

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.09.020

基于转向角变换的智能转运叉车运动规划研究^{*}

霍旭坤¹, 马晓录^{1*}, 刘 艳², 吴立辉¹

(1. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 湖南迎春思博瑞智能装备有限公司, 湖南 宁乡 410006)

摘要:针对智能转运叉车在无人装车作业时的姿态调整问题,对其行驶过程的运动规划问题进行了研究。首先,研究了普通叉车装车作业时的运行轨迹特征,并结合叉车进行了运动学分析;在满足初始状态约束、目标状态约束、曲率连续有界约束、转向速度有界、转向加速度有界以及侧滑约束状态下,建立了基于转向角变换的9种运行状态组成的运动控制模型;然后,在该模型中输入了目标相对叉车位姿,运行、计算出了控制参数,并生成了最优运行轨迹与航向规划策略;最后,在MATLAB环境中输入目标位姿参数,生成了可行运动轨迹,揭示了叉车位姿对应的转向角、航向角、坐标偏移量变化与对应的运行轨迹的关系。仿真及研究结果表明:所建立的模型在前向位移5 m~8 m、侧向位移 ± 2 m、航向角 $\pm 10^\circ$ 范围内,能快速生成运动规划控制参数,平均运行时间约为0.0123 s;该模型可以改进以往的路径规划算法,省去以往需通过优化路径曲线光滑度来实现最优路径规划的过程,减少叉车运行控制计算量,使运行时间减少约59%。

关键词:智能转运叉车;转向角变换;MATLAB;运动规划算法

中图分类号:TH242;TP24

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)09-1212-09

Motion planning of intelligent transfer forklift based on steering angle transformation

HUO Xu-kun¹, MA Xiao-lu¹, LIU Yan², WU Li-hui¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Hunan Yingchun Spring Intelligent Equipment Co. Ltd., Ningxiang 410006, China)

Abstract: Aiming at the attitude adjustment problem of intelligent transfer forklift during unmanned loading, the motion planning problem of its driving process was studied. First, the running orbit characteristics of the ordinary forklift during the loading operations were studied and combined with forklift truck kinematics analysis, in the initial state and target state constraints, the curvature of bounded constraint, steering speed bounded acceleration, steering bounded and sideslip constraint condition, the movement control model was established based on 9 kinds of running state of steering angle transformation. Then, the relative pose of the target was input into the model and the model was run, the control parameters was calculated and the optimal trajectory and heading planning strategy were generated. Finally, in the MATLAB environment, the target pose parameters were input, that is, the feasible trajectory was generated, and the relationship between the change of steering angle, heading angle, coordinate offset and the corresponding running trajectory of the forklift pose was revealed. The simulation and research results show that the established model can quickly generates motion planning control parameters within the range of forward displacement of 5 m~8 m, lateral displacement of ± 2 m and course angle of $\pm 10^\circ$; and its average elapsed time is about 0.0123 s. The motion planning model can improve the previous path planning algorithm, eliminate the need to optimize the smoothness of path curve to achieve the optimal path planning process, reduce the calculation amount of forklift operation control, and reduce the running time of about 59%.

Key words: intelligent transfer forklift; steering angle transformation; MATLAB; motion planning algorithm

收稿日期:2021-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1704156)

作者简介:霍旭坤(1994-),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事智能叉车设计与研究方面的研究。E-mail:huo.xk@foxmail.com

通信联系人:马晓录,男,教授,硕士生导师。E-mail:maxiaolu@haut.edu.cn

0 引言

在大中型企业、仓库、码头等场所,常需要将货物从码垛或卸货点转运,并装载到大型运输车辆上。以往采用人工叉车时,用工成本高且工人存在安全隐患。

有企业提出了无人化、智能化转运装载需求。在非结构化环境下,无人驾驶运载车辆作业正在活跃地进行^[1],货车停放位姿具有不确定性,在叉车运载箱、包到达装载区域后,需要对车身位置和航向进行调整,以对准登车桥,才能准确驶上货车车厢并完成装载。叉车属于低自由度的大吨位车辆,在调整航向时应尽量避免原地打转、频繁启停、倒车等复杂动作。应用运动规划技术可使叉车仅用简单动作就准确调整位置和航向的需求,因此,对智能转运叉车的运动规划进行研究很有意义。

解决智能转运叉车的自动驾驶运动规划问题有3个层次:(1)搜索最佳路径;(2)搜索最佳机动动作;(3)搜索最佳轨迹。解决方式可归纳为两种方案:(1)忽略时间,只考虑二维空间的路径规划;(2)考虑时间因素,在三维时空进行的运动规划。

屈盼让等^[2]提出了基于B样条曲线解决无人车路径规划问题的方法,建立了完整的分步规划模型。吕恩利等^[3]采用四次五阶准均匀B样条曲线,分前后段合并生成满足叉车多约束条件下的避障路径。周兵等^[4]提出了一种基于非均匀B样条曲线,且满足多约束要求的路径规划方法。吕恩利等^[5]提出了基于三次均匀B样条曲线的托盘拾取路径规划方法。王国辉等^[6]提出了一个用于自动驾驶车辆运动规划的时空网络模型,该网络利用采集的时空信息产生转向运动反应。KHESRANI S等^[7]提出了一种解耦的路径-轨迹规划方法,引入了模糊平坦度的概念,以保证在不同不确定性条件下规划任务的准确执行。

路径规划需要路径跟踪算法控制行车动作予以配合,不仅需要复杂的计算,还可能出现行车动作的快速变换,如急转、急加速等情况,而这些情况在实际行车中可能会受到车辆本体机械结构的限制^[8]。运动规划是根据特定场景特点和车辆参数建立的,只需要简单地控制动作参数即可完成轨迹跟踪,针对性强。常见的运动规划方法有轨迹预测^[9]、泛函梯度优化^[10]、多项式插值^[11]等。

结合真实货场装载场景,为实现智能转运叉车的自主登车,提高叉车在箱、包转运装载过程的灵活性和功能性,本文以具有非完整约束的智能转运叉车为研究对象,综合考虑各种约束条件,建立智能转运叉车运动规划模型,并根据车辆和装车场景数据求解该模型

