

# 电磁智能小车控制算法设计

唐 昊, 刘海刚, 刘 群, 何国渊  
(五邑大学 信息工程学院, 广东 江门 529020)

**摘 要:** 设计了一台自动识别路径的电磁智能小车。介绍了智能小车控制位置、舵机和电机的算法思想, 提出了基于三次多项式曲线拟合的位置解算算法和阿克曼转向舵机控制算法。该算法采用三次多项式来拟合通电导线周围磁场强度变化曲线, 从而解算出小车相对赛道的偏移距离; 通过阿克曼转向模型计算出转角控制量, 建立转角与舵机 PWM 占空比的关系, 便可控制小车按照预定轨迹稳定行驶。该算法在满足实时性与检测精度的前提下, 对复杂赛道具有很强的适应性。

**关键词:** 三次多项式曲线拟合; 智能车; 电磁导航

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1672-4305.2014.04.017

## Design control algorithms for electromagnetic smart cars

TANG Hao, LIU Hai-gang, LIU Qun, HE Guo-yuan  
(School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

**Abstract:** In this page, the design of an automatic identification path electromagnetic smart car. This page introduces the intelligent car control algorithm of position、steering gear and motor. A robust localization algorithm which is based on tri-polynomial is presented and a “Ackerman steer” control algorithm which is based on steering gear control is presented. A robust localization algorithm which is based on tri-polynomial is presented. It uses tri-polynomial to fit the spatial magnetic field distribution, and then computes the position between the car and wire. Through the Ackerman steering model to calculate the Angle of control volume, set up around the corner and PWM duty ratio, the relationship between the steering gear can control the car according to the desired trajectory stability. The algorithm has very strong adaptability to the complicated match path while satisfying the requirement of real time and detection accuracy.

**Key words:** three polynomial curve fitting; smart car; electromagnetic navigation

用飞思卡尔系列 MC9S12XS128 单片机作为核心控制器, 设计制作了一台智能电磁小车, 提出了单排传感器方案, 对单排传感器的 4 个 X 方向电磁传感器的值进行了三次多项式曲线拟合, 很好地描述了该排传感器所在位置的磁场分布情况<sup>[1]</sup>, 拟合曲线的极大值的位置便是黑线所在位置, 因此算法不依赖于赛道情况, 具有很好的适应性。通过小车的偏移位置求出运动轨迹的曲率, 然后通过阿克曼转

向模型将小车运动轨迹的曲率、小车速度和转角联系起来, 使小车的转向更加精确、运动更加稳定。智能电磁小车模型如图 1 所示。

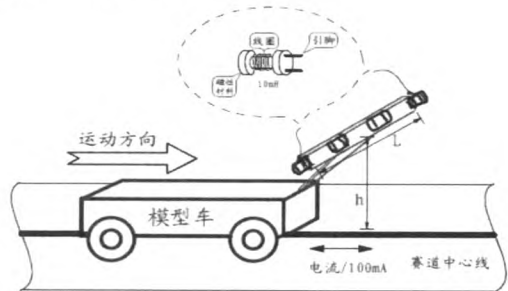


图 1 智能电磁小车模型图

设计智能车软件控制策略的基本原则是: 在保

**基金项目:** 2013 年广东省大学生创新创业训练计划项目  
(五邑大学 86 号)。

**通信作者:** 刘海刚, 指导老师, 高级工程师, 主要从事传感器技术及应用研究, 高教研究。



证智能车能够稳定运行的基础上,尽量做好智能车的路径优化和寻找尽可能大的稳定速度<sup>[2]</sup>。为了方便控制,主函数里面除了初始化和起跑线检测的程序,其他所有的核心操作放在定时中断中处理。画出流程图后,从宏观上来看是两条线同时执行。基于如上原则,智能车软件控制总体流程如图2。

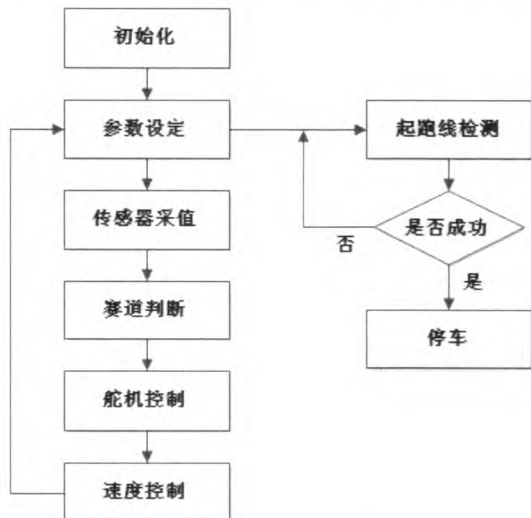


图2 软件控制总流程图

## 1 位置解算算法

位置解算就是要通过传感器检测数值确定当前道路的类型和位置<sup>[3]</sup>。在本文中,提出了一种新的基于三次多项式拟合的位置解算算法,相比于以前的位置解算算法,具有线性度好、精度高,无跳变的优点。

