

智能控制在木材加工和林业机器人中的应用研究进展^{*}

陈思晗^{1,2} 张长青^{1,2}

(1 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091; 2 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:近年来智能控制被广泛应用于工业过程控制和智能机器人控制领域,旨在解决传统控制方法难以解决的高度非线性、模型不精确和复杂任务要求等控制问题。将智能控制应用于木材加工过程和林业机器人相关的控制系统中,能够克服传统控制的弊端、改善系统控制品质,显著提升木材加工及林业生产效率。文中概述智能控制在木材干燥、刨纤板施胶、中纤维板热压过程控制和林业机器人控制中的应用现状,分析目前应用中存在的不足和问题,并提出了相关建议,对智能控制在木材加工和林业机器人中的应用前景进行展望,以期促进林业向自动化、无人化和智能化方向的产业升级。

关键词:智能控制,木材加工,林业生产,过程控制,林业机器人

中图分类号:S776, TP273⁺⁵

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2023)03-0045-06

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2023.0026.y

Research Progress in Application of Intelligent Control in Wood Processing and Forest Robots

Chen Sihan^{1,2} Zhang Changqing^{1,2}

(1 Research Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091 China;

2 Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Intelligent control has been widely applied in industrial process control and intelligent robot control in recent years, with the aim at solving control problems such as high nonlinearity, model inaccuracy, and complex task requirements, which are difficult to be solved by traditional control methods. The application of intelligent control to the control system related to wood processing and forest robot can overcome the drawbacks of traditional control, improve system control quality, and significantly improve the efficiency of wood processing and forestry production. The paper summarizes the current application of intelligent control in wood drying, glue application for particleboard, hot press process control for fiberboard and forest robot control, analyzes the gaps and problems in the application, and proposes relevant suggestions. The prospects of future application of intelligent control in wood processing and forest robots are elaborated in order to promote the upgrading of forestry sector towards automatic, unmanned and intelligent directions.

Keywords: intelligent control, wood processing, forestry production, process control, forestry robot

随着林产品市场规模的不断扩大和相关政策的扶持,近年来我国林业产业链不断调整,产业结构日益完善,林业经济形势日趋向好^[1-2]。虽然在世界范围内我国木材及木制品的生产能力和消费市场均位居前列,但人均占有及可供消费的林木资源却很少^[3]。为解决日益增长的市场需求与林木资源供应不匹配的问题,应大力开展林草科技,提高木材加工效率和

林木资源利用率以实现林业高质量发展。智能控制被用于解决高度非线性、任务复杂和模型不精确等控制难题,近年来也被应用于木材加工过程及林业机器人控制系统。在木材加工中,木材干燥、刨纤板施胶和中密度纤维板热压等需要对多个状态参量进行调节和控制,智能控制能够提高系统的控制精度、响应速度和抗扰能力,进而提高加工效率和产品质量。相

*收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-04-16; 网络出版日期: 2023-04-18。

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“四头电主轴操作臂耦合木构件运动控制系统研究”(CAFYBB2020SY043)。

第一作者: 陈思晗,男,硕士研究生,主要研究方向为木材加工装备及自动化, E-mail: 1060596602@qq.com。

通信作者: 张长青,女,博士,主要研究方向为木材加工装备及自动化、林业智能装备与信息化, E-mail: zhangchangqing69@sina.com。

比普通林业机械,林业机器人控制任务更为复杂,对控制精度和外部干扰的自适应性要求更高,因此其控制系统的设计也尤为重要。采用智能控制可使机器人迅速响应外界环境变化,确保各类任务完成的效率和质量。本文将阐述近年来智能控制在木材加工过程和林业机器人控制中的研究应用现状,针对出现的不足和问题提出改进建议,并对智能控制在木材加工过程和林业机器人控制中的应用前景进行展望。

1 智能控制在木材加工中的应用

木材加工行业具有能耗低、污染小和资源可再生性的特点,在国民经济中占有重要地位^[4]。随着木材加工产业规模扩大和产品质量要求提高,加工过程参数的控制精度和控制难度更高。为满足加工生产的需求,越来越多的学者在木材加工过程中采用模糊控制、神经网络控制、智能 PID 等智能控制的方法,提高系统控制精度和稳定性,以提升整个加工过程的效率、连续性和自动化程度。

