

## 利用新型模拟技术解决秘鲁卡米塞亚气田复杂一体化生产系统的挑战

Varun Pathak 和 Arash Mirzabozorg, 计算机模拟软件集团有限公司 ; Pavel Zuloaga 和 Jose Miguel Dorival Vargas, 秘鲁石油公司 ; Belen Klix, 秘鲁石油公司

本文原计划在2020年3月17日至19日于哥伦比亚波哥大举行的SPE拉丁美洲和加勒比石油工程会议上发表。线下会议延期至2020年7月27日至31日，并改为线上会议。会议论文集已于2020年7月20日在线发布。

### 摘要

卡米塞亚油田可能是南美洲最重要的巨型天然气资产，占秘鲁天然气产量的90%以上。该资产包含多个气田，地下复杂程度各不相同，流体类型多样，从极贫气到极富气的凝析气均有涵盖。所有产出的天然气通过管道网络输送至天然气处理厂。整个开发项目位于环境敏感区域，这增加了地面管网设计的复杂性。因此，进行集成生产系统模拟对于设计具有适当精度的地面管网至关重要，以确保IPSM的每个组件都能得到适当的模拟。

在目前的工作中，我们为该资产的A区块开发了一个复杂的一体化生产系统。这是一个包含两个气田的系统，流体相态复杂。各种流体在井管以及地面管网中混合。产出的天然气在处理厂进行液体提取，脱水后的天然气则用于销售和回注。所有这些工作都采用了新型多精度IPSM工具，并同时采用了隐式和显式耦合模式。

这是通过对气藏模拟模型、井模型和地面管网模型进行隐式和显式耦合来实现的。这项工作使得对该油田进行可靠的长期产量预测成为可能。此外，还可以评估管道设计和管网约束，并评估压缩需求随时间的变化。最后，通过为任何IPSM组件使用合适的精度级别，可以轻松生成更高效、更可靠的预测。

现有文献中普遍缺乏对IPSM隐式耦合和显式耦合的比较。本研究通过使用单一模拟工具进行两种耦合来填补这一空白，从而提供一致的比较。除了各种长期产量预测外，本文还介绍了两种耦合方法的优缺点。

## 引言

位于秘鲁乌卡亚利盆地南部的天然气和凝析油藏是南美洲发现的最大天然气藏之一。其估计原始天然气储量为16万亿立方英尺，目前产能为18亿立方英尺/天。由于地理位置偏远，这些气田的开发面临着经济和后勤方面的挑战。目前正在生产的气田位于A区块，对应于四个主要的背斜构造，分别称为S气田和C气田；位于B区块，对应于M气田和P气田。这些气田共有28口井，混合开采多达五个不同地层的油气。

所产天然气通过位于油田1或2个生产集群内的集气站进行输送。同一气田的天然气随后通过更大容量的管道输送至MA分离厂。在分离厂出口，天然气管道和液体管道将碳氢化合物输送至消费中心。此外，超出市场需求的剩余天然气将被压缩后重新注入S气田的储层，该油田已实施天然气循环项目。

本研究重点关注A区块。该区域的天然气生产始于2004年7月A区块的S气田，并于2009年7月C气田也开始生产。S气田目前的采收率为11%，C气田迄今为止的采收率为23%。该分离厂的入口压力为1300 psi。在第一阶段生产中，可用井下压力足以在无需额外压缩的情况下生产天然气。然而，为了达到生产目标，需要安装压缩机和新的管道。主要目标之一是实施并完善包含气藏、生产和工厂设施的模拟模型。

模型中需要考虑的一些主要约束条件包括：

- 生产能力。
- 为避免侵蚀/腐蚀，最大限度地提高气井产量。
- 天然气处理能力。
- 回注能力
- MA工厂的压缩能力。
- 天然气和液体运输能力
- 按区块销售。

一体化生产系统模拟对于此类资产至关重要，以确保对整个系统中的流体流动进行正确模拟，重点在于使用正确的组分和组成来表示地面设施中的流体流动——因为多种流体在地面设施中混合。使用传统的分别软件对气藏、气井和地面设施进行建模的方法可能极具挑战性，并且已被证明可能导致模拟结果不可靠 (Stevenson 等人, 2012; Obidike等人, 2014; Pathak等人, 2016) )。

## IPSM 工作流程

气藏与生产系统的集成使得生产设计能够针对不同的气藏条件、流体和流量进行评估和优化。同时，气藏和气井在地面设施施加的系统约束下运行。在设计阶段，可以使用此工作流程分别求解气藏系统和生产系统。最终，对于中长期预测，这两个系统将被集成。该工作流程可以用以下方式表示：图 1。此工作流程之前已成功用于类似复杂资产模型 (Pathak 等人, 2017)。

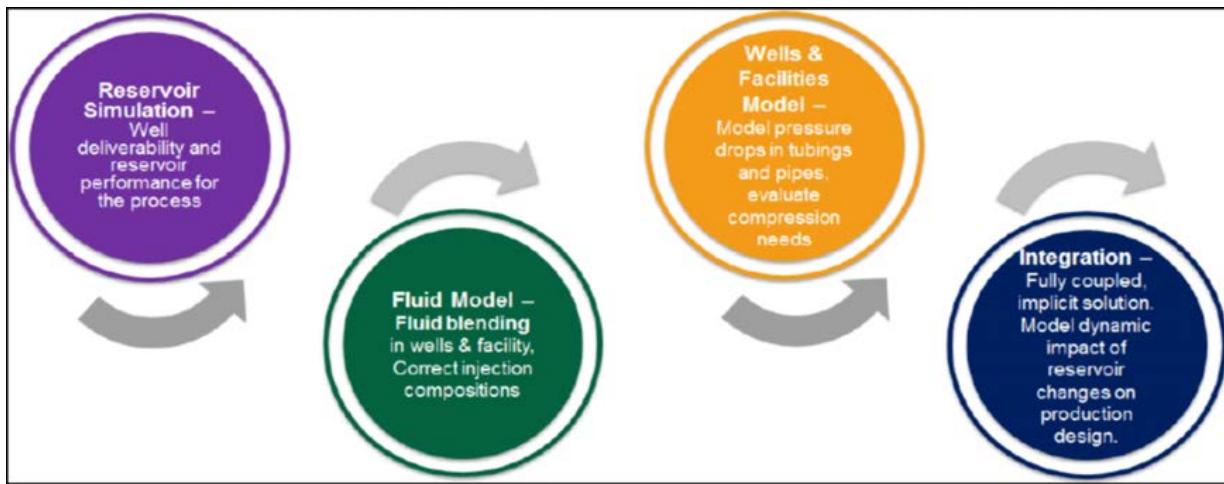


图 1—一体化气藏和生产系统模拟工作流程

## 1. 气藏模型

A区块的气藏模型由S气田和C气田两个区域组成。该系统富含凝析气，因此选择组分模拟方法来模拟凝析油析出和其他复杂的相态特征。组合气藏模型包含约100万个有效网格。这两个气田共有9个不同的流体PVT区域，每个区域具有不同的组分属性。此外，气藏的非均质性很高，渗透率范围从低于1 mD到高于2000 mD，超过90%的网格单元渗透率低于300 mD。气藏孔隙度范围从低于0.9%到23%。气藏具有10个相对渗透率区域，每个区域代表不同的初始含水饱和度范围。初始状态下，两个气藏的温度均高于露点，因此最初是典型的具有不同程度束缚水饱和度的凝析气藏。模拟开始时（2004年5月1日）两个储层的三元饱和度分布如图2所示。

