果园植保仿形喷雾技术研究现状与展望

张 惠[1],姜春淼[2],张 景[1]*,陈金成[1],潘 峰[1]

(1.新疆农垦科学院机械装备研究所,新疆石河子 832000;2.石河子大学机械电气工程学院,新疆石河子 832000)

摘要 果园植保作业机械化、智能化发展有力助推了果园经济效益的提升。其中,以树冠仿形喷雾为代表的果园精准植保技术,能够提高药液喷施精度与果树受药效果,实现减药增效,相关技术装备研发已成为当前热点。首先,对目前国内外冠层仿形机构展开综述,分别介绍并对比分析了倒U型、变喷杆与双摇臂式仿形机构的工作原理和特点;其次,介绍了采用上述仿形机构研制出的智能化植保作业机具;最后,指出制约当前智能化植保机械技术发展的关键问题,并对进一步推进研发、应用进程提出建议。

关键词 植保机械;精准喷雾;仿形机构;力学分析;农机与农艺

中图分类号 S22 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)04-0006-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2023.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Status and Prospect of Profile Spray Technology for Orchard Plant Protection

ZHANG Hui[1], JIANG Chun-miao[2], ZHANG Jing[1] et al (1. Mechanical Equipment Institute of Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract The development of mechanization and intelligence of plant protection in orchard has greatly promoted the improvement of economic benefits of orchard. Among them, precise plant protection technology in orchard represented by crown biomimetic spray can improve spraying precision of liquid medicine and effect of fruit trees to reduce pesticides and increase efficiency. Research and development of relevant technical equipment has become a current hot spot. Firstly, this paper summarizes the current domestic and international crown profiling mechanisms, introduces and compares the working principles and characteristics of "inverted U-shaped", "variable spray bar" and "double rocker arm" profiling mechanisms respectively. Subsequently, the intelligent plant protection working machine developed by the above imitation mechanism is introduced. Finally, the key problems that restrict the development of current intelligent plant protection machinery technology are pointed out, and suggestions are put forward for further promotion of R&D and application process.

Key words Plant protection machinery; Precision spray; Profile mechanism; Mechanical analysis; Agricultural machinery and agronomy

我国果园种植面积和水果产量常年稳居世界首位,水果已成为我国继粮食和蔬菜之后的第三大农业种植产业[1]。果园田间生产作业主要包括整地、中耕除草、开沟施肥、灌溉、植保、修剪、采收等多个环节,过程烦琐、用工需求大[2-3]。其中,植保作业作为防治病虫害、调节长势的重要环节,不仅劳动强度大,操作者还要面临有毒作业环境,其解放人力、实现机械化的需求更显迫切。尤其,随着我国城市化进程的加快,农村劳动力愈发紧缺,推进植保作业机械化、自动化已成为实现果园生产节本增效的必然要求[2,4-9]。

喷雾装备是实现果园植保机械化的重要载体,一般由机架、喷杆、喷头、药箱、动力系统等部分组成。近年来,随着精准喷雾技术的发展,喷雾装备逐步向自动化、智能化迭代升级[10-11]。尤其,为提升雾滴分布质量,越来越多的喷雾机械配置了仿形机构及其控制系统,即通过人工观测或传感器探测树冠形状尺寸,手动或自动调整喷杆折叠位姿实现对树冠均匀包络,从而均匀、稳定喷雾距离及药液分布,改善喷雾效果[12-14]。发展仿形喷雾技术对于实现精准施药,提高农药利用率、降低果园生产成本与环境污染具有重要意义。

该研究对国内外目前存在的果树冠层仿形机构进行综述,分别描述以倒U型、双摇臂式、变喷杆式为主的仿形机构特点,介绍具有上述仿形机构的植保作业整机,同时进一步分析树冠仿形机械当前存在的问题,并对树冠仿形技术的发展予以展望。

1 树冠仿形机构及分析

1.1 倒U型仿形机构 倒U型仿形机构由多个连杆铰接而成,其形状与倒"U"相似,该仿形机构在同一平面内有多个旋转自由度,各连杆之间角度变化范围相对较小、仿形精度较高[15]。

张建瓴等[16]首次提出果树仿形喷雾技术,设计出的对称仿形机械臂如图1,各机械臂前后铰接,相邻两机械臂之间通过直流电动机驱动螺旋机构改变仿形机构形状,滑块调节机械臂宽幅,转盘电动机驱动机械臂绕果树180°旋转。通过建立运动方程,计算了在平面内各喷头的工作可达空间,作业空间的数值仿真结果表明基本能完成树冠仿形运动,但上述结论只建立在仿真分析基础上,未得到试验验证。

