

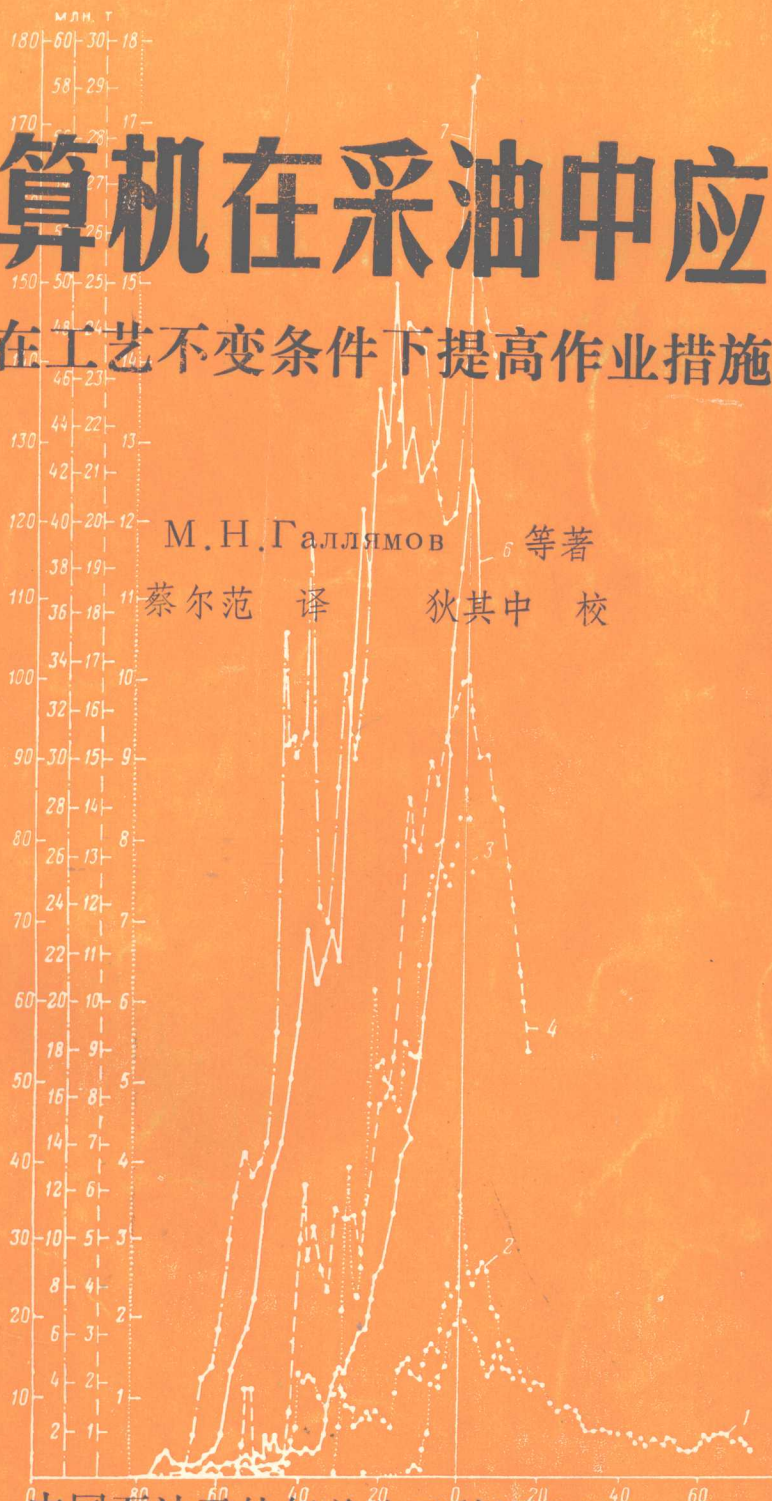
油气田开发系列丛书④

计算机在采油中应用

(如何在工艺不变条件下提高作业措施效率)

М. Н. Галлямов 等著

蔡尔范 译 狄其中 校



中国石油天然气总公司科技发展局

1993年6月

油气田开发系列丛书④

计算机在采油中的应用

(如何在工艺不变的条件下提高作业措施成功率)

М.Н. Галлямов 等著
蔡尔范译 狄其中校

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国石油天然气总公司科技发展局

1993年2月

内容提要

本书论述了用电子计算机预测油产量和安排油、水井作业措施计划方面的经验。论述中对每一具体情况应用了各种数学方法和优化方法(概率统计法, 样品识别, 预测等)。

可供从事油田开发和开采工程技术的人员阅读, 也可作为有关院校师生及科学研究单位的参考书。

计算机在采油中的应用

(如何在工艺不变的条件下提高作业措施成功率)

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ В ДОБЫЧЕ НЕФТИ

蔡尔范译 狄其中校

※ ※ ※

中国石油天然气总公司科技发展局

江汉石油学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 5.5 印张 132 千字 印数 1-1000

1993 年 2 月第一版 1993 年 2 月第 1 次印刷

前 言

系统调整泵装置的工作制度, 进行井下作业和堵水修井工作是保持和提高采油水平的主要措施。

(1) 对上述三组措施进行计算是建立在大量信息处理基础上的。数学方法和电子计算机的应用, 实质上就提高了信息的处理速度, 但主要的是对每组措施的数据能精确地确定其效果。例如, 数理统计方法在进行酸化时能精确地确定地质油矿因素的信息性, 以及采油水平与这些技术因素的关系。

