

拖挂式大载荷特种车辆导航控制系统设计与试验

伟利国^{1,2} 袁玉龙^{1,2} 董鑫^{1,2} 周达^{1,2} 汪雅琦^{1,2} 陈文科³

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083; 3. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对拖挂式大载荷特种车辆作业自动化以及高精度安全作业需求,以大载荷牵引车为对象,设计了一套拖挂式机组自主导航控制系统。车载程控系统采用模块化分布式系统,通过 CAN 总线实现系统内各模块间通信,远程运管平台与车载程控终端之间采用 TCP 协议进行数据通信,实现远程运管平台与车载程控系统间信息交互。建立拖挂式特种车辆的运动学模型,分析牵引作业时被牵引机具的牵引状态和最小转弯半径。针对传统纯追踪算法中固定前视距离缺陷,本文根据当前牵引车实时速度、追踪路径曲率、航向等信息动态计算前视距离,将固定前视距离改进为动态前视距离追踪,由单参数变为多参数进行优化控制参数,显著提高了轨迹追踪精度;使用随机森林算法对轨迹追踪数据进行特征提取,根据各个特征重要性指标权重,修改算法参数。在试验场地为水平倾斜度最大为 2°的空旷的水泥跑道上,牵引车质量 2 t,被牵引机具质量 10 t、长 22 m,且牵引机组设计要求最大行驶速度为 6 km/h、最大横向偏差为 50 cm。根据复杂路径试验与数据分析,系统纠偏响应时延最大为 84 ms,牵引机组绝对横向误差最大为 37.14 cm,平均绝对误差为 14.91 cm,满足大载荷拖挂作业中的实际应用要求。

关键词: 拖挂式特种车辆; 导航; 控制系统; 路径追踪; 纯追踪算法; 随机森林算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0324-08

Design and Experiment of Navigation Control System for Trailer Special Vehicle

WEI Ligu^{1,2} YUAN Yulong^{1,2} DONG Xin^{1,2} ZHOU Da^{1,2} WANG Yaqi^{1,2} CHEN Wenke³

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Beijing 100083, China
3. Beijing Jinlun Kuntian Special Machine Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the operation automation and high-precision safety operation requirements of trailer-type large-load special vehicles, a set of trailer-type unit autonomous navigation control system was designed for the large-load tractor. The vehicle-mounted program control system adopted a modular distributed system, and the communication between the modules in the system was realized through the CAN bus. The TCP protocol was used for data communication between the remote operation and management platform and the vehicle-mounted program control terminal, so as to realize the information exchange between the remote operation and management platform and the vehicle-mounted program control system. The kinematic model of the trailer-type special vehicle was established, and the towing state and the minimum turning radius of the towed machine were analyzed during the towing operation. Aiming at the defect of fixed foresight distance in the traditional pure pursuit algorithm, the foresight distance was dynamically calculated based on the current real-time speed of the tractor, tracking path curvature, heading and other information, and the fixed foresight distance into dynamic foresight distance tracking was improved. The control parameters were optimized for multiple parameters, which significantly improved the accuracy of trajectory tracking; the random forest algorithm was used to extract the features of the trajectory tracking data, and the algorithm parameters were modified according to the weight of each feature importance index. On an open concrete runway with a maximum horizontal inclination of 2° on the test site, the mass of the tractor was 2 t, the mass of the towed machine was 10 t,

and the length was 22 m, and the design of the traction unit required a maximum running speed of 6 km/h and a maximum lateral deviation of 50 cm. According to the long and complex path test and data analysis, the maximum delay of the system correction response was 84 ms, the maximum absolute lateral error of the traction unit was 37.14 cm, and the average absolute error was 14.91 cm, which met the practical application requirements in large-load towing operations.

Key words: trailer special vehicle; navigation; control system; path tracking; pure pursuit algorithm; random forest

0 引言

目前,大载荷拖挂式特种车辆自动导航系统的研究成为重要的研究课题,具有自动导航控制功能的拖挂特种车辆被广泛地运用于农业运输、港口调运、机场牵引等领域。在这些领域中有着许多复杂且重复繁琐的任务,拖挂式牵引车辆已成为不可缺少的运输工具。

2021 年加拿大 Cyberworks Robotics 公司设计了一款 Industrial tow-tugs (RAVS-T100) 自主导航驾驶牵引车,用于将温室中装有农产品的拖车从种植区拖到加工区。HATA 等^[1]提出了一种刚性卡车的主动转向系统,该系统可以使拖车在低速时沿着拖拉机的路径行驶,而不会出现尾部摆动。RANGAVAJHULA 等^[2]提出了一种控制策略,通过拖车转向控制改善多拖车车辆在低速和高速下的性能。现有路径跟踪控制方法分为 3 种:基于几何原理的路径跟踪控制,如纯追踪控制、Stanley 控制等;基于线性控制理论的路径跟踪控制,如 PID 控制、线性反馈控制等;基于模型的路径跟踪控制,如模型预测控制(Model predictive control, MPC)、线性二次调节器(Linear quadratic regulator, LQR)等^[3-6]。对于拖挂式特种车辆的作业结构特点, PID 是最常用的实现技术,然而对于不同的驾驶情况需要调整控制参数;对于纯追踪控制器(Pure pursuit control, PPC)^[7],首先确定距离车辆最近的路径点并生成曲