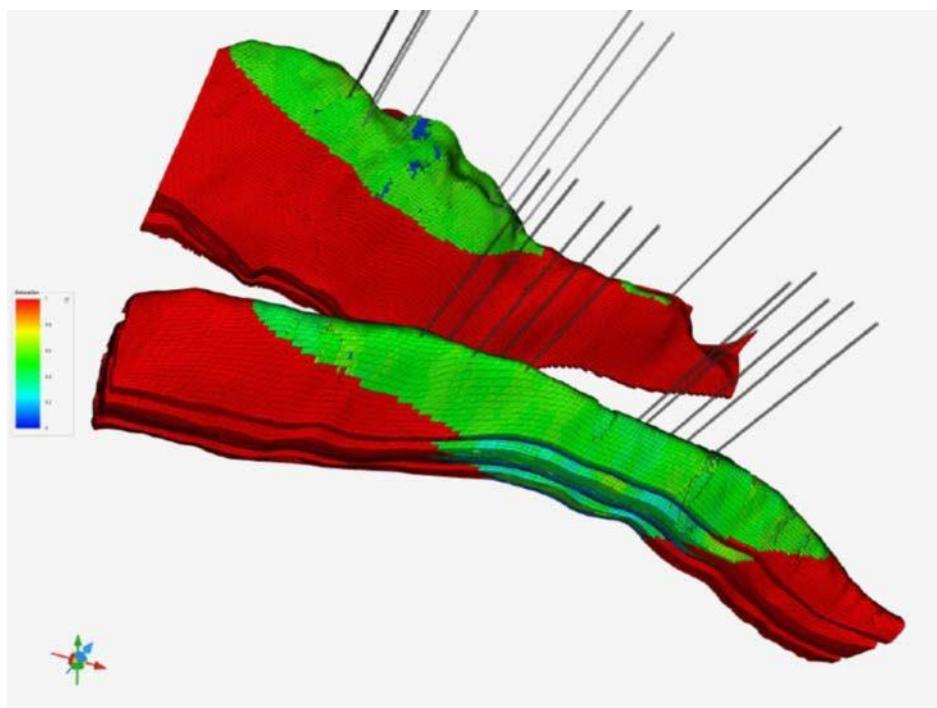


图2——S气田（上）和C气田（下）储层的三元饱和度分布（t=0时）

新工具能够控制气藏模型的精度，并可选择使用适合特定用途的精度。例如，生产工程师可能希望降低复杂气藏模型的精度，将其转换为较为简化的储罐或递减曲线模型。这适用于短期预测，因为快速运行大量模拟对于评估修井作业需求至关重要。在本研究中，气藏模型采用两种精度：高精度（保留原始网格结构）和中精度（在低活动区域选择性地粗化原始网格）。所有这些对藏气精度的敏感性都可以在新工作流程中轻松测试。

图 3 显示了高保真度精细离散化模型 (a) 和中等保真度可变尺度离散化模型 (b) 在模拟结束时 (2040年1月1日) 的网格压力。

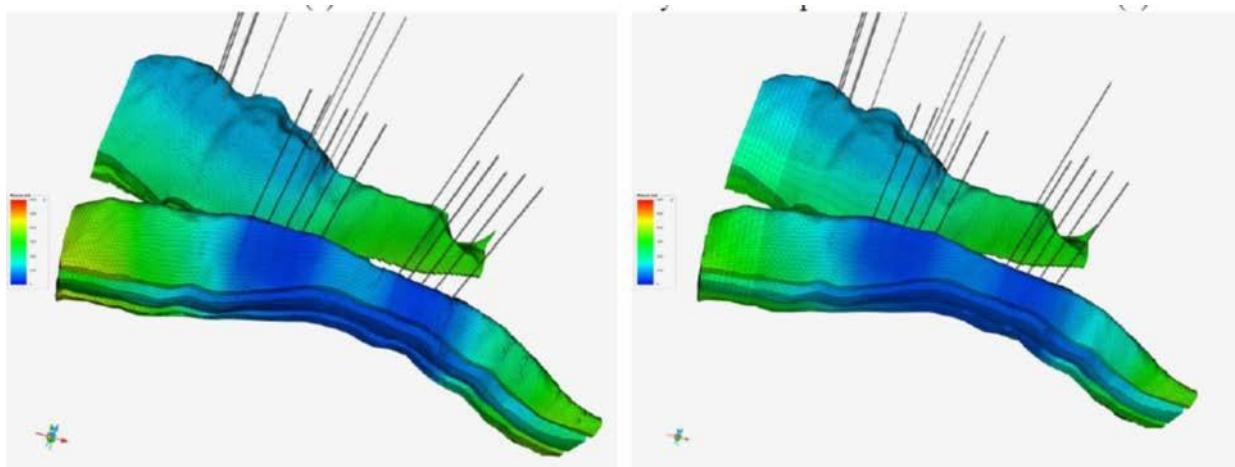


图 3—原始精细地质模型  
(a) 和不同尺度放大的地质模型 (b) 显示的属性是模拟结束时 (约2040年) 的网格压力。

对于一体化模拟，可以使用这两种模型中的任何一种；并且可以立即在两者之间切换。这使得评估低保真度模型的适用性具有灵活性。一般来说，降低保真度对于短期模拟效果良好，并且可以加快模拟速度。但对于长期模拟，应使用高保真度油藏模型进行油藏建模以避免误差。相关指南见表 1(Pathak等人, 2016) 。

表 1——气藏模拟的多种保真度选择。

“低”：递减曲线或物质平衡罐。“中”：放大离散化模型。“高”：精细离散化模型。颜色表示适用场景——绿色表示适用，橙色表示适用但有限制，粉色表示不适用。首选方案以粗斜体显示。（直接摘自 Pathak等人, 2016）。

Process	Inter-well effects	Short-term ~1 month			Medium-term <2 years			Long-term >2 years		
		Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High
Primary production	No	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High
	Yes	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High
Water Injection	Yes	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High
Gas Injection	Yes	Low	Med	High	Low	Med	High	Low	Med	High

## 2. 流体模型

两个气田的9个PVT区域均采用各自的状态方程流体进行模拟，每个流体的性质各不相同。每个状态方程流体包含6种烃类似组分以及水。由于这些组分在9个PVT区域中有许多相同或近似相同，因此可以进行映射。

为了获得最高的流体模拟精度，所有6种烃类拟组分都可以在井和地面设施中按原样模拟——从而在井和地面设施中得到一个包含54个组分的“主”流体模型。然而，由于这些组分在各个PVT区域中有许多相似之处，并且可以相互映射，因此可以减少精确表示流体混合所需的组分数量。因此，所有轻组分都可以从一种流体映射到另一种流体，而井和地面网络的流体模型中仅考虑每种流体中最重的烃类组分。映射方案如图 4所示。

