doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.013

基于 CAN 总线的旋翼无人机喷洒模拟系统

张艳超[1,2]　陈　杨[1]　李艺健[1]　刘　飞[1,2]　何　勇[1,2]

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 设计了一套高精度、高可控性的无人机喷洒模拟平台,并进行了试验验证。该系统机械部分采用直线导轨结合伺服电机,最大承载质量 50 kg,控制部分采用 MFC 设计上位机控制软件,与主控板 STM32 通过串口进行通讯,实现对水平和垂直 2 个方向上伺服电机的控制,同时采用 CAN 总线与喷洒控制器通讯和远程操控,可以实现喷洒流量控制以及旋翼风速控制。为评价系统运行精度,采用激光测距仪分别对系统在水平运动速度 0.05、0.10、0.15、0.20 m/s 下和垂直运动速度 0.01、0.02、0.03、0.04 m/s 下的控制距离进行距离测量,结果显示,垂直和水平方向上,控制参数与实际行程决定系数 $R^2=1$,水平与垂直重复精度优于 2 mm,系统控制精度高;采用振动测试仪对系统在 0.05、0.10、0.15 m/s 运行速度下进行测试,通过分析振动数据,在不同运动速度下系统振动均不超过 20 m/s^2,其中 X 向和 Y 向在运行中存在较为稳定的 4 ~ 5 m/s^2 的加速度,系统运行稳定。本系统可以有效降低喷洒试验载具成本,降低试验风险。

关键词: 无人机; 喷洒; 模拟测试平台; CAN 总线

中图分类号: TP271; S499　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)01-0108-08

Development of CAN – based Aerial Spraying Simulation System

ZHANG Yanchao[1,2]　CHEN Yang[1]　LI Yijian[1]　LIU Fei[1,2]　HE Yong[1,2]

(1. *College of Biosystem Engineering and Food Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*
2. *Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture*, *Ministry of Agriculture*, *Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract: Agricultural spraying unmanned aerial vehicles (UAV) become a new hot spot in intelligent agricultural machinery field. It has a lot advantages over traditional spraying method like manual spraying and machine spraying. There is an urge need of UAV spraying technology. Meanwhile, since UAV onboard spraying takes a lot of time to prepare and is highly risky because for now there was a lack of customized flight controller for agriculture spraying. The development of an UAV aerial spraying simulation system was described. This system was developed for aerial spraying theory and methods test so as to shorten experiment cycle and motivate new spraying methods to be optimized. The system was designed and developed as a high precision, highly automated unmanned aerial vehicle (UAV) simulation platform to perform UAV indoor test. The system mechanical precision was maximum 2 mm error for horizontal, maximum error 1 mm for vertical, maximum load weight 50 kg. MFC-based upper machine software was designed and it was communicated with the main control board to realize the horizontal and vertical directions movement. CAN bus was used for communication between main control board and the far end spraying unit controller. The far end spraying controller controlled spray flow control and rotor speed. This system can effectively reduce the spraying test vehicle costs, reduce the risk, and promote the UAV spraying technology development and testing. The system can be expanded to the agricultural plant protection spray test area in many places.

Key words: unmanned aerial vehicles; spraying; test simulation platform; CAN bus

收稿日期: 2017 – 04 – 05　修回日期: 2017 – 07 – 24

基金项目: 浙江省科技重大专项(2015C02007)和国家重点研发计划项目(2016YFD0700304)

作者简介: 张艳超(1988—),男,助理研究员,博士,主要从事无人机低空遥感与三维地表分析研究,E-mail: yczhang@zju.edu.cn

通信作者: 何勇(1963—),男,教授,博士,主要从事数字农业与农业物联网研究,E-mail: yhe@zju.edu.cn

0　引言

利用植保无人机进行农田喷洒已成为新型农机应用热点。目前国内农用植保无人机领域的研究正处于快速发展阶段，相对于传统人工喷药，无人机在植保喷药方面具有速度快、效率高、安全性较好、喷洒效果好等优点。但植保无人机的使用中，也有较多细节问题需要优化与完善，如适用于无人机的喷洒系统关键部件的优化与设计，包括药泵、药箱、喷头等的优化，喷洒助剂研究与喷洒效果评价等方面。秦维彩等[1]研究了基于无人直升机的喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响，喷洒参数包括作业高度与横向喷幅，确定了针对其所使用无人机较为适宜的作业参数。张宋超等[2]采用 N－3 型农用无人直升机作为载机，通过 CFD（Computational fluid dynamics）在约束条件下对作业过程中旋翼风场和农药喷洒的两相流进行了模拟，并设计了条件相似的对应试验进行验证，试验结果表明，在飞行高度6 m，侧风风速分别在 1、2、3 m/s 下，仿真模拟结果与实测数据的拟合直线决定系数 R^2 分别为 0.748 2、0.805 0 和 0.687 5，对实际生产具有一定指导意义。

