doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.035

土壤速效氮磷钾自动检测系统设计与试验

姚冶桐[1,2]　王　军[1,2]　董万静[1,2]　田屹维[1,2]　张　扬[1,2]　丁幼春[1,2]
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对传统土壤速效氮磷钾含量检测效率低、自动化程度不足,车载式检测设备在复杂农田环境中路径规划与跟踪性能受限的问题,本研究构建了无人化作业平台赋能的大田土壤速效氮磷钾自动检测系统。集成北斗定位与四轮驱动转向平台,优选传感器检测模型,设计分级-适配式测肥点遍历路径规划方法及遗传算法(Genetic algorithm,GA)优化的线性二次调节器(Linear quadratic regulator,LQR)路径跟踪控制算法,构建云-端架构的自主测肥系统。为实现土壤肥力指标的原位、快速检测,经 4 种机器学习模型对比,优选随机森林(Random forest,RF)预测模型处理传感器数据,对速效氮磷钾预测相对误差分别小于 16.44%、19.26% 和 13.91%,较传感器未建模的直接测量精度平均提升 49.46%。为精准表征田块尺度肥力指标空间分布,通过量化不同采样密度的克里斯琴森均匀度系数(Christiansen uniformity coefficient,CUC)确定最优检测点间距。针对平坦无障、含大障碍物及含小障碍物田间环境,分别设计梳式(Comb path,CP)、梳式跨行(Comb cross-row path,CCP)及梳式-五阶贝塞尔(Comb fifth-order Bézier path,CFBP)3 种检测点连续遍历路径规划方案。仿真试验结果表明,GA-LQR 控制器使平台路径跟踪精度平均提高 24.32%,最大绝对横向偏距和航向偏角分别为 1.71 cm 和 1.69°。田间试验结果表明,直线路径跟踪下,GA-LQR 相较传统 LQR 算法最大绝对横向偏距、最大绝对航向偏角、检测点平均停车绝对值误差及全检测流程耗时分别减小 15.62%、19.59%、20.79% 和 13.43%;曲线路径跟踪下对应指标减小 19.28%、27.34%、22.94% 和 15.76%。同时,优化算法使单位公顷检测时长缩短 927 s,单点检测流程减少 6.28 s,定位检测准确性平均提高 14.26%。研究结果可为土壤速效氮磷钾含量信息获取的自主化、信息化和智能化提供参考。

关键词: 土壤速效氮磷钾; 自动检测; RF 预测模型; 路径规划; 路径跟踪控制
中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0355-14　　**OSID**:

Design and Experiment of Automatic Detection System for Soil Available Nitrogen, Phosphorus and Potassium

YAO Yetong[1,2]　WANG Jun[1,2]　DONG Wanjing[1,2]　TIAN Yiwei[1,2]　ZHANG Yang[1,2]　DING Youchun[1,2]
(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Aiming to address the issues of low efficiency and insufficient automation in traditional soil available nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) content detection, as well as the limited path planning and tracking performance of vehicle-mounted detection equipment in complex farmland environments, an autonomous detection system for soil available NPK in field empowered by an unmanned operation platform was established. It integrated Beidou positioning and a four-wheel drive steering platform, optimized sensor detection models, designed a hierarchical-adaptive traversal path planning method for fertilizer-measuring points and a path tracking control algorithm based on genetic algorithm (GA)-optimized linear quadratic regulator (LQR), and built an autonomous fertilizer detection system with cloud-edge architecture. For in-situ, rapid detection of soil fertility indicators, random forest (RF) prediction mode was selected as the optimal algorithm after comparing four machine learning models. Its relative prediction errors for available N, P and K were below 16.44%, 19.26% and 13.91%,

收稿日期: 2025-07-20　修回日期: 2025-09-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2001001、2023YFD2001001-1)和湖北省农业关键核心技术攻关项目(HBNYHXGG2023-2)
作者简介: 姚冶桐(2000—),女,博士生,主要从事农业生产智能化技术研究,E-mail: yao_yetong@163.com
通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

respectively, with an average 49.46% accuracy improvement over the direct measurement accuracy of sensors without prior modeling. To accurately characterize the spatial distribution of field-scale fertility indicators, the optimal detection point spacing was determined by quantifying the Christiansen uniformity coefficient (CUC) across different sampling densities; three continuous traversal path planning schemes—comb path (CP), comb cross-row path (CCP), and comb fifth-order Bézier path (CFBP)—were designed for flat obstacle-free, large-obstacle, and small-obstacle farmland environments, respectively. Simulation tests showed that the GA-LQR controller improved the platform's path tracking accuracy by an average of 24.32%, with maximum absolute lateral deviation and heading angle of 1.71 cm and 1.69°, respectively. Field tests demonstrated that under straight path tracking, the GA-LQR algorithm reduced the maximum absolute lateral deviation, maximum absolute heading angle, average absolute parking error at detection points, and total detection time by 15.62%, 19.59%, 20.79%, and 13.43%, respectively, compared with the conventional LQR algorithm; under curved path tracking, the corresponding indicators were decreased by 19.28%, 27.34%, 22.94%, and 15.76%. Additionally, the optimized algorithm shortened the detection time per hectare by 927 s, reduced the single-point detection process by 6.28 s, and improved the positioning and detection accuracy by an average of 14.26%. The research result can provide a reference for the autonomy, informatization, and intelligentization of soil available NPK content information acquisition.

Key words: soil available nitrogen, phosphorus and potassium; automatic detection; RF prediction modeling; path planning; path tracking control

0 引言

速效氮、磷、钾作为土壤肥力的核心指标,其含量直接反映土壤供肥能力[1],在保障作物健康生长、提升农产品质量、优化资源利用效率及推动农业可持续发展中占据重要地位[2-3]。2024 年中央一号文件[4]指出,扎实推进化肥农药减量增效,鼓励采用测土配方施肥、精准施药,在减少农业药源污染的同时,保护和提升土壤肥力。当前,土壤肥力检测技术正向自主化方向转型[5-6],智能采样与检测设备虽改善了传统实验室化学分析的低效、人工依赖等弊端,但土壤检测精度、检测平台在复杂农田环境中的路径规划适配性及跟踪控制可靠性方面仍存在局限,且未充分实现肥力检测与无人作业的深度融合。

土壤肥力指标检测主要包括化学分析、光电比色、电导率间接测定及近红外光谱分析等方法[7-8]。陈珊等[9]设计基于铂修饰丝网印刷电极的电化学传感体系,结合碳酸盐干扰掩蔽技术及快速提取装置,实现土壤铵态氮的现场快速检测。PAL 等[10]开发物联网微流控比色平台,通过捕获土壤中亚硝酸盐、磷酸盐与特定试剂反应的颜色变化,实现 2 种目标离子的连续在线监测。DARMAWAN 等[11]耦合电容与电导率参数优化检测维度,构建电导率与土壤氮磷钾含量的定量映射模型,依托电阻抗频谱分析技术实现三者的快速精准检测。姚成硕等[12]构建基于变量筛选的可见光-近红外光谱技术方案,用于土壤肥力属性预测,为黑土地肥力监测提供高效方法与工具。冀荣华等[13]针对光谱预测土壤氮含量模型精度和泛化能力不足的问题,提出 VNIRSformer 模型,经大型公开数据集训练,对土壤低氮含量预测效果较好且泛化能力较强。然而,上述方法仍普遍存在操作繁琐、检测指标单一等问题,尤其难以满足无人化需求,无法通过有效集成形成原位土快速检测与作业的完整闭环。

车载式土壤检测平台的出现为构建高效、自主肥力指标检测提供了新方案[14-15]。姚照胜等[16]研发的搭载机械臂和土壤传感器的移动式采集车,实现了定时定点大范围土壤信息采集。裴晓帅等[17]针对田间土壤参数采集效率低等问题,开发车载式光-电特性采集系统,同步获取电导率、光谱及 GPS 数据,提升采集精度与效率。韩长杰等[18]针对大田土壤电导率快速检测需求,基于四端法设计车载式检测系统,通过试验建立回归模型(R^2 为 0.996 1),实现电导率实时精准检测。NORBY 等[19]针对土壤取样分析过程人力成本高、耗时长、操作不一致问题,提出集成传感器的自主作业机器人,其可沿预设路径完成土壤自主取样与检测数据实时获取。尽管现有的车载式土壤检测方法在扩大作业范围和传感器优化方面取得了一定进展,但在车体自主导航作业能力方面仍显薄弱,尤其在路径规划的适应性、跟踪控制的稳定性以及障碍物环境中的鲁棒性方面亟待提升。

基于上述研究现状与不足,本研究将构建融合快速检测、智能规划与精准控制于一体的土壤速效氮磷钾自主检测系统。通过构建传感器检测模型、提出分级-适配式路径规划方法、开发 GA-LQR 优化跟踪算法,进行仿真与田间试验验证,为

土壤速效氮磷钾元素智能化、精准化检测提供技术方案。

1　土壤速效氮磷钾自动检测系统总体设计

1.1　系统总体架构

土壤速效氮磷钾自动检测系统由检测作业云端、导航控制模块、执行驱动模块组成，系统总体架构如图 1 所示。导航控制终端作为上位机，通过接收云端发送的导航作业信息引导平台按预定路径行走，实现定点停车测肥作业需求；执行驱动终端作为下位机，通过解析上位机发送的报文指令，实现系统的数据检测及驱动转向控制。

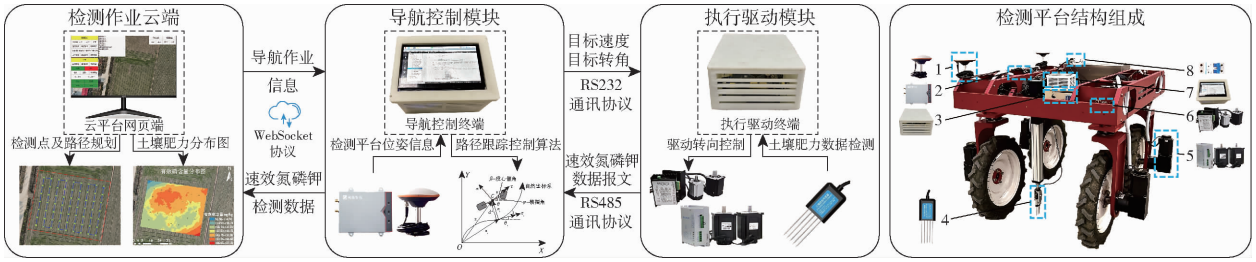

图 1　土壤速效氮磷钾自动检测系统总体架构

Fig. 1　Overall architecture of automatic soil test system for available nitrogen, phosphorus and potassium

