

张智刚, 王明昌, 毛振强, 等. 基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统开发与测试 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 109-116.
ZHANG Zhigang, WANG Mingchang, MAO Zhenqiang, et al. Development and test of auto-navigation system for agricultural machinery based on satellite-based precision single-point positioning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 109-116.

基于星基增强精密单点定位的农机 自动导航系统开发与测试

张智刚¹, 王明昌¹, 毛振强², 王 辉³, 丁 凡¹, 李洪开¹, 张 天¹

(1 华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642; 2 农业农村部
农业机械化技术开发推广总站, 北京 100021; 3 潍柴雷沃重工股份有限公司, 山东 潍坊 261206)

摘要:【目的】开发基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统。【方法】以国产雷沃 TX1204 拖拉机为平台, 采用国产星基增强定位板卡的输出数据作为农机位置反馈量, 设计位速卡尔曼滤波器对定位数据进行滤波处理, 开发预瞄跟随 PID 路径跟踪控制算法进行导航控制, 整定不同行驶速度条件下的模型控制参数, 采用地基增强 RTK 高精度定位接收机输出数据作为参考量, 搭建农机自动导航测试系统并开展系统性能测试。【结果】在直线跟踪误差方面, 所开发的农机自动导航系统平均误差为-0.000 943 6 m, 标准差为 0.024 52 m, 最大误差绝对值为 0.084 72 m; 在邻接行误差方面, 平均误差为 0.000 712 8 m, 标准差为 0.029 86 m, 最大误差绝对值为 0.154 44 m。这一精度可满足大部分农机自动导航作业需求。【结论】将国产星基增强精密单点定位技术用于农机自动导航是可行的; 本文设计的预瞄跟随 PID 路径跟踪控制模型和提出的不同速度条件下 PID 参数与前视距离的整定方法, 提高了系统对不同速度的自适应能力。

关键词: 农业机械; 精密单点定位; PID 路径; 自动导航
中图分类号: TP23;S24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)06-0109-08

Development and test of auto-navigation system for agricultural machinery based on satellite-based precision single-point positioning

ZHANG Zhigang¹, WANG Mingchang¹, MAO Zhenqiang², WANG Hui³, DING Fan¹, LI Hongkai¹, ZHANG Tian¹
(1 College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 2 Agricultural Mechanization Technology Development and Promotion Station, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Beijing 100021, China;
3 Weichai Lovol Heavy Industry Limited Company, Weifang 261206, China)

Abstract: 【Objective】To develop an automatic navigation system for agricultural machinery based on satellite-based precision single-point precision. 【Method】With the domestic Lovol TX1204 tractor as the platform, the output data of the domestic satellite-based precision single-point positioning board were used as the position feedback of the agricultural machinery, the position-velocity Kalman filter was designed to filter the positioning data, and the preview following PID path tracking control algorithm was developed. The model control parameters under different driving speed conditions were tuned, and the output data of the ground-based RTK high-precision positioning receiver were used as the references, the automatic navigation test system of

agricultural machinery was built and the system performance test was carried out. 【Result】 In terms of linear tracking error, the average error was $-0.000\,943\,6\text{ m}$, the standard deviation was $0.024\,52\text{ m}$, and the absolute maximum error was $0.084\,72\text{ m}$. In terms of adjacent line error, the average error was $0.000\,712\,8\text{ m}$, the standard deviation was $0.029\,86\text{ m}$, and the absolute maximum error was $0.154\,44\text{ m}$, which could meet the needs of most agricultural machinery automatic driving operations. 【Conclusion】 Domestic satellite-based precision single-point positioning technology can be used for agricultural machinery automatic navigation. The preview-following PID path tracking control model designed in this paper is valid and the proposed method for tuning PID parameters and foresight distance under different speed conditions provides a basis for improving the adaptive ability of this system to different speed conditions.

Key words: agricultural machinery; precision single point positioning; PID path; automatic guidance

自动导航是智能农机装备的核心技术之一。农机自动导航作业技术可有效提高农机的作业效率和质量,避免漏行叠行作业,以及降低驾驶员的劳动强度^[1-2]。目前,自动导航农机在我国新疆、黑龙江等地已实现产业化与规模化生产,但在实际应用中也存在一些问题:一是农机自动导航系统需要依赖高精度 GNSS 定位技术,其复杂的地基增强差分通讯链路增加了系统复杂度和运营成本;二是导航控制算法对不同农机作业速度的适应性不好,随着速度的增加,导航精度会逐渐下降^[3-4]。

