

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.009

双通道光纤陀螺捷联惯导的设计与实现

张阳艳¹, 李星善¹, 胡华峰¹, 施丽娟¹, 丰彪¹, 邓卫林², 徐孔赞²

(1. 湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040;

2. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 孝感 432000)

摘要:针对光纤陀螺惯导精度和动态性能相互矛盾的问题,从实际应用需求出发,提出了一种高精度和大量程的双通道光纤陀螺捷联惯导系统。介绍了设计的基本原理和系统组成,并详细阐述了大小光纤陀螺设计、双通道加速度计设计和软件算法设计等关键技术,最后研制了一套原理样机。通过系统级标定试验、量程和陀螺精度试验、高动态振动环境试验和动态跑车试验等对样机进行验证,结果表明该技术方案具有可行性,为其他光纤陀螺惯导系统提供了新的设计思路。

关键词:双通道;光纤陀螺惯导;高精度;大量程

中图分类号:TN24

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)06-0067-07

Design and Implementation of Dual-channel FOG Strapdown Inertial Navigation System

ZHANG Yang-yan¹, LI Xing-shan¹, HU Hua-feng¹, SHI Li-juan¹, FENG Biao¹, DENG Wei-lin², XU Kong-zan²

(1. Designing Institute of Hubei Space Technology Academy, Wuhan 430040, China;

2. Hong Feng Control Company Limited of Sanjiang Astronautic, Xiaogan 432000, China)

Abstract: Aiming at the contradiction between the precision and dynamic performance of the fiber optic gyroscope (FOG) inertial navigation systems, a new dual-channel FOG strapdown inertial navigation system with high precision and large dynamic range is proposed. The basic principle and system composition of the design are introduced. The key technologies such as the design of the large and small FOGs, the design of the two channel accelerometer and the software algorithm are described in detail. Finally, a set of principle prototype is designed. Through the system-level calibration test, range and gyro precision test, high dynamic vibration test and dynamic vehicle test, the results show that the technical scheme is feasible, and provides a new design idea for other FOG inertial navigation systems.

Key words: Dual-channel; FOG inertial navigation system; High precision; Large dynamic range

0 引言

光纤陀螺惯导具有全固态、寿命长、可靠性高、隐蔽性好、自主性高等优点,被广泛应用于航空、航天、航海及武器装备领域^[1-3]。随着技术的进一步发展,对光纤陀螺惯导系统提出了更高的要求,一方

面,要求精度越来越高,从战术级、导航级向战略级转变^[4-5];另一方面,要求动态性能越来越好,能适应各种复杂的振动、冲击等恶劣环境^[6-7]。但是,随着精度的提高,动态性能将下降,严重制约了光纤陀螺惯导系统的应用。

为解决这一问题,文献[8]提出了一种基于微机

收稿日期:2021-06-01;修订日期:2021-07-09

作者简介:张阳艳(1991-),男,硕士,工程师,主要从事光纤惯性导航系统方面的研究。

电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)陀螺辅助的增大闭环光纤陀螺动态范围的方法,利用MEMS陀螺输出信息,判断闭环光纤陀螺输出对应的干涉条纹级数,修正闭环光纤陀螺输出,从而提高其动态范围。该方法需要提前完成MEMS陀螺和主光纤陀螺安装偏差角的标定,同时由于MEMS陀螺精度较低,导致判断光纤陀螺干涉条纹级数存在误差。文献[9]提出了采用跨条纹的工作方式增大陀螺的量程,但是也存在一些不足,如必须设定陀螺的启动速率范围、陀螺所敏感的角度也要根据陀螺的单条纹量程提前给定等。

本文提出了一种双通道光纤陀螺捷联惯导设计方案,可根据实际应用需求选择通道。在常用的惯性导航场景中,光纤陀螺惯导需要先进行自对准以获得当前的初始姿态,自对准完成后进入导航模式。自对准模式下,产品一般处于静态或准静态,精度要求高,动态性能要求不高。导航模式下,产品动态性能要求高,精度要求相对不高。因此,通过合理选择通道,可以满足实际应用需求。

