

脉冲检测技术在倒立摆系统中的应用

杨 智 潘家森

(中山大学信息科学与技术学院 广州 510006)

摘 要: 倒立摆控制系统对外部干扰信号非常敏感,并且对状态反馈量的精确度要求较高。为了提高系统反馈量的精确度,设计了一种采集以及统计旋转光电编码器脉冲信号的方案。该设计方案以 STM32 为核心,并设计了二阶低通滤波器、脉冲整形电路以及其他辅助电路。在实验中,分别测试了不同转速下光电编码器输出的脉冲信号。实验结果表明,该方案有效地解决了脉冲高频干扰、波形边缘振荡以及脉冲畸形的问题。此外,通过拉格朗日建模法建立了一级倒立摆的数学模型,并设计了基于此数学模型的倒立摆 LQR 控制器。最后,在实物系统中观察了摆杆角度实时变化曲线,间接验证了该脉冲信号采集方案的有效性。

关键词: 倒立摆;光电编码器;脉冲信号;STM32;脉冲畸形

中图分类号: TN78 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Application of pulse detection technology in the inverted pendulum systems

Yang Zhi Pan Jiasen

(College of Information Science and Technology, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The inverted-pendulum systems are sensitive to the external interference signal and have a high precision request for state feedback quantity. In order to improve the precision of feedback quantity, a scheme used to pick up pulse signals of rotary photoelectric encoders is designed in this paper. The scheme is based on STM32, including second order low-pass filters, pulse shaping circuit and other subsidiary circuits. The pulse signals of photoelectric encoders are tested respectively at different speeds in the experiment and the result shows that the scheme is available to the high frequency disturbance, edge oscillation and pulse deformity. Besides, the mathematic model of single inverted pendulum is built by Lagrangian method and a LQR controller of the inverted pendulum based on this mathematic model is designed. Finally, the real time curve of the pendulum angle is observed in the actual system, indirectly proving the effectiveness and reasonability of the scheme in this paper.

Keywords: inverted pendulum; photoelectric encoder; pulse signal; STM32; pulse deformity

1 引 言

一般的脉冲计数器有多种构成形式,通常可以用可编程逻辑器件(CPDL 或者 FPGA)、纯硬件电路以及普通单片机编程实现。但是 CPDL 或者 FPGA 的实现方式成本较高,编程要求高以及流程较为复杂;如果采用纯硬件电路搭建计数器,所需要的元器件较多,电路复杂,更重要的是有较大的时延,从而导致精度较低^[1];而普通的单片机(如 8051 系列)没有自带滤波功能,处理速度慢,反应能力差,对于高频的脉冲处理不过来。更重要的是以上这些方

案并没有考虑在高速转动下旋转光电编码器传感器发出的脉冲信号发生畸形的问题。

在位置控制系统中,准确获取被控对象的位置信息对于提高整个系统的控制精度是相当重要的^[2-4]。获取高精度的位置信息的前提条件是能够对传感器的脉冲进行准确的计数。然而,传感器的脉冲信号并不是完美的方波信号,避免不了因为震荡或者别的原因而叠加了高频干扰噪声,甚至在高速转动下脉冲发生畸形,从而导致脉冲计数出现误差。因此,在脉冲计数之前有必要对传感器的脉冲信号进行处理修正。

收稿日期:2015-03

倒立摆系统是一个多变量、强耦合、严格的非线性以及自然不稳定的系统^[5-6],两足机器人的研究与倒立摆有诸多相似性^[7],对倒立摆的研究将有助于推动两足机器人的发展。倒立摆的状态变量,如角度、位移,需要通过光电编码器进行反馈。控制系统的精度以及控制效果对状态变量的精度提出了一个很高的要求。所以,脉冲计数的准确性对于倒立摆系统的稳定控制起着很关键的作用^[8]。

该文提出了一种简单、易行以及低成本的基于STM32的光电编码器脉冲信号处理解决方案,包括硬件电路设计以及软件设计,并将该方案应用到一级车载倒立摆系统中,取得了较好的控制效果。

2 倒立摆数学建模

首先需要建立一级倒立摆系统的数学模型^[9],这里采用拉格朗日建模法。拉格朗日建模法是一种基于能量的建模方法,涉及能量包括动能和势能。在推导系统模型过程中使用的是标量,易于计算。拉格朗日建模法既适用于线性系统,也适用于非线性系统。

