

# 采油自动化原理与自动计量

新疆石油学院科研处



# 目 录

## 采油自动化原理与自动计量

### 第一部分 采油自动化

- 一、采油自动化综合工艺的任务和方案特征…………… (1)
- 二、采油自动化综合工艺控制系统的数学模型…………… (5)
- 三、采油自动化综合技术工艺的统一标准…………… (12)

### 第二部分 油井的自动计量

- 第一章 油井自动化计量的理论基础…………… (15)
- 第二章 油井液体流量的计量…………… (31)
- 第三章 油井的天然气的产量的计量…………… (67)
- 第四章 油井的原油产量计量…………… (84)
- 第五章 油井自动化计量装置…………… (91)
- 第六章 石油的管道输送…………… (105)

# 第一部分 采油自动化

## 一、采油自动化综合工艺的任务和方案特征

石油工业的采油厂、管理石油天然气的开采。采油厂是一个面积很大的综合体，它生产设备分散，车间多、设施多、管线复杂。它有石油天然气开采车间、有借助于注水保持地层压力的注水车间，油、气、水的分离车间、原油的集输和储存及天然气加工车间。这些车间的工作相互紧密联系形成一个有组织的综合体。石油天然气开采管理的生产设施目前已达到很高水平，其生产的经济效益直接依赖于管理的质量，依赖从所有检查点上生产过程的资料最优化的处理。

技术工艺过程的复杂性，设备分散、车间又相互距离很远，就决定了管理上的差异。石油开采生产的组织技术工艺系统和开采技术工艺自动化管理系统是复杂的。在使用过程中自动化系统需改变设备工作的管理形式，部分地改变操作方式，以适应对地层的开采工艺措施和部分改变运转指命和它的形式以适应生产计划的需要。因此最初设计阶段石油开采的组织技术工艺系统必按《基本工作原理》进行，由《基本工作原理》再决定结构形式，来设计组织技术工艺的自动化控制系统。

石油开采技术工艺系统是石油天然气开采控制的基础。全苏石油天然气综合自动化研究院根据石油开采技术工艺研制的自动化控制系统，已在1980年投入使用，除提高生产水平之外，石油开采技术工艺自动化控制系统研制的目的是：通过《鞑靼石油》联合体的使用，建立科学的、具有先进技术的（算法、模型、程序）标准的石油开采技术工艺自动化控制系统。它计划在第十一个和第十二个五年计划中广泛使用。

石油自动化开采由三部分组成：第一部分给出石油开采技术工艺的特征，即管理的目标和自动化控制系统的主要功能；第二部分中，介绍管理目标的数学模型、预测方法和控制方法；第三部分中研究自动化控制系统的标准化问题和它的今后发展。本文介绍第一部分。

石油开采的技术工艺过程可以简化为下面的形式。石油蕴藏在地下数个收集槽（一个地层或数个地层），油井则是这些收集槽的开口，开采的过程是将水注入注水井，驱动气、液混合物从油井里排出。在这种情况下，油水混合物在地层产生渗流。为了注水，在油田安装有专门的水泵和供水管线网。从油井里采集原油，对有较大地层能量的油层，采油采取自喷法；否则借助专门的抽油机抽油。油井产品流入集油站的管道网，然后在专门的装置中从开采的气液混合物里分离出气体、水和原油，原油的含水量必须达到商业标准。

实际上，采油系统是一个液压系统。这个液压系统由地下收集槽、具有深井泵的油井、自喷井、注水井、供水的水泵组，分配水的管道网和收集产品的管道网组成。

采油过程有其特点，首先是不稳定的过程。因为在石油产地的生产过程中，被开采的地层的含水量和开采的原油中的含水量都在不断增加，同时渗流条件变化。为此要钻新的油井与注水井，并减少从大量含水地层和大量含水的收槽里的开采量，或者改变油井深井泵的参

数和工作制度。这意味着石油开采技术工艺的内容应随时改变。当掌握技术特征的变化时，管理石油开采过程便成为石油开采技术工艺的主要内容。

所有管理动作都是断续的并分为两组。第一组是根据生产在三至五年时间里的前景拟订石油开采技术工艺的技术内容，其中包括专门方案的设计。第二组是对油井实施地质技术措施。〔注1〕地质技术措施在石油开采过程中如何和何时去实现。对油井实施地质技术措施的决定通常是在每星期（或者更短）与保证一至三个月石油开采的水驱动力方案一起计算。在实施地质技术措施之后需要在油井之间、水井之间重新分配开采的液体产量和注水量。

为了对油井实施地质技术措施，要求要有不同装备的专门化作业队、深井泵、油井的设备与材料、运输工具等。所有的装备还是部分装备的数量都受到人力与资金的限制。在实施地质技术措施的时间里，油井要停产，停产的时间从10~15小时到几十个昼夜。这些限制使工作复杂化。石油开采技术工艺系统范围有时能够包含几千口井。覆盖的面积达1000平方米。而国家主要油区藏油地层在2~3千米深处。这些情况使石油开采过程的技术参数的测量的自动化带来很大困难，因此开采过程中参数的资料受到了很大的限制。

预测油井实施地质技术措施的结果（包括将开采的液体流量和注水量）是非常近似的。为实施地质技术措施所必需的时间同样也不准确。石油开采过程存在着各种干扰，油井突然停产，不能适时的提供实施地质技术措施所需的物资。这一切对石油开采技术工艺的业务管理带来了很大的不确定性。

在管理目标范围很大的条件下，预测实施地质技术措施的结果有很大的不确定性。参数测量的限制，各种干扰的作用和人力、物资资源不足，石油开采技术工艺用传统的方法进行控制是不可能得到令人满意的效果。在这种情况下，也不可能客观估价当时石油开采计划完成的可靠性。为提高可靠性，可连续正确的选择对油井实施地质技术措施，真实地确定必需物资的数量。

建立石油开采技术工艺自动化控制系统的主要目的是提高业务管理的效率。为此，石油开采的预测和对开采业务的最优控制是系统的主要功能。

为了预测石油的开采，在自动化管理系统的组成中有石油开采技术工艺的数学模型。数学模型包含了地下收集槽、油井、注水井的压力和流量的分配，包含模型的参数的周期估价。它的根据是石油开采技术工艺管理目标在长达三个月至一年时间里，工作的实际资料积累，并利用当时获得的参数资料，改变石油开采技术工艺的模式。

为了保证石油开采所需动力，系统应具有在油井实施地质技术措施日程的最优化数学模型。一方面要满足在不确定条件下控制方面的需要，另一方面要满足最优解决计算的实际的需，这些要求导致了在石油开采技术工艺模型的业务管理中，从多个阶段的工作时间间隔里找出最优实施地质技术措施的日程。这些概念将在下面介绍。

