

# 2018 Synopsys ARC 杯电子设计竞赛

## 技术论文

论文题目：

**会过跷跷板的两轮平衡车**

参赛单位：华中科技大学

队伍名称：稳住，我们能赢

指导老师：何顶新

参赛队员：胡蓉 田思佳 田大为

完成时间：2018 年 5 月 18 日

基本情况表

队伍名称	稳住，我们能赢			单位名称	华中科技大学
项目名称	会过跷跷板的两轮平衡车				
项目负责人	胡蓉			联系方式	15871739078
指导老师	何顶新			职务	副教授
参赛 队员 信息	姓名	学历	证件号码	专业	分工情况
	田大为	本科	152624199506300019	自动化	
	田思佳	硕士	130628199405034225	自动化	
	胡蓉	硕士	430421199610050107	自动化	
项目时间	2017 年 1 月 15 日 - 2017 年 5 月 18 日				
队伍简介	我们来自华中科技大学自动化学院，拥有熟悉算法、软硬件设计与应用的队员们。				
参与项目	会过跷跷板的两轮平衡车				
获奖情况 (校级及以上)					
研究专长	嵌入式软硬件、控制算法				
其他	无				

## 摘 要

自平衡车从一阶倒立摆模型演化而来，是一个非线性，多变量，强耦合的系统。倒立摆控制是控制领域里的一个经典问题，对于检验控制算法的性能有重要意义。90 年代自平衡车作为代步工具问世，如今已成为广为人知的一种新型环保的交通工具，对于解决当下的大气污染和交通拥堵等问题具有重要意义。目前自平衡车已经在警用巡逻，环卫清洁等场合得到广泛应用，此外，近年来自平衡控制系统在工业应用领域也渐露头角。

自平衡车的运动能力、抗干扰能力限制了它应用领域的推广。对平衡车性能影响最大的因素除控制器外，就是对传感器信号的处理。本作品的平衡控制基于线性二次最优控制方法(LQR)，此外也使用了 PID 等控制方法。本文也将介绍如何对低成本传感器的信号进行处理，以获得实时准确的反馈数据并且能够抵抗外界扰动的影响。在本设计中我们让小车通过一个简易的跷跷板，以此证明其平衡能力。

尽管 EMSK 开发板缺乏用于运动控制的 PWM、QEI 等外设，我们使用了一块低成本的 CPLD 对其进行扩展，很好地满足了需求。所有运算使用定点计算实现并使用 DSP 指令优化，实现了高效的控制算法。

关键词：自平衡车 倒立摆 LQR 控制器

## ABSTRACT

The self-balanced vehicle evolved from the first-order inverted pendulum model. It is a non-linear, multivariable, strongly coupled system. The control of inverted pendulum is a classical problem in the study of control, and has important implications for testing the performance of control algorithms. In the 1990s, the self-balanced vehicle came as a kind of transportation, and it has now become widely known as a new type of environmentally-friendly transportation, which is of great significance for solving current problems such as atmospheric pollution and traffic congestion. At present, self-balanced vehicles have been widely used in police patrols, sanitation and other occasions, balance control systems is emerging in industrial applications in recent years.

The self-balanced vehicle's athletic ability and anti-interference ability limit the promotion of its application field. The most important factor to the performance of the balance vehicle is the processing of the sensors' signals except the controller. The balance control of this design is based on the linear quadratic optimal control method (LQR), in addition to the use of PID and other control methods. This article will also describe how to process low-cost sensor signals to obtain real-time and accurate feedback data and be able to resist the external disturbances. In this design we let the vehicle pass a simple seesaw to prove its ability of balance.

Although the EMSK development board lacks peripherals such as PWM and QEI for motion control, we have used a low-cost CPLD to expand it so that it meets the needs well. All operations are implemented using fixed-point calculations and optimized using DSP instructions to implement efficient control.

**Keywords:** Self-balanced vehicle; Inverted pendulum; LQR controller

## 目 录

基本情况表 .....	ii
摘 要 .....	iii
ABSTRACT .....	iv
目 录 .....	V
第一章 方案论证 .....	1
1.1 项目概述 .....	1
1.2 资源评估 .....	1
1.3 预期结果 .....	2
1.4 项目实施评估 .....	3
第二章 作品难点与创新 .....	4
2.1 作品难点分析 .....	4
2.2 创新性分析 .....	4
第三章 系统结构与硬件实现 .....	5
3.1 系统原理分析 .....	5
3.2 系统结构 .....	5
3.3 硬件实现 .....	7
3.4 小结 .....	8
第四章 软件设计流程及实现 .....	9
4.1 软件设计流程 .....	9
4.2 软件实现 .....	10
4.2.1 LQR 控制器 .....	10
4.2.2 卡尔曼滤波器 .....	11
4.3 小结 .....	13
第五章 系统测试与分析 .....	14
5.1 系统测试指标 .....	14
5.2 测试与结果 .....	14
5.2.1 模块测试 .....	14
5.2.2 线性运动测试 .....	15
5.2.3 扰动测试 .....	15