运动控制参数,生成车辆行驶轨迹,验证到达登车点时车辆航向的准确性以及控制过程的可行性。

1 智能转运叉车作业

在半结构化箱、包装载环境下,货车停放在指定的装车区域内,叉车作业的整个流程如下:

智能转运叉车从仓库拾取托盘,通过调度系统得知目标货车的停放区域,经全局路径规划行驶到装载区域目标货车登车桥后方一定的距离,启动登车桥位姿识别算法,通过传感器进行登车桥位姿识别以及叉车自身位姿识别,根据识别到的登车桥相对位姿启动运动规划算法,得到智能转运叉车行车动作控制参数,进而通过控制系统跟踪行车,完成调整航向和位置的目标。

登车前位姿调整作业流程如图1所示。

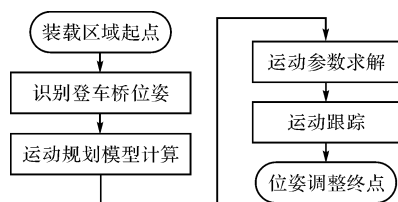


图1 智能转运叉车位姿调整作业流程

在叉车动力学研究中,叉车稳定性问题通常用横摆角速度的变化规律来描述,而叉车轨迹保持问题通常用侧滑角的变化规律来描述^[12]。

针对叉车侧偏角难以直接测量的问题,ZHANG Xu^[13]提出了一种仅采用横摆角速度反馈的叉车主动转向系统设计方案,提高了叉车的转向稳定性以及操纵稳定性。研究叉车运动规划问题常忽略动力学和其他微分约束,主要关注车辆的转向和位移^[14]。

叉车属于前轮驱动、后轮转向的非完整性约束车辆,因此此处以前轴中心点为车辆坐标系原点建立右手坐标系,并将识别到的登车桥尾板位姿作为目标点,根据在二维平面内生成一条从起点到终点的可行路线轨迹,再运用逆运动学方法得出决策动作的参数。

不同位姿下的运动规划算法生成的行车轨迹如图2所示。

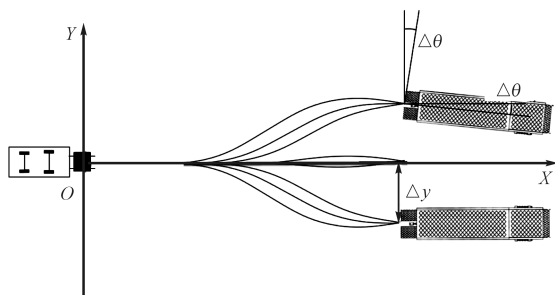


图2 不同位姿下的运动规划算法生成的行车轨迹

2 智能转运叉车运动约束

登车运动规划的目的是使得智能转运叉车能实现自主登车。智能转运叉车运动规划以匀速前进和匀转向角速度为基础,建立分阶段运动的运动模型,通过控制每个阶段持续的时长、速度、角速度,确保智能转运叉车到达目标位置且终点航向角准确^[15],使该运动规划模型生成一条可供智能转运叉车跟踪的行驶路径。

2.1 智能转运叉车运动学模型

智能转运叉车的结构方式是后轮转向前轮驱动,阿克曼转向机构在实际转向时后轮内侧轮胎转角偏大。在建立智能转运叉车运动学模型时,假设叉车车体为刚体,忽略不计车轮形变,在后轴中心设一个等效转向轮,在前轴中心设一个等效驱动轮;假设理想状态下所有车轮作纯滚动而无滑移,且转向时无侧滑。

以前轴为原点建立的运动学模型如图 3 所示。在全局坐标系 XOY 下, (x,y) 为前轴轴心坐标, P 为转向中心。在前轴轴心处,根据运动学约束可得:

$$\dot{x} = v \cos \theta \tag{1}$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \tag{2}$$

式中: θ —叉车的航向角, rad; $\dot{x}$ — x 轴方向的速度分量, m/s; $\dot{y}$ — y 轴方向的速度分量。

智能叉车航向角 $\theta = \arctan \frac{dy}{dx}$, 横摆角速度为 $\dot{\theta} =$

表 1 叉车基本参数

全长(带货叉) /mm	全宽 /mm	轴距 /mm	轮距 /mm	额定载荷 /t	自重 /kg	最小转弯 半径/mm	最大速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	爬坡度 /%
3 285	1 070	1 500	920/890	2.0	3 230	2 050	14	12/15

智能叉车转向曲率为:

$$k = \left(\frac{\dot{x} \ddot{y} - \dot{y} \ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{3}{2}}} \right) = \frac{\dot{\theta}}{v} = \frac{\tan \varphi}{L} \tag{5}$$

式中: $\ddot{x}$ — x 轴方向上的加速度, m/s^2 ; $\ddot{y}$ — y 轴方向上的加速度, m/s^2 ; $\dot{\theta}$ —航向角速度, rad/s 。

转弯半径与转向曲率关系为 $R = 1/k$, 转向角 $\varphi = \arctan\left(\frac{L}{R}\right)$, 等效转向轮最小转弯半径 $R_{\min} = 2\,050 - 950/2 = 1\,585\text{ mm}$, 得出等效转向轮最大转向角 $\varphi_{\max} = \arctan\left(\frac{L}{R_{\min}}\right) = 43.4^\circ$, 模拟真人打方向盘速度, 定义最大转向速度 $w_{\max} = 45^\circ/\text{s}$ 。

