

国家973项目
国家科技重大专项
国家自然科学基金及广西科技重大专项成果

海洋资源开发系列丛书



深海管道试验的 数值模拟理论及应用

——ABAQUS参数化设计中的Python脚本

余建星 王华昆 余杨 韩宇 编著

天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

海洋资源开发系列丛书

国家 973 项目、国家科技重大专项、国家自然科学基金及广西科技重大专项成果

深海管道试验的数值模拟理论及应用 ——ABAQUS 参数化设计中的 Python 脚本

Numerical Simulation Theory and Application for Deep-sea Pipeline Test

——Python Script for ABAQUS Parameterized Design

余建星 王华昆 余杨 韩宇 编著

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统介绍了深海管道局部失稳破坏涉及的基本理论和数值分析方法。通过大量实例重点介绍了基于 Python 语言的 ABAQUS 参数化建模在深海管道工程中的应用。通过建模流程分析和参数化建模命令流对比以及建模技巧总结,为 ABAQUS 参数化建模提供了详细的工程应用实例。

全书共 4 章,第 1 章绪论介绍天津大学深海结构实验室的基本信息,第 2 章介绍在 ABAQUS 参数化建模过程中常用的 Python 基本语法和建模方法,第 3 章介绍深海管道的局部屈曲问题及相应的参数化建模语句,第 4 章介绍与深海管道的屈曲传播和止屈防护相关的建模技巧和 Python 命令流。

本书在写作过程中注重层次递进,以深海管道结构的屈曲破坏、屈曲传播问题为例,系统介绍 ABAQUS 有限元分析技巧及参数化建模技巧。

图书在版编目(CIP)数据

深海管道试验的数值模拟理论及应用: ABAQUS 参数化设计中的 Python 脚本 / 余建星等编著. — 天津: 天津大学出版社, 2019. 1

(海洋资源开发系列丛书)

ISBN 978-7-5618-6350-3

I. ①深… II. ①余… III. ①海上油气田-水下管道-数值模拟-试验 IV. ①TE973.9-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 020450 号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 北京虎彩文化传播有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm × 260mm

印 张 11.5

字 数 287 千

版 次 2019 年 1 月第 1 版

印 次 2019 年 1 月第 1 次

定 价 35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

本书编委会

主任 余建星 王华昆 余 杨 韩 宇

委员 段晶辉 樊志远 孙震洲 付一钦

韩梦雪 陈海成 王彩妹

前 言

随着有限元的发展和完善,越来越多的工程问题都能够直接借助有限元进行前期设计。基于非线性力学理论和固体力学发展的 ABAQUS 是数值仿真的重要工具。对于涉及复杂非线性的问题,相比 ANSYS, ABAQUS 具有更大的优势;此外 ABAQUS 有丰富的子程序接口,以满足用户不同的需求。因此,在工程和科学研究领域,ABAQUS 得到了广泛的应用。建模是数值模拟的第一个步骤,对于复杂的模型,建模往往耗费研究人员大量的时间和精力。而参数化建模则是提高建模效率的有效手段,可以使研究人员把更多的时间和精力投入到理论研究和数据分析中。此外,脚本程序还可实现 GUI 无法实现的涉及随机性的问题(如随机点蚀、混凝土随机骨料、随机晶体模型等)。

天津大学深水结构实验室(Deep Water Structure Laboratory, DWSL)由全尺寸深海结构及设备测试平台、深海管线物理模拟仿真平台及海洋结构腐蚀与防护实验室共同组成。在深海管道结构稳定性失效研究上具有十多年的工程经验,近十年来完成了“十一五”“十二五”“十三五”(进行中)和“973”等国家重大基础研究课题。基于全尺寸和缩尺比试验设备,积累了大量的试验数据,为深海油气输送结构(管道)的安全运营提供了可靠的试验依据。依托天津大学深水结构实验室,余建星科研团队在管道结构局部失稳、屈曲传播机理及其破坏规律上做了大量试验研究和数值模拟分析。

