

天然气勘探情报调研系列之二

物探和测井方法在天然气勘探 中的应用

中国石油天然气总公司情报研究所

一九八九年五月

目 录

第一章 地球物理方法在天然气勘探中的应用	(1)
一、地震法	(1)
(一) 天然气藏上地震参数的某些特点	(2)
(二) 气藏勘探中的实用地震法	(3)
二、非地震物探方法	(13)
(一) 重力法	(13)
(二) 磁法	(14)
(三) 电法	(16)
(四) 放射性法	(19)
(五) 综合方法	(20)
三、结语	(23)
附件: 加拿大阿尔伯达盆地天然气田勘探实例	(24)
第二章 天然气勘探的测井方法	(33)
一、天然气储集层的地质特点	(33)
二、天然气勘探测井的特点	(35)
1. 天然气勘探测井技术的特点	(35)
2. 天然气勘探的测井系列选择	(36)
三、天然气储集层的测井评价	(37)
1. 低孔、低渗致密砂岩气层测井评价	(37)
2. 裂缝性碳酸盐岩储气层的测井评价	(45)
四、测井技术在气田勘探或寻找有利含气区中的作用	(48)
1. 应用测井资料研究生物礁特征	(49)
2. 应用测井资料寻找裂缝发育带	(52)
3. 深探测测井技术寻找有利含气区	(59)
4. 气田勘探中的多井测井评价	(61)
五、结论与建议	(66)
参考文献	(69)

第一章 地球物理方法在天然气勘探中的应用

至今，在世界范围内已发现了许多天然气藏，我国也把天然气勘探列为“七五”期间的重点攻关项目之一。随着世界技术进步，天然气勘探技术也不断发展。目前，在用于天然气勘探的物探方法中，地震法仍是最有效的方法。由于油、气常常伴生，并且在运移，蚀变中它们表现出相同的特征，引起相似的异常，有些方法难于区别它们。例如，一些非地震物探方法，虽然可以发现气藏或在已知气藏得到好的应用，但是难于判别油和气。由于这些方法在天然气勘探中已得到应用并取得良好的效果，因此我们也把它们做为天然气勘探的方法加以介绍。

一、地 震 法

早期是进行了大间距网络、低分辨率单次覆盖模拟地震勘探，这样仅辨别出较大的构造特征。随着技术的发展，采用了先进的地震技术，进行高分辨率多次覆盖地震工作，从而发现新的构造圈闭和区域断裂，产生详细的地层、岩性信息，提高勘探成功率。目前在天然气勘探中普遍采用了数字地震法，象三维地震、垂直地震剖面（VSP）等技术也得到了应用。数据处理手段不断完善，应用的处理技术有速度分析，动、静校正，子波处理，真振幅恢复，滤波、偏移、反演、层析成像、模拟等等。得到的成果图有：速度图、时

间—构造图、深度图、真振幅剖面图、相对振幅保持时间剖面图、相对振幅平面图、瞬时频率平面图、吸收系数平面图、声阻抗剖面图，以及含气砂岩等厚图等。在数据采集、处理、解释中广泛应用了微机、人机联作工作站等辅助设备。

由于天然气的密度小、易压缩，没有剪切模量，因此它相应具有特殊的地震参数。而在天然气勘探中主要是围绕着如何在地震信息中识别含气层，判断含气层的位置和分布范围以及气层的厚度等。

（一）天然气藏上地震参数的某些特征

由于天然气的特点，充气储层相对于充液岩石来说，其纵波反射具有下列特征：

1. 地震波速度异常

由于气体的可压性比液体大，因而纵波速度在充气岩中比充液的同类岩石中更小。

2. 振幅异常

振幅主要取决于不同岩性界面的反射系数。由于含气砂岩的波阻抗较小，在气砂—水砂（油砂或页岩）界面反射系数较高，而页岩—水砂，油砂—水砂，油砂—页岩界面的反射系数则小得多，因此含气砂岩的顶部和底部出现高振幅——强“亮点”。

