

油藏工程和 油气田保角映象

[美] 威廉·赫斯特 著

石油工业出版社

14596

油藏工程和油气田保角映象

〔美〕威廉·赫斯特著

石油工业出版社

内 容 提 要

保角映象就是把一种平面展换成另一种平面的过程,对油藏工程来说,就是把一个具体的油气田的实际图形变换为一个矩形。在这个矩形中确定了井位以后即可进行流体动力学计算。经过计算之后通过点与点间的对应又可以把等压线或流线的关系重行转换到原来的油气田上来。这样就可完成油藏模拟工作。

本书适合从事油气田开发的技术人员阅读。

9756/24

Reservoir Engineering and Conformal Mapping of Oil and Gas Fields

William Hurst

The Petroleum Publishing Company 1979 TULSA

第一版

油藏工程和油气田保角映象

〔美〕威廉·赫斯特著

童宪章译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

人民交通出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 4¹/₂印张 88千字 印1—1,700

1983年12月北京第1版 1983年12月北京第1次印刷

书号: 15037·2442 定价: 0.43元

序 言

本书中各章所叙述的是近几年来所发生的一些彼此相互联系的概念，而不是按照它们的发展时间顺序编写的。因此各章彼此之间都是相对的整体。

前面三章是1976~1977年在路易斯安那州的新奥尔良地区所举办的一次连续培训期间所讲述的系统教材，最后一章则是近期的发展成果。

和听课的学员们会谈时，他们建议这些知识应该广泛地推广，因此就把这本书编写出来供石油工业的专业工程师们应用。

第一章的内容是油、气田的保角映象，本书即以此命名。

对于保角映象这一课题不熟悉的人们说来，这是把一种平面展换为另一种平面的过程。对我们的工作说来，就是把一个具体的油、气田的实际图形变换为一个矩形。在这个矩形中确定了井位以后，可以进行一切流体动力学运算。经过计算以后，通过点与点间的对应，又可以把等压线或流线的关系重行转换到原来的油、气田上来。这样一来就完成了油藏模拟工作。

本书中所举的例子是把一个圆形的油、气田变换为一个矩形。这样做的原因是由于我们已经知道一个圆形面积中一口井的动态解析，包括稳定和不稳定状态在内。因而选择一个圆形的例子就可以检验本书中广泛叙述的保角映象工作。

后面两章的标题为流体动力学的非线性解及其辅助方程，其中所论及的是有关保角映象的流体动力学问题。前面一部分所涉及的是气体在气藏中的非线性流动。当把扩散方程应用于一个气藏时所研究的是产气层中一个无穷小单元中的气体平衡问题，所导出的气体流动方程是一个非线性的微分方程式。针对一个气藏处理这一方程时，确定一系列的地层压力增值，通过把变化的气体压缩系数保持为常数而使方程线性化，其所得结果和布鲁斯等人所得结果十分吻合。

对于向井底流动的双相油气流动辅助方程求解时也应用了同样的线性化概念。首先是从双相流动的实际方程中推导出辅助方程来求出油藏压力递减后的地层原油饱和度。后面所举的例子则表明一个油田内部由于一口井产出油气而造成的地下亏空体积。结果证明所算出的油藏中的油气亏空量和井中所产出的结果非常吻合。

计算结果之所以能达到上述的成功程度是由于应用了凯尔文氏所发现的 E_i 函数式，该式表现的是不稳定液体流动状态。在本书作者所发表的刊物中，在这一点上与过去应用经典的贝赛尔函数方法有所不同。对于应用工程师们，这一简便的算式比那些复杂的方法要方便得多。象其他一些作者一样，在本书中对这一算式的推导和求解都加以说明。

在油、气藏模拟方面有一点要提请读者们注意：在所处理的矩形连续面上，每一个点都要受到油、气田中每一口井的影响。这一点在本书的第一章中是通过 $P(t_D)$ 函数式来实现的，而它又是通过 E_i 函数式来表达的。每口井对于所分析的点都分别提供一个 $P(t_D)$ 函数值。所有这些 $P(t_D)$ 值的总和构成了不稳定流动方程，其中各项参数包括渗透率，孔隙率和砂层厚度等等都代表的是分析点的数值。

