

无人机变量施药实时监控系统设计及试验

刘洋洋 茹煜 陈青 陈旭阳 刘彬
(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘要: 在航空施药过程中,为保证单位面积施药量的一致性、实现施药流量的实时控制,提出一种航空变量施药分级控制算法。该算法根据各参数的等级和阀门开度建立分级控制表,再结合分级控制公式计算作业参数变化时阀门对应的开度,从而计算出施药流量,实现施药流量的自动调节。基于该算法设计了基于单片机多信息融合的航空变量施药实时监控系統,通过软硬件设计实现了对作业航迹、作业高度、作业速度、施药流量及药液余量等信息的实时监测,进行了航迹监测试验、施药流量监测试验、液位监测试验和变量施药控制试验等。结果表明,该系统可以准确监测多种作业参数,并可根据参数变化精准调控施药流量;飞行航迹监测平均偏差为 0.98 m,施药流量监测平均误差为 3.57%,液位监测平均误差为 1.97%,系统对流量控制的最大误差为 9.26%。

关键词: 无人机; 变量施药; 实时监控; 分级控制

中图分类号: S252⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0091-09 OSID: 

Design and Test of Real-time Monitoring System for UAV Variable Spray

LIU Yangyang RU Yu CHEN Qing CHEN Xuyang LIU Bin
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The dosage sprayed upon per unit area is an important indicator to measure the performance of spray. In order to ensure the consistency of the dosage sprayed upon per unit area, and realize the real-time control of the spray volume, based on the analysis of aerial variable spray technology, a set of hierarchical control algorithm of aerial variable spray for UAV was proposed. A hierarchical control table was created based on the level of each spray parameter and the opening degree of the valve. And then a corresponding opening degree value of the valve was obtained when spray parameters changed by combining hierarchical control formula. And it can calculate the spray volume to realize the purpose of automatically adjusting the spray volume. A set of real-time monitoring system of aerial variable spray for UAV was developed in view of the algorithm and multi-information fusion technology based on single chip microcomputer. And the system realized the real-time monitoring of information such as flight track, flight height, flight speed, spray volume and liquid residue through the design of software and hardware. And experimental studies of flight track monitoring, spray volume monitoring, liquid level monitoring and variable spray control were carried out. The test results showed that the system can accurately monitor a variety of spray parameters in real time and precisely regulate the spray flow according to the parameter changes. And the mean deviation of flight track monitoring was 0.98 m. The mean deviation of spray volume monitoring was 3.57%. The average deviation of liquid level monitoring was 1.97%. The maximum error of spray volume control was 9.26%.

Key words: UAV; variable spray; real-time monitoring; hierarchical control

0 引言

技术发展的因素,常规施药方式的农药利用率只有 30%,不仅影响了病虫害防治效果,也造成环境污染^[1-2]。精准施药技术是农业植保技术未来的

农药利用率低一直是困扰我国施药机械、施药

收稿日期: 2020-03-02 修回日期: 2020-05-05
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0600202-04)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18-0969)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)3077)
作者简介: 刘洋洋(1991—),男,博士生,主要从事农林植保技术与装备研究,E-mail: gwglyy@163.com
通信作者: 茹煜(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事农林植保技术与装备研究,E-mail: superchry@163.com

发展方向^[3-4],其中旋翼类无人机具有作业灵活、成本低、效率高、不受作物长势和地理因素制约、旋翼气流可以增加药液沉积效果等优势^[5-9],被广泛应用于信息遥感、农业监测和农业植保中^[10-11]。基于无人机发展精准施药技术对提高我国农业机械化水平、实现精准农业具有重要意义。

航空变量施药是实现精准施药的重要途径之一^[12-15]。主要体现在可以根据处方图的作业需求,以及作业高度、作业速度等参数的变化,实时调节施药流量,避免造成农药浪费或施药量不足,从而实现单位面积施药量的一致。航空变量施药的关键是实时监测施药作业参数和精准调控施药流量^[16]。施药作业参数监测是实现精准施药的前提,国内外学者对无人机施药监测展开了一些相关研究。Adapco公司生产的Wingman GX^[17]和袁玉敏^[18]设计的无人机高精度定位系统都可以监测无人机的位置和施药轨迹,但是不能对施药流量进行监测。翟长远等^[19]设计了基于单片机的地面植保机械施药监测系统,可以同时监测施药压力和施药流量,但航空施药在作业轨迹规划、作业速度、作业高度等方面都与地面施药有很大的不同。目前的研究还不能满足航空变量施药的监测需求。在航空变量施药控制方面国内外学者也取得了一定的研究成就。邢航等^[20]研发的无人机变量喷洒地面监控系统和王玲等^[21]研发的无人机变量施药系统,可对施药流量进行手动控制,这种基于经验的人为调控方式难以保证施药的精准性。张瑞瑞等^[22]设计的有人直升机变量施药控制系统,LIAN等^[23]设计的变速喷洒系统和YAO等^[24]设计的变速喷洒系统,主要研究作业速度、风向、添加剂等因素对液滴沉积、飘移和液滴大小的影响,并根据作业速度变化调节流量。以上研究不能同时根据作业高度、作业速度和公顷施药量等多参数的变化自动调控施药流量。

