doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.06.015

受控交通农业模式机器人化作业平台路径规划方法

闫洪峰[1,2]　李法镰[1,3]　朱　玉[1,3]　李　璐[1,2]　吴海华[1,2]　方宪法[1,2]

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对受控交通农业模式下机器人化作业平台自主作业需求,提出一种对多边形地块具有普适意义的全生产周期作业路径规划方法。该方法构建主永久道网络与子作业路径层双层结构,通过等距缩放与顶点平滑规划转向预留区路径,基于垂直行进方向投影长度最小化原则确定中心作业区行方向;对主永久道网络设计间隔梭行的遍历顺序,对子作业路径层设计相邻梭行遍历顺序;采用 Dubins 曲线设计衔接路径,并设计潜在弹性出入口以解决作业弹性中断路径衔接问题;利用序列二次规划算法求解满足运动学约束的路径,消除传统直线-圆弧路径的曲率突变缺陷。综合考虑作业路径占比、作业覆盖率、曲率变化率、路径跃度、压实区域面积占比等指标,以机器人化作业平台为对象进行田间路径规划试验,结果表明,针对凸/凹多边形地块中,主永久道作业路径长度占比达 77.21%,子作业层作业路径占比 56.87%;作业覆盖面积占比均达 90.65%;最大曲率变化率不大于 0.04 m^{-2},跃度不大于 0.05 m^{-3};总压实区域占比 8.83%,将全生产周期作业路径限制在永久固定道上,满足受控交通农业下机器人化作业平台作业需求。

关键词: 受控交通农业; 机器人化作业平台; 全生产周期路径规划; 运动学约束; 序列二次规划

中图分类号: S231　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)06-0155-12　　**OSID**:

Path Planning Method for Robotic Operation Platforms in Controlled Traffic Farming

YAN Hongfeng[1,2]　LI Falian[1,3]　ZHU Yu[1,3]　LI Lu[1,2]　WU Haihua[1,2]　FANG Xianfa[1,2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
3. *Beijing Jinlunkuntian Special Machine Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to address the autonomous operation requirements of robotic platforms under controlled traffic farming, a universally applicable full production cycle path planning method for polygonal agricultural fields was proposed. The method constructed a dual-layer structure comprising a primary permanent road network and a sub-operation path layer. Paths in the steering reserved area were planned through equidistant scaling and vertex smoothing, while the row direction in the central operation area was determined by minimizing the projection length perpendicular to the travel direction. An interval-shuttle traversal sequence was designed for the primary road network, and an adjacent-shuttle sequence was adopted for the sub-operation path layer. Dubins curves were employed to design transitional paths, while potential elastic entry/exit points were incorporated to address path connectivity challenges caused by operational elasticity interruptions. The sequential quadratic programming algorithm was employed to generate paths satisfying kinematic constraints, eliminating curvature discontinuity defects inherent in traditional linear – arc path planning. Field experiments on robotic platforms demonstrated that, for convex/concave polygonal fields, the planned paths achieved 77.21% operational path length proportion in primary road path length proportion, 56.87% operational path proportion in sub-operation layer, 90.65% operational coverage rate for both layers, maximum curvature change rate was not greater than 0.04 m^{-2}, jerk limit was not greater than 0.05 m^{-3}, and total soil compaction area ratio was 8.83%, successfully confining all production cycle paths to permanent fixed roads and fulfilling CTF requirements

收稿日期: 2025-04-21　修回日期: 2025-05-02

基金项目: 国机集团科研专项(ZDZX2022-1)

作者简介: 闫洪峰(1979—),男,正高级工程师,博士,主要从事特种车辆及技术研究,E-mail: hongfeng216@163.com

for robotic operation platforms.

Key words: controlled traffic farming; robotic operation platforms; full production cycle path planning; kinematic constraints; sequential quadratic programming

0 引言

为实现长期的气候中性、资源节约型农业,许多学者在农业与自然和谐相处技术方面进行了重新思考[1-5]。随着农业机械化程度的提高,农机装备朝着大功率、大型化方向发展,车身质量和轮胎尺寸不断增长,同时为满足耕、种、管、收全套作业流程的需求,农业机械呈现出多样化的规格与结构尺寸,采用随机交通农业(Random traffic farming,RTF)对土壤压实带来土壤结构恶化、降低作业效率、影响作物产量及收益的负面影响逐渐显现[6]。因此,将所有田间作业车辆的土壤压实限制在尽可能少的永久式行走道上的受控交通农业(Controlled traffic farming,CTF)逐渐受到国外学者的重视[7-9]。开展适用于 CTF 理念的一机多能、精准高效、土壤压实率低的机器人化作业平台和作业模式相关研发也逐渐受到重视。

满足农业各个环节作业需求的全覆盖作业路径规划作为实现 CTF 关键技术之一,与单一作业场景不同,针对 CTF 的路径规划主要目标是将种、管、收全流程的路径限制在固定的永久行走道上,从而达到少耕、免耕效果。目前,多边形全覆盖路径规划领域的研究热点主要集中在以 *AB* 线为基础的路径规划[10-14]、地头转弯[15-16]、行间遍历顺序优化[17-18]等。

现有的农机作业路径大多是基于生产过程中某个场景进行单独的路径规划,将一个生产周期内的作业路径固定在永久行走道上的完整规划方法研究较少,尚无法满足基于受控交通农业的机器人化作业平台路径规划需求。因此,本文面向受控交通农业的需要,提出一种适用于多边形地块的机器人化作业平台全覆盖路径规划算法,以真实地块和机器人化作业平台为基础进行试验,以验证方法的合理性和高效性。

1 作业分析

1.1 机器人化作业平台特点

机器人化作业平台底盘如图 1 所示,采用大跨度不对称 U 形的龙门架式结构、分布式独立转向与驱动方案,4 组行走转向装置布置在底盘四端,得益于这种设计,如图 2、3 所示,不同于标准 CTF,传统农业机械遍历 N 个作业行时,至少产生 $2N$ 条车轮碾压路径,机器人化作业平台采用宽跨度 CTF 方案,往返时一侧车轮碾压在同一路径上,只会产生 $N+1$ 条碾压路径,极大改善土壤压实问题。同时,基于模块化设计,采用标准型动力接口,通过悬挂的方式挂载农机具,实现一机多用[19]。得益于机器人化作业平台独特的设计,在规划受控交通农业路径时,仅需考虑一种农机底盘参数,设计满足种植、收获的单倍幅宽与植保作业的多倍幅宽需求的 2 种作业路径。



图 1 机器人化作业平台

Fig. 1 Robotic work platform chassis generation

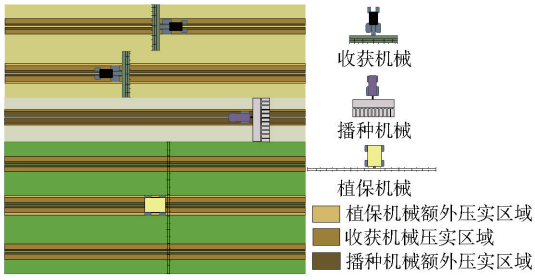


图 2 标准受控交通农业示意图

Fig. 2 Standard controlled traffic farming diagram

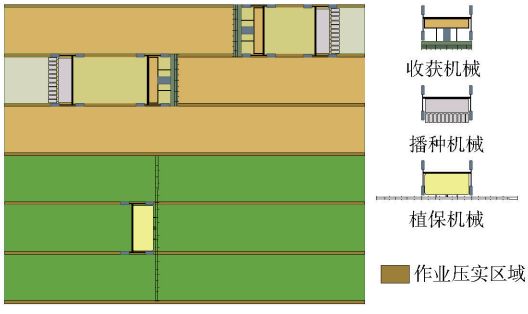


图 3 宽跨度受控交通农业示意图

Fig. 3 Widespan controlled traffic farming diagram

为保证转向时行走转向装置与农机具不发生干涉碰撞,机器人化作业平台基于阿克曼转向原理采用后轮转向策略,原理如图 4 所示。

作业时,前轴中心处转弯半径 R 为

$$R=\frac{a+(W+a)\cos\theta}{\sin\theta}+\frac{T}{2} \tag{1}$$

式中 W——机器人化作业平台轴距,m

T——机器人化作业平台轮距,m

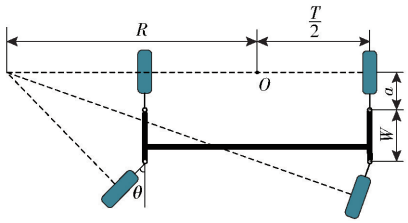


图 4　机器人化作业平台作业时转向原理图

Fig. 4　Steering principle of robotized work platform during operation

θ——内侧后轮转向角，(°)