(8) 诊断法可用来对措施分类, 并对并按因素值为特征进行分组, 以提高选井和选择措施类型的有效性。

(15) 在解决分类问题(判断对象)可采用适应法。它可以用来对油田所有井实施每一种所计算措施后效果的有效期作预测。油田产量受到随时间而变的采油水平和资源的限制, 为了达到计划采油量就有必要对其采取措施。

(25) 在本书中, 在规划地质技术措施和选井时应用了图论。它可以用来分析整排井的产量, 甚至整个油田的产量。这时还考虑了以最少开支进行所计算地质技术措施的顺序。

(85) 书中以具体的例子研究了上述数学方法的应用, 并提供电子计算机运算实例, 对巴什基利亚各油藏编制地质技术措施规划的情况。资料的整理是按这样的顺序进行, 即与地质油矿资料实际情况相适应: 从在油矿上资料求取一直到作出措施计划。

(84) 应指出, 本书在评价地质技术措施的有效性时, 将不考虑井的干扰。但当上述工作发展和加深时, 井间干扰可以用简单的单相数学模型或采用文献[16]中的方法来考虑。

(02) 作者们感谢 A. X. Мирзаджанзаде 教授, K. C. Фазлутдинов, B. O. Богопольский, B. И. Бакаржиев, Л. П. Воронков, P. Б. Узбеков, E. Г. Шестак, B. A. Сорокин。由于他们的帮助才有可能写成此书。

(42)

(42) 立数阶图

(22) 息阶阶象权干关

(22) 计算机在采油中的应用

(22) (如何在工艺不变的条件下提高作业措施成功率)

(27) 去其合系

(87) ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ В ДОБЫЧЕ НЕФТИ

(27) 聚尔范译 秋其中校

(27) 果能康定井业工阶表升

(28) 注 注 注

(28) 中国石化天然气总公司科技发展局

(28) 江汉石油学院印刷厂印刷

(28) 1692毫米 16开本 5.3印张 132千字 印数1-1000

(28) 1993年2月第一版 1993年2月第1次印刷

第一章 地质技术措施计划

前 言

第一章 地质技术措施计划 (1)

完善计划的途径 (1)

地质技术措施的计划结果 (3)

根据计算结果对地质技术措施的实施 (4)

第二章 为完成地质技术措施规划任务的信息保障 (7)

整理地质油矿资料的检验统计方法 (8)

选择地质油矿因素信息时的非参数准则 (14)

计算统计标准 (21)

第三章 在对井底附近地层选择有效增产措施时概率

统计方法的应用 (22)

用秩分类法对所采用方法有效性的评价 (22)

在对增产措施有效性作评价时的 Вальд 逐次步骤法 (26)

第四章 有效地质技术措施的选择 (28)

在选择堵水修井措施时的随机近似法 (29)

在选择井底作用措施时的势函数法 (35)

电动离心泵井工作制度的计算 (43)

抽油机井工作制度的计算 (47)

所计算的地质技术措施的实施结果分析 (50)

第五章 用图论作地质技术措施规划 (53)

任务的提出 (53)

任务的具体化 (54)

图的建立 (54)

关于对象的信息 (56)

МИНТИ 算法 (66)

综合算法 (73)

计算结果的形成 (78)

任务的工业性实现结果 (79)

参考文献 (82)

1973 年以前地质技术措施计划的编制是建立在测井资料的基础上, 而不用计算方法和电子计算机, 并带有主观性因而按技术经济计算来进行论证。这就要求完善对措施计划的编制, 它应达到:

1. 在评价新实施措施效果时应消除主观因素。

2. 应能根据这些措施的结果作出对油井采取这个或那个措施的决定。

3. 经工程技术人员在选井和确定强化开采方法时的工作量和时间减到最少。

第一章 地质技术措施计划

编制地质技术措施的计划，以前是不用电子计算机的，极大多数是根据专家们的主观意见而编制的。这样就要花费较多的时间。首次用电子计算机来有效地选择地质技术措施是1973年在 Чекмагушнефть 油气开采管理局。目前巴什基利亚石油联合企业所属的所有油气开采管理局都已用电子计算机来选择地质技术措施。曾进行了对计算模型的评价分析(把计算地质技术措施和实际进行的地质技术措施结果数据相比较)。

完善计划的途径

巴什基利亚石油联合企业在巴什基利亚各油田开发期间所钻的四万多口井中，经常生产的有一万二千多口井。多年来的开发状况是原油加凝析油的产量稳定在四千万吨的水平上。达到这个水平是靠不断地有少量新油田和油藏发现并投产；并对老的已建设油区进行了大量强化采油工作。强化开采包括进一步完善对地层作用系统(如注水)的措施，以及对井采取不同的地质技术措施。某些总结分析表明，由于采取地质技术措施每年能增产原油达 $3.2-3.4 \cdot 10^6 \text{t}$ 。由于大批油田进入开发后期，强化采油的意义就更加突出了。在这种情况下油田开发效果的提高可以从下列两方面来达到：油井本身的水动力完善(补孔，水力压裂，水力喷砂射孔，酸化，表面活性剂处理，油层电加热，井底热油洗井，热气化学作用，热酸处理)，以及机械采油井工作制度的完善和井底附近注入水影响的改善。

