

# 油田开发调整潜力一体化评价系统<sup>①</sup>

尹晓喆<sup>1</sup>, 郭军辉<sup>2</sup>, 赵 娅<sup>1</sup>, 杨冬黎<sup>1</sup>, 程 亮<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 大庆 163318)

<sup>2</sup>(大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 大庆 163712)

**摘 要:** 针对注水开发油田经常性的开发调整问题, 成功设计研发了基于.NET 的油田开发调整潜力一体化评价系统. 通过将油藏工程师的研究经验与数值模拟成果的有机结合, 实现了注水开发油田的动用状况、剩余油潜力和开发调整潜力的一体化快速评价, 极大地提高了开发调整对策制定的效率, 并在大庆油田 SZ 开发区开发调整潜力评价中得到应用, 效果良好. 该系统具有操作简单、运行高效、通用性好等特点, 具有很好的应用前景.

**关键词:** 油田开发; 动用状况; 数值模拟; 调整潜力; 一体化评价

## Integrated Evaluation System of Oilfield Adjustment Potential

YIN Xiao-Zhe<sup>1</sup>, GUO Jun-Hui<sup>2</sup>, ZHAO Ya<sup>1</sup>, YANG Dong-Li<sup>1</sup>, CHENG Liang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

<sup>2</sup>(Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Ltd. Co., Daqing 163712, China)

**Abstract:** As to the general issues of adjustment in waterflooding oilfield development, we develop an integrated evaluation system of the oilfield's development and adjustment potential based on .NET technology. By combing the working experience of the reservoir engineers and the study results from numerical simulation, the quick and integrated evaluation of the producing performance is realized, the remaining oil potential and the adjustment potential in the waterflooding oilfield, which improves the efficiency of the planning of adjustment measures greatly. It has been used in the evaluation of the adjustment potential in SZ development area of Daqing Oilfield, which shows a good result. The system has the characteristics of easy-to-use, high-efficiency of running, good universality, etc., which guarantees a very good application prospects in the oilfields.

**Key words:** oilfield development; producing performance; numerical simulation; adjustment potential; integrated evaluation

剩余油和开发调整潜力研究是贯穿油田开发始终的一项基础性工作. 油田开发的过程就是一个不断认识、不断调整的过程, 其首要目的是高效、经济地开采地下的油气资源. 我国大部分已开发油田基本都发现于陆相含油气盆地, 多属于陆相-三角洲沉积体系. 一方面, 这种沉积特征决定了该类型油藏天然能量不足、渗流条件差、开发难度大<sup>[1]</sup>, 在开发过程中还须不断调整、不断进行油层改造, 才能使它能朝着人们预定的方向发展, 取得既定的开发效果. 另一方面, 目前我国的主要油田都已进入高含水开发后期, 剩余油

分布高度分散<sup>[2]</sup>, 开发调整潜力评价难度逐年增大, 已有的人工分析方法<sup>[3,4]</sup>人为影响因素大、研究周期长, 亟需建立一套快速的油田开发调整潜力自动评价系统, 以满足特高含水期注水开发油田调整的需要. 本文在小层动用状况评价方法的基础上, 结合油藏数值模拟研究成果, 设计提出了基于动用状况分析和数值模拟成果的油田开发调整潜力一体化研究平台, 实现了特高含水期注水开发油田动用状况、剩余油潜力及类型、开发调整潜力的自动定量评价, 极大地提高了开发调整对策制定的针对性和效率, 对水驱开发油田高效开

① 基金项目:国家自然科学基金(61502094);东北石油大学青年科学基金项目(NEPUQN2015-1-11)

收稿时间:2016-03-20;收到修改稿时间:2016-04-27 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005484]

发和调整具有很好的借鉴意义。

## 1 系统必须解决的关键问题

大庆喇萨杏油田作为中国最大的陆相多层砂岩油田, 经过 50 多年的注水开发, 已采出地质储量的 44%, 综合含水高达 93%, 目前已全面进入“双特高”开发阶段, 剩余油分布总体呈现“整体零散, 局部富集”的特点<sup>[2]</sup>。研究表明, 对于注水开发砂岩油田, 注采井网与油层非均质性的匹配关系是影响特高含水期剩余油分布的主要因素<sup>[5,6]</sup>, 剩余油主要是由于注入水不能有效驱替而形成的。因此, 以注采连通关系研究为基础的小层动用状况评价是开发调整潜力评价的基础。另一方面, 数值模拟<sup>[7,8]</sup>是油田剩余油研究的最常用和主要手段之一, 大庆喇萨杏油田目前数值模拟研究的覆盖率已达到 100%, 如何有效利用已有的数值模拟成果成为油藏研究亟需解决的难题之一。

