

变量喷雾智能控制

宋乐鹏 彭 军 著

INTELLIGENT CONTROL FOR VARIABLE RATE SPRAYING



西南交通大学出版社

内容简介

本书是作者近几年来从事面向精准农业变量喷雾控制方法的研究与总结。全书共10章, 主要内容包括变量喷雾的意义与研究现状、变量喷雾控制系统建模、变量喷雾系统的模糊控制器、遗传算法、粒子群算法、混沌优化变量喷雾系统、Simulink中变量喷雾系统建模与仿真分析、变量喷雾控制系统试验平台的构建、变量喷雾控制系统软件设计、变量喷雾控制系统调试与分析以及变量喷雾控制系统研究。其中, 附录中加入了作者关于变量喷雾系统的研究论文, 以方便读者理解本书的内容。此外, 在附录中还介绍了遗传算法优化变量喷雾控制器的源程序。

本书可作为从事面向精准农业控制工程的技术人员, 高等工科院校自动化、农业工程、农业机械化及其自动化、电子信息工程、电气工程及其自动化等相关专业师生的参考读物, 也可供其他专业师生和工程技术人员参考。

作者简介

宋乐鹏, (1976.10—), 重庆科技学院电子信息工程学院教师、自动化系副主任, 陕西耀县人, 副教授。

《Lecture Notes in Electrical Engineering》期刊 (ISSN:1876-1100) 副主编, 控制工程期刊编委 (ISSN:2167-0196), 西南交通大学出版社“十二五”规划教材编委, IEEE会员, 农业工程协会会员, 中国电工技术学会会员, 美国农科院、威斯康星大学和南京航空航天大学访问学者。

教学方面, 主要负责“自动控制原理”等课程的教学。参加四次青年教师讲课比赛, 获三次一等奖, 一次三等奖, 2012年获重庆科技学院教学成果二等奖。

科研方面, 已在国际国内核心期刊发表论文60余篇, 其中SCI/EI收录30余篇。先后主持主研完成省部级以上纵向科研课题10余项, 主持主研教研教改项目20余项, 主持主研省部级质量工程4项 (主持1项), 申请国家发明专利/实用新型专利30项。

主要研究方向: 面向精准农业的智能控制、自适应控制、风力发电。

文轨车书 交通天下
<http://www.xnjdcbs.com>

责任编辑 / 李 伟

封面设计 / Design  本格设计

变量喷雾智能控制

BIANLIANG PENWU
ZHINENG KONGZHI

ISBN 978-7-5643-4031-5



9 787564 340315 >

定价: 45.00 元

图书在版编目 (C I P) 数据

变量喷雾智能控制 / 宋乐鹏, 彭军著. — 成都:
西南交通大学出版社, 2015.7
ISBN 978-7-5643-4031-5

I. ①变… II. ①宋… ②彭… III. ①喷雾 (农药)
— 智能控制 — 研究 IV. ①S48

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 158459 号

变量喷雾智能控制

宋乐鹏 彭 军 著

责 任 编 辑 李 伟
封 面 设 计 本格设计

出 版 发 行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533
邮 政 编 码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成 品 尺 寸	148 mm × 210 mm
印 张	5
字 数	139 千
版 次	2015 年 7 月第 1 版
印 次	2015 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4031-5
定 价	45.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

粮食安全是国家安全中的重中之重，而精准农业（Precision Agriculture）是今后我国农产品实现保收、增收的关键。精确农业是对农田进行科学、精细的管理，将农田分割成许多小块，对这些小块实行与之相适应的管理方案，即对每一小块分别实行其需要的耕作、播种、病虫草害控制、灌溉等。针对每一块土壤的类型（含水率、有机物含量等）、作物长势、病虫草害程度、季节、天气等许多因素，通过全球定位系统（Global Position System, GPS）、地理信息系统（Geographic Information System）以及遥感技术（Remote Sensing）和自动化控制技术的应用，在每一操作单元上投入相应的施用量，以此来控制生产成本，提高经济效益，同时降低农药的浪费及对环境的污染，提高生态效益。

