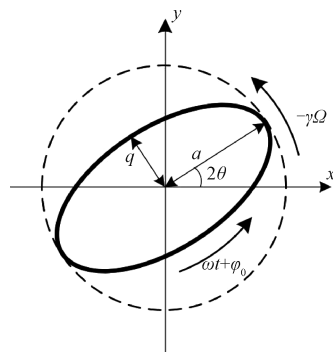


图 1 半球谐振子运动轨迹

Fig. 1 Motion trajectory of hemispherical resonator

其中, a 表示椭圆轨道的长轴即主波波幅,表征半球谐振子振幅大小; q 表示椭圆轨道的短轴即正交波波幅,理想状态下趋近于 0; θ 表示主波波幅与 0° 电极轴的夹角; φ_0 表示驻波振型的初始相位角; ω 表示半球谐振子的谐振角频率。图 1 所对应的动力学模型可表示为^[16]:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \omega^2 \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 4\gamma\Omega \\ -4\gamma\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x 和 y 表示半球谐振子在笛卡尔坐标系下两个相互正交坐标轴上的振动位移; f_x 和 f_y 表示施加在上述两个轴上的静电力; Ω 表示外界输入角速度; γ 表示半球谐振子的进动因子。可以将式(1)的通解表示为^[17]:

$$\begin{cases} x = a \cos 2\theta \cos \varphi - q \sin 2\theta \sin \varphi \\ y = a \sin 2\theta \cos \varphi + q \cos 2\theta \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\varphi = \omega t + \varphi_0$, $\theta = \theta_0 - \gamma \int \Omega dt$ 。

1.2 全角半球谐振陀螺控制系统模型

非理想情况下,考虑各类误差项,式(1)表示为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 4\gamma\Omega \\ -4\gamma\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\tau} + \Delta \frac{1}{\tau} \cos 4\theta_\tau & \Delta \frac{1}{\tau} \sin 4\theta_\tau \\ \Delta \frac{1}{\tau} \sin 4\theta_\tau & \frac{2}{\tau} - \Delta \frac{1}{\tau} \cos 4\theta_\tau \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega^2 - \omega \Delta \omega \cos 4\theta_\omega & -\omega \Delta \omega \sin 4\theta_\omega \\ -\omega \Delta \omega \sin 4\theta_\omega & \omega^2 + \omega \Delta \omega \cos 4\theta_\omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{C}$ 与 $\mathbf{K}$ 分别为半球谐振子的阻尼矩阵与刚度矩阵,其中 $2/\tau = (1/\tau_1 + 1/\tau_2)$, $\Delta(1/\tau) = (1/\tau_1 - 1/\tau_2)$ 为阻尼各向异性, τ_1 、 τ_2 分别为半球谐振子最小和最大的阻尼衰减时间常数; θ_τ 为阻尼主轴与 0° 电极轴之间的夹角; $\omega^2 = (\omega_1^2 + \omega_2^2)/2$, $\omega \Delta \omega = (\omega_1^2 - \omega_2^2)/2$; ω_1 与 ω_2 分别为半球谐振子周向最高与最低频率轴上的谐振角频率, ω 为平均谐振角频率;其中 $\Delta \omega$ 为频率各向异性; θ_ω 为谐振角频率最低的频率轴与 0° 电极轴之间的夹角。图1所示的半球谐振子运动轨迹可由椭圆参数 a, q, θ, φ 完全表征,因此可以针对这4种椭圆参数分别进行控制,控制方程如式(6)所示^[18]:

$$\begin{cases} \dot{a} = \frac{q}{2} \Delta \omega \sin 4(\theta - \theta_\omega) - \frac{a}{2} \left[\frac{2}{\tau} + \Delta \frac{1}{\tau} \cos 4(\theta - \theta_\tau) \right] \\ \dot{q} = -\frac{a}{2} \Delta \omega \sin 4(\theta - \theta_\omega) - \frac{q}{2} \left[\frac{2}{\tau} - \Delta \frac{1}{\tau} \cos 4(\theta - \theta_\tau) \right] \\ \dot{\theta} = \frac{1}{2} \Delta \frac{1}{\tau} \sin 4(\theta - \theta_\tau) + \frac{q}{a} \Delta \omega \cos 4(\theta - \theta_\omega) - \gamma \Omega \\ \dot{\delta} = -\frac{q}{a} \Delta \frac{1}{\tau} \sin 4(\theta - \theta_\tau) - \frac{1}{2} \Delta \omega \cos 4(\theta - \theta_\omega) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 表征半球谐振子振动幅值,陀螺正常工作时需要通过幅值控制回路令其恒定; q 表征半球谐振子的正交误差,陀螺正常工作时需要通过正交控制回路将其抑制为0; θ 表征半球谐振子驻波方位角,该回路称为角度控制回路,理想状态下全角半球谐振陀螺振型角自由进动,无需施加角度控制; δ 表征参考信号相位与半球谐振子振动相位的差值。

