



UM 培训教程

Computational Mechanics Ltd.

四川同算科技有限公司

首次发布：2017 年 11 月

最新修订：2021 年 03 月



Euromech Colloquium, 2008, Bryansk, Russia



UM Workshop, 2018, Bryansk, Russia



UM User Meeting, 2018, Pengshan, China



UM User Meeting, 2018, Pengshan, China

目 录

1.	认识 UM 软件	- 1 -
1.1	软件简介	- 1 -
1.2	模块与功能	- 5 -
1.3	学前准备工作	- 7 -
2.	多体系统动力学建模与仿真	- 8 -
2.1	实例一：地球仪	- 8 -
2.1.1	建模	- 9 -
2.1.1.1	新建模型	- 9 -
2.1.1.2	底座建模	- 11 -
2.1.1.3	支架建模	- 16 -
2.1.1.4	球体建模	- 22 -
2.1.2	仿真	- 28 -
2.1.2.1	进入仿真程序	- 28 -
2.1.2.2	设置求解参数	- 29 -
2.1.2.3	设置初始条件	- 30 -
2.1.2.4	执行仿真计算	- 31 -
2.1.2.5	修改初始条件	- 32 -
2.1.2.6	再次进行仿真	- 33 -
2.1.2.7	卸载当前模型	- 33 -
2.2	实例二：四连杆机构	- 34 -
2.2.1	建模	- 35 -
2.2.2	仿真	- 43 -
2.3	实例三：椭圆规	- 48 -
2.3.1	建模	- 49 -
2.3.2	仿真	- 55 -
2.4	实例四：刚柔耦合系统	- 60 -
2.4.1	准备柔性体	- 61 -
2.4.2	刚柔耦合系统建模	- 65 -
2.4.3	动力学仿真	- 72 -
2.5	实例五：自动控制系统	- 79 -
2.5.1	机械系统建模	- 80 -
2.5.2	控制系统建模	- 83 -
2.5.3	动力学仿真	- 86 -
3.	轨道交通系统动力学建模与仿真	- 92 -
3.1	铁路交通	- 92 -
3.1.1	多刚体车辆动力学建模	- 93 -
3.1.1.1	刚体与铰	- 93 -
3.1.1.2	一系悬挂	- 97 -
3.1.1.3	二系悬挂	- 101 -
3.1.1.4	整车装配	- 106 -
3.1.2	多刚体车辆动力学仿真	- 110 -
3.1.3	构建刚柔耦合车辆系统	- 118 -

3.2	单轨交通.....	- 122 -
3.2.1	跨座式单轨车辆动力学建模.....	- 123 -
3.2.1.1	刚体与铰.....	- 123 -
3.2.1.2	悬挂力元.....	- 129 -
3.2.1.3	整车装配.....	- 134 -
3.2.2	跨座式单轨车辆动力学仿真.....	- 138 -
3.3	磁浮交通.....	- 147 -
3.3.1	高速磁浮车辆动力学建模.....	- 148 -
3.3.1.1	刚体与铰.....	- 148 -
3.3.1.2	悬挂力元.....	- 152 -
3.3.1.3	加速度传感器.....	- 158 -
3.3.1.4	磁浮力元.....	- 161 -
3.3.1.5	整车装配.....	- 163 -
3.3.2	高速磁浮车辆动力学仿真.....	- 167 -

1. 认识 UM 软件

1.1 软件简介

Universal Mechanism, 简称 UM, 是一款来自俄罗斯的大型通用多体系统动力学仿真分析软件, 既能模拟多刚体系统, 又能模拟多柔体 (刚柔耦合/混合) 系统。UM 软件提供了一系列用于机械、铁路、单轨、磁浮、汽车、履带车、油气钻井、航空航天、核工业和机器人等行业的专业模块和工具。

UM 软件的创始人是俄罗斯数学家、物理学家和计算科学家德米特里·波戈列洛夫教授 (Prof. Dmitry Pogorelov)。他于 1979 年从莫斯科大学数学力学系毕业, 获得理论力学博士学位, 其导师是俄罗斯科学院院士、国际宇航科学院院士、洪堡奖金获得者 Vladimir Beletskiy 教授 (1930-2017)。他曾在德国斯图加特大学访学多年, 回俄后在布良斯克国立技术大学 (Bryansk State Technical University, 又译作布良斯克国立理工大学、布良斯克国立工程工艺大学) 任教至今, 主持创建了计算力学实验室 (www.universalmecanismo.com, www.umlab.ru), 并任首席科学家。

UM 软件发展历程:

- 1985 年: 启动开发计划;
- 1989 年: 发布 UM 1.0, 用于一般多刚体系统动力学计算;
- 1991 年: 增加子系统功能, 开始研发铁路车辆模块;
- 1993 年: 增加铁路车辆模块;
- 1998 年: 开始用于 Windows 系统;
- 2003 年: 发布 UM 2.0, 增加多变量计算模块和并行计算模块;
- 2004 年: 增加刚柔耦合分析模块, 开始研发履带车辆模块;
- 2005 年: 发布 UM 3.0, 增加一维列车纵向动力学模块和散粒体模块;
- 2006 年: 发布 UM 4.0, 增加三维列车动力学模块、公路车辆模块、轮轨磨耗模块、履带车辆模块和控制模块;
- 2009 年: 发布 UM 5.0, 增加三维自动接触模块;
- 2010 年: 发布 UM 6.0, 开始研发铁路车桥耦合模块;
- 2011 年: 增加铁路车桥耦合模块;
- 2012 年: 发布 UM 7.0, 增加车轮滚动接触疲劳模块和单轨列车模块;
- 2015 年: 增加传动系模块;
- 2016 年: 发布 UM 8.0, 增加柔性轨道和柔性轮对模块, 开发了 CONTACT 接口;
- 2017 年: 增加磁浮模块, 柔性轨道拓展到单轨和磁浮;
- 2018 年: 单轨列车和磁浮列车支持外部导入柔性轨道梁;

- 2019 年：全新的车轮磨耗及滚动接触疲劳分析工具；
- 2020 年：全新的图形内核、增加场景模块；
- 2021 年：发布 UM 9.0，全新的钢轨磨耗及滚动接触疲劳分析工具、增加气动模块；
-