变量喷雾是实现精准农业的关键，其核心是采用 GPS、地理信息技术或实时传感器技术获取农田小区域内病虫草害的差异性信息，采用智能控制（模糊 PID 控制、遗传优化模糊控制、变论域自适应模糊控制、混沌优化模糊控制等）方式，精确、快速、稳定地实现按目标喷量进行喷雾作业，并且具有良好的雾化特性。

变量喷雾系统按照目标信息获取方式的不同可构建基于 GPS 的变量喷雾系统、基于地理信息系统的变量喷雾系统和基于实时传感器的变量喷雾系统；变量喷雾控制技术按照喷药量调节对象的不同可分为压力控制式变量喷雾技术、流量控制式变量喷雾技术和药液浓度调节式变量喷雾技术。通过开展面向精准农业的信息获取、机具的移动速度获取、机具幅宽信息获取、农田土壤信息获取、农田处方图的获取，再结合获取信息建立系统控制模型，准确得到农田

所需的农药量和施肥量，可获得机具实际需要喷洒的农药量和施肥量，进而结合智能控制器实施农业精准施药和施肥。

本书作者长期从事面向精准农业的变量喷雾控制学术研究、技术研发和应用实践，并结合农田实验总结出变量喷雾的控制方法与实验系统，所以，本书具有重要的学术参考价值和借鉴意义。

宋乐鹏

2015 年 4 月 10 日

前 言

农药的用法与用量直接影响病虫害的防治效果。在我国，农药的滥用已经导致了严重的环境与生态问题。农药直接靶标到害虫上的药量仅占所用农药的 0.03%，每年因施药中毒的人数高达 8 万之多，消耗的水资源达 2 亿吨，大量农药的使用引发了严重的“3R”（Residue—残留害物；Resurgence—害物再猖獗；Resistance—害物抗药性）问题，其直接后果是造成小麦每年减产 40 亿千克，玉米每年减产 25 亿千克，严重制约了我国农业生产的可持续发展。在对地下水污染源的调查中发现，有近 80% 的淡水资源受污染。2013 年 2 月 21 日，央视《新闻 1 + 1》调查发现，在 2000—2002 年间有超过 60% 的地下水为 1~3 类标准，到了 2009 年，地下水 4~5 类的却占到了 73.8%。不到十年的时间，这两个数字居然颠倒了。2011 年，有 55% 的地下水为极差水质，对饮用水造成严重威胁。由此可见，要保持农业可持续发展，减少农药对环境和生态的危害，发展精准施药技术是一个重要途径。

精准的施水、施肥、施药能够大幅提高农作物的产量。使用精准农业技术后，美国明尼苏达州的甜菜每亩增加 48~75 美元，荷兰马铃薯每亩增加 36.8~44.8 美元，日本的葡萄每串由原来的 300 g 增加到 400 g。用精准农业技术指导施肥的作物产量与传统平衡施肥作物相比，不仅产量提高了 30% 左右，而且化肥施用总量减少了 20% 左右，农药施用总量减少了 50% 左右。

本项目研究的变量喷雾技术能够非常有效地解决精准施药、施肥技术难题。目前，微小流量喷雾随着国内外现代农业装备的发展，植保机械及施药技术有了长足的发展，喷药方法由传统的常量喷雾

发展为变量喷雾。但是精准农业中微小流量检测与控制的问题还没有得到很好解决，目前国内变量喷雾主要采用预混药式，药液浓度不变，通过改变施药量得以实现。国内外为解决变量喷雾问题所采取的主要技术手段是准确喷雾技术，如静电喷雾、仿形喷雾、自动对靶喷雾、变量喷雾等，而变量喷雾是喷雾技术的一个重要发展方向和众多植保专家的研究热点。目前，变量喷雾的主要控制手段为PID控制、模糊控制等，但是变量喷雾系统是一个大滞后、强时变、非线性、多干扰的系统，应用传统的控制难以达到农药最佳利用效率及减少环境污染的目的。本项目从变量喷雾机具控制器的输入量（机具速度、机具作业幅宽、喷雾处方量）与机具控制器的输出量（喷头喷雾量）以及系统延时时间等中间变量出发，以提高控制系统的性能为目的，设计变量喷雾控制器。该变论域自适应模糊非线性PID控制可以使微小流量喷雾系统在干扰作用下的控制精度和超调量比PID控制效果提高4~5倍。

