

# 基于单片机的上下肢康复训练机器人

谷士鹏<sup>1</sup> 宋爱国<sup>1</sup>

## 摘要

介绍了一种基于单片机的上下肢训练机器人.首先介绍了它的机械设计和控制系统设计.上下肢康复训练机器人由SSU7301单片机控制直流电机系统,由C8051F320单片机负责与上位机的USB通信部分,两部分之间通过串口通信.它可在一台康复训练机器人上实现上、下肢的康复训练,并有被动模式和主动模式2种训练方式,主、被动模式能实现自动切换.最后给出了上下肢训练机器人产品实例和实验结果,经过试验验证,该机器人设计合理,性能稳定,实现了上下肢的康复训练.

## 关键词

上下肢训练机器人;单片机;电路控制

中图分类号 TP242.3

文献标志码 A

## 0 引言

目前,我国和世界许多国家一样,正逐步步入老龄化社会,在老龄人群中大量的脑血管病或神经系统疾病患者,这类患者多数有偏瘫症状,同时,因交通事故而造成神经损伤或者肢体损伤的人数也越来越多.这两类患者除了早期的手术治疗和必要的药物治疗外,科学的康复训练对于肢体损伤治疗的后期运动功能恢复起到非常重要的作用<sup>[1]</sup>.传统的康复程序依赖于治疗师的经验与徒手操作技术,然而随着病人数目迅速增大,节省治疗时间越来越成为关注的问题.在这种背景下,康复训练机器人应运而生,它的主要功能是代替治疗师帮助患者完成各种运动功能的恢复训练,如行走训练、手臂运动训练等.自从英国的Mike Topping公司于1987年推出世界上第1台商业用途的康复机器人Handy1,康复训练机器人的研究获得了巨大的发展.康复训练机器人技术是一项国际前沿技术,虽然它的历史很短,但发展的速度却很快,不断有新的研究成果出现<sup>[2]</sup>.近年来,虽然国内有分别针对上、下肢的康复训练机器人出现,但是能同时完成上下肢康复训练的机器人却鲜有问世.

基于此,本文针对上下肢康复训练的要求,研制了一款上下肢康复训练机器人,并有USB接口与上位机通信,以便后期的网络化改造<sup>[3]</sup>.

## 1 系统机械结构及工作原理

根据已广泛应用于临床的CPM(Continuous Passive Motion)理论,即滑膜关节持续被动活动理论,康复训练机器人的设计应遵循2种设计原则<sup>[4]</sup>.

1) 解剖学设计.支撑并推动关节按其自然运动形式活动,在技术上可使支撑带动关节接近生理活动.

2) 随意联动设计.通过牵动关节周围组织运动,使关节按其固有的运动轨迹活动.

解剖学设计可使患者更舒适,而随意联动则考虑到机械实现简单和使用方便,更易帮助患者进行康复训练.因此上下肢康复训练机器人的设计采用随意联动设计,通过运动臂的运动分别牵引上、下肢做大范围的康复训练.上下肢康复机器人的机械结构如图1所示,其主要结构见图1中1—11.

收稿日期 2011-08-26

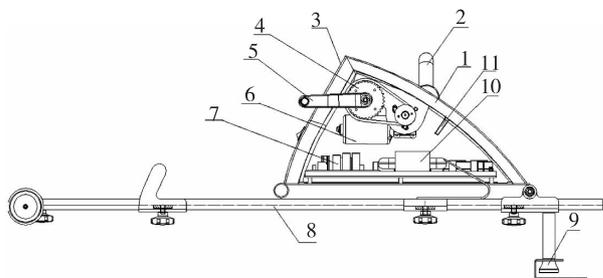
资助项目 国家863计划(2008AA040202);江苏省自然科学基金重点项目(BK2010063)

## 作者简介

谷士鹏,男,硕士生,研究方向为康复训练机器人和空间机器人.seufyloe@126.com

宋爱国(通信作者),男,博士后,主要从事测控技术和智能仪器等方面的研究和教学工作.a.g.song@seu.edu.cn

<sup>1</sup> 东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096



1—训练器主体,2,5—运动臂,3—控制面板及LED显示模块,4—齿轮,6—电机,  
7—电机控制模块,8—床边固定件,9—墙体固定件,10—电源,11—USB通信模块。

图1 上下肢康复机器人机械结构

Fig. 1 The mechanical structure of upper and lower limbs rehabilitation training robot

