

一种基于三角网的等值线自动填充算法

汤子东^{1),2)} 郑明奎³⁾ 王思群⁴⁾ 冯俊杰⁵⁾

¹⁾(山东省气象科学研究所, 济南 250031) ²⁾(山东省气候中心, 济南 250031) ³⁾(山东省气象局, 济南 250031)
⁴⁾(山东省雷电防护技术中心, 济南 250031) ⁵⁾(济南市气象局, 济南 250002)

摘要 等值线填充就是先在等值线间建立拓扑关系,然后基于拓扑关系来完成等值线的填充,这一直是一个比较困难的问题。为了快速方便地进行等值线自动填充,提出了一种基于不规则三角网的等值线自动填充算法。该算法把采用不规则三角网生成的非闭合等值线,先根据一定关系与自定义边界连接成闭合等值线,然后通过确定各闭合等值线之间的包含关系和各等值线之间的填充颜色来绘制出等值线填充图。实践表明,该算法易于实现,且运算速度能满足业务需求。

关键词 三角网 等值线 填充

中图法分类号: TP391.72 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)12-2577-05

A New Automatic Filling Algorithm between Contours Based on Triangulation Net

TANG Zi-dong^{1),2)}, ZHENG Ming-xi³⁾, WANG Si-qun⁴⁾, FENG Jun-jie⁵⁾

¹⁾(The Meteorological Institute of Shandong Province, Jinan 250031) ²⁾(Shandong Province Climate Center, Jinan 250031)
³⁾(Shandong Province Meteorological Bureau, Jinan 250031) ⁴⁾(Shandong Province Lightning Protection
Technology Center, Jinan 250031) ⁵⁾(Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250002)

Abstract Contour filling is based on the topology relationship between contours, which remains a difficult research question. In order to fill contours fast and conveniently, a new automatic filling algorithm between contours based on triangulation irregular net was proposed. From the relationship between unclosed counters generated by the irregular triangulation net and the custom border, the closed counters were built, and then the filling color between contours was determined through determining the relationship of the closed counters, so the contour filling chart was mapped. This algorithm is easy to implement and the computing speed can meet the business needs.

Keywords triangulation net, contour, filling

1 引言

目前,利用矩形格网或三角网进行等值线绘制已经有比较成熟的算法和实现的软件^[1-11],而等值线的自动填充,仍一直是一个比较困难的问题。所谓等值线填充就是先在等值线间建立拓扑关系,然

后基于拓扑关系来完成等值线的填充。

不规则三角网(triangulation irregular net, TIN),是由Peucker和他的同事于1978年设计的一个系统,它是由不规则分布的数据点连成的三角网组成,其三角面的形状和大小取决于不规则分布的观测点或节点的密度和位置。

由于基于不规则三角网绘制的等值线符合手工

基金项目:国家自然科学基金项目(40575012);山东省气象局气象科学技术研究项目(2007sdqxz14)

收稿日期:2008-05-08;改回日期:2008-10-22

第一作者简介:汤子东(1969~),男,高级工程师。1992年6月毕业于南京气象学院,获天气动力专业学士学位。主要从事短期气候预测及技术开发工作。E-mail: yh12392004-2006@yahoo.com.cn

绘制等值线的规则要求,所以本文研究基于三角网的等值线的自动填充算法^[12]。

文献[13]提出了一种等值线拓扑填充算法,它的核心是先生成“拓扑包含二叉树”,同时自动建立等值线之间的拓扑关系,然后基于拓扑关系来实现许多重要的应用。

本文算法主要参考了文献[13]的算法,本文的基于拓扑关系的自动填充算法,其实现等值线的填充与文献[13]不同。

2 算法基本原理

2.1 前提条件

采用三角网自动绘制等值线时,所有资料站点都在单一闭合地图边界的内部,需要用手工或者自动建立完全包含地图边界的自定义边界点,并使该边界的所有点经过插值参与建立三角网,而且由这些边界点按照逆时针方向组成的多边形为凸多边形。所有等值线按照从小到大排列,而且所有坐标全部由经纬度坐标转换为屏幕坐标。