遇宝俊[17]基于以上研究,在支架与仿形机构上做了较大改进(图2)。改进后的喷雾机可同时对两行果树作业,仿形机构平面自由度较高,水平间距与竖直高度可调,可满足不同形状、行距、高度的果园作业要求。采用ADAMS对其设计的倒"U"型仿形机构进行了动力学及力学参数分析,校验了其仿形机构的作业空间以及各铰链点在运动过程中的受力情况,仿真分析结果与样机试验结果基本吻合,满足其作业空间及强度的设计要求,实际喷雾作业效果未得到验证,且该仿形机构体积较为庞大,没有收缩机构,不方便运输。

尹翔宇[18]针对此机构设计出了一套基于LabVIEW与单

基金项目 兵团科技创新人才计划项目(2021CB035);兵团科技合作计划项目(2022BC007)。

作者简介 张惠(1987—),女,湖南衡阳人,助理研究员,硕士,从事农业机械设计研究。*通信作者,副研究员,硕士,硕士生导师,从事大田林果收获机械装备研究。

收稿日期 2022-08-21;**修回日期** 2022-09-20

片机的控制系统,以完成对仿形机构的运动控制。但该控制系统只以台架试验验证了其可行性,树冠信号采集问题与在真实作业环境中传感器的干扰问题仍有待解决。

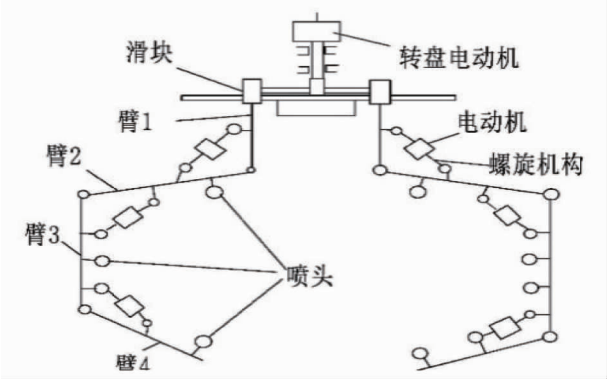
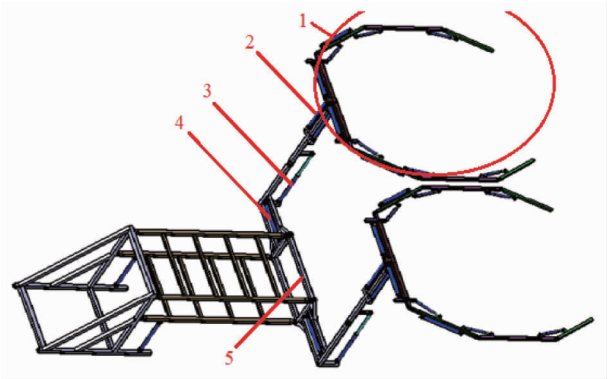


图 1　仿形机械臂

Fig.1　Profile robot arm



注:1.仿形机构;2.机械臂高度调节液压缸; 3.支架折叠液压缸;4.支架横向伸缩液压缸;5.支架。

Note:1.Profile mechanism;2.Hydraulic cylinder for working height adjustment;3.Hydraulic cylinder for folding;4.Horizontal telescopic hydraulic cylinder for folding;5.Bracket.

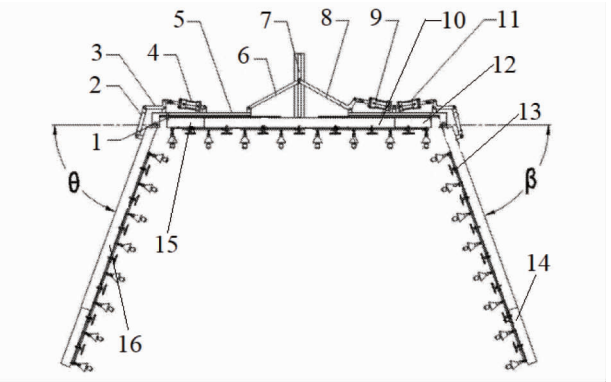
图 2　倒“U”型仿形机构

Fig.2　Inverted U-shaped profiling mechanism

霍鹏[19]设计了一种多段式可折叠仿形喷杆施药装置,该装置各段喷杆前后铰接,可实现折叠、展开和伸缩动作,该装置特点为便于运输存放,质量较轻。并且建立了多段式折叠仿形喷杆动力学模型,分析其动力学特性,求得该装置的关键部件的力学特性曲线及关键几何参数,将参数代入 ADAMS与 ANSYS 分别进行动力学、静力学分析,校验了结构设计的合理性与可行性,通过试验对该装置的运动过程进行验证,结果表明该机构能平稳完成仿形运动。

