

文章编号: 2095-2163(2023)03-0163-06

中图分类号: TP368.1;R318.6

文献标志码: A

基于 RT-Thread 操作系统的上肢康复外骨骼控制系统

许鑫^{1,2}, 孟青云^{2,3}, 刘观鑫^{1,2}, 孟巧玲^{1,3}, 喻洪流^{1,3}

(1 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2 上海健康医学院 医疗器械学院, 上海 201318;

3 上海理工大学 康复工程与技术研究所, 上海 200093)

摘要: 针对自主开发的六自由外骨骼式上肢康复机器人,设计了一种基于直流电机和实时多线程(RT-Thread)操作系统的多电机控制系统。该装置由硬件系统和软件系统部分构成。硬件系统将 STM32F767 作为控制器模块,可以实现外骨骼的姿态信号采集和电机控制。控制器内部集成 CAN 控制器和 TJA1050 收发器。软件系统在 RT-Thread 嵌入式操作系统上搭建,可实现操作系统多线程的 CAN 驱动移植和上肢外骨骼机器人的运动控制。经过试验证明,该系统有很好的实时性,多线程切换稳定,可以准确控制上肢外骨骼机器人的运动。

关键词: RT-Thread 操作系统; CAN 驱动; 控制系统; 上肢康复外骨骼

Upper limb rehabilitation exoskeleton control system based on RT-Thread operating system

XU Xin^{1,2}, MENG Qingyun^{2,3}, LIU Guanxin^{1,2}, MENG Qiaoling^{1,3}, YU Hongliu^{1,3}

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

2 School of Medical Instruments, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China; 3 Institute

of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] A multi-motor control system based on DC motor and real-time multi-thread (RT-Thread) operating system is designed for the self-developed six-free exoskeleton upper limb rehabilitation robot. The device is composed of hardware system and software system. The hardware system takes STM32F767 as the controller module, which can realize the attitude signal acquisition and motor control of the exoskeleton. CAN controller and TJA1050 transceiver are integrated inside the controller. The software system is built on RT-Thread embedded operating system, which can realize multi-threaded CAN drive transplantation of operating system and motion control of upper limb exoskeleton robot. Experiments show that the system has good real-time performance, stable multi-thread switching, and can accurately control the motion of the upper extremity exoskeleton robot.

[Key words] RT-Thread operation system; CAN controller; control system; upper limb rehabilitation exoskeleton

0 引言

脑卒中是目前世界上第二大死亡原因,也是成年人后天残疾的主要原因^[1],这可能导致患者遭受神经和肌肉损伤,严重的肌肉无力和运动灵活性的丧失是脑卒中后期的突出特征^[2]。对于由于神经损伤引起的运动功能障碍患者,合理地进行重复的康复训练能够促进患者的运动功能康复,激发患者运动可塑性^[3]。外骨骼康复训练设备针对神经系统康复的关键特征是机器人的控制策略^[4]。最常

见的控制外骨骼的方法是通过高增益的位置反馈控制器,外骨骼根据预定轨迹命令控制运动,此类控制器增益需要不断调整,避免外骨骼在轨迹运动中因为肌肉收缩造成患者损伤^[5]。根据预定轨迹进行康复运动可以通过不同的方式实现,比如典型案例^[6]使用比例积分反馈控制,可以调节外骨骼力跟随指定的轨迹位置;利用闭环 PD 迭代学习控制方法^[7]控制上肢外骨骼训练的精度;RAHMAN 等学者^[8]采用 PID 控制方法,控制上肢外骨骼机器人按照预先设计的轨迹运动,在被动运动控制方案上已

基金项目: 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”生物医药科技支撑专项项目(20S31905400)。

作者简介: 许鑫(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:康复机器人控制系统;孟青云(1971-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:柔性医疗器械设计及智能控制、康复机器人设计及智能控制、机器视觉等。

通讯作者: 孟青云 Email: mengqy@sumhs.edu.cn

收稿日期: 2022-11-06

经取得很大的进展。但是,控制系统的实现方式单一,普遍存在响应性慢等问题,本控制系统采用基于直流电机和实时多线程(RT-Thread)操作系统的多电机控制系统。

1 系统总体结构

六自由度上肢康复外骨骼机器人的训练动作包括单关节动作(如肩关节屈曲/伸展、内收/外展、肘关节屈曲/伸展、腕关节内旋/外旋、腕关节掌屈/背屈、尺偏桡偏等)和多关节动作(如吃饭等)。设计