深入研究农业生产中变量喷雾的控制问题，建立变量喷雾控制对象的精准控制模型和方法，有利于我国充分利用资源，降低不必要的投入，减少环境污染，是取得最大经济、社会和环境效益的一种能实现可持续农业发展的战略。把农业变量喷雾的控制精度在系统要求的基础上提高到精准农业控制所需的要求，使农业对象的控制效果和控制比例达到最佳将具有重要的工程意义和学术价值。

编 者

2015年4月

目 录

1	变量喷雾的意义与研究现状	1
1.1	变量喷雾的背景及意义	1
1.2	国内外研究现状分析	1
2	变量喷雾控制系统建模	7
2.1	变量喷雾机电流量阀介绍	7
2.2	变量喷雾机电流量阀控制系统数学模型建立	10
3	变量喷雾系统的模糊控制器	13
3.1	模糊控制器的发展	13
3.2	模糊控制的基本工作原理	15
3.3	常规 PID 与模糊 PID 控制	19
3.4	模糊控制器的设计方法	22
4	遗传算法	32
4.1	遗传算法的发展与应用	32
4.2	遗传算法的结构	33
4.3	遗传算法的特点	36
4.4	遗传算法的优缺点	36
4.5	遗传算法在模糊 PID 控制器中的应用	37
4.6	遗传算法优化的收敛性	42
4.7	遗传算法优化模糊 PID 控制器的仿真	45
4.8	本章小结	49
5	粒子群算法	50
5.1	基本粒子群算法	50
5.2	粒子群算法的基本步骤	51

5.3	粒子群优化的模糊 PID 控制器	53
5.4	PSO 优化模糊 PID 的仿真模型	53
5.5	本章总结	56
6	混沌优化变量喷雾系统	57
6.1	混沌优化算法的发展与应用	57
6.2	Logistic 映射的数学模型	57
6.3	混沌优化算法的原理和特点	59
6.4	混沌优化算法在控制理论中的应用研究	60
6.5	基于混沌算法的模糊控制器优化研究	62
6.6	本章总结	73
7	Simulink 中变量喷雾系统建模与仿真分析	74
7.1	Matlab 简介	74
7.2	仿真模型建立	75
7.3	仿真及结果分析	76
8	变量喷雾控制系统试验平台的构建	90
8.1	变量喷雾控制系统的硬件组成	90
8.2	变量喷雾控制系统的硬件电路设计与分析	99
8.3	喷雾机器人的主要构成及配置	102
9	变量喷雾控制系统软件设计	105
9.1	变量喷雾控制系统主程序设计	105
9.2	变量喷雾控制系统子程序设计	106
9.3	变量喷雾控制系统中断程序设计	108
10	变量喷雾控制系统调试与分析	109
10.1	变量喷雾控制系统硬件调试与分析	109
10.2	变量喷雾控制系统软件调试与分析	112
	参考文献	113
	附录一 变量喷雾控制系统研究（相关论文）	118
	附录二 遗传算法优化模糊控制器	142