天津大学深水结构实验室为天津钢管公司提供了大量可靠的试验数据,证明了天津钢管公司国产无缝钢管质量的可靠性,使国产无缝钢管大量取代发达国家生产的钢管,避免了我国钢管产品被西方国家“卡脖子”的现象,大大降低了我国深海油气开发成本。目前,天津钢管公司已取得中国海洋石油集团有限公司就部分油气田开采项目深海管道订单,进一步加快了我国深海油气开发全面国产化步伐。

英国爱丁堡大学的 Spyros 教授目前也与天津大学建立了合作, Spyros 教授多次到天津大学深水结构实验室就深海油气开发做专题讲座,同时还派遣自己的博士研究生前来做试验和交流学习。

本书主要介绍 ABAQUS 参数化建模在深海管道工程中的应用,包括基本的 Python 语法,管道局部屈曲涉及的基本理论,求解局部屈曲和屈曲传播这种大变形、高度非线性问题的基本方法、局部屈曲机理、屈曲传播与止屈防护。全书程序基于 ABAQUS 软件 6.14 版本开发,其内容来自 DWSL 教师和研究生多年的科研工作,汇集了近 5 年部分研究成果和工程应用实例。

全书由余建星教授执笔,王华昆博士参与了全书第1~4章的研究工作和编写,并编写了全部的脚本程序和数值分析内容;余杨副教授参与了第1、2章的编写,韩宇参与了第3.1、3.2节及第4.2节动态屈曲传播部分的编写。博士生段晶辉、樊志远、韩梦雪、陈海成、付一钦、王彩妹等参与了本书的编写和校对工作,在此对各位参与人员表示诚挚的感谢。

本书得到国家“973”项目(国家基础研究重点发展计划)、“十三五”国家科技重大专项(2016ZX05028005—004)、国家自然科学基金青年基金(51609169)和广西科技重大专项(桂科AA17292007)资助,在此表示诚挚的感谢。

本书可作为船舶与海洋工程专业研究生、高年级本科生的教材,也可作为从事海洋工程、船舶工程以及土木结构工程等研究人员的参考书。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎广大读者对书中不详尽的内容批评指正。有问题请发邮件至邮箱 tjuwhk@tju.edu.cn,作者会及时为您解答。

余建星等

2018年5月

于天津大学北洋园校区

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 海底管道的破坏形式	(1)
1.2 天津大学深海结构实验室简介	(2)
1.3 国内外压力舱技术指标对比	(5)
第2章 Python 基础	(7)
2.1 所需要的软件	(7)
2.2 Python 参数化建模的优点	(7)
2.3 ABAQUS 的运行机理	(9)
2.4 Python 语言简介	(9)
2.5 Python 基本语法	(10)
2.5.1 注释	(10)
2.5.2 空行	(10)
2.5.3 缩进	(10)
2.5.4 代码的分隔符	(10)
2.6 Python 数据结构	(11)
2.6.1 列表(list)	(11)
2.6.2 元组(tuple)	(13)
2.6.3 字典(dictionary)	(13)
2.7 运算符	(14)
2.8 常用函数	(15)
2.8.1 类型转换函数	(15)
2.8.2 常用数学函数	(15)
2.8.3 随机数生成函数	(16)
2.9 判断	(18)
2.10 循环	(19)
2.10.1 while	(19)
2.10.2 for...in...	(19)
2.10.3 break	(19)
2.10.4 continue	(19)
2.11 函数定义	(19)
2.12 ABAQUS 中的 Python 命令简介	(20)
2.12.1 常用几何绘制命令	(20)
2.12.2 常用几何查找命令	(25)

2.12.3	常用部件构建命令	(28)
2.12.4	常用装配命令	(34)
第3章	局部屈曲	(39)
3.1	非线性有限元基本理论	(39)
3.1.1	材料非线性	(39)
3.1.2	几何非线性	(40)
3.1.3	接触非线性	(42)
3.2	求解方法	(44)
3.2.1	牛顿迭代法	(44)
3.2.2	弧长法	(45)
3.2.3	静水流体加载法	(46)
3.3	不同缺陷对管道局部屈曲压力的影响	(49)
3.3.1	局部椭圆度模型	(52)
3.3.2	腐蚀缺陷	(77)
3.3.3	复合型缺陷	(100)
3.3.4	落物撞击引起的凹陷	(105)
第4章	屈曲传播与止屈防护	(117)
4.1	准静态传播	(118)
4.1.1	整体式止屈器	(118)
4.1.2	扣入式止屈器	(133)
4.1.3	缠绕式止屈器	(143)
4.2	动态传播	(162)
4.3	数据传递技术	(164)
参考文献	(173)

