

油田开发预测

(苏)A.И.阿库利申 著

石油工业出版社

(京) 新登字082号

内 容 提 要

本书论述了用水动力学方法和累积年产量统计数据预测油藏采油量。书中尤其对开发非均质油层确定油、水产量随时间变化过程的研究给予了特别注意。预测方法的选择与油田的地质构造紧密相联系。还研究了油田不同开发阶段应用溶剂、水蒸汽、加热液及火烧油层方法提高原油采收率的计算方法。

本书的主要对象是从事于油田开发和油气开采研究、设计和现场的工程技术人员。

本书第1、2、3、4章由中国石油天然气总公司开发生产局周成勋同志译，第5、6、7、8、9章由北京石油勘探开发科学研究院开发所孙志道同志译。全书由北京石油勘探开发科学研究院开发所俞启泰同志校。

0721/30

油田开发预测

〔苏〕A.И.阿库利申 著

周成勋 孙志道 译 俞启泰 校

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京密云华都印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 7⁷/₈印张 1插页 205千字 印 1—1,200

1993年1月北京第1版 1993年1月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0779-7/TE·732

定价：4.70元

前 言

顺利完成苏联经济发展的石油开采领域的任务，就必须进一步提高油田开采效率和增加地层原油采收率。

石油开采技术领域的科学技术进步和提高采收率方面新科研成果的应用，对解决上述问题起着重要的作用。

不了解或不善于根据现代油田开发指标计算方法来完成原油产量预测任务，则这些计划是不可能顺利完成的。

根据水动力学计算和上述研究成果的应用而建立起来的开发指标预测方法，经受了实践的检验，并得到了广泛的应用。根据水动力学计算结果确立了不同开发条件下原油产量与井数之间随时间而变的关系。在这种情况下，便可非常充分地研究饱和液体地层参数和油藏驱动类型。

苏联各科学研究所制订了许多种开发指标的水动力学计算方法，这些方法的不同之处是不同程度地考虑了产层结构特点和选用了不同的流体渗流特性。对不同石油开采区域进行的预测数据表明，这些方法是可以接受的（特别是对于油田开发初期阶段），并能促进油田加快投入工业性开发。

与此同时，由于产层在形成过程中及以后的岩石地质过程，再加上油、气水在地层中渗流时复杂的物理化学过程及热动力条件的变化，而具有多种多样的复杂性质，可能导致无法建立精确的开发指标计算方法。

考虑多种因素的结果是建立非常复杂的开发指标计算方法，例如ВНИИ-2方法，用这种方法求解必须使用复杂的程序和有大容量存储器的计算机。由于计算过份复杂，难以根据计算开发指标进行工业性应用，而在作决定时常常只根据研究者的职业经

验。因此，本书对建立在水动力学计算基础上的各研究院的开发指标预测方法，作了某些简化。作者认为需更深入研究可以读原著。这里只摘录了一部分。这样可以使材料更易领会，并能促进职业性经验和直觉的形成。

在本书中分析研究各研究院的不同方法而不作任何选择，可以使读者针对油田开发具体条件，自己选择解题方法。

此外，可以肯定断言，对于地质条件非常复杂而地层原油性质不好的油田，宁愿采用不太复杂的方法，并随后根据原先的开发数据对结果进行校正。

在研究分析开发指标预测方法时，应注意完成计算的正确性。不深刻了解产层中原油、天然气和其它渗流流体之间的相互作用，而只是形式地进行计算，常常是发生错误的原因。

由于现阶段的油田开发必须采用提高原油采收率的方法，因此，在阐述油田开发预测问题时，必须与提高采收率的主要方法（注溶剂，注蒸汽，火烧油层）一起进行研究。还注意到，为了更深入研究这些方法，我们根据简单的提高原油采收率模型和原著中所提供的摘要进行了论述。

目 录

第一章 根据水动力学计算进行油田开发预测的矿场地质

资料 (1)

§ 1 独立开发层系的划分 (2)

§ 2 确定渗透率下限 (4)

§ 3 利用数学统计方法整理矿场原始资料 (5)

§ 4 建立极限产量或极限压差的原则 (21)

第二章 溶解气驱开发油藏时确定预期采油量 (28)

§ 1 压力和原油采收率与含油饱和度的关系 (28)

