

油、气层等压图的 繪制与应用

苏联 B·H·华西里也夫斯基等著

石油工业出版社

油、气层等压圖的 繪制与应用

苏联 B·H·华西里也夫斯基等著

张柏年 叶詩美等譯

石油工业出版社

內 容 提 要

油、气層等压图是反映油層中压力分布情况的图幅，是解决控制油、气田开发过程問題的基本資料之一。

在这本書里，作者扼要地介紹了現在繪制等压图常用的方法，指出了它們的缺点，並根据自已的經驗提出了新的方法。按照这种新方法繪制等压图，更精确和簡便些。

等压图的应用，在本書中佔相当比重。作者用具体的例子，說明如何利用等压图确定油、气層和油井的参数，油水接触面的移动速度和方向，以及平均地層压力等等。

本書供油、气矿地質、采油、采气工程技術人員，石油設計院油田開發設計人員，以及各石油院校師生参考。

本書由張柏年、叶詩美、朱恩明等同志譯出。

В.Н.ВАСИЛЬЕВСКИЙ,

Э.Л.ЛЕЙБИН, В.С.ОРЛОВ

КАРТЫ ИЗОБАР В ДОБЫЧЕ

НЕФТИ И ГАЗА

根据苏联国立石油燃料科技書籍出版社 (ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1959年莫斯科版翻譯

統一書号: 15037·889

油、气層等压图的繪制与应用

張柏年 叶詩美等譯

*

石油工业出版社出版 (地址: 北京六鋪炕石油工部局內)

北京市書刊出版業營業許可証出字第033號

石油工业出版社印刷厂印刷 新华書店发行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本 * 印张3 $\frac{1}{4}$ * 84千字 * 印1—2,300册

1960年8月北京第1版第1次印刷

定价 (10) 0.57元

引 言

为了解决油、气田开发中許多的实际問題，必須知道地层压力在任一时期的分布情况。

地层中压力的分布，可以用等压图表示出来。它决定于地层的物理性質和开发历史。因此，知道了地层的开发历史，有了正确繪制的等压图，就可以判断出地层各部分的物理性質。如果有了表示地层压力在不同時間内分布情况的整套等压图，那就可以判断地层中液体运动的性質。

很遺憾，直至目前为止，不仅在解决油、气田开发的各种实际問題时，沒有广泛使用等压图，即使等压图的繪制方法，現在也还很不完善。

油、气层等压图，和开发图、等厚度图以及其它表示油层构造特性的图一样，应当作为解决控制油、气田开发过程問題的基本資料。

在这本小册子中，研究了等压图的繪制方法，以及利用等压图解决油、气田开发中某些实际問題的方法。应当指出，作者所提出的繪制等压图的方法，也还不是尽善尽美的，但是它沒有現在常用的方法所具有的那些缺点。書中举了一些例子，說明如何应用等压图解决油、气田开发中某些实际問題。但这並不是全部，等压图还可用来解决其它問題。这还有待大家共同研究。

本書介紹的繪制和应用等压图的方法，暂时还只适用于水压驅动和弹性水压驅动的油、气藏，而且油、气藏沒有被破坏，即被分割成小块。如果油、气藏被分割成許多互不联系的小块，則应对每个小块繪制等压图。另外要用恢复压力法試井，和用精确度比較高的压力計（微差压力計）測压。

目 录

引 言

第一篇 繪制等压图的程序問題

第一章 論地层压力·問題的提出	1
第二章 等压图繪制方法簡述	7
第1节 根据在井中測得的地层压力繪制等压图的方法	7
第2节 繪制等压图的計算方法	14
第三章 繪制等压图的方法	17
第1节 基本概念及定义	17
第2节 影响地层压力分布特性的因素	19
第3节 在不同的滲滤方式下地层压力的分布	20
第4节 繪制等压图的原始数据	27
第5节 繪制等压图时內插压力的方法	40
第6节 繪制等压图的步驟	50
第7节 对試井技术和检查量測仪器的基本要求	52
第8节 按照我們提出的方法繪制的等压图和“真实” 等压图的对比	55
第9节 “真实”等压图的繪制方法	61

