

全日制硕士专业学位研究生专业实践报告

撰写及实习考核要求

1. 专业实践报告应包括专业实践基本情况（包括实习基地简介、专业实践计划完成情况、校内外导师对专业实践环节协同指导情况等）、实践内容与成果、实践收获（包括知识、能力和素质提高、对学位论文研究贡献等方面）、意见建议等内容，文字部分不少于 5000 字且实习内容与成果部分不得少于 3000 字，要求重点突出，公式图表要规范、清晰。

2. 全日制专业学位研究生专业实践考核包括个人总结、导师评价和学院考评。个人总结以专业实践总结报告的形式体现；校内外导师根据专业学位研究生专业实践工作表现和提交的实践总结报告，对其实践能力、职业素养等做出系统的评价；各学院（研究院）组织校内外专家对研究生专业实践情况统一进行答辩考核，结合导师评价意见，最终确定研究生个人专业实践考核成绩。

3. 实践报告的基本格式见附件一，用 A4 纸打印。内容形式可自行设计，上交时将校内外导师评阅表、实践月报打印附后。



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

专业实践报告

实 践 课 题 水下管汇总体设计软件编制

姓 名 郭鸿飞

学 号 2020215401

专 业 领 域 机械工程

实践基地名称 中海油研究总院有限责任公司

专业实践类别

校级基地 院级基地 导师自主安排
学生自行联系

学 校 导 师 顾继俊副教授

校 外 导 师 马强高级工程师

入学时间 2020 年 9 月 报告完成时间： 2022 年 9 月

目 录

第 1 章 实践概况.....	2
1.1 实践单位概况	2
1.2 实践目的	2
1.3 专业实践计划完成情况	3
1.4. 校内外导师协同指导情况	4
第 2 章 实践内容与成果	6
2.1 研究方法与路线	6
2.2 实践内容	6
2.2.1 主要模块划分	6
2.2.2 系统设计	9
2.2.3 管汇设计及其参数计算	9
2.2.4 管汇重量计算及其验证.....	12
第 3 章 实践收获	15
第 4 章 意见建议	16
参考文献	17
附录 A 附录内容名称.....	18

第 1 章 实践概况

1.1 实践单位概况

中海油研究总院(原中海石油研究中心),是中国海洋石油总公司和中国海洋石油有限公司的技术参谋部、战略规划部、科技人才培养中心,是支撑总公司可持续发展的技术提供者。中海油研究总院作为中国海油所属最大的综合性大型科研机构,中海油研究总院业务范围涵盖海上油气勘探研究,海外勘探、开发、工程目标评价与新项目识别,海上油气田总体开发方案设计,海上油气田工程基本设计和新能源研发;同时承担国家“863”项目、“973”项目、国家自然科学基金项目、国家重大专项和中国海油科技攻关等重大研究任务。

中海油研究总院共有 12 个院、中心、部门,拥有员工近 1000 人,每年承担近 300 项科研生产任务。近年来,共有多项科研成果获得国家及总公司级科技进步奖,获得国家授权专利和软件著作权百余项。

经过多年的发展,中海油研究总院已经形成了海洋油气勘探地质综合评价研究、油藏工程研究、油气田开发工程设计和钻采工程研究等领域完整的学科体系,拥有工程设计、工程咨询、环境评价、安全评价、压力管道设计等多项资质,以及大规模并行计算机等先进的计算设备和盆地模拟、目标评价、地震资料处理及解释、测井和试井分析、油藏数值模拟、油藏工程评价、工艺计算、结构分析、经济评价、安全评价和环境评价等多种类型的先进专业软件,建立了深水工程、提高采收率、地球物理、边际油田开发四个国家及总公司级重点实验室和一个博士后科研工作站。

中海油研究总院还与国内外多所大学和研究机构保持着良好的合作关系。迄今为止,先后与美国、英国、法国、德国、意大利、日本、加拿大、挪威、俄罗斯、韩国、荷兰等 40 多个国家和地区的石油公司、科研院所、大专院校、工程公司及中国石油大学、上海交通大学等各大高校开展了一系列的技术合作、技术交流和技术服务活动。

为适应中国海油“二次跨越”的战略需要,中海油研究总院将继续在总公司“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的方针指引下,创新思路和方法,不断加强科技创新能力建设,培养高端人才,增强核心竞争力,逐步形成具有海洋石油特色的核心技术体系和科技人才队伍,为实现中海油跨越式发展贡献智慧和力量。

1.2 实践目的

实践课题来源于工业和信息化部高技术船舶科研项目“水下油气生产系统工程化示范应用”子课题“水下油气生产 系统示范应用工程总体设计技术研究”,分为以下三部分内容:

(1)水下管汇总体布置原则研究

通过国外规范和文献进行分析研究，如 DNV.GL、ISO13628-15 及 API 17P 等系列标准为基础，分析水下管汇总体布置原则推荐做法。布置研究对象包括如管汇管线布置，ROV 操作面板布置，水下液控阀门布置，水下连接器布置，水下控制模块布置、水下分配单元布置、水下连接器布置、水下多相流量计布置、水下发球筒布置、水下法兰布置等推荐做法。基于以上研究，形成水下管汇布置原则报告。

