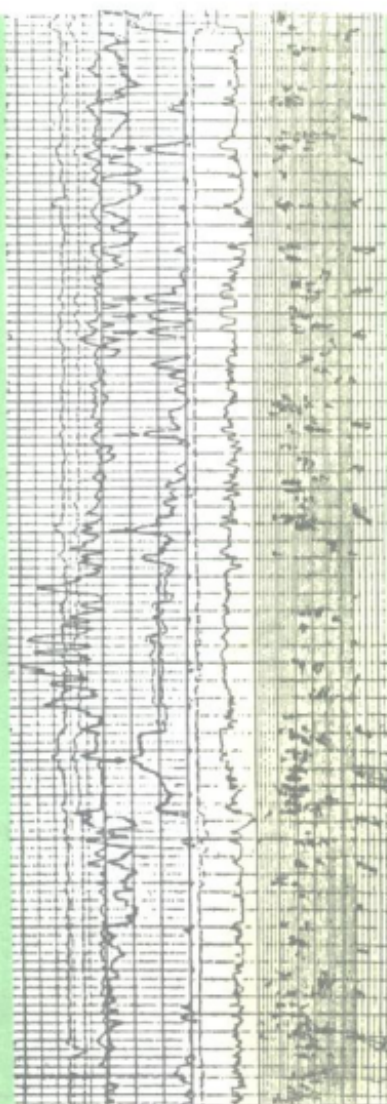


测井培训丛书

自然伽马与 自然伽马能谱测井

石油工业出版社





数据加载失败，请稍后重试！



200353241

32871

测 井 培 训 丛 书

自然伽马与自然伽马能谱测井

程宗华 张作信 郑思蕴 编译

郑思蕴 校 章兆琪 审



00284677



SY77/22

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是《测井培训丛书》中的一种。书中介绍了自然伽马和自然伽马能谱测井的测量原理及其物理基础,对自然伽马(SGT)和自然伽马能谱(NGT)仪器、技术指标、操作、维修和刻度也做了较详细的介绍,此外还介绍了测井质量控制和资料解释。本书不仅是一本测井操作、维修技术人员的培训教材,也是测井技术人员及大专院校有关师生的参考书。

• • •

本书的第一章的第一节~第三节由程宗华编译;第四节~第六节及第二章的第一节由张作信编译;第二章的第二节~第四节由郑思蕴编译。全书由章兆琪审。

测 井 培 训 丛 书

自然伽马与自然伽马能谱测井

程宗华 张作信 郑思蕴 编译
郑思蕴 校 章兆琪 审

•

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4 $\frac{1}{2}$ 印张104千字 印1—2,500
1986年7月北京第1版 1986年7月北京第1次印刷
书号:15037·2673 定价:0.89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CSO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
微球形聚焦测井
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
电缆通信系统
核测井仪器模块
重复式电缆地层测试器
打捞技术

《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	(1)
第一节 测量介绍	(1)
1.1. 仪器原理介绍	(1)
1.2. 基本测量	(2)
1.3. 自然伽马 (SGT) 测量——硬件介绍	(3)
1.4. 自然伽马能谱 (NGT) 测量——硬件介绍	(8)
第二节 仪器说明及技术指标	(15)
2.1. SGT 仪器说明	(15)
2.2. NGT 仪器说明	(16)
第三节 仪器的刻度与准备	(16)
3.1. NGT 标准刻度	(16)
3.2. NGT 现场刻度	(18)
3.3. SGT 刻度	(18)
第四节 操作须知	(19)
4.1. SGT 操作须知	(19)
4.2. NGT 操作须知	(19)
4.3. 安全	(20)
第五节 测井质量控制	(20)
5.1. 测井曲线显示实例	(20)
5.2. NGT 测井曲线的质量控制	(24)
5.3. SGT 显示	(24)
5.4. SGT 测井曲线的质量控制	(24)
第六节 维修	(25)
6.1. SGT 的维修	(25)
6.2. NGT 的维修	(25)
第二章	(27)
第一节 测量的物理基础	(27)
1.1. 物理基础	(27)
1.2. 伽马射线的性质	(30)
1.3. 自然伽马测井的测量原理	(35)
1.4. 闪烁探测器的特性	(36)
1.5. 统计变化	(38)
第二节 仪器方框图	(41)
第三节 查找故障须知	(47)
3.1. SGT 故障排除	(47)

3.2. NGT 故障排除	(49)
第四节 资料解释	(50)
4.1. 典型的测井实例	(50)
4.2. 基本计算	(53)
4.3. 岩石中的放射性元素	(55)
4.4. 自然伽马能谱测井 (NGT) 的应用	(59)
4.5. 环境校正	(60)
4.6. CSU 和 FLIC (现场测井解释中心) 成果	(63)
参考文献	(65)

