

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.018

单轴高速转台设计及速率精度测试研究

侯海鹏¹, 潘烨¹, 陈元正¹, 陈志龙¹, 杨建¹, 罗仕挺²

(1. 杭州集普科技有限公司, 浙江 杭州 311199; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘 要: 基于大量陀螺仪的校准要求, 通过对校准装置结构、控制系统、硬件电路和上位机软件的设计, 研制一台可以实现陀螺仪全量程校准的高速率精度单轴高速转台。利用角位置测量系统、安全带位移传感器和激光测速仪 3 种方式验证转台的速率精度。试验结果表明: 转台的速率精度和速率平稳性皆符合 GJB 1728A—2019《速率转台通用规范》的三级指标要求。

关键词: 陀螺仪; 校准; 高速转台; 速率精度; 速率平稳性

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0091-05

Design and Speed Accuracy Test of Single-axis High-speed Turntable

HOU Haipeng¹, PAN Ye¹, CHEN Yuanzheng¹, CHEN Zhilong¹, YANG Jian¹, LUO Shiting²

(1. Hangzhou Jebbool Technology Co., Ltd., Hangzhou 311199, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Based on the calibration requirements of large range gyroscope, a high speed accuracy single-axis high-speed turntable is developed by designing the structure, control system, hardware circuit and software of upper computer. The speed accuracy is verified by angle position measurement system, seat belt displacement sensor and laser velocimeter. The test results show that the speed accuracy and speed smoothness of the turntable meet the requirements of the three-level index of GJB 1728A—2019 “General Specification for Speed Turntable”.

Keywords: gyroscope; calibration; high-speed turntable; speed accuracy; speed smoothness

0 引言

惯性导航系统通过加速度计和陀螺仪可获取物体的位置和姿态, 陀螺仪的误差可能会随时间累积, 进而影响惯性导航系统的准确性^[1-6]。定期对惯性陀螺仪进行校准是确保其在工作期间保持高准确性的重要措施^[7-9]。根据 JJF1535—2015《微机电(MEMS)陀螺仪校准规范》可知, 速率转台是实现陀螺仪精度校准的常用设备, 且已有不少的研究基础和成果^[10-21]。根据检测标准的要求, 用于校准陀螺仪等惯性元件的测试转台等设备, 自身的精度在原则上需要超出一个数量级^[22]。对于量程大于 10°/s 的陀螺仪而言, 转台的速率精度及速率平稳性至少需要达到 0.05%。为满足大量程陀螺仪的校准需求, 本文研制了一种高速率精度单轴高速转台, 采用多种方式测量了转台的速率精度及平稳性。

1 转台机械结构设计

1.1 转台主要技术指标

本文研制的转台指标参考 GJB1728A—2019《速率转台通用规范》的三级规范, 如表 1 所示。

表 1 转台技术指标

参数	数值
速率范围/(°/s)	$\pm 1 \sim \pm 16\ 000$
最大角加速度/(°/s)	400
速率精度及平稳性	$5.00 \times 10^{-3} (1^\circ/\text{s} \leq \omega < 10^\circ/\text{s})$ $3.00 \times 10^{-4} (\omega \geq 10^\circ/\text{s})$

