

基于空间运行轨迹的农机往复作业行距估算方法

王培^{1,2} 孟志军¹ 安晓飞¹ 张安琪¹ 李立伟¹ 梅鹤波¹

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100097)

摘要: 为了快速评估农机作业重漏状况,针对农机往复作业模式下,通过在农机上装载智能终端设备,采集车载终端 GNSS 信息,分析农机空间运行轨迹数据,统计方位角分布频次,计算农机作业方向,提取农机作业线,进一步建立了农机作业行距评估模型。为了验证农机作业行距评估模型,于 2021 年 6 月 25 日在北京小汤山国家精准农业研究示范基地开展实验,利用装载有自动导航系统的拖拉机,设定不同的行距,且每个行距进行往复直线作业,验证作业方向计算、作业线提取和作业行距提取等模型。结果表明,与实际相比,模型计算的作业行距平均误差为 3.07%,均方根误差为 0.14 m,从整体上来看,识别的农机作业平均行距和实际行距比较相符,可为农机作业重叠、遗漏等农机作业质量评估提供数据支撑。

关键词: 农业机械; 往复作业; 作业行距; 空间运行轨迹

中图分类号: O657.3; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0044-04

Estimating Model of Row Spacing Based on Spatial Track of Agricultural Machinery and Corresponding Experiment in Headland Pattern

WANG Pei^{1,2} MENG Zhijun¹ AN Xiaofei¹ ZHANG Anqi¹ LI Liwei¹ MEI Hebo¹

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: According to agricultural machinery operation in headland pattern, through installing intelligent monitoring terminal in the agricultural machinery, data of spatial track of agricultural machinery was collected, the distribution frequency of azimuth angle was analyzed, the direction of agricultural machinery operation was calculated, the agricultural machinery operation lines were extracted, and model of row spacing of agricultural machinery operation was built. Furthermore, in order to verify the algorithm of row spacing of agricultural machinery operation, field experiments were conducted on June 25, 2021 at the National Precision Agriculture Demonstration Research Base in Beijing, China. The tractor installed automatic navigation system was selected, different row spacings were set by navigation system, such as 3.0 m, 4.0 m and 5.0 m. According to the set value of row spacing, the agricultural machinery operation experiment was carried out three times in headland pattern. The results showed that the average error was 3.07% between the set value of row spacing and model calculated value. The RMSE of validation was 0.14 m. Overall, conclusion analysis of an example showed that its results were coincided with the active situation. Row spacing was an important parameter of farm machinery operation supervision, combined with the width of operation, it can provide data support to quality evaluation of agricultural machinery operation, such as overlapping and omission and so on.

Key words: agricultural machinery; headland pattern; row spacing; spatial track

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1709602)、北京市农林科学院青年基金项目(QNJ202103)和国家自然科学基金项目(31971800)

作者简介: 王培(1983—),男,高级工程师,主要从事农机作业大数据与人工智能研究,E-mail: wangp@nrcita.org.cn

通信作者: 安晓飞(1986—),男,正高级工程师,主要从事农机智能装备研究,E-mail: anxf@nrcita.org.cn

0 引言

近年来中国农机信息化发展迅猛,农业作业信息化水平逐年提高,国内逐渐开始了农机监控调度平台的研究^[1-2],2011 年以来,黑龙江省为投资额达到千万元以上的 800 多个农机合作社的大型农机设备安装了定位装置,实行智能化管理;2012 年,河南省农机跨区作业信息网络设施和智能调度管理服务平台为参加跨区作业的 5 000 多台联合收获机安装 GPS 定位系统,实现了对“三夏”跨区作业的信息化管理^[3];2012 年,农业部继续利用信息化手段加强春耕、“三夏”、“三秋”等重要农时农机调度工作,及时收集、分析和发布机具供需、作业价格等市场信息,为农民、农机手和农机企业免费提供有效的信息服务,促进了作业机械的有序流动。此外,雷沃、中联等农机行业的一些重点企业依托物联网、互联网等信息技术,搭建了农机智能云服务平台,实现了对农机设备装备和作业的远程监控,为产品售后服务和车辆调度提供信息服务,仅雷沃就覆盖了 1.3×10^5 台农机^[4]。

