

摘 要.....	1
1 蛋壳的建模.....	2
1.1 蛋壳的形状.....	2
1.2 有限元模型的建立和网格的划分（前处理）	2
1.2.1 利用板壳力学对模型进行简化处理.....	2
1.2.2 鸡蛋壳的力学量.....	3
1.2.3 建模工作流.....	3
1.2.4 划分网格.....	8
2 求解仿真.....	8
2.1 静力学分析.....	8
2.2 标准椭球面验证.....	9
附录.....	13
A 鸡蛋的结构.....	13

摘 要

通过确定蛋壳轮廓线方程，在 matlab 中获取坐标点，利用 python 工具导入 abaqus，实现模型的建立。求解模型当中遇到困难，推断是网格划分的质量不佳或是几何模型有缺陷。

为了确定是模型问题还是网格问题，采用标准椭球面进行相同网格的求解，可以运行。结果表明蛋壳在上侧和下侧有比较大的应力分布。

本次仿真属于简化的仿真模拟，目的在于熟悉有限元软件和发现问题。在这次仿真当中，遇到的困难在于几何模型实质上是一个有很多面的多面体，其中有许多细小的面，而这些面在自动网格划分当中很难非常好的处理，这个问题有待于进一步的深入研究。

关键词：仿真；网格划分；

1 蛋壳的建模

1.1 蛋壳的形状

参考文献[4]，假设蛋壳的轮廓线为近似的椭圆形，满足如下曲线方程：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(b + x \tan \theta)^2} = 1 \quad (1)$$

式中 a ——蛋壳的长半轴， b ——蛋壳短半轴； x ， y 分别为蛋壳边缘曲线的横坐标和纵坐标； θ ——蛋形角。

根据文献[6]的数据，本次仿真将蛋壳的长轴设为 56mm，短轴 44mm，蛋形角设为 8° ，比较接近真实鸡蛋的几何特性。

1.2 有限元模型的建立和网格的划分（前处理）

1.2.1 利用板壳力学对模型进行简化处理

本节通过讨论《板壳力学》课程有关概念和计算假定，试图寻找简化蛋壳模型的依据。在有限元仿真中，使用实体单元对板壳力学问题进行分析往往会花费不必要的计算资源，如果能够明确我们的问题为板壳力学问题，并且确定适当的单元类型，则会事半功倍。

1.2.1.1 薄板小挠度弯曲问题

板壳力学中，对于薄板小挠度弯曲问题，计算假定主要有：法线假定、 z 方向无线应变假定、计算 ε_x ， ε_y 而不考虑 σ_z 影响的假定、中面内各点无平行中面的位移假定。

在薄板小挠度弯曲问题中，各个力学量有主要和次要的研究顺序，对于应变，属于 x - y 平面应变的三个应变变量 ε_x ， ε_y ， γ_{xy} 被称为主要应变，而 ε_z ， γ_{xz} ， γ_{yz} 被称为次要应变，取为 0，由于我们放弃了与 ε_z 有关的物理方程，从而容许 $\varepsilon_z=0$ ，而 $\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y) \neq 0$ 。

薄板小挠度问题的物理方程：

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy}\end{aligned}\quad (2)$$

1.2.1.2 壳体

1.2.1.1.1 壳体和板的比较

	板	壳
载荷	横向	法向为主
几何	薄	
变形	小变形	
内力	弯曲内力	弯曲内力和膜力

1.2.2 鸡蛋壳的力学量

根据文献[7]，仿真使用的鸡蛋壳的杨氏模量为 3GPa，泊松比为 0.25。根据文献[8]，可将鸡蛋壳的厚度设为 0.32mm。鸡蛋是脆性材料。

1.2.3 建模 workflow

1. 利用 matlab，将方程(1)绘制形成轮廓点，轮廓点如下图，保存为 egg_data.txt。如此形成代码：

```
f=ezplot('(y)^2/28^2+(x)^2/(22+y*0.1405)^2=1',[0 70 -70
70])% 蛋形角为 8° a=28mm,b=22mm
a=f.ContourMatrix
a=a'
dlmwrite('egg_data.txt', a(2:end,:), 'precision', '%f',
'delimiter', ',')
```

