

# 液位监测技术在植保无人机中的应用分析

周志艳<sup>1,2</sup> 姜锐<sup>1,2</sup> 罗锡文<sup>1,2</sup> 兰玉彬<sup>1,2</sup> 宋灿灿<sup>1,2</sup> 李克亮<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学广东省农业航空应用工程技术研究中心, 广州 510642;

2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642)

**摘要:** 为了探究适合植保无人机药箱液位实时监测的可行方法, 阐述了国内外常见的接触式和非接触式液位监测方法, 包括差压式、浮体式、电极式、电容式、超声波式、激光式、光电式、流量计式、机器视觉式、雷达式等主要方法, 指出了植保无人机作业过程中, 其药箱存在的特点, 包括液面波动剧烈、药液的理化特性各异、药箱空间小、防腐蚀要求高等, 并对上述常见液位测量方法用于植保无人机药箱液位测量时存在的局限进行了分析, 在此基础上, 探讨了适合植保无人机质量轻、功耗小、精度高、耐腐蚀药箱液位监测方法及装置, 并针对植保无人机药箱液位监测中需克服的难题, 提出了气压式液位无线监测的解决方案, 为进一步开发适用于植保无人机的药箱液位监测装置提供参考。

**关键词:** 航空植保; 植保无人机; 药箱; 液位监测; 无线监测

**中图分类号:** S252<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0047-09

## Application Analysis of Liquid-level Monitoring Technology to Plant Protection UAV

ZHOU Zhiyan<sup>1,2</sup> JIANG Rui<sup>1,2</sup> LUO Xiwen<sup>1,2</sup> LAN Yubin<sup>1,2</sup> SONG Cancan<sup>1,2</sup> LI Keliang<sup>1,2</sup>

(1. *Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application (ERCAA)*,

*South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*

2. *National Center for International Collaboration Research on*

*Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology, Guangzhou 510642, China*)

**Abstract:** The liquid-level data is one of the most important informations for flying operators of spraying UAV. During the operation, the liquid content in the pesticide tank is dynamic, the flying operators have always to pay attention to the liquid content so that they can make suitable decisions for the flight control according to the liquid content adjustment in the pesticide tank. Therefore, the liquid-level monitoring method for pesticide tank is important in the design of key components of spraying UAV. In order to explore the feasible method for liquid-level monitoring of pesticide tank in spraying UAV, several major methods about contact and non-contact liquid-level monitorings were reviewed, including differential pressure, floating electrode, capacitance, ultrasonic, laser, photoelectric, flowmeter, machine vision and radar. Spraying UAV has special requirements, such as liquid surface violent fluctuation, different physical and chemical properties of different pesticides, different shapes in different tanks and high anti-corrosion requirements and small size of tank. Lots of limitations of the above mentioned methods when they were used in spraying UAV were pointed out. And then solutions called air-pressure wireless liquid-level monitoring (APWLLM), a kind of non-contact liquid-level monitoring method, which was suitable for use in spraying UAV, were proposed. It would provide a reference for the further development of liquid-level monitoring device for pesticide tank in spraying UAV.

**Key words:** aviation plant protection; plant protection UAV; pesticide tank; liquid-level monitoring; wireless monitoring

收稿日期: 2016-12-21 修回日期: 2017-01-30

基金项目: 广东省科技计划项目(2014A020208103, 2014B090904073, 2015B020206003) 和国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)

作者简介: 周志艳(1972—), 男, 教授, 主要从事农业航空应用技术研究, E-mail: zyzhou@scau.edu.cn

通信作者: 罗锡文(1945—), 男, 教授, 主要从事农业工程研究, E-mail: xwluo@scau.edu.cn

## 引言

作为现代农业的重要组成部分和反映农业现代化水平的重要标志之一,农用航空在中国现代农业建设中具有重大需求。应用航空植保技术对提高中国农作物病虫害防治机械化水平,实行统防统治专业化服务,提高农业资源的利用率,增强突发性大面积病虫害防控能力,缓解农村劳动力短缺,增强农业抗风险能力,保障国家粮食安全、生态安全、实现农业可持续发展具有十分重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

植保无人机将无人直升机技术与施药技术相结合,具有尺寸小、无需专用机场、操控灵活、可在田间地头起降、下旋气流可提升靶标着药效果等优点,非常适用于中、小田块的病虫害防治或大田块局部精准施药,目前越来越受到社会各界的关注<sup>[5]</sup>。

药箱是植保无人机作业的关键部件,在作业过程中,药箱中的药量是动态变化的,药箱的药量是地面飞控手时刻关注的重要信息,飞控手可以根据药箱的药量调整植保无人机的飞行操控策略。特别是在超视距飞行和自动驾驶飞行作业中,药箱药量与电池电量或油料的优化搭配、药箱药量用尽后的断点续航等,更需要时刻掌握药箱药量信息,否则容易出现频繁起降、电池损耗大、作业效率低下和漏喷等不利现象。

药箱液位的监测是获得药箱中药量信息的方法之一。植保无人机药箱具有作业中液面晃动剧烈、药液的理化特性各异、药箱空间小、防腐蚀要求高等特性,传统的液位监测方法受到诸多局限。

为了实现对植保无人机药箱药量的实时监测,本文在综合国内外现有液位监测方法的基础上,结合植保无人机作业的特点及其药箱的特殊性,对植保无人机药箱液位的监测方法进行分析,探讨适合植保无人机质量轻、功耗小、精度高、耐腐蚀药箱液位监测方法及装置,以期为提高植保无人机的作业质量和效率,更好地实现精准施药提供技术手段。