读者们对于计算方法和程序——用计算器或计算机——可以自由选择。他们只要把代表不稳定流态的所有 $P(t_D)$ 值综合起来，就可以对一个油（气）田进行模拟研究。

本书最后一章——钻加密井——是油藏模拟工作的一个实际应用说明。在这一章中所叙述的是一个油藏中油、气流向生产井的流线分布状况。应用这一方法可以说明在哪里钻加密井可以遇到那些从来没有进入油、气田主流线的油和气。它还能进一步表现出一个油（气）田过去动态表现的蓝图，并且说明在哪里可以采用注水或其他强化采油方法来提高采收率。

编写本书的目的是使它对应用本书的任一读者说来能自成一个整体。对于本书中所用公式的推导有兴趣的人们可以参看附录，这样就可以不必另查其它资料。此外为了在课堂里作练习的需要还附加了一些数据表。以上就是作者向读者们在目前所能提供的说明。

威廉·赫斯特

1978年

目 录

序 言

第一章	油、气田的保角映象.....	1
第二章	液体非线性方程求解方法.....	26
第三章	辅助方程.....	59
第四章	钻加密井.....	90
附 录	数学公式、数据和数学问题的推导.....	105

第一章 油、气田的保角映象

编写这一章的动机是由于在工作中我们常面临的问题是地质家们对一些断块或油田的解释感到困难，因为表现这些油、气藏的区域常常包括一些曲折的、不规则的图形。

我们常常提出这样一个问题：“怎样能确定象图 1-1 中所表现的这样一个典型断块中的压力分布和流线的轮廓”。

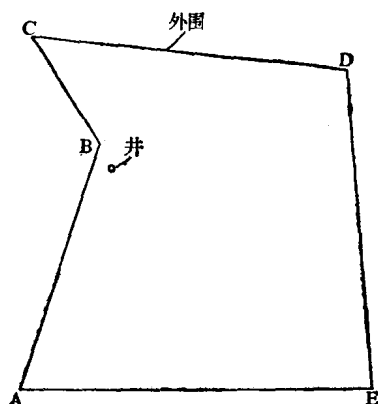


图1-1 断块构造示意图

当一口井的位置接近一个油、气藏的外围边界时，它附近液体的流动和压降的变化必然要受到边界的影响。同样，一个整个油、气藏的压降也要受到地质家所圈定的各种边界的影响。

由断层和砂层的尖灭线形成的一个孤立的油、气藏使问题更加复杂化，这一问题将留待后面讨论。

保角映象

在不少的文献和教科书中都已对保角映象进行了详尽的讨论。但是其中却很少提到它在当前实际问题中的应用。

早期工作中把一个区域转换为另外一个平面的目的是为了了解有关弹性问题、势能理论和流体力学，其通用公式如下：

$$\nabla^2 P = \frac{\partial P}{\partial t_D} \quad (1-1)$$

当上式的右侧为零时，它就相当于稳定流态。在后面将看到，我们所要处理的问题是比较复杂的不稳定液体流态问题。

几种模型

在作者早先发表的一篇报告〔1〕和本书的第二章中都曾讨论过，在过去一些文献中对一个圆形的保角映象对我们的情况是不实用的，因为在它的圆心位置存在一个表示径向流动的特异点。

如果我们要了解这一方法的实用性时，我们必须对一个圆形范围内全部区域进行变换，而不要任何特异点。

之所以考虑到选择一个圆形并把它转换为一个矩形平面的原因是因为我们已经知道位于一个圆形面积中一口井的各种解答，包括稳定和不稳定流态在内，因而就可以检验保角映象的方法。