1. 北斗天线　2. 北斗接收机　3. 执行驱动模块　4. 肥力检测传感器　5. 直流驱动电机及驱动器　6. 伺服转向电机及驱动器　7. 导航控制模块　8. 48 V 电源总开关

1.2　自动测肥作业工作流程

导航控制模块以树莓派 4B 为核心控制器，通过 WebSocket 协议接收云端规划的导航作业信息。将北斗接收机获取的平台实际位姿信息与规划的路径信息实时对比，经路径跟踪控制算法计算跟踪偏差，进而解算出车轮目标速度与转角，通过 RS232 协议发送至执行驱动模块。执行驱动模块以 STM32 为核心控制器，通过解析导航控制模块下发的指令报文，实现 4 个驱动与 4 个转向电机的同步控制，确保平台沿目标路径稳定行进。

测肥作业中，导航控制终端实时监测平台与设定检测点间距离，当间距≤6 cm 时，执行驱动终端向传感器发送检测问讯指令，启动土壤速效氮磷钾含量的定量分析，将结果通过 RS485 协议以报文形式上传至导航控制终端。单点检测完成后，平台自行启动并行进至下一检测点，直至完成全局检测任务。系统工作流程如图 2 所示。

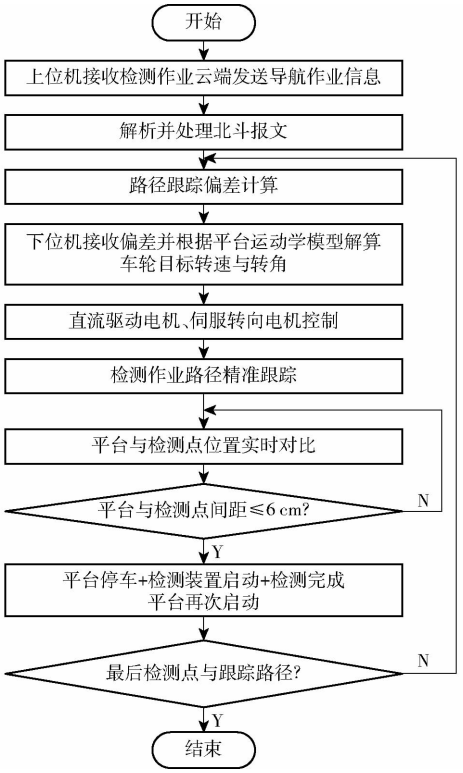

图 2　系统工作流程图

Fig. 2　System workflow diagram

2　土壤传感器检测参数模型构建

2.1　数据采集

速效氮磷钾含量检测采用河南秉晟实业有限公司研发的全参数土壤检测设备，通过“均匀网格布设＋随机选取”相结合的方式选取 191 处采样点作为土壤传感器标定模型取样点，如图 3 所示。以传感器在各点实测的土壤温度、含水率、pH 值、电导率作为输入参数；同步采集土壤样本，经风干、研磨、过筛等前处理后，采用纳氏比色法[20]、钼锑抗比色法[21]、四苯硼钠比浊法[22]分别测定速效氮、磷、钾真实含量[23]，并将其作为目标参数。输入与目标参数特征统计如表 1 所示。

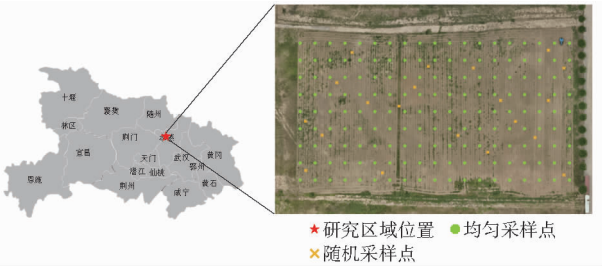

图 3　采样点选取

Fig. 3　Selection of sampling points

表 1 输入及目标参数特征统计

Tab. 1 Statistical characteristics of input and target parameters

项目	温度/℃	含水率/%	pH 值	电导率/(μS·cm^{-1})	速效氮含量/(mg·kg^{-1})	速效磷含量/(mg·kg^{-1})	速效钾含量/(mg·kg^{-1})
平均值	6.07	14.47	6.52	181.97	37.28	133.50	287.42
标准差	0.83	4.30	0.47	128.79	5.12	22.79	42.28
中位数	6.40	13.71	6.30	157.52	36.89	136.20	292.10
变异系数	0.14	0.30	0.07	0.69	0.14	0.17	0.15

2.2 模型构建

为实现检测平台对土壤肥力指标的原位、快速检测需求，对传感器数据的解析模型进行构建与优选。采用随机森林、BP 神经网络（Back propagation neural network，BPNN）、极限学习机（Extreme learning machine，ELM）和支持向量机（Support vector machine，SVR）4 种机器学习算法对取样土壤速效氮、磷、钾 3 种肥力指标进行测算，将采样数据集按比例 7∶3 分为训练集和测试集，对输入及目标参数进行归一化处理，同时使用均方根误差（RMSE）、决定系数（R^2）和平均绝对误差（MAE）3 项指标构建评价体系。检测模型评价结果如图 4 所示，各元素含量真实值与预测值结果如图 5 所示。

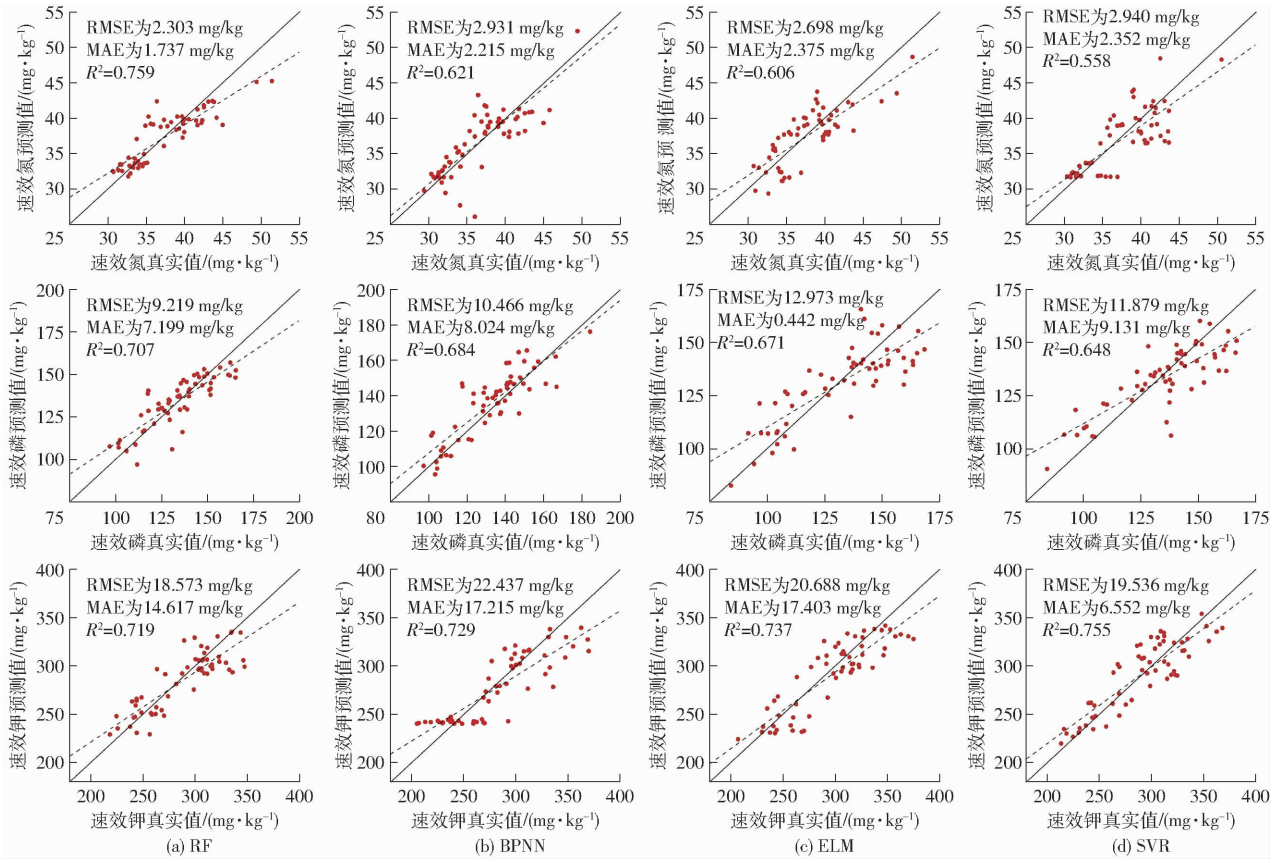

图 4 基于 RF、BPNN、ELM、SVR 模型的测试集速效氮磷钾元素检测评价结果

Fig. 4 Detection evaluation results for available NPK elements based on RF, BPNN, ELM, and SVR models

在 191 个采样点中，使用传感器直接测量所得的土壤速效氮磷钾相对误差分别为 54.66%、72.61%、70.72%。由图 4 可知，经 4 种机器学习模型进行优化后，预测精度均得到提升，其中随机森林模型表现最优。对于速效氮和速效磷，RF 的 RMSE、MAE 最低且 R^2 最高；对于速效钾，RF 的 RMSE、MAE 最低，仅 R^2 略低于其他模型。由图 5 可知，RF 对 3 种检测参数的预测值与实测值相关性最强，预测值相对误差分别小于 16.44%、19.26%、13.91%，较传感器未建模直接测量精度平均提升 49.46%，优于 BPNN、ELM 和 SVR 模型。因此，选用 RF 模型对土壤速效氮磷钾含量进行预测。

