

重磁资料数据处理程序分析

▲ 曾 华 霖 编 著

▲ 地 质 出 版 社

重磁资料数据处理程序分析

S2427/OK

曾 华 霖 编 著

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书对重磁资料数据处理中有代表性的几个程序（包括垂向二次导数法、积分插值法解析延拓、长方体组合模型最优化选择法反演、直立线元法正演以及频率域滤波程序）的方法原理、数学模型、计算方法、程序设计、结构和用法等进行了详细的论述。

本书适合具有中专以上文化程度的物探人员阅读，也可供地质科研工作者和地质院校物探专业师生参考。

重磁资料数据处理程序分析

曾华霖 编著

责任编辑：石正礼 阙筱玲 张怀素

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：850×1168¹/₃₂ 印张：12¹/₈ 字数：321,000

1985年4月北京第一版·1985年4月北京第一次印刷

印数：1—2,630册 定价：3.45元

统一书号：13038·新 71

前 言

最近几年,应用电子计算机处理重力勘探和磁法勘探资料,即“重磁资料数据处理”的工作,已成为重磁资料解释的一个重要环节。一位物探工作者,在开始接触这项工作时,可能会遇到一定的困难,如怎样根据物探问题设计数学模型,怎样编制计算机程序等。作者几年来在教学、生产和科研实践中接触到这方面的一些具体工作,整理出这个材料,供从事物探数据处理工作的同志们参考。

本书分析了目前重磁资料数据处理工作中有代表性的五个解释方法程序。包括:(1)垂向二次导数法程序;(2)积分插值法解析延拓程序;(3)应用改进的马奎特方法与直立长方体组合模型解磁法反演问题程序;(4)直立线元法正演程序;(5)重磁异常频率域滤波程序。本书详细叙述了它们的方法原理、数学模型、计算方法、程序设计、结构及用法等。涉及的数学方法主要有:解线性方程组、插值、数值积分、非线性最优化以及富里叶变换等。这些都是重磁资料数据处理中常用的计算方法。

为了使广大的物探工作者能够看懂,本书文字力求浅显,公式推导步骤详细,附有较多插图,在章节的编排上先易后难。此外,各章内容基本上是独立的,读者可以根据需要单独阅读某一章。

本书所附程序用DJS-6机 ALGOL 语言编写,但读者可以根据书中详细描述算法和计算公式,直接用FORTRAN或 BASIC 等语言编程序。

本书涉及物探、数学等方面的某些问题,并具体到处理实际资料的计算机程序,内容比较广泛。本书得以问世,非作者一人之力,而是许多单位和个人辛勤劳动的结果。作者在此特别对滤

波程序的主要编者刘秀芳同志，反演程序的原编者陈亚浙等同志，对本书提出宝贵意见的陈维雄同志，为本书清绘图件的侯建琼、贾美芝同志，以及地质矿产部北京计算中心和1974年原国家地质总局在北京大学协助下举办的重磁数据处理短训班表示诚挚的谢意。

本书介绍的方法有一定的局限性，程序本身也有粗糙之处，特别是作者作为一个物探人员，进行“程序分析”这种题材的创作还是初次尝试。书中缺点、错误难免，诚恳地请同志们批评指正。

目 录

第一章 垂向二次导数法程序	1
§ 1.1 计算公式.....	1
§ 1.2 程序标识符含义的说明.....	4
§ 1.3 程序的示意框图.....	8
§ 1.4 对程序中几个主要部分的分析.....	8
§ 1.5 程序的使用方法.....	45
§ 1.6 程序.....	53
第二章 积分插值法解析延拓程序	66
§ 2.1 计算公式.....	66
§ 2.2 程序标识符含义的说明.....	76
§ 2.3 程序的示意框图.....	77
§ 2.4 对程序中几个主要部分的分析.....	79
§ 2.5 程序的使用方法.....	84
§ 2.6 程序.....	86
第三章 应用改进的马奎特方法与直立长方体组合模 型解磁法反演问题程序	97
§ 3.1 计算方法和迭代公式.....	97
§ 3.2 程序的示意框图.....	111
§ 3.3 系数矩阵、右端项的形成和目标函数值的计算	113
§ 3.4 解方程.....	133
§ 3.5 约束.....	145
§ 3.6 系数矩阵的规格化.....	148
§ 3.7 改进的马奎特方法和MMARQ过程.....	151
§ 3.8 计算理论场值.....	164