拉格朗日函数 $L = T - V$, 式中, T 为系统动能, V 为系统的势能。在倒立摆系统中,动能由两部分构成: 小车动能 (T_M) 和摆杆的动能 (T_m), 如式(1)所示, M 为小车质量, m 为摆杆质量。如图1所示为一级倒立摆模型。

$$T = T_M + T_m \quad (1)$$

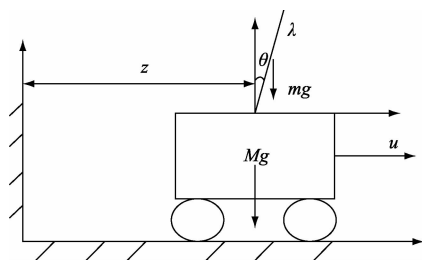


图1 一级倒立摆模型

设系统的2个广义坐标为 z 与 θ , 以左边的墙壁为坐标的零参考点。

小车的动能为:

$$T_M = \frac{1}{2} M \dot{z}^2 \quad (2)$$

对于摆杆:

$$T_m = \frac{1}{2} m \left[\frac{d}{dt} (z + l \sin \theta) \right]^2 + \frac{1}{2} m \left[\frac{d}{dt} (l \sin \theta) \right]^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (3)$$

式中: l 为摆杆长度 λ 的一半, 即 $l = \frac{1}{2} \lambda$, J 为均匀摆杆的转动惯量, $J = \frac{1}{3} m l^2$ 。

取小车平面为势能参考零点, 则系统的势能为:

$$V = mgl \cos \theta \quad (4)$$

因此, 通过计算可以得到一级倒立摆的状态空间表达式:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{-1}{M} \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$y = \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \quad (6)$$

3 系统结构简介

自主设计由2个大扭矩直流减速电机驱动的三轮平板小车, 倒立摆硬件系统主控芯片采用具有 ARM Cortex-M3 内核的 STM32, 该芯片通过锁相环可扩频到 72 MHz 的 CPU 时钟频率, 运算速度较快, 处理能力强, 能够对数据信息实现滤波功能, 而且 STM32 拥有强大的程序库, 编程方便简单^[10], 这是其他普通单片机 (如 8051 系列) 无法比拟的地方; 用于数据采集的角度以及位移传感器使用的是欧姆龙 E6B2-CWZ6C, 精度为 2 000 P/R, 共有三相输出, 分别为 A、B 以及 Z (A、B 为相位差为 90° 的脉冲信号, Z 为每转一圈输出的一个脉冲信号, 在本系统中做为零点校正信号)。倒立摆系统信号流程图结构如图2所示。由光电编码器反馈的状态变量信息被 STM32 单片机获取, 分别计算出倒立摆小车速度、小车位移、摆杆偏移角度以及摆杆角速度, 并根据 LQR 算法计算出最优的控制量, 通过相关电机驱动电路来达到控制的目的。

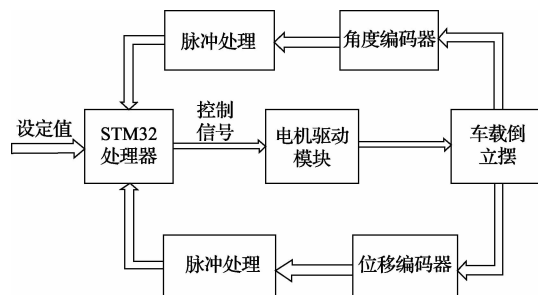


图2 系统流程

光电编码器反馈的信号是关键的部分, 反馈信号误差是系统误差的主要来源, 因此, 着重研究这个问题。

光电编码器的转动速度跟电机有关系, 而电机的转速跟加载在其两端的电压成正比。如图3所示, 使用 LabVIEW 虚拟示波器分别观测了不同电机电压下原始的光电编码器脉冲波形信号。

由上述不同电机电压下的脉冲信号图可知,光电编码器转速越大,脉冲信号畸变以及高频干扰越严重,在边缘位置甚至还产生振荡。电机电压为12 V的时候,脉冲波形的上升沿已经变化非常缓慢,并且变得很尖锐,这对于脉冲统计会造成误差干扰,可能会导致脉冲丢失。