1.2　变喷杆式仿形机构　变喷杆式仿形机构变形范围较大,该机构可以在“一”字型、“U”型、倒“U”型 3 种状态之间任意转换,“一”字型状态可适用于大田作物,“U”型与倒“U”型可适用于果园、景观树等多种场景,具有一机多用的特点[20]。

张慧春等[21]发明了一种仿形机械臂(图 3),该机械臂由 3 部分组成,包括 1 个主臂和 2 个侧臂,均为中空管结构。主臂与两侧臂铰接,通过液压缸调节其夹角在 0~90°变化,使得机构在“一”字型与倒“U”型之间进行转换,主臂两侧与侧臂下端均可通过内置电动推杆伸长,实现对不同树冠形状、不同作物的仿形。



注:1.滑块板与主移动臂焊接点;2.第一连杆;3.第一直角连杆; 4,9,11.液压缸; 5.滑块板;6.第二连杆;7.导向滑杆;8.第二直角连杆;10.主臂;12.右移动臂;13,16.侧臂;14.侧移动臂; 15.左移动臂。

Note:1.Welding point between slider plate and main moving rod;2.First connecting rod;3.First right angle connecting rod;4,9,11.Hydraulic cylinder;5.Slide block;6.Second connecting rod;7.Guide sliding rod;8.Second right angle connecting rod;10.Main boom;12.Right rod;13,16.Side rod;14.Side moving rod;15.Left moving rod.

图 3　林木喷雾机仿形机械臂

Fig.3　Profiling arm of forest spray machine

李振生[22]基于虚拟样机技术设计了一种可以在喷杆式与隧道式之间相互转换的机构,如图 4(a)所示,在中喷杆上设置衔架并安装气缸,侧杆通过气缸伸缩完成变角动作,将左右喷杆错位设计,不仅运输方便,还可使喷杆在非工作状态可沿轴向缩小而减小占用空间。徐幼林等[20]对设计喷杆转换机构的起降运动与变角运动进行了分析,通过建立机构起降、变角运动的运动方程,得到了原动件的角速度与其他构件间的位置、速度、加速度关系,建立机构在静力平衡状态下与原动件关于时间的函数关系,得到该装置的动力学方程并求解,用 ADAMS 动力学仿真求得机构特征位置的位移、速度、力与力矩特性曲线,其结果与动力学方程求解结果基本吻合,验证了动力学模型的正确性。

随学仕[23]在此机械结构做出改进,如图 4(b)所示,将原来用于调节喷杆高度的升降机构换成了由单个液压缸驱动的平行四边形机构,这一改进不仅使喷杆在升降过程中保持竖直状态,还避免了喷杆的前后摆动。此外,侧杆变角部分改为了由液压驱动的曲柄摇杆机构,使得侧杆由原来 0~90°角度变化扩大到 0~180°,实现喷杆 3 种状态(喷杆式、隧道式、正 U 型)之间的切换。原喷杆左右伸缩机构改为了由液压缸驱动的折叠机构,使得运输状态与工作状态之间的切换更加稳定快速。

张疼[24]设计了一种集喷杆式、隧道式、仿形式于一体的多功能喷杆机构(图 5),该装置具有结构轻便、便于运输、一机多用的特点。水平移动液压缸通过右端伸缩改变两门架的水平距离;电动推杆Ⅱ调节喷杆上下旋转完成隧道式与仿

