

MEMS 角速率陀螺仪标定实验与数据处理

曾 唯, 林 麒, 梁 斌

(厦门大学 机电工程系, 厦门 361005)

摘要: 分析了以微电子机械MEMS技术制成的单片偏航角速率陀螺仪ADXRS150的匹配电路原理与工作原理, 阐述了角速率陀螺仪的设计要点, 设计并搭建了其标定实验平台, 对其进行标定实验, 通过对标定实验所得的数据进行处理和分析, 得到标定曲线和误差分析关系式, 从而给出在陀螺仪标定实验可行的数据处理方法。

关键词: 微陀螺仪; 微电子机械; 数据处理; 标定试验

中图分类号: TN21 **文献标志码:** A

Calibrating Testing and Data Processing of MEMS Rate Gyro

ZENG Wei, LIN Qi, LIANG Bin

(Department of Mechatronics Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The matching circuit and the principle of the single chip rate gyro, ADXRS150, based on integrated micro electro-mechanical system have been introduced and analyzed. The keystone in design of the rate gyro was explained. The rotational stand for the test to the gyro was built and the calibrating has been carried out. The experimental data recorded by compute has been processed through analyzing. The relationship between the angular rate ω and the output voltage V of the gyro is obtained. The error analysis for calibrating test data is presented. The result shows the method of the calibrating test and the data processing on the gyro is available.

Key Word: microgyro; microelectro-mechanical system (MEMS); data processing; calibrating testing

陀螺仪是定姿定向应用中的关键器件。它是航空、航海及太空导航系统中判断方位的主要依据。目前, MEMS 技术广泛应用于生物、化学、机械制造等各个领域, 在传感器的研制中发挥了重要的作用。运用 MEMS 技术制成的微陀螺仪体积小、灵敏度高, 其优越的性能很适合于风洞实验中的飞行器模型的姿态测量。ADXRS150 是美国 ADI 公司采用 MEMS 技术制造的单片偏航角速率陀螺仪。本文以该微陀螺仪为对象, 分析其工作原理, 设计了合理的实验方

案, 搭建了实验台架和实验数据采集系统, 对其进行标定实验, 并做了实验数据的误差分析。

1 匹配电路原理与工作原理

ADXRS150 采用微电子机械集成技术 iMEMS (integrated micro electro mechanical system) 的表层显微机械加工工艺制成。其内部同时集成有角速率传感器和信号处理电路, 能够对运动物体的转动角速率进行测量, 采用 5V 电压供电时, 负载电流为 5mA^[1]。

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50475099)

作者简介: 曾唯 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机测控技术; 林麒 (1954-), 女, 博士, 教授, 研究方向为航空工程; 梁斌 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电一体化技术。

图 1 给出了 ADXRS150 的匹配电路原理图。

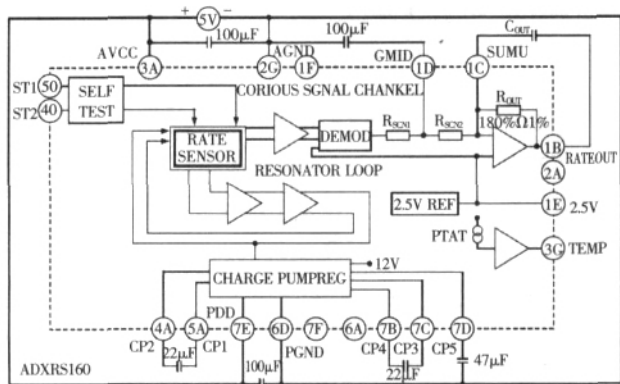


图 1 ADXRS150 的匹配电路原理框图

Fig.1 Block diagram of the circuit matching ADXRS150

ADXRS150 的芯片内部集成了两个多晶硅敏感结构的弹簧谐振框架,当发生角运动时,会产生一个和转动角速率相关的哥氏力^[2]。在最外的框架上,沿振动运动的正交方向,安装有可移动杆,且该杆置于两个固定的力敏感装置之间,从而可将哥氏力转换为相应的电信号,输出给增益放大器、信号处理电路。信号处理之后,经过一个由内部 $9k\Omega$ 的电阻 R_{SENI} 和外部电容 C_{MD} 组成的低通滤波器,以及一个由放大器、内部 $180k\Omega$ 电阻 R_{OUT} 和外部电容 C_{OUT} 组成的带通滤波器后输出(RATEOUT)。 C_{MD} 可改变低通滤波器极点,用来限制高频噪声,以免最后一级放大器饱和; C_{OUT} 可以调整角速率响应带宽,以 3dB 频率为例,可根据下式确定:

