

一种电阻率测深曲线自动解释的快速方法

卢巧媛

(中南工业大学)

摘要 本文介绍了一种适合野外队现场使用的电测深曲线自动快速解释法。这种方法可从PC-1500上一次处理大批数据。并分析了高速的原因,给出了不同类型曲线的解释误差。

关键词 电阻率;电测深法勘探;曲线;阻尼;最小二乘法;迭代法

0 前言

从格霍什提出滤波理论^[1]后,电测深曲线的自动反演就可在 T 函数域和 ρ 函数域两种域中进行。所使用的优化方法主要有阻尼最小二乘法、最速下降法、变尺度法^[2]。这些方法需计算一阶或二阶导数,并需解方程,都比较复杂,要计算机提供一定量的内存空间,费机时较长。1979年Koefoed^[3]介绍了一种称作快速自动迭代的算法,这种算法具有占用内存少、计算速度快等特点。笔者在1981年第一次全国岩溶物探学术会议上报导了使用的情况,仅在少数情况下不收敛。1984年,作者所编 $T1-59$ 程序发表^[4]之后,甘肃、河南、湖南等地相继使用。1989年姚文斌对其也作了介绍^[2]。作为一种经验方法,已在国内外广泛使用。目前面临的问题是,对这种经验方法的理论基础认识不足,保证收敛的条件有待改进。

本文介绍了作者提出的一种约束改进方法,及这种方法改进后的使用情况和求解精度。改进为分段建立目标函数,用轴迭代法求解的一种优化模式。并将这种经验方法,从优化理论上给予说明。作者认为这种优化模式是有其发展前景的,因为其最大特点在于可以将高维优化问题降为多个一维优化问题,是一种优化的新思路。

1 基本原理

按照格霍什的理论^[1],测得的转换电阻率 T_s 可通过视电阻率 ρ_s 滤波得到,即

$$T_s(z) = \sum_{k=-K}^{+K} C(k) \cdot \rho_s(j-k) \quad (1)$$

式中: $C(k)$ 为滤波系数, K 为滤波系数序号, j 为取样点号。

而视电阻率 ρ_s 可通过反滤波得到,即

收稿日期:1992年1月12日

$$\rho_e(Q) = \sum_{R=R_1}^{R_2} C(R) T_L(Q-R) \quad (2)$$

其中 $C(R)$ 系反滤波系数, R 为反滤波系数序号, Q 为取样点号。

n 层介质组成的水平电性层(图 1) 的理论转换电阻率函数 T_L 与层参数有如下的关系式

$$T_i(\lambda) = \frac{W_i(\lambda) + T_{i+1}(\lambda)}{1 + W_i(\lambda) \cdot T_{i+1}(\lambda) / \rho_i^2} \quad i = n-1, n-2, \dots, 2, 1 \quad (3)$$

其中

$$W_i(\lambda) = \rho_i \frac{1 - e^{-2\lambda d_i}}{1 + e^{-2\lambda d_i}}$$

λ 为参变量, 其它符号所代表的意义见图 1。

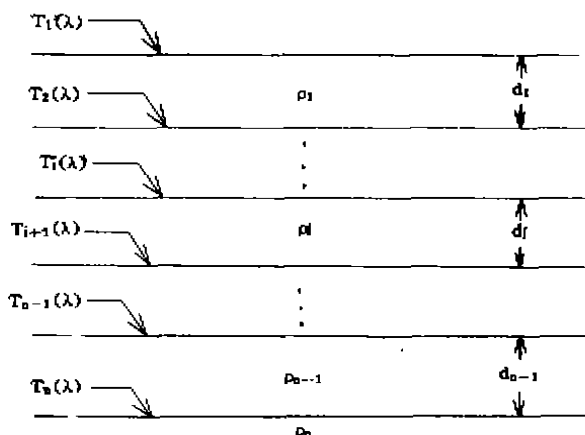


图 1 分层解释示意图

Fig. 1 Indication figure of layer-dividing explanation

2 最优化方法原理

2.1 Koefoed 快速算法^[1]

通常电测深曲线自动反演是求^[6]

