

# 北京航空航天大学

第二十五届“冯如杯”

学生学术科技作品竞赛论文

2015 年 4 月

# 基于多旋翼无人航空器的空气污染物溯源系统

## 摘要:

我国环境污染问题日益严峻, 空气污染治理的重要性早已不言而喻。而空气污染治理的关键在于大气环境的监测与分析, 即污染物溯源和大气扩散条件的分析。现今的环保部门工作难点就在于执法过程的取证。本文基于此提出一种基于多旋翼无人航空器的PM2.5实时监测系统。该系统采用四轴飞行器搭载PM2.5颗粒光学监测传感器按照一定的测量轨迹进行数据采集, 通过电台实时将数据传回并进行处理。地面站将采样点经均值估计法构建空间中特定平面的污染情况, 结合图像处理技术进行三维模型绘制, 便于后续分析。运用该系统对污染企业污染进行证据搜集是十分便利的。灵活方便的四旋翼无人机能够在排污企业不知情的情况下准确对目标进行指定高度, 指定范围的污染物采集与分析, 同时, 根据各种大气条件结合当地天气情况, 可以对污染物扩散情况进行分析。根据污染区域的形状, 可以分析其扩散的方向; 根据颜色渐变的情况, 可以分析其扩散的时间。因此大规模采用四轴航空器测量雾霾将对气象学环保学的研究提供丰富的数据来源。同时, 通过对污染物分布情况的了解, 能更加科学的规划城市道路与建筑, 规划更有利于污染物扩散的城市架构, 将城市道路规划成更有利于因机动车尾气造成污染的扩散, 这是未来智慧城市的重要发展方向之一。

**关键词:** 四轴飞行器, PM2.5 监测, 污染物溯源, 大气污染模型

## Abstract:

The problem of the environmental pollution is more and more serious in our country. The importance of air pollution has long been known. Air pollution control is the key to the atmospheric environment monitoring and analysis, which is the analysis of pollution source and atmospheric diffusion conditions. The difficulty of today's environmental protection department of forensics work lies in the law enforcement process. This paper puts forward a kind of PM2.5 real-time monitoring system based on multiple rotor unmanned aircraft. The system consists of four shaft aircraft carrying PM2.5 particles optical monitoring sensors, whose routes are according to certain measuring path for data acquisition. It also support real-time data on the radio. The average sample points estimate the space of a particular plane pollution situation. With image processing technology, the computer can draw 3D models to facilitate subsequent

analysis. It is very convenient that the department use this system for pollution evidence collection. The UAV like quadrotor can accurately fly to the target in specific height. According to various atmospheric conditions combined with the local weather conditions, the results can analyze the pollutant diffusion conditions. According to the shape of the pollution area, the results can analyze the pollutant's spread direction. According to the situation of gradual change color, the results can analyze its spread time. This system can provides a rich source of data. At the same time, through the understanding of the distribution of the pollutant, planning urban roads and buildings can be more scientific.

**Key words:** Quadrotor, PM2.5 monitoring, Pollution source, Atmospheric pollution model

# 目 录

摘要: .....	i
Abstract: .....	i
一、背景分析 .....	1
二、测量方法综述 .....	3
2.1 系统架构 .....	3
2.2 地面站软件 .....	5
2.3 算法简述 .....	8
2.3.1 算法验证 .....	8
2.3.2 高斯投影坐标 .....	9
2.3.3 权值估计法 .....	11
结论 .....	13
参考文献 .....	15

## 一、背景分析

环境污染治理的前提是对污染物的监测分析和溯源,这是整个环境保护链条的起点。相信大家都看过 2015 年初柴静的《穹顶之下》(图 1-1),片中柴静问的一个最重要的问题就是“雾霾从哪里来? ”。带着这样一个问题,柴静同行的环保局工作人员却在河北的一家钢铁企业(图 1-2)中发生了意外,工作人员掉入了一个 2 米深的坑内。因此,我就在思考,是否有一个更有效的方法来进行污染物溯源。



图 1-1

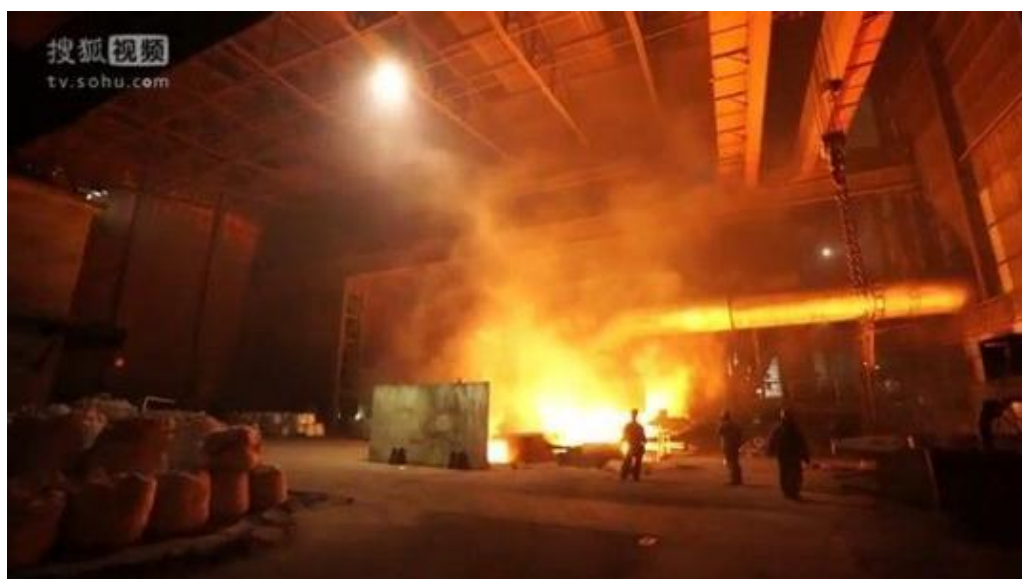


图 1-2

显然，现有的监测方法无法主动的获取先下大气污染物的分布状况，对于数据的采集较为单一，且该方法无法做到特定区域的污染物溯源。相比之下，利用无人机搭载传感器进行雾霾的监测方式是较为灵活主动的。据调查，宁波市环保局已经采用车载雾霾传感器进行数据采集，但显然地面情况无法全面的反应大气污染的分层状况。此外，河北省环保局采用的固定翼式无人机进行雾霾监测又受到固定翼飞机速度过快、飞行较不灵活等缺点的制约。

