

文章编号:1671-5497(2006)Suppl.-0099-06

集成化储能与姿态控制系统中飞轮高精度测速方法

刘治华^{1,2}, 贾宏光¹, 白 越^{1,2}, 吴一辉¹, 詹迪铌³, 杨作起^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对集成化储能与姿态控制系统中飞轮速度测量要求范围宽、精度高的特点, 从误差分析的角度提出了一种速度测量方法。该方法在低速阶段测量多个完整飞轮转速脉冲信号所用时间, 跨越转速分界点进入高速阶段后, 测量一定时间内飞轮转速脉冲信号个数。为了验证该测量方法的可行性, 文中以 Agilent 公司生产的高精度信号发生器及信号计数器为基准对该系统进行了速度测量实验, 并对实验结果进行了分析。结果表明, 该系统具有测速精度高, 测量范围宽的优点, 完全能够满足集成化飞轮储能与姿态控制系统测速精度的要求。

关键词: 测速方法; 误差分析; 飞轮; 储能; 姿态控制

中图分类号: TH115 文献标识码: A

High precision speed measurement method of flywheels in integrated energy-storage and attitude-control system

Liu Zhi-hua^{1,2}, Jia Hong-guang¹, Bai Yue^{1,2}, Wu Yi-hui¹, Zhan Di-ni³, Yang Zuo-qi^{1,2}

(1. State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To accomplish the wide range and high precision speed measurement in the attitude control and energy storage flywheel application, a new measurement method was put forward based on the analysis of the errors. In the low speed region, the time of several integrated flywheel speed pulse signal was measured. While the speed exceeds a certain threshold speed, the pulse number in a certain time was counted. For proving the feasibility of this method, the speed measurement experiment was done by using high precision arbitrary waveform generator and universal counter produced by Agilent Company, and the experiment results showed that the suggested speed measurement method can meet the demand of the integrated flywheel energy storage and attitude control system with the advantages of high precision and wide range.

Key words: speed measurement method; error analysis; flywheel; energy storage; attitude control

收稿日期:2005-09-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60474055).

作者简介:刘治华(1971-),男,博士研究生. 研究方向:微光机电集成系统. E-mail:liu_zh312@163.com

通讯联系人:吴一辉(1965-),女,研究员,博士生导师. 研究方向:微光机电集成系统. E-mail:yihuiwu@ciomp.ac.cn

0 引言

集成化储能、姿态控制飞轮(以下简称姿控飞轮)系统以高速旋转飞轮储存的能量和角动量来代替卫星中的化学电池储能系统和姿态执行元件,用电动/发电机和电子控制设备来控制能量的输入和输出^[1-3]。在能量变化的同时,利用动量矩的变化进行姿态控制,从而实现卫星的轻量化和长寿命,使卫星储能系统具有高比能、高效率、高可靠性和宽工作温度范围的优点^[4,5]。

影响集成化单轴飞轮储能与姿态控制系统位置精度的主要因素有飞轮安装不同轴误差、转动惯量误差和飞轮速度测量与控制误差等。其中飞轮转动惯量误差和飞轮安装不同轴误差与国内飞轮生产工艺及机械制造装配的整体水平有关,是不可控量;而飞轮的转速测量与控制误差则可以通过提高位置测量传感器和速度测量传感器的分辨率、采用先进的控制算法来降低,它在飞轮储能与姿态控制过程中是可控量^[6]。因此,为了实现飞轮储能与姿态控制系统的高精度控制,需要采用一种高精度、宽范围的转速测量方法。

目前,常用的数字式转速测量方法主要有 M 法(频率法)、T 法(周期法)和 M/T 法(频率/周期法)。M 法是在既定的检测时间内,通过测量所产生的转速脉冲信号的个数来确定转速,适合于高速测量;T 法是通过测量相邻两个转速脉冲信号的时间来确定转速,适于低速测量;而 M/T 法是通过同时测量检测时间和在此时间内的转速脉冲信号的个数来确定转速,该种方法优于 M 法和 T 法。

作者以单轴飞轮储能与姿态控制系统为例,对储能、姿控飞轮转速的宽度范围、高精度测量问题进行了研究。

1 系统速度测量原理

集成化储能、姿控飞轮用高精度测速系统由测速码盘、比较整形电路和速度测量电路组成。系统转速采集模块采用的是数字式转速测量方法,测速装置是每周产生 N 个脉冲的增量式光电编码盘,它将速度信号转换成电脉冲信号,经过放大整形后,获得相同频率的方波信号,通过测量该方波信号的频率,进而得到飞轮转速^[7]。在系统

