

# 电磁智能车循迹算法<sup>①</sup>

张晓峰, 钟一博, 李清晨, 陈国定

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** 提出了一种智能车竞赛电磁组的循迹算法——比值法, 针对现有的常用循迹算法差值法和归一化法中存在计算所得偏差值和偏离距离的函数存在极值点并且在两极值点外距离与偏差值的关系变为负相关的问题, 采用对电动势分别开根号作差再比上它们的和值的方法去除极值点, 使得距离与电势差在整个取值范围内都呈正相关, 去除了错误判断. 通过实验验证该方法比常用方法有更好的效果. 解决了智能车竞赛中的一个实际问题.

**关键词:** 电磁; 智能车; 循迹算法; 比值法; 模糊 PID 控制器

## Electromagnetic Intelligent Vehicle Tracking Algorithm

ZHANG Xiao-Feng, ZHONG Yi-Bo, LI Qing-Chen, CHEN Guo-Ding

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In this paper, a tracking algorithm called “ratio method” is introduced for intelligent vehicle competition electromagnetic group. The conventional tracking algorithms including “difference method” and “normalization method” have problems. For instance, there are extreme points in the function of deviation value and deviation distance, what is worse, the relation between them will change into negative correlation outside two extreme points. To solve this problem, the ratio method changes the electromotive force values into the ratio of the difference and the sum of respective square root electromotive force values. It turns out this tracking algorithm could remove the extreme points, besides the relation between electric potential difference and deviation distance maintains positive correlation within the entire value range, so as to eliminate misjudgment. After experimental verification, the results using this tracking algorithm are more effective than other conventional tracking algorithms. This paper solves a practical problem appearing in intelligent vehicle competition.

**Key words:** electromagnetism; intelligent vehicle; tracking algorithm; ratio method; fuzzy PID controller

智能车竞赛电磁组的赛道中心是一根通有 20kHz、100mA 交流电的载流导线, 智能车利用电磁感应原理检测其产生的交变磁场来进行路径判断, 控制小车沿赛道行驶<sup>[2]</sup>. 由毕奥-萨伐定理<sup>[3]</sup>可知, 电感检测到的感应电动势会随小车远离载流导线而减小. 而往届一些全国赛参赛队伍的技术报告提供的循迹方案中, 都存在一个共性问题, 即小车偏离中心线一定距离后, 随着偏离距离的增加, 左右电感检测到的电压经过一系列计算后得到偏差反而会逐渐减小, 高速情

况下容易引起循迹误判, 这大大限制了智能车的行驶速度. 因此, 循迹算法优劣直接影响了智能车运行的稳定性和行驶的快速性, 同时也是制约智能车竞赛成绩的关键因素之一.

本文针对循迹的难点和常用算法的局限性, 提出了一种新型循迹算法——比值法, 当小车逐渐偏离赛道中心线时, 该算法计算得到的偏差值随小车到中心线距离的增大而增大, 不会因为感应电动势过小而引起误判, 结合模糊 PID 控制器, 显著地提高了小车的

① 收稿时间:2014-04-11;收到修改稿时间:2014-05-19

运行速度。

### 1 电磁智能车模型的建立与分析

电磁智能小车前上方水平方向固定两个相距  $L$  的电感, 两个电感的轴线为水平, 高度为  $h$ , 如图 1 所示。

在跑道上建立如图 2 所示的坐标系。设沿着跑道前进的方向为  $z$  轴, 垂直跑道往上为  $y$  轴, 在跑道平面内垂直于跑到中心线为  $x$  轴,  $xyz$  轴满足右手定则。将电磁小车模型简化成如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

