

刚柔耦合动力学仿真

UM 软件入门系列教程

(04)

四川同算科技有限公司 译

2021 年 3 月

前言

本教程介绍使用**UM FEM**模块进行刚柔耦合系统动力学建模和仿真基本方法和流程。其中，柔性体模型在有限元软件里建立并导入**UM**软件，其弹性变形只能为小变形，且是线性的。

本教程将通过两个例子讲解多刚体系统与柔性体耦合的实现过程。有关柔性体建模和计算更加详细的内容，请参见用户手册第**11**章。

请读者在学习本课程之前务必先学习《**UM**软件入门系列教程**01：多体系统动力学仿真**》，并熟悉**UM**软件的基本操作：新建模型，创建几何图形、刚体、铰和力元。

UM FEM模块应用修正的**Craig-Bampton**模态综合法来实现柔性体的动力计算，这种方法需要求解柔性体的一组固有模态和静模态。**UM FEM**模块提供了**ANSYS**、**ABAQUS**、**MSC.NASTRAN**和**NX NASTRAN**等有限元软件的接口程序。

本教程以**ANSYS**为例进行讲解，其余软件接口的用法请参见第**11**章用户手册。

在**UM**模型里，每个柔性体作为一个单独的子系统存在，最终的数据文件为**input.fss**。使用**ANSYS**软件时有两种方式得到**input.fss**文件。其一是直接通过程序**ANSYS_UM.EXE**转换得到；其二是先用**ANSYS_UM.EXE**转换得到**input.fum**文件，再到**UM Input**程序里用柔性子系统向导转换生成**input.fss**文件。

一旦生成了**input.fum**或**input.fss**文件，那么就不再需要**ANSYS_UM.EXE**和**ANSYS**了，后续操作全部在**UM**软件里进行。

请读者务必逐页阅读、一步一步操作，有些基本的软件操作在后面不会详细介绍甚至忽略。

请先运行**UM Input**或**UM Simulation**程序，选择菜单**Help | About**，在弹出窗口查看**UM FEM**一栏是否为“+”标记，若显示为“-”，则请重新申请试用或购买正版许可。

版权和商标

本教程仅供读者参考，不同的版本其界面可能有个别不同之处，我们会不定期进行修订。对于本文档中可能出现的任何错误，我们不承担任何责任或义务。

版权所有© 2021 Computational Mechanics Ltd.

俄罗斯计算力学有限公司保留所有权利。

联系方式

最新版的UM软件和相应的用户手册下载地址：

<http://www.universalmechanism.com/en/pages/index.php?id=3>.

若无法访问，请点击：<http://www.umlab.ru/en/pages/index.php?id=3>.

在使用过程中，读者如有任何报错、疑问和建议，请发送邮件至：

um@universalmechanism.com

UM总部

Computational Mechanics Ltd.

Vostochnaya str. 2-14, Glinischevo, Bryansk region, 241525, Russia

Phone, fax: +7 4832 568637

www.universalmechanism.com www.umlab.ru

UM中国

四川同算科技有限公司

四川省眉山市彭山区蔡山西路2号伟业广场1911室

办公电话：028-38520556

公司网站：www.tongsuan.cn

电子邮件：um@tongsuan.cn



微信公众号



QQ 交流群

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 | 13 |
| 1.3.1 | 创建几何图形 | 14 |
| 1.3.2 | 创建刚体..... | 16 |
| 1.3.3 | 创建柔性子系统..... | 17 |
| 1.3.4 | 创建铰..... | 18 |
| 1.4 | 刚柔耦合系统动力学仿真 | 21 |
| 2. | 柔性平台-电机模型..... | 27 |
| 2.1 | 准备柔性平台 | 28 |
| 2.1.1 | 在 ANSYS 环境里工作..... | 29 |
| 2.1.2 | 在 ANSYS Workbench 环境里工作 | 30 |
| 2.1.3 | 柔性子系统向导..... | 37 |
| 2.2 | 刚柔耦合系统动力学建模与仿真..... | 38 |
| 2.2.1 | 导入柔性平台 | 38 |
| 2.2.2 | 连接柔性平台与大地 | 39 |
| 2.2.3 | 创建几何图形 | 39 |
| 2.2.4 | 创建力元..... | 43 |
| 2.2.5 | 导入电机子系统..... | 46 |
| 2.2.6 | 设置电机转子速度曲线 | 48 |
| 2.2.7 | 连接电机与柔性平台 | 50 |
| 2.2.8 | 计算系统平衡位置和固有频率 | 52 |
| 2.2.9 | 运动仿真..... | 54 |

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。

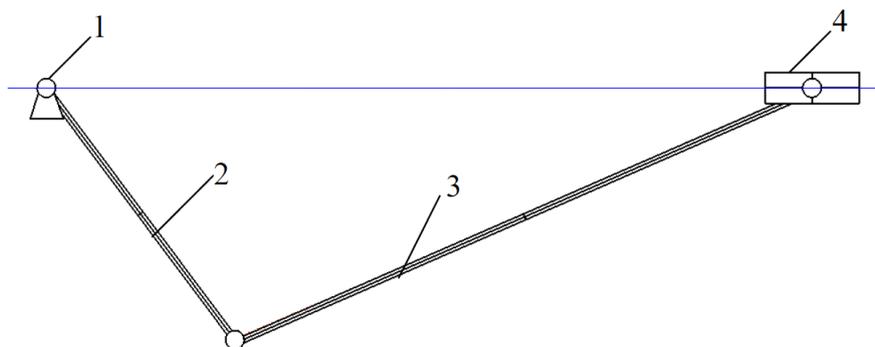


图 1.1 曲柄-滑块机构：1-机架，2-曲柄，3-连杆，4-滑块

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:\Program Files\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\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，弹出如图 1.2 所示的界面。否则，请手动运行，其文件路径为{UM}\bin\ansys_um.exe。

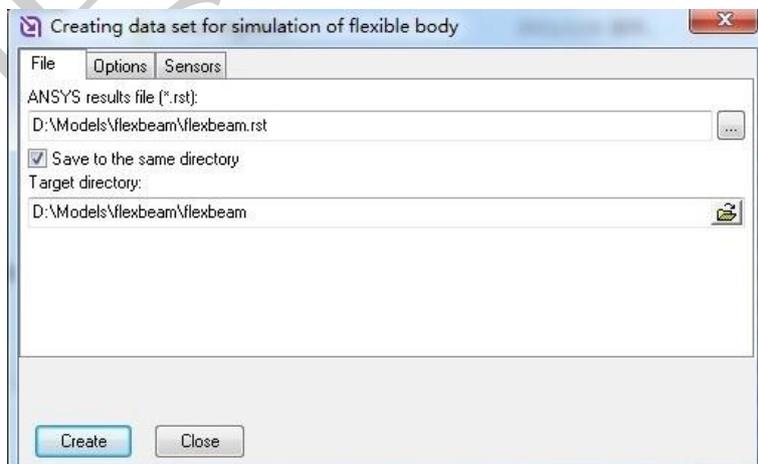


图 1.2 ANSYS_UM 程序界面

5. 在**File**页面，点击按钮，选择上一步计算得到的ANSYS结果文件，路径为.\flexbeam\flexbeam.rst，勾选**Save to the same directory**，自动将保存目录设置为.\flexbeam\flexbeam（第一个flexbeam是我们先前创建的文件夹，第二个flexbeam是程序自动识别的有限元模型名称）。
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。

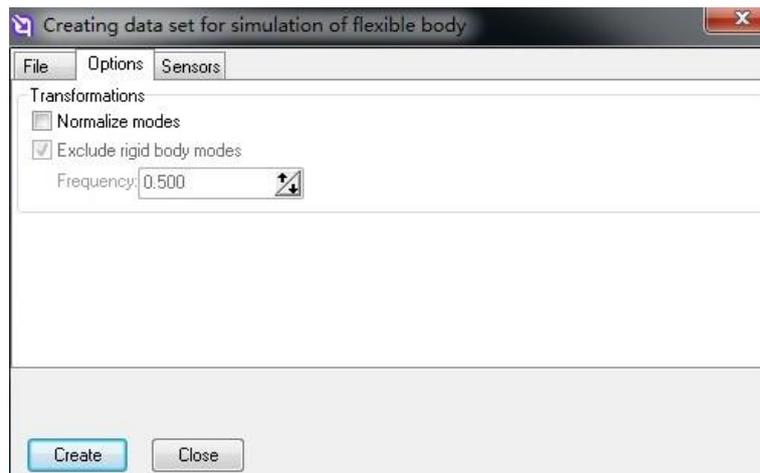


图 1.3

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\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\flexbeam** 文件夹里的文件 **input.fum**，点击 **OK**，如图 1.4 所示。

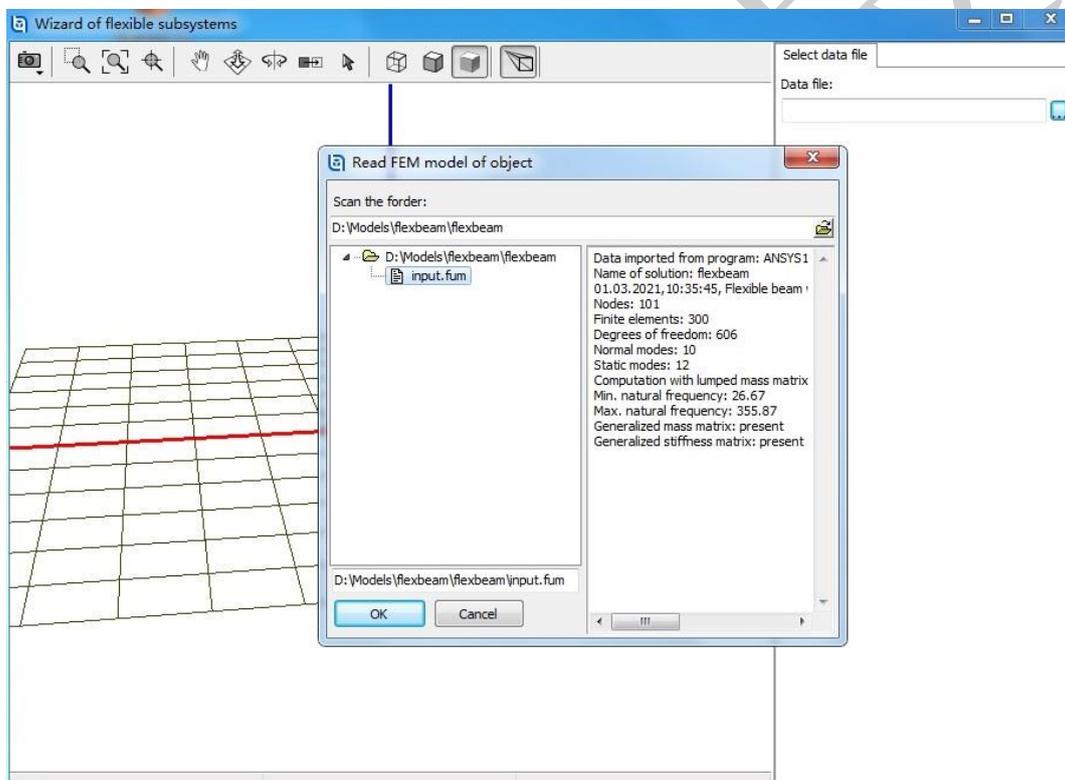


图 1.4

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。

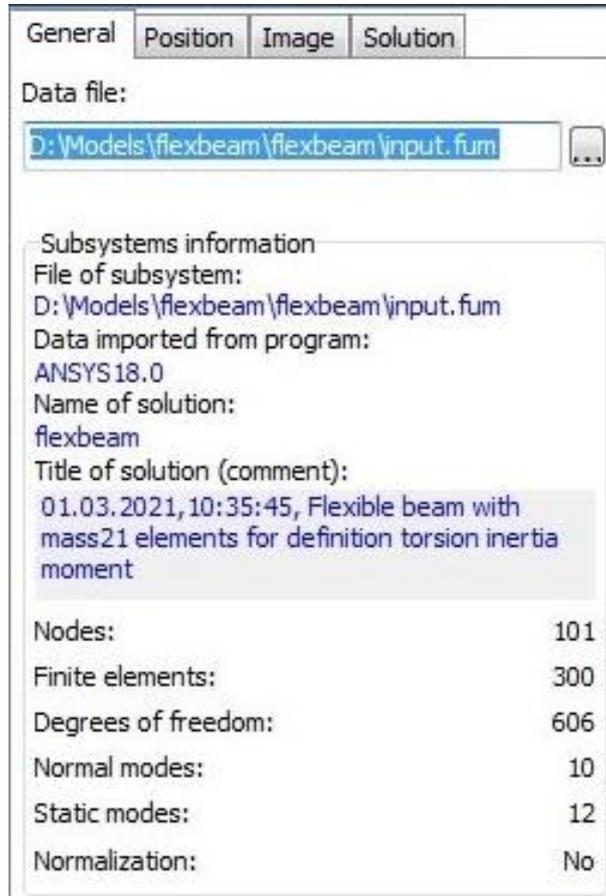


图 1.5

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

The screenshot shows the 'Image' tab of a software interface. It is divided into three sections: 'Shift', 'Rotation', and 'Shift after rotation'.
 - The 'Shift' section contains three input fields for x, y, and z. The x and y fields are empty, while the z field contains the value '0.3'. Each field has a small red 'n' icon to its right.
 - The 'Rotation' section contains three dropdown menus, each showing the value '0.00000000'. To the right of each dropdown is a small icon with four arrows pointing outwards.
 - The 'Shift after rotation' section contains three input fields for x, y, and z, all of which are empty. Each field has a small red 'n' icon to its right.

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，如图 1.7 所示。

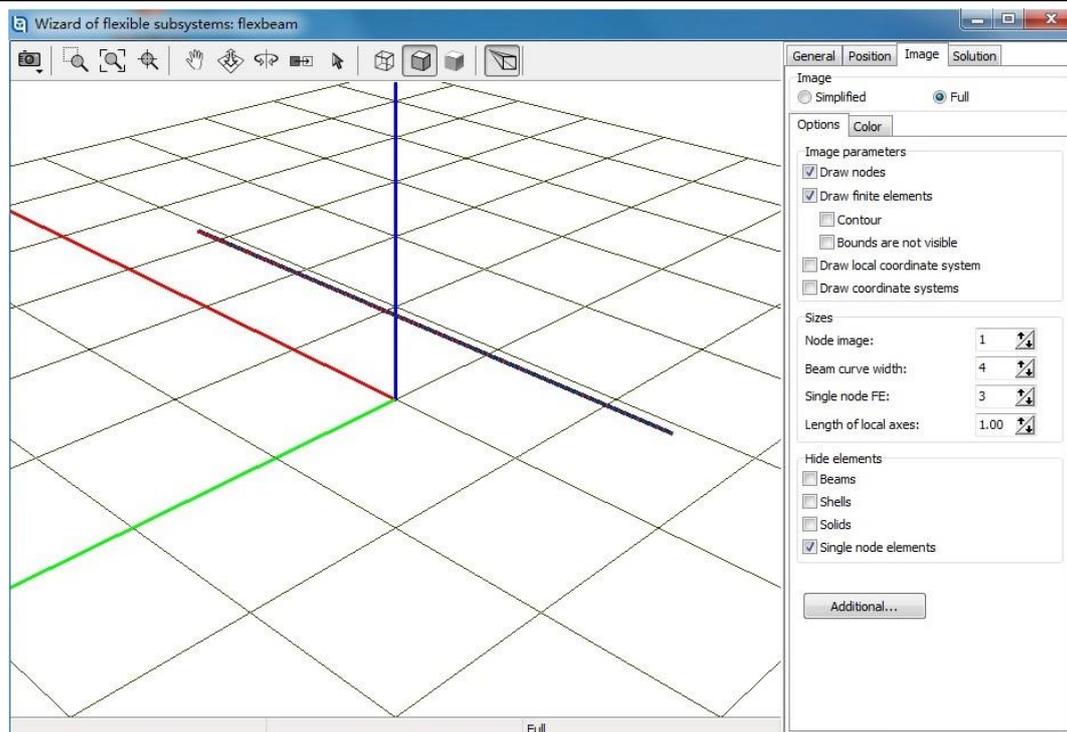


图 1.7

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。

8. 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。
9. 点击 **Transform** 按钮, 开始转换。