$\min F(P)$ 的解。函数 F 称作目标函数, 定义为

$$F(P) = \sum_{j=1}^m (\rho_{0j} - \rho_{0j})^2 / m \quad P = (d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, \rho_1, \dots, \rho_n) \quad (4)$$

P 为一向量, m 为整条曲线的取样总点数, n 为层数。由于用(4)式定义目标函数, 故为求解 L_2 范数问题, 其隐含条件是: 误差为高斯分布^[2]。

为解(4)式, 常用的方法是阻尼最小二乘法、变尺度法、最速下降法。它们要求计算导数, 并解一个方程组。因而程序比较复杂, 计算时间较长。

1979 年 Koefoed 介绍了一种快速算法, 其中心点有三个:

(1) 一个 n 层曲线, 可以把它分成 $n-1$ 段, 每一段的视电阻率值分别由与之对应的那一层层参数决定。即某一层参数发生变化, 则整条曲线视电阻率会有所变化, 但与之对应的那段曲线的视电阻率值变化最大, 最灵敏。因而将实测视电阻率曲线划分为与各层对应的 n 段, 如图 2

所示。记各段的取样点数为 m_i , 则有

$$\sum_{i=1}^n m_i \leq m$$

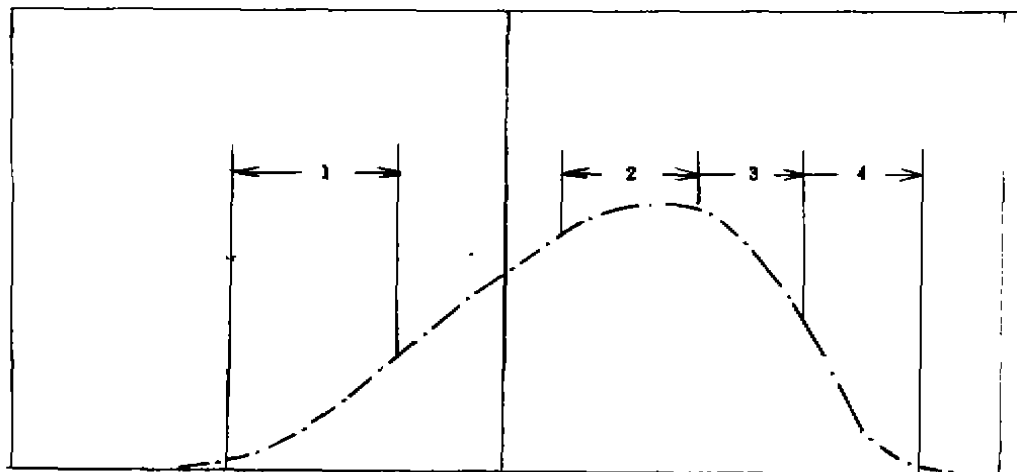


图2 分段解释示意图

Fig. 2 Indication figure of section-dividing explanation

(2) 各层层参数的修改由各段的平均相对误差 $M_i^{(y)}$ 确定。定义

$$M_i^{(y)} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\rho_{ai} - \rho_{ui}}{\rho_{ui}} \quad y = 0, 1, 2, \dots, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中 ρ_{ai} 为第 i 段、第 j 点的实测视电阻率, ρ_{ui} 为第 i 段第 j 点的理论视电阻率, y 为迭代顺序号。由关系式下式得下一个迭代点:

$$\left. \begin{aligned} d_i^{(y+1)} &= (1 - \mu M_i^{(y)}) d_i^{(y)} \\ \rho_i^{(y+1)} &= (1 - \mu M_i^{(y)}) \rho_i^{(y)} \end{aligned} \right\}$$

式中 μ 为一系数。

(3) μ 为约束系数, 应大于 0.5 而小于 7。

1981 年, 笔者在内存单元极少的 TI-59 计算器上实现了与 Koefoed 方法相似的一种算法, 用 T 函数取代了 (4) 式与 (5) 式中的 ρ 。

结果表明, 在 TI-59 计算器上, 约 10 分钟可以反演一条曲线, 证明方法是可行的。但发现少数含 Q 的多层曲线易出现发散的情况。针对以上问题, 作了约束改进, 并将优化方法重新作了研究和改进, 提出了一种称作分段建立目标函数和轴迭代进退法求极小的算法, 叫改进快速法。