为依次解决石油开采技术工艺业务控制，我们选用 $\tau$ 代表工作天数，时间的时刻 $t_m$ 中 $m = 1, 2, \dots$ ，且有 $t_{m+1} - t_m = \tau$ 。时间的成分是顺序的昼夜号，从某些条件具备时计算才开始。在时刻 $t_1$ ，根据当时的资料估价石油开采过程的状态和资源的状态，并在预计的时间间隔 $[t_1 + 1, t_1 + n\tau]$ ，制定实施地质技术措施的日程。在这种情况下，可利用依赖实施地质技术措施日程的石油开采动力预测模型。在时刻 $t$ ，需考虑前面实施地质技术措施的实际情况，再考虑控制的区间为 $[t_2 + 1 \dots t_2 + n\tau]$ ，并根据 $t_2$ 时刻得到的石油开采过程的参数和资源的新资料制订实施该区间的地质技术措施的日程。这样每段 $\tau$ 天都可调整解出石油开采业务

预测的任务并找到对油井实施地质技术措施的最优日程。在标准的石油开采技术工艺自动化控制系统里，取 $\tau=7$ 天，取 $n=10$ 。优选各控制时间区间的实施地质技术措施日程，并使开采动力的预测值与当时的生产计划值差判据最小，这个判据体现了当时的石油开采计划完成的可靠性。

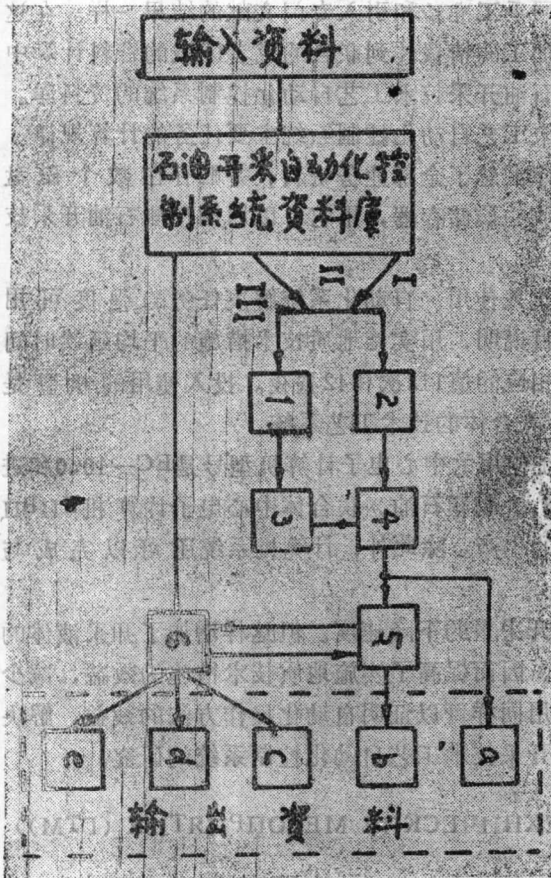


图1

石油开采技术工艺系统的主要函数关系：  
 I—测量；II—当时的石油开采的技术工艺参数；III—关于当时资源和生产计划的资料；  
 1—积累的资料；2—石油开采过程当时状态的估价；3—石油开采技术工艺模型参数周期的估价；4—石油开采技术工艺模型业务的适应性；5—在管理期间，石油开采动力的预测；6—对油井最优实施地质技术措施的日程和生产可能性的估价；a—石油开采过程中当时的参数值；b—开采动力的预测和它可靠性估价；c—实施地质技术措施的最优日程；d—最优的当时开采计划；e—最优的资源数量。

自动化系统具有估价石油开采技术工艺生产可能性的数学模型。这些模型允许最优利用存在的贮备，即在当使用资源产量缩减时，增加其它资源的开采量以保证可靠地完成当时的石油开采计划。同时这些模型还应给上级领导部门给出石油开采的变化情况，适时给出资源值的变化。石油开采技术工艺的生产可能性按规定在每个 $\tau$ 昼夜里进行一次评价。石油开采技术工艺自动化控制系统的主要函数关系和它们的作用在图中已经指出。

石油开采技术工艺自动化控制系统的技术保证建立在局部自动机、遥控系统和计算技术的基础上。局部自动机保证油井液体流量的计量、检测、深井泵和地面泵的自动的开动与停止，保护电气设备正常运行；遥控系统（型号为TM—600M和TM—300）间断地收集和传递油井的流量周期计量的结果。局部自动机和遥控系统是石油开采生产过程自动化的基础，它是石油开采技术工艺自动化系统的下级控制。

石油开采技术工艺自动化管理系统使用的计算机是联合的或者区域的资料计算中心的中心电子计算机，并同安装在石油开采控制车间的终端电子计算机（11台）连接，同基层的控制点连接。电子计算机网的形成，并按照职能、管理权分散的原则进行工作。这样形成了分

的自动化系统，并使控制系统具有活力，且减轻了传递资料渠道的负担。

石油开采技术工艺的主要任务是石油开采的预测和最优化管理。这些均在中心电子计算机上进行。终端电子计算机装备了显示器，它一方面反映了经过筛选、整理的资料，而另一方面给车间和全体石油开采控制工作人员给出石油开采技术工艺自动化系统的工作推荐书。资料通过遥控系统进入终端电子计算机，这如同手工准备和引入专门文献的结果一样。在这种情况下，业务加工任务完成了一部分。然后加工的情报传到联合的或者区域的资料计算中心的外部储存器并借助专门的程序增加并修正石油开采技术工艺自动化控制系统的资料库。输入情报的规则和伴随的储存保证石油开采技术工艺自动化控制系统主要任务的计算规律。

石油开采技术工艺自动化控制系统的资料库汇总了全部业务资料，并贮存在数个磁盘中。根据积存的程度，业务情报传送到长期存放的磁储存器，用它可以周期预测石油开采技术参数。

1980年12月石油开采技术工艺自动化系统投入使用。自动化系统解决任务的强度可用在70个昼夜区间里执行地质技术措施的平均数目说明，用实施地质技术措施的平均延续时间说明。对这些数量，石油开采技术工艺系统有相应的值112次和42昼夜。投入使用的机型是《Несрмб—石油》，它是典型属《鞑靼石油》联合体的技术工艺系统。

在典型的石油开采技术工艺自动化控制系统使用的中心电子计算机型号是EC—1040和进口的终端电子计算机。多台计算机组成一个系统，《鞑靼石油》联合体中心电子计算机КиВЦ安排设计计算机系统的工作，由此来组织油田的生产。除此外，计算机系统还可以完成与控制生产无关的不同任务。

