

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。

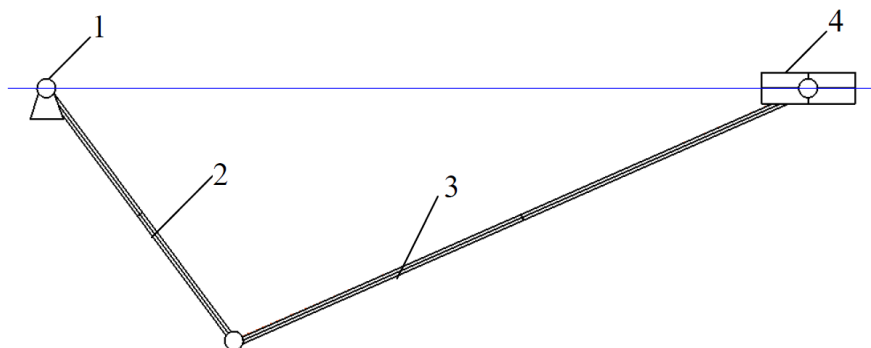


图 1.1 曲柄-滑块机构：1-机架，2-曲柄，3-连杆，4-滑块

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。

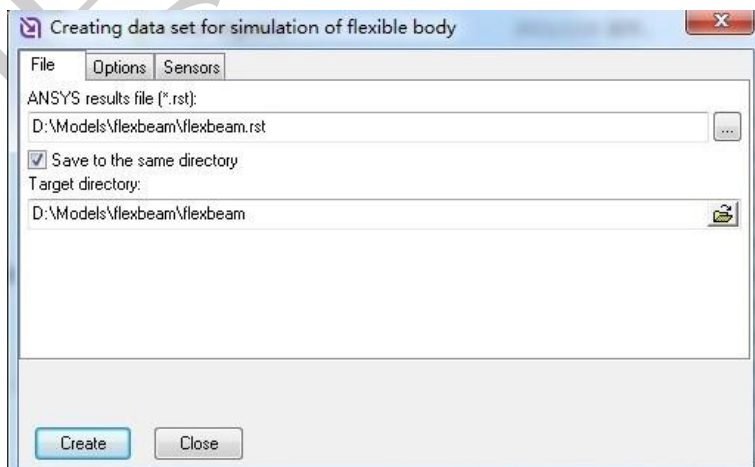



图 1.2 ANSYS_UM 程序界面

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。

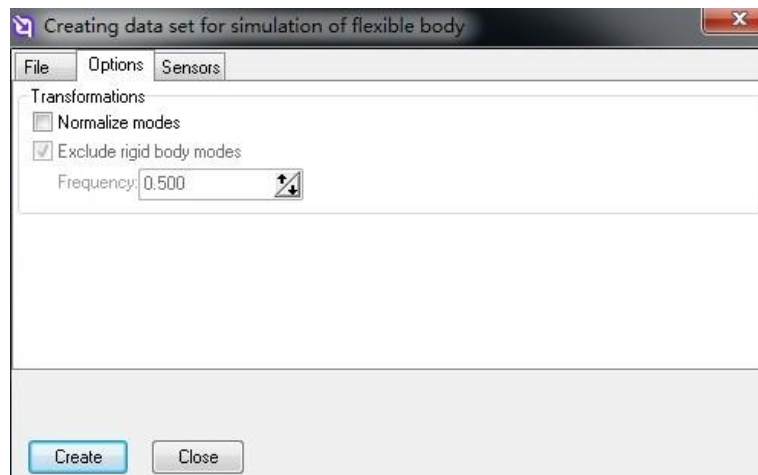



图 1.3

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。

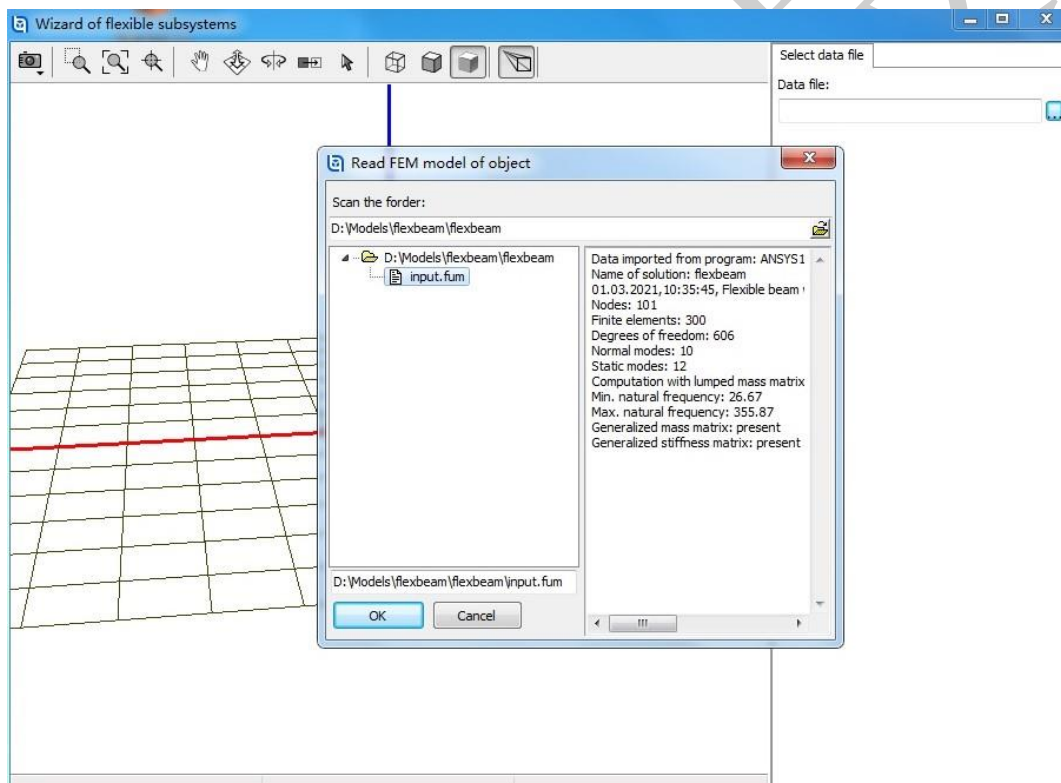


图 1.4

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。

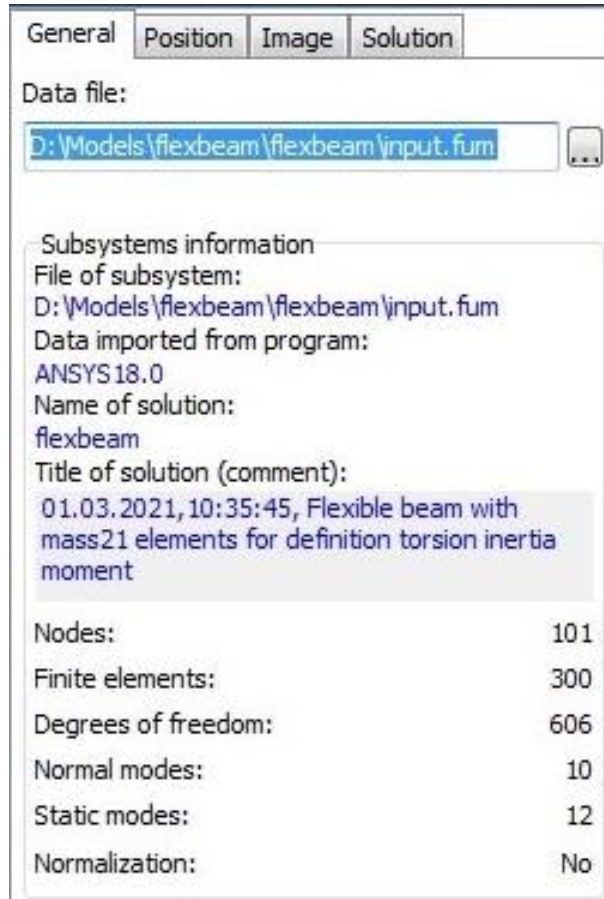


图 1.5

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 contains three main sections: 'Shift', 'Rotation', and 'Shift after rotation'. Each section has input fields for x, y, and z coordinates. The 'Rotation' section also includes three dropdown menus, each set to '0.00000000', and a small icon for each. The 'Shift' and 'Shift after rotation' sections have input fields for x, y, and z, with the z field in 'Shift' containing the value '0.3'. Each input 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。