2.2 改进快速算法

改进之处包括二点:

(1) 分段建立目标函数

依 Koefoed 快速算法的思路, 将实测 ρ_s 曲线, 或转换电阻率曲线 T , 进行分段。并令各段的目标函数为 F_i , 转换电阻率函数有:

$$F_i = \sum_{j=1}^{m_i} \left| \frac{T_{aj} - T_{ib}}{T_{aj}} \right| / m_i \quad i = n, \dots, 1 \quad (6)$$

对视电阻率曲线有

$$F_i = \sum_{j=1}^{m_i} \left| \frac{\rho_{ni} - \rho_{n+1}}{\rho_{ni}} \right| / m_i \quad i = n, \dots, 1 \quad (7)$$

其中 i 代表段号, j 代表取样点号, m_i 为 i 段内的总点数。

显然可以认为

$$\left. \begin{aligned} F_i(\rho_i, d_i) &\doteq F_i(\rho_1, \dots, \rho_n, d_1, \dots, d_{n-1}) \quad i = n-1, \dots, 1 \\ F_n(\rho_n) &\doteq F_n(\rho_1, \dots, \rho_n, d_1, \dots, d_{n-1}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8) 式表明, 分段建立目标函数的结果, 使一个 $(2n-1)$ 维的优化问题, 降为 $(n-1)$ 个二维最优化问题和一个一维最优化问题。由于 $\sum_{i=1}^n m_i \leq m$, 故分段建立比整条曲线建立目标函数的计算量会稍有下降。另外, 由优化理论可知, 这样做的结果可带来两个好处:

- ① 由于仅是二维优化问题, 因而只是在二维欧氏空间求极小, 可使用简单的直接法。
- ② 由于用直接法不必算导数, 程序将极大地简化, 速度将极大地提高。

(2) 轴迭代进退法求目标函数极小

对 $F_i(\rho_i, d_i)$ 的二维优化问题, 固定一组参数, 例如 d_i , 正如井旁测深所遇到的情况, 或者固定 ρ_i , 如地电剖面参数已知情况, 或者轮换固定参数 ρ_i 或 d_i , 同时反演电阻率和厚度的情况。则(8)式成为一维问题

$$F_i(\rho_i^*) = \min F_i(\rho_i) \quad i = n, \dots, 1 \quad (9)$$

和

$$F_i(d_i^*) = \min F_i(d_i) \quad i = n-1, \dots, 1 \quad (10)$$

即用 $(2n-1)$ 个一维问题, 取代了通常 $(2n-1)$ 维的电测深反演问题。从而从原理上突破了最优化高维解法的复杂性、限制高维应用的困难。

对一维优化问题(9)(10)式求解是比较容易的。笔者在实际中摸索了一种简单算法, 令

$$d_i^{(y+1)} = (1 - 2M_i^{(y)})d_i^{(y)}$$

$$\rho_i^{(y+1)} = (1 - 2M_i^{(y)})\rho_i^{(y)}$$

作为 ρ_i^*, d_i^* 的第 $(y+1)$ 次近似, 经过迭代, 求得(9)(10)式的解。

由于段内 $M_i^{(y)}$ 为一个在 ± 1 之间变化的数, 为保证收敛, 可将 $M_i^{(y)}$ 给予约束。实践表明, 令

$$M_i^{(y)} = 0.2 \quad \text{当 } M_i^{(y)} \geq 0.2 \text{ 时}$$

$$M_i^{(y)} = M_i^{(y)} \quad \text{当 } -0.1 < M_i^{(y)} < 0.2 \text{ 时}$$

$$M_i^{(y)} = -0.1 \quad \text{当 } M_i^{(y)} \leq -0.1 \text{ 时}$$

可以获得满意的结果。这对含 Q 的多层曲线的收敛改进效果好。

3 应用情况

用改进的快速算法, 编制了 T1-59 程序, 对四十多条理论曲线和两个工程工区的实测 ρ_s 曲线进行反演计算。反演时当取 $F_i \leq 5\%$ 终止计算或拟合精度达不到 5% 时, 若迭代次数大于 10, 则终止计算; 同时反演 ρ_i 和 d_i ; 由于 T1-59 内存太少, 滤波系数取 9 个。从所算的曲线看, 精度可满足生产要求。