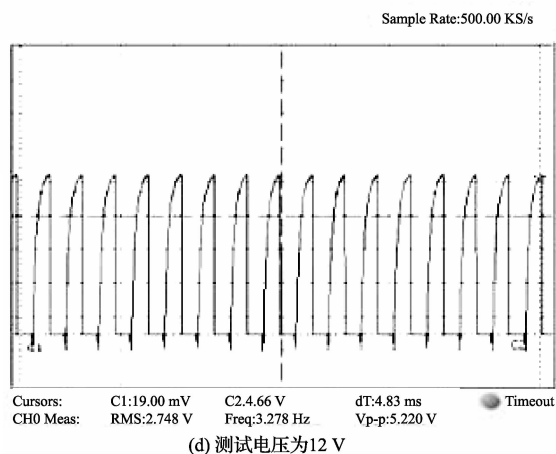
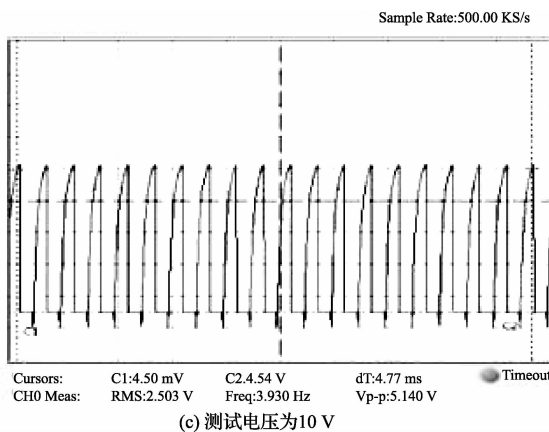
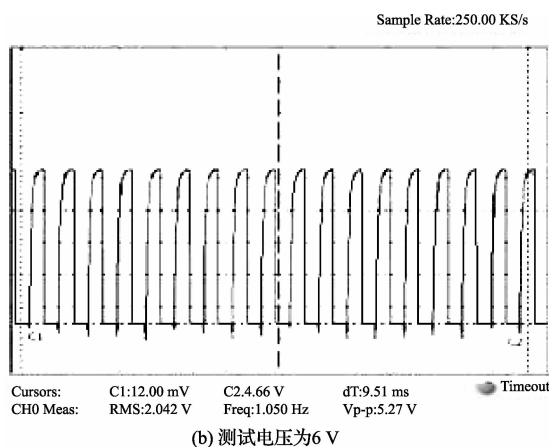
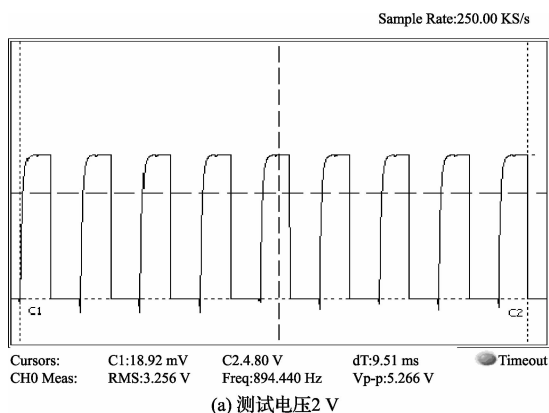


图3 不同电机电压下编码器的脉冲信号

针对上述问题,本文提出了一个如下的解决方案。

4 脉冲信号采集方案

光电编码器产生的原始脉冲信号会因为外部干扰或者别的因素而叠加了高频干扰信号以及脉冲变形,因此,脉冲信号处理模块应当具有滤除高频成分以及脉冲整形的功能。如图4所示为反馈信号采集流程图,该模块采用了硬件和软件相结合的方式进行信号处理。