1 基本原理

1.1 光纤陀螺工作原理

光纤陀螺是基于Sagnac效应的一种全固态角速度传感器,由于数字闭环检测方案具有动态范围大、标度因数误差小等优点,是目前主流的数字闭环方案^[10-12]。当光纤环转动时,输入角速率 Ω 在两束反向传播的光束中产生的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda_0 c_0} \Omega \quad (1)$$

其中, L 为光纤长度; D 为光纤环直径; λ_0 为光源波长; c_0 为光传播速度。从式(1)可以看出,为提高光纤陀螺的精度,需要增大光纤环直径或增加光纤长度,但是随之带来的问题是光纤陀螺的量程缩小。光纤陀螺的单条纹量程可以用式(2)表示^[9]

$$\Omega_\pi = \frac{\lambda_0 c_0}{2LD} \quad (2)$$

以某高精度光纤陀螺基本参数为例,光源波长 λ_0 为1550nm,光纤长度 L 为3000m,光纤环直径 D 为120mm,光传播速度 c_0 为 3×10^8 m/s,则有

$$\Omega_\pi = \frac{1550 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^8}{2 \times 3000 \times 120 \times 10^{-3}} \times \frac{180}{\pi} = 37(^{\circ})/\text{s} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,该光纤陀螺的单条纹测量

范围为 $\pm 37(^{\circ})/\text{s}$,不满足高动态环境使用要求。从式(2)可以看出,可以通过减少光纤长度或光纤环直径来提高测量范围。

1.2 IF转换电路工作原理

IF转换电路是基于电荷平衡的原理^[13-15],当积分电路的积分电压超过设定电压时,比较电路控制开关电路选择正恒流源或负恒流源对积分电路进行充放电,从而达到电荷平衡。逻辑控制电路将比较电路的输出和频标信号,并进行与运算,得到脉冲数的输出。

IF转换电路中输出量程和分辨率之间是相互矛盾的,在频标频率一定的情况下,输出量程越大,IF转换电路的标度因数越小,对应的分辨率越低。在实际测试中发现,电路设计的频标频率越高,线性度越差,因此频标频率不能无限制增加,目前比较成熟的方案频率一般不超过512kHz^[16]。因此,可以设计一种双通道的IF转换电路,一路分辨率较高但是量程较小,另一路分辨率较低但是量程较大,可根据实际应用进行合理选择。

2 双通道光纤陀螺捷联惯导系统设计

2.1 系统组成

根据以上原理,本文设计了一种双通道光纤陀螺捷联惯导系统,基本组成框图如图1所示,主要由结构本体、大陀螺、小陀螺、加速度计、大陀螺采集电路、小陀螺采集电路、温度传感器、双通道IF转换电路、电源管理模块和导航计算机板等部分组成。大光纤陀螺和小光纤陀螺同时测量本体的角速度信息,加速度计测量本体的加速度信息,并分别通过陀螺采集电路和IF转换电路得到数字敏感信号送至导航计算机板。导航计算机板是惯导系统的核心控制单元,主要完成惯导的整机数据处理和通信,包括通道选择处理,陀螺、加速度计的数据采集,温度补偿功能,自对准、导航功能,以及对外通信功能。

2.2 大小光纤陀螺设计

在实际应用中选择通道时,应尽量保证2个通道的安装方位一致。加速度计部分,2个通道为共用表头,安装方位一致。陀螺部分,2个通道的安装偏差主要由光纤环决定,因此设计采用单轴双敏感环方案:大小陀螺共用一个光纤环,通过光纤长度