### 1.1 传感器滤波与归一化

#### (1) 滤波

在小车运动中,不可避免的会受到一些干扰,例如传感器的抖动、电机磁场等。为了使单片机从传感器上获得的值全部是来自于赛道的感应电压,在做硬件滤波的同时,也要在软件上进行滤波。在本文中,使用了均值滤波的方法。该方法具有运算速度快,滤波简单效果好等特点<sup>[4]</sup>。其具体的实现方式为:循环对每个传感器各采集10次数据,然后将对应的三次数据叠加后取均值,作为最后的控制量。

#### (2) 归一化

归一化包括传感器标定与数值归一化。单片机读入的数据是电磁线圈放大后的峰峰值,这个电压不仅与小车与赛道中心线之间的距离、导线电流、和传感器高度有关,还与电磁线圈的内阻、放大器的放大倍数、检波电路的损耗有关<sup>[5]</sup>。在正常的情况下,在同一高度同一位置,不同电磁线圈感应的电压值是不一样的,这将对采样值直接计算小车偏移位

置造成一定的误差;在不同赛道中,其导线电流也是不尽相同的,这将对采样值直接计算小车偏移位置造成一定的误差;在小车运动中,由于抖动而产生的传感器高度变化,也会对对采样值直接计算小车偏移位置造成一定的误差。因此,必须要进行传感器的标定与归一化。如图3 标定流程图所示:

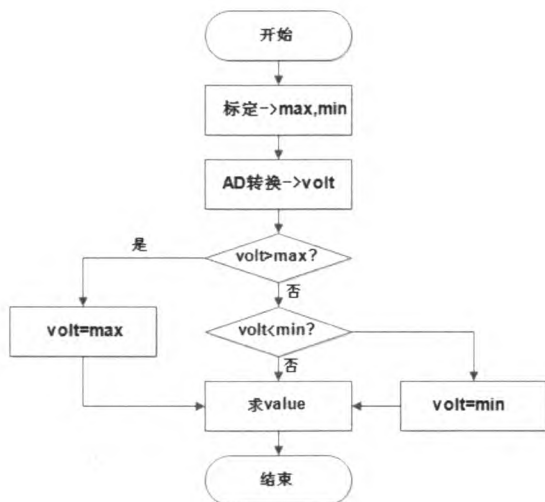


图3 标定流程图

传感器的标定就是获取传感器的转换结果的最大值(max)的过程,主要是为数值归一化作准备,在单片机每次重新上电前都要标定一次,且在小车运动中应动态实现。

若AD转换的值(volt)大于标定的最大值(max),令当前值(volt)等于标定最大值(max);若AD转换的值(volt)小于标定的最小值(min),令当前值(volt)等于标定最小值(min)。

不同传感器的常数系数是不一样的,因此导致在同一高度和同一位置时,传感器感应的数值不同。数值归一化是将所有传感器AD转换的结果归一化到同一尺度,将常数系数约去。将每一个传感器的感应值都归一化到了一个同一的量纲,其值只与传感器的高度与小车的偏移位置有关,与电流大小和传感器内部差异无关<sup>[6]</sup>。

根据归一化公式,求value得值:

$$value = \frac{ad - min}{max - min + 1} \times 100$$

其中ad为当前传感器采集回的值,max是标定的最大值,min是标定最小值。

### 1.2 小车位置解算算法设计

故本文选择三次多项式拟合算法来解算小车位置。三次多项式拟合有四个未知数,需要4个传感器的值来确定其参数。三次多项式具有一个极大值

点与一个极小值点,故无论传感器位于哪个位置,拟合后的曲线总是有极大值,且极大值必定分布在感应值最大的传感器周围<sup>[7]</sup>。

本文将4个X线圈从左至右依次编号,分别为线圈1、线圈2、线圈3和线圈4,以传感器中轴为原点,故4个线圈的X轴左边分别为-10cm、-5cm、5cm、10cm。

由公式:  $ax^3 + bx^2 + cx + d = y$

$$\begin{bmatrix} -1000 & 100 & -10 & 1 \\ -125 & 25 & -5 & 1 \\ 125 & 25 & 5 & 1 \\ 1000 & 100 & 10 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x1value \\ x2value \\ x3value \\ x3value \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1000 & 100 & -10 & 1 \\ -125 & 25 & -5 & 1 \\ 125 & 25 & 5 & 1 \\ 1000 & 100 & 10 & 1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} x1value \\ x2value \\ x3value \\ x3value \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0007 & 0.0013 & -0.0013 & 0.0007 \\ 0.0067 & -0.0067 & -0.0067 & 0.0067 \\ 0.0167 & -0.1333 & 0.1333 & -0.0167 \\ -0.1667 & 0.6667 & 0.6667 & -0.1667 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} x1value \\ x2value \\ x3value \\ x3value \end{bmatrix} \quad (3)$$

故由式(3)可以解算出未知常数系数的值。在解算出常数系数后,解算出小车的位置,就相当于算出三次多项式的极大值。因为单片机没有专门处理数学函数的指令,用求根公式求解极大值会对单片

机造成很大的负担。因此,在本文中,选取了分段搜索的方法求取最大值,其基本的思想是:先找出4个

$$ax_1^3 + bx_1^2 + cx_1 + d = y_1$$

$$ax_2^3 + bx_2^2 + cx_2 + d = y_2 \quad (1)$$

$$ax_3^3 + bx_3^2 + cx_3 + d = y_3$$

$$ax_4^3 + bx_4^2 + cx_4 + d = y_4$$

线圈中的最大值,然后在该线圈周围搜索极大值,该极大值对应的位置就是小车的偏移位置。其流程图如图4:

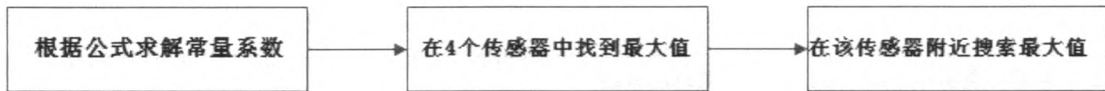


图4 位置算法流程图

```

/* 附上归一化代码 */
Pe[1] = (int16)((inductor[0] - Min[0]) *
100 / (Max[0] - Min[0] + 1));
Pe[2] = (int16)((inductor[1] - Min[1]) *
100 / (Max[1] - Min[1] + 1));
Pe[3] = (int16)((inductor[2] - Min[2]) *
100 / (Max[2] - Min[2] + 1));
Pe[4] = (int16)((inductor[3] - Min[3]) *
100 / (Max[3] - Min[3] + 1));

```

```

/* 计算三次曲线系数 */
a = -0.0007 * Pe[3] + 0.0013 * Pe[4] - 0.0013
* Pe[1] + 0.0007 * Pe[2];
b = 0.0067 * Pe[3] - 0.0067 * Pe[4] - 0.0067
* Pe[1] + 0.0067 * Pe[2];
c = 0.0167 * Pe[3] - 0.1333 * Pe[4] + 0.1333
* Pe[1] - 0.0167 * Pe[2];

```

Pe数组分别是4个电感的value值。Inductor数组分别是4个电感当前AD值。



Max 数组为 4 个电感的标定最大值。Min 数组为 4 个电感的标定最小值。

a,b,c 为三次曲线的系数。

### 1.3 Matlab 仿真

以赛道中心线为参考线,左边为负右边为正。当分别把智能车放在的左边 5cm 时(也就是当第二个电感在电导线的正上方时)和放在电导线的右边 5cm 时(也就是当第三个电感在电导线的正上方时),我们在线通过软件得出当前 a,b,c 的值。

然后我们用 Matlab 仿真出来得出相应的曲线<sup>[8]</sup>。X 轴的值 of 智能车中心与赛道中心线的相对位置差,Y 轴的值 of 归一化 value 的值。如图 5 和 6。