2.3 运动起终点约束

在登车前,调整位姿运动路径的起点及智能转运叉车的后轮转向角为零,航向角方向定义为 X 轴正方向,沿 X 轴方向左侧且垂直于 X 轴定义为 Y 轴正方

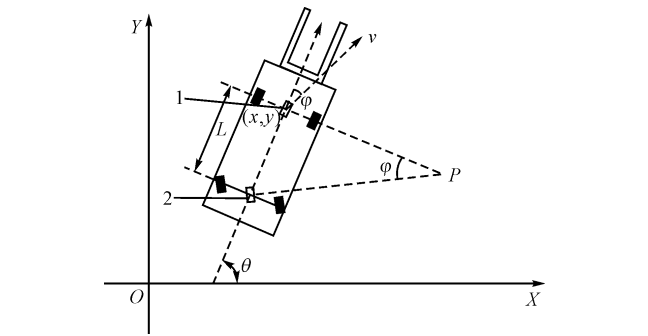


图 3 智能转运叉车运动学模型
1—等效驱动轮;2—等效转向轮

w , 转向半径 $R = \frac{L}{\tan \varphi}$, 可得:

$$\dot{\theta} = w = \frac{v}{R} = \frac{V}{L} \tan \varphi \tag{3}$$

式中: L —叉车的轴距, m; φ —等效后轮转向偏角, rad; w —转向速度, rad/s ; v —前轴中心速度, m/s 。

智能叉车运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{\tan \varphi}{L} \end{bmatrix} v \tag{4}$$

2.2 智能转运叉车参数约束

诺力 FE4P20E 型四支点前驱平衡重电动叉车基本参数如表 1 所示。

向,起点定义为坐标系原点;登车桥尾板中点为调整位姿运动的终点,智能转运叉车在此处航向角应垂直于登车桥尾板,且后轮转向角为零。

此处叉车相对登车起点的相对位姿 $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$, 如图 4 所示。

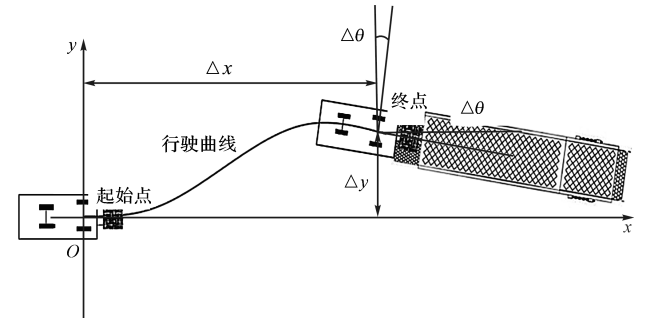


图 4 登车运动起终点约束

图 4 中, Δx 向右偏移为正; Δy 向上偏移为正; $\Delta \theta$ 以 x 轴逆时针偏移为正。

登车桥按类型分有移动式 and 固定式两种,按需求定制。

本文以某一普通移动式登车桥为例,该登车桥规格尺寸参数如表 2 所示。

表 2 登车桥尺寸参数表

总长 /mm	桥宽 /mm	高度 /mm	坡长 /mm	翻板 间隙 /mm	坡度 /%	额定 载荷 /T	尾板 长度 /mm
11 300	2 000	900 ~ 1 700	9 000	400	10 ~ 18	6	800

为避免发生翻车、碰撞登车桥等情况,通过登车桥的长度、宽度、翻板间隙、智能叉车前后轮距以及轮胎宽度的计算,可得叉车运动到终点位姿误差范围 $D \leq 230\text{ mm}$, $\theta \leq 1.14^\circ$ 。

3 运动规划模型

3.1 运动规划的维度

在满足安全性和稳定性的要求,智能转运叉车运动规划中,在行走模块,叉车的运动输出动作主要由输入速度和转向角动作控制。虽然行走轨迹可以在二维平面上,但同时也要考虑时间维度,因此,行走轨迹就是一条在二维空间和一维时间中的三维曲线。

从动力学上来说,叉车有很大的惯性;从运动学上来说,叉车又属于非完整性系统,因此,只考虑当前位姿而没有前瞻性动作就无法准确跟踪规划行车路线。运动规划不仅包括路径规划,也考虑运动控制。这样由运动规划得出的一条在三维时空中的跟踪路径可以完整地描述智能叉车的运动全貌,并对该运动规划模型进行求解,从而实现对叉车的精确运动控制。

3.2 运动控制模型

为保持车身行驶平稳,避免急转向情况的出现,建立智能转运叉车运动规划模型,有必要考虑叉车运动的横向和纵向加速度、加加速度,即前进运动的速度、加速度和转向角的速度、加速度。

运动模型主要有恒速模型(CV)、恒加速度模型(CA)、恒角速度模型(CTR)和恒角加速度模型(CTRA)^[16]。转向角速度对于高速行驶车辆影响较大,不同的运动模型轨迹会有较大的差别,因此,要在规划之初,根据叉车运动特性对运动模型进行合理决策。

为了简化智能转运叉车计算的复杂度,假设整个运动规划过程中车辆匀速行驶,给定行驶匀速度 $v = 1.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,角速度 $w = \pi/6\text{ s}^{-1}$ 。由于加速转向减速

转向时间较短可忽略不计,在该模型下简化为匀速转向阶段,且每个转向状态阶段持续时长相同。

CC 曲线(continuous curvature path)是曲率线性变化的曲线,它由最小转弯半径曲线转换而来,对路径进行平滑化处理^[17]。

本文研究了常见场景下的叉车运动规律,并在 CC 曲线的基础上进行了优化,提出了 S 型曲线的行车轨迹。此处按转向角状态转换将运动模型分为 9 个阶段,分别为:

- (1)起始线型阶段。转向角为零且不变,车辆沿初始航向角直行;
- (2)转向阶段。转向角匀速增加,车辆转向曲率增加;
- (3)转向保持阶段。转向角保持不变,车辆沿固定半径圆弧行走;
- (4)转向回正阶段。转向角匀速减小,车辆转向曲率逐渐减小;
- (5)斜向直行阶段。转向角为零且不变,车辆沿当前航向角直行;
- (6)反转向阶段。转向角反向匀速增加,车辆转向曲率增加;
- (7)反转向保持阶段。转向角保持不变,车辆沿固定半径圆弧行走;
- (8)反转向回正阶段。转向角匀速减小,车辆转向曲率逐渐减小;
- (9)结尾直行阶段。转向角为零且不变,车辆沿当前航向角直行。

在运动模型的 9 个阶段中,每个阶段转向角状态持续时长用 $\{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_9\}$ 表示,整个过程有 10 个时间节点,分别用 $\{t_0, t_1, t_2, \cdots, t_9\}$ 表示。其中: t_0 —开始时间; t_9 —结束时间。