1.2 转台结构设计

转台主要由台面、轴、底座等加工件, 及轴承、电机、圆光栅等采购件组成, 如图 1 所示。

第一作者简介: 侯海鹏(1983—), 男, 河南长垣人, 工程师, 硕士, 研究方向为传感器技术及系统集成, haipeng.hou@jebbool.com。

通信作者简介: 罗仕挺(1999—), 男, 浙江慈溪人, 硕士, 研究方向为自动化, 1146065789@qq.com。

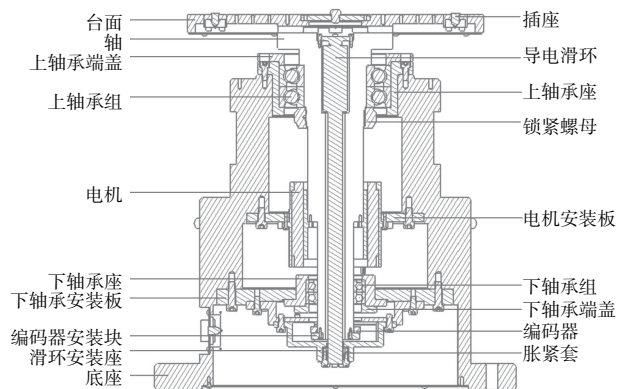


图1 转台结构图

台面上下表面都均布了螺纹孔,用于安装被测传感器和固定传感器线缆。轴支承传动零件和传递运动,其中心通孔用于导电滑环走线。底座确保转台运行过程中的稳定性。考虑高速,轴承一端固定一端游走。轴承类型选择角接触球轴承,同时承受轴向力和径向力。转台驱动元件采用直驱式无刷直流电机。转台反馈元件选用26位高精度的绝对式圆光栅,实现位置和速度反馈。

2 转台控制系统设计

2.1 转台控制系统方案设计

单轴转台作为一种多回路控制系统,其核心主要集中在频率响应特性上,即转台需要在规定的误差限度内能连续且稳定地匹配输入信号的变动,确保输出的位置和速度符合预期的平滑跟随效果^[23]。因此,转台控制系统在设计时最好采用三闭环反馈控制策略^[24],包括电流环、速度环和位置环。电流环和速度环的旨在增强转台在运动过程中的抗干扰性能,减少干扰因素的影响。位置环旨在降低系统稳定状态下的稳态误差,提升整个系统的控制精度。

2.2 转台硬件电路设计

转台内部硬件电路如图2所示,主要分为传感器校准部分和电机驱动部分。传感器校准部分是将待校准陀螺仪安装在转台台面上,通过转台内部导电滑环将线路传输到转台外部数显万用表上,从而读取陀螺仪的电压信号并输出到PC机的人机交互界面上;电机驱动部分是PC机通过CAN卡和驱动器通信,并发送相应指令控制电机运动,圆光栅将电机实时角位置和角速度反馈给驱动器。其中,主电源用于给驱动器供电,辅助电源用于给主电源和驱动器提供使能。

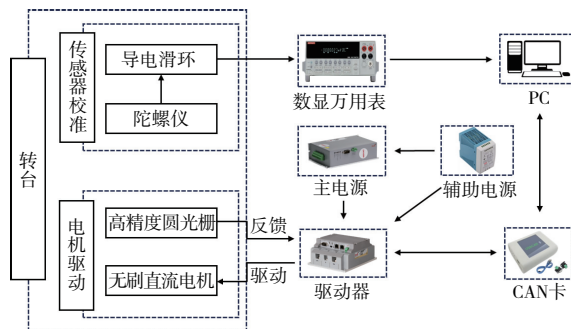


图2 转台硬件电路示意图

2.3 上位机软件设计

基于LabVIEW软件开发设计了GUI人机交互系统,主要分为4大模块:转台通信模块、转台操作模块、转台测试模块和传感器校准模块。转台通信模块实现PC上位机和伺服驱动器的通信;转台操作模块实现转台限速保护、转台使能、启动、停止和急停;转台测试模块根据GJB1801—1993《惯性技术测试设备主要性能测试方法》来测试转台的速率性能;传感器校准模块根据JJF1535—2015《微机电(MEMS)陀螺仪校准规范》中提及的陀螺仪输入角速度和输出电压的关系来校准传感器。