根据油田开发的驱动类型和产层的地质物理特征，在各油田开采管理局过去曾采用，现在还采用的主要是那些对某效果最好的措施。对于堵水修井工作计划编制有一定意义的是：在编制强化开采措施计划时对油井水淹途径和原因作精确诊断。强化采油和堵水工作的主要方向取决于储集层类型及其埋藏深度。例如，对于下二迭统的，上泥盆统上发门那阶的，中石炭统卡希罗一波到利层碳酸盐岩裂缝型储集层在伊希姆拜 Ишимбайнефть，阿尔兰 Арланнефть，切克马古什 Чекмагушнефть，红霍尔姆斯克 Краснохолмскнефть，乌发 Уфанефть 等油气开采管理局主要采取酸化和热酸处理，而对于泥盆与石炭纪陆源沉积颗粒储集层在所有的油气开采管理局采用水力喷砂射孔，水力压裂和注入表面活性剂。采用得最多的是热力法，酸化和注入表面活性剂等措施。为了提高油井的生产能力，在堵水的同时还采取水力压裂措施。

在1973年以前地质技术措施计划的编制是建立在油井资料的基础上，而不用计算方法和电子计算机，并带有主观性质而没用技术经济计算来进行论证。这就要求完善对措施计划的编制。它应达到：

1. 在评价所实施措施效果时应消除主观因素。
2. 应根据该油田这些措施的结果作出对油井采取这个或那个措施的决定。
3. 将工程技术人员在选井和确定强化开采方法时的工作量和时间减到最少。

4. 提高对原始和最终结果资料的处理效能。

5. 在选井, 确定措施和其技术参数时应充分利用国内外科学技术成果。

数学方法的发展和电子计算技术的出现使我们有可能对单井和整个油田的采油问题最优化求解。在目前阶段为达到这个目的可作七个方面的工作(图 1)。该图反映了油井井下作业和大修的动力模型, 即其流动资金, 提高采量或降低其下降速度等主要方面的模型。由图可见, 所有工作量按其现实性可划分为三种主要类型。

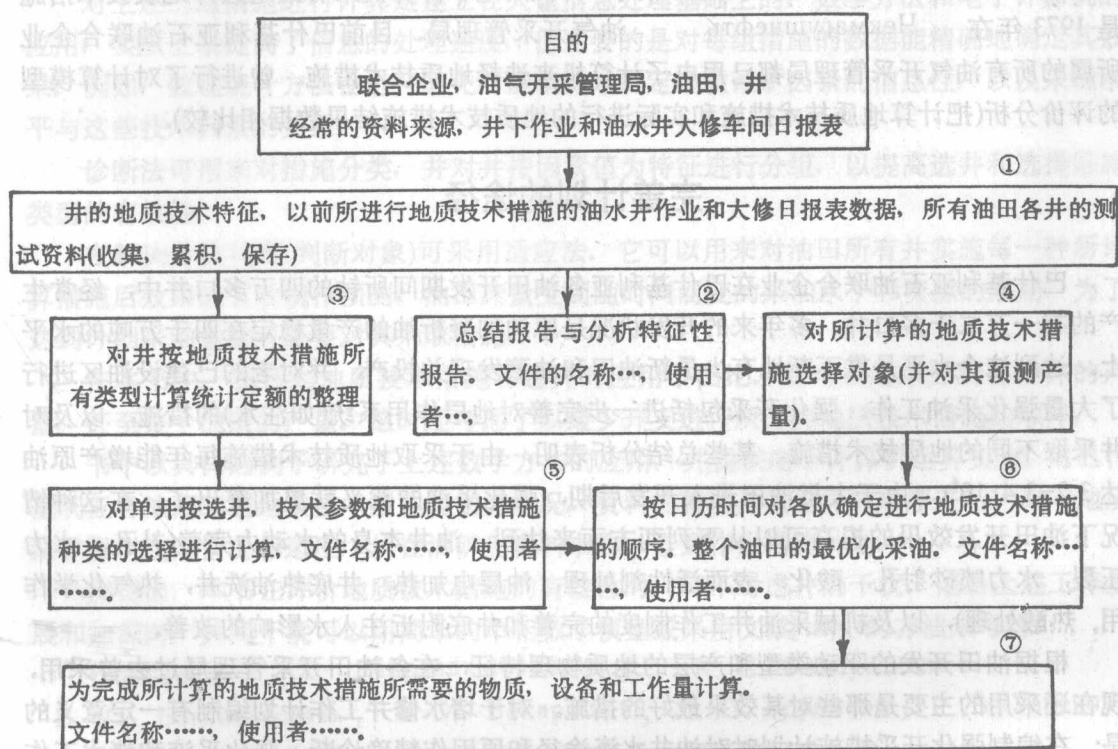


图 1 数学方法和电子计算机的应用示意图

1. 大量资料的处理

关于井的地质技术特征和油田投入开发以来以往所进行措施资料的收集, 累积, 保存和经常性的补充和校正(块 1);

对进行过修井和其它作业井的总结和分析报告(块 2);

用概率统计方法和电子计算机对井采用各种地质技术措施计算统计定额(块 3)。

2. 计算工作:

对上述地质技术措施选择对象(油田, 油藏)(块 4)。

选井, 并根据块 3(块 5)计算统计定额确定地质技术措施的名称;

按日历对各作业队确定上述地质技术措施进行顺序, 即整个油田采油的最优化(块

6);