5.2.4 程序执行时间测试.....	16
5.3 小结.....	16
第六章 总结展望.....	17
参考文献.....	18

# 第一章 方案论证

## 1.1 项目概述

汽车工业的快速发展给人们带来方便的同时带来了严重的环境、能源、交通问题，双轮自平衡车由于采用高能充电电池作为动力能源已成为一种新型的、便携式交通工具，其节能环保、体积小、无刹车系统、控制方便等特点极大程度上缓解了当今社会严重的大气污染、能源短缺、交通拥挤等问题，在现实生活中双轮自平衡车已经在警用巡逻、公园、高尔夫球场等场合广泛应用，因此同样具有很高的实用价值。

双轮自平衡车系统看似容易实现，但实际上并非如此，它的动力学模型特点为：多变量、非线性、强耦合、参数不确定性等。它是一个综合性的，带有检验控制算法能力的复杂系统，例如可以验证和分析具有统一控制层面的航空航天模型和导弹控制模型，因此具有很高的理论研究价值。

双轮自平衡车的运作原理主要是建立在一种被称为“动态稳定”的基本原理上，也就是车辆本身的自动平衡能力。通过陀螺仪来判断车身所处的姿势状态，透过精密的中央微处理器计算出适当的指令后，驱动马达来做到平衡的效果。我们设计的双轮平衡车系统采用 EMSK 开发板，通过编码器测速模块来检测车速，进行脉冲计数计算速度和路程；电机控制采用 LQR 与 PID 融合控制，通过 PWM 控制驱动电路调整电机的转速，完成平衡车速度和姿态的闭环控制。此外，还增加了串口模块作为输入输出设备，用于平衡车的调试与控制。与传统的平衡车的不同是在 EMSK 相对较低的主频下实现平衡车平稳走过跷跷板以及在跷跷板上站立等功能。

## 1.2 资源评估

**软件环境：**

### （1）工具

EMSK 开发板软件开发平台——embARC OSP GNU

编译工具——GNU Toolchain for ARC Processors, 2017.03 RC2

## (2) UI 界面

实现倒立摆运动状态的监测以及控制参数调节。

### 硬件环境：

EMSK 开发板和车模平台。本次设计基于 EMSK 开发板，其支持硬件浮点运算和 DSP 指令集。

表 1.1 硬件环境

硬件系统	资源及模块使用
EMSK开发板	SPI
	I2C
	UART
	GPIO
车模平台	电机驱动模块
	直流有刷电机
	光电编码器
惯性测量单元	MPU6050模块
通讯模块	蓝牙模块
外设扩展模块	EPM240

## 1.3 预期结果

### 预期功能：

- (1) 能够实现一阶倒立摆平衡；
- (2) 实现一阶倒立摆动态平衡过跷跷板，并且在外部扰动下仍然可以保持平衡；

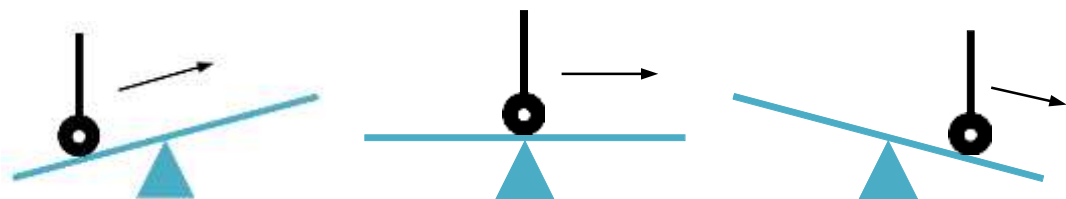


图 1.1 两轮平衡车过跷跷板

### 具体指标：

- (1) 稳定性。平衡车系统能稳定地直立行走；
- (2) 快速性。电机等执行机构的算法的控制效果要具有快速收敛的效果；
- (3) 准确性。要准确控制到算法期望状态。

### 效果演示：

平衡车要能自动平衡并且平稳经过跷跷板，在跷跷板上有扰动时也可以保持平衡。



## 1.4 项目实施评估

表 1.2 人员分工

姓名	分工情况
胡蓉	编写驱动，算法实现
田思佳	根据系统建模，优化算法
田大为	系统设计，算法整定

## 第二章 作品难点与创新

### 2.1 作品难点分析

**抗干扰性。**自平衡车系统设计的最主要难点在于采用成本低廉的惯性传感器进行准确的姿态检测与系统的控制算法设计。加速度计信号噪声大且易受动态加速度干扰，采用滤波算法可以在一定程度上去除噪声；采用互补滤波和卡尔曼滤波对加速度计和陀螺仪输出信号进行融合，可以抑制动态加速度的干扰，但输出的波形还可能出现过冲问题。此外，对外界干扰的抵抗能力是衡量平衡车性能的一个重要指标，由于外界干扰复杂多样，还需要通过系统辨识保证平衡车在各种环境下都可以正常运行；

