

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009

变量喷雾技术研究进展分析*

邱白晶¹ 闫润^{1,2} 马靖¹ 管贤平¹ 欧鸣雄¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 江苏农林职业技术学院机电工程系, 句容 212400)

摘要: 变量喷雾是精准施药的重要方式之一。近 10 年来,变量喷雾在技术发展和应用方面均取得了重要进展。本文从变量喷雾的探测技术、控制技术及系统集成三方面,对现有研究成果进行综合性评述。在作物形貌和密度的探测技术上,重点讨论了超声波用于作物形貌探测的方法,给出了误差分析,比较了超声波技术和激光技术用于作物形貌探测时的特点,强调了 LIDAR 用于树木结构和冠层探测的优势以及提取叶面积指数表征作物密度的优势。在作物病虫害的探测方面,总结了自组织映射(SOM)、人工神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)等信息解析技术用于探测作物病虫害的特点,强调病虫害的探测应结合农作物栽培和管理特点。在变量喷雾伺服系统方面,归纳了现有变量喷头及其控制技术,强调用控制技术提升低成本器件和装备的使用性能。最后,对变量喷雾系统集成进行了总结,指出了变量喷雾技术进一步发展的方向。

关键词: 变量 喷雾机 作物形貌 LIDAR PWM

中图分类号: S49; N39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0059-14

Research Progress Analysis of Variable Rate Sprayer Technology

Qiu Baijing¹ Yan Run^{1,2} Ma Jing¹ Guan Xianping¹ Ou Mingxiong¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China)

Abstract: Variable spray is one of the important ways for precision applying pesticide. In the past decade, great progress has been made in the technology and applications of variable spray. A comprehensive review of current research was presented in following categories: detection technology of variable spray system, control technology of variable spray system, and integration of spraying system. On the detection of crop morphology and density, ultrasonic method for detecting crop morphology was discussed and the error analysis of ultrasonic detection of crop morphology was carried out, the characteristics of ultrasonic technology and laser technology used in crop morphology detection were compared, and the advantages of LIDAR (Laser imaging detection and ranging) used for the detection of structural characteristics and canopy of trees and the superiority of LAI (Leaf area index) introduced to characterize the crop density were specially emphasized. On the detection of crop diseases, insect pests and weed, and the features of some information analysis techniques such as SOM (Self-organizing maps), ANN (Artificial neural networks) and SVM (Support vector machines) etc. used for detecting crop diseases, insect pests and weed were summarized. A point was emphasized that the characteristics of crop cultivation and management should be combined with the detection of crop diseases, insect pests and weed. In terms of variable spray servo system, the existing variable nozzle and its control technology was generalized, and using the control technology to improve the performance of low-cost devices and equipments was highlighted. Finally, the integration of spraying systems was also summarized and the development direction of the variable spray technology was pointed out.

Key words: Variables rate Sprayer Crop morphology LIDAR PWM

收稿日期: 2014-08-08 修回日期: 2014-09-18

* 国家自然科学基金资助项目(31271620)、国家公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201203025-04)、国家农业科技成果转化资金资助项目(2012GB2C100154)、江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA470007)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2014]37号)和江苏省普通高校毕业生科研创新计划资助项目(CXLX13_678、XZZ11-0582)

作者简介: 邱白晶,教授,博士生导师,主要从事植保机械领域研究,E-mail: qbj@ujs.edu.cn

引言

变量喷雾是实现精准施药的一种重要技术方式。它通过获取作物的病虫害、形貌和密度等喷雾对象信息,以及喷雾机位置、速度和喷雾压力等机器状态信息,对喷雾对象按需施药。目前,国际上对变量喷雾在提高农药利用率、减少农药残留和降低环境风险等方面的前景和潜力已形成共识。美国、西欧等发达国家已经在变量喷雾技术及其系统集成上取得了重要进展,我国也开展了相应的探索性研究。本文拟从作物形貌、密度和病虫害等喷雾对象的探测识别技术,压力调流、变量喷头调流和PWM控制调流等变量喷雾伺服技术,以及变量喷雾系统集成和评价等方面展开评述。

1 作物形貌的探测技术

果树喷雾是苗圃和果园普遍采用的有效植保方式。苗圃和果园的喷雾对象是树木,其与喷雾密切相关的典型形态特征有:树冠结构和密度的分散性较大;树和树之间、树木的行与行之间存在空隙区,而且这种空隙区通常不是均布的。这种树木形态的特征意味着:如果采用连续均匀喷雾方式,就必然会有很多农药被喷在树间空隙区,不仅浪费农药,而且增加了环境污染。因此在果树喷雾领域较早地提出了对靶喷雾的概念,即当喷头对着树时才开启,对着树间空隙区时就关闭。

Moltó 等^[1]发展了一种三态对靶喷雾系统,系统结构如图1。其技术核心为利用两个超声波传感器建立对靶探测系统,采用了满喷、半喷和不喷的三态喷雾控制策略。就是当喷头对着树冠中心A区时采用满喷量,当喷头对着树冠边缘B区时半雾量,当喷头对着树间空白区C区时零喷量。Moltó 等的

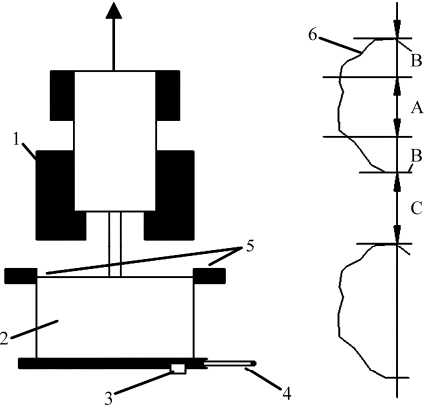


图1 三态对靶喷雾系统结构图

Fig. 1 Structure of tri-state target spray system

1. 拖拉机 2. 药箱 3. 喷杆运动电动机 4. 垂直喷杆及喷头
5. 超声波传感器 6. 树

实验揭示出这种三态对靶喷雾系统比连续均匀喷雾系统节省农药 37%。Moltó 等的这项研究工作在国际上有广泛影响。

对靶喷雾的新近发展是对“靶”的解释进行了拓展,引入了作物形貌和作物密度的概念。Tumbo 等^[2]较早地进行了基于超声探测作物形貌的实验研究,其实验方案可用图2来描述。

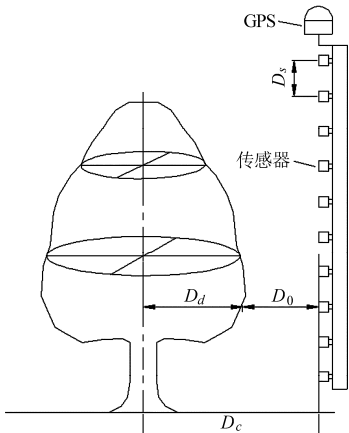


图2 超声波测量树冠体积示意图

Fig. 2 Canopy volume schematic of ultrasonic measurement

图2中, D_s 为垂直方向上均布传感器的间距, D_d 为由树冠中心线到外圆之间的距离, D_c 为传感器到树冠中心线的距离, D_0 为超声波传感器测得的传感器到树冠外缘的距离。在实际测量过程中,由于果树成行栽培,机器前进方向选择与果树栽培行线平行,因此 D_c 是不变的,从而在测得 D_c 后,由 D_c 减去 D_0 就可以确定 D_d 。Zaman 等^[3]给出了由超声测量信号计算树冠体积的原始公式

$$U = \sum_1^n \frac{SD_d D_s}{S_r} \tag{1}$$

式中 U ——由超声测量信号计算的单边树冠体积
 S ——机器前进速度
 S_r ——超声波传感器的采样频率
 n ——超声波传感器对单棵树的采样个数

但 Zaman 等^[3]并未给出式(1)的细致解释。实际上式(1)就是把树冠的连续体积用离散化来表示,本文用图3说明。

图3中,由 D_d 和 D_s 所对应的断面为矩形AOCB,当机器速度为 v 时,经过 Δt 时间该断面所前进的距离为 $v\Delta t$,因此在 Δt 时间内该断面扫过的区域所对应的体积为

$$U = D_d D_s v \Delta t \tag{2}$$

式(1)相当于式(2)中 Δt 取为超声波传感器采样周期时的特例,这是因为采样周期 Δt 是采样频率 S_r 的倒数。式(2)中的 v 就是式(1)中的 S 。

Zaman 等^[3]选择佛罗里达州艾尔弗雷德湖柑橘

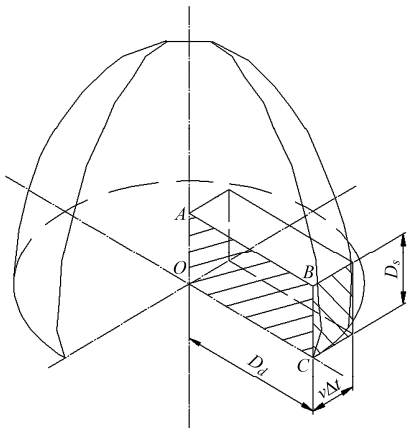


图 3 树冠体积离散化的模型
Fig. 3 Crown volume discrete model

研究教育中心的 10 年树龄柑橘树,利用公式(1)对树冠体积进行了超声波测量。参数配置为:垂直方向上均布超声波传感器个数为 10 个,传感器采样频率为 5.1 Hz,传感器到树冠中心线距离 D_c 为 3 m,在机器前进速度分别为 1.6、3.4、4.7 km/h 的情况下测量树冠体积。Zaman 等^[2]将树冠体积的超声波测量值与手工测量值进行统计对比,得出结论:在 95% 的置信水平下,超声波测量与手工测量的偏差

