

目 录

1.	曲柄-滑块机构	1
1.1	配置 ANSYS 工作环境	3
1.2	准备连杆柔性体模型	4
1.2.1	在 ANSYS 里的工作	4
1.2.2	柔性子系统向导	6
1.3	刚柔耦合系统动力学建模	12
1.3.1	创建几何图形	13
1.3.2	创建刚体	15
1.3.3	创建柔性子系统	16
1.3.4	创建铰	17
1.4	刚柔耦合系统动力学仿真	20
2.	柔性平台-电机模型	26
2.1	准备柔性平台	27
2.1.1	在 ANSYS 环境里工作	28
2.1.2	在 ANSYS Workbench 环境里工作	29
2.1.3	柔性子系统向导	36
2.2	刚柔耦合系统动力学建模与仿真	37
2.2.1	导入柔性平台	37
2.2.2	连接柔性平台与大地	38
2.2.3	创建几何图形	38
2.2.4	创建力元	42
2.2.5	导入电机子系统	45
2.2.6	设置电机转子速度曲线	47
2.2.7	连接电机与柔性平台	49
2.2.8	计算系统平衡位置和固有频率	51
2.2.9	运动仿真	53

1. 曲柄-滑块机构

本例模型为一个曲柄-滑块机构，如图 1.1 所示。在{UM Data}\SAMPLES\Flex 目录有一个名为 slider_crank_all 的模型。这个模型里共有三个曲柄-滑块机构，其不同之处在于构件连杆的建模方式：

- 连杆为一个刚体；
- 连杆为一个子系统，由 11 个刚体通过铰和力元连接而成；
- 连杆为一个柔性体，从有限元软件导入。

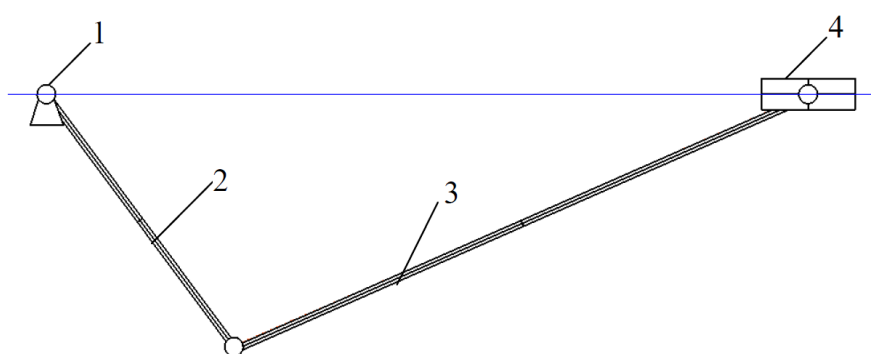


图 1.1 曲柄-滑块机构：1-机架，2-曲柄，3-连杆，4-滑块

这里主要介绍第三个模型——刚柔耦合机构的建模流程：

1. 建立连杆的有限元模型；
2. 计算所需的模态，并转换保存为 UM 格式；
3. 创建几何图形；
4. 创建刚体（曲柄和滑块）；
5. 导入连杆弹性体；
6. 创建铰和力元。

前两步在 ANSYS 里进行，后面四步在 UM 软件里进行。

备注：UM 使用子系统技术处理外部导入的柔性体，每个柔性体都是一个独立的子系统，导入时选择 Linear FEM Subsystem 类型。

我们可以先创建一个工作目录，方便后续模型使用，如：{UM Data}\My Models，或者 D:\models。

以下以“\”来表示工作目录。在这个目录下我们再创建两个子文件夹：

- flexbeam：存放柔性体数据；
- slider_crank_fem，存放刚柔耦合模型。

根据自身情况，读者可以有选择地阅读本教程。

- 如果有 ANSYS 软件，并想学习从 ANSYS 导入 UM 的整个流程，那么请逐页顺序阅读。
- 如果没有 ANSYS 软件或者不想学习在 ANSYS 里的准备工作，那么请直接从 1.2.2 章节开始阅读。请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam 目录复制 input.fum 文件到.\flexbeam 目录。
- 如果想跳过所有准备柔性体文件的步骤，可以直接从 1.3 章节开始阅读。请注意需要从{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam 目录复制 input.fss 文件到.\flexbeam 目录。

1.1 配置 ANSYS 工作环境

我们需要先使用 ANSYS 软件创建柔性体模型，然后运行宏命令 **um.mac** 计算静模态和固有模态，再通过 **ANSYS_UM.EXE** 转换为 **UM** 的数据格式。

宏命令文件 **um.mac** 位于 **UM** 安装路径的 **bin** 文件夹下，需要将其复制到 **ANSYS** 的 **apdl** 目录。否则，请通过 **ANSYS** 命令来自定义宏文件搜索路径：

```
/PSEARCH,Path_to_macro
```

转换程序 **ANSYS_UM.EXE** 也位于 **UM** 安装路径的 **bin** 文件夹下，为了在 **um.mac** 执行完毕后自动运行程序 **ANSYS_UM.EXE**，我们需要打开 **um.mac** 文件指定 **ANSYS_UM.EXE** 的完整路径，如：

```
/sys,c:\um\bin\ansys_um.exe
```

备注：如果 **ANSYS_UM.EXE** 的路径中包含空格，那么需要用双引号，如：

```
/sys,"c:\universal mechanism\bin\ansys_um.exe"
```

ANSYS_UM.EXE 的路径只能包含英文字母和数字，不支持中文。

1.2 准备连杆柔性体模型

如前所述，对于刚柔耦合系统中的柔性体，需要先在有限元软件里计算其模态矩阵，一般有两种方法：

- 集中质量矩阵；
- 一致质量矩阵。

在{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input 目录下有两个文件夹：**lumped** 和 **consistent**，其中分别对应使用集中质量矩阵和一致质量矩阵计算连杆模态的 ANSYS 命令流文件。

本例我们采用集中质量矩阵。

1.2.1 在 ANSYS 里的工作

1. 首先，请从{UM Data}\SAMPLES\Flex\flexbeam\input\lumped 目录复制 **flexbeam&mass21.ans** 文件到先前创建好的.\flexbeam 目录。该文件为 ANSYS 命令流文件，用 APDL 语言编写，可自动完成建模。
2. 运行 ANSYS 程序（经典界面），指定.\flexbeam 目录为当前工作目录。
3. 选择菜单 **File | Read Input from**，选择 **flexbeam&mass21.ans** 文件，ANSYS 开始自动建模和计算。模型为一根长 2m、截面为 2cm*2cm 的钢梁，共有 100 个 **BEAM4** 梁单元和 200 个 **MASS21** 质量单元。梁两端的节点选为界面节点。如果 **um.mac** 文件已经复制到 ANSYS 的 **APDL** 目录，那么它会自动运行计算出 12 阶静模态和 10 阶固有模态。
4. 如果 **um.mac** 文件中的 **ANSYS_UM.EXE** 路径定义正确，那么在 **um.mac** 执行完毕后，**ANSYS_UM.EXE** 会自动运行，如图 1.2 所示。否则，请手动运行，其文件路径为{UM}\bin\ansys_um.exe。

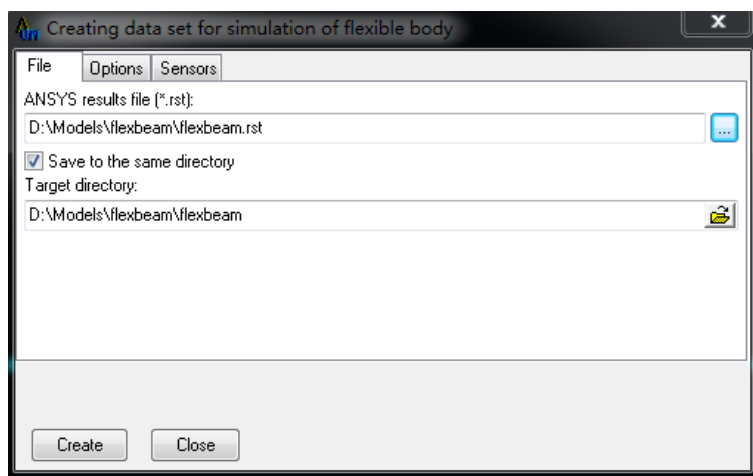


图 1.2 ANSYS_UM 程序界面

5. 在 **General** 页面，选择上一步计算得到的 ANSYS 结果文件，路径

为.\flexbeam\flexbeam.rst，并将保存目录设置为.\flexbeam。

6. 在Options页面，取消勾选normalize modes，这样我们就不直接生成最终的input.fss文件，而是生成中间格式文件input.fum。下一步我们再用UM的柔性子系统向导工具进行转换得到最终所需的文件input.fss。

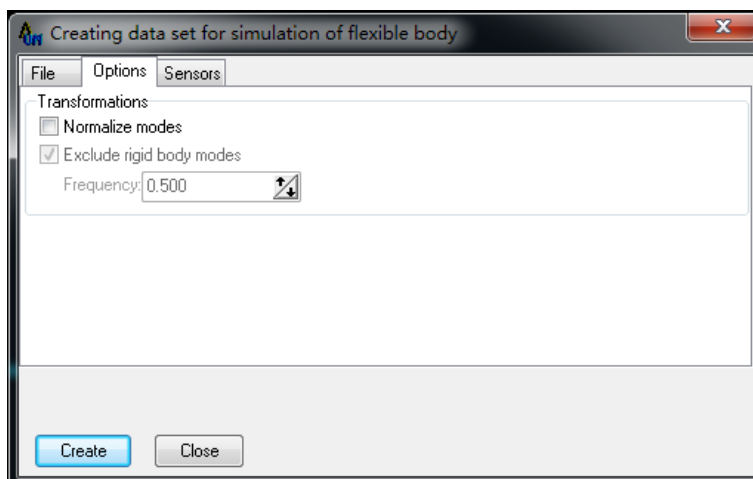



图 1.3

备注：其实这里也可以勾选 normalize modes，直接得到 input.fss 文件，注意需要在 exclude rigid body modes 处设置一个频率，以将 6 个刚体模态剔除。

