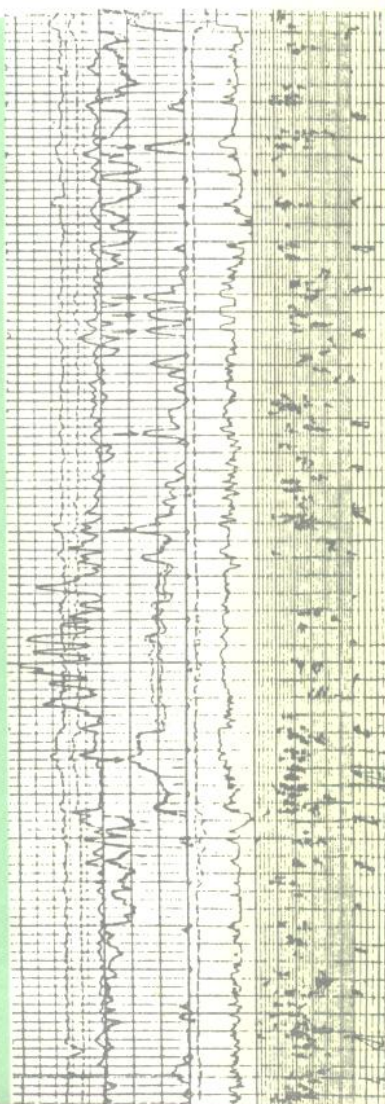


测井培训丛书

感应测井

石油工业出版社



测井培训丛书

感应测井

冯启宁 李忠荣 编译 周坤瑞 冯启宁 审校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍感应测井基本理论、测井仪器操作、质量控制及其应用。全书分为两章，第一章内容包括感应测井的一般原理、仪器基本结构、操作方法、现场刻度、维修及测井质量检查；第二章内容为感应测井的理论基础、详细的仪器结构框图、仪器总调、刻度理论、环境校正及其解释。此外，还配合感应测井对球形聚焦及自然电位测井原理、仪器结构和刻度方法等做了简要叙述。书中附有上述仪器的技术特性、现场刻度表格、典型测井曲线、组合解释图版及环境校正图版等。附录给出感应测井仪与其它测井仪的另两种组合。

本书可作为数控测井操作与维修技术人员、现场资料解释与技术管理人员的培训教材，也可作为测井技术人员及大专院校测井专业师生的参考书。

* * *

本书第一章由李忠荣编译，冯启宁审校；第二章由冯启宁编译，周坤瑞审校。

测 井 培 训 丛 书

感 应 测 井

冯启宁 李忠荣 编译 周坤瑞 冯启宁 审校

*

石油工业出版社出版发行
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 5 印张 117 千字 印1—2,500
1986 年 5 月北京第 1 版 1986 年 5 月北京第 1 次印刷
书号: 15037·2666 定价: 0.97 元

内 部 发 行

出版者的话

为了做到在引进国外测井仪器的同时,要注意消化、吸收和掌握国外先进的测井技术,提高我国石油测井技术人员的技术水平,我们出版了《测井培训丛书》。该丛书主要根据斯伦贝谢公司CSU数控测井系列编译的,包括有:

- 数控测井
- 声波测井
- 感应测井
- 双侧向测井
- 球形聚焦测井
- 电磁波传播测井
- 高分辨率地层倾角测井
- 补偿中子测井
- 自然伽马与自然伽马能谱测井
- 岩性密度测井
- 电缆通信
- 核测井仪器模块
- 重复式电缆地层测试器
- 打捞技术
- 测井车及动力设备系统

《测井培训丛书》每一分册的内容一般分为两部分,第一部分是操作、维修和现场解释人员必须具备的知识,介绍了测井方法原理,测量技术,仪器的基本框图、结构和技术特性,操作与维修须知,刻度与环境校正,质量控制与资料解释。第二部分是需要更深入了解的知识,主要介绍了测井方法的理论基础,详细框图以及需要详细说明的关键技术问题。因此该丛书可做为数控测井操作与维修技术人员、资料解释与技术管理人员的培训教材,也可做为测井技术人员及大专院校测井专业师生的参考书。

在《测井培训丛书》的编译出版过程中,石油部地质勘探司做了大量的组织工作;石油部科学技术情报研究所、华东石油学院勘探系承担了编译工作;大庆石油管理局测井公司、中原石油勘探局测井公司给予了大力支持和帮助;四川石油管理局井下作业处、华北石油管理局测井公司、大港石油管理局测井公司、江汉石油管理局测井公司、江汉石油管理局测井研究所、江汉石油学院物探系、辽河石油勘探局测井公司、西安石油勘探仪器总厂也给予了积极的支持和帮助,在此一并表示感谢。

目 录

第一章 感应测井的测量原理、仪器操作及质量检查	(1)
第一节 概述.....	(1)
1.1 电 阻 率测井.....	(1)
1.2 SP (自然 电位).....	(3)
1.3 小 结	(3)
第二节 测量原理.....	(3)
2.1 引 言	(3)
2.2 ILD: 测量原理.....	(6)
2.3 ILD: 基本框图.....	(8)
2.4 SFL/SP: 测 量 原 理.....	(8)
2.5 SFL/SP: 基本框图.....	(10)
第三节 设备说明及技术特性.....	(12)
3.1 清 单	(13)
3.2 技 术 特 性.....	(13)
3.3 电 缆 芯分配.....	(13)
第四节 仪器刻度及准备工作.....	(15)
4.1 安 全 问 题.....	(15)
4.2 现场刻度与总调.....	(15)
4.3 SFL 现场刻度.....	(19)
4.4 自然电位 (SP)	(19)
4.5 CSU 常 量	(19)
第五节 操作须知.....	(20)
5.1 安 全	(20)
5.2 操 作 步 骤.....	(20)
5.3 一 般 问 题.....	(22)
第六节 测井质量检查 (LQC)	(22)
6.1 测井质量检 查.....	(22)
6.2 校 正 图 版.....	(23)
第七节 维修.....	(23)
7.1 仪器快速外观检 查 (FIT)	(23)
7.2 操 作 检 查.....	(23)
第二章 感应测井的理论基础、仪器详细框图、刻度及解释	(25)
第一节 测量理论基础.....	(25)
1.1 感应测井的物理基础和测 量 原 理.....	(25)
1.2 几 何 因 子.....	(28)
1.3 多 线 圈 系.....	(32)
1.4 反 褶 积.....	(32)