在现今的环境问题执法过程中，对排污企业的调查取证是一个很重要的环节。在柴静的《穹顶之下》纪录片中，环境部分在污染企业的调查取证中就曾经受到了各种主客观因素的干扰。而如果采用本文所述的雾霾监测系统，调查人员能够在排污企业不知情的情况下进行证据搜集，不仅测量方法科学准确，同时方便快捷，不会出现调查人员受到伤害、排污企业在得知调查人员来访时关闭污染源等问题。

## 二、测量方法综述

### 2.1 系统架构

由于现今还未有采用无人机进行污染物溯源的先例，因此我们需要思考这个方案的实现方式。由此导出了如图 2-1 所示的系统框图。

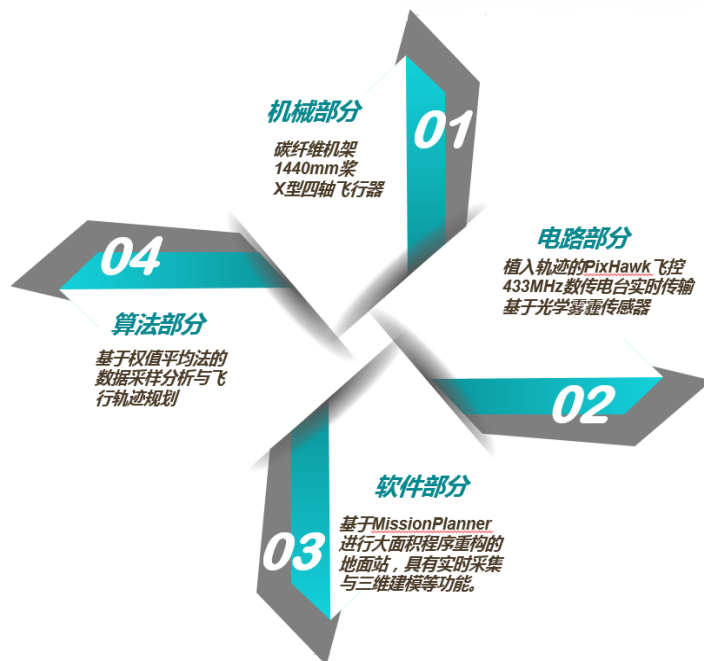


图 2-1

本所所述的 PM2.5 实时监测系统主要由四个部分组成，其中机械部分主要为团队自主搭建的四轴飞行器平台。该平台采用 X 型四轴飞行器模型，机架轴距为 650mm，桨径达 1440mm，提供较大的升力。动力部分为采用新西达 40v 电机配合好赢 20a 电调。全机身碳纤维架构也保障了系统的稳定性。系统机架部分见图 2-2。

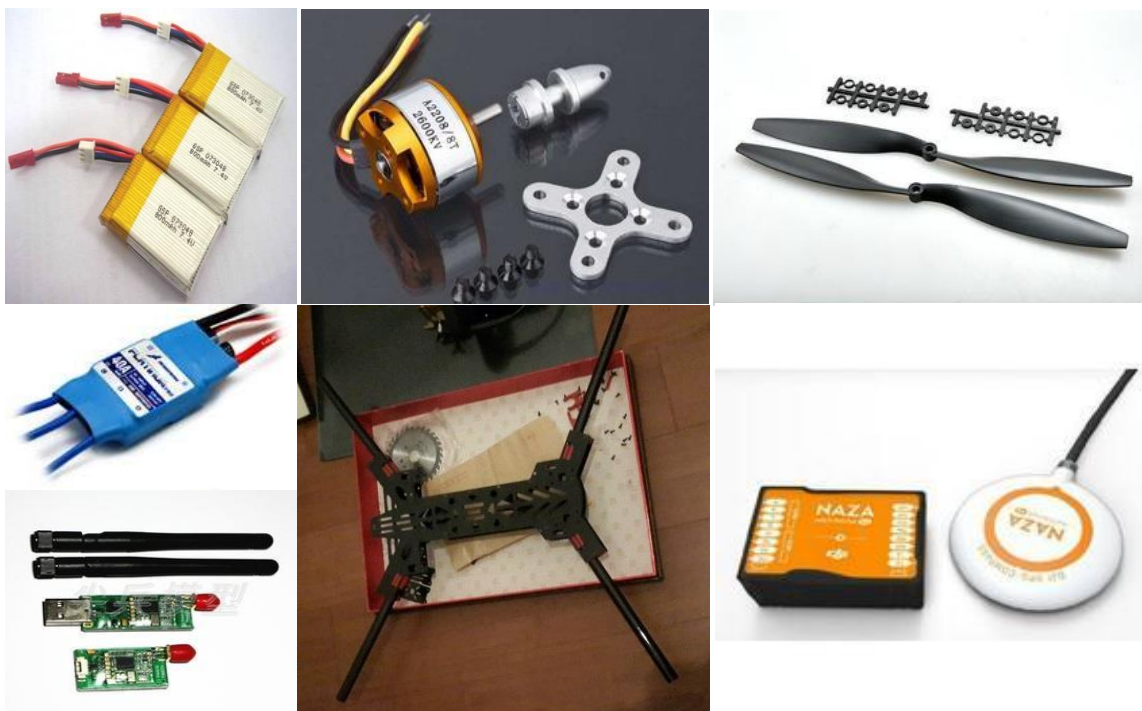


图 2-2

电路部分主要基于开源 PixHawk 飞控进行程序修改（如图 2-3），对其中植入了基于飞行轨迹规划的嵌入式程序。PixHawk 飞控采用的是基于 Nuttx 的嵌入式操作系统，通过 uORB 协议进行数据交换，允许运行操控者开发的第三方 APP。笔者在构建本系统时，分别采用了修改原生程序与增加第三方 APP 两种方法进行试验，最终采用了第二种方法，效果较好且便于调试与修改。雾霾传感器采用了夏普 GP2Y1051AU0F，其工作原理是通过孔洞内的红外光监测通过孔洞的空气中颗粒物对红外光的散射情况来判断 PM2.5 颗粒含量，再将该数值通过 AD 转化为数字量经过串口输出，传感器的工作相关参数与外形见图 2-4。

