

文章编号: 2095-2163(2022)03-0162-05

中图分类号: TP368.1

文献标志码: A

基于 STM32 多维腰椎牵引装置控制系统设计与实现

杜妍辰^{1,2}, 周琦^{1,2}, 喻洪流^{1,2}

(1 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2 上海理工大学 康复工程与技术研究所, 上海 200093)

摘要: 腰椎牵引作为常见的腰椎病治疗手段,已被广泛应用于临床治疗。目前,市面上的牵引治疗设备功能较少,维度单一,牵引力不足。针对以上问题,设计了一款多维腰椎牵引装置,采用了液压系统提供动力,可实现三维可控牵引。该装置的控制系統以 STM32F103ZET6 为核心进行搭建,实现了对整个液压系统控制;采用传感器技术和经典 PID 算法,保证了装置稳定运行。试验结果表明,该控制系统能够准确控制装置进行三维牵引。

关键词: STM32; RS485 通讯; 传感器; PID 控制

Design and realization of control system of multi-lumbar traction device based on STM32

DU Yanchen^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2}, YU Hongliu^{1,2}

(1 University of Shanghai for Science and Technology, School of Health Science and Engineering, Shanghai 200093, China;

2 Institute of Rehabilitation Engineering & Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 As a common treatment for lumbar spondylosis, lumbar traction is widely used in clinical treatment. At present, traction therapy equipment on the market has fewer functions, single dimensions, and insufficient traction. In response to the above problems, we designed a multi-dimensional lumbar traction device, which can realize three-dimensional controllable traction, and uses a hydraulic system to provide power. The control system of the device is built with STM32F103ZET6 as the core, which realizes the control of the entire hydraulic system, adopts sensor technology and classic PID algorithm to ensure the stable operation of the device. The test results show that the control system can accurately control the device for three-dimensional traction.

【Key words】 STM32; RS485 communication; sensor; PID control

0 引言

腰椎牵引作为椎间盘突出症的治疗方法,是治疗背痛和腿痛患者的常见方式^[1-2]。根据腰椎牵引原理,已有大量牵引设备出现在市面上。如:机械式牵引床、电动式牵引床、自重式牵引床等^[3]。但是,该类设备普遍存在牵引维度单一,牵引力不足的劣势,由于运动维度的限制,无法实现手法牵引。为解决这些问题,本设备实现了多维的牵引,包括成角牵引、摆角牵引、旋角牵引和手法牵引。另外,用液压驱动代替传统的电机驱动,能方便地实现无级调速,而且输出推力转矩更大。

本文基于 STM32F103ZET6 芯片,针对多维腰椎牵引装置,设计了相关牵引装置的控制系統。该系统由软硬件两部分组成。底层硬件包括 RS485 通讯电路、液压电磁阀控制电路、液压调节电路以及传

感器信号变送电路。软件方面采用 RT-THREAD 实时操作系统,以及多线程架构。为了提高控制精度,系统中包含多个传感器,实时提供位置信号和拉压力数据,形成闭环控制。另外,还配备了移动端上位机,通过 WIFI 与设备通讯,实现无线操作。

1 硬件设计

系统控制主板主要由电源模块、液压电磁阀控制模块、通讯模块、传感器采集模块和液压调节模块构成,其结构如图 1 所示。

1.1 单片机选型

STM32F103ZET6 单片机,是 32 位基于 Arm 的 Cortex-M3 微控制器,具有全面的外设选择^[4]。该芯片同时保持完全集成和易于开发两种特点,其 MCU 的最大系统时钟可达 72 MHz,可在外围搭建 IO 控制电路、模拟量采集电路以及 RS485 通讯电

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目(19441902800)。

作者简介: 杜妍辰(1976-),女,博士,教授,主要研究方向:康复设备和振动应用;周琦(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统;喻洪流(1966-),男,博士,教授,主要研究方向:康复机器人。

通讯作者: 喻洪流 yhl98@hotmail.com

收稿日期: 2021-12-08

路,能够满足本系统的设计需求。而且该单片机引脚数充足,体积小,既能够满足功能又能够减小控制主板的整体大小,其具有强大的实时功能,也可对数字信号进行相关处理。

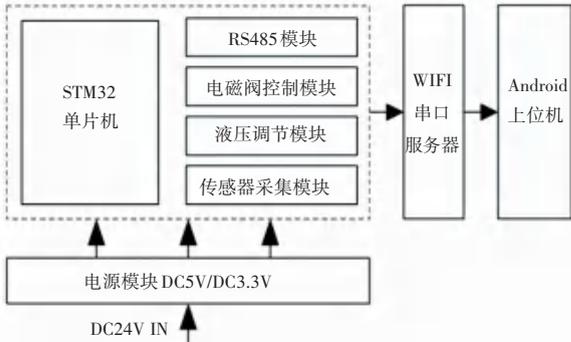


图 1 控制主板结构图

Fig. 1 Control board structure diagram

1.2 RS485 通讯电路设计

RS485(TIA-485(-A)/EIA-485)采用 2 线通讯,允许半双工数据传输,数据可以在两个方向上一次向一个方向往返于设备;RS485 能够在长距离和电噪声环境中有效使用。

