

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.011

# 基于模糊 PID 的电磁循迹小车控制系统

朱里红<sup>1</sup>, 王定文<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000;  
2. 珠海市长陆工业自动控制系统有限公司, 广东 珠海 519090)

**摘要:** 为达到速度和转角协调控制的目的, 提出自适应模糊 PID 控制算法。电磁循迹小车系统以 MK60N512VMD100 微控制器为核心控制单元, 通过 LC 谐振电路检测赛道中心线感应电动势来判断车身姿态, 实现舵机转动角度的控制, 并通过光电编码器实时检测车速来控制电机的转速。结果表明: 该算法能保证小车在路径最优、速度最快的状态下跑完全程, 使小车电机速度和舵机转角达到最佳配合。

**关键词:** 电磁循迹小车; 模糊 PID 控制; MK60N512VMD100

**中图分类号:** TP273+.4 **文献标志码:** B

## Control System of Electromagnetic Tracking Car Based on Fuzzy PID

Zhu Lihong<sup>1</sup>, Wang Dingwen<sup>1,2</sup>

(1. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China;  
2. Zhuhai Changlu Industrial Automatic Control System Co., LTD, Zhuhai 519090, China)

**Abstract:** In order to reach the goal of coordinated control of the speed and angle of car, the adaptive fuzzy PID control algorithm is proposed. The control system of an electromagnetic tracking car is based on the core control unit of MK60N512VMD100 MCU, the posture of car must be judged by the electromotive force of the center line of the racetrack in the LC resonance circuit for realizing the control of the angle of servo rotation, and the speed of car must be detected by the photoelectric encoder. The results show that the car can complete the whole with the conditions of the optimal path and the fastest, and the optimum match between the speed and the angle was obtained.

**Keywords:** electromagnetic tracking car; fuzzy PID control; K60N512VMD100

### 0 引言

电磁循迹小车以一条直径为 0.1~1.0 mm, 并通有 20 kHz, 100 mA 交变电流的漆包线作为导航引导线, 小车需要以引导线周围的电磁场分布规律和通过 LC 谐振回路传感器采集到的信号作为判定小车相对位置的依据<sup>[1]</sup>。由于规定电磁循迹小车没有赛道宽度限, 但要求小车通过特定路段标志, 由此可以看出路径规划策略尤为重要, 也就是在保证有路标的地方顺利通过, 在没有路标的地方完全可以按最优化或者说捷径的路线前行。为实现小车平稳、高速以及时间最短跑完整赛道, 在准确检测赛道的基础上, 笔者分别设计小车电机速度、舵机转角自适应的模糊 PID 控制, 在速度最快要求下, 实现两者的优化控制。

### 1 总体设计方案

电磁循迹小车系统根据电磁传感器和超声波模块采集数据, 通过核心控制单元对每一路传感器的数据综合分析, 确定小车姿态和运动情况, 通过控

制舵机和电机调整小车状态, 整体设计方案如图 1。

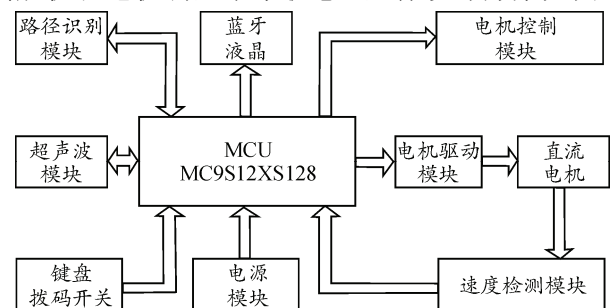


图 1 系统总体设计

### 2 小车姿态分析

#### 2.1 电感传感器工作原理

假定导线中通有恒定电流  $I$ , 由物理知识可知, 图 2 中  $P$  处的磁感应强度  $B$  可表示<sup>[2-3]</sup>为

$$B = \oint dB = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (1)$$

其中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$ , 假设导线无限长, 则  $\theta_1$  与  $\theta_2$  可以分别近似等于 0 和  $\pi$ ; 因此, 可以得到与导线相距  $r$  处的磁感应强度为