3 速率精度及平稳性测试方案

3.1 角位置测量系统测试方案

转台的角位置测量系统集成在转台软件系统中的转台测试区。该方案采用定时测角法,定时间隔设定为0.7s,利用转台自身的编码器反馈测试转台的速率精度和速率平稳性。具体测试原理如下:让转台处于速率工作模式,通过点击转台测试模块中的按钮或者手动输入速率大小从而使PC机发送相应的速率指令给伺服驱动器,进而控制转台按需运动。当转台以给定的速率稳定运转后,按下记录按钮,系统每隔0.7s读取转台的实时角位置值,连续测量共11次,得到10次角位置的实际增量值 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{10}$ 。此时,转台的速率精度和速率平稳性计算公式如下:

$$U_{\omega} = \frac{1}{\theta_g} |\bar{\theta} - \theta_g| \quad (1)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{\bar{\theta}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta})^2} \quad (2)$$

式中: θ_g 为转台给定速率下在规定采样时间间隔内的角度增量名义值; $\bar{\theta}$ 为转台给定速率下在规定

采样时间间隔内角度增量实测值的平均值; N 为测试次数, U_{ω} 为转台速率精度; σ_{ω} 为转台速率平稳性。

3.2 安全带位移传感器测试方案

安全带位移传感器是一种用于在汽车碰撞试验下测量车辆安全带位移的传感器,工作时基于光电反射原理,将检测纸带脉冲转换为模拟量,进而实现对安全带位移的高速测量。配对使用的纸带由黑白相间的条纹组成,采用高对比度黑白印刷。

安全带位移传感器测试方案如图3所示。首先,将黑白条纹纸带粘贴在转台台面的侧边。然后,把安全带位移传感器安装在铝型材机架上,调整安全带位移传感器和黑白条纹纸带间的距离在1 mm以内,以保证安全带位移传感器能充分识别黑白条纹纸带的运动。最后,将安全带位移传感器的输出接入到示波器中,读取其信号波形。

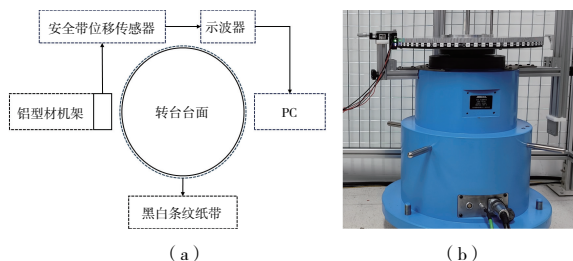


图3 安全带位移传感器测试方案

该方案采用定角测时法来检测转台的速率精度和速率平稳性,具体如下:对于转台 $10^{\circ}/s$ 及以上的速率点,定角间隔为 360° 。纹纸中黑色与白色的宽度均为1 mm,台面直径为450 mm,则台面外圆周长 450π mm。此时,将台面侧边展开,取700个间隔的黑白纹纸粘贴在台面侧边,再用黑纹纸补充台面侧边剩余的区域,如图4所示。

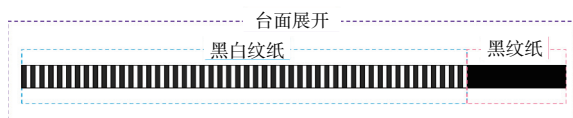


图4 黑白纹纸示意图

安全带位移传感器在识别黑色条纹时示波器出现高电平,识别白色条纹时示波器出现低电平,如图5所示。此时,通过读取每两段长时间示波器的时间间隔 T_{θ} ,即为转台每转一周的时间。

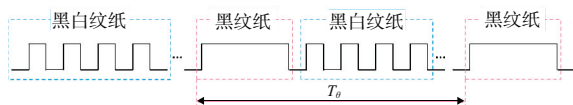


图5 示波器读取信号

转台的速率精度和速率平稳性计算公式如下:

$$U_{\omega} = \frac{1}{T_g} |\bar{T} - T_g| \quad (3)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (4)$$

式中: T_g 为转台给定速率下转过定角间隔所用时间的名义值; $\bar{T}$ 为转台给定速率下转过定角间隔实测时间的平均值。

3.3 激光测速仪测试方案

激光测速仪是应用于车辆碰撞速度检测及其他移动测速的速度测量系统,通过检测物体穿过两组激光传感器的时间差来计算速度。当物体进入传感位置即触发测量,通过后立即显示速度结果。