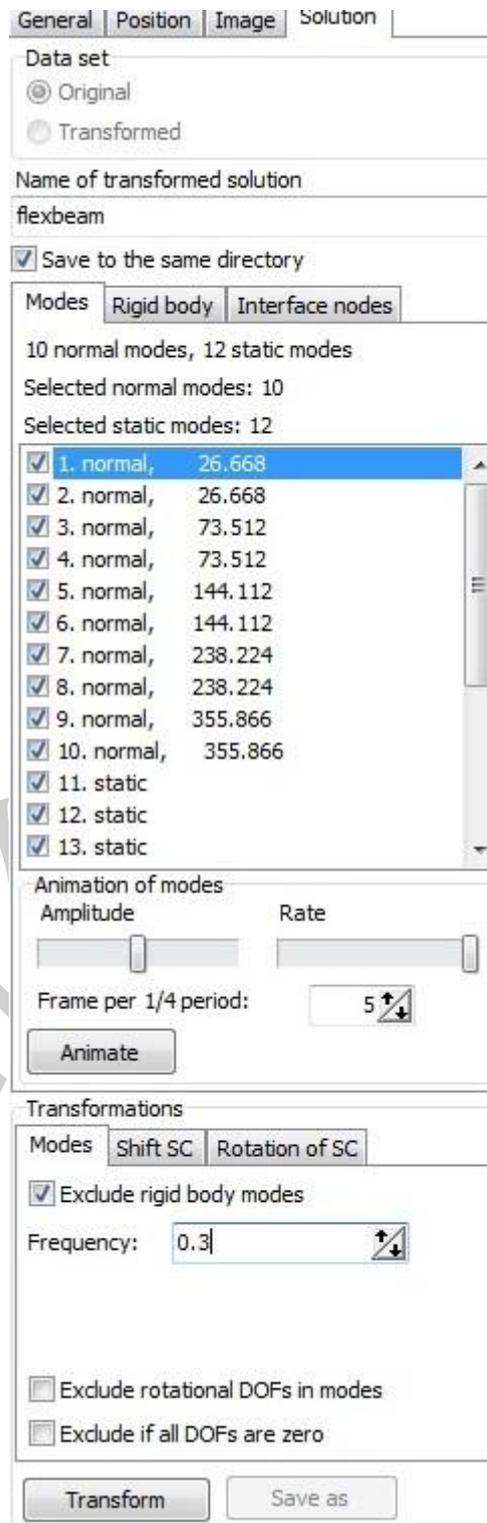


图 1.8

10. 然后依次点击是(Y), 确定, OK。

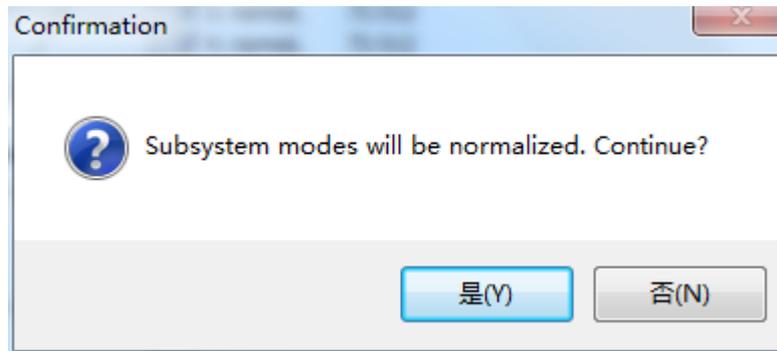


图 1.9

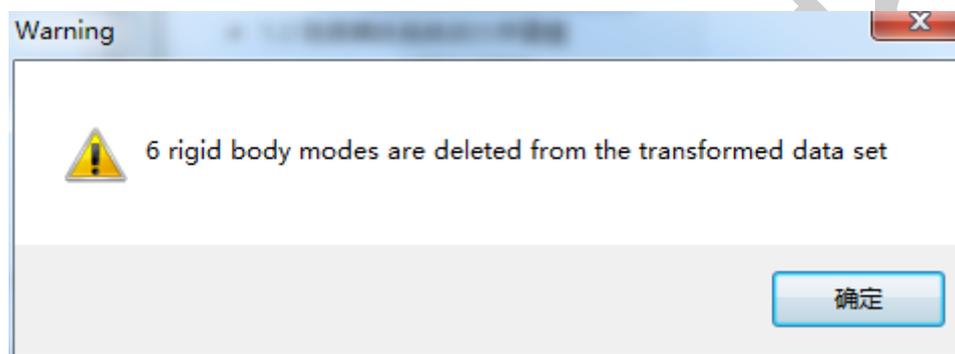


图 1.10

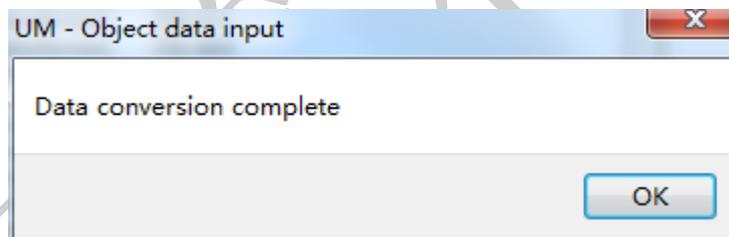


图 1.11

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。

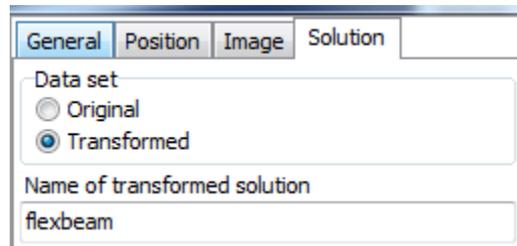


图 1.12

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。

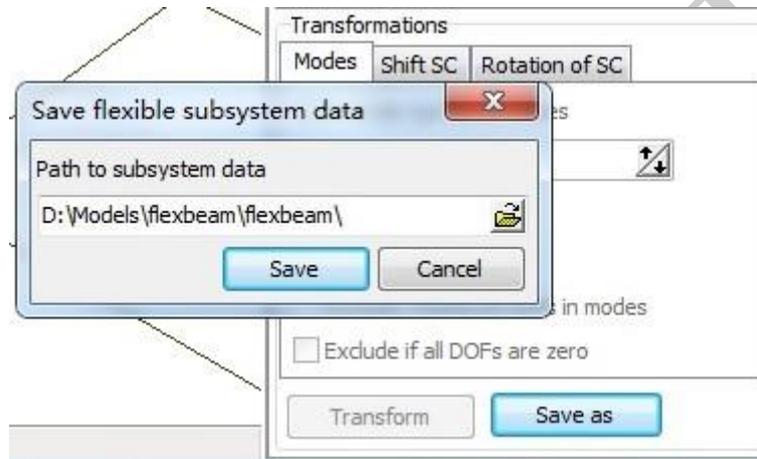


图 1.13

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**。若有报错界面出现，点击 **No** 即可。

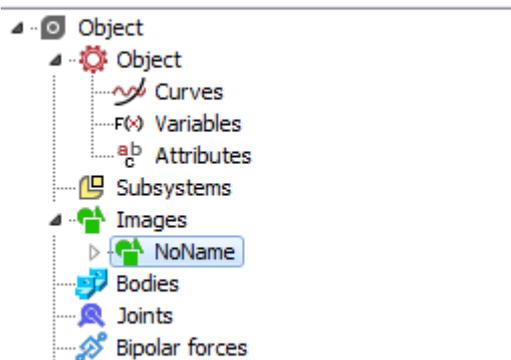


图 1.14

3. 选中 **NoName**，设置名称为 **Base0**。

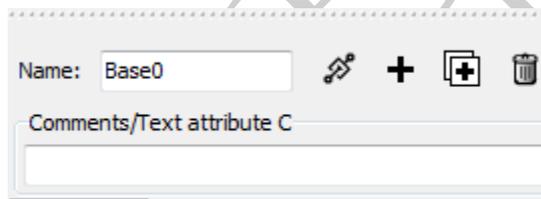


图 1.15

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**。

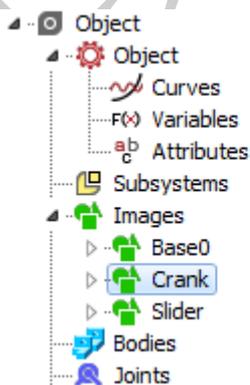


图 1.16

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**。

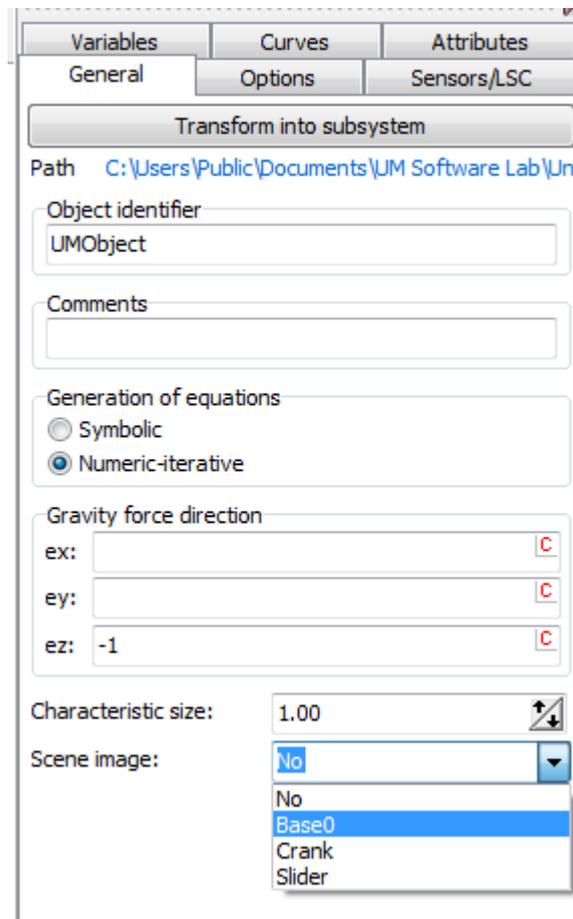


图 1.17

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。

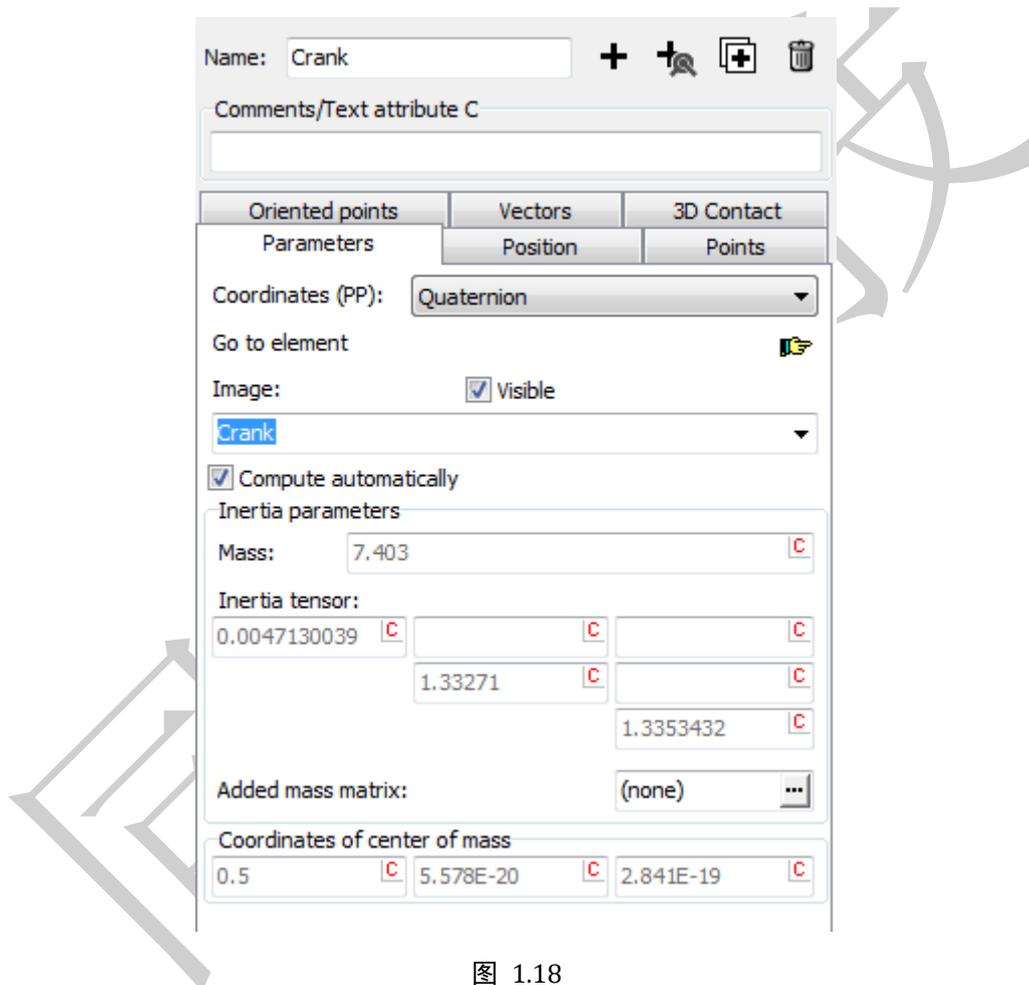


图 1.18

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式；
- 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。

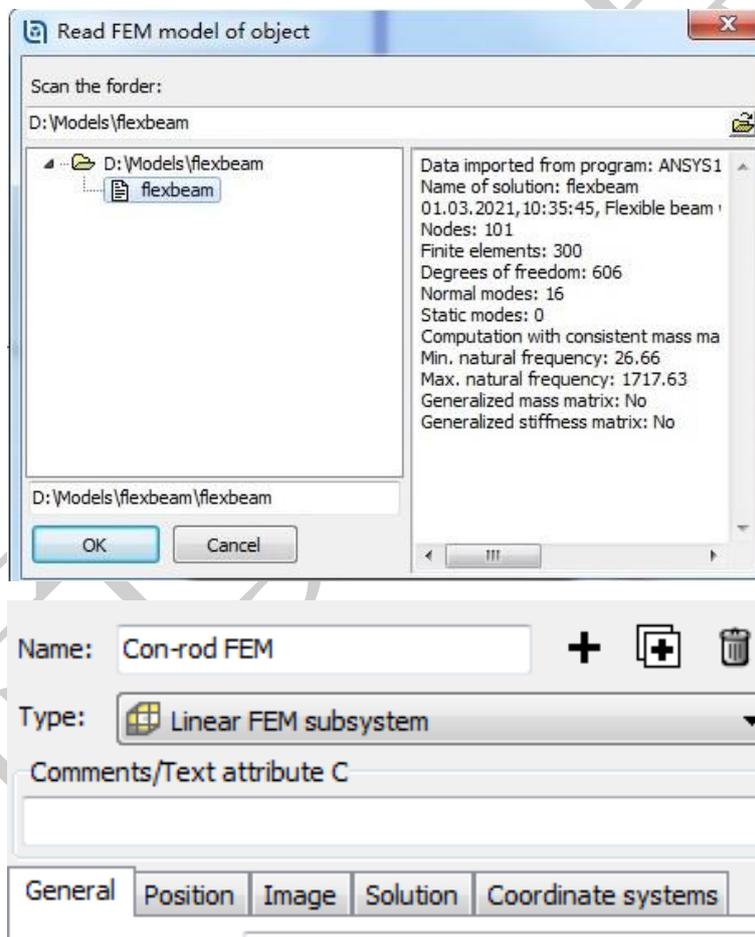


图 1.19

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。

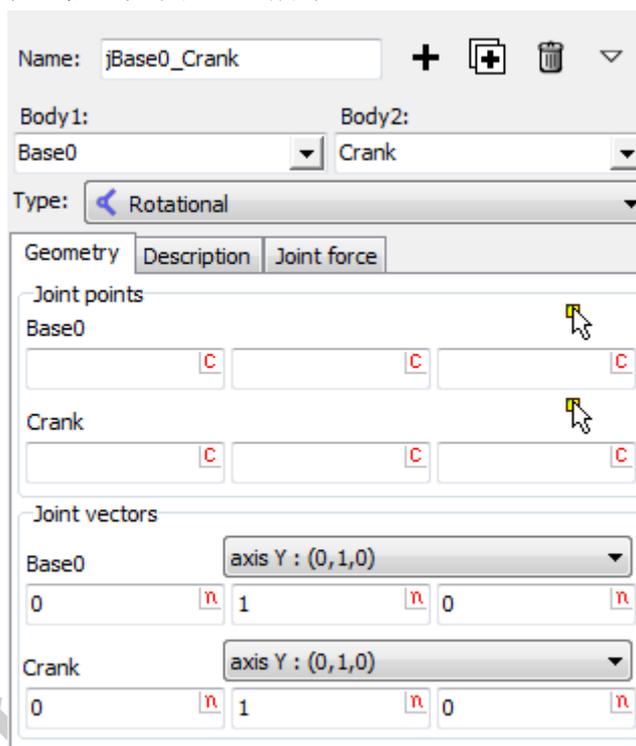


图 1.20

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： $\text{torque}=100$ ， $\text{cdiss_crank}=10$ 。

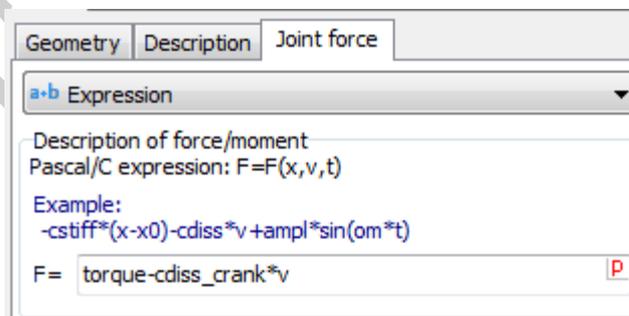
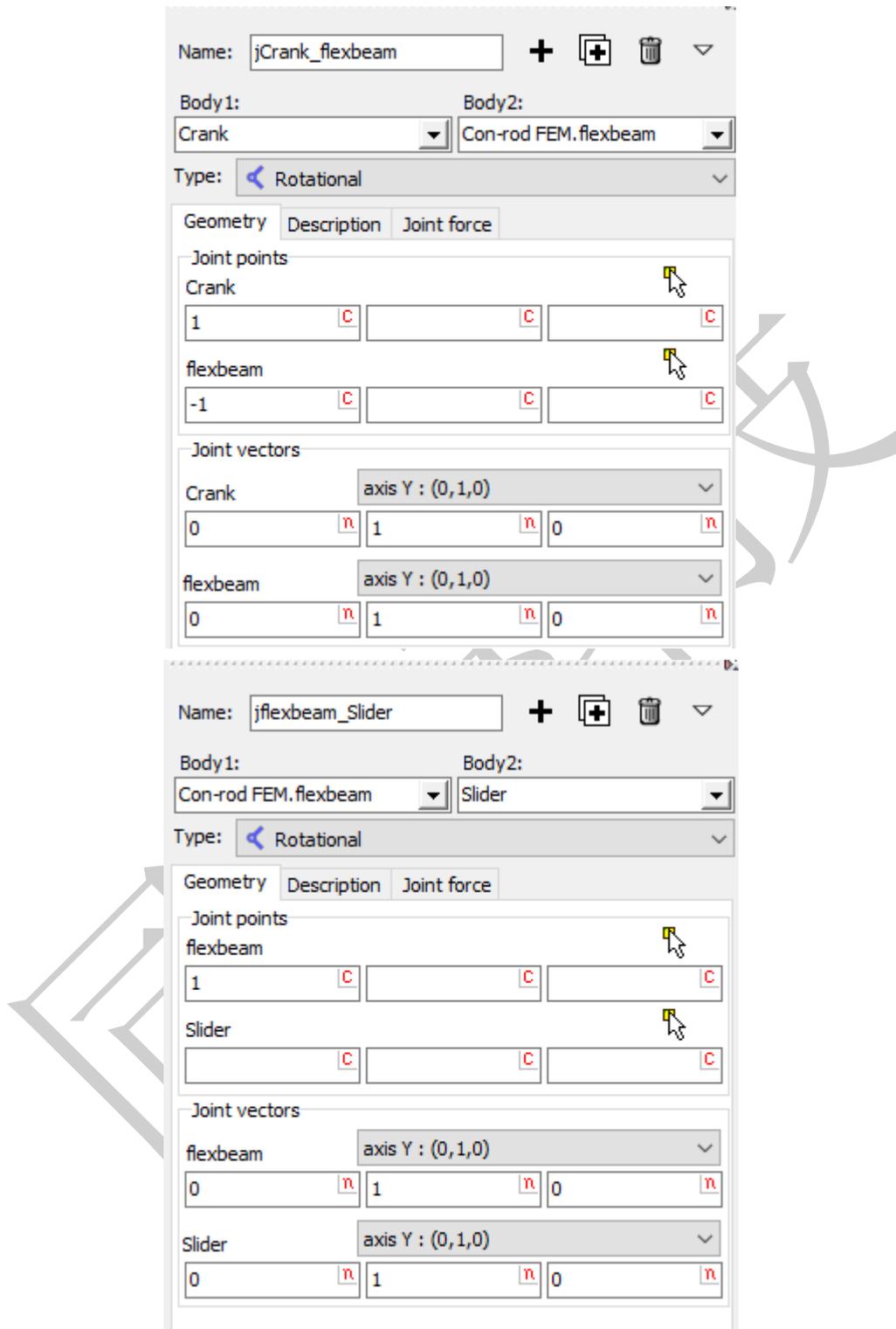


图 1.21

4. 另外三个铰定义如图 1.22 所示。



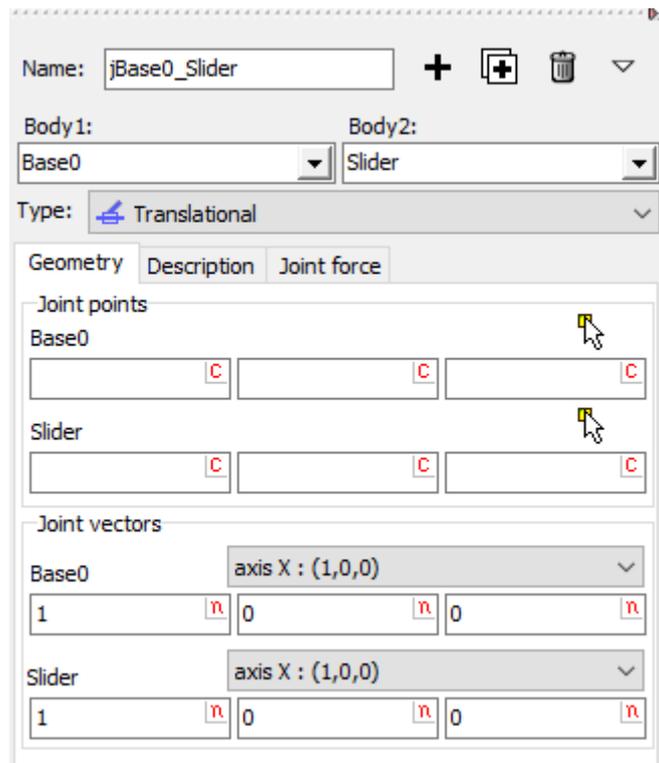


图 1.22

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\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。