§ 3.9 程序的使用方法·····	167
§ 3.10 程序·····	172
第四章 直立线元法正演程序·····	186
§ 4.1 计算公式·····	187
§ 4.2 计算方法·····	197
§ 4.3 程序标识符含义的说明·····	203
§ 4.4 程序框图·····	209
§ 4.5 程序的使用方法·····	220
§ 4.6 程序·····	224
第五章 重磁异常频率域滤波程序·····	234
§ 5.1 数学基础和基本概念·····	236
§ 5.2 滤波算子（频率响应函数）的推导·····	258
§ 5.3 与编程序有关的数学处理·····	273
§ 5.4 对程序中几个主要部分的分析·····	302
§ 5.5 程序的使用方法·····	342
§ 5.6 程序·····	348
附录 在应用快速富氏变换进行计算时实数组转化为复 数组的计算·····	363
主要参考文献·····	382

第一章 垂向二次导数法程序

重力异常 Δg 、航磁异常 ΔT 或地磁异常 Z_n 的垂向二次导数 $\partial^2 \Delta g / \partial z^2$, $\partial^2 \Delta T / \partial z^2$ 或 $\partial^2 Z_n / \partial z^2$ (以下把它们简记为 $\partial^2 G / \partial z^2$), 在突出局部异常和分离水平叠加异常的问题上有比较明显的作用。至今, 重磁异常的垂向二次导数值还不能用仪器测出, 一般是用观测的重磁异常值进行换算而得。三十多年来, 国外的地球物理学家发表了不少计算垂向二次导数值的公式。早期发表的有艾尔金斯 (T. A. Elkins) 公式、罗森巴赫 (O. Rosenbach) 公式以及亨德尔森 (R. G. Henderson) 和吉茨 (I. Zietz) 公式^[4] 1971年, 阿加尔沃尔 (B. N. P. Agarwal) 和莱尔 (T. Lal) 发表了计算二次导数值的新公式。1977年, 苏联别列兹金 (B. M. Березкин) 在《重力勘探在普查油气田中的应用》一书中介绍了几位苏联地球物理学家提出的计算公式, 其中包括利用一维数据 (剖面资料) 计算二次导数的公式。由于本书的主题是程序分析, 这里就不讨论公式的推导过程和方法效果问题, 只介绍应用某些公式编程序的方法。

§ 1.1 计 算 公 式

本程序应用了以下八个计算公式:

1. 哈克公式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{4}{R^2} [G(0) - \bar{G}(R)] \quad (1-1-1)$$

2. 艾尔金斯 (13) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{60R^2} [64G(0) - 8\bar{G}(R) - 16\bar{G}(\sqrt{2}R) - 40\bar{G}(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-2)$$

3. 艾尔金斯 (14) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{28R^2} [16G(0) + 8\bar{G}(R) - 24\bar{G}(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-3)$$

4. 艾尔金斯 (15) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{62R^2} [44G(0) + 16\bar{G}(R) - 12\bar{G}(\sqrt{2}R) - 48\bar{G}(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-4)$$

5. 罗森巴赫 (16) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{24R^2} [96G(0) - 72\bar{G}(R) - 32\bar{G}(\sqrt{2}R) + 8\bar{G}(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-5)$$

6. 亨德尔森和吉茨 (10) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{R^2} [6.185G(0) - 8.374\bar{G}(R) + 2.189\bar{G}(\sqrt{2}R)] \quad (1-1-6)$$

7. 亨德尔森和吉茨 (13) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{R^2} [6G(0) - 8\bar{G}(R) + 2\bar{G}(\sqrt{2}R)] \quad (1-1-7)$$

