

基于 FreeRTOS 的移动机器人控制系统设计

曹俊, 陈劲杰

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200082)

✉ 1228627728@qq.com; 2502526194@qq.com



摘要:针对传统四轮移动机器人的环境适应性、行走灵活性和功能扩展性较差的问题,设计提出一套基于 STM32 嵌入式单片机和 FreeRTOS 实时操作系统的四轮移动机器人控制系统。以 STM32F405RGT6 单片机为底层控制主控芯片,搭载 MPU6050 传感器获取位姿。使用 BQ7692003PWR 芯片模块获取磷酸铁锂电池电芯的电压,并运用开路电压法和安时积分法精确计算电池的剩余电量,运用 PI(比例积分控制)算法控制四轮速度。软件系统基于 FreeRTOS 实时操作系统开发,可满足软件多任务运行。实验结果表明,该控制系统具有较高的稳定性和可靠性,实现了对四轮移动机器人速度的精准控制和剩余电量的实时监控。

关键词: STM32; FreeRTOS; PI 算法; 开路电压法; 安时积分法

中图分类号: TP249 **文献标识码:** A

Design of Control System for Mobile Robot Based on FreeRTOS

CAO Jun, CHEN Jinjie

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Technology, Shanghai 200082, China)

✉ 1228627728@qq.com; 2502526194@qq.com

Abstract: Aiming at the problems of poor environmental adaptability, walking flexibility and functional expansion of traditional four-wheel mobile robots, this paper proposes to design a four-wheel mobile robot control system based on STM32 embedded MCU (Micro Control Unit) and FreeRTOS real-time operating system. This control system uses STM32F405RGT6 MCU as the main control chip of bottom control, and is equipped with MPU6050 sensor to obtain the pose. The BQ7692003PWR chip module is used to obtain the voltage of the lithium iron phosphate battery cell, and the open circuit voltage method and the ampere-hour integral method are used to accurately calculate the remaining power of the battery. The PI (Proportional Integral Control) algorithm is used to control the speed of the four wheels. The software system is developed based on the FreeRTOS real-time operating system, which can meet the multi-tasking operation of the software. The experimental results show that the control system of the four-wheel mobile robot has high stability and reliability, achieving precise speed control and real-time monitoring of the remaining power of the four-wheel mobile robot.

Keywords: STM32; FreeRTOS; PI algorithm; open circuit voltage method; ampere-hour integral method

0 引言 (Introduction)

随着控制技术和智能制造的快速发展,越来越多的智能移动装备应用于工业生产和人们的日常生活中。四轮移动机器人作为智能化装备的一部分,对工业和农业的改革与发展有着不可替代的作用。许多行业都需要移动机器人协助或者代替人类完成工作,这样可降低工作人员的劳动强度,提高劳动效

率^[1]。例如,工业园区的货物运送、快递和外卖的配送以及一些危险的勘探任务等。因此,对于移动机器人控制系统的研究符合未来发展方向并能够加快智能移动装备的发展进程^[2]。当前的一些移动机器人环境适应能力差、实时性差且功能扩展性较差,难以普及。针对上述背景,本文采用 FreeRTOS 实时操作系统和 STM32 硬件平台设计了一种低成本和高实时性、

可靠性的小型四轮移动机器人控制系统。

1 系统设计方案(System design scheme)

本文基于嵌入式实时操作系统,设计了四轮移动机器人小车(以下简称四轮移动小车)的下位机控制系统。四轮移动小车底层控制系统以 STM32F4 作为核心处理器,使用 MPU6050 传感器获取四轮移动小车的位姿,上传至上位机主控制器进行数据融合,以获得更加精准的位姿数据,使用 BQ7692003PWR 芯片模块获取磷酸铁锂电池的电压数据,并使用开路电压法和安时积分法计算电池的 SOC(剩余电量),使用 PI 算法控制四轮移动小车的速度。通过整套设计可以实现四轮移动机器人控制的实时性和稳定性。系统总体框图如图 1 所示。