$$f_{out}=1/(2\pi R_{OUT}C_{OUT}) \quad (1)$$

在 RATEOUT(1B, 2A) 和 SUMJ(1C, 2C) 引脚之间外接一个电阻可以减小最后一级放大器的放大倍数,从而增大该芯片的角速率测量范围。更改测量范围之后,由此带来的附加零位漂移和初始零位偏差需要重新调整^[3,4]。

在 SUMJ(1C, 2C) 引脚处外接一个合适的电阻到地或电源正极就可以进行零位调整。在对称角运动情况下 RATEOUT 的正常零位是 2.5V,但有些情况下,角运动范围可能不是对称的,此时可按下式计算零位调整电阻:

$$R_{NULL}=(2.5 \times 180 \ 000)/(V_{NULL}-V_{NULL}) \quad (2)$$

图 2 给出了 ADXRS150 的工作原理图。当物体转动时,在哥氏力的作用下,角速率传感器的转动方向不变,其旋转方向可以是顺时针或逆时针,由转动物体而定。当 ADXRS150 如图处于水平方位时,绕 Z 轴转动,将输出与 Z 轴方向的角速率成正比的电压信号。若已知这两者的关系,便可利用 ADXRS150 来测量转动物体的偏航角(或称航向角)。这就是本文标定实验的目的。

轴转动,将输出与 Z 轴方向的角速率成正比的电压信号。若已知这两者的关系,便可利用 ADXRS150 来测量转动物体的偏航角(或称航向角)。这就是本文标定实验的目的。

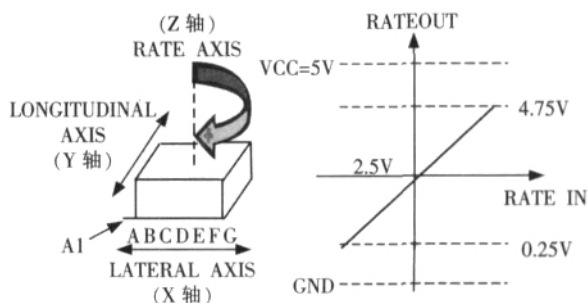


图 2 ADXRS150 工作原理图

Fig.2 Chart of ADXRS150 principle

2 标定实验装置与数据采集

ADXRS150 在应用前需预先进行标定,取得其输出电压信号与角速率之间的关系。本文利用单轴转台和光电门装置对 ADXRS150 进行标定,图 3 给出了该装置简图。

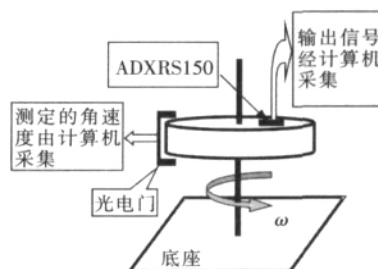


图 3 单轴转台实验装置简图

Fig.3 Diagram of testing equipment

实验时将陀螺仪固定在转台的平台上,注意使陀螺仪工作轴与转台转动轴保持一致,即陀螺仪与转台之间不可有相对运动。利用光电门得到转台速率的标准输出并由计算机采集。由此可得到 ADXRS150 的角速率。同时,将 ADXRS150 输出端接入数据采集卡,读出并记录其输出电压值。改变转台的转速,即可得到一系列的实验数据。实验系统的框图如图 4 所示。

3 实验数据处理

本文选取五个典型的角速率值 135 %s、120 %s、100 %s、90 %s 和 60 %s 对陀螺仪 ADXRS150 的输出电压信号进行标定和误差分析。对每个典型值分别