图1中,电源10为电机6提供24V工作电压,电机6经过减速器和一个链传动带动齿轮轴4转动,在齿轮轴4的两端有2个运动臂2和5,它们的位置相差 $180^\circ$ <sup>[5]</sup>,以保证患者在被动模式下运动时最大限度地被运动臂牵引。当2个运动臂安装有2个运动手柄时,患者就可以在运动手柄的带动下进行上肢康复训练,而当2个运动臂安装有2个运动脚踏时,患者就可以在进行相应的下肢康复训练。

## 2 控制系统设计

上下肢康复训练机器人控制系统采用2级控制方案<sup>[5]</sup>,总体控制方案示意如图2所示。PC机主要负责系统的管理、状态显示和机器人运动的控制。控制面板作为备用控制设备,在PC机控制出现异常时及时控制机器人的运动状态。

### 2.1 电机选择

上下肢康复训练机器人可提供训练者进行主动训练和被动训练。主动训练是指训练者利用自身的力量克服阻力旋转曲柄进行的训练;被动训练是指训练者不借助自身的力量,随着由电机带动的曲柄进行旋转的训练。在被动训练状态,当训练者向运动方向施加主动力时即自动转为主动训练。在主动训练状态,当训练者停止施加主动力时即自动转为被动训练。为适应这种训练要求,电机选择台湾HIWIN公司的AM-1型电机。该电机体积小,控制电压即可控制转速,且转矩为线性,有益于电路设计。通过增加减速箱可达到增加扭力的效果。

### 2.2 电机控制电路

电机控制电路选用上海新茂半导体有限公司的SSU7301单片机作为主控芯片。SSU7301是一款8位

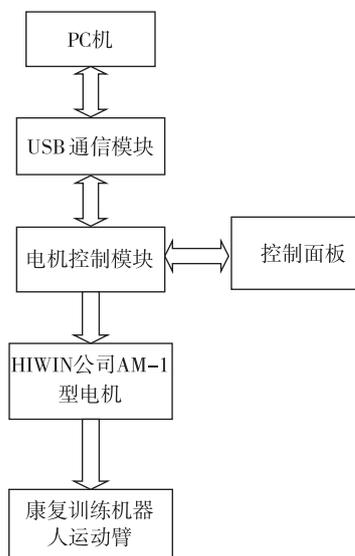


图2 总体控制方案

Fig. 2 The overall control scheme

单片机,以标准8052CPU为核心,外围集成了A/D转换器、PWM、SPWM、看门狗定时器和LCD驱动器等多种功能,内置8KB的闪存存储器。总体来说,SSU7301单片机性能优良,资源丰富,应用方便,完全满足上下肢康复训练机器人电机控制电路设计要求。

采用单片机PWM调制方式对电机进行控制,驱动芯片选用LM18200,驱动部分电路原理如图3所示。单片机SSU7301的P1.5口用作PWM的输出端口。PWM采用5位分辨率,PWM频率选择为23437.5Hz。通过分别写入0F—1F到PWM D0特殊功能寄存器,将PWM均匀分为9个等级,对应电机转速的9个等级。P1.6端口用作电机方向控制端口,实现电机的正向和反向转动。P1.3端口用作继电器控制端口,继电器导通时电机才能工作。P3.5端口使能第2功能,作为AD1的模拟输入端,采集W2上的电压,以判断机器人的运动是主动模式还是被动模式。

电机控制电路配备一块南京国显电子公司的LED显示屏HD44780,在机器人上实时显示电机运转状态以及主、被动模式信息。

通过USB与上位机通信,上位机可以通过用户端控制电机的转速、负载以及运动方向,并能实时显示以上信息以及有无主动训练等信息。SSU7301MCU的P3.0和P3.1端口作为第2功能引脚用作串口通信,用于与C8051F320MCU通信。同时,P2的8个I/O端口用作控制面板按键的检测,以防备PC机控制出现异常时直接控制电机的转速、负载以及运动方向。