目前,农机信息化技术装备已经能够实现农机作业的定位、追踪、远程监控、面积计量等^[5-9],并对特定作业类型的作业质量进行监管,如深松、深翻的作业深度^[10],并开始对农机空间运行产生的实际数据进行分析,研究农机作业状态^[11-12]、农机作业效率^[13-14]、田间作业路径规划^[15-20]等。农机作业的分段轨迹数据,反映农机作业方向、作业行距等农机运维的关键技术指标,农机作业行距是农机作业监管的一个重要参数,特别是对农机作业重叠遗漏、接行精度等作业质量评估有重要意义,作业线为研究农机作业转弯等提供基础。目前农机作业方向和作业行距等参数多是采用人工去现场测量和超声波传感器^[21]等方式,人工测量效率低下,而传感器方式成本较高且安装复杂,对安装位置有很高要求。因此,本文通过分析农机作业的位置轨迹,自动识别农机作业方向、提取作业线、估算作业行距,以期对农机作业监管、作业质量评价等提供数据支撑。

1 材料与方法

农机往复直线作业是一种常见的作业模式^[22-23],农机作业线表现为平行作业路径。农机作业行距是指农机往复直线作业模式下相邻两条作业线的距离,针对农机作业行距的测量困难、成本较高等问题,本研究设计了基于农机空间运行轨迹的作业行距估算方法。该方法通过对农机空间运行轨迹

的方位角进行分析,自动计算作业行距,具体包括数据采集、农机作业方向计算、农机作业线提取、作业行距估算 4 个步骤,如图 1 所示。

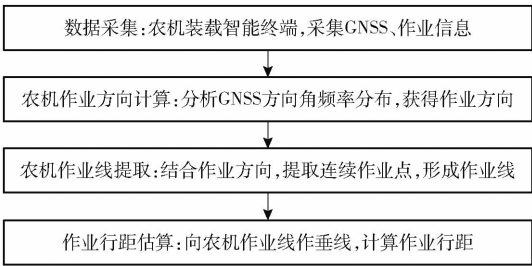


图 1 农机作业行距估算流程图
Fig. 1 Operation flow chart of row spacing of agricultural machinery operation

1.1 农机远程监测装置

北京农业智能装备技术研究中心研发了农机智能监测终端,用于农机作业全程机械化的作业监控。农机智能监测终端主要包括全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)模块、无线传输模块和作业状态传感器模块,如图 2 所示。其中 GNSS 模块定位精度为 2.5 m 圆概率误差(Circular error probable, CEP),速度精度为 0.1 m/s;作业状态传感器模块采用姿态传感器确定作业状态等作业信息;采集农机作业的空间运行轨迹数据,包括 UTC 时间、经纬度、海拔、速度、方位角等信息;无线传输模块将采集的空间运行轨迹信息和作业信息无线传输至服务器。



图 2 农机智能监测终端
Fig. 2 Intelligent monitor terminal of agricultural machinery

1. GNSS 2. 监测主机(包含无线传输模块) 3. 作业状态传感器

1.2 农机作业方向计算

农机作业方向是指农机在农田中作业时,农机的行进方向,计算步骤如下:

(1) 农机作业方向区间定义

农机往复作业模式下,作业路径一般采取的是平行路径作业,由于农机实际作业和 GNSS 的方位角精度都一定的误差,因此将农机作业方向分为 N (通常 $N \geq 18$) 个方向区间,每个方向区间占的角度为 $360^\circ/N$,计算式为

$$\frac{360^\circ}{N}(i-1) < A_i \leq \frac{360^\circ i}{N}$$

式中 i ——作业方向序号

A_i ——第 i 个方向区间的角度

(2) 农机作业方向判定

从数据库中获取一次地块作业 GNSS 和作业状态数据记录集合 P , 并按照 GNSS 时间排序, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$, 其中 p_i 为第 i 个记录点数据, 包括 UTC 时间、经纬度、方位角、速度和作业状态 (是否作业) 等属性信息。

提取集合 P 的作业状态为作业的数据集, 并统计数据集方位角落在各农机作业方向区间的频次 $F, F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$, 其中 f_i 为数据集落在第 i 个方向区间的频次。

分析其频次直方图, 查找频数最大的 2 个方向区间, 并按照方向区间从小到大排序得到 f_a, f_b , 由于农机作业是呈往复直线运动, 所以有 2 个最大峰值, 一个为“往”方向, 一个“复”方向, 两者相差 180° 左右。定义方向区间序号较小的 f_a 表示的方向为农机作业方向, 方向区间序号较大的 f_b 表示的方向为农机作业反方向。