系统的使用，减轻了产品成本增长与石油开采量的下降速度。但这样增加了开采液体的含水量。由于较精确的预测了石油的开采动力，因而提高了实施地质技术措施的效益，减少了因实施地质技术措施的停产时间。系统的使用同样可以证明自动化操作方法的效益，解决主要技术问题的正确性，从而推动标准式石油开采技术工艺自动化控制系统的研究。

[注1]地质技术措施 (ГЕОЛОГО—ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ (ГТМ)) 内容包括修井、压裂等多项作业。

## 二、采油自动化综合工艺 控制系统的数学模型

本篇文章研究建立数学模型的工作方法，介绍石油开采最优方案的制订，介绍控制系统如何连续地完成生产任务。

自动化石油开采技术工艺控制系统的首要任务是，系统按时按量完成石油开采生产计划。让 $\theta$ 表示时间， $T\theta$ 表示自动化系统在一个周期内工作的时间间隔则有

$$T\theta = \{ \theta + 1, \theta + n\tau \}$$

式中 $\tau$ 为阶段的延续时间， $n$ 为阶段的数目。我们用 $Q_{\theta i}^*$ 表示自动化控制系统，在控制范围内，全部油井在 $i\tau$ 个昼夜里要求开采的石油容积产量， $i\tau$ 个昼夜的时间间隔为 $\{ \theta + 1, \theta + i\tau \}$ ，这里 $i$ 为阶段顺序号数， $i = 1 \dots n$ 。即 $Q_{\theta i}^*$ 是表示 $\theta$ 时刻全部 $i$ 个阶段的产量（当 $i = n$ 时为系统整个周期里石油开采的总容积产量 $Q_{\theta n}^*$ ）。在时刻 $\theta$ 指定开采产量 $Q_{\theta n}^*$ 称为计划产量。为了根据实际条件随机应变地保证计划产量的完成，必须找出各种生产方法控制下的预测产量 $\hat{Q}_{\theta i}$ 。以便采取相适应的“采油技术工艺措施〔5〕。预测产量 $\hat{Q}_{\theta i}$ 与实施采油技术工艺措施在时刻 $\theta$ 的初始状态有联系。比较指定的计划产量 $Q_{\theta i}^*$ 和预测产量 $\hat{Q}_{\theta i}$ ，按照某些标准可以评价石油开采技术工艺的工作质量。图1画出系统在两个连续控制的时间间隔 $T\theta_1$ 、 $T\theta_2$ 的产量与时间的关系图。

$$[T\theta_1 = \{ \theta_1 + 1, \theta_1 + n\tau \}; T\theta_2 = \{ \theta_2 + 1, \theta_2 + n\tau \}]$$

图中各点表示时间与指定石油产量、时间与预测产量的对应关系（图中各点联成的直线是假想的）。

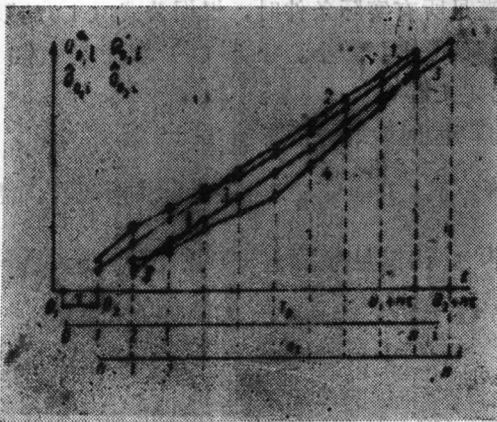


图1 石油计划产量和预测产量在两个连续工作过程的关系； $t$ —昼夜数；1—石油计划产量 $\{ Q_{\theta i}^* \}$ ，它对应时间间隔 $T\theta_1$ ；2—石油开采预测容积产量， $\{ \hat{Q}_{\theta i} \}$ ，它对应时间间隔 $T\theta_1$ ；3—石油计划产量 $\{ Q_{\theta_2 i}^* \}$ 它对应时间间隔 $T\theta_2$ 区间；4—石油开采预测容积产量 $\{ \hat{Q}_{\theta_2 i} \}$ 它对应时间间隔 $T\theta_2$ 区间。

让 $I_\theta$ 具有下面关系

$$I_\theta = \sum_{i=1}^n \beta_{\theta i} E (\hat{Q}_{\theta i} - Q_{\theta i}^*)^2$$

式中 $E$ 为数学期望符号,  $\beta_{\theta i}$ —时刻 $\theta$ 给定的不良比例常数〔注1〕;  $I_\theta$ 为偏差度〔注2〕, 它的大小说明预测产量偏离计划生产的程度。如果给定条件

$$\left| \hat{Q}_{\theta i} - Q_{\theta i}^* \right| \leq \zeta_{\theta i} \quad i=1 \dots n. \quad (1)$$

那么偏差度 $I_\theta$ 能够近似表达为

$$I_\theta = \sum_{i=1}^n \beta_{\theta i} \sigma_{\theta i}^2 \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\theta i}^2$ 为预测产量 $\hat{Q}_{\theta i}$ 的方差。

下面详细解释实施采油“技术工艺措施”的过程方案的制订。在每个顺序时刻 $\theta$ , 系统管理的油井集合为 $L_\theta$ ,  $L_\theta$ 里每口油井的工作情况是已知的, 一般需对油井中的一部分合理安排维修和进行某种井下作业, 即需实施技术工艺措施; 对每口油井 $1, 1 \in L_\theta$ , 应明了需进行维修或井下作业的内容, 确定所需要的人力、物资器材的数量和种类, 并估计停产持续的时间 $\tau_1$ 。设 $U_{01}(t)$ 、 $U_{11}(t)$ 分别为 $t$ 时刻停产油井和经维修、井下作业后重新开工的油井, 这样总和为

$$\{U_{j1}(t); j=0,1, t \in T_\theta \quad 1 \in L_\theta\} \{\tau_1; 1 \in L_\theta\}.$$

由此可以确定实施采油技术工艺措施的日程。

为了满足在油井实施技术工艺措施时具备有专门的作业队伍和各种必需的材料。很明显选择对某个油井实施技术工艺措施日程必须考虑, 在当时 $\theta$ 时刻, 每个专门化的作业队有几个, 每一种器材有多少, 并估计需要的时间。同时还必须考虑在施工油井使用一个作业队还是几个不同的专门化作业队, 是否在实施技术工艺措施整个期间油井都要停产。这样一些限制的总和称为实施技术工艺措施的实际条件。

下面介绍石油开采技术工艺操作控制最优化任务。主要任务(A)组成如下, 在时间 $T_\theta$ 区间找出 $\theta$ 时刻实施采油技术工艺措施的油井, 在满足所有实际条件时, 根据公式(1)的限制代入公式(2), 使偏离计划生产的程度最小, 即偏差度 $I_\theta$ 最小。任务(B)和任务(C)预定供评价石油开采技术工艺控制系统的生产状况〔文献1〕。