8. 亨德尔森和吉茨 (15) 式

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{R^2} [7G(0) - \frac{32}{3}\bar{G}(R) + 4\bar{G}(\sqrt{2}R) - \frac{1}{3}\bar{G}(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-8)$$

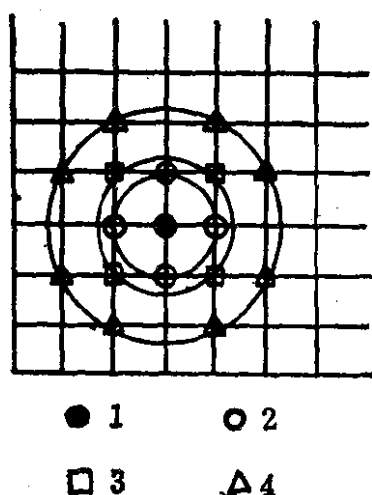


图 1.1 计算二次导数值的取值点位

1—计算二次导数值的点
位；2、3、4—环半径分别
为 R 、 $\sqrt{2}R$ 、 $\sqrt{5}R$ 的
圆周上的取值点位

上列各公式中，人名后面的编号是作者论文中的公式号。公式中各个符号的含义如下（见图1.1）：

$\partial^2 G / \partial z^2$ ——计算点的垂向二次导数值；

R ——选取的内环半径，图 1.1 中选取 R 为一个格点距；

$G(0)$ ——计算点处的异常值；

$\bar{G}(R)$ ——以计算点为圆心、半径为 R 的圆周上四个点处的异常平均值；

$\bar{G}(\sqrt{2}R)$ ——以计算点为圆心、半径为 $\sqrt{2}R$ 的圆周上四个点处的异常平均值；

$\bar{G}(\sqrt{5}R)$ ——以计算点为圆心、半径为 $\sqrt{5}R$ 的圆周上八个点处的异常平均值。

从上列公式看出，它们对重磁异常的取值基本相同，只是系数不同。为编程的方便，把这八个公式用一个一般式表示：

$$\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \frac{1}{R^2} [A_{P1}G(0) + A_{P2}G(R) + A_{P3}G(\sqrt{2}R) + A_{P4}G(\sqrt{5}R)] \quad (1-1-9)$$

式中 $G(0)$ ——计算点处的异常值；

$G(R)$ 、 $G(\sqrt{2}R)$ ——以计算点为中心，半径分别为 R 、 $\sqrt{2}R$ 的圆周上四个点处的异常值之和；

$G(\sqrt{5}R)$ ——以计算点为中心、半径为 $\sqrt{5}R$ 的圆周上八个点处的异常值之和；

系数 A_{P1} 、 A_{P2} 、 A_{P3} 和 A_{P4} ($P=1, 2, \dots, 8$ ，是公式号) 见表 1.1。由于 (1-1-9) 式中的 $G(R)$ 、 $G(\sqrt{2}R)$ 和 $G(\sqrt{5}R)$ 已取

表 1.1 垂向二次导数系数

项 数 公式号(P)	1	2	3	4
1	4.0	-1.0	0.0	0.0
2	1.06667	-0.03333	-0.06667	-0.08333
3	0.57143	0.07142	0.0	-0.10714
4	0.70968	0.06452	-0.04838	-0.09677
5	4.0	-0.75	-0.33333	0.04166
6	6.185	-2.0935	0.54725	0.0
7	6.0	-2.0	0.5	0.0
8	7.0	-2.6665	1.0	-0.04166

为一些点处的异常值之和，所以表 1.1 中列举的系数与 (1—1—1) 至 (1—1—8) 式中的系数不同。

例如，如果需要应用艾尔金斯 (14) 式计算测区内某点的垂向二次导数值，可采取下列步骤：

1. 计算以计算点为中心，半径分别为 0 (只有一个值)、 R 、 $\sqrt{2}R$ 和 $\sqrt{5}R$ 的圆周上 4 个点或 8 个点处的异常值之和；

2. 用各个圆环上的异常值之和分别与 $P=3$ 时对应的系数 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{33} 和 A_{34} 相乘，见 (1—1—9) 式；