现有的开发调整潜力分析方法是, 首先在数值模拟研究的基础上确定剩余油潜力富集的井层, 然后根据单井的动态数据, 结合单层的物性参数、储层发育等地质特征和吸水剖面等测试资料, 综合确定可调整潜力井层及调整类型。为了充分利用油藏工程师动用状况分析的经验, 并将其与数值模拟成果相结合, 实现开发调整潜力的自动定量评价, 必须解决以下几个关键问题:

- (1) 单井单层注采连通关系的自动及人机交互评价;
- (2) Eclipse 数值模拟研究地质模型的解析和成果后处理;
- (3) 单井单层剩余油潜力类型的自动及人机交互评价;
- (4) 不同类型开发调整潜力的自动评价;
- (5) 基于井层的海量数据的快速存取。

## 2 系统设计

### 2.1 系统架构

在主体上采用了三层架构的形式, 即 UI 层、业务逻辑层和数据层, 做到各层之间松散耦合。油田开发调整潜力一体化评价系统的基础是各项动静态数据和精细地质及数值模拟研究成果, 包括井位数据、储层物性数据、沉积微相数据、生产数据、测试数据、数模成果等, 在其上结合技术和经济指标界限, 通过注

采关系划分、数模成果处理、剩余储量计算、潜力类型评价、加密及措施潜力评价等各项算法, 最终以表格、图形等形式在用户界面进行结果展示和输出。系统逻辑架构如图 1 所示。

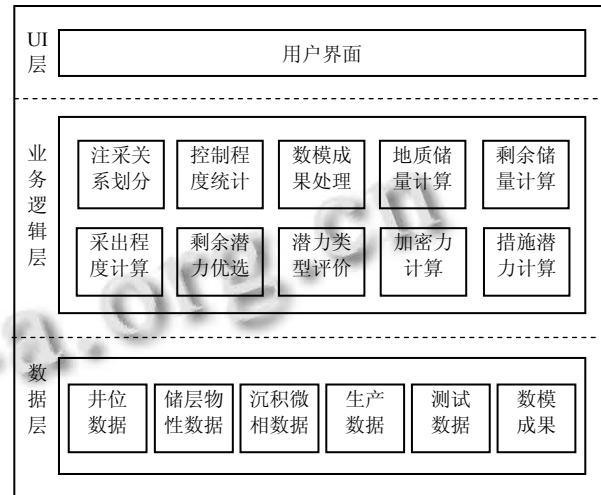


图 1 系统逻辑架构

### 2.2 系统功能结构

油田开发调整潜力的评价是一项庞杂的过程, 涉及到油田开发的各项动静态数据和精细地质、数值模拟研究成果。通过对油田开发调整潜力一体化评价系统的分析, 得到系统的功能模块图, 如图 2 所示。

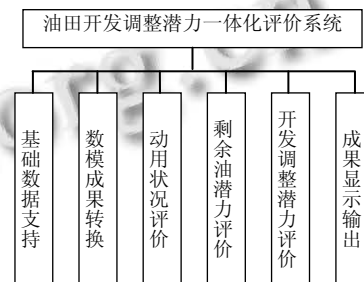


图 2 系统功能模块图

其中, 基础数据支持和数模成果转换模块为整个系统的数据输入部分, 动用状况评价、剩余油潜力评价和开发调整潜力评价模块为系统的中间处理部分, 而成果显示输出则为系统的输出部分。各功能模块具体描述如下:

- (1) 基础数据支持模块: 油田开发过程中形成的数据主要有油藏基本信息、精细地质研究成果、生产动态数据、测试数据和措施数据等几类。由于油田开发的复杂性, 这些数据多存储与不同的数据库中, 并

且不同的数据标识方式也不同。如生产动态数据、测试数据、储层数据等是以井号为标识，而沉积微相图、断层发育情况则是以小层为标识，油藏流体性质等则以整个区块为标识。同时，不同数据和研究成果的软件平台不同，数据格式也不相同，如生产数据、储层数据是表格形式，而沉积相带图则是二维矢量图形式。在功能模块设计时，规定所有数据均以文本形式输入，并首先建立整个区块的井号和小层号索引，然后以二进制文件分类进行存储。而对于矢量图性质的沉积相带图，需首先在相应的软件平台上进行数字化，之后再应用于动用状况评价。