我国地形复杂,尤其在南方山区山坡、丘陵较多,农田不平整。无人机在这种特殊地形上空作业时,很难控制恒定的飞行参数,在调头、转向、爬坡等过程中,作业高度、作业速度、施药流量等参数需要实时改变。本文结合我国实际情况,针对无人机施药提出一种航空变量施药分级控制算法,并研发适合我国航空变量施药的实时监控系统,实时监测无人机的作业高度、作业速度、作业航迹、施药流量及药液余量等信息,并根据飞行参数的变化自动调节施药流量。

1 监控系统设计

1.1 控制理论

为了达到农业病虫害有效的防治效果,单位面

积需要满足一定的施药量。施药量过少起不到植保的目的,过多则会造成农药浪费与环境污染。所以单位面积的施药量应该控制在一定范围内,本文对施药量的控制采用调节流量阀门开度的方式。根据实际无人机施药作业经验可知,作业高度、作业速度、施药流量都会影响单位面积施药量(即公顷施药量)。因此阀门的开度需要根据作业高度、作业速度和公顷施药量的情况进行调节。

本文通过开发的分级控制算法控制流量阀门的开度,分级控制算法包括:确定无人机的作业高度、作业速度和公顷施药量的权重;根据作业高度、作业速度、公顷施药量以及阀门开度变化范围,生成分级控制表;当作业高度、作业速度和公顷施药量改变时,根据分级控制表和分级控制公式计算阀门对应的开度。

采用层次分析法确定各施药参数的权重^[25]。确定方法主要包括:①设置施药参数判断表,如表1所示,并邀请安徽、江苏、浙江、山东、河北、河南6省的9家植保公司共计80位员工进行打分。分值评定为:同等重要、稍微重要、明显重要、强烈重要和极端重要5个等级,对应的分值分别为1、3、5、7、9分。

表 1 施药参数判断表

Tab.1 Determination table of spray parameters

比项	被比项		
	作业高度	作业速度	公顷施药量
作业高度	e_{11}	e_{12}	e_{13}
作业速度	e_{21}	e_{22}	e_{23}
公顷施药量	e_{31}	e_{32}	e_{33}

②计算判断矩阵的特征向量,计算公式为

$$W_i = \frac{\sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 e_{ij}}}{\sum_{i=1}^3 \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 e_{ij}}} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

式中 W_i ——特征向量,施药参数判断表中第*i*行参数的权重

e_{ij} ——施药参数判断表中第*i*行第*j*列分值

特征向量即为各参数对应的权重,通过计算80位评分人员的打分,可得出作业高度的权重为0.3,作业速度的权重为0.3,公顷施药量的权重为0.4。

分级控制表是根据无人机植保作业标准和作业经验总结得出。无人机正常施药作业时的作业高度在1~5 m,作业速度在3~6 m/s,公顷施药量在7.5~15 L/hm²,施药流量在1.2~2.1 L/min。把作业高度、作业速度、公顷施药量和施药流量各分为5个等级。其中流量由电磁阀门开口面积和药液流

速共同决定,在药液流速和施药时间不变的前提下,阀门开口面积越大流量越大。由于开度阀都是球型电磁阀,开口面积可视为两个大小相等圆重合、相交或相切。阀门开度的调节范围为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,当阀门开度为 0° 时,两圆重合,此时阀门处于全开状态;当阀门开度在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间时,两圆相交;当阀门开度为 90° 时,两圆相切,此时阀门处于关闭状态。因此可推导出流量与阀门开度的公式为

$$q_v = 60 \left[1.2273 - \frac{\pi \arccos \frac{\theta}{180^{\circ}}}{90^{\circ}} + \frac{\theta}{90^{\circ}} \sqrt{1 - \left(\frac{\theta}{180^{\circ}} \right)^2} \right] R^2 v_1$$

$(51^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ})$ (2)

表 2 分级控制表
Tab.2 Hierarchical control table

参数	一级	二级	三级	四级	五级
作业高度 h/m	[0,1.5]	(1.5,2.5]	(2.5,3.5]	(3.5,4.5]	>4.5
作业速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	[0,3]	(3,4]	(4,5]	(5,6]	>6
公顷施药量 $c/(\text{L}\cdot\text{hm}^{-2})$	[0,7.5]	(7.5,9.75]	(9.75,12]	(12,14.25]	>14.25
阀门开度 $\theta/(^{\circ})$	[51,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	90

度等级公式得出。阀门开度等级公式为

$$D_{\theta} = 0.3D_h + 0.3D_v + 0.4D_c$$
(3)

式中 D_{θ} ——阀门开度等级
 D_h ——作业高度等级
 D_v ——作业速度等级
 D_c ——公顷施药量等级

把阀门开度等级代入阀门开度公式

$$\theta = \begin{cases} 51^{\circ} & (D_{\theta} = 1) \\ 50^{\circ} + 10^{\circ}(D_{\theta} - 1) & (1 < D_{\theta} < 5) \\ 90^{\circ} & (D_{\theta} = 5) \end{cases}$$
(4)