任务(B)组成如下, 在时间 $\theta$ 找出行将到来的 $T_\theta$ 区间计划的石油容积产量 $Q_{\theta n}^*$ ,  $Q_{\theta n}^*$ 必须满足许可偏差度条件 $I_\theta \leq \bar{I}_\theta$ ( $\bar{I}_\theta$ 为指定偏差度许可值), 且 $Q_{\theta n}^*$ 要考虑实际生产条件, 需减去部分资源(即要遵守实施技术工艺措施的安排), 当满足方程(1)条件时有 $Q_{\theta i}^* = \text{in}^{-1} Q_{\theta n}^*$ 。任务(B)的解决给出了系统最优的日产量计划, 同时也给出了在 $T_\theta$ 区间实施技术工艺措施的日程。

在提出任务(C)时, 需建立《利用地层资源》的投资标准 $\phi_\theta$ 。投资标准 $\phi_\theta$ 需考虑成本和作业队、物资器材等条件。任务(C)的组成是, 在时间 $\theta$ 找到最小的投资标准 $\phi_\theta$ 值, 在这



种情况下计算是否满足方程(1)式条件,计算偏差度 $I\theta$ (按方程式(2))不许超过许可值即 $I\theta \leq \bar{i}\theta$ 。并且在对油井实施技术工艺措施时,具备必须的人力和物资器材,并且在 $T\theta$ 间距中最优时间里进行。

计算(A)、(B)、(C)的最优方案是间断的预测模型,他们在复杂的相互关系中,各项任务的条件相互制约,有足够的宽度可以调节。现已研究了计算这种任务的专门算法[文献2],专门算法建立在多种程序修正的基础上。

对于上述制订的最优方案,要求在任何可能实施技术工艺措施的日程里随时计算预测产量 $\hat{Q}_{\theta i}$ 和方差 $\sigma_{\theta i}^2$ ( $i=1 \dots n$ ),此外,为了保证这些计算,要求研究数学模型的大系统,大系统能够经常预测石油开采过程其它一些参数。图2中描绘了数学模型怎样输入输出情报资料。

液体渗流过程模型、实施技术工艺措施后结果的预测、供水等均包含未知因素的臆断,这些都要根据石油开采技术工艺系统工作得到的情报资料周期地进行评价,时间长达8个月至1年。这些任务在各周期里的数学模型内容相同,但边界条件模型的参数根据当时取得的情报资料进行评价。石油开采技术工艺系统要根据评价的结果制订出相适应的生产计划,以便随机应变地完成生产任务。

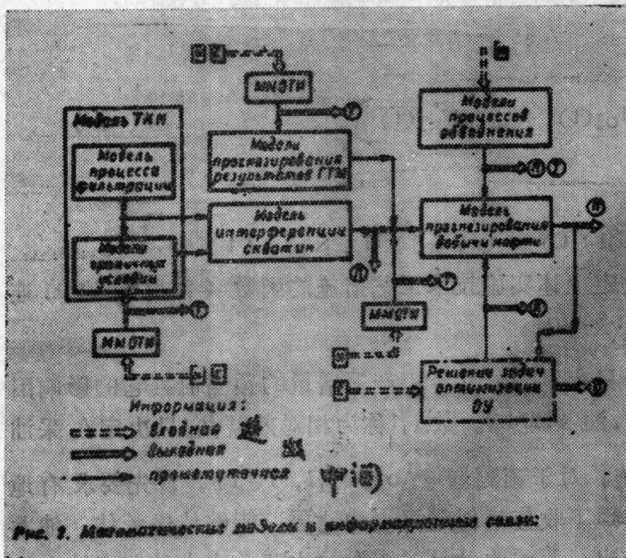


图2 数学模型与情报资料联系  
图中OY—业务控制;MM OTN—根据当时情报资料加工成数学模型,包括石油开采过程参数的处理和开采工艺方案状态的处理;N、C—输入被测量的情报资料和石油开采技术工艺方案;T—过程参数当时的评价;n—预测输出;K—输出实施技术工艺措施的日程;B—输出石油开采技术工艺系统的生产情况的评价。

石油开采预测模型按下面形式建立。在每一个顺序的时刻 $\theta$ ,石油开采技术工艺系统应能预计在面临的控制时间间隔 $T\theta$ 期间,从油井里开采的石油产量将怎样变化。存在着两个方面使产量减少的因素。一方面由于供水不足,地层压力下降使石油产量下跌;另一方面由于储量不断减少使石油产量自然下跌,它可以由于对油井实施技术工艺措施而能够得到部分和完全的补偿。在 $T\theta$ 期间 $i$ 个阶段里石油开采总的预测容积产量由两部分组成:

$$\hat{Q}_{\theta i} = \hat{Q}_{\theta i}^v + \hat{Q}_{\theta i}^{\Delta} \quad (3)$$

式中 $\hat{Q}_{\theta i}^v$ —变化只决定注入供给水的石油开采预测容积产量; $\hat{Q}_{\theta i}^{\Delta}$ —由于实施技术工艺措

施，因而增加的石油开采预测的容积产量。

设 $q_m(t)$ 、 $V_m(t)$ 相应地在 $t$ 昼夜里 $m$ 油井的液体容积产量和液体里的石油的产量。对于注水井， $q_m(t)$ 表示 $t$ 昼夜注入地层里水的容积。我们引入向量 $q(t)$ 、 $V(t)$ ，对产油井 $m$ ，它所对应的向量为 $q_m(t)$ 和 $V_m(t)$ ；对于注水井，它所对应的向量为 $-q_m(t)$ 和 $O$ 。

让 $\hat{q}(\theta)$ 、 $\hat{V}(\theta)$ 表示 $\theta$ 时刻当时的预测向量， $\hat{V}(t)$ —预测向量，其 $t \in T\theta$ 。这样决定于注水的预测容积产量

$$\hat{q}_{\theta i} = q'(\theta) \sum_{t=\theta+1}^{\theta+i\tau} \hat{V}(t)。$$

为了找到 $T\theta$ 间距内 $i$ 个阶段预测总产量 $\hat{q}_{\theta i}$ ，需要把现今的情报资料加工成相适的模型，

然后根据模型计算时间 $\theta$ 被开采的液体的消耗量估算值(向量 $\hat{q}(\theta)$ 的成分)。按供水模型计算液体的石油含量(向量 $\hat{V}(t)$ 的成分， $t \in [\theta+1, \theta+i\tau]$ )。供水过程的模型依赖于关系式 $W_m(t) = f(t)$ ， $W(t) = 1 - V_m(t)$ 。对每个油井 $m$ 而言，这个关系式需经常建立和评价。