率,且只有车辆的前视距离一个可调参数^[8-9]; Stanley 控制器^[10]和滑模控制^[11]没有视野提前量的算法,难以在复杂驾驶场景中使用;其他经常使用的算法是最优控制算法,如 MPC、LQR 及其变体,如 iLQR 和 LQG^[12],虽然这些算法含有运动规划和控制器,但计算复杂度相对较高,实时性差,不适用于现实场景。

对于水平倾斜最大为 2°的空旷水泥跑道,牵引车质量 2 t,被牵引机具质量 10 t、长 22 m,在最大行驶速度为 6 km/h 的机组牵引作业环境下,设计一种基于改进的纯追踪算法的大载荷拖挂式特种车辆的导航控制系统,由车载程控系统、行驶控制系统、机组姿态感知系统、车辆状态系统、远程运管平台等构成。其通过北斗定位系统进行车辆坐标定位,采用激光雷达进行障碍物检测与避障。由远程运管平台下发车辆待追踪的行驶路径,其为连续时间序列下的离散点,以车载控制终端作为下位机存储解析待追踪路径信息,根据运管平台的启停控制指令按预定轨迹进行自动导航控制。

1 系统结构设计

1.1 运动控制系统设计

采用分布式技术将牵引车辆的控制系统进行模块化分层处理,以提高系统总体的可维护性、可测试性。如图 1 所示,本文车载程控系统与机组姿态感知模块、行驶控制系统之间采用 CAN 总线通信;机

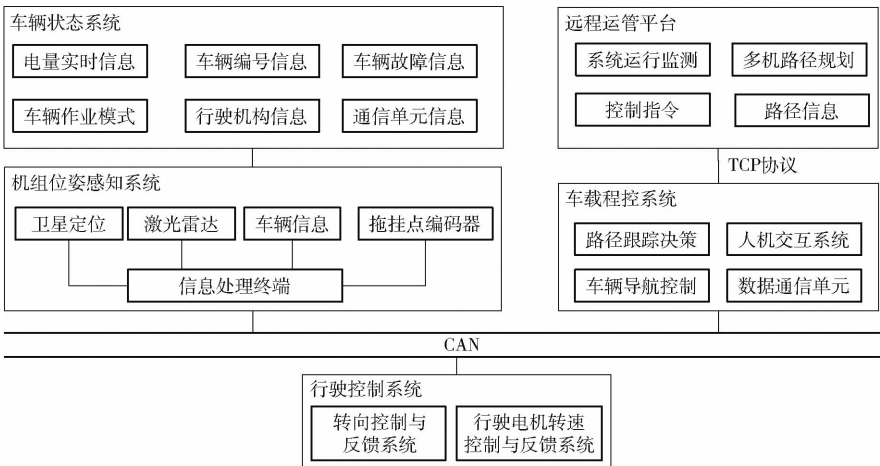


图 1 系统总体架构图

Fig. 1 System overall architecture diagram

组位姿感知系统模块中分别对北斗卫星定位模块、激光雷达避障模块、车辆状态信息模块、拖挂节点处编码器转角模块的数据进行采集与解析,其中车辆状态系统与机组位姿感知系统进行耦合,所有数据通过 CAN 总线发送给车载程控系统;其中行驶控制系统,通过 stm32 单片机控制板接收车载程控系统的车辆导航控制指令,并实时反馈车辆的转角、行驶电机转速信息;远程运管平台与车载程控系统之间通过 TCP 协议建立服务端和客户端的长链接通道,以确保数据传输的稳定性和可靠性,传输信息包括控制指令、离散路径信息、车辆位姿状态信息等。

1.2 行驶控制系统设计

本文牵引车辆作业环境为地势平坦的水泥场地,由于特殊的作业环境要求车辆作业速度不得超过 5 km/h。如图 2 所示,采用前驱立式舵轮结构,转向与行走驱动一体化设计,驱动性能良好,且控制结构较为简单便于运动学分析。其中行走编码器和转向编码器信息通过 CAN 总线传输;前驱舵轮最大转向角度为 $\pm 60^\circ$;行走驱动力矩最大 1 500 N·m,驱动车辆行进速度可达 6 km/h。

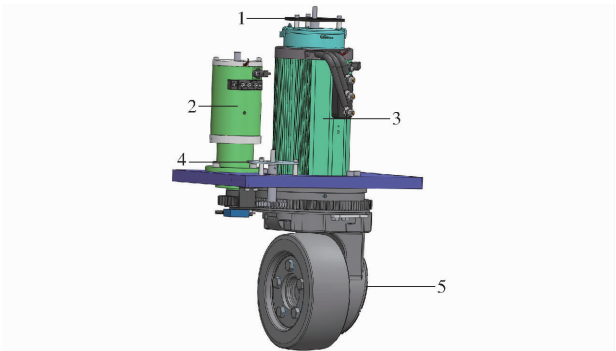


图 2 车辆立式舵轮结构图

Fig. 2 Vehicle vertical steering wheel structure diagram
1. 行走编码器安装支架 2. 转向电机 3. 驱动电机 4. 转向编码器安装支架 5. 行走减速机箱体