即可计算出阀门开度。

当作业高度、作业速度和公顷施药量发生变化时,系统根据分级控制表再结合公式(3)、(4),可及时调节阀门到相应的开度,进而合理地改变施药流量,达到精准施药的目的。

1.2 硬件设计

该监控系统的硬件部分主要包括:单片机、GPS 导航模块、流量传感器、液位传感器、高精度大气压传感器、无线通信传输模块、按键和显示屏等,图 1 为航空施药监控系统整体框架图^[26]。采用 Ublox 公司生产的 GPS 导航模块获取无人机飞行坐标和对地飞行速度;选用深圳林恩科技公司生产的 LRL01 型涡轮流量传感器采集施药流量;选用深圳林恩科技公司生产的 LDY02 型电容式液位传感器

式中 q_v ——施药流量, L/min
 θ ——阀门开度, $(^{\circ})$
 v_1 ——药液流速, m/s
 R ——阀门管道半径, mm

由于施药流量在 $1.2 \sim 2.1 \text{ L}/\text{min}$ 之间,本文选择额定流量为 $3.5 \text{ L}/\text{min}$ 的隔膜泵,管径为 6 分管。所以在正常施药时,阀门开度的变化范围在 $51^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间。因此流量等级可以转换成阀门开度等级。由于阀门开度、作业高度、作业速度和公顷施药量都为连续型变量,因此采用一般线性模型的方法进行分级,如表 2 所示。

计算阀门开度,需要先确定阀门开度等级。阀门开度等级是把作业高度、作业速度和公顷施药量的实际值,在分级控制表中对应的等级,代入阀门开

采集药箱液面高度;选用广州市浩云安防科技股份有限公司生产的 GY-63 MS5611-01BA03 型高精度大气压传感器采集作业高度;选用英国 ARM 公司生产的 STM32F103VET6 单片机作为信息处理控制的微控制器,用于对多元信号进行融合处理,计算出无人机的实际飞行状态和施药情况;通过深圳永达创力电子有限公司生产的 RGB 显示屏和手机终端 APP 将无人机飞行状态和施药情况以数值和图表的形式直观地显示。

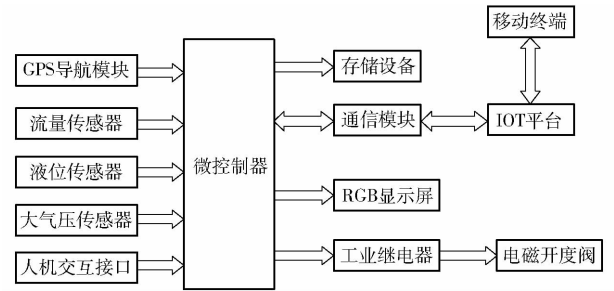


图 1 系统框架图
Fig.1 System frame diagram

为了保证不影响无人机正常作业,该系统配有独立的电源模块,通过大容量锂电池为系统供电,由于电池输出电压为 3.7 V ,而微控制器、传感器、通信模块以及继电器等需要不同的电压,为保证输出稳定电压,分别用 LM2577 和 AMS1117 电源芯片进行稳压。其中,LM2577 主要为 GPS 模块、通信模

块、工业继电器和微控制器提供稳定的 5 V 电压; AMS1117 主要为多元传感器、微控制器和存储设备提供稳定的 3.3 V 电压。GPS 导航模块、流量传感器、液位传感器和大气压传感器通过串行通信方式与微控制器进行数据交互,通信模块作为无线传输的主要方式通过异步串行通信口与微控制器相连。以复位电路、晶振电路与微控制器内部电路相结合的方式,使微控制器稳定运行。工业继电器作为阀门的控制开关,其电路原理图如图 2 所示,通过控制两个继电器的断开与接通方式,来调节阀门开度。

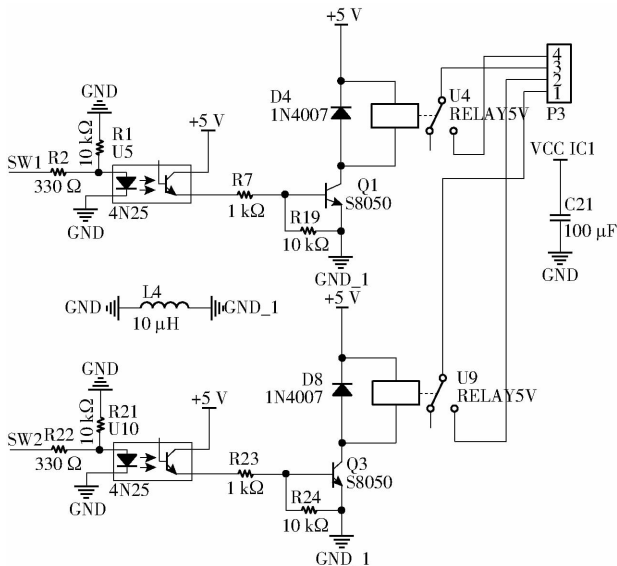


图 2 继电器电路图

Fig. 2 Diagram of relay circuit

1.3 软件设计

根据无人机施药监控的可靠性、实时性以及可维护性等要求,采用 C 语言编写系统软件程序,系统软件设计流程图如图 3 所示。在系统启动时,先进行初始化程序,再调用执行 GPS 子程序、作业高度子程序、流量监测子程序、液位监测子程序。其中,由于 GPS 导航模块数据结构采用标准的 NMEA-0183 协议,所以在 GPS 导航模块监测应用中,通常采用队列的方式来接收数据,串口接收到数据后存入队列中,最后再对数据进行解析,可得到飞行坐标。