1.1 木材干燥过程控制

木材干燥是一个将木材含水率降低至所要求标准的重要木材加工环节,对后续加工及木制品成型质量和使用寿命有很大影响^[5]。确保木材干燥的质量是改善产品品质、提高木材综合利用率和减少成本的关键。木材干燥过程对环境温度、相对湿度、含水量等均有严格的控制要求,并涉及预处理、干燥、后处理等多个不同阶段的优化控制。选用合适的智能控制算法能够有效地改善干燥质量、降低能耗和成本。

Wang 等^[6]根据木材干燥基准表,提出含水量与干燥温度之间的模糊规则,设计了模糊自适应控制器。与自适应控制相比,模糊自适应控制将含水量的误差率从 0.6% 降到 0.3%,平均干燥温度由 50 ℃ 降低为 46 ℃。Zakarias 等^[7]在太阳能干燥中提出了一种混合模糊控制策略,依据不同的天气条件设计对应的隶属度函数进行控制器的切换。经实验验证,混合控制器比单一控制器对于系统的调节能力更加优良、效率更高。周正等^[8]对木材干燥窑温度和木材含水率之间强耦合关系进行解耦,设计了一种自适应模糊滑模控制器。与传统 PID 控制和滑模控制相比,该控制器降低了最大超调量,缩短了响应时间,在相同干燥基准下耗时更短、能耗更低。姜滨等^[9]利用 BP 神经网络的自学习能力,动态调整模糊控制的相关参数,提高了高频真空木材干燥过程的控制性能,与模糊控制相比温度上升快、控制精度高、稳定性好。张少如等^[10]引入免疫粒子群算法对模糊神经网络进行优化,提升了

全局寻优性能,避免了系统陷入局部极值,优化后干燥过程温、湿度控制更加迅速和平滑,误差更小。Jia 等^[11]将生物免疫系统调剂机制引入控制系统中,提出了一种免疫 PID 控制器,对易受外界扰动和参数不确定性的木材干燥控制系统进行仿真实验,结果表明免疫 PID 控制能够有效地控制整个干燥过程。夏春江等^[12]为提高木材干燥过程参数检测精度,引入了深度学习中深度置信网络(DBN),设计了一种 DBN-PID 控制算法,相比于 BP-PID 算法其对含水量检测精度更高,改善了木材干燥的质量。

木材干燥过程模糊控制应用广泛,但模糊控制设计尚缺乏系统理论性,依赖于实践经验,对高频干燥、微波干燥、太阳能干燥、真空干燥等非常规干燥控制精度有限。可以将模糊控制与神经网络、进化算法等结合,优化系统结构,提高控制品质。

1.2 刨纤板施胶过程控制

刨纤板指刨花板和纤维板一类的人造板,其施胶过程是将胶粘剂和其他添加剂按照一定比例均匀施加到刨花和纤维中^[13]。施胶过程是刨纤板生产的重要工序,施胶精准度对板材的性能、质量、合格率及成本有很大影响。但在实际加工中,实现施胶过程的精准控制不容易。施胶过程被控对象模型参数不确定且易受外界干扰,传统 PID 难以满足现今生产需要。采用智能 PID,不仅能实现配比关系的精确性,还能提高系统的稳定性和鲁棒性,对提高产品合格率、降低成本有着重要的现实意义。