然而无人机喷施作业中受很多因素影响，如风力风向、雨雪大雾、风场等自然因素，操作人员技术水平、设备挂载安装等人为因素。同时由于目前无人机系统稳定性、安全性和可靠性仍需时间检验，无人机机载实验需要承担很大风险，使得实验开展困难，单次实验人力、财力花费较高，不利于植保无人机喷洒技术的快速发展。因此需要开发一种可以快速在地面测试各种喷洒参数的无人机喷洒模拟系统[3]。本文设计一套无人机喷洒模拟系统，并进行系统性能测试试验，旨在模拟无人机机载田间喷洒试验。

1　无人机喷洒测试平台搭建

1.1　系统设计

系统设计如图 1 所示。本系统主要包含 3 部分：机电部分、电气控制部分和上位机软件部分。其中机电部分为执行运动机构（包含水平和竖直方向上的直线运动），包含喷洒组件及风压系统。电气控制系统包含伺服电机编码器、电子调速器、主控板、远端控制板。上位机软件主要包含串口通讯、系统参数设定、系统运行状况显示。

机电部分实现对植保无人机喷洒动作仿真。采用 2 个伺服电机实现对水平移动速度和垂直移动速度的精确控制。直线导轨相对于滑轨等其他直线运动导轨系统力学性能好，实际工作中滚动摩擦小，在长时间的往复运动过程中，磨损较小，适合做高精度大型仪器与系统[3]，直线导轨制作精密，且各向最大承受拉压力及扭转力矩差别很小，多用在自动化机械上提供导向和支撑作用，如 PCB（Printed circuit board）制板、3D 打印、数控加工机床等精密加工机械[4－6]。为满足植保喷药的需求，本系统采用直线导轨作为直线运动执行机构，电动缸作为垂直运动执行机构。系统载荷为 50 kg，满足挂载喷洒设备和喷洒控制器，采用悬垂设计，水平导轨采用 30 mm 的方形滚珠直线导轨。为覆盖较大量程，水平方向设计长度为 12 m，采用 3 段直线导轨拼接而成，并安装在一整条槽钢上。为使得 3 段导轨能够较好的配合在同一平面，降低内部应力，设计将 3 段直线导轨安装在一个用车床冲出的导槽上，并通过 8 mm 的螺纹旋紧固定，考虑到金属热胀冷缩，导轨与导轨之间留有 1 mm 安装间距。直线导轨上挂载 2 个滑块，滑块最大可承受拉压力为 38.74 kN，在上下翻动、左右摇晃以及侧向旋转 3 个方向上最大承受扭矩分别为 0.88、0.92、0.92 kN·m。这使得系统强度高，变形小，可以承受较大的侧向和径向扭矩，从而降低了系统因为频繁加减速而损坏的可能。直线导轨的滑块由于其如图 2 所示的设计结构，滑块在各个方向上最大承受力基本相同，拉力和压力的作用效果相同，使得其对不同方向的冲击具有很好的保护作用，并且由于该系统为吊装，执行往复运动，主要的受力形式包括：垂直向下的拉力、加减速时俯仰方向的力矩 M_P、振动引起横滚方向和偏航方向的力矩 M_R 和 M_Y。分别针对以上受力形式进行强度设计和分析，以保障系统安全。

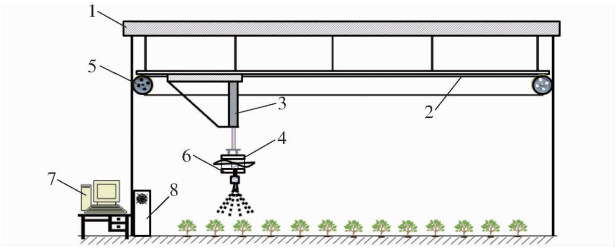

图 1　系统示意图

Fig. 1　System diagram

1. 系统顶板　2. 直线导轨　3. 电动缸　4. 远端喷洒控制器　5. 伺服电机　6. 喷洒组件　7. 上位机　8. 控制箱

图 1 为垂直方向采用电动缸的机械结构，其最大提升力为 750 N，满足系统设计需求。电动缸是伺服电机与丝杠一体化的机械组件，将电机旋转运动转化为直线运动，其在机械系统中被大量使用[7－9]。电动缸有效行程为 0.5 m，最大拉升速度为 0.5 m/s。电气部分水平方向采用东菱 1.2 kW 伺