(2)水下管汇总体设计软件编制

搜集和整理有关水下管汇集成单元部件数据库，如水下阀门、流量计、连接器、控制模块。数据库信息如尺寸、重量、材质、设计压力、供货商等。开发水下管汇总体设计软件，可以根据典型输入条件下，快速分析管汇的重量、管汇的投资费用。此外可以分析管线的壁厚、重量等功能。

(3)水下管汇及元件库三维布局软件开发

基于常见三维软件开展水下管汇及元件库的三维模型库的开发，并形成典型水下管汇三维建模 2 个（single header 及 dual header）。开发一套水下管汇自主布局三维平台软件，针对典型输入条件实现水下管汇最优三维布置方案。具备管汇上设备元器件自主布局功能、管线最优路径自动生成及避障功能、漫游可视化功能，实现不同输入条件下对水下管汇布置进行优化策略。

水下管汇是一个非标设计的装备，平时设计时需要 CAD 和三维软件结合并且多次循环迭代。

项目目的是能够实现输入设计参数，在三维空间快速搭建出一个管汇模型，能够得到管汇的预估重量和费用，做一个前期设计的参考，减少前期设计的二维和三维的多次迭代设计。项目主要包括模型与数据库、布置原则研究、管汇三维设计、重量计算四部分。

1.3 专业实践计划完成情况

实践内容	考核指标	完成情况
总体布置原则研究	分析水下管汇总体布置原则及布置研究对象的推荐做法，并形成水下管汇布置原则报告。	完成
总体设计软件编制	a.管汇单元部件数据库开发。	完成
	b.管汇总体设计分析。输入相关参数，快速得到管汇的总重量、总投资，并可以分项统计。	完成

	c.管线参数计算功能，如压力管线壁厚及重量计算功能。	完成
水下管汇模型库及三维布局软件开发	a.形成水下管汇及元器件三维模型数据库。	完成
	b.水下管汇模块自动布局功能。可以快速布局管汇模块，并在软件上显示设备位置坐标等信息。	完成
	c.水下管汇管线最优路径自动生成及避障功能。通过软件可实现管线的自动生成，以及对管道管径、长度的调节，实现自动避障功能。	完成
	d.平台漫游可视化功能。具备第一人称视角体验水下管汇内部布局情况，至少具备前后左右的视角移位，具备周边海洋、环境渲染。	完成
	e.针对典型输入条件实现水下管汇最优三维布置方案，实现不同输入条件下对水下管汇布置进行优化策略。	完成

1.4. 校内外导师协同指导情况

导师指导内容
项目实施方案审查，启动项目。
孟博士讲解陵水管汇，校外导师和校内导师交流指导管汇结构和整体软件的开发思路。
校外导师指导软件参数变量问题，变量包括主管、支管、连接器、基础结构、弯头、阀门等。
校外导师指导根据 API 及标准规范，列出报告大纲并撰写内容，阀门的磅级或者 psi 定义，压力等级分档，模型移动距离通过 UI 界面进行定量调整。
校外导师指导软件应可调整主管上连接器与阀门间的距离，模型库中加上 3D、5D 弯头等。
校外导师指导总投资总重量的计算附有各模块的占比，壁厚计算做两个版本，包括 DNV 和 ASME。
校外导师对三通、四通、连接器之间的最小距离进行了指导并确定初步做法。提出阳极块占比为整体（不含防沉板）重量的 5%~10%，对壁厚计算的单位选择等提出了一些意见。对主管的移动、支管的伸缩、SCM 的放置等功能提出要有更高自由度。

确定了 MEG 管线只做单管，以及在管汇中的设计尺寸，指导了关于数据分析功能的 tubing 管和牺牲阳极块部分的设计。

校外导师指导了哪些结构物与机电仪属于管汇内和管汇外,对陵水 17-2 的 MEG 管线进行了讲解。

在实践中，校内外导师带领参加项目相关课题报告会以增长专业知识，了解项目内容。



图 1.1 珠海基地现场学习管汇结构



图 1.2 在研究总院相关报告会学习

第 2 章 实践内容与成果

2.1 研究方法路线

在水下油气田的建设中，水下管汇是生产系统的关键组成部分^[1]。传统水下管汇设计手段采用二维图纸与三维模型相结合的方式^[2-3]，一旦管汇的设计重量有所更改，则原有的机电仪布局、管线排布、框架等需要循环改动，直至达到设计要求，步骤繁琐且效率低下。在设计阶段，水下管汇的重量计算通常需要在完成三维模型建立后，然后对所用设备、钢材进行逐步计算然后累加，没有办法进行预期计算，如果完成模型建立后的管汇重量不符合工程预期，则需重新开展空间优化和计算，这样往往会耗费大量时间、人力和物力。随着技术的发展，2018 年 McWilliams 等^[4]在海上技术会议提出水下管汇的模块化设计理念，通过统一接口、分工设计与组装的方式以节省设计时间，控制管汇重量与成本。

