

基于 Python 的特殊螺纹接头参数化有限元分析

詹先觉, 左宏志

(宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 介绍了一种基于 Python 的特殊螺纹接头参数化有限元分析方法。采用 Python 语言编写了 Abaqus 参数化有限元分析程序, 可实现程序调用电子表格中接头尺寸及其偏差、材料属性、载荷等输入参数后, 自动完成内外螺纹接头建模、网格划分、载荷施加、作业提交、后处理分析等全过程。该程序避免了大量人工操作, 仅需维护电子表格即可自动完成全过程, 不仅节省了大量人工建模时间, 提高了效率, 而且可实现特殊螺纹接头有限元分析的标准化。

关键词: 油套管; 特殊螺纹接头; Python; Abaqus; 有限元分析

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2022.1.70.74

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Python-based Parametric FEA of Premium Connection

ZHAN Xianjue, ZUO Hongzhi

(Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Described here in the essay is a Python-based parametric method for the premium connection. The Python language is used to prepare the Abaqus parametric FEA program with which after the premium connection input parameters such as the dimension and deviations, the material properties, and the load values are called from the Excel, the whole processes of modeling of internal and external connection, meshing, loading, job submission, and post-processing analysis, etc can be automatically completed. Thanks to the said program, a lot of manual operations can be saved, and the whole process can be completed without doing anything except maintaining the Excel file. As a result compared with manual modeling operation, much more time is saved, the efficiency is greatly enhanced, and moreover the FEA of the premium connection is expected to be standardized.

Key words: tubing and casing; premium connection; Python; Abaqus; FEA

油套管特殊螺纹接头在石油、天然气开采过程中受到恶劣的外界环境载荷的长期作用, 主要有拉伸、压缩、内压、外压等载荷^[1-6]。特殊螺纹接头是由数控车床加工而成的, 每个接头的尺寸不可避免地存在偏差, 因此在研发时需要按照 ISO 13679:2019《石油天然气工业 套管及油管螺纹连接试验程序》及 ISO/PAS 12835:2013《热采井用套管连接的质量评定》加工多组极限偏差组合的试样进行全尺寸复合载荷试验。该试验的费用高、周期长, 若在试验过程中发生螺纹黏结或气体泄漏等异常情况,

需要修改设计并重新试验。为了提高试验的成功率, 在设计时除了采取以往经验、解析方法外^[7-8], 有限元方法是最有效的工具。现介绍一种基于 Python 的特殊螺纹接头参数化有限元分析方法。

1 问题背景

有限元方法在常规的机械结构受力分析中有成熟的理论模型, 可模拟得到无法测量位置的应力、应变, 找到危险点, 从而在设计初始阶段优化结构, 避免对实物试验的过分依赖, 降低研发成本, 缩短研发周期。但是, 特殊螺纹接头的有限元案例与常规案例相比, 具有以下不同特点: ①内、外螺纹间有很长的相互接触; ②螺纹升角很小, 可将三

詹先觉(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事特殊螺纹接头产品的研发。

维模型简化为二维轴对称模型；③密封面处为大位移变形，应力 \geq 材料屈服强度；④过盈配合面对尺寸偏差变化敏感；⑤载荷为变化的复合载荷。

目前，采用 Abaqus 等软件对特殊螺纹接头进行有限元分析已较普遍^[9-11]。一般采用人工建模的方式进行特殊螺纹接头分析，但是该方式存在以下缺点：①手工界面操作过多，过程离散；②效率较低，大批量尺寸组合的分析难以进行；③手工错误率较高，模型不完全相同；④计算结果不收敛时，纠错时间成本高。

一种结构形式的特殊螺纹接头包含上百个规格（一种外径、壁厚和钢级组合为一个规格），每个规格又有多种尺寸、偏差配合，从而带来了大量的有限元分析任务。

Python 语言是一种应用广泛的多平台高级程序语言，具有丰富的扩展模块，适用于各类应用程序的快速开发，是 Abaqus 软件的内置语言，可用于 Abaqus 软件从前处理至后处理的全过程开发^[12]。采用基于 Python 的参数化分析的方式，可以克服人工建模的缺点，实现特殊螺纹接头有限元分析的自动化、标准化分析^[13-15]。但是由于特殊螺纹接头结构的复杂性，基于 Python 语言，实现参数化全过程控制的研究尚不多见。

