

# 多物理场仿真帮助追踪地下流体运动

科罗拉多矿业学院的地球物理学家们正在借助多物理场仿真开发一种方法来追踪地下流体流动的方法，并期望能更好地测绘和了解地下地层和动态。潜在的应用：追踪在非常规天然气和石油开采中使用的压裂流体。

作者：GARY DAGASTINE

地球物理学家通过探测和分析地震活动传播到地球表面的声波来描绘地下地层和事件。这些波产生于自然事件（例如地震）造成的地球运动、为研究地质特征而故意引发的地下爆炸，以及为提高渗透性而对致密地层进行的水力压裂或断裂。

虽然声波可以传播很长距离，但它们在提供关于地层属性的详细信息方面却存在很大制约。它们不能被用于直接识别和追踪流经它们的液体（称为孔隙水）。但是，科罗拉多矿业学院的创新研究表明，伴随地震事件发生的电磁扰动可能会提供这部分缺失的信息。

电磁波的传播距离不如声波，但理论模型和借助多物理场数值仿真进行的实验室实验表明，它们可以识别和追踪孔隙水。基于俄罗斯和日本研究人员的先进工作成果，这种不断发展的技术开启了一扇大门，即利用声学 and 电磁分析互补建立地下世界的更全面视图，这将超越我们现有的认识。

这种震电功能将使我们能够更好地监测沿构造断裂和活火山的浅层地震。也使我们可以安全地开采非常规能源，以及在已开采过的油藏中进行更有效的二次采油/强化采油。

随着压裂技术的使用日益广泛，使得该技术成为了一个特别重要和迫切的问题；使用该技术时，流体在高压下注入地面，使低渗透页岩地层裂开，以提取其中的天然气和石油。至关重要的是需要知道压裂流体的去向，从而可

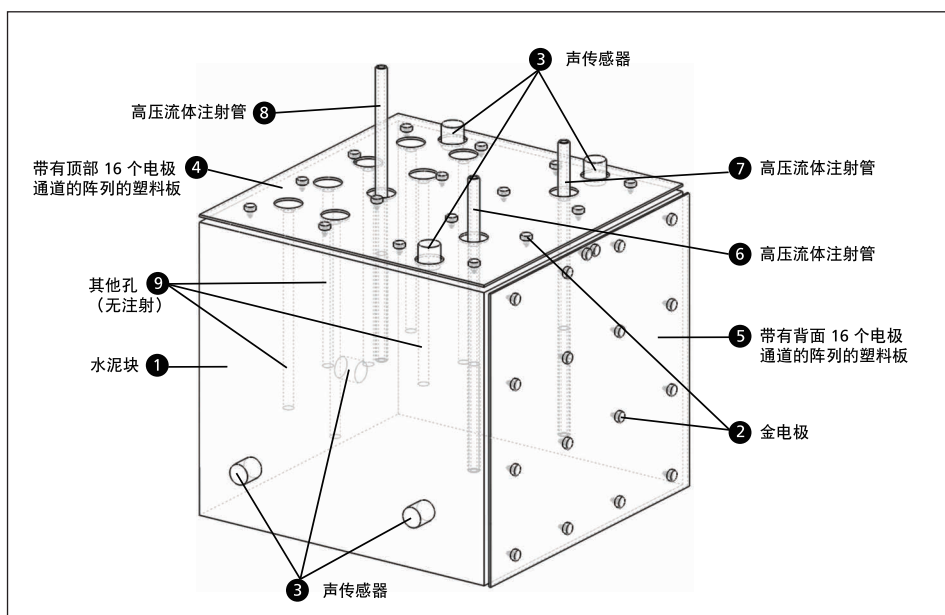


图 1：在水力压裂实验中使用的水泥块的图示。(1) 水泥块，(2) 金电极，(3) 声传感器，(4) 带有顶部 16 个电极通道的阵列的塑料板，(5) 具有背面 16 个电极通道的阵列的塑料板，(6-8) 高压流体注射管，(9) 其他孔（无注射）。