3. 把四项乘积之和除以 R^2 ，即得该点的垂向二次导数值。

实际应用中，垂向二次导数值的单位，对于重力异常为 10^{-13} CGS 单位，对于磁异常为伽马/公里。内环半径均以公里为单位。

§ 1.2 程序标识符含义的说明

算法语言语法规定，标识符的说明要放在所在分程序的执行性语句的前面，紧接在该分程序的 **BEGIN** 的后面。下面就按各个标识符在各层分程序中出现的顺序解释如下。

BEGIN($P1, 1$) (表示这个字母串在 § 1.6 源程序的 **PAGE1** 的第 1 行，下同)

整型简变

M: 算区内原始数据的线数；

N: 算区内原始数据每条线的点数；

P: 选用的公式号 (由控制台变量 III 赋值)；

X: 内环半径 R 与经过插值以后的新点距的比值；

Y: 内环半径 R 与经过插值以后的新线距的比值 (**X**、**Y** 这两个标识符的作用见本节末尾的说明)；

MK: 两条线间的插线数；

NK: 改变点距用的插值信息；

① 本书正文中出现的用黑体字表示的英文字母串，其实际形式应在字母串的左右各加一撇。例如，**BEGIN** 实际上应为 'BEGIN'。

DOU: 为使宽行机打印的计算结果和 $X-Y$ 仪绘的等值线图与原始数据格网一致, 本程序规定, 当算区的首线首点取在左下角时, 对于近东西向测线, 取 $DOU=0$, 对于近南北向测线, 取 $DOU=1$;

PX: 对原始数据进行圆滑时, 取值点数的信息 (取 $PX=0$ 时, 不进行圆滑; 取 $PX=9$ 、25 或 49 时, 分别进行 9 点、25 点或 49 点圆滑);

MM: 插线以后的新线数, $MM=(MK+1) \cdot (M-1)+1$;

NN: 进行点插值后每条线的新点数;

I、J、K: 循环变量;

AA: 插值用工作单元, 循环变量。

实型简变

R: 内环半径 (公里)。

数组

A[1:8,1:4]: 存放八个计算公式的系数。

开关标号

L: 选择不同公式、不同内环半径计算二次导数值时的控制标号;

LL: 圆滑过程用的标号。

BEGIN (P1,27)

数组

G[1:MM,1:N]: 存放原始数据、插值和圆滑后数据以及二次导数值的公用数组;

XX[1:3]、YY[1:3]: 插值用工作单元;

GG[1:NN]: 存放点插值后一条线的数据。

BEGIN (P2,1)

YUANHUA 圆滑过程

形参

T: 欲圆滑的数组;

PX: 圆滑的取值点数;

MM: 数组 *T* 的线数;

NN: 数组 *T* 中每条线的点数。

LAG 一维三点拉格朗日插值过程

形参

U: 插值点的坐标;

X: 存放三个已知点的坐标值的数组;

Y: 存放三个已知点的函数值的数组。

过程体中的标识符

QI、**QJ**: 循环变量;

V: 存放插值点的函数值;

L: 工作单元, 存放插值公式中一项的值。

KHTY 宽行打印过程

形参

SZ: 欲打印的数组;

L: **SZ** 的线数 (从“1”起算);

D: **SZ** 中每条线的点数 (从“1”起算);

BZ: 线距与点距的比值;

DOU: 同前面的标识符 **DOU**;

BIJI: 图名, 是一个“行” (**STRING**)

过程体中的标识符

I、**J**、**K**: 循环变量;

N、**M**: 控制打印出的数据图中线距的工作单元;

PL: **PL** = -1 时, 以正方形网打印数据; **PL** = 0 时,
以矩形网格式打印;

S: 一页宽行纸上每行打印的数据个数 (即线数);

JA、**JB**: 测点 (行) 循环的初值和终值;

Q: 分别表示点循环的步长和是否形成用 **X-Y** 仪作等
值线图的数组的信息;

MA、**MI**: 分别存放数组 **SZ** 元素中的极大值和极小值;

ZO: 求 **MA**、**MI** 值用的工作单元;

