

文章编号 :1003-5850(2014)11-0061-03

MEMS 陀螺主要性能指标研究

程秀芹,翁志能,张建飞,吴红霞,张勇华

(北方自动控制技术研究所,太原 030006)

摘 要:以 ADI 公司的微角速度单轴陀螺仪 ADXRSXXX 为例,对 MEMS 陀螺的主要性能指标进行了研究,并进行了标定实验,计算了主要性能指标。通过数据拟合方法得到了该陀螺的校准曲线,经过分析计算,该陀螺的精度较高,在姿态测试系统中有一定的应用前景。

关键词:微机电系统,陀螺仪,惯性传感器,标定,校准曲线

中图分类号:V241.622

文献标识码:A

Study of MEMS Gyro's Main Capability Target

CHENG Xiu-qin, WENG Zhi-neng, ZHANG Jian-fei, WU Hong-xia, ZHANG Yong-hua

(North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Choosing the ADI's micro-angular-velocity-monaxial Gyroscope ADXRSXXX as a case, this paper makes a research on the MEMS Gyroscope's main capability target, and experimentizes on calibration and then calculates the main capability target. Through the least squares fitting method, the Gyroscope calibration curve is obtained, analyzing and calculating the data from the calibration curve, The Gyroscope's accuracy is very high, and it has far-reaching applications on the attitude test system.

Key words: MEMS gyroscope, geomagnetic sensor, calibration, calibration curve

引 言

惯性导航是一门涉及精密机械、计算机技术、微电子、光电子、光学、自动控制、材料等多种学科和领域的综合技术^[1]。应用需求的增长和现代科技的蓬勃发展支撑着惯性传感器技术的不断进步^[2]。在工程应用中,选择惯性器件主要考虑以下几方面的因素:传感器的功耗、振动灵敏度、精度、动态范围、带宽、物理尺寸、成本等^[3]。本文针对飞行器姿态测试系统中应用的 ADI 公司生产的微角速度单轴陀螺仪 ADXRSXXX 研究其主要性能指标。

1 MEMS 陀螺性能指标计算方法

通常衡量 MEMS 陀螺性能的指标有标度因数、标度因数非线性、零偏、零偏重复性和零偏稳定性。

下面介绍这些性能的计算方法^[4]。

1.1 标度因数生成方法

标度因数通常用 K 表示,它是指陀螺的输出量与输入角速率的比值,也就是在整个输入速率范围内根据所测得的输入输出数据,用最小二乘法拟合求得的直线斜率,用这种方法拟合出来的直线由于存在拟合误差,所以为了解决这种误差,后面又引出了标度因数的非线性度、标度因数的零偏、重复性和稳定性等概念,这些概念都分别从不同角度反映了该拟合直线与实际的陀螺输入输出数据的偏离程度^[5]。

首先针对线性输出器件建立一个陀螺输入输出的线性模型:

$$F_j = K \bullet \Omega_{ij} + F_0 + V_j \quad (1)$$

其中第 j 个输入角速度为 Ω_{ij} 时陀螺的输出值为 F_j ; F_0 为拟合零位; V_j 为拟合误差。式中的 K 和 F_0

* 收稿日期 2014-07-21,修回日期 2014-09-14

** 作者简介:程秀芹,女,1985 年生,助理工程师,研究方向:检测与维修。

可用最小二乘法求出,计算公式如下所示。

$$K = \frac{\sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \cdot F_j - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \cdot \sum_{j=1}^M F_j}{\sum_{j=1}^M \Omega_{ij}^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \right)^2} \quad (2)$$

$$F_0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_j - \frac{K}{M} \sum_{j=1}^M \Omega_{ij} \quad (3)$$

在进行实验时,可以假设以下参数:

(1) 设第 j 个输入角速度时陀螺输出的平均值为 $\overline{F_j}$, 用表达式可表示为:

$$\overline{F_j} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N F_{jp} \quad (4)$$

