

黄聪, 李继宇, 兰玉彬, 等. 一种风压转换近地风速检测装备设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(1): 105-111.

一种风压转换近地风速检测装备设计与试验

黄 聪, 李继宇, 兰玉彬, 叶伟鑫, 李思嘉, 邢 航

(国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】针对目前相关设备风场自干扰大的问题, 为更好地获取无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 近地风场参数信息, 以风压信号为基础, 采用皮托管风速传感器设计一种风压转换近地风速检测装备。【方法】利用轴流风机对叶轮风速传感器和皮托管风速传感器的感应位置进行风速干扰对比试验, 利用热线式标准风速仪测定干扰前后的风速变化, 利用轴流风机以相同的风速检测该装备所有传感器的测量风速并记录, 得到该系统的一致性。将同一风速下标准热线式风速仪的测量风速和该系统的传感器测量风速进行对比, 找出皮托管风速传感器准确度较低的风速段, 利用 Matlab 软件对风压信号-风速值进行拟合。【结果】在 10.00~15.00 m·s⁻¹ 风速下皮托管风速传感器对直流风速的削弱不超过 1%, 而叶轮传感器达到 20% 以上。系统所采用的 30 个风压变送器在风速为 15.00 m·s⁻¹ 时的最大绝对差异为 0.96 m·s⁻¹, 最大相对差异为 6.40%, 变异系数为 1%。以三次公式进行拟合后, 误差平方和 (SSE) 为 0.099 6, 拟合优度 (R^2)>0.96。【结论】本系统能够有效检测无人机下旋翼风速数据, 且比叶轮式风速传感器网络测量系统在减少干扰方面具有明显优势, 可以为研究无人机田间作业提供有效帮助。

关键词: 农用无人机; 旋翼风场; 皮托管; 风压转换; 风速检测

中图分类号: S237

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2018)01-0105-07

Design and experiment of a wind speed detection equipment with wind pressure conversion near ground

HUANG Cong, LI Jiuyu, LAN Yubin, YE Weixin, LI Sijia, XING Hang

(National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticides Spraying Technology/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】The current wind speed detection equipment is influenced by wind speed interference in the wind field. To solve this problem, this paper presented a new kind of wind speed detection equipment using pitot tube speed sensors based on wind pressure signal to obtain better unmanned aerial vehicle(UAV) wind parameters near ground. 【Method】We first used axial fan to test the interference of induction position of pitot tube wind speed sensor as well as vane anemometer, and then used hot wire anemometer to detect the changes of wind speeds before and after interference. In the end, we used axial fan to test and record wind speeds of all pitot sensors at the same wind speed, and obtained the consistency of the system. The measured wind speed of the standard hot wire anemometer was compared with that of the sensor in the system at the same wind speed to find out the range of wind speed in which the accuracy of pitot tube wind speed sensor was low. Matlab software was used to fit the wind pressure signal and wind speed value. 【Result】At the wind speed of

收稿日期: 2017-02-04 优先出版时间: 2017-12-29

优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20171229.1142.038.html>

作者简介: 黄 聪 (1991—), 男, 硕士研究生, E-mail: 1339492499@qq.com; 通信作者: 兰玉彬 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: ylan@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200700); 广东省青年创新人才项目 (2014KQNCX030); 广东省自然科学基金 (2015A030313420); 广东省农业标准化研究项目 (2016“农用无人机风力授粉作业效果评价体系”); 广东省科技计划项目 (2015A020209106)

10–15 m·s⁻¹, the reduction of wind speed interfered by pitot tube did not exceed 1%, while reached more than 20% for the vane anemometer. The maximum absolute discrepancy of all 30 sensors of this equipment was 0.96 m·s⁻¹ when the wind speed was 15.00 m·s⁻¹, the maximum relative discrepancy was 6.40%, and the coefficient of variation was about 1%. Fitting with three-time formula, the sum of squares for error was 0.099 6, the goodness of fit (R^2) was more than 0.96. 【Conclusion】 Comparing to the current methodology, the proposed system can effectively detect the rotor wind speed data of UAV and has the significant advantage of reducing interference. This system can effectively help research the field work of UAV.