了一种基于直流电机和实时多线程(RT-Thread)操作系统的多电机控制系统,实现上肢康复训练外骨骼机器人运动控制的准确性及稳定性。

该系统由软件和硬件控制系统两部分组成,如图1所示,上位机通过设定的预定轨迹,将电机的运动程序发送给电机驱动器,用以控制外骨骼机器人的关节运动;下位机控制模块通过与电机编码器实现通信,获取编码器的信号,并实现电机的位置反馈控制。

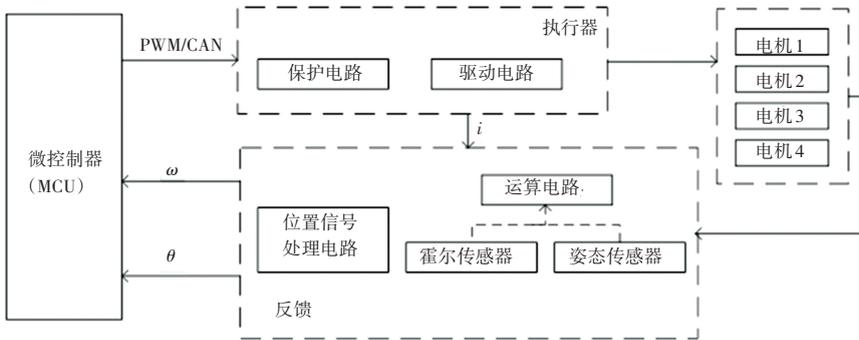


图1 控制主板结构图

Fig. 1 Control board structure diagram

2 硬件设计方案

硬件系统控制主板主要由电源模块、电机驱动模块、通讯模块和传感器采集模块构成,其结构如图2所示。硬件设计采用主控模块与功能模块分开的方法,可以有效避免芯片间的信号干扰和调试电路产生的不确定因素。控制系统下位机主控芯片采用的STM32F767IGT6单片机开发;传感器采集模块通过搭载ATK IMU六轴姿态传感器实时获取运动姿态;电机驱动模块由L298N驱动板和CAN驱动方案构成。

2.1 传感器采集模块

传感器用于通过反馈控制机器人外骨骼的状态和物理属性,如关节位置、速度和加速度。ATK-IMU601六轴姿态传感器可通过串口输出姿态角、加速度、角速度等数据,从而实现上肢运动的精确控制,实现上肢的闭环反馈控制。图3即为姿态传感器硬件组成部分。

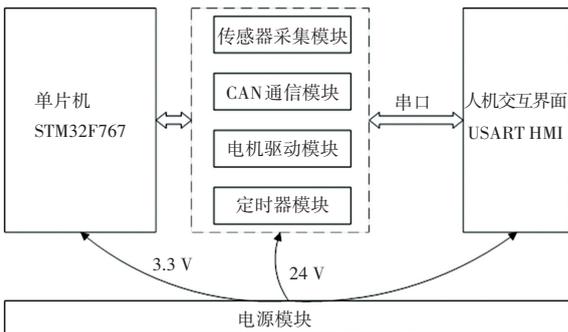


图2 硬件控制系统

Fig. 2 Hardware control system

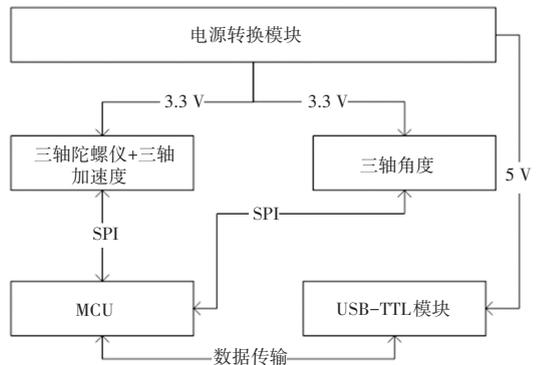


图3 姿态传感器硬件框图

Fig. 3 Hardware diagram of ATK-IMU

2.2 电机驱动模块

腕关节使用RoboMaster M2006动力系统,该系统由RoboMaster M2006 P36直流无刷减速电机和RoboMaster C610无刷电机调速器组成。肩关节和