设计中采用 MAX485 芯片,搭建了能够自收发 RS485 电路,如图 2 所示。本电路能够最小化 EMI,减少不良终端对电路产生的干扰,其传输频率最高可达 2.5 Mbps。

1.3 液压控制电路设计

控制系统液压调节模块中使用了 24 V 的直流有刷电机,作为压力调节电机。通过对电机的控制,改变内部阀口的开合大小,控制内部压力,进而控制运动速度。

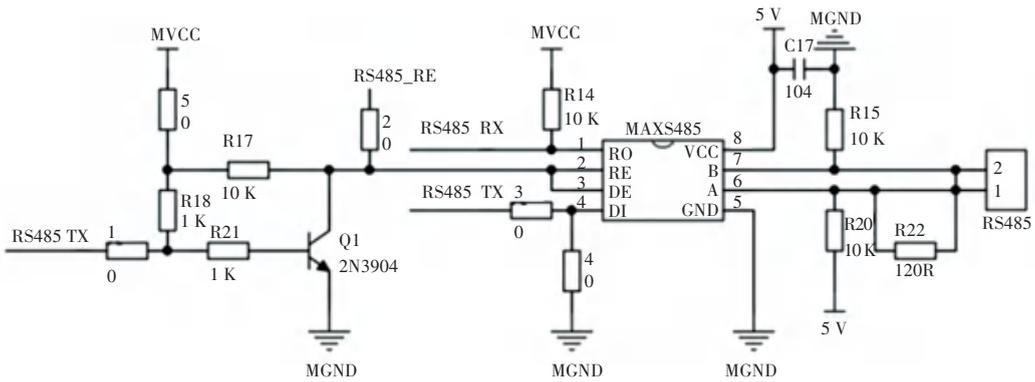


图 2 RS485 电路原理图

Fig. 2 RS485 circuit schematic diagram

该模块基于全集成、大电流半桥 BTS7970,设计的电机驱动电路如图 3 所示。由于 p 通道高压侧开关无需电荷泵,从而将 EMI 降至最低。集成驱动 IC 易于与微控制器接口,具有逻辑电平输入、电流检测诊断、转换率调整、死区时间生成功能。在过热、过压、欠压、过流和短路的情况下,能够对电路起到保护作用^[5]。当电机驱动需要大电流驱动时选择 BTS7970,能够优化电路、降低电路板空间消耗。

另外,电磁阀控制模块主要实现对液压回路中电磁换向阀的控制,从而控制整个设备的成角、摆角、旋角以及牵引运动。电路中主要采用 ULN2803 达灵顿晶体管阵列,每一对达林顿集的电极电流额定值为 500 ma,足以驱动 30 ma 继电器。达林顿(复合)管原理如图 4 所示。其中,COM 端是为了连接感性负载时所需续流而用;钳位二极管具有电路保护作用。

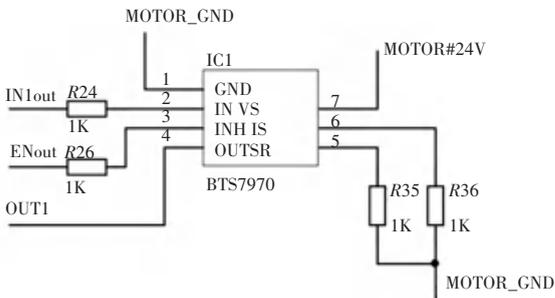


图 3 BTS7970 驱动电路图

Fig. 3 BTS7970 driving circuit diagram

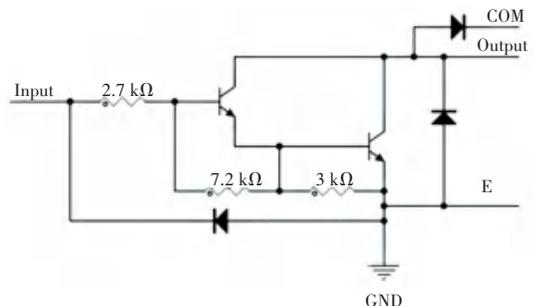


图 4 达林顿(复合)管原理图

Fig. 4 Darlington (composite) tube schematic diagram

1.4 传感器采集模块

系统所用传感器包括光电式编码器和拉压力传感器。其中,光电式编码器主要用于检测设备进行成角、摆角和旋角运动时的位置信息,从而实现运动位置的精准控制;拉压力传感器用于观察牵引过程中牵引力的变化情况。基于拉压力传感器的反馈信息,可以实现牵引力的闭环控制。