第二篇 利用等压图解决油田开发的实际問題

第一章 利用等压图求地层和油井的参数	72
第1节 平面平行流动	72
第2节 平面径向流动	74
第3节 复杂流动	76
第4节 在弹性驅勁条件下开发油藏时闡明外部(边緣外) 区域特性	87
第二章 利用等压图解决含油边緣移动速度的控制問題	90
第三章 确定平均地层压力	98
第1节 “平均地层压力”的物理概念	98
第2节 利用等压图求平均地层压力	101

第一篇 繪制等压图的程序問題

第一章 論地层压力・問題的提出

在技术文献、地質报告以及其他的文件中,常用“地层压力”,“原始地层压力”,“动地层压力”,“井底压力”,“井底压力降”等专门术语来表达某些一定的概念,反映地层中压力的变化过程与状态。

“地层压力”这一术语是比较籠统的。人們有时把地层在开发以前的压力,亦即原始地层压力称为地层压力。而在另外的情况下,則把地层中的平均压力,或者是停产井的井底压力等等称为地层压力。

生产层常常延伸得很远,甚至长达数十公里。地层的沉积通常也都不是水平的。地层中液体所承受的压力,系与油藏的形成条件,地层与地表的連通程度,地层水的运动方向及速度,生产层的埋藏深度等有关。在地层的不同方向,甚或是当地层为一个統一的水动力系统并且未进行开发时,地层压力的变化都是很大的。在已开发的地层中压力的变化也是很大的,它的变化主要取决于布井、排液量与注入量的分配及其随時間而变的情况。由此可得出結論:只有当指明压力是地层某一点或点系(例如,对一等压綫——連結同一压力值的綫段,或者是对等势面——經過压力相同的各点之表面)在某一时刻的压力时,“地层压力”这一概念才可能有一定的含义。

在未曾开发的統一水动力系统的地层中,地层各点上的压力在大多数情况下,主要是取决于埋藏深度。如果研究比油藏較小的地段,那么不考虑影响压力大小的其他因素,这在大多数情况

下是完全允許的。認為未开发地层中各点的压力不随時間而变，如果这一時間不是地質時間的話，这同样也是完全有根据的。

为了表明这种地层中的压力，利用“原始地层压力”这一概念。原始地层压力，也只有当它是就某一点或某一点系而言时，才有一定的含义。在这种地层中的等势面，是各种水平面^①，其中也包括油水和油气等接触面在內（如果这两种接触面不是由于其他原因而成斜面的話）。一般在論及原始地层压力时，是指其对某一表面而言的（常常是对油水接触面而言）。

地层某一点上压力的大小，通常总是用深井压力計或其他方法（例如，按照井口压力或井內液面位置）直接測出的。如果不可能直接量出一定深度上（例如在水油接触面上）的压力，那么就只有用“折算”到一定深度的方法計算求出，也就是在实际測出的压力上，加上或減去在量測点与折算点或面之間的一段液柱所造成的压力。

如果忽略地层水的天然流动、地层液体比重的变化等等，那么未开发地层所有各点的压力，若折算到同一个水平面上，則應該是一样大小。在已开发的地层中，折算压力与地层的构造特点无关，而是在各个方向变化。这种变化取决于生产井与注入井的布井方式；取决于各井排液量与注入量之分配及其随時間而变化的情况；同样还取决于地层的弹性、水力传导系数^②以及地层中液体在水平面和垂直方向上的变化情况。

如果已知地层的开发历史及任一时刻折算压力的分布的特点，就可利用上述情况来确定地层上各区段的水力传导性。若

①严格的說，等势面并不是水平的，而是取决于地层水的天然流动特点及地层性質，具有某种其它的形状，但是对于比較小的地层区段而言，这些因素在大多数情况下可以不考虑。

②所謂水力传导系統，系指 $\frac{kh}{\mu}$ 而言。式中 k —渗透率； h —地层有效厚度； μ —地层中液体的粘度。

知道了地层各区段上水力传导性变化情况，及各区段上压力变化的历史，就可以判断液体在这些区段的流动特征。最后综合起来，就可以判断由于地层的不均一性，液体在整个地层中流动的特征。

决定地层开发历史及状态的因素（布井方式，排液量与注入量之分配与随时间而变的情况），一般都可以相当可靠地知道；而估计地层中压力分布的特点，则是一个相当复杂的问题。在一个统一水动力学系统的地层中，压力是座标及时间的连续函数，亦即随时间及空间平滑地改变。任一生产层在任一时刻的特点，都可用这样的或那样的压力场来表示。

