DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.01.005

植保机械智能化技术研究现状与趋势

刘政[1], 金诚谦[1, 2*], 冯玉岗[1], 杨腾祥[1]

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所,江苏南京,210014;
2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院,山东淄博,255049)

摘要:大田智能化植保机械是提高农药利用率、提升粮食品质、保障农业可持续发展的重要手段。为了解植保机械智能化技术的研究现状、明确未来发展方向,围绕高地隙植保机智能化作业的规模农田大尺度下的处方施药、地块级小尺度下的对靶喷药以及随速变量喷药三大主流方向,从感知、分析、决策、控制等方面,阐述了融合高精度卫星定位的处方图构建、空间坐标变换方法和处方识别的技术原理、对靶喷药技术路线及杂草识别关键技术研究水平,认为基于在线处方的高精度喷药是未来研究的重点;针对随速变量喷药的高精度测速这一关键技术,进行了4种测速模式的优缺点对比分析,随着卫星定位在农机上的广泛应用,卫星测速以其更加通用、便捷、精准将成为高精度测速的主要方式。为探究变量喷药控制的发展现状,对压力控制变量喷药和管路截流式流量控制变量喷药两种控制方式及实现方法进行了总结,从结构复杂性、实现的安全性和系统稳定性方面综合来看,管路截流式流量控制是实现变量喷药的主要方式,并从技术原理、实现过程及优化应用情况对流量控制的分段控制、脉宽调制、PID控制3种控制算法进行了论述,认为基于机器学习的PID控制将是改善流量调控性能重要方向。随着人工智能技术的不断发展,融合智能感知、分析决策和自主作业能力的植保机器人将成为植保机械未来主流的发展方向。

关键词:植保机械;处方喷药;杂草识别;对靶喷药;变量喷药;植保机器人

中图分类号:S224;S49 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2024)01-0040-11

刘政, 金诚谦, 冯玉岗, 杨腾祥. 植保机械智能化技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 40-50

LIU Zheng, JIN Chengqian, FENG Yugang, YANG Tengxiang. Research status and trends of intelligent technology in plant protection machinery [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 40-50

0 引言

大田精准施药是节约农药投入,降低农药残留,促进农业可持续发展的重要途径[1-3]。智能化植保机是保障大田精准施药的重要手段,主要包括3个方面内容:一是通过精确的作物及杂草识别进行精准的对靶施药,节约农药用量;二是匹配车辆前进速度自动调节喷药量,改善喷药均匀度;三是作业全程自主调控,降低作业人员劳动强度[4]。

20世纪80年代,欧美发达国家已经在中大型自走式植保机械上进行了信息技术的成熟应用[5],如使用辅助气流、静电喷雾、光电或红外等技术进行定向对靶喷雾,根据作业速度和作业密度自动调节喷量进行精确喷雾,通过机械及电子方法控制雾滴大小,提高农药中靶率等,实现了低喷量、精喷洒、少污染、高质量的植保作业[6-9]。

截至2020年我国植保机械社会保有量突破2.5亿台,其中自走式喷杆喷雾机260多万台[10],但我国自主设计的高地隙喷杆喷雾机存在作业机型小、类型单一、工作效率低等问题[11],机器视觉、静电喷雾、自动对靶喷雾等高新技术应用比例不高[10-13]。《中国制造2025》进一步明确了"安全多能、自动高效、精准智能"的新型高效农业机械装备发展目标[14],本文围绕植保机械智能化发展及主要关键技术现状与发展趋势进行阐述。

1 处方喷药

处方喷药是一种面向田块全局,基于植物病虫草害诊断和防治的个性化喷药方法,处方喷药工作流程如图1所示。通过专业的技术手段,对病虫害进行诊断,根据田间杂草、病虫害的实际分布情况制定针对性的防治措

收稿日期:2022-07-29 修回日期:2023-12-20
基金项目:江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2020-60);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010734)
第一作者:刘政,男,1990年生,江苏宿迁人,博士,助理研究员;研究方向为智能农机技术与装备。E-mail: 913573407@qq.com
*通信作者:金诚谦,男,1973年生,安徽潜山人,博士,研究员,博导;研究方向为智能农机及农业机械化。E-mail: 412114402@qq.com

施，然后采用精确的喷药设备，按照预先设定的处方进行喷药，以实现对病虫草害的高效、精准防治。

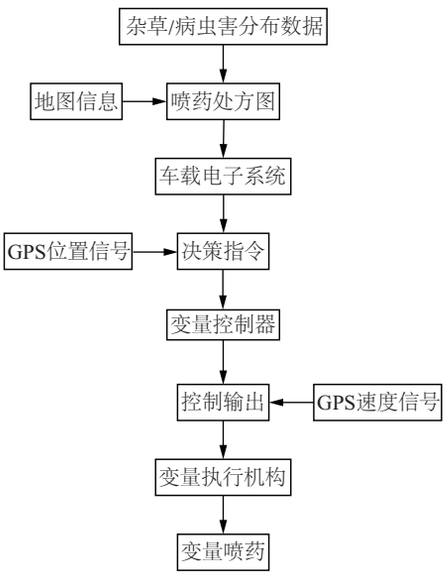


图 1　处方喷药工作流程图

Figure 1　Prescription spraying workflow diagram

LUCK 等[15]研究开发了基于处方农作的喷杆分区域式喷施控制系统，通过 GPS 定位设备解译处方图进行变量施药作业并且能够实现各喷头的独立自动开关控制，该喷雾施药机在农药用量上节约了 15.2%～17.5%。NORDMEYER[16]将 8 块面积为 8.5～9.1 hm^2 的冬小麦田分成大小为 18 m×18 m 的作业网格，运用 DGPS 系统完成了杂草分布地图的绘制，连续 5 年的变量喷药试验显示：基于处方图的变量喷药控制系统喷洒除草剂除杀细长型杂草和宽叶型杂草时，除草剂使用量分别节省 61% 和 56%。