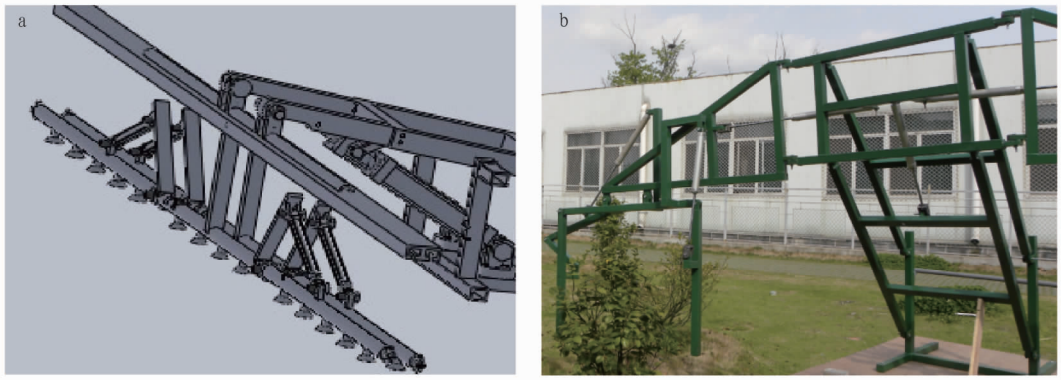
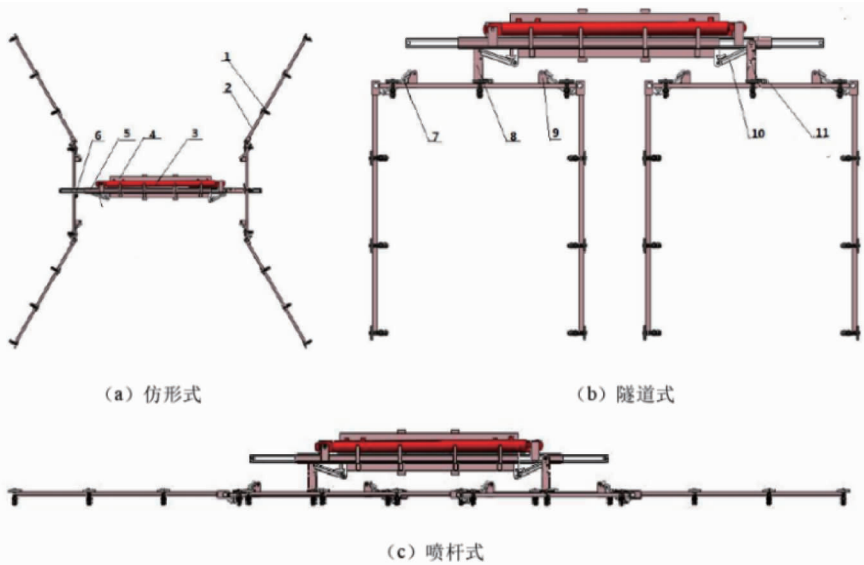


图 4 变换喷杆的研究

Fig.4 Study on changing spray bar

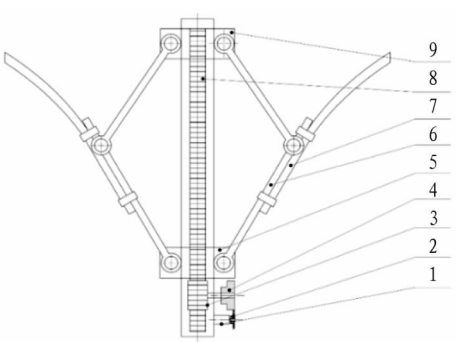


注:1.喷头; 2.喷杆; 3.水平移动液压油缸; 4.机架固定装置 ;5.固定六方管 ;6.滑动六方管; 7.电动推杆Ⅰ; 8.喷杆机架连接件; 9.电动推杆固定装置 ;10.电动推杆Ⅱ ;11.电动推杆Ⅲ。

Note:1.Spray head;2.Spray bar;3.Horizontally moving hydraulic cylinder;4.Frame fixing device;5.Fixed hexagonal tube;6.Sliding hexagonal tube;7.Electric push rod Ⅰ;8.Spray bar frame connector;9.Electric push rod fixing device;10.Electric push rod Ⅱ;11.Electric push rod Ⅲ.

图 5 三位一体多功能喷雾机

Fig.5 Trinity multifunctional spray machine



注:1.电机;2,3,4.齿轮;5.下导向块;6.支撑杆;7.喷杆;8.齿条;9.上导向块。

Note:1. Motor; 2, 3, 4. Gear; 5. Lower guide block; 6. Support rod; 7. Spray bar;8.Rack;9.Upper guide block.