张丽^[14]基于遗传算法的寻优能力对刨花板施胶 PID 控制器参数进行在线整定,优化后系统响应速度更快、自适应能力更强、控制品质更好。姜其锋^[15]在人造板调施胶系统中采用模糊 PID,实现 PID 参数的实时调整。与传统 PID 相比,其更加灵活且适应性更强,超调量由 26% 降低为 8%,调节时间由 12 s 减小为 9 s,反映出系统良好的动态性能和稳定性。神经网络可适用于模型无法确定和规则难以描述的控制对象,在刨纤板施胶过程控制系统中,神经网络 PID 控制具有很大的优势。李婧讴等^[16]为了缩短施胶系统受干扰后恢复稳态的时间,设计了一种模糊神经网络 PID 控制器,让控制器具有自学习、自适应的能力,提高了系统的控制精度、鲁棒性和平稳性,实现了施胶过程胶液的最佳配比。Wang 等^[17]为了实现胶液配比和流量跟踪的高精度控制,提出一种基于神经网络观测器的改进型自抗扰控制器,并首次引入到刨花板施胶控制系统中,通过严格的李亚普诺夫分析证明了该方法的可行性。仿真实验表明,该系统具有快速、准

确地跟踪期望信号的优秀能力,以及对干扰和噪声的鲁棒性。朱良宽等^[18]设计了一种基于非线性扩张的状态观测器,并加入双曲正切函数的鲁棒控制器的模型降阶自抗扰控制器。仿真实验表明,控制器拥有很好的鲁棒性,能够提高系统控制精度和快速性。

施胶系统易受外界干扰、控制参数复杂,胶液配比过程流量控制的实时性要求很高,环境波动、各种不确定因素对实现输出精确地跟随输入有着很大的影响。除智能 PID 控制外,可采用鲁棒性更强的自抗扰控制、鲁棒控制来提高系统的抗扰能力、稳定性和快速性。

1.3 中密度纤维板热压过程控制

与天然木材相比,中密度纤维板(MDF)结构更为均匀,密度适中、表面平整光滑、机械加工性能良好,具有不错的抗弯曲强度和冲击强度^[19]。热压过程是施胶的后续工艺,其基本参数控制的精确性对板材密度、强度、板坯厚度等性能指标有着很大影响。目前 MDF 热压过程控制研究主要集中在热压压力、温度、时间及热压机伺服控制方面。

孙海佳等^[20]通过研究板坯厚度、热压温度、加热方式、板坯材质、板坯含水率与热压时间的相关性,设计了 MDF 热压时间模糊控制规则表,将板胚厚度和热压温度偏差作为输入量、热压时间作为输出量,明显改善了因热压时间不合理而导致的板材鼓包和水渍现象。李新华等^[21]基于欧姆龙 PLC 和压力传感器构建热压压力自动控制系统,通过模糊 PID 实现了压力较为精确的控制,同时设计了人机交互的监控界面对热压压力进行实时监控,系统达到了较高的连续性和自动化程度。王野平等^[22]利用 BP 神经网络自学习和逼近非线性函数的能力来解决 MDF 热压压力控制存在的大惯性、纯滞后和非线性的问题,优化后的系统响应速度快、稳定性好且不存在超调震荡。在热压工艺过程中,确保连续热压机液压伺服系统精确的位置跟踪控制是实现板胚厚度控制的关键。Zhou 等^[23]为确保 MDF 板胚厚度的精确性,研究了基于智能动态表面控制(DSC)的连续热压工艺,引入自适应模糊逻辑系统对连续热压机液压伺服数学模型中的不确定函数进行模拟,设计了一种板胚厚度跟踪器,实验证明该方法能够很好地保证热压过程板材厚度的精度。Zhu 等^[24]提出了一种基于自适应径向基函数神经网络(RBF)的分阶全局快速终端滑模控制策略,通过 RBF 网络近似连续热压机位置伺服系统的外部负载干扰,利用自适应定律估算内部未知参数的上界,克服可能出现的内部参数扰动。仿真实验结果表明,

该策略能够确保跟踪控制的精度,提高了系统的快速性和鲁棒性,为后续的试验台实验研究提供了理论基础。

针对热压机伺服系统内部参数的不确定性、外部干扰和未建模部分等问题,可利用神经网络非线性逼近的能力进行系统辨识,以提高模型精度和改善控制品质。在热压过程控制系统中被控参数多且耦合性强,因此系统的解耦控制也是今后的研究方向。