定义第 2 阶段转向时左转为正,右转为负,转速为 w ,则第 4 阶段转速为 $-w$,第 6 阶段转速为 $-w$,第 8 阶段转速为 w ,且在这 4 个阶段转向过程持续的时间相同,则转向角表达式如下:

$$\varphi = \begin{cases} 0, & t_0 \leq t < t_1 \\ w(t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ w(t_2 - t_1), & t_2 \leq t < t_3 \\ w(t_2 - t_1) - w(t - t_a), & t_3 \leq t < t_4 \\ 0, & t_4 \leq t < t_5 \\ -w(t - t_5), & t_5 \leq t < t_6 \\ -w(t_6 - t_5), & t_6 \leq t < t_7 \\ -w(t_6 - t_5) + w(t - t_7), & t_7 \leq t < t_8 \\ 0, & t_8 \leq t < t_9 \end{cases} \quad (6)$$

其中,第 5 阶段转向角 $\varphi_5 = w(t_2 - t_1) - w(t_4 - t_3) = wT_2 - wT_4 = 0$, 第 9 阶段转向角 $\varphi_9 = -w(t_6 - t_5) + w(t_8 - t_7) = -wT_6 + wT_8 = 0$ 。

智能转运叉车的航向角为:

$$\theta = \frac{v}{L} \int_{t_0}^t \tan \varphi dt \quad (7)$$

式中: L —叉车轴距。

X 轴方向移动的距离为:

$$S_x = v \int_{t_0}^t \cos \theta dt \quad (8)$$

Y 轴方向移动的距离为:

$$S_y = v \int_{t_0}^t \sin \theta dt \quad (9)$$

运动模型中转向角变换对应的 θ 、 S_x 、 S_y 变化曲线和行车轨迹如图 5 所示。

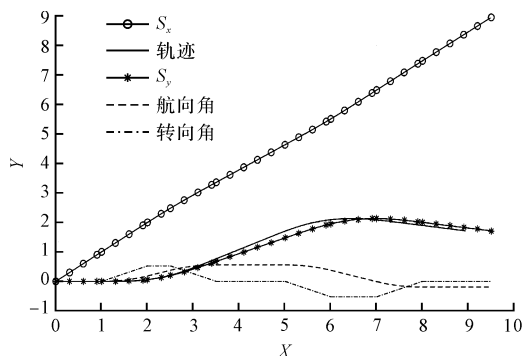


图 5 转向角变换对应的 θ 、 S_x 、 S_y 变化曲线和行车轨迹

可见,在指定后轮转速和车速以后,通过控制每个阶段的时长即可控制叉车的最终位姿。

3.3 运动模型求解

运动模型规划要达到的目标是智能转运叉车从起点运动到终点时,满足以下 3 式:

$$\Delta \theta = \frac{v}{L} \int_{t_0}^{t_9} \tan \varphi dt \quad (10)$$

$$\Delta x = v \int_{t_0}^{t_9} \cos \theta dt \quad (11)$$

$$\Delta y = v \int_{t_0}^{t_9} \sin \theta dt \quad (12)$$

在建立运动模型时,根据已知车速 v ,轴距 L ,转速 w ,设定第 2、4、6、8 阶段转向过程持续时间 T_2 、 T_4 、 T_6 、 T_8 相等,即 $T_2 = T_4 = T_6 = T_8 = T_\varphi$,可知影响 $\Delta \theta$ 变化的有 T_3 、 T_7 ,影响 Δy 变化的有 T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9 ,影响 Δx 变化的有 T_1 、 T_3 、 T_5 、 T_7 、 T_9 。

由此,先求解第 3、7 阶段持续时间 T_3 、 T_7 ,其次求解第 5、9 阶段持续时间 T_5 、 T_9 ,最后求解第 1 阶段持续时间 T_1 。

3.3.1 T_3 、 T_7 求解

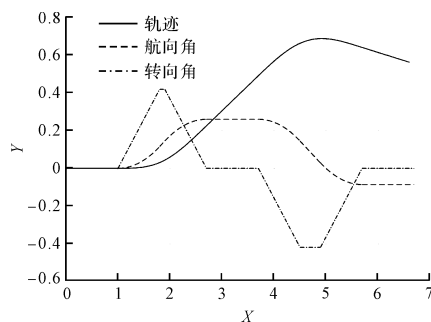
根据式(10)可知,在其他 7 个阶段航向角变化之

和为零。求解 T_3 、 T_7 时,已知 $\varphi_3 = wT_2$, $\varphi_7 = -wT_6$; 又 $T_2 = T_4 = T_\varphi$,可得:

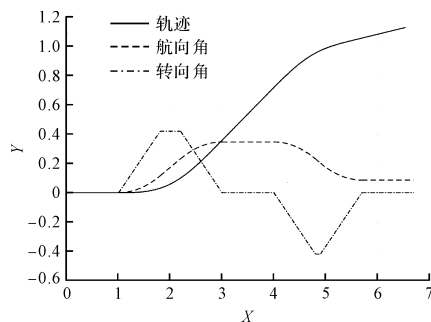
$$\Delta \theta_3 + \Delta \theta_7 = \frac{v}{L} \int_{t_2}^{t_3} \varphi dt + \frac{v}{L} \int_{t_6}^{t_7} \tan \varphi dt \quad (13)$$

其中,设 $k_\varphi = \frac{v}{L} \tan(wT_\varphi)$, k_φ 为常量。上式可改写为 $\Delta \theta = k_\varphi (T_3 - T_7)$, 即 $|T_3 - T_7| = \Delta \theta / k_\varphi$ 。

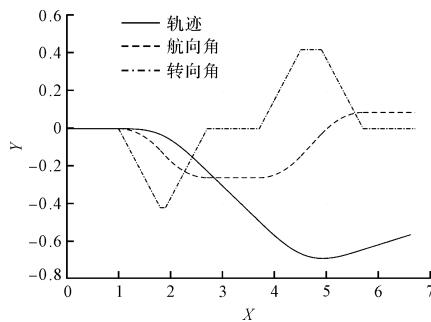
Δy 、 $\Delta \theta$ 值分别为正、负时, T_3 与 T_7 大小关系如图 6 所示。