(2) 数模成果转换模块: Eclipse 是油藏剩余油研究中应用最广泛的数值模拟器。该模块的输入数据包括两种，一是地质模型信息，二是指定时间的剩余油饱和度场。其中地质模型信息可通过对数模数据流的解析得到，包括网格类型、网格相对坐标、相对渗透率曲线分区信息等；剩余油饱和度场可通过 Eclipse 软件导出成文本文件，然后与网格信息进行匹配。

(3) 动用状况评价模块: 精细的单井单层动用状况评价是油田开发调整潜力研究的基础。该模块的主要功能是在油藏工程师动态分析经验的基础上，实现与测试资料相结合的非均质油藏单井单层注采连通关系和分层注水量及产液量的自动评价，进而得到单井单层的注采完善状况，为开发调整潜力评价提供支持。

(4) 剩余油潜力评价模块: 该模块主要对剩余油潜力及成因类型进行评价，包括：利用转换后的数值模拟成果，开展分层及多层的剩余地质储量丰度计算；结合相对渗透率曲线分区信息，对剩余油潜力进行优选；结合单井单层动用状况评价结果，并进行剩余油潜力的成因类型分析等。

(5) 开发调整潜力评价模块: 该模块在剩余油潜力评价的基础上，进一步结合给定区块的技术经济界限和油层地质发育特征，进行加密调整潜力、注采系统调整潜力和注采结构调整潜力的评价，包括可调厚度的计算，补孔、压裂、堵水、换泵等调整措施潜力的评价等。

(6) 成果显示输出模块: 主要是对输入数据、中间过程数据和最终成果数据及图形的显示和输出。由于系统涉及到的数据量巨大，同时也为了方便数据管理和检查，对于表格类数据，可根据情况分别按照井号、层号、时间步或所有数据进行显示或输出。而为了便

于与其它应用对接，表格类数据的输出格式有文本和 Excel 数据表两种。对于图形类数据，针对不同的图形类型分别制定了相应的模板，方便用户对不同需求的定制；而图形输出则支持 EMF 和 JPG 两种格式，其中 JPG 格式还可自行定制输出比例。

### 3 系统实现

#### 3.1 系统流程

系统以 Visual Studio 为开发工具，建立一套通用化数据访问服务程序类库、窗体对象控制程序类库、图形绘制程序类库和核心算法类库，使软件后续开发难度大大降低，方便了软件和业务的扩展，提高了系统的重用度。同时，对于一个注水开发的油田，油水井数常从几十到数千口不等，纵向小层数从几个到上百个不一，而本系统需对单井单层的动用状况和剩余油潜力进行评价，因此，系统设计时采用工区的形式对数据和成果进行管理，同时对不同类型的数据分别采用不同的文件夹予以存储。系统流程如图 3 所示。

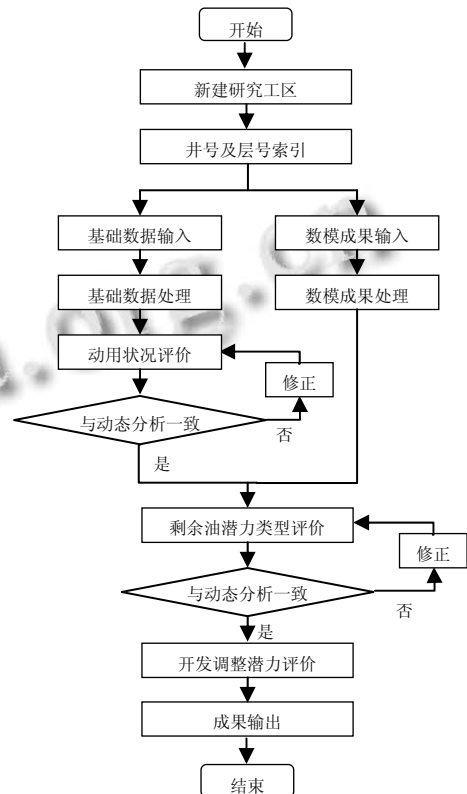


图 3 系统流程图

#### 3.2 关键技术

水驱开发油田的剩余油研究表明<sup>[9]</sup>，剩余油富集

区主要是由于井网形式和储层非均质性不匹配等原因造成的注采不完善形成的. 为开展剩余油潜力类型和开发调整潜力的评价, 须首先开展油层动用状况的和剩余油分布的评价.