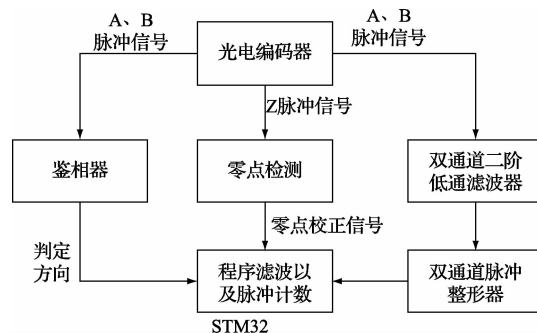


图4 反馈信号采集流程

经过观察光电编码器的输出波形,在倒立摆系统中光电编码器输出脉冲频率在10 kHz以内,采用普通低成本二阶有源低通滤波器即可。脉冲整形器采用由门电路构成的施密特触发器。鉴相器是用来检测A、B两路脉冲信号的先后顺序,通过鉴相器的输出可获知倒立摆摆杆的摆动方向。

鉴相器由D触发器门电路构成,主要芯片采用74LS74。倒立摆运行过程中会产生误差积累,通过Z脉冲信号可以进行零点校正从而消除误差积累。

最后,经过处理的 A、B 脉冲信号输入到 STM32 处理器进行脉冲统计。STM32 的定时器具有输入捕获功能,每个定时器具有 4 个输入通道,并且每个通道带有一个滤波器。当有脉冲输入时,脉冲先经过内置数字滤波器,当滤波器连续采样到 N (N 值可通过程序设定) 次有效电平时,才认为这是一次有效的输入电平。判断脉冲有效后,定时器相应通道捕获到脉冲的上升沿并进行脉冲计数。如图 5 所示为当 $N=8$ 时的有效脉冲检测示意图。最终脉冲统计结果采取 A、B 两路脉冲的算术平均值。

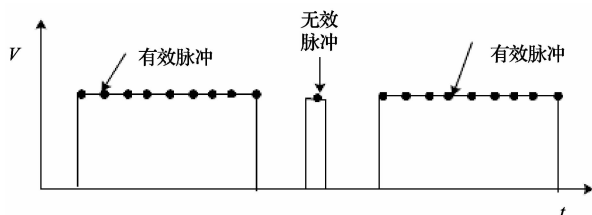


图 5 有效脉冲检测示意

5 硬件电路设计

5.1 二阶压控电压源 LPF

为了滤除高频干扰成分,在信号处理模块加进了二阶压控电压源低通滤波器^[11]。电路原理如图 6 所示,可推导其传递函数为 $A_v(s)$:

$$A_v(s) = \frac{V_o}{V_i(s)} = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sCR + (sCR)^2} \quad (7)$$

式中: $R_m = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $A_{vp} = 1 + \frac{R_f}{R_4}$, 品质因数

$Q = \frac{1}{3 - A_{vp}}$ 。因此滤波器通频带增益应该小于 3,才能保证电路正常工作。

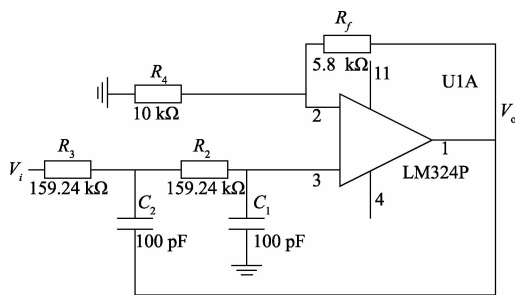


图 6 二阶低通滤波器电路

令 $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$, 则当取 Q 值为 0.707 时,截止频率 $f_c = f_0$ 。根据脉冲信号最大可能达到的频率为 10 kHz,故以此为截止频率,可计算得到 RC 等参数。如图 7 所示为设计得到的二阶低通滤波器波特图。

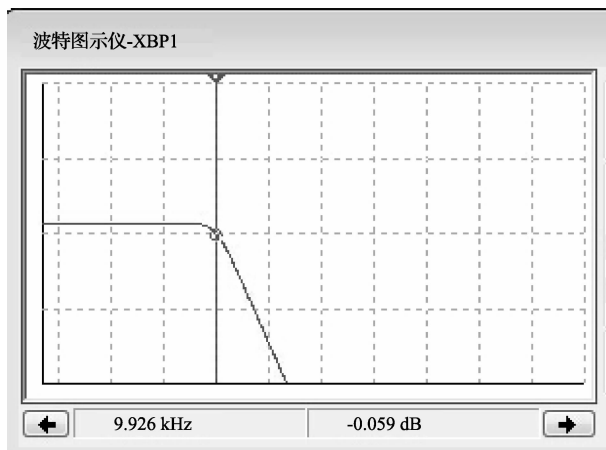


图 7 滤波器波特

5.2 施密特脉冲整形电路设计

施密特触发器的主要作用是把上升沿和下降沿不陡峭的脉冲信号整形为陡峭的脉冲信号。脉冲信号在传输过程当中往往会发生畸变,或者在脉冲的边缘位置产生振荡,从而对信号采集造成误差干扰。如图 8 为由两个 CMOS 反相器构成的施密特触发器电路。