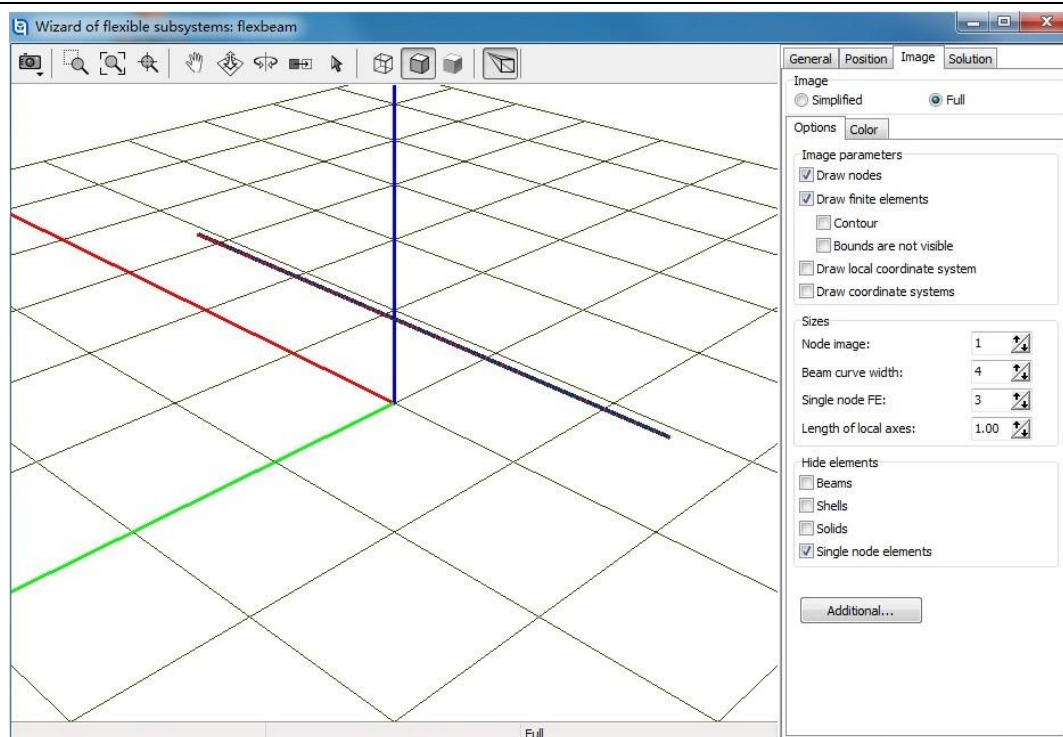


图 1.7

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。

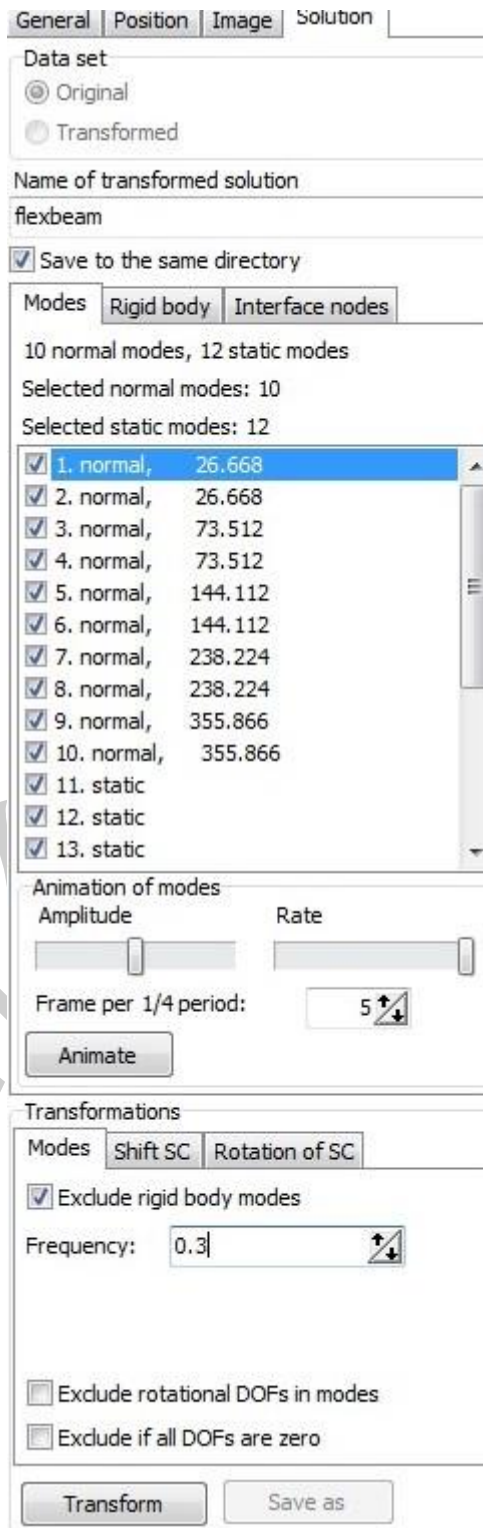


图 1.8

10. 然后依次点击是(Y), 确定, OK。

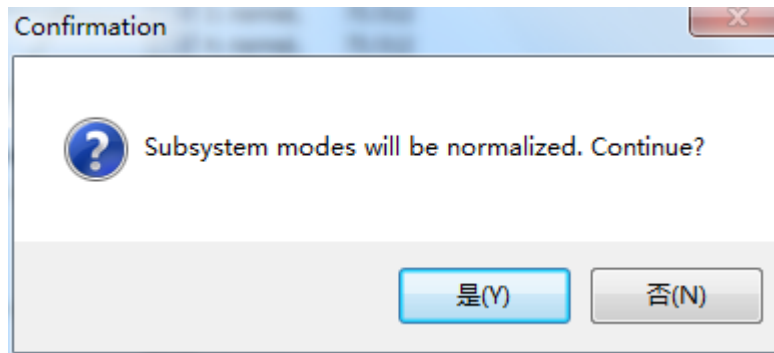


图 1.9

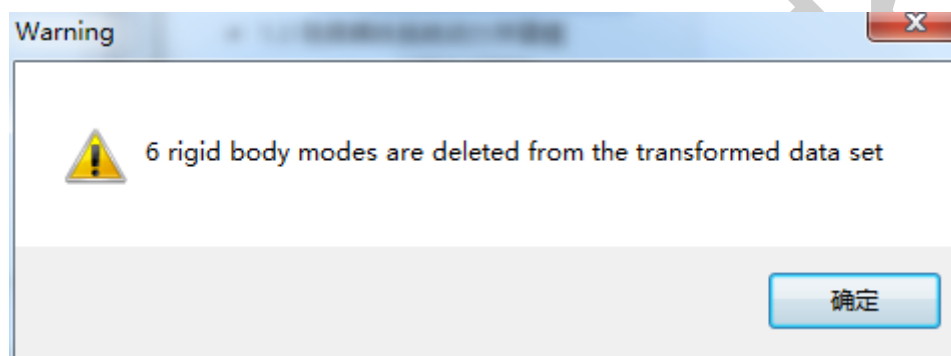


图 1.10

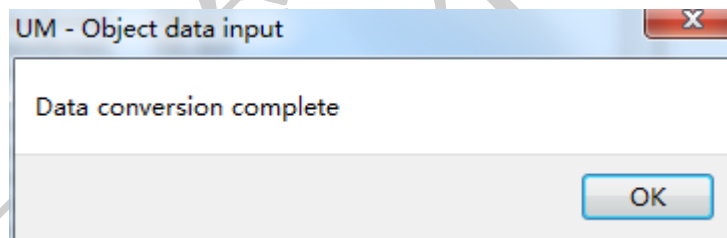


图 1.11

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。

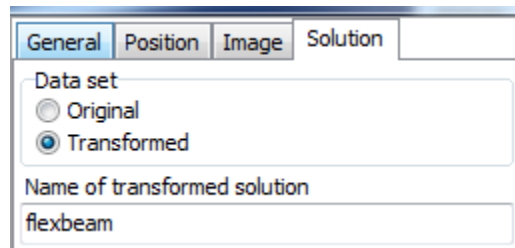


图 1.12

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。

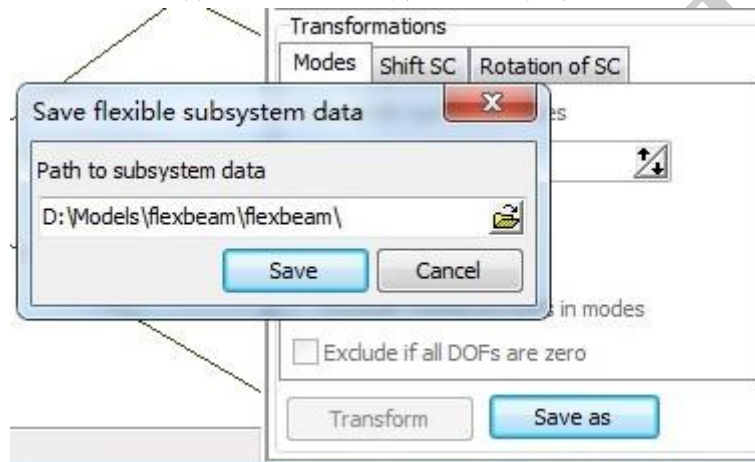


图 1.13

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。

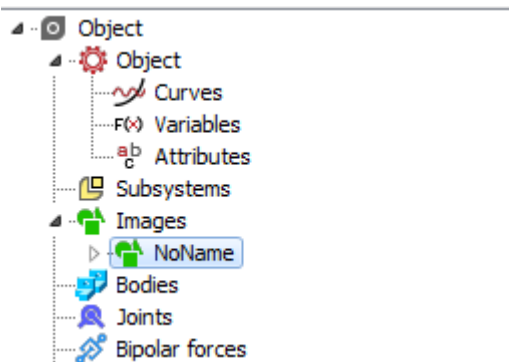


图 1.14

3. 选中 **NoName**，设置名称为 **Base0**。

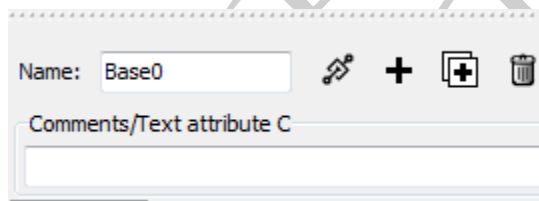


图 1.15

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**。

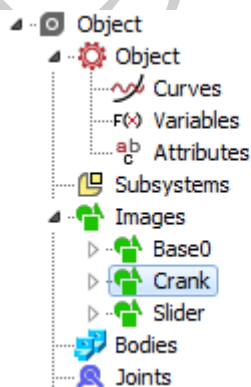


图 1.16

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**。

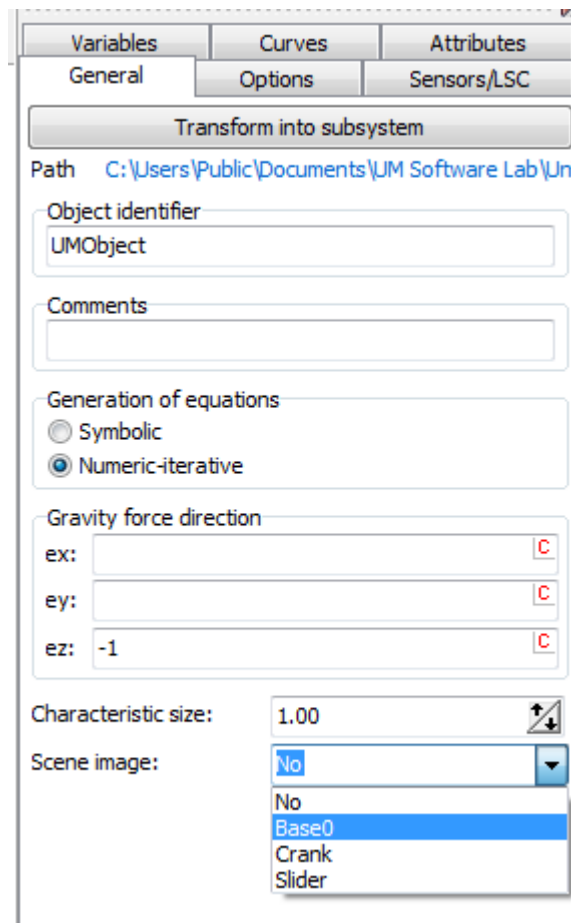


图 1.17

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。

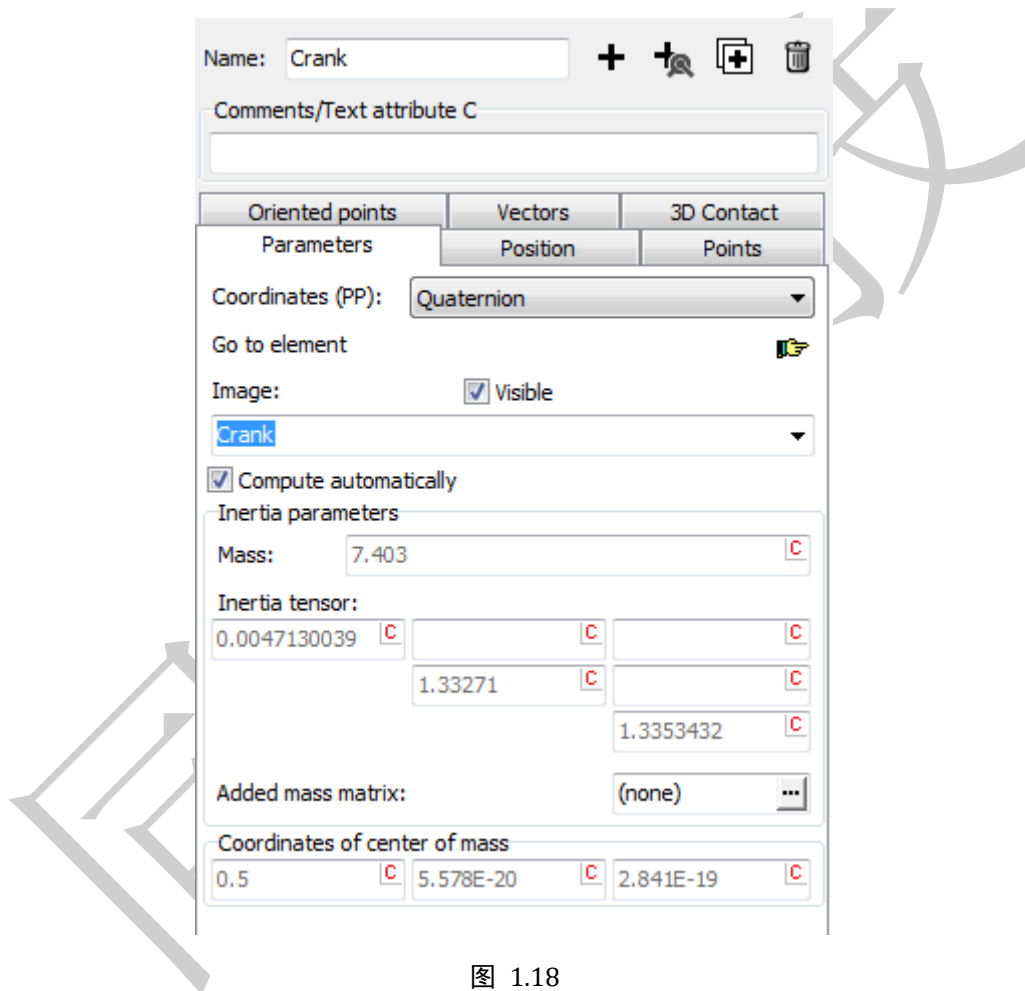


图 1.18

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。

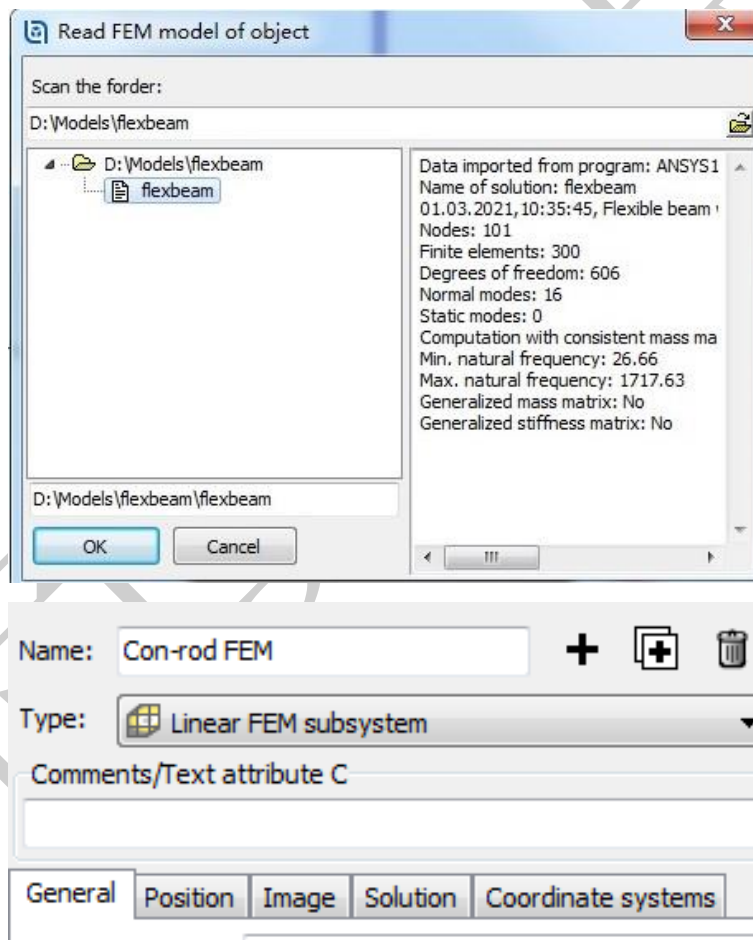


图 1.19

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。

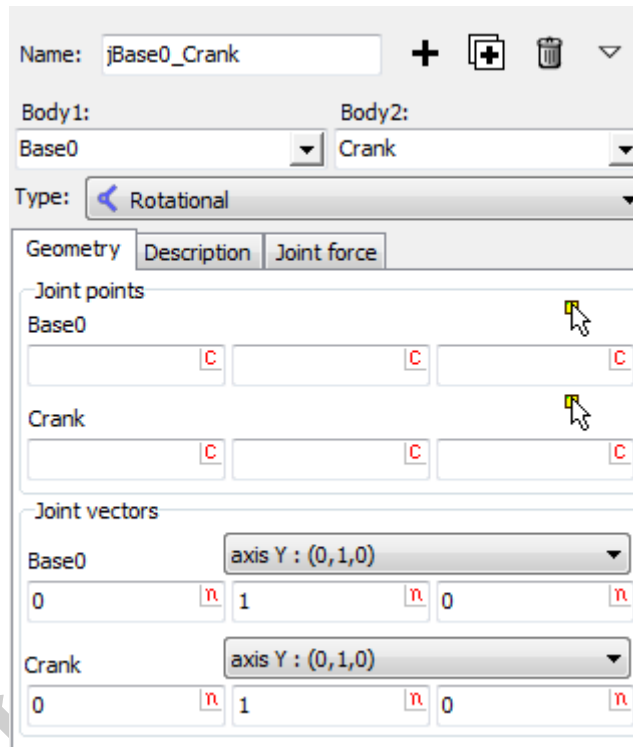


图 1.20

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

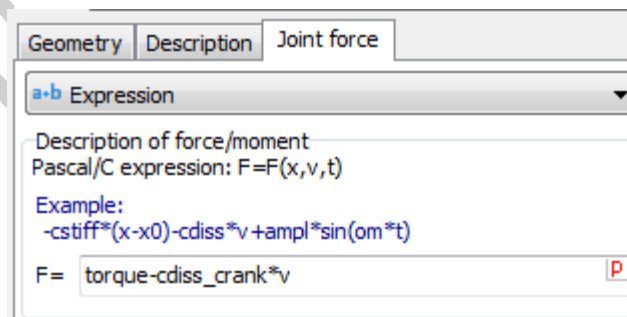
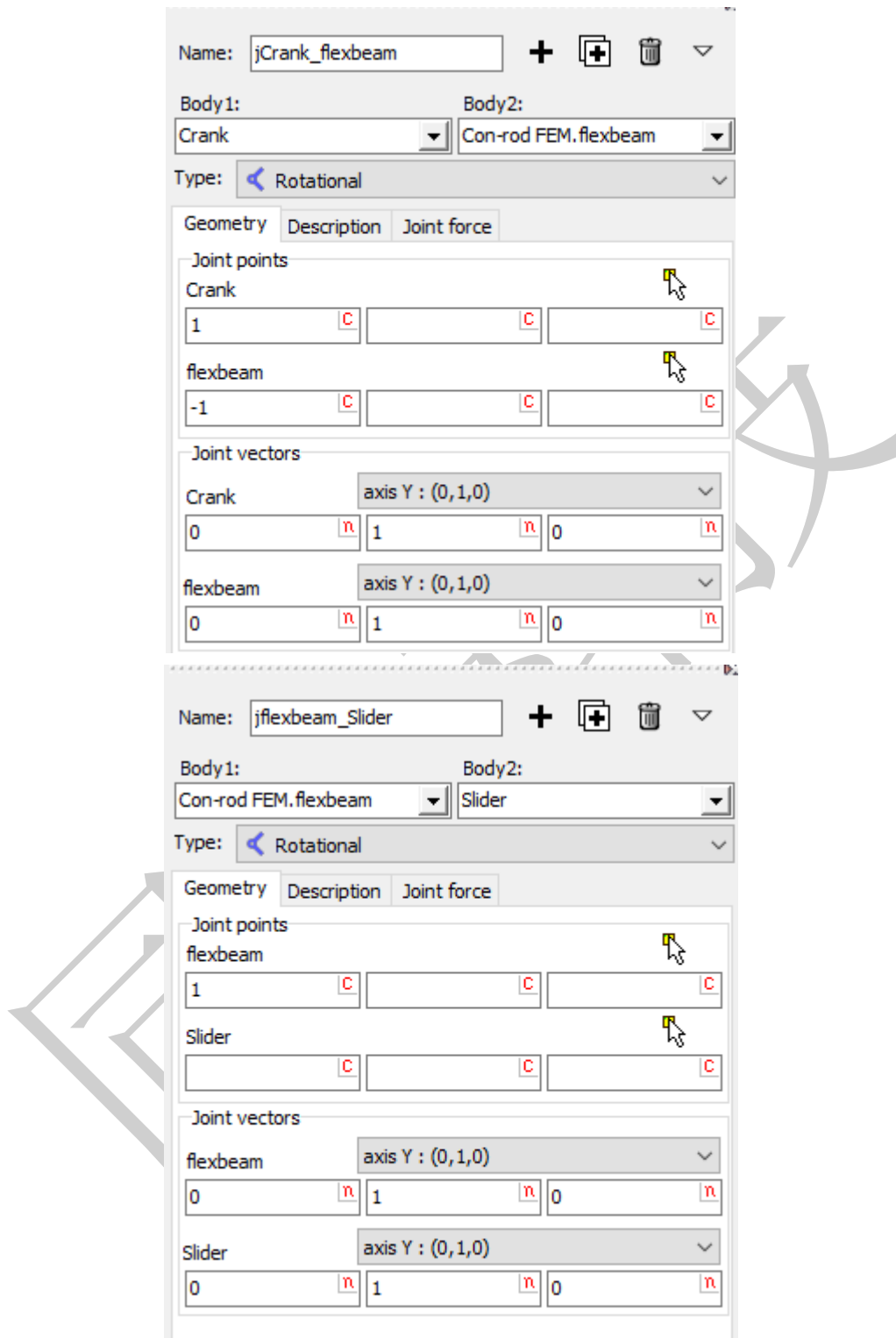


