

第十一届“恩智浦”杯全国大学生

智能汽车竞赛



技 术 报 告

学 校：浙江工业大学

队伍名称：浙工大银江 BOOM

参赛队员：秦志飞

周鹏豪

汪泽南

带队教师：朱 威

陈 朋

关于技术报告和研究论文使用授权的说明

本人完全了解第十一届“恩智浦”杯全国大学生智能汽车竞赛关保留、使用技术报告和研究论文的规定，即：参赛作品著作权归参赛者本人，比赛组委会和恩智浦公司可以在相关主页上收录并公开参赛作品的设计方案、技术报告以及参赛模型车的视频、图像资料，并将相关内容编纂收录在组委会出版论文集中。

参赛队员签名： 秦志飞
周鹏豪
汪泽南

带队教师签名： 朱威
陈琳

日 期： 2016.09.10

摘 要

本文介绍了浙江工业大学摄像头组银江BOOM队队员们在准备第十一届恩智浦杯智能车大赛中的工作成果。智能车的硬件平台采用Kinetis 微控制器，软件平台为IAR开发环境，车模采用大赛组委会统一提供的B型仿真车模。文中主要介绍了智能小车控制系统的机械结构、软硬件结构及设计开发过程，整个系统涉及车模机械结构调整、传感器电路设计及信号处理、控制算法和策略的优化等多个方面。参赛车模以MK60FX512ZVLQ15单片机为控制核心，以安装在车身上的前瞻野火鹰眼摄像头为循迹传感器，利用500线欧姆龙编码器检测速度信息。车模系统的简单工作原理是MK60FX512ZVLQ15单片机通过野火鹰眼摄像头采集到赛道信息，结合舵机控制算法控制舵机转角，结合编码器的速度反馈信号利用电机控制算法优化控制车模的速度变化。结合MATLAB软件仿真和上位机软件的监控调试，最终确定了各项最佳控制参数。

关键字：摄像头；PID 控制；K60；上位机；MATLAB

目 录

摘 要.....	I
引 言.....	1
第一章 系统总体设计.....	2
1.1 系统概述.....	2
1.2 整车布局.....	3
第二章 智能车机械结构调整与优化.....	5
2.1 舵机的安装.....	5
2.2 摄像头的安装.....	6
2.3 底盘加固与高度调整.....	7
2.4 坡道导轮装置.....	7
2.5 编码器的安装.....	8
2.6 前轮定位.....	8
2.6.1 主销后倾.....	8
2.6.2 主销内倾.....	9
2.6.3 前轮前束.....	10
2.7 差速器的调整.....	11
2.8 其他优化调整.....	11
第三章 硬件系统设计及实现.....	12
3.1 硬件设计方案.....	12
3.2 电路设计方案.....	12
3.2.1 单片机最小系统板.....	13
3.2.2 电源稳压电路.....	14
3.2.3 舵机供电电路.....	15
3.2.4 电机驱动电路.....	16
3.2.5 拨码开关、按键及显示屏电路.....	16
3.2.6 其他电路模块.....	17

第四章 软件系统设计及实现.....	18
4.1 赛道双边线提取及优化处理.....	18
4.1.1 原始图像的特点.....	18
4.1.2 赛道提线.....	19
4.1.3 偏差量的计算.....	21
4.1.4 路径选择.....	21
4.2 PID 控制算法介绍.....	22
4.2.1 位置式 PID.....	23
4.2.2 增量式 PID.....	23
4.2.3 微分先行 PID.....	24
4.2.4 PID 参数整定.....	24
4.3 转向舵机的 PD 控制效果.....	25
4.4 驱动电机的 PID 控制效果.....	26
第五章 系统开发及调试.....	27
5.1 开发工具.....	27
5.2 调试工具.....	28
5.2.1 匿名科创地面站.....	28
5.2.2 MATLAB R2014a.....	28
5.3 调试方法.....	29
第六章 模型的主要技术参数.....	30
第七章 总 结.....	31
参考文献.....	32
附录 部分程序代码.....	33

引 言

智能车竞赛是从 2006 开始，由教育部高等教育司委托高等学校自动化类教学指导委员会举办的旨在加强学生实践、创新能力和培养团队精神的一项创意性科技竞赛。至今已经成功举办了十届。在继承和总结前十届比赛实践的基础上，竞赛组委会努力拓展新的竞赛内涵，设计新的竞赛内容，创造新的比赛模式，使得围绕该比赛所产生的竞赛生态环境得到进一步的发展。

第十一届比赛的题目各组别分别如下：光电组、摄像头组、电磁直立组、电轨组、双车追逐组、信标越野组、电轨节能组。

为了克服往届比赛中人工判断车模出界的困难，本届比赛规则中增加了两种方法提高车模出界判断的客观性。一种是采用路肩方法；另一种采用感应铁丝方法。也改变了计时系统的方式，采用了磁标的方式标志了车模检测位置。

对于摄像头组，车模可以使用 B 型车模；其传感器允许使用面阵 CCD 或者 CMOS 摄像头以及超声传感器进行赛道检测；比赛任务是选手制作基于摄像头传感器的车模完成赛道运行一周。比赛时间从车模冲过起跑线到重新回到起跑线为止。

本技术报告主要包括智能小车控制系统的机械结构调整与优化、硬件系统设计、软件算法设计等，详尽地阐述了我们的设计方案，具体表现在机械结构的多种尝试，硬件电路的创新设计以及人工智能控制算法的应用。

在一年的备赛过程中，我们参看了大量的书籍，如：《先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真》、《新型 PID 控制及其应用》等，以及大量 K60 芯片方面的资料，如《轻松玩转 ARM Cortex-M4 微控制器——基于 Kinetis K60》。不仅如此，在这一年漫长的做车过程培养了我们电路设计、软件编程、系统调试等方面的能力，锻炼了我们心理素质、实践动手的能力、团队合作能力，在此要感谢浙江工业大学对比赛的关注，我们的成果离不开学校的大力支持及指导老师悉心的教导；还要感谢的是和我们一起协作的队员们，协助，互促，共勉使我们能够走到今天。

第一章 系统总体设计

1.1 系统概述

智能小车的基本结构大致可分为电源模块、传感器模块和控制模块。本智能车系统的总体结构为：Ov7725 数字摄像头拍摄赛道图像，输出 PCLK、FOOD、HREF 信号和 8 路数字图像信号，输入到 MK60FX512VLQ15（K60）微控制器，由 K60 的 DMA 模块进行图像采集，通过模拟比较器对图像进行硬件二值化，进行进一步处理获得主要的赛道信息，为舵机和电机的控制提供决策；转向舵机采用 PD 控制；驱动电机采用 PID 控制，通过 PWM 控制 MOS 管来调整电机的功率；通过编码器来检测车速，并采用 K60 的输入捕捉功能进行脉冲计算获得转速，并对应到相应的速度，与速度 PID 形成闭环；而车速的目标值由优化后的决策层给出，具体的控制策略将在下文中详细介绍。

根据竞赛的规则和智能车系统的基本要求，设计了系统结构图，如图 1-1 所示。在满足比赛要求和小车正常运行的情况下，力求系统简单高效。因而在设计过程中尽量简化硬件结构，减少因硬件而出现的问题。各模块的作用如下：

1) K60 最小系统模块，作为整个智能车系统的控制中枢，将采集电感传感器、编码器、超声波等传感器的信号，根据控制算法做出控制决策，驱动直流电机和伺服舵机完成对智能车的控制。