**建模难度大。**自平衡车是一个非线性，强耦合的系统，除了实现平衡还要能稳定运动，按照传统的倒立摆模型设计控制系统的话效果不理想。除了选择合适的算法，建立接近实际又易于控制的系统模型，是设计中的重点。

**处理器资源受限。**各类滤波算法、控制算法都需要很大的运算量，由于控制器的主频为 25MHz，必须要尽力优化算法以控制运算量。此外处理器的外设资源也有限，必须合理安排使用，发挥处理器的全部性能以满足系统需求。

### 2.2 创新性分析

**基于 Iot 平台实现运动控制。**使用低成本的 CPLD 对 EMSK 进行外扩，补充了 PWM 和 QEI 外设从而可以很好地完成运动控制的任务。此外，使用价格低廉的惯性传感器与自制增量式编码器，所有材料都是市面常见材料。

**高效率。**基于 ARCEMSK 平台运行 FreeRTOS，所有运算使用定点运算，使用了 DSP 指令加速，充分发挥了处理器性能，在低开销的情况下实现了高性能的控制算法。

**应用场景延伸。**能够应对更为复杂的路况。测试运行过程中可能遇到不同类型障碍物的情况，进一步对控制系统进行优化，使其拥有一定的爬坡、越障甚至负重能力。

## 第三章 系统结构与硬件实现

### 3.1 系统原理分析

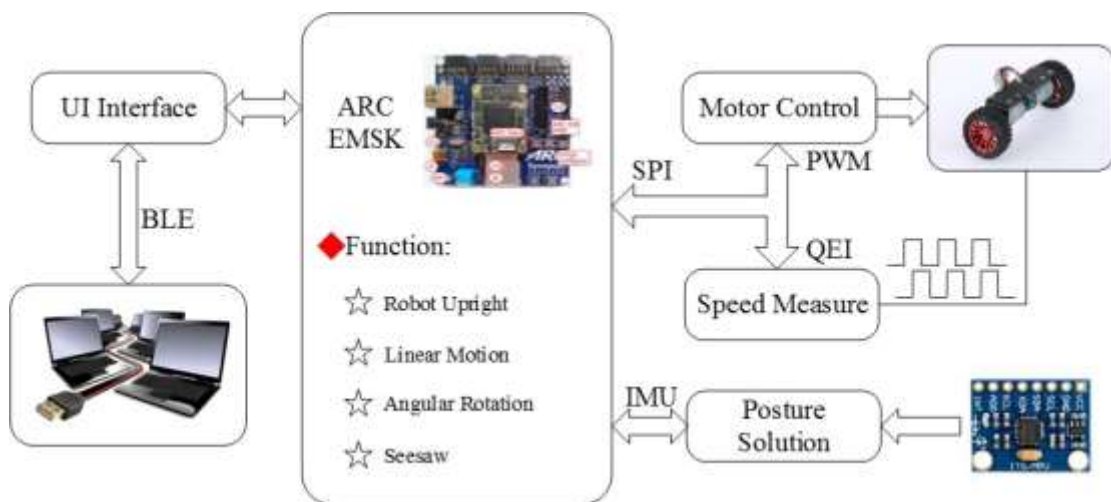


图 3.1 系统结构框图

底层硬件包括电机驱动、用于姿态解算的惯性传感单元、进行脉冲计数的光电编码器以及调试用的串口等。硬件平台采用 synopsys ARC 处理器的 EMSK FPGA 开发板，基于整合 FreeRTOS 操作系统的 embARC 软件平台进行程序开发。