以优化压裂过程，避免浅层含水层发生污染。

## 地电信号

地下电磁扰动来源于矿物表面电荷的净缺电量。这种电荷缺失通过孔隙水中的过剩电荷进行补偿。带有这些过剩电荷的孔隙水的流动会产生电流密度（大约为每平方米几毫安）。

由于电流会随着水经过的地层的类型而变化，所以希望可以基于这些电信号（可以通过放置在地面上和/或钻孔中的电极网络探测）作出有用的推断。

“这种方法类似于脑电图——EEG。在 EEG 中，神经元之间的突触产生电信号，并在

头皮上进行记录。EEG 一直是了解大脑如何工作的重要方法”，引领这个不断发展的地球物理分支学科的研究人员 André Revil 说，“如果将电极放在头上，可以监测大脑内感兴趣区域的电活动，并作出准确的推断。我们正尝试在地下做相同的事情。”

Revil 是全球领先的矿业工程学院之一科罗拉多矿业学院的地球物理学副教授，也是法国国家科学研究中心 (CNRS) 的一名教师。他从事这项工作的团队成员包括学生 Harry Mahardika（使用多物理场耦合软件进行了大量的正向建模和一些逆向建模）、Allan Haas（一直是主要的实验研究人员）以及副研究员

Marios Karaoulis (与 Revil 共同监督他们的工作)。

该团队隶属于科罗拉多学院非常规天然气研究所 (UNGI)。UNGI 的职能是作为一个协调中心,推动和促进所有非常规天然气领域(包括煤层气、致密砂岩气、页岩气和天然气水合物)的研究和开发。UNGI 集合了 7 个学术部门和 11 个研究中心与联盟的资源,在这个快

速增长的领域形成了一股重要的专业力量。

## 正向和逆向建模

“我们发现裂解会同时释放地震和电磁能量,所以我们形成了与这些事件关联的电活动的行为模式理论”, Revil 说,“为此,我们使用 COMSOL Multiphysics 来仿真压裂事件,生成合成地震图和电图,借助于 LiveLink for

MATLAB®, 我们可以配合使用 MATLAB® 和 COMSOL 来执行正向和反向建模的多次迭代。”

“COMSOL 为我们节省了大量的时间,因为软件中清楚地定义了所有必需的基础物理场,例如流体力学方程等,我们不需要花时间来编写它。”