图 1.21

4. 另外三个铰定义如图 1.22 所示。



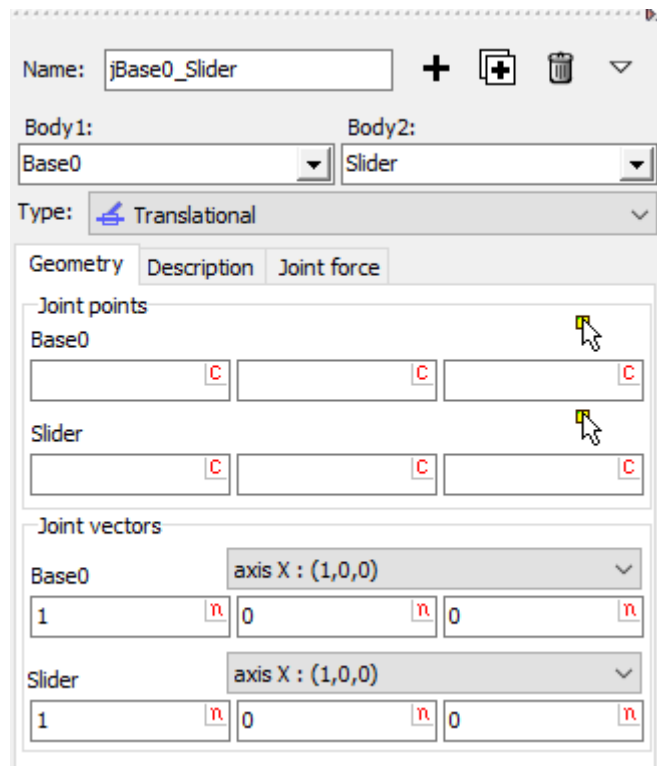


图 1.22

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。

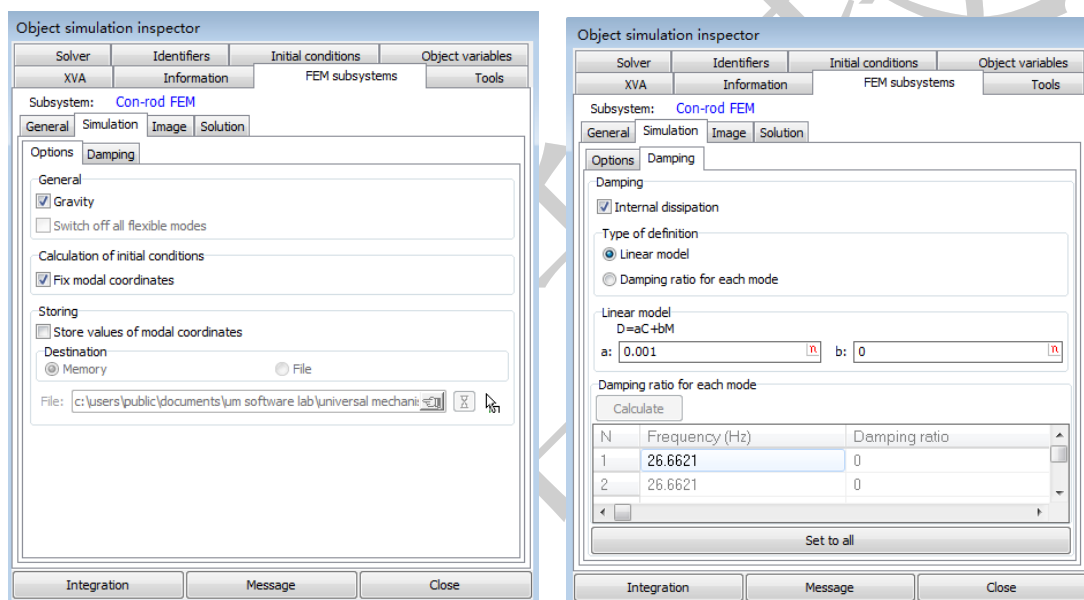




图 1.25

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。

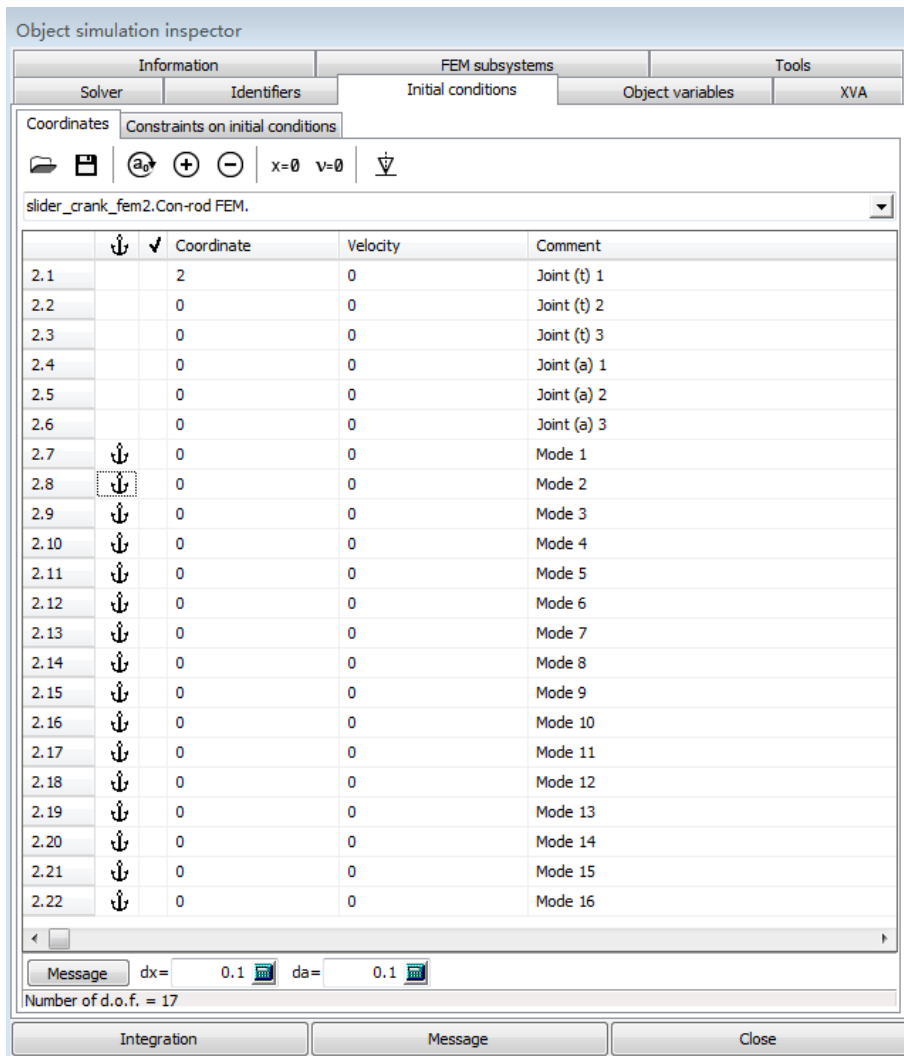


图 1.26

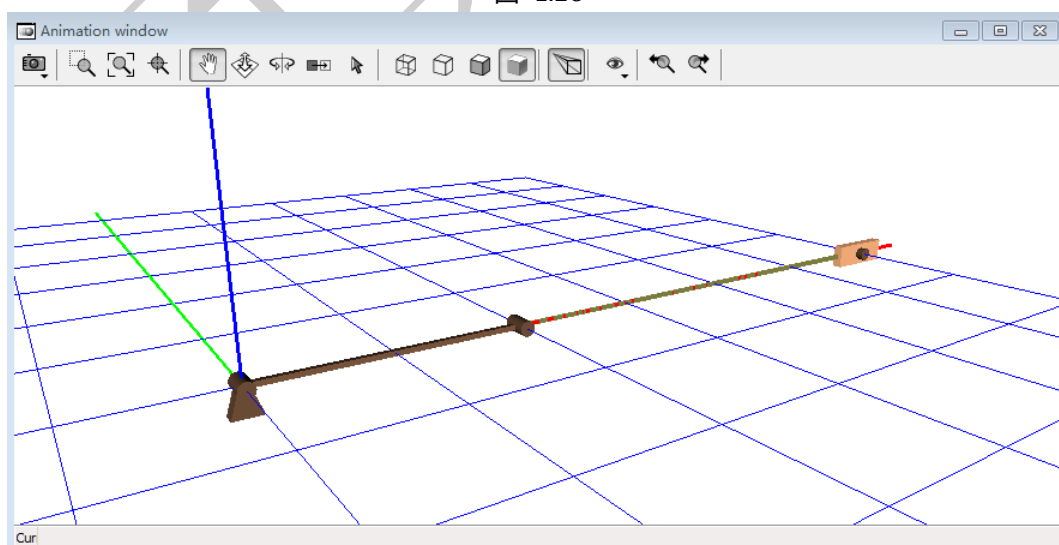


图 1.27

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。

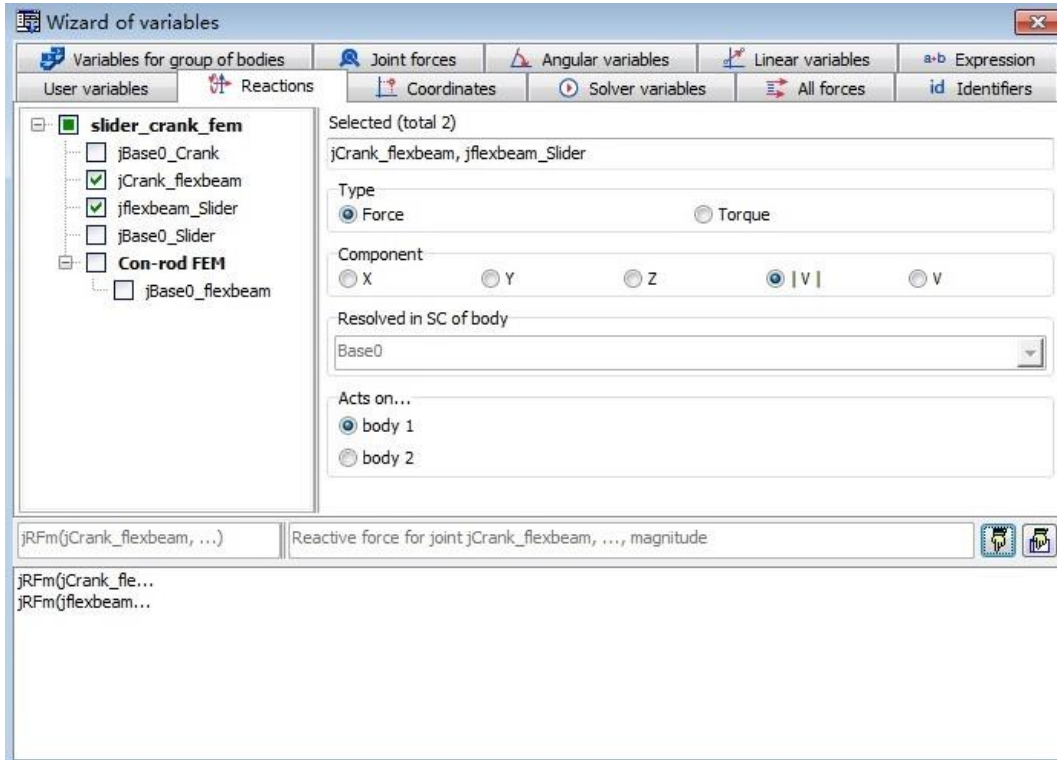


图 1.28

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**

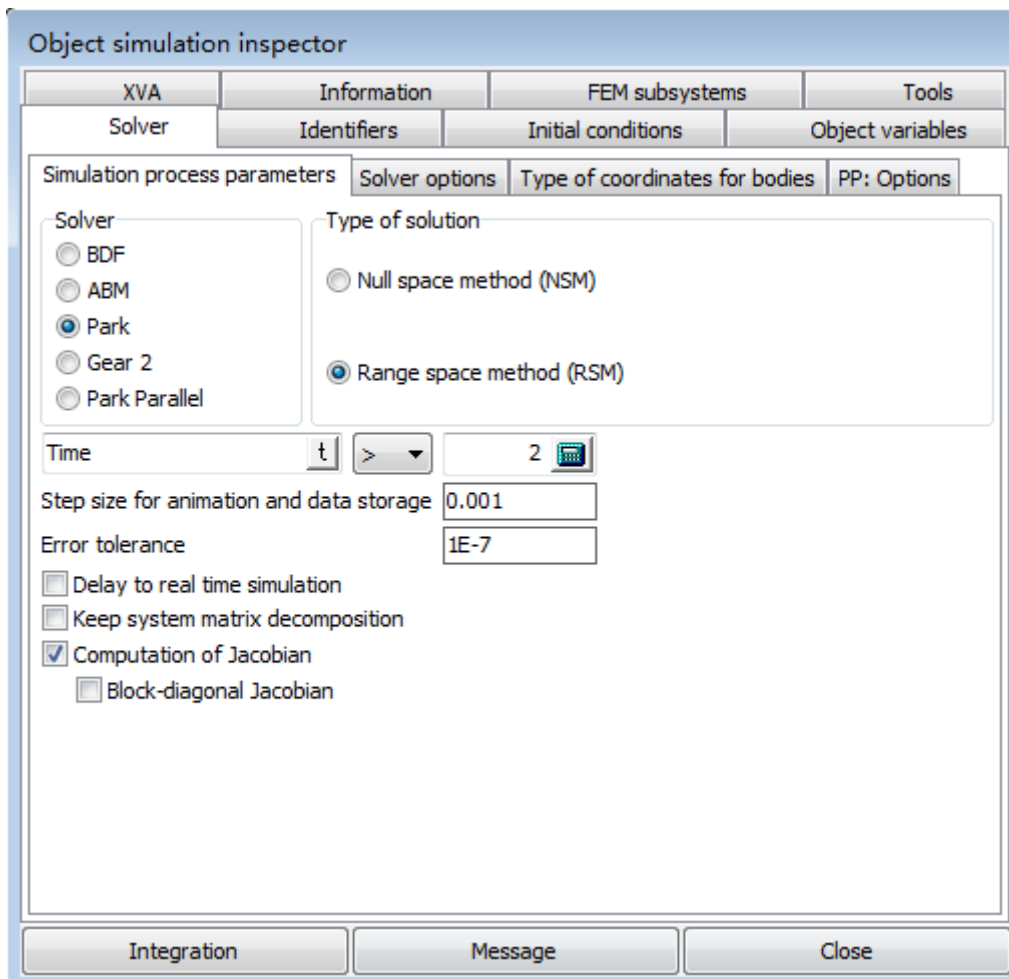


图 1.29

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）。

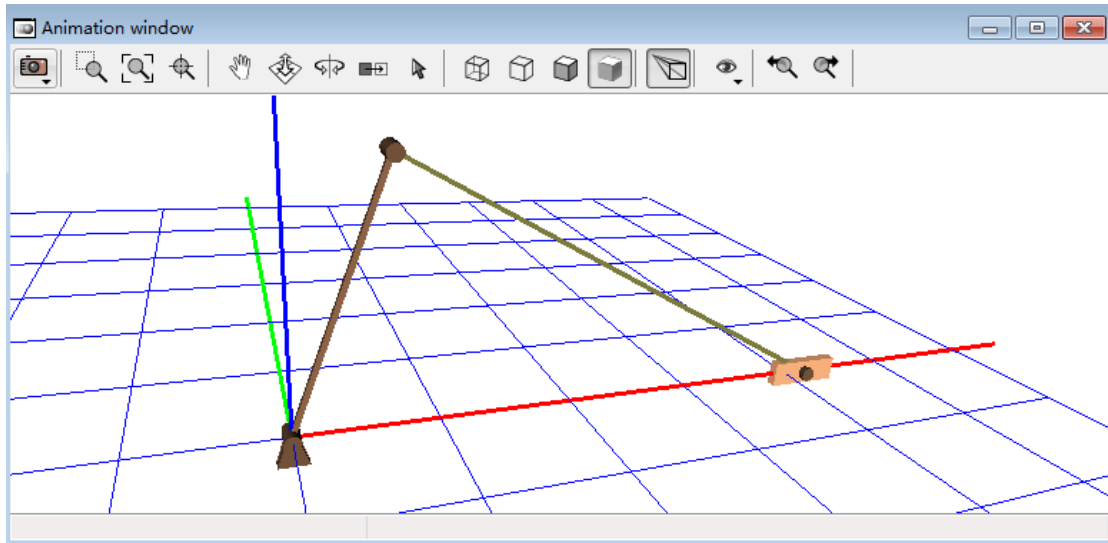


图 1.30

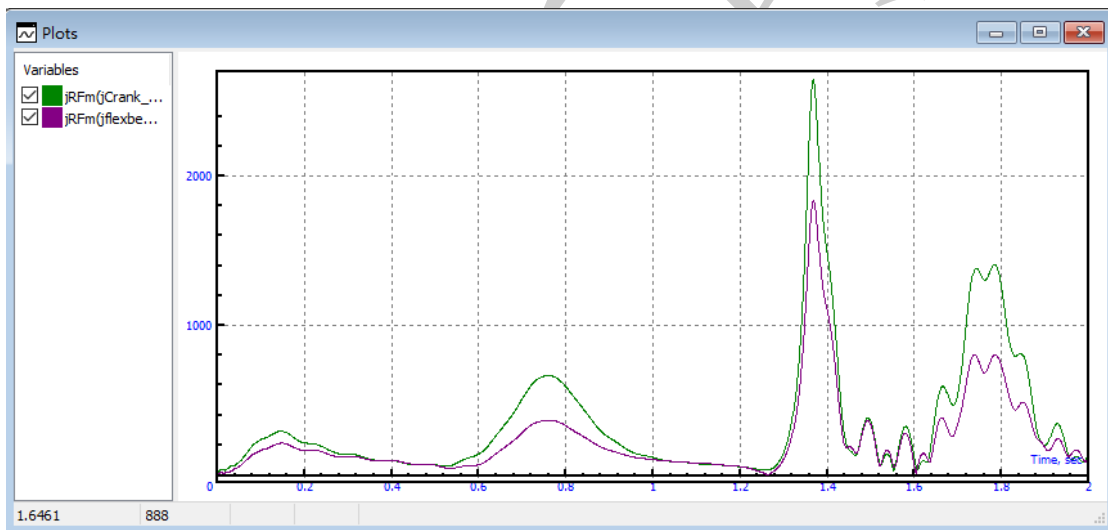


图 1.31

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。

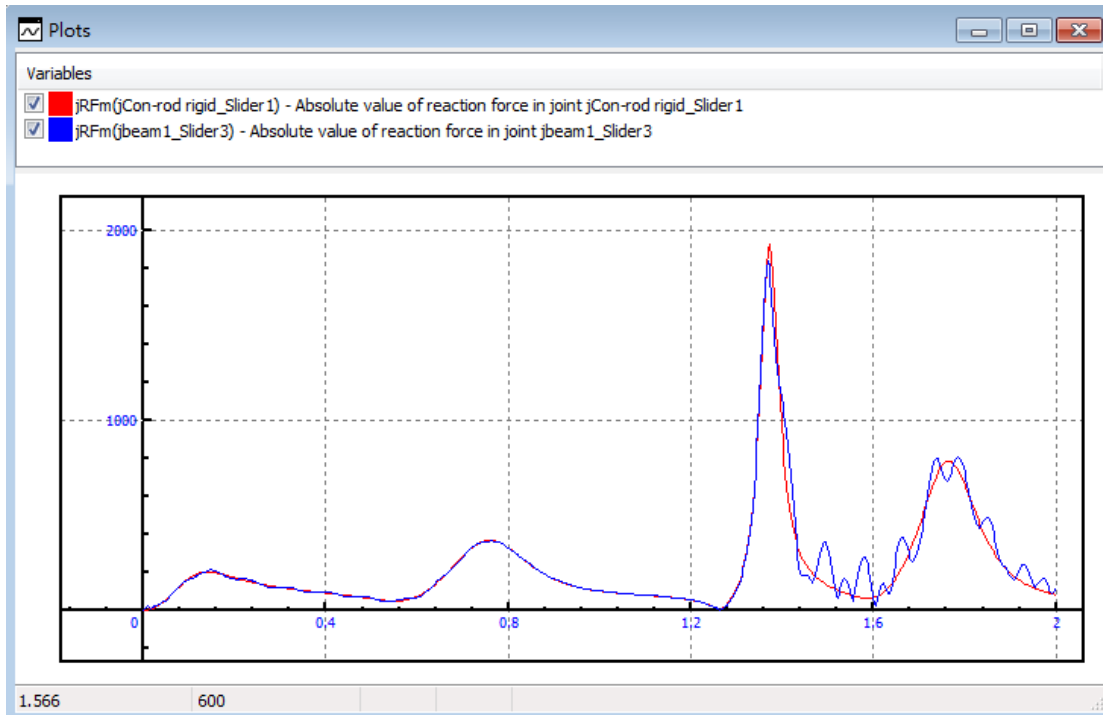


图 1.32 红色曲线对应刚性连杆, 蓝色曲线对应柔性连杆

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。

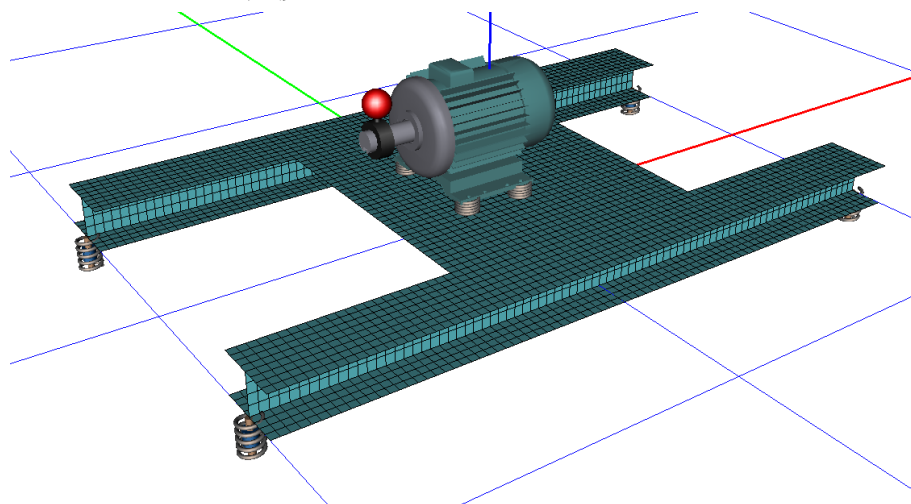


图 2.1

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。

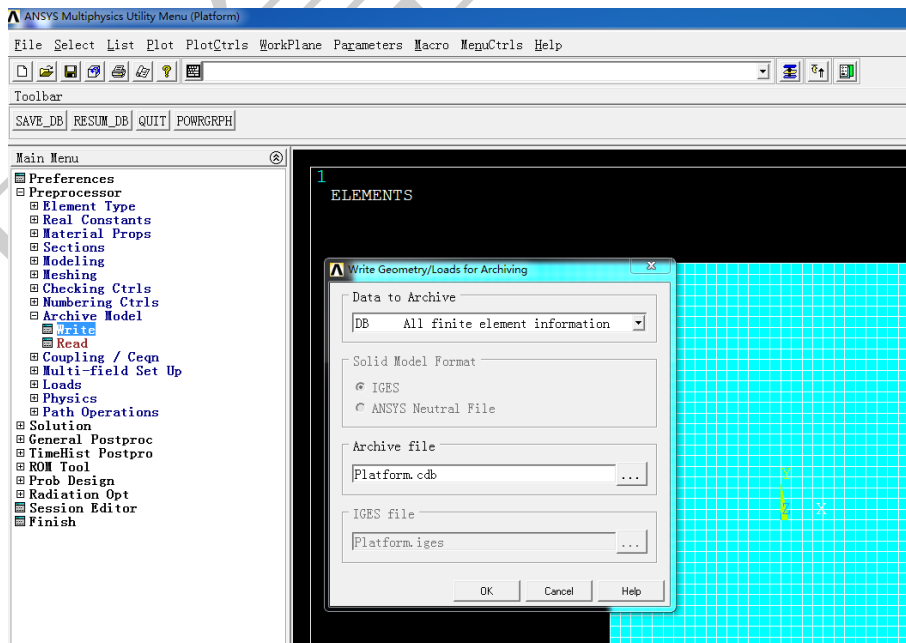


图 2.2

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。