1 变量喷雾的意义与研究现状

1.1 变量喷雾的背景及意义

“民以食为天”，农业是人类社会的基础，也是国家安全的保障。农业生产力的发展水平和农业劳动生产率的高低直接影响着整个国民经济的发展水平。我国传统的喷洒技术使大部分农药流失到环境中，造成“3R”（Residue—残留害物；Resurgence—害物再猖獗；Resistance—害物抗药性）问题，严重影响了农业生态系统的平衡。农业部对我国6个省29个基地县的调查发现，粮食农药检出率为60.1%，残留超标率达1.12%，一些大城市郊区蔬菜农药检出率超过50%^[1]。目前，经济发展与环境保护的矛盾日益突出，在这一形势之下，农业的可持续发展问题开始受到越来越多的关注。解决“3R”问题的一条技术出路就是实施“精准农业”（Precision Agriculture），“精准农业”是信息和人工智能高新技术应用于农业的产物，可简单定义为“在准确的时空内，实施精确的农业管理”^[2]。相应的技术有机电式流量阀的模糊控制实现和测试^[3]。在精准农业技术的发展方向中，变量喷雾技术日益受到农业工程领域的重视。变量喷雾是采用全球定位技术（GPS）、地理信息技术（GIS）或实时传感器技术获取单位作业面积的目标喷量信息，然后采用基于药液的压力控制式和流量调节式或药液浓度调节式等控制方式精确、快速地实现按目标喷量进行喷雾的作业，同时具有良好的雾化特性^[4]。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 国内研究现状分析

刘志壮等采用小型针阀、直流电动机及减速器设计了机电流量

控制阀,解决了变量喷雾过程中药液微小流量的控制问题,构建了机电流量控制阀传递函数的数学模型,并为之设计了模糊控制算法。而后又依靠 STC12C5410AD 单片机实现了对农药流量的模糊控制,并对所设计的系统进行了静态跟踪测试和动态响应测试^[5,6]。

曹小荣等利用阀式变量乳化液泵的配流系统完成了一次配流过程中的动态数学模型,并用此模型对具体阀式变量乳化液泵进行了仿真计算,通过仿真计算容积效率和实测容积效率的误差对比分析验证了数学模型的正确性^[7]。

宋乐鹏等采用小型针阀、直流电动机及减速器设计了机电流量控制阀,构建了机电流量控制阀传递函数的数学模型,并为之设计了变论域自适应模糊 PID 控制算法^[8]。

李浩等研究了流量控制系统,分析了模糊控制理论和 PID 控制理论的特点,设计了自适应模糊 PID 控制器以控制电动阀门的开度,从而进行试验台流量的调节^[9]。

李湘闽等针对 PID 控制数字流量阀的局限性,设计了模糊自调整 PID 控制器,实现了数字流量阀控制系统 PID 参数在线自整定的智能化,取得了优于传统 PID 控制的效果^[10]。

朱银法等通过对自整定模糊 PID 控制策略在电液比例位置控制系统上的应用进行研究,在介绍自整定模糊 PID 控制基本原理的基础上,通过实验比较该系统自整定模糊 PID 控制和 PID 控制对正弦信号的跟踪效果。结果表明,自整定模糊 PID 控制比 PID 控制有更好的精度和稳定性^[11]。

黄明辉等针对活动横梁位置控制高精度、大滞后和大惯性等特点,提出了基于位移反馈的五驱动缸主动平衡系统;同时,结合 PID 和模糊控制的优点,设计开发了基于 S7-300 PLC 的模糊 PID 参数自整定控制算法,利用模糊推理对 PID 参数 KP、TI 和 TD 进行在线自整定,实现了输出量对比例流量阀阀芯的控制,保证活动横梁位置偏差在允许范围内,并详细说明了 Step7 软件中的程序设计,利用间接寻址的方法实现了在线查询功能,大大提高了控制系统的智能化程度^[12]。

檀甲友等提出了一种电液比例阀的模糊与自适应模糊 PID 复合控制设计及 MATLAB 仿真。在大偏差时采用模糊控制,小偏差时采用自适应模糊 PID 控制,仿真结果表明,该方法具有模糊控制的 PID 动态响应快、超调量小和抗干扰能力强等优点,是一种更加有效的控制策略^[13]。

1997 年,李兵等利用类似载波的方法将混沌序列引入优化算法中,成功解决了优化算法中收敛于局部极小值的缺点,取得了较大的成功^[14]。

1999 年,张彤等提出了一种变尺度混沌优化方法,使得搜索速度和搜索精度都得到了一定程度的提高^[15]。

南京林业大学从 1999 年开始进行基于树木特征图像采集与处理的精确农药施用技术的探索^[16],并且利用实时计算机视觉技术和 BP 神经网络原理设计出树形自动识别系统,识别率达 93.8%^[17]。