## 1 常见液位监测方法综述

液位测量主要是基于相界面两侧物质的物性差异或液位改变时引起有关物理参数变化的原理而实现的<sup>[6-7]</sup>。液位监测按照监测原理主要分为接触式和非接触式两种方式<sup>[8-9]</sup>,接触式液位测量利用被测液体的导电性、液体压力、液体浮力等物理特性推算出液位的高度,主要包括玻璃管式、差压式<sup>[10]</sup>、电极式、浮体式、磁致伸缩式、流量计式和电容式<sup>[11]</sup>等类型;非接触式液位测量利用超声波、激光、无线电波以及图像特征等信息将液位高度的模拟量转换成

数字量实现液位的监测<sup>[12]</sup>,主要包括超声波式、激光式、雷达式、机器视觉法、光纤式<sup>[13]</sup>、光电式<sup>[14]</sup>和核辐射式等类型。不同的监测方式和装置,其原理、结构及适用场合均有不同<sup>[15-17]</sup>。其中,差压式、浮体式、电容式<sup>[17]</sup>、电极式、光电式、流量计、超声波式、机器视觉法、激光式测量技术的应用较为广泛<sup>[18]</sup>。

### 1.1 差压式液位测量

差压式液位测量的原理是根据测量到的液柱的质量间接反映液位,常用于常温常压且精度要求不高的场合的液位监测。差压法是目前最常用的储罐内液位测量方法之一,但当被测液体的密度随环境变化而变化时,其测量误差较大,需要进行温度补偿和双差压法等处理<sup>[8]</sup>。PRAVEEN等<sup>[19]</sup>提出了一种基于脉动压差传感器的高分辨率液位监测装置,并在1 m深的水箱内进行了试验验证,试验测得液位测量系统的精度小于1.1 mm,分辨率为3 mm,灵敏度为10 Hz/mm,响应时间约4 s。

尽管研究人员对差压式液位测量方法进行了大量改进,但该方法仍存在如下缺点:①取样系统复杂,连接管路长,阀门较多,易堵塞或泄漏。②由于变送器感应的是微差压,任何轻微泄漏,都将严重影响液位测量,而对于真空系统,轻微的泄漏往往不易被察觉。③使用麻烦,须在变送器引压管中注满水或等水蒸气凝结充满引压管后才能准确投用。④测量的综合误差较大,变送器测量微差压的精度有限,再加上取样管路中液柱的不稳定等因素致使实际测量的综合误差较大。

### 1.2 浮体式液位测量

浮体式液位测量装置主要分为浮筒式与浮子式,其中钢带浮子式液位传感器是浮体式液位测量中最常见的类型,它由一根不锈钢管和一个空心球组成,不锈钢管内部装有若干个干簧继电器,空心球内装有一块永磁铁,当空心球随着液面上下运动时,磁铁作用于继电器,从而产生相应的液位信号<sup>[20]</sup>。另一种浮体式液位测量方法是在滑轮组上用钢丝绳一端挂一浮球,另一端挂一重锤,通过浮球与重锤的运动距离实现液位的监测。其缺点是钢丝绳与滑轮间存在滑动摩擦力,回位误差较大,特别是在钢丝绳和滑轮生锈的情况下,回位误差更大甚至失效<sup>[21]</sup>。浮体式液位测量一般用于静止固定的水箱液位测量。

### 1.3 电容式液位测量

电容式液位测量方式根据被测量容器电容的变化来测量液面的高度<sup>[22-24]</sup>。其测量原理如下:一个电极(棒式电极、缆式电极、板式电极等)插入盛液

容器内,电极作为电容的一个极,容器壁作为电容的另一极;两电极间的介质即为液体及其上面的气体,通过两电极间电容的变化来测量液位的变化信息<sup>[25-27]</sup>。PACZESNY等<sup>[28-29]</sup>采用喷墨打印技术制造了电容式液位测量传感器,并将传感器放在装满水的容器内测试,试验表明传感器线性度较好且基本没有滞后问题,其灵敏度约为 $7.41 \times 10^{-2}$  pf/mm。GONG等<sup>[24]</sup>根据梳状电极和容器内的液体形成的等效电容进行液位测量,当液面位置达到较大面积的梳状电极时,等效电容会有显著的梯度变化,测量误差约为6%。

电容式液位测量具有结构简单、安装方便、成本低等特点<sup>[30-31]</sup>。但该测量方式在实际应用中存在如下局限<sup>[32]</sup>:①必须确保容器中两电极间介质的介电常数恒定才能保证电容式液位测量方式的准确度<sup>[33]</sup>,因此,当容器中液体晃动或出现气泡时,易产生虚假液位信息而影响测量准确度。②金属棒电极要有绝缘层覆盖,且与容器的距离必须保证相对固定,否则会出现测量不稳定现象。③若被测液体是粘性的液体,当由于晃动使液位由高到低回落时,粘性的液体会在测杆上面留下残液,形成挂料层,由于液位计无法自动识别挂料层的存在,挂料层的电容也会计入代表液面高度的总体电容中,造成虚假液位,给液位测量带来较大误差。此外,电容式传感器本身结构特性决定其输出阻抗较高,负载能力较差,电容式液位测量的信号处理较困难,且使用寿命较短<sup>[18,31]</sup>。