第 一 章

第一节 测量介绍

1.1 仪器原理介绍

自然伽马测井 (SGT) 和自然伽马能谱测井 (NGT) 都是探测地层辐射的自然伽马射线的测井仪器。

伽马射线是一种高能电磁波。它是由某些元素自然放射出来的。在地层中遇到的全部伽马辐射几乎都是由铀族和钍族放射性元素产生的。

对于每种元素而言,伽马射线的能量和数量是不相同的。钾 (K-40) 辐射 1.46MeV 的单能伽马射线。铀族和钍族元素发射了多种能量的伽马射线 (图1-1)。

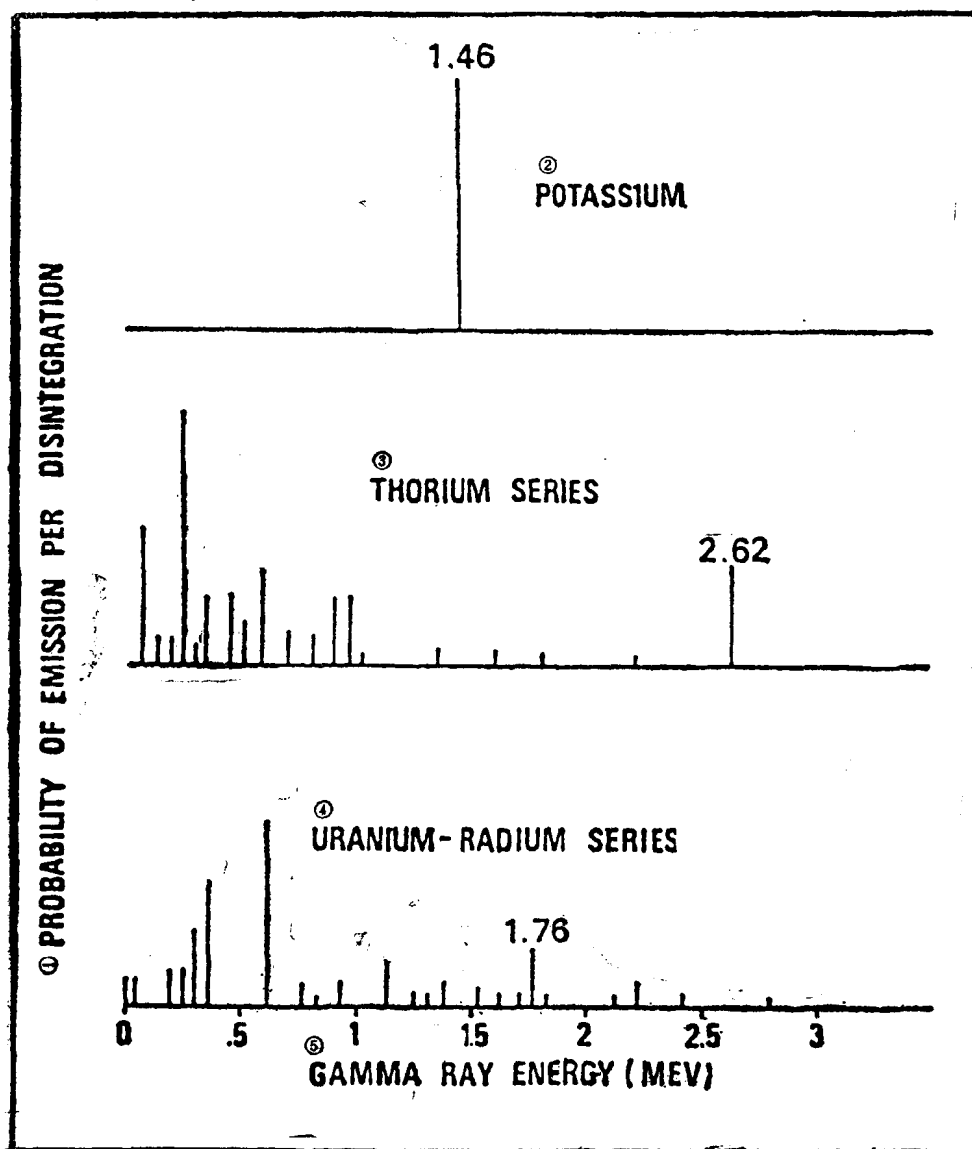


图1-1

①每次裂变的辐射几率; ②钾; ③钍族; ④铀-镭族; ⑤伽马射线能量 (MeV)

伽马射线通过地层时，与地层元素的原子相继产生康普顿散射，而每次散射都要损失能量；最后以光电效应的形式将伽马射线吸收。（在光电效应中，低能伽马射线被地层元素的原子全部吸收，并发射出电子）。

吸收率随地层密度的不同而改变。在单位体积中含有等量放射性物质而密度不相同的两个地层，在测井图上将显示出不同的放射性值，即密度较小的地层显示较高的放射性数值。换句话说，在经过井眼、套管等校正之后，伽马射线测井响应正比于地层中放射性物质的重量浓度（假定放射性物质的强度〈以每克伽马通量为单位〉不变；并假定密度变化是由于孔隙度和岩性的变化引起的，而且在地层中没有原子序数大的物质出现，因为这种元素将会改变吸收特性）。

伽马射线测井是测量地层的天然放射性。因此，在确定并评价放射性矿物方面（例如钾碱或铀矿），它是很有用的。在沉积地层中，该测井方法通常反映地层的泥质含量。这是因为放射性元素趋向于聚集在粘土和泥岩中。纯地层通常含有少量放射性的杂质。放射性杂质可能是火山灰，花岗岩冲积物或者是地层水中已溶解的钾盐。