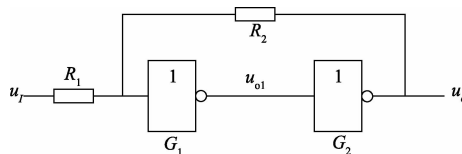


图 8 施密特触发器

5.3 鉴相电路设计

由于摆杆有两个摆动方向,所以必须判断出摆杆是往哪个方向摆动。系统使用的传感器光电编码器共有三相 (A、B、Z) 输出,当编码器顺时针转, A 相比 B 相超前,逆时针转时,则 A 相比 B 相滞后。利用 A、B 相输出脉冲波形相位差为 90° 的特点,使用 D 触发器就可以轻易判断出摆杆的转向。如图 9 所示,假设 A 相波形比 B 相波形超前 90° ,那么 D 触发器 Q 端就会输出高电平,反之,如果 A 相比 B 相波形迟滞 90° ,则 Q 端输出低电平。通过 MCU 的 IO 引脚可以轻易捕获 D 触发器的输出状态。图 10 所示为由 D 触发器构成的相位判断电路。

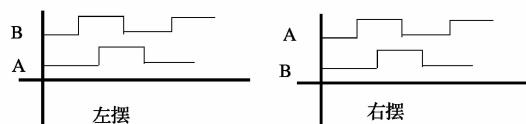


图 9 方向判断示意

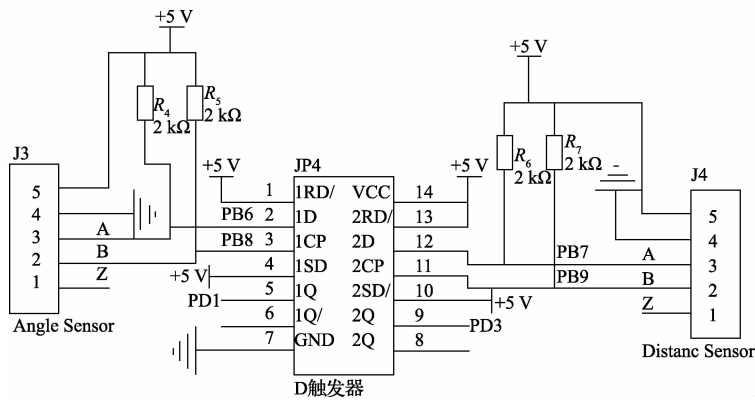


图 10 鉴相器电路

6 实验

实验部分的内容主要包括观测不同速度下的光电编码器输出的脉冲信号情况,并分别比较处理前的脉冲信号以及处理后的脉冲信号,并根据系统设计控制器,最后在倒立摆系统中验证其控制效果。

6.1 LQR 控制器设计

对于 n 阶线性时变系统

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \tag{8}$$

式中: $x(t_0) = x_0, t \in [t_0, t_f]$, 确定控制向量为 $u^*(t)$ 的值,使目标式 $J[u(t)]$ 的二次性能指标取得最小值^[12]:

$$J[u(t)] = \frac{1}{2}x^T(t_f)Sx(t_f) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f} [x^T Q(t)x + u^T R(t)u]dt \tag{9}$$

式中: $S, Q(t), R(t)$ 为加权矩阵, R 为正定的实对称矩阵, Q 与 R 确定了系统的误差和能量损耗的相对重要性,一般都是根据经验选择 Q 与 R 的值。

$$u^*(t) = -K^*(t)x^*(t) \tag{10}$$

式中: $K^*(t) = R^{-1}(t)B^T(t)P(t)$, $P(t)$ 为 Riccati 微分方程的解。

设计 LQR 控制器的关键在于选定 Q 矩阵与 R 矩阵的元素值,工程上常采用试探法^[13],然后可以使用 MATLAB 提供的 lqr() 函数求解反馈控制系统的反馈增益矩阵 K 。如图 11 所示加入状态反馈后的系统结构。

