



Leapfrog Energy 海上风电场工程三维地质建模与应用

筑信达 郭晓通

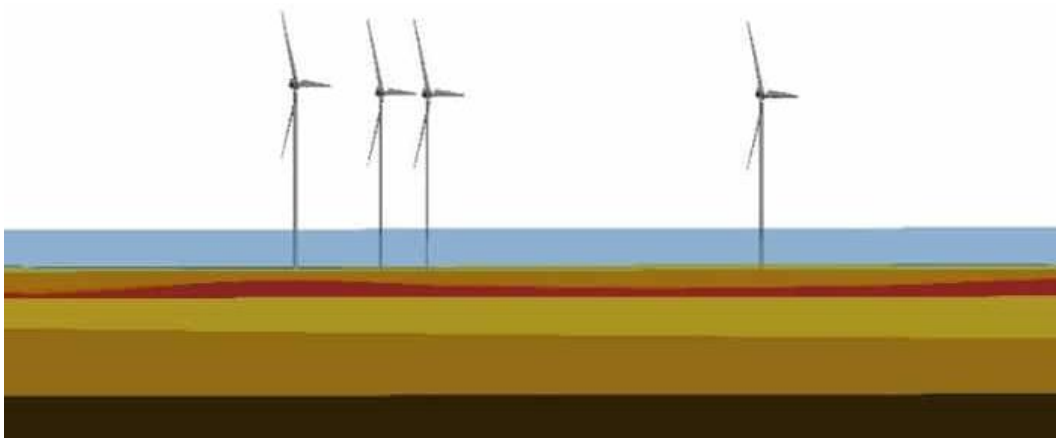
1. Leapfrog Energy 概述

Leapfrog Energy 是 Seequent 推出的面向能源领域的动态三维地质建模软件包，可以应用于海上风电、石油、天然气、地热、压缩空气储能、碳捕集利用与封存等多个能源领域。

Leapfrog Energy 是一款直观的、基于工作流的三维地质建模软件。Leapfrog Energy 将地理信息系统、地形地貌、地质调查、地球物理、钻探、原位测试与岩土试验等各类地球科学与岩土工程数据整合到一个三维可视化的环境中，将地质、流动和数值模型进行结合。工程师可以根据多学科数据快速构建三维地质模型；通过不断测试和更新、完善三维地质模型来进行地层展布、地层属性、地质与岩土工程条件的预测；可以使用普通和简单克里格、反比例加权、最近邻、径向基函数等多种地质统计学方法进行地质与岩土数据的分析、统计和解释。

2. Leapfrog Energy 与海上风电场三维地质建模

2.1 精细三维地质模型在海上风电场工程中的价值



三维建模技术在促进海上风电场工程生命周期内的经济性和可持续性方面具有重要价值。

- 1、 隐式三维地质建模的过程本身也是对海洋地质结构的查明与判断推测过程，伴随着勘查手段与勘探点数量的增加，三维地质模型逐渐被完善和动态修正。同时，三维地质模型也实时影响着勘探手段的选择、勘探点的布置（如地球物理测试的方式与方法，静力触探和勘探钻孔的位置与数量等），这影响着整个岩土工程勘察过程的经济性和有效性。
- 2、 地球物理测试、原位测试、钻探等技术是海洋地质勘查中的常见技术手段。过去，一维的钻孔数据被更多地应用于风机的规划和基础设计。地球物理，特别是高分辨率技术的使用（如三维超高分辨率 UHR 调查）、静力触探数据的应用与数据解释可以为地质结构与属性的获取提供更精细和丰富的依据。三维地质建模技术，可以很好地将三者进行结合。
- 3、 通过精确的地质数据采集与分析，三维地质建模技术将海底地质结构透明化，工程师可以很方便地理解并向所有工程利益相关者传达完整的地质与岩土条件，通过三维模型交流见解。三维地质模型帮助工程师识别潜在的地质风险，如软弱土层、断层等，这些因素对基础设施的稳定性至关重要。
- 4、 三维地质建模技术可以为海上风电项目的选址、设计和施工提供科学依据。通过对拟建区域地质结构的精细把控，工程师能够选择地质条件更有利的风机机位，能够优化基础设计，减少设计与维护成本。
- 5、 通过精准的地质评估，项目可以更好地融入生态环境，降低对海洋生态的影响，推动绿色能源的发展。