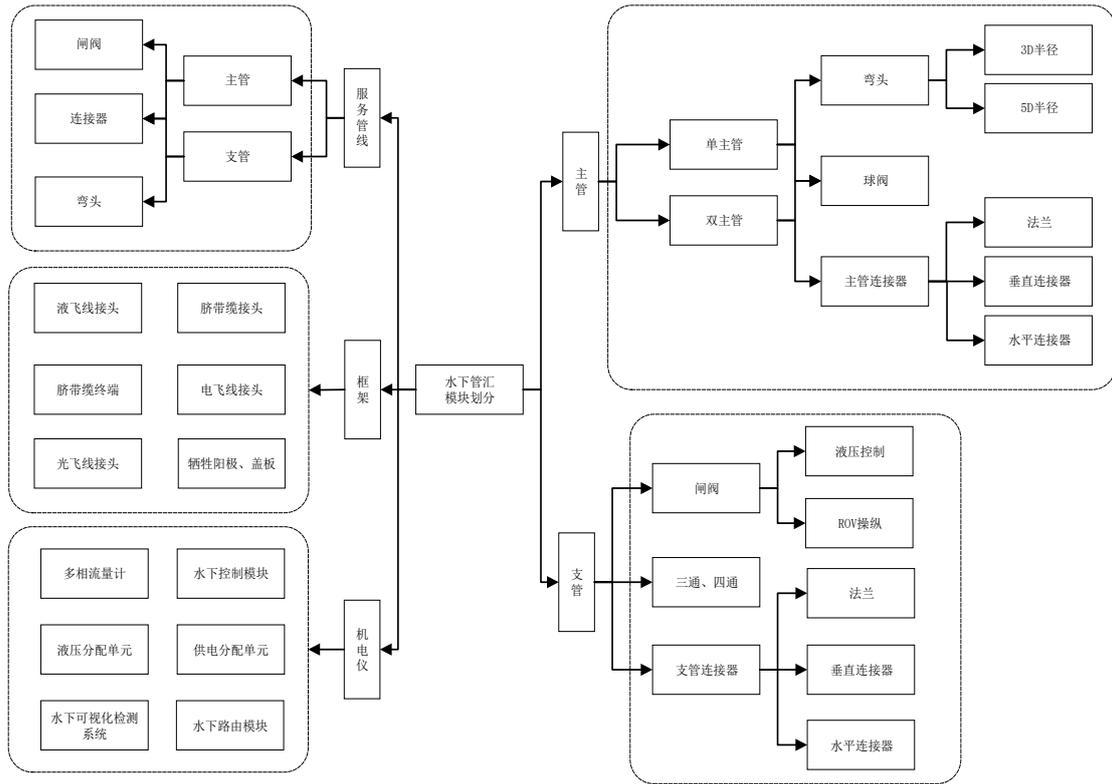
在总结国内外对水下管汇的设计经验^[5-8]的基础上，在国内首次引入模块化设计理念，提出了水下管汇重量理论计算公式，设计完成了水下管汇总体设计软件。该软件对水下管汇的各个模块建立了模型库、数据库及模块的布置、安装原则，基于虚拟仿真技术实现管汇搭建的三维模型化，并可依据信息库资源调用，实现了水下管汇设计过程的可视化以及管汇的实时重量计算，有助于在前期研究阶段实时优化水下管汇总体布局，减少常规二维到三维设计的迭代工期，可以实时发现水下管汇中电仪设备与管缆的干涉现象以及评估 ROV 操作空间或者潜水员操作空间的可操作性，提升设计效率。在前期研究阶段能够有效评估水下管汇尺寸和重量，有助于锁定匹配的安装资源能力。

2.2 实践内容

2.2.1 主要模块划分

传统水下管汇功能模块通常按照设备类别进行划分^[9-13]，包括主管、支管、阀门、连接器、水下控制系统、框架等，这种划分方式割裂了不同类别设备之间的设计关联，不利于水下管汇总体设计软件的开发。以管线为主体，将水下管汇按管线、机电仪、框架的设计流程进行模块划分，可以添加不同类别设备之间的设计关联逻辑（如球阀自动跟随主管的管径进行变化）。

根据先管线，再机电仪与框架（机电仪和框架的设计互相循环，一直到彼此合适）的设计步骤，水下管汇可划分为主管、支管、服务管线、机电仪、框架 5 大模块（图 1），包含与之设计相关的子模块。这 5 大模块既相互关联，又分别为独立的设计系统。5 大模块的子模块添加了提高设计效率的逻辑代码，因此虽然这些子模块之间有一定的关联性，但其设计逻辑并不相同。



水下管汇 5 大模块及其子模块的布局原则，是需要遵守的设计准则、是满足 ROV 或潜水员操作的空间条件、是确定各个模块互不影响的空间距离、是优化空间布置的边界限制，这些具体的布局条件和限制，组成了水下管汇模块化设计的前提条件。

对于双主管的水下管汇，两根主管通过两个弯头连接进行清管作业，主管间距可根据清管频率的高低情况以及主管间容纳设备所需的空间距离进行判断。

①当清管频率高时，主管的弯头半径为 5D（D 为水下管汇主管直径），则主管间距至少为 10D；

②当清管频率低时，主管的弯头半径为 3D，则主管间距至少为 6D；

③一般闸阀布置在两个主管内侧，需要两个闸阀来切换油气流入的主管道，为了保证有足够的闸阀安装空间，根据闸阀尺寸、三通尺寸以及闸阀焊接短节的长度要求，主管的间距至少为 2000mm。