星基增强精密单点定位技术可单机作业,灵活机动,作业不受通讯距离的限制^[5-7]。它集成了标准单点定位和差分定位的优点,克服了各自的缺点^[8-11],改变了只能使用双差定位模式才能达到较高定位精度的现状,较传统的差分定位技术具有显著的技术优势^[12-16]。近年来,国内有些公司和科研机构开始提供星基增强精密单点定位技术的商业化服务,定位性能不断提高,服务范围不断扩大。本研究尝试采用星基增强精密单点定位技术开发农机自动导航系统,以减少系统对地基增强差分通讯链路的依赖。与此同时,设计基于位速卡尔曼滤波的导航信息处理算法和预瞄跟随 PID 路径跟踪控制算法,

通过对不同农机作业速度下的前视距离与 PID 参数进行试验整定,获得控制参数整定表,并在自动导航拖拉机上进行不同行驶速度下的性能验证,以期为提高系统对不同速度的自适应能力提供参考。

1 系统总体结构

本研究以华南农业大学研究的农机自动导航系统为基础,以配套高花轮胎的雷沃 TX1204 拖拉机为平台^[17-21],基于精简、通用、稳定可靠的设计思想,融合导航信息获取和路径跟踪控制算法,开发基于星基增强精密单点定位的拖拉机自动导航系统。导航系统由 GNSS 天线、合众思壮 V28 星基增强定位板卡、导航控制器、显示终端、轮角/压力传感器、电控液压转向系统等组成,如图 1 所示。导航控制器是农机导航系统的核心,主要功能是:1) 根据显示终端输入的 A_1 、 A_2 点信息和作业幅宽规划作业路径;2) 通过 GNSS 天线、星基增强定位板卡以及轮角/压力传感器获取定位信息以及前轮转向角度信息,之后对接收的各传感器信息进行处理;3) 利用路径跟踪控制算法决策期望轮角并输出转向控制信号。电控液压转向系统是农机的转向执行机构,其作用是将转向控制信号转换成农机转向轮的

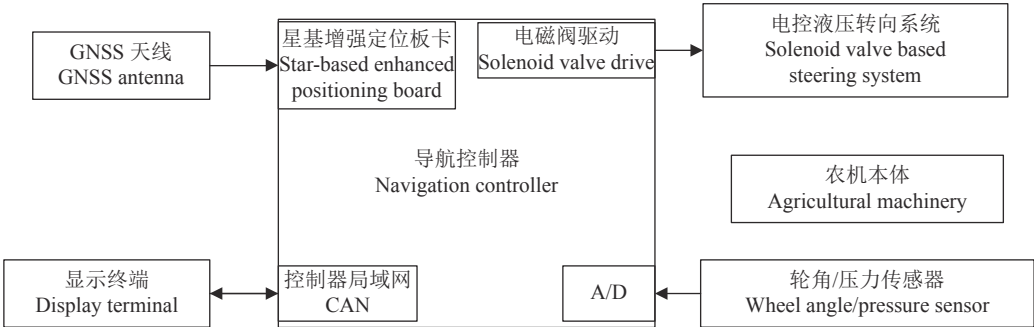


图 1 农机自动导航系统的总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall structure of the agricultural machinery automatic navigation system

转向速度和角度, 进而控制农机按照预定作业路线精确跟踪行走。显示终端是导航系统的人机交互终端, 通过 CAN 总线与导航控制器进行通信, 实现导航系统的状态显示、系统调试、作业设置和系统操控等人机交互功能。

2 导航信息处理方法

2.1 GRS80 大地坐标向大地导航坐标系的转换

为了使 GNSS 星基增强定位板卡输出的 GRS80 大地坐标定位数据能用于拖拉机的导航控制系统, 需要采用高斯投影变换公式, 将 GRS80 地心大地坐标转换为对应于 GRS80 椭球的高斯投影平面坐标。

采用如下公式:

$$x = X + \frac{l^2}{2} N \sin B \cos B + \frac{l^4}{24} N \sin B (\cos^3 B) (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \frac{l^6}{720} N \sin B (\cos 5B) (61 - 58t^2 + t^4), \tag{1}$$

$$y = lN \cos B + \frac{l^3}{6} N (\cos^3 B) (1 - t^2 + \eta^2) + \frac{l^5}{120} N (\cos^5 B) (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2) + 500\,000, \tag{2}$$

式中, $l = L - L_0$, L_0 为投影带中央子午线经度, B 为纬度, 卯酉圈曲率半径 $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$, 椭球第一偏心率 $e = 2\delta - \delta^2$, 辅助变量 $t = \tan B$, 辅助变量 $\eta = e' \cos B$, 椭球第二偏心率 $e' = \sqrt{a^2/b^2 - 1}$, a 、 b 分别为参考椭球的长、短半径; 扁率 $\delta = (a - b)/a$ 。 X 为赤

$$R_{bn} = R_{\psi}^Z R_{\theta}^Y R_{\varphi}^X \\ = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}. \tag{4}$$