3.1 理论曲线反演结果

理论曲线反演的条数、类型及精度见表1。由表1可见,三层及大部分曲线反演精度都很好。值得注意的是:表1的AA型、QH型较差。经分析,其原因系滤波系数取得太少, T 拟合不佳所致。改用PC-1500A机,用滤波系数19编程后,消灭了 $\delta > 10\%$ 的现象。保证了精度,全部相对误差 $\delta < 10\%$ 。

表1 理论曲线反演的条数、类型及精度表

Tab. 1 The line number, types and accuracy table of theory curve inversion

曲线类型	H	K	Q	A	AA	HK	AK	KQ	QH	KH
总条数	3	3	2	2	10	6	5	3	6	5
$\delta^* < 10\%$	3	3	2	2	7	5	4	2	5	5
$\delta^{**} < 20\%$					2					
$\delta > 20\%$					1	1	1		1	1

- 为各层参数反演值偏离理论值的相对误差。
- 为某一层参数的反演值偏离理论值的相对误差。

3.2 实测曲线反演结果

表2、表3分别为河南某区和甘肃某区实测 ρ_a 测深曲线用本方法拟合 T 函数反演的结果与阻尼最小二乘法拟合 T 函数反演的结果及钻孔揭露的厚度对比表。

从表2、表3可知,本方法反演的精度和阻尼最小二乘法反演的结果精度相当。

表2 河南某区实测曲线反演结果及钻孔揭露厚度对比表

Tab. 2 Comparison table of the result of the practical-surveying curve inversion and drilling exposure thickness in some area of henan

曲线编号及附近钻孔	曲线类型	目的层埋深(m)			阻尼最小二乘法误差	本方法误差
		阻尼最小二乘法反演	本方法反演	钻孔		
① C-1孔	K	15.72	15.75	13.81	-16.4%	-16.3%
⑬ K-201孔	K	28.52	29.34	24.54	+16.2%	+19.5%
⑮ K-211孔	K	27.01	27.98	23.32	+15.8%	+19.98%
⑰ K-212孔	K	27.69	22.89	22.15	+16.2%	-7.7%

表3 甘肃某区实测曲线反演结果及钻孔揭露厚度对比表

Tab. 3 Comparison Table of the result of the practical-surveying curve inversion and drilling exposure thickness in some area of Gansu

曲线编号及附近钻孔	曲线类型	目的层埋深(m)			误差	
		阻尼最小二乘法反演	本方法反演	钻孔揭露	阻尼最小二乘法反演	本方法反演
盘六孔	K	12.97	14.33	15.04	-13.8%	-4.72%
CKB ₂ 孔	K	11.96	10.37	12.16	-1.64%	-14.72%
D ₁₁ 孔	K	14.72	13.24	14.6	0.82%	-9.32%
盘一孔	Q	10.90	10.02	9.47	15.1%	5.81%
盘二孔	K	8.13	8.14	8.39	-3.1%	-2.98%
盘三孔	K	14.90	14.37	14.21	4.86%	1.12%
D ₁₆ 孔	A	11.96	12.24	12.00	-0.33%	2%
D ₁₃ 孔	K	17.87	17.94	17.55	1.82%	2.22%
D ₁₂ 孔	K	28.8	28.04	25.00	-12.88%	-2.64%

3.3 速度对比

将改进的快速算法在 PC-1500 机上与阻尼最小二乘法计算速度进行对比,在相同的初始值条件下,随以下条件而有所变化:

(1) 快速算法因分段方法不同而稍有不同,一般 $\sum_{i=1}^n m_i < m$ 时,所得速度较 $\sum_{i=1}^n m_i = m$ 时高。

(2) 两种方法的不同曲线类型收敛速度的不同,总体来说,改进的快速算法的速度比阻尼最小二乘法快 10 ~ 30 倍。

4 结 论

(1) Koefoed 快速算法,具有速度高、内存省、一般可以收敛的特点,是一种适合野外队用 PC-1500 机进行解释的方法,该方法在 TI-59 上可以容纳一条曲线,在 PC-1500 上一次可以存入 50 条曲线,可自动连续计算成批数据。