图1-2和图1-3表现的是这类模型的示意图，它们是专为

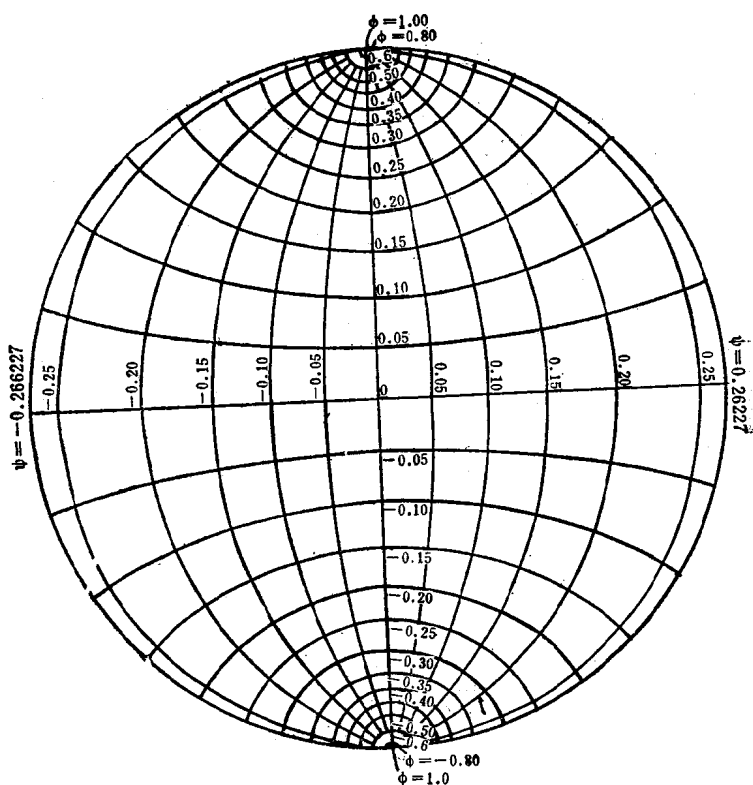


图1-2 当源点和汇点位于圆形外围
时等势线和流线分布图

本书的目的推算出来的（参看本章末尾的推导步骤）。进行这一求解工作的理由是因为在过去发表的文献中找不到这种图解的表现方式。

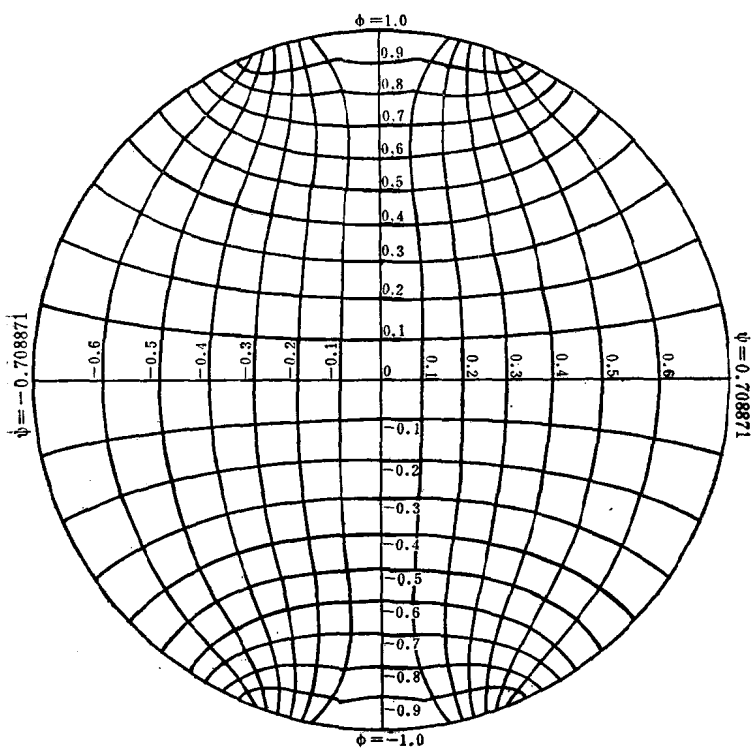


图1-3 圆面中的等势线和流线分布图。图中线状源和汇分别对立在圆形外围，各自张开 45° 角

在图 1-2 中表现的是一个源点和一个汇点分别相对地分布在一个圆形的外围线上，在圆形的内部则分布着所产生的等势线和流线。

在很早的研究工作中就已发现这种模型不适于应用，因为我们又遭遇到在源点和汇点发现特异点的问题，因而不适宜于进行保角映象。

从这一个例子可以学习到怎样应用互相对立在圆形外围上的线状源和汇，它们的张开角度都为 45° 。

图 1-3 中的模型表现的是一个直径为 1 的圆形，在图中绘出了等势线和流线。应用这一基础图幅可以重新转换为一个能够表现 $(1 - 1)$ 方程式的数学应用的矩形。

保 角 变 换

把上述图形转换为一个矩形时应用的相似原理是电和欧姆定律的应用。

用来作为研究对象的一个圆形的外半径 $r_c = 100$ ，在它的域内布了一口井，其半径为 1。因而这一区域的面积应为：

$$A = 100^2 \times \pi = 31,415.92654$$

从图 1-3 上可以求出这一模型的阻力如下：

$$\frac{\nabla\phi}{\nabla\psi} = \frac{1.0000}{0.708871} = 1.410694$$

一个矩形的阻力可以按照一条电缆的阻力推算，它和长度除以截面积的数值成正比，对一个平面来说可计算如下：

$$\frac{L}{W} = 1.410694$$

从数学观点说来，它的比电阻为 1，因而：

$$\begin{aligned} A &= 31,415.92654 = L \times W \\ &= 1.410694 W^2 \end{aligned}$$