1.5	趋肤效应	(33)
1.6	深感应测井 (ILD) 电阻率的计算	(35)
1.7	球形聚焦测井 (SFL-E) 的物理基础和测量原理	(36)
1.8	球形聚焦测井电极系安排	(38)
1.9	自然电位测井 (SP) 的物理基础和测量原理	(40)
1.10	设备类型	(43)
1.11	IRT-R的优点和缺点	(46)
第二节	仪器的详细方框图	(47)
2.1	感应测井仪器方框图	(47)
2.2	球形聚焦测井仪器方框图	(48)
2.3	自然电位测井	(52)
2.4	感应测井仪器 (接口) 部件 (IEM)	(56)
第三节	刻度理论	(56)
3.1	概述	(56)
3.2	深感应测井总调	(57)
3.3	球形聚焦测井刻度	(61)
3.4	自然电位测井刻度	(61)
第四节	故障检查提示	(61)
4.1	井场故障检查	(61)
4.2	故障统计	(63)
4.3	自然电位问题	(63)
第五节	解释	(64)
5.1	感应-球形聚焦测井 (ISF) 的应用	(64)
5.2	环境校正图版	(64)
5.3	根据感应-球形聚焦测井确定 R_t	(65)
5.4	根据自然电位确定 R_w	(67)
第六节	附录	(69)
6.1	球形聚焦电极 H-142851/2/3/4	(69)
6.2	主绝缘套	(71)
6.3	2Hz空调干扰	(71)
6.4	与微球形聚焦测井仪SRT-B组合	(71)
6.5	感应-球形聚焦测井与声波测井组合	(73)
6.6	RTGLOB	(73)

第一章 感应测井的测量原理、仪器操作及质量检查

第一节 概述

1.1 电阻率测井

图1与图2示出了含水地层和含油地层的 R_t 公式。

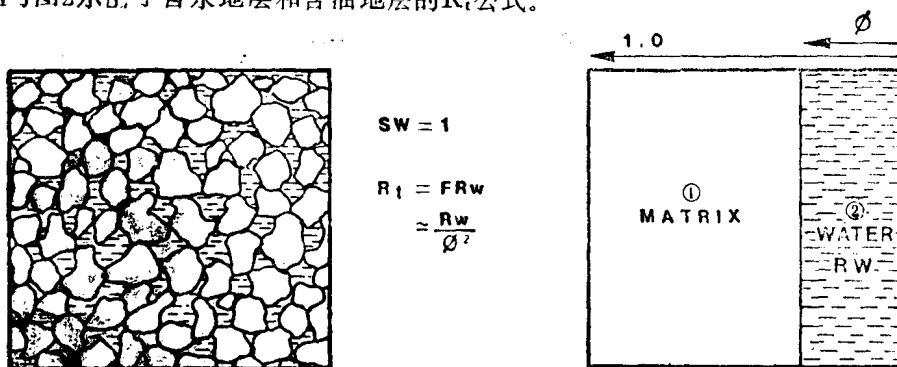


图1 含水地层

①骨架；②水

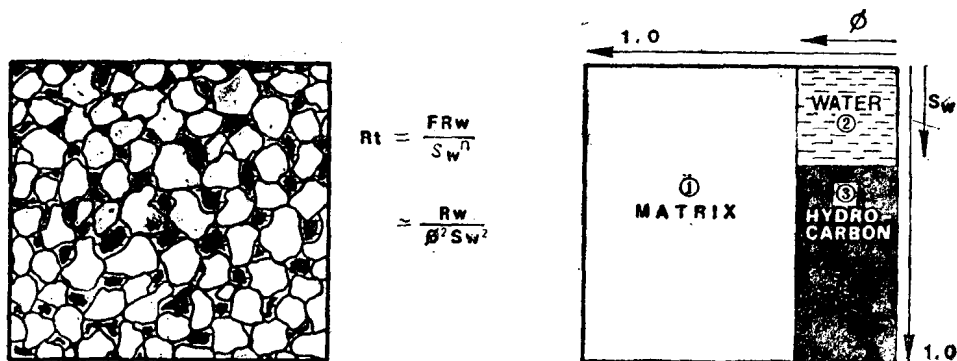


图2 含油地层

①骨架；②水；③油

公式表明有三种原因能使 R_t 增大

- (1) R_w 增大——在所给的单一地层中变化很小；
- (2) ϕ 减小——地层变得致密；
- (3) S_w 减小——含水部分被油气代替。

因此， R_t 值与 ϕ 的测量值相配合，是确定油气存在与否的重要手段。

对于 $S_w=1$ 的含水地层（图1），假若已知 R_t 和 ϕ ，则可算出 R_w ；对于含烃地层（图2），假若已知 R_t ， ϕ 和 R_w ，则可算出 S_w 。

地层中被烃占据的部分是 $(1-S_w) \times \phi$ 。因此，测量 R_t （和 ϕ ）就能决定是否含烃以及含烃量。

钻井过程中，由于泥浆压力过大而使泥浆滤液侵入地层，地层中原有的部分流体就被冲到远离井壁的地方（图3）。

以 R_{xo} 表示侵入带电阻率， S_{xo} 表示含水饱和度。如果测得 R_{xo} ，则可利用前述阿尔奇公

式计算出 S_{xo} 。

比较 $(1-S_w)$ 和 $(1-S_{xo})$ ，相当于比较未被侵入带的含油量和侵入带的含油量，从而可以确定在侵入过程中有多少烃被剂出。

因此，作为油气生产中重要指标之一的油气的可驱动能力，可以通过电阻率测井来确定。

电阻率测井的下井仪器可以设计成测 R_t （深探测仪），也可以设计成测 R_{xo} （探测深度很浅）。

另一个未知参量是侵入带直径 d_i 。它由很多因素所决定，如泥浆类型、侵入时间和地层结构。图4为地层电阻率分布图。

用以测量 R_t 的下井仪器会受到 R_{xo} 的影响，其影响程度主要取决于侵入带直径。欲对 R_t 或 R_{xo} 作出完整的评价，必须知道 d_i 。

为解决这一问题，可用三种不同探测深度进行三次测量，即深探测、浅探测（中探测）和非常浅的探测。这样，就可以对 R_t ， R_{xo} 和 d_i 等三个未知量作出评价。