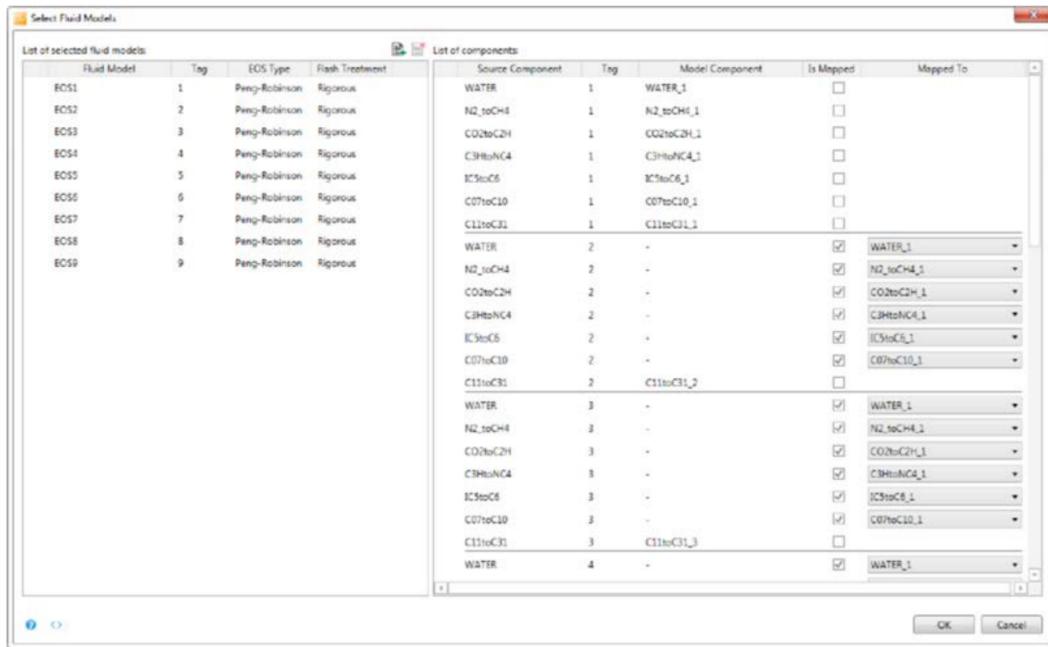


图 4——流体映射方案，用于创建组分数量较少的“主”流体。

这个新的“主”流体模型现在包含总共 15 个组分（1 个水组分、9 个独特的重组分——每个 PVT 区域的 C11 至 C31，以及 5 个轻组分——分别代表每个 PVT 区域的 N2 和 C1 至 C10）。然后可以在该“主”流体与所有其他流体模型之间建立关系，从而使生产井和注入井能够自动使用正确的组分，并在上下游之间实现正确的组分映射，如图 5.

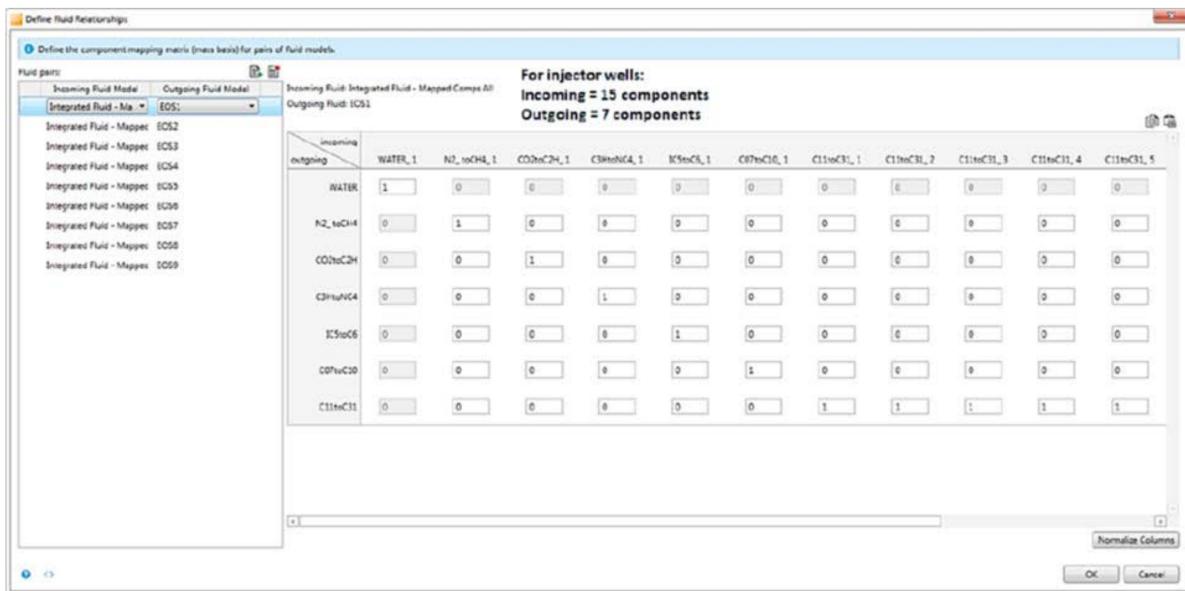


图 5——流体关系，便于解析从生产井到地面设施以及从地面设施到注入井的流体模型。

流体模拟工作流程可从示意图中理解图 6 所示。在图 6(a) 中，生产井跨越两个 PVT 区域，使用不同的流体完井。这些流体将根据上述映射方案在生产油管中混合。在图 6(b) 中，多个生产井的流体流入一个共享的歧管。每个井可以从不同的 PVT 区域和/或不同的储层进行生产。一旦各种流体在地面设施中混合完毕，“主”流体模型即可精确模拟流体混合物在流经各种设备和地面管网时的相态和性质。

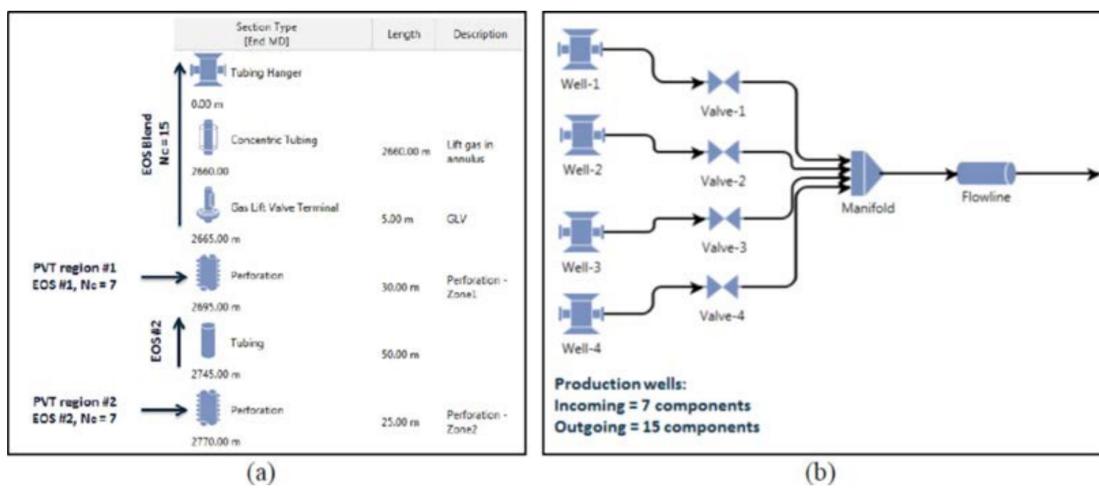


图 6—井筒内 (a) 和地面设施内 (b) 的流体混合。

图 7 显示了所有 10 种流体的 PT 相图——9 种用于油藏的状态方程流体，以及用于井和地面设施的混合流体。为了便于表示，混合流体的相图是在假设 9 种油藏流体的摩尔分数相等的情况下构建的。实际上，每种流体在地面设施中的流量会在模拟过程中以及现场作业变化时动态变化，并且由于流体映射和“主”流体的创建，这些变化会在本工作流程中自动捕捉。