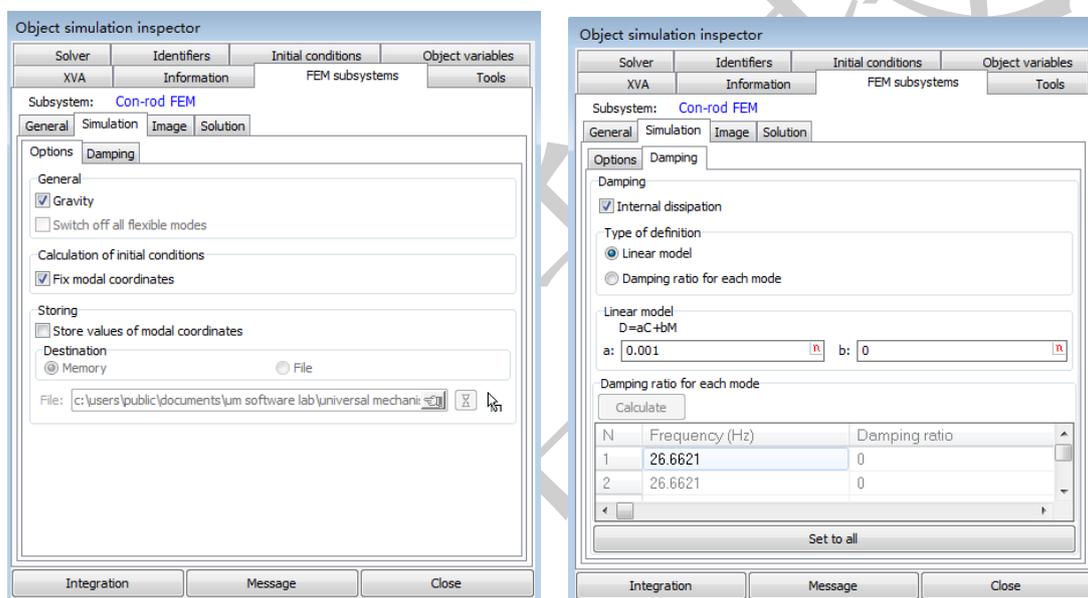


图 1.25

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。

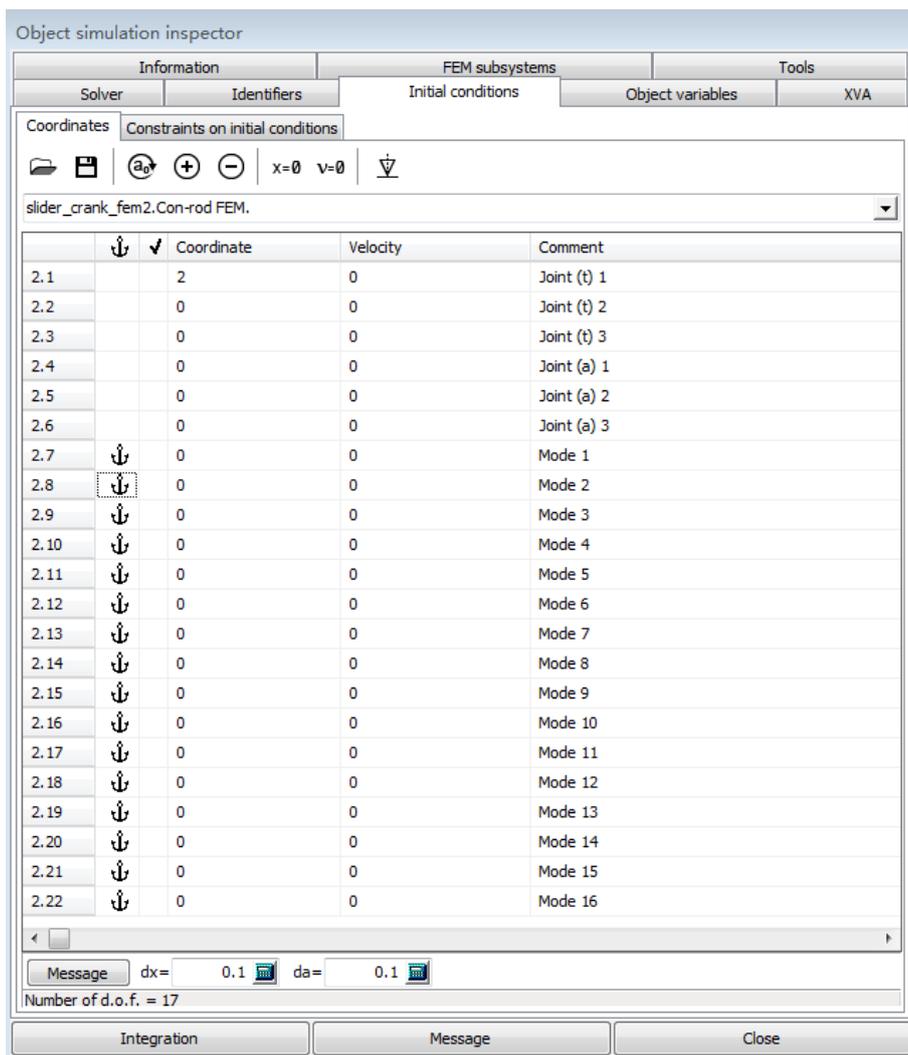


图 1.26

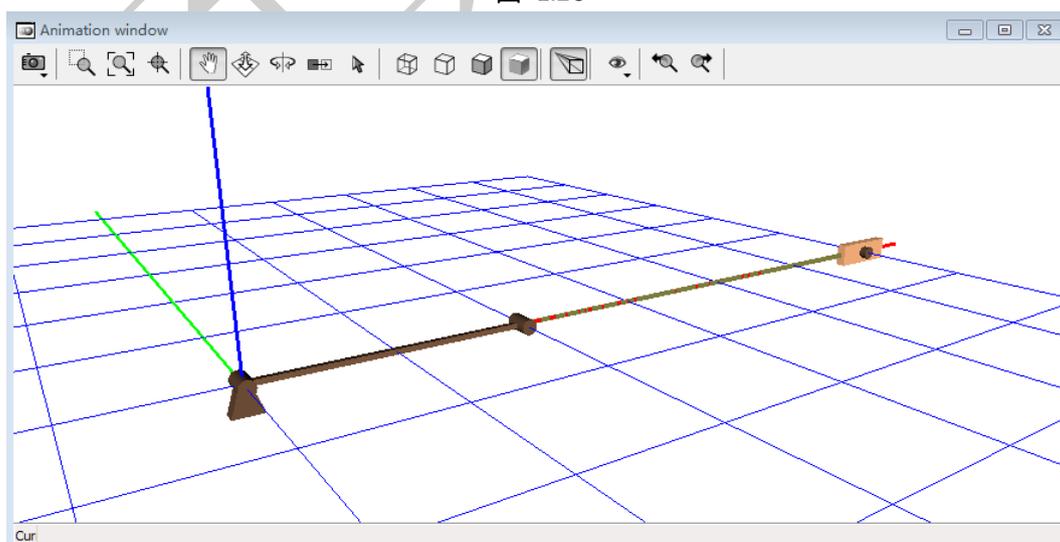


图 1.27

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_flexbeam** 和 **jflexbeam_Slider**，如图 1.28 所示(Reactions 页面)，并拖入绘图窗口，然后关闭变量向导。

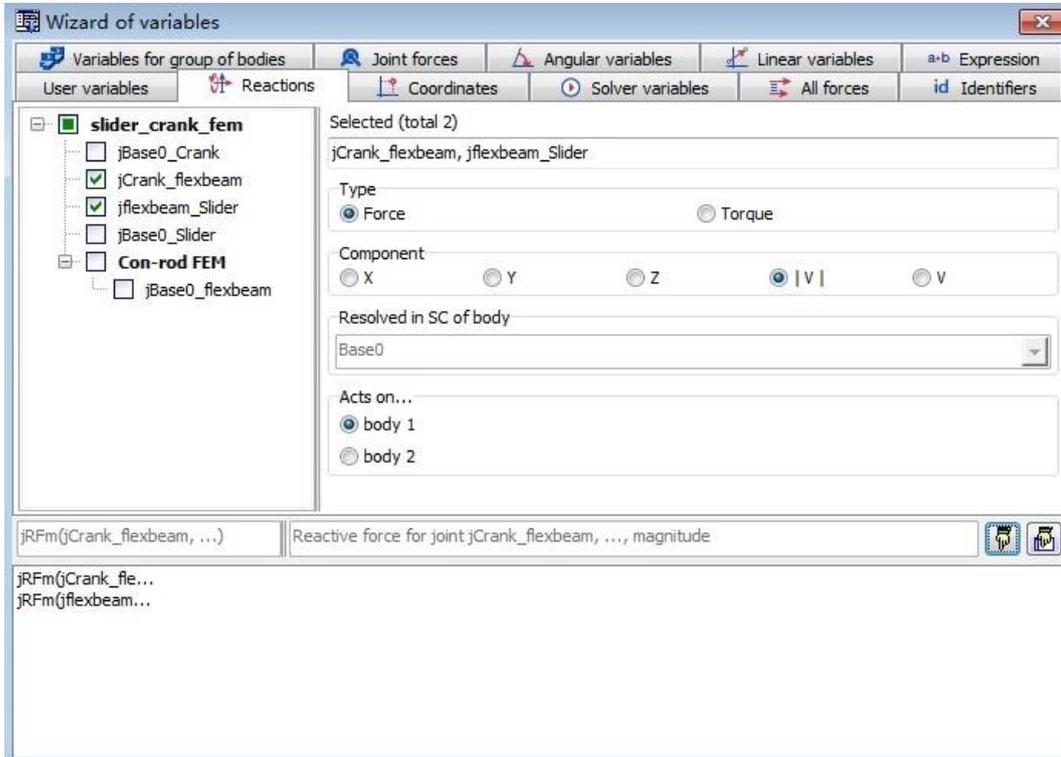


图 1.28

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**

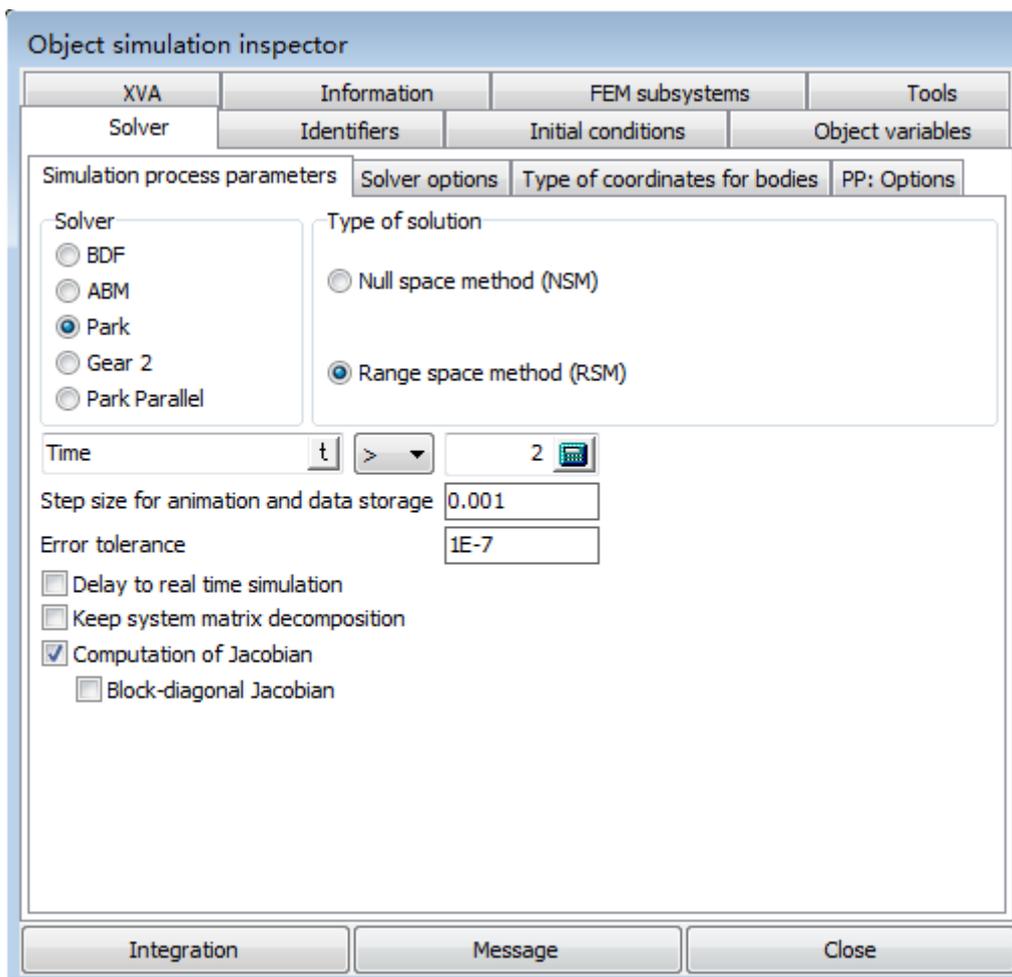


图 1.29

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）。

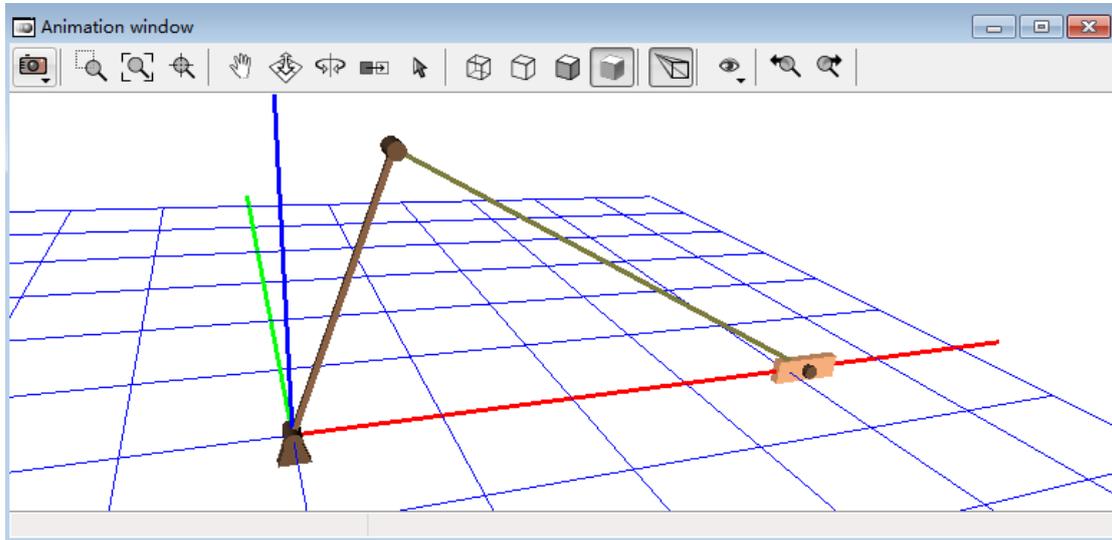


图 1.30

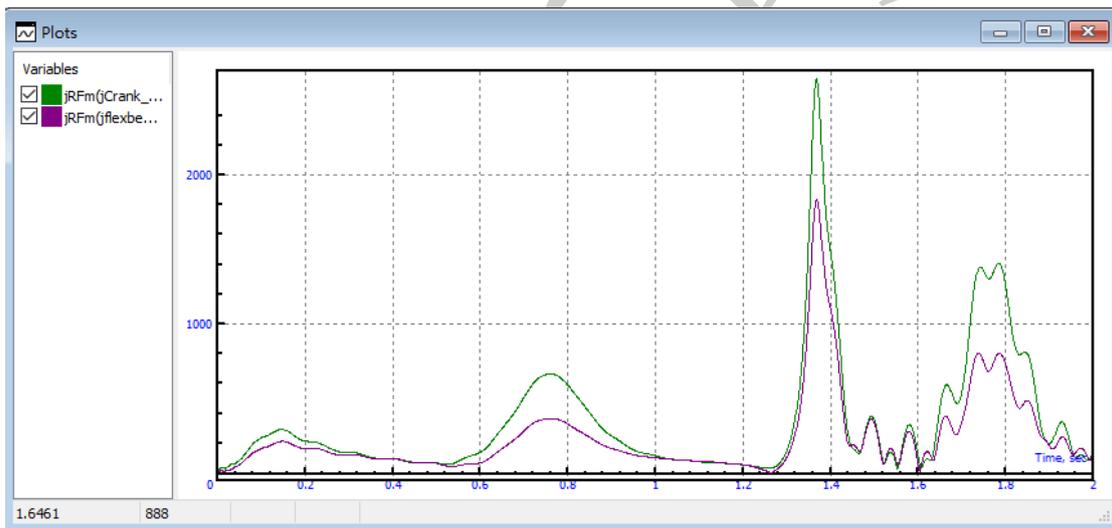


图 1.31

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。

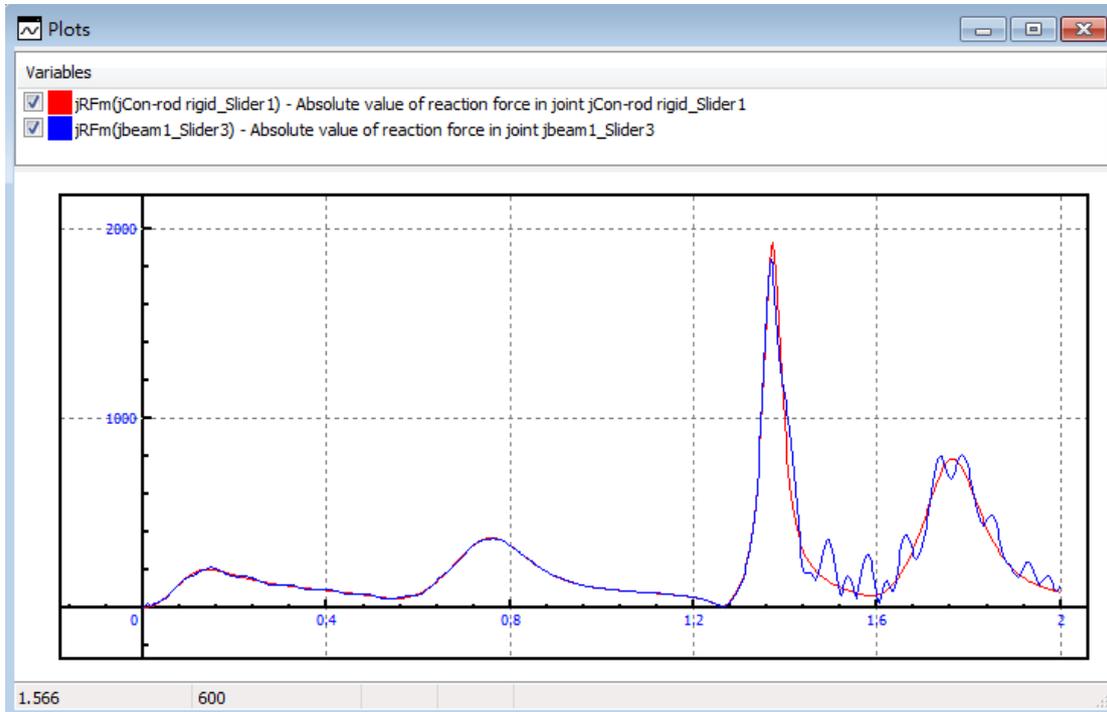


图 1.32 红色曲线对应刚性连杆, 蓝色曲线对应柔性连杆

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。

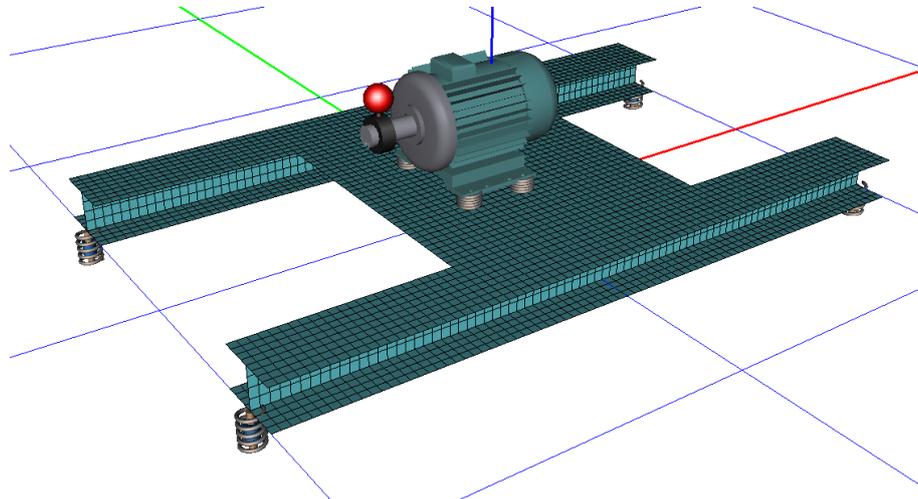


图 2.1

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 目录下有几个文件：**input.fss**、**input.fum** 和 **PlatformShell63.ans** 等。

- 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 **PlatformShell63.ans** 到.\Vibrostand\Platform 目录。
PlatformShell63.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 **PlatformShell63.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 PlatformShell63.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。
7. 请注意，在转换页面，当勾选“**Save to the same directory**”后若 **Target directory** 显示路径为“**D:\Models\Vibrostand\Platform\Platform**”，可将其修改为“**D:\Models\Vibrostand\Platform**”。

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 **PlatformShell63.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 **PlatformShell63.ans**；然后选择菜单 **Preprocessor | Archive Model | Write**，输出 **Platform.cdb** 文件，设置如图 2.2 所示，然后关闭经典界面。

