

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.02.017

## 稳定平台中通用陀螺数据采集处理系统

张智永, 周晓尧, 张连超

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 为提高稳定平台的性能, 针对平台中各种类型陀螺高速度、高精度、宽动态范围的设计指标要求, 研制了一种通用数据采集处理系统。在详细分析动力调谐、光纤和微机械陀螺典型型号性能参数指标的基础上, 提出了系统的设计指标要求, 选择 8 通道 24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  高精度模数转换器 ADS1278 和 32 位数字信号处理器 TMS320F2812, 设计实现系统的硬件电路, 编写了相关的软件程序, 并进行了实验验证。实验表明: 系统的转台测试数据与陀螺出厂标定的性能参数之间, 测量误差小于 1%, 完全满足稳定平台中陀螺的应用要求。

**关键词:** 稳定平台; 陀螺; 数据采集; 数据处理; ADS1278; TMS320F2812

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A

## General Data Acquisition and Processing System of Gyros in Stabilized Platform

Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Zhang Lianchao

(School of Electromechanical Engineering &amp; Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of stabilized platform, research and develop a data acquisition and processing system for various gyros in stabilized platform to achieve high speed, high accuracy and wide dynamic range. The system design requirements are proposed based on detail analysis of several typical gyros, such as dynamically tuned gyro (DTG), fiber optical gyro (FOG) and MEMS gyro. In the meanwhile, 8 channels and 24 bits  $\Sigma$ - $\Delta$  analog-digital converter ADS1278 and 32bits digital signal processor TMS320F2812 are chosen to design and realization the hardware circuits, and also the software program is compiled. The experiment result shows that the errors of data acquisition and processing system are less than 1%, which can meet the requirements of stabilized platform gyros.

**Keywords:** stabilized platform; gyroscope; data acquisition; data processing; ADS1278; TMS320F2812

### 0 引言

陀螺稳定平台能够隔离载体的运动干扰, 不断调整姿态和位置变化, 精确保持动态姿态基准, 在现代武器系统中得到了广泛应用。稳定平台还装有昼视、夜视、测距功能的观瞄设备, 使观察者能清楚地洞察战场情况。随着国防工业的不断发展, 对武器装备行进间瞄准、跟踪和打击能力提出了更高的要求, 需要更高精度的陀螺稳定平台。

在纯稳定模式下, 稳定平台的陀螺误差与稳定回路的指令信号有相同的传递函数, 在提高指令跟踪精度的同时, 陀螺误差也会以相同的精度传递到系统的输出中。在稳定精度的诸多影响因素中, 陀螺漂移占主要部分和起主导作用。因此, 设计高速度、高精度、宽动态范围的陀螺数据采集处理系统, 进行陀螺误差补偿, 对提高稳定平台的性能具有重大意义<sup>[1]</sup>。故针对稳定平台中各种类型陀螺高速度、高精度、宽动态范围的设计指标要求, 研制一种通用的数据采集处理系统。

### 1 设计指标要求

目前在稳定平台中有 3 类陀螺: 动力调谐陀螺、

光纤陀螺、微机械陀螺, 性能参数指标如表 1。

表 1 陀螺性能参数指标

性能参数	陀螺型号		
	动调 GAM-1G	光纤 VG910	微机械 G50Z-LN
量程/ $(^{\circ})\cdot s^{-1}$	$\pm 100$	$\pm 200$	$\pm 100$
分辨率/ $(^{\circ})\cdot s^{-1}$	$< 0.005$	$< 0.005$	$< 0.005$
零偏重复性/ $(^{\circ})\cdot s^{-1}$	0.02	0.04	0.1
零偏稳定性/ $(^{\circ})\cdot s^{-1}$	0.01	0.01	0.05
标度因数	100	50	20
标度因数非线性性	0.2%	0.1%	0.5%
噪声/ $(^{\circ})\cdot s^{-1}\cdot Hz^{-1/2}$	0.003	0.005	0.007
功率/W	1.5	1	0.3

设计过程中应遵循的基本原则是: 数据采集处理系统各项性能指标应均优于陀螺的性能, 以免产生采集误差, 同时, 系统的数据实时处理能力应满足陀螺误差补偿和稳定平台伺服系统的要求。具体要求如下:

1) 动态特性。分析可知三类陀螺中的最大的动态测量范围 $\pm 0.005 \sim 2000/s$ , AD 芯片的数据测量范围要求能覆盖陀螺全部量程, 同时, 其分辨率一般要高于陀螺一个数量级, 以避免量化误差。因此 AD 芯片动态测量范围 $\pm 0.0005 \sim 2000/s$ , 即 $20\log(200/0.0005)=112$  dB, 而 20 位 AD 芯片动态特性为 114.4 dB, 所以要求选择 20 位以上的 AD。

收稿日期: 2010-09-10; 修回日期: 2010-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50805144); 湖南省自然科学基金 (09JJ4029)

作者简介: 张智永 (1979—), 男, 安徽人, 博士, 讲师, 从事柔顺机构、嵌入式系统以及精密光电跟踪平台的测控技术研究。

2) 噪声特性。系统的噪声包括采集噪声和电源噪声。要求采用高性能的差分放大器或仪表放大器, 选用低纹波的 DC/DC 电源, 同时, 对电路板需进行模数地分离、模拟低通滤波、抗混叠滤波和电源滤波等抗干扰手段, 以降低电路噪声。

3) 非线性度。选择的芯片的非线性度需优于陀螺非线性 (0.1%) 一个数量级以上, 同时调理电路中的电阻, 需采用高精度低温漂的铂金电阻, 以降低电压调理过程中的变换误差。

4) 实时性。陀螺误差补偿和稳定平台伺服控制的时频要求为 1 kHz, 那么系统的数据采集、处理和通讯速率应为其 2~3 倍。

5) 采集通道数和电源功率。稳定平台需要陀螺组件提供 3 自由度的姿态角测量, 那么需要采集 3 路陀螺测量信号和 3 路温度信号, 系统的采集通道需 >6, 同时, 电源模块功率应 >4.5 W。

## 2 系统设计与实现

### 2.1 总体结构

系统总体结构主要包括: 陀螺测量组件、信号调理电路、数据采集电路、DSP 处理电路、通讯电路和电源电路, 如图 1。

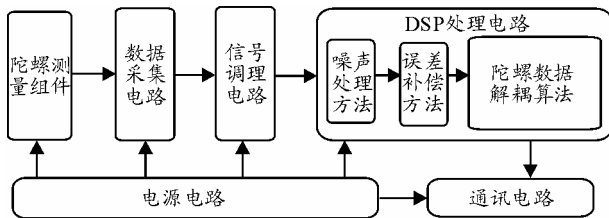


图 1 数据采集与处理系统总体结构

其中, 陀螺测量组件实时测量稳定平台姿态角运动信息; 信号调理电路对输出数据进行差分放大和模拟滤波, 起驱动 AD 芯片、滤除陀螺信号中高频噪声和隔离前后级单元的作用; 数据采集电路完成电压信号的实时高速高精度转换; DSP 处理电路实现数据的数字滤波、误差补偿和解耦算法, 并控制通讯芯片完成与稳定平台伺服系统的数据交互。

### 2.2 硬件电路

#### 1) 信号调理电路

主要功能是对输入原始电压信号, 进行差分调制、增益变换、模拟滤波, 以及增强对数据采集芯片的驱动能力。核心器件为 TI 的 OPA1632, 它是一款高带宽 (150 MHz)、低噪声 (1.3 nV/√Hz)、低线性度 (0.000 022%) 的差分放大器, 专门应用于驱动高性能的 AD 采集芯片。

#### 2) 数据采集电路

根据设计指标要求, 选用 TI 公司 24 位  $\Sigma-\Delta$  高精度模数转换器 ADS1278。ADS1278 具有如下特点:

- (1) 24 位高分辨率, 动态特性高达 138 dB;
- (2) 8 个  $\Sigma-\Delta$  调制器实现真正意义上同步采集;
- (3) 高阶限幅自稳调制器利用专有设计技术, 实现极低的失调漂移 1.8  $\mu\text{V}/0\text{C}$ ;
- (4) 采集噪声 6.5  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ , 信噪比高达 109 dB;
- (5) 3 种可选工作模式, 实现高速率 105 kSPS、高分辨率 138 dB 和低功耗 35 mW 的数据采集;
- (6) 为与 TMS320DSP 平台的协同工作, 进行了优化, 设计了帧同步和 SPI 串行接口, 每个接口均支持菊花链结构, 便于数据传输和通道扩展。