算法部分包括车体直立、车辆运行、方向控制、调试与设置等，基于 LQR 与 PID 算法进行控制并进一步优化。

通过 DSP 库与定点运算实现 kalman 滤波、LQR 与 PID 控制等算法，进行软硬件优化，提升系统性能，使其适用于 EMSK 平台。

### 3.2 系统结构

为了实现车模直立行走，需要采集惯性测量单元信号、车模电机转速脉冲信号、（两路）需要进行如下控制环节，控制车模电机转动：

- 车模直立与速度控制：使用 LQR 控制。
- 车模方向控制：使用 P（比例）控制。

因此，控制算法的实现分析如下：

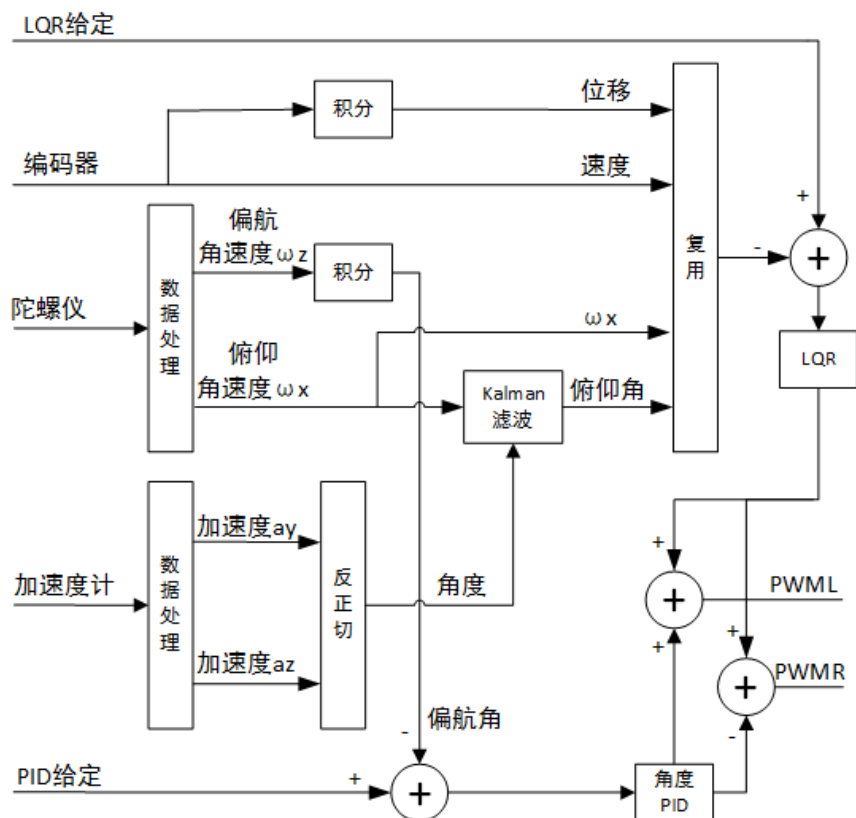


图 3.2 控制算法结构

车模的三种控制（直立、速度、方向）最终是将控制量叠加在一起作为电机输出电压控制量。直立控制是基础，它的调整速度非常快，速度和方向控制相对调整速度慢。速度和方向控制的输出量是直接叠加在电机控制电压上。它们假定直立控制会始终保持车模不跌倒，直立控制会自动调节车模的倾角以适应车模的加速、减速和转弯的需要。

车模加速前进时，由速度控制算法给出电机增加的正向电压，电机开始逐步加速旋转。在此同时，车模直立控制会迅速进行调整，使得车模往前倾斜，车模开始加速。当车模速度达到设定值，由车模速到控制算法使得电机进入恒速运行。此时车模直立控制算法也会相应调整车模处于直立状态恒速运行。车模减速过程与此类似，由速度控制算法减少了电机的电压，电机开始减速运行。直立控制算法会自动调整车模往后倾斜，使得车模减速。车模转向控制是在车速控制基础之上，调节两个电机驱动电压差使得电机运行速度出现差动，进而调整车模的方向。

在此控制算法中，直立控制一直维持车模的直立状态，速度与方向控制将会成为直立控制的外部干扰。为了确保车模不会跌倒，因此外部的速度和方向控制算法调整速度不能够过快，过于剧烈。这一点在后面软件实现的时候需要注意。

### 3.3 硬件实现

#### (1) ARC EM Starter Kit v2.3

硬件平台采用 synopsys ARC 处理器的 EMSK FPGA 开发板，基于 FreeRTOS+ embARC 软件平台进行程序开发。



图 3.3 EM Starter Kit Board

EMSK2.3 支持硬件浮点计算，支持 DSP 指令集，具备一定计算能力的同时保证较低功耗。作为系统的“大脑”，处理传感器的信号，根据控制算法做出控制决策，驱动直流电机和伺服电机完成对系统的控制。

#### (2) CPLD扩展板

由于EMSK缺乏运动控制相关的PWM、QEI外设，我们使用一块CPLD——EPM240对其进行扩展，如下图所示，通过Pmod与EMSK连接。EPM240是一个非常经典而且廉价、低功耗的可编程数字逻辑器件，具有240个等效的逻辑单元。我们使用EPM240实现了一个SPI控制器，两个PWM外设，两个QEI外设，由此便使EMSK具有了运动控制的能力。



