

# 自动引导车辆 (AGV) 定位停车的控制\*

王志中 金辉 周云山 张友坤 王荣本

(吉林工业大学)

**提 要** 建立了后轮驱动、前轮转向自动引导车辆的定位停车运动学模型, 基于这一模型提出了经过两步消除定位停车误差的控制策略。根据极小值原理探讨了 Ping-Ping 控制算法, 车辆以最佳方式消除停车误差应切换控制的状态轨迹, 以及消除停车误差车辆应行驶的最短距离。还分析了车辆当前位置到预定停车位置之间的距离对实施该控制策略的影响, 提出了超前给出定位停车标志的必要性。

**关键词** 自动引导车辆 定位停车 最优控制

## A Control Strategy for AGV to Stop at a Specified Location

Wang Zhi-zhong Jin Hui Zhou Yun-shan Zhang You-kun Wang Rong-ben

(Jilin University of Technology, Changchun)

**Abstract** A mathematics model of AGV with a single front steering wheel for stopping at a specified location is established in this paper. Based on the model developed, a control strategy with two steps is investigated. According to optimal control principle, Ping-Ping control algorithm is used to eliminate vehicle's errors from current position to the expected location, the switching line of control action and the minimum moving distance are given by using this algorithm. Since the vehicle needs to move the minimum distance to eliminate all error being away from the given path, the stopping mark ahead of the expected location is required so as to achieve the satisfied results.

**Key words** Automated guided vehicle (AGV) Vehicle positioning stop Optimum control

## 1 引 言

近 10 年来, 自动引导车已广泛应用于计算机集成制造系统 (CIMS) 中, 从而实现了毛坯、零部件及加工工具的自动传输。AGV 作为自动传送物料的运载工具, 其精确定位的性能是非常重要的。仅当它能准确地停靠在期望的位置, 才能使与之配合的其它设备 (比如机械手) 顺利完成对物料的各种传送。国内外的许多研究工作已经提出了多种路径跟踪控制策

收稿日期: 1997-07-29

\* 本文为国家机器人开放实验室项目

王志中, 工程师, 长春市人民大街 142 号 吉林工业大学农机工程学院, 130025

略, 经过研究发现自动引导车辆在指定点的定位停车与路径跟踪的控制并不尽相同。为此, 本文研究了自动引导车在最短时间内抵达指定点实现定位停车的控制策略。

### 2 定位停车的数学模型

#### 2.1 车辆的运动学模型

采用后轮驱动, 单前轮转向三轮车辆的运动方程<sup>[1]</sup>为

$$\frac{dx}{dt} = v \cos(\alpha + \beta) \tag{1}$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin(\alpha + \beta) \tag{2}$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{v_0}{L} \tan\alpha \tag{3}$$

式中  $\alpha$ ——前轮偏转角;  $\beta$ ——车体方位角;  $v = v_0 / \cos\alpha$ ,  $v_0$  为车辆实际运动速度。

#### 2.2 车辆制动的力学模型

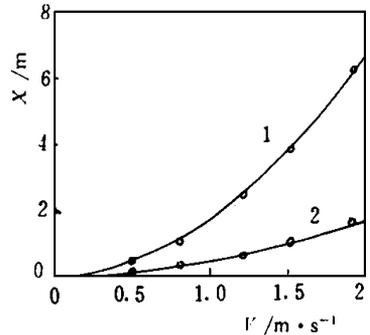
设车辆的运动速度为  $v_0$ , 在制动过程中, 施加的制动力为  $F_r$ , 地面摩擦力为  $F_{uf}$ , 则车辆在惯性力作用下的移动距离为初始动能沿制动力和滚动阻力方向所作的功。用公式描述为

$$\frac{m \cdot v_0^2}{2} = \int_0^{t_s} (F_r + F_{uf}) dx \tag{4}$$

式中  $t_s$ ——停车所用时间,  $m$ ——车辆质量。若上式中  $F_r, F_{uf}$  均为常数, 则车辆移动距离可以表示为

$$x = \frac{m \cdot v_0^2}{2(F_r + F_{uf})} \tag{5}$$

在施加常制动力和不加制动力两种工况下测试了车辆初始速度和移动距离之间的关系, 如图 1 所示。



— 计算曲线 ° 试验点  
1.  $F_{uf} = 147\text{N}, F_r = 0$ , 2.  $F_{uf} = 147\text{N}, F_r = 440\text{N}$