蛋壳的有限元仿真

x	y
0	28
4. 694499677	27. 2
8	26. 61082662
8. 390849088	26. 4
9. 812735722	25. 6
11. 16517095	24. 8
12. 44948894	24
13. 66701356	23. 2
14. 81905835	22. 4
15. 90692655	21. 6
16	21. 52794844
16. 55914665	20. 8
17. 13717673	20
17. 67900956	19. 2
18. 18540231	18. 4
18. 65710599	17. 6
19. 09486541	16. 8
19. 4994192	16
19. 87149979	15. 2
20. 21183344	14. 4
20. 5211402	13. 6
20. 80013395	12. 8
21. 04952237	12
21. 27000696	11. 2
21. 46228302	10. 4
21. 62703969	9. 6
21. 76495989	8. 8
21. 87672037	8
21. 96299168	7. 2
22. 0244382	6. 4
22. 0617181	5. 6

蛋壳的有限元仿真

22.07548338	4.8
22.06637985	4
22.03504712	3.2
21.98211863	2.4
21.9082216	1.6
21.8139771	0.8
21.7	0
21.56689897	-0.8
21.41527649	-1.6
21.24572888	-2.4
21.05884624	-3.2
20.85521251	-4
20.63540541	-4.8
20.3999965	-5.6
20.14955114	-6.4
19.88462851	-7.2
19.60578159	-8
19.31355718	-8.8
19.00849589	-9.6
18.69113213	-10.4
18.36199416	-11.2
18.021604	-12
17.67047752	-12.8
17.3091244	-13.6
16.9380481	-14.4
16.55774593	-15.2
16.168709	-16
16-16.33749339	
15.61903702	-16.8
14.94394051	-17.6
14.25667971	-18.4
13.55803187	-19.2
12.84876395	-20

12.12963256	-20.8
11.40138402	-21.6
10.66475435	-22.4
9.920469231	-23.2
9.169244041	-24
8.411783845	-24.8
8	-25.22933072
6.946350186	-25.6
4.642781387	-26.4
2.326667514	-27.2
0	-28

表 轮廓点 egg_data.csv(已经过缩减)

2.将 egg_data 的后缀改为 csv。

3.在利用进行有限元分析时，有限元模型的建立是一个比较耗费时间和精力关键步骤，而实体建模又是建立有限元模型的基础。ANSYS 的自建模功能主要是通过 GUI 或者命令流的方式，它们只能处理一些相对简单的模型，对于实际工程中越来越复杂的实体模型，ANSYS 自带的建模功能就显得非常不足，难以满足实际的建模需要。为此编写 python 脚本 egg_create.py，实现读入 egg_data.csv 并在 abaqus 当中自动化建模：

```
# -*- coding: mbcs -*-
# Do not delete the following import lines

from abaqus import *
from abaqusConstants import *
import __main__
```

```
import section
import regionToolset
import displayGroupMdbToolset as dgm
import part
import material
import assembly
import step
import interaction
import load
```

```
import mesh
import optimization
import job
import sketch
import visualization
import xyPlot
import displayGroupOdbToolset as dgo
import connectorBehavior
```

```
s1 = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
    sheetSize=200.0)
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
s1.ConstructionLine(point1=(0.0, -100.0), point2=(0.0, 100.0))
s1.FixedConstraint(entity=g[2])
```

```
import csv
csv_reader = csv.reader(open("egg_data.csv"))
point_list = []
for row in csv_reader:
    row[0],row[1] = float(row[0]),float(row[1])
    point_list.append(row)
for i in range(len(point_list)-1):
    s1.Line(point1=(point_list[i][0], point_list[i][1]), point2=(point_list[i+1][0], point_list[i+1][1]))
p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Part-1', dimensionality=THREE_D,
    type=DEFORMABLE_BODY)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
p.BaseShellRevolve(sketch=s1, angle=360.0, flipRevolveDirection=OFF)
s1.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models['Model-1'].parts['Part-1']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
```