2) 摄像头检测模块，是智能车的获取赛道信息途径，具有一定的前瞻性，提前感知前方的赛道信息，为 K60 做出控制决策提供必要的依据和充足的反应时间。

3) 编码器检测模块，反馈智能车后轮的实时转速，用于电机转速的闭环控制。

4) 陀螺仪检测模块，感知赛道坡道信息。

5) 电源模块，为整个智能车的硬件系统提供稳定合适的电源。

6) 电机驱动模块，驱动直流电机按照控制中枢给出的控制信号进行加减速。

7) 舵机控制模块，控制小车的左右转向。

8) LCD 显示屏模块，辅助调车工具，用于显示调车过程中所用到的信息

9) 按键与拨码开关模块，辅助调车工具，用于更改控制参数等

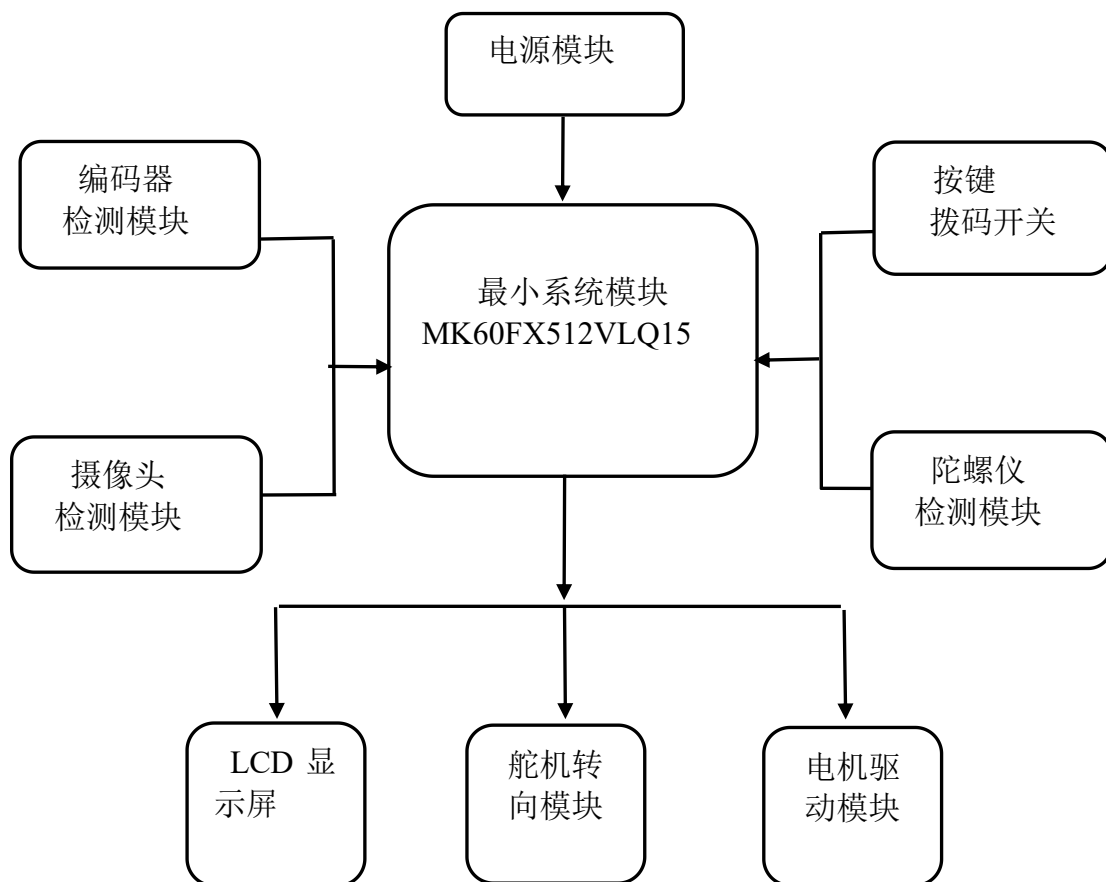


图 1-1 整车系统结构图

1.2 整车布局

车体整体布局，归纳为以下几点：

- (1) 最大限度降低整车重心，车模底盘降低,主板低放。因为车子重心高低和位置对车子行驶、转弯有很大影响，例如转弯性能和直道加（减）速性能等。
- (2) 改变电池位置，进一步降低重心；
- (3) 电机与车身连接采用硬固定，提升车子加减速性能；
- (4) 调整舵机的摆放位置，提升响应速度；
- (5) 用轻便坚固的碳卷管作为摄像头杆的材料；
- (6) 注意摄像头固定位置，保证该区域振动小，重心分布要和盲区与前瞻匹配。

经过充分考虑与实际方案比较，智能车整体布局如图 1-2 所示。



图 1-2 整车效果

第二章 智能车机械结构调整与优化

智能车系统的任何控制都是在一定的机械结构基础上实现的，因此在设计整个软件架构和算法之前一定要对整个车模的机械结构有一个感性的认识，再针对具体的设计方案来调整赛车的机械结构，并在实际的调试过程中不断的改进和提高。本章主要介绍智能车 B 车模的机械结构^[1]和我们的调整方案。

2.1 舵机的安装

考虑到主板的安装方便以及车模转向性能，我们对舵机安装结构进行了较大的调整。在多次装车过程中，我们通过实践和比较发现，卧式舵机要比立式舵机更加灵活，输出的力矩更大，但有一个缺点就是占用空间比较大，在安装的过程中要注意支架的选用和位置的选取，因此，我们采用卧式舵机的安装方案，卧式舵机与立式舵机相比，卧式舵机拉杆与舵机摆臂处于同一水平面上，有利于保证线性关系。另外车模的转向是通过舵机带动左右横拉杆实现。舵机的转动速度和功率是一定，要想加快转向机构的响应速度，必须优化舵机的安装位置及其力矩延长杆的长度。由于功率是速度与力矩乘积的函数，过分追求速度，必然要损失力矩，力矩太小也会造成转向迟钝，因此安装时还要综合考虑转向机构响应速度与舵机力矩之间的关系，通过优化得到一个最佳的转向效果。

转向舵机我们采用卧式安装的方法，因此自己设计并定做的支架，使其安装空间更小，稳定性更高，拆卸也更加灵活。具体舵机部分的机械结构如图 2-1、图 2-2 所示：

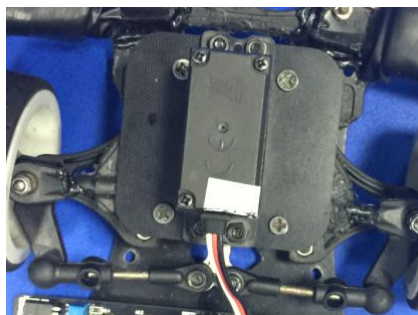


图 2-1 改进后的舵机转向机构及安装图

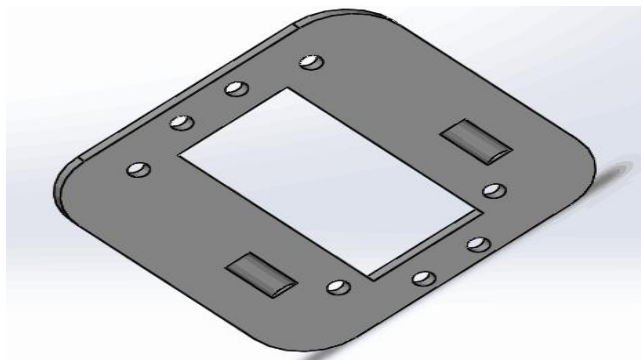


图 2-2 舵机支架模型图

2.2 摄像头的安装

为了降低整车重心，我们摒弃了以往通过铝合金夹持组件来固定摄像头，采用塑料的夹持组件来固定。采用轻质且刚度大的 8mm 碳卷管作为安装摄像头的主桅。底部采用 3D 打印定制的塑料固定件固定碳卷管。这样可以保证摄像头固定的牢固和平稳性，获得最大的刚度质量比，整套装置具有很高的定位精度和刚度，为了保证摄像头不易松动，避免因摄像头松动而反复校准的过程，为顺利完成比赛提供保障力，我们还在摄像头两边加了细的碳素杆作为支架形成三角形固定。

为了更加准确的固定摄像头支架和拆卸更换摄像头更加方便我们还设计了专门的其固定器件，摄像头安装的机械结构如图 2-3 所示



图 2-3 摄像头安装效果图

2.3 底盘加固与高度调整

由于车模在赛道上高速行驶和连续急转弯，合理的底盘刚度和底盘高度调节会提高智能车的加减速性能、转向性能、行驶稳定性等，官方发布的 B 车模底盘过软，尤其是在转弯及上下坡是表现的更加明显，较软的底盘刚度很容易造成智能车在行驶过程中及其不稳定。为解决这个问题，我们对智能车底盘用质量轻，强度大的 PCB 板加以固定。为降低底盘高度，我们采取对智能车前端左右轮垫一块垫木的方式。底盘调整效果如图 2-4 所示：

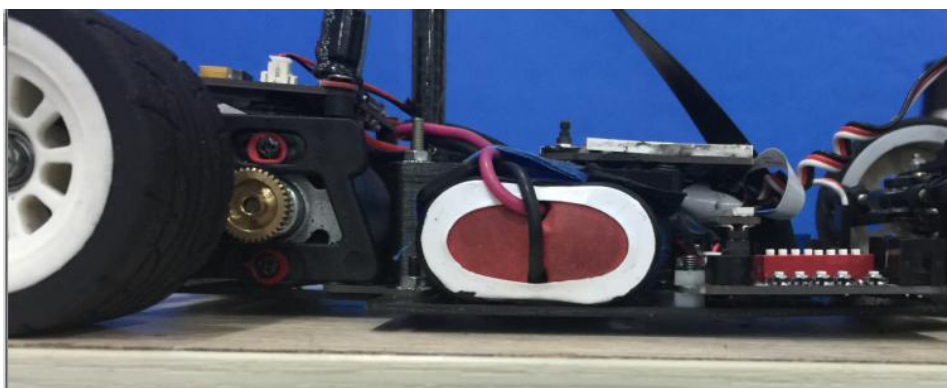


图 2-4 底盘调整效果图

2.4 坡道导轮装置

为了防止车子与坡道之间产生摩擦，我们自己制作了导轮装置，如图 2-5 所示：



图 2-5 坡道导轮装置

2.5 编码器的安装

速度编码器我们采用了欧姆龙 500 线编码器，安装时应注意调整好齿轮间隙。齿轮传动机构对车模的驱动能力有很大的影响。齿轮传动部分安装位置的不恰当，会大大增加电机驱动后轮的负载，经调试我们发现一个比较简便的方法就是先把电机和编码器齿轮咬合紧，然后用一长条 A4 纸，从编码器和电机齿轮间滚过，这个咬合间隙基本恰到好处，调整好的齿轮传动噪音很小，并且不会有碰撞类的杂音，动力传递十分流畅。最终编码器安装效果如图 2-6 所示。