2002 年,李吴等提出了一种加速混沌优化算法^[18];同年,何哲明提出了一种混沌约束优化算法,并且编制了通用的 MATLAB 优化程序;王志良等提出了一种在可行域中进行二次载波的混沌优化算法。

2003 年,尤勇等利用一类在有限区域范围内折叠次数无限的一维迭代混沌自映射来进行搜索,具有较高的搜索效率与精度^[19];修春波等提出一种具有双混沌机制的优化方法,利用两种不同的混沌机制进行搜索,再根据搜索情况来缩小搜索空间,使算法具有通用性^[20]。

2004 年,梁慧勇等采用并行计算的混沌优化方法,令搜索从不同的初始值同时出发,降低对初始值的敏感度,加快了搜索速度^[21]。

2006 年,刘洪臣等在 YcbC 颜色模型中以色差为特征量,利用自适应阈值对植被和背景进行分割,利用形态学操作将棉花与杂草分离,杂草成功识别率为 83.1%^[22]。

2008 年,王秀梅等运用最小二乘法建立了圆度误差的数学模型,综合 SWIFT 法和混沌算法的优点,提出了改进的混沌优化算

法,将约束优化问题转化为无约束优化问题求解,并且通过对圆度误差测量数据处理的应用实例,说明了此优化算法的优点,从而达到全局最优^[23]。

葛玉峰等建立了基于机器视觉的室内农药自动精准喷雾系统,对信号采集、图像处理、施药决策、数据交换等主要问题作了较深入的研究,提出了基于相对色彩因子的树木图像分割算法,与传统方法相比,在不影响分割效果的同时大大提高了图像分割的实时性^[24]。

陈勇等开发了基于机器视觉和模糊控制原理的精准农药可变量喷雾控制系统,并在实验室进行了试验,通过试验证明了系统能融合树冠面积信息和距离信息,通过模糊决策判断树木的大小和距离,进而选择不同的喷头组合,控制喷雾系统的流量和喷头射程,实现对树木目标的智能喷雾,大幅减少了农药的使用量^[25]。

尹东富等提出了基于 MATLAB 软件对机器视觉系统采集的棉田杂草图像处理系统,并生成了喷施除草剂处方图^[26]。

袁秀平等通过对阀控缸电液伺服控制系统的理论分析,并根据实际操作经验,确定出系统位置模糊控制器的结构、输入输出变量、量化因子和比例因子以及模糊推理法则,然后使用 MATLAB 中的 Fuzzy 工具箱对系统进行建模和仿真计算,并根据仿真结果在线调整量化因子参数,从而对系统进行优化,使系统性能达到最佳状态^[27]。

陈霄提出将混沌 DNA 遗传算法用于优化 T-S 模糊递归神经网络(FRNN),利用混沌优化算法优化种群中的较差个体^[28]。

王禾军等采用混沌遗传算法优化参数的模糊最小二乘法支持向量机分类器^[29]。

2006 年,赵小梅根据混沌运动的遍历性提出了一种改进的混沌优化算法,把优化变量的取值范围细分为若干个等距区间,在各个区间内同时进行混沌搜索,不仅加快了搜索的速度,而且提高了得到全局最优解的近似精度^[30];陆慧娟提出了三次载波的概念并付诸实现,同时提出一种改进的变尺度混沌优化方法,仿真结果表明,

该方法具有较强的局部搜索能力^[31]；赵强提出了一种改进的混沌优化方法，该方法利用混沌变量对当前点进行扰动，并且通过时变参数逐渐减小搜索进程中的扰动幅度，同时以一定方式确定了时变参数的初值，可以显著提高收敛速度和精确性^[32]。

史岩等在自行设计的压力式变量喷雾系统的基础上建立了压力式变量喷雾系统的控制数学模型和传递函数，并利 MATLAB 对系统模型进行了仿真，试验表明，该模型能达到较满意的控制效果。同时，他们还针对压力变量喷雾的不理想状况开发了压力式变量喷头^[33]。