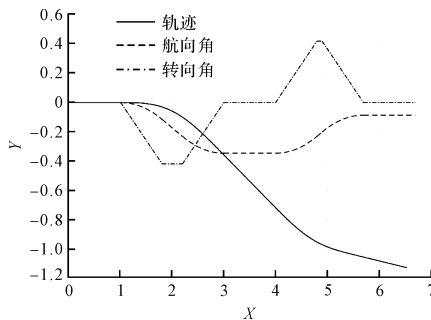
(a) Δy 为正, $\Delta \theta$ 为正时, 转向角、航向角变化曲线及行车轨道



(b) Δy 为正, $\Delta \theta$ 为负时, 转向角、航向角变化曲线及行车轨道



(c) Δy 为负, $\Delta \theta$ 为正时, 转向角、航向角变化曲线及行车轨道



(d) Δy 为负, $\Delta \theta$ 为负时, 转向角、航向角变化曲线及行车轨道

图 6 Δy 、 $\Delta \theta$ 值分别为正、负时 T_3 与 T_7 大小关系

图6中:规定 Δy 向 y 轴正方向偏移为正,反之则为负; Δy 为正时,车辆先左转后右转,反之先右转后左转;

规定向 x 轴接近为正,远离 x 轴 $\Delta\theta$ 为负,可知 $\Delta\theta$ 为正时 $t_3 < t_7$, $\Delta\theta$ 为负时 $t_3 > t_7$ 。

3.3.2 T_5 、 T_9 求解

求解运动规划模型中的 T_5 、 T_9 时,模型中的第2-4、6-8阶段的时长参数已由前文确定,当 T_5 变化时,并不影响随后的第6-8阶段 Δy_{6-8} 的变化值,举例如图7所示。

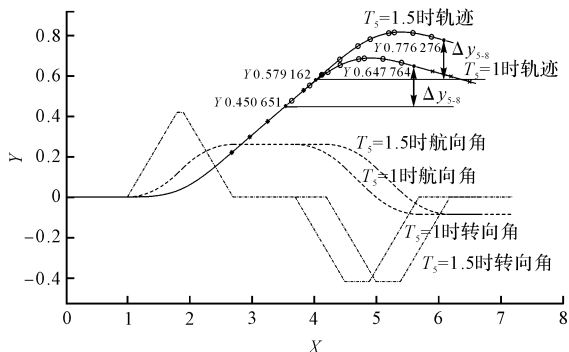


图7 其他参数不变, $T_5 = 1.0/1.5$ 时
 Δy_{6-8} 的变化量对比

已知总的 Y 轴偏移量为 Δy ,且 $\Delta y_1 = 0$,根据前文得 $\Delta y_{2-4,6-8} = \Delta y_2 + \Delta y_3 + \Delta y_4 + \Delta y_6 + \Delta y_7 + \Delta y_8$,则:

$$\Delta y_{5,9} = \Delta y - \Delta y_{2-4,6-8} \quad (14)$$

在运动模型中,第(5,9)阶段的行驶轨迹分别是两条不同斜率的直线,可知 Δy_5 、 Δy_9 是和时长 t 相关的一阶线性方程。

由 $\theta = \frac{v}{L} \int_{t_0}^t \tan \varphi dt$, $\varphi_1 = \varphi_5 = \varphi_9 = 0$,可知:

$$\theta_5 = \frac{v}{L} \int_{t_1}^{t_4} \tan \varphi dt \quad (15)$$

$$\theta_9 = \frac{v}{L} \left(\int_{t_1}^{t_4} \tan \varphi dt + \int_{t_5}^{t_8} \tan \varphi dt \right) \quad (16)$$

则 $\Delta y_5 = v \int_{t_4}^{t_5} \sin \theta_5 dt = v \sin \theta_5 T_5$, $\Delta y_9 = v \int_{t_8}^{t_9} \sin \theta_9 dt = v \sin \theta_9 T_9$ 。令 $k_{y_5} = v \sin \theta_5 = v \sin \left(\frac{v}{L} \int_{t_1}^{t_4} \tan \varphi dt \right)$, $k_{y_9} = v \sin \theta_9 = v \sin \left(\frac{v}{L} \left(\int_{t_1}^{t_4} \tan \varphi dt + \int_{t_5}^{t_8} \tan \varphi dt \right) \right)$, 则这两个一阶线性方程可简写为 $\Delta y_5 = k_{y_5} T_5$, $\Delta y_9 = k_{y_9} T_9$, 有:

$$\Delta y_{5,9} = k_{y_5} T_5 + k_{y_9} T_9 \quad (17)$$

式(17)中, T_5 和 T_9 有多组解,调用MATLAB中的fmincon函数,以 $T_5 + T_9$ 取最小值为优化目标,建立方程组如下:

$$\begin{cases} \min & T_5 + T_9 \\ s. t. & T_5 + T_9 > 0 \\ & k_{y_5} T_5 + k_{y_9} T_9 = \Delta y_{5,9} \\ & 0.1 < T_5, T_9 \\ & T_0 = (0, 0) \end{cases} \quad (18)$$

当 $\Delta\theta$ 为正时, k_{y_5} 与 k_{y_9} 的值一个为正、一个为负, T_5 和 T_9 总有解,且成正比。当 $\Delta\theta$ 为负时, k_{y_5} 与 k_{y_9} 的值均为正值或负值, T_5 和 T_9 的值成反比,若此时 $\Delta y_{5,9} = |\Delta y| - |\Delta y_{2-4,6-8}| < 0$ 就得出 T_5 、 T_9 为负值,与事实不符,要通过减小 $|\Delta y_{2-4,6-8}|$ 的值,即减小 w 或者 T_φ 的值来使 T_5 和 T_9 为正值。