第 1 章 绪 论

由于管道运输具有效率高、可持续等特点,随着深海油气的开发,海底管道在油气开采中得到越来越多的应用。深海管道在铺设、服役过程中由于环境复杂,具有各种各样的破坏模式,包括铺设过程中由于弯矩过大引起的管件截面局部椭圆化、内部多相流引起的冲刷腐蚀损伤、外物撞击引起的凹陷、地震断层引起的截面大变形甚至断裂、高温原油引起的热膨胀导致的整体失稳等。在深海中,巨大的水压是结构的主要载荷之一,一旦管件截面发生大变形,巨大的外压会使缺陷进一步扩大,最终导致整个管线系统的破坏。按照国际惯例和相关规范,海洋结构物在投产之前都要进行试验。本书主要介绍与深海管道局部屈曲相关的问题,包括试验与数值模拟方法,为工程实际提供参考。

1.1 海底管道的破坏形式

1. 整体式屈曲(欧拉型屈曲)

深海低温环境会导致蜡质凝固,因此需要在高温条件下保证原油流动,而高温会导致管道沿轴向出现极大的压应力。对于暴露在海床上的管道往往通过形成侧向屈曲来释放轴向压应力,而对于埋地管道往往通过形成上浮屈曲来释放轴向应力。这种横向变形是不受控制的,可能会破坏管道的完整性,这就是管道的欧拉型失稳模式,如图 1-1 所示。严重的屈曲变形可能导致管件截面发生椭圆化。由于外部水压的影响,一旦局部椭圆度过大,管道就可能由整体失稳引发沿环向的局部失稳破坏。

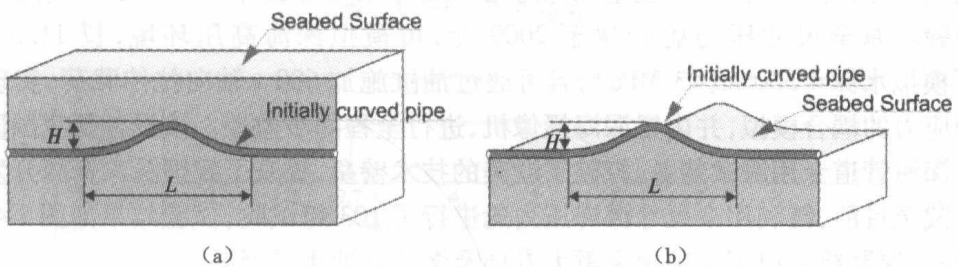


图 1-1 含初始缺陷管道示意图

2. 局部屈曲

局部屈曲是深海管道的另一种破坏模式。该破坏模式引起的经济损失往往比整体式屈曲大得多。一旦发生局部屈曲,巨大的外压就可能引发管道发生屈曲传播,使得大面积管线发生破坏,造成巨大的经济损失。典型的局部屈曲破坏构型和屈曲传播构型如图 1-2 和图 1-3 所示。