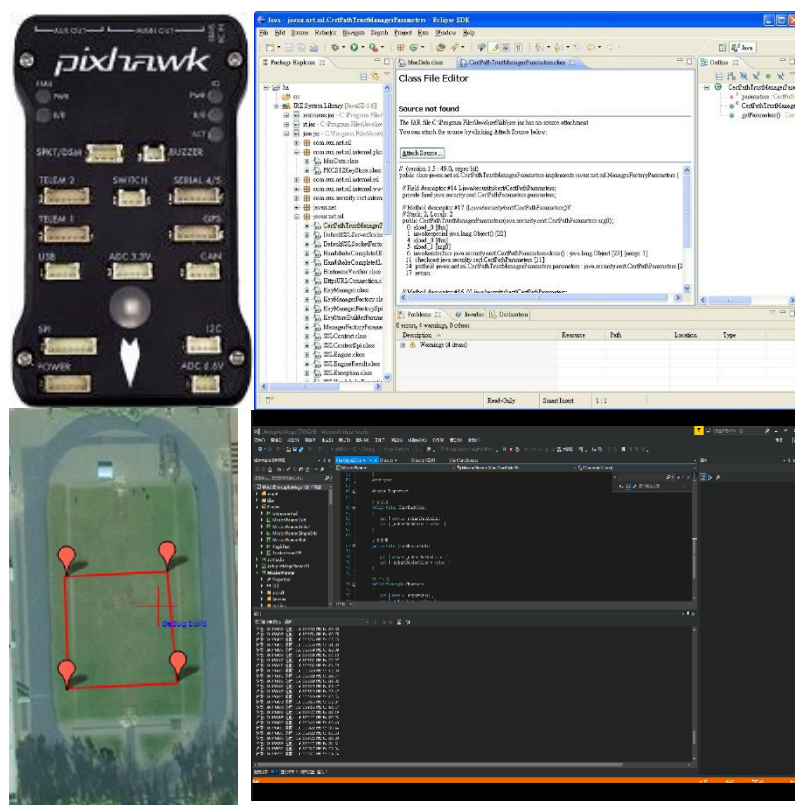


图 2-3

(T<sub>a</sub> = 25℃, V<sub>cc</sub> = 5V)

项目/Items	符号/Symbol	条件/Condition	MIN	TYP	MAX	单位/Unit
检测范围	D	(※1, 2)	0.03	2.5	—	um
检测感度	K	(※1, 2)	0.20	0.35	0.50	V/ (0.1mg/m <sup>3</sup> )
无尘时输出电压	ΔVo	(※1, 2)	0	—	—	V
出电压范围	TXD	高电平/V <sub>cc</sub> =5.0V 低电平/V <sub>cc</sub> =5.0V	4.6 0.3	—	V <sub>cc</sub> 0.8	V
电流	I <sub>cc</sub>	V <sub>cc</sub> =5.0V	—	17	20	mA

※1粉尘浓度是使用了数字粉尘仪（柴田化学器械工业（株）制 P-5L2），测量七星香烟的烟雾的浓度值。

• 检出感度K是关于粉尘浓度0.1mg/m<sup>3</sup>变化时的输出电压变化量所规定的。

图 2-4

## 2.2 地面站软件

本系统的地面站是基于 MissionPlanner 开源软件进行重新编译，植入数据采集，三维成像模块，图 2-5 演示了该地面站基本功能，姿态回传和航迹规划，左侧仪表盘显示的是飞控自带的 MPU6050 三轴加速度计实时回传的数据。当成功搜星并定位时，仪表