§ 2 确定产量、井底压力和开发年限 (36)

§ 3 渗透率在面积上变化的油藏在溶解气驱条件下的开发布井 (40)

第三章 在弹性水压驱动下确定压力和产量的变化 (48)

§ 1 给定采出量为常数下无限地层中的圆形油藏 (49)

§ 2 在给定常压下无限地层中的圆形油藏 (57)

§ 3 有限地层中的圆形油藏 (59)

§ 4 无限地层中的直线坑道 (61)

§ 5 弹塑性渗流状态 (64)

第四章 在刚性水驱条件下油藏开发计算的理论前提 (68)

§ 1 开发方式的选择 (68)

§ 2 开发条件的简化 (69)

§ 3 利用水电相似方法解决水动力学问题 (71)

§ 4 水驱油不考虑相渗透率条件下产量与压力的水动力学计算 (74)

§ 5 在水驱油条件下考虑渗流流体的两相性 (79)

§ 6 考虑油水粘度差和渗流阻力增加系数确定产量和井底压力 (81)

§ 7 确定开发年限 (86)

第五章 注水保持地层压力过程的计算 (88)

§ 1 注水油田开发系统 (89)

§ 2	确定总注入水量	(95)
§ 3	注水井数的计算	(97)
§ 4	面积注水时确定采油量和开发年限的基本计算	(99)
§ 5	对注入水的要求	(104)
第六章	考虑产层非均质性开发指标的水动力学计算	(105)
§ 1	全苏石油科学研究所方法一 (ВНИИ-1)	(106)
§ 2	乌发石油科学研究所方法	(110)
§ 3	苏联东部地区国家石油开采工业科学研究设计所方法	(113)
§ 4	鞅鞅石油科学研究设计所方法	(121)
§ 5	阿塞拜疆石油科学研究设计所方法	(127)
§ 6	全苏石油科学研究所方法二 (ВНИИ-2)	(132)
§ 7	开发指标计算方法选择	(137)
第七章	注水部分保持地层压力下的油藏开发研究	(140)
§ 1	部分保持地层压力并考虑注水地层不完全波及的水动力学计算方法	(140)
§ 2	部分保持地层压力的研究结果	(146)
第八章	利用先前的开发结果评价开发方式效果和确定预 期的原油产量	(150)
§ 1	利用物质平衡方程评价储量和开发方式的效果	(150)
§ 2	用过去开发的统计资料预测油产量	(160)
§ 3	利用累计油、水产量曲线解决开发预测问题	(181)
§ 4	回归分析用于采油短期预测	(185)
第九章	用提高产层原油采收率方法时的原油产量预测	(189)
§ 1	提高原油采收率方法选择的依据	(189)
§ 2	用溶剂设计油藏开发工艺时预测原油产量的计算	(204)
§ 3	向地层注热载体和确定原油采收率	(219)
§ 4	注湿蒸汽情况下的基本计算	(229)
§ 5	火烧油层开发指标的确定	(233)
参考文献		(241)

第一章 根据水动力学计算进行油田 开发预测的矿场地质资料

由于油田快速开发的需要，确定合理的油田探明程度并求得开发方案设计所需最低限度的原始数据，便具有特殊意义。

油田和油藏工业开发准备程度，必须与“石油与可燃气田储量分类”相适应。提醒注意的是，必须有经过苏联部长会议下属的国家有用矿物储量委员会批准的B和C₁级石油储量，才允许进行油田开发设计并编制工艺方案。

制订工艺方案或开发设计时，使用在地质勘探和试采时取得的矿场地质资料如下：

1. 油层顶、底构造图，并标明构造断裂，产层尖灭和产层过渡到非产层界线，以及等厚度和地层剖面图。

2. 含油内、外边界的油水界面（BHK）和油气界面（ГHK）位置。

3. 油、气、水在地层和地面条件下的分析资料。在地层原油性质中需要特别仔细研究的是饱和压力，地层原油粘度和体积系数与该压力的关系。这些数据确定的高度可靠性和正确性，是计算原油储量和确定油藏开发工艺技术指标所必须的。

4. 根据地层岩心和矿场地球物理以及水动力学方法研究的地层储集性质（孔隙度、渗透率、碳酸盐含量等）研究结果，必须利用数学统计法和概率理论来进行整理。

应当指出，在地层边缘和含水部分的储层性质，也应当仔细研究，因为边外部分的地层状况常常决定开发系统的选择。不能把中心含油部分的储层性质研究结果推广到它的边外部分。油田