#### 1.4 电极式液位测量

电极式液位测量方式利用液体的导电特性将导电液体的液面升高与电极接通视为电路的开关关闭,该信号传给后续处理电路,从而获得液位信息,该测量方式属于点液位测量<sup>[34]</sup>,优点是结构简单、成本低。早期的电极式液位测量方式是分段式开关量输出,测量的液位数据点数与电极的个数相关,无法获得连续的液位变化信息<sup>[35]</sup>。为此,RAMON等<sup>[36]</sup>提出了一种基于线性电极阵列的新型连续液位测量技术,该技术将线性电极阵列垂直浸入液体中,注入电流,测量不同深度的电压波形。然而,使用电极式液位测量方式的前提条件是液体导电且不容易被电引燃,并需要持续供电,使该测量方式在许多应用场合受到限制。直流电极式液位测量装置仅适用于导电液体的液位测量,主要用于水位的控制和报警,目前大多用于水利、水文监测中<sup>[37-38]</sup>。

#### 1.5 光电式液位测量

光电式液位测量方法基于光学全反射和折射原理,采用光信号进行液位测量<sup>[39-40]</sup>。测量装置包

含一个近红外发光二极管和一个光敏接收器,发光二极管所发出的光被导入传感器顶部的透镜。当透镜没有接触液体时,发光二极管发出的光直接从透镜接近全反射回接收器;当液体浸没光电液位测量装置的透镜时,光折射到液体中,从而使接收器收不到或只能接收到少量光线;光电液位测量装置根据该变化,判断传感探头是否接触到液面,进一步驱动相应的控制电路动作,例如控制步进电机的运动方向,从而带动传感探头跟踪液面的变化,实现液位信息的测量。如果上述光信号采用光纤作为传输媒介,又称为光纤液位测量方法<sup>[41]</sup>。该测量方法具有抗电磁干扰、适用于易燃易爆环境等特点,但不能用于探测易在探头表面形成粘着物的液体的液位,此外,由于需要专门的探头驱动装置,带来了整个监测装置的质量、体积和复杂度增加等问题。

#### 1.6 流量计式液位测量

常见的液体流量计有涡轮流量计<sup>[42]</sup>、超声波流量计<sup>[43-45]</sup>和电磁流量计等<sup>[46]</sup>。流量计法估测液位的原理是在容器内加入已知体积的液体,容器的出水口连接流量计,流量计实时监测流过的液体体积,已知体积减去流过的液体体积为剩余液量,由此获得实时液位。该方法的缺点:单次作业过程中出现中断时,作业前容器内液位未充满会造成液位估测混乱,准确度降低;涡轮流量计易受药液粘度影响而产生较大误差;超声波流量计易形成二次流误差<sup>[45]</sup>;电磁流量计易受药液电导率和粘度的影响而产生误差。

#### 1.7 超声波液位测量

超声波的反射和折射遵守几何光学规律<sup>[47]</sup>。在测量中,目前应用较广泛的是脉冲回波法<sup>[48]</sup>,由传感器(换能器)发出脉冲超声波,超声波经液体表面反射后被同一传感器接收,转换成电信号,通过声波的发射和接收之间的时间差,再根据介质中超声波传播速度和换能器的安装高度,即可计算传感器到被测物体之间的距离,从而计算出液位高度<sup>[49]</sup>。

由图1中可见液位的高度计算公式为<sup>[50]</sup>

$$L = L_0 - vt/2 \quad (1)$$

式中  $v$ ——超声波在介质中的传播速度

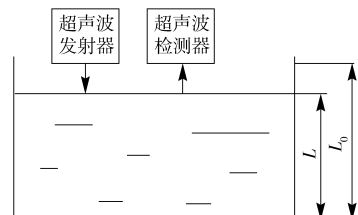


图1 超声波脉冲回波法原理图

Fig. 1 Sketch of ultrasonic pulse-echo method

$t$ ——超声波往返传播时间, s

$L_0$ ——超声波传感器与容器底部之间的距离, mm

$L$ ——液位高度, mm

一体化超声波液位计的发射功率有限, 测量范围一般在 10 m 以内。该方法的优点包括: 可实现非接触测量, 能用于腐蚀性液体、高粘性液体、有毒性液体等液位的测量<sup>[51]</sup>。LI 等<sup>[52]</sup>提出了基于二维图像处理方法的液面超声波回波信号准确测量方法, 利用改进的椭圆算法计算超声波传播时间, 在二维图像中加入了 Canny 算子的使用。经过试验验证, 改进的方法将传播时间测量误差减小了 30%。

但超声波液位测量方式仍有许多局限<sup>[53]</sup>: ①必须用于能充分反射声波和传播声波的对象, 不宜用于含气泡和含固体颗粒的液体中。②超声波的传播速度受传播介质的密度、压力、温度等因素影响, 例如密闭容器内挥发性液体的液位测量, 由于容器内气体声速可能与空气中的声速不同, 从而带来较大的测量误差, 要实现较高的精度, 需要对测量方法进行相对较复杂的修正, 从而提高了测量装置的成本。③挥发性的液体会在超声波探头表面凝结, 阻挡声波的收发, 影响测量精度, 严重时造成失效。④超声波液位测量中, 在发射超声波脉冲时, 不能同时监测反射回波, 而且发射的超声波脉冲具有一定的时间宽度, 同时发射完超声波后传感器还有余振, 期间不能监测反射回波, 因此从探头表面向下开始的一小段距离无法正常监测, 这段距离是超声波测量时存在的固有盲区, 通常测量盲区为 0.25 ~ 0.8 m, 被测的最高物位如进入盲区, 将无法进行正确的液位测量<sup>[54]</sup>。因此, 超声波传感器的安装位置与被测液面之间需保持一段距离, 进行加高安装, 而且无障碍物, 此外, 对于液面剧烈波动的液体, 超声波测量时, 易与液体接触, 造成超声波模块不能正常工作。超声波液位测量方式适用于液面较为平稳、液面上方留空较多的测量场合。当物料有挥发、液夹气时不能选用超声波方法测量液位<sup>[55]</sup>。