3. 平点反射

由于气—液接触面是水平的，在其界面产生一个几乎平坦的反射。

4. 极性反转

从含水层到含气层的界面反射系数由正变到负，引起气藏边缘反射极性的变化。

5. 绕射

气藏边界的储集岩的顶部和底部反射系数的突变产生一种绕射现象。

6. 下陷

通过气层的传播时间相对于通过充有液体的同类岩石的传播时间增大而引起的气层下面的反射时间下陷。

7. 屏蔽区

气层上下任一界面反射系数高导致下行传播的能量偏小，使得深部反射变弱，因此气层下出现屏蔽区。

8. 低频

由于气体对高频信息的吸收系数较大，引起气藏下深部的反射波频率成分偏低。

以上几个特征是地震方法识别天然气藏的基本标志。由于石油与天然气的物理性质（如速度、密度等）的差异，产生的地震响应也有所不同，只要认真分析地震特征，还是能够辨别它们的。

（二）气藏勘探中的实用地震法

1. 波形分析

多年来，已认识到可以利用地震波形变化来直接检测天然气层，波形变化最明显的形式被称为“亮点”，其主要标志有振幅异常、速度异常、平界面反射、极性反转、绕射现象、反射时间下陷、频率降低、屏蔽现象等。这些标志也称为直接烃类显示（DHIs），其影响因素有储层深度、岩性、厚度以及源检一致性等。

国外在深度不大于2000米的砂页岩含气的背斜构造条件下已有大量成功的实例。下面举例说明这种方法的应用效果。

埃及尼罗河三角洲阿布马迪(Abu Madi)气田,其圈闭是地层型的,含气层是离散的砂岩透镜体而不是轮廓分明的连续储层组合。这些离散的砂岩储层在经过子波处理的声阻抗剖面上表现为不同横向范围的振幅异常。根据振幅异常确定井位,经钻井见气^[28]。

加拿大阿尔伯达图希尔斯地区科洛尼(Colony)气田,其圈闭即是地层型的,也是构造型的。在大约550米深度上,科洛尼组主要是厚约3米左右的席状砂岩与页岩的互层。1976年哈得孙湾油气有限公司在这个层位钻遇到约30米厚的河道砂岩(含大量天然气)。为了扩大该河道趋势带,根据地质解释成果打中了一些井,落空了一些井,于是以后就应用了地震方法。在通过该河道气井的一条地震剖面上展示了典型的亮点,其它几条地震剖面也在科洛尼组中出现亮点。对该区的研究表明:(1)为使每个局部地区的解释都有把握,必须在本区的一些井中获得建立研究地震响应背景的地震模型资料,而且要尽可能地获得研究天然气地震响应背景的地震模型资料;(2)负极性剖面清楚地表明了天然气层的厚度变化的影响效果,正极性剖面虽然也明显地表明了异常特性,但它们对天然气量的敏感性似乎不大。这个研究区的某些地区可以解释薄到1.5米的含气层的微小波形特征^[38]。

这种波形分析虽然能提高钻井成功率,但是其它一些地质现象(如薄煤层、低速层等)也能产生相似于含气层的波形变化。如上例,科洛尼组下面就存在这样的煤层。再如澳大利亚吉普斯兰盆地金海滩(Golden Beach)构造就同时存在引起高振幅亮点反射的气/水接触面和煤层,而当产气层的密度和速度接近于围岩的密度和速度时也就不会在气层出现亮点显示,因此需要综合考虑各种地