范围为 $-17.37\% \sim 28.71\%$ 。

关于超声波传感器测量树冠体积的工作有学者在持续开展。Llorens 等^[4]采用超声波传感器测量葡萄树树冠体积,针对葡萄园变量施药给出的超声波传感器安装于喷雾机上的方案如图 4a。图 4b 是对应的用于超声波传感器测量树木体积的体积模型分区方法。

采用超声波传感器测量树冠体积时,制约其精度提升的主要因素可由图 3 定性地给出。超声波传感器测量所计算的体积与图中立方体 3 个方向上的尺度 D_s 、 D_d 、 $v\Delta t$ 相关联。 D_s 越小,则垂直方向的离散与连续的相关度越高,这势必会增加传感器个数。 D_d 是由超声波传感器测距换算所得,其误差直接由传感器的精度决定。 $v\Delta t$ 既与机器的行走速度波动相关,也与超声波传感器的采样周期 Δt 相关。 Δt 越小,有助于机器前进方向的精度,但这直接导致了超声波采样频率的提高。因此要提高超声波测量树冠体积的精度,需要较小的 D_s 、较高的超声波传感器采样频率、稳定的超声测距精度和稳定的机器行驶速度。

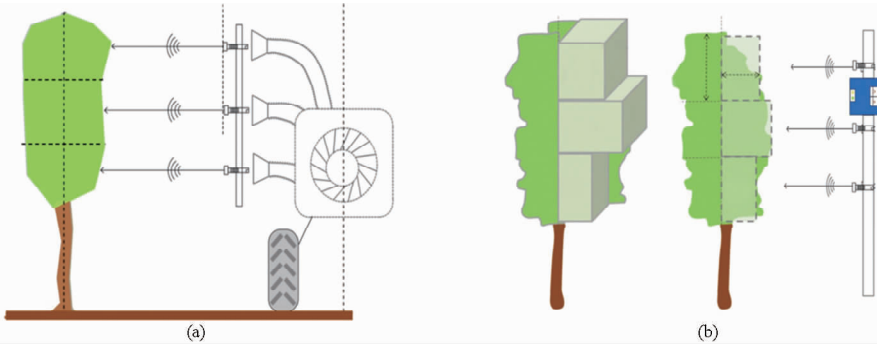


图 4 超声波测量葡萄树冠体积示意图
Fig. 4 Grape canopy volume schematic of ultrasonic measurement
(a) 超声波传感器安装结构图 (b) 体积模型分区方法

事实上,上述用超声波传感器测量树冠体积的方式本质上是通过测距来推算体积,因此,其他测距传感器也可以借用这一方法。例如采用激光传感器测距就有可能得到更高的精度。如果同样布置多个激光传感器,成本会大大增加,因此利用激光传感器测量树冠体积时,技术发展道路并不同于超声的技术发展道路,体现在技术方案上就是没有采用图 2 所示布置多个传感器的方案,而是发展利用单个激光传感器扫描的方法。这方面新近发展的技术是光探测激光搜索技术(Light detection and ranging, LIDAR)。

Pfeifer 等^[5]和 Rosell 等^[6-7]分别利用激光和 LIDAR 进行了树冠探测,不仅获得了传感器与测量目标之间的距离信息,同时还获得了测量目标的 3D

云点图信息,通过 3D 云点图快速算法可以进一步得到测量目标的几何细节。Zande 等^[8]采用 LIDAR 给出了树木生长空间的细节描述。Kise 等^[9]进行了单个激光传感器扫描法的误差评估研究,比较了从 3D 场获得的基于 90 点的作物高度与实际手工测量的作物高度,发现均方根误差为 0.04 m,最大误差为 0.09 m。

近年来苗圃及人工观赏树木的种植需求增大,专门针对苗圃的作物形貌探测技术研究也随之展开。美国农业部农业应用中心(USDA-ARS)朱和平等^[10-15]选择美国量大面广的葡萄苗圃以及各类观赏苗圃,进行了苗木的超声波探测和激光探测的研究。

国内在作物形貌探测方面也展开了研究,翟长

远等^[16]采用 Honeywell 公司生产的 946 - A4V - 2D - 2C0 - 175E 型超声波测距传感器开发了一种树型喷洒靶标外形轮廓探测实验平台,并以自制规则树树冠和花期樱桃树树冠进行对比实验,树冠体积探测精度分别为 92.8% 和 90.0%。

2 作物密度的探测技术

基于变量喷雾的需求,早期的研究思想是对靶喷雾,因此强调作物形貌的探测,随着研究的深入,发现仅考虑作物的形貌无法全面反映喷雾的对象。例如,树冠体积相同条件时,树叶密度对喷雾效果也有影响。因此很多学者对作物的密度开展了研究,各种表征作物密度的指标也随之被提出。

Zande 等^[8]采用 LIDAR 探测树冠结构,给出了叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 的计算公式。

德国倍加福公司 (Pepper l + Fuchs) 开发了一种 UC 2000 - 30GMIU - V1 型超声波传感器,该传感器采用单头信号接收与发射系统,如图 5。对于超声波传感器而言,都有一个最小探测距离,在这个最小探测距离里,超声波传感器不可用,UC 2000 - 30GMIU - V1 型超声波传感器最小探测距离是 200 mm。另一方面,传感器的最大探测距离受制于超声波功率,UC 2000 - 30GMIU - V1 型的最大探测距离是 2 000 mm。因此,UC 2000 - 30GMIU - V1 型的有效探测距离是 200 ~ 2 000 mm。此外,传感器的检测范围还受到目标物表面特性和入射角度的影响,因此这种传感器设置了灵敏度调节,通过调节灵敏度可以在一定程度上补偿目标物特性的影响。Scotford 等^[17]采用 UC 2000 - 30GMIU - V1 型超声波传感器估算了冬小麦分蘖密度和叶面积指数 LAI。为了考核以密度指标指导化学剂投放的实用效果,Scotford 等进行了 2 年实验测试,得出结论:面向农业化学剂投放的变量作业,利用超声波传感器获取作物分蘖密度和叶面积指数可以直接用于确定杀菌剂、生长调节剂等用量。

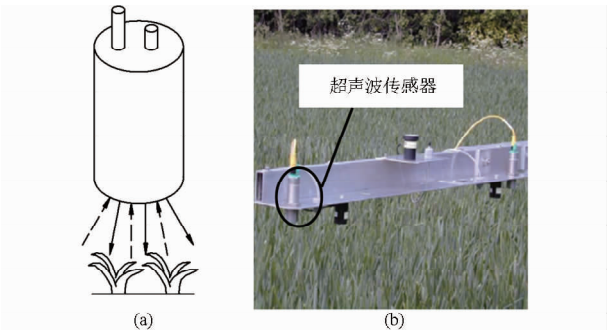


图 5 超声波传感器探测原理及装置
Fig.5 Principle and devices of ultrasonic sensors detect
(a) 探测原理图 (b) 探测装置

Palacín 等^[18]使用激光扫描 (Laser scanner) 进行树木及树叶表面估算,得到结论:尽管树干极易引起瞬时相关误差,但树木外轮廓与树叶表面积可用线性关系建模,平均误差小于 6%。

上述 LIDAR、超声、激光 3 种方法本质上均是波谱方法。与波谱方法不同,德国 CLAAS 公司发展了一种利用机械摆原理的叶面积指数探测仪,并命名为 CROP-Meter。Ehlert 等^[19-20]利用 CROP-Meter 对自然条件下不同生长阶段的冬小麦、冬黑麦、草坪、水稻等进行了探测,发现作物密度与摆角测量的相关系数达到 0.89,标准误差为 9.6%。为了检验实时探测效果,Dammer 等^[21]应用 CROP-Meter 实时探测了谷类作物叶面积指数,并与手持式叶面积指数测量仪 LAI 2000 的测量结果进行对比,结论是:田间变量喷雾时,CROP-Meter 可作为叶面积指数实时探测装备。