1.1　处方生成

喷药处方需要提前对田间的杂草分布和病虫害情况进行测定，结合 GIS 系统对大田地块轮廓进行提取，根据作物行走向构建数学坐标系，在坐标系内将地块均匀分割成若干个等面积的网格，单个网格内近似认为杂草及病虫害等级相同，以一个均值标识该网格的喷药量，从而形成融合坐标、喷药量的矢量处方，喷药处方如图 2 所示。

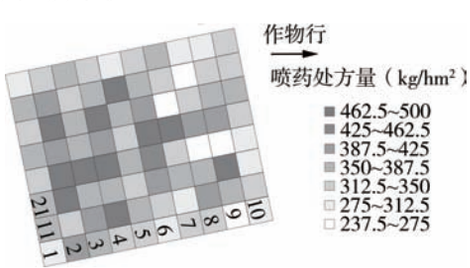


图 2　喷药处方图

Figure 2　Spray prescription map

1.2　处方识别

农业地块往往与大地经纬线不平行，进行处方提取时首先需解决网格识别的问题。一般处方作业多依据 GPS 精准定位进行网格识别，这里主要介绍 GPS 定位下的正交网格识别算法。

对地块网格构建一个 X、Y 轴分别平行于大地纬度和经度的坐标系 Oxy，将 Oxy 坐标系旋转一定角度 θ，得到与地块边界平行的新坐标系 $Ox'y'$，GPS 定位的当前经纬度坐标 (x', y') 对应原 Oxy 内的坐标 (x, y) 即为

$$\begin{cases} x = x'\cos\theta - y'\sin\theta \\ y = x'\sin\theta + y'\cos\theta \end{cases} \tag{1}$$

通过该方法即可实现 GPS 定位坐标在不同坐标系下的坐标转换，处方图网格坐标转换及位置定位示意图如图 3 所示，处方图中的每个网格对应一定的作业面积，还需对当前位置在网格区域中的落点位置进行确定来提取网格标号，通过行列扫描的方式即可解决。

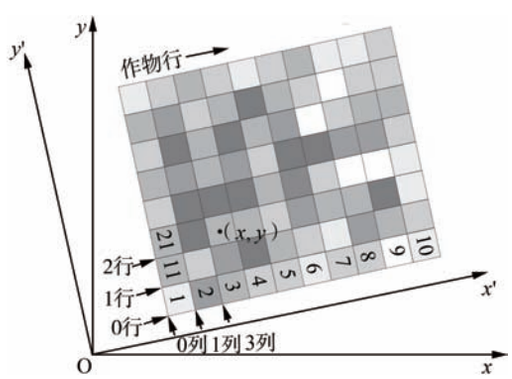


图 3　网格坐标转换及位置定位示意图

Figure 3　Grid coordinate conversion and position positioning schematic

在正交的坐标系 Oxy 内，将标号为 N 网格的左下端点和右上端点的坐标分别记为 (x_{n1}, y_{n1}) 和 (x_{n4}, y_{n4})，则可以确定该网格内的点横坐标区间为 $[x_{n1}, x_{n4}]$，纵坐标区间为 $[y_{n1}, y_{n4}]$，对 GPS 位置信号分别进行行坐标 x 和列坐标 y 的落点判断即可确定当前所在位置的网格编号。

尹东富等[17]利用 CCD 相机对棉田进行 1 m×1 m 的地块单元划分，进行棉花和杂草的识别，根据每个单元杂草面积的大小将网格喷药量设定为 4 个等级，以 12.5 cm×12.5 cm 的网格表示实际地块单元，通过三维数组表示杂草所在网格和喷药量等级，以此生成作业处方图进行精准喷药作业。

王利霞等[18]阐述了倾斜网格识别和定位网格识别等算法，构建了田间喷药处方图，并设计了一种变

量喷药控制系统,并在处方图的自动控制模式下,实现喷药流量的误差范围在5%之内的处方精准变量喷药。

陈志刚等[19]基于北斗定位系统,在车载电脑中融合嵌入式GIS信息系统,对农田进行网格划分,并通过线性插值方法在网格内写入农田信息,生成了根据杂草密度精准施药作业的处方图,田间作业时通过实时卫星定位进行处方匹配,控制系统根据处方施药量控制喷药装置执行变量喷药作业,处方网格判别误差小于0.75 m,处方解译时间为0.876 s,试验效果较好。

随着视觉识别、车载数据处理能力的提升,离线处方逐渐被在线处方所取代,精准识别、在线分析、精准喷药在效率提升和农业节约上更有优势,但在线处方构建手段和规范上还不完善,基于在线处方识别的智能化喷药精度还有待提升。

2 作物及杂草识别技术

作物及杂草识别是实现农药智能精准喷施的重要前提,目前国内外主要采用机器视觉、光谱的方法进行植保机作业的田间作物、杂草的识别。美国NTech公司的WeedSeeker选择性喷淋系统,该系统通过叶绿素光学传感器向地面发送770 nm近红外光和656 nm红光,利用叶绿素荧光成像特性,当检波器检测到杂草时,控制喷头对准杂草喷洒,避免喷到空地上。基于机器视觉进行杂草识别与精准喷药主要是利用计算机视觉、机器学习等技术,实现对农田杂草的识别、定位和精准防控,是实现精准、高效植保,减少农药使用的重要技术手段之一。该技术借助视觉或光谱相机进行作物图像获取,通过降噪、增强、色彩空间转换等预处理操作,提取杂草的特征信息,如颜色、形状、纹理等,利用机器学习对提取的特征进行分类和识别,判断杂草种类、位置和密度等,从而根据识别信息在线调节喷药策略,通过调节喷头流量实现针对不同区域杂草不同药量的精准喷施,基于机器视觉的精准喷药技术路线如图4所示。

SABZI等[20]针对Marfona马铃薯提出了基于视频处理和meta-heuristic在线识别与分类的机器视觉原型,对马铃薯种植区中锦葵、苍耳子等5种草本植物进行纹理、颜色、不变矩和形状特征等提取,并进行机器学习,系统在0.15 m/s的车速下,杂草识别准确率达到98%。PARTEL等[21]采用3个视觉相机基于神经网络算法完成植物中的杂草识别,并基于RTK-GPS定位生成杂草地图,控制多路喷头实现精准对靶施药。袁佐云等[22]针对基于计算机视觉的作物行中心线定位困难问题,提出了基于垂直投影法的作物行定位方法,运用过滤特征值法对原图像中的作物和背景进行分割,对所有图像条上的位置点进行线性拟合,得到农作物的行中心线,获得较好的定位结果。