2.2 非闭合等值线连接成闭合等值线

由于存在边界,致使等值线有闭合的,也有非闭合的,为了方便计算等值线之间的包含关系,需要利用自定义边界将非闭合等值线连接成闭合等值线。

2.2.1 确定非闭合等值线首尾端点在边界上的走向的算法

一条非闭合等值线与三角形边界中有交叉点的两条边线为 E_1 和 E_2 ,则这两条边线与等值线的两个交叉点定义为该等值线的首尾端点。

若把非闭合等值线连接成闭合等值线(用三角形边界的点连接),则需要确定等值线首尾端点的在三角形边界上的走向。

假如首端点所在的边线为 E_1 ,则其在三角形边界中的序号 $BeginIndex$ 就是按逆时针方向旋转的边线 E_1 的两个端点在三角形边界中的序号的最小值(一条边两个点)。

如果首端点和边线 E_1 两个端点的数值按逆时针方向是递增的,则该端点的走向为正,此时序号 $BeginIndex$ 变为 $1\ 000 + BeginIndex$;如果是按顺时针方向递增,则该端点的走向为负,此时序号 $BeginIndex$ 变为 $-1\ 000 - BeginIndex$ 。

下面用图例来进一步说明。

如图 1 所示的一条非闭合等值线 C_1 ,其首尾端

点分别为 P_1 和 P_2 ,在三角形边界上的序号分别是 $BeginIndex = 1$ 和 $EndIndex = 3$,假设等值线 C_1 的数值为 10,则三角形边界点 1 和 2 的数值分别为 13 和 8,边界点 3 和 4 的数值分别为 9 和 17。按照三角形边界的逆时针方向旋转,从边界点 1 到端点 P_1 再到边界点 2,其数值是逐步减少的,由此确定的端点 P_1 的走向是负的,因此端点 P_1 的序号 $BeginIndex$ 变为 $-1\ 000 - 1$;同理,可以确定端点 P_2 的走向是正的,因此端点 P_2 的序号 $EndIndex$ 变为 $1\ 000 + 3$ 。

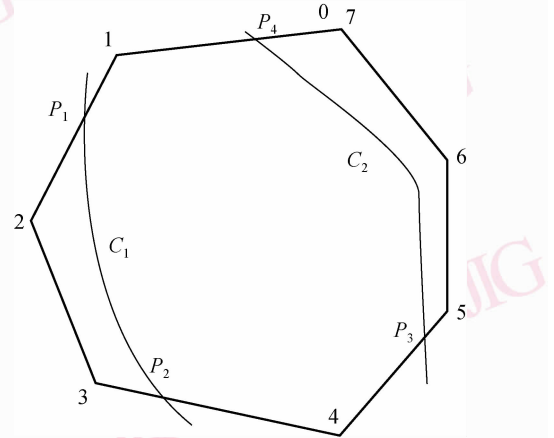


图 1 确定非闭合等值线首尾端点在边界上的走向
Fig. 1 Determine the trend of the two-endpoints of the unclosed contour on the border

2.2.2 将非闭合等值线连接成闭合等值线的算法

如果 $BeginIndex$ 是正值,则下一个点按照逆时针方向顺着边界找,其第 1 个点就是首点,第 2 个点就是 $BeginIndex - 1\ 000 + 1$ 的三角形边界点,先顺着边界寻找,一直找到等值线的尾点 $-EndIndex + 1\ 000$,而且只寻找边界上的点,然后即可与非闭合等值线连接形成闭合的等值线。

2.2.3 将最小非闭合等值线连接成闭合等值线的算法

首先找到由最小非闭合等值线形成的闭合等值线和三角边界之间的闭合区域(空域),然后将其作为闭合等值线来进行填充(因为可能里面还有闭合等值线)。这个空域可能有几个,因为如果最小非闭合等值线是由几条等值线连接起来的,那么就可能出现这种情况。

由于是找最小非闭合等值线,所以这里算法与一般的由非闭合等值线连接成闭合等值线的算法的寻找方向是相反的。

如果 $BeginIndex$ 是正值,则需要沿顺时针方向

寻找,其闭合的第 1 个点就是首点,第 2 个点就是 $BeginIndex - 1\ 000$ 的三角边界点,寻找时,先沿着边界顺时针方向寻找,直至找到等值线的尾点 $EndIndex - 1\ 000$,而且只寻找边界上的点,然后即可与等值线连接形成闭合的等值线。

假设图 1 所示的等值线 C_1 就是数值最小的一条等值线,其首端点 P_1 的走向为负,如果是一般的非闭合等值线,则应该按照顺时针方向沿着边界寻找,但是现在要找的是最小非闭合等值线与边界之间的空域,所以要按照逆时针方向沿着边界寻找,第 1 个点是 P_1 ,第 2 个点就是边界点 2,接着是边界点 3,点 P_2 ,再从点 P_2 开始连接等值线 C_1 ,一直到点 P_1 ,就形成一个闭合的区域。它的填充颜色根据该等值线的值就可以确定了。