1.3 车辆位姿采集模块

机组牵引作业环境为室外空旷且无建筑物遮挡,并且许多研究将 GNSS(Global navigation satellite system)作为车辆导航的基础传感器。本文选用北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system)的卫星定位模块及技术,采用 RTK(Real-time kinematic)定位方式,其中接收装置为智能实时差分仪(图 3),定位模块为“和芯星通 UB482”,RTK 差分数据采用 1.4 GHz 无线专用网络传输,传输延迟在 20 ms 以内,以 5 Hz 采集车辆位置和航向角信息。采用全站仪检测静态差分定位数据,定位平均误差为 0.46 cm。

1.4 程控软件系统流程设计

车载程控系统是牵引机组导航系统的核心组成

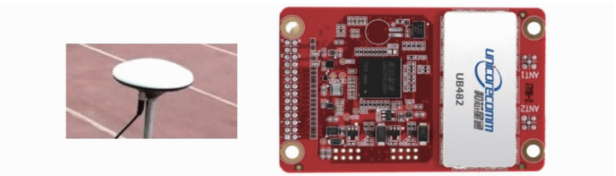


图 3 智能实时差分仪和定位模块
Fig. 3 Intelligent real-time differential meter and positioning module

部分。车载程控系统在启动时,以 TCP 协议于建立客户端请求链接远程运管平台建立的远程服务端,与远程服务端进行指令通信、数据接发;程控终端与远程服务端以心跳包形式保持长链接,实时监测网络通信通道的连接;定位模块以 5 Hz 频率定时接收车辆位姿信息,经过解析换算后,调用路径追踪算法进行闭环控制。图 4 中箭头的方向代表数据或指令流通方向。

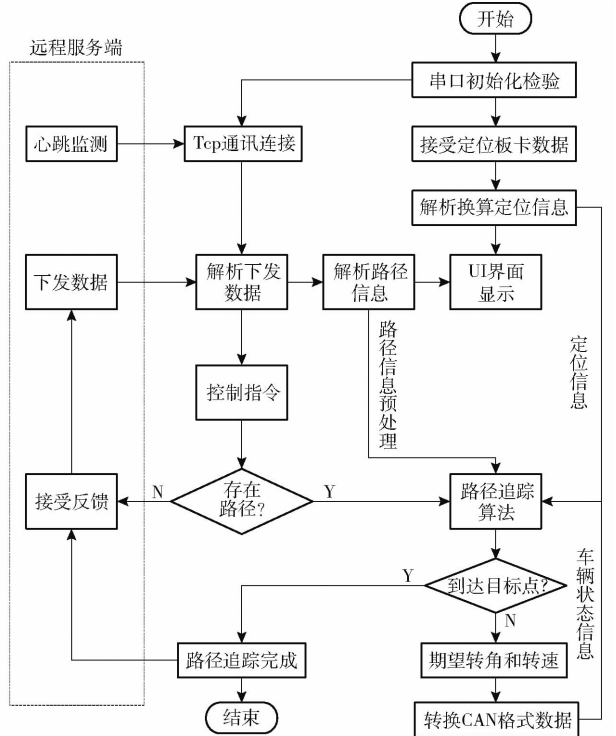


图 4 程控系统流程图

Fig. 4 Program control system flow chart

1.5 车载程控系统

车载控制终端是一款基于 Android 显示终端(图 5),采用高通 8 核 64 位 SDM 450 处理器,ARM Cortex - A53 架构,主频 1.8 GHz。内置 2 路 CAN 总



图 5 车载程控终端和系统 UI 界面
Fig. 5 On-board program control system and system UI interface

线、RS485、RS232 接口；软件系统采用多线程并发的分布式软件架构；系统 UI 界面实时显示接收的车辆状态信息、机组姿态感知系统采集的数据信息和轨迹跟踪状态；WiFi 网络用于链接远程服务端，接收上位机系统指令。

2 自动驾驶控制系统设计

2.1 纯跟踪算法

本文中预定路径以离散路径点的形式给出，为保证曲线段路径平滑，令相邻路径点间隔为 10 cm。由于路径点间隔相对较短，采用线性插补的方法，使用直线段顺次连接路径点，从而形成多条首尾相接的直线段。图 6 所示粗实线为实际行驶路径，虚线为路径点依次连接的直线段，实心圆圈为车辆当前位置，带箭头线段为设定的前视距离。本文采用 PID 进行纵向控制，采用纯跟踪算法进行车辆的横向控制，基于几何原理的纯跟踪算法有着实时计算控制输入的优越性。