由于流量传感器输出的信号是脉冲信号,无法直接得出流量。所以需要调用流量积分函数,把得到的脉冲数转换为相应的数字信号,进而得到流量信息。流量积分函数根据流量传感器特性而定,该传感器的计算函数为

$$Q = 60V_0 \frac{f}{K} \quad (5)$$

式中 Q ——实时流量, L/min

f ——脉冲频率, Hz

K ——每转输出的脉冲数

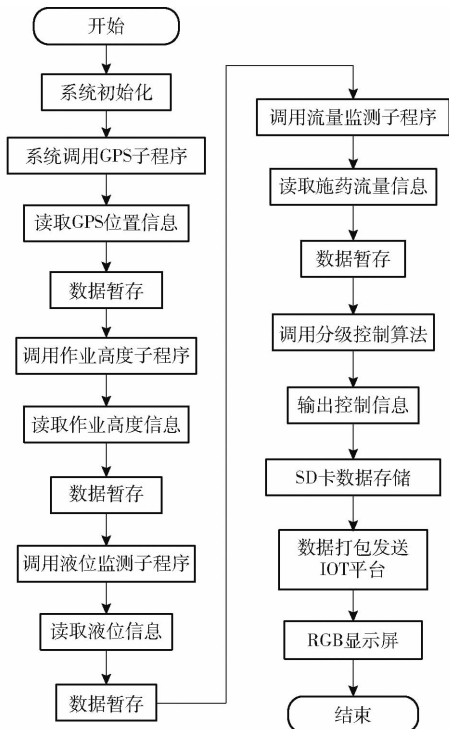


图 3 系统软件设计流程图

Fig. 3 System software design flow chart

V_0 ——每转一周流过的药液体积, L

作业高度信息和液位信息则是通过 A/D 转换器把传感器监测的模拟量电流信号转换成数字信号,再经过单片机处理后得到作业高度和液面高度。

微控制器每 100 ms 读取一次传感器信息,并对多元传感器获得的坐标信息、流量信息、作业高度信息、液位信息进行融合处理。其中,通过连接每个时刻的飞行坐标点得到轨迹信息;通过计算单位时间内的坐标点位移变化量得到无人机的作业速度;通过高精度大气压传感器模块得到作业高度信息;通过流量传感器输出的脉冲信号结合公式(5)可以得到施药流量信息;通过液面高度信息再结合该高度位置药箱的截面积,计算出药液剩余量。

在得到多元传感器信息后,单片机通过分级控制算法,把监测的数据根据分级控制表和公式(3)、(4),计算出阀门相应的开度。

系统把监控信息每 100 ms 自动存储到数据存储单元。并将信息以数值和图形的形式通过 RGB 显示屏显示,与此同时把数据打包发送到 IOT 平台,为以后的研究提供参考。数据上传采用 TCP 通讯协议,通过上传的自定义脚本来实现对数据的解析以及向设备下发数据。用户通过手机、平板计算机或者个人计算机等终端设备与平台网络联接,即可实现远程监测^[27]。

2 试验

为了衡量自主研发的监测系统的精准性,确保

作业区域内单位面积的施药量一致,需要开展航迹监测试验、施药流量监测试验、液位监测试验和变量施药控制试验。

试验场地选择面积约为 0.3 hm²的矩形空地,顶点经纬度为(117.476 644 37° E, 39.298 906 45° N)、(117.476 645 71°E, 39.298 601 33°N)、(117.477 538 88°E, 39.298 600 29°N)、(117.477 540 22°E, 39.298 908 53°N)。试验时间为2019 年 6 月 27 日,平均气温为 24 ~ 33℃,风速为 1.6 ~ 3.3 m/s。试验通过大疆 MG-1SA 型电动八旋翼植保无人机搭载自主研发的监控系统进行,喷头采用德国 LECHLER 公司生产的 ST110-02 型植保无人机雾化高压扇形喷头。

2.1 航迹监测试验

航迹监测即对无人机飞行轨迹经度、纬度和高

度的监测。

试验前先设置喷幅为 5 m,作业速度为 4 m/s,再在空地上规划出长 72 m、宽 30 m 的矩形试验场地,根据喷幅设置 12 个坐标点,其中前 6 个坐标点作业高度设置为 2 m,后 6 个坐标点作业高度设置为 3 m,如表 3 所示。最后规划出飞行航线。试验时控制无人机依次遍历所标定的 12 个空间坐标点。在飞行过程中,系统通过 GPS 模块获取飞机的经纬度信息,通过 GY-63 型大气压传感器获取无人机的高度位置。本试验通过记录每个航点的经纬度和作业高度来描述无人机的三维作业轨迹。