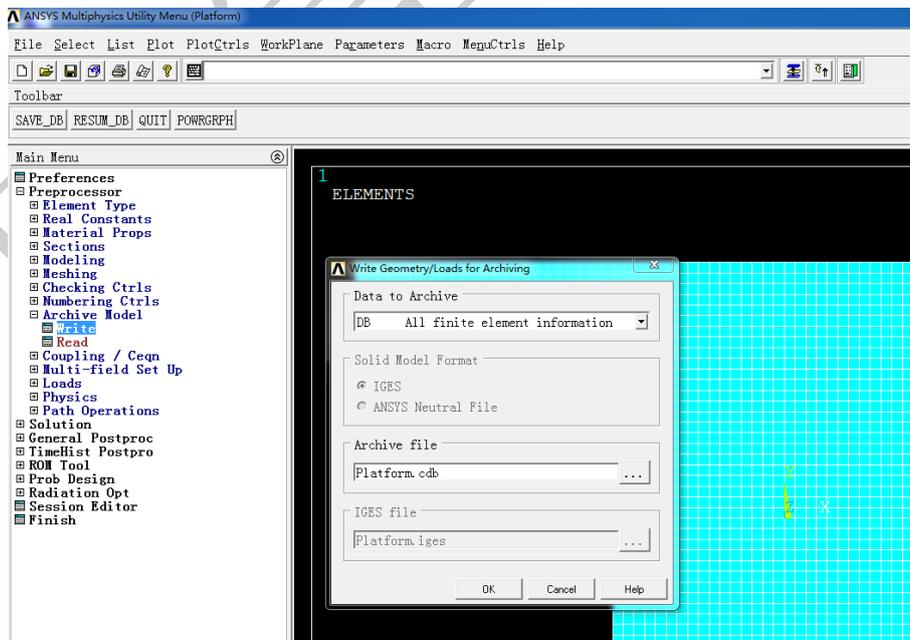


图 2.2

3. 运行 ANSYS Workbench, 在左侧 **Component Systems** 工具箱列表双击 **Finite Element Modeler**。这样就在右侧的 **Project Schematic** 区域生成了一个空的有限元建模项目 **A**。
4. 选中 **Model** 点右键, 选择 **Add Input Mesh | Browse**, 选择之前创建的 **Platform.cdb** 文件, 如图 2.3 所示。

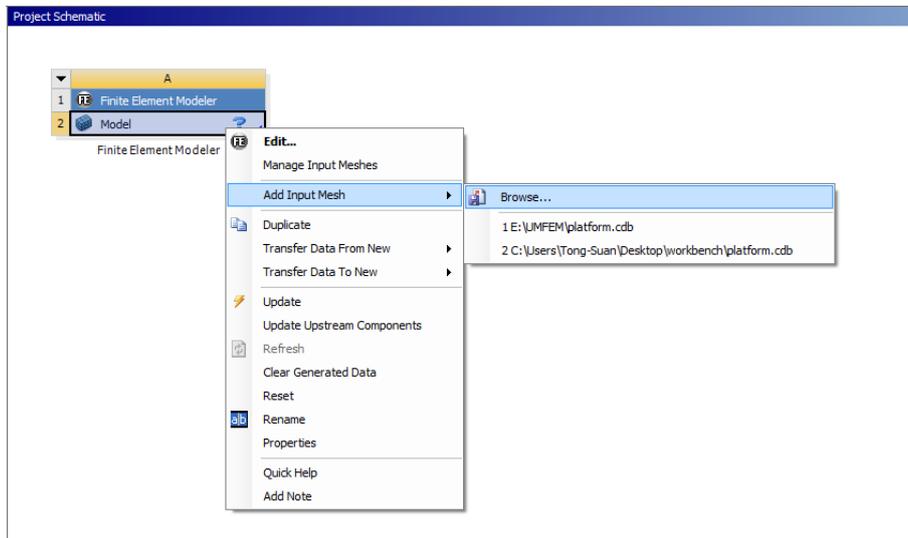


图 2.3

5. 选中 **Model** 点右键, 选择 **Update**, 更新模型。

6. 选中 **Model** 点右键，选择 **Manage Input Meshes**，点击 **Platform**，然后在第 6 行选择 **SI** 国际单位制，如图 2.4 所示。

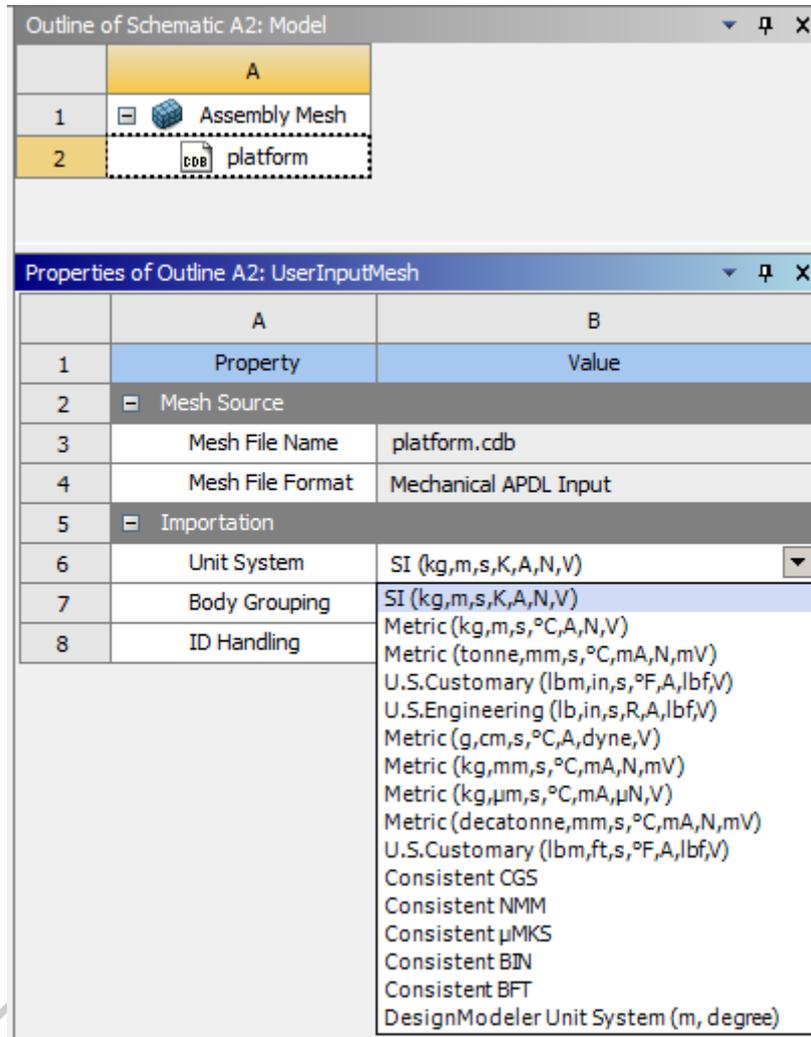


图 2.4

7. 在左侧 **Analysis Systems** 工具箱列表双击 **Modal**，创建一个模态分析项目 **B**。
8. 从有限元建模项目 **A** 选中 **Model** 并拖至模态分析项目 **B** 的 **Model**，将两个项目联系起来，如图 2.5 所示。

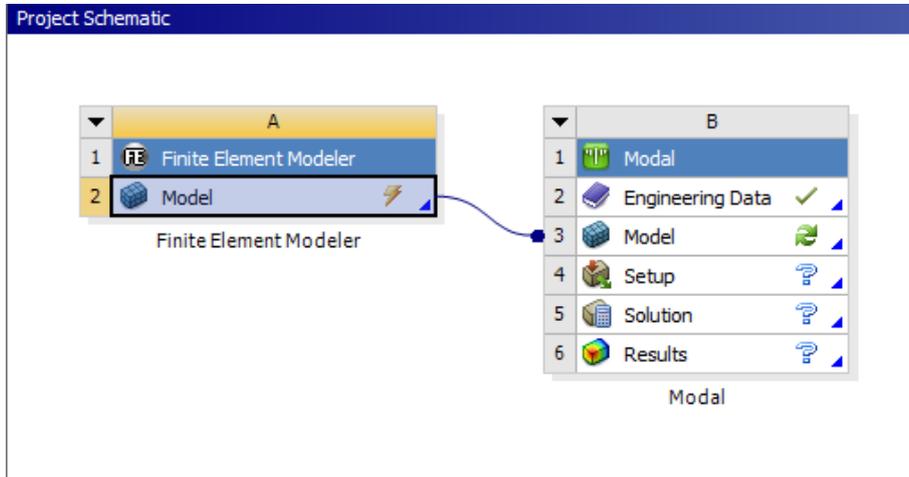


图 2.5

9. 选中模态分析项目 **B** 的 **Model** 点右键，选择 **Update**，更新模型。
10. 选择菜单 **File | Save**，保存项目。
11. 双击模态分析项目 **B** 的 **Model**，进入有限元模型，缩放合适窗口，如图 2.6 所示。

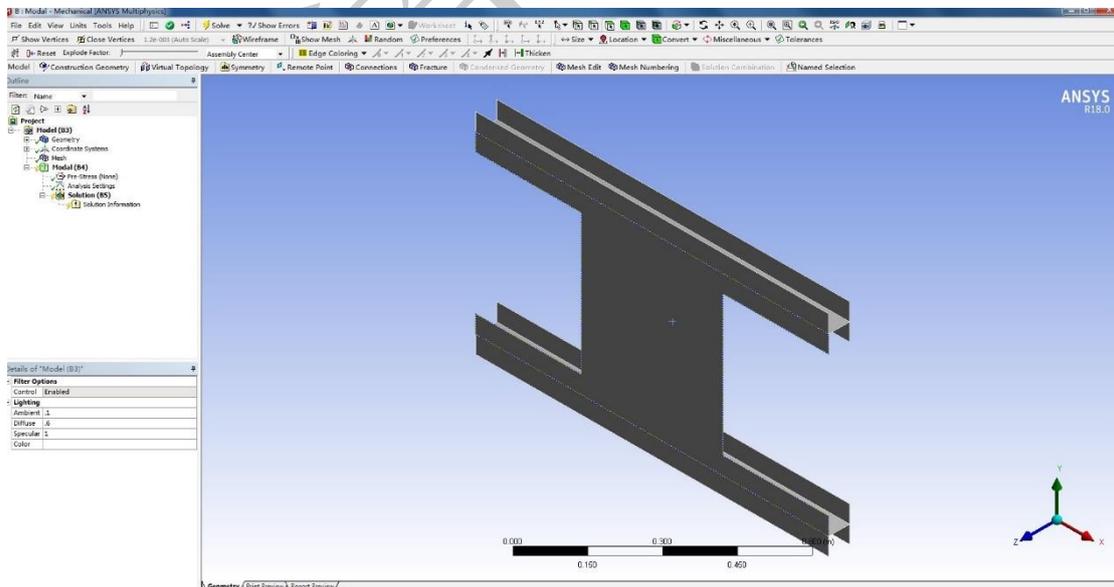


图 2.6

12. 从模型树依次选中 **Modal** 点右键，选择菜单 **Insert | Commands**，插入以下 APDL 命令，如图 2.7 所示：

```

/UNITS, SI
NSEL,s,,,ALL
ESLN,s,0,ALL
CM,ESTRS,ELEM
ESEL,ALL
NSEL,ALL
NSEL,s,,,2435
NSEL,A,,,730
NSEL,A,,,2659
NSEL,A,,,958
UM,10,1,1,1
    
```

其中，2435、730、2659 和 958 是柔性平台的界面节点编号，对应原始命令流文件 **PlatformShell63.ans** 里的关键点 5、11、105 和 111。

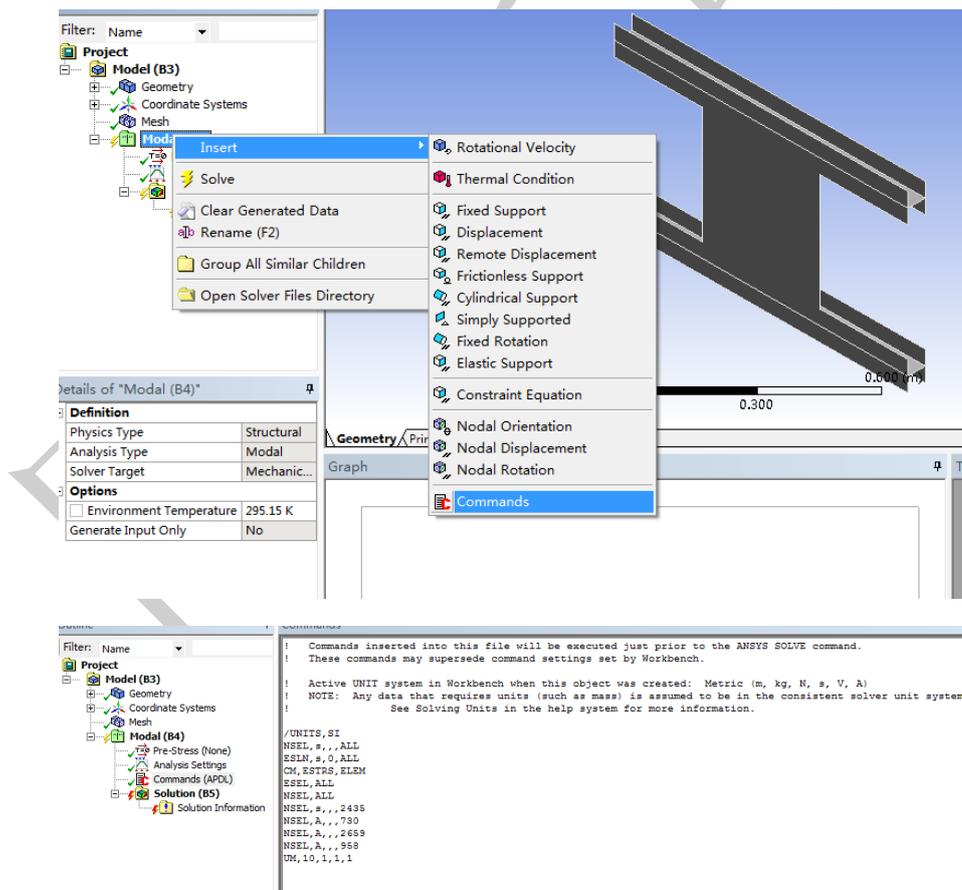


图 2.7

13. 选中模型树里的 **Solution** 点右键，选择菜单 **Solve**，开始计算。
14. 此时，请先关闭自动弹出的 **ANSYS_UM.EXE** 程序。

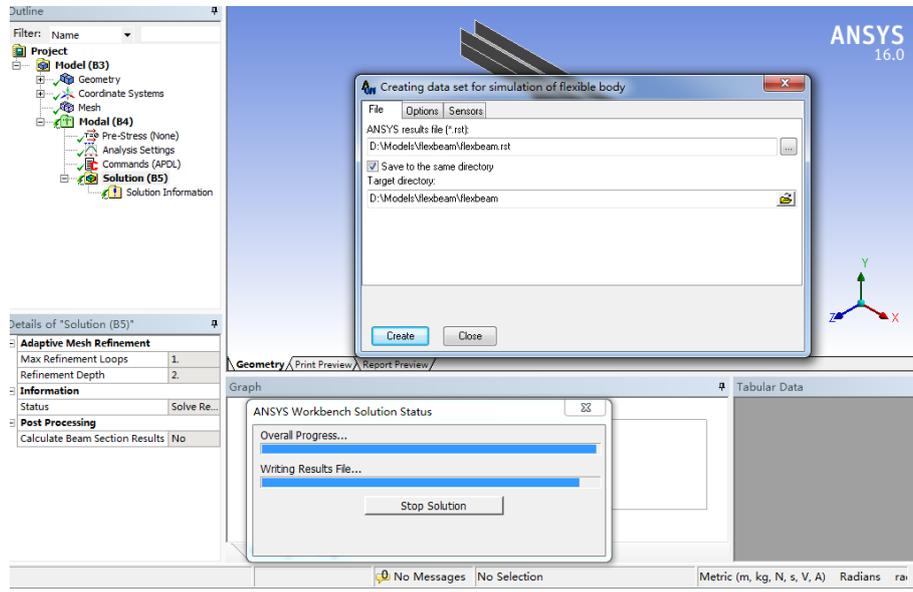


图 2.8

15. 关闭 ANSYS Workbench，最后得到的 **.rst** 和 **.free** 文件位于项目路径下的 **.\dp0\SYS\MECH** 目录。

16. 手动运行 UM 安装目录下的 **ANSYS_UM.EXE**，选择 **.rst** 文件（缺省名字为 **file**），按图 2.9 进行设置，生成 **input.fum** 文件。

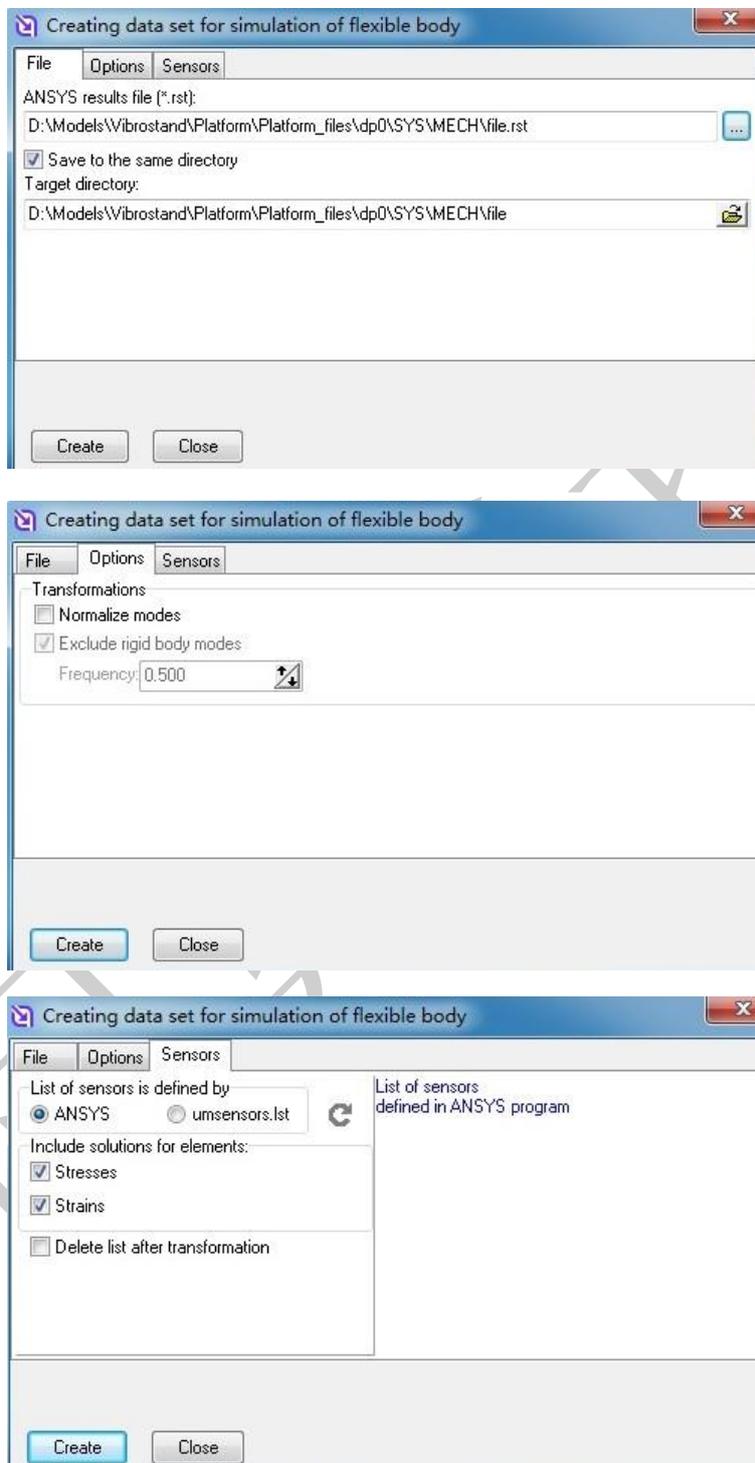


图 2.9

17. 将生成的 **input.fum** 文件复制到 **.\Vibrostand\Platform** 文件夹下。

2.1.3 柔性子系统向导

利用 UM 的柔性子系统转换中间格式文件 **input.fum** 为最终的 **input.fss** 文件。

请读者参考 1.2.2 章节的方法步骤，将 **.Vibrostand\Platform** 里的 **input.fum** 文件转换为 **input.fss** 文件，并存放于同一目录。

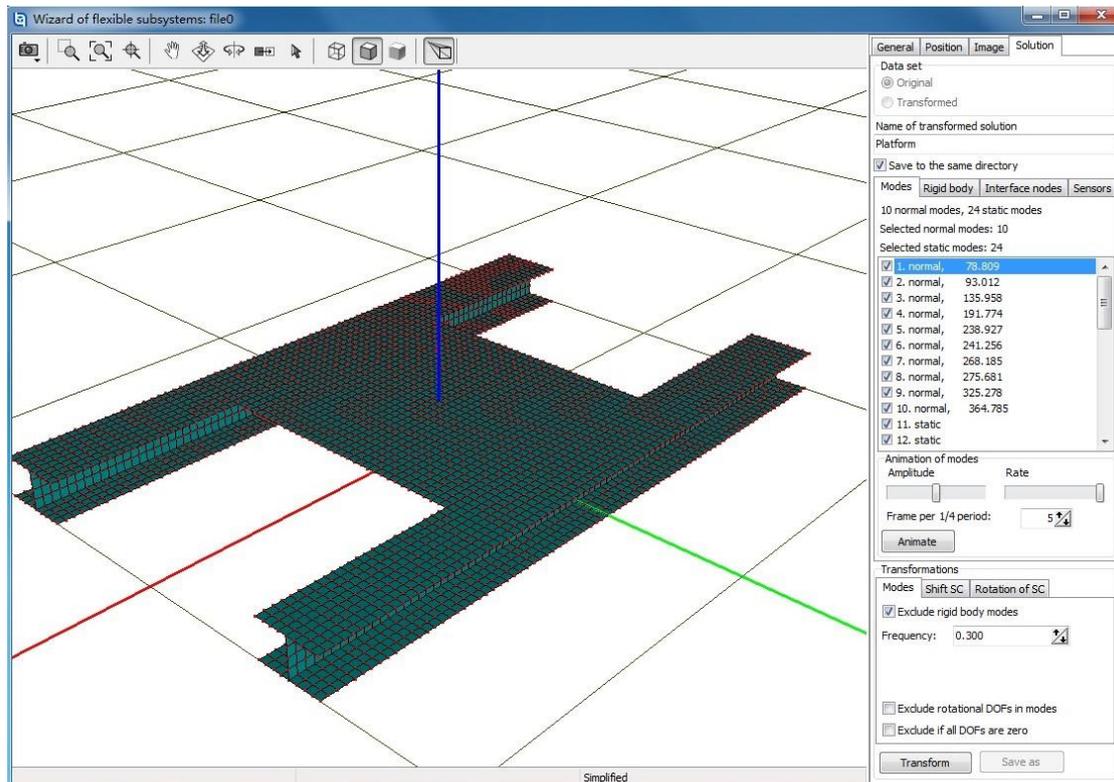


图 2.10

2.2 刚柔耦合系统动力学建模与仿真

运行 **UM Input** 程序，新建一个模型。

2.2.1 导入柔性平台

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**，在弹出的对话框中选择 **Vibrostand** 下的 **Platform**，点击 **OK**，导入柔性平台子系统。在 **Solution | Modes** 页面可以观察柔性体的各阶模态。

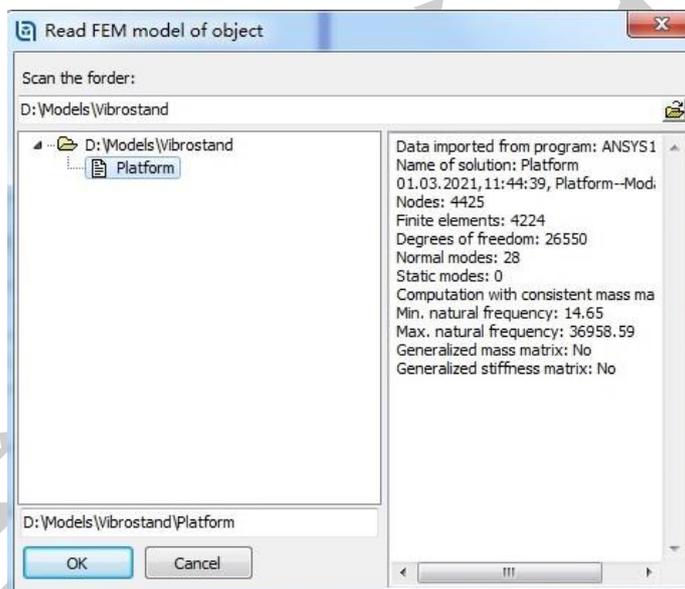


图 2.11

3. 重命名为 **Platform**。

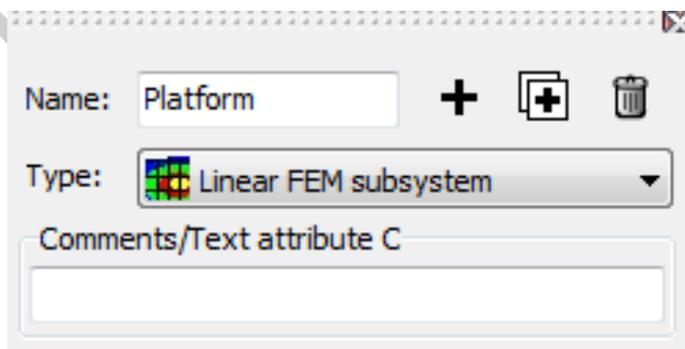


图 2.12

2.2.2 连接柔性平台与大地

柔性平台四个角与大地通过四个粘弹性力元连接。下面我们先创建几何图形，再定义力元。

2.2.3 创建几何图形

1. 先在左侧模型树选中 **Images**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，添加一个几何图形。
2. 重命名为 **Damper**。
3. 点击按钮 ，设置 **Bipolar GO** 参数如图 2.13 所示。

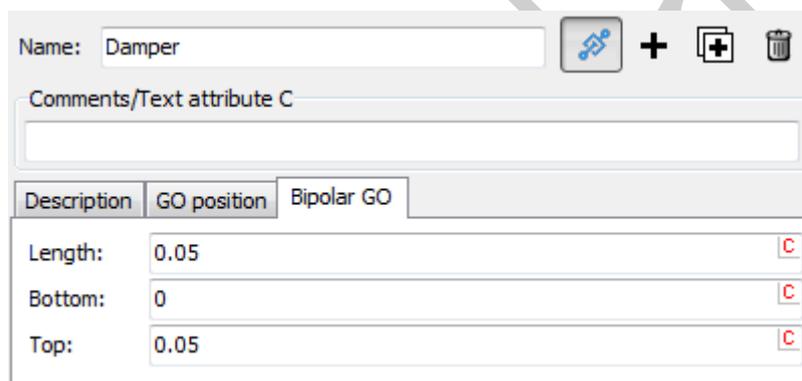


图 2.13

4. 点击 **Description** 页面，点击 **Type** 一栏的按钮 **+**，添加一个图形元素，如图 2.14 所示。

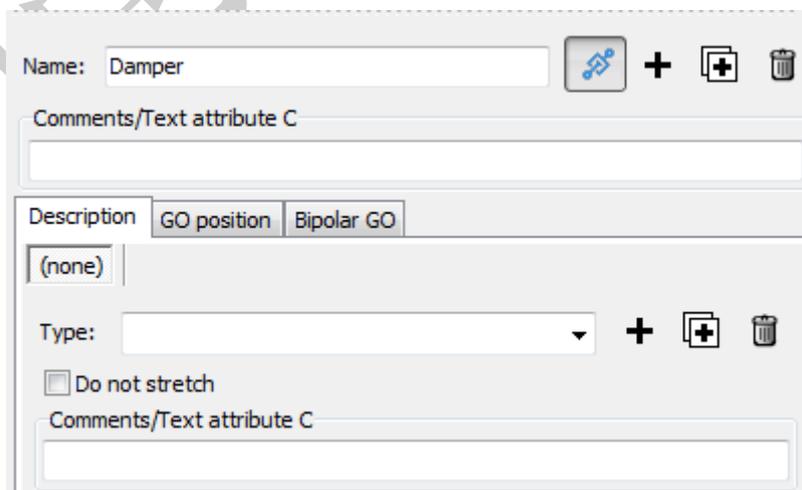


图 2.14

5. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Spring**。

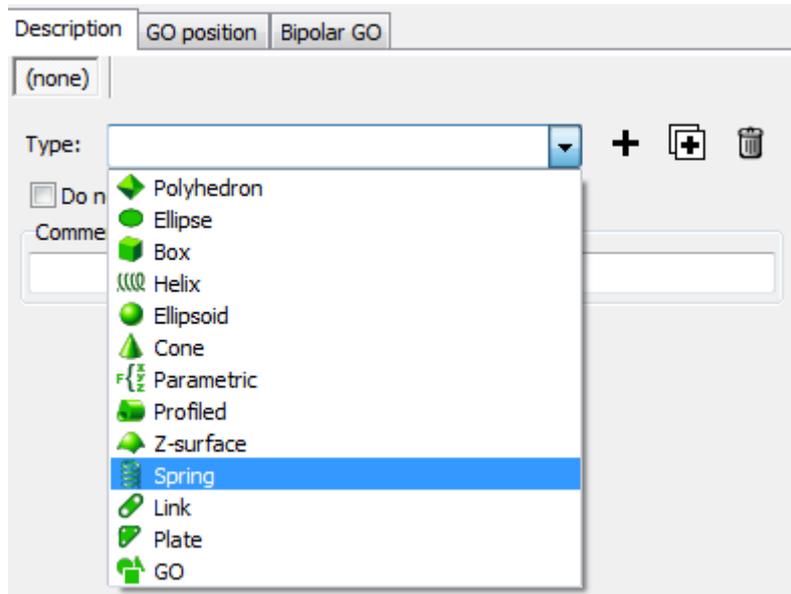


图 2.15

6. 设置 **Spring** 几何参数如图 2.16 所示。

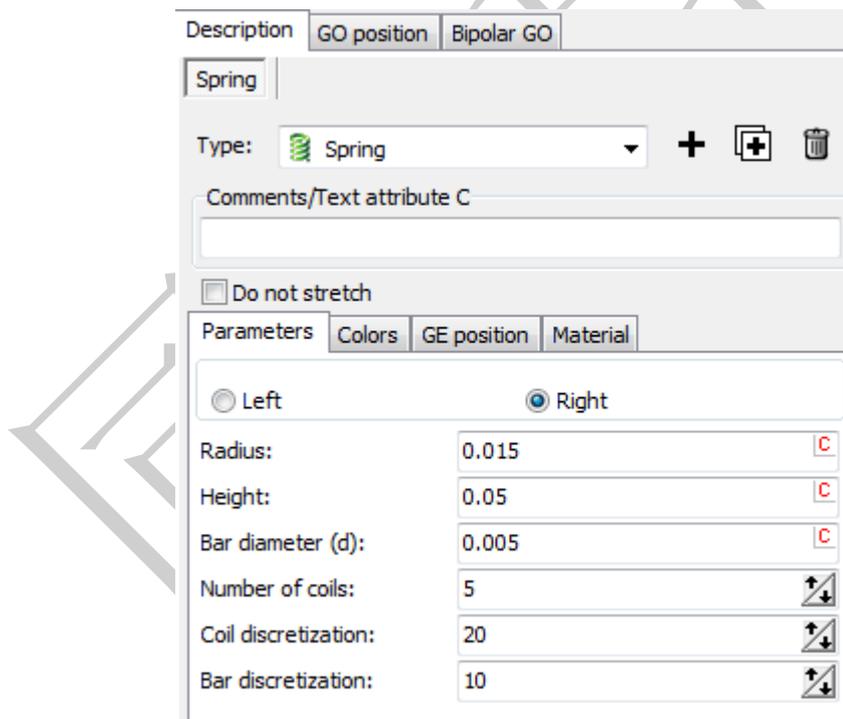


图 2.16

7. 点击 **Type** 一栏的按钮 **+**，添加一个 **Cone** 类型，如图 2.17 所示。

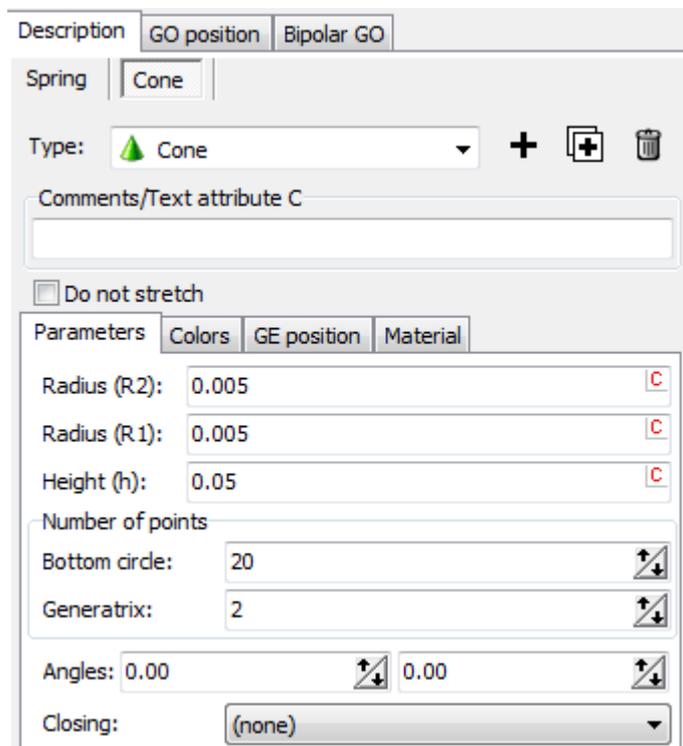


图 2.17

8. 再添加一个 **Cone** 类型的 **GE**，并设置参数如图 2.18 所示。

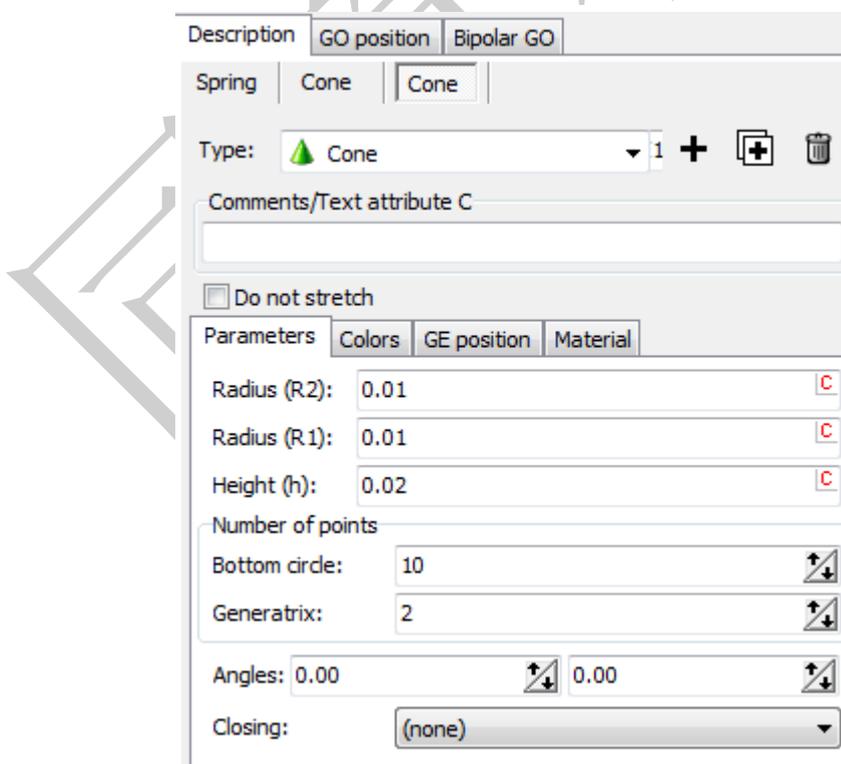


图 2.18

9. 在第二个 **Cone** 的 **GE Position** 页面，设置位置参数，如图 2.19 所示。

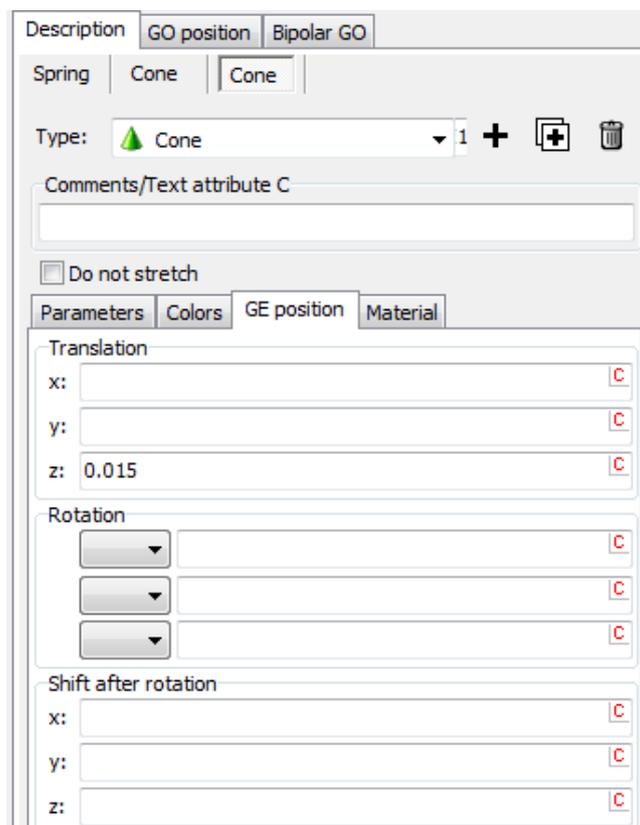


图 2.19

10. 设置两个 **Cone** 以不同颜色显示，如图 2.20 所示。

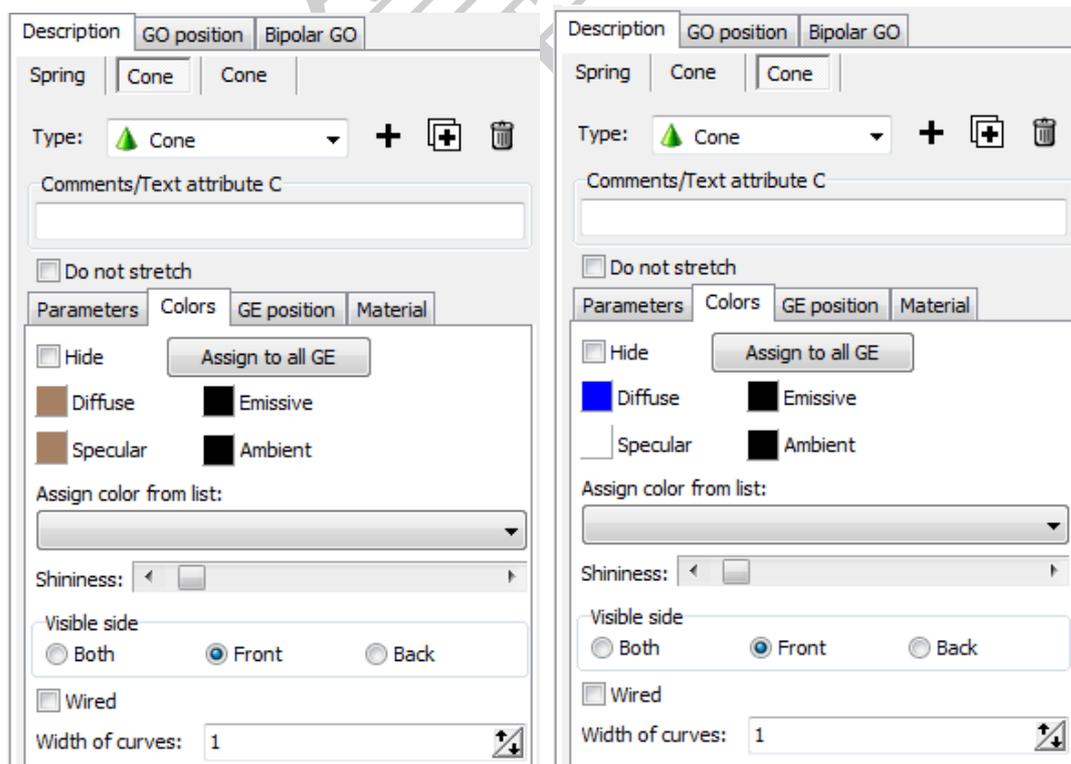


图 2.20

2.2.4 创建力元

1. 先在左侧模型树选中 **Linear Forces**, 然后在右侧交互界面点击按钮 **+**。
2. 重命名为 **Damper_FL**, 保持缺省类型 **Viscous-elastic**, 选择 **Base0** 作为 **Body1**, 选择 **Platform.Platform** 为 **Body2**, 选择 **Damper** 作为 **GO**, 如图所示。
3. 在 **Body1** 页面设置 **Base0** 的下连接点 Point A 坐标: (**BeamLength/2**, **WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2**, **-0.05**), 参数符号赋初值: **BeamLength=1.0**, **WidthShelf=0.4**, **WidthBeamShelfLow=0.1**。
4. 在 **Body1** 页面设置 **Base0** 的上连接点 Point B1 坐标: (**BeamLength/2**, **WidthShelf/2+ WidthBeamShelfLow/2**, **0**), 如图 2.21 所示。

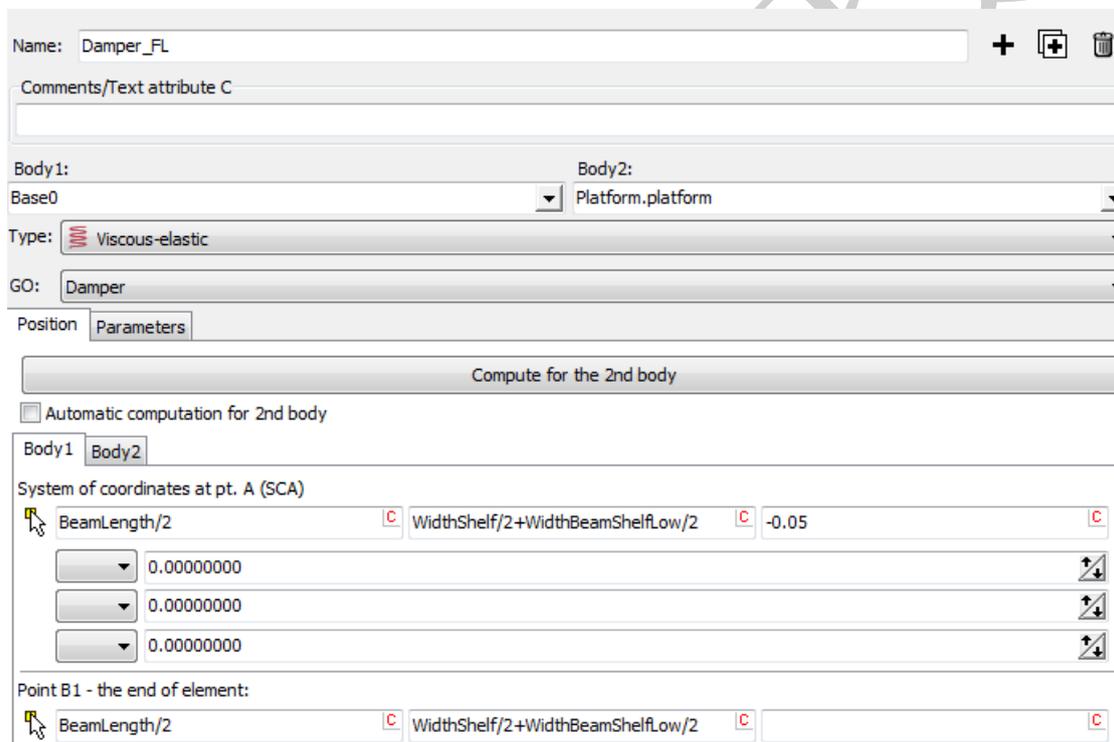


图 2.21

5. 在 **Body2** 页面设置 **Platform.Platform** 连接点 Point B2 (对应 **Base0** 的 Point B1) 坐标为 : (**BeamLength/2** , **WidthShelf/2 + WidthBeamShelfLow/2**, **0**), 如图 2.22 所示。

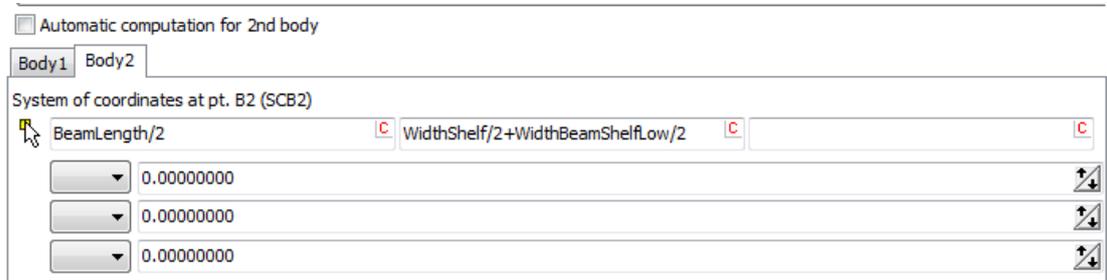


图 2.22

6. 点击 **Parameters** 页面 **Stiffness matrix** 一栏的按钮 , 按图 2.24 所示设置刚度参数, 并赋初值 **cxx=1e6**, **cyy=1e6**, **czz=1e6**, 点击 **OK**。

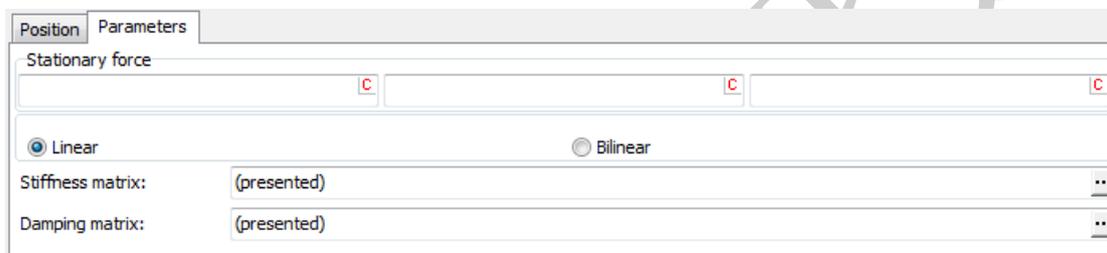


图 2.23

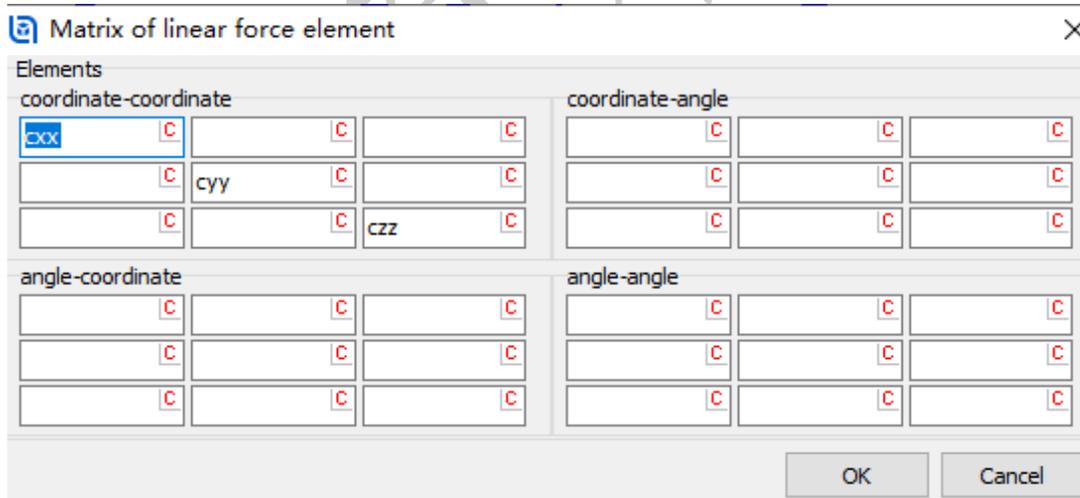


图 2.24

7. 点击 **Parameters** 页面 **Damping matrix** 一栏的按钮 ，按图 2.25 所示设置阻尼参数，并赋初值 $dx_x=1e3$ ， $dy_y=1e3$ ， $dz_z=1e3$ ，点击 **OK**。

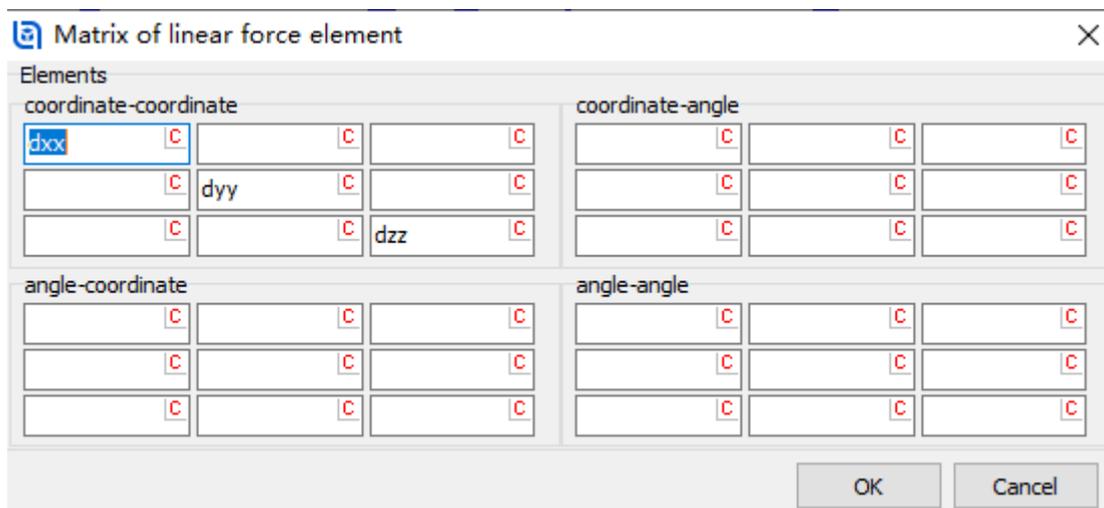


图 2.25

8. 点击最上方的按钮 ，复制生成第二个力元。
9. 重命名为 **Damper_FR**。
10. 设置 **Body1** 的两个连接点坐标分别为： $(\text{BeamLength}/2, -\text{WidthShelf}/2 - \text{WidthBeamShelfLow}/2, -0.05)$ ， $(\text{BeamLength}/2, -\text{WidthShelf}/2 - \text{WidthBeamShelfLow}/2, 0)$ 。
11. 设置 **Body2** 的连接点坐标为： $(\text{BeamLength}/2, -\text{WidthShelf}/2 - \text{WidthBeamShelfLow}/2, 0)$ 。
12. 以同样的方法定义另外两个阻尼力元 **Damper_BL** 和 **Damper_BR**，并修改相应的连接点坐标（由于模型对称，只需修改符号）。

2.2.5 导入电机子系统

这里我们将直接调用现有的电机多刚体模型，模型位于 {UM Data}\SAMPLES\Flex\electricmotor。

1. 先在左侧模型树选中 **Subsystems**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**。
2. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Included** 类型，并加载模型 {UM Data}\SAMPLES\Flex\electricmotor，如图 2.26 所示。

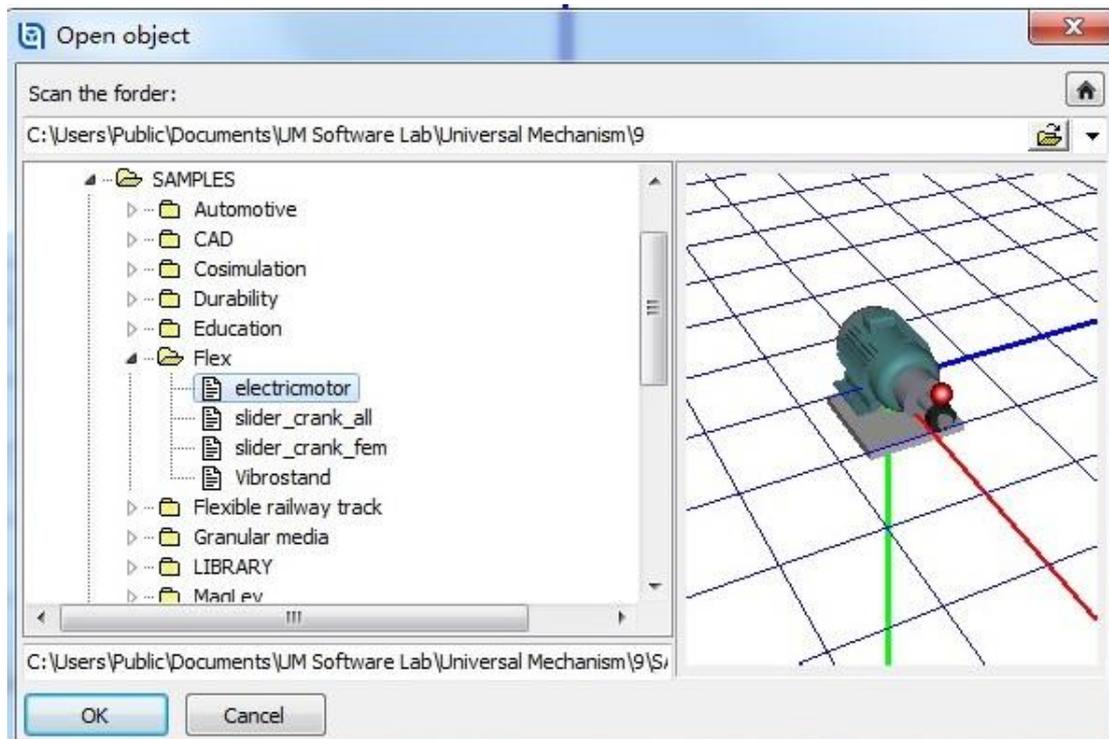


图 2.26

3. 重命名为 **Electricmotor**。

4. 在 **Position** 页面设置电机子系统的方位，如图 2.27 所示。

Name: Electricmotor + + -

Type: included

Comments/Text attribute C

Edit subsystem

General Position Identifiers

Translation

x: [] C

y: -0.0148 C

z: 0.13 C

Rotation

X: -90.00000000 ↕

[] 0.00000000 ↕

[] 0.00000000 ↕

Translation after rotation

x: [] C

y: [] C

z: [] C

图 2.27

2.2.6 设置电机转子速度曲线

在电机模型里定义了如图 2.28 所示的角速度曲线，由图可知，电机启动时，转速从 0 开始线性增加，稳定工作一段时间，再线性降速至 0。

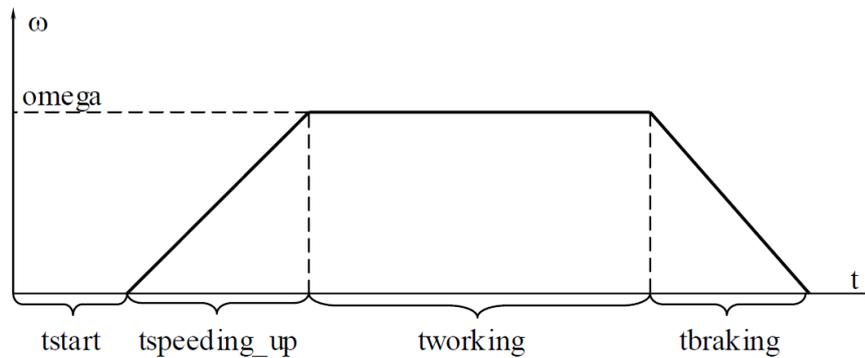


图 2.28

电机模型中的参数见表 2.1。

表 2.1

| 序号 | 参数符号 | 备注 |
|----|--------------|--------------------|
| 1 | nu | 电机转子的额定转速 (r.p.m) |
| 2 | omega | 电机转子的额定角速度 (rad/s) |
| 3 | tstart | 启动的时刻 (s) |
| 4 | tspeeding_up | 加速时间 (s) |
| 5 | tworking | 稳定工作时间 (s) |
| 6 | tbraking | 降速时间 (s) |

我们可以进入电机子系统查看参数设置。

1. 在电机子系统页面点击 **Edit subsystem**，进入子系统。
2. 选择 **Joint | jRotor->Body**，这是一个 **Generalized** 类型的铰。
3. 点击铰的 **RTx** 页面，显示类型为 **Table**，如图 2.29 所示，是以表格形式定义的分段函数。

表 2.2

| 序号 | 时间区间 | 函数表达式 |
|----|--|--|
| 1 | Tstart | 0 |
| 2 | tstart+tspeeding_up | $(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(t-tstart)/2}$ |
| 3 | tstart+tspeeding_up+twworking | $(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * t - \omega * (t-tstart-tspeeking_up)$ |
| 4 | tstart+tspeeding_up+twworking +tbraking | $(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * twworking + \omega * (t-tstart-tspeeking_up - twworking) - (\omega/tbraking) * \sqrt{(t-tstart-tspeeking_up-twworking)/2}$ |
| 5 | 100 | $(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * twworking + \omega * (twworking) - (\omega/tbraking) * \sqrt{(tbraking)/2}$ |

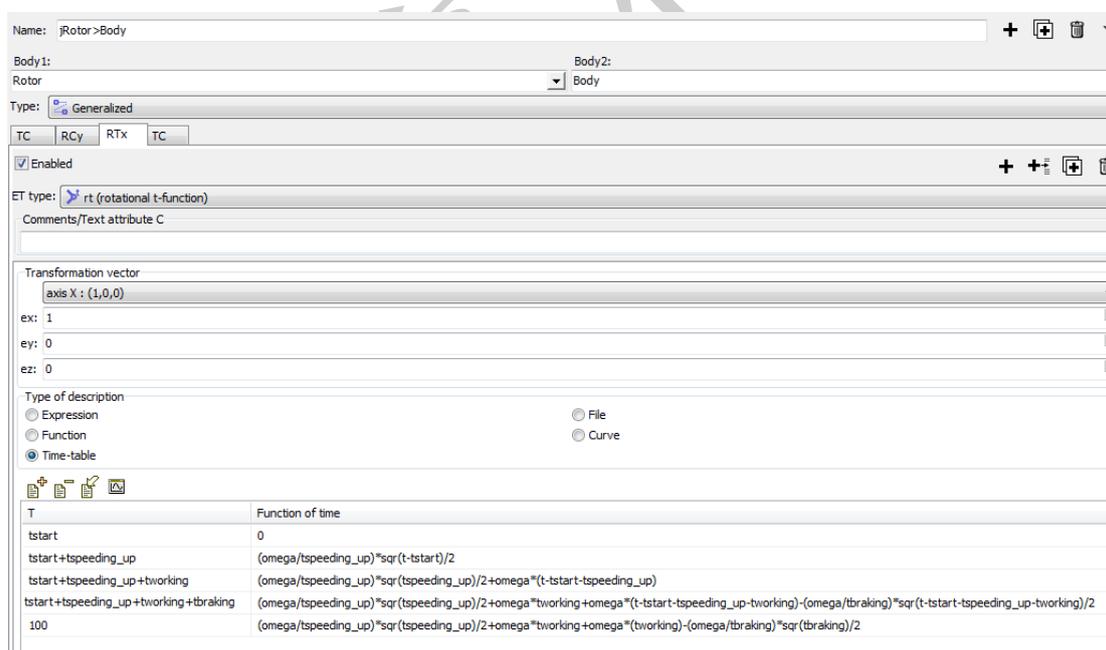


图 2.29

4. 点击 **Cancel**，不做任何修改，退出子系统。

2.2.7 连接电机与柔性平台

柔性平台与电机之间的连接和其与大地之间的连接非常相似，也是通过四个粘弹性力元连接。连接物体是 **Electricmotor.Body** 和 **Platform.Platform**，如图 2.30 所示。

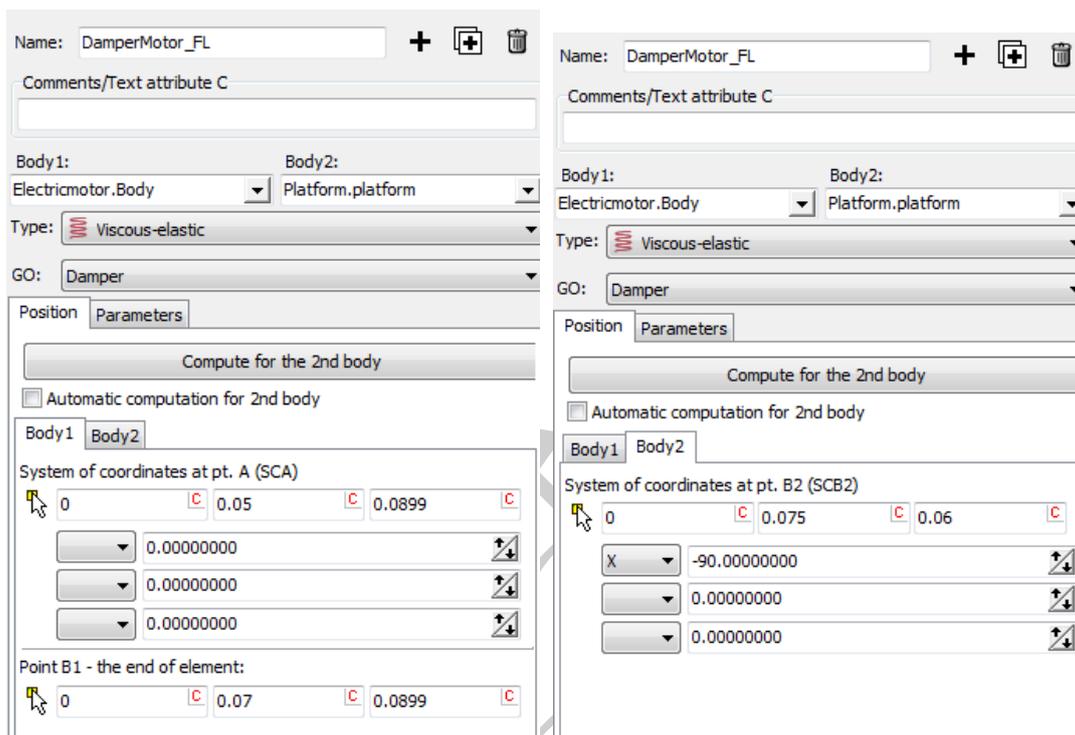


图 2.30

请读者对照表 2.3 中的坐标点定义四个 **Linear Force** 力元。

表 2.3

| 力元名称 | Electricmotor.Body | | | Platform.Platform | | |
|---------------|--------------------|------|--------|-------------------|--------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z |
| DamperMotorFL | 0 | 0.05 | 0.0899 | 0 | 0.075 | 0.06 |
| DamperMotorFR | 0 | 0.05 | -0.06 | 0 | -0.075 | 0.06 |
| DamperMotorBL | -0.0875 | 0.05 | 0.0899 | -0.0875 | 0.075 | 0.06 |
| DamperMotorBR | -0.0875 | 0.05 | -0.06 | -0.0875 | -0.075 | 0.06 |