2.2 Leapfrog Energy 在海上风电项目中的优势

Leapfrog 系列软件的核心技术特点是复杂地质条件下三维模型的构建能力。在海上风电领域，海洋地质勘探往往涉及较



多覆盖层相关内容。对于覆盖层类型较多、覆盖层分布较复杂区域的地质建模，特别是涉及互层、尖灭、透镜体问题时，常规的一些曲面建模算法往往进行无法处理或极其耗时。Leapfrog Energy 可以针对不同成因类型、分布特征的覆盖层选择不同的曲面建模算法。如选择“沉积”和“侵蚀”类型的曲面构建方法时，可以很容易地处理互层和尖灭问题；选择“侵入”类型的曲面构建方法，特别适合应用于分布不规则的海洋土层透镜体的建模。

地球物理与静力触探数据的解释同样是海上风电岩土工程勘察中面临的问题。Leapfrog Energy 具有数据统计和公式、逻辑编辑功能，一方面帮助工程师分析数据分布规律与特征，另一方面工程师可以基于自定义的静力触探/地球物理数据解释方法进行地层分层、地层属性定义及应用于三维地质模型、数值模型的创建。

Leapfrog Energy 具有非常优秀的三维渲染效果，并提供了免费的模型查看器，方便工程师之间进行模型交流，项目成果进行三维可视化展示；Leapfrog Energy 具有与其它数据平台之间的交互能力，Leapfrog Energy 创建的三维地质模型可以与各 BIM 平台下的 BIM 模型进行结合，也有机会与项目的监测、维护进行结合，为项目运营提供助力。

3. 某海上风电场三维地质模型创建过程

3.1 地形数据的可视化与地表建模

项目中的地形数据通过多波束测深系统获取，多波束测深系统能够有效地探测海床地形，从而得到高精度的三维地形图。图 1 为通过地形点云数据构建的海床三维表面模型，点云数据间隔为 5m。

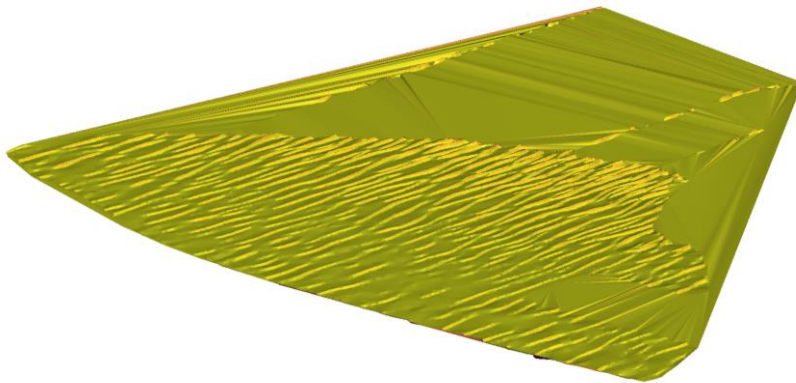


图 1 海床表面三维模型

3.2 静力触探的可视化及模型创建

静力触探数据的常规成果数据包括贯入阻力、修正的锥头阻力、侧壁摩阻力、摩阻比等，将静力触探数据成果按位置和深度（图 2）分别整理成表格，导入到 Leapfrog Energy。在 Leapfrog Energy 中可以对静力触探各数据结果进行可视化。如图 3 所示，通过插值，静力触探成果可以以数值模型的方式进行可视化显示，通过对修正的锥头阻力属性（图 4）的数值模型创建，可以初步判断区域内土层的软弱程度。