图 2-6 编码器安装效果图

2.6 前轮定位

为了使车模在行驶过程中，能够直线稳定，过弯轻便，转向后能自动回正以及减少轮胎和转向系零件的磨损等，系统需要对车轮的定位参数进行调整。其中主要包括有：主销后倾角，主销内倾角，前轮外倾角，前轮前束。这四个参数反映了前轮、主销和前轴三者之间在车架上的位置关系。由于竞赛专用的 B 车模设计的原因，B 车模其实是不能调整前轮外倾角的。因而 B 车模的前轮定位只有主销后倾、主销内倾和前轮前束。现下面分述其作用。

2.6.1 主销后倾

主销后倾角是指在纵向平面内主销轴线与地面垂直线之间的夹角。如图 2-7 所示。它在车辆转弯时会产生与车轮偏转方向相反的回正力矩，使车轮自动恢复到原来的中间位置上。所以，主销后倾角越大，车速越高，前轮自动回正的能力就越强，但是过大的

回正力矩会使车辆转向沉重。下面我们利用理论力学知识进行以下分析：

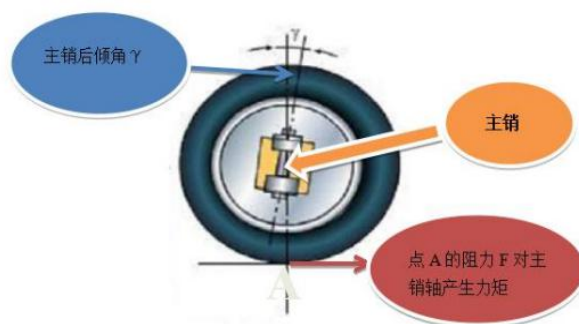


图 2-7 主销后倾角示例图

1) 当转向轮不转向时，在直道上行驶时，阻力 F 的作用线与主销轴线在同一个平面，此时的阻力对主销轴的力矩为零，由动量矩守恒定理可知作用点 A 对轴的动量矩保持不变，即如果没有其他作用力，此时前轮不会绕主销定轴转动。

2) 当转向轮转向时，阻力 F 的作用线与主销轴线不在同一个平面，由力学知识可知，阻力 F 对主销轴产生力矩，该力矩使前轮偏转的方向刚好与前轮的偏转方向相反，所以有利于前轮的回正，从而避免了前轮绕主销左右抖动，使小车在直道行驶稳定。

通常主销后倾角值设定在 1° 到 3° 。B 型模型车的主销后倾角无法通过直接调整前桥结构实现改变，采用在前桥处增加垫片，可以适当的增加主销内倾角，有利于保持直线行驶、转向后回正。

2.6.2 主销内倾

主销内倾角是指在横向平面内主销轴线与地面垂直线之间的夹角，它的作用也是使前轮自动回正，如图 2-8。角度越大前轮自动回正的作用就越强，但转向时也就越费力，轮胎磨损增大；反之角度越小前轮自动回正的作用就越弱。

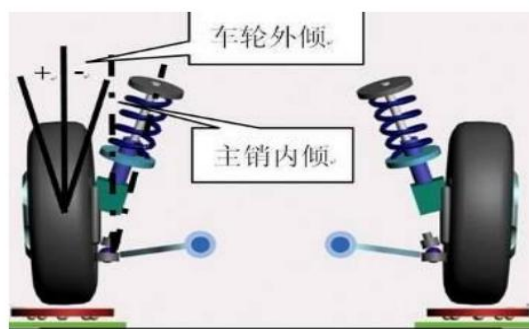


图 2-8 主销内倾角示意图

对于模型车，通过调整前桥的螺杆的长度可以改变主销内倾角的大小。由于过大的内倾角也会增大转向阻力，增加轮胎磨损，所以在调整时可以近似调整为 $0^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 左右，不宜太大。

2.6.3 前轮前束

前轮前束是指两轮之间的后距离数值与前距离数值之差，也指前轮中心线与纵向中心线的夹角。前轮前束的作用是保证汽车的行驶性能，减少轮胎的磨损。前轮在滚动时，其惯性力自然将轮胎向内偏斜，如果前束适当，轮胎滚动时的偏斜方向就会抵消，轮胎内外侧磨损的现象会减少。像内八字那样前端小后端大的称为“前束”，反之则称为“后束”或“负前束”。在模型车中，前束的调整总是依据主销内倾的调整。只有主销内倾确定后才能确定合适的前轮前束与之配合，前轮前束是通过调整伺服电机带动的左右横拉杆实现的。如图 2-9 所示。

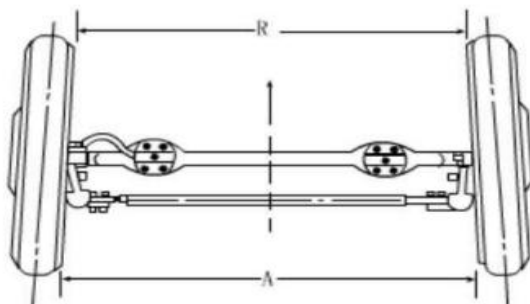


图 2-9 前轮前束示意图

在实际的调整过程中，我们发现较小的前束，约束 $0 \sim 2\text{mm}$ 可以减小转向阻力，使模型车转向更为轻便，但实际效果不是十分明显。

对于 B 型车模来说，调节主销内倾和前轮前束的方法如图 2-10 所示



图 2-10 主销内倾和前轮前束的调整方法

由于车模加工和制造精度的问题，在通用的规律中还存在着不少的偶然性，一切是实际调整的效果为准。

2.7 差速器的调整

差速作用就是在电机向两边半轴传递动力的同时，允许两边半轴以不同的转速旋转，满足两边车轮尽可能以纯滚动的形式作不等距行驶，减少轮胎与地面的摩擦。为了弥补这种用距离的差异，我们采用两轮不同的转速来实现，这就是差速的通俗解释。

我们希望是模型车在直道加减速的时候，后轮没有差速，而在过大弯道时有很大的差速。这样，即加速快又过弯灵活。但是，实际的差速机构不可能达到这效果，我们调节差速只是平衡两项，在转弯较灵活地方情况下尽量不影响加速性能。

B 型模型车采用双滚珠差速，首先将左后轮的防松螺母拧紧，通过调整后轴上的防松螺母压紧小差速盘；通过调整右后轮防松螺母的松紧，实现对大差速齿轮盘松紧的调节。调节后的效果应为：开动电机后，握住一侧轮，另一侧可正常转动；握住两侧轮，差速尺寸无法转动。

2.8 其他优化调整

除了上述机械结构的调整，我们对整车重心也做了研究，重心的高低决定了车模的加减速性能、转向性能、行驶稳定性等，重心的调整我们坚持将整车重心最大限度的降低，所以我们尽可能的降低底盘高度。另外影响重心分布的原因有舵机的安放方式，电路板、电池等的安放位置以及前瞻支架的重量，对电路板和电池的安装，选择尽可能的靠近底板。所以上述的各种调整，贯穿着以降低重心的原则。调整后的重心位置如图 2-11 所示。

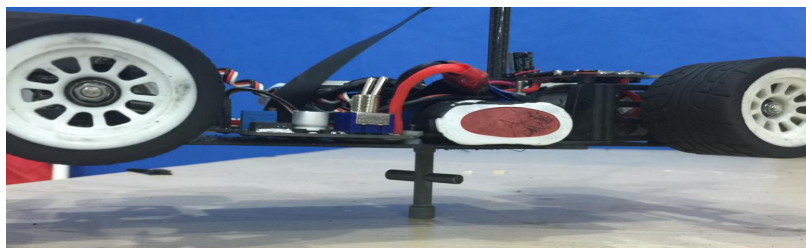


图 2-11 重心位置

第三章 硬件系统设计及实现

3.1 硬件设计方案

从最初进行硬件电路设计时就既定了系统的设计目标：可靠、高效、简洁，在整个系统设计过程中严格按照规范进行。可靠性是系统设计的第一要求，我们对电路设计的所有环节都进行了电磁兼容性设计，做好各部分的接地、屏蔽、滤波等工作，将高速数字电路与模拟电路分开，使本系统工作的可靠性达到了设计要求。简洁是指在满足了可靠、高效的要求后，为了尽量减轻整车重量，降低模型车的重心位置，应使电路设计尽量简洁，尽量减少元器件使用数量，缩小电路板面积，使电路部分重量轻，易于安装。我们在对电路进行了详细分析后，对电路进行了简化，合理设计元件排列、电路走线，使本系统硬件电路部分轻量化指标都达到了设计要求。

3.2 电路设计方案

两辆智能车的电路系统均由三部分组成：以 MK60FX512VLQ15 为核心的包括电源在内的主板，检测模块，电机驱动模块。考虑到 MK60FX512VLQ15 的最小系统板比较大，会占据较大的主板空间，在电池及其他结构调整时主板的空间有限，所以在设计主板时，直接将 MCU 设计在主板上，同时为了整辆车子的重量分布和重心，我们将电机驱动电路单独打板，安装在车子最后方。驱动部分与主板的连接做了隔离，检测部分与主板的连接采用 FPC 排线，简洁可靠。主板上集成了本系统的控制电路，它包括如下部件：MCU 系统、电源稳压电路、检测模块接口、陀螺仪模块接口、电机驱动模块接口、NRF24L01 接口、舵机接口、编码器接口、拨码开关、按键、指示灯、显示屏等。检测模块采用仪表放大器，差分输入，CMRR 高，放大能力强，能有效抑制共模干扰。电机驱动模块采用 MOS 管 H 桥驱动电路，驱动能力相比 BTS7960 有了大幅提升。

