

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.016

全数字挠性加速度计加矩设计与读出精度分析*

文一青, 贺慧勇*, 唐立军, 赵 丹, 王 燕, 商梅雪, 刘 文, 曾鹏飞
(长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对石英挠性加速度计全数字闭环系统设计问题,开展了对加速度计力矩器的结构和工作原理以及与加速度数据输出的关系的分析,对加速度计力矩器的驱动和加速度计的读出精度等方面进行了研究,提出了一种数字脉宽调制(PWM)电路对力矩器进行的驱动方法,该方法不仅实现PWM对加速度计力矩器的驱动,并且该PWM数字电路的占空比参数直接作为加速度数字信号输出。利用PWM数字脉冲对加速度计力矩器进行驱动实现加速度计全数字闭环读出,对加速度计全数字读出系统进行了仿真和实验测试。研究表明,在一定范围内,通过调整力矩器外接电阻、PWM频率和逻辑位数,全数字挠性加速度计闭环读出电路可以测得标准偏差为 1.5×10^{-5} g,精度为 10^{-4} g的加速度值,该方法精简了电路,减少了模拟驱动电路引起的干扰。

关键词: 石英挠性加速度计; 力矩器; PWM驱动

中图分类号: TH824.4; U666.12 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-1035-05

Read-out accuracy analysis and torquer-driver design of quartz flexible accelerometer

WEN Yi-qing, HE Hui-yong, TANG Li-jun, ZHAO Dan, WANG Yan,
SHANG Mei-xue, LIU Wen, ZENG Peng-fei

(School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at realizing the all-digital closed-loop system of the quartz flexible accelerometer, the torquer-driver and read-out accuracy of the accelerometer, after the analysis of the structure and working principle of the torquer and relations between torquer-driver and read-out accuracy, were studied. The digital pulse-width modulation (PWM) circuit has been designed, which was used to drive the torquer of the accelerometer and its duty parameters was worked as the export of the accelerometer. By the means of PWM, the all-digital closed-loop system was simulated and experimented. The experimental and the simulation results show that the standard deviation of the system can reach at about 1.5×10^{-5} g, and the system accuracy can reach at about 10^{-4} g by adjusting the external resistor of the torquer, frequency and logic digits of the PWM within the specific limits. And this scheme simplify the circuit and reduces the interference.

Key words: quartz flexure accelerometer; torquer; PWM driver

0 引 言

加速度计是惯性导航系统的重要组成部分之一,其工作性能决定了导航系统的精确性^[1-2]。传统的模拟

加速度计力矩器加矩电路结构复杂,电路元器件参数偏差和温漂影响测量精度。目前,有研究人员采用模数结合力矩器驱动方法对加矩电路进行了改进^[3-6]。该方法对于高精度加速度测量,所需的D/A转换器位数及性能要求比较高,而且D/A转换器的失调误差容

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 湖南省科技厅计划资助项目(2011GK3116)

作者简介: 文一青(1988-),男,湖南株洲人,主要从事信号检测与处理方面的研究。E-mail: 936816089@qq.com

通信联系人: 贺慧勇,男,教授,硕士生导师。E-mail: he_37@qq.com

易造成整体读出电路的不稳定,测量结果不精确。

本研究采用PWM直接对加速度计力矩器实现驱动,减少影响加速度测量精度的环节,并由PWM占空比参数实现加速度信号数字输出,是提高全数字石英挠性加速度计闭环系统测量精度的一条可能途径。

