





分离器浅析 - 适用于分离器设计的计算流体力学简介

46 - 51

## 简介



为顺应石油和天然气行业的未来发展,缩减勘探与开发成本已变得空前重要。不仅如此,优化生命周期过程中的生产效率,以及如何以及济的方式延长现有及老旧油田关闭,已成为走向美好未来的关键所在。所有这些目标的实现,必须环境最高级别的安全性和做好环境保护工作为前提。

在石油和天然气行业,以往会对油田使用经验性分析、物理测试和基于经验的学习来开发工程设计。虽然这些方法仍然非常重要,但仿真型设计的兴起,使工程师得以借机对广泛的物理与化学行为进行详细、准确的预测,进而以数字化方式探索设计与系统运行。

Siemens 的仿真软件可以让工程师以数字化方式探索设计,其借助的方法有详细、准确的计算流体力学(CFD) 仿真以及设计空间探索。

使用多物理场仿真,即便是在最复杂的场景中,也能够以较高的精度对广泛的物理行为进行预测。多相流、复杂的热传导、流体结构交互及化学反应都可以通过单一、集成

式软件包来进行仿真。此外,自动 化设计空间探索可以更快找到优化 设计,即使是在大量设计与操作变 量共存的情况下也是如此。

在这份特殊的报告中,我们展示了来自顶尖石油和天然气公司的工程师与科学家如何在一系列石油和天然气产品及系统的设计与运行中部署 Siemens 仿真软件。报告中讨论了各式各样的应用和挑战,其中包括:

- 井下工具优化
- 海底与流体安全保障风险的降低
- 近海与船舶设计
- 技术安全
- 流程装备设计性能

技术创新是石油和天然气行业未来 发展的关键。西门子公司的仿真软 件可以助力工程师应对这一挑战。

Siemens PLM Software 行业集团总监 Alex Read

## "持久低价"环境中的 工程设计

虽然各家公司应对这一全新模式的 观念有所不同,其中大多数会选择 继续开展日常工作(交付高质量的 创新产品和解决方案),但前提都 是在符合安全性的情况下缩短开发 时间并降低成本。基本原理工程仿 真工具将成为主要促进因素,因为 各大公司将愈加依赖基于仿真的设 计探索。最初的驱动因素是降低工 程成本和时间,而如果将仿真作为 创新促进因素,公司也能从中受 益。

仿真的重要性可以清晰体现在三个 具体实例中:其中两个来自于西门 子近期举办的石油、天然气和化学 计算流体力学(CFD)大会,另一个 来自于行业之外。

"对于工程设计团队来说,目前的市场状况正是检验实践的大好时机,借此机会可以向他人学习如何善用低迷的市场,通过 仿真重塑流程并削减开发成本,缩短开发时间。"

## "持久低价"环境中的 工程设计

## Schlumberger 流体控制阀设计

在西门子大会上,来自斯伦贝谢公司的Reda Bouamra 分享了公司设计的井下流体控制阀 (FCV)。积垢是一项主要的流动保障挑战,因为它不仅能导致减产,而且治理成本高昂,同时还会引起 FCV 堵塞,因此斯伦贝谢公司的目标是开发一种对积垢敏感度较低的 FCV。其集成的CFD 实验性设计流程帮助公司实时时区,同时还缩短了工程交付的这一目标,同时还缩短了工程交付的设计了测试程序,确保其尽可能的接近了测试程序,确保其尽可能的接近最实的油井条件,并且重点关注获益最的方案。该程序可以验证 CFD 方法,让使用者可以放心地使用 CFD 来探索未经测试的条件和设计。

仿真的主要优势之一就是可以轻松创建 经过最初验证的模型,并且可以评估替 代设计或方案。凭借这一优势以及提供 的详细信息,工程师可以想出新的创新 解决方案,并高效地对其进行测试。

业内企业纷纷转向标准化解决方案,在 多个项目间进行重用,这就需要在广泛 的操作条件中验证设备性能。经过验证 的仿真可以提供经济高效的方式来实现 这一目标。最终成果:斯伦贝谢公司凭 借集成的 CFD 实验性方法降低了设计流程的时间与成本,同时在真实的油井条件下评估了更多设计。

## Technip 的虚拟造波水池

Technip USA 副总裁兼首席技术官 Jim O'Sullivan 介绍了 Technip 如何将"数字造波水池"方法用于各项目中,所涉范围从深吃水半潜式钻井平台的全面涡激移动到重力式结构上的阻尼振荡。阻尼振荡与在高于入射波频率的频率上发生的结构位移有关。一直以来,近海板块依赖于物理测试和潜在的流代码来评估流体动力学设计。然而,这两种方式都会遇到相应的挑战:物理测试成本高昂、耗时,测试结果需要从模型转换为全尺寸。潜在的流代码则会忽略(或必须通过调整才能模仿)重要的物理现象,如粘性作用和碎波现象。

Technip 还提前对物理测试进行了建模,并将测试聚焦在正确的领域,由此将 CFD 和物理测试程序集成在一起,进而 降低了失败的几率。这种方法不仅验证 了针对测试的 CFD,而且使用了 CFD 来全面探索其他设计和条件,以及真实海底条件下的所有行为。

使用 CFD 等经过验证的基本原理设计工 具意味着不需要对结果进行调整,这就 减少了后续设计周期或现场发生的预料之外的问题。最终成果:通过使用基于CFD的设计探索,Technip得以高效地优化设计,采用能够更好呈现操作条件的流程,从而有效地降低了风险。

## 汽车行业中的仿真演变

最后一个示例来自于石油和天然气行业之外。无论是全球经济危机、新竞争对手进军市场,还是行业法规的改变,汽车行业都需要以更短的时间和更低的成本来持续推动交付创新解决方案。成功企业已经通过循序渐进地摒弃传统方法(昂贵耗时的物理原型)实现了这一目标,其目的就是要支持丰富的工程仿真。

捷豹路虎 (JLR) 在 2008 年开始了他们的战略转型。其目标不仅是在低迷的经济环境中生存,更要在确保利润增长的同时,充分扩展其产品服务与销售范围。他们希望在 5 年内开展 40 项"产品行动"。这无疑是一项艰巨的任务,因为现如今的车辆极度复杂,所包含的客户需求就有约 9,000 项,另外还有签收前的3,000 项评估。

正如 JLR 仿真主管 Andy Richardson 所指 Technology 期刊上出的那样,业务驱动因素与挑战很容易出现在石油和天然气装备中:在应对大

肆增长的系统复杂性的同时开发新技术;确认故障模式并确定对策以便一次性实现设计的成功;减少服务故障,对所有范围内的使用案例进行仿真,以及实现经过优化的产品设计效率和更低的生产成本。

JLR 正在实现强大工程设计的目标之路上稳步前行,他们在第一个原型构建之前就已经为签收做好了准备,公司正在践行这一方法,同时取得了良好的经济成效:过去五年中,每年都实现了 15% 或更高的营收增长(未扣除利息、税、折旧和分期偿还)。最终成果:通过在制造周期期间发展仿真文化,并以削减成本为需求导向,JLR 欣然接受由这些技术带来的创新潜力,并在市场条件改善之际充分将机会转化为价值。

当前"持久低价"的市场情况给石油和天然 气行业带来了巨大挑战。

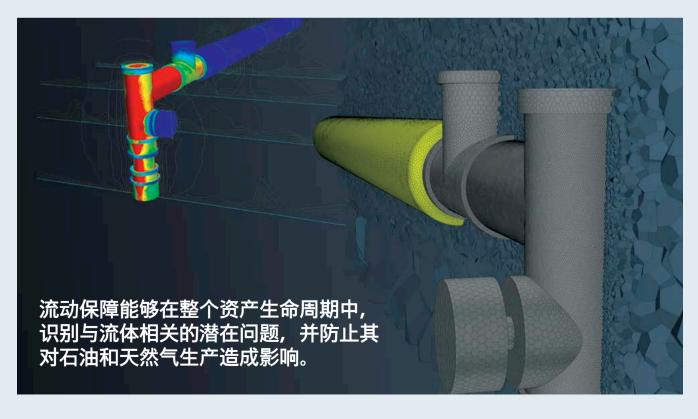
对于工程设计团队来说,这正是检验实践的大好时机,借此机会可以向他人学习如何善用低迷的市场,通过仿真重塑流程并削减开发成本,缩短开发时间。

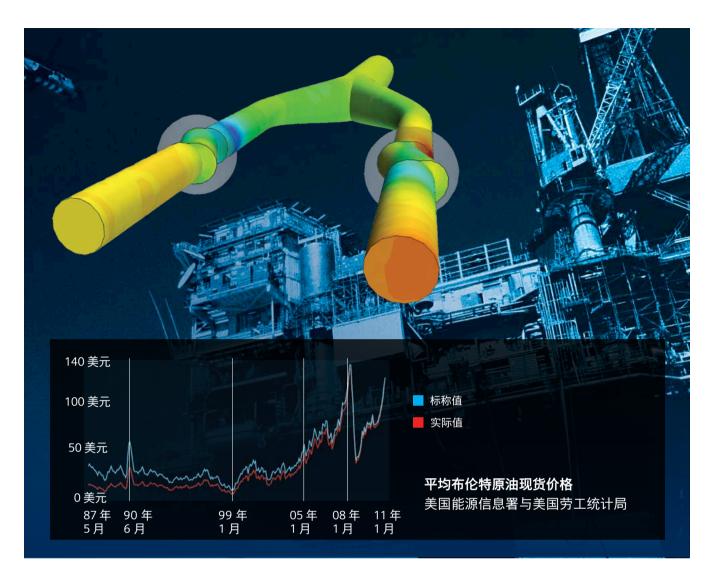
最初发表在 Journal of Petroleum Technology 期刊上

# 1D 与 3D 流体仿真的集成有助于解决深水流体安全保障方面的挑战

## 水下采油树的冷却分析 与多面体网格

虽然 1D 流体仿真软件可以快速准确地对 长直管路等简单任务进行仿真,但它们 并不适用于分离器、段塞捕集器及干式 采油树等复杂 3D 几何图形。另一方面, 完整的 3D CFD 代码已被证实能够准确地 在这些情况下预测流体,尽管这种做法 通常会带来更高的计算成本。生成组合 型 1D/3D 仿真可以一举两得:相较于仅采用 1D 仿真,该方法能够对复杂的管道和设备系统进行仿真且准确性更高;相较于仅采用 3D 代码,这种方法可以节省大量时间,在设计的早期阶段防范问题。





## 深水钻井与生产方面的挑战

由于那些能够轻松生产的石油和天然气 的数量已经大幅减少,勘探与生产公司 纷纷转向较难获取的碳氢化合物资源, 包括深水盆地与超深水盆地。然而,要 从这类环境提取石油和天然气资源, 面 临的挑战可想而知。举几个简单的例 子:水深达到 3,000 米以下的时候, 井 产流体与海底海水的压力都会增加,高 温井产流体(华氏温度 300 度/摄氏温度 150 度) 需要在接近冰冻的海水中流 动,还需要在更长的管道和上升管中流 回到生产设施, 同时还得应对复杂多变 的深海海流。这些艰难的条件都能导致 流动保障问题, 例如在深水环境中发生 了水合物与石蜡油的腾涌和形成,相较 于普通近海条件, 其补救措施所消耗的 成本与时间会高出很多。

## 1D 仿真工具的优势与限制

流动保障分析师通常使用 1D 建模工具来整体查看现场生产方案。1D 仿真适用于调整油管、流经线和接收设施,以便最大程度地提高初期生产量,同时避免油田在后期出现过度腾涌和液体激增的现象。使用诸如 OLGA 等 1D 代码来进行油井和管道网络的多相流仿真,可以解决隔热与送达温度要求,以及液体库存、流体模式和潜在的生产系统不稳定等一系列难题。

为了提供适用运行时间,1D 仿真过去一直将 3D 多相流缩减成简化的 1D 组件。过去这需要通过开展成本高昂的物理实验来提供 1D 流体系数,从而提前预估出流体的状态(例如分层、环状还是封堵)。1D 仿真的准确性也因此受到物理条件的限制,上述实验也是在这些物理

针对具有两个阀门的 Y 形接头的分析。



石油钻塔四周的水流流线。

条件下执行的;随着石油和天然气行业向着更深层的方向发展,于浅层执行的实验也变得越来越边缘化。而另一个顾虑则是深水装备的几何结构往往超出 1D 仿真工具提供的现成组件所能进行仿真的复杂程度。

诸如管道改变方向与其他管道相遇,或是流入蓄水池等情况都体现了固有的 3D 问题。此外,还会出现许多其他的问题。甚至是在 1D 长管道中也可能发生流动问题,例如上升管中的回流流动,这种状态超出了 1D 的预测能力。在另一个示例中,有时会使用泵将压缩气体输送到管道当中,以便推动水流并防止腾涌,进而实现气举采油,这也是另一个无法轻松利用 1D 代码进行建模的固有 3D 现象

## 日益增加的 3D 仿真需求

3D 仿真可以应对这些问题,这得益于它能够在 3D 环境中对多相流进行仿真,且无需任何基于经验性数据的假设。针对具有复杂几何结构和边界条件的问题,CFD 仿真可在整个解决方案领域提供流速、压力、温度、气体成分及其他变量。在分析过程中,工程师可以更改系统的几何结构或边界条件,并可观察这些变更对液体流动模式或其他变量(如气体成分)分布的影响。

由于工程师时常缺乏经验性数据的指导,因此在深水环境中,CFD 正变得愈发重要。然而,还是存在某些障碍让工程师无法更好地利用 CFD 的优势。例如,从计算角度来讲,用于海底钻井和生产的复杂几何结构的 CFD 仿真成本非常高昂,并且需要花费过长的时间进行解析。不过,解决方案算法上的改进以及向大规模并行高性能计算配置的迁移,已经成功克服了这一障碍。

另一个潜在的障碍就是工程师既希望使用 CFD 对复杂的海底设备进行仿真,同时又想利用更快的 1D 代码继续处理简单的几何体,例如直管道管路。然而,随着

1D 和 3D 软件对各自特定的液体流动区域进行仿真, 各自的代码会逐步依赖于对方的信息,如 1D 和 3D 仿 真组件间边界的流速、流率和压力。在过去,该操作需 要复杂的流程,分析师需要在 1D 和 3D 仿真之间来回 迁移数据。考虑到复杂几何结构区域的准确性可能受到 影响,分析师首先会对 1D 中的整套系统进行仿真。接 下来,分析师会在具有复杂几何结构的区域边界提取流 动状态,并使用它们作为 3D 仿真的边界条件。3D 仿 真能够更清晰地呈现复杂区域中的对象。当然,这些变 更会影响 1D 环境,并且 1D 仿真会要求再次输入 3D 结果,从而再次运行。根据设计流程的阶段以及所需的 准确性级别,可能需要在 1D 和 3D 仿真之间进行多次 手动交换边界条件的迭代。每次发生设计变更或产生一 组新的操作条件时,都必须重复所有这些迭代。