3 作物病虫害的探测技术

从对地遥感技术研究开始,农业遥感就一直是星载和机载遥感的重要应用领域。星载和机载遥感获得的病虫害信息均为大尺度信息,主要用于大范围的管理决策,而不是针对田间的实时变量喷雾。近 10 年来,基于田间实时变量喷雾的需要,田间病虫害现场探测技术和信号解析方法取得了较大发展。

Moshou 等^[22]采用 CCD 相机和光谱仪组合获取小麦感染条锈病信息,研究了自组织映射 SOM (Self-organizing maps)、人工神经网络 ANN (Artificial neural networks) 以及二次判别分析 QDA (Quadratic discriminant analysis) 等用于光谱和图像信息解析,进而分类判别小麦病害的方法。图 6a 给出典型小麦条锈病图像,图 6b、6c、6d 给出了变量相关性的 3 种典型状态。图中变量值是指光谱特征波段的光谱信息值,而特征波段的选择则是由自组织映射 SOM 对光谱样本训练所得。Dimitrios Moshou 等由实验获得用于判别健康样本和病害样本的 4 个特征波段,按相关度由高到低排序为 543、861、630、750 nm,这 4 个特征波段所对应的光谱信号值依次记为变量 1、变量 2、变量 3、变量 4。图 6c 反映出变量 1 与变量 3 呈现正相关性,图 6d 反映出变量 1 与变量 4 呈现负相关性,而图 6b 看不出变量 1 与变量 2 的散点分布有确切规律,表现为不相关。由于统计上可把散点图中确切的相关性视为随机结构中隐藏的确定性结构,并可解释为变量间存在必然的关系,据此,Dimitrios Moshou 等对 4 个变量所有两两关系进行了仔细的相关性检验,发现正相关代表健

康样本,负相关代表病害样本,判别的准确度大于 95%。

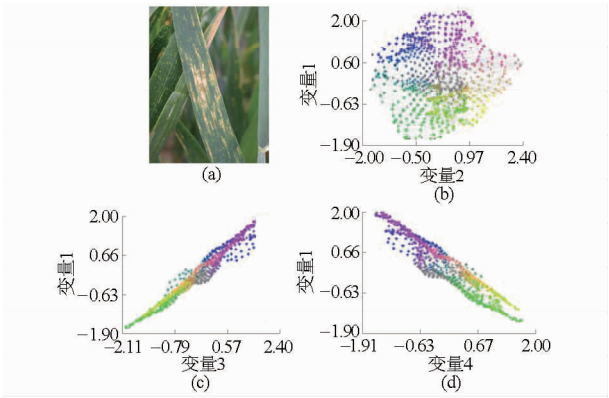


图 6 小麦条锈病图像和样本光谱变量的散点图

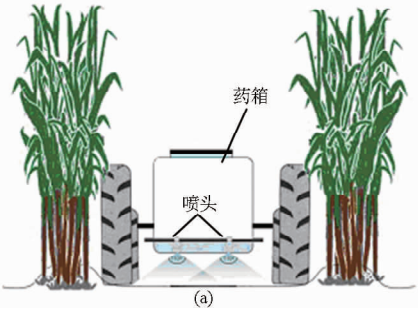
Fig. 6 Scatter wheat stripe rust images and sample spectra variables

(a) 小麦条锈病图像 (b) 无相关图
(c) 正相关图 (d) 负相关图

Yang 等^[23]针对棉花根腐病采用主成分分析和迭代自组织数据分析技术 ISODATA (Iterative self-organizing data analysis) 处理多光谱和高光谱成像信息,比较了两种光谱成像技术探测棉花根腐病的能力。其结果表明:就一般的区分根腐病发生范围而言,多光谱成像和高光谱成像在探测精度上的差异性不显著,但高光谱因为波段多,在早期病害探测方面具有潜在优势。

Römer 等^[24]研究了荧光光谱探测小麦叶锈病的能力。光谱范围 370 ~ 800 nm,步长 2 nm,分别选择 36 个正常小麦叶片和 36 个病害叶片获得荧光光谱数据样本。为了缩减特征空间维数,Römer 等采用支持向量机 SVM (Support vector machine) 进行特征建模,发现在整个波段上直接应用 SVM 效果并不理想。为此,Römer 等采用了加权的支持向量机方案,也就是用权重的高低来区分特征与分类器相关度的高低。结论是:加权 SVM 与 SVM 相比,可使识别精度提高 4% ~ 9%。

近年来,热红外和主动光学信息技术也开始引



起了关注。Stoll 等^[25]利用热红外成像技术,对早期葡萄霜霉病进行了检测,发现热成像仪能够探测到病菌感染的早期叶温变化,进而用于病害探测。Mishra 等^[26]发展了一种基于可见光和近红外光谱的四通道调制式主动光学传感器,如图 7。Mishra 等给出了该传感器对柑橘冠层的测量结果,发现从 4 个通道提取 570 nm、670 nm、890 nm 和 970 nm 4 个波段,能有效地识别柑橘冠层病害。

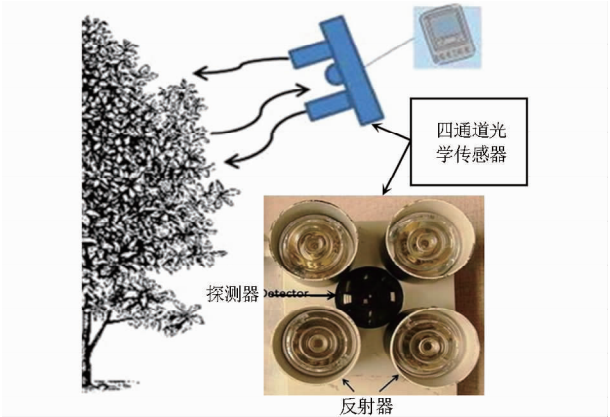


图 7 四通道光学传感器及测量实验示意图

Fig. 7 Four-channel optical sensor and measurement experiments schematic

4 作物草害的探测与识别技术

目前杂草的探测识别通常采用两种方法:机器视觉方法,即利用杂草的颜色、形态、纹理等特征来探测和识别杂草;光谱方法,即利用杂草与作物在光谱信号上的差别来探测和识别杂草。根据作物实际种植情况,杂草又可分为“行间杂草”和“行内杂草”两类。对于行间杂草的探测和识别主要是利用杂草的颜色特征,例如 Tangwongkit 等^[27]用机器视觉实现了对甜菜行间杂草的探测和变量施药。图 8a 为喷雾装置示意图,图 8b 为杂草的探测识别结果,以及根据杂草识别实施变量喷雾的效果。图 8b 中数值 0、1、2 代表喷量。

Tellaache 等^[28]面向变量喷雾,总结了一套利用

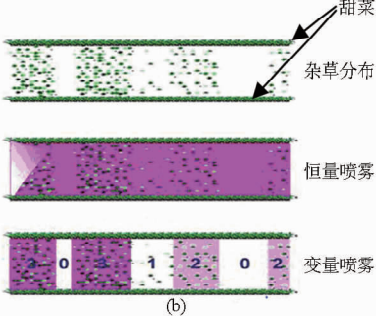


图 8 利用机器视觉对田间杂草的探测

Fig. 8 Detection of field weeds by using machine vision

(a) 喷雾装置示意图 (b) 杂草探测识别结果

彩色图像信息的方法,如图 9。将采集到的原始图像在 RGB 空间中转换为单色图像,利用熵阈值的直方图确定分割杂草与土壤背景的灰度级阈值,再将图像转换为二值图像,实现了大麦行间杂草与土壤背景的分割。分割的结果作为条播大麦作物的行间杂草变量施药的决策依据。

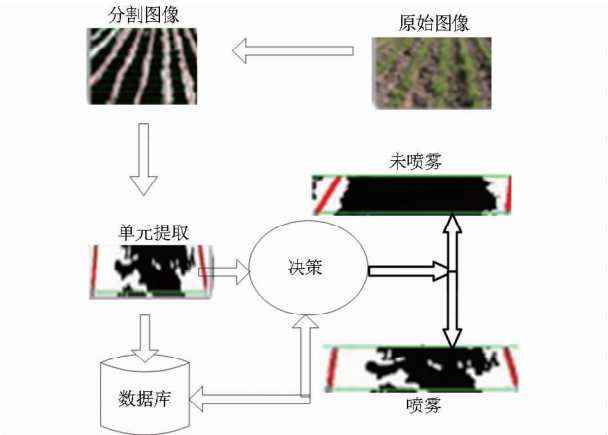


图 9 大麦行间杂草变量施药流程图
Fig. 9 Variable spraying process barley weeds between lines

对于行内杂草的识别,不仅要 将杂草从土壤背景中分割出来,还要将杂草与作物区分。

作物与杂草往往颜色相似,仅用颜色特征识别杂草易受土壤湿度、光照强度及空间分辨率的影响。为此常结合形态特征、光谱特征、纹理特征实施多特征融合探测和识别。例如 Lee 等^[29]研究基于形态特征的杂草识别方法,通过叶片的伸长度和紧密度实现番茄苗中的杂草识别,进而确定施药区域,实现变量喷雾,如图 10。