2 核心程序展示

Abaqus 软件具有强大的多物理场模拟仿真功能，可用于解决从相对简单的线性问题到复杂的高度非线性问题，提供了丰富的单元库和材料模型库。Abaqus 软件的对象模块分为 session、mdb 和 odb 三类。其中，session 为视图对象，可用于用户定义视图；mdb 为模型数据对象，主要包含计算模型对象和作业对象；odb 为数据库对象，包含计算模型数据和结果数据等信息。前处理主要在 mdb

对象中操作，后处理主要是对给出的 odb 对象进行数据分析，session 对象主要在输出结果图片时定义视图。

2.1 参数化几何模型构建

特殊螺纹接头所有参数可以分为：外螺纹接头参数、内螺纹接头参数、外螺纹参数、内螺纹参数。其中，每一个实际尺寸参数 L 都可以看成是名义值 N_L 加上偏差值 D_L ，即 $L=N_L+D_L$ 。

带密封面与扭矩台肩的特殊螺纹接头约有 64 个尺寸，因此程序设定了等量的名义参数和偏差参数。在产品设计中，如果接头结构不太确定，可以更改少数几个参数的名义值，偏差值暂时设为 0，从而对接头进行粗略对比；如果接头结构设计基本确定，参数的名义值不变，仅改动少数几个偏差值，从而对接头进行极限偏差下的精细分析。

编写几何模型程序时，除了定义必要的尺寸约束外，还需要定义位置约束，从而使整个模型处于完全定义状态。几何造型过程中，为了将图纸上的标注作为尺寸约束，部分关键点的相对和绝对坐标需要根据几何关系求出算式，以驱动几何参数模型的成型。

在完成 pin-body(外螺纹接头主体)，pin-thread(外螺纹)，box-body(内螺纹接头主体)和 box-thread(内螺纹)四个草图参数化构建后，利用布尔函数 InstanceFromBooleanCut()，由 pin-thread/box-thread 切除 pin-body/box-body，从而生成部件 pin(外螺纹接头)和 box(内螺纹接头)，这样可避免螺纹首、末端交点的复杂计算过程。螺纹草图可以通过阵列函数 linearPattern()对构建好的单个完整螺纹进行复制，从而方便得出全部螺纹线。

为了避免程序运行过程中的人工介入，将参数的输入接口统一放置于外部的电子表格里，以方便管理。部分参数的输入接口示例见表 1。

表 1 部分参数的输入接口示例

编号	名义名称	名义值	偏差名称	偏差值
1	NP_seal_dia(外螺纹接头密封面直径) ^①	234.9	DP_seal_dia(外螺纹接头密封面直径偏差)	-0.05
2	NP_thread_dia(外螺纹接头螺纹直径)	242.8	DP_thread_dia(外螺纹接头螺纹直径偏差)	0.05
3	NP_thread_taper(外螺纹接头螺纹锥度)	0.062 5	DP_thread_taper(外螺纹接头螺纹锥度偏差)	0.001
4	NB_seal_dia(内螺纹接头密封面直径)	234.0	DB_seal_dia(内螺纹接头密封面直径偏差)	0.05
5	NB_thread_dia(内螺纹接头螺纹直径)	242.6	DB_thread_dia(内螺纹接头螺纹直径偏差)	-0.05
6	NB_thread_taper(内螺纹接头螺纹锥度)	0.062 5	DB_thread_taper(内螺纹接头螺纹锥度偏差)	-0.001

注：①直径及其偏差的单位为mm。

为了实现 Python 程序与电子表格数据的交互, 首先将 Python 的 xlrd 和 xlwt 扩展模块添加至 Abaqus 的安装文件夹中, 使用以下程序调用电子表格中的数值。

```
data = xlrd.open_workbook('.../input_data.xls')
sh = data.sheet_by_name('sheet1')
NP_seal_dia = str(sh.cell(1, 1).value)
DP_seal_dia = str(sh.cell(2, 1).value)
```

2.2 关键几何元素拾取

在材料属性分配、网格布种、相互作用面指定、载荷施加等过程中需要准确拾取关键的点、线、面等几何元素。参数化模型的几何元素拾取必然也是参数化的, 现通过组合运用 findAt()、getClosest()、getByBoundingBox() 等函数自动拾取各类点、线、面等几何元素。