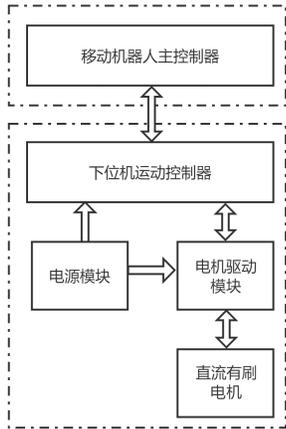


图 1 系统总体架构图

Fig. 1 Overall system architecture diagram

2 系统硬件设计(System hardware design)

四轮移动小车下位机控制系统采用 STM32F405RGT6 主控芯片,通过串口 USART3 完成与上位机主控制器的通信,并传输下位机的相关数据^[3];通过 I2C 双向总线获取 MPU6050 传感器的数据,将位姿传感器获得的数据传给主控制器;通过 I2C 接口获取 BQ7692003PWR 芯片模块传输的电芯电压数据对电池系统进行管理;使用定时器产生 PWM(脉冲宽度调制),通过电机驱动模块对 4 个直流电机进行控制,电机通过光电编码器反馈电机的实时速度^[4]。这 4 个下系统共同完成对四轮移动小车系统的控制,系统硬件设计架构如图 2 所示。

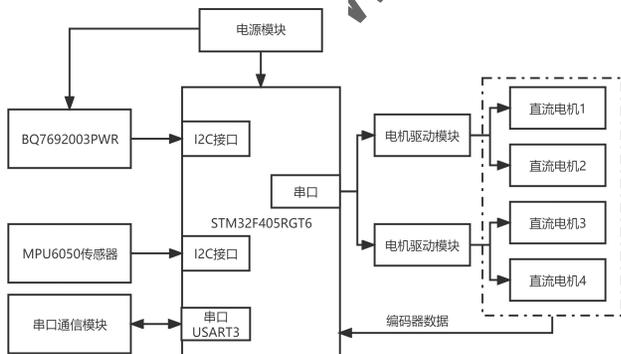


图 2 系统硬件设计架构

Fig. 2 System hardware design architecture

2.1 MPU6050 模块

MPU6050 陀螺仪模块是四轮移动小车的位姿检测模块,是一种六轴传感器模块,可以同时检测三轴加速度、三轴陀螺

仪的运动数据及温度数据。六轴传感器模块内置数字运动处理器,可对数据进行滤波、融合处理。该模块通过模拟 I2C 接口向下位机主控制器输出运动数据^[5]。

2.2 电源模块

四轮移动小车的电源模块使用 12 V 的锂电池,锂电池具有重量轻、容量大和寿命较长等优点。锂电池使用 18650 锂电池,通过串、并联方式连接后容量可达 13 600 mAh,可以满足小型移动机器人的电压和电流需求,并且此类电池的质量较轻,不影响机器人的移动性能,价格较其他电池实惠,适用于小型的移动平台。

2.3 电池管理模块

使用 BQ7692003PWR 芯片模块对四轮移动小车进行电池管理,锂电池采用串、并联方式连接。电池分为 4 组,每组由 3 节 18650 锂电池串联而成。使用 BQ7692003PWR 芯片模块对一组 3 节电池进行电芯电压数据的采集,再通过开路电压法和安时积分法对锂电池的剩余电量进行实时的估算。通过 I2C 接口向 STM32 主控芯片传输电压数据。

2.4 电机驱动模块

四轮移动小车采用的电机是 12 V 直流减速电机。电机尾部带光电编码器,可实时反馈四轮移动小车电机的转速。电机驱动模块采用 WS1C2412D,是直流电机驱动集成电路,采用标准逻辑电平信号控制;使用高性能 MOSFET(金氧半场效晶体管)组成 H 桥驱动,可驱动最高 300 W 电功率的直流电机;允许 PWM 输入的最小脉宽低至 3 μs,可保证 PWM 的动态调节范围。

3 系统软件设计(System software design)

3.1 基于 FreeRTOS 的软件系统设计

FreeRTOS 操作系统是一款轻量级的实时操作系统,可移植在嵌入式设备上,它可免费用于商用。FreeRTOS 操作系统提供任务管理、时间管理、信号量和消息队列等功能,完全可满足移动机器人的系统功能需求^[6]。