等比例减小 w 或 T_φ 生成的轨迹如图8所示。

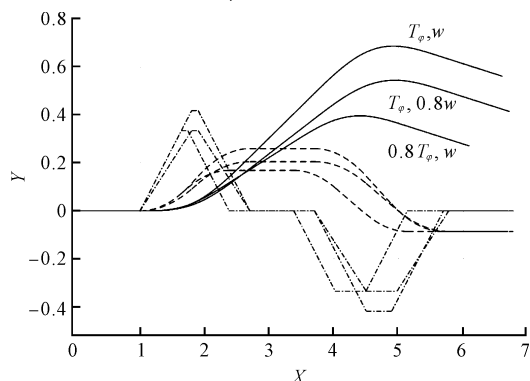


图8 等比例减小 w 或 T_φ 生成的轨迹

由图8可知:减小 w 对减小 $|\Delta y_{2-4,6-8}|$ 值的效果不如等比例减小 T_φ ,且会使 X 轴偏移量增大,对下一步求解 T_1 不利,故选择通过减小 T_φ 减小 $|\Delta y_{2-4,6-8}|$ 值更合适。此处引入迭代法计算,直到 T_5 、 T_9 均为正解,但要注意 $\tan(w T_\varphi)$ 值的变化会引起 $|T_5 - T_9|$ 值的变化,迭代时要重新计算 T_5 、 T_9 的值使 $\Delta\theta$ 保持不变。

3.3.3 T_1 求解

已知 X 轴方向总变量 Δx ,每一阶段 Δx_i ($i = 1, 2, \dots, 9$)均为正值。由于 $\varphi_0 = 0, \theta_0 = 0$, $\Delta x_1 = v \int_{t_0}^{t_1} \cos \theta dt = v T_1$, 且 T_1 的大小并不改变 Δx_{2-9} 的值,可得:

$$T_1 = \frac{\Delta x - \Delta x_{2-9}}{v} \quad (19)$$

若 $\Delta x_1 = \Delta x - \Delta x_{2-9} < 0$,则依旧用迭代法通过减小 T_5 、 T_9 或者 T_φ 的值,达到使 $\Delta x_1 > 0$ 的目的。

3.4 模型求解步骤总结

整个模型的求解过程用到了分步法、迭代法和fmincon函数。已知轴距 $L = 1.5$ m, 目标 Δx 、 Δy 、 $\Delta\theta$, 求解步骤总结如下:

(1) 初选速度 $v = 1.0$ m/s、转向角速度 $w = \pm \frac{\pi}{6}$

rad/s, $t_2 = t_4 = t_6 = t_8 = t_f = 1$ s;

(2) 根据 Δy 的正负, 确定 w 的正负;

(3) 根据 $\Delta \theta$ 的值, 确定 t_7 、 t_3 的值;

(4) 计算 $\Delta y_{2-4,6-8}$ 的值, 并与 Δy 比较。若 $\Delta y - \Delta y_{2-4,6-8} < 0$ 则减小 w 值, 并重新计算 $\Delta y_{2-4,6-8}$ 的值;

(5) 根据 $\Delta y - \Delta y_{2-4,6-8}$ 的值, 确定 t_5 、 t_9 的值;

(6) 计算 Δx_{2-9} 的值, 并与 Δx 比较。若 $\Delta x - \Delta x_{2-9} < 0$ 则适当增大 w 的值, 但要注意不能超出最大转向速度, 然后再返回第 3 步;

(7) 根据 $\Delta x - \Delta x_{2-9}$ 的值确定 t_1 ;

(8) 代入所有控制参数, 运行运动规划模型, 生成行车轨迹, 验证终点位置与航向是否在误差范围内。

4 仿真实例及分析

不同目标位姿 ($\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$) 下运动规划模型运算后生成的运动轨迹簇, 如图 9 所示。