盘还会显示当前 GPS 经纬高数据，电子罗盘航向等参数。图 2-6 显示的是通过地面站规划全自主飞行测量航线的功能演示。

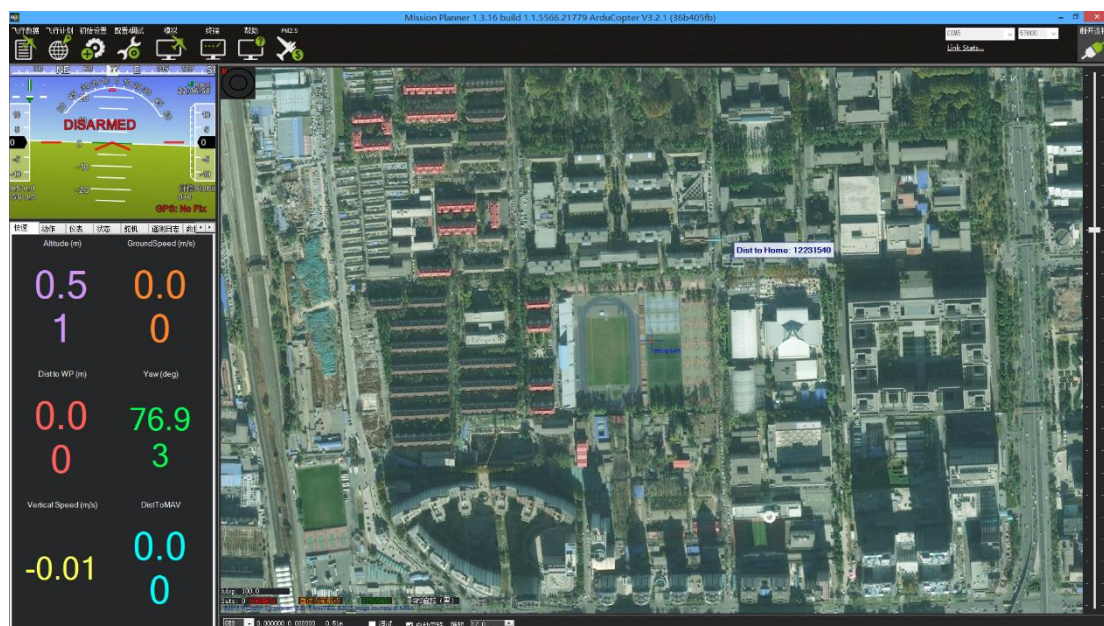


图 2-5

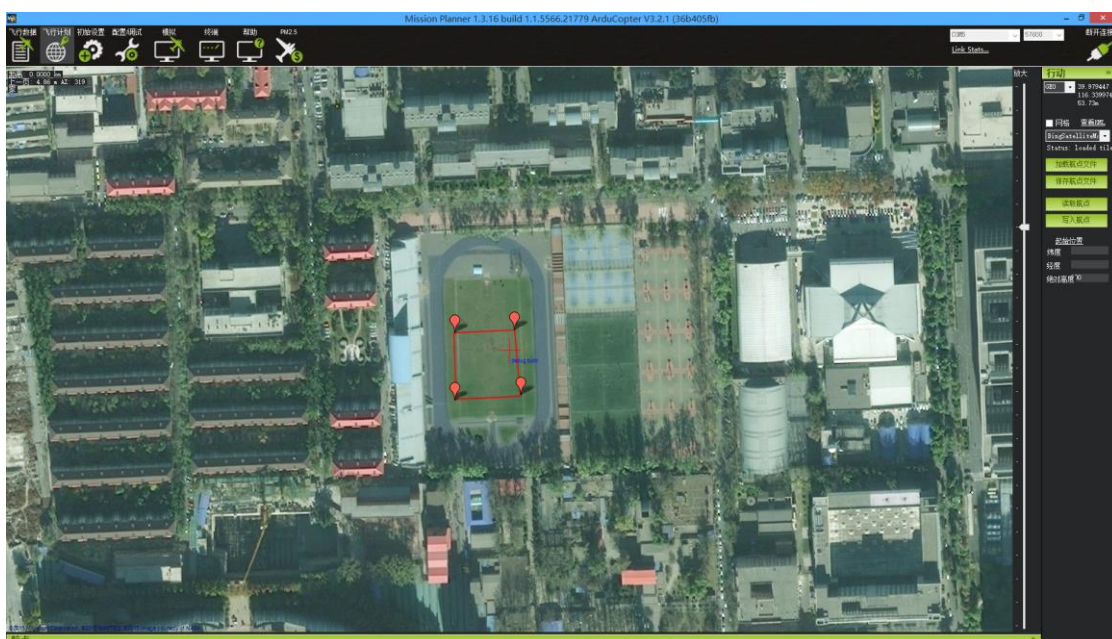


图 2-6

当然，该地面站代码重构部分最多的是数据实时回传后处理的部分，在主菜单的最右边我们增加了一个全新的窗口按钮，点击后转到三维图像成像页面，如图 2-7。首先页面正中央是三维建模的格线图（标度可调），格线图上方有两行参数选项，能分别选择不同的成像对象：X-Y 平面，Y-Z 平面，X-Z 平面；且能选择模型的不同显示方式：平面，马鞍面，柱体。效果如图 2-8,2-9 所示。