与电场及磁场可以用一组等势线或面表示一样，压力场也可以用等压图表示出来。等压图就是在所考察的地层区段的平面图上，描绘的一族平滑的，彼此不相交的，穿过具有同一压力的地层点之曲线。

绘出这种等压图是相当复杂的，因为一般只知道相当于井位的地层点上的压力，而在各点之间的压力，则仅能靠内插法近似地求出。我们知道，只有当知道了各点之间压力的变化规律的时候，用内插法求得的数据才可能是正确的。

只有在同一时间内量测出地层所有点上的压力，才有可能绘出理想的精确的等压图。在实际情况下，绘制等压图时造成误差的原因有以下几种：

1. 可以直接量测压力的点子数目不多，而相邻各点之间的压力变化规律又不知道。
2. 测压仪器的误差。
3. 地层中有未发现的不渗透边界，不渗透的或低渗透性的透镜体，以及任何类型的不均匀性。

对于实际的地层，要精确地阐明在某一方向上压力的变化规律，实际上是做不到的。这是因为地层任何一点上的压力，不仅取决于油藏的开发历史，取决于该点的地层性质，而且还与整个

地层的性質与构造，以及地层不均匀性的特点及程度有关，亦即还与各种未知的因素有关。因此，在任意一对点子之間进行压力的内插工作时，都以地层是均一的这一假定为根据。亦即选用的内插方法与开采均質地层的布井方式近似地相一致。最常用的是綫性内插法。在一定条件下，就像下面將談到的，使用这种方法是完全允許的。此时通过任何一对井之間的等压綫的特征，可近似地反映出这些井区的地层压力的分布情况；但是在这些井区地层必須是均質的，而已有的参数又接近于这些井区的平均值。如果在各对井間地层的传导性有变化，那么这种变化在繪制等压图时是不可能考慮到的。这样，在今后利用等压图确定地层参数时，对这一区段就只能获得这些参数的平均值。因此用等压图确定的地层特性，具有区段的性質，各区段的边綫約等于或大于井距。

由此可得出結論，地层等压图繪得愈准确，地层的不均匀性就愈能精細地表示出来。而等压图的精确度，主要决定于量测地层压力的点子的密集程度，換句話說，也就是取决于开采层井網的密度（如果对每口井都測压的話）。井網越密，等压图就越精确，就愈能細致地研究在不同区段上地层的性質及构造。

現在我們来研究一下任意一对生产井間压力变化的剖面（图1）。

由压力面与垂向剖面相交所构成的剖面綫 $AA'B'B$ ，其特点是在直接靠近井的地区内有着陡的綫段（ AA' 和 $B'B$ ）。

在这些綫段上，压力变化的特点接近于对数的性質，因为油井的生产对它的影响很大。距 A 及 B 井愈远（ $A'B'$ 段曲綫），它們对压力的影响就愈小，因而曲綫变得平緩起来。

繪制等压图，實質上就是根据已知的井底压力繪出整条曲綫 $AA'B'B$ 。

如果在各井生产时測出它們的井底压力，那么对已測出的压力在各井之間进行直綫内插，將得出与直綫段 AB 相应的压力剖面，它与实际的压力剖面（ $AA'B'B$ ）迥然不同。根据这一原因，

矿場上在繪制等压图时大多不是使用井底压力，而是所謂动地层压力或条件的静地层压力，亦即关井一定時間后測出的压力。根据关井時間的长短，井底压力就或多或少的恢复起来。

在矿場，压力計在井底停留的時間可用一般試驗的方法确定。关井后，在井底录下的压力恢复曲綫，照例在初期有一陡然上升，而后就很快的变緩，并变得接近于水平綫。从关井的时刻起，直到仪器开始不再录出压力繼續上升止，这一段时间通常取为量測“地层压力”所必需的关井時間。按照这种量測数据所繪出的等压图，称为等地层压力图；倘若把測出的压力都折算到某一水平面上，則称为等折算压力图。这些等压图較之等井底压力图，能更近似地反映出地层压力的实际分布情况，这一情况相当于地层的正常状态，即当所有的井都生产时的状态。