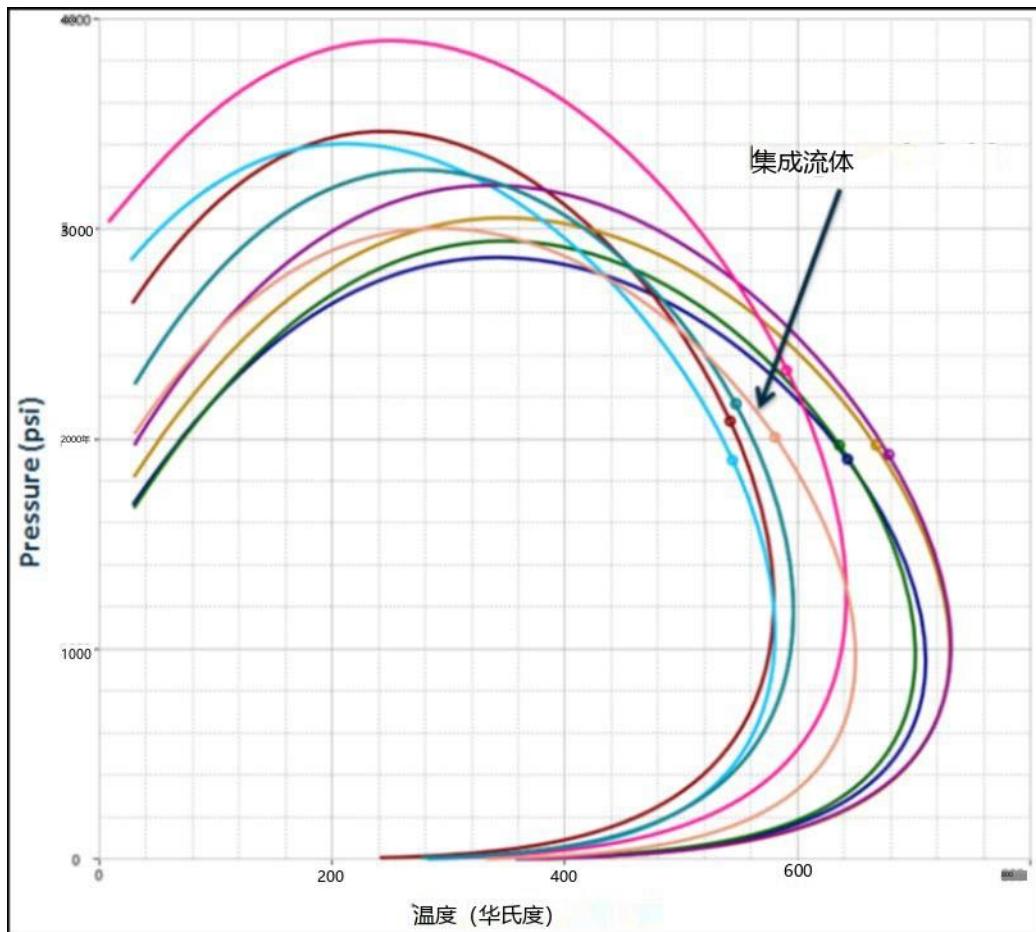


图 7——该资产中所有流体模型的相包络线，包括混合流体（设施中所有流体的混合物）的相包络线。

### 3. 气井模型

该资产共使用同一集成工具对 19 口井进行了模拟。C 气田有 10 口生产井，S 气田有 9 口井——其中 4 口井在整个油田生命周期内均为生产井，5 口井最初为注水井，后来转为生产井。

借助新的工作流程，可以轻松地在 VLP 表或低保真度井模型（实时计算静压降）和高保真度井模型（实时计算静压降、加速度压降和摩擦压降）之间切换井模型。在本研究的大部分时间里，每口井都使用了单独的 VLP 表。

### 4. 设施模型

地面设施模型也使用同一工具创建，从而实现了整个生产系统与两个储层的显式或隐式耦合。此外，设施的每个组件都以适当的精度进行了模拟。本研究中设施模型的主要目标如下：

1. 对设施设备地面管网进行模拟。
2. 对压缩机进行模拟，使其压缩量与气体产量相关。
3. 将中间组分和重组分分离到单独的销售容器中。
4. 将干气重新注入 S 气田模型。
5. 尊重设施限制，延长生产平台期。

## 设施模型的主要特征

该设施拥有两条生产生产线，分别对应两个气田。每条生产线内均有两个歧管。S气田的天然气通过其专用管道输送至 MA 处理厂。该处理厂的运行压力为 1300 psi。C气田的天然气也通过其专用管道输送至 MA 处理厂——但该处理厂预留了一定的灵活性，可以增设一套与原有管道平行的管道，该管道连接 C 气田集气站和处理厂。这套额外的管道可以将天然气产量分配到两条独立的输气管线上，从而降低压降，防止C 气田井口压力过低。在处理厂内，采用两级三相分离工艺，随后进行天然气处理。液体被送至液体销售罐，干燥的天然气用于销售、燃料以及回注至 S 气田的 5 口井。地面设施的示意图如图8所示。

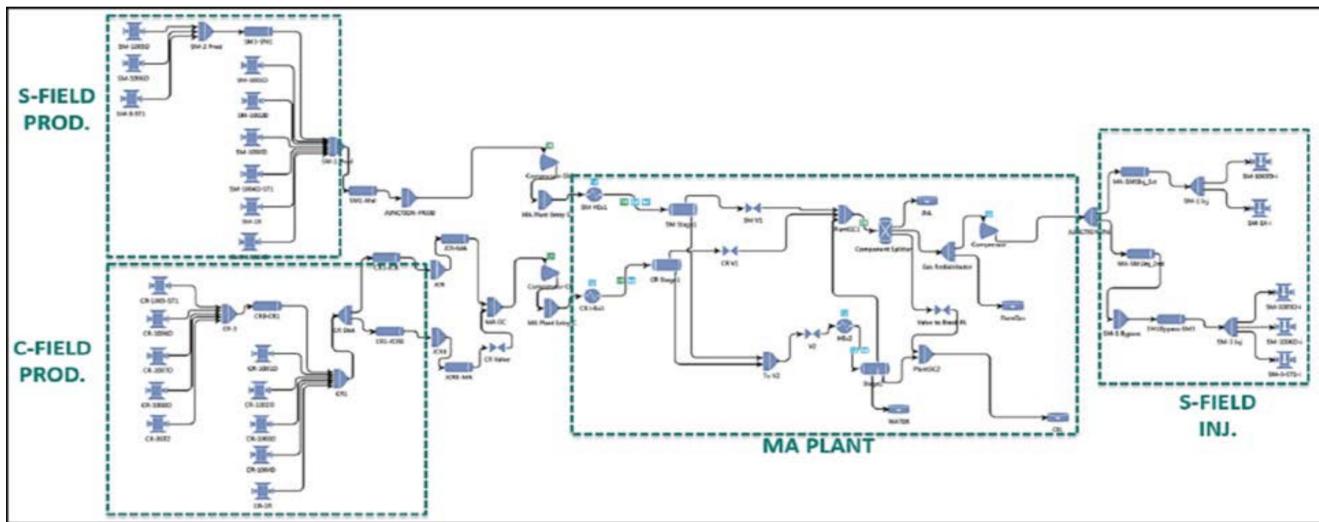


图 8—A 区地面设施示意图。

设施的一些主要特征包括：

1. 压缩机：共有两台压缩机，每条生产线一台。该设施的要求是尽可能长时间地以固定目标产量运行。另一项要求是尽可能长时间地以固定目标产量运行C气田。当两个油藏压力下降导致实际产量开始下降时，压缩机将逐一启动。
  2. 装置：除了进行三相分离外，该装置还会分离出中间组分（C3 至 C4）并将其送至液体收集器。组分分离逻辑如图9所示。