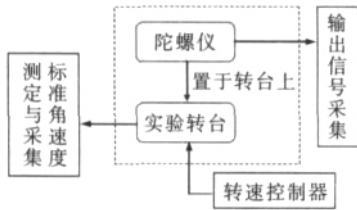


图4 实验系统框图

Fig.4 System of the calibrating test

测试十组陀螺仪输出电压信号值，数据采集间隔时间为 30s,再以此十组数据计算平均灵敏度，表 1 是数据分析结果。

表 1 不同角速率下的计算灵敏度

Tab.1 Calculated sensitivity in different angular rate

角速率 $\omega/(^{\circ}/s)$	平均灵敏度 $k/(mV/(^{\circ}/s))$	$\omega=1000V/k$ (V:单位为 V)
135	12.5090	$\omega=79.942V$
120	12.4636	$\omega=80.234V$
100	12.5115	$\omega=79.926V$
90	12.5125	$\omega=79.920V$
60	12.4613	$\omega=80.248V$

由以上表中数据，可以得到全部数据的总平均灵敏度为 $12.4916(mV/(^{\circ}/s))$ ，由此可得角速率与电压输出值的平均比例关系式为

$$\omega=80.054V \quad (3)$$

其中 V 的单位为伏特(V)。

若对五个典型角速率值的所有实验数据用最小二乘法进行拟合，可得到其拟合曲线，即 $\omega \sim V$ 关系式：

$$\omega=79.803V+0.3009 \quad (4)$$

显然，这是条直线。若以 ADXRS150 输出电压值 V 为横轴，以给定的标准角速率 ω 为纵轴，则可在如图 5 所示的坐标平面上绘出 ADXRS150 的角速率 ω 与输出电压值 V 的实验值及其拟合得到的关系曲线。

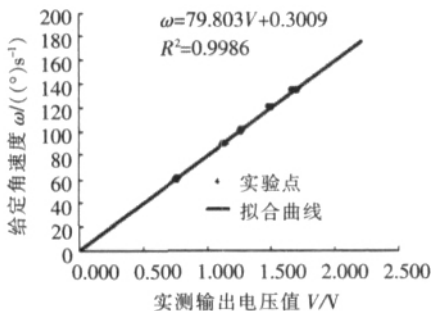


图5 ADXRS150 角速率与输出电压信号的关系

Fig.5 Relation between angular rate and output voltage of ADXRS150

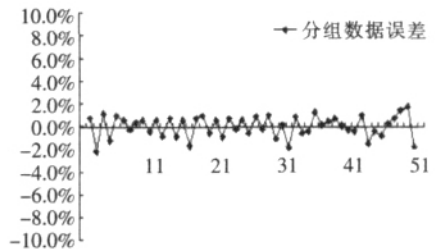
从图 5 可看出，十组实验共五十个数据点都分布在所拟合的直线附近。图中的 R 为直线关系的相关系数，具体表示为：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}} \quad (5)$$

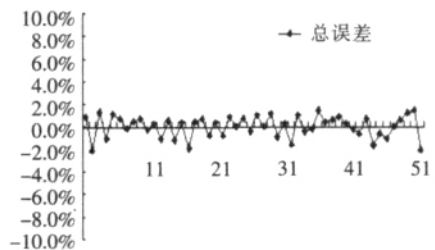
其中： $\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$, $\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$ ；式中 V_i , ω 为实验数据；n 为实验数据的总数；相关系数平方 R^2 越接近于 1，表示拟合曲线与实验数据的符合性越好，拟合曲线越合理。图 5 中实验数据线性拟合的 R^2 高达 0.9986，这表明实验数据分布的线性度很高，可以用直线关系式(4)来表示，也说明 ADXRS150 性能不错。

4 误差分析

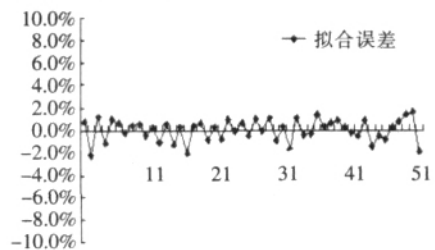
将测得的 ADXRS150 输出电压分别带入所得的 $\omega \sim V$ 关系式计算角速率，并将之与标准角速率相比较，计算误差，可得图 6。