7. 点击Create按钮，生成input.fum文件并存放于.\flexbeam目录。
8. 点击Close，关闭ANSYS_UM.EXE程序。

1.2.2 柔性子系统向导

由 **ANSYS_UM.EXE** 程序得到的中间格式文件 **input.fum** 包含了 **ANSYS** 软件计算得到的静模态和固有模态，我们需要进行正交变换。**UM** 软件的柔性子系统向导是一个可视化的模态转换工具，可以将 **input.fum** 转化为 **input.fss**。

1. 运行 **UM Input** 程序。
2. 选择菜单 **Tools | Wizard of flexible subsystem**，弹出柔性子系统向导窗口。
3. 点击按钮 ，选择 **.flexbeam** 文件夹里的文件 **input.fum**，点击 **OK**，如图 1.4 所示。

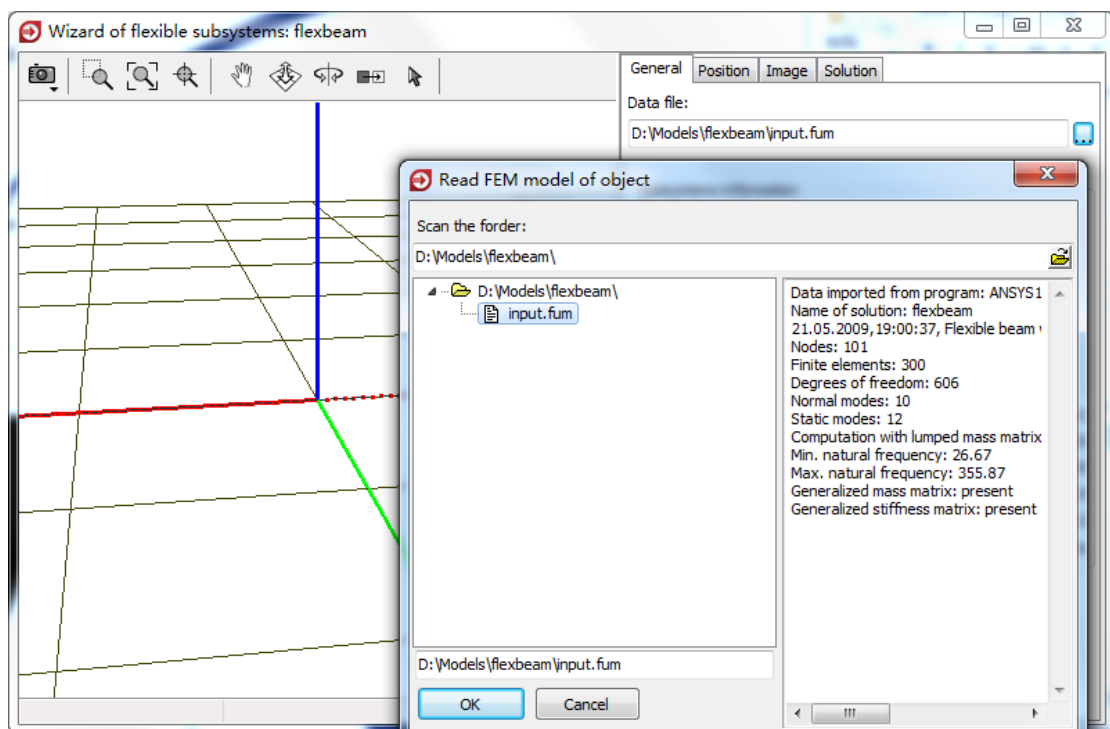


图 1.4

柔性子系统向导加载弹性体模型并在 **General** 页面显示其主要信息，如图 1.5 所示。**Position** 页面可以调整弹性体在动画窗口显示的位置和方向，当前梁模型与 **X** 轴重合，不便于观察，我们可以将其移动适当距离。

4. 点击 **Position** 页面。
5. 设置 **Shift | z** 为 **0.3**，如图 1.6 所示。

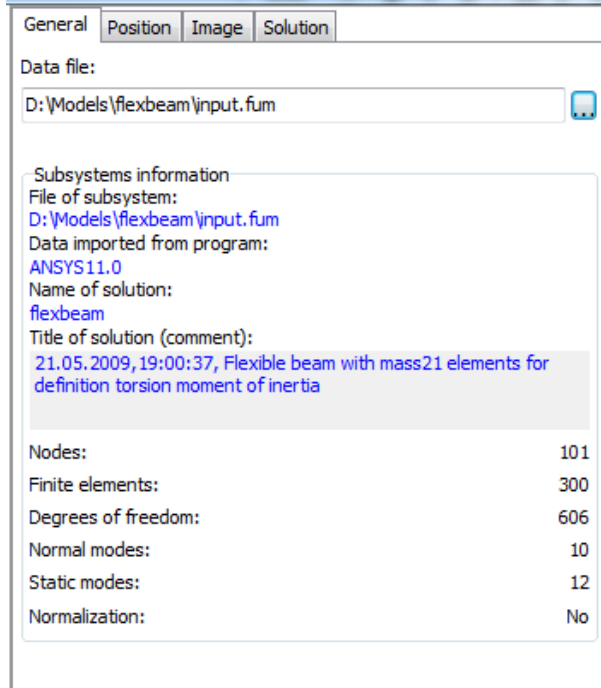


图 1.5

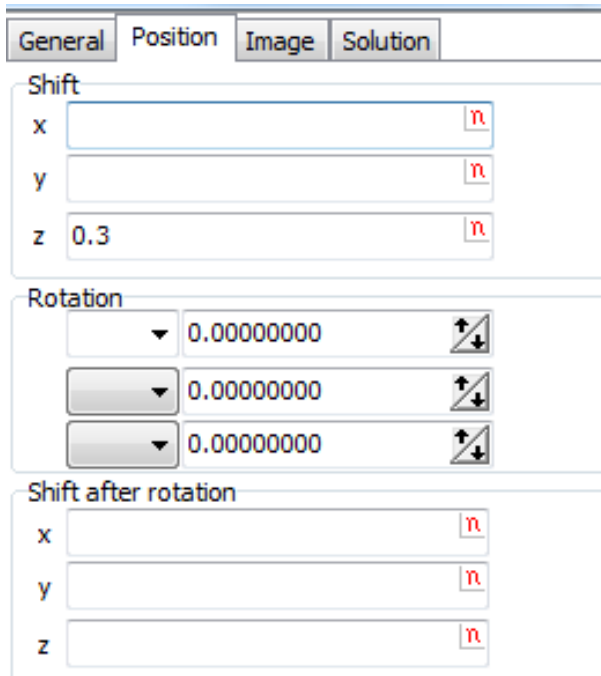


图 1.6

在 **Image** 页面可以设置弹性体的显示模式：**Simplified** 和 **Full**。**Full** 模式需

要占用更多的 CPU 和内存资源，当光标指向单元或节点时，会显示相关信息。

6. 设置 **Image** 为 **Full** 模式。
7. 取消选择 **Image parameters** 框的 **Draw nodes** 选项，勾选 **Hide elements** 框的 **Single node elements** 选项。

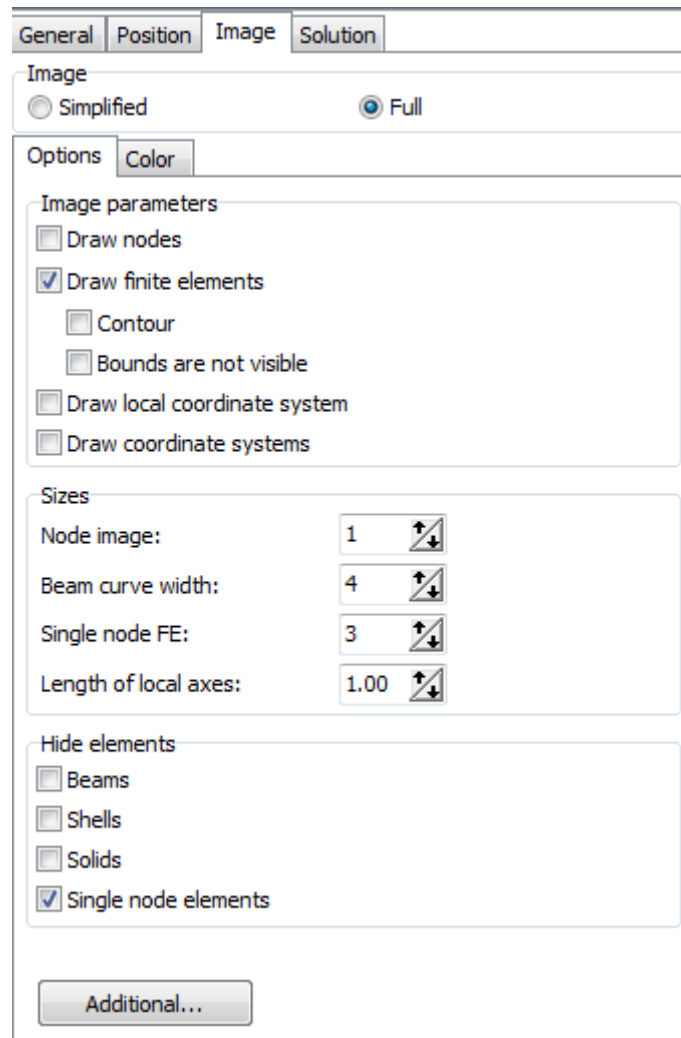


图 1.7

Solution 页面可以查看弹性体每一阶模态的频率和振型动画。选中某阶模态，点击 **Animate** 即可。可通过 **Amplitude** 和 **Rate** 调节显示的振动幅度和快慢。