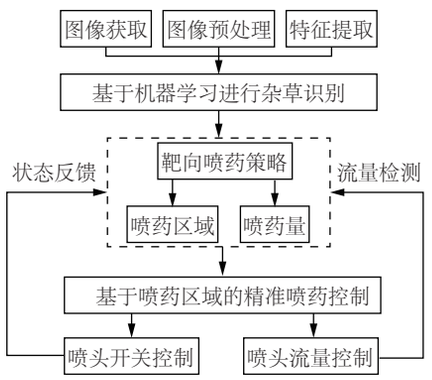


图4 基于机器视觉的精准喷药技术路线

Figure 4 Precise spraying technology route based on machine vision

卷积神经网络在传统神经网络基础上,融合了特征提取模块,通常包含卷积层、池化层和全连接层,卷积神经网络结构如图5所示。其中,卷积层和池化层用于特征提取,全连接层用于分类识别。基于CNN的图像处理技术具有强大的特征提取能力、较高的计算效率、良好的泛化能力,能够在训练过程中自动寻找对分类有益的特征,而且准确度高,因而在作物病虫草害识别中也开始广泛应用[23-24],卷积神经网络在杂草识别中应用的结构如图5所示。

彭明霞等[25]针对棉花地的杂草识别,将Faster R-CNN卷积神经网络的深度学习算法引入到棉花的图像识别中并进行结构优化,使用残差卷积网络提取图像特征,通过训练可以实现平均目标识别准确率达95.5%,对复杂背景下棉花杂草有较好的检测效果。王国伟等[26]基于经典CNN的深度学习网络模型LeNet,构建了一个10层的玉米病害识别模型,完成了对4类不同玉米的花叶病、灰斑病、锈病、叶斑病的识别,平均识别准确率超过96%,平均识别时间为0.15 s。惠巧娟等[27]针对基于VGG、ResNet等深度卷积难以较好解决多物种交叉及外表相似的杂草识别问题,以经典的ResNet-50网络为特征提取器,引入一种强化注意力模块,通过计算原始主干网络提取的特征与位置编码之间的偏移量,强化目标物体的定位与识别。马盼等[28]分别采用YOLOv5和YOLOv8系列的10种模型进行棉蚜图像识别,试验验证模型对死棉蚜与活棉蚜计数的平均精度为0.945,展现出与人工计数相当的精度,具

有较好的实用价值。

以土壤为背景的杂草识别技术已经成熟，但如何解决复杂环境对图像处理的影响导致识别准确度低的问题，还在不断的探索完善[29]。基于卷积神经网络的杂草识别还存在样本数据不平衡、计算资源需求较高等问题，未来研究还需要通过数据增强的方法丰富数据集以提高特征提取能力，并通过引入轻量级的卷积神经网络结构来降低计算资源需求等。

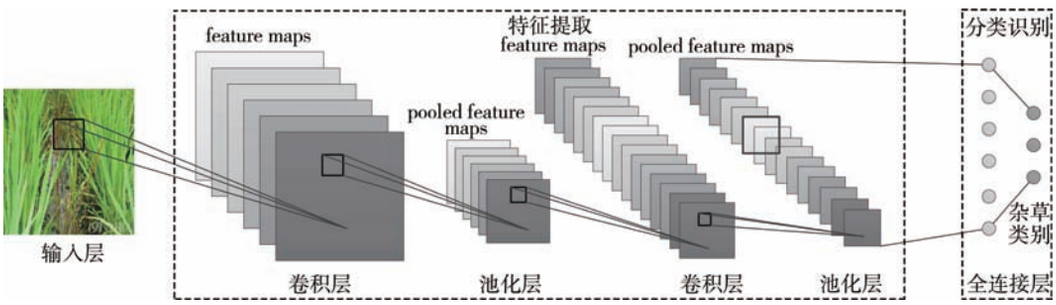


图 5　卷积神经网络结构示意图

Figure 5　Schematic diagram of convolutional neural network structure

3　即时测速技术

植保机械作业状态参数主要包括前进速度、喷雾压力、喷药流量、喷杆姿态等[30]，植保机作业过程中，作业速度受机手操作和地形等外界因素的影响会随机变化，若喷药压力和流量不可调节则会造成过量喷药等问题。进行作业状态参数的精准感知是解决此问题的首要前提。常用的农机即时速度测量方法主要有多普勒雷达测速法、轮速传感器测速法、卫星测速法。

