

蠕动泵控制系统的设计

赵凯¹,舒明雷²,刘照阳²,高天雷²,金中一¹

(1. 齐鲁工业大学电气工程与自动化学院,山东 济南 250353;

2. 山东省计算中心(国家超级计算济南中心) 山东省计算机网络重点实验室,山东 济南 250014)

摘要: 蠕动泵在科研和生产的应用越来越广泛。为充分体现蠕动泵在实际应用中的优越性,设计了蠕动泵控制系统。采用 Kamoer 蠕动泵,进行相应的软硬件设计。以 MSP430 FR5969 单片机为控制核心,通过直流脉冲宽度调制(PWM)实现对直流电机转速的控制。利用上位机串口发送相应指令,并采用光电开关检测电机转速,以实现单闭环控制。利用 Code Composer Studio,进行单片机程序编写。根据主控模块、电机控制、转速控制和显示模块几个部分,实现模块化编程,控制灵活。系统具有体积小、噪声低、方便维护、无污染及重复精度高等特点,实现了蠕动泵的正反抽及流量控制,在医疗、化工及家庭等领域有着较为广泛的实际应用价值。

关键词: 蠕动泵; MSP430 单片机; 脉冲宽度调制; 串口程控; 光电开关; 流量控制

中图分类号: TH-328; TP216

文献标志码: A

DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2017080009

Research and Design of Peristaltic Pump Control System

ZHAO Kai¹, SHU Minglei², LIU Zhaoyang², GAO Tianlei², JIN Zhongyi¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Computer Networks Shandong Computer Science Center(National Supercomputer Center in Jinan), Jinan 250014, China)

Abstract: Peristaltic pumps are becoming more and more widely used in scientific research and production. To fully demonstrate the superiority of peristaltic pump in practical applications, the peristaltic pump control system is designed; and corresponding hardware and software are designed by adopting Kamoer peristaltic pump. With MSP430 FR5969 microcontroller as the control core, through DC pulse width modulation (PWM), the speed of DC motor is controlled. It uses the upper machine serial port to send relevant instructions, and adopts photoelectric switch to detect motor speed and achieve the single closed-loop control. Using the Code Composer Studio for the programming of MCU, which is written into master control module, motor control, speed control and display module to realize modular programming and flexible control. The system has the characteristics of small size, low noise, convenient maintenance, no pollution and high repeatability, it realizes the positive and negative pumping and flow control of peristaltic pump, and has a wide range of practical application value in medical, chemical and family fields.

Keywords: Peristaltic pump; MSP430 microcontroller; Pulse width modulation (PWM); Serial port programmable control; Photoelectric switch; Flow control

0 引言

蠕动泵是一种微型水泵,主要用于控制流体的传输方向和流速^[1]。泵管在工作中被压轮压紧并随之移动。随着压轮移动,未被转轮压紧的泵管回弹,泵管内的流体在此过程中会被推出,从而实现流体的泵送。由于流体只接触泵管而不接触泵体,故蠕动泵适于输送腐蚀性强及相对敏感的流体。其自吸能力好,能空转并可防止回流,因而得到广泛的应用。因此,如何灵

活、有效地控制蠕动泵变得越来越重要。

目前,实际生产中对于蠕动泵的控制,多采用正负极对调的方式实现正反方向的改变,并通过特定流量大小的蠕动泵控制流量大小,控制方式简单,但不够灵活。

本设计充分利用了蠕动泵精度高、维护简单的特性,采用串口发送指令程序控制的方式,实现对流体方向及流量大小的实时控制;同时,方便在不同的环境下的扩展开发,控制方式灵活、有效。

收稿日期:2017-08-08

作者简介:赵凯(1990—),男,在读硕士研究生,主要从事物联网方向的研究,E-mail:1509629967@qq.com;

舒明雷(通信作者),男,博士,副研究员,主要从事无线体域网方向的研究,E-mail:shuml@sdas.org

1 系统总体设计

蠕动泵的构造并不复杂。蠕动泵头分为转子和泵壳两部分^[3]。泵管置于泵壳与转子之间,每两个转轮之间的距离让泵管形成了一个封闭空间,称之为泵室。其容积大小与轮距、泵管内径大小及转轮直径有关。理论上,流体流量是泵速、泵室容积和 360° 内泵室数量这三者的乘积。