四轮移动机器人软件控制系统基于 FreeRTOS 实时操作系统开发,软件系统架构如图 3 所示。需要建立 6 个主应用任务:串口通信任务、位姿检测任务、电机控制任务、电池状态监测任务、电池状态分析任务及信息打印任务,使用 FreeRTOS 操作系统对多个任务进行协调管理,各任务的功能如下。

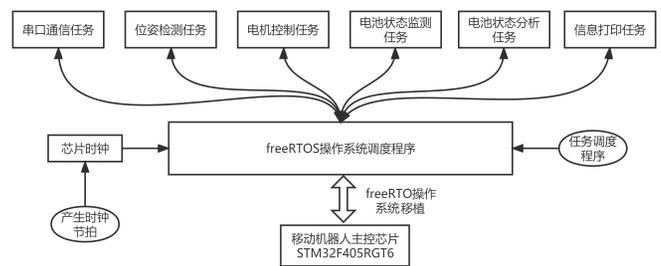


图 3 软件系统架构

Fig. 3 Software system architecture

(1)串口通信任务。串口通信任务使用 USART3 和上位机主控芯片进行通信。当串口通信任务运行时,首先会对四轮移动小车的 x、y、z 轴的目标速度等信息进行赋值,其次使用串口将数据发送到下位机主控制器。接收信息时,会等待串口中断回调函数中的消息通知,当上位机发送命令时会触发中断接收函数,下位机对数据进行接收和解析。

(2)位姿检测任务。在四轮移动小车开机前,位姿检测模块首先使用 MPU6050 模块检测读取陀螺仪的零点,行驶中得到加速度传感器数据和陀螺仪数据。其次使用模拟 I2C 接口将数据传输到上位机主控制器。最后下层主控制器将数据发送到上位机主控制器进行数据拟合。

(3)电机控制任务。电机控制任务首先读取上位机传来的 $x、y、z$ 轴的目标速度,根据编码器读取四轮移动小车的实际速度。其次使用 PI 算法进行调速,将得到的值赋值给 PWM 寄存器对电机的转速进行调整,进而提高四轮移动小车运动控制的准确性^[7]。

(4)电池状态监测任务。电池状态监测任务是通过 BQ7692003PWR 芯片模块对锂电池的单体电芯电压和电池组电压进行监测。测得数据可用于电池状态分析任务。

(5)电池状态分析任务。电池状态分析任务对 BQ7692003PWR 芯片得到的电压数据进行分析。首先进行简单的数据分析,并通过简单的计算获得最大电压差、平均电压和最大最小电压。其次使用开路电压算法和安时积分算法估算锂电池的剩余电量。

(6)信息打印任务。信息打印任务负责打印 4 个电机转速、锂电池的单体电压和电池的 SOC 等信息。

在 FreeRTOS 实时操作系统中,任务和中断都具有不同的优先级。调度器总是在所有处于就绪态的任务中选择具有最高优先级的任务执行。优先级相同的任务在时钟节拍中断中进行切换并执行相同的时间片大小。当任务优先级足够高,该任务就会立即得到响应,然后根据优先级依次响应。本设计中的电机控制任务和通信任务相对于电池管理任务,优先级更高。任务优先级分配如表 1 所示。

表 1 任务优先级
Tab. 1 Task priority

任务名称	任务优先级	任务堆栈大小/字
串口通信任务	4	512
位姿检测任务	3	512
电机控制任务	4	512
电池状态监测任务	5	512
电池状态分析任务	6	512
信息打印任务	7	512

3.2 电机 PI 控制

四轮移动小车的电机控制采用 PI(比例积分)控制器。P 为比例环节,可以反映偏差信号,以减少偏差;I 是积分环节,可以消除系统静差。比例积分控制器是根据给定值与实际输出值构成控制偏差,将偏差的比例(P)和积分(I)通过线性组合构成控制量,对车速进行控制^[8]。PI 位置式算法离散公式如公式(1)所示:

$$PWM=U(t)=K_p \Delta e_k + K_i e_k \quad (1)$$

其中, $U(t)$ 是控制器输出值; e_k 是本次控制器输入与设定值之间的误差; K_p 是比例系数; K_i 是积分系数。

PI 算法的核心代码如下:

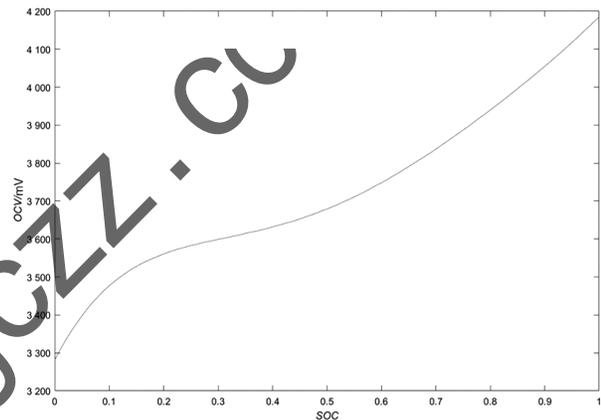
```
int Incremental_PI(float Current,float Target)
{
    static float Bias = 0, Pwm, Last_bias = 0;
    Bias = Target-current; //计算误差
    Pwm += Velocity_KP * (Bias - Last_bias) + Velocity_KI * Bias; //计算 PWM
```

```
if(Pwm > maxPWM) Pwm = maxPWM;
if(Pwm < -maxPWM) Pwm = -maxPWM;
Last_bias = Bias;
return Pwm;
}
```

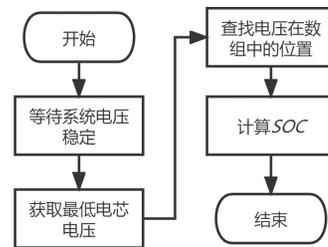
3.3 锂电池的 SOC 算法

四轮移动小车的 SOC(State Of Charge),即电池剩余电量,采用的是开路电压法和安时积分法结合的方法对电量进行估算。开路电压法是在四轮移动小车长时间待机静止后以最低电芯电压为标准校准一次电容^[7];安时积分法是电池充放电状态下实时对电流进行积分校准电池的实际容量,然后计算 SOC 值。前者用于准确地估计初始 SOC 值,后者用于估计实时 SOC 值。两种方法结合可以更加精准地估计电池的剩余电量。

开路电压法是测量锂电池后得到一个具有 100 个元素的数组,然后根据数组查找最小电芯电压在数组中位置对应的 SOC,从而得出当前电池电量,经过实验可得开路电压与 SOC 关系曲线和开路电压法流程图,如图 4 所示。



(a)开路电压与 SOC 的关系曲线图



(b)开路电压法流程图

图 4 开路电压与 SOC 的关系曲线图和开路电压法流程图
Fig. 4 Relation curve between open circuit voltage and SOC and flow chart of open circuit voltage method

安时积分法,测量电池主回路的实时电流,将电流对时间积分,数值在放电时为正,充电时为负。放电过程中用初始电量减去积分结果,得到当前电量;充电过程中用初始电量加上积分结果,得到当前电量。如公式(2)所示, SOC_0 为锂电池荷电状态的初始值, SOC_t 为 t 时刻电池的剩余电量, Q_N 为电池的额定容量, I 为 t 时刻的充放电负载电流^[8]。

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{1}{Q_N} \int_0^t I dt \quad (2)$$

安时积分法的核心算法如下:

```
static void AHSocCal(void)
```

```

{
//abs 取绝对值,A·S 换算为 A·H 单位
floatCurrentValue= abs((int32_t) (BatteryCurrent * 1000)) /
1000.0 / 3600;
if (SysMode == CHARGE) //充电模式
{
//电池真实电量大于电池剩余电量
if(CapacityReal >= (CapacityRemain + CurrentValue))
{CapacityRemain += CurrentValue;}
else
{CapacityRemain = CapacityReal;}
}
//放电模式
else if (SysMode == DISCHARGE)
{
//电池真实电量大于电池剩余电量
if(CapacityRemain >= CurrentValue)
{CapacityRemain -= CurrentValue;}
else
{CapacityRemain = 0;}
}
//SOC 计算
SOC=CapacityRemain/ CapacityReal;
if (SOC > 1)
{SOC = 1;}
}