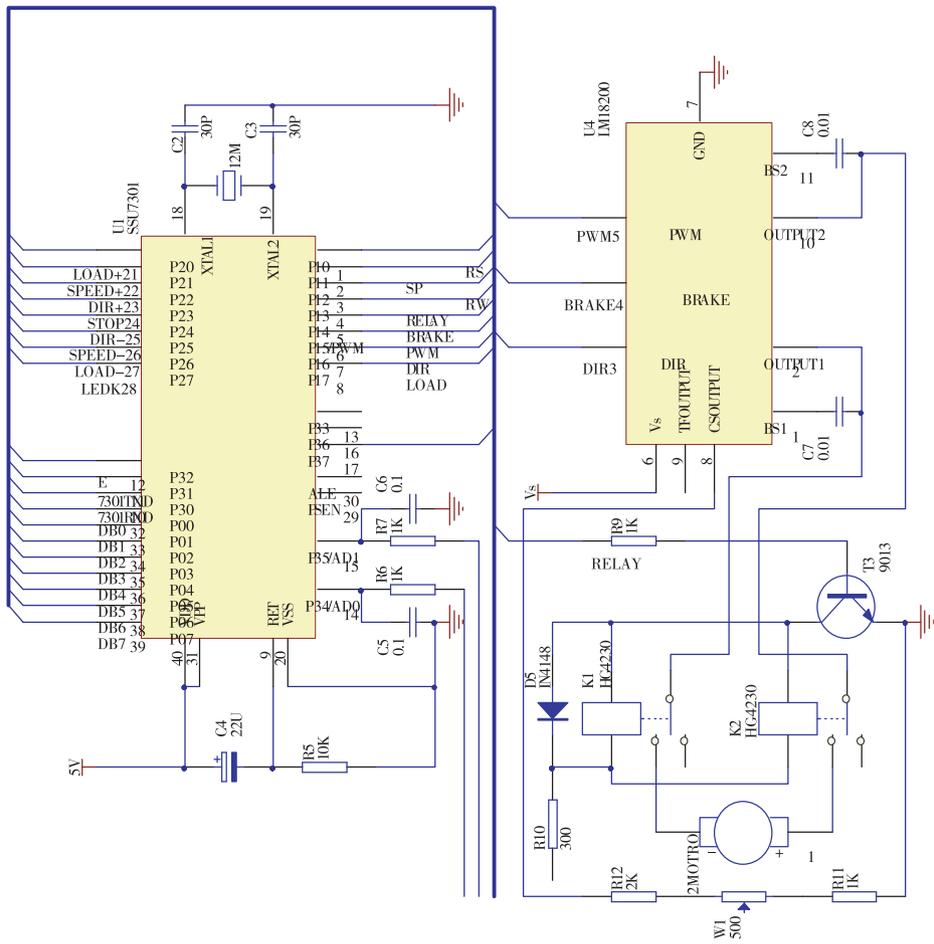


图3 电机驱动部分电路原理

Fig. 3 The circuit principle diagram of motor drive part

### 2.3 USB 通信电路

上下肢康复训练机器人拥有一个 USB 接口与 PC 机通信. 该通信接口为 USB2.0 接口, 向下兼容 USB1.0. USB 通信芯片选择内嵌 USB 控制器的 C8051F320 芯片. C8051F320 完全符合 USB 规范 2.0 版; 集成时钟恢复电路, 无需外部晶体; 支持 8 个端点; 1 KB USB 缓存; 集成收发器, 无需外部电阻. C8051F320 使用 Silicon Labs 的专利 CIP-51 微控制器内核, 与标准的 8051 结构相比, 指令执行速度有很大的提高, 性能更为强大.

通信接口电路原理如图 4 所示. C8051F320 单片机通过串口与电机控制电路通信, 将上位机发送的控制命令传输给 SSU7301. 由于 USB 通信电路使用 USB 线供电, 电机控制电路使用交流电源供电, 而不同电源电路之间是不能直接进行信号传输的. 因此, 通过光电耦合器 TLP521, 对输入、输出信号采用光电隔离措施, 不仅实现了在 2 个不同电源电路间的信号传

输, 同时将微处理器与前向通道、后向通道及其他部分从电气上隔离开来, 有效地防止干扰的侵入.

### 2.4 系统软件设计

单片机 SSU7301 可以分别接受来自 PC 机和控制面板的控制命令, 通过串口中断服务子程序接收来自 PC 机的控制命令, 通过查询的方式接收来自控制面板的命令. 在串口中断服务子程序中设置一个全局变量标志位, 只有标志位有效时, 才能通过读键盘的方式接收控制面板命令. 电机控制中的所有控制命令均采用查询的方式在主程序中进行响应. 在 USB 通信电路固件编程中, 直接调用 C8051F320 封装好的函数即可实现对 USB 接口的读写<sup>[6]</sup>. 系统固件编程采用了结构化的程序设计方法, SSU7301 的主程序流程如图 5 所示.