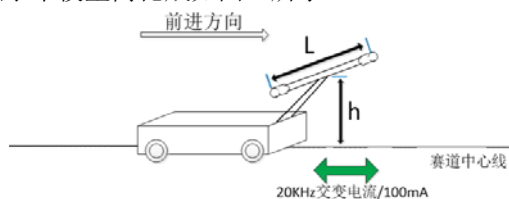


图 1 电磁智能车模型

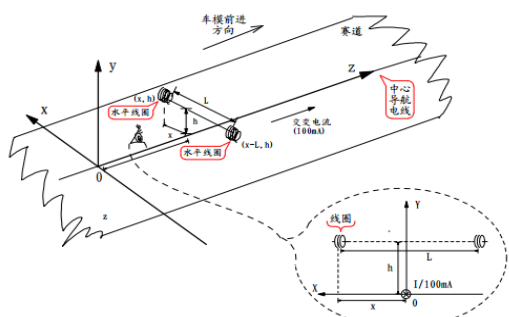


图 2 赛道坐标系与电感布置方案<sup>[2]</sup>

由于磁场分布是以  $z$  轴为中心的同心圆, 所以在计算磁场强度的时候可仅仅考虑坐标  $(x,y)$ 。因为电感的轴线是水平的, 所以感应电动势反映了磁场的水平分量, 跑道中心的电磁线对于电感均可等效为无线长直导线, 根据毕奥-萨伐定理易得单个电感感应电动势大小与  $h/(h^2+x^2)$  成正比, 即感应电动势:

$$E = \frac{Kh}{h^2+x^2} \quad [2]$$

令两个电感之间的中点坐标为  $(x,y)$ , 则左边的电感的坐标为  $(x-L/2,h)$ , 电动势为  $E_1$ , 右边的电感的坐标  $(x+L/2,h)$ , 电动势为  $E_2$ , 易得:

$$E_1 = \frac{Kh}{h^2+(x-\frac{L}{2})^2}$$

$$E_2 = \frac{Kh}{h^2+(x+\frac{L}{2})^2}$$

### 2 常用循迹方案及其局限性

#### 2.1 差值法

差值法的做法是将检测到的左右两个电感的感应电动势作差, 将其差值  $\Delta E$  来反映小车与赛道中心线的偏差量(以下简称偏差量), 即:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{Kh}{h^2+(x-\frac{L}{2})^2} - \frac{Kh}{h^2+(x+\frac{L}{2})^2} \quad (1)$$

取  $K=1, h=15\text{cm}, x \in (-50,50)\text{cm}, L=25\text{cm}$ , 得到差值  $\Delta E$  随着电感水平位置  $x$  的变化曲线, 如图 3 所示。

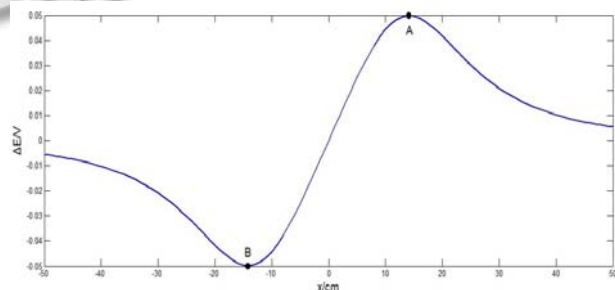


图 3 感应电动势差  $\Delta E$  与距离  $x$  之间的函数

由图 3 可见, 差值  $\Delta E$  存在两个极值点  $A$  和  $B$ , 虽然在  $A$  和  $B$  之间,  $\Delta E$  是一个单调函数并且  $|\Delta E|$  随着  $|x|$  的增大而增大, 可作为小车方向的控制信号; 但是当  $x$  处于  $AB$  之外时,  $|\Delta E|$  随着  $|x|$  的增大而减小, 此时计算得到的偏差量信号显然是错误的, 不能作为小车方向的控制信号。因此, 差值法计算得到的偏差量只在一定范围内是可信的, 一旦小车偏离中心线的距离超出这个范围, 其偏差量便不可取, 这也是差值法的最大弊端。

#### 2.2 归一化法

归一化法对差值法进行了改进, 用左右两个电感的感应电动势差值除以它们的和值, 将所得的值  $Error$  来反映偏差量, 即:

$$Error = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} = \left[ \frac{Kh}{h^2+(x-\frac{L}{2})^2} - \frac{Kh}{h^2+(x+\frac{L}{2})^2} \right] \left/ \left[ \frac{Kh}{h^2+(x-\frac{L}{2})^2} + \frac{Kh}{h^2+(x+\frac{L}{2})^2} \right] \right. \quad (2)$$

取  $K=1, h=15\text{cm}, x \in (-50,50)\text{cm}, L=25\text{cm}$ , 归一化值  $Error$  随着电感水平位置  $x$  的变化而变化, 同时为了

对比更加直观, 将差值法所得的 $\Delta E$  放大 10 倍后放入同一坐标系中, 如图 4 所示.