假设 GNSS 天线定位点 P' 到导航控制点 P 的空间矢量在车体坐标系下的表达式为 $[a \ b \ h]^T$, GNSS 天线定位点 P' 在大地导航坐标系下的坐标为 $[x' \ y' \ z']^T$, 导航控制点 P 在大地导航坐标系下的坐标为 $[x \ y \ z]^T$, 则有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} - R_{bn} \begin{bmatrix} a \\ b \\ h \end{bmatrix}. \tag{5}$$

道至纬度为 B 的平行圈的子午线弧长, 其计算公式为:

$$X = c \int_0^B (1 + e' 2 \cos 2B - 2/3) dB, \tag{3}$$

式中, c 为极曲率半径。

所用投影坐标系的主要参数为: 投影方式: Gauss-Kruger; 中央经线: 114.000 000(3 度带); 水平偏移量: 500 km; 地理坐标系: GCS_GRS_1980; 大地参照系: D_GRS_198 参考椭球体: GRS80; 椭球长轴: 6378 137.000 000; 椭球扁率: 0.003 352 810 7。

2.2 GNSS 天线位置点向导航控制点的转换

本文所使用的大地导航坐标系由 GRS80 椭球对应的高斯-克吕格投影坐标平面加上 GRS80 地心坐标系中的大地高程构成, 其中 x_n 轴指向地理东向, y_n 轴指向地理北向, z_n 轴指向天空方向, 与 $x_n y_n$ 轴构成右手握手坐标系, 坐标原点 O_n 设置在拖拉机作业区域的适当位置; 所使用的车体坐标系原点 O_b 位于拖拉机重心位置, 三轴指向分别为: x_b 轴指向拖拉机机头方向, z_b 轴指向拖拉机驾驶室顶棚方向。将导航控制点 P 选择在拖拉机 2 个后轮着地点的连线中点处, 有利于建立更为严密的拖拉机航位推算递推关系式; 有利于 GNSS 天线定位点 P' 至导航控制点 P 距离的量取; 有利于拖拉机自动导航过程中后挂作业机具的位置控制; 有利于 GNSS 天线倾斜误差的校正。

假设导航系统测得的拖拉机三轴姿态角航向角度、横滚角度和俯仰角度分别为 ψ 、 φ 和 θ , 则拖拉机车体坐标系下的空间矢量向大地导航坐标系转换的转换矩阵 R_{bn} 为:

2.3 位速卡尔曼滤波器设计

为保证作业质量, 拖拉机田间作业过程中大多采用往复直线作业的形式。针对这种情况, 本文提出基于位置和速度的拖拉机运动学模型, 来适配拖拉机田间直线行驶作业的实际过程。

基于航位推算原理, 建立拖拉机导航控制点 P 在 2D 平面坐标系下的运动方程:

$$x_k = x_{k-1} + v_{xk} \Delta t, \tag{6}$$

$$y_k = y_{k-1} + v_{yk}\Delta t, \tag{7}$$

式中, x_k 、 y_k 为 k 时刻拖拉机导航控制点的高斯投影平面坐标, v_{xk} 、 v_{yk} 为 k 时刻的导航控制点在高斯投影平面 x 、 y 轴向的前进速度, Δt 为航位推算的时间间隔。 Δt 与 GNSS 定位数据的更新频率 f' 有关:

$$\Delta t = 1/f'. \tag{8}$$

星基增强精密单点定位可能存在异常跳点, 会对导航系统产生干扰。为了提高导航系统的工作稳定性, 本文基于上述航位推算原理设计了位速卡尔曼滤波器来对星基增强精密单点定位进行滤波处理。卡尔曼滤波器的设计基础是状态转移方程和观测方程。考虑到拖拉机田间匀速行驶作业的实际特点, 本文假设 v_{xk} 、 v_{yk} 的稳态是缓变的。将前述 (6)、(7) 式以卡尔曼滤波器状态转移方程的形式表示为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{u}_k, \tag{9}$$

式中, $\mathbf{X}_k = [x_k, v_{xk}, y_k, v_{yk}]$, 表示状态空间向量;

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 是 k 时刻状态转移矩阵,

根据前述分析是个常值矩阵;

$\mathbf{u}_k$ 是状态转移方程的白噪声; 系统过程噪声协方差矩阵为 $\mathbf{Q}_k$, 用于表示状态转移方程的误差大小, 本文中 $\mathbf{Q}_k$ 设定为常数矩阵, 在仿真和试验过程中整定矩阵参数。