1.2.4 划分网格

划分网格是一个难点，使用默认的划分方式会出现报警：poor element，这是 abaqus 的快速分析功能，让用户得知这个网格划分欠佳。

2 求解仿真

2.1 静力学分析

采用四边形壳体单元 S4R。

由于网格划分的质量不佳，出现报错：

```
The job "Job-1" has been created.
The job "EggJob" has been created.
The model database has been saved to
"C:\Users\Administrator\Desktop\Advanced-Deep-Learning-with-Keras-master\chapter8-vae\myhomework\eggshell.cae".
The job input file "EggJob.inp" has been submitted for analysis.
Macro "Macro_cal" has been added to "F:\temp\abaqusMacros.py"
Error in job EggJob: Normal cannot be computed in 261 elements. The nodal coordinates
may be incorrect or the element aspect ratio may exceed 1000 to 1. The elements
have been identified in element set ErrElemNormal.
Error in job EggJob: Error in defining normal to the element surface at a node in
261 elements. The elements have been identified in element set ErrElemShellNormal.
Job EggJob: Analysis Input File Processor aborted due to errors.
Error in job EggJob: Analysis Input File Processor exited with an error.
Job EggJob aborted due to errors.
```

遇到网格警告“poorElements”，于是把网格改为三角形壳体单元：

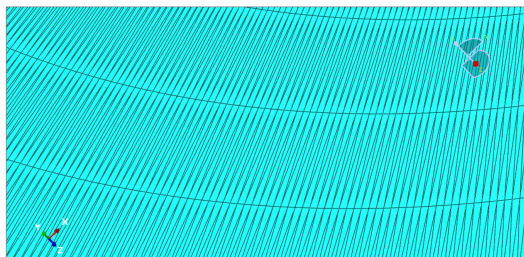


图 三角形网格图片，可以看到，这个三角形网格不太符合壳体的假设了。

改为三角形壳体单元后，网格划分没有报错，但是仍然在求解时报错（运行 InputFile 成功了，但是之后跑了很长时间报了错）：

```
The job input file "EggJob.inp" has been submitted for analysis.  
Job EggJob: Analysis Input File Processor completed successfully.  
Error in job EggJob: Too many attempts made for this increment  
Job EggJob: Abaqus/Standard aborted due to errors.  
Error in job EggJob: Abaqus/Standard Analysis exited with an error - Please see  
the message file for possible error messages if the file exists.  
Job EggJob aborted due to errors.
```

为了确认是建立模型的问题还是网格划分本身的问题，采用标准椭球面再次求解。

2.2 标准椭球面验证

使用 abaqus 自带的建模工具可以方便的建立标准椭球模型：

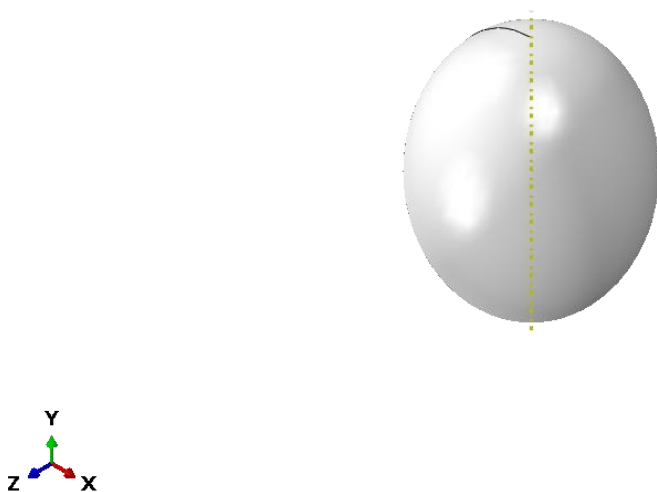


图 标准椭球

建模步骤：

1. shell,revolution; 进入草稿，先绘制一个椭圆，然后利用 Auto-trim(左侧工具)按钮消去一半椭圆，规定尺寸：长轴=112mm，短轴=88mm.
2. 旋转 360，形成我们想要的椭球。