Key words: agricultural UAV; rotor wind field; pitot tube; wind-pressure conversion; wind speed detection

利用无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 进行施药作业时,无人机的旋翼风场对施药作业效果有重要影响^[1]。其中,无人机风力大小直接影响药液雾滴的穿透性^[2],将无人机的风场分解,其指向地面的风速对雾滴的穿透和沉积有显著影响,水平风速则对喷幅、雾滴均匀性以及雾滴漂移等产生较大影响^[3]。利用无人机进行杂交水稻授粉作业时,风场直接作用于水稻花粉。无人机旋翼风既能直接将父本花粉吹离,也能使父本振动抖落花粉,其风场特点直接影响花粉量和花粉漂移距离并最终影响授粉效果^[4]。因此,对无人机的风场进行研究具有重要的现实意义。然而,现有的无人机下旋翼风速测量技术,特别是室外风速测量技术,较难满足无人机作业时风场研究的需要。本文拟设计一种自扰流干扰小、实时准确性高、可移动性强和多点实时采集的近地式皮托管风速检测装备,可辅助无人机施药技术研究和无人机辅助水稻授粉研究,并为无人机作业参数优选提供依据。

1 近地式皮托管风速检测装备设计

1.1 风速测量原理与可变式风速检测节点设计

1.1.1 风速测量原理 目前风速的测量方式主要有机械式测量、散热率式测量、风压转换式测量、超声波式测量和激光多普勒测量等方式^[5]。现有的无人机风速测量设备大多使用的是机械式叶轮风速计,叶轮风速计体积较大,对风场的干扰较大,且其测量截面较大,影响风速测量的准确性。另外,由于叶轮风速计的桨叶具有惯性,对风速变化的反应延迟,影响其测量的实时准确性。为更好地测量农用无人机下旋翼近地风速,本文拟采用风压转换式风速测量技术开发一种风压转换近地风速检测装备。风压转换式风速测量装备主要包括皮托管风速传感器等,在测量高速风时准确性很高,至今仍然广泛应用于飞机等航空设备实时速度的测量。皮托管风速传感器成本较低,精度较高,其体积小,扰流较

小,且不存在惯性延迟,相比叶轮风速计具有优势。风压转换式测量是通过皮托管等传感器测量空气流动产生的动压信号(即风压信号)进行风速的测量。在有关皮托管风速测量的研究中,相关研究者通过伯努利方程^[6]推导得出皮托管所测得的风压信号与风速大小关系为:

$$v = k \sqrt{2\Delta P/\rho}, \tag{1}$$

式中 v 为风速, m·s⁻¹; ΔP 为气压差(风压), Pa; ρ 为空气密度, kg·m⁻³; k 为皮托管系数(与皮托管本身有关, S 型皮托管一般为 0.8~1.0, 本文通过试验标定后取 1.0)。皮托管主要分为 L 型和 S 型^[6], 二者主要区别是静压孔的位置不同。S 型皮托管的总压孔和静压孔可以实现功能对换, 同时测量同一直线上的正反双向风速, 而 L 型皮托管只能测量单向风速。从实际应用的角度, 本文选取 S 型皮托管。

1.1.2 可变式风速检测节点设计 为测量农用无人直升机旋翼气流在作物冠层产生的风场分布, 特意设计能够安装皮托管的支撑架结构。该皮托管支撑架为可拆卸式, 可将其中的可拆卸部件位置进行放射性布置(坐标系)以达到测量 X、Y、Z 3 个方向(平行航迹方向、平面上垂直航迹方向和垂直地面方向)风速的目的; 亦可将其可拆卸部件位置进行梯度布置(梯度式), 以达到测量同一个方向的风速在作物冠层上方、作物冠层以及作物冠层下方的分布。皮托管支撑架的布置方式如图 1 所示。

