

doi:10.3969/j.issn.1007-2012.2012.04.005

基于 MATLAB 的 ABAQUS 二次开发 (上) ——解决方案与技术要点

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072) 熊 威 甘 忠 熊仕鹏
(成都飞机工业(集团)有限责任公司 制造工程部, 成都 610092) 袁 胜 李光俊

摘 要: 为提高使用有限元软件 ABAQUS 进行分析的效率和与分析结果数据进行处理效率, 使用 MATLAB 对 ABAQUS 的前置处理和后置处理程序进行开发。分析了 ABAQUS 二次开发的思路和步骤; 并根据分析结果, 使用 MATLAB 开发了更改材料参数、网格尺寸、模具半径和模具型面的前置处理程序和自动提取仿真数据, 而且拟合成形半径, 对曲面外形进行配准拟合的后置处理程序。使用 MATLAB 实现了整体壁板的时效成形回弹补偿。结果表明, 所开发的程序可以实现对 ABAQUS 有限元模型的更改、批量计算和自动结果分析。从而提高研究工作效率。该文为 ABAQUS 二次开发提供了不同于 Python 语言的思路。

关键词: 时效成形; ABAQUS; 二次开发; MATLAB; 前处理; 后处理

中图分类号: TP311.1; TG386.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012(2012)04-0021-06

Secondary development for ABAQUS based on MATLAB, part 1: Solution and key technologies

XIONG Wei GAN Zhong XIONG Shi-peng

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern
Polytechnical University, Ministry of Education, Xi'an 710072 China)

YUAN Sheng LI Guang-jun

(Manufacturing Engineering Department, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092 China)

Abstract: To improve the efficiency of simulation with finite element software ABAQUS, especially that of processing the resultant data, MATLAB has been employed to develop pre-processing and post processing program. By analyzing the principle of ABAQUS secondary development, MATLAB has been used to program pre-processing software that can modify material parameters, mesh size, mold radius and surface. And post processing program that can fit forming radius, register curvature surfaces and fit them has also been developed. With their help springback compensation for panel has been realized. The results reveal that these programs can modify parameters in ABAQUS finite element model, calculate a batch job and abstract data automatically. Therefore, the research efficiency was improved. And the paper provides a way, which is different from using Python, to carry out ABAQUS secondary development.

Key words: age forming; ABAQUS; secondary development; MATLAB; pre-processing; post processing

引 言

有限元软件 ABAQUS 在时效成形领域获得了很好的应用。然而, 如何对有限元计算获得的海量数据进行有效地提取和操作, 是目前亟待解决的关键问题^[1]。如在模拟小曲率零件成形中, 仅凭变形网格图或云图不易判断成形效果, 若要进一步

熊 威 E-mail: xiongwei@mail.nwpu.edu.cn

作者简介: 熊 威, 男, 1983 年生, 湖北黄陂人, 西北工业大学机电学院, 博士研究生, 主要研究方向为精密成形技术

收稿日期: 2012-04-18; **修订日期:** 2012-06-15

的回弹补偿,则更需要定量计算。传统方法是将 ABAQUS 计算得到的试件外形面的所有节点坐标(COORD)导出,进而借助其他数据处理软件,如 Geomagic, CATIA, Excel 半手工的完成曲率计算、偏差比较和回弹补偿等工作^[2-3]。但是,对成百上千的数据点进行导入导出操作容易造成数据丢失,而且因为存在人工操作,一方面会降低数据处理的效率;另一方面,存在操作失误对分析结果的影响。因此,需要对 ABAQUS 进行二次开发,在保证数据准确度的前提下,方便快速的获得目标结果。

ABAQUS 二次开发的外延包括两个方面,第一,是指编写如用户材料子程序(UMAT)^[4-13],用户幅值子程序(UAMP)和用户单元子程序(UEL)^[14]等 ABAQUS 的子程序,需要使用 Fortran 语言编程。第二,是指开发前后处理程序,可以使用 Python 语言^[15-17]或者 C++^[18]。本文中的二次开发指的是第二方面,但使用 MATLAB 编程进行,用于修改模型材料参数、模具型面和网格参数,并对仿真数据进行拟合、配准等后处理计算,可供从事 ABAQUS 二次开发的科研人员参考。