肘关节采用直流无刷电机和 L298N 电机驱动板组成动力系统的方式。其中, M2006 直流无刷电机通过电子换向器实现换向, 根据配套的电调输出电流的大小和方向并改变电机的转速和方向; 电机上有电感元件, 在断电的瞬间会产生 3~5 倍的感应电

压, 图 4 的光耦隔离电路^[9]可以通过光的传递在物理上隔离电的联系, 还可以防止在单片机和驱动器之间无共地问题引起的干扰。为保护电路, 由于电机输入电压为 24 V, 控制器与控制器输入输出间串联 2 K 电阻, 如图 5 所示。

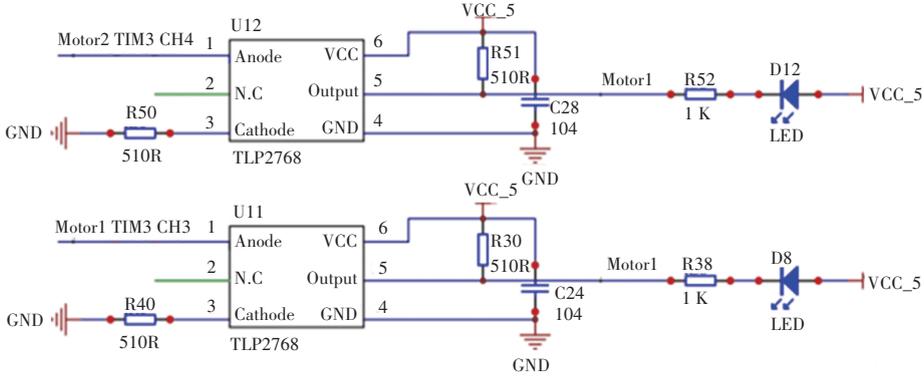


图 4 光耦隔离电路

Fig. 4 Optocoupler isolation circuit

令停止康复运动动作。

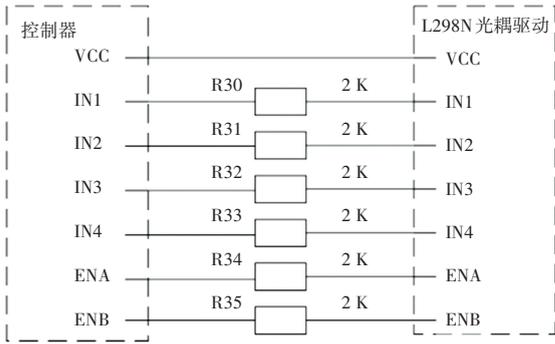


图 5 驱动器输入连接框图

Fig. 5 Driver input connection block diagram

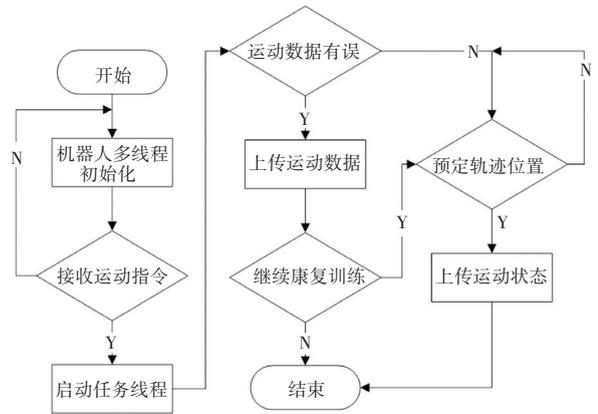


图 6 上肢康复训练软件控制流程图

Fig. 6 Flow chart of upper limb rehabilitation training software control

3 软件设计方案

3.1 总体程序设计

软件设计是上肢康复机器人康复训练实现安全运作的前提, 这对软件设计的合理性与安全性提出了要求, 软件控制采用 RT-Thread 实时操作系统, 利用操作系统多线程结构, 提高控制精度, 减少系统反应时间。其中包括: 传感器数据采集线程、电机控制线程、CAN 通信驱动线程和定时器 PWM 信号输出线程, 控制流程如图 6 所示。由图 6 可见, 上肢康复训练外骨骼机器人在上电之后对传感器数据采集、电机控制、CAN 通信驱动和定时器 PWM 信号输出线程进行初始化; 在接收上位机信号量之前, 机器人处于挂起状态; 上肢康复训练机器人接收到信号量启动, 根据预定轨迹运动, 在康复运动过程中感知运动参数并实时上传比较, 若出现异常数据, 根据指