location	from	Depth	Cone	Qnet-	qt	Friction	Pore2	Bq	Fric_ratio
HKZ1-BH01	0	50	0.4328	-0.433	0.5669			-0.085	
HKZ1-BH01	50	50.02	1.0102	0.1437	1.1441		0.536	0.1181	
HKZ1-BH01	50.02	50.04	1.8648	0.9981	1.9989		0.5361	0.0374	
HKZ1-BH01	50.04	50.06	2.4228	1.5549	2.5561	0.0087	0.5313	0.0214	0.3983
HKZ1-BH01	50.06	50.08	3.155	2.2839	3.2855	0.0127	0.5168	0.0095	0.4418
HKZ1-BH01	50.08	50.1	3.7565	2.8777	3.8797	0.02	0.4886	-0.003	0.5532
HKZ1-BH01	50.1	50.12	4.062	3.1802	4.1826	0.0318	0.4686	-0.006	0.7939
HKZ1-BH01	50.12	50.14	4.816	3.9247	4.9275	0.0428	0.4429	-0.014	0.9211
HKZ1-BH01	50.14	50.16	5.8788	4.9837	5.9869	0.054	0.4372	-0.014	0.9571
HKZ1-BH01	50.16	50.18	6.9754	6.0857	7.0893	0.066	0.4582	-0.008	0.9856
HKZ1-BH01	50.18	50.2	8.0615	7.1756	8.1796	0.0819	0.4755	-0.004	1.0561
HKZ1-BH01	50.2	50.22	8.7855	7.9036	8.908	0.0955	0.4922	-0.002	1.1169
HKZ1-BH01	50.22	50.24	8.924	8.0408	9.0456	0.1005	0.4883	-0.002	1.1272
HKZ1-BH01	50.24	50.26	8.9352	8.0576	9.0628	0.103	0.5118	0.001	1.1554
HKZ1-BH01	50.26	50.28	9.0231	8.1451	9.1507	0.1104	0.511	0.0009	1.2314

图 2 静力触探数据表

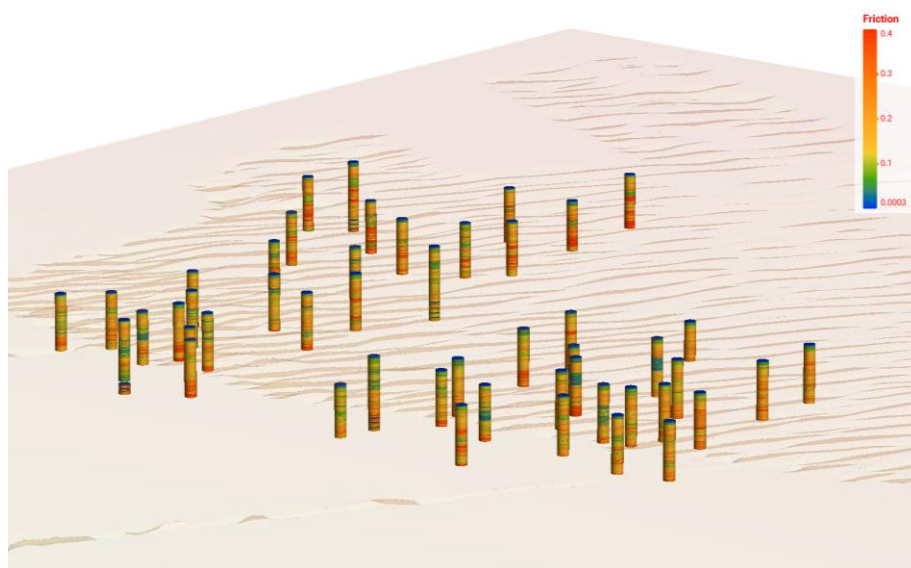


图3 静力触探及锥侧摩阻力分布图

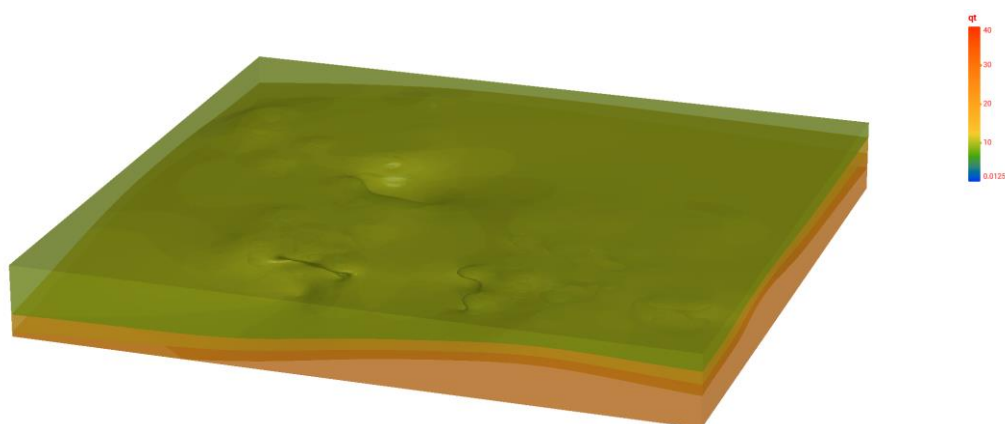


图4 修正的锥头阻力 q_t 属性分布模型

静力触探数据可以进行数据解释,并作为土层划分的依据,常用的数据解释方法包括 Robertson、CUR3 等。Leapfrog Energy 中,支持变量的自定义功能,并允许用户编辑逻辑和公式来进行数据的分析和解释。如图 5 所示,项目中首先通过修正的锥头阻力和摩阻力值,计算了土层分层指标 Soil Behaviour Index,再根据该指标的大小将土层总体分为了 5 层,分别为 Silty clay to clay, Peats, Silty sand to sandy silt, Clean sand to silty sand, Clayey silt to silty clay。各静力触探机位的土层分层结果如图 6 所示。