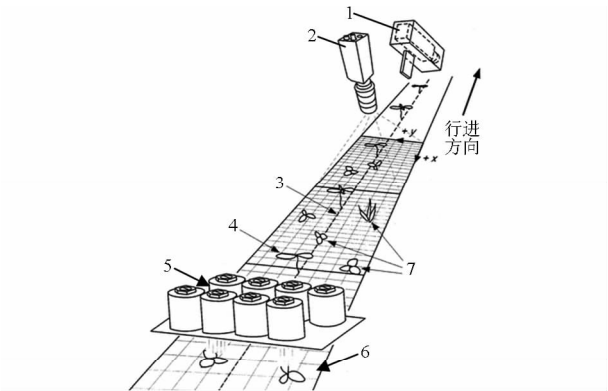


图 10 番茄苗杂草识别及变量喷雾
Fig. 10 Weed identification and variable spray of tomato seedlings

1. 导引相机 2. 识别相机 3. 种子线 4. 番茄苗 5. 变量喷头阵列 6. 杂草喷雾 7. 杂草

Manh 等^[30]利用形态特征识别棉田中的狗尾草。Persson 等^[31]利用形态特征识别甜菜田中的杂草。在自然环境下,由于杂草叶片相互遮挡或受到

其他附着物影响时,提取形态特征就很困难,这时利用杂草和作物的光谱差异性进行探测较为有利。Feyaerts 等^[32]采用成像光谱仪测定了甜菜和杂草在可见光和近红外光谱段的反射率,通过特征波长建模识别甜菜田中的杂草,系统配置如图 11。

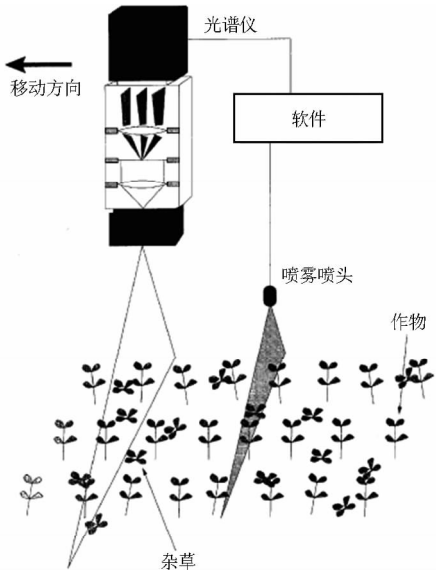


图 11 光谱法识别甜菜田中的杂草原理图
Fig. 11 Identification of weed beet *Tanaka naka* by using spectrum method

从实用上考虑,Zaman 等^[33]根据野生蓝莓场杂草的高度特点,设计了超声波探测系统用于变量喷雾时杂草探测。

在杂草分布的非线性表征方面,Tian^[34]应用杂草覆盖率算法以及小波变换等算法计算了杂草的分布特性,实现杂草识别。吴兰兰等^[35]引入分形维参数作为杂草表征参数,比较了 3 种分形维数的计算方法,发现“毯子”法 (Bouligand-minkowski method) 最优,再结合支持向量机,玉米地杂草识别率可达 80%。

关于 2012 年以前的杂草实时获取技术,毛文华等^[36]给出了简要评述。

5 压力调流技术

改变压力来调节流量是最早应用于变量喷雾的调流技术之一,简称压力调流。压力调流的调节特性可用公式表达为^[37]

$$Q = \frac{1}{\rho R} (p_1 - p_2)^{1/\alpha}$$
 (3)

式中 Q ——流体流量
 ρ ——流体密度
 $p_1、p_2$ ——调节阀入口和出口的流体压力
 α ——节流类型 R ——流阻
理论上 α 的取值范围为 $[1,2]$,工程上一般取

$\alpha = 2$, 此时系统的压力差与流量的平方成正比, 属于典型的非线性关系。因此, 采用线性控制方法时压力调流的压力变化范围不能很大。针对扁平扇形喷嘴变量喷雾, Stone 等^[38]推荐系统压力设置在 0.2~0.4 MPa 之间, 并指出超过这个压力范围会导致雾滴尺寸分布变差、雾滴漂移风险增加和农药叶面沉积分布不均等。邱白晶等^[39]构建了以电动调节阀为变流器件的变量喷雾系统, 结构如图 12a, 实测 5 种目标流量阶跃响应如图 12b。图 12b 中 τ 为纯时滞环节时间, t_{p1} 和 t_{p2} 为目标流量 4.5 L/min 和 5 L/min 时的阶跃响应峰值时间。图 12b 给出了 3 方面信息: 5 种阶跃响应下均有稳定的 τ 值, 这说明系统存在稳定的纯时滞环节; τ 的具体取值在 1~1.5 s 之间, 这表明系统响应速度与现有文献公开的调压变量喷雾系统相当; 系统上升时间、峰值时间和超调量都有幅值相关性, 而这是线性系统所不具备的, 因此系统有非线性, 此类调流变量喷雾系统必须考虑非线性问题。

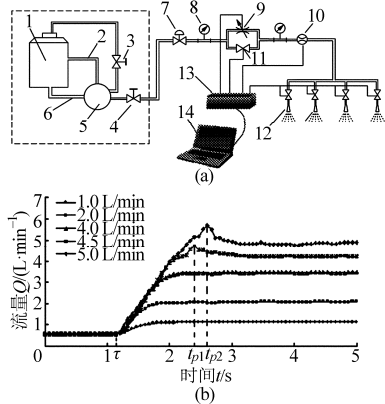


图 12 变量喷雾系统结构图及阶跃响应图
Fig. 12 Variable spray system structure diagram and step response

(a) 变量喷雾系统结构图 (b) 阶跃响应图

1. 药液箱 2. 自动卸荷泵溢流管 3. 自动卸荷泵回流调节阀
4. 自动卸荷泵供液调节阀 5. 自动卸荷泵 6. 自动卸荷泵进液管
7. 平衡减压阀 8. 压力表 9. 电动调节阀 10. 流量计
11. 电磁阀 12. 喷头 13. PLC 14. 计算机

虽然压力调流存在固有的非线性, 但是, 在同等精度条件下, 压力传感器的成本比流量传感器更低。因此, 从经济上考虑, 压力调流有潜在的优势。也正因为如此, 研究者近年来开始关注变量喷雾系统的非线性控制及其实现。Gonzalez 等^[40]设计了一种基于压力调节的非线性变量喷雾系统, 如图 13。

该系统由压力传感器实时测量系统压力, 通过电动比例阀、电动开关阀来控制喷量。以电动比例阀开度为输入, 以压力传感器所测喷雾压力为输出, Gonzalez 等^[40]实验得出开环系统可用一阶系统描述, 并给出了系统传递函数的具体公式

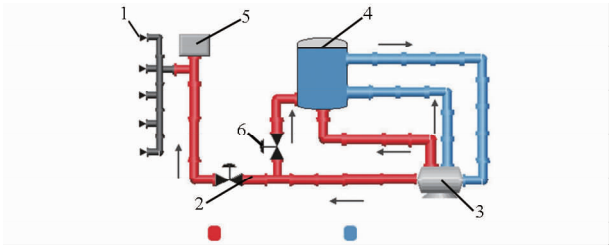


图 13 变量喷雾系统压力调节过程示意图
Fig. 13 Schematic pressure regulation process for variable spray system

1. 喷头 2. 电动开关阀 3. 泵 4. 药箱 5. 压力传感器 6. 电
- 动比例阀

$$G(s, p) = \frac{k(p)}{\tau(p)s + 1}$$

(4)

式中, 系统的静态增益参数 k 和时间参数 τ 写成了与系统压力 p 相关联的形式, 体现了 Gonzalez 等采用参变的方法处理非线性的思路。

6 变量喷头调流技术

变量喷头是相对于传统固定式喷头而言的。“固定”是指工作过程中喷头的内部结构固定不变。图 14a 以扇形雾喷头为例, 示意了传统固定式喷头的典型结构。在图 14a 中, 盲端直径 d 、V 口角 β 和 V 口深度 h 是决定流量的 3 个主要参数, 而喷雾模式(包括雾角以及沿雾角的雾滴分布)则还与盲端断面结构形状密切相关。图 14b 是图 14a 的变形, 增加了前置喷孔, 变成了两级喷孔组合形式。不管是图 14a 还是图 14b, 只要结构和参数固定, 则流量就由压力所确定, 如式(3)所示。以式(3)取 $\alpha = 2$ 为例, 要使流量加倍, 则压力要增加 4 倍。由于压力变化时, 也会引起喷雾模式和雾滴粒径的变化, 这就导致工程上采用固定式喷头直接调压来调流时, 调压范围只能达到 2^[41]。因此, 从理论上讲, 要在相同调压范围条件下使对应的调流范围扩大, 就必须使式(3)中的模型参数随压力变化而变化, 反映在喷头结构中, 等价于设置随压力而动的随动部件, 这正是设计变量喷头的核心思想。