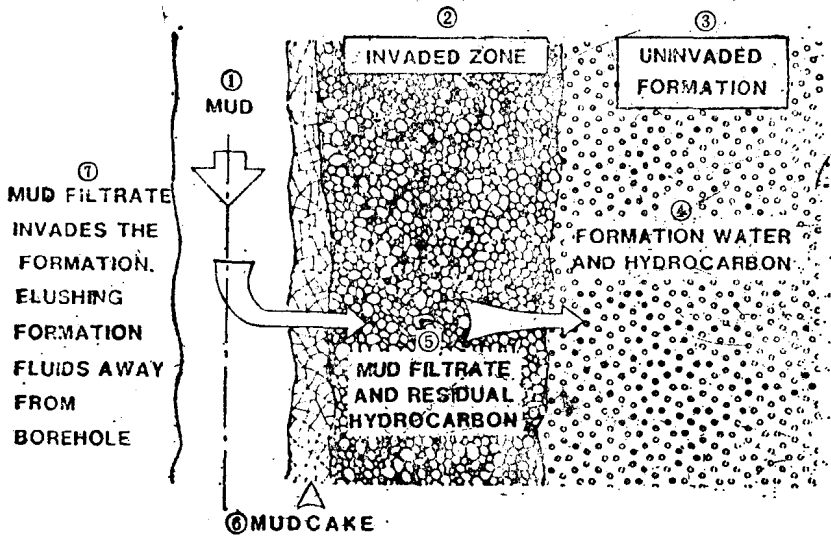


图3 侵入情况

- ①泥浆；②侵入带；③原状地层；④地层水和油气；⑤泥浆滤液及残余烃；
⑥泥饼；⑦泥浆滤液侵入地层将地层流体冲至远离井眼

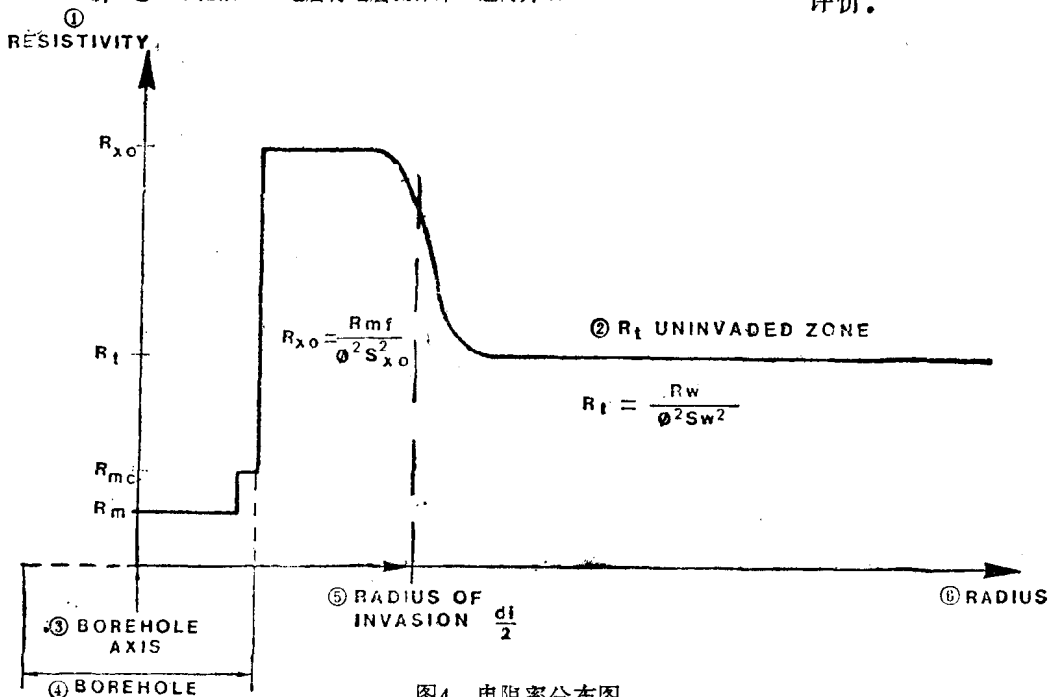


图4 电阻率分布图

- ①电阻率；②未被侵入带；③井轴；④井眼；⑤侵入半径；⑥半径

IRT-R提供了两种电阻率测井,即

ILD:深感应测井——深探测

SFL:球形聚焦测井——浅探测

ILD和SFL经常合写成ISF,即感应球形聚焦测井。

1.2 SP(自然电位)

SP(自然电位)是一种“自然的”直流电压。井内出现自然电位(即自然电动势)有三种可能的原因。

动电电动势:流体在地层中流动时产生。在低渗透性地层的侵入过程中,可以见到这种电动势。不过这种情况很罕见,通常忽略不计。

薄膜电动势:一薄膜分隔开两种含盐量不同的溶液时产生。泥岩是理想的薄膜。当泥浆和地层水的含盐量不同时,便产生薄膜电动势。

流体接触电动势:两种含盐量不同的流体接触时产生。在泥浆滤液与地层水相接触的侵入带发生这种情况。

薄膜电动势和流体接触电动势都属于电化学生电动势。

电化学生电动势与泥浆滤液和地层水的含盐量有关。

只要测得SP,已知 R_{mf} (泥浆滤液电阻率)便能计算出 R_w 。

SP作为泥岩指示器也是非常有用的。

电阻率测井和SP测井在斯仑贝谢公司的早期石油勘探中即已使用。

电阻率测井在找油以及定量计算含烃量方面所起的历史作用和它的重要性如此之大,以至在一个新的钻井井段最先进行的测井就是电阻率测井。

最早进行的电阻率测井,常叫基本测井。它的现场解释可能影响到买主的测井计划、钻井计划或者甚至放弃继续钻探。

1.3 小结

电阻率测井是寻找油井定量求得 S_w 的主要方法,它有助于确定油的可驱能力。欲完整地评价 R_t 、 R_{xo} 和 D_i ,需进行三种测量。

IRT-R提供了其中的两种测量,即ILD(深探测)和SFL(浅探测),如图5、图6所示。

SP用作为泥岩的指示器和计算 R_w 。

第二节 测量原理

2.1 引言

IRT-R提供了两种完全独立的电阻率测井:ILD深感应测井和SFL球形聚焦测井。

这两种测井的物理基础各不相同:

ILD:发射线圈产生磁场,在地层中感应生成电流。感应电流的大小正比于地层的电导率。接收线圈测得地层中的感应电流值,从而可以推断出地层的电导率。

SFL:由一个电极向地层发送电流 I_o ,以维持某一固定电压 V_o 值恒定不变。 I_o 的大小依赖于地层的电导率 C

$$C = \frac{1}{K} \times \frac{I_o}{V_o}$$

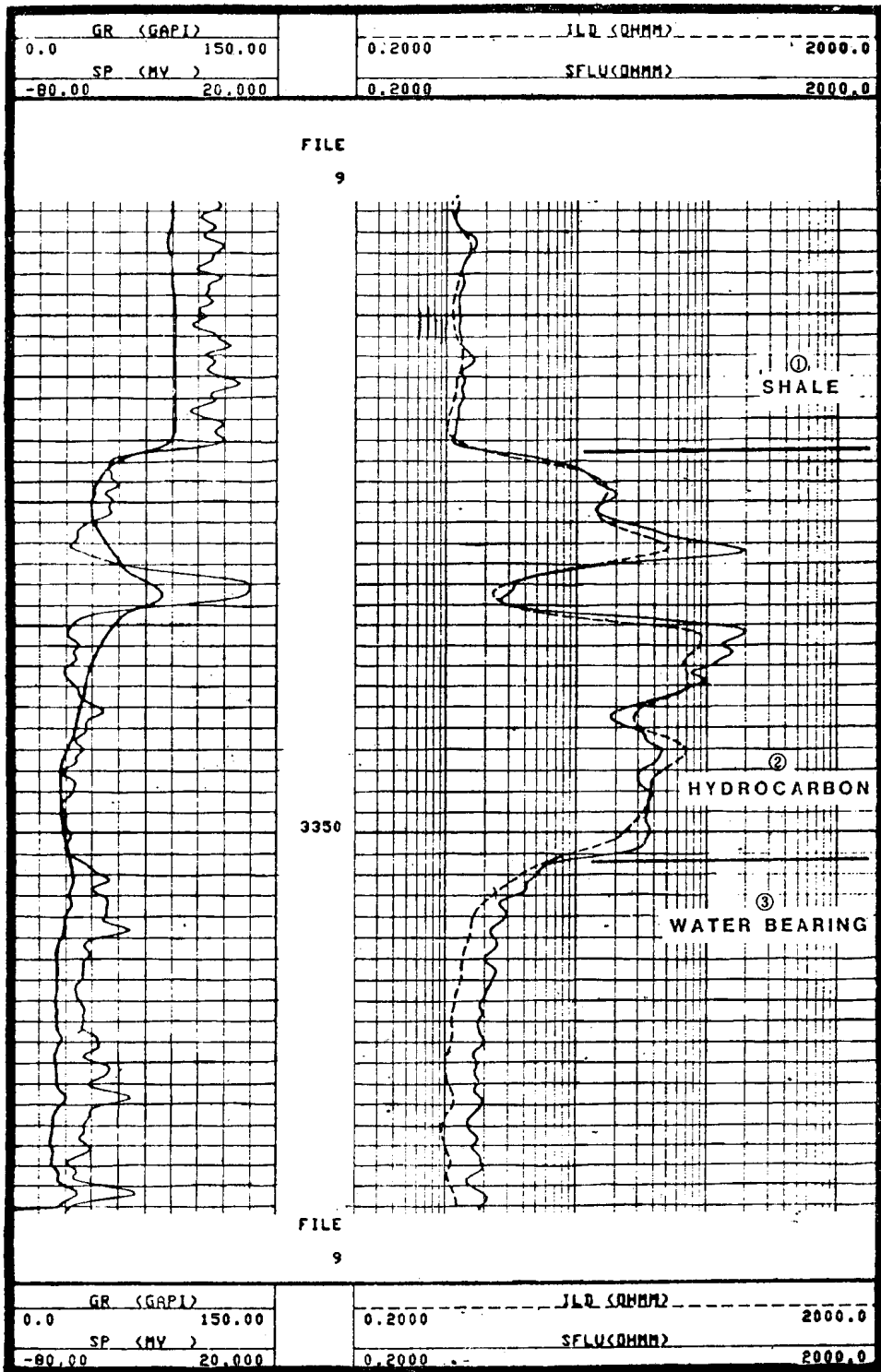


图5 ISF 对数坐标表示

①泥岩；②含油气层；③含水层

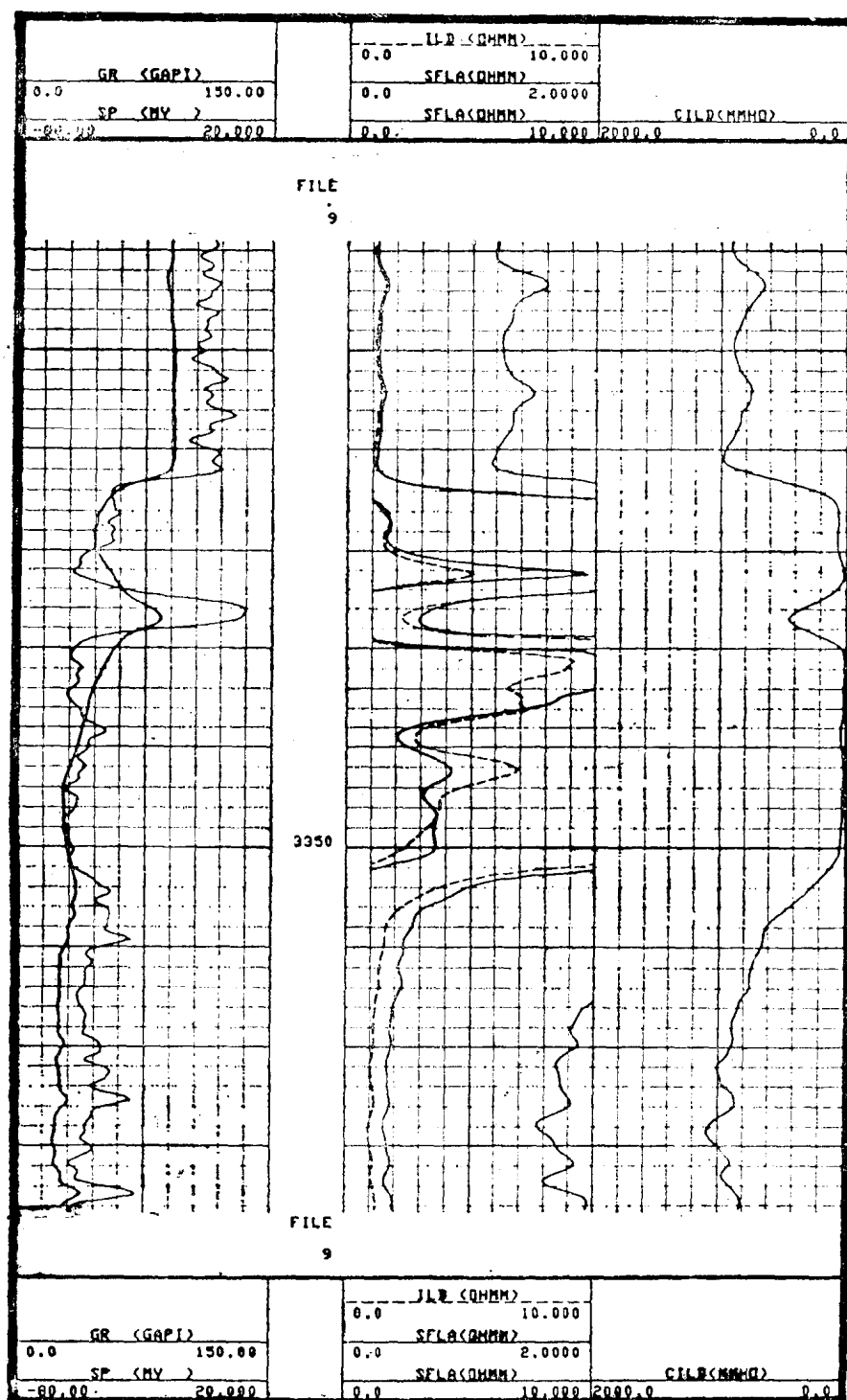


图6 ISF 线性坐标表示

式中, K 为仪器常数。它与电流 I_0 的流动形式有关。

IRT-R 常被称为电导率测井仪, 因为它所测量的信号正比于地层的电导率。因此, 对应高电导率地层或者低电阻率地层, 当接收信号很强时, 测量结果尤为精确。

在井下, IRT-R 周围存在着泥浆、泥饼和邻层等, 它们影响着测量结果。

在上提测井过程中, 下井仪器周围环境不断变化, 如井径的变化, 地层电导率的变化

等。

仪器具有聚焦系统，它们自动调节仪器功能，即使井眼条件在较大范围内变化，仍能维持仪器特性不变。

ILD有聚焦线圈，以维持较深的探测深度和减小邻层的影响。

SFL有监视电路，以保持电流按一确定的路径流动（在一定的电位降下，电流径向流动）。表明电流流动的电流线形状，决定了仪器常数K。只有在电流线形状维持不变的情况下，才能把K考虑为一个常数。为有助于测量电流I₀流入地层而不沿泥浆柱分流，还发射附加的电流——屏蔽电流。