ENZ: 比例因子 (详见 § 1.4);

AB, BS: 求 *ENZ* 用的工作单元;

DXY [1:*D*]: *SZ* 中元素变换位置用的工作单元, 并且
只有用 *X-Y* 仪作等值线图时才设此数组。

VZZZ 计算并输出二次导数值的过程

形参

GZ: 存放一条线上的二次导数值的数组;

G: 存放原始数据的数组;

M: 数组 *G* 的线数;

N: *G* 中每条线的点数。

过程体中的标识符

KA, KB: 二次导数值计算范围的首线号、首点号;

I, J: 循环变量;

W, Q: 控制一条线的二次导数值的窄行输出用;

GZZZ[1:*M*-2**KA*+2, 1:*N*-2**KB*+2]^①: 纯粹存放
一个算区二次导数值的数组, 只有在用 *X-Y* 仪作
等值线图时才设此数组。

BEGIN (P7, 2)

数组

GZ[1:*NN*-2*(*ENTIER*(2**X*+0.5))]: 存放一条线的
二次导数值。

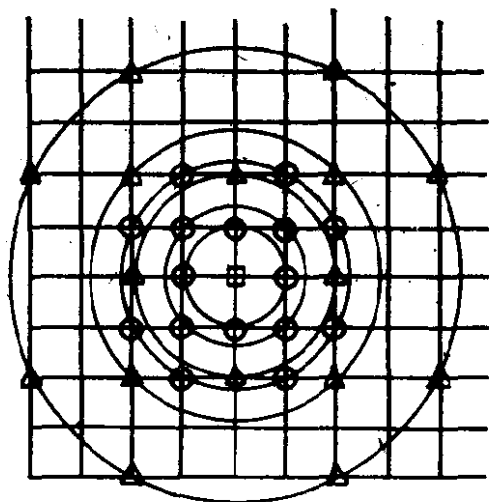
标识符 *X*、*Y* 的作用是控制取值点位。下面举两例说明。

例1. 正方形网情况

设正方形网点距 $\Delta X = \Delta Y = 200$ 米 (图1.2)。取内环半径 $R = 200$ 米 = 0.2 公里, 即取为一个点距, 则 $X = Y = R/\Delta X = R/\Delta Y = 1$ 。在图 1.2 中, 对于计算点, 取值点为带圆圈号的格点 (包括计算点), 点、线号的增加以“1”为步长。

如果取 $R = 400$ 米 = 0.4 公里, 即取为两个点距, 则 $X = Y = 2$ 。在图1.2中, 对同一个计算点, 取值点为带三角形号的格点,

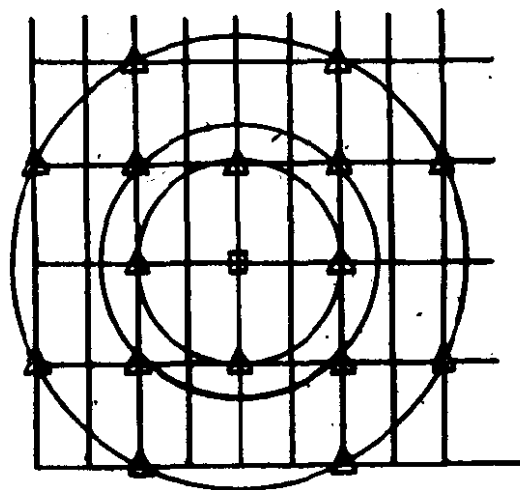
① 本书中程序语句中的“*”号表示乘号。



□ 1 ○ 2 △ 3

图 1.2 正方形网

1—计算点；2—取 R 为一个点距时的取值点位；3—取 R 为两个点距时的取值点位



□ 1 △ 2

图 1.3 矩形网

1—计算点；2—取 R 为一个线距时的取值点位

点、线号的增加以“2”为步长。

例2. 矩形网情况 (线距/点距=2/1)