a——车轮中心到回转支承的距离，m

为提高作业路径覆盖率和转向效率，目前农机路径规划通常采用“转向预留作业区域”和“中心作业区域”的组合方案[20]。转向预留区域主要用于农机在作业中进行转弯换道，中心区域则用于生成条带式全覆盖的作业路线。当内侧车轮转向角达到最大时，转弯半径小于 2 倍幅宽，故而对中心作业区域主永久道网络采用间隔梭行的遍历顺序，对子作业路径层采用相邻梭行遍历顺序。

1.2　受控交通农业特点及路径规划要求

受控交通农业技术通过建立永久性压实路径网络，将农机作业严格限制在固定区域，形成“非压实种植区 + 压实交通区”的可持续土壤管理模式。这一技术的核心特征在于压实区域固化形成长期复用的农机交通路径，从而减少种植区土壤结构破坏、提升作物产量。然而，CTF 的固有特性也使其路径规划面临耕、种、管、收全流程的复杂需求矛盾：①作业幅宽动态适配需求。CTF 要求压实区域长期固定，但播种、植保、收获、转运物料等环节中，不同环节的作业幅宽差异显著。单一层级的永久道路网难以兼顾多机具作业需求，易导致作业重复率高或被迫扩大压实区域，违背 CTF“最小化压实”的核心原则。②作业流程弹性中断需求。CTF 依赖稳定的永久道网络，但田间作业需频繁中断以完成物料装卸、设备维护等操作。传统刚性路径网络缺乏动态出入口设计，迫使农机为返回装卸点而碾压非压实带，破坏“非压实-压实”分区结构。③路径跟踪高精度需求。CTF 的长期效益依赖于农机对永久道的精准跟踪，而农机运动学特性会导致路径跟踪偏差，尤其在曲率突变区域[21]，轨迹偏移会侵蚀非压实带边界，造成次生土壤压实。

针对上述复杂需求，本研究提出面向 CTF 的多边形田块路径规划框架：①建立双层级路径结构，规划主永久道网络保证压实区域固定，在主永久道网络中规划子作业路径层适应不同作业幅宽作业需求。②永久道设计应具有出入口弹性的路径网络，在保持主体路径稳定的同时允许农机中途脱离与回归。③为尽可能将压实区域限制在固定区域，考虑农业机械自身运动学，引入曲率变化连续约束条件，将农机转向特性转换为路径平滑度指标，提高永久道路径跟踪精度。

1.3　机器人化作业平台运动学对路径约束

在农机自动作业中，曲线路径的跟踪误差往往比直线路径大[22]，优化路径曲率以满足农机运动学约束可显著提高路径跟踪精度[23]，这在减少次生土壤压实、提高 CTF 长期收益中显得尤为重要。在考虑最小转弯半径的基础上，进一步增加机器人化作业平台运动学约束，以提高永久固定道跟踪适应性。运动学模型如图 5 所示。

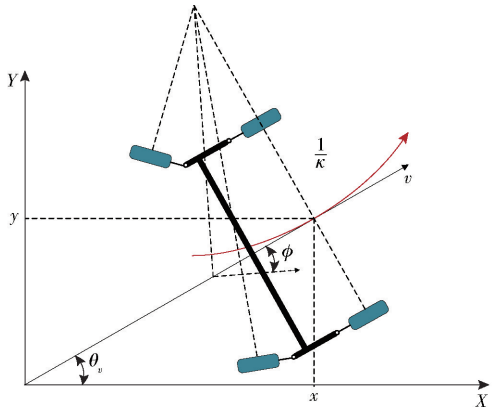


图 5　机器人化作业平台运动学模型

Fig. 5　Kinematic model of robotized work platform

可推导路径曲率与转向角关系为

$$\kappa = \frac{\tan\phi}{W_r} \tag{2}$$

$$\dot{\kappa} = \frac{\dot{\phi}}{W_r \cos^2\phi} \tag{3}$$

式中　κ——路径曲率，m^{-1}

ϕ——后轴中心等效转角，rad

W_r——行驶过程中实际轴距，m

进而得到机器人化作业平台运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v\cos\theta_v \\ v\sin\theta_v \\ v\kappa \\ \sigma \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中　$\dot{x}$——在 x 轴方向速度，m/s

$\dot{y}$——在 y 轴方向速度，m/s

$\dot{\theta}_v$——航向角速度，rad/s

σ——转角加速度，rad/s^2

v——行驶速度，m/s

θ_v——航向角，rad

受车辆转向系统物理限制，有以下约束

$$\begin{cases} |\phi| \leqslant \phi_{\max} \\ |\kappa| \leqslant \kappa_{\max} = \dfrac{\tan\phi_{\max}}{W_r} \\ |\dot{\kappa}| \leqslant \sigma_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\kappa_{\max}$——路径允许最大曲率，m^{-1}

$\phi_{\max}$——后轴中心允许最大等效转角，rad

$\sigma_{\max}$——允许最大转角加速度，rad/s^2

综合机器人化作业平台运动学约束，在速度恒定的情形下，为避免曲率不连续导致横摆角速度的突变，转向系统的动态响应特性要求路径曲线至少具备 C^3 连续。

2 路径规划策略

2.1 转向预留作业区域路径设计

机器人化作业平台作业场合大多数为多边形田块，按顺时针顺序存储作业区域经纬坐标边界点。转向预留作业区域采用多边形等距缩放原理实现路径规划，为建立双层级路径结构，规划满足需求的 2 种作业路径，植保作业参数设定为 3 倍幅宽，对转向预留作业区域规划 $\{3n \mid n \in \mathbf{N}, n \geqslant 1\}$ 条路径。以农田边界点构造简单闭合多边形 Z，通过等距缩放生成边界与最外侧路径距离为一半幅宽（$W_c/2$）、路径之间距离为 W_c 的 $3n$ 条路径。

遵循以下步骤实现多边形等距缩放：

（1）边的平移。对于 Z 的每一条边，根据边的法向量方向进行平移，获得一组偏移的边界线段。

（2）顶点处平滑处理。由于直接平移边界在转角处会产生间隙或重叠，在每个顶点处平滑地连接相邻平移边，保证边界的连续与平滑。

（3）布尔并集。将所有偏移边与顶点处生成的圆弧区域进行布尔并运算，合成完整路径。

顶点处平滑处理中，分别对凸角和凹角采用差异化路径规划策略，如图 6 所示，针对凸角几何特征采用半径等差的圆弧进行平滑处理，确保凸角区域的完全覆盖且无作业盲区。如图 7 所示，针对凹角场景中单一圆弧平滑方法存在的车轮越界难以满足边界约束的问题，设计 Dubins -圆弧- Dubins 复合路径结构，通过两段 Dubins 路径衔接中间定曲率圆弧进行凹角平滑处理。