### 1.8 机器视觉法液位测量

机器视觉的水位测量方式是一种比较新颖的非接触式液位测量方法<sup>[56-57]</sup>, 通过 CCD 或者 CMOS 图像传感器采集图像, 然后将数字化的图像数据输入计算机中, 通过数字图像处理技术得到液位信息<sup>[37, 58-59]</sup>。LORENZ 等<sup>[60]</sup>提出了基于激光束以分辨率为 3 万像素的 CMOS 摄像头作辅助的液位测量方法, 测量速度高达 12 次/s, 测量精度可以达到  $(0.013 \pm 0.008)$  mm。然而机器视觉法液位测量在环境恶劣的条件下存在液位图像分割困难以及液位

数据难以准确提取的问题, 尤其是在无光条件下的监测, 误差较大, 可靠性较差<sup>[61-62]</sup>。且由于易受光照变化影响, 仪器装置价格较昂贵, 该方法目前还没有得到广泛应用<sup>[63]</sup>。

### 1.9 激光液位测量

激光是一种单色性和方向性好且亮度极高的相干光<sup>[64-65]</sup>。激光液位测量方式与超声波液位测量方式类似, 属于非接触式液位测量方式, 采用激光测距的原理对液面位置进行探测<sup>[66]</sup>。该方法的优点是安全防爆、无活动部件、维护较方便简单。但也存在与超声波液位测量方式类似的局限, 例如: 有些激光发射和接收部件的最前端到被测容器的外表面最小距离为 0.5 m 以上; 激光光束在物料表面的反射点应该没有波纹、涟漪和反射物; 对于液面剧烈波动的液体, 易造成激光探测头污染而失效等, 影响测量结果的准确性<sup>[17]</sup>。

### 1.10 雷达液位测量

雷达液位测量利用雷达传感器实现。雷达传感器利用发射、反射、接收雷达波的原理来测量距离, 因此可用于有毒有害的恶劣环境下<sup>[67-68]</sup>。雷达波是一种特殊形式的电磁波, 其物理特性与可见光相似。所有导电介质都能很好地反射雷达信号, 当介质的导电性变化时雷达波通常也不易受干扰, 且能穿透塑料容器或玻璃容器进行测量, 无需在容器上开孔, 实现非接触测量。雷达传感器可应用真空测量、液位测量、粉尘位或固体料位测量, 即便在飞灰、粉尘强烈并有很强旋涡的环境下也能进行较准确测量。NAKAGAWA 等<sup>[67]</sup>提出了一种新的非接触式液位测量方法, 利用毫米波多普勒传感器清晰检测不透明容器内的空气与液体的相界面。HOFFMANN 等<sup>[69]</sup>认为利用干涉导波可以较精确地测量液位高度, 且开发了一套装置, 其主要特点是确定了液面的反射相, 经测试, 精度达到了 X 光的效果。然而雷达传感器的测量信号运行时间极短, 这给信号分析处理提出了极高的要求, 因此价格昂贵、技术实施难度大<sup>[70]</sup>。

## 2 植保无人机药箱液位监测的特点

药箱液位的监测是获得药箱中药量信息的方法之一。植保无人机作业过程中, 药箱液位的测量有如下特点:

(1) 植保无人机作业过程中, 阵风等环境因素干扰、地头调头等特殊工况较多, 在这些特殊工况出现时, 药液由于惯性作用, 其行驶方向和垂直方向受力都比较大, 易产生震荡效应, 因此液面易出现较剧烈的波动。

(2)作业过程中,植保无人机移动时机身会呈倾斜状态,故在作业中,药箱内液体液面与竖直状态下的实际液面存在夹角,则液体底部测压装置实测液位需换算成实际液位。

(3)植保作业对象的多样性,决定了农药或助剂的多样性,不同类型的农药或助剂导致药箱中液体的浓度、粘度、导电特性等理化特性各异。

(4)植保无人机载荷有限使得植保无人机药箱结构非常紧凑,液面上方留空非常少,且药箱的体积通常较小,同时也要求使用的液位监测装置不宜过大和过重,且功耗要非常低。

(5)农药或助剂通常都具有一定腐蚀性,要求液位监测装置具有一定的抗腐蚀和抗污染能力。

前述的常见液位监测方法各有优缺点,较难满足当前植保无人机药箱液位监测的需要。例如:差压式液位测量的系统构造复杂,而且较长的连接管路也不适合安装在体积较小的植保无人机药箱内;浮体式液位测量、光电式液位测量和机器视觉法液位的测量装置较庞大,整体质量较大,安装于结构非常紧凑的植保无人机药箱将面临诸多困难<sup>[71]</sup>;电容式液位测量和电极式液位测量适用于导电特性稳定、粘性较小的药液,且两者的标定工作较为复杂;超声波液位测量、激光液位测量存在盲区,需要与液面有一定距离才能正常使用,而植保无人机的药箱安装非常紧凑,几乎没有可能进行留空处理,此外,超声波及激光测距传感器设备的抗腐蚀抗污染能力较差,挥发性的液体会在传感器探头表面凝结,药液晃动时沾到传感器而受到侵蚀极易造成传感器数据异常甚至失灵<sup>[72]</sup>。

综上,植保无人机药箱液位监测需要一种新型的液位监测方法和装置,该装置应满足以下特点:

(1)当药液产生震荡、波动和倾斜时,能够自动滤除对液位真实数据的干扰。

(2)需有一定的抗腐蚀、抗污染能力。在植保无人机作业过程中,不可避免地会因为机身晃动或药液惯性致使药液飞溅到监测装置造成装置工作异常。

(3)液位监测装置的质量越小越好,功耗越低越好,避免对植保无人机的有效载荷及滞空时间造成影响。

(4)液位监测装置应具有液位数据输出接口、远程液位数据传输和液位指示功能,地面操控手既可以实时远程观测到药箱剩余液量,又可以将液位信息融入飞控系统,实现药箱药量与电池电量的优化搭配、药箱药量用尽后的断点续航等自主作业功能,提高施药效率。

(5)不同类型的植保无人机的药箱大小不一、形状规格不同,液位监测装置需最大程度适用于各类不用药箱的安装和使用。

### 3 植保无人机药箱液位监测方法探讨

结合植保无人机作业的实际情况,在总结分析现有技术的基础上,本文针对上述植保无人机药箱液位监测中需克服的难题,提出气压式液位无线监测的解决方案:

(1)针对液面波动剧烈,拟通过混合数字滤波算法和陀螺仪角度数据进行限幅校正,滤除液面波动对液位测量的影响。

(2)针对药液的理化特性各异,拟采用测量空心管内气压间接测量液位的方式,去除不同浓度农药或助剂对液位检测结果的影响。由于液体对空心管内气压压缩,使得管内气压大于管外气压,当有一定粘度的农药或助剂喷洒完毕时,在空心管内壁不会因粘附液体而造成测量误差;此外,由于同一次植保作业过程中空心气管截面积、药液浓度恒定,通过对空箱气压值和满箱气压值标定存储后,气管内气压值只与液面高度有关,因此能解决药液理化特性各异带来的测量误差。

(3)针对药箱空间小,拟采用可弯曲空心气管作为间接测量媒介,既减小监测装置体积,又不占用原本紧凑的药箱内部空间。

(4)针对药液腐蚀和污染问题,拟选用微型气压传感器通过测量空心管内气压间接测量液位,相比传统的投入式液位变送器,由于传感器不需要直接与被测液体接触,可较好地解决农药或助剂对传感器的腐蚀和污染问题。

图2为气压式液位无线监测装置设计方案示意图。图中 $H$ 为满箱液位高度, $h$ 为空心气管液位高度。该监测装置包括液位监测器、转发器和地面监控器。

液位监测器与植保无人机机身平行水平放置,

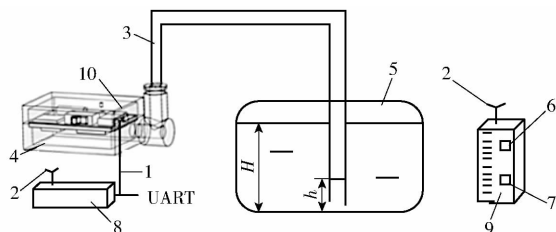


图2 气压式液位无线监测装置设计方案示意图  
Fig. 2 Design scheme of wireless liquid-level monitoring device based on air pressure

1. 通信电缆 2. 天线 3. 空心气管 4. 密闭气室 5. 药箱
6. 空箱校正按键 7. 满箱校正按键 8. 转发器 9. 地面监控器
10. 液位监测器

转发器给液位监测器供电的同时用于液位数据转发,当药箱内没有药液时,空心气管的液位高度  $h = 0$ ,液位监测器密闭气室内气压  $P$  等于大气压  $P_0$ 。地面监控器空箱校正按键 K1 按下,通过无线通讯方式将校正指令由转发器发送至液位监测器,液位监测端存储当前气压  $P_0$ ;当药箱 E 内液位高度为  $H$  时,由于液体底部压力大于大气压力,空心气管内会有高为  $h$  的液柱,空心气管内气体被压缩,使得与其联通的密闭气室内气压  $P = P_1$ ;地面监控器满箱校正按键 K2 按下,通过无线通讯方式将校正指令由转发器发送至液位监测器,液位监测端存储当前气压  $P_1$  为

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho g H}{s} \quad (2)$$

式中  $P_0$ ——空箱时的环境大气压

$\rho$ ——液体密度

$g$ ——重力加速度

$s$ ——空心气管横截面积

在喷洒作业过程中,动态变化的药箱液位高度记为  $H'$ ,对应的液位监测器密闭气室内动态变化气压记为

$$P_2 = P_0 + \frac{\rho g H'}{s} \quad (3)$$

将  $P_1$  和  $P_2$  均减去  $P_0$  再作除法运算得出液位百

分比  $W$

$$W = \frac{H'}{H} \times 100\% \quad (4)$$

## 4 结束语

微电子技术的发展使液位计的小型化和微型化成为可能。介绍了国内外常见的接触式和非接触式液位监测方法,分析了上述常见液位测量方法用于植保无人机药箱液位测量时存在的局限。非接触式液位监测装置应用于植保无人机液位监测时,主要难点在于植保无人机飞行时药箱液位晃动比较大,造成液位监测不准确;非接触式测量方法通常成本较高,此外,植保无人机的药箱体积较小,形状各异,用非接触式液位监测装置有安装不便的问题。接触式液位监测装置用于植保无人机药箱液位监测时,受到的局限主要包括监测装置体积较大,质量大,且对传感器的抗腐蚀能力要求较高等。针对植保无人机作业过程中,其药箱液面波动剧烈、药液的理化特性各异、药箱空间小、防腐蚀要求高等特点,药箱液位监测装置应针对性解决这些问题。本文在总结分析现有技术的基础上提出了一种气压式液位无线监测方案,属于非接触式液位监测方法。该方法可较好地解决现有液位监测技术在植保无人机药箱液位监测中存在的键问题。