公式(3)的预测产量 $\hat{q}_{\theta i}$ 依赖于油井在时间间距 $T\theta$ 内实施技术工艺措施的日程，它具有关系式〔文献3〕。

$$\hat{q}_{\theta i}^{\Delta} = \sum_{t=\theta+1}^{\theta+i\tau} \sum_{1 \in L\theta} \left[ \hat{\Delta}_{01} U_{01}(t) + \hat{\Delta}_{11} U_{11}(t) \right]。 \quad (4)$$

式中函数 $U_{11}(t)$ 中 $i=0, 1$ 由方程

$$U_{j1}(t) - U_{j1}(t-1) = U_{j1}(t) - (1-j)U_{(1-j)1}(t)$$

确定， $U_{j1}(t)$ 中 $i=0, 1, 1 \in L\theta$ ——决定上述实施技术工艺措施的函数(油井开停的连续性)。

公式(4)的 $\hat{\Delta}_{01}$ 、 $\hat{\Delta}_{11}$ ——系统在一昼夜里的油井容积产量增量的预测值。它的影响因素是油井的停产或者实施了技术工艺措施，油井 $1 \in L\theta$ 。数 $\hat{\Delta}_{11}$ 称为相对效益，它只决定在采油过程中，由于对油井 $1$ 实施了技术工艺措施。对于预测增量 $\hat{\Delta}_{01}$ 、 $\hat{\Delta}_{11}$ ， $1 \in L\theta$ ，首先要求有地下渗流过程的模型。这个模可如下建立。地下收集槽似是平坦的地层，能够传送液体，油井象一个个出口点，液体从这些出口点被送出；而注水井是一个个的水源，水由这些点注入地层。地层建立的压力分布可以用系统的代数方程写出，该方程近似于初始的椭圆微分方程。近似计算建立在有限方法的基础上〔文献4〕，相应的地层压力函数 $p(x, t)$ ( $x$ 为控制系统范围内的点)也可以用近似形式代替即：

$$\hat{p}(x, t) = \sum_{n \in N} p(x_n, t) \Psi_n(x) \quad (5)$$

式中 $N$ ——大量给定结点； $x_n$ ——范围点，它是结点分布所在范围内的点； $\Psi_n(x)$ ——基准块的线性函数。设 $p(t)$ 、 $P\Psi(t)$ 分别代表井的地层压力向量和结点的压力向量。近似公式(5)给出关系式 $P(t) = \Psi' P\Psi(t)$ ， $\Psi$ ——为矩阵，在矩阵里的元素是结点 $n$ 和井 $m$ ，它们分布在 $X_m$ 范围， $\Psi_n$ 等于 $\Psi_n(X_m)$ 。地下收集槽通常不是孤立的(周围可能有邻近

的采油厂)，因此要分为内部点与边界点，向量 $p\Psi(t)$ 和矩阵 $\Psi$ 也要随之相应分出即

$$p\Psi(t) = [p_B'(t), p'_\Gamma(t)]' \Psi = [\Psi_B', \Psi_\Gamma]'$$

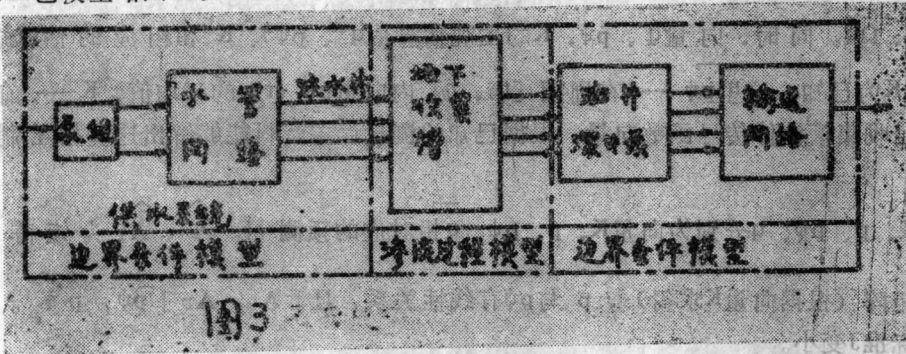
式中下标«B»表示属于内部，下标«Γ»表示为边界。可得出结论，渗流过程具有代数式：

$$A_B P_B = \Psi_B q(t) + A_\Gamma p_\Gamma(t) \quad (6)$$

矩阵 $A_B$ 、 $A_\Gamma$ 的元素在组成向量为 $K$ 的结点地层范围，与地层液体渗流函数有线性关系。 $q(t)$ ——前面已建立的井产量函数向量。整个方程(6)在给定 $q(t)$ 、 $p(t)$ 时，则 $p_B$ 可解出。边界条件的模型在井的产量和地层压力之间有补充公式

$$q(t) = R(t) [\Psi' P \Psi(t) - g(t)] \quad (7)$$

这些关系式可解出矩阵 $R(t)$ 和向量 $g(t)$ ，即它们由地面上和地下的参数决定，由系统地面上的参数与地面下参数比较决定。当必需点上缺少压力和产量资料时，系统只有缩小控制范围，从方程式(7)去掉这些井的对应部分，也去掉供水系统相对应的部分(图3给出了石油开采工艺模型略图)。



此外为了直接利用公式(6)、(7)预测单个井的相对效益 $\Delta_1$ 、 $1 \in L_\theta$ ，在实施技术工艺措施后，矩阵 $R(t)$ 和向量 $g(t)$ 的边界条件参数应改变，因而必须再建立这样的模型。由于很多原因，那样的模型实际上不可能建成。但是根据实施技术工艺措施所积累的经验能够建立经验模型，这种模型对井 $1$ 、 $1 \in L_\theta$ ，其产量不考虑相互之间的干涉，与实施技术工艺措施后的预测产量增值 $\delta_1$ 无关。图2中部分是«实施技术工艺措施结果的预测模型»。与此同时，由关系式(6)和(7)可建立井的干涉模型，建立相对效益预测量 $\Delta_1$ 同预测增量 $\delta p$ 的联系。井干涉的模型可以预测损失 $\Delta_0$ 。井干涉模型可通过对公式(6)、(7)、(3)进行求解而得出。当井之间无压力联系时，可得到最简单结果如下。

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_1 &= [\hat{U}_1(\theta) - Z_1(\theta)] \delta_1 \\ \hat{\Delta}_0 &= -[\hat{U}_1(\theta) - Z_1(\theta)] q_1(\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $Z_1(\theta)$ ——向量 $Z(\theta) = \Psi Z_B(\theta)$ 的成分，而向量 $Z_B(\theta)$ 可从代数方程中解出[文献3]。

$$[A_B + \Psi_\Gamma R(\theta) \Psi_\Gamma'] Z_B(\theta) = \Psi_\Gamma R(\theta) \hat{V}(\theta)$$