图 1 车辆初速度和停车距离

### 3 定位停车控制策略

图像识别自动引导车由绘制在地面上的线条引导。

A 点表示车辆的预定停车位置, B 表示车辆的当前位置。由当前位置到预定位置的误差为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta\beta$ 。当车辆停到期望位置时,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta\beta$  均应为 0 (见图 2)。通过不同的方法可使 A GV 停在指定的位置。本文仅讨论使车辆移动最短的距离来消除定位误差的控制策略。

#### 3.1 最小距离控制策略

设车辆由当前位置行驶到指定位置的误差为  $(\Delta x, \Delta y, \Delta\beta)$ 。若令预定停车位置为  $(0, 0, 0)$ , 车辆当前位置为  $(x_0, y_0, \beta_0)$ , 则  $\Delta x = x_0, \Delta y = y_0, \Delta\beta = \beta_0$ 。让 A GV 停靠在指定位置可以分两步完成, 第一步先消除误差  $y_0$  和  $\beta_0$ , 然后再消除误差  $x_0$ 。

为便于控制器的设计, 对车辆运动方程(1)~(3)进行线性化

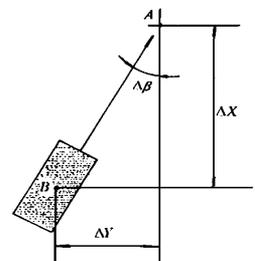


图 2 车辆定位误差

处理<sup>[1]</sup>, 得

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (6)$$

$$\frac{dy}{dt} = v(\alpha + \beta) \quad (7)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{v}{L}\alpha \quad (8)$$

由(6), (7), (8)式可得

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = \alpha\mu + \beta \\ \frac{d\beta}{dx} = \frac{\alpha}{L}\mu \end{cases} \quad (9)$$

上式中  $\alpha (> 0)$  是转向轮偏转角,  $\mu (-1 \leq \mu \leq 1)$  是控制信号,  $x$  为车沿  $x$  轴方向移动的距离。令  $z_1 = y, z_2 = \beta$ , 将(9)式转化为状态方程

$$\dot{Z} = A Z + B \mu \quad (10)$$

其中  $Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha/L \end{bmatrix}$ 。

由于(10)式是  $y$  和  $\beta$  对车辆前进距离  $x$  的微分, 故上述车辆运动模型在最短距离内消除误差  $y_0$  和  $\beta_0$ , 与用最短时间使状态由  $(y_0, \beta_0)$  变化到  $(0, 0)$  等同, 故可采用 Ping-Ping 控制策略。对前述问题, 引入目标函数

$$J = \int_{x_0}^{x_1} (1) dx \quad (11)$$

现在问题成为确定控制规律  $\mu$ , 使目标函数  $J$  取得最小值的问题。根据受约束最优控制的极小值原理, 建立哈密顿函数为

$$H [Z(x), P(x), \mu(x)] = 1 + P^T(x)A Z(x) + P^T(x)\beta\mu(x)$$

当哈密顿函数取极小值时, 其允许控制  $\mu(x)$  可由下式表示:

$$\mu(x) = -\text{sign}[P^T(x)\beta]$$

可见, 要使目标函数取最小值,  $\mu$  仅能取  $\pm 1$ 。为此假设车体的初始位置为  $(0, 0)$ , 先分析在  $\mu = +1$  的作用下, 车辆的状态变化曲线。将  $\mu = +1$  代入状态方程(10)中, 求此时该方程的解可得

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \alpha x + \frac{\alpha}{2L} x^2 \\ z_2 &= \frac{\alpha}{L} x \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

方程(12)描述了在  $\mu = +1$  控制作用下, 车辆状态  $[z_1, z_2]^T$  由坐标原点开始的变化曲线。而为了消除误差  $(y_0, \beta_0)$ , 是使车体由  $(y_0, \beta_0)$  运动到  $(0, 0)$ , 状态的变化正好与(12)式描述的相反。为了得到此时的运动轨迹, 仅需将(12)式中的  $x$  用  $-x$  代换即可。令把状态从  $(y_0, \beta_0)$  转移到坐标原点  $(0, 0)$ , 车辆沿前进方向  $x$  移动的距离为  $x_b$ , 则用  $-x_b$  代替(12)式中的  $x$ , 整理后得

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \alpha x_b \left( \frac{x_b}{2L} - 1 \right) \\ z_2 &= -\frac{\alpha}{L} x_b \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