对各级(油田, 油藏, 油矿, 油气开采管理局)在计划期间进行上述地质技术措施所需

要的物质和设备进行计算(块 7)。

3. 对进行上述油水井作业和大修工作作出决定。

示意图(图 1)表明, 所选择的方向是对油水井作业和大修工作管理系统的规范化。

这样做的最大优点是: 由对每口井进行计算, 并应用这些计算结果转为对整个地层, 油藏或油田所有井的计算结果进行综合研究。由此可以确定为完成各种采油任务(达到规定日产液或日产油水平; 在计划期间内达到累积产油量)的地质技术措施工作量。这时还应考虑劳动组织、物质、技术或其它资源的情况。

井下作业和大修管理系统的规格化之所以成为可能, 是由于能处理大量实际数据(包括地层流体的储集性能, 井身结构, 以及进行地质技术措施工作的经验等)的概率统计方法已被普遍掌握。数学方法和电子计算机在经验的基础上可以对每个油田, 对一系列地质技术措施计算其统计的标准, 并在这基础上, 为达到采油最优化, 就可以选出最“好”的措施。

在本书中对采油最优化并不只是简单地选择地质技术措施, 而是对一系列地质技术措施确定其最优的实施顺序。为了确定这个顺序利用了图论, 这样就能在本质上减少计算机运算时间和计算次数。这就是管理系统规格化的最主要特征。

地质技术措施的计划结果

研究进行地质技术措施结果的主要目的是搞清当前产量构成的规律性, 即对不用电子计算机计算所安排的这个或那个地质技术措施使其能达到的最大增产量。

这样, 1974—1976 年期间在石油联合企业的三个油气开采管理局 (Арланнефть, Южарланнефть, Чекмагушнефть) 进行了下列井下处理作业(表 1·1)。

表 1·1

井底处理类型	总次数	有效次数	井底处理措施的有效率, %
酸化	262(66)	111(23)	0.42(0.35)
水力压裂	235(131)	156(87)	0.66(0.66)
地层电加热	213(137)	146(114)	0.68(0.83)
BO	28(-)	18(-)	0.64(-)
表面活性物质	8(-)	5(-)	0.62(-)
热气化学作用	105(105)	48(48)	0.48(0.46)
小计	851(449)	384(272)	0.45(0.60)

注: 括号内数字为 Арланнефть 油气开采管理局的。

在石油联合企业的所有油气开采管理局范围内曾作了地质技术措施的结果分析。曾对一万二千口井作了地质技术措施计划, 其 30% 为电动离心泵井, 70% 为抽油泵井。能明显提高产量的主要地质措施为改变泵井的工作制度。这类措施的效率在整个石油联合企业为 65—70%。堵水修井工作和井底处理所增加的产量能达整个石油联合企业年计划产量的 0.8%。进行堵水修井工作的效率为 30—50%, 而井底处理在整个石油联合企业的效率为

60—65%。

进行地质技术措施的分析结果表明，下列措施的效率最高：对产量不到 10 吨/日，含水高于 70% 的井进行堵水修井工作；对于产量为 15—20 吨/日的井进行井底处理；对于产量大于 25 吨/日的井要改变电动离心泵的工作制度；对于产量为 5 至 45 吨/日的井，改变抽油泵的工作制度。

对所编制的计划和进行地质技术措施的结果进行研究可以搞出用电子计算机编制作业计划的算法，即在电子计算机上进行选井，确定措施名称及其技术参数。

根据计算结果实施地质技术措施

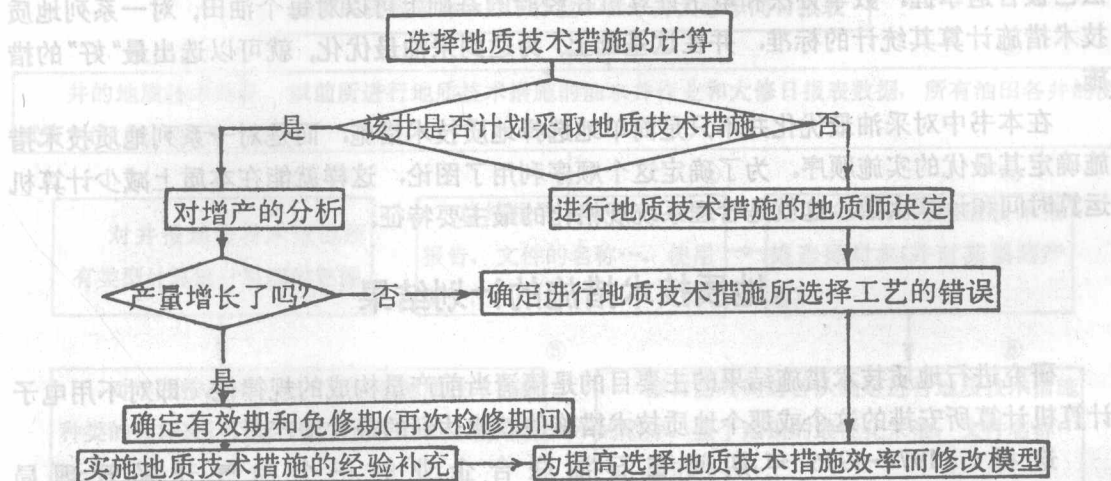


图 2 地质技术措施计算的和实际结果分析的框图

现在对人工和用电子计算机所确定的地质技术措施实施结果加以分析。定期在电子计算机上作对比分析可以解决下列问题：

1. 选择堵水修井作业种类。这里包括通过专门的或射开孔眼挤入水基或油基水泥，
гипан，焦油多丙醛烯基氨基化物(paly-acryl-amide)，泡沫以及用封隔器(共有 14 种作业)；