目前关于转向预留作业区域的路径规划使用直线-圆弧连接，暂不符合车辆运动学约束，在后续步骤中会得到优化。

2.2 中心作业区域行间遍历序列设计

2.2.1 中心作业区域作业行生成

经过多边形等距缩放获取最内圈边界 P_1，其包围起来的区域作为中心作业区域，为提高作业效率，

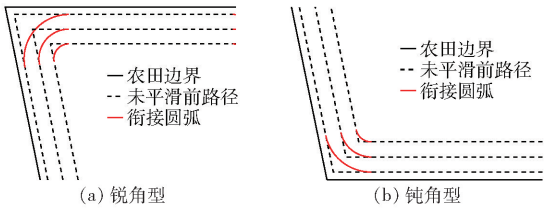


图 6 凸角平滑路径

Fig. 6 Convex corner smoothing path

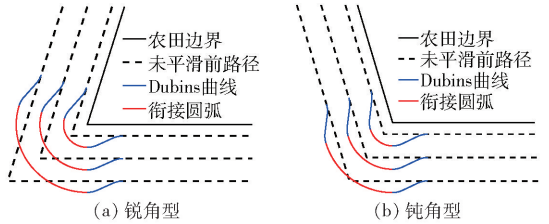


图 7 凹角平滑路径

Fig. 7 Concave corner smoothing path

在作业宽度固定的前提下，对该区域规划平行作业线，通过使作业区域在垂直于作业方向上的投影长度最小化，实现所需作业线路数量最少、降低因转向所带来的无效行驶距离。为提高平行作业线的排布效率，构造候选旋转角度集合 $\boldsymbol{\Theta} = \{0°, 0.01°, 0.02°, \cdots, 180°\}$，对于每个候选角度 $\theta \in \boldsymbol{\Theta}$，定义顺时针旋转矩阵 $\boldsymbol{R}(\theta)$，将 P_1 的所有顶点 v_{ir} 依次旋转，获得旋转后的顶点坐标 v_{ir}，对旋转后的顶点集合，计算垂直于作业方向上的投影长度 $H(\theta)$，计算最小 $H(\theta)$ 的角度 θ^*，公式为

$$\theta^* = \underset{\theta \in \boldsymbol{\Theta}}{\operatorname{argmin}} H(\theta) \tag{6}$$

使用矩阵 $\boldsymbol{R}(\theta^*)$ 对 P_1 进行变换，得到旋转后的顶点 v_{ir}。依据作业幅宽均匀生成水平作业线路，从而在区域内形成多个与边界相交的交点。实际区域经过最优旋转后，可能出现局部空隙，为保证全覆盖，在作业线路生成后，计算最后一条作业线路 y_{last} 上边界 $y_{\max}$ 之间的间隙，当上边界与最后一条作业线之间的距离超过半行间距，则认为存在覆盖盲区，在最后一条作业线之后的间隙中心位置增加一条作业线路。

根据纵坐标生成平行作业线获取区域内多个与边界相交的交点集合序列 P_{int}^*，将 P_{int}^* 进行逆时针旋转回到最内圈边界 P_1，获得序列点集 P_{int}

$$P_{\text{int}} = \boldsymbol{R}(-\theta^*) P_{\text{int}}^* \tag{7}$$

2.2.2 主永久道网络间隔梭行遍历序列设计

为了实现对中心作业区域内作业行的全面、高效遍历，本文基于 P_{int} 中交点个数 N_P，设计顺逆互补的间隔梭行遍历点集序列作为主永久道网络。

$N_P/2$ 除以 4 的余数 r 决定后续主永久道网络顺序列参数 M_{odd}、逆序列步长 $\Delta^{(\text{in})}$ 和逆序列起始值 M_{even}。映射规则见表 1，对应步长见表 2，逆序列起

始取值规则见表 3。

表 1　主永久道网络顺序列参数映射规则

Tab. 1　Main permanent road network sequence parameter mapping rule

余数 r	M_{odd}取值规则	终止条件
0/2	N_P-2	$S'_{\text{se}}(k_s)>M_{\text{odd}}$
1/3	N_P	

表 2　主永久道网络逆序列步长

Tab. 2　Main permanent road network reverse sequence step length

余数 r	步长序列 $\Delta^{(\text{in})}$	终止条件
0/3	$\{1,-4,-1,-4\}$	$S_{\text{in}}(k_i)<3$
1/2	$\{-1,-4,1,-4\}$	

表 3　主永久道网络逆序列起始取值规则

Tab. 3　Main permanent road network reverse sequence starting value rule

余数 r	M_{even}取值规则
0/2	$S_{\text{se_last}}+2$
1/3	$S_{\text{se_last}}-2$

在主永久道网络顺序列 S_{se} 构造过程中，以周期方式生成序列数 $S_{\text{se}}(k_s)$。具体实现为：

定义周期内起始数

$$S_{\text{se}}(k_s)=1+8k_s\quad(k_s=0,1,2,\cdots)\tag{8}$$

定义固定偏移量数组

$$\Delta^{(\text{se})}=\{0,1,5,4\}\tag{9}$$

对每个周期中的起始数 $S_{\text{se}}(k_s)$ 进行偏移，得到序列数

$$S_{\text{se}}(k_s+j)=S_{\text{se}}(k_s)+\Delta^{(\text{se})}[j]\tag{10}$$

其中 j 随递推以周期为 4 循环取值。

为了实现作业区域内行间的有效衔接，在顺序列构造结束后，生成逆序列来设计剩余作业行。逆序列 S_{in} 的起始值 M_{even} 则根据 r 与正序列的最后一个交点 $S_{\text{se_last}}$ 取值。逆序列数 $S_{\text{in}}(k_i)$ 的生成依次按照步长序列进行递推。

$$S_{\text{in}}(0)=M_{\text{even}}\tag{11}$$

$$S_{\text{in}}(k_i+j)=S_{\text{in}}(k_i)+\Delta^{(\text{in})}[j]\tag{12}$$

式中　$\Delta^{(\text{in})}$——随循环取值的步长序列值

正序列与逆序列拼接构成完整的主永久道网络行间遍历序列 S

$$S=S_{\text{se}}\parallel S_{\text{in}}\tag{13}$$

2.2.3　子作业路径层间隔梭行遍历序列设计

在主永久道网络中规划 3 倍幅宽的相邻梭行遍历点集序列作为子作业路径层，对于子作业路径层序列 S_{sub} 构造，同样以周期方式生成序列数 $S_{\text{sub}}(k_{\text{sub}})$。但是周期起始数、固定偏移数组、终止条件不同。

定义周期内起始数

$$S_{\text{sub}}(k_{\text{sub}})=2+12k_{\text{sub}}\quad(k_{\text{sub}}=0,1,2,\cdots)\tag{14}$$

定义固定偏移量数组

$$\Delta^{(\text{sub})}=\{1,2,8,7\}\tag{15}$$

得到序列数

$$S_{\text{sub}}(k_{\text{sub}}+j)=S_{\text{sub}}(k_{\text{sub}})+\Delta^{(\text{sub})}[j]\tag{16}$$

由交点个数 N_P 计算周期个数，取尽周期内序列数，若最后一个序列数小于 N_P-3，则依据表 4 追加末尾序列数，r_e 为 N_P 除以 2 的余数。

表 4　子作业路径层序列终止补偿情况

Tab. 4　Compensation for termination of sub homework path layer sequence

余数 r_e	终止
0	$S_{\text{sub}}(\text{end}+1)=N_P$
	$S_{\text{sub}}(\text{end}+2)=N_P-1$
1	$S_{\text{sub}}(\text{end}+1)=N_P-1$
	$S_{\text{sub}}(\text{end}+2)=N_P$

依据主永久道网络行间遍历序列 S 和子作业路径层序列 S_{sub} 依次连接序列点集 P_{int} 中的点，得到如图 8 所示的 4 种中心作业区域行间遍历顺序组合。

主永久道网络采用间隔梭行遍历序列，子作业路径层采用间隔梭行遍历序列满足种植、收获的单倍幅宽与植保作业的多倍幅宽需求的 2 种作业路径。建立起双层级路径结构，有效满足 CTF 下机器人化作业平台自主作业需求。