2 林业机器人智能控制

由于林业生产的迅速发展和生产方式的改变,一些自动化、智能化程度低的林业装备已无法适应复杂的工作环境和多样化的生产需求。林业机器人的产生弥补了这方面的不足,有效地提升了林业生产经营的自动化和智能化水平,提高了生产力和效率,显著降低了生产过程中的事故率,增强了安全性,在一定程度上缓解了林业劳动力短缺的问题,对促进林业现代化有着十分重要的意义^[25~26]。林业机器人按照应用场景可以分为林业生态机器人^[27]、林业产业机器人^[28]和林业特种机器人^[29]。近年来,除了对机器人本体机械结构的设计外,林业机器人的智能化程度也开始受到关注,在智能控制方面也开展了相关研究。

2.1 林业生态机器人

林业生态机器人主要应用于采伐、抚育、播种和森林防护等领域,工作环境大多为森林林地等野外环境,地形、气候等不确定因素对机器人的精确控制造成了很大的难度。

为了克服林业采伐机器人电液比例位置控制系统参数时变、不确定性和非线性的问题,郭秀丽等^[30]设计了基于模糊自适应卡尔曼滤波的 RBF 神经网络控制器,实现了机械臂对木材定位、采伐和归堆多功能自动作业,有效避免了采伐过程中的危险,实验结果表明效率较人工提高了 10~15 倍。Jennifer 等^[31]将强化学习的策略引入到林业起重机机器人,对操作臂进行强化学习控制,抓取成功率达 97%;在学习过程中将奖励函数加入能量优化目标后,能耗显著降低,抓取的成功率保持在 93%,表明该方法对环境干扰和不确定因素具有一定的鲁棒性。针对传统农林播种机器人播种效率和合格率低及均匀性差等缺点,Wang 等^[32]设计了一种双闭环模糊 PID 控制算法,实现了对电机的高精度速度控制。在播种实验中,当理论播种速度为 0~34 r/min 时,电机的响应时间比普通 PID 控制缩短了 0.51 s,速度误差小于 0.35%,平均种植间隔合格率大于 95.81%。Ghamry 等^[33]通过粒子群算法对

森林消防多无人机控制系统进行优化,在考虑控制输入约束的同时,计算最优控制输入,避免无人机在运动过程中潜在的碰撞,能够有效地完成森林防火任务。Zhang 等^[34]对防火机器人多传感器信息融合检测系统开展研究,在检测过程中基于 BP 神经网络来融合特征层,并选择模糊控制来融合决策层。测试结果表明,训练后运行时间为 0.027 6 s,均方误差为 0.001 3,精度水平良好,基本达到了对检测精度的要求。为了提高喷洒机器人路径跟踪精度和行驶过程的稳定性,Ren 等^[35]提出一种双重深度 Q 网络(DQN)的导航路径跟踪控制算法,显著降低了横向偏差,具有较高的路径跟踪精度和驱动稳定性,提高了灌溉和病虫防护工作的效率。

2.2 林业产业机器人

林业产业机器人主要应用于林木生产加工,如木材、家具和木构件加工以及经济林果的采收等。对机器人控制算法进行改进,可以提高生产加工效率、产品质量和木材利用率。

为提高木构件打磨机器人打磨加工的效率和质量,张连滨等^[36]设计了一种改进型的模糊神经网络控制器,对打磨轨迹跟踪控制。仿真实验表明,该控制器跟踪误差在 ± 0.01 mm,能够实现良好的启动控制和高精度的曲线轨迹跟踪。郑立平等^[37]为了实现弯曲木加工过程速度和压力的特定控制要求,采用 BP 模糊控制,提高了弯曲速度和弯曲力向理想状态收敛时的效率、减少了震荡,控制精度更高,能够实现压力和速度的最优控制。徐强等^[38]对喷涂机器人采用一种基于迭代学习的 PID 控制,PID 构成内环、迭代学习控制器为外环,对于实现机器人对预设轨迹的高精度跟踪控制具有较高的实际应用价值。Fan 等^[39]针对推摇式油茶果采摘机器人的机械臂设计了一种 RBF 神经网络模糊滑模控制器,基本消除了机械臂关节力矩的抖振,实现了关节稳定的跟踪规定轨迹,跟踪误差在 0.06 mm 内。经实验验证,该控制器响应迅速、稳定性好、鲁棒性强,可以在提高采摘率的同时降低落花率。Ma 等^[40]为了减少环境因素对枸杞采摘机器人的干扰,采用了模糊控制的策略,输入量为机器人的横向偏差和偏转角度,输出量为机器人的转向强度。实验结果表明,机器人运行时最大横向偏差和平均横向偏差均显著减小,具有良好的鲁棒性,基本能够完成真实环境下枸杞的自动采摘。