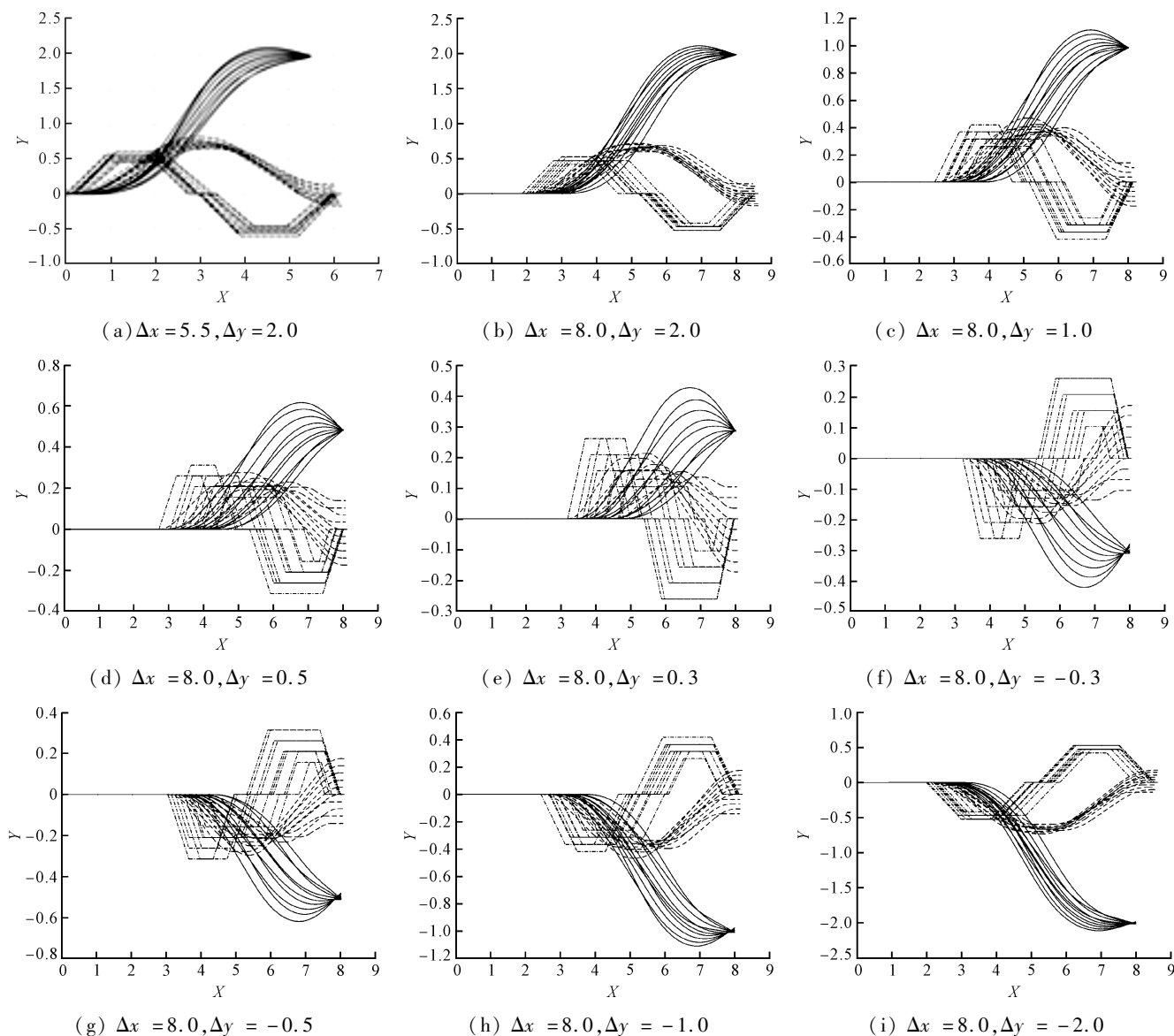


图 9 $\Delta x, \Delta y$ 分别取不同值时, $\Delta \theta$ 在 $[-10^\circ: 2^\circ: 10^\circ]$ 范围的运动簇

图 9 中, 虚线是转向角变化曲线, 点划线是航向角变化曲线, 实线是叉车前轴中心行车轨迹。

对比图 9(a~b) 可知: 在相同 Δy 值情况下, 随着 Δx 值减小, w 会有所增大, 这是因为第一阶段时长只改变 X 方向距离; 后面阶段完成求解而发生了后 8 个阶段在 X 轴偏移量超出了总的目标 Δx 值, 为避免 T_1

出现负值, 通过调整 w 来重新求解运动模型。由此可见, 在极限情况下 (Δx 最小, Δy 最大), 模型在范围内有解, 即运动模型设计满足应用需求。

对比图 9(b~d) 中, Δx 值不变, Δy 值变化, 可知随着 Δy 的减小, 最大转向角 w_{ϕ} 在减小, 即转向阶段在 Y 轴的偏移量超出了总的目标 Δy 值。为避免 T_3 、

T_7 出现负值,通过调整 t_φ 来减小转向阶段的 Δy 值,使得模型有解,然后重新求解运动模型。

对比图 9(b,i,c,h)可知,在 Δx 值相等、 Δy 值相反时,运动模型规划出的轨迹对称,即对 w 转向的控制很成功。

观察图 9(d~g)生成的运动轨迹簇可知: $\Delta\theta < 0$ 时,随着 Δy 的减小,在 $\Delta\theta$ 为较大值时运动规划模型得不到行车轨迹;而 Δy 越小,模型无解时的最大 $\Delta\theta$ 值也越小。这时,需要调整策略,经过试验把 t_φ 初始值调整为 0.5 s 时能得出最优运动规划结果。

调整转向策略的最佳范围如图 10 所示。

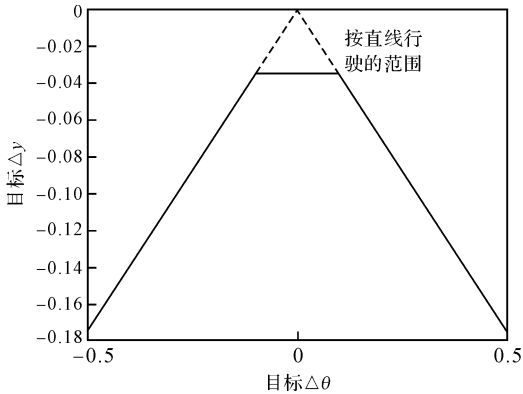
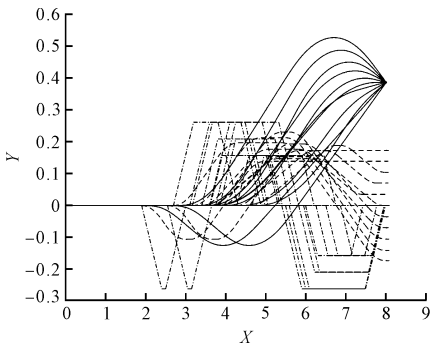


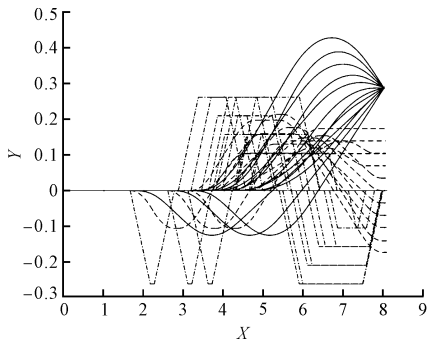
图 10 调整转向策略的范围

图 10 中,对 $0 < \Delta y < 0.5$ 且 $\Delta\theta < 0$,调整为先右转;对 $0 > \Delta y > -0.5$ 且 $\Delta\theta < 0$,调整为先左转。