Walker 等^[41]采用喷孔面积随压力而动的方案

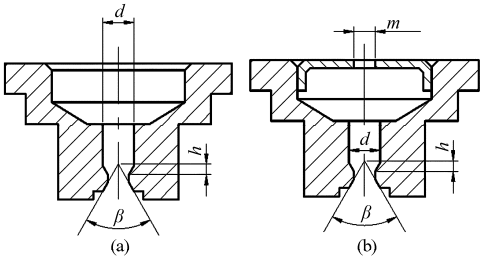


图 14 固定式喷头典型结构示意图
Fig. 14 Schematic diagram of a typical fixed nozzle
(a) 一级喷孔 (b) 二级喷孔

设计了一种变量喷头,结构特点是:喷孔由内部铰接的 2 块金属薄板构成,这 2 块金属薄板随压力而动,从而实现喷孔尺寸随压力变化而变化。Womac 等^[42]和 Bui^[43]在喷孔面积随动的基础上,针对两级喷孔喷头,引入了随动定流芯,设计出一种双随动器件的变量喷头,结构如图 15a。图 15b 示意了高压和低压两种状态下随动器件的运动状态。液体从楔形沟槽流经前置喷孔,再从喷嘴头端的喷孔流出。由

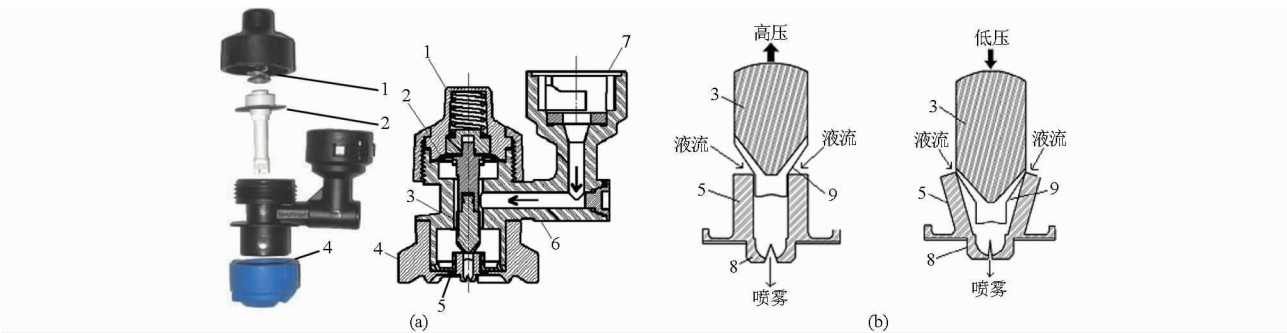


图 15 VariTarget 变量喷头
Fig. 15 VariTarget variable nozzle

(a) 主要部件及内部截面图 (b) 不同压力下的喷雾孔和随动定流芯运动状态
1. 弹簧 2. 隔膜 3. 随动定流芯 4. 喷嘴头 5. 随动推杆 6. 管路 7. 入口 8. 喷口 9. 楔形沟槽

变量喷头的另一发展方向是把电子控制集成到喷头内,实现机电一体化喷头。

Daggupati^[44]给出了一种喷头集成方案,喷头结构和工作原理如图 16。控制电磁阀通断电来驱动阀芯动作,实现变量喷雾。

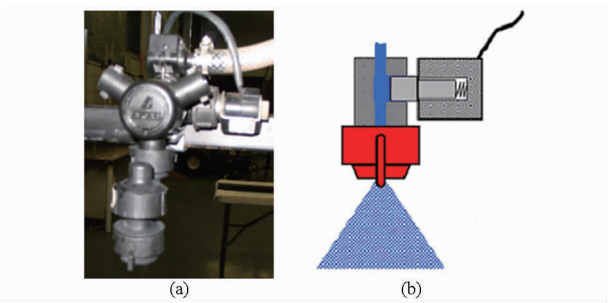


图 16 变量喷头结构图和工作原理图
Fig. 16 Structure diagram and work schematic of variable nozzle

(a) 变量喷头 (b) 工作原理示意图

Funseth 等^[45]发明了一种变量喷头,如图 17。喷头内置了一个转盘流量控制阀。转盘流量控制阀位于喷头体内,从流体通道来看是处于流体入口和喷嘴之间,从动力传动来看,是由步进电动机控制转动。

Needham 等^[46]提出了把比例电磁阀与喷头相耦合的方法,可以实现喷雾量和雾滴尺寸分别可控。

7 PWM 控制调流技术

脉冲宽度调节(PWM)是一种通用技术,主要通

于随动定流芯底部是楔形沟槽结构,因此改变随动定流芯位置就改变了液体流经楔形沟槽时的开口度,从而实现调流。随动定流芯的位置由液体压力和弹簧力控制。当液体压力小于弹簧力时,随动定流芯向喷雾孔方向移动,因而流量减少;反之,当液体压力大于弹簧力时,随动定流芯向弹簧方向移动,流量增加。Bui 的方案已被美国 SprayTarget 公司采用,形成了 VariTarget 系列、VeriJet 系列和 VeriFlow 系列产品。

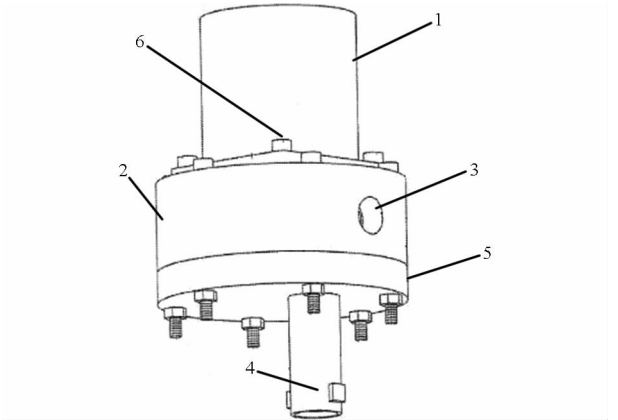


图 17 新型农用喷雾喷头
Fig. 17 New agricultural spray nozzles

1. 喷头 2. 喷头体 3. 流体入口 4. 喷嘴 5. 圆柱状底盘 6. 水平凸缘

过快速开和关(脉冲方式)转换设备来控制电子执行元件,转换设备被脉冲驱动的速度就是频率。转换设备“开”状态占每个周期的时间比例称为占空比,是 PWM 技术中的重要参数。利用 PWM 技术实现调流最初应用于汽车领域,随后发展到化学农药喷施等领域^[47]。由于农业喷雾与汽车发动机喷雾在雾化性能和沉积特性等方面的要求不尽相同,Giles^[48]以农业喷雾为背景,开展了 PWM 脉动间歇式喷雾雾化特性研究,对平口扇形喷嘴,给出了流量调节范围 4:1 的结果。Giles 等^[49]通过在喷头的入口处安装电磁驱动阀,进一步研究了 PWM 流量控制条件下系统压力与流量之间的关系,确定了流量

控制范围,并预测用于商用变量喷雾机的可行性。Gopalapillai 等^[50]采用 PWM 控制,使流量调节范围达到了 9.9:1。Tian 等^[51]研究了 PWM 脉动喷雾工作过程中的雾滴沉积分布的建模评估。Lebeau 等^[52]研制了 PWM 控制喷雾来补偿水平喷杆速度变化的实验装置,如图 18。喷头可在直线传送台上匀速移动, PWM 控制器对喷头喷量进行脉冲控制,通过调节脉冲频率进行实验可以建立占空比与喷头流量之间的关系曲线。Lebeau 等发现脉冲频率为 16 Hz 时流量曲线最佳。