1 力矩器的PWM驱动及加速度输出

全数字加速度计闭环读出系统是由石英挠性加速度计表头和基于FPGA的数字电路构成,全数字闭环系统原理图如图1所示。

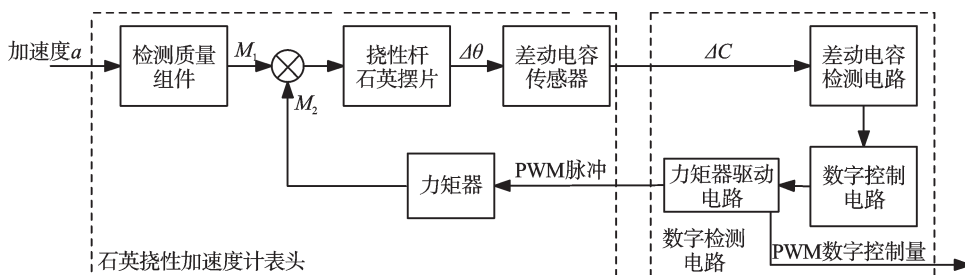


图1 全数字闭环系统原理图

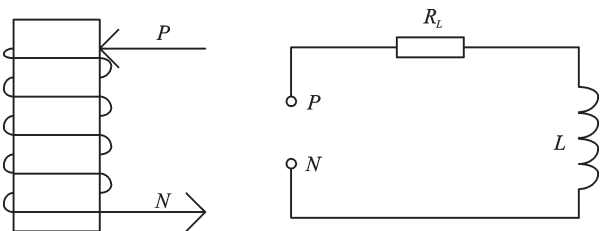
电路主要包括:差动电容检测模块、控制处理模块和力矩器驱动模块。

当外界加速度信号沿轴输入时,石英挠性摆片相对平衡位置产生偏离角度 $\Delta\theta$,形成电容差 ΔC ,电容检测模块检测表头差动电容器的电容差 ΔC 。控制电路对检测到的 ΔC 的数字量做相应的数字处理,将处理的信息转换成反馈电流对力矩器进行驱动,使力矩器产生相应的电磁力矩 M_2 与摆片受到的惯性力矩 M_1 平衡使摆片保持在零偏位置,并且将反馈的数字量作为加速度信号数字输出。

1.1 加速度计PWM波驱动力矩器的实现

1.1.1 PWM与力矩器的连接

力矩器的主要由线圈和磁铁^[7]构成,力矩器等效模型如图2(a)所示。力矩器的构成等效成电阻 R_L 与电感 L 的串联,力矩器等效电路如图2(b)所示。PWM与力矩器通过外接电阻 r 相连,可视为力矩器内阻,PWM与力矩器的连接示意图如图3所示。



(a) 力矩器等效模型 (b) 力矩器等效电路

图2 力矩器结构图

1.1.2 PWM的产生

当外界电流流经线圈时,产生电磁力,力矩器磁力的大小由通过线圈的电流大小决定。由图1所示,差动电容传感器检测到由加速度计挠性摆片的偏离 $\Delta\theta$ 引起的电容差 ΔC ,PWM产生电路根据电容差的

极性和大小转化成PWM的极性和占空比大小,产生PWM对加速度计力矩器施矩,PWM工作流程如图4所示。

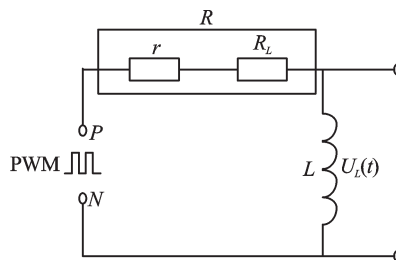


图3 PWM与力矩器的连接示意图

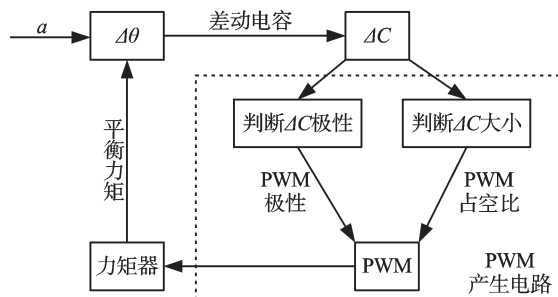


图4 PWM工作流程

1.1.3 力矩器的驱动与PWM信号关系

如图3所示,力矩器的驱动脉冲实质是电流信号对线圈的作用,而力矩器等效的RL串联电路工作特性会引起力矩器驱动误差,从而降低了力矩发生器的线性度,当PWM波通过线圈时,会产生不稳定的电流。根据KVL,设 $t=0$ 时,电路电流为 I_0 ,最大输入电压为 U ,电路最大当PWM从1跳变到0状态, $t \geq 0$ 时,电路中的电流为^[8-9]:

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{L/R}} \quad (1)$$

电路中电感上的电压为:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = I_0 R e^{-\frac{t}{\tau}} = U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

当PWM从0跳变到1状态, $t \geq 0$ 时,电路中的电流为:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3)$$

电感上的电压为:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau}} = U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

当电路满足:输出电压 $u_L(t)$ 是电感 L 上的响应电压, $u_R(t)$ 是电阻 R 的响应电压;电路的时间常数 τ 很小,而输入的信号周期 T 较大,即满足 $\tau = L/R \ll T$ 。此时电感电压衰减很快,则有:

$$u_L(t) \ll u_R(t) \quad (5)$$

$$u_R(t) \approx u_i(t) \quad (6)$$

式中: $u_i(t)$ —输入激励信号。

由式(2,4,5,6),可得出:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = -L \frac{du_R}{dt} \approx -\frac{L}{R} \frac{du_i(t)}{dt} = -\tau \frac{du_i(t)}{dt} \quad (7)$$

由式(7)可知,电感响应信号近似与PWM激励的微分成正比。由式(7)还可见,当输入信号固定,且 L 为定值时,输出信号大小与电阻 R 成反比,与 τ 成正比。

1.1.4 力矩器对PWM波的响应分析

为确保加速度计精确性、稳定性,其挠性摆片必须及时准确回到平衡位置,这就要求力矩器响应速度高,即力矩器必须根据PWM波作出响应。RL电路对PWM的响应是一个冲击脉冲,在理想情况下其响应的上升时间和下降时间都为零。在实际工作中,由于误差的不可避免,响应的上升时间和下降时间都不为零,上升/下降时间与 $\tau = L/R$ 有关。

RL激励与响应波形如图5所示。由图5(c)可以看出,响应信号幅值高于PWM幅值,则设定PWM幅值为1,即响应幅值为 A , $A > 1$,有:

$$u_L(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

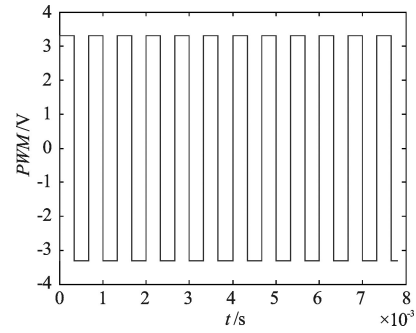
电感 L 在时间点 t_1 开始放电,即 $u_L(t_1) = U$, $0 < U \leq A$;时间点 t_2 时放电一半,即 $u_L(t_2) = U/2$,根据式(8),有:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = -\tau \left(\ln \frac{2U}{A} - \ln \frac{U}{A} \right) = -\tau \ln 2 \quad (9)$$

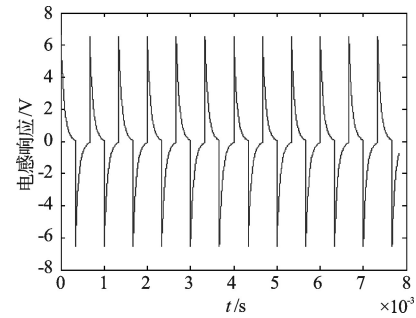
电感 L 放电一半的时间 Δt 为绝对误差,由式(9)可表明绝对误差的大小与PWM波的周期 T 无关,与时间常数 τ 成正比, τ 越大,绝对误差就越大。

由式(8)可知,当 $t = \infty$ 时,有 $u_L(\infty) = 0$,根据图5(c)可知,只有当PWM波极性跳转的瞬间,电感 L 的响应为0,所以在PWM波单个极性的保持时间即 $T/2$ 内,响应的下降时间 $fall_time$ 与PWM波周期 T 的关