Calculations

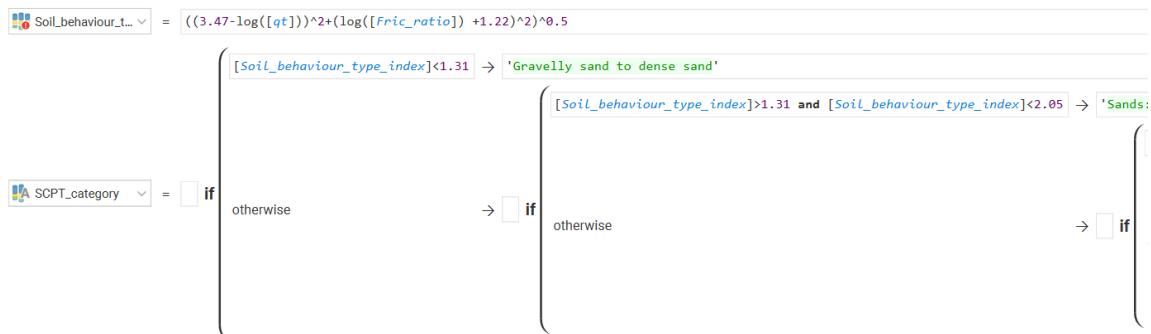


图5 基于静力触探成果进行土层分层

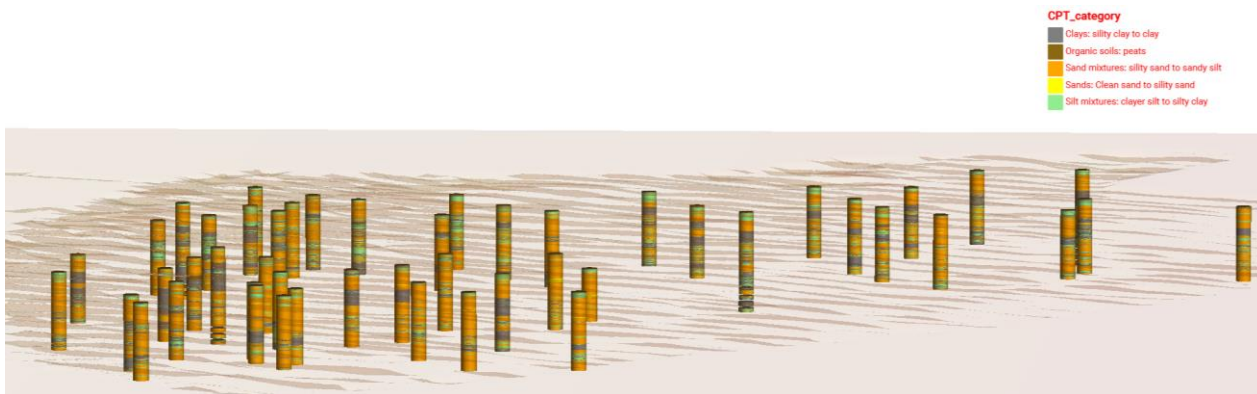


图 6 土层分层结果的可视化

通过对静力触探成果进行解释完成土层划分后，可以开始进行初步的三维地质模型创建。Leapfrog Energy 的三维地质模型创建流程包括：1、定义模型的地表面；2、定义模型范围；3、定义断层或其它不连续面；4、定义各土层之间的接触曲面/体。根据本模型中各土层的分布特征，在创建接触曲面时选择“侵入”的接触方式，并选择接触曲面创建的数据为静力触探分层数据 SCPT_category。创建好的各土层曲面/体模型以及整体的三维地质模型如图 7-10 所示。