图 1-1 UM 软件开发核心团队



图 1-2 计算力学实验室



图 1-3 UM 软件著作权登记证书

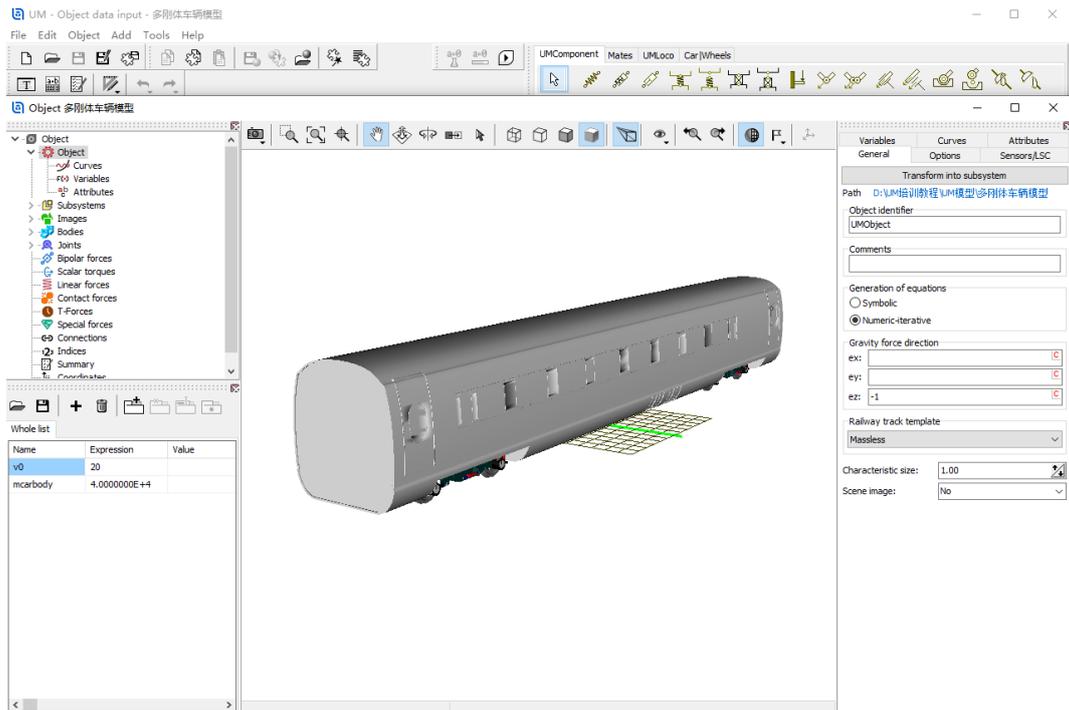


图 1-4 UM Input 建模界面

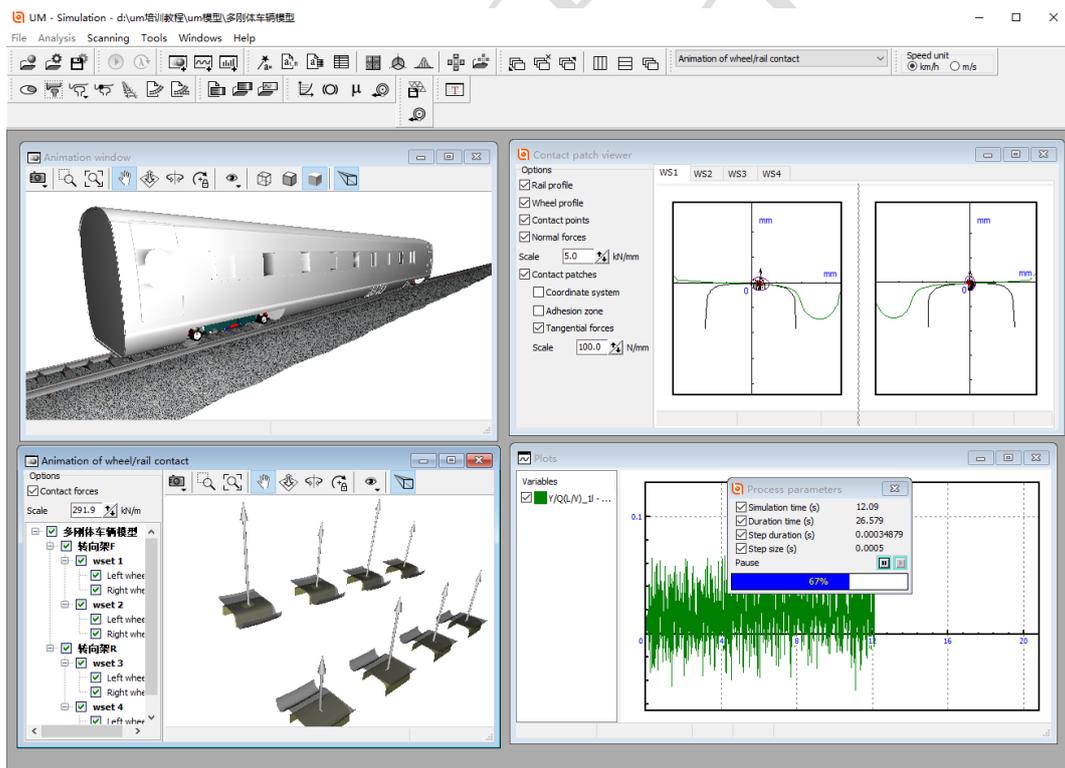


图 1-5 UM Simulation 仿真界面

1.2 模块与功能

UM 现有模块列表及功能简介见表 1-1。

表 1-1 UM 模块列表

序号	主模块/附加工具/独立子模块	中文名称	备注
1	UM Base	基础模块	必选模块
1.1	UM Base/Control Panel	交互式控制仿真工具	需要模块 1
1.2	UM Base/Training Ground	履带车辆三维场地工具	需要模块 1 和 4
1.3	UM Base/Ride Comfort	车辆平稳性与舒适度工具	需要模块 1 和 3 或 4/5/6/7
2	UM Subsystems	子系统模块	需要模块 1
3	UM Automotive	公路车辆模块	需要模块 2
3.1	UM Automotive/Truck And Trailer	重型卡车 PBS 分析工具	专供澳大利亚用户
4	UM Tracked Vehicle	履带车辆模块	需要模块 2
5	UM Monorail Train	单轨车辆模块	需要模块 2
6	UM Maglev	磁浮车辆模块	需要模块 2
7	UM Loco	铁路车辆模块	需要模块 2
7.1	UM Loco/Track Quality Estimation	轨道质量分析工具	专供俄罗斯用户
7.2	UM Loco/Multipoint Contact Model	轮轨多点接触模型	需要模块 7
7.3	UM Loco/CONTACT add-on Interface	CONTACT 程序接口	需要模块 7.2 和 CONTACT add-on to UM
7.4	UM Loco/Wheel Profile Wear Evolution	车轮型面磨耗分析工具	需要模块 7.2
7.5	UM Loco/Rail Profile Wear Evolution	钢轨型面磨耗分析工具	需要模块 7.2 和 14
8	UM Train	一维列车模块	需要模块 2
9	UM Train 3D	三维列车模块	需要模块 7 和 8
10	UM Flexible Wheelset	柔性轮对模块	需要模块 7 和 16
11	UM Drilling	钻柱动力学模块	尚未发布
12	UM Driveline	传动系模块	需要模块 1
13	UM Pneumatic Systems	气动模块	需要模块 1
14	UM Experiments	多变量计算模块	需要模块 1

序号	主模块/附加工具/独立子模块	中文名称	备注
14.1	UM Experiments/Cluster	分布式并行计算工具	需要模块 14
15	UM Control	控制模块	几个相互独立的子模块
15.1	UM Control/Matlab Import	Matlab 导入子模块	需要模块 1
15.2	UM Control/Matlab CoSimulation	Matlab 联合仿真子模块	需要模块 1 和 23
15.3	UM Control/User-Defined Routines	用户自定义控制系统子模块	需要模块 1
15.4	UM Control/Block Editor	控制系统编辑器子模块	需要模块 1
15.5	UM Control/SimInTech Import	SimIntech 导入子模块	专供俄罗斯用户
15.6	UM Control/SimInTech Cosimulation	SimIntech 联合仿真子模块	专供俄罗斯用户
16	UM FEM	刚柔耦合模块	需要模块 2
16.1	UM FEM/Vehicle-Bridge Interaction	铁路车桥耦合分析工具	需要模块 7 和 16
16.2	UM FEM/Monorail Track	单轨车桥耦合分析工具	需要模块 5 和 16
16.3	UM FEM/Maglev Track	磁浮车桥耦合分析工具	需要模块 6 和 16
17	UM Ballast	散粒体模块	需要模块 2
18	UM Durability	疲劳耐久性分析模块	需要模块 16
18.1	UM Durability/Loco	机车疲劳耐久性分析工具	专供俄罗斯用户
18.2	UM Durability/Carriage	客车疲劳耐久性分析工具	专供俄罗斯用户
18.3	UM Durability/FreightWagon	货车疲劳耐久性分析工具	专供俄罗斯用户
19	UM 3D Contact	三维接触模块	需要模块 1
20	UM CAD Interfaces	三维设计软件接口模块	需要模块 1
21	UM RCF Wheel	车轮滚动接触疲劳模块	需要模块 7.4
22	UM RCF Rail	钢轨滚动接触疲劳模块	需要模块 7.5
23	UM COM	第三方软件支持模块	需要模块 1
24	UM Flexible Railway Track	铁路柔性轨道模块	需要模块 7 和 16
25	UM Scene	三维场景模块	需要模块 1
26	UM Quick Track	铁路轨道几何模块	需要模块 7 或 8
27	UM Sensors	传感器模块	需要模块 3 和 25
28	UM Video Flow	视频流模块	需要模块 27

1.3 学前准备工作

- 1) 加入 UM 用户 QQ 交流群：[262743795](#)，在群文件里下载最新版软件安装包和教程等资料，如下载不成功，可联系管理员单独发送。
- 2) 关注微信公众号：[同算科技](#)，及时获取 UM 软件动态，通过[微文目录](#)或[关键词](#)获得常见问题的详细解答。



QQ 交流群



微信公众号

- 3) 向[同算科技](#)微信公众号发送消息：[安装](#)或 [000](#)，可[查看安装方法](#)。
- 4) 在 Windows 7/8/10 系统上安装 UM 软件，自 8.3.3.4 起，UM 只发布 64 位版本，不再提供 32 位版本程序。
- 5) 首次安装 UM 软件可直接使用 30 天/600 次，之后可以申请延长试用期。向[同算科技](#)微信公众号发送消息：[license](#) 或 [001](#)，可[查看申请方法](#)。
- 6) 使用过程中有任何问题可发送电子邮件（如果是具体模型的问题，请将整个模型文件夹及其调用的文件一起打包）至邮箱：tongsuan@qq.com。
- 7) 在学习建模之前，请务必先从 QQ 群的 [UM 学习资料](#) 文件夹里下载“[UM 培训教程.rar](#)”，并解压到本地计算机的 D 盘（本教程里模型的缺省路径为“[D:\UM 培训教程](#)”）或其他位置，这里包含了本套教程的全部模型及素材。若无法下载或文件损坏，请私信管理员。
- 8) 本教程使用 [UM 9.1.1.1](#) 版本，UM 各个版本的界面和基本操作差异不大，仅在个别地方略有不同。
- 9) 本教程循序渐进，分析的模型从简单到复杂，对基本操作的讲解从详细到简略，请读者务必顺序阅读，夯实基础。
- 10) 本教程旨在引导用户快速入门，熟悉 UM 软件建模和仿真的基本方法和流程，具体的数学和力学知识及计算原理请仔细阅读相关章节的帮助文档以及专业教科书。
- 11) 本教程中所有模型的参数系自编，并不对应实际的物理原型，不可直接用于科学和工程研究。
- 12) 此外，UM 软件自带了很多例子，值得学习借鉴，建议读者一一浏览。

2. 多体系统动力学建模与仿真

2.1 实例一：地球仪

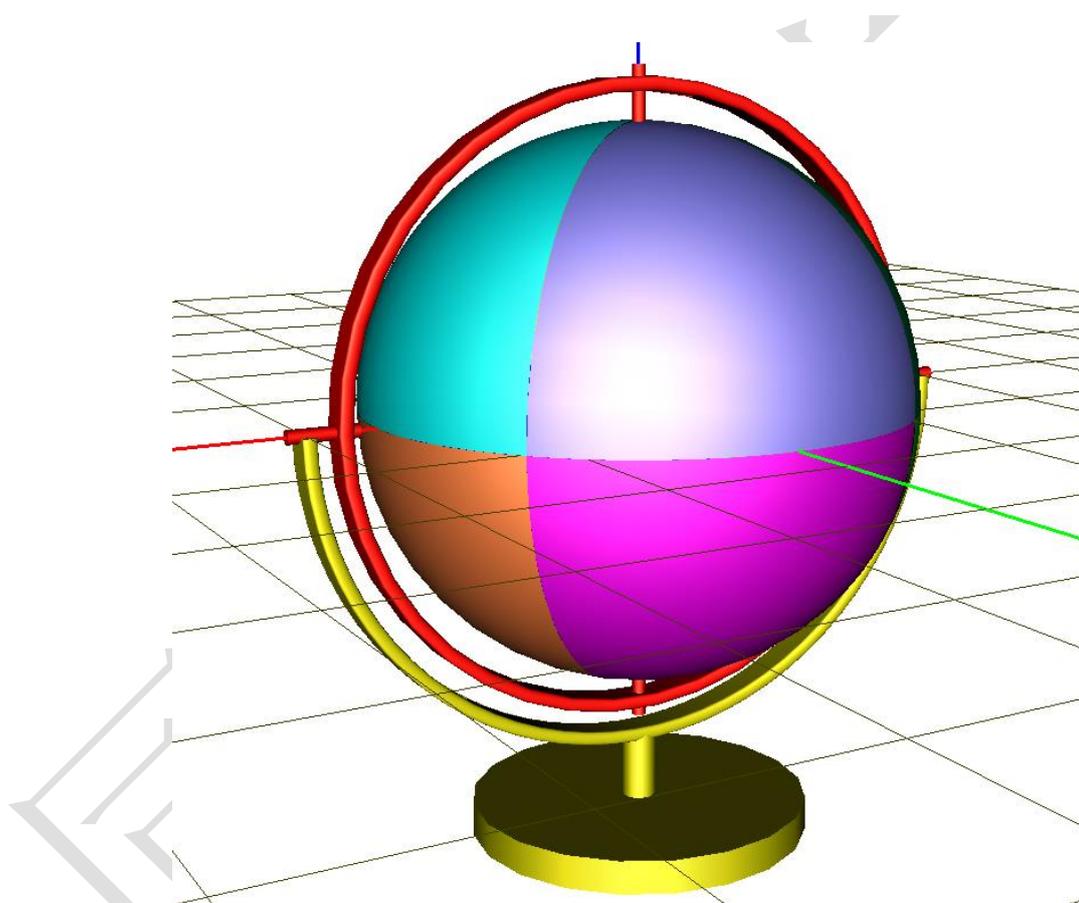


图 2-1 地球仪模型

图 2-1 所示为一个常见的地球仪模型，该模型由三个刚体（底座、支架、球体）组成。惯性参考系原点位于球体几何中心，红色为 X 轴，绿色为 Y 轴，蓝色为 Z 轴。其中底座固定在地面，没有自由度，支架具有绕底座 X 轴转动的自由度，球体具有绕支架 Z 轴转动的自由度，因此系统共有两个自由度。