其中 N 为采样次数, F_{jp} 为陀螺在第 j 个输入角速度 Ω_{ij} 时第 P 个输出值。

(2) 转台静止时,陀螺的输出平均值为 $\overline{F_r}$, 用表达式可表示为:

$$\overline{F_r} = \frac{1}{2} (\overline{F_s} + \overline{F_e}) \quad (5)$$

其中 $\overline{F_s}$ 为测试开始时陀螺输出的平均值, $\overline{F_e}$ 为测试结束时陀螺输出的平均值。

(3) 设第 j 个输入角速度 Ω_{ij} 时陀螺的输出值为 F_j , 用表达式可表示为:

$$F_j = \overline{F_j} - \overline{F_r} \quad (6)$$

1.2 标度因数非线性度生成方法

标度因数通过式(2)计算出来后,陀螺的输入输出关系就可以用拟合直线来表示,用式(7)来表示,陀螺输出特性的逐点非线性偏差用式(8)来计算,标度因数非线性度用式(9)来计算。

$$\hat{F}_j = K \cdot \Omega_{ij} + F_0 \quad (7)$$

$$a_j = \frac{\hat{F}_j - F_j}{|F_m|} \quad (8)$$

$$K_a = \max |a_j| \quad (9)$$

其中: \hat{F}_j 为第 j 个输入角速度 Ω_{ij} 所对应拟合直线上计算出的陀螺输出值, a_j 为第 j 个输入角速度 Ω_{ij} 时输出值的非线性偏差; F_m 为陀螺输出的单边幅值, K_0 为标度因数非线性度。

1.3 零偏、零偏稳定性和零偏重复性计算方法

零偏是指 MEMS 陀螺在零输入状态下较长时间内的输出的平均值,用 B_0 来表示;零偏稳定性是指 MEMS 陀螺在零输入状态下输出值的均方差,用 B_s 来表示;零偏重复性是指在同样条件下重复测试陀螺零偏之间的一致程度,用 B_r 来表示^[6]。

零偏、零偏稳定性和零偏重复性的计算公式如下所示:

$$B_0 = \frac{1}{K} \cdot \overline{F} \quad (10)$$

$$B_s = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (F_i - \overline{F})^2} \quad (11)$$

$$B_r = \sqrt{\frac{1}{(Q-1)} \sum_{i=1}^Q (B_{0i} - \overline{B_0})^2} \quad (12)$$

其中 \overline{F} 为陀螺输出量的平均值; F_i 为陀螺在 t_i 时刻输出的单边幅值; K 为标度因数; n 为采样点数; B_{0i} 为第 i 个试验温度点的陀螺零偏; $\overline{B_0}$ 为零偏平均值; Q 为零偏测试次数。

2 测试方法

2.1 标度因数及标度因数非线性测试

将装有 MEMS 陀螺的板子用夹具牢固安装在转台上,使其敏感轴平行于速率转台的旋转轴,并且与当地水平面垂直。选择下面所示的速率点从正反两个行程测试陀螺的输出电压值数据(单位为 $^{\circ}/s$): -300、-240、-160、-120、-60、-40、0、25、70、100、135、185、230、300。测试时,先给陀螺通电预热 5min~10min,打开转台电源进行测试。根据上面提供的速率点依次从小到大改变转台输入角速率,从正反两个方向进行 4 次测试,记录下转台各个速率输入点的输出数据,并计算出各组数据的平均值,最后利用最小二乘法进行数据处理,根据前面所列出的公式就可以得到标度因数和标度因数非线性。

2.2 零偏、零偏稳定性和零偏重复性测试

将装有 MEMS 陀螺的板子用夹具牢固安装在转台上,使陀螺的输入轴垂直于当地水平面。接通电源,陀螺通电预热后就可以开始测试了,1s 采样间隔,采样时间 1200s。本次实验共测 4 次,尽量避免外界干扰,得到零偏、零偏稳定性和零偏重复性比较真实性的测试数据。

3 标定结果

ω_x 轴、 ω_y 轴、 ω_z 轴的数据采集结果分别如表 1、表 3、表 4 所示,对应的校准曲线分别如图 1、图 2、图 3 所示,零偏电压如表 5 所示。根据数据采集结果以及校准曲线可计算出 MEMS 陀螺的标度因数、线性度、迟滞、重复性、精度等性能指标^[7],如表 6 所示。