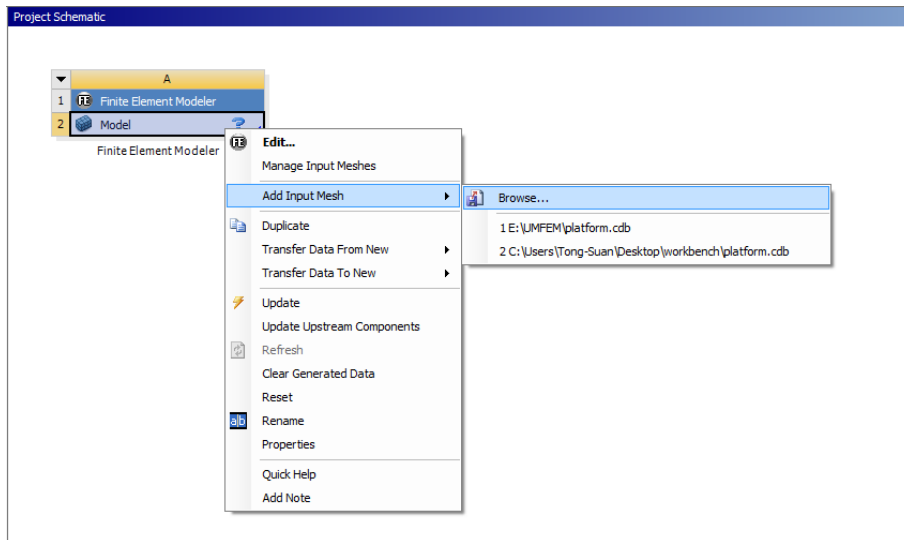


图 2.3

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。

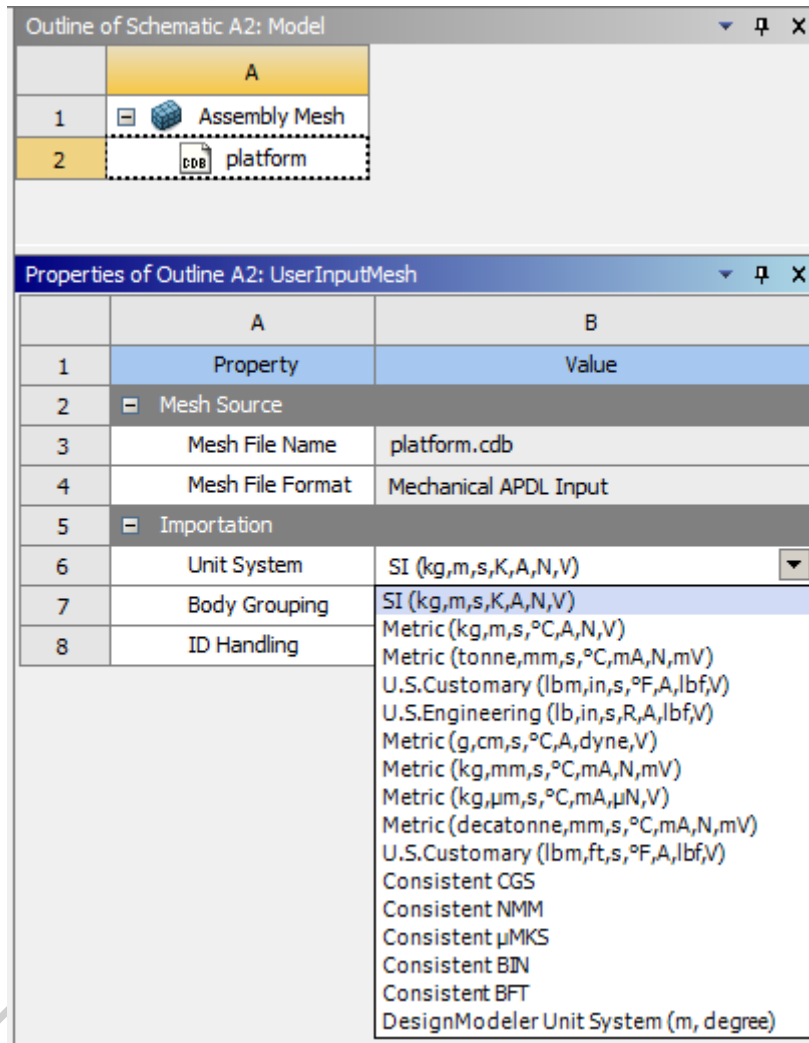


图 2.4

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。

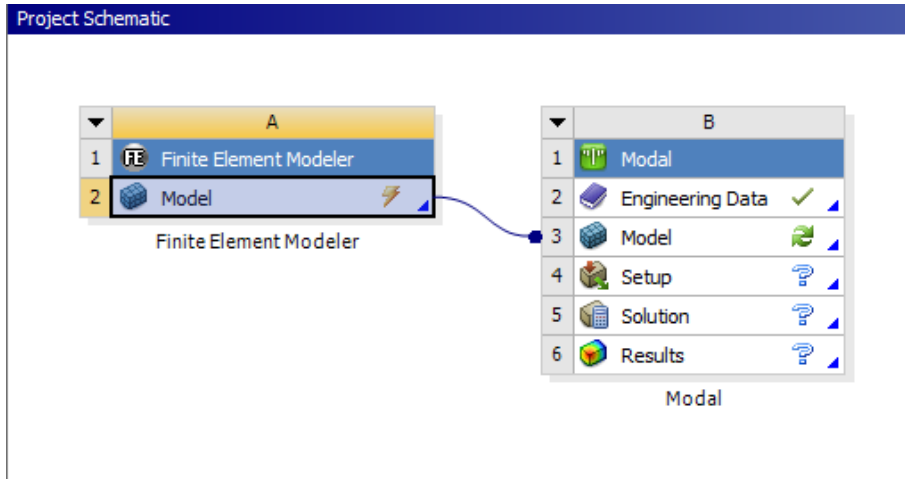


图 2.5

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。

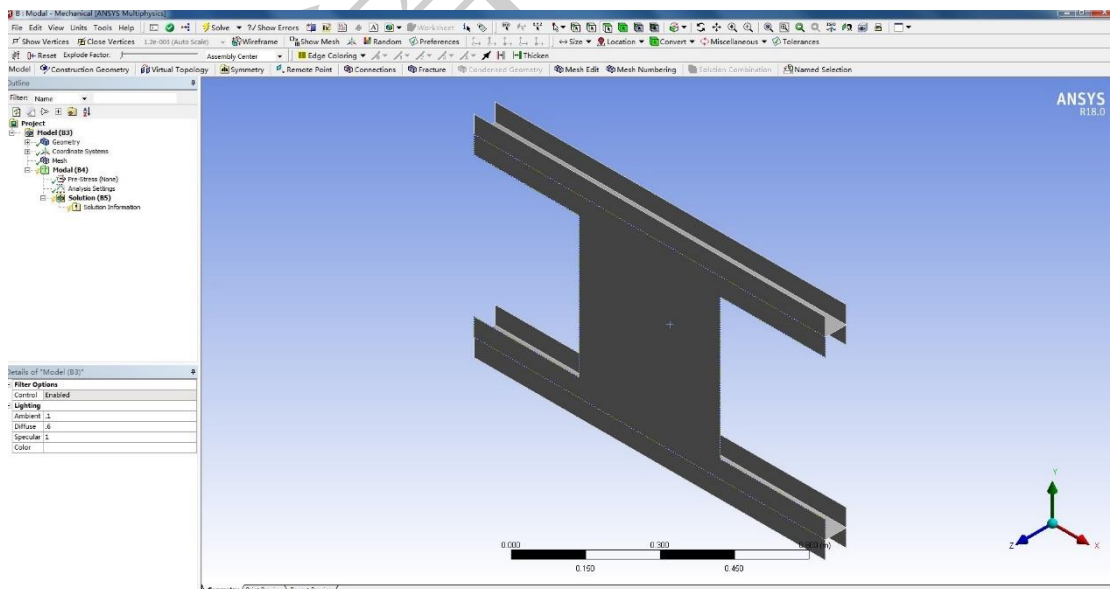


图 2.6

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。

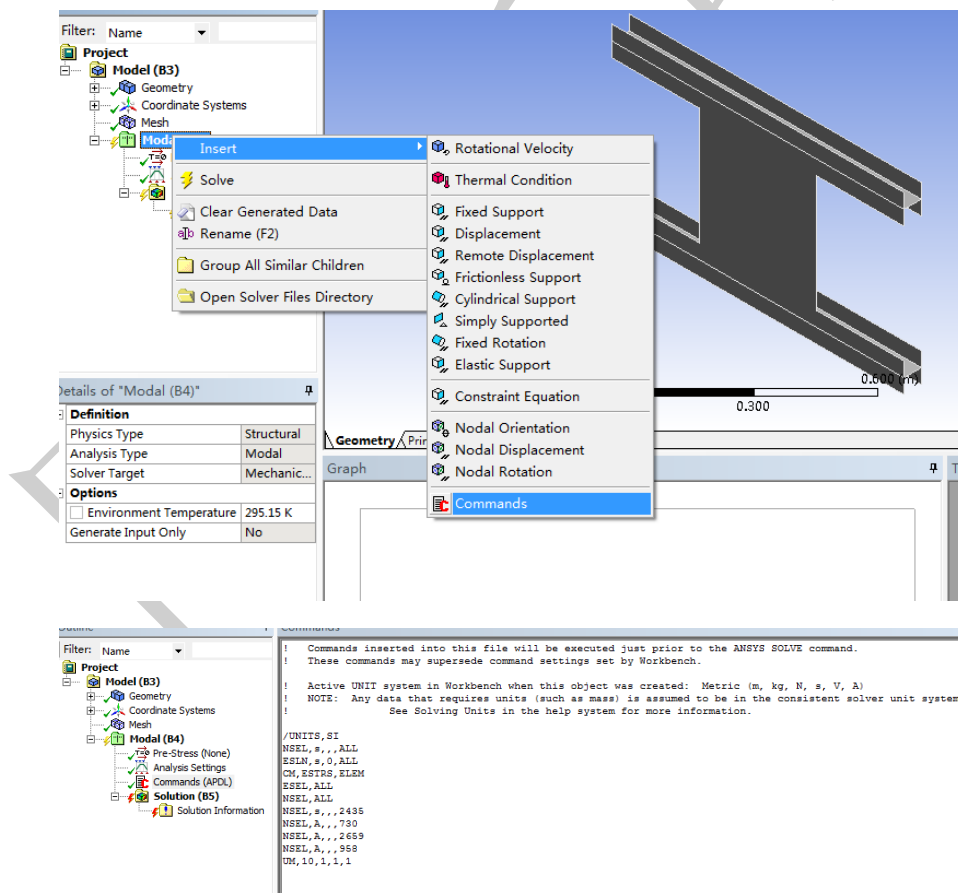


图 2.7

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。

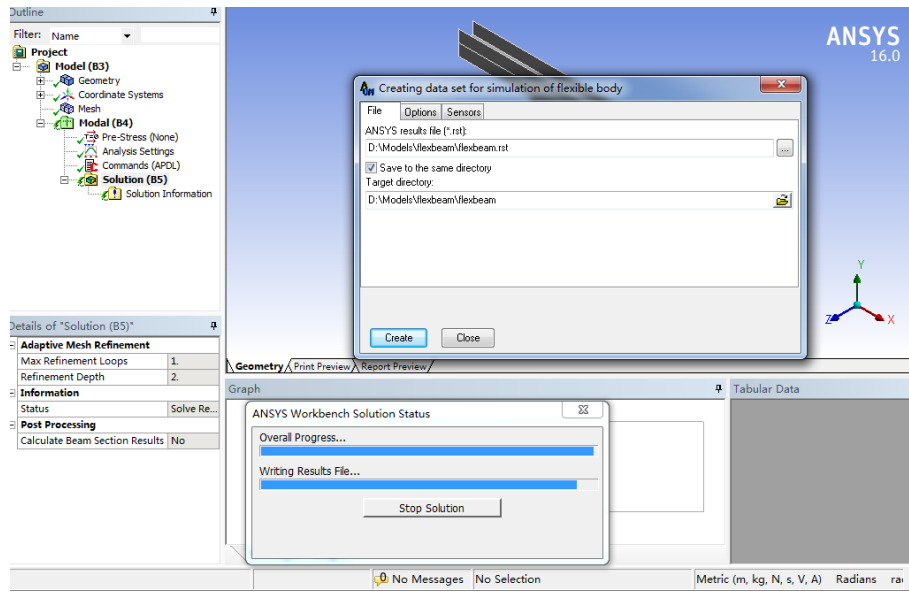


图 2.8

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。

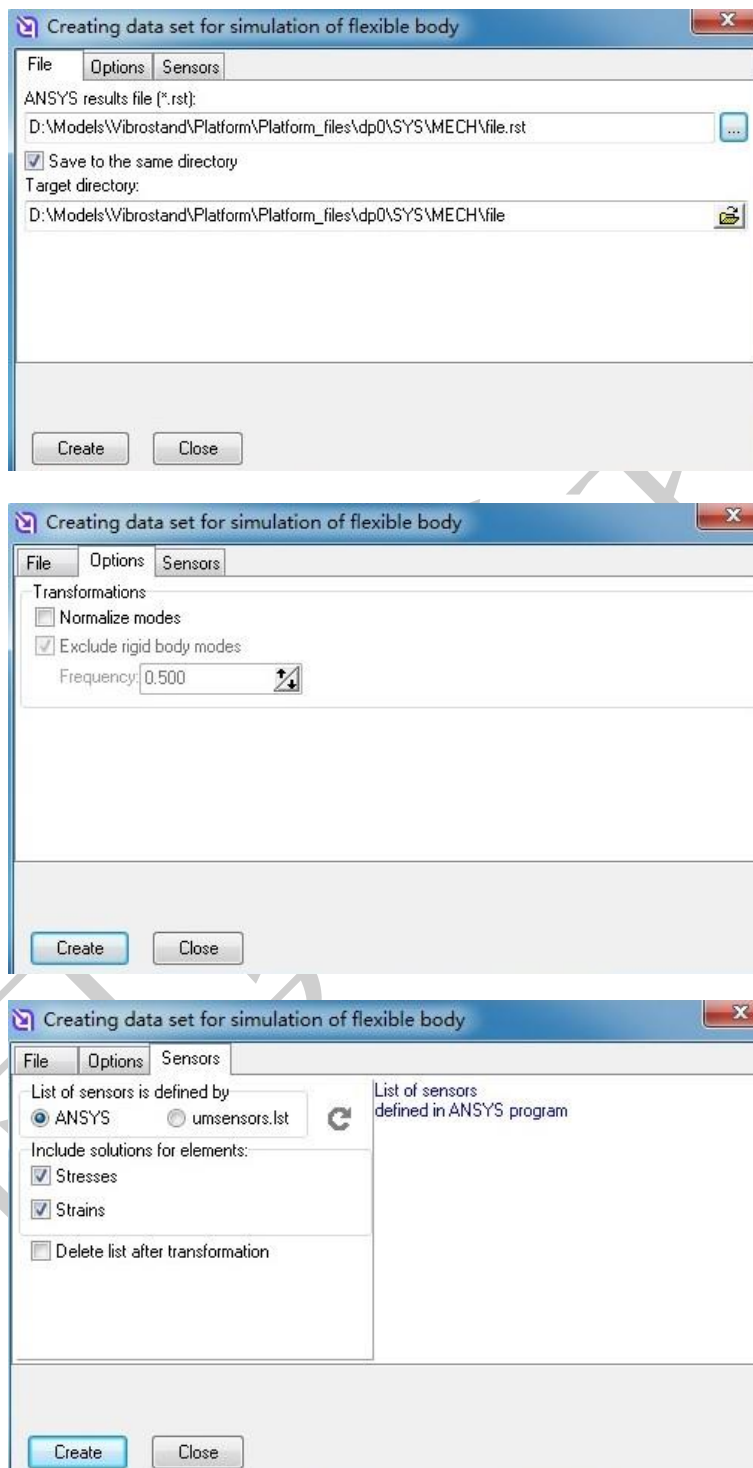


图 2.9

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。

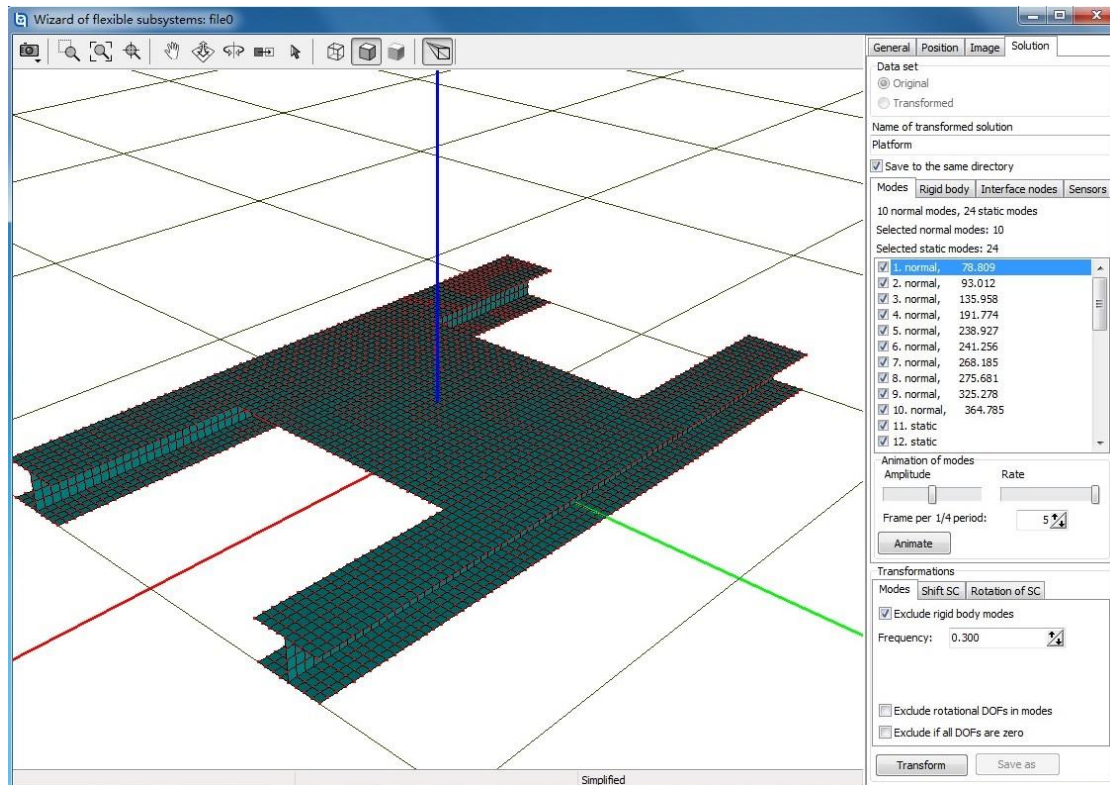


图 2.10

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。

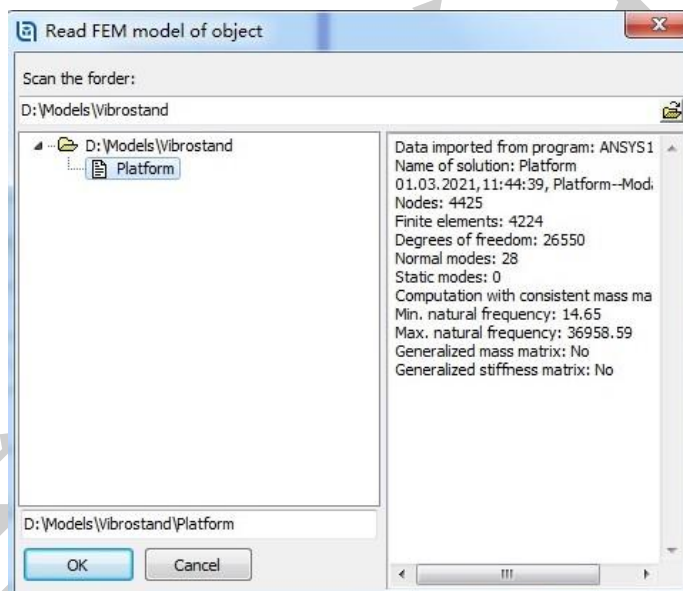


图 2.11

3. 重命名为 **Platform**。

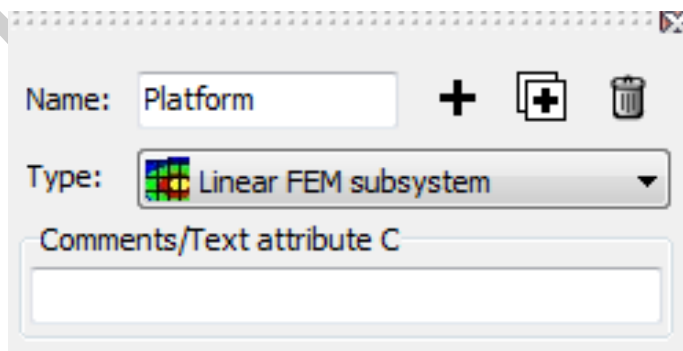



图 2.12

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。

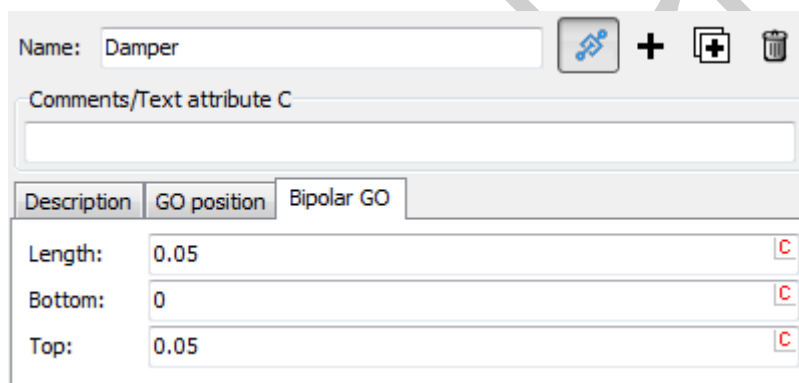


图 2.13

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。