本例用到的模块：UM Base。

2.1.1 建模

2.1.1.1 新建模型

- 1) 选择开始菜单 → 所有程序 → **Universal Mechanism 9 x64** → **UM Input**, 运行 **UM Input** 建模程序 (或双击桌面快捷方式 **UM Input** 图标), 出现如图 2-2 所示界面, 这是 **UM Input** 程序的主菜单和常用工具栏。



图 2-2

- 2) 选择主菜单 **File** → **New object**, 新建一个 UM 模型, 缺省名称为 **UmObj0**。这时出现 **UM Input** 建模主窗口, 左侧上部是模型树 (层次结构), 下部是参数表 (参数化建模), 右侧为交互界面 (输入和修改模型数据), 中间为动画窗口 (显示三维模型), 如图 2-3 所示。左侧模型树选中的对象决定了动画窗口和交互界面显示的内容, 当前模型没有任何对象, 因此只显示了总体坐标系 (惯性参考系, **Base0** 坐标系), 辅助网格缺省位于 X-Y 平面。

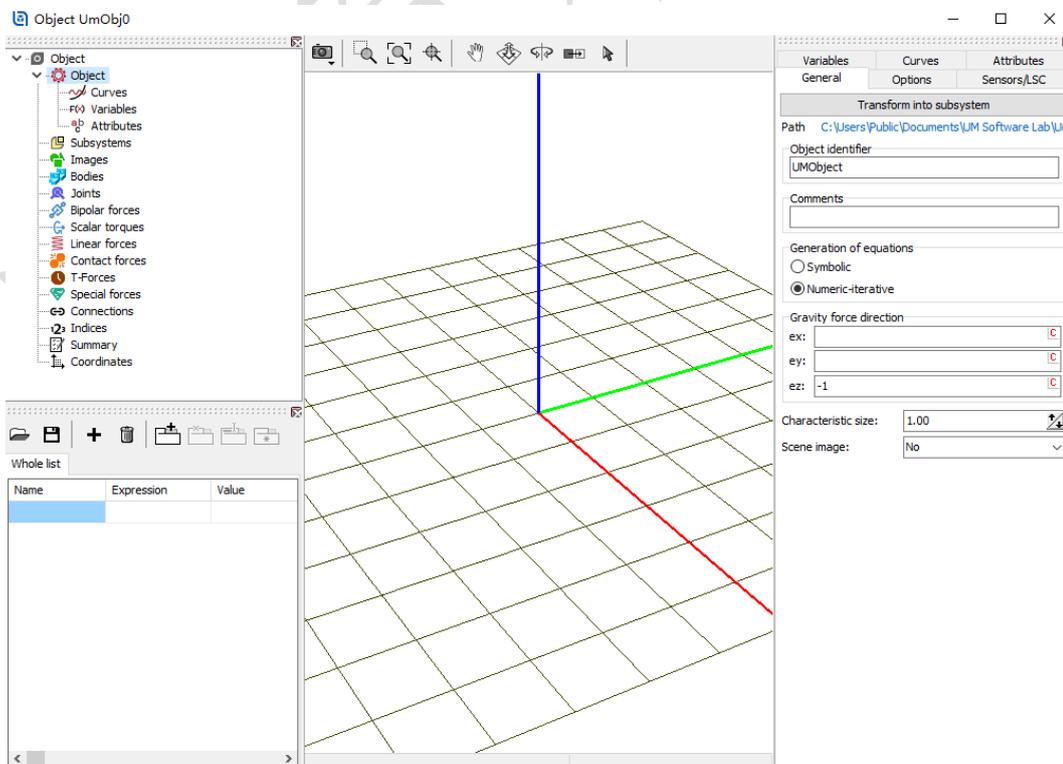


图 2-3

- 3) 动画窗口顶部有一个工具栏，用于视图操作，可进行缩放、平移和转动，请读者尝试每个按钮的功能。用鼠标和键盘也可直接调整视图：按下左键并移动鼠标为转动操作，同时按下左键和 CTRL 键并移动鼠标为平移操作，滑动鼠标滚轮或同时按下左键和 SHIFT 键并移动鼠标为缩放操作。
- 4) 选择主菜单 **File** → **Save as...**，将模型另存为，在弹出窗口删除缺省路径，直接输入包含模型名称（万向地球仪）的模型路径“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\地球仪**”，当然也可通过按钮 ▼ 选择其他路径，如图 2-4。

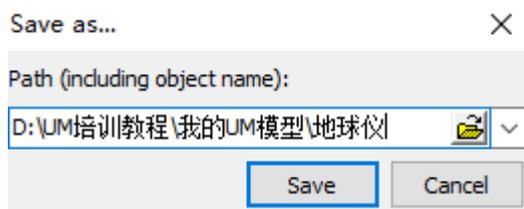


图 2-4

- 5) 点击按钮 **Save** → **是(Y)**，确定在当前目录创建一个 UM 模型。

Confirmation

 Create new directory D:\UM培训教程\我的UM模型\地球仪?

是(Y)

否(N)

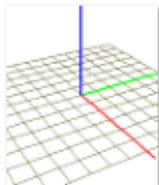
图 2-5

- 6) 这样，我们就创建了一个名为“**地球仪**”的模型，模型对应一个文件夹，文件夹名称即为 UM 的模型名称，文件夹里有“**input.dat**”和“**object.bmp**”两个文件，如图 2-6 所示，前者是模型的动力学描述文件（用于计算），后者是模型缩略图（用于预览）。

此电脑 > Data (D:) > UM培训教程 > 我的UM模型 > 地球仪



input.dat



object.bmp

图 2-6

2.1.1.2 底座建模

- 1) 选择主菜单 **Edit** → **Read from file**，定位到路径“D:\UM 培训教程\几何素材地球仪”，选中**底座.img**，点击按钮**打开**，如图 2-7 所示。