综上所述，无论是水平布局还是垂直布局，清管回路都需要两个弯头，所以主汇管间距至少为两倍的弯头半径，分为 10D 和 6D，同时 10D 和 6D 需要和 2000mm 进行对比，取最大值。双主管的最小间距取值如图 2 所示。

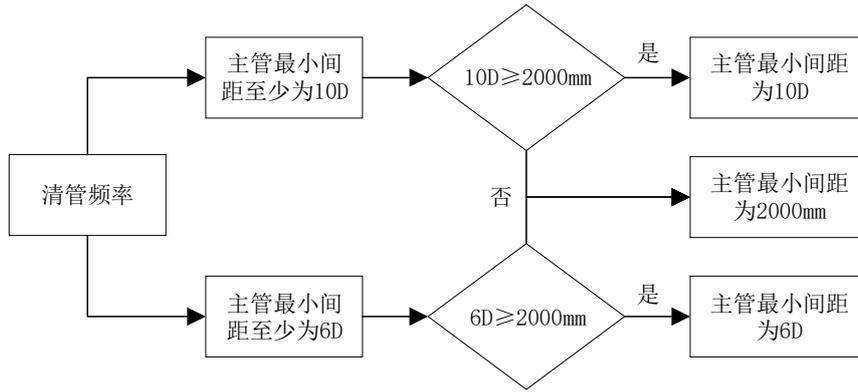


图 2.2 水下管汇主管间距取值判断流程

支管布置从形式上可以分为对称和交错 2 种布置方式（图 3），具体又可细分为单管对称、单管交错、单管非常规、双管水平交错、双管水平对称、双管垂直交错、双管垂直对称等类型。无论对于哪种布置形式，支管间均需预留一定的空间，便于完成闸阀、水下连接器等部件的安装拆除操作。为了适用于不同水深的油气田，管汇同侧支管之间的间距要求也不同。若为浅水管汇，交错布置的支管之间的间距最小为 0.75m，对称布置的支管之间的间距最小为 1.5m。若为深水管汇，交错布置的支管之间的间距最小为 1m，对称布置的支管之间的间距最小为 2m。

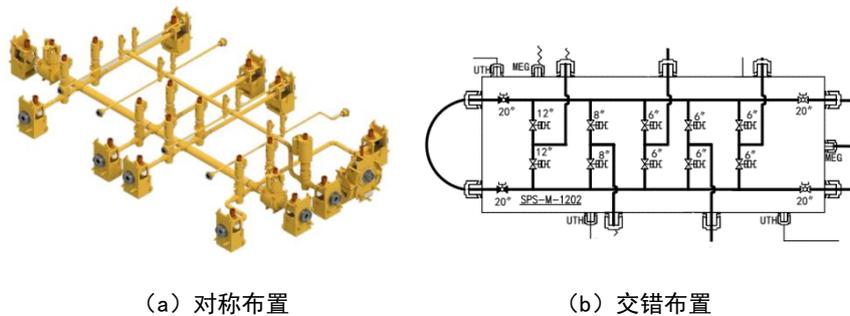


图 2.3 水下管汇支管布置形式

为了防止上游采油树的油嘴或阀门失效，水下管汇处的阀门通常需与采油树阀门的压力等级保持一致。由于焊接可能造成阀体扭曲，因此阀门焊接端需要连接长度至少 200 mm 的直管短节^[14]。

框架高度一般由机电仪设备、闸阀和球阀中高度最大的部件决定，通常要求可容纳机电仪设备且高于液控阀门。因此需要在阀门和机电仪模型上附加高度信息，以便根据各部件的空间位置与高度进行框架高度的调整。

2.2.2 系统设计

三维模型的建立采用 Solidworks 完成，不同模块或相同模块设计参数不同的设备均需建立不同模型，以闸阀为例，要根据设计压力、供应厂商、使用尺寸、操纵方式等参数建立大量的三维模型。这些模型组成了水下管汇总体设计软件的模型部分，这些模型携带着关联设计、智能生成、自动装配等算法，并且都有相应的标签以供重量计算时进行相应设备的数据调用。

数据库主要存储价格和重量信息。数据库结构按照设备类型、设备型号、工作压力、供货厂商等参数进行设计，然后写入每个设备的重量与价格，这些数据与模型库设备模型的标签相对应，根据管汇设计时选用的设备进行数据库信息调用，输入到管汇重量计算及成本统计运算中。

水下管汇总体设计软件设计流程为（图 4）：

- ①对主管进行设计，包括布局类型（水平或垂直）、尺寸、长度等参数，然后对与主管相连的水下连接器和球阀进行设计；
- ②对支管进行设计，包括布局类型、间距、长度等参数，然后对与支管相连的水下连接器和闸阀进行设计。若有 MEG 管线则进行 MEG 管线设计；
- ③选择框架模型，然后对框架进行设计调整的同时布置机电仪设备以提高空间利用率，直至通过重量计算和可视化漫游的验证。