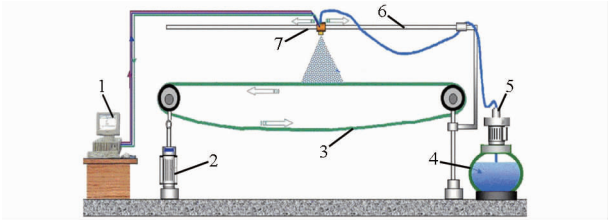


图 18 PWM 喷雾控制器实验装置

Fig. 18 PWM spray controller experimental device

1. 控制器 2. 传送电动机 3. 传送装置 4. 染料 5. 泵 6. 直线传送台 7. 喷头及 PWM 控制器

魏新华^[53-54]等把 PWM 间歇喷雾式变量喷施系统与喷雾机组前进速度相关联。

虽然工业界已有高速高精度电磁阀出现,但农业喷雾有自身特殊性,尚难于直接采用高速高精度工业用电磁阀。这既有农业喷雾介质清洁度不够和腐蚀性的问题,更有成本等经济性问题。因此,通过改进 PWM 算法来提升低成本电磁阀使用性能开始受到关注。Shahemabadi 等^[55]面向基于 GPS 的变量喷雾,研究了一种改进 PWM 的算法,该算法通过改变每秒脉冲个数及脉冲宽度来调节流量。由于典型的农用 GPS 数据更新速度为每秒更新一次,因此 Shahemabadi 等以这样的 GPS 为背景构思算法,如图 19。

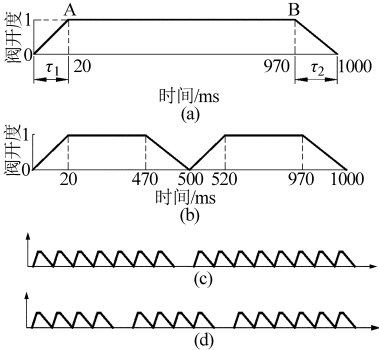


图 19 改进算法

Fig. 19 An improved algorithm

(a) 每秒发生 1 次脉冲 (b) 每秒发生 2 次脉冲
(c) 每秒丢掉 1 个脉冲 (d) 每秒丢掉 2 个脉冲

图 19 中纵坐标是阀开度,阀开度 0 对应阀全

闭,阀开度 1 对应阀全开。阀有机械惯性,因此从全闭到全开需要上升时间 τ_1 ,从全开到全闭需要下降时间 τ_2 ,如图 19a。Shahemabadi 等所用电磁阀为 Burkert 6013 型电磁阀,上升时间 τ_1 和下降时间 τ_2 分别为 20 ms 和 30 ms。图 19a 为每秒钟发生一次脉冲的情形,其中阀开度下降段对应信号脉冲低电平,记阀在每秒钟保持全开的满流量为 100%,则通过计算图 19a 曲线下面积可知此时得到的平均流量为满流量的 97.5%,相对于 100% 减少了 2.5%。图 19b 为每秒钟发送 2 个脉冲,同理可计算平均流量为 95%。所以当发送 16 个脉冲时平均流量降至为 60%。依此,在 100% ~ 60% 范围内,可按照 2.5% 的调节精度来调节流量。

当流量需要继续下降时,则不再增加脉冲个数,而是通过将 16 个脉冲中的部分脉冲丢掉的方法进行,所谓丢掉脉冲就是将该脉冲信号置为零。由于每秒 16 个脉冲数时对应平均流量为满流量的 60%,等价于单个脉冲对应的平均流量为满流量的 3.75%。因此,每丢掉一个脉冲就等价于平均流量减少 3.75%。依此,在 60% ~ 0% 范围内,可按照 3.75% 的调节精度来调节流量。例如,当丢掉 1 个脉冲时,平均流量从 60% 下降到 56.25%,如图 19c,丢掉 2 个脉冲时,平均流量下降到 52.5%,如图 19d。把 100% ~ 60% 和 60% ~ 0% 两流量调节范围结合,就实现了 0% ~ 100% 的流量调节范围,而原来采用标准 PWM 算法,只能实现 25% ~ 75% 的流量调节范围。

蒋焕煜等^[56]采用卡尔曼滤波方法处理压力数据,将喷雾流量与 PWM 信号占空比相关联。

针对宽幅喷杆喷雾的需要,Liu 等^[57]发展了多路 PWM 集成化控制器,可以对多喷头系统的每个喷头实现独立的 PWM 控制。

刘伟等^[58]针对背负式喷雾器研制了一种 PWM 变量喷雾控制系统,并在占空比分别为 40%、60%、80% 和 100% 工况下对喷雾量、喷雾角、雾滴粒径以及雾滴速度场等特性进行分析。蔡祥^[59]采用美国 NI 公司生产的 compact Rio 9014 型控制器,借助流量计,实现 PWM 用于农药注入量的闭环控制,系统框图如图 20。

8 机器的集成及其评价

Moltó 等^[1]针对果树喷雾,发展了一种三态对靶喷雾系统,其超声波探测单元已在上文描述,三态流量控制系统如图 21,由调压阀、电动液压阀和截止阀等构成,4 个电动液压阀 (E1 ~ E4) 可由微控制器独立控制。图 21 中子系统 (B1、E1、E2 和 R1) 与子

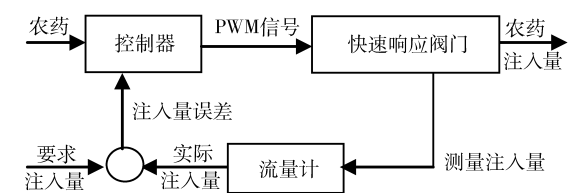


图 20 PWM 信号流量闭环控制框图

Fig. 20 PWM signal flow block diagram of closed-loop control

系统(B2、E3、E4和R2)在功能和配置上完全相同,分别对应左侧喷雾和右侧喷雾。以电动液压阀E1和E2所在子系统为例,E1开、E2闭对应满喷量,E2开、E1闭对应半喷量,E1和E2都关闭对应零喷量。总回路上的调压阀R和分回路上截至阀R1、R2用于根据喷雾对象,预先设定满喷和半喷对应的流量值。该系统可根据实际情况实现单侧喷雾和双侧同时喷雾。虽然这一变量喷雾系统控制较为简单,精度也有待提高,但却是国际上基于传感器现场感知喷雾对象并实现变量喷雾的先驱性工作,被广为引用。

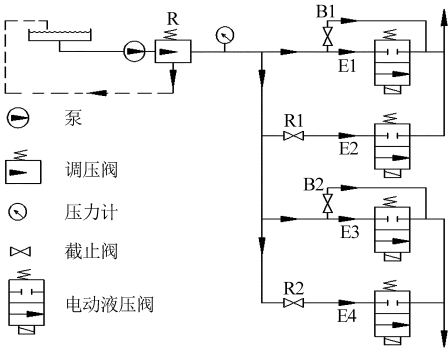


图 21 三态对靶喷雾控制系统示意图

Fig. 21 Diagram of tri-state target spray control system

Tian^[34]研究和测试了一种基于实时机器视觉的自动喷雾系统,如图22。该系统利用双照相机获取杂草信息,用测速雷达获取喷杆喷雾机前进速度信息,经计算机进行数据处理后,喷量信息传输给

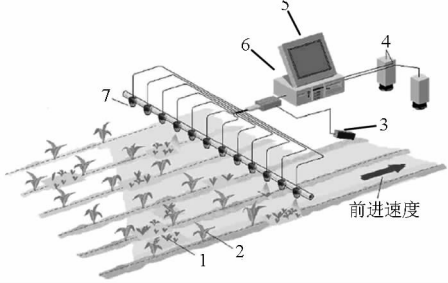


图 22 基于实时机器视觉的自动喷雾系统

Fig. 22 Automatic spray systems based on real-time machine vision

1. 杂草 2. 作物 3. 测速雷达 4. 照相机 5. 计算机 6. 喷头控制器 7. 电磁阀和喷头

喷头控制器,实现变量喷雾。Taylor等^[60]设计了变量喷雾系统,用于棉田管理。系统包括高光谱传感单元、GPS/GNSS定位单元和雷达测速单元等,结构如图23。

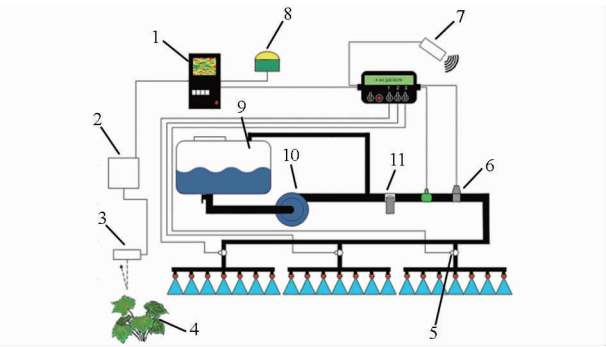


图 23 基于传感器的变量喷雾系统

Fig. 23 Sensor-based variable spray system

1. 用户界面 2. 界面组件 3. 传感器 4. 作物 5. 喷杆开关阀 6. 流量控制器 7. 雷达 8. GPS/GNSS接收器 9. 电动调节阀 10. 泵 11. 流量计