计算 f_a 方向区间内的作业数据的方位角平均值 C 为作业方向, 计算公式为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ai}}{n}$$

(1)

式中 p_{ai} ——方向区间 f_a 中第 i 个作业记录点的方位角

n ——方向区间 f_a 中方向角个数

1.3 农机作业线提取

农机作业线是指农机在农田中作业时, GNSS 轨迹形成的作业路径。遍历农机作业集合 P , 提取连续作业状态为作业的数据组合成集合 $W, W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 其中 w_n 为第 n 个连续作业数据记录集集合。

遍历集合 w_n , 判断该集合数据记录点的方位角是否在农机作业方向或者农机作业反方向所在的方向区间, 如果在则添加到作业线中, 如果不在则跳过。遍历完成得到 m 条作业线集合 $L, L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$, 其中 l_m 为第 m 个条作业线中数据记录点的集合。

1.4 农机作业行距计算

通过预先设置垂线个数 s 和垂线间隔距离 E , 以作业地块中心点 $A(x_0, y_0)$ 为初始位置, 垂直于作业方向 C , 做垂线 k , 然后把 k 按照线段间隔距离分别向两侧平移 E , 得到 n 条垂线集合 $K, K = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}$, 对于每一个垂线 k_i 与 m 条作业线相交, 得到线段 O_i , 计算该线段下作业行距的平均距离 $\bar{D}_i$, 计算式为

$$\bar{D}_i = \frac{D_i}{m-1}$$

(2)

式中 D_i ——垂线段 O_i 的长度

m ——垂线段 O_i 与作业线相交点个数

对集合 K 所有垂线, 分别求取所有垂线下的作业行距的平均距离, 并求平均, 得到农机作业行距

$$D = \frac{\sum_{i=1}^s D_i}{s}$$

(3)

2 实验及结果分析

为了验证农机作业行距估算方法, 2021 年 6 月 25 日, 在国家精准农业研究示范基地 ($40^\circ 10' 33'' \sim 40^\circ 11' 20'' \text{N}, 116^\circ 26' 10'' \sim 116^\circ 27' 06'' \text{E}$) 进行实验, 示范基地位于北京市昌平区小汤山镇, 实验地块面积为 $10\,563\text{ m}^2$ 。

选取纽荷兰 T1404 型拖拉机作为实验农机, 拖拉机上车载智能终端和自动导航系统, 车载智能终端采集 GNSS 信息和作业信息, 自动导航系统直线跟踪标准偏差小于 2.5 cm 。

利用自动导航系统分别设定行距 $5.0, 4.0, 3.0\text{ m}$, 每个行距进行 3 次往复直线作业, 对其产生的作业轨迹数据进行分析, 以第一次实验为例 (行距设定为 5.0 m), 进行行距的计算。

2.1 农机作业方向确定

从服务器获得农机空间运行轨迹数据, 将农机作业方向分为 18 个方向区间, 每个方向区间为 20° , 提取农机作业速度大于 0 的轨迹点, 统计轨迹点分布在各个方向区间的频次, 如图 3 所示。

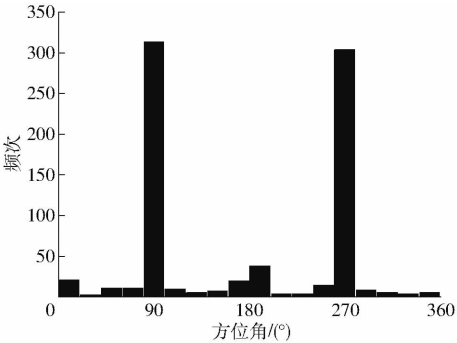


图3 方位角频次分布直方图

Fig. 3 Histogram of frequency distribution of azimuth angle

从图 3 可以看出, 第 5 个作业区间 (方位角范围 $80^\circ \sim 100^\circ$) 和第 14 个作业区间 (方位角范围 $260^\circ \sim 280^\circ$) 的轨迹点分布频次最多, 分别为 314 和 304, 得到 $f_a = 5, f_b = 14$, 根据式 (1) 计算农机作业方向为 90.49° , 作业反方向为 271.00° , 且相差 180.51° , 呈明显的往复作业规律。