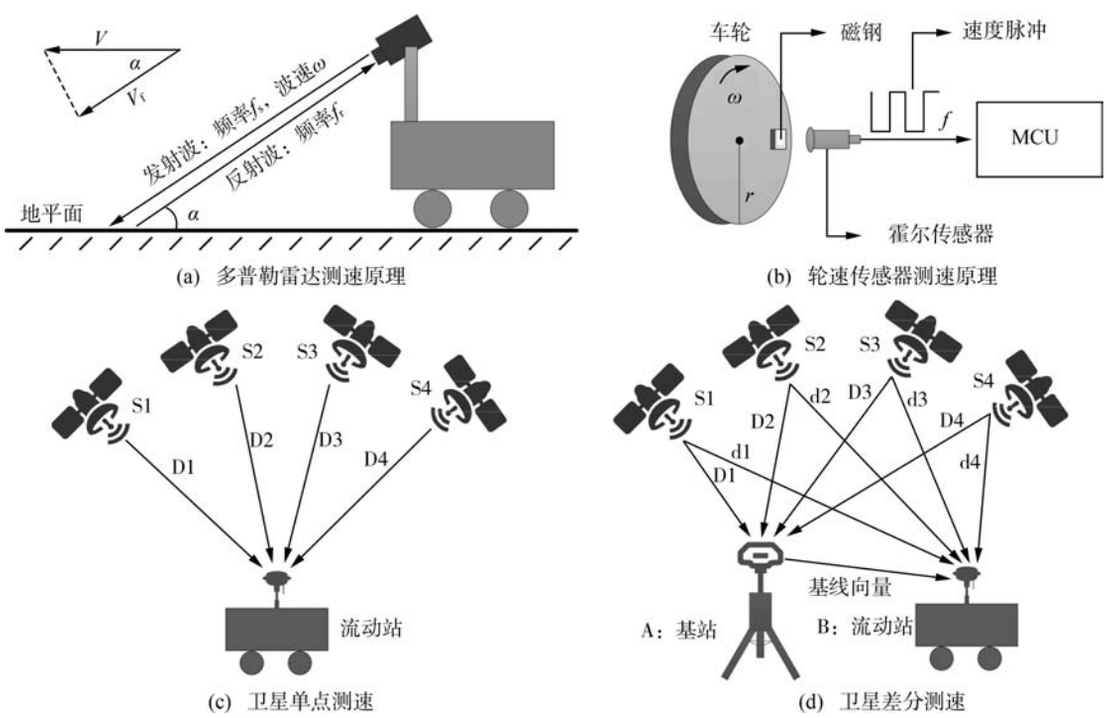


图 6　测速原理图

Figure 6　Speed measurement schematic

针对农业车辆行驶速度慢、精确测速困难的问题，田光兆等[31]在农业田间移动平台上进行了多普勒雷达测速的优化试验，如图 6(a)所示。对 0.1～1 m/s 的常用速度区间进行了 10 个等级划分，判断速度等级自动进行测量分辨率动态自适应调整，并建立可变滑窗灰色预测模型进行下一时刻速度有效性的验证，有效提高了测量精度、降低了系统负荷。车辆前进速度

$$V=\frac{w\times\left(f_r-f_s\right)}{2f_s\times\cos\alpha} \tag{2}$$

式中：w——波速；

f_s——发射波频率；

f_r——反射波频率；

α——雷达波与地平面夹角。

轮速传感器测速方法是通过一定时间内光电编码

器、霍尔传感器输出的脉冲数进行车轮滚动距离计算，进而计算前进速度。此种方法测速准确，但实际作业中易受轮胎打滑影响产生较大测量误差。以霍尔传感器为例测速原理如图6(b)所示，车辆前进速度

$$V=\frac{2\pi rf}{n}(1-\delta) \tag{3}$$

式中：r——车轮半径；

n——磁钢个数；

f——脉冲频率；

δ——车轮滑转率。

卫星测速以经济、快速、可靠的特点在农业机械定位导航中广泛应用，主要分为单站测速和差分测速，基本原理如图6(c)和6(d)所示。单站测速使用一台接收机，通过多普勒观测值直接确定接收机在WGS84坐标中的绝对速度，原理简单但对数学模型精度要求较高；差分测速是使用至少两个接收机同步观测相同的卫星，通过解算两台接收机的相对速度进行测速，但受数传通讯距离的限制难以在大范围空间应用，两种测速方式在静态和低动态条件下具备相同水平的测速精度[32-34]。

孟志军等[35]在拖拉机平台上集成了多普勒雷达、霍尔元件、RTK－GPS、RTD－GPS和单点GPS五种不同测速设备，分别进行了小麦地、翻耕地、未耕地、水泥地4种地表环境下的测速性能对比试验，试验表明GPS测速满足农机精准变量作业的测速需求。

综上来看，基于卫星的测速方法是最为便捷、高效、精准的测速方式，随着北斗卫星及网络RTK定位在农机无人化和远程监管方面的广泛应用，卫星测速的成本更低，且不再受电台通讯距离限制，成为高精度测速的主要方式。

4 变量喷药技术

4.1 变量控制方式

植保机变量喷药控制主要有压力控制方式、流量控制方式和药业浓度控制方式，其中流量控制又包括管路截流控制方式、药泵变频控制方式、变量喷头控制方式和组合喷头控制方式。从系统实现的复杂性、体积大小和成本综合考虑，常用的主要方法是压力控制方式和管路截流式的流量控制方式，管路结构及实现方式如图7所示。

图7(a)所示的压力控制式变量喷药系统正常工作时$q_y=0$，通过改变旁路回流量改变泵压从而改变实时喷药流量，计算公式为

$$q_2=q_1-q_3-q_y=q_t-K_t p_1-KAp_1{}^m \tag{4}$$

图7(b)所示的管路截流式变量喷药实时喷药流量则是通过改变球阀流通面积改变实时喷药量

$$q_2=KA(p_1-p_2)^m \tag{5}$$

式中：q_t——泵的理论输出流量；

K_t——泵的泄漏系数；

K——通流口形状相关系数；

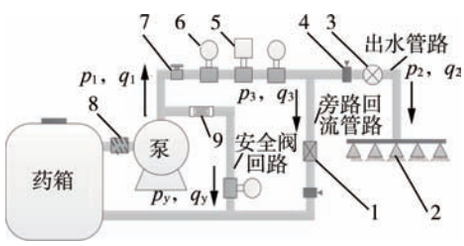
A——电动球阀流通面积；

p_1——球阀入口压力；

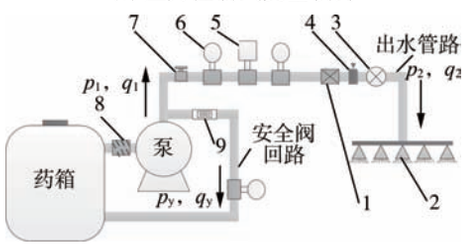
p_2——球阀出口压力；

m——球阀通流口形状指数($m\in[0,1]$)。

GONZALEZ等[36]设计了一种基于压力调节电磁阀开度的喷药流量控制系统，实现变压流量控制。为选择合适的电动球阀安装位置，研究喷药量、喷药压力和电动球阀开启角度的关系，王利霞[37]在保证喷药雾滴效果的前提下，分析电动球阀分别位于旁路回流管路和出水管路时的可调角度范围和单位喷药量，确定安装于旁路回流管路时球阀可调角度范围大，对喷药量的调节作用明显、灵敏度高，如图7(a)所示。范龙[38]则从系统的安全性和喷药的稳定性考虑，采用了图7(b)所示的出水管路截流式流量控制的方式进行变量喷药系统的研究。目前，通过调节回路电磁阀开度进行精准施药控制成为主流方式。