实际上，对关井后在井底測出的压力数值进行直綫內插，可以比內插井底压力（參閱图 1 直綫段 $A''B''$ ）得出更为接近实际的压力剖面。

誠然，在編制等压图时仅用直綫內插法并不总是合宜的。采用其他的內插法（參閱第三章第 9 节），以井底压力作为原始数据，也能多多少少正确地繪出曲綫 $AA'B'B$ 。但是这一方法极为繁瑣，並且只在特定情况下使用才是合理的。用这种方法繪出的等压图，將反映出整个地层和紧靠油井地区的压力的分布情

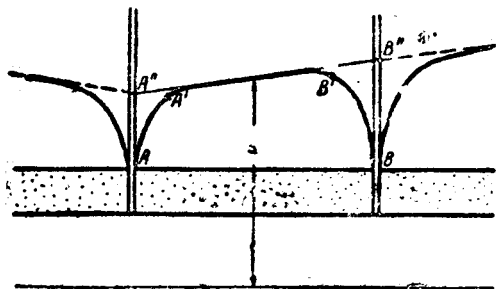


图 1

况。

如果等压图是根据关井测出的压力而繪成，那么这种等压图將近似地反映出整个压力面。

用精密的深井微差压力計测压的实践表明，井底压力显著恢复的时间是很长的。即使具有高渗透率且含低粘度石油的地层，这段时间也有若干小时，而且常常是若干天。

因此就提出以下問題：

1. 为了根据压力数据繪出等压图，最近似地反映出开采层中压力分布的实际情况，需用什么方法量测井内压力？

2. 如果关井测压的目的仅仅是为了繪等压图，那么为了测压而长期关井是否有意义？或者是否有可能不长期关井甚至不关井而获得足够精确的、为繪等压图所必需的压力数据？

本書試答了这些問題。

但是它的内容还不仅限于这点。等压图不是为了繪制而繪制。但是很遺憾，这种現象在有些矿場还是存在的。正确編制成的等压图乃是非常宝贵的資料，可以用来解决很多与油藏开发过程的調节及建立最合理的开采条件有关的重要的实际問題。

但是，迄今还只有少量的著作，曾探討过利用等压图来解决实际的油田开发問題。

另外，等压图在采油实践中用得很少，也未起到促进繪制等压图的方法进一步发展的作用。

在大多数情况下，等压图仅被用来确定平均地层压力，而等压图的作用却並不仅限于此。

在本書中将列举一些用等压图解决某些实际問題的例子。这些例子虽然只部分地介紹了等压图的作用，但已充分說明等压图是反映生产层开发过程及状态的主要資料。

第二章 等压图繪制方法簡述

第1节 根据在井中測得的地层压力繪制

等压图的方法

在油藏开发中，地层压力数值的重要作用，早已被实践所証实。

除其它的因素外（油层的大小，供給区的特点等），地层儲能取决于地层压力的大小。在其它条件相同时，地层压力愈高，天然的地层儲能就愈大，油藏的开发就愈容易和愈經濟。

最初，地层压力只是被当作衡量举昇石油到地面的地层能量的尺度。以后，給石油工作者提出了另一个問題，即控制地层中液体运动的过程，保証油藏不同部分含油边綫达到必需的移动速度。为了解决这个問題，只知道地层压力的絕對数值或者整个地层的平均压力值已經不夠了，而必需研究整个油藏中或油藏部分地区地层压力分布的特性。这也就促使了等压图繪制方法的发展。

在三十年代初苏联已有了第一批反映已开发油藏压力分布特征的等压图〔1〕。这种等压图的繪制方法如下：

1. 根据在生产井及观察井中測得的靜液面，求出地层压力（关井以后的井底压力）。
2. 将在每口井中所測得的压力，通过計算折算到它的射孔井段中間点的标高上。
3. 把折算到衬管中部的地层压力标在井位图相应井号的旁边。
4. 利用直綫內插法求出各井之間地层中間点的压力数值。
5. 用光滑的綫段將压力值相同的各点（每隔一定的压力間隔）