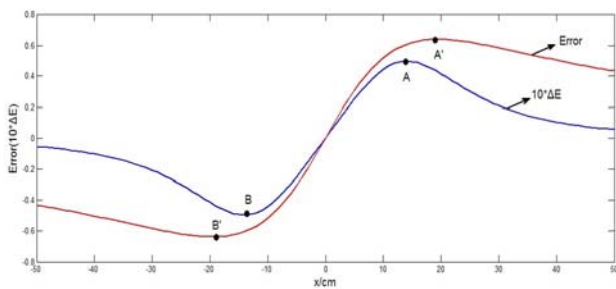


图4 感应电动势差值 $10 \cdot \Delta E$ 、归一化值 $Error$ 与距离 $x$ 之间的函数

由图 4 可知, 和差值法相比, 归一化法所得的值  $Error$  可信的取值范围有一定的增加, 且当  $x$  处于  $A'B'$  之外时,  $|Error|$  下降的趋势更趋于平缓, 结果更能反映小车实际的偏差量. 但依旧存在极值点  $A'$  和  $B'$ , 在极值点之外  $|Error|$  仍然会随着  $|x|$  的增大而减小, 该算法无法完整地描述整个小车远离中心线的过程.

### 3 比值法的分析和实现

归一化法之所以存在极值点, 是因为当距离  $x$  大于其极值点时, 分子的衰减速度大于分母的衰减速度, 导致计算得到的偏差值在极值点之外出现递减趋势. 因此, 我们可以通过降低归一化法中分子的衰减速度, 使计算得到的偏差值随距离  $x$  是一个单调函数, 以此来反映实际偏差量.

比值法的做法是:

① 将左右两边电感的感应电动势值  $E_1$  和  $E_2$  分别进行开根号计算, 得到  $\sqrt{E_1}$  和  $\sqrt{E_2}$ .

② 将  $\sqrt{E_1}$  和  $\sqrt{E_2}$  作差后, 比上左右感应电动势值  $E_1$  和  $E_2$  的和, 将所得的值  $Bias$  作为最后的偏差值, 即:

$$Bias = \frac{\sqrt{E_1} - \sqrt{E_2}}{E_1 + E_2} \quad (3)$$

我们知道, 对一个函数进行开根号运算后, 会使它的变化趋势趋于平缓. 因此, 与原先归一化法相比, 比值法降低了分子的衰减速度, 而分母的衰减速度不变. 这样所得的偏差值  $Bias$  随距离  $x$  的变化就更加贴近小车的实际偏差.

依旧取  $K=1, h=15\text{cm}, x \in (-50, 50)\text{cm}, L=25\text{cm}$ , 得到偏差值  $Bias$  随着电感水平位置  $x$  的变化的曲线, 如图 5 所示.

由图 5 可见, “比值法”所得的偏差值  $Bias$  是一个单调函数,  $|Bias|$  随着  $|x|$  的增大而增大. 而我们对  $Bias$  进行求导后, 会发现它不存在极值点, 即  $Bias(x)$  在  $x \in (-\infty, +\infty)$  上都是单调的. 偏差值  $Bias$  很好地描述了整个小车远离中心线过程中与赛道中心线的偏差量.

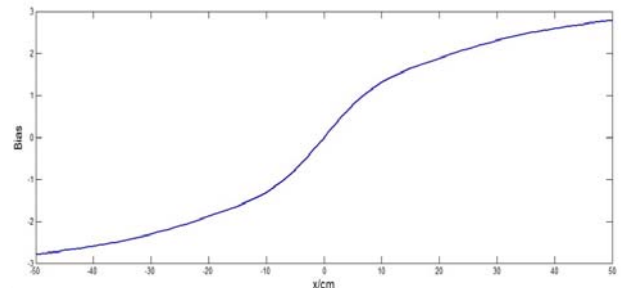


图5 偏差 $Bias$ 与距离 $x$ 之间的函数

### 4 比值法在电磁智能车循迹控制中的应用

经比值法计算后得到的偏差  $Bias$  的绝对值可直观地反映小车与赛道中心线的偏差量, 但数量级上存在差异, 且没有方向判断. 因此需要经过一个模糊 PID 控制器, 并结合方向判断后才能作为方向的控制量. 对于方向, 可通过比较  $E_1$  和  $E_2$  的大小来判断. 当  $E_1 < E_2$  时, 说明车子处于中心线的左侧, 需要给出向右的方向控制; 当  $E_1 > E_2$  时, 说明车子处于中心线的右侧, 需要给出向左的方向控制. 整个过程的流程图如图 6 所示.