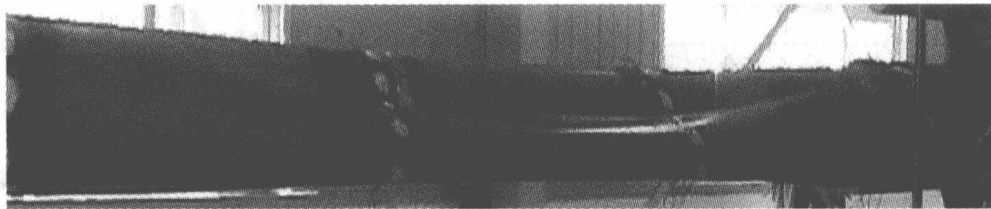


图 1-2 局部屈曲破坏构型

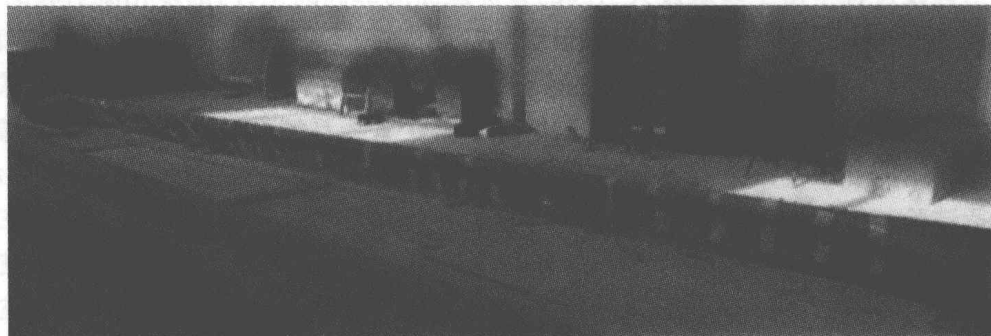


图 1-3 屈曲传播构型

1.2 天津大学深海结构实验室简介

天津大学深海结构实验室(Deep Water Structure Laboratory, DWSL)由全尺寸深海结构及设备测试平台、深海管线物理模拟仿真平台、海洋结构腐蚀与防护实验室共同组成。其中,全尺寸深海结构及设备测试平台由两个全尺寸深海压力舱和两个缩尺比压力舱组成。

依托全尺寸深海压力舱,课题组在深海结构局部稳定性破坏上积累了大量宝贵的试验数据和经验。原全尺寸压力舱始建于2009年,可模拟深海高压环境,长11.5 m,直径1.6 m,可模拟水深4 300 m(43 MPa),且可通过油缸施加600 t轴向拉伸载荷,实现外压和轴向拉伸应力的耦合模拟,并内置深海摄像机,进行全程同步监控。该设备是我国国内第一个全尺寸深海管道专用测试装备,打破了欧美的技术壁垒,提升了我国深水资源开发的核心竞争力。截至目前,已利用全尺寸深海压力舱进行了103组试验(试验结果如图1-4所示),依托该设备,课题组完成了2项国家重大专项及多项其他重要课题。

对于深海管道压溃试验,对舱体设备的长度是有要求的。对于采用图1-5所示管端固支边界的试验,图1-6给出了 $\phi 325 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 管件在试验过程中其上的应变分布情况。由于端部约束会抑制管件两端的变形,左侧从0到2.7 m无实际意义(存在边界效应),对称的右侧2.7 m也没有意义,因此长度大于5.4 m的试验装置才能进行有效的试验。这就对舱体总体长度提出了较高的要求。过短的舱长不能避免边界效应,无法对全尺寸管件进行有效的局部屈曲试验。对于直径更大的管件(如406 mm等),有效试验段的长度更小。因此,深海压力舱总长达11.5 m是十分必要的。

2013年,课题组在原全尺寸深海压力舱基础上,对设备进行了升级改造。新全尺寸深海压力舱长11.5 m,直径1.6 m,内径1.25 m,理论上可对外径为630 mm的管件进行试验,

