

旋翼无人机大气探测设备布局仿真优化设计

沈 奥, 周树道^{1,2}, 王 敏^{1,2}, 彭舒龄¹, 任尚书¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211100;

2. 南京信息工程大学 气象灾害预警与评估协同创新中心, 南京 210000)

摘要: 为了提高多旋翼无人机气象探测的准确度, 基于 CFD 方法对偶数旋翼无人机的流场进行分析, 比较了不同旋翼数和不同旋翼间距的无人机的流场, 分析了流场的特点; 同时, 结合大气探测设备对温湿度、气体浓度及颗粒物浓度测量的基本原理, 分析了多旋翼无人机扰流场对探测设备测量精度的影响及其原因; 由此确定了进行大气探测的多旋翼无人机尽量根据情况选择旋翼数较多、翼间距较大的机型, 探测设备安装位置应当靠近无人机中心轴靠近旋翼旋转平面处的相对静风区, 经实验对比, 通过优化可以有效减小测量的误差; 并提出可利用多旋翼无人机流场特点设计多旋翼无人机专用探测设备的构想。

关键词: 多旋翼无人机; 计算流体力学; 流场; 大气探测; 传感器

Simulation and Optimization Design of Atmospheric Detection Equipment Layout Based on UAV

Shen Ao¹, Zhou Shudao^{1,2}, Wang Min^{1,2}, Peng Shuling¹, Ren Shangshu¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211100, China;

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of multi-rotor UAV meteorological detection, CFD method is used to analyze the flow field of even-rotor unmanned aerial vehicle (UAV). The flow field of UAVs with different rotor numbers and distance between different rotors is compared. The characteristics of the flow field are analyzed. At the same time, the influence of the multi-rotor UAV on the measurement accuracy of the detection equipment is analyzed based on the basic principle of measurement of temperature and humidity, gas concentration and particle concentration. It is determined that the multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) for atmospheric detection should choose the number of rotors with large number of windings as far as possible. The installation position of the detection equipment should be close to the relative static wind at the axis of rotation of the unmanned aerial vehicle Area, by experimentation, through optimization can effectively reduce the measurement error. And put forward the idea of using the multi-rotor unmanned aerial vehicle flow field in the future to design the multi-rotor unmanned aerial vehicle special detection equipment.

Keywords: UAV; CFD; flow field; atmospheric detection; sensor

0 引言

利用多旋翼无人机进行气象探测是在多旋翼无人机平台的发展和大气探测技术的基础上发展起来的一种新型气象探测方法^[1]。可以将探测仪器直接加装在多旋翼无人机上, 对指定区域进行探测。具有人机分离、按指定航线探测、飞行高度高、可重复使用、机动性强、直接探测等优点, 而多旋翼无人机操作控制简单、起降方便、成本低, 特别是可以实现悬停飞行和垂直起降, 能够对大气垂直分布特征进行探测, 使其在气象探测中具有了独特的作用和优势, 得到了广泛的应用^[2-3]。

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-10-19。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775039); 国家自然科学基金项目(41775165); 国家自然科学基金项目(91544230)。

作者简介: 沈 奥(1990-), 男, 江苏启东人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事信息与通信工程方向的研究。

周树道(1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事气象装备方向的研究。

王 敏(1983-), 女, 陕西咸阳人, 博士研究生, 副教授, 主要从事大气探测方向的研究。

如今对于无人机流场的分析多用于固定翼无人机, 或者分析旋翼无人机的气动外形, 用以提升无人机的性能, 降低功耗^[4-6]。而对于旋翼无人机搭载传感器进行探测, 则需要对无人机产生扰流场进行分析, 否则将会使探测产生较大误差。所以, 研究多旋翼无人机流场对提高多旋翼无人机气象探测精度具有重要意义。

本文首先对常见气动布局(四旋翼、六旋翼、八旋翼无人机不同翼间距的布局)的多旋翼无人机的流场进行仿真计算, 分析总结出不同气动布局多旋翼无人机的流场特点, 进而结合大气探测设备的类型和原理, 对大气探测设备的使用提出建议, 最后针对多旋翼无人机流场的特点, 对大气探测设备提出改进方法, 使其能在多旋翼无人机平台上更精确地进行探测。