連接起來。

這類等壓圖是控制與調節油田開發過程的方法發展的起點。然後直到四十年代這類圖仍是唯一的。

用這種方法繪制的等壓圖，主要地用來求地層平均壓力。

研究平均地層壓力變化的規律之後，利用各種統計方法和物質平衡方法，可以預測以某種速度開采的油藏以後的開發情況，還可以估計出油藏的工業儲量和確定出油藏的開發期限等。

現在，物質平衡方法在預測開發情況的計算中仍然使用。

在這裡不討論地層壓力量測的工藝問題，而討論一下上述方法中的幾個原則問題。

1. 不用井底壓力，而應用地層壓力來繪制等壓圖，目的在於使等壓圖更能正確地反映出地層中壓力分布的真實狀況。

可是地層壓力本身也是十分不定的，這是由於測定地層壓力時關井時間的長短不一致所造成的。

即使是關井的時間相同，井中壓力量測的技術情況實質上還會影響到等壓圖的精確性，因為量測本身就帶有很大的誤差。

2. 利用折算到射孔井段中部的壓力來繪制等壓圖，其目的是使所得到的等壓圖上反映出的壓力分布不僅能表明油藏開發歷史，而且也能反映出構造的因素。

目前情況下有必要經常地繪制這種等壓圖。利用這種等壓圖所求出的平均地層壓力，代表着地層中油、氣、水所承受的壓力。

對油、氣同時運移的地層（在氣體中還包括着在油藏開發期間由石油中分離出來的氣體），知道它們的平均壓力的大小，就可以估計出地層孔隙中各相的飽和度，以及在石油中呈溶解狀態的天然氣體的數量。數據本身最大的用處，是能夠在最初階段從數量上估計油層的流動特性（相滲透率）等等。

然而在解決很多實際問題時（確定地層參數和含油邊緣移動的速度），最重要地不是知道地層各點的絕對壓力，而是地層各

点上的压力相对变化。这种变化不仅取决于地层的流动特性，甚至与油藏开发系统与开发时间也有着一定关系；但与构造因素无关。

換句話講，为了解决許多实际問題需要有折算压力图。

为了消除油藏构造特点对油藏压力分布的影响，1940年M. A. 日丹諾夫教授〔1〕曾建議將全部所測得的压力折算到同一平面上（海平面上），並且根据这些折算压力数据来繪制“折算等压图”。M. A. 日丹諾夫建議將井内所測得的压力換算为与其等值的油柱，它的高度由下面的关系式求得：

$$h = \frac{10P}{\gamma}, \quad (\text{I.1})$$

式中 P ——在油层顶部所测出的压力，大气压；

γ ——石油的比重，吨/米³；

h ——油柱高度，米。

根据这种压力計算求出从海平面讀起的油柱的假定水平面（图2）

根据公式求出的以油柱高度表示的折算压力（或者称为折算液面）等于：

$$h' = h'' - H, \quad (\text{I.2})$$

式中 h'' ——油柱的高度，米；

H ——油层顶部的绝对标高，米；

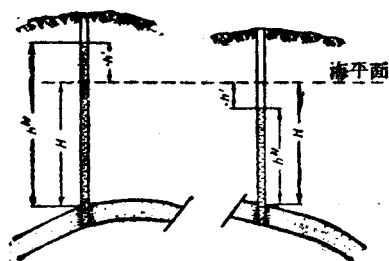


图 2

h' ——由海平面讀起的油柱假定（折算）液面，米。

根据折算液面高于海平面还是低于海平面， h' 的数值可以是正值或者是負值（图2）。

根据折算液面的数据可

以繪出以油柱高度来表示的折算等压图。

然而 M.A. 日丹諾夫所建議的將压力換算为等值的油柱高度的方法並不方便，因为用油柱高度所表示的压力在計算中要重新換成公斤/厘米²或者水柱高度（米）。

此外，所建議的方法还有一个不便地方，就是等折算液面图（表示为油柱高度，米）只能代表各方向的压力的相对变化，但不能得出地层压力绝对数值的近似概念。因此为了方便起見不采用海平面，而采用直接靠近油藏的一个水平面做为折算水平面，例如，相当于原始油水或者油气接触位置的平面。

1946年，M.A. 日丹諾夫〔2〕曾建議將井內所測得的压力折算为等值的水柱高度，同时取水的比重为 1。高出海平面的水柱高度称做压头。

在水文地質中，根据地层不同点的压头能判断地层水流动的速度与方向。这种方法对油层各点折算压力的相对变化可以給出清晰的概念；但是和以前的方法一样，同样不能得到关于地层压力绝对数值的概念。