以经式 (5) 转换得到的拖拉机导航控制点定位坐标作为观测向量, 得到卡尔曼滤波器的测量方程如下:

$$\mathbf{Z}'_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{w}_k, \tag{10}$$

式中, $\mathbf{Z}'_k = \begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix}$, x'_k 、 y'_k 为拖拉机导航控制点的 k 时刻定位坐标, $\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 为卡尔曼滤波器 k 时刻的测量矩阵, $\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} \xi'_{xk} \\ \xi'_{yk} \end{bmatrix}$, ξ'_{xk} 、 ξ'_{yk} 表示 OEM GNSS 板卡定位在水平面坐标系下的随机定位误差。

测量向量的噪声方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} r_{xk}^2 & 0 \\ 0 & r_{yk}^2 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

式中, r_{xk}^2 、 r_{yk}^2 分别为 ξ'_{xk} 、 ξ'_{yk} 的方差统计值。

综合上述推导, 采用线性离散卡尔曼滤波器的递归差分方程进行状态向量预测和测量向量校正:

预测方程组为:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{u}_k, \tag{12}$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_{k-1}, \tag{13}$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 代表 k 时刻的预测结果, $\hat{\mathbf{x}}_k$ 代表 k 时刻的最优估计结果, $\mathbf{A}_k$ 代表 k 时刻的状态转移矩阵, $\mathbf{A}_k^T$ 代表 $\mathbf{A}_k$ 的转置, $\hat{\mathbf{P}}_k$ 为对应 $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ 在 k 时刻的系统过程噪声方差预测值, $\mathbf{P}_{k-1}$ 为对应 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 在 $k-1$ 时刻的系统过程噪声方差预测值, $\mathbf{Q}_{k-1}$ 为 $k-1$ 时刻的系统过程协方差。

校正方程组为:

$$\mathbf{K}_k = \hat{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \hat{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \tag{14}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}'_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-), \tag{15}$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{E} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \hat{\mathbf{P}}_k, \tag{16}$$

式中, $\mathbf{K}_k$ 为 k 时刻的卡尔曼滤波增益, $\mathbf{H}_k^T$ 为 $\mathbf{H}_k$ 的转置, $\hat{\mathbf{x}}_k$ 为 k 时刻卡尔曼滤波器最优估计值, $\mathbf{Z}'_k$ 为 k 时刻卡尔曼滤波器的测量更新值, $\mathbf{P}_k$ 为 k 时刻卡尔曼滤波器的系统过程噪声方差估计值, $\mathbf{E}$ 为单位矩阵。

3 预瞄跟随路径跟踪控制算法设计

3.1 预瞄跟随 PID 路径跟踪控制模型

本文设计的预瞄跟随 PID 路径跟踪控制模型可用图 2 描述: 直线 A_1A_2 为作业规划行直线; 点 P_1 为拖拉机的当前导航控制点, P_2 为拖拉机前进方向上的预瞄点, P_1P_2 为预瞄跟随的前视距离 d ; 过点

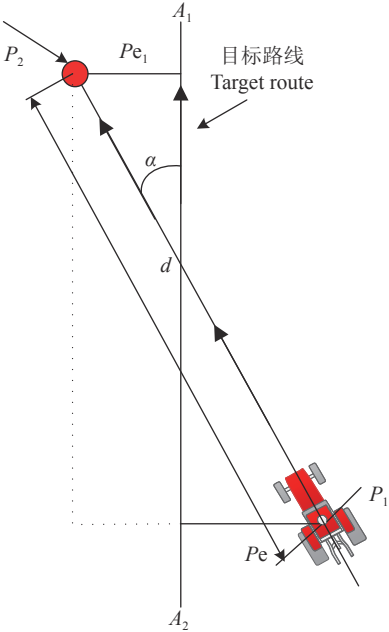


图 2 预瞄追踪模型几何示意图

Fig. 2 Geometric diagram of preview tracking model

P_1 向 A_1A_2 做垂线, 垂线的距离即为拖拉机在大地坐标系下的位置偏差 Pe ; 预瞄点 P_2 向 A_1A_2 做垂线, 垂线的距离为拖拉机的预瞄点位置偏差 Pe_1 ; 设 α 为拖拉机当前航向与目标航向的偏差角, 称为航向偏差。预瞄跟随 PID 路径跟踪控制算法步骤如下:

1) 获取拖拉机当前导航控制点 P_1 的导航平面坐标。

2) 计算拖拉机导航控制点到规划路径 A_1A_2 上位置偏差 Pe , 则拖拉机预瞄位置点处的位置偏差 Pe_1 可计算为:

$$Pe_1 = Pe \pm dsin\alpha。$$

(17)