消去(13)式中  $x_b$ , 可以得到

$$z_1 - L z_2 \left( \frac{z_2}{2\alpha} + 1 \right) = 0 \quad (14)$$

$z_1, z_2$  之间的关系曲线如图3中的  $OPQ$  所示。它表明  $OPQ$  曲线上的任意点可在  $\mu = +1$  规律作用下到达坐标原点。用同样方法, 所有能够在  $\mu = -1$  控制规律下, 把状态能转移到坐标原点的状态轨迹为

$$z_1 + L z_2 \left( \frac{z_2}{2\alpha} - 1 \right) = 0 \quad (15)$$

它由图3中  $NMO$  曲线所示。 $NMOPQ$  曲线称为开关曲线。它将平面分成左右两部分。如果初状态  $(z_{10}, z_{20})$  在开关线的右半平面, 如  $a(z_{1a}, z_{2a})$ , 首先采用  $\mu = -1$  的控制, 使状态由  $(z_{1a}, z_{2a})$  变化到与  $OPQ$  线的交点  $c$ , 然后采用  $\mu = +1$ , 驱动状态到达坐标原点。如果初状态在左半平面, 如  $b(z_{1b}, z_{2b})$ , 则先采用  $\mu = +1$  的控制, 然后采用  $\mu = -1$  的控制, 就能使状态到达  $(0, 0)$ 。如果初态在开关曲线上, 则  $\mu = +1$  或  $\mu = -1$ , 就能直接使状态到达坐标原点。显而易见, 采用此控制策略, 控制最多只需切换两次。

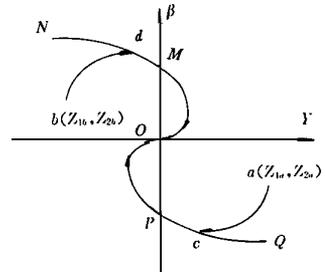


图3 控制切换线

把从状态  $a(z_{1a}, z_{2a})$  过渡到  $(0, 0)$  的最短距离为

$$x_{min} = x_{ac} + x_{co} \quad (16)$$

其中  $x_{ac}$  是状态从  $a(z_{1a}, z_{2a})$  到  $(z_{1c}, z_{2c})$  间的距离,  $x_{co}$  是由状态  $c(z_{1c}, z_{2c})$  转移到  $O(0, 0)$  车辆所通过的距离。

首先计算在  $\mu = -1$  作用下, 由  $a$  到  $c$  间的距离  $x_{ac}$ 。将  $\mu = -1$  及初始状态坐标  $(z_{1a}, z_{2a})$  代入状态方程可得

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= (z_{2a} - \alpha)x - \frac{\alpha}{2L} x^2 + z_{1a} \\ z_2 &= -\frac{\alpha}{L} x + z_{2a} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由(17)式可见: 随着移动距离  $x$  的增大,  $z_2$  不断减小直至与开关曲线  $OPQ$  相交于  $c$  点。从(17)式中消去  $x$ , 得到状态变化的轨迹方程为

$$z_1 = \frac{L}{\alpha} (z_{2a} - \alpha)(z_{2a} - z_2) - \frac{L}{2\alpha} (z_{2a} - z_2)^2 + z_{1a} \quad (18)$$

由方程(14)、(18), 可求得两条弧线相交点  $c$  的坐标  $(z_{1c}, z_{2c})$  为

$$\left. \begin{aligned} z_{1c} &= L z_{2c} + \frac{L}{2\alpha} z_{2c}^2 \\ z_{2c} &= -\sqrt{\frac{\alpha}{L} \left( \frac{L}{2\alpha} z_{2a}^2 + z_{1a} - L z_{2a} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

把  $z_{2c}$  代入方程 (17) 中的第二式得

$$z_{2c} = -\frac{\alpha}{L} x_{ac} + z_{2a} \tag{20}$$

故状态从  $a$  点过渡到  $c$  点, 车辆沿  $x$  方向移动的距离为

$$x_{ac} = -\frac{L}{\alpha} (z_{2c} - z_{2a}) \tag{21}$$

由方程 (13) 中的第二式可以得到状态由  $c$  点驱动到原点移动的距离

$$x_{co} = -\frac{L}{\alpha} z_{2c} \tag{22}$$

故由  $a$  点移动到原点车辆沿  $x$  方向移动的最短距离为

$$x_{min} = x_{ac} + x_{co} = \frac{L}{\alpha} (z_{2a} - 2z_{2c}) \tag{23}$$

用同样的方法, 若初状态为左半平面的  $(z_{1b}, z_{2b})$ , 可得

$$z_{2d} = \sqrt{\frac{\alpha}{L} \left( \frac{L}{2\alpha} z_{2b}^2 + L z_{2b} - z_{1b} \right)} \tag{24}$$