进行储能与姿态调整过程中,根据飞轮系统速度高低,以系统低速测量方法与高速测量方法相对误差相等的转速为分界点,可以分为两个不同的速度测量阶段。

(1) 低速阶段

飞轮系统转速处于转速分界点以下为低速阶段。系统采用测量整数个完整转速脉冲信号个数的方法,同时以一高频晶振计时。设电机转速为 ω_1 ,单位为 r/min,电机端部码盘为 n_1 位,所计的完整电机脉冲个数为 n_2 ,定时器的时钟频率为 n_3 ,单位为 MHz,则可以得到低速时相对误差为^[8]:

$$\varepsilon_1 = \omega_1 2^{n_1} / 60 n_2 n_3 \times 10^6 \quad (1)$$

(2) 高速阶段

飞轮系统转速处于转速分界点以上为高速阶段,系统采用测量一定时间内的电机脉冲个数的方法,设电机转速为 ω_2 ,单位为 r/min,电机端部码盘为 n_1 位,采样时间为 ΔT_1 ,则可以得到高速时相对误差为^[8]:

$$\varepsilon_2 = 60 / 2^{n_1} \times \omega_2 \times \Delta T_1 \quad (2)$$

分界点转速为参数一定的情况下,系统转速由低速阶段向高速阶段或由高速阶段向低速阶段跨越的分界点的速度。

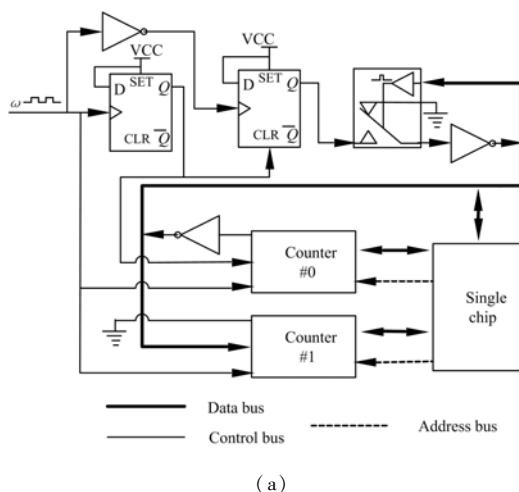
电机的分界点转速 ω 的确定是根据低速时转速测量相对误差与高速时转速测量相对误差相等的原理来计算得到的。设飞轮系统的分界点转速为 ω ,单位为 r/min,电机端部码盘为 n_1 位,低速测量时所计的完整电机脉冲个数为 n_2 ,定时器的时钟频率为 n_3 ,单位为 MHz,高速测量时的采样时间为 ΔT ,则可以得到分界点转速 ω 为:

$$\omega = \frac{60 \times 10^3}{2^{n_1}} \sqrt{\frac{n_2 n_3}{\Delta T}} \quad (3)$$

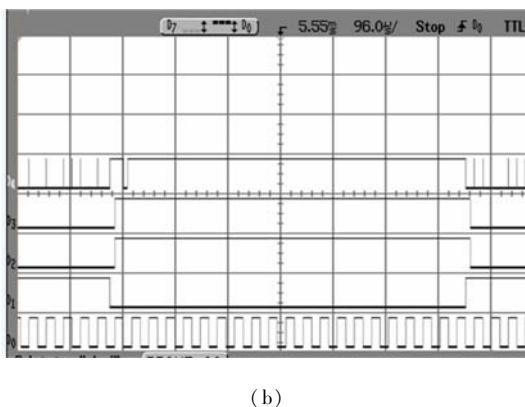
2 系统软硬件设计

2.1 系统硬件电路设计^[9-11]

为了实现飞轮转速脉冲信号任意整数个完整周期所用时间的准确测量,设计了系统转速测量电路。如图 1(a)所示,由单片机 89C51、计数器 82C53、反相器、D 触发器和可控模拟开关组成。低速阶段,在飞轮转速脉冲信号一上升沿及紧随其后的下降沿触发下,82C53 计数器将初值打入计数器 0,同时飞轮转速脉冲信号的该上升沿以及紧随其后的下降沿依次触发两个 D 触发器翻



(a)



(b)