SGT 和 NGT 给出伽马射线测井图作为最后资料。但是对SGT来说，获取伽马射线测井图的方法非常简单；而对NGT则稍微复杂一些。从另一方面来说，NGT测井在地质方面包含了额外的资料，这种资料SGT测井是不能直接获取的。

1.2 基本测量

SGT 和 NGT 采用的基本测量是相同的。它们采用了闪烁型探测器。

这种探测器有三个基本部分：NaI（TL）晶体，光电倍增管和电子学线路。

1.2.1 NaI（TL）晶体

晶体是这样一种部件，它将伽马射线在穿过介质的路径上所消耗的部分能量转变成光，然后通过光耦合，光电倍增管可接收晶体发射的光脉冲。

能量为200keV或者更小的自然伽马射线，所佔的百分比很大。在这样低的能量范围，光电效应是控制光产额的主要方式。

1.2.2 光电倍增管

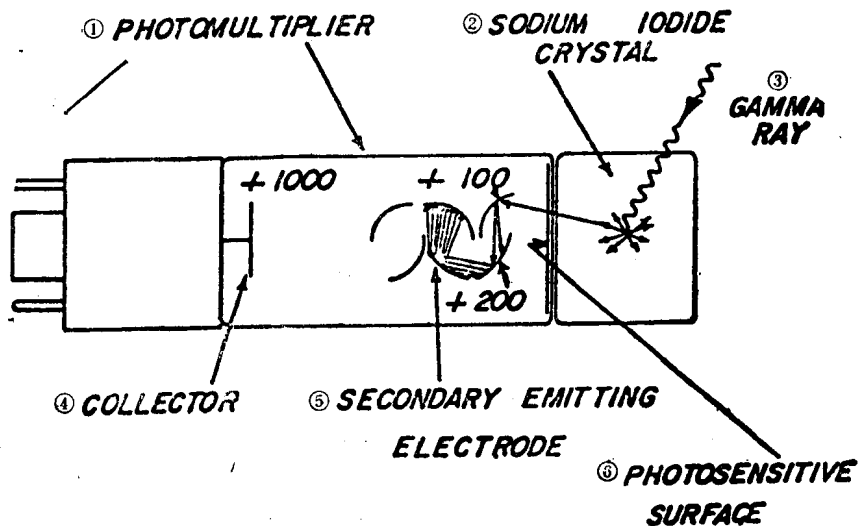


图1-2

- ①光电倍增管；②碘化钠晶体；③伽马射线；④收集极（阳极）；⑤二次发射极（打拿极）；
⑥ 光电灵敏表面（光阴极）

因为晶体是透明的，经过一种光学耦合，晶体所产生的光投射到灵敏的光电倍增管上。这种光引起光阴极发射出一些电子。在光电倍增管中，第一打拿极相对于光阴极有一个正电位。所以，这些电子被第一打拿极吸引。这便产生了二次发射现象，更多的电子由这个打拿极表面发射出来。第二打拿极具有更高的正电位。因此，这些电子被吸收并再次引起更多的电子发射。光电倍增管的全部打拿极都重复上述过程，形成了大约200000倍或者更高的电流倍增。在最后一个电极即阳极上，将出现一个负脉冲（图1-2）。

光电倍增管与晶体光学耦合并屏蔽了周围的光线。当光电倍增管两端加上低电压时，只有高能伽马射线产生输出脉冲。当电压增高时，可以达到这样一个点：在该点几乎全部伽马射线与晶体的相互作用都产生输出脉冲。在稍高于坪的起始点电压时发生这种现象。在比该起始点更高的电压下，脉冲数基本上不再增加；但是，如果电压增高到足以使暗电流被放大，将产生额外的脉冲输出（图1-3）。