服电机,驱动编码器采用配套的 EPS145 型驱动编码器。垂直部分采用松下 200 W 伺服电机,驱动器为原装 MAD－1507CA 型驱动器。由于伺服电机内部存在锁紧装置,可以很好地停在所需要的位置。锁紧方法与内部 PID 调节有关,内部编码器感应到主轴旋转产生的位移量,将其作为反馈,对速度和位移做出相应的调节。17 bit 的编码器在旋转一周时产生的脉冲数为 2^{17},通过减速比可算出水平方向上的指令脉冲当量为 0.001 mm,竖直方向上位置分辨率为 0.000 5 mm。

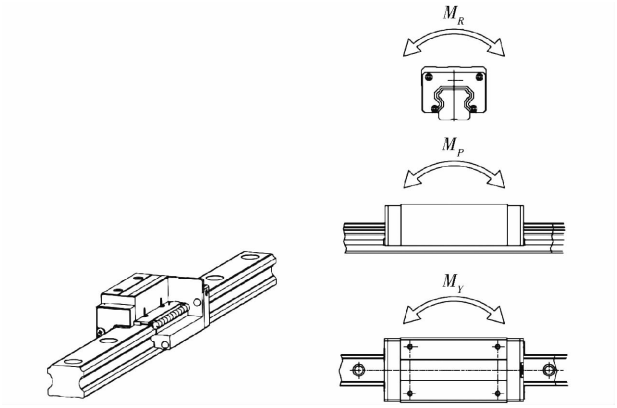

图 2 滑块组成与受力图

Fig. 2 Slider stress

系统在水平和竖直方向上采用限位开关来实现系统归零和位移标定。水平限位开关采用光电式限位开关,检测限 5 mm,安装时滑块距离光电接近开关 2 mm,满足触发条件。竖直限位开关采用磁感应式,当电动缸内的磁环下移到限位开关时,触发开关产生中断脉冲。中断脉冲被主控记录并作为水平和垂直方向的零点,同时中断脉冲成为系统停止运行的信号。由于该系统电压不同,限位开关的接线需要做电磁屏蔽,以防止信号被干扰。

1.2 主控板与执行端控制器

为提高系统的自动化程度,采用如图 3 所示的系统设计。上位机软件向下与主控板采用串口通讯,主控板到上位机的通讯字段包括:水平方向速度和位置,垂直方向速度与位置,导管内液体流速。上位机软件到主控板的通讯字段包括:设定的水平方向速度和位置,设定的垂直方向速度与位置,设定的风力,设定的流速。

主控板采用 12 V 独立电源供电,可接受的电压范围在 10 ~ 50 V 之间。两边作为排针接口,与伺服电机驱动器相连。由于限位开关只有通断两种状态,因此设立两路 Pulse + 和 Pulse －给限位开关。主控板采用意法 STM32F103RCT6 嵌入式微控制器,搭配 8 MHz 外部晶振。该芯片核心频率 72 MHz,提供了丰富的传感器接口,如 CAN(Controller area network),I2C,IrDA(Infrared data association),LIN(Local interconnect network),SPI(Serial peripheral interface),UART/USART(Universal asynchronous receiver/transmitter),USB,并为外围设备如电机等提供 PWM 输出信号,提供 51 路的输入与输出,工作电压 3.6 V。

为实现对远端机载部分的控制,本系统采用 CAN 总线进行数据通讯和控制指令发送。由于主控芯片意法 STM32F103RCT6 已经提供 CAN 接口,不再需要配合 CAN 控制器[10]。CAN 总线技术是多主分布式控制系统串行通讯较好的总线解决方案,具有高位率、高抗电磁干扰、容错性强、实时性好等优点[11]。由于控制端处于移动状态并且离主控器较远(>10 m),其他信息传输方式难以实现长距离的控制和数据通讯,CAN 总线采用双绞线[12-14],传输距离较远,易于部署系统,成为该系统设计的最佳方案。