2.3 林业特种机器人

为满足林业生产经营的特定需求,目前已衍生出一批林业特种机器人,如巡检机器人、攀爬机器人、野

外作业机器人等,能够替代人类从事一些重复且危险性高的工作,减少事故发生率,提高安全性和工作效率。

为减小对古建筑木立柱的破坏和提高检测的可靠度,刘存根等^[41]采用模糊 PID 对攀爬机器人水平伸缩关节夹持力进行精确控制,通过巴特沃斯二阶低通滤波有效减小噪声的干扰,与耦合 PD 控制相比,夹持力的控制精度最大提高了 51.8%。Canning 等^[42]开发了一种用于森林巡检机器人的导航的行为模块分解模糊逻辑控制器,控制器结构简单,能够自主规划机器人在森林环境中的前行路径,减小了人工参与程度,提高了操作的安全性。Xie 等^[43]设计了一种能够实现山区森林检测机器人上升下移运动的模糊控制器,Matlab 仿真实验表明,机器人在穿越障碍物时能够准确地把握直线方向,有效保持身体的稳定性,证明了该方法的可行性。王少辉等^[44]以树障清理机器人为研究对象,设计了一种滑模姿态控制器,结合切换控制分配矩阵的方法解决了空中切割树障作业时机器人动力学模型突变的问题。实验结果表明,该控制策略有效地克服了机器自身惯量的不确定性,可保持机体作业时的姿态稳定。Xu 等^[45]在一种带有新型悬挂锯的空中修枝机器人系统中,设计了一种基于自抗扰控制的位置和姿态控制器,以及一种基于线性 SEF 方法的摆动角度控制器,实现了机器人快速、准确、稳定的飞行,可有效地抑制挂载的摆动和达到指定位置后的残余振荡。

林业机器人起步晚、发展慢,但近年来也进入了发展的快速时期。为了面向复杂多变的工作环境,目前林业机器人研究更多地集中于视觉检测系统和机械本体结构设计,如行走机构和执行机构;而控制系统的研究大多停留在开环或简单的 PID 闭环控制方面,对智能控制算法的研究还不够深入。

3 研究展望

与传统控制方法相比,智能控制方法在处理非线性、控制模型不精确和复杂任务需求等问题时控制效果好,能够显著改善木材加工过程控制和林业机器人控制系统的控制品质,在提高木材加工、林业生产效率及林木资源利用率上均有很大的优势。目前许多应用研究仅停留在仿真实验和实验室阶段,虽然取得了不错的研究成果,但未考虑在工程应用时现实环境、软硬件设备、网络通信条件等带来的实际误差,从应用研究现状来看仍有很大的优化和发展空间。针对目前所遇到的不足和问题,提出以下建议和展望:

- 1)深入研究多种智能控制算法的配合使用,取长

补短,发挥各自优势。针对木材加工过程中存在的大惯性、纯滞后现象,可将模糊控制、神经网络控制、预测控制、自适应控制、变结构控制、自抗扰控制和优化算法等结合相互特点配合使用,以提高系统控制精度、稳定性和快速性。

2)综合考虑实际应用中的时间和经济成本以及加工生产需求等多个因素,确保系统良好的控制性能,设计性价比高、鲁棒性好、自适应性强的算法,降低工程实现难度,提高木材加工过程和林业机器人智能化程度,促进林业向自动化、无人化和智能化方向的产业升级。

3)将能耗及污染排放纳入木材加工过程和林业机器人系统的控制目标,形成完整的控制性能评价体系,探索控制精度、能耗成本及环境污染三者间的最优控制,以求达到生产要素投入少、资源配置高、环境成本低,经济和社会效益好,实现绿色高质量发展。