## 参 考 文 献

- 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20141009&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009.  
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. (in Chinese)
- 姚宝刚. 现代农业与农业机械化发展[J]. 农业机械学报, 2006,37(1): 79-82.  
YAO Baogang. Development of agricultural mechanization and modern agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(1): 79-82. (in Chinese)
- 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130534&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130534&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034.  
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(5): 194-201. (in Chinese)
- 周志艳,臧英,罗锡文,等. 中国农业航空植保产技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013,29(24):1-10.  
ZHOU Zhiyan, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(24):1-10. (in Chinese)
- 龚艳,傅锡敏. 现代农业中的航空施药技术[J]. 农业装备技术, 2008,34(6):26-29.
- 招惠玲,周美娟,胡远忠. 电容式液位测量系统的设计[J]. 传感器技术, 2004,23(3):40-42.  
ZHAO Huiling, ZHOU Meijuan, HU Yuanzhong. Design of capacitive system for liquid level measurement [J]. Journal of Transducer Technology, 2004,23(3):40-42. (in Chinese)
- 韩建坤. 液位检测标准装置的设计[D]. 抚顺:辽宁石油化工大学, 2012.  
HAN Jiankun. Design of standard liquid level detection device [D]. Fushun: Liaoning Shihua University, 2012. (in Chinese)
- 王宏亮,王琳,贾振安,等. 一种实用的光纤光栅液位传感器[J]. 光电子·激光, 2009(10):1275-1277.  
WANG Hongliang, WANG Lin, JIA Zhen'an, et al. Apractical fiber grating liquid level senso [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009(10):1275-1277. (in Chinese)

- 9 齐永生, 宋生奎, 涂亚庆. 储油罐液位测量技术现状与发展趋势[J]. 石油工程建设, 2006,32(4):1-3.
- 10 孙慧卿, 郭志友. 液位测量仪的研制[J]. 传感器技术, 2002,21(8):26-28.  
SUN Huiqing, GUO Zhiyou. Development of liquid level instrument[J]. Journal of Transducer Technology, 2002,21(8):26-28. (in Chinese)
- 11 隋修武, 谢望, 樊玉铭, 等. 电容式液位传感器的有限元计算与误差分析[J]. 传感器与微系统, 2008,27(6):53-55.  
SUI Xiuwu, XIE Wang, FAN Yuming, et al. Finite element calculation and error analysis on capacitance liquid level sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008,27(6):53-55. (in Chinese)
- 12 骆宇锋, 高应俊, 刘志麟, 等. 新型光纤液位传感器及其系统研究[J]. 传感器技术, 2005,24(5):19-21.  
LUO Yufeng, GAO Yingjun, LIU Zhilin, et al. Study of novel fiber optic liquid sensor and its system[J]. Journal of Transducer Technology, 2005,24(5):19-21. (in Chinese)
- 13 杨建春, 陈伟民. 连通管式光电液位传感器在桥梁挠度监测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006,25(8):79-81.  
YANG Jianchun, CHEN Weimin. Application of connected pipe optoelectronic liquid level sensor in bridge deflection monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006,25(8):79-81. (in Chinese)
- 14 叶琳琳. 新型聚合物光纤液位传感器的精确测量技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.  
YE Linlin. Research on accurate measurement technology of new type polymer optical fiber liquid level sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 15 张恩平, 刘希民. 基于CC2510的无线液位变送器设计[J]. 化工自动化及仪表, 2010,37(4):49-53.  
ZHANG Enping, LIU Ximin. Design of RF chip CC2510 based wireless level transmitter[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010,37(4):49-53. (in Chinese)
- 16 孟磊, 邹志云, 郭宇晴, 等. 机器视觉在化工过程液位检测中的应用研究[J]. 石油化工自动化, 2015,51(4):39-43.  
MENG Lei, ZOU Zhiyun, GUO Yuqing, et al. Application research of machine vision in liquid detection in chemical process[J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2015,51(4):39-43. (in Chinese)
- 17 刘薇娜, 谢国红. 基于CCD的激光三角位移法测液位的性能研究[J]. 自动化仪表, 2010,31(7):19-21.  
LIU Weina, XIE Guohong. Study on the performance of laser triangulation displacement measurement based on CCD[J]. Process Automation Instrumentation, 2010,31(7):19-21. (in Chinese)
- 18 任开春, 涂亚庆. 20余种液位测量方法分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003,12(5):12-16.  
REN Kaichun, TU Yaqing. Analyzing more than 20 methods relating to liquid level measurement[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2003,12(5):12-16. (in Chinese)
- 19 PRAVEEN K, Rajiniganth M P, Arun A D, et al. A novel technique towards deployment of hydrostatic pressure based level sensor in nuclear fuel reprocessing facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2016,87(2):0251112.
- 20 童鑫, 韩成成, 卢翌. 汽车油箱液位测量技术研究[J]. 电子科技, 2012,25(8):144-146.  
TONG Xin, HAN Chengcheng, LU Li. Technology for automobile fuel tank level measurement[J]. Electronic Science and Technology, 2012,25(8):144-146. (in Chinese)
- 21 李丽宏, 谢克明. 液位自动检测的现状与发展[J]. 太原理工大学学报, 2001,32(4):417-420.  
LI Lihong, XIE Keming. The developing status of automatic measurement for materials level[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001,32(4):417-420. (in Chinese)
- 22 程卫丹. 电容式液位传感器及积算仪表的研制[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2011.  
CHENG Weidan. Development of capacitive level sensors and integrating instrument[D]. Shenyang:Shenyang Ligong University, 2011. (in Chinese)
- 23 MANDAL Hiranmoy, BERA Satish Chandra. An improved technique of measurement of liquid level in a storage tank [C]//2014 1st International Conference on Automation, Control, Energy & Systems (ACES-14), 2014:318-324.
- 24 GONG Cihun-Siyong Alex, CHIU Huanke, HUANG Liren, et al. Low-cost comb-electrode capacitive sensing device for liquid-level measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2016,16(9):2896-2897.
- 25 杨万国, 贾延刚. 多种液位仪表的应用对比[J]. 石油工程建设, 2004,38(1):38-43.  
YANG Wanguo, JIA Yan'gang. Application comparisons of kinds of liquid level meters[J]. Petroleum Engineering Construction, 2004,38(1):38-43. (in Chinese)
- 26 朱高中. 电容式传感器在液位测量中的应用研究[J]. 液压与气动, 2012,70(2):70-72.  
ZHU Gaozhong. Application of capacitive sensor for liquid level measurement[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2012,70(2):70-72. (in Chinese)
- 27 杨天麒. 基于电容测量的液位检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.  
YANG Tianqi. Research of liquid level detection technology based on capacitance measurement[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 28 PACZESNY Daniel, TARAPATA Grzegorz, MICHAL Marzęcki, et al. The capacitive sensor for liquid level measurement made with ink-jet printing technology[J]. Procedia Engineering, 2015,120:731-735.
- 29 PACZESNY Daniel, TARAPATA Grzegorz, MICHAL Marzęcki, et al. The capacitive sensor for liquid level measurement made with ink-jet printing technology[M]//Urban G, Wollenstein J, Kieninger J. Procedia Engineering, 2015:731-735.

