

Based on the Non-Inertial Motion State Meteorological UAV Wind Method^{*}

ZHOU Shudao¹, WANG Yanjie^{1,2}, WANG Min¹, YE Song¹, ZHU Guotao¹

(1. The College of Meteorology PLA University Science and Technology, Nanjing 211101, China;
2. 65066 unit of the PLA, Dalian Liaoning 116100, China)

Abstract: Meteorological UAV must keep a linear uniform velocity in its monitoring flight. But to push through the detection in its accelerating translation state, we introduced an equivalent stress and considered the law of energy conservation to get out a Bernoulli equation for this non-inertial state. Based on form of this Bernoulli equation, we established an airspeed model of non-inertial state and analysed rationality of this airspeed model. The simulation and experiment results indicated that when the meteorological UAV flight in a state of accelerating translation, the airspeed model adapted to deal with the meteorological UAV flighting in non-inertial state and met the need for the detection accuracy.

Key words: meteorological UAV; airspeed model; analysis of rationality; non-inertial motion; equivalent stress; simulation experiment

EEACC:7320E;7710B

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.01.031

基于非惯性运动状态的气象无人机测风方法研究^{*}

周树道¹, 王彦杰^{1,2}, 王敏¹, 叶松¹, 朱国涛¹

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101;
2. 65066 部队, 辽宁 大连 116100)

摘要: 针对气象无人机必须匀速直线飞行探测的条件限制, 在气象无人机加速平动的状态下, 通过引入等效压力, 利用能量守恒定律, 得出了非惯性运动状态的伯努利方程, 建立了气象无人机非惯性运动状态的空速模型, 并对非惯性运动状态空速模型的合理性进行了分析, 最后进行了仿真实验。结果表明: 当气象无人机处于加速平动状态时, 本文所提出的气象无人机非惯性运动状态空速模型具有一定的实用价值。

关键词: 气象无人机; 空速模型; 合理性分析; 非惯性运动; 等效压力; 仿真实验

中图分类号: P414.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)01-0155-04

气象无人机^[1]主要用于远程气象监测, 是专为海洋、边远地区和不利天气条件下气象探测而研发的。它具有低成本、多功能、长航时、微型化、通用化和智能化等优点, 其在高空风探测方面的应用正在迅速发展, 已成为一种新的高空风探测平台。

气象无人机现用空速模型^[2-3]要求无人机保持匀速、水平、直线飞行, 而在实际探测中, 无人机时常存在加、减速运动, 很难保持匀速飞行。

为突破气象无人机匀速飞行探测的条件限制, 提高数据获取率, 更准确获取风场信息, 本文拟在气象无人机加速平动时, 通过引入等效压力, 利用能量守恒定律, 得出非惯性运动状态的伯努利方程, 建立气象无人机非惯性运动状态的空速模型, 实现气象

无人机在加速平动状态的风速测量。

1 现用空速模型及其局限性

1.1 气象无人机现用空速模型的建立

气象无人机现用空速测量原理^[4-6]是根据流体不可压、无黏性、流动沿流线、在管道中作恒定流动(压力、流速和密度不变化的流动形式)的伯努利方程推导所得。经典流体力学伯努利方程示意图如图1所示, 其中 P 、 V 、 h 分别表示 A 、 B 两点的压强、流速、位势高度。

伯努利方程表示流体各种机械能的守恒与转换关系, 突出了流体的速度与压强之间的关系, 可用式(1)表示为:

项目来源: 国家自然科学基金资助(40976062); 江苏省自然科学基金资助(BK2009062)

收稿日期: 2010-06-18 修改日期: 2010-08-22

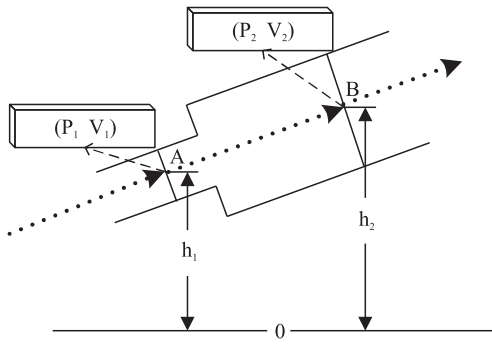


图1 理想流体伯努利方程示意图

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \text{const} \quad (1)$$

从力学观点来看,伯努利方程表示无黏性流体定常流动中的能量守恒定律^[7-9]。式中, P/γ 表示单位重力流体的压力能; $V^2/(2g)$ 表示单位重力流体所具有的动能; Z 表示单位重力流体所具有的位能。式(1)表明,对于不可压、无黏性定常流动,单位重力流体的压力能、位能和动能的总和沿流线是一个常数。