图 1 测速电路逻辑框图及信号时序图

Fig. 1 Logic block diagram of the circuit and its timing sequence diagram

转,产生高电平。该高电平经模拟开关和反相器反相后产生一下降沿,触发单片机产生中断,在中断服务程序中,启动单片机内部定时器开始计时,并断开模拟开关;当82C53计数器由初值减为零,也即所测量的整数个完整转速脉冲信号结束,82C53计数器产生一高电平,经反相器反相后产生一下降沿,触发单片机产生中断,在中断服务程序中,停止单片机内部定时器计时,并接通模拟开关。根据系统参数和所测定的整数个完整飞轮转速脉冲信号所用时间,即可算得飞轮系统转速。当飞轮系统转速跨过转速分界点进入高速阶段时,由82C53计数器和单片机89C51组成测速电路,实现在 ΔT 时间内,采样飞轮系统转速脉冲信号个数,根据设定的采样时间及采样时间内所计脉冲个数,即可算得飞轮系统转速。

图1(b)为用逻辑分析仪捕捉到的飞轮系统转速信号的时序图,图中测量的完整电机脉冲个数为20,其中 D_0 代表飞轮系统转速信号脉冲, D_1 代表82C53的第10管脚信号, D_2 代表82C53的

第11管脚门控信号, D_3 代表D触发器第5管脚Q端信号, D_4 代表单片机的12管脚外中断0信号。

2.2 系统软件设计

系统速度测量程序流程图如图2所示。首先对89C51进行初始化,判断电机转速,如果电机转速小于转速分界点 $\omega_{\text{分界点}}$,则采用计整数个完整电机转速脉冲信号所用时间的方法进行电机转速测量,在该种方法下中断服务程序1用于启动89C51内部的定时器并断开模拟开关,确保82C53打入计数初值的同时开始计时;中断服务程序2用于在82C53作减一计数结束时,关闭89C51内部的定时器停止计时并接通模拟开关,确保82C53内部计数器数值从N减到零的同时,89C51内部的定时器停止计时;如果电机转速大于电机转速分界点 $\omega_{\text{分界点}}$,则采用计一定时间之内电机脉冲个数的方法,在该种方法下,中断服务程序3用于保证设定的采样时间结束后,对82C53停止作减一计数,同时读出82C53内部的数值。

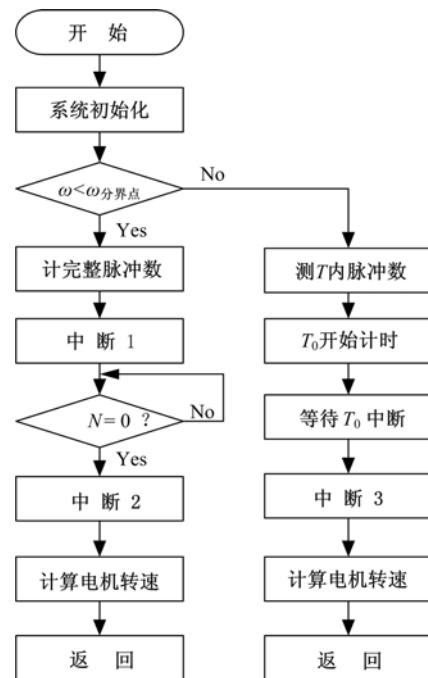


图 2 测速程序流程图

Fig. 2 The flow chart of speed measurement program

3 实验结果与误差分析

为了验证该种方法的可行性,作者以Agilent公司生产的高精度信号发生器Agilent 33220A为

基准对该系统进行了速度测量模拟实验, Agilent 33220A 信号发生器所产生的信号最高频率可达 20 MHz, 相对误差为 3.125×10^6 。在速度测量模拟实验中, 电机端部码盘为 8 位, 低速测量时, 所计的完整电机脉冲个数 $N = 10,890$, 内部定时器频率为 2MHz, 高速测量时采样时间 $\Delta T = 0.1$ s, 则由公式(3)可以得到分界点转速为:

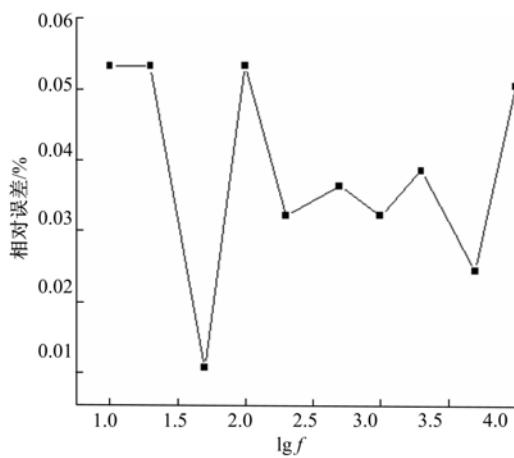
$$\omega_{\text{分界点}} = 3314.56 \text{ r/min}$$