上位机软件采用 VC++6.0 编程, 调用 SiUSBxp.h 中封装好的 API 函数实现对 USB 接口的控制<sup>[7]</sup>. 对 USB 接口进行读写操作的程序代码如下:

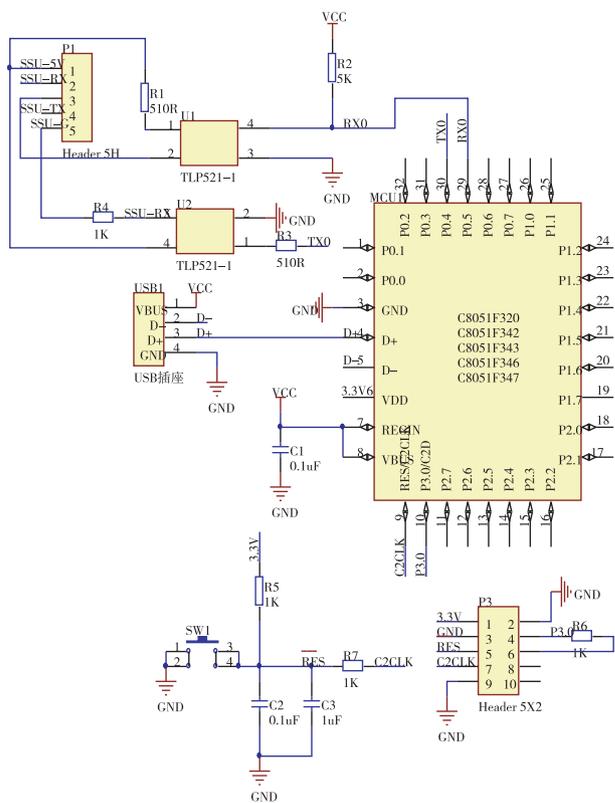


图4 USB通信接口电路原理

Fig. 4 The circuit principle diagram of USB communication

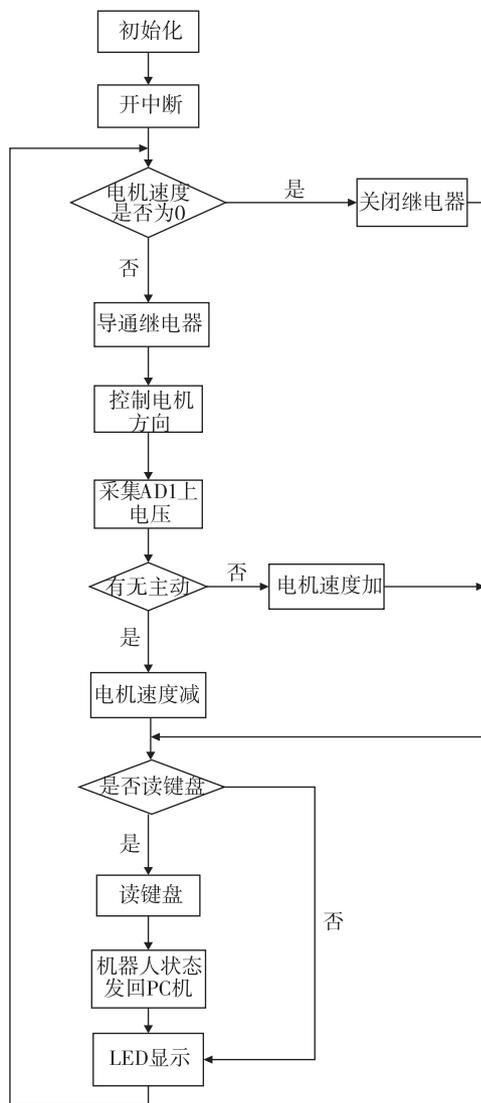


图5 SSU7301主程序流程

Fig. 5 The SSU7301's main program flow chart

```

DWORD dwBytesSucceed = 0;
unsigned char OutBuffer[5] = {0xaa,0,1,1,0};
OutBuffer[1] = carcontrol. speed;
OutBuffer[2] = carcontrol. load;
if ( SI_Write ( m_hUSBDevice, &OutBuffer, 5,
&dwBytesSucceed) != SI_SUCCESS)
{
    MessageBox("写 USB 停止命令发生错误!");
    SI_Close(m_hUSBDevice);
    return;
}

DWORD dwBytesSucceed = 0;
unsigned char InBuffer[5] = {0xaa,0,0,0,0};
if ( SI_Read ( m_hUSBDevice, &InBuffer, 5,
&dwBytesSucceed) != SI_SUCCESS)
{
    MessageBox("读 USB 停止命令发生错误!");
    SI_Close(m_hUSBDevice);
    return;
}

carcontrol. speed = InBuffer[1];
carcontrol. load = InBuffer[2];
    
```

### 3 实验研究

上下肢康复训练机器人可以实现对患者的上、下肢康复训练. 根据训练需求的不同和训练场所的不同, 机器人可以有多种放置方式, 如图6所示. 实验中对每一种放置方式都进行了验证.