3 自动测肥作业路径规划方法设计

3.1 检测点规划方法

基于测土配方原理[24-25]及施肥作业需求，通过

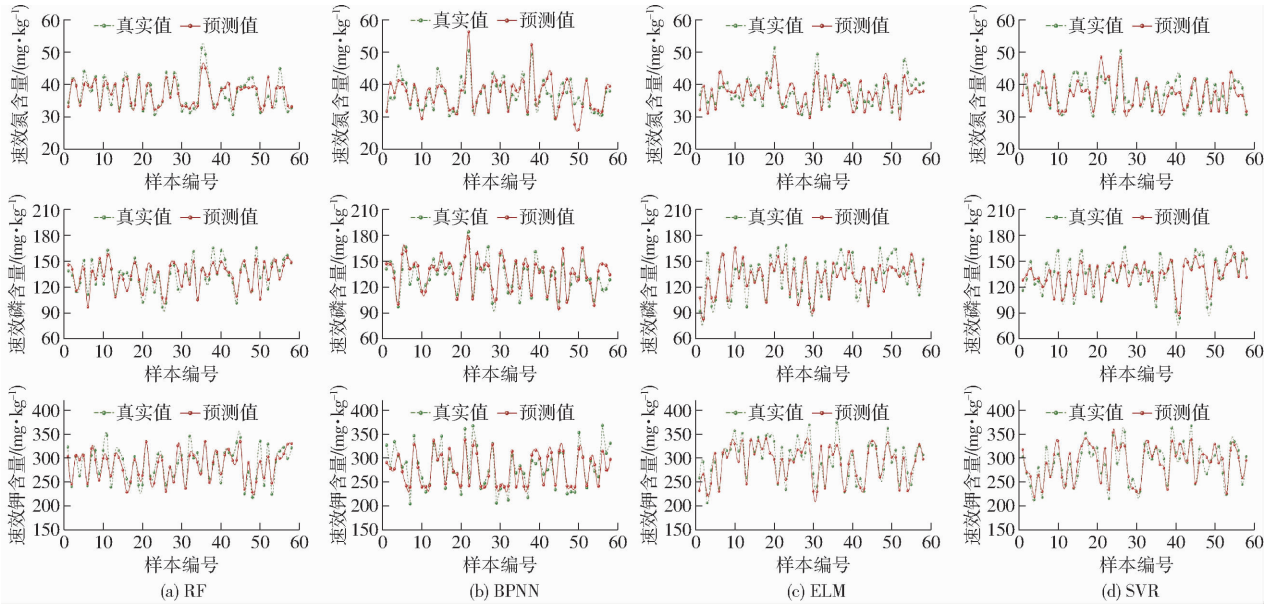

图 5　基于 RF、BPNN、ELM、SVR 模型的测试集速效氮磷钾真实值与预测值

Fig. 5　Actual values and measured values of available NPK elements based on RF, BPNN, ELM, and SVR models

优化检测点布局以精准表征田块速效氮磷钾元素分布。考虑检测作业中可能涉及含厢垄结构的田块环境，依据厢宽 2.3 m 与车宽 1.2 m 的倍数关系，将检测点间纵向距离设定为 6.9 m，横向距离同步采用 6.9 m 的整数倍。该布局在保障平台安全行驶的同时，通过量化不同采样密度的克里斯琴森均匀度系数合理控制检测点，避免过密导致作业时长增加及过疏造成覆盖不足，实现检测点均匀性与作业效率的平衡。检测点规划如图 6 所示，其中 a、b 均为正整数。

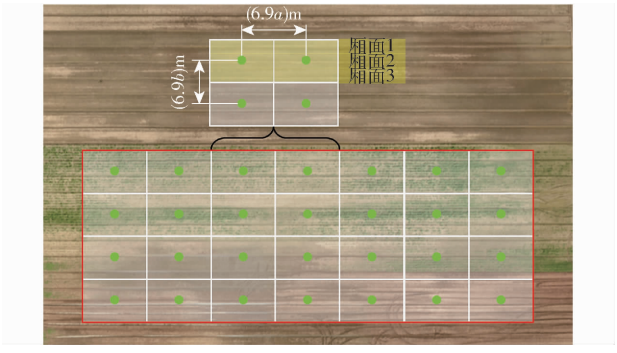

图 6　检测点规划

Fig. 6　Test point planning

3.2　不同田间环境路径规划方法

由于田间环境复杂多样，为确保平台自主导航作业的安全性以及检测结果的可靠性，根据不同作业场景差异化选择路径规划方法，从而实现检测点连续遍历。针对田间障碍物存在状态及尺寸差异，提出保障检测全覆盖与作业无中断的分级-适配式路径规划策略。

3.2.1　无障田块路径规划方法

针对无积水、无肥堆且平坦的无障碍田块，采用梳式路径规划算法连接各检测点，其核心流程如图 7所示。根据设定的田块边界，以固定间距扫描并初始化检测点阵列，进而自动生成连续的梳式导航作业路径。

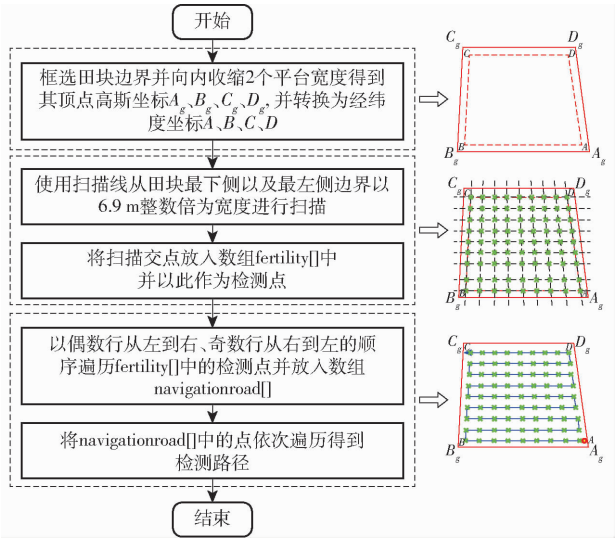

图 7　无障田块检测点梳式路径遍历算法流程

Fig. 7　CP traversal algorithm flow of detection point of unimpeded field

基于该算法，通过 Google Maps API 在网页端实现规划路径的自动生成，结果如图 8 所示。图中，红色边框表示作业田块区域，绿色点标识肥力检测点，蓝色线段代表肥力检测作业路径，其方向与箭头指向一致。

3.2.2　障碍物田块路径规划方法

由于田间障碍物大小、形状与分布特性各异，需根据具体情况选择合适避让策略。为提升作业效率，平台在遍历检测点的基础上需保持连续工作状

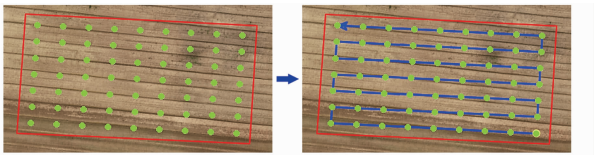

图 8 无障田块检测点及梳式导航路径网页端生成结果

Fig. 8 Obstacle free field detection points and CP generate results on web side

态,即无论障碍物处在田间何处都能实现检测作业一次完成,确保全作业流程无间断。此外,将障碍区域向外扩展半个车宽作为安全缓冲带,进一步降低平台避障行驶时的碰撞风险。基于田间障碍物大小差异,设计检测点遍历路径规划方案,适配不同障碍场景,保障检测作业连贯高效开展。

基于尺度分级的障碍物田块检测点遍历路径规划实现步骤如图 9 所示。该算法通过网页端交互框选田块与障碍物边界以生成检测点阵列,采用射线法滤除障碍物内部点,最终基于障碍物跨越的检测行数进行尺度分级,从而自适应地规划最优路径,确保复杂田间场景下检测作业的连贯与高效。

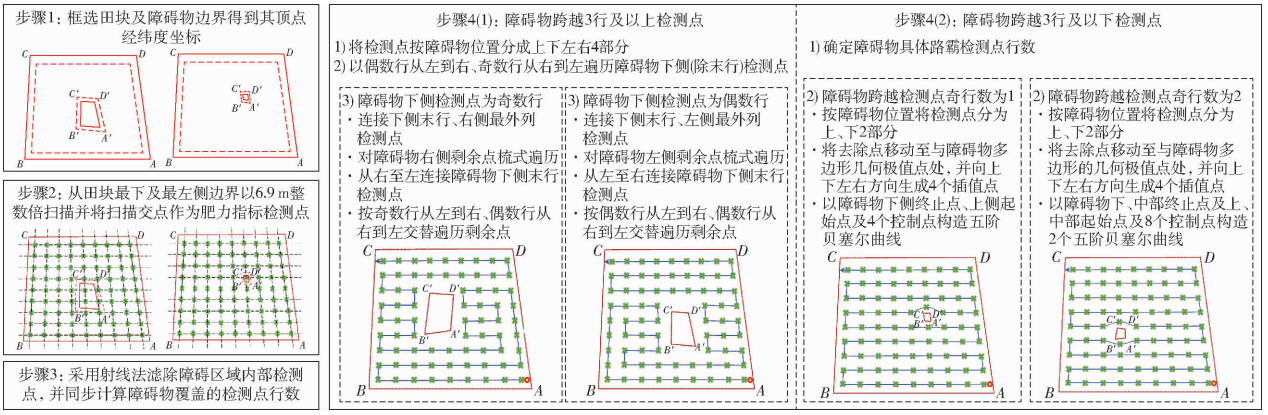

图 9 基于障碍物尺度分级的农田检测点路径规划算法实现步骤

Fig. 9 Implementation steps of farmland detection point path planning algorithm based on obstacle scale classification

应对跨越 3 行及以上检测点的大型障碍区域时,如灌溉水渠、仓储设施等,采用直线换行避让方法,即从障碍物两侧分别绕行以避免碰撞,同时去除规划在障碍区域的检测点以维持作业连续性。但梳式遍历模式易因障碍阻断形成“分段作业”,如图 10 所示,需额外增加独立作业次数才能完成设定点的全覆盖作业。

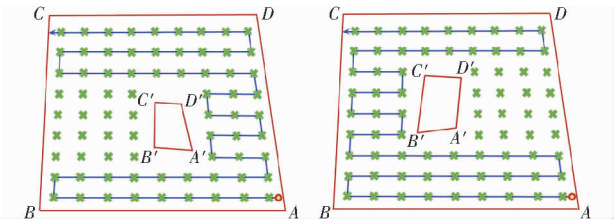

图 10 检测路径中断示意图

Fig. 10 Detection path interrupt schematic

为解决上述问题,提出一种梳式跨行路径规划策略,实现平台对所有检测点的连续遍历。网页端规划路径自动生成结果如图 11 所示。

应对跨越 3 行以下检测点的小型障碍区域时,如肥堆、电线杆等,平台可利用自身灵活性从一侧绕过障碍物,避让完成后返回原路径继续作业。当检测点被规划在该区域时,采取移动检测点至曲线避障路径上的方式确保检测作业完整性。