对于气体,由于重度很小,通常忽略重力势能,因此(1)式可表示为:

$$P_1 = P + \frac{1}{2} \rho V_a^2$$

上式中: P_1 为总压(Pa), P 为静压(Pa), ρ 为空气密度(kg/m^3), V_a 为空速(m/s)。

根据理想气体的状态方程可得到空速计算公式为:

$$V_a = \sqrt{2RT \frac{q_c}{P}} \quad (2)$$

式(2)即为气象无人机现用空速模型。其中: R 为专用气体常数($\text{m}^2/(\text{K} \cdot \text{s}^2)$); T 为静温(K); $q_c = P_1 - P$,为动压(Pa),即总压与静压之差。

1.2 现用空速模型的局限性

牛顿力学^[10]在惯性运动状态下成立,我们应用流体力学各种机械能的守恒与转换关系,即伯努利方程对问题进行求解,要求选定的参照系必须是惯性参照系。根据惯性参照系的定义^[4],相对于惯性参照系作匀速直线运动的参照系也是惯性参照系,即要求气象无人机必须匀速直线飞行探测,现用测风原理才能成立。

在实际探测过程中,无人机时常存在加、减速运动,很难保持匀速飞行。而在气象无人机非惯性运动时,现用空速模型将不再成立。

2 非惯性运动状态空速模型的建立

与惯性运动状态受力情况相比,气象无人机在加

速平动的非惯性运动状态,只是增加了一个惯性力 F_i ,它等于有效质量 M 与气象无人机加速度 a 的乘积,方向与 a 的方向相反。惯性力所做的功与气象无人机的位移、加速度和惯性力做功的有效质量相关。

2.1 受力分析

设气块 t_1 时刻处于AB间, t_2 时刻处于CD间,如图2所示, $\Delta t = t_2 - t_1$,气块受到的内力可分为非保守力和保守力^[11],非保守力包括内摩擦力和内压力,内压力分为平行于气块运动方向和垂直于气块运动方向上的内压力;保守力指重力。气块受到的外力可分为皮托-静压管管壁对空气的黏滞力、平行于流线的侧面上受到的压力、惯性力和两端面上的压力。

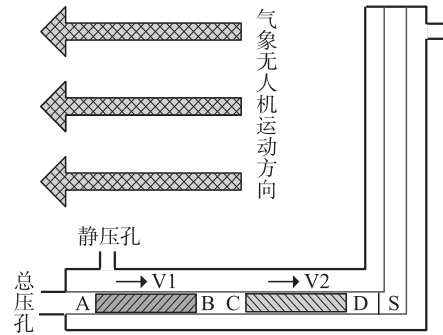


图2 气象无人机非惯性运动状态气流示意图

2.2 有效质量 M

由于皮托-静压管总压孔平行于气象无人机水平运动方向,所以流管内的气块与气象无人机运动方式相同,在加速平动状态,气块有效质量就是惯性力做功的有效质量,即 $M = \rho (V_0 + a/2) S$,其中: ρ 为空气密度(kg/m^3), V_0 为前一时刻的空速(m/s), S 为皮托-静压管总压孔横截面积(m^2), a 为气象无人机运动加速度(m/s^2)。

2.3 做功情况分析

2.3.1 内力功

(1)非保守力功 在理想气体中,内摩擦力可被忽略;平行于流线的面元上受到的内压力与位移正交,不做功;垂直于流线的任一面元两侧的流体相互作用的内压力,等大、反向,位移相同,他们在运动过程中所做的功正负相消,其和为0。

(2)保守力功 重力与气象无人机皮托-静压管运动方向正交,不做功。

2.3.2 外力功

在理想流体中,黏滞力可被忽略;平行于流线的侧面受到的管壁压力与位移正交,在此过程中不做功。所以,外力功只有惯性力和两端面上的压力做功。

2.4 非惯性运动状态空速模型的建立

设非惯性运动状态的等效压力^[12]为 P'_1 :

$$P'_1 = P_1 + F_i/S = P_1 + \rho(V_0 + a/2)a \quad (3)$$

式(3)中: P_1 为测量总压(Pa), ρ 为空气密度(kg/m^3), V_0 为前一时刻的空速(m/s), S 为皮托-静压管总压孔横截面积(m^2), a 为气象无人机运动加速度(m/s^2),根据能量守恒定律,由式(3)可得非惯性运动状态的伯努利方程^[13]:

$$\frac{P_1 + \rho(V_0 + a/2)a}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (4)$$

