

嵌入式新型血栓弹力仪系统的研究与设计

陈曦 徐俊峰* 宋浩然

(河北工业大学 控制科学与工程学院 天津 300130)

摘要 针对目前常用的扭力丝结构的血栓弹力仪对装配、环境适应性、成本要求较高等问题,设计了一种新型血栓弹力仪系统。以模块化的方式给出了系统的测量模块、加热模块、存储与通信模块等。在常规结构的基础上利用 SolidWorks 软件设计出一种盘式结构的测量模块;利用正交编码器精确定位的特点通过嵌入式控制器 STM32 的时间差处理法反映血液粘弹性的变化;针对温度控制具有的大滞后、非线性、大惯性特点,利用模糊 PID 复合控制算法实现快速、精确的温度控制。实验结果表明:系统温差在 0.5℃ 以内,能区分高低凝,容易装配,环境适应性好,成本较低,有重要的发展应用前景。

关键词 血栓弹力仪; SolidWorks 软件; 盘式结构; 嵌入式控制器

中图分类号 TH776 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)02-0104-05

The Research and Design of Embedded New Type of Thrombelastograph Coagulation Analyzer System

Chen Xi, Xu Junfeng, Song Haoran

(College of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract In view of typical structure of torsion wire demanding a high level of assembly and cost, designing a new type of thrombelastograph coagulation analyzer system. Measurement module, heating module, storage and communicating module were designed by modularization. On the basis of conventional structure, combining the designing ideal of axial magnetic field SRM and using SolidWorks software designed the disc structure measurement module. Accurate positioning of the orthogonal encoder is used to reflect the change of blood viscoelasticity by the method of the time difference of the STM32. Aiming at the characteristics of large time delay, nonlinear and large inertia of temperature control, the fuzzy PID compound control algorithm is used to realize the fast and accurate temperature controlling. The experimental results show that temperature error of system is less than 0.5℃, could distinguish between high and low coagulation, easily assembling, excellent environmental adaptability, low cost and has important application prospects.

Keywords thrombelastograph coagulation analyzer; SolidWorks software; disc structure; embedded controller

血栓弹力仪(TEG)是近年来国内陆续引进的一种新型凝血检测诊断仪器。传统的凝血功能检测很难区分高凝、低凝等各种细分类型,治疗和预测都要进行后续各种检测,TEG反映的是凝血和纤溶过程的综合情况,对于指导术中输血、高凝状态的监测及纠正、创伤病人的救治以及凝血机制的研究具有重要的意义^[1]。

国际上的 TEG 产品主要以美国 Haemoscope 公司生产的 TEG5000 为代表,国内大部分依赖进口,自主研发的企业较少,且主要以文献^[2]中扭力丝结构为主,这种结构的血弹仪对装配要求、环境适应性和成本要求限制了在国内的进一步推广。故本文设计了一套新型的血栓弹力仪系统,主要从机械结构、接口电路、软件开发三个方面对系统进行详细介绍。

收稿日期 2016-09-10 * 通讯作者 徐俊峰 研究方向:嵌入式应用与生物医疗设备的开发 E-mail: 1140225089@qq.com

作者简介 陈曦(1963-)男,教授,博士,研究方向:智能检测与智能仪表以及生物医疗设备的设计与开发 E-mail: 321221828@qq.com

基金项目 天津市科技计划项目(14ZCDZSY00032)

1 血栓弹力仪系统总体设计

系统主要由传感检测模块、恒温模块、存储与通讯模块和上位机模块组成. 传感检测模块将微小的生物信号转换成电信号, 包括测量结构与驱动器、编码器及其接口电路、控制器内部的信号处理; 恒温模块为保证测试血液的温度为 37℃, 误差不超过 0.5℃, 包括加热器、固态继电器及其驱动电路和温度传感器及其测量电路; 存储与通信模块将采集到的数据通过 SPI 总线保存到 SD 卡, 包括 SD 卡接口电路; 上位机模块通过 RS232 接收控制器上传的数据, 经过数据处理进行描点并显示. 系统总体框图如图 1 所示.