## 1D 与 3D 仿真之间的无缝集成

最近,1D 代码与 3D 代码之间实现自动信息交换,显著缩短了执行此类分析所需的时间;与此同时,得益于二者之间形成的无缝信息流,其结果的准确性也有所提高。其中最典型的示例就是 Simcenter STAR-CCM+™ 软件与 OLGA(一种主流 1D 代码)的集成。 Simcenter STAR-CCM+ 用户可将 OLGA 作为从属进程运行,使两种代码交换每个时间步长的数据,而且交换频率远非手动方法所能及。

举一个典型的示例:一根长管道采用 OLGA 进行建模,但使用 Simcenter STAR-CCM+ 对不同流速和气液比状态下段塞流捕集器的多相流瞬态特性进行仿真。在分析结果的辅助下,工程师成功优化了段塞流捕集器设计,有效处理了整个资产生命周期的各种流态,从而显著降低了更换风险,避免了数千万美元的潜在损失。

## 适用于近海漂浮物设计 且经济高效的计算工具

## 简介

海上移动式平台属于复杂工程系统、它 会给工程师带来安全性、可靠性和持久 性等诸多方面的设计挑战。在各种不同 的应用中,移动式平台堪称海洋石油和 天然气生产的生命线,不仅能够创造高 达数十亿美元的产业价值,而且对整个 世界也有着深远的影响。移动式平台的 周边环境极其恶劣,长期遭受飓风、巨 浪的侵袭, 因此保障平台和工作人员的 安全是设计师最关心的问题。Technip 是 一家全球领先的海底、陆地和海上能源 业务企业, 致力于能源产业的项目管 理、工程与建设。身为海上移动式平台 的行业领军企业, Technip 运用数字仿真 等一系列现代设计工具, 针对这些复杂 系统持续开展设计和施工创新。本文将 详细介绍 Technip 如何通过海上平台设 计螺旋仿真部署流程, 完成经济、快 速、高效的设计。

## 海上平台设计

## 挑战

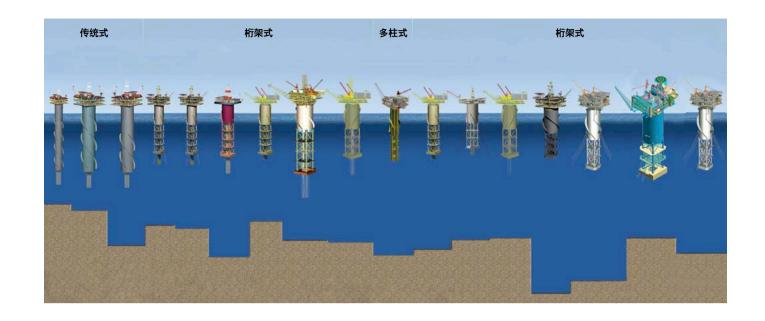
在处于运营和开发阶段的 21 座立柱式平台中,Technip 宣称已交付了其中的 17 座。这些平台的水深范围从 590 米一直延伸到 2,382 米,涵盖干树与湿树两种采油模式。立柱式平台是唯一具有固有稳定性的平台,浮力中心位于重心之

上,无法翻转。目前共有三种不同的立柱式平台-传统立柱式平台、桁架立柱式平台(见图 1)。立柱式平台和多柱立柱式平台(见图 1)。立柱式平台通常采用张紧式或半张紧式系泊系统,通过立管系统将石油从海床输送到平台。传统立柱式平台采用整体柱状结构,桁架立柱式平台顶部以重大型,加头上型柱式平台(TLP)和半潜式平台,本文后续部分将会进行讨论。海上立柱式平台下面临大量设计挑战:

- 准确掌握平台承受的环境荷载
- 估算极端风力、当前和非线性/随机波 浪引发的平台结构荷载和移动。

## Technip 设计周期

Technip 典型设计螺旋包括主体调节,旨在适应各种操作、安装和运输条件。在设计过程中,首先需要完成极端操作条件下的全局性能分析。全局性能是指水中运动,通常采用基于半经验势流的运动求解器执行,此类求解器采用分析技术对重力和惯性力进行组合,凭借经验处理旋转/粘性力。设计中还会执行比例模型测试,以校准全局性能分析工具,虽然这些测试通常仅可妥善进行重力和



惯性力建模(弗劳德数),而非粘性力建模(雷诺数)。如果不满足性能要求,则在测试新模型之前再次执行整整个流程,直至达到最终性能标准。 促模型测试历表。 此境型测试好存在不确定因素。 此境型则认识的无法完全解决关为, 连结独决的结构共 的 电, 许多这些设计问题牵涉海气界面(自由表面)。

Technip 传统设计螺旋包含半经验(内部)工具 MLTSIM,供主体模型获取水动力系数。内部悬链线建模工具 FMOOR 用

于系泊建模,同时还将作为筛选工具辅助完成准静态分析。最后,将执行模型测试,校准经验工具。最近,CFD已被纳入设计周期来增强设计周期和模型测试;一旦 CFD 模型通过验证,便可以消除测试结果的大部分先验不确定性和建模结果的后验扩展(例如,采用 CFD 的模型)。然而,由于 CFD 使用成本高昂,加之半经验工具已积累了 20 余年数据处理经验,因此半经验工具仍将在设计选代中发挥主导作用。在吸纳这些设计仿真后,CFD 将继续发展壮大;而模型测试则很难做到这一点,或者根本起不到任何作用。

图 1:Technip 开创的三代立柱式平台。

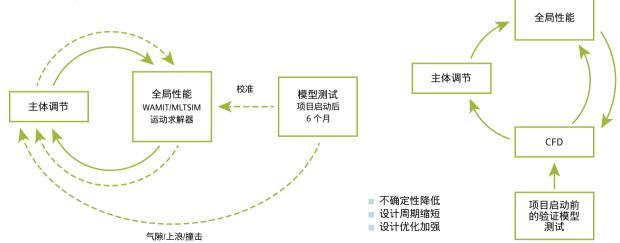


图 2:未采用 CFD 的典型设计螺旋(左)与采用 CFD 的典型设计螺旋(右)。

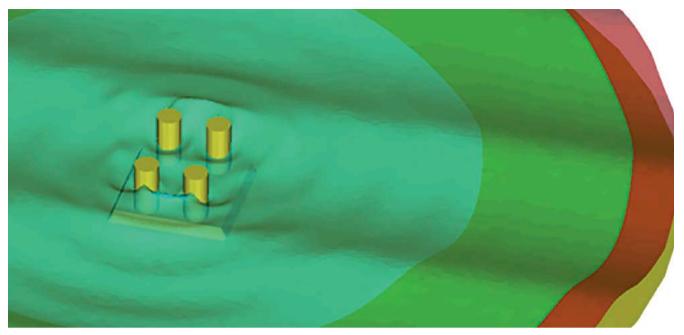
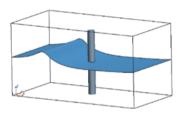


图 3:EOM 典型解决方案 – 欧拉求解器用红色表示,纳维-斯托克斯用蓝色表示,重叠区用绿色表示。



0.2 0.2 10 20 30 40 50 60 -0.2

图 4: 立柱四周长峰波概况。

## Simcenter STAR-CCM+ 作为数值波浪水槽程序

为了在设计螺旋中实施数字仿真,Technip 采用了 Simcenter STAR-CCM+ 这款完全集成的现代化仿真 包,该仿真包非常适合石油和天然气行业的各种应用场 景。相较于其他仿真工具,Simcenter STAR-CCM+ 的 主要特色功能包括:精准采集自由表面的模型破损和冲

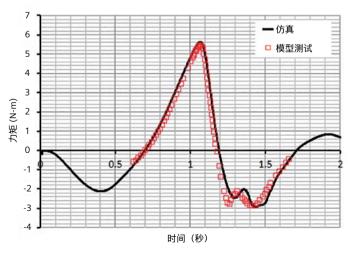
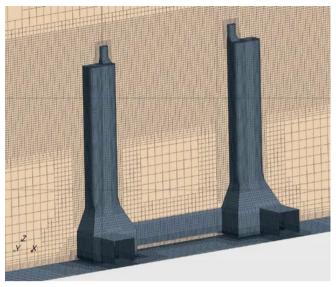


图 5:柱力矩与测试数据比较。

击波、包括动态流体相互作用 (DFBI) 在内的运动模型、嵌入式 DFBI 和重叠网格,以及强大的前/后处理器。

抑制 CFD 工程仿真运用的一大因素是计算成本。计算成本取决于可用的硬件资源与计算时间。Technip 内部硬件资源包含一个专用 CFD 群集(144 个计算机核心),它可以在一天内仿真 30 秒到 1 分钟的实时平台运动。得克萨斯州高级计算中心 (TACC) 提供的高级计算资源由 10,000 多个核心组成,占 TACC 行业合作伙伴计划 (STAR) 提供的 Stampede 群集核心总数的 10%。相较于一天 30 秒的单次仿真,使用 TACC 可在一天内对三小时的实时运动进行多次仿真。三小时周期对于海上作业而言十分重要,因为风暴经过特定地点的平均时长刚好是三小时。

为完成典型海上平台水动力仿真,必须通过大网格捕获自由表面。当仿真涉及非线性强风暴的极端环境时,这一要求尤为突出,因而计算时间和成本都将有所增加。该仿真方法还存在其他一些缺陷,亟需加以解决。Technip 已开始着手弥补现有仿真方法的种种技术



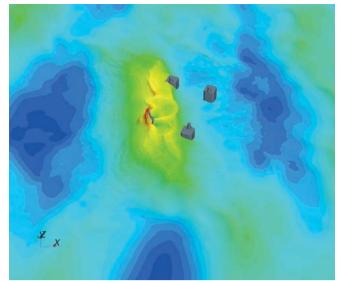


图 6: 重力立柱式平台 (GBS) 上经过修剪的网格 (左侧) 和 GBS 周边波形 (右侧)。

缺陷,旨在打造一款完备的设计工具,将 CFD 方法全面集成至设计周期。

Simcenter STAR-CCM+流体体积 (VOF) 法包含大量波浪模型,这些波浪模型适用于多种不同场景,而且经过良好的自由表面捕获验证。在海上移动式平台中,Simcenter STAR-CCM+五阶斯托克斯波模型非常适合深水仿真,而大部分移动立柱式平台均为深水环境。在浅水极限波浪环境下,则不适于采用上述五阶模型作为物理模型。为克服这一问题,我们针对浅水极限波浪环境自行开发了一种完全非线性的波浪模型。此外,为了完成立柱式平台仿真,还必需提供超大区域用于平台上游吸波。Simcenter STAR-CCM+仅在下游方向具有波阻尼能力。

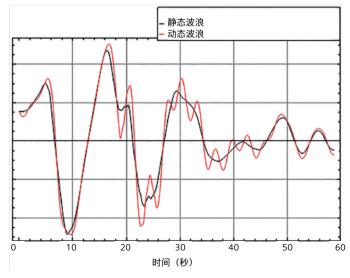


图 7:GBS 静态 (黑色曲线)与动态 (红色曲线)倾覆力矩比较。

为尽量削减超大区域的计算成本,Technip 开发了EOM (Euler Overlay Method) 方法,在不含主体结构的远场中使用欧拉求解,在平台附近使用借助动态流体相互作用的 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) 方法。在 RANS 与欧拉区域的交叉位置使用重叠法(采用动量和体积分数源),能够顺利融合这两种求解方法。该方法可大幅缩小域尺寸,避免面向更大的区域求解RANS 方程,从而减少所需的计算时间及硬件资源。

## 应用 EOM 解决实际问题

Technip 成功运用 EOM 与 Simcenter STAR-CCM+ 为各种海上平台结构提供极端设计载荷。运用试验数据妥善验证数字模型是确定适当数字分析方法的关键。为验证 EOM, Technip 对 Chaplin 等人 (1997) 开展的模型测试进行了仿真,其中涉及长峰波和立柱。这些 3D 计算涵盖两米 CFD 区域和长度为 105 米的欧拉求解区域,如图 4 所示。EOM 柱力矩与模型测试数据匹配良好,从侧面验证了这种方法(见图 4)。

我们已将此方法引入设计螺旋并取得良好效果。下面举例说明了 EOM 如何帮助完成各个项目的设计周期:

• 重力立柱式平台 (GBS) 振铃分析:当这些结构在共振周期和高次谐波位置产生极大振幅时,张力腿与钢制重力平台将出现振铃现象,这很可能会在油田开发过程中造成疲劳损伤。我们已应用 EOM 对遭受短峰不规则波影响的新型重力平台执行振铃分析。图 5 展示了 GBS 周边经过修剪的六面体网格、自由表面轮廓和结构压力分布细节。波的 EOM 二阶解将花费15 秒获得,其中最短捕获周期为 7.5 秒。该 GBS 的模型测试存在问题,不规则波会限制载荷力。使用

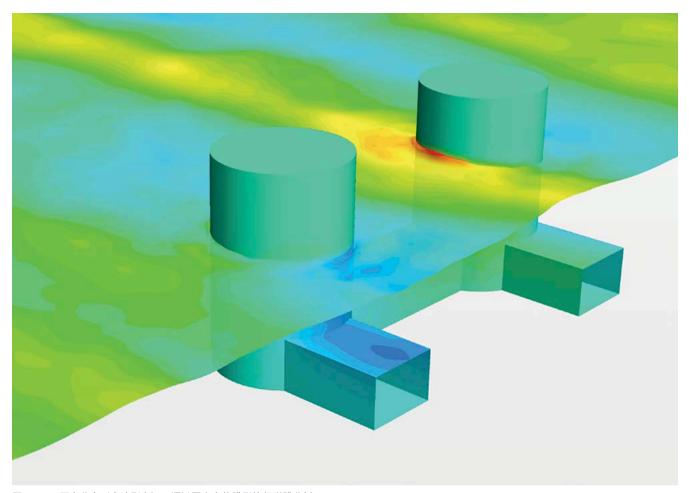


图 8:TLP 压力分布(含波形高):通过固定主体模型执行弹跳分析。

EOM 进行 CFD 分析可以在更高的载荷力条件下适当研究这个 GBS。图 7 展示了静态波浪与动态波浪对立柱式平台造成的结构载荷比较结果。数值计算表明,由于结构对高次谐波载荷做出共振响应,因而会动态放大动态波浪的结构载荷。

- 张力腿式平台 (TLP) 气隙/振铃分析: 务必重点考量海上平台下的气隙, 因为它们决定了波浪对结构底部造成的影响。Technip 利用 EOM 执行 TLP 气隙和振铃分析。使用 Simcenter STAR-CCM+ 内置的悬链线模型仿真张力筋腱。张力筋腱的张力反映了振铃响应,背风面和迎风面的张力筋腱的张力如图 8 所示。数值结果与模型测试结果比较一致,其中背风面张力筋腱的张力来自波频率响应,而迎风面张力筋腱的张力则来自垂荡和纵摇时的 TLP 固有频率。时域气隙与模型测验比较还表明,CFD 在预测气隙和相对波形高方面与模型测试比较一致。
- 半潜式运动仿真:EOM 用于在设计阶段执行半潜式 平台运动分析。系泊和立管模型用于计算系泊和立管 运动。模型测试提供了垂荡幅值响应算子(RAO)数 据,RAO 是一种用于确定平台在波浪中的行为和响应 的工程统计方法。采用 EOM 模型进行数值分析可以 对半潜式垂荡 RAO 做出有效预测
- 干树半潜式主体优化:石油和天然气行业投入大量精力寻找干树解决方案,以用于深海恶劣环境半潜式平台。干树半潜式平台的设计要点在于尽量减少垂荡运动,从而调节水线以上部分的设备分离平台运动和立管系统的设计限制。Technip 一直在开发新的主体形态,以满足全球设计环境的行业需求。同时采用基于 EOM 的 CFD 仿真提供试用主体形态的垂荡运动性能,以期打造最佳的干树半潜式设计