Jeon等^[13]开发了一种用于苗圃的变量喷雾系统,如图24。采用了超声传感器实时探测靶标,并通过PWM电磁阀控制喷雾。

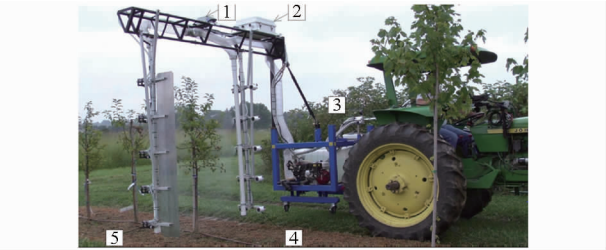


图 24 苗圃的变量喷雾系统

Fig. 24 Nursery variable spray system

1. 控制器 2. 数据记录仪 3. 喷雾传输系统 4. 超声波传感器 5. 安装了PWM电磁阀的喷头

Esau等^[61]开发了一种用于野生蓝莓场的变量喷雾系统原型,采用4个摄像头实时探测蓝莓叶上病害斑点,基于计算机视觉变量喷雾。

随着GIS、GPS、RS技术的发展,基于处方图的变量喷雾系统也得到了快速发展。Carrara等^[62]设计了一套基于处方图的变量喷雾系统,如图25。该系统兼容多种定位系统,配置了多普勒测速雷达、喷雾压力传感器、DGPS\GPS定位单元以及特制的精准农业控制器(PAC)。机器位置、机器前进速度和喷雾压力等机器状态信息被采集后通过RS232接口传送到便携式数据处理系统中。数据处理系统把机器状态信息与喷雾处方图信息融合后,发出决策给执行机构以改变喷雾参数或施药量。执行机构由安装在步进电动机上的压力调节器及压力调节阀等组成。Carrara等^[62]进行了除草剂变量喷雾实验,与传统等量喷雾对比,采用变量喷雾可节省除草剂

29%。Nørremark 等^[63]采用变量喷雾系统对田间杂草喷雾,其田间数据的实时采集和处方图生成都利用了 RTKGPS 技术,提高了定位精度,减少了响应时间和动态误差。

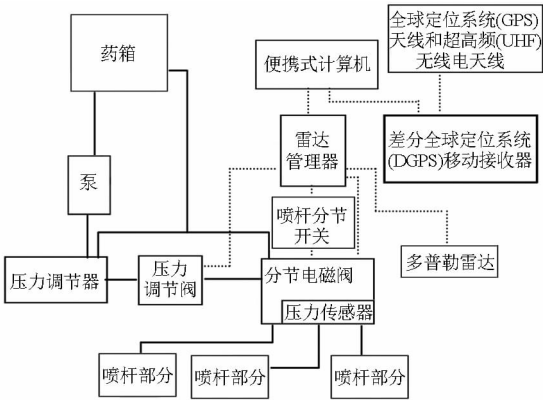


图 25 变量喷雾系统示意图
Fig. 25 Schematic variable spray system

胡开群等^[64]针对处方图进行变量施药作业也给出一种直接注入式变量喷雾方案。

基于处方图的变量喷雾和基于实时传感器的变量喷雾是变量喷雾技术发展方向的两条主线,而衡量技术成熟度的关键则是变量喷雾系统响应特性指标。Sui 等^[65]在 John Deere 4700 型喷雾机上装载了一个 MidTech TASC 6300 变量喷雾控制系统。通过测量从发出控制信号开始到喷头里的溶液稳定在指标浓度时的响应时间来检测系统的动态响应。发现整个系统的平均延迟时间为 38.3 s,上升时间为 65.9 s。Crowe 等^[66]针对表征两种液体混合喷雾瞬态过程的需要,设计了一种电子传感器,可以用于实验条件下对靶喷雾的瞬态过程测量。Hloben 等^[67]测量了喷杆注入式系统 BDIS (Injection in the sprayer boom section) 的响应时间和施药误差,发现响应时间小于 4 s,地面施药误差小于 20 m。Sharda 等^[68]针对典型自动分节控制喷雾机,测量了系统响应特性。在分节控制器开启情况下,利用高频响应特性良好高精度压力传感器采集喷头压力信号,计算出喷头流量响应时间和喷头流量损失率百分比。

Sharda 发现当喷头流量响应时间变化范围为 0.4 ~ 14.4 s 时,喷头流量损失率在 36.6% ~ 28.7% 之间。

9 展望

上述 8 个方面梳理了变量喷雾的主要技术,从中可以寻觅出一些发展的线索。在此,结合国内外情况,总结出值得关注的几个方面:

(1) 针对作物形貌、密度和位置等信息的探测,超声和激光是最常用的两类基本技术。超声探测技术成本低,接近工程应用,未来的发展重点是提高测量可靠性、稳定性和拓展多传感器阵列的应用。激光探测技术的成本高于超声成本,虽然一些低成本激光传感器会借鉴超声传感器的应用技术和方案,但这个领域的发展重点主要还是根据自身特点,发展高精度探测技术,在第 1 节提到的 LIDAR 技术尤其值得期待。

(2) 针对病虫草害探测和识别,虽有硬件和软件之分,但新近的发展主要侧重于软件,特别是信号处理和模式识别方面。其中,信号处理主要用在病虫草害探测和识别的前处理阶段,模式识别主要用在病虫草害探测和识别的后处理阶段。由于信号处理和模式识别均有多学科交叉特点,并有专门的国际学术组织,因此学术活动非常活跃,新想法、新方法和新算法很多。如何借鉴这些新成果,结合农作物栽培和管理特点,进行有所选择、有所改进和有所创新的应用值得期待。

(3) 针对变量喷雾伺服系统,近 10 年来在控制技术和变量器件方面均取得了重要进展。其中,在第 5 节提到 Gonzalez 等发展的基于压力调节的非线性变量喷雾系统,以及在第 7 节提到 Shahemabadi 等针对低成本阀构思 PWM 算法,均强调从经济性上考虑,用控制技术提升低成本器件和装备的使用性能,体现了面向农业装备的特殊性,针对性地发展专门算法的特点,值得关注。变量喷头经过 10 多年的发展,已经形成多种系列的商品化产品,而且不断有新专利公布,应该引起国内企业重视。

参 考 文 献

- 1 Moltó E, Martén B, Gutiérrez A. PM—power and machinery: pesticide loss reduction by auto matic adaptation of spraying on globular trees[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(1): 35–41.
- 2 Tumbo S D, Salyani M, Whitney J D, et al. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3): 367–372.
- 3 Zaman Q U, Salyani M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(2): 173–178.
- 4 Llorens J, Gil E, Llop J. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: advances to improve pesticide application methods[J]. Sensors, 2011, 11(2): 2177–2194.
- 5 Pfeifer N, Gorte B, Winterhalder D. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data[C] // ISPRS Congress: Proceedings of Commission V, 2004: 114–119.