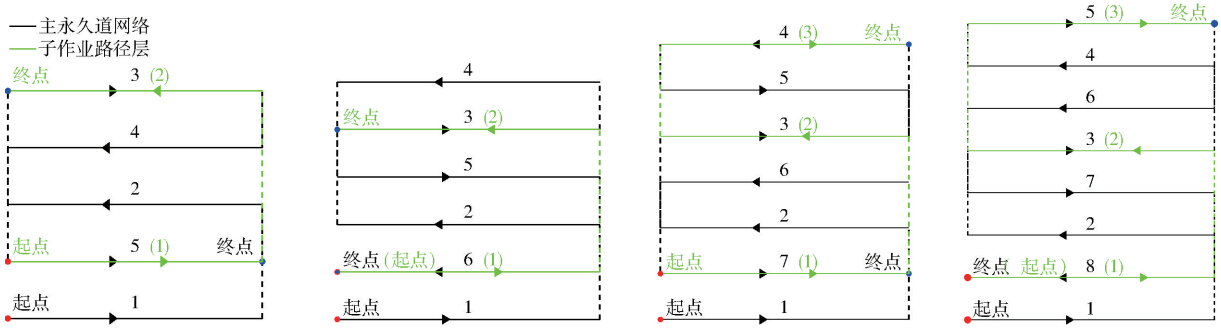


图 8　4 种中心作业区域行间遍历顺序组合

Fig. 8　Four combinations of inter-row traversal sequences in central operating area

2.3 基于 Dubins 曲线的区域间及行间衔接路径规划

在实际作业中,要求转向预留作业区域和中心作业区域之间、中心区域内部各作业行之间平滑衔接。Dubins 曲线作为一种经典的路径规划工具,对于只允许前进且转弯半径受限的车辆,能够在满足固定行驶速度和最小转弯半径的前提下,生成由直线-圆弧组合而成平滑且连续的路径。如图 9 所示,通常有:LSL、RSR、LSR 等类型,其中“L”表示左转,“R”表示右转,“S”表示直行,图中(x_{start},y_{start},θ_{start})为起点位置坐标和朝向,(x_{end},y_{end},θ_{end})为终点位置坐标和朝向。如图 10 所示,根据不同的起始点和终点,Dubins 曲线可构造出常见的 U 形转向、平 U 形转向、Ω 形转向和钩形转向 4 种农机区域转向模式,以及如图 11 所示的 2 种常见转弯预留区域换行路径。利用 Dubins 曲线对转向预留区域与中心作业区域之间、中心作业区域内行间以及转向预留区域间的衔接路径进行规划。

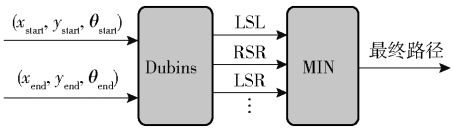


图 9 基于 Dubins 曲线规划衔接路径原理图

Fig. 9 Principle diagram of connecting path planning based on Dubins curve



图 10 Dubins 曲线构造 4 种农机转弯方式

Fig. 10 Dubins curve to construct four turning modes of agricultural machinery

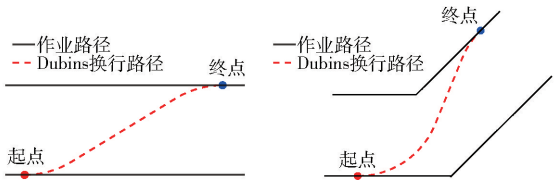


图 11 2 种转弯预留区域换行路径

Fig. 11 Two types of turn zone route change paths

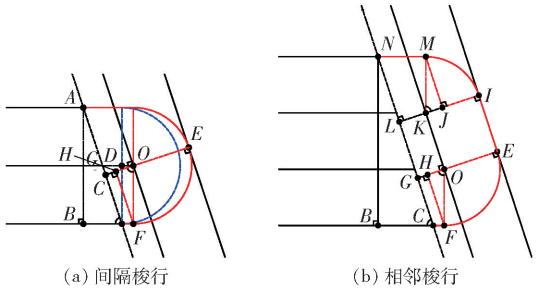
在平行作业线首末 2 行的 4 个顶点规划转向预留区域与中心作业区域之间衔接路径,基于最小距离准则,选择与转向预留区衔接路径终点沿作业方向欧氏距离最小的路径,作为转向预留区域与中心作业区域之间衔接路径。

2.4 中心作业区域行间衔接路径弹性出入口规划

对于作业过程中的出入口规划,“转向预留作业区域”和“中心作业区域”的组合方案将衔接路径与转向区域分离设计[24],农机中途脱离中心作业区域需额外增设出入口,或将路径规划问题转换为某个作业场景下带有容量约束的车辆路径问题[25],为减小生产周期内永久道网络的复杂度与土壤压实风险。基于 Dubins 曲线特性,构造行间衔接路径连接转向预留作业区域和中心作业区域,空间重合节点定义为潜在弹性出入口,允许农机沿连接点在区域间转移,使路径网络具备弹性出入能力,避免新增路径对非压实带的侵占。

间隔梭行衔接路径规划如图 12a 所示,对 Dubins 曲线的起始点 C 和终点 A 作偏移处理,使偏移后的 Dubins 曲线与转弯预留作业区域的路径重合于点 E 作为出入口。点 C 与点 A 偏移距离相等,偏移 d_{CA} 为

$$d_{CA}=\frac{3(W_c-R-R\cos\angle GOF)}{2\sin\angle BFD} \tag{17}$$



(a) 间隔梭行 (b) 相邻梭行

图 12 行间衔接路径规划

Fig. 12 Inter-row connection path planning

如图 12b 所示,对于相邻梭行衔接路径规划,构造 FEI 和 MI 2 段 Dubins 曲线与转弯预留作业区域的路径重合于 EI 段作为出入口,点 C、点 N 偏移距离 d_C、d_N 分别为

$$d_C=\frac{3(W_c-R-R\cos\angle FOH)}{2\sin\angle BCN} \tag{18}$$

$$d_N=\frac{3(W_c-R+R\cos\angle MNC)}{2\sin\angle MNC} \tag{19}$$

为确保偏移后行间衔接路径能有效连接转向预留作业区域和中心作业区域,对于间隔梭行中平行作业行与转向预留区域路径夹角有约束

$$\left|\arcsin\frac{2W_c}{L_{AC}}\right|\leqslant\left|\arccos\left(\frac{3W_c}{2R}-1\right)\right| \tag{20}$$

对于相邻梭行衔接夹角有以下约束

$$\left|\arcsin\frac{3W_c}{L_{NC}}\right|\leqslant\left|\arccos\left(\frac{3W_c}{2R}-1\right)\right| \tag{21}$$

不满足约束的不做偏移处理,该衔接路径为不可出入段。

通过对衔接路径设计,连接转向预留作业区域和中心作业区域,使得田间作业需频繁中断等操作可沿着空间重合的弹性出入口自主出入,满足 CTF 作业下永久道设计应具有出入口弹性的路径网络需求。

2.5　基于序列二次规划的曲率平滑优化

在上述规划中路径由若干直线段与圆弧段连接而成，不具备 C^3 连续，兼顾原始路径保持、曲率平滑性，通过序列二次规划（Sequential quadratic programming，SQP）方法实现曲率平滑过渡，降低急剧转向，提高永久道路径跟踪精度。

将整个路径离散成 N 个采样点 $\{(x_i,y_i)\}(i=1,2,\cdots,N)$，将这些点的坐标合并为优化向量

$$\boldsymbol{z}=[x_1,x_2,\cdots,x_N,y_1,y_2,\cdots,y_N]^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