结合前面的 A 值可算出：

$$W = 149.230821$$

$$L = 210.519022$$

这样一来就得到图1-4中的保角矩形，图1-3中的等势线和流线都在这一图中用直线重行表现出来。其中座标值 $(\bar{x}, \bar{y}) = (0, 105.25951)$ 的 ϕ 值为 1.00；而座标值 $(\bar{x}, \bar{y}) = (74.61541, 0)$ 的 ψ 值 = 0.708871，这些数值都和作为模型的圆形图象彼此符合。

不稳定状态液体流动

为了向读者介绍上述方法的工程应用及其重要意义，我们首先确定在一个圆形油气藏中（井位在圆心处）座标为 $(x, y) = (100, 0)$ 这一点的压力随时间变化情况。这一点在图1-4的矩形中的对应座标点为 $(\bar{x}, \bar{y}) = (74.61541, 0)$ ，矩形中的井点位于原点。对于矩形中一点的不稳定液体流动分析可以应用 E_i 函数计算，这一函数表在文献中可以找到。对于一个无限大的介质中，液体流动的压力降可用下式表示：

$$\Delta p = \frac{q\mu}{2\pi kh} \times \frac{1}{2} \left\{ -E_i \left(\frac{-r^2}{4t_D} \right) \right\} \quad (1-2)$$

在上式中我们要考虑的是 $P(r, t_D)$ 函数，它的表示式如下：

$$P(r, t_D) = \frac{1}{2} \left\{ -E_i \left(\frac{-r^2}{4t_D} \right) \right\} \quad (1-3)$$

在图 1-4 中井位在原点位置的情况下，就可以用一系列和原点井位成对的镜像井来加以处理。这样做就用一系列的汇点表现出没有流体通过矩形边界，而对课题中 $(\bar{x}, \bar{y}) = (74.61541, 0)$ 这一点来说，每一个汇点都要产生一个压降