2 控制回路动态特性分析

2.1 全角半球谐振陀螺控制解算流程

如图2所示,半球谐振子上周向分布有8个平板电极,8个电极等角度分布在球壳边缘。半球谐振子的驱

动和检测主要依靠半球谐振子与基座上对应电极极板间电容的交流电压来实现。选择 $Dx+$ 与 $Dx-$ 两个电极作为一对 x 轴向差分驱动电极,选取 $Sx+$ 与 $Sx-$ 两个电极作为一对 x 轴向差分检测电极,同理其余4个电极为 y 轴驱动电极与检测电极。

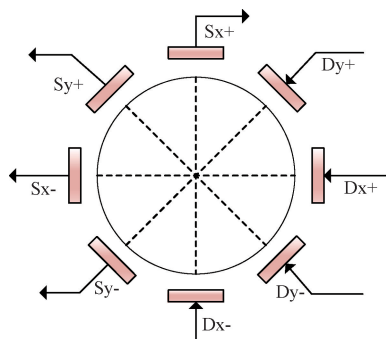


图2 半球谐振陀螺电极分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electrodes distribution of HRG

结合上述半球谐振陀螺工作原理与控制方法,可以给出全角半球谐振陀螺控制解算流程,如图3所示。其中, Sx 和 Sy 的两对差分电极采集半球谐振子振动信号,振动信号进入检测时分复用模块与模数信号转换(A/D)模块;转换出的数字信号与DDS信号发生器产生的参考信号解调出椭圆参数解算所需的 c_x, c_y, s_x 和 s_y ;将椭圆参数解算模块解算出的 a, q 和 δ 分别进行幅值控制、正交控制和相位控制;将经过振型合成矩阵的角度信号与3种控制分别生成的 a_PID, q_PID 和 f_PID 3种信号输入到驱动信号调制合成模块生成驱动力,将驱动力进行数模转换(D/A);最后通过驱动时分复用,施加静电力对半球谐振子进行控制从而完成整个控制解算回路。

2.2 全角半球谐振陀螺控制回路动态模型

当不考虑扰动输入的情况时,将图3中全角半球谐振陀螺控制解算系统框图简化为如图4所示的原理框图,其中驱动增益系数包含D/A转换及高压放大增益,检测增益系数包含滤波放大及A/D转换增益。设定被控椭圆参数幅值为输入信号 $R(s)$,经过中间的多个控制环节,最后得到输出椭圆参数幅值为输出信号 $C(s)$ 。

根据对全角半球谐振陀螺控制回路每个模块的分析,可以将图4中的原理框图转化为如图5所示的输入-输出控制系统结构图。图5中5个环节的表达式分别对应图4中5个控制环节,由经典控制理论可知PI控制可以分解为比例环节与积分环节,则环节①PI控制的传递函数 $G_1(s)$ 可以表示为:

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (7)$$

因此, a 可以表示为:

$$a = \frac{1}{2}(\sqrt{E+Q} + \sqrt{E-Q}) \quad (14)$$

引入检测通道增益后,式(13)变为:

$$\begin{cases} E_c = a^2(k_x^2 \cos^2 2\theta + k_y^2 \sin^2 2\theta) + \\ q^2(k_x^2 \sin^2 2\theta + k_y^2 \cos^2 2\theta) \\ Q_c = k_x k_y 2aq \\ R_c = a^2(k_x^2 \cos^2 2\theta - k_y^2 \sin^2 2\theta) + \\ q^2(k_x^2 \sin^2 2\theta - k_y^2 \cos^2 2\theta) \\ S_c = k_x k_y (a^2 - q^2) \sin 4\theta \\ L_c = k_x k_y (a^2 - q^2) \sin 2\delta\varphi \end{cases} \quad (15)$$

此时,受检测通道增益影响解算出来的主波波幅 a_c 表示为:

$$a_c = a \sqrt{(k_x \cos 2\theta)^2 + (k_y \sin 2\theta)^2} \quad (16)$$

当 $k_x = k_y$ 时, $a_c = a$, 检测通道增益对信号解算没有影响; 当 $k_x \neq k_y$ 时, 若 $k_x > k_y$, a_c 会随着角度的增加呈现正弦变化, 如图 6 所示。