将本系统监测的轨迹与规划航线进行对比,检验该监测系统对飞行轨迹监测的精准度。试验重复进行 3 次,飞行作业现场如图 4 所示。

表 3 无人机飞行轨迹信息数据
Tab.3 UAV flight track information data

序号	规划经度/(°)	监测经度/(°)	规划纬度/(°)	监测纬度/(°)	规划作业高度/m	监测作业高度/m	航迹偏差/m
1	117.476 667	117.476 667	39.298 864	39.298 872	2	2.22	0.95
2	117.477 500	117.477 503	39.298 864	39.298 872	2	1.87	0.96
3	117.477 500	117.477 494	39.298 819	39.298 825	2	2.19	0.80
4	117.476 667	117.476 669	39.298 819	39.298 828	2	2.25	0.99
5	117.476 667	117.476 672	39.298 769	39.298 775	2	2.21	0.81
6	117.477 500	117.477 506	39.298 769	39.298 761	2	1.84	0.95
7	117.477 500	117.477 500	39.298 731	39.298 742	3	2.82	1.25
8	117.476 667	117.476 661	39.298 731	39.298 739	3	3.23	1.06
9	117.476 667	117.476 658	39.298 681	39.298 686	3	3.25	0.97
10	117.477 500	117.477 500	39.298 681	39.298 675	3	2.79	0.97
11	117.477 500	117.477 492	39.298 642	39.298 647	3	2.85	0.95
12	117.476 667	117.476 672	39.298 642	39.298 650	3	3.18	1.05



图 4 飞行作业图
Fig.4 Flight operation diagram

由于 GPS 获取的是经纬度信息,因此需要通过高斯-克吕格等角度投影法把经纬度转换成平面直角坐标信息^[28-30]。无人机的作业航线为三维空间轨迹,所以通过欧几里得度量计算三维空间中两个航点之间的距离即航迹偏差,计算公式为

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (6)$$

式中 x_1 ——规划点横坐标,m
 x_2 ——监测点横坐标,m
 y_1 ——规划点纵坐标,m
 y_2 ——监测点纵坐标,m
 z_1 ——规划作业高度,m
 z_2 ——监测作业高度,m
 δ ——航迹偏差,m

航迹偏差主要影响单位时间的作业面积,进而影响单位面积的施药量。当实际公顷施药量与设定的公顷施药量偏差在 10% 以内时,即可认为满足农业航空施药作业需求^[23]。在航迹监测试验中,当施药流量不变,作业面积的变化范围在 90% ~ 110% 之间时,即可认为航迹监测精度满足航空施药的需求。所以用航迹偏差的平均值作为有效值可计算单位面积的施药误差,计算公式为

$$\phi = \left[\frac{(B \pm \delta) vt}{Bvt} - 1 \right] \times 100\% \quad (7)$$

式中 ϕ ——单位面积施药误差,%

B ——喷幅, m t ——作业时间, s
 v ——作业速度, m/s

2.2 施药流量监测试验

在额定流量为 3.5 L/min 的隔膜泵上安装功率调节器,将液泵输出功率分为 7 挡进行调节,通过调节挡位来改变施药流量,本系统通过 LRL01 型涡轮流量传感器实时监测无人机流量。在施药流量监测试验前,先通过量筒向药箱装入 6 L 水代替药液。试验时依次改变调节器的挡位,用本系统监测不同挡位下的流量,并记录抽出 5 L 水所用时长,每个挡位试验重复 4 次,取平均值视为时间有效值。流量理论值为 5 L 水的体积与时间有效值的百分比,通过计算系统监测的流量有效值与理论流量值的百分比,可获得误差。计算公式为

$$\eta = \left| \frac{q_0 t_0}{5 \times 60} - 1 \right| \times 100\% \tag{8}$$

式中 η ——流量相对误差, %
 q_0 ——流量监测有效值, L/min
 t_0 ——时间有效值, s

为确定结果的可靠性和可信赖程度,计算平均相对误差,计算公式为

$$\psi = \frac{|q_1 - q_0| + |q_2 - q_0| + |q_3 - q_0| + |q_4 - q_0|}{4q_0} \times 100\% \tag{9}$$

式中 ψ ——流量平均相对误差, %
 q_1 ——第 1 次监测流量, L/min
 q_2 ——第 2 次监测流量, L/min
 q_3 ——第 3 次监测流量, L/min
 q_4 ——第 4 次监测流量, L/min

为了确定数据的离散程度,需要计算变异系数,计算公式为

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{(q_1 - q_0)^2 + (q_2 - q_0)^2 + (q_3 - q_0)^2 + (q_4 - q_0)^2}{4}}}{q_0} \times 100\% \tag{10}$$

2.3 液位监测试验

预先对药箱装载一定的药液,用刻度尺测量液面高度,作为实际值。再操作无人机按照正常施药时的速度飞行,但不进行施药。本试验作业速度设定为 4 m/s,在飞行过程中本系统通过 LDY02 型电容式液位传感器监测记录液面高度。每组液面高度重复试验 5 次,取平均值作为监测的有效值,最后与实际值进行对比,计算出相对误差。计算公式为

$$\varphi = \left| \frac{h'}{h_0} - 1 \right| \times 100\% \tag{11}$$

式中 φ ——液位相对误差, %
 h' ——液位监测有效值, mm
 h_0 ——液位实际值, mm

2.4 变量施药控制试验

在进行变量控制试验时,先规划飞行作业航线,按照规划的航线进行作业,在飞行过程中实时监测航迹,如果发生偏离需及时调整航线,以保证作业面积为 0.14 hm²。试验过程中通过流量传感器记录 0.14 hm² 试验田施药总量,再除以试验场地面积,即可得出实际每公顷的施药量,最后与所设定公顷施药量比较,计算误差,计算公式为