4)积极开展企业高校间多层面的合作交流,结合物联网技术、通信技术等,联合研发智能控制装备,有效驱动现有学术研究成果转化落地成为现实生产力,提高工作生产效率和林木资源利用率。

参 考 文 献

- [1] 佟光霁,耿晓雪.国有林区经济转型认知调查与分析:以伊春市为例[J].林业经济,2018,40(2):19–23,57.
- [2] 陈腾达.林业产业结构变动对林业经济增长的价值研究[J].产业创新研究,2022,98(21):91–93.
- [3] KE S F, QIAO D, ZHANG X X, et al. Changes of China's forestry and forest products industry over the past 40 years and challenges lying ahead[J]. Forest Policy and Economics, 2021, 123(1). DOI:10.1016/j.forepol.2020.102352.
- [4] 解德艳.我国木材加工产业现状及对策分析[J].林业勘查设计,2013(3):85–92.
- [5] 丁奉龙,刘英,贺婷.人工智能在木材加工中的应用[J].世界林业研究,2021,34(1):42–47.
- [6] WANG X G, LIU W, GU L, et al. Development of an intelligent control system for wood drying processes[C].2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001: 371–376.
- [7] SITUMORANG Z, SITUMORANG J A. Intelligent fuzzy controller for a solar energy wood dry kiln process[C].2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E). IEEE, 2015: 152 – 157.
- [8] 周正,梁春英.木材干燥模糊自适应滑模控制器设计[J].东北林业大学学报,2021,49(8):122 – 125.
- [9] 姜滨,孙丽萍,曹军.高频真空木材干燥的模糊神经网络控制方法研究[J].中国工程科学,2014,16(4):17 – 20.
- [10] 张少如,孙丽萍.引入免疫粒子群优化算法的木材干燥模糊神经网络控制系统设计[J].东北林业大学学报,2016,44(12):83 – 90.
- [11] JIA H M, SONG W L, WANG H T, et al. Immune PID algorithm of wood drying control system[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(9): 248 – 258.
- [12] 夏春江,王培良.基于DBN-PID的木材干燥窑参数检测系统[J].计算机测量与控制,2015,23(1):99 – 101,105.
- [13] 朱良宽,刘冬皓,曹军.刨纤类人造板调施胶工艺特性分析与主参数控制模型研究[J].自动化技术与应用,2013,32(11):15 – 23.
- [14] 张丽.基于自适应遗传算法整定的刨花板施胶PID控制[J].林业机械与木工设备,2008,36(7):42 – 44.
- [15] 姜其锋.基于Fuzzy-PID的人造板调施胶系统的研究[D].吉林市:东北电力大学,2016.
- [16] 李婧讴,孙丽萍.MDF施胶系统模糊神经网络PID控制[J].木材加工业,2013,24(1):31 – 33.
- [17] WANG P, ZHANG C, ZHU L, et al. The research of improved active disturbance rejection control algorithm for particleboard glue system based on neural network state observer[J]. Algorithms, 2019, 12(12): 259. DOI: 10.3390/a12120259.
- [18] 朱良宽,程赛葛,王沛煜.模型降阶的刨花板施胶自抗扰控制[J].控制工程,2022,29(4):707 – 716.
- [19] 陈芯锐.基于分数阶滑模的MDF连续热压机液压伺服系统控制方法研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2021.
- [20] 孙海佳,孙丽萍,姜滨.中密度纤维板热压时间模糊控制研究[J].木材加工业,2014,25(2):4 – 6.
- [21] 李新华,邓贞贞,邓富洲.人造板连续压机的压力自动控制系统研究[J].中南林业科技大学学报,2012,32(4):216 – 219.
- [22] 王野平,陈文倩,江华荣.基于BP算法的中密度纤维板热压机压力控制研究[J].华东交通大学学报,2012,29(4):29 – 34.
- [23] ZHOU Y G, ZHU L K, WANG Z B. Medium density fiberboard continuous hot-pressing process based on intelligent DSC[C].2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2018: 1 – 6.
- [24] ZHU L, CHEN X, QI X, et al. Research on fractional-order global fast terminal sliding mode control of mdfcontinuoushot-pressing position servo system based on adaptive rbfneuralnetwork[J]. Electronics, 2022, 11(7): 1117. DOI: 10.3390/electronics11071117.
- [25] 刘延鹤,傅万四,张彬.林业机器人发展现状与未来趋势[J].世界林业研究,2020,33(1):38 – 43.
- [26] ABDELSALAM A, HAPONEN A, KARHA A, et al. Toward autonomous vehicles and machinery in mill yards of the forest industry: technologies and proposals for autonomous vehicle operations[J]. IEEE Access, 2022, 10: 88234 – 88250.
- [27] 徐海燕,姜树海.森林作业机器人研究动态[J].世界林业研究,2017,30(2):51 – 55.
- [28] 钟燕,赵鹏炜,李佳淇.林业攀爬机器人研究现状及关键技术综述[J].世界林业研究,2022,35(3):40 – 44.
- [29] GIOVANNI C, MAZZETTA F, RENATO V. Design and evaluation of a branch sensing system for a climbing and pruning robot[C].2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor). IEEE, 2021: 454 – 459.
- [30] 郭秀丽,陆怀民.采伐联合机设计与研究[J].机械设计,2010,27(8):14 – 17,86.