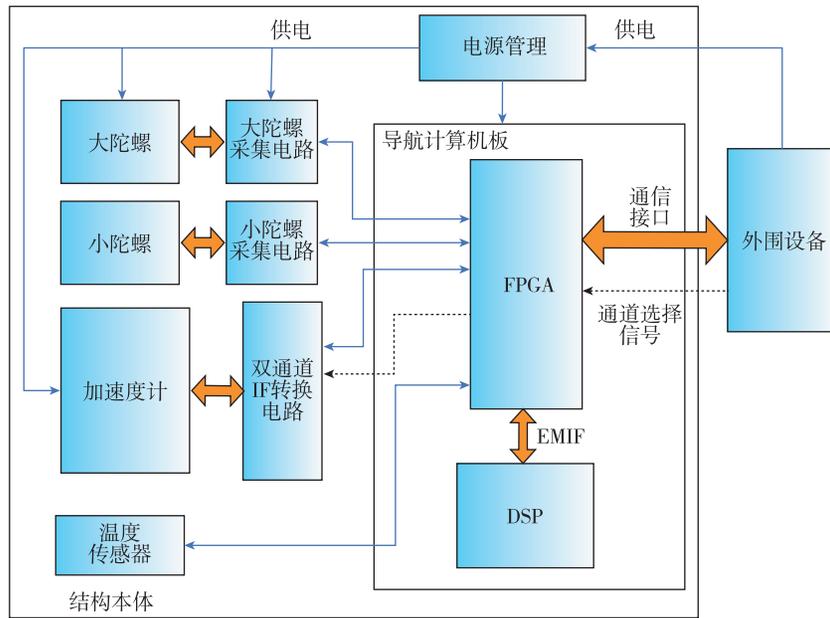


图 1 惯导系统组成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the inertial navigation system

和光纤环等效直径的不同实现大小陀螺不同的精度。光源共用多通道放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 光源, 其他耦合器、Y 波导、探测器及闭环处理电路部分独立设计, 其组成示意图如图 2 所示。闭环处理电路主要包括前置放大、A/D 转换、处理器、D/A 转换和驱动放大等电路构成。探测器输出的电信号经过前置放大器后, 再进入 A/D 转换器, 转换为数字信号, 并在数字逻辑电路内进行闭环处理, 完成后将调制信号与反馈信号叠加输出到 D/A 转换器, 并施加到 Y 波导上, 完成闭环, 闭环处理结果即为陀螺的输出。

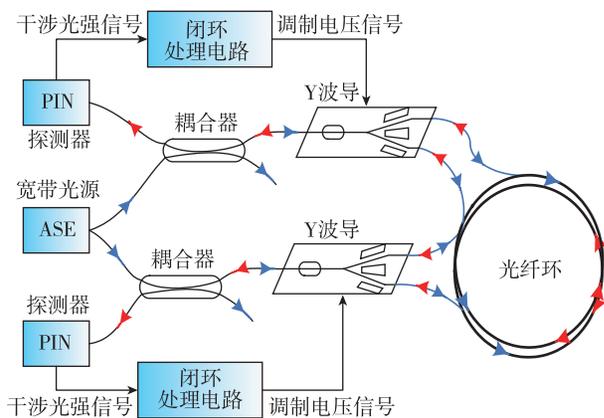


图 2 大小光纤陀螺组成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the large and small fiber optic gyroscope

2.3 双通道加速度计设计

双通道加速度计主要由双通道 IF 转换电路实现。传统的 IF 转换电路主要由恒流源、积分电路、比较电路、开关电路和逻辑控制电路等部分组成。双通道 IF 转换电路在传统 IF 转换电路的基础上, 增加了电流分流和通道选择功能, 其组成示意图如图 3 所示。电流输入信号 I 经过精密分流电路后得到电流 I_1 和 I_2 , 其中 $I_1 > I_2$ 。逻辑控制电路根据外部的通道选择信号选择不同的通道, 然后进行后续积分处理, 输出对应通道的脉冲数。电流 $I_1 >$