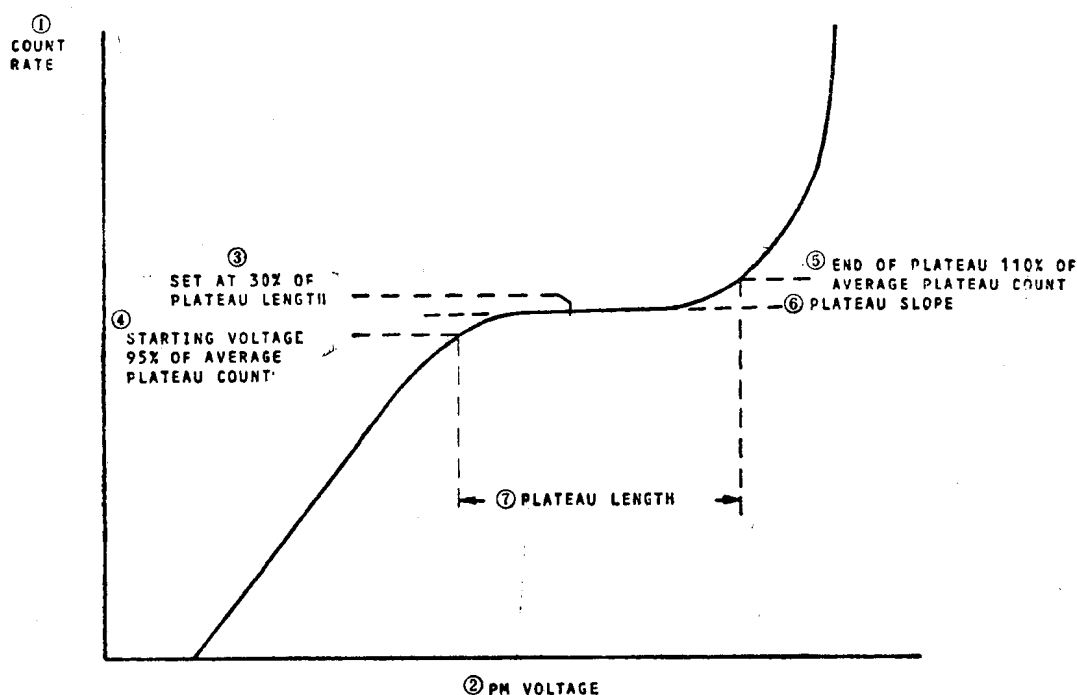


图1-3

① 计数率；② 光电倍增管电压；③ 调节到坪宽度的30%处；④ 起始电压对应于平均计数率的95%；⑤ 坪的端点对应于平均坪计数率的110%；⑥ 坪斜率；⑦ 坪宽度

为了摆脱这种不希望有的脉冲，光电倍增管的电压被调节在坪的中部。在此情况下，输出脉冲正比于初始伽马射线的能量，然后由井下的电子学电路处理。

1.3 自然伽马 (SGT) 测量——硬件介绍

SGT仪器的目的在于测量井下探测的伽马射线的数值。怎样进行这种测量呢？

1.3.1 井下



①NaI(TL)晶体; ②光电倍增管; ③TB1, TB2; ④信号放大器; ⑤鉴别器; ⑥除法器($\div 2$); ⑦单稳态电路; ⑧电缆驱动器; ⑨上接头; ⑩尾锥; ⑪下接头; ⑫电缆; ⑬微分器; ⑭放大器自动偏置电路; ⑮比较器; ⑯单稳态电路; ⑰逻辑系统; ⑱中央处理器; ⑲GEU计数器0; ⑳SGT闪烁自然伽马; ㉑核测井模块; ㉒CSU

光电倍增管输出端的负脉冲首先被送到一个倒相前置放大器(图1-4a)。其后是另一级放大器。信号再由放大器送到甄别器。甄别器仅选择那些超过一定幅度的脉冲信号。一级除2电路(高灵敏度探测器用两级)使计数率降低。脉冲负沿触发一个单稳态电路,以便产生一个 $30\mu\text{s}$ 宽的正脉冲。在下接头引线柱13与14之间,电缆驱动器输出端得到一个 $30\mu\text{s}$ 宽15伏的脉冲,并经电缆送到地面。尾锥连接器组合仪的引线柱14接缆芯7,引线柱13接缆芯10(外皮)。

1.3.2 地面

目前NSM模块是核测井的标准地面设备。对于SGT来说,仅使用了该设备的一小部分。

从井下经缆芯7到达地面的信号送到NSM-003板。它的第一级是一个微分器。经过成形之后,微分器的输出送到一个带有自动偏置电路的放大器。自动偏置电路仅选择超过门槛电平的信号。然后,比较器将脉冲放大到标准电平(5伏峰-峰),以便推动两个单稳态电路。按SGT的工作方式,该电路在脉冲正沿触发。

然后,伽马信号进入NSM-005板。在该板中,逻辑系统将信号直接送到GEU计数器0处理,并使其输出信号能为中央处理机CPU接受。图1-4a是SGT测量——电子线路。

1.3.3 自然伽马 (SGT) 补偿中子 (CNT) 组合

如果自然伽马 (SGT) 与补偿中子 (CNT) 组合测井,其过程是不相同的(图1-5)。

在井下,SGT下接头引线柱13和14的信号被送到CNT仪器。接口电路对输入CNT电路的信号进行变换。存储器用以保持伽马信号,一直到时钟脉冲驱动一个程序机构进行开门,允许伽马存储器在CNT遥测装置中注入一个脉冲(该装置带有近、远和同步脉冲)。单稳态电路后面接有电缆驱动器,它将信号经CNT下接头引出线13和14跨接到缆芯10和7(图1-4b)。

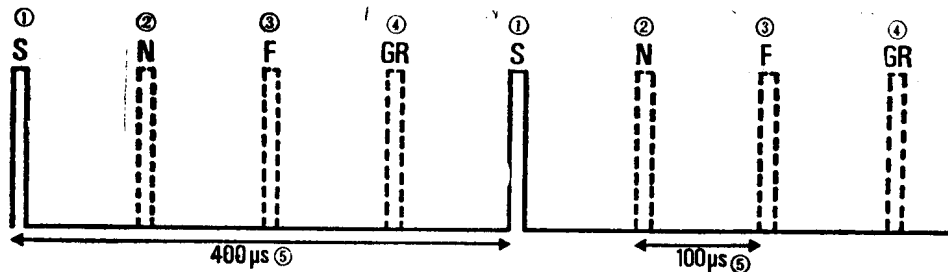


图1-4b

①同步; ②近; ③远; ④伽马射线

在地面,这个过程稍不同于NSM-005板。同步、近、远和伽马脉冲之间的分离,由一个斜坡发生器来完成。同步脉冲能使斜坡幅度进行复位,该幅度与产生逻辑系统输入脉冲的四