仪器设计和它的聚焦系统并非对所有的井眼条件都适合。测井之后，必须用斯伦贝谢“测井解释图版”按实际的井下情况做一些小的校正。

SP是井下存在的直流电位：在IRT-R电极系上安装一个简单电极即可测得该电位。这一直流信号不作任何特别处理送至地面。

小 结

ILD 通过磁场在地层中感应生成电流。

SFL是在维持某一固定电压降下向地层发送电流。

IRT-R是一种电导率测井仪。

它具有聚焦装置，以维持合适的仪器功能。

测井之后，对记录结果作些小的图版校正是必须的。

SP用一个简单电极进行测量。

2.2 ILD：测量原理

以20kHz的恒定交流电通入发射线圈。这样，便在地层中建立起磁场。

依据右手定则，在地层中感应生成电动势。按照磁场形状，进而在地层单元环中有电流流动（图7）。

地层单元环电流的大小取决于地层单元环的电导率。

地层单元环具有象线圈的作用，将建立二次磁场，二次磁场在接收线圈感应生成电动势。

地层单元环的电导率越高，流过它的电流就越大，所建立的二次磁场就越强，从而接收线圈中的电动势就越大。

因此：

（1）电导性地层在接收器中产生大信号；

（2）电阻性地层在接收器中产生小信号。

聚焦线圈：

在本公司的系统中，线圈尺寸较小，其目的是：

（1）减小下井仪器周围的磁场，从而减少井眼的影响；

（2）减小接收线圈以上和发射线圈以下的磁场，从而减少邻层的影响。

“X”信号（无用信号）：

第一个磁场也可以直接在接收线圈中产生与地层单元环无关的电动势。这个信号称为无用信号，是不希望有的，它与地层电导率无关，必须通过仪器电路予以抑制。

趋肤效应：

接收线圈信号来自地层中无数个单元环，这些地层单元环相互作用，使测量结果比应得

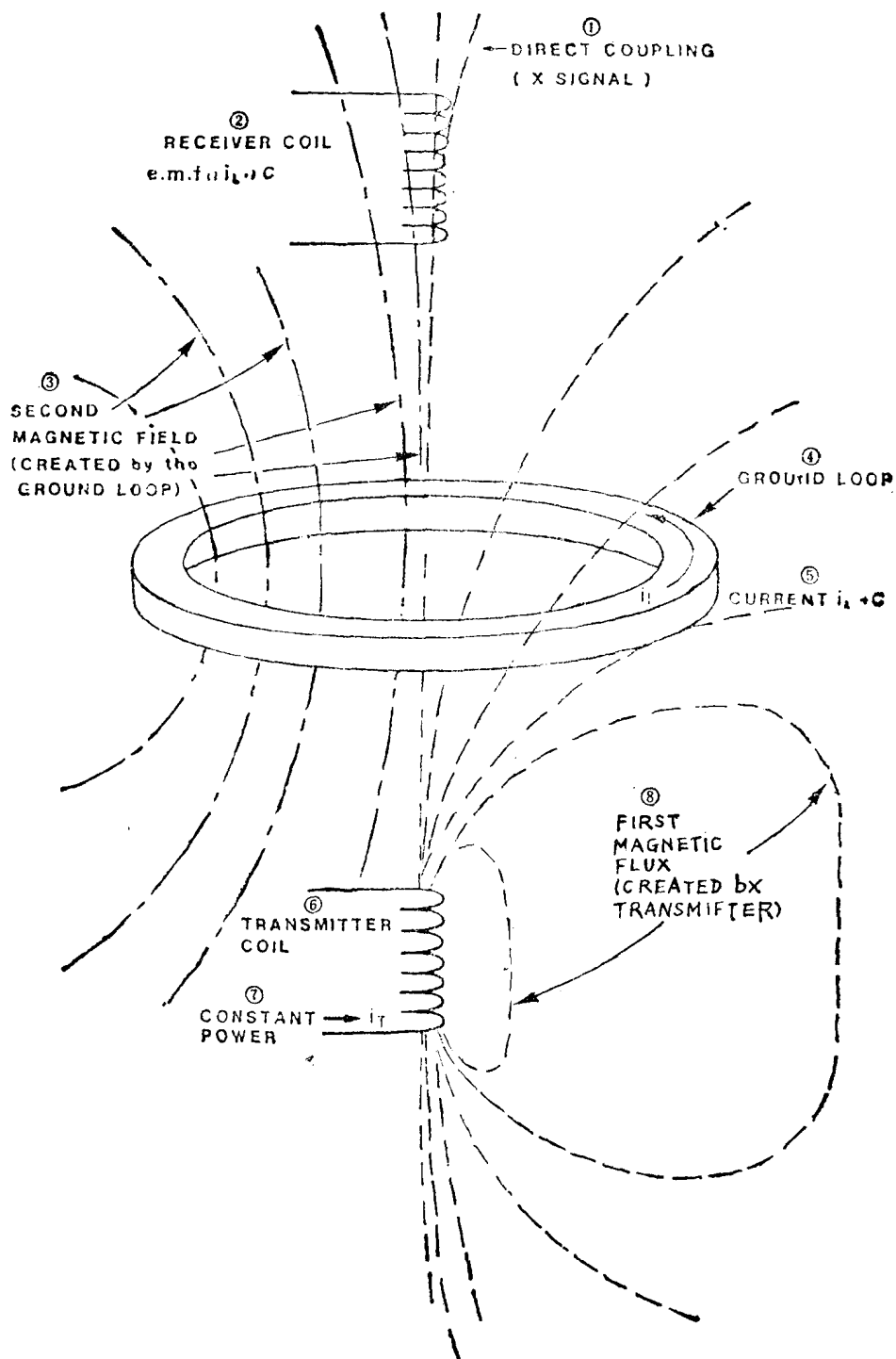


图7 感应原理

- ①直接藕合（无用信号）；②接收线圈；③二次磁场（由地层单元环建立）；④地层单元环；
⑤电流 I_L ；⑥发射线圈；⑦恒功率；⑧一次磁场（由发射线圈建立）

值偏小。该效应通称“趋肤效应”。下井仪器不做该项校正,而是由CSU人为地提高下井仪器的电导率读数,给予合适的趋肤效应校正。

反褶积:

为进一步减少邻层影响(围岩效应),CSU应用了一种加权平均法,它把邻层的影响考虑到测量值之中。这一方法称为“反褶积”。

测井系统最后输出的电导率值经过简单地变换后,便成为电阻率值。

2.3 ILD: 基本框图

20千赫兹振荡器供给发射线圈恒定的交流电流。

接收线圈输出两种成分的信号:一个是正比于地层电导率的“R”信号,即有用信号;另一个是发射器—接收器直接耦合产生的“X”信号,即无用信号。后者是不希望有的。它较有用信号大得多。

有用信号与无用信号有不同的相位,利用相位差可大大的减小无用信号。

由于下井仪器线圈系的不完善也产生一种不希望有的信号,称为“线圈系误差”信号。

对“线圈系误差”进行补偿,将大大减弱因线圈系不完善而产生的寄生信号。

然后接收信号被放大。

“X”信号与“R”信号分离后送“变感器”,“变感器”输出一个——“X”信号,送至放大器输入端。该放大器就只有微弱的无用信号输出。变感器在消除无用信号方面非常重要,没有它,很强的无用信号将会使放大器饱和。

相敏检波电路(PSD)作进一步的选择,输出正比于有用成分的直流信号,压低残存的无用信号。

直流信号沿6号缆芯送至地面,并以幻路中的1号和4号缆芯构成回路。

在CSU中,该信号在下井仪器接口装置(TIU)中由IEM部件进行滤波,然后送至通用电子单元(GEU)再次滤波、放大,经多路开关进入模-数转换器,将信号以数字形式通过单总线送入中央处理机(CPU)。

中央处理机在软件控制下处理信息,把测井结果输出到胶片和磁带。

下井仪器电源装置(TPU)将电源经TIU和IEM送至下井仪器的电子线路短节和继电器。

图8为深感应测井仪基本框图

2.4 SFL/SP: 测量原理

在均匀介质中,由供电电极发出的电流是径向流动,等位面呈球形。

在泥浆电阻率不同于地层电阻率的井内,电流流动的图型受到畸变。

仪器常数K只有在等位面呈球形的前提下才能视为不变的常数。因此,必须防止测量电流沿泥浆柱分流而不进入地层。

聚焦电流(屏蔽电流)由电极A₀送出而返回至A₁,该屏蔽电流迫使测量电流进入地层。屏蔽电流的强弱由仪器调节,以保持球面B和球面C之间的电位差为2.5mV。

为进一步加强等位面呈球形形状,利用第二个监视回路依靠I₀的变化,保持V_{M2}和V_{M1}为相同电位。

可以求得

$$C = \frac{I_0}{K V_{ref}}$$

式中 C——地层电导率;

I₀——测量电流;

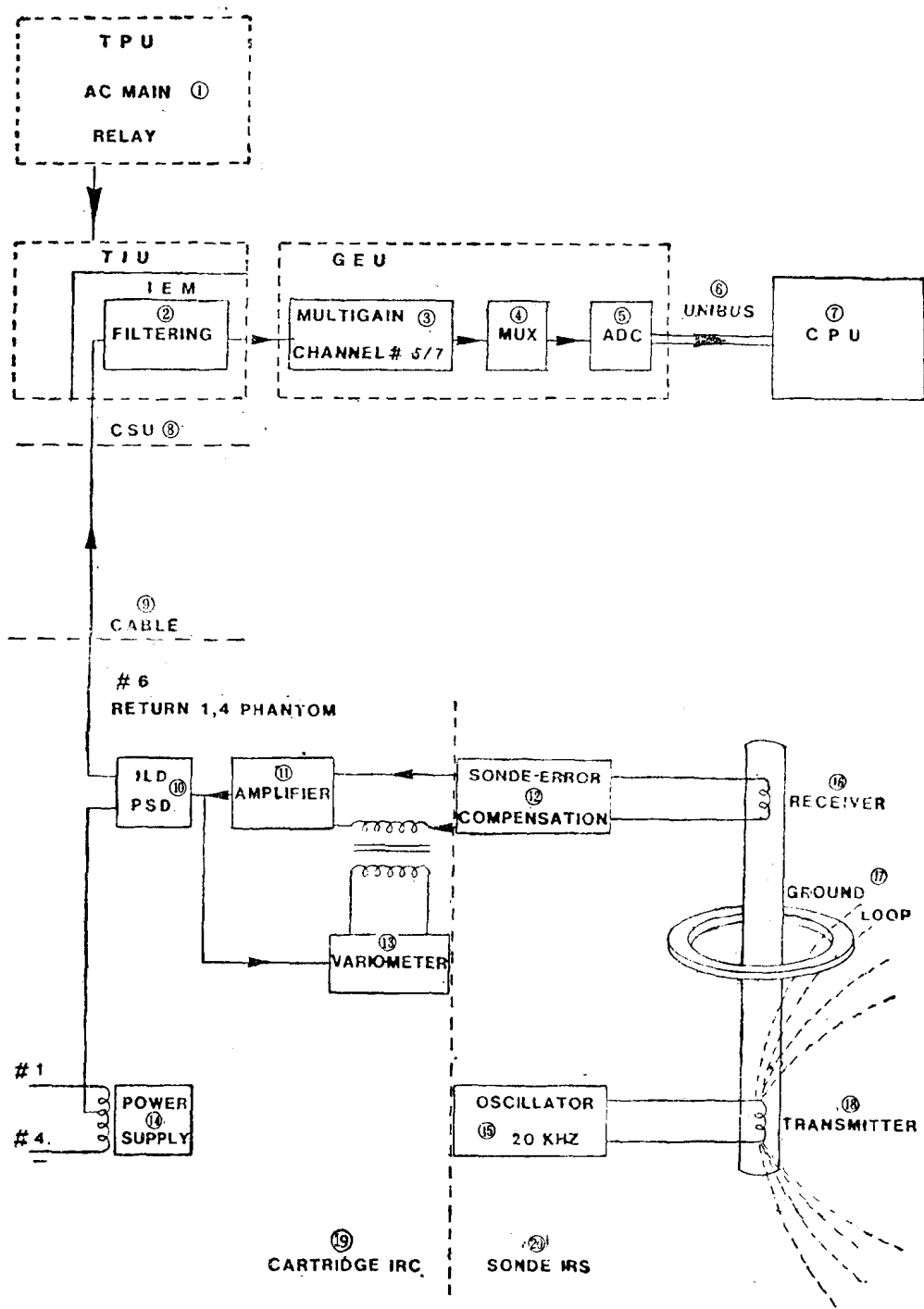


图8 深感应测井仪基本框图

①下井仪器电源；②滤波器；③增益放大；④多路开关；⑤模-数转换器；⑥单总线；⑦中央处理机；⑧CSU 数控仪；⑨电缆；⑩相敏检波器；⑪放大器；⑫线圈系误差补偿；⑬变感器；⑭电源；⑮20 千赫兹振荡器；⑯接收线圈；⑰地层单元环；⑱发射线圈；⑲下井仪器电子线路短节 (IRC)；⑳下井仪器线圈系 (IRS)

V_{ref} ——参考电压, 为 25mV;

K——仪器常数, 对 SFL-E 型仪器 $K=2.13$ 。

图 9 为球形聚焦测井原理。

自然电位的直流电位直接由靠近下井仪器电极系底部的 SP 电极测得, 并沿 5* 缆芯送至地面。SP 的返回电极是一个埋入地下的鱼尾板状地面电极, 它与 CSU 测井电缆的 8* 缆芯相连接。

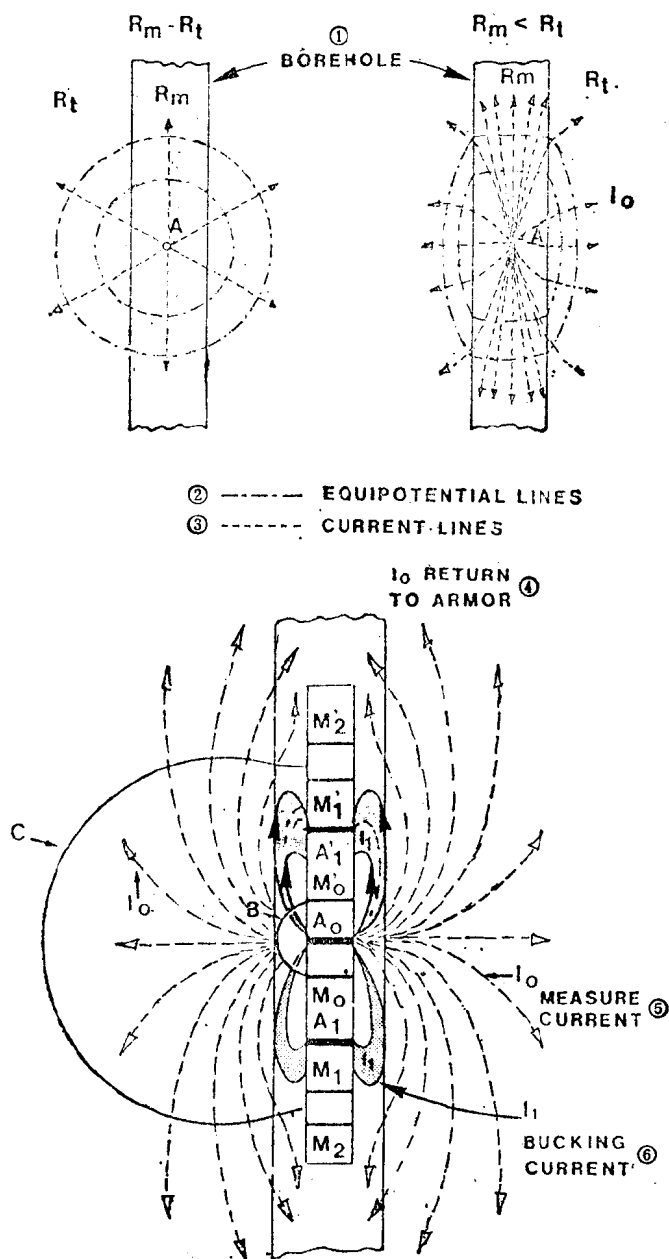


图9 球形聚焦测井原理

①井眼; ②等位线; ③电流线; ④返回到钢丝电缆外皮; ⑤测量电流; ⑥屏蔽电流

2.5 SFL/SP: 基本框图

图10为SFL/SP基本框图。

1kHz 的振荡器以稳定的信号向整个 SFL 系统供电。

屏蔽电流 I_1 和测量电流 I_0 均由 A. 发出。

I_1 电流回路调节 I_1 以保持外层 (定义为 M_1 和 M_2 之间的中点) 和内层 (定义为 M. 点) 的电位差为 2.5mV。

I_0 电流回路调节 I_0 以保持 M_1 和 M_2 有相同电位。

上述两个监视电路有助于保持等位面呈球形形状, 使仪器适应测井过程中条件的不断变化。

测量电流 I_0 经过放大及相敏检波后, 输出正比于 I_0 的直流电压, 同时压制其他寄生成分。

信号沿 2* 缆芯送至地面, 用幻路的 1* 和 4* 缆芯返回。

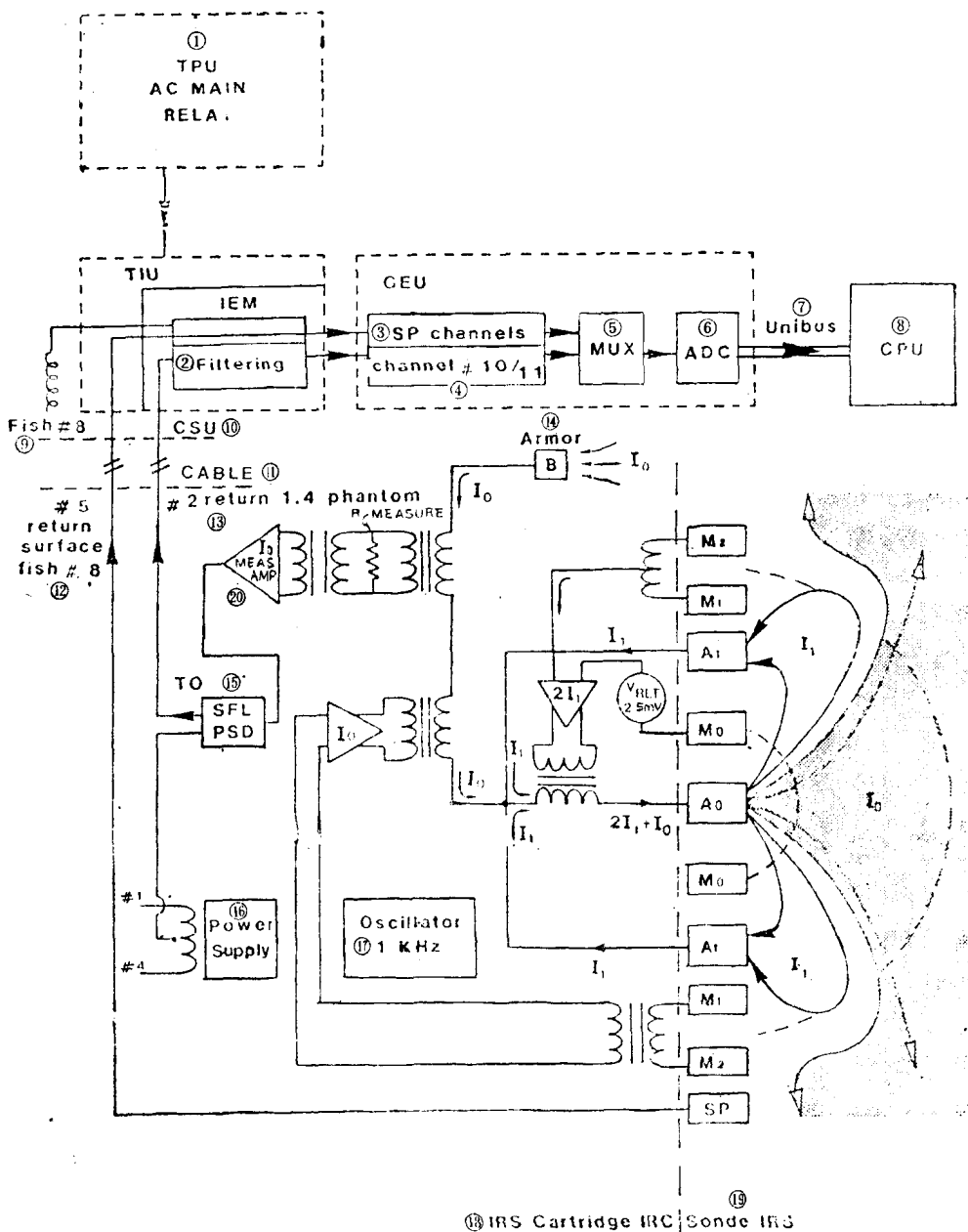
像深感应测井仪一样, 信号在 TIU 中由感应部件 IEM 进行滤波, 然后送至 GEU 再次滤波、放大、经多路开关进入模-数转换器, 将信号以数字形式通过单总线送至中央处理机。

中央处理机在软件控制下处理信息, 把测井结果输出到胶片和磁带。

TPU 经 TIU 和感应部件 IEM 给下井仪器的电子线路短节和继电器供电。

SP 信号由电极系上的 SP 电极拾取, 不经任何处理沿 5* 缆芯

SP 信号通过 IEM 部件而不作任何处理, 然后送至 GEU 的 SP 道, 经放大、滤波、多路开关到模-数转换器, 以数字形式由中央处理机接收。中央处理机不作任何专门计算而把结果输出到胶片和磁带。



①下井仪器电源;②滤波;③SP道;④0*/11*道;⑤多路开关;⑥模数转换;⑦单总线;⑧中央处理机;⑨地面
接地电极;⑩数控仪;⑪电缆;⑫5*缆芯返回到地面电极;⑬2*缆芯返回到幻路1*、4*缆芯;⑭电缆钢丝外皮;⑮SFL相
敏检波器;⑯电源;⑰1kHz振荡器;⑱电子线路短节IRC;⑲电极系IRS;⑳L。测量放大器