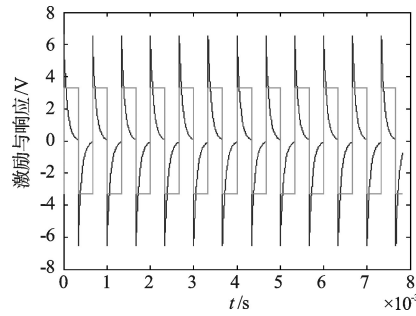
系有 $fall_time = T/2$ 。



(a) PWM激励



(b) 电感响应



(c) 激励与响应

图5 RL激励与响应波形

根据以上分析可以知道,PWM驱动力矩器时,PWM频率越大驱动性能越好,工作的绝对误差与串联电路中的 R 成反比。

1.2 加速度信号输出精度

在全数字加速度计读出系统中,PWM输出电路一方面是输出数字脉冲作用在力矩器上实现闭环平衡,另一方面是将PWM控制参数作为加速度数字信息输出,如此就精简了读出电路的设计,提高了读出系统的工作效率。系统方案中PWM是由多位逻辑数字位控制输出,因此PWM控制逻辑位数不仅对力矩器的驱动有一定影响,也对整个系统读出的精度有决定性作用。

力矩器驱动电流 I 与外部输入加速度 a 在平衡状态下,有:

$$K_b a = K_i I \quad (10)$$

$$I = \frac{K_b}{K_i} a \quad (11)$$

式中: K_b —摆性; K_i —力矩系数; K_b/K_i —标度系数^[10-11]。

由式(10,11)可知,力矩器驱动电流 I 与加速度 a 成比例,PWM的输出控制电流 I 的大小及方向,电流 I 的精度对 a 的精度有决定性的作用。设定加速度在静态情况下,力矩器的稳定驱动电流为 I_a ,PWM的逻辑位数 N_a ,对于加速度计读出精确度 M_a ,有:

$$M_a = \frac{I_a}{N_a} \quad (12)$$

可见,PWM控制位数与系统精确度成正比关系。

2 实验和仿真验证

2.1 PWM驱动力矩器仿真验证

首先验证绝对误差的可靠性,仿真选用PWM的 V_{pp} 为6 V,选用PWM的频率 $f=1.5$ kHz,占空比 $D=50\%$,线圈电阻 $R_L=400$ ohm,电感 $L=31.23$ mH。 τ 与力矩器驱动误差关系如表1所示。表1可表明, τ 越大,误差越大,与理论分析相符。

表1 τ 与力矩器驱动误差关系

r/ohm	τ	$(fall_time/2)/\mu\text{s}$
0	0.078	94.162
400	0.039	41.431
800	0.026	24.482
1 200	0.020	18.832
1 600	0.016	15.066

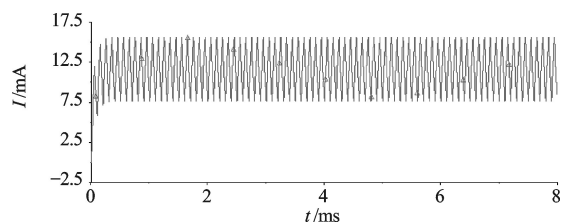
选定 $R_L=400$ ohm,改变PWM频率,表明误差约为 $T/2$,如表2所示。

表2 PWM频率 f 与力矩器驱动误差关系

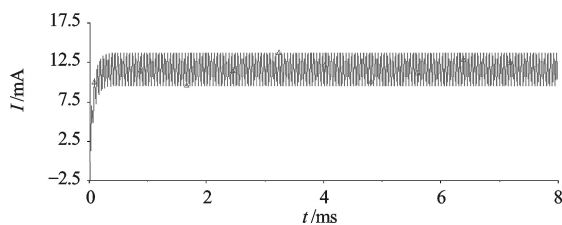
f/kHz	$T/\mu\text{s}$	$fall_time/\mu\text{s}$
1	1000	492
1.5	666	313
1.8	555	260
2	500	234
2.5	400	186