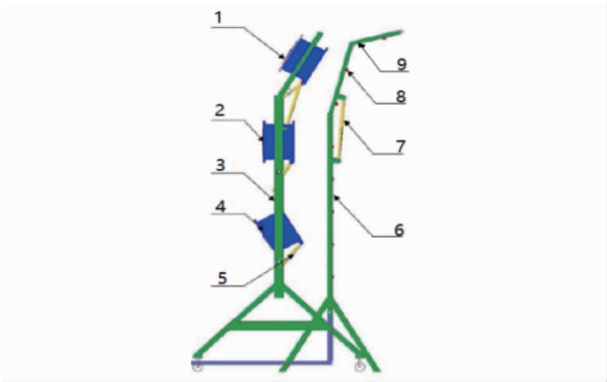
图 6 电动遥控仿形机构

Fig.6 Electric remote control profiling mechanism

形式的切换;电动推杆Ⅰ调节门架两端的推杆实现隧道式与喷杆式的切换;电动推杆Ⅲ调节门架绕竖直轴向的转动以实现喷雾机运输状态与工作状态的变换。该样机的田间试验结果表明,仿形式、隧道式、喷杆式叶面与叶背的药液附着率分别为 60.5%与 38.9%、52.2%与 37.8%、63.6%与 43.6%。在开启气流辅助系统时,雾滴沉积量分别提高了 32.1%、26.5%、13.7%。

1.3 双摇臂式仿形机构 双摇臂式仿形机构则是一种对果树单侧进行仿形的机构,工作时,该机构位于两行果树之间,左右两侧的机械臂分别对行道两侧的果树进行仿形。

李明等[25]设计了一种电动遥控仿形机构(图 6)。其上、下导向块与 4 根支撑杆组成四边活动摇杆机构。下导向块固定在机架上,上导向块与齿条焊接,通过控制电机正反转,带动齿条上下运动,从而带动上导向块上下运动,实现四边活动摇



注:1,2,4.轴流风机;3.风机机架;5.风机调角;6.喷杆支架;7.喷杆调角液压缸;8.喷头;9.顶部仿形支架。

Note:1,2,4.Axial flow fan;3.Fan frame;5.Angle adjustment of fan;6.Spray bar support;7.Spray rod angle adjusting hydraulic cylinder;8.Nozzle;9.Top profiling support.

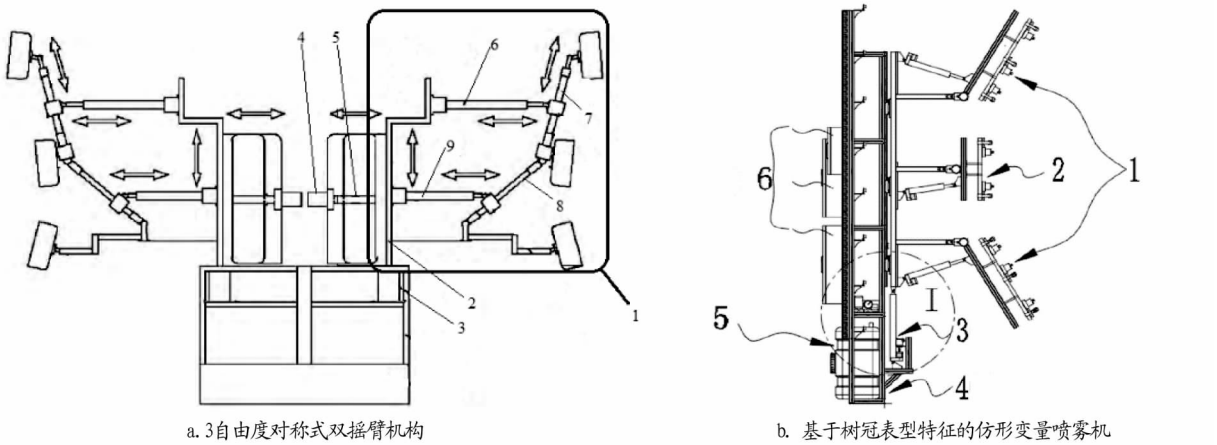
图 7　风送式仿形喷雾机

Fig.7　Pneumatic profiling spray machine

杆机构的开合控制,从而实现仿形功能。该仿形机构喷杆形状变化较为单一,无法完成不同树冠的准确仿形。

李杰[26]设计的风送式仿形喷雾机(图 7),通过调节喷杆角度与风机送风角度联合实现仿形喷雾,该装置将喷杆置于风机之前,喷杆上的液压缸用于调节喷杆状态可实现果树顶部的仿形,进一步通过控制电缸的伸缩改变风机的送风角度以改变喷雾方向,并通过正交试验得到了风机的最佳送风参数为送风风速 11.78 m/s、送风角度 30°、送风距离 25 mm,样机试验表明增加送风系统使得雾滴穿透性最大提升了 55.8%,叶片正面沉积量最大提升 60.2%,试制样机后的试验结果与仿真结果基本吻合。