利用贝塞尔曲线可控性好、平滑度高、可实现平台在导航作业过程中保持稳定姿态,减少因路径不

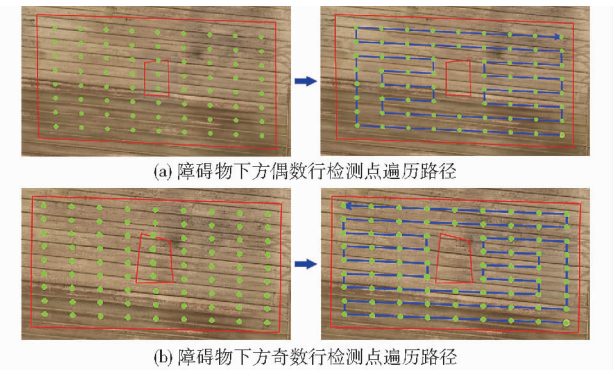

图 11 大障碍物田块检测点及梳式跨行导航路径网页端生成结果

Fig. 11 Results generated from detection point of large obstacle field and web page of CCP

平滑导致的误差和损耗等特点[26],将其作为曲线避障路径规划方法。相较于低阶曲线,五阶贝塞尔曲线提供了更高的灵活性和精确度,能够更好拟合复杂形状,同时避免锯齿效应;与高阶曲线相比,五阶贝塞尔曲线在计算复杂度和数值稳定性上更具优势,确保了平滑过渡和更好的视觉质量[27]。因此,采用五阶曲线作为速效氮磷钾检测平台的局部路径规划方法,确保平台在避让小型障碍物过程中的平滑性、稳定性和安全性。

五阶贝塞尔曲线 $B(t)$ 由 6 个控制点 $P(0)$、$P(1)$、$P(2)$、$P(3)$、$P(4)$ 和 $P(5)$ 定义,表达式为

$$B(t)=(1-t)^5P(0)+5t(1-t)^4P(1)+10t^2(1-t)^3P(2)+10t^3(1-t)^2P(3)+5t^4(1-t)P(4)+t^5P(5) \quad (1)$$

式中　t——差值参数，取 0 ~ 1

五阶贝塞尔曲线生成过程及结果如图 12 所示。

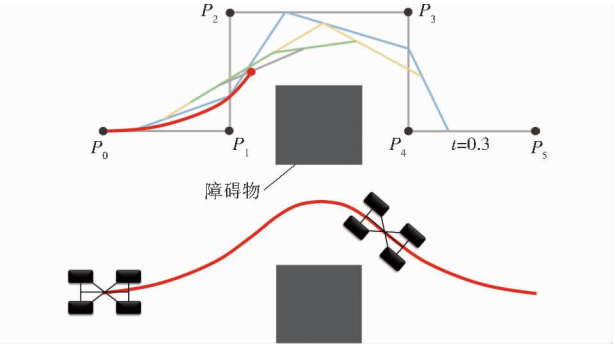

图 12　五阶贝塞尔曲线生成过程及平台跟踪示意图

Fig. 12　Fifth-order Bézier curve generation process and platform tracking schematic

当障碍物跨越 1 行或 2 行检测点时，分别采用一次或二次贝塞尔曲线绕行，并通过移动检测点位置确保自主作业安全进行。梳式与贝塞尔曲线融合的检测点网页端规划路径自动生成结果如图 13 所示。

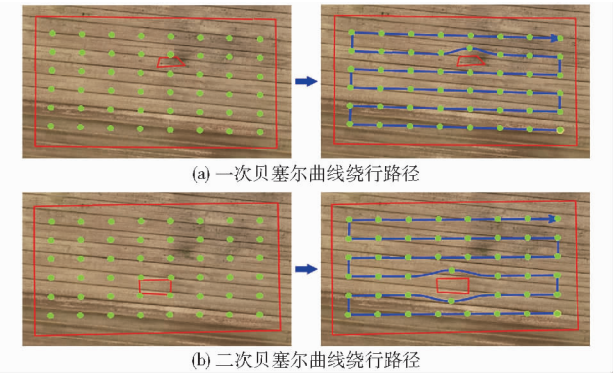

图 13　小障碍物田块检测点及梳式与贝塞尔曲线融合导航路径网页端生成结果

Fig. 13　Small obstacle field detection points and CFBP web page generated results

4　路径跟踪控制器设计

土壤速效氮磷钾自主检测作业中，精准的路径跟踪算法可缩短作业时长，降低能耗、提升效率；同时提高检测点定位精度，减小实测点位置误差，保障采样间距均匀性，生成可靠的肥力指标分布图，为土壤肥力精准检测与科学管理提供支撑。

4.1　检测平台模型建立

为提高检测平台田间行驶的稳定性与灵活性，采用四轮阿克曼转向模式减少其在复杂农田环境中的侧滑与摇摆[28-29]，确保检测作业路径跟踪过程的精准高效执行。

图 14 为检测平台四轮阿克曼转向示意图。图中，点 O 为平台质心；点 P_o 为速度瞬心；L 为车身长

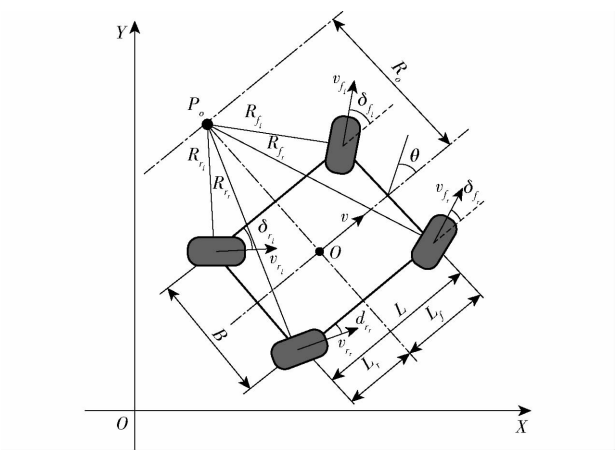

图 14　平台四轮阿克曼转向模型

Fig. 14　Four-wheel Ackermann steering model of platform

度，其中前桥长度为 L_f，后桥长度为 L_r；B 为车身宽度；δ_{f_r}、δ_{f_l}、δ_{r_r}、δ_{r_l} 为四轮转向角度；v_{f_r}、v_{f_l}、v_{r_r}、v_{r_l} 为四轮速度；R_{f_r}、R_{f_l}、R_{r_r}、R_{r_l} 为四轮转向半径；v、R_o 为整车质心速度和转弯半径，θ 为平台前轴瞬时转角。

由几何关系可得

$$R_o=\frac{L_f}{\tan\theta} \quad (2)$$

$$\begin{cases}\delta_{f_r}=\arctan\dfrac{L_f}{R_o+\dfrac{B}{2}}=\dfrac{L_f}{\dfrac{L_f}{\tan\theta}+\dfrac{B}{2}}=\dfrac{2L_f\tan\theta}{2L_f+B\tan\theta}\\ \delta_{f_l}=\arctan\dfrac{L_f}{R_o-\dfrac{B}{2}}=\dfrac{L_f}{\dfrac{L_f}{\tan\theta}-\dfrac{B}{2}}=\dfrac{2L_f\tan\theta}{2L_f-B\tan\theta}\\ \delta_{r_r}=\arctan\dfrac{L_r}{R_o+\dfrac{B}{2}}=\dfrac{L_r}{\dfrac{L_f}{\tan\theta}+\dfrac{B}{2}}=\dfrac{2L_r\tan\theta}{2L_f+B\tan\theta}\\ \delta_{r_l}=\arctan\dfrac{L_r}{R_o-\dfrac{B}{2}}=\dfrac{L_r}{\dfrac{L_f}{\tan\theta}-\dfrac{B}{2}}=\dfrac{2L_r\tan\theta}{2L_f-B\tan\theta}\end{cases} \quad (3)$$

由瞬心定理可得

$$\frac{v}{R_o}=\frac{v_{f_r}}{R_{f_r}}=\frac{v_{f_l}}{R_{f_l}}=\frac{v_{r_l}}{R_{r_l}}=\frac{v_{r_l}}{R_{r_l}} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases}v_{f_r}=\dfrac{vR_{f_r}}{R_o}=\dfrac{v\sqrt{L_f^2+\left(R_o+\dfrac{B}{2}\right)^2}\tan\theta}{L_f}\\ v_{f_l}=\dfrac{vR_{f_l}}{R_o}=\dfrac{v\sqrt{L_f^2+\left(R_o-\dfrac{B}{2}\right)^2}\tan\theta}{L_f}\\ v_{r_l}=\dfrac{vR_{r_l}}{R_o}=\dfrac{v\sqrt{L_r^2+\left(R_o+\dfrac{B}{2}\right)^2}\tan\theta}{L_f}\\ v_{r_r}=\dfrac{vR_{r_r}}{R_o}=\dfrac{v\sqrt{L_r^2+\left(R_o+\dfrac{B}{2}\right)^2}\tan\theta}{L_f}\end{cases} \quad (5)$$

已知整车质心速度 v 和前轴瞬时转角 θ 时，基

于式(3)、(5)可获得平台各轮转角和速度,实现分布式四轮驱动与四轮转向的协同控制。此外,为方便建立平台的运动学模型,将四轮平台简化为二轮车模型进行研究。

图 15 为简化的二轮车运动学模型,(X_f, Y_f) 为前轴中心坐标;(X_r, Y_r) 为后轴中心坐标;(X, Y) 为质心坐标;φ 为车身横摆角。

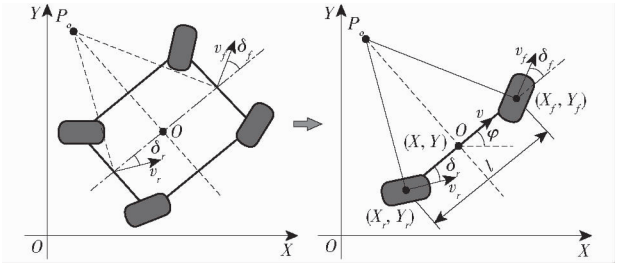

图 15 平台二轮车简化模型

Fig. 15 Simplified model of platform two-wheeler

根据几何关系及运动学约束可得检测平台运动学模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \dot{Y}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi\\ \sin\varphi\\ 2\tan\delta/l\end{bmatrix}v \tag{6}$$

其中 $\delta=\arctan(2l/R_o)$

式中 $\dot{X}$——平台在 X 方向速度

$\dot{Y}$——平台在 Y 方向速度

$\dot{\varphi}$——平台横摆角速度

l——平台轴距 δ——前轮偏角

4.2 基于 GA 优化的 LQR 路径跟踪控制方法

4.2.1 线性时变误差运动学模型分析

式(6)平台运动学模型为连续时间域内的状态空间模型,含有 sin( )等非线性函数,还涉及 v 和 δ 函数间的乘法操作,鉴于非线性模型优化计算的复杂性,将其转化为线性模型。