2.2 农机行距估算

根据 1.3 节方法,通过对农机作业轨迹点的方位角分析,获得 12 条作业线,如图 4 所示。

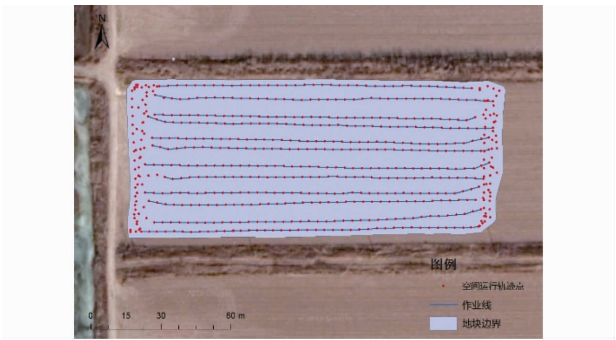


图 4 农机作业线提取

Fig.4 Extraction of agricultural machinery operating lines

按照农机作业方向 C,按照 20 m 间隔做 3 条垂线,如图 5 所示。

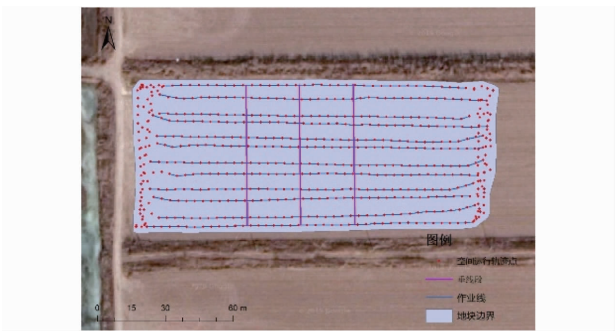


图 5 农机作业行距估算

Fig.5 Estimation of row spacing of agricultural machinery operation

根据式(2)计算 3 个行距分别为 5.08、5.18、5.16 m,并利用式(3)计算得到作业行距为 5.14 m。

表 1 为 9 次农机作业实验数据统计信息,包括

作业方向、作业线条数、设定行距和计算行距等信息,序号 1~3、4~6、7~9 的农机自动导航行距设定分别为 5、4、3 m。从表 1 可以看出,识别行距最大误差为 6.25%,最小误差 0.67%,平均误差为 3.07%,均方根误差为 0.14 m,从整体上来看,识别的农机作业行距和实际行距比较相符。

表 1 农机实验结果统计

Tab.1 Statistics of agricultural machinery experimental results

序号	作业方向/ (°)	作业线/ 条	设定行距/ m	计算行距/ m	误差/ %
1	90.49	12	5.00	5.14	2.80
2	89.61	12	5.00	5.19	3.80
3	89.49	12	5.00	5.09	1.80
4	90.23	15	4.00	4.25	6.25
5	89.30	15	4.00	4.06	1.50
6	90.64	15	4.00	4.18	4.50
7	90.83	19	3.00	2.93	2.33
8	88.67	19	3.00	3.12	4.00
9	89.09	19	3.00	2.98	0.67

3 结束语

农机作业行距是农机作业监管的一个重要参数,通过对往复作业模式下的农机作业轨迹数据进行分析,计算了农机作业方向,提取了作业线,建立了农机作业行距评估模型。从实验结果来看,平均误差 3.07%,均方根误差为 0.14 m,模型计算行距和实际行距比较相符,综合农机作业幅宽等信息,为农机作业重叠、遗漏等农机作业质量评估提供数据支撑;作业线提取为农机作业转弯等研究提供了基础。

参 考 文 献

[1] WANG Z, CHEN L, LIU Y. Design and implementation of agricultural machinery monitoring and scheduling system[J]. Computer Engineering,2010,36(11): 232-234, 237.

[2] 史国滨,王熙. 基于 ASP.NET 的农机监控 Web GIS 系统性能优化[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(5):2821-2823. SHI Guobin, WANG Xi. Optimization of performance of agricultural machinery monitoring Web GIS system based on ASP.NET [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(5):2821-2823. (in Chinese)

[3] 杨勇. 信息化助力农业现代化[J]. 农产品市场周刊,2013(22):12-15.

[4] 夏木. 潍柴雷沃:高端“智造”迈向未来[J]. 农机市场,2022(5):55-56.