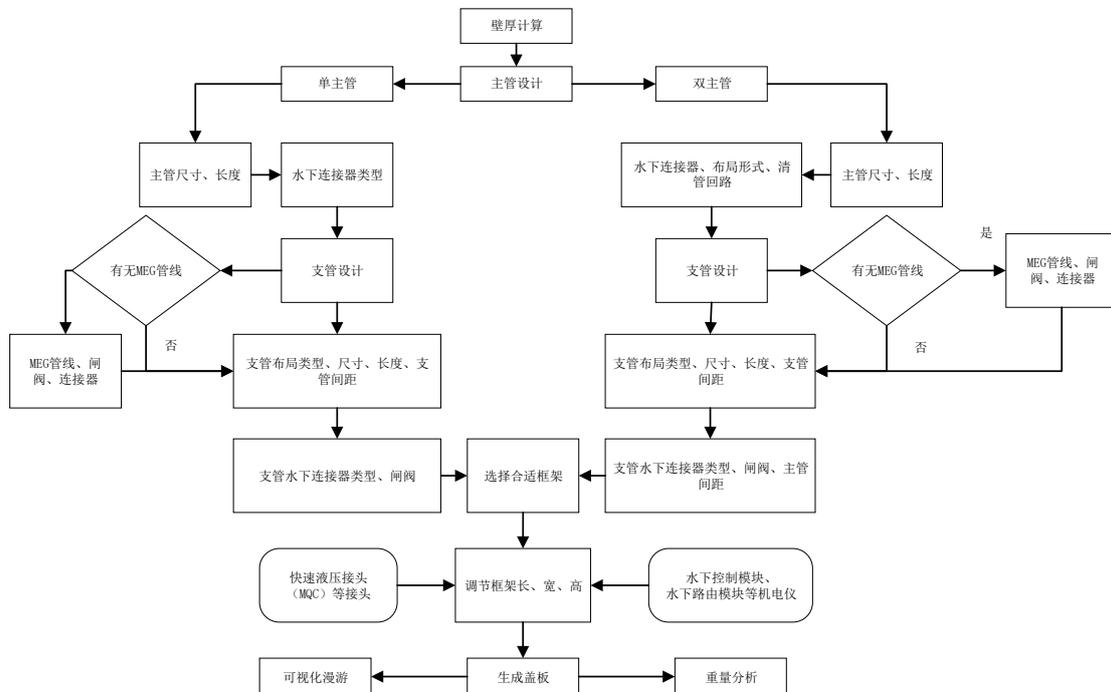


图 2.4 水下管汇整体设计流程

2.2.3 管汇设计及其参数计算

在设计管汇之前，需根据管道的直径、壁厚等参数对其壁厚进行计算。壁厚

计算准则包括 ASME 31.8^[15]和 DNVGL-ST-F101 (2017)^[16]。2 种准则都适用于管道壁厚计算，但 ASME 准则适合水下管汇承压管道，而 DNV 准则更侧重于海底管道，由于管汇主管为了便于通球清管，一般和海底管道等径，因此两种准则都进行计算。

将 ASME 与 DNV 准则集成于水下管汇总体设计软件，并将计算结果与实际管汇的管道壁厚比对（表 1），ASME 准则的壁厚计算与工程实际壁厚更加接近，所以采用 ASME 计算准则的计算值作为后续重量计算的输入条件。

表 1 两种计算准则计算结果对比

主管尺寸/mm	实际值/mm	ASME 计算值/mm	DNV 计算值/mm
203.2	18.3	18.2	13.0
308.4	23.8	23.4	15.6
508	34.9	34.4	16.0

管线的设计顺序为主管、支管、服务管线（例如 MEG 管线），这 3 类管线均融合了阀门模块与连接器模块等选项，因而虽然布置形式不同，但设计步骤相同。通过管线设计，可形成多种布局的管线，包括单管对称、单管交错、双管水平交错、双管水平对称、双管垂直交错、双管垂直对称等类型的布局。

在管线设计过程中，闸阀、球阀、连接器、变径三通等部件模型可自动生成装配，即模型库的每个管汇部件都有装配接口及标签，通过模型生成算法调用模型时，会根据布置原则将模型生成在装配触发范围内的位置，并根据装配接口和标签自动将部件装配至相应的部件。

管线设计完成后，可在软件中对支管间距、阀门位置进行调节；如果更换管线、阀门、连接器等的类型，则软件将自动删除原模型及其装配模型：①当管线长度、位置、布局类型发生变化时，与管线相连接的部件将通过设定的坐标实现装配位置的同步变化；②当管线尺寸发生变化时，阀门、连接器等部件将通过比例转换算法转换为可装配的尺寸。阀门、连接器、变径三通等部件的自动布局算法原理见图 5。

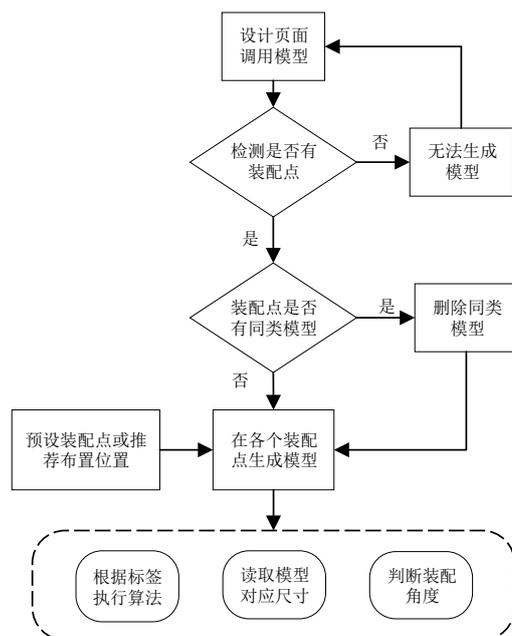


图 2.5 子模块设备自动生成装配算法原理

机电设备的安装位置自由度极高，因此需要根据管汇内部空间及管线的排布，在软件中进行自主拖拽装配。模型库的所有模型都具有碰撞体，以模拟各模块在实际工况中的碰撞：管线、阀门、框架等部件的碰撞体为锁死状态，以防止位移的发生；如果机电仪的模型与锁死状态模块的模型发生碰撞，则机电仪设备将自动调整至不存在与其他模块模型干涉的位置，而锁死状态的模块模型不会发生位置变化，这样就可以最大化利用管汇内的部空间，减小管汇体积。