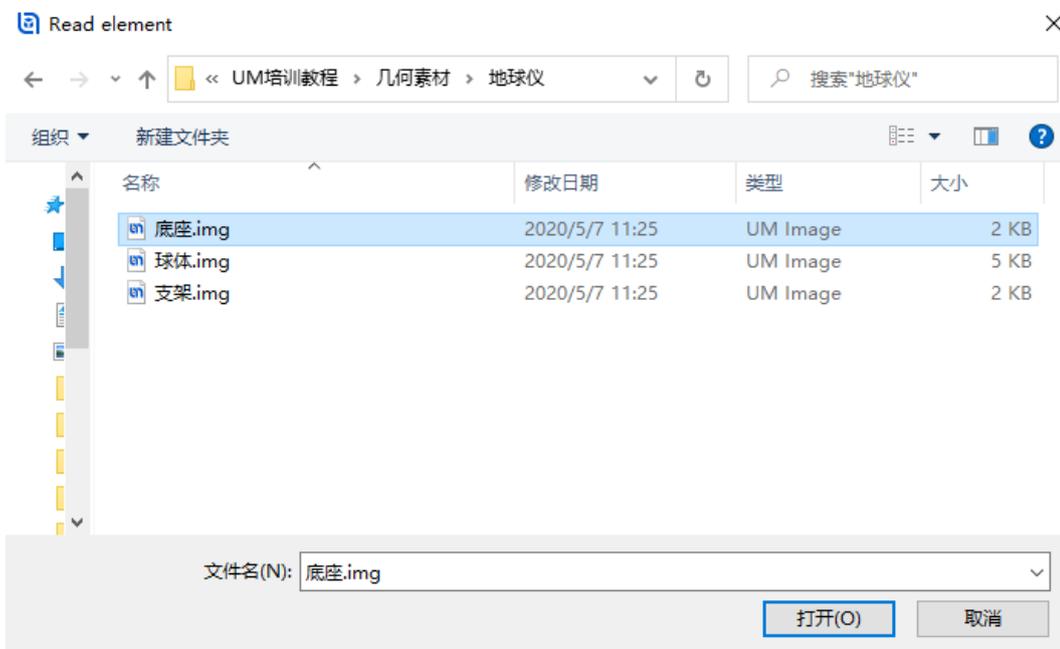


图 2-7

- 2) 这样，我们就导入了地球仪底座的几何图形（**Images**），如图 2-8 所示。导入几何图形的目的是增强模型可视化效果，它并不参与动力学计算。

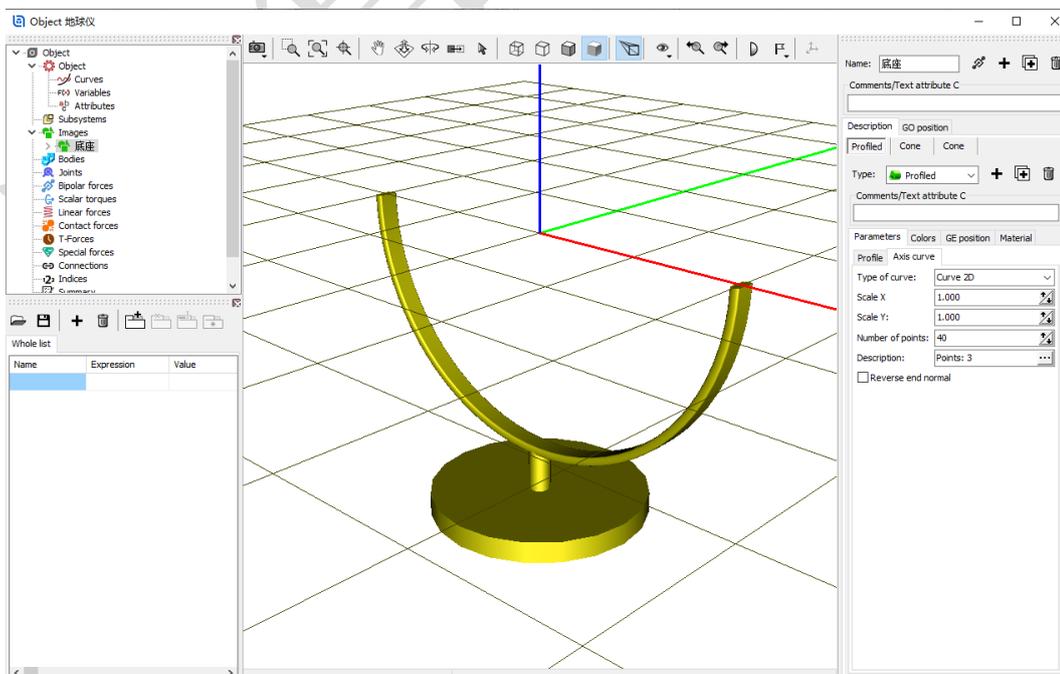


图 2-8

- 3) 选中左侧模型树中的 **Bodies**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，如图 2-9。

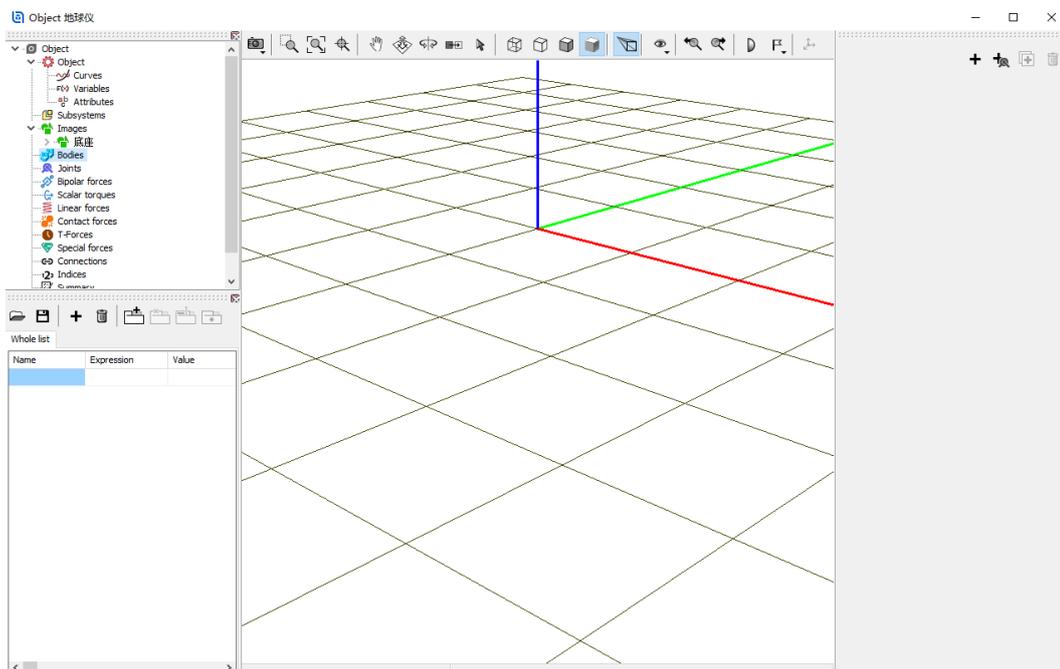


图 2-9

- 4) 这样，我们就创建了一个刚体，系统自动命名为 **Body1**。在交互界面 **Parameters** 页面 **Image** 处的下拉菜单中选择 **底座**，并保持 **Visible** 选项为勾选状态，如图 2-10。

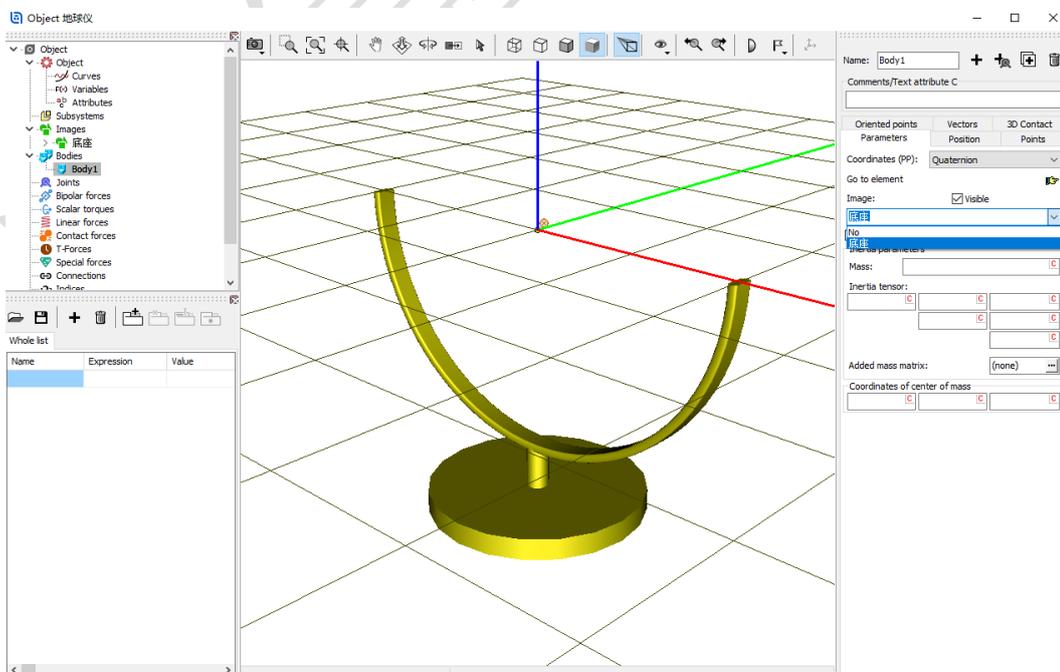


图 2-10

- 5) 在交互界面顶部 **Name** 处将该刚体重名为**底座**，在 **Parameters** 页面下部 **Mass** 处定义质量（国际单位：kg）为 **1**，在 **Inertia tensor** 处定义刚体相对其惯性主轴的转动惯量（国际单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）分别为 **1, 1, 1**，如图 2-11。