激光测速仪测试方案如图6所示。先将激光测速仪的发射端和接收端分别安装在铝型材机架上,调整两者位置,使接收端接收发射端信号;接着将摆杆通过定位销和螺栓安装在转台台面上;最后将激光测速仪的输出信号连接到示波器上,此时的激光测速仪等效为一个光电开关。

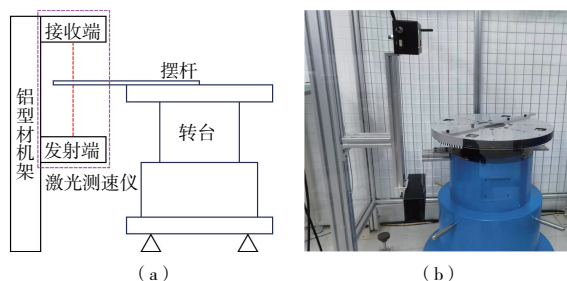


图6 激光测速仪测试方案

该方案同样使用定角测时法来检测转台的速率精度和速率平稳性。当转台带动摆杆转动时,若摆杆挡住激光测速仪发射端的信号,示波器则会显示高电平信号,反之显示低电平信号。因此,只需读取示波器每两个高电平信号间的时间间隔,即为转台转动一圈的时间。转台的速率精度和速率平稳性计算见式(3)和式(4)。

4 速率精度及平稳性试验

4.1 角位置测量系统测试

选择转台的测试速率点共15个,分别为 $1^{\circ}/s$ 、 $5^{\circ}/s$ 、 $10^{\circ}/s$ 、 $25^{\circ}/s$ 、 $50^{\circ}/s$ 、 $100^{\circ}/s$ 、 $200^{\circ}/s$ 、 $400^{\circ}/s$ 、 $1\,000^{\circ}/s$ 、 $2\,000^{\circ}/s$ 、 $5\,000^{\circ}/s$ 、 $10\,000^{\circ}/s$ 、 $3\,000^{\circ}/s$ 、 $15\,000^{\circ}/s$ 、 $16\,000^{\circ}/s$ 。已知系统采样时间为

0.7 s,则选取的速率点对应的角度增量名义值 θ_g 分别为 0.7° 、 3.5° 、 7° 、 17.5° 、 35° 、 70° 、 140° 、 280° 、 700° 、 $1\ 400^\circ$ 、 $3\ 500^\circ$ 、 $7\ 000^\circ$ 、 $9\ 100^\circ$ 、 $10\ 500^\circ$ 、 $11\ 200^\circ$ 。根据角位置变化率结果计算出各个速率点下的角度增量实测值的平均值 $\bar{\theta}$,再将 θ_g 和 $\bar{\theta}$ 分别代入式(1)和式(2),可得转台的速率精度和速率平稳性,详细结果如表2所示。