质、地球物理因素^[20]。

2. 瞬时频率和吸收系数

含气砂岩的反射通常具有低频的特点，同时地震波通过含气砂岩时能量衰减较快，具有较高的吸收系数，因此，这两项信息也是预测含气层范围的重要信息。

中国南海北部大陆架某含气构造为一秃顶的轴背斜，主要含气层为下第三系滨海相砂岩。从其瞬时频率图和吸收系数图可以看出，低频和高吸收系数异常与振幅异常的范围基本是吻合的，但是在A构造处频率偏高。以已有的钻井资料（不同层位的速度、密度等）作参考，选取相对振幅9000，振幅包络5000，瞬时频率20赫兹，吸收系数4000作为信息异常的边界值，将振幅、瞬时频率和吸收系数信息叠加在一起，可以得到如下结论：在构造部位，振幅、频率、吸收系数均有异常，为可靠含气区；A构造处，振幅和吸收系数均有异常，但无低频特征，这也可能是由于沉积环境变化、砂泥岩互层且单层厚度较小所致^[19]。

3. 振幅与偏移距的关系

首先来分析反映振幅与反射角（偏移距）关系的简化的Zoeppritz方程：

$$R(\theta) \approx R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right] \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} (\tan^2\theta - \sin^2\theta)$$

其中 $R(\theta)$ 、 R_0 为绝对振幅和法向入射振幅， σ 为泊松比， θ 为透射角和入射角的平均值， V_P 为界面两侧的平均速度， ΔV_P 为界面两侧的速度之差， $A_0 = B - 2(1+B) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma}$ ， $B = (\Delta V_P / V_P) / (\Delta V_P / V_P)$

$+4\rho/\rho$)。由此可见,对于振幅与炮检距关系的研究, σ 是一个至关重要的参数。而气饱和高孔隙砂岩往往具有低的 σ 值。理论模型计算表明,含气层振幅具有随炮检距增大而增强的特征,而由其它高速层或低速层引起的振幅异常就没有这个特征。

例如,在加利福尼亚萨克拉门托谷某大气田,选择一段迭加剖面(图1-1),砂岩储集层深2233米,对应的强振幅在1.75s。从两口已知气井A、B的CDP道集图(图1-2A、B)可以明显看出振幅具有明显的随炮检距增大而增强的特征。而C位置的CDP道集(图1-2C)的振幅随炮检距增大而减小,表示C附近无气^[21]。

内华达州维尔京(Virgin)盆地中一条24次覆盖迭加剖面,1.6s处有振幅异常,经钻井证实是玄武岩,它的CDP道集上的反射振幅随着炮检距增大而明显减小^[21]。

利用CDP道集中的振幅变化模拟方法取得泊松比,再由P波速度和泊松比曲线可以粗略地绘制岩性变化图并识别出含气态烃的层位。利用这种振幅随炮检距变化估计岩性的方法,对加利福尼亚萨克拉门托谷上已标明的每口井位进行了分析,正确地发现了两个气层、砂层和页岩层。

可是还应看到存在一些非地质成因的因素,影响地震反射波振幅,在此可以采用道求和及炮检距深度比迭加等部分迭加法提高CDP道集的信噪比。一般的相对振幅处理常遇到一些不利的影响因素,包括:道均衡、多次波、炮检距及地面一致性等;从而发展了有控制的振幅处理法。其处理流程归纳如下:(1)对任何中间试验和处理应用指数增益;(2)压制相干干扰;(3)消除第(1)步的指数增益;(4)炮检距补偿;(5)反褶积;(6)动校正;

(7) 表面一次性校正; (8) 部分道求和以提高信噪比; (9) 带通滤波; (10) 在CDP道集显示中应用与剖面有关的道均衡; (11) 迭加; (12) 对迭加剖面应用与区域有关的道均衡。

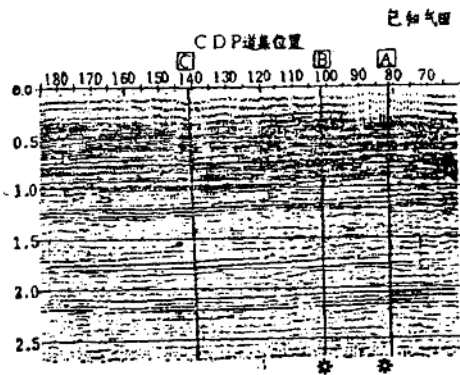


图1-1 萨克拉门托谷某气田的CDP 迭加剖面

4. 加权叠加法

该方法是根据振幅和偏移距的关系导出的。下面我们考虑四个加权函数:

$\Delta V/V$ ΔV 和 V 分别是界面两侧P波速度之差和平均速度

$\Delta W/W$ ΔW 和 W 分别是界面两侧S波速度之差和平均速度

$\Delta a/a$ 称为视泊松比反射系数, $a=V/W$

ΔF 称为流体因子, $\Delta F = \frac{\Delta V}{V} - 1.16 \frac{W}{V} \frac{\Delta W}{W}$

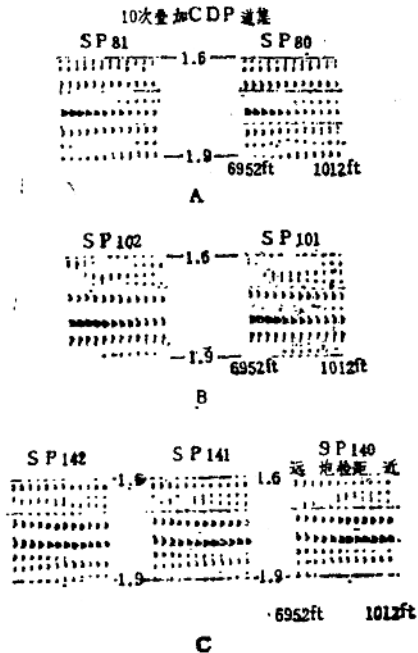


图1-2A、B、C三口井位的振幅与炮检距关系

对所有的含水岩石 ΔF 接近零,而在含气岩石顶部 ΔF 为负的,在底部为正的。合成剖面例子及利用井控的气田实验结果都表明,除气层外,其它层的 ΔF 均为零。

层速度可以利用全波声测井、VSP、叠加速度的结果求得。

图1-3示出了在某个具有井控的气田利用加权叠加法得到的 ΔF 叠加剖面,可以看出在大约2秒处有气层显示。

5. 纵波 (P波)、横波 (S波) 联合勘探

1) 速度比 (V_p/V_s): 由于流体的切变强度为零,因而S波只能在岩石基质中传播,而不能通过孔隙内的流体传播,即S波与孔隙充填流体无关。这就是说,含气砂岩的S波速度与含液砂岩的差别不大。而P波对岩石内存在的孔隙流体类型反映灵敏。因此,观测通过水饱和与/或气饱和的地震波速度之比,可以得到一个能够看出来的异常,它与P波速度的区域变化无关。在进行P、S波对比时,要求取得含气区上、下相同深度上二个反射面反射来的P、S波,计算出P、S波速度之比 V_p/V_s ,即可作为直接天然气显示的指标。

美国阿纳达科盆地,亨顿 (Hunton) 组石灰岩和白云岩是复杂的勘探目的层。这个地区的研究目标是通过P、S波地震资料解释制定探测亨顿储气层的战略。在约777平方公里的区域内,做了P波和S波CDP剖面。在测区内打了200多口穿过亨顿组地层的井,井中信息作为地震解释的基础资料。根据P、S波传播时间计算出 V_s/V_p 比之后,绘制成等值线图。与井中资料相比,发现大多数气井 $V_s/V_p > 0.55$,而亨顿组含油、含水岩石常出现在 $V_s/V_p < 0.55$ 的范围。因此,对该测区来说 $V_s/V_p = 0.55$ 有效地区分出了产气层和产油层或水层^[29]。

2) 振幅对比: 与裂隙有关的P波低速异常造成的气藏亮点(强振幅), 在S波剖面上可能根本没有或很小。反之, 如果P波振幅异常是诸如砾岩带这样的地下地质条件引起的, 则S波剖面振幅至少是同样的强, 甚至有可能强于P波剖面上的。这是因为对这一类介质, 非固结的沉积物和固结良好的围岩之间S波速度的差异较P波速度的差异大的缘故。因此, S波反射可以区分各种不同的地下异常。这种P、S波资料的综合, 可将亮点解释中潜在的多解性减至最小程度, 并提供可靠的直接天然气显示。下面举二个例子来说明其效果。