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2015-11-26

基金项目: 成都理工大学工程技术学院教育教学改革项目资助(2014-YY-JG11)

作者简介: 朱里红(1979—), 男, 硕士, 讲师, 从事冶金节能技术和智能控制技术的研究。

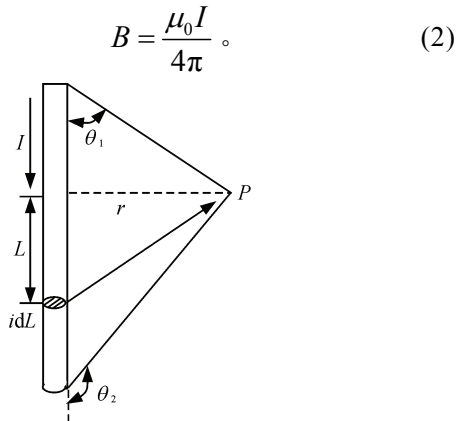


图 2 通电直导线恒电流磁场

为方便讨论赛道中磁场的分布，在小车赛道上建立图 3 所示的坐标系。

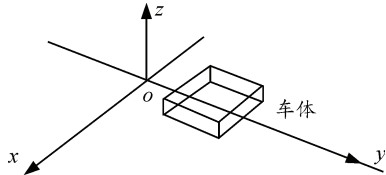


图 3 赛道坐标系建立示意图

感应线圈水平放置和竖直放置离地面高度为 5、8 和 10 cm，强度分布图如图 4、图 5 所示。

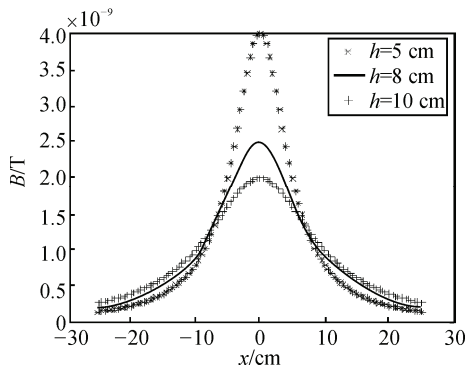


图 4 水平线圈磁感应强度分布图

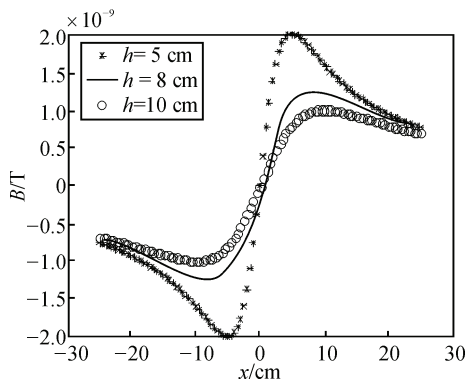


图 5 竖直线圈磁感应强度分布图

根据右手定则可知：处于 y 轴方向的磁感应 B 的强度可以忽略不计，所以智能小车线圈中磁感应电动势可以表示为

$$E = -\frac{d\phi(t)}{dt} = (NA) \times (\mu_0 \mu) \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

引导信号线中所通电流频率比较低，而且所采用的传感器截面较小，可以将传感器感应到电动势 E 近似为

$$E = -\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{k dI}{r dt} \quad (4)$$

其中 k 是与电磁传感器线圈匝数、截面积及线圈摆放方式等相关的常量。

### 2.2 车身定位

根据图 4 所知：水平线圈磁感应强度曲线关于 y 轴对称，离地面越近，强度越高，反之越低。由于水平电感线圈对较远处道路状况相对比较敏感，虽能区分相对于赛道的远近，但却难以判定小车的左右。为此，在 x 轴方向上再添加一对水平电感，利用两电感的采值电动势的和与差来判定小车当前姿态。两水平电感中电磁感应强度的差值(右-左)与和值如图 6、图 7 所示。