2.2.4 把具有相同值的几条非闭合等值线连接成闭合等值线

因为几条具有相同值的等值线可能在更大的范围为闭合的一条等值线,现在被边界分开成为几条,所以要考虑把值相同的几条非闭合等值线,沿着边界连接成一条闭合等值线。

连接时,首先找出值相同的等值线,然后看看能否通过边界连接成一条闭合等值线,如果可以,则连成一条,这里需要考虑 2 条及 2 条以上的等值线按照顺序被连接起来的情况。

先考虑简单的,如果有 2 条等值线的值相同,则可根据它们的位置、走向等进行连接,一般分为以下 4 种情况(见图 2,边界为矩形,走向为逆时针):

(1)第 1 种情况,等值线 A 的首尾端点序号都小于等于等值线 B 的首尾端点序号。

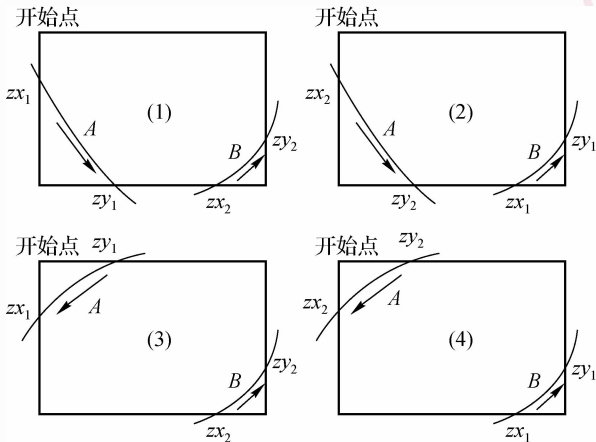


图 2 把几条具有相同值的等值线连接成一条闭合等值线

Fig. 2 Connect several same value contours into one closed contour

(2)第 2 种情况,等值线 A 的首尾端点序号都大于等于等值线 B 的首尾端点序号。

(3)第 3 种情况,等值线 A 的首端点序号都小于等于等值线 B 的首尾端点序号,等值线 A 的尾端点序号都大于等于等值线 B 的首尾端点序号。

(4)第 4 种情况,等值线 B 的首端点序号都小于等于等值线 A 的首尾端点序号,等值线 B 的尾端点序号都大于等于等值线 A 的首尾端点序号。

zx_1, zy_1 分别是第 1 条等值线 A 首尾端点在边界上点的序号,等值线的走向可能与图示方向相反。

zx_2, zy_2 分别是第 2 条等值线 B 的首尾端点在边界上点的序号,等值线的走向可能与图示方向相反。

下面是这 4 种情况的具体实现代码:

```
// 4 种情况
// 判断两个连接最近的端点的走向(正负),如果这两个端点之间是高值,则表明这两条等值线可以连接在一起
// 1,等值线 A 的首尾端点序号都小于等于等值线 B 的首尾端点序号
if(zy1 <= zx2 && zy1 <= zy2) // 第 1 条等值线离起点最近的端点序号小于第 2 条等值线离起点最近的端点序号
{
    // 第 1 条等值线离起点最近的端点序号由低到高
    // 第 2 条等值线离起点最近的端点序号由高到低
    if(ee1 > 0 && bb2 < 0)
    { // 这两条等值线可以连接
        sample_1[i-begin] = j + 1;
        sam_num ++ ;
    }
}
// 2,等值线 A 的首尾端点序号都大于等于等值线 B 的首尾端点序号
else if(zy2 <= zx1 && zy2 <= zy1) // 第 1 条等值线离起点最近的端点序号小于第 2 条等值线离起点最近的端点序号
{
    // 第 1 条等值线离起点最近的端点序号由低到高
    // 第 2 条等值线离起点最近的端点序号由高到低
    if(ee1 > 0 && bb2 < 0)
    { // 这两条等值线可以连接
        sample_1[i-begin] = j + 1;
        sam_num ++ ;
    }
}
// 3,等值线 A 的首端点序号都小于等于等值线 B 的首尾端点序号,等值线 A 的尾端点序号都大于等于等值线 B 的首尾端点序号
else if(zx1 <= zx2 && zx1 <= zy2 && zy1 > zy2 && zy1 > =
```

```

zx2) // 第 1 条等值线离起点最远的端点序号大于第 2 条等
值线离起点最远的端点序号
{
    // 第 1 条等值线离起点最远的端点序号由高到低
    // 第 2 条等值线离起点最近的端点序号由低到高
    if (ee1 < 0 && ee2 > 0)
    { // 这两条等值线可以连接
        sample1[ i - begin ] = j + 1;
        sam_num ++ ;
    }
}
// 4, 等值线 B 的首端点序号都小于等于等值线 A 的首尾端
点序号, 等值线 B 的尾端点序号都大于等于等值线 A 的首尾
端点序号
else if (zx2 <= zx1 && zx2 <= zy1 && zy2 >= zy1 && zy2 >
= zx1) // 第 1 条等值线离起点最远的端点序号大于第 2 条
等值线离起点最远的端点序号
{
    // 第 1 条等值线离起点最远的端点序号由高到低
    // 第 2 条等值线离起点最近的端点序号由低到高
    if (ee1 > 0 && ee2 < 0)
    { // 这两条等值线可以连接
        sample1[ i - begin ] = j + 1;
        sam_num ++ ;
    }
}