每一阶模态前面有一个复选框，默认为勾选状态，可以根据研究需要取消选择某些模态。需注意，模态越多计算越精确，但计算量越大。对于具体模型，需要在精度和效率之间找到一个折中方案。

因此，通常只需要在 **ANSYS** 里计算一次模态（取研究所需最大的模态阶数），然后在 **UM** 的柔性体子系统向导可选择不同数量的模态分别进行转换，做对比研究。

- 勾选 **Save to the same directory**，勾选 **Transformations | Exclude rigid body modes**，设置 **Frequency** 为 **0.3** (Hz)，如图 1.8 所示。
- 点击 **Transform** 按钮，开始转换。

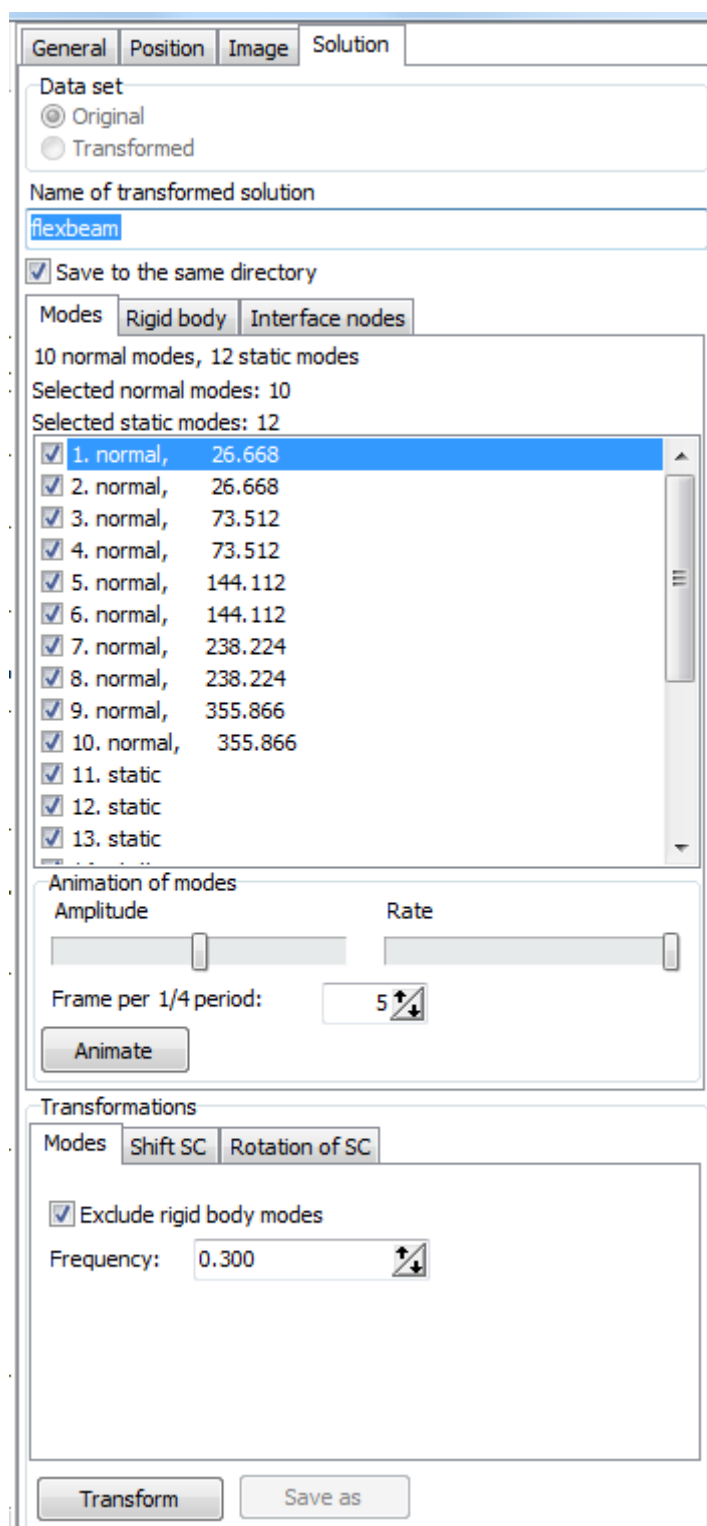


图 1.8

10. 然后依次点击是(Y)，确定，OK。

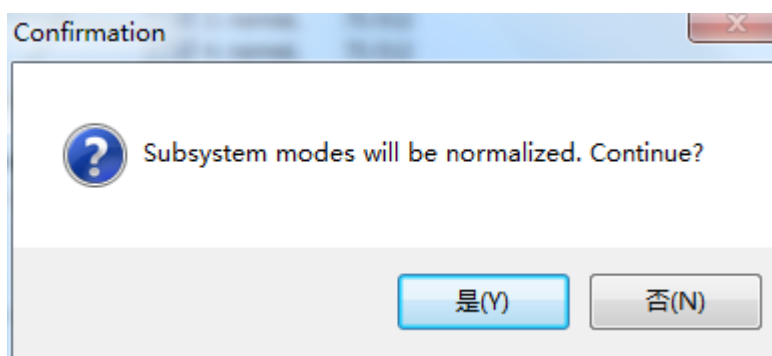


图 1.9

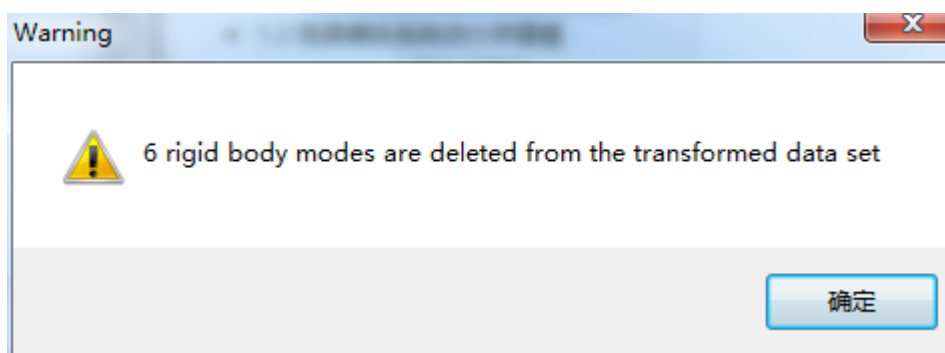


图 1.10

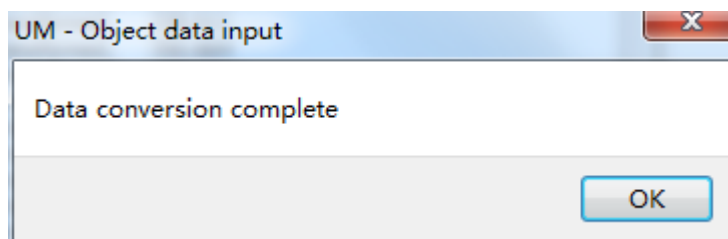


图 1.11

转换完成后会弹出提示，表示 6 个刚体模态已经被剔除。

备注：有限元计算得到的模态包含了其刚体模态，根据 C-B 模态综合法原理，必须将其剔除。理论上刚体模态频率为 0Hz，但由于数值方法和舍入误差，计算得到的刚体模态频率不一定为 0，可能是接近 0 的数。

实际上在 Transformations | Frequency 设置的截断频率，即表示小于该频率值的模态被认为是刚体模态，并予以剔除。

11. 在 **Data set** 框可以查看原始模态 (**Original**) 和转换后的模态 (**Transformed**), 确保选择 **Transformed**, 如图 1.12 所示。

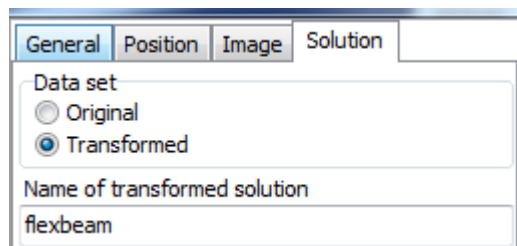


图 1.12

12. 点击 **Save as** 按钮, 在弹出的对话框设置保存路径, 并点 **Save**, 如图 1.13 所示。请注意文件夹 **flexbeam** 将作为一个弹性体子系统。

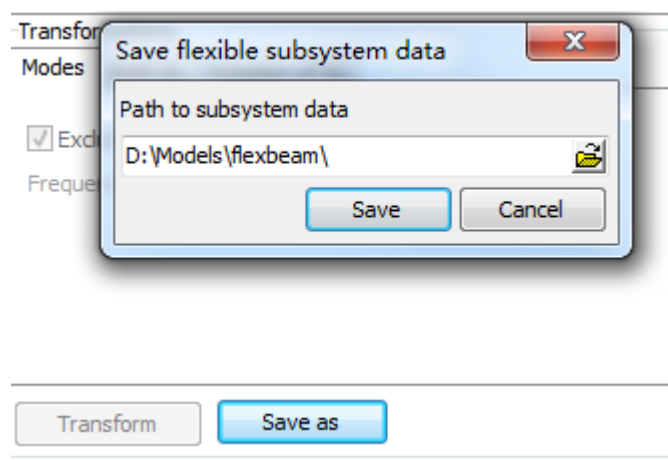


图 1.13

至此, 弹性体模型已经准备好。

1.3 刚柔耦合系统动力学建模

曲柄-滑块机构刚柔耦合模型由两个刚体、一个弹性体和四个铰组成。

刚体:

- 曲柄，长 1m;
- 连杆，长 2m;
- 滑块。

其中曲柄和滑块为刚体，连杆为弹性体。

铰:

- 曲柄与机架（大地）之间的转动铰;
- 连杆与曲柄之间的转动铰;
- 滑块与连杆之间的转动铰;
- 滑块与大地之间的平动铰。

1.3.1 创建几何图形

1. 运行 **UM Input** 程序，选择菜单 **File | New object**，新建一个模型。
2. 选择菜单 **Edit | Read from file**，导入几何模型 **{UM Data}\graph**
Base1.umi，这样就一个名为 **NoName** 的几何图形就添加到 **Images**。

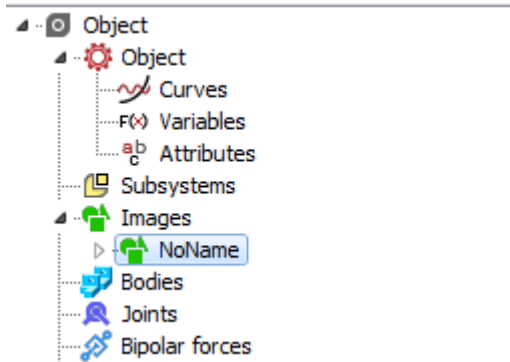


图 1.14

3. 选中 **NoName**，设置名称为 **Base0**。

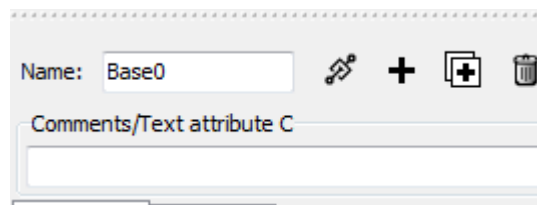


图 1.15

4. 以同样的方法从 **{UM Data}\graph** 导入 **Crank1.umi** 和 **Slider1.umi**，分别重命名为 **Crank** 和 **Slider**。

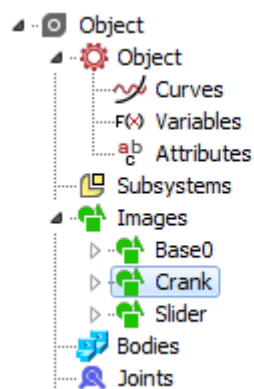


图 1.16

5. 先左侧模型树选中 **Object**，然后在右侧交互界面设置几何图形 **Base0** 为 **Scene Image**。

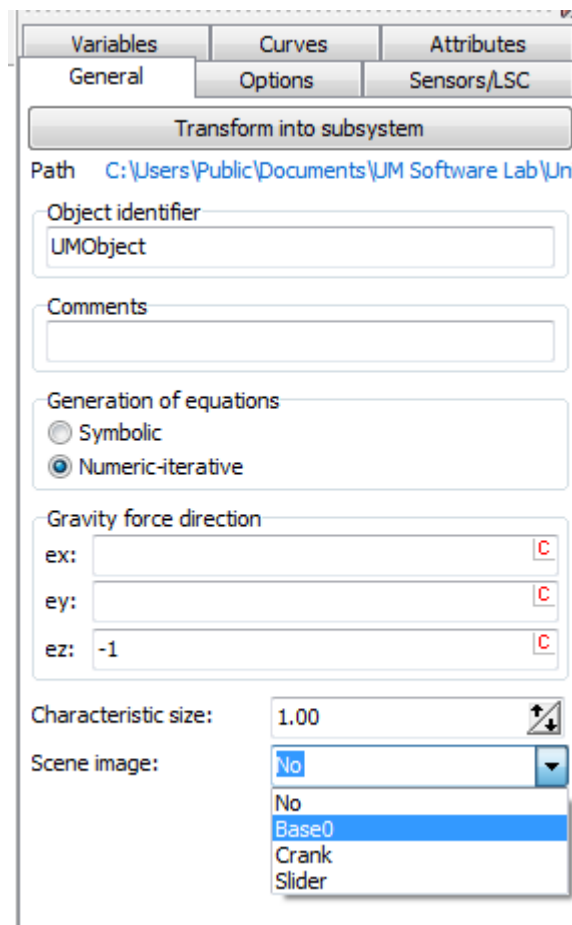


图 1.17

1.3.2 创建刚体

1. 先左侧模型树选中 **Bodies**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，添加一个刚体。
2. 重命名为 **Crank**，并选择几何图形 **Crank**。
3. 在 **Parameters** 页面，勾选 **Compute automatically**，程序自动根据几何形状的密度计算出质量和转动惯量，如图 1.18 所示。

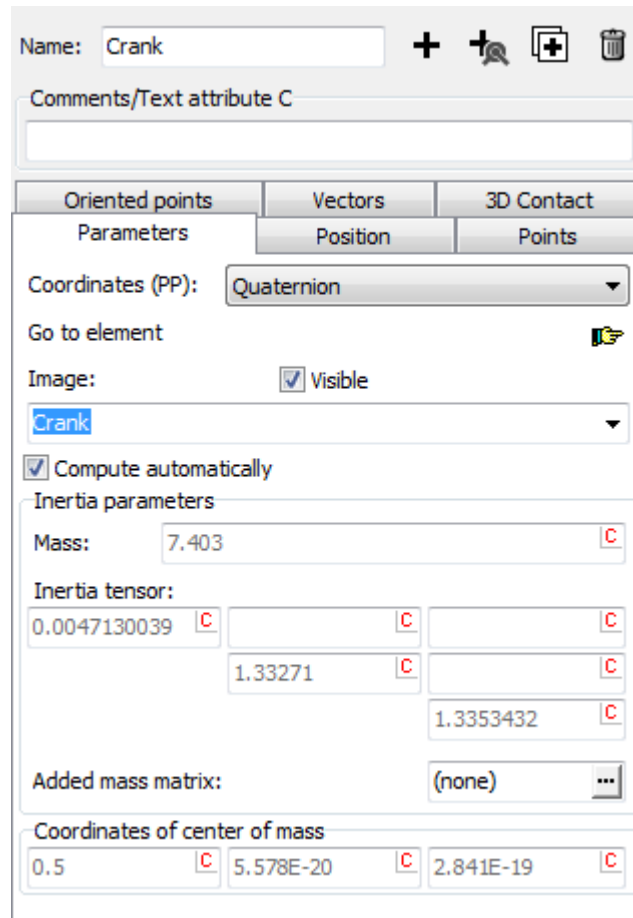


图 1.18

4. 用同样的方法创建刚体 **Slider**。

1.3.3 创建柔性子系统

1. 先在左侧模型树选中 **Subsystems**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，添加一个子系统。
2. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Linear FEM Subsystem**，并在弹出对话框选择 **flexbeam**，点击 **OK**。
3. 重命名为 **Con-rod FEM**。

这样就导入了弹性体模型，其界面与柔性子系统很相似，但有两处不同：

- 这里不能选择或取消某些模态；
- 这里 **Position** 界面设置的参数会影响到弹性体在整个模型中的位置。

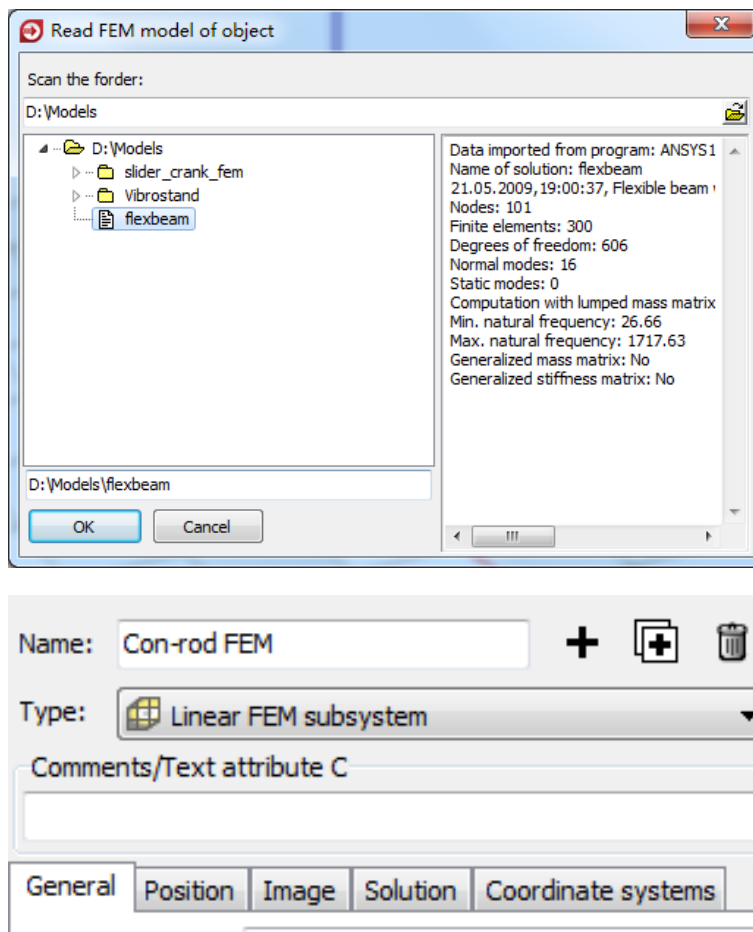


图 1.19

1.3.4 创建铰

1. 先在左侧模型树选中 **Joints**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，添加一个铰。
2. 选择 **Base0** 作为 **Body1**，选择 **Crank** 作为 **Body2**，类型为 **Rotational**，转动轴为 **Y** 轴，如图 1.20 所示。