光电式编码器利用的是光电转换原理,通过内部光电传感器产生电信号,输出3组方波脉冲。其中,A、B相输出脉冲相位之间相差90°,脉冲的先后可以用于判断旋转方向,Z相脉冲的一个周期对应电机旋转一圈^[6]。STM32内部自带通用定时器的编码器模式,可以直接连接编码器,对其输出脉冲计数,从而直接获取旋转角度值。

由于拉压力传感器的输出形式为电压差分信号,单片机无法通过内部AD转换直接读取信号值,因此需要相关的仪表放大电路进行信号处理。INA128芯片是常用的仪表放大器芯片,能够保护输入电路,具有输入缓冲放大器,起到差动放大作用。使用INA128芯片时,不需要对输入阻抗进行特意匹配,放大倍数可以根据公式(1)计算,使其放大器特别适用于测量和测试设备^[7]。

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_c} \quad (1)$$

其中, G 为放大倍数, R_c 为外部增益设置电阻器,控制实际放大倍数,具体电路如图5所示。

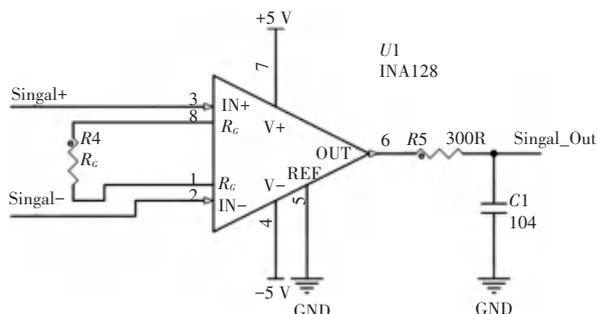


图5 INA128 仪表放大器电路图

Fig. 5 INA128 instrumentation amplifier circuit diagram

2 软件设计

2.1 RS485 通讯程序设计

控制系统使用RS485,通过WIFI串口服务器连接,实现与上位机的无线通讯。对RS485通讯的相关基础配置在程序初始化中完成,保证通讯的正常启动。通讯初始化包括单片机对应引脚的配置、内部时钟使能、相关标志位设置、接收中断优先级以及

RS485的工作模式设置。RS485正常工作模式下,波特率为115 200,采用自拟的通讯协议格式。

RS485处于接收状态时,先在中断函数内完成上位机下发的指令报文接收,并验证报文是否符合正常报文格式。符合则进入报文解析函数,对报文进行解析,其中包括头帧、ID号、功能码、数据帧以及16位的CRC校验;否则返回错误报文信息。当RS485处于发送状态时,会对数据信息进行打包处理,报文格式与接收报文格式相同^[8]。协议格式见表1。

表1 通讯协议表

Tab. 1 Communication protocol table

	上位机下发指令	下位机回复指令
帧头 8 位	表明数据由此位开始	表明数据由此位开始
从机地址 8 位	指定接收该段数据的从机	指定发出该段数据的从机
功能码 8 位	指定从机所要执行的功能	指定从机已经执行的功能
数据地址低 8 位 数据地址高 8 位	执行功能时有关传感器的数据所在的地址	执行功能时有关传感器的数据量
CRC16 低 8 位 CRC16 高 8 位	CRC16 校验	CRC16 校验

2.2 位置反馈液压控制方案

根据输入指令,确定设备所需要进行的动作,通过控制继电器驱动电磁阀开合,实现设备具体动作(如成角、旋角、摆角等牵引);在动作进行过程中,能够通过编码器实时采集位置角度信息,不断更新实际位置与预定位置的误差值 θ_{err} ,控制运动速度,使其能更精准的到达设定角度或是牵引位置。位置控制框架如图6所示。