计算相邻离散点间的弧长增量，累加形成全局弧长 s_i

$$s_i=\sum_{k=1}^{i-1}\sqrt{(x_{k+1}-x_k)^2+(y_{k+1}-y_k)^2} \tag{23}$$

使用离散差分计算曲率 $\kappa(s_i)$

$$\kappa(s_i)=\frac{x'(s_i)y''(s_i)-y'(s_i)x''(s_i)}{(x'(s_i)^2+y'(s_i)^2)^{3/2}} \tag{24}$$

2.5.1　代价函数构造

（1）平滑代价

为使生成的路径在几何形状上连续、平滑，整体轨迹在各段之间平顺衔接，设计平滑代价 $J_{\mathrm{smooth}}(\boldsymbol{z})$

$$J_{\mathrm{smooth}}(\boldsymbol{z})=\lambda_{\mathrm{smooth}}\sum_{i=2}^{N-1}((\Delta^2x_i)^2+(\Delta^2y_i)^2) \tag{25}$$

式中　$\lambda_{\mathrm{smooth}}$——平滑代价权重

Δ^2x_i——坐标分量 x_i 的二阶差分

Δ^2y_i——坐标分量 y_i 的二阶差分

（2）原路径保持代价

为保证新的优化轨迹不过度偏离已有的平滑路线，设计原始路径保持代价 $J_{\mathrm{reg}}(\boldsymbol{z})$

$$J_{\mathrm{reg}}(\boldsymbol{z})=\lambda_{\mathrm{reg}}\|\boldsymbol{z}-\boldsymbol{z}_0\|^2=\lambda_{\mathrm{reg}}\sum_{i=1}^{2N}(z_i-z_{0,i})^2 \tag{26}$$

式中　λ_{reg}——原路径保持代价权重

$\boldsymbol{z}_0$——原路径坐标向量

z_i——优化后路径第 i 个分量坐标

$z_{0,i}$——原路径第 i 个分量坐标

（3）曲率代价

为避免过度转向，尽量采用小曲率进行转向，设计曲率代价 $J_k(\boldsymbol{z})$

$$J_k(\boldsymbol{z})=\lambda_k\sum_{i=1}^{N}\kappa_i^2 \tag{27}$$

式中　λ_k——曲率代价权重

（4）曲率变化率代价

为降低在直线-圆弧连接处曲率突变带来的急剧转向，提高轨迹的可行性，设计曲率变化率代价 $J_{kc}(\boldsymbol{z})$

$$J_{kc}(\boldsymbol{z})=\lambda_{kc}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\mathrm{d}\kappa_i}{\mathrm{d}s_i}\right)^2 \tag{28}$$

式中　λ_{kc}——曲率变化率代价权重

（5）路径跃度代价

为构造具备 C^3 连续的路径，添加路径跃度代价 $J_j(\boldsymbol{z})$

$$J_j(\boldsymbol{z})=\lambda_{\mathrm{jerk}}\sum_{i=1}^{N}\mathrm{jerk}_i^2 \tag{29}$$

其中

$$\mathrm{jerk}_i=\sqrt{\left(\frac{\partial x''(s_i)}{\partial s}\right)^2+\left(\frac{\partial y''(s_i)}{\partial s}\right)^2} \tag{30}$$

式中　λ_{jerk}——路径跃度代价权重

jerk_i——路径第 i 个坐标跃度，m^{-3}

综上，针对每一点的坐标引入二阶差分平滑项，以度量路径在离散点上的弯曲程度；增加对原始参考路径的正则项，避免最终结果与初始估计出现过大的偏离；设定曲率项、曲率变化率项、路径跃度项，用于在全局范围内抑制过小的转向半径以及曲率的快速波动。通过对这些子目标进行求和，得到曲率平滑优化目标函数 $J(\boldsymbol{z})$

$$J(\boldsymbol{z})=J_{\mathrm{reg}}(\boldsymbol{z})+J_{\mathrm{smooth}}(\boldsymbol{z})+J_k(\boldsymbol{z})+J_{kc}(\boldsymbol{z})+J_j(\boldsymbol{z}) \tag{31}$$

2.5.2　约束条件

约束条件主要包括线性等式约束和非线性不等式约束两方面。

（1）线性约束

为确保优化后路径保持与原路径相同的首末端点坐标，在优化向量 $\boldsymbol{z}$ 中需对特定索引位置指定

$$\begin{cases}x_1=x_{\mathrm{start}}\\x_N=x_{\mathrm{end}}\\y_1=y_{\mathrm{start}}\\y_N=y_{\mathrm{end}}\end{cases} \tag{32}$$

（2）非线性约束

农机作业时受到最小转弯半径约束，优化时需对曲率进行约束

$$c_1(i)=|\kappa(s_i)|-\frac{\tan\phi_{\max}}{W_r}\leqslant 0 \tag{33}$$

为构造具备 C^3 连续的路径，提高农机行驶的稳定性，减小行驶过程中的角加速度和侧向加速度，使得农机更好地跟踪规划的路径，需对曲率变化率进行约束

$$c_2(i)=|\dot{\kappa}(s_i)|-\sigma_{\max}\leqslant 0 \tag{34}$$

对路径跃度进行约束

$$c_3(i)=|\mathrm{jerk}_i|-\mathrm{jerk}_{\max}\leqslant 0 \tag{35}$$

式中　$\mathrm{jerk}_{\max}$——允许的最大跃度，m^{-3}

2.5.3　构造序列二次规划

序列二次规划的核心思路是，将原始的非线性约束优化问题在每一步迭代中近似为一个二次规划子问题来求解，利用目标函数和约束的一阶、二阶信

息,逐步逼近原问题的最优解。

第 k 处迭代点 z_k 处,对目标函数 $J(z)$ 和约束条件 $c_j(z)$ 做泰勒展开,并保留到二阶,从而得到一个近似的二次规划问题。

由此构造二次规划子问题

$$\begin{cases}\min_{\Delta z_k} \nabla J(z_k)^{\mathrm{T}}\Delta z_k + \dfrac{1}{2}\Delta z_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\Delta z_k \\ \text{s.t. } c_j(z_k) + \nabla c_j(z_k)^{\mathrm{T}}\Delta z_k \leqslant 0\end{cases} \tag{36}$$

式中 $\boldsymbol{B}_k$——BFGS 拟牛顿法近似矩阵

Δz_k——z_k 迭代增量

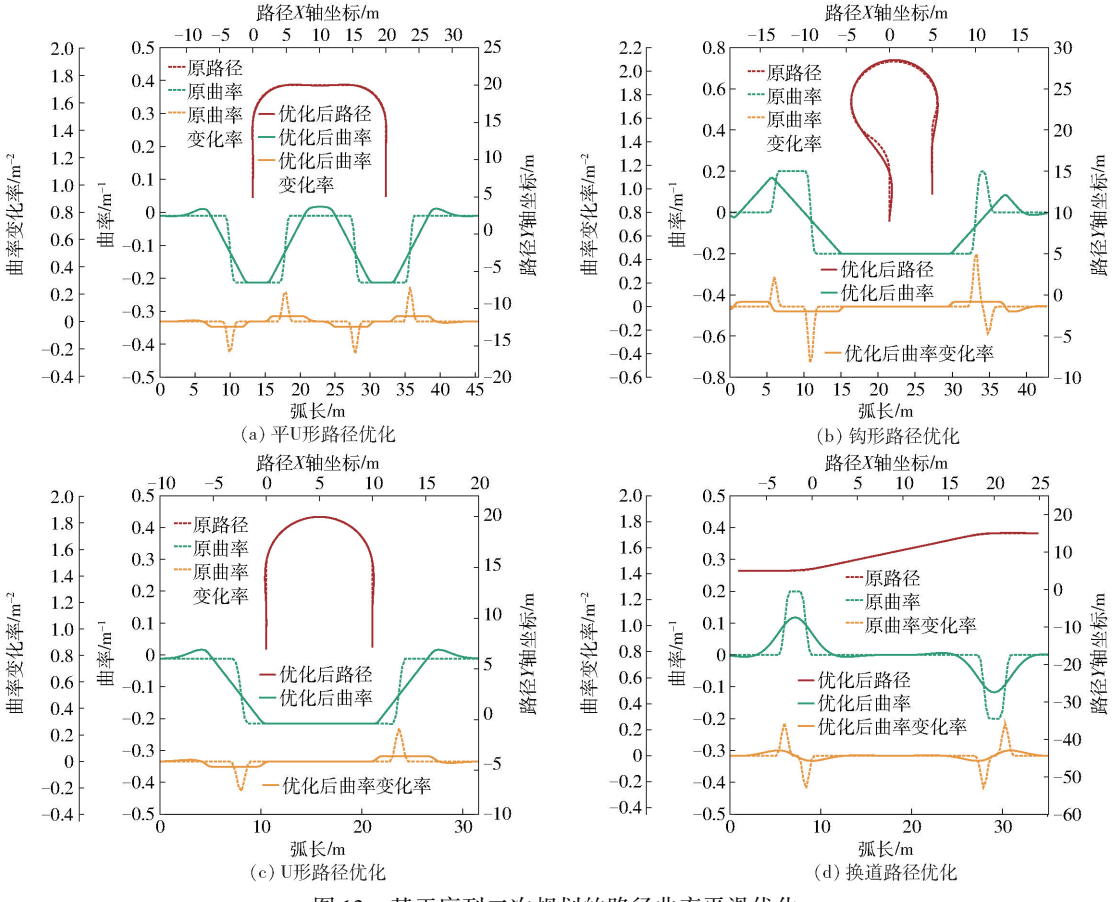
求解该二次规划子问题,当迭代收敛时,不断逼近原问题 KKT 点,得到首末端点坐标不变、曲率和曲率变化率在最大允许值内路径的可行解。