$$\sigma = \left| \frac{c'}{c_0} - 1 \right| \times 100\% \tag{12}$$

式中 σ ——公顷施药量相对误差, %
 c' ——实际公顷施药量, L/hm²
 c_0 ——设定公顷施药量, L/hm²

试验包括单因素试验和多因素试验两部分。单因素试验是分别以作业速度、作业高度和公顷施药量作为可变因素,进行该因素三水平测试。其中, G1 组是在保持作业高度和公顷施药量不变,对作业速度做三水平试验; G2 组是在保持作业速度和公顷施药量不变,对作业高度做三水平试验; G3 组是在保持作业高度和作业速度不变,对公顷施药量做三水平试验。多因素试验是以作业速度、作业高度、公顷施药量为可变因素,进行三因素四水平测试。每个水平测试重复 3 次,取平均值作为实际公顷施药量的有效值。

3 结果与分析

3.1 飞行轨迹监测试验结果

飞行轨迹如图 5 所示,图中黄色线为规划航迹,绿色线为监测航迹。

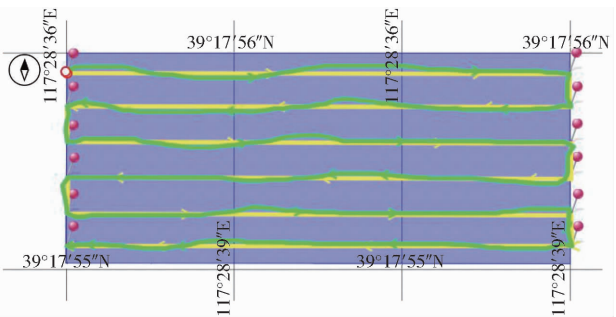


图 5 飞行轨迹图

Fig. 5 Flight track diagram

从图 5 可以看出,监测航迹与规划航迹有一定的偏差,这是由于在飞行过程中 GPS 定位存在一定的误差,且受风向风速等环境因素的影响,使航迹发生偏移。对照表 3 的数据结果也可发现,在航迹监

测试验中,飞行最大航迹偏差为 1.25 m,最小航迹偏差为 0.80 m,平均航迹偏差为 0.98 m。由于航迹偏差随机分布在规划航线两侧,并且本次试验的喷幅为 5 m,因此通过公式(7)可得面积平均变化范围在 90.2% ~ 109.8% 之间,该区间包含于区间 90% ~ 110%,因此该监测系统对航迹监测精度较高,满足航空施药对航迹监测的需求。由于航迹主要依赖 GPS 采集与计算,但是 GPS 模块对位置的获取存在误差,因此误差不可避免。

3.2 施药流量监测试验结果

施药流量监测试验结果如图 6 所示。通过图 6 可知,液泵在低挡位工作时监测的流量与理论的流量误差较大,最大是 10%,随着挡位的提高,误差呈缩小趋势。误差产生的主要原因是液泵在低功率工作时,管道内药液流速低,混有部分空气,影响传感器监测精度,使该系统不能及时监测出通过的真实流量。随着挡位提升,液泵的工作功率逐渐增大,药液流速增大,监测的精准度也随之提高。但由于液泵及水管等之间连接处密封性问题、液泵电压的波动以及流量传感器的精度等问题,误差始终存在,本试验的最小误差是 1.6%,平均误差为 3.57%。试验表明,在无人机户外飞行施药作业时,流量监测误差在 1.6% ~ 10% 之间。误差为 10% 时流量为 0.5 L/min,此时造成施药量误差为 0.05 L/min,无人机每分钟作业面积在 0.07 hm² 以上,所以每公顷施药量的误差在 0.71 L 以内。而正常施药时每公顷施药量在 7.5 ~ 15 L 之间,所以施药量的误差在 10% 以内,满足航空施药对流量检测的需求。试验数据的变异系数在 1.991% ~ 3.889% 之间,并且平均相对误差在 2.97% 以内,说明试验数据的离散程度小,数据可靠性高。

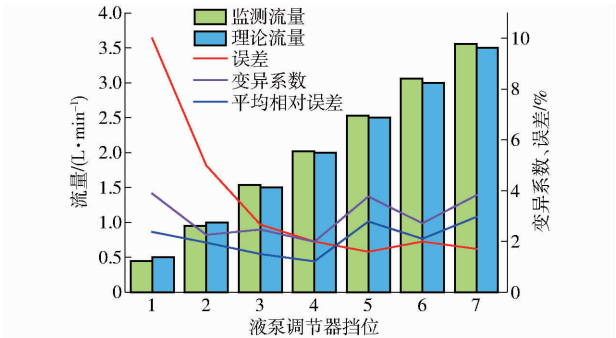


图 6 流量误差分析图
Fig. 6 Error analysis diagram

3.3 液位监测试验结果

液位监测试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,系统对液位的监测和实际液位误差最大为 3.51%,最小为 1.23%,平均误差为 1.97%。虽然在作业过程中是匀速直线飞行,但是由于飞机振动