备注：每次输入参数或修改参数后，请敲一下回车键。

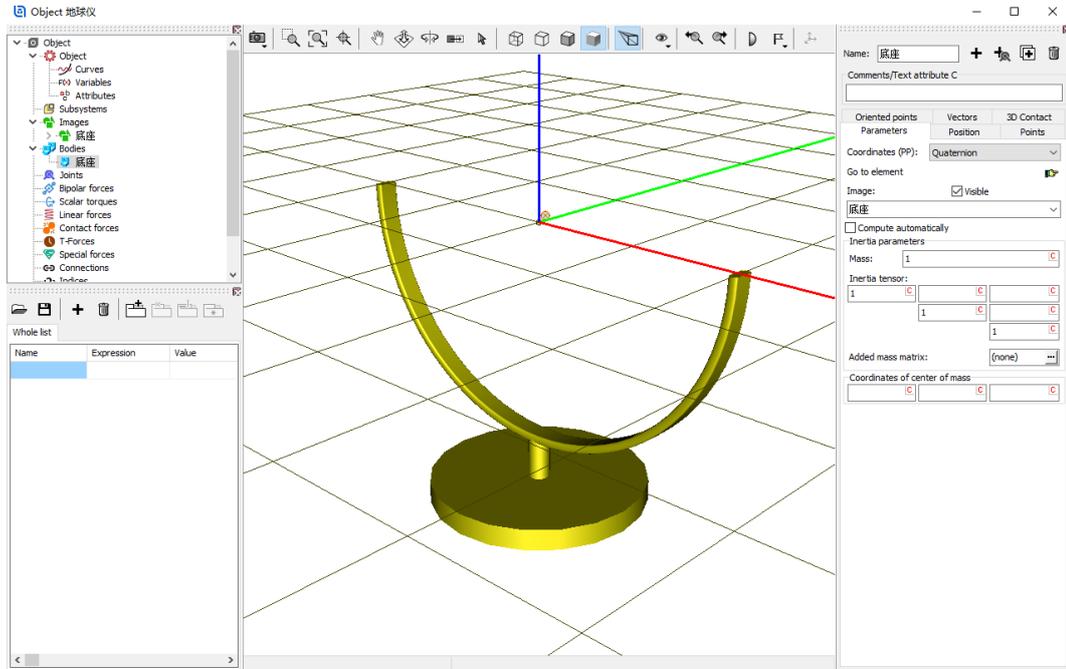


图 2-11

- 6) 选中左侧模型树中的 **Joints**，然后在右侧交互界面点击按钮 **+**，如图 2-12。

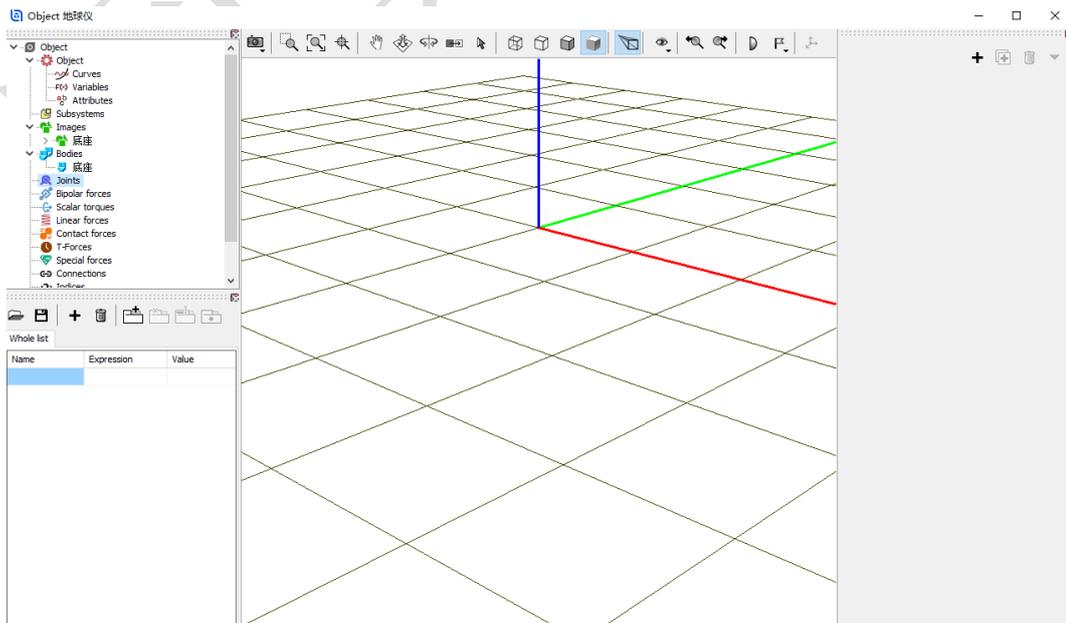


图 2-12

7) 这样，我们就创建了一个铰，系统自动命名为 **Joint1**，如图 2-13。

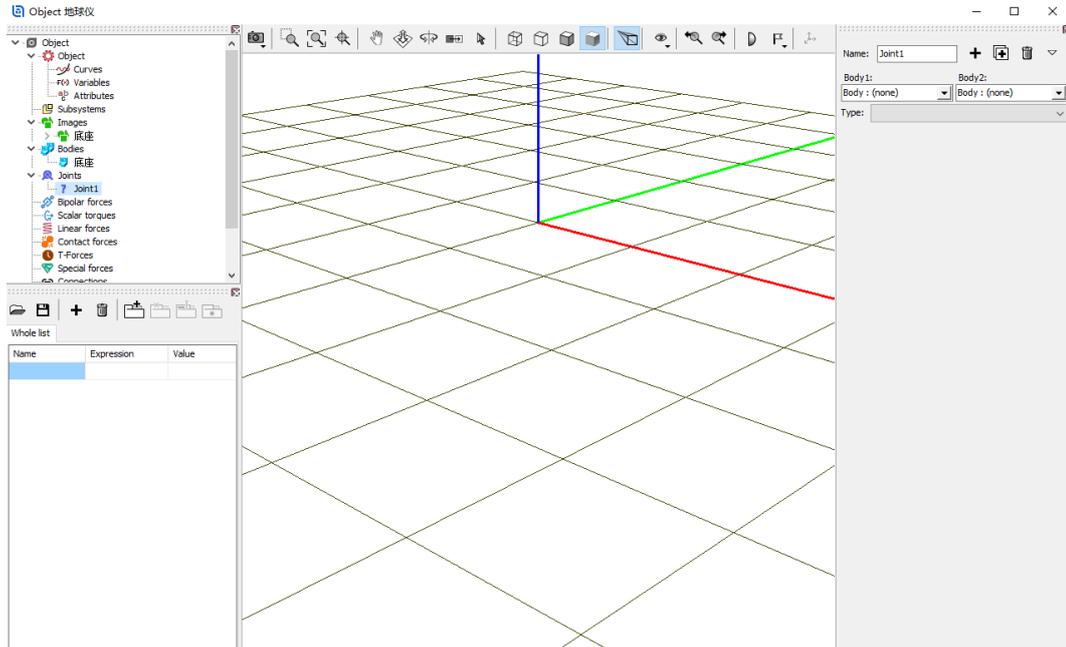


图 2-13

8) 然后从 **Body1** 下拉菜单选择 **Base0**，从 **Body2** 下拉菜单选择**底座**，系统会自动将该铰重命名为 **jBase0_底座**，如图 2-14。

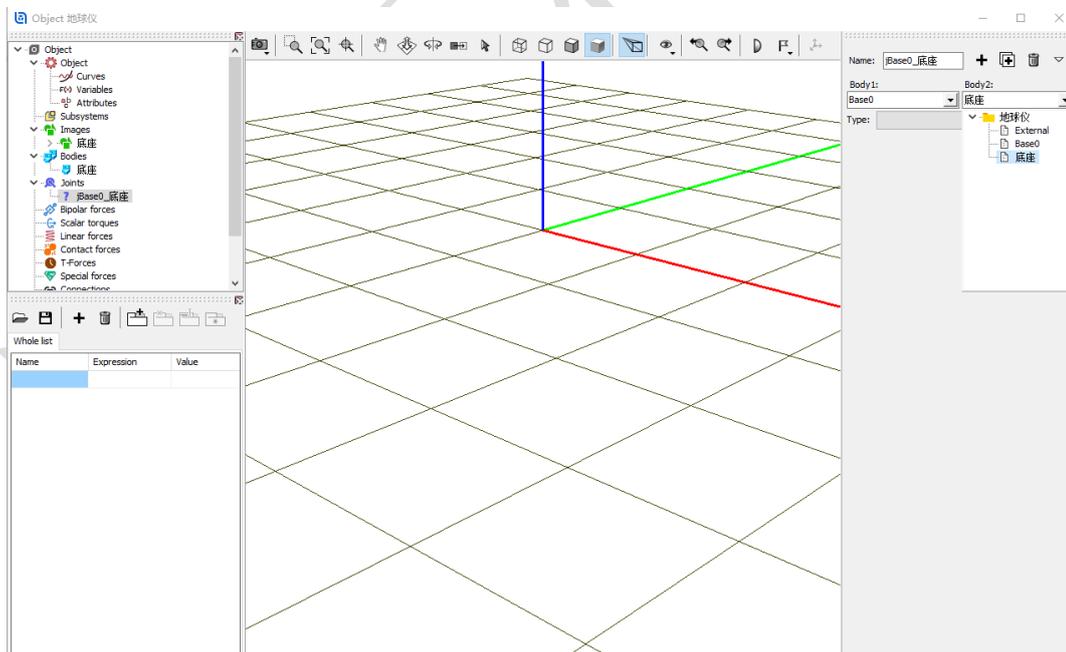


图 2-14

- 9) 从 **Type** 下拉菜单中选择 **6 d.o.f.**，然后在 **Coordinates** 页面取消勾选三个平动和三个转动自由度选项（缺省全部为勾选状态），如图 2-15。

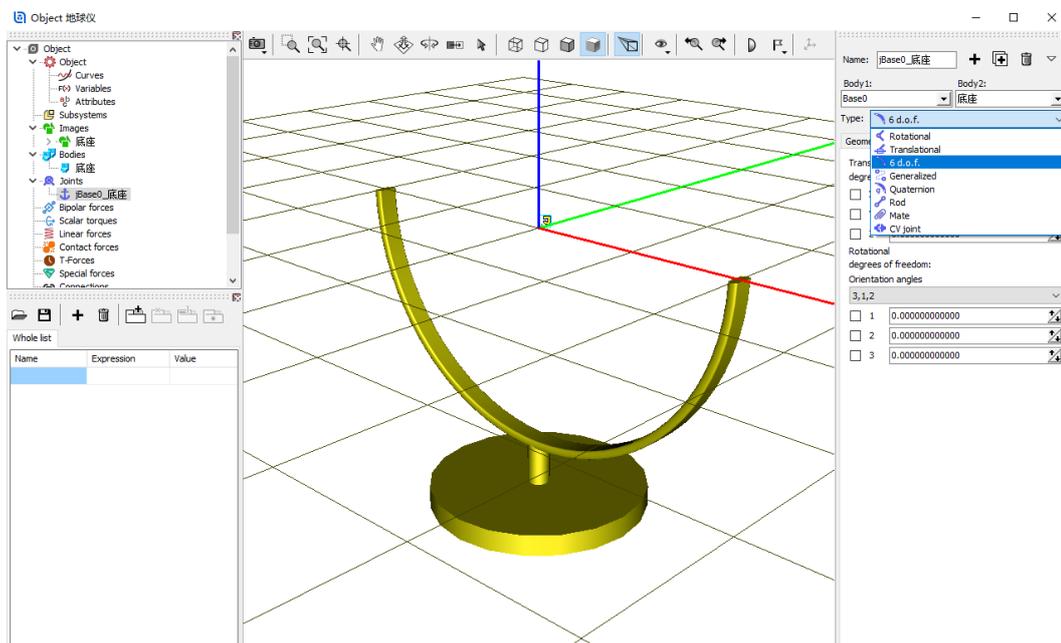


图 2-15

- 10) 选择菜单 **File** → **Save**，保存模型。

通过以上操作，我们就完成了底座的建模：

- ✓ 准备几何图形
- ✓ 把几何赋给刚体
- ✓ 定义刚体的属性
- ✓ 描述刚体的运动

2.1.1.3 支架建模

- 1) 选择主菜单 **Edit** → **Read from file**，定位到路径“D:\UM 培训教程\几何素材地球仪”，选中**支架.img**，点击**打开**，如图 2-16。