充分考虑代价函数数量级与优先性,经过调参与试验,参数取值如表 5 所示,结合式(3),曲率变化率限制在 0.04 m^{-2} 以内,路径跃度限制在 0.1 m^{-3} 以内。路径转向段优化如图 13 所示,优化结果表明,优化后路径满足 C^3 连续性要求,显著提升了路径的运动学适应性,满足 CTF 理念下永久固定道路径规划要求。

表 5 序列二次规划参数

Tab. 5 Sequential quadratic programming parameters

参数	步长/m	$\lambda_{\mathrm{smooth}}$	λ_{reg}	λ_k	λ_{kc}	λ_{jerk}	$\dot{\kappa}_{\max}/\mathrm{m}^{-2}$	$\mathrm{jerk}_{\max}/\mathrm{m}^{-3}$	最大迭代次数
数值	0.3	1	0.01	0.01	0.01	0.001	0.04	0.1	10^5



(a) 平U形路径优化 (b) 钩形路径优化

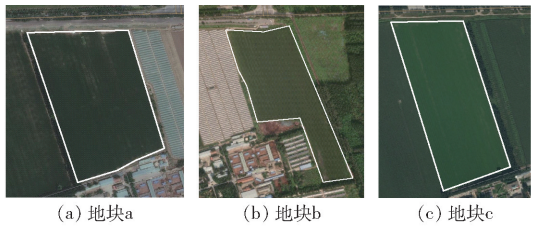
(c) U形路径优化 (d) 换道路径优化

图 13 基于序列二次规划的路径曲率平滑优化

Fig. 13 Path curvature smoothing optimization based on sequential quadratic programming

3 测试与分析

在中国农机院北京农机试验站地块对本研究规划算法进行了验证。如图 14 所示,地块边界数据通过 Google Earth Pro 获取,经纬度坐标经过横轴墨卡托投影转换为平面坐标。试验设备为机器人化作业平台。相关参数如表 6 所示,为兼顾计算效率,步长取 0.5 m,其他序列二次规划参数同表 5。



(a) 地块a (b) 地块b (c) 地块c

图 14 实际地块截图

Fig. 14 Screenshots of actual plot

表 6　机器人化作业平台与系统相关参数

Tab. 6　Parameters related to robotized operation platform and system

参数	数值
车轮与地面接触区域宽度/m	0.71
转向时最大作业速度/(km·h^{-1})	10.80
最小转弯半径/m	9.86
作业时转弯半径/m	11.20
单倍作业幅宽/m	11.20
多倍作业幅宽/m	34.39
步长/m	0.50
最大曲率变化率/m^{-2}	0.04
路径最大跃度/m^{-3}	0.10

3.1　评价指标

受控交通农业路径规划由作业路径长度占比 ξ_w 评估作业效率、由作业覆盖面积占比 ξ_{wc} 评估作业质量，此外，引入路径最大曲率变化率 $\dot{\kappa}_{\max}$、路径最大跃度 $\mathrm{jerk}_{\max}$ 评价路径跟踪适应性，引入压实区域面积占比 ξ_r 评价受控交通农业路径规划质量。

作业路径长度占比 ξ_w 表征作业路径与总路径的比例，通过路径点间距求和获得，占比越大，农机工作效率越高，公式为

$$\xi_w = \frac{L_w}{L_a} \times 100\% \tag{37}$$

式中　L_w——作业路径长度，m

L_a——总路径长度，m

作业覆盖面积占比 ξ_{wc} 表征有效作业面积与田块总面积的比例，通过高斯面积公式获得，占比越大，土地利用率越高，公式为

$$\xi_{wc} = \frac{S_{wc}}{S_{ac}} \times 100\% \tag{38}$$

式中　S_{wc}——作业覆盖面积，m^2

S_{ac}——田块总面积，m^2

路径最大曲率变化率 $\dot{\kappa}_{\max}$、路径最大跃度 $\mathrm{jerk}_{\max}$ 表征农机跟踪路径时转向角变化快慢，值越小，路径跟踪适应性越好。

压实区域面积占比 ξ_r 表征永久压实区域面积与田块总面积的比例，通过对轮胎碾压区域二值掩膜求和获得压实区域面积。将每个车轮在不同采样位置处的接触矩形“栅格化”到一个像素网格，兼顾计算精度和效率，选定分辨率为 32 像素/m，利用多边形扫描填充生成每个车轮轨迹的二值局部掩膜，并对所有局部掩膜做像素级逻辑“或”并集，得到完整轨迹的覆盖掩膜，统计掩膜中被碾压的像素数并乘以每像素实际面积，获得准确计算去重后的车轮碾压总面积，该面积占比越小，受控交通农业路径规划质量越好，公式为

$$\xi_r = \frac{S_{cr}}{S_{ac}} \times 100\% \tag{39}$$

式中　S_{cr}——压实区域面积，m^2

3.2　测试结果

测试地块包括凹多边形地块（地块 a、b）和凸多边形地块（地块 c），按本文所述路径规划方法对多边形地块分别进行全生产周期路径规划，并基于等距缩放获取的转向预留作业区域路径、平行作业行、Dubins 曲线衔接路径获得的路径初始解，采用序列二次规划对转向段路径曲率优化，求出相关评价指标，结果如表 7、8 所示。生成结果如图 15 ~ 17 所示，图中，黑色实线为地块边界线，白色区域为作业遗漏区域，蓝色实线为主永久道路径，粉色实线为子作业路径，红色圆点为弹性出入口。