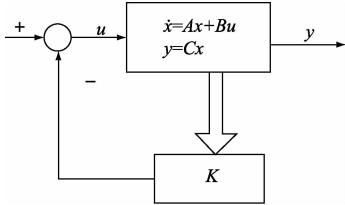


图 11 全状态反馈结构

此闭环反馈控制系统的状态方程为:

$$\dot{x} = (A - BK)x + Bu \tag{11}$$

$$y = Cx \tag{12}$$

如表 1 所示为一级倒立摆系统的相关参数。

表 1 倒立摆参数

变量名称	含义	参数值
M	小车质量	2.3 kg
m	摆杆质量	0.04 kg
λ	摆杆长度	0.263 m
g	重力加速度	10 m/s ²

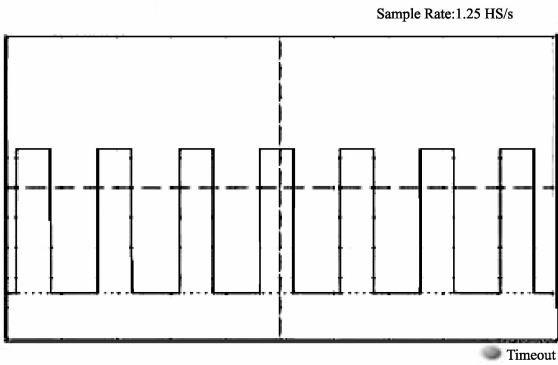
通过反复尝试,本控制系统选取的 Q 与 R 值分别为:

$$Q = [5\ 000\ 0\ 0\ 0; 0\ 1000\ 0\ 0; 0\ 0\ 5000\ 0; 0\ 0\ 0\ 1000]$$

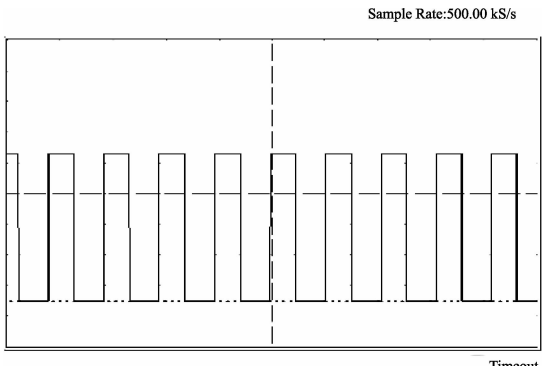
$$R = 2$$

6.2 脉冲信号处理结果

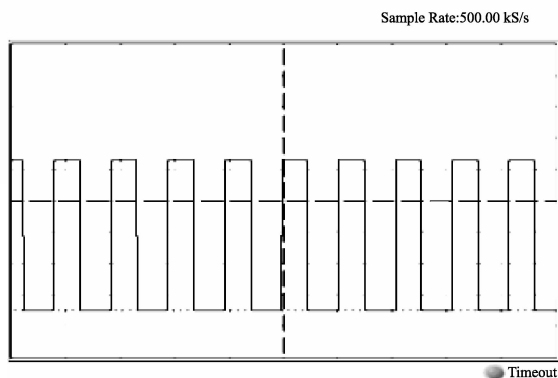
经过二阶有源低通滤波器以及脉冲整形器后,不同电机测试电压下光电编码器的脉冲信号波形如图 12 所示。



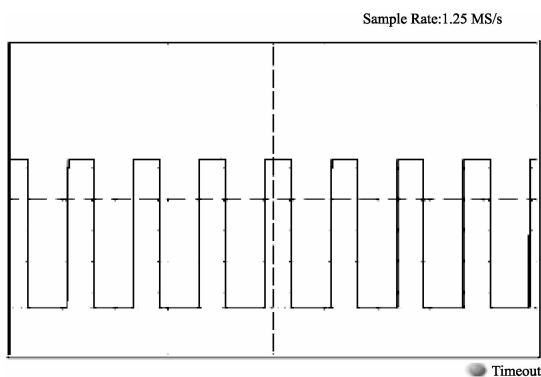
(a)测试电压为2 V



(b)测试电压为6 V



(c)测试电压为10 V



(d)测试电压为12 V

图 12 不同电机电压下脉冲处理结果波形

由实验结果波形图可知,光电编码器的脉冲信号经过采集处理后,被还原成了规则的方波脉冲信号,上升沿和下降沿都很陡峭,波形的尖刺已经被消除掉,脉冲边缘的振荡也已经被消除。无论光电编码器是低速转动还是高速转动,所采集到的脉冲信号都是比较完美的信号,有效地解决了脉冲高频干扰、波形边缘振荡以及脉冲畸形的问题。