- 30 冯斌. 一种与介质无关的电容式液位测量方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.  
FENG Bin. Study on a medium-independent capacitive liquid-level measurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)
- 31 黄颖桦. 双电容 LNG 液位传感器的应用分析与市场发展策略[D]. 广州:华南理工大学, 2015.  
HUANG Yinghua. Application analysis and market development strategy of dual capacitor LNG liquid level sensor [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- 32 KUMAR B, RAJITA G, MANDAL N. A review on capacitive-type sensor for measurement of height of liquid level [J]. Measurement & Control, 2014, 47(7): 219-224.
- 33 李一方, 朱华铭, 童鑫. 新型数字电容式液位传感器[J]. 电子科技, 2011, 24(5): 65-68.  
LI Yifang, ZHU Huaming, TONG Xin. A novel digital capacitive liquid level sensor [J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(5): 65-68. (in Chinese)
- 34 高伟. 电极式液位开关失效分析及研究[J]. 科技展望, 2016, 26(9): 201.
- 35 李红云, 张慧慧, 杨建武, 等. 一种新型液位开关在潜水电机保护中的应用[J]. 液压与气动, 2004(1): 77-78.
- 36 RAMON Casanella, CASAS Oscar, RAMON Pallas-Areny. Continuous liquid level measurement using a linear electrode array [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(7): 1859-1866.
- 37 赵洪圣. 基于数字图像处理的液位检测[D]. 天津:天津大学, 2010.  
ZHAO Hongsheng. Liquid level detection based on digital image processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- 38 田学隆, 林芳钦. 基于光电传感器的液位检测方法 with 装置[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(10): 73-74.  
TIAN Xuelong, LIN Fangqin. Liquid level detecting method and equipment based on optoelectronic sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(10): 73-74. (in Chinese)
- 39 陈阳, 张洪泉. 光电式液位传感器寿命特征分析[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2008, 24(1): 69-72.  
CHEN Yang, ZHANG Hongquan. Analysis of photoelectric interface sensor's lifetime [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2008, 24(1): 69-72. (in Chinese)
- 40 MESQUITA Esequiel, PAIX O Tiago, ANTUNES Paulo, et al. Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 240: 138-144.
- 41 陈阳, 张洪泉. 具有冗余设计的光电式液位传感器[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(4): 389-392.  
CHEN Yang, ZHANG Hongquan. Photoelectric liquid level sensor based on redundant design [J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(4): 389-392. (in Chinese)
- 42 齐峰. 基于 GPRS 无线通讯的电涡流式涡轮流量计的研究[D]. 天津:天津大学, 2008.  
QI Feng. Study on eddy current turbine flowmeter based on GPRS wireless communication[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 43 陈亦文, 邱公伟. 超声波流量计的原理、应用和发展[J]. 福建电脑, 2002(9): 34-36.
- 44 廖志敏, 熊珊. 超声波流量计的研究和应用[J]. 管道技术与设备, 2004(4): 12-13.  
LIAO Zhimin, XIONG Shan. Research and application of ultrasonic flowmeter[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2004(4): 12-13. (in Chinese)
- 45 姜勇. 时差法超声波流量计设计与研发[D]. 杭州:浙江大学, 2006.  
JIANG Yong. Transit-time ultrasonic flowmeter design and development[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 46 邹伟华. 基于 ARM-Linux 的嵌入式系统在电磁流量计中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.  
ZOU Weihua. Application and research of embedded ARM-Linux system on electromagnetic flowmeter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 47 赵刚, 唐得刚. 几种常用的液位在线检测方法的比较[J]. 中国仪器仪表, 2005(5): 36-38.  
ZHAO Gang, TANG Degang. The comparison between common methods of on-line measurement of liquid level [J]. China Instrumentation, 2005(5): 36-38. (in Chinese)
- 48 洪志刚, 杜维玲, 周玲. 超声波外测液位检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(4): 46-49.  
HONG Zhigang, DU Weiling, ZHOU Ling. Study on ultrasonic liquid level measurement on the external of seal vessel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(4): 46-49. (in Chinese)
- 49 韩升晖. 基于单片机的超声波液位计的设计与实现[D]. 北京:华北电力大学, 2014.  
HAN Shenghui. Design and implementation of ultrasonic liquid level meter based on single chip microcomputer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014. (in Chinese)
- 50 葛君山. 液位检测技术的现状与发展趋势[J]. 船电技术, 2013, 33(2): 43-45.  
GE Junshan. Situation and developing trend of measuring technology for liquid-level [J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2013, 33(2): 43-45. (in Chinese)
- 51 姜志成. 超声波反射装置对超声波流量计内水流特性影响的研究[D]. 济南:山东大学, 2010.  
JIANG Zhicheng. Ultrasonic reflecting means within the flow characteristics of the ultrasonic flowmeter [D]. Ji'nan: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- 52 LI Peng, CHEN Sai, CAI Yulei, et al. Accurate TOF measurement of ultrasonic signal echo from the liquid level based on a 2-D