3) 设 $\Delta\psi$ 为拖拉机转向轮角控制量, 则基于位置偏差 Pe_1 的 PID 控制算法如式 (18) 所示:

$$\Delta\psi = K_P Pe_1 + K_I V \tan \alpha + K_I \int_0^t Pe(t)dt,$$

(18)

式中, K_P 为位置误差系数, K_I 为航向误差系数, K_I 为位置误差积分系数, V 为行驶速度。

3.2 模型控制参数的试验整定方法

由于算法简单、鲁棒性好和可靠性高, PID 控制策略被广泛应用于工业过程控制, 尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。比例控制 P 可快速、及时、按比例调节偏差, 提高控制灵敏度^[2], 在保持系统稳定的前提下, P 值越大, 精度越高。积分控制 I 能消除偏差, 提高控制精度、改善稳态性能。微分控制 D 是一种超前控制, 能调节系统速度、减小超调量、提高稳定性。驾驶员在驾驶农机作业时常常使用对中杆, 对中杆与预定路线偏差大时, 驾驶员对转向轮角进行大角度控制, 以快速校正预瞄航向偏差跟踪预瞄路径; 当农机方向和预瞄方向偏差较小时, 驾驶员对转向轮角进行小角度控制, 以稳定地跟踪预瞄路径^[23-26]。在路径跟踪控制过程中, 农机的行驶速度越高, 其需要设置的前视距离越大, 也就是要瞄的更远些。根据上述经验和规律, 需合理选择前视距离和 PID 控制器参数才能迅速、准确、平稳地消除偏差, 达到较好的控制效果。

本文制定的模型控制参数的试验整定方法为: 在某一恒定前进速度条件下, 首先将 P 固定为一个经验适中值, 前视距离由大向小调 (步长 1 m), 调到系统微微震荡时停止, 将前视距离+1 作为此前进速度条件下前视距离的寻优结果; 然后, 将前视距离固定为寻优值, 将 P 从那个适中值由小向大调 (步长 5), 调到系统微微震荡时停止, 当前的 P 值即为寻优结果; 再次, 将前视距离和 P 值固定为寻优值, 将 D 从 0 由小向大调 (步长 1), 调到系统不震荡时

停止, 当前的 D 值即为寻优结果。对 I 的寻优整定, 遵循低速大些、高速小些的调节原则, 保证在能够快速纠偏的前提下不引起震荡即可。整定后的参数如表 1 所示。

表 1 不同速度条件下的路径跟踪控制参数

Table 1 Navigation control parameters under different travelling speeds

速度/ (km·h ⁻¹) Velocity	前视距离/m Foresight distance	比例 Proportional (P)	积分 Integral (I)	微分 Differential (D)
3	1.4	170	13	39
5	2.4	150	10	30
7	3.2	130	8	22

4 试验测试

4.1 测试方法

采用和芯星通 UM482-BOX2 RTK 定位终端输出数据作为参考量, 搭建拖拉机自动驾驶测试系统。自动驾驶系统测试的原理图如图 3 所示。

本文使用 1 拖 2 功分器将 GNSS 双天线分别接入 V28 星基增强定位板卡和 UM482-BOX2 RTK 定位终端。导航控制器将拖拉机路径跟踪结果加上 GNSS 定位时间戳以 10 Hz 的输出频率从串口输出到笔记本以供保存。导航控制器的输出参数主要包括: 星基增强定位的相关数据、 A_1 和 A_2 点、位置偏差、航向偏差、期望轮角、反馈轮角等。与此同时, UM482-BOX2 RTK 定位终端通过内置 4G 网络模块接入千寻知寸厘米级差分服务数据, 将带有 GNSS 定位时间戳的 NMEA GPGGA 报文以 10 Hz 的输出频率从串口输出到笔记本以供保存。笔记本同时接收 2 路数据输入, 以 GNSS 定位的时间戳保持数据同步, 以 UM482-BOX2 RTK 定位终端的参考数据以及 A_1 和 A_2 点数据为依据, 通过自主开发的 Matlab 程序和 Python 程序来测算导航控制精度指标。

具体测试过程为: 在平坦地面, 启动拖拉机自动驾驶系统, 按照速度为 3、5、7 km/h 3 个档位开展系统性能测试^[27]。每次测试执行如下流程: 首先是完成上线过程, 再按规定的速度继续沿着 A_1A_2 线一个方向自动驾驶, 直线行驶测试段长度不小于 80 m, 然后掉头, 重新上线, 并沿着相邻行的相反方向自动驾驶至少 80 m 回到开始位置, 最后依据和芯星通 UM482 RTK 接收机提供的记录数据计算相关参数, 进而测试系统的直线跟踪误差和邻接行误差, 如图 4 所示。