相应信号发生器频率为 14.142 kHz, 因此在该频率下采用测量电机脉冲信号整数个完整周期所用时间的方法, 高于该频率采用测量一定时间

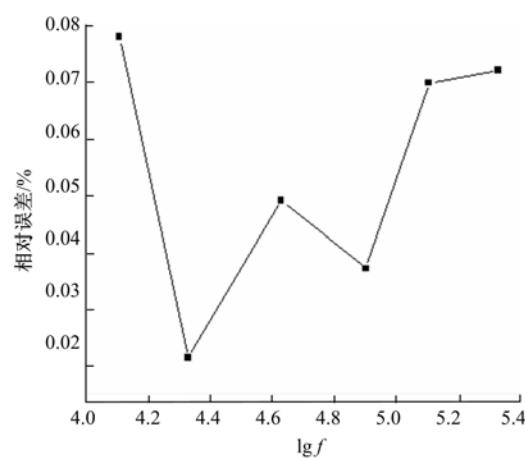
内电机脉冲个数的方法。

3.1 实验结果

图 3(a) 为电机转速低于 3314.56 r/min, 也就是信号发生器频率低于 14.142 kHz 时电机转速测量实验误差曲线, 图中横轴代表频率对数, 纵轴代表电机实测转速与理论转速的相对误差, 可知电机转速测量最大误差为 0.053%; 图 3(b) 为电机转速高于 3314.56 r/min 时, 电机转速测量实验误差曲线, 电机转速测量最大误差为 0.078%。



(a)



(b)

图 3 速度测量实验误差曲线

Fig. 3 The experiment error curve line of speed measuring

3.2 误差分析

表 1 为低速、不同频率情况下测量 10 个完整电机脉冲信号所用时间的 8 次实测速度数据, 表中 T_0 代表 89C51 内部定时器所计 2M 频率脉冲的个数, ω 代表电机转速实测值, 进行速度测量模拟实验所采用的信号发生器的相对误差很小, 为 3.125×10^{-6} , 可以近似认为电机的理论转速为:

$$\omega_{\text{理论}} = 60f/256 \quad (4)$$

通过计算得到低速时电机速度测量最大误差为 0.053%。

表 2 为高速、采样时间为 0.1 s 时电机转速实测数据, 表中 T_1 为计数器 82C53 在采样时间内所计电机脉冲个数, ω 为电机转速实测值, 电机理论转速可以由式(4)得到, 从而得到高速时电机

表 1 计 10 个完整电机脉冲实测速度数据

Table 1 Test data of speed while counting ten integrated motor pulses

测量次数		1	2	3	4	5	6	7	8
$f = 0.1 \text{ kHz}$	T_0	199 889	199 889	199 889	199 889	199 889	199 889	199 889	199 890
	ω	23.45	23.45	23.45	23.45	23.45	23.45	23.45	23.45
$f = 1 \text{ kHz}$	T_0	19 992	19 992	19 992	19 992	19 990	19 992	19 993	19 992
	ω	234.46	234.46	234.46	234.46	234.49	234.46	234.45	234.46
$f = 10 \text{ kHz}$	T_0	2001	2001	1999	2000	2000	1998	2000	2000
	ω	2342.57	2342.57	2344.92	2343.75	2343.75	2346.09	2343.75	2343.75

表 2 采样时间为 0.1 s 时实测速度数据
Table 2 Test data of speed in 0.1 s sampling time

测量次数		1	2	3	4	5	6	7	8
$f = 21.333 \text{ kHz}$	T_1	2134	2134	2134	2134	2134	2134	2134	2134
	ω	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001	5001
$f = 42.667 \text{ kHz}$	T_1	4268	4268	4268	4269	4268	4269	4268	4268
	ω	10 003	10 003	10 003	10 005	10 003	10 005	10 003	10 003
$f = 128 \text{ kHz}$	T_1	12 809	12 810	12 809	12 809	12 810	12 809	12 810	12 810
	ω	30 021	30 023	30 021	30 021	30 023	30 021	30 023	30 023

速度测量最大误差为 0.078%。

3.3 对比实验

为了检测该测速系统对电机实际转速测量的准确度,用安捷伦公司生产的 Agilent 53131A 计数器(频率测量精度高于 0.000 01)与之进行了实验对比。在测量过程中,以文中所述的测速系统测量电机转速脉冲信号得到的转速为实测值(单位为 r/min),Agilent 53131A 计数器测量电机转速脉冲信号的频率经计算后得到的转速为理论值(单位为 r/min);低速阶段所计的完整电机脉冲个数为 20 个,高速阶段采样时间为 0.1 s,转速分界点为 4687.5 r/min。