(a) 压力控制式变量喷药



(b) 管路截流式变量喷药

图7 压力控制变量喷药及管路截流式流量控制变量喷药管路结构图

Figure 7 Pressure control variable spraying and pipeline shut down flow control variable spraying pipeline structure diagram

1. 可调电动球阀 2. 喷头 3. 流量传感器 4. 压力传感器 5. 蓄能器 6. 压力表 7. 手动阀 8. 过滤器 9. 安全阀

4.2 流量控制方法

变量控制目标是融合计算或设定的目标施药量、检测的实际施药量和喷药机械前进速度等信息，快速准确地计算并实时调控喷药执行机构的工作参数，达

到变量均匀喷药的目的。主流的控制方法主要有以下几种。

4.2.1　分段控制方法

该控制方法是根据目标喷药量设定电磁阀开度增减动作的阈值，系统运行时根据前进速度进行目标喷药量的实时计算，通过喷药量检测反馈计算喷药量偏差，判断增加电动球阀开度、减小电动球阀开度还是保持开度不变。

翟长远等[39]基于该算法设计了滞环控制模型，如图8所示，分别以目标施药量0.9和1.1倍作为控制模型的内外环边界，通过线性数模电压跟随调节电动球阀开度，实现施药量的在线调控，田间试验误差不超过8%。

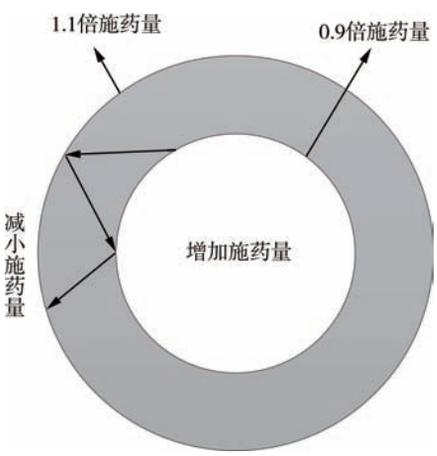


图8　分段控制算法（滞环控制算法）

Figure 8　Segmented control algorithm (hysteresis control algorithm)

4.2.2　脉宽调制控制方法

脉宽调制控制是通过构建可控阀门开度和流量的数学模型，在实际作业中根据目标喷药量动态改变电机脉宽输入从而改变阀门开度达到流量调节的方法。SILVA等[40]设计了基于PWM电磁阀开度控制的可变流量喷雾系统。蒋焕煜等[41]根据喷头的输出压力与输出流量之间的特定关系，建立基于PWM喷药流量模型的变量喷药试验平台，该设计能使喷药流量误差控制在±6%的范围内。

尹东富等[42]采用LWGY－06型涡轮流量传感器和UM系列V型电动比例调节阀搭建了喷药量实时调控系统，设计了融合行驶速度、杂草密度的喷药量模糊控制器，喷药量关系曲线如图9所示，根据车辆行驶速度和检测的杂草分布在线计算喷药量，通过改变PWM输出占空比调节比例阀的开度，从而改变实时喷药量，能够实现9级变量喷药作业，室内试验对靶率为90%。

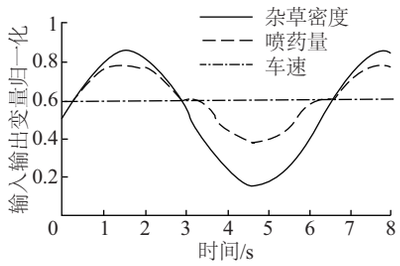


图9　车速、杂草密度及喷药量关系曲线

Figure 9　Vehicle speed, weed density and spraying amount relationship curve

4.2.3　PID控制算法

PID控制算法是控制领域的经典控制算法之一，变量喷药PID控制算法如图10所示，系统根据计算喷药量Q与实际喷药量Q'的偏差量，进行PID实时计算求解电动阀输入控制信号U调节电动阀开度完成喷药控制，PID控制算法如图10所示。

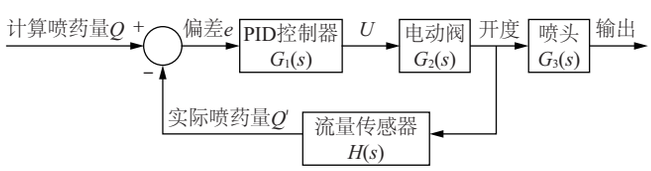


图10　PID控制算法

Figure 10　PID control algorithm

PID控制原理如式(6)。

$$\begin{cases} U_k = U_{k-1} + \Delta U(t) \\ \Delta U(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=1}^{t} e(j) \\ \qquad\qquad + K_d [\, e(t) - e(t-1) \,] \end{cases} \tag{6}$$

式中：U_k——PID控制器的计算输出量；

U_{k-1}——PID控制器前一次的控制输出量；

$\Delta U(t)$——PID控制器两次输出量的调整值；

K_p、K_i、K_d——PID控制器的比例、积分、微分系数；

$e(t)$——计算喷药量Q与实际喷药量Q'的偏差量。

PID控制的K_p、K_i、K_d 3个参数一般通过经验参数、软件仿真加试验分析的方法进行确定。李为[43]、蔡有杰等[44]基于PID控制算法设计仿真并研制了变量喷药控制系统；为解决传统PID控制参数整定复杂、控制经验性强等不足，王新东等[45]基于灰狼优化算法的PID控制算法设计了变量喷药系统，改善了传统PID的响应速度和控制精度。

精准喷药系统为一个有较大滞后性的非线性时变系统，喷药量随田间杂草密度、病虫害分布无规律随机波动，精确的数学模型建立较为困难，模糊控制算法得到了广泛应用。邵陆寿等[46]为实现喷药量和喷药浓度