1 开发环境

ABAQUS 是一种功能强大,且通用性很强的商用工程分析有限元软件。可以解决从相对简单的线性问题到复杂的非线性分析等各种工程问题^[16]。

对 ABAQUS 进行二次开发,需要理解 ABAQUS 软件的运行原理。ABAQUS 的运行流程如图 1。

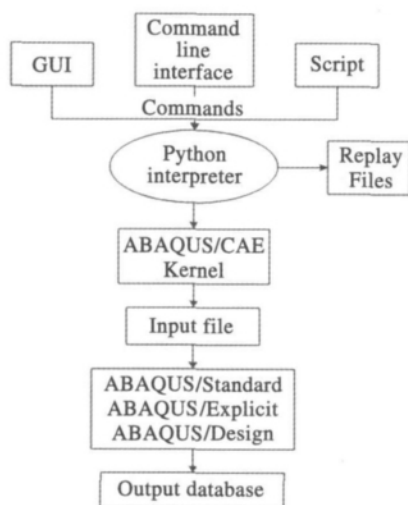


图 1 ABAQUS 运行流程^[19]

Fig. 1 Procedure of ABAQUS

当用户使用 ABAQUS/CAE 的图形用户界面进行前处理建模和对分析结果进行可视化后处理时, ABAQUS/CAE 会记录每一步操作相应的命令,这些命令反映了用户创建的几何体参数,有限元建模的每一个设置,包括所有对话框中的选择^[19]。这些命令保存在 temp 文件夹下的 abaqus rpy 文件中,是 Python 语言格式的脚本,更改后缀名为 .py,得到可以运行的 ABAQUS 脚本文件。脚本文件是一个文本文件,可以使用任何文本编辑软件进行修改,也可以使用程序进行修改。

另外, ABAQUS 在提交分析任务时,使用的是 inp 文件,即图 1 中的 input file,同样也是文本文件,也可以编写程序进行修改。实际上,较早版本的 ABAQUS 软件没有前处理部分,需要用户自己编写 inp 文件提交计算,现在还有高级用户使用这种方式创建分析任务,用来实现一些 ABAQUS 前处理所不具备的功能。

在 ABAQUS 产生的结果文件中,包含 dat 文件。如果在建模时建立 Set 集合,包含需要输出几何实体节点,并在 Model 中更改关键词。可以在 dat 文件中得到相应的输出结果。同上, dat 文件也是文本文件,可以使用程序读取其中的数据。

由上述分析可知,只要能够实现文本文件的读写操作,一种程序语言就有进行 ABAQUS 二次开发的潜力。因此, MATLAB 可以用于 ABAQUS 的二次开发,并且因为 MATLAB 带有丰富的数学函数,使得仿真后的数据处理程序编写更为简便。

2 开发解决方案

将用户二次开发出的程序称为主程序,包含前置处理和后置处理两个部分。其中前置处理用于改变模型的参数,如对模型进行参数化造型,改变模型的几何尺寸、材料参数、网格密度和成形条件等;后置处理用于处理有限元分析的结果,主要工作是在有限元分析结束之后,从 dat 文件中读取数据,并且对数据进行分析。

前后置处理有以下 4 个技术要点:

主程序向 ABAQUS 脚本传递参数

在进行有限元建模的同时,保存 abaqus rpy 文件,删除其中多余的操作记录,并且在预定修改参数值的位置,设定特殊的字符串作为关键词,保存修改后的脚本文件作为脚本模版。编写主程序,逐行读取脚本模版,并且用相应的参数替换对应的关

关键词, 另行保存。假设脚本文件名为 abaqus.py, 并保存在当前目录下。

以脚本方式调用 ABAQUS/CAE

由主程序创建一个批处理文件, 设为 CalculationOrders.bat, 向里面写入如下内容:

```
call abaqus cae noGUI=abaqus.py
```

在 MATLAB 中使用 dos() 函数, 运行上述批处理文件。需要注意的是, 主程序一般应当和 ABAQUS 异步运行, 即在提交分析任务后, 等待有限元计算完成后, 再进行下一步的处理。如果开发语言不具备异步运行功能, 如 VB, 需要特别处理。但因为 MATLAB 中的 dos 命令是异步运行的, 可以直接使用。

向 ABAQUS 提交 inp 文件

作为提交有限元分析的另一种方式, 提交 inp 文件的方式在二次开发中主要用于仅需要修改网格节点坐标而不改变网格划分方式的情况。对于改变模型的几何参数, 因为涉及到修改网格的构型, 不如使用脚本方式简便。具体方法是向 CalculationOrders.bat 文件中写入:

```
abaqus job=Job-DA cpus=3 int
```

其中 inp 文件的全名为 Job-DA.inp, 不写后缀名, 可以避免输出不必要的警告信息, cpus=3 表示使用 3 核并行计算, 因为并行计算和调整使用内存的大小在脚本文件中有记录, 而在 inp 文件中没有, 需要在提交任务时输入。int 命令在程序运行窗口输出运行信息, 如果是使用 MATLAB 调用, 信息会显示在 Commands 窗口中。