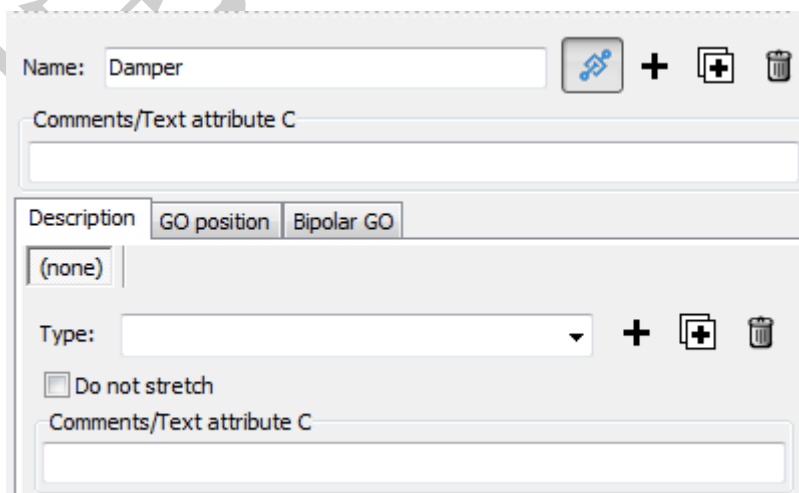


图 2.14

5. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Spring**。

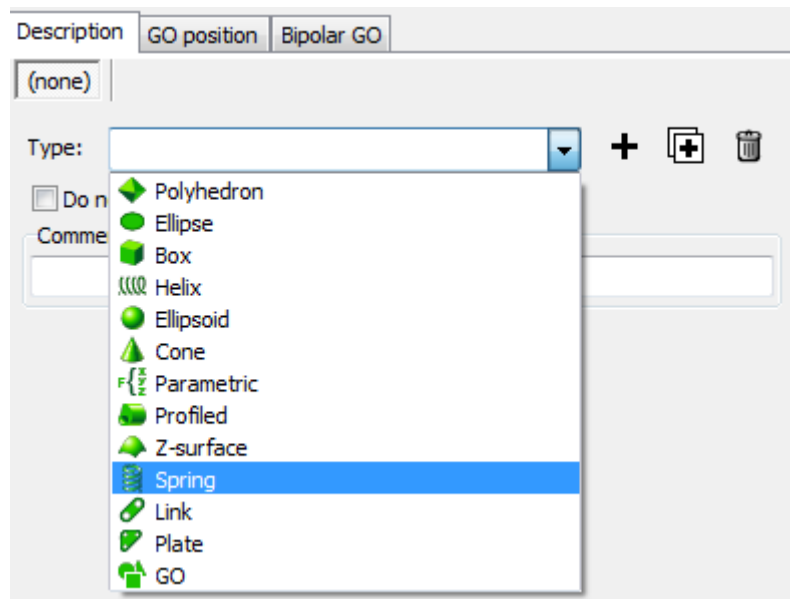


图 2.15

6. 设置 **Spring** 几何参数如图 2.16 所示。

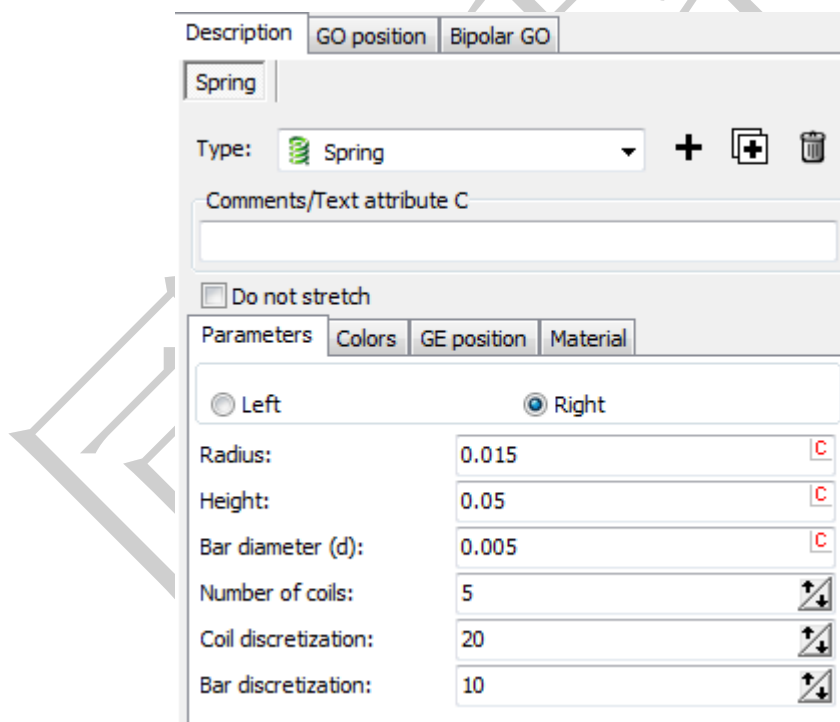


图 2.16

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

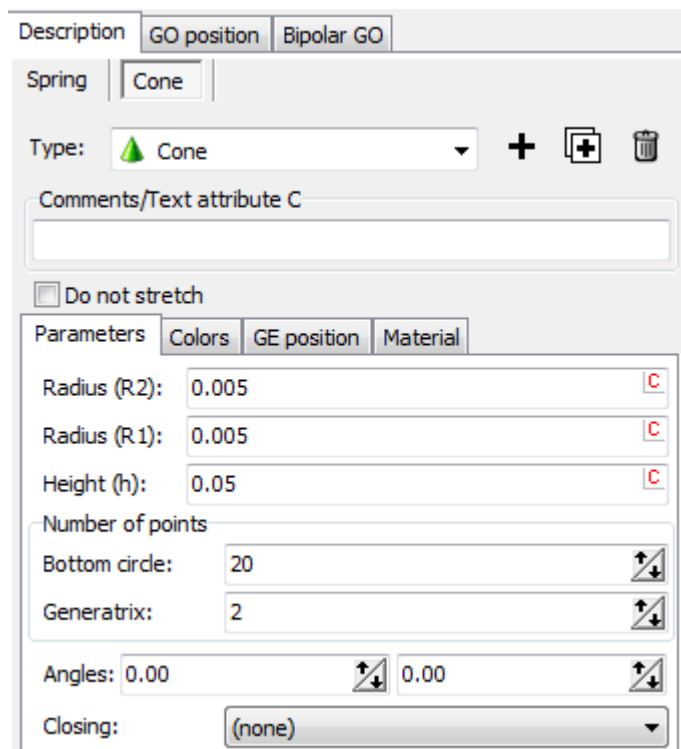


图 2.17

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

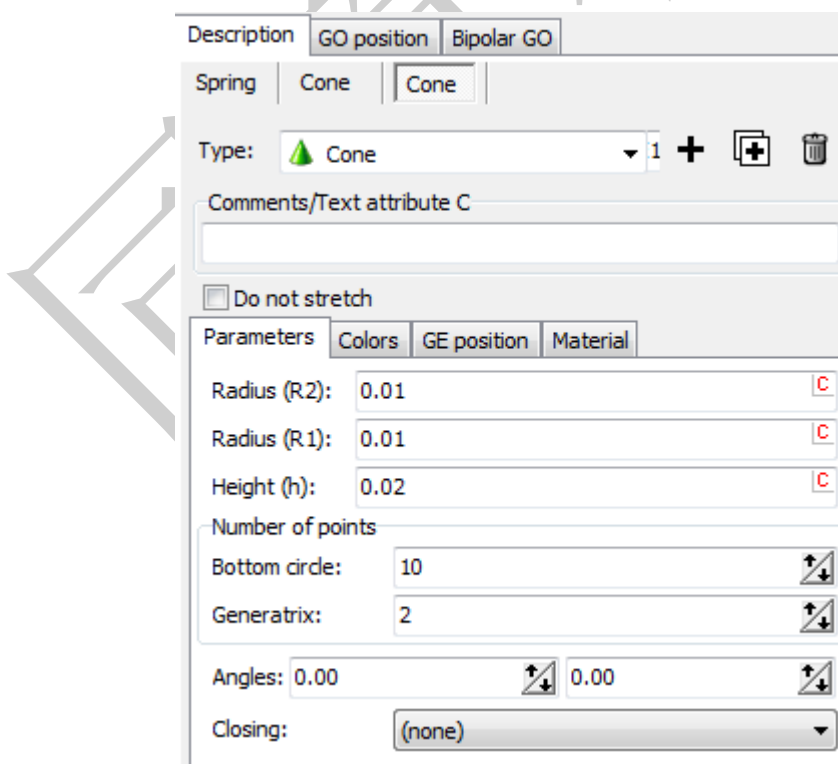


图 2.18

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

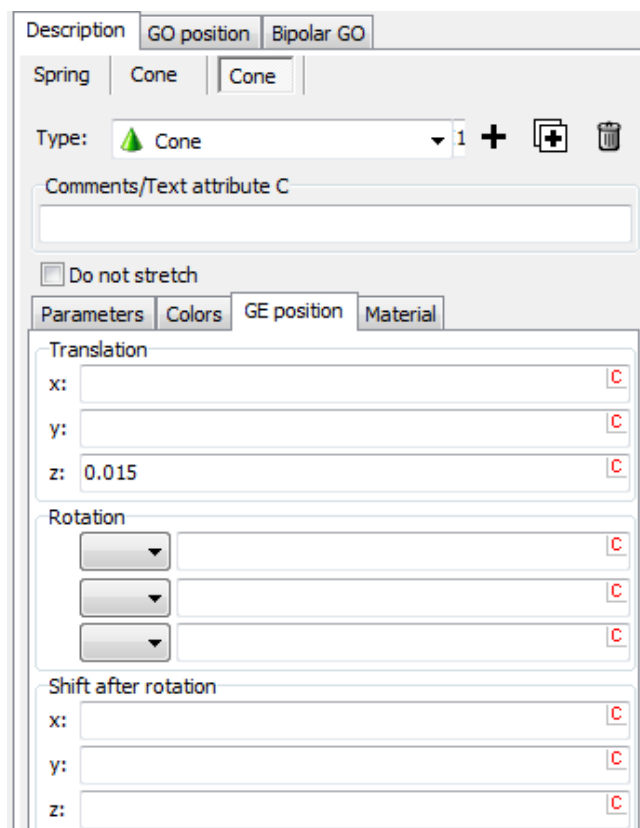


图 2.19

10. 设置两个 **Cone** 以不同颜色显示，如图 2.20 所示。

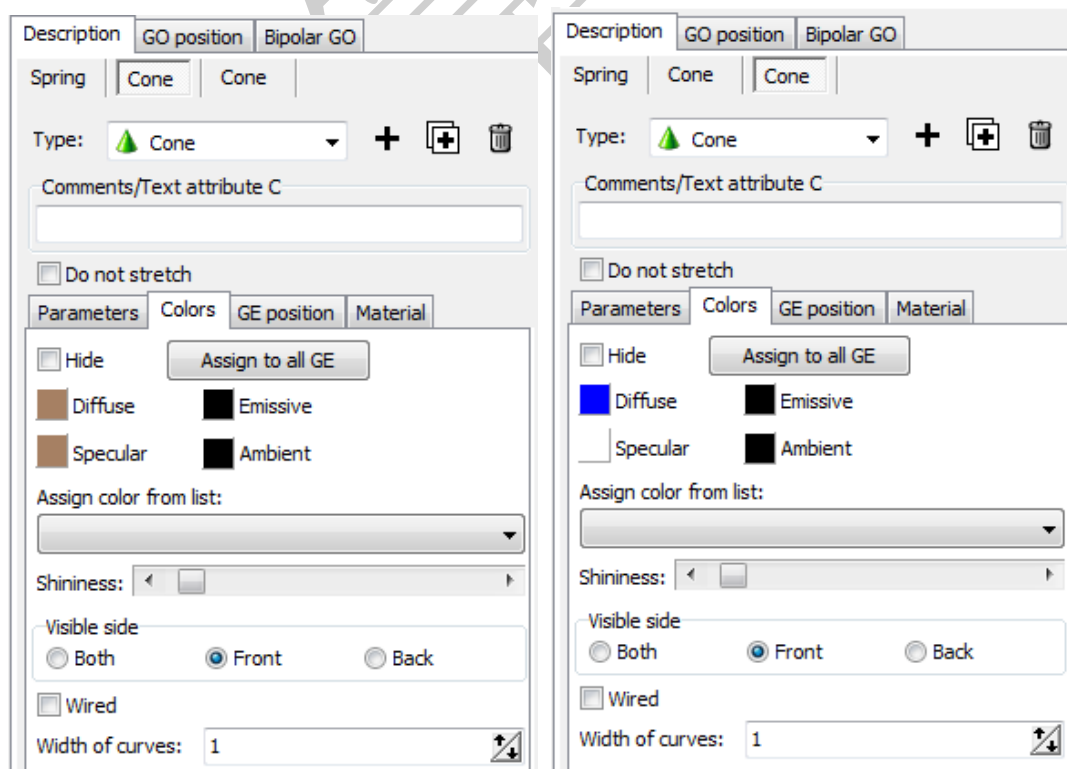


图 2.20

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。

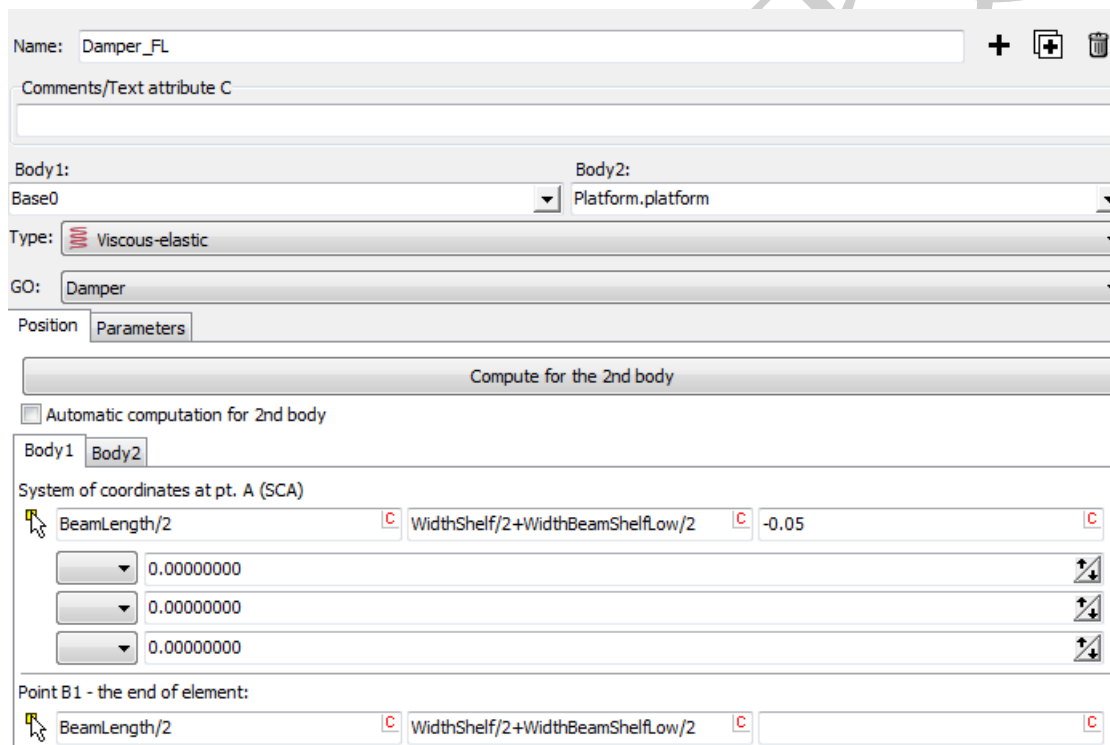


图 2.21

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。

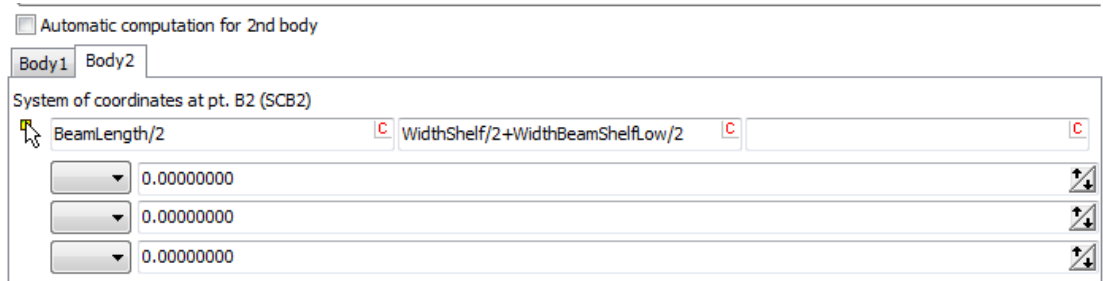



图 2.22

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**。

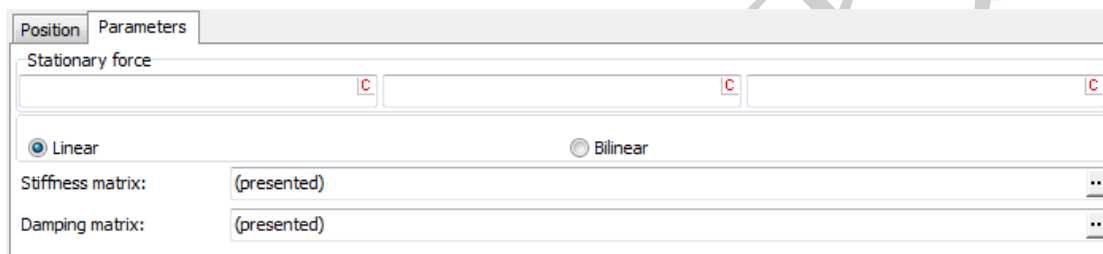


图 2.23

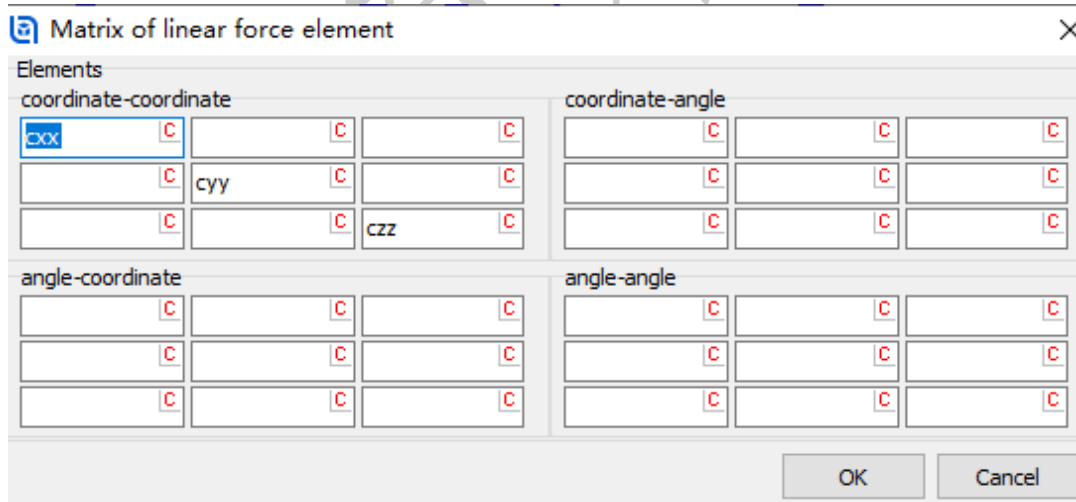



图 2.24

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**。