- image processing method[J]. *Neurocomputing*, 2016,175(A):47-54.
- 53 高丙坤,潘翔.非介入式超声波液位检测系统设计[J].*科学技术与工程*,2012,12(1):42-45.  
GAO Bingkun, PAN Xiang. The designing of non invading ultrasonic liquid level detecting system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012,12(1):42-45. (in Chinese)
- 54 贾丽,袁小平,陈焯,等.常用液位检测方法的研究[J].*能源技术与管理*,2009(1):120-122.
- 55 陈维吉.液位检测方案的选择[J].*自动化与仪器仪表*,2012(1):155-157.
- 56 孙臣良,题正义,高波.基于图像处理的爆堆块度分布自动测试系统[J].*辽宁工程技术大学学报*,2002,21(4):449-451.  
SUN Chenliang, TI Zhengyi, GAO Bo. Automatic test system based on the distribution of rock pile image processing[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2002,21(4):449-451. (in Chinese)
- 57 代素梅,张贵涛,钟旭,等.基于图像识别的液位在线读取[J].*辽宁工程技术大学学报:自然科学版*,2009,28(2):284-287.  
DAI Sumei, ZHANG Guitao, ZHONG Xu, et al. Liquid level on-line reading based on image recognition[J]. *Journal of Liaoning Technical University: National Science Edition*, 2009,28(2):284-287. (in Chinese)
- 58 陈金丽,张帆,张显.基于卡尔曼滤波的液位检测与跟踪[J].*计算机仿真*,2009,26(9):317-320.  
CHEN Jinli, ZHANG Fan, ZHANG Xian. Moving liquid-line detecting and tracking based on Kalman filter[J]. *Computer Simulation*, 2009,26(9):317-320. (in Chinese)
- 59 SAKAINO Hidetomo. Camera-vision-based water level estimation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016,16(21):7564-7565.
- 60 LORENZ M G, MENGIBAR-POZO L, IZQUIERDO-GIL M A. High resolution simultaneous dual liquid level measurement system with CMOS camera and FPGA hardware processor[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2013,201:468-476.
- 61 张显.基于图像处理的视频液位检测系统的研究[D].长沙:湖南大学,2010.  
ZHANG Xian. Based on the video image processing level detection system [D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese)
- 62 王敏.基于ARM平台的液位检测算法研究与实现[D].长沙:湖南大学,2009.  
WANG Min. Research and implementation of level detection algorithm based on ARM platform [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)
- 63 YU Chunhe. Liquid level measurement by using an image method[C]//YUAN B, RUAN Q, TANG X. *International Conference on Signal Processing*, 2014:2320-2323.
- 64 曹开田,韩建中,彭念.易燃易爆环境下激光液位监测系统的研究与实现[J].*中国仪器仪表*,2003(10):13-15.  
CAO Kaitian, HAN Jianzhong, PENG Nian. Study and realization of the laser liquid level monitoring system under the combustible and explosive environment[J]. *China Instrumentation*, 2003(10):13-15. (in Chinese)
- 65 张艳,程春梅.激光液位传感器在炸药装药中的检测应用[J].*测试技术学报*,2008,22(2):184-188.  
ZHANG Yan, CHENG Chunmei. Application of laser level sensor to explosive filling[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*,2008,22(2):184-188. (in Chinese)
- 66 LIU Weina, XU Wenbo, YANG Lifeng. Liquid level measurement system design based on laser displacement sensor[M]//YARLAGADDA P, KIM Y H. *Applied Mechanics and Materials*, 2013:37-40.
- 67 NAKAGAWA Tatsuo, HYODO Akihiko, KOGO Kenji, et al. Contactless liquid-level measurement with frequency-modulated millimeter wave through opaque container[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013,13(3):926-933.
- 68 刘伟佳.导波雷达液位计信号处理模块设计[D].成都:电子科技大学,2010.  
LIU Weijia. Design of signal processing module of the guided wave radar level gauge [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 69 HOFFMANN Karel, SKVOR Zbynek, PRIHODA Milan. Precise microwave measurement of liquid level [C] // IEEE: 79th ARFTG Microwave Measurement Conference, 2012.
- 70 MUNYANEZA O, WALIUMARU G, UHLENBROOK S, et al. Water level monitoring using radar remote sensing data: application to Lake Kivu, central Africa[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009,34(13-16):722-728.
- 71 安宗权,冷护基,林宗良.储罐液位检测技术的现状与展望[J].*芜湖职业技术学院学报*,2005,7(4):9-10.  
AN Zongquan, LENG Hujia, LIN Zongliang. Situation tank level detection technology and prospects[J]. *Journal of Wuhu Institute of Technology*, 2005,7(4):9-10. (in Chinese)
- 72 梁波.基于数字图像的液位远程监测系统[D].太原:太原理工大学,2013.  
LIANG Bo. Based on digital image remote water-level automatic monitoring system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese)