

论文题目：阵列感应数据处理与测井响应计算软件开发

专 业：测试计量技术及仪器

硕 士 生：李 强(签名) 李强

指导教师：仵 杰(签名) 仵杰

摘 要

在石油测井中，感应测井是重要的电阻率测井方法。随着测井技术的发展，阵列感应测井，由于分辨率高，探测深度深，侵入指示明显，提供丰富的地层信息，已成为电阻率测井的主要手段。本文研究的目的就是开发阵列感应数据处理与测井响应计算软件，不但方便测井解释工程师对阵列感应测井数据进行处理、综合解释和异常测井数据分析，而且还方便研究人员进行阵列感应测井仪器设计。

本文首先论述了感应测井的基本原理，研究了阵列感应数据处理方法，主要包括趋肤效应校正、井眼校正、信号合成、反演处理和基于非均匀背景地层的信号合成。完成所有 Fortran 程序转换为 C++ 程序。然后以 Visual C++ 为主要开发工具，实现了阵列感应数据处理与测井响应计算软件。本软件主要有测井数据管理、数据处理、响应计算和多种形式的测井图形绘制等四部分。在测井数据管理中，根据测井数据记录文件的特点，设计了中间数据文件格式，实现了常见测井数据格式文件解编为中间数据文件格式，以及中间数据文件格式的读写访问操作。测井图形绘制部分，主要实现了一维曲线、波列曲线、曲线填充和成像等形式的测井图形绘制和鼠标操作。数据处理和响应计算部分，根据数据处理的特点，设计了以动态链接库为主要形式的处理方法挂接接口，将每个处理方法编译成独立的 DLL 文件，既方便了软件的处理方法扩展，也有利于软件的升级维护。

最后通过实际应用实例，验证了本文所开发的阵列感应数据处理与测井响应计算软件，界面友好，操作方便，功能丰富，满足测井解释人员和科研人员要求。

关键词：阵列感应 数据处理 响应计算 软件开发

论文类型：应用研究

Subject : Software Development of Array Induction Logging Data Processing and Response Calculation

Speciality: Technology & Instruments of Test and Measurement

Name : Li Qiang(signature) LiQiang

Instructor: Wu Jie(signature) Wu Jie

ABSTRACT

Induction logging plays an important role in the resistivity logging field. With the development of logging technology, the array induction logging tool, which can provide higher resolution, deeper depth of investigation, clearer invasion indications and richer formation information, has become the primary method of resistive logging. The purpose of the thesis is to develop the software platform for array induction data processing and model response calculation. It facilitates not only data processing, integrated interpretation and analysis of abnormal phenomena for interpretation engineers, but also instrument design of the array induction logging for researchers.

At first, this thesis gives the fundamentals of induction well logging, and studies the array induction data processing methods, mainly including skin effect correction, borehole correction, signal synthesis, inversion processing and focus processing based on inhomogeneous background conductivity. All Fortran code are rewritten by C++ code. Then, the software platform of the array induction data processing and response calculation is developed by Visual C++ tool. Its function is composed by four main modules. They are respectively well logging data management, data processing, response calculation and various forms of plotting tools. In the data management module, we have designed a file format for the temporary data based on the special features of well logging files. It has the functions to convert the available file formats to temporary file format, and realize Read and Write operations of the temporary data file. The plotting module realizes many operations on 1D curves, wave-array curves, curve filling and imaging. At same time they can be operated by mouse. In the data processing and response calculation module, we have designed interfaces to DLLs according to the data processing features. Each processing method is compiled into an independent DLL file. This function is convenient to expand, maintain and update

Finally, the developed software platform has validated through an actual well data processing. The results show that the software has friendly human-machine interface, easy operations and rich functions, which can satisfy the needs from the interpretation, engineers and researchers.

Keywords: Array Induction Logging, Data Processing, Response Calculation, Software Development

Thesis: Application

学位论文创新性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安石油大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 苏飞

日期： 2010.5.20

学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安石油大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安石油大学。学校享有以任何方法发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利，同时授权中国科学技术信息研究所将本论文收录到《中国学位论文全文数据库》并通过网络向社会公众提供信息服务。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为西安石油大学。

论文作者签名： 苏飞

日期： 2010.5.20

导 师 签名： 徐杰

日期： 2010.5.20

·注：如本论文涉密，请在使用授权的说明中指出（含解密年限等）。

第一章 绪论

1.1 研究目的和意义

在石油天然气勘探开发中，地层电阻率测量是测井解释评价油气储藏的主要依据^[1]。感应测井是重要的电阻率测井方法。随着测井技术的发展，阵列感应测井在仪器设计、方法研究、信号处理、解释应用等方面取得了重大突破。阵列感应测井，由于分辨率高，探测深度深，侵入指示明显，正在逐渐成为电阻率测井的主要手段^[2]。开发快速准确的阵列感应数据处理与测井响应计算软件，对阵列感应测井仪器设计、测井数据分析和解释具有重要作用。本文的目的是实现阵列感应数据处理与测井响应计算软件开发。本文研究内容可分两个部分，第一部分是开发阵列感应测井解释数据处理软件，使测井解释工程师可以方便、快捷地对阵列感应测井数据进行处理和综合解释。第二部分是阵列感应测井响应数值计算可视化研究，实现仪器结构、地层模型和测井响应计算结果的可视化，不但方便研究人员进行阵列感应测井仪器设计，而且有利于测井分析人员解释异常测井数据。

1.2 阵列感应测井仪器发展现状

感应测井仪器经历了双感应、相量感应、阵列感应测井仪器等几个发展阶段。

1949 年 Doll 根据电磁感应原理提出了感应测井方法^[2]，1962 年研制出商用双感应测井仪器。由于感应测井不但适用于油基泥浆和淡水泥浆井，而且在不太咸的井中也可使用，因此得到了广泛应用。

进入 90 年代，由于感应测井的理论研究、数值计算、计算技术的进步，出现了阵列感应测井仪器。1983 年，BPB 公司首先推出了商用的阵列感应测井仪器（Array Induction Sonde, AIS）。Schlumberger 公司在不断改进相量感应测井仪器和研究各种环境影响校正同时，着手研究阵列感应测井仪器（Array Induction Tool, AIT）。1990 年，斯伦贝谢（Schlumberger）测井公司推出商业的 AIT-B 型仪器^[3]，线圈系由一个主发射和上下非对称布置的 8 个线圈系组成。仪器同时测量实部和虚部信号，利用软件聚焦得到三种纵向分辨率（0.3m, 0.6m 和 1.2m）和五种径向探测深度（0.25m, 0.50m, 0.75m, 1.50m, 2.25m）的合成曲线。1992 年开始商业应用。由于实际测井中经常遇到测井不匀速、遇卡和仪器组合过长等问题，1995 年推出了新型阵列感应测井仪器 AIT-H^[4,5]，该仪器仍保留 5 种探测深度的 3 种分辨率曲线。

1992 年，阿特拉斯公司（Atlas）开始研究一种高确定性阵列感应测井仪器（High Definition Induction Log, HDIL），1996 年该公司正式推出 HDIL^[6]仪器，它由 7 个单侧布置的子阵列组成，测量记录 8 个工作频率（10、30、50、70、90、110、130 和 150kHz）

的实部和虚部信号，即每一个测量深度点有 112 个信号；HDIL 提供 6 种探测深度（0.254m, 0.508m, 0.762m, 1.524m, 2.286m 和 3.048m）的三组信号合成曲线（0.3m, 0.6m 和 1.2m）。

2000 年，哈里伯顿（Halliburton）公司在其高分辨率感应测井仪器（HRI）的基础上，推出了新型高分辨率阵列感应测井仪器 HRAI^[7,8]，它由 4 线圈系组成，中间为主发射线圈，上下各布置 5 个接收线圈，两个工作频率（8kHz 和 32kHz），同时测量实部和虚部信号，探头有一个发射线圈和十个接收子阵列组成，接收子阵列为三线圈系或五线圈系。

2003 年，中国石油集团测井公司研制的阵列感应测井仪 MIT^[9]，其线圈系由 8 个 3 线圈的子阵列组成。三个工作频率（25.256KHz、52.512KHz 和 105.024KHz）。MIT 的仪器结构与 AIT 的结构类似，仪器同时测量实部和虚部信号，其中第 1、2 阵列，仅接收高频信号（105.024KHz），第 3、4 阵列，接收高频和中频信号（52.512KHz、105.024KHz），第 5~8 阵列，接收中频和低频信号（52.512KHz、25.256KHz），共记录 28 条曲线，利用软件聚焦得到三种纵向分辨率（0.3m, 0.6m 和 1.2m）和五种径向探测深度（0.25m, 0.50m, 0.75m, 1.50m, 2.25m）的合成曲线。目前已投商业应用。

1.3 阵列感应数据处理软件现状

目前国外的测井资料处理解释系统主要有斯伦贝谢公司研制的 GeoFrame^[10,11]、贝克-阿塔拉斯研制的 eXpress^[12]、哈利伯顿研制的 Petrosite^[13]。GeoFrame 的主要特点有支持多类操作系统环境、增强 3D 体雕刻的功能，这样能够更容易地识别那些指示含烃类的异常体、支持对光栅测井曲线的管理、项目管理功能等，但其只能处理本公司的新型高分辨率阵列感应测井仪器（HRAI）。eXpress 运行在 Unix 平台下，主要包括复杂储层分析模块（CRA）、地层倾角测井处理（Stratagon）、全波列声波测井处理（MAC & XMAC）、电阻率、声波井壁成像测井处理（Star-II）、核磁共振测井处理（Mril）等模块。其 Star-II 模块中阵列感应子模块 hdilproc 仅处理的高分辨率阵列感应仪器(HDIL) 视电导率数据。程序要对数据施加趋肤效应和井眼校正，进行真分辨率聚焦和分辨率匹配^[12]。程序的最初输入曲线是原始的多频阵列数据，包括 7 个(HDIL)线圈间距的实部和虚部数据。使用的处理方法只适用于 Baker Atlas 公司的 HDIL 仪器，不适用于任何其它阵列感应仪器数据处理。但这些系统都是在 UNIX 系统下运行，主机为 SUN 工作站。这些公司很少采用微机作为软件开发平台。

国内微机化处理测井资料大约开始于 1986 年左右。石油大学石达公司开始研制 DOS 下测井微机解释系统，1990 年左右开始投放市场。随着微机速度的提高，测井资料微机化已开始全面展开。1996 年前后中石油北京石达油软公司开始开发 windows 版微机解释系统 Forward^[17,18,19,20]，目前已在国内广泛推广使用。

另外，中国石油集团测井公司从 2002 年开始开发 LEAD^[16,17]测井解释系统，目前已成功推广应用。LEAD 测井资料综合处理解释软件是基于 Windows 操作系统的新一代测井资料处理解释系统软件，该系统集成了多学科的优秀研究成果，将成熟的测井处理解释方法与先进的计算机技术完美结合，实现多种仪器类型测井资料的快速准确处理和解释。LEAD 软件采用先进的设计理念，充分体现和发挥测井资料在勘探开发中的地位和作用，适应中国油气藏的地质情况特点，符合中国用户的使用习惯，能够满足生产需要，并提供消息终端、参数编辑等辅助工具以及可供二次开发的模块接口。除了国际通用的测井仪器外，还与新一代国产成套测井装备配套，形成有机的系统体系。LEAD 软件具有开放化的底层平台、集成化的应用模块、交互式可视化的处理解释流程，能处理包括常规测井、成像测井和特殊测井资料，满足快速直观处理、储层精细解释及综合评价的需要。在常规测井处理方面加入了处理模型的自定义功能，能够根据地区特点，在处理过程中由处理人员随时输入合理的模型公式，得到更加理想的处理结果。软件提供了包括泥质砂岩分析处理程序（SAND）、粘土分析处理程序（CLASS）、单孔隙度处理程序（POR）、复杂岩性处理程序（CRA）和多功能处理程序（PORTN）共五种处理模型。该系统采用先进的计算机技术实现模型实时修改的功能，能够在不改动程序的情况下，由使用者自行定义更加合理的处理解释模型，并提供处理结果的实时回放功能。

它们最新版本分别为 Forward.Net、LEAD 2.1。其中 Forward 中没有阵列感应数据处理模块，由用户通过软件预设接口自行开发 LEAD 中自带阵列感应数据处理模块。

1.4 阵列感应测井响应计算方法现状

阵列感应测井的正演响应计算主要应用于仪器设计和异常测井数据的解释。电法测井正演方法主要包括：解析法（Analysis Method）、有限元法（Finite Element Method, FEM）、有限差分法（Finite Difference Method, FDM）、积分方程法（Integral Equation Method, IEM）和数值模式匹配法（Numerical Mode Match, NMM）等。

解析法是通过严密的数理逻辑推导，得到精确描述电磁场运动规律的解析表达式的方法。该方法只适用于一些比较简单的介质模型情况，对于比较复杂的带侵入的地层模型由于需要考虑的因素太多，几乎无法适用，三分量感应测井响应的计算一般没有解析解。解析法仅在理论上起着先导作用，它全面地考虑电磁波在电介质中传播时发生的各种传播效应，所得的结果是精确解。

有限元法，从数学的观点来看，实质上就是 Ritz-Galerkin 法。它适用于广泛类型的偏微分方程问题，特别是线性椭圆型偏微分方程的数值求解^[21]。有限元素法中网格部分的大小与形状的任意性较大，它能够模拟较复杂的介质模型，是一种精度较高的数值模

拟方法，但是存在数据存储量大，计算速度慢等缺点。

积分方程法一般假定介质是分区均匀的，在这种分区均匀的介质中，积分方程法所涉及的物理量只分布在不同介质的边界上。如在二维子午面上，边界面相当于一维的线，因而未知量由分布在二维的面上缩减到分布在一维的线上，数目大为减少。在地层边界增多时，积分方程法将变得非常复杂且占用大量的计算机时间。有限差分法，类似于有限元法，也是将求解区域进行网格划分^[25]，然后根据差分原理，用各离散点上的函数差商近似代替该点的偏导数，从而得到偏微分方程的差分格式，将初边值问题转化为相应的差分方程，求解这个方程组即得到各离散点上的场分布值。有限差分法与有限元法类似，也存在着数据存储量大，占用机时长等缺点。

数值模式匹配法^[22,23]也叫半解析半有限元法，在电磁测井的数值模拟中，它被认为是二维条件下电磁响应中最有效的正演计算方法。它由 W.C.Chew 等人于 1984 年首先提出，国内的张庚骥和聂在平为其发展作了很大贡献。数值模式匹配法是将二维的方程通过分离变量法简化为两个一维的问题，其中的一个可通过有限元计算出，另一个则可直接解析求出^[24]。这种方法的优点是运算速度快。

1.5 主要研究内容

阵列感应数据处理与测井响应计算软件的目标是实现阵列感应测井数据的计算机处理、显示和解释，建立阵列感应测井数据处理解释和分析的人机交互式处理解释软件平台。本文的主要研究内容有以下几部分：

(1) 阵列感应数据处理方法研究

阵列感应数据处理部分是西安石油大学与中国石化集团河南石油勘探局地球物理测井公司的技术合作开发项目“高分辨率阵列感应测井解释软件开发”。该项目的主要研究内容有以下三个方面：

a. 预处理研究，包含数据预处理方法研究、趋肤效应校正方法研究和井眼校正方法研究，并设计实现程序。

b. 信号合成与分辨率提高处理研究，包括信号合成标准聚焦自适应处理方法研究和基于非均匀背景地层的信号合成方法（IBF）等，并设计实现程序。

c. 反演方法研究，包括一维快速反演研究，设计实现程序。

(2) 阵列感应测井响应计算可视化

主要研究地层模型、仪器模型的可视化显示和灵活编辑，以及测井响应计算结果的可视化显示实现方法。

(3) 测井数据管理

在分析研究常见测井数据文件格式的基础上，研究设计中间数据文件格式，编程实现中间数据文件格式的读写访问 I/O 接口，并实现常见数据格式文件（WIS、XTF、DLIS、LIS）解编为中间数据文件格式。

(4) 测井图形绘制编辑

在测井解释中，图形与图像的显示及编辑是一个很重要的环节。根据不同的应用，需要生成各种各样的图形，如常规的测井曲线图、处理成果图等。在分析常见测井图形绘制特点的基础上，研究设计多种测井图形显示和测井图形响应鼠标操作等。

(5) 处理方法接口

处理方法接口是各个处理模块与软件数据信息交互的通道。在分析各个处理模块的输入输出和控制参数的特点基础上，研究各个处理模块方法在软件中的挂接方法。

第二章 阵列感应数据处理和测井响应计算方法

本章首先论述了感应测井的基本原理，在此基础上深入研究了阵列感应测井数据处理中的各个方法，并简要阐述了阵列感应测井响应计算中常用的数值模式匹配法。

2.1 感应测井基本理论

2.1.1 测井模型

钻井后未下套管前的裸眼井模型由井眼、上下围岩、泥浆、泥饼、冲洗带、过渡带和原状地层。如图 2-1 示，由于泥浆的侵入和地层的复杂性，原状地层真电阻率 R_t 受上述模型的影响。当井具有大的倾角时，还须考虑倾角的影响。

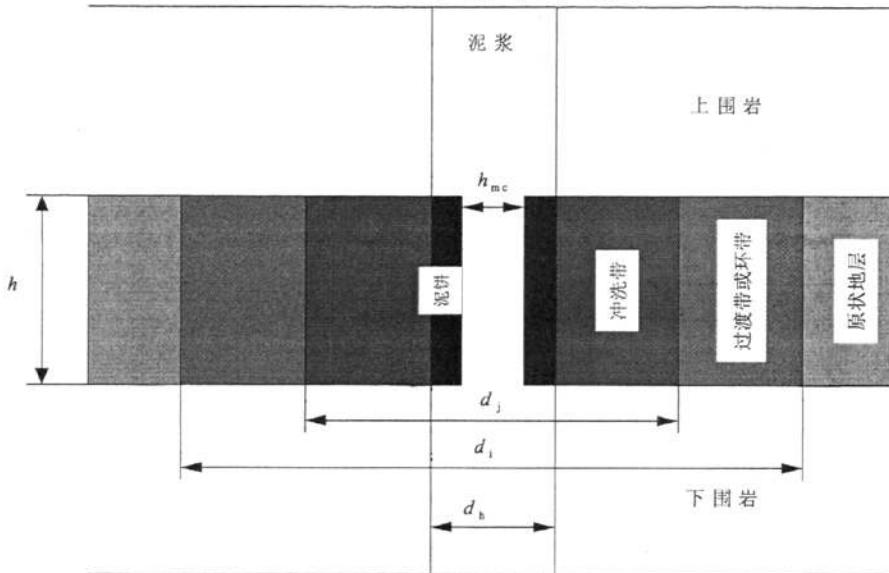


图 2-1 裸眼井剖面图基本模型

2.1.2 双线圈系感应测井原理

最简单的感应测井是双线圈系感应测井，多线圈系感应测井以双线圈系感应测井为基础，因此，首先研究双线圈系的感应测井理论。双线圈系感应测井模型如图 2-2 所示。相隔一定间距的发射线圈和接收线圈置于井内，若给发射线圈通以稳定的交变电流，那么交变电流在井眼周围将产生交变电磁场（称一次电磁场），同时，交变电磁场在导电地层中感应出环形涡流，该涡流所建立的二次交变电磁场将在接收线圈中产生感生电动势^[2]。由于涡流的大小是地层的电导率的函数，所以它在接收线圈感应的电动势也是周围地层电导率的函数。通过适当的信号处理，将测量电压转换为地层电导率，这就是感应测井基本原理。在图 2-2 中：

- a. 双线圈系位于均匀各向同性时不变的均匀地层，磁导率 μ 、电导率 σ 和介电常数 ϵ 均为常数；
- b. 地层绕 z 轴(即井轴)旋转对称；

c. T和R分别为发射线圈和接收线圈，匝数为 N_T 和 N_R ；线圈半径均为 a ； L 为发射线圈与接收线圈之间的间距；线圈的标准工作频率 $f = 20\text{kHz}$ ；发射线圈中的交变电流 $I = I_T e^{-i\omega t}$ ， I_T 是电流强度， ω 是电流变化的角频率。

对均匀介质感应测井，可以通过电磁场理论推算出接收线圈中的感应电动势 V 为

$$V = \frac{i\omega\mu I_T A_T N_T A_R N_R}{2\pi L^3} (1 - ikL) e^{ikL} \quad (2-1)$$

式(2-1)中，角频率 $\omega = 2\pi f$ ； I_T 是发射电流强度； $A_T = \pi a^2$ 和 $A_R = \pi a^2$ 分别是发射和接收线圈面积； $k^2 = i\omega\mu\sigma$ ， k 是地层介质的波束。

当电导率为零时，定义其电动势称为直耦电动势 V_m ，其表达式为

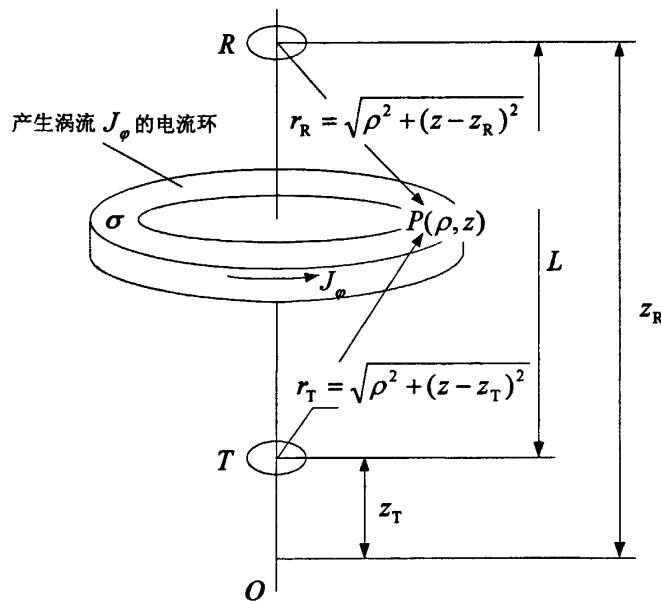


图2.2 双线圈系感应测井示意图

$$V_m = \frac{i\omega\mu I_T A_T N_T A_R N_R}{2\pi L^3} \quad (2-2)$$

在感应测井中，测量到的信号是电压信号，即感生电动势。为了方便，常定义一个测量电导率来表示测量信号。由于测量电导率不等于地层的真实电导率，故称其为视电导率，而称真实电导率为真电导率。视电导率^[2]定义为

$$\sigma_a = -\frac{V - V_m}{K} \quad (2-3)$$

式(2-3)中

$$K = \frac{\omega^2 \mu^2 A_T A_R N_T N_R I_T}{4\pi L} \quad (2-4)$$

称为双线圈系感应测井仪器的仪器常数，对于给定的线圈系，它是常数。

将式(2-1)、(2-2)和(2-4)代入(2-3)，经化简整理，得双线圈系的视电导率为

$$\sigma_a = \frac{-2i}{\omega\mu L^2} [(1 - ikL)e^{ikL} - 1] \quad (2-5)$$

显然，一般情况下，视电导率为复数，可分解为实部和虚部

$$\sigma_{aR} = \frac{-2}{\omega\mu L^2} \operatorname{Re}\left\{ i[(1 - ikL)e^{ikL} - 1] \right\} \quad (2-6)$$

$$\sigma_{aX} = \frac{-2}{\omega\mu L^2} \operatorname{Im}\left\{ i[(1 - ikL)e^{ikL} - 1] \right\} \quad (2-7)$$

可以进一步把式(2-6)和式(2-7)化简。对 $k^2 = i\omega\mu\sigma$ 开方并取正，得

$$k = \frac{1+i}{\delta} \quad (2-8)$$

其中 $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$ ，定义为趋肤效应深度，它表示电磁场在介质中传播时的渗透深度。

将式(2-8)代入式(2-6)和式(2-7)，经化简整理，得

$$\sigma_{aR} = \frac{2}{\omega\mu L^2} \left\{ e^{-\frac{L}{\delta}} \left[(1 + \frac{L}{\delta}) \sin \frac{L}{\delta} - \frac{L}{\delta} \cos \frac{L}{\delta} \right] \right\} \quad (2-9)$$

$$\sigma_{aX} = \frac{2}{\omega\mu L^2} \left\{ 1 - e^{-\frac{L}{\delta}} \left[(1 + \frac{L}{\delta}) \cos \frac{L}{\delta} + \frac{L}{\delta} \sin \frac{L}{\delta} \right] \right\} \quad (2-10)$$

或者展开为 L/δ 的幂级数形式

$$\sigma_{aR} = \sigma \left[1 - \frac{2}{3} \frac{L}{\delta} + \frac{2}{15} \left(\frac{L}{\delta} \right)^3 - \frac{1}{18} \left(\frac{L}{\delta} \right)^4 + \frac{1}{105} \left(\frac{L}{\delta} \right)^5 \dots \right] \quad (2-11)$$

$$\sigma_{aX} = \sigma \left[\frac{2}{3} \frac{L}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{L}{\delta} \right)^2 + \frac{2}{15} \left(\frac{L}{\delta} \right)^3 - \frac{1}{105} \left(\frac{L}{\delta} \right)^5 \dots \right] \quad (2-12)$$

2.1.3 三线圈系感应测井理论

感应测井的双线圈系仅有理论上的意义，因为它的纵向探测特性和径向探测特性不理想，而且直耦信号太强，以致仪器无法测量出比直耦信号弱几十倍到几千倍的地层信号。实用的线圈系是以双线圈系为基础的多线圈系阵列。传统感应测井中利用井下线圈系聚焦来改善双线圈系的探测特性和消除直耦信号。阵列感应测井的思想是井下使用最少的线圈系，提供原始的测量信息，用地面软件来改善探测特性并提取测井分析家所需要的信息。

阵列感应测井采用基本三线圈系子阵列，在双线圈系之间增加一个屏蔽接收线圈，

屏蔽接收线圈不但屏蔽了直耦分量，而且同时增加了高分辨率信息。完整的阵列感应测井由多个三线圈子阵列组成。因此，三线圈系的感应测井理论是阵列感应测井理论和信号处理的基础。

三线圈系子阵列结构如图2-3所示。在双线圈系基础上，为屏蔽直耦分量，引入第二个接收线圈B，与第一个接收线圈R串联，线圈缠绕方向相反。在两接收线圈中，第一个接收线圈称为主接收线圈R，第二个接收线圈称为屏蔽线圈B。

由式(2-2)，得到三线圈系的总直耦信号为

$$\begin{aligned} V_m &= V_{mTR} + V_{mTB} \\ &= \frac{i\omega\mu I_T}{2\pi} \left[\frac{A_T N_T A_R N_R}{L_{TR}^3} + \frac{A_T N_T A_B N_B}{L_{TB}^3} \right] \end{aligned} \quad (2-14)$$

其中， I_T 为发射电流强度； A_T 为发射线圈面积， $A_T = \pi a_T^2$ ； N_T 为发射线圈匝数； A_R 和 A_B 是接收和屏蔽线圈的面积， $A_R = \pi a_R^2$ ； N_R 和 N_B 是接收和屏蔽线圈的匝数； L_{TR} 是发射到接收线圈之间的距离； L_{TB} 是发射到屏蔽线圈之间的距离。

因三线圈均缠绕在同一芯棒上，所以 $a_T = a_R = a_B = \alpha$ 。设 $L_{TR} = L$ ， $L_{TB} = \alpha L$ ， α 为比例因子，那么式(2-14)变为

$$V_m = \frac{i\omega\mu I_T A_T A_R N_T}{2\pi L^3} \left[N_R + \frac{N_B}{\alpha^3} \right] \quad (2-15)$$

要使直耦分量等于零，必须 $V_m = 0$ ，即

$$N_R + \frac{N_B}{\alpha^3} = 0 \quad (2-16)$$

由此解得

$$N_B = -\alpha^3 N_R \quad (2-17)$$

为了消除直耦分量对测量信号的影响，屏蔽线圈参数与主接收线圈的参数必须满足以上关系式。Zhou等人(1994)研究了屏蔽线圈参数 N_B 和 α 的选取与响应函数和井眼的关系以及径向响应函数的特性，指出在径向坐标指数变换后，测量信号为径向响应函数与径向电导率的褶积。因而提出子阵列的主接收线圈间距按指数排列的新思想。这种阵列布置方式使得阵列感应测井在径向方向具有最少的重复信息。

依据式(2-3)，三线圈系的视电导率为

$$\sigma_a = \frac{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} \sigma_{aTR} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}} \sigma_{aTB}}{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}}} \quad (2-18)$$

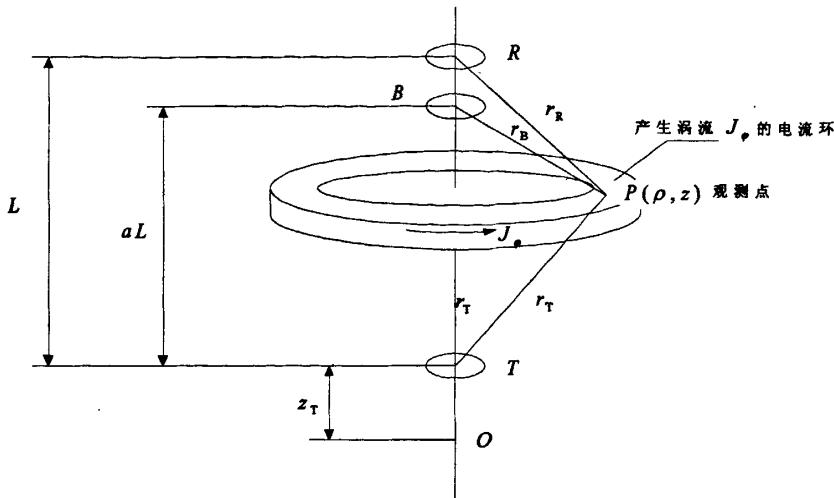


图 2-3 三线圈系子阵列结构

其中 σ_{aTR} 是由双线圈系 TR 确定的视电导率； σ_{aTB} 是由双线圈系 TB 确定的视电导率。将式(2-17)代入式(2-18)，并利用 $L_{TR} = L$ ， $L_{TB} = \alpha L$ ，得

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{aTR} - \alpha^2 \sigma_{aTB}}{1 - \alpha^2} \quad (2-19)$$

再将双线圈系视电导率式(2-5)代入上式，得三线圈系的复视电导率式为

$$\sigma_a = \frac{-2i}{\omega \mu L^2} \frac{1}{1 - \alpha^2} [(1 - ikL)e^{ikL} - (1 - ikL\alpha)e^{ikL\alpha}] \quad (2-20)$$

2.2 阵列感应数据处理方法

2.2.1 趋肤效应校正

趋肤效应影响^[2]是感应测井测量误差的重要来源之一，它使感应测井测量值低于实际地层的电导率。因此感应测井信号处理中必须将它消除。为了更好地进行趋肤效应校正，首先分析感应测井中的趋肤效应影响，然后根据阵列感应测井仪器工作频率的差异分别设计两种不同的趋肤效应校方法。

(1) 趋肤效应影响

设均匀地层电导率为 σ ，视电导率为 σ_a ，则趋肤效应误差 σ_s 定义为地层电导率与

视电导率的差值，即

$$\sigma_s = \sigma - \sigma_a \quad (2-21)$$

由(2-5)式知， σ_a 为复数，因此 σ_s 也为复数。利用复视电导率的概念，定义复趋肤效应误差为 $\sigma_s = \sigma_{sR} + i\sigma_{sX}$ ，其中实部 σ_{sR} 和虚部 σ_{sX} 为

$$\sigma_{sR} = \sigma - \sigma_{aR} \quad (2-22)$$

$$\sigma_{sX} = -\sigma_{aX} \quad (2-23)$$

式(2-22)就是 Moran 和 Kunz(1962)定义的趋肤效应误差^[2]，它也是通常人们说的趋肤效应误差。图 2-4 绘出了双线圈系视电导率与地层电导率的关系曲线，图中真电导率为理想条件下(即不考虑趋肤效应校正影响是)的视电导率，由式(2-6)和(2-7)计算得出均匀介质条件下双线圈系的视电导率实部和虚部。

从图 2-4 可以看出，(a) 只有在理想条件下，视电导率 σ_s 与真电导率 σ 才为线性关系；(b) 当 $\sigma < 0.1\text{S/m}$ 时，视电导率实部 σ_{aR} 很接近 σ ，而视电导率虚部 σ_{aX} 几乎为零；(c) 当 $\sigma > 0.1\text{S/m}$ 时， σ_{aR} 非线性增加逐渐偏 σ ，而 σ_{aX} 却逐渐线性增大，这说明，随着地层电导率增大，视电导率实部与真电导率出现的差别在视电导率虚部上反映出来，或者说趋肤效应使视电导率实部与真电导率不同，同时出现视电导率虚部。

由式(2-5)可知，趋肤效应影响与线圈间距 L 、磁导率 μ 、频率 f 和地层电导率 σ 都有关系。

从电磁波理论上来说，电磁波在有耗媒质(如电导率不为零的媒质)中从一点传播到另一点时，由于能量损耗，必然存在幅度衰减和相位移动，在感应测井中表现为复视电导率，其值低于真电导率。这就是趋肤效应产生的物理原因。

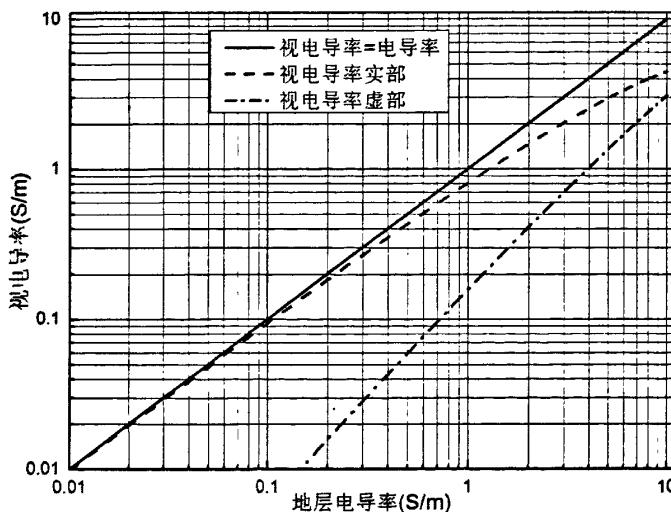


图 2-4 双线圈系视电导率与地层电导率的关系

(2) 双频率趋肤效应校正方法

对于只有两个工作频率的阵列感应测井仪器,如 Halliburton 公司的 HRAI 主要有两个工作频率理 (8kHz 和 32kHz), 理论上讲, 在低电阻率地层使用低频数据, 高电阻率地层使用高频数据, 中等电阻率地层两种频率均适用^[26]。但在实际应用中, 采用该种方法进行趋肤效应校正, 总是存在一些问题。下面来讨论双频率趋肤效应校正方法:

对式(2-20)进行关于频率开方 ($y = \sqrt{f}$) 的级数展开, 取其实部 σ_{ar} , 得

$$\frac{\sigma_{ar}}{\sigma} = 1 - \frac{2}{3} \frac{1-\alpha^3}{1-\alpha^2} cy + \frac{2}{15} \frac{1-\alpha^5}{1-\alpha^2} c^3 y^3 - \frac{1}{18} \frac{1-\alpha^6}{1-\alpha^2} c^4 y^4 + \frac{1}{105} \frac{1-\alpha^7}{1-\alpha^2} c^5 y^5 - \Lambda \quad (2-24)$$

式中, $c = L\sqrt{\pi\mu\sigma}$ 。根据式 (2-20), 可以得出关于频率开方的一阶导趋肤效应校正, 公式为

$$\sigma_{sc} = \sigma_{ar} - y \frac{\partial \sigma_{ar}}{\partial y} \quad (2-25)$$

校正后的残余误差为

$$\begin{aligned} \sigma_{er} &= \sigma - \sigma_{sc} \\ &= \sigma \left[\frac{4}{15} \frac{1-\alpha^5}{1-\alpha^2} c^3 y^3 - \frac{1}{6} \frac{1-\alpha^6}{1-\alpha^2} c^4 y^4 + \frac{4}{105} \frac{1-\alpha^7}{1-\alpha^2} c^5 y^5 - \dots \right] \end{aligned} \quad (2-26)$$

将式 (2-24) 和式 (2-25) 代入式 (2-23), 得

$$\sigma_{er} = \sigma \left[\frac{4}{15} \frac{1-\alpha^5}{1-\alpha^2} c^3 y^3 - \frac{1}{6} \frac{1-\alpha^6}{1-\alpha^2} c^4 y^4 + \frac{4}{105} \frac{1-\alpha^7}{1-\alpha^2} c^5 y^5 - \Lambda \right] \quad (2-27)$$

比较式 (2-25) 和式 (2-27) 表明, 对频率开方的一阶导数趋肤效应校正后, 残余趋肤效应影响是 3 次方以上函数, 当趋肤效应影响不是很严重时, 残余误差已很小。

根据数值求导方法, 给定 2 种频率及其相应的视电导率就可计算式 (2-25) 中的导数, 并对其中一个频率的视电导率进行趋肤效应校正。实际测井中, 在正常工作范围, 高频信号大、稳定, 而低频信号小, 测量噪声大, 因此选择对高频信号进行趋肤效应校正, 即

$$\sigma_{sch}(z) = \sigma_{arh}(z) - \frac{\sqrt{f_h}}{\sqrt{f_h} - \sqrt{f_l}} [\sigma_{arh}(z) - \sigma_{arl}(z)] * w(z) \quad (2-28)$$

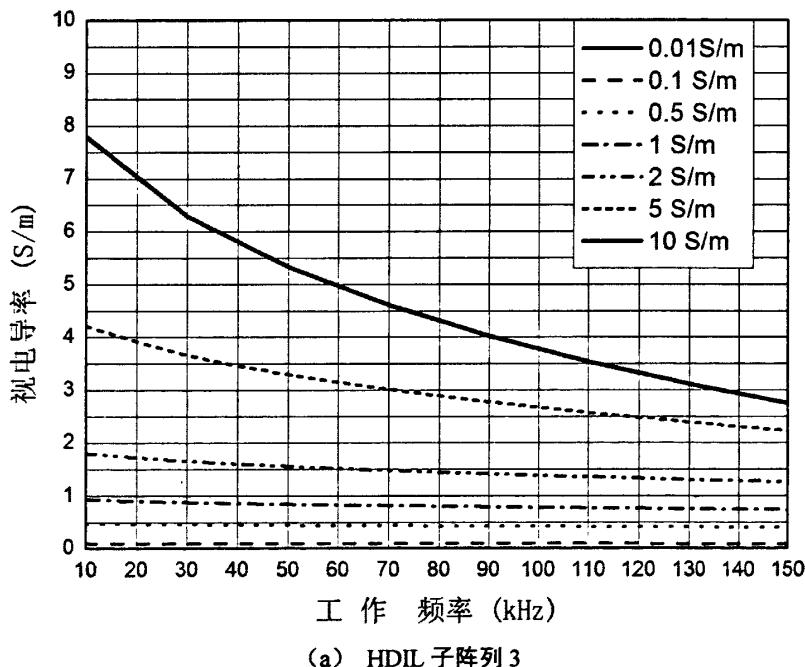
式中, $\sigma_{sch}(z)$ 为趋肤效应校正后的视电导率; $\sigma_{arh}(z)$ 为高频测量信号的实部; $\sigma_{arl}(z)$ 为低频频测量信号的实部; f_h 和 f_l 分别为高低工作频率; $w(z)$ 为低通滤波器, 其目的是消除低频信号中的随机干扰信号; 后面一项表示低通滤波器与高、低频测量信号之差的卷积。

从 (2-28) 式, 它相当于视电导率关于频率平方根的一阶导数在高频平方根处的展开。因此, 利用 (2-28) 式可以实现对测量信号的趋肤效应的一阶导数校正。使用这种

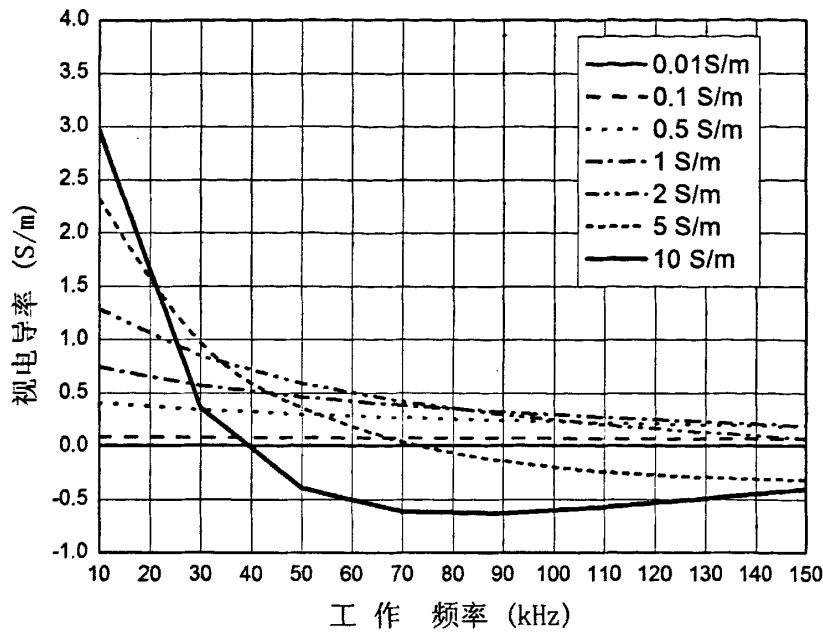
方法进行趋肤校正时还要考虑高低频视电导率的关系,由(2-28)式可知,仅当 $\sigma_{aRh} > \sigma_{aRl}$ 时,即上式右端第二项为正时,才能实现趋肤效应校正;否则,就不能补偿趋肤效应影响。而这种情况只发生在电导率比较低的时候,此时低频信号较小,测量结果不准确。相反,高频测量信号较大,测量结果比较准确,可直接使用高频信号作为趋肤效应校正后结果。在具体处理时可以根据高低频率测量信号之差,来设置一个较小的开关阀值,选择校正方法。

(3) 多频率趋肤效应校正方法

对于由多个工作频率的阵列感应测井仪器,如Atlas公司的HDIL阵列感应仪有8个工作频率(10kHz, 30kHz, 50kHz, 70 kHz, 90 kHz, 110 kHz, 130 kHz, 150 kHz),采集到丰富的频率信息,可以利用视电导率与频率的函数关系实现多频率趋肤效应校正。图2-5给出不同地层电导率(0.01、0.1、0.5、1.0、2.0、5.0和10.0S/m)时视电导率随频率的变化关系。



(a) HDIL 子阵列 3



(b) HDIL 子阵列 7
图 2-5 视电导率与频率的关系

从图 2-5 可知，当地层电导率小于 10S/m 时，短子阵列，视电导率与频率的关系均为单调下降函数；只有长子阵列出现双值现象。对于双值现象问题，如果根据视电导率与地层电导率的关系是不可能实现趋肤效应校正的，因为一个视电导率对应两个地层电导率。但是，根据视电导率与频率的关系是可以实现趋肤效应校正的，因为频率是已知的，在均匀地层中视电导率与频率的关系是确定的。这就是利用多频率趋肤效应校正比常规趋肤效应校正好的一个方面。

由上面分析可知，对于给定地层和给定子阵列，仅为频率 f 的函数，或者是频率开方 \sqrt{f} 的函数。如果能求出线性项，就可消除线性项，对视电导率实现三次项校正。进一步如果能求出三次项，就可实现四次项校正。用求导方法求出校正项，因而称导数多频率趋肤效应校正方法。下面将具体阐述基于导数的多频率趋肤效应校正的实现方法。

上面 (2-25) 和 (2-26) 式给出了一阶导数的趋肤效应校正公式和校正误差，其是 (2-24) 式对频率开方 \sqrt{f} 求导推导而来的，下面改为对频率 f 求导。由 $y = \sqrt{f}$ 可得：

$$\frac{\partial y}{\partial f} = \frac{1}{2\sqrt{f}} \quad (2-29)$$

视电导率对频率的导数为

$$\frac{\partial \sigma_{aR}}{\partial f} = \frac{\partial \sigma_{aR}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial f} = \frac{1}{2\sqrt{f}} \frac{\partial \sigma_{aR}}{\partial y} \quad (2-30)$$

将式 (2-30) 代入 (2-25) 式，可以得到用对频率求导表示的一阶导数多频率趋肤

效应校正公式

$$\sigma_{sc1} = \sigma_{ar} - 2f \frac{\partial \sigma_{ar}}{\partial f} \quad (2-31)$$

当地层电导率较大时,一阶导数校正仍然误差较大,必须使用高阶导数校正。对式(2-25)再求一阶导数,得

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 \sigma_{ar}}{\partial y^2} = \frac{4}{5} \frac{1-\alpha^5}{1-\alpha^2} c^3 y - \frac{2}{3} \frac{1-\alpha^6}{1-\alpha^2} c^4 y^2 + \frac{4}{21} \frac{1-\alpha^7}{1-\alpha^2} c^5 y^3 - \dots \quad (2-32)$$

消去式(2-26)中一阶导数校正后的误差的三次项,得二阶导数校正公式为

$$\sigma_{sc2} = \sigma_{ar} - y \frac{\partial \sigma_{ar}}{\partial y} + y^2 \frac{1}{3} \frac{\partial^2 \sigma_{ar}}{\partial y^2} \quad (2-33)$$

其校正误差为

$$\begin{aligned} \sigma_{er2} &= \sigma - \sigma_{sc2} \\ &= \sigma \left[\frac{1}{18} \frac{1-\alpha^6}{1-\alpha^2} c^4 y^4 - \frac{8}{315} \frac{1-\alpha^7}{1-\alpha^2} c^5 y^5 + \dots \right] \end{aligned} \quad (2-34)$$

类似于一阶导数,二阶导数改为对频率 f 求导,可得二阶导数校正公式:

$$\sigma_{sc2} = \sigma_{ar} - \frac{4f}{3} \frac{\partial \sigma_{ar}}{\partial f} + \frac{4f^2}{3} \frac{\partial^2 \sigma_{ar}}{\partial f^2} \quad (2-35)$$

上面给出了基于导数多频率趋肤效应校正方法的一、二阶导数校正公式,就可以利用求导进行趋肤效应校正。但在实际测井中,视电导率与频率的关系是8个离散的点,不是简单的函数,因而必须解决离散数据的函数拟合问题。切比雪夫多项式被认为是在函数拟合最大绝对误差最小的方法,同时也是某一区间上的最佳平方逼近多项式。

在闭区间 $[a, b]$ 中 $n+1$ 个点 $x = x_j$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n$) 上其值等于 $y(x)$ 并使 $\max_{a \leq x \leq b} \left| \prod_{k=0}^n (x - x_k) \right|$ 取最小值的 n 次多项式 $Y(x)$, 将近似地使插值误差在 $[a, b]$ 上的最大绝对值取最小。而所求的切比雪夫插值多项式 $Y(x)$ 由下式给出:

$$Y(x) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{k=1}^n A_k T_k \left(\frac{2x-b-a}{b-a} \right) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (2-36)$$

$$A_k = \frac{2}{n+1} \sum_{j=0}^n y(x_j) \cos \frac{(2j+1)k\pi}{2n+2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (2-37)$$

式中 $T_k(t)$ 是 k 次切比雪夫多项式,并有

$$x_j = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} \cos \frac{(2j+1)\pi}{2n+2} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (2-38)$$

$T_0(t)$ 到 $T_7(t)$ 的切比雪夫多项式为

$$\begin{aligned}
 T_0(t) &= 1 \\
 T_1(t) &= t \\
 T_2(t) &= 2t^2 - 1 \\
 T_3(t) &= 4t^3 - 3t \\
 T_4(t) &= 8t^4 - 8t^2 + 1 \\
 T_5(t) &= 16t^5 - 20t^3 + 5t \\
 T_6(t) &= 32t^6 - 48t^4 + 18t^2 - 1 \\
 T_7(t) &= 64t^7 - 112t^5 + 56t^3 - 7t
 \end{aligned} \tag{2-39}$$

2.2.2 井眼校正

阵列感应测井仪器在有井眼地层中测量时，受到井眼大小、泥浆电导率和仪器偏心的影响，井眼模型如图 2-6 所示，使测量的地层电导率产生误差。当井眼较大，或者泥浆电导率与地层电导率的比值较大，短子阵列严重受井眼影响，尤其在海水等高矿化度泥浆井中，阵列感应的软件合成聚焦已无能为力，常出现异常结果。即使在一般，如果不预先进行井眼校正，处理结果也会出现问题。在实际测井数据的井眼校正时，要将具有井眼影响的测量信号校正到无井眼时的测量信号。有两种方法来实现井眼校正。第一种方法是基于几何因子的近似校正方法^[27]，它速度快，但精度低。第二种方法是基于正演模拟数据库的井眼校正方法，完全自适应时，速度较慢，但精度高，校正效果好。本文主要使用第二种方法进行井眼校正。

阵列感应测井仪器的多子阵列布置方式，测量到丰富的地层信息，前几个短子阵列（HDIL 前 3 个子阵列、MIT 前 4 个）测量到了井眼附近的信息，为实现井眼校正提供了可能。在基于正演模拟数据库的井眼校正方法中，首先利用三维有限元程序，根据实际工程应用需要，把井径、泥浆电阻率、仪器偏心和地层电阻率四个参数分段计算各种已知地层模型的测井响应数据库，然后根据已计算出的测井响应数据库通过快速响应计算方法，计算各种情况下的测井响应。再根据前几个短子阵列测量数据反演井眼模型参数，进行各子阵列的井眼校正。限于篇幅三维有限元计算方法参考文献^[2]，下面就详细讨论基于正演模拟数据库的井眼校正的具体实现方法。

(1) 测井响应的快速计算

为了快速计算各种情况下的测井响应，采用样条函数(Spline)构造出两个局部逼近多项式，得到多元函数分段拟合来快速计算测井响应。仪器居中状态下，多元函数拟线性函数表达式为

$$P(r, \sigma_m, \sigma_f) = a_0 + a_1 r + a_2 \sigma_m + a_3 \sigma_f + a_4 r \sigma_m + a_5 r \sigma_f + a_6 \sigma_m \sigma_f + a_7 r \sigma_m \sigma_f \tag{2-40}$$

其 (2-40) 中， $P(r, \sigma_m, \sigma_f)$ 满足

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial r} &= p(\sigma_m, \sigma_f) & \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \sigma_m} &= p(\sigma_r, \sigma_f) & \frac{\partial^2 P}{\partial \sigma_m^2} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \sigma_f} &= p(r, \sigma_m) & \frac{\partial^2 P}{\partial \sigma_f^2} &= 0\end{aligned}$$

上述表达式的待定系数可以通过正演模型计算出的函数值来确定。

对于仪器偏心状态，井眼环境影响参数还应该包含仪器在井眼中的偏心程度，即仪器离井壁的距离 ECC，共包含四个变量（井眼直径、井眼泥浆电导率、地层电导率和仪器在井眼内的偏心），其多元函数拟线性函数表达式类似与 (2-40)。

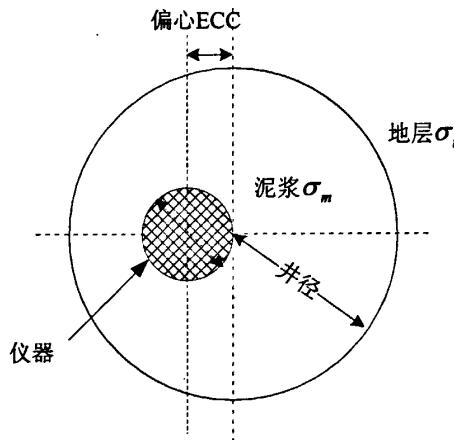


图 2-6 井眼模型示意图

由于仪器偏心情况与仪器居中类似，限于篇幅，仅讨论仪器居中情形下测井响应快速计算方法具体实现。假定模拟数据点参数为 $r = X_r, \sigma_m = X_m, \sigma_f = X_f$ ，要求用模拟多项式(2-40)计算井眼信号的 $P(X_r, X_m, X_f)$ 值。其步骤如下：

a. 输入正演计算提供的函数值表

$$\begin{aligned}&r(i), \sigma_m(j), \sigma_f(k) \\ &PR(r(i), \sigma_m(j), \sigma_f(k)) \\ &PI(r(i), \sigma_m(j), \sigma_f(k))\end{aligned}\quad (2-41)$$

$$\begin{aligned}i &= 1, 2, \dots, N_r, \quad r(1) < r(2) < \dots < r(N_r) \\ j &= 1, 2, \dots, N_m, \quad \sigma_m(1) < \sigma_m(2) < \dots < \sigma_m(N_m) \\ k &= 1, 2, \dots, N_f, \quad \sigma_f(1) < \sigma_f(2) < \dots < \sigma_f(N_f)\end{aligned}$$

式中， PR, PI 分别表示井眼信号的实部和虚部，虚部没有使用。

b. 输入拟合点集

$$(X_r(l), X_m(l), X_f(l)), \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (2-42)$$

c.从正演数值表中确定包含拟合点(即模拟数据点) (X_r, X_m, X_f) 的最小区域

$$\begin{aligned} r_0 \leq X_r \leq r_1, m_0 \leq X_m \leq m_1, f_0 \leq X_f \leq f_1 \\ r_0 = r(i_0), r_1 = r(i_1), i_0 < i_1, 1 \leq i_0, i_1 \leq N_r \\ m_0 = \sigma_m(j_0), m_1 = \sigma_m(j_1), j_0 < j_1, 1 \leq j_0, j_1 \leq N_m \\ f_0 = \sigma_f(k_0), f_1 = \sigma_f(k_1), k_0 < k_1, 1 \leq k_0, k_1 \leq N_f \end{aligned} \quad (2-43)$$

下面用 P 表示 PR, PI , 记为

$$\begin{aligned} P(r(i), \sigma_m(j), \sigma_f(k)) &= P(i, j, k) \\ P(i_0, j_0, k_0) &= p_1, \quad P(i_0, j_0, k_1) = p_5 \\ P(i_0, j_1, k_0) &= p_2, \quad P(i_0, j_1, k_1) = p_6 \\ P(i_1, j_0, k_0) &= p_3, \quad P(i_1, j_0, k_1) = p_7 \\ P(i_1, j_1, k_0) &= p_4, \quad P(i_1, j_1, k_1) = p_8 \end{aligned} \quad (2-44)$$

d. 将正演数值表中提供的 8 个点

$$\begin{aligned} (r(i), \sigma_m(j), \sigma_f(k), P(i, j, k)) \\ i = i_0, i_1, \quad j = j_0, j_1, \quad k = k_0, k_1 \end{aligned} \quad (2-45)$$

代入模拟多项式(2-40)可得到一个 8 阶的线性方程组, 其未知数为 a_0, \dots, a_7 . 方程组记为

$$\begin{aligned} AX = P \\ X = (a_0, a_1, \dots, a_7)^T, \quad P = (p_1, p_2, \dots, p_8)^T \end{aligned} \quad (2-46)$$

A 是方程组的 8×8 阶系数矩阵, 由于其行列式 $\det A = \pm(r_1 - r_0)^4(m_1 - m_0)^4(f_1 - f_0)^4 \neq 0$

因而方程组(2-46)的存在唯一的解, 将解 a_0, \dots, a_7 与拟合点 $r = X_r, \sigma_m = X_m, \sigma_f = X_f$ 代入多项式(2-40), 便求得井眼信号 $P(X_r, X_m, X_f)$ 的近似值。

注意到多项式(2-40)关于变元 r, σ_m, σ_f 的拟线性性质, 不用解方程组(2-46)求出 a_0, \dots, a_7 , 可直接对每个变元作线性插值, 求出 $P(X_r, X_m, X_f)$ 的近似值。计算流程如下:

$$\begin{aligned} S &= \frac{p_2 - p_1}{m_1 - m_0}(X_m - m_0) + p_1 \\ T &= \frac{p_4 - p_3}{m_1 - m_0}(X_m - m_0) + p_3 \\ U &= \frac{T - S}{r_1 - r_0}(X_r - r_0) + S \end{aligned} \quad (2-47)$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{p_6 - p_5}{m_1 - m_0} (X_m - m_0) + p_5 \\ T &= \frac{p_8 - p_7}{m_1 - m_0} (X_m - m_0) + p_7 \\ V &= \frac{T - S}{r_1 - r_0} (X_r - r_0) + S \end{aligned} \quad (2-48)$$

$$P(X_r, X_m, X_f) = \frac{V - U}{f_1 - f_0} (X_f - f_0) + U \quad (2-49)$$

不难看出，用两种方法算出的 $P(X_r, X_m, X_f)$ ，在不计舍入误差的情况下，是完全一致的。显然，线性插值法比解方程组方法，工作量省，精度高，程序实现时采用该方法。

(2) 确定地层视电导率的反演计算

在实际井眼校正前，井眼环境影响信号是未知的，地层真电导率 σ_f 和地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ 也是未知的。为了进行井眼环境影响校正，要快速确定地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ ，从而求得井眼环境影响信号，然后对各个接收子阵列测量的信号进行校正，所以，根据测量响应确定地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ 是一个反演问题，也是井眼环境影响校正的关键问题。为此，设计一个补偿函数，并采用非线性最小二乘方法求补偿函数的极值，即使仪器的测量值与具有一定井眼环境影响的模型值之差为最小，从而确定地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ 。

设计如下的补偿函数^[27]：

$$E(\bar{\sigma}_f) = \sum_{j=1}^N \frac{|U_M^j - V_D^j(d, r, \sigma_m, \bar{\sigma}_f)|^2}{\varepsilon^j} \quad (2-50)$$

其中 U_M^j 为仪器第 j 个接收线圈对的测量值； $V_D^j = PR_j(d, r, \sigma_m, \bar{\sigma}_f)$ 是阵列感应仪中第 j 个接收线圈对井眼信号的模拟多项式在点 $(d, r, \sigma_m, \bar{\sigma}_f)$ 处的井眼影响信号； V_{hom}^j 为第 j 个接收线圈对的均质模型计算值； N 为所使用的线圈组合数目； ε^j 为加权系数。

利用非线性最小二乘方法求补偿函数的极值实际上是一个反演问题，反演问题一般都存在多解性，补偿函数中的模型中隐藏了井眼直径、泥浆电导率、地层电导率和仪器在井眼内的偏心等多个变化参数，对同一个响应值可能对应多组井眼环境参数，所以，如何能够快速得到上面补偿函数的最优解，除了要先确定合理的误差范围外，迭代搜索路径是另一个很重要的因素，若迭代搜索路径不同，将产生不同的效果。

对于仪器居中情况，仪器偏心情况与此类似，井眼环境参数只包括井眼直径、泥浆电导率和地层电导率，这种情况下的迭代搜索路径按照下面四种情况考虑：

a. 井眼直径和泥浆电导率给定的情况。这时只对地层电导率进行搜索，首先考虑每一个接收子阵列模型值的搜索，得到每一个接收子阵列的地层视电导率，然后，加权平均后，得到用于井眼环境影响校正的地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ 。

b.井眼直径给定，对泥浆电导率和地层电导率两个参数进行搜索的情况。先对泥浆电导率进行搜索，再对地层电导率进行搜索，即先给定一个泥浆电导率，对地层电导率进行搜索，泥浆电导率再增加一个步长，对地层电导率进行搜索，直到搜索到需要的目的值。在对泥浆电导率进行搜索时，为了减少搜索时间，避免出现多解（不希望的解），一般都将泥浆电导率设定在某一个较小的范围内进行搜索。

c.泥浆电导率给定，对井眼直径和地层电导率两个参数进行搜索的情况。与第二种情况相似，先对井眼直径进行搜索，再对地层电导率进行搜索，同样，需要先将井眼直径设定在某一个较小的范围内进行搜索，以提高精度。

d.井眼直径和泥浆电导率都不给定，对井眼直径、泥浆电导率和地层电导率三个参数进行搜索的情况。最先搜索井眼直径，然后搜索泥浆电导率，最后搜索地层电导率，具体搜索方法与上面相似。

通过上述求补偿函数的解，可以求得地层视电导率和视井眼环境参数，由此可以求得井眼环境影响信号。

(3) 消除井眼影响

根据短阵列接收信号进行反演计算确定的地层视电导率 $\bar{\sigma}_f$ ，计算出实际的模型值 $V_M^j(d, r, \sigma_m, \bar{\sigma}_f)$ ，由此可求出全部子阵列的井眼环境影响信号 $V^j(\bar{\sigma}_f)$ 。

$$V^j(\bar{\sigma}_f) = V_M^j(d, r, \sigma_m, \bar{\sigma}_f) - V_{\text{hom}}^j(\bar{\sigma}_f) \quad (2-51)$$

其中， $V_{\text{hom}}^j(\bar{\sigma}_f)$ 为第 j 个阵列均匀地层的响应。再根据井眼环境影响信号 $V^j(\bar{\sigma}_f)$ 对全部子阵列测量值 V_M^j 进行井眼校正，得到最后校正后的信号。

$$V_c^j = V_M^j - V^j(\bar{\sigma}_f) \quad (2-52)$$

通过上述校正后，便得到无井眼影响的测量信号。

(4) 井眼校正实现流程

综合上述分析，井眼校正计算程序实现流程如图 2-7 所示。可分为以下几个步骤：

- a. 输入趋肤效应校正后的测井数据和控制参数。
- b. 确定井眼半径、泥浆电阻率、仪器偏心和地层电阻率的搜索范围和初始值。井眼半径和泥浆电阻率的搜索范围由输入参数确定，仪器偏心搜索范围根据井眼半径计算，地层电阻率范围根据输入测井信号确定。
- c. 根据输入参数，对井眼半径、泥浆电阻率、仪器偏心三个参数中的一个或两个进行搜索优化，逐渐缩小搜索范围。
- d. 根据上一步搜索优化的确定的井眼半径、泥浆电阻率、仪器偏心值，利用前述的测井快速计算方法，计算测井响应。
- e. 根据上一步计算的测井响应求解补偿函数极值，判断计算的最优解是否满足条件，如满足进入下一步，否则返回上一步，继续优化搜索。

e. 根据均值响应库，计算井眼影响，并消除井眼影响。

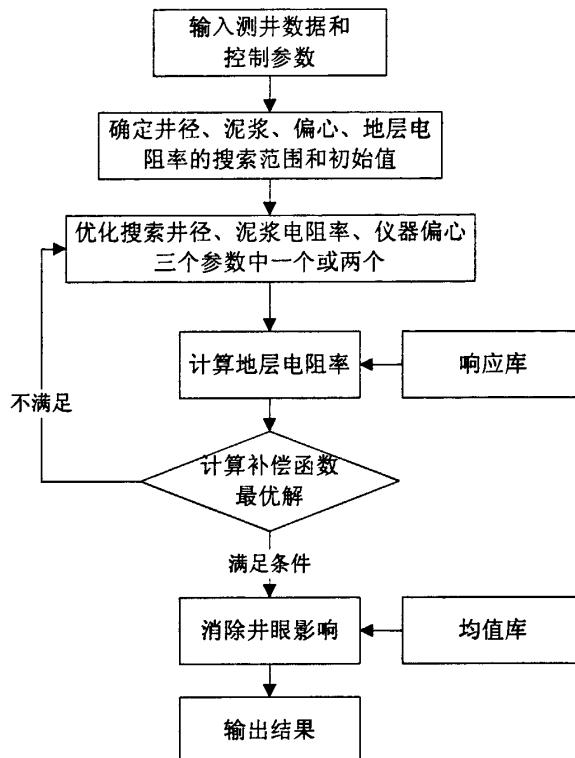


图 2-7 井眼校正程序流程图

2.2.3 信号合成处理

阵列感应信号合成处理的目的是通过二维信号处理将测井信号合成为测井分析家所需的信号。信号合成首先根据井眼校正后的数据计算有效背景电导率。其次是由有效背景电导率和井眼校正数据进行满足物理条件的纵向分辨率匹配，实现输出相同分辨率不同探测深度的多组曲线。下面从阵列感应信号合成的基本原理出发，具体讨论信号合成处理的实现。

(1) 信号合成基本原理

图 2-8 是阵列感应测井中地层信号、测量信号与处理信号之间的关系，假定地层旋转对称，因而地层电导率仅是纵向和径向深度的函数。地层二维电导率信号经过多个子阵列（响应函数）得到多个输出（各子阵列测量信号），近似反映二维地层信息。它是一个单输入多输出系统^[28]。由于受井眼、侵入、围岩等环境影响和趋肤效应影响以及响应函数有限的分辨率，测量信号不能有效地反映原状地层信息。感应测井信号处理的目的就是消除测量信号中不必要的影响，反演出地层真电导率。

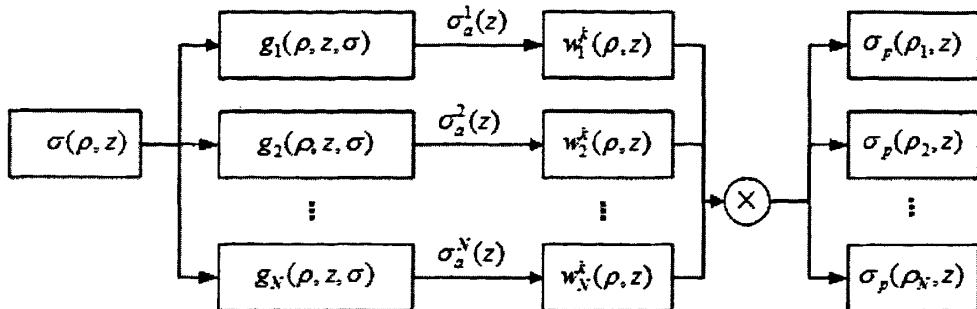


图 2-8 阵列感应测井中地层信号、测量信号与处理信号之间的关系

图 2-8 中的测量信号合成部分可用数学语言描述为

$$\sigma_p(\rho_k, z) = \sum_{j=1}^J \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_j^k(z', \sigma) \sigma_a^j(z - z') \quad (2-53)$$

其中 $\sigma_p(\rho_k, z)$ 为经处理后径向探测深度 ρ_k , 纵向深度位置 z 处的电导率; $k=1, 2, \dots, K$, K 是合成探测深度数目; $\sigma_a^j(z)$ 为第 j 个子阵列在 z 点的测量值, $j=1, 2, \dots, J$, J 为子阵列个数; $w_j^k(z, \sigma)$ 为聚焦合成到探测深度 ρ_k 时, 第 j 个子阵列的滤波器, σ 是地层的电导率, $z = z_{\min} \sim z_{\max}$ 是聚焦合成处理的窗口范围, 它说明聚焦合成滤波器 $w_j^k(z, \sigma)$ 是地层电导率的函数。

式(2-53)说明, 对于任一电导率为 σ 的地层, 通过调整滤波器 $w_j^k(z, \sigma)$, 可以用范围为 $z = z_{\min} \sim z_{\max}$ 的所有子阵列的测量值聚焦合成同一纵向深度, 不同径向深度上的新的测量值, 故称为聚焦合成处理。此时, $w_j^k(z, \sigma)$ 称为聚焦合成滤波器。聚焦合成处理的质量取决于聚焦合成滤波器的设计。

根据 Born 近似理论^[2], 图 2-8 中 $\sigma_a^j(z)$ 为阵列感应测井的第 j 子阵列的测量信号, 可表示为

$$\sigma_a^j(z) = \sigma_{ba}(z) + \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} g_j(\rho', z - z', \sigma_b) [\sigma(\rho', z') - \sigma_{ba}(z)] d\rho' dz' \quad (2-54)$$

其中 $\sigma_a^j(z)$ 是深度 z 处第 j 子阵列的测量信号; σ_b 是背景电导率; $\sigma_{ba}(z)$ 是深度 z 处地层电导率为 σ_b 时的视背景电导率; $g_j(\rho, z, \sigma_b)$ 是电导率为 σ_b 的均匀地层中第 j 子阵列的空间响应函数。

(2) 背景电导率计算

在对阵列感应测井数据处理过程中, 根据背景电导率来选择合适的滤波器对测量信号进行处理, 因此背景电导率计算是阵列感应信号合成中的关键步骤。从理论上讲是没有计算背景电导率的公式, 但根据数学中的积分中值定理, 则存在使其对应几何因子与地层褶积为测量信号的背景电导率。

由 (2-54) 式可知, 实际测井中得到的是视电导率, 因而可从视电导率数据中提取背景电导率, 然后在计算背景电导率。对于任一测量深度, 将实际测量值与几何因子褶

积结果比较，插值求出最接近实际测量值的几何因子，其相应的背景电导率即为真背景电导率，因为对应该背景电导率的几何因子与地层褶积等于地层的实际测量值^[2]。

为了在测量信号处理时快速计算背景电导率，必须预先设计好计算背景电导率的滤波器库。其设计步骤为：

(a). 将测量范围内的电导率分段(0.01、0.02、0.05、0.02、0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、3.5、5.0、7.0、10.0S/m)，然后根据不同电导率和不同频率选择高斯函数作为初始滤波器。其高斯函数的覆盖范围以相应电导率和频率时的趋肤深度为依据。

(b). 将滤波器与地层的响应褶积，其结果视背景电导率。

(c). 根据均匀介质中的精确计算结果，不同电导率和频率有不同的视电导率，从第二步中得到的视背景电导率反推出电导率，即背景电导率。

(d). 将背景电导率与真背景电导率比较，若两者一致，则所对应的滤波器即为所求视背景电导率的滤波器，否则从第一步开始重新选择高斯函数。

有了上述设计好的一系列滤波器，对于实际测量数据，按如下步骤自适应计算背景电导率。

(a). 以井眼校正校正后的测量值作为视背景电导率的估计值。由于测量信号中存在各种高频干扰，因此，可用三点或五点平滑来估计每个信号对应的视背景电导率 σ_{ba}^j 。

(b). 将估计的视电导率转化为背景电导率的估计 σ_{b0}^j 。

(c). 计算对应于 σ_{b0}^j 的滤波器。引入背景电导率集合 $\{\sigma_{bi}^j : i = 1, \dots, N_b\}$ 和计算视背景电导率的滤波器集合 $\{w_{bai}^j : i = 1, \dots, N_b\}$ ，其中 N_b 为背景电导率分段，对于给定深度，如果 σ_{b0}^j 满足

$$\sigma_{bi}^j \leq \sigma_{b0}^j < \sigma_{b(i+1)}^j \quad (2-55)$$

则对应 σ_{b0}^j 的滤波器有如下插值公式求得

$$w_{ba}^j = a_2 w_{bai}^j + a_1 w_{b(a+1)}^j \quad (2-56)$$

式中， a_1 和 a_2 是由背景电导率 σ_{bi}^j ， σ_{b0}^j ， $\sigma_{b(i+1)}^j$ 确定的归一化权值，即

$$a_1 = \frac{\ln \sigma_{b0}^j - \ln \sigma_{bi}^j}{\ln \sigma_{b(i+1)}^j - \ln \sigma_{bi}^j} \quad (2-57)$$

$$a_2 = 1 - a_1$$

(d). 用新计算出的滤波器与一定范围的测量值褶积就等到给定深度的视背景电导率，即

$$\sigma_{ba}^j = w_{ba}^j(z) * \sigma_a^j(z) \quad (2-58)$$

(e). 根据上述计算出的每个阵列的给定深度的视背景电导率计算有效背景电导率 $\sigma_{aveb}(z)$ 。由于在纵向分辨率滤波器设计中，所有信号取得是同一背景电导率，因此必须把上一步计算的所有阵列的背景电导率转换为单一的背景电导率，即有效背景电导率。其计算公式如下

$$\sigma_{aveb}(z) = \sum_{j=1}^N d_j \sigma_{ba}^j \quad (2-59)$$

式中, N 为子阵列个数, d_j 满足归一化条件, 即 $\sum_j d_j = 1$ 。

综上所述, 其程序实现流程, 如图 2-9 所示。

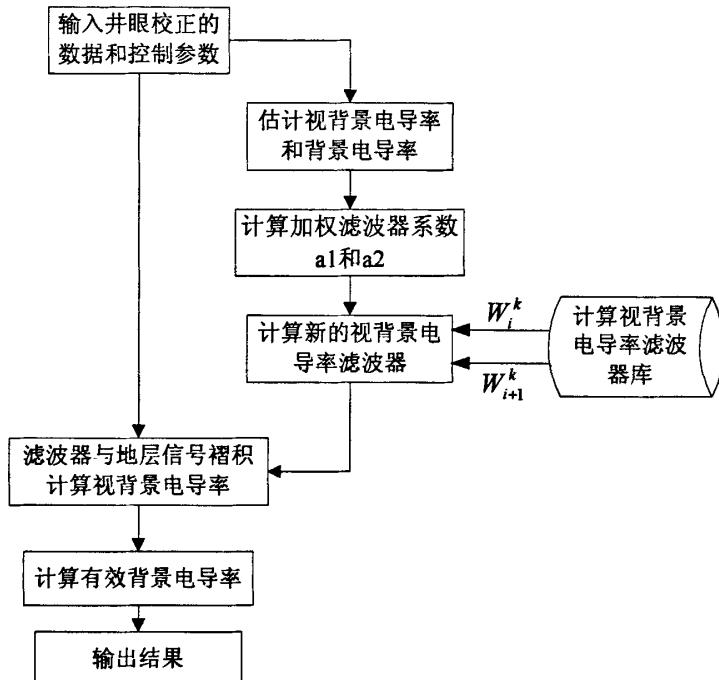


图 2-9 计算背景电导率程序流程

(3) 纵向分辨率匹配

阵列感应测量信号具有高分辨率是测井分析人员对测井及信号处理的要求, 以便精细分析薄层, 另外测井分析人员还希望提供不同探测深度同分辨率的曲线, 同一分辨率下不同探测深度的曲线可直接反映地层的侵入特征, 纵向分辨率匹配就是实现上述功能。

如图2-10所示两条(如20in.和30in., 1 in=0.0254m, 下同)不同分辨率曲线的空间频域响应。从响应曲线可知, 如果能设计出高与低分辨率曲线差值信息的差值滤波器。想使低分辨率曲线变为高分辨率曲线, 只需将低分辨率曲线加上差值信息。反之, 想使高分辨率曲线变为低分辨率曲线, 只需将高分辨率曲线减去差值信息, 这就是分辨率信息补偿原理。对于6条(MIT, AIT为5条)聚焦合成曲线的纵向分辨率匹配的实现方法是滤波出相邻两条曲线的差值信息, 然后根据所需的分辨率匹配到相应的曲线上。

设 $g_{pvgf1}, g_{pvgf2}, \dots, g_{pvgf6}$ 分别为由浅到深的6条不同聚焦合成深度的曲线。由前面的分析知, 首先要设计在相邻两条曲线中将高分辨率曲线变换为低分辨率曲线的滤波器,

即设计滤波器 h_{vgfi} , 使 g_{pvgf_i} 变换为 $g_{pvgf_{(i+1)}}$, 用数学公式表示为

$$g_{pvgf_{(i+1)}}(z) = h_{vgfi}(z) * g_{pvgf_i}(z) \quad (2-60)$$

式中, $i=1,2,\dots,6$, 左侧为将要分辨率匹配的目的函数。上式离散化并写成矩阵形式为

$$G_{pvgf_{(i+1)}} = H_{vgfi} G_{pvgf_i} \quad (2-61)$$

式中,

$$G_{pvgf_i} = [g_{pvgf_i}(1) \quad g_{pvgf_i}(2) \quad \cdots \quad g_{pvgf_i}(N_i)]^T \quad (2-62)$$

$$H_{vgfi} = [h_{vgfi}(1) \quad h_{vgfi}(2) \quad \cdots \quad h_{vgfi}(N_{hi})]^T \quad (2-63)$$

N_i 为响应函数的长度; N_{hi} 为滤波器的长度。

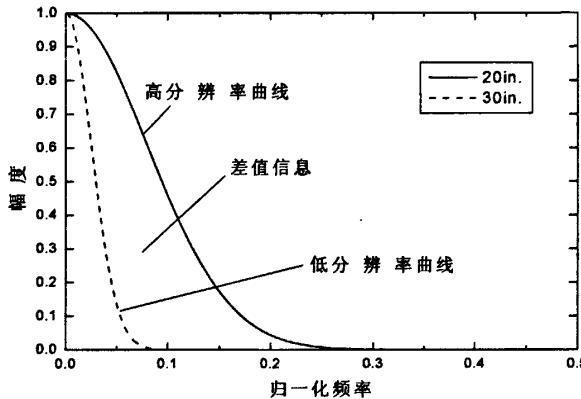


图2-10 分辨率匹配中的信息补偿原理

式(2-60)或(2-61)描述的是一维信号匹配问题。可以用一维最优化方法来设计滤波器 h_{vgfi} 。有了 h_{vgfi} 就很容易得到响应函数 g_{pvgf_i} 和 $g_{pvgf_{(i+1)}}$ 之间的差值信息为

$$\Delta g_{pvgf_i} = g_{pvgf_i} - h_{vgfi} * g_{pvgf_i} \quad (2-64)$$

上面得到了相邻两条曲线间的差值信息, 就可实现6条不同聚焦合成探测深度曲线间的分辨率匹配。表2-1是将所有曲线匹配到10 in.探测深度曲线时的情况。例如, 如果要将60 in.探测深度曲线匹配到10 in.探测深度曲线, 则新的曲线为:

$$g_{pvgf_4}^1 = g_{pvgf_4} + \Delta g_{pvgf_1} + \Delta g_{pvgf_2} + \Delta g_{pvgf_3} \quad (2-65)$$

式中 Δg_{pvgf_1} , Δg_{pvgf_2} 和 Δg_{pvgf_3} 分别为10 in.与20 in.、20 in.与30 in.和30 in.与60 in.之间的差值信息。其它探测深度曲线匹配到10 in.曲线的方法类似, 只是增加的信息不同, 这里不再赘述。

结合前面的分析, 纵向分辨率匹配的程序实现流程如图 2-11 所示, 具体计算步骤为:

(a) 跟据自适应计算背景电导率所得的平均背景电导率加权插值求出平均背景电导率所对应的 5 个分辨率匹配滤波器。加权插值计算新滤波器的方法与背景电导率计算的方法相同。

(b) 用这 5 个分辨率匹配滤波器分别加到 10in 至 90in 这 5 条探测深度曲线上, 计算出相邻 2 条曲线的差值信息。

(c) 根据分辨率要求进行信息补偿, 将所有曲线匹配到所需分辨率的曲线上, 即实现分辨率匹配。

(d) 消除过校正影响和滤波处理, 完成纵向分辨率处理。

表 2-1 分辨率匹配到探测深度为 10in. 时的曲线(分辨率 1ft, 1ft=0.3048m 下同)

		不同探测深度的分辨率匹配					
不同探测深度之间 的分辨率差值信息		10in. g_{pvf1}^1	20in. g_{pvf2}^1	30in. g_{pvf3}^1	60in. g_{pvf4}^1	90in. g_{pvf5}^1	120in. g_{pvf6}^1
真分辨率聚焦曲线		g_{pvf1}	g_{pvf2}	g_{pvf3}	g_{pvf4}	g_{pvf5}	g_{pvf6}
10in 与 20in.			+	+	+	+	+
$\Delta g_{pvf1} = g_{pvf1} - g_{pvf1} * h_{vgf1}$							
20in. 与 30in.				+	+	+	+
$\Delta g_{pvf2} = g_{pvf2} - g_{pvf2} * h_{vgf2}$							
30in. 与 60in.					+	+	+
$\Delta g_{pvf3} = g_{pvf3} - g_{pvf3} * h_{vgf3}$							
60in. 与 90in.						+	+
$\Delta g_{pvf4} = g_{pvf4} - g_{pvf4} * h_{vgf4}$							
90in. 与 120in.							+
$\Delta g_{pvf5} = g_{pvf5} - g_{pvf5} * h_{vgf5}$							

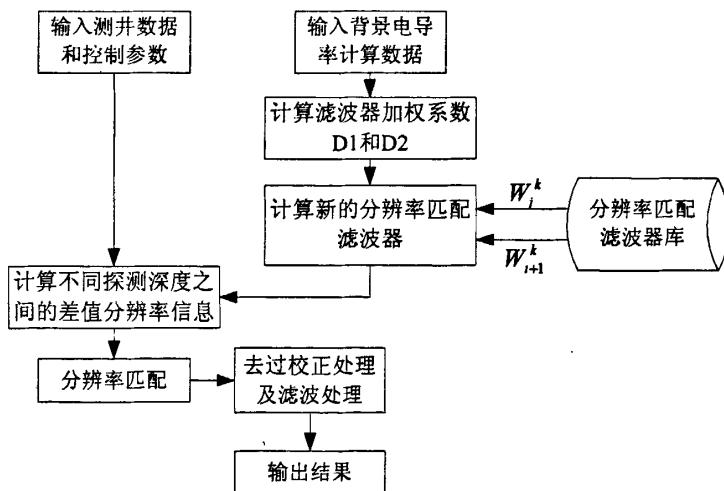


图 2-11 纵向分辨率匹配程序实现流程

2.2.4 反演处理

实际测井解释中，工程人员希望知道地层的原状电阻率、侵入电阻率、侵入起止深度等情况。求解上述四种参数的方法称为四参数反演方法。下面就从地层侵入模型出发，讨论四参数反演的原理及实现。

(1) 反演地层模型

设测井模型如图2-1所示，地层关于井轴旋转对称，任一目的层，它受井眼、上下围岩和侵入带影响。侵入带分为冲洗带和过渡带两部分，过渡带的电阻率变化严格意义上是十分复杂的。常用的两种侵入模型分别假设电阻率径向分是线性模型和指数模型，如图2-12b和图2-12c所示。图中各参数为：井眼泥浆电阻率 R_{mc} ，井眼半径 r_h ；冲洗带电阻率 R_{xo} ；上下围岩电阻率 R_{su} 、 R_{sd} ；地层厚度 H ；原状地层电阻率 R_i 。

图2.12b所示的线性侵入模型,过渡带电阻率为

$$R_i = R_{xo} + (R_i - R_{xo}) \frac{L_i - L_{xo1}}{L_{xo2} - L_{xo1}} \quad (2-66)$$

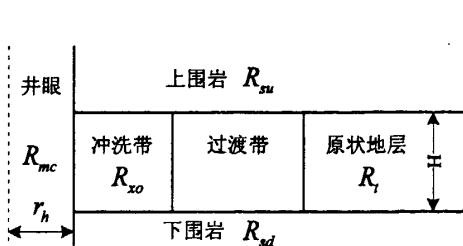
式(2-66)中， R_i 为任意侵入深度 L_i 对应的电阻率； L_{xo1} 和 L_{xo2} 分别为过渡带开始和结束半径。

图2.12c所示是一种指数侵入模型，过渡带电阻率为

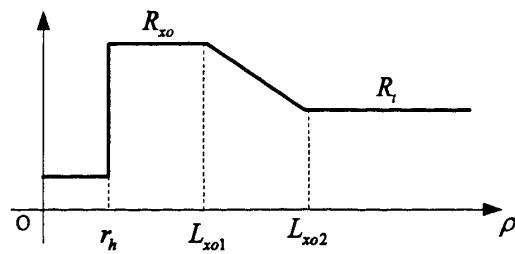
$$\sigma_i = \sigma_i + \frac{\sigma_{xo} - \sigma_i}{1 + \left(\frac{L_i}{L_c}\right)^n} \quad (2-67)$$

式(2-67)中， σ_i 是侵入深度 L_i 对应的电导率； L_c 是侵入过渡带中点深度； σ_{xo} 和 σ_i 是对应于电阻率 R_{xo} 和 R_i ； n 是大于2的指数，描述过渡带变化特性， n 较大，表示侵入过渡带很窄，电导率变化快， n 较小，表示侵入过渡带很宽，电导率变化缓慢。 L_c 和 n 与侵入起止半径的关系为：

$$\begin{aligned} L_{xo1} &= L_c \left(1 - \frac{2}{n}\right) \\ L_{xo2} &= L_c \left(1 + \frac{2}{n}\right) \end{aligned} \quad (2-68)$$



(a) 地层模型



(b) 地层电阻率径向分布线性模型

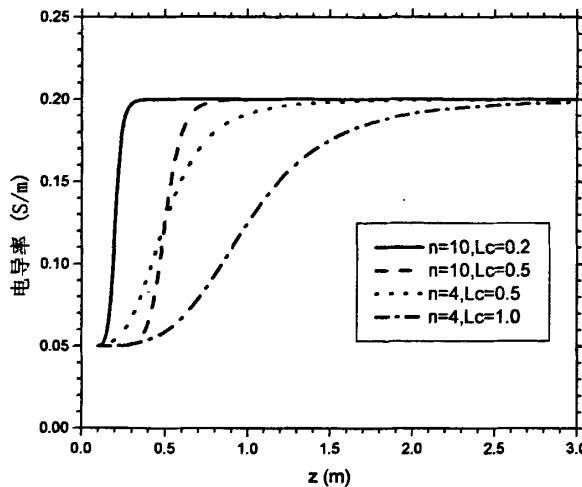
(c) 地层电阻率径向分布指数模型: $\sigma_{x_0} = 0.05 \text{S/m}$, $\sigma_i = 0.2 \text{S/m}$

图2-12 四参数反演模型

图2-12c中给出了四参数时的过渡带电导率分布,可以看出 L_c 和 n 变化对过渡带电导率分布的影响。

(2) 反演原理

阵列感应测井反演中,其基本反演思想和方法与一般的电测井反演方法相同^[29],因此从研究一般电测井反演方法出发,讨论阵列感应测井四参数反演的实现。

电阻率测井反演问题的一般提法是:要求用一个具有 M 个参数的正演模型去拟合 N 个测井数据值,其数学表达式为

$$d_n = F_n(p_1, p_2, p_3, \dots, p_M, S_n) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (2-69)$$

式中, d_n 表示测量数值,函数 F_n 表示正演模型, $p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$ 表示待反演的模型参数, S_n 表示正演模型中的其它参数。

(2-69)式是一组非线性方程组,若根据经验给出模型的初始猜测

$$P_0^T = (p_{10}, p_{20}, p_{30}, \dots, p_{M0}) \quad (2-70)$$

则可以用泰勒级数把式(2-69)右边展开为线性化的形式(略去二阶以上项)

$$d_n = y_n(P_0) + \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial F_n}{\partial p_i} \right) \Delta p_i \quad n=1, 2, \dots, N \quad (2-71)$$

把上式写成矩阵形式

$$E = D - Y = J \Delta P \quad (2-72)$$

式中

$$D = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_N)^T \text{ 为测井数据矢量;} \quad$$

$Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_N)^T$ 为正演模型预测数据矢量;

$E = (d_1 - y_1, d_2 - y_2, d_3 - y_3, \dots, d_N - y_N)^T$ 为测井值和预测值之差矢量;

$P = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_M)^T$ 为待反演参数矢量;

$\Delta P = (p_1 - p_{10}, p_2 - p_{20}, p_3 - p_{30}, \dots, p_M - p_{M0})^T$ 为待反演参数矢量修正步长;

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial p_M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial p_M} \end{bmatrix} \text{ 为 Jacobi 矩阵。}$$

式(2-72)是关于待反演参数矢量修正步长 ΔP 的 $N \times M$ 线性方程组, 一般解法为: 先将方程组

$$J\Delta P = E \quad (2-73)$$

正则化, 即变换式(2-73)为

$$J^T J \Delta P = J^T E \quad (2-74)$$

相应的最小二乘解为

$$\Delta P = (J^T J)^{-1} J^T E = J^+ E \quad (2-75)$$

式中 $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$ 称为 J 的广义逆。

为了增加解的稳定性, 通常采用奇异值分解方法求解式(2-73)。对于 $N \times M$ 阶矩阵 J , 存在一个 $N \times N$ 阶的正交矩阵 U 和 $M \times M$ 阶的正交矩阵 V , 可使 J 分解为

$$J = U \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V^T \quad (2-76)$$

其中, $\Sigma = diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$, ($r \leq \min\{N, M\}$), 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq 0$, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, r)$ 称为 J 的奇异值。式(2-76)称为实矩阵 J 的奇异值分解式, 利用该式可以计算 J 的广义逆及方程(2-73)的最小二乘解 ΔP 。

设 $U = (U_1, U_2)$, U_1 为 U 中前 r 列正交向量组构成的 $N \times r$ 阶矩阵; $V = (V_1, V_2)$, V_1 为 V 中前 r 列正交向量组构成的 $M \times r$ 阶矩阵。则 J 的广义逆为

$$J^+ = V_1 \Sigma^{-1} U_1^T \quad (2-77)$$

式(2-73)的最小二乘解为

$$\Delta P = J^+ E = V_1 \Sigma^{-1} U_1^T E \quad (2-78)$$

对于电阻率测井反演问题, 由于 J 的部分奇异值可能为零, 方程常为病态方程组, 要使计算具有一定的稳定性, 需要采用加阻尼因子的正则化方程

$$(J^T J + \alpha I) \Delta P = J^T E \quad (2-79)$$

式中, α 为阻尼因子, I 为 $M \times M$ 单位矩阵。 相应的最小二乘解为

$$\Delta P = (J^T J + \alpha I)^{-1} J^T E = V_1 \text{diag} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \alpha} \right) U_1^T E \quad (2-80)$$

按照上面叙述的方法，在初值 P_0 处将正演模型线性化，利用阻尼最小二乘法求出参数 P 的增量 ΔP 后，可以得到新的参数矢量 P'

$$P' = P_0 + \Delta P \quad (2-81)$$

把这组新的参数代入正演模型，可以求出新的预测数据 Y' 及新的差值矢量

$$E = D - Y' \quad (2-82)$$

以及新的Jacobi矩阵；再用这些结果得出新的矢量参数增量 $\Delta P'$ ，由此构成迭代过程直到满足收敛条件为止。

(3) 反演实现

综上所述，阵列感应反演处理的实现，可分以下几个步骤：

(a) 估计地层模型参数初始值和范围。根据 2ft 纵向分辨率匹配后的 6 条（MIT 为 5 条）曲线之间的关系和大小，初始地层模型的原状电阻率、侵入电阻率、侵入起止深度四个参数的值和范围。

(b) 根据几何因子计算地层预测响应。几何因子计算响应公式如下，

$$\sigma_a = G_m \sigma_m + G_{xo} \sigma_{xo} + G_f \sigma_f + G_t \sigma_t$$

式中， σ_a 为地层预测响应； G_m, G_{xo}, G_f 和 G_t 分别为井眼、侵入带、过渡带和原状地层的积分几何因子，表示各区对测井响应信号的贡献大小。

(c) 求反演参数矢量修正步长 ΔP ，迭代计算。

(d) 预测响应与实际测井数据是否匹配。判断两者之差是否满足精度要求，若满足，进入下一步，否则调整地层模型参数返回第二步。

(e) 反演后处理。根据自然电位、自然伽马或泥质含量曲线反演后处理，具体为：当前点的测井曲线值小于给定最小阀值时，则将计算出的侵入限制为无侵入；反之当前点的测井曲线值大于给定最大阀值时，则对反演出的侵入不做限制；在这 2 个值之间时则按线性方程对其进行限制。上述曲线可以同时使用或只使用其中的一条或两条，由输入参数确定。

综上所述，反演程序实现流程如图 2-13 所示。

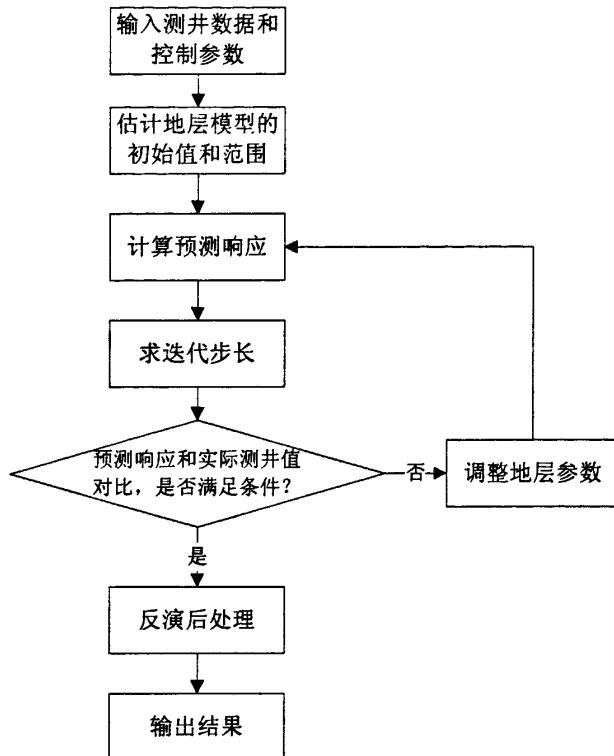


图 2-13 反演处理程序流程图

2.2.5 基于非均匀背景地层的信号合成 (IBF)

阵列感应的信号合成聚焦方法虽然是基于背景电导率的信号处理方法，但是其背景电导率是基于均匀地层的，给定背景条件下系统是线性的。实际测井中，地层的非线性比较严重，如纵向非均匀，高围岩与地层对比度；径向非均匀，高泥浆与地层对比度，高侵入与地层对比度。此外其它原因可以引起地层的非均匀性，如井眼粗糙性、仪器偏心和井斜。在这些非均匀中，一般是高对比度纵向非均匀地层中起主要作用。对于海水井，其径向非均匀性也必须考虑。阿特拉斯 (Atlas) 开发了基于纵向非均匀背景电导率的 IBF 信号处理方法^[12]。对该方法进行详细研究并设计开发了基于纵向分均匀背景电导率的聚焦处理程序。因此，该方法仅适用于阿特拉斯 (Atlas) 公司的 HDIL 阵列感应测井仪器。

(1) 基于非均匀背景地层的信号聚焦原理

将式 (2-54) 中的视背景电导率移到左边，得

$$\sigma_a(z) - \sigma_{ba}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{Born}}(\rho', z - z', \sigma_b) [\sigma(\rho', z') - \sigma_b(\rho', z')] d\rho' dz' \quad (2-83)$$

式(2-83)说明 Born 几何因子将地层信号与背景电导率的差 $[\sigma(\rho, z) - \sigma_b(\rho, z)]$ 映射为测量值与视背景电导率的差 $[\sigma_a(z) - \sigma_{ba}(z)]$ ，视扰动信号，也称为残差。令

$$\Delta\sigma_a(z) = \sigma_a(z) - \sigma_{ba}(z) \quad (2-84)$$

$$\Delta\sigma_t(\rho, z) = \sigma(\rho, z) - \sigma_b(\rho, z) \quad (2-85)$$

则式(2-83)变为

$$\Delta\sigma_a(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{Born}}(\rho', z - z', \sigma_b) \Delta\sigma_t(\rho', z') d\rho' dz' \quad (2-86)$$

根据对 Born 几何因子^[2]的研究结论, 对于实际非均匀地层, 式(2-86)必须分解为实部和虚部, 不能同时使用。因此上式分解为如下两式

$$\Delta\sigma_{aR}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{BornR}}(\rho', z - z', \sigma_b) \Delta\sigma_t(\rho', z') d\rho' dz' \quad (2-87)$$

$$\Delta\sigma_{aX}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{BornX}}(\rho', z - z', \sigma_b) \Delta\sigma_t(\rho', z') d\rho' dz' \quad (2-88)$$

式(2-87)对应于实部信号, 它表明 Born 几何因子实部将地层电导率与背景电导率的差(扰动)映射为测量信号实部的扰动。式(2-88)对应于虚部信号, 它表明 Born 几何因子虚部将地层电导率的扰动映射为测量信号虚部的扰动。显然, 式(2-87)和式(2-88)是两个独立的方程, 通过滤波器均可以反演出地层电导率的扰动, 即

$$\Delta\sigma_{PR}(z) = \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_R[z', \sigma_b(z)] \Delta\sigma_{aR}(z - z') \quad (2-89)$$

$$\Delta\sigma_{PX}(z) = \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_X[z', \sigma_b(z)] \Delta\sigma_{aX}(z - z') \quad (2-90)$$

式中, $w_R(z, \sigma_b)$ 和 $w_X(z, \sigma_b)$ 分别是对应于实部和虚部的滤波器, $z' = z_{\min} \sim z_{\max}$ 是处理测量信号的窗口范围; $\Delta\sigma_{PR}(z)$ 和 $\Delta\sigma_{PX}(z)$ 分别是从实部和虚部反演出的扰动, 是对真实扰动 $\Delta\sigma_t(z)$ 的逼近, 即

$$\Delta\sigma_t(z) \approx \Delta\sigma_{PR}(z) = \sigma_{PR}(z) - \sigma_b(z) \quad (2-91)$$

$$\Delta\sigma_t(z) \approx \Delta\sigma_{PX}(z) = \sigma_{PX}(z) - \sigma_b(z) \quad (2-92)$$

其中 $\sigma_{PR}(z)$ 和 $\sigma_{PX}(z)$ 分别就是从实部和虚部反演出的地层真电导率。

将式(2-84)与式(2-89)至(2-92)各式结合起来, 可以得到基于 Born 几何因子理论的测量信号处理公式为

$$\sigma_{PR}(z) = \sigma_b(z) + \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_R[z', \sigma_b(z)] [\sigma_{aR}(z') - \sigma_{baR}(z)] \quad (2-93)$$

$$\sigma_{px}(z) = \sigma_b(z) + \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_x[z', \sigma_b(z)][\sigma_{ax}(z') - \sigma_{baX}(z)] \quad (2-94)$$

其中, $\sigma_{ax}(z)$ 和 $\sigma_{ax}(z)$ 分别是测量信号(视电导率)的实部和虚部; $\sigma_{baR}(z)$ 和 $\sigma_{baX}(z)$ 分别是视背景电导率的实部和虚部。式(2-92)和(2-93)说明, 实现基于 Born 几何因子的信号处理归结为两个问题: 设计非线性滤波器和计算背景电导率。

对于阵列感应测井, 由于虚部信号影响复杂以及测量不准确, 不使用虚部信号, 仅使用实部信号, 其理论基础就是式(2-93)。在实际处理测量数据时, 自适应实际滤波器从测量数据计算出背景电导率, 然后处理扰动信号, 最后再求出地层真实信号。大量的地层模拟和实际处理表明, 这种处理方法在电阻率对比度不太高的地层是十分有效的。但是在电阻率对比度的地层, 其效果降低, 必须研究新的方法。

进一步研究 Born 近似公式 (2-54) 知, 背景电导率不一定是均匀的, 可以是非均匀地层, 如果非均匀背景地层与地层接近, 则扰动就很小, 适应范围就可以拓宽。当非均匀背景地层等于地层时, 扰动不存在, 背景地层就是原地层, 无须处理。事实上, 这是不可能的。但是, 可以估计比较好的背景地层, 其对比度不大, 同时其扰动也不大, 此时就可得到较好的处理结果。这种新方法的基本基础仍然是基于自适应的信号聚焦方法。

将式(2-93)重新改写, 省略实部于虚部标记, 以下信号均为实部。

$$\sigma_p(z) = \sigma_{bp}(z) + \Delta\sigma_p(z) \quad (2-95)$$

其中, 第一项 $\sigma_{bp}(z)$ 是视背景地层的聚焦结果, 即

$$\sigma_{bp}(z) = \sum_{j=1}^J \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_j(z', \sigma) \sigma_{ba}^j(z - z') \quad (2-96)$$

式中的滤波器就是阵列感应信号聚焦处理滤波器。由于背景模型 σ_b 已经估计出来, 理论上无须再处理。但是为了与第二项一致, 必须计算出对应三种分辨率的地层模型。因此, $\sigma_{bp}(z)$ 可用背景模型 σ_b 与聚焦的目的函数褶积得到, 即

$$\sigma_{bp} = \sigma_b * T_p \quad (2-97)$$

其中, T_p 表示聚焦的目的函数。

式(2-95)中的第二项 $\Delta\sigma_p$ 是扰动的聚焦结果, 对于合成多种探测深度的阵列感应测井, 其表达式为

$$\Delta\sigma_p(z) = \sum_{j=1}^J \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_j(z') \Delta\sigma_a^j(z - z') \quad (2-98)$$

其中 $\Delta\sigma_a^j(z)$ 为扰动视电导率差, 也称为残差。即

$$\Delta\sigma_a^j(z) = \sigma_a^j(z) - \sigma_{ba}^j(z) \quad (2-99)$$

综合式(2-95)至(2-99)得

$$\sigma_p(z) = \sigma_{bp}(z) + \sum_{j=1}^J \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_j(z') [\sigma(z-z') - \sigma_{ba}(z-z')] \quad (2-100)$$

由于 $\sigma_{bp}(z)$ 可以直接确定, 因而滤波器只须应运在残差上。式(2-100)是基于非均匀背景地层模型的信号处理方法, 因此称为非均匀背景地层聚焦方法。

$\sigma_{bp}(z)$ 由非均匀背景地层模型直接得到的理, 没有带入非线性影响。因此, 最终的结果中非线性影响是从公式(2-100)中的第二项引入的。如果背景地层模型就是真正的地层, 那么残差部分就是零, 而 $\sigma_p(z)$ 就等于 $\sigma_{bp}(z)$ 。这也只是理想情况下, 实际中是获得真正的地层模型是不可能的, 因此非线性影响是不可能消除的。通常只能从标准聚焦合成结果或原始的测量数据中估计一个背景地层模型, 使得相对较小的残差通过滤波器, 从而极大地消除非线性影响。同时, 聚焦合成过程的错误传播引起的错误也可以有一定的压制。因为对残差的放大毕竟要比标准聚焦中原始数据的放大小得多。

(2) 基于非均匀背景地层的信号聚焦的实现

对于实际测井数据处理, 必须设计自适应信号处理算法, 以趋肤效应和井眼校正后的信号作为原始输入信号, 其处理步骤如下:

(a) 从趋肤效应和井眼校正后的数据估计背景地层模型。理论上短子阵列分辨率高, 分层能力强, 无侵时, 读数也高, 更接近地层。但是, 实际测井数据的情况十分复杂, 侵入可能是高侵, 也可能是低侵。综合考虑, 选择子阵列 3 作为分层数据, 用第 3 和第 5 个子阵列的平均值作为背景模型的读数, 使模型折衷考虑地层和侵入影响。

(b) 计算背景模型的响应。用快速一维正演程序计算背景模型的每个阵列的测量结果, 7 个阵列、8 个频率的实部与虚部共 112 条信号, 按正常测井数据一样排列输出。

(c) 对背景模型响应进行趋肤效应校正。取背景模型响应的 56 个实部信号进行趋肤效应校正, 得到对应 7 个子阵列的 7 个信号。

(d) 计算残差。计算原始井眼校正数据与背景模型响应趋肤效应校正的差值, 即残差(视扰动信号)。

(e) 对残差进行标准聚焦处理。根据标准信号聚焦处理, 分两步进行。第一步根据背景电导率, 从滤波器库查表插值求出对应的真分辨率信号聚焦滤波器, 对残差进行真分辨率聚焦, 得到对应六个探测深度的真分辨率曲线。第二步, 从分辨率匹配滤波器库查表插值得到对应背景电导率的匹配滤波器, 对真分辨率曲线进行分辨率匹配得到对应 3 种分辨率 6 个探测深度的 15 条真扰动信号。

(f) 计算背景模型的理想聚焦合成结果。将 3 种分辨率的目的函数与背景模型褶积得到对应 3 种分辨率的背景电导率。

(g) 生成最终结果。3 种分辨率的背景电导率分别加到 3 种分辨率的真扰动信号加上, 就得到地层真电导率。

综上所述，基于非均匀背景地层的信号聚焦程序实现流程如图 2-14 所示。

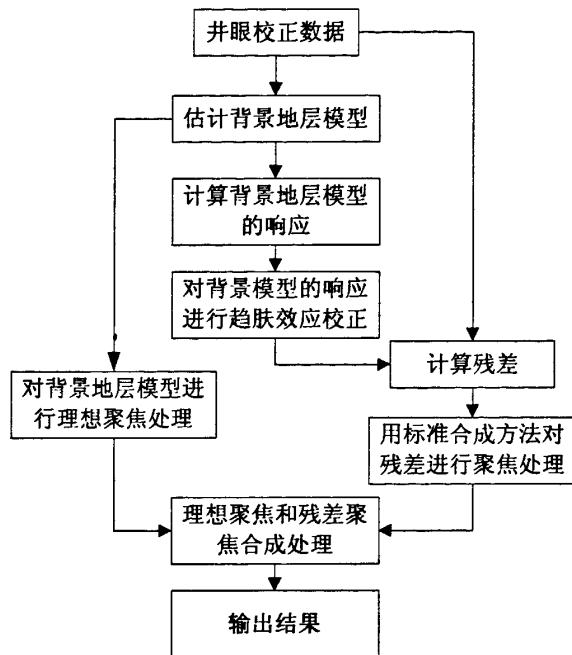


图 2-14 基于非均匀背景地层的信号聚焦程序流程图

2.3 阵列感应响应计算方法

目前的阵列感应数值模拟计算方法主要有有限差分法、有限元法、积分变换法和数值模式匹配法。数值模式匹配法由于计算速度快，因而在实际工程中应用最多，本软件也采用数值模式匹配法计算阵列感应响应。下面就简要介绍数值模式匹配法基本原理。

设通有交变电流的环形发射线圈 T 和接收线圈 R 位于轴对称多层地层的井眼中心，如图 2-15 所示。在柱坐标系 (ρ, φ, z) 下，发射线圈 T 中的电流密度表示为 $\mathbf{J}_T = \hat{\phi} I \delta(\rho - a) \delta(z - z_T)$ 。其中，I、a 和 z_T 分别是发射电流强度、发射线圈半径及其纵向位置。一般情况下，根据 Maxwell 方程，电场 \mathbf{E} 满足以下波动方程（设电磁波传播的时间指数为 $e^{-i\omega t}$ ）

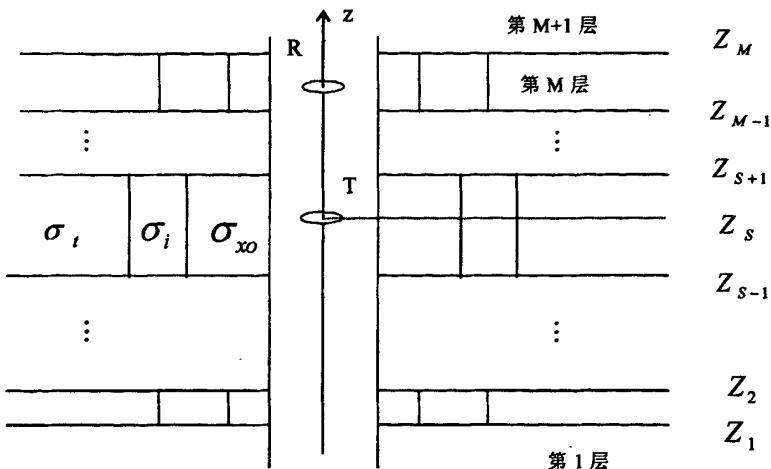


图 2-15 轴对称多层地层模型

$$\mu \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} - \omega^2 \mu (\epsilon + i \frac{\sigma}{\omega}) \mathbf{E} = i \omega \mu \mathbf{J}_T \quad (2-101)$$

式 (2-101) 中, ω 为发射电流的角频率, μ 、 ϵ 和 σ 分别是地层的磁导率、介电常数和电导率。对于图 2-15 所示的轴对称性地层和电流源, 周围产生的电场只有 φ 方向分量 $E_\varphi(\rho, z)$ 。设 μ 为常数, ϵ 和 σ 是空间位置 (ρ, z) 的函数, 则式 (2-101) 化简为

$$\left[\frac{\partial}{\partial \rho} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} k_m^2 \right] \rho E_{\varphi m} = -i \omega \mu I \delta(\rho - a) \delta(z - z_T) \quad (2-102)$$

式 (2-102) 中, $E_{\varphi m}$ 是第 m 层电场强度的 φ 分量; $k_m^2 = \omega^2 \mu (\epsilon_m + i \sigma_m / \omega)$, 是第 m 层的波数。

式 (2-102) 中的电场只有 ρ 和 z 分量, 可表示为

$$\rho E_{\varphi m}(\mathbf{r}) = R_m(\rho) Z_m(z) \quad (2-103)$$

当采用纵向解析径向数值的 NMM 法时, 同一径向层中波数 $k_m(\rho)$ 只是径向位置 ρ 的函数, 与 z 无关。将 (2-103) 代入 (2-102), 引入本征值 λ_m , 变量分离, 得到两个方程

$$\frac{d^2 Z_m}{dz^2} = \lambda_m^2 Z_m \quad (2-104a)$$

$$\frac{d}{d\rho} \frac{1}{\rho} \frac{dR_m}{d\rho} + \frac{1}{\rho} (\lambda_m^2 + k_m^2) R_m = 0 \quad (2-105a)$$

式 (2-104a) 为谐波方程, 可以直接得出解析解。式 (2-105b) 为 Bessel 方程, 由于波数 $k_m(\rho)$ 是径向位置 ρ 的函数, 没有解析解, 其数值求解等效于求以下泛函 $J(R_m)$ 的极值。

$$J(R_m) \equiv \int_0^\infty d\rho \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{dR_m}{d\rho} \right)^2 - \frac{1}{\rho} (\lambda_m^2 + k_m^2) R_m^2 \right] \quad (2-106a)$$

同时满足边界条件

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dR_m}{d\rho} \right) = 0 \quad (2-107a)$$

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} (R_m) = 0 \quad (2-107b)$$

当采用径向解析纵向数值的 NMM 法时，同一纵向层中波数 $k_m(z)$ 只是纵向位置 z 的函数，与 ρ 无关。引入本征值 λ_m ，通过变量分离，同样得到两个方程

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k_m^2 \right) Z_m = \lambda_m^2 Z_m \quad (2-104b)$$

$$\frac{d}{d\rho} \frac{1}{\rho} \frac{dR_m}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \lambda_m^2 R_m = 0 \quad (2-105b)$$

Bessel 方程式 (2-105b) 有解析解。式 (4) 中，波数 $k_m(z)$ 是 z 的函数，没有解析解，只能通过求泛函 $J(Z_m)$ 的极值来计算数值解。

$$J(Z_m) \equiv \int_0^\infty \left[\left(\frac{dZ_m}{dz} \right)^2 + (k_m^2 - \lambda_m^2) Z_m^2 \right] dz \quad (2-106b)$$

泛函(2-106)式的有效解法就是有限元法。有限元方法的基本思路是网格剖分和选择基函数，通过求泛函数值极值得到关于节点变量的代数方程，最后求解方程获得整个求解区域节点的解。式 (2-106) 中的 $R_m(\rho)$ 和 $Z_m(z)$ 是一元函数，网格剖分很简单，关键是以基函数的选择。一元基函数中，早期数值模式匹配法使用的都是分段线性三角基函数。三角基函数在节点上一阶导数不连续。后来用 Hermit-Gauss 函数，节点处的一阶导数被强制为零，不符合实际情况。张庚骥提出并构造幅度和斜度基函数生成 $R_m(\rho)$ ，保证节点一阶导数自然连续^{[23][24]}。设径向任意一个区间为 n ，则 $R_m^n(\rho)$ 表示为幅度和斜度基函数的线性组合

$$R_m^n = (\mathbf{g}_m^n)^T \mathbf{c}_m^n \quad (2-108)$$

式(2-107)中

$$\mathbf{g}_m^{(n)} \equiv (t_{(n-1)>} \quad s_{(n-1)>} \quad t_{n<} \quad s_{n<})^T \quad (2-109a)$$

$$\mathbf{c}_m^{(n)} \equiv (\alpha_m^{(n-1)} \quad \beta_m^{(n-1)} \quad \alpha_m^{(n)} \quad \beta_m^{(n)})^T \quad (2-109b)$$

式 (2-109a) 中， $t_{(n-1)>}$ 、 $s_{(n-1)>}$ 、 $t_{n<}$ 和 $s_{n<}$ 分别是幅度基函数 t_{n-1} 右部、斜度基函数 s_{n-1} 右部、幅度基函数 t_n 左部和斜度基函数 s_n 左部， \mathbf{c}_m^n 中的各项为对应的系数。图 2-16 给出了幅度和斜度基函数图形，它们使 $R_m(\rho)$ 满足边界条件 (2-107)。采用幅度和

斜度基函数虽然使每个结点上有两个基函数，但是它可以大量降低结点的数目，6个结点的幅度基函数和斜度基函数能达到与45个结点的三角形基函数相同的精度。

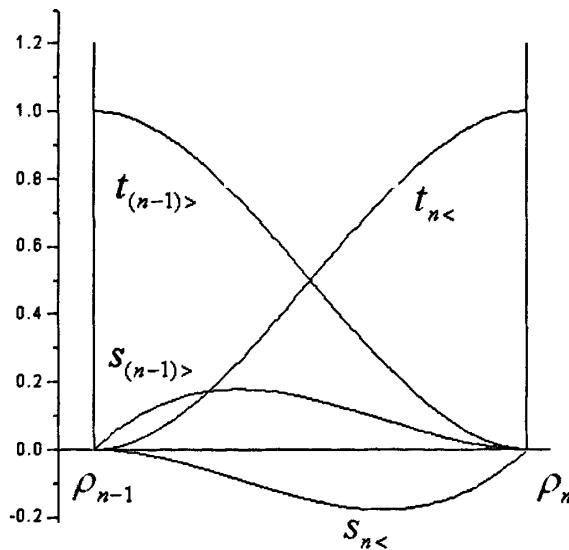


图 2-16 在区间 n 内取非零值的幅度基函数和斜度基函数($n=1, \dots, N$)

将 R_m 和 Z_m 的解代入式 (2-103) 就得到第 m 层的电场

$$\rho E_m(\rho, z) = g^T C_m [I + Q_m^\pm(z)] u_m^\pm(z) \quad (2-110)$$

式 (2-110) 中, Q_m^+ 和 Q_m^- 分别是上行波 u_m^+ 和下行波 u_m^- 的广义反射阵。通过使纵向界面上电场和磁场满足边界条件(即模式匹配)可以解出反射和传输矩阵, 从而得到整个地层的电场。在发射线圈上对电场进行线积分就可计算出接收电压, 进一步求出视电导率。以上就是数值模式匹配法计算感应测井响应的基本原理。

2.4 小结

本章主要研究感应测井的基本原理, 阵列感应测井数据处理和响应计算方法, 主要完成的工作如下:

(1) 阵列感应仪器最基本的子阵列是三线圈系或四线圈系, 这些子阵列的组成、原理都是建立在双感应测井的理论基础之上的。通过双感应测井电导率的计算公式, 推导出阵列感应测井中电导率的计算公式。为阵列感应测井数据处理和响应计算奠定理论基础。

(2) 研究阵列感应的数据处理方法, 首先从阵列感应的数据处理的各个处理方法的基本原理出发, 分析各个处理方法具体程序实现流程。主要包含趋肤效应校正, 井眼校正, 信号合成处理, 反演处理和基于非均匀背景地层的信号聚焦合成。

(3) 研究阵列感应测井响应常用计算方法——数值模式匹配法, 简要分析了数值模式匹配法计算阵列感应测井响应的基本原理。

第三章 阵列感应数据处理与测井响应计算软件结构及功能分析

前面研究阵列感应数据处理的各个方法的基础上，完成所有 Fortran 程序代码重写为 C++。下面就可以开始具体设计和实现软件。在油储描述中，阵列感应测井数据处理和解释起着重要的作用，特别是具有图形图像处理功能、界面友好的人机交互解释软件，更能为测井解释人员进行储层描述研究提供快速、灵活、方便的手段，将专业人员的经验和计算机系统运算速度快、精度高、存取方便、图形图像显示直观等特点有机结合起来，以便更好地开展油储描述解释工作^[40]。阵列感应数据处理与测井响应计算软件正是为完成上述功能而提出和开发的。本章主要论述阵列感应数据处理与测井响应计算软件实现功能和层次结构，以及开发和软件运行环境。

3.1 软件功能

阵列感应数据处理与测井响应计算软件的目标是实现阵列感应测井数据的计算机处理、显示和解释，建立阵列感应测井数据处理和分析的人机交互式处理解释平台，其软件功能如图 3-1 所示。从图中可知，软件主要功能包含测井数据管理、数据预处理、阵列感应数据处理、阵列感应测井响应计算可视化、测井图形图像显示、解释成果输出和动态帮助等功能。

3.1.1 测井数据管理

测井数据是油田珍贵的数据资源。测井数据管理是阵列感应数据处理与测井响应计算软件的基础功能，它提供以下几种功能：

- (1) 常见测井数据格式文件（WIS、XTF、DLIS 等）的解编功能，使用户可以方便直观的读取数据文件中的内容，并且可以转换自定义中间数据文件格式，将测井数据转换成容易阅读的文本文件；
- (2) 曲线深度移动，可以在当测井深度和钻探深度不一致时，但钻探的深度确信无疑时，通过移动深度使其达到正确的深度；
- (3) 曲线滤波，用户可以对测井曲线进行平滑滤波处理，并提供多种形式的滤波器供用户选择；
- (4) 曲线计算，可以对单条曲线或多条曲线间进行简单的加、减、乘、除和对数等逐点运算；
- (5) 曲线编辑，实现单井曲线创建、复制、拷贝、删除、重命名、重采样及异常点剔除处理等，还可以实现井和井之间的曲线拷贝等功能。

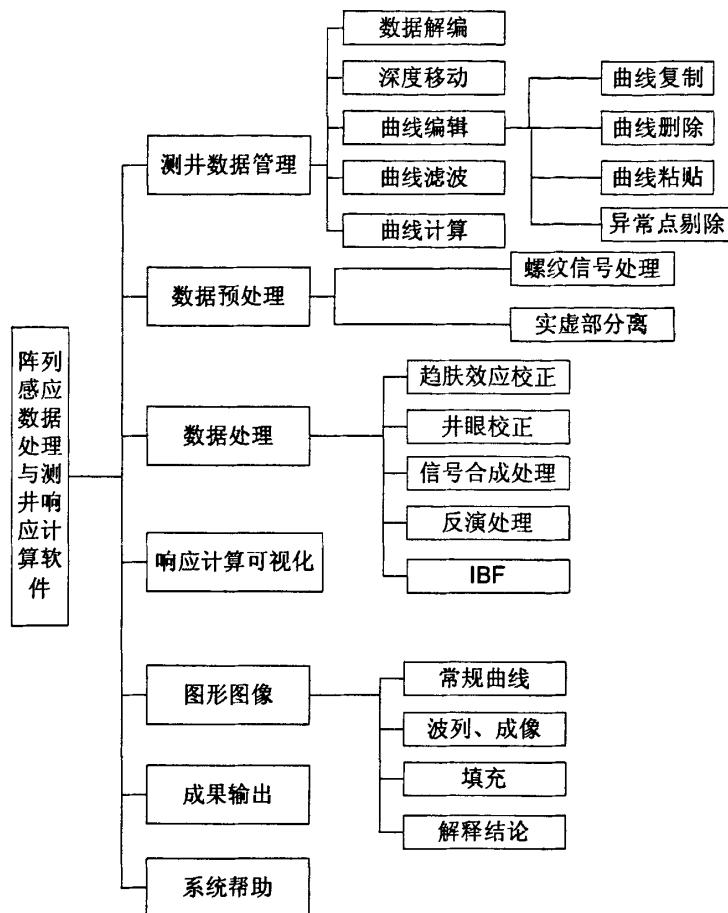


图 3-1 阵列感应数据处理与测井响应计算软件功能图

3.1.2 数据预处理

数据预处理主要为后续的数据处理提供数据来源，是整个阵列感应测井数据处理的第一步。它主要提供以下几种功能：

(1) 螺纹信号处理，当测井曲线出现螺纹现象时，用户选择该选项，可以消除螺纹信号干扰，提取出原始测井信号；

(2) 测井原始资料的实部和虚部测井数据分离，一般阵列感应测井（如 HDIL）的测井信号的实部和虚部都记录在原始数据中，且按波列的形式存放，但阵列感应数据处理过程中不使用虚部数据，实部和虚部测井数据分离后，方便后续数据处理。

3.1.3 数据处理

数据处理是软件的核心功能。虽然阵列感应测井提供丰富的地层信息，但其测井原始数据未经处理不能直接为测井解释人员使用。阵列感应数据处理的流程如图 3-2 所示，它主要提供以下几个处理方法：

(1) 趋肤效应校正，消除阵列感应测量信号的趋肤效应影响，其输入数据为原始数据或经预处理后的数据，校正后为井眼校正提供数据。

(2) 井眼校正，消除井眼尺寸、钻井泥浆等对阵列感应测量信号的影响，其输入数据为趋肤效应校正后的数据，校正后为信号合成处理或基于非均匀背景地层信号合成提供数据。

(3) 信号合成处理，对阵列感应测量信号进行信号聚焦匹配合成处理，其输入数据为井眼校正后数据，合成处理得到一英尺、二英尺和四英尺的三组纵向分辨率匹配曲线，每组 5 条或 6 条 (HDIL 为 6 条、MIT, AIT 为 5 条) 径向探测深度曲线 (10in, 20in, 30in, 60in, 90in 或 120in)；

(4) 基于非均匀背景地层的信号聚焦 (IBF) 处理，在地层的非线性比较严重时 (如纵向非均匀，高围岩与地层对比度；径向非均匀，高泥浆与地层对比度，高侵入与地层对比度)，进行测井数据聚焦匹配合成处理，其输入数据为井眼校正后数据，输出结果与信号合成处理相同；

(5) 反演处理，根据信号合成或基于非均匀背景地层的信号聚焦 (IBF) 处理后的数据，反演地层模型参数，经过反演处理输出侵入带电阻率、原状地层电阻率、侵入开始结束半径和径向电阻率剖面成像，使用户得到比较直观的井眼和地层模型。

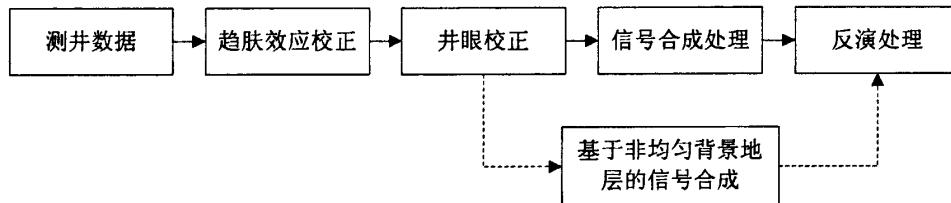


图 3-2 阵列感应数据处理流程

3.1.4 测井响应计算可视化

阵列感应响应计算主要通过用户设定的地层模型和仪器模型，通过调用外部可执行程序计算阵列感应正演响应。阵列感应响应计算模块主要功能有：

(1) 仪器模型可视化编辑。用户通过简单的鼠标操作可以实现仪器模型设计。另外，还预置常见的阵列感应仪器模型 (AIT、MIT、HDIL)，供用户使用。

(2) 地层模型可视化编辑。实现“橡皮筋”方式的鼠标拖拽改变地层模型侵入深度和地层电阻率。

(3) 调用外部可执行程序 (exe) 计算测井响应，并显示计算结果。

3.1.5 图形图像

测井图形图像显示直接面向用户，是阵列测井资料的实现计算机描述的关键部分。阵列感应数据处理与测井响应计算软件主要支持常规一维曲线、波列、成像、曲线填充和解释结论等测井对象的显示，以及地层模型和仪器模型的显示。它提供以下几个功能：

(1) 测井绘图对象名称、别名等字体及颜色，深度和刻度等网格的样式、颜色、粗细等属性设置；

(2) 测井绘图对象的刻度方式 (线性，对数)、二比例绘制和是否跨道绘制等常规

属性设置，对于填充、波列和成像等复杂测井绘图对象还有填充边界、填充样式和调色板等对象特有属性设置；

(3) 测井绘图对象的鼠标拖拉、移动操作，实现改变测井绘图对象的重排序、改变曲线道的宽度；

(4) 绘图模板文件的创建、编辑、保存和加载。

(5) 测井数据的动态交互显示，当鼠标道某曲线上时，自动拾取曲线，并以文本或图形方式显示该曲线道的所有曲线数据。

3.1.6 系统帮助

动态提供各个处理模块的控制参数含义、输入输出曲线含义等。根据用户选择的当前处理模块动态显示帮助。

3.2 软件层次结构及开发环境

根据软件功能需求分析和 MVC 结构模式^[33]，划分软件为四个层次：软件开发运行系统层、测井数据访问层、测井图形显示交互界面层和处理方法模块层，如图 3-3 所示。

3.2.1 软件开发运行系统层

软件开发运行系统层是指本软件开发所应用的开发环境和运行平台。它是由 Windows 系统、MFC 库^[41]和 Visual C++ 2008 开发环境等组成。Windows 系统是最常用系统，其具有多任务多窗口、用户程序界面接口对象化等优点。它的突出优点是：

(1) 通用性强。Windows 操作系统是目前广泛使用的操作系统之一，且具有软件工程工业标准的软件系统。

(2) 用户界面设计美观、直接、方便。Visual C++ 是一个面向对象的图形用户界面开发集成环境。它具有良好的用户编程接口，可以方便的开发界面简单、美观的应用程序。

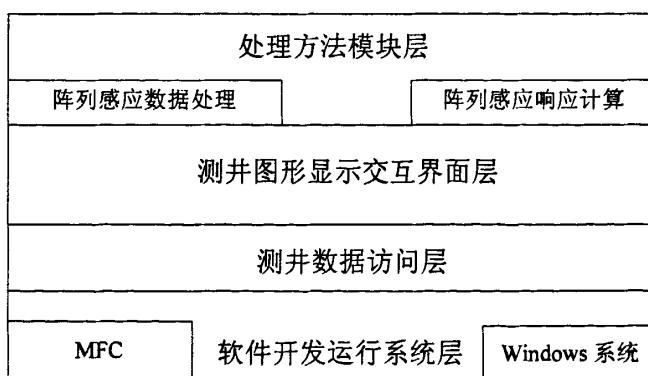


图 3-3 阵列感应数据处理与测井响应计算软件层次结构

(3) 多任务多窗口管理系统。Windows 系统是一个多任务、多窗口管理系统，应用程序可以在多个窗口下执行而实现各自对象的目的任务，为多窗口操作以及多窗口信息通信建立了良好的基础。

(4) 方便的系统 API 接口和功能强大的图形函数。MFC 库封装了完整的 Windows API 函数，MFC 库提供了包括消息、控件、窗口函数、菜单、图形设备等 API 函数接口，以及功能强大的图形函数。

3.2.2 测井数据访问层

该层是阵列感应数据处理与测井响应计算软件的基础层，直接面向测井图形显示交互界面层和处理方法模块层。它的主要以 I/O 接口的形式提供一维、波列、成像、控制参数和解释结论等数据的访问操作，为测井图形显示交互层提供各种显示数据，还为处理方法模块层进行数据处理和响应计算提供数据，并把处理结果写入到测井数据文件。

3.2.3 测井图形显示交互界面层

该层是直接面向操作用户与阵列感应数据处理与测井响应计算软件中各个应用方法模块及其它实用工具的数据传递、处理和显示层。该模块主要任务有：

- (1) 实现一维曲线、波列曲线、成像、曲线填充和解释结论等测井对象的显示和属性编辑。
- (2) 解释、处理来自用户操作界面的用户命令请求（如：鼠标按钮、键盘输入命令），驱动相应程序模块完成实现用户的目的任务。
- (3) 实现处理方法模块层与测井数据访问层之间的信息传递和处理。

3.2.4 处理方法模块层

处理方法模块层是阵列感应数据处理与测井响应计算软件的核心功能层，主要包含阵列感应数据处理的各个方法模块和阵列感应响应计算模块。

对于阵列感应数据处理的各个方法模块，采用多线程和动态链接库（DLL）技术实现各处理模块在软件的挂接和运行，每一个处理方法编译生成独立动态链接库文件。多线程和动态链接库（DLL）是 Windows 系统程序开发的常用技术，其具有多任务、易于扩展和便于维护等优点。

对于阵列感应响应计算模块，采用多线程调用外部可执行文件（EXE），实现在软件的挂接和运行。

3.3 小结

本章主要分析阵列感应数据处理与测井响应计算软件的实现功能和层次结构，主要完成工作如下：

(1) 软件功能需求分析。分析软件主要实现的功能有测井数据管理，测井数据预处理，测井数据处理，响应计算，测井图形图像显示和软件帮助等，针对每个功能模块的具体实现功能做了分析，根据功能确定阵列感应数据处理与测井响应计算软件的实现目标。

(2) 软件层次结构设计。根据软件实现的功能划分软件为四层次结构：软件开发运行系统层，测井数据访问层，测井图形显示交互界面层和处理方法模块层。

第四章 阵列感应数据处理与测井响应计算软件设计与实现

前面分析阵列感应数据处理与测井响应计算软件软件的层次结构和主要功能，下面就从软件主界面、测井数据的访问、测井图形对象绘制等方面具体阐述软件设计和实现。

4.1 软件主界面设计与实现

4.1.1 软件主界面设计

软件主界面直接面向用户，是用户进行曲线编辑、解释、处理、绘图的平台，负责与各个功能块的连接与实现。按照简单、易于使用、灵活和可靠的设计原则，设计主界面如图 4-1 所示。它主要分为六个区：菜单区、工具栏区、状态栏区、对象头显示与编辑区、对象体显示编辑区和浮动窗口区。

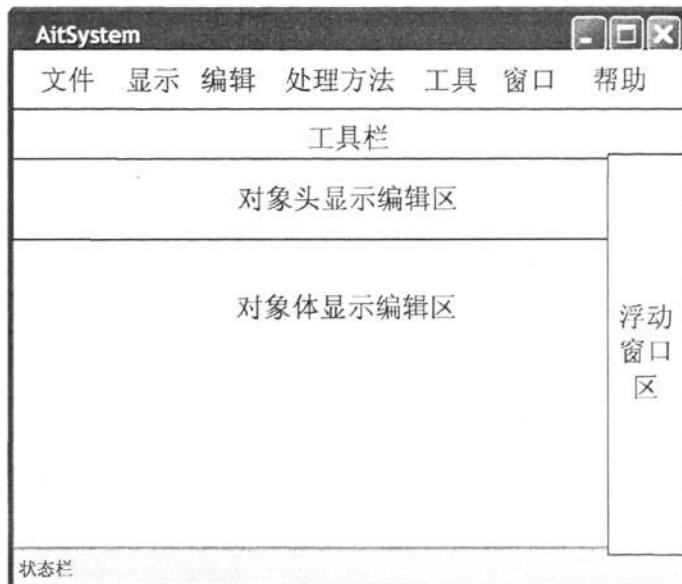


图 4-1 软件主界面设计示意图

(1) 菜单区

菜单区主要包含文件、显示、编辑、处理方法、工具等七部分：

a.“文件”，用于文件的加载、存储、打印等。主要包括：测井数据文件的打开，绘图模板的打开与保存，测井图形输出、打印等。

b.“显示”，用于测井图形的绘制。它主要包括：添加曲线道、一维曲线、深度道、波列、解释结论、填充、成像等测井绘图对象，测井对象的复制、粘贴、删除、置顶、置底、属性设置等。

c.“处理方法”，用于阵列感应测井处理方法选择。该部分支持用户按订制设定，即支持新数据处理方法的添加和删除。根据处理方法分类，分为数据处理和响应计算两部分，其中，数据处理包含趋肤效应校正、井眼校正、信号合成、反演处理和基于非均匀

背景地层的信号聚焦合成 (IBF)。

d.“编辑”，用于曲线的编辑与校深。该部分的功能需要考虑用户的方便性，主要功能为：标准曲线设定、校深曲线设定、自动深度对比、深度段设定、曲线拼接、曲线数值更改确认等。

e.“工具”，用于调用各种实用工具，如测井数据文件管理、系统参数管理、菜单方法管理和井眼泥浆电阻率计算等。

f.“窗口”，用于屏幕窗口管理，如屏幕窗口式样的设置、拆分，以及浮动窗口的打开和停靠等。

g.“帮助”，为用户提供操作说明，以及个处理模块控制参数、输入输出曲线说明等。

(2) 工具栏

用于菜单快速定位，是对“菜单”的补充。

(3) 对象头显示编辑区

对于每一个测井绘图对象，都对应着一个自己的对象头和对象体。对象体中绘制对象数据。对象头绘制该绘图对象的名，以及对象信息(如一维曲线的左、右刻度值、单位等)，如图 4-2 所示。对象体显示编辑区主要实现以下功能：

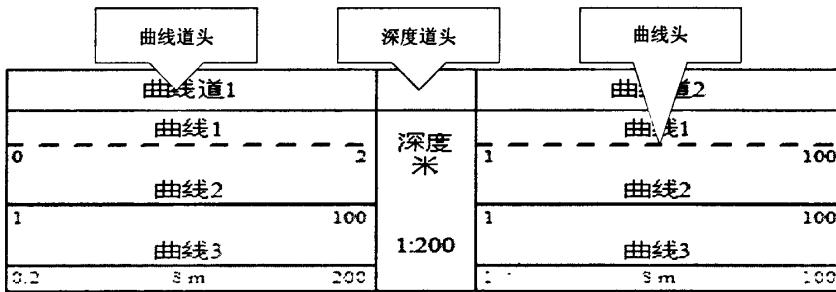


图 4-2 对象头分类

a.对象头按表格方式显示。内容可以是用户添加的，也可以是从绘图模板文件中加载。表格可以按照用户的需要设定，可以设置表格的各种属性。

b.通过对象头完成对测井对象的管理和控制。为了便于用户察看曲线信息，当图形显示区沿深度方向（纵向）滚动对对象体时该区域不变化，而沿水平方向滚动时随对象同步滚动。

c.响应鼠标操作。鼠标点击对象头，选中当前对象；鼠标双击对象头，设置对象属性；鼠标拖拽对象，可以改变对象的宽度、位置以及所属父道。

(4) 对象体显示编辑区

对象体显示编辑区是测井图形对象的对象体显示区。该部分支持水平滚动和垂直滚动；不同的测井图形对象具备不同的功能需求，例如解释结论绘图对象，此区域支持双击鼠标，进行解释结论属性设置；

(5) 浮动窗口区

浮动窗口区主要有控制参数卡编辑窗口、地层模型设计编辑窗口、仪器模型设计编辑窗口、输出信息窗口和动态帮助窗口等。浮动窗具有自动停靠功能，用户在使用是打开，不使用是自动停靠，从而以最大视图空间显示测井图形对象。

(6) 状态区

状态区主要显示系统信息。比如，菜单的功能说明等。

4.1.2 软件主界面实现

根据上述设计要求，阵列感应数据处理与测井响应计算软件的主界面实现如图 4-3 所示。下面阐述视图拆分、菜单、工具栏和浮动窗口等的具体编程实现过程。

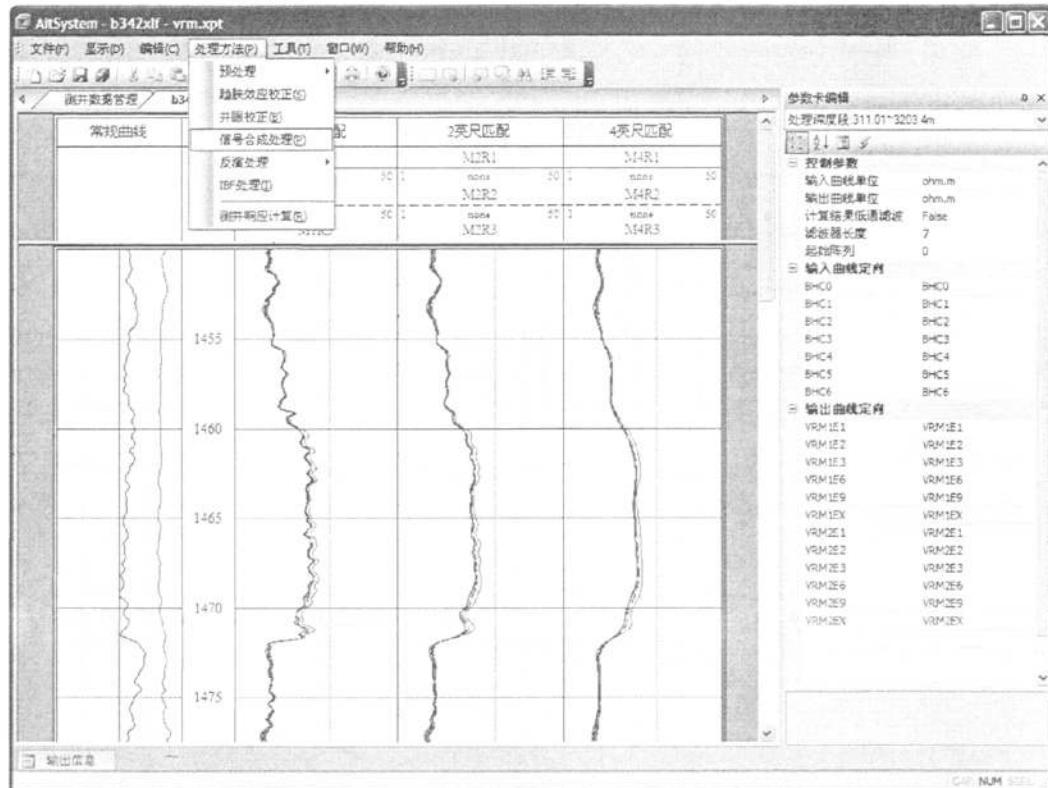


图 4-3 软件主界面

(1) 窗口拆分

在上述设计中视图区分为对象头显示编辑区和对象体显示编辑区两部分，即屏幕窗口要采用分区管理，就需要软件具有动态拆分窗口的能力。要实现这一功能，可分为以下几个步骤：

(a) 在主框架类中定义成员变量 `CSplitterWnd m_wndSplitter`。`CSplitterWnd` 类提供分隔器窗口的功能，分隔器窗口是一个包含有多个窗格的窗口。

(b) 在主框架类中重载 `OnCreateClient(...)` 函数，在该函数中通过 `CreateStatic` 函数实现视图拆分，由 `CreateView` 函数为每个窗格关联相应的视图类。

(c) 通过函数 `RecalcLayout`，重新布局窗口，实现拆分视图窗口的代码如下：

```

BOOL CMainFrame::OnCreateClient()
{
    MyContext.m_pCurrentDoc->m_bAutoDelete = FALSE;
    m_wndSplitter.DestroyWindow(); //销毁以前创建的分割视图
    MyContext.m_pCurrentDoc->m_bAutoDelete = TRUE;
    m_wndSplitter.Clear(); //清除 m_wndSplitter 的内容
    m_wndSplitter.CreateStatic(this, 2, 1); //拆分视图为 2 行 1 列
    m_wndSplitter.CreateView(0, 0, RUNTIME_CLASS(CHeadView), CSize(10,10),
    &pContext );
    m_wndSplitter.CreateView(1,0,RUNTIME_CLASS(CBodyView),CSize(20,20),
    &pContext);
    m_wndSplitter.SetActivePane(0,0);
    RecalcLayout();
    .....
    return TRUE;
}

```

其中，`m_wndSplitter` 是 `CSplitterWnd` 类实例，负责对各个拆分窗口的管理；`CHeadView` 是用于管理测井对象头显示类；`CBodyView` 是测井曲线体显示类。

(2) 菜单实现

考虑到阵列感应数据处理与测井响应计算软件的处理方法可扩展性的要求，在菜单设计上采用静态菜单与动态菜单产生相结合的方式实现。将处理方法菜单分别存放到“处理方法.cfgm”文件中，用户直接修改该文件或使用方法菜单编辑工具，来修改菜单项。系统在启动时自动从这个文件中加载，动态创建菜单项。处理方法.cfgm 文件的部分内容如下：

```

POPUP "处理方法"
BEGIN
    POPUP "预处理"
    BEGIN
        MENUITEM "螺纹信号处理" SPRO.DLL SPRO SPRO.INP 2
        MENUITEM "实部虚部分离" RESX.DLL RESX RESX.INP 1
    END
    MENUITEM SEPARATOR
    POPUP "数据处理"
    BEGIN
        MENUITEM "趋肤效应校正" SKIN.DLL SKIN SKIN.INP 2

```

```

MENUITEM "井眼校正" BHC.DLL BHC BHC.INP 2
MENUITEM "信号合成处理" VRM.DLL VRM VRM.INP 2
MENUITEM "一维反演" INV.DLL INV INV.INP 2
MENUITEM "二维反演" INV2D.DLL INV2D INV2D.INP 2
MENUITEM "IBF" IBF.DLL IBF IBF.INP 2
END
POPUP "响应计算"
BEGIN
    MENUITEM "响应计算" NMM.EXE TOOL.INP BED.INP
END
END

```

其定义格式为每一个 POPUP 为一个分级菜单，以 BEGIN 和 END 为结束标志， MENUITEM 为一个菜单项。每个菜单项的含义为第一项为处理方法名称，即菜单显示名，第二项为处理方法的动态链接库文件名，第三项为处理方法的入口函数名，第四项为处理方法默认的参数卡文件名，第五项为处理方法入口函数的调用方式（1 为按深度逐个采样点处理，2 为入口函数自行控制处理深度）。特别地，响应计算通过调用外部 EXE 程序，其后面两个参数分别为仪器模型和地层模型参数文件名。

(3) 工具栏实现

通常，阵列感应数据处理某些处理需要进行多次，才能达到要求，每次用户都从菜单中选择会感到麻烦。因此在工具栏上加入一个处理方法下拉组合框列表。当用户从菜单上选中方法后，此方法被加载到工具栏的方法选择区。具体实现为：

(a) 从 CDlgBar 类派生 CMethodDlgBar，在该类中实现工具栏中添加下拉列表选择功能。

(b) 在类 CMethodDlgBar 中添加 CComboBox m_comMethod 成员变量，用于存放用户所选择测井处理方法。

(c) 在主框架中添加 CMethodDlgBar m_wndMethodBar 的成员变量，并在 OnCreate 函数中创建显示该工具栏。

(4) 浮动窗口实现

浮动窗口的特点是使用时点击打开，不使用是自动隐藏停靠。下面以参数卡编辑浮动窗口为例阐述浮动窗口的具体实现，其它浮动窗口实现方法类似，只是显示内容和功能不同，参数卡编辑浮动窗口可分 3 步实现：

(a) 声明定义浮动窗口类。从 CDockablePane 类派生自己的浮动窗口类，向窗口添加响应的控件成员变量，重载不同的函数实现特定的目标。下面为参数编辑浮动窗口类的实现代码，其中添加 CMFCPropertyGridCtrl m_wndParaList 成员变量，来完成参数可视化显示编辑。

(b) 声明成员变量、生成浮动窗口。在软件主框架类中添加成员变量 CParameterPane m_ParaPane。然后在 OnCreate 函数中通过函数 Create() 创建浮动窗口，再调用相应的函数设置浮动窗口的停靠方式，外观等，实现代码如下：

```
CMainFrame::OnCreate(LPCREATESTRUCT lpCreateStruct)
{
    .....
    if (!m_ParaPane.Create(_T("参数卡编辑"), this, CRect(0, 0, 200, 200), TRUE,
ID_VIEW_PROPERTIES, WS_CHILD | WS_VISIBLE | WS_CLIPSIBLINGS |
WS_CLIPCHILDREN | CBRS_RIGHT | CBRS_FLOAT_MULTI))
    {
        TRACE0("Failed to create Properties Bar\n");
        return FALSE; // fail to create
    }
    m_ParaPane.OnChangeVisualStyle();
    m_ParaPane.EnableDocking(CBRS_ALIGN_ANY); //设置窗口可以停靠的位置
    DockPane(&m_ParaPane); //浮动窗口停靠到主窗口
    .....
}
```

4.2 测井数据 I/O 设计与实现

4.2.1 中间数据 XIf 文件格式

测井资料不仅数据量大，而且文件格式类型多样，包括 XTF、WIS、DLIS、LIS 等多种格式的数据。为了使软件支持多种阵列感应测井仪的数据处理 (HDIL 为 XTF、AIT 为 DLIS)，并减少程序代码的编写量，若每种数据格式格式文件都编写相对应的读写 I/O 接口，编写的代码量是可想而知的，而且软件的设计和实现就更为复杂。因此，采用自定义中间数据格式文件 XIf 的方法，首先将多种数据格式文件转换为自定义中间数据格式文件，在自定义中间数据格式文件的基础上，实现测井数据的读写操作。自定义中间数据格式文件的格式如图 4-4 所示，文件的各部分含义及存储内容如下：

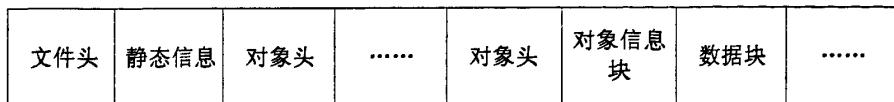


图 4-4 自定义中间数据文件 XIf 格式示意图

- (1) 文件头内存储一些全局信息，包括文件的版本号、对象头首地址、地址类型、对象头个数等一些基本的信息；
- (2) 静态信息是指一口井的固有信息，包括井名、井场的地理位置、钻井类型和测井时间等信息；

(3) 对象头是用来区别各种不同类型的测井对象的，对象头主要包括对象名称、对象类型、对象子类型、数据块的入口地址等，其中，对象类型最为重要，不同的对象类型来代表不同的对象，如 01 代表曲线数据（0101 一维曲线、0102 二维波列曲线、0103 二维成像），02 代表其它类型数据（0201 参数卡数据、0202 解释结论、0203 用户自定义数据格式）；

(4) 数据块就是测井物理数值数据记录块，曲线的数据都保存在数据块中，其中在等间隔采样时，不记录深度值，反之记录深度值；

(5) 对象信息块存储对象的一些具体的信息。对曲线来说，曲线对象信息块里包含很多从原始文件中解编出来的信息，包括采样间距，起始深度，结束深度，采样点数等等，对象信息块因记录对象的不同而不同。

4.2.2 测井数据 I/O 接口

测井数据 I/O 接口是按照磁盘文件读写 I/O，测井对象读写 I/O 和内存同步数据 I/O 来实现的，其类之间的关系如图 4-5 所示。CXlfDataIO 类主要负责数据文件结构数据基本读写操作；CLogDataIO 类为测井对象 I/O，其主要是按照测井数据记录对象来读写访问操作，如曲线、波列和参数卡等；CLogDataMemIO 类负责数据的内存管理，确保系统各部分数据同步；CLogDataMangerIO 和 CLogDataConvertIO 主要为测井数据管理 I/O 接口和测井数据转换的 I/O 接口。

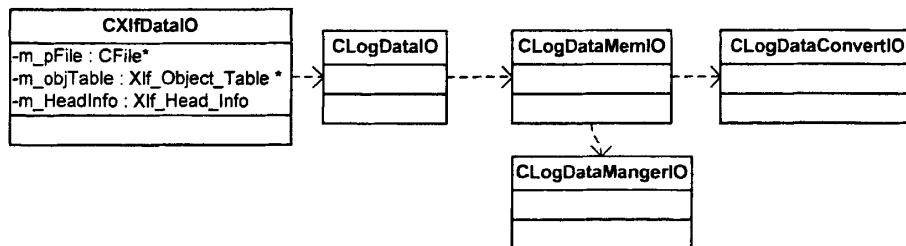


图 4-5 测井数据 I/O 接口类之间的关系

根据自定义中间数据文件格式 Xlf 的结构，设计实现该数据格式的磁盘文件读写类 CXlfDataIO 其具体定义如下，限于篇幅仅给出主要成员变量和成员函数。

```

class Xlf_LIB CXlfDataIO
{
public:
    //打开文件方式标志
    enum OpenFlags
    {
        modeRead = 0x0000,
        modeWrite = 0x0001,
        modeReadWrite = 0x0002,
    }
}
  
```

```

        shareDenyWrite =      0x0020,
        shareDenyRead =       0x0030,
        modeCreate =         0x1000|modeReadWrite,
        modeNoTruncate =    0x2000,
    };

    // attributes

protected:
    CFile*           m_pFile;
    Xlf_File_Head   m_Head;
    Xlf_Object_Info* m_pObjectInfo;
    .....
};

// operation

public:
    CXlfDataIO();
    CXlfDataIO(LPCTSTR* LogName);
    ~CXlfDataIO();
    //文件打开、新建、关闭
    BOOL Open( LPCTSTR lpszFileName, UINT nOpenFlags, CFileException* pError
= NULL );
    BOOL Open( UINT nOpenFlags, CFileException* pError = NULL );
    void Close();
    //文件头信息读写
    BOOL ReadHead(Xlf_HEAD *pHead);
    BOOL WriteHead(Xlf_HEAD mHead);
    //添加一个新测井对象
    int CreateObject(char *Name,int Type);
    int CreateObject(Xlf_Object_Head * pObjectHead);
    //删除一个测井对象
    BOOL DeselectObject(char *Name);
    //查找一个测井对象
    int FindObject(char *Name);
    //打开关闭一个测井对象
    int OpenObject(char *Name);
    void CloseObject(char *Name);
    //对象信息结构读写

```

```

BOOL ReadObjectHead(int Index,Xlf_Object_Head *pObjectHead);
BOOL WriteObjectHead(int Index,Xlf_Object_Head mObjectHead);
//测井对象数据块定位计算
BOOL SeekObjectBlock(int Index);
//数据体读写
int ReadBlockData(int Index,int Len,char *Buffer);
int WriteBlockData(int Index,int Len,char *Buffer);
int ReadBlockData(int Index, int Pos,int Len,char *Buffer);
int WriteBlockData(int Index, int Pos, int Len,char *Buffer);
//扩充对象所占用数据块大小
int ExpendObject(int index,int Length);
//缩小对象所占用数据块的大小
int CutObject(int index,int Length);
//整理删除对象所占的数据块
void Pack();
.....
};


```

4.3 测井数据管理实现

测井数据管理是阵列感应数据处理与测井响应计算软件重要的基础组成部分，数据管理流程如图 4-6 所示。测井数据管理是以独立的视图窗口提供给用户的数据操作环境平台。用户可以在该窗口中对测井数据文件的测井对象管理、查询和编辑等。

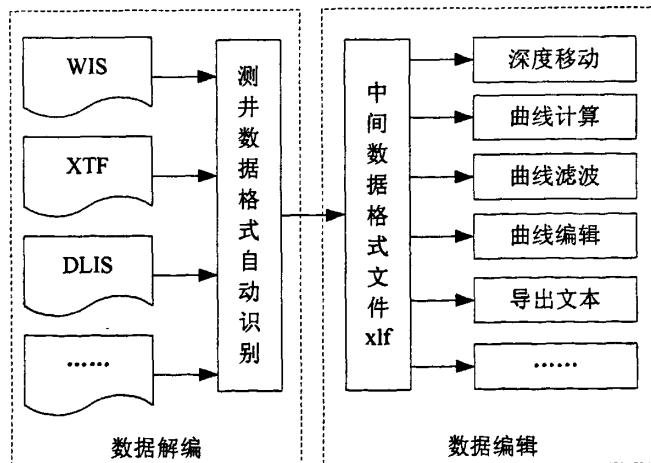


图 4-6 数据管理流程图

4.3.1 测井数据解编实现

阵列感应数据处理与测井响应计算软件系统支持 WIS、DLIS、LIS 和 XTF 等常见

数据格式解编为自定义中间数据格式。根据参考文献^[30,31,32,35,36]中分析的数据格式，编写相应的数据格式解编接口动态链接库，由于上述几种数据格式文件存在识别标志，可以直接利用识别标志来识别文件格式。

对于 WIS、DLIS、LIS 和 XTF 等常见数据格式的自动识别，是测井数据解编的核心步骤。当打开一个文件时，需要识别一个文件的类型，然后才能创建相应的数据访问接口的实现的实例，这时就需要一种方法识别文件的类型。出于对性能的考虑，此时文件的扩展名是有帮助的，但不能把扩展名作为决定性的因素，因为对于同一个扩展名可能有多个版本的可能，此时就需要遍历所有支持的数据格式，根据文件标识来识别文件。这里采用如图 4-7 所示流程来实现自动识别文件格式，获得正确的实例。

文件格式识别以后，就可以根据对应的文件访问模块，实现数据解编。其具体流程可分为 2 步实现：

- (1) 根据已识别测井数据文件格式，对源文件的参数、数据准确定位，并读取所需的信息，计算数据记录块的长度等。
- (2) 对各参数、数据按图 4-2 所示的 XLF 数据格式重新排列，生成目标文件。

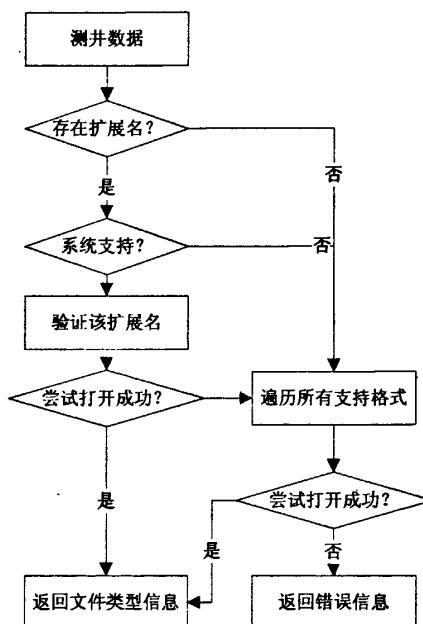


图 4-7 数据格式自动识别流程图

数据解编功能没有直接的命令供用户显示调用，而是放在“打开井数据”菜单命令内部，当一个文件加载时，系统首先读取文件头的几个字节信息，是否是自定义中间数据文件，如果不是，进行文件格式自动扫描，如果是软件支持的数据格式，则直接弹出文件识别信息对话框，然后对打开的数据文件解编为中间数据格式文件，如果不是系统支持的数据格式，则返回错误信息。

4.3.2 测井数据编辑实现

测井数据编辑是以独立的操作视图窗口提供给用户的。用户可以在该窗口中操作实现对测井数据文件的创建管理以及文件中测井对象（常规曲线、波列曲线、数据表和参数卡等）的属性、数据编辑，对象删除，深度移动，重新采样，计算，滤波等操作。

在界面实现上采用一档多视图的方式，从 CFormView 派生视图窗口类，CFormView 类是用于窗体视图的基类，一个窗体视图是包含控件的基本视图，可以类似与对话框一样放置控件。测井数据编辑实现界面如图 4-8 所示。

在功能上，由 CLogDataMangerIO 类实现，该类派生于 CLogDataMemIO 类。主要实现测井对象的添加删除，重新采样，深度移动，曲线滤波处理，曲线计算和测井数据统计。大部分函数都是以曲线名称作为索引而实现的，其中曲线计算函数 Compute 比较特别，是通过解析传入的形参字符串，进行曲线运算。

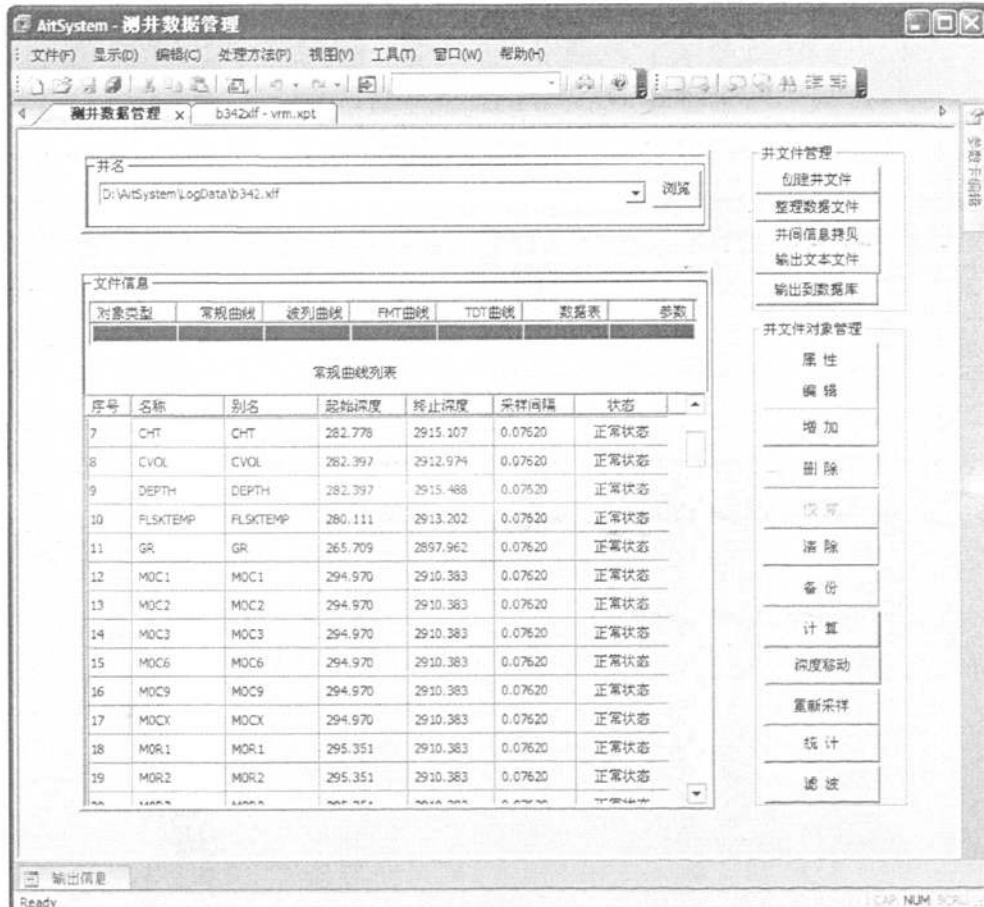


图 4-8 测井数据管理界面

CLogDataMangerIO 类的部分实现代码如下：

```
#include "LogDataMemIO.h"
class CLogDataMangerIO : public CLogDataMemIO
{
```

```

// Attributes:
private:
    char*    m_szName;
    char**   m_pIndex;
    .....
//Operations
public:
    CLogDataMangerIO();
    CLogDataMangerIO(const char *wellname);
    ~CLogDataMangerIO();
    BOOL Open(const char *wellname, UINT nOpenFlags);
    BOOL Open(UINT nOpenFlags);
    void Close();
    //新建、删除对象
    BOOL AddCurve(const char *name,BOOL bExit=FASLE);
    BOOL AddWave(const char *name,BOOL bExit=FASLE);
    BOOL AddImage(const char *name,BOOL bExit=FASLE);
    BOOL AddInp(const char *name,BOOL bExit=FASLE);

    BOOL DelCurve(const char *name);
    BOOL DelWave(const char *name);
    BOOL DelImage(const char *name);
    BOOL DelInp(const char *name);
    //重新采样
    BOOL ResampleCurve(const char *name,float sample);
    BOOL ResampleWave(const char *name,float sample);
    void ResampleImage(const char *name,float sample);
    //深度移动
    BOOL ShiftCurveDepth(const char *name,float delta);
    BOOL ShiftWaveDepth(const char *name,float delta);
    BOOL ShiftImageDepth(const char *name,float delta);
    //滤波处理
    BOOL Filter(const char *name,int nLength,float *Coef,float Sdep,float Edep);
    //曲线计算
    BOOL Compute(const char *szStr,float Sdep,float Edep);
    //测井数据统计
    void Statistic(const char *name,float Sdep,float Edep);
    .....
};

```

4.4 测井图形绘制设计与实现

测井图形绘制是阵列感应数据处理和响应计算的主要部分，它将各类测井数据以图像的形式直观的展示在测井解释人员面前，用户可以根据自身的需要定制图像的内容和形式。解释人员可以轻松地根据所绘制出的曲线、图像的形态和走势来判断地下的油

藏、气藏分布情况，产生解释结论以指导油田生产。另外，在软件的实际开发过程中，利用内存 DC 技术^[34]来解决绘图闪烁问题，采用部分刷新和重绘实现宽幅测井图形的快速连续滚动显示。

4.4.1 测井图形绘制设计

根据测井绘图内容的多样性，软件的底层针对不同的绘图内容设计了相对应的绘图模型类，每个类中都包括该绘图模型的特定信息、绘制参数以及一系列的绘制方法。常见的测井绘图内容包括：Curve(曲线)、Fill(填充)、Track(曲线道)、Depth(深度道)、Image(成像)、Wave(二维波列)等。针对常见的测井绘图内容设计的测井绘图模型类的组织关系如图 4-9 所示。

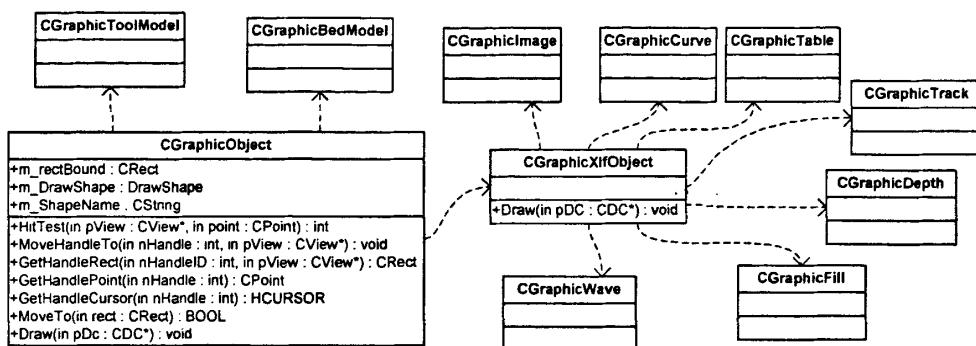


图 4-9 测井绘图模型类组织关系

其中绘图模型类 CGraphicObject 定义为一个抽象类，为测井图形绘制的基础类，所有测井图形类都是从 CGraphicObject 派生的，在它的内部定义了一些所有绘图对象的公有绘制信息，例如绘图对象的标识、上下左右坐标值(以 CRect 类型表示)、对象选中状态、绘图对象的类型、绘图的刻度类型和父道等。此外，CGraphicObject 中还定义了一个纯虚函数 Draw()，用来定制各种绘图对象的具体绘制。

CGraphicObject 是对各种绘图对象功能的抽象，它为各种绘图对象的绘制提供了统一的接口。有了 CGraphicObject 这个抽象类，所有的绘图对象就可以作为 CGraphicObject 的子类来实现，各绘图模型类中包含方法 Draw() 的不同实现以完成绘制功能。这样，绘制的代码中将只包含 CGraphicObject 的 Draw() 函数不涉及绘图对象的具体绘制方法，方便了开发和维护。

另外，图形库中的基础类 CGraphicObject 还包括测井图像模型对象的串行化和基本操作，其中，串行化用来实现绘图模板的保存和载入，基本操作包括对齐、撤消恢复，通过右键弹出菜单设置图元的具体属性。这些基本操作被设计成虚函数的形式，可以根据图元的具体情况实现不同的功能，限于篇幅只给出主要成员变量和成员函数，类 CGraphicObject 定义如下：

```
class CGraphicObject : public CObject
```

```

{
protected:
    DECLARE_SERIAL(CGraphicObject) //声明支持序列化
public:
    CGraphicObject ();
    CGraphicObject (const CRect& rect, CGraphicObject * pParentOb);
    ~CGraphicObject ();

// Attributes:
public:
    CRect m_Rect;
    WORD m_ParentType;
    DrawShape m_DrawShape;
    COBList m_ObjList;
    CLogProcessDoc* pDoc;
    CString m_ShapeName;
    TrackState m_TrackState;
    SelectMode m_SelectMode;

.....
enum TrackState{normal, selected, active};
enum SelectMode {none, net, move,size,editdata};
enum DrawShape {trackobj,curveobj,depthobj,fillobj,waveobj,imageobj,textobj};

protected:
    CGraphicObject * m_pParentObj;
//Operations
public:
    virtual CRect GetRect();
    virtual void SetRect(const CRect& rect);
    virtual CGraphicObject * GetParentObj();
    virtual WORD GetParentType(){return m_ParentType; };
    virtual void SetParentObj(CGraphicObject * pObj,WORD nParentType = 0);
    virtual BOOL Properties(CView* pView); //图元属性编辑
    virtual void MoveTo(const CPoint& point); //拖拽图元到新的位置
    virtual HCURSOR GetHandleCursor(int nHandle); //得到调整点光标的句柄
    virtual int GetHandleCount(); //得到图元边框矩形调整点的数量
    virtual CPoint GetHandlePoint(int nHandle); //得到调整点的位置
}

```

```

virtual BOOL Intersects(const CRect& rect); //判断是否在图元内
virtual CRect GetHandleRect(CView* pView,int nHandleID); //得到编辑图元的边框矩
形
virtual int HitTest(CView* pView,const CPoint& point); //测试鼠标是否选中图元
virtual void MoveHandleTo(CView* pView,int nDragHandle, const CPoint& point);
//移动图元句柄
virtual void Draw(CView* pView, CDC* pDC){}; //绘制测井图元
virtual void DrawTracker (CDC*pDC,TrackerState state); //绘制跟踪状态
//鼠标消息响应函数
virtual void OnLButtonDown(CView* pView, UINT nFlags, const CPoint& point);
virtual void OnLButtonUp(CView* pView, UINT nFlags, const CPoint& point);
virtual void OnMouseMove(CView* pView, UINT nFlags, const CPoint& point);
virtual void OnLButtonDblClk(CView* pView, UINT nFlags, const CPoint& point);
virtual void OnRButtonDown(CView* pView, UINT nFlags, const CPoint& point);

// Implementation

public:
    virtual void Serialize(CArchive& ar); //串行化
    .....
};


```

4.4.2 对象头绘制

前述，每一个绘图对象可分为对象头和对象体。当用户选中一个绘图对象或通过鼠标拖拽改变绘图对象相对位置和父道时，为了便于操作，只在对象头内捕获而不是对象体内。

以一维曲线为例，对象头分为上下两部分，上部为曲线名称，下部分为该曲线的左、右刻度值，单位和绘图样式。绘制效果如图 4-2 所示，具体绘制方法如下：

(1) 对象头边框的绘制。根据对象头和重绘区域的相对位置关系，分为四种情况进行绘制：重绘区域包含对象头的上边界而不包含对象头的下边界；重绘区域包含对象头的下边界而不包含对象头的上边界；重绘区域包含整个对象头；对象头在垂直方向上包含重绘区域（此时仅绘制对象头的左右边界即可）。根据这四种情况可依次画出所需显示的对象头边框。同时，仅当重绘区域包含对象头分界线时才进行对象头分界线的绘制。

(2) 对象头内容的绘制。分为三种情况：重绘区域的下边界穿过字体；重绘区域的上边界穿过字体；重绘区域包含整个字体况分别确定对象头内容字符串的起始点坐标即可完成绘制。依据这三种情况分别确定对象头内容字符串的起始点坐标即可完成绘制。

其他类型对象头的绘制方法大同小异，仅是对象头的内容不同，不再赘述。

4.4.3 一维曲线绘制

一维曲线是测井数据中最常见的数据形式。一维曲线数据中，除曲线名、曲线起始深度、曲线结束深度、采样间隔等说明性信息外，数据体是一系列的深度、数值对，深度值一般是等间隔分布的(也可能是离散的)，每一个深度值对应着一个物理测量值。因此一维曲线的绘制的主要任务就是将相邻采样点之间用符合要求的线型进行连接，使离散的数据连成一条曲线直观地显示给用户。绘制效果如图 4-10 所示。

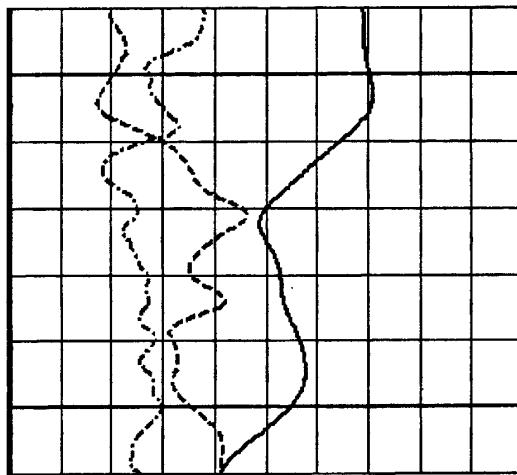


图 4-10 一维曲线

测井图像在显示的过程中要求严格按照比例尺对应真实深度并支持比例尺的改变。例如，绘图数据深度区间为 200 米，显示比例尺为 1:200，则要求显示出的图像高度为 1 米。由于用户显示器分辨率的不同，一英寸所包含的像素数可能不同，为使图像的绘制比例可以完全对应用户显示器的分辨率，软件中定义了像素向深度转换的工具函数 DepToPixel() 和 PixelToDep()，它的功能是在像素和深度单位(米)之间进行相互转化并对应用户显示器的分辨率设置。深度值到的像素值转化公式为：

$$\text{当前深度对应的像素值} = \frac{(\text{当前深度} - \text{图像在当前屏幕顶端的起始深度}) * \text{显示参数}}{2.54 * \text{深度比例}} + \text{曲线的顶点像素} \quad (4-1)$$

其中，当前深度(纵向)对应的像素值，对应于 CPoint 的 y 值，CPoint 类每点的坐标为(x, y)；显示参数，即显示器在实际长度的一米上显示像素数；2.54 是一个常量，即一英寸等于 2.54 厘米。

像素值到深度值的转换公式：

$$\begin{aligned} \text{当前像素值对应的深度} = & \text{当前像素值} * 2.54 * \text{深度比例} / \text{显示参数} \\ & + \text{当前曲线道的起始深度} \end{aligned} \quad (4-2)$$

横向曲线测量数值刻度计算，分为两种情况，一是线性刻度，二是对数刻度，其计算公式分别为：

$$\text{当前曲线数值对应的横向像素值} = \frac{\text{当前曲线数值}}{(\text{曲线右值} - \text{曲线左值})} * (\text{道右边界像素值} - \text{道左边界像素值})$$

(4-3a)

$$\text{当前曲线数值对应的横向像素值} = \text{道左边界像素值} + \frac{\log 10(\text{当前曲线数值} / \text{曲线左值})}{\log 10(\text{曲线右值} / \text{曲线左值})} * (\text{道右边界像素值} - \text{道左边界像素值})$$

(4-3b)

式(4-3)中，当前曲线数值对应的横向像素值，对应于 CPoint 的 x 值；曲线左、右值，为曲线的左、右刻度值。

一维曲线的具体实现流程：首先根据曲线道的起始深度（实际绘图的起始深度）和重绘区域的大小，确定重绘深度区间的曲线数据，获得需要重绘的起始深度和结束深度。根据深度区间和采样间距获得需要重绘的点数。根据绘图起始深度和曲线起始深度计算数据文件的偏移量，根据偏移量从数据文件中读取要重绘的数据。得到数据后分别进行横向和纵向像素值计算，得到点坐标后，依次绘制。具体实现算法流程如图 4-11 所示。

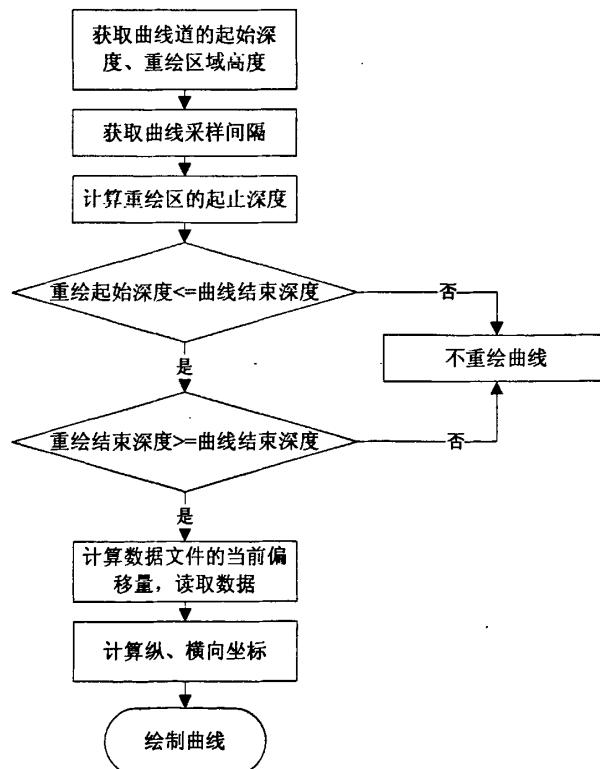


图 4-11 一维曲线绘制流程

4.4.4 曲线填充绘制

曲线填充是指在曲线和曲线之间或曲线和道边界之间填充特定符号，通过曲线填充可以一目了然的看出各地质层面的性质和它们之间的相对位置关系。曲线填充有三种：左填充、右填充和曲线和曲线之间填充。左填充指填充在道的左边界至曲线之间；右填充指填充在曲线到道的右边界之间；曲线间填充指填充发生在两曲线之间的填充。实际上，道的左边界和右边界都可以看成一条具有恒定值，且在深度上可无限延伸的测井曲线，通常称之为参考线。由此测井曲线填充只有一种，即曲线间填充。左填充和右填充只是曲线间填充的一个特例。曲线填充绘制效果如图 4-12 所示。

测井曲线实际上是由一系列采样点组成的，每个采样点具有深度值和该深度值对应的物理测量值，测井曲线填充本质上是计算两条深度索引的折线之间的相交区域，然后对相交区域进行颜色或图案填充。这些相交区域实质上是多边形。为了论述方便，假设两条曲线具有相同采样深度间隔，若不一致则需要进行插值处理，即将采样间隔大的插值添加数据点与采样间隔小的曲线的采样间隔一致。填充区域分为正填充区域和负填充区域，如果在填充区域中曲线 2（将两条曲线分别记为曲线 1 和曲线 2）在同一个深度采样点上的值比曲线 1 的值小，则该填充区域称为正填充区域；反之，为负填充区域。传统的算法是首先计算两条曲线的交点情况，在获得了交点情况后，分别对生成的多个多边形进行填充，这种做法存在着几个弊端：一是曲线交点的计算不精确，因为都是浮点型运算，转换为坐标时（坐标值为整数）难免会存在误差，当曲线道宽度较大时可能会出现填充不够或超出的情况；二是要在内存中保存个数不确定的多个多边形，在测量段比较长的时候，容易出现内存不足，导致软件崩溃。

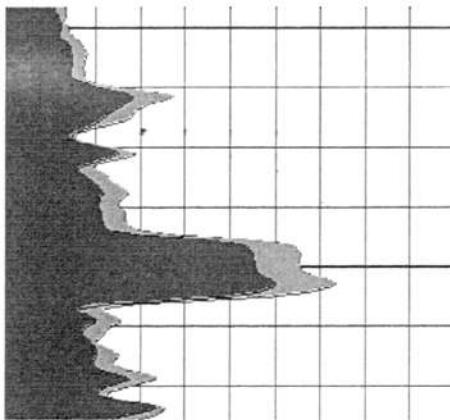


图 4-12 曲线填充

本文采用的方法是：不考虑是正填充区域还是负填充区域，将整个填充区域看作一个不规则的多边形，对整个多边形进行填充。这样既减少了所需维护的多边形的个数，降低了内存消耗，又避免了对曲线交点坐标的计算，使所绘制的填充效果更精确。曲线填充的具体实现为：

(1) 计算所需填充的多边型的端点个数 N。若为曲线间填充，则多边型的端点个数 N 的值为填充区域采样点数的 2 倍；若为左填充或右填充，则 N 的值为填充区域采样点数加 2。

(2) 用两个数组分别存储多边形各端点的横纵坐标。这里要注意的是当左填充或右填充时，数组中应包含起始采样点和结束采样点在道边界上的两个投影点。

(3) 当获得了填充多边形各端点的坐标数组后，就可以构造出 MFC 中的多边形区域类 CRgn 的一个对象。

(4) 按用户选定的填充符号创建位图画刷，通过 FillRgn() 函数来完成填充。

4.4.5 电阻率成像绘制

成像测井数据属于二维数据。成像测井数据的存储形式为：纵向上依然同一维曲线一样是一系列等间距的深度值，而在横向不再是单独的一个物理测量值，而是关于井轴对称的 0~2m 径向范围内等采样间隔的一系列值。在其绘制过程中要求用颜色代表每一个测量点的测量值，并且可以改变横向显示范围，即用户指定横向绘制范围，例如用户可以设定径向绘图范围为 0.3~2m。电阻率成像的绘制效果如图 4-13 所示：

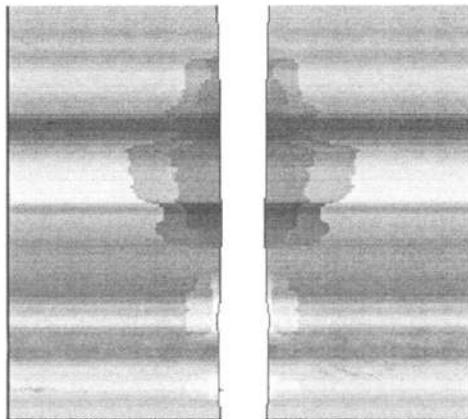


图 4-13 电阻率成像绘制

对于纵向，如直接按照真实深度比例间隔绘制每个采样点，则绘制出来的是一系列离散的等间隔的点阵，这时就需要在采样点之间进行插值，以使二维曲线数据以连续的图像形式展示给用户，经测试采用线性插值即可满足要求。

另外，对于横向绘制方法是读取该深度点的数据，计算每一点的颜色，颜色的具体计算后面讨论，然后通过函数 SetPixel() 逐点绘出，即可连续的图像。横向绘制有三种情况：一是实际绘制点数等于第二维采样点数；二是实际绘制点数小于第二维采样点数；三是实际绘制点数大于第二维采样点数。下面对这三种情况分别讨论：