2.3 网格划分

网格划分对于后续计算结果收敛与否影响较大, 考虑到特殊螺纹接头螺纹段、密封面以及台肩面是相互接触的主要区域, 因此可利用 Partion() 函数对 pin 和 box 部件进行分区, 再进行局部布种细化网格。网格划分过细或过粗都有可能影响计算时间与计算收敛性。对首个参数化模型需进行调校, 以取得最佳的分析效果, 因此建议将需要调校的主要数值也放置于电子表格里, 以方便修改而不影响 Python 主程序。网格划分中选用线性轴对称减缩积分的 CAX4R 和 CAX3 单元。

2.4 装配与接触定义

选择刚度较大的内螺纹表面作为主面, 选择刚度较小的外螺纹作为从面。主面网格设置较粗, 从面网格设置较细。由于螺纹与密封面接触过盈量较大, 可以分多个分析步缓慢完成相互接触, 以提高计算收敛概率。

程序设置了 thread-contact(螺纹接触)、seal-shoulder-contact(密封面台肩面接触)、make-up(拧紧)和 load(加载)四个分析步。实际接头在旋转拧紧过程中, 固定外螺纹接头时, 沿轴向某一个剖面的内螺纹接头扭矩台肩与螺纹的相对位置(轴向与径向)是逐渐变化的。由于采用的是二维模型, 在模型草图绘制完成后就确定了二维模型, 因此无法模拟实际拧紧过程, 但是可以采用以下两种方法弥补: ①将整个分析设置为循环程序, 每次循环, 逐渐改变外螺纹的偏差参数, 分析结束后, 将多个结果文件结合起来; ②由于螺纹锥度为 1:16, 接头

在最后拧紧过程中轴向拧进距离小于 0.2 mm, 该距离将引起螺纹直径增大 0.012 5 mm, 相比于轴向变化, 径向变化量可忽略不计, 因此在 make-up(拧紧)分析步中, 将外螺纹接头端部的柱面定义沿轴向的温度场, 改变柱面轴向长度, 从而模拟拧紧过程中扭矩台肩与螺纹的相对轴向位置的变化。

虽然第一种方式与实际情况更相符, 但是第二种方式的计算量明显要少, 因此采用第二种方式。

2.5 载荷施加

ISO 13679:2019 标准规定了实物试验的 A 系、B 系和 C 系载荷点以及具体的计算方法, 在参数化分析不同规格特殊螺纹接头时, 不同规格相应的载荷也不同, 为了方便参数化分析, 将需要施加的载荷值通过电子表格中的内置函数内嵌于电子表格中, Python 程序直接调用载荷值。

2.6 后处理程序

odb 数据库文件包括模型数据(model data)和结果数据(result data)。其中, 模型数据是用来描述根装配中的部件和部件实例, 例如节点坐标、集合定义、单元类型等; 结果数据是用来描述各种分析结果, 例如应力、应变和位移等。同样地, 可以使用 Python 的扩展模块, 如 NumPy(独立的函数库)、SciPy(科学计算工具库)、Matplotlib(绘图函数库)等直接对从多个 odb 文件中提取的数据进行计算与绘图分析。

从 myJob.sta 文件中可以查看到分析结果里各分析步每个增量步的详细列表, 所有单元的数值结果都包含在一个树形架构里, 因此可以通过在“命令行界面”输入命令“print(odb.steps["load"].frames[12].fieldOutputs["S"].values[100].mises)”查看具体数值。该命令的含义是: load 分析步第 12 个增量步中单元编号为 100 的 Mises 等效应力值。

为了提高后处理分析的自动化, 可以根据编写的相应程序对数据进行处理分析。例如, 可以用程序将 load 分析步各增量步的节点应力/应变求平均值后保存为 data.txt 文件。

```
import numpy as np
myOdb = odbAccess.openOdb(r".../myJob.odb",
readOnly=False)
myFrames = myOdb.steps["load"].frames
data = []
for i in range(len(myFrames)):
    myField = myFrames[i].fieldOutputs
```

```

tempField = [myFrames[i].frameValue,]
for key in ["E", "S"]:
    myValues = myField[key].values
    temp = []
    for value in myValues:
        temp.append(value.mises)
    # 对 temp 数据进行计算处理, 以求平均值为例
    tempField.append(np.mean(np.array
        (temp)))
data.append(tempField)
data = np.array(data)
np.savetxt(r".../data.txt", data, fmt="%.10f")