如果有限元分析需要使用子程序, 则命令改为:

```
abaqus job=Job-DA user=Umat for cpus=3 int
```

其中 Umat.for 为用户子程序名。

后处理程序读取结果数据

在进行有限元建模时, 为需要输出的几何节点建立一个 Set, 设为 Set-Coord, 以输出节点坐标为例, 修改模型的关键词, 在需要输出的分析步之后找到如下语句:

```
* Output, field, variable=PERSELECT
```

在其后添加以下语句:

```
* NODE PRINT, NSET=Set-Coord
COORD,
```

可以将节点的坐标输出到 dat 文件中。在 dat 文件中每一个时间增量输出类似以下内容:

```

                                INCREMENT    52 SUMMARY
TIME INCREMENT COMPLETED  9.598E-04, FRACTION OF STEP COMPLETED  9.166E-02
STEP TIME COMPLETED        9.166E-02, TOTAL TIME COMPLETED        1.09

                                NODE OUTPUT
THE FOLLOWING TABLE IS PRINTED FOR NODES BELONGING TO NODE SET ASSEMBLY_SET-1

```

NODE FOOT-	COORD1	COORD2	COORD3
NOTE			
384	-251.3	-17.11	-141.9
385	-249.3	-17.36	-142.0
:			
MAXIMUM	353.0	24.73	375.1
AT NODE	2538	693	636

其中 STEP TIME COMPLETED 代表当前分析步完成的时间, TOTAL TIME COMPLETED 代表全部分析步完成的时间, 使用这两个时间的数值作为关键词, 可以找到所需时间增量的数据段。数据段在空行之后以 MAXIMUM 结束。可以使用空行来判定停止读取数据。

3 前置处理

3.1 模型参数修改

修改模具半径的方法和模具圆弧面构建时使用的方法有关, 如果使用三点法构造半径为 R 的圆弧, 在脚本文件中会出现如下语句:

```
s, Arc3Points(point1 = (x1, y1),
              point2 = (x2, y2),
              point3 = (x3, y3))
```

其中圆弧的起点和终点分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 假设 (x_3, y_3) 是圆弧的中点, 并且 3 个点是顺时针排列。第 3 个点的坐标可以按式(1)计算。

$$\begin{cases} x_3 = \frac{x_1 + x_2}{2} + H \cos \arctan k \\ y_3 = \frac{y_1 + y_2}{2} + H \sin \arctan k \end{cases} \quad (1)$$

式中 $H = R - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}(x_1 - x_2)^2 - \frac{1}{4}(y_1 - y_2)^2}$

$$k = -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$$

在 ABAQUS 中, 划分网格前, 需要首先生成网格种子 (seed), 这一步操作在 py 脚本中记录为:

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
p.seedPart(size=M, deviationFactor=0.1)
```

其中, M 代表网格尺寸, 可以设定关键词, 用主程序进行修改。如果需要考察局部网格加密的影

响, 可以使用设定边界上的局部种子的功能, 在脚本中相关记录为:

```
p. seedEdgeBySize (edges=pickedEdges, size=M)
```

同样设定关键词, 由主程序赋值。

以使用粘弹塑性本构方程为例, 材料参数的设置在脚本文件中记录为:

```
mdb.models['Model-1']. materials['Material-A1'].
UserMaterial ( mechanicalConstants = ( 22632,
7. 1875e9, 59020. 7, 337, 1300))
```

其中第三行的数字代表材料参数的数值, 排列顺序和 UMAT 子程序中 PROPS 数组的使用顺序相对应。如果要修改粘性系数, 可以在模版中将上述语句改写为:

```
mdb.models [' Model-1' ] . materials [' Material-
A1' ] . UserMaterial ( mechanicalConstants =
( 22632, < ! -- EtaG -- >, 59020. 7, 337,
1300))
```

其中< ! -- EtaG -- >是代表粘性系数的关键词, 在修改有限元参数时, 由主程序识别和替换。

3.2 模具型面修型

与上述只改变模具的半径不同, 模具型面的修型通常要对双曲率的曲面进行更改, 可以通过修改 inp 文件中的网格节点坐标实现。在 inp 文件中, 节点坐标的数据格式为:

```
* Part, name=Mold
* Node
1, -355., 20. 9205837, 374. 94101
2, -355., 6. 56003523, -375. 05899
:
* Element, type=R3D4
```

Mold 是用户设定的模具名称, * Node 标志定义节点坐标数据段的开始, * Element 标志定义网格数据段的开始, 同时也是节点坐标数据段的结束。通过这 3 个关键词, 可以在 inp 文件中确定节点数据段。在节点数据段中, 第一列是节点编号, 其余 3 列是节点的坐标值。一般而言, 需要改变的只是模具型面的弯曲程度, 不需要修改模具型面的尺寸, 所以只需要更改一列坐标就可以实现。

4 后置处理

4.1 成形半径计算

时效成形一般用于成形小曲率壁板零件, 在成形中零件近似于纯弯曲状态, 成形后的零件和模具

的几何外形具有相似性。在单曲率模具上成形的 T 型梁试件的外形, 可以认为是一段圆弧。这构成了计算成形半径的基础。

在有限元中, 将 T 型梁试件底面沿筋条方向的中心线定义为 Set 集合。因为试件对称, 变形后 Set 集合中的节点还近似在同一个平面 (YOZ 面) 内。有限元计算完成之后, 主程序从 dat 文件中读取 Set 集合中的节点坐标, 设拟合的圆弧方程为:

$$z^2 + y^2 + az + by + c = 0 \quad (2)$$

使用最小二乘拟合法, 即求解方程:

$$\begin{bmatrix} \sum_i z_i^2 & \sum_i z_i y_i & \sum_i z_i \\ \sum_i z_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i \\ \sum_i z_i & \sum_i y_i & \sum_i 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_i (z_i^3 + z_i y_i^2) \\ \sum_i (z_i^2 y_i + y_i^3) \\ \sum_i (z_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)得到的系数, 可以得到拟合半径为:

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \quad (4)$$

4.2 曲面拟合

从 dat 文件和 inp 文件中提取出的节点坐标是按照节点编号升序排列的, 但是由于不清楚 ABAQUS 前处理程序对节点的编号规则, 节点的空间次序是未知的, 需要进行有序化处理。有序化处理的过程如图 2 所示。

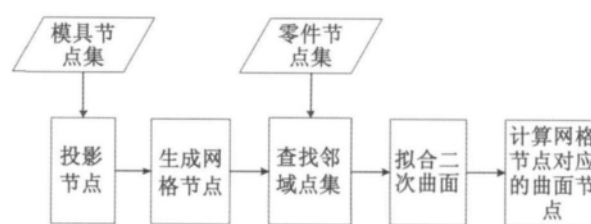


图 2 节点有序化处理

Fig. 2 Process of ordering nodes

假设将节点集投影到 XOZ 面上, 并对平面区域内划分矩形网格, 对于每一个网格节点, 在曲面节点集的投影中查找处于其邻域内的点, 而且要求查找到的点不能小于拟合二次曲面所要求的最低数目 6 个。如果小于 6 个点, 则扩大邻域范围, 再次查找。将网格节点的坐标代入二次曲面方程, 求得相应的 y 坐标。

需要拟合的曲面包括零件的外形面和模具的型面, 但是在生成投影网格的时候, 即使是拟合零件

的外形,网格的边界也要根据模具节点的投影范围来确定。这一步称为边界拓展,因为在有限元建模时,为了防止试件和模具接触时有节点落在模具的背面,导致分析失败,模具的尺寸通常要比零件的展开外形尺寸稍大。而B样条曲面在定义区域之外的值为0。如果按照试件节点的投影范围确定投影网格的边界,模具边界上的投影节点在零件的B样条曲面上就没有合适的值,在需要同时应用模具曲面和零件曲面的情况下,可能会产生错误。即使将模具尺寸设定为零件的展开外形尺寸,由于成形中零件的弯曲,投影区域还是会减小,仍然存在出错的可能。

假设有序化后的节点集,将 x 坐标相同的节点存储在同一行。借助MATLAB中的函数`augknt()`在定义区域上声明B样条的节点,然后使用`spap2()`函数,首先沿 z 方向拟合B样条曲线,再将拟合得到的`coefs`沿 x 方向再次拟合B样条曲线,得到B样条曲面。已知 x 和 z 坐标,可使用`spsol()`函数计算相应的 y 坐标。

4.3 曲面的配准

仿真曲面和设计曲面的配准分为两步。第一步是初始配准,使仿真曲面与设计曲面处于小方位偏差状态,为精确配准做准备;第二步是精确配准,使得仿真曲面与设计曲面处于最佳拟合状态。

初始配准使用力矩主轴法^[20],首先求解设计节点集和仿真节点集的质心,移动仿真节点集,使其质心与设计节点集的质心重合,并且将两个节点集中的点都转换到以设计节点集质心为原点的局部坐标系下。

计算两个节点集的惯性张量:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $I_{xx} = \int (y^2 + z^2) dm$

$I_{yy} = \int (x^2 + z^2) dm$

$I_{zz} = \int (x^2 + y^2) dm$

$I_{xy} = I_{yx} = - \int xy dm$

$I_{xz} = I_{zx} = - \int xz dm$

$I_{yz} = I_{zy} = - \int yz dm$

使用`eig()`函数得到惯性张量矩阵的,进行了

单位正交化的特征向量和特征值,得到惯性主轴和相应的主转动惯量,旋转仿真节点集,使其惯性主轴和设计节点集的惯性主轴重合,再移动仿真节点集到全局坐标系下,完成初始配准。