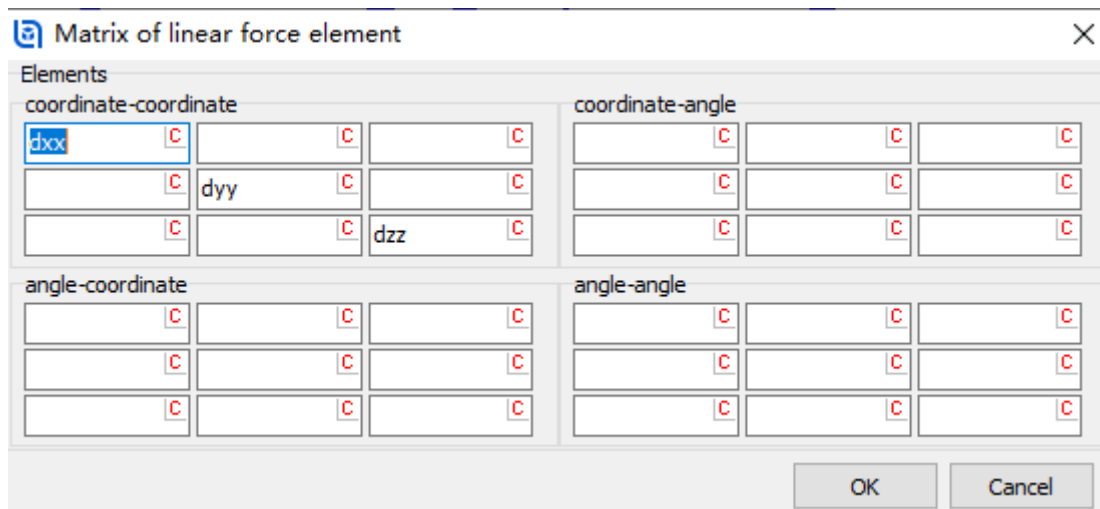


图 2.25

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。

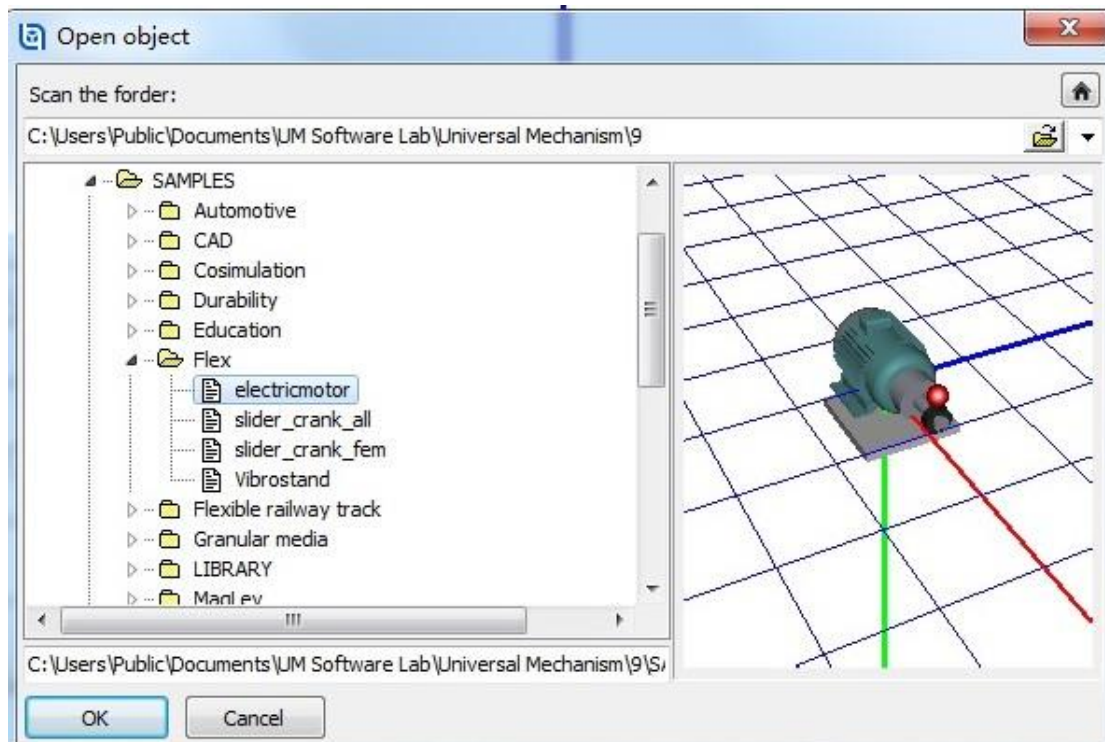


图 2.26

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。

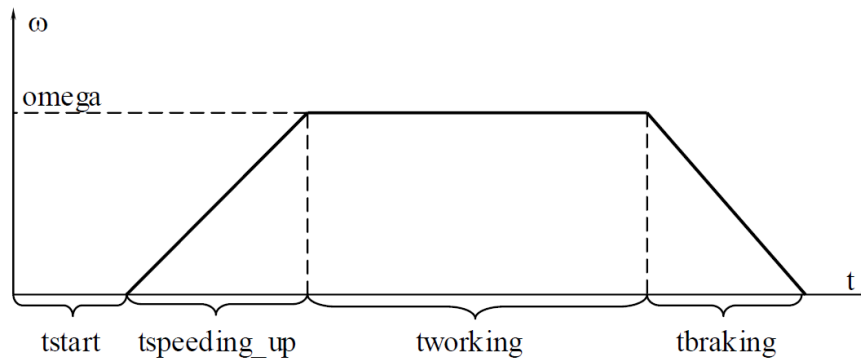


图 2.28

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	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * tstart - \omega * (t-tstart - tspeeding_up)$
4	tstart+tspeeding_up+twworking +tbraking	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * twworking + \omega * (t-tstart - tspeeding_up - twworking) - (\omega/tbraking) * \sqrt{(t-tstart - tspeeding_up - twworking)/2}$
5	100	$(\omega/tspeeding_up)*\sqrt{(tspeeding_up)/2} + \omega * twworking + \omega * (twworking) - (\omega/tbraking) * \sqrt{(tbraking)/2}$

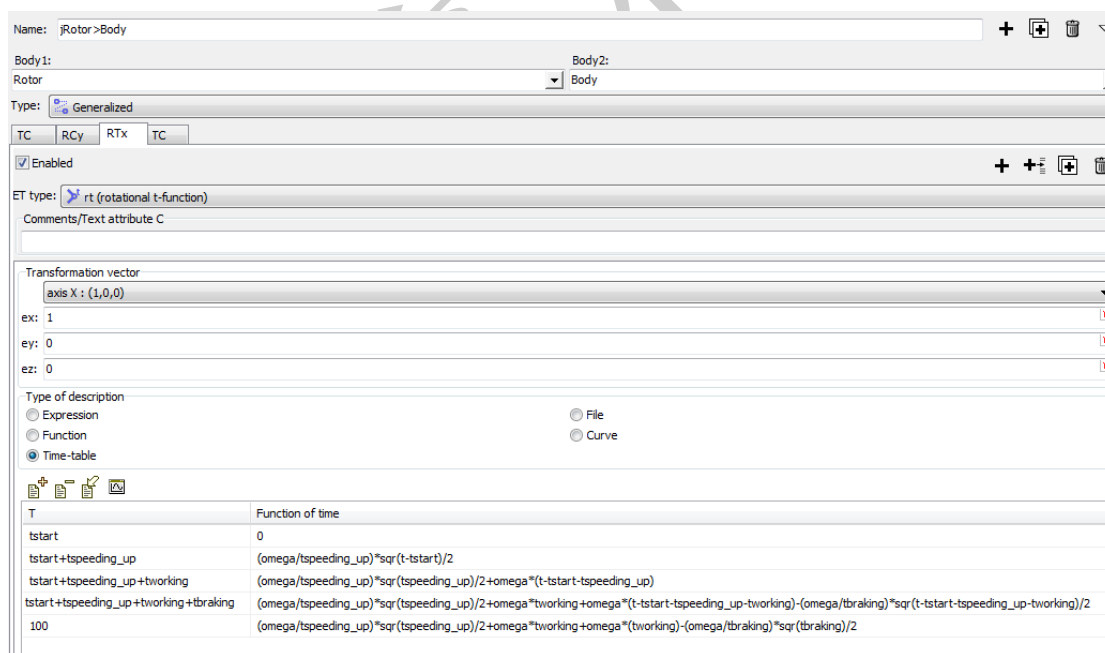


图 2.29

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。

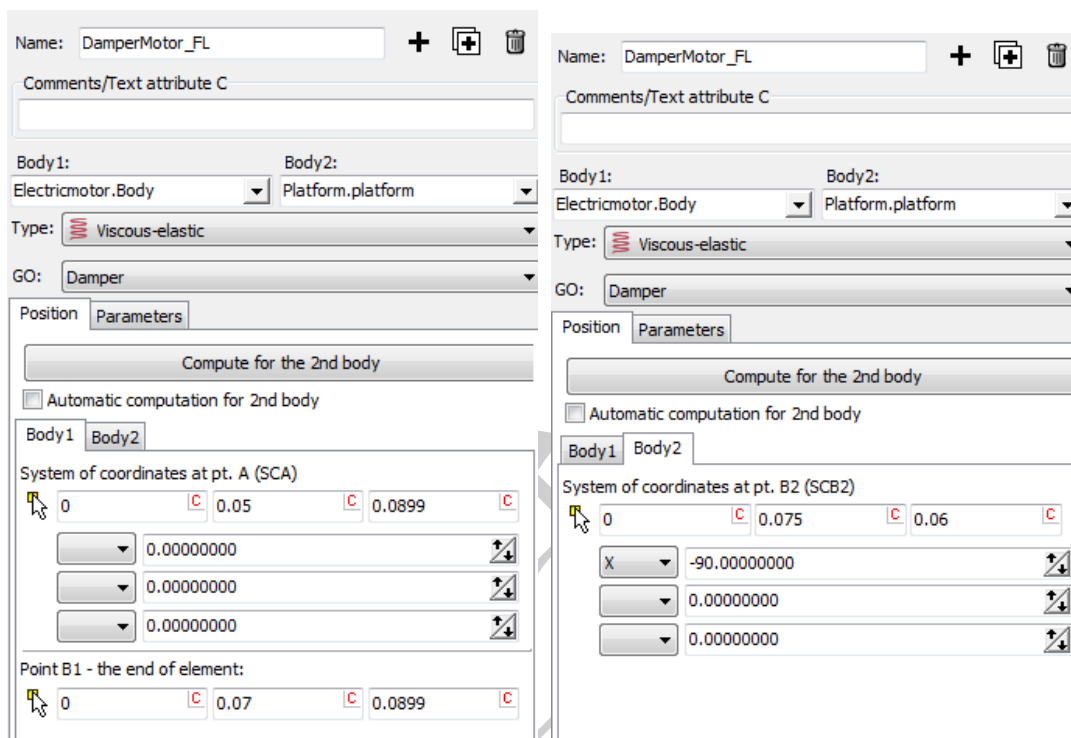


图 2.30

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： $cStiff\ lateral=1.0e6$ ， $cStiff\ longitudinal=1.0e6$ ， $cDiss\ lateral=1.0e3$ ， $cDiss\ longitudinal=1.0e3$ 。