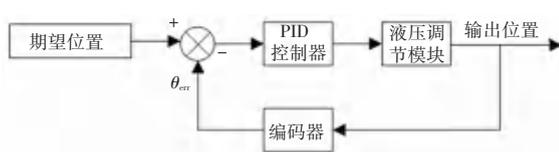


图6 PID控制框图

Fig. 6 PID control block diagram

由于PID算法具有简单实用、响应快、对静态误差有抑制效果等优势,所以采用PID算法进行控制器设计。为了便于程序实现,将公式离散化。控制器的实现形式为:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=0}^t e(j) + K_d (e(t) - e(t-1))$$

式中, K_p 为比例增益; K_i 为积分时间常数; K_d 为微分时间常数; $e(t)$ 是当前周期位置偏差; $e(t-1)$ 为上周期的位置偏差^[9-10]。

2.3 系统程序工作流程

本控制程序采用 RT-Thread 实时操作系统, 搭建了多线程的架构。其中包括: RS485 通讯线程、传感器数据采集线程、调压电机控制线程, 以及继电器控制线程。线程之间通过消息队列进行通信, 发送线程将消息发送到消息队列控制模块中, 从而唤醒被挂起的线程接收并处理消息。

系统启动后, 先对线程初始化并创建消息队列。RS485 通讯线程最先启动, 保持接收状态。当接收到上位机发来报文时, 对报文进行处理, 提取其中的功能指令和数据信息, 将其放入消息队列; 继电器控制线程获取功能指令, 控制对应继电器; 传感器数据采集线程获取数据信息, 不断更新当前传感器的数据; 调压电机控制线程根据实时运动位置信息变化, 对调压电机进行控制, 调整系统内部压力, 从而控制运动速度。系统控制流程如图 7 所示。

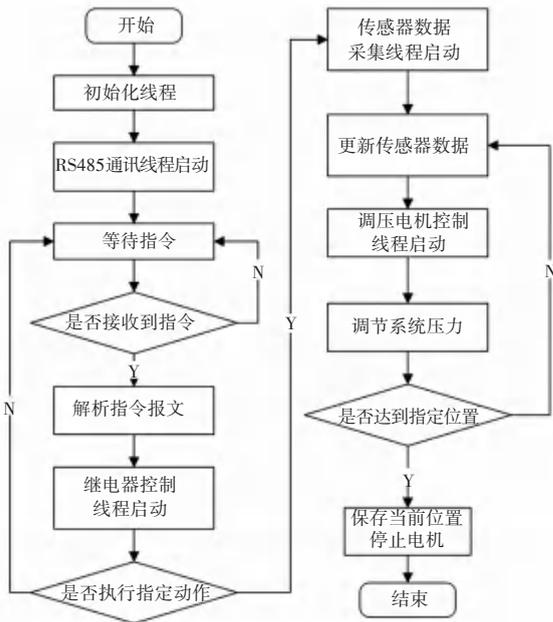


图 7 系统程序控制流程图

Fig. 7 System program control flow chart

3 实验及结果分析

控制系统搭建安装完成后, 对整机进行了功能试验。图 8 的电路安装在设备侧面的门板上, 占用极少的设备内部空间。



(a) 控制系统主板



(b) 测试样机

图 8 控制系统主板和样机实物图

Fig. 8 The physical diagram of the control system

在实验过程中, 上位机发送指令, 控制设备进行成角、摆角、旋角以及牵引动作的实现。实时采集编码器反馈的位置信号, 并通过最后停止位置与设定位置进行比较。经 5 次检测实验, 最终结果数据见表 2。

由表中数据可知, 各个角度和牵引动作的误差基本保持在 1% 左右, 验证了该控制系统能够准确控制装置进行三维牵引。另外, 也表明控制系统对整体的液压控制是可行的。

表 2 实验数据表

Tab. 2 Experimental data table

动作	设定位置	5 次试验	实际位置平均值	误差/%
成角运动	10°	9.8、9.9、9.9、10.1、9.8	9.90°	1
摆角运动	15°	15.0、15.2、14.6、14.9、14.5	14.84°	1.07
旋角运动	15°	14.8、15.2、14.6、14.7、14.5	14.76°	1.6
牵引	50 mm	50.9、49.7、49.5、49.8、50.3	50.04 mm	0.08

4 结束语

本文针对多维腰椎牵引装置, 设计了基于 STM32 的液压控制系统。采用 RS485 实现了与上位机的通信, 配合电磁阀驱动电路、液压调节模块与

传感器采集模块, 构成多维腰椎牵引装置的硬件系统。软件系统方面, 采用了实时操作系统, 多线程的程序架构。控制器使用了 PID 算法, 通过编码器获取位置偏差, 对内部液压进行调整, 提高装置的精确 (下转第 168 页)