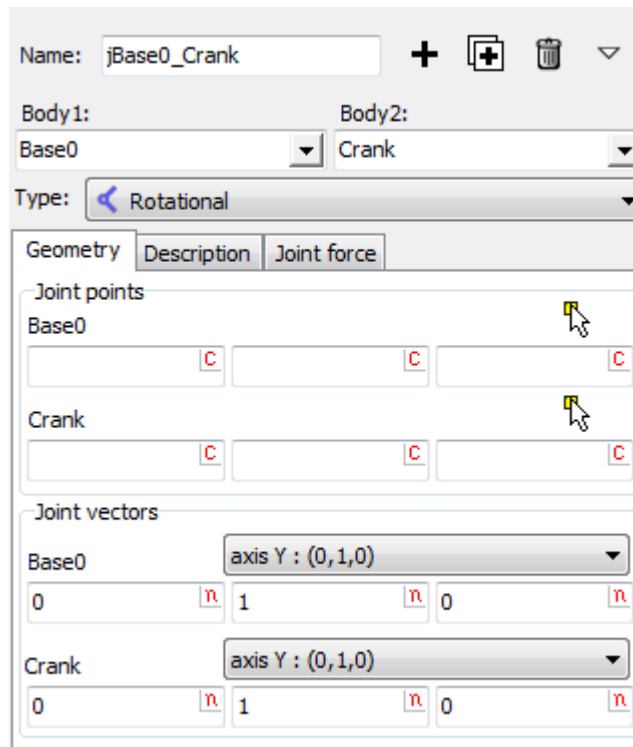


图 1.20

3. 点击 **Joint force** 页面，选择类型 **Expression**，并输入表达式 $\text{torque} - \text{cdiss_crank} * v$ ，回车，在弹出的窗口输入参数： $\text{torque}=100$ ， $\text{cdiss_crank}=10$ 。

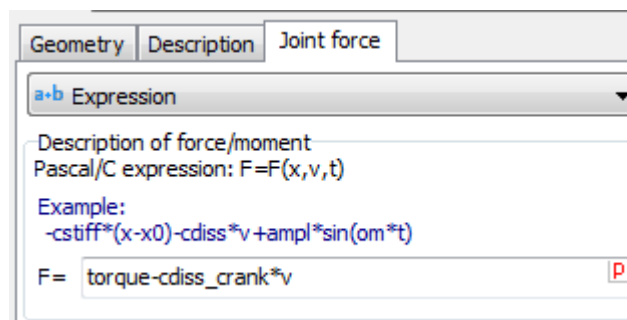


图 1.21

4. 另外三个较定义如图 1.22 所示。

Name: +

Body1: Body2:

Type:

Geometry Description Joint force

Joint points

Crank

<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

flexbeam

<input type="text" value="-1"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
---------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Joint vectors

Crank

<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

flexbeam

<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Name: +

Body1: Body2:

Type:

Geometry Description Joint force

Joint points

flexbeam

<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Slider

<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Joint vectors

flexbeam

<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Slider

<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

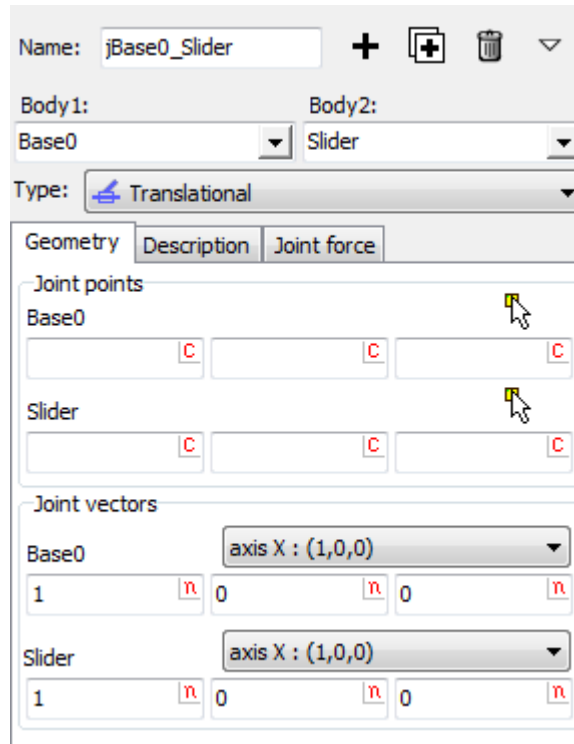


图 1.22

5. 选择菜单 **File | Save as** 保存模型。

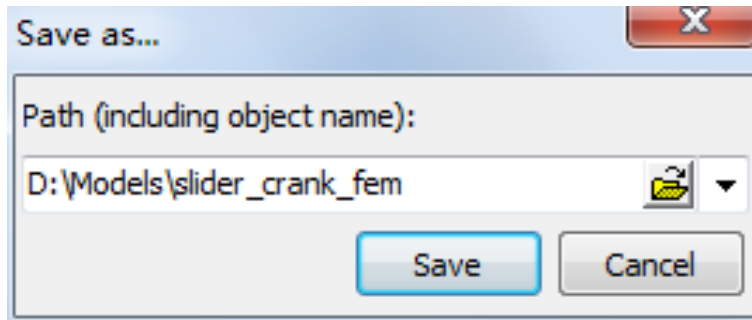


图 1.23

6. 最后，请将包含柔性体信息的 **input.fss** 文件所在文件夹 **flexbeam** 复制到模型目录 **slider_crank_fem**，这样在运行仿真时程序会自动找到柔性体子系统，否则需要手动指定。

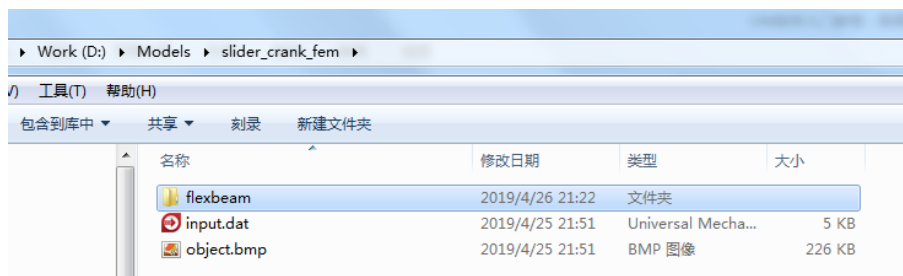


图 1.24

1.4 刚柔耦合系统动力学仿真

1. 选择菜单 **Object | Simulation**, 运行 **UM Simulation** 程序并加载模型(待 **UM Simulation** 程序运行加载模型后, 最好将 **UM Input** 程序关闭)。
2. **UM Simulation** 程序默认会打开一个动画窗口, 如果没打开, 可选择菜单 **Tools | Animation window**。
3. 选择菜单 **Analysis | Simulation**, 弹出仿真控制界面。读者可以在 **FEM subsystems | Image** 页面自由设置显示参数。
4. 在 **FEM Subsystems | Simulation | Option** 页面, 勾选 **Gravity** 和 **Fix modal coordinates**, 在 **Simulation | Damping** 页面, 设置阻尼相关系数 $a=0.001$, $b=0$, 如图 1.25 所示。

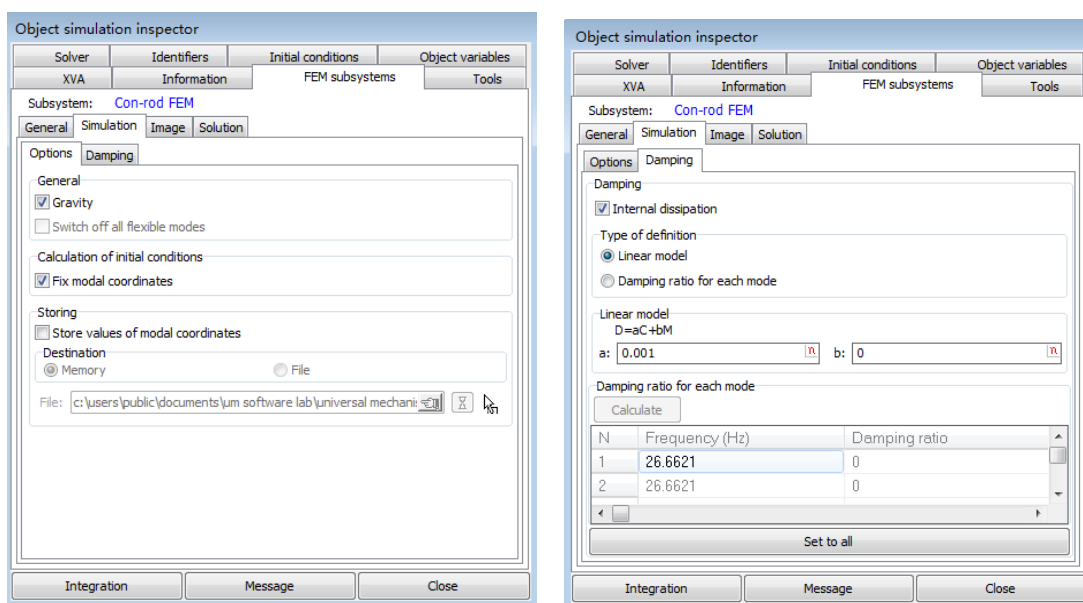




图 1.25

5. 点击 **Initial conditions** 页面, 从下拉菜单选择 **Con-rod FEM** 子系统, 如图所示。带有  标记的自由度意味着锁定状态。在这里, 表示在计算初始位置时忽略其弹性变形。
6. 点击按钮 , 计算约束状态下的初始位置, 这时动画窗口也会相应显示, 如图 1.27 所示。

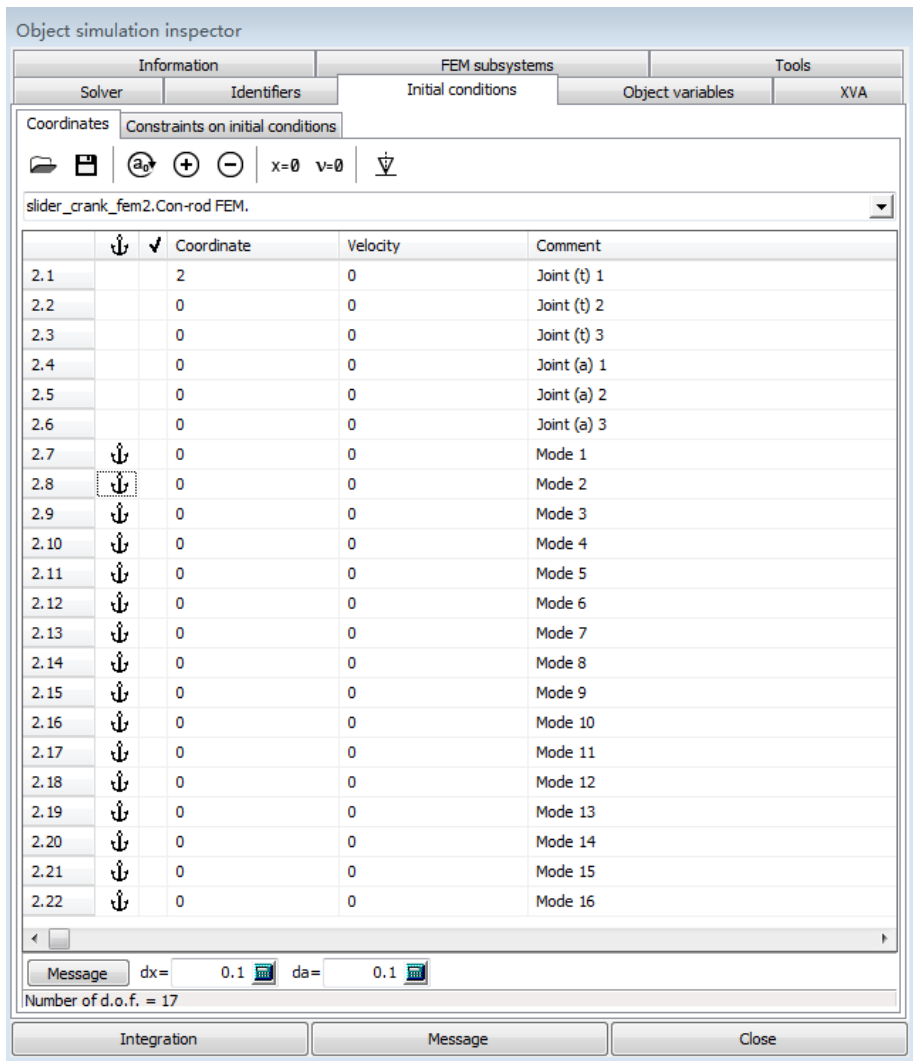


图 1.26

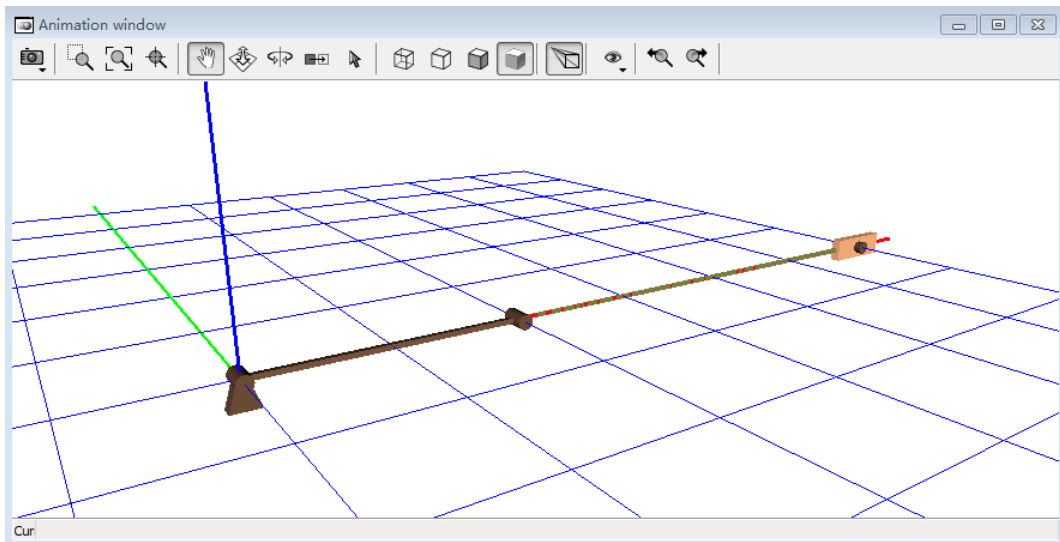


图 1.27

7. 选择菜单 **Tools | Graphic window**，打开一个绘图窗口。
8. 选择菜单 **Tools | Wizard of variables**，打开变量向导，创建两个支反力 **jCrank_Con-rod** 和 **jCon-rod_Slider**，如图 1.28 所示 (**Reaction** 页面)，并拖入绘图窗口，然后关闭变量向导。

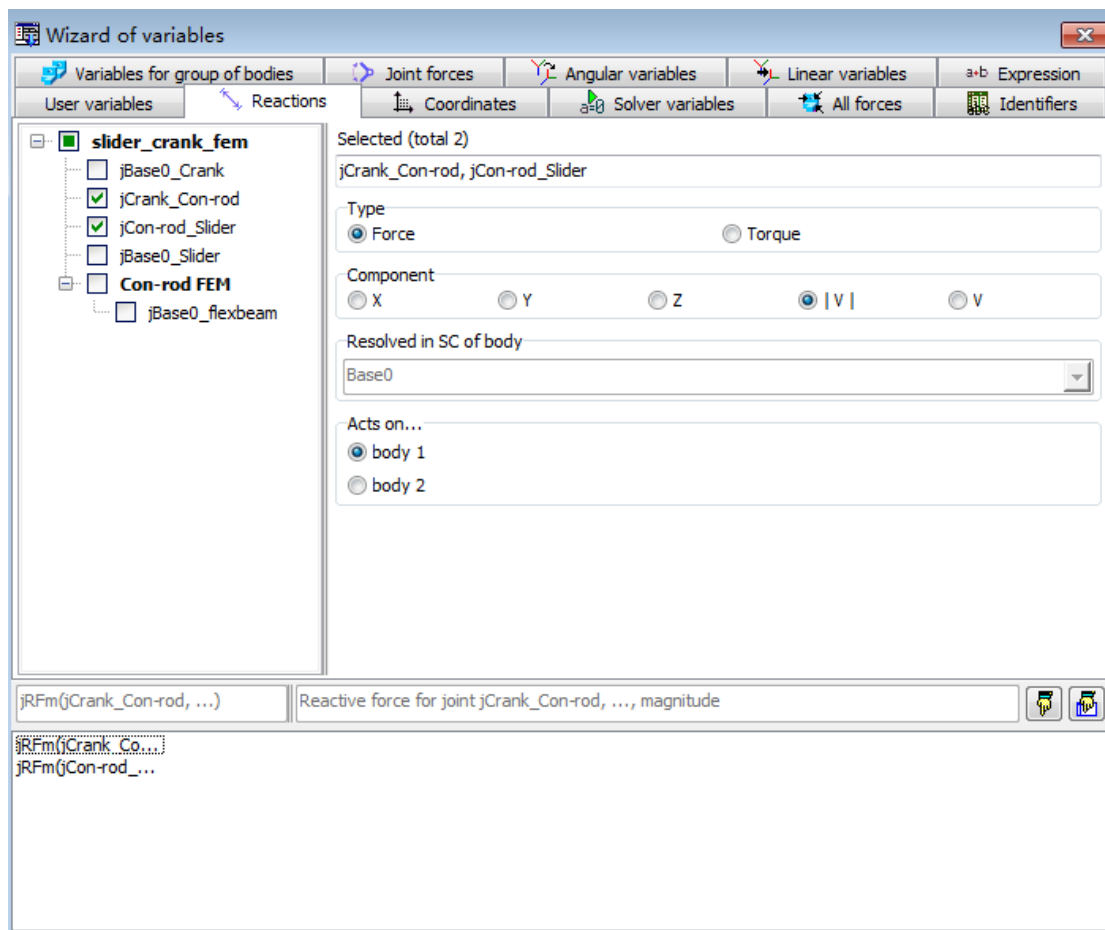


图 1.28

9. 在仿真控制界面点击 **Solver** 页面，设置参数如下：

- **Solver = Park**
- **Type of solving = Range Space Method**
- **Simulation time = 2**
- **Step size for animation and data storage = 0.001**
- **Error tolerance = 1E-7**
- **Computing Jacobian matrices = on**
- **Block-diagonal matrices = off**