表2 角位置测量系统数据处理结果				
速率/($^\circ/\text{s}$)	$\bar{\theta}/(^\circ)$	速率精度	平稳性	要求
1	0.699 881 267	1.696×10^{-4}	1.675×10^{-4}	5.00×10^{-3}
	0.699 889 851	1.574×10^{-4}	6.140×10^{-5}	
	0.699 895 215	1.497×10^{-4}	1.525×10^{-4}	
5	3.499 423 503	1.647×10^{-4}	5.894×10^{-5}	
	3.499 459 981	1.543×10^{-4}	5.132×10^{-5}	
	3.499 447 107	1.580×10^{-4}	2.477×10^{-5}	
10	6.998 892 068	1.583×10^{-4}	3.102×10^{-5}	
	6.998 843 788	1.652×10^{-4}	3.401×10^{-5}	
	6.998 874 902	1.607×10^{-4}	1.583×10^{-5}	
25	17.497 210 86	1.594×10^{-4}	9.058×10^{-6}	3.00×10^{-4}
	17.497 185 11	1.609×10^{-4}	8.042×10^{-6}	
	17.497 219 44	1.589×10^{-4}	9.412×10^{-6}	
50	34.994 393 82	1.602×10^{-4}	2.396×10^{-6}	
	34.994 386 31	1.604×10^{-4}	5.341×10^{-6}	
	34.994 412 06	1.597×10^{-4}	5.494×10^{-6}	
100	69.988 743 43	1.608×10^{-4}	6.363×10^{-6}	
	69.988 785 49	1.602×10^{-4}	2.306×10^{-6}	
	69.988 770 47	1.604×10^{-4}	2.249×10^{-6}	
200	139.977 584 9	1.601×10^{-4}	1.850×10^{-6}	
	139.977 606 4	1.600×10^{-4}	2.014×10^{-6}	
	139.977 566 7	1.602×10^{-4}	1.715×10^{-6}	
400	279.955 228 9	1.599×10^{-4}	7.910×10^{-7}	
	279.955 207 4	1.600×10^{-4}	1.506×10^{-6}	
	279.955 176 3	1.601×10^{-4}	1.004×10^{-6}	
1 000	699.888 028 8	1.600×10^{-4}	2.650×10^{-7}	
	699.888 045 9	1.599×10^{-4}	2.336×10^{-7}	
	699.888 070 6	1.599×10^{-4}	3.489×10^{-7}	
2 000	1 399.776 087	1.599×10^{-4}	3.876×10^{-7}	
	1 399.776 084	1.599×10^{-4}	2.497×10^{-7}	
	1 399.776 113	1.599×10^{-4}	2.415×10^{-7}	

续表2				
速率/($^\circ/\text{s}$)	$\bar{\theta}/(^\circ)$	速率精度	平稳性	要求
5 000	3 499.440 131	1.600×10^{-4}	7.969×10^{-7}	
	3 499.440 788	1.598×10^{-4}	6.761×10^{-7}	
	3 499.440 338	1.599×10^{-4}	7.347×10^{-7}	
10 000	6 998.879 472	1.601×10^{-4}	4.641×10^{-7}	3.00×10^{-4}
	6 998.885 071	1.593×10^{-4}	6.608×10^{-7}	
	6 998.885 177	1.593×10^{-4}	5.527×10^{-7}	
13 000	9 098.543 445	1.601×10^{-4}	2.136×10^{-7}	
	9 098.544 999	1.599×10^{-4}	2.730×10^{-7}	
	9 098.545 060	1.599×10^{-4}	3.022×10^{-7}	
15 000	10 498.315 48	1.604×10^{-4}	2.122×10^{-7}	
	10 498.316 01	1.604×10^{-4}	2.072×10^{-7}	
	10 498.316 64	1.604×10^{-4}	2.081×10^{-7}	
16 000	11 198.200 18	1.607×10^{-4}	3.140×10^{-7}	
	11 198.201 24	1.606×10^{-4}	3.006×10^{-7}	
	11 198.201 99	1.605×10^{-4}	2.041×10^{-7}	

4.2 安全带位移传感器测试

该方案采用转台外部的测时与测角元件。为更全面、准确的测试,选取转台的速率点尽量与4.1方案避开,分别为 $10^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$ 、 $50^\circ/\text{s}$ 、 $80^\circ/\text{s}$ 、 $100^\circ/\text{s}$ 、 $300^\circ/\text{s}$ 、 $500^\circ/\text{s}$ 、 $800^\circ/\text{s}$ 、 $1\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $3\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $5\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $8\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $10\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $13\ 000^\circ/\text{s}$ 、 $16\ 000^\circ/\text{s}$ 。已知转台每转一圈的角度为 360° ,则选取的速率点对应的时间名义值 T_g 分别为 36 s 、 12 s 、 7.2 s 、 4.5 s 、 3.6 s 、 1.2 s 、 0.72 s 、 0.45 s 、 0.36 s 、 0.12 s 、 0.072 s 、 0.045 s 、 0.036 s 、 $0.027\ 692\text{ s}$ 、 $0.022\ 5\text{ s}$ 。此时,根据测试结果计算出各个速率点下实测时间的平均值 $\bar{T}$,再将 T_g 和 $\bar{T}$ 分别代入式(3)和式(4),可得转台的速率精度和速率平稳性,结果如表3所示。