1 多旋翼无人机流场数值模拟

1.1 数值计算模拟方法

常用的 CFD 计算方法的思想是利用有限体积法, 把连续的空气介质离散化, 对离散后的每一个单元进行数学描述, 形成大型代数方程组, 在计算机上进行求解。而对流场的分析, 是基于 N-S 方程中的 3 个基本定律^[7]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \tag{2}$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \tag{3}$$

式中， ρ 为流体的密度， u_i 为流体速度沿 i 方向的分量， p 是静压力， τ_{ij} 是应力矢量， ρg_i 是 i 方向的重力分量， F_i 是由于阻力和能源而引起的其它能源项， h 是焓， k 是分子传导率， k_t 是由于湍流传递而引起的传导率， S_h 是定义的体积源。

由于需要计算的是旋翼在空气中低雷诺数下的旋转的问题，本文使用 Spalart-Allmaras 模型（简称 S-A 模型）来封闭方程组。S-A 模型是专门为航空航天应用所设计的，对于网格不是非常密的模型有较高的精度，计算时间短，在中小型流场仿真，特别是叶轮机计算中得到了广泛使用^[8]。而 S-A 模型在 N-S 方程基础上，建立了 $\mu\tau$ 与 k 的函数作为运输方程，从而使方程封闭。运输方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu\tau}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + \mu\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^3/2}{l} \tag{4}$$

式中， ∂k 、 C_D 、 C_μ 为经验常数， l 为模型中混合长度。

另外，湍流粘性系数为：

$$\mu\tau = \rho C_\mu \sqrt{k} l \tag{5}$$

1.2 模型的建立

影响多旋翼无人机流场的因素有很多，如图 1 所示，列举了影响多旋翼无人机流场的部分因素。根据无人机的功能用途，设计了无人机不同的外形特征，其中旋翼数量、转速和旋翼形状共同决定了升力的大小，旋翼数和间距比则影响了无人机的稳定性^[9-10]，而旋翼数、转速、旋翼形状和间距比都会对流场产生影响。在本研究中，以 9047 螺旋桨（直径 9 英寸，螺距 4.7 英寸）为例，分别对四旋翼和六旋翼无人机在不同间距比（相邻两旋翼中心距离 L 与旋翼直径 D 之比）的情况下的流场情况进行分析。为了排除其他因素的干扰，分析使用的无人机模型除旋翼数和间距比不同之外，机身、支架大小不做改变。在 SolidWorks 软件编辑多旋翼无人机的机身、支架和旋翼部分，再根据分析模型的参数调整模型，在 ICEM 中进行网格划分。

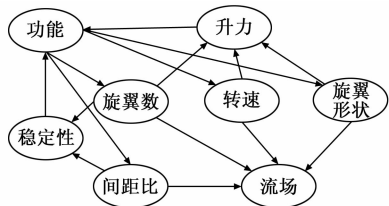


图 1 影响多旋翼无人机的主要因素

1.3 网格的划分

由于每一个旋转旋翼的流场是非定常状态，针对这一问题，可以将流体计算域划分为多个区域：每一个旋翼所在的旋转域和其余部分的静止域。采用非结构化网格，对旋翼旋转部分网格进行加密，相对远离旋翼的部分网格相对稀疏，兼顾计

算精度和计算效率^[11]。

1.4 边界条件设定

将旋翼所在的旋转区域设定为绕旋翼中心旋转的滑移网格，由于要平衡旋翼旋转产生的力矩，相邻两旋翼转向相反，转速设定为 700 rad/s。旋翼边界设定为与连接域同步转动的 moving wall。旋转区域和静止区域边界设置为 interior。

1.5 结果分析

1.5.1 四旋翼无人机

四旋翼无人机在间距比为 1 时，流场速度矢量图如图 2、图 3 所示。图中箭头表示速度的方向，箭头颜色表示速度的大小。从图中可以看出，气体流动最快的区域是在旋翼尖旋转的区域，瞬时速度最快达到了 87.83 m/s，整个计算域内，气体运动也比较剧烈，大多数区域风速在 0~20 m/s 之间；旋翼通过旋转，将上方的气体螺旋向下吸入旋转，然后向下喷出，为了更加直观地观察分析，加入了过无人机中心轴的竖直平面以及机身所在的水平平面作为切片进行分析。