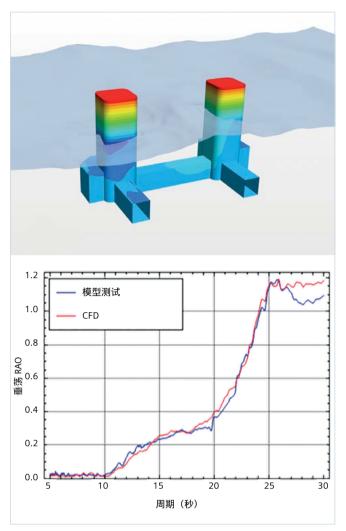


图 9:半潜式平台的压头(含波形高,顶部);CFD 与白噪声波浪测试的 垂荡 RAO 比较(底部)。

## 1.2 主体 A 1.0 主体 B 主体 C 0.8 主体 D 9.0 g 0.4 0.2 0.0 25 30 10 周期(秒) 图 10: 多种干树半潜式平台主体形态 CFD 的垂荡 RAO。

## 结论

以上示例展示了仿真作为有效替换手段的重要价值,它可以在设计阶段初期进行模型测试,先确定最佳海上平台设计再进行模型测试,从而减少测试时间和成本,同时缩短设计时间。完成模型测试后可以使用 CFD,将设计扩展应用于各种变体,缩短整体优化过程的时间。此外,相较于模型测试,仿真可以提供更多物理信息。例如,利用仿真技术执行 TLP 和半潜式分析可节约总体计算成本,针对 640 个核心 5 分钟和 1 小时实时运动进行仿真的成本分别为 538 美元和 752 美元。这项成

本在模型测试成本与整体项目总成本中微不足道,但节省的设计时间和成本却可能高达数百万美元。对于海上平台设计,仿真技术的投资回报 (ROI) 十分可观。随着波浪模型和系泊/立管建模的持续改进,Technip 有望通过在设计周期中使用数值仿真技术获得更大的收益。经证实,采用 Simcenter STAR-CCM+ 的 EOM 是一款十分有效的设计螺旋工具,有助于打造经济高效的设计流程。

## 这里的温度在升高! Zeeco 公司使用 Simcenter STAR-CCM+ 揭开加热器运转失常的 真正原因

## 简介

工程咨询期间, 高效及时地解决客户面临的问题是建立业务关系的基础。因此,除了派遣高素质工程师解决问题以外,配备合适的工具同样至关重要。本文展示了一个相关示例,印证了优秀的工程师可以将现代数值仿真软件打造成高效且行之有效的虚拟故障排除工具。

Zeeco Inc. 是一家燃烧和环保解决方案提供商,参与过大量燃烧器、火炬和焚烧炉工程的设计和制造过程。此外,Zeeco还面向客户提供工程咨询服务。曾有一家客户找到 Zeeco,表示其加热器出现问题,性能十分拙劣。本文重点介绍了Zeeco 如何使用 Simcenter STAR-CCM+切实排除加热器故障,找出加热器运行效率低下的原因。

## 工业加热器问题

存在问题的工业加热器如图 1 所示。这一经过建模的系统包含位于两侧底部的燃烧炉和位于顶部的辐射段,以及沿加热器四周分布的处理管。该模型中未包含对流段和烟道。处理管会输送经过处理的流体,从顶部流入加热器并从底部流出。燃烧炉上装有助燃空气分配管,

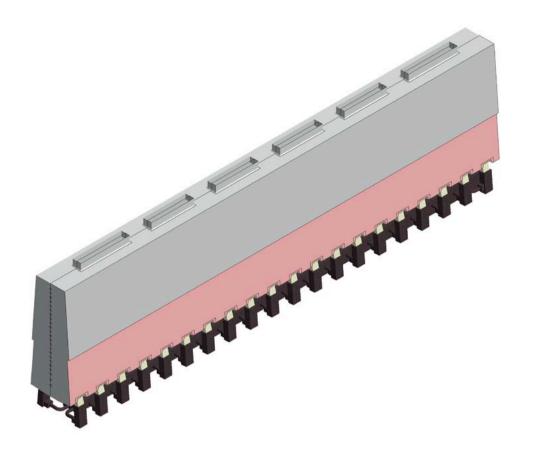
可均衡地向各个燃烧炉分配燃烧所需的 空气。加热器壁的材料为耐火砖和陶瓷 纤维模块。

该加热器在使用时会出现下列问题,Zeeco需要找出问题原因并提供对这些问题的解决方案:

焦化:焦化是指加热器管内形成焦炭, 从而降低加热器的热传导能力。处理管 会输送烃类流体,这些流体中较重的物 质容易导致焦化。使用期间,发现处理 管内出现焦化。

运行周期:最初设计该加热器时,预期运行周期为9到10个月。然而由于焦化问题,该加热器只运行了三到四个月,之后便不得不关闭加热器来清理管道内的焦化物。

热行为:管壁金属上的温度读数显示了管道表面的温度及热通量分布不均匀。由于难以进入系统内部,因而用肉眼检测加热器及其各类组件的故障不仅极其困难,而且不切实际。Zeeco决定采用虚拟仿真来深入了解加热器性能。此前,该公司使用多物理场仿真软件Simcenter STAR-CCM+作为实现此目的的故障检测工具。



## 加热器的 CFD 设置

他们使用 SolidWorks® 软件为分析工作 准备好了加热器几何体的计算机辅助设 计 (CAD) 模型。该计算模型包含了加热 器辐射段,以及处理管、燃烧炉和空气 分配管。在 Simcenter STAR-CCM+ 中使 用经过修剪的六面体单元对域进行离散 化(图 2),并在这些单元中解算纳维-斯托克斯方程。此处仅使用约 1300 万个 单元对加热器的一半进行建模,对于另 一半则假定条件对称。围绕燃烧炉的计 算网格已充分细化,可准确解析流动场 和燃烧。加热器长85英尺,高约25英尺,宽10英尺,并按比例进行了建模。

Simcenter STAR-CCM+中的分离流求解器非常适合用于低速流,因而在此处得到应用。加热器中的燃料气混合物为炼厂气,包含氢以及诸如甲烷和丙烷等烃类化合物。Simcenter STAR-CCM+提供一整套燃烧模型,可对各种燃烧现象进行仿真。多组件物质模型则用于为加热器引入各种燃气成分。Simcenter STAR-CCM+中的涡破碎 (EBU)模型通过解算计

图 1:穿过齿轮箱外壳的 X 切剖面显示了模型网格细节。

## Simcenter STAR-CCM+ 是可用于检测故障的高效且经济的工程工具

算网格上物质的个体输运方程求得均值,从而对物质的非预混燃烧进行了建模。根据加热器火焰特性,并未将点火纳入考量;在与可实现的 k-ε 湍流模型结合使用时,通常认为标准 EBU 模型足以对燃烧进行建模。选择 Simcenter STAR-CCM+中的灰度热辐射模型后,也将辐射纳入了考量范围。

## 利用仿真识别加热器问题

图 3 所示为利用燃烧输出物质等值 面予以呈现的预测燃烧火焰轮廓。 助燃空气会从右向左进入分配管, 因而随着可用助燃空气减少, 火焰 高度从右向左降低。最左边的燃烧 炉呈现了火焰较高的反常现象,这 是由最左端的特殊管道设计引起 的。火焰(正视图)与侧壁极为贴 近, 通过目视查看加热器的观察孔 就可以确定这一点。根据图 4 所 示,一氧化碳(左侧)和未燃烧 烃(右侧)集中在各燃烧炉的中心 面上;此外还显示了 CO 快速烧 尽,表明燃烧完全度并不存在问 题。图 5 所示为各燃烧炉中心面上 的氧气含量。氧气浓度定量分析表 明过量氧气的数值约为 5%, 与加热 器设计一致。

经过处理的流体会从顶部流入加热器并从底部流出,使温度从上到下逐步升高。图 6 中的管壁金属温度的视觉分析证实了这一行为。管道的废气温度表明右侧存在热点,而左侧的温度较低。

对于任何加热器,都需要管道表面 热通量适当均匀地分布,才可实现 优化运行。若热通量分布不均匀, 不仅会导致加热效果差,而且会导 致加热器内烃类化合物易于焦化。 图 7 所示为管道表面的热通量分 布。该图对加热器左侧、右侧和中

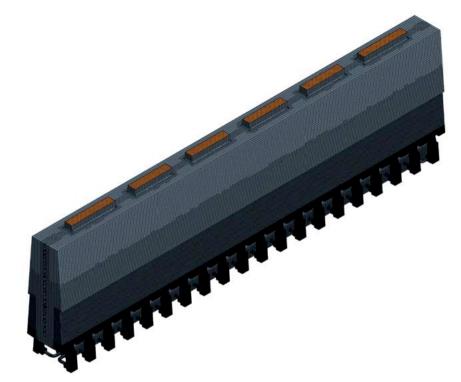


图 2:三种不同注油量的初始分配。

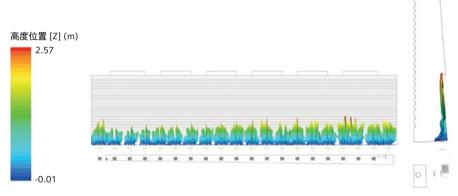


图 3:中间注油量情况下的油量分配变化。

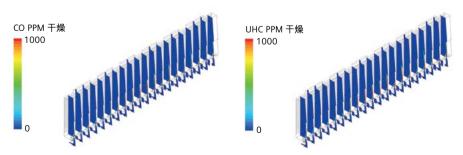


图 4:显示啮合齿轮间的瞬态流特征(左侧)与齿轮箱内的瞬态速度流场变化(右侧)的流线。

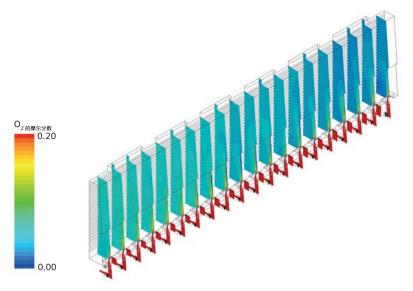
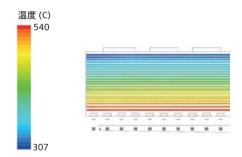


图 5:齿轮箱内压力条件随时间变化的情况。



气体温度 (C) 66720

图 6: 互相啮合的齿轮间的含油率,以及 1/3 r 情况下三种不同注油量的含油率(以及 1/2 r 情况下高注油量的含油率)。

15413

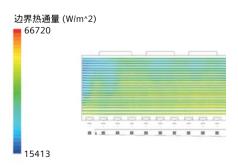


图 7:a) 齿轮箱内的含油率和b) 1/3 r 和 1 r 后齿面上的含油率。

间截面进行了勘查,旨在分析热通量分布。图 8 对三个不同位置截面的加权热通量进行了比较。加权热通量代表的是所有管道表面的局部热通量与总平均热通量之间的比值。可以看出左侧管道表面吸收的热少于右侧表面。

## 加热器问题和建议

对于过程加热器,下层的热通量较高是十分常见的;在下层,燃烧火焰进入加热器的方式与加热器内的

Zeeco 使用 Simcenter STAR-CCM+成功对加热器的运行进行仿真,并确定了加热器故障的原因。他们基于数值仿真提出了一系列建议以便改进性能。Simcenter STAR-CCM+让 Zeeco 能够以及时、经济高效的方式妥善应对客户的工程挑战,这进一步凸显了 Simcenter STAR-CCM+在任意工程咨询机构中的核心地位。

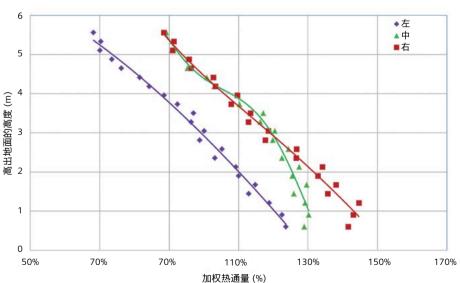


图 8: 齿轮箱 1 和齿轮箱 2 的齿面上含油率的时间演变特性。

## 使用仿真评估海底跨接管的疲劳寿命

## 简介

水下管道系统的结构振动来自绕过结构的外电流(涡激振动或 VIV),或者来自管道内混合物的瞬态流(流激振动或 FIV)。这些振动会损害水下系统的结构完整性,在极端情况下会导致疲劳寿命由数年缩短至数周。

水下管道内的瞬态多相流相当复杂;如果要通过水下实际丈量来获得信息,这将是一件成本高昂而又充满挑战的事情。因此,业界高度仰赖于简单的分析方法来预测 FIV 的效果。这些方法往过于保守,导致与水下管道系统结构完整性相关的决策制定流程十分困难。对于石油和天然气行业来说,这些方法已经产生了严重的经济影响;由于这些行业绝不容许出现故障,因而昂贵的过度设计是规避风险的惯常做法,而由此产生的费用高达数亿美元。

西门子公司正与业界展开紧密协作,希望能够为 FIV 建模开发一系列最佳实践。本研究通过一个示例描绘了计算流体力学 (CFD) 如何用作其他分析方法的补充,提供以其他方式无法获得的高准确度信息,从而降低风险、减少过度设计并提升利润率。

## 利用仿真解决 FIV 的问题

Joint Industry Programme (JIP) 是由国际能源咨询公司 Xodus Group 和荷兰创新公司 TNO 共同运作的一家协会,该机构致力于确立和验证 FIV 适用的最佳实践,而西门子是其会员。JIP 的终极目标是让行业参与者能够判断因多相流所产生的激振而导致管道疲劳的可能性。可行改善举措包括通过使用 CFD 和实证研究方法来改善筛选、仿真和预测模型。[1]

本研究是采用双向完全耦合的流体结构 交互 (FSI) 对跨接器中的段塞流进行建模 的演示示例。仿真过程在跨接器的通用 几何体 [3] 上进行,这样西门子客户就都 能加以使用。

跨接器中出现的多相流涵盖了各种流向图,包括段塞流、环状流、弥散流、分层流及波形流。对于 FIV 的仿真,准确捕获管内不同相之间结合面上的移动至关重要,因而需要使用多相模型。此处使用 Simcenter STAR-CCM+ 中提供的流体体积 (VOF) 多相模型来对混合物质的瞬态行为以及跨接器中段塞流的形成进行方真。VOF 使用欧拉框架;对于包含大于或等于两个难混溶流体相位的应用而言,这一点相当实用;此类应用中每个相位都构成系统中的一个大型结构。