正向建模生成对应于所仿真压裂事件的合

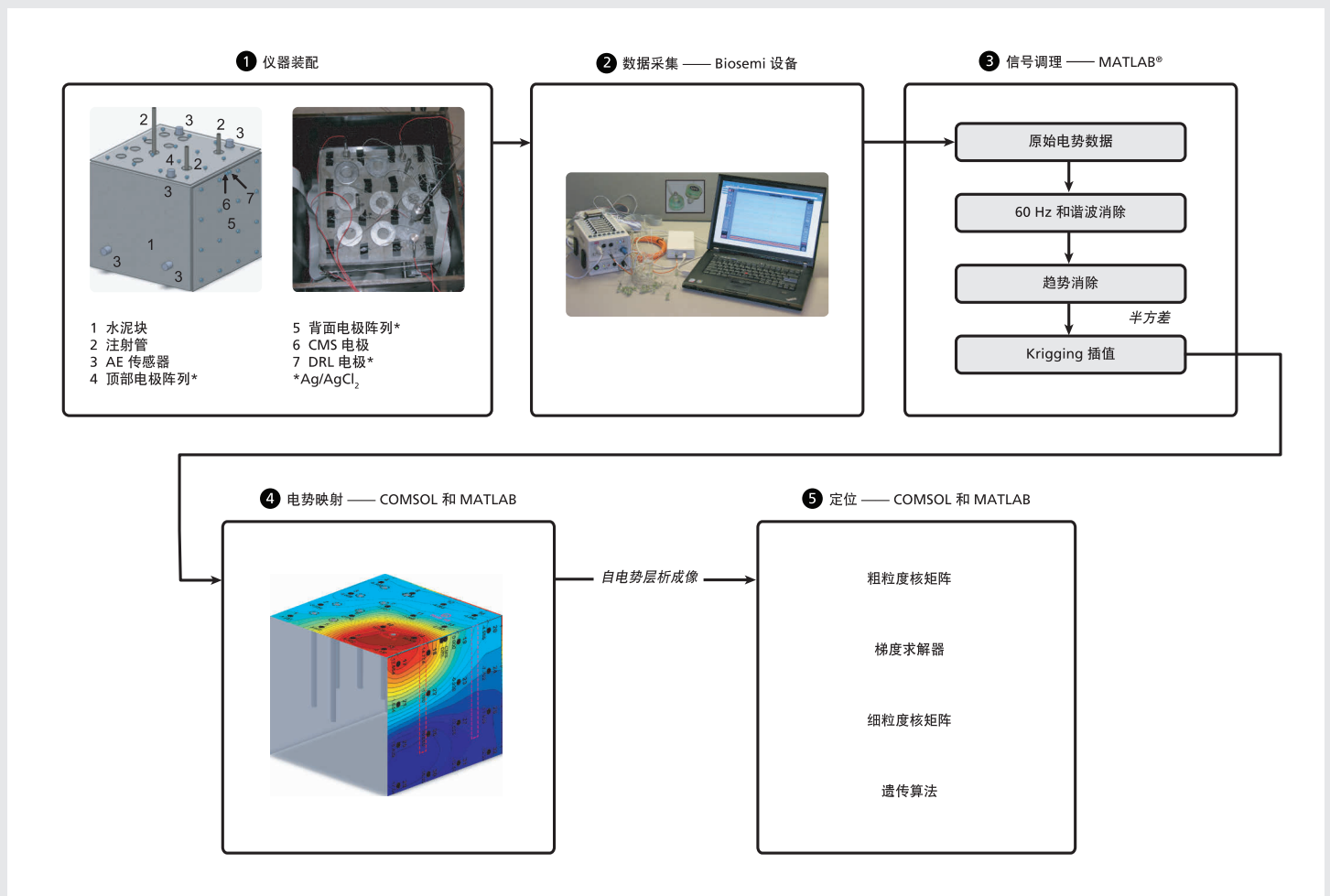


图 2: 处理电数据的流程图。(1) 多孔水泥块的仪器装配, (2) 数据采集系统, (3) 原始数据的信号调理, (4) 使用普通 krigging 插值法映射电压响应 (地质统计推断), (5) 定位块中的引发源。

成地震图和电图，而逆向建模则相反：逆向仿真基于合成传感器数据计算压裂事件的所有可能参数。正向和逆向结果之间的差异通过反复的调整和迭代逐渐缩小，直到获得一致的结果为止。

下一步是确定它们与现实情况的对应程度。该团队设计了一个实验室实验，即通过在高压下泵入盐水来使多孔水泥块重复地发生水力断裂。其目的是，观察是否可以被动地记录电信号，然后通过反演来精确定位随时间推移实际发生流体渗漏的位置。他们在 30.5 厘米 × 30.5 厘米 × 27.5 厘米的水泥块中以不同深度钻了几个直径为 10 毫米的孔或“井”（见图 1）。

测试了各种密封井眼的方式，并将外径 9.5 毫米的不锈钢管放入孔中来仿真油井套管。该水泥块配备了 32 个非偏振银/氯化银电极来进行电压测量，水泥块顶部和某一面各 16 个，再加上 6 个安装在三个面上的声发射传感器（见图 2）。

### 实验验证仿真

在测试期间，探测到对应于沿井封方向的流体渗漏的电信号（见图 3），以及声发射脉冲串和流体压力变化。

“我们使用一个两步过程来反演电数据，以精确定位这些渗漏的位置，” Revil 说，“首先，我们采用确定性最小二乘算法来获取在给定时间处于块中给定点的源电流密度。然后，我们使用遗传算法或概率采样来进一步精确定位源电流密度的位置。”

“反演结果与所提到的井的位置，以及井附近的声发射良好地吻合，”他说，“这明确地表明，可以使用被动记录的电信号来监测在渗漏期间沿井方向的流体流动。它也表明，它们或许可以监测涉及到流体力学扰动的众多其他应用中的流体流动。”