开发实际表明,多数油田边外部分的储层性质往往变坏。

5. 在井的试采阶段测量原始地层压力数据并建立地层压力随时间的变化关系。在稳定和不稳定渗流制度下确定所钻井的产油指数和导压系数。如果开发对象中包含小层的非均质油层,则用井下流量计研究井的数据。

在井的试采阶段根据产量或井出砂的极限压差研究水锥或气锥收缩具有特别重要意义。

这些问题不及时研究可能导致在实际开采中达不到水动力学研究计算的采油量,而需要补充资料并重新计算开发技术指标。

6. 在试采阶段油田出现天然驱动的研究结果。

知道天然驱动在很大程度上决定了对开发系统设计的态度和确定设计决策方案。例如,根据对开发对象试采观察结果不期望出现溶解气驱(饱和压力显著低于原始地层压力,发现边水进入油层等),则设计油藏开发方案时不能采用溶解气驱。

§1 独立开发层系的划分

如果在油田勘探时油井揭开几个产油层,则划分单个井网的独立开发层系的问题,在解决设计任务中具有特别重要性和现实性。

这个任务的解决是建立在仔细研究和分析油藏的地质构造、油层的储集性质、液体和气体的物理化学性质、油层天然驱动开发的特点等基础之上的。因此,在研究油田地质构造时,应当确定油藏类型,评价所划分油层的油、气储量,确定油层的延伸厚度。

划分独立开发层的基础原则是保证开采水平在经济上是合算的。

在划分开采层系时应当考虑井的各层的产率。例如,应当把具有高产特征的油层划分为独立开采层,尽管它的总储量和储量

丰度比低产层要低。划分为独立开采层的厚度取决于井的产率和具体技术经济条件。

由于五、六十年代巨大的多油层油田的发现，合并几个层为一个开发层系的问题，具有巨大的现实性。

地质、水动力学和技术经济研究人员确定了把几个层合并为一个开发层系的先决条件归纳如下：

1) 这些层的地层压力和温度应当大体上是相同的，即它们埋藏深度相近，中间没有大的断层；

2) 这些层的储层性质和孔隙空间结构应当大体相同；

3) 合并层的地层原油性质和它的商品特性应当大体相同；

4) 联合成一个开发层系的各层开发工作制度应当是相同的。

几个层合成一个开发层的思想是经过技术经济论证的，由于减少了油田井数，而大量节约投资。此外，因为几个层由一个油嘴联合起来，这就降低了油井产油指数，从而使评价这种开发层效率的任务成为多因素的，而应当考虑技术经济指标随时间变化的条件来解决。

如果在油田上分出几个独立开采的目的层，则实施开发方案时必须对每个目的层的采油井和注水井分布作修正。例如，油田开发实践表明，只有当注水井排线与采油井排线在平面上相符时才能达到最好的结果。

由于油井和注水井管外空间不密封产生的层间串流并不造成开发上的严重问题。

几个层合成统一的开发层在道林、乌仁、萨玛特洛尔和其它油田的实践，也发现了这种方法的缺点，主要是这些开发目的层调整的复杂性。个别层储量的不均匀开采，要求对这些层补充钻井。例如在乌仁油田对联合开发的ⅩⅢ和ⅩⅣ层，在剖面上储量不能保证均衡开采的区块实施了补充钻井，单独打开这些层生产。在西西伯利亚油田几个开采目的层也进行了这样的工作。

如上所述我们注意到，多油层油藏的开发钻井应当根据设计

决策方案通过逐步加密井网来实施。这可以防止井网过密并及时修正有关参加联合开发的个别层后再作合理的决定。

§2 确定渗透率下限

产油层的地质矿场研究表明,地球物理研究结果认为含油的油层厚度在开发过程中达到的压差条件下并不全部出油。

此外,在层状非均质油层中增加压差就伴随着吸引原先不出油的油层和小夹层投入开发。

由此可见,建立油层的极限渗透率是个复杂的课题,它直接与达到大压差的可能性有关,而后者本身又受机械采油装备能力的制约。

因为设计的方法指南规定在执行开发设计时,应当预先确定极限压差和开采方式(在技术经济计算基础上作论证),因此,在极限压差基础上可以确定出油单层的渗透率下限。

为了解决提出的问题,在稳定流量条件下用井下流量计(产量计)进行试井,在井底建立不同压差。根据研究结果作了反映出油厚度与含油总厚度比与压差关系的曲线(图1.1)。根据相应压差下取得的流量剖面数据和给出的井的流量剖面图,按厚度确定单层渗透率和在该压差下还可以有原油流动的 单层最低渗透率值。