房开拓[27]设计了图 8(a)所示的仿形喷雾机构,该机构左右两侧完全对称,单侧自由度为 3,以右侧机构为例,其主要包括水平调节机构和垂直调节机构。水平调节机构由电机驱动,调节仿形架整体左右移动,以适应不同行距的果树,竖直方向的调节机构由电机驱动,用于调节仿形架整体上下移动,以适应不同高度的果树。水平仿形推杆的伸缩改变连



a. 3自由度对称式双摇臂机构　　b. 基于树冠表型特征的仿形变量喷雾机

注:a 中 1.仿形架;2.垂直调节机构;3.垂直调节电机;4.水平调节电机;5.水平调节机构;6.仿形推杆;7、8.连杆;9.仿形推杆;b 中 1.仿形机构模块 A;2.仿形机构模块 B;3.升降滑动模块;4.仿形支架;5.供液系统;6.电气箱。

Note:In a1.Profiling frame;2.Vertical adjustment mechanism;3.Vertical adjustment motor;4.Horizontal adjustment motor;5.Horizontal adjustment mechanism;6.Profiling push rod;7,8.Connecting rod;9.Profiling push rod;In b1.Profiling mechanism module A2.Profiling mechanism module B;3.Lifting sliding module;4.Profiling support;5.Liquid supply system;6.Electric box.

图 8　双摇臂式仿形机构

Fig.8　Double rocker arm profiling mechanism

杆的运动状态,实现不同树冠的仿形;通过建立机构的数学模型,采用D-H法得到仿形机构各喷雾点的运动学方程,并利用 ADAMS 的运动学和动力学分析对机构参数进行优化,综合考虑喷雾点运动空间与受力状况,求得原动件最佳安装位置,使得铰链点最大受力减小了 1 282.05 N,喷雾沉积特性试验结果表明,仿形喷雾雾滴覆盖率平均值达 43.85%,变异系数平均值 26.63%,优于固定喷雾整体雾滴覆盖率平均值 29.97%,变异系数平均值 39.05%。

张慧春等[28]发明了一种树冠表型特征仿形作业臂及其控制方法(图 8b),仿形机构模块由液压缸驱动来改变其形状,仿形机构上装有超声波传感器,自动采集超声回波信号并处理获得树木冠层表型特征信息,以此调节喷雾量,以超声波传感器测得的距离信息求得仿形控制量,驱动仿形机构仿形实现对树冠轮廓的自动仿形,升降滑动模块控制仿形机构整体上下移动,适应不同高度的果树。

3 种类型仿形机构由于结构及作业原理不同,作业性能差异明显,呈现的优缺点如表 1 所示。

2　树冠仿形作业机具

随着传感器技术与电子信息技术应用于林业领域,国内外研制出了一些典型的自动仿形作业机具。

房开拓等[29-30]设计了一种针对篱笆型果树的组合圆盘式果树风送喷雾机,采用电动丝杆调节雾化器的上下左右运动,试验结果表明,组合喷雾执行装置完成升降、伸缩和旋转的时间分别为 51.3、50.5、26.5 s。刘学串等[31]设计了一种果园宽幅联合仿形修剪机,可根据果树高度、果树形状进行调节,最大切割直径为 60 mm,修剪合格率为 90.9%。

Hočevar 等[32]和 Osterman 等[33]设计了如图 9 所示的果树单侧自动仿形喷雾机,该喷雾机采用激光扫描仪测得树冠轮廓信息,通过空间定位算法确定各作业臂的位置,以液压驱动的方式调节作业臂的形状,实现对树木单侧的仿形。并采用自动控制算法控制喷头作业角度,实现仿形对靶喷雾。

表 1 各类型仿形机构优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of various types of profiling mechanisms