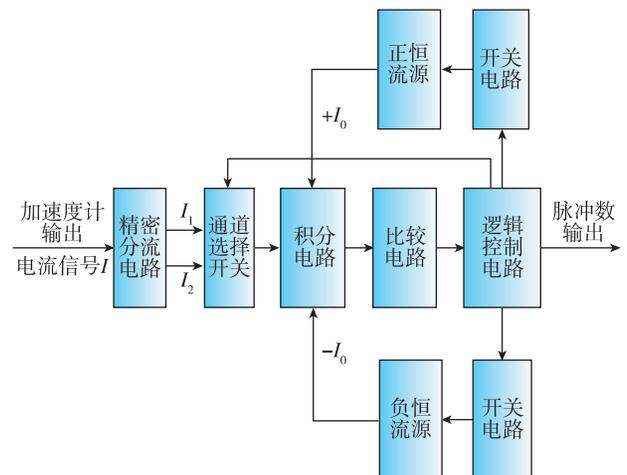


图 3 双通道 IF 转换电路组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the dual-channel IF conversion circuit

I_2 , 表明 I_1 通道分辨率较高但是量程较小, I_2 通道分辨率较低但是量程较大, 可根据实际应用进行选择。

2.4 软件算法设计

双通道光纤陀螺捷联惯导系统软件主要包括上电初始化、自检、状态准备、通道选择、对准和导航解算等功能, 工作流程如图 4 所示。

1) 上电后惯导先进行相关初始化, 随后进入准备模式;

2) 在准备模式下接收到对准指令(含导航方式: 自动进入导航或者手动进入导航)后, 惯导选择高精度通道(对应大陀螺和高分辨率加速度计组合), 进入对准模式;

3) 在对准模式下接收到对准指令, 则重新进入对准模式;

4) 若为自动导航方式, 在对准完成后自动选择大量程通道(对应小陀螺和大量程加速度计组合), 并进入导航模式;

5) 若为手动导航方式, 在对准模式下仅在接收到导航指令后才选择大量程通道, 并进入导航模式;

6) 在导航模式下接收到对准指令, 则重新选择高精度通道, 进入对准模式。

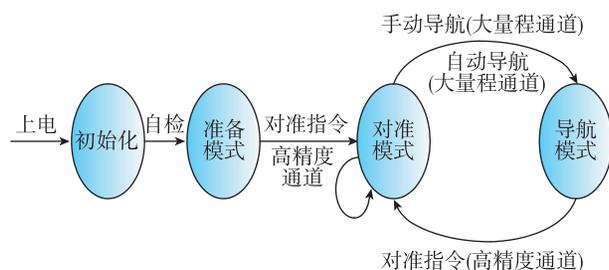


图 4 惯导系统工作流程图

Fig. 4 Work flow chart of the inertial navigation system

惯导系统具有自对准和导航功能, 并能够实时输出角速度、线加速度、速度、位置和姿态等信息。在包含阵风、发动机振动、人员上下车等环境下, 陀螺仪和加速度计的输出信号中包含了因载体摆动而产生的误差信息, 如果不及时补偿这种误差, 将直接影响对准精度。

为提高惯导的对准精度和环境适应性, 设计采用了一种新的抗扰动惯性系自对准算法。该算法针对各种扰动环境下惯性系准时因惯性器件偏差及外界扰动带来的比力干扰导致离散化解算对准精度差的问题, 通过对整个对准过程中的视速度

进行多项式拟合, 并利用拟合后的视速度代替容易受扰动引起跳变的单周期输出, 相较于传统惯性系粗对准方案能明显提升对准精度。

为提高惯导的导航精度, 综合采用了杆臂误差补偿、圆锥误差补偿、划桨误差补偿等多项补偿算法, 提高了惯导的导航精度。

3 样机研制与试验验证

3.1 双通道光纤陀螺捷联惯导样机

双通道光纤陀螺捷联惯导样机实物如图 5 所示, 惯导外形尺寸为 $382\text{mm} \times 245\text{mm} \times 245\text{mm}$, 质量小于 20kg 。