3.2.1 单片机最小系统板

MK60FX512VLQ15 是 K60 系列 MCU。Kinetis 系列微控制器是 Cortex-M4 系列的内核芯片。K60 内存空间可扩展，从 32KB 闪存/8KBRAM 到 1MB 闪存/128KBRAM，可选的 16 KB 缓存用于优化总线带宽和闪存执行性能^[2]。其原理图如下

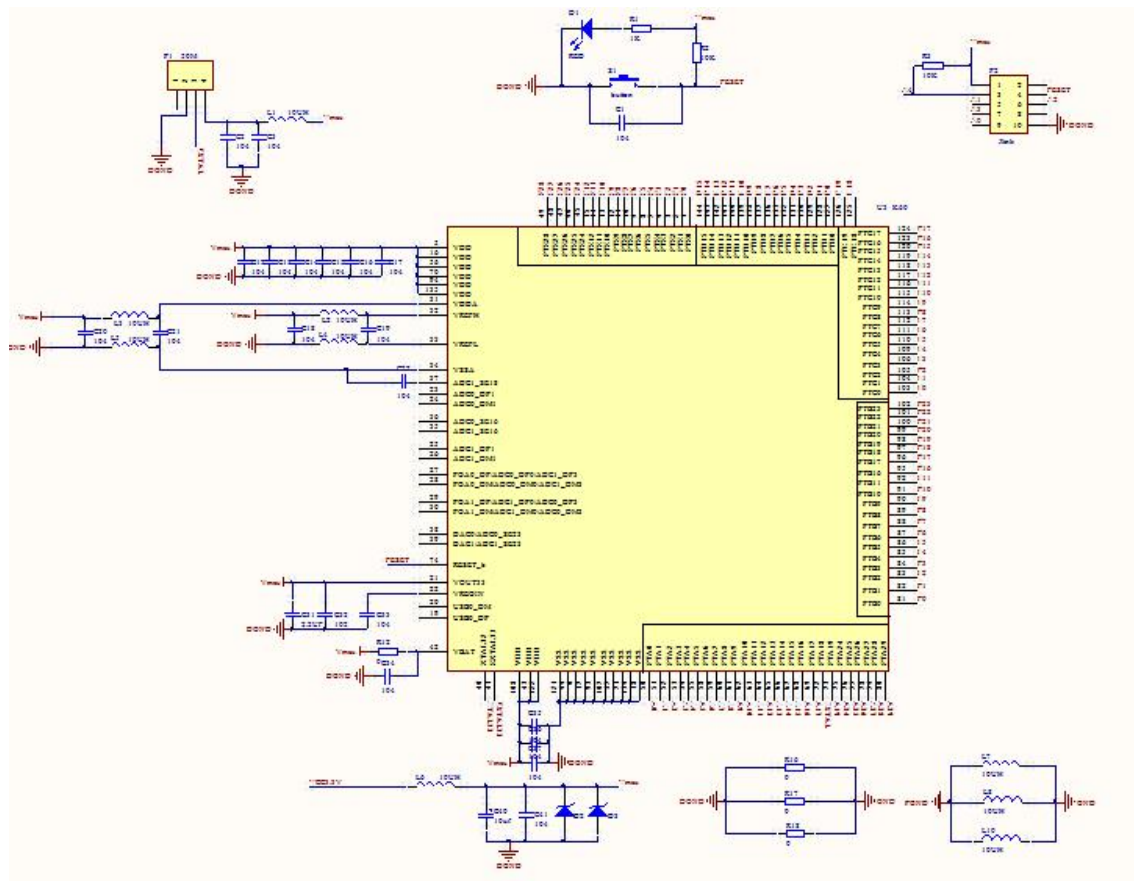


图 3-1 单片机最小系统

最小系统使用 K60144 PIN 封装，为减少电路板空间，板上仅将本系统所用到的引脚引出，包括 PWM 接口，舵机接口，编码器接口，若干普通 IO 接口。其他部分还包括电源滤波电路、时钟电路、复位电路、串行通讯接口、J-Link 接口。

表 3-1 本系统所用到的引脚

用途	使用引脚
电机 PWM 波输出	PTD5, PTD6
舵机 PWM 波输出	PTA12

编码器信号输入	PTB18, PTB19
摄像头信号输入	PTA25, PTA26, PTA27, PTA28, PTA29, PTB0, PTB1, PTB2, PTB3, PTB4, PTB5, PTB6, PTB7
陀螺仪检测 AD 信号输入	PTA17
按键信号输入	PTE0, PTE1, PTE2, PTE3
拨码开关信号输入	PTE5, PTE6, PTE7, PTE8, PTE9, PTE10, PTE11, PTE12
LCD 显示屏输出	PTC0, PTC1, PTC2, PTC3, PTC4, PTC5, PTC6, PTC7, PTC9, PTC10, PTC11, PTC12, PTC13, PTD10, PTD11, PTD12, PTD13, PTD14
蜂鸣器接口输出	PTD15
蓝牙接口	PTC16, PTC17

3.2.2 电源稳压电路

本系统中电源稳压电路分别需要有+3.3V, +5V, +5.5V, +12V 供电。

+3.3V 给单片机、摄像头模块、拨码开关、陀螺仪、LCD 液晶、蜂鸣器等供电；+5V 为编码器模块供电；+5.5V 为 FUTABA 舵机供电；+12V 给电机驱动电路中 IR2104 供电，而电机则直接由电池供电。

由于整个系统中+5V 电路功耗较小，为了降低电源纹波，我们考虑使用线性稳压电路。另外，电机和舵机工作时，电池电压压降较大，为提高系统工作稳定性，必须使用低压降电源稳压芯片，选用了 LM2940。LM2940 是微功耗低压差线性电源芯片，具有完善的保护电路，包括过流，过压，电压反接保护。使用这个芯片只需要极少的外围元件就能构成高效稳压电路。另外为避免在电机启动的瞬间电池的电压巨大压降影响检测的正常工作，为检测模块供电的 3.3V 电压采用级联稳压的方式，即电池电压先经过 TPS7350 的一级降压，然后再经过 TPS7333 稳压到 3.3V。电机驱动电路的驱动芯片要 12V 供电，我们选择了封装较小并且足以满足需求的 MC34063 芯片。

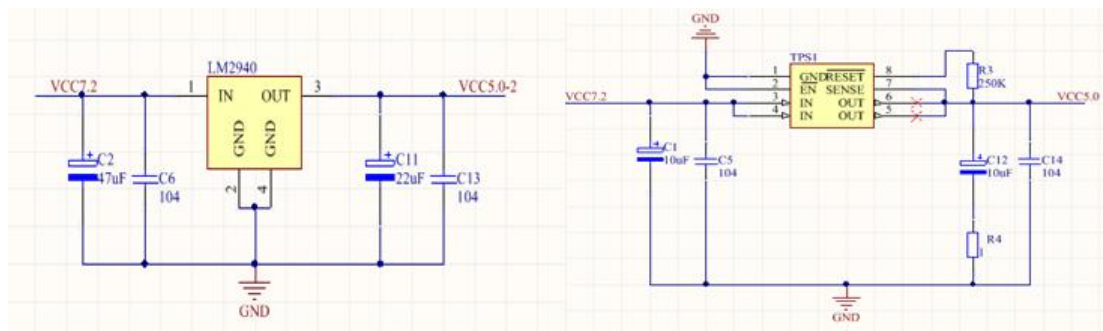


图 3-2 +5V 稳压原理图

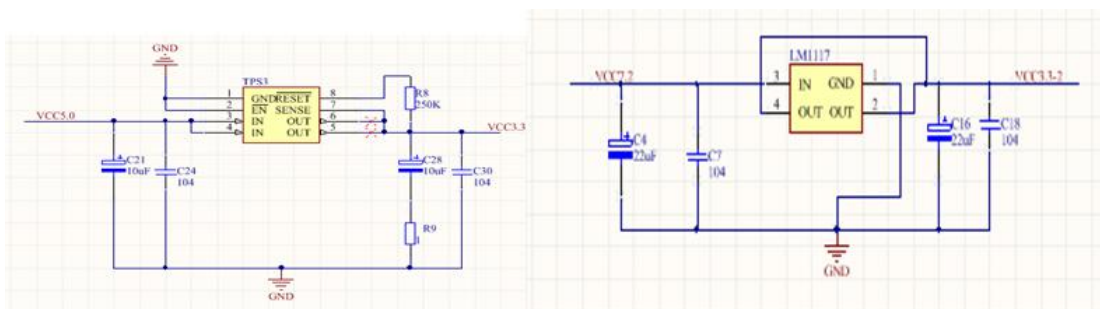


图 3-3 +3.3V 稳压原理图

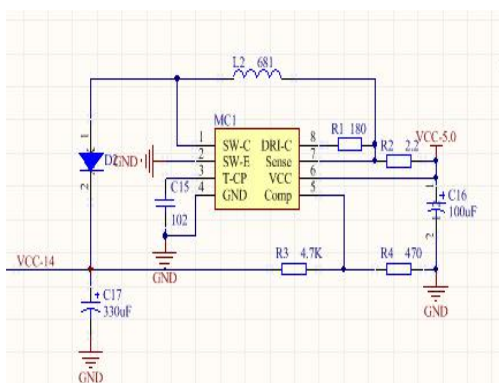


图 3-4 +12V 稳压原理图

3.2.3 舵机供电电路

舵机额定工作电压为 +5.5V，但实际上超过 6V 也可以工作，而且会一定程度上提升响应速度，因此有些学校直接采用电池电压给舵机供电。但考虑到舵机自身的安全，我们选用大电流可调稳压芯片 TL1963 给舵机供电。该芯片最大电流可达 1.5A，足以满足舵机的供电需要。其原理图如图 3-5 所示。