图6a中机器人放置在平坦地面上, 患者采用坐姿进行下肢康复训练; 图6b中机器人放置在桌面上, 患者采用坐姿进行上肢康复训练; 图6c中将机器人搁至在床上, 并用塑柄螺钉锁紧床边、下固定板, 患者可采用卧位在床上进行下肢康复训练; 图6d中将墙体固定件用膨胀螺丝紧固在墙上, 然后将机器人悬挂在墙体固定件上, 患者采用立位进行上肢康复训练.



a.地面



b.桌面



c.床上



d.墙上

图6 机器多种放置方式

Fig.6 The various placement of the designed machine

试验结果表明,上下肢康复训练机器人运动平稳,扭矩范围为 $0 \sim 15 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;训练速度 $20 \sim 44 \text{ r/min}$ ,可实现9级速度控制,每级速度步进为 $3 \text{ r/min}$ ;运动负荷分为9级,1级最小,9级最大;输入功率为 $200 \text{ W}$ .

## 4 结论

本文首先介绍了上下肢康复训练机器人的机械结构和工作原理,然后重点介绍了电机控制电路设计和USB通信电路设计,最后给出了系统软件设计.经试验验证,该机器人的结构巧妙,易于控制,很好地实现了上、下肢的康复训练.系统采用单片机控制,成本低,有利于产品化.通过PC机对机器人进行控制,为以后产品的网络化改造提供了便利.

## 参考文献

### References

- [1] 杨勇,张立勋,谭爱华,等.由单片机实现的多功能手臂康复训练器[J].自动化技术与应用,2004,23(2):55-57  
YANG Yong, ZHANG Lixun, TAN Aihua, et al. A multi-functional arm trainer by using AVR MCU[J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23(2): 55-57
- [2] 徐国政,宋爱国,李会军.康复机器人系统结构及控制技术[J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(4):718-720  
XU Guozheng, SONG Aiguo, LI Huijun. System design and control technique of robot-aided rehabilitation[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2009, 13(4): 718-720
- [3] 徐宝国,彭思,宋爱国.基于运动想象脑电的上肢康复机器人[J].机器人,2011,33(1):307-313  
XU Baoguo, PENG Si, SONG Aiguo. Upper-limb rehabilitation robot based on motor imagery EEG[J]. Robot, 2011, 33(1): 307-313
- [4] 李震,于学龙.新型下肢关节康复器的研制[J].中国医疗器械信息,2006,12(12):35-38  
LI Zhen, YU Xuelong. Development of new style healing instrument for lower limbs joint[J]. China Medical Device Information, 2006, 12(12): 35-38
- [5] 颜庆,张立勋,杨勇,等.下肢康复训练机器人单片机控制系统设计[J].应用科技,2004,31(11):1-3  
YAN Qing, ZHANG Lixun, YANG Yong, et al. The design of lower limbs rehabilitative robot control system using AVR MCU[J]. Applied Science and Technology, 2004, 31(11): 1-3
- [6] 王月皎,宋爱国.力反馈远程康复训练虚拟驾驶系统的软件设计[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(35):6479-6482  
WANG Yuejiao, SONG Aiguo. Software design of a force-feedback virtual driving tele-rehabilitation system[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2010, 14(35): 6479-6482
- [7] 刘攀峰,戴启军.基于C8051F320单片机的低成本心电图监护系统设计[J].电子设计工程,2009,17(10):49-51  
LIU Panfeng, DAI Qijun. Design of low-cost ECG monitoring system based on C8051F320[J]. Electronic Design Engineering, 2009, 17(10): 49-51

## Upper and lower limbs rehabilitation training robot based on singlechip

GU Shipeng<sup>1</sup> SONG Aiguo<sup>1</sup>

1 School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

**Abstract** This paper designed a rehabilitative training robot for upper and lower limbs. The designs of mechanical structure and its control system are introduced. The DC-motor of the rehabilitative training robot was controlled by the SSU7301 MCU, and the C8051F320 MCU was used for the USB communication to the upper computer. These two parts were communicated through serial port. This robot could be used to train the upper and lower limbs on one robot. There were two modes of the training: the passive mode and the active mode, which can be automatically switched with different condition of patient's movement. The experiment results show that the robot is rationally designed and stably performed.

**Key words** the upper and lower limbs rehabilitation training robot; singlechip; circuit control system