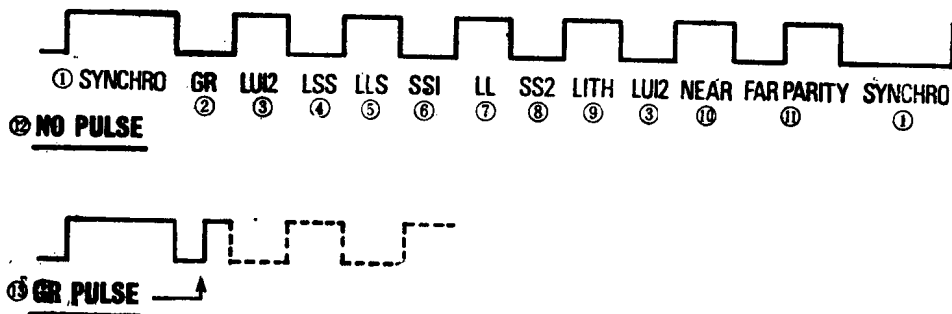


图1-4c

①同步; ②伽马; ③LDT长间距窗口; ④长源距声波; ⑤浅侧向; ⑥LDT短间距窗口1; ⑦侧向; ⑧LDT短间距窗口2; ⑨岩性; ⑩近; ⑪远; ⑫奇偶校验; ⑬伽马脉冲; ⑭无脉冲信号

