

第九届“华为杯”全国研究生数学建模竞赛



题 目 基于卫星云图的风矢场度量模型与自适应算法

摘 要：

针对第一问，首先构建三维地球坐标系和二维帧平面坐标，其中前者描述了探测点的经纬度或三维坐标，后者又描述了灰度矩阵元素的行列号；其次，根据星下点在灰度矩阵中的行列号和经纬度进行校准，建立帧平面到经纬度转换模型和经纬度到帧平面转换模型，其中前者的建模流程为：灰度矩阵元素行列号→帧平面像点两个方向的扫描角→探测点的直角坐标→探测点的经纬度，后者为前者的逆过程，最终完成卫星视场的坐标变换。本算例求得的纬度和经度分别为： $(32.74^\circ \text{ N}, 46.49^\circ \text{ E})$ 、 $(32.74^\circ \text{ N}, 46.57^\circ \text{ E})$ 、 $(32.73^\circ \text{ N}, 46.65^\circ \text{ E})$ 。

针对第二问，首先对于任意给定探测点，基于经纬度到帧平面转换模型以及最优近似修正，实现目标云定位；其次在搜索范围内，采用最大交叉相关系数选择最优匹配面；然后将匹配云中心的行列号转换为经纬度；在此基础上，基于目标云和匹配云的经纬度估计风矢方向和速度，最终建立风矢固定尺度度量模型，进而度量风矢场。本算例的非零风矢为 524281 个；前后两次测量风矢的相对偏差与云窗口参数和搜索窗口成正比。

针对第三问，基于目标云和匹配云的最大交叉相关系数与设定阈值比较，权衡效率和精度两方面考虑，设计搜索方向调整和搜索窗口实时变尺度的自适应算法。算例验证了算法的正确性和有效性。

针对第四问，基于第 1 问和 2 问的结果，同时对温度和压强进行分段线性插值，给出非零风矢的等压面。

模型改进部分，本文提出精细化建模和数据来源多样化两种思路。

关键词：卫星视场；卫星云图；风矢；坐标变换；自适应

目 录

绪 论	- 1 -
0.1 问题背景	- 1 -
0.2 概念界定	- 2 -
0.3 本文建模假设	- 3 -
0.4 主要变量说明	- 3 -
0.5 技术路线图	- 5 -
第 1 章 卫星视场坐标变换模型	- 6 -
1.1 问题分析	- 6 -
1.1.1 问题描述	- 6 -
1.1.2 坐标系构建	- 6 -
1.2 帧平面到经纬度转换模型	- 7 -
1.2.1 转换模型	- 7 -
1.2.2 模型求解	- 9 -
1.3 经纬度到帧平面转换模型	- 9 -
1.3.1 转换模型	- 9 -
1.3.2 模型求解	- 10 -
1.4 本章小结	- 12 -
第 2 章 风矢场固定尺度度量模型	- 13 -
2.1 问题分析	- 13 -
2.2 目标云定位	- 13 -
2.3 匹配云定位	- 14 -
2.4 风矢量度量模型	- 15 -
2.5 模型求解	- 16 -
2.5.1 参数灵敏度	- 16 -
2.5.2 计算结果	- 18 -
2.6 本章小结	- 18 -
第 3 章 风矢场自适应度量模型	- 19 -
3.1 自适应变化风矢场算法	- 19 -
3.2 方法对比及建议	- 21 -
3.3 本章小结	- 21 -
第 4 章 风矢场等压面模型	- 22 -
4.1 问题分析	- 22 -
4.2 等压面的确定	- 22 -
第 5 章 模型改进	- 24 -
参考文献	- 25 -

绪 论

0.1 问题背景

卫星云图在掌握大气环流、中长期天气预报以及灾害性天气学的研究中有重要作用。它由地球同步卫星上的红外探测仪探测地球上空的温度数据再转换成灰度数据制作而成。附件中定标数据文件 `k_temp.txt` 给出了灰度数据与温度数据的转换关系, `k_temp.txt` 内有 1024 个实型数, 依次是图象灰度数据为 0 到 1023 所对应的 K 氏温度值, 灰度值为 -1 时对应的是地球以外的探测点。红外探测仪扫描采样时, 按步进角(南北方向)和行扫描角(东西方向)均为 140 微弧采样。在卫星与地球中心的连线 and 地球表面的交点(称为星下点)处的分辨率大约是 5 公里。本题提供的卫星探测数据文件都是 2288×2288 的灰度值矩阵, 矩阵的每个元素都对应地球上或地球外的一个探测点(或称采样点)。同步卫星离地球中心的高度为 42164000 米, 星下点在东经 86.5 度, 北纬 0 度, 星下点对应的矩阵元素位于矩阵的第 1145 行和第 1145 列相交处。

为解答本题, 首先要确定灰度矩阵中每个元素对应的采样点在地球上的经纬度。地球可视为理想椭圆, 可由地球的一个经过南北极的椭圆截面绕南北极的连线旋转而得到, 椭圆截面的长半轴(赤道半径) = 6378136.5m, 短半轴(极半径) = 6356751.8m; 据此就可以将灰度矩阵中非负元素的行列号按上北下南、左西右东的地图规则换算成地球上经纬度坐标, 此结果既可用于估算各探测点之间的距离, 还可用于在云图上依据海岸线经纬度坐标标出海岸线以方便看图。

观测大气环流情况的一个方法是在卫星云图上标出风矢。风矢的大小和方向由云块移动的速度决定。风矢与风的速度有所不同, 如某个台风中一些区域的风速可达每秒五、六十米, 而台风(看作云块)中心的移动速度可能仅每小时十多公里。没有云或云块不稳定处的风矢规定为零风矢, 这种用云块的移动所定义的风矢被称为云迹风。气象部门已经有一些方法根据变化的卫星云图计算云迹风, 这类方法称为云导风方法。计算云迹风时通常将云块大小限定为 16×16 个像素, 搜索范围限定为 64×64 个像素。

本题的主要目的是希望大家充分利用卫星图像数据及其特点建立尽可能准确地描述实际风矢场的度量模型和算法。

题目提供了我国风云 2 号卫星获得的三个灰度矩阵, `IR1_2030.mat`, `IR1_2100.mat`, `IR1_2130.mat`, 分别表示某天的 20:30, 21:00, 21:30 时刻红外探测仪探测到的地球上空的温度数据对应的灰度值。又给出了海岸线经纬度坐标数据文件 `coastline0.txt`, 文件的第 1 列为经度(东经), 第 2 列是纬度(北纬), 每一行 2 个数据对应海岸线上一点, 而特大数据(99999.99, 99999.99)表示前一曲线已结束, 将要开始下一曲线。

具体要求解决如下问题:

(1) 换算视场坐标。给出灰度矩阵元素行列号对应于经纬度坐标的换算公式, 建立矩阵形式的经纬度坐标文本文件, 这里矩阵的第 i 行与第 j 列, 分别对应灰度矩阵的 $450+i$ 行与 $450+j$ 列, 矩阵元素是(经度, 纬度)这种形式的二维数组, 给出结果的范围为: 灰度矩阵中的第 451 行至 550 行, 第 451 列至 550 列, 文本文件取名为 `jwd.txt`; 而在论文中给出第 500 行和第 500、501、502 列三个交叉点处对应的经纬度。进而将卫星灰度矩阵 `IR1_2100.mat` 转化为卫星云图(参考附录中的卫星云图), 并在这个卫星云图上添加海岸线。

(2) 根据三个相邻时刻的卫星数据 (`IR1_2030.mat`, `IR1_2100.mat`,

IR1_2130.mat), 用适当的方法建立 21:00 时刻风矢场的度量模型, 给出计算方案, 这里限定风矢计算中像素块匹配所选用的窗口大小为 16×16 个像素, 搜索范围限定为 64×64 个像素。

利用所给的方法计算 21:00 时刻在各个 (整数) 经纬度处的二维风矢。确定一个二维风矢需要 4 个指标: 起始点的纬度、经度, 风矢的方向 (单位: 从正北方顺时针方向量得的角度) 和大小 (单位: 米/秒)。计算范围为: 南纬 40 度至北纬 40 度, 东经 46 度至 126 度。

在论文中给出上面计算结果中全部非零风矢的个数, 并给出在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58 (度) 处的风矢。

给出对上述窗口大小和搜索范围的限定的理解或评价。

(3) 为了提高像素块匹配质量, 取消问题 2 中窗口大小和搜索范围的限定, 利用图像特征匹配等思想, 设计能自适应地确定窗口大小和搜索范围的有效方法。进而建立风矢场的度量模型和算法。

利用此模型和算法计算问题 2 中在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58 (度) 处的风矢。

分析比较建立的这两种风矢计算方法的优劣, 结论要有定量数据支撑。提出关于云图数据量和云导风风矢场计算研究的建议。

(4) 应用附件中全球温度数值预报文件 temp3.mat 计算问题 2 中非零风矢所在的等压面 (用该时刻该处大气的压强值标志, 物理单位为毫巴)。并在论文中给出在纬度 26 度, 经度分别是 52, 53, 54, 57, 58 (度) 处附近求出的风矢量所在的等压面。

0.2 概念界定

为了后文叙述的方便, 本节将其涉及的概念集中进行说明。

- (1) 星下点: 地球同步卫星与地球中心连线和地球表面的交点, 即向地心的投影点。由于地球同步卫星的运动轨迹和地球具有同步特性, 故该点位于赤道平面上。
- (2) 步进角: 地球同步卫星在南北方向上的扫描角。
- (3) 行扫描角: 地球同步卫星在南北方向上的扫描角。
- (4) 静态探测: 地球同步卫星专门针对地球上某特定位置进行探测, 即扫描角度不会变化。
- (5) 探测点: 也称采样点, 为地球表面上的点。由于地球同步卫星离散采样, 实际探测到的点与步进角和行扫描角有关; 此外, 还与初始探测点的位置有关。
- (6) 帧平面: 为一个虚拟的二维平面, 其引入是为了满足描述探测的扫描角度的需要。显然这样的平面有无穷个。在后文建模 (建立坐标系) 时, 进行了特别的规定。
- (7) 像点: 连接卫星和探测点的直线与帧平面的交点。对于特定的帧平面, 每个探测点的像点唯一确定。
- (8) 灰度: 介于 0 与 1023 之间的数。引入的目的, 是为了区分不同属性的点。在本文中, 灰度由探测点的温度换算而得, 如果温度越低, 则灰度越小。在后文画卫星云图时, 又将该数据进行了处理, 转化到 0 到 1 之间。
- (9) 灰度矩阵: 为一个二维矩阵, 其元素为对应像点的灰度。这种对应关

系体现在，元素的行列序号对应像点在帧平面的位置。

- (10) 卫星云图：一个二维平面，为灰度矩阵的图形化表示。
- (11) 风矢：一个二维矢量，起点为当前云团的位置（由经纬度进行描述）；方向为云团整体的移动方向（以正北方顺时针方向计算）；数值的大小为风速，反应了单位时间移动的距离。
- (12) 零风矢：为一个零向量，指没有云或云块不稳定处的风矢。
- (13) 风矢场：一定区域内所有风矢构成的集合。
- (14) 云迹风：用云块的移动所定义的风矢。
- (15) 云块：在帧平面中，灰度矩阵呈正方形分布的像点区域，根据其对称性，可以其几何中心进行刻画。
- (16) 目标云块：也简称目标云，特指需要匹配的云块，具体的，本文指 21:00 时刻的云块。
- (17) 匹配云：相对于目标云而言的一个概念，本文指 20:30 和 21:00 两个时刻的云块。
- (18) 云窗口：目标云或者匹配云在帧平面像分布的正方形边长，如第 2 章取值为 16。
- (19) 搜索窗口：匹配云可能分布的正方形区域的边长，如第 2 章取值为 64。

0.3 本文建模假设

为了便于建模，首先将各个问题中的假设先归纳在此，以便随时参考。

- (1) 温度来源假设。地球是被探测温度的唯一来源。
- (2) 地球形状假设。地球被视为理想椭球，可由地球经过南北极的椭圆截面绕南北极旋转而得到。
- (3) 卫星扫描方向为从北向南、从西向东。
- (4) 风矢特征假设：对于某特定区域的风（如果有的话），在较短时间内保持方向和风力不变，即为匀速直线运动。
- (5) 云团移动关系假设：忽略云团内部的变化。对于某特定区域的云（如果有的话），在较短时间内，移动的方向与风矢相同、移动距离与风力匹配。
- (6) 探测温度与地面温度关系假设。没有云层的地方，相应的探测温度为地球表面温度；在有云层的地方，探测温度相对较低。
- (7) 云团温度分布假设。如果有云的话，将观测到的温度可看成云层所在区域的温度；云层海拔越高或者厚度越厚，温度就越低。

在上述假设中，前三条是全文的基础假设，对问题的边界进行了限定；假设（4）和（5）简化风和云移动规律，不同时间不同区域的风的变化特点是不相同的，但是二者同步变动；假设（6）是第 2 个问题进行云团识别的机理；假设（7）主要应用于第 4 个问题计算风矢的等压面。

0.4 主要变量说明

为了便于全本建模，将各个问题涉及参数和变量的符号和意义归纳在此。主要包括四个方面，其一是地球物理参数、卫星扫描参数，如表 1 所示；其二是星下点的参数，如表 2 所示；其三是探测点的相关变量，如表 3 所示；其四是风矢的相关变量，如表 4 所示。

表 1 物理参数的符号及意义

符号	意义
O	地球的几何中心，简称为地心
S	地球同步卫星的几何中心
h	卫星距离地心的距离，本文取为 42164000 米
a	地球的长半轴长，本文取为 6378136.5 米
b	地球的短半轴长，本文取为 6356751.8 米
p	步进角，本文取为 140 微弧
q	行扫描角，本文取为 140 微弧
N	灰度矩阵（方阵）的阶数，本文取为 2288
Δt	卫星静态探测的时间间隔，本文取为 0.5 小时

表 2 星下点的参数符号及意义

符号	意义
O_E	星下点
O_F	星下点在帧平面的像
lat^*	星下点的纬度，本文取为北纬 0 度
$long^*$	星下点的经度，本文取为东经 86.5 度
i_0	星下点在灰度矩阵中的行号
j_0	星下点在灰度矩阵中的列号

表 3 探测点的变量符号及意义

符号	意义
lat	探测点的纬度，其中 $0 \leq lat \leq 90^0$ ，为北纬度数； $-90^0 \leq lat \leq 0$ ，数值为南纬度数
$long$	探测点的经度，其中 $0 \leq long \leq 180^0$ ，为东经度数； $-180^0 \leq long \leq 0$ ，数值为西经度数；
i	探测点在灰度矩阵的行号，其中 $1 \leq i \leq N$
j	探测点在灰度矩阵的列号，其中 $1 \leq j \leq N$
α	以星下点为参照，探测点在南北方向扫描的角度
β	以星下点为参照，探测点在东西方向扫描的角度

表 4 风矢相关的变量符号及意义

符号	意义
N_0	云窗口
$2r$	匹配云的搜索窗口，其中 $N_0 < 2r$
x_0	目标云在灰度矩阵中的行号，其中 $1 \leq x_0 \leq N$
y_0	目标云在灰度矩阵中的列号，其中 $1 \leq y_0 \leq N$
x_w	匹配云在灰度矩阵中的行号，其中 $1 \leq x_w \leq N$
y_w	匹配云在灰度矩阵中的列号，其中 $1 \leq y_w \leq N$

θ_w	风矢的方向
F_w	风矢的速度

0.5 技术路线图

本文技术路线图如下所示：

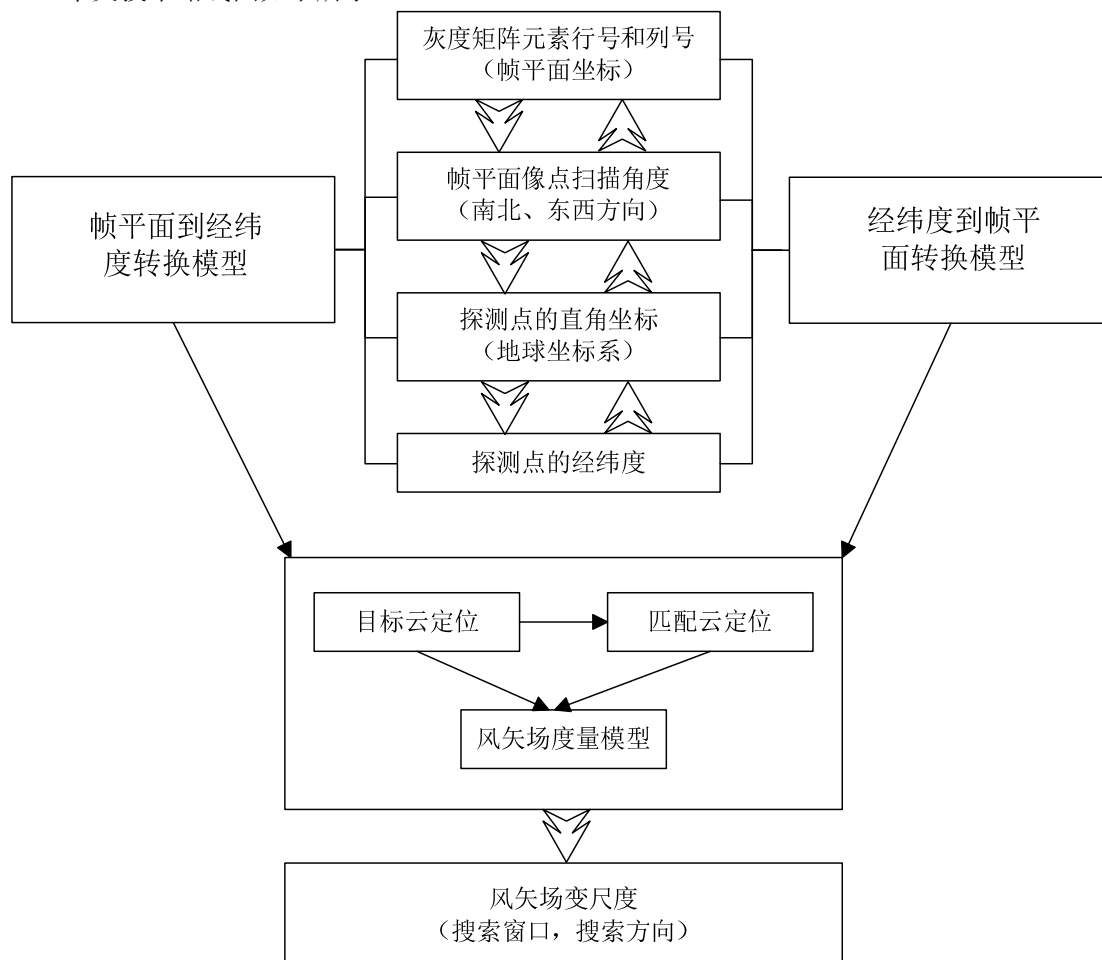


图 1 技术路线图

第 1 章 卫星视场坐标变换模型

1.1 问题分析

1.1.1 问题描述

卫星云图在掌握大气环流、中长期天气预报以及灾害性天气学的研究中有重要作用^[1]。地球上空的区域不同，温度也有所差异，而卫星云图能够体现这种规律特点，其绘制需要同时具备以下硬件和软件条件：

(1) 硬件上的数据。显然，地球上空的温度分布是输入数据，可以通过地球同步卫星上的红外探测得到。

(2) 软件上的转换方法。这又细分两个方面：其一是，是灰度信息，可由温度数据转换；其二是，卫星云图上的点与地球空间中的探测点的对应关系。

显然，对应关系在以上因素中具有非常重要的地位。这也正是本问题需要解决的问题。

卫星云图是二维平面，其上点的位置信息，直接来源于灰度矩阵元素的行列序号。而地球空间是三维空间，其上探测点的位置关系，可以通过经纬度进行刻画，如果要画等压面还需要考虑海拔因素（如本文的第四个问题）。

因此，两种点的对应关系，也即是，灰度矩阵的行列序号和探测点的经纬度之间转换规则，包括以下两个互逆的问题：

(1) 灰度矩阵行列序号到经纬度转换；

(2) 经纬度到灰度矩阵行列序号转换。

两种转换过程都需要经纬度和灰度矩阵行列号。显然，经纬度与地球的三维坐标有关，而灰度矩阵的行列号，相当于是平面坐标。因此，转换实质是坐标变换。本文第 2.2 节和 2.3 节分别针对这两个问题进行建模和求解。由于坐标系的构建是这两种变换的基础，下面专门对其进行介绍。

1.1.2 坐标系构建

地球坐标系 O-XYZ：其中，坐标原点为地心；Y 轴为地心到卫星的方向；X 轴为在赤道平面上且与 Y 轴垂直；Z 轴与 X 轴和 Y 轴都垂直，满足右手定则，即 $Z=X \times Y$ 。

帧平面 IJ：过星下点 O_E 且垂直于地球坐标系的 X 轴的平面。在该平面中，星下点的坐标为 (i_0, j_0) ，I 轴的正方向对应卫星自北向南的扫描方向，J 轴的正方向又对应了自西向东的扫描方向。

地理上的直角坐标和帧平面坐标间的对应关系，如下图 2 所示。

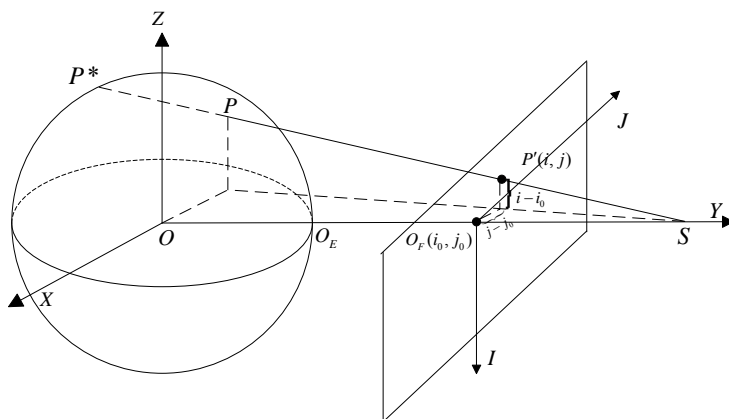


图 2 地球坐标和帧平面坐标的对应关系

上图中，点 P' 为探测点 P 的像，对应帧平面的坐标为 (i, j) ；点 O_F 为星下点 O_E 的像，对应帧平面的坐标为 (i_0, j_0) 。 S 、 P' 和 P 三点，以及 S 、 O_F 和 O_E 三点分别都满足共线。变动探测点，像点会随之移动。二者的联动变化，始终满足与卫星共线。基于这种特性，同时结合解析几何知识^[4]，推导二者之间的转换关系。

根据本文假设 (2)，地球为理想椭球体，故地球表面在地球坐标系 $O-XYZ$ 下的解析式为：

$$\Omega: \frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

将灰度矩阵第 i 行第 j 列元素对应上地球上点，记为 P ，且在地球坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标记为 (X, Y, Z) 。

根据空间解析几何知识有，过 S 和 P 两点的直线方程，相当于是地球坐标系 $O-XYZ$ 中以下两个平面的交线：

$$\Gamma: \begin{cases} Z = (Y - h) \tan \alpha \\ X = -(Y - h) \tan \beta \end{cases} \quad (2)$$

其中， α 和 β 分别为卫星在南北方向和东西方向分别旋转的角度，如图 2 所示。

根据假设 (5)，卫星由北向南扫描，帧平面的行号增加，反之减少；由西向东扫描，帧平面的列号增加，反之减少。因此，这两个旋转角满足关系：

$$\begin{cases} \alpha = (i - i_0) \times p \\ \beta = (j - j_0) \times q \end{cases} \quad (3)$$

1.2 帧平面到经纬度转换模型

1.2.1 转换模型

本小节解决的任务是，对于灰度矩阵中的任意元素（帧平面上的像点）的行列号，计算相应地球上扫描点的经纬度。

将式 (2) 代入式 (1)，可以整理为如下关于 Y 的一元二次方程：

$$AY^2 + BY + C = 0 \quad (4)$$

其中三个系数分别为

$$\begin{cases} A = \frac{1}{a^2} + \frac{\tan^2 \beta}{a^2} + \frac{\tan^2 \alpha}{b^2} \\ B = -2 \frac{\tan^2 \beta}{a^2} h - 2 \frac{\tan^2 \alpha}{b^2} h \\ C = \frac{\tan^2 \beta}{a^2} h^2 + \frac{\tan^2 \alpha}{b^2} h^2 - 1 \end{cases} \quad (5)$$

另外，扫描点 P 属于直线 Γ 和曲面 Ω 的交点。由图 2 可知，这样的交点有两个，其中一个位于 $Y \geq 0$ 的区域内（如图 2 中的 P ），另一个位于 $Y < 0$ 的区域内（如图 2 中的 P^* ）。根据采样点的物理意义，以及本文坐标系建立规则，应选择 Y 坐标大于 0。即有

$$Y = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (2)，即可求出 X 坐标和 Z 坐标。

在三维坐标系下，经纬度的物理含义^[2]如下图 3 所示。为了更加形象地描述经纬度和三维坐标的关系，分别作 XOZ 平面和 XOY 平面投影，如下图 4 所示。

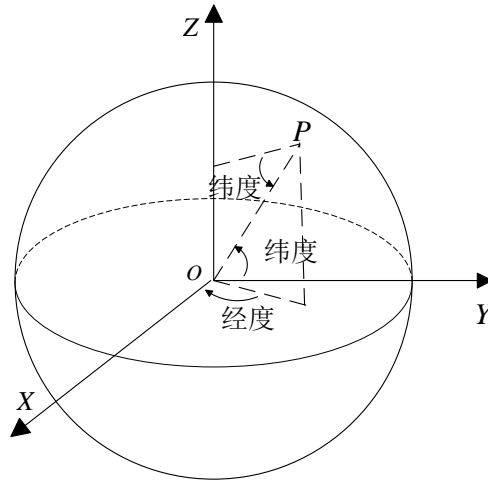


图3 三维坐标系下探测点经纬度示意图

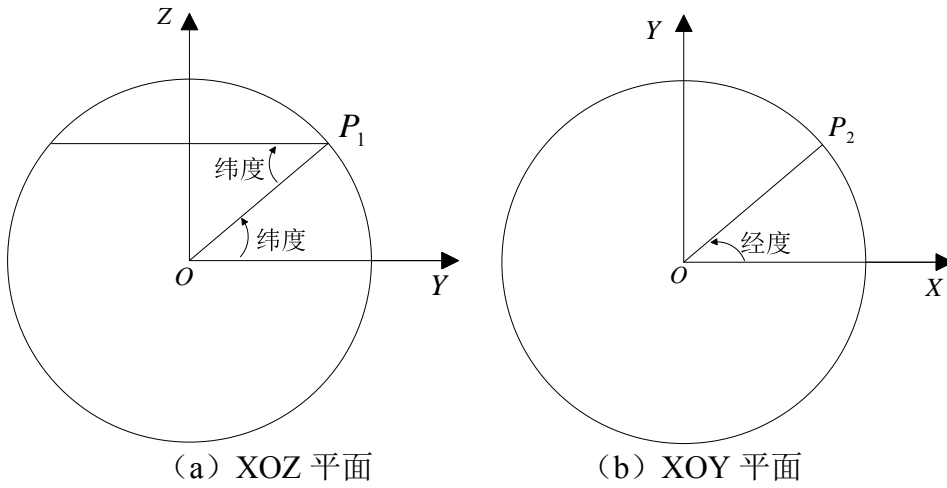


图4 二维坐标系下探测点经纬度示意图

在上图 4 中，点 P_1 为探测点 P 在 XOZ 面的投影，点 P_2 为探测点 P 在 XOY 面的投影。因此，得到帧平面到经纬度的换算模型：

$$\begin{cases} long = \arctan \frac{X}{Y} + long^* \\ lat = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + lat^* \end{cases} \quad (7)$$

以上公式存在一些中间变量，具体计算涉及式 (2)、(3)、(5) 和 (6) 四个式子。

综上所述，灰度矩阵元素行列号对应经纬度的换算，涉及帧平面坐标(二维)和地球的直角坐标(三维)，二者借助两个扫描角度(南北方向和东西方向)关联和过渡。两个坐标系转化过程如下图 5 所示。

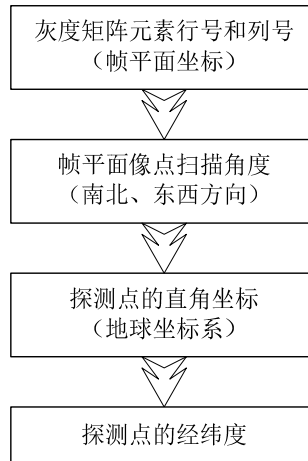


图 5 帧平面到经纬度转换流程

1.2.2 模型求解

给定灰度矩阵元素行列号，即已知帧平面像点的位置，最终由式（7）可以求得相应探测点的经纬度。

灰度矩阵中的第 451 行至 550 行，第 451 列至 550 列，共计 100×100 个元素的经纬度，经 MATLAB 编程，计算结果详见另给文件 jwd.txt。其中，矩阵（500,500），（500,501）和（500,502）三个元素的经纬度，如下表所示。

表 5 灰度坐标下的经纬度

灰度坐标	经度（单位：度）	纬度（单位：度）
（500,500）	46.4851427976137	32.7404592934558
（500,501）	46.5695660960079	32.7353074185807
（500,502）	46.6538174766810	32.7301748212274

注：表中经度符号为正，表示为东经，否则数值为西经度数；表中纬度符号为正，表示为北纬，否则数值为南纬度数。

1.3 经纬度到帧平面转换模型

1.3.1 转换模型

本小节解决的任务是，对于任意的探测点，计算在灰度矩阵相应元素的位置。等价地也即是说，灰度矩阵哪个位置上的元素，满足相应的探测点为给定的经纬度。显然，该问题为 2.2 节转换模型的逆问题。

首先，由式（7）有，三维坐标和经纬度之间，满足关系

$$\begin{cases} \frac{X}{Y} = \tan(\text{long} - \text{long}^*) \\ \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = \tan(\text{lat} - \text{lat}^*) \end{cases} \quad (8)$$

即有

$$\begin{cases} X = Y \tan(\text{long} - \text{long}^*) \\ Z = Y \sqrt{1 + \tan^2(\text{long} - \text{long}^*)} \tan(\text{lat} - \text{lat}^*) \end{cases} \quad (9)$$

将上式代入式（1）可以求解 Y 坐标，如下式。舍掉 Y 小于 0 的一个解，进

$$Y = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(\text{long} - \text{long}^*)}} \frac{ab}{\sqrt{b^2 + a^2 \tan^2(\text{lat} - \text{lat}^*)}} \quad (10)$$

将上式代入 (9)，即可求出其他两个坐标。

其次，由式 (2) 有，旋转角度和 XYZ 坐标之间，满足关系

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{Z}{Y-h} \\ \beta = -\arctan \frac{X}{Y-h} \end{cases} \quad (11)$$

再其次，由式 (3) 有，灰度矩阵元素位置与旋转角度之间，满足关系

$$\begin{cases} i = i_0 + \frac{\alpha}{p} \\ j = j_0 + \frac{\beta}{q} \end{cases} \quad (12)$$

因此，只要给定探测点的经纬度，即已知其直角坐标，最终可由式 (12) 求得相应灰度矩阵元素行列号，其中该公式存在一些中间变量，具体计算涉及式 (9)、(10) 和 (11) 三个式子。

综上所述，探测点的经纬度对应灰度矩阵元素行列号的换算，也涉及地球的直角（三维）和帧平面（二维）之间的坐标，同样也借助了两个方向扫描角度关联和过渡。建模流程如下图 6 所示。

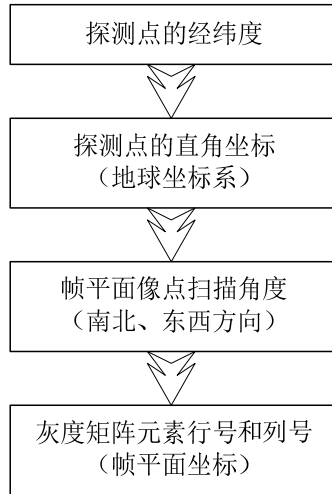


图 6 经纬度到帧平面转换流程

1.3.2 模型求解

模型求解的算例为海岸线数据，设计算法，主要步骤如下：

STEP.1 载入海岸线经纬度坐标数据文件 coastline0.tx;

STEP.2 删除文件中所有的“99999.999999.99”;

STEP.3 WHILE 是否所有探测点都已经完成转换 DO
探测点经纬度到帧平面像点坐标转换

经 MATLAB 编程计算，海岸线帧平面像图如下图 7 所示。

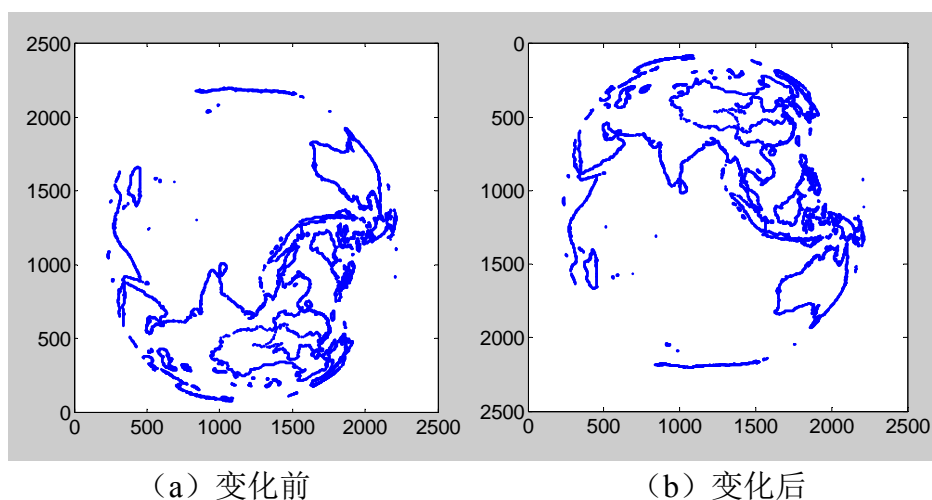


图 7 海岸线帧平面像图

由于 MATLAB 默认的坐标系与帧平面像图不一致, 因此计算结果还需要进行处理。在上图 7 (a) 为变化前, 纵坐标的正方向朝上; 图 7 (b) 为变化后, 纵坐标的正方向向下, 方便后续在卫星云图上加载该图。这样操作的理由是, 于卫星从北向南的方向进行扫描, 两张图的坐标系统一。

另外, 由灰度值与温度值的关系对照表文件 `k_temp.txt` 可知卫星云图共包含 0~1023 个灰度级, 考虑 MATLAB 可识别灰度值范围为 0~1, 故本文对卫星灰度矩阵数据 `IR1_2100.mat` 进行如下处理:

- (1) 灰度值为-1 的元素, 将其处理为 1, 即在卫星云图中反映为白色;
- (2) 灰度值大于 0 的元素, 进行 1024 等分处理, 即在卫星云图中, 温度越高区域, 其颜色浓度越深, 反之越浅。

使用 MATLAB 编程对该文件处理后, 其卫星云图如下图所示。

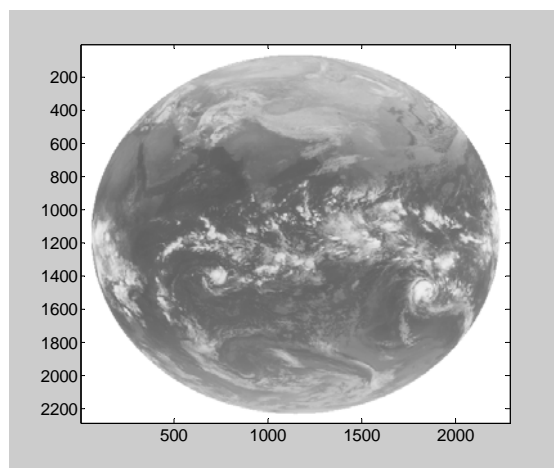


图 8 某天 21:00 点时的卫星云图

通过对海岸线的真平面图进行处理后, 对应图 7 (b), 然后在同一坐标系下 (横轴的正方向超右, 纵坐标的正方向朝下)。使用 MATLAB 进行图像叠加, 可得附加海岸线的卫星云图, 如下图所示。

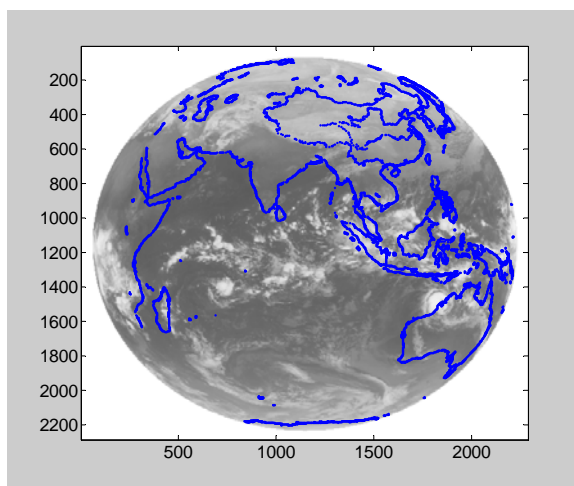


图 9 包含海岸线的卫星云图

1.4 本章小结

本章研究了卫星视场坐标变换问题。首先，构建两个坐标系，其一是地球坐标系：以地心为原点、地心到卫星的方向为 Y 轴、 X 轴在赤道平面上且与 Y 轴垂直、 Z 轴与 X 轴和 Y 轴满足右手定则；其二是帧平面坐标：过星下点 O_E 且垂直于地球坐标系的 X 轴，两个正方向分别对应自西向东和自北向南的扫描方向；然后在此基础上，利用解析几何知识进行推导，建立两个模型，其一是帧平面到经纬度转换模型，实现了灰度矩阵元素行列号到探测点经纬度的转化，其流程为：灰度矩阵元素行号和列号（也即帧平面坐标）→帧平面像点在南北和东西两个方向扫描角度→探测点在地球坐标系的直角坐标→探测点的经纬度；其二是经纬度到帧平面转换模型，实现了探测点经纬度到灰度矩阵元素行列号的转化，这两个转换过程互逆。实例计算验证了模型的正确性和合理性。

第 2 章 风矢场固定尺度度量模型

2.1 问题分析

风,是地球上的一种自然现象,其形成的直接原因是大气压强分布不均所致,本质上是太阳辐射引起的。风无形不可见。云,有形可见,是地球上庞大的水循环的结果。二者之间存在关联,如“风吹云动”,云的位置变化受到风的影响。同理,云块的移动在一定程度上可以反映风的特征。因此,由无形的风来刻画有形的云是可行的。通过卫星静态探测的,对同一块云团进行连续追踪观测,根据其位置变化特征,如方向和位移,从而估计实际风矢场。

另外,影响云位置变动的原因很多,地势,海洋等。因此,有必要对风和云的移动规律进行限定,重叙如下(对应 0.4 节的假设(4)和(5)):

(1) 风矢特征假设:对于某特定区域的风(如果有的话),在较短时间内保持方向和风力不变,即为匀速直线运动。

(2) 云团移动关系假设:忽略云团内部的变化。对于某特定区域的云(如果有的话),在较短时间内,移动的方向与风矢相同、移动距离与风力匹配。

风矢场的度量,需要计算出区域内每个非零风矢的速度和方向。本章关于风矢度量的建模,依赖于目标云和匹配云定位两个步骤的实现。其中,目标云的定位,涉及经 1.3 节的经纬度到帧平面转换。而最终的建模,还涉及第 1 章的另一个转换模型——帧平面到经纬度的转模型。

2.2 目标云定位

目标云定位是本章风矢度量模型的第一步。该步骤的主要作用是,将探测点的经纬度转换到灰度矩阵的一个区域(本文设置为正方形,也可以为其他形状,如圆形),从而得到了目标云。本文设计了算法,流程如下:

子算法 1: 目标云定位。

STEP.1 给定探测点的经纬度。

STEP.2 调用 1.3 节的经纬度到灰度矩阵行列号的转换模型,求得理论帧平面坐标 (x'_0, y'_0) 。

STEP.3 修正帧平面坐标。如下图所示, (x'_0, y'_0) 不一定处于格子的顶点处,选择四个顶点中距离最近的一个,不妨记为 (x_0, y_0) 进行修正,即有下式:

$$(x_0, y_0) = \arg \min \left\{ \sqrt{(k_1 - x'_0)^2 + (k_2 - y'_0)^2} \mid k_1 = i, i+1; k_2 = j, j+1 \right\} \quad (13)$$

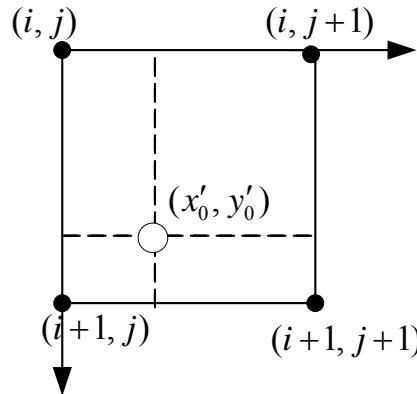


图 10 目标云定位示意图

STEP.4 目标云定位为:

$$\Omega_0 : \left\{ (x, y) \mid x_0 - \frac{N_0}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{N_0}{2}, y_0 - \frac{N_0}{2} \leq y \leq y_0 + \frac{N_0}{2} \right\} \quad (14)$$

其中, (x_0, y_0) 为目标云中心位置的行列号; N_1 为云窗口。

关于算法特点的补充说明:

- (1) 嵌入了第 1 章的经纬度到帧平面转换模型;
- (2) 帧平面坐标的修正, 主要原因是: 由于离散扫描采样, 使得灰度矩阵行列号也为离散整数。而对于任意经纬度的探测点, 其像点在帧平面坐标却不一定为整数。本文对这个矛盾的解决方案是, 选择近似效果最佳, 对应式 (13), 其实际意义是欧式距离最小。

2.3 匹配云定位

匹配云的定位, 是风矢度量模型的另一个准备。该步骤的主要作用是, 在目标云的搜索窗口内, 从中选择最佳的匹配云。匹配效果通过最大交叉相关系数来度量。本文设计了算法, 流程如下:

子算法 2: 匹配云定位算法。

STEP.1 给定匹配云的搜索空间: $\Phi : \{(x_w, y_w) \mid L_x \leq x_w \leq U_x, L_y \leq y_w \leq U_y\}$,

其中: L_x 为行号的下界, 即 $L_x = \max \left\{ 1, x_0 - \frac{N_0}{2} \right\}$;

U_x 为行号的上界, 即 $U_x = \min \left\{ N, x_0 + \frac{N_0}{2} \right\}$;

L_y 为列号的下界, 即 $L_y = \max \left\{ 1, y_0 - \frac{N_0}{2} \right\}$;

U_y 为列号的上界, 即 $U_y = \min \left\{ N, y_0 + \frac{N_0}{2} \right\}$ 。

STEP.2 确定初始搜索点: $\begin{cases} x_w^{(k)} = L_x \\ y_w^{(k)} = L_y \end{cases}$, 初始迭代次数 $k = 1$ 。

STEP.3 确定搜索方向: 按照行号进行搜索, 当不超过灰度矩阵的范围 (即阶数) 数时, 行号增加一个步长; 否则行号退回至下界, 列号增加一个步长。即有迭代关系:

$$\begin{cases} x_w^{(k+1)} = x_w^{(k)} + \Delta, & \text{当 } x_w^{(k)} + \Delta \leq N \text{ 时,} \\ y_w^{(k+1)} = y_w^{(k)} \\ x_w^{(k+1)} = L_x + \Delta, & \text{当 } x_w^{(k)} + \Delta > N \text{ 时。} \\ y_w^{(k+1)} = y_w^{(k)} + \Delta \end{cases}$$

STEP.4 匹配云和目标云的相对位置刻画:

$$\begin{cases} \lambda_x = x_w^{(k)} - x_0 \\ \lambda_y = y_w^{(k)} - y_0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: λ_x 和 λ_y 分别为匹配云的中心位置相对目标云在行号和列号的变化量。

STEP.5 匹配云的评价: 按照下式计算匹配云 $(x_w^{(k)}, y_w^{(k)})$ 与目标云 (x_0, y_0) 之间的最大交叉相关系数^[5]

$$r(x_w^{(k)}, y_w^{(k)}, x_0, y_0) = \frac{\sum_{(x,y) \in \Psi_0} (f(x,y) - \bar{f}(x_0, y_0)) (g(x+\lambda_x, y+\lambda_y) - \bar{g}_{(k)})}{\sqrt{\sum_{(x,y) \in \Psi_0} (f(x,y) - \bar{f}(x_0, y_0))^2} \sqrt{\sum_{(x,y) \in \Psi_0} (g(x+\lambda_x, y+\lambda_y) - \bar{g}_{(k)})^2}} \quad (16)$$

式中： $f(x, y)$ 为目标云在位置 (x, y) 处的灰度值；

$\bar{f}(x_0, y_0)$ 为目标云的平均灰度值，即 $\bar{f}(x_0, y_0) = \frac{1}{N_0^2} \sum_{(x,y) \in \Psi_w} f(x, y)$ ；

$g(x+\lambda_x, y+\lambda_y)$ 为匹配云在位置 $(x+\lambda_x, y+\lambda_y)$ 处的灰度值；

$\bar{g}_{(k)}$ 为匹配云的平均灰度值，即 $\bar{g}_{(k)} = \frac{1}{N_0^2} \sum_{(x,y) \in \Psi_w} g(x+\lambda_x, y+\lambda_y)$ 。

STEP.6 最佳匹配云中心的确定：

$$(x_w^*, y_w^*) = \arg \max \left\{ r(x_w^{(k)}, y_w^{(k)}, x_0, y_0) \mid (x_w^{(k)}, y_w^{(k)}) \in \Phi \right\} \quad (17)$$

STEP.7 最佳匹配云的定位：

$$\Omega_w : \left\{ (x, y) \mid x_w^* - \frac{N_0}{2} \leq x \leq x_w^* + \frac{N_0}{2}, y_w^* - \frac{N_0}{2} \leq y \leq y_w^* + \frac{N_0}{2} \right\} \quad (18)$$

其中， (x_w^*, y_w^*) 为最佳匹配云中心位置的行列号； N_l 为云窗口。

对比式 (14) 和式 (18)，目标云和最佳匹配云位置之间呈现“整体平移”性质，其中平移关系仍然如式 (15) 所示。

2.4 风矢量模型

前两小节实现了目标云和最佳匹配云在帧平面上的区域定位。由于风矢的方向和速度的计算是在地球坐标系进行。因此在建模之前，还需要将匹配云在灰度矩阵的行列号转化为经纬度，这基于 1.2 节帧平面到经纬度转换模型进行处理。

目标云在灰度矩阵的中心 (x_0, y_0) ，最佳匹配云在灰度矩阵的中心 (x_w^*, y_w^*) ，分别对应地球上的探测点 A 和 B，二者的经纬度分别记为 $(long_A, lat_A)$ 和 $(long_B, lat_B)$ 。

(1) 风矢的速度

记 R 为 A 点到球心的距离，按照下式^[6]确定：

$$R = b \sqrt{\frac{1 + tg^2(long_A)}{b^2/a^2 + tg^2(long_A)}} \quad (19)$$

其中， a 为地球的长半轴（赤道半径）； b 为地球的短半轴（极半径）。

记 γ 为 OA 与 OB 之间的夹角，如图 11 所示，具体计算如下式：

$$\gamma = \arccos(\sin(lat_A) \sin(lat_B) + \cos(lat_A) \cos(lat_B) \cos(long_B - long_A)) \quad (20)$$

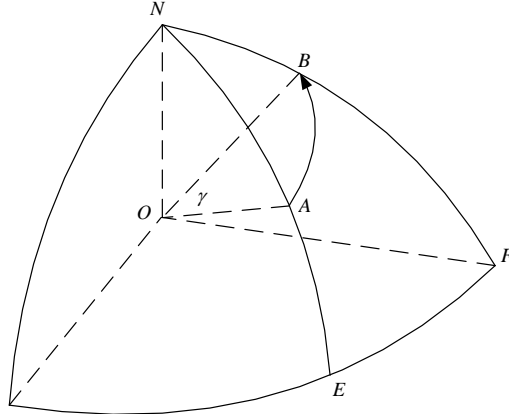


图 11 风矢计算示意图

根据以上两式，有 AB 之间的弧长

$$D = R\gamma \quad (21)$$

因此，风矢的速度为

$$F_w = \frac{D\gamma}{\Delta t} \quad (22)$$

式中： F_w 为风矢的速度； Δt 为从 A 运动到 B 的时间，也即为扫描间隔时间。

(2) 风矢的方向

如图 11 所示，在球面三角形 ABN 中， $\angle AON = \frac{\pi}{2} - lat_A$ ， $\angle BON = \frac{\pi}{2} - lat_B$ ，

$\angle AOB = \gamma$ ， $\angle NAB = \theta'_w$

根据球面三角形的余弦定理^[4]有，

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - lat_B\right) = \cos\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} - lat_A\right) + \sin\gamma \sin\left(\frac{\pi}{2} - lat_B\right) \cos\theta_w \quad (23)$$

可以整理得到

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - lat_B\right) = \cos\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} - lat_A\right) + \sin\gamma \sin\left(\frac{\pi}{2} - lat_B\right) \cos\theta_w \quad (24)$$

求解得夹角：

$$\theta'_w = \arccos\left[\frac{\sin(lat_B) - \cos\gamma \sin(lat_A)}{\sin\gamma \cos(lat_B)}\right] \quad (25)$$

在确定风矢的方向时，需要确定始点和终点具体所属。随着时间的延续，扫描点的经度增加（西经的度数都是小于 0，因此从东经 180 度转到西半球，仍然满足增加），纬度减小（南纬的度数都是小于 0，因此从赤道转到南半球，也仍然满足减小）。时间轴的方向和扫描点的经纬度大小之间存在关系。

故，可由夹角转化而得

$$\theta_w = \begin{cases} \theta'_w, & \text{如果 } long_B > long_A \\ 2\pi - \theta'_w, & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

综上所述，基于式 (22) 和式 (26) 即可确定风矢的速度和方向，从而完成一个风矢的度量。在实现了区域内每个非零风矢的度量后，风矢场也就随之确定。

2.5 模型求解

2.5.1 参数灵敏度

理论上, 风矢的度量只需要两幅扫描图即可实现。本算例提供了某地区连续 3 次观测 (20:30, 21:00, 21:30 时刻), 对应三个数据文件: IR1_2030.mat, IR1_2100.mat, IR1_2130.mat。本文的求解方案是: 对任意指定的探测点

- (1) 计算 20:30→21:00 期间的风矢;
- (2) 计算 21:00→21:30 期间的风矢;
- (3) 将前两步计算得到的速度和方向分别求平均, 作为 21:00 时的风矢。

本章 2.3 节的匹配算法是风矢度量的重要环节, 而该步骤中涉及步长的给定。该参数直接与搜索空间中的匹配云数量关联。先后测量计算的风矢并不完全一致, 为了说明这种差别性, 引入相对偏差:

$$error = \rho \frac{|F_1 - F_2|}{\bar{F}} + (1 - \rho) \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{\bar{\theta}} \quad (27)$$

式中, F_1 , F_2 和 \bar{F} 分别为先后测算的风速; θ_1 , θ_2 和 $\bar{\theta}$ 分别为先后测算的风矢方向; ρ 为速度偏差的权重。

为说明步长对风矢度量效果的影响, 对四个探测点设计如下两组对照试验, 其中搜索窗口都设置为 64×64 , 速度单位为米每秒。

表 6 风矢估计结果与步长的关系 (云窗口 16×16)

序号	步长	纬度	经度	20:30→21:00		21:00→21:30		相对偏差	
				方向	速度	方向	速度	方向	速度
1	8	26	54	88.4676	21.9410	88.9601	23.6340	0.4925	1.6930
2	8	26	57	88.5330	20.2586	91.9873	17.9687	3.4543	2.2898
3	16	26	54	92.0811	22.4418	92.0587	22.2830	0.0224	0.1588
4	16	26	57	84.5659	20.7983	91.9920	25.2470	7.4260	4.4487

表 7 风矢估计结果与步长的关系 (云窗口 32×32)

序号	步长	纬度	经度	20:30→21:00		21:00→21:30		相对偏差	
				方向	速度	方向	速度	方向	速度
1	8	26	54	92.1164	22.5304	88.9915	23.6666	3.1250	1.1362
2	8	26	57	86.5891	19.4416	86.6932	20.2599	0.1041	0.8183
3	16	26	54	92.0811	22.4418	92.0587	22.2830	0.0224	0.1588
4	16	26	57	84.6942	20.8890	83.0930	17.2054	1.6012	3.6836

观察以上两表可知:

- (1) 对于同一云窗口参数, 步长越小, 风矢的方向和速度的相对偏差都越小。这是显然的。如果搜索越密集, 从而候选的匹配集越多, 从而有改善最优匹配的可能。
- (2) 对于同一步长, 云窗口越大, 两种相对偏差几乎都越小。究其原因, 当云窗口越大时, 云团中个别奇异值对结果的影响减弱, 云团总体的信息越明显。当然云团窗口也是有限度的。

为了对比搜索窗口的影响, 本文还补充了其取 96×96 的情形, 计算结果如下表所示。结果表明: 增大搜索窗口 (64×64 变为 96×96), 也能改善风矢辨识的效果。

表 8 风矢估计结果与云窗口的关系 (步长等于云窗口)

序号	云窗口	纬度	经度	20:30→21:00		21:00→21:30		相对偏差	
				方向	速度	方向	速度	方向	速度
1	16	26	54	92.0811	22.4418	92.0587	22.2830	0.0224	0.1588
2	16	26	57	84.5659	20.7983	91.9920	25.2470	7.4260	4.4487
3	32	26	54	92.0811	22.4418	92.0587	22.2830	0.0224	0.1588
4	32	26	57	84.6942	20.8890	83.0930	17.2054	1.6012	3.6836

2.5.2 计算结果

21:00 时刻，南纬 40 度至北纬 40 度，东经 46 度至 126 度的区域（经纬度取为整数）的二维风矢场，如下图所示，其中非零风矢有 524281 个。

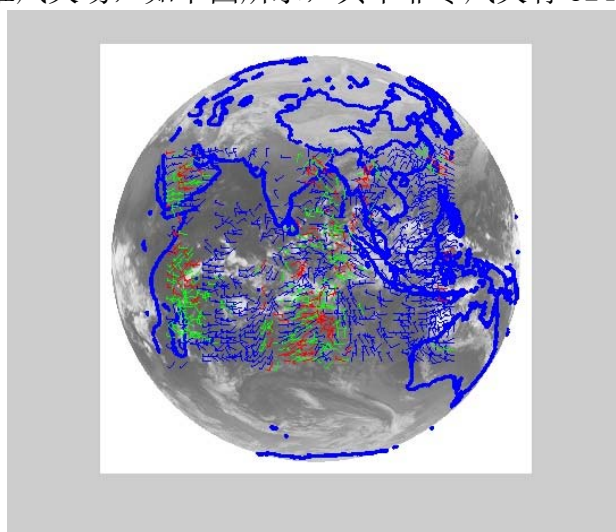


图 12 算例的风矢场

(2) 给出五个探测点的风矢估计结果，如下表所示。

表 9 风矢估计结果

纬度	经度	方向 (北顺)	速度 (米/秒)	压强 (毫巴)
26	52	0.0000	0.0000	1000.0000
26	53	0.0000	0.0000	724.5587
26	54	92.0699	22.3624	652.5624
26	57	83.8936	19.0472	532.6288
26	58	83.8936	19.0472	684.4543

2.6 本章小结

本章研究了风矢场的度量问题。首先，对于任意给定探测点的经纬度，根据经纬度到帧平面的转化模型进行转换，并以最优近似的整数行列号进行修正，实现目标云的定位；其次，在目标云的搜索窗口范围内，采用最大交叉相关系数选择最优匹配面；再次，将匹配面中心的行列号转换到对应的经纬度；在此基础上，基于时间轴方向和两点经纬度大小的关系确定风矢方向，并给出其速度估计，最终建立风矢量度量模型，进而度量风矢场。

第3章 风矢场自适应度量模型

3.1 自适应变化风矢场算法

与上一节采用固定搜索窗口方法不同，本文采用“自动适应变化”算法对搜索窗口尺寸和目标云尺寸进行调整。所谓“自动适应变化”，就是根据前一时刻的搜索结果，对下一时刻的搜索窗口尺寸和目标云尺寸进行调整。具体的思路如下：

设搜索窗口的搜索半径为 r ，即为正方形区域搜索的半边长，定义如下：

$$r = \frac{v \cdot t}{p} \quad (28)$$

其中， v 表示风速； t 表示时序云图的间隔时间； p 表示像素点的空间分辨率。

现有 A、B、C 三幅卫星云图，需由 $B \rightarrow A$ 和 $B \rightarrow C$ 计算某个参考位置为 (x_0, y_0) 目标云窗口的风矢。设目标云窗口的尺寸为 $N_0 \times N_0$ ，搜索窗口的尺寸为 $2r \times 2r$ 的正方形区域，如下图所示。

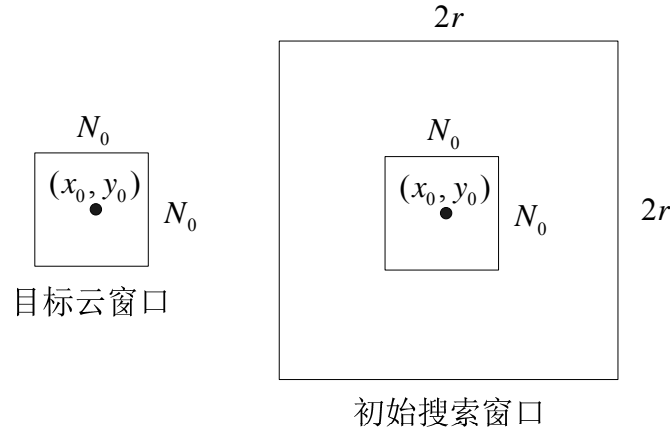


图 13 目标云及初始搜索窗口对照

在云图 $A \rightarrow B$ 的匹配中，若目标云在搜索范围内匹配云成功，则必有相应“间隙”存在，如图 2 中 S_x^i 、 S_y^i 、 S_x^o 和 S_y^o 所示。这便造成一定目标云尺寸的搜索“浪费”。基于上述分析，本文对搜索窗口尺寸和目标云尺寸修改如下：

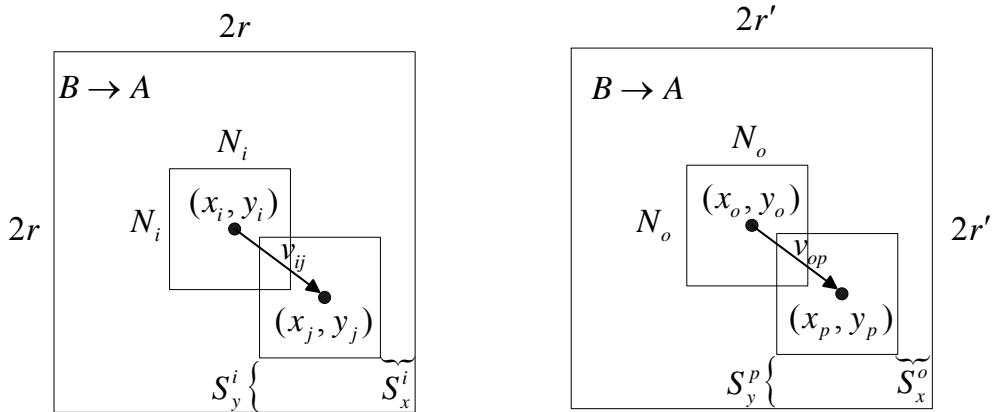


图 14 窗口尺寸及目标云尺寸自适应变化过程

由上图可以得出如下关系式：

$$\begin{cases} S_x^i = 2r - x_i - \frac{N_i}{2} \\ S_y^i = 2r - y_i - \frac{N_i}{2} \end{cases} \quad (29)$$

如此可更新下次云匹配窗口尺寸及目标云尺寸，公式如下：

$$r' = \frac{v_i \cdot t}{p} \quad (30)$$

$$N_o = N_o + \min\{2r - x_i - \frac{N_i}{2}, 2r - y_i - \frac{N_i}{2}\} \quad (31)$$

同理，若出现目标云尺寸的搜索“紧缺”现象，可对搜索窗口和目标云窗口减去相应尺寸。

基于上述分析，本文建立如下自适应变化算法，步骤如下：

Step1: 对最初搜索窗口 Sr_0 进行目标云窗口匹配。

由上述分析可知， Sr_0 的搜索窗口 $Aerp_0$ 尺寸为 $2r \times 2r$ ，即要计算 $2r \times 2r$ 次目标云与 Sr_0 中的各灰度参数值的相关系数，得到一个大小为 $2r \times 2r$ 的相关系数矩阵，并找出相关系数最大值 $SMax_0$ 。

若 $SMax_0$ 所对应的参考位置 (m_0, n_0) 在搜索窗口 $Aerp_0$ 内，则可确定为匹配云，并开始进行计算，目标云窗口 (x_0, y_0) 匹配算法终止，否则转入下一步。

Step2: 重新确定搜索窗口 Sr_1 ，并重新进行云匹配。

新的搜索窗口尺寸 Sr_1 确定方法如下：将 Sr_0 的参考位置 (x_0, y_0) 向 (m_0, n_0) 方向移动直至 (m_0, n_0) 在 $Aerp_1$ 边沿上为止。 Sr_1 的搜索窗口为 $Aerp_1$ ，参考位置为 (x_1, y_1) ，此时在搜索窗口 $Aerp_1$ 进行目标云匹配，计算相应关系矩阵，得到 $SMax_1$ 。

若 $SMax_1$ 所对应的参考位置 (m_1, n_1) 在搜索窗口 $Aerp_1$ 内，则可确定为匹配云，并开始进行计算，否则转入下一步。

.....

Step k: 重新确定搜索窗口 Sr_{k-1} 并进行云匹配。

新的搜索窗口尺寸 Sr_{k-1} 确定方法如下：将 Sr_{k-2} 的参考位置 (x_{k-2}, y_{k-2}) 向 (m_{k-2}, n_{k-2}) 方向移动，直至 (m_{k-2}, n_{k-2}) 不在 $Aerp_{k-2}$ 内为止。 Sr_{k-1} 的搜索窗口为 $Aerp_{k-1}$ ，参考位置为 (x_{k-1}, y_{k-1}) ，此时在搜索窗口 $Aerp_{k-1}$ 进行目标云匹配，得到 $SMax_{k-1}$ 。

若 $SMax_{k-1}$ 对应的参考位置 (m_{k-1}, n_{k-1}) 在搜索窗口 $Aerp_{k-1}$ 内，则可确定为匹配云，并开始进行计算。若 (m_{k-1}, n_{k-1}) 不在搜索窗口 $Aerp_{k-1}$ 内，则进入步骤 k+1。

在上述 Step1~Step4 步骤中，k 表示第 k-1 次重新确定搜索窗口 Sr_{k-1} 并进行云匹配。如此，可通过式 (28)，由第 i 步 Sr_{k-1} 的参考位置 (x_{k-1}, y_{k-1}) 得到第 i+1 步 Sr_k 的参考位置 (x_k, y_k) ：

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \beta(x_{m_{k-1}} - x_{k-1}) \\ y_k = y_{k-1} + \beta(y_{n_{k-1}} - y_{k-1}) \end{cases} \quad (32)$$

其中， (x_{k-1}, y_{k-1}) 为搜索窗口 Sr_{k-1} 中位于 $Aerp_{k-1}$ 内的 $SMax_{k-1}$ 对应的匹配云参考位置； β 为搜索区位置的调整量， β 太小则降低计算效率，太大则导致搜索区前后不连续。

搜索窗口尺寸自动调整过程，如下图所示。

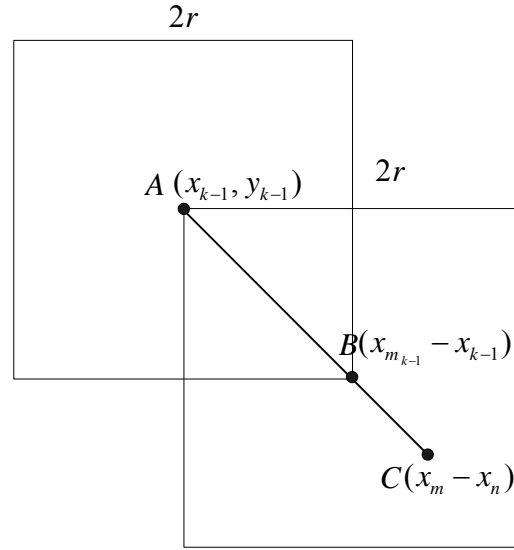


图 15 搜索窗口尺寸自动调整示意图

在上图中，A 点代表 (x_{k-1}, y_{k-1}) ，B 点代表 $(x_{m_{k-1}} - x_{k-1})$ ，C 点代表 $(x_m - x_n)$ 。

对某一目标云来说，当在搜索窗口进行云匹配时，只要满足以下任意一个条件，即可判断无法在卫星云图 B 和 C 中找出与其匹配的云，并结束此目标云的匹配，从而开始匹配下一目标云：

- (1) 遍历匹配区域或 $SMax_{k-1} < \varphi$ ；
- (2) 在 $SMax_{k-1}$ 中找到匹配云，但 $SMax_{k-1} < \varphi$ ；
- (3) $k > 4$ 时。

上述算法的核心思想是在每一个搜索点上以周围各点的相关系数的大小确定下一步搜索的方向，寻找相关系数变化梯度增加的方向进行搜索，并根据上一次计算的速度实时更新搜索窗口的尺寸大小。这样既避免固定搜索窗口导致计算量扩大，也提高了搜索效率。但需要注意的是，当搜索区的关系系数为非线性变化时，本算法可能得不到正确的结果。

3.2 方法对比及建议

3.3 本章小结

本章解决的问题与第 2 章相同，但实现手段和技术有所区别。基于目标云和匹配云的最大交叉相关系数与设定阈值比较，权衡效率和精度两方面的考虑，设计搜索方向调整和搜索窗口变尺度实时变化的自适应算法。

第4章 风矢场等压面模型

4.1 问题分析

在同一水平上气压相等的各点的连线就是等压线,可见,等压线实际上是等压面和等高面的交线,所以等压线分布图可以表示在同一海拔高度上气压水平分布的状况。“高压”和“低压”是针对同一水平面上的气压差异而言的。由于天气并不是由一个单独的层面决定的,而是由高空和低空环流共同作用的结果,且由于高空气流在运行过程中受摩擦力小,气流变化和运动均具有稳定和周期性明显的特点,而 500HPa 层属于中高层大气,很多天气过程在该层面上都会有或大或小的印迹,通过这些印迹可以预测未来天气变化计算思想。

根据等压线所示的气压高低状况:

(1) 预测气温:相邻地区,尤其是同纬度地区,气压高的地方一般气温低,气压低的地方一般气温高。

(2) 预测气流垂直运动:一般情况下,气压高的地方气流下沉,气压低的地方气流上升。

根据气压分布状况:

(1) 预测天气:低压区或低压槽盛行上升气流,多阴雨天气;高压区或高压脊盛行下沉气流,多晴朗天气。

(2) 预测海陆分布:夏季,副热带地区,大陆内部有低压中心;冬季,副极地地区,大陆内部有高压中心。

根据等压线分布状况:

(1) 预测风向:先判明高低气压,然后确定水平气压梯度力的方向,(水平气压梯度力永远从高压指向低压,且垂直于等压线),再根据半球确定地转偏向力的方向(北半球向右偏,南半球向左偏):高空——风向与等压线平行(风受两个力,无摩擦力);近地面——风向与等压线斜交(风受三个力,且摩擦力越大,斜交夹角越大)。

(2) 预测风力:在同一等压线图上,等压线越密集,说明该地区气压差越大,水平气压梯度力越大,风力也越大;等压线越稀疏,则说明该地区气压差越小,水平气压梯度力越小,风力也越小。解题时应注意相邻两条等压线的数值差和不同地图的比例尺。

4.2 等压面的确定

等压面的确定依赖于压强数据的获取,以下以 21:00 点非零风矢为例,说明等压面的确定过程。

图 16 为非零风矢压强计算示意图。可见,得出一个非零风矢的压强需要以下步骤:

(1) 根据非零风矢 i 的帧平面坐标 (I_i, J_i) , 从对应时刻的卫星数据 IR1_2100.mat 中读出其灰度值 f_i , 按 f_i 值查找文件 k_temp.txt, 得出风矢 i 的温度 t_i ;

(2) 由式 (7), 得出风矢 i 的帧平面坐标 (I_i, J_i) 所对应的经纬度坐标 $(long_i, lat_i)$;

(3) 由风矢 i 的经纬度坐标、温度 t_i 确定其所在层 $Ceil_i$, 由所在层导出压强风矢 i 的压强 p_i , 计算过程结束。

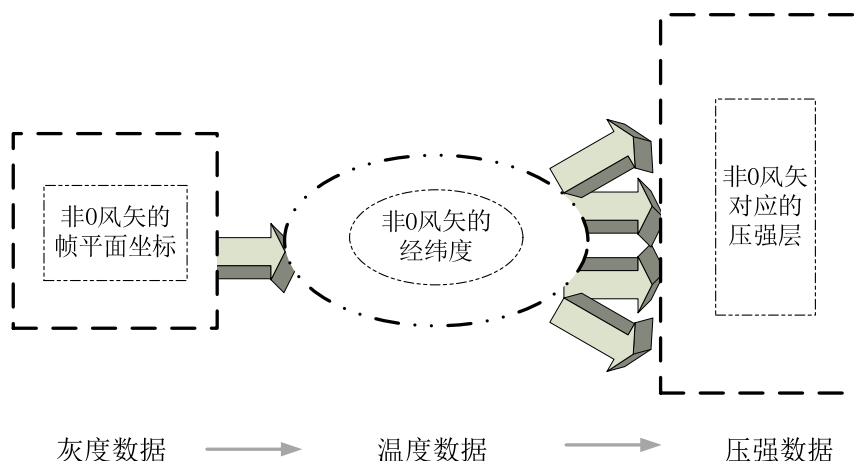


图 16 非零风矢压强计算示意图

在步骤（3）的计算过程中，需要使用对应时刻的卫星数据——全球温度数值预报文件 **temp3**，其中存放的温度数据按“等压面高度”从上到下分 36 层，每层大气压相同。同一层是个矩阵，同行纬度相同，同列经度相同，相邻两行(列)相差 0.28125 度。由于排列顺序为从北到南，从西到东，即可确定出起始点的经纬度为(-180, 90)，从而确定出各个坐标点对应的经纬度。

同一个经纬点的每一层对应一个压强，这样就建立起了温度与压强的对应关系 $p_j = \text{fun}(t_j)$, $j = 1, 2, \dots, 36$ 。由于各层之间的压强值变化较大，文中使用线性插值法提高计算精度，示意图如图 4.2 所示。其中 $p_1 = \text{fun}(t_1)$, $p_2 = \text{fun}(t_2)$, 且 $t_2 > t_1$ 。

若 $t_1 < t_i < t_2$ ，则有： $p_i = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1}(t_i - t_1)$ 。

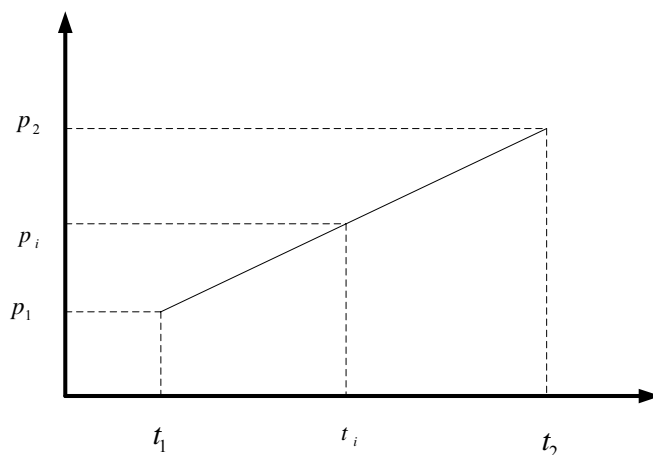


图 17 线性插值示意图

本文题目特点是涉及到各种数值体系转换操作，在计算过程中，都应尽可能利用插值等方法，提高数据转换的精度。

第5章 模型改进

5.1 精细化建模

精细化建模主要体现在对研究对象的精细划分，本文提供五个思路：

其一，云块匹配准则模型。只有符合客观合理的云块匹配准则，才能唯一准确地找出最佳匹配块。目前对云块的定义还没有比较认可的统一标准，采用单一标准，忽略不同标准对结果的差异，这将会影响模型的准确性。

其二，搜索范围的确定。云块的搜索范围不仅影响搜索精度，而且影响搜索的速度。搜索范围太大，搜索时间成倍增加，搜索范围太小，影响搜索的精度。因此动态调整尺度的研究有助于提高模型的计算结果精度。

其三，搜索区域形状的影响。本文主要采用正方形的搜索区域，而圆形和矩形等形状的搜索区域未作尝试，因此搜索区域类型对模型计算结果的影响还有待进一步研究。

其四，现实中，云的运动方向不止水平方向，而本文对云的方式只考虑水平运动，这与现实有一定的差距。

其五，搜索起点的选择。本文进行云块匹配时，初始搜索位置都设置为其左上角。然而由于不同区域不同起点的选择对模型求解结果的影响对比，是本文进一步研究的问题。

5.2 数据来源多样化

卫星云图是精确的天气实况分布图。单一的数据来源往往可能造成不可预期的错误。考虑与此，本文提供以下三个思路：

其一，考虑多颗卫星同步采集数据，通过对照融合方式综合确定卫星云图。

其二，要把红外云图、可见光云图和水汽云图对照使用。红外云图的色调取决于温度的高低，可见光云图的色调取决于物体对太阳的反照率，而水汽图取决于中空以上水汽的多少，将三种云图对照起来使用，具有很好的互补性。

其三，熟悉各种地物、地貌的特征。熟悉卫星云图上一些特征点的地理位置、形状和色调，一来可以校对订正卫星云图的偶尔误差；二来可以准确将低云、海水等区域区分开来。

参考文献

- [1] 王丕诰, 应用卫星气象学, 青岛: 海洋大学出版社, 2004。
- [2] 蒋尚城, 应用卫星气象学, 北京: 北京大学出版社, 2006。
- [3] 陈渭民, 卫星气象学(第二版), 北京: 气象出版社, 2009。
- [4] 徐祥德, 许健民等, 大气遥感再分析场构造技术与原理, 北京: 气象出版社, 2003。
- [5] 许健民, 张其松, 王大昌等, 云迹风计算中的两个几何问题, 应用气象学报, 8 (1) : 11-17, 1997。
- [6] 白洁, 王洪庆, 陶祖钰, GMS卫星红外云图云迹风的反演, 北京大学学报(自然科学版), 33 (1): 85-82。
- [7] 姜启源, 数学模型, 北京: 高等教育出版社, 1992: 272-283。
- [8] 苏金明, 阮沈勇, MATLAB6.1实用指南, 北京: 电子工业出版社, 2002: 143-270。