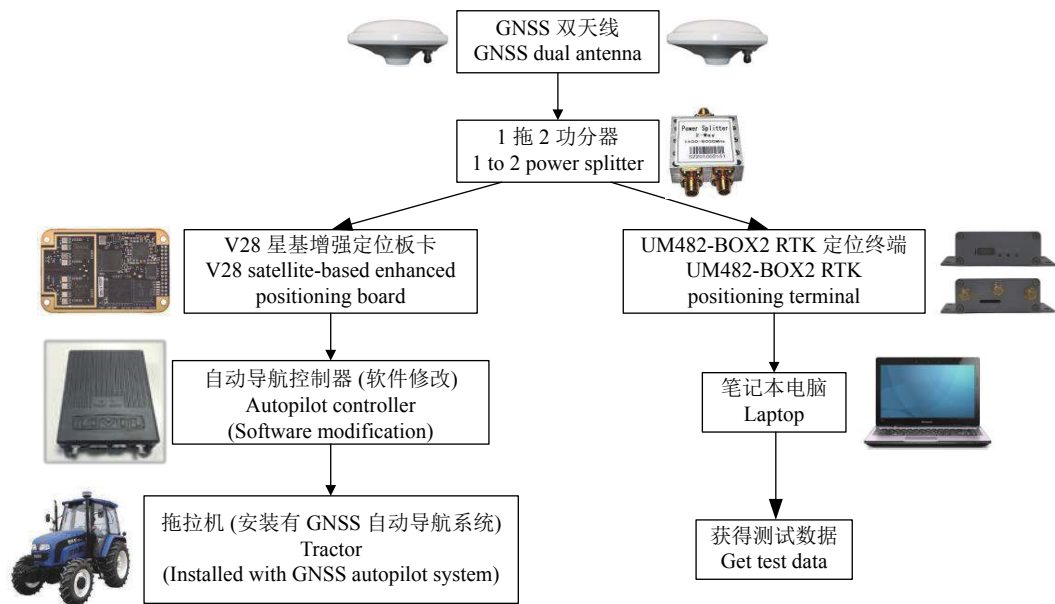


图 3 拖拉机自动导航测试系统结构

Fig. 3 Test system structure for satellite-based automatic pilot system of tractor

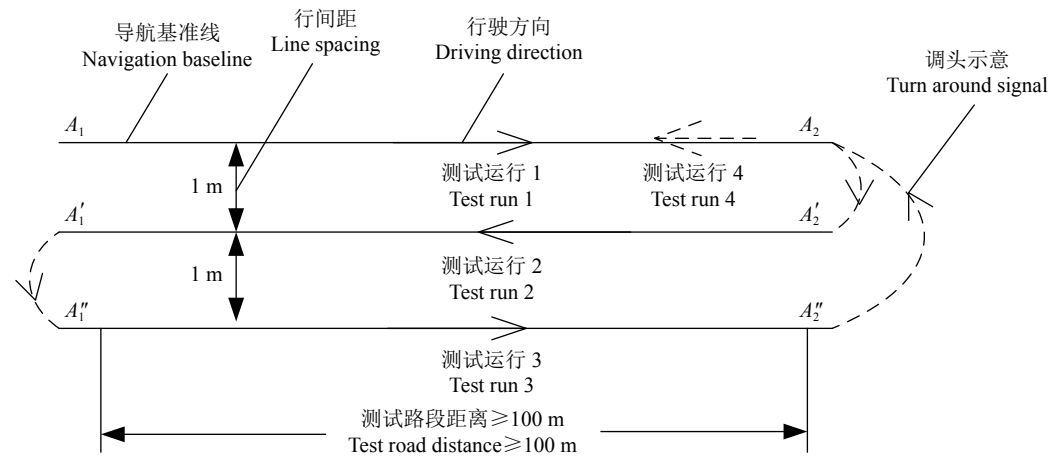


图 4 系统误差测试行驶方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of driving mode of system error test

4.2 试验结果

用 Python 编程语言开发原始数据对照测试的程序。最后将测算的数据以文本文件的方式导入 Matlab 程序中，绘制出自动导航性能测试结果如图 5 所示。

4.3 测试结果分析

以和芯星通 UM482 RTK 接收机提供的记录数据为参考，对速度 3、5、7 km/h 3 个档位的路径跟踪数据进行统计分析，结果如表 2 所示。

由表 2 统计路径跟踪的误差分析可知，农机自动导航系统在直线跟踪方面，3、5、7 km/h 的平均误差分别为-0.000 756 4、-0.000 917 0 和-0.001 157 5 m，直线跟踪误差大小随着行驶速度的增加而略微增大，表明行驶速度对农机自动导航系统的直线跟踪