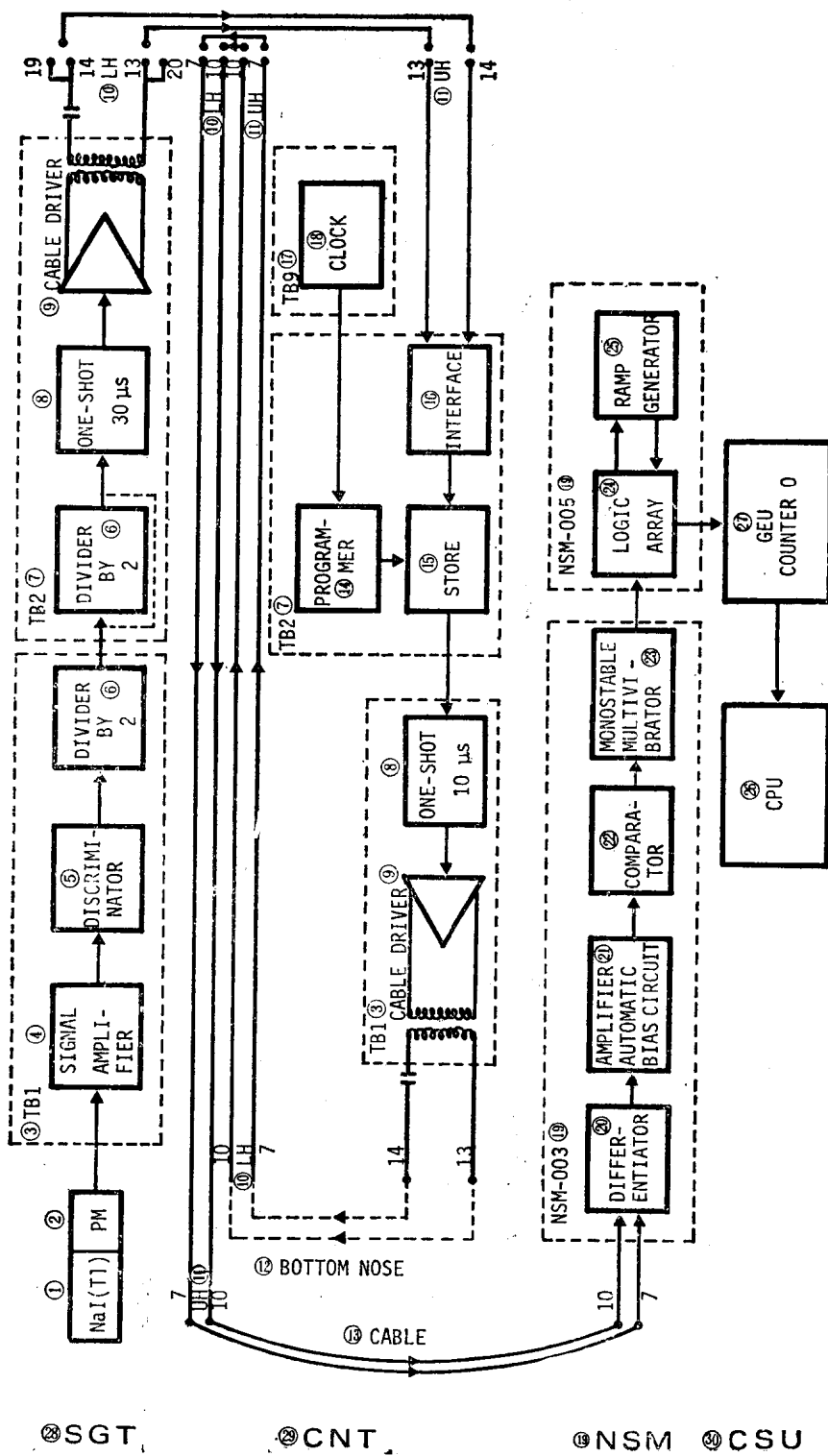


图1-5 自然伽马能谱补偿中子组合伽马电路图

① NaI(TL) 晶体; ② 光电倍增管; ③ TB1; ④ 信号放大器; ⑤ 鉴别器; ⑥ 除法器 (+2); ⑦ TB2; ⑧ 单稳态 30 μs; ⑨ 电缆驱动器; ⑩ 下接头; ⑪ 上接头; ⑫ 尾锥; ⑬ 电流; ⑭ 程序装置; ⑮ 存储器; ⑯ 接口装置; ⑰ TB9; ⑱ 时钟; ⑲ NSM-003; ⑳ 微分器; ㉑ 放大器自动偏置电路; ㉒ 比较器; ㉓ 单稳态; ㉔ 逻辑系统; ㉕ 斜坡发生器; ㉖ 通用电子线路单元 (GEU) 计数器0; ㉗ 闪烁自然伽马; ㉘ 补偿器; ㉙ 数字测井系统