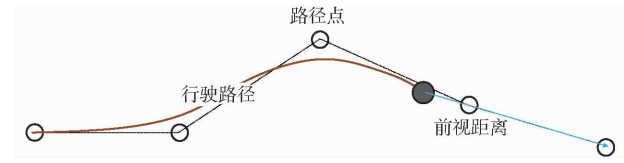


图 6 纯跟踪控制器效果图

Fig. 6 Pure pursuit controller renderings

本文采用双天线 RTK - BDS 定位，图 7 中以被牵引机具幅宽距离相隔最大点 A、B 为双天线安放位置，且 A、B 两点关于被牵引机具轴线对称。故定位采集模块可得到被牵引机具点 A 相对于点 O 的坐标 (x_1, y_1) 和被牵引机具的航向角 θ_3 （以 Y 轴正方向为正北方向）。

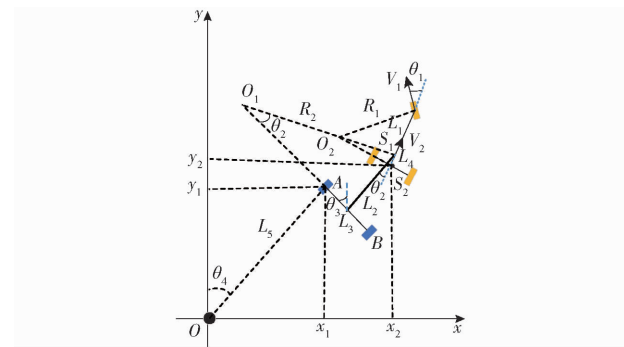


图 7 拖挂式特种车辆运动学模型

Fig. 7 Kinematics model of trailer-mounted special vehicle

由纯跟踪算法可知

$$\theta_1(t) = \arctan \frac{2L_1 \sin \alpha(t)}{l_d} \quad (1)$$

式中 θ_1 ——牵引车前驱舵轮的转向角
 L_1 ——牵引车车长，m
 t ——运行时间，s

α ——车身与目标路径点的夹角

l_d ——前视距离，m

牵引车系统运动学模型如图 7 所示，在牵引车为刚体的情况下，可得牵引车的空间状态信息

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = V_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_4 \\ \frac{dy_1}{dt} = V_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_5 \sin \theta_4 \\ L_5 \cos \theta_4 \\ x_1 + \frac{L_3}{2} \sin \theta_3 + L_2 \cos \theta_3 \\ y_1 - \frac{L_3}{2} \cos \theta_3 + L_2 \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 V_1 ——牵引车舵轮转速，m/s
 (x_1, y_1) ——移动基站差分定位坐标
 (x_2, y_2) ——牵引车后桥中点坐标
 θ_2 ——牵引车和被牵引机具间夹角
 θ_3 ——被牵引机具航向角
 θ_4 ——点 A 与点 O 间距离对地投影与正北方向之间顺时针的夹角
 L_2 ——被牵引机具轴距，m
 L_3 ——点 A 和点 B 之间的距离，m
 L_5 ——点 A 与基站间距离对地投影，m

牵引作业中，当牵引车坐标点与相邻路径点、目标路径点所成曲线的曲率越大，牵引车转角 θ_1 越大，转弯半径越小。为避免出现被牵引机具的横向滑动过大造成侧翻、牵引车和被牵引机具发生碰撞的现象，牵引机组存在最小转弯半径，并且牵引车存在最大转角。设牵引车角速度为 φ_1 和被牵引机具角为速度 φ_2 。根据 Lyapunov 理论，为保证牵引车和牵引机具间夹角的可恢复性，当 $\theta_2 > 0$ 时，即 $\varphi_2 < 0$ ，有

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{V_1 \cos \theta_1}{L_2} \sin \theta_2 + \left(1 + \frac{L_4 \cos \theta_2}{L_2} \right) \frac{V_1}{L_1} \sin \theta_1 < 0 \quad (4)$$

$$\varphi_3 = \frac{V_2}{L_1 \cot \theta_1} \left[1 - \frac{\sqrt{L_4^2 + (L_1 \cot \theta_1)^2}}{L_2} \sin \theta_2 \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{L_4^2 + (L_1 \cot \theta_1)^2} \quad (6)$$

式中 V_2 ——被牵引机具瞬时速度，m/s
 L_4 ——牵引车后桥中点到链接点的距离，m
 φ_3 ——牵引车和被牵引机具的相对角速度，rad/s
 σ ——链接点到牵引车转弯圆心的距离，m
 由式(5)可得，牵引车在保持一定速度的情况下，转角 θ_2 不变时，牵引车的转弯角速度不变，被牵

引机具的转弯角速度 φ_2 随着 θ_2 的增大而增大, φ_3 则会随之变小。由于 $\varphi_3 \geq 0$, 当 $\sigma \geq L_2$ 时, 随 φ_3 减小到 0 时, O_1 、 O_2 重合, 牵引车系统做圆周运动; 当 $\sigma < L_2$ 时, 随 θ_1 增大转弯半径逐渐减小, 直至牵引车与被牵引机具碰撞, 即 θ_1 存在临界值以保证牵引机组作业安全。