性能的影响不明显；农机自动导航系统在邻接行误差方面，3、5、7 km/h 的平均误差分别为 0.000 618 7、0.000 724 9 和 0.000 795 0 m，表明不同的行驶速度对农机自动导航系统邻接行跟踪性能的影响不明显。上述分析表明，预瞄跟随 PID 参数的整定有利于提高系统对不同速度的适应性。

由不同速度下各个指标的平均值可知，在直线跟踪误差方面，平均误差为-0.000 943 6 m，标准差为 0.024 52 m，最大误差绝对值为 0.084 72 m；在邻接行误差方面，平均误差为 0.000 712 8 m，标准差为 0.029 86 m，最大误差绝对值为 0.154 44 m。结果表明，农机自动导航作业直线平均误差和邻接行平均误差都在 1 mm 左右，标准差小于 3 cm，这一精度可满足大部分农机自动导航作业需求，星基增强

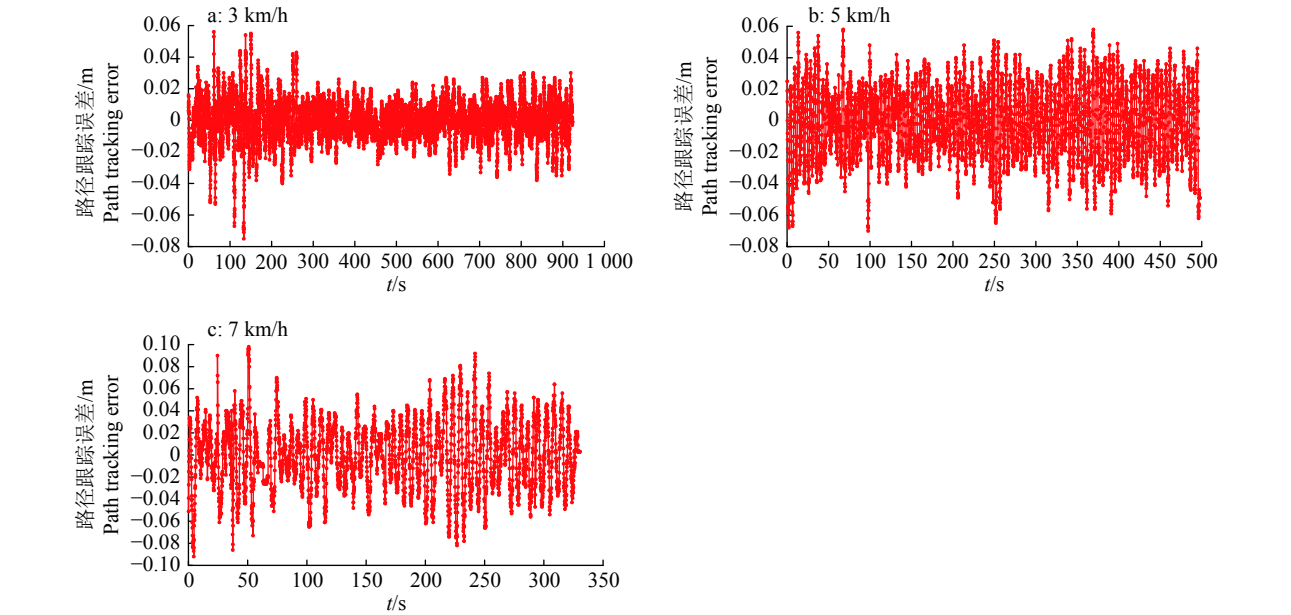


图 5 不同速度下自动驾驶系统路径跟踪误差曲线

Fig. 5 Path tracking error curve of automatic autopilot system at different speed

表 2 农机星基辅助自动导航系统性能统计表						
Table 2 Performance statistics of satellite-based auxiliary agricultural machinery automatic autopilot system						
行驶速度/ (km·h ⁻¹) Driving speed	直线跟踪误差/m Straight line tracking error			邻接行误差/m Adjacent row error		
	平均误差	标准差	最大误差绝对值	平均误差	标准差	最大误差绝对值
	Average error	Standard deviation	Absolute value of maximum error	Average error	Standard deviation	Absolute value of maximum error
3	-0.000 756 4	0.014 30	0.088 67	0.000 618 7	0.015 13	0.117 36
5	-0.000 917 0	0.023 74	0.070 96	0.000 724 9	0.024 86	0.122 54
7	-0.001 157 5	0.035 53	0.094 55	0.000 795 0	0.049 60	0.223 42
平均值 Average	-0.000 943 6	0.024 52	0.084 72	0.000 712 8	0.029 86	0.154 44