由式(4)可得非惯性运动状态的理想气体方程:

$$P_i + \rho(V_0 + a/2)a = P + \frac{1}{2}\rho V_a^2 \quad (5)$$

气象无人机在非惯性运动状态的空速计算公式为:

$$V_a = \sqrt{2RT \frac{P_i + \rho(V_0 + a/2)a - P}{P}} \quad (6)$$

式(6)即为非惯性运动状态的空速模型。其中: R 为专用气体常数($\text{m}^2/(\text{K} \cdot \text{s}^2)$); T 为静温(K); P_i 为测量总压(Pa), P 为静压(Pa)。

3 理论分析及仿真实验

通过对气象无人机非惯性运动状态的空速模型进行可行性、探测精度、误差影响权重等方面的分析,结合 MATLAB 仿真实验,论证了气象无人机非惯性运动状态空速模型的合理性。

为进行仿真实验,根据气象无人机探测情况设定 $P = 55\ 000\ \text{Pa}$, $R = 287\ \text{m}^2/(\text{K} \cdot \text{s}^2)$, $\Delta t = 1\ \text{s}$, $T = 270\ \text{K}$, $\rho = 1\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

3.1 可行性分析

由气块受力分析可知 Δt 时刻的空速为:

$$V_{at} = V_{a0} + a\Delta t$$

式中: V_{at} 为 Δt 时刻的空速, V_{a0} 为前一时刻的空速, a 为气象无人机 Δt 时刻的加速度。

气象无人机非惯性运动状态的空速模型与受力分析得出的空速进行对比,可得出气象无人机非惯性运动状态空速模型的可行性,仿真实验结果如图 3 所示。

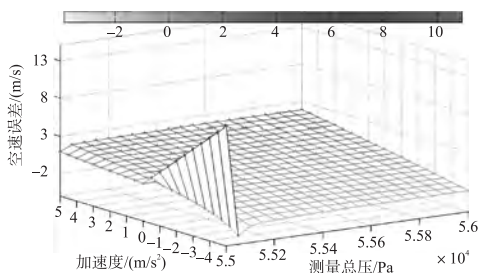


图 3 气象无人机非惯性运动状态空速模型的可行性误差

由图 3 可知:剔除边缘随机误差,气象无人机非惯性运动状态空速模型的可行性误差均小于等于 $2.8\ \text{m}/\text{s}$,满足气象无人机探测精度要求。

3.2 探测精度分析

采用标准差形式进行探测精度分析^[14]。假设各输入变量的误差均服从正态分布,且互不相关,则气象无人机非惯性运动状态的空速误差标准差为:

$$\sigma_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V}{\partial f_i}\right)^2 \sigma_{f_i}^2} \quad (7)$$

由测量总压 P_i 、加速度 a 、静压 P 引起的空速误差分别为:

$$\Delta V_1 = \frac{RT}{PV} \Delta V_{P_i} \quad (8)$$

$$\Delta V_2 = \frac{RT(\rho V_0 + a)}{PV} \Delta V_a \quad (9)$$

$$\Delta V_3 = -\frac{RT(2P_i + 2\rho V_0 a + a^2)}{2P^2 V} \Delta V_P \quad (10)$$

空速误差标准差为:

$$\sigma_v = \left\{ \left(\frac{\partial V}{\partial P_i}\right)^2 \sigma_{V_{P_i}}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_a}\right)^2 \sigma_{V_a}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)^2 \sigma_{V_P}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

取测量总压和加速度为自变量,则仿真实验结果如图 4 所示。

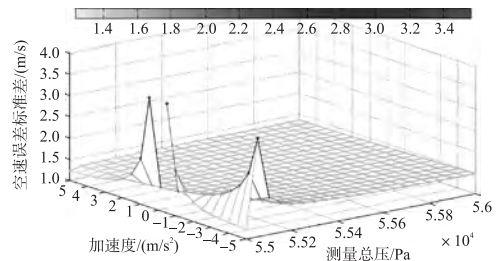


图 4 所有误差来源引起的空速误差标准差

由图 4 可知:①不论测量总压 P_i 和加速度 a 如何变化,空速误差均小于等于 $3.5\ \text{m}/\text{s}$;②当测量总压较大时,不论加速度如何变化,空速误差均小于等于 $1.5\ \text{m}/\text{s}$;③随着测量总压的减小,空速误差波动较大。

忽略测量总压 P_i 和静压 P 引起的测量误差^[15],则式(11)变为:

$$\sigma_v = \frac{RT(\rho V_0 + a)}{PV} \sigma_{V_a} =$$

$$\sqrt{\frac{RT}{2P[P_i + \rho(V_0 + a/2)a - P]}} (\rho V_0 + a) \sigma_{V_a} \quad (12)$$