14 个输入转台速率所对应的正行程输出电压值

表 1 ω_x 轴数据采集结果

测试次数 输出电压 (V) 转台速率 ($^{\circ}/\text{sec}$)	第一次		第二次		第三次		第四次	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
-300	0.251348	0.248927	0.249736	0.258732	0.257372	0.249873	0.252831	0.249822
-240	0.723459	0.732847	0.724732	0.739288	0.723192	0.739282	0.728373	0.739291
-160	1.373145	1.373674	1.379323	1.378373	1.367732	1.363828	1.357822	1.362882
-120	1.697853	1.698827	1.687372	1.698323	1.687263	1.672662	1.672636	1.686325
-60	2.185053	2.184982	2.186372	2.185626	2.187362	2.185362	2.186326	2.187732
-40	2.347453	2.347837	2.348176	2.339827	2.348717	2.338717	2.348171	2.334874
0	2.513789	2.529938	2.518372	2.528373	2.518332	2.523737	2.523722	2.517277
25	2.716789	2.723349	2.713628	2.727632	2.712736	2.723763	2.763261	2.793277
70	3.006239	3.012283	3.028736	3.012883	3.017262	3.026736	3.018383	3.028473
100	3.253259	3.258783	3.258372	3.262382	3.257372	3.265633	3.258727	3.268382
135	3.538719	3.538743	3.532134	3.537324	3.537222	3.543822	3.523128	3.537626
185	3.949419	3.947276	3.942662	3.947271	3.972763	3.982732	3.973271	3.982773
230	4.526569	4.512783	4.581212	4.576262	4.572712	4.587272	4.542772	4.542782
300	4.651023	4.703882	4.712843	4.721276	4.673382	4.716622	4.662363	4.678238

的算术平均值记为 $\overline{y_{zi}}$, 反行程输出的电压值的平均值记为 $\overline{y_{Fi}}$, 正行程和反行程的算术平均值记为 $\overline{y_i}$ ($i=1, 2, \dots, 14$)。如表 2 所示为校准曲线数据处理。

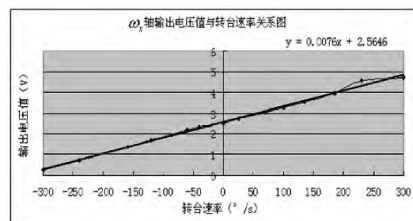
表 2 校准曲线数据处理

i	$\overline{y_{zi}}$	$\overline{y_{Fi}}$	$\overline{y_i}$
1	0.25282175	0.2518385	0.2523301
2	0.724939	0.737677	0.731308
3	1.3695055	1.36968925	1.3695974
4	1.686281	1.68903425	1.6876576
5	2.18627825	2.1859255	2.1861019
6	2.34812925	2.34031375	2.3442215
7	2.51855375	2.52483125	2.5216925
8	2.7266035	2.74200525	2.734304
9	3.017655	3.02009375	3.018874
10	3.2569325	3.263795	3.260364
11	3.53292575	3.53937875	3.536152
12	3.95952875	3.965013	3.962271
13	4.55581625	4.55477475	4.5552955
14	4.67501225	4.7050045	4.690001

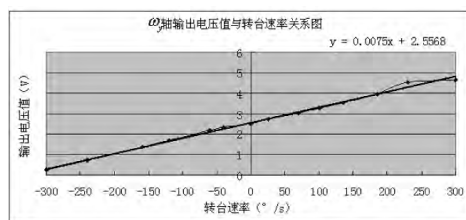
由 $\overline{y_i}$ 所生成的曲线为校准曲线, 应用 EXCEL 进行校准曲线拟合, 可得图 1 所示的 ω_x 轴输出电压值与转台速率关系图。