2. 选择地层井底附近的处理方法(增产措施)。它们包括：水力压裂，水力喷砂射孔，酸化，热酸、泡沫酸和油酸处理，注表面活性剂，热气化学作用，地层电加热，井底热油洗井(共有十种)；

3. 计算泵井(电动离心泵井，抽油泵井)的工作制度。这类计算有十种(换泵，泵挂深度、冲程、冲次的改变等等)。

在电子计算机上进行计算，即选井和选择对其有效的地质技术措施是建立在充分利用整个开发期内油田各井所进行措施参数和结果的已有信息基础上的。这时，有效的标准是对进行这种或那种措施的花费是合算的。

分析的实质可归结为：研究关于油水井生产的已有资料；确定为进行分析所必须的数据量，为进行计算分析所需的资料密度，考虑分析结果为措施计划的综合组合确定工作顺

序。分析方法见图2。

为了对所有井(其地质技术措施已按计算实施)进行分析,应逐月地注意其产量变化。进行这类分析的方法和原则已经制定。为分析可利用下列数据。

1. 对油气开采管理局所有井堵水修井作业和井底附近处理结果的评价表。
2. 对油气开采管理局油井选泵结果评价表。
3. 所研究阶段在管理局范围内所采取措施的综合资料。
4. 在所研究时期内,在石油联合企业内所采取措施的综合资料。

主要数据(所研究井的产量)取自日报表。在第一阶段由油气开采管理局和网格信息处理中心的负责数据处理部门工作人员和其它专家平行进行分析。

表 1·2

地质技术措施	油气开采管理局	进行地质技术措施		增加产油量, 吨		计算的实现率%	1种方法的增产油量, 吨	
		总	计算的	总	计算的		总	计算的
堵水修井作业	АрН	13	8	900	—	未得到	—	180
	ЮАН	21	—	9400	—	—	448	—
	ЧН	24	24	7820	7820	67	325	—
井底附近处理(增产措施)	АрН	98	82	35975	31335	70	382	290
	ЮАН	191	9	60400	4900	44	700	350
	ЧН	10	10	—	13719	70	1372	—
电动离心泵	АрН	92	49	3221	119478	86	2504	537
	ЮАН	214	45	164400	89600	71	1900	443
	ЧН	45	26	10103	48770	62	1870	537

Арланнефть, Южарланнефть, Чекмагушнефть 油气开采管理局采用综合规划

第一年的某些分析结果见表1·2。根据分析结果可以得出下列结论。

三个管理局在一年内共进行708个措施,其中253个是用电子计算机作了计算的。

堵水修井作业的效率为67%(不采用电子计算机计算的为30—50%),增产措施为70%(不用电子计算机计算的为60—65%),电动离心泵的选择为73%(不用电子计算机计算的为65—70%,即等于或超过不用电子计算机计算选择措施的效果。)

每次措施的增产油量计算的比未计算的要高,甚至在总的选择结果效率很差的情况下也是如此。

按措施类型找到了因素的计算机最优选取,它们在综合规划时能确定所采取措施的效果。对堵水修井作业的这种选取为 Чекмагушнефть 管理局的工作经验,对增产措施 — Арланнефть 的工作经验;而离心泵的选择则为 Арланнефть, Южарланнефть 的经验。

所采取的地质技术措施,如果没有经电子计算机计算推荐则所得的增产油量还不能补偿其花费,即这些措施是无效的。这样在 Арланнефть 油气开采管理局由82口所研究井中推荐了58口。这些地质技术措施的实施曾增产了24240吨原油,即其经济效

应为六万三千卢布。没有用计算机计算推荐而进行增产措施的 24 口井中采出 7098 吨原油，而其亏损为 2 万卢布。

按现有方法计算了对整个管理局在进行地质技术措施方面的花费，即增产 1 吨原油的成本。

在泵的选择方面其结果更为明显。

分析结果以不明显的形式反映了处于不同开发阶段所有油田的普遍经验。

经常进行分析可以对各油田和个别区块建立计算统计模型，确定地质技术措施种类与各层系特征之间的关系。

用电子计算机进行上述工作首先将导致提高整个石油联合企业的采油水平。但广泛地采用这种方法要求作业计划的完善及其不断地发展。在发展方面应考虑为提高所计算的地质技术措施实施效率模型应进一步完善。这包括建立在能反映地质师直觉的逻辑运算，以及采用能更精确地概括出地质技术措施的数学新方法。

从 1977 年起对石油联合企业的所有油气开采管理局对实施地质技术措施所作的计算结果进行了分析。分析结果较好，这样就开始了根据其当前采油量指标及其预测量对管理局按井，按层系和按整个油田由机器来编制作业计划，即由作为计划地质技术措施结果的单井计算产量转为产量计算。这样，计算的采油水平就与进行一定地质技术措施所计算的工作量，物质与设备就等同了。

井号	层系	油田	措施类型	措施效果 (吨/日)	措施成本 (卢布)	措施效率 (吨/卢布)
200	323	70	3133	3232	85	38
320	323	44	4000	60400	9	191
-	323	10	10	10	10	10
323	323	10	10	10	10	10
434	1000	11	88000	104400	45	514
323	1870	65	48700	10100	20	48