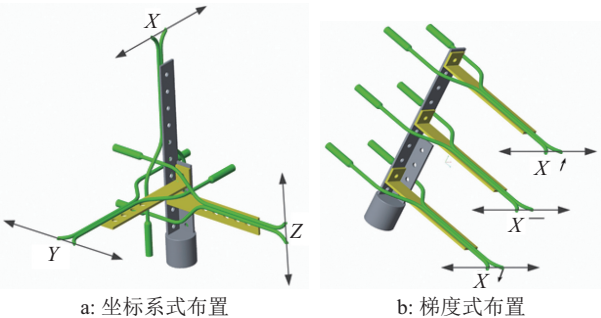


图 1 皮托管布置方式示意图

Fig. 1 Diagram of the arrangement form of pitot tube
<http://xuebao.scau.edu.cn>

可变式风速检测节点由风速测量模块、皮托管支撑架、三角架、3 个皮托管及气压传送软管等组成, 风速检测节点的安装和电原理框图如图 2a 所示。如图 2b 所示, 风速测量模块和皮托管支撑架均固定在三脚架上; 气压传送软管连接皮托管和风速测量模块, 负责将皮托管采集的风压信号传送给风速测量模块; 风速测量模块由防水外壳、3 个风压变送器、微控制器、无线传输模块和供电模块等组成; 风压变送器负责接收风压信号并将其转换成电信号; 微控制器集成了处理与存储的功能, 负责将风压变送器的电信号转换成风速值并临时存储; 无线传输模块负责将风速值信号发出; 供电模块可供模块正常工作 4 h 以上。

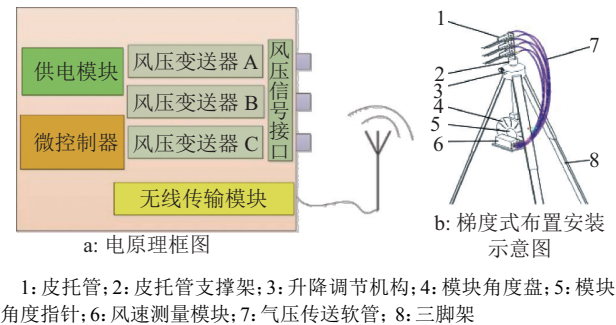


图 2 可变式风速检测节点示意图

Fig. 2 Diagram of alterable wind speed detection node

1.2 风速检测装备网络布局的设计

该风速检测装备网络布局参考文献[7], 如图 3 所示, 由若干个可变式风速检测节点、无人机机载北斗移动站和地面监测控制终端组成。其中无人机机载北斗移动站为北斗 RTK 差分定位系统的移动站。该北斗系统为航空用北斗系统 UB351, 其平面精度为 $(10+5\times10^{-7}D)$ mm、高程精度为 $(10+10^{-6}D)$ mm (D 为该系统实际测量的距离, km), 用于记录无人机的飞行高度、飞行速度以及飞行轨迹参数, 分析风场参数与无人机飞行参数的关系, 从而优化无人

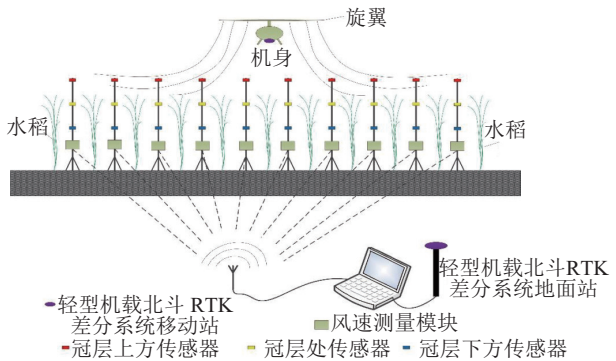


图 3 风速检测装备网络框架示意图

Fig. 3 A framework diagram of the wind speed detection equipment network

机飞行参数以达到更好的作业效果。地面监测控制终端由风速/GPS 采集分析软件、便携式计算机、无线收发模块天线以及北斗地面站组成。地面监测控制终端与各风速测量节点为星型拓扑结构, 各风速测量节点采集到风速后, 地面监测控制终端按顺序接受各风速测量节点发来的数据并以数据表格的形式存储于计算机中, 用于分析风速的时序变化, 地面监测控制终端接收数据的总共时长为 5 s。