在线可调控制,采用两个泵分别控制进水、进药,将田间作物密度、虫害等级、进水量、进药量进行了模糊等级划分,通过Simulink进行了模型仿真结果与专家经验一致。

为改善PID控制中动态品质和稳态精度调控矛盾的问题,宋乐鹏[47]等提出了变论域自适应模糊PID控制方法,兼具了模糊控制灵活适应性强和PID控制精度高的优点。控制模型如图11所示,大误差($|e|\geqslant e_0$)时选择开关选择Fuzzy1模糊控制器,小误差时则选择模糊PID控制器由Fuzzy2进行PID参数的在线整定,改善PID控制性能,模糊PID控制算法原理如图11所示。

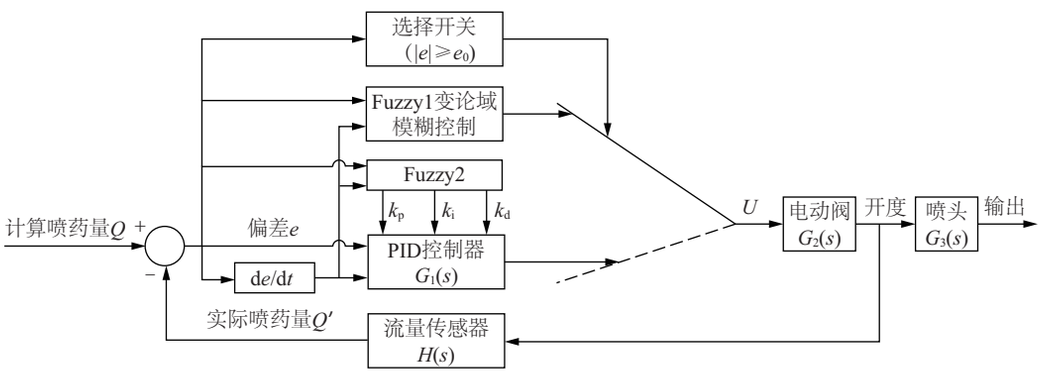


图11 模糊PID控制算法

Figure 11 Fuzzy PID control algorithm

滞环控制虽然实现较为简单,但作为非线性控制方法,控制动作不够连续、控制精度受喷药系统压力波动的稳定性和电动球阀的动作性能影响较大、鲁棒性较差,因此,该方法存在很大缺陷。基于脉宽调制控制方法通过改变脉冲宽度或频率改变输出电压或电流,灵活性强;同时,输出电压或电流的纹波较小,从而可以实现较高精度的电磁阀开度控制;此外,该方法抗干扰能力强,可以适用于恶劣的田间环境,因此该方法也是植保喷药流量控制中普遍采用的控制方法,但对作物、农业、环境等综合因素的适用性欠缺。PID调控能够根据系统误差进行实时补偿,响应速度比脉宽调控更快,而且通过调整比例、积分、微分参数,能够根据作物、农药、田间环境等综合因素灵活地实现高精度喷洒控制,具备更好的适应性和系统稳定性。

5 存在问题及展望

精准施药技术的核心在于实时监测作物病虫害状况,并根据监测结果调整农药施用量和施药时间。从国内外智能植保机械的发展现状来看,我国植保机械的智能化水平显著提升,智能识别、精准施药技术已逐步开始示范推广,但仍然存在较多问题,主要概况如下。

1)植保处方大多都是人工采样或通过遥感的方式提前进行病虫草害的识别,借助第三方软件融合GIS数据离线制定植保处方图,再将作业处方图通过U盘或SD卡的方式导入智能植保机械的控制系统进行解译,从而实现依据处方的植保作业,该过程周期长、操作繁琐、植保的实时性差。

2)大田场景中的作物病害、虫害、草害种类繁杂,而且有些特征并不明显难以识别,此外,当前基于机器视觉的杂草识别普遍采用机器学习、特征识别的技术方法,技术成本及病虫草害识别的准确率、识别速度成为对靶施药的主要制约因素。

3)植保作业中常需要人工驾驶或操作植保机械进行高强度作业,用工量大且农药的漂移、挥发会对作业人员带来直接或间接健康危害。

未来,随着传感器、遥感技术和大数据分析等技术的发展,精准监测能力不断提高,植保机械的发展主要致力于高效、精准、安全、省工的新技术研发与应用,主要体现在以下3个方面。

1)在处方喷药领域,基于在线感知、在线决策的处方喷药技术将极大简化处方构建及解译过程,决策系统和作业装备深度融合,通过标准的通讯规约实现快速下发,为植保提供实时、精准的决策支持,实现高效智能化精准施药。

2)随着卷积神经网络等AI人工智能技术的高速发展,高性能人工智能硬件的成本将呈下降趋势,基于轻量化网络模型的病虫草害在线识别的准确度和识别速度将不断提升,对靶喷药将成为精准喷药的重要方式,极大地减少农药使用、降低环境危害。

3)随着导航自动驾驶、无人机等新技术在农业领域的广泛应用,地面植保机器人、无人植保飞机逐渐成为植保的主要形式,目前,大田地面植保机器人已经能够实现基于路径规划的自动驾驶、自主喷药,随着雷达、视觉导航等技术的不断成熟,未来在果园、林地等卫星信号难以覆盖的区域也将实现机器人植保作业,

并将具备一定的自动避障、安全应急处理能力。同时，随着多机协同技术的发展，面向大尺度植保场景的多机器人协同植保作业将成为进一步解放劳动力、提高植保作业效能的重要方向。

综上所述，地面植保机械精准施药技术的发展趋势表现为：精准喷药技术的不断提升、智能化控制系统的普及、植保机器人的广泛应用，在未来，精准施药技术将更好地服务于农业生产，实现优质、高产、环保的植保作业目标。

参 考 文 献

[1] 王海光. 智慧植保及其发展建议[J]. 中国农业大学学报，2022，27(10)：1－21.
WANG Haiguang. Smart phytoprotection and suggestions for its development [J]. Journal of China Agricultural University，2022，27(10)：1－21.

[2] 冯耀宁，裴亮，陈晓，等. 变量施药关键技术综述[J]. 中国农机化学报，2021，42(12)：65－71.
FENG Yaoning，PEI Liang，CHEN Xiao，et al. Summary of the key technology of variable rate application [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42 (12)：65－71.