序号 No.	仿形机构 Profiling mechanism	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
1	倒 U 型	自由度高,有较高的包络度,喷雾更加精准,作业效率较高	连杆较多,仿形机构自重较大,其质量与惯性决定了其运动特性有严重的滞后性;由于各连杆之间运动相互影响,自动控制难度较大;仿形部分与悬挂架形成了悬臂梁,加剧疲劳磨损
2	双摇臂式	双摇臂式仿形机构的自由度较高,其布置方式也避免了悬臂梁结构,具有稳定性高的特点	该机构只能对果树单侧实现仿形,作业效率相对较低
3	变喷杆式	变形范围大,具有一机多用的特点	变换机构较为复杂,稳定性相对较差

图 9 果园自动仿形喷雾机

Fig.9 Orchard automatic profiling spray machine

李龙龙等[34]研制出了一种基于变量喷雾的果树仿形喷雾机(图 10),该设备由 ZM10000YCE 汽油发电机供电,采用激光传感器采集果树冠层信息,基于测得的距离、体积等信息,采用 PWM 间歇式喷雾技术完成对喷头运动、喷雾流量和风量的调节,实现不同果树的仿形喷雾。在行株距为 5 m×2 m 的苹果树试验得到果树左右两侧平均沉积量分别为1.92 和 1.37 μL/cm^2,雾滴沉积个数大于 46.2 个/cm^2。

图 10 果园自动仿形变量喷雾机

Fig.10 Orchard automatic profiling variable spray machine

塔里木大学张德智[35]研制了红枣园喷雾机,该喷雾机最大作业幅宽 4 m,最大喷雾高度 3 m。仿形喷杆采用 PVC 管与钢筋,使其具备柔性变形功能与支撑功能,田间试验结果表明,风送式仿形喷雾方式能够有效对矮化密植枣树进行喷雾作业,且较人工喷雾有效节省用药量。

3 存在的问题及建议

发展和应用精准智能施药装备技术是果园植保领域的重要趋势,其中仿形喷雾技术尤为典型,通过综述国内外研究现状,结合当前生产实践情况,归纳制约植保机械智能化提升的主要因素。

(1)农艺无统一标准,果树种植模式分散。果树的建园模式是推广先进植保机械大面积作业的基础,大多数农户在建园初期未考虑到机械化作业方式,使得果树种植模式与植保机械不能有机融合,只能采用传统的植保方式,导致很多先进植保机械无法得到实际应用与推广,从而限制了果园经济的发展[36]。

(2)植保装备智能化技术亟待走出实验室,开展产业化应用。随着计算机技术、传感技术、控制技术及机器视觉技术等的发展,植保作业与上述技术的结合,使得果园植保取得较大的研究进展,但目前大部分相关研究仍处于试验阶段,还无法得到实际应用与推广。

(3)精准施药技术到位率低,未彰显作业优势。由于农户对精准施药信任度不高,认为只有加大农药的喷洒量才能

有效防治病虫害,在实际果园作业中,即使应用了精准施药机具,但仍然以“雨淋式”大雾量施药方式为主,减药增效的作业优势无法体现。

基于以上问题,为发展以果树冠层仿形喷药为代表的精准施药技术,进一步推广应用先进智能化施药装备,提出以下几点建议:

(1)政府积极引导,推进标准化果园建设,加速农机与农艺融合。推广应用主干结果型标准化果园种植模式,统一果树的行距、株距以及果树冠层形状等,为先进智能施药装备提供更为结构化的作业环境,使农机与农艺有机融合,提高机具识别、定位、作业精度。

(2)加大人才资金投入力度,不断提升植保机械智能化技术水平。加大果园智能植保机械的科学研发力度,鼓励科技人才投身农业研究,加强高新技术的应用与推广,如静电喷雾、对靶喷雾、变量喷雾技术等。通过人工智能、机器学习等先进算法,提高标靶识别精度,进一步夯实、提升智能植保技术水平。

(3)大力推广以冠层仿形技术为代表的智能施药技术装备,广泛应用于实践生产。为先进植保技术及装备走出实验室提供政策、基层保障,大力宣传仿形喷雾等精准植保技术的作业优势,提高先进植保机具成果转化以及农户购置补贴标准,建立智能植保技术装备示范应用基地,推进产、学、研、用深度融合。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.

[2] 郑永军,陈炳太,吕昊暾,等.中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J].农业工程学报,2020,36(20):110-124.

[3] 张悦,宋月鹏,韩云,等.丘陵山区果园植保机械研究现状及发展趋势[J].中国农机化学报,2020,41(5):47-52.