3.2 通讯程序设计

单片机向电调发送控制指令控制电调的电流输出, 控制电流范围为 -16384~16384, 对应电调输出转矩电流范围为 -20~20 A。CAN 通信的数据帧只有 8 Byte, 每台电机的电流值对应需要 2 Byte, 所以一个数据帧只能给 4 台电机发送数据。其中, 控制 4 台电机时单片机发送报文将标识符为 0X200 并依次将电流数据输入数据帧中进行发送。单片机发送、及接收报文协议分别见表 1、表 2。

为了实现闭环控制, 单片机需要接收电调的反馈报文, 得到电机的转速、机械转子角度、实时电流数据。电调反馈报文 ID 规定为 0x200+电调 ID(1-4), 如 0x201(电调 ID 为 1)。

表1 单片机发送报文协议

Tab. 1 Packet sending protocol of MCU

数据域	DATA[0]	DATA[1]	DATA[2]	DATA[3]	DATA[4]	DATA[5]	DATA[6]	DATA[7]
内容	电压给定值 高8位	电压给定值 低8位	电压给定值 高8位	电压给定值 低8位	电压给定值 高8位	电压给定值 低8位	电压给定值 高8位	电压给定值 低8位
电机ID	0x201		0x202		0x203		0x204	

表2 单片机接收报文协议

Tab. 2 Packet acceptance protocol of MCU

数据域	DATA[0]	DATA[1]	DATA[2]	DATA[3]	DATA[4]	DATA[5]	DATA[6]	DATA[7]
内容	转子机械角 度高8位	转子机械角 度低8位	转子转速 高8位	转子转速 低8位	实际转矩 电流高8位	实际转矩 电流低8位	电机温度	NULL
电机ID	0x201		0x202		0x203		0x204	

创建 CAN 通信线程,并通过串口助手打印接收数据,通信程序如图 7 所示。

的配置需求,采用 CAN 驱动方式,在中断中实现指令的发送和接收,图 8 为 RT-Thread 中 CAN 驱动框图。

针对不同的患者进行不同的频率配置,采用脉冲宽度调制 (PWM) 来调节控制上肢康复训练中肩关节和肘关节的电机。STM32F767 芯片通过定时器 TM3 的 CC1 和 CC2 通道输出双路 PWM 波信号对电路进行控制,经驱动器控制电机。区别于传统定时器通过 *ARR* 自动重装载值、*CNT* 计数值和 *CCRx* 比较寄存器值输出高低电平,生成 PWM 波,如图 9 所示。现使用同一定时器的不同通道可输出不同占空比的 PWM 波,关闭 *CCR* 预装载,减少了硬件资源。初始化中可以定义输出 PWM 波的通道,在定时器中断服务程序中,当通道标志位为 0 时,判断 *CCR* 的值和预定义 *crr_value_l* 的和与 *ARR* 值的大小,超出标记标志位为 1,则执行一次相位偏移并将标志位置 0,未超出则 *CCR* 的值为 *CCR* 和 *crr_value_l* 的和;当通道标志位为 1 时,判断 *CCR* 的值和预定义 *crr_value_h* 的和与 *ARR* 值的大小,未超出则 *CCR* 的值为 *CCR* 和 *crr_value_h* 的和。赋值完成,反转通道标志位并清除 TIM3 中断待处理位。图 10 为实际 PWM 信号输出波形。