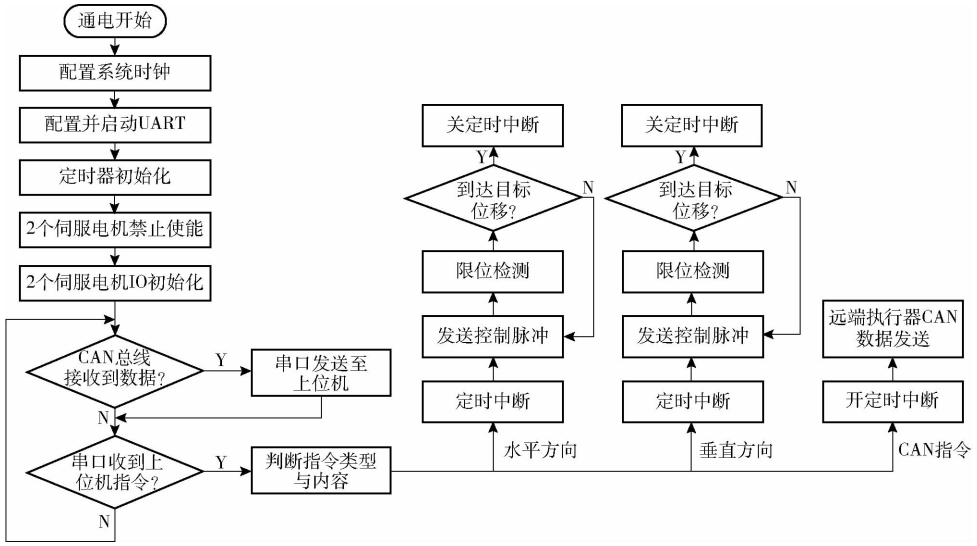

图 3 系统控制流程图

Fig. 3 Flow chart of system control

远端喷洒控制器主要控制板采用意法 STM32F103RCT6，控制板采用独立 12 V 锂电池供电。控制器与主控板通过 CAN 总线进行通讯，波特率设置为 57 600 bps，实测通讯长度为 17.5 m，远低于 CAN 总线的最长传输距离。远端喷洒控制器向齿轮泵驱动器发送 PWM（Pulse width modulation）信号，控制齿轮泵转速；流量传感器发送脉冲计数的方法计算单位时间内通过的液体流量；控制器向无刷电动机的电子调速器发送 PWM 信号控制电动机转速，PWM 频率 50 Hz，占空比变化范围为 25% ~ 75%，通过改变电动机转速来改变产生的风压。

1.3　喷洒组件

喷洒组件包括齿轮泵及其 MOS（Metal oxide semiconductor）管调速器、流量计、无刷电动机、螺旋桨、导液管及药箱喷杆等。齿轮泵为 385 微型齿轮泵，额定电压 12 V，空载电流 0.4 A，最大水压力 0.23 MPa。控制板输出的 PWM 信号通过 MOS 管来调节输出齿轮泵电动机转速。输出流量与 PWM 指令之间的关系如图 4 所示，其标定函数为

$$V = 9.396 \times 10^{-5} N^3 - 0.049\,24 N^2 + 11.93 N - 49.03 \tag{1}$$

式中　V——输出流量，mL/min

N——PWM 占空比（0 ~ 1）量化为 256 级之后的值

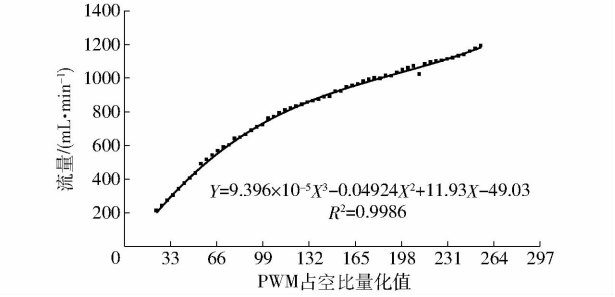

图 4　水泵标定曲线

Fig. 4　Pump calibration curve

通过测量数据可以看出该齿轮泵输出与 PWM 的输入呈三次相关，决定系数 $R^2 = 0.998\,6$。

流量计采用基于霍尔元件的微量流量计，其最小检测流量为 0.4 L/min，最大流量为 3 L/min，最大承受压力 0.8 MPa。基于霍尔元件流量计的工作原理[15]，当液体流过时，叶轮旋转带动叶轮上的金属片在霍尔元件处产生磁感应，从而产生脉冲，通过计算脉冲数对应流过液体的体积。通过检测并计算信号输出上升沿的次数，判断流速，通过标定方法进行测试，得到标定方程为

$$L = 0.222\,6n + 71.377 \tag{2}$$

式中　L——通过霍尔传感器的液体体积

n——霍尔传感器输出的波形上升沿数

其 $R^2 = 1$，表明流量传感器可以准确地反映管道中的流速。

风力系统以浙江大学研制的 SH－8V 系列植保无人机的动力风场进行模拟，电动机采用高压无刷电动机[16]，最大电流 22.8 A，相应的电子调速器也要选择较大型号，并且有优化过的散热结构，本系统采用双天 100 A 电子调速器[17]，可以通过较高电流，并且设计有散热片，具有较好的散热性能。配 15 寸 55 mm 螺距的碳纤尾桨，在 22.2 V 电压下通过风速计测量，最大风速为 4.4 m/s，电动机位于喷头正上方，以模拟原型机中风场对喷洒雾滴的影响效果[18]。