对特定蠕动泵而言,其每转一圈产生的流量是固定的,所以能够通过调节泵的转速实现改变流量的大小。本文设计的蠕动泵内置直流电机。直流电机是常见的一种电机,具有良好的起动、制动性能,可在大范围内实现平滑调速,在需要调速或转向的电力拖动领域,其得到了广泛的应用。因此,对于蠕动泵流量的控制,等同于对直流电机转速的控制。

MSP430 FR5969 单片机是一款低功耗的嵌入式混合信号微控制器,在计量、能量采集传感器节点及可穿戴电子产品中有着广泛的应用。该单片机采用时钟频率高达 16 MHz 的 16 位精简指令集计算机架构,非易失性存储器高达 64 KB,智能数字外设包括 32 位硬件乘法器、3 通道内部直接存储器存取 (direct memory access, DMA)、12 位模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 和 5 个 16 位定时器等。其中,每个定时器具有多达 7 个捕捉比较寄存器^[3]。蠕动泵控制系统设计框图如图 1 所示。

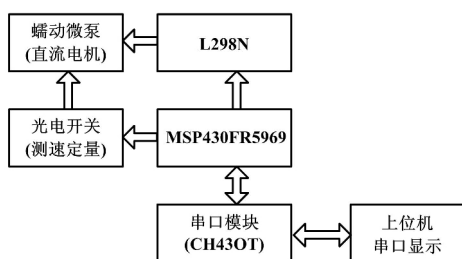


图 1 控制系统设计框图

Fig. 1 Design block diagram of control system

直流电机的转速控制大多数采用按键式。本设计采用串口控制的方式,其目的主要是为上位机提供程序调用接口,以便后续上位机控制软件应用 (application, APP) 的开发,可扩展为蓝牙、WiFi 等无线控制方式。直流电机的控制,采用较为常用且成熟的专用控制芯片 L298N。其应用广泛、成本较低。测速部分采用光电开关,通过单片机定时器的捕获模式测定电机转速,由流量计算公式换算成实时流量^[4]。

转子从位置 A 运动到位置 B,输送的流体体积约

为圆弧 AB 段泵管内的流体体积大小^[5],即:

$$\Delta q = \frac{\theta D}{2} \times \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \theta D^2 d}{8} \quad (1)$$

式中: D 为泵壳圆周节圆直径; d 为泵管直径; Δq 为圆弧 AB 段内流体的体积; θ 为转子转动的角度; δ 为泵管壁厚。

蠕动泵转子转动一圈输送的流量为:

$$q = \frac{2\pi}{\theta} \times \Delta q = \frac{2\pi}{\theta} \times \frac{\pi \theta D^2 d}{8} = \frac{\pi d^2 D}{4} \quad (2)$$

式中: q 为蠕动泵的排量。

则蠕动泵的流量为:

$$Q = v \times q \quad (3)$$

式中: Q 为蠕动泵的流量; v 为蠕动泵的转速。

蠕动泵流量计算图解如图 2 所示。

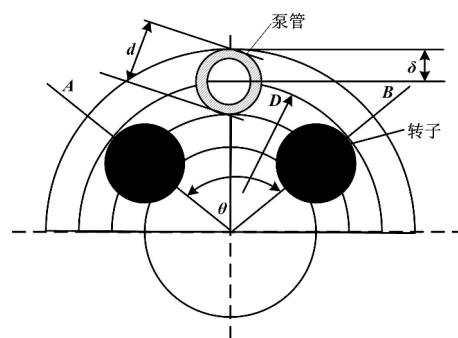


图 2 蠕动泵流量计算图解

Fig. 2 Flow calculation graphic of peristaltic pump

由图 2 可知,蠕动泵流量只与转速、泵管内径及泵壳圆周节圆直径相关。本文设计的蠕动泵,基于串口控制最终实现的功能如下:

- ①正反两个反向输送流体;
- ②实时控制流量的增大和减小;
- ③串口显示实时电机转速及流量大小;
- ④定速、定量的档位设置;
- ⑤可随时停止运行。

2 系统硬件模块设计

2.1 蠕动泵选取

本设计采用型号为 NKP-DC-S06 S kamoer 微型泵 (硅胶管),其性价比高、精致精巧。电机长度为 48.5 mm,整机长度为 65 mm,环境噪声实测值 ≤ 40 dB,流速范围为 5.2 ~ 90 mL/min。蠕动泵的管内径为 2.0 mm,泵壳圆周节圆直径约为 18.0 mm。

2.2 直流电机 H 桥驱动电路

H 桥驱动电路是由达林顿管组成的 H 型 PWM 电路构成的,工作制为单极性。本设计采用单片机对达

林顿管进行控制,使它工作于占空比可调的开关状态,实现对电机转速的精确控制。单片机控制端口一端输出脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号,另一端置低电平,两端口的输出状态及 PWM 信号的占空比决定电机的转速及转向。H 桥驱动电路如图 3 所示。

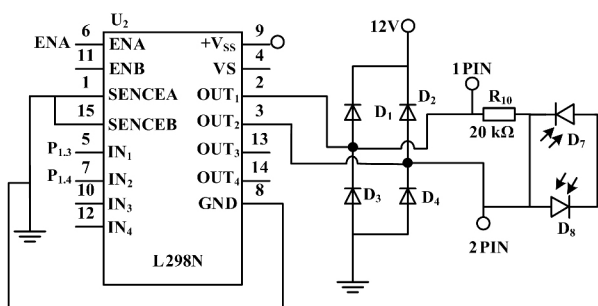


图3 H 桥驱动电路

Fig. 3 H bridge drive circuit

主控芯片为 L298N, 引脚 IN_1 、 IN_2 和 ENA 分别是极性控制端口、使能控制端口, 分别接至单片机的 $P_{1.3}$ 、 $P_{1.4}$ 和 $P_{1.5}$ 引脚, 1PIN 和 2PIN 为连接蠕动泵直流电机两极的端口。

2.3 CH340T 电路

CH340T 以 USB 为总线的转接芯片,能够实现 USB 转打印口、USB 转串口或 USB 转 IrDA 红外[®]。在串口方式下,其可以提供 MODEM 联络信号,实现计算机扩展异步串口或者升级普通的串口设备为 USB 总线。

本设计中,CH340T 作为 USB 转 TTL 的模块,起到连接上位机与单片机(下位机)的桥梁作用。其 TXD 和 RXD 端口分别接至单片机的 RXD 和 TXD 端口,实现上位机与单片机的串口通信,达到指令发送与串口显示接收的目的。

2.4 测速电路

转速检测采用红外光电传感器,即一个光电开关。它具有体积小、功能多、寿命长、精度高、响应速度快以及抗干扰能力强等优点。测速电路如图4所示。

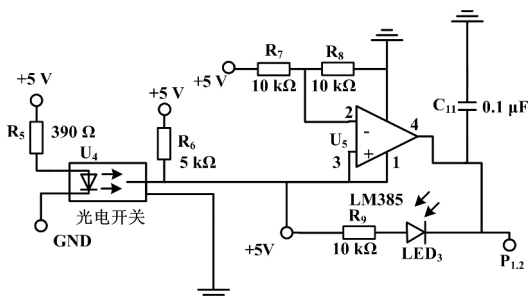


图4 测速电路

Fig. 4 Speed measuring circuit

测速电路由接收管和红外发射管构成。它们被分别固定于电机叶片的两侧位置。当电机转动时,由于叶片遮挡,使得红外接收管产生多个连续脉冲。脉冲的个数取决于电机叶片数量。LM358 的输出作为脉冲输出端,与单片机的 P_1 端口相连。

2.5 电源和主控电路

本设计共需 12 V、5 V、3.3 V 三种幅值的电压。12 V 为蠕动泵的工作电压,5 V 为直流电机驱动模块 L298N 的工作电压,3.3 V 为主控芯片的工作电压。整体系统分为主控模块、L298N 驱动模块、CH430T 串口模块及测速模块。由于电路图设计的模块化,控制系统总原理图的设计采用了层次原理图的设计思想,表述清晰,易于查看。