图 5 双通道光纤陀螺捷联惯导样机实物图

Fig. 5 The prototype of dual-channel FOG strapdown inertial navigation system

3.2 系统级标定试验验证

双通道光纤陀螺捷联惯导样机放置于高精度双轴转台进行系统级标定试验。样机根据测试设备的控制指令进行通道选择, 先选择高精度通道, 进行第一次标定试验, 再选择大量程通道, 进行第二次标定试验, 试验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 2 个通道的安装误差偏差都在 10^{-5} 量级, 表明 2 个通道安装方位一致性很好。对比加速度计标度因数, 高精度通道约为大量程通道的 6 倍, 具有更高的分辨率。大小陀螺的零位和标度因数为独立参数, 不具备对比性。

3.3 量程和陀螺精度试验验证

加速度计量程试验采用离心机测试, 先选择高精度通道, 依次增加离心机的转速, 当发现加速度计输出为满量程时停止试验, 再选择大量程通道, 用同样的方法进行测试, 得到样机的加速度计量程。陀螺量程试验用单轴温箱转台进行测试, 测试方法类似, 通过依次增加转台转速得到陀螺样机的最大量程。陀螺精度试验将样机放置于大理石平台, 先选择

表 1 样机系统级标定试验结果

Tab. 1 The results of system-level calibration test of the prototype

参数	高精度通道	大量程通道	2 个通道的偏差
K_{0x}/g	4.6476163×10^{-4}	4.6555006×10^{-4}	$-7.8843000 \times 10^{-7}$
K_{0y}/g	$-1.4316678 \times 10^{-3}$	$-1.4206451 \times 10^{-3}$	$-1.1022700 \times 10^{-5}$
K_{0z}/g	$-4.1241264 \times 10^{-4}$	$-4.2801792 \times 10^{-4}$	1.5605280×10^{-5}
$K_{1x}/(^{\circ}/s \cdot g)$	3.7981420×10^4	6.3290283×10^3	—
$K_{1y}/(^{\circ}/s \cdot g)$	3.7558848×10^4	6.2584528×10^3	—
$K_{1z}/(^{\circ}/s \cdot g)$	3.7785520×10^4	6.2963434×10^3	—
$K_{yx}/(^{\circ}/s \cdot g)$	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0
K_{xy}/rad	3.1836674×10^{-5}	2.8579115×10^{-5}	3.2575590×10^{-6}
K_{xz}/rad	6.6724390×10^{-5}	7.1081608×10^{-5}	$-4.3572180 \times 10^{-6}$
K_{zx}/rad	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0
K_{zy}/rad	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0
K_{yz}/rad	2.4075064×10^{-4}	2.5224478×10^{-4}	$-1.1494140 \times 10^{-5}$
$D_{0x}/[^{\circ}/h]$	$-1.8980286 \times 10^{-2}$	$-4.3330112 \times 10^{-2}$	—
$D_{0y}/[^{\circ}/h]$	$-7.0823782 \times 10^{-2}$	$-2.5148371 \times 10^{-2}$	—
$D_{0z}/[^{\circ}/h]$	$-5.3508761 \times 10^{-2}$	9.5448372×10^{-3}	—
$E_{1x}/(^{\circ}/\prime\prime)$	2.5985609×10^4	1.5086295×10^4	—
$E_{1y}/(^{\circ}/\prime\prime)$	2.6019767×10^4	1.5113701×10^4	—
$E_{1z}/(^{\circ}/\prime\prime)$	2.5968649×10^4	1.5069066×10^4	—
E_{yx}/rad	$-2.3769032 \times 10^{-4}$	$-1.6034151 \times 10^{-4}$	$-7.7348810 \times 10^{-5}$
E_{xy}/rad	$-8.8141161 \times 10^{-4}$	$-9.3183487 \times 10^{-4}$	5.0423260×10^{-5}
E_{xz}/rad	3.4750848×10^{-4}	2.7948562×10^{-4}	6.8022860×10^{-5}
E_{zx}/rad	3.3892002×10^{-5}	8.6971965×10^{-5}	$-5.3079963 \times 10^{-5}$
E_{zy}/rad	$-8.0634365 \times 10^{-4}$	$-8.1084020 \times 10^{-4}$	4.4965500×10^{-6}
E_{yz}/rad	2.8978305×10^{-4}	3.2484559×10^{-4}	$-3.5062540 \times 10^{-5}$