请注意：对于每个力元的 **Body1** 需要输入两个坐标（**PointA** 和 **PointB1**），这里四个力元的 **PointB1** 的 X 和 Z 坐标与 **PointA** 均相同，Y 坐标为 0.07。

请注意：电机子系统的局部坐标系与柔性平台并不一致，电机绕 X 轴转动了 -90° ，因此需要按图 2.30 所示设置，相应的刚度和阻尼矩阵如图 2.31 和图 2.32 所示，并赋初值： $cStiff\lateral=1.0e6$ ， $cStiff\longitudinal=1.0e6$ ， $cDiss\lateral=1.0e3$ ， $cDiss\longitudinal=1.0e3$ 。

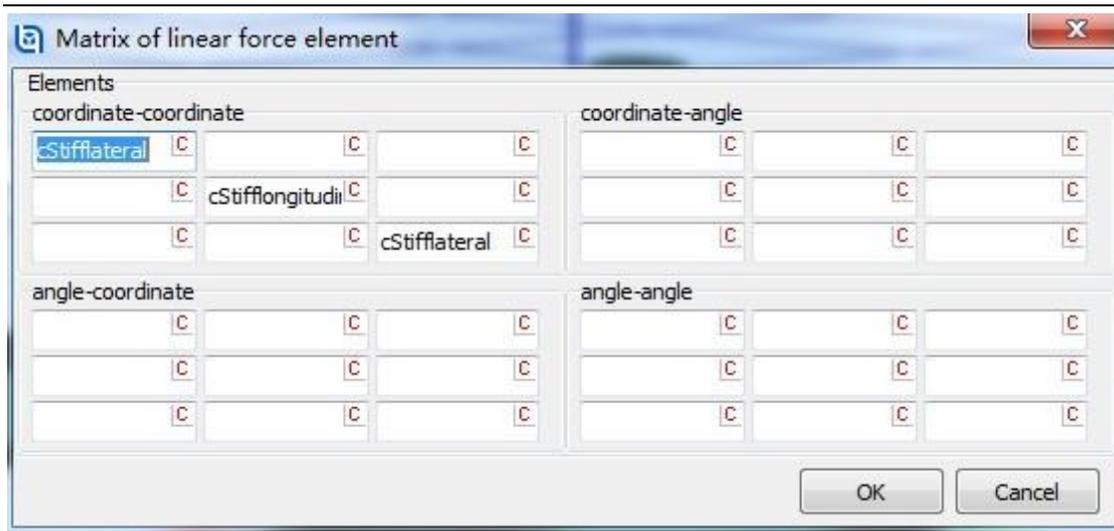


图 2.31

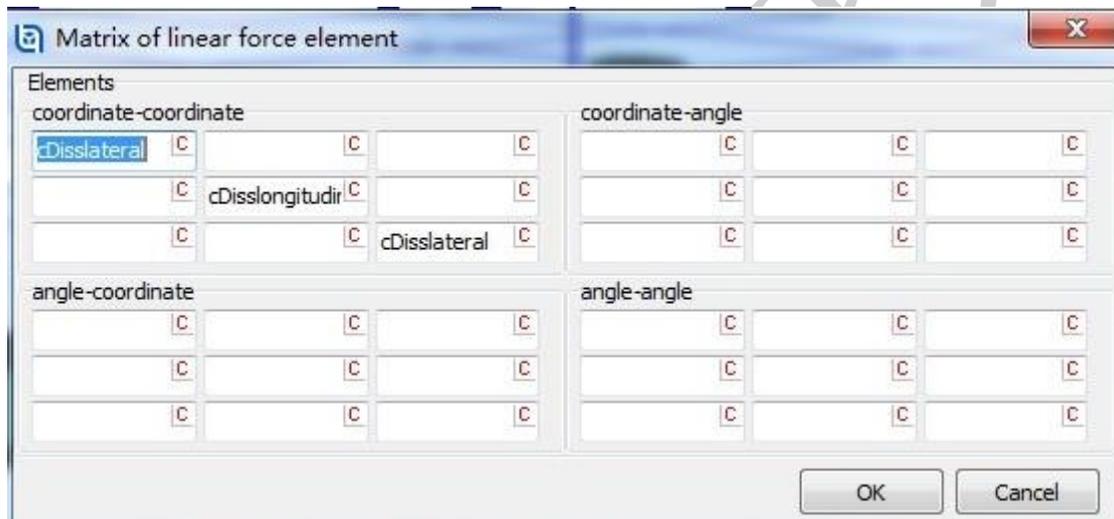


图 2.32

完成以上设置后，请保存模型.\Vibrostand，关闭 **UM Input** 程序。

2.2.8 计算系统平衡位置和固有频率

1. 运行 **UM Simulation** 程序，并加载模型.\Vibrostand。
2. 程序会自动打开一个动画窗口，如果没有，请选择菜单 **Tools | Animation window** 打开。
3. 选择菜单 **Analysis | Simulation**，打开仿真控制界面。
4. 根据需要，可以在 **FEM Subsystems | Image** 页面设置显示模式。
5. 点击 **Close**，关闭仿真控制界面。
6. 选择菜单 **Analysis | Static and linear analysis**，弹出线性分析界面。
7. 在 **Equilibrium** 页面，点击按钮 ，计算系统平衡位置。
8. 在 **Initial conditions** 页面，点击按钮 ，保存当前平衡状态的坐标为 **equilibrium.xv** 文件。

备注：坐标对应当前参数配置下的模型的平衡状态，如果参数发生变化，则需要将坐标清零，重新计算平衡位置。

9. 在 **Frequencies/Eigenvalues** 页面，点击按钮 ，计算模态，频率在左侧列表显示。

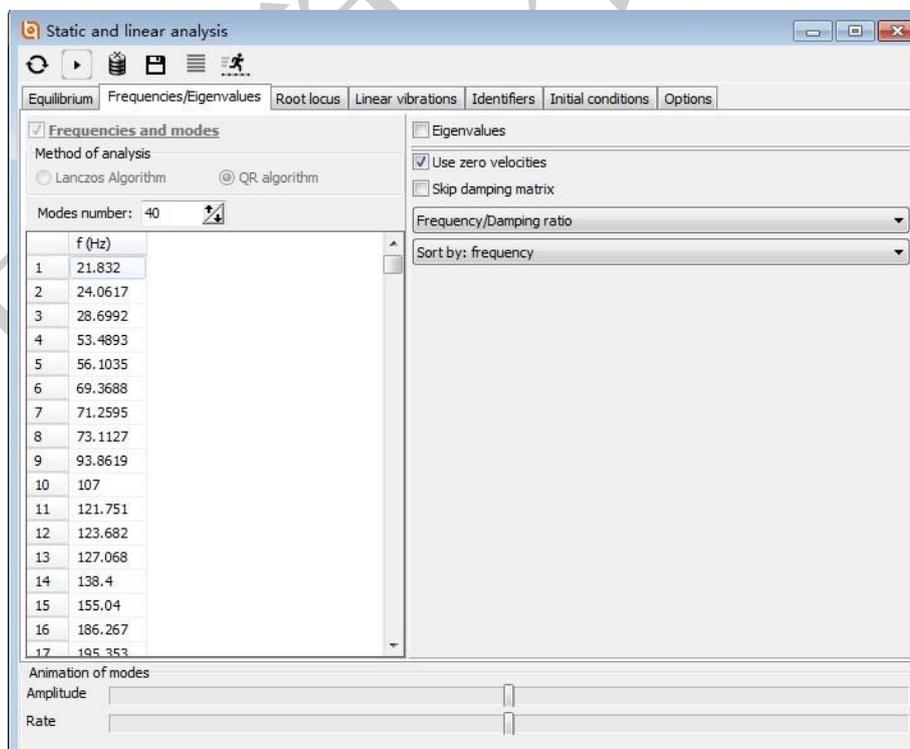


图 2.33

10. 选中某阶模态，点击按钮 ，可在动画窗口显示振型动画；拖动 **Amplitude**和**Rate**的滑动条可以调节振动幅度和速度；点击按钮 ，可停止播放动画。

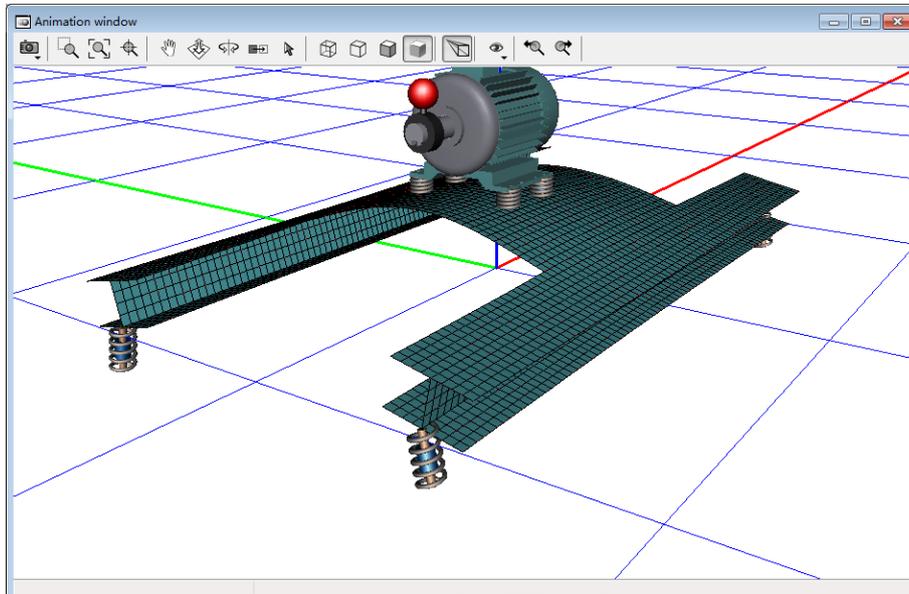


图 2.34 频率 24.0617Hz

11. 关闭线性分析工具。

2.2.9 运动仿真

1. 选择菜单**Tools | Wizard of variables**，打开变量向导。
2. 在**Linear forces**页面选中**DamperMotor_BR**，右侧选择**Force**分量**Z**，点击按钮，创建变量并自动打开一个绘图窗口。