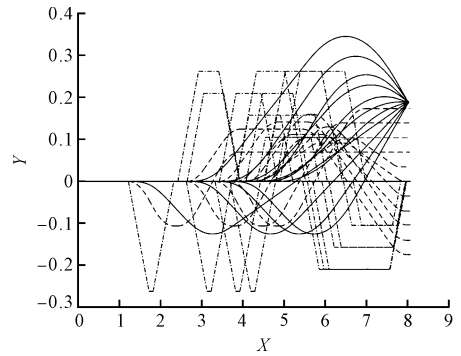
调整转向策略后的运动模型求解出的运动轨迹如图 11 所示。



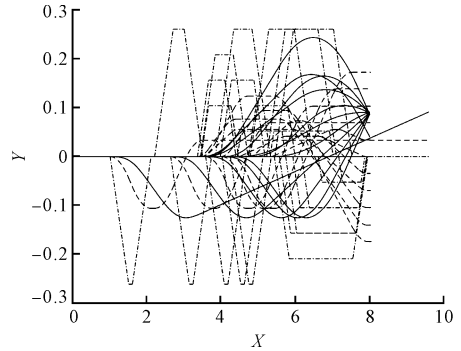
(a) $\Delta y = 0.4$



(b) $\Delta y = 0.3$



(c) $\Delta y = 0.2$



(d) $\Delta y = 0.1$

图 11 调整转向策略后的 Δy 在较小值时生成的运动轨迹簇

对比图 11(a~c)可知:在 $\Delta\theta < 0$, Δy 分别为 0.4、0.3、0.2、0.1 时,除 $\Delta y = 0.1$, $\Delta\theta = 0.2$ 外都能求出模型的解。在 Δy 值极小,且 $\Delta\theta$ 极小情况下,全程按直线行驶也满足误差范围,添加修正函数为:

$$y = \begin{cases} y, & \text{其他} \\ 0, & y \leq 0.1 \text{ 且 } \theta \leq \frac{\pi}{90} \end{cases} \quad (20)$$

$$\theta = \begin{cases} \theta, & \text{其他} \\ 0, & y \leq 0.1 \text{ 且 } \theta \leq \frac{\pi}{90} \end{cases} \quad (21)$$

融合未调整转向策略区域的模型算法,可以得到在目标位移和目标航向范围内的所有运动规划算法。至此,修正后的运动规划算法模型在全部情况下都有解,完成了适用于本文的智能转运叉车运动规划算法。

在计算效率上,在 Intel(R) Xeon(R) CPU 3.50 GHz 的计算机中, MATLAB2020b 版本环境使用 tic、toc 函数生成多个控制点的 B 样条曲线轨迹,运行 25 次后得出平均运行时间为 0.029 5 s。而本文的运动规划模型在 100 种不同目标中求解运行总时间为 1.228 159 s,平均单一目标求解运行时间为 0.012 3 s,效率比前者高 59%。

5 结束语

在参考了普通叉车装车作业时运行轨迹特征,并

结合叉车运动学分析的基础上,笔者建立了基于转向角变换的 9 种运行状态组成的叉车运动规划模型,并在 MATLAB 环境下对其进行了仿真验证。

研究结果表明:

(1)该运动规划算法模型能在前向位移 5 m ~ 8 m、侧向位移 ± 2 m、航向角 $\pm 10^\circ$ 范围内简单、准确、快速地生成满足多约束状态下的运动规划控制参数,平均运行时间约为 0.012 3 s;

(2)模型改进了以往在固定场景下的路径规划算法,省去了需通过优化路径曲线光滑度来实现最优路径规划的过程,减少了叉车运行控制计算量,运行时间减少了约 59%。

在今后的研究中,笔者将针对智能转运叉车目标位姿识别差错,或供叉车行驶空间过于狭窄的情况,进行叉车进退式运动规划研究,使叉车可以在更复杂的环境或场景内做二次运动规划。

参考文献 (References):

- [1] JEEHUN P, MINHWAN K, SUK L, et al. Development of autonomous loading and unloading for network-based unmanned forklift[J]. **Journal of Institute of Control, Robotics and Systems**, 2011, 17(10): 1051-1058.
- [2] 屈盼让,李 林,任晓琨,等. 基于 B 样条曲线的无人车路径规划算法[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(26): 235-237.
- [3] 吕恩利,阮清松,刘妍华,等. 基于动态识别区和 B 样条曲线的智能叉车避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 359-366.
- [4] 周 兵,万 希,吴晓建,等. 紧急避撞工况下的路径规划与跟踪[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(10): 10-18.
- [5] 吕恩利,林伟加,刘妍华,等. 基于 B 样条曲线的智能叉车托盘拾取路径规划研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 394-402.
- [6] 王国辉,杨 波,王春阳. 基于深度学习的自动驾驶车辆运动规划研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版,

- 2020, 43(2): 94-98.
- [7] KHESRANI S, HASSAM A, BOUTALBI O, et al. Motion planning and control of nonholonomic mobile robot using flatness and fuzzy logic concepts[J]. **International Journal of Dynamics and Control**, 2021(6): 1-12.
- [8] TAMBA T A, HONG B, HONG K S. A path following control of an unmanned autonomous forklift[J]. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, 2009, 7(1): 113-122.
- [9] 孙巍伟,王 晗,黄 民. 一种基于运动学约束的工业机器人轨迹规划算法[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2020, 39(2): 91-96.
- [10] 傅来磊,易 阳,张兴华. 基于泛函梯度优化的运动规划算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(4): 1006-1011.
- [11] 张 程,张 卓. 码垛机器人运动学分析及关节空间轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020, (2): 19-21, 25.
- [12] 彭 锦. 基于横摆角速度反馈的汽车四轮转向控制研究[J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 38-43.
- [13] ZHANG Xu, XIAO Ben-xian. Research on active steering control strategy based on sideslip angle estimation for a steering-by-wire forklift[J]. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, 2019, 14(6): 908-916.
- [14] ZAPATA C A, GONZALEZ J. Sequential collision-free optimal motion planning algorithms in punctured euclidean spaces[J]. **Bulletin of the Australian Mathematical Society**, 2020, 102(3): 506-516.
- [15] 邵新明,肖本贤. 基于横摆角速度反馈的三轮全转向电动叉车转向研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2017, 40(11): 1496-1501.
- [16] 张一鸣,周 兵,吴晓建,等. 基于前车轨迹预测的高速智能车运动规划[J]. 汽车工程, 2020, 42(5): 574-580, 587.
- [17] 张 驰. 基于连续曲率的平行泊车路径规划研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车工业学院, 2015.

[编辑: 雷 敏]

本文引用格式:

霍旭坤,马晓录,刘 艳,等. 基于转向角变换的智能转运叉车运动规划研究[J]. 机电工程, 2021, 38(9): 1212 - 1220.

HUO Xu-kun, MA Xiao-lu, LIU Yan, et al. Motion planning of intelligent transfer forklift based on steering angle transformation[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(9): 1212 - 1220.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>