表 7　主永久道路径规划算法测试结果

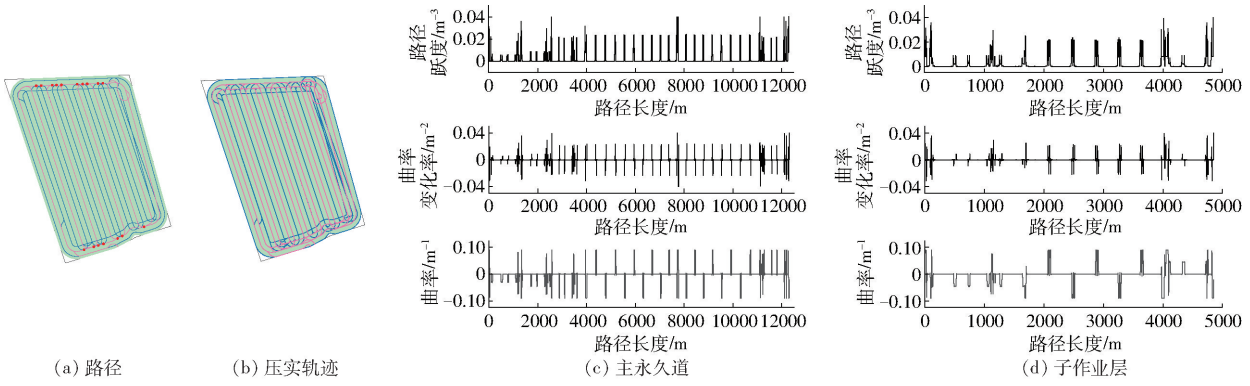
Tab. 7　Primary permanent road test results

地块	总长度/m	作业路径占比/%	地块总面积/m^2	覆盖面积占比/%	最大曲率变化率/m^{-2}	路径最大跃度/m^{-3}
a	12 304.70	75.47	105 106.74	91.92	0.040	0.040 3
b	10 800.45	76.49	92 117.67	88.82	0.040	0.040 0
c	11 104.26	79.66	98 161.45	91.22	0.040	0.040 2
平均		77.21		90.65	0.040	0.040 2

表 8　子作业层路径规划算法测试结果及全局压实率

Tab. 8　Sub-operation layer path planning algorithm test results and global compaction rate

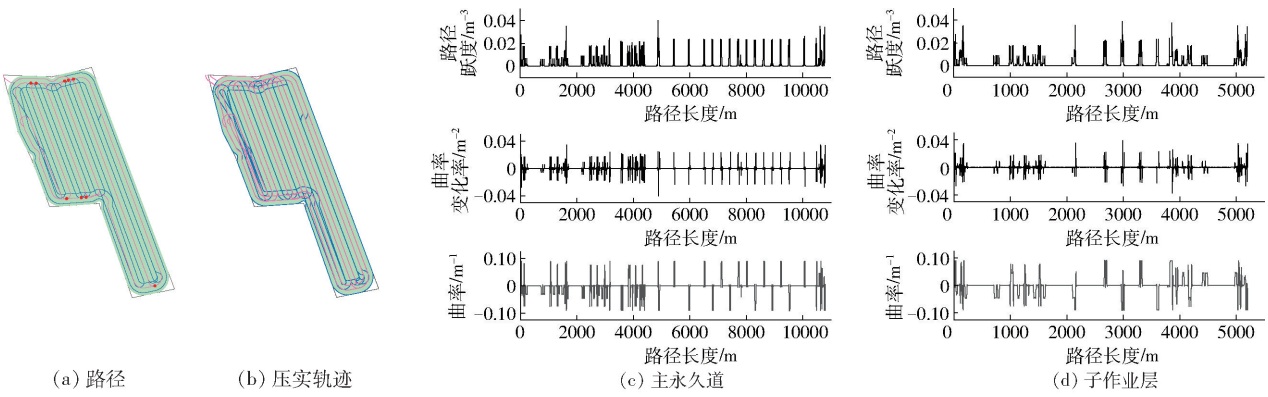
地块	总长度/m	作业路径占比/%	覆盖面积占比/%	最大曲率变化率/m^{-2}	路径最大跃度/m^{-3}	总压实面积/m^2	总压实面积占比/%
a	4 850.87	57.58	91.92	0.040	0.040 2	9 107.30	8.66
b	5 206.26	51.00	88.82	0.040	0.040 0	8 681.01	9.42
c	5 033.05	62.04	91.22	0.034	0.040 0	8 274.17	8.42
平均		56.87	90.65	0.038	0.040 1		8.83



(a) 路径 (b) 压实轨迹 (c) 主永久道 (d) 子作业层

图 15 地块 a 测试结果

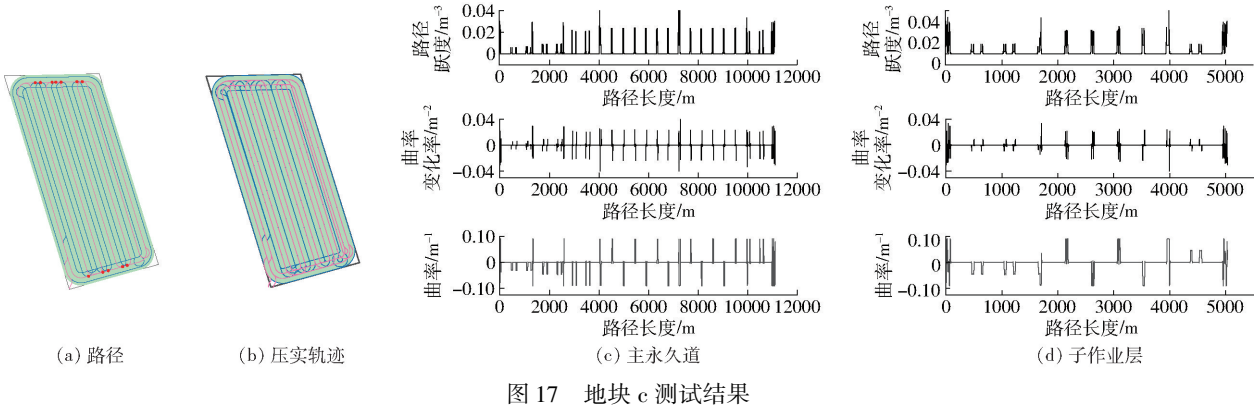
Fig. 15 Plot a test results



(a) 路径 (b) 压实轨迹 (c) 主永久道 (d) 子作业层

图 16 地块 b 测试结果

Fig. 16 Plot b test results



(a) 路径 (b) 压实轨迹 (c) 主永久道 (d) 子作业层

图 17 地块 c 测试结果

Fig. 17 Plot c test results

3.3 讨论

从作业路径占比来看,主永久道作业路径长度平均占比达 77.21%,子作业层作业路径长度占比达 56.87%,子作业层作业幅宽更大,跨行衔接等非作业路径长,作业路径占比明显比主永久道作业路径小。

从覆盖面积占比来看,主永久道与子作业层作业覆盖面积平均占比均为 90.65%,主要原因为采用转向预留作业区域和中心作业区域的规划方案,中心作业区域为构造弹性出入口对行顶点进行了“向外”偏移,使得中心作业区域得以全覆盖作业。遗漏区域主要发生在转向预留区域的顶点平滑段,覆盖率占比与作业机具转向半径、地块形状相关。

从最大曲率变化率与路径最大跃度来看,路径最大曲率变化率限制在 0.04 m^{-2} 以内、路径跃度限制在 0.05 m^{-3} 以内,存在优化后路径与原路径位置发生变化,但弹性出入口位置的最大变形量控制在 10 cm 以内,占作业幅宽的 0.98%,对实际作业影响较小,满足作业需求,序列二次规划效果良好。

从总压实面积占比来看,总压实区域平均占比达 8.83%,该指标多边形地块复杂度相关,并与田块形状、尺寸,作业幅宽、轮胎宽度等因素有关,后续可减小车轮宽度,增大作业幅宽,优化该指标。

整体上来看，凸多边形作业路径占比高于凹多边形，主要原因是规则的地块换行等非作业路径短，并且作业效率更高，最大曲率变化率更小，额外造成的土壤压实也越小。

通过对凸多边形和凹多边形地块下全生产周期的路径规划与相关评价指标可以看出，该规划方法对多边形地块具备良好的适应性，满足基于受控交通农业的机器人化作业平台路径规划需求。