2 系统自干扰与误差分析

2.1 传感器外廓风速干扰对比分析

为验证皮托管风速传感器相比于叶轮风速计的优点, 本研究进行了传感器风速外廓干扰对比试验。此试验在室内进行, 试验设备包括风速可调的轴流风筒、准热线式风速仪、稳压电源、皮托管、叶轮风速计等。叶轮风速计尺寸为: 宽度 30 mm, 风速测量截面直径 70 mm, 手柄长度 80 mm。皮托管总长 150 mm, 管径 3 mm, 最大横截面面积不超过 0.5 cm^2 , 体积明显小于叶轮风速计。试验示意图如图 4 所示。

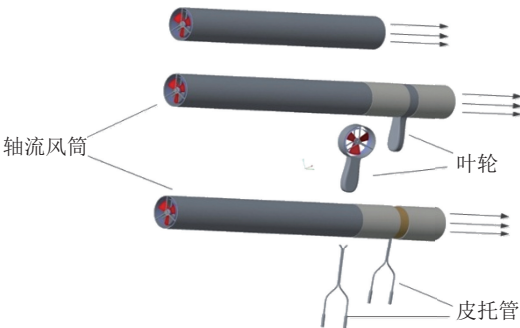


图 4 传感器外廓风速干扰示意图

Fig. 4 Diagram of wind speed interference of the sensor profile

如图 4 所示, 在相同的风源风速下, 先测定不安装皮托管或叶轮风速计的出风口风速, 然后利用套筒将皮托管和叶轮风速计测量风速的部位固定在轴流风筒的相同位置, 使用热线式风速仪分别检测 2 种情况下的出风口风速。风源风速测定 10.10、11.00、12.10、13.05、14.00 和 15.00 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 6 个档位, 2 种传感器的外廓对风速干扰的数据记录如表 1 所示, 表中数据都是风速稳定后的记录值。

如表 1 所示, 皮托管传感器探头部分对所测方向风速的干扰非常小, 外廓干扰后的风速削减不超过 0.57%, 而叶轮式风速计仅风速通过截面的桨叶就已经对测量方向的风速产生了较大削弱, 干扰后的风速削减量最高达到 28.2%, 最小也达到了 24%。所以从减少风场干扰考虑, 皮托管风速传感器更适

表 1 皮托管和叶轮的外廓风速干扰对比测试结果¹⁾

Tab. 1 The results of wind speed interference of pitot tube and vane anemometer profiles

风源风速/ (m·s ⁻¹)	皮托管干扰		叶轮风速计干扰	
	风速/ (m·s ⁻¹)	削减量/ %	风速/ (m·s ⁻¹)	削减量/ %
10.10	10.10	0	7.52	25.5
11.00	11.00	0	8.16	25.8
12.10	12.09	0.08	9.08	24.9
13.05	13.00	0.38	9.47	27.4
14.00	13.92	0.57	10.04	28.2
15.00	14.88	1.13	11.40	24.0

1) 削减量=(风源风速-干扰后的风速)/风源风速×100%

合应用于无人机下旋翼风场进行多点测量。

2.2 节点误差来源分析与试验

虽然皮托管风速传感器相比叶轮风速计具有一定优势,但也存在一些问题。皮托管风速传感器通过测量风压达到检测风速的目的,因此对空气密度造成影响的环境因素理论上也会对皮托管风速传感器的测量精度造成一定影响,此处所涉及的环境因素主要指海拔高度和试验环境温度。将工作稳定的节点模块(未消除残余误差,目标零点信号的电压为 3 000 mV)在不同高度楼层观察其零点变化,发现变化极微小。同时将工作稳定的节点模块置于温度变化的环境中观察其零点变化(每 30 min 记录 1 次),零点随温度变化的结果如表 2 所示。由表中数据计算可得,零点电压与温度的相关系数(r)为-0.181($P>0.05$),线性相关性较差,因此环境温度变化对节点模块零点的影响不明显。结合王敏等^[21]对皮托管影响因素的模拟计算研究可认为,在适合无人机作业的地区,海拔高度和环境温度对该系统测量精度的影响均较小。

表 2 零点信号的电压随温度变化的结果

Tab. 2 Temperature-dependent voltage of zero point signal

温度/℃	32.2	35.2	37.4	40.1
电压/mV	3 010.250	3 007.625	3 009.875	3 009.125

对皮托管风速传感器装备测量精度产生影响的因素主要来自风压变送器,包括加工和姿态变化产生的零点误差。风压变送器将风压信号转换成电压信号,输出信号范围为 1~5 V,为配合 S 型皮托管双向测量特点,节点模块零点信号定为 3 000 mV,但由于加工误差等原因,实际零点相对于 3 000 mV 有小幅差异,为消除此差异,需对微控制器程序进