公式(8)有清楚的物理意义，预测增量 $\delta e$ 估算井的产量增量 $\delta_1$ ，估算时没有考虑干涉；但是有些内容与干涉有关。对油井选择性开采，虽然有的 $\delta_1 > 0$ ，但它却伴随系统总容

积产量的下降；一些油井停产损失了部分产量 $Z_1(\theta) q_1(\theta)$ ，则由系统控制下的其它油井补偿；对于注水井1，数 $Z_1(\theta)$ ——由系统产量增长额系数决定注入该井水量的增长额。

公式(4)、(8)仅能预测石油开采技术工艺系统由于实施技术工艺措施后潜在容积产量增量。因为假定地层压力的变化是由于井之间相互干涉而暂时产生的。为考虑干涉，文献3指明了这些公式怎样变换。

为了运用上述描绘的模型，必须在每个时刻 $\theta$ 处理矩阵 $A_B, A_r, R(\theta)$ ，通过周期地计算模型(6)来估算矩阵 $A_B, A_r$ ，对矩阵 $R(\theta)$ ，按当时获得的测量资料，根据公式(6)、(7)的相适性进行估算。

渗流过程模型(6)的任务内容如下。设 $p, q$ 为某个周期 $[t_n, \theta]$ 内地层压力向量 $p(t)$ 和井流量向量的平均值。根据测量所得，可获得下一个周期内地层压力和油井产量的估算值 $\tilde{p}, \tilde{q}$ 。且 $\tilde{p} = H_p p + \varepsilon_p$ ， $\tilde{q} = H_q q + \varepsilon_q$ 。式中 $H_p$ 和 $H_q$ 为系数，它考虑到事实上的计量值不是全部油井； $\varepsilon_p, \varepsilon_q$ ——误差随机向量，它的平均值为零，具有相应的对角方阵 $\Omega_p, \Omega_q$ 。同时，向量 $q, p\psi, K$ 的主观估算值 $q^*, p\psi^*, K^*$ 和相应的估算矩阵 $\Sigma q, \Sigma p\psi, \Sigma K$ 为已知。这里 $p\psi$ ——在周期 $[t_q, \theta]$ 内向量 $p\psi(t)$ 的平均值， $K$ ——前文已介绍，它是收集槽液体传导函数向量。根据已知的测量误差资料能够解出这些相互制约的矩阵。

设 $\hat{K}, \hat{p}, \hat{p}\psi, \hat{q}$ 分别为向量 $K, p, p\psi, q$ 相对应的预测量。 $\hat{A}_B, \hat{A}_r$ 为矩阵 $A_B, A_r$ 的预测矩阵(根据向量 $\hat{K}$ 求得)， $\hat{p}$ 与 $\hat{p}\psi$ 有线性关系，且 $[\hat{A}_B, \hat{A}_r] \hat{p}\psi = \hat{p} \hat{K}$ 。任务(D)使检验标准 $J$ 变小。

$$\text{而 } J = | \hat{p} - H_p \hat{p} |^2 \Omega_p^{-1} + | \hat{q} - H_q \hat{q} |^2 \Omega_q^{-1} + | \hat{q}^* - \hat{q} |^2 \Sigma q^{-1} + | \hat{p}\psi^* - \hat{p}\psi |^2 \Sigma p\psi^{-1} + | \hat{K}^* - \hat{K} |^2 \Sigma K^{-1}$$

式中符号 $|y|_G$ 表示 $y' G y$ ，当 $\hat{p} \hat{K} + \Psi_B \hat{q} = 0, \hat{K} \geq 0, \hat{p} = \Psi' \hat{p}\psi$ 。

为了解出任务(D)，采用叠代法计算，在计算过程中，轮流进行，当指定向量 $\hat{p}\psi$ 解出任务(D<sub>1</sub>)最小的检验标准 $J$ ；指定向量 $\hat{K}$ 时解出任务D<sub>2</sub>的最小检验标准 $J$ ；(D<sub>1</sub>)相对向量 $\hat{K}$ 经两次编程序，可得到 $[\hat{p}\psi', \hat{q}']$ 线性方程系统，由此解出(D<sub>2</sub>)；任务(D<sub>2</sub>)、(D<sub>1</sub>)各只有唯一的解。计算的难度决定任务D的范围大小，由于矩阵 $A_B, A_r, \Psi$ 特殊的结构和充填元素较少，任务(D)可顺利求解。

公式(6)、(7)不是系统业务工作的全部任务，我们用简单方法可得到矩阵 $R(\theta)$ 的预测矩阵 $\hat{R}(\theta)$ 。向量 $q(\theta), g(\theta)$ 的预测向量 $\hat{q}(\theta), \hat{g}(\theta)$ 、系统可随时根据需要由确定点测量的压力和产量估算出。利用最后解出的模型(6)的向量 $K$ 在周期 $[t_a, \theta]$ (这儿 $t_a < t_q$ )内油井产量与地层压力的测量结果可找出边界点地层压力向量 $P_r(\theta)$ 的估算向量 $\hat{P}_r(\theta)$ ，同时解出任务(D<sub>2</sub>)。之后，在方程(6)、(7)的基础上能够求解与预测向量 $\hat{q}(\theta), \hat{g}(\theta), \hat{P}_r(\theta)$ 和主观估价 $R(\theta)^*$ 对应的估价 $R(\theta)$ 。

这样建立在数学模型基础上的石油开采和预测任务得以实现，模型的参数（系数）根据当时的和过去的流量、压力资料，根据实施技术工艺措施结果的统计，根据开采液体成分分析的资料进行估算（最后利用到供水模型中）。预测误差和方差 $\delta_{\theta i}^2$ （ $\delta_{\theta i}^2$ 用来求公式(2)的偏差度 $I(\theta)$ ）是原始资料的误差和偶然误差的复合函数。同样在已知模型的基础上，可求解函数的各个参数，再由这些参数求解方程(2)的偏差度。得到上述结论后，我们研究系统在每个工作周期可视作相同的任务的连续求解、模型的适用性、石油开采的预测和系统的最优控制。

渗流过程模型可视作相同的任务(D)，它一般很少求解（一年内计算大约两次）。重复计算的原因在于地层含水量增加，它使渗流函数状态有变化。较多的计算（每年4至5次）任务(D<sub>2</sub>），其目的在于得到当时的预测向量 $\hat{Pr}(\theta)$ ，由于地层压力测量资料所限，这种任务更常的计算缺少内容。在(D)与(D<sub>2</sub>)之间的时间里，系统保存使用最后得到的预测向量 $\hat{K}$ 和 $\hat{q}(\theta)$ 。每12个星期计算一次系统井的注水模型，而在两次计算之间，根据喷出液体的分析结果修正模型。