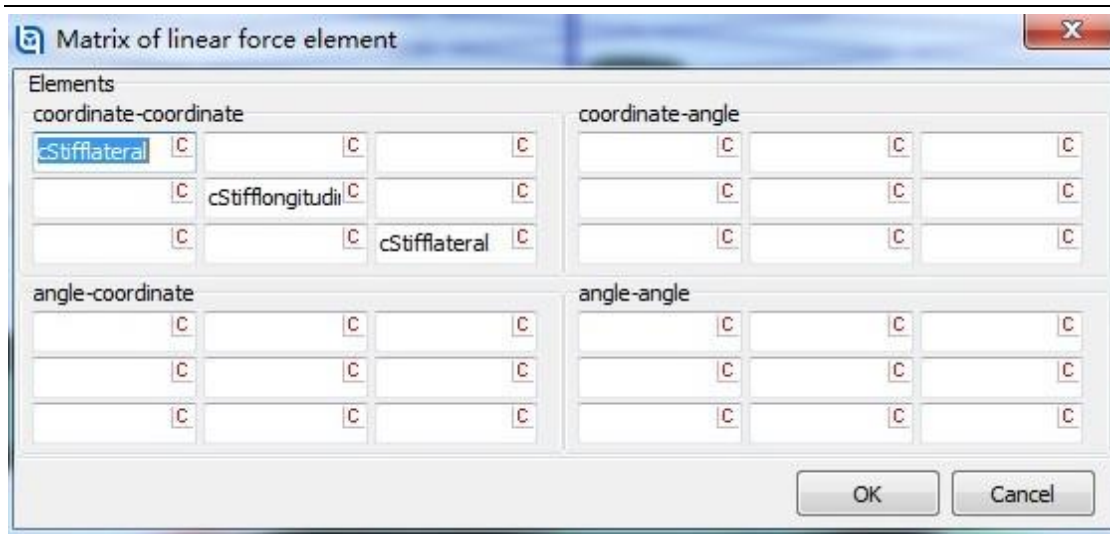


图 2.31

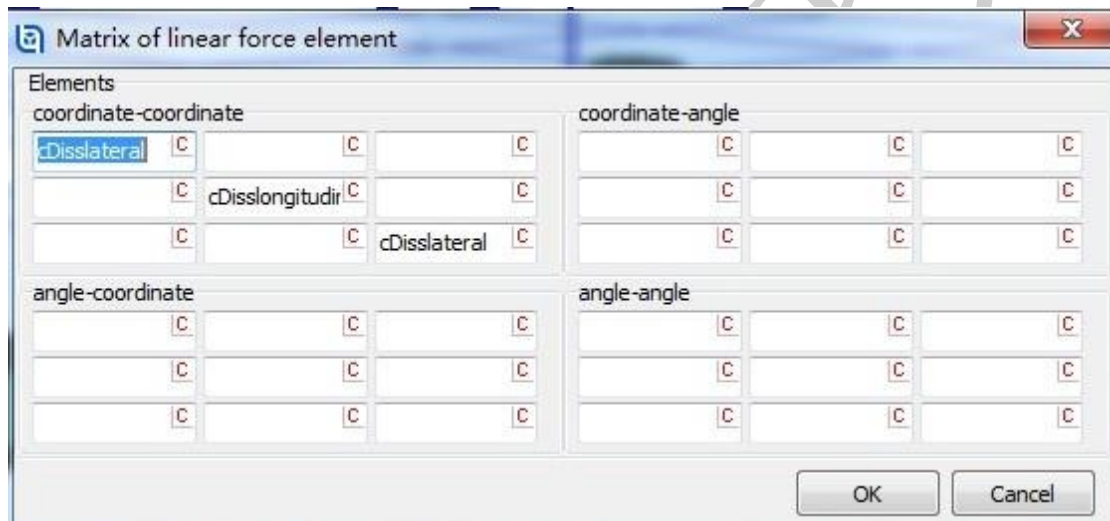




图 2.32

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。

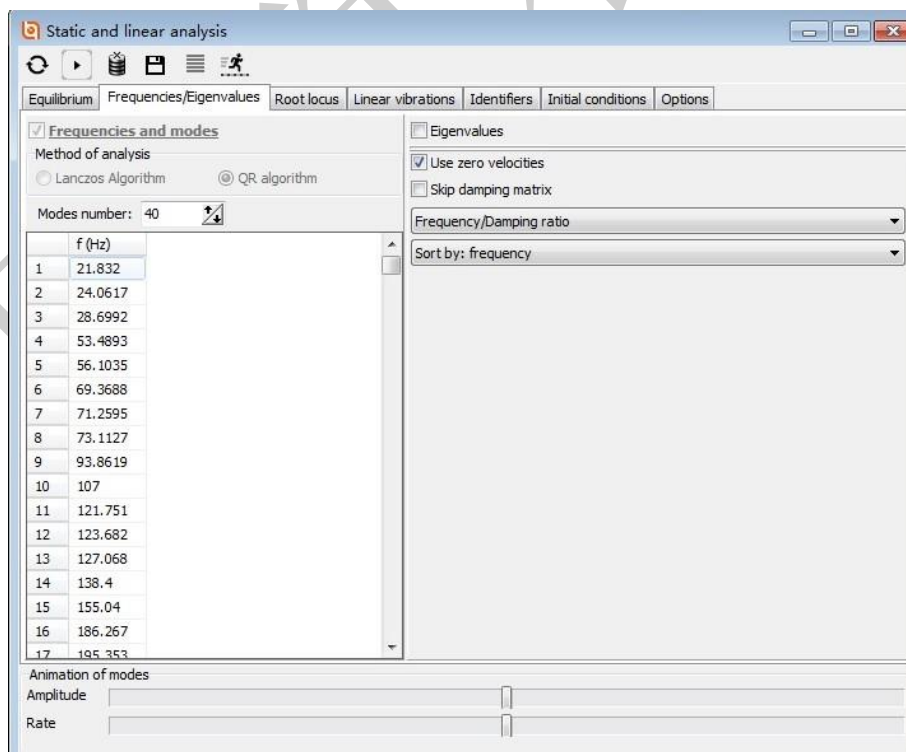




图 2.33

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。

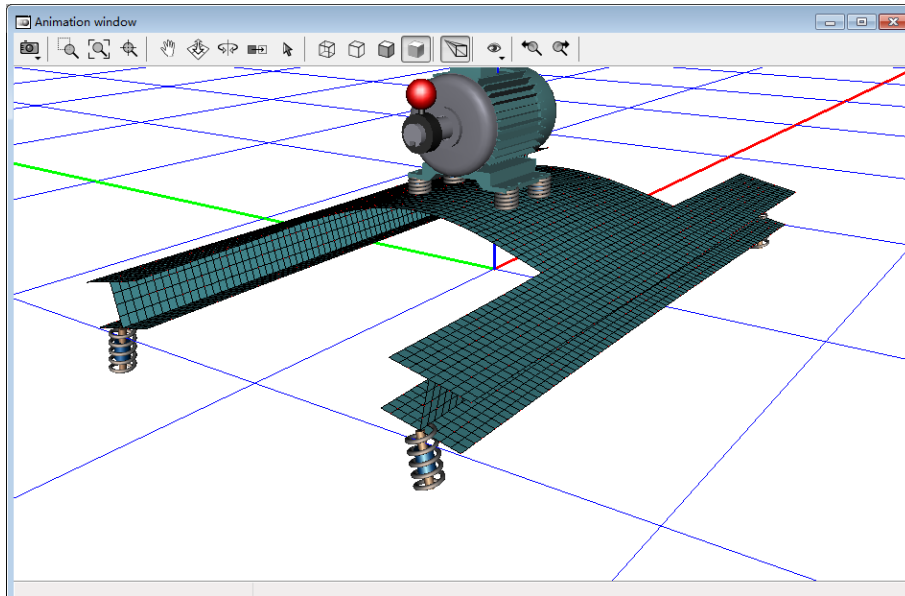



图 2.34 频率 24.0617Hz

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。

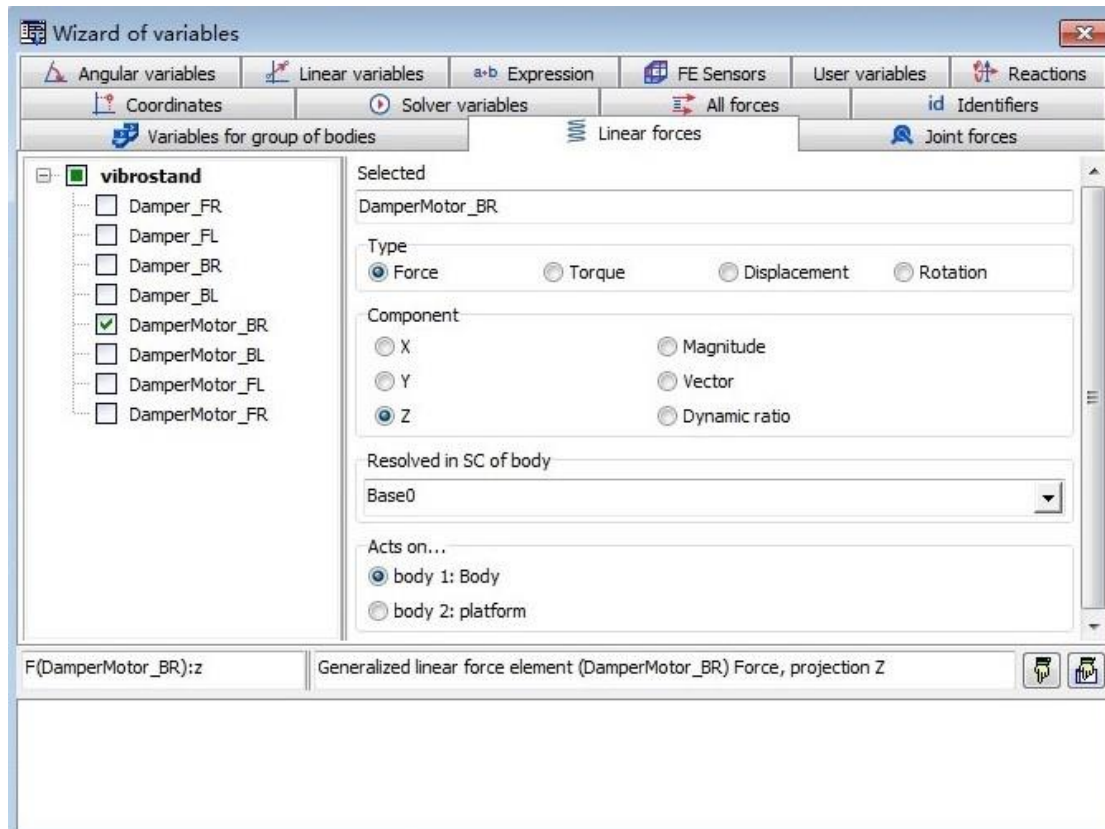


图 2.35

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。

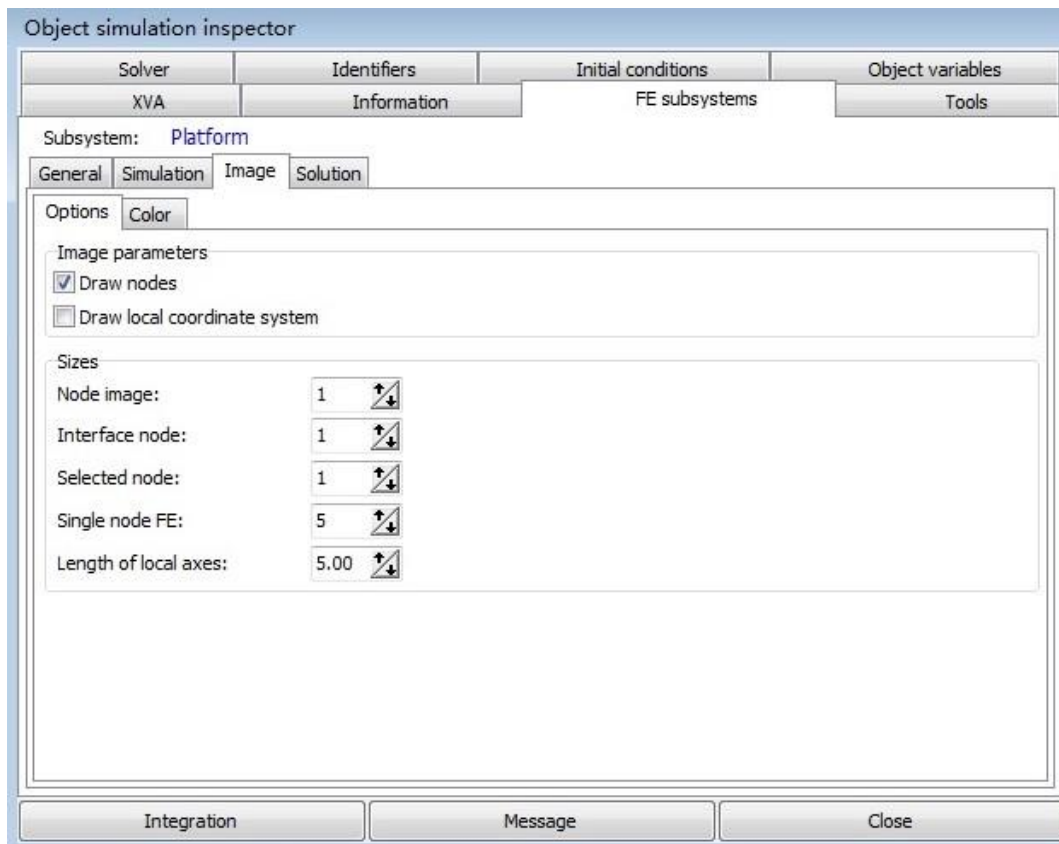


图 2.36

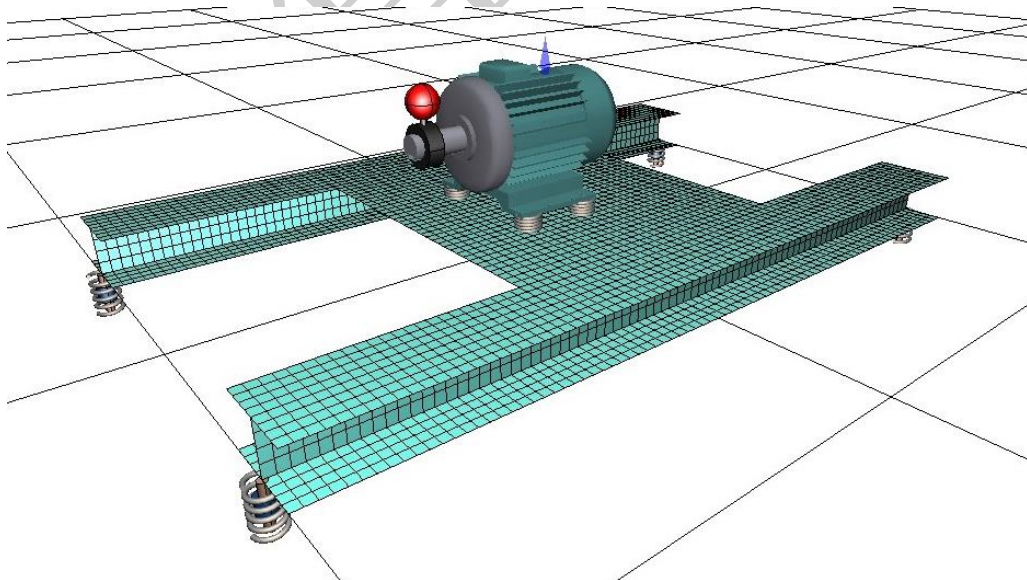


图 2.37

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。

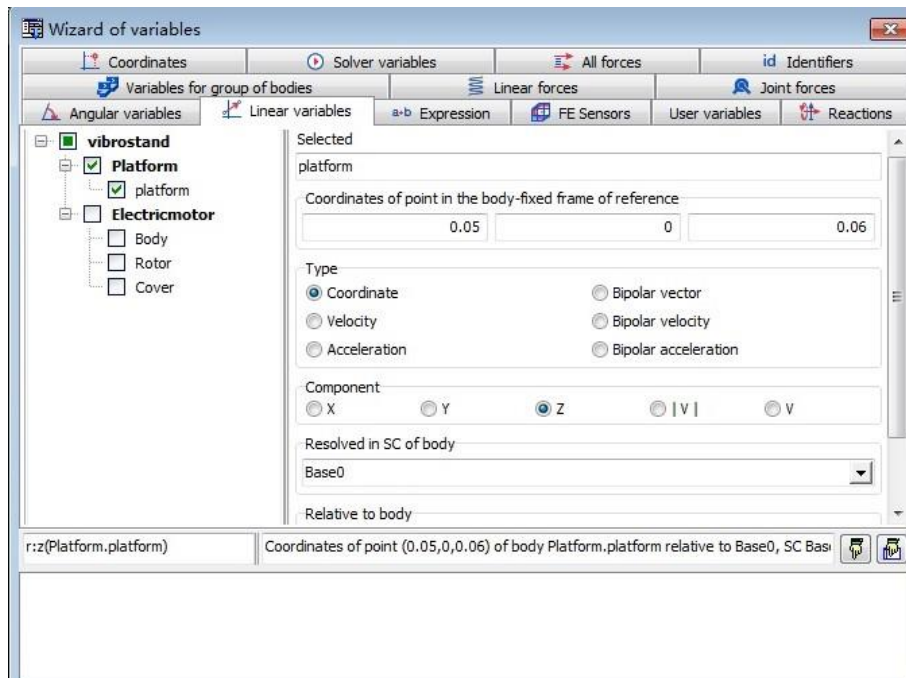


图 2.38

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。