在精确配准时,将配准问题作为一个最优化问题处理,使用单纯形法(Simplex Method)进行搜索。MATLAB带有优化工具箱,也可以使用工具箱中的函数进行优化求解。

5 验证

综合运用上述数据接口、函数和数学公式,实现了对整体壁板的模具型面设计,最终仿真结果和设计型面的误差小于0.8mm(其详细实现过程将在本文的下篇论述,见塑性工程学报,2012年第5期)。

6 结论

1) 使用MATLAB对ABAQUS的前置处理进行开发,用于更改有限元模型的网格参数、材料参数、模具半径和模具型面的修改,可以实现时效成形仿真的批量计算,提高仿真研究效率。

2) 使用MATLAB对ABAQUS的后置处理程序进行开发,实现结果数据的自动提取,成形半径计算和与成形曲面的拟合配准,可以提高时效成形有限元分析结果数据分析的效率。

3) 分析了使用MATLAB对ABAQUS进行二次开发的思路和一般步骤,综合利用这些方法,可以实现壁板时效成形模具型面的回弹补偿自动计算。同时,本文也为非基于Python语言的ABAQUS前后置处理程序的开发提供了借鉴。

参考文献

- [1] 岳永保,杨合,詹梅等.基于Python的ABAQUS数控弯管数值模拟后处理[J].塑性工程学报,2009,16(3):48-54
- [2] 甘忠,张磊,许旭东等.整体壁板时效成形模具回弹补偿的工艺研究[J].塑性工程学报,2010,17(5):15-18
- [3] 朱加赞.铝合金整体壁板时效成形仿真与模具设计[D].西安:西北工业大学,2012
- [4] 王田修.时效成形的有限元模拟[D].西安:西北工业大学,2008
- [5] 陈卫忠,伍国军,贾善坡.ABAQUS在隧道及地下工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010

- [6] 黄硕,曾元松,黄遐. 2324 铝合金蠕变时效成形有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4):129-133
- [7] Andrew Levers. Finite element analysis of creep age forming[C]. ABAQUS Users Conference[C]. 1998; 461-474
- [8] K C Ho, J Lin, T A Dean. Modelling of springback in creep forming thick aluminium sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 20(4-5):733-751
- [9] K C Ho, J Lin, T A Dean. Constitutive modeling of primary creep for age forming an aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 122-127
- [10] J Lin, K C Ho, T A Dean. An integrated process for modelling of precipitation hardening and springback in creep age-forming[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46:1266-1270
- [11] 黄霖,万敏,黄硕. 7B04 铝合金厚板蠕变时效成形有限元分析[J]. 航空制造技术, 2007, (S1):485-486
- [12] 李超,万敏,金兴等. 7B04 铝合金时效成形本构模型研究与有限元应用[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5):61-65
- [13] 熊威,甘忠,许旭东等. 基于粘弹塑性模型的时效成形仿真[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2):33-37
- [14] 庄茁,由小川,廖剑晖等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009
- [15] 连昌伟,王兆远,杜传军等. ABAQUS 后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J]. 锻压技术, 2006(4):111-114
- [16] 成玲,李海波. 基于脚本语言的 abaqus 二次开发[J]. 现代机械, 2009(2):58-65
- [17] 郭玲,杨合,邱晞等. 基于 Python 的 ABAQUS 后处理研究开发及其在薄壁管数控弯曲中的应用[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5):32-37
- [18] 任淮辉,李旭东,刘德学等. 二维复合材料微结构的力学响应计算[J]. 武汉科技大学学报, 2009, (1):427-431
- [19] 杨大彬,王长欣,张毅刚等. 基于 ABAQUS 的空间结构参数化建模系统开发[C]. 第九届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2009
- [20] 刘晶. 基于 CAD 模型的配准技术综述[J]. 机床与液压, 2007, 35(9):231-232