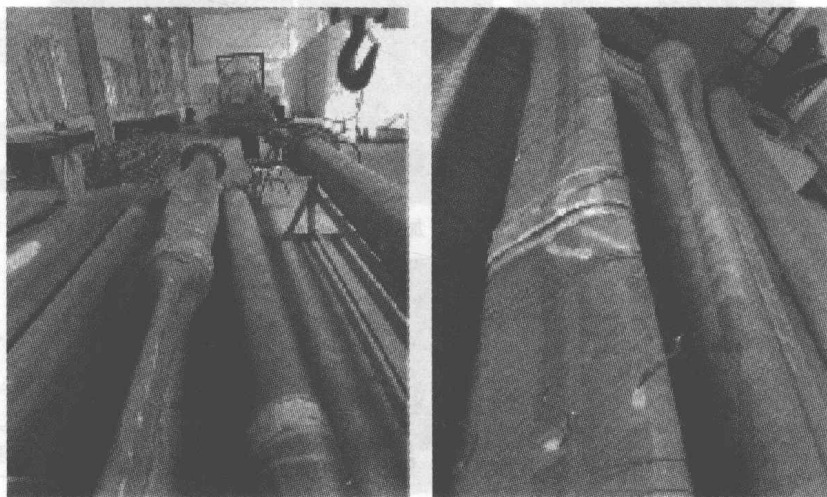


图 1-4 试验结果示意图

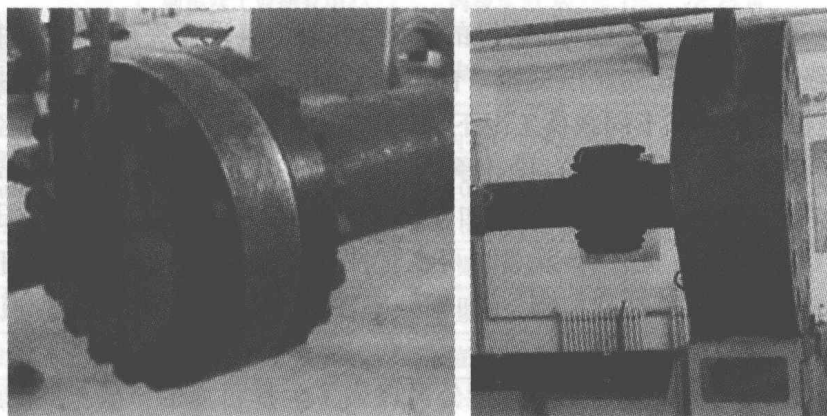


图 1-5 管端固支边界

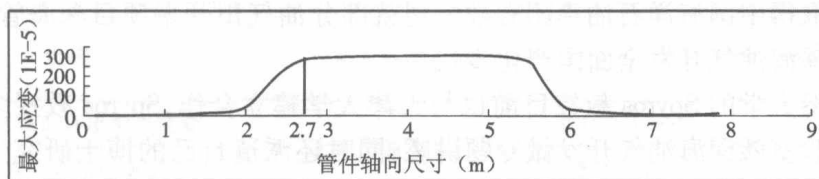


图 1-6 试验过程中管件上的应变分布

试验装置承压能力 8 300 m 水深 (83 MPa), 主舱体侧面预留了三个功能接口, 可实现弯矩加载和振动载荷的模拟, 最大侧向载荷作用力 50 kN, 最大振幅 ± 5 cm, 最大加载频率 40 Hz。该装置集深海高压、振动、弯矩加载功能于一身, 可同时实现不同载荷组合同时加载, 为进一步探究深海管道在极端海况下的局部破坏机理及深海管道防护设计评估提供了依据。

图 1-7 给出了深海压力舱主要的辅助设备, 包括气泵、加压泵、操控系统、排气阀、排水阀、安全阀、舱体压力表和高压阀等。

原缩尺比超高压试验装置始建于 2013 年, 其内部总长 1.3 m, 直径 0.12 m, 可模拟 14 000 m 水深, 舱盖自动启闭。利用该装置, 课题组已进行了 34 组试验。



图 1-7 辅助设备

2015年,在原缩尺比超高压试验装置的基础上,课题组设计完成了新的缩尺比超高压试验平台。升级后的缩尺比超高压试验平台实现了静水压力、轴向力、扭矩和振动载荷的联合加载,可满足深水管道的不同载荷工况下的近似模拟。压力舱设备主体内径 240 mm,总长 4.453 m (有效试验长度 2.3 m),设计承压 140 MPa,适用于外径 8~76 mm,长 2.3 m 管道的局部屈曲试验。该设备可对管件施加轴向拉压载荷、扭转载荷,轴向拉压加载功能为 90 t,扭矩为 2 000 N·m。此外,该设备也可在管件中部的水平方向和竖直方向对管件施加规则或随机振动载荷(位移加载控制),加载频率在 0.1~40 Hz,可模拟管道及梁在高压、轴向加载条件下的振动特性。