高精度通道静态采集 2h,再选择大量程通道静态采集 2h,并重复多次计算重复性。试验结果如表 2 所示。

表 2 样机量程和陀螺精度试验结果

Tab. 2 The results of dynamic range and gyro precision of the prototype

试验项目	高精度通道	大量程通道
X、Y、Z 加速度计量程/g	-6~6	-35~35
X、Y、Z 陀螺量程/ $(^{\circ})/s$	-40~40	-220~220
X 陀螺一次通电稳定性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.00076	0.00459
Y 陀螺一次通电稳定性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.00084	0.00501
Z 陀螺一次通电稳定性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.00091	0.00476
X 陀螺重复性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.000941	0.00294
Y 陀螺重复性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.001287	0.00258
Z 陀螺重复性(1σ)/ $(^{\circ})/h$	0.000933	0.00226

3.4 高动态振动环境试验验证

将样机安装在振动台上进行振动环境试验,考核产品在高动态复杂力学环境下的适应性。图 6 所示为样机振动试验减振前后响应频谱,可以看出减

振效果较好,高频部分响应得到有效抑制,峰值频率集中在 74Hz 左右,为减振器的谐振频率。振动过程中由于高分辨率加速度计通道会超过使用量程,选择大量程加速度计通道,大小陀螺通道可同时输出,振动精度如表 3 所示。可以看出,大小陀螺工作正常,但小陀螺振动精度优于大陀螺,表明其动态环

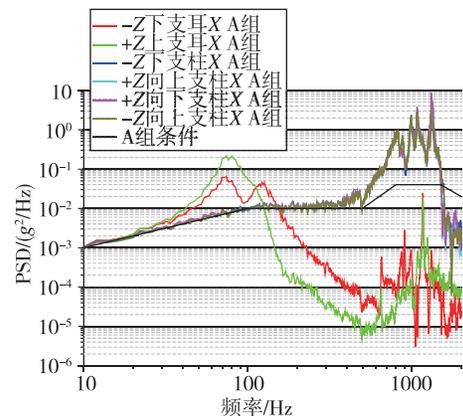


图 6 样机振动试验减振前后响应频谱图
Fig. 6 Response spectrum before and after vibration absorber during vibration test

表3 样机振动试验结果

Tab. 3 The results of vibration test of the prototype

参数	X向振动	Y向振动	Z向振动	
大量程 加速度计	A_x/g	-1.40×10^{-5}	-2.00×10^{-5}	-1.66×10^{-5}
	A_y/g	9.67×10^{-6}	1.78×10^{-4}	-1.22×10^{-5}
	A_z/g	3.92×10^{-5}	-3.57×10^{-5}	4.82×10^{-5}
$G_x/[(^\circ)/h]$	0.30	0.09	-0.06	
小陀螺	$G_y/[(^\circ)/h]$	-0.03	0.20	0.04
	$G_z/[(^\circ)/h]$	-0.08	0.26	-0.01
大陀螺	$G_x/[(^\circ)/h]$	2.54	0.87	0.66
	$G_y/[(^\circ)/h]$	0.63	1.36	-0.95
	$G_z/[(^\circ)/h]$	-0.78	1.24	1.13