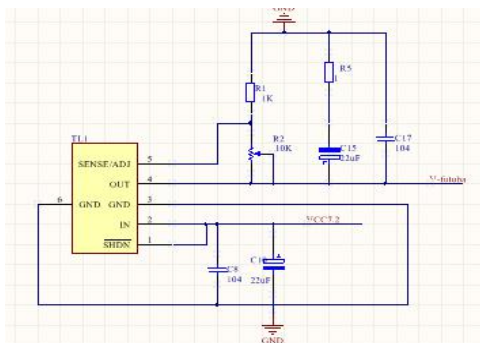


图 3-5 舵机供电电路

3.2.4 电机驱动电路

电机驱动板为两个由分立元件制作的直流电动机可逆双极型桥式驱动器，其功率元件由 8 只 N 沟道功率 MOSFET 管组成，额定工作电流可以轻易达到 100A 以上，大大提高了电动机的工作转矩和转速。该驱动模块主要由以下部分组成：PWM 号输入接口、IR2104 控制电路、电源电路、功率 MOSFET 管栅极驱动电路、桥式功率驱动电路等。其中 IR2104 自带死区控制，电源电路采用上述的 12V 升压和电源电压，驱动电路如图 3-6 所示。

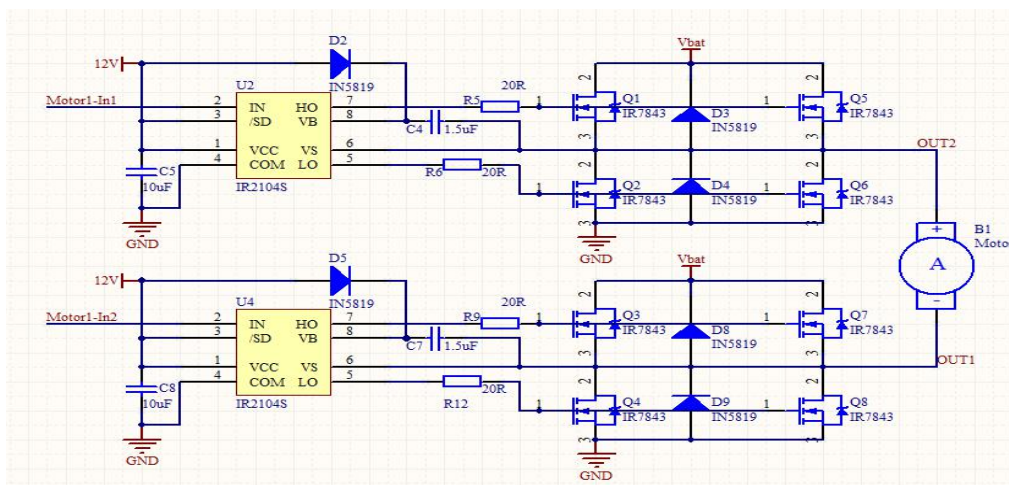


图 3-6 驱动电路

3.2.5 拨码开关、按键及显示屏电路

主板上还包括拨码开关电路和按键电路，其原理图 3-7。

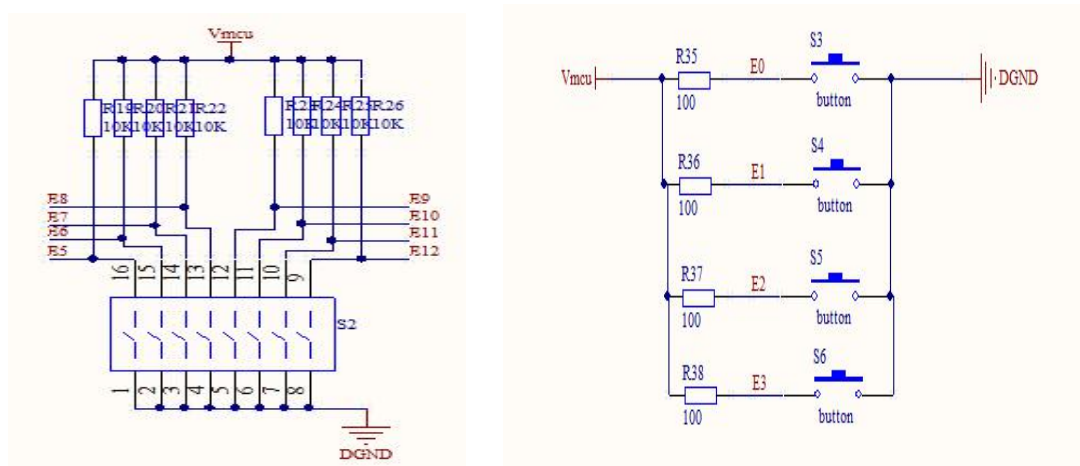


图 3-7 拨码开关与按键电路

3.2.6 其他电路模块

主板上还包括各种模块的接口电路，如超声波模块、陀螺仪模块、LCD 显示屏模块，蓝牙模块，由于只是预留的接口电路，在这里不做详细说明

第四章 软件系统设计及实现

高效的软件程序是智能车高速平稳自动寻线的基础。我们设计的智能车系统采用 CMOS 摄像头进行硬件二值化，DMA 图像采集，边线提取，赛道识别。在智能车的转向和速度控制方面，我们使用了鲁棒性很好的经典 PID 控制算法，配合使用理论计算和实际参数补偿的办法，使智能车能够稳定快速寻线。

4.1 赛道双边线提取及优化处理

4.1.1 原始图像的特点

在单片机采集图像信号后需要对其进行处理以提取主要的赛道信息，同时，由于十字、起点线的存在，光线、赛道远处图像不清楚的干扰，图像效果会大打折扣。因此，在软件上必须排除干扰因素，对赛道进行有效识别，并提供尽可能多的赛道信息供决策使用。在图像信号处理中我们提取的赛道信息主要包括：赛道两侧边沿点位置，赛道边沿点附近的原始像素值，赛道类型。

由于摄像头自身的特性，图像会产生梯形式变形，以及筒形失真尤其在 ov7620 的上下左右各个角落处桶形失真和梯形失真叠加，导致图像畸变严重，因此在数据采集时我们只采集半幅图像，也就是中心上下处的图像，这样几乎不存在筒形失真。

摄像头采集到几种典型赛道图像如图 4-1～图 4-3 所示。



图 4-1 连续弯原始图像



图 4-2 弯道原始图像



图 4-3 十字交叉弯道原始图像

4.1.2 赛道提线

边沿提取算法的基本思想如下：

- (1) 逐行扫描最近处的原始图像，根据设定的阈值提取黑白跳变点；
 - (2) 利用赛道的连续性，根据上一行黑点的位置来确定本行的边沿点；
 - (3) 在弯道的时候赛道有回拐的情况，所以提取本行边沿之前还要向前搜索回拐的边沿点；
 - (4) 求边沿点时，因为近处的图像稳定，远处图像不稳定，所以采用由近及远的办法；
 - (5) 进出十字的时候，有可能错误的提线，因此要将直角以后的线滤除；
- 边沿提取算法的程序流程如图 4-4 所示。