求解步骤：

1. 采用四边形单元 S4R，随机种子为 5；
2. 固定下端，对上端施加一个 10N 的压力；
3. 结果可以成功运行。

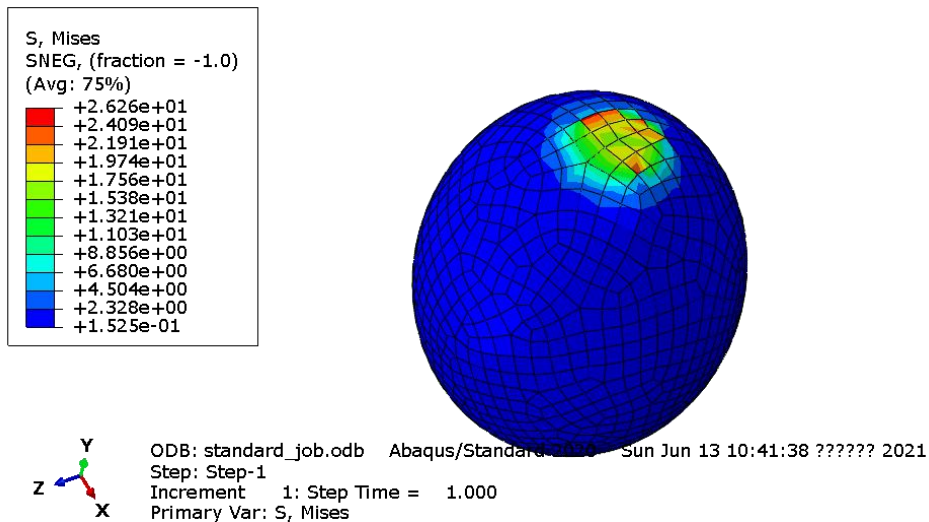


图 四边形单元

4. 使用三角形单元 S3，随机种子为 5；
5. 固定下端，对上端施加一个 10N 的压力；
6. 结果也可以成功运行。

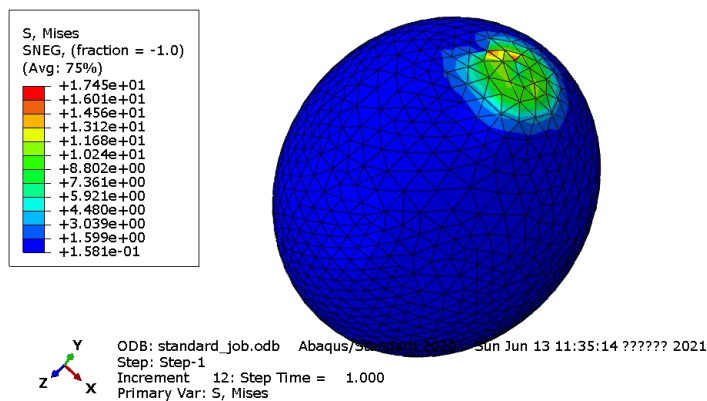


图 三角形单元

至此确定问题是由于几何模型本身的问题导致网格划分质量差。采用轮廓线法得到的点组成的多边形轮廓实际旋转而成的是一个多面体。其中有很多面非常小，难以划分。

2.3 解决小面问题

减少 ezplot 生成点的数目，可以获得缩减后的 egg_data.csv（见上表）。

使用缩减后的点可以生成比较高质量的网格，不过我还使用了面编辑的技巧，把有可能造成问题的小面“修复”（[Geometry Edit 功能](#)，在 [part 模块里的左侧工具栏](#)）。

修改后，采用 S4R 单元可以较好的划分，如下。

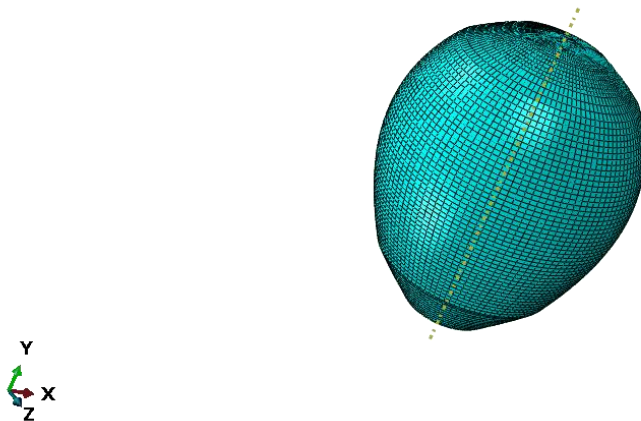
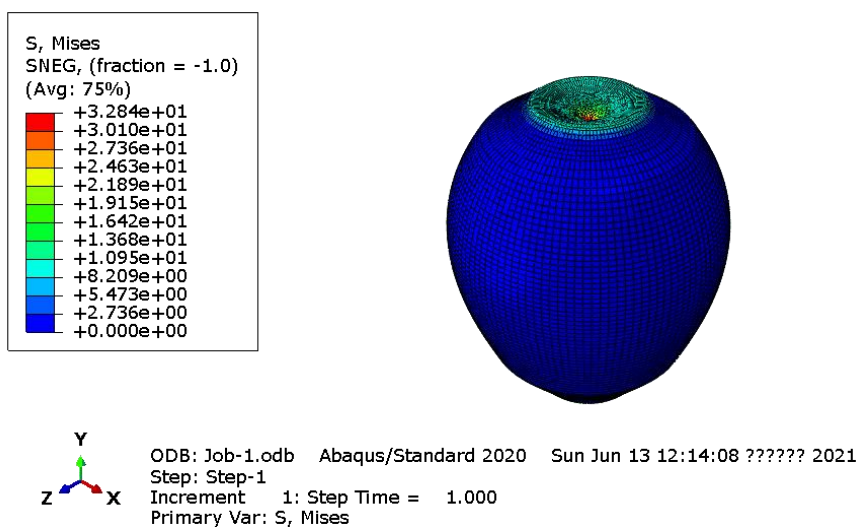