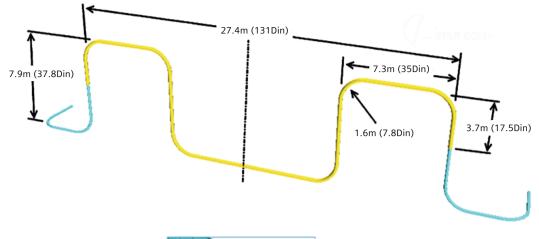
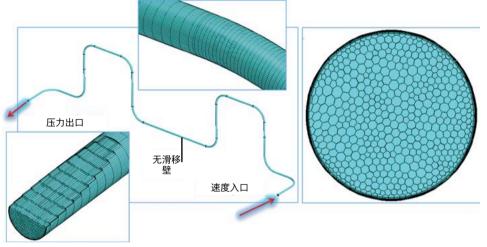


图 1:FSI 协同仿真的 M 形跨接器 几何体以及圆形横截面。



这项研究的一项重要目标是为了满足人们对于了解 FSI 在水下结构疲劳寿命中所发挥作用的需求。Simcenter STAR-CCM+中的动态开放架构非常适合协助提供这项研究的答案,因为它可以无缝启用从FIV 或 VIV 单向耦合直到双向耦合的 FSI 仿真,并且包括管道内部混合物和外部流。

此处呈现的仿真工作重点是使用协同仿真(完全耦合的双向互动)的 FIV,其中 Simcenter STAR-CCM+ 可处理多相流,Abaqus FEA (SIMULIA) 则用于预测跨接器的动态结构变形。两个域利用 SIMULIA 协同仿真引擎 (CSE) 互相连接。尽管这种方法计算量较大,但它可以为最终用户提供更通用的方法,因为它在

部署之后可用于预测复杂系统的行为,包括非线性结构和高度复杂的几何体。另外,由于这项工作的特定通用跨接器几何体在几何学上和结构上相对不复杂(例如,它与海床并不接触),这项特定的仿真也可通过更简单的方法来执行,例如,使用单向耦合并利用梁元素对跨接器进行建模,或者完全在Simcenter STAR-CCM+中使用其结构应力分析模型执行 FSI 问题。

除结合使用直接协同仿真和 Abaqus 之外,Simcenter STAR-CCM+ 还为用户提供定制其 FSI 仿真的能力,通过利用 Java 功能让用户能够轻松集成其自身遗留代码或其既有的有限元分析 (FEA) 软件,以进行 FSI 仿真。

图 2:使用 Simcenter STAR-CCM+ 中广义圆柱网格 器生成的 VOF 网格。

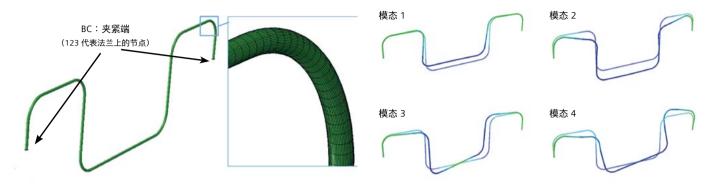


图 3:用于协同仿真的 FEM 模型拥有 21,000 个四节点壳单元。

图 4:跨接器的前四种固有模态。

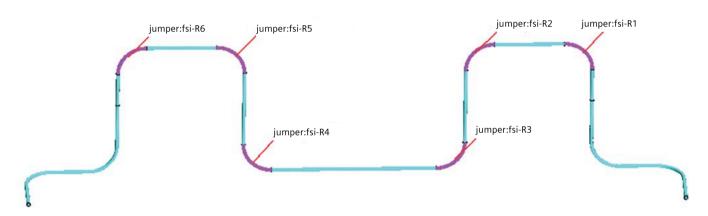


图 5:跨接器中的弯管是产生荷载的主要位置。

## 计算跨接器几何体

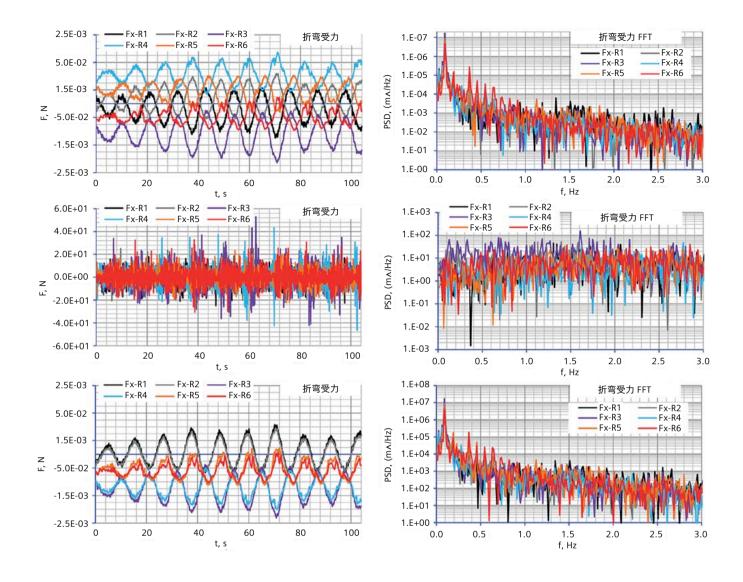
本研究中的通用跨接器几何体(图 1)为钢制,具备圆形横截面和传统的 M 形外形 [3]。跨接器在两端夹持固定,通过管道的多相流由空气和水按各自 50% 体积比组成(定义为在入口边界底部为水、顶部为空气的分层流)。流体域(图 1 中的蓝绿色部分)延伸到变形结构(图 1 中的黄色部分)之外,可避免跨接器内的流上的边界条件影响。

对于 VOF 网格,Simcenter STAR-CCM+中的广义圆柱 网格器与多面体体积网格器搭配使用。该方法非常适用于此类特殊应用,因为几何体由圆柱段组成,流的方向与器壁平行。使用挤出棱柱单元可减少总单元计数,确保单元之间正交并改善收敛速度。最终的 VOF 网格拥有约 4 百万个多面单元,如图 2 所示。

用于协同仿真的 Abaqus 有限元模型由 21,000 个四节点壳单元组成,如图 3 所示。首先,执行独立结构模态分析来确定结构动态特性。通过将荷载应用到管道来计算各坐标方向上的刚度,从而获取生成的载荷-位移关系,执行特征值分析可获得跨接器的固有频率。本例中使用了同时代表来自管道内流质量(假定水气混合均匀)以及因管道周围排水而产生的附加质量。该附加质量系数取自参考文献 [4] 和 [5]。图 4 所示为跨接器的前四种固有模态,表 1 列出了每种模态的频率。

## 采用 Simcenter STAR-CCM+ 和 Abaqus FEA 执行 FIV 分析

Simcenter STAR-CCM+ 先假设处理的是刚性结构和固定结构,并以独立模态执行。这些刚性结果用于更好地



理解因系统中混合物质而产生的内力,并作为双向耦合协同仿真的起始解。

对于协同仿真,在 VOF 端,使用 k-omega SST 湍流模型的二阶隐式分离求解器运行不稳定,其中的时间步长提供了大部分的相分离表面上约为 0.5 的对流科朗数值。这对应到该结构的第 4 种固有模态的第 1/100 周期,及其第 7 固有模态的第 1/63 周期,以及沿管道弯管流动的混合物的大约第 1/150 周期。该仿真中纳入了重力,入口速度设为 3 米每秒 (m/s),定义为底部的水和顶部的空气各占 50% 的分层流。

变形前的结构作为 Abaqus 的初始运行条件。除上述附加质量以外,结构模型还包括质量比例阻尼,用于计算管道四周的外部水阻尼以及跳线接头的某种附加阻

EM#	1	2	3	4	5	6	7	8
f, Hz	0.59	1.30	1.70	1.77	2.06	2.07	2.82	6.07

表 1:每种跳线模式的固有频率。

尼 [5]。表示质量比例阻尼的阻尼系数值是通过对放置在水中的柔性圆管进行全双向耦合仿真获取而来。无论进行哪项仿真,均需集中精力研究结构的前七种固有模式,固有频率范围是 0.59 至 2.82 赫兹 (Hz)(表1)。

跳线折弯是因流向改变产生的大动量而引发显著载荷变化的主要位置。图 6 显示图 5 中描绘的每个折弯处的力及其快速傅里叶变换 (FFT)。显而易见,折弯处的多相流十分复杂,会出现大量可识别的频率峰值。这意味

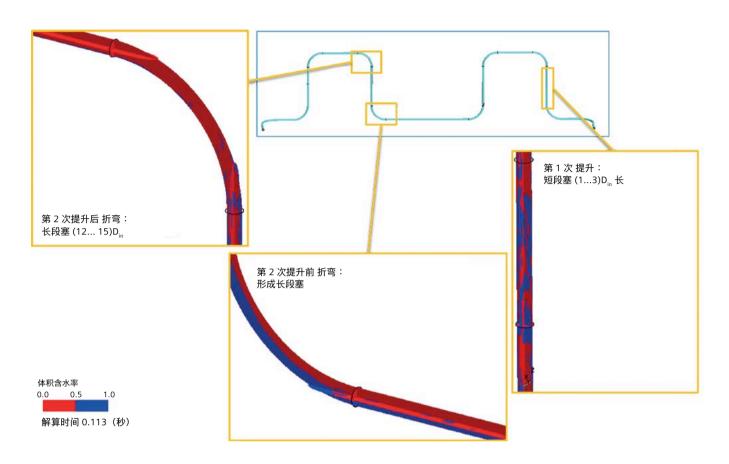


图 7:混合物经过跳线时形成 段塞。

着存在大量瞬态压力载荷,很可能导致应力和振荡振动不断变化,从而导致跳线疲劳损伤,继而影响跳线使用寿命。根据折弯受力 FFT 观察到的主要主频率较低,时间范围最长为 10 秒。这是由混合物(段塞形成)流经跳线时的相位分离导致。虽然这些频率远低于结构的固有模式,但却是预测跳线疲劳寿命的关键因素。

图 7 直观地描绘了跳线各个部分的体积含水率,展示了段塞的演变过程,自第一次提升开始形成短段塞,平均长度约为 2 个管道直径。当混合物穿过跳线抵达第四个折弯时,将形成更长的段塞。当完成第二次提升后,长度已达到约 12 个管道直径。

仔细观察主段塞频率(见表 2),同样会 发现段塞的时间范围相对较大,一阶主频 率约为 0.09 Hz。因此,每个独立段塞沿 管道移动都会产生某种脉冲载荷,主要因结构固有频率导致结构振动。这一点从受控点跳线位移 FFT 中不难看出(图 8)。此外,还观察到其中一个段塞频率接近第一个系统基本模式,频率为 0.54 Hz(表2)。

编号	1	2	3	4	5	6
f, Hz	0.089	0.18	0.28	0.37	0.46	0.54

表 2:混合物的主段塞频率。

## 疲劳损伤预测

系统的等效应力和位移已经过计算,在管道的悬臂部分观察到最大拉张应力,管道已纳入仿真范畴,在现实生活场景中将接入相邻设备(见图 9)。因此,该位置被确定为预测跳线疲劳损伤的主要候选位置,因为焊缝通常位于该位置,而且这个点需承受张力。

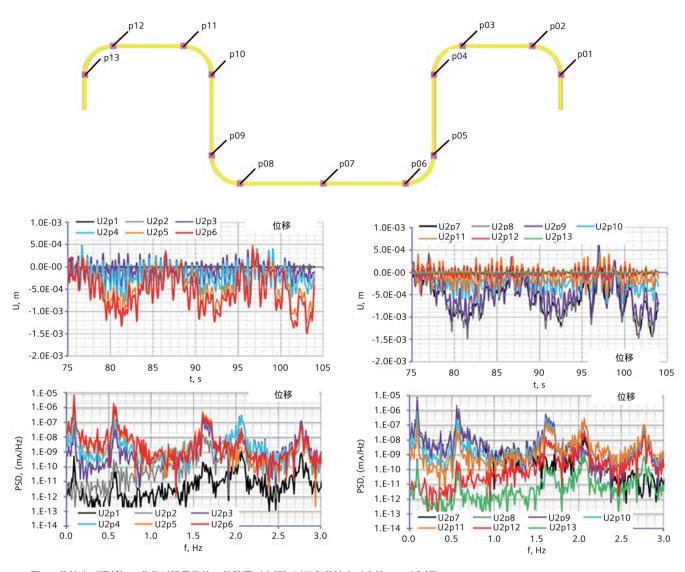


图 8:监控点(顶部)、作为时间函数的 Y 位移图(中间)以及各监控点对应的 FFT(底部)。

该位置不同时间的应力行为及其 FFT 如图 10 所示。主频率在 1.3 Hz 时出现明显峰值,而后回落至第二种固有模式的频率。但除此之外,由于跳线段塞的瞬态运动,再次出现 0.09 Hz 的低频响应。使用该关键位置处的应力结果作为输入,利用雨流计数技术估算所呈现的应力。化对跳线造成的破坏。结果显示了应力范围与平均应力和循环次数之间的关系,如图 11 所示。根据图 12 显示的 S-N 曲线 [2],Palmgren-Miner 准则预测出疲劳设计因子为 5 时,疲劳寿命仅为 5.5 年

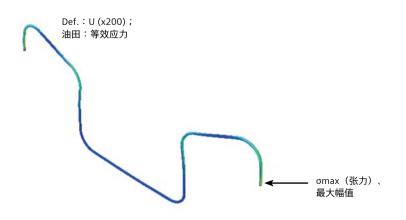
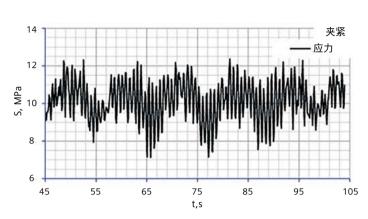


图 9:出现最大拉张等效应力的跳线位置。



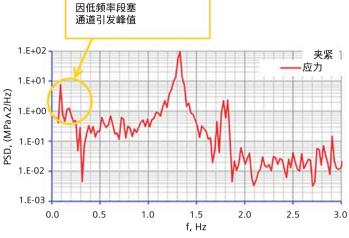


图10:与时间相关的行为与对应 的跳线最大拉张应力 FFT。

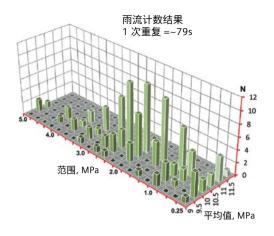
左右。这是一个很好的示例,充分展现了在设计流程初期采用高保真仿真评估疲劳寿命的价值:预先确定潜在的结构振动问题,同时以较低成本执行其他仿真,完成对跳线的重新设计并缓解相关问题。

## 结论

Simcenter STAR-CCM+和 Abaqus FEA 双向耦合 FSI 仿真的使用,成功评估了流致振动及其对通用跳线疲劳寿命的影响。在使用 Simcenter STAR-CCM+的多相 VOF 模型进行仿真后,发现结果非常稳健,仅存在极小的数值问题。在这种特殊的跳线几何模型中,形成段塞的主频率远低于结构的固有频率。这表明流体与结构间的耦合可以通过单向耦合进行