每个星期，根据当时的情报资料求解 $\hat{q}(\theta)$ 、 $\hat{g}(\theta)$ ，求解系统相适用的模型并计算矩阵 $\hat{R}(\theta)$ 。根据注水过程的模型和预测量 $\hat{Pr}(\theta)$ ，计算 $\hat{V}_m(\theta)$ 、 $\hat{V}_m(t)$   $\theta+1 \leq t \leq \theta+n\tau$ ；其结果我们还可求解 $Z_1(\theta)$ 、损失的预测 $\hat{\Delta}o_1$ 、效益的预测 $\hat{\Delta}i_1$ 、 $1 \in L\theta$ ；当允许在任何日程实施技术工艺措施时，求解出石油开采预测容积产量 $\hat{q}_{\theta i}$ 、 $i=1 \dots n$ ；同时可求解预测测量的方差 $\delta_{\theta i}^2$   $i=1 \dots n$ ，求解出偏差度。此后解出(A)、(B)、(C)并估价石油开采技术工艺系统的生产情况。

所有介绍的任务和相应的模型、预测方法和控制均在电子计算机中心或区域计算机中心进行。（石油自动化开采技术工艺控制系统的基础是电子计算机EC—1040解)出的结果再输送给车间的终端电子计算机和石油天然气开采控制室。）

### 三、采油自动化综合技术工艺的统一标准

莫斯科全苏石油工业自动化研究院研制了典型的石油开采技术工艺自动化管理系统即，以《鞑靼石油》联合体命名的自动化管理系统，在系统使用时生产上的大量的管理控制工作通过《鞑靼石油》和石油天然气开采管理的《伊尔克石油》系统执行。

前两篇文章已讨论过系统的主要任务和方案特征。标准型的石油开采技术工艺自动化管理系统的研制运用是建立在上述经验的基础上。本文将讨论系统的规格统一化概念。

在建立复杂的石油开采技术工艺自动化管理系统的组织——技术工艺系统时，整个研制工作（分析——研究——设计——制造）进行了许多年，必须考虑系统的多种功能，因此整个研制的时间很长。若为了掌握某个系统的使用，需要了解学习很长一段时间，则很难使这样的系统获得广泛的运用。规格统一的标准化系统可以大量减少这方面的困难，并缩短系统的研制过程，使用也方便些。

——标准系统必须具有广泛的适用性，即适用不同的控制方案。这样标准系统与单个方案的联系程序应能减少设计的劳动强度和时间的。众所周知，任何控制系统应具有现代化的特性，允许控制方案的结构和性质发生变化。标准系统对方案变化只要不会导致程序“级”的溢出时能自动满足上述要求。因此必须考虑标准系统有足够长的使用期限。

石油开采技术工艺控制系统设计最困难的是数学保证，[注1]当然希望研制的数学保证系统最稳定，即建立一种标准系统，它对每个具体控制方案的联系使数学保证只有最小的变化。在这里规格统一化的主要任务是研制标准的数学保证。

在设计标准石油开采技术工艺的自动化管理系统的数学保证时，必须考虑部门自使用通用的算法语言和程序模型（此外还有标准的程序）。技术工艺的对象和石油开采过程的特点，需要仔细研究专门的数学模型和预测的方法。

在计算机内部的运算系统的结构应保证数学模型的稳定性，而它的原功能不变。但不应排除两种形式变化的可能性。首先能随时进行某个任务的计算，即完成系统的主要功能，能合理更换一个或几个程序。当标准式的数学保证设计正确时，这种更换是在固定的结构内，此外还有用户的单独系统，能够满足部分变化的需要或者补充系统输出的指令。这样的修改不需要费很多时间，是非常有意义的。

对地层注水驱油的石油开采工艺在国家石油工业里有很好效果。其它方法只是在开采高粘度的石油、开采少储量的石油方面，使用这些方法虽然已经开始研究并运用，但是应该看到在近15至20年石油开采的主要方法将不会改变。

标准的石油开采技术工艺自动化管理系统的使用对象是注水的采油方法，液体渗流按线性规律。现在国家有90%以上的石油属于这种大家都知道的方法。

每一种管理方案必须规定标准系统的主要功能，它的典型式样的使用说明标准的石油开采技术工艺自动化管理系统的功能随时扩大，在建立的标准系统中可预见到，如下述：

每星期石油开采技术工艺自动管理系统完成一次主要计算，即按期依一定次序解决对标

准的石油开采技术工艺系统的业务控制。但是在两个序列的解决之间的时刻，形势会发生变化，例如某油井突然停产，对每个这样的事件，需要马上修井。为此要求专门的作业队，而这些作业队往往在对其它油井实施地质技术措施（后备作业队实际上总不在现场）。

因而当油井突然停产时，应能修正实施地质技术措施的日程。如果过去的日程是最优的，那么日程的修正增加了预测石油产量偏离现在生产计划产量的危险性。因而石油开采技术工艺自动化管理系统的任务是，采取一定的措施，使能按日程修正生产；而标准系统则应及时提供油井突然停产的资料，并尽量保证计划生产任务的完成。

在系统的典型模式中可看到，只能对车间的石油开采技术工艺提出顺序时刻的生产计划。而且那个生产计划也只有车间能够执行。此外企业的地质技术服务队也可参加对个别地段、地层里的石油开采的意见。考虑所有类似情况，在标准的石油开采检测设备。在每一个指令通过时，检测目标应该给出指定时间里石油开采的总产量，给出某个阶段车间里石油开采技术工艺完成的生产计划数。

必须找到与实施地质技术措施日程的油井相适的预计开采量，计算出所有石油开采控制方案的开采预测量偏离指定产量的危险性。如果对每个检查目标确定了许可的危险值，那么应在工作中记入，且在业务的最优控制中加上补充的限制。标准的石油开采技术工艺自动化管理系统保证在石油天然气开采车间之间获得最优的分配产量任务，分配注水流量。

不同的石油天然气开采管理的技术工艺系统允许有很大的差别，此外在它的使用过程中能够适用存在的变化。石油开采技术工艺多变的性质可分为两种，第一种是技术工艺的内容，地质技术措施，业务的管理和资源的情况。这些称为石油开采技术工艺结构特征。第二种是对石油开采业务预测的模型数据。

对不同的石油开采技术工艺系统，模型的参数可反复使用来解决周期相同的各种任务和预测的适用性（这些已在文章[2]中简述）。已知任务的解决包括在系统的主要功能之中，包括在数学保证的函数关系中。因此不同形式的石油开采技术工艺系统可自动地考虑模型参数。标准数学保证的不变性和变化的石油开采技术工艺的结构特征的关系、通过能写出它们之间相互关系的全部特征的数字，通过用这些数字作为算法语言的参数来达到。系统最重要的任务是保证结构特征和工艺的变化相互对应。对此标准的石油开采技术工艺自动化管理系统采用下述途径。