式(12)即为由加速度 a 引起的空速误差标准差计算公式。取测量总压和加速度为自变量,则仿真实验结果如图 5 所示。

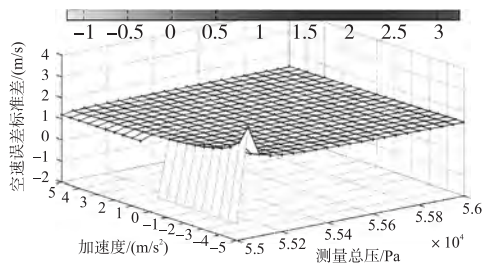


图5 加速度引起的空速误差标准差

由图5可知:①不论测量总压 P_t 和加速度 a 如何变化,由加速度引起的空速误差标准差均小于等于 3.2 m/s ;②在测量总压接近静压的时候,空速误差最大;③在测量总压较大时,由加速度引起的空速误差小于等于 1.5 m/s 。

3.3 影响权重分析

通过公式(11)和(12)的对比分析,可以获取由加速度引起误差的影响权重,仿真实验结果如图6所示。

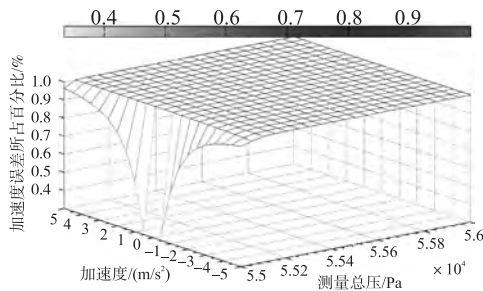


图6 加速度误差所占误差的百分比示意图

由图6可知:不论测量总压 P_t 和加速度 a 如何变化,由加速度引起的误差在所有误差中均具有较高的影响权重。

MATLAB 仿真结论:气象无人机非惯性运动状态的空速模型满足气象无人机探测精度要求,可行性误差小于等于 2.8 m/s ;空速误差标准差小于等于 3.5 m/s ;由加速度引起的空速误差标准差小于等于 3.2 m/s 。因此本文所提出的气象无人机非惯性运动状态的空速模型具有一定的实用价值。

4 结束语

本文在气象无人机现用空速模型的基础上,通过

引入非惯性参照系的等效压力,并利用能量守恒定律,推导出非惯性运动状态的伯努利方程,得出了气象无人机非惯性运动状态的空速模型,通过对气象无人机非惯性运动状态空速模型的可行性、探测精度、误差影响权重等方面分析,并结合 MATLAB 仿真实验,得出:气象无人机处于加速平动时,本文所提出的气象无人机非惯性运动状态的空速模型具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Holland G J. The Aerosonde Robotic Aircraft: A New Paradigm for Environmental Observations [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000(7): 889-901.
- [2] Hou J. Analysis on Structure and Characteristics of Pitot Type flowmeter [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2005, 22(2): 189-193.
- [3] 周伟静,沈怀荣. 磁偏角对无人机皮托-静压管测风的影响分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(4): 97-101.
- [4] 潘锦珊. 气体动力学基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.
- [5] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006, 5.
- [6] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2006, 9.
- [7] 王敏,周树道,王彦杰,等. 影响皮托管测风精度的几个因素[J]. 实验室研究与探索, 2010, 3: 35-37.
- [8] 孙志强,周子民,张宏建,等. 皮托管测量影响因素分析 I. 检测杆与安装角的影响[J]. 传感技术学报, 2007, 3(20): 690-693.
- [9] 孙志强,周子民,张宏建,等. 皮托管测量影响因素分析 II. 全压孔与静压孔的影响[J]. 传感技术学报, 2007, 4(20): 941-944.
- [10] 李书民. 经典力学概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2007, 10.
- [11] 田宝忠. 非惯性参照系下的伯努利方程式的推导[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(1): 126-128.
- [12] 顾书龙. 非惯性参照系中的伯努利方程[J]. 物理与工程, 2003, 13(1): 1-3.
- [13] 杨景芳. 非惯性系中的功能原理[J]. 大庆师范学院学报, 2006, 26(2): 29-30.
- [14] 丁振良. 误差理论与数据处理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002, 5.
- [15] 任金彬,沈怀荣. 无人机皮托-静压管测风误差分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(4): 45-48.



周树道(1964-),男,汉族,浙江宁波人,硕士,副教授,主要研究方向为信号与信息处理, zhousd70131@sina.com;



王彦杰(1983-),男,汉族,河北平山人,硕士研究生,主要研究方向为信号与信息处理, 214847363@qq.com.