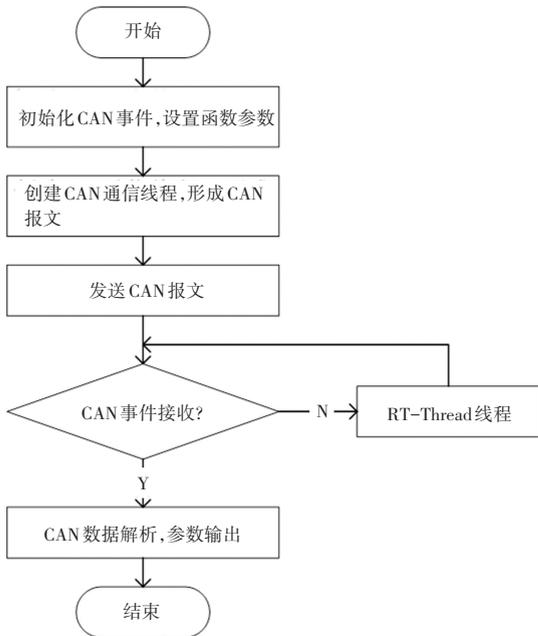


图 7 CAN 通讯流程图

Fig. 7 CAN communication flow chart

3.3 电机驱动设计

根据机械结构设计需求,腕关节由M2006电机

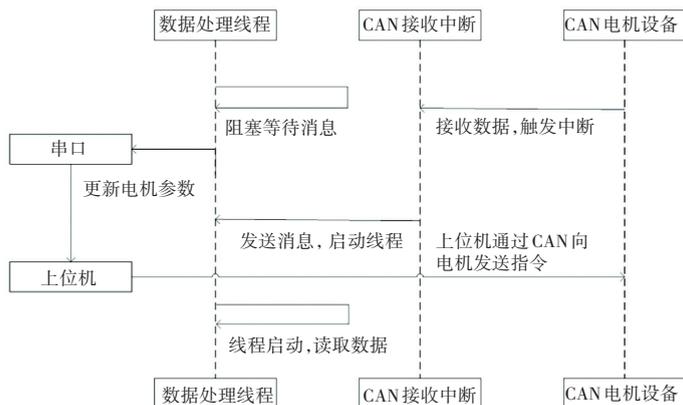


图 8 RT-Thread 中 CAN 驱动框图

Fig. 8 Block diagram of CAN driver in RT-Thread

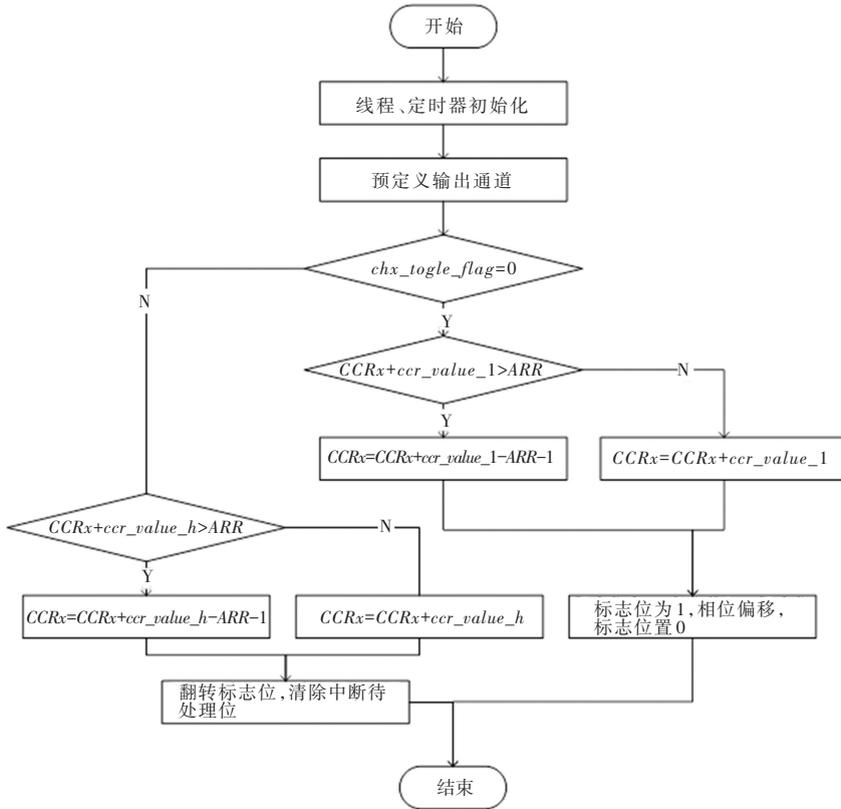


图 9 PWM 信号生成流程

Fig. 9 Flow chart of PWM signal generation

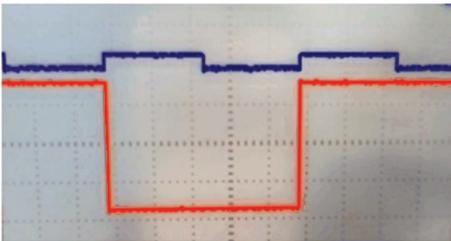


图 10 实际 PWM 输出信号波形

Fig. 10 Actual PWM output signal waveform

3.4 PID 位置反馈闭环控制程序设计

根据程序输入指令,通过不同按键键值,实现上肢康复训练外骨骼设备的运动动作,在运动过程中,通过电机编码器和 ATK IMU 姿态传感器实时采集的角度位置信号与预定轨迹的误差值之间不断修正,控制运动更加精确,PID 控制程序流程如图 11 所示。