天津大学深水结构实验室为天津钢管公司提供了大量可靠的试验数据,证明了天津钢管公司国产无缝钢管质量的可靠性,使国产无缝钢管大量取代发达国家生产的钢管,避免了我国钢管产品被西方国家“卡脖子”的现象,大大降低了我国深海油气开发成本。目前,天津钢管公司已取得中国海洋石油集团有限公司就部分油气田开采项目深海管道订单,进一步加快了我国深海油气开发全面国产化步伐。

英国爱丁堡大学的 Spyros 教授目前也与天津大学建立合作, Spyros 教授多次到天津大学深水结构实验室就深海油气开发做专题讲座,同时还派遣自己的博士研究生前来做试验和交流学习。(图 1-8)。



图 1-8 余建星教授指导 Kostis 博士做试验

1.3 国内外压力舱技术指标对比

基于天津大学现役深海压力舱试验装置功能,将压力舱分为深水油气输送结构试验装置及其他用途深水结构试验装置分别汇总,以便与天津大学深海压力舱进行对比分析,技术细节见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 国内外深水油气输送结构试验装置对比

编号	名称	研发单位	尺寸		最大承压能力
			直径	长度	
1	压力筒	浙江大学	内径 0.2 m	1.75 m	50 MPa
	RTP 管道承压试验设备		直径 0.350 m	4 m	16 MPa
2	深水试验舱	加拿大 C-FER 技术公司	内径 1.22 m	有效长度 10.7 m	55 MPa
3	阿根廷工业研究中心 (CINI) 压力舱	阿根廷工业研究中心	内径 0.51 m	2.25 m	30 MPa
4	美国德州奥斯汀大学压力舱	美国德州奥斯汀大学	内径 0.04 m	1.78 m	62 MPa
5	澳大利亚昆士兰大学高压舱	澳大利亚昆士兰大学	内径 0.173 m	4 m	20 MPa
6	Simulated Service Vessel (SSV) 压力舱	加拿大 ShawCor 公司	内径 0.095 ~ 0.66 m 外径 0.145 ~ 0.81 m	6 m	30 MPa
7	原全尺寸深海压力舱	天津大学	直径 1.6 m	11.5 m	43 MPa
8	新全尺寸深海压力舱	天津大学	直径 1.6 m	11.5 m	83 MPa
9	原缩尺比深海压力舱	天津大学	直径 0.12 m	1.74 m	140 MPa
10	新缩尺比深海压力舱	天津大学	内径 0.24 m	试样有效长度 2.3 m	140 MPa

表 1-2 国内外其他用途深水结构试验装置对比

编号	名称	研发单位	尺寸		最大承压能力
			直径	长度	
1	2 000 m 深海环境模拟装置	上海交通大学	直径 2.1 m	不详	20 MPa
	4 000 m 深水高压环境试验筒		直径 1 m	不详	40 MPa
2	深水石油钻采工程模拟试验装置	中国石油大学(北京)	外径 1.38 m 内径 1.12 m	3.02 m	50 MPa
3	深海腐蚀模拟实验压力釜	中国海洋大学	不详	2 m	15 MPa
4	1 500 m 深水压力舱	中石油海洋工程实验室	内径 1.5 m	3 m (有效长度)	15 MPa
	3 000 m 深水压力舱		内径 1 m	2 m (有效长度)	30 MPa
5	水下防喷器组控制系统 42 MPa 小高压舱	河北华北石油荣盛 机械制造有限公司	内径 0.4 m	内腔 1 m (有效长度)	42 MPa
	水下防喷器组控制系统 30 MPa 大高压舱		内径 1.5 m	内腔 2.8 m (有效长度)	30 MPa
6	深水模拟高压舱	日本海洋科技中心(JAMSTEC)	直径 1.4 m	3 m	147 MPa