- 6 Rosell J R, Llorens J, Sanz R, et al. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1505 – 1515.
- 7 Ribes-Dasi M, Masip J, Camp F, et al. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: a comparison with conventional destructive measurements[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(2): 128 – 134.
- 8 van der Zande D, Hoet W, Jonckheere I, et al. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2): 147 – 160.
- 9 Kise M, Zhang Q. Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 191 – 198.
- 10 Zhu H, Salyani M, Fox R D. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(1): 38 – 43.
- 11 Jeon H Y, Zhu H, Derksen R, et al. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 213 – 221.
- 12 Zhu H, Altland J, Derksen R C, et al. Optimal spray application rates for ornamental nursery liner production[J]. *Hort Technology*, 2011, 21(3): 367 – 375.
- 13 Jeon H Y, Zhu H, Derksen R C, et al. Performance evaluation of a newly developed variable-rate sprayer for nursery liner applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(6): 1997 – 2007.
- 14 Jeon H Y, Zhu H. Development of a variable-rate sprayer for nursery liner applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(1): 303 – 312.
- 15 Chen Y, Zhu H, Ozkan H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(3): 773 – 781.
- 16 翟长远, 赵春江, 王秀, 等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 26(12): 173 – 177.
Zhai Changyuan, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Probing method of tree spray target profile[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 26(12): 173 – 177. (in Chinese)
- 17 Scotford I M, Miller P. Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 89(4): 395 – 408.
- 18 Palacín J, Pallegà T, Tresanchez M, et al. Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(4): 1377 – 1383.
- 19 Ehlert D, Hammen V, Adamek R. On-line sensor pendulum-meter for determination of plant mass[J]. *Precision Agriculture*, 2003, 4(2): 139 – 148.
- 20 Ehlert D, Dammer K. Widescale testing of the crop-meter for site-specific farming[J]. *Precision Agriculture*, 2006, 7(2): 101 – 115.
- 21 Dammer K, Wollny J, Giebel A. Estimation of the leaf area index in cereal crops for variable rate fungicide spraying[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 351 – 360.
- 22 Moshou D, Bravo C, West J, et al. Automatic detection of ‘yellow rust’ in wheat using reflectance measurements and neural networks[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44(3): 173 – 188.
- 23 Yang C, Everitt J H, Fernandez C J. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for mapping cotton root rot[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(2): 131 – 139.
- 24 Römer C, Bürling K, Hunsche M, et al. Robust fitting of fluorescence spectra for pre-symptomatic wheat leaf rust detection with support vector machines[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 79(2): 180 – 188.
- 25 Stoll M, Schultz H R, Baecker G, et al. Early pathogen detection under different water status and the assessment of spray application in vineyards through the use of thermal imagery[J]. *Precision Agriculture*, 2008, 9(6): 407 – 417.
- 26 Mishra A, Karimi D, Ehsani R, et al. Evaluation of an active optical sensor for detection of Huanglongbing (HLB) disease[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110(3): 302 – 309.
- 27 Tangwongkit R, Salokhe V M, Jayasuriya H P. Development of a real-time, variable rate herbicide applicator using machine vision for between-row weeding of sugarcane fields[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR EJournal*, PM 06 009. Vol. VIII, 2006.
- 28 Tellaeche A, Burgosartizzu X P, Pajares G, et al. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 60(2): 144 – 155.
- 29 Lee W S, Slaughter D C, Giles D K. Robotic weed control system for tomatoes[J]. *Precision Agriculture*, 1999, 1(1): 95 – 113.
- 30 Manh A, Rabatel G, Assemat L, et al. AE—automation and emerging technologies: weed leaf image segmentation by deformable templates[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 80(2): 139 – 146.
- 31 Persson M, Åstrand B. Classification of crops and weeds extracted by active shape models[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(4): 484 – 497.
- 32 Feysaerts F, van Gool L. Multi-spectral vision system for weed detection[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(6): 667 – 674.
- 33 Zaman Q U, Esau T, Schumann A W, et al. Development of a prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-

- application of agrochemicals in wild blueberry fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011,76(2):175-182.
- 34 Tian L. Development of a sensor-based precision herbicide application system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2):133-149.
- 35 吴兰兰,刘俭英,文友先. 基于分形维数的玉米和杂草图像识别[J]. 农业机械学报,2009,40(3):176-179.
Wu Lanlan, Liu Jianying, Wen Youxian. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):176-179. (in Chinese)
- 36 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. (in Chinese)
- 37 Franklin Gene F, Powell J David, Emami Naeini Abbas. Feedback control of dynamic systems[M]. Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall,2002.
- 38 Stone M L, Giles D K, Dieball K J. Distributed network system for control of spray droplet size and application rate for precision chemical application[C]//The 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark, 1999:857-866.
- 39 邱白晶,李坤,沈成杰,等. 连续可变量喷雾系统响应特性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(9):32-35.
Qiu Baijing, Li Kun, Shen Chengjie, et al. Experiment on response characteristics of variable-rate continuous spraying system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):32-35. (in Chinese)
- 40 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.
- 41 Walker J T, Bansal R K. Development and characterization of variable orifice nozzles for spraying agro-chemicals[C]//ASAE/CSAE SCGR Annual International Meeting, 1999:1-9.
- 42 Womac A R, Bui Q D. Design and tests of a variable-flow fan nozzle[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(2):287-295.
- 43 Bui Q. VariTarget: a new nozzle with variable flow rate and droplet optimization[C]//2005 ASAE Meeting, ASAE Paper 051125,2005.
- 44 Daggupati N P. Assessment of the varitarget nozzle for variable rate application of liquid crop protection products[D]. India: ANGR Agricultural University,2007.
- 45 Funseth T G, Mercer D S, Humpal R A. Sprayer pulsing nozzle flow control using rotational step positions;US, 20130161413 [P]. 2013-06-27.
- 46 Needham D L, Holtz A J, Giles D K, et al. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(2):379-386.
- 47 Bora G C, Schrock M D, Oard D L, et al. Performance of a stacked valve multipoint pulse width modulation (PWM) manifold for variable rate anhydrous ammonia application[J]. CIGR EJournal, Vol 7,2005.
- 48 Giles D K, Ben-Salem E. Spray droplet velocity and energy in intermittent flow from hydraulic nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1992, 51:101-112.
- 49 Giles D K, Henderson G W, Funk K. Digital control of flow rate and spray droplet size from agricultural nozzles for precision chemical application[C]//Proceedings of the 3rd International Congerence on Precision Agriculture, 1996:729-738.
- 50 Gopalapillai S, Tian L, Zheng J. Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications[J]. Transactions of the ASAE,1999, 42(4):863-870.
- 51 Tian L, Zheng J. Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(1):5-12.
- 52 Lebeau F, El Bahir L, Destain M, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(2):149-161.
- 53 魏新华,蒋杉,孙宏伟,等. PWM 间歇喷雾式变量喷施控制器设计与测试[J]. 农业机械学报,2012,43(12):87-93,129.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Sun Hongwei, et al. Design and test of variable rate application controller of intermittent spray based on PWM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(12):87-93,129. (in Chinese)
- 54 魏新华,蒋杉,张进敏,等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报,2013,44(2):87-92,86.
Wei Xinhua, Jiang Shan, Zhang Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):87-92,86. (in Chinese)
- 55 Shahemabadi A R, Moayed M J. An algorithm for pulsed activation of solenoid valves for variable rate application of agricultural chemicals[C]//IEEE International Symposium on Information Technology, 2008,4:1-3.
- 56 蒋焕煜,周鸣川,童俊华,等. 卡尔曼滤波的 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, et al. Research of PWM variable spray control based on Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):60-65. (in Chinese)
- 57 Liu H, Zhu H, Shen Y, et al. Development of digital flow control system for copy multi-channel variable-rate sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1):273-281.
- 58 刘伟,汪小岳,丁为民,等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报,2012,28(9):16-21.
Liu Wei, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9):16-21. (in Chinese)

59 蔡祥, Walgenbach Martin, Doerpmund Malte, 等. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 69 – 72.
Cai Xiang, Walgenbach Martin, Doerpmund Malte, et al. Direct nozzle injection sprayer based on electromagnetic-force valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 69 – 72. (in Chinese)

60 Taylor R, Fulton J. Sensor-based variable rate application for cotton[C]. Oklahoma Cooperative Extension Service. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma, 2010.

61 Esau T, Zaman Q U, Chang Y, et al. Spot-application of fungicide for wild blueberry using an automated prototype variable rate sprayer[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(2): 147 – 161.

62 Carrara M, Comparetti A, Febo P, et al. Spatially variable rate herbicide application on durum wheat in Sicily[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 387 – 392.

63 Nørremark M, Griepentrog H W, Nielsen J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396 – 410.

64 胡开群, 周舟, 祁力钧, 等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 70 – 74, 102.
Hu Kaiqun, Zhou Zhou, Qi Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable-rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 70 – 74, 102. (in Chinese)

65 Sui R, Thomasson J A, Willers J L, et al. Variable-rate spray system dynamic evaluation[C] // 2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 031128, 2003.

66 Crowe T G, Downey D, Giles D K, et al. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 73 – 82.

67 Hloben P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides[D]. Bonn; Germany: University of Bonn, Institute of Agriculture Engineering, 2007.

68 Sharda A, Fulton J P, McDonald T P, et al. Real-time nozzle flow uniformity when using automatic section control on agricultural sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 169 – 179.

(上接第 82 页)

11 周山明, 金保升, 孙志翱. 低压力大流量喷嘴液膜射流破碎长度[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(6): 539 – 542.
Zhou Shanming, Jin Baosheng, Sun Zhiao. Sheet breakup length of nozzle with large flow volume and lower pressure[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(6): 539 – 542. (in Chinese)

12 赵欣, 张宝珍, 赖维, 等. 针型喷嘴雾化特性的影响因素分析[J]. 轻工机械, 2004(4): 22 – 24.
Zhao Xin, Zhang Baozhen, Lai Wei, et al. Effect factors of needle shape nozzle's spray characteristics[J]. Light Industry Machinery, 2004(4): 22 – 24. (in Chinese)

13 Shinjo J, Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(7): 513 – 532.

14 Lebas R, Menard T, Beau P A, et al. Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modelling study[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(3): 247 – 260.

15 靳自霞, 董宇红, 周哲玮, 等. 低速液体射流 Rayleigh 模式破碎的数值模拟[J]. 上海大学学报, 2008, 14(2): 161 – 167.
Jin Zixia, Dong Yuhong, Zhou Zhewei, et al. Numerical simulation of Rayleigh breakup in low-velocity liquid jet[J]. Journal of Shanghai University, 2008, 14(2): 161 – 167. (in Chinese)