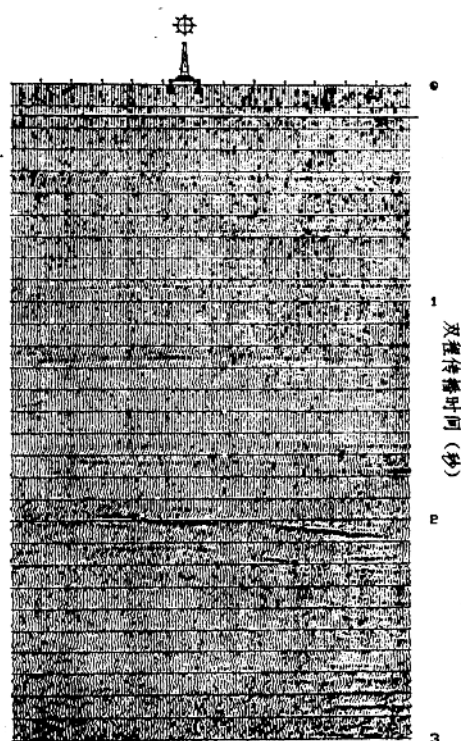


图1-3 某气田的一条“流体因子”剖面。在井孔位置气层出现在约2秒层位

美国加利福尼亚州庞塔赫辛克 (Punatah Sink) 气田, 含气层

(厚29米)为上白垩统Winters地层内的First Winters砂岩,气/水接触面深约2100米。对该气田P、S波地震资料进行地震层序和反射特征的分析表明,P波地震剖面表现出一个具有振幅异常和平点特征的DHI,而S波剖面没有相似的显示。测井资料表明,这是First Winters含气砂岩。另外,P波剖面上在这个DHI上方存在着第二个高振幅反射,类似的高振幅反射也出现在横波剖面上。合成地震记录的分析表明,这一反射与覆盖着高速粉砂岩的低速页岩有关^[35]。

加拿大阿尔伯达迈尔纳姆(Myrna m)气田,产气层为白垩系科洛尼组,测区内最大产气层厚约6.7米,气/水接触面深约535米。此外,还存在有与气层层位大致相当的已知煤层(厚约3.6~6米)。在该区记录了两条P、S波地震数据,质量很好,表现出可对比的反射连续性。在第一目的层,纵波剖面表现出DHI,具有振幅异常和振幅横向突变的特征;但是横波数据没有显示,仅表示出低振幅连续反射。测井资料证实,这是一含气砂层。第二目的层上,纵波和横波剖面皆表现出类似的异常,DHI具有振幅异常和振幅横向突变的特征。然而,测井资料表明这是一煤层,它具有类似于含气砂岩的波阻抗^[36]。

这两个实例说明,尽管与气有关的DHI和与岩性有关的假DHI可能具有类似的纵波特征,但是通过对比P波和S波地震数据可以区别它们。

3)反射系数之比(R_{pp}/R_{ss}):多数浅层沉积反射系数 R_{pp} (P波的)和 R_{ss} (S波的)较小,若某一层的孔隙中充填气体而不是液体,那么 R_{pp} 很高, R_{ss} 仍很小,但是不同浓度气体的沉积岩层之间有明显的差异。因此, R_{pp}/R_{ss} 之比可以判别天然气,并且它还是气

体浓度的一个明显的标志。

6. 三维地震、VSP技术的应用

众所周知，三维技术可以提供大量的地下信息并用于详细研究地下构造。由于其费用问题，它一般只用在远景、构造复杂而二维地震资料质量又不好的地方，有针对性地进行应用。显然，三维地震勘探可以查清地下构造和含气层的分布。