```

安时积分法算出的 SOC 为 SOC_1 , 开路电压法得出的 SOC 为 SOC_2 。如果 $SOC_2 > SOC_1$, 则 $SOC = SOC_1$, 取最小值可以使 SOC 更为准确; 如果 $SOC_2 < SOC_1$, 则 $SOC = SOC_2$, 这样可以修正放置一段时间后电池的 SOC 值; 安时积分法和开路电压法相结合, 能够估算较为准确的 SOC。

4 系统实现(System implementation)

四轮移动小车的硬件平台如图 5 所示, 主要包括四轮移动小车底盘、下位机主控制器 STM32、电池管理模块、位姿传感器、电机驱动器、电机、电源。

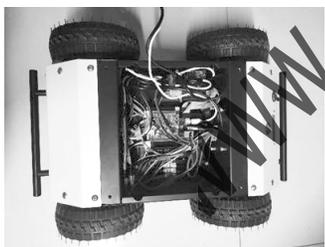


图 5 四轮移动小车的硬件平台

Fig. 5 Hardware platform of four-wheel mobile car

通过实验可以证明四轮移动小车在行驶过程中有很好的实时性和动态反应能力, 并且对地形有较好的适应能力。信息打印任务监控的功能如表 2 所示。

表 2 监控信息列表

Tab. 2 Monitoring information list

序号	功能监测	说明
1	运行状态	启动/停止/待机
2	左前轮转速	0.001 m/s
3	左后轮转速	0.001 m/s
4	右前轮转速	0.001 m/s
5	右后轮转速	0.001 m/s
6	电芯 1 电压	0.001 mV

续表

序号	功能监测	说明
7	电芯 2 电压	0.001 mV
8	电芯 3 电压	0.001 mV
9	SOC	电池剩余电量

一组电池的测试数据如表 3 所示。电池的最大误差为 4 mV。可见, 电池管理模块可以很好地管理四轮移动小车的电源, 实现对电源剩余电量的监测。

表 3 测试数据

Tab. 3 test data

电池编号	实测值/V	采集值/V
1	3.856	3.854
2	3.862	3.866
3	3.851	3.855

5 结论(Conclusion)

本文设计的四轮移动机器人底层控制系统, 采用电机控制模块、光电编码器、位姿传感器、电源管理模块实现了四轮移动机器人的快速转向和加速能力, 并且可实时监控电源的剩余电量。四轮移动机器人基于 STM32 平台和 FreeRTOS 实时操作系统, 使用 PI 算法进行电机调速保证电机的动态响应, 并使用开路电压法和安时积分法对电池的剩余电量进行监测, 提高了四轮移动机器人的运动能力和环境适应能力, 应用场景较为广泛, 具有较好的实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] VLASOV A, YUDIN A. Distributed control system in mobile robot application: general approach, realization and usage[C]// GOTTSCHEBER A. International Conference on Research and Education in Robotics, Germany. Berlin: Springer, 2010:180-192.
- [2] LU S, ZHANG Y, SU J. Mobile robot for power substation inspection: a survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 830-847.
- [3] 卢雪红, 邵亚军. 基于 STM32 智能小车自主循迹避障系统设计及功能实现[J]. 世界有色金属, 2021(22): 165-168.
- [4] 朱贵国, 汪党. 基于 STM32 单片机的直流电机调速系统设计[J]. 数字技术与应用, 2013(5): 2-3.
- [5] 丁电宽, 赵晨浩, 贾天光. 基于 STM32 的四旋翼无人机控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2021, 44(19): 113-118.
- [6] 张龙彪, 张果, 王剑平, 等. 嵌入式操作系统 FreeRTOS 的原理与移植实现[J]. 信息技术, 2012, 36(11): 31-34.
- [7] 仇成群, 刘成林, 沈法华, 等. 基于 Matlab 和模糊 PID 的汽车巡航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 197-202.
- [8] 续远. 基于安时积分法与开路电压法估测电池 SOC[J]. 新型工业化, 2022, 12(1): 123-124, 127.

作者简介:

曹俊(1999-), 男, 硕士生. 研究领域: 机械电子, 嵌入式系统开发.

陈劲杰(1969-), 男, 硕士, 副教授. 研究领域: 智能机器人, 机械电子.