1.2.2 国外研究现状分析

美国 Patchen 公司研制的 Week seeker 喷雾系统的核心部分是 Phd600，它由叶色素光学传感器、控制电路和阀体组成，阀体内含有喷头和电磁阀，当传感器通过检测叶色素检测到有草存在时，即控制喷头对准目标喷洒除草剂，由此可节省农药 60% ~ 80%。

1996 年，R. Brivot 等在漫反射光照条件下，用近红外图像对移栽花椰菜、杂草和土壤进行分割，识别效果达到 73% 以上^[34]。

1996 年，King B. A 开发了另一种可变流量的喷头，通过调节位于喷头内的移动销，调节喷头开口面积，从而调节喷头流量^[35]。

1996 年，Giles D K 等开发了脉宽调制（PWM）喷头，并应用于车载农药喷雾装备。在脉宽调节控制方式下，通过调节喷头的启闭时间来调节喷雾流量^[36]。

1997 年，Giles D K 和 Slaughter D C 研制了一种基于机器视觉的精确喷药装置，该系统将机器视觉作为导向系统，能根据目标作物的宽度自动调节扇形喷头相对于前进方向的偏转角度^[37]。

Lee 等人研制了由机器视觉系统、精准喷施系统等组成的智能杂草控制系统，该系统能根据植物形状特征的差异识别作物和杂草，并确定其位置^[38]。

Stark J C 等开发了一套用于灌溉的组合式喷头系统，通过在每个喷雾点设置三个不同喷量的常规喷头，以及组合控制不同位置、

不同个数的喷头的开合实现八级可变喷量的喷雾^[39]。

日本开发的植保机械自动化程度高,包括可识别蔬菜和杂草、牧草和杂草的图像处理装置和药液定位除草机构,以便选择性地除草^[40,41]。

德国等欧洲国家十分重视机械对环境的影响,采取了一系列技术措施减少农药漂移和地面无效沉积,提高了农药有效利用率,降低了单位面积的农药使用量^[42,43]。

E. A. Anglund 和 P. D. Ayers 开发了基于压力控制式的喷雾机,并测试了其在田间的相应性能。结果表明,从控制系统发出指令使改变喷雾压力到喷头压力达到期望值的时间为 2 s 左右^[44]。

Tian L 等用建模的方法研究了 PWM 喷头工作过程中的雾滴沉积分布情况^[45]。

1999 年,King B. A 等学者开发的变量喷雾控制系统就是利用变频器,通过调节电机的频率和电压的有效幅值来控制电机的转速,进而调节喷雾泵的流量^[46]。

2001 年,Alvin R. Womac 设计出一种变量喷头,该喷头内孔中有一个倒锥孔,而倒锥孔中又设计了一个端面开有狭缝的阀芯。阀芯位置根据喷雾压力变化而上下移动,喷头的开口面积也就发生了相应改变,从而实现流量的改变^[47]。

2002 年,L Tian, J. E Reid 研制了一种基于机器视觉的精准对靶喷雾系统,应用机器视觉传感器采集和计算杂草分布特性,能以 14 km/h 的速度进行喷雾,其分辨目标的准确率为 91%^[48]。

Unavut J K 和 Schueller J K 等使用了一种收缩阀,用来控制每个喷头的进液通道通流面积,采用调节喷头喷雾压力的方法调节喷头流量,为改善收缩阀的动力学性能,在收缩阀内附加了一个刚性嵌入物,采用连续的空气压力调节以改变喷头的进液通道流通面积,从而实现喷头流量的连续调节^[49]。

本课题通过学习国内外学者在变量喷雾控制系统的研究进展,分析比较模糊 PID 控制、神经网络控制、遗传算法优化模糊 PID 控制、混沌优化模糊 PID 控制和粒子群优化模糊 PID 控制方法的优缺点,利用 SIMULINK 仿真并对结果进行分析。