### 下一步：现场试验

下一步是制定现场试验，以进一步研究这项技术，规模为从几米到几公里。如果一切顺利，一些长期以来一直困扰我们的重要问题的解决方案可能就在眼前，例如开发含水层监测和安

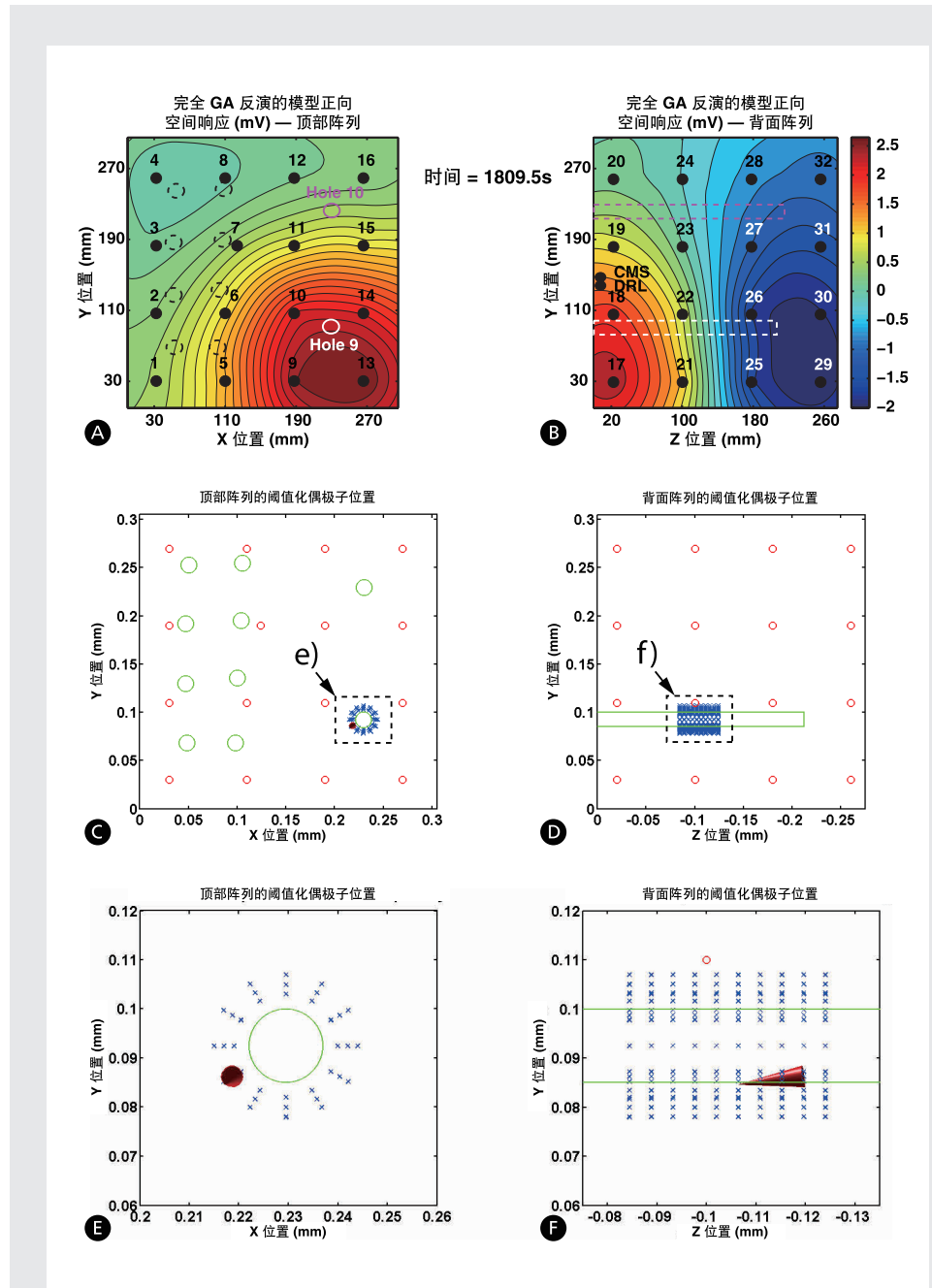


图 3：偶极子对应于一个事件的正向建模电压分布（a 和 b），偶极子在水泥块中的空间位置（c 和 d），偶极子位置的特写（e 和 f），显示了偶极矩的非垂直方向。

全系统，更好地评估陈旧堵塞废弃井的完整性，甚至可以通过断裂岩体系系统内的流体运动来描绘断裂岩体系统。

Revil 说最终目标是将电数据与压力和声学数据相结合，实现完全集成的分析能力。

“数据融合达到前所未有的水平，”他说，

“对于这个领域而言，是一个非常令人振奋的时刻。”