#### 3) DSP 处理电路

主要功能是实现陀螺信号的噪声处理、误差补偿和数据解耦算法, 以及对数据采集芯片和通讯芯片的控制管理。数字信号处理器选用 TI 公司 TMS320F2812, 它是专门针对工业控制推出的低功耗、高性能 32 位定点数字信号处理器, 具有 6 级流水线结构, 主频高达 150 MHz, 内部集成 18KBRAM, 128KBFlash 存储器, 以及定时器、事件管理器、SPI、SCI、CAN、AD 等丰富的片内外资源, 高效率的 C/C++ 编译程序、独特的 “IQmath” 程序库和专程序包, 适于嵌入式系统、智能仪器仪表等需要高速数据处理的系统<sup>[2]</sup>。

#### 4) 通讯电路

主要功能是实现稳定平台伺服系统与硬件电路的实时数据交互, 其中, CAN 通讯芯片选用 SN65HVD230, RS422 通讯芯片选用 MAX3490。

#### 5) 电源电路

主要功能是为陀螺测量组件及硬件电路, 提供  $\pm 15\text{ V}$ 、 $+5\text{ V}$ 、 $+3.3\text{ V}$ 、 $+1.8\text{ V}$  的电源保障。由于电源电路的噪声特性直接影响着系统采集噪声。因此, 电源电路的设计以及电源模块的选取在整个装置的设计中显得尤为重要。电源模块选用电源模块 HIC24S05MC 和 HJC24D15MC, 宽电压输入 18~36 V 输出功率 10 W, 纹波 50 mVp-p, 效率 75%, DSP 电源芯片选用 TI 公司 TPS767D318。

### 2.3 软件流程

系统软件流程如图 2, 采用 C 语言编写<sup>[3]</sup>。软件设计过程中, 首先在主程序里完成初始化设置, 包括系统初始化、中断向量和中断向量表初始化、定时中断初始化、GPIO 初始化、SPI 初始化、Can

接口初始化和 SCI 初始化; 然后采用中断方式来完成陀螺数据采集、陀螺信号处理以及稳定平台伺服通讯等子函数。

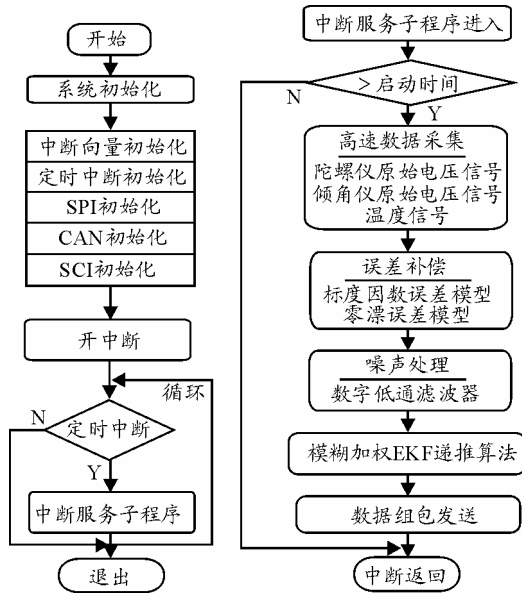


图 2 系统软件流程

由于 F2812 属于 32 位定点 DSP, 所以在编写软件程序时, 涉及到程序中浮点运算如何处理的问题, 为了兼顾程序的实时性和姿态解算的精度, 需要在编写程序时注意以下几个方面的问题:

1) 采用定时中断的方式工作, 降低 DSP 开销, 以保证系统的低功耗和实时性;

2) 在处理浮点运算时, 采用 TI 公司提供的用于实现定点 DSP 仿真浮点运算的算法库, 通过调用 IQmath 可以很好地将软件程序移植到 DSP 中, 从而保证了计算精度。

### 2.4 算法实现

在系统软件的中断服务程序中, 陀螺信号处理子程序是算法的核心部分, 包括: 陀螺误差补偿、噪声数字滤波和解耦算法。

#### 1) 误差补偿算法<sup>[5-6]</sup>

典型的陀螺测量模型可以表示为:

$$\hat{U}_i = K_g (\omega_i + w_{gi}) + \varepsilon_i \quad i = x, y, z \quad (1)$$

式中:  $\hat{U}_i$  为陀螺测量的电压值;  $K_g$  为标度因数;  $\omega_i$  为载体的理想角速度;  $\varepsilon_i$  为陀螺零漂;  $w_{gi}$  陀螺噪声。