(2) 改进的快速算法,在加强约束条件以后,改善了收敛性,其计算速度比阻尼最小二乘法快 10 ~ 30 倍,占用内存和快速算法相近。

(3) 分段建立目标函数,用 L_1 范数进行度量,轴迭代进退法求解,使一个 $(2n - 1)$ 维优化问题,变成 $(2n - 1)$ 个一维优化问题直接求解,形成了一种优化方法。由于不求导数、不解方程,减少了求目标函数的计算次数,从原理上保证了高速。用 L_1 范数,可使该方法具有允许个别坏数据点的能力。

参 考 文 献

- [1] Ghosh D P. The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geophys. prospect.* 1971, 19, 192~217
- [2] 姚文斌. 电测深数值计算和解释入门. 北京: 地震出版社, 1989
- [3] Koefoed O. *geosounding principles*. 1979 (1)
- [4] 卢巧媛. 电测深 T 曲线自动拟合程序. 物化探计算技术. 1984 (3)
- [5] 南京大学数学系计算数学专业. 最优化方法. 北京: 科学出版社, 1978
- [6] 王明光. 楼海译. 地球物理数据分析——离散反演理论. 北京: 地质出版社, 1988

A FAST AUTOMATIC METHOD OF INTERPRETATION FOR RESISTIVITY SOUNDING CURVES

Lu Qiaoyuan

(Central-South university of Technology)

ABSTRACT This paper introduces a fast automatic method of interpretation for electrical sounding curves, which is suitable for field spot use. Numbers of datums can once be handled in PC-1500 by this method. The reason for computing at high speed is analysed and the interpretation errors of different types of curves are given in this paper.

KEY WORDS electrical resistivity; electrical sounding; curves; damping; least squares methods; alteration methods

· 简 讯 ·

纪念地洼学说创立 35 周年学术讨论会在长沙市召开

纪念地洼学说创立 35 周年、中国科学院长沙大地构造研究所成立 30 周年暨祝贺陈国达教授 80 寿辰的学术讨论会，于 1991 年 12 月 12 日至 15 日在湖南省长沙市隆重召开。来自全国 18 个省、自治区、直辖市的地质矿产、有色、冶金、石油、核工业、地震、中国科学院和高等院校的近百名代表参加了会议。中国科学院、湖南省委、省政府、省人大、省政协和长沙市的有关领导同志出席了开幕式，新华社湖南分社、人民日报湖南记者站等十几家报社和省广播电视台的记者也到会采访报导。会上还宣读了各单位发来贺电和贺信。

在会上，陈国达教授以“历史—因果论大地构造学”为题发表了系统的论述，阐述了历史—因果论大地构造学是地洼学说的指导思想，是地洼学说的基础。在大会期间，30 多位代表作了内容丰富的学术报告，畅谈了地洼学说的发生、发展和如何开创未来。并以各自多年的实践，充分的事实，说明了地洼学说的基本原理已被区域地质、成矿规律、找矿勘探、地震地质、工程地质、水文地质等高科技应用，并在指导生产实践中发挥了巨大作用。它的理论意义和实践意义已在全世界产生巨大影响。

我院为大会提交了三篇论文（摘要），已先后刊在《大地构造与成矿学》1992 年第 1，2 期上。康自立副教授被选为大会主席团成员，主持大会学术讨论，并在会上对地洼学说如何开创未来发表了自己的意见。

地洼学说起源于我国，它是陈国达教授创立的一种新的大地构造及成矿学理论。自诞生之日起，经受了 35 年的考验和广泛的实践验证，并逐步充实提高，日趋成熟，为地质界广泛接受和应用。至今已发展成具有五个组成部份：大陆地壳新型构造单元活化区即地洼区概念；地壳动“定”转化递进说；递进成矿理论；壳体概念；地幔蠕动热能聚散交替假说，两个衍生学科：构造地球化学；成矿构造学的大地构造及成矿学理论体系。今后，随着研究工作的不断深入，必将更加完善，并在指导生产实践中发挥越来越大的作用。（金玉书供稿）