2.2 动态前视距离

2.2.1 纯追踪算法缺点

由式(1)可知, 对任一时刻其余参数确定的情况下, 由纯跟踪算法得出的转向角度只与前视距离 l_d 相关。当 l_d 过大时, 会造成牵引车“抄近路”的现象; 当 l_d 过小, 会出现在轨迹之间“震荡”的现象。牵引作业过程中, l_d 会直接影响到牵引车的追踪效果。牵引车的速度不同且前视距离固定的情况下, 牵引车会不断微调舵轮转角, 造成被牵引机具出现摇摆的状况^[13-15]。

在牵引机组大载荷转弯的情况下, 因惯性会导致牵引机组转弯过程中向外侧滑, 且速度越大, 侧滑越严重。由纯追踪算法特点知, l_d 越大牵引机组越会存在“抄近路”的现象, 故在牵引机组转向时, 采用增大 l_d 并降速, 来降低惯性对牵引车辆跟踪精度的影响。即以路径曲率动态降速为前馈, 根据牵引机组速度和路径曲率为输入, 采用模糊控制动态输出前视距离。

2.2.2 动态前视距离

对传统的纯追踪算法特性进行分析可知, 参数 l_d 受到牵引车的速度和追踪路径的曲率影响。先考虑速度的情况下, 式(1)可改写为

$$\theta_1(t) = \arctan \frac{2L_2 \sin \alpha(t)}{f(V(t), \rho)} \tag{7}$$

式中 $V(t)$ —— t 时刻下的牵引车速度, m/s

ρ ——所求目标路径点的曲率

$f(V(t), \rho)$ ——动态前视距离函数

分析可得, 前视距离 $l_d \propto V$, 并且 $l_d \propto R_1$ 。牵引大载荷的机具进行转弯时, 为降低轮胎侧滑风险, 转弯同时也需降低车速, 转弯曲率越大行驶速度越小, 即 $V \propto 1/\rho$ 。

本文中路径由离散路径点构成, 选取车辆模型当前位置坐标点、当前位置到前视距离内最远点的中点、前视距离内最远的点构成二次曲线 $y = y(x)$, 计算该点的曲率。即

$$\rho = \frac{|x''y' - x'y''|}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} \tag{8}$$

式中 x ——二次曲线函数表达式的自变量

y ——二次曲线函数表达式的应变量

通过调整式(7)中 $f(V(t), \rho)$ 函数的参数, 仿真

得到结果如图 8。

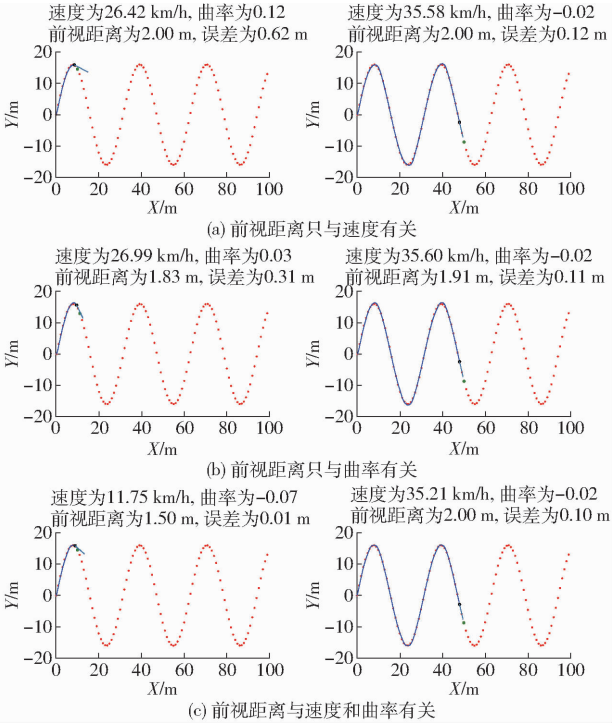


图 8 前视距离不同因素下跟踪效果
Fig. 8 Tracking effect under different factors
of foresight distance

图 8 中, 离散点为正弦型曲线路径信息, 实线为实际路径, 短横线末端为车辆模型的位置, 并在上方实时显示车辆状态信息。表 1 为图 8 仿真数据的误差分析对比。3 组路径同为正弦型曲线, 离散路径点的横向间隔为 1.00 m, 共 100 个离散路径点, 误差定义为当前位置到最近 3 个点所拟合曲线的最小距离。车辆所设目标速度为 36 km/h, 车辆模型轴距 2.50 m, 最小前视距离为 1.50 m, 每次调用算法时间间隔为 0.1 s。为验证算法的稳定性, 路径点的起始坐标为(0,0), 车辆模型的初始位置为(0,0)。其中, a 组的前视距离只与速度相关, 速度越大前视距离越大; b 组前视距离只与曲率相关, 曲率越大前视距离越小; c 组前视距离考虑速度和曲率, 并且在 a、b 组基础上, 曲率越大移动速度越小。结果表明 c 组算法考虑当前位置与目标点所成曲线曲率以及车速, 在曲率较大时降低车速, 动态调整前视距离, 其均方根误差更小, 追踪效果更好且更具稳定性。