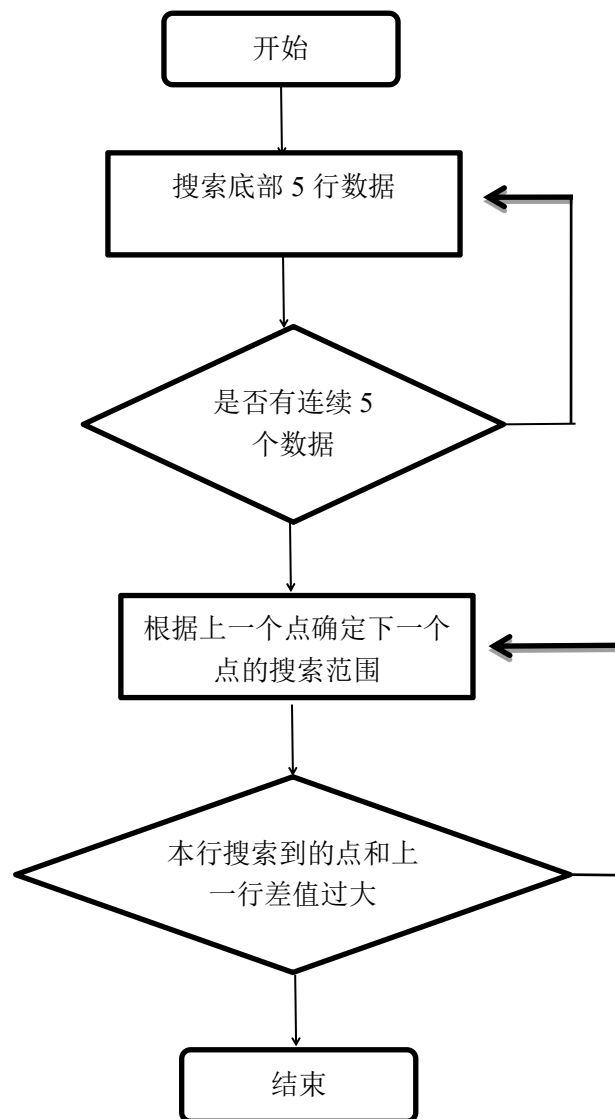


图 4-4 算法流程图

处理后得到的黑线边线如图 4-5 和图 4-6 所示。



图 4-5 连续弯处理后的图像

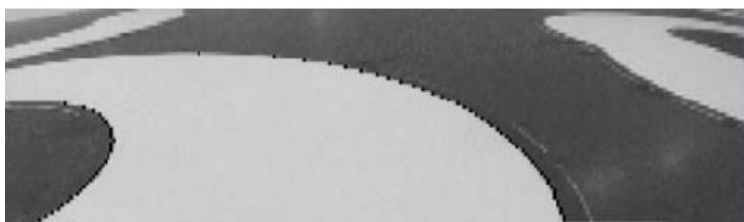


图 4-6 弯道处理后的图像

4.1.3 偏差量的计算

使用前方一定距离的偏差量来控制小车具有较强的鲁棒性。其思想很简单。有的队伍加上了斜率，我们测试发现远处斜率较为不稳定，最后还是放弃了斜率算法，使用较为稳定的偏差算法。

在获得偏差前要先标定赛道边沿，我们将车放在直道上，标定出标准的左右边线。之后通过取到的左线和左标准边线作差，取到的右边线和右标准线作差得出前方一定距离处的偏差量，用作后期控制等算法。

在选用多少距离范围的数据用作偏差量也很重要。在直道上由于速度较快，要选取远处的偏差，防止来不及转向，当在弯道内，由于视野有限，应该尽量使用能采集到的最远的数据段，这样能在连续弯的切换上较为流畅，在回环弯道上较为稳定。

4.1.4 路径选择

根据往届比赛的经验，赛车能否以最短的时间完成比赛，与赛车的速度和路径都有着密切的关系，因此，如何使赛车以一个最合理、最高效的路径完成比赛是提高平均速度的关键。

对于赛车路径的优化，不能仅在匀速下调节转弯系数，应该将变速考虑进去。我们调节路径的方法是在慢速匀速情况下调出一套较为切弯的 PD 系数，慢慢的提高匀速的速度。由于在弯道内前瞻量有限，在提速的过程中不可避免的会出现反应迟钝，此时就停止调节转向参数。此时获得了这套转向参数的可用速度范围，在此基础上添加变速程序，以起到稳定并且高速的效果。

4.2 PID 控制算法介绍

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制，又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史，它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象的结构和参数不能完全掌握，或得不到精确的数学模型时，控制理论的其它技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时，最适合用 PID 控制技术。PID 控制，实际中也有 PI 和 PD 控制^[2]。

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值与实际输出值构成控制偏差。将偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，故称 PID 控制器^[3]，原理框图如图 4-7 所示。

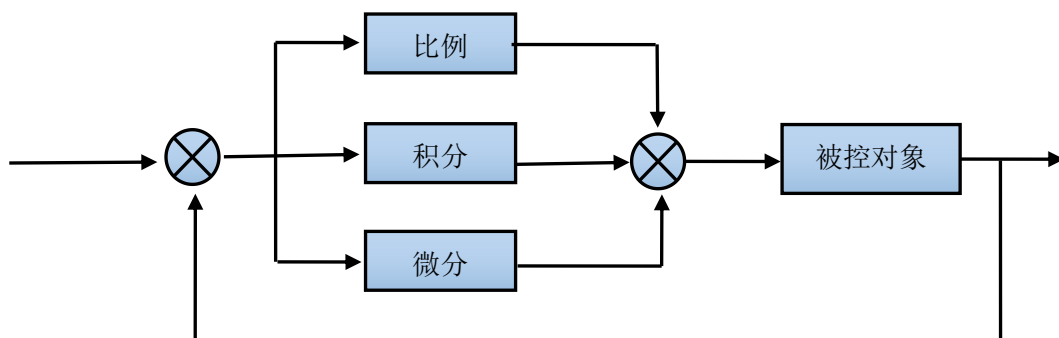


图 4-7 PID 控制器

在计算机控制系统中，使用的是数字 PID 控制器，控制规律为：

$$e(k) = r(k) - c(k) \quad (1)$$

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_I} (\sum_{j=0}^k e(j)) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (2)$$

(1)、(2)式中：

k --采样序号， $k=0,1,2,\dots$

$r(k)$ --第 k 次给定值；

$c(k)$ --第 k 次实际输出值；

$u(k)$ --第 k 次输出控制量；

$e(k)$ -- 第 k 次偏差;

$e(k-1)$ -- 第 $k-1$ 次偏差;

K_p --比例系数;

T_i --积分时间常数;

T_D --微分时间常数;

T --采样周期。

简单说来, PID 控制器各校正环节的作用如下:

比例环节: 及时成比例地反映控制系统的偏差信号, 偏差一旦产生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。

积分环节: 主要用于消除静差, 提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数, 越大, 积分作用越弱, 反之则越强。

微分环节: 能反映偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在该偏差信号变得太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减小调节时间。

数字 PID 控制算法[4]通常分为位置式 PID 和增量式 PID 控制算法。

4.2.1 位置式 PID

位置式 PID 中, 由于计算机输出的 $u(k)$ 直接去控制执行机构(如阀门), $u(k)$ 的值和执行机构的位置(如阀门开度)是一一对应的, 所以通常称公式(2)为位置式 PID 控制算法。位置式 PID 控制算法的缺点是: 由于全量输出, 所以每次输出均与过去的状态有关, 计算时要对过去 $e(k)$ 进行累加, 计算机工作量大; 而且因为计算机输出的 $u(k)$ 对应的是执行机构的实际位置, 如计算机出现故障, $u(k)$ 的大幅度变化, 会引起执行机构位置的大幅度变化, 这种情况往往是生产实践中不允许的, 在某些场合, 还可能造成严重的生产事故。因而产生了增量式 PID 控制的控制算法, 增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量 $\Delta u(k)$ 。

4.2.2 增量式 PID

当执行机构需要的是控制量的增量(例如: 驱动步进电机)时, 可由公式(1)和(2)推导出提供增量的 PID 控制算式。结果如下:

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= K_p \{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \} \\ &= K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]\end{aligned}\quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned}
\Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\
K_I &= Kp \frac{T}{T_I} \\
K_D &= Kp \frac{T_D}{T}
\end{aligned} \tag{4}$$

公式(4)称为增量式 PID 控制算法，可以看出由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期 T，一旦确定了 KP、TI、TD，只要使用前后三次测量值的偏差，即可由公式 3 求出控制增量。

增量式 PID 具有以下优点：

- (1) 由于输出增量，所以误动作时影响小，必要时可用逻辑判断的方法关掉。
- (2) 手动/自动切换时冲击小，便于实现无扰动切换。此外，当计算机发生故障时，由于输出通道或执行装置具有信号的锁存作用，故能保持原值。

(3) 算式中不需要累加。控制增量 $\Delta u(k)$ 的确定仅与最近 k 次的采样值有关，所以更容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

但增量式 PID 也有其不足之处：积分截断效应大，有静态误差；溢出的影响大。使用时，常选择带死区、积分分离等改进 PID 控制算法。

4.2.3 微分先行 PID

由于智能车在跑道上行驶时，经常会遇到转弯的情况，所以智能车的速度设定值和方向设定值都会发生频繁的变化，从而造成系统的振荡。为了解决设定值的频繁变化给系统带来的不良影响，本文在智能车的速度和方向控制上引入了微分先行 PID 算法，其特点是只对输出量进行微分，即只对速度测量值和舵机偏转量进行微分，而不对速度和方向的设定值进行微分。这样，在设定值发生变化时，输出量并不会改变，而被控量的变化相对是比较缓和的，这就很好地避免了设定值的频繁变化给系统造成的振荡，明显地改善了系统的动态性能。算法如公式(4)。

$$\Delta u(k) = Kp[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) - K_d[c(k) - 2c(k-1) + c(k-2)] - K_d[c(k) - c(k-1)] \tag{5}$$

4.2.4 PID 参数整定

PID 控制器参数选择的方法很多，例如试凑法、临界比例度法、扩充临界比例度法

等。我们一般选择相对操作简单的试凑法。

一般试凑法确定参数的步骤如下：

(1)确定比例系数 K_p

确定比例系数 K_p 时，首先去掉 PID 的积分项和微分项，可以令 $T_i=0$ 、 $T_d=0$ ，使之成为纯比例调节。输入设定为系统允许输出最大值的 60%~70%，比例系数 K_p 由 0 开始逐渐增大，直至系统出现振荡；再反过来，从此时的比例系数 K_p 逐渐减小，直至系统振荡消失。记录此时的比例系数 K_p ，设定 PID 的比例系数 K_p 为当前值的 60%~70%。