3 系统软件设计

3.1 软件整体设计

根据硬件部分的模块化设计,本设计软件部分同样采用模块化的编程思想,分别为电机控制模块、通用异步接收发射机(universal asynchronous receiver transmitter, UART)模块、测速模块及主程序;集成开发环境为 IAR Embedded For MSP430 V6.4,系统上位机通过单片机的 UART 通信方式,采用相应的通信协议,由不同的指令实现对电机的运动控制;采用光电模块进行速度追踪,同时,串口实时显示控制状态信息。系统整体软件流程如图 5 所示。

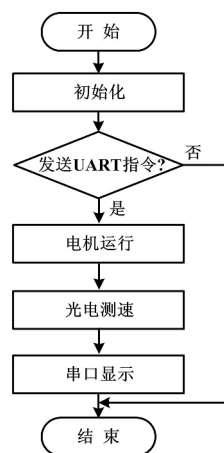


图5 系统整体软件流程图

Fig. 5 Flowchart of overall system software

3.2 串口控制电机模块

本设计基于 PWM 法控制直流电机的转速,分别采用了延时方式和基于单片机的定时器输出 PWM 波控制方式。延时方式主要是指 L298N 驱动模块的使能端 ENA 端口采用延时的方式来决定高低电平的时间。

间长短,从而达到控速的目的。

由于延时的方式存在较大的误差,且不易灵活扩展,本设计最终采用了单片机定时器输出占空比可变的 PWM 波控制方式,即单片机的 P_{1.5} 端口输出 PWM 波。这里选用的是定时器 TB0。

本设计采用了简单的串口协议^[4],如下所示。

“0x0A”:电机正转(蠕动泵正向传送)。

“0x0B”:电机反转(蠕动泵反向传送)。

“0x0C”:电机加速(蠕动泵流量增大)。

“0x0D”:电机减速(蠕动泵流量减小)。

“0x0E”:电机停止(蠕动泵停止工作)。

“0x01”:1 档位,电机转速约为 50 r/min,蠕动泵流量约为 2.85 mL/min。

“0x02”:2 档位,电机转速约为 700 r/min,蠕动泵流量约为 39.90 mL/min。

“0x03”:3 档位,电机最大转约为 1 050 r/min,蠕动泵最大流量约为 59.85 mL/min。

串口采用串口中断实现指令的发送,在本设计中的优先级最高。系统根据指令内容进入不同的子函数,执行相应的运行过程。

3.3 测速模块

本设计测速采用光电开关及 20 孔码盘。当码盘遮挡光电对管,测速模块输出 +5 V 高电平;反之,输出低电平。电机转轴带动码盘运动就形成了脉冲输出,对电机速度的测量就是对脉冲频率的测量。本设计利用 MSP430 FR5969 单片机定时器的捕获模式及定时功能,无需其他复杂的外围电路。按照计时频率原则,如果测量 N 个脉冲所用的时间是 T ,那么频率 f 的测量有如下公式:

$$f = \frac{N}{T} \quad (4)$$

式中: f 为频率; N 为脉冲个数; T 为对应时间。

对于脉冲计数,MSP430 FR5969 单片机 TimerA 的捕获模式可以为此所用。通过设置 $CAP = 1$,选择定时器的捕获功能,其主要用来记录与时间密切相关的时间。本设计把它自动设置为上升沿捕获 $CM = 1$,其自动地将 16 位计数器 TAR 的数值赋给 TACCRx 寄存器,以便后续程序的调用。TimerA 包含三个捕获/比较模块。其中,捕获模块的输入为 CCIxA,分别与外部的 P_{1.1}/TA₀、P_{1.2}/TA₁ 和 P_{1.3}/TA₂ 对应。本设计选择 P_{1.2} 端口为单片机的捕获脉冲输入口,同时配合使用中断,利用 TAIFG 的 TA0IV 中断向量,每记录到一次上升沿程序即进入一次中断。为了降低功耗,采用外部低频晶体振荡器 XT₁,即 $ACLK = 32\ 768\ \text{Hz}$ 。