[3] 杨学军，严荷荣，徐赛章. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报，2002，33(6)：129－131.
YANG Xuejun，YAN Herong，XU Saizhang. The current situation and development trend of equipment for crop protection in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2002，33(6)：129－131.

[4] 杜娟，于明群，陈艳普，等. 高地隙植保机速度自动控制系统研制[J]. 中国农业大学学报，2019，24(12)：104－110.
DU Juan，YU Mingqun，CHEN Yanpu，et al. Development of an automatic speed control system for high-clearance sprayer [J]. Journal of China Agricultural University，2019，24(12)：104－110.

[5] 刘丰乐，张晓辉，马伟伟，等. 国外大型植保机械及施药技术发展现状[J]. 农机化研究，2010(3)：246－248.
LIU Fengle，ZHANG Xiaohui，MA Weiwei，et al. Current development status of foreign big-scale protection machinery and application technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2010 (3)：246－248.

[6] 王卫国. 德国的植保机械和植保机械的管理[J]. 植保技术与推广，1998(4)：45－46，8.

[7] 耿爱军，李法德，李陆星. 国内外植保机械及植保技术研究现状[J]. 农机化研究，2007(4)：189－191.
GENG Aijun，LI Fade，LI Luxing. The plant protection machinery and technology at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2007 (4)：189－191.

[8] AITKENHEAD M J，DALGETTY I A，MULLINS C E，et al. Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2003(3)：157－171.

[9] FELIZARDO K R，MERCALDI H V，CRUBINEL P E，et al. Modeling and model validation of chemical injection sprayer system [J]. Applied Engineering in Agriculture，2016，32(3)：285－297.

[10] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报，2022，49(1)：389－397.
HE Xiongkui. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China：A review [J]. Journal of Plant Protection，2022，49 (1)：389－397.

[11] 贾卫东，张磊江，燕明德，等. 喷杆喷雾机研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报，2013，34(4)：19－22.
JIA Weidong，ZHANG Leijiang，YAN Mingde，et al. Current situation and development trend of boom sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2013，34 (4)：19－22.

[12] 郑文钟，应霞芳. 我国植保机械和施药技术的现状、问题及对策[J]. 农机化研究，2008(5)：219－221.
ZHENG Wenzhong，YING Xiafang. Study on actuality and problems with measure of plant protection machinery and spray techniques of agricultural chemicals in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2008(5)：219－221.

[13] 冯耀宁，裴亮，李晔，等. 自走式喷杆喷雾机行业现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报，2019，40(6)：56－59，66.
FENG Yaoning，PEI Liang，LI Ye，et al. Industry status and development trend of self-propelled boom spray [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40 (6)：56－59，66.

[14] 工业和信息化部装备工业司.《中国制造2025》规划系列解读之农业机械装备领域[J]. 现代农业装备，2015(3)：7－8.

[15] LUCK J D，PITLA S K，SHEARER S A，et al. Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2010，70(1)：19－26.

[16] NORDMEYER H. Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals [J]. Precision Agriculture，2006，7：219－231.

[17] 尹东富，陈树人，裴文超，等. 基于处方图的室内变量喷药除草系统设计[J]. 农业工程学报，2011，27(4)：131－135.

YIN Dongfu, CHEN Shuren, PEI Wenchao, et al. Design of map-based indoor variable weed spraying system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 131－135.

[18] 王利霞, 张书慧, 马成林, 等. 基于ARM的变量喷药控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 113－118.
WANG Lixia, ZHANG Shuhui, MA Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 113－118.

[19] 陈志刚, 陈梦溪, 魏新华, 等. 基于北斗定位的农田变量处方施药喷雾系统[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 965－970.
CHEN Zhigang, CHEN Mengxi, WEI Xinhua, et al. Variable prescription pesticide spraying system for farmland based on the Beidou navigation satellite system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(11): 965－970.

[20] SABZI S, ABBASPOUR-GILANDEH Y, ARRIBAS J I. An automatic visible-range video weed detection, segmentation and classification prototype in potato field [J]. Heliyon, 2020, 6(5): e03685.

[21] PARTEL V, CHARAN KAKARLA S, AMPATZIDIS Y. Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 339－350.

[22] 袁佐云, 毛志怀, 魏青. 基于计算机视觉的作物行定位技术[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(3): 69－72.
YUAN Zuoyun, MAO Zhihuai, WEI Qing. Orientation technique of crop rows based on computer vision [J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(3): 69－72.

[23] 黄华盛. 基于无人机遥感图像的稻田杂草识别研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2022.
HUANG Huasheng. The research on weed recognition in rice fields using UAV remote sensing imagery [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2022.

[24] 付豪, 赵学观, 翟长远, 等. 基于深度学习的杂草识别方法研究进展[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 198－207.
FU Hao, ZHAO Xueguan, ZHAI Changyuan, et al. Research progress on weed recognition method based on deep learning technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 198－207.

[25] 彭明霞, 夏俊芳, 彭辉. 融合FPN的Faster R－CNN复杂背景下棉田杂草高效识别方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 202－209.
PENG Mingxia, XIA Junfang, PENG Hui. Efficient recognition of cotton and weed in field based on Faster R－CNN by integrating FPN [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 202－209.

[26] 王国伟, 刘嘉欣. 基于卷积神经网络的玉米病害识别方法研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2021, 2(1): 64－70.
WANG Guowei, LIU Jiaxin. Research on corn disease recognition method based on convolutional neural network [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2021, 2(1): 64－70.

[27] 惠巧娟, 马伟, 边超. 融合强化注意力机制的农田杂草识别方法[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(4): 195－201.
HUI Qiaojuan, MA Wei, BIAN Chao. Agricultural weeds recognition method based on enhanced attention mechanism [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 195－201.

[28] 马盼, 杨子恒, 万虎, 等. 基于YOLOv8网络的棉蚜图像识别算法及软件系统设计[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 42－49.
MA Pan, YANG Ziheng, WAN Hu, et al. A new cotton aphid image recognition algorithm and software based on YOLOv8 [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 42－49.

[29] 毛文华, 张银桥, 王辉, 等. 杂草信息实时获取技术与设备研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 190－195.
MAO Wenhua, ZHANG Yinqiao, WANG Hui, et al. Advance techniques and equipments for real-time weed detection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 190－195.