(2)确定积分时间常数 T_i

比例系数 K_p 确定之后，设定一个较大的积分时间常数 T_i ，然后逐渐减小 T_i ，直至系统出现振荡，然后再反过来，逐渐增大 T_i ，直至系统振荡消失。记录此时的 T_i ，设定 PID 的积分时间常数 T_i 为当前值的 150%~180%。

(3)确定微分时间常数 T_d

微分时间常数 T_d 一般不用设定，为 0 即可，此时 PID 调节转换为 PI 调节。如果需要设定，则与确定 K_p 的方法相同，取不振荡时其值的 30%。

(4)系统空载、带载联调对 PID 参数进行微调，直到满足性能要求。

4.3 转向舵机的 PD 控制效果

对于舵机的闭环控制，我们采用了位置式 PID 控制算法，根据往届的技术资料 and 实际测试，将每场图像的黑线中心加权平均值与舵机 PID 参考角度值构成一次线性关系。

在较低速(2m/s 以下)试验时，在偏离黑线很少的某个范围，将 K_p 直接置零，在偏离黑线较少的某个范围，将 K_p 值减小为原来的一半，在偏离较大的其他情况，则保持 K_p 原来的大小。取得的实际效果在弯道较多、直道较短的赛道上，车子转弯流畅，直道也能基本保持直线加速，车身左右抖动较小。

在提高车速至高速(2.5m/s 以上)时，我们发现车身在直道上特别是长直道上时，车身左右震荡比较严重，究其原因，硬件上，我们认为首先是轮轴本身的松动并且转向机构左右转向性能可能存在不对称性，设计有待改进，软件上，则是自身编写的 PID 舵机控制还不够精细，动态适应能力不够。在从弯道到直道的过程中，由于小车寻赛道本

质上是一个随动系统，积分项在弯道累积的偏差错误地加在直道的跟踪上，造成在进入直道时转向不够准确，跑直道时虽然能跟踪黑线，但是转向调整往往超调，导致车身在直道上左右震荡，这种震荡严重影响了车的整体速度。此外，我们对 S 弯的控制也过于简单，没有特别的处理，导致车在跑 S 弯的时候，几乎完全沿弯走，没有明显的直冲 S 弯的效果，原因是在前瞻有限的情况下，在采集的图像中 S 弯入弯和普通弯道是一样的，导致小车开始转向，由于中间一直检测到弯道，小车会沿 S 弯道左右震荡，同时相应会减速。对此我们采用的策略是根据远处曲线的变化率对 K_p 进行修正，使得路径得到优化。

4.4 驱动电机的 PID 控制效果

对于速度控制，我们采用了增量式 PID 控制算法，基本思想是直道加速，弯道减速。经过反复调试，将每场图像得到的黑线位置与速度 PID 参考速度值构成二次曲线关系。在实际测试中，我们发现小车直道和弯道相互过渡时加减速比较灵敏，与舵机转向控制配合得较好。

第五章 系统开发及调试

5.1 开发工具

程序开放在 IAR Embedded Workbench IDE 下进行，Embedded Workbench for ARM 是 IAR Systems 公司为 ARM 微处理器开发的一个集成开发环境(下面简称 IAR EWARM)。比较其他的 ARM 开发环境，IAR EWARM 具有入门容易、使用方便和代码紧凑等特点。EWARM 中包含一个全软件的模拟程序(simulator)。用户不需要任何硬件支持就可以模拟各种 ARM 内核、外部设备甚至中断的软件运行环境。从中可以了解和评估 IAR EWARM 的功能和使用方法。其操作界面如图 5-1 所示。