```

其中 bb_1, ee_2 分别是第 1 条等值线首尾端点在边界上的走向(带有正负号); bb_2, ee_2 分别是第 2 条等值线首尾端点在边界上的走向(带有正负号)。

2.3 判断闭合等值线之间的包含关系

判断闭合等值线中有包含关系的等值线时, 首先从最小值开始判断是否包含其他等值线, 然后从最大值开始判断是否包含其他等值线。

根据包含关系就可以确定其填充颜色。

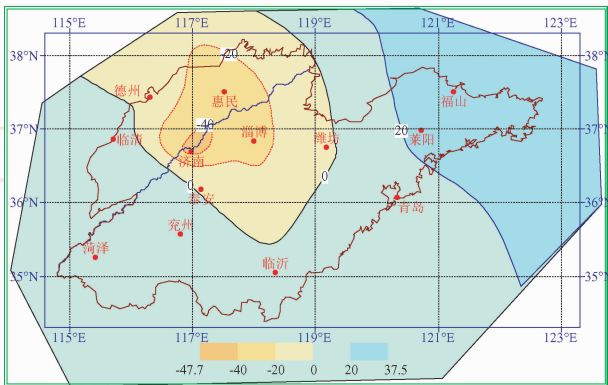
对于没有互相包含关系的闭合等值线, 需要先寻找在其内部的三角网格点, 并判断其内部数据的大小, 因为闭合等值线内部必然有 1 个或 1 个以上的三角网格点, 然后根据该三角网格点值和等值线值, 即可确定其填充颜色。

2.4 绘制填充等值线

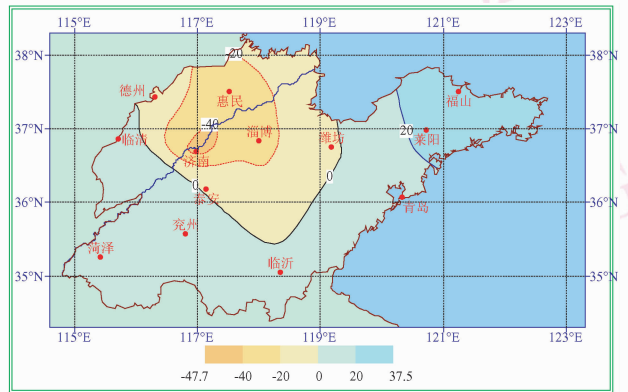
绘制填充等值线时, 首先绘制由非闭合等值线形成的闭合等值线和三角边界之间的闭合区域(空域); 接着显示非闭合等值线(未能生成闭合等值线); 然后根据等值线之间的包含关系进行绘制填充; 最后绘制填充剩下的单个闭合等值线。

2.5 根据地图边界裁剪绘制填充的等值线

有时候需要利用地图边界来对所绘制填充的等值线进行裁剪, 即绘制填充等值线后, 再把地图外面所有区域全部填充为其他颜色, 其填充效果见图 3。



(a) 未裁剪等值线图



(b) 裁剪等值线图

图 3 未裁剪和裁剪等值线对比图

Fig. 3 Cut and uncut contour comparison chart

3 结论

本文算法是先把采用三角网生成的非闭合等值线与自定义边界, 根据一定关系连接成闭合等值线,

然后通过确定各闭合等值线之间的包含关系来确定各等值线之间的填充颜色, 进而绘制出美观大方的等值线填充图。本文算法易于实现, 且运算速度较快, 能满足业务需求。对于由非三角网生成的等值线, 只要符合本文算法的要求, 经过适当修改, 也能