针对不同的管道布局形式，软件提供了单主管框架 1、单主管框架 2、双主管框架 3、双主管框架 4 这四种预设的整体框架（图 6），其中框架 1 和 4 有预留机电仪安装位置，框架 2 和 3 没有预留。不同框架的长、宽、高均可在限制条件下进行调整，限制条件由已生成的阀门、支管、主管等模块的布置原则决定（如框架的高度不应小于阀门高度，宽度与支管的长度和水上连接器位置有关）。在框架的四周设有接头的安装区域，可以拖动接头进行安装。完成框架、机电仪、接头的设计后，即可确定小管线排布，由于小管线排布方式复杂多变，因此只参与重量与成本计算。

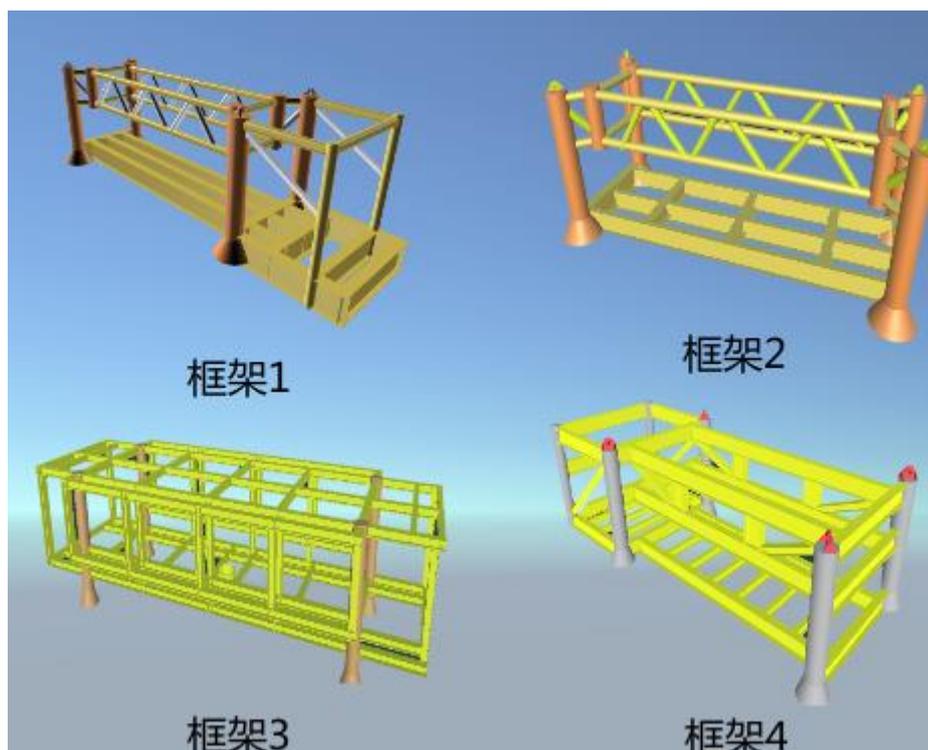


图 2.6 水下管汇主题框架的主要形式

2.2.4 管汇重量计算及其验证

完成管汇设计后，可在数据分析界面先对已设计管汇进行设计参数的提取，然后对各模块设备的重量、价格信息在数据库进行数据调用，完成重量与投成本计算后形成管汇的重量和价格分类统计图。牺牲阳极块与小管线的重量系数分别取水下管汇整体重量的 5%~10%^[17-18]和 3%。由于水下管汇不同设计方案的总重量差异较大，根据工程经验，软件重量分析得出的总重量与实际管汇的重量的偏差在 15%内且大于实际管汇重量是较为合理的。

管汇框设计架是在考虑井口布局、管线排布、机电仪放置位置、空间利用等多重因素作用下完成^[19-20]，因而尽管各管汇的材料、型钢尺寸、外形等均不相同，但在进行重量计算时，均可先将管汇框架近似为长方体，其表面采用 2m 间隔的型钢进行网格化搭建（图 7）。长方体的顶面和底面采用横梁进行加固，高度方向的 4 个棱边作为立柱，计算时对其重量进行相应的补偿，基于此提出一种管汇框架的理论计算公式。