此外，所討論的方法也不可避免会有某些錯誤。例如，对未开发的油藏上的油井及水井繪制以水柱高度（米）表示的压力綫时，井內的液面保持在不同的高度上（水井中的液面保持同一高度，但油井中液面彼此之間將會不同）。

为了使液面保持在同一个标高上，需要加以校正，校正的数值取决于油水比重的比值，以及油井內测压点与开始計算最深水井压头的假定水平面之間的高度差。

折算压头的确定方法在 M.A. 日丹諾夫的文章〔3〕中已敘述过。

最近几年开始广泛使用这种等压图。它是將所測得的地层压力数据折算到原始油水接触位置的标高上，或者折算到某一个直接靠近油藏的其它的水平面上。

这种等压图繪制的方法如下：

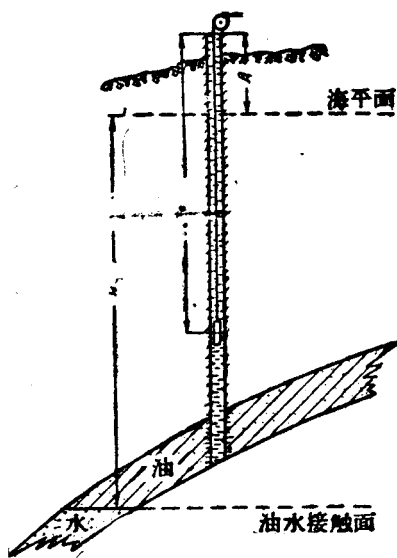


图 3

1. 在与该油层生产有关的全部井中（万不得已时要在油层大多数井中）量测地层压力。

2. 把所测得的压力用换算方法折算到以前所选择好的折算平面上。

利用公式将压力折算到油水接触面的标高上（图 3）：

$$P_{np} = P_{зам} + \frac{[(A + H_k) - h]\gamma}{10}, \quad (1.3)$$

式中 P_{np} ——折算到油水接触面标高上的压力，大气压；

$P_{зам}$ ——实际测得的压力，大气压；

h ——量测压力的深度，米；

H_k ——油水接触面的标高（由海平面到油水接触面的距离），米；

γ ——量测深度与折算平面深度之间井段内的液体平均比

重, 吨/米³;

A ——井的标高, 米。

3. 把折算到所选用的水平面上的地层压力註到井位图上相应井号的旁边。

4. 用內插法 (大多数情况下用直綫內插法) 求出各井之間地层間隔点上的压力数值。

5. 用光滑綫段——等压綫, 將折算压力相同的点連結起来 (每隔一定的压力間隔)。

用这种方法所繪制的等压图, 能比較正确地反映出折算地层压力分布的特点。利用这种等压图, 可以解决油田开发中很多的重要問題。然而根据这种等压图求地层参数或者地层各部分含油边綫移动速度时, 它的精确性在大多数情况下是很不夠的。

如第一章中所提到的, 等压图应当反映出某一瞬間的地层中压力的分布。

所以要比較正确地量測地层压力, 就应同时在所有井內下深井压力計, 然后同时关井, 使仪器在井底停留一定時間, 记录下地层压力的数值。不要說这样做在大多数情况下是不可能的, 因为缺少必要数量的仪器和試井人員, 而即使能够这样做, 也不可能获得繪制等压图所需要的数据。

对矿場实际工作有用的, 不是反映任意瞬时的压力状况的等压图, 而是能反映出全部油井投入生产后油层正常工作条件下的压力状况的等压图。大量的关井会引起地层压力的急剧变化, 因此根据同时关井测压所得到的数据繪制等压图, 压力分布的特点与地层正常生产时的压力分布会有很大的差別。

由此可見, 为了繪制等压图而关井及在井內量測地层压力必須是依次地。但是这里我們又碰到另外一个困难, 就是对有很多生产井的油藏, 要在所有选定的井內依次地量測地层压力, 就会使量測時間拖长, 結果到最后一批井試井結束时, 第一批試井地区内的地层压力可能已发生很大的变化, 这样也就不可能繪制某