表3 安全带位移传感器数据处理结果				
速率/($^\circ/\text{s}$)	$\bar{T}/\text{s}$	速率精度	平稳性	要求
10	35.995 8	1.17×10^{-4}	1.55×10^{-4}	3.00×10^{-4}
30	12.000 16	1.33×10^{-5}	1.05×10^{-5}	
50	7.200 25	3.47×10^{-5}	5.64×10^{-5}	
80	4.499 96	8.89×10^{-6}	4.08×10^{-5}	
100	3.600 01	2.78×10^{-6}	4.23×10^{-5}	
300	1.200 004	3.33×10^{-6}	1.53×10^{-5}	

续表 3

速率/(°/s)	$\bar{T}/s$	速率精度	平稳性	要求
500	0.720 002	2.78×10^{-6}	2.43×10^{-5}	
800	0.449 998	4.44×10^{-6}	4.42×10^{-5}	
1 000	0.359 998	5.56×10^{-6}	5.52×10^{-5}	3.00×10^{-4}
3 000	0.119 999	8.33×10^{-6}	7.30×10^{-5}	
5 000	0.072 000 8	1.11×10^{-5}	4.38×10^{-5}	
8 000	0.044 999 2	1.78×10^{-5}	7.01×10^{-5}	
10 000	0.036 000 4	1.11×10^{-5}	5.11×10^{-5}	
13 000	0.027 693 6	4.67×10^{-5}	7.46×10^{-5}	
16 000	0.022 500 81	3.60×10^{-5}	2.32×10^{-5}	

4.3 激光测速仪测试

该方案选择测量的速率分别是 $10^\circ/s$ 、 $25^\circ/s$ 、 $50^\circ/s$ 、 $100^\circ/s$ 、 $200^\circ/s$ 、 $400^\circ/s$ 、 $1\ 000^\circ/s$ 、 $2\ 000^\circ/s$ 、 $5\ 000^\circ/s$ 、 $10\ 000^\circ/s$ 、 $13\ 000^\circ/s$ 、 $16\ 000^\circ/s$ 。同理,选取的速率点对应的时间名义值 T_g 分别为 36 s、14.4 s、7.2 s、3.6 s、1.8 s、0.9 s、0.36 s、0.18 s、0.072 s、0.036 s、0.027 692 s、0.022 5 s。此时,根据测试结果计算出各个速率点下实测时间的平均值 $\bar{T}$,再将 T_g 和 $\bar{T}$ 分别代入式(3)和式(4),可得转台的速率精度和速率平稳性,结果如表 4 所示。

表 4 激光测速仪数据处理结果

速率/(°/s)	$\bar{T}/s$	速率精度	平稳性	要求
10	36.002	5.56×10^{-5}	1.20×10^{-4}	
25	14.400 5	3.47×10^{-5}	8.81×10^{-5}	
50	7.199 8	2.78×10^{-5}	1.43×10^{-4}	
100	3.599 9	2.78×10^{-5}	2.76×10^{-4}	
200	1.799 96	2.22×10^{-5}	8.76×10^{-5}	
400	0.900 01	1.11×10^{-5}	1.10×10^{-4}	3.00×10^{-4}
1 000	0.360 008	2.22×10^{-5}	8.76×10^{-5}	
2 000	0.179 998	1.11×10^{-5}	9.73×10^{-5}	
5 000	0.072 001	1.39×10^{-5}	1.02×10^{-4}	
10 000	0.036 001	2.78×10^{-5}	2.05×10^{-4}	
13 000	0.027 692 8	1.78×10^{-5}	5.05×10^{-5}	
16 000	0.022 499 3	3.11×10^{-5}	4.71×10^{-5}	