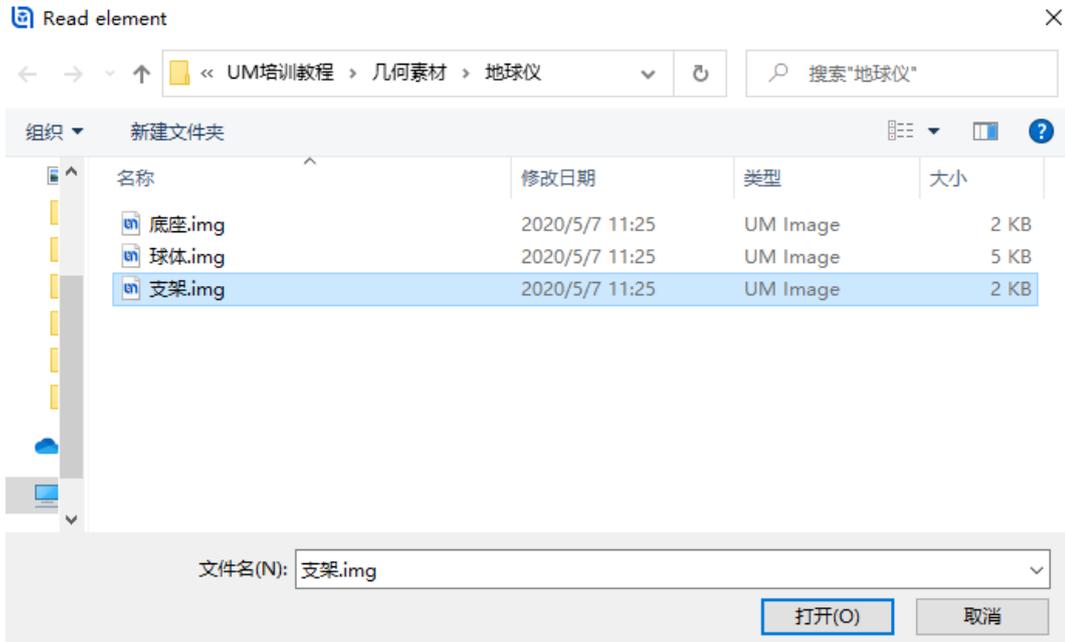


图 2-16

- 2) 这样，我们就导入了地球仪支架的几何图形 (**Images**)，如图 2-17 所示。导入几何图形的目的是增强模型可视化效果，它并不参与动力学计算。

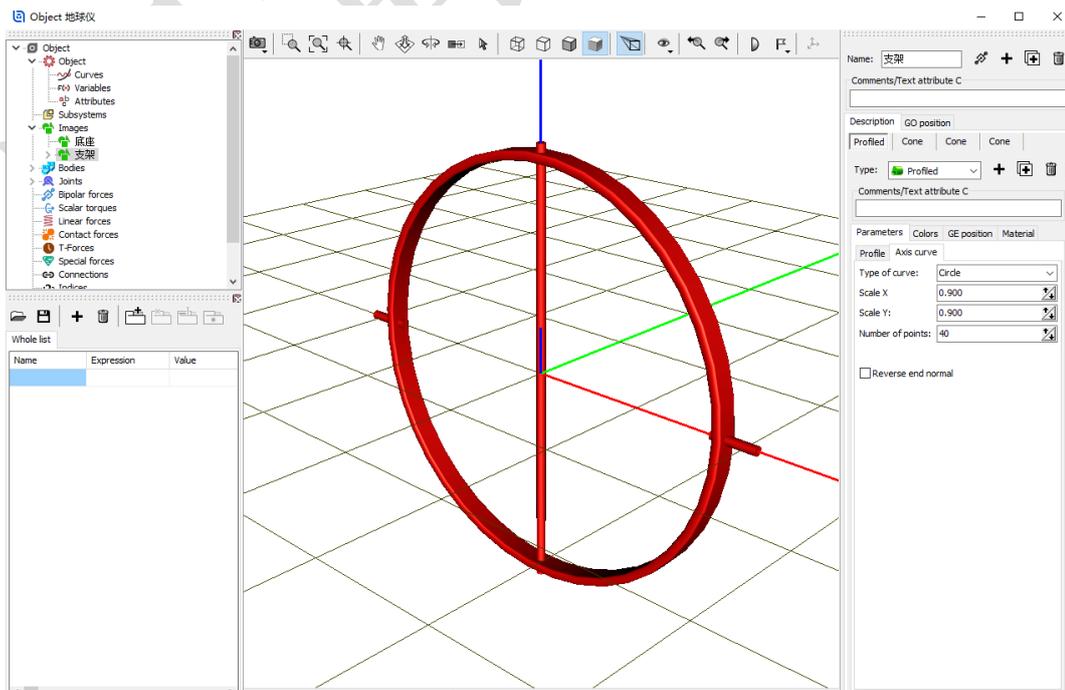


图 2-17

- 3) 选中左侧模型树中的 **Bodies**，右侧交互界面默认显示刚体**底座**的参数，如图 2-18，然后在交互界面点击按钮 **+**。这里也可以选中 **Bodies**，点右键，选择菜单 **Add element to group “Bodies”**。

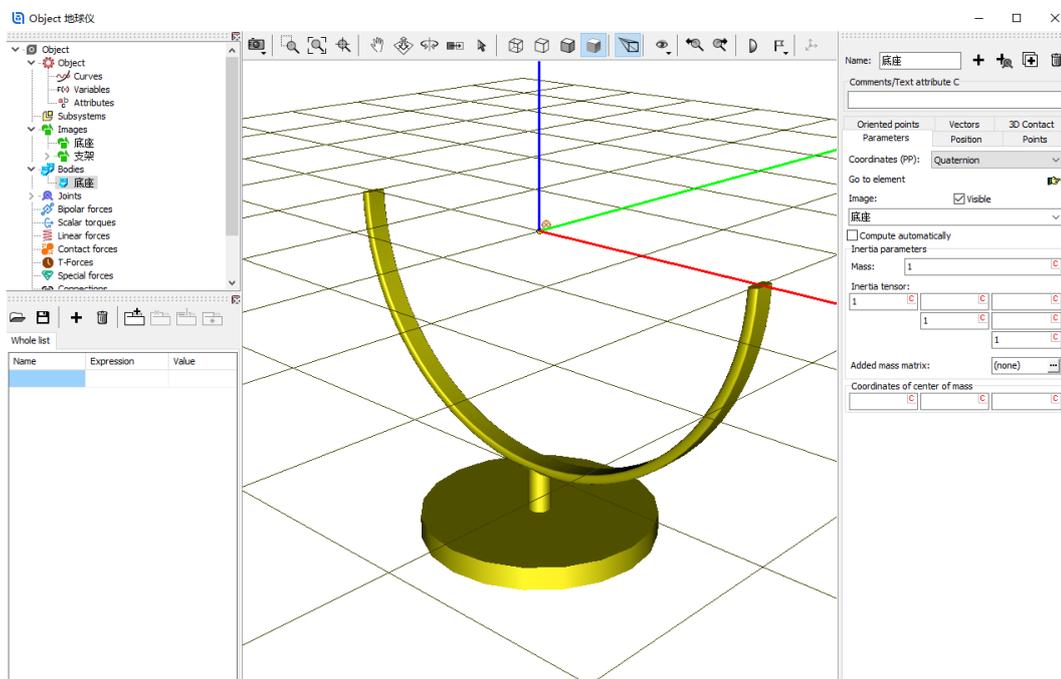


图 2-18

- 4) 这样，我们就创建了第二个刚体，系统自动命名为 **Body1**，在交互界面 **Parameters** 页面 **Image** 处的下拉菜单中选择 **支架**，并保持 **Visible** 选项为勾选状态，如图 2-19。

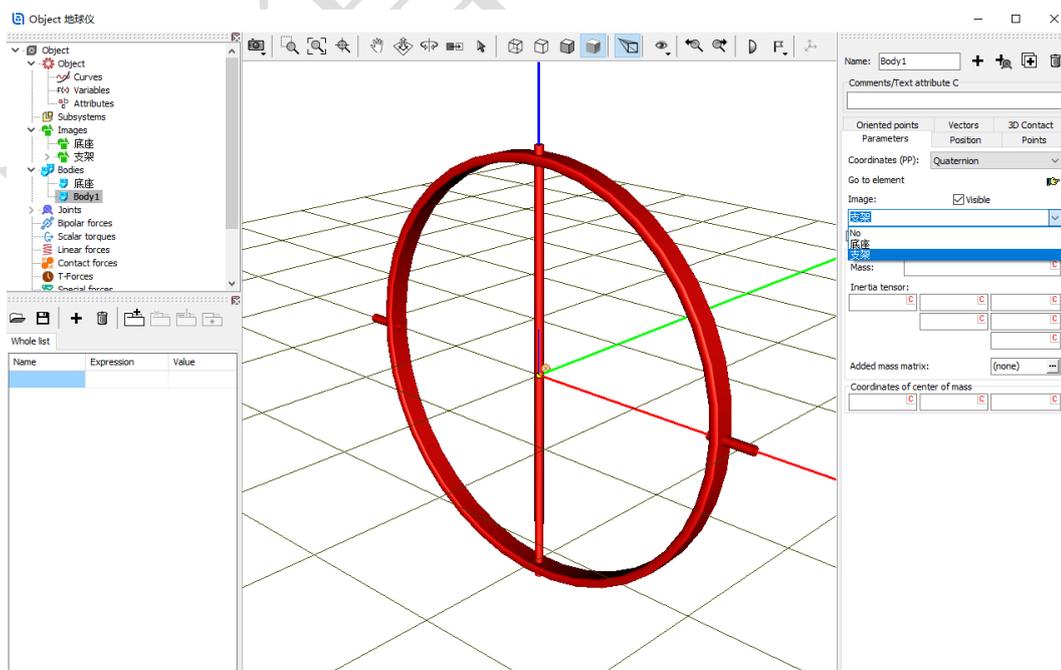


图 2-19

- 5) 在交互界面顶部 **Name** 处将该刚体重名为**支架**，在 **Parameters** 页面下部 **Mass** 处定义质量（国际单位：kg）为 **1**，在 **Inertia tensor** 处定义刚体相对其惯性主轴的转动惯量（国际单位：kg·m²）分别为 **1, 1, 1**，如图 2-20。