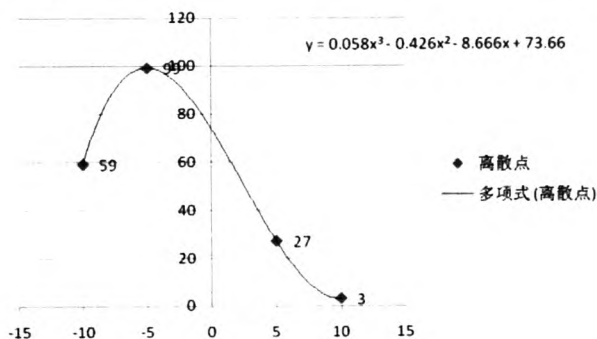


图 5 第二个电感在赛道中心线的正上方时所对应的曲线

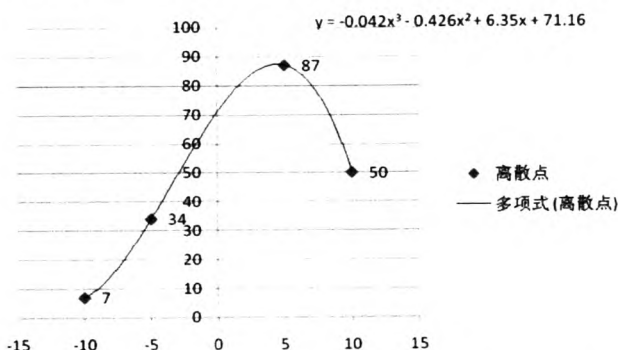


图 6 第三个电感在赛道中心线的正上方时所对应的曲线

图 5,该车的实际偏移位置为-5.0 cm,算法计算的偏移位置为-5.1cm,误差为 0.1cm。

图 6,该车的实际偏移位置为 5.0 cm,算法计算的偏移位置为 5.1cm,误差为 0.1cm。

我们通过实践得出,该算法的精度在 5mm 以上,并且偏移位置越小,误差越小,满足了小车的控制要求。

## 2 舵机控制算法设计

### 2.1 阿克曼转向控制算法

本文采取了基于赛道曲率的“阿克曼转向”控

制算法。该算法通过位置偏差计算出赛道曲率,然后应用“阿克曼转向模型”计算出转角控制量。该转向控制算法能适应各种曲率的赛道,克服了已有方法在大半径赛道中的抖动现象。

对以车速为  $V$  向前行驶的车辆,作用于轮胎所有的侧向力的和等于质量乘以向心加速度,即

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + \left( \frac{W_{fs}}{C_{af}} - \frac{W_{rs}}{C_{ar}} \right) \frac{V^2}{gR} = 57.3 \frac{L}{R} + Ka_y \quad (5)$$

$\delta$  为前轮转向角(deg), $L$  为轴距(m), $V$  为前进速度(m/s), $g$  为重力加速度, $W_{fs}$  为前轴静态载荷, $W_{rs}$  为后轴静态载荷, $C_{af}$  为两个轮胎侧偏刚度, $C_{ar}$  为两个后轮侧偏刚度, $K$  为不足转向梯度常数(deg/g),为侧向加速度。 $L$  是已知量,当小车的速度与  $R$  一定时,与  $\delta$  便可通过测量获得。因此不足转向梯度常数  $K$  便可求得。在本文中,求得的  $K$  值为 1.39。因此,在  $K$  已知的前提下,知道小车运动时的速度  $V$  与前方道路的曲率  $\frac{1}{R}$ ,便可得出小车的期望转角  $\delta$ ;通过建立转角与舵机 PWM 占空比的关系,便可控制小车按照预定轨迹稳定行驶<sup>[9]</sup>。

### 2.2 PID 控制舵机

我们采用了线性 PID 控制舵机。如图 7 所示。

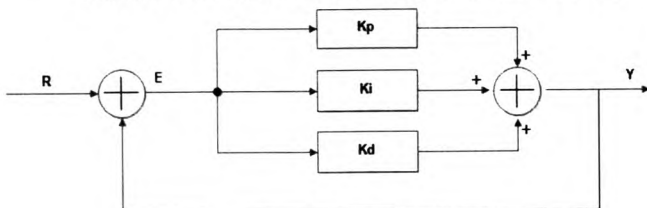


图 7 PID 示意图

比例  $K_p$ :比例项部分其实就是对预设值和反馈值差值的放大(是否放大)倍数。 $K_p$  越大,系统的响应速度越快,调节精度越高,但是容易产生超调,超过一定范围会导致系统振荡加剧甚至不稳定。

积分  $K_i$ :顾名思义,积分项部分其实就是对预设值和反馈值之间的差值在时间上进行累加。 $K_i$  越大,系统的静态误差消除越快,但是容易在初期产生积分饱和现象,从而引起响应过程的较大超调。

微分  $K_d$ :微分项部分其实就是求电机转速的变化率。也就是前后两次差值的差而已。 $K_d$  的作用是在回应过程中抑制偏差向任何方向的变化,对偏差变化进行提前预测。但是会使响应过程提前制动,从而延长调节时间。