本设计以 2 s 为时间阈值,即记录 2 s 内上升沿的个数 N 及时间 T 。2 s 由定时器定时中断产生,定时器从 0 计数到最大值 65 535 将会置位标志寄存器 TAIFG,从而生成中断请求。这里采用片外低频振荡器。由其频率 32 768 Hz 可知,定时器的 16 位计数器 TAR 每增加一个计数值经历的时间是 $\frac{1}{32\ 768}\ \text{s}$,所以

溢出中断的时间间隔为 $\frac{1}{32\ 768} \times 65\ 536 = 2\ \text{s}$,即每经过 2 s 产生一次溢出中断。中断服务程序中,采用变量 $pulse$ 来表示捕获到的脉冲个数 N 。它在数值上等同于捕获到的脉冲上升沿个数。时间 T 为计数器 TAR 从程序自定义变量 cap_first 到变量 cap_last 经历的时间间隔。其中,第一个脉冲上升沿到来的时间点赋给变量 cap_first ,然后每个脉冲上升沿到来的时间点赋给变量 cap_last ,并且实时更新,程序中用 $time$ 表示^[5]。 $T = \frac{1}{32\ 768} \times time$,则:

$$F = \frac{N}{T} = \frac{pulse}{\frac{1}{32\ 768} \times time} \quad (5)$$

式中: $pulse$ 为捕获到的脉冲个数; $time$ 为时间间隔。

3.4 主程序

本设计主程序包含初始化设置及串口显示服务程序。初始化主要是完成相关引脚配置,如设置微控制单元(microcontroller unit,MCU)的 P_{1.0}、P_{4.6} 分别为绿色与红色指示灯等。

4 结束语

本设计通过对微型蠕动泵的控制,基本可以实现其自由的流量控制。在医疗^[6]、化工、喷码、试验、食品、环保、工厂及家庭等领域,与相应设备配套使用,可以实现液体传输、取样、管道清洗、定量提取及灌溉等功能。

本控制系统设计是基于串口实现的,严格意义上来说是提供了一种设计思路。该系统实现了无线及远程控制,其灵活运用离不开上位机软件的开发。在一般的应用中,将串口控制改为按键控制、增加 LCD 显示模块取代串口显示、增加被控制蠕动泵的数量都会增强系统应用的灵活性。该系统的研究和设计有着较为实际的工程应用意义。

参考文献:

- [1] 李想,郭庆.基于单片机的蠕动泵控制系统设计[J].大众科技,2011,5(11):128-130.

(下转第 45 页)

自激振荡频率。当前,振弦的固有频率为 2 770 Hz。在同样的激振参数下, T_0 中断 10 次时, T_1 的计数值却不是 T_0 中断两次时 T_1 计数值的 5 倍。由此说明,刚进入精确测频阶段的激振参数并非最佳的,没有引起有效的自激振荡。程序进入的精确测频部分循环了 12 次,已完全满足要求。

4 提高测频精度方法

频率测量方法有两种。一种为测频法,即在某一选定的时间间隔内对被测信号脉冲进行计数,然后将计数值除以时间间隔得到被测信号的频率。测频法在低频时测量误差稍大些。另一种为测周期法,即通过测量被测信号的周期再求其倒数,得到被测信号的频率。测周期法在高频时的测量误差较大。测频法又分为直接测频法、组合测频法、倍频法、等精度测频法等^[7-9]。等精度测频法的关键在于将信号脉冲来临的时刻与计数器开始计数的时刻同步,消除对信号脉冲计数的 ± 1 量化误差。采用测频法,通过对多次测量值取平均来消除系统的随机误差,提高信噪比,从而提升测量精度。

影响测频精度的因素有多个。保证振弦在固有振荡频率上有效自激振荡是提高测量精度的先决条件。此外,还要达到一定的振动幅度。理论上,振弦振动的幅度越大,对提高测量精度越有利。振弦振动的幅度受多种因素限制,包括激振的次数、激振的电压、激振脉冲的频率等。增加测量的时间可以提高测量精度,但前提是在该时间段内硬件电路能够正确检测出微弱的振弦振荡感应信号。在扫频环节,当振弦出现自激满时,增加激振次数,激振后立即拾频,增加测量时间,找出接下来的 12 次测量中频率最高的结果。其即为振弦的固有振动频率。这是提高拾频精度的方法。然后,停止扫频,延时几秒后再从头开始进入下一轮扫频过程。此外,单片机扫频与拾频系统的软件设计的计时部分选用主程序中查询的方法。之所以没有选用中断的方式来计时,是因为当开发软件采用 C51 高级语言时,用中断很难达到要求的计时精确度,而且中断内数据处理工作越多,测量结果越不准确。这也是提