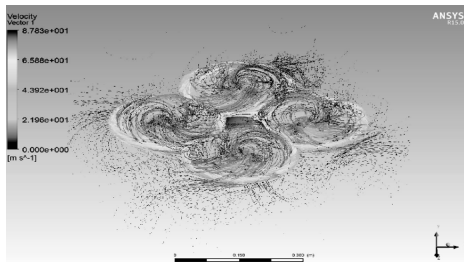


图 2 速度矢量图斜上视图 ($L/D=1$)

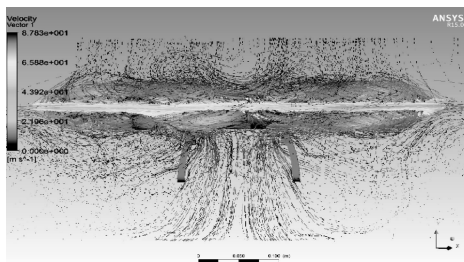


图 3 速度矢量图平视图 ($L/D=1$)

如图 4、图 5 所示，图中不同颜色区域代表此区域内气体流动速度大小，区域边界线即为速度大小的等值线。箭头表示速度矢量，箭头方向即为速度方向，箭头的大小表示速度的大小。在竖直切片上（如图 4 所示），旋翼将无人机上方及外侧气体卷向无人机中心以及旋翼下方，流向无人机中心的气流与机身和对流碰撞，方向发生改变，分成了向上流动和向下流动的两股，可以看出，向下的气流强度较大。

而在水平切片上（如图 5 所示），在无人机机身的水平平面上，在与旋翼垂直对应的区域，气流随旋翼转动，形成漩涡，流速相对较大，旋翼中心区域较小；在无人机机身正上方和正下方，存在一块流速相对较小的区域。

由于在实际探测中，为了维持无人机的平衡，探测设备的重心要尽量靠近无人机重心（一般多位于无人机的中心位置），因此，要着重分析无人机中心附近区域的流场特点。结合图 4、图 5 可以发现，在机身上下存在一块近似圆锥形的静风区域。由于下洗气流比较强并且方向更加集中，下方的区域跟上方相比较小，而圆锥底面椭圆长轴在 z 轴方向；在圆锥

的底部, 空气入流由于对面入流以及两侧旋翼的作用, 分成两股, 分别从两侧流出; 在竖直方向上, 机身上方从 x 轴方向汇入的气流在机身中心附近改变方向, 向上流动, 在向上流动的过程中, 受到旋翼向下漩涡的吸引, 逐渐向两侧分流, 在圆锥两侧改为向下流动, 而在下方, 由于距离旋翼较远, 下洗气流强, z 轴上向外的吸引对气流影响减小, 气流方向主要由四周旋翼下洗气流向中间挤压, 向中心流动, 在锥体两侧, 则有强烈的斜向下气流。

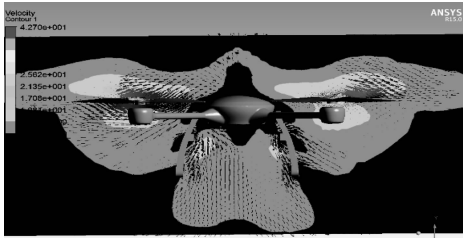


图 4 竖直切面上速度云图 ($L/D=1$)

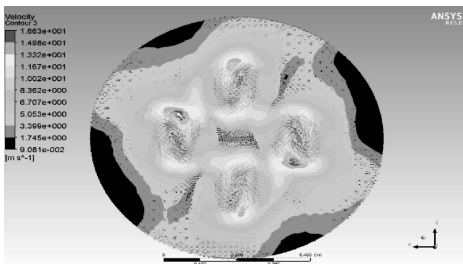


图 5 水平切片上速度云图 ($L/D=1$)