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

现在人工和用电子计算机计算结果对比。

第二章 为完成地质技术措施 规划任务的信息保障

可以用各种不同的数学方法(匹配, 自适应, 最优化等)来进行地质技术措施的选择。因此每一个要解决的问题对于信息的要求有着自己的特点。

首先必须确定为解决每个问题所需要的最少, 但足够的资料量。为此研究了巴什基利亚从油田开发起实施地质技术措施的全部经验。例如, 曾进行了 1500 多次堵水作业; 石炭系油田曾在一千多口井中采取了增产措施。并且, 措施的类型是预先确定的。这为通过射孔孔眼各种类型的注入, 或井底部分各种处理(水力压裂酸化等), 或者是泵的变换(离心泵换离心泵, 抽油泵换成离心泵, 改变泵挂深度等等)。在这些的基础上制定了地质技术措施的分类(表 II · 1), 根据这种分类来收集已进行的地质技术措施资料。对这些资料的分析可以帮助我们对管理局作出地质技术措施种类的进一步选择。

方法选择的基础是收集统计并处理必须的资料。

对每种措施编写出影响其成功率的因素单子。这单子应经管理局的专家们同意。因素的收集取决于用检验方法对专家们意见的处理。

表 II · 1

堵水作业种类	符 号	堵 剂	符 号
通过专门孔眼挤入	1	水 泥	1
形成水的不渗透遮挡	2	表面活性剂溶液	19
对已有射孔井段注入	3	油基溶液	24
改变生产滤器	4	水基溶液	25

增产措施	符 号	作业种类	符 号
水力压裂	ГРП	离心泵改变工作制度	ЭЦН-ЭЦН
水力喷砂射孔	ГПП	改离心泵为抽油泵	ЭЦН-ШГН
酸化	КОС	改变抽油泵工作制度	ШГН-ШГН
热酸处理	ТКО		
注沫酸处理	ПКО		
表面活性剂	ПАВ		
热气化学作用	ТГХВ		
井底电加热	ЭП		
井底热油洗井	ПЗ		

地质技术措施种类	各管理局的地质技术措施符号					
	ТН	ОН	АКН	АрН	ЮАН	ЦН
堵水修井工作	1101	1101	1101	2101	2401	2101
	1125	1225	1201	2301		2301
	1124	1301	1124	2319		2401
	1301	1401	1401	2401		
增产措施(井下处理)				ГРП КОС ПАВ ЭП ГГХВ	ПАВ ЭП	ГРП КОС ПАВ ЭП ГГХВ
泵变换和工作制度改变	ЭЦН-ЭЦН ЭЦН-ШГН ШГН-ШГН	ЭЦН-ЭЦН ЭЦН-ШГН ШГН-ШГН	ЭЦН-ЭЦН ЭЦН-ШГН ШГН-ШГН			

注：在堵水修井工作的符号中第一个数字—泥盆纪(1)或石炭纪(2)，第二个数字为地质技术措施的种类，最后两位数字为堵剂。

整理油矿地质资料的检验统计方法

为获得检验评价的系统处理由下列步骤组成[1,2]。

1. 由相对大量因素中只找出对施工结果有影响的那些。组成提交专家—矿场工作者检验的评价因素组合。

2. 确定进行咨询的方法(根据调查表，不记名调查表)。

3. 组成由编制计划和研究地质技术措施实施效果的专家参加的检验组。检验组的人员组成在 $10 < n < 20$ 范围内[2]。参加检验组的应包括：油气开采管理局的总地质师，油气开采管理局地质部门负责人，采油气厂矿的主任地质师，主任工程师，检修车间的主任工程师。

4. 形成检验组工作准则和工作顺序。这些准则是建立在检验评价系统原则基础上，并要导至保持下列条件：关于其他检验的评价结果的检验资料的完整性；在整理咨询调查表结果时每一检验的完全独立性；评价匿名的完整。向专家们提出表II·3 那样的补充调查表。

表II·3

因素	业务确定	因次	井段因素特征	等级
x_1 ⋮ x_n	储集层类型(根据岩心和薄片确定)	—	层状 单—层	4

当对每一个因素专家们的认识一致时作业务确定，并指出其变化范围的特征，因为在不同油矿，因素的影响可能是不同的。

为了进行定量衡量，专家应按其对最优化参数影响减弱的顺序排列因素。最后一列里的数字为研究者对该因素在所排列系列中的位置。如果专家对某些因素不能给出其排列的位置，则对它们可以给以相同的号。

根据咨询结果将调查表数据填入地质油矿因素等级矩阵中(表II·4)。这些结果用下列方式进行处理[1, 3]。对每一个参数计算该列的等级和

$$R = \sum_{j=1}^m R_{ij}, \quad (II.1)$$

式中: m —研究人数; R_{ij} —第 i 个因素 j 次检验评价的等级。确定等级的平均和

$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}, \quad (II.2)$$

式中 n —因素数目。计算一个因素的等级和与等级平均和的偏差值

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m R_{ij} - \bar{R}. \quad (II.3)$$