图3.4 CPLD扩展板

### (3) 车模平台

车模平台集成了电源模块、电机驱动模块、速度检测模块、传感器模块、运动控制扩展模块和通讯模块。

**电源模块：**为整个系统提供合适而又稳定的电源。电机工作电压可到 12V，而 EMSK 系统供电 5V，因此选用 7.2V 镍镉电池对电机进行供电，再通过 LM7805 线性稳压模块进行电压转换。

**电机驱动模块：**驱动直流电机完成加减速控制和转向控制。

**速度检测模块：**检测转速，用于速度的闭环控制。

**惯性测量模块：**MPU6050 模块，用于测量加速度和角速度。

**辅助调试模块：**主要用于系统的功能调试、状态监控等方面。



图 3.5 IMU 模块



图 3.6 电机驱动模块

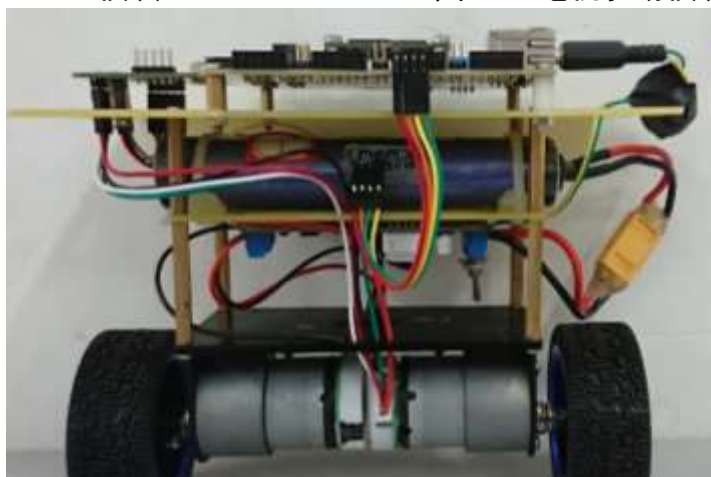


图 3.7 小车实物图

## 3.4 小结

本章介绍了小车的硬件组成，包括硬件系统结构分析和器件选型等，用较低的成本完成了满足要求的硬件平台，这是进行下一步软件设计的基础。

## 第四章 软件设计流程及实现

### 4.1 软件设计流程

系统的软件流程图如图 4.1 所示，基于 FreeRTOS 建立了 3 个任务。核心任务是电机控制任务 TskMotor，负责接收传感器数据，进行数据处理，实现控制算法，控制电机输出；TskTop 的主要任务是修改系统参数以及串口 UI 的显示；TskDbg 负责管理 UART，实现数据与指令的自由收发。

