

doi: 10.7690/bgzd.2019.01.018

## 双差动单元四轮驱动 AGV 路径跟踪策略

徐建萍, 盛 君, 刘净瑜, 刘铜泽

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 为解决车体中心在运行过程中会偏离导航轨迹的问题, 对双差动单元四轮驱动 AGV (automated guided vehicle) 路径跟踪策略进行研究。针对地面状况及车体结构过约束等情况, 构建 AGV 运动学模型, 采用角度纠偏与距离纠偏分离的纠偏策略, 对车体角度和距离偏差进行纠正, 得出一种按照三级优先级交叉纠偏的路径跟踪算法, 解决了车体不能按期望轨迹运行的问题。实际应用结果表明, 该算法纠偏可操作性强、纠偏效果好。

**关键词:** 双差速驱动 AGV; 角度偏差; 距离偏差; 三级优先级; 路径跟踪

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Path Tracking Strategy of Dual Differential Driving AGV

Xu Jianping, Sheng Jun, Liu Jingyu, Liu Jianze

(Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** For solving the problem that vehicle center deviate from guidance track, research on the dual differential driving automated guided vehicle (AGV) path tracking strategy. Aiming at the ground situation and vehicle structure constraint, establish AGV kinematics model, use strategy of angle deviation rectification and distance deviation rectification separation, correct angle deviation and distance deviation, and acquire path tracking method of three-level priority crossover deviation rectification, solve the problem that the vehicle could not run along the expecting path. The practical application results show that the algorithm has strong operability and good correction.

**Keywords:** dual differential driving AGV; angle deviation; distance deviation; three-level priority; path tracking

### 0 引言

目前停车场主流的停车方式依旧是驾驶员自主寻找车位、自主停车、自主取车, 这往往导致寻找车位困难、排队拥挤、忘记车位取车困难等, 停车效率低、操作复杂。随着 AGV 技术的日趋成熟, 运行灵活的若干 AGV 由调度系统统一规划路径实现智能化停车, 将成为停车场的主流趋势。笔者研究的 AGV, 车体长度约 3.7 m, 宽度约 1.7 m, 高度约 0.2 m, 载重约 2 t, 最高车速约 1.5 m/s, 具备直行、横移、斜移、原地旋转、任意半径走弧功能动作。由于地面状况的不完全一致性以及车体结构的过约束等问题, 使 4 个驱动轮受力不一致, 会导致车体纵轴线与轨迹产生角度与距离偏差, 车体中心在运行过程中会渐渐偏离导航轨迹。

文献[1]提出双参考点路径跟随, 前后差动单元主从控制的方式。采用模糊控制技术和人工驾驶思想分别设计模糊控制器, 将差动单元横向偏差、角度偏差、路径虚曲率及差动单元角速度作为输入, 得到差动单元速度与角速度, 实现路径跟随, 最后采用前后差动单元中心距为 0.5 m 的车体模型进行

了仿真实验。文献[2]将前后 2 个驱动模块之间的连接设计为可以变化的结构, 这样 2 个模块之间的距离是可变的, 增加了车体的附加自由度, 但是增加了建模控制的复杂性, 也降低了车体的承载力。文献[3]建立了双输入-双输出的非线性运动学模型, 进行输入-输出线性化, 提出了一种融合偏差智能转化评价函数法和指数稳定控制的混合规律。最后采用前后差动单元中心距 0.7 m, 差动单元轮距 0.343 m 的车体模型进行实验。机器人移动速度 0.4 m/s, 直线路径跟踪的角度误差小于  $2^\circ$ , 距离偏差小于 7 mm。模型复杂性高、计算量大、误差较大。

笔者分别建立车体横向偏差与角度偏差 2 个线性函数以及一个速度约束函数。横向偏差函数的输入量为车体与轨迹的横向距离偏差, 输出为前差动单元与车体轴线的夹角, 后差动单元与车体轴线的夹角; 角度偏差函数的输入量为车体与轨迹的角度偏差, 输出为前差动单元与车体轴线的夹角, 后差动单元与车体轴线的夹角; 速度约束为前后差动单元为满足刚性约束所建立的约束以及单个差动单元 2 个驱动轮之间的速度约束。