用同样的方法可以测得 ω_y 轴的采集数据, 如表 3 所示。

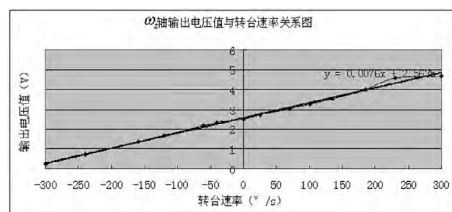
从表 6 所计算的数据可看出: 该 MEMS 陀螺的线性度、迟滞、重复性和精度都很高, 在惯性导航中弹体姿态测试中具有一定的应用前景。

图 1 ω_x 轴数据校准曲线表 3 ω_y 轴数据采集结果

测试次数 输出电压 (V) 转台速率 ($^{\circ}/\text{sec}$)	第一次		第二次		第三次		第四次	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
-300	0.247828	0.250182	0.251827	0.247277	0.253664	0.246236	0.247722	0.250238
-240	0.727473	0.727642	0.738765	0.735327	0.736271	0.726633	0.726372	0.727738
-160	1.367221	1.365321	1.369282	1.376262	1.365627	1.370277	1.376266	1.362738
-120	1.683727	1.698827	1.697171	1.698323	1.686712	1.672662	1.674167	1.682773
-60	2.172663	2.184982	2.185237	2.172663	2.183722	2.197332	2.182637	2.186273
-40	2.348722	2.347837	2.346822	2.346217	2.357128	2.358717	2.338171	2.344874
0	2.509837	2.519938	2.528372	2.517272	2.518332	2.527383	2.518733	2.524884
25	2.727744	2.723349	2.719383	2.727632	2.717373	2.723763	2.776362	2.793277
70	3.017373	3.012283	3.026373	3.012883	3.017637	3.02743	3.018383	3.027748
100	3.248959	3.258783	3.257382	3.262382	3.257728	3.265633	3.257822	3.268382
135	3.536478	3.538743	3.527748	3.537324	3.538484	3.543822	3.528774	3.537626
185	3.943721	3.947276	3.932662	3.937271	3.978292	3.982732	3.978293	3.982773
230	4.528224	4.512783	4.573263	4.586262	4.572632	4.587272	4.546237	4.542782
300	4.673282	4.693882	4.722843	4.711276	4.72382	4.716622	4.692363	4.708238

图 2 ω_y 轴数据校准曲线表 4 ω_z 轴数据采集结果

测试次数 输出电压 (V) 转台速率 ($^{\circ}/\text{sec}$)	第一次		第二次		第三次		第四次	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
-300	0.257272	0.249873	0.252783	0.249827	0.257328	0.249278	0.257282	0.256822
-240	0.734151	0.729642	0.726765	0.737327	0.729271	0.726283	0.736473	0.726622
-160	1.362838	1.365321	1.369238	1.386262	1.373622	1.373777	1.376476	1.362756
-120	1.689372	1.678282	1.692722	1.697372	1.687266	1.679872	1.687416	1.683873
-60	2.178263	2.186747	2.186722	2.179463	2.188272	2.187332	2.193437	2.193273
-40	2.342722	2.347837	2.356825	2.346437	2.353925	2.358717	2.348171	2.346645
0	2.498272	2.519938	2.509288	2.517272	2.527735	2.527383	2.528735	2.524784
25	2.729453	2.723349	2.718835	2.727632	2.702093	2.717334	2.768296	2.783269
70	3.027373	3.016345	3.026373	3.014783	3.017829	3.023829	3.027743	3.037854
100	3.256712	3.258783	3.264382	3.257824	3.257728	3.259882	3.257822	3.257181
135	3.537748	3.547882	3.527748	3.567282	3.548493	3.543822	3.523464	3.537346
185	3.949721	3.946728	3.933784	3.938945	3.976267	3.982732	3.987793	3.983874
230	4.528744	4.512783	4.553263	4.576362	4.572632	4.576624	4.546237	4.542782
300	4.677829	4.693882	4.737495	4.741276	4.71382	4.716622	4.702363	4.718238

图 3 ω_z 轴数据校准曲线

(下转第 66 页)