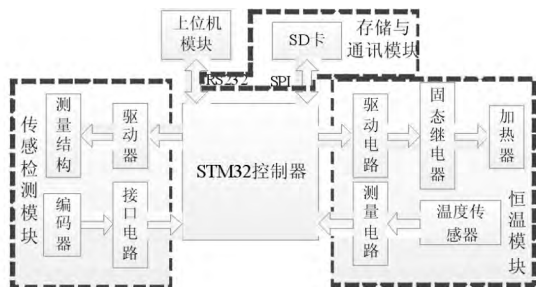


图 1 系统总体框图

Fig.1 Main block diagram of the system

1.1 传感检测模块

SolidWorks 是一款非常友好的三维机械设计软件, 与传统 CAD 软件相比具有更加直观、操作简便、可以联动生成用于生产的二维图纸的特点, 故本文选择该软件进行机械结构设计. 传感检测模块的测量结构最终设计图纸如图 2 所示.

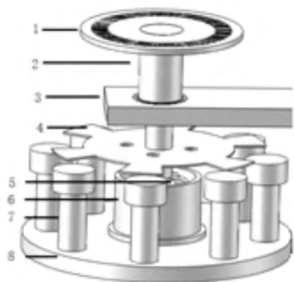


图 2 测量结构的三维图

Fig. 2 Three dimensional diagram of measurement structure

图 2 中各部件参数、作用以及制作方式如下:

- 1 码盘, 作为光电编码器的核心结构, 主要用来测量传感头和转盘的旋转角度, 购置;
- 2, 3 中间连接轴、中间支架, 起着连接上下部件和传递力矩的作用, 分为上下两段, 直径分别为

8mm 与 5mm, 自制;

4 转盘, 传导定子线圈产生的磁场, 充当转子, 用来带动传感头在血液中转动, 材料为 50W350 的硅钢片, 六凸极结构, 内外直径分别为 28mm 与 40mm, 加工定制;

5 传感头, 为了增加血液对传感头的阻力矩, 使血液粘度的变化能更大的影响转盘转速变化, 将圆柱形的悬针改进为类似于搅拌器叶片的形状, 增加了传感头与血液的接触面积, 增大了传感头所受的阻力矩, 达到放大检测信号的作用, 加工定制;

6 血液测试杯, 材料铝合金, 不导磁, 导热性好, 直径 10mm, 高度 10mm, 加工定制;

7, 8 定子极、定子底盘, 定子极为 8 个, 均匀分布在圆周上, 直径 5.2mm, 高度 18.2mm, 定子底盘, 直径 50mm, 加工定制.

每个定子极上绕有绕组(图中未画出), 两个相对的极绕组串联为一相, 总共 8 极 4 相, 转子为 6 极, 定转子为双凸极结构. 通过驱动器轮流给四相通电就会产生旋转的轴向磁场, 利用磁阻最小原理, 当定转子极不在对齐位置时就会产生水平方向的切向磁拉力, 从而带动转盘转动, 进而带动探头转动. 而血液凝结与纤溶过程会对探头阻力发生改变影响到转盘转速的变化^[3, 4].

电磁驱动器通过控制流过绕组的电流大小以及通电相序来控制转盘力矩以及旋转方向. 在这里由于驱动原理与步进电机类似, 使用 42 步进电机驱动器, 电流调到 0.8A, 16 细分模式. 由于要测量凝血与纤溶全貌, 并且尽量模拟血液在人体中的流速, 所以转速较小同时根据实际情况做调整, 将转速定为 5r/min, 使用 TIM2 的通道 2 配置为 PWM 输出功能^[5, 6].

