

实时地震监测台网中 Voronoi 图生成算法的改进^{*}

赵 瑞, 刘希强

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 地震预警是近年来发展起来的地震监测新技术和震灾防御新手段, 实时地震监测台网中 Voronoi 图生成算法研究可为地震早期预警系统提供有效的技术支持。在对 Voronoi 图逐点插入算法进行分析研究的基础上, 结合实时地震监测台网运行实际, 提出了改进后的局部三角网格生长法, 能够快速有效生成除中断台站之外正常运行台站的 Voronoi 单元, 同时有效约束凸壳的生成。与传统方法相比, 该方法生成的 Voronoi 图不失精度, 但运行时间更短。

关键词: 实时地震监测; Voronoi 图; Delaunay 三角形; 逐点插入算法; 局部三角网格生长法

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)02-0244-07

0 引言

建设地震监测台网的主要科学目的之一就是一旦地震发生后, 第一时间开展地震速报工作。当前基于实时地震监测台网建立地震预警系统和地震应急控制系统在国际上已形成潮流。日本、美国、墨西哥、土耳其、意大利、瑞典、罗马尼亚、中国台湾等地震多发国家和地区发展了多套预警系统, 如日本铁路 UrEDAS 系统、墨西哥 SAS 和 SASO 系统、美国 ElarmS 和 PreSEIS 系统、土耳其 PreSEIS 和 SO-SEWIN 系统等, 并有一些成功预警且收到减灾实效的先例 (Gasparini *et al*, 2007; Wu *et al*, 2007; Allen *et al*, 2009; 殷海涛等, 2012)。在地震预警技术中, Voronoi 图 (以下简称 V 图) 在地震事件触发判断、地震定位等方面已得到初步应用 (Rydelek, Pujol, 2004; Horiuchi *et al*, 2005; Satriano *et al*, 2008; 王庆民等, 2012); 同时在地理信息系统、计算机图形学、气象学、虚拟现实、机械工程、机器人等领域也有着广泛的应用 (刘金义, 刘爽, 2004; 范会川等, 2010)。

V 图最早可追溯至 1908 年, Georgy Voronoi 首先在数学上限定了每个离散点的有效作用范围, 提出了二维 V 图 (Voronoi, 1908)。1934 年, Boris Delaunay 提出 Delaunay 三角网, V 图与 Delaunay 三

角网格互为对偶图, 可通过 Delaunay 三角网格寻找与每个离散点相关的三角形, 顺序连接每个三角形的外接圆心得多边形, 即为 V 图 (孙继忠等, 2010)。经过众多专家学者的研究, Delaunay 三角网的生成算法日趋成熟。目前主要有分割—归并法、逐点插入法和三角网格生长法及每种方法的改进算法, 其中前两种方法应用较多 (Aurenhammer, 1991; Delaunay, 1934; Okabe *et al*, 1994)。每种算法各有其优缺点, 分割—归并算法适合离散点较多的情况, 但该算法含有大量迭代运算, 空间复杂度高, 并且凸壳形成时, 算法较复杂, 时间复杂度也较高 (周培德, 2000)。逐点插入法算法简单, 占用内存少, 空间和时间复杂度不高, 但没有很好地解决凸壳问题。三角网格生长法算法简单, 以基边为循环条件, 产生凸壳时较困难, 同时易产生边与边相交, 不利于 Delaunay 三角网格优化。武晓波等 (1999, 2000) 将逐点插入法与分割—归并法相结合, 提高了计算速度, 降低了算法复杂度, 但同样没有很好解决凸壳、初始三角网的生成问题。王强等 (2010) 在此合成算法的基础上, 提出一种改进的 Delaunay 三角网生成算法, 采用虚拟四边形凸壳, 较好解决了初始三角网的生成问题, 但是在删除虚拟顶点时, 若想保证实际凸壳的正确性, 必须提前在程序中对离散的数据点进行预处理排序, 排序原理没有给出很好的说明, 同时采用这种合并算

^{*} 收稿日期: 2013-12-13.