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-10-23

作者简介: 徐建萍(1990—), 女, 山东人, 硕士, 工程师, 从事控制科学与控制工程研究。

## 1 车体结构

笔者研究的双差动单元四轮驱动 AGV 外观模型如图 1 所示。该款 AGV 采用激光导航与 PGV(position guided vision)导航 2 种方式。如图 2 所示,激光导航器安装于车体前端,PGV 读头安装于车体中心。在停车场运行范围内,采用激光导航方式进行导航,在小范围(如工位)切换至 PGV 导航。在车体的 4 个角,安装有 4 个万向轮,用于车体的平衡性支撑以及缓冲。整个车体的驱动系统由前差动单元、后差动单元组成,每个差动单元由 2 个驱动轮组成。车体中轴线与前差动单元(靠近激光导航器的一端记为车体前端)轴线的夹角记为  $\theta_f$ ;车体中轴线与后差动单元轴线的夹角记为  $\theta_r$ 。以车体轴线靠近激光导航器的一端作为轴线正向,以轴线正向作为起始轴,顺时针转过的角度记为正(如图 3 中  $\theta_f$ ),逆时针转过的角度记为负(如图 3 中  $\theta_r$ )。前后差动单元的轴心距记为  $L$ ,单个差动单元的轮心距记为  $D$ ,如图 3 所示。

笔者研究的 AGV 可实现直行、横移、斜移、原地旋转、走弧以及托盘升降动作<sup>[4]</sup>。2 个驱动轮的轮距  $D=502\text{ mm}$ ,驱动轮周长  $C=628\text{ mm}$ ,直径  $d=200\text{ mm}$ ,2 个差动单元中心距  $L=2\ 915\text{ mm}$ 。

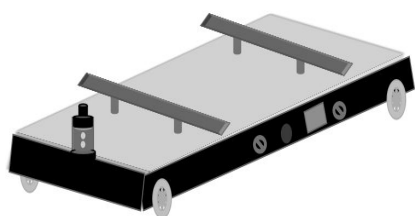


图 1 双差动单元 AGV 外观模型

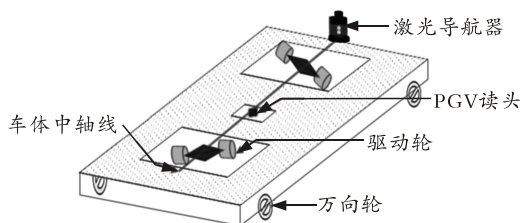


图 2 AGV 结构

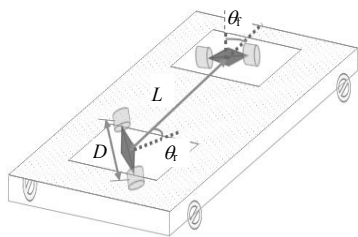


图 3 AGV 车体参数

## 2 车体路径纠偏建模

在对 AGV 进行运动学建模之前,先作如下假设<sup>[5-6]</sup>:

- 1) AGV 由刚性构架组成;
- 2) 运动平面平整光滑,且只作无滑移纯滚动运动;
- 3) 车轮与地面摩擦小到不足以影响车轮沿自身旋转轴线转动。

车体速度大小记为  $v$ ,转速为  $\omega$ 。前差动单元速度大小记为  $v_f$ ,后差动单元记为  $v_r$ 。前差动单元的左驱动轮速度大小记为  $v_{fl}$ (以车体轴线正向为观测方向,轴线左侧的记为左轮,右侧的记为右轮),右驱动轮速度大小记为  $v_{fr}$ 。后差动单元的左驱动轮、右驱动轮速度大小分别记为  $v_{rl}$ 、 $v_{rr}$ 。实际应用中,车体与轨迹的角度偏差分为 4 种(箭头表示车体前进方向),前进时车体右偏、后退时车体右偏、后退时车体左偏、前进时车体左偏,如图 4 所示。车体与轨迹的距离偏差分为 4 种,前进时右偏、后退时右偏、后退时左偏、前进时左偏,如图 5 所示。