6.3 倒立摆控制效果

本系统结合了 LabVIEW 上位机编程以及无线 Wifi 数据传送模块,通过 PC 可以观察到倒立摆摆杆的角度变化曲线。

测试结果显示,倒立摆能够快速回归稳定并保持摆杆在附近微小角度振荡。

如图 13 所示为稳定状态角度变化实时曲线,由图明显得知,摆杆一直在零点附近振荡,在所观察的数据之内,角度的振荡幅度一直维持在很小的水平范围之内。图 14 为施加外部干扰摆杆角度自我调整实时曲线。测试表明,当给其一个小于 10° 的干扰时,倒立摆也能快速回归稳定状态并保持竖立状态。

随着系统运行时间的增加,系统的误差也慢慢积累,如果不采取措施,那么摆杆在一定的时间之后就会掉下来。通过 Z 相脉冲信号可以进行定时零点校正,从而消除系统误差积累。

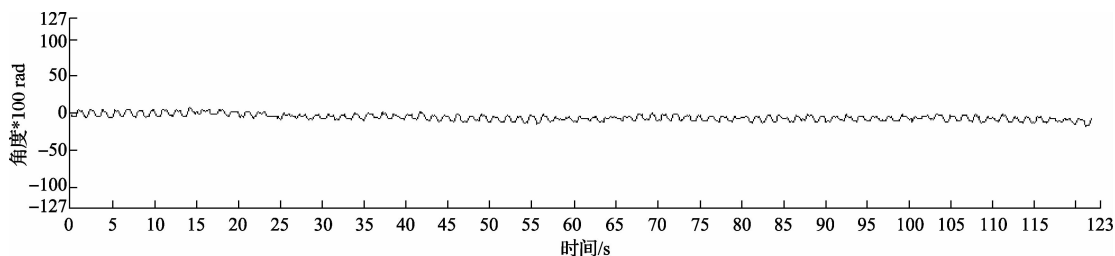


图 13 摆杆角度实时变化曲线

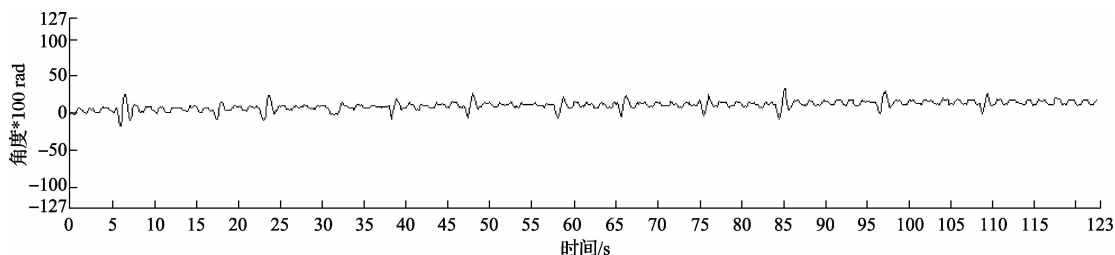


图 14 施加外部干扰摆杆角度实时变化曲线

7 结 论

提出了一种脉冲信号采集方案,分别经过硬件滤波、脉冲整形以及程序滤波等步骤,把原始较差的脉冲信号整理成较完美的易于采集统计的脉冲信号。还结合了自主

设计的一级车载倒立摆系统,把信号采集模块应用到该系统中,其控制效果证明,该信号采集模块的方案设计是合理有效的。

与其他脉冲计数器相比,设计的以 STM32 为核心的脉冲信号采集方案具有成本较低、使用方便、处理能力强

(对较高频率脉冲也适用)、反应快、编程方便简单等优点。同时 STM32 自带的滤波功能提供了极大的方便,可以通过程序设置需要滤除的频率,给开发者提供了选择的空间。文中特别针对光电编码器在高速转动下脉冲畸形的处理进行了处理,提高了脉冲统计的准确性。