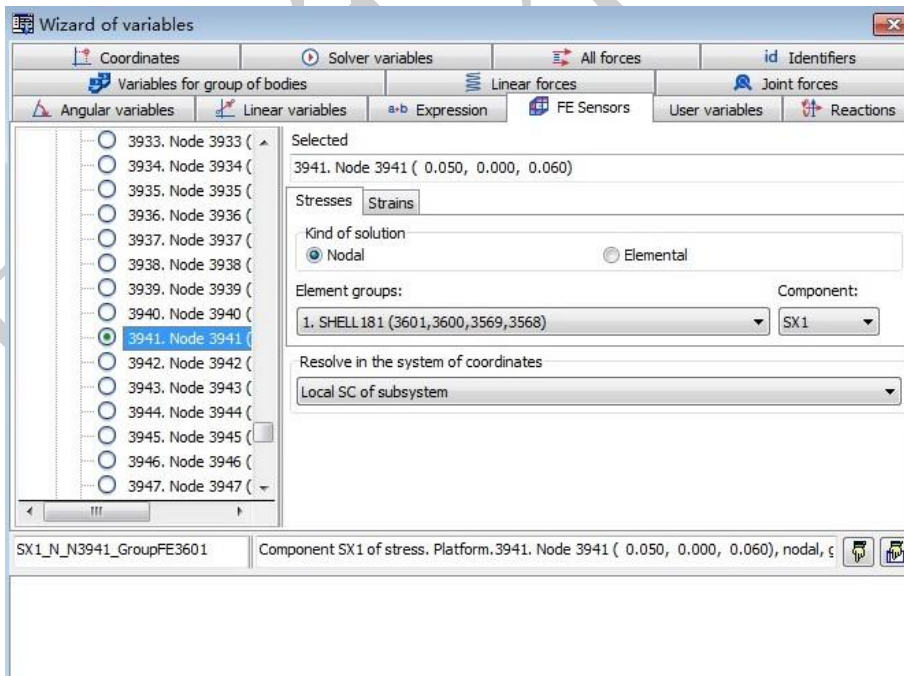


图 2.39

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。

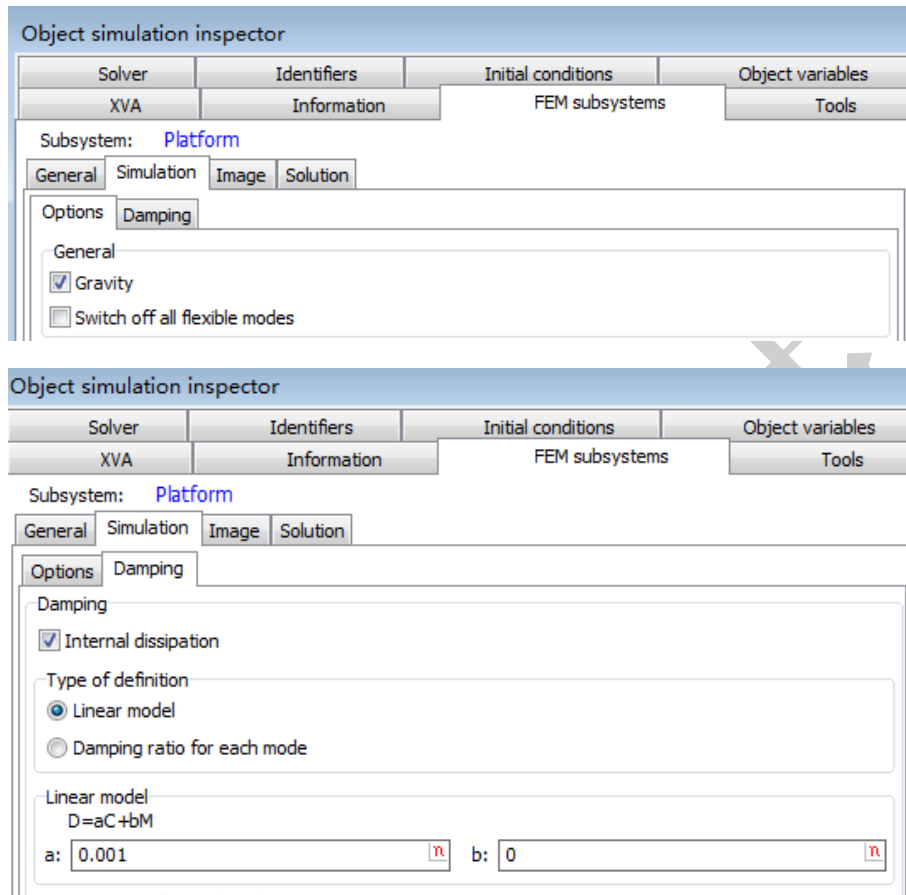


图 2.40

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。

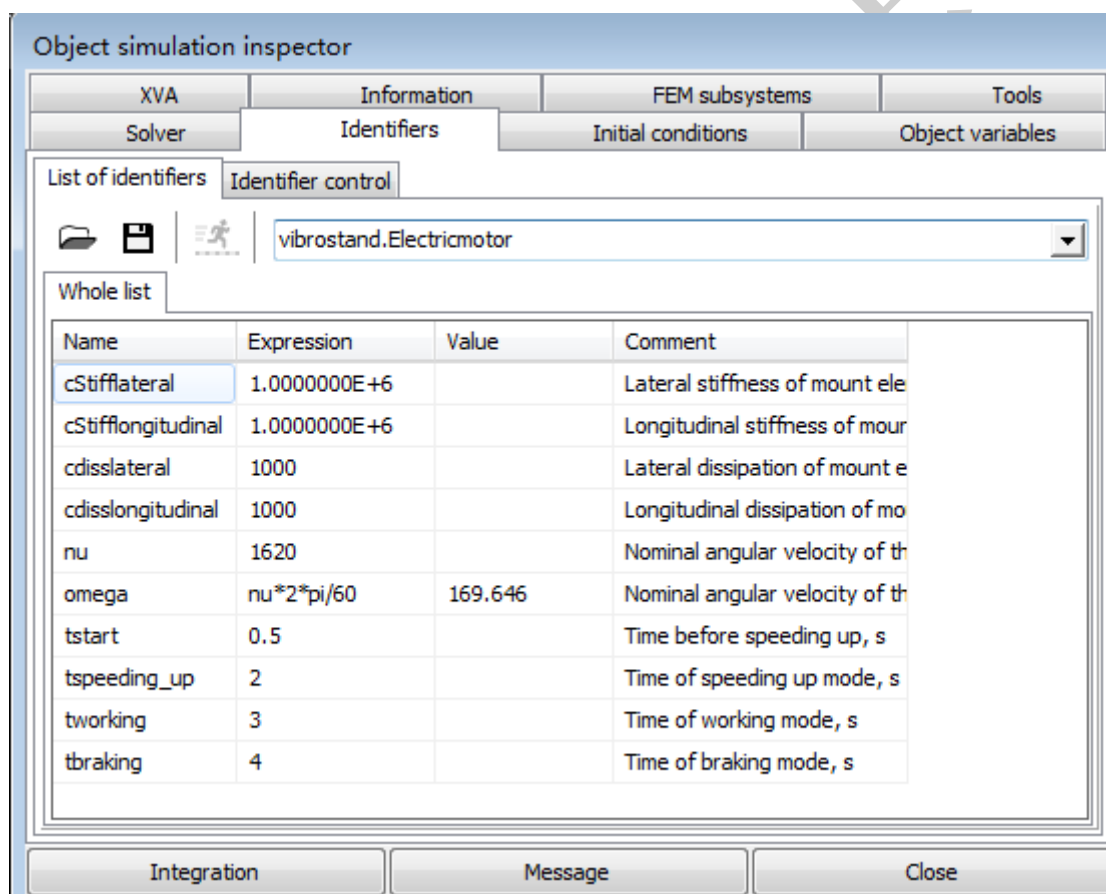


图 2.41

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**

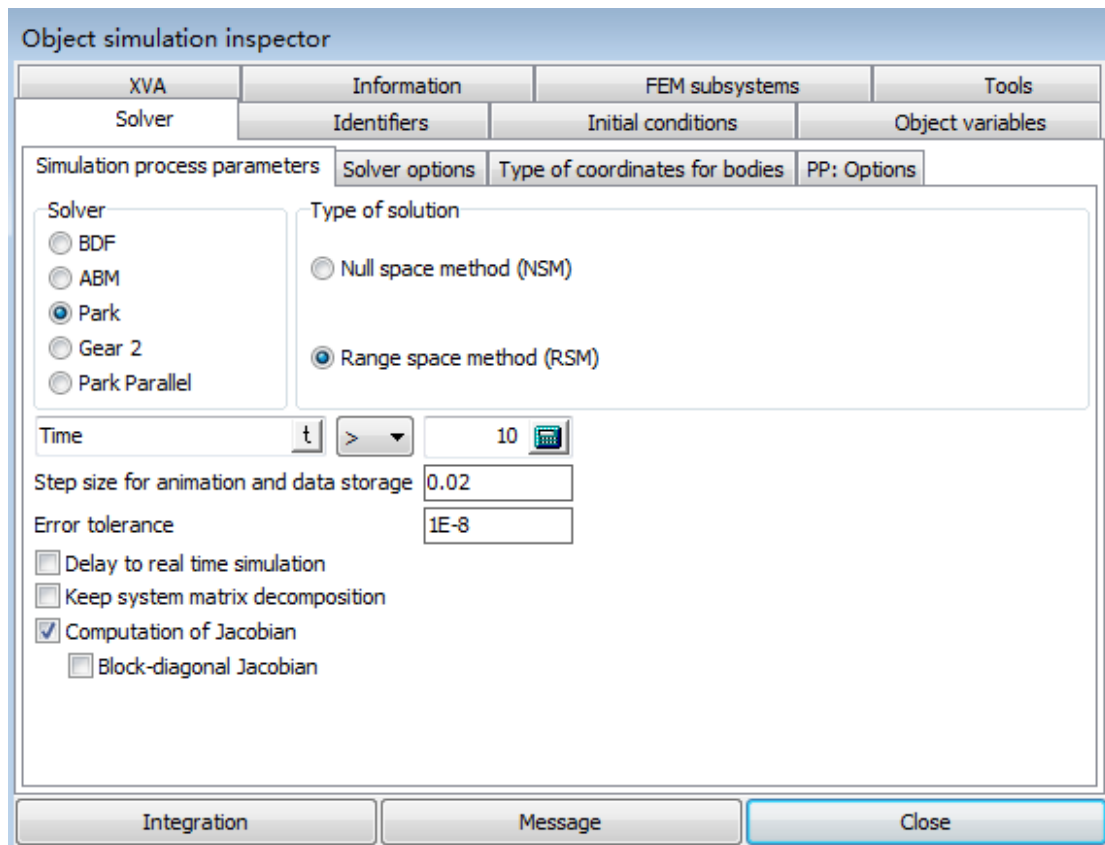


图 2.42

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

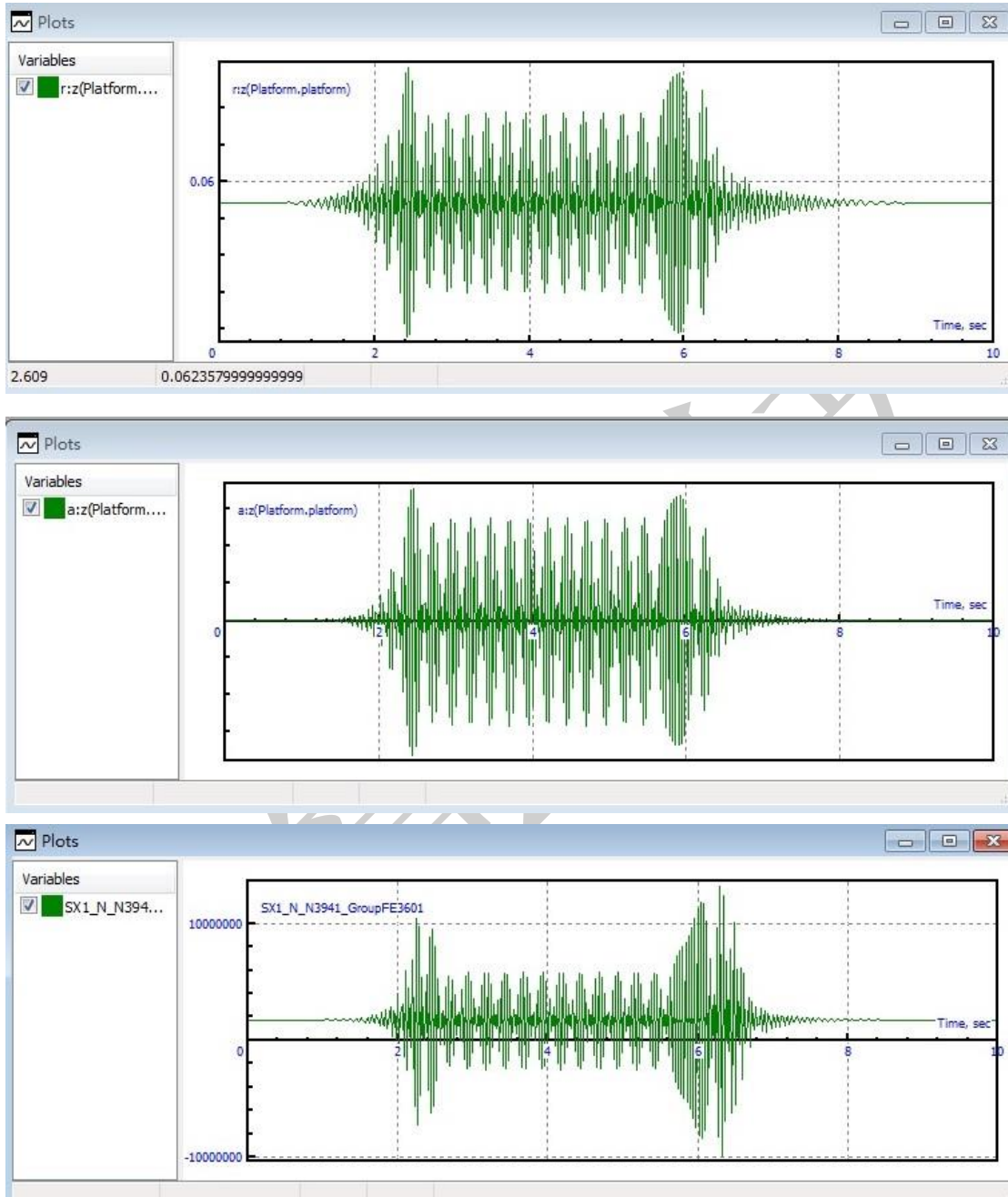


图 2.43

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。

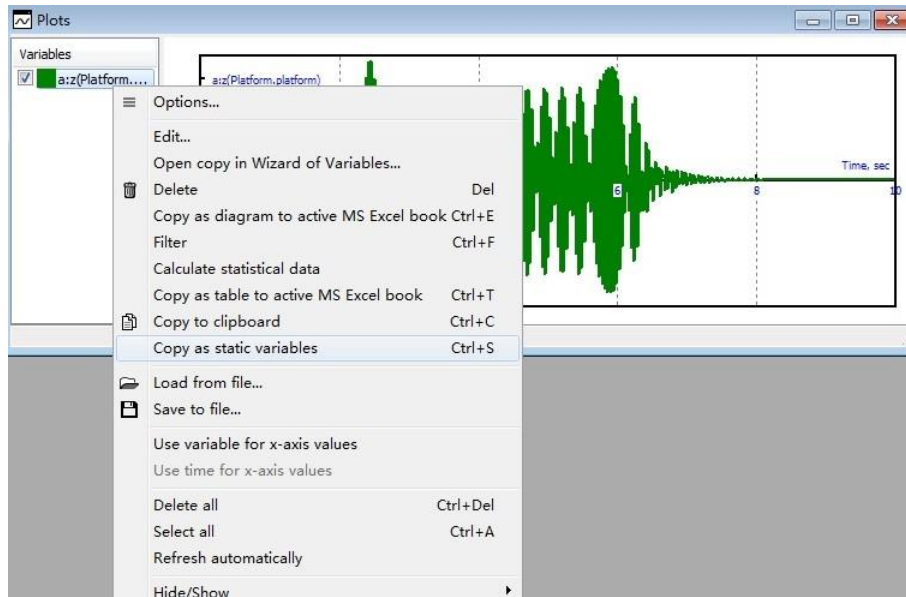


图 2.44

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。

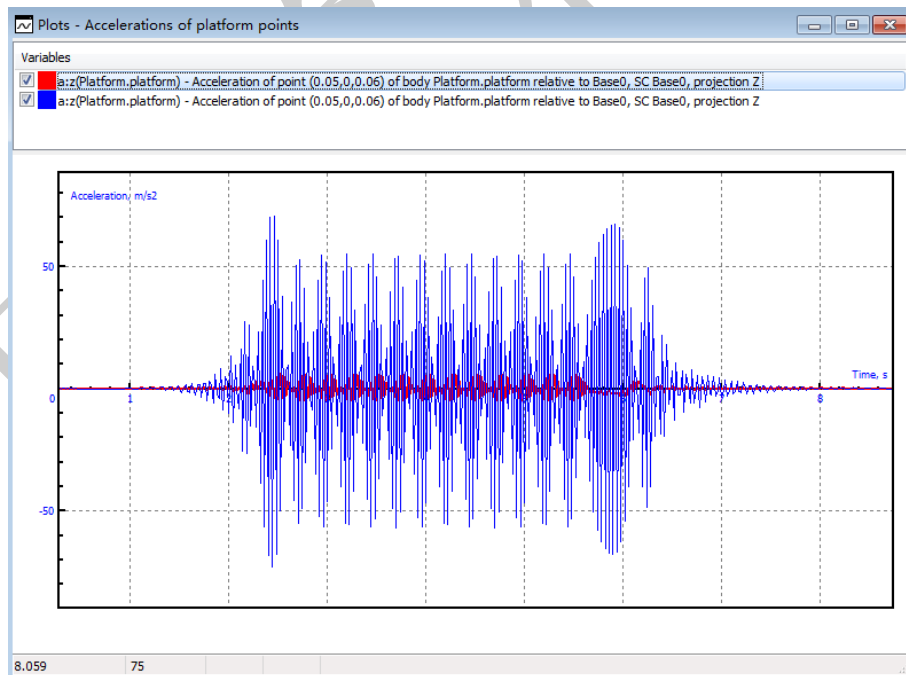


图 2.45 蓝色曲线对应柔性体，红色曲线对应刚体