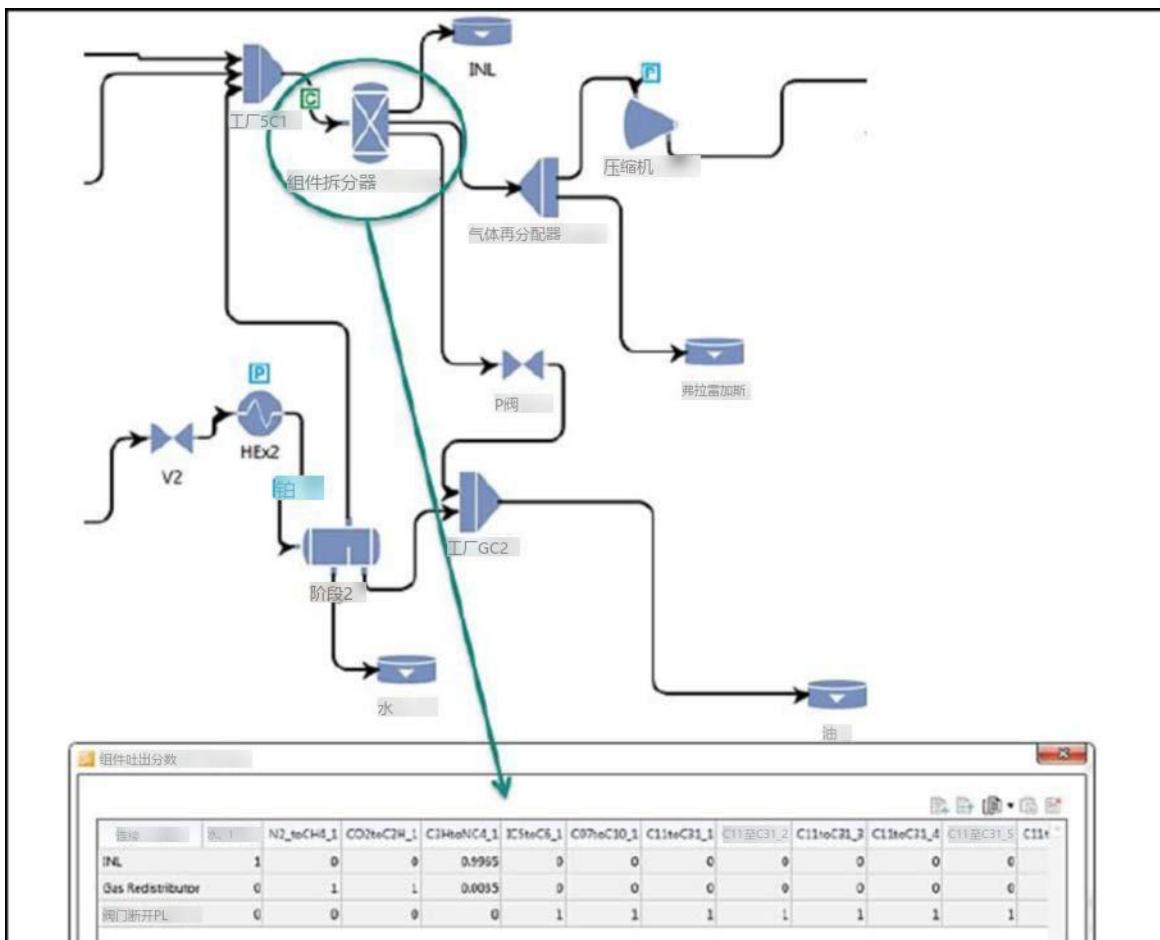


图 9—MA 工厂中的组分分离逻辑。

## 5. 系统约束

系统运行的主要约束条件由设施本身决定，同时还受到代表其运行范围的油井的一些边界约束。本研究考虑的约束条件包括：

- 整个资产的最大天然气产量限制 ( $Q$ )，即  $Q_{\text{资产}} \leq Q$ 。
- C 油田最大天然气产量限制 ( $Q_1$ )，即  $Q_{\text{C气田}} \leq Q_1$ 。
- S 油田最大天然气产量约束 ( $Q_2$ )，即  $Q_{\text{S气田}} \leq Q_2$ 。
- S 油田应作为备用油藏，其实际产量 ( $Q_{\text{S气田}}$ ) 由以下公式给出  

$$Q_{\text{S-field}} = Q_{\text{Asset}} - Q_{\text{C-field}}$$
- C 气田和 S 气田的压缩机都有最大压差限制。
- 每口生产井都有最大产气量限制和最小井口压力限制。
- 每口注气井都有最大气体流量限制和最大井口压力限制。

## 6. IPSM解决方案

运行一体化模拟是为了将气藏变化的影响整合到生产系统的设计和运行中。基本目标是以适当的精度对所有设施设备进行模拟，并保持流体混合物在组分质量和整体流体性质方面的一致性。IPSM 模拟的运行目标如下：

- 延长资产以最大产量“Q”生产的时间。
- 延长 C 气田以最大产量“Q1”生产的时间。
- 当 C 气田压缩机的产量低于“Q1”时，启动 C 油田压缩机。具体时间取决于油藏的产能，而产能又取决于油藏的流动特性，例如：  
渗透率和孔隙度都存在一定程度的不确定性。
- 在 C 气田增加一条管道，以缓解过大的压力损失并提高压缩程度。具体时间可以作为模型中的一个敏感性参数，尽管这条管道已安装在油田中。
- 将 S 气田用作备用气藏，向该气藏注入部分天然气，然后根据天然气产量需求，在稍后将这些注入井改为生产井。
- 为 S 油田生产提供压缩，也有助于满足将资产水平产量尽可能维持在“Q”水平的需求。

## 结果和敏感性

模拟采用新的工作流程运行，该流程既支持完全耦合的隐式求解，也支持显式求解。隐式模拟的结果如下所示。

历史生产和注入持续约 14 年，之后开始进行产量预测。最初，C气田和工厂均能以最大天然气产量生产。随后，由于气藏压力下降以及输气管线压力降低，C气田产量出现下降。然而，S 气田产量上升，以维持工厂的最大流量。在C气田增设管道后，有助于缓解地面设施的压力下降。随后，启动C气田压缩机以缓解压力并维持该气藏的天然气产量。压缩机压力下降在每个时间步长均采用基于比例-积分-微分（PID）控制器的模型进行评估。最后，当C气田产量明显下降时，在S气田气藏中增设油井，并启动S气田压缩机，该压缩机也采用基于PID的模型进行控制。

对于基准情况，所有这些影响都可以在以下方面看到图 10 和图 11.