标度因数  $K_g$  和零漂  $\varepsilon_i$  中存在非线性影响因素和温度影响因素, 在解算过程中, 其影响则会产生较大的误差, 因此建立其误差模型:

$$\begin{cases} K_g = K_{g0} \cdot k_{\omega} \cdot k_T \\ \varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2 + c_3 \cdot T^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $K_{g0}$  为标度因数常温下标定值;  $k_{\omega}$  为标度因数非线性修正系数;  $k_T$  为标度因数温度修正系数;  $\varepsilon_{i0}$  为陀螺常温零漂;  $T$  为温度测量值;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为零漂温度修正参数。

综合式 (1)、式 (2) 可知, 经过误差补偿后, 陀螺测量角速度  $\hat{\omega}_i$  为

$$\hat{\omega}_i = (\hat{U}_i - \varepsilon_i) / K_g \quad (3)$$

#### 2) 噪声滤波算法<sup>[7-8]</sup>

针对误差补偿后, 陀螺测量角速度中残余的噪声信号  $w_{gi}$ , 采用数字低通滤波器来滤除数据采集过程中, 串入的高频噪声干扰。可以用差分方程来描述该数字滤波器:

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (4)$$

其中,  $a_k$ 、 $b_k$  为滤波系数;  $x(n)$  为当前滤波输入;  $y(n)$  为当前滤波输出;  $x(n-k)$  为前第  $k$  时刻输入;  $y(n-k)$  为前第  $k$  时刻滤波输出;  $M$ 、 $N$  为滤波器阶数。设计的数字滤波器, 对误差补偿后的陀螺测量角速度  $\hat{\omega}_i$  进行滤波, 可以将高于截止频率的高频噪声进行较大幅度衰减。

### 3 实验验证

为了验证数据采集处理系统的实用性, 设计基于高精密伺服转台的测试实验, 如图 3。

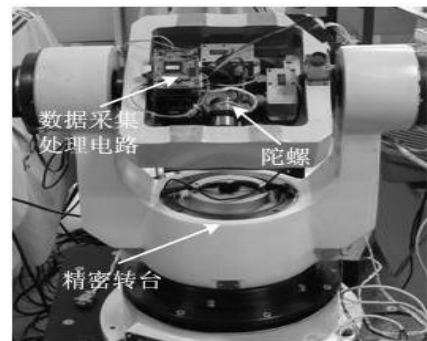


图 3 转台验证实验

将系统安装在转台上, 对陀螺零偏、标度因数、标度因数非线性、噪声等参数进行测试, 测试数据如表 2。通过与陀螺出厂标定的性能参数进行比较, 测量误差小于 1%, 完全满足陀螺高速度、高精度、宽范围的设计指标要求。

(下转第 79 页)

$$V_{DCS} = V_{MS} - V_D = \frac{V_D}{I(A)} - V_D = -V_m \cos(q_H) \left( \frac{1}{I(A)} - 1 \right) \quad (5)$$

### 3.4 辅助决策流程

辅助决策由火控计算机完成, 在完成提前点、射击诸元计算后, 判断是否满足禁射条件, 并根据  $I(A)$  值判断是否转移火力, 在不满足禁射和转火条件时计算  $K_b$  值, 作为下定开火的依据, 流程如图 2。

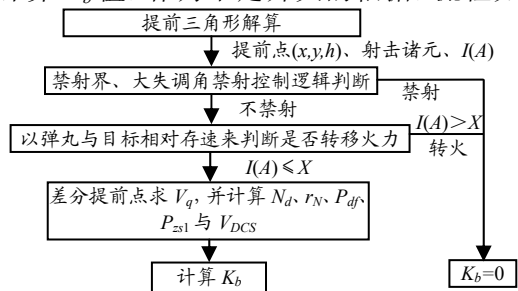


图 2 开火时机辅助决策流程

## 4 实例仿真与分析

以 57 高炮和某多管 25 高炮进行了实例仿真分析, 仿真结果见表 2、表 3。仿真用的相关参数如下:

### 1) 57 高炮

航路: 水平等高匀速, 捷径 980 m, 速度 150 m/s

$$P_{\min} = 0.8, \quad L_d = 50 \text{ m}, \quad N_s = 2,$$

$$r_k = 0.5, \quad V_{HS} = 500.$$

### 2) 某多管 25 高炮

航路: 水平等高匀速, 捷径 780 m, 速度 250 m/s

$$P_{\min} = 0.8, \quad L_d = 30 \text{ m}, \quad N_s = 70,$$

$$r_k = 0.3, \quad V_{HS} = 500.$$

\*\*\*\*\*

(上接第 57 页)

表 2 陀螺性能参数测试数据

陀螺型号	性能参数				
	零偏/ mV	标度/ (mV·°)⁻¹·s⁻¹	标度非线性	噪声/ mV(1σ)	
出厂	GAM-1G	0.6	100	0.012%	1.2
标定	VG910	1.1	50	0.005%	3.2
	G50Z-LN	2	100	0.02%	5
实测参数	GAM-1G	0.62	100.30	0.013%	2.1
	VG910	1.07	50.13	0.005%	2.0
	G50Z-LN	1.98	101.20	0.025%	2.5

## 4 结论

实验结果表明, 该系统具有如下优点:

1) 将信号调理、数据采集、DSP 处理、通讯电路集为一体, 具有集成度高、体积小、处理能力强、功耗低等优点;

2) 实时性好。陀螺误差补偿、噪声处理和解耦算法均采用实时的递推结构, 能为平台伺服系统提供至少 10 kHz 以上的陀螺测量信号;

3) 通用性强。除了能够完成各种类型陀螺的高速度、高精度、宽动态范围的数据采集之外, 也适

表 2 57 高炮仿真结果

提前距离	$K_b$		$P_{zs1}$		$P_{df}$		$N_d$	
	航前	航后	航前	航后	航前	航后	航前	航后
1 000	1.2	1.1	0.9	0.9	0.8	0.8	1.7	1.6
1 500	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.6	1.8	1.5
2 000	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	1.8	1.5
3 000	0.5	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	1.8	1.5
4 000	0.37	0	0.3	0.1	0.2	0.1	1.9	1.4
5 000	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0.1	2	1.3

表 3 某多管 25 高炮仿真结果

提前距离	$K_b$		$P_{zs1}$		$P_{df}$		$N_d$	
	航前	航后	航前	航后	航前	航后	航前	航后
800	1.25	1.17	1.0	1	0.6	0.6	10	9
1 200	1.25	0.4	1.0	0.98	0.4	0.4	11	7
1 500	1.24	0.2	0.99	0.91	0.31	0.31	12	6
2 000	0.95	0	0.95	0.72	0.21	0.21	13	5
2 500	0.7	0	0.9	0.51	0.15	0.15	14	4
2 800	0.5	0	0.85	0.4	0.11	0.12	15	4

从仿真结果可看出, 虽然航前远处单位航程内分布的弹丸数量多, 但由于射弹散布大而使得单发命中概率低,  $K_b$  值小, 不利于开火射击; 过航后, 由于单位航程内弹丸数量的减少, 以及动能的迅速下降, 使得  $K_b$  值下降速度加快, 且目标速度越高其下降速度也越快。

## 5 结束语

从实例仿真结果可知, 最佳开火时机决策方法符合防空高炮系统实际情况, 能应用到实际的工作中去。该辅助决策系统还可应用于无人值守自主作战的防空高炮武器平台。

## 参考文献:

[1] 周启煌, 等. 战车火控系统指挥系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 123-130.

用于其它装置的数据采集系统。

## 参考文献:

[1] 王家琪, 金光. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.

[2] 杨胜, 房建成. 基于双DSP的POS数据采集与处理系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1821-1826.

[3] 崔旭涛, 杨日杰, 何友. 基于DSP+FPGA的信号处理实验系统研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 918-922.

[4] David H T. Strapdown inertial navigation technology [M]. UK: The Institution of Electrical Engineers, 2004: 59-115.

[5] Quang M L. Gyro modeling and estimation of its random noise sources[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Austin, Texas, 2003: 1-12.

[6] DEMOZ G, ROGER C.H. Design of Multi-Sensor Attitude Determination Systems[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(2): 627-648.

[7] 易康, 李廷志, 吴文启. FLP滤波算法在光纤陀螺信号预处理中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(5): 58-62.

[8] 朱华征, 周晓光, 范大鹏. 光电稳定平台中陀螺随机漂移的处理方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2): 11-16.