[30] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1－18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1－18.

[31] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 低速智能农业车辆多分辨率自适应测速系统设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 159－164.
TIAN Guangzhao, AN Qiu, JI Changying, et al. Design of multiresolution adaptive speed measurement system for low-speed intelligent agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 159－164.

[32] 李乐乐, 贺凯飞, 王振杰, 等. GPS实时单站测速和相对测速的误差比较与精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1063－1069.
LI Lele, HE Kaifei, WANG Zhenjie, et al. Error comparison and accuracy analysis between stand-alone

and relative velocity determination using GPS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1063－1069.

[33] 王潜心. 机载GPS动态定位定速与定姿理论研究及软件开发[D]. 长沙：中南大学, 2011.
WANG Qianxin. Research of airborne GPS kinematic position velocity and attitude determination and software development [D]. Changsha: Central South University, 2011.

[34] 何海波, 杨元喜, 孙中苗. 几种GPS测速方法的比较分析[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 217－221.
HE Haibo, YANG Yuanxi, SUN Zhongmiao. A comparison of several approaches for velocity determination with GPS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(3): 217－221.

[35] 孟志军, 刘卉, 付卫强, 等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141－145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 141－145.

[36] GONZALEZ R, PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ C, et al. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2012, 10(4): 939－949.

[37] 王利霞. 基于处方图的变量喷药系统研究[D]. 长春：吉林大学, 2010.
WANG Lixia. Variable-rate spraying system based on the prescription map [D]. Changchun: Jilin University, 2010.

[38] 范龙. 变喷杆式喷雾机可变喷量施药控制系统研究[D]. 南京：南京林业大学, 2016.
FAN Long. Research on variable rate spraying control system for boom-transformable sprayer [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.

[39] 翟长远, 朱瑞祥, 随顺涛, 等. 车载式变量施药机控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 105－109.
ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, SUI Shuntao, et al. Design and experiment of control system of variable pesticide application machine hauled by tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 105－109.

[40] SILVA J E, ZHU H P, CUNHA J P A R D. Spray outputs from a variable-rate sprayer manipulated with PWM solenoid valves [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(3): 527－534.

[41] 蒋焕煜, 周鸣川, 童俊华. 卡尔曼滤波PWM变量喷雾控制研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 60－65.
JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, TONG Junhua. Design and experiment of rotary converter of liquid fertilizer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 60－65.

[42] 尹东富, 陈树人, 毛罕平, 等. 基于模糊控制的棉田变量对靶喷药除草系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 179－183.
YIN Dongfu, CHEN Shuren, MAO Hanping, et al. Weed control system for variable target spraying based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 179－183.

[43] 李为. 果园对吧施药控制系统设计[D]. 咸阳：西北农林科技大学, 2014.
LI Wei. Design of target pesticide application control system in the orchard [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2014.

[44] 蔡有杰, 吴志东, 高诗博, 等. 基于PID控制的变量式喷药系统设计与仿真[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 97－100.
CAI Youjie, WU Zhidong, GAO Shibo, et al. Design and simulation of variable injection system based on PID control [J]. Journal of Grain and Oils, 2020, 33(2): 97－100.

[45] 王新东, 徐艳蕾, 张奇, 等. 基于灰狼优化PID控制的变量喷药系统研究[J]. 农机化研究, 2020(5): 114－119.
WANG Xindong, XU Yanlei, ZHANG Qi, et al. Research on variable spraying system based on grey wolf optimized PID control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020(5): 114－119.

[46] 邵陆寿, 戴之祥, 崔怀雷, 等. 基于模糊控制的变量施药控制系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 110－112.
SHAO Lushou, DAI Zhixiang, CUI Huailei, et al. Study on a pesticide system spraying with changeable quantity based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 110－112.

[47] 宋乐鹏, 董志明, 向李娟, 等. 变量喷雾流量阀的变论域自适应模糊PID控制[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 114－118.
SONG Lepeng, DONG Zhiming, XIANG Lijuan, et al. Variable universe adaptive fuzzy PID control of spray flow valve [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 114－118.

Research status and trends of intelligent technology in plant protection machinery

LIU Zheng[1], JIN Chengqian[1, 2*], FENG Yugang[1], YANG Tengxiang[1]

(1. *Nanjing Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*; 2. *College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo* 255049, *China*)

Abstract: Intelligent plant protection machinery in large fields is an important means to improve pesticide utilization, enhance the quality of agricultural products, and ensure the sustainable development of agriculture. In order to understand the research status of intelligent plant protection technology and clarify the future development direction, this article focused on three main directions of intelligent operation of high-clearance plant protection machinery: prescription application in large-scale farmland, target spraying on a small scale in land parcels, and variable-speed spraying. From the aspects of perception, analysis, decision-making, and control, the article elaborates on the technical principles of prescription map construction, spatial coordinate transformation methods, and prescription recognition that integrate high-precision satellite positioning, the current level of key technologies for target spraying technology routes and weed recognition, and believed that high-precision spraying based on online prescriptions must be the focus of future research. The article carried out a comparative analysis of the advantages and disadvantages of four speed measurement modes for variable-speed spraying and believed that with the widespread application of satellite positioning in agricultural machinery, satellite-based speed measurement will become the main method of high-precision speed measurement due to its greater versatility, convenience, and accuracy. To explore the current development status of variable spraying control, the article summarized two control methods and implementation methods for pressure-controlled variable spraying. From a comprehensive perspective, pipeline cut-off flow control is the main way to achieve variable spraying, and three control algorithms of segmented control, pulse width modulation, and PID control of flow control were analyzed from the perspective of technical principles, implementation processes, and optimized applications. After the discussion, it is believed that PID control based on machine learning will be an important direction to improve traffic control performance. With the continuous development of artificial intelligence technology, plant protection robots that integrate intelligent perception, analysis and decision-making and autonomous operation capabilities will become the mainstream development direction of plant protection machinery in the future.

Keywords: plant protection machinery; prescription spraying; weed identification; target spraying; variable spraying; plant protection robot