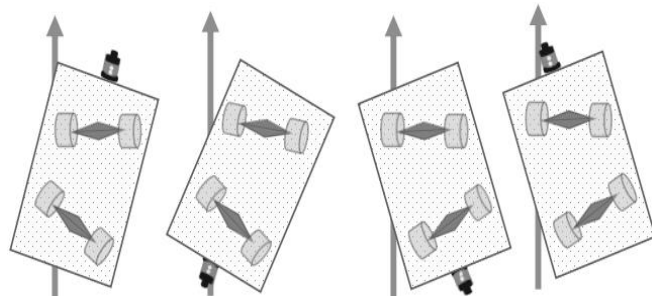


图 4 角度偏差

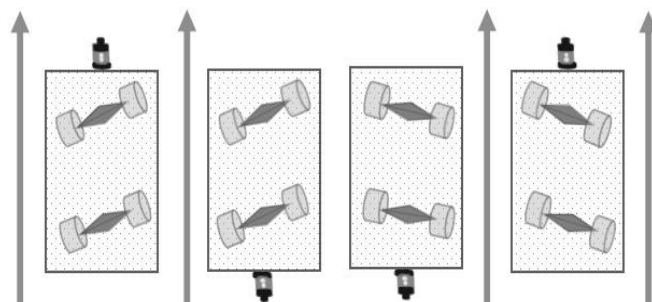


图 5 距离偏差

当车体与轨迹之间的偏差为前进方向角度右偏、距离右偏时,如果同时让车体角度与距离偏差达到允许偏差值,则轮系调整为图 6 所示状态。根据本车体的实际结构参数值,此时需要较大的  $\theta_f$  才能让车体及时跟踪上轨迹路线,经实际测试证明,高速情况下该策略不适用(高速运行值为  $1\text{ m/s}$ ),容易造成车体状态不稳定。笔者采用角度纠偏与距离

纠偏分离的纠偏策略, 建立二者共同的约束如下:

约束 1: 车体的刚性约束  $v = v_f \cos|\theta_f| = v_r \cos|\theta_r|$ ;

约束 2:  $2v_f = v_n + v_{fr}, 2v_r = v_n + v_{rr}$ ; 为方便控制,

建立约束 3:

约束 3:  $|\theta_f| = |\theta_r|$ 。

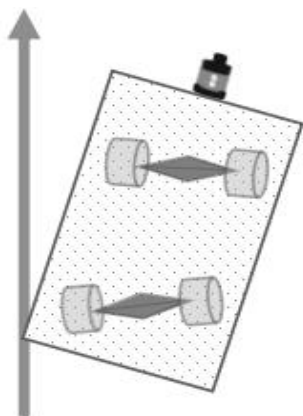


图 6 轨迹偏差

## 2.1 车体角度偏差纠正

当车体与运行轨迹出现角度偏差时, 轮系调整状态, 如图 4 所示。

前进右偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 即  $\theta_f < 0, \theta_r < 0$ 。

前进左偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 即  $\theta_f > 0, \theta_r > 0$ 。

后退右偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 即  $\theta_f < 0, \theta_r < 0$ 。

后退左偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 即  $\theta_f > 0, \theta_r > 0$ 。

建立车体角度偏差  $|\text{err}_{\text{ang}}|$ 、车体运行速度与  $|\theta_f|$  的大小关系:

$$|\theta_f| = k_1 * |\text{err}_{\text{ang}}| * v. \quad (1)$$

分别调整  $v_n$  与  $v_{fr}$ 、 $v_n$  与  $v_{rr}$  的差值  $\Delta v_f$ 、 $\Delta v_r$  的值, 使得  $\theta_f$ 、 $\theta_r$  的值达到目标值:

$$\Delta v_f = k_2 |\theta_f|, \Delta v_r = k_3 |\theta_r|. \quad (2)$$

## 2.2 车体距离偏差纠正

当车体与运行轨迹出现距离偏差时, 轮系调整状态, 如图 5 所示。

前进右偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 即  $\theta_f < 0, \theta_r > 0$ 。

前进左偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 即  $\theta_f > 0, \theta_r < 0$ 。

后退右偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 即  $\theta_f > 0, \theta_r < 0$ 。

后退左偏: 前差动单元轴线与车体轴线夹角为负值, 后差动单元轴线与车体轴线夹角为正值, 即  $\theta_f < 0, \theta_r > 0$ 。

建立车体距离偏差  $|\text{err}_{\text{dis}}|$ 、车体速度与  $|\theta_f|$  的关系

$$|\theta_f| = k_4 * |\text{err}_{\text{dis}}| * v. \quad (3)$$

分别调整  $v_n$  与  $v_{fr}$ 、 $v_n$  与  $v_{rr}$  的差值  $\Delta v_f$ 、 $\Delta v_r$  的值, 使得  $\theta_f$ 、 $\theta_r$  的值达到目标值:

$$\Delta v_f = k_2 |\theta_f|, \Delta v_r = k_3 |\theta_r|. \quad (4)$$

## 2.3 车体轨迹跟踪纠偏流程

设定车体角度偏差阈值  $\theta_{1\text{ang}}$ 、 $\theta_{2\text{ang}}$  距离偏差阈值  $\text{dis1}_{\text{err}}$ 、 $\text{dis2}_{\text{err}}$ 、 $\text{dis3}_{\text{err}}$  ( $\text{dis1}_{\text{err}} > \text{dis2}_{\text{err}} > \text{dis3}_{\text{err}}$ ), 则路径跟踪流程如图 7 所示:

1) 根据给定的起始坐标点与目标坐标点生成目标轨迹方程;