实现等值线的自动填充。

根据本文算法编制的程序,已经应用到日常业务中,可以绘制海温、山东省、山东省各市的等值线填充图,并取得了良好效果。

参考文献 (References)

- 1 Wu Zi-yin, Gao Jin-yao. A fast algorithm of color fill between contours based on grid data [J]. *Acta Geodaetica et. Cartographica Sinica*, 1999, **28**(4):350-354. [吴自银,高金耀.一种基于格网的快速等值线填充算法[J].测绘学报,1999,**28**(4):350-354.]
- 2 Chen Jian, Kong Yu-shou, Li Hui-jun. Automatic drawing of contours based on triangle-mesh meteorological fields [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, **32**(2):116-119. [陈剑,孔玉寿,李汇军.基于三角形网格的气象场等值线自动分析[J].气象科技,2004,**32**(2):116-119.]
- 3 Cheng Jian-mei, Chen Chong-xi, Sun Hong-lin. Automatic generation of contour in triangle mesh and its programming [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, **29**(10):23-26. [成建梅,陈崇希,孙红林.三角网格等值线自动生成方法及程序实现[J].水利学报,1998,**29**(10):23-26.]
- 4 Wang Ji-zhi, Tang Gui-sheng, Yang Yuan-qin. *Computer Graphics Display System Principle* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991. [王继志,汤桂生,杨元琴.微机图形显示系统原理[M].北京:气象出版社,1991.]
- 5 Wang Ji-zhi, Tang Gui-sheng. *Weather Graphics Principles and Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1991. [王继志,汤桂生.气象图形显示原理与方法[M].北京:科学出版社,1991.]
- 6 Yan Shi-qiang, Xiong De-qi, Teng Guang-wei, et al. Projection conversion of graphic and its application in marine numerical prediction based on GIS [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2003, **22**(4):321-326. [严世强,熊德琪,滕广伟等.地图投影及其在基于GIS的海洋数值预报中的应用[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2003,**22**(4):321-326.]
- 7 Yang Qin, Xu Yong-an, Chen Qi-ming, et al. Triangulation algorithm of scattered data on arbitrary planar domain [J]. *Journal of Software*, 1998, **9**(4):241-245. [杨钦,徐永安,陈其明等.任意平面上离散点集的三角化方法[J].软件学报,1998,**9**(4):241-245.]
- 8 Sun Yu-wen, Wang Xiao-ming, Liu Jian. Triangulation of scattered data and its application to rapid prototyping manufacturing [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, **40**(1):98-101. [孙玉文,王晓明,刘健.散乱数据的三角剖分及其在快速原型制造中的应用[J].大连理工大学学报,2000,**40**(1):98-101.]
- 9 Li Hui-jun, Kong Yu-shou, Wang Chang-yu. The application of the optimized triangulation to conventional meteorological observation network [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2001, **2**(1):91-96. [李汇军,孔玉寿,王昌雨.最优三角形剖分在常规气象观测网上的应用[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2001,**2**(1):91-96.]
- 10 Yu Wei-dong, Li Xiang-ge, Wang Jing. Automatic meteorological field contour map [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2002, **30**(4):222-225. [余卫东,李湘阁,王靖.气象场等值线自动绘制[J].气象科技,2002,**30**(4):222-225.]
- 11 Tang Zi-dong, Feng Xiao-yun, Zheng Ming-xi, et al. Introducing the program of drawing isoline of the factor field distributing image [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, **34**(4):490-493. [汤子东,冯晓云,郑明玺等.气象要素场等值线图自动绘制[J].气象科技,2006,**34**(4):490-493.]
- 12 Baidu Encyclopedia. Triangulation Irregular Net [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/542738.htm>, 2006-10-11. [百度百科.不规则三角网 [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/542738.htm>, 2006-10-11.]
- 13 Zhang Deng-rong, Liu Shao-hua, Mao Tian-lu, et al. An algorithm of automatic creation of topological relation and its application of fast color fill between contours [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2001, **6A**(3):264-269. [张登荣,刘绍华,毛天露等.等值线自动建立拓扑关系算法与快速填充应用[J].中国图象图形学报,2001,**6A**(3):264-269.]