导液管及药箱喷杆等采用与原型植保无人机相同的喷洒部件。所搭载喷洒部件皆可依据特定的喷洒环境进行定制化开发，当前采用的喷洒部件中喷头为国产 Licheng 102A－1 型扇形喷头（Licheng Ltd.，浙江）[19－20]，喷洒锥角为 45°，喷头间隔 1 m。

1.4　上位机软件开发

为实现对试验因素（如喷洒高度、喷洒流量和喷洒风力等）远程精确控制，及喷洒流量的实时显示，本系统设计开发了上位机软件。软件开发采用 Visual C + + 2010 开发环境，上位机软件采用串口通信，串口波特率选择 57 600 bps，设计界面如图 5 所示。由于 PC 一般不安装串口，通过串口转 USB 接到 PC 的 USB 接口处。

考虑到以后系统的便携性，增加 WiFi 转发，将 PC 机通过 LAN 口与平板电脑连接入同一局域网中，通过 WiFi 路由器将平板控制指令传输到 PC 机



图 5　系统完成构架与软件操作界面

Fig. 5　System image and software user interface

上,将实时信息显示在平板上。平板电脑采用国产某型 Intel CPU 平板电脑,搭载 Windows 8 系统,运行界面如图 5 所示。其中运动模块由 OpenGL 制作模型并集成进系统用以显示系统运行状态。OpenGL 是一个跨编程语言、跨平台的专业图形程序接口,用于二维和三维图像的显示,是一个功能强大、调用方便的底层图形库。

1.5 系统安全性

由于本系统运动部分较重,在启动和停止时需要较大作用力来使得悬挂系统产生与设定所需速度值相同的速度,同时悬挂系统并非一体成型,中间存在诸如减振垫等软性连接部分,在完成运动过程中会产生振动和位移。为降低振动和位移,提高系统安全性,考虑以下问题:机械结构设计优化、控制程序优化、紧急保护。

结构设计优化主要体现在:平移部件优化、减振连接件优化设计、喷洒平台平衡性优化。水平移动是系统中最多的运动,若用单一滑块搭配电动缸运行,则会在产生加速度时对垂直方向的电动缸产生过大的剪切应力,对滑块和电动缸造成损害,因此在水平方向上构建三角形来提高水平移动方向的强度。该设计在提高系统强度的同时减小由于加速度作用造成的悬垂系统的位移。

减振连接件针对下方承载较重的情况,采用 VV 型减振器连接的方式。橡胶减振器利用橡胶具有较高弹性和黏弹性,冲击刚度高,静刚度低,有利于减小变形等特点,将金属件与橡胶直接硫化粘合[21],成为各类机械、汽车、飞机及航空器等广泛使用的减振连接[22]。设计采用 4 个 M4 螺纹的橡胶减振器,如图 6 所示。

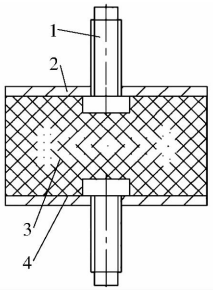

图 6 橡胶减振器示意图

Fig. 6 Rubber damper demonstration

1. 螺纹 2. 封口铁 3. 橡胶内填物 4. 底面封口铁

控制程序优化主要用于电动机可能出现较大加速度时的缓速控制。优化表现为:①启动时,横向在启动速度大于 0.5 m/s 时,采用从 0.3 m/s 启动,在 1 s 内提速到设定速度,在到达设定位置之后,在 1 s 内降低到 0。垂直方向由于速度不大(设定范围为 0 ~ 0.5 m/s),而且距离有限(50 cm),如果缓速启动的话,存在较大的未使用空间。选择电动缸进行运动控制,足以应对上下产生的加速度。②水平和垂直方向的复位动作采用较低的 0.2 m/s 的速度进行。由于在检测零位的时候存在急停刹车动作,因此不宜采用较大的行进速度进行零位寻找。紧急保护措施有电源紧急切断以及限位螺栓。在配电柜外部有紧急电源关闭的开关,当限位措施失效时有限位螺栓卡紧运动部分,防止滑块出现脱轨现象。