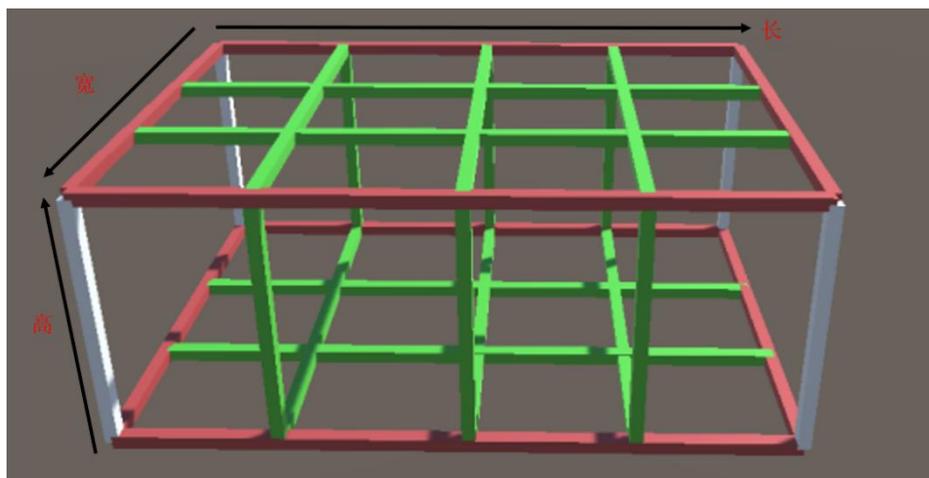


图 2.7 水下管汇框架理论模型

因此可以得到水下管汇的总重量计算公式为：

$$T = (1 + s + l)(\sum a_i + \sum b_i + G + \alpha\beta N) \quad (1)$$

其中

$$G = x(U\beta + V\alpha + (U - 4)\gamma + 4y\gamma) \quad (2)$$

$$V = 2\left(\left[\frac{\beta}{2} + 0.5\right] + 1\right) \quad (3)$$

$$U = 2\left(\left[\frac{\alpha}{2} + 0.5\right] + 1\right) \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 中： G 为理论框架重量， kg ； x 为型钢单位长度重量， kg/m ； y 立柱重量补偿系数，推荐取 2.5~4； U 是与框架的宽和高长度相等的型钢数量， V 是与框架长相等长度的型钢数量，采用中括号进行取整计算； α 、 β 、 γ 分别为框架的长、宽、高， m ； s 为牺牲阳极块重量系数，一般取值 0.05~0.1； l 为小管线重量系数，根据工程经验可取值为 0.03； a_i 为各个模块重量， kg ； b_i 为各个模块的附带结构的重量， kg ； N 为盖板单位面积的重量， kg/m^2 ，根据所用钢材进行取值。

以陵水 17-2、25-1 气田等部分水下管汇为例，采用水下管汇总体设计软件对其进行搭建并进行搭建管汇的整体重量估算，其计算与实际重量的对比见表 2。可以看出，通过公式 (1) 计算，得出的水下管汇总重量均大于且接近实际重量，并且误差在 15% 的范围内。因此，公式 (1) 满足工程使用要求。

表 2 总体重量公式计算重量与实际重量对比

专业实践报告

管汇尺寸/m	类型	主管尺寸/mm	支管尺寸/mm	MEG 管线	井口 数	机电仪	实际 重量/t	计算 重量/t	误差
14.580×8.4 ×6.326	双主管	308.4	203.2	无	3	1 个 SCM, 2 个 EDB	169.00	180.21	6.6%
14.580×8.4 ×6.326	双主管	308.4	203.2	无	4	1 个 SCM, 2 个 EDB	188.00	196.67	4.6%
18×10×6	单主管	254.0	152.4	有	7	1 个 SCM, 2 个 SRM	230.00	238.38	3.6%

2.3 实践成果

郭鸿飞,顾继俊等.水下管汇模块化设计技术与仿真系统研究 《计算机技术与发展》
安维峥,郭鸿飞等. 水下管汇的模块化设计方法及应用 《中国海上油气》

第 3 章 实践收获

在一年的专业实践中，我负责项目进度汇报、专家意见落实、项目问题分析归类、撰写研究报告、软著申请文件、审查 PPT 等内容，对我个人能力进行全面的锻炼培养，极大的提升了我的沟通交流能力、分析问题能力、编程能力。在专业知识方面，两位导师带领我参加了 FMC、Aker 等公司的工程项目汇报，对水下管汇的组成、作用、设计方法、设计流程等方面有了深入的了解，提高了对水下生产系统的认知，也对课题方向有了更明确的规划。在平时两位导师也与我进行了扩展性的学术交流，比如生产立管、水下管汇、卫星井的优化布置问题、国产钢制悬链线立管的研究进度和实际应用，使得我对自己的学术问题有了明确的方向，也认识到深水海洋油气生产装备国产化之路任重而道远，希望将来能够投身于国家海洋石油行业的发展中，为祖国贡献一份力量。

第4章 意见建议

希望学校能够将这种模式推广,使得学生能够开阔视野,了解工程实际难题,只有学术与工程实际相结合,才能够认清自己的学术之路,才能够更快成为一名合格的硕士研究生,更好的为国家贡献一份自己的力量。