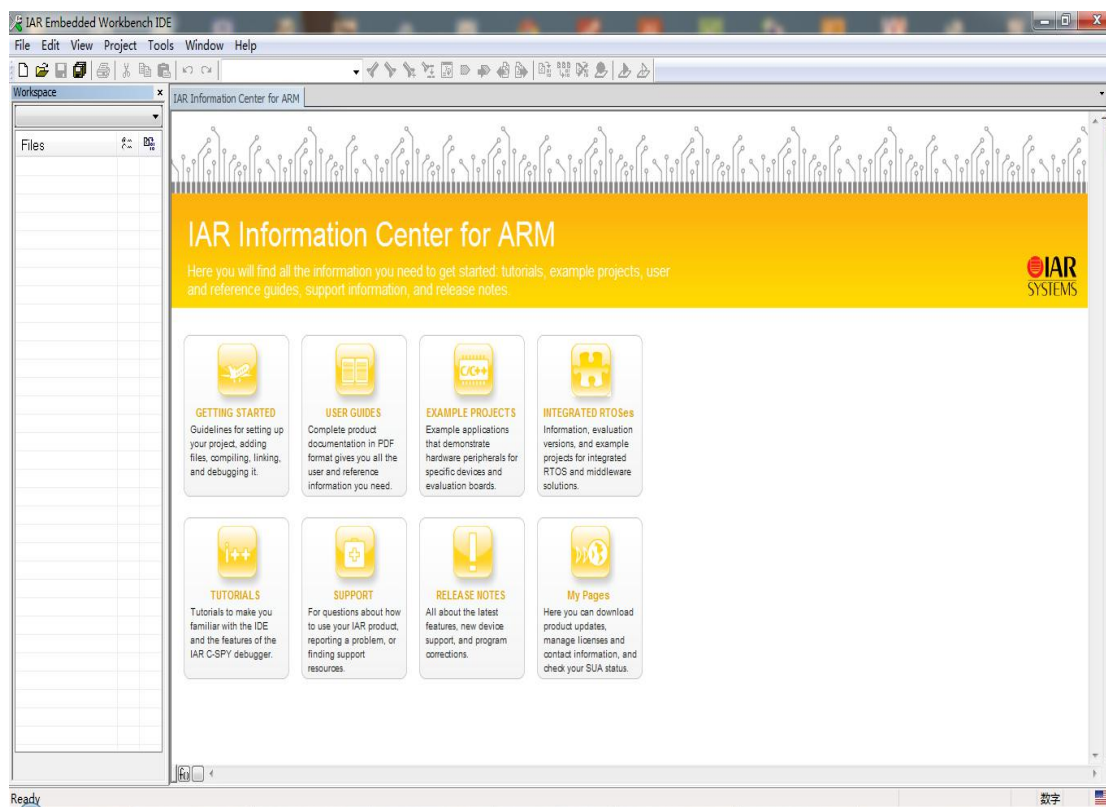


图 5-1 IAR 工作环境

5.2 调试工具

5.2.1 匿名科创地面站

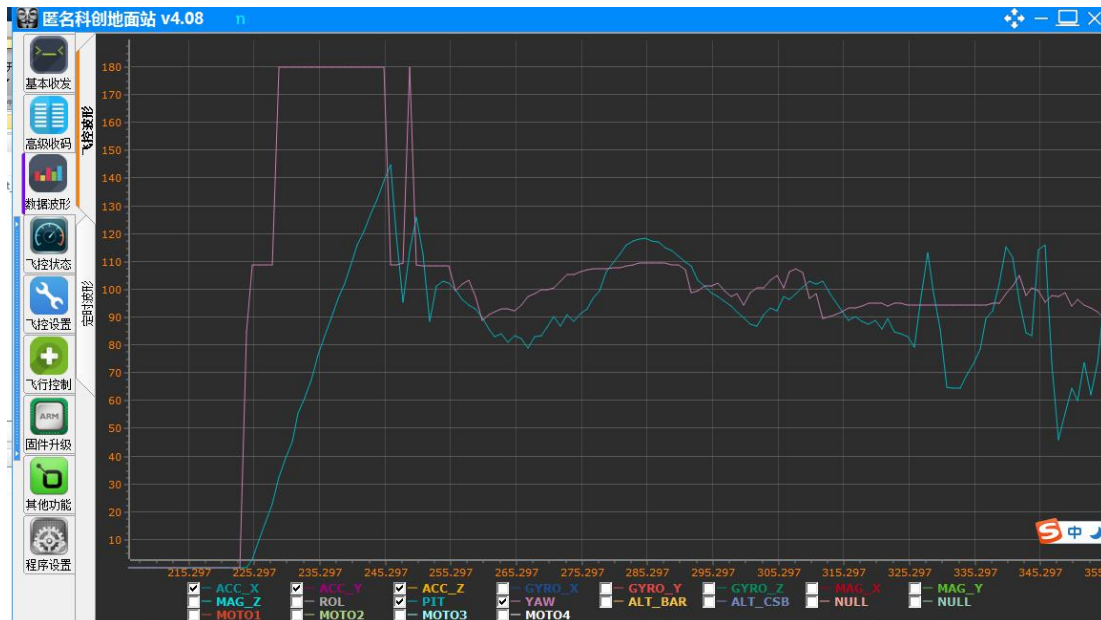


图 5-2 匿名科创地面站工作环境

5.2.2 MATLAB R2014a

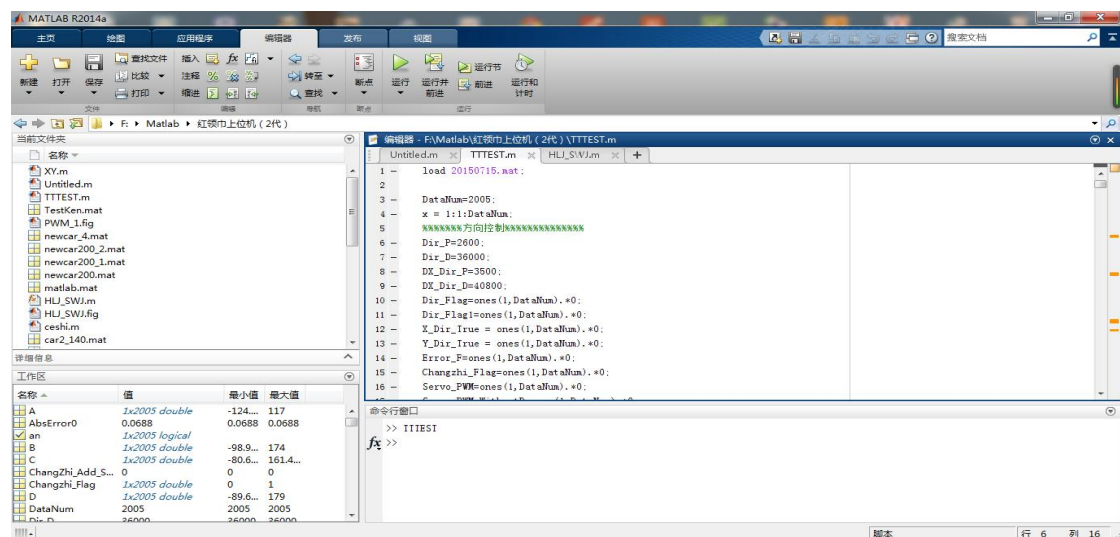


图 5-3 MATLAB R2014a 工作环境

5.3 调试方法

我们做车前期主要利用智能车上的蓝牙发送数据给匿名科创地面站，显示智能车所需数据的波形变化，根据波形曲线分析智能车的行驶情况，之后有针对的对智能车的参数进行修改；再做车后期我们主要利用 Matlab 编写上位机程序，然后通过智能车上的蓝牙发送数据给上位机，在 Matlab 上绘制曲线分析车辆行驶情况，再有针对的对智能车的参数进行修改。

Matlab 上位机使用方法如下：

将主机模块接到电脑 USB 口，运行上位机程序会得到如下界面，请将图 5-4 红色方框内的端口号（可以在电脑的设备管理器查看）选择正确，波特率设置为 115200，然后“打开串口”，在“接收帧数”位置会显示接受的数据总数，接受完成后保存数据。这组数据就保存在了本地电脑，可以随时使用这组数据。



图 5-4 Matlab 上位机界面

第六章 模型的主要技术参数

赛车基本参数	长	32cm
	宽	20cm
	高	39cm
车重		1.2kg
功耗	空载	6w
	带载	大于 10w
传感器	欧姆龙编码器	1 个
	陀螺仪	1 个
	Ov7725 摄像头	1 个
赛道信息检测	视野（近瞻/远瞻）	10/185cm
	精度(近/远)	2/12.5mm
	采集频率	62.5HZ
除了车模原有的驱动电机、舵机之外伺服电机个数		0

第七章 总 结

从参加智能汽车竞赛开始，我们队伍就不断地从查找资料、设计方案、机械改装、编写程序、调试改进一步一步地进行，最后终于完成了最初目标，定下了现在这个设计方案。

在此份技术报告中，我们主要介绍了准备比赛过程中的基本思路，包括机械结构的改进、硬件电路的设计以及最重要的双车控制策略。在机械结构方面，我们尝试了不同的舵机安装方法，最终选择了卧式装法。前轮定位以及在其他细节方面，我们都进行了尝试改装，也深刻意识到前轮定位对 B 车模的影响，此外，我们也进行了一些机械改进，在底盘前方加装导轮，防止底盘与坡道摩擦；底盘加固一块轻质 PCB 板，防止车身不平；在电路设计方面，各模块的供电本着稳定的原则，芯片的选型以低压降为原则，单片机供电采用级联稳压的方式，模拟和数字地进行隔离，经过不断实验，最后决定了我们最终的电路图。在程序方面，我们使用 C 语言编程，利用比赛推荐的开发工具调试程序，经过小不断的改进，最终设计出一套比较通用稳定的程序。在这套算法中，我们进行了大量的 MATLAB 仿真，算法不断改进创新，结合赛道信息调整车速，从而控制后车速度以实现直道加速、弯道减速效果，保证在最短时间内跑完全程。

虽然进行了各种尝试，但是有些问题还是没能找到比较好的解决方案，比如如何消除由于装车过程中无法精确定舵机安放位置而引起的车身左右不对称的因素，由于存在这种不和谐的因素导致我们小车左右的转弯性能以及车的加减速受到限制，从而使得程序的调整变得更为复杂。

在这一年多的备战过程中，场地和经费方面都得到了学校和学院的大力支持，在此特别感谢一直关注和支持智能车比赛的学校和学院领导以及各位指导老师，同时也感谢比赛组委会能组织这样一项有意义的比赛。

参考文献

- [1] 綦声波, 张玲 “飞思卡尔”杯智能车设计与实践. 北京航空航天大学出版社, 2015 年
- [2] 王宜怀, 吴瑾, 蒋银珍 嵌入式系统原理与实践-ARM Cortex-M4 Kinetis 微控制器. 电子工业出版社, 2012.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 电子工业出版社, 2004
- [4] 尹怡欣, 陶永华. 新型 PID 控制及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1998 年.
- [5] 王日明, 廖锦松, 沈柏华. 轻松玩转 ARM Cortex-M4 微控制器——基于 Kinetis K60. 北京航空航天大学出版社, 2014

附录 部分程序代码

```
#include "common.h"

#include "include.h"


int current_car = GREENCAR;//BLACKCAR  && GREENCAR;

float cnst=62;//调鹰眼调阈值

/*****定义存储接收图像的数组 *****/

uint8 imgbuff[CAMERA_SIZE];

Size_t imgsize= {CAMERA_W, CAMERA_H};           //图像大小


float LCD_pagenum=1;

int Open_Ob_Sflag=0;


extern int Flag_5ms;

extern int Flag_20ms;

extern int Flag_50ms;

extern int SWJ_getflag;

void main(void)
{
    all_Init();//初始化

    //调阈值

    SCCB_WriteByte(OV7725_CNST, (uint8)cnst);

    //初始化 LCD 显示位置

    Site_t site1 = {0, 0};

    Size_t Size;           //显示区域图像大小

    Size.H  = LCD_H;
```

```

Size.W = LCD_W;

//配置中断服务函数

set_vector_handler(PORTA_VECTORn , PORTA_IRQHandler);

set_vector_handler(DMA0_VECTORn , DMA0_IRQHandler);

//设置中断优先级

NVIC_SetPriorityGrouping(4);

set_irq_priority(DMA0_VECTORn,0);

set_irq_priority(PORTA_VECTORn,1);

//基本时钟 50ms

set_irq_priority(PIT0_VECTORn,3);

//速度控制 10ms

set_irq_priority(PIT1_VECTORn,4);

//上位机采集数据 5ms

set_irq_priority(PIT2_VECTORn,2);

/*****开机提示*****/

Beep_On();

DELAY_MS(500); //开单片机蜂鸣器响 0.5s

Beep_Off();

while(1)

{

/***** 图像采集一直进行 *****/

get_Img();

deal_Img();

/***** 拨码开关3 使能舵机控制 *****/

if(BoKey3_State == BoKey_Right)

{direction_Control(); }

else

{

```

```

    stop_flag=1;

    Servo_ChangePWM(Servo_Center);

}

/**** 拨码开关 1 显示处理后的图像*****/

if(BoKey1_State == BoKey_Right)

{

    if(stop_flag==1)

        showImg();

}

/***** 拨码开关 2 控制图像显示 *****/

if(BoKey2_State == BoKey_Right&&BoKey5_State != BoKey_Right)

{

    if(stop_flag==1)

    {

        if(BoKey1_State != BoKey_Right)

            ShowCheckLine_X();

        LCD_Img_Binary_Z(site1, Size, imgbuff, imgsize);

    }

    else

    {

        LCD_clear(WHITE);

    }

}

/***** 拨码开关 4 显示变量信息并处理 *****/

if(BoKey4_State == BoKey_Right)

{

    if(stop_flag==1)

    {

```



```

/* 停车的时候处理，行进中略去 */

var_display(VAR_MAX1);    //显示全部

key_IRQHandler();

deal_key_event();        //按键消息处理

SCCB_WriteByte(OV7725_CNST, (uint8)cnst);

}

}

/*****  拨码开关 5 显示变量 *****/

if(BoKey5_State == BoKey_Right)

{

    LCD_Show();

    Key1Mode=1;

}

else

{

    Key1Mode=0;

    LCD_Show1();

}

/*****  拨码开关 6 Matlab 上位机 *****/

if(BoKey6_State == BoKey_Right )    ////////////20ms 发送一次

{

    if(Flag_5ms == 1)

    {

        if(SWJ_SendTime_Standard_Get() < SWJ_SendTime_Max)

        {

            SWJ_Show();

            SWJ_SendTime_Standard_AddOne();

        }

    }

}

```

```
        Flag_5ms=0;
    }
}
else
{
    SWJ_SendTime_Standard_Clear();
}

/**** 拨码开关 7 障碍减速*****/
if(BoKey7_State == BoKey_Right){Open_Ob_Sflag=1;}
else {Open_Ob_Sflag=1;}

/**** 拨码开关 8 初始化 flash*****/
}
}
```