2 系统性能测试试验

2.1 位置精度测试

采用 iLDM 激光测距仪(CEM Ltd., 深圳, 中国)进行,该仪器的量程为 0.05 ~ 70 m,测量精度 ±1.5 mm。该仪器采用 635 nm type Ⅱ 型激光仪进行长度测量,激光功率低于 1 mW。激光测距仪安装在电动缸端点,安装误差为俯仰方向 ±0.1°,偏航方向 ±0.2°。俯仰角安装误差通过测距仪读数调节,采用测量远点与零位点在垂直参考面上亮点距离,通过三角方程近似算出偏航角误差。其中最近端与最远端在参考平面的距离为 7 cm。垂向测量采用平行于电动缸主轴方向安装,激光测距仪安装位于电动缸的下端点,并以电动缸活动端点的安装板作为参考平面,安装误差在 ±0.2°。激光测距仪通过蓝牙与手机相连,可以通过手机来触发采集数据和数据监控。其安装方式如图 7 所示。平台沿着水平方向分别按照 0.05、0.10、0.15、0.20 m/s 运行,每 0.25 m 设置 1 个点进行位置测量。每一个位置的数据点做 3 次重复,取平均值。所得的 36 个位置数据如图 8 所示。横轴为通过上位机发送的位置指令,纵轴为实测所得值。垂直方向的位置测量,使系统在垂向分别按照 0.01、0.02、0.03、0.04 m/s 4 种速度运行,每种速度做 3 次重复,以 5 cm 为间隔采集位置点,取 3 次重复之后的平均值,垂向的位置测量结果如图 9 所示。其中水平向重复误差低于 2 mm,垂直向重复误差低于 1 mm。

2.2 振动测试

振动和晃动在自动化系统中很难避免,一般由电动机转动、不规则加减速等原因造成,而本系统中运动部件为悬垂安装,以上原因造成的振动和晃动对系统精度影响更为显著,对系统运行的稳定性和安全性有着很大的影响。且本系统对直线导轨的准直度要求很高,在系统安装和操作过程中,都会降低系统的表现,准直度低会降低系统寿命。在维护保养中,直线导轨和滑块的锈蚀都会影响系统的表现。因此系统的振动与晃动是系统的基础功能指标。振