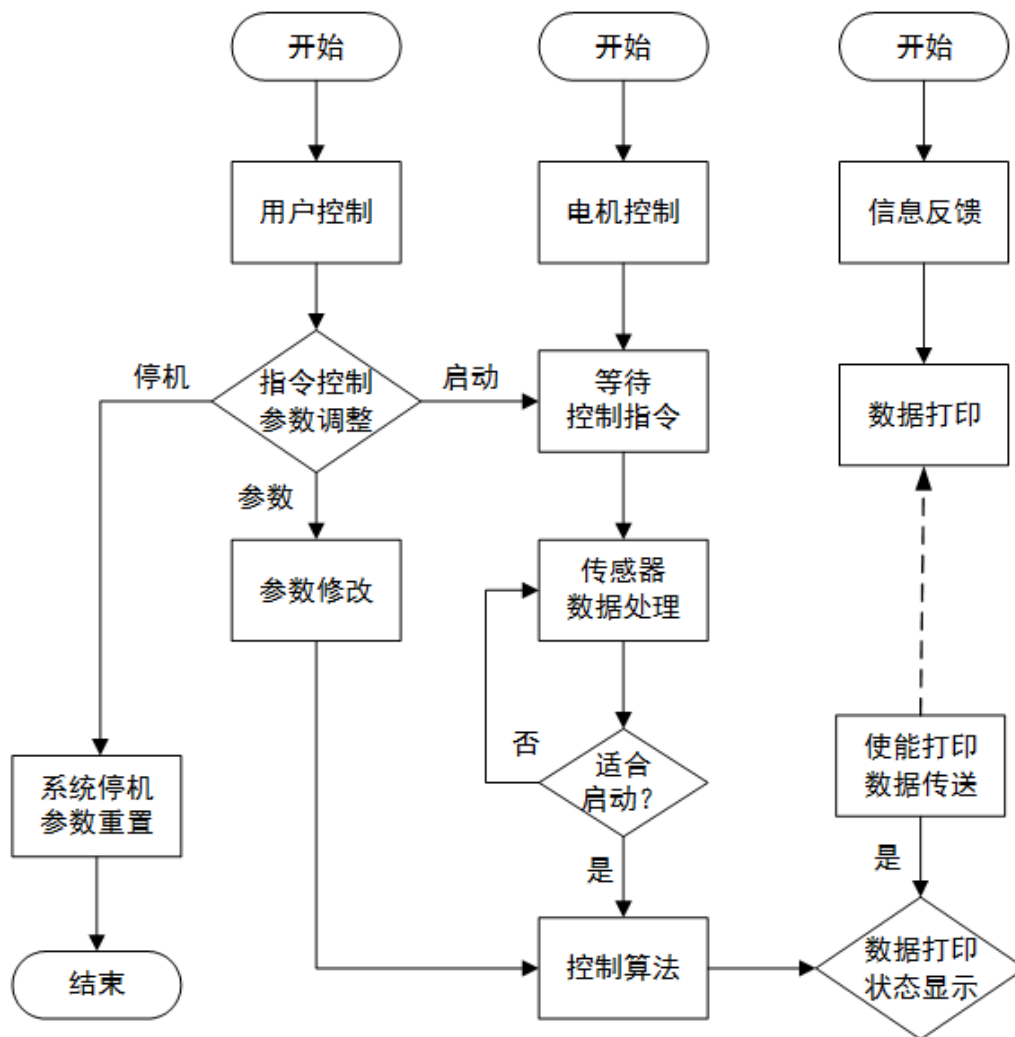


图 4.1 软件流程图

TskDbg 不停地检测串口队列内容并将其发送，在程序任何一部分想要发送数据只要向队列里写入内容即可，由于该任务为最低优先级，不会发生冲突。

TskTop 实现了与上位机的交互。它会检测串口接收的内容，根据内容修改相应的系统状态和参数，在交互的过程中它还会返回提示信息，实现了一个简单的 UI。主要指令包括：start/stop（启动/停止），修改参数指令，put（打印系统参数），q（停止打印参数）等。

TskMotor 是核心控制任务。它首先会读取加速度计、陀螺仪和码盘的数据，如果此时控制器满足启动状态则进行下一步的数据处理操作，否则等待并重置系统参数。控制器启动要满足两个条件：1.接收到 start 命令；2.车身角度在可调节范围内。数据滤波之后会被送入 LQR 和 PID 控制器计算出 PWM 控制量，并通过 SPI 写入 PWM 外设，至此结束一个控制周期。

系统控制周期为 2ms。LQR 控制器要求传感器数据采样频率不能过低，同时考虑到 ARC em7d 内核主频只有 25MHz，综合考虑之后选择了 2ms 的控制周期。

## 4.2 软件实现

软件的主要工作集中在控制器和数据处理的实现以及 DSP 优化。主要使用了 LQR 控制器和 PID 控制器，我们将详细介绍 LQR 相关的内容；主要使用了卡尔曼滤波器和互补滤波器，我们将详细介绍卡尔曼滤波器。

### 4.2.1 LQR 控制器

经典控制方法在处理多输入多输出以及复杂的系统时往往得不到令人满意的控制效果。现代控制理论在经典控制理论的基础上给出了多输入多输出系统控制的解决方案，这就是最优控制。最优控制是现代控制理论的核心，它指的是在满足系统的约束条件的同时寻找一种控制规律，以使我们选定的目标函数具有最大（或最小）值，以此来完成控制任务。

LQR (linear quadratic regulator)即线性二次调节器，所谓的线性二次是指系统的状态方程是线性方程，同时目标函数是状态变量和(或)控制变量的二次型的积分。这种动态系统的最优化问题称为线性二次型最优控制问题，其最优解可以写成统一的解析表达式，并且可以实现求解过程的规范化。线性二次型问题非常易于分析和计算，在进行控制器的设计时无需计算闭环极点的位置，只需通过系统的响应曲线确定状态变量和控制量的加权矩阵。线性二次控制器在倒立摆的控制问题上有广泛应用。接下来我们直接给出设计流程。



二次系统结构如下：

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$x(0) = x_0$$

LQR 控制器结构如下图所示：

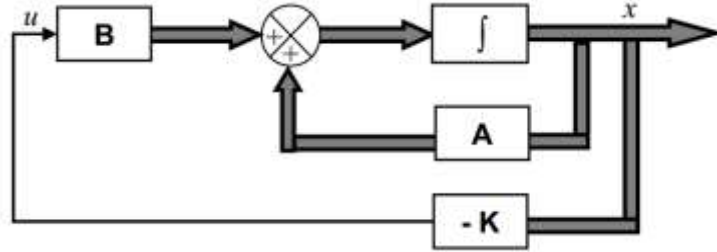


图 4.2 LQR 控制器的结构

对于 LQR 控制器，我们选择的目标函数如下：

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)]dt$$

这里直接给出 LQR 的控制规律：

$$u = -R^{-1}B'\bar{P}x$$

控制器的设计问题就转变为求增益向量  $K = R^{-1}B'\bar{P}$ 。LQR 有两个控制参数矩阵 Q 和 R，他们分别对应于状态向量和输入给定的权重。因为参数矩阵中的各个参数是相互耦合的，所以工程上一般根据经验（与不同状态向量对应的参数往往带有不同的物理意义）或者多次实验来确定参数矩阵的值。LQR 法中要求 Q 和 R 矩阵是正定的。经过实验我们确定的参数矩阵如下：

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5102 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = [1]$$

P 矩阵是 Racatti 方程的解：

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

如果 P 存在且为正定，那么系统就是稳定的。我们可以借助 MATLAB 工具来求解 P 矩阵。最终计算得到 K 向量  $K = [-0.951, -10.88, 155.9, 19.67]$ 。