当用标准系统分析方案时，需准备石油开采技术工艺结构特征的备用资料，而结构特征可以认为在相当长的时间里是固定的。备用资料的内容是标准石油开采技术工艺自动化管理系统与单个方案《联系》的主要依据。备用的资料记入参考磁带，在每次计算中，系统的数学保证应保证程序可利用备用资料。调入内存，需要时可将内存读出，也可以修改与写入。

关于石油开采技术工艺经常变化的结构特征的资料直接从业务输入磁带再进入石油开采技术工艺自动化控制系统的资料库的储存器。

用下面两个例子说明，在石油工业里存在着开采目标的概念。开采目标是油层的一部分，可以说，这是通过引伸和切断、被认为不与油井系统发生关系的一部分（最终意味任何的一口井不能同时作为两个开采目标使用），开采目标可以是石油产地或者它的一部分，这部分又可是几个被使用的地层或者单个地层。石油天然气开采管理系统和它的技术工艺系统的开采目标的开采方案是多种多样的。例如在石油天然气开采控制中能独立使用一个产区或地段的两个到三个油层，或者几个不大的独立经营的产区。石油开采技术工艺的结构特征的

记载应包括它的每一个开采目标的数据，即延伸界限、渗透过程的油层模型，开采目标的相互位置。全部这些数据记入备用储存器。开采目标的组成通常在数年里保持稳定。

相反的例子——石油开采技术工艺系统的油井不断增加（开发初期，大量钻井，大批新井交付使用）。但是这个不会带来任何复杂性，我们可以直接计算它给系统带来的影响。

数学保证的标准化决定系统其它部分的要求：数据和组织的保证。标准的数学保证必须具有独立性。这不仅是每个石油开采技术工艺管理系统的结构特征所要求的，而且这也是联合资料计算中心或者区域资料计算中心的必须条件。为此需要统一输入数据的结构形式，按数学保证的程序要求进行。

输入数据的规格统一，保证石油开采技术工艺自动化管理系统建立专门的数据库。这样能够清楚地划分在标准系统中数据的作用和数学保证的组织作用。其结果形成了：数据和组织的保证包罗全部函数关系；即与石油开采自动化系统的正常准备和伴随输入专门数据库储存器的业务与传递系统的输入文件给使用者；数学保证包括有全部石油开采技术工艺自动化控制系统主要任务的正常解决的功能，有产生输出文件的功能。

现在在石油工业的联合资料计算中心（区域资料计算中心）正在编制实用的计算程序数据库、实用的表报程序库、设计程序库和对不同用户的标准问题质询程序库。数据系统的工作在很多方面上区别于数据的传递和保存、区别于文件的结构；在方法上区别于专门的和中心电子计算机之间数据传递的组织方法，区别于数据库的组织方法。

此外部门尚设有统一的代码系统。同时现有数据库建立的情报部分能够、也应该利用来研制石油开采技术控制自动化系统的专门数据库，只要求情报输入的速度达到必须的要求。其余的数据从石油开采技术工艺自动化系统的业务输入文件进入（专门的电子计算机）。的确在现有的数据库和业务的输入文件中都使用代码，而且这代码是联合资料计算中心（或者地区情报计算中心）的情报系统使用的，这个称为外部代码。

与具体计算机中心的条件无关的数学保证的独立性用标准的石油开采技术工艺自动化管理系统实行恒定的统一代码来达到，这就是系统的内部代码。当标准的石油开采技术工艺自动化管理系统与个别方案《联系》时，需建立在内外代码之间的接口，规定在备用储存器上使用的程序工具，建立自动化控制系统的专门数据库。

标准的石油开采技术工艺自动化控制系统的研制开始于1981年。在第一阶段中，制订了系统的内部代码和表示石油开采技术工艺特征的结构代码数；规定了系统内外代码的配合原则与备用储存器的结构；统一了自动化控制系统的专门数据库的结构制定了数据库的组织、指导、行动的规定；制订了对标准化系统的情报和组织保证动作的工艺要求（在情报进入时允许推迟动作并存放在外部装置的数据库）。这样允许建立标准的数据保证和组织保证，允许独立研制标准的数学保证，允许对标准系统使用的计算机设计作好准备。

[注1] 数学保证原文为 Математическое обеспечение (Мо)



## 第二部分 油井的自动计量

### 第一章 油井自动化计量的理论基础

1970年~1973年苏联油田开始使用自动化计量装置。为了合理利用地下资源，需要知道那些参数需要测量、控制与调节。采油厂的工作有多种任务和目的，人们常常把在完成原油产量计划任务的前提下，以取得最低成本作为合理经营的标准。这个标准的确定还必须和采油厂的远景计划相适应。

采油厂第一位的任务是保证完成石油天然气开采的计划。为此必须测量每口油井的产量，同时这种测量要求能够及时的找到突然停产的油井，以便正确对它拟定技术工艺措施和对其它油井实施预防性的修理；并合理使用补足的石油开采技术措施。以保证计划任务的完成。在苏联通常三昼夜测量一次油井的液体产量，但很多研究人员认为，这些参数需要连续检测。并对油井的原油的含水进行计量。计量目的是搞清注水过程、注水井的技术状态、计量出油井中纯净原油的产量。

与原油一起喷出的天然气，计量的必要性在于原油产地的管理水平。如果开采油层的压力高于气体压力，则天然气无法从地层中分离，在这种情况下油气比是个常数[参考文献21、41]。从产地得到资料证实了这种理论如表1示。因此，在这种条件下，气体产量实际上不需计量，它可通过计量油井中的石油产量估计得出：

$$Q_T = Q_H T_4 \quad (1)$$

式中 $Q_T$ —天然气产量； $Q_H$ —石油产量； $T_4$ —天然气产量与石油产量的比值，即油气比。

表1

| 油井<br>号数 | 油气比 标准状态下的容积米 <sup>3</sup> /吨 |       |       |       |       |       |
|----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 1963年                         | 1964年 | 1965年 | 1966年 | 1967年 | 1968年 |
| 160      | 204                           | 204   | 204   | 204   | 204   | 204   |
| 162      | 204                           | 204   | 204   | 204   | 204   | 204   |
| 824      | 202                           | 201   | 202   | 202   | 201   | 202   |
| 817      | 201                           | 203   | 204   | 204   | 202   | 204   |
| 788      | 204                           | 204   | 203   | 204   | 204   | 203   |
| 832      | 204                           | 204   | 204   | 204   | 204   | 204   |
| 277      | 204                           | 204   | 204   | 204   | 204   | 204   |

石油开采过程中的特征是，溶解在原油中的天然气不计入气体产量，但应计入液体产