```

3 程序运行实例

现以最常见的接箍式气密封特殊螺纹接头为例, 运行所开发的 Python 程序。首先, 在电子表格中录入图纸中的尺寸及其偏差以及其他相关参数, 然后在 Abaqus 软件里打开 Python 程序并运行, 程序自动提交作业(花费时间小于 10 s), 作业计算完成后, 自动进行后处理分析, 并生成所需的数据和图片。由于作业计算花费的时间最长, 为确保所建立模型的正确性, 可在提交作业前设置程序中断, 检查模型接触面、网格、载荷等是否正确, 然后再运行后续程序。

对 9 种接头尺寸偏差情况进行有限元分析, 接头偏差配合情况见表 2, 借助开发的 Python 程序可以高效完成分析任务。借助上海超级计算中心运行程序, 获得 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.99 \text{ mm}$ 规格 P110 钢级某特殊螺纹接头拧接后的应力云图, 如图 1 所示。

程序化的分析计算对特殊螺纹接头各个设计参数的敏感性分析有很大帮助, 可有力地支撑产品开发和结构优化, 获得实物试验难以测量的数据。

从图 1 中发现, 试样 4 和 8 外螺纹入口处应力较大, 采用“print(odb.steps["make-up"].frames[35].fieldOutputs["S"].values[7750].mises)”命令查看该单元(编号 7750)应力值高达 473 MPa。试样 8 的螺纹局部应力分析结果如图 2 所示。按模拟尺寸加工试样 4 和 8, 发现上卸扣过程中试样 4 和 8 的最后 1~2 牙均发生了螺纹黏结现象, 与有限元模拟结果吻合, 黏结形貌如图 3 所示。为了克服该尺寸组合下螺纹黏结的发生, 适当调整接头设计公差或检验公差, 从而可有效降低螺纹黏结的发生几率。

表 2 接头偏差配合情况

试样编号	直径过盈量		螺纹锥度 ^①
	密封面	螺纹	
0	名义值	名义值	名义值
1	最小值	最小值	PS/BF
2	最小值	最小值	PF/BS
3	最小值	最大值	PS/BF
4	最小值	最大值	PF/BS
5	最大值	最小值	PS/BF
6	最大值	最小值	PF/BS
7	最大值	最大值	PS/BF
8	最大值	最大值	PF/BS

注: ①“PS/BF”指外螺纹锥度缓与内螺纹锥度陡相配合, “PF/BS”指外螺纹锥度陡与内螺纹锥度缓相配合。

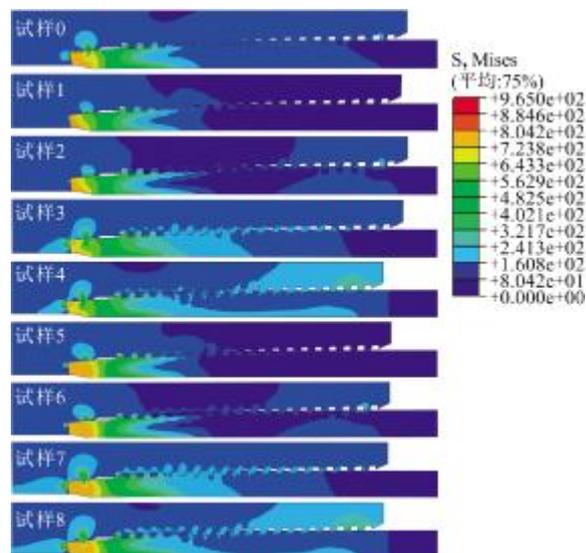


图 1 用 Python 程序获得的不同尺寸偏差接头的应力分析结果

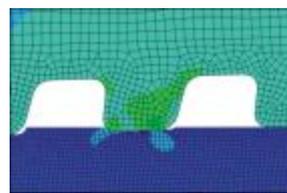


图 2 试样 8 的螺纹局部应力分析结果

4 结 语

借助于 Python 丰富的扩展模板, 可方便实现与电子表格的数据交互功能, 实现有限元分析全程自动化; 将基于 Python 的参数化建模与分析方法运用在特殊螺纹接头的有限元分析中, 不仅能节省大量人工建模时间, 提高效率, 而且可实现有限元分析的标准化, 有利于技术人员之间交流与合作; 此外, Python 程序具有良好的继承性, 程序也方便