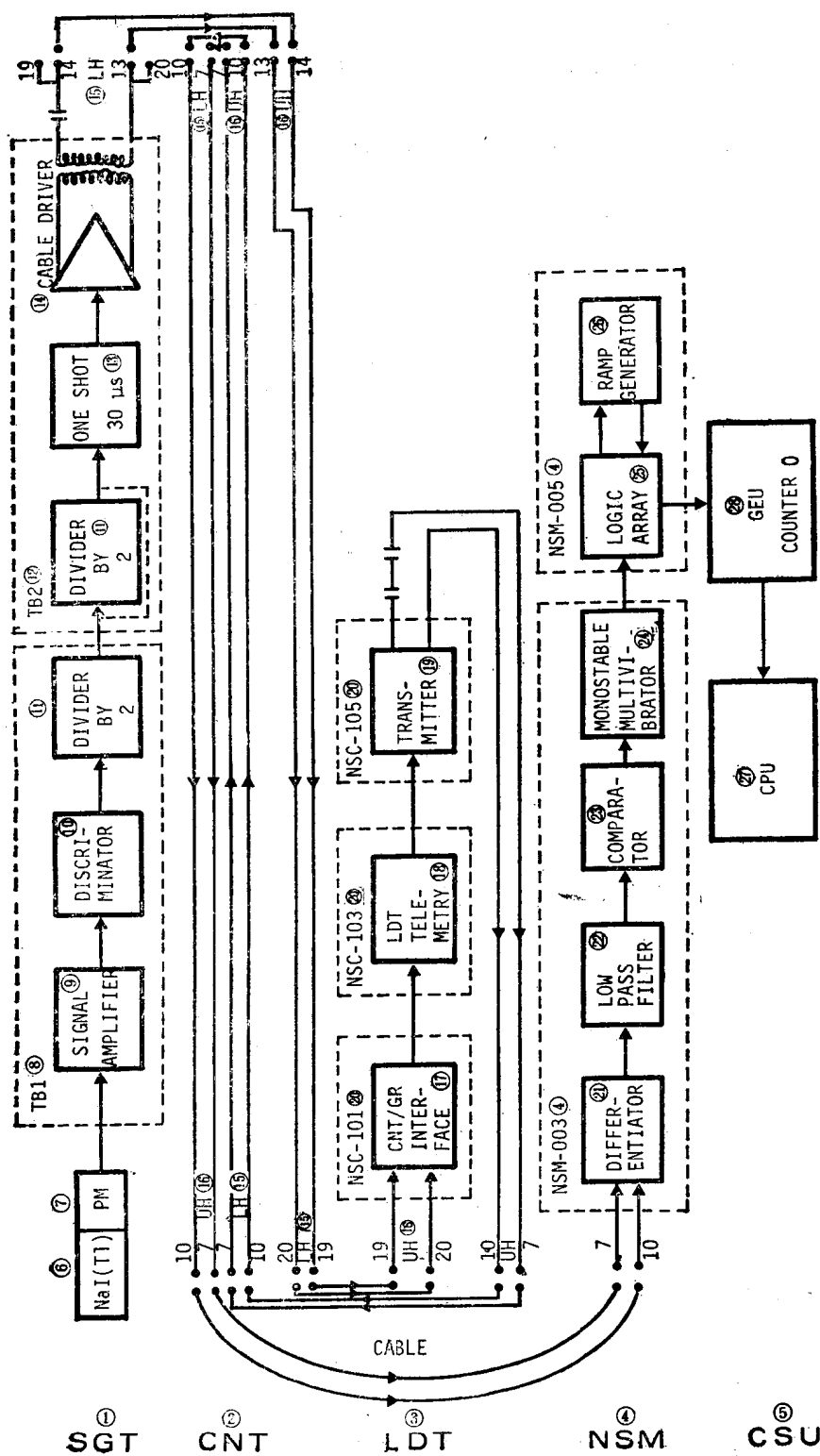


图1-6 自然伽马-补偿中子-岩性密度组合-伽马电路图

①闪烁自然伽马；②补偿中子；③岩性密度；④核测井组件；⑤CSU；⑥NaI(Tl)晶体；⑦光电倍增管；⑧TB1；⑨信号放大器；⑩鉴别器；⑪除法器(+2)；⑫TB2；⑬单稳态30μs；⑭电缆驱动器；⑮下接头；⑯上接头；⑰补偿中子/伽马接口；⑱岩性密度探测器；⑲发送器；⑳NSC103，NSC105；㉑微分器；㉒低通滤波器；㉓比较器；㉔单稳态；㉕逻辑系统；㉖斜坡发生器；㉗中央处理机；㉘GEU计数器0

个电压值相比较，逻辑系统能够区分伽马、近、远脉冲。伽马脉冲被送到GEU计数器0。

如果岩性密度 (LDT) 也加入仪器组合系列, 其电子学处理又有所不同 (图1-6)。在井下, SGT下接头引线柱13和14接收的伽马信号被送到CNT下接头引线20和19; 这组引线是岩性密度线路可以利用的。

在送到电缆芯7和10之前, 遥测装置的信号先通过发送器 (NSC 105 板) 和一级脉冲功率放大器。

在每个遥测通道之间, NSM-005 板的斜波发生器产生了幅度不变的斜波。同步代码占有两个间隔并且其斜波幅度也大一倍。斜波复位信号是用以产生通道计数器增量。该计数器由每一个同步信号复位。逻辑系统将伽马信号放置在第1道并将其直接送到GEU计数器0。

这种过程与上述SGT-CNT-LDT组合相同。为了操作这种组合测井,必须用NSM的变更型2代替 NSM-005板的逻辑系统以及SGC的变更型26;除去通常的引线柱13和14之外,还将伽马输出脉冲连接到下接头引线柱19和20。

1.4.1 一般原理

自然伽马能谱 (NGT) 仪器更为复杂一些。除去标准伽马信号之外, 它还提供了三种测量。这些测量用于评价地层的三种天然放射性: 钍 232 (Th^{232})、铀 238 (U^{238}) 和 钾 40 (K^{40})。

Th-232=12ppm, U-238=4ppm, K-(39+40)=2%

$$GR = \alpha \text{ Th} + \beta \text{ U} + \gamma \text{ K}$$

图 1-7

通常是采用测量Th-232和U-238的子系产物来探测它们的含量，并且在假定各种成分永久稳定的条件下，计算它们的含量（图1-7）。

(1)高能能谱。在此区域的三个能窗口 W_3 、 W_4 、 W_5 探测三个主要的峰。

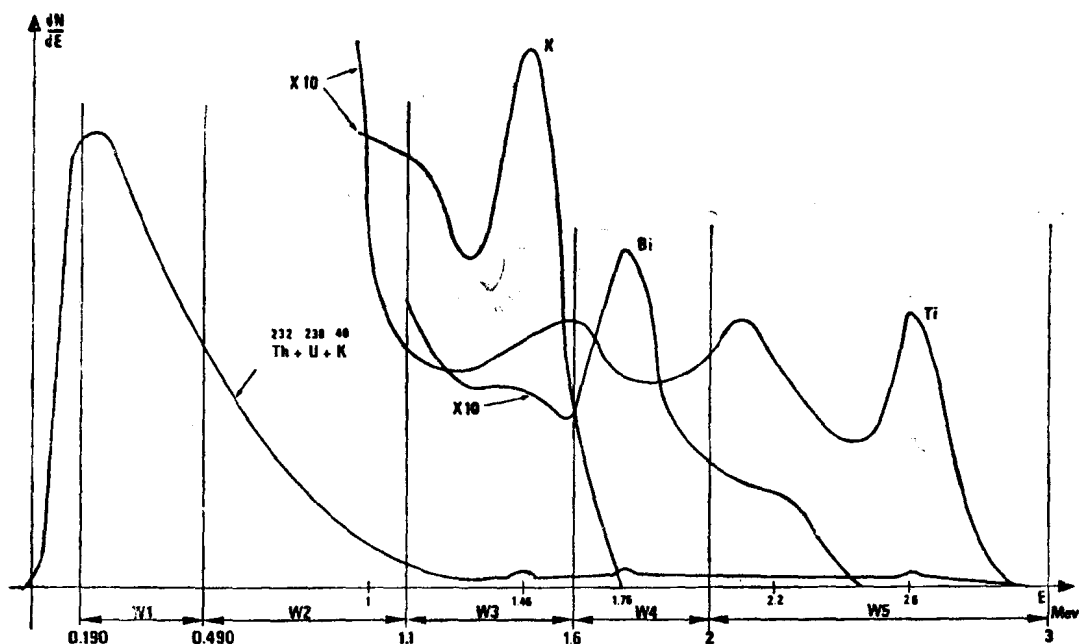


图1-8

(2)低能能谱。该区域包含了在地层中散射后的主要伽马射线。它们由两个能窗口 W_1 和 W_2 来探测。

由于闪烁计数器探测效率低，按计数率计算，高能部分仅占能谱的10%。因此，为了减小统计起伏和提高仪器测井速度（900英尺/小时）[●]，必须使用低能区域计算钍、铀、钾含量。