境适应性更好。此外,结果表明,在低动态环境下,大小陀螺可以作为冗余设计,提升了惯导的可靠性。

3.5 动态跑车试验验证

为考核双通道光纤陀螺捷联惯导样机的导航精度,进行了动态跑车试验。试验选择孝感某路线相对较直的东西路段和南北路段,距离为5~10km。试验前,准备试验车、工装、样机、采集设备、全球定位系统(Global Positioning System,GPS)接收设备等,跑

车试验实物如图7所示。



图7 跑车试验实物图

Fig. 7 Physical diagram of vehicle test

跑车试验流程:惯导先预通电2min,然后选择高精度通道并启动对准,对准时间为3min,对准完成后选择大量程通道并启动导航,跑车时间在5min左右,试验中采集全程GPS信息作为基准信息。跑车试验共进行10次循环,其中东西向6次,南北向4次,试验结果如表4所示,圆概率误差(Circular Error Probability, CEP)统计结果9.5m,验证了产品的性能。

表4 跑车试验结果

Tab. 4 The results of vehicle test

方向	次数	GPS输出结果			惯导输出结果			导航误差		
		纬度/($^\circ$)	经度/($^\circ$)	高度/m	纬度/($^\circ$)	经度/($^\circ$)	高度/m	南北向/m	东西向/m	水平误差/m
东西向	1	30.919049	114.001157	14.2	30.919060	114.001150	20.0	1.2	-0.7	1.4
	2	30.918949	114.035642	23.2	30.919090	114.035520	29.0	15.7	-11.9	19.6
	3	30.919073	114.002165	13.9	30.918950	114.002230	20.4	-13.7	6.4	15.2
	4	30.918946	114.035605	23.1	30.919040	114.035500	28.9	10.5	-10.3	14.7
	5	30.919078	114.002262	13.9	30.919080	114.002220	19.4	0.2	-4.1	4.1
	6	30.918946	114.035600	23.2	30.918950	114.035610	28.8	0.4	1.0	1.1
南北向	7	30.926968	113.986239	22.3	30.926950	113.986230	26.6	-2.0	-0.9	2.2
	8	30.946035	113.986340	25.9	30.945930	113.986260	29.6	-11.7	-7.9	14.2
	9	30.920720	113.986239	20.2	30.920840	113.986300	24.7	13.4	6.0	14.7
	10	30.940350	113.986341	31.1	30.940390	113.986350	36.2	4.4	0.9	4.5
CEP									9.5	

4 结论

针对光纤陀螺惯导精度和动态性能相互矛盾的问题,本文从实际应用需求出发,通过试验发现,在自对准模式下,产品一般处于静态或准静态,精度要求高,动态性能要求不高,而在导航模式下,产品动态性能要求高,精度要求相对不高。因此,提出了一种双通道光纤陀螺捷联惯导系统,可根据需要灵活选择高精度通道或大量程通道。通过对基本原理、系统组成的介绍和样机研制、试验验证的

考核,证明了该方案的可行性,为其他光纤陀螺惯导系统提供了新的设计思路。

参考文献

- [1] 薛连莉,沈玉芃,徐月. 2019年国外惯性技术发展回顾[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 60-66.
Xue Lianli, Shen Yupeng, Xu Yue. Development and review of foreign inertial technology in 2019[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 60-66 (in Chinese).
- [2] 戴邵武,郑百东,李文国,等. 基于多参量模型的光