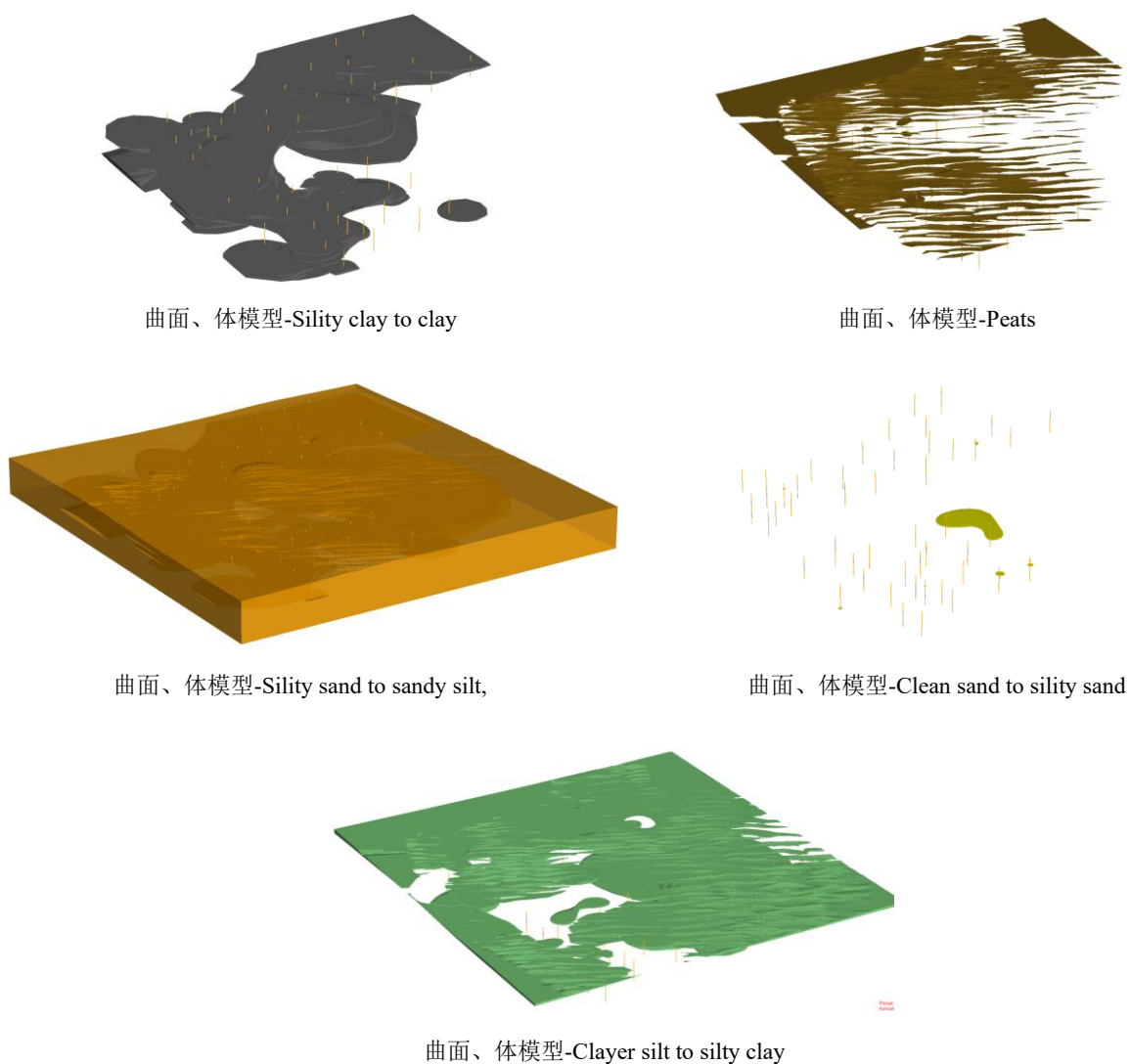


图 7 模型中各土层曲面/体

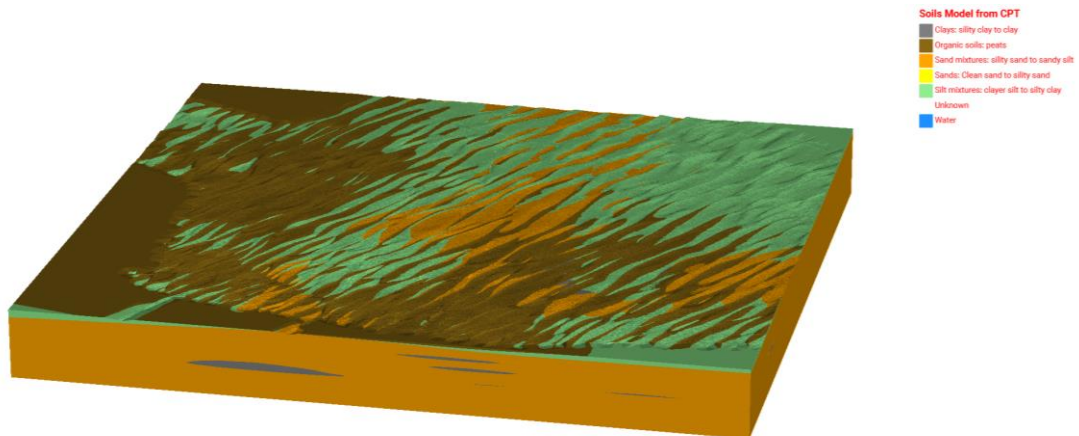


图 8 初步的三维地质模型

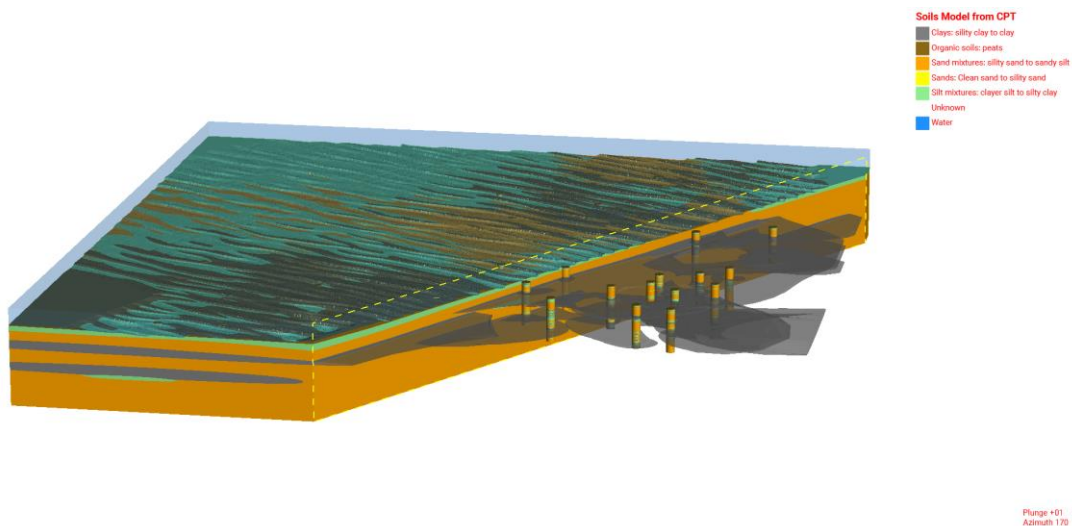


图 9 初步的三维地质模型（模型切片显示，增加海平面）

根据初步的三维地质模型和模型中土层的软弱程度分布，初步选定拟建风场中五个风机机位位置，并将风机机位示意模型导入到 Leapfrog Energy 指定的位置，如图 10 所示。