舵机控制我们使用的是位置式 PD,舍弃了 I 环节,避免了因为转向不及时导致的滞后作用<sup>[10]</sup>。

/\* PID 控制舵机代码 \*/



$Steer = steermid + (K_p * position[0] + k_d * (position[0] - position[1]));$

其中 Steer 为控制器输出的 PWM 信号,steermid 为舵机中值时的 PWM 信号,position[0] 为当前赛道曲率,position[1] 为上一次的赛道曲率。

### 3 电机控制算法设计

#### 3.1 PID 控制电机

由于外界原因,小车的实际速度有时不稳定,要让小车以最快时间达到目标速度且稳定下来,必须要用到 PID<sup>[11]</sup>。基于光电编码器的速度检测系统,可以实现速度的闭环控制。具体的控速方法使用了增量式 PID 控制。电机控制流程图如图 8 所示。



图 8 电机控制流程图

/\* PID 控制电机代码 \*/

```
Speedsum = S_Kp * (e_speed[0] - e_speed[1]) + S_Ki * e_speed[0] + S_Kd * (e_speed[0] - 2 * e_speed[1] + e_speed[2]);
```

其中 e\_speed[0] 储存本次速度值, e\_speed[1] 为前一次速度值, e\_speed[2] 为前两次速度值。

其中 S\_Kp, S\_Ki, S\_Kd 需不断尝试, 找到合适的值。

#### 3.2 PID 调试原则和步骤

原则:

- (1) 在输出不振荡时, 增大比例增益 S\_Kp
- (2) 在输出不振荡时, 减小积分时间常数 S\_Ki
- (3) 输出不振荡时, 增大微分时间常数 S\_Kd

参数调整步骤:

- (1) 确定比例增益 S\_Kp
- (2) 确定积分时间常数 S\_Ki
- (3) 确定微分时间常数 S\_Kd

(4) 系统空载、带载联调, 再对 PID 参数进行微调, 直至满足要求

### 4 结语

本文讨论了自动识别路径的电磁智能小车系统设计, 提出了使用三次多项式拟合算法来解算智能车的偏移位置的算法, 解决了之前所用方法对复杂赛道适应能力不强、精度不高的缺点。使用“阿克曼转向模型”来实现小车的转向控制。该转向控制算法能适应各种曲率的赛道, 克服了已有方法在大半径赛道中的抖动现象, 提高了小车的精度。通过测试以及参加飞思卡尔智能车比赛证明本算法的设计是合理的, 也大大提高了小车运行的速度。

#### 参考文献 (References):

- [1] 张昊颢, 马旭, 卓晴. 基于电磁场检测的寻线智能车设计[J]. 电子产品世界, 2009, 11: 48-50.
- [2] 李涵武, 崔宏耀, 张娜伟, 等. 基于电磁场检测的智能寻迹模型车设计[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版) 2011, 25(2): 23-25.
- [3] 李仕伯, 马旭, 卓晴. 磁场检测的寻线小车传感器布局研究[J]. 电子产品世界, 2009(12): 41-44.
- [4] (美)冈萨雷斯, (美)伍兹著, 阮秋琦等译. 数字图像处理(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011
- [5] 陈军, 高雅. 电磁智能车二值离散式磁场检测系统设计[J]. 洛阳师范学院学报, 2013, 32(8): 21-23
- [6] 杨翌. 智能车算法的简单研究[J]. 硅谷, 2013, 132(12): 59, 35.
- [7] 廖秋明. 三次参数曲线拟合算法的优化研究[J]. 肇庆学院学报, 2001, 22(2): 98-101.
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [9] 曾锦锋, 陈晨, 杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 13-16, 19.
- [10] 杨雪, 高成恩, 高攀, 等. 基于电磁场检测的寻迹智能车系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011(12): 61-64.
- [11] 徐莺. 基于间接 PID 的智能车控制算法研究[J]. 湖北广播电视大学学报, 2008, 28(05): 155-156.

收稿日期: 2014-02-17

修改日期: 2014-04-18

作者简介: 唐昊(1992-), 男, 广东深圳人, 在读本科生, 主要从事传感器及智能控技术研究。

一项工程科技创新, 可以催生一个产业, 可以影响乃至改变世界。袁隆平院士的团队发明了杂交水稻, 促进中国粮食亩产提升到 800 公斤以上, 不仅为中国解决 13 亿多人口吃饭问题作出了突出贡献, 而且推广到印度、孟加拉国、印度尼西亚、巴基斯坦、埃及、马达加斯加、利比里亚等众多国家, 使那些地方的水稻产量提高 15%~20%, 为人类保障粮食安全、减少贫困发挥了重要作用。

——摘自: 习近平在 2014 年国际工程科技大会上的主旨演讲