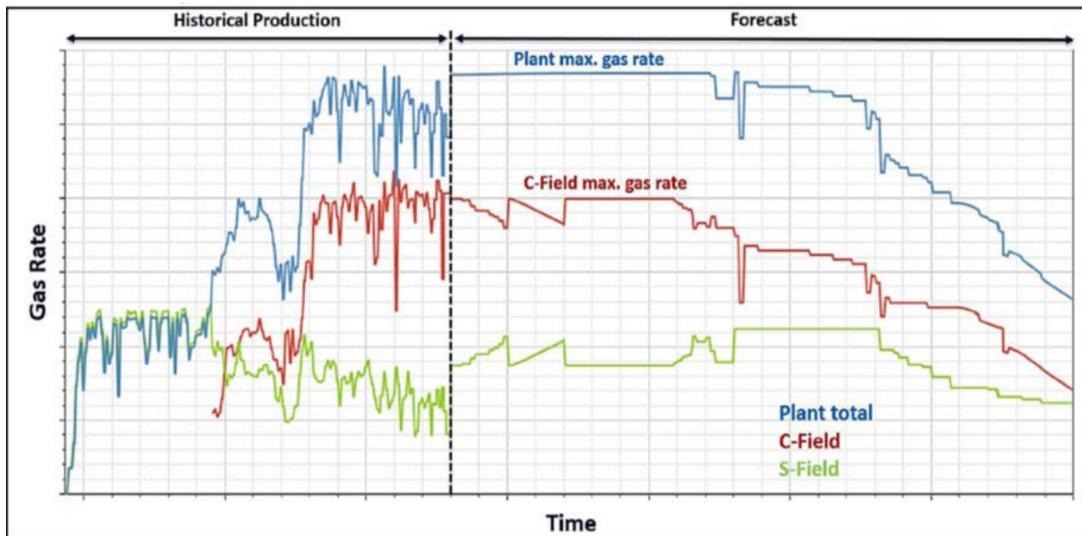


图 10——处理厂和气田天然气产量。

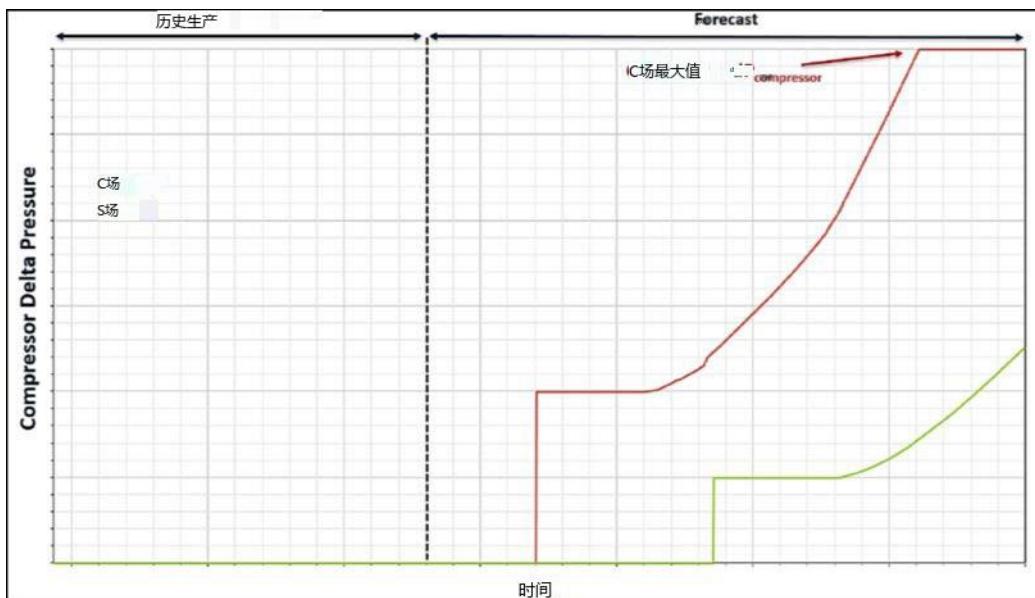


图 11——两个储层的不同压缩需求。

在C气田“CR Dist”和“Mal GC”连接点之间增设管道的影响可见于图 12这张图显示，在新管道投入使用前，旧管道（“CR1-JCR”和“JCR-Mal”）在C气田的管道入口和MA工厂的管道出口之间存在约300 psia的压降。新管道投入使用后，旧管道的压降大幅降低，仅约60 psia。这有助于控制压缩需求，因为管道压降降低后，油井可以在较低的井口压力下运行。因此，即使压缩水平降低，工厂的整体天然气流量也能保持在较高水平。

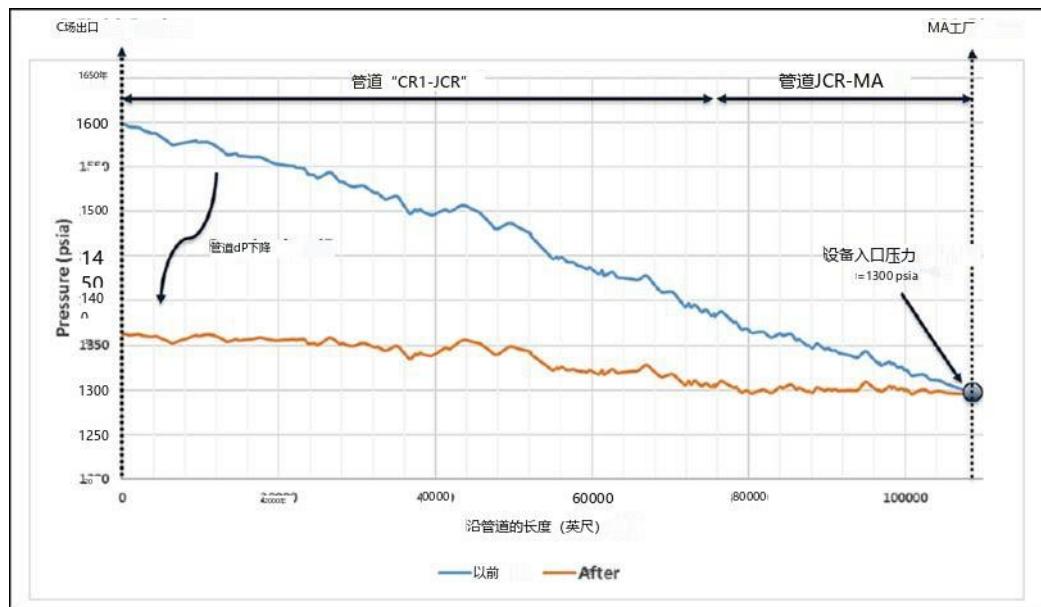


图 12——新增管道投入使用前后 C 油田和 MA 工厂之间管道的压降

在所选操作约束条件下，油藏中几乎没有凝析油析出的迹象。两个气藏产生的凝析油分布情况见图图 13

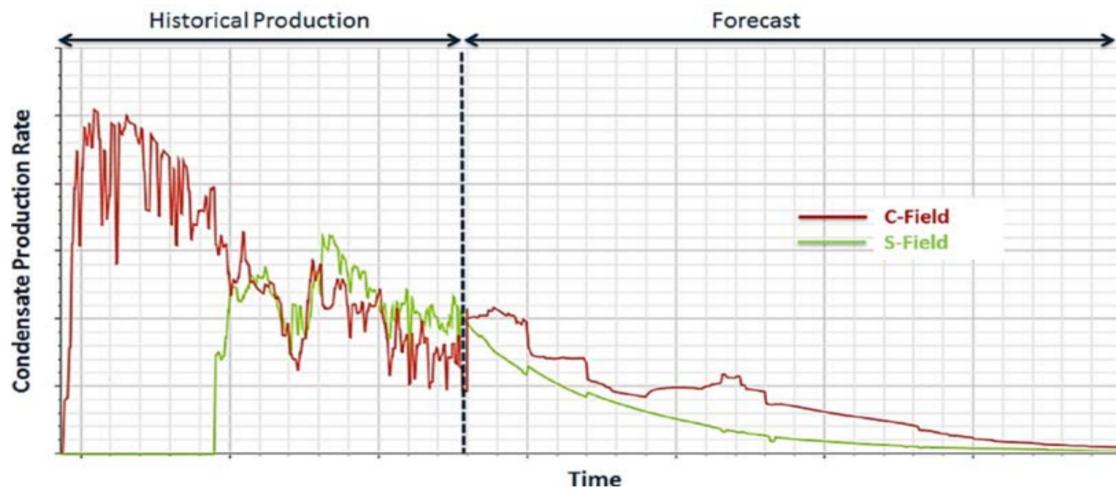


图 13—两个储层的凝析油产量曲线

基础模型中可以改变许多参数。以下部分重点介绍了一些已执行的敏感性分析。

- 压缩需求可以作为决策变量，用于评估以更快的速度和更高的最大值提高压缩的影响。
- 储层的不确定性也可以在集成方法中量化。天然气总储量存在一定的不确定性（这是由于孔隙度、净毛比等方面不确定性的造成）。
- 以及储层的范围），以及固有渗透率。