- [31] ANDERSSON J, BODIN K, LINDMARK D, et al. Reinforcement learning control of a forestry crane manipulator[C].2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots And Systems (IROS). IEEE, 2021: 2121 – 2126.
- [32] WANG W, WU K, ZHANG Y, et al. The development of an electric-driven control system for a high-speed precision planter based on the double closed-loop fuzzypid algorithm[J]. Agronomy, 2022, 12(4): 945. DOI: 10.3390/agronomy12040945.
- [33] GHAMRY K A, KAMEL M A, ZHANG Y. Multiple uavs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization[C]//2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2017: 1404-1409.
- [34] ZHANG J J, YE Z Y, LI K F. Multi-sensor information fusion detection system for fire robot through back propagation neural network[J]. Plos One, 2020, 15(7). DOI:10.1371/journal.pone.0236482.
- [35] REN Z, LIU Z, YUAN M, et al. Double-dqn-based path-tracking control algorithm for orchard traction spraying robot[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2803. DOI: 10.3390/agronomy12112803.
- [36] 张连滨, 葛浙东, 鞠明远. 改进型神经网络在木件打磨机器人中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(4): 19 – 22, 25.
- [37] 郑立平, 陈叶叶, 杨存亮. 弯曲木成型加工机器人BP模糊控制理论分析与实验研究[J]. 木工机床, 2017(4): 17 – 20.
- [38] 徐强, 郑磊, 蒋立军. 基于迭代学习控制的喷涂机器人轨迹精度策略研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(27): 95 – 97.
- [39] FANG Z Y, LI L J, GAO Z C, et al. Neural network fuzzy sliding mode control design of camellia fruit picking manipulator[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America:AMA, 2021, 52(1): 2597 – 2624.
- [40] MA Y, ZHANG W Q, QURESHI W S, et al. Autonomous navigation for a wolfberry picking robot using visual cues and fuzzy control[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(1): 15 – 26.
- [41] 刘存根, 周玉成, 刘晓平. 一种古建筑木立柱CT扫描攀爬机器人[J]. 林业科学, 2018, 54(11): 96 – 103.
- [42] CANNING J R, EDWARDS D B, ANDERSON M J. Development of a fuzzy logic controller for autonomous forest path navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1): 301 – 310.
- [43] XIE Y, XIAO A P, WU J, et al. The structure to a brachiation inspection robot and its fuzzy control for obstacle-negotiation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 278/279/280: 622 – 628.
- [44] 王少辉, 杨忠, 张秋雁. 树障清理空中机器人的姿态控制器设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 247 – 256.
- [45] XU H, YANG Z, CHANG L, et al. ARSS: a novel aerial robot performs tree pruning tasks[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020(3): 1 – 14.