$$x_{min} = \frac{L}{\alpha} (2z_{2d} - z_{2b}) \tag{25}$$

### 3.2 $x$ 方向的定位停车

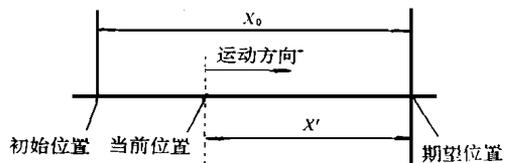
当位置误差  $(y_0, \beta_0)$  消除后, 剩下的问题就是消除距离误差  $x_0$ 。由方程 (5) 可知, 初速度为  $v_0$  的车在一恒定制动力作用下的移动距离为

$$x_0 = \frac{v_0^2 m}{F_r + F_{uf}} \tag{26}$$

上式中  $x_0, m, v_0, F_{uf}$  均为已知, 于是可以容易地获得制动力, 但是由于误差的影响, 上式并不能准确地保证移动的距离。为了提高定位精度, 应采用闭环控制, 实时制动力计算公式为

$$F_r = \frac{v^2}{x} m - F_{uf}, \quad F_r < F_{max} \tag{27}$$

上式中  $x$  是当前位置与指定位置间的距离,  $v$  是车体当前的移动速度, 故实际制动力将随车的行驶速度和距期望点的距离而变化 (见图 4)。



## 4 超前定位停车

图 4 车辆消除误差  $x$  的过程

在上一节讨论了消除误差  $(y_0, \beta_0)$  的最小位移策略。一般 AGV 的定位误差为  $(x_0, y_0, \beta_0)$ , 在消除  $(y_0, \beta_0)$  误差的过程中并未考虑车辆在  $x$  方向的误差, 且在消除  $(y_0, \beta_0)$  的过程中还可能进一步加大  $x$  方向的误差。为此, 需要进一步讨论消除误差  $x_0$  的控制策略。由前面讨论的最短距离控制策略可知, 要消除车辆误差  $(y_0, \beta_0)$ , 车辆需沿  $x$  方向移动距离  $x_{min}$ , 于是当车辆消除误差  $(y_0, \beta_0)$  后, 可能会出现下面几种情况:

- 1)  $x_0 = x_{min}$
- 2)  $x_0 < x_{min}$

3)  $x_0 > x_{\min}$ 

如果是属于第一种情况,则自动引导车在消除  $(y_0, \beta_0)$  误差的同时也消除了  $x$  方向的误差,自动引导车在第一步完成后就准确地停在了指定的位置,这是一种理想情况。通常自动引导车在发现定位停车标志后实施定位停车策略,此时车辆当前位置与指定点间的距离并非恰好是  $x_{\min}$ ,而且  $x_{\min}$  是依赖车辆当前的误差  $(y_0, \beta_0)$  变化的。实际情况更多的是属于第二、第三种情况。

如果是第二种情况,则意味着自动引导车在消除偏差  $(y_0, \beta_0)$  后,要越过指定停车位置,并在  $x$  方向产生新的一维误差:  $x_{\min} - x_0$ 。为了消除此误差,自动引导车必须倒车行驶。为了提高自动引导车的定位停车效率,应力求避免第二种情况。要做到这一点,可在停车点的前面加一超前停车标识符,使之满足条件  $x_0 > x_{\min}$ ,变为第三种情况。

对于第三种情况可采用第3节分析和讨论过的两步定位停车控制策略。即第一步消除  $(y_0, \beta_0)$ ,引导车沿  $x$  方向移动距离  $x_{\min}$ 。此时引导车的一维误差为  $x_0 - x_{\min}$ ,然后再在一维方向实施相应的定位停车控制策略。

## 5 结 论

1) 运动车辆实施定位停车时,为消除当前位置与期望位置间的误差  $(x_0, y_0, \beta_0)$ ,可以分两步实现,即先消除跟踪路径偏差和车辆方位角偏差  $(y_0, \beta_0)$ ,然后再消除前进方向的距离偏差  $x_0$ 。

2) 当采用砵-砵最优控制策略时,可使车辆消除误差所移动的距离最短,并把车辆由任意位置转移到期望位置其控制最多切换两次。

3) 对于本文研究的车辆运动,当满足  $x_0 > x_{\min}$  时,有理想的定位效果。为使车辆能以更快的速度进入期望的停车位置,超前  $x_{\min}$  距离给出预定位停车标识符,能避免车辆在消除  $x$  方向误差时倒车,可以提高自动引导车定位停车的精度和效率。

## 参 考 文 献

- 1 周云山,王荣本等. 自动引导车辆系统的研究(四)——自动引导车辆(A GV)的建模仿真. 农业工程学报, 1994, 10(4)
- 2 于长富. 现代控制理论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988