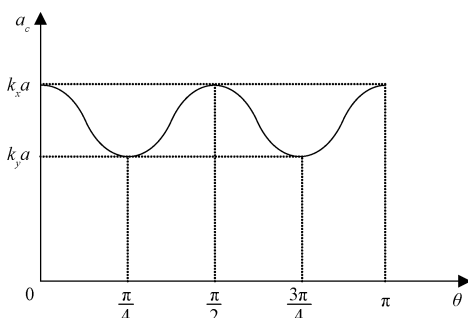


图 6 主波波腹 a_c 波动曲线

Fig. 6 Main wave antinode a_c fluctuation curve

可以由此建立扰动-输出控制回路, 将检测增益不匹配引起的扰动输入量 $N(s)$ 引入到上述控制回路中, 置于 5 个控制环节之后如图 7 所示。

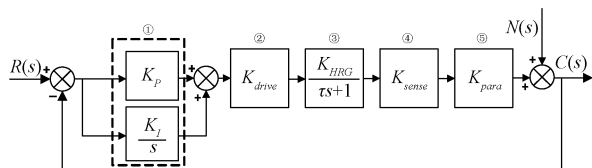


图 7 全角半球谐振陀螺扰动-输出控制系统结构图

Fig. 7 Disturbance-output control system structure drawing of the WA HRC

根据闭环控制回路模型的分析方法, 可以将扰动环节的传递函数 $\Phi_N(s)$ 表示为:

$$\Phi_N(s) = \frac{1}{1 - (-G(s))} = \frac{\tau s^2 + s}{\tau s^2 + (K_p K + 1)s + K_f K} \quad (17)$$

其幅频特性可以写作:

$$|\Phi_N(j\omega)| = \frac{\sqrt{(\omega^2 \tau)^2 + \omega^2}}{\sqrt{(K_f K - \omega^2 \tau)^2 + \omega^2 (K_p K + 1)^2}} \quad (18)$$

3 控制回路动态特性仿真研究

为了验证第 2 节中分析的全角半球谐振陀螺闭环控制回路模型及其动态特性的准确性, 利用 SIMULINK 仿真工具搭建了如图 8 所示的全角半球谐振陀螺控制回路仿真平台, 通过合理设定半球谐振陀螺控制回路中的各项参数, 来验证半球谐振陀螺闭环控制回路和扰动控制回路的动态特性。

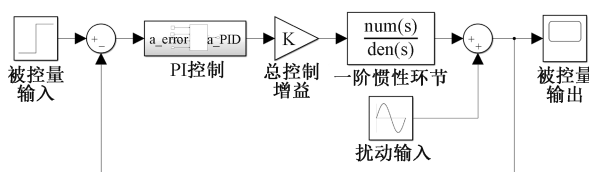


图 8 全角半球谐振陀螺控制回路仿真模型

Fig. 8 Simulation model of the control circuit for the WA HRC

由式(15)可知, 椭圆参数 a 与 q 的波动频率由 θ 的变化率决定。 θ 变化率的大小可以表征扰动信号频率的高低, 进而可以通过分析控制系统的幅频特性曲线来分析不同输入角速度下的系统动态响应情况。图 9(a) 为全角半球谐振陀螺输入-输出控制回路的伯德图, 可以看出: 幅频特性曲线呈现低通滤波器的形式, 频率低于截止频率时, 控制信号衰减约为 0 dB, 近似通带增益为 1; 当频率高于截止频率时, 被控椭圆参数对控制信号的响应开始迅速衰减。图 9(b) 中展示了全角半球谐振陀螺扰动-输出控制回路的伯德图, 可以看出: 幅频特性曲线呈现高通滤波器的形式, 随着扰动频率的增加, 输出对扰动信号的响应逐渐变大, 在频率超越截止频率后, 扰动对于输出的影响趋于稳定。由图 7 可知, 由于被控量输入与扰动输入的开环传递函数相同, 则二者具有相同的幅频特性, 因此由图 9(a) 与 (b) 可以看出两个系统截止频率也近似相同。仿真结果表明: 两个系统的截止频率均为 1.48 Hz, 对应的转速为 532.8°/s。即当转速超过 532.8°/s 时扰动信号导致的输出波动达到最大。