可以推导出下列公式：

$$\text{Th-232} = a_1 W_1 + a_2 W_2 + a_3 W_3 + a_4 W_4 + a_5 W_5$$

$$\text{U-238} = b_1 W_1 + b_2 W_2 + b_3 W_3 + b_4 W_4 + b_5 W_5$$

$$\text{K-40} = c_1 W_1 + c_2 W_2 + c_3 W_3 + c_4 W_4 + c_5 W_5$$

$$\text{GR} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5$$

1.4.2 测量技术

为了探测伽马射线，我们使用了闪烁探测器。它是由与光电倍增管光学耦合的NaI晶体构成的。当伽马射线射入晶体时，可能产生几种相互作用。其结果是一次短暂的闪光。这种闪光被光电倍增管接收。在光电倍增管输出端，我们得到一个持续期为250ns的电脉冲，它的幅度与晶体中吸收的伽马射线能量成正比。

能窗使用高速比较器来完成。比较器的参考电压保持不变。与各能窗计数相应的输出量被送到地面。处理这些数据，给出Th、U、K和GR值。

可是晶体和光电倍增管对温度十分灵敏。当温度升高时晶体的增益下降；并且，光电倍

● 1英尺=0.3048米；
1英寸=0.0254米——译者注。

增管的特性更是难以预测。因为能窗参考电压不变，温度变化所引起的脉冲幅度变化将等效于能谱的漂移。如果这样的话，各种伽马射线将归入错误的能窗。

用调整高压电源的方法来控制光电倍增管的输出脉冲幅度是可能的。这种想法是改变高压，以便使能谱相对于它的能窗保持正确的位置。为了做到这一点，我们需要一个伽马射线的能量参考。这种能量参考由一个小的镅-241 (50 微居里) 源提供。它发射的伽马射线能量为 60keV。这个源紧靠着晶体放置，它产生了没有散射的清晰的单峰。这个峰不受地层能谱的影响。

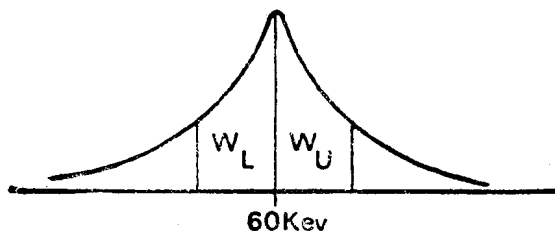


图1-9

我们在 60keV 两旁对称地设置了两个窗口，将镅峰作为参考标准。这两个窗口称为 W_L 和 W_U (图1-9)。

如果满足以下条件，全谱将处于正确位置：

$$\frac{W_L - W_U}{W_L + W_U} = 0$$

为了满足这一条件，在井下仪器中，光电倍增管的高压电源不断进行调节。

1.4.3 井下

光电倍增管的输出是一个负脉冲，其幅度与伽马射线能量成正比，时间常数为 250ns。这种脉冲被送入 NGC-009 的核子放大器。放大器有两个输出：

- (1) 第一个输出送入能谱流程，由能谱的逻辑系统处理 (NGC-004 板)；
- (2) 60keV 的参考源产生第二路输出，它被用于调整高压电源。

第二路输出脉冲的平均幅度为 0.5V。因此，来自地层能谱的脉冲幅度比它要大得多 (最大值 5V)。这两种输出脉冲的上升时间为 1μs，下降时间为 3μs。

1) 反馈

反馈逻辑电路 (NGC-006 板) 接收了平均幅度为 0.5V 的脉冲 (5V 的脉冲已被甄别)。两个比较器分别探测高于和低于 0.5V 的两个电平。两个比较器的输出送到一级双稳态电路。这个双稳态电路的差分输出正比于 $W_U - W_L$ 。它就是误差信号。

从一个电平到另一电平的转变值送到遥测系统，以便送到地面 (稳定器)。在正常情况下，稳定器基本上保持不变 (统计起伏)。

误差信号被送入积分器 (NGC-005 板)，为了平滑地控制高压电源，积分器具有大的时间常数。为了调整振荡器、变压器和直流电压倍加器的输出电压，积分后的误差信号被送到高压电源 NGC-007 板。用这种方法，一定能量的伽马射线在光电倍增管输出端产生一个幅度总是不变的脉冲输出。

2) 能谱单元 (NGC-004 板)

来自核放大器的能谱信号送到六个电压比较器，比较器的比较电压分别为 $V_{c0}, V_{c1}, \dots, V_{c4}$ ；第六个低于 V_{c0} ，这一点将在以后解释 (禁止器电路)。这样一来，任何伽马脉冲都与一个二进制数值联系起来。

这些二进制数送往逻辑单元：该逻辑单元将确定这些伽马射线属于哪个能窗：

$$W_1 = V_{c0}$$

$$W_2 = V_{c0} + V_{c1}$$