### 3.2.1 动用状况评价

非均质油层条件下注采连通关系的精细评价是动用状况评价<sup>[10-12]</sup>的基础和主要内容. 由于油田开发的动态特性, 不同阶段的油水井射孔、开关井、注采压差等情况各不相同, 对应的注采连通关系也不尽一致. 对任一时间步和小层, 首先根据射孔和措施及生产动态将可能的油水井筛选出来, 然后对油水井两两组合得到可能的注采连通关系, 最后对注采连通关系进行优选得到最终的评价结果. 注水井的最大受效范围由油水井间的沉积微相分布决定, 可用非均质加权系数表示:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i} / n \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为非均质加权系数, 小数;  $n$  为油水井间的网格数, 个;  $f_i$  为油水井间第  $i$  个网格的沉积微相值, 并规定砂体性质越好数值越小, 整数.

注采关系评价的具体步骤为: ①根据精细地质研究成果, 制定不同沉积微相条件下的最大受效半径图版; ②统计各时间步的生产、射孔、措施等情况, 筛选出射孔井层; ③以采油井为中心, 在最大受效半径内搜索相关注水井, 并删除有断层遮挡的注采关系; ④根据油水井间非均质加权系数对各对注采关系进行综合评价, 根据注采关系不相交原则, 依据评价结果删除次要注采关系; ⑤结合油藏工程师的经验, 采用人机交互模式, 对注采连通关系进行修正; ⑥进行水驱控制程度的精细评价.

### 3.2.2 数值模拟成果后处理

Eclipse 数值模拟是最常用的剩余油分布研究手段. 由于数值模拟特殊的数据组织方式, 将其用于开发调整潜力自动评价需要经过 3 个步骤的后处理.

#### (1) 模拟层位匹配

数值模拟中层位以有序整数表示的, 为了将其与实际小层匹配, 系统中须提供一套索引, 并在成果导入时对其进行重新命名.

#### (2) 地质模型解析

通过对 Eclipse 输入数据流关键字的解析, 可得到网格系统的详细信息和相渗曲线的分区信息. 在数值模拟中, 信息是以网格为单元进行存储的, 网格的位

置则以网格坐标进行标识. 矩形和角点系统是两种最常用的网格系统. 对于矩形网格系统, 只需以第 1 个网格为基础, 分别在 X 和 Y 方向累加相应的网格步长即可得到对应网格的相对坐标. 对于角点网格系统, 每个网格 8 个顶点的相对坐标需由 4 组坐标线和 8 个顶点深度分别计算得到, 其中坐标线以两组坐标进行定义. 设  $\mathbf{P}_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $\mathbf{P}_2(x_2, y_2, z_2)$  定义一条坐标线, 则距离点  $\mathbf{P}_1$  为  $d$  的网格顶点  $\mathbf{P}$  可表示为:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_0 \frac{d}{\cos \gamma} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{P}$  为待解网格顶点;  $d$  为点  $\mathbf{P}$  与点  $\mathbf{P}_1$  的距离, 也即顶点深度,  $m$ ;  $\mathbf{P}_0$  为单位方向矢量;  $\gamma$  为  $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$  与 Z 轴的夹角.

$$\mathbf{P}_0 = \frac{(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3)$$

通过地质模型解析, 即可得到网格系统各网格中心的相对坐标以及该网格对应的相渗曲线编号.

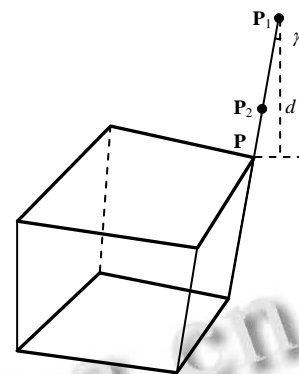


图4 角点网格示意图

#### (3) 网格坐标变换

对于矩形网格系统, 各网格的坐标为相对于原点网格的相对坐标; 而对于角点网格系统, 由于建模过程的不同, 其坐标系统与实际坐标系统也可能不同. 为此, 在进行剩余潜力和开发调整潜力评价之前, 还将各网格的坐标转换为实际坐标. 设已知  $\mathbf{P}$  点的网格坐标为  $(x'_p, y'_p, z'_p)$ , 并考虑到 X 与 Y 方向的缩放尺度可能不同, 可按下式将其变换为实际坐标  $(x_p, y_p, z_p)$ :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $A, B, C, D$  为变换参数;  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为 X 及 Y 方向的相对平移,  $m$ .