求均方差

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2. \quad (II.4)$$

表II·4

研究者	等级矩阵(水力压裂)										t_j
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
1	9	10	4	4	4	4	4	8	4	4	7
2	6	9	3	3	8,5	3	7	8,5	3	3	5+2
3	6,5	3	6,5	1,5	6,5	6,5	6,5	10	6,5	1,5	6+2
4	1	6,5	2,5	2,5	6,5	6,5	6,5	1	6,5	6,5	2+6
5	3,5	10	8	3,5	3,5	8	3,5	8	3,5	3,5	6+3
6	3	1	10	4	8,5	6	8,5	6	6	2	2+3
7	9	10	7,5	5,5	3,5	3,5	5,5	7,5	1,5	1,5	2+2+2
8	6	9,5	3,5	3,5	9,5	8	5	7	2	1	2+2
9	2	6,5	6,5	2	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	10	2+7
10	2,5	2,5	2,5	8	8	8	8	8	2,5	2,5	5+5
等级和	48,5	68	54	37,5	65	60	61	70,5	42	35,5	
与等级平均和的偏差	5,7	13,8	0,2	16,7	-10,8	-5,8	-6,8	-16,3	12,2	18,7	
均方差	32,49	190,44	0,04	278,89	116,54	33,64	46,24	265,69	148,84	349,69	1462,50

专家意见的协调一致性可以用 Кенделл 协和(协调性)系数[1]来评价

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}$$

在<有联系>等级情况下, 协和系数

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_i T_i}$$

式中 $T_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j)$ 第*i*个排列中相同等级的数目。

专家们意见的一致程度可以用下列准数来评价

$$\chi^2 = m(n-1)W = \frac{S}{\frac{1}{12} mn(n+1)}$$

在<有联系>等级情况下

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12} mn(n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_i T_i}$$

χ^2 值属于自由度为 $n-1$ 的 χ 平方分布。

研究一下对水力压裂实施结果有影响的主要因素的选择。

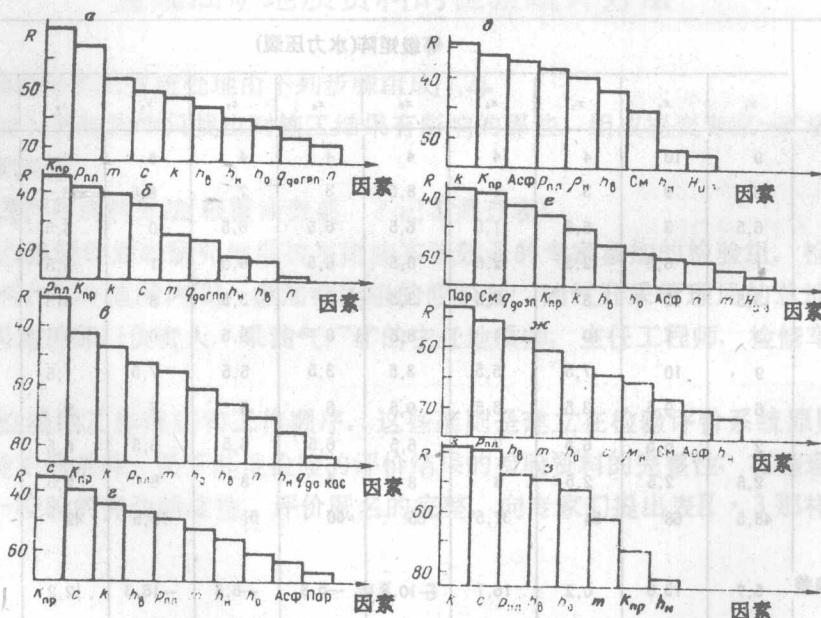


图3 地质油矿因素等级先验柱状图

在增产措施情况下: a-水力压裂; b-水力喷砂射孔; c-酸化; d-热气化学作用;

e-井底热油洗井; f-地层电加热; g-表面活性剂; h-热酸处理; 因素: k_{np} -采油指数, p_m -地层压力; m-孔隙度; c-储集层类型; k-渗透率; h_b , h_H , h_o -分别为射开, 含油和总厚度; q-采取地质技术措施前的产量; n-射孔孔眼密度; c_m -胶质含量; A_{cp} -沥青质含量, n_{ap} -石蜡含量; H_{a3} -人工井底; μ_H -原油粘度; ρ_H -原油密度。

选择地质矿物因素。其中有影响的为： x_1 —储集层类型(单一或层状的)； x_2 —水力压裂产量(吨/日)； x_3 —孔隙度(%)； x_4 —渗透率(微米²)； x_5 —总厚度(米)； x_6 —含油厚度(米)； x_7 —射开厚度(米)； x_8 —射孔密度(每米孔数)； x_9 —地层压力(帕)； x_{10} —采油指数(t/MPa)。

根据十位专家的意见编写等级矩阵(见表II.4)。计算等级和，与平均等级和的偏差值，均方差。调和系数 $W=0.25$ ，其概率 $P=0.99$ 。系数的显著性用 χ^2 准数校正，该准数为 22.5。在自由度为 $n-1$ 情况下计算值 $\chi^2 > \chi^2_{表} (\chi^2_{表}=21.7)[1]$ 。

因此，专家们的意见并非偶然。协和显著系数的确定可以编绘等级的平均先验柱状图(图3)。对所有增产措施的所研究种类进行这类计算，则得单调递减的不相等分布情况。因此在今后计算中包括所有因素。