备注：每次输入参数或修改参数后，请敲一下回车键。

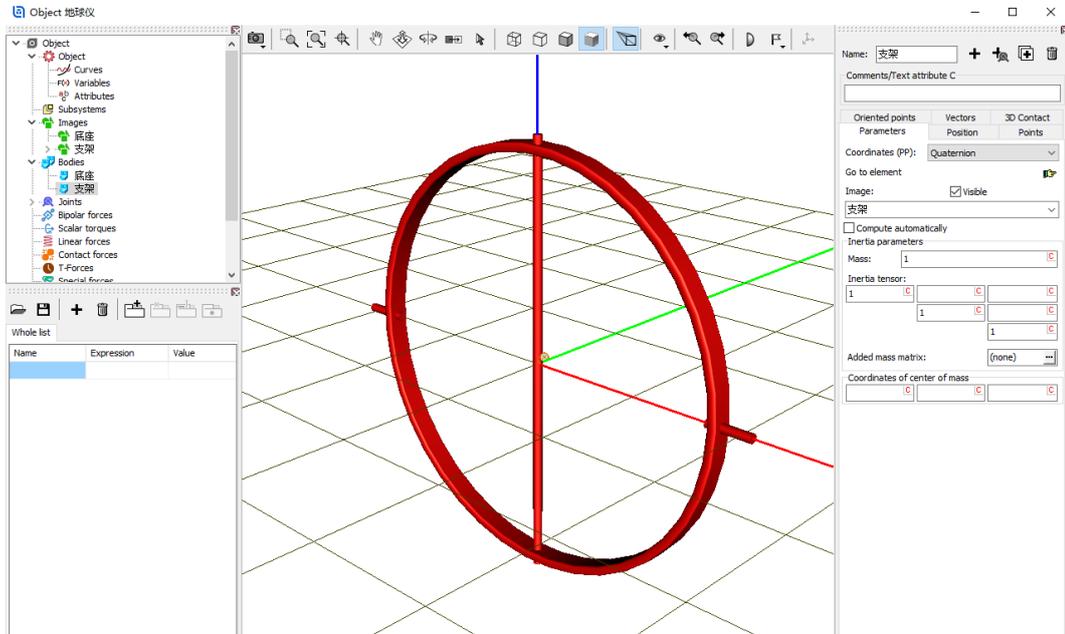


图 2-20

- 6) 选中左侧模型树中的 **Joints**，右侧交互界面默认显示较 **jBase0_底座** 的参数，如图 2-21，然后在交互界面点击按钮 **+**。

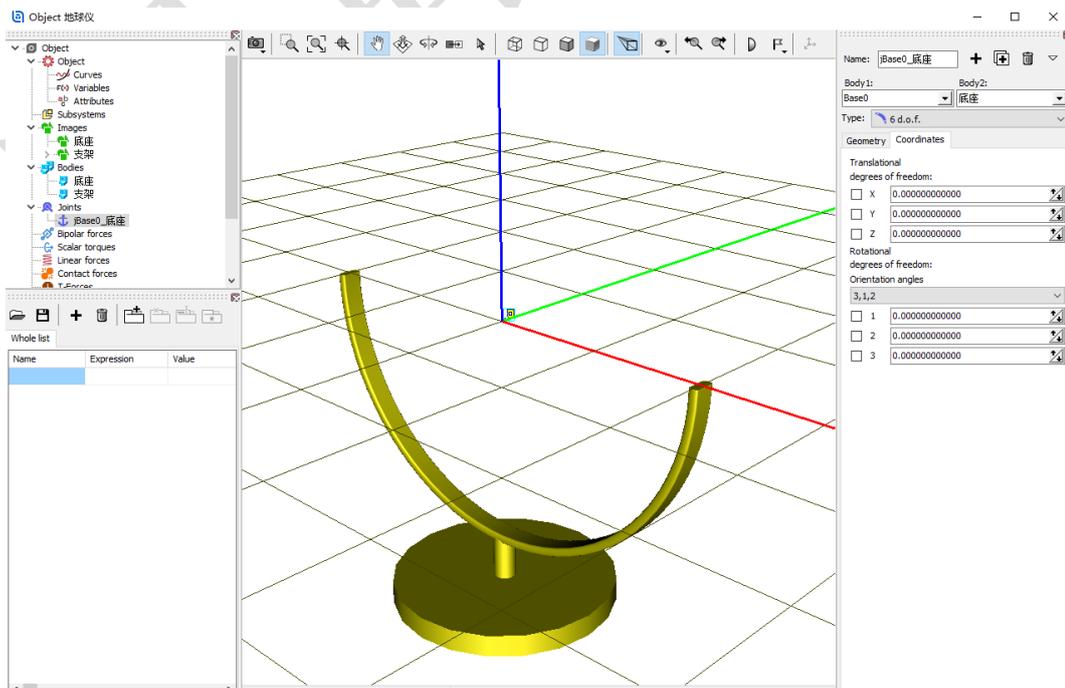


图 2-21

7) 这样，我们就创建了第二个铰，系统自动命名为 **Joint1**，如图 2-22。

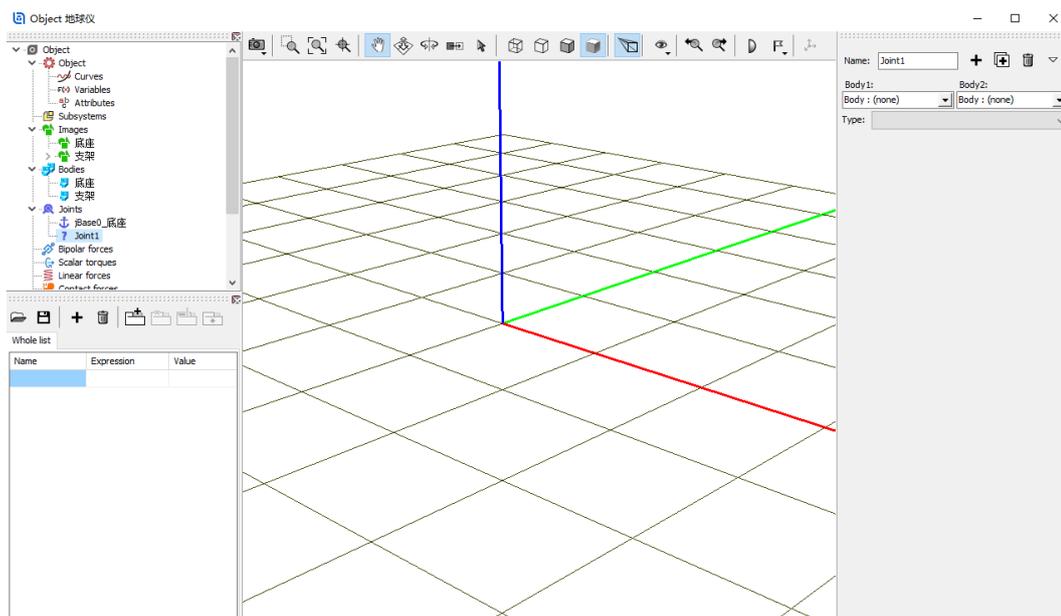


图 2-22

8) 然后从 **Body1** 下拉菜单选择**底座**，从 **Body2** 下拉菜单选择**支架**，系统会自动将该铰重命名为 **j 底座_支架**，如图 2-23。

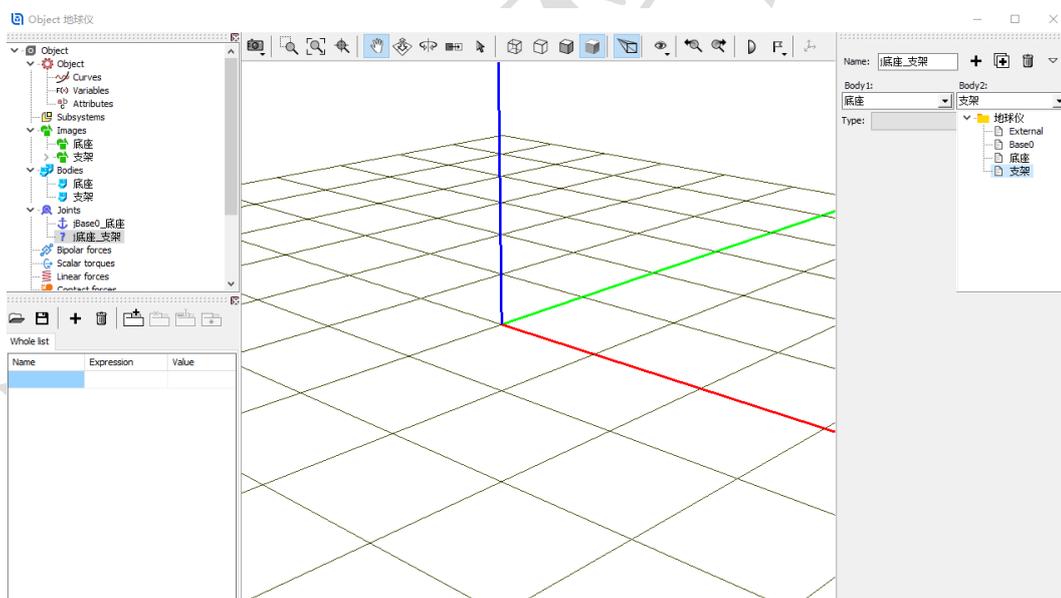


图 2-23

- 9) 从 **Type** 下拉菜单中选择 **Rotational**，保持缺省设置。表示物体 2 **支架** 相对物体 1 **底座** 具有一个转动自由度，铰点位于底座的原点，转动轴是底座的 **X** 轴，并且支架的原点与底座的原点重合，支架的 **X** 轴与底座的 **X** 轴平行（重合），如图 2-24。

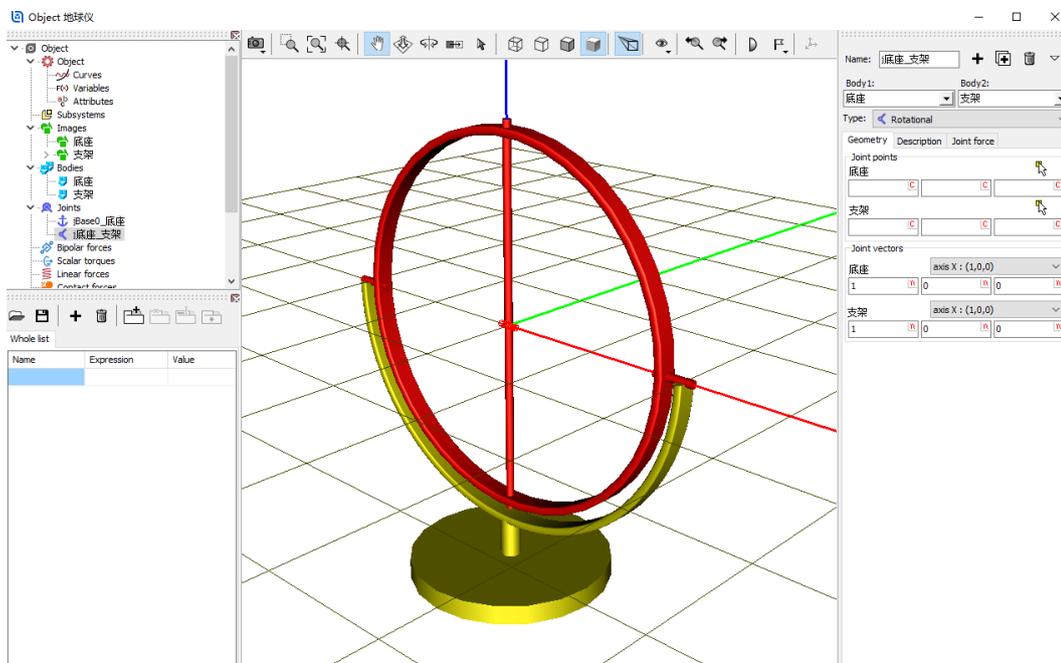


图 2-24

- 10) 在 **Description** 页面，我们可以改变 **Value** 值（转动铰对应为角度），预览支架相对底座的运动（预览后请记得归零，并敲回车键），如图 2-25。