为了计算变换参数, 可在两个坐标系中分别选取三个重合点, 分别记为  $(x'_i, y'_i)$  和  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i=1, 2, 3$ ,

并令:

$$x'_{ij} = x'_i - x'_j, y'_{ij} = y'_i - y'_j \quad (5)$$

$$x_{ij} = x_i - x_j, y_{ij} = y_i - y_j \quad (6)$$

则式(4)中的各参数可由下式给出:

$$\begin{cases} A = (x_{12}y'_{13} - x_{13}y'_{12}) / (x'_{12}y'_{13} - x'_{13}y'_{12}) \\ B = (x_{12} - Ax'_{12}) / y'_{12} \\ C = (y_{12}x'_{13} - y_{13}x'_{12}) / (x'_{12}y'_{13} - x'_{13}y'_{12}) \\ D = (y_{12} - Cy'_{12}) / y'_{12} \\ \Delta x = x_1 - Ax'_1 - By'_1 \\ \Delta y = y_1 - Cx'_1 - Dy'_1 \end{cases} \quad (7)$$

最后遍历网格系统, 将各网格的相对坐标利用(4)式变换得到对应的实际坐标, 进而得到各层的剩余油饱和度分布情况, 结合动用状况评价结果即可进行剩余油潜力类型和开发调整潜力的精细评价。

### 3.2.3 剩余油潜力类型评价

首先通过遍历各井层, 利用储层数据和经过坐标变换的数值模拟成果, 采用容积法计算分层剩余地质储量丰度, 并叠加得到多层剩余储量丰度。

其次是剩余油潜力区的优选。在给定含水率界限的条件下, 对指定的井层, 通过实际坐标将其与数值模拟含油饱和度场和相渗曲线分区数据进行匹配评价, 若含水率满足要求, 则该井层为剩余油潜力区。遍历所有井层, 即可得到研究区块的剩余油潜力区。

最后是剩余油潜力成因类型的分析。对优选出的剩余油潜力区, 结合注采连通关系评价结果, 综合考虑井层其周围的注采连通、油层发育、断层发育等情况, 将剩余油潜力划分为断层边、有采无注、无注无采、平面干扰、层间干扰、吸水差、物性差、层内等不同类型。同时, 在可视化的二维图形上还可结合油藏工程师经验通过人机交互进行潜力类型的修改。

### 3.2.4 开发调整潜力评价

开发调整潜力的评价主要包括三类: 一是可加密调整潜力, 一般以可调整厚度表示。按照给定的上下隔层和邻层条件对潜力区进行进一步筛选, 即可得到对应小层的可调整厚度。二是以补孔为主的注采系统调整潜力。以单层技术经济界限为约束, 对剩余油潜力类型为注采不完善的潜力区进行筛选, 再结合单井的厚度和产量界限, 确定可补孔的潜力井层。三是以压裂、堵水为主的注采结构调整潜力。对于压裂潜力, 首先对剩余油潜力类型不为注采不完善的潜力区进行筛选, 再结合隔夹层、单井产液量、单井厚度等, 确定最终的压裂井层。对于堵水潜力, 首先将单井日产液、

含水率大于界限标准的油井筛选出来, 然后将该井中单层含水率、单层产液量比例大于堵水界限的层筛选出来, 即为堵水潜力层。

### 3.3 应用测试及效果

在系统架构设计和技术流程研究的基础上, 完成了油田开发调整潜力一体化评价系统的开发, 并以大庆油田 BYQ 区块为例, 进行了系统的应用测试。研究工区共有小层 150 个, 油水井 3187 口, 研究时间从油田投入开发的 1960 年到 2013 年, 时间步间隔为 1 年, 共计 54 个时间步。整个工区建立所需时间大约 1 周, 单次动用状况评价约 3 小时。对应的数值模拟模型采用相控建模技术, 网格节点数为 76.5 万, 共有油水井 477 口, 模拟时间从 1982 年到 2013 年, 模拟层位为 150 个小层中的 75 个。测试表明, 系统各项功能运行良好, 其中坐标变换需时 2 分钟, 剩余油潜力厚度优选耗时 20 分钟, 剩余油潜力类型分析耗时 10 分钟, 可调潜力评价耗时 30 分钟, 实现了动态分析与数值模拟研究的一体化, 极大提高了注水开发油田调整潜力评价的效率和可重复性。系统运行界面如图 5 所示。