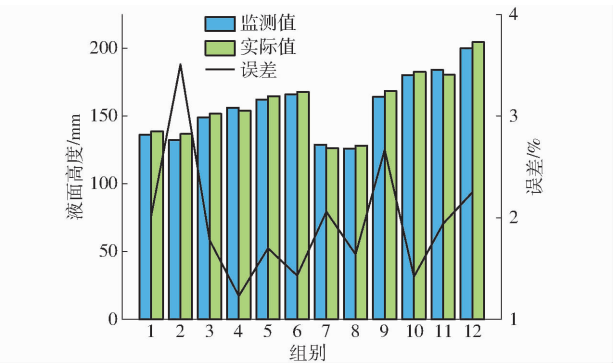


图 7 液位监测试验结果
Fig. 7 Result of liquid level monitoring test

和传感器存在精度误差问题,所以监测误差不可避免。由于无人机药箱的横截面在 400 cm² 左右,所以平均液位误差 1.97% 造成的药液量监测误差为 78.8 mL,低于管道内残余药量,因此满足航空施药对液位检测的需求。试验表明,该系统对液位监测的准确性较高,且误差在合理范围内。在更高要求的液位监测中,可以通过选用更高精度的传感器,也可以在系统中优化防振程序,以提高液位监测的精度。

3.4 变量施药控制试验结果

3 组单因素试验结果如表 4 所示。

表 4 单因素试验设计与结果
Tab. 4 Single factor test design and results

组别	作业速度/ (m·s ⁻¹)	作业高度/m	设定公顷施药量/ (L·hm ⁻²)	实际公顷施药量/ (L·hm ⁻²)	公顷施药量相对误差/%
G1	3.5	4	12	12.888	7.40
	4.5	4	12	11.881	0.99
	5.5	4	12	12.946	7.88
G2	4	2	12	11.778	1.85
	4	3	12	13.023	8.53
	4	4	12	12.467	3.89
G3	4	4	9.0	9.510	5.67
	4	4	10.5	10.905	3.86
	4	4	13.5	14.315	6.04

通过表 4 可知,分别改变作业高度、作业速度和公顷施药量时,该变量监控系统能根据单一参数的改变及时准确的调节流量,以保证施药均匀性,避免局部少喷或者多喷现象。并且实际公顷施药量与设定值的误差在 0.99% ~ 8.53% 范围内,小于 10%。因此该系统在单一参数变化时对流量控制的精度满足农业航空变量施药的需求。

多因素试验结果如表 5 所示。由表 5 可得,当作业高度、作业速度、公顷施药量在设置范围内同时改变时,实际公顷施药量与设定值的误差在 0.20% ~ 9.26% 范围内,小于 10%,说明该系统在

表 5 多因素试验设计与结果
Tab.5 Multi-factor test design and results

组别	作业速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	作业 高度/ m	设定公顷 施药量/ ($\text{L}\cdot\text{hm}^{-2}$)	实际公顷 施药量/ ($\text{L}\cdot\text{hm}^{-2}$)	公顷施药 量相对误 差/%
1	3.5	2	9.00	9.454	5.04
2	3.5	3	10.50	10.986	4.63
3	3.5	4	12.75	12.452	2.34
4	3.5	5	15.00	14.970	0.20
5	4.5	2	10.50	10.786	2.72
6	4.5	3	9.00	9.833	9.26
7	4.5	4	15.00	14.522	3.19
8	4.5	5	12.75	13.126	2.95
9	5.5	2	12.75	13.248	3.91
10	5.5	3	15.00	15.737	4.91
11	5.5	4	9.00	9.607	6.74
12	5.5	5	10.50	10.352	1.41
13	6.5	2	15.00	16.189	7.93
14	6.5	3	12.75	12.210	4.24
15	6.5	4	10.50	11.344	8.04
16	6.5	5	9.00	9.151	1.68

多参数同时变化时可以准确地调节流量,保证公顷

施药量一致。系统对流量控制的精度满足农业航空变量施药的需求。

4 结 论

(1)针对无人机施药作业,提出了一种航空变量施药分级控制算法。在航空施药过程中,当作业高度、作业速度和公顷施药量发生变化时,该算法可以自动调节施药流量,以保证单位面积施药量的一致性。

(2)基于该算法设计了航空变量施药实时监控系統,通过监测试验验证了系统监测的精准性。监测试验结果表明,该系统对航迹监测的偏差范围为 0.80 ~ 1.25 m,施药流量监测误差范围为 1.6% ~ 10%,液位高度监测误差范围为 1.23% ~ 3.51%,误差在合理范围内,能够满足航空施药的监测需求。

(3)变量施药试验结果表明,无论是单一飞行参数改变,还是多参数同时改变,该系统可精准调节施药流量,最大误差为 9.26%,小于 10%,满足农业航空变量施药的控制需求。

参 考 文 献

[1] 洪添胜,杨洲,宋淑然,等.柑橘生产机械化研究[J].农业机械学报,2010,41(12):105-110.
HONG Tiansheng, YANG Zhou, SONG Shuran, et al. Mechanization of citrus production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):105-110. (in Chinese)

[2] 茹煜,金兰,贾志成,等.无人机静电喷雾系统设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(8):42-47.
RU Yu, JIN Lan, JIA Zhicheng, et al. Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(8):42-47. (in Chinese)

[3] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等.中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL].农业机械学报,2014,45(10):53-59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):53-59. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)

[4] JACOPO P, SALVATORE FILIPPO D G, EDOARDO F, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture [J]. Precision Agriculture, 2012,13(4):517-523.