图 7　激光测距仪安装方式与测试

Fig. 7　Laser distance meter installment and measurement

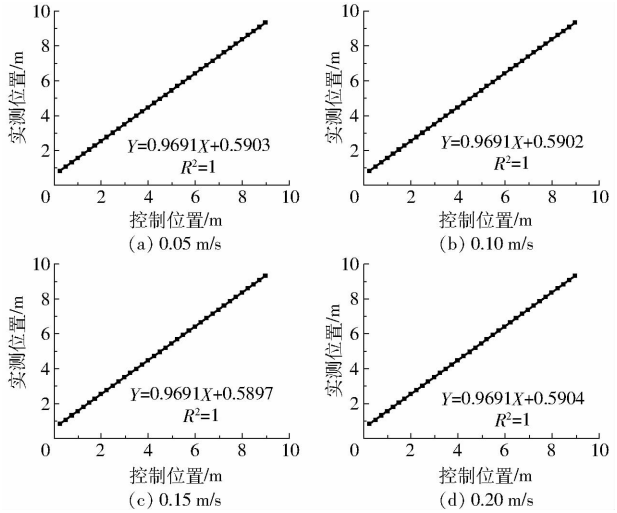

图 8　水平方向不同速度下距离测量结果

Fig. 8　Horizontal test results at different moving speeds

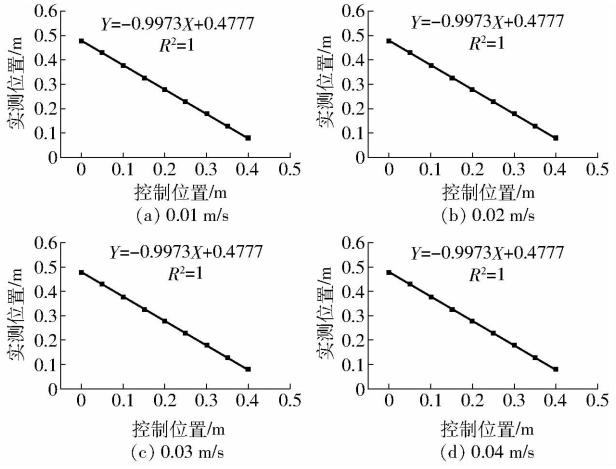

图 9　垂直方向不同速度下距离测量结果

Fig. 9　Vertical test results at different moving speeds

动与晃动采用华盛昌 CEM DT178 型振动分析仪进行测量，内置 3 轴加速度计，采样率为 256 Hz，量程 ±180 m/s^2，测量精度为 0.062 5 m/s^2，支持 FFT (Fast fourier transformation)。该振动分析仪固定在云台上，系统以 0.05、0.10、0.15 m/s 速度运行，分别测量其振动数据如图 10 所示，通过分析振动晃动数据，可知在不同运动速度下，系统振动晃动均不超过 20 m/s^2，其中 X 向和 Y 向在运行中存在较为均匀的 4 ~ 5 m/s^2 的加速度，在合理范围内。

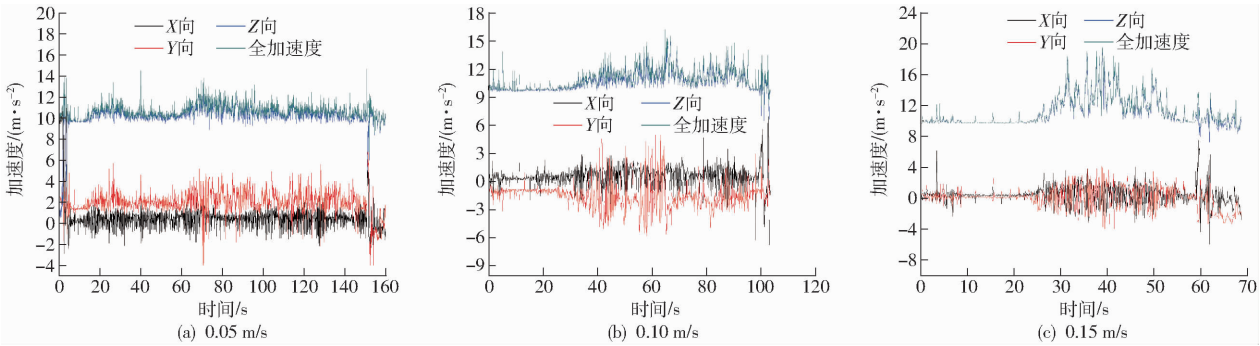

图 10　不同速度下的振动数据

Fig. 10　Vibration data at different moving speeds

3　结论

(1)针对目前农用植保无人机快速发展，而相关的机载雾滴检测及喷洒理论验证缺乏的现状，设计了无人机仿真喷洒系统。基于 PWM 的齿轮泵控制量与实际出水量决定系数 R^2 = 0.998 6。采用激光测距仪对系统水平运动在 0.05、0.10、0.15、0.20 m/s，垂直运动在 0.01、0.02、0.03、0.04 m/s 进行测量，系统控制精度高，控制参数与实际行程决定系数均为 R^2 = 1，水平与竖直重复精度优于 2 mm，其水平方向重复误差为 2 mm，为无人机喷洒理论测试提供了良好的平台。采用振动测试仪对系统在 0.05、0.10、0.15 m/s 运行速度下进行测试，通过分析振动晃动数据，在不同运动速度下系统振动均不超过 20 m/s^2，其中 X 向和 Y 向在运行中存在较为稳定的 4 ~ 5 m/s^2 的加速度，可知系统运行稳定。

(2)系统对无人机喷洒过程中的风力、流量、移动速度进行在线远程控制,采用 CAN 总线作为远端与控制台的通讯手段,具有较高的实时性,并且实现了喷洒状态的实时回传和显示。

(3)设计了伺服电机控制器以及远端喷洒控制器、喷洒组件、上位机软件,实现了室内喷洒系统自动化集成,为系统化研究无人机喷洒过程中各项参数对最终喷洒效果的影响提供了有力支撑。

参 考 文 献

1 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)

2 张宋超, 薛新宇, 秦维彩, 等. N - 3 型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(3):87 - 93.
ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N - 3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(3):87 - 93. (in Chinese)

3 冯婧婷. 直线导轨精密矫直的误差检测及补偿技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
FENG Jingting. Study of linear guide precise straightening error detection and compensation technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2013. (in Chinese)

4 ZENG Tao, GHULAM A, YANG Wunian, et al. Estimating the contribution of loose deposits to potential landslides over Wenchuan Earthquake Zone, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015,8(2):750 - 762.

5 TURNER D, LUCIEER A, DE J S M. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Remote Sensing, 2015,7(2):1736 - 1757.