综上可得出如下结论: 随着外界输入角速度的增加, 扰动信号的频率也随之增加, 全角半球谐振陀螺闭环控制系统逐渐难以抑制扰动信号。扰动信号对于椭圆参数控制的影响会逐渐增加, 在扰动信号频率到达控制系统的截止频率后趋于稳定。

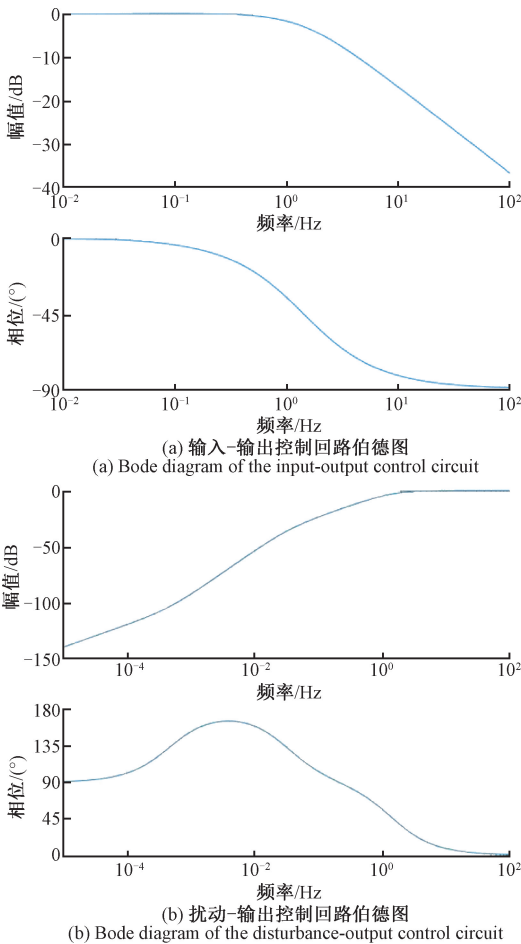


图 9 全角半球谐振陀螺控制回路伯德图
Fig. 9 Bode diagram of the control circuit for the WA HRG

4 实验与结果分析

根据上述对全角半球谐振陀螺控制回路的分析进行实验验证。全角半球谐振陀螺的实验系统如图 10 所示,主要包括半球谐振陀螺表头、控制解算系统电路板、测试用单轴转台与数据采集上位机。其中实验采用的半球谐振陀螺表头工作在全角模式下,控制解算电路板主要包括现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片、A/D 芯片和 D/A 芯片等电子元器件,与半球谐振陀螺表头相连,主要完成陀螺的控制解算工作。测试用单轴转台充当陀螺载体,向陀螺施加外界旋转角速度。数据采集软件可以将全角半球谐振陀螺测试过程中采集到的各项数据显示在上位机界面,并实时绘制半球谐振陀螺各项参数的变化曲线,还可以根据实验结果对陀螺控制与解算程序进行修改。

为了验证本文所设计的全角半球谐振陀螺控制回路模型及其动态特性,在设定好各类控制系统参数与陀螺

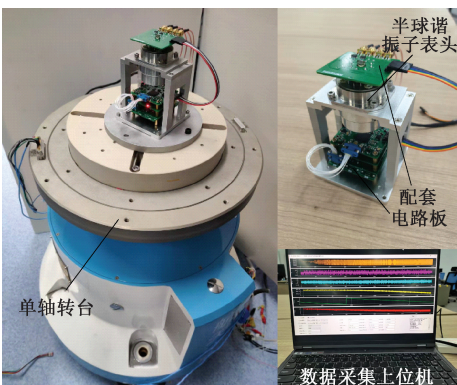


图 10 实验装置实物图
Fig. 10 Physical drawing of experimental device

特征参数的条件下,分别采集了外界输入角速度为 0、20、50、100、200、300、400 和 500°/s 的 8 组数据。

表 1 中给出了实验系统主要参数,其中 a_P 和 a_I 分别表示幅值控制回路中 PI 控制环节的比例系数与积分系数; q_P 和 q_I 分别表示正交控制回路中 PI 控制环节的比例系数与积分系数; $a_{setting}$ 表示主波波幅的设定值; f 表示半球谐振子的工作频率; Q 表示半球谐振子的品质因数。

表 1 实验系统主要参数	
Table 1 Main parameters of the experiment system	
参数	设定值
a_P	400
a_I	0.2
q_P	2 000
q_I	0.2
$a_{setting}/LSB$	40 000
f/Hz	4 558
Q	3 000 000