控制器通过发 PWM 脉冲控制转盘正反旋转, 旋转角度为 45°, 通过编码器将角度信号实时反馈给控制器, 实现角度的闭环控制. 光电编码器作为信号转换部件, 与转盘同轴相连, 本设计应用 1000 线增量式光电编码器, 型号 HKT3008-C03G-I000B-5L 5V 长线驱动型, 输出差分信号, 而控制器一般接收单端 3.3V 信号, 故需要进行差分转换与电平转换, 使用差分转换芯片 AM26LS32 和电平转换芯片 74LVC4245 将最终信号输入到控制器的 PA6 和 PA7 引脚, 信号转换接口电路如图 3 所示. 对于 1000 线码盘, 其脉冲周期 T 对应的码盘角位移固定为 0.36°, 量化误差为 0.18°, 通过输出波形可知对于两相信号在一个周期内会产生 4 次电平跳变, 对

其进行计数则可以实现4倍频,从而将光电码盘测量精度由 0.18° 提高到 0.045° [7].

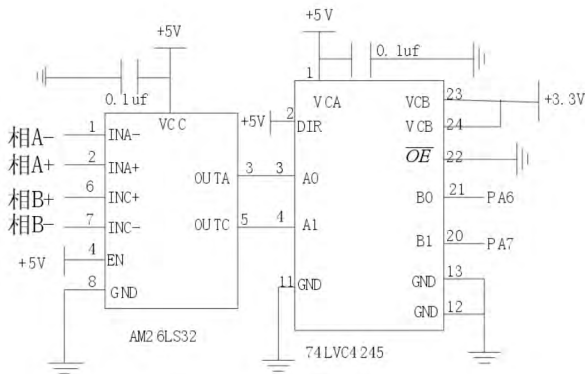


图3 光电编码器信号转换接口电路

Fig.3 Photoelectric encoder signal conversion circuit

信号处理部分使用STM32的编码器接口模式,通过引脚PA6和PA7将测量信号输入至TIM3的CH1和CH2,设置计数器在TI1和TI2边沿同时计数实现4倍频。TIM3计数开始时开启TIM4定时器,转盘到达 45° 即TIM3产生更新事件时捕获TIM4计数器的值为N2,与上一次更新事件捕获的值N1相减得到转过相同角度所用时间 $N2 - N1$,为了反映出血液随时间而发生变化这一关系,使初始值从零开始,将所有数据减去测试之初的时间差 $N0$,也即 $N2 - N1 - N0$ 结果为正则表示码盘正转,结果为负表示码盘反转。测量时序图如图4所示。

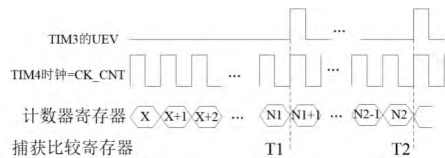


图4 测量时序图

Fig.4 Measurement sequence diagram

1.2 恒温模块

恒温模块的关键在于温度检测部分,温度传感器使用AD590,它在 $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 温域中有较好的线性度。选择M档,标定精度 $\Delta T < \pm 0.3^\circ\text{C}$ 。通过外加电阻及差动放大电路使 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 温度变化转化为 $0 \sim 5\text{V}$ 标准电压,再通过ADC输入到控制器中进行比较和运算。温度检测电路如图5所示。

AD590输出电流以绝对零度(-273°C)为基准,每增加 1°C 增加 $1\mu\text{A}$ 的输出电流I,则其输出电压通过一个电压跟随器引出后加到运放的同向输入端,其电压为:

$$V_2 = (273 + T) \mu\text{A} \times 10\text{K}. \quad (1)$$

运放的反向输入端电压来自于12V电源通过

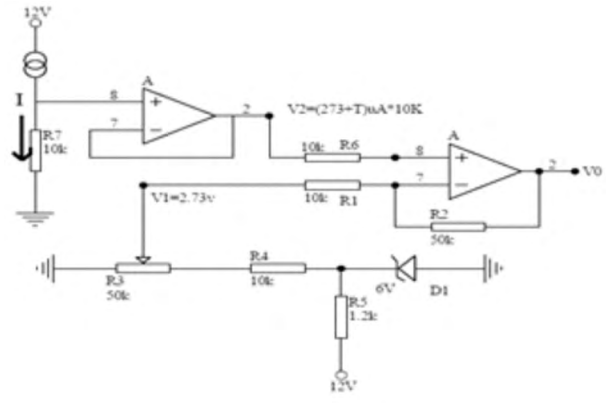


图5 温度检测电路

Fig.5 Temperature detecting circuit

可调电位器分压得到,电压为 $V_1 = 2.73\text{V}$,因此差动放大电路的输出如下式,由此测量输出端电压即可反映出对应温度。

$$V_D = \frac{50k}{10k} (V_2 - V_1) = T/20. \quad (2)$$

由于水温的控制具有非线性、大时滞、大惯性等不确定性,PID控制在偏差较大时容易出现积分饱和,导致系统出现很大的超调,故选用常规PID与模糊PID复合控制器,由于温度控制已经比较成熟,所以我们参考了文献[8]中的控制算法结构,在系统启动的纯滞后阶段使用纯比例控制加快响应速度,在温度动态上升阶段使用模糊PID控制来减小温度的超调,稳态阶段使用常规PID控制来消除稳态误差[9]。本设计中复合PID控制器的输出量对应PWM的占空比,通过对占空比的控制实现对加热器的加热功率的控制,最终实现对温度的闭环控制。软件实现上通过配置TIM5的通道3为PWM输出模式,通过改变捕获/比较寄存器TIM5_CCR3的值来修改占空比来控制加热功率,这一过程可以通过调用库函数TIM_SetCompare2(TIM5,hot)修改参数hot的值来实现。复合PID控制和普通PID控制的响应曲线如图6所示(左普通PID控制,右复合PID控制)。由图可知复合控制器几乎没有超调而普通PID则超调到 38°C 以上;系统达到设定温度所需时间短,复合控制器的在260s,而普通PID的在460s。经测量在500s时加入 1°C 扰动后系统误差为 0.33°C ,不超过 0.5°C ,满足设计要求。

1.3 存储与通讯模块

SD卡又叫做安全数码卡,是基于flash闪存的一种快速大容量便携式的存储卡,通过SPI模式与控制器STM32进行通信,其接口电路如图7所示。

硬件连接上使用STM32的SPI2接口与SD卡

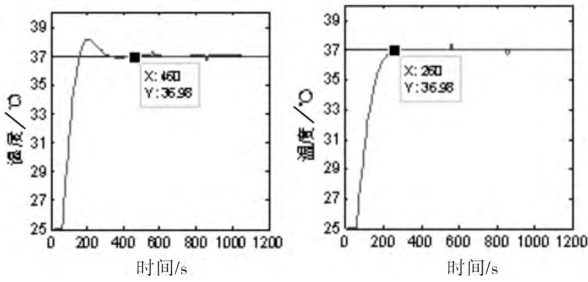


图 6 两种方法的响应曲线

Fig. 6 The response curves of the two methods

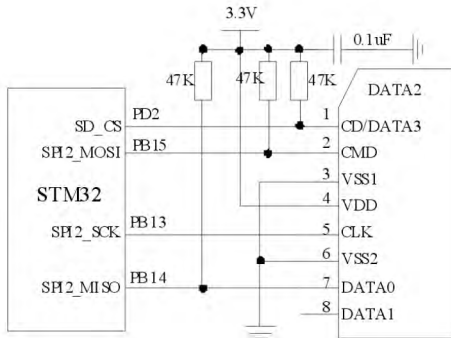


图 7 STM32 与 SD 卡接口电路

Fig. 7 STM32 and SD card connection circuit

通信, SPI2_SCK 引脚与 CLK 相连提供 SPI 通信的时钟, PD2 与 CD/DATA3 相连在通过 47 kΩ 电阻上拉实现 SD 卡的片选信号功能, SPI2_MOSI 与 SPI2_MISO 通过上拉与 SD 卡的 CMD 与 DATA0 连接, 实现信息的交换。