精密单点定位技术可以用于农机自动导航系统的产品研发和推广应用。

5 结论

本文设计了基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统, 以和芯星通地基增强 RTK 接收机为参考, 按 3、5、7 km/h 3 个速度档位开展了系统测试工作。测试结果表明, 国产星基增强定位技术已趋于成熟, 将国产星基增强定位技术用于农机自动导航是可行的, 其路径跟踪控制精度可满足大部分农机作业需求。另外, 本文设计的预瞄跟随 PID 路径跟踪控制模型和提出的不同速度条件下 PID 参数与前视距离的整定方法, 为提高系统对不同速度的自适应能力提供了基础。

对于农机自动导航系统来说, 星基增强精密单点定位精度是影响其直线跟踪精度和对行精度的重要因素, 因而优化精密单点定位的算法性能, 提

升其定位稳定性, 是提升星基增强自动导航系统精度的重要措施。

参考文献:

[1] 夏普. 农机自动导航系统精度影响因素分析与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.

[2] 晓琳, 薄斌, 知谷 APP. 合众思壮: 推进精准农业全球化发展[J]. 农业机械, 2019(7): 29-31.

[3] 韩树丰, 何勇, 方慧. 农机自动导航及无人驾驶车辆的发展综述 (英文)[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 381-391.

[4] 化祖旭. 自动驾驶汽车路径跟踪控制算法综述[J]. 装备制造技术, 2021(6): 100-103.

[5] 张超. BDS/GPS 精密单点定位模型与质量控制研究[D]. 淄博: 山东科技大学, 2014.

[6] 张胜利. 基于三频模糊度解算的精密单点定位技术研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

[7] 鲍建宽, 陈伟荣, 高成发. 精密单点定位的数学模型选择[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2013, 27(2): 1-4.

- [8] 吴紫晗. 北斗导航系统在农机化应用现状浅析[J]. [农机科技推广](#), 2020(7): 32-34.
- [9] 朱清山, 高广智, 牛文祥. 农机自动导航驾驶系统及其应用[J]. [现代化农业](#), 2016(5): 65-67.
- [10] ZENG P. Research on precise point positioning based on RTKLIB[J]. *International Journal of Intelligent Information and Management Science*, 2020, 9(6): 275-277.
- [11] NIE Z X, WANG B Y, WANG Z J, et al. An offshore real-time precise point positioning technique based on a single set of BeiDou short-message communication devices[J]. *Journal of Geodesy: Continuation of Bulletin Géodésique and manuscripta geodaetica*, 2020, 94(9): 78.
- [12] 陈玉龙. 浅析 GPS 精密单点定位技术及应用[J]. [科技创新与生产力](#), 2017(9): 72-73.
- [13] 张之琛. GPS/BDS 实时精密单点定位技术实现[J]. [现代导航](#), 2020, 11(3): 171-177.
- [14] 孟范伟. GPS 卫星钟差预报与精密钟差估计研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2014.
- [15] INNAC A, ANGRISANO A, GAGLIONE S, et al. Performance comparison among multi-GNSS single frequency precise point positioning techniques[J]. *Cartography and Geoinformation*, 2019, 18(32): 80-99.
- [16] 范先铮, 帅明明. GPS 精密单点定位技术要点及其处理方法研究[J]. *测绘通报*, 2020(S1): 305-310.
- [17] 刘建强. 基于 stm32 的农机自动驾驶系统的设计与实现[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2019.
- [18] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. [农业工程学报](#), 2018, 34(1): 15-21.
- [19] 尤文宽. 拖拉机播种作业自动转向控制系统的设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
- [20] 吴林, 施闯, 姜斌. 基于北斗/GNSS 星基 PPP 增强技术的农机自动导航驾驶系统[J]. [农机科技推广](#), 2019(10): 41-43.
- [21] 史扬杰, 奚小波, 吴飞, 等. 电机式北斗农机自动导航系统设计与试验[J]. [东北农业大学学报](#), 2019, 50(4): 88-96.
- [22] 张智刚, 罗锡文, 胡炼, 等. 4 种 DGPS 模块动态定位精度测试与分析[J]. [华南农业大学学报](#), 2010, 31(1): 102-107.
- [23] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(4): 11-19.
- [24] 万豪, 莫中秋, 张宇. 农业机械自动驾驶系统轨迹跟踪误差测试[J]. [无线电工程](#), 2020, 50(5): 373-376.
- [25] 刘辉. 农机自动导航系统作业精度评价方法研究与试验验证[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [26] 张智刚, 朱启明, 何杰, 等. 基于 RTK-GNSS 和 MEMS 陀螺仪的车辆航向角测量技术[J]. [华南农业大学学报](#), 2019, 40(5): 34-37.
- [27] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. [农业机械学报](#), 2020, 51(3): 18-27.

【责任编辑 霍 欢, 庄 延】