泰国海上某气田，地质构造复杂，储层形态不规则，主要含气层是中新统中下部的砂岩，埋深1200~3600米，为三角洲—浅海相沉积，一般厚6米左右。为了查清含气层分布，在主要含气构造上进行了三维地震测量。利用三维地震资料结合砂泥岩互层的地层模型，研究了地震波的反射波形与含气层的关系，辅以合成地震记录、VSP记录，对三维地震剖面作了解析；研究了地震剖面的波谷、波峰形态的地震异常带与含气层平面分布的关系。根据三维地震资料及钻井的对比，获得了含气砂岩层等厚图，发现地震波异常带的分布与含气砂岩层的厚度（6~9米以上的砂岩层厚度）分布近一致；划分出了气层及水层，进而指出含气砂岩层的容积及储量，为气田的正规开发提供了定量的解释资料，加速了气田合理开发的进程^[23]。

三维地震的测线布置也要考虑多种因素，如工区的地质—地球物理条件、要求达到的目的、施工的时间等，总之要做到经济有效。

VSP测量主要用在已知气田，目的在于查清已知井位附近区域的构造；准确地测定层速度分布与深度的关系；尽最大可能研究储层内岩石特性；在已知井位附近再提供新的井位等。在测量之前进行模拟实验，以确定测量参数。采用三分量井中检波器记录VSP能使在数据处理阶段更好地分离波场，增强P波反射图像，提取P波

和S波速度。在数据处理中采用波场分离、多次波压制、层析技术（如反射图像重构）等。

北海南部英国海域的武尔坎（Vulcan）气田，储气层为二叠纪赤底统的砂岩，上覆蔡希斯坦统碳酸盐岩和蒸发盐岩层序。构造包括被许多不同走向小断层切割的两个雁列式翘起断块。产气层是下伏的石炭系煤系。该区发现R01气井之后，穿过这口井以不同方向做了三条高分辨率三分量VSP剖面。结果表明，VSP解释比地表地震数据解释得到的断层模式更详细，提高了储层的构造解释精度，最后在R01井附近确定了R03、R04、R09等气井井位，这样做比二、三维地震勘探速度都高^[41]。

7. 产气砂岩层厚度预测

当发现气层之后，要进一步评价该气层，看其是否具有开采价值，因此要提供其厚度和面积信息。下面介绍两种含气砂岩等厚图的制作方法。

第一种方法是首先对目的层作出相对振幅异常区；第二步是利用薄层反射模型和测井所得层速度、密度资料，计算出反射振幅随厚度变化的关系曲线；然后，利用现有钻井资料和反射波的频率、速度，对振幅-厚度关系曲线进行标定；最后，根据标定后的振幅-厚度曲线，将相对振幅平面图变成等厚图。

第二种方法是一种纯产气砂岩等厚图的制作。对于一个砂层来说，利用它的到达时间就可以作出顶面和底面反射构造图，将这些时间相减就可以作出砂层的总等时图。利用砂层的振幅可以作出砂层顶、底反射的地震切片，然后把这些绝对值加起来就得出砂层合成振幅响应。通过编辑将调谐效应去掉，再加以平滑求出比例值，

就可以产生一张纯产气砂层与总砂层的比例图。把这些图与总等时图相乘，就得到一张纯产气砂岩层等时图，付于产气砂岩层一个恒定的层速度值，就可以将这张纯产气砂岩层等时图转换成纯产气砂岩层等厚图。

另外，作为声阻抗剖面显示的反射地震能量被用来产生视“纯产气层”等值线图，结合附近井控或现代响应也能预测气藏的范围和气层厚度。

以上所介绍的几个方面都是基于反射波法及CDP剖面，除此之外，还可以根据衍射（全息）地震测量结果编绘的地震剖面的波异常性质寻找天然气层。

二、非地震物探方法

（一）重力法

重力勘探主要用于区域普查，探明区域构造，随着勘探工作的深入开展，这种方法也用于详查细测阶段，预测局部构造，解决地震勘探中的多解性问题，校正依据地震勘探资料划分出的古生界沉积构造单元的从属关系，详查断裂，直接寻找天然气藏等。