在实际运用中, 同样是四旋翼无人机, 尺寸不同也会使流场不同, 图 6、7 和图 8、9 就分别展示了当间距比分别为 1.1 和 1.2 时, 四旋翼无人机周围的流场特征。通过对比图 4~9, 不难看出, 相邻旋翼之间距离的增大, 圆锥型的相对静风区总体形状没有改变, 气体流动方向变化也不大, 但是距离的增大, 静风区域范围明显增大, 内部气流的相互干扰逐渐减轻, 气流流动方向和趋势也更加清晰。

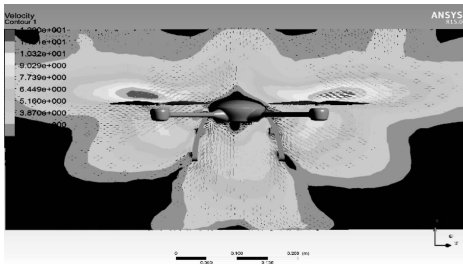


图 6 竖直切面上速度云图 ($L/D=1.1$)

1.5.2 六旋翼无人机

由于多旋翼无人机飞行原理相似^[12], 六旋翼无人机周围的流场变化遵循的规律跟四旋翼无人机也十分相似, 但为了保证相邻旋翼不发生碰撞, 分布在以无人机中心为圆心的圆上的旋翼数的增加, 就要使无人机旋翼到无人机中心的距离增大, 机身上下相对静风区的范围也相应较大, 如图 10、11 所示。又由于相邻旋翼旋转方向相反, 在过无人机中心点的 3 个水平轴方向, 产生了运动方向一致的气流, 如图 10 所示。此外,

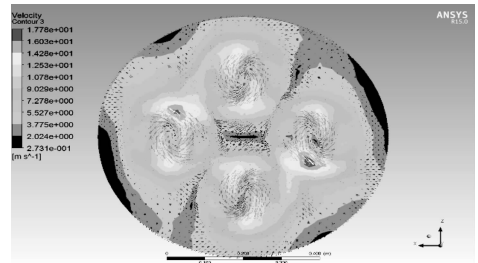


图 7 水平切片上速度云图 ($L/D=1.1$)

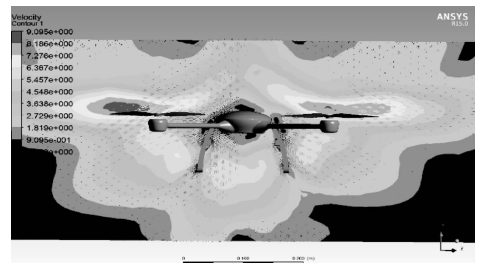


图 8 竖直切面上速度云图 ($L/D=1.2$)

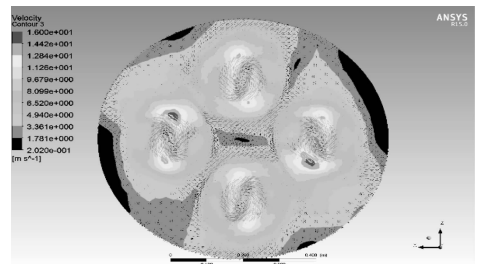


图 9 水平切片上速度云图 ($L/D=1.2$)

六旋翼无人机动力源多, 分布更分散, 控制量增多, 使得无人机稳定性更好, 无人机对于动力系统失效的容忍程度比四旋翼无人机要大, 负载能力较强, 同时, 当整机重量相差不大时, 六旋翼无人机每一个旋翼所需产生的推力变得更小, 转速会相对较低, 也降低了每个旋翼对流场的影响。

而当六旋翼无人机间距比增大时, 流场变化趋势跟四旋翼无人机相似, 静风区区域不断变大, 空气流速逐渐降低, 气流流动方向规律更加明显。

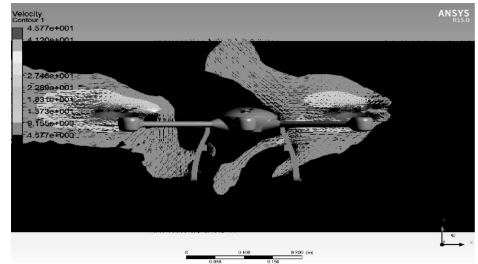


图 10 竖直切面上速度云图 ($L/D=1$)