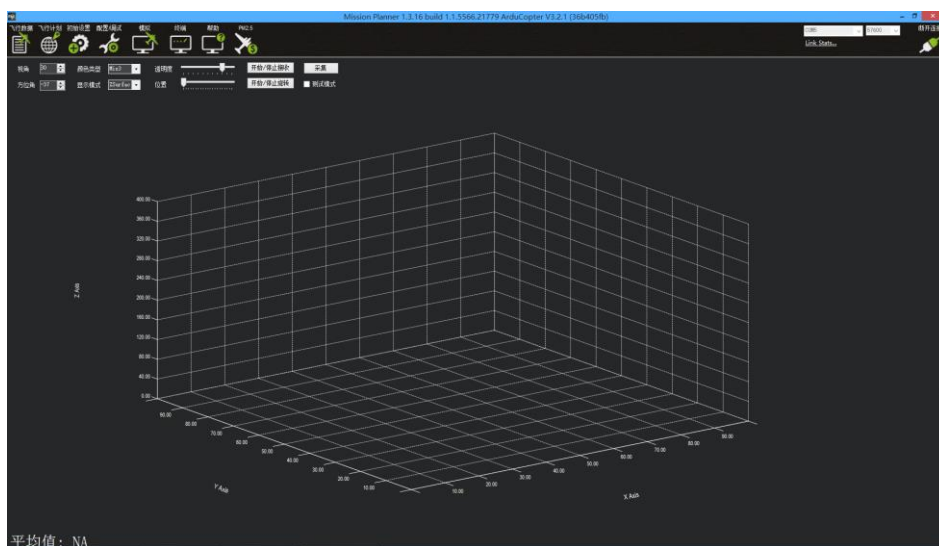


图 2-7

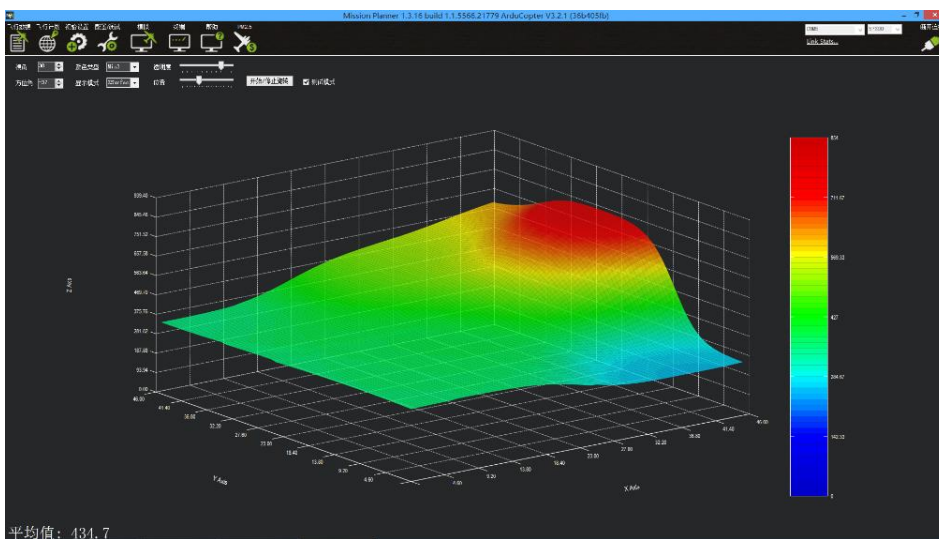


图 2-8

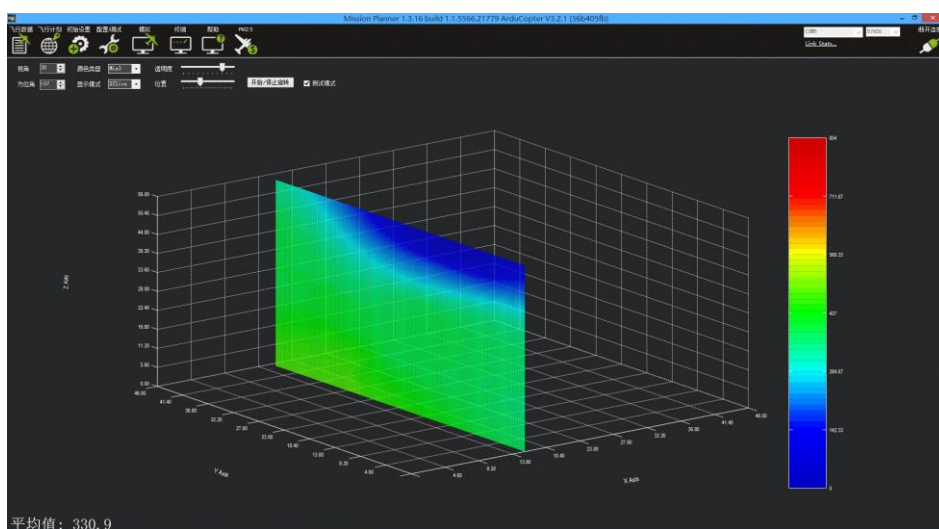


图 2-9

## 2.3 算法简述

### 2.3.1 算法验证

本文提出的四轴测雾霾进行的科学测量是有理论依据和多次实验的数据验证。前文已经叙述了主动测量、不同高度测量雾霾在科学研究与环境保护工作中的重要性，但本文仍然没有对该方法进行科学的验证，利用四轴飞行器进行主动测量并建模这一方法是否科学，将由下文所述。

根据实验分析，螺旋桨的扰动会对传感器周围的气流造成一定程度的影响。通过查找空气动力学方面文献资料，笔者了解到了四轴俯视机身平面的气流分布情况大致如图 2-10 所示。显然，布局在四轴机架中心靠后的位置，受到桨叶的气流扰动和平行机体前进方向的扰流较少。通过考察四轴表面各种电子设备的供电线、信号线排布情况，综合考量将雾霾传感器布置在机体平行前进方向中轴线的最末端，如图 2-2 所示。

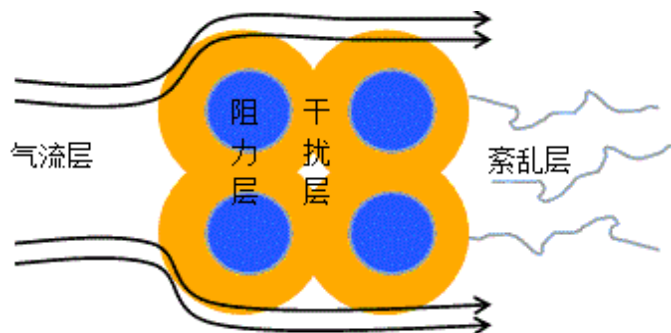


图 2-10

当然，仅有理论分析只能定性的布置传感器在最在最小干扰区域，为了定量分析由于四轴航空器飞行对雾霾产生的干扰，需要通过实验，确定测量值的大致分布与误差情况。显然，影响雾霾测量值最主要的因素有两个：风速，桨转速。因此，我们做了一组验证实验。

实验组：在高度的 20 米高度，当天风力 2 级，油门行程 40%（油门行程影响转速）。测量 100 组数据。图 2-10 中红色散点。

对照组：在同一位置，地面测量 100 组数据。图 2-11 中蓝色散点。

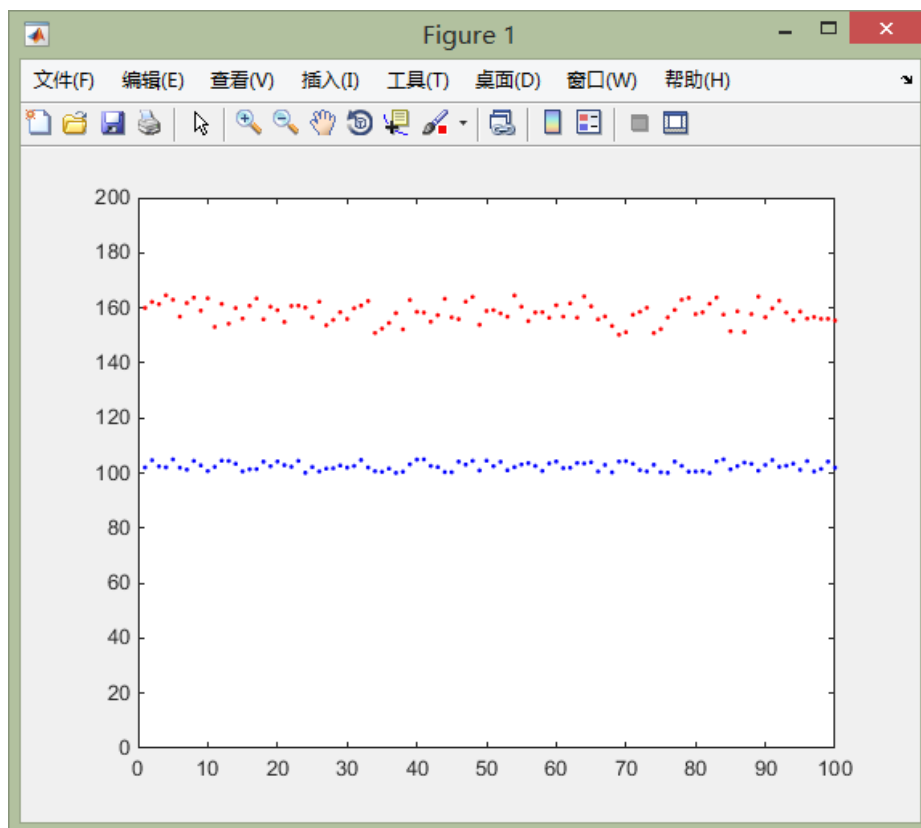


图 2-11

观察数据不难得出，测量值与真值存在着一定的差值，该差值中部分是由于高度不同导致的数值变化，另外一部分则属于由扰动带来的误差。进过多次试验的分析，笔者认为误差主要分为恒定值的系统误差，和一个满足高斯分布的随机误差。通过对图像分析，大致确定了系统误差的大小，不妨以下式在后续的建模过程中对测量值进行修正。

$$\text{测量值} = \text{PM2.5 真值} + \text{螺旋桨扰动（系统误差）} + \text{自然空气扰动（随机误差）}$$

### 2.3.2 高斯投影坐标

在测量中，采集到的原始 GPS 经纬高和 PM2.5 值，如图 2-12 所示。首先将 GPS 经纬度投影到高斯 XY 坐标系，由于平面的 PM2.5 分布可以视为连续分布，而采样点是离散的，因此建模的过程就是从样本估计整体的过程。