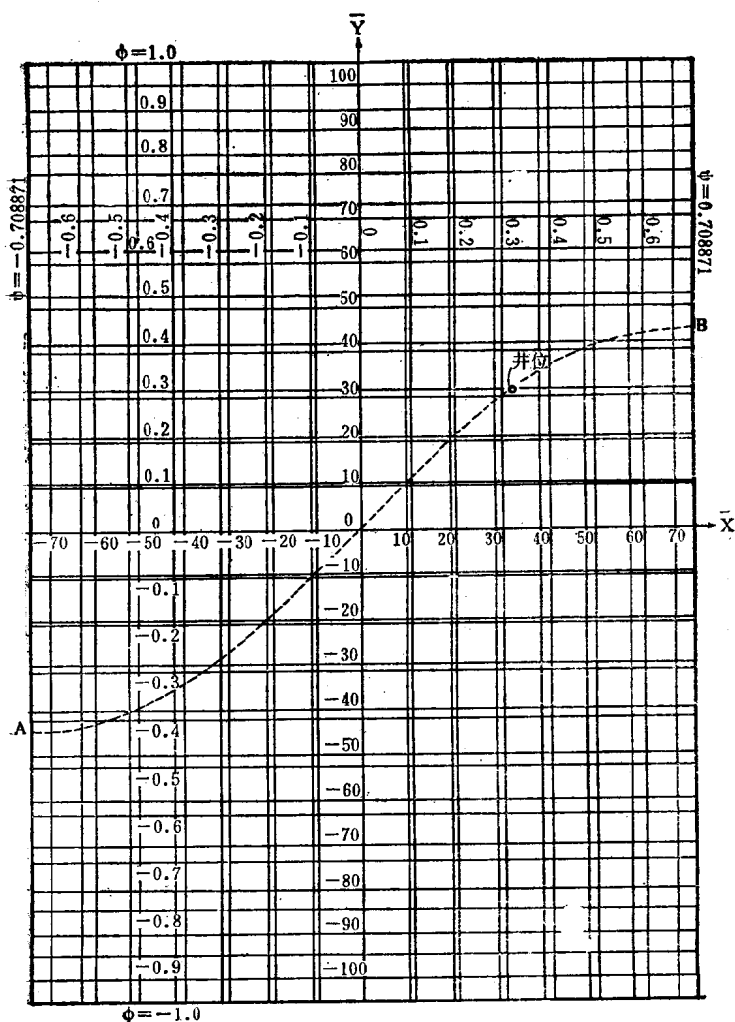


图1-4 一个 $r_c = 100$ 的圆形的保角矩形

值 $P(r, t_D)$ 。

计算结果见图1-5。上部一根线是用保角映象法求得的。第二根直线则是麦斯盖特^[3]和赫斯特^[4]在他们的研究报告中计算的结果，计算时假定条件是一口井位于一个 r_e 为 100 的封闭性油气藏的中心，所计算的是井的产量不变时边界上一点的压降。

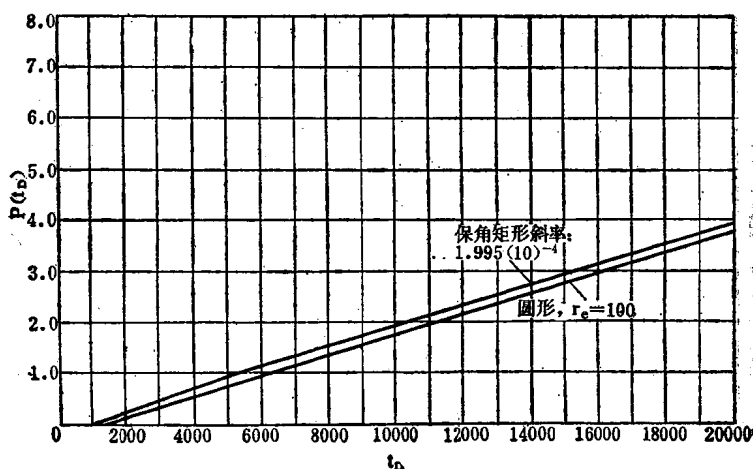


图1-5 $P(t_D)$ 值计算结果($r_e = 100$, $\theta = 0$,
井位在圆心)

现在再应用供应半径的公式计算不同距离处的 t_D 值如下:

$$r_d = 2.6408 \sqrt{t_D} \quad (1-4)$$

所求的时差就是在图中按照保角映象法算出不同的 $P(t_D)$ 函数值相应的 t_D 值沿轴向的位移。加上或者减去一个

时间常数不致破坏(1-1)式所代表的法则。

图1-6的计算结果是井位仍在圆心，但所算出的函数值却代表的是井的半径为1处的结果。在这一情况下两种方法所得结果几乎完全吻合。这时在时间比例上没有偏移，因为在圆形和矩形中井径为1的结果是一样的。