[5] 秦维彩,薛新宇,周立新,等.无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):50-56.
QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):50-56. (in Chinese)

[6] HUANG Y, HOFFMANN W C, LAN Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(6):803-809.

[7] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等.航空喷施与人工喷施方式对水稻施药效果比较[J].华南农业大学学报,2017,38(4):103-109.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiuyu, et al. Comparison of the pesticide effects of aerial and artificial spray applications for rice [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017,38(4):103-109. (in Chinese)

[8] TANG Q, ZHANG R R, CHEN L P, et al. Droplets movement and deposition of an eight-rotor agricultural UAV in down wash flow field [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5):24-32.

[9] YANG F B, XUE X Y, ZHANG L, et al. Numerical simulation and experimental verification on downwash air flow of six-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hover [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(4):41-53.

[10] 刘峰,刘素红,向阳.园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J/OL].农业机械学报,2014,45(11):250-257.
LIU Feng, LIU Suhong, XIANG Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(11):250-257. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141139&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.039. (in Chinese)

[11] HUNT E R, HIVELEY W D, FUJIKAWA S J, et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft

- for crop monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(1): 290 – 305.
- [12] LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(3): 1 – 17.
- [13] LAN Y, THOMSON S J, HUANG Y B, et al. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 34 – 38.
- [14] ANDREWS J. Variable rate spraying-not so far fetched [J]. *Farmers Weekly*, 2010, 152(6): 64.
- [15] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 194 – 201.
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 194 – 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034. (in Chinese)
- [16] 段立蹄, 刘洋洋, 茹煜. 植保无人机变量施药监测技术研究发展与展望[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(6): 108 – 113.
DUAN Liti, LIU Yangyang, RU Yu. Research development and prospect of plant protection UAV aerial application monitoring technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(6): 108 – 113. (in Chinese)
- [17] BILL K. Aerial application equipment guide 2003 [M]. Washington: USDA Forest Service, 2003: 59 – 62, 143 – 147.
- [18] 袁玉敏. 农业植保无人机高精度定位系统研究与设计——基于 GPS 和 GPRS[J]. *农机化研究*, 2016, 38(12): 227 – 231.
YUAN Yumin. Research and design of high-precision positioning system for agricultural plant protection UAV—based on GPS and GPRS [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38(12): 227 – 231. (in Chinese)
- [19] 翟长远, 朱瑞祥, 黄胜, 等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8): 70 – 74, 84.
ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, HUANG Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(8): 70 – 74, 84. (in Chinese)
- [20] 邢航, 梁宇发, 陈伟政. 变量喷洒地面监控系统设计[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(35): 219 – 222.
XING Hang, LIANG Yufa, CHEN Weizheng. Design of variable spraying ground monitoring system [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(35): 219 – 222. (in Chinese)
- [21] 王玲, 兰玉彬, CLINT HOFFMANN W, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 15 – 22.
WANG Ling, LAN Yubin, CLINT HOFFMANN W, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 15 – 22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.003. (in Chinese)
- [22] 张瑞瑞, 李杨, 伊铜川, 等. 有人直升机变量施药控制系统的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2017, 39(10): 124 – 127.
ZHANG Rui Rui, LI Yang, YI Tongchuan, et al. Design and experiments of control system of variable pesticide application for manned helicopter [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(10): 124 – 127. (in Chinese)
- [23] LIAN Q, TAN F, FU X M, et al. Design of precision variable-rate spray system for unmanned aerial vehicle using automatic control method [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(2): 29 – 35.
- [24] YAO W X, LAN Y B, WEN S, et al. Evaluation of droplet deposition and effect of variable-rate application by a manned helicopter with AG – NAV Gufa system [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(1): 172 – 178.
- [25] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. *北方交通大学学报*, 1999, 23(5): 119 – 122.
ZHU Yin, MENG Zhiyong, KAN Shuyu. Determination of weight value by AHP [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1999, 23(5): 119 – 122. (in Chinese)
- [26] 南京林业大学. 农用无人机航空施药作业监控装置: CN108363335A [P]. 2018 – 08 – 03.
- [27] HE De bao, ZEADALLY S. An analysis of RFID authentication schemes for internet of things in healthcare environment using elliptic curve cryptography [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2015, 2(1): 72 – 83.
- [28] 时玮. 基于面向服务架构的企业级 GIS 平台的实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
SHI Wei. Implementation of GIS platform based on service oriented architecture [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
- [29] 刘健, 卢加华, 杨新云, 等. 中纬度地区兰勃特投影和高斯-克吕格投影变形分析[J]. *地矿测绘*, 2019, 35(3): 12 – 14, 17.
LIU Jian, LU Jiahua, YANG Xinyun, et al. Deformation analysis of lambert projection and Gauss – Kruger rojection in mid-latitude area [J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2019, 35(3): 12 – 14, 17. (in Chinese)
- [30] 徐博. 植保无人机航线规划方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
XU Bo. Research on route planning for plant protection unmanned aerial vehicles [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)