4　结论

（1）针对播种、植保、收获、转运物料等各环节的作业幅宽差异显著，单一层级的永久道路网难以兼顾多机具作业需求，本研究路径规划建立双层级路径结构，采用转向预留作业区域和中心作业区域组合方案，前者通过等距缩放规划路径，后者对中心作业区域主永久道网络设计间隔梭行的遍历顺序，对子作业路径层设计相邻梭行遍历顺序，并通过 Dubins 曲线设计衔接路径，适应不同作业幅宽作业需求。

（2）基于 Dubins 曲线特性，构造行间衔接路径连接转向预留作业区域和中心作业区域，空间重合节点定义为潜在弹性出入口，允许农机沿连接点在区域间转移，使路径网络具备弹性出入能力，避免新增路径对非压实带的侵占。

（3）针对直线-圆弧段路径曲率突变、跟踪精度低的问题，分析机器人化作业平台运动学对路径约束，采用序列二次规划算法对路径进行优化，设计非线性约束，所规划的路径曲率、曲率变化率、路径跃度均满足机器人化作业平台运动学约束，提高了路径跟踪适应性。

（4）基于机器人化作业平台参数进行实地测试，所规划的路径，主永久道作业路径长度平均占比达 77.21%，子作业层作业路径长度占比达 56.87%，主永久道与子作业层作业覆盖面积平均占比均为 90.65%，总压实区域平均占比达 8.83%，路径最大曲率变化率限制在 0.04 m^{-2} 以内、路径跃度限制在 0.05 m^{-3} 以内，满足受控交通农业的机器人化作业平台路径规划需求。

参　考　文　献

[1] VAN BALEN D, CUPERUS F, HAAGSMA W, et al. Crop yield response to long-term reduced tillage in a conventional and organic farming system on a sandy loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105553.

[2] SALAMANCA-FRESNO C, SORIANO M A, TESTI L, et al. Effects of conservation tillage, controlled traffic and regulated deficit irrigation on soil CO_2 emissions in a maize-based system in Mediterranean conditions[J]. Science of The Total Environment, 2022, 813: 152454.

[3] PULIDO-MONCADA M, PETERSEN S O, MUNKHOLM L J. Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems: a review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2022, 42(3): 38.

[4] GODWIN R J, WHITE D R, DICKIN E T, et al. The effects of traffic management systems on the yield and economics of crops grown in deep, shallow and zero tilled sandy loam soil over eight years[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: 105465.

[5] BOTTA G F, ANTILLE D L, NARDON G F, et al. Zero and controlled traffic improved soil physical conditions and soybean yield under no-tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105235.

[6] GASSO V, SØRENSEN C A G, OUDSHOORN F W, et al. Controlled traffic farming: a review of the environmental impacts[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 48: 66 - 73.

[7] HEFNER M, LABOURIAU R, NØRREMARK M, et al. Controlled traffic farming increased crop yield, root growth, and nitrogen supply at two organic vegetable farms[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 117 - 130.

[8] DA LUZ F B, GONZAGA L C, CASTIONI G A F, et al. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane fields[J]. Geoderma, 2023, 432: 116427.

[9] MCHUGH A D, TULLBERG J N, FREEBAIRN D M. Controlled traffic farming restores soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 164 - 172.

[10] 周俊，何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报，2021, 52(9): 1 - 14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1 - 14. (in Chinese)

[11] ŘEZNÍK T, HERMAN L, KLOCOVÁ M, et al. Towards the development and verification of a 3D-based advanced optimized farm machinery trajectory algorithm[J]. Sensors, 2021, 21(9): 2980.

[12] 黄小毛，王绍帅，石逸泽，等. 稻油轮作无人化农场农机作业路径规划算法与移动端软件研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 73 - 82.
HUANG Xiaomao, WANG Shaoshuai, SHI Yize, et al. Development of agricultural machinery operation path planning algorithms and mobile software for unmanned rice oil rape rotation farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 73 - 82. (in Chinese)

[13] 黄小毛，张垒，王绍帅，等. 凸多边形田块下油菜联合直播机组作业路径规划[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 33 -

40,150.
HUANG Xiaomao,ZHANG Lei,WANG Shaoshuai, et al. Path planning of rapeseed combine seeder in field of convex boundary [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 33 - 40,150. (in Chinese)
[14] OKSANEN T, VISALA A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8): 651 - 668.
[15] HÖFFMANN M, PATEL S, BÜSKENS C. Optimal coverage path planning for agricultural vehicles with curvature constraints [J]. Agriculture, 2023, 13(11): 2112.
[16] MIER G, FENNEMA R, VALENTE J, et al. Continuous curvature path planning for headland coverage with agricultural robots [J]. Journal of Field Robotics, 2024,42(3): 641 - 656.
[17] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17 - 26,43.
CHEN Kai,XIE Yinshan,LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17 - 26,43. (in Chinese)
[18] CONESA-MUÑOZ J, BENGOCHEA-GUEVARA J M, ANDUJAR D, et al. Route planning for agricultural tasks: a general approach for fleets of autonomous vehicles in site-specific herbicide applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 204 - 220.
[19] 马家祥,闫洪峰,贾双龙,等. 通用型宽幅农机作业平台分析与设计[J]. 农业工程, 2023, 13(9): 97 - 101.
MA Jiaxiang,YAN Hongfeng,JIA Shuanglong,et al. Analysis and design of universal wide span agricultural machinery operation platform[J]. Agricultural Engineering,2023,13(9):97 - 101. (in Chinese)
[20] HÖFFMANN M, PATEL S, BÜSKENS C. Optimal guidance track generation for precision agriculture: a review of coverage path planning techniques[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(3): 823 - 844.
[21] SABELHAUS D, RÖBEN F, MEYER ZU HELLIGEN L P, et al. Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(4): 399 - 409.
[22] 刘文龙,郭锐,赵静一. 基于反馈线性化的插秧机路径跟踪模糊预测函数控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 51 - 61.
LIU Wenlong,GUO Rui,ZHAO Jingyi. Fuzzy predictive function control for the path tracking of transplanters using feedback linearization[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(22): 51 - 61. (in Chinese)
[23] 张闻宇,胡力文,王辉,等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 42 - 51,115.
ZHANG Wenyu,HU Liwen,WANG Hui,et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve path tracking method based on B-spline optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 42 - 51,115. (in Chinese)
[24] BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, VOUGIOUKAS S G. Path planning for in-field navigation-aiding of service units[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(1): 80 - 90.
[25] 胡炼,张鸿,何杰,等. 再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 19 - 27.
HU Lian,ZHANG Hong,HE Jie,et al. Path planning technical research of low-rolling compaction harvesting operation for the first season of ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 19 - 27. (in Chinese)

(上接第 **108** 页)

[34] 王子晴, 韦羿伶, 马旭超. 技术资源、知识协同与供应链企业合作创新绩效[J]. 中国商论, 2020(20):97 - 98.
WANG Ziqing, WEI Yiling, MA Xuchao. Technological resources, knowledge collaboration and cooperative innovation performance of supply chain enterprises[J]. China Journal of Commerce, 2020(20): 97 - 98. (in Chinese)
[35] 林杰, 曾富全. 财务共享服务智能化转型对企业绩效的影响——基于 RPA 技术视角[J]. 现代商业, 2024(19): 180 - 183.
LIN Jie, ZENG Fuquan. Theimpact of intelligent transformation of financial shared services on enterprise performance: a perspective based on RPA technology[J]. Modern Business, 2024(19): 180 - 183. (in Chinese)
[36] 齐萧苑. 云技术与信息共享能力对中小企业供应链伙伴及绩效的影响[J]. 武汉商学院学报, 2023, 37(3):63 - 68.
QI Xiaolie. Impact of cloud technology and information sharing capabilities on supply chain partners of SMEs and on performance[J]. Journal of Wuhan Business University, 2023, 37(3): 63 - 68. (in Chinese)
[37] BRECKLER S J. Applications of covariance structure modeling in psychology-cause for concern[J]. Psychological Bulletin, 1990,107(2):260 - 273.