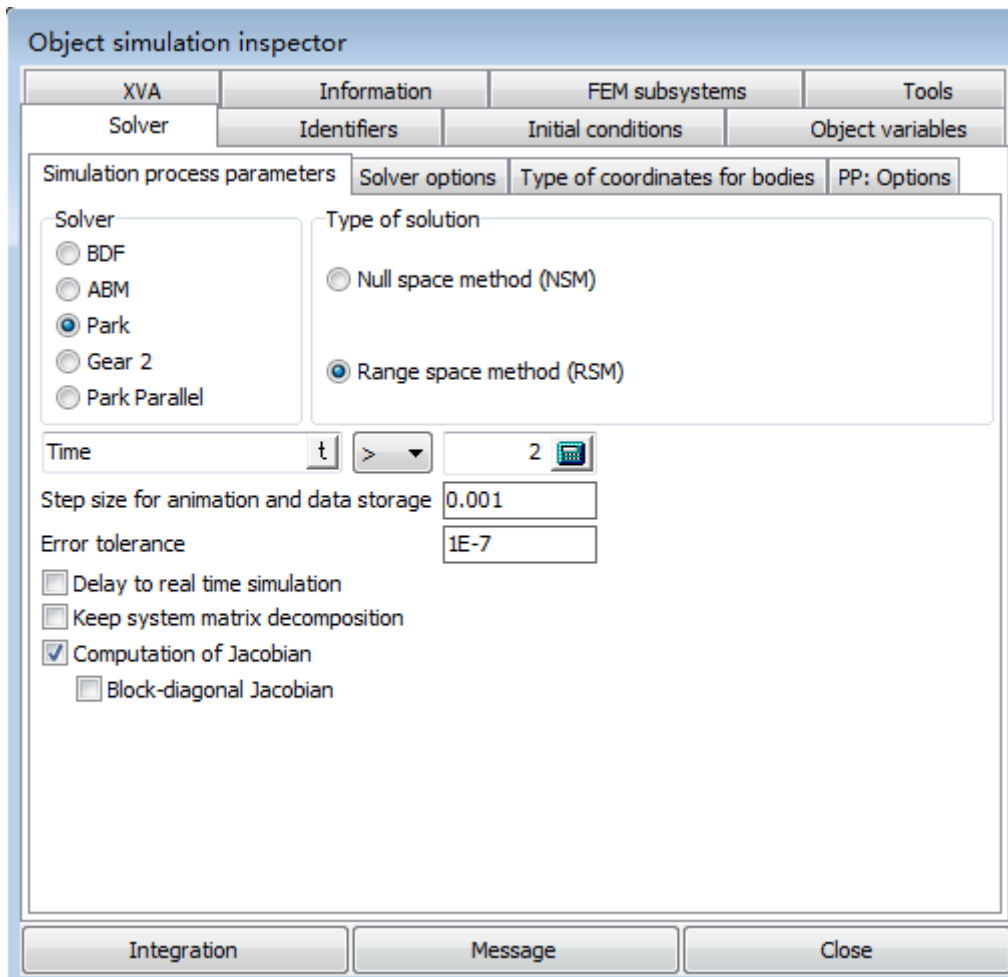


图 1.29

10. 点击 **Integration** 按钮开始仿真，在动画窗口可以观察机构的运动情况（图 1.30），在绘图窗口可以观察支反力时程曲线（图 1.31）。

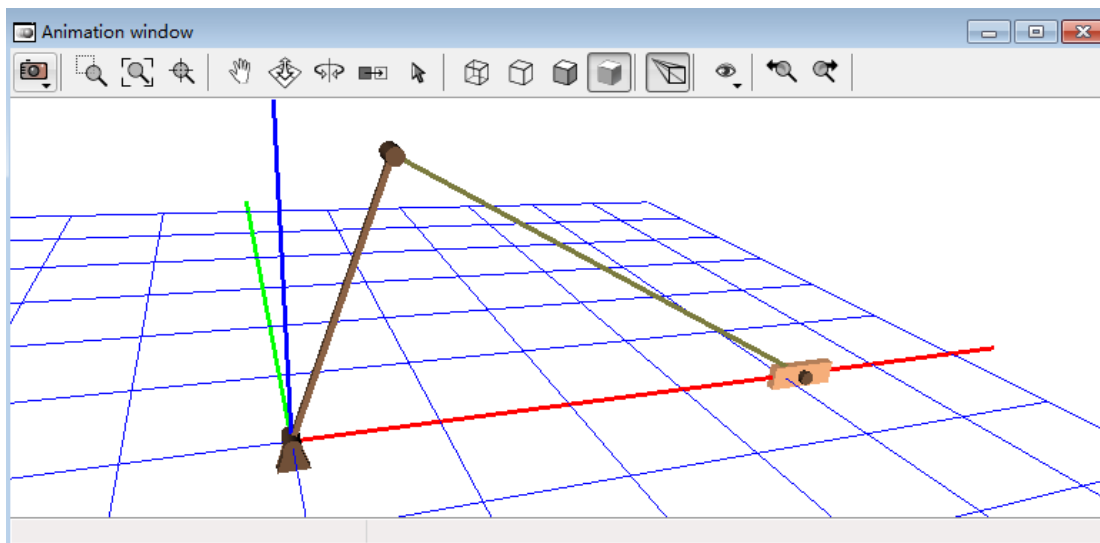


图 1.30

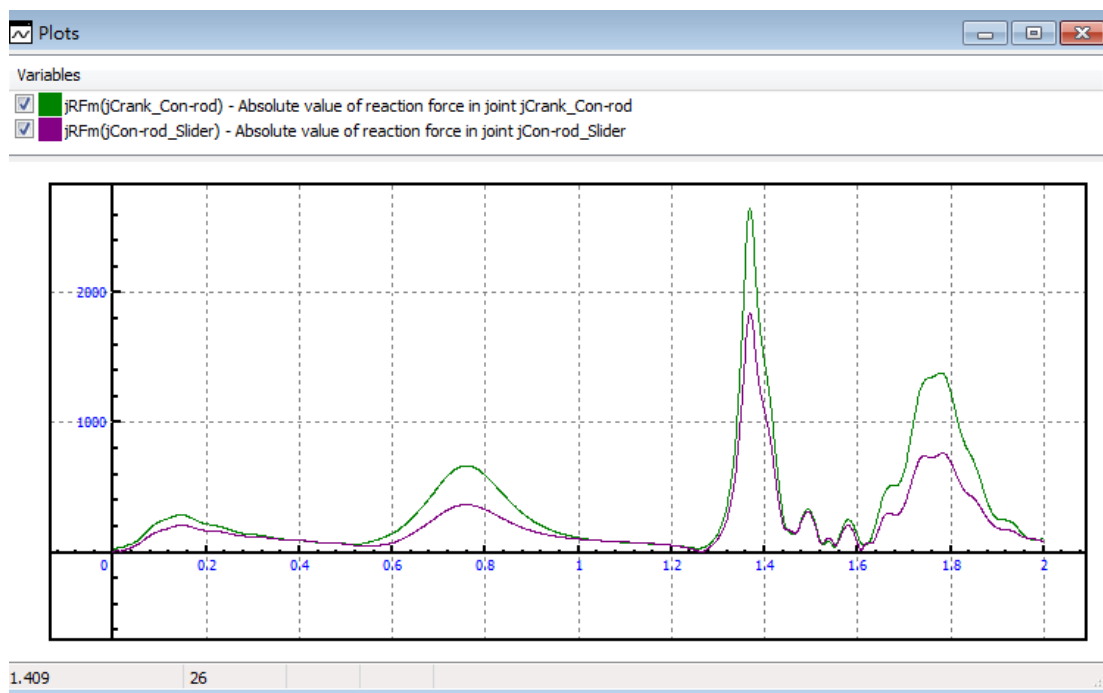


图 1.31

读者可以打开位于{UM Data}\SAMPLES\Flex 目录的 slider_crank_all 模型，对比不同建模方法的连杆对结果的影响，如图 1.32 所示。