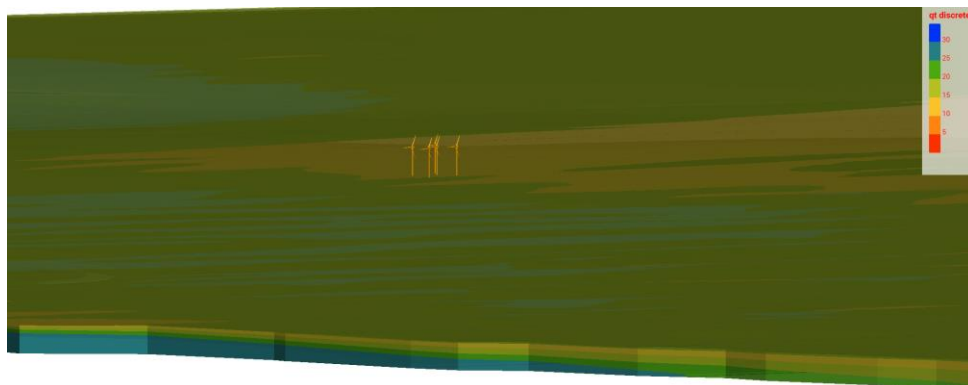


图 10 初步选定的风机机位

3.3 地球物理数据的可视化及模型创建

Leapfrog Energy 支持对各类地球物理数据进行三维可视化。将项目中地震探测得到的三个剖面导入到 Leapfrog Energy。



如图 11 所示，三个平行剖面位于拟建风机两侧，最长的剖面长度约为 17000m。

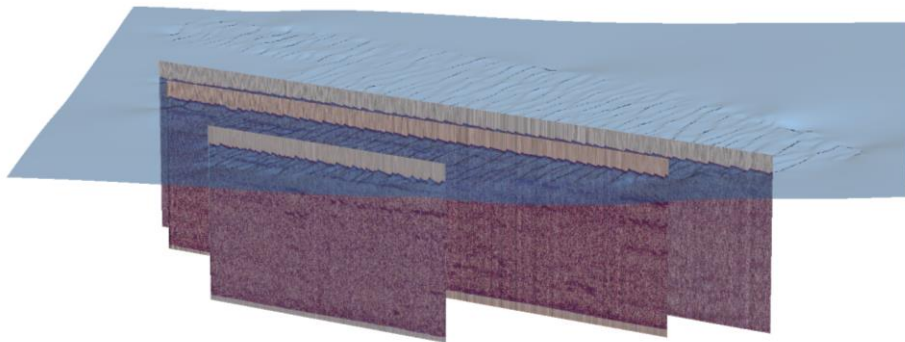


图 11 地震探测剖面（Z 轴比例 30:1）

将地震探测剖面通过 Fast RBF 插值方法进行插值，得到风机附近位置土层的波速分布模型如图 12 所示。将地震探测数据进行解释后，得到的地层分布模型如图 13 所示。