基金项目: 国家科技支撑项目 (2012BAK19B04), 地震科技星火计划项目 (XH12029) 和山东省地震局重点科研基金项目 (JJ1309Y) 联合资助。

法对 Delaunay 三角网优化时, 复杂度高于其它算法。

在实时地震监测台中, 当在台站中断记录时段发生地震, 利用 V 图进行地震定位必须要调整 V 图布局, 若考虑所有正常台站重新计算 V 图则复杂度会明显加大, 如何能在不改变全局 V 图的前提下, 快速完成对中断台站 V 图单元的重新剖分, 又不失精度, 是地震预警系统中需要解决的问题。

1 V 图生成算法

以山东测震台网 79 个台站为例, 生成 V 图的主要技术思路是选择算法较简单的逐点插入法, 采用向量关系解决节点定位 (王强等, 2010), 同时对点集进行预处理、Delaunay 三角网生成进行改进, 从而保证凸壳的客观性。

1.1 初始凸壳的生成

采用虚拟矩形方式生成初始凸壳, 由 4 个顶点 ($[\text{Min}(x), \text{Min}(y)]$ 、 $[\text{Min}(x), \text{Max}(y)]$ 、 $[\text{Max}(x), \text{Min}(y)]$ 、 $[\text{Max}(x), \text{Max}(y)]$) 形成矩形, 同时判定顶点是否属于原有节点, 如果

不属于, 则将该虚拟顶点加入到离散点集进行循环计算。分两种情形生成初始三角形: 一是当 4 个顶点不相重复, 则按图 1a 生成初始三角形; 二是当 4 个点有相重点时, 则按图 1b 生成初始三角形。根据节点所在位置, 在图 1 上显示 $R1$ 、 $R2$ 、 $R3$ 和 $R4$ 四个区域。

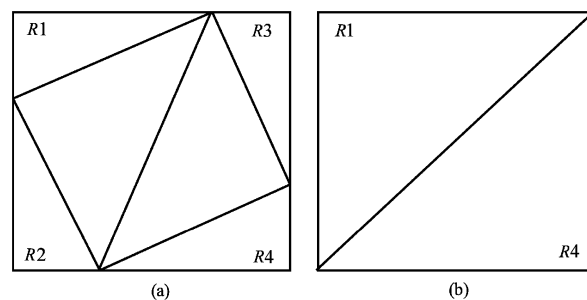


图 1 初始三角形生成图情形 1 (a) 和情形 2 (b)

Fig. 1 Generating the initialization triangle in situation 1 (a) and situation 2 (b)

1.2 点集预处理

为保证凸壳的有效生成, 即删除原始虚拟凸壳顶点时不出现凹陷面, 需要在逐点插入算法前, 对节点进行排序。图 2a 中当前节点 M 位于第 $R1$

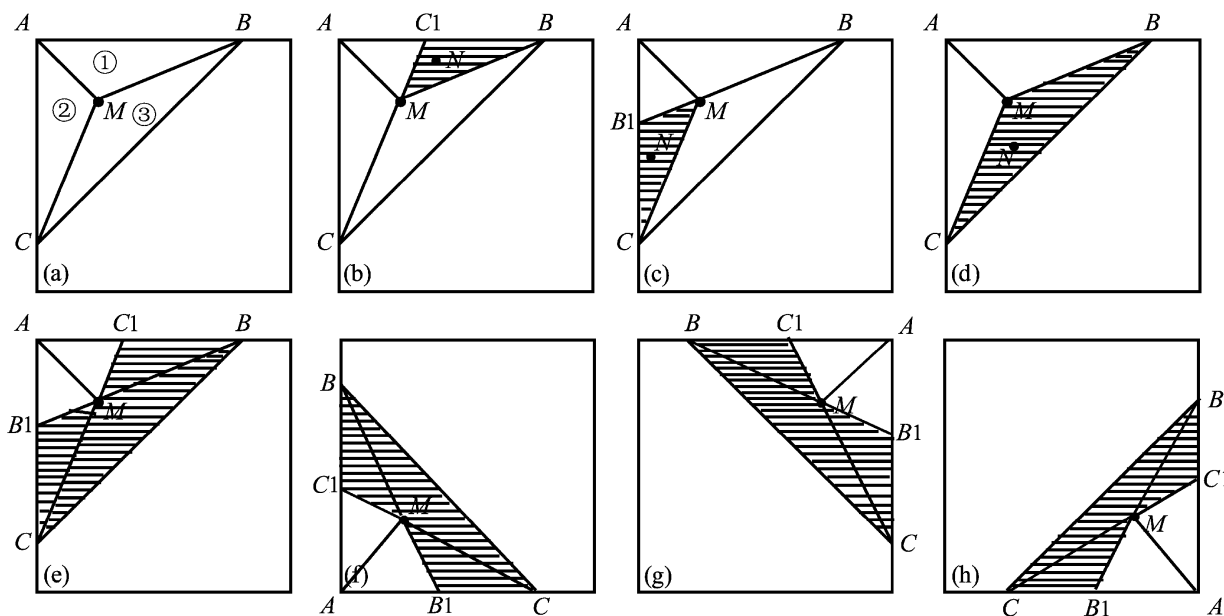


图 2 点集预处理

(a) M 点位于 $R1$ 区; (b) N 点位于 $R1$ 区中①区; (c) N 点位于 $R1$ 区中②区; (d) N 点位于 $R1$ 区中③区; (e) M 点位于 $R1$ 区; (f) M 点位于 $R2$ 区; (g) M 点位于 $R3$ 区; (h) M 点位于 $R4$ 区

Fig. 2 Preprocessing of point set

(a) point M locates in zone $R1$; (b) point N locates in zone ① of zone $R1$; (c) point N locates in zone ② of zone $R1$; (d) point N locates in zone ③ of zone $R1$; (e) point M locates in zone $R1$; (f) point M locates in zone $R2$; (g) point M locates in zone $R3$; (h) point M locates in zone $R4$

区域时, 连接 MA , MB , MC 生成 3 个新的三角形区域①、②、③。图 2b 中当后节点 N 位于①区时, 做线段 CM 的延长线至 AB , 交点为 C_1 , 当点 N 位于 $\triangle C_1BM$ 内部时 (图 2b 中阴影区), 能够满足 $BNMC$ 的连线为凸面, 则将 N 点排在 M 点后, 反之, 调换 M 与 N 点顺序。图 2c 中当点 N 位于②区时, 做线段 BM 的延长线至 AC , 交点为 B_1 , 当点 N 位于 $\triangle C_1BM$ 内部时, 点 $BMNC$ 的连线为凸面, 则将点 N 排在 M 点后, 反之, 调换 M 与 N 点的顺序。当点 N 位于图 2d 阴影区内时, 点 BMC 的连线均为凸面, 则点 N 排在点 M 后。总之, 当点 N 位于图 1 第 $R1$ 区中如图 2e 所示阴影区内时, 不用调换 M 与 N 点的顺序, 反之需要调换顺序。同理, 当点 N 位于图 1 第 $R2$ 、 $R3$ 和 $R4$ 区域内的阴影区时, 不需要调换 M 与 N 点的顺序 (图 2f~h)。

1.3 逐点插入算法

根据王强等 (2010) 向量叉乘算法来判定点与三角形的位置。逐点插入时, 每当新边、新三角形生成时, 其编号权重设置为 1。

1.4 Delaunay 三角剖分优化算法

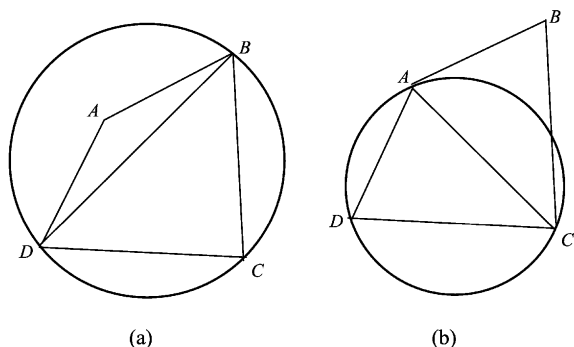


图 3 Delaunay 三角优化前 (a) 和优化后 (b)

Fig. 3 Delaunay triangles before (a) and (b) after optimization

判断新生成的三角形是否为 Delaunay 三角形, 即判断是否满足 Delaunay 三角形的空圆特性。首先判断四边形 $ABCD$ 是否为凸四边形。为避免复杂的平方、开方计算, 同样引入向量叉乘的概念。如图 3 所示有两个待优化的三角形 ABD 和 BCD , 连接 AD , DC , CB , AB , 得到 4 个向量, 如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} \vec{AD} = (D.x - A.x) \cdot \vec{i} + (D.y - A.y) \cdot \vec{j} \\ \vec{DC} = (C.x - D.x) \cdot \vec{i} + (C.y - D.y) \cdot \vec{j} \\ \vec{CB} = (B.x - C.x) \cdot \vec{i} + (B.y - C.y) \cdot \vec{j} \\ \vec{AB} = (B.x - A.x) \cdot \vec{i} + (B.y - A.y) \cdot \vec{j} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_1 = \vec{DC} \times \vec{DA} = D.C.y * D.A.x - D.C.x * D.A.y \\ T_2 = \vec{DC} \times \vec{CB} = D.C.y * C.B.x - D.C.x * C.B.y \\ T_3 = \vec{AB} \times \vec{AD} = A.B.y * A.D.x - A.B.x * A.D.y \\ T_4 = \vec{AB} \times \vec{BC} = A.B.y * B.C.x - A.B.x * B.C.y \end{cases} \quad (2)$$

当四边形为凸四边形时, 向量 \vec{DA} 、 \vec{CB} 在 \vec{DC} 的同侧, 并且向量 \vec{AD} 、 \vec{BC} 在 \vec{AB} 的同侧, 即 T_1 与 T_2 同号, 且 T_3 与 T_4 同号 (如式 (2) 所示)。确定为凸多边形后, 分别求取 $\triangle ABD$ 、 $\triangle BDC$ 的外接圆圆心, 判定是否满足空圆性。如果圆内有其他顶点, 则交换四边形的对角线。原 $\triangle ABD$ 及 $\triangle BDC$ 的权重设置为 0, 边 BD 的权重设置为 0, 新生成的两个三角形, 即 $\triangle ADC$ 及 $\triangle ABC$ 的权重设置为 1, 边 AC 的权重设置为 1。

为降低 Delaunay 三角网格优化的复杂度, 在逐点插入过程中进行优化。当所有离散点插入之后, 再次对全体三角形进行优化, 以期全部达到 Delaunay 三角剖分的准则。按照本文选取的研究区域 ($33.0^\circ \sim 40.0^\circ \text{N}$, $114.5^\circ \sim 122.5^\circ \text{E}$), 将经纬度转换成直角坐标, 研究范围为 $800 \text{ km} \times 800 \text{ km}$ 。由山东地区测震台网生成的 Delaunay 三角剖分图见图 4。

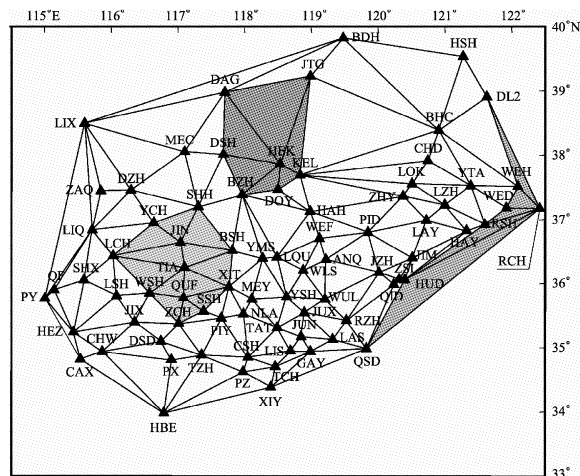


图 4 由山东测震台网生成的 Delaunay 三角剖分图

Fig. 4 Delaunay triangulation diagram generated by Shandong Seismic Network

1.5 V 图生成算法

存储每个台站所涉及三角形的个数及编号, 按一定顺序对三角形外接圆心进行排序连接, 即得到此台站的 V 图单元。同理, 依次遍历所有台站, 得到研究区域的 V 图见图 5。

当多个中断台站相邻时,此空区不一定为凸多边形,有可能存在凹陷的边界(图 6c),这时无论采取分割—归并法、逐点插入法或传统的三角网格生长法均不能完全保证空区边界点所重新形成的凸壳与空区边界线重合,并且易存在空区新凸壳与空区边界线相交的情况,这为小空区内 Delaunay 三角剖分、V 图生成增加了难度。笔者在传统的三角网格生长法上提出了一种改进方法,使其保证空区凸壳的完整,步骤如下:

(1) 如图 6b~e 所示,中断点设为点 O ,选取空区中任意两条相交边 AB 、 BC ,当 AO 、 AC 在 AB 边同侧且 CA 、 CO 在 CB 边同侧,即 T_5 与 T_6 同号, T_7 与 T_8 同号时,连接 AC 形成新三角形 $\triangle AOC$ 、 $\triangle ABC$ (见图 6b、6d),反之不能形成新的三角形,

如图 6c、6e 所示。

$$\begin{cases} T_5 = \mathbf{AB} \times \mathbf{AC} = AB.y * AC.x - AB.x * AC.y \\ T_6 = \mathbf{AB} \times \mathbf{AO} = AB.y * AO.x - AB.x * AO.y \\ T_7 = \mathbf{CB} \times \mathbf{CA} = CB.y * CA.x - CB.x * CA.y \\ T_8 = \mathbf{CB} \times \mathbf{CO} = CB.y * CO.x - CB.x * CO.y \end{cases} \quad (3)$$

(2) 当空区内所有三角形形成后,在空区内对其进行优化,使之成为 Delaunay 三角形。针对图 6a 中存在 5 个中断台站的情形,应用上述思路,生成的新的 Delaunay 三角剖分图见图 7a,3 个空区新生成的三角形用不同颜色标识出。

(3) 遍历所有台站,生成新 V 图 (图 7b),其中由于台站中断而涉及 V 图变化的区域用不同颜色给出。

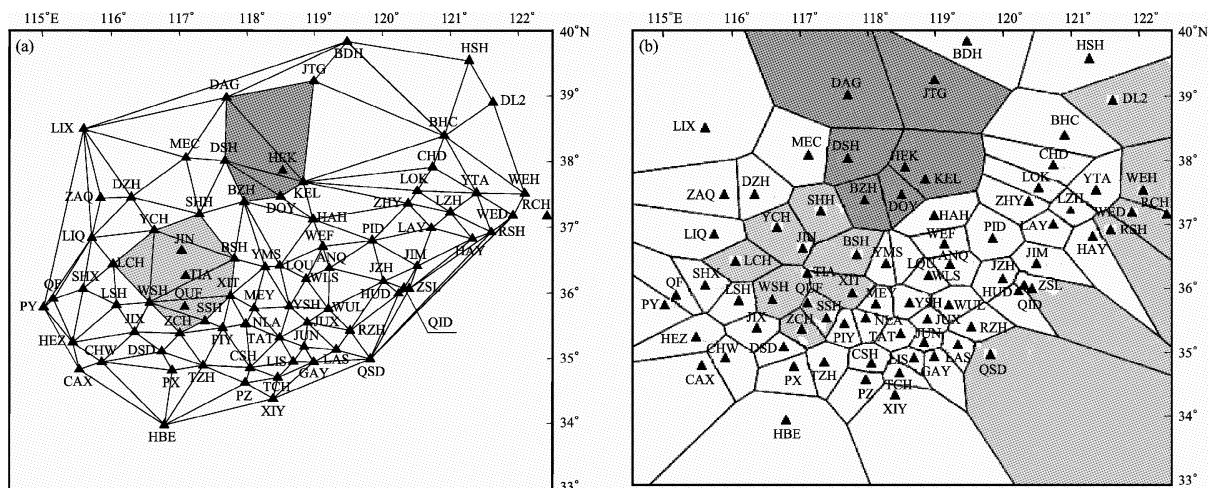


图 7 考虑地震台站中断时生成的 Delaunay 三角剖分图 (a) 和新生成的 Voronoi 图 (b)

Fig. 7 Delaunay triangulation (a) and the new Voronoi diagram (b) generated by considering the interrupted seismic stations

3 计算时间测试

为测试算法改进后的实际效果,我们进行了计算时间的测试,这也是在地震预警系统中必须解决的一个科学问题。本文程序编写采用 Fortran 语言,时间对比均采取相同的硬件条件(联想台式机,主频 2.83G)。下面分为两种情况进行讨论:

第一种是台站不存在中断的情况,采用改进后的逐点插入法与传统的逐点插入法进行对比。分别模拟 1 000 个、2 000 个、5 000 个、10 000 个节点数据,运算得到 Delaunay 三角网格的 CPU 计算时间,对比如表 1。

表 1 Delaunay 三角网格剖分算法改进前后对比表

Tab. 1 The comparison of delaunay triangulation algorithm before and after improvement

点数	三角形个数	本文算法耗时/s	传统法耗时/s
1 000	1 981	0.833	1.324
2 000	3 970	2.068	4.763
5 000	9 971	7.984	11.694
10 000	19 960	23.898	32.486

第二种是模拟山东地区存在 5 个中断台站,除去中断点,其余 74 个台站点重新剖分生成 Delaunay 三角网格与本文提出的局部采用改进后的三角网格生长法所用的时间进行对比分析。前者生成

的 Delaunay 三角网格如图 8 所示。这两种方法所用的时间分别是 0.35 和 0.10 s, 生成 V 图的计算时间分别是 0.52 s 和 0.15 s。

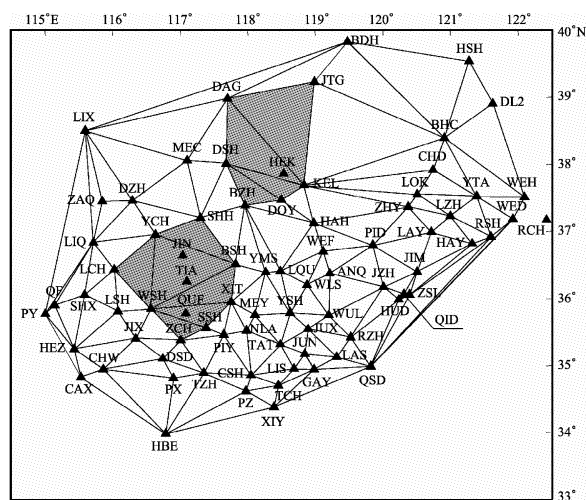


图 8 除去 5 个中断台站后新生成的
Delaunay 三角剖分图

Fig. 8 The new generation Delaunay triangulation
by removing five interrupt stations

通过两种计算时间对比, 可以看出本文提出的 V 图生成算法优于传统的逐点插入法, 在实际台网中, 台站数量较少的情况下, 基本上是瞬间完成的, 并且地震台站中断时, 局部采用改进后的三角网格生长法与除去中断点、重新剖分 Delaunay 三角网格得到的结果是一致的, 但在计算用时上优于后者。

4 结语

本文对实时地震监测台网 V 图的逐点插入算法的细节进行了梳理, 明确了点集预处理的准则, 改进了 Delaunay 三角网格优化算法, 提高了计算速度, 并且考虑了实际台网运行过程中, 地震台站中断时, V 图重新生成的情况。其突出的优点是在不改变全局 V 图的前提下, 局部区域采用三角网格生长法, 完成对中断台站 V 图单元的重新剖分, 即使在网缘台站中断的情况下, 也能有效地约束凸壳的生成。通过计算时间的对比, 可以看出在同等效果的基础上, 计算用时要优于除去中断台站, 重新剖分 Delaunay 三角网格。

V 图在地震监测预报中具有潜在应用前景, 如根据触发台站所在 V 图单元的集中性判定是否有

地震事件发生, 根据 V 图单元面积, 搜索得到区域内相关地理信息及应急资源信息, 同时结合其它台站记录信息, 迅速判定震中位置, 为地震早期预警系统提供有效的技术支持。

本文在撰写过程中得到国家科技支撑课题组 (2012BAK19B04) 和地震科技星火计划项目组 (XH12029) 成员的帮助, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 范会川, 周慧娟, 贾利民. 2010. Voronoi 图和 Delaunay 三角网在铁路应急管理中的运用[J]. 中国科技信息, (8): 245-247.
- 刘金义, 刘爽. 2004. Voronoi 图应用综述[J]. 工程图学学报, 25(2): 125-132.
- 孙继忠, 胡艳, 马永强. 2010. 基于 Delaunay 三角剖分生成 Voronoi 图算法[J]. 计算机应用, 30(1): 75-77.
- 王强, 郑逢斌, 乔保军, 等. 2010. 一种改进的 Delaunay 三角网生成算法[J]. 计算机应用与软件, 27(8): 138-140.
- 王庆民, 刘希强, 沈得秀. 2012. Voronoi 图和双曲线联合方法在地震快速定位中应用[J]. 西北地震学报, 34(3): 234-244.
- 武晓波, 王世新, 肖春生. 1999. Delaunay 三角网的生成算法研究[J]. 测绘学报, 28(1): 28-35.
- 武晓波, 王世新, 肖春生. 2000. 一种生成 Delaunay 三角网的合成算法[J]. 遥感学报, 4(1): 32-35.
- 殷海涛, 刘希强, 李杰, 等. 2012. 现今地震预警技术及其在国内发展状况的探讨[J]. 中国地震, 28(1): 1-9.
- 周培德. 2000. 计算几何算法分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社.
- Allen R. M., Gasparini P., Kamigaichi O., et al. 2009. The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview[J]. Seismol. Res. Lett., 80(5): 682-693.
- Aurenhammer F.. 1991. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure [J]. ACM Computing Surveys, 23(3): 345-405.
- Delaunay B Sur la Sphere Vide. 1934. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR[J]. Classe des Sciences Mathematiques et Naturelles, 8: 793-800.
- Gasparini P, Manfredi G, Zschau J. 2007. Earthquake Early Warning System [M]. Germany: Springer-Verlag, 249-282.
- Horiuchi S., Negishi H., Abe K., et al. 2005. An Automatic Processing System for Broadcasting Earthquake Alarms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2): 708-718.
- Okabe A., Boots B., Sugihara K.. 1994. Nearest neighborhood operations with generalized Voronoi diagrams: A review[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 8(1): 43-71.
- Rydelek P., Pujol J.. 2004. Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(4): 1546-1550.
- Satriano C., Lomax A., Zollo A.. 2008. Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning[J]. Bulletin of the Seismo-

- logical Society of America, 98(3):1482–1494.
- Voronoi G. . 1908. Nouvelles Applications des Paramètres Continus, a la Theorie des Formes Quadratiques. Deuxieme Memoire; Recherches sur les Paralleloedres Primitifs[J]. Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik, 134:198–287.
- Wu Y. M. , Kanamori H. , Allen R. M. , *et al.* 2007. Experiment using the tau-c and pd method for earthquake early warning in southern California[J]. Geophys. J. Int. , 170:711–717.

Improvement of Voronoi Diagram Generation Algorithm in Real-time Seismic Monitoring Network

ZHAO Rui, LIU Xi-qiang

(*Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

Earthquake early warning develops in recent years, which is a kind of new earthquake monitoring technology and earthquake disaster prevention. The research on Voronoi diagram generation algorithm in real-time seismic monitoring network can provide the effective technical support for earthquake early warning system. Basing on the analysis and research on the incremental insertion algorithm of Voronoi diagram, combined with the actual running conditions of real-time seismic monitoring network, an improved local triangulation generation algorithm is proposed, which could generate Voronoi cells of the normal operation of the stations quickly and efficiently except for the interrupt stations. Meanwhile, it is possible to constraint the generation of the convex hull. Compared to the traditional method, the Voronoi diagram generates by the proposed method which is able to guarantee accuracy, and is superior in shorter CPU times.

Key words: real-time seismic monitoring; Voronoi diagram; Delaunay triangulation; incremental insertion algorithm; local triangulation generation algorithm