行参数调节,使零点信号正常。

风压变送器内部实际感应风压信号的元件为感压膜片,感压膜片的重力方向和感压方向呈一定夹角,当风压变送器的姿态改变,该夹角随之改变,进而影响风压变送器零点。为探寻风压变送器姿态对零点的影响,试验设计如图 5 所示,利用角度仪测量风压变送器从正常姿态到翻转姿态再回到正常姿态过程中的节点模块零点变化规律。

采用角度仪测定风压变送器的多个姿态角,图 5 所示为几个典型姿态角的测试场景。试验表明,风压变送器在图 5c 和 5d 输出的零点电压信号为最大值和最小值,在其他倾斜角度输出的零点电压信号均在这 2 个姿态输出的零点电压信号之间,且随倾斜角度的顺时针变化呈现先逐渐减小后逐渐增加的变化规律,电压信号最大差异约为 3~5 mV。基于此,所有风压变送器在防水外壳内都应该保持同样姿态,进行零点调节时,风压变送器姿态要与实际工作姿态一致。实际工作时所有模块都应保证以同样的角度安装,以减小零点误差。

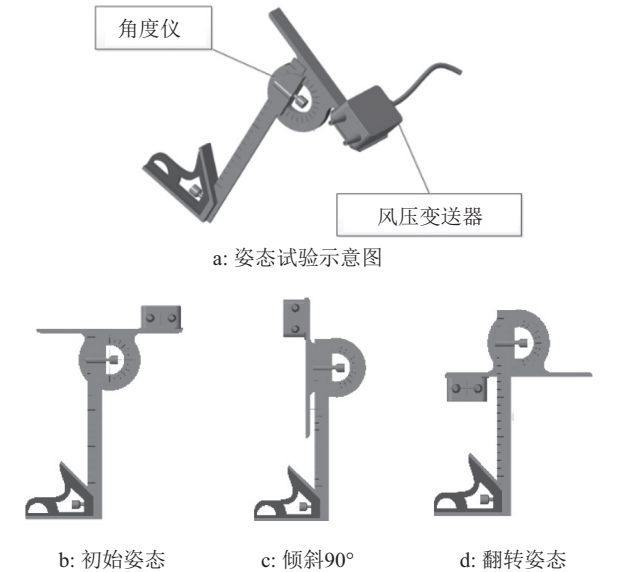


图 5 风压变送器的姿态示意图

Fig. 5 Diagrams of wind pressure convertors in different angles

3 系统校正与试验

3.1 皮托管单管测量风速对比试验与分析

风速是本装备的目标参数,皮托管传感器的准确性和一致性对整套装备的实用性有很大影响,因此需要大量测试确保传感器的性能可靠且测量差异较小。每个独立的皮托管风速传感器包括一个 S 型皮托管,一个风压变送器,以及连接二者的气压传送软管。其中,皮托管和气压传送软管对皮托管