令 $L=2l$,即 $\dot{\varphi}=v\tan\delta/L$。选取状态量为 $\boldsymbol{X}=[x\quad y\quad \varphi]^{\mathrm{T}}$,控制量为 $\boldsymbol{u}=[v\quad \delta]^{\mathrm{T}}$,模型则可表示为非线性向量值函数。$\dot{\boldsymbol{X}}=f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{u})$ 对于目标跟踪路径上任意一个参考点,用 g 表示,可表达为 $\dot{\boldsymbol{X}}_g=f(\boldsymbol{X}_g,\boldsymbol{u}_g)$,其中参考点 $\boldsymbol{X}_g=[x_g\quad y_g\quad \varphi_g]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{u}_g=[v_g\quad \delta_g]^{\mathrm{T}}$。在参考点处进行泰勒级数展开并求解雅可比矩阵可得连续线性状态空间运动学模型

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{x}_g\\ \dot{y}_g\\ \dot{\varphi}_g\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0&0&-v_g\sin\varphi_g\\ 0&0&v_g\cos\varphi_g\\ 0&0&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x-x_g\\ y-y_g\\ \varphi-\varphi_g\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\cos\varphi_g&0\\ \sin\varphi_g&0\\ \dfrac{\tan\delta_g}{L}&\dfrac{v_r}{L\cos^2\delta_g}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v-v_g\\ \delta-\delta_g\end{bmatrix} \tag{7}$$

定义实际状态和参考点之间的状态偏差为新状态量 $\boldsymbol{X}_e$,实际输入和参考点之间的输入偏差为新输入 $\boldsymbol{u}_e$,假设采样时间为 T,使用前向欧拉法并用差商近似代替微分,最终得到检测平台离散线性状态空间运动学模型为

$$\boldsymbol{X}_e(k+1)=\begin{bmatrix}1&0&-Tv_g\sin\varphi_g\\ 0&1&Tv_g\cos\varphi_g\\ 0&0&1\end{bmatrix}\boldsymbol{X}_e(k)+\begin{bmatrix}T\cos\varphi_g&0\\ T\sin\varphi_g&0\\ \dfrac{T\tan\delta_g}{L}&\dfrac{Tv_g}{L\cos^2\delta_g}\end{bmatrix}\boldsymbol{u}_e(k) \tag{8}$$

4.2.2 GA-LQR 路径跟踪控制器设计

LQR 控制器本质是寻求状态量和控制量在约束条件下的最优控制规律,使目标函数达到最小[30]。在基于车辆运动学模型的 LQR 路径跟踪控制问题中,构建代价函数 $\boldsymbol{J}$,并定义误差矩阵及其权重系数,计算式为

$$\boldsymbol{J}=\sum_{i=0}^{N}\boldsymbol{X}_{ei}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X}_{ei}+\boldsymbol{u}_{ei}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}_{ei} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{u}_e=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}_e \tag{10}$$

其中 $$\boldsymbol{K}=(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}q_1&0&0\\ 0&q_2&0\\ 0&0&q_3\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_1\\ r_2\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中 $\boldsymbol{X}_e$——状态误差矩阵

$\boldsymbol{u}_e$——控制误差矩阵

$\boldsymbol{K}$——状态反馈矩阵

$\boldsymbol{Q}$——状态误差权重矩阵

$\boldsymbol{R}$——控制误差权重矩阵

q_1、q_2、q_3——x、y、φ 误差权重系数

r_1、r_2——v、δ 误差权重系数

在状态反馈矩阵中,$\boldsymbol{P}$ 可通过黎卡提(Riccati)方程 $\boldsymbol{P}=\boldsymbol{Q}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}$ 求得。令 $\boldsymbol{P}$ 等于 $\boldsymbol{Q}$ 并进行反复迭代,直到前后 2 次所得 $\boldsymbol{P}$ 差值小于设定阈值,计算出状态反馈矩阵,即可求得最优控制量和最小代价。

在使用 LQR 控制器进行路径跟踪时,矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 影响路径跟踪时的横向偏距和横摆角偏差;矩阵 $\boldsymbol{R}$ 影响跟踪速度与车轮转角。因此,选择合适的 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 矩阵是使用 LQR 算法进行路径跟踪的关键[31]。因此,引入遗传算法实时调节误差权重矩阵,以寻求最佳平衡点。

在本文涉及的作业场景中,更加关注跟踪的横向偏距和航向偏角,因此仅对状态量权重矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 进

行优化，保持 $\boldsymbol{R}$ 矩阵不变。遗传算法对 $\boldsymbol{Q}$ 矩阵优化的具体流程如图 16 所示。

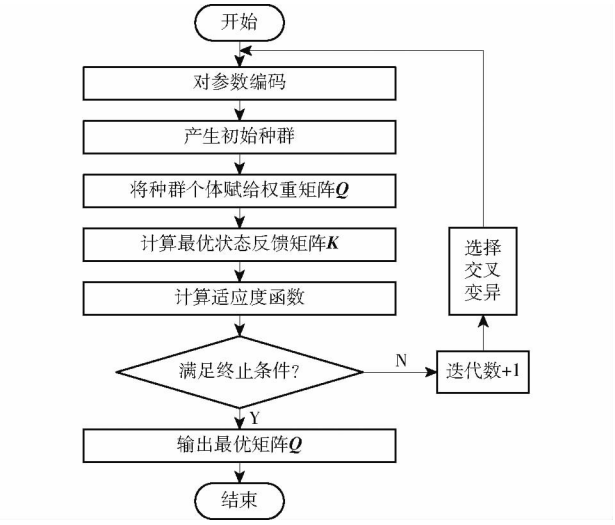

图 16　遗传算法优化状态误差权重矩阵流程

Fig. 16　Genetic algorithm optimized state error weight matrix flow

在遗传算法中，适应度函数设计应综合考虑横向偏距、航向偏角及车轮转角变化量，使平台在跟踪目标路径过程中保持较小偏差的同时避免车轮转向出现较大变化，为达到该目标，建立性能指标函数 J_{GA} 为

$$J_{GA} = \eta_1 |e_d| + \eta_2 |e_\varphi| + \eta_3 |e_\delta| \tag{13}$$

其中　　$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1$

式中　η_1——横向偏距 e_d 权重系数

η_2——航向偏角 e_φ 权重系数

η_3——车轮转角偏差 e_δ 权重系数

该算法中，个体适应度通过适应度函数计算得到，直接反映个体质量，其值越大，个体越优。性能指标函数 J_{GA} 和适应度函数 F 转换公式为

$$F = \frac{1}{1 + J_{GA}} \tag{14}$$

适应度函数取值范围为 0 ~ 1。

4.3　路径跟踪仿真试验

为验证所设计的 GA－LQR 路径跟踪控制算法应用于土壤速效氮磷钾检测平台自主导航作业的可行性，使用 Matlab/Simulink 搭建跟踪控制器。该控制器包括 3 大模块，如图 17 所示。目标跟踪路径模块可解算出与平台当前位置匹配的最近道路点信息、GA－LQR 控制算法模块可获得平台质心目标速度与转角、检测平台运动学模型模块可输出平台实时位姿信息。

为全面满足实际田间作业需求，搭建 Simulink 仿真模型，如图 18 所示，验证 LQR 及其优化算法对直线及曲线路径的适应程度。

设计仿真路径为直线与贝塞尔曲线相融合，路径

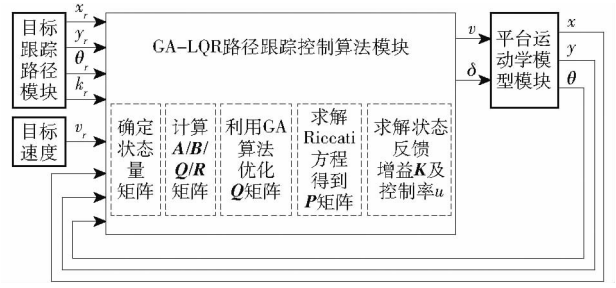

图 17　GA－LQR 路径跟踪控制算法实现流程

Fig. 17　GA－LQR path tracking control algorithm implementation flowchart

总长 200 m，直线部分为(0,40) m 和(160, 200) m，曲线部分设置在(40,160) m 范围内。设定检测平台质心起始位置为(－1, 0) m，航向角为 0°，仿真采样时间为 0.025 s。为验证设计的控制策略在不同车速下跟踪效果以及 GA 对 LQR 的优化效能，分别在 0.4、0.7、1.0 m/s 速度下进行仿真试验，试验结果如图 19 所示。

由图 19 可知，当平台行驶速度为 0.4、0.7、1.0 m/s 时，在 LQR 控制下最大横向偏距为 0.90、1.76、2.19 cm，最大航向偏角为 1.01°、1.75°、2.12°而在 GA－LQR 控制下的相应指标分别为 0.62、1.26、1.71 cm，以及 0.83°、1.29°、1.69°，GA 优化后的控制器使平台路径跟踪精度平均提高 24.32%。试验结果表明，随着平台行驶速度增加，控制精度有所下降，但 2 种控制器仍能在较高速度下实现目标路径的稳定跟踪。此外，GA－LQR 控制算法在测试速度下均展现出更小的偏差和更好的跟踪性能，验证了其在动态环境中的适用性，也为后续实地试验提供了理论支持。

5　田间试验

为验证本文设计的速效氮磷钾检测平台自主导航作业系统在田间环境下的适应性、GA－LQR 路径跟踪控制方法相较于传统 LQR 算法在自主检测作业中的适用性优势，平台与检测装置间通信与数据传输的可靠性以及自主测肥作业效率，试验以四轮独立驱动转向平台为载体，其搭载全参数土壤传感器，并配备自主导航作业系统，于 2025 年 4 月在湖北省安陆市永祥农机装备有限公司试验田开展田间试验。该田块采用华中地区棉花－油菜年度轮作模式，土壤质地为砂壤土，试验于油菜收获后开展，且田块已完成整地作业，试验场景如图 20 所示。

5.1　检测点采样密度选择

选取试验样地约 0.26 hm^2，为确定采样密度，结合本文检测点规划方法，在试验样地分别选取

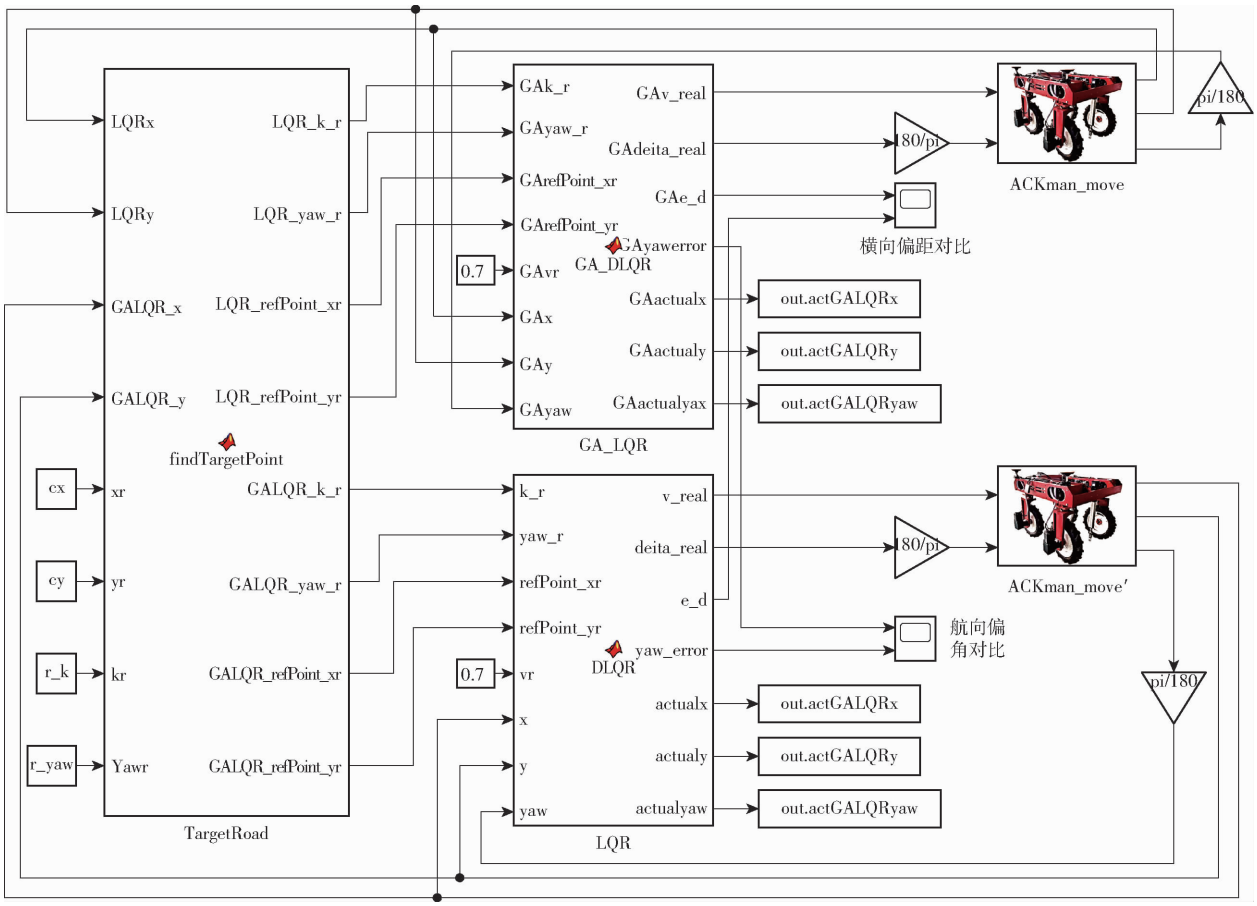

图 18 路径跟踪控制器 Simulink 仿真模型

Fig. 18 Simulink simulation model of path tracking controller

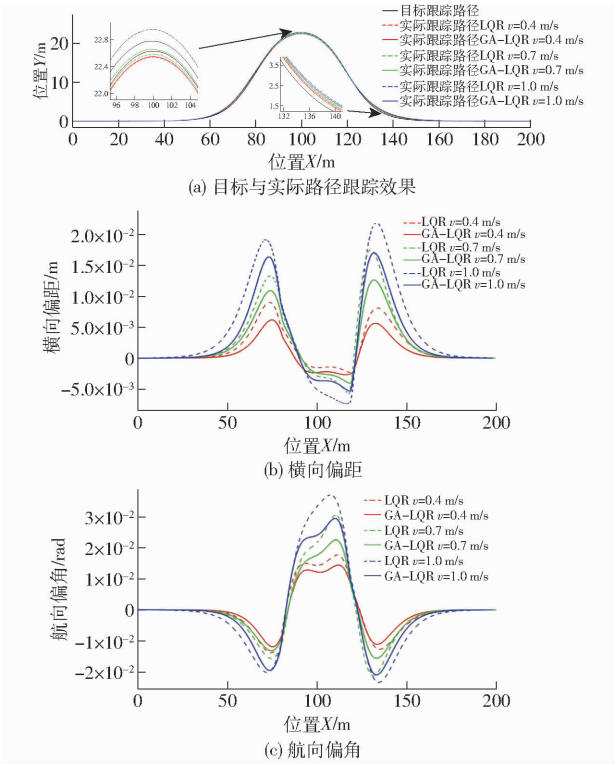

图 19 LQR 与 GA－LQR 算法在不同平台速度下的仿真试验结果

Fig. 19 Simulation results of LQR and GA－LQR algorithms at different platform speeds



图 20 田间试验场景

Fig. 20 Scene of field experiments

6.9 m×6.9 m、6.9 m×13.8 m、13.8 m×6.9 m、13.8 m×13.8 m 为检测点全域。

克里斯琴森均匀度系数是表征土壤养分空间分布特征的统计学量度，通过构建检测点实测值与空间均值离散度的标准化函数关系，实现养分异质性量化评估[32]。计算公式为

$$C_{UC}=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}|\omega_i-\overline{\omega}|}{n\overline{\omega}}\right)\times 100\% \quad (15)$$

式中 ω_i——第 i 个样本值

n——样本数量

$\overline{\omega}$——样本均值

该系数通过标准化处理各检测点与整体均值的偏差，将计算结果约束在 0～1 区间。当 C_{UC} 趋近理

论最大值 1 时，表明研究区域养分高度均质化，随着系数递减，土壤养分空间变异增强，表现为离散型或聚集型分布特征。

基于式(15)对上述 4 种采集区域土壤肥力指标分布均匀度进行测算，结果如表 2 所示。

表 2　不同采样密度土壤肥力指标分布均匀度特征

Tab. 2　Uniformity characteristics of soil fertility indicators at different sampling densities

采样区域	检测点个数/个	克里斯琴森均匀度系数/%		
		速效氮	速效磷	速效钾
6.9 m×6.9 m	54	87.74	85.43	89.09
6.9 m×13.8 m	27	83.26	80.78	84.35
13.8 m×6.9 m	30	85.21	81.20	83.96
13.8 m×13.8 m	12	78.19	73.48	76.33

由表 2 可知，3 种肥力指标的克里斯琴森均匀度系数均在第一种采样区域达到峰值，该区域能够更精准反映土壤肥力的空间均匀性，有效降低因养分空间异质性导致的评估偏差。因此，选用 6.9 m×6.9 m 作为检测点布局，以实现更优检测效果。

5.2　土壤氮磷钾自动检测作业

云平台网页端框选并自动生成的检测点及导航作业路径如图 21a 所示，图中规划的检测作业路径共 6 条，检测点共 54 个，总路程约 370 m。设定直线、曲线作业以及原地转换行模式速度分别为 0.7、0.4、0.5 m/s，分别使用 LQR 和 GA－LQR 算法对规划路径进行跟踪试验，轨迹如图 21b、21c 所示。平台跟踪路径避障场景如图 22 所示。



(a) 检测点及导航规划路径　(b) LQR算法路径跟踪效果　(c) GA-LQR算法路径跟踪效果

图 21　目标路径及跟踪轨迹

Fig. 21　Target path and tracking track



(a) 前方遇到障碍物　(b) 曲线绕行　(c) 返回原始作业路径

图 22　平台曲线避让障碍物实际行走路线

Fig. 22　Platform curve to avoid obstacles actual route

传统 LQR 与 GA－LQR 控制算法在直线及曲线路径跟踪中的性能指标如表 3 所示。

由表 3 可知，直线路径跟踪中，平台在传统 LQR 控制下最大横向偏距为 4.29 cm、最大航向偏角为 3.42°，而在 GA－LQR 控制算法下对应指标为 3.62 cm 和 2.75°，较传统方法分别提升 15.62% 和 19.59%；曲线路径跟踪中，LQR 控制下最大横向偏距与航向偏角为 4.98 cm 和 4.28°，经 GA－LQR 优化后降至 4.02 cm 和 3.11°，分别降低 19.28% 和 27.34%。试验结果揭示了 GA 优化对 LQR 控制器路径跟踪精度的改善，尤其在曲线路径中表现出更优的轨迹跟随鲁棒性与动态适应性。检测平台在不同路径及跟踪控制算法下路径跟踪误差如图 23 所示。2 种算法控制下平台在各检测点处停车绝对值误差对比如图 24 所示。

表 3　LQR 与 GA－LQR 路径跟踪算法性能指标对比

Tab. 3　Comparison of performance indicators for path tracking algorithms between LQR and GA－LQR

路径类型	跟踪算法	最大绝对横向偏距/cm	最大绝对航向偏角/(°)	检测点处平均停车误差绝对值/cm	检测作业全流程时间/min
直线	LQR	4.29	3.42	5.82	27.69
	GA－LQR	3.62	2.75	4.61	23.97
曲线	LQR	4.98	4.28	7.76	1.65
	GA－LQR	4.02	3.11	5.98	1.39

设定速度下，直线检测路径跟踪时，平台在传统 LQR 控制下的平均停车误差绝对值为 5.82 cm、全流程检测耗时 27.69 min；GA－LQR 控制下，停车误差与耗时分别优化至 4.61 cm、23.97 min，降低 20.79% 和 13.43%。曲线路径跟踪场景中，采用传统 LQR 算法控制时，平台在检测点处的平均停车误差绝对值为 7.76 cm、全流程检测耗时 1.65 min；经 GA－LQR 优化，停车误差与耗时降至 5.98 cm、1.39 min，降低 22.94% 和 15.76%。

由表 3 可知，经 GA 优化的 LQR 算法使单位公顷检测作业时长降低 927 s；单点自主检测作业全流程(涵盖检测点及相邻检测点间作业路径)耗时缩短 6.28 s。此外，平台与检测装置间通信及数据传输具备可靠性，各点检测信息上传至云数据库的延时控制在 0.28 s 内。

由田间试验结果可知，经 GA 优化的 LQR 路径跟踪控制方法较传统 LQR 算法可有效缩短作业时长、降低能源消耗，在检测路径上实现精准、平稳跟踪；检测点定位精度得到提升，实测点与设定点位置误差进一步减小，较好地保障了采样间距均匀性。同时，平台与检测装置间通讯控制系统可靠，检测信息可完整传输及存储，验证了自主导航作业系统的田间适应性与自主检测作业的高效性。

5.3　检测结果分析

使用 RF 预测模型标定传感器，通过 LQR 与

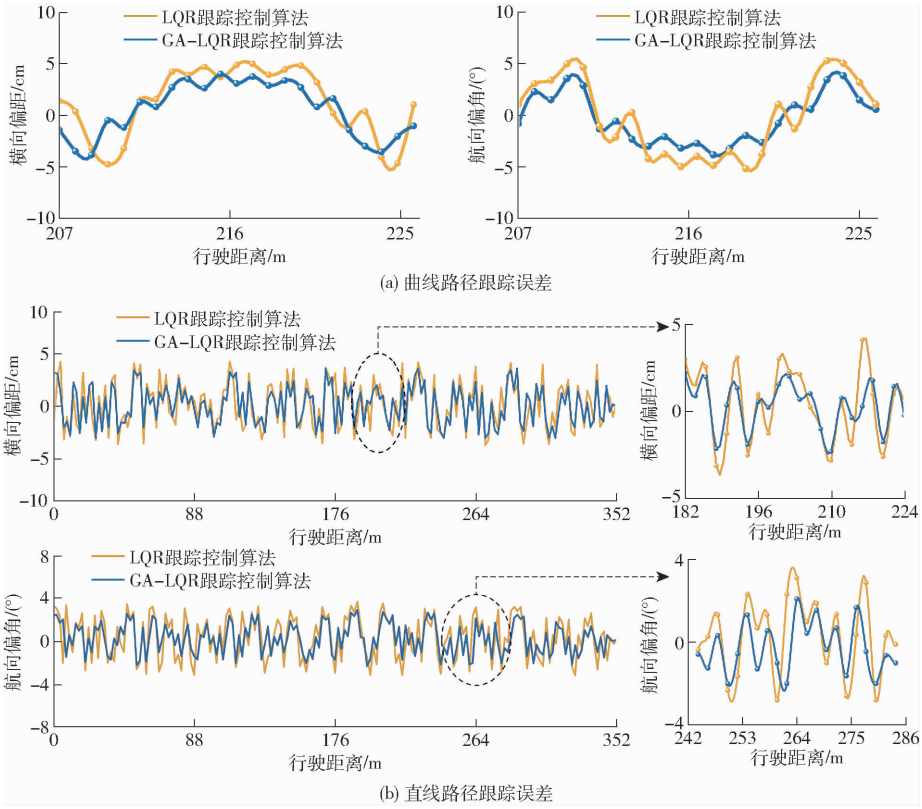

图 23 LQR 和 GA－LQR 算法路径跟踪误差曲线

Fig. 23 Path tracking error curves of LQR and GA－LQR algorithms

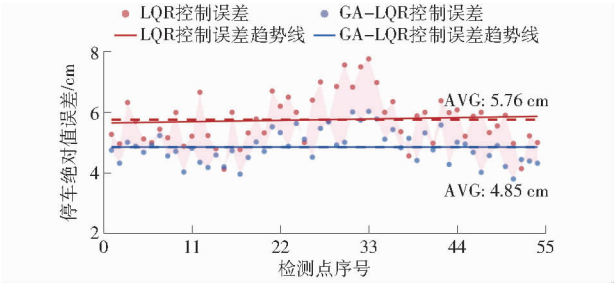

图 24 停车绝对值误差

Fig. 24 Absolute value error of parking

GA－LQR 跟踪算法控制平台田间移动，获取设定检测点处土壤速效氮磷钾元素信息，验证 2 种跟踪控制方法对试验田块速效氮、磷、钾元素含量的检测精度。2 种路径跟踪控制算法所得肥力指标检测数据与实验室化学分析真实数据结果如表 4 和图 26 所示。

由表 4 和图 26 可知，经 RF 标定的传感器在 GA－LQR 路径跟踪算法下，凭借更精准的检测点处停车位置控制，其检测值在均值一致性与波动控制

表 4 不同路径跟踪算法速效氮磷钾检测数据与真实值统计参数

Tab. 4 Statistical parameters of rapid nitrogen, phosphorus and potassium detection data from different path tracking algorithms and true values

数据源	参数	最大值/(mg·kg^{-1})	最小值/(mg·kg^{-1})	平均值/(mg·kg^{-1})	标准差/(mg·kg^{-1})	变异系数
实验室检测真实值	速效氮含量	51.42	30.24	41.96	6.71	0.16
	速效磷含量	162.71	104.54	126.25	13.23	0.10
	速效钾含量	342.52	230.90	288.63	25.02	0.09
LQR 算法检测值	速效氮含量	56.06	25.13	40.34	9.27	0.23
	速效磷含量	149.18	92.47	122.06	16.72	0.14
	速效钾含量	357.01	221.03	286.24	30.32	0.11
GA－LQR 算法检测值	速效氮含量	58.24	28.63	42.63	8.29	0.19
	速效磷含量	155.63	93.25	124.81	15.89	0.13
	速效钾含量	341.34	234.06	289.97	27.08	0.09

表现上优于 LQR 控制算法。由表 4 可知，平台在 GA－LQR 控制算法驱动下，传感器检测速效氮、磷、钾的最大误差分别为 13.60%、14.66%、15.71%，相较于 LQR 控制算法的 15.23%、16.15%、20.36%，定位检测准确性平均提高 14.26%，进一步验证了文中设计的路径跟踪优化算法通过提升检

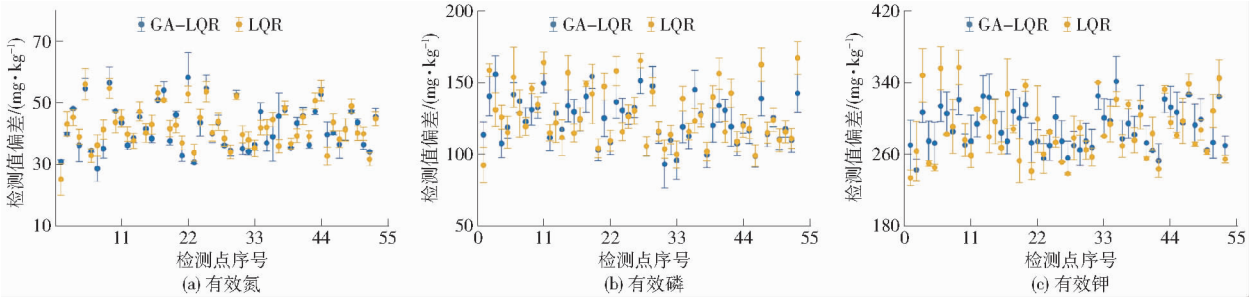

图 26　LQR 与 GA－LQR 路径跟踪算法下速效氮磷钾检测值相对真实值偏差

Fig. 26　Deviations between measured values of available NPK and true values under LQR and GA－LQR path tracking algorithms

测点停车位置精度，有效提高了土壤速效氮磷钾检测准确性。

6　结论

（1）为提升传感器对土壤肥力指标的检测精度，构建 RF、BPNN、ELM、SVR 4 种机器学习模型，以土壤温度、含水率、pH 值及电导率为输入参数，对土壤速效氮磷钾元素含量进行预测。经评估对比，选定 RF 模型为最优方法，其测试集土壤速效氮磷钾含量检测相对误差分别小于 16.44%、19.26%、13.91%，而使用传感器直接测量的对应指标分别为 54.66%、72.61%、70.72%。

（2）结合平台尺寸及后续施肥作业需求，通过量化不同采样密度的克里斯琴森均匀度系数确定最优检测点间距。针对农田场景中障碍物分布状态与尺度特征，构建场景分级的检测点遍历路径规划体系。其中，针对平坦无障、存在大障碍物及小障碍物田块，分别提出梳式、梳式跨行及梳式与五阶贝塞尔曲线融合的路径规划策略，实现多场景下检测作业一次性连续执行。

（3）为有效引导检测平台沿所设计导航路径稳定、高效跟踪，同时提升检测点定位精度，建立检测平台线性时变误差运动学模型，提出基于遗传算法优化的线性二次调节器路径跟踪方法。Matlab/Simulink 仿真试验结果表明，经 GA 优化的 LQR 控制器平均跟踪精度提高 24.32%，横向偏距和航向偏角可分别控制在 1.71 cm 和 1.69°范围内。

（4）田间试验结果表明，GA－LQR 控制方法较传统 LQR 算法有效提升了路径跟踪精度、作业效率及检测点定位精度。直线路径跟踪中，最大绝对横向偏距、最大绝对航向偏角、检测点处平均停车绝对值误差及全检测作业耗时分别从 4.29 cm、3.42°、5.82 cm 和 27.69 min 减少至 3.62 cm、2.75°、4.61 cm 和 23.97 min；曲线路径跟踪中，对应指标由 4.98 cm、4.28°、7.76 cm 和 1.65 min 降至 4.02 cm、3.11°、5.98 cm、和 1.39 min。同时，在 0.26 hm^2 试验田的自主检测任务中，优化算法使单位公顷检测时长减少 927 s，单点检测流程缩短 6.28 s，数据传输延时控制在 0.28 s 内。此外，GA－LQR 路径跟踪算法通过提升检测点停车控制精度，使经 RF 标定的传感器检测表现更优，定位检测准确性较 LQR 平均提升 14.26%。

参　考　文　献

[1] YANG W J, YU J, LI Y H, et al. Optimized NPK fertilizer recommendations based on topsoil available nutrient criteria for wheat in drylands of China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(7): 2421－2433.

[2] 张甘霖，吴华勇. 从问题到解决方案：土壤与可持续发展目标的实现[J]. 中国科学院院刊，2018，33(2)：124－134.
ZHANG Ganlin, WU Huayong. From “problems” to “solutions”: soil functions for realization of sustainable development goals [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 124－134. (in Chinese)

[3] 张福锁，申建波，危常州，等. 绿色智能肥料：从原理创新到产业化实现[J]. 土壤学报，2022，59(4)：873－887.
ZHANG Fusuo, SHEN Jianbo, WEI Changzhou, et al. Green intelligent fertilizer: from interdisciplinary innovation to industrialization realization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 59(4): 873－887. (in Chinese)

[4] 中共中央国务院.《中共中央 国务院关于学习运用“千村示范、万村整治”工程经验有力有效推进乡村全面振兴的意见》[N]. 2024. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11186/202402/content_6934551.html.