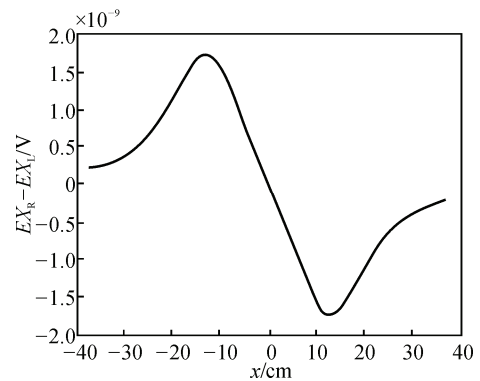


图 6 电动势差值(右-左)

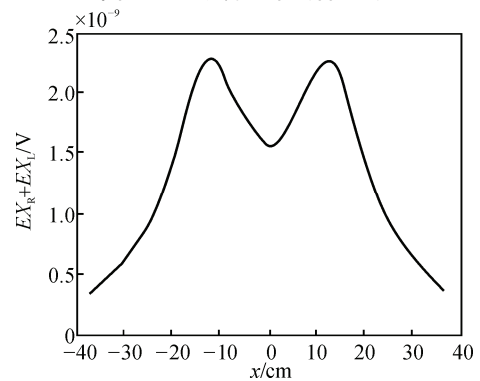


图 7 电动势和值

依据图 6 和图 7 所示，根据两水平电感的和值与差值可以比较容易判断小车在赛道所处的位置。然而，仅有两水平电感却不能区分直角、弯道，为了能及时准确地判断，必须在 y 轴方向添加一对电感，根据两对电感采集回来的差值与和值可以完成电机和舵机的控制策略设计。

### 3 模糊 PID 控制器设计

由于该模糊控制器主要是根据速度和转角的偏差与偏差变化率调整控制器的参数，采用的是 2 输入 3 输出的结构<sup>[4-5]</sup>，如图 8 所示。

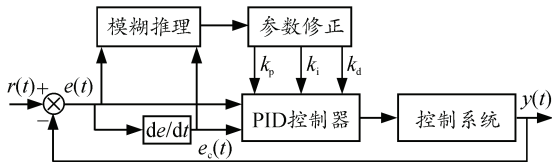


图 8 模糊 PID 控制器结构

离散 PID 控制算法：

$$u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (5)$$

在模糊 PID 中计算 3 个输出参数的增量后，根据下面的公式计算当前时刻 PID 控制器控制参数：

$$\left. \begin{aligned} k_p(k) &= k_{p0} + \Delta k_p(k) \\ k_i(k) &= k_{i0} + \Delta k_i(k) \\ k_d(k) &= k_{d0} + \Delta k_d(k) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

建立隶属函数：基于系统实用性方面的考虑，将所输入、输出变量模糊集都定义为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。同时，将两输入量和输出变量中的  $k_d$  模糊论域分别定义为 [-3, 3]，输出变量  $k_p$  和  $k_i$  模糊论域分别定义为 [-0.3, 0.3] 和 [-0.06, 0.06]。

表 1  $\Delta k_p$  的模糊控制规则

| $e_c$ | $e$ |    |    |    |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|
|       | NB  | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB    | PB  | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM    | PB  | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS    | PM  | PM | PM | PS | ZO | NS | NS |
| ZO    | PM  | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS    | PS  | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM    | PS  | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB    | ZO  | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

表 2  $\Delta k_i$  的模糊控制规则

| $e_c$ | $e$ |    |    |    |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|
|       | NB  | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB    | NB  | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM    | NB  | NB | NM | NS | NS | ZO | ZO |
| NS    | NB  | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| ZO    | NM  | NM | NS | ZO | PS | PM | PM |
| PS    | NM  | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM    | ZO  | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB    | ZO  | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |

表 3  $\Delta k_d$  的模糊控制规则

| $e_c$ | $e$ |    |    |    |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|
|       | NB  | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB    | PS  | NS | NB | NB | NB | NM | PS |
| NM    | PS  | NS | NB | NM | NM | NS | ZO |
| NS    | ZO  | NS | NM | NM | NS | NS | ZO |
| ZO    | ZO  | NS | NS | NS | NS | NS | ZO |
| PS    | ZO  | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO |
| PM    | PB  | NS | PS | PS | PS | PS | PB |
| PB    | PB  | PM | PM | PM | PS | PS | PB |

建立模糊控制规则：自适应模糊 PID 模糊控制器的 3 个输出参数  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  相关的模糊控制规则分别定义为表 1~表 3。

去模糊化：采用重心法将模糊的 PWM 信号转换为精确的控制量。

### 4 控制系统设计

为提高小车平均速度，使其在较短的时间内完成预定的赛道，速度控制至关重要。但小车在行驶过程中路径选择的好坏，不仅决定了小车的平均速度，而且容易出现小角度的过冲、响应不及时等情况，尤其对于高速行驶的小车来说，在弯道处极容易出现犯规，达不到理想的效果；因此，必须通过良好的控制策略使舵机和电机配合控制，根据传感器传回的信息判定赛道情况，制定最优的速度值和转角值。基于此，笔者采用模糊 PID 进行速度控制和舵机转角控制，其控制流程图<sup>[6]</sup>如图 9、图 10。

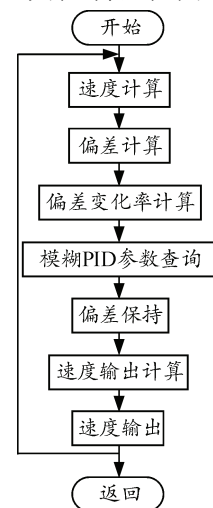


图 9 电机控制流程

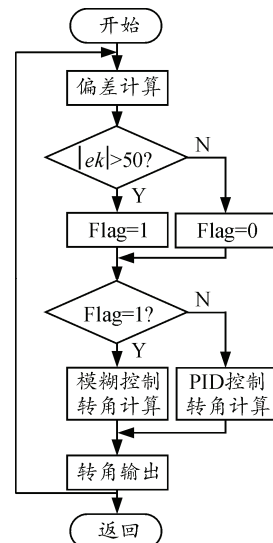


图 10 舵机控制流程

### 5 模型仿真

笔者根据 Matlab 提供的仿真功能模块建立仿真模型，选取舵机作为被控对象的数学模型进行仿真验证。舵机的数学模型为一个二阶惯性模型，其传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2}{s^2 + 3s + 1} \quad (7)$$

模糊 PID 仿真模型主要包括模糊逻辑模块和 PID 模块。在添加连接好各模块后，将其封装为小系统模块；最后，将模糊逻辑模块(图 11)和 PID 模块(图 12)两者封装为 Fuzzy\_PID 模块，自适应模糊 PID 和传统 PID 的系统 SIMULINK 结构如图 13。