由式(1)可以知道,力矩器的实际工作电流是在理想驱动电流上下波动。从式(11)也可以看出,驱动电流的精确度对加速度值有很大的影响。在保持其他参数不变的情况下,改变PWM的输出频率对力矩器工作电流的影响如图6所示。从仿真结果可以看出,随着PWM频率的增大,电路中工作电流的波动幅度减小。图6(a)中PWM的频率是10 kHz,图6(b)中PWM的频率是20 kHz,可以看出20 kHz的电流波动幅度比10 kHz情况下的小40%。但是,PWM频率是随着数字电路频率的增大而增大,数字电路频率增大

到一定值,系统的抗干扰度就会降低,所以若要提高PWM的频率必须考虑系统的稳定工作频率,这样,在提高PWM频率,降低驱动电流波动幅度的同时也会降低系统的干扰噪声。



(a) PWM频率10 kHz时电流波纹



(b) PWM频率20 kHz时电流波纹

图6 PWM频率对力矩器的影响

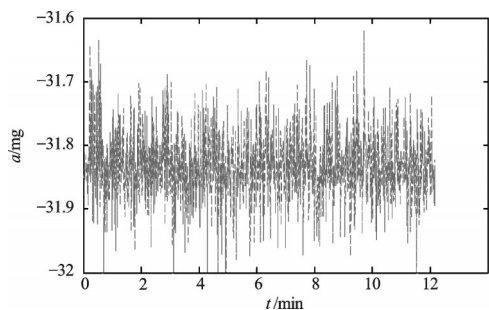
通过仿真,可以看到PWM频率越大,驱动电流纹波越小,力矩器的工作性能越好;力矩器驱动的绝对误差与串联电阻 r 成反比。

2.2 PWM与加速度输出精度关系实验验证

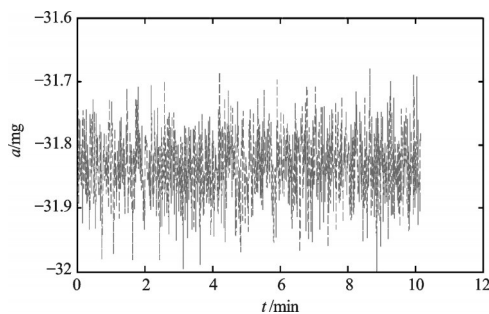
时钟频率为50 MHz的FPGA逻辑电路与加速度计表头(力矩器参数: $R_L=423.2$ ohm, $L=31.23$ mH)组成全数字加速度计闭环读出系统,力矩器外接电阻 $r=942$ ohm。加速度计读出电路检测、控制、驱动等逻辑设计以及加速度计表头性能对整个读出电路测量结果都有影响,在只改变PWM位数情况下,测得一定值姿态的加速度计静态数据结果,如图7所示。同等条件下,改变加速计姿态,对实验数据进行统计分析得到加速度静态测量的标准差与PWM位数的关系,如图8所示。从图7~9中可以看出,系统精度逐步增大,逻辑位为15位时,测得的加速度标准偏差为 1.5×10^{-5} g,精度为 10^{-4} g,到了15位以后,精度没有明显增高。经过数据分析可见,并不是位数越高系统越精确。

3 结束语

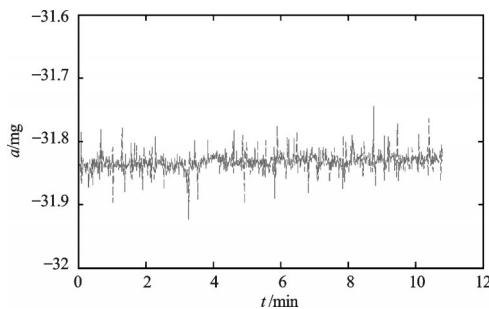
本研究通过分析和验证表明全数字加速度计闭环读出电路可以实现对加速度的精确测量,使用PWM可以实现对力矩器的驱动和加速度高精度输出,大大减小了模拟器件误差影响,精简了电路设计,设计成本相对常规方案节约7~10倍。实验和仿真结果表明,在一定范围内,加大力矩器外接电阻和PWM