[5] 齐江涛，程盼婷，高芳芳，等. 农田土壤理化参数快速获取技术研究进展与展望[J]. 智慧农业(中英文)，2024，6(3)：17－33.
QI Jiangtao, CHENG Panting, GAO Fangfang, et al. Research advances and prospects on rapid acquisition technology of farmland soil physical and chemical parameter[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 17－33. (in Chinese)

[6] 杜兆辉，和贤桃，杨丽，等. 玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报，2023，39(9)：1－16.
DU Zhaohui, HE Xiantao, YANG Li, et al. Rearch progress on precision variable-rate seeding technology and equipment formaize[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 1－16. (in Chinese)

[7] 吴威，廖晓勇，李晓鹏，等. 土壤快速检测技术助力摸清我国土壤养分家底[J]. 中国科学院院刊，2025，40(2)：320－327.

WU Wei, LIAO Xiaoyong, LI Xiaopeng, et al. Rapid soil detection technology aids in assessing soil nutrients in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(2): 320 - 327. (in Chinese)

[8] 何东健,杨成海,杨青,等. 面向精准农业的农田土壤成分实时测定研究进展[J]. 农业工程学报,2012,28(7):78 - 85.
HE Dongjian, YANG Chenghai, YANG Qing, et al. Research progress of real-time measurement of soil attributes for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 78 - 85. (in Chinese)

[9] 陈珊,陈劲虎,徐郭海林,等. 基于铂修饰丝网印刷电极检测土壤中铵态氮的电化学传感器[J]. 高等学校化学学报,2023,44(12):176 - 182.
CHEN Shan, CHEN Jinhu, XU Guohailin, et al. Electrochemical sensor for ammonium nitrogen in soil based on platinum modified screen-printed electrodes[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2023, 44(12): 176 - 182. (in Chinese)

[10] PAL A, DUBEY S K, GOEL S. IoT enabled microfluidic colorimetric detection platform for continuous monitoring of nitrite and phosphate in soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 195: 106856.

[11] DARMAWAN D, PERDANA D, ISMARDI A, et al. Investigating the electrical properties of soil as an indicator of the content of the NPK element in the soil[J]. Measurement and Control, 2023, 56(5): 1 - 12.

[12] 姚成硕,王昌昆,刘杰,等. 基于变量筛选的典型三江平原耕地土壤肥力属性光谱预测[J]. 光谱学与光谱分析,2025,45(5):1422 - 1431.
YAO Chengshuo, WANG Changkun, LIU Jie, et al. Spectral prediction of soil fertility attributes in typical croplands of sanjiang plain based on band selection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(5): 1422 - 1431. (in Chinese)

[13] 冀荣华,李常昊,郑立华,等. 基于稀疏自注意力和可见-近红外光谱的土壤氮含量预测[J]. 农业机械学报,2024,55(10):392 - 398,409.
JI Ronghua, LI Changhao, ZHENG Lihua, et al. Prediction of soil nitrogen content based on sparse self-attention and visible-near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 392 - 398, 409. (in Chinese)

[14] 盛文溢,曾庆猛,林剑辉,等. 大田尺度下车载式土壤多参数测量方法研究[J]. 农业机械学报,2010,41(11):188 - 192.
SHENG Wenyi, ZENG Qingmeng, LIN Jianhui, et al. On-the-go measuring method of soil parameters in field-scale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 188 - 192. (in Chinese)

[15] 张日红,陈德照,王振豪,等. 宽行距果蔬种植环境土壤检测机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(2):217 - 228.
ZHANG Rihong, CHEN Dezhao, WANG Zhenhao, et al. Design and experiment of soil detection robot for wide-rowing fruit and vegetable planting environments[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 217 - 228. (in Chinese)

[16] 姚照胜,刘涛,刘升平,等. 农田信息采集车设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(10):236 - 242.
YAO Zhaosheng, LIU Tao, LIU Shengping, et al. Design and experiment of farmland information collection vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 236 - 242. (in Chinese)

[17] 裴晓帅,孙红,郑立华,等. 车载式土壤光-电特性参数采集系统研究[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊):90 - 95.
PEI Xiaoshuai, SUN Hong, ZHENG Lihua, et al. Development of movable acquisition system for soil optical-electrical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 90 - 95. (in Chinese)

[18] 韩长杰,杨文奇,窦汉杰,等. 大田土壤电导率快速检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):301 - 310.
HAN Changjie, YANG Wenqi, DOU Hanjie, et al. Design and experiment of rapid detection system for field soil conductivity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 301 - 310. (in Chinese)

[19] NORBY J, WANG S, WANG H, et al. Path to autonomous soil sampling and analysis by ground-based robots[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: 121 - 130.

[20] 张臻宇. 连续流动分析法和纳氏试剂分光光度法测定地表水氨氮的比较研究[J]. 环境与发展,2020,32(11):87 - 88.
ZHANG Zhenyu. Comparative study on continuous flow analysis and Nessler's reagent spectrophotometry in determination of ammonia nitrogen in surface water[J]. Environment and Development, 2020, 32(11): 87 - 88. (in Chinese)

[21] 张向向,娄向弟,贺江,等. 基于常规 Olsen 法的全自动化学分析仪(SmartChem 200)测定土壤有效磷的研究[J]. 中国土壤与肥料,2023(7):232 - 237.
ZHANG Xiangxiang, LOU Xiangdi, HE Jiang, et al. Study on the method of determining soil available phosphorus(Olsen-P) by SmartChem 200 automatic chemical analyzer[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(7): 232 - 237. (in Chinese)

[22] 余松灿,王循睿,马铭,等. 多糖微生物菌液对油菜吸收养分和土壤氮磷淋失的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(5):245 - 251.
YU Songchan, WANG Xunrui, MA Ming, et al. The effect of polysaccharide microbial culture on nutrient uptake of rape and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(5): 245 - 251. (in Chinese)

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[24] 中华人民共和国农业农村部. 关于印发《测土配方施肥技术规范(2011 年修订版)》的通知[N]. 2011. http://www.moa.go-v.cn/ztzl/ctpfsf/gzdt/201109/t20110922_2293389.htm.

[25] 白由路,杨俐苹. 我国农业中的测土配方施肥[J]. 土壤肥料,2006(2):3 - 7.
BAI Youlu, YANG Liping. Soil testing and fertilizer recommendation in Chinese agriculture[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2006(2): 3 - 7. (in Chinese)

(下转第 398 页)

Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(6):666 - 674. (in Chinese)
[21] LIU Yangqi, LIN Yifan, HUO Zailin, et al. Spatio-temporal variation of irrigation water requirements for wheat and maize in the Yellow River Basin, China, 1974—2017[J]. Agricultural Water Management,2022, 262:107451.
[22] NAFEES M, AHMAD F, BUTT M, et al. Effects of water shortage in Kabul River network on the plain areas of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan[J]. Environmental Monitoring & Assessment an International Journal, 2018, 359. doi: 10. 1007/S10661-018-6730-3.
[23] 黄彬彬,鄢小令,李光锦,等. 基于投入产出模型的萍乡市水资源短缺风险的经济评估[J]. 人民珠江,2018,39(11):79 - 82,88.
HUANG Binbin, YAN Xiaoling, LI Guangjin, et al. Economic loss assessment of water resources shortage in Pingxiang City [J]. Pearl River, 2018,39(11):79 - 82,88. (in Chinese)
[24] TIAN Guiliang, HAN Xiaosheng, ZHANG Chen, et al. Virtual water flows embodied in international and interprovincial trade of Yellow River Basin: a multiregional input-output analysis[J]. Sustainability, 2020,12(3):su12031251.
[25] ZHONG Shen, LI Jian, WEN Hongmei, et al. Spatial spillover effect of green water use efficiency and its influence factor: new evidence from Yellow River economic belt, China[J]. Environmental Science, Economics ,2021,3: 188354.
[26] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报,2008,39(4):440 - 447.
ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(4):440 - 447. (in Chinese)
[27] 王煜,郑小康,彭少明,等. 黄河流域水资源配置研究与展望[J]. 人民黄河,2024,46(9):18 - 27.
WANG Yu, ZHENG Xiaokang, PENG Shaoming, et al. Research and prospect of water resources allocation in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024,46(9):18 - 27. (in Chinese)
[28] 魏征,李道西,柳佳奇,等. 石羊河流域水-作物-生态系统耦合协调度时空演变与调控潜力研究[J]. 农业机械学报,2025,56(8):142 - 151.
WEI Zheng, LI Daoxi, LIU Jiaqi, et al. Spatiotemporal evolution and regulation potential of water - crop - ecosystem coupling coordination degree in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(8): 142 - 151. (in Chinese)

(上接第 368 页)

[26] 杨洋,温兴,马强龙,等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报,2022,38(6):34 - 43.
YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 38(6): 34 - 43. (in Chinese)
[27] 彭晓燕,谢浩,黄晶. 无人驾驶汽车局部路径规划算法研究[J]. 汽车工程,2020,42(1):1 - 10.
PENG Xiaoyan, XIE Hao, HUANG Jing. Research on local path planning algorithm for unmanned vehicles[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 1 - 10. (in Chinese)
[28] QIU Q, FAN Z Q, MENG Z J, et al. Extended Ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 40 - 50.
[29] 徐圣林,朱立成,韩振浩,等. 作物表型信息获取机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 2):388 - 399.
XU Shenglin, ZHU Licheng, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of robot chassis for obtaining crop phenotypic information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 388 - 399. (in Chinese)
[30] 马悦琦,迟瑞娟,赵彦涛,等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 1):1 - 8,102.
MA Yueqi, CHI Ruijuan, ZHAO Yantao, et al. Optimization method of LQR curve path tracking controller for unmanned rice transplanter based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 1 - 8,102. (in Chinese)
[31] 宋春生,于传超,张锦光,等. 基于遗传算法的复杂双层磁悬浮精密隔振系统 LQR 控制研究[J]. 振动与冲击,2016,35(16):99 - 105.
SONG Chunsheng, YU Chuanchao, ZHANG Jinguang, et al. LQR control of a complex two-stage magnetic suspension active precise isolation system based on the genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16):99 - 105. (in Chinese)
[32] 陈满,施印炎,汪小旦,等. 冬小麦精准追肥机专家决策系统[J]. 农业机械学报,2015,46(7):17 - 22.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Expert decision system of precision fertilizer for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 17 - 22. (in Chinese)