续表

编号	名称	研发单位	尺寸		最大承压能力
			直径	长度	
7	深水模拟高压舱	挪威 Oslo FMC 采油树制造工厂	直径 0.8 m	0.8 m	34.5 MPa
8	高压舱	巴西 CENPS 中心	直径 2 m	6 m	30 MPa
9	深海压力模拟测试舱	美国西南研究院 (SwRI)	直径 1.22 m	4.52 m	22.75 MPa
			直径 2.29 m	5.84 m	27.58 MPa
			直径 1.27 m	7.32 m	41.37 MPa
			直径 0.15 m	1.04 m	68.95 MPa
			直径 0.76 m	2.90 m	68.95 MPa
			直径 0.23 m	1.17 m	68.95 MPa
			直径 0.20 m	2.29 m	75.85 MPa
			直径 0.25 m	0.86 m	137.9 MPa
			直径 0.30 m	3.05 m	137.9 MPa
			直径 0.38 m	3.05 m	137.9 MPa
直径 0.41 m	3.05 m	206.85 MPa			
10	深海模拟试验压力装置	中国船舶工业集团公司 九江船用机械厂	不详	不详	不详

对比现有压力舱设备可知:从试验装置的承压能力角度看,天津大学现役全尺寸、缩尺比深海压力舱承压能力最高,功能更加齐全。综合来看,天津大学现役全尺寸深海压力舱的综合技术指标目前居于世界领先水平。

第 2 章 Python 基础



2.1 所需要的软件

下面推荐几种参数化建模常用的软件。

(1) 文本编辑器(如 Sublime Text, 记事本, Notepad ++, ABAQUS PDE), 推荐使用 Sublime Text。

(2) Python Reader: ABAQUS 会记录每一个 GUI (Graphical User Interface, 图形用户界面) 操作对应的内核函数 Python 命令, 并存储在工作目录的 abaqus. rpy 文件中, 这就提供了一个快速学习 ABAQUS 的 Python 脚本的方式: 一边操作 CAE, 一边查看每步操作所对应的命令。Python Reader 可以实时读取 rpy 文件, 对于参数化建模学习很有利。

值得一提的是, Sublime Text 跨平台支持 Win/Mac/Linux, 同时具备写字板和 Python Reader 的优点, 具有写字板保留 rpy 文件格式的优点, 还可实时读取 rpy 文件, 建议采用。

ABAQUS PDE 是 ABAQUS 自带的文本编辑器, 具有高亮和自动缩进功能, 且可直接运行和调用程序, 不用担心类库无法引用的问题。

2.2 Python 参数化建模的优点

ABAQUS 的内核语言为 Python 语言, 因此用户在 GUI 上的任何操作都会通过编译器对 GUI 操作命令进行编译, 生成 ABAQUS 内核所能解读的语言, 进而执行相应的命令, 最终生成 inp 文件提交求解器进行计算。也就是说, 任何能在 GUI 上完成的操作都有相应的 Python 命令可替代, 用户可以直接在命令行接口 (Command Line Interface, CLI) 上输入对应的语句进行建模, 也可以通过 File > Run Script 完成相应的建模过程。Python 参数化建模具有高效、可批量完成重复性极强的建模过程的优点, 让研究人员从枯燥无味的重复性工作中解放出来, 将更多的精力放在数据分析和处理上。下面一个简单的案例, 就可突出采用 Python 脚本建模的优点, 而这仅仅是 Python 参数化建模的冰山一角。

【用 Python 脚本定义材料】

在模拟分析时, 用户可能会发现, 每当自己开始一项新的模拟时都要频繁地重新定义同一种材料属性, 这不仅浪费时间而且容易出错, 而采用脚本 (script) 就能很好地解决这个问题。假定用户经常使用表 2-1 所示三种金属。

表 2-1 三种常用金属材料参数

材料	钛合金	AISI 1005 钢	黄金
密度/(kg/m ³)	4 500	7 872	19 320
杨氏模量(E)/GPa	116	200	77.2
泊松比(ν)	0.34	0.29	0.42

如使用写字板,写入以下语句,再将文本保存成“Material - 1. py”,以后凡是使用到这些材料只需通过 File > Run Script > 文件路径 \Material - 1. py,就能将材料属性直接导入模型,避免重复进行输入材料属性的操作。当然,用户也可以在窗口下方的 CLI 直接输入“execfile('Material - 1. py)”,但要保证“Material-1. py”文件置于 ABAQUS 安装的工作目录下,否则应指明文件所在路径,如“execfile('H:/文件路径/Material - 1. py)”。实际上,ABAQUS 的 CLI 完全可以当作一个编译器来使用,在 CLI 和在 MATLAB、Fortran 等界面一样可以定义变量和运算,且对变量的定义相对更为宽松,而无须指明其类型。