[4] 陆华忠,李君,李灿.果园机械化生产技术研究进展[J].广东农业科学,2020,47(11):226-235.

[5] 温翔宇.丘陵山区果园机械化装备发展现状分析与展望[J].广东科技,2021,30(2):34-38.

[6] 赵映,肖宏儒,梅松,等.我国果园机械化生产现状与发展策略[J].中国农业大学学报,2017,22(6):116-127.

[7] 宋淑然,李琨,孙道宗,等.山地果园植保技术与装备研究进展[J].现代农业装备,2019,40(5):2-9.

[8] 陆丹丹,柳国光,楼婷婷,等.南方丘陵地带果园管理机械发展思路与对策[J].农业开发与装备,2020(6):12-13.

[9] 秦喜田,刘学峰,任冬梅,等.我国果园生产机械化现状及其发展趋势[J].农业装备与车辆工程,2019,57(S1):35-38.

[10] 郑棋棋,汤奇荣,张凌楷,等.空间机械臂建模及分析方法综述[J].载人航天,2017,23(1):82-97.

[11] 冷舒,吴克,居鹤华.机械臂运动学建模及解算方法综述[J].宇航学报,2019,40(11):1262-1273.

[12] 王贵恩,洪添胜,李捷,等.果树施药仿形喷雾的位置控制系统[J].农业工程学报,2004,20(3):81-84.

[13] 洪添胜,王贵恩,陈羽白,等.果树施药仿形喷雾关键参数的模拟试验研究[J].农业工程学报,2004,20(4):104-107.

[14] 郑加强,徐幼林.环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J].农业机械学报,2021,52(3):1-16.

[15] 王贵恩.果树仿形喷雾机理及其关键技术[D].广州:华南农业大学,2003.

[16] 张建瓴,陈树军,可欣荣,等.仿形喷雾装置的设计及分析[J].现代制造工程,2006(1):120-122.

[17] 遇宝俊.多关节树木仿形喷雾机及其关键部件研究[D].南京:南京林业大学,2014.

[18] 尹翔宇.变喷杆喷雾机喷杆自动仿形系统的研究[D].南京:南京林业大学,2015.

[19] 霍鹏.果园仿树形喷杆施药装置设计与试验[D].保定:河北农业大学,2021.

[20] 徐幼林,李振生,郑加强.喷杆转换机构多刚体动力学分析及仿真研究[C]//2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集.杭州:中国农业机械学会,2012:301-306.

[21] 张慧春,南玉龙,郑加强,等.一种林木喷雾机仿形机臂及其仿形喷雾的方法:CN201810246106.8[P].2018-07-06..

[22] 李振生.基于虚拟样机技术的喷杆转换机构研究[D].南京:南京林业大学,2010.

[23] 随学仕.多功能喷雾机喷杆变换机构研究[D].南京:南京林业大学,2012.

[24] 张疼.三位一体多功能喷雾机研制与试验研究[D].雅安:山东农业大学,2016.

[25] 李明,戴思慧,袁晴春,等.一种电动遥控静电可调仿形喷雾机:CN201410561506.X[P].2015-02-04.

[26] 李杰.柑橘仿形喷雾机的研制与性能测试[D].武汉:华中农业大学,2019.

[27] 房开拓.智能型果树仿形施药系统研究[D].无锡:江南大学,2012.

[28] 张慧春,南玉龙,周宏平,等.基于树冠表型特征的仿形变量喷雾机及仿形控制方法:CN202010911259.7[P].2020-11-24.

[29] 房开拓,周良富,尤丽华.果园仿形风送喷雾机构设计与试验[J].中国农机化学报,2022,43(3):68-74,83.

[30] 周良富,傅锡敏,丁为民,等.组合圆盘式果园风送喷雾机设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(10):64-71.

[31] 刘学串,刘学峰,张立峰,等.新型果园宽幅联合仿形修剪机设计与研究[J].中国农机化学报,2020,41(8):65-71.

[32] HOČEVAR M,ŠIROK B,JEJČIČ V,et al.Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards[J].Journal of plant diseases and protection,2010,117(2):71-79.

[33] OSTERMAN A,GODEŠA,HOČEVAR M,et al.Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J].Computers and electronics in agriculture,2013,98:175-182.

[34] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等.基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):70-76.

[35] 张德智.矮化密植红枣枣园喷雾机的研究与设计[D].阿拉尔:塔里木大学,2016.