将全角半球谐振陀螺外界输入角速度为 0°/s 时主波波幅 a 、正交波波幅 q 和相位差 δ 的输出曲线表示在图 11 中。由图 11 所示,在静态条件即当外界输入角速度为 0°/s 时,主波波幅 a 和正交波波幅 q 的误差主要表现为噪声,且不存在正弦波动,此时扰动对输出的影响最小。为分析相同结构的控制回路中系统增益对动态特性的影响,将八组不同输入转速数据解算后的椭圆参数 a 与 q 的波动值整理在图 12 中。

图 12 表征了外界输入角速度与椭圆参数动态误差的关系,两条曲线均呈现高通滤波器形式,符合上文所建立模型的分析与仿真结果。表 1 中 q_P 的值大于 a_P ,对 a 与 q 曲线的分析可以发现, q 比 a 更晚到达最大波动值,

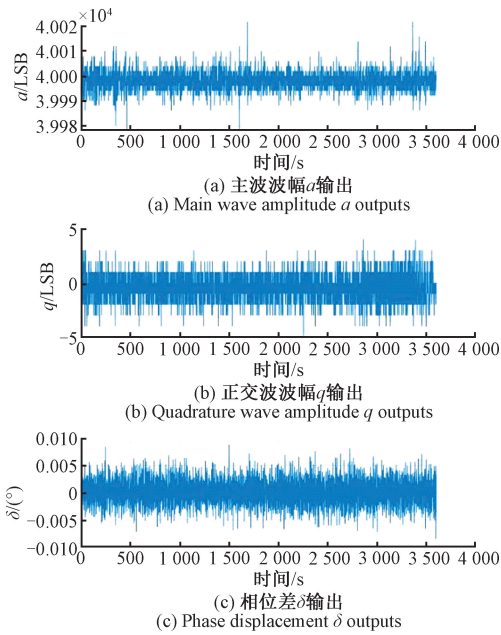


图 11 0°/s 条件下全角半球谐振陀螺椭圆参数输出
Fig. 11 Elliptic parameter outputs of the WA HRG under 0°/s

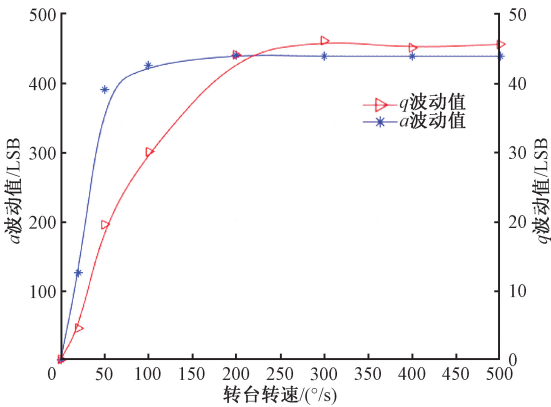


图 12 全角半球谐振陀螺椭圆参数波动曲线
Fig. 12 Elliptic parameter error curve of the WA HRG

即正交控制回路相较于幅值控制回路具有更高的带宽,说明在相同的控制回路结构中,前向通道增益对控制回路带宽具有显著的影响。在实际控制过程中,通过适当调整控制增益、驱动检测增益、参数解算增益等方式改变前向增益^[6],可以有效提高控制系统带宽,优化动态性能。

5 结 论

针对全角半球谐振陀螺控制回路的带宽问题,本文分别建立了全角半球谐振陀螺输入-输出控制回路与扰动-输出控制回路两种模型,并从理论上分析了两种模型的动态特性。运用 SIMULINK 工具箱仿真了两种

控制回路模型,并基于全角半球谐振陀螺样机进行了实验测试,仿真与实验结果均与理论模型相一致。仿真与实验结果表明:全角半球谐振陀螺控制回路的带宽不足会导致扰动信号作用下椭圆参数产生较大波动,波动会随着输入转速的升高而增大。在外界输入转速超越系统截止频率对应的转速后,椭圆参数的波动趋于稳定。通过适当增加系统的前向通道增益可以提高控制系统带宽,从而改善控制效果。本文的研究成果可以为全角半球谐振陀螺控制系统的设计与优化、误差参数补偿等提供参考。

参考文献

[1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets [J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2013, 134(1):1157-1178.

[2] 伊国兴,魏振楠,王常虹,等. 半球谐振陀螺控制及补偿技术[J]. 宇航学报,2020,41(6):780-789.

YI G X, WEI ZH N, WANG CH H, et al. Hemispherical resonator gyro control and compensation technology[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 780-789.