6 MONDINI A C, GUZZETTI F, REICHENBACH P, et al. Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(7):1743 - 1757.

7 苑飞虎, 赵铁石, 边辉, 等. 重载并联运动模拟台机构动力特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(9):311 - 317. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140950&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.050.
YUAN Feihu, ZHAO Tieshi, BIAN Hui, et al. Analysis on dynamics characteristic of heavy-load parallel motion simulation platform mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9):311 - 317. (in Chinese)

8 杨传华, 方宪法, 杨学军, 等. 基于 PLC 的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊1):19 - 23. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s104&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.004.
YANG Chuanhua, FANG Xianfa, YANG Xuejun, et al. Automatic delivery mechanism of potted-seedling for vegetable transplanter based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):19 - 23. (in Chinese)

9 武光华, 龚烈航, 卢颖, 等. 6 - UPU 电动平台动力学完整模型与简化模型仿真分析[J]. 农业机械学报, 2011,42(4):195 - 200.
WU Guanghua, GONG Liehang, LU Ying, et al. Integrated and simplified dynamics modeling simulation analysis of 6 - UPU electric platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):195 - 200. (in Chinese)

10 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2009,25(12):88 - 92.
HU Lian, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(12):88 - 92. (in Chinese)

11 安秋, 姬长英, 周俊, 等. 基于 CAN 总线的农业移动机器人分布式控制网络[J]. 农业机械学报, 2008,39(6):123 - 126.
AN Qiu, JI Changying, ZHOU Jun, et al. Distributed control network for CAN-based autonomous agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):123 - 126. (in Chinese)

12 苗中华, 褚剑钢, 刘成良, 等. 采棉机智能监控系统 CAN 应用层协议设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012,43(1):180 - 184. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120132&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.032.
MIAO Zhonghua, CHU Jian'gang, LIU Chengliang, et al. CAN application-layer protocol design of intelligent monitoring system for cotton-picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1):180 - 184. (in Chinese)

13 李光林, 李晓东, 曾庆欣. 基于太阳能的柑桔园自动灌溉与土壤含水率监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2012,28(12):146 - 152.
LI Guanglin, LI Xiaodong, ZENG Qingxin. Development of automatic irrigation and soil moisture monitoring system based on solar energy in citrus orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(12):146 - 152. (in Chinese)

14 纪朝凤, 刘刚, 周建军, 等. 基于 CAN 总线的农业车辆自动导航控制系统[J]. 农业机械学报, 2009,40(增刊):28 - 32.
JI Chaofeng, LIU Gang, ZHOU Jianjun, et al. Automatic guidance system of agricultural vehicles based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):28 - 32. (in Chinese)

15 孟志军，刘卉，付卫强，等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报，2010,26(6):141 - 145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(6):141 - 145. (in Chinese)

16 PREMKUMAN K, MANIKANDAN B V. Speed control of brushless DC motor using bat algorithm optimized adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Applied Soft Computing, 2015,32:403 - 419.

17 MOZAFFARI NIAPOUR S A KH, TABARRAIE M, FEYZI M R. A new robust speed-sensorless control strategy for high-performance brushless DC motor drives with reduced torque ripple[J]. Control Engineering Practice, 2014,24:42 - 54.

18 汪沛，胡炼，周志艳，等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报，2013,29(3):54 - 61.
WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(3):54 - 61. (in Chinese)

19 张慧春，GARY Dorr，郑加强，等. 喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J]. 农业工程学报，2015,31(3):94 - 100.
ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment and regression model for spray drift[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(3):94 - 100. (in Chinese)

20 张慧春，GARY Dorr，郑加强，等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报，2012,43(6):53 - 57, 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120610&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010.
ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):53 - 57, 52. (in Chinese)

21 曾富财，汪艳. 橡胶减震器金属件与橡胶直接硫化粘合的研究[J]. 特种橡胶制品，2012,33(1):34 - 36, 40.
ZENG Fucai, WANG Yan. Study on direct vulcanization adhesion between metal and rubber of the rubber damper[J]. Special Purpose Rubber Products, 2012,33(1):34 - 36, 40. (in Chinese)

22 黄华，卢曦，余慧杰. 基于 Ansys 与 iSIGHT 的橡胶减震器迟滞回线仿真研究[J]. 现代制造工程，2014(12):59 - 63.
HUANG Hua, LU Xi, YU Huijie. Simulation research of the rubber damper hysteresis loop under harmonic load based on Ansys and iSIGHT[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(12):59 - 63. (in Chinese)