表 1 轨迹跟踪效果误差对比

Tab.1 Trajectory tracking effect error comparison				m
组别	最大误差	平均误差	均方根误差	
a	0.742 1	0.415 1	0.327 5	
b	0.814 8	0.239 4	0.182 1	
c	0.270 4	0.153 1	0.122 9	

2.3 随机森林算法优化参数

令前视距离关于路径曲率和当前车速的函数方程为 $G(V,\rho)$, 该函数存在参数优化的问题。手动调整函数中的参数时, 不同参数之间存在相互影响, 即按一定顺序修改其中某个参数, 也会存在追踪效果变好或变差的现象。故本文使用车载终端将牵引车作业数据实时传输给远程运管平台, 当牵引作业完成后, 由远程运管平台采用随机森林的形式构建

决策树, 进行特征的提取, 从而进行特征参数的优化, 并将优化后的参数通过网络传输给车载程控系统。其中随机森林算法属于集成学习, 随机选取样本的方式能够防止过拟合, 可以处理特征较多的高维数据, 并且训练后的准确性很高^[16-20]。

如图 9a 所示, 粗实线为待跟踪路径, 细实线为车辆模型追踪轨迹。将图 9a 车辆模型的航向角、速度、路线曲率数据作为自变量, 横向误差变化值作为

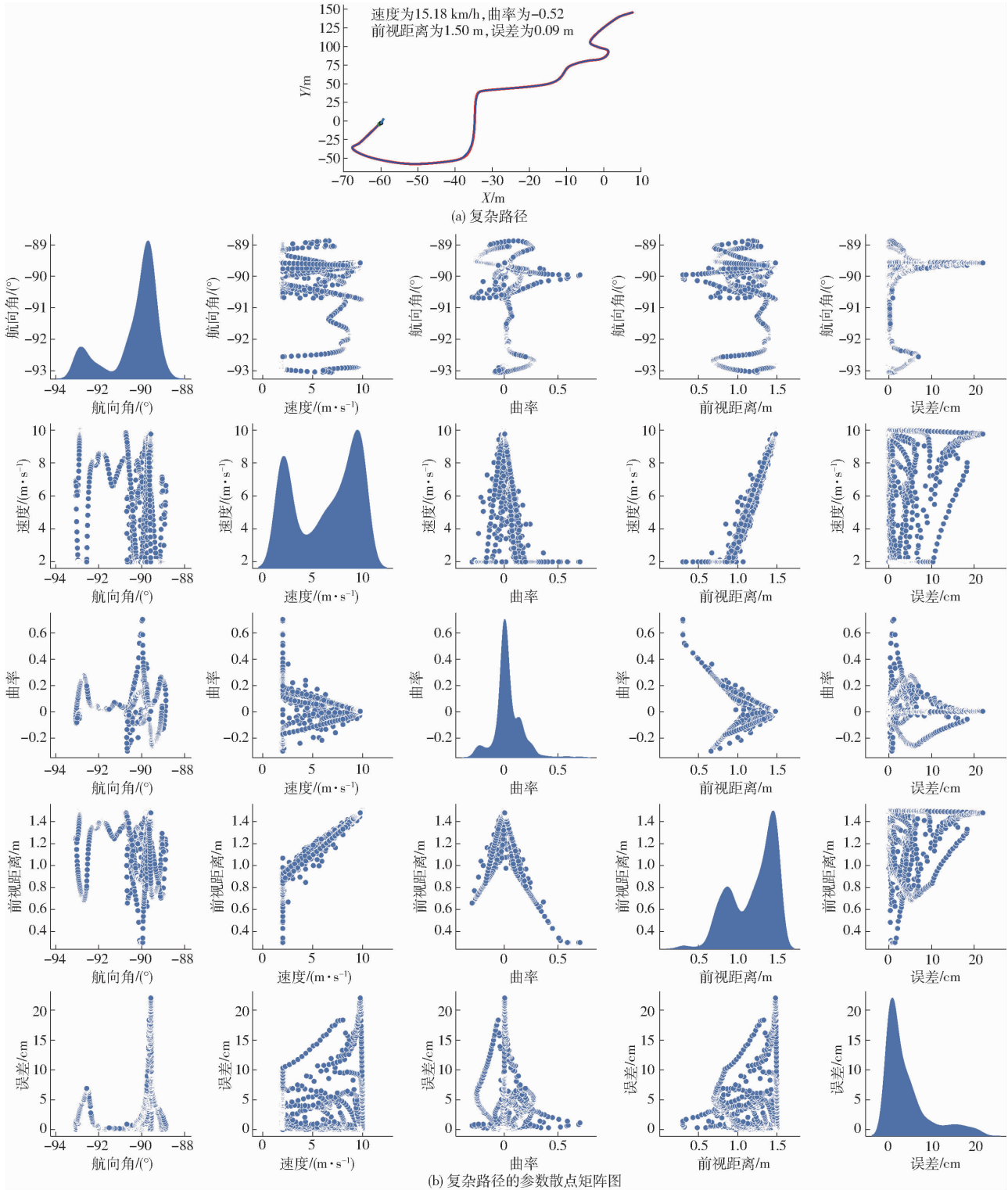


图 9 随机森林特征选择

Fig. 9 Random forest feature selection

因变量。其中平均绝对误差为 15.90 cm,按照横向误差变化值的上下四分位数将误差类型分为小、中、大 3 类评判类型变量。如图 9b 所示,实验数据中速度和前视距离的线性关系很大,并且曲率是横向误差变化影响最大的指标。并且各因素之间相互影响,不能满足独立条件,故不能采用直接线性回归方法。所以本文采用随机森林分析轨迹误差和各参数的数据关系,评判动态前视距离函数 $G(V,\rho)$ 中各参数的特征权重。