图 缩减点后的几何模型划分

不过，由于缩减点，鸡蛋的应力云图也发生了微妙的变化：



参 考 文 献

- [1] 鸡蛋力学特性实验分析[J]. 江苏工学院学报, 1992, 13:1-8-13.
- [2] 焦洪杰, 张以都, 陈五一, 张洪伟. 蛋壳夹芯结构的变形机制及力学性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(02):205-208.
- [3] 马和中, 余德伟, 赵资奎. 恐龙蛋壳的生物力学性质(III)——恐龙幼雏出壳时蛋壳破裂的力学分析[J]. 古脊椎动物学报, 1995(02):160-164.
- [4] 张凯. 鸭蛋壳的力学特性及多孔超微结构的渗透特性研究[D]. 湖北:华中农业大学, 2012. DOI:10.7666/d.Y2162316.
- [5] 邓海霞, 刘友明, 文友先, 等. 基于机器视觉群体鸡蛋尺寸的检测方法[J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(4):452-454. DOI:10.3321/j.issn:1000-2421.2006.04.027.
- [6] <https://wenku.baidu.com/view/03c7fd3a43323968011c9239.html>
- [7] 李硕, 肖书浩, 刘静. 基于逆向工程和 ANSYS 的鸡蛋蛋壳受力分析[J]. 机械制造, 2015, 53(10):25-28.
- [8] <https://zhidao.baidu.com/question/1645573290462791700.html>
- [9] <https://wenku.baidu.com/view/68c0c93467ec102de2bd899b.html>

附录

A 鸡蛋的结构

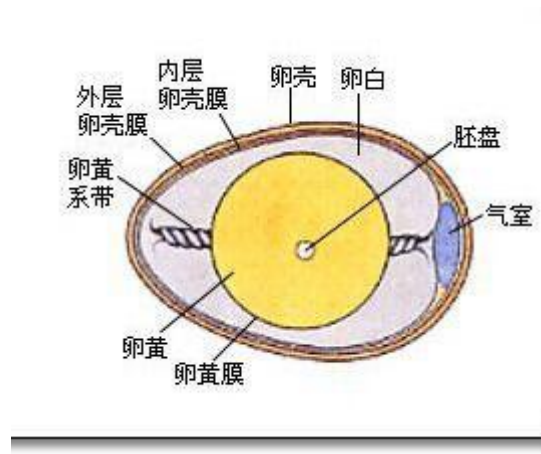


图 1 鸡蛋的结构

完整的蛋壳呈鸡蛋椭圆型，一头大、一头小，约占全蛋体积的 11%~11.5%。蛋壳又可分为壳上膜、壳下皮、气室。

鸡蛋壳的主要成分是碳酸钙（calcium carbonate），约占整个蛋壳质量的 91%~95%，其含钙的成分与珍珠、牡蛎、牛骨、小鱼乾相同，是钙质的良好来源。此外，蛋壳中尚含约占有 5%的碳酸镁（magnesium carbonate），以及 2%的磷酸钙（calcium phosphate）和胶质（colloid）。

壳上膜:即在蛋壳外面，一层不透明、无结构的膜；作用是防止蛋的水分蒸发。

壳下皮:在蛋壳里面的薄膜，共二层；空气能自由通过此膜。

气室:二层壳下皮之间的空隙；若蛋内气体遗失，气室会不断地增大。

蛋壳在醋或一些酸性溶液中浸泡一段时间后，蛋壳会消失，就变成无壳鸡蛋，只剩下一层薄膜。

由此看来，蛋壳实际是一种复合多孔材料，需要更加细致的几何模型才能更好的解释其力学行为。