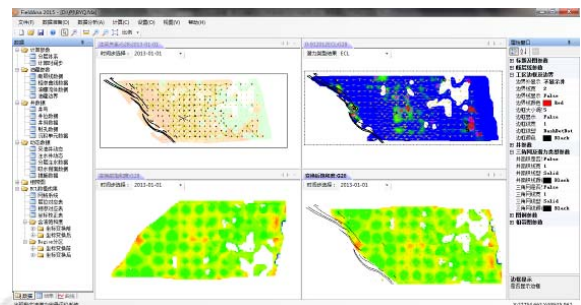


图 5 系统运行界面

BYQ 区块的研究结果表明(表 1), 研究区砂岩水驱控制程度达到 89.0%, 注采系统相对较完善, 且以两向受效为主, 为 43.4%。从含油饱和度较高的剩余油主要集中在注采不完善、断层边部等注入水波及不到或受效不好的区域(表 2), 占 49.1%。开发调整潜力的评价表明, 研究目前条件下没有全面加密调整的潜力; 而由于特高含水期剩余油整体较分散, 全井补孔潜力井数较小, 仅有 10 口左右; 而压裂和堵水潜力井数较大, 分别为 54 口和 140 口。

表 1 BYQ 油层水驱控制程度统计

分类	一向受效/%	两向受效/%	多向受效/%	合计/%
井层数	25.8	41.1	18.1	85.1

砂岩	23.0	43.4	22.6	89.0
有效	20.0	44.6	27.5	92.2

表2 BYQ不同剩余油潜力类型比例

无注 无采 /%	有采 无注 /%	有注 无采 /%	孤立 砂体 /%	断层 边部 /%	层间 干扰 /%	平面 干扰 /%	层内 /%	物性 差/%	吸水 差/%
27.6	11.3	1.9	0.3	8.0	8.4	12.1	8.0	4.7	17.7

#### 4 结语

对于注水开发的砂岩油田,如何充分利用油藏工程师进行动用状况分析的经验,并将其与数值模拟研究成果相结合,实现动用状及剩余油和开发调整潜力的一体化快速评价是油田开发中亟需解决的一项难题。同时,自动评价与人机交互的有机结合、精细地质研究成果与Eclipse数值模拟研究成果的有效利用、油田开发过程产生的海量数据的高效管理等都是系统开发过程中必须解决的问题。实际应用测试表明,本文设计实现的油田开发调整潜力一体化评价系统很好的解决了上述各项问题,系统具有界面清晰、运行高效、操作简单、通用性好等特点,极大地提高了油田开发中调整对策制定的效率和针对性,具有很好的应用前景。该系统已在大庆油田SZ开发区的开发调整潜力评价中得到应用,效果良好。

#### 参考文献

1 姜汉桥,姚军,姜瑞忠.油藏工程原理与方法.东营:石油大学出版社,2000.

- 董冬,陈洁,邱明文.河流相储集层中剩余油类型和分布规律.油气采收率技术,1999,6(3):39-46.
- 杨昱杰,曲艳玲,刘蕊.水驱砂岩油田小层注采关系分析方法和应用效果.科技导报,2008,26(7):30-33.
- 沈长志,李和全,杨俊华.注采动态连通关系的确定方法.大庆石油地质与开发,1994,13(2):42-45.
- 徐艳梅,郭平,黄伟岗,郑威,尹永飞.剩余油分布的影响因素.西南石油学院学报,2005,27(6):29-32.
- 魏纪德,杜庆龙,林春明,张同意.大庆油田剩余油的影响因素及分布.石油与天然气地质,2001,22(1):57-59.
- 岳大力,吴胜和,程会明,杨渔.基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式.中国石油大学学报,2008,32(2):21-27.
- 王巍.剩余油量化的多学科有效方法研究.长江大学学报(自科版),2014,11(6):78-80.
- 郭军辉,朱丽红,曾雪梅,张兴德,吴忠臣,金艳鑫.喇萨杏油田特高含水期调整潜力评价方法研究.长江大学学报(自科版),2016,13(2):1-6.
- 杜庆龙,朱丽红.油、水井分层动用状况研究新方法.石油勘探与开发,2004,31(5):96-98.
- Du QL, Zhu LG, Guo JH. A quick-and-novel method in evaluating the producing performance of single-layer in the multilayered sandstone oilfield. SPE131482, 2010.
- 郭军辉.水驱多层砂岩油田注采关系定量评价方法研究.石油天然气学报,2012,(7):132-135.