4.4 测试方案结果讨论

上述测试结果表明,3 种方案均验证了转台的速率精度及平稳性满足本文所提指标要求,但

在测量结果的准确性方面存在一定差距。具体而言,通过内置编码器实现的角位置测量系统,尽管操作方便,但其测量结果会因转台自身的机械误差和电气干扰而稍显不足。采用定角测时法的安全位移传感器和激光测速仪作为独立的外部测量工具,由于它们与转台驱动系统的分离,能有效避免转台自身误差的干扰,准确性更高,使测量结果能够更准确地反映出转台的实际运动性能。

5 结语

本文针对大量程陀螺仪的校准要求,研制了一台符合 GJB1728A—2019《速率转台通用规范》三级速率精度及平稳性要求的高速转台,具体如下:

1)在转台机械结构方面,完成了主要加工工件台面、轴和底座的设计,以及主要采购件轴承、电机和反馈元件的选型;

2)在转台控制系统方面,采用电流、速度和位置的三闭环 PID 控制方式,并对转台的硬件电路进行了设计,通过 LabVIEW 软件开发设计了上位机交互界面,实现转台的性能测试与陀螺仪的校准;

3)在测试方面,通过角位置测量系统测试方案、安全带位移传感器测试方案和激光测速仪测试方案,验证了转台的速率精度及平稳性符合预期要求。

参考文献:

- [1] 邢朝洋. 高性能 MEMS 惯性器件工程化关键技术研究[D]. 北京:中国航天科技集团公司第一研究院,2017.
- [2] 毛清华,周庆,安炎基,等. 惯导与视觉信息融合的掘进机精确定位方法[J]. 煤炭科学技术,2024,52(5): 236-248.
- [3] 张金鹏,王鲁,魏琦,等. 双通道 MEMS 陀螺仪精密频率估计研究[J]. 计算机仿真,2025,42(4):545-551.
- [4] 李娇,向洲,陈华,等. 基于 MPU6050 六轴陀螺仪的高精度动态水平姿态监测系统的开发与应用[J]. 河南科技,2025,44(5):38-43.
- [5] 刘旭,杨智勇,张道德,等. 基于卡尔曼滤波的陀螺仪电参数测量系统设计[J]. 湖北工业大学学报,2025,40(1):7-11,19.
- [6] 高阳,贾佳,孟琳,等. MEMS 速率陀螺仪力平衡控制回路相位误差分析与验证[J]. 光学 精密工程,2024,32(20):3059-3070.
- [7] 张胜男. MEMS 惯性测量单元测试标定方法研究[D]. 太原:中北大学,2019.

(下转第 113 页)

- 收稿日期: 2024-01-22

- [8] 柳贵福. 光学院陀螺输入输出特性建模及补偿技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2002.
- [9] 魏代芹. 转台控制系统设计与实现及基于神经网络的参数优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 王清源,王晓燕,张晓明,等. 基于转台实验的 MEMS 陀螺仪自动化标定软件设计[J]. 舰船电子工程, 2024,44(6):53-56.
- [11] KOKUYAMA W, WATANABE T, NOZATO H, et al. Angular velocity calibration system with a self-calibratable rotary encoder[J]. Measurement, 2016, 82:246-253.
- [12] FENG Y, XU Q J. Application of PID control algorithm based on improved BP neural network to turntable system[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490/491/492/493/494/495:191-194.
- [13] JUNG J W, LEU V Q, DO T D, et al. Adaptive PID speed control design for permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2):900-908.
- [14] 李醇铄. 三轴电控转台的自适应控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

- 收稿日期:2024-02-01