本文随机森林的参数设置为:树 800 棵;分隔的最小样本数为 5;叶子节点的最小样本数为 2;随机选用的特征个数为 5。随机森林回归模型得到训练和测试集 R^2 分别为 0.995 7、0.987 5。得到航向角、速度、曲率、前视距离关于横向误差变化值的特征权重分别为 0.148 0、0.193 7、0.600 4、0.056 9。根据特征指标权重逐步调整 $G(V,\rho)$ 的参数,使得预测

输出横向误差变化最小。

3 实验

3.1 实验环境

在完成导航控制系统的设计和集成后,在水平倾斜度为 2°的空旷水泥跑道上完成实验。实验所用车辆的参数如下:牵引车轴距 2 406 mm,轮距 1 254 mm,质量 2 t,最大行驶速度 6 km/h,被牵引机具质量 10 t、长 22 m。在实验多条路径和不断优化 $G(V,\rho)$ 后,牵引机组的平均误差在 16 cm 以内,最大误差在 40 cm 以内。图 10a、10b 为程控系统运行实验完成时的轨迹界面,其中实线为远程运管平台发送的待跟踪路径的离散路径点拟合的行驶路径曲线,虚线为被牵引机具的移动轨迹,并实时显示被牵引机具相对于基站实时位置和车辆信息。

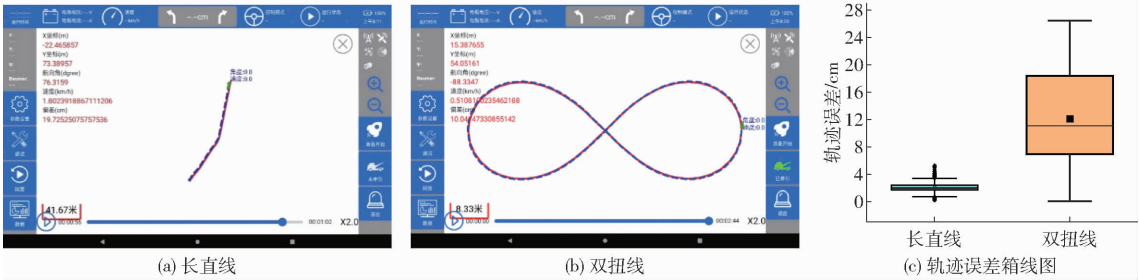


图 10 直线段和双扭线段轨迹误差

Fig. 10 Trajectory error of straight line segment and twisted pair line segment

3.2 结果分析

图 10c、11b 所示为牵引车追踪各路径时的轨迹误差,轨迹误差采用绝对横向误差;图中每个箱体的上/下两条线分别对应上/下四分位数;箱体中横线为轨迹误差的中位数;上/下两条线外的点为临界异常值;箱体中空心点为绝对横向误差均值。如图 10c 所示,长直线的误差分布比较集中,平均误差为 2.04 cm,图中异常点的原因因为牵引车初始状态距离追踪路径存在一定偏差,也有转向响应速度和定位信息传输时延的影响;由于双扭线的路径点曲率始终变化,在曲率的影响下双扭线的横向误差分布比较分散,平均误差为 12.10 cm。图 11b 中每组数据为牵引车满载荷后连续追踪图 11a 路径 3 次,取最后一次的实验数据进行误差分析。其中,路径全长约为 296 m,误差采样频率为 5 Hz,每次路径行走为 1 780 个采样点。在选择