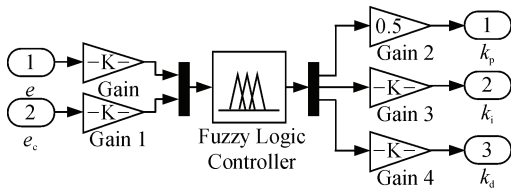


图 11 模糊逻辑模块

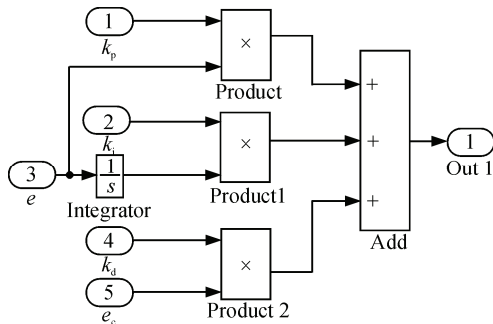


图 12 PID 模块

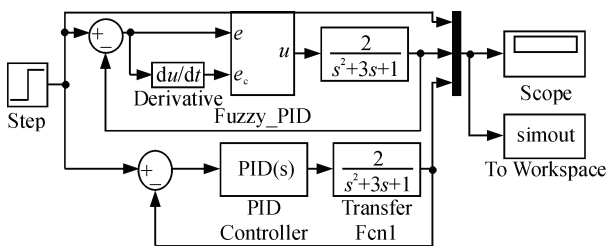


图 13 舵机模型模糊 PID 和传统 PID 结构

给控制系统施加一个单位阶跃信号，观测系统的响应输出曲线如图 14 所示。

由阶跃响应曲线可以看出：实线的模糊 PID 的

快速性和稳定性比虚线的传统 PID 效果更佳，主要表现在响应时间更快、无超调和稳态时间短。表明小车从一种赛道到另一种赛道时，舵机转向更迅速，电机变速更流畅，由于小车的电机和舵机控制都采用闭环系统，且在特定赛道上运行，外界干扰影响小，即使存在，通过闭环模糊 PID 良好的动态性能也能保证控制精度。

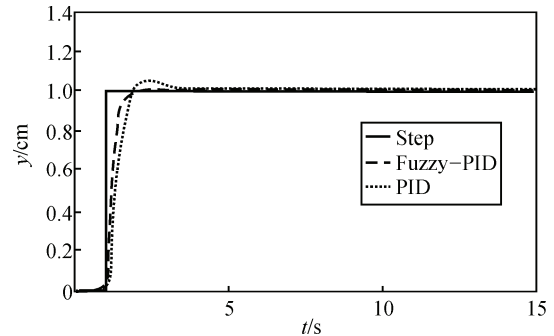


图 14 阶跃响应曲线

### 6 结束语

根据小车利用电磁感应循迹的特点，笔者提出了小车运行时间最短为目的的电机速度、舵机转角自适应模糊PID控制策略。把模糊控制技术中能够反映实际经验的模糊控制规则与不同类型赛道路径相结合，使小车电机速度和舵机转角达到最佳的配合，既快又稳地完成各类型赛道。

### 参考文献：

- [1] 卓晴, 黄开胜, 邵贝贝, 等. 学做智能车: 挑战“飞思卡尔”杯[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 12-43.
- [2] 师黎, 陈铁军. 电磁循迹控制理论及运用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 1-153.
- [3] 刘庆丰. 空间磁场检测装置的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2013: 50-51.
- [4] 张德丰. Matlab 模糊系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 98-182.
- [5] 乔志杰, 王维庆. 模糊自适应控制器的设计及其仿真[J]. 自动化与仪表, 2008, 23(1): 26-29.
- [6] 杨素梅, 潘宏侠, 卢士彬, 等. 智能寻迹小车控制系统设计及其速度控制[J]. 车辆与动力技术, 2013(4): 34-38.
- [6] 卢玉斌, 程永生, 孙远程. 冲击载荷作用下压阻式微加速度计的动态力学响应研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 22-25.
- [7] 陆兆峰, 秦旻, 陈禾, 等. 压电式加速度传感器在振动测量系统的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7): 3-4.
- [8] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 79-84.

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

- [3] 程永生, 李科杰. 压电引信传感器设计与研究[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(9): 812-814.
- [4] 金浩, 张晋敏, 唐华杰. 压电传感器前置信号接收电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2014(12): 10-12.
- [5] 胡红革, 杜连明, 杨黎明. 一种基于压电石英晶体的高 g\_n 值加速度传感器[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 86-88.