[5] 王玲,王新,刘健,等. 基于虚拟仪器的柔性化农机机群远程监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1):34-39. WANG Ling, WANG Xin, LIU Jian, et al. Research on flexible remote monitoring system of agricultural machinery based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):34-39. (in Chinese)

[6] 刘阳春,苑严伟,张俊宁,等. 深松作业远程管理系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):43-48. LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):43-48. (in Chinese)

[7] 孟志军,尹彦鑫,罗长海,等. 农机深松作业远程监测系统设计与实现[J]. 农业工程技术,2018,38(18):34-37.

[8] 赵世卿,吴永峰,李光林,等. 丘陵山区农机深松作业深度和面积远程监测系统[J]. 西南大学学报(自然科学版),2018, 40(12):22-29. ZHAO Shiqing, WU Yongfeng, LI Guanglin, et al. A remote monitoring system for depth and area of agricultural machinery subsoiling in hilly regions[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(12):22-29. (in Chinese)

- meter[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2014, 32(3): 408–411. (in Chinese)
- [20] 袁昊,刘彩玲,宋建农,等. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动匀种装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 31–40.
YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong, et al. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 31–40. (in Chinese)
- [21] 郭浩. 矩形穿孔板压电换能器的弯曲振动研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [22] 刘超. 压电悬臂梁水平布置式直线送料器的设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [23] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 37–43.
- [24] 扈凯,张文毅,李坤,等. 基于模态规划法的履带拖拉机车架振动分析与优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 121–126.
HU Kai, ZHANG Wenyi, LI Kun, et al. Vibration analysis and optimization of tracked tractor frame based on modal programming method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 121–126. (in Chinese)
- [25] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123–132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for panax notoginseng seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123–132. (in Chinese)
- [26] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35–42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 35–42. (in Chinese)

(上接第 47 页)

- [9] 刘卉,孟志军,王培,等. 基于农机空间轨迹的作业面积的缓冲区算法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 180–184.
LIU Hui, MENG Zhijun, WANG Pei, et al. Buffer algorithms for operation area measurement based on global navigation satellite system trajectories of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 180–184. (in Chinese)
- [10] 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68–74.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68–74. (in Chinese)
- [11] 王培,孟志军,尹彦鑫,等. 基于农机空间运行轨迹的作业状态自动识别试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 56–61.
WANG Pei, MENG Zhijun, YIN Yanxin, et al. Automatic recognition algorithm of field operation status based on spatial track of agricultural machinery and corresponding experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 56–61. (in Chinese)
- [12] CAI Y, WU C, LUO M, et al. Automatic recognition method of operation status for agricultural machinery based on GNSS data mining[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) Proceedings, 2012: 135–145.
- [13] HUANG P, LUO X, ZHANG Z. Headland turning control method simulation of autonomous agricultural machine based on improved pure pursuit model[C]//IFIP International Federation for Information Processing, 2010: 176–184.
- [14] 王培,孟志军,安晓飞,等. 拖拉机功率与深松作业效率关系研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 87–90.
WANG Pei, MENG Zhijun, AN Xiaofei, et al. Relationship between agricultural machinery power and agricultural machinery subsoiling operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 87–90. (in Chinese)
- [15] ZHOU K, LECK J A, SØRENSEN C G, et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 12–22.
- [16] HAMEED I A, BOCHTIS D D, SØRENSEN C G, et al. Automated generation of guidance lines for operational field planning[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(4): 294–306.
- [17] PALMER R J, WILD D, RUNTZ K. Improving the efficiency of field operations[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3): 283–288.
- [18] BOCHTIS D D, VOUGIOUKAS S G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(1): 1–12.
- [19] 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)
- [20] 张帆,罗锡文,张智刚,等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192–198.
ZHANG Fan, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 192–198. (in Chinese)
- [21] 赵春江,陈立平,黄文倩,等. 一种收割面积测量与计费系统及方法: CN101398297[P]. 2009–04–01.
- [22] JOHN T E, SANTOSH K P, JOE D L, et al. Row crop grain harvester path optimization in headland patterns[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 1–8.
- [23] 张凯,白美健,李益农,等. 联合收割机生产率计算模型与适宜作业路线分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 37–43.
ZHANG Kai, BAI Meijian, LI Yinong, et al. Combine harvester productivity calculation model and analysis of suitable operation route[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 37–43. (in Chinese)