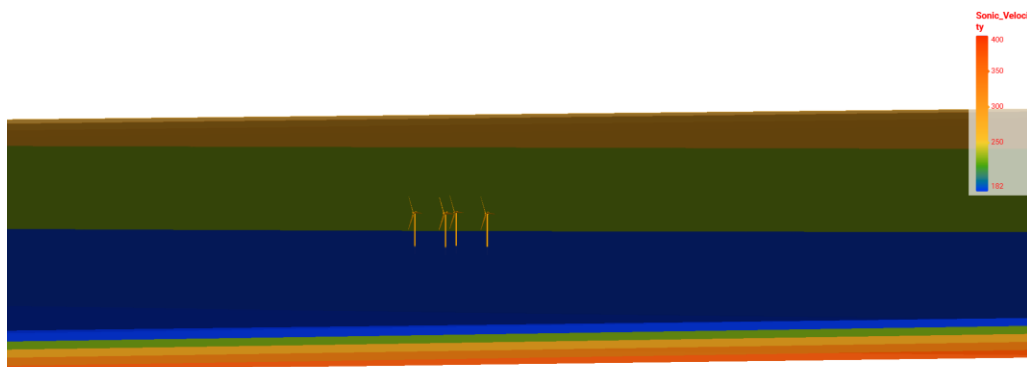


图 12 拟建风机附近的土层内波速分布

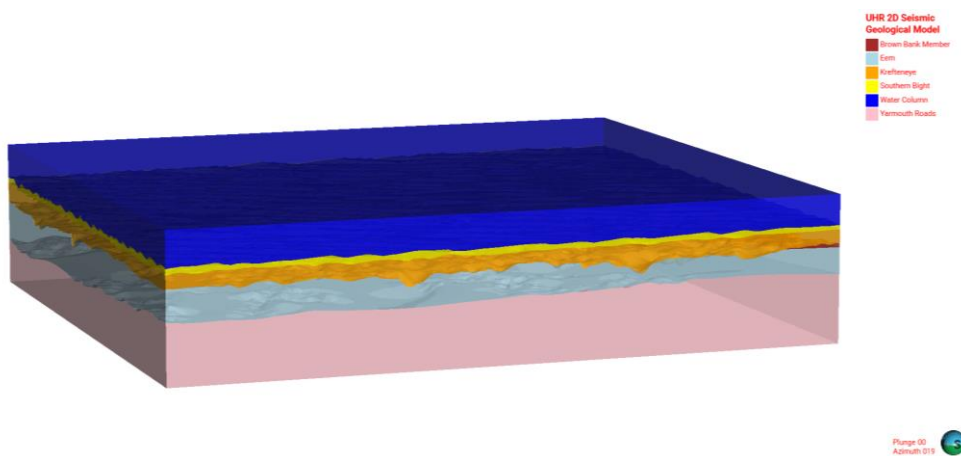


图 13 根据地震探测剖面得到的三维地质模型

3.4 钻孔数据的建模及可视化

为了验证和改进现有模型，项目场地中增加了 14 个勘探钻孔，部分钻孔位置与静力触探位置（线形）重叠，钻孔模型如图 14 所示。

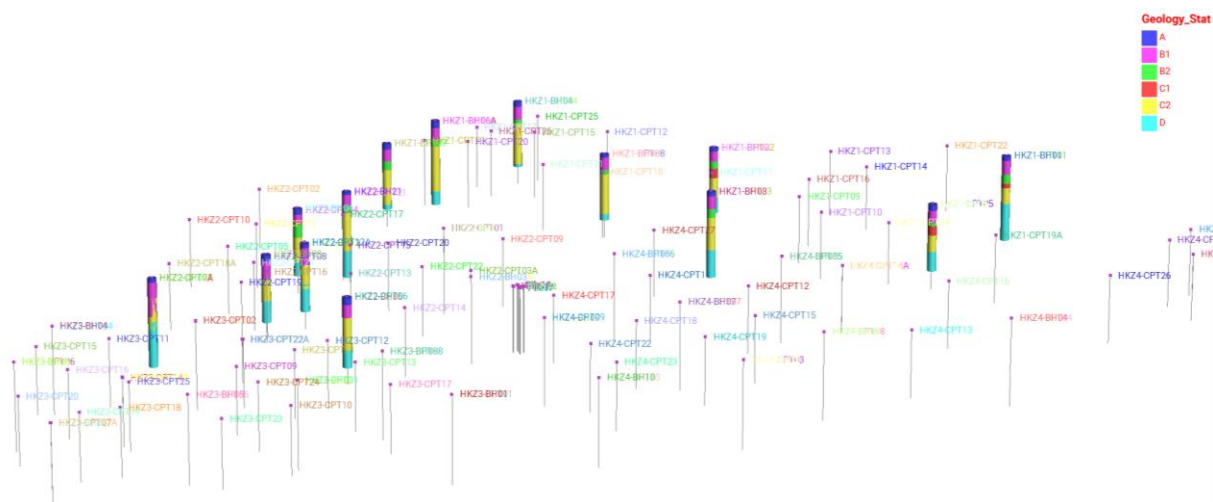


图 14 勘探钻孔模型

综合考虑钻孔、静力触探与地震探测数据，并改进模型范围后，修改更新后的模型如图 15 所示。该模型可以作为本次岩土工程勘察过程的最终地质模型。

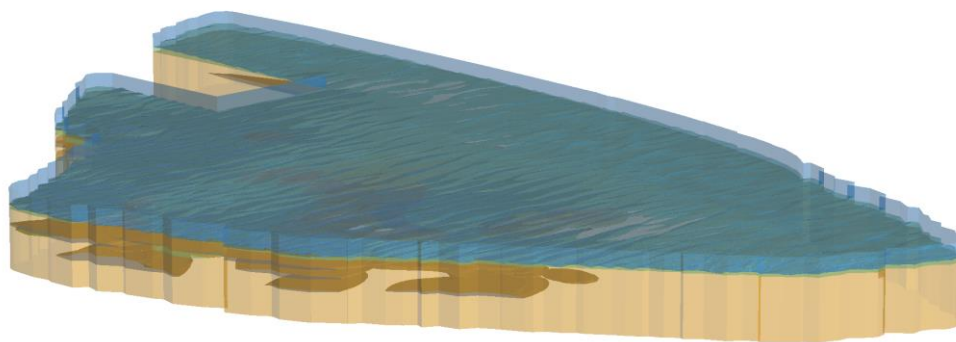


图 15 改进后的三维地质模型

4. 小结

随着海上风电产业的迅猛发展，海上风电场的规划和设计越来越依赖更先进的技术工具。

Leapfrog Energy 作为一款专为能源领域设计的动态三维地质建模软件，在海上风电场项目中展现出了卓越的应用能力。Leapfrog Energy 通过整合地理信息、地球物理、地质勘探、原位测试等数据，将海底地质结构精细化、透明化，为海上风电项目的规划、设计、施工以及后续的运营维护提供了科学的支持和决策依据。