高度	纬度	经度	PM2.5浓度
20.03922	39.9789	116.3395	162.4392
20.06555	39.9789	116.3395	161.785
20.01712	39.97889	116.3394	167.4755
20.0706	39.97888	116.3393	174.3962
20.00318	39.97888	116.3393	165.1058
20.02769	39.97888	116.3393	168.779
20.00462	39.97888	116.3393	163.3572
20.00971	39.97888	116.3393	171.269
20.08235	39.97888	116.3393	163.8264
20.06948	39.9789	116.3393	167.5894
20.03171	39.9789	116.3393	170.4862
20.09502	39.9789	116.3393	173.3635
20.00344	39.97891	116.3393	174.3894

图 2-12

高斯坐标是将 GPS 坐标通过高斯投影方法将地球表面坐标(椭球面)转换到平面上,该方法又名“等角横切圆柱投影方法”。该投影按照投影带中央子午线投影为直线且长度不变和赤道投影为直线的条件,确定函数的形式。取中央子午线与赤道交点的投影为原点,中央子午线的投影为纵坐标  $x$  轴,赤道的投影为横坐标  $y$  轴,构成高斯克吕格平面直角坐标系。高斯-克吕格投影在长度和面积上变形很小,中央经线无变形,自中央经线向投影带边缘,变形逐渐增加,变形最大之处在投影带内赤道的两端。按一定经差将地球椭球面划分成若干投影带,这是高斯投影中限制长度变形的最有效方法。在本系统中使用经差 3 度,即所谓三度带划分。坐标变换之后的一组数据,在 Matlab 中以散点显示如图 2-13。

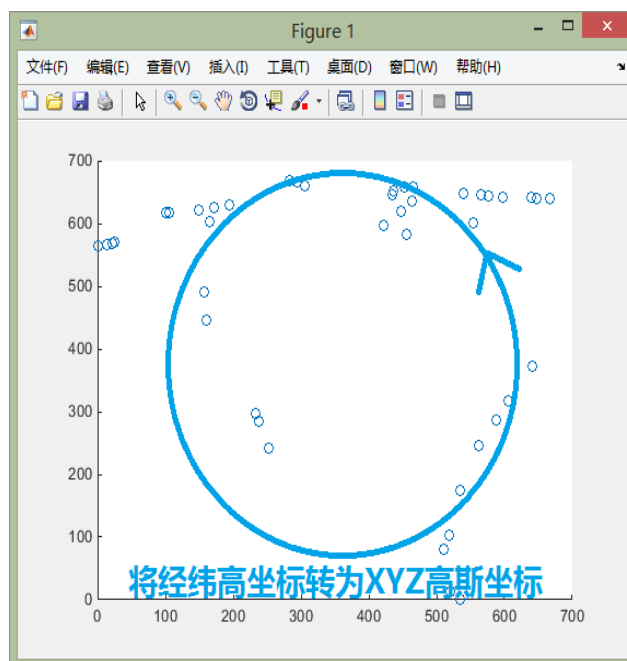


图 2-13

### 2.3.3 权值估计法

我们的测量作业过程分为实时和非实时两种，非实时作业是先对数据进行采集，而后进行数据处理和模型绘制，实时作业是两个过程同时完成，但受限于现有计算机配置，其实时作业的处理速度较低。但无论是何种作业方式，其数据处理的本质是相同的。

在非实时测量中，首先，对采集到的所有数据进行三维曲线拟合，发现数据分布大致呈高斯分布；将测量区域进行了分块处理，简要示意图如图 2-14 所示，对每个区块的采样点数据进行了数据分析，发现数据分布也大致服从高斯分布。再根据每个区块内采样点的位置和数据大小，通过权值平均法算出每个区块的权值中心，再通过高斯分析预测法利用权值中心的位置和数据值来填充这个区块中的离散空点，逼近连续的平面。

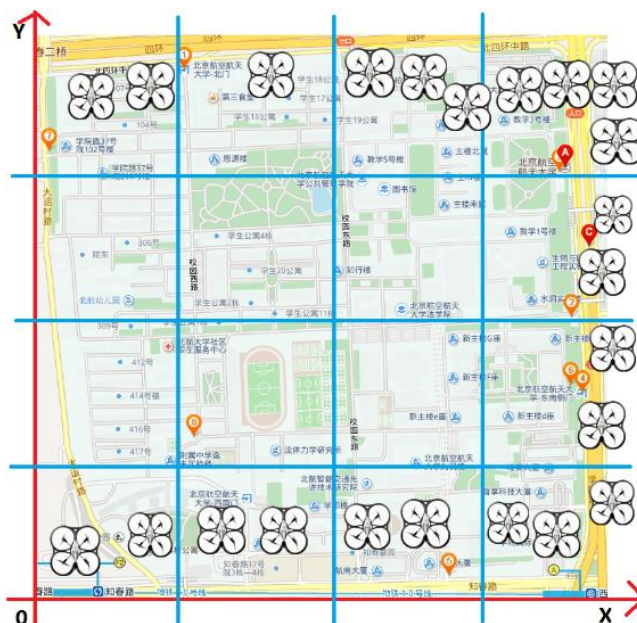


图 2-14

最后通过每个区块的数据分布，就能得到整个区域的数据分布，对区块与区块重合的空点集合，我们采用了多点高斯分析法通过多个权值中心之间的位置关系来填充该点的值，从而提高数据的可靠性。对于区块未覆盖区域，我们利用整体均值的高斯分析法来填充该点的空值，保证数据的连续性。通过不断填充空值，直到区域内的点集全都有定义，就得到了整个区域的大致 PM2.5 分布图像，某一高度下 X-Y 平面的成像结果如图 2-15 所示。通过颜色表征区域 PM2.5 浓度值。