1.5.3 八旋翼无人机

通过上述分析, 我们不难发现, 随着无人机旋翼数的增加, 无人机流场变化存在着明显的规律, 相比较四旋翼和六旋翼无人机, 八旋翼无人机机身中心距离旋翼更远, 中心部分受到影响更小, 中心区域的流场变化相对平缓; 同时, 八旋翼无

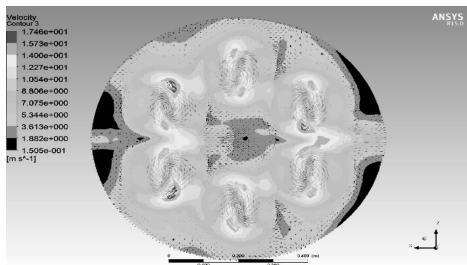


图 11 水平切片上速度云图 (L/D=1)

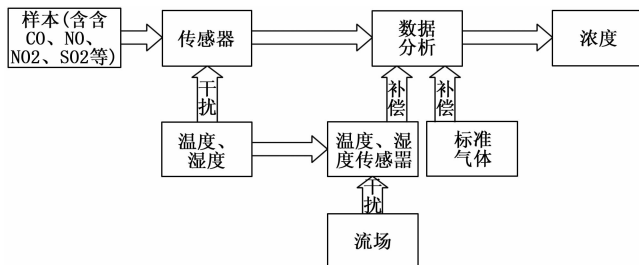


图 12 流场对气体传感器影响示意图

人机稳定性更强，负载能力更强，八旋翼可以承受单发甚至双发失效的状况，并且飞行器仍然可控，增加了飞行的安全性；当负载相同时，每一个旋翼需要提升的转速也相对较小。而这些因素都决定了利用多旋翼无人机进行气象探测时，八旋翼无人机更有优势。

2 无人机流场对大气探测设备的影响

大气探测设备通常是在一个设备上集成多种传感器配合主控板进行数据采集进行大气探测，其种类多种多样，技术也相当成熟。但是在无人机大气探测的过程可以发现，无人机上的探测设备的测量数据跟定点和飞艇测量的数据相比，有一定的偏差，并且波动较大。结合大气探测设备的原理，可以发现，气流的干扰会对传感器的测量产生影响，而根据影响方式的不同，可以将流场对传感器的影响情况分为以下几类：

2.1 对温度、湿度传感器的影响

常用的能够实时连续监测温度的传感器利用了热敏电阻或其他元器件的温度特性，通过测量元器件参数的大小，测量环境的温度值^[13-14]。这类传感器在使用中，要考虑到元器件附近的散热，如热敏电阻，当电流通过电阻，会产生热量，此外，集成的探测仪中其他电路部分，也会有损耗，产生热量。因此，需要一定的气体流通，加速散热，同时，通过对工作状态下的值进行标定，来修正误差。而当传感器加装在无人机上，无人机产生的气流将会影响到传感器正常的散热环境，使温度检测产生误差。

湿度传感器与温度传感器原理相似，使用了湿敏电阻或其他湿敏元件。而无人机带来的气流，将改变流过湿敏元件的气体流量，在单位时间内，附着在湿敏元件上的水也会相应变化，影响湿度的检测。

2.2 气体浓度传感器

目前常用的气体传感器是先进行采集，采集到一定量的样本气体，再通过对采集到的样本进行电化学性质分析，来获取样本中的特定气体含量，进而检测出环境中气体浓度^[15]。这种方法易受环境温度湿度变化的干扰，针对这一问题许多传感器采用了温度湿度补偿，然后再用高纯度的标准气体进行数据校准，因此性能更稳定，误差较小。但当温度湿度的检测因为受到流场影响出现误差时，就会影响到对气体浓度的补偿，给测量带来了误差。

2.3 颗粒物传感器

随着雾霾问题的关注不断提高，对大气颗粒物的检测应用的越来越多。对大气颗粒物的实时检测主要是通过对周围环境气体进行采样，利用颗粒物的光学特性，对样本进行分析^[16]。在样本的采集，传感器通过一个风扇，将周围气体以及其中的颗粒物吸入传感器作为样本，对样本进行光电特性分析，求