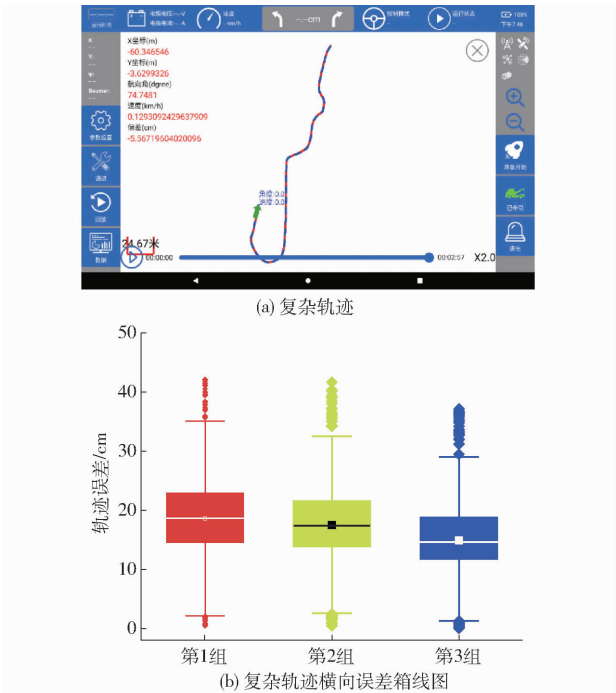


图 11 3 组复杂轨迹试验误差

Fig. 11 Three groups of complex trajectory test errors

14.91 cm。相较于第 1 组,第 3 组在参数优化后,最大误差减少了 5.25 cm,平均误差减少了

3. 70 cm。实验结果表明,最大横向误差小于 50 cm,满足牵引机组导航系统的设计要求。

4 结束语

对拖挂式牵引大载荷特种车辆离散路径点下的轨迹跟踪控制问题进行了研究,针对拖挂式车辆的

特有形式进行了运动学分析,并在此基础上设计了一种改进的纯追踪控制器。在动态前视距离的基础上,引入机器学习进行参数优化和特征提取,优化动态前视距离的效果,从而提高了牵引作业的跟踪效果。实验结果表明,该改进的纯追踪控制器具有良好的控制效果,满足实际应用需求。

参 考 文 献

[1] HATA N, HASEGAWA S, TAKAHASHI S, et al. A control method for 4WS truck to suppress excursion of a body rear overhang[C]//SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition, 1989.

[2] RANGAVAJHULA K, TSAO H S J. Active trailer steering control of an articulated system with a tractor and three full trailers for tractor-track following[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2007, 14(3):271-293.

[3] LIU J, ZHAO X, GUO H, et al. Tractor semi-trailer modeling and regional path tracking control strategy[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020.

[4] 刘璇,王子航,张桐瑞,等.港口重载 AGV 横向稳定的优化控制策略[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(8):113-121.

[5] XU H,ZHU J. Interval trajectory tracking for AGV based on MPC[C]//Chinese Control Conference (CCC), 2019.

[6] LI J,RAN M, WANG H, et al. MPC-based unified trajectory planning and tracking control approach for automated guided vehicles[C]//2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA), 2019.

[7] 李逃昌,胡静涛,高雷,等.基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J].农业机械学报,2013,44(1):205-210.

LI Taochang,HU Jingtao,GAO Lei,et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):205-210. (in Chinese)

[8] 黄沛琛,罗锡文,张智刚,等.改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J].计算机工程与应用,2010,46(21):4.

[9] 李革,王宇,郭刘粉,等.插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J].农业机械学报,2018,49(5):21-26.

LI Ge, WANG Yu,GUO Liufen,et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):21-26. (in Chinese)

[10] NOOR H A B,KHISBULLAH H A,HAIRIZ B, et al. Adaptive modified Stanley controller with fuzzy supervisory system for trajectory tracking of an autonomous armoured vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 105:94-111.

[11] YAMASAKI T,BALAKRISHNAN S N. Sliding mode based pure pursuit guidance for UAV rendezvous and chase with a cooperative aircraft[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2010.

[12] BERNSTEIN D S,HADDAD W M. LQG control with an H_{∞} performance bound: a Riccati equation approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 34(3):293-305.

[13] 张朝宇,董万静,熊子庆,等.履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):105-114.

ZHANG Chaoyu,DONG Wanjing,XIONG Ziqing,et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):105-114. (in Chinese)

[14] 张攀,柳阳,刘新杰,等.改进的智能飞机牵引车路径导航纯追踪算法[J].计算机工程,2019,45(5):267-271.

[15] RANKIN A L,CRANE C D, ARMSTRONG D G. Evaluating a PID, pure pursuit, and weighted steering controller for an autonomous land vehicle[J]. The International Society for Optical Engineering, 1998, 3210:1-12.

[16] 姚登举,杨静,詹晓娟.基于随机森林的特征选择算法[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(1):137-141.

YAO Dengju, YANG Jing,ZHAN Xiaojuan. Feature selection algorithm based on random forest[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(1):137-141. (in Chinese)

[17] YU Y,WANG L, HUANG H, et al. An improved random forest algorithm[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1646:012070.

[18] ZHANG X,WANG M. Weighted random forest algorithm based on Bayesian algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1924(1):012006.

[19] STROBL C,BOULESTEIX A L,KNEIB T,et al. Conditional variable importance for random forests[J]. BMC Bioinformatics, 2008,9(1):307.

[20] NICODEMUS K K,MALLEY J D,STROBL C,et al. The behaviour of random forest permutation-based variable importance measures under predictor correlation[J]. BMC Bioinformatics, 2010,11(1):110.