一些敏感性分析的结果如下所示：图 14 至图 16。图中所示的四个模型是：

方案 1：基准案例，压缩起始日期固定，压缩量根据需要通过 PID 控制器进行调整

方案 2：当产量首次低于阈值时自动启动压缩机。

方案 3：当产量首次低于阈值时自动启动压缩机，以略微改善储层质量（例如 p30 实现）

方案 4：当产量首次低于阈值时自动启动压缩机，以改善储层质量（例如 p10 实现）

整个储层在工厂的产气量如图所示图 14。案例 4 的结果正如预期，平台产量维持的时间最长，因为在这种情况下，两个储层的流动特性都更好，更接近 p10 实现。

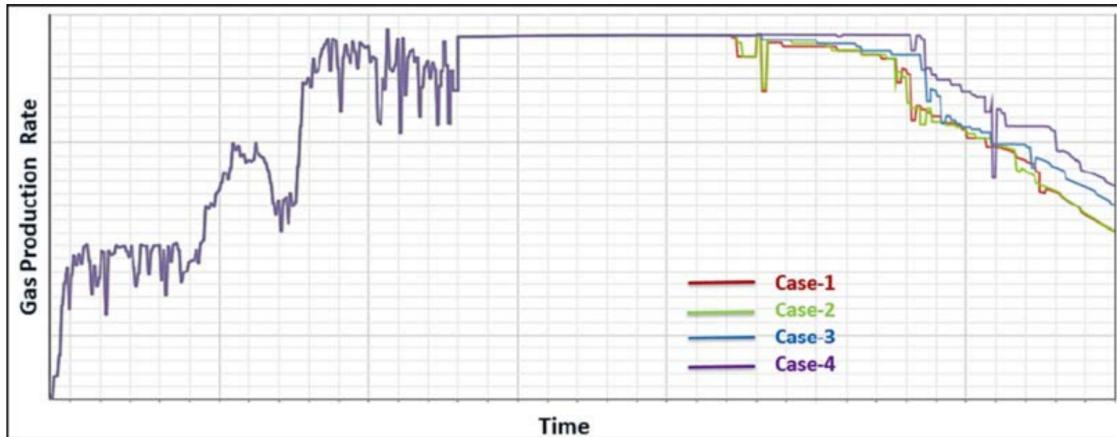


图 14——不同敏感性案例下的工厂产气量。

仔细分析后发现，S 气田的产量受各种案例的影响很小，而 C 气田则更多地受到储层特性不确定性的影响。这并非完整的不确定性评估，但可以帮助我们了解在压缩需求和管道设计方面应该重点关注哪个气田，以应对储层总产量的不确定性。图 15 显示了上述案例中两个气田在模拟期间的累计产量。可以看出，C 气田的累计产量与 S 气田相比有 10% 的差异。各种情况都有所变化，而 S 气田的采收率基本保持不变。

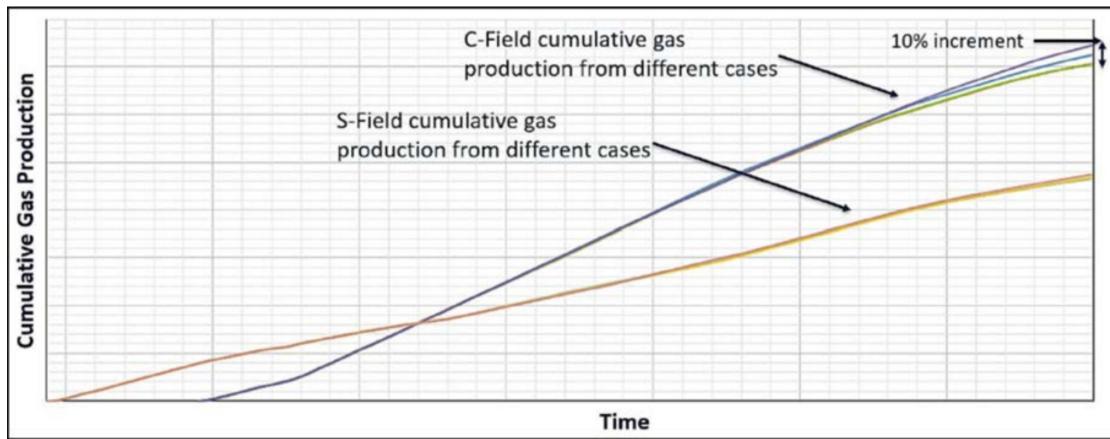


图 15—各种情况下 C 气田和 S 气田的累计天然气产量

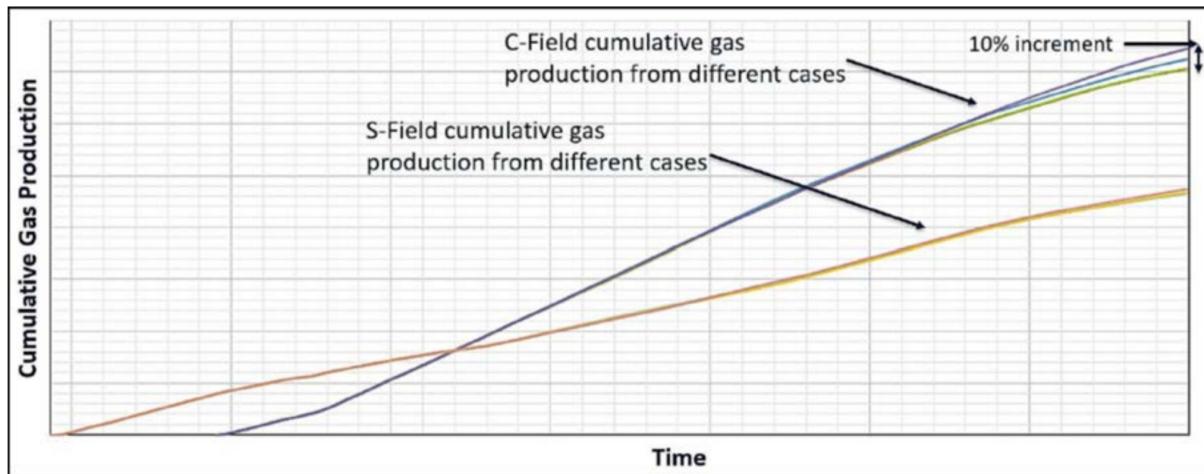


图 16——不同敏感性方案下的 C 气田压缩需求

这与 C 油田的压缩要求有关，因此可以看出，对于案例 4（储层性质最佳的案例），压缩开始的时间最晚，达到最大值的时间也最晚。

## 显式耦合方法的评估

显式耦合模拟可以通过两种不同的方式进行。一种是使用隐式工具，将油藏、油井和设施的雅可比矩阵分开求解。另一种是使用单独的油藏模拟器，并通过传统的显式耦合将其与油井和设施的求解耦合。本研究尝试了这两种方法，但仅讨论显式方法的结果，因为前一种方法将在单独的研究中详细讨论。