转方式如图3所示。

(1)基础数据服务:主要实现 ECIF 系统客户数

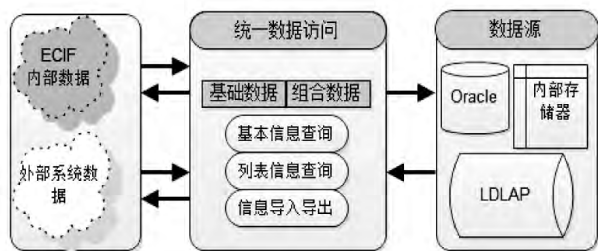


图3 数据流转方式

据的各类操作(如增、删、改、查、关联、归并等)。主要包括数据访问服务、客户管理服务和历史版本追溯服务等。并遵循信息存取权限实现客户信息的访问和维护处理,客户信息在修改处理之前备份当前的历史信息并在历史表保存当前修改时间戳,并以链表的记录形式记录每个客户修改历史等。

(2)组合数据服务:一般指批量数据处理,包括批量数据的导入和导出。对于 ECIF 系统获取数据的方式有两种,一种是采用联机处理方式实时从周边系统获取数据,另一种则是采用批处理方式从周边系统获取数据。同时,系统还会根据周边系统的要求,批量导出数据。

4 系统安全

系统的安全架构就是保护系统不受恶意访问和攻击,保护系统的重要数据不被窃取。主要针对现存和潜在的各种攻击与窃密手段进行可靠的应对。

(1)SQL注入攻击,攻击者在 HTTP 请求中注入恶意 SQL 命令,服务器用请求参数构造数据库 SQL 命令时,恶意 SQL 一起被构造,并在数据库中执行导致系统数据损坏,对于这种攻击使用预编译 SQL 语句绑定参数就可以很好的进行防范。

(2)CSRF(Cross Site Request Forgery,跨站请求伪造)攻击,攻击者通过跨站请求,以合法用户的身份进行非法操作,其核心是利用了浏览器 Cookie 或服务 Session 策略,盗用用户身份。对于这种攻击主要采取用户输入验证码,以避免在用户不知情的情况下被攻击者伪造请求。

(3)给系统追加 Web 应用防火墙,可以有效地探测攻击并保护 Web 应用程序。

5 小结

通过构建企业客户信息系统,企业客户信息的采集可以按照业务流程直通式采集,减少重复录入的工作量,降低操作风险,全面支持跨渠道、跨部门、跨地区的客户信息的管理,为内部精细化管理提供支持,同时也为外部监管等提供整合的、准确的客户信息。

参考文献:

- [1] 李智慧.大型网站技术架构:核心原理与案例分析[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [2] 伽玛.设计模式:可复用面向对象软件的基础[M].北京:机械工业出版社,2000.

(上接第63页)

表5 零偏结果

测试次数	第一次	第二次	第三次	第四次	平均值
ω_x	2.513789	2.529938	2.518372	2.528373	2.522618
ω_y	2.509238	2.513487	2.510234	2.523647	2.514152
ω_z	2.512743	2.527474	2.517377	2.523417	2.520253

表6 MEMS陀螺性能指标计算结果

技术参数	ω_x	ω_y	ω_z
标度因数	$7.6 mV/^{\circ}/sec$	$7.5 mV/^{\circ}/sec$	$7.6 mV/^{\circ}/sec$
零偏电压	2.522618V	2.514152V	2.520253V
线性度	0.010478%	0.018927%	0.016373%
迟滞	0.023673%	0.018766%	0.020772%
重复性	0.028975%	0.026378%	0.025637%
精度	0.063126%	0.064071%	0.062782%

参考文献:

- [1] 丁衡高.惯性技术文集[M].北京:国防工业出版社,1994.
- [2] 徐爱东.MEMS 惯性器件的新进展及应用[J].半导体技术,2010:109-113.
- [3] 杨俊波,赵继敏.基于 TI6000 系列 DSP 的多路信号采集系统[J].工业控制计算机,2008,21(1):57-59.
- [4] High Stability, Low Noise Vibration Rejecting Yaw Rate Gyroscope ADXRS646, Analog Devices.
- [5] 邓正隆.惯性技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.
- [6] 刘迎春,叶湘滨.传感器原理设计与应用[M].长沙:国防科技大学出版社,2004:19-22.