传感器系统的一致性影响不大 (参数相同), 故主要测试风压变送器对皮托管传感器测量差异性的影响。根据测试需要, 应用轴流风筒搭建风速测试系统, 如图 6 所示。

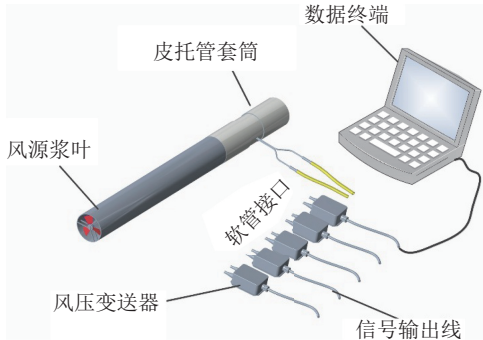


图 6 风压变送器测试示意图

Fig. 6 Testing diagram of wind pressure convertor

小型轴流风筒一端由涵道风扇提供稳定风源, 该涵道风扇由稳压电源供电, 能提供稳定风速, 且风速大小可调节。该轴流风筒内截面变化小, 尺寸适中, 能够保证测量端风速稳定。测量端为固定 S 型皮托管的加长管道 (可拆卸), 被固定的皮托管感应管道内风压, 与皮托管连接的软管可换接多个风压变送器, 在相同风速下采用不同的风压变送器测量风速, 以比较其一致性。本试验在相同风速下轮替测试 30 个风压变送器, 测试所用标准风速为 $15.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 测定该标准风速的仪器为标准热线式风速仪 (上海前谨电子有限公司, 风速测量范围 $0\sim30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 基本精度 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 分辨率 $0.01\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。所有风压变送器测得的风速数据如表 3 所示。

表 3 风压变送器测试结果比较¹⁾

Tab. 3 Comparisons of test results of wind pressure convertors

变送器 编号	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	变送器 编号	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	变送器 编号	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	14.80	11	14.70	21	14.41
2	14.30	12	14.35	22	14.20
3	14.32	13	14.40	23	14.30
4	14.40	14	14.32	24	14.33
5	14.90	15	14.47	25	14.44
6	14.27	16	14.20	26	14.54
7	14.41	17	14.40	27	14.28
8	14.40	18	14.90	28	14.60
9	14.30	19	14.29	29	14.53
10	14.11	20	14.33	30	14.04

1) 标准风速为 $15.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

对表 3 数据分析得到, 这套风速测试系统采用的 30 个风压变送器在标准风速 $15.00\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的最大绝对差异为 $0.96\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最大相对差异为 6.40%, 变异系数为 1%, 因此认为该风速测量系统具有较好的测量一致性。

3.2 风速传感器的参数优化与校正

一般认为, 皮托管风速传感器在低风速下由于气压差较小, 实际测量时不够准确。为检验该测量系统的准确度, 以 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为梯度, 将 $0\sim20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速分为 19 个梯度进行检测。测试的风源设备是轴流风筒, 每个风速梯度内的具体风速由标准热线式风速仪测定, 利用标准风速与风速检测模块测得的数据, 绘制曲线图 (图 7)。由图 7 可知该检测模块所测风速值在 $0\sim7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速范围内与标准风速差异较大, 在 $7\sim20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速范围内与标准风速基本吻合。

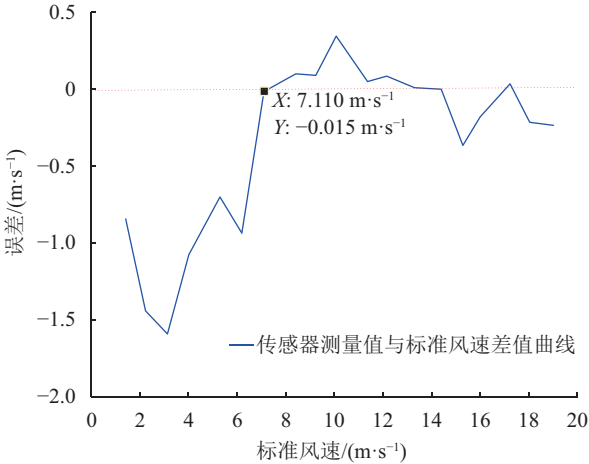


图 7 传感器测试结果曲线图

Fig. 7 Diagram of test result of wind sensor

基于以上的数据, 可认为所开发的近地式皮托管风速检测装备在 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上风速时测量精度较高, 风速低于 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时精度较低。为使该风速测量系统在所有风速范围均具有较高测量精度, 通过试验与数据拟合方式直接构建风压信号与风速值的关系, 达到低风速段的高精度测量。试验以 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为梯度将小于 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速分为 13 个梯度, 在不同风速下采集风压变送器所产生的风压信号。风压信号随着风速增大而增大, 但并不呈现等比例变化, 为建立低风速下风压信号与风速值的函数关系, 使用 Matlab 软件对每个风压变送器的风压信号—风速值 ($\Delta P-v$) 进行拟合。系统中某个风压变送器测得的 $\Delta P-v$ 值如表 4 所示。

经过多次拟合比较, 在多种数据拟合公式中发现三次拟合公式具有较好的效果, 公式如下:

表 4 某风压变送器的 ΔP - v 值
Tab. 4 The ΔP - v value of a wind pressure sensor

风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.99	1.54	1.92	2.68	3.14	3.60	4.07	4.50	5.14	5.42	5.94	6.49	6.92
风压/Pa	1.78	1.87	2.25	3.12	3.87	4.87	5.62	10.03	13.37	14.75	18.15	21.28	24.37

$$v = P_1X^3 + P_2X^2 + P_3X, \tag{2}$$

式中，自变量 X 为风压信号， v 为风速，对表 4 中 ΔP - v 数据进行拟合时，式中各参数值 $P_1=0.001\ 5$ ， $P_2=-0.06$ ， $P_3=0.98$ ，误差平方和 (SSE)=0.099 6，拟合优度 (R^2)>0.96。基于此，为使该风速测量系统在整个测量范围内都具有较高精度，将所有模块内的风速测量程序均采用 2 种风速计算公式：当风速低于 $7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，计算公式为 (2)；当风速大于 $7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，计算公式为 (1)。不同风压变送器的风速测量程序均应采用自身 ΔP - v 值拟合所得参数。

3.3 室外试验检验

在室内多次测试、分析与调试之后，这套近地式皮托管风速检测装备开发基本完成。为检验此装备的实际工作性能，设计并进行了无人机旋翼风场室外检测试验。试验中使用的无人直升机为深圳高科新农技术有限公司生产的四旋翼电动无人直升机 (机型 M234)，该无人机基本尺寸为长 1 280 mm，宽 1 280 mm，高 500 mm，旋翼直径 762 mm，空载质量 7.1 kg，作业载荷 10 kg，最大续航时间 13 min，空载最大续航约 20 min。试验场地为华南农业大学跃进北运动场旁边草地，时间为 2016 年 12 月 11 日上午，自然风速较低 ($<1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)，室外温度与室内温度差异较小 ($<2\ ^\circ\text{C}$)，试验场景如图 8 所示。

进行室外试验时，所有采样点呈直线排列并与飞行航线垂直，每 2 个采样点之间相距 1 m，各采样点按照风速测量模块编号顺序排列。试验前，先用北斗定位系统对各采样点的位置按顺序进行采样，无人机的飞行路线轨迹及风速采样点位置如图 9 所示。

试验共 6 次，分 2 组，固定高度组和固定速度



图 8 室外试验场景
Fig. 8 The scene of outdoor test

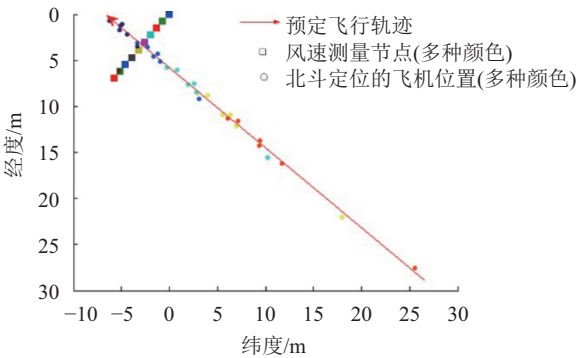


图 9 无人机飞行轨迹及风速采样节点位置示意图
Fig. 9 Diagram of flight path of unmanned helicopter and wind speed sampling node position

组，固定高度组为 V1、V2、V3，固定速度组为 H1、H2、H3。在固定高度组，飞机的飞行高度基本保持不变，改变飞机的飞行速度；在固定速度组，飞机的飞行速度基本保持不变，改变飞机的飞行高度。2 组试验均测量无人机作业时的三向风速。

因试验数据较多，本文以其中一架无人机试验所得数据为例，说明该近地式皮托管风速检测装备的实际应用情况。图 10 所示为利用固定速度组 H2 的无人机测得的风速数据绘制的采样时段内风