从程序实现上看：**控制器输出=k1\*位移误差+k2\*速度误差+k3\*角度误差+k4\*角速度误差。**

#### 4.2.2 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法。由于观测数据中包括系统中的噪声和干扰的

影响，所以最优估计也可看作是滤波过程，在通信，导航，制导与控制等多领域得到了较好的应用。

卡尔曼滤波器可以将所有的可用数据进行融合来预测所有可以测量获得的数据，但并不要求数据非常精确，只要我们知道系统噪声、测量误差等统计数据以及初始状态等数据，就可以进行计算。假设我们感兴趣系统的模型是线性的并且噪声与时间无关，那么卡尔曼滤波器的计算结果就是最优的。卡尔曼滤波器不需要将所有以前的数据保存在存储器中，每次进行新的预测时都会重新进行计算。因此实现卡尔曼滤波器不需要大容量的存储器，这就允许我们在资源受限的嵌入式微控制器上运行卡尔曼滤波器。

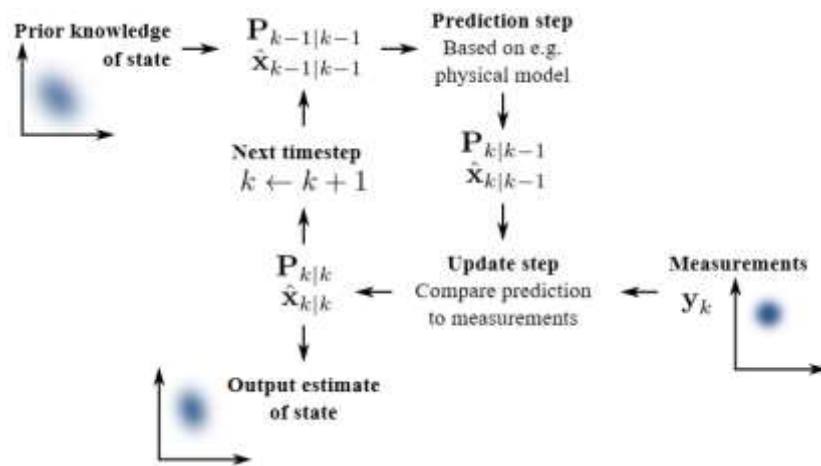


图 4.3 卡尔曼滤波器的计算过程

卡尔曼滤波器的计算过程如图所示，其主要包括“预测”和“更新”两部分。用代码可以很容易地描述这个过程（一阶卡尔曼滤波器）：

Predict:

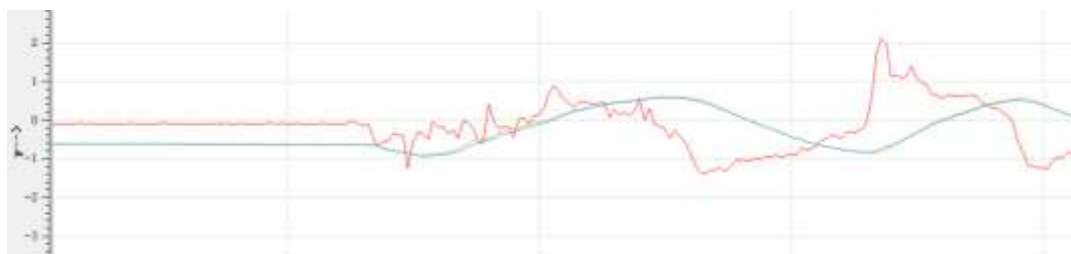
$$\begin{aligned} \text{xpri} &= A * \text{xpos} + B * u; \\ \text{Ppri} &= A * \text{Ppos} * A + Q; \end{aligned}$$

Correct:

$$\begin{aligned} K &= \text{Ppri} * H / (H * \text{Ppri} * H + R); \\ \text{xpos} &= \text{xpri} + K * (z - H * \text{xpri}); \\ \text{Ppos} &= (1 - K * H) * \text{Ppri}; \\ \text{return } &\text{xpos}; \end{aligned}$$

$\text{xpri}$  和  $\text{Ppri}$  为“预测”部分计算的先验状态和误差， $\text{xpos}$  为“更新”部分计算的后验状态和误差。 $A$ 、 $B$  和  $H$  为系数矩阵（二阶或以上时为矩阵）， $Q$  和  $R$  是两个输入数据的协方差矩阵， $Q$  和  $R$  的设置对滤波器性能影响很大。举例来说，我们可以根据 MPU6050 的数据手册给定的噪声等数据去计算一个大概

值出来，然后根据实际表现对两个值进行调整。比如我们发现计算得到的角度值噪声较大，对机械震动很敏感，那么我们可以将对应于加速度计数据的  $R$  系数增大，表示实际的方差大于我们预想的方差；不过减小  $Q$  系数可以获得近似的效果。卡尔曼滤波器的实际测试效果如下：



\*图中加速度转化数据与滤波后的数据几乎重合了

### 4.3 小结

本章介绍了系统软件的结构及其设计过程以及程序各部分的功能，并详细介绍了主要的控制算法和滤波算法。在调试阶段，主要的工作正是集中在控制器和滤波器参数的整定。

## 第五章 系统测试与分析

### 5.1 系统测试指标

在这一部分将对小车的性能进行测试，包括直观的评价，如稳定与否，响应是否迅速；此外通过给定特定的输入信号或者扰动，可以测试小车反应的一些定量数据，借助数据我们可以进一步对小车的稳定性/响应速度/控制误差做出评价。在此之前，平衡小车作为一个使用了多种外设的复杂系统，首先要保证各模块工作正常，没有冗余代码，我们同样将给出测试。

### 5.2 测试与结果

#### 5.2.1 模块测试

电源测试：检测硬件各部分供电是否正常。

测试结果：各部分电压正常，系统正常启动。

外设测试：通过蓝牙串口与上位机收发数据，观察是否可以正常收发数据；通过 I2C 读取 MPU6050 数据，并移动 MPU6050 观察数据变化趋势是否正确。

测试结果：串口数据可以正常收发；MPU6050 数据正确。

外扩模块测试：连接外扩模块进行响应的数据收发，用逻辑分析仪观察 SPI 波形是否正确；给一定的 PWM 数据用示波器观察 PWM 输出是否正确；用信号源给 QEI 输入信号，观察读书与计算值是否一致。

测试结果：SPI 波形正常；PWM 可以正确输出；QEI 在不同输入信号频率下都可以读到正确数据。

## 5.2.2 线性运动测试

直立测试：让小车在平面/斜面直立，观察是否稳定，测量位移误差。

表 5.1 直立测试结果

平面	小车可以稳定直立，位移误差 $\pm 3\text{cm}$
10 度斜面	小车可以稳定直立，位移误差 $-8 \pm 4\text{cm}$
20 度斜面	小车有轻微振荡，位移误差 $-21 \pm 4\text{cm}$

直线运动测试：在小车直立的基础上给固定速度，观察小车是否可以跟随给定，并测量稳定时间。

表 5.2 直线运动测试结果

平面	小车可以迅速响应，响应时间 0.5s
10 度斜面	小车可以跟随给定速度，响应时间 1.5s
20 度斜面	小车可以跟随给定速度，响应时间 3s

转向测试：在小车直立/运动的基础上让小车旋转一定角度，测试用时以及角度误差。

表 5.3 转向测试结果

转向测试结果		用时	角度误差
静止	左转 90 度	0.5s	5 度
	左转 180 度	0.9s	9 度
	右转 360 度	1.7s	18 度
线速度 0.3m/s	左转 30 度	0.15s	2 度
	右转 90 度	0.4s	5 度

## 5.2.3 扰动测试

碰撞测试：用手拨动、干扰静止的小车，观察小车的反应。

碰撞测试结果：小车可以迅速调节车身平衡，并回到原位置。

跷跷板测试：给恒定速度让小车通过跷跷板，观察其运动状态。

跷跷板测试结果：小车可以通过跷跷板；在整个过程中车身基本保持平衡；运动过程未发生振荡；在上坡时有所减速，下坡时有所加速。

#### 5.2.4 程序执行时间测试

测试一个控制周期内固定代码的执行时间。

周期代码运行时间测试

耗时程序	消耗时间（us）
SPI 读取 QEI 值	100
I2C 读取 IMU 数据	400
卡尔曼滤波	10
反正切计算角度（atan 函数）*	300
PID 及相关滤波	20
LQR	1
SPI 设置 PWM	80
总耗时	约 900

\*使用查表计算反正切只需 20us，但精度较差

### 5.3 小结

系统各部分都能够正常工作，实现了较高的代码执行效率。小车能够稳定地进行各种运动，并具有较强的抗干扰能力。

## 第六章 总结展望

本文设计的平衡小车实现了各种运动功能，拥有较强的抗干扰能力；本设计实现了高效的控制程序，充分发挥了 EMSK 开发板的性能。在此基础上，我们从以下几方面进行了进一步的展望：

- 进一步提高稳定性。主要的问题依然在于如何准确地获得系统状态数据，例如通过加速度计测量角度会受加速度影响，码盘数据表示车轮速度（局部速度）而不能反应小车整体速度。
- 提高可控制性。一方面，增加手机 app 控制的功能，可以实时控制运动状态、调节系统参数；另一方面，增加外环控制以准确控制速度与位移，甚至可以通过模式识别的方法自行确定是否强制控制速度与位移。
- 系统联网。通过无线模块接入互联网，实现云端控制与状态显示。
- 基于此平台尝试使用深度学习算法进行平衡控制。
- 增加无需人帮助自行启动的功能。

项目刚开始时我们对 EMSK 的生态系统完全不了解，无从下手，经过几个月的努力我们终于实现了想要的功能。在这个过程中我们掌握了很多嵌入式开发的相关技能，对嵌入式系统有了更深入的了解，收获颇丰。感谢 Synopsys 提供的这个平台，衷心祝愿 ARC Design Contest 越办越好！

## 参考文献

- [1]Rich Chi Ooi.Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot. Final Year Thesis of Us Q, 2003:1-15.
- [2]宫文文. 直立式双轮自平衡运动小车控制方法研究[D]. 长春工业大学, 2016.