当气藏模拟器与油井及设施求解器之间进行传统的显式耦合时，双向通信会在特定的耦合或“握手”时刻发生。在这些特定时刻，气藏模拟器会评估所有气井的流入性能关系 (IPR)，以及每口油井中流体的相态和相组成。气藏模拟器还会评估下一次握手的可能时间。所有这些信息随后由耦合工具进行管理和处理，该工具会将相关信息（即油井的 IPR 和相组成）传输给气井及设施求解器。此时，气藏模拟器暂停，气井及设施求解器开始以稳态方式求解气井和设施方程。它会根据油井的 IPR 和系统中流动的组分评估压力和温度下降。它还会求解约束方程，以确定需要对各个生产井和注入井施加何种产量或压力约束。气井和设施求解完成后，信息会传输到气藏模拟器。这些信息包括所有气井的运行约束、每个注入井的注入流体成分（基于设施处理结果）以及下一次握手时间的建议。耦合工具可以访问来自气藏模拟器以及气井和设施求解器的所有信息。除了传输信息外，它还能智能地选择最合适的下一次握手时间。之后，气井和设施求解器暂停，气藏模拟器再次开始执行时间步长——直到下一次握手时间循环开始。此工作流程如图17所示。



图 17—显式耦合的工作流程，每次握手时间点。

图中显示了模拟时间段内该油田的累积天然气产量对比图 18。结果表明，两种耦合方式在天然气产量方面几乎可以得出相似的结果。然而，两种方法报告的凝析油产量存在一些差异。造成这种差异的原因之一是隐式方法和显式方法在油井中使用的流体模块不同——隐式方法具有更高的保真度，因此精度更高。有趣的是，在运行时间方面，隐式耦合方法比显式方法快了近2.25倍。所选模型的显式耦合与其自身特性相关。井约束和压缩需求的计算非常频繁。因此，油藏模拟器与油井和设施求解器之间的交互频率很高。同时，隐式耦合效率也很高。两者结合，使得隐式耦合方法的运行速度相对较快。

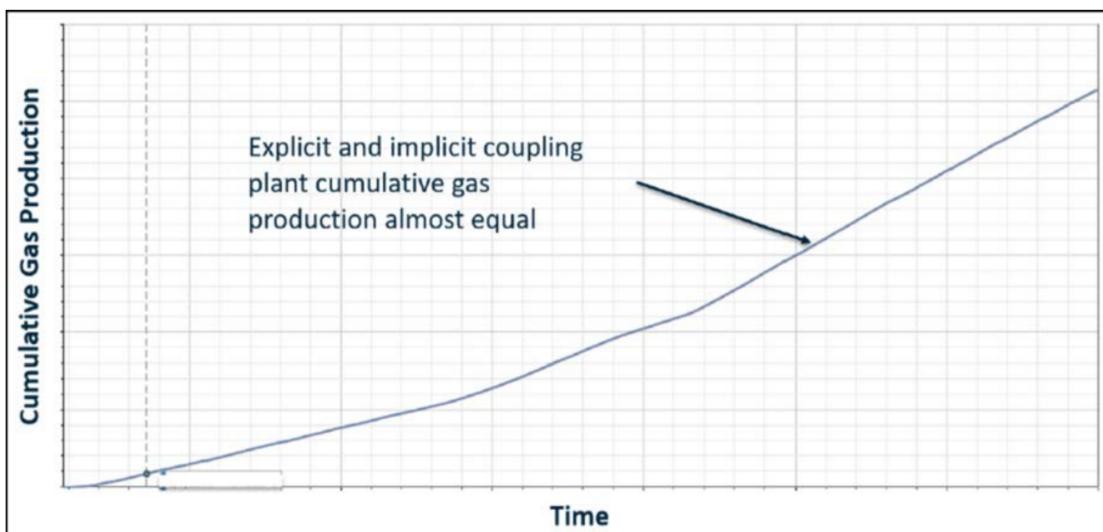


图 18—隐式方法和显式方法之间的气体产量比较。

这项工作将在未来的工作中扩展，纳入气藏模拟器与气井和设施求解器相同的方法——这将带来更高的显式耦合精度。

## 总结与结论

针对Camisea资产A区块，我们开发了一种新的多保真度IPSM工作流程，用于构建包含两个气田的复杂一体化生产系统。生产井油管和地面设施中存在复杂的流体混合。新的工作流程采用一种新型流体混合方法对此进行了模拟，最终得到一个包含15个组分的生产系统（气井和地面设施）。

地面设施的模拟非常详细，包括各种管道、工厂内产气的液体提取处理以及用于销售和回注的干气输送。

利用此工作流程，可以对气藏进行可靠的长期产量预测，并在不同的IPSM组件中使用合适的精度，从而加快周转时间。敏感性分析和假设情景分析也可以轻松地纳入此工作流程。

此外，隐式和显式方法都可以轻松评估，并适用于不同的精度级别。对于当前模型，隐式耦合方法更为高效，但我们正在进行更多研究，并将在未来的工作中对此进行扩展。

## 未来工作

作为当前工作的延续，计划将敏感性分析扩展到涵盖油藏和生产系统的不确定性，以便量化采收率的总体不确定性。这项工作将在近期开展。另一项未来的工作是进一步研究油藏、流体、油井、地面设施的不同精度水平以及耦合类型的影响，以深入了解这些因素对结果准确性的影响。作为一项基本原则，能够模拟基本物理过程的最简单模型将是任何模拟工作的首选。最后，将进行更详细的研究，比较不同精度水平的显式耦合和隐式耦合。

## 致谢

作者感谢 Pluspetrol 和计算机模拟软件集团 (CMG) 允许并支持发表本文。

## 参考文献

- Obidike, P., Vlaardingerbroek, R. 2014. 用于业务规划的集成生产预测。论文 SPE 172479-MS, 发表于 SPE 尼日利亚年度国际会议暨展览会，尼日利亚拉各斯，8月5-7日。[10.2118/172479-MS](#)
- Pathak, V., Palaschak, C., Martinez, O., Hudson, J., Ita, J., Cotrim, H., Segundo, J. 2016. 使用完全耦合的隐式集成生产建模系统解决短期和长期生产预测及不确定性的挑战。论文 SPE 181427, 发表于 SPE 年度技术会议暨展览会，阿联酋迪拜，9月26-28日。[10.2118/181427-MS](#)
- Pathak, V., Palaschak, C., Kumar, A., Eastick, R., Schulz, R., Al-Hadhrami, A. 2017. 中东陆上油藏酸性气体回注混相提高采收率的多油藏多网络耦合生产优化。SPE 188377 号论文，发表于阿联酋阿布扎比 SPE 阿布扎比国际石油展览会暨会议，11月13-16日。[10.2118/188377-MS](#)
- Stevenson, AE, Wanorue, EP, Okoro, EC, Ozen, O. 2012. 从尼日利亚海上资产大型一体化生产模型建设中汲取的经验教训。SPE 159918 号论文，发表于美国德克萨斯州圣安东尼奥 SPE 年度技术会议暨展览会，10月8-10日。[10.2118/159918-MS](#)