参考文献

- [1] 曾庆中,何玉珠. 脉冲信号在导引头测试中的检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(2): 105-107.
- [2] 马有良,任同. 光电编码器脉冲检测电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 76-77.
- [3] 黄煌,姜义成,林力. 两种实时计数脉冲检测方法及应用[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1455-1457.
- [4] 武伟,仇洪冰,刘贵生. 高速超宽带脉冲检测电路的设计[J]. 光通信技术, 2007, 31(6): 58-59.
- [5] 孔灵芳,孔辉,刘长国. 倒立摆系统及研究现状[J]. 机床与液压, 2008, 36(7): 306-309.
- [6] 彭秀艳,胡忠辉. 二级倒立摆状态反馈控制器设计优化方法[J]. 控制工程, 2012, 19(3): 463-465.
- [7] 林文建,钟杭,黎福海,等. 两轮自平衡机器人控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 751-755.
- [8] 胡阳,王吉芳. 二级倒立摆系统的实时稳定实验研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 342-345.
- [9] 刘惠超,孔庆忠. 基于 MATLAB 的倒立摆 LQR 控制方法的研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(4): 166-168.
- [10] 荣少巍. 基于 STM32 的实收实发超声波检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 54-57.
- [11] 刘鑫,刘琪芳,高文华. 有源低通滤波器仿真设计教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2013, 35(3): 59-61.
- [12] 杨智,范正平. 自动控制原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2014.
- [13] 张晶. 基于 MA 优化的二级倒立摆系统 LQR 控制器设计[D]. 太原:山西大学工程学院, 2012.

作者简介

杨智, 1961 年出生, 教授。主要研究方向为复杂系统的建模仿真与控制策略研究、计算机集成制造系统(CIMS)、智能检测与自动化仪表、电气与计算机控制系统。

E-mail: issyz@mail.sysu.edu.cn

潘家森, 1988 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为自动控制装置与信号处理。

E-mail: panjiasen@foxmail.com

是德科技延长新产品和停产产品的仪器服务与保修期

广泛服务范围专注于客户长期成功

是德科技(NYSE:KEYS)日前宣布延长了多款已经停产的热门产品的服务周期,大大超越了行业服务标准。新的延长服务期(ESP)计划满足了客户常见的需求,保证关键测试设备在长达数十年的项目寿命期内正常运行。另外,是德科技目前还提供多年维修保证方案,使最终用户获得长达 10 年的仪器最高性能。

ESP 解决方案着眼于在仪器停产后继续为客户提供是德科技、安捷伦和惠普测试设备的服务。是德科技提供了一系列标准服务(包括多年期维修协议在内),并将与客户共同开发定制解决方案以保证长期项目的成功与顺利进行,直到客户所在企业为过渡到新技术做好准备。

是德科技维修保证方案将业界领先的 3 年标准保修服务扩展到 5 年、7 年乃至 10 年。维修保证方案可在最初购买仪器时获得,是一种成本极低、方便有效的方法:一方面既能确保设备性能,又能最小化对客户业务的中断;另一方面还能减少烦琐的审批手续和保证优先服务。

是德科技高级副总裁、客户支持与服务及全球营销部门

的总经理 Mike Gasparian 表示:“是德科技通过必要的基础设施投资,包括人员、设备和原装原厂商(OEM)零部件供应链,为维修保证方案奠定了稳固的基础。我们承诺,将帮助已有客户和潜在客户确保业务连续性,无论是现在、明天还是未来。”

维修保证方案和 ESP 是是德科技仪器生命周期解决方案(ILS)的一部分,可以满足客户在整个产品寿命周期内的持续服务要求。除此之外,ILS 还包含标准服务周期解决方案,确保仪器在保修期后的持续稳定性能。这些解决方案提供是德科技卓越的校准和维修服务,优化客户预算和测试系统正常运行时间。

美国定价及上市信息

仪器生命周期解决方案现已发布,包括维修保证方案和延长服务期校准与维修计划。定价取决于仪器的类型和每种解决方案包含的服务范围。有关背景介绍,请访问 http://www.keysight.com/find/Services_Background。