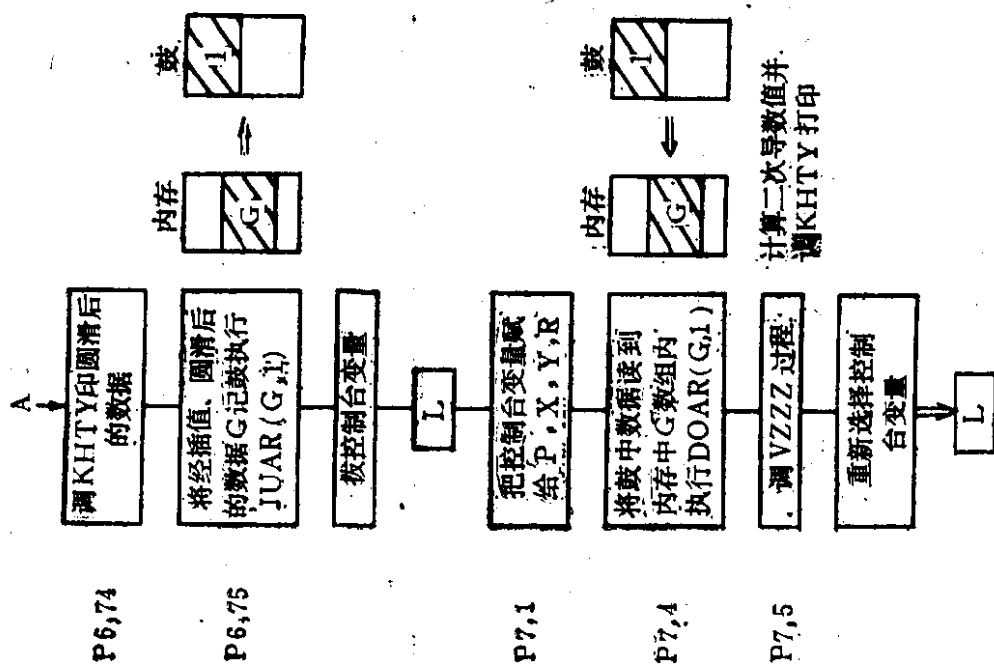
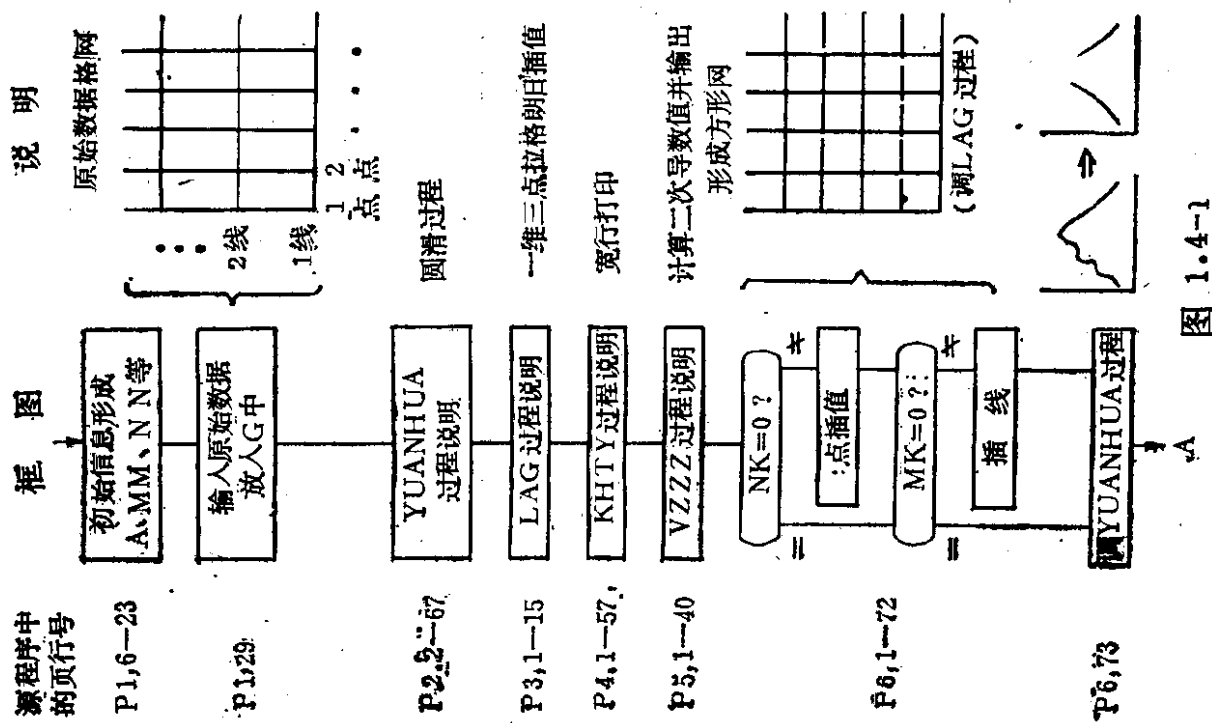
设点距 $\Delta X = 100$ 米，线距 $\Delta Y = 200$ 米，取 $R = 200$ 米 = 0.2 公里 (要求取为线距的整数倍)，则 $X = R/\Delta X = 2$ ， $Y = R/\Delta Y = 1$ 。在图1.3中，对于计算点，取值点为带三角形号的格点。取值时，点号的增加以“2”为步长，线号的增加以“1”为步长。