得颗粒物含量的大小。但当传感器处于变化的流场中，颗粒物与气体惯性不同，流动速度的变化会使采集到的样本中颗粒物的含量与真实值不一致，带来测量误差。

3 对于多旋翼无人机气象探测的优化建议与对比实验

3.1 优化建议

通过以上的分析，我们发现，通过在多旋翼无人机平台上加装大气探测设备的方式进行气象探测，有其他方式无法取代的优势，但同时，无人机本身造成的流场变化对传感器的影响也不得不考虑在内。所以，在实际运用中，在考虑无人机平衡保证飞行安全的同时，要寻找一块与在地面固定环境相似的，即流场相对稳定的区域。结合以下方法，可以明显改善测量精度：

1) 根据需要选用旋翼数多，相邻旋翼间距较大的无人机。根据上述分析，我们发现，当旋翼数增多，相邻旋翼间距增大的时候，无人机机身距离旋翼距离较远，受影响程度小，更适合探测仪器的测量。

2) 根据无人机外形，将探测仪器加装在无人机中心轴，高度位于旋翼所在平面处为宜。根据以上分析，在无人机中心轴气体流动较为平缓，同时，旋翼旋转时，从上方很大范围内吸入气体，向下高速喷出，总体上看，上方气流强度要小于下方。但同时，将设备装在无人机上方会提升整体的重心，使稳定性下降。所以大气探测设备安装位置应在旋翼所在平面附近，对于重量较轻、精度需要较高的，可放在无人机上方，重量较大、精度要求不高的可放在无人机下方。

3) 结合探测仪器设计布局，调整摆放方向。为了保证仪器内气体与外界环境气体的交换，许多探测设备在某些位置设计了通气孔，在无人机上加装仪器时，可根据无人机上气体流动方向和大小，调整仪器方向，保证仪器内外流通，兼顾气体流速大小。

3.2 对比实验

根据利用无人机进行大气探测的特点和需要，可以搭载在无人机上进行检测的必须具有实时探测能力，同时拥有储存数据的功能，或根据需要选择可以实时传输数据的设备。此外，设备响应速度要快，能够进行连续测量，采集方式必须采用自动采集，不能通过人工捕集等手段。基于以上要求，这里选择了一款多参数大气环境检测仪进行实验，将对温度、湿度、NO、PM2.5 等参数进行检测。

实验步骤：

- 1) 将多参数大气环境测试仪安装在无人机下方（首先选用的无人机为轴距为 450 mm 的四旋翼无人机）。
- 2) 打开测试仪，让其开始检测，此时未启动无人机，无

人机周围流场可认为没有变化, 检测结果为真实值。

- 3) 启动无人机, 让无人机在同一高度、位置上保持悬停。
- 4) 关闭无人机, 再次记录无人机未启动状态下的各参数值。

5) 根据优化建议更换无人机平台 (使用大疆 S1000 八旋翼无人机), 改变测试仪放置位置, 重复以上 2~4 步。使用无人机参数及测试仪放置位置对比见表 1。

表 1 优化前后差异对比

	优化前	优化后
无人机旋翼数	4	8
无人机轴距	450 mm	1 045 mm
放置位置	旋翼平面下方 5 cm 处	旋翼平面上方 3 cm 处

- 6) 卸载数据, 分析结果。



图 13 实验优化前后对比

4 实验结果与分析

经过以上对比实验, 卸载测试仪上数据, 将两次实验数据整理, 绘制折线图, 如图 14、15 所示。

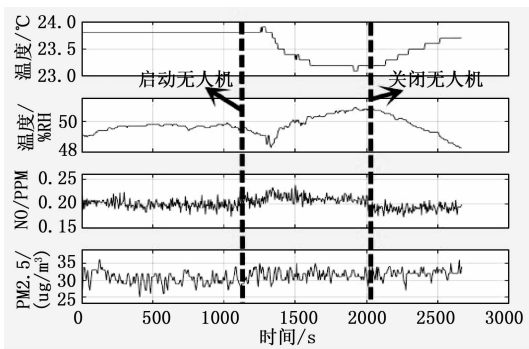


图 14 改进前测量结果

通过对比改进前后的实验结果, 可以发现:

- 1) 在无人机启动之前, 不存在旋翼产生的气流影响, 此时测量结果稳定, 优化前后测量结果基本保持一致, 可见两次实验进行时, 环境并没有发生很大的变化。
- 2) 无人机启动后, 可以看出在优化前, 测得温度先略有上升, 很快开始持续降低, 降低到一定程度后趋于平缓, 而当旋翼停止旋转后, 测得温度值逐渐回升; 优化后, 温度变化趋势与优化前基本一致, 但变化的幅度明显减小。
- 3) 无人机启动后, 在优化前, 测得湿度先有所下降, 然后开始持续上升, 上升到一定程度后趋于平缓; 而当旋翼停止旋转后, 测得湿度值逐渐下降; 优化后, 湿度变化趋势与优化前基本一致, 不过幅度明显减小。

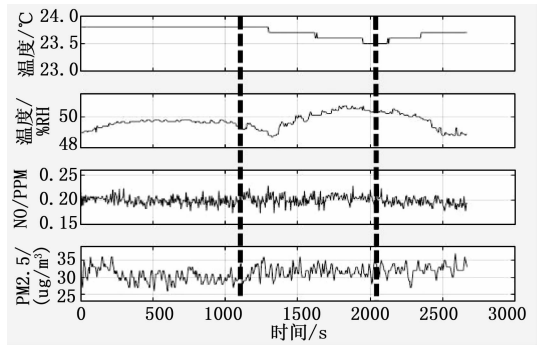


图 15 改进后测量结果

4) 以 NO 为例的气体浓度检测值在无人机启动后, 优化之前, 测得浓度值略有上升, 当旋翼停止旋转后, 测得浓度跟无人机启动前相比, 浓度略有下降; 而优化后, NO 浓度值变化不大。

5) 以 PM2.5 为例的颗粒物含量检测值在无人机启动后, 优化前后的检测值相差不大, 但可以看出, 优化后在无人机启动之后, 波动的峰值会有所降低。

通过以上结果的对比分析, 可以发现, 通过改变无人机平台, 将测试仪放置在影响较小的位置, 可以使测试仪对温度与湿度的影响明显减小; 减小气体浓度及颗粒物的检测结果的波动, 准确度明显提升。

5 总结与展望

本文面向目前新兴的利用多旋翼无人机进行气象探测的方法, 针对此方法中由于无人机流场对探测精度产生影响的问题, 着重分析了多旋翼无人机在飞行时的流场特点; 同时, 结合大气传感器的设计原理, 分析造成测量误差的原因; 针对这一问题, 在现有条件基础上, 提出了可以减轻影响的方法, 即, 选用更多旋翼的无人机平台, 相同旋翼的无人机, 选用旋翼之间距离较大的无人机, 此外, 仪器安装位置要靠近在机身中心椭圆锥形的相对静风区; 最后对多旋翼无人机加装的探测仪器的设计提出了一些建议。通过实验验证了优化的效果, 可以明显减小测量的误差。

作为一种新型的大气探测技术, 利用多旋翼无人机进行大气探测还有很多技术需要完善, 比如文中提到的如何去减少气流干扰的影响, 在今后的研究中, 可以在以下方面进行进一步优化:

- 1) 改变传统的探测设备外形, 采用流线型外形, 在气流速度较大的地方可以减轻气流与仪器表面的碰撞, 减少乱流, 减轻激烈的碰撞带来的无人机震动, 提高飞行安全性。
- 2) 结合多旋翼无人机流场特点和仪器外形设计, 将无人机产生的有较明显流动规律的区域气流进行整流, 以获得近似的定常流, 进行气体的更新, 加速探测设备中的气体交换。
- 3) 对多旋翼无人机正常飞行时旋翼转速范围内的流场进行分析, 对此时探测仪器进出气流速度进行估算求解, 在仪器分析探测结果时, 将气流流速的影响加入进行定标, 或直接接受无人机转速信息, 对结果进行补偿。
- 4) 优化探测设备内部构造, 将各传感器和主要发热部分进行合理布局, 提高其准确度。

(下转第 174)