- 纤陀螺温度误差补偿[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(4): 78-82.
- Dai Shaowu, Zheng Baidong, Li Wenguo, et al. Temperature error compensation of fiber optic gyroscope based on multi-parameter model[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(4): 78-82(in Chinese).
- [3] Therice A M, Jonathan M W, Matthew J G, et al. Advances in optical gyroscopes[C]// Proceedings of 7th European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS), 2019.
- [4] 王鹏飞, 林媛. 高精度光纤陀螺技术的发展与思考[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(12): 11-15.
- Wang Pengfei, Lin Yuan. Development and prospect of high precision fiber optical gyroscope technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(12): 11-15(in Chinese).
- [5] 吴衍记. 高精度光纤陀螺发展现状及对策[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(4): 53-57.
- Wu Yanji. The current situation and countermeasures of high precision fiber optical gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(4): 53-57(in Chinese).
- [6] 张衡, 芮筱亭, 杨富锋, 等. 捷联惯组振动模糊控制方法[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(1): 1-7.
- Zhang Heng, Rui Xiaoting, Yang Fufeng, et al. Fuzzy control method for vibration of strap-down inertial measurement unit[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2018, 42(1): 1-7(in Chinese).
- [7] 姚俊杰, 王磊, 陈杏藩, 等. 大动态光纤陀螺标度因数双线性插值补偿模型[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(3): 400-404.
- Yao Junjie, Wang Lei, Chen Xingfan, et al. Bilinear interpolation compensation model for scale factor of high-dynamic range FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(3): 400-404(in Chinese).
- [8] 张勇刚, 孙娜, 李宁, 等. 基于 MEMS 陀螺辅助增大闭环光纤陀螺动态范围的方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3070-3074.
- Zhang Yonggang, Sun Na, Li Ning, et al. Method of increasing the dynamic range of closed-loop fiber optic gyroscope based on aided MEMS gyroscope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 3070-3074(in Chinese).
- [9] 袁慧铮, 陆俊清, 李星善, 等. 大量程高精度光纤陀螺的设计与实现[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(3): 59-62.
- Yuan Huizheng, Lu Junqing, Li Xingshan, et al. Design and implementation of high precision I-FOG with wide dynamic range[J]. Navigation Positioning and Timing, 2014, 1(3): 59-62(in Chinese).
- [10] Chamoun J, Dignonnet M J. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5664-5667.
- [11] 李绪友, 王长伟, 邹继斌. 集成光学器件对光纤陀螺稳定性影响的研究[J]. 光子学报, 2005, 34(6): 830-834.
- Li Xuyou, Wang Changwei, Zou Jibin. The influence of integrated optic device's stability for fibre optic gyroscopes[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(6): 830-834(in Chinese).
- [12] 王夏霄, 张猛, 李传生, 等. 数字闭环光纤陀螺动态模型研究[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 1-5.
- Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Li Chuansheng, et al. Research on dynamic model of digital closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 1-5(in Chinese).
- [13] 宋雪杰, 王晓东, 韩军海. 电流/频率转换类型综述[J]. 导航与控制, 2009, 8(1): 31-38.
- Song Xuejie, Wang Xiaodong, Han Junhai. The analysis of the type of the current/frequency converter[J]. Navigation and Control, 2009, 8(1): 31-38(in Chinese).
- [14] 黄丽娟, 邵志浩, 郑永强, 等. 加速度计 I/F 变换电路数字补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 547-551.
- Huang Lijuan, Shao Zhihao, Zheng Yongqiang, et al. Digital compensation for I/F converter of accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(4): 547-551(in Chinese).
- [15] 程远超, 黄伟, 赵新强, 等. 基于 FPGA 的大比例系数高精度 I/F 电路设计[J]. 导航与控制, 2018, 17(2): 59-66.
- Cheng Yuanchao, Huang Wei, Zhao Xinqiang, et al. Design of large proportional coefficient and high precision I/F convert circuit based on FPGA[J]. Navigation and Control, 2018, 17(2): 59-66(in Chinese).
- [16] 黄武扬, 黎坤, 吴一. 高分辨率模数转换电路的设计及误差分析[J]. 导航与控制, 2019, 18(5): 113-119.
- Huang Wuyang, Li Kun, Wu Yi. Design and error analysis of high resolution analog-to-digital conversion circuit[J]. Navigation and Control, 2019, 18(5): 113-119(in Chinese).