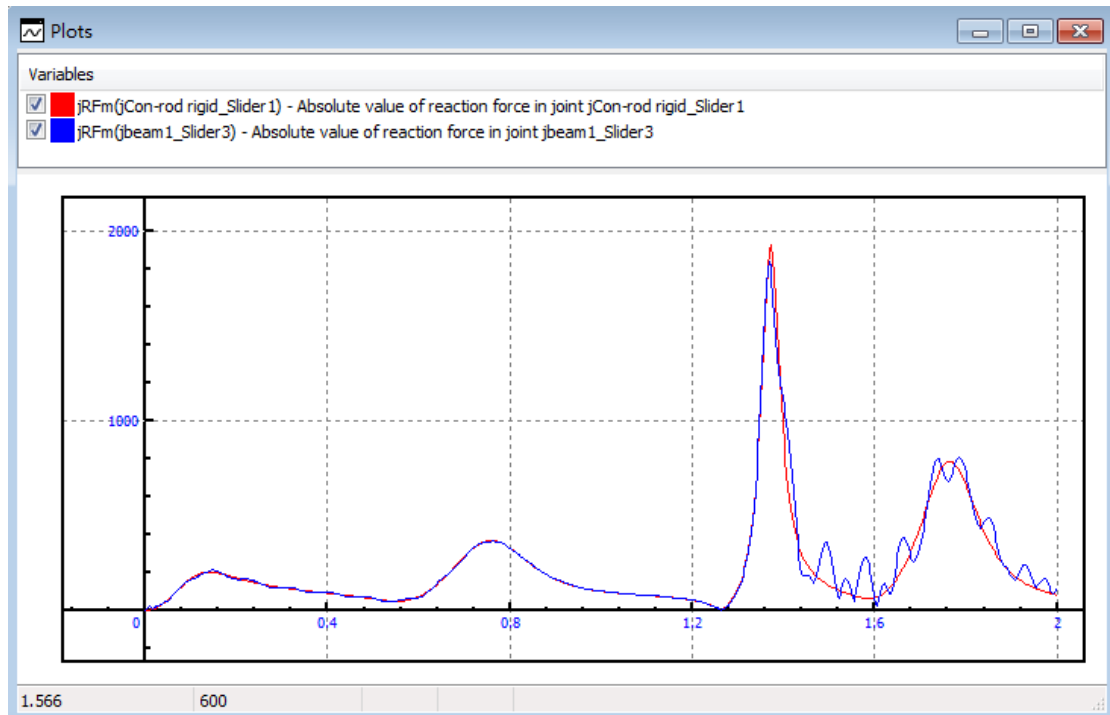


图 1.32 红色曲线对应刚性连杆，蓝色曲线对应柔性连杆

2. 柔性平台-电机模型

本例的柔性平台-电机模型如图 2.1 所示。

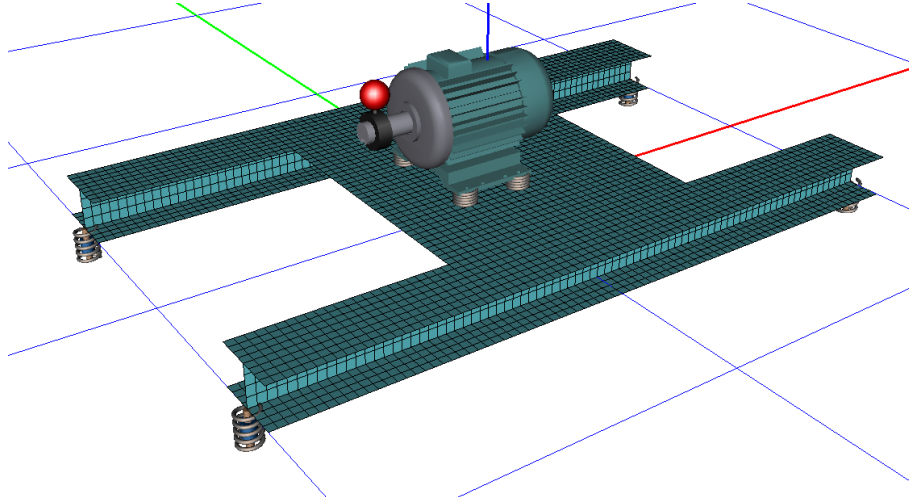


图 2.1

柔性平台通过四个粘弹性力元与大地相连，电机多刚体模型作为一个外部子系统导入，并与柔性平台通过四个粘弹性力元连接。电机转子上安装有一个偏心轮，它的转动引起柔性平台振动。

刚柔耦合系统建模流程：

- 在 ANSYS 软件里创建平台有限元模型；
- 将柔性平台导入 UM 模型；
- 创建柔性平台与大地的连接；
- 创建电机模型；
- 以子系统形式导入电机模型；
- 创建柔性平台与电机的连接。

动力学仿真分析内容：

- 各个力元的时程曲线；
- 柔性平台节点的垂向位移和加速度。

模拟电机的工作模式：

- 启动（角速度从 0 逐步增加）；
- 匀速（角速度恒定）；
- 关机（角速度逐步减小至 0）。

请先在工作目录创建两个文件夹 **Vibrostand** 和 **Platform**。

- **.\Vibrostand** （用于最终的刚柔耦合模型）
- **.\Vibrostand\Platform** （用于柔性平台子系统）

2.1 准备柔性平台

在 **UM** 软件里，每个柔性体都是作为一个独立的子系统存在，其类型为 **Linear FEM Subsystem**，标准格式文件为 **input.fss**，制作流程如下：

- 在 **ANSYS** 软件里创建平台有限元模型；
- 计算模态并输出 **UM** 所需的格式文件；

两种方式：

- 由 **ANSYS_UM.EXE** 程序直接生成 **input.fss** 文件。
- 先由 **ANSYS_UM.EXE** 程序生成 **input.fum** 文件，再利用 **UM** 的柔性子系统向导工具转换生成 **input.fss** 文件。使用柔性子系统向导的优势在于既能可视化观察每阶模态，还能手动剔除某些不需要的模态。

在 {**UM Data**}**SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform** 目录下有三个文件：**input.fss**、**input.fum** 和 **PlatformShell63Demo.ans**。

- 如果没有 **ANSYS** 软件或者不想学习在 **ANSYS** 里的准备工作，那么请直接从 2.1.3 章节开始阅读。请注意需要从 {**UM Data**}**SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform** 目录复制 **input.fum** 文件到先前创建的 **\Vibrostand\Platform** 目录。
- 如果想跳过所有准备弹性体文件的步骤，可以直接从 2.2 章节开始阅读。请注意需要从 {**UM Data**}**SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform** 目录复制 **input.fss** 文件到 **\Vibrostand\Platform** 目录。

2.1.1 在 ANSYS 环境里工作

在开始前，请确认已经按 1.1 章节的操作配置好了 ANSYS 工作环境。

接下来进行如下操作：

1. 请读者先从{UM Data}\SAMPLES\Flex\Vibrostand\platform 目录复制文件 **PlatformShell63Demo.ans** 到.\Vibrostand\Platform 目录。
PlatformShell63Demo.ans 文件是采用 ANSYS 的 APDL 命令编写的，可自动完成建模。
2. 运行 **ANSYS APDL Product Launcher**，设置.\Vibrostand\Platform 为当前工作目录。
3. 点击 **RUN**，运行 **ANSYS** 经典界面。
4. 选择菜单 **File | Read Input from**，选择命令流 **PlatformShell63Demo.ans**，程序自动完成平台建模。

备注：平台有两根 1m 长的梁和中间一块板组成，共有 4224 个 SHELL63 单元，单元尺寸为 5cm。读者可以用记事本打开 PlatformShell63Demo.ans 文件，修改模型参数。与大地相连的四个节点选作界面节点。

5. 建模完成后自动运行 **um.mac** 宏命令，计算出 **24** 阶静模态和 **10** 阶固有模态。
6. 随后，**ANSYS_UM.EXE** 程序自动运行，请读者按 1.2.1 章节第 5-8 步骤进行转换，生成 **input.fum** 文件。

2.1.2 在 ANSYS Workbench 环境里工作

1. 适用于 ANSYS 经典界面的命令流文件 **PlatformShell63Demo.ans** 不可直接用于 ANSYS Workbench 环境。我们需要用记事本打开，删除以下与 **UM** 有关的代码，并保存文件：

```
NSEL,s,,,ALL
ESLN,s,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
KSEL,S,,,5
KSEL,A,,,11
KSEL,A,,,105
KSEL,A,,,111
NSLK,S
UM,10,1,1,1
```

2. 运行 ANSYS 经典界面，选择菜单 **File | Read Input from**，读入修改后的 **PlatformShell63Demo.ans**；然后选择菜单 **Preprocessor | Archive Model | Write**，输出 **Platform.cdb** 文件，如图 2.2 所示。

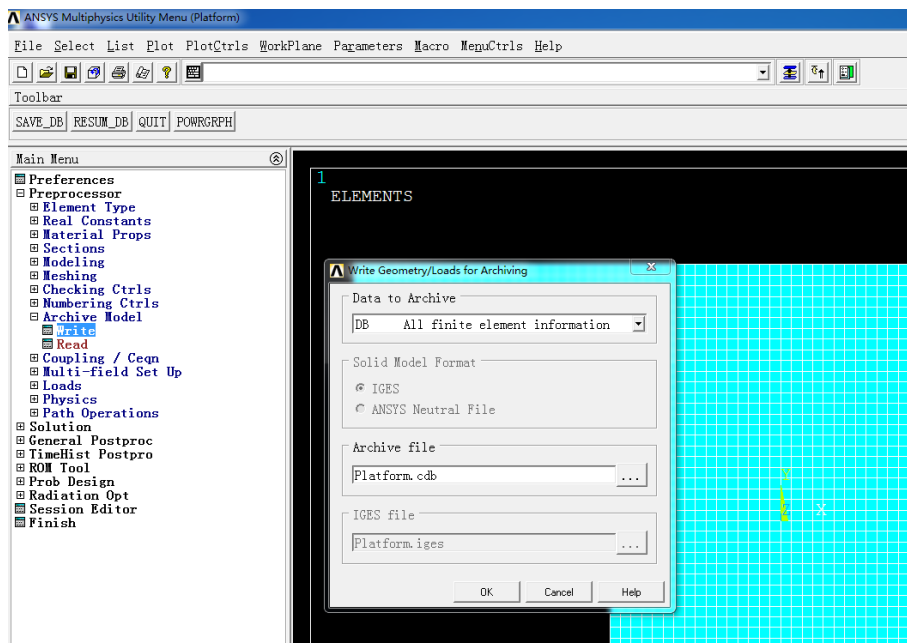


图 2.2

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/737024051136010020>