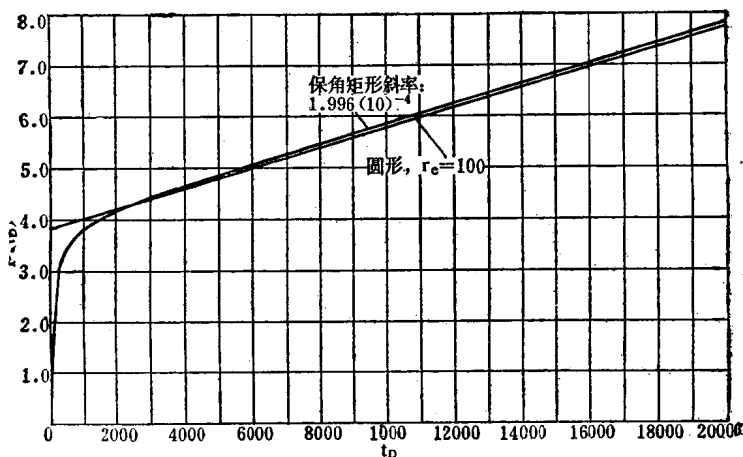


图1-6 一口半径为1的圆心井的 $P(t_D)$ 计算值

作者认为有必要检验一下图1-3所表示图形内部的点子，看看上述方法的计算结果是否仍然有效。

为了这样做就在图1-3上选定一口偏心井，从圆心作一根 45° 线，把井位放在 $r=50$ ， $\theta=45^\circ$ 的位置；在图1-3的矩形中与这一井位相当的座标点为 $(\bar{x}, \bar{y}) = (33.864300, 30.391999)$ ，在图1-4上重复表现的面积投影为AB曲线。

计算所用的参考点是这口偏心井半径为1的位置。计算

的结果和麦斯盖特用格林函数所求得解^[3]相比是一致的, 见图1-7。

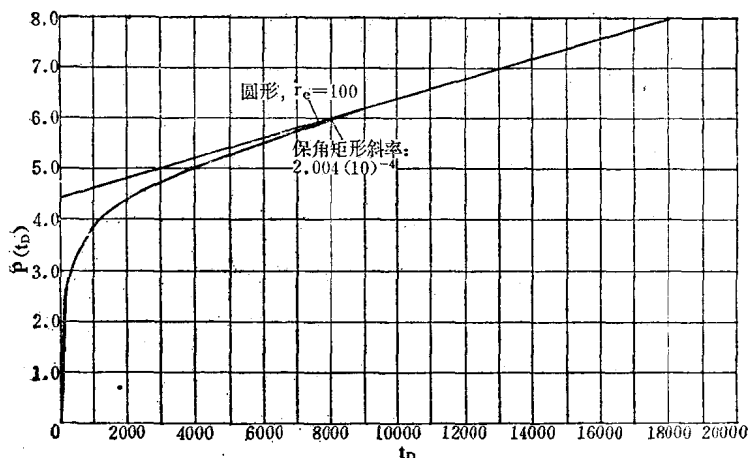


图1-7 一口偏心井($r = 50$, $\theta = 45^\circ$)井的
半径为1处 $P(t_D)$ 计算值

用这条线另一极端的点 ($r_e = 100$, $\theta = 225^\circ$) 计算结果证明, 用保角映象法算出的 $P(t_D)$ 函数值和麦斯盖特的解也是符合的, 见图1-8。

在所有这些图中时间座标的位移都是正值, 因为在参考矩形中半径的距离总是比圆形中所引用的距离要短一些。

我们希望看到一种负的位移, 也就是说与上相反的结果。这一情况可以在图1-9中见到, 井位还在圆心, 而计算参考点的位置则在 $r_e = 100$, $\theta = 67.5^\circ$ 这一点。根据相似准则法把 $r_e = 100$ 折算到矩形上的距离为129.023346。