(a) 各组平均灵敏度的计算误差



(b) 总平均灵敏度的计算误差



(c) 拟合曲线计算误差

图6 各 $\omega \sim V$ 关系误差比较

Fig.6 Comparison among errors about $\omega \sim V$

(下转第 78 页)

MAX232 进行串行通讯。

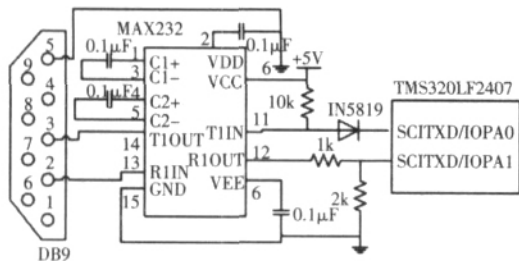


图7 串行通信接口电路

Fig.7 Interface circuit of serial communication

3 系统软件设计

系统软件设计主要包括了 DSP 的初始化, SCI 初始化, SCI 发送接收数据, 定时器中断采样等软件的设计, 由于篇幅的限制, 本文只分析定时器中断采样程序。

由于 ADS8364 的转换速度很快, 在启动 A/D 转换之后, 只需等待 $5\mu\text{s}$ 即可读取转换结果, 因此采用等待方式, 等待时间大于 $5\mu\text{s}$ 即读数据。图 8 为定时器中断采样程序的流程图。

4 结语

以上设计的电力信号采集与处理系统模拟量的计算精度为 0.1 级, 达到了比较好的性能, 能够和上位机通过 RS-232 标准通信。在此基础上, 可进行各

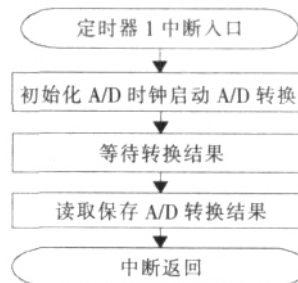


图8 定时器中断采样程序

Fig.8 Sampling program of timer interrupt

种参数, 如有功率、无功功率、功率因数以及谐波等的分析和计算, 并传给上位机。同时, 还可完成一定的控制功能, 这种高效的数据采集与处理系统可广泛应用于各种智能仪表、自动化控制设备、配电网终端设备中。

参考文献:

- [1] ADS8364 250KHz, 16-bit, 6-Channel Simultaneous Sampling Analog-to-digital Converters[Z]. TI company, 2002.
- [2] 刘和平, 严利平, 张学锋. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] 郑立新, 周凯汀, 方瑞明, 等. DSP 多路同步数据采集板设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 145-149.
- [4] 苏清, 吴顺君, 李真芳, 等. 高性能 DSP 与高速实时信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

(上接第 22 页)

从图中可以看到, 对于各组平均灵敏度, 最大误差为 2.26%; 对于总平均灵敏度, 最大误差为 2.13%; 对于拟合曲线, 最大误差为 2.21%。所有情况的误差都在 $\pm 3\%$ 之间, 具有较高的精度, 满足一般应用要求。也就是说, 实际应用时采用式(4)或式(5)均可。

5 结语

采用 MEMS 技术制造的单角速率陀螺仪适用于各种惯性测量系统, 在航空、航海和军事领域都有广泛应用。本文分析了其中一种典型的微陀螺仪——ADXRS150 的匹配电路及其工作原理、角速

率测量的设计要点, 搭建了陀螺仪的标定实验平台并进行了标定实验, 对实验数据进行了处理和曲线拟合, 误差分析表明不同处理方式下得到的三种 ω -V 关系式均具有较好的精度。结果证明, 本文的标定实验方法是可行的, 具有广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] ADI. Singal Chip Yaw Rate Gyro with Singal Conditioning[Z]. 2002.
- [2] 胡恒章. 陀螺仪漂移测试原理及其实验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] 曾庆华, 张为华. iMEMS 速率陀螺芯片在 MAV 飞行控制系统中应用研究[J]. 测控技术, 2004(2): 68-70.
- [4] 沙占友, 王彦朋, 张永昌. 单片偏航角速度陀螺仪的原理与应用[J]. 传感器世界, 2004(9): 31-34.