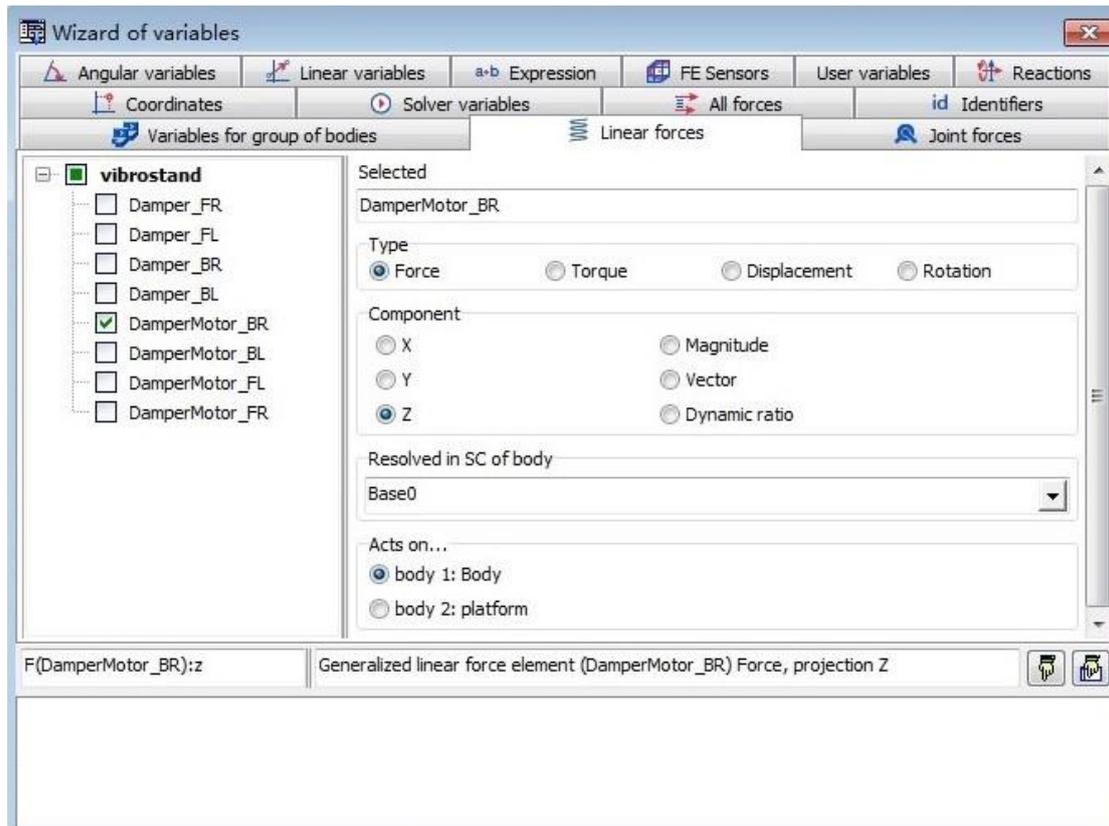


图 2.35

3. 打开仿真控制界面，在**FEM subsystems | Image**页面，用户可自由设置单元和节点的显示特征，如图 2.36所示。

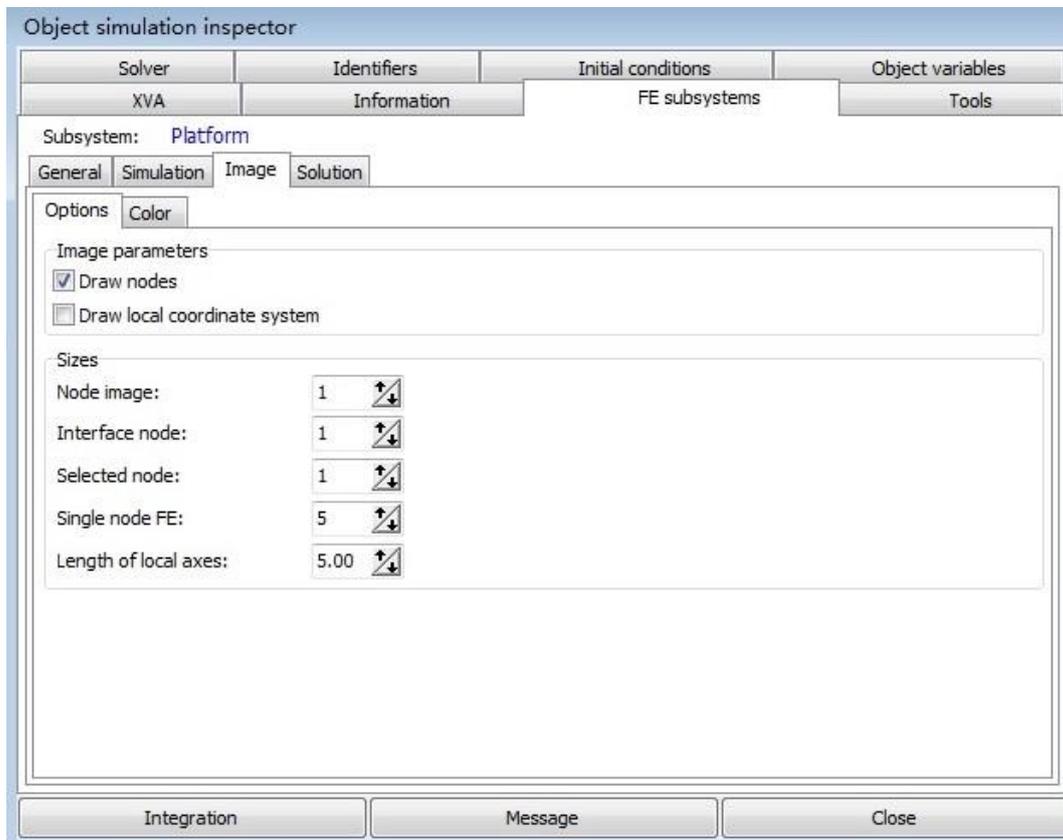


图 2.36

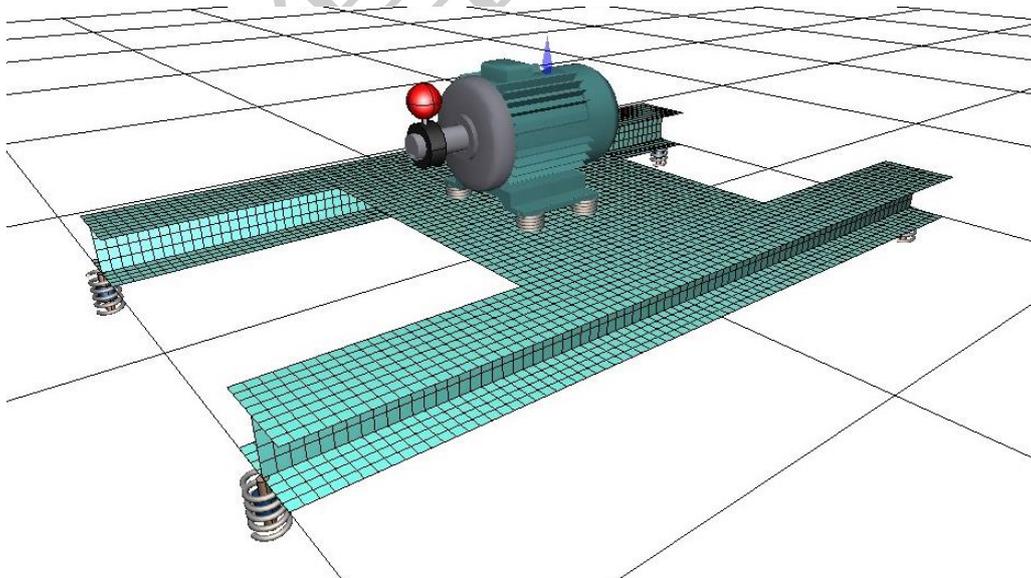


图 2.37

4. 在变量向导定义第3941号节点（坐标为：**0.05, 0, 0.06**）的垂向位移和垂向加速度两个变量，并分别在一个绘图窗口显示。

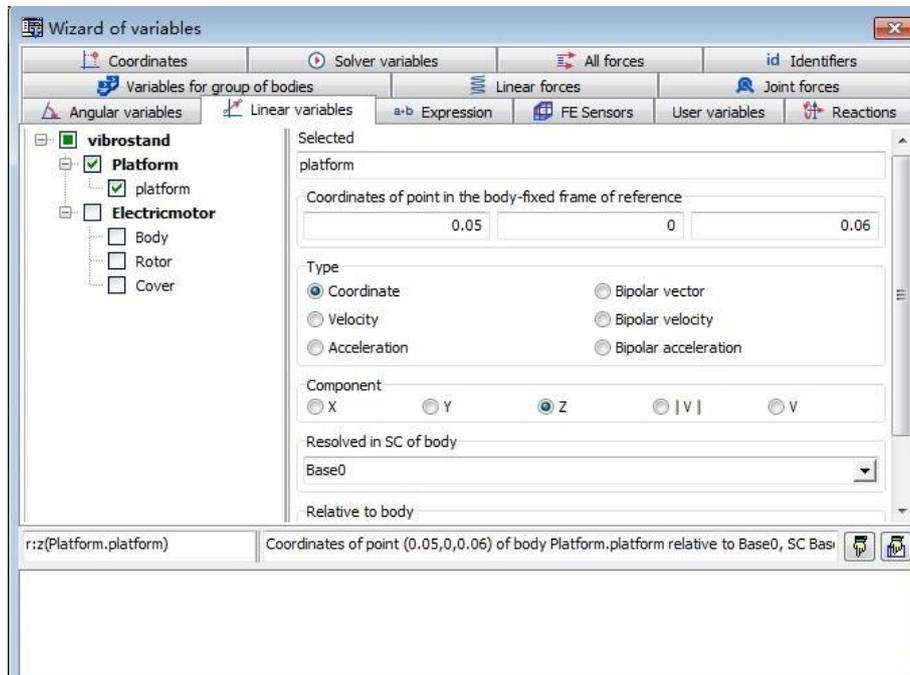


图 2.38

5. 在变量向导定义第3941号节点的应力分量SX1，并在绘图窗口显示。

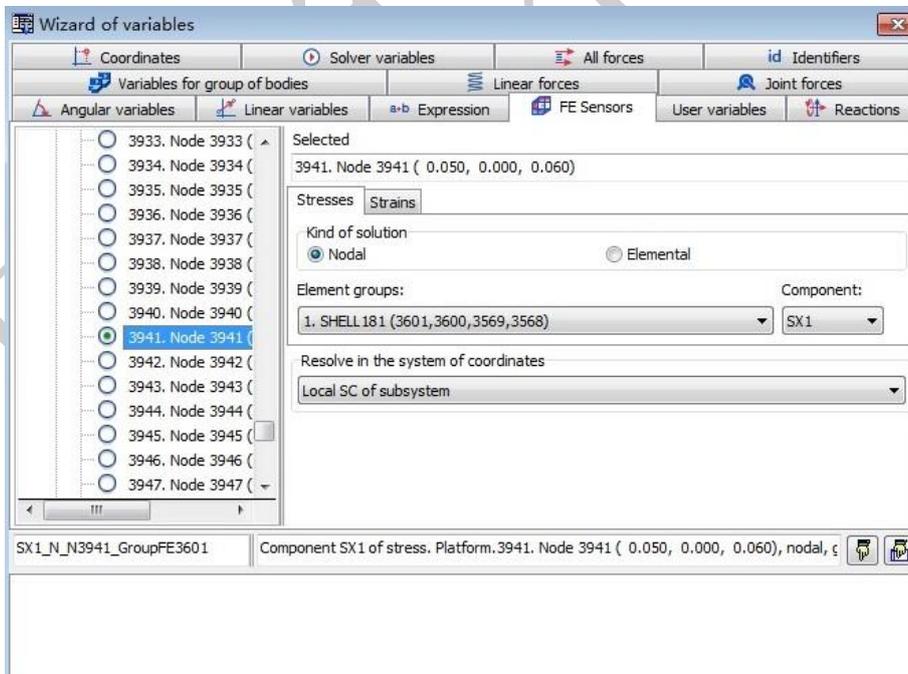


图 2.39

6. 在FEM subsystems | Simulation页面，保持Gravity选项为勾选状态，并设置阻尼相关的系数a为0.001，b为0，如图 2.40所示。

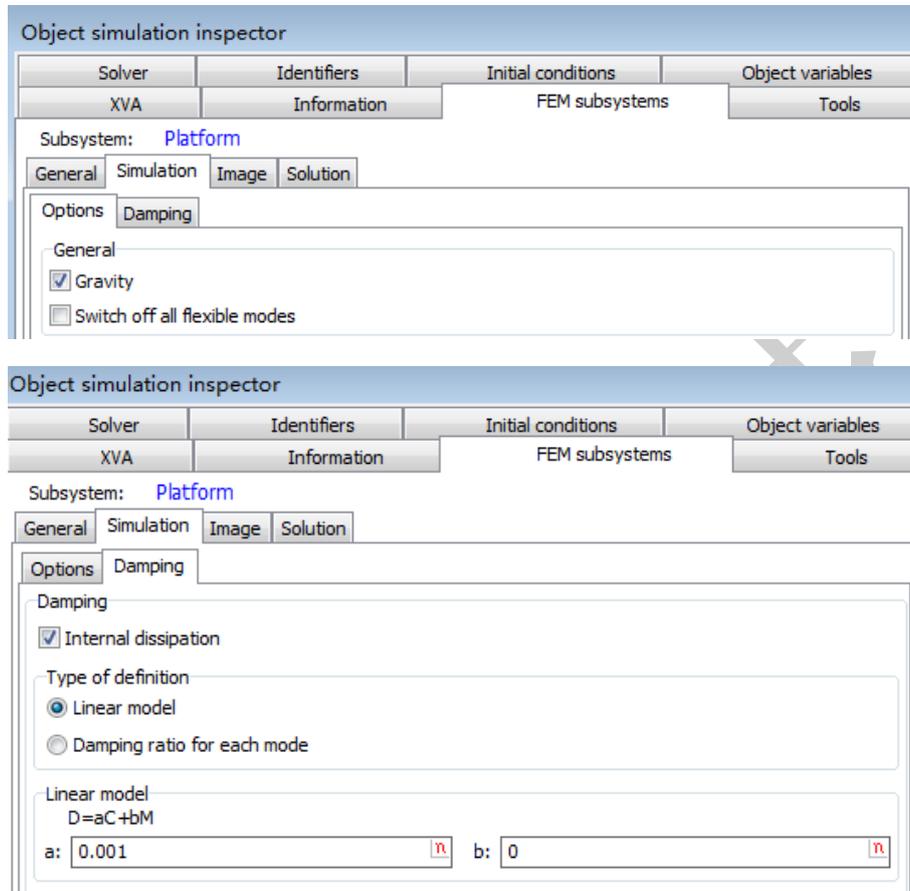


图 2.40

7. 在**Identifiers**页面，从下拉菜单选择子系统**Vibrostand.Electricmotor**，并设置以下参数：

- **nu=1620**
- **tstart=0.5**
- **tspeeding_up=2**
- **tworking=3**
- **tbraking=4**

备注：转子的转动频率超过了系统的前两阶固有频率，因此在后面仿真时启动阶段会出现共振现象。

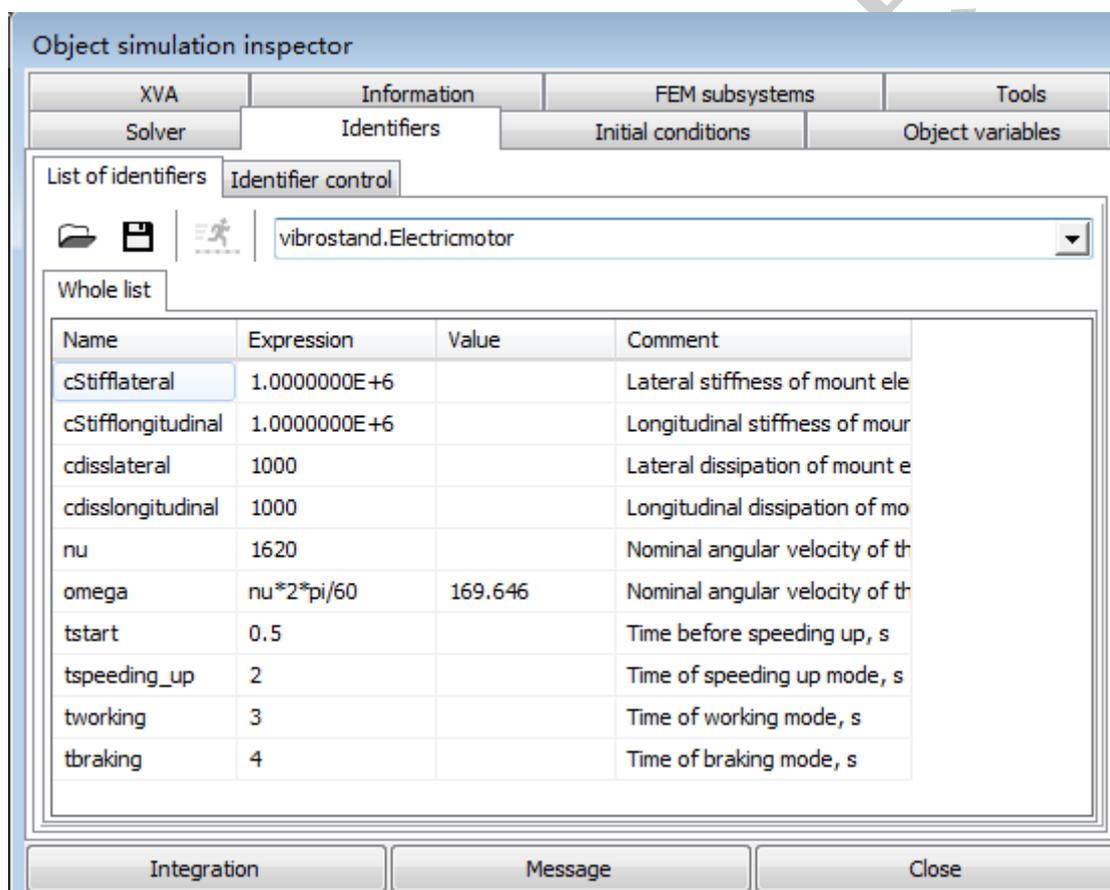


图 2.41

8. 在**Solver**页面设置求解器参数如下：

- **Solver = Park**
- **Type of solving = Range Space Method (RSM)**
- **Simulation time = 10**
- **Step size = 0.002**
- **Error tolerance = 1E-8**
- **Computing Jacobian Matrices = ON**
- **Block-diagonal matrices = OFF**

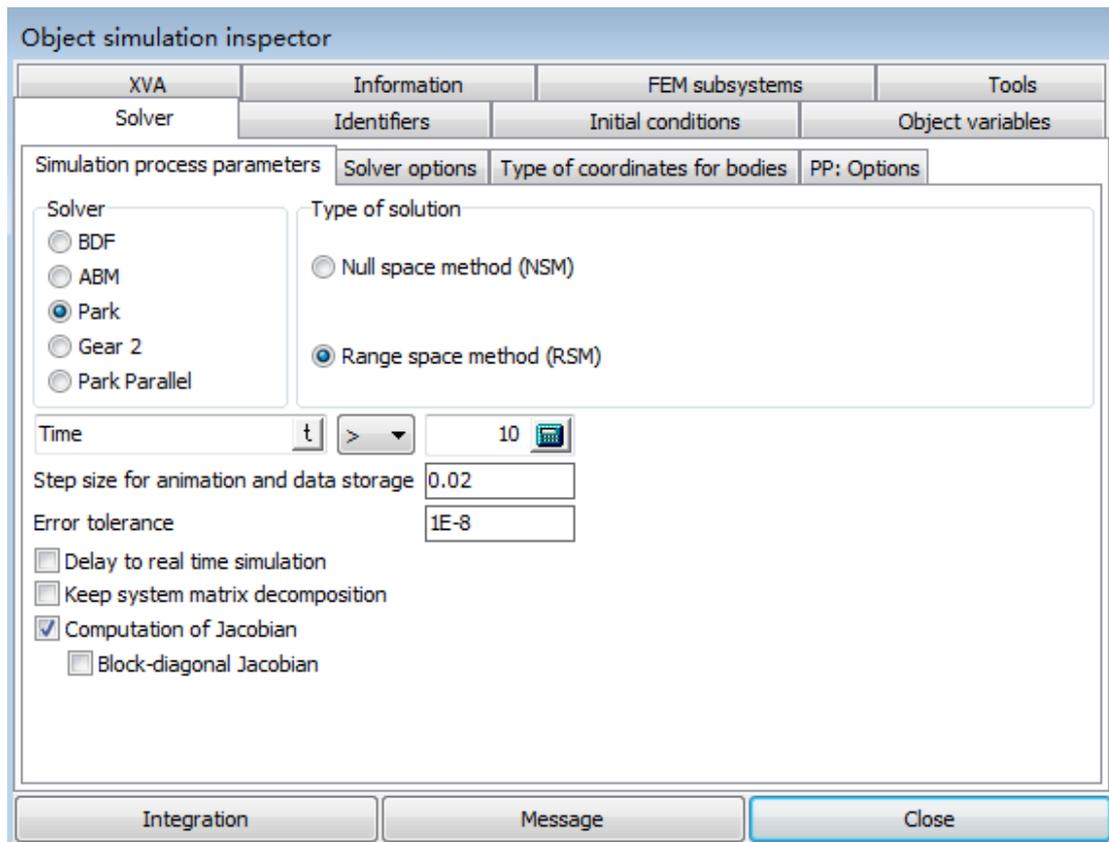


图 2.42

9. 点击**Integration**按钮开始仿真，结果如图 2.43所示。

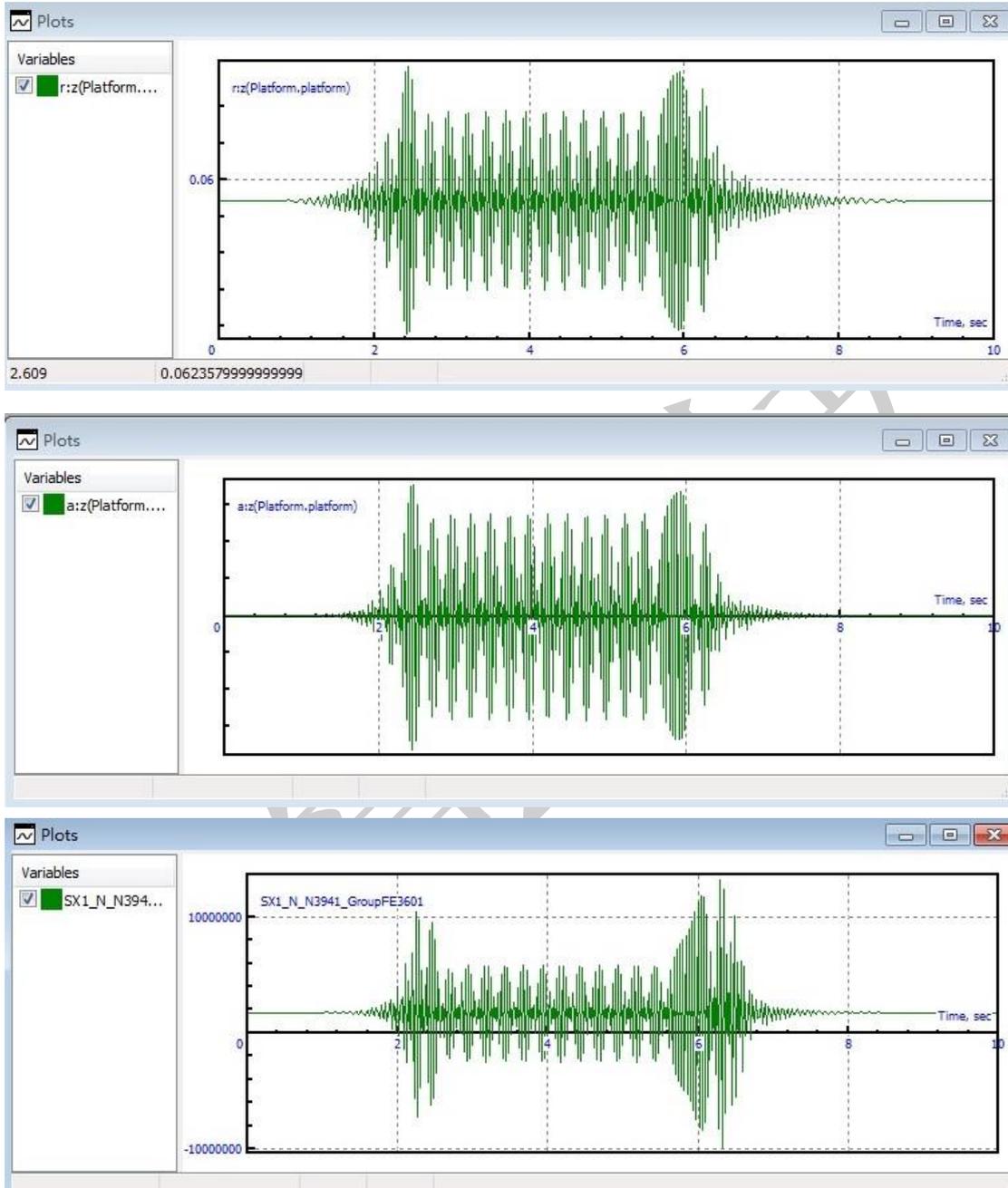


图 2.43

10. 读者可以将绘图窗口的变量复制为静态变量，以便于对比分析。

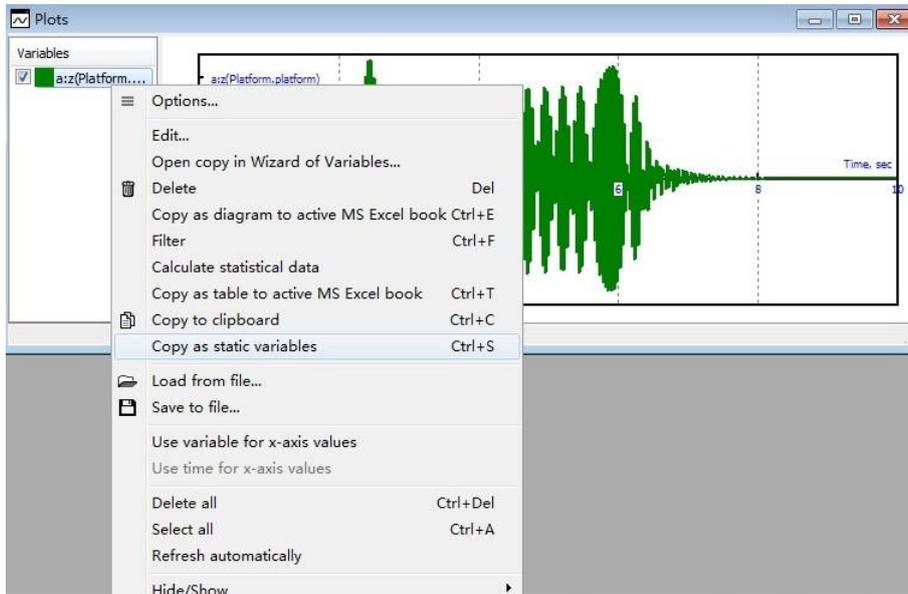


图 2.44

11. 点击 **Interrupt**。
12. 在图 2.40所示界面勾选 **Switch off all flexible modes**。
13. 点击 **Integration**，再次进行仿真。

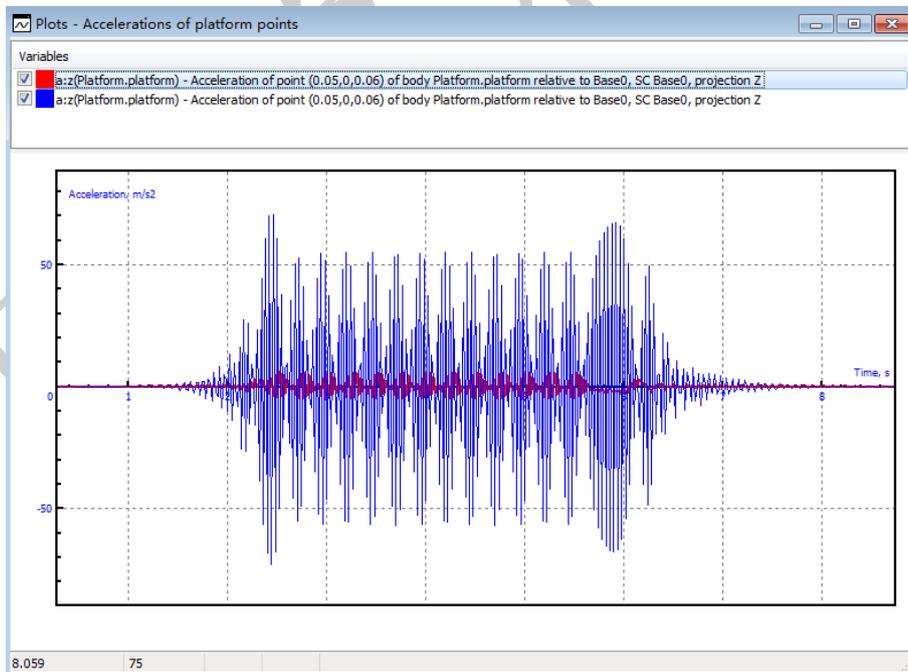


图 2.45 蓝色曲线对应柔性体，红色曲线对应刚体