2) 采集激光导航的数、当前 2 维平面坐标以及方位角度;

3) 计算当前车体中心到目标路径的距离值以及方向夹角;

4) 判断距离偏差值是否超过误差允许值最大值  $\text{dis1}_{\text{err}}$  (设定为第一优先级), 或已经开启一级距离纠偏且误差大于调整值下限值  $\text{dis3}_{\text{err}}$ , 若是则根据偏差情况以及 2.2 节提供方案进行距离偏差纠偏, 然后跳转 2); 否, 则执行 5);

5) 判断角度偏差是否超过误差允许值  $\theta_{1\text{ang}}$  (设定为第二优先级), 或已经开启二级角度纠偏且误差大于调整值下限值  $\theta_{2\text{ang}}$ , 是则根据偏差情况以及 2.1 节提供方案进行角度偏差纠偏, 然后跳转 2); 否, 则执行 6);

6) 判断距离偏差值是否超过误差允许值  $\text{dis2}_{\text{err}}$  (设定为第三优先级), 或已经开启三级距离

纠偏且误差大于调整值下限值  $\text{dis3}_{\text{err}}$ ，若是，则根据偏差情况以及 2.2 节提供方案进行距离偏差纠偏，

然后跳转 2)；否，则执行 7)；

7) 执行正常动作，无需纠偏。



图 7 纠偏流程

### 3 实际应用

该算法已应用于笔者研究的双差动单元四轮驱动 AGV，实物如图 8 所示。实验时速度设定为 0.4 m/s，角度纠偏阈值  $\theta_{1\text{ang}}$  设定为  $0.2^\circ$ ， $\theta_{2\text{ang}}$  设定为  $0.05^\circ$ 。距离偏差阈值  $\text{dis1}_{\text{err}}$  设定为 4.5 cm， $\text{dis2}_{\text{err}}$  设定为 3 cm， $\text{dis3}_{\text{err}}$  设定为 1.5 cm。纠偏系数  $k_1$  设定为 6.5， $k_2$  设定为 0.98， $k_3$  设定为 0.94， $k_4$  设定为 62.5，为防止超调，若当前误差值降为原来的 60%，则这 4 个系数值相应的分别采用 3.5, 0.90, 0.84, 35。笔者就纠偏算法连续进行了一个月的跟踪测试，纠偏精度均控制在笔者设定的精度值范围内<sup>[7]</sup>，文中角度的偏差精度为  $0.3^\circ$ ，距离偏差精度为 1.5 cm。

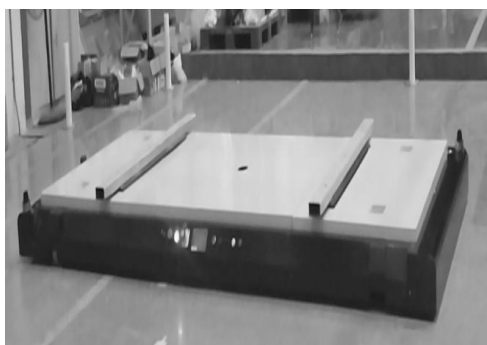


图 8 产品

### 4 结论

笔者针对 AGV 在运行过程中会偏离导航轨迹

的问题，设计了一种角度纠偏与距离纠偏按照三级优先级交叉纠偏的路径跟踪算法，解决了 AGV 运行过程中的偏差及时纠正问题。实际应用结果表明：采用该算法，车体纠偏响应速度快、纠偏时运行平稳、能够较为精确地完成路径跟踪。因高速运行 (1.5 m/s) 时，车体在运行稳定的前提下高精度纠偏难度较大，笔者将继续优化纠偏算法，实现 AGV 的高速路径跟踪。

### 参考文献：

- [1] 马伟. 四轮差动全方位移动机器人路径跟随技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [2] BORENSTEIN J. Control and kinematic design of multi-degree-of-freedom mobile robots with compliant linkage[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995, 11(1): 21-35.
- [3] 武星, 朱琳军, 石陈陈, 等. 双差速驱动移动机器人路径跟踪混合控制律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46[3]: 51-58.
- [4] 葛红豆, 赫雷, 曹维清, 等. 基于模糊 PID 控制的 AGV 控制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 76-79.
- [5] 朱琳军. 双差速驱动 AGV 协同运动控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [6] 王殿君, 关似玉, 陈亚, 等. 双驱双向 AGV 机器人运动学分析及仿真[J]. 制造业自动化, 2006, 38(3): 42-46, 56-56.
- [7] 谢晓竹, 何成. 复杂环境背景下车辆目标识别研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017(6): 90-94.