由于 PID 算法不需要系统建模,实现相对简单,所以采用 PID 算法进行控制器设计。控制器的实现形式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) \quad (1)$$

其中, K_p 为比例增益,用于位置误差; K_I 为积

分增益,用于累积位置误差; K_D 为微分增益,用于速度误差; $e(t)$ 是实际位置和期望位置之间的误差; $\dot{e}(t)$ 是关于时间的导数。图 12 为 PID 控制系统框图。

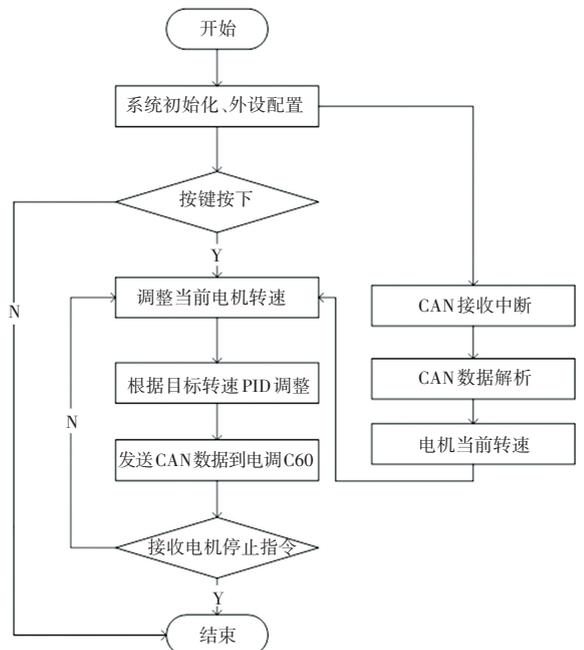


图 11 PID 控制程序流程图

Fig. 11 Control program flow chart of PID

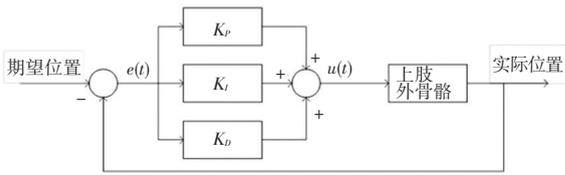


图 12 PID 控制系统框图

Fig. 12 Block diagram of a PID controlled system

4 控制系统验证

控制系统搭建安装完成后,对整机进行了功能

试验和系统测试。在实验过程中。上位机通过 RT-Thread 操作系统发送消息,控制外骨骼实现肩关节屈曲/伸展、内收/外展、肘关节屈曲/伸展、腕关节内旋/外旋、腕关节掌屈/背屈、尺偏/桡偏动作。采集电机的位置信号和姿态传感器信号,并对比预设运动角度和实际运动角度。研究得到的上肢各关节控制曲线如图 13 所示。由图 13 分析可知,实际运动角度和期望运动角度的误差较小,证明该控制方案的可行性。