(a) 试样 4

(b) 试样 8

图3 按模拟尺寸加工的试样的螺纹黏结形貌

改进、升级，避免技术的原地踏步，使分析工作具有成长性。

5 参考文献

- [1] 唐家睿, 晁利宁, 徐凯, 等. 油套管特殊螺纹连接密封性能试验研究[J]. 钢管, 2020, 49(4): 64-69.
- [2] 王怡, 张建兵, 聂艳, 等. 高温高压井用特殊螺纹接头的设计与评价现状[J]. 钢管, 2020, 49(1): 72-76.
- [3] 高建昌, 高连新, 邱吉. CBFJ 直连型特殊螺纹接头设计分析[J]. 钢管, 2018, 47(1): 75-79.
- [4] 史彬, 周晓锋. G3 耐蚀合金油管特殊螺纹接头 TP-G2 的设计与开发[J]. 钢管, 2019, 48(2): 63-67.
- [5] 李渭亮, 白松, 陈晓华, 等. 基于 ISO 13679 的套管特殊螺纹极限承载能力仿真评价[J]. 钢管, 2017, 46(3): 66-70.
- [6] 李小兵, 胡志立. 油套管特殊螺纹的发展[J]. 钢管, 2020, 49(5): 15-22.
- [7] 詹先觉, 罗蒙, 王琍. 锥面密封油套管特殊螺纹接头密封面过盈量计算[J]. 宝钢技术, 2014(6): 55-58.
- [8] 詹先觉, 王琍, 邓强. 气密封特殊螺纹接头扭矩值理论研究[J]. 宝钢技术, 2019(4): 68-71.
- [9] 白鹤, 党涛, 何石磊, 等. 模拟工况下特殊螺纹密封特性的有限元分析[J]. 钢管, 2013, 42(4): 60-63.
- [10] 胡志立, 张垂贵, 李小兵, 等. 基于 ABAQUS 特殊螺纹接头的螺纹参数优化设计[J]. 钢管, 2018, 47(6): 50-57.
- [11] TAO GANG, XIE Jueren. Analytical evaluation of casing connections for thermal well applications[C]//Paper presented at the SPE Heavy Oil Conference-Canada, Calgary, Alberta, Canada, 2013.
- [12] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python 二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [13] 谢瑞敏, 王雪军. 基于 Python 的 ABAQUS 二次开发应用[J]. 中国水运, 2017, 17(10): 77-79.
- [14] 唐维, 康泽毓, 杨婷, 等. 基于 Python 的 ABAQUS 层压板参数化建模[J]. 成都工业学院学报, 2019, 22(4): 17-20.
- [15] 程可慧. 基于 Python 的 ABAQUS 在特征值屈曲分析上的应用[J]. 山西建筑, 2020, 46(19): 196-198.

(收稿日期: 2021-07-29; 修定日期: 2021-08-09)

●专利信息

一种钢管接头内、外径自动检测设备

公开了一种钢管接头内外径自动检测设备。该检测设备包括安装在条形机架上的条形工作台，还包括钢管接头平行推动输送装置，将平行排序的钢管接头由链条传送装置推入接头推出装置，钢管接头检测承接体还包括横向安装在承接体后侧靠近其下部的拨料装置以及安装在承接体及条形工作台上的钢管接头内外径自动检测装置。该设备实现了对钢管接头内外径尺寸的自动检测，降低了钢管接头内外径检测工人的劳动强度，提高了钢管接头内外径检测的工作效率。(专利申请号: CN202011078921.1 公开号: CN112139054A 申请日: 2020.10.10 公开日: 2020.12.29 申请人: 济南迈科管道科技有限公司)

一种小内径钢管刻制标准内外伤设备

公开了一种在小内径钢管上刻制标准内外伤的设备，属于无损检测用的标准样管电火花加工领域，包括精密工作台、控制单元、设置在精密工作台上的移动平台、冷却循环单元、精密运行机构。移动平台和冷却循环单元由控制电缆与控制单元相连，移动平台包括配合使用的高精度滚动导轨、精密丝杠、锁紧装置和手轮，配合使用的高精度滚动导轨、精密丝杠、锁紧装置和手轮使工件在其轴向 X 向、径向 Y 向、垂直 Z 向上移动。该设备能实现在小内径(内径 6~180 mm, 外径 ≤ 210 mm)精密钢管和各种特殊钢管(棒)材上制作高精度内外伤的需要。(专利申请号: CN202010906923.9 公开号: CN112139619A 申请日: 2020.08.31 公开日: 2020.12.29 申请人: 成都新特齐科技有限公司)

(王元荪)