

一种速定地震震中位置的最优化方法

陈 龙

(中国科学院自动化研究所)

摘 要

本文先将确定地震震中位置问题转化成求某一指标函数的极值问题,然后用最优化方法提出了一种确定震中位置的实用方法。方法的优点是适用性好、求解速度快、对台站数量及布局的依赖性小,在仅有三个台站时,也能确定震中的位置。

一、引 言

震级较高的地震是一种灾害,监视和预报地震是人类梦寐以求的愿望。为此,世界上多地震的国家,在积极探讨地震发生机理及其数学模型的同时,在不同地域建立了一系列地震观测台网,这既是监测地震的需要,也是为了积累地震资料,以便为有朝一日彻底解决地震的预报创造条件。

地震台网主要用于观测、记录和预报地震,系统呈网状结构。当网内台站记录到地震波信号后,快速而准确地确定地震三要素(震中位置、震级大小和发震时间),是该类系统的主要功能。因此,该类系统是以计算机为核心的快速响应系统。其中确定震中位置的方法不仅与系统完成测震所需时间密切相关,而且直接影响测震结果的精度。

传统的确定震中位置的方法主要是多台交汇方法。在具有多台记录的前提下,有的方法只需要台站记录到地震波的纵波到时值 \bar{P} ;有的方法既要有 \bar{P} 值,又需有地震波之横波到时值 \bar{S} 。不同方法所需台站个数亦不相同,对近震或远震的适用程度也不相同。另一类方法是基于地震波走时方程的数学方法,它至少需有五个台站的 \bar{P} 值方能进行求解。上述两类方法对于仅有三个台站 \bar{P} 值的情况,都是无能为力的。

对于以监视网内地震为目的的区域性近震台网而言,如能在网内台站个数较少的情况下仅通过本台网快速和准确地确定震中位置,则对于降低该类系统的投资、加快台网建设进度、实现网内地震的快速自测自报,都是有益的。本文依据最优化理论,提出了一种实现方法。该方法在仅有三个台站记录到地震波纵波到时值 \bar{P} 时,就能很快确定出网内近震的震中位置。

二、数学描述

设台网内共有 M 个观测记录台站 ($M \geq 3$), 当发生一次地震时, 各台站之微震仪记录到地震波的纵波到时值为 $\bar{P}_i (i = 1, 2, \dots, M)$. \bar{P}_i 均为绝对时间值.

台网中经纬度坐标为 (λ, φ) 的任一点到经纬度坐标为 (λ_i, φ_i) 的观测台站的直线距离为 Δ_i (公里), 则有

$$\Delta_i = 111.199 \left[(\varphi - \varphi_i)^2 + (\lambda - \lambda_i)^2 \cos^2 \frac{\varphi + \varphi_i}{2} \right]^{1/2}.$$

地震波在介质内的传播路径(即地震射线)与介质有关, 在均匀介质中, 它是直线; 在非均匀介质中, 因存在反射和折射现象将呈曲线. 地震波沿地震射线从震源点传播至各台站的行进时间, 称为地震波走时.

研究地震波在某区域内的传播模型可有微观和宏观两种方法. 前者根据介质状况和地震波传播规律得出数学模型, 后者则脱离介质状况仅根据大量的实测数据用数学方法归纳而成. 对于不同的区域, 因地质条件不同, 地震波的走时公式或走时表也不相同. 对北京地区而言, 在地震波走时 T_i 和传播直线距离 Δ_i 之间存在有下列近似公式:

$$T_i = \begin{cases} \Delta_i/6, & \text{当 } \Delta_i < 187.1 \text{ 公里时;} \\ \Delta_i/7.9 + 7.5, & \text{当 } \Delta_i \geq 187.1 \text{ 公里时.} \end{cases}$$

如果坐标为 (λ, φ) 之点确是震源点, 则有 $\bar{P}_i - T_i = c_i$, 反映的是由第 i 个台站定出的该次地震的发震时间. 如果上述走时公式确能宏观地反映地震波在该区域内传播的客观效果, 同时各台站的纵波到时值 \bar{P}_i 又是准确的, 则由所有各台站定出的该次地震的发震时间 $C_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 应该是相同的. 实际上由于走时公式的近似性和微震仪的记录与读出误差, 要求所有 C_i 值相等是不现实的. 但对于震源点, 要求所有 C_i 值均较相近则是合理的; 而对于非震源点, 按上述方法求出的所有 C_i 值之间, 其离散程度一定较大, 故可以

$$Q = \text{Max}_{i,j=1,\dots,M} |(\bar{P}_i - T_i) - (\bar{P}_j - T_j)| = F(\lambda, \varphi)$$

作为衡量坐标为 (λ, φ) 之点与震中接近程度的指标函数, 即对该点以所有各台站定出的发震时间中的最大离散度作为指标函数.

对于发生在网内的地震, 因震中位置是存在和唯一的, 故指标函数为极小值 $Q^* = \text{Min } Q$ 之点定是震源点. 当然, 这是局部极值, 至于在多大范围内能保证该指标函数是以震源点为谷底的单峰函数, 即凹函数, 则较难以估算, 只能通过试探法进行验算. 由此, 将确定震中位置问题已转化成在某个区域内寻找使指标函数取极小值之点的问题. 由于该指标函数是二维的非线性函数, 故求震中问题是在无约束条件下求该非线性函数的极值问题, 这正是最优化问题, 可用直接法求解.

综上所述, 该方法实质上是对每两个台站作一条震中轨迹线, 对该轨迹线上的任何一点, 以此两台站定出的发震时间值是相等的. 这样 M 个台站将有 $(M - 1)$ 条独立的震中轨迹线, 这些轨迹线的交汇点就是震中位置. 由此可见, 台网中只需有三个台站记录到纵波到时值, 就可以确定震中的位置. 当然台站的纵波到时值应该是准确的, 在此前提下, 所

用台站个数的多少与结果的精度基本上是无关系的。此外,该方法在确定震中位置的同时,可将发震时间也一并定出,这些都是此方法的独特之处。

三、基本方法

使用直接搜索法求解无约束条件下非线性函数的极值问题,其实质是利用已有信息,通过空间点的移动、比较,逐步改善指标函数值,最后达到最优点。可采用的方法有多种,

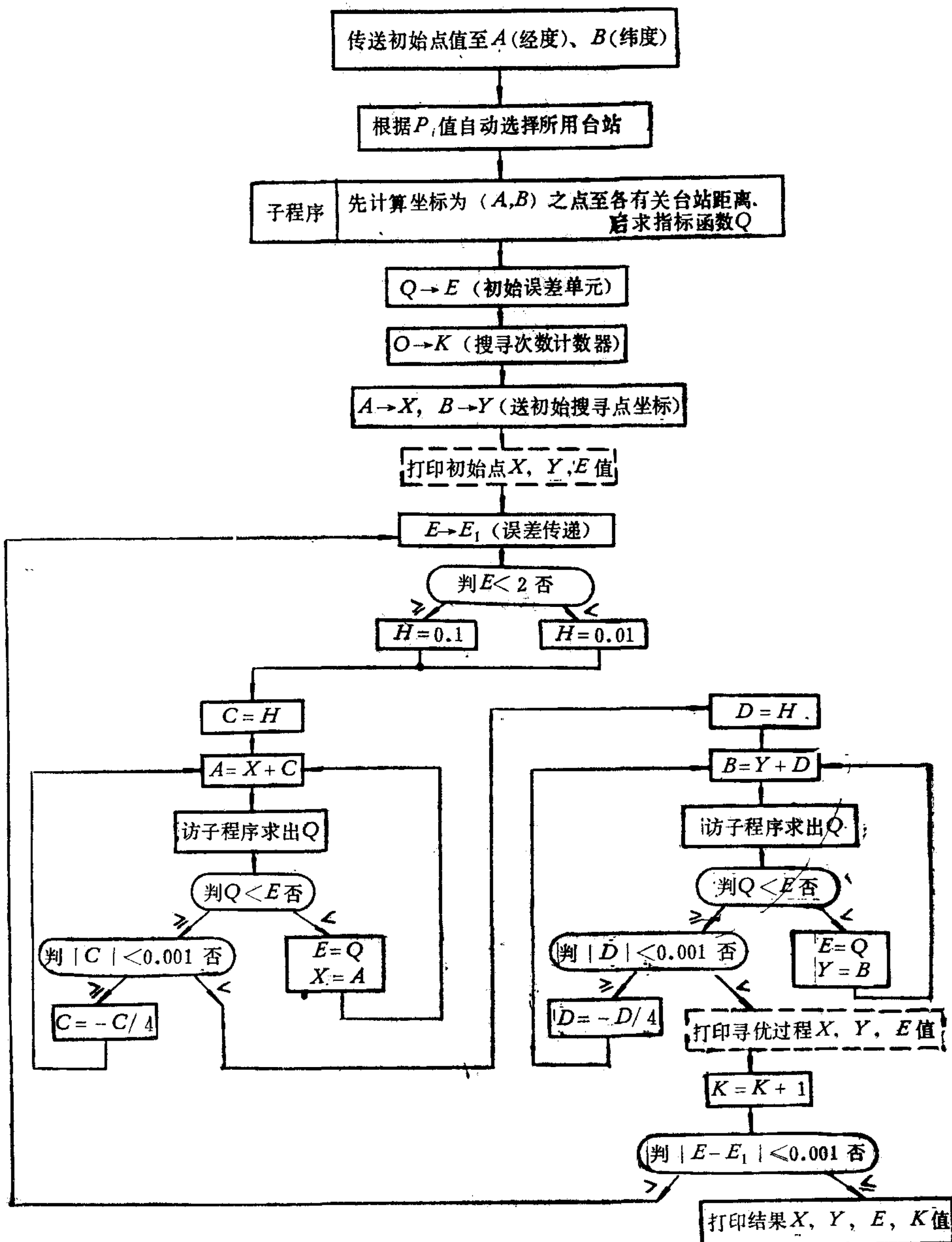


图 1

但由于确定震中位置是定出其经纬度值,而指标函数也是经纬度的函数,即 $Q = F(\lambda, \varphi) = F(X)$, 点 $X = (\lambda, \varphi)$, 故直接以经度和纬度作为搜索的坐标,采用坐标轮换寻优方法是可取的. 实现途径是将此二维寻优问题转化成两次一维的寻优,其过程是:

1) 首先选择一个初始点,设其经纬度值是 $(\lambda_0, \varphi_0) = X^{(0)}$.

2) 从该点出发,先沿经度方向搜寻最优点,即找出经度方向上的最优点 (λ_1, φ_0) , 使

$$Q_1 = F(X^{(1)}) = F(X^{(0)} + \alpha_1 s_1) = \underset{\alpha}{\text{Min}} F(X^{(0)} + \alpha s_1),$$

$$s_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \alpha_1 \text{ 为最优步长.}$$

为此,使用稍加修改的进退法(成功失败法)来进行一维寻优. 设从 A 点搜索至 B 点,如果 B 点的指标函数值比 A 点的值小,即 $Q_B < Q_A$ 时,则认为 B 点优于 A 点,可取 B 点作为新的开始点,并仍沿此方向继续搜索. 因是近震台网,故搜索过程中每两步间的步长 H 值不宜取得过大. 为了先粗后细,可安排两种不同大小的步长值,同时每次正向搜索只增加步长 H 的单位增量. 如果从 A 点向 B 点正向搜索失败,即 $Q_B \geq Q_A$, 则搜索点应先退至 A 点,下一步沿相反方向进行小步搜索,此时步长可取为前次搜索步长值的 $1/4$,如此继续,直至找到经度方向上的最优点或者搜索步长值已足够小时为止.

3) 类似于2),在纬度方向上搜寻最优点,即找到点 $X^{(2)} = (\lambda_1, \varphi_1)$, 使

$$Q_2 = F(X^{(2)}) = F(X^{(1)} + \alpha_2 s_2) = \underset{\alpha}{\text{Min}} F(X^{(1)} + \alpha s_2),$$

$$s_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \alpha_2 \text{ 为最优步长.}$$

4) 由2)3)两步得到一个新点 $X^{(2)}$, 若该点的指标函数值优于初始点且指标函数值已小于规定的误差值,或者指标函数在搜索过程中已无改进时,则寻优过程结束,终点为局部极值点;否则重复2)3)两步,直至寻优结束为止. 图1为基本方法的框图.

四、试验结果与讨论

为了证明本方法的有效性,以国家地震局有线台网中的平谷、马道峪、白家疃、周口店、沙城和喇叭沟门六个台站构成北京地区试验台网,以参考文献[1]中的地震数据为例,进行了寻优试验,均能获得较满意的结果. 用本方法确定的震中与实际震中相比,误差绝大部分在十公里之内. 本方法求解速度快,使用以 FORTRAN 语言编写的程序,在小型机和微型机上进行计算,大多在一到两分钟内可得到结果. 表1示出了部分试验结果.

前已论及,无论采用何种测震方法,重要的是各台站之到时值 \bar{P} 必须是准确的. 本方法也不例外,在此前提下,其结果与所用台站个数的多少以及台站的组合方式基本无关. 表2以1972年3月27日白家疃地震 ($M_s = 3.5$) 为例,列出了使用不同个数台站及台站的不同组合情况下的寻优结果.

在假定所用走时公式确能反映该区域地质状况的条件下,影响结果精度的主要因素将是各台站 \bar{P} 值的准确程度. 如果参与计算之台站的 \bar{P} 值全部是准确的,则参与搜索台站的多少对结果影响甚微;如果其中有个别台站的 \bar{P} 值不准(如表2中的白家疃台站),则

表 1.

地震实例	使用台站个数	震中位置	寻优结果	搜寻次数	指标函数终值
1972.3.27 白家疃地震 ($M_S = 3.5$)	6	116°10'0'' 40°4'30''	116°13'53'' 40°4'42''	3	2.090702
1972.3.25 马道峪地震 ($M_S = 4.0$)	6	116°37'12'' 40°26'30''	116°40'37'' 40°22'24''	2	3.250306
	5	116°51'3'' 39°52'19''	116°50'30'' 39°52'14''	5	0.136199
	5	116°34'14'' 40°27'41''	116°34'56'' 40°29'27''	3	0.970509
1970.9.13 昌平北地震 ($M_L = 3.5$)	4	116°15'30'' 40°16'18''	116°13'47'' 40°12'24''	8	0.993336
1971.7.4 喇叭沟门地震 ($M_L = 3.5$)	4	116°43' 40°47''	116°42'8'' 40°50'23''	4	0.767850
1973.6.2 通县地震 ($M_L = 2.3$)	3	116°40' 39°55'	116°41'26'' 39°54'54''	5	0.012155

表 2

使用台站个数	所用台站名	寻 优 结 果		搜寻次数	指标函数终值
6	震 中 平、马、白、周、沙、喇	116°10'0''	40°4'30''	3	2.090702
		116°13'53''	40°4'42''		
5	平、马、白、周、沙	116°9'23''	40°7'55''	2	1.849150
	平、马、白、沙、喇	116°12'9''	40°7'39''	3	0.705819
	平、马、周、沙、喇	116°10'37''	40°4'46''	3	0.296424
	平、白、周、沙、喇	116°13'53''	40°4'42''	3	2.090702
4	平、白、周、沙	116°9'7''	40°7'46''	2	1.815888
	平、周、沙、喇	116°11'2''	40°4'40''	2	0.222533
3	平、周、沙	116°10'48''	40°4'11''	4	0.006848
	平、周、喇	116°10'15''	40°4'55''	5	0.024367
	平、马、周	116°11'3''	40°3'57''	6	0.027672
	马、周、沙	116°10'44''	40°4'8''	3	0.018426
	周、沙、喇	116°11'52''	40°4'21''	3	0.007224
	平、马、沙	116°10'43''	40°3'57''	5	0.002526
	平、沙、喇	116°11'21''	40°5'35''	6	0.003762
	白、周、沙	116°3'38''	40°2'50''	4	0.006687
	白、沙、喇	116°24'26''	40°0'0''	1	2.659262

用较多个数的台站,一般可相对减少这些台站对结果精度的影响,但此时因各台站的震中轨迹线不可能交汇于一点,故结果将有一定的误差;相反,若只选用较少个数 \bar{P} 值是准确

的台站,则搜索结果的指标函数将优于多个台站的情况,且可提高结果的精度。但是,如果选用的台站个数较少,且其中有的台站 \bar{P} 值不准,则结果误差将显著加大,如表 2 最后两行所示。在此情况下,可否根据估值理论来“遴选”台站是值得探讨的。

此外,从表 2 还可看出,本方法不仅是一种有效的测震方法,同时也可用于核实地震资料的正确性,例如用它对各台站纵波到时值的可信度进行事后的检验分析。

本方法中进行搜索的次数影响计算所需时间。搜索次数的多少一般是与初始点的选择有关的。表 3 仍以白家疃地震为例,列出了从不同初始点开始搜索的结果(均用三个台站)。由该表可见,在大多数情况下,从不同初始点出发,均可确定出震中位置且结果误差相差无几。

表 3

初始点坐标		寻 优 结 果		搜寻次数	指标函数终值
震	中	116°10'0''	40°4'30''		
115.5°	39.5°	116°10'49''	40°4'13''	4	0.021056
116.0°	39.5°	116°10'49''	40°4'13''	4	0.020834
116.5°	39.5°	116°10'52''	40°4'13''	4	0.039205
115.5°	40.0°	116°10'47''	40°4'11''	4	0.007069
116.0°	40.0°	116°10'48''	40°4'11''	4	0.006848
116.5°	40.0°	116°10'47''	40°4'11''	4	0.007291
115.5°	40.5°	116°10'50''	40°4'10''	4	0.017954
116.0°	40.5°	116°10'50''	40°4'10''	4	0.019123
116.5°	40.5°	116°10'50''	40°4'10''	4	0.019123
115.0°	40.0°	116°10'47''	40°4'11''	4	0.007291
117.0°	40.0°	116°10'49''	40°4'11''	4	0.011385
116.0°	41.0°	116°10'48''	40°4'14''	4	0.025773

从理论上说,本方法中搜索次数的多少以及能否收敛于震中点,是与指标函数的分布状况密切相关的。一般说来,如果指标函数的各变量间无交互作用,则经少数几次搜索即可达到最优点;相反,如果目标函数出现了“脊线”,本来沿此脊线方向搜索一步就可达最优,但本方法因限定了搜索方向只能是单个变量方向,不能沿脊线方向搜索,所以一旦搜索到该脊线上的某一点后,就不可能找到更优的点了。这表示从某些初始点出发,只经一次搜索就得出结果,但该结果并非真正的震中,其特征是结果的经纬度值之一与初始点值雷同。另外,从某些初始点出发的寻优过程可能出现搜索次数很多,甚至不收敛的情况,这些都与方法本身是一种试探法有关。解决途径是或设法选用合适的初始点,或增强方法的自适应能力,使之能在搜索次数过多或不收敛时自动调正初始点,由此引出下述实用方法。

五、实用方法

由前面各表可见,从某一初始点开始的寻优过程,如能得到较准确的结果,则寻优结束时的指标函数值通常都小于二;另一方面,如果两次搜索结果的指标函数值之差已小于某个 ϵ 值时,则再继续寻优过程也难以优化指标函数值,而只是浪费计算时间。再者,从任一初始点开始的寻优过程,一般在 15 次以内均可告结束,如经 15 次搜索仍无结果,则表明该次寻优收敛过慢甚至不收敛,没有必要再耗费时间,应改换初始点,此外,对于只经一次搜索即得出结果的非正常寻优也必须予以排除。这样,可以下列三条件作为寻优的验收标准,即 1) 从一个初始点开始的搜索次数应大于 1 和小于或等于 15。2) 寻优结束时的指标函数值应小于二。3) 寻优结束时,与前次搜索结果指标函数值之差应小于某个 ϵ 值。图 2 为实用速定震中位置方法的程序框图。

算法中初始点的改变,可事先按一定的规律设定,也可以计算机程序库中的随机数发生器产生的随机数作一些加工后产生。对于一个矩形台网,简便的方法是以台网中心点作为最初的初始点,在寻优不成功时再改换成四周各点。初始点的个数 R 可根据需要设定,也可在算法中根据结果自动选择。为慎重起见,还可以从不同初始点出发,对得到的多个结果自动加以比较,从而确定出最终结果。

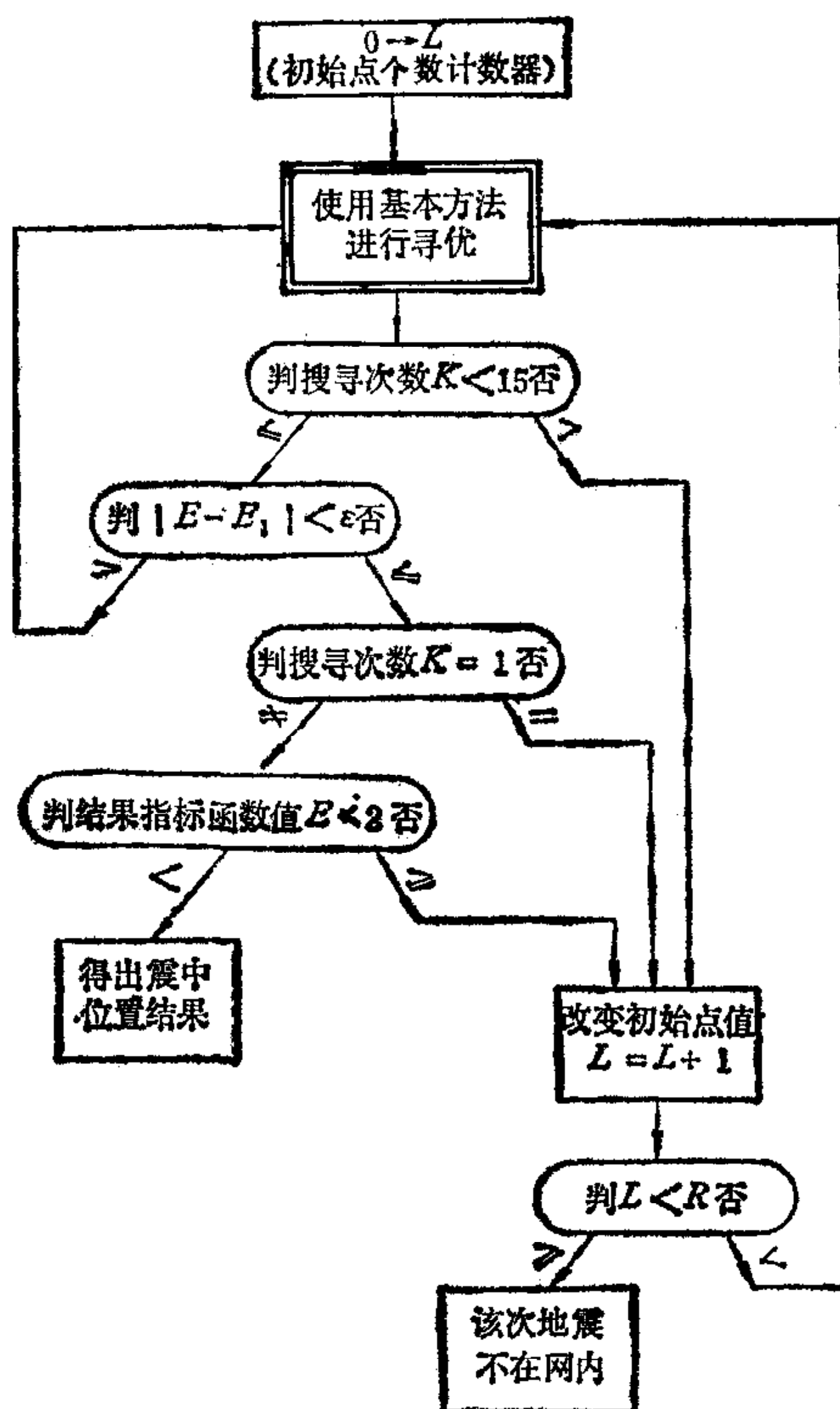


图 2

参 考 文 献

- [1] 中国科学院地球物理研究所, 近震分析, 地震出版社, 1977 年。
- [2] 蔡宣三, 最优化与最优控制, 清华大学出版社, 1983 年。
- [3] 范鸣玉、张莹, 最优化技术基础, 清华大学出版社, 1982 年。
- [4] Beightler, C. S., Phillips, D. T., Wilde, D. J., Foundations of optimization (second edition), 1979.
- [5] Singh, M. G., Title, A., 大系统的最优化及控制, 周斌等译, 机械工业出版社, 1983 年。

AN OPTIMIZATION METHOD FOR LOCATING EARTHQUAKE CENTRE

CHEN LONG

(*Institute of Automation, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In this paper, the problem of locating earthquake centre is transformed into a problem of searching extreme value of a target function. A practical method is presented using optimization technique.

The advantages of this method are as follows: good adaptability, fast response, less dependence on the number and distribution of stations. The method can also be used when there are only three stations.



国际自动控制学术会议在北京召开

由国际自控联 (IFAC)、国际运筹学会发起,中国自动化学会主办的国际自动控制学术会议于 1985 年 8 月 20 日至 22 日在北京科学会堂召开。中国、美国、苏联、日本、西德、东德、英国、罗马尼亚、南斯拉夫、匈牙利等二十八个国家和地区的一百五十九名代表出席了会议。IFAC 的官员 M. Thoma, P. Egkhoff, M. Najim, 严筱钧, W. Schaufelberge, 顾绳谷等也出席了会议。会议组织委员会主席杨嘉墀教授致开幕词。IFAC 主席 M. Thoma 等也在开幕式上致了词。

这次会议共录取论文一百四十三篇,在会上宣读了一百篇,其中大会报告七篇。中国代表宣读了五十九篇论文。论文的内容包括工农业及经济建模与辨识、过程控制、水利资源及能源管理、自动控制的训练和教育、计算机辅助设计和辅助制造、经济和管理系统、机器人等。一些论文在会上报告后引起了较大的兴趣,讨论十分热烈。特别是参加这次会议的我国的一些研究生,他们英语较好,发言积极,没有顾虑,在会上十分活跃。

会议还组织了“发展中的自动控制教育”和“微型机对工业的影响”两个专题讨论会。