(1) 实际绘制点数等于第二维采样点数。这种情况是曲线道的宽度恰好等于第二维采样点数，绘制比较简单，只需按(4-5)式计算每点的颜色，然后连续绘出即可以。

(2) 实际绘制点数大于第二维采样点数。该情况是曲线道的宽度大于第二维采样

点数，需要对测井数据进行插值处理，首先通过两者之差计算出实际多绘制的点数，然后通过下式计算每间隔多少个点插值一个点并插值计算，再根据插值计算后的数据进行颜色计算，绘制图形。

$$\text{间隔点数} = \frac{\text{第二维采样点数}}{|\text{实际绘制点数} - \text{第二维采样点数}|} \quad (4-4)$$

(3) 实际绘制点数大于第二维采样点数。该情况是曲线道的宽度小于第二维采样点数，需要对测井数据进行跳点处理，即舍弃部分数据点，同样类似的通过两者之差计算出实际舍弃的点数，然后通过(4-4)式计算每间隔多少个点舍弃一个点，再根据舍弃后的数据进行颜色计算，绘制图形。

在电阻率成像的绘制过程中，是用颜色代表每一个测量点的测量值的。因此颜色刻度准确与否直接影响到绘图的精度。软件中为了节省内存消耗，通过渐变颜色的起始值和渐变颜色数三个数值来存储渐变颜色，使用时在R, G, B上按照颜色的起始值、结束值和颜色数进行均匀增减即可获得所有的渐变颜色值。对于任意的一个电阻率成像测量数据值，其转化为颜色值的计算公式为：

$$\text{颜色值} = \frac{(\text{测量数据值}-\text{刻度左值}) * \text{渐变颜色数}}{\text{刻度右值}-\text{刻度左值}} \quad (4-5)$$

综上所述，电阻率成像的具体实现流程如图 4-14 所示：

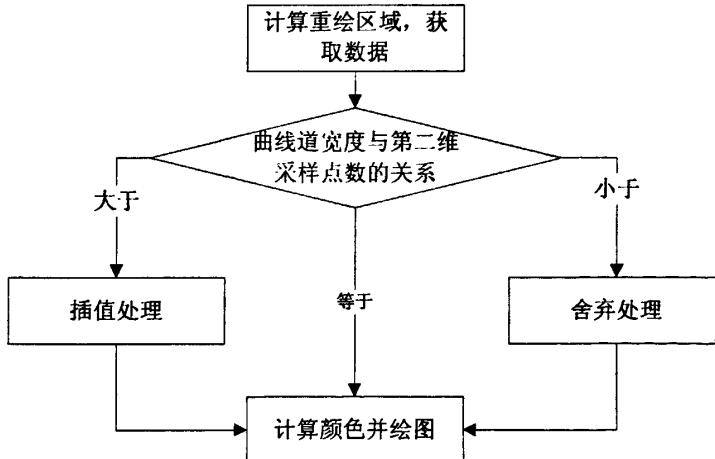


图 4-14 电阻率成像绘制流程图

4.4.6 二维波列绘制

二维波列是二维数据的另一种绘制方法，相当于多条一维曲线一起绘制。其数据存放格式与成像数据类似，相当于把多条具有相同采样间隔的曲线，按同一个深度索引存放，例如某二维波列数据的横向采用点数为 16 个，则该数据就相当于存放了 16 条具有相同采样间隔的一维曲线。它不是用颜色值来表示当前点的测量值，而是通过对当前多个测量值进行横向刻度计算，通过连接同一条曲线所有测量点，实现二维波列绘制。二

维波列绘制效果如图 4-15 所示。

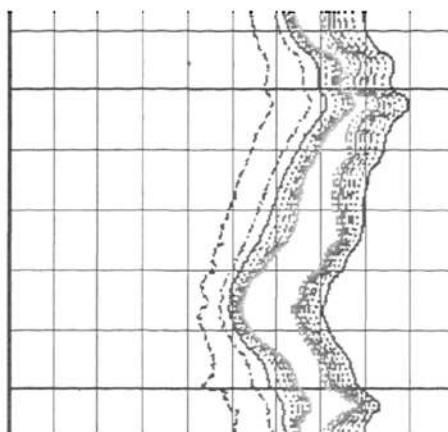


图 4-15 二维波列曲线绘制

特别地，将二维波列数据读取并按曲线形式重排列，例如阵列数据第二维采样点数为 16，则读取数据后按 16 条曲线重排列，重排列后即为简单的一维曲线绘制，绘制方法与一维曲线相同，这里不再赘述。

4.5 测井图形快速连续滚动的实现

复杂的开发测井工程图件含有大量的图像元素，且其测井图形元件一般幅度很大，当道或绘制的曲线很多并且井的测量井段很长时，横向和纵向都不可能在当前窗口一次全部显示出来。如果当前视图的所有测井图形全部绘出，由于绘图要经过大量的比例关系换算、坐标系转换和复杂的坐标映射才能将像素在正确的位置显示出来，因此绘图数据量大，绘图速度很慢，甚至可能用户无法接受。所以必须采用好的绘图技术，提高绘图效率。连续滚动显示是常用的方法，但是必须解决测井图形的绘图速度问题。

4.5.1 一般滚动测井图形绘制存在的问题

如果采用一般或者最容易实现的图形绘制滚动方案，即用户每横向或纵向滚动一次，根据所有测井图形的实际大小，在内存设备环境 DC 中把整幅测井图形重新绘制一次，不考虑当前的滚动轴 (x, y) 的坐标，直接按当前采用的映射方式，按屏幕左上角坐标点 $(0,0)$ 进行图形拷贝，从而实现滚动显示。一般方案对于图形幅度较小时，该方案是可行的。但对于测井图形绘制，由于存在成像、波列等复杂测井图形，每次滚动都要重新绘制整幅图形，绘图速度会很慢，且会占用很大的内存，因此实际工程中不会采用该方案进行测井图形绘制。

4.5.2 部分刷新测井图形快速连续滚动

部分刷新的方法是指用户每次滚动视图时，根据滚动轴 (x, y) 的坐标来重新计算当前客户区的大小，然后在内存设备环境 DC 重新绘制该部分图形，仅将客户区的大小的部分拷贝到显示 DC 中。这样用户的每次滚动操作时，不必要将整幅图形重新绘制，

仅绘制前客户区的图形，从而减少了内存消耗，提高了绘图速度。具体实现如图 4-16 所示。

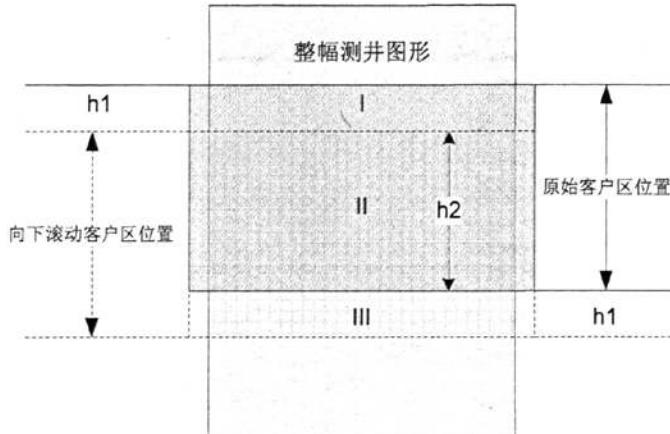


图 4-16 滚动绘制原理

图 4-16 中，实线部分为滚动前的原客户区位置，此时的显示屏幕由 I、II 两部分组成，其高度分别为 h_1 和 h_2 。虚线部分为向下滚动 h_1 后的客户区位置，显示屏由有 II、III 两部分构成，高度分别为 h_2 和 h_1 。屏幕每次向下滚动 h_1 后，I 区滚出客户区，III 区滚入客户区，两者高度一致。由于采用当前客户区刷新的方法实现滚动，只需要将 II 和 III 区的图形重新绘制并拷贝到显示 DC 中即可。其它方向的滚动与此类似，重复该过程即可实现测井图形的快速连续绘制。但是，每次刷新必须准确计算当前屏幕图形在整幅图形中的位置。

4.5.3 部分重绘实现复杂测井图形快速连续滚动

部分刷新方式对于一般测井图形绘制是可以应用的，但对于复杂测井图形，如反演中径向电阻率剖面，由于绘图的数据量大，绘图时速度仍较慢，在实际应用中效果仍然不好。由于部分重绘只绘制滚入客户区的部分，可以进一步减小绘图量，提高绘图速度。其实现如图 4-16 所示，每次向下滚动时，I 区滚出客户区，III 区滚入客户区，II 区内容未发生变仍在当前客户区，只是位置发生改变。因此，只重新绘制 III 区，II 区只作移动拷贝到显示 DC。这样绘图数据量和消耗的内存有进一步减少了，提高了绘图效率。其它方向类似，重复上述过程就可以实现复杂测井图形的快速连续滚动。

4.6 测井绘图对象响应鼠标操作

Windows 程序是个复杂的有机整体，为了能让这个有机整体健康稳定运行，Windows 程序引进了消息机制。有了消息机制，应用程序不仅可以更加快捷有效地处理某个事件。而且可以很方便地跟其他应用程序进行通信。下面就具体论述通过鼠标操作来编辑测井绘图对象。

4.6.1 Windows 消息机制

在 Windows 中无论是操作系统还是硬件所做的每个动作都会标记成某种类型的消息存放起来，例如鼠标、键盘事件。也就是说当用户需要完成某种任务时，需要调用操作系统的某种支持，然后操作系统将用户的需要包装成消息，并投入到相应进程或线程的消息队列中，最后应用程序从消息队列，取走消息并进行响应^[34]。

软件中很多地方都要涉及 Windows 消息机制，如单击 (WM_LBUTTONDOWN) 对象头时，选中对象；双击 (WM_LBUTTONDOWNDBLCLK) 对象头或曲线头来改变其属性；鼠标滚动改变绘图区间；鼠标拖拽 (WM_LBUTTONDOWN 和 WM_MOUSEMOVE) 对象头改变对象间相对位置关系或改变对象的宽度度等；在对象体鼠标移动 (WM_MOUSEMOVE)，显示曲线该深度点测量值。

4.6.2 鼠标单击

当用户单击选中一个测井绘图对象时，应该将该测井绘图对象的边框改变颜色或填充颜色改变以标识其被选中（默认选中为红色渐变填充，曲线为红色边框），如图 4-17 所示。软件中通过捕获鼠标左键单击消息 (WM_LBUTTONDOWN) 来判断用户是否选中一个绘图对象。

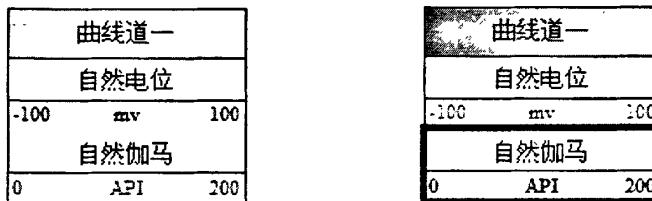


图 4-17 绘图对象未选中和选中对比（曲线道一和自然伽马曲线选中）

当鼠标左键单击消息发生时，通过左键单击消息的回调函数 OnLButtonDown() 传回的形参，获取当前鼠标的坐标点 CPoint (x,y)，然后遍历各个测井绘图对象头，找出点 CPoint (x,y) 所在的测井绘图对象。对于不同类型的绘图对象，应根据其不同的区域判断其是否被选中。若点 CPoint (x,y) 在曲线道头内，说明选中该曲线道；若点 CPoint (x,y) 在某一道得对象头内，说明选中该道的一个对象。选中了某个绘图对象之后，应该更改原来选中的和新选中的绘图对象的选中标志，方法是遍历整个文档类中测井对象列表 m_objects，在未按下 Shift 键时，仅将选中的绘图对象标志为选中 (selected)，将其它对象选中标志设置为未选中 (none)；按下 Shift 键时，可以选中多个测井绘图对象。在对象选中后，为方便操作，将选中的对象拷贝到选择列表 m_Selection 中，最后调用选中对象的 DrawTracker 函数刷新重绘测井绘图对象。在程序中鼠标左键单击功能实现流程如图 4-18 所示。

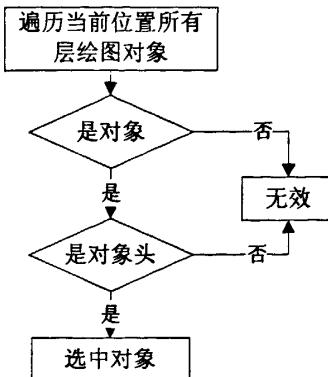


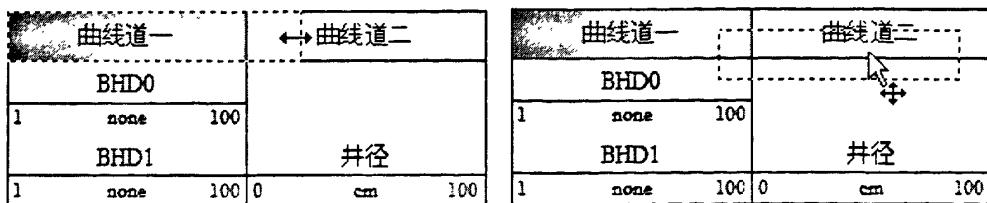
图 4-18 鼠标左键单击流程图

4.6.3 鼠标拖拽

当用户使用鼠标拖拽时，有三种可能情况，一是可能改变道的宽度（图 4.19a 所示），二是可能改变几个道之间的相互位置（图 4.19b 所示），三是可能将一个绘图对象从一个道内拖拽至另一个道内（图 4.19c 所示）。首先拷贝一个当前被选中对象的副本拷贝到 `m_Selection`，并设置状态为 `selected`。在拖拽动作结束后，即鼠标左键弹起后（`WM_LBUTTONDOWN`），将 `m_Selection` 中绘图对象的左、右边界坐标按照拖拽起点和拖拽终点之间的距离进行平移。根据 `m_Selection` 内的对象绘图类型标志 `m_DrawShape` 可以判断当前选中对象的类型（`Trackobj` 为曲线道，`Depthobj` 为深度道，`Curveobj` 为曲线）。

(1) 当拖拽的绘图对象为曲线道时。判断 `m_Selection` 中对象的左边界值是否等于当前选中对象的左边界值。

如果不相等，则说明道和道之间的相对位置发生了改变，即两个道的位置发生了交换。由于曲线道的宽窄不一样，两道之间的所有道都可能发生了位置偏移。解决方法是：首先将 `m_Selection` 中对象拷贝回文档类中测井对象列表 `m_objects` 中。然后定义两个 `CObList` (`tempList` 和 `CurrentList`) 将当前视图中的所有曲线道拷贝到 `tempList` 中。对于 `tempList` 中的所有曲线道对象，每次从中选出左边界值最小的一个存入 `CurrentList` 中并将它从 `tempList` 中删除。这样当 `tempList` 中元素数为 0 时，`CurrentList` 中存储的道正好是按照从左到右的顺序。遍历 `CurrentList` 中的曲线道，从 0 开始根据每个曲线道的宽度以此更改它们的左边距和右边距。此时已经完成了所有曲线道位置的更新，将拷贝出来的 `CurrentList` 中的所有曲线道对象覆盖回文档类中测井对象列表 `m_objects` 中，最后调用视图的重绘函数刷新绘图。



曲线道一	曲线道二
BHD0 1 none 100	
BHD1 1 none 100	半径

(c) 改变曲线父道

图 4-19 鼠标拖拽

如果相等，则说明是改变了曲线道的宽度，应先将曲线道中的曲线对象的宽度作相应的调整，使它们与所在曲线道的宽度一致，并计算曲线道的变化量 $m_nChange$ （小于零为缩小，大于零位增大）。而后对所拖拽道右边所有的曲线道进行平移，平移量为 $m_nChange$ 的绝对值，移动方向由变化量 $m_nChange$ 决定（小于零向左平移，大于零向右平移）。将 $m_Selction$ 中对象拷贝回文档类中测并对象列表 $m_objects$ 中并重绘视图即可。

(2) 当拖拽的绘图对象为曲线时。判断 $m_Selction$ 中对象的左边界值是否等于当前选中对象父道的左边界值。

如果相等，则说明曲线未改变父道，此时不做任何处理。

如果不相等，则说明曲线有可能被拖拽到别的曲线道中了。判断的方法是：首先判断 $m_Selction$ 中对象的左边界是否位于某个曲线道内，若不在，不做处理；若在某个曲线道内，说明该曲线已被移到这个曲线道内，做相应的处理：首先删除原来所在曲线道该对象，而后将 $m_Selction$ 拷贝添加到新移到的曲线道，重绘视图。在重绘视图时为节省计算量，需考虑两种情况，一是若移动后的道和之前的父道的宽度一致，则曲线的横向坐标没必要重新刻度计算，仅作简单平移即可，平移量为两道之间的相对距离；反之则需要重新进行横向刻度计算。

注意上述的鼠标拖拽操作之前都要先判断 $m_Selction$ 中对象的个数，若不为 1 时上述操作均不执行。软件中鼠标左键按下移动实现流程如图 4-20 所示

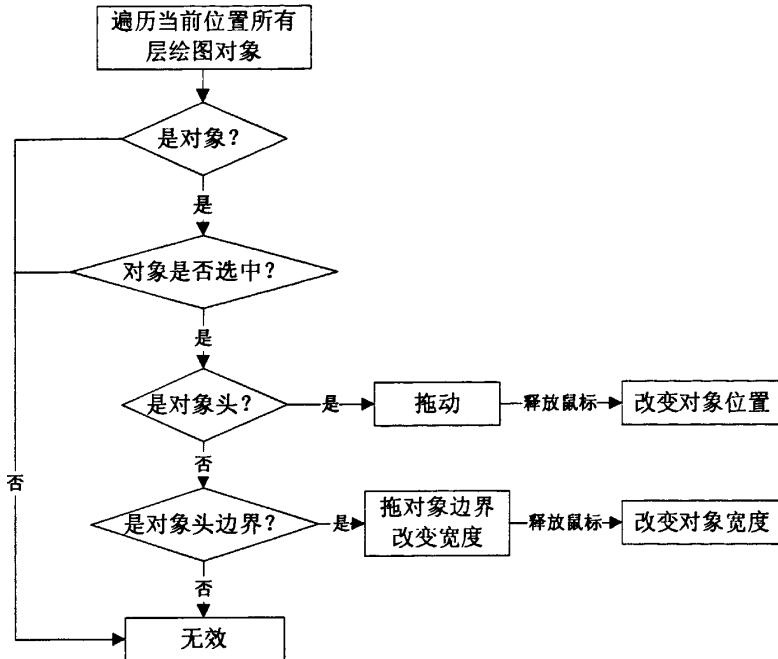


图 4-20 鼠标拖拽流程图

4.6.4 鼠标双击

用户通过双击鼠标左键浏览和修改绘图对象的属性。当捕获到鼠标双击消息后(WM_LBUTTONDOWNDBLCLK)，首先遍历文档类中测井对象列表 m_objects，根据坐标点 CPoint(x,y) 来判断被激活的是哪个绘图对象。而后根据该绘图对象的类型弹出相应的对话框，弹出之前利用该绘图对象的属性对对话框各类参数进行初始化。用户修点击对话框的确定按钮后，应判断该对象属性是否改变，若改变则重绘视图，反之，不做任何操作。程序中鼠标左键双击功能实现流程如图 4-21 所示。

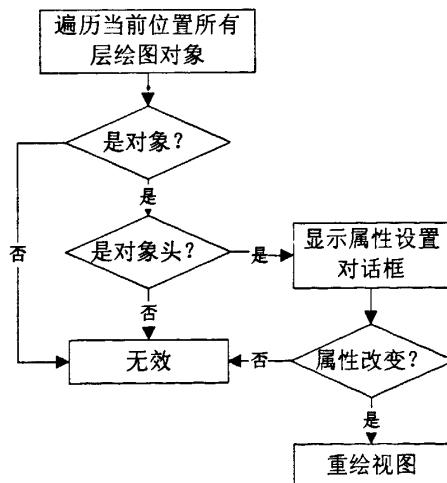


图 4-21 鼠标双击流程图

4.6.5 鼠标移动

鼠标移动消息（WM_MOUSEMOVE）分别在对象头显示编辑区和对象体显示编辑区中捕获该消息，下面分两种情况讨论：

(1) 对象头显示编辑区。当鼠标移动到道或井道的边界时，应该更改光标以提示用户可以改变曲线道的宽度。设鼠标移动后捕获的坐标值为 CPoint (x,y)。获得当前曲线道列表之后进行遍历。为方便用户操作，在鼠标进入曲线道边界左右各 3 个像素值时即认为鼠标移动到了曲线道边界之上，此时改变光标即可。

(2) 对象体显示编辑区。当鼠标移动到测井曲线上时，设鼠标移动后捕获的坐标值为 CPoint (x,y)，根据该点的坐标，反算出曲线的当前深度和测量值并显示。传统的实现方式仅显示当前曲线道一条曲线，且为数值显示。而对于阵列感应测井阵列解释来说，是通过该道内的所有曲线的径向数值的关系来判断油气层的，因此软件提供曲线道内所曲线在同一深度点径向电阻率分布绘图，如图 4-22 所示。实现该功能后，测井解释人员只需移动鼠标，就可以清晰地看出某个层电阻率分布情况。

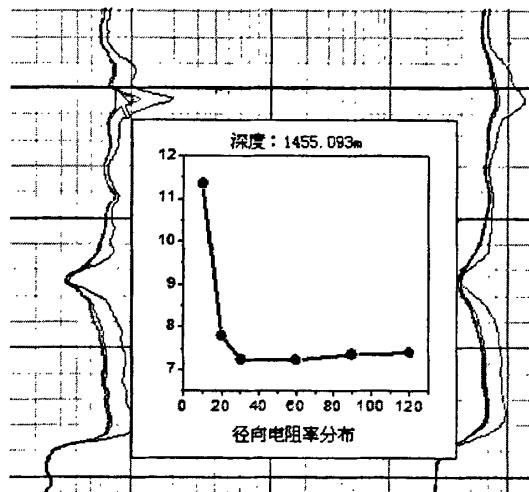


图 4-22 鼠标移动

4.7 数据处理模块设计与实现

4.7.1 处理方法接口设计与实现

为提高系统的可扩展性，系统中提供以动态链接库(DLL)的形式的用户处理程序接口。其中输入输出曲线、控制参数等均以结构体的形式给出，主要包含输入输出曲线的个数、名称、含义描述，控制参数的个数、名称、含义描述、默认值，默认参数卡文件名和绘图模板名等信息。其具体实现代码如下：

```
#include "LogDataMemIO.h"
```

```
extern "C"
```

```
{
```

```

__declspec(dllexport) struct INC_STRU INC={2,"SP GR","输入曲线含义"};
//输入曲线条数和名称;
__declspec(dllexport) struct OUTC_STRU OUTC={2,"GR1 SP1","输出曲线含义"};
//输出曲线条数和名称;
__declspec(dllexport) struct CONC_STRU CONC={2,"ISP,IGR ","参数类型","参数含义说明;"};
//控制参数个数、名称、类型及含义
__declspec(dllexport) struct CON_STRU CON={2,1};//控制参数默认值
__declspec(dllexport) struct HD_STRU HD={"vrm.inp","vrm.xpt"};
//参数卡文件名和默认绘图模板名
__declspec(dllexport) struct ErrorInf errorinf;//错误信息
__declspec(dllexport) int VRM();// 定义出口函数
__declspec(dllexport) LogDataMemIO m_LogMemIO;

}

int VRM()
{
    m_LogMemIO.ReadInp(); //读取控制参数，并将值拷贝到 CON
    //用户计算部分
    return 1; //计算成功，刷新绘图
}

```

4.7.2 控制参数可视化设计与实现

阵列感应数据处理每个方法中都有大量的计算参数和输入输出曲线。采用传统的文本编辑方式，没有直观的参数含义和取值范围等说明，对用户来说进行参数修改既费时又费力，而且容易出错。对于参数可视化，一般采用对话框的形式实现，由于阵列感应数据处理中的方法模块比较多，并且考虑到处理方法的扩展性，所以该方式实现每个方法模块对应一个对话框，工作量较大，不宜采用。本软件中采用类似 Visual C++ IDE 中的控件属性编辑栏的方式实现，如图 4-23 所示。

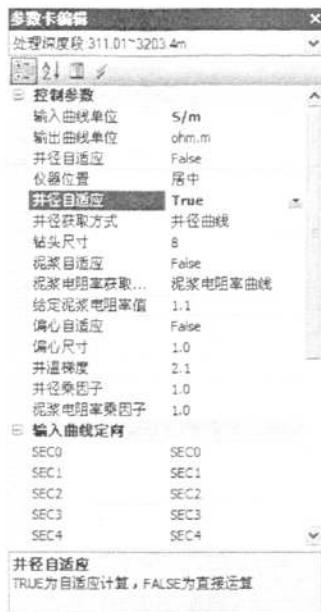


图 4.23 控制参数编辑界面

其具体实现流程如图 4-24 所示，首先根据用户菜单命令选择，加载 DLL 文件后获取 DLL 导出的参数、输入输出曲线等参数信息，然后判断测井数据文件中是否存在该模块对应的参数文件，如果存在则把参数值读入并赋值，否则取 DLL 文件中的默认值，最后按参数类型生成控件并添加到参数编辑栏中。参数取值、名称和类型等信息从结构体 CONC_STRU CONC 中获取，CONC_STRU 结构体包含四部分信息：参数个数、参数名称，参数类型（1=数值编辑式，2=下拉列表选择式）和参数含义描述。其中参数名字和参数含义每项以分号隔开。输入输出曲线以参数类似，这里不再赘述。

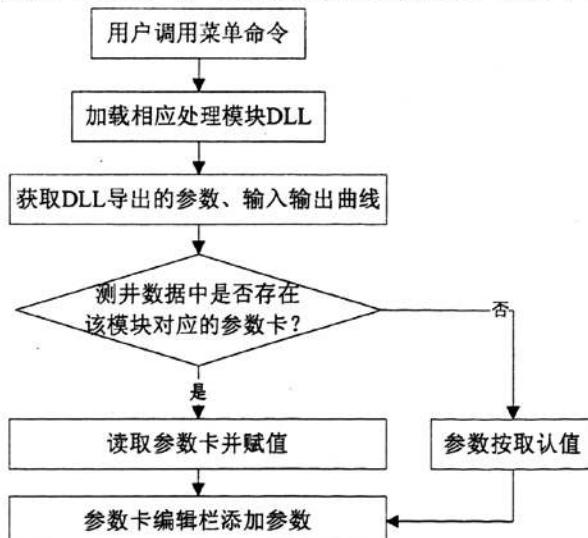


图 4-24 参数卡可视化编辑实现流程

4.8 响应计算模块设计与实现

4.8.1 计算程序挂接设计与实现

响应计算部分由于不需要输入测井数据，其输入数据为用户设计的地层模型和仪器模型，计算结果要写入测井数据文件。因此软件开发中采用多线程调用外部可执行文件的方式实现。软件只负责地层模型和仪器模型的可视化设计，用户完成地层模型和仪器模型设计后，调用响应计算程序，计算完成后向软件发送消息，软件再将计算结果读取并写入测井数据文件，完成计算结果显示。

MFC 应用程序可以处理两种类型的线程：一种称为工作线程(work thread)，另一种称为用户界面线程(user-interface thread)^[41]。工作线程的最大特点是不需要与用户交互，它自生自灭，并做一些后台工作，如后台计算、后台打印等任务。它也适合在后台等待某一事件的发生。虽然线程都是基于 CWinThread 类，但创建一个工作线程无需显式地创建一个对象。因为当调用 AfxBeginThread() 函数生成一个线程时，这个函数已为你建立了一个 CWinThread 对象。利用创建线程调用外部可执行文件实现响应计算，可分为 5 步，具体实现如下：

(1) 声明和定义工作线程函数。此函数原形为 `UINT NMMThreadProc(LPVOID pParam)`，函数名可以由用户定义但确定的是参数 `pParam` 为 `LPVOID` 类型和返回 `UNIT` 类型值。`pParam` 是一个 32 位参数，可以通过它传递一个 `int` 型参数给线程。这里将函数名定为 `NMMThreadPro`。

(2) 在此函数中用函数 `ShellExecuteEx(SHELLEXECUTEINFO* info)` 来创建进程来执行后台计算程序。设置其中的 `info` 参数初始化将要打开的程序信息以及运行方式。

(3) 在计算函数中用函数 `AfxBeginThread(MyThreadPro,this)` 创建并启用工作线程，并将对话框指针传给工作线程。

(4) 在工作线程中用同步函数 `WaitForSingleObject(info.hProcess,INFINITE)` 等待计算程序结束。如果后台计算程序结束则终止则向软件系统传递读取计算结果消息 `UM_WRITEDATA`。

(5) 响应自定义消息 `UM_WRITEDATA`，读取数据写入测井数据文件并显示计算结果。

4.8.2 地层模型和仪器模型可视化编辑

传统响应计算程序中地层模型和仪器模型参数是以文本的形式提供给用户修改编辑的。如果用户不熟悉地层模型和仪器模型参数结构，用户修改起来极不方便，而且容易出错，导致计算结果错误^[38]。因此将地层和仪器模型重新打包可视化显示，用户通过鼠标操作实现模型的修改和编辑。对于地层模型实现“橡皮筋”式的编辑，径向拖拽改变地层电阻率，纵向拖拽改变层厚，层的合并、拆分、创建和删除等操作。对于仪器模型提供线圈的鼠标移动改变线圈之间的距离，删除、添加和属性修改等操作。