升测频精度时要注意的一个方面。

用其他测频仪器在恒定压力下实际测得的振弦自激振荡频率值分别是 2 701 Hz、2 777 Hz、2 717 Hz、2 705 Hz、2 690 Hz、2 700 Hz、2 777 Hz 和 2 732 Hz,实测值不太稳定。而采用新的激振与测频方法,经过多次测量,测得的一组振弦自激振荡频率值为 2 700 Hz、2 704 Hz、2 766 Hz、2 700 Hz 和 2 769 Hz,偏差很小,大都在 2 700 Hz 左右。由此可见,采用长短计数时间结合测频法测量的振弦自激振荡频率更加可靠,也更加精确。

5 结束语

系统采用的粗精接合测频法,是一种全新的扫频激振与测频方法。粗略扫频时,该方法测频精度低但扫频速度快。此时,测频值只用于预测振弦的固有频率。通过计算,当激振频率与振弦的固有频率接近时,进入精确扫频阶段。在精确扫频阶段,增加测频时间以提升测频精度。此外,还采用了对多次有效测频数据取平均值等方法消除系统误差。经现场应用,证明粗精接合测频法是一种高效的单线圈振弦传感器数据采集方法,提升了测频精度。

参考文献:

- [1] 吕国芳,李东明,刘希涛. 振弦式传感器扫频激振技术 [J]. 自动化与仪表,2006(3):79-81.
- [2] 吕焱,李文生,邓春健. 多通道振弦传感器同步测量系统 [J]. 传感器技术学报,2013,26(3):372-376.
- [3] 贺虎,王万顺,田冬成,等. 振弦式传感器激振策略优化 [J]. 传感技术学报,2010,23(1):74-77.
- [4] 崔军辉,张恩亮,张培仁,等. 提高振弦式传感器测量精度的方法的研究 [J]. 传感技术学报,2009,22(9):1279-1279.
- [5] 白泽生. 基于振弦式传感器测频系统的设计 [J]. 现代电子技术,2007,25(13):135-137.
- [6] 王大涛,滕德贵,胡波. 一种振弦采集仪自适应扫频激振方法 [J]. 仪表技术与传感器,2016(2):103-106.
- [7] 姜印平,赵会超,赵新华,等. 单线圈光电式振弦传感器测频系统的设计 [J]. 传感技术学报,2010,23(1):28-33.
- [8] 潘妍,王茜. 基于振弦式传感器的测频系统设计 [J]. 仪表技术与传感,2008(11):99-103.
- [9] 轻工机械,2016,34(3):18-22.
- [10] 吴波. 89C52 单片机系统的 USB 接口 [J]. 中国科技信息,2012,45(16):84-89.
- [11] 罗玮,余淑荣,张乾军. 基于 Modbus RTU 的蠕动泵测控系统的设计与研究 [J]. 工业仪表与自动化装置,2016,4(5):98-101.
- [12] 贺虎,王万顺. 基于 MSP430 单片机的高精度测频模块设计 [J]. 数据采集与处理,2009,24(5):241-244.
- [13] 吴月凤,闵杏秀,李冬梅. 应用电子蠕动泵输液加药的研究 [J]. 齐鲁护理杂志,2001,7(4):242-243.
- [14] 刘伟,刘璇,檀润华. 基于专利分析的蠕动泵设计研究 [J]. 工程设计学报,2013,20(5):361-367.
- [15] 贲洪奇,刘凡明. 应用单片微机的蠕动泵控制电路 [J]. 仪表技术,1997,1(5):24-25.
- [16] 王道臣,陈志军. 蠕动泵流量的理论计算与实验验证 [J]. 化工自动化及仪表,2015,2(5):186-187.
- [17] 张铁虎,詹民民,代欣,等. 蠕动式点胶机的精确点胶研究 [J].

(上接第 41 页)