在完成研究和计算之后作渗透率下限与压差关系图(图1.2)。

在图1.1和1.2上引用了全苏石油研究院得到的乌仁油田XⅢ层和XⅣ层的油层厚度开发波及系数和渗透率下限与压差的关系。

如果事先对压差作了技术经济研究论证,则可以直接根据图来确定油层出油厚度和渗透率下限。在制订层状非均质油层计算方案和从中计算渗透率平均值时,应当把渗透率 $0-k_{min}$ 的单层厚度不包括在内,而在计算渗透率平均值时也不能把渗透率等于

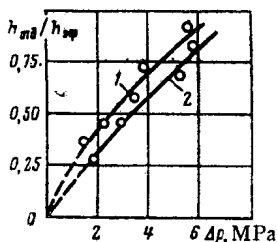


图1.1 油层厚度波及系数与压差的关系

1—XⅢ层；2—XⅣ层

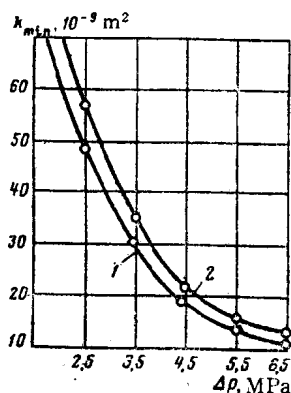


图1.2 渗透率下限与压差的关系

1—XⅢ层；2—XⅣ层

和小于 k_{min} 的样品考虑进去。

在选择开发设计方案时，为了按照过程的工艺指标完成水动力学计算，可以利用各种不同压差的方案。在这种情况下对于各种不同压差的方案，计算渗透率下限和考虑 k_{min} 、平均渗透率、孔隙度和油层出油厚度。

我们注意到，在油田开发初步设计阶段常常缺少井下流量计的数据或者数据不足，因此，作为近似估算常常取 $k_{min} = k_{e_f}/10$ 。在以后的研究过程中使这个值更精确些。

§3 利用数学统计方法整理矿场原始资料

产油层具有非均质结构。很多油田的实际数据分析表明，在实际井距可比的距离内油层参数可以多次变化。这就允许认为所取得的各个井的渗透率值是个偶然数，可以用数学统计方法和概率理论来研究它。

在进行油田开发设计时最重要的参数就是渗透率。研究渗透率变化规律时利用概率论的基本数值特性，如数学期望、离散和变异系数，可允许表示非均质油层的定性和定量性质。

研究非均质性按二个方向进行。一个方向是在广阔范围内进行地质对比来研究非均质性。另一个方向是较为狭窄的，主要是研究非均质性对油田开发中选择最优开发系统的影响。

在研究非均质性时要区分地质非均质性和石油在油藏中分布的非均质性。

地质非均质性根据原因分为：

统一层分成油层与夹层；

孔隙岩石被泥岩和粉砂岩所取代；

油层的储集性质按全部厚度（或部分厚度）随着岩相变化而变化。

对于开发设计来说重要的是估价渗透率和油层不连续程度，也就是储油层被不渗透岩石替代产生的非均质性对油田开发的影响。

在研究非均质性时必须对所有井的剖面作详细分析，接着对比它们的相互关系以划分产油层为组和更细的小层。取得的数据应当用统计方法和概率理论进行综合。

为了建立统计特性和对比开发目的层，作各种所研究参数（ k ）和出现频率（ n ）之间关系图。图上的点可以用阶梯状曲线连结起来（图1.3），这种曲线称为柱状图或者谐调曲线一分布场（图1.4）。用于渗透率分布场的分布称为“渗透率谱”。

油田的实际油层的非均质性研究表明，可能有不同的渗透率分布。水动力学计算原油和液体产量的精确程度取决于描述实际渗透率分布的理论函数的可信程度。因此，重要的是获得可描述很宽范围的随机数（渗透率、孔隙度等）分布的数学模型。

最著名的统计模型是正态或高斯分布。正态分布给很多（虽然不是所有）实际现象以可接受的描述。在渗透率非均质油层水

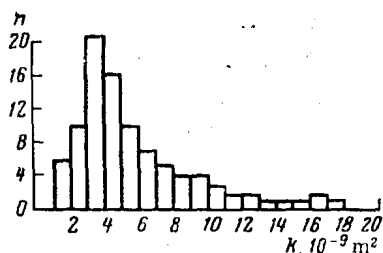


图1.3 渗透率分布柱状图

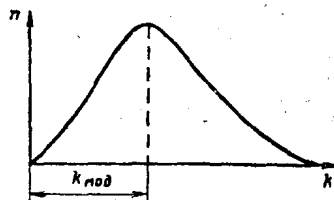


图1.4 渗透率分布场

$k_{\text{мод}}$ — 渗透率分布最频值

淹过程计算实践中，同样也利用了对数—正态分布规律，马克思维尔规律（类型I—B.T.巴依舍夫，类型II—M.M.萨达洛夫），伽马分布以及综合分布等。

在表1.1中摘录了水淹过程计算中最常用的分布函数和密度，以及这些规律的分布参数。根据油层渗透率的非均质性，并考虑确定和取得渗透率资料的方法，实际的渗透率分布可以选用一种最适合的理论规律来描述。例如，根据在前卡尔帕德油田的原油油藏的应用表明，如果渗透率是根据岩心分析资料确定的，则渗透率分布最好用对数正态规律来描述。如果油层渗透率是根据地球物理数据或者是井的地球物理研究结果确定的，即得到一定油层体积的平均值，则实际的渗透率分布最好用马克思维尔规律来加以描述。对每个具体情况必须找到对应的规律。

为了评价在最佳程度上与实际一致的油层参数分布的理论规律，较适宜的是应用Г.汉和C.萨皮洛的方法（图1.5）并随后确

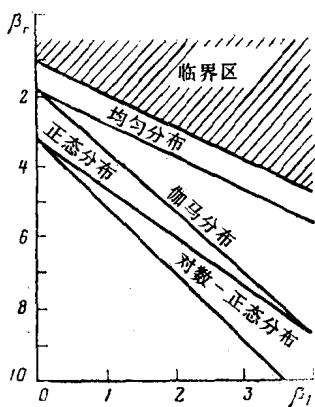


图1.5 确定地层参数实际
概率分布与理论的
对应程度的诸模图

定分布参数。

在诺模图上 (图1.5) 表示了各种分布的地区和密度 β_1, β_2 为正态的、均匀的, 伽马分布和对数—正态分布。这里 β_1 为非对称规格化指标的平方, 而 β_2 为规格化峰态指标。对于任何正态分布 $\sqrt{\beta_1} = 0$ 和 $\beta_2 = 3$

对于所有的 β_1 和 β_2 值都可选择伽马分布。它位于对数—正态分布曲线的附近。

为了应用诺模图必须知道参数 β_1 和 β_2 。为此可以用下列公式来确定 β_1 和 β_2 并把坐标 β_1 和 β_2 的点标在诺模图上:

$$\sqrt{\beta_1} = M_3 / (M_2)^{\frac{3}{2}}; \quad \beta_2 = M_4 / M_2^2 \quad (1.1)$$

式中 M_2, M_3, M_4 ——用以下公式确定的约定时刻:

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= a_2 - a_1^2; \\ M_3 &= a_3 - 3a_2a_1 + 2a_1^3; \\ M_4 &= a_4 - 4a_3a_1 + 6a_2a_1^2 - 3a_1^4; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \sum_{i=1}^n k_i n_i / \sum_{i=1}^n n_i; & a_2 &= \sum_{i=1}^n k_i^2 n_i / \sum_{i=1}^n n_i; \\ a_3 &= \sum_{i=1}^n k_i^3 n_i / \sum_{i=1}^n n_i; & a_4 &= \sum_{i=1}^n k_i^4 n_i / \sum_{i=1}^n n_i. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中 k_i ——按大小排列的渗透率分布值;

n_i ——渗透率出现的频率。

如果诺模图上坐标为 β_1 和 β_2 的点的位置, 离开曲线点或者已命名的模型 (伽马分布, 对数正态分布等等) 区之一足够近的话, 则可以利用该分布来描述经验数据。然后可以着手寻找理论分布的数值参数 (见表1.1)。