处理。但对于单向耦合,由于内部 VOF 流会导致流体质量和流体阻尼增加,无论采用何种预测方式都极难评估。因此,此类全双向耦合仿真可以深入了解预期阻尼,从而对寿命估算产生显著影响。此外,这项工作中展示的方法有望为石油和天然气行业增添重要价值,因为它可以用于解决与非线性结构和复杂水下设备相关的复杂现实问题。

投资打造更高端的仿真工具对于故障分析预测和水下系统防护意义重大。有预测表明,提前完善设计空间结构完整性有助于量化和减少石油与天然气行业目前使用的保守方法数量,可尽量提高流体产量,从而增加利润率。



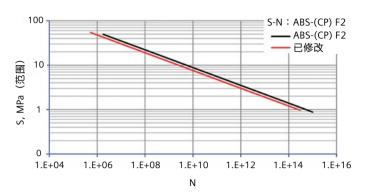


图 11:使用雨流计数方法估算疲劳寿命。

图 12:用于估算疲劳寿命的 S-N 曲线 [1]。

投资打造更高端的仿真工具对于故障分析预测和水下系统防护意义重大。有预测表明,提前完善设计空间结构完整性有助于量化和减少石油与天然气行业目前使用的保守方法数量,可尽量提高流体产量,从而增加利润率。

## 参考信息

- 1. http://www.xodusgroup.com/press/press-releases.html
- 2. Guide for the fatigue assessment of offshore structures. American Bureau of Shipping, Houston, Texas, USA. November 2010.
- 3. L. Chica: Fluid Structure Interaction Analysis of Two-Phase Flow in an M-shaped Jumper. University of Houston, College of Technology, Mechanical Engineering Technology. STAR Global Conference 2012. January 28, 2012.
- 4. J.P. Pontaza, B. Abuali, G.W. Brown, F.J. Smith: Flow-Induced Vibrations of Subsea Piping: A Screening Approach Based on Numerical Simulation. Shell International Exploration and Production Inc., Shell U.K. Limited. SPE 166661. 2013.
- 5. J.P. Pontaza, R.G. Menon: Flow-Induced Vibrations of Subsea Jumpers due to Internal Multi-Phase Flow. Shell Projects and Technology. OMAE2011-50062.

## 利用 CFD 优化张力腿海 上平台方向的函数方法

## 简介

在石油和天然气行业,技术安全重于泰 山。由于大部分 TLP 地理位置偏远、耗 资超过 35 亿美元,且拥有数不清的流程 和操作危险,不仅如此,工作人员还得 在拥挤的平台上作业,因此竭力降低人 员与资产风险至关重要。这一目标可以 通过固有安全设计 (ISD) 流程来实现, 技 术安全直接影响设计,其范围涵盖从概 念到调试的整个过程。平台定位是一个 关键设计环节,在 ISD 流程中发挥着重 要的作用,它能在发生事故时控制不利 影响。一直以来,平台定位都是通过工 程判断来决定,严重依赖于过往经验。 虽然起初这种方法似乎符合成本和时间 效益,但有可能导致设计解决方案不够 理想,继而导致安全和运营问题得不到 解决,徒增未来设计阶段的成本。

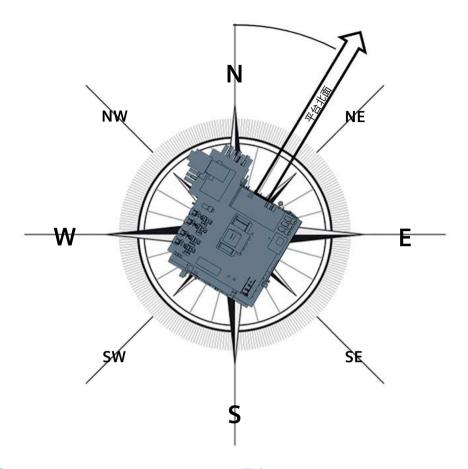
本文将探讨海上平台定位和布局对于打造更出色、更周全设计及持续遵循 ISD 原则所能产生的重大影响。文中将介绍一个成功案例,即通过将其他分析工具集成到 Simcenter STAR-CCM+,来优化固定海上平台的定位。我们将演示一项

技术,以期确定最佳平台定位,例如综合考量各指定参数打造最佳设计方案的平台定位。

## 优化参数

## 自然通风(风)

石油学会 (IP) 15 文档中提供了通风率指南。当发生碳氢化合物意外泄露时,往往通风率越高形成的可燃气体云越小。因此,人们希望最大化这个参数。



## 排气口

民航协议(CAP) 437 规定,如果直升机停机坪上方操作区环境温度升高 2 摄氏度(C)以上,则对直升机操作施加限制。升温通常用于界定潜在操作危害;在基些情况下,可能会完全限制操作,或整载荷重量及进场航线等参数。对于许多海上设施,有升机将作为数。这场和疏散工具。因此,直升机停机等等的预期天气条件。此外,平台还要最大限度地减少排气对于钻孔、要将废气对声的损失作的影响。因此,要将废气对高架桥操作的影响。因此,要将废气对高升机停机坪造成的损害降至最低水平。

## 风寒

风寒通过裸露在外的身体皮肤所感受到 的温度下降幅度进行表示,

需遵循 NORSOK S-002 规定。风寒可能会影响操作设施所需的人数。众所周知,在某些情况下,风寒等环境效应会增加操作员的出错概率。为使工作人员获得可接受的工作条件并最大限度地提高安全性,应尽量缓解风寒效应。值得注意的是,这可能与碳氢化合物意外泄露时增加通风以缩小可燃气体云的做法刚好相反。优化方法的目的之一是要在这两个相互矛盾的目标之间找到平衡。

图 1:本研究的目的是根据一组参数确定正北朝向与平台北面之间的最佳角度。

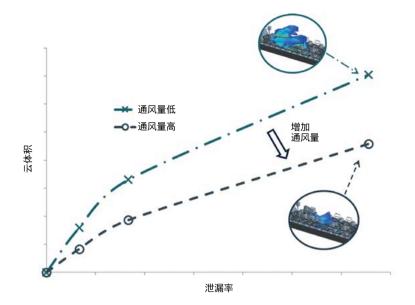


图 2:在指定碳氢化合物泄漏率的 情况下,增加通风率有助于驱散 可燃气体云,点火时产生的爆炸 影响将有所减弱,人员伤亡和结 构损坏概率也会随之降低。

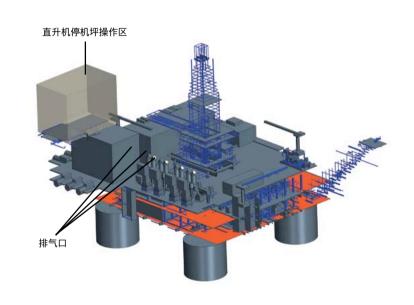


图 3:海上平台通过燃烧其产生的 部分气体来提供动力。排气口需 要按适当的方式进行定位,以保 证将废气可能对直升机停机坪操 作区造成的全年损害降至最低。

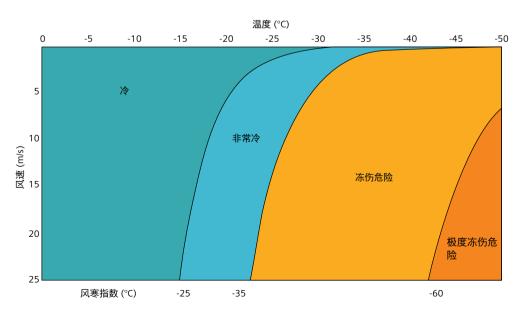


图 4:风寒指数图显示了工作人员 面临的冻伤危险。

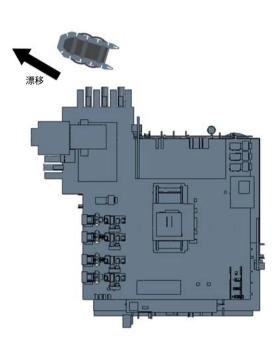


图 5:在紧急情况下,救生艇应偏离平台,而不是进入平台内或平台下。

## 救生艇漂移

如果在紧急情况下部署救生艇,则必须限制潜在危险的暴露范围,从而尽量提高潜艇的潜在生还率。另外,救生艇部署还可能遭遇丧失动力的情况,这时只能通过环境因素来保证安全。为尽可能地提高生还率,救生艇应在电流的辅助下与平台保持安全距离。这样做的目的在于,尽量减少不利漂移、缩短到达安全区域的时间以及降低漂回设施的概率。

## 张力筋腱应力

通常,TLP 平台的适用水深可达 7,000 英尺。尽管存在波浪冲击和当前结构引发的阻力载荷,但为了保障成本效益并遵循美国石油学会 (API) 推荐作法 (RP) 2T,需尽量减少因维持平台而产生的张力筋腱应力。张力筋腱要求可能会引发重量和结构设计限制,还会在操作期间带来复杂而不必要的浮力问题。

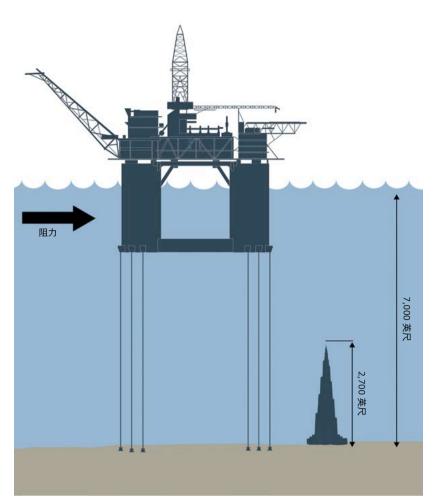


图 6:水深达到 7,000 英尺时,由波浪冲击和阻力载荷引起的张力筋腱疲劳是一个重要成本因素。在这里,平台深度相当于世界最高建筑物哈利法塔的高度。

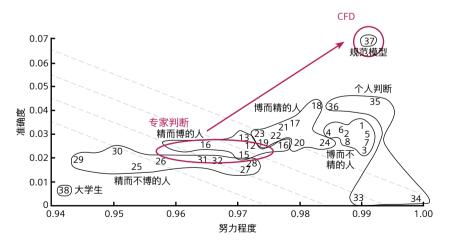


图 7:社会科学家 Philip Tetlock [1] 将领域专家做出的 20,000 次预测与 CFD 等规范模型做出的预测进行了比较。在每一次比较中,规范模型的结果均优于专家判断。

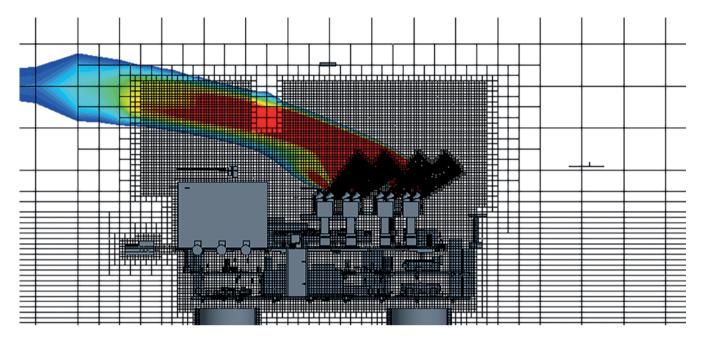


图 8:平台上的网格,显示了排气口和直升机甲板周围的局部细化情况。

## 为什么使用 CFD?

良好的判断力是解决任何工程问题的基础,但数值仿真可以更有效地完成优秀设计。在"Expert Political Judgment: How Good is It?How Can We Know?"一书中,社会科学家 Philip Tetlock 阐述了为何依托 CFD 一类规范模型得出的解决方案始终优于完全依赖专家判断做出的决策。如今,在强大的多学科设计探索 (MDX)和多学科设计优化 (MDO) 工具(如 HEEDS™ 软件)的支持下,依靠设计发挥潜力从未如此简单。

但在石油和天然气行业中,平台定位相关决策仍习惯于完全依靠经验和定性判断,这种方式很可能无意中造成偏差。本研究旨在使用数值工具提高专家预测的准确度,从而实现以下设计目标:

- 最大化通风效果
- 尽量减小排气对直升机甲板的损伤
- 尽量减小风寒效应
- 尽量减小张力筋腱应力
- 尽量减少救生艇的不利偏移

毫无疑问,在使用规范模型时,存在限制是在所难免的。使用 CFD 解决海上平台相关问题时,存在以下挑战:

- 首先,从技术角度而言,海上平台极大,其几何结构 非常复杂。这使得在有限时间内显式解析所有对象变 得十分困难,甚至难以实现
- 其次,从项目管理角度而言,项目很大程度上受日程 驱动:利益相关者希望其平台能够尽早开始运行,因 为每延迟一天,便会造成高达 1000 万美元的递延收 益。
- 此外,平台方向是首先要确定的设计要素之一。然而,在设计阶段初期,获得的信息十分有限。设备位置等诸多不确定性均需处理。
- 最后,针对健康与安全的预算拨款通常约为项目总成本的 1%,这极大地限制了技术安全性对最终设计的影响程度。

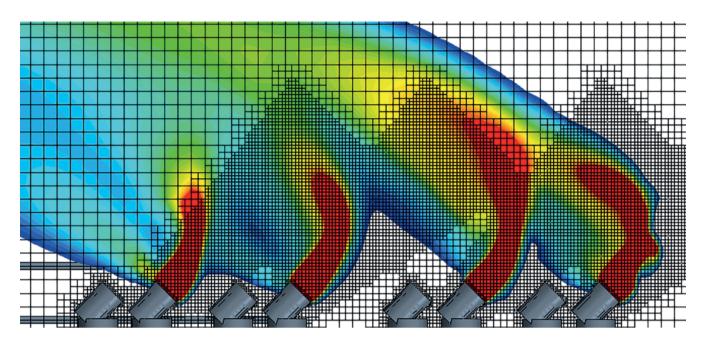


图 9:排气口周围的网格细化。

Simcenter STAR-CCM+ 中用于表示排气的物理参数如下:

- 稳态
- 可实现的双层 k-epsilon 湍流模型
- 分离式多组分气体模型
- 用于处理浮力驱动型排气流的重力模型

## 网格参数的设置如下所示:

- 对大量对象进行显式解析
- 使用子网格阻力项表示少量对象
- 200-500 万个六面体网格
- 针对平台和直升机甲板进行局部细化
- 对排气口进行细化

## 结论和后续考虑因素

根据通风、排气、风寒、救生艇偏移和张力筋腱应力五 大设计目标,利用仿真工具确定了平台的最佳方位,即 平台北面朝向东南偏东方向。本案例研究中采用的方法 考虑了设计的早期阶段,其参数涵盖了安全和操作问题。随着设计向前推进,所考虑的参数数量预计将有所变化,其加权贡献也会随之改变。其理念在于,随着设计流程的推进,方向可以得到进一步优化,或在某些情况下,可以根据安全性和操作优先级彻底改变所作选择。如果在经验、定性判断和规范模型(如 CFD)的使用之间进行适当平衡,则这一函数方法可用于获得本质上安全的设计。进一步的工作可能包括基于以下因素优化设施布局:涡轮机堆栈设计和定位、直升机甲板定位、模块放置以及火炬塔设计等。

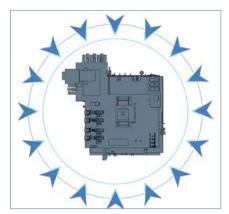
## 参考信息

 Philip E. Tetlock: "Expert Political Judgment: How Good is It? How Can We Know?"