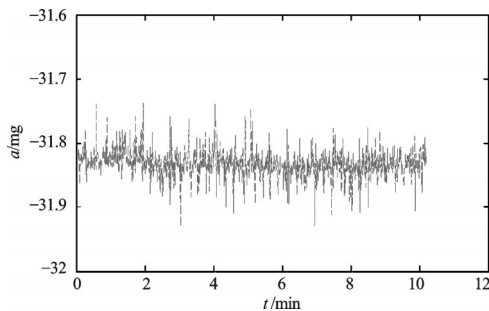
(a) PWM13位时加速度计静态采集数据



(b) PWM14位时加速度计静态采集数据



(c) PWM15位时加速度计静态采集数据



(d) PWM16位时加速度计静态采集数据

图7 改变PWM位测得静态加速度值对比图

工作频率及逻辑位数可以提高系统读出精度,在外接电阻 $r=942\ \Omega$,FPGA时钟频率为 50 MHz,PWM逻辑位为 15 位的条件下,全数字挠性加速度计闭环读出电路可以测得标准偏差为 $1.5\times 10^{-5}\text{ g}$,精度为 10^{-4} g 的加速度值。

本文引用格式:

文一青,贺慧勇,唐立军,等. 全数字挠性加速度计加矩设计与读出精度分析[J]. 机电工程,2014,31(8):1035-1039.

WEN Yi-qing, HE Hui-yong, TANG Li-jun, et al. Read-out accuracy analysis and torquer-driver design of quartz flexible accelerometer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2014,31(8):1035-1039.

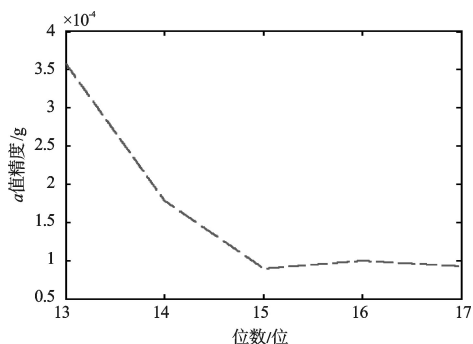


图8 PWM位数与测得加速度标准差关系图

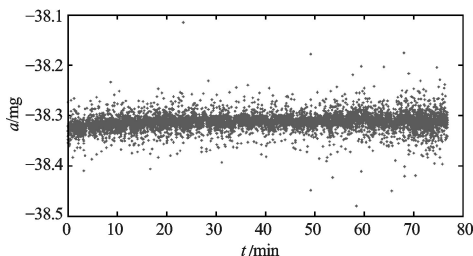


图9 15位PWM加矩力矩器测得加速度值

参考文献(References):

- [1] 王春爱,蔡体菁. 挠性加速度计石英摆片的力学分析[J]. 舰船电子工程,2009,29(3):56-60.
- [2] RATCLIFFE C, HEIDER D, CRANE R, et al. Investigation into the use of low cost MEMS accelerometers for vibration based damage detection[J]. **Composite Structures**, 2006, 82(1):61-70.
- [3] 张春熹,魏 渊,张 晞,等. 数字闭环加速度计系统模型分析与校正设计[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12):2833-2839.
- [4] 李 安,张云电. 石英挠性加速度计摆片组件的应力分析[J]. 机电工程,2010,27(10):1-4.
- [5] 顾欣怡,张 晞,魏 渊. 数字闭环加速度计控制器设计与仿真[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(6):170-173.
- [6] 张 晞,张声艳,曹巧媛. 数字闭环石英挠性加速度计量化误差分析与实验研究[J]. 传感器与微系统,2013,32(11):33-36.
- [7] 周连贵. 挠性摆式加速度计(FHPA)的研究[J]. 飞航导弹,1986(S2):41-61.
- [8] 邱关源. 电路[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [9] 吕伟锋. RC和RL微分实验电路误差的时间分析法[J]. 实验技术与管理,2010,27(12):48-50.
- [10] 夏 瑜,孙立宁,杨 晔. 石英挠性摆式加速度计全数字化伺服回路[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2009,25(3):314-317.
- [11] 王 巍. 高精度加速度计测量系统的分析与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2011.

[编辑:罗向阳]