评价理论和实际分布的一致性可以利用 A. H. 柯尔玛戈洛夫或皮尔逊的准则来完成。

A. H. 柯尔玛戈洛夫一致性准则可以用下列条件表示：

$$1 - k(\lambda_0) = p[(\lambda = D\sqrt{n_i}) \geq \lambda_0] \quad (1.4)$$

式中 $k(\lambda_0) = \sum_{-\infty}^{+\infty} (-1)^{2m^2\lambda_0^2}$ —— A. H. 柯尔玛戈洛夫函数；

n_i —— 渗透率定义数。

$p(\lambda)$ 概率值列于表 1.2

表 1.2 利用柯尔玛戈洛夫准则的概率值 $p(\lambda)$

λ	$p(\lambda)$	λ	$p(\lambda)$	λ	$p(\lambda)$
0	1	0.7	0.711	1.4	0.040
0.1	1	0.8	0.544	1.5	0.022
0.2	1	0.9	0.393	1.6	0.012
0.3	1	1	0.27	1.7	0.006
0.4	0.997	1.1	0.178	1.8	0.003
0.5	0.964	1.2	0.112	1.9	0.002
0.6	0.864	1.3	0.068	2.0	0.001

下面列出在整理具体研究结果时选择理论分布的例子。

实例。在实验研究时取得的实际渗透率分布（表 1.3）。

为了利用 Γ . 汉和 C. 萨皮洛（见图 1.5）的诺模图来确定渗透率分布的理论规律，应当预先用公式（1.1）—（1.3）计算确定 β_1 —— 非对称标准化指标平方和 β_2 —— 标准化指标峰值。

与确定参数 β_1 和 β_2 有关的中间计算完成结果归纳于表 1.4。

在表 1.4 的第 4 栏中 1.25 是渗透率的最频值；0.5 是渗透率分类中的步长。

按下式预先确定系数 a_1, a_2, a_3, a_4 后，我们可以找到瞬间值

$M_2, M_3, M_4:$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} = \frac{68}{233} = 0.291;$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} = \frac{894}{233} = 3.837;$$

$$a_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^3 n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} = \frac{2366}{233} = 10.15;$$

表 1.3

渗透率间隔 μm^2	间隔的平均值 $\bar{k}_i$ μm^2	频率 n_i	$\bar{k}_i^2$	$\bar{k}_i^2 \cdot n_i$
0—0.5	0.25	44	0.0625	2.76
0.5—1	0.75	48	0.56	26.2
1—1.5	1.25	53	1.56	82.5
1.5—2	1.75	37	3.05	113
2—2.5	2.25	19	5.15	98
2.5—3	2.75	13	7.55	99
3—3.5	3.25	9	11.2	100
3.5—4	3.75	7	14	98
4—4.5	4.25	2	18	36
4.5—5	4.75	1	22	22.5

表 1.4

渗透率 间隔 μm^2	间隔平 均值 $\bar{k}_i$ μm^2	频率 n_i	$\epsilon_i = (\bar{k}_i - 1.25)/0.5$	$\epsilon_i n_i$	$\epsilon_i^2 n_i$	$\epsilon_i^3 n_i$	$\epsilon_i^4 n_i$
0—0.5	0.25	44	-2	-88	176	-352	704
0.5—1	0.75	48	-1	-48	48	-48	48
1—1.5	1.25	53	0	0	0	0	0
1.5—2	1.75	37	1	37	37	37	37
2—2.5	2.25	19	2	38	76	152	304
2.5—3	2.75	13	3	39	117	351	1053
3—3.5	3.25	9		36	114	576	2304
3.5—4	3.75	7		35	175	875	4375
4—4.5	4.25	2		12	72	432	2592
4.5—5	4.75	1		7	49	343	2401
		$\Sigma n_i = 232$		$\Sigma \epsilon_i n_i = 68$	$\Sigma \epsilon_i^2 n_i = 894$	$\Sigma \epsilon_i^3 n_i = 2366$	$\Sigma \epsilon_i^4 n_i = 13818$