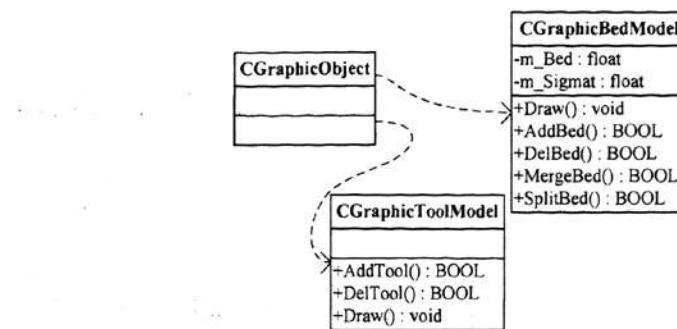


图 4-25 地层、仪器模型类组织关系

(1) 模型对象组织形式

定义两个 CGraphicToolModel 和 CGraphicBedModel 类，分别实现地层模型和仪器模型的管理和绘制，两个都继承自抽象类 CGraphicObject。类 CGraphicObject 抽象了两种模型的共有属性，并重载方法 Draw()(绘制函数)、Add()、Del()等操作函数，实现两种模型的绘制和操作，类的组织关系如图 4-25 所示。地层模型和仪器模型在在测井数据文件中是以表数据的方式存储。其绘制分别在地层模型和仪器模型独立的浮动窗口中绘制。

(2) 可视化编辑

绘制模型时需分别调用各自对象的 Draw 方法，其绘制效果如图 4-26 所示。这里需要对一系列的鼠标消息进行捕获，进行响应的操作，主要包括：

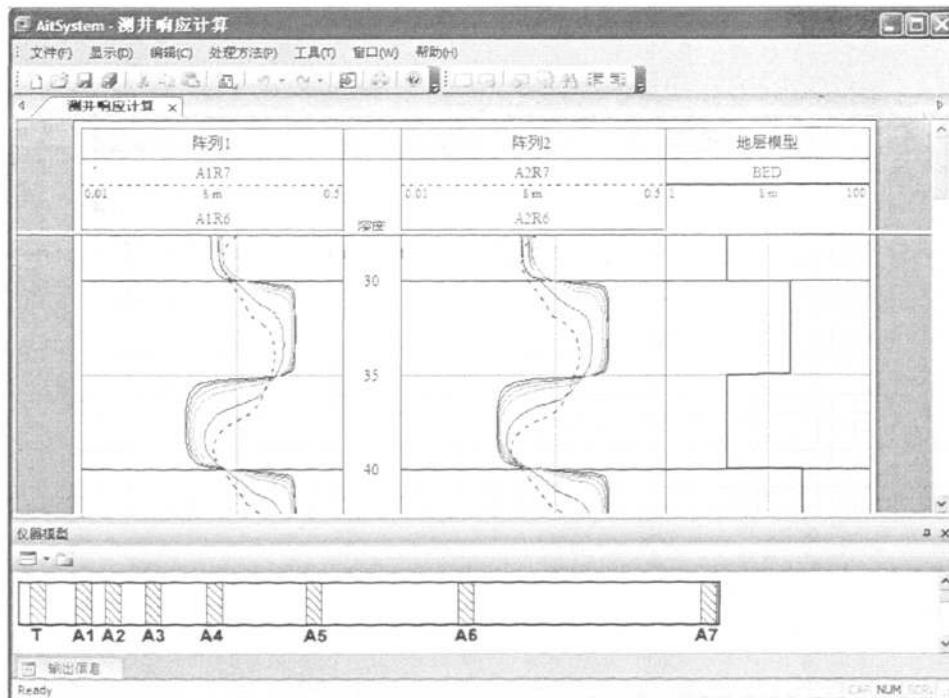


图 4-26 阵列感应响应计算中地层模型和仪器模型

(1) 添加操作。对应于地层模型为添加一个地层，仪器模型添加一个发射或接受线圈。当用户在工具栏点击某一插入按钮时，弹出添加模型对话框，设置添加对象属性后，即可在模型画布上显示添加的对象，添加操作通过 Add()方法实现。

(2) 拖拽模型对象。当用户拖拽对象时，该对象应该随着用户的拖拽不断的改变绘制位置。具体的做法是：捕获鼠标拖拽事件，根据模型对象选择方式成员变量 m_SelectMode，响应相应的操作。对于仪器模型没有 size(改变大小) 模式，首先记录拖拽事件的起点和终点坐标，根据拖拽的起点判断是否选中一个模型对象，如果选中了，将其放入选择拷贝到变量 m_Selection。根据起点和终点坐标可以计算出 m_Selection 横向和纵向的位移距离和位移方向，对 m_Selection 的属性进行修改，鼠标左键弹起后，将 m_Selection 再拷贝回原模型。然后调用刷新重绘画布对象。

(3) 更改对象的属性。当用户双击鼠标时，应根据双击的位置判断用户选中了哪个模型对象，并根据其类型弹出相应的对话框供用户查看和更改对象属性。对于地层模型有地层电阻率、径向深度和层厚度等属性，仪器模型有线圈类型（发射、接收线圈）、线圈匝数、线圈距和工作频率等属性。

(4) 删除合并等操作。模型对象的删除合并等操作，可以通过工具栏或点击右键弹出快捷菜单实现。要根据 m_Selection 中选中对象个数，允许用户执行相应的操作。

4.9 小结

本章主要对阵列感应数据处理与测井响应计算软件的各个功能模块进行设计，并编程实现。本章的主要工作有：

- (1) 软件主界面的设计与实现。
- (2) 测井数据 I/O 接口的设计与实现。
- (3) 测井图形绘制设计与实现。主要包括一维曲线、曲线填充、二维阵列和电阻率成像等测井图形绘制的设计与实现。
- (4) 利用部分刷新和重绘实现测井图像的快速连续滚动；
- (5) 对测井图形对象响应鼠标操作做了分析和实现；
- (6) 数据处理模块设计与实现。包括数据处理方法在软件平台的挂接接口，控制参数可视化的设计和实现。
- (7) 响应计算模块的设计与实现。主要包括响应计算程序的软件挂接，地层模型和仪器模型的可视化编辑的设计和实现。

第五章 应用实例

前面完成了阵列感应数据处理与测井响应计算软件的设计与开发，下面以 B342 井为例，对软件实际应用效果进行说明，该井是使用 HDIL 型阵列感应仪器测量的。

5.1 测井数据解编

首先通过菜单命令“打开井文件”，打开该井的数据文件 b342.xtf，会自动弹出如图 5-1 所示的数据解编信息窗口，单击全选，选中所有曲线，开始转换。解编完成后，自动根据井名创建文件夹和同名的数据文件 b342.xls。

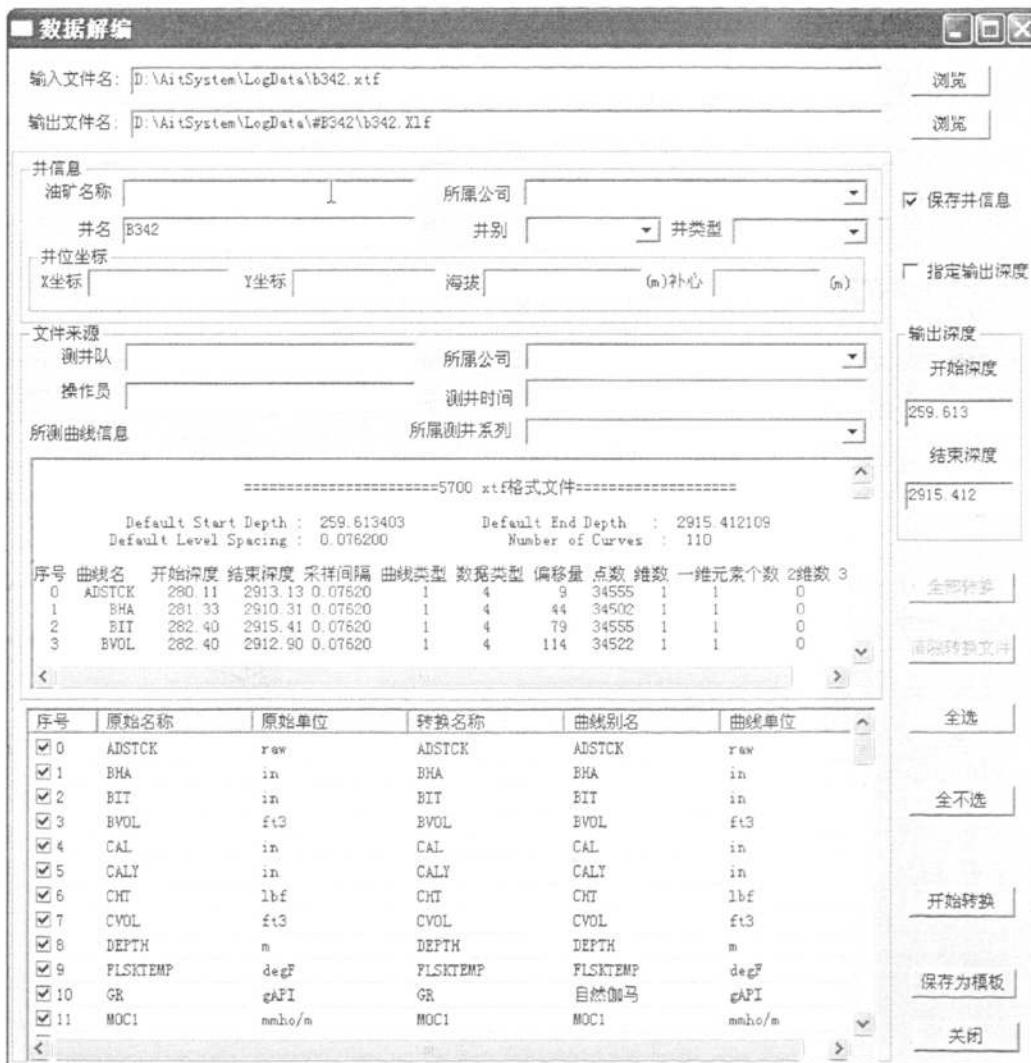


图 5-1 数据文件格解编对话框

5.2 阵列感应数据处理

有了前面解编后数据，下面就可以进行阵列感应数据处理，按图 3-2 所示处理流程，

依次选择处理方法进行阵列感应数据处理，选择处理方法后，软件将自动加载对应的绘图模板文件，处理方法选择菜单如图 5-2 所示。然后设置相应的控制参数，运行处理。其中趋肤效应校正和信号合成处理控制参数采用默认值。井眼校正和反演处理参数设置如图 5-3 所示，数据处理结果如图 5-4 所示。

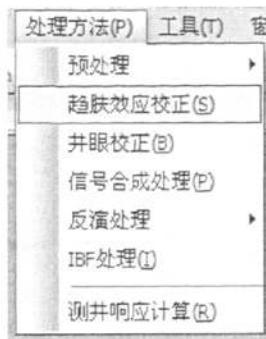


图 5-2 处理方法菜单

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>参数卡编辑</p> <p>处理深度段:311.01~3203.4m</p> <p>② ④ ⑤</p> <p>③ 控制参数</p> <ul style="list-style-type: none"> 输入曲线单位 S/m 输出曲线单位 ohm.m 井径自适应 False 仪器位置 居中 井径自适应 True 井径获取方式 井径曲线 钻头尺寸 8 泥浆自适应 False 泥浆电阻率获取方式 泥浆电阻率曲线 给定泥浆电阻率值 1.1 偏心自适应 False 偏心尺寸 1.0 井温梯度 2.1 井径乘因子 1.0 泥浆电阻率乘因子 1.0 <p>③ 输入曲线定向</p> <ul style="list-style-type: none"> SEC0 SEC0 SEC1 SEC1 SEC2 SEC2 SEC3 SEC3 SEC4 SEC4 <p>井径自适应 TRUE为自适应计算，FALSE为直接运算</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>参数卡编辑</p> <p>处理深度段:311.01~3203.4m</p> <p>② ④ ⑤</p> <p>③ 控制参数</p> <ul style="list-style-type: none"> 输入曲线单位 ohm.m 输出曲线单位 ohm.m 反演处理方式 前后反演处理 自然伽玛数据控... True 自然伽马上限控... 170 自然伽马下限控... 70 自然电位控制输... True 自然电位上限控... 120 自然电位下限控... 50 泥质含量控制输... False 泥质含量上限控... 70 泥质含量下限控... 40 电阻率比值控制... False 电阻率比值上限控... 70 电阻率比值下限控... 40 计算结果滤波 滤波器长度 7 <p>③ 输入曲线定向</p> <ul style="list-style-type: none"> VRM2E1 VRM2E1 VRM2E2 VRM2E2 VRM2E3 VRM2E3 <p>反演处理方式 反演处理方式：前后反演处理,仅作前反演,仅作后反演。</p> </div>
--	---

(a) 井眼校正参数

(b) 反演处理参数

图 5-3 参数卡编辑

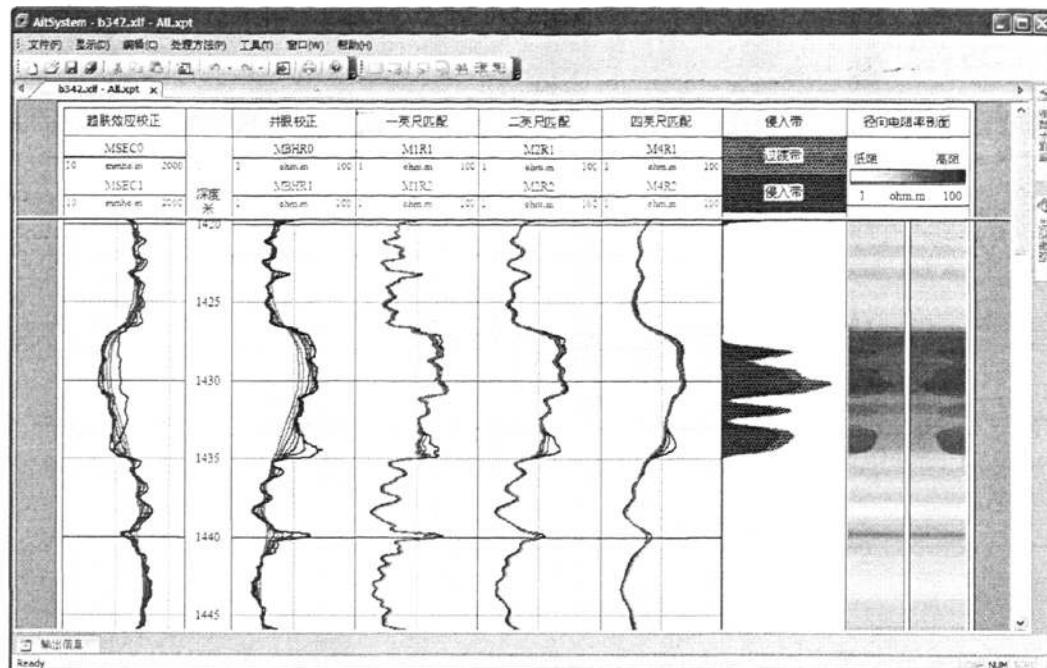


图 5-4 阵列感应数据处理结果

5.3 阵列感应响应计算

(1) 打开地层模型和仪器模型。通过命令菜单“打开仪器模型”，如图 5-5 所示，打开仪器模型文件 MIT.tol，类似的打开地层模型文件 Bed1.bed。

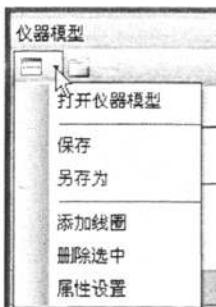


图 5-5 仪器模型命令菜单

(2) 模型属性编辑和查看。在地层模型浮动窗口中，双击某个线圈弹出如图 5-6 所示的对话框，即可对该线圈的匝数，位置等参数进行修改。对于地层模型操作方式类似，属性设置对话框如图 5-7 所示。

(3) 计算运行，测井响应计算结果如图 5-8 所示。显示结果为 MIT 仪器 8 个阵列的 14 条响应曲线。

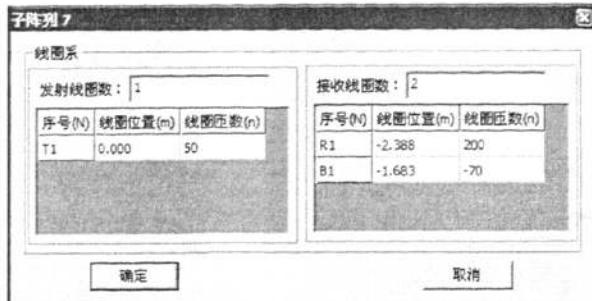


图 5-6 仪器模型线圈系属性设置



图 5-7 地层模型属性编辑

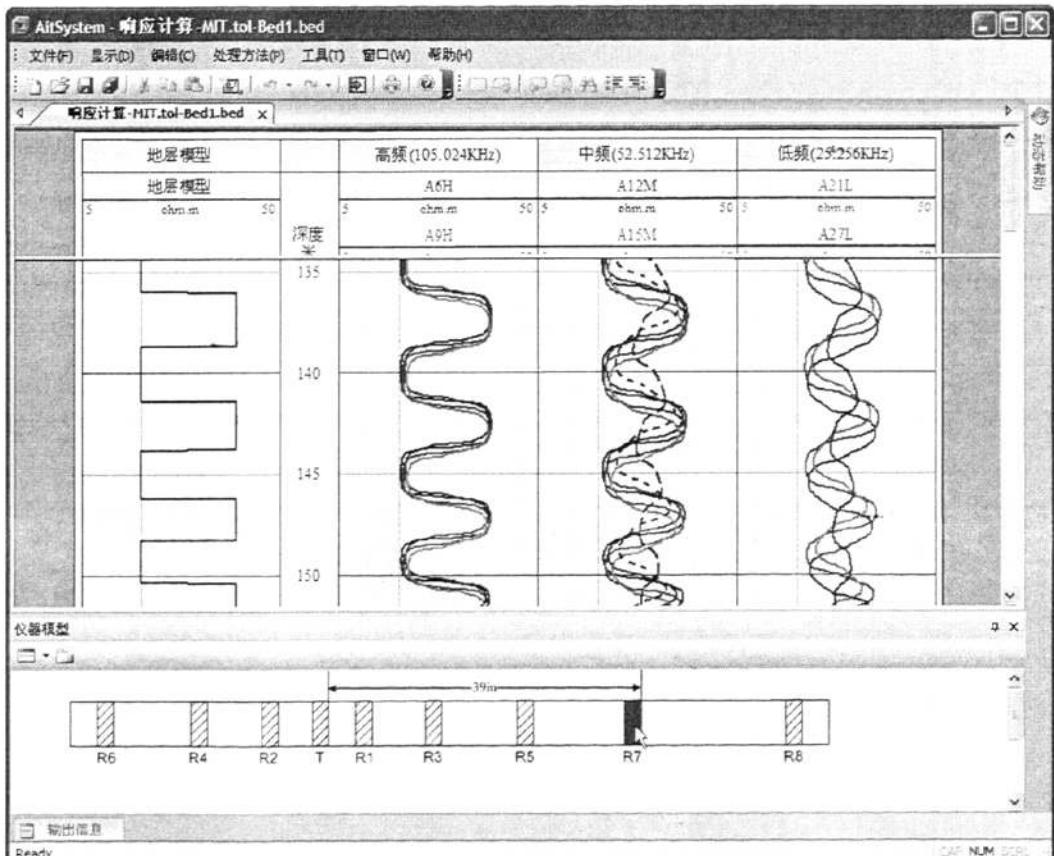


图 5-8 MIT 型阵列感应响应计算结果

结 论

本文主要研究了阵列感应数据处理、测井响应计算方法及其软件的设计开发，现将全文的主要工作总结如下：

1. 阵列感应数据处理方法实现。在分析感应测井理论基础上，研究阵列感应测井数据的各个处理方法。阵列感应数据处理主要包括以下几部分：

(1) 趋肤效应校正。通过对感应测井趋肤效应和对其主要影响因素的分析，深入研究了两种阵列感应仪器的趋肤效应校正方法，一是仅有两个发射频率仪器（如 HARI）的双频率趋肤效应校正方法，另一个是有多个发射频率仪器（如 HDIL）的基于导数的多频率趋肤效应校正方法。

(2) 井眼校正。在分析井眼大小、泥浆电导率和仪器偏心对阵列感应测量信号影响的基础上，研究了基于正演模拟数据库的井眼校正方法。首先根据实际情况把井径、泥浆电阻率、仪器偏心和地层电阻率四个参数分段，利用三维有限元方法各种已知地层模型的测井响应数据库，在实际校正中采用样条函数快速计算测井响应，采用非线性最小二乘方法求补偿函数的极值反演井眼参数，改进了补偿函数的极值的具体求解方法，实现了基于正演模拟数据库的自适应井眼校正。该方法与传统方法比较，处理速度稍慢，但精度高，校正效果好。

(3) 信号合成处理。在分析信号合成处理的基础上，研究了计算背景电导率和分辨率匹配原理。

(4) 反演处理。在深入分析地层侵入模型和一般电测井反演方法的基础上，提出阵列感应四参数（侵入开始结束半径、侵入带电阻率和原状地层电阻率）反演方法。

(5) 基于非均匀背景地层的信号合成。在研究 Atlas 基于纵向非均匀背景电导率的信号处理方法的基础上，实现基于非均匀背景地层的信号合成。

2. 阵列感应响应计算实现。简要分析了利用数值模式匹配法计算阵列感应测井响应的基本原理。

3 阵列感应数据处理与测井响应计算软件设计与实现。阵列感应数据处理与测井响应计算软件是借助计算机技术和运用数学的方法对测井资料进行自动处理，并将解释结果以图形的方式直观地显示出来。该部分主要包括以下几部分：

(1) 根据软件功能需求和 MVC 结构模式，设计软件的层次结构。

(2) 根据测井数据文件记录对象的特点，设计了中间数据文件格式，并实现常见数据格式（WIS、XTF、DLIS 等）解编为中间数据文件格式，该文件格式结构简单，操作方便灵活。

(3) 设计实现了一维曲线、曲线填充、波列和电阻率成像等测井图形的绘制，并实现测井图形对象对鼠标消息的响应，提高了测井图形的灵活性。在实际测井绘图开发过程中，还采用内存 DC 和局部刷新重绘等技术实现了测井图形的快速连续滚动显示。

从绘图效果看，达到了预期效果。

(4) 设计实现了以动态链接库为主要形式的数据处理方法模块接口，方便了处理方法的扩展和软件升级维护。

(5) 设计实现了地层模型和仪器模型的可视化编辑，并使其响应鼠标操作，使地层模型和仪器模型的编辑更加灵活方便。

4 通过对阵列感应数据处理与测井响应计算软件的实际应用和测试，软件已具备了借助计算机对阵列感应测井资料进行自动处理，并将解释结果以图形的方式直观地显示的目标，满足了实际工程的需要。

本软件研制过程中，因经验不足等原因，目前还存在许多不足，将在进一步的工作中加以改进：

- (1) 阵列感应数据处理中井眼校正方法还需要进一步完善和改进；
- (2) 如何利用各种地质勘探资料进行更综合的测井解释；
- (3) 进一步完善测井数据解编功能，支持更多的测井数据格式解编，实现各种测井数据格式自由转换；
- (4) 如何实现多口井的阵列感应数据处理的对比综合解释。

致 谢

首先要感谢我的导师仵杰教授。在我攻读硕士期间，仵老师渊博的知识、敏锐深刻的洞察力、锐意进取的开拓精神和严谨的治学作风让我受益匪浅。他为我创造了良好的学习环境和大量实践的机会，使我一方面顺利地完成硕士阶段的学业和科研任务，同时个人综合能力也有了很大的提高。在研究生学习结束之际，谨对导师多年的辛勤培养和关心表示衷心的感谢，并向他致以深深的敬意。

其次，感谢所有给予我支持和鼓励的同学，感谢他们在我遇到困难时给予了热情的帮助。

最后，我要感谢我的家人。他们一直给我精神上的鼓励、物质上的支持、学习上的帮助和督促，用言辞无法表达我对他们的感激之情。他们的关怀和鼓励，是我前进的最大动力。

参考文献

- [1] 中国石油天然气总公司勘探局.技术与油气层评价进展[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [2] 张建华,刘振华.电法测井原理与应用[M].西安: 西北大学出版社.2002.
- [3] J.F.Hunka and T.D.Barber. A New Resistivity Measurement System for Deep Formation Imaging and High-Resolution Formation Evaluation[C].New Orieans. The 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE,September 23-26.1990.295~307.
- [4] T.D. Barber,R.A.Rosthal. Using a Multiarray Induction Tool To Achieve High-Resolution Logs With Mininum Environmental Effects[C].Dallas,Texas.The 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE,6-9 October,1991.637~651.
- [5] Barer, T., Orban, A.,Hazen,G, at all. A Multiarray Induction Tool Optimized for Efficient Wellsite Operation[C].Dallas, Texas. Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE,22-25 October,1995,549~561.
- [6] J. Xiao, J. Buchanan, M. Bittar.A New Asymmetrical Array Induction Logging Tool[J]. Society of Petroleum Engineers. 2006.
- [7] Beard,Dave,Zhou,Qiang,Bigelow,Ed.Practical Applications of a New Multichannel and Fully Digital Spectrum Induction System[C].Denver,Colorado.SPE Annual Technical Conference and Exhibition,6-9 October,1996,549~561.
- [8] Beste B.,Hagiwara T.,King G.,Strickland R. and Merchant G.A.,A New High Resolution Array Induction Tool[C],SPWLA 41th June 4-7,2000.
- [9] 包德洲, 周军, 王正等.新型阵列感应成像测井仪的研制与应用 [J].测井技术,2004,28(6),547~550.
- [10]杜飚. GeoFrame 软件在测井评价中的应用[J]. 江汉石油科技,2006,23(1),33~35.
- [11]黄芳. GeoFrame 数据库管理问题分析与研究[J].2005,19(5),77~79.
- [12]Baker Hughes, Incorporated.eXpress Reference Manual[Z].2000.
- [13]Halliburton. PetroSite Reference Manual[Z].2002.
- [14]中国石油测井公司.LEAD 综合应用平台用户手册[Z],2006.
- [15]余春吴, 李长文 . LEAD 测井综合应用平台开发与应用 [J]. 测井技术,2005-10,29(5),396~398.
- [16]朱涵斌, 魏海云, 李国军, 李长文. LEAD 平台中的电声成像测井处理方法[J].测井技术,2007-04,31(2),149~152.
- [17]CNPC 测井软件项目组. 测井解释平台底层 WellBase 技术开发手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [18]姜涛.新一代测井地质综合应用平台 FORWARD.NET. 石油工业计算机应用

2005,13(3),9~11.

- [19]金勇, 唐文清, 陈福利, 张世刚. 石油测井地质综合应用网络平台 Forward. NET[J]. 石油勘探与开发, 2004-06,31(3),92~96.
- [20]金勇.张世刚.顾列刚.杜国兵.FORWARD 测井解释平台中使用的先进技术[J].测井技术.2000, 24(1) : 64~70.
- [21]刘圣民. 电磁场的数值计算方法[M].武汉:华中理工大学出版社, 1991.
- [22]张庚骥,金勇.快速求解复杂地层电磁波测井响应的方法[C].中国石油学会测井专业委员会第一届测井年会论文选集北京:石油工业出版社,1988.
- [23]张庚骥, 汪涵明, 汪功礼.成层介质中交流电测井响应 [J].地球物理学报,1995,38(6):840-849.
- [24]张庚骥.电测井算法[M].北京, 石油工业出版社,2009.
- [25]李荣华, 冯果松. 偏微分方程数值解法[M]. 北京: 高等教育出版社,1995.
- [26]刘春雅, 张甜甜, 王晓鹏. 一种新的趋肤效应校正方法 [J]. 测井技术,2007,31(6),524~527.
- [27]张美玲,王宏建. 高分辨率阵列感应井眼校正技术[J].测井技术,2006,30(5):404~407.
- [28]程建华等.感应测井信号处理及应用研究[J].测井技术,2003,18(2):71~75.
- [29]谢尉尉.阵列侧向测井反演研究[D].西安石油大学,2008.
- [30]胡佳庆. 测井数据常用格式及格式转换[J].海洋石油,2002,23(1):75~80.
- [31]李河, 王祝文, 李舟波, 丁永浩. 地球物理测井数据格式及面向对象的数据读取[J]. 物探与化探,2005,29(2):174~177.
- [32]马玲华, 杨劲松, 李传伟等.ECLIPS5700 测井系统 XTF 文件格式分析[J].测井技术,2001,25(3):225~230.
- [33]许家珩.软件工程——方法与实践[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [34]付作鹏. 测井资料 Web 绘图系统设计与实现[D].吉林大学,2007.
- [35]刘涛. 测井软件系统的设计与实现[D].西安电子科技大学,2008.
- [36]王奕. 测井数据管理系统[D].吉林大学,2006.
- [37]李洪奇. 测井软件构件化开发框架[J].测井技术,2005,29(5):399~403.
- [38]张美玲,崔杰等.测井数值模拟软件平台开发[J].大庆石油学院学报,2008,32(6):21~24.
- [39]蔡耀泽,张林. 测井资料处理软件的开发[J].地质装备,2007,8(1):19~21.
- [40]孙淑霞,黄地龙等.测井资料处理解释系统软件的设计与实现[J].1997,24(3):64~69.
- [41]孙鑫.VC++深入详解[M].北京:电子工业出版社,2006.

攻读硕士学位期间发表的论文

- 1 仵杰, 李强, 解茜草等, 阵列感应测井数据处理解释系统研究[J].国外测井技术,2010年第1期.
- 2 仵杰, 李强, 白彦等, 三正交线圈系在均匀地层中的趋肤效应影响研究[J].国外测井技术, 2010年第2期.