软件上初始化 SD 卡后就可以进行数据的读写过程. 初始化过程首先配置 MCU 的 SPI 功能, 接着通过发送命令与接收应答的方式使 SD 卡进入 SPI 模式, 最后取消片选, 多发 8 个 CLK 时钟结束初始化. 在数据传递过程中通过函数 SPI_I2S_SendData (SPI2, TxData) 来发送数据, TxData 表示待发送的数据, 通过函数 SPI_I2S_ReceiveData (SPI2) 来接收数据, 其返回值即接收到的数据。

控制器 STM32 通过 RS232 实现与上位机的通讯. 具体过程如下, 先使能 USART1、GPIOA 与复用功能时钟, 复位串口, 设置 PA9 为复用推挽输出, PA10 浮空输入, 再配置串口的通讯参数, 使能串口, 结束初始化, 最后通过调用函数实现数据的读写. 上位机通过 C#软件的窗体化设计, 将所接收数据在窗体中通过描点连线的方式显示出来。

2 控制系统软件设计

控制系统采用 KEIL_MDK 软件为交叉编译工具, 系统整体程序流程图如图 8 所示。

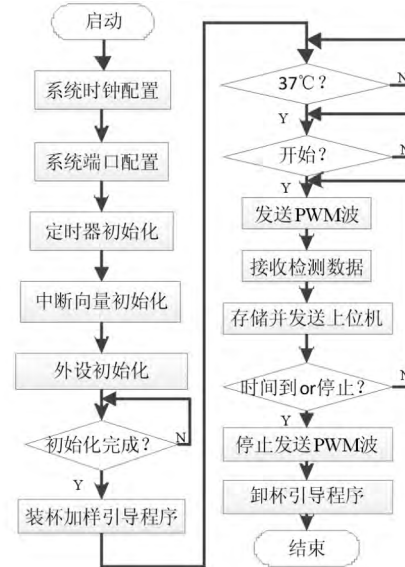


图 8 系统整体流程图

Fig. 8 Overall system flow chart

系统上电之后先进行相应时钟配置, 通过调用 SystemInit() 函数, 并且配置系统工作频率 72MHz, 之后配置所用到的 GPIO 口的模式、频率、时钟等, 本设计所用定时器较多, 分别是 TIM2 与 TIM5 通道 2、3 配置为 PWM 输出模式, TIM3 的通道 1 和通道 2 配置为正交编码模式, TIM4 配置输入捕获模式. 接下来初始化外部加热中断、定时器中断与串口中断, 下一步进行具体外设的初始化, 例如串口、SD 卡等, 当所有初始化结束之后进入主程序. 先通过上位机进行装杯加样的引导, 在 37°C 的条件下开始测量, 通过定时器 2 发送 PWM 波驱动转盘转动, 通过光电编码器测量旋转角度并反馈给控制器, 控制器通过如图 5 所示的测量手段将数据存储并通过串口发送给上位机, 一直循环这一测试过程直到完成测量或者按下停止, 程序将停止发送 PWM 脉冲并完成卸杯引导从而结束整个测量过程^[10]。

3 实验结果

对高凝、低凝两组样本做实验通过上位机软件得出图形如图 9 所示, 其中左右分别为血液高凝、低凝状态下的时间与幅值关系的弹力图, 由于高低凝幅值以 200 为界限, 图中可以看出本系统可以完成区分高凝低凝的基本任务。

为了对比本系统与常规 TEG 的环境适应能力, 对同一样本分成相等的两份, 一份用常规 TEG, 一份用本系统的新型 TEG. 为了模拟震动的干扰, 旁边放上以不同频率转动的电机, 将其震动由低到高分 9 个等级, 将此测量结果与无干扰情况下结果做误差

百分比计算,得到如表1所示的结果(表中单位%).由表可知在相同震动干扰下,本系统的测量误差比基

本上为常规TEG误差的一半,反映出较强的环境适应能力.