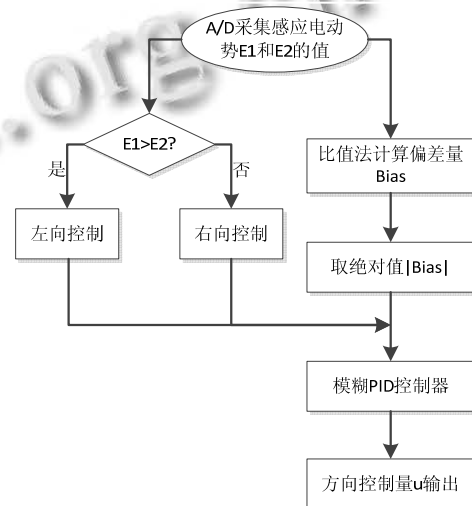


图6 比值法在循迹算法中的应用

### 5 实验结果

按照比赛规则, 我们自行设计了一辆电磁智能小

车, 以 FreeScale 单片机为核心控制器, 并采用工字电感作为电磁传感器识别路径. 按图 2 的方案排布电感及建立赛道坐标系, 两个电感相距 25cm, 高度为 15cm.

将小车置于赛道上, 在  $x \in (-50, 50)$ cm 范围内, 每隔 5cm 用单片机对电感放大后的感应电动势进行一次 A/D 采样, 采用上述算法进行计算, 并记录计算结果. 将计算结果放大一定的倍数后导入 Matlab, 得到一条连续的曲线, 如图 7 所示.

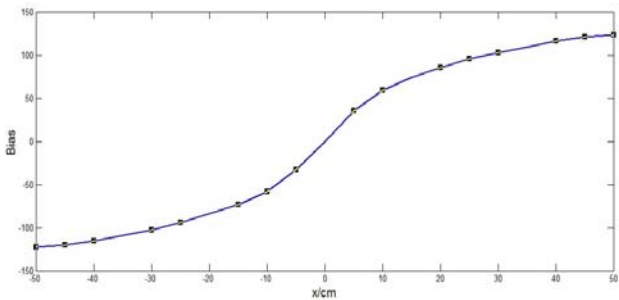


图 7 实际比值法所得偏差与距离 x 的关系

而为了验证应用比值法后电磁智能车系统的稳定性和快速性, 我们在实验室自行搭建了比赛跑道, 并让小车分别采用差值法、归一化法和比值法作为循迹算法进行多次试跑, 着重观测了同一速度下, 小车在 90°弯、180°弯和 270°弯三种典型弯道上的行驶路径, 具体情况如图 8 所示.

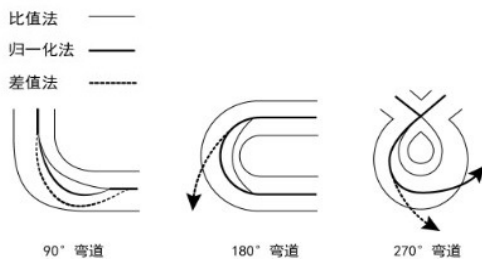


图 8 三种典型弯道的行驶路径

经过多次实验后, 我们对总体实验数据进行了统

计和整理, 情况如表 1 所示.

表 1 差值法、归一化法、比值法结合模糊 PID 控制器控制下小车实际运行情况

	运行路径	稳定性	平均速度(m/s)
差值法	弯道上大部分偏外切	弯道易冲出	1.25
归一化法	急弯外切, 大弯基本内切	急弯偶尔冲出, 大弯基本不冲出	1.92
比值法	所有弯道都内切	基本无冲出现象	2.82

### 6 结论

对电磁智能车现有循迹算法的局限性详细分析后进行改进, 提出了一种简单高效的方向控制算法——比值法. 实验证明, 该方案具有良好的稳定性和精确性, 优化了行驶路径, 使得智能车能平稳、快速地运行.

### 参考文献

- 1 张涛,李家启.基于参数自整定模糊 PID 控制器的设计与仿真.交通与计算机,2001,19(Z1):27-30.
- 2 竞赛秘书处.电磁组竞赛车模路径检测设计参考方案.1.1版,2010:1-7.
- 3 施建青.大学物理学(下册).北京:高等教育出版社,2009.10-11.