以下语句通过定义三个函数 add_Ti_Materials()、add_Steel_Materials()、add_Gold_Materials() 来定义脚本文件“Material - 1. py”,该脚本文件在后续定义材料属性时只需通过 File > Run Script > 文件路径 \Material - 1. py 即可快速导入材料参数。

```

===== Material - 1. py =====
from abaqus import *                                #导入 ABAQUS 模块
from abaqusConstants import *                       #导入 ABAQUS 符号常数模块
def add_Ti_Materials():                             #定义函数
    import material
    name = getInput('Enter model name', mdb.models.keys()[-1])
    if not name in mdb.models.keys():
        raise ValueError, 'mdb.models[%s] not found'% repr(name)
    m = mdb.models[name].Material(name = 'Ti')
    m.Elastic(table = ((116000000000, 0.34),))
    m.Density(table = ((4500,)),)
add_Ti_Materials()

def add_Steel_Materials():
    import material
    name = getInput('Enter model name', mdb.models.keys()[-1])
    if not name in mdb.models.keys():
        raise ValueError, 'mdb.models[%s] not found'% repr(name)
    m = mdb.models[name].Material(name = 'Steel')
    m.Elastic(table = ((200000000000, 0.29),))
    m.Density(table = ((7872,)),)
add_Steel_Materials()

```

```

def add _ Gold _ Materials():
    import material
    name = getInput('Enter model name', mdb.models.keys()[-1])
    if not name in mdb.models.keys():
        raise ValueError, 'mdb.models[%s] not found'% repr(name)
    m = mdb.models[name].Material(name='Gold')
    m.Elastic(table=((77200000000, 0.42),))
    m.Density(table=((19320,)),)
add _ Gold _ Materials()
=====

```

注:程序中所有“#”号后面的语句均为注释语句。

2.3 ABAQUS 的运行机理

ABAQUS 的运行机理可用图 2-1 所示流程图来表示。采用 ABAQUS 进行有限元分析最终提交的文件为 inp 文件,在没有开发出 ABAQUS CAE 之前,用户需要直接编写 inp 才能用 ABAQUS 求解器进行分析求解。采用 inp 文件建模的优缺点都很明显,本书介绍的 ABAQUS 脚本参数化建模所用的脚本(script)其实是图 2-1 中的 Python 命令流,相比直接编写节点、单元等信息的 inp 建模方法,采用脚本参数化建模有其独特的优势,尤其适用于对几何外形变化进行参数敏感性分析或几何尺寸优化问题;对于改变外载,采用脚本参数化建模同样能实现,且能方便地控制网格划分等操作。

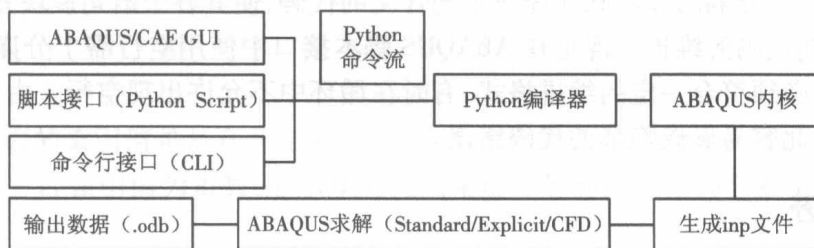


图 2-1 ABAQUS 的运行机理

2.4 Python 语言简介

Python 是一种面向对象、直译式计算机程序设计语言,由 Guido van Rossum 于 1989 年底发明,第一个公开发行人版发行于 1991 年。Python 语言语法简捷而清晰,具有丰富和强大的类库,常被称为胶水语言,能够很轻松地用其他语言制作的各种模块(尤其是 C/C++) 联结在一起。

Python 的开发人员有意地设计限制性很强的语法,使得不良的编程习惯都无法通过编译,其中很重要的一项就是 Python 的缩进规则。其与其他大多数语言(如 C 语言)的区别就是一个模块的界限完全是由每行的首字符在这一行的位置来决定的。通过强制程序员们