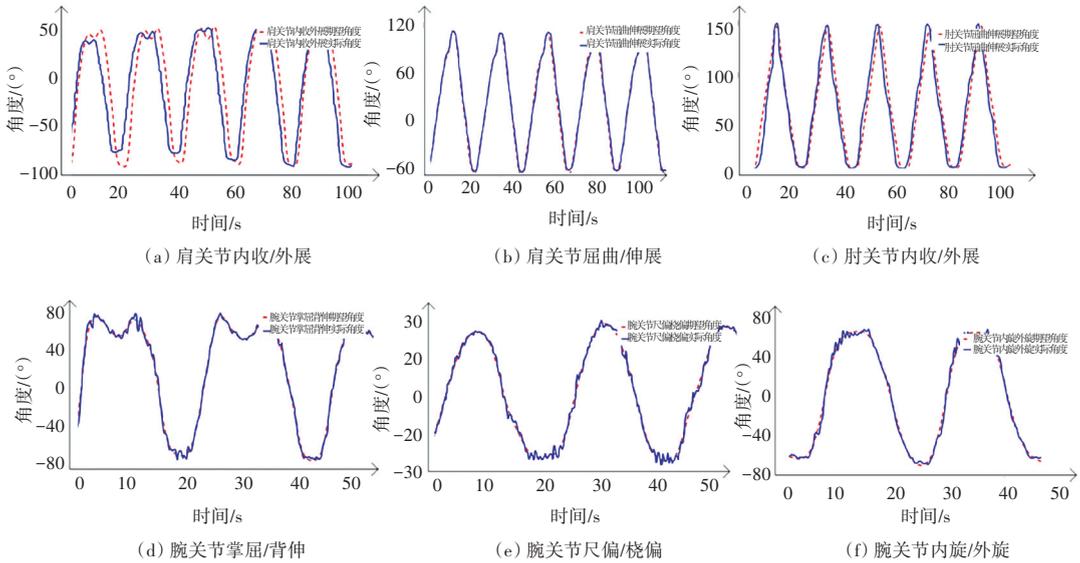


图 13 上肢各关节控制曲线图

Fig. 13 Control curve of each joint of the upper limb

实验过程中,通过发送消息队列,多线程任务可以实现上肢康复训练运动。可选择模式进行单关节训练或多关节训练,根据预设优先级,多线程操作可减少系统响应时间。

5 结束语

设计了一种基于直流电机和实时多线程(RT-Thread)操作系统的多电机控制系统,实现上肢康复训练外骨骼机器人运动控制的准确性及稳定性。完成控制系统的硬件和软件设计,包括 CAN 电机驱动系统和单片机生成 PWM 信号设计等,实现了系统的 CAN 通讯功能。本研发软件设计功能更加丰富,可移植性较强,可为更多上肢外骨骼机器人控制系统提供方案。

参考文献

[1] WHO. Global status report on noncommunicable diseases 2010 [R]. Geneva, Switzerland; World Health Organization. 2011.

[2] GUO Yida, WANG Haoping, TIAN Yang, et al. Position/force evaluation-based assist-as-needed control strategy design for

upper limb rehabilitation exoskeleton[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(15): 13075-13090.

[3] 张豪杰,王云雷,樊令仲,等. 亚急性期脑卒中康复过程中半球间皮质结构可塑性差异[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(04): 436-444.

[4] TOMMASO P, VINCENT C, ROBY-BRAMI A, et al. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: A review on control strategies[J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2016(9): 4-14.

[5] GULL M A, BAI Shaoping, BAK T. A review on design of upper limb exoskeletons[J]. Robotics, 2020, 9(1): 16.

[6] OTTEN A, VOORT C, STIENEN A, et al. LIMPACT: A hydraulically powered self-aligning upper limb exoskeleton[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatron, 2015(20): 2285-2298.

[7] 王文东,肖孟涵,孔德智,等. 基于人机耦合模型的上肢康复外骨骼闭环 PD 迭代控制方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 11-21.

[8] RAHMAN M H, OUMET T K, SAAD M, et al. Tele-operation of a robotic exoskeleton for rehabilitation and passive arm movement assistance [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Karon Beach, Thailand: IEEE, 2011: 443-448.

[9] 吴鹏浩,徐梦如,窦浩鹏,等. 基于 STM32 单片机的扫地机器人设计[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(06): 248-250, 253.