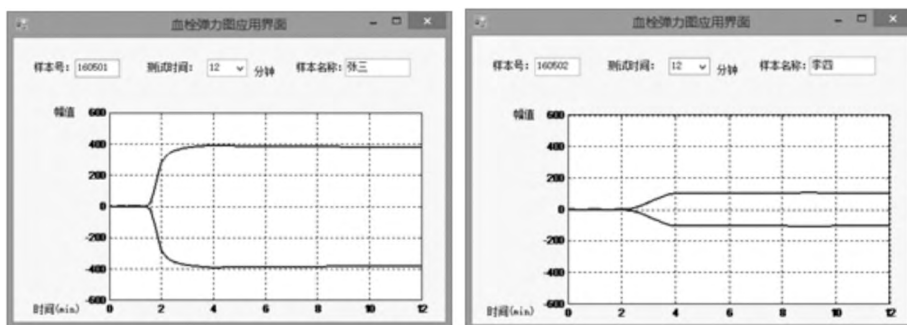


图9 高低凝弹力图

Fig. 9 High and low coagulation thrombelastogram

表1 不同震动下两组实验误差百分比

Tab.1 Two experiments' error percentage under different vibration

震动级数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	%
常规TEG	1.2	3.3	3.9	4.8	6	8.6	10.1	11	13.7	
新型TEG	0.5	0.67	1.2	1.7	2.1	3.8	4.3	5.6	7.3	

表2所示为两种类型TEG的相关项目的对比.本设计的旋转轴与常规类型的扭力丝直径相差25倍,反映出本设计的加工精度与装配难度大大降低;器件选择方面对于PLC控制器的价格是STM32价格的10倍甚至更多,PSD和激光相关设备比光电编码器成本也高很多,故本设计体现出较高的性价比,有助于成本的降低.

表2 两种类型TEG相关项目对比

Tab.2 Comparison of two types of TEG related projects

TEG类型	测量部件直径/mm	控制器	信号转换部件
常规TEG	0.2	PLC等	PSD、激光
新型TEG	5	STM32	光电编码器

4 结语

本文着重从硬件结构与软件设计上对新型血栓弹力仪检测部分、加热部分与存储部分做了较详细的说明,最后通过上位机软件显示最终时间-幅值图形.综合运用了模拟及数字电子技术以及现代控制方法,成功的将一种生物体指标转化为了实际可测的物理指标通过嵌入式控制器STM32进行测量.由实验结果可知本设计在完成基本测试任务的同时具有易于装配、抗干扰强、成本低等优势,具有广阔的应用发展前景.

参 考 文 献

- [1] 王毅盟,吴芳.血栓弹力图仪的研究进展[J].国际检验医学杂志,2011,32(10):1102-1103.
- [2] 周薇,李幼生.血栓弹力图的临床应用及进展[J].肠外与肠内营养,2011,18(5):314-315.
- [3] Bolliger D, Seeberger M D, Tanaka K A. Principles and practice of thromboelastography in clinical coagulation management and transfusion practice [J]. Transfusion Medicine Reviews, 2011, 26(1): 1-13.
- [4] 王小勇.基于轴向磁场的开关磁阻电机新型结构研究[D].成都:电子科技大学,2013:6.
- [5] 杨继森,江中伟,许强.基于AD9959与STM32F4的时栅位移传感器电气系统设计[J].传感技术学报,2013,26(8):1050-1053.
- [6] 曹彬乾,程远增,孙书鹰,等.基于STM32步进电机多细分控制的设计[J].科学技术与工程,2013,13(23):6893-6897.
- [7] 韩壮志,李伟,王田苗,等.光电码盘四倍频分析[J].电子技术应用,2000,(12):38.
- [8] 何慧,候国强.模糊PID控制在恒温水浴加热器中的应用[J].仪器仪表用户,2010,17(5):41-42.
- [9] 李晓斌,吴燕翔,孙海燕.油料输送温度的智能预测控制[J].计算机工程与应用,2009,45(02):197-200.
- [10] 李晓丹.基于STM32的物联网嵌入式网关的设计[J].计算机工程与应用,2015,51(04):61-65.