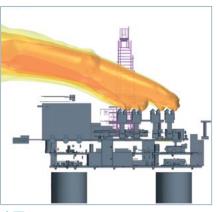
有关详细信息,请联系 CFDHouston@atkinsglobal.com

## 方法

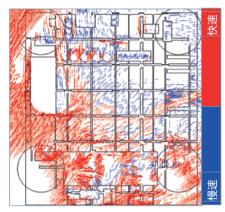
## 下表对方法进行了总结:



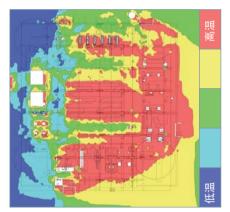
步骤 1: 对 16 种风向和 2 种风速进行仿真



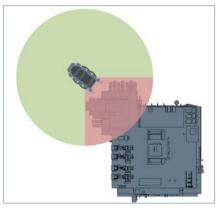
步骤 2: 计算每种场景下排气对直升机甲板的 损伤



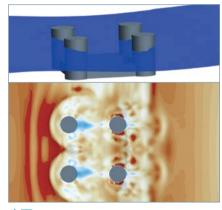
步骤 3: 计算通过平台的平均风速



步骤 4: 计算平台上的风寒效应



步骤 5: 确定救生艇偏移碰撞概率



步骤 6: 计算船体上的阻力载荷,作为张力筋 腱应力的替代

## 全年 30% 25% 26 NW NE 20% 24 15% 10% 20 18 5% 10 米处 10 分钟内的风速 16 W 2 SE SW S

步骤 7: 根据年度风力和当前概率分布情况组合所有结果

## 结果

计算了各个设计目标的成本函数,如图 10 至 14 所示。图 15 显示了组合目标的线性加权成本函数。组合成本函数表明,在将所有目标考虑在内以后,平台的最佳方向是其北面朝向东南偏东方向。这一结果并不是任何单个设计目标的理想方向,而是所有这些目标之间的最佳折衷。

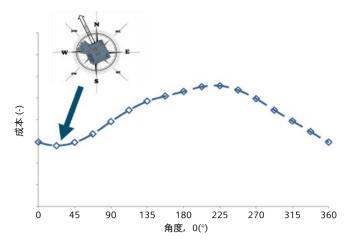


图 10:通风目标的成本函数,表明从通风角度而言,理想的方向为 平台北面与西北偏北方向对齐。

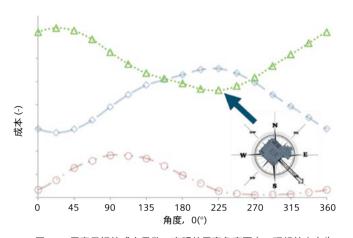
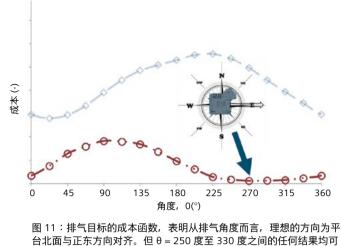


图 12: 风寒目标的成本函数,表明从风寒角度而言,理想的方向为 平台北面与正东南方向对齐。请注意,此成本函数曲线与通风目标的 成本函数曲线相反。这是因为风寒与通风一样受风速驱动,同时还与 温度相关。在这一特定情况下,温度不够低,因而不会产生显著影 响。



台北面与正东方向对齐。但 θ = 250 度至 330 度之间的任何结果均可 以接受。

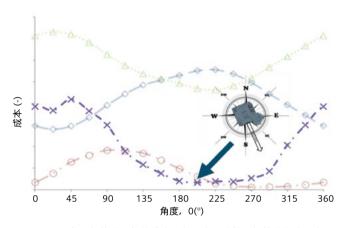


图 13: 救生艇偏移目标的成本函数,表明从救生艇偏移角度而言,理 想的方向为平台北面与东南偏南方向对齐,但  $\theta$  介于 180 度到 260 度之间的任何方向均可接受。

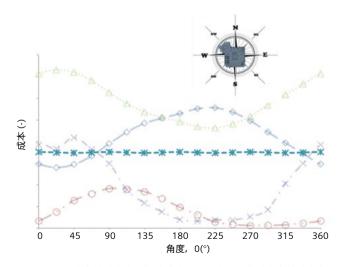


图 14:张力筋腱应力目标的成本函数,表明方向对张力筋腱应力没 有任何实质性影响。这是因为平台具有对称性。

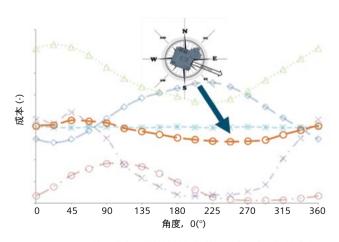


图 15:通过单个成本函数的线性加权获得所有组合目标的成本函 数。结果表明,最佳的平台方向是面向东南偏东方向。











张力筋腱应力

# 非洲基伍湖 排气管安装项目促进人 口安全与发电事业

### 简介

基伍湖位于卢旺达与刚果民主共和国的 边界上,处于非洲大裂谷中。基伍湖是 东非裂谷湖泊之一,含有高浓度的溶解 二氧化碳,也是唯一一个含有甲烷的湖 泊。二氧化碳来自于水下泉水,并流入 基伍湖最深的水域。甲烷则有三大来源:细菌分解湖底有机物、泉水以及细菌将二氧化碳转化为甲烷。这些气体在 深水中的静水压力下保持溶解状态。

这便会造成危险,因为山体滑坡或火山活动,甚至溶解气体浓度的不断增加都可能导致湖泊水柱的垂直破裂。这种情况也称为湖底喷发,其中含气深水将转移到较浅的深度,从而降低压力,使气体打破溶解状态并喷发而出——这一情况将对生活在湖边的 200 多万人构成生命威胁。

20 世纪 80 年代,此类气体喷发在喀麦隆发生过两次。其中较为致命的一次发生在 1986 年,当时一巨团二氧化碳从喀麦隆的尼奥斯湖中 100 米长的水柱中喷发而出,导致方圆 25 公里内有 1,700 多人窒息。基伍湖的气体储量是尼奥斯湖的一千倍,因此存在更大的危险。

但卢旺达政府认为,基伍湖富含甲烷的 水域不仅是一个急需解决的风险,同时 也是一项有待开发的资源。于是,卢旺

### 达政府与美国能源服务公司

ContourGlobal 取得了联系,双方共同设计并打造了一款系统来提取甲烷,并利用它来显著增强国家的发电能力,同时稳定湖泊以防止未来喷发。最终,双方开发了一个 300 吨重的漂浮设备,能够从湖泊深处提取含气湖水,从中分离出甲烷和二氧化碳,然后再将经过脱气的湖水注入湖中。

这一斥资 2 亿美元的 KivuWatt 沼气项目由气体提取平台和一个初期发电量为 25 兆瓦的发电厂组成,于 2015 年 12 月 31 日投入运行。卢旺达总统 Paul Kagame 在 2016 年 5 月的正式落成典礼上宣布,到 2020 年,该项目规模将扩大至 100 兆瓦,几乎是整个国家总发电量的两倍。

这将对卢旺达的经济发展产生巨大推力。如今,其首都基加利已成为充满活力的国民经济纽带,在过去的 10 年中,国民经济的年平均增长率高达 8%。但随着国家和首都的发展,电力供应已跟不上发展的步伐。开展 KivuWatt 项目之前的总装机容量仅为 156 兆瓦。在卢旺达1200 万公民中,近 80% 的公民仍未接入电网,而接入电网的人群则面临着高昂的电力费用,因为该国依赖进口柴油和重质燃料油作为其发电机动力。

# 采用 CFD 分析脱气水羽流并评估 湖底喷发风险

作为 KivuWatt 项目的一部分,工程和科学咨询公司 Exponent, Inc. 应用 CFD 分析了气体提取设备中的脱气水排放羽流,并表征了羽流的动力学特性。脱气水羽流带来了两个关键问题:进水立管和脱气水排放点之间是否存在再循环?羽流的动力学特性是否会导致湖底喷发和灾难性的气体喷发?

Exponent 公司的仿真结果表明,脱气水 羽流最终会在密度梯度内分层,不会发 生再循环,并且在所评估的条件下,排 放水羽流不会导致湖底隆起或喷发。

### 基伍湖的特点

基伍湖有着不同寻常的热结构。在大约80米以下的深度,水温随着深度而升高。而水中还溶解着大量二氧化碳(CO2)和盐,浓度也随着深度而增加。二氧化碳和盐的密度增加效应维持了湖泊分层,尽管温度分布曲线呈反向态势。湖泊的密度结构由一系列相对均匀的混合带构成,其间以密度梯度层分隔。

基伍湖中的气体在深处的静水压力下保持溶解状态。如果由于山体滑坡或火山活动对湖泊造成了破坏而导致一部分含气湖水来到较浅的深度,此时静水压力低于饱和压力(使所有气体保持溶解状态所需的压力),则水中会形成气泡。气泡将形成一股浮力羽流,将更多含气湖水带到更浅的深度,从而释放更多的气体。这最终可能会导致湖泊表面气体的大规模释放。

基伍湖中甲烷 (CH4) 浓度最高的位置在最深处,位于上下资源带之间。浮式驳船上的气体提取设备可通过四个提取立管从下资源带(水深 350 至 360 米)提取含气湖水。然后,该设备将溶解气体(CH4、CO2 和一些 H2S)从水中分离,并通过四个排水立管将脱气水重新注入湖中。



图 1:基伍湖中的 KiyuWatt 甲烷提取平台。

### 流体动力学仿真

为了确定关键问题(即脱气水是否会再循环回进水立管并阻碍有效的气体抽取,以及脱气水羽流是否会扰乱湖泊分层并导致气体释放),Exponent 公司使用 Simcenter STAR-CCM+ 对脱气水羽流进行了多次仿真。水温以及甲烷、二氧化碳和盐的浓度会严重影响水的密度,进而影响羽流动力学特性。因此,计算方法在整个仿真过程中对这些量进行了跟踪。模型中还融入了湖泊的背景条件,包括由密度梯度分隔的混合带。

此过程使用了 RANS 模型和 k-omega 湍流模型。计算域是以立管为中心、半径为 120 米的圆柱体。域的顶部在水深 240 米的位置处,而底部为水深 365 米



图 2: 卢旺达基伍湖以及提取设备驳船的位置。

的湖床。域的侧面和顶部应用了承压边界,以使湖水流入和流出此域。两组进水和排水立管之间采用垂直对称平面。水温、压力和物种质量分数(水、盐、CO2 和CH4)作为初始状态,以及承压边界上的流入条件。计算域使用多面体网格进行离散化,该网格在立管和扩散器周围进行了细化。仿真假设不存在横向电流。

### 羽流密度

无论是在排放点还是在湖水中演变和稀释时,羽流密度都是决定羽流行为的最重要参数。密度主要取决于四个变量:水温、盐浓度、CH4 浓度和 CO2 浓度。温度越高,密度越低,而盐度越高,密度越大。气体浓度会对密度产生复杂的影响。如果气体浓度足够小,以至于局部静水压力足以使气体保持溶解状态,则溶解气体对密度的影响相对较小(但仍然至关重要)。溶解的 CO2会增加密度,而溶解的 CH4 实际上会降低密度。

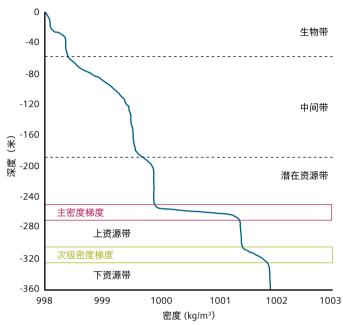


图 3:基伍湖的垂直密度分布图、标注了不同地带。

然而,如果气体浓度足够高,以至于气体无法在静水压力下保持溶解状态,则水中将形成气泡,从而显著降低局部密度。必须将这两种效应(溶解气体和气泡气体)全部考虑在内,才能准确计算出羽流密度。

### 仿真羽流行为

在 Exponent 检验的提取场景中,原水从 355 米的深度 处提取,而脱气水在 280 米处重新注入。4 个排水立 管以扩散器作为终端,而扩散器可在水平方向上引导排 放流。仿真结果如图 6 至 8 所示。为说明排放羽流的 特性,图 6 显示了被动标量示踪剂的浓度(脱气水排 放设置为 1,周围湖水设置为 0)。

### 结论

除了确定关键问题之外,Exponent 公司还发现脱气水 羽流不会进入进水立管,而是在其上分层;脱气水羽流 的动力学特性不会导致水柱抬升,因此对于所建模的提

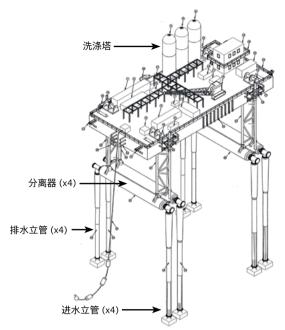


图 4: 浮式气体提取驳船示意图(未按比例绘制)。

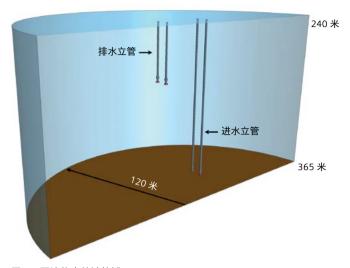


图 5:羽流仿真的计算域。

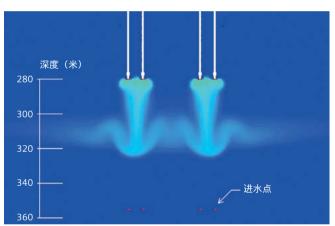


图 6:脱气水羽流的被动标量值:显示了四个排水立管及进水点的位置。 仿真垂直对称平面穿过图像的中心。深蓝色线表示 95% 的稀释云图。

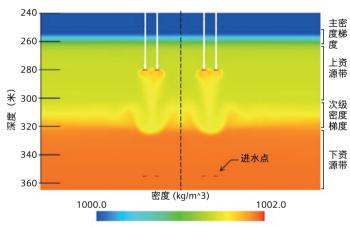


图 7:脱气水排放羽流的密度:虚线表示仿真垂直对称平面。

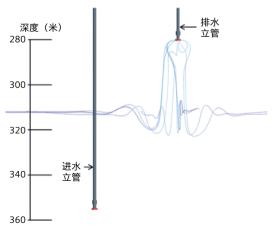


图 8:脱气水羽流的流线:视图由图 6 和图 7 中的视图旋转了 90 度。

取场景, 气体提取过程中不存在湖底喷发风险。仿真结果还表明, 脱气水在特定密度梯度内分层。这是因为如果将脱气水排放到密度梯度之外(密度几乎不随深度变化), 并且密度高于周围湖水,则无论发生多少次混合,均无法阻止羽流下沉,直至达到某密度梯度。通过调节排水深度,可对脱气水羽流进行控制,使其在任何所选密度梯度内分层。