天然气层的密度比周围围岩的密度低，在重力场中形成重力低，根据重力低的范围可以圈定气藏的平面位置。但是在实际解释重力资料时，仍存在一些困难，即如何把这些最小值从具有复杂背景值的重力场中划分出来并对最小值进行地质分类等。因此，要详细研究重力资料，进行地形分析和中间层密度评价等，必要时还应与其它方法综合研究。

总归一化梯度（GH）法是对重力资料进行处理的一种方法，

它可以提供关于在垂直断面中是否存在气层及其埋藏深度、形态等方面的信息。计算和实验结果表明，对于含气的构造来说出现两个 G_H 极大值，位于构造的两翼，两个极大值之间有一极小值，其中心位于气层上；而不含气（也不含油）的构造只有一个极值，位于构造断面上，因此这种处理方法可以解决构造问题和确定气层的垂向位置。苏联在已知区试验取得令人满意的结果，表明该方法能发现厚30米以上的气层。

利用滑动散度法处理重力资料，可以准确地查明断裂和近垂向环状不均匀带的位置。由于垂向环状不均匀带是气藏（也是油藏）的一种伴生地质要素，出现在构造的边缘，圈定它就可圈出气藏（或油、油气藏）的位置。实验表明，散度值很高的线性带是由断层引起的，而散度值不很高的等轴状、环状带由垂向不均匀带引起。

如果把重力异常、 G_H 极值和散度值相结合就可更有效地圈定气藏。

（二）磁 法

常规的磁法勘探主要用于研究的初期阶段，做中比例尺的测量，观测长波长而忽视短波长。这个时期的磁测主要是查明一些最大的构造单元，确定磁性基底的埋藏深度，研究其起伏及内部结构，从而指出对天然气储存有利的构造。近年来，随着磁测精度的提高，可以观测到一些微弱的磁异常，从而用来研究沉积盖层中的结构，同时转向直接寻找天然气藏。一些气田上的磁测结果表明，那些高波数磁异常与区域内查明的气层分布之间存在对应关系。有人认为气田上方的小异常是由于烃类向上运移时在近地表形成的次生磁铁矿引起的。

用磁测，主要是航磁，直接寻找天然气藏时，要求测线间距要小，飞行高度要低，灵敏度要高。为了提高探测气藏上局部微弱磁异常的效果，美国地质测量有限公司推出了一种航磁水平梯度测量系统。利用它可以测得地磁场横向水平梯度值并计算出纵向水平梯度值，而且这种系统的测量不受测线与地质异体走向夹角大小以及日变的影响，从而可以提高磁测的效果。

在美国阿拉斯加国家野生动植物保护区，利用上述测量系统做了低空（90米高）航磁测量，线距1.6公里，圈出了高波数、低幅度磁异常。其中，在卡维克（Kavik）气田上就表现为这种异常。这一地区的工作进一步说明，特别目的的航磁测量，甚至是在环境恶劣的条件下，勘探天然气也是有效的〔34〕。

在天然气渗漏导致的化学还原岩石和气田周围的氧化还原界面上产生所谓的磁电效应，在大地中产生的垂向大地电流（ET）在静地磁场内引起异常。利用航磁图或地磁图，通过磁场闭合线积分，测量垂向大地电流通量密度，以圈出适于储集有工业价值气藏的有利的岩石环境，并确定它们的大致深度的方法，称为磁电（ME）法。

最近几年，在数据处理中发展了向下延拓法，把磁场向下延拓到非常接近（但最好略高于）大地电流发生源的深度。向下延拓深度可以根据用电测曲线和其它测井曲线推断的可能气层的地下地质确定。结果用与地层天然气含量有关的在大地内流动的磁电电流垂向通量（单位面积电流量）来表示。当我们在由此编成的垂向大地电流通量图上发现有希望的异常时，即可将电流通量密度值换算成单位面积地层含烃量，并可在整个含气区用这种方法圈定可能气田。然后利用适当的采收率系数即可估算出所发现的可能气藏的经济价值。