为了收集对水力压力压裂成功率有影响的主要工艺因素曾填了调查表(表II.5)，该表中专家们排列了八个工艺因素，并与其对该措施结果的影响程度相对应。

表II·5

因素编号	因 素	符号	等级
1	水力压裂的压力	$p_{раа}$, 兆帕 MPa	
2	前置液体积	$V_{жр}$, 三次方米 m^3	
3	顶替液体积(每米)	$V_{пж}$, 三次方米 m^3	
4	前置液粘度	$\mu_{жр}$, mm^2/s	
5	砂 量	Q_n , 吨 t	
6	悬砂液体积	$V_{жп}$ 三次方米 m^3	
7	砂的质量比	π_n , %	
8	注入压力	$p_{зак}$, 兆帕 MPa	

根据所填的调查表资料所得到的水力压裂工艺因素的等级矩阵(表II·6)曾这样来改造，以使每一列的等级和等于 $n(n-1)/2$ [1]。协和系数 $W=0.49$ 。该系数的显著性 χ^2 为 34.3。概率 $P=0.99$ ，在自由度 $n-1=7$ 的情况下 $\chi^2_{表}=18.5$ ，即 $\chi^2 > \chi^2_{表}$ 。因此，可以肯定，专家们对所研究因素影响程度有着一定的一致性。在对不同油气开采管理局专家意见整理时曾考虑了对泥盆和石炭油田的协和系数。

对泥盆油田所考虑的协和系数 $W_1=0.408$ 。其对 χ^2 准数的显著性为 20.6。

$\chi^2_{表}=13.3$ ，即 $\chi^2 > \chi^2_{表}$ 。

对石炭纪油田计算的协和系数 $W_2=0.765$ ($\chi^2=26.8$ ， $\chi^2_{表}=13.3$)。比较 W_1 与 W_2 可以得出下列结论：专家们相对于因素排列的一致情况并非偶然。这两个准则的概率 $P=0.99$ 。

对水力压裂效果影响最大的因素为：砂量，前置液体积，顶替液量，悬砂液量，压裂的压力(图4)。

因此，等级回归法可以在专家组意见的基础上关于因素的选择得出一定的结论。这不会与对客观资料用统计方法所整理的结果有分歧。

表II·6

专家编号	因素								t_i
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	4	4	4	4	4	4	4	8	7
2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	8
3	6	3	3	3	3	3	7	8	5
4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	7	3,5	8	5
5	5	5	5	5	1	5	5	5	7
6	4,5	2	4,5	6	1	3	7	8	2
7	4,0	1,5	4	6	1,5	4	7,5	7,5	3+2+2
8	4,5	2	2	7	2	4,5	7	7	2+2+2
9	4	2	4	6,5	1	4	6,5	8	3+2
10	3,5	3,5	7	3,5	3,5	3,5	8	3,5	6
等级和	43,5	31	41,5	49	25	42,5	60	77,5	
	1,5	14	3,5	-4	20	2,5	-15	-22,5	
	2,25	196	12,25	16	400	6,25	225	506,25	

对检验评价结果的分析表明各油气开采管理局专家们的意见有很高的一致性。但对某些地质技术措施，例如电加热，井底热油洗井，在研究期间对泥盆纪油田发现专家们的意见一致性较差。实际上 Туймазанефть 油气开采管理局泥盆纪油田与 Аксаковнефть 油气开采管理局的油田在埋藏深度上(Туймазанефть 为 1460—1480 米，而在 Аксаковнефть 为 1750—1770 米)，生产层厚度等都有差异。其储集性质也不同：

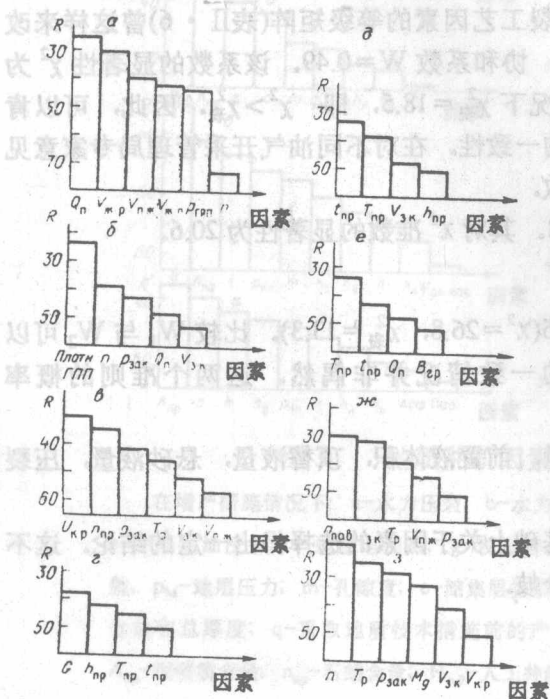


图4 工艺因素等级先验柱状图

a-水力压裂；b-水力本砂射孔；c-酸化；d-热化学作用；e-井底热油洗井；f-地层电加热；g-表面活性剂；h-热酸处理因素： Q_n -砂量； V_{np} -前置液量； V_{nx} -顶替；液体体积； V_{xn} -悬砂液量； P_{ipn} -压裂压力； P_{yak} -注入压力； n -砂浓度； V_{np} -酸液量； T_p -作用时间； V_{3k} -注入溶液体积； V_{kp} -酸液体积； np -溶液浓度； G -ADC 雷管质量； h_{np} -加热厚度； T_{np} -加热延换时间； t_{np} -加热温度； n_{ab} -表面活性剂浓度。