# 使用 CFD 仿真竭力降低水合物形成的风险及减排成本

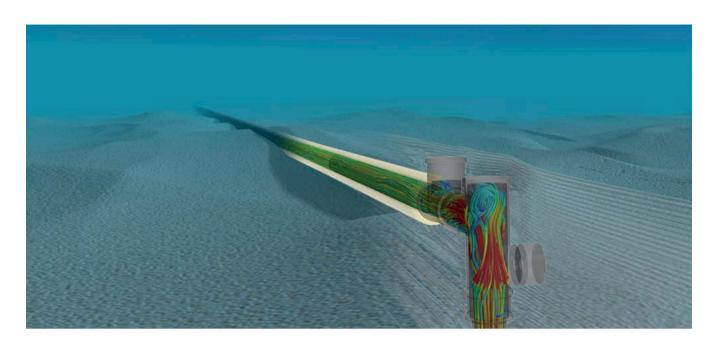
水合物防治方案通常涉及热管理和化学 注入。最新一代的 CFD 仿真软件为各大 运营商和行业领先的水下工程公司提供 了所需的工具,使其能够可靠地制定运 行策略并有效地设计水下生产系统设 备(如采油树和管汇)上的隔热系 统。CFD 可用于精确预测最复杂系统的 热性能,而随着技术的日新月异,目前 它能以前所未有的细节水平对水合物的 形成机制进行仿真。

本文将详细介绍目前可供工程师设计和 运行海底生产系统的先进仿真技术,并 探讨未来技术发展将如何改变水合物的 管理方式。

### 水合物形成的风险与日俱增

如果未能在系统设计中有效解决水合物 形成问题,则可能会导致严重的生产问 题。水合物可能会迅速形成,从而造成 系统的部分甚至完全堵塞。这可能会导 致生产损失,甚至是完全停产。虽然堵 塞的形成速度很快,但水合物修复过程 可能需要几天乃至几个月的时间,这会

尽管一维热传导计算可能适用于管道评估,但三维 CFD 仿真是对几何结构更为复杂的管道(如管中管、管束)、水下生产系统(采油树、管汇和连接系统)和水下结构进行精确热性能评估的唯一可行技术。CFD 仿真能够将几何体的细节以及更为复杂的流量和热行为(如多相流和自然对流)考虑在内,因此必不可少。主要用于执行结构仿真的 FEA 工具无法满足需求,因为它们无法对流体



水深越深、回接长度越长且生产条件越复杂,形成水合物的风险就越大,在水下生产系统和管道中避免这一问题所需的成本就越高。

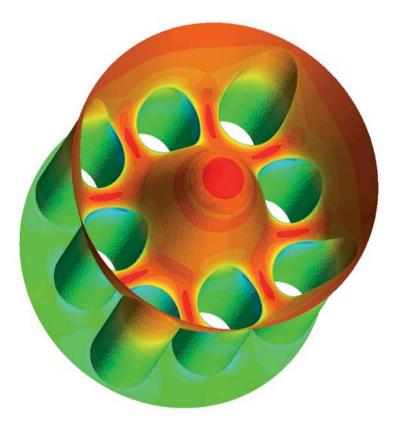
行为进行明确仿真,而这种仿真在冷却 期间却尤其重要,因为所含生产流体的 自由对流在热性能中发挥着重要作用。

### CFD 仿真的益处

CFD 仿真可以应用于水下系统和设备设计的诸多方面。以 CAD 模型为切入点,我们可以针对最为复杂的几何体和运行条件在整个解域内进行一系列仿真,从而获得无可比拟的细节。在 CFD 仿真过程中,工程师可以更改系统的几何体、运行条件或生产流体,并观察这些更改对流体流动图、多相流状态、热传导率以及系统温度分布等现象的影响。此外,工程师还可以预测其他相关物理特性,包括砂蚀速率、流体或化学浓度,甚至是易受内外部腐蚀的区域。

目前,CFD 软件可用于对最为复杂的系统在生产期间和停输(系统冷却)后的热性能进行准确预测。使用 CFD 方法,我们能够准确预测水合物在系统中的形成位置和时间,然后根据这些信息修改系统或隔热设计,从而避免此类情况的发生。这一方法对于制定水合物防治策略而言至关重要,有助于使系统在规定的时间内完全保持在水合物形成区域之外。现在人们普遍认为,CFD 可以提供可靠的热仿真,从而避免水合物的形成温度。很多水下作业开发现已将 CFD 用于热设计,某些还辅以全面的测试程序。

水下生产系统设备中的流动 CFD 仿真



水下组件侵蚀速率云图

# 流体安全保障 CFD 仿真的未来将何去何 从?

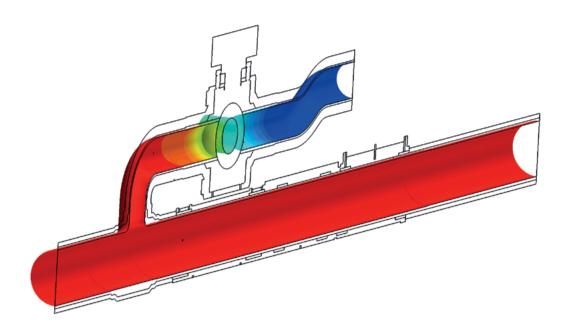
随着技术发展的日新月异,要完全避免水合物的形成条件,就不会仅限于使用CFD进行热设计。西门子开发的仿真技术可以将多相流模型与水合物形成之前及形成过程中发生的机制相结合。这一技术基于其久经验证的CFD解决方案(Simcenter STAR-CCM+)开发而成。这一方法将所有生产流体相考虑在内,此外,Simcenter STAR-CCM+ 还将水合物形成仿真所需的温度、压力和化学成分纳入了考量。形成速度取决于当地温度、压力以及流体和相结构。在形成条件下,该方法可将溶解甲烷的消耗过

程(水合物形成过程的必要条件)仿真 为一个反应过程,其中一部分自由水将 转化为水合物。这一方法不仅能够确定 符合水合物形成条件的位置,还能够预 测系统中可能形成水合物的位置和数 量。这一开发工作可能会显著改变 CFD 仿真在开发水下作业理念与隔热设计方 面的应用方式。未来,使用基于 CFD 的 仿真,水合物防治策略可能会转向一种 全新方法,这有助于深入了解水合物形 成的可能性,从而降低保守性,而不会 增加运行和商业风险。

### 缩短仿真解决方案开发时间

想要将详细的 CFD 仿真(及其他 3D 计算机辅助工程 (CAE) 技术)作为工程流程的组成部分,仍需直面一些明显的障碍。一直以来,CFD 仿真都涉及一个耗时巨大的阶段,即模型构建和设置阶段,期间我们需要导入 CAD 或构建自己的 3D 几何模型。

Norton Straw 咨询公司在工作中使用 CFD 软件包 Simcenter STAR-CCM+,显 著节省了获取仿真结果所需的时间。该 软件不仅能够从客户的设计团队自动导 入 CAD 几何体,而且可以解决表孔或重 叠和非流形表面等各种与 CAD 相关的问 题。对于最为复杂的水下生产系统设备 和组件,这种自动化技术能够将几何体 准备时间从数周缩短到数天(甚至是数 小时)。随后,该软件的自动六面体和 多面体网格划分工具可以生成高质量的 计算网格,满足仿真过程的需求。此 外,仿真、处理和评估结果、更新设计 以及执行修正仿真的所有操作均在单一



### 结论

在水下生产中,水合物风险往往被视为 最棘手的流体安全保障问题。先进的 CFD 仿真安全可靠,可用于制定安全可 靠的水合物防治方案。此外,最新的技 术发展意味着,现在有望通过对最新的复 杂的生产系统中的水合物形成过程进为 仿真来推进水合物的管理。如果运用得 当,前沿仿真技术能够提供无可比对 工程见解和知识,有助于开发出完善的 水下系统设计和运行策略,从而显著降 低与流体安全保障相关的技术和商业风 险。 运行期间水下直列三通中的生产 流体温度曲线图,其中主流动管 线处于运行状态,但上部分支阀 门处于闭合状态,导致球阀周围 出现冷点

Matt Straw 博士是 Norton Straw 咨询公司的董事,该公司面向石油和天然气行业提供工程和技术咨询服务。他在石油和天然气行业从事 CFD 的开发和应用工作已有 15 年之久,参与了诸多重大水下开发项目的流体安全保障和热设计。Norton Straw 咨询公司在石油和天然气行业的流体动力学仿真领域积累了雄厚的实力和丰富的经验,并与西门子建立了合作伙伴关系,能够为石油和天然气行业提供与仿真软件开发相关的建议和咨询服务。

# 分离器浅析 - 适用于分离器设计的计算流体力学简介

### 分离器 CFD

如果您从事与处理和分离相关的工作,那您可能对 CFD 并不陌生。不同的人对 CFD 持有不同的态度,有的人对此极度 恐惧,因为这容易使他们回忆起早已被遗忘的大学课堂以及令人眼花缭乱的偏微分方程,而有的人则满怀好奇甚至充满热情。本文的目的就在于减轻这些恐惧并答疑解惑,帮助您成为一名训练有素的 CFD 使用者。

许多人首先都会摆出"那又怎样"的心态,提出"为什么以及何时应该关注 CFD"这样的问题。我们将会解答这个问题,然后对 CFD 进行简要介绍(包括主要的多相模型),再回答一些常见问题 (FAQ),最后以在旋风分离器中应用 CFD 和自动化设计探索的简短案例分析为结尾,所有一切均不涉及任何方程!

## 那么,为什么要在分离器设计中应用 CFD?

在当今"持久低价"的市场中,降低成本是重中之重。CFD 可为项目的所有阶段提供支持:从降低初始项目成本(资本支出)和运营成本(运营支出),到管理

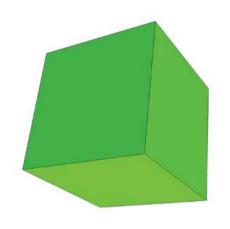
项目扩建模块,例如将附加油井与现有 设施捆绑在一起。

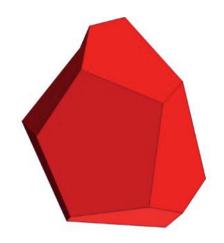
海底分离器用于在泵送前将气体和液体分离。因此,确保分离器满足其工艺要求至关重要。如果存在残留或不足情况(气流中存在液体或液流中存在气体),则下游的泵或压缩机将无法按需运行。在这种情况下,运营上将面临着成本高昂的问题亟待解决。

除了满足最低工艺要求之外,还需考虑 其他设计因素。例如,可能需要减轻其 重量以便于安装,了解上游管道的变化 如何影响性能,从而提供能够与诸多水 下处理系统 (SPS) 配置相连的标准化设 计,最大限度减小尺寸以减少占地空 间,以及最大限度减少压降以及内部构 件的使用量和成本。

手动计算(如斯托克斯定律)可用于评估所需的停留时间,但需要对流动进行假设(例如,无短路,甚至是整个流动区域内的分布)。尽管可以运行物理测试,但这些测试本身也带来了挑战:成本和时间,难以呈现的复杂多相流,以及对工艺流体和高压及高温进行测试而带来了显著的额外成本和安全问题。







使用 CFD 可以预测上游管道、入口装置以及分离器内部的流动模式,从而确保足够的停留时间。可以研究各种分离机制,例如评估由于高气体速度导致液滴二次夹带的可能性,以及通过提高除雾器流量的均匀性来改善内部构件的性能(有关示例,请参阅 Lee Rhyne 博士的SPE 在线研讨会,如"洗涤器入口设计的CFD 优化")。

通过利用实际的工艺流体、温度和压力,CFD 较为快速和轻松地实现了这一目标。对初始设计进行仿真之后,我们可以运行假设设计研究,由此确定如何改进设计。简而言之,CFD 的成功应用可以加速探索更出色的设计,同时降低成本。

此应用基于正确无误的 CFD 研究进行,因此结果是可信的。CFD 的诸多不确定性均可以进行系统化测试(例如网格细化研究),而了解手头相关物理特性(而非 CFD)的工程师也可对此进行询问控制。常见的疑虑是结果必须经过"调整"才能确保准确性。其实不然,因为通过系统化测试、量化和最大限度减小不确定性及误差,以及确保充分考量各种问

题且建模假设适用于当前问题,也可以确保准确性。询问控制 CFD 解决方案的第一步在于运用合理的工程判断。流场是否合理?如果不是,原因何在?它与手工计算以及具有验证数据和简单分析方法的先前设计相比如何?在早期阶段,CFD 错误往往为拼写错误,因此如果代码看似解决了与正在询问控制的问题不同的问题,那么很有可能就是这样!