每隔一定时间,我们对型号为 90ZWSG01 的高速电机进行一次测量,表 3 是采用这两种方法在相同时间对电机测速的一组数据。

表 3 用 Agilent 53131A 计数器和测速系统测量电机转速的数据比较

Table 3 Comparison of data of motor speed by Agilent 53131A and by the measuring system

次数	实测值	理论值	误差/%
1	234.46	234.375	0.036
2	937.68	937.5	0.019
3	2345.5	2343.75	0.075
4	4685.15	4687.5	0.050
5	7500	7500	0
6	11 716.4	11 718.75	0.020
7	14 997.65	15 000	0.016
8	18 747.65	18 750	0.013

以 Agilent 53131A 的测速数据为标准值,对电机转速有:

$$\sum \Delta x = -7.385, \sum \Delta x^2 = 25.192$$

由标准偏差公式^[12]可求得:

$$\sigma = \sqrt{\left[\sum \Delta x^2 - (\sum \Delta x)^2 \right] / n} =$$

$$\sqrt{(25.192 - (-7.385)^2 / 8) / 8} =$$

$$1.516 \text{ r/min}$$

$$3\sigma = 4.547 \text{ r/min}$$

对大量实验数据用同样的方法进行统计,其 3σ 均能优于 4.547 r/min。

值得注意的是,虽然该方法可以实现对电机转速的精确测量,但是由于电机转速脉冲信号最高频率高达 128 kHz,因此要实现从低速到高速之间精确测量转速,对测速系统中的比较整形电路的设计也有较高的要求,包括电子元件的选取及电路的抗干扰能力设计等方面,本文不再介绍。

4 结束语

设计了储能、姿控飞轮用高精度速度测量系统,解决了集成化飞轮储能与姿态控制过程中的高精度速度测量问题,为提高姿态控制系统的控制精度提供了必要的前提条件。该测量系统具有速度快、精度高(小于 0.1%)的优点,保证了集成化飞轮储能与姿态控制系统在能量的存储与释放过程中对姿态的实时控制和调整,该速度测量系统可广泛应用于其他要求精确测量的转速系统中。

参考文献:

- [1] 韩邦成. 单轴飞轮储能/姿态控制系统的仿真及其实验研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
Han Bang-cheng. Simulation and experiment of single axis attitude control and energy storage system with two flywheels[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [2] Peter E Kascak, Ralph H Jansen, Barbara Kenny,

- Timothy P Dever. Single axis attitude control and DC bus regulation with two flywheels [R]. IECEC 2002-20078.
- [3] 白越, 吴一辉, 宣明. 高速储能飞轮转子设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4): 13-17.
Bai Yue, Wu Yi-hui, Xuan Ming. Design of the high speed rotors for the energy storage flywheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(4): 13-17.
- [4] 夏永江, 张云, 牛睿. 卫星储能/姿控一体化飞轮构型及其误差分析[J]. 上海航天, 2005, 22(1): 19-23.
Xia Yong-jiang, Zhang Yun, Niu Rui. Analysis on configuration and errors of integrated power and attitude control flywheel in satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2005, 22(1): 19-23.
- [5] 贾宏光, 赵华兵, 白越. 单轴储能及姿态控制一体化系统研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 504-509.
Jia Hong-guang, Zhao Hua-bing, Bai Yue. Single axis double flywheels integrated power and attitude control system[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 504-509.
- [6] 刘治华, 白越, 黎海文. 单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1): 127-132.
Liu Zhi-hua, Bai Yue, Li Hai-wen. Analysis on errors of single axis double function flywheels integrated power and attitude control system[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 127-132.
- [7] 杨宁, 王昊, 田蔚风, 麋长军. 高精度飞轮控制系统方案分析研究[J]. 航天控制, 2004, 22(3): 50-53.
Yang Ning, Wang Hao, Tian Wei-feng, Mi Chang-jun. Analysis and research on the proposal of the high precision flywheel control system[J]. Aerospace Control, 2004, 22(3): 50-53.
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理(5版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 唐清安, 伊希荣. 采用8253定时器实现转速测量的方法[J]. 电脑学习, 1999(2): 37-38.
Tang Qing-an, Yi Xi-rong. The way of measuring speed of rotation by use of 8253 timer[J]. Computer Study, 1999(2): 37-38.
- [10] 李华, 孙晓民, 李红青, 等. MCS-51系列单片机实用接口技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [11] 靳达. 单片机应用系统开发实例导航[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [12] 钟平, 续志军. 一种对空间突发性强闪光目标的测角方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 643-649.
Zhong Ping, Xu Zhi-jun. Method for measuring the angle of burst strong flashing object in space[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(2): 643-649.

(责任编辑 张祥合)