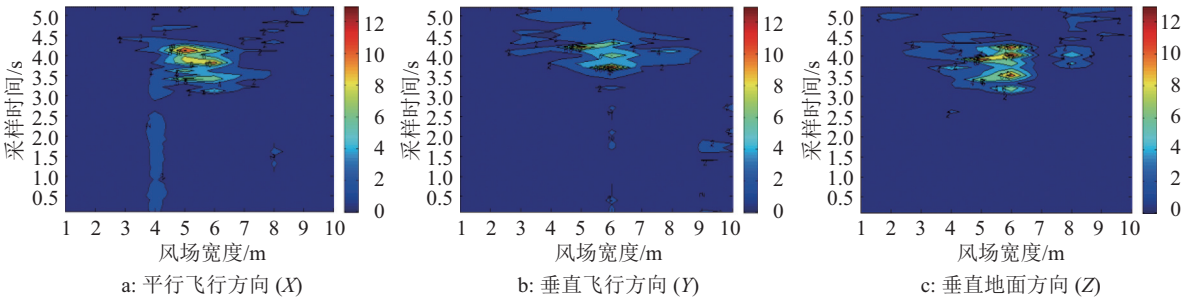


图 10 不同飞行方向的风场分布示意图
Fig. 10 Diagram of wind field distribution in different flight direction

场分布图, 该图由风速/GPS 采集分析软件处理数据后得到。该架次测得的平均飞行高度为 1.50 m, 平均飞行速度为 $1.50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在此飞行状态下, X 方向最大风速为 $12.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Y 方向最大风速为 $12.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Z 方向最大风速为 $12.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在 X 方向, 参考风速 $2、3、4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风场宽度分别为 8.2、7.5 和 6.6 m; 在 Y 方向, 参考风速 $2、3、4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风场宽度分别为 6.6、5.8 和 3.5 m; 在 Z 方向, 参考风速 $2、3、4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风场宽度分别为 4.8、4.1 和 2.9 m。

4 结论

- 1) 本文选用皮托管风速传感器设计的近地式皮托管风速检测装备, 利用风压信号进行风速测量, 能够对无人机旋翼下方风场进行多方向多梯度的测量, 且测量准确性好, 各传感器之间的变异系数为 1%, 能够提供可靠的风场数据。
- 2) 该近地式皮托管风速检测装备相比较叶轮式风速传感器网络测量系统在减少干扰方面具有明显优势, 在 $10\sim15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下皮托管风速传感器对直流风速的削弱不超过 1%, 而叶轮传感器达到 20% 以上。
- 3) 对该装备各皮托管进行校正后, 校正参数的拟合优度达到 0.96, 具有较高精度。该装备进行室外试验时, 能够有效检测和分析无人机下旋翼风速数据, 可为研究无人机田间作业提供有效帮助。

参考文献:

[1] 薛新宇. 航空施药技术应用及对水稻品质影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.

[2] 王玲, 兰玉彬, HOFFMANN W C, 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]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 15-22.

[3] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 40-46.

[4] 李继宇, 周志艳, 兰玉彬, 等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77-86.

[5] 周军莉, 尹飞, 李善玉, 等. 自然风的实测研究[J]. 建筑

热能通风空调, 2014(3): 30-34.

[6] 孙志强, 郑剑武, 张宏建, 等. 类 S 型皮托管及其测量特性研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(5): 40-42.

[7] 胡炼, 周志艳, 罗锡文, 等. 无人直升机风场无线传感器网络测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 221-226.

[8] 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]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.

[9] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194-201.

[10] 邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 25-32.

[11] 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.

[12] 周志艳, 袁旺, 陈盛德. 中国水稻植保机械现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2014(15): 178-183.

[13] 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 圆形多轴多旋翼电动无人机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014(11): 1-9.

[14] 李继宇, 周志艳, 胡炼, 等. 单旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 10-17.

[15] 胡达明. 杂交稻制种授粉花粉悬浮速度测定与应用研究[J]. 杂交水稻, 1996(1): 11-13.

[16] 周伟静, 沈怀荣. 一种基于小型无人机的风场测量方法[J]. 测试技术学报, 2009, 23(4): 297-302.

[17] 王慧敏, 汤楚宙, 李明, 等. 气流速度对杂交水稻制种授粉花粉分布影响的研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 63-69.

[18] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94-96.

[19] 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.

[20] 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): 54-62.

[21] 王敏, 魏根宝, 马锦国, 等. 二等皮托管测风误差分析及偏差模拟计算[J]. 气象科技, 2013, 41(5): 843-846.

【责任编辑 周志红】