§ 1.3 程序的示意框图

程序的示意框图见图1.4—1和图1.4—2。图中列举了程序的几个主要部分，并描述了程序的执行过程。

§ 1.4 对程序中几个主要部分的分析

本程序包括圆滑过程 (YUANHUA)、拉格朗日插值过程 (LAG)、宽行打印过程 (KHTY)、计算二次导数值的过程



(VZZZ) 以及插值等几个主要部分, 下面分别介绍。

一、计算垂向二次导数值的VZZZ过程

本过程的作用是用经过插值、圆滑后的数据计算二次导数值。因为不同点处的二次导数值, 其计算方法是相同的, 所以下面首先研究某个点处二次导数值的算法, 然后叙述整个算区的计算过程。

1. 计算某个点处的二次导数值

前已介绍, 本程序中选用的八个计算公式对原始数据的取值方式相同, 只是系数不同。现把表 1.1 中的 32 个系数存放在二维数组 $A[1:8, 1:4]$ 中, 数组元素排列为

$A_{11} A_{12} A_{13} A_{14}$ 哈克公式

$A_{21} A_{22} A_{23} A_{24}$ 艾尔金斯 (13) 式

$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$

$A_{81} A_{82} A_{83} A_{84}$ 亨德尔森-吉茨 (15) 式

如果采用艾尔金斯 (13) 式计算, 只需选择 (1—1—9) 式中的 P 为 2, 在式中出现的系数则为

$$A_{21}=1.06667, A_{22}=-0.03333,$$

$$A_{23}=-0.06667, A_{24}=-0.08333$$

假定用来计算二次导数值的测区 (称为算区^①) 有 M 条线, 每条线上有 N 个点, 数据呈正方形网分布, 如图 1.5 所示。如果取内环半径 $R=1$ 个点距, 应用艾尔金斯 (13) 式 ($P=2$) 计算第 I 线第 J 点 (图 1.5) 的二次导数值, 程序语句可以写为

$$\begin{aligned} GZ[I, J] := & 1/R^2 * (A[2, 1] * G[I, J] + A[2, 2] * (G[I+1, J] + G[I-1, J] + G[I, J+1] + G[I, J-1]) + \\ & A[2, 3] * (G[I+1, J+1] + G[I+1, J-1] + G[I-1, J+1] + G[I-1, J-1]) + A[2, 4] * (G[I+1, J+2] + G[I+1, J-2] + G[I-1, J-2] + G[I+2, J+1] + G[I+2, J-1] + G[I-1, J+2] + G[I \\ & -2, J+1] + G[I-2, J-1] + G[I-1, J+2] + G[I \\ & -2, J-1]) \end{aligned}$$

① 算区是计算所用的原始数据所在的区域。根据需要, 算区可能等于、大于或小于测区。