上述从离散采样点估计连续平面的方法即为反距离加权插值，也可以称为距离倒数乘方法。距离倒数乘方格网化方法是一个加权平均插值法，可以进行确切的或者圆滑的方式插值。方次参数控制着权系数如何随着离开一个格网结点距离的增加而下降。对于

一个较大的方次，较近的数据点被给定一个较高的权重份额，对于一个较小的方次，权重比较均匀地分配给各数据点。

计算一个格网结点时给予一个特定数据点的权值与指定方次的从结点到观测点的该结点被赋予距离倒数成比例。当计算一个格网结点时，配给的权重是一个分数，所有权重的总和等于 1.0。当一个观测点与一个格网结点重合时，该观测点被给予一个实际为 1.0 的权重，所有其它观测点被给予一个几乎为 0.0 的权重。换言之，该结点被赋给与观测点一致的值。这就是一个准确插值。

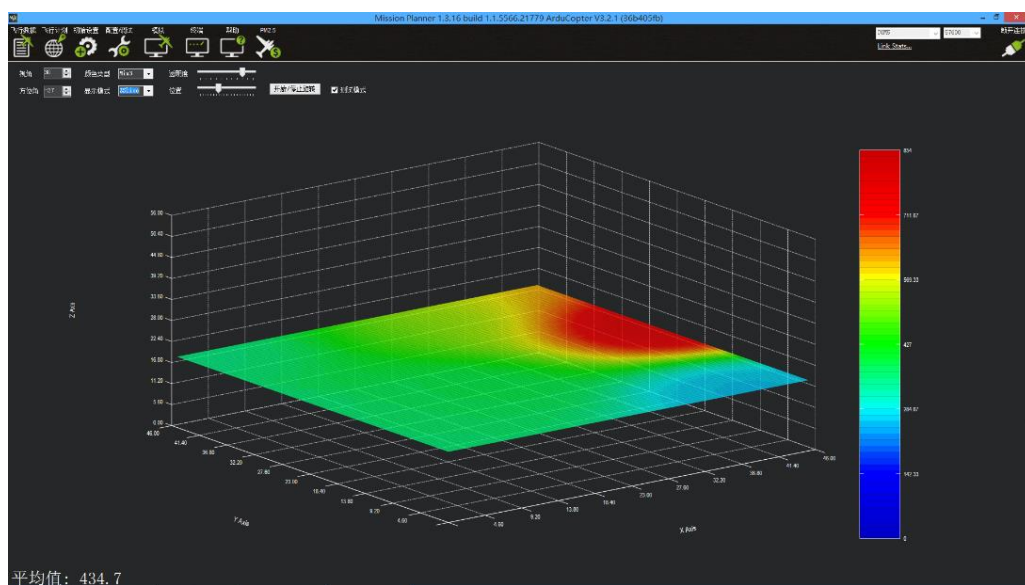


图 2-15

## 结论

如图 3-1 是四轴在北航操场 20 米高空的实验航拍视频，右下方小窗内为实时传送回的数据控制台。如图 3-2 所示为北航操场 20 米高度的雾霾分布情况，可以见到北航操场上空没有显而易见的污染源，空气质量较好。

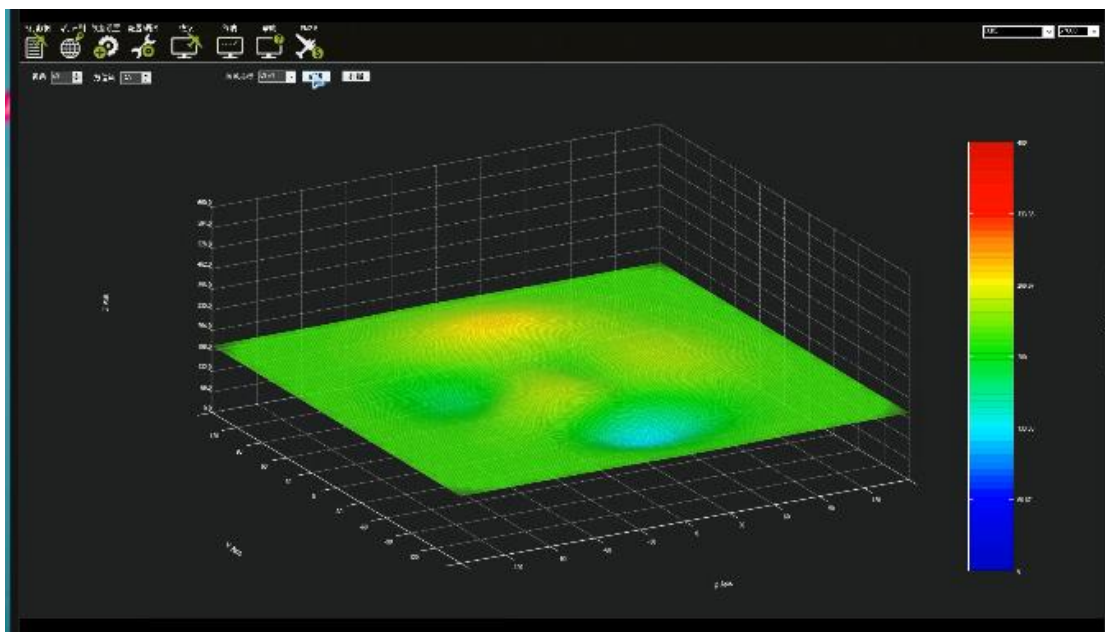


图 3-1

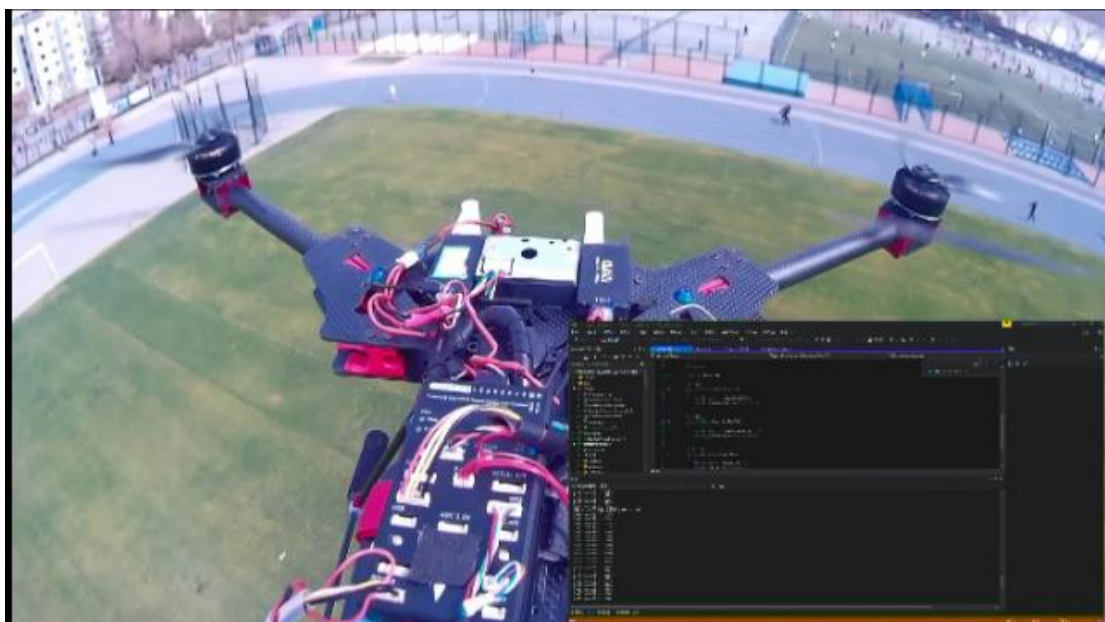


图 3-2

显然，在如果该特定区域存在污染源时，可以通过该解决方案替换现有的大气污染物溯源方法，适用于环保部门对违规环保企业的调查取证，因条件所限，在这里以模拟

实验所示，如图 3-3 所示，图中标度可见红色部分污染即为严重，可视区域内；可以对污染源进行精确定位和溯源，同时结合当地天气情况，可以对污染物扩散情况进行分析。根据红色区域的形状，可以分析其扩散的方向；根据颜色渐变的情况，可以分析其扩散的时间。大气活动与污染物的扩散与分布密不可分，因此大规模采用四轴航空器测量雾霾将对气象学环保学的研究提供丰富的数据来源。同时，通过对污染物分布情况的了解，能更加科学的规划城市道路与建筑，规划更有利于污染物扩散的城市架构，将城市道路规划成更有利于因机动车尾气造成污染的扩散，这是未来智慧城市的重要发展方向之一。系统实时采集并建模如图 3-4 所示。

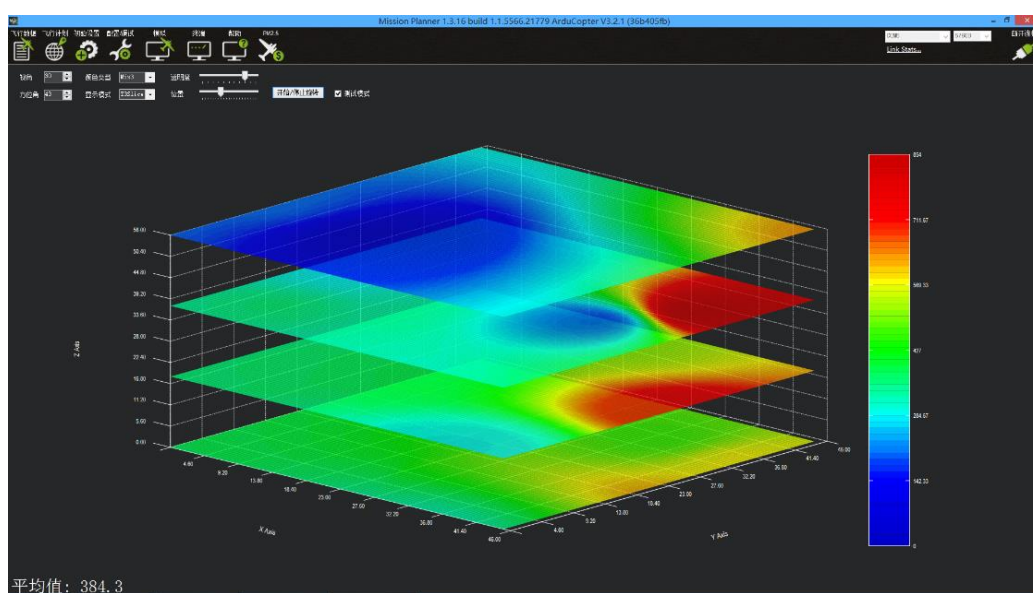


图 3-3

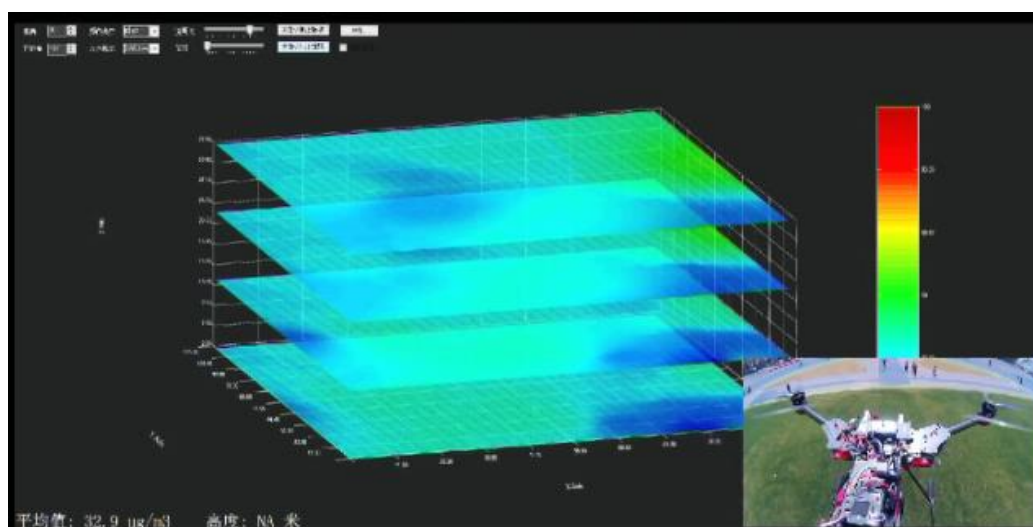


图 3-4

## 参考文献

- [1] 内格尔（Nagel.C）C#高级编程[美].北京：清华大学出版社,2008 年.
- [2] 邓兴升 椭球变换后的高斯投影正反算算法. 大地测量与地球动力学, 2010 年,2 期