参考文献

- [1] 李华, 余峙伟, 朱永梅, 等. 水下管汇的应用现状及发展趋势 [J]. 中国海洋平台, 2018, 33(04):1-4.
- LI Hua, YU Zhiwei, ZHU Yongmei, et al. Current status and development trend of subsea manifold applications [J]. China Offshore Platform, 2018, 33(04):1-4.
- [2] Li Wei, Ding Pu, Min Huang, et al. Applications of Digital Twins to Offshore Oil/Gas Exploitation: From Visualization to Evaluation, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 5, 2020.
- [3] Kwang-Phil Park, Seung-Ho Ham, Namkug Ku, et al. Development of offshore drilling platform simulation for virtual onboard experience, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 14, 2022.
- [4] MCWILLIAMS, R. S., PHIPPS, P. J., MYRES, D. J., et al. Compact modular manifold design for reduced cost and added value subsea production systems. [C] Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, April 2018. doi: <https://doi.org/10.4043/29007-MS>
- [5] 吴露, 安维峥, 马强, 等. 基于水下管汇工程样机的改造与集成设计分析 [J]. 石化技术, 2020, 27(05):48-49.
- WU Lu, AN Weizheng, MA Qiang, et al. Based on the subsea manifold engineering prototype modification and integrated design analysis [J]. Petrochemical Technology, 2020, 27(05):48-49.
- [6] 吴露, 安维峥, 马强. 水下油气生产管汇测试技术与实践 [J]. 石油和化工设备, 2020, 23(06):43-47.
- WU Lu, AN Weizheng, MA Qiang. Test technology and practice of subsea oil and gas production manifold. [J]. Petro & Chemical Equipment, 2020, 23(06):43-47.
- [7] 石磊, 姜瑛, 琚选择, 等. 深水水下管汇设计关键技术研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(02):138-142.
- SHI Lei, JIANG Ying, JU Xuanze, et al. Study on key techniques of deepwater subsea manifold design. [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology 2018, 5(02):138-142.
- [8] 丁进. 深海管汇方案设计与分析研究 [D]. 江苏科技大学, 2018.
- DING Jin, Design and analysis of deep-sea manifold scheme. [D]. Jiangsu university of science and technology, 2018.
- [9] 孟宪武, 姜瑛, 程寒生, 等. 水下油气开发项目中管汇管道布置研究 [J]. 石油化工设备, 2018, 47(05):19-24.
- MENG Xianwu, JIANG Ying, CHENG Hansheng, et al. Subsea manifold and piping layout research of oil and gas development project [J]. Petro-Chemical Equipment, 2018, 47(05):19-24.
- [10] 石磊, 胡晓明, 姜瑛, 等. 水下阀门国产化关键技术研究 [J]. 石油机械, 2018, 46(02):58-62.
- SHI Lei, HU Xiaoming, JIANG Ying, et al. Key Technologies research for developing domestic subsea valves [J]. China petroleum machinery, 2018, 46(02):58-62.
- [11] 孙雪梅. 深水水下管汇的结构设计概述 [J]. 石化技术, 2020, 27(04):299-300.
- SUN Xuemei, The structure design summary of deepwater subsea manifold [J]. Petrochemical Technology, 2020, 27(04):299-300.
- [12] 黄振东, 李雪梅, 沈人杰, 等. 崖城 13-4 气田水下管汇研究与应用 [J]. 中国海上油气, 2014, 26(01):105-108+118.
- HUANG Zhendong, LI Xuemei, SHEN Renjie, et al. The research and application of YC 13-4 gas

- field underwater manifold[J].China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(01):105-108+118.
- [13] 丘砾霏.深水气田水下管汇设计研究[J].石化技术, 2016, 23(08):140-142.
- QIU Lifei.Design o subsea manifold in deep water gas field[J].Petrochemical Technology, 2016, 23(08):140-142.
- [14] 张飞,周美珍,姜璞,等.水下管汇阀门的选型和材料要求[J].船海工程, 2014, 43(02):135-138.
- ZHANG Fei,ZHOU Meizhen,JIANG Ying,et al. Type Selection and material requirements of the subsea manifold valve[J].Ship & ocean engineering,2014,43(02):135-138.
- [15] American Society of Mechanical Engineers.ASME B31.8.Gas transmission and distribution piping system[S].2012.
- [16] DNVGL-ST-F101, Submarine pipeline systems (Edition October2017, Amended December 2017) [S].
- [17] 年继业,姜福洪,印坤,等.水下输油管汇牺牲阳极阴极保护系统的优化[J].腐蚀与防护, 2020, 41(04):49-53.
- NIAN Jiye,JIANG Fuhong,YIN Kun,et al. Optimization of sacrificial anode cathodic protection system for oil pipeline subsea manifold[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(04):49-53.
- [18] 范嘉堃,罗晓兰,段梦兰,等.深水水下生产系统阴极保护系统设计[J].腐蚀与防护, 2014, 35(03):277-281.
- FAN Jiakun,LUO Xiaolan,DUAN Menglan,et al. Design of cateodic protection for production system in deepwater[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(03):277-281.
- [19] 张宁.水下管汇结构可靠性分析及可靠性评估软件开发[D].哈尔滨工程大学,2020.
- ZHANG Ning.Analysis of structural reliability of subsea manifold and software development of reliability assessment[D].Harbin Engineering University,2020.
- [20] 刘科伟.水下管汇及基础结构设计与分析研究[D].宁波大学,2017.
- LIU Kewei. Structure design and analysis of subsea manifold and foundation[D].Ningbo University,2017.

附录 A 附录内容名称