接下来,需要更深入的解释来了解仿真 过程中的主要步骤以及这些步骤对结果 的潜在影响。

CFD 会尝试求解用于描述流体行为的纳维-斯托克斯方程。不幸的是,求解纳维-斯托克斯方程在计算上很难实现,因此对于所有实际问题,均会使用 RANS 方程。这些解算均受"闭包问题"的影响,因为求平均值会产生更多的未知量,而这些未知量可使用湍流模型来求解。模型也会用于整合更为先进的物理场,如多相流动力学。进行 CFD 研究共分为四步:

1. 确定感兴趣的领域、几何体、流体进出和边界条件(例如,入口处速度)

图 1:不同的单元类型:四 面体(蓝色)、六面体(绿 色)、多面体(红色)。

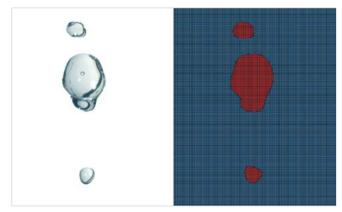


图 2:使用 VOF 建模的液滴。

- 2. 域的离散化或网格划分:相对于求解空间中每一点的流体行为(速度、压力等),我们会使用一个网格分割体积,然后仅在网格中各个单元的中心求解方程——好比是一个装满乐高积木的分离器。CFD 将显示每个积木中心的速度、压力、温度等。出于完整性考虑,在时变问题中,可通过求解时间增量(例如每0.1 秒)对时间进行离散化。
- 3. 选择要进行仿真的物理因素,例如是单相流还是多相流,是热流还是等温流。
- 4. 然后, CFD 程序会使用迭代法求解方程得到收敛性。 这些步骤也代表了四个应得到重点关注的不确定领域。

如果有 3D CAD 模型或几何体图形可用,则定义域通常不是难事。但定义入口和出口处的流动条件难度更高。在分离器仿真中,通常要规定入口的液滴粒径分布,这就需要对其有所了解或进行估计。通常,可从其他分析方法(例如从系统的一维模型)中获得边界条件信息,从 CFD 中可通过将上游相关域扩展到不确定性更小的某个点,或者通过如手动计算来获得这些信息,例如,估计最小液滴粒径。进行 CFD 研究的工程师需要能够说明使用条件、这些条件的物理意义及其适用的原因。

接下来,需要对域(几何体)进行离散化或网格化。在分析过程中,这可能是一个耗时但非常重要的环节。优质的网格会使 CFD 效果更佳。

网格(所使用单元的数量、大小和类型)会影响结果。 例如,如果 CFD 仿真试图使用一个单元对漩涡进行仿 真,则求解器仅会得出一个点,在这个点会计算速度和 压力,用来呈现该漩涡。随着单元数量的增加,每个单 元的尺寸会减小,漩涡所呈现的分辨率及相应的准确度 会提高。采用类似的方法可以确定或尽可能地降低网格



图 3:用于基准设计的几何体和流动可视化。

对解决方案的影响,网格逐渐细化(减小单元尺寸)直至所需量(例如压降)停止变化。在<sup>1</sup>中可以找到有关网格收敛研究之成熟方法的简要说明。

单元的类型还有很多:六面体(六面)、多面体(多面,但通常是 12-14 面的足球形状)或四面体(四面)。

一直以来都会采用四面体网格,因为构建六面体网格难度很大且非常耗时,对于复杂的几何结构更是如此。但使用四面体网格也并非理想之选,因为四面体单元的数值属性不佳,会对流体行为造成影响,给人以更加粘滞的感觉。因此,需要更多的四面体单元才能达到与使用六面体或多面体网格时一样的准确度。

幸运的是,在过去十年中,网格划分软件包已经得到显著提升,时至今日,构建多面体或六面体网格已成为可能,即使是复杂的几何结构也可以实现,而且无需花费过高的费用。

构建网格后,工程师必须选择要考虑的物理因素。CFD的优势之一就是能够简化问题,仅考虑相关物理因素,从而更加轻松地探寻和了解相应的结果和趋势。但这种优势也是一把双刃剑,因为过度简化可能会错过一些重要的结果。与选择边界条件一样,执行分析的工程师需要能够说明所使用的模型、其物理意义及其对当前问题的适用性。

多相建模是分离器领域的核心环节。CFD 采用了三种主要的多相模型:

- 1. 自由表面或 VOF。
- 2. 欧拉-拉格朗多相模型通常简称为拉格朗多相模型 或 LMP。
- 3. 欧拉多相模型 (EMP)。

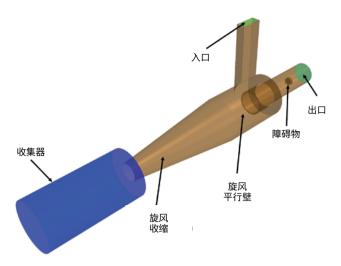


图 4:基准旋风几何体。

在 VOF 方法中,可通过网格解析相位之间的交接面。 如图 2 所示,如果水滴在重力作用下穿过空气,假如 网格分辨率足以在网格中捕获水滴的形状和运动,那么 CFD 可以使用 VOF 模型捕获该水滴的运动。

因此,该模型非常适用于在相位之间具有明确交接面的流体(例如分层流),在这里网格可以进行本地细化网格,从而捕获交接面。VOF 的常见应用之一就是对海水及其在船舶周围的行为进行建模,因为海洋与空气之间有着明显的交接面。

VOF 可用于对分层流以外的流体进行建模,但需要对网格进行细化以捕获相位之间交接面处的多相位效应,例如将细小液滴卷吸到气相中。但是这样会增加分析的计算成本。在分离领域,VOF 通常用于评估容器的总体流动性。当流体分散时,通常使用 LMP 或 EMP。

在 LMP 中,可使用 RANS CFD 方法求解连续流场。在 液滴穿过空气的示例中,空气是连续相,液滴是分散相。连续相可以在欧拉框架中通过固定网格和相对于网格的流体运动进行求解。LMP 的全称是欧拉-拉格朗日 多相模型,但是为方便起见会将"欧拉"省略。

对于分散相,可使用牛顿第二运动定律求解每个颗粒或液滴的轨迹。从移动液滴的参考系(而不是固定网格)对液滴或颗粒运动进行计算,这种方法被称为拉格朗日法。为了降低计算成本并使其适用于具有大量液滴的情况,每个液滴都代表一组液滴。对运动计算的投入包括适用于由于湍流引起的液滴或颗粒的拖拽力与分散的子模型。可以采用额外的子模型来包含液滴的分离和聚结。相位之间的相互作用可以是单向的,也可以是双向的。单向是指液滴的运动受连续相影响但连续相并未"看到"液滴;双向是指两个相位相互影响。通常都会采用单向耦合。该方法可以高效、准确地对液滴或颗粒流

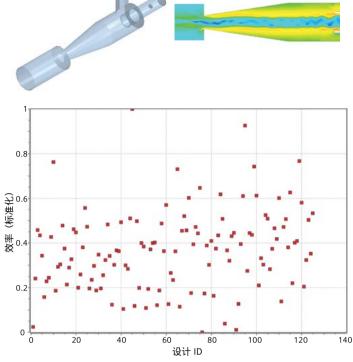


图 5:具有改进设计的几何体、通过旋风中心剖面的速度大小,以及显示分离效率逐步提升的设计研究历史记录。

进行建模,而当液滴或颗粒的体积分数较高时则不太适用。关于体积分数临界值的看法因人而异,但通常都在5-10%的范围内,从这一临界值开始,模型的准确性和稳定性开始下降。对于颗粒流,可以使用更高级的模型来解决这一问题,例如离散元素法 (DEM) 或多相质点网格法 (MP-PIC)。在分离器领域,LMP 通常用于研究气流中液滴的运动情况。

对于欧拉多相模型,可以针对每个相位求解完整的 RANS 方程。使用"互穿连续体"的概念,连续相和分散 相通过源项相互作用来获得拖拽力、提升力、虚拟质量 力和湍流扩散力。这就使其成为一种非常灵活的模型, 能够同时处理任意数量的相位和任何范围的体积分数。 这种模型还可以通过包含子模型来考虑其他物理因素, 例如液滴或气泡的分离和聚结,或是热量和质量的传 递。

EMP 的缺点是每组 RANS 方程都会带来相应的成本(研究许多颗粒尺寸或相位使计算成本变得很高),并且用户需要了解并选择适用的子模型和设置。EMP 在灵活性上也存在不足,虽然它可以应用于各种多相流,但这也需要了解和应用多个子模型。

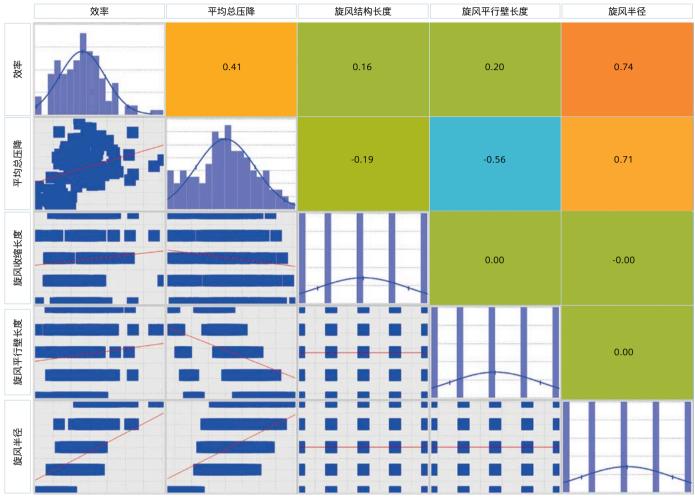


图 6:相关性图。

对于分离器分析,EMP 可以用于对整个容器进行建模,但在混合区域中效果更好,因为在这一区域体积分数可以超过 LMP 的限制,而且用 VOF 跟踪小液滴或气泡的计算成本非常高。

构建网格、指定边界条件并选择适用的建模假设之后, 求解器会使用迭代技术不断改进解决方案, 直到实现" 收敛性"。从数学角度上, 收敛性表示极限行为, 特别 是趋近于其极限的一个级数。在 CFD 中, 级数就是流场(速度值、压力值等等)。当速度、压力等值停止迭代变更时, 流场便达到了极限。

通常会通过监控残差来判断收敛性。残差可判断出不满 足离散方程的量。一般来说, 残差值应该减少三个数量 级。 如果残差值未减少且流场继续变化,这可能表示由于存在内在的不稳定现象(如湍流),稳定态假设不适用。 另外,它还可以指出网格中单元质量较差等问题或边界 条件的位置或数值等不适定问题。

# 案例研究:为提高分离效率而进行的气固旋风分离器的 设计空间探索

在介绍了建立 CFD 研究的步骤并树立了对结果的信心 之后,下面将分享如何使用 CFD 来了解和改进气固旋 风分离器设计和性能的相关示例。

CFD 仿真是使用 Siemens PLM Software 的产品 Simcenter STAR-CCM+ 来运行的。图 3 展示了分离器 的几何结构,通过在等值面上显示低压区域、等压力线 的立体渲染,以及通过对使用多种方法的 CFD 与实验

数据之间的比较来获得旋风中两个位置之间的平均轴向速度,对设备进行了简化。这些仿真的目的是进行模型验证,这也是在同一案例中使用多种方法的原因。

设计研究的基准几何体是从欧洲流体湍流及燃烧研究协会 (ERCOFTAC) 的一篇论文中引用的,其中提供了整个旋风平均速度分布的几何体和实验数据(采用激光多普勒测速仪 (LDV) 测量所得)。验证基础模型后,我们可以利用 CFD 快速、轻松地寻找其他设计方案。它还可以与能够实现仿真过程自动化并有效探索设计空间的工具结合使用。在本案例中,采用了 Siemens PLM Software 用于多学科设计探索的 HEEDS™ 软件,并结合使用了 Simcenter STAR-CCM+。为了进行设计空间探索研究,在入口处应用了 25 米/秒 (m/s) 的恒定气体速度。在入口处放入直径为 1.2 μm 的砂粒,使其占流体体积分数的 1%。然后使用与连续相单向耦合的LMP,以及雷诺应力湍流模型 (RSM)。

自动化和设计空间探索工具 HEEDS 会使用算法来预测设计空间中的下一个探查点。HEEDS 要求工程师提供:

设计目标:可设定多个目标,且彼此可存在差异。在本案例中,目标是达到最大的旋风分离效率。

限制条件:在本案例中,分离器的压降不能超过某一特定值,否则会认定设计不可行。

要评估不同载荷的情况,例如,如果在颗粒载荷不同的情况下是否会导致分离性能不同。

设计变量:确定其范围和合理增量。在本案例中,我们 改变了旋风的半径、收缩长度和平行壁剖面。

已经开发出了多种不同方法来帮助用户高效探索设计空间。这些方法通常称为优化算法,同时包括其他实验设计 (DOE)、遗传算法、下坡单纯形法和粒子群算法。其实优化一词并不贴切,因为对于大多数工业应用而言,并不存在单一的最佳解决方案或设计。但是,这些技术可以非常有效地找到更好的设计。

种类繁多是应用这些方法的一个阻碍:用户必须了解在哪些情况下使用哪种方法。HEEDS 采用名为 SHERPA的自适应混合算法,该算法将根据其具备的与分析相关的信息(例如变量的数量、可用的时间和资源),在不同的探索方法(DOE、遗传算法等)之间进行切换。使用这些方法的优势在于,相较于工程师自己寻找或使用

其他优化方法来寻找,这些方法能以更少的迭代来发现更好的设计。在本案例中,五天内评估了 125 项设计(始终是同时进行两个案例)。经过 44 次尝试,分离效率提高了 19%,同时压降下降了约 1%。

相关性图显示了两个变量(例如旋风的半径和旋风分离效率)之间的关系和相关性。右上角的数字表示方形中出现两个变量之间的相关性(1.0表示完全相关)。相关性图有助于工程师查询大量数据(100多个设计),并快速了解影响设计的因素。在本案例中,旋风半径对其效率和压降有显著影响(相关性分别为 0.74 和 0.71)。

### 总结

对于非专业工程师来说,CFD 最初可能会令人生畏,特别是在多相流和分离等更先进的领域。尽管只有专家才具备子模型的详细知识,但非专业工程师可以通过评估能否解释结果的物理意义,以及询问所采用的建模决策及其对结果和关注数量的预期影响来评判 CFD 的成果。通过介绍所使用的主要多相模型,本文旨在帮助您实现这一过程。

CFD 对其他分析方法(分析类或实验类)提供了补充。 该方法的成功应用,可以在经济方面对项目产生重要的 积极影响:降低设计成本、改进和验证设备性能以及减少或避免问题的出现。通过将 CFD 与自动化设计空间 探索工具结合使用,则可进一步了解和改进分离器设计。

### 参考信息

- 1. http://journaltool.asme.org/templates/jfenumaccuracy.pdf
- https://www.nafems.org/join/resources/cfdconvergence/ Page0/
- 3. http://www.ercoftac.org/

### 关于 Siemens PLM Software

西门子数字化工厂事业部旗下业务部 Siemens PLM Software 是全球领先的软件解决方案提供商,致力于推动行业数字化转型,为制造商创造新的机会并实现创新。Siemens PLM Software 的总部位于美国得克萨斯州普莱诺市,在全球拥有超过 140,000 个客户,并与所有规模的企业协同工作,帮助他们转变将想法变成现实的方式、产品实现方式以及使用和了解运行中产品和资产的方式。要了解有关 Siemens PLM Software 产品和服务的更多信息,请访问 www.siemens.com/plm。

## 总部

Granite Park One 5800 Granite Parkway Suite 600 Plano, TX 75024 USA +1 972 987 3000

### 美洲

Granite Park One 5800 Granite Parkway Suite 600 Plano, TX 75024 USA +1 314 264 8499

### 欧洲

Stephenson House Sir William Siemens Square Frimley, Camberley Surrey, GU16 8QD +44 (0) 1276 413200

### 亚太地区

Unit 901-902, 9/F Tower B Manulife Financial Centre 223-231 Wai Yip Street Kwun Tong, Kowloon Hong Kong +852 2230 3333

©2019 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Siemens 和 Siemens 徽标是 Siemens AG 的注册商标。Femap、 HEEDS、 Simcenter 3D 和 Teamcenter 均为 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其附属公司在美国及其他国家/地区的商标或注册商标。Simcenter、Simcenter Amesim、 LMS Samtech Samcef、 LMS Samcef Caesam、 Simcenter ScADAS、 Simcenter Testxpress、 Simcenter Soundbrush、 Simcenter Sound Camera、 Simcenter Testlab 和 LMS Virtual.Lab 是 Siemens Industry Software NV或其任何附属公司的商标或注册商标。Simcenter STAR-CCM+和 STAR-CD 是 Siemens Industry Software Computational Dynamics Ltd. 的商标或注册商标。SolidWorks 是 Dassault Systemes 的注册商标。Java 是 Oracle 和/或其附属公司的注册商标。所有其他商标、注册商标或服务标记均属于其各自持有方。67144-47-ZH 4/19 02e