[3] 赵洪波. 半球谐振子频率裂解分析与陀螺仪误差抑制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

ZHAO H B. On error mechanism analysis and error restraint method for the hemispherical resonator gyroscope[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[4] ZHAO W L, HAO Y, LIU F C, et al. High sensitivity rate-integrating hemispherical resonator gyroscope with dead area compensation for damping asymmetry[J]. Sci Rep,2021,11:2195 .

[5] RASPOPOV V Y, LADONKIN A V, LIKHOSHERST V V. Calibration of a coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator and an electronic unit [C]. 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2019.

[6] 张勇猛,郭锶琛,孙江坤,等. 全角模式半球谐振陀螺的阻尼误差修调与补偿技术研究[J]. 机械工程学报, 2022,S8(16):145-152.

ZHANG Y M, GUO K CH, SUN J K, et al. Research on damping error tuning and compensating technology of whole angle mode hemispherical resonator gyroscope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, S8(16): 145-152.

[7] 王奇,解伟男,伊国兴,等. 基于主动驱动旋转的全角模式半球谐振陀螺驻波漂移补偿方法[J]. 中国惯性技术学报,2021,29(4):522-525.

WANG Q, XIE W N, YI G X, et al. Compensation

- method of standing wave drift of whole angle mode hemispherical gyro based on actively driving rotation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(4): 522-525.
- [8] XU Z Y, XI B Q, YI G X, et al. High-precision control scheme for hemispherical resonator gyroscopes with application to aerospace navigation systems [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119:107168.
- [9] QIU B M, WANG J W, LI P H. Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1):71-75.
- [10] LEE J, SUN W Y, JAEWOOK R. Design and verification of a digital controller for a 2-piece hemispherical resonator gyroscope [J]. Sensors, 2016, 16(1):555.
- [11] 曹慧亮,郭天琪,申冲.抗过载环形 MEMS 固体波动陀螺设计加工与测试[J].仪器仪表学报,2022,43(5):1-7.
- CAO H L, GUO T Q, SHEN CH. Design, fabrication and test of high overload resistance MEMS silicon-based ring wave gyroscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):1-7.
- [12] 黄子军,卞雷祥,李辉,等.高 Q 值超低功耗谐振式磁传感器的设计与实现[J].电子测量与仪器学报,2021,35(5):1-7.
- HUANG Z J, BIAN L X, LI H, et al. Design and fabrication of a resonant magnetic field sensor with high quality factor and low power consumption[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):1-7.
- [13] 王鹏.蜂巢式 MEMS 陀螺模态匹配闭环控制技术研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
- WANG P. A closed-loop control method for mode matching of honeycomb-like disk resonator gyroscope[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [14] 邓卫斌,李云妮. MEMS 陀螺系统自适应滑模控制研究[J].传感器与微系统,2020,39(6):45-47.
- DENG W B, LI Y N. Research on adaptive sliding mode control of MEMS gyro system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6):45-47.
- [15] 郜中星,彭斌,陈小伟,等.振动陀螺椭圆参数的离散滑模控制[J].系统工程与电子技术,2022,44(1):226-232.
- GAO ZH X, PENG B, CHEN X W, et al. Discrete sliding mode control for ellipse parameters of vibrating gyroscope [J]. Systems Engineering and Electronics, 2022,44(1):226-232.
- [16] WANG X, LIN H, HO S L, et al. Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6):1633-1636.
- [17] LYNCH D D. Vibratory gyro analysis by the method of averaging[C]. The 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation, Petersburg, 1995:26-34.
- [18] LYNCH D D, MATTHEWS A, VARTY G T. Innovative mechanizations to optimize inertial sensor for high or low rate operations[C]. Symposium Gyro Technology, 1997.

作者简介



Nan Fangbo

received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Harbin Engineering University. His main research interests include hemispherical resonator gyroscope and its application.



Gao Zhongxing

(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2012, and received his Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2017. He is currently an associate professor at Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University. His main research interests include Coriolis vibrating gyroscope (CVG), fiber optic gyroscope (FOG), and their applications in navigation technology.

南方伯,2020 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,现为哈尔滨工程大学博士研究生,主要研究方向为半球谐振陀螺及其应用。

E-mail: nanfangbo150901@hrbeu.edu.cn

郜中星(通信作者),2012 年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2017 年于哈尔滨工程大学获得博士学位,现为青岛哈尔滨工程大学创新发展中心副教授,主要研究方向为哥式振动陀螺、光纤陀螺及其在导航技术的应用。

E-mail: zhongxing1141@sina.com