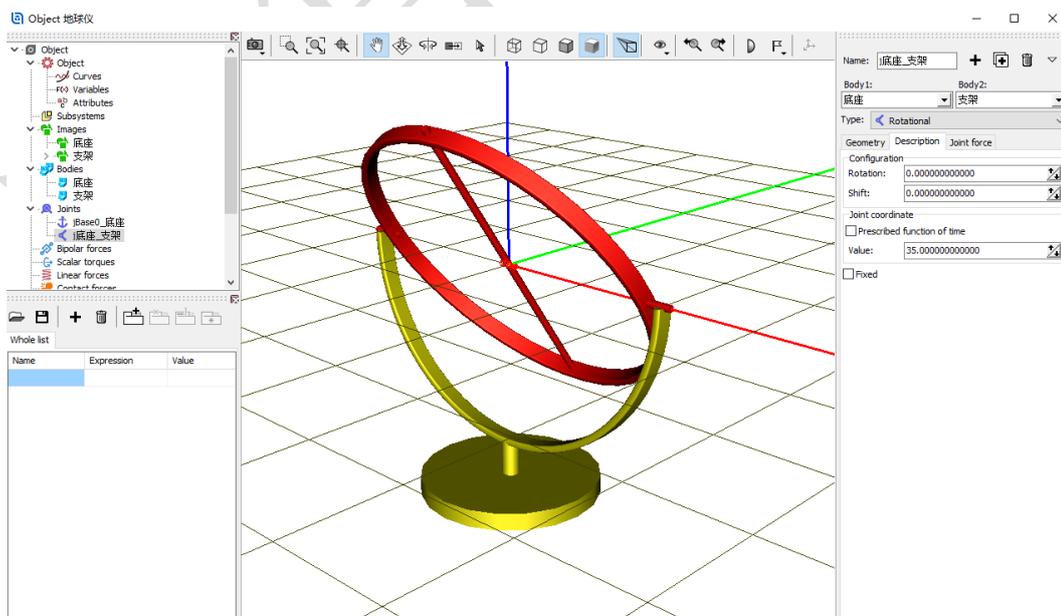


图 2-25

其实，从第 6-9 步，也可以选中左侧模型树的 **Joints**，点右键，选择菜单 **Add element to group “Joints”** → **Rotational**，然后分别选择 **Body1** 和 **Body2** 对应的物体，如图 2-26。

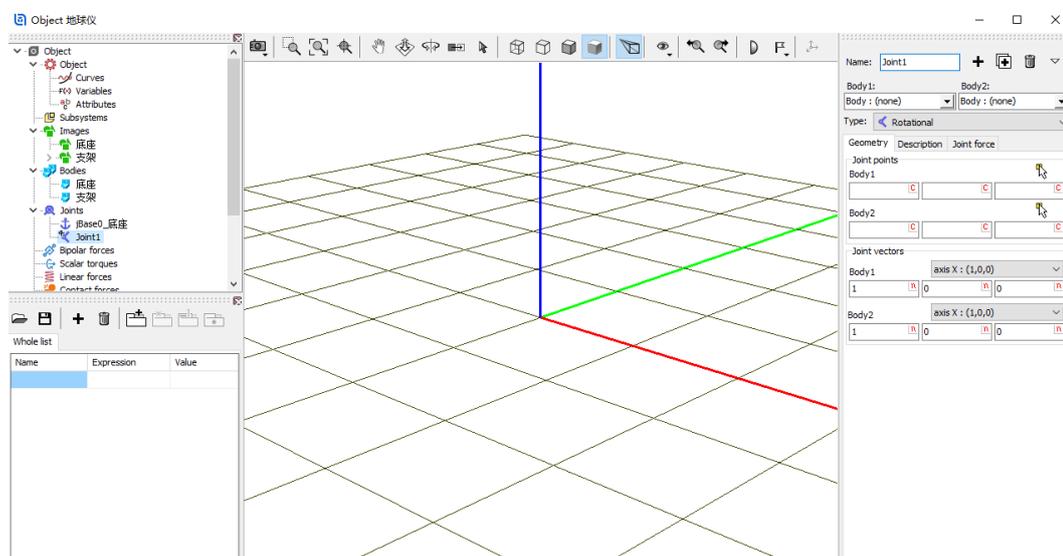


图 2-26

11) 选择主菜单 **File** → **Save**，保存模型。

通过以上操作，我们就完成了支架的建模：

- ✓ 准备几何图形
- ✓ 把几何赋给刚体
- ✓ 定义刚体的属性
- ✓ 描述刚体的运动

2.1.1.4 球体建模

- 1) 选择主菜单 **Edit** → **Read from file**，定位到路径“**D:\UM 培训教程\几何素材地球仪**”，选中**球体.img**，点击按钮**打开**，如图 2-27。

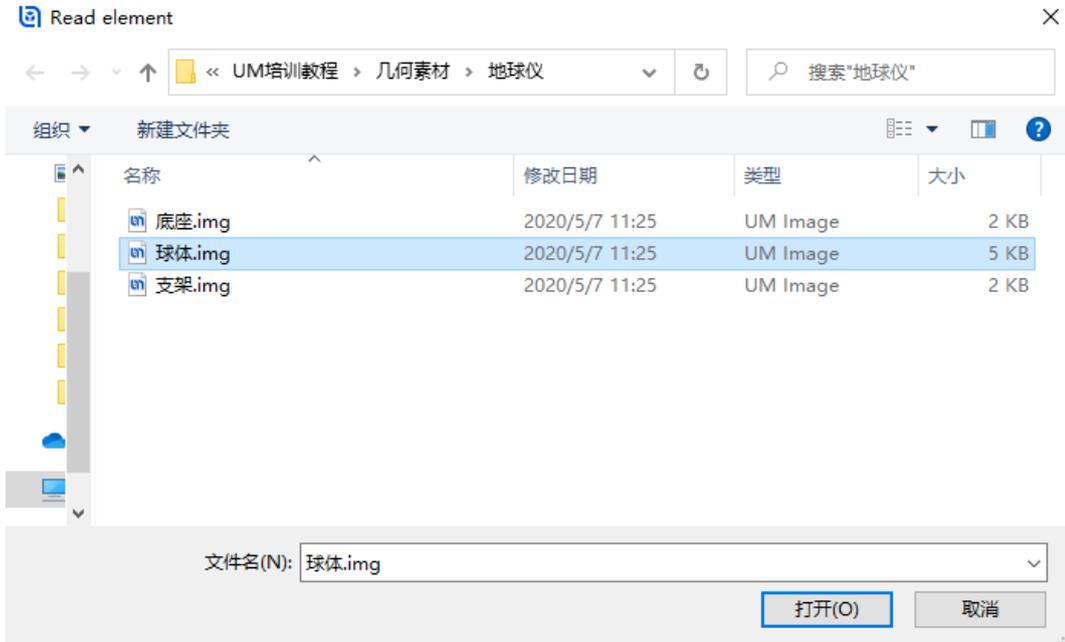


图 2-27

- 2) 这样，我们就导入了地球仪支架的几何图形 (**Images**)，如图 2-28 所示。导入几何图形的目的是增强模型可视化效果，它并不参与动力学计算。

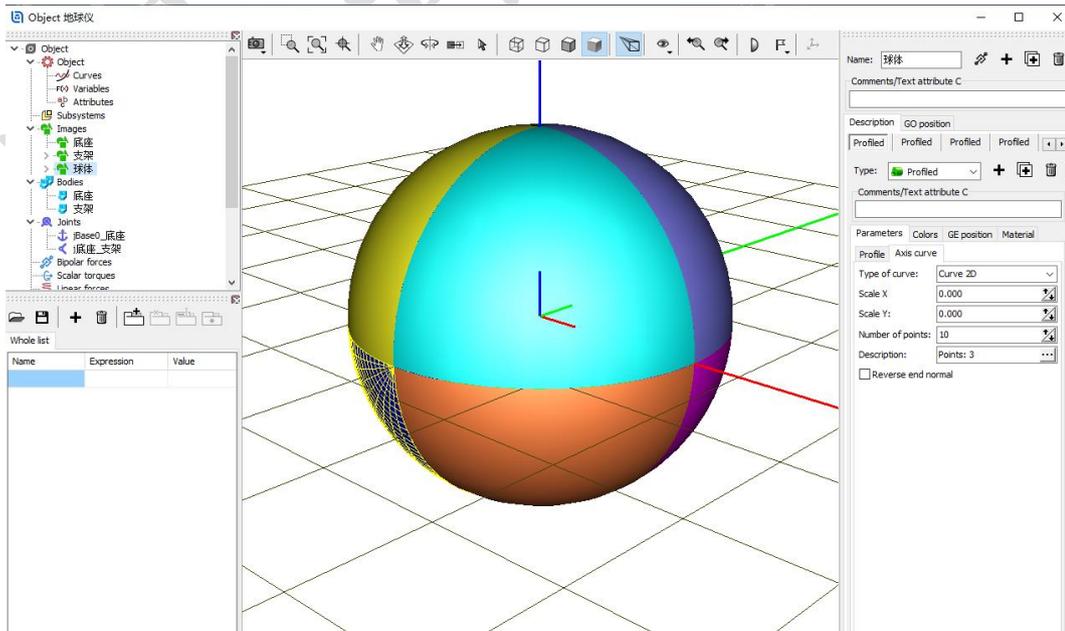


图 2-28

- 3) 选中左侧模型树中的 **Bodies** (其实选中任意一个刚体都行), 然后在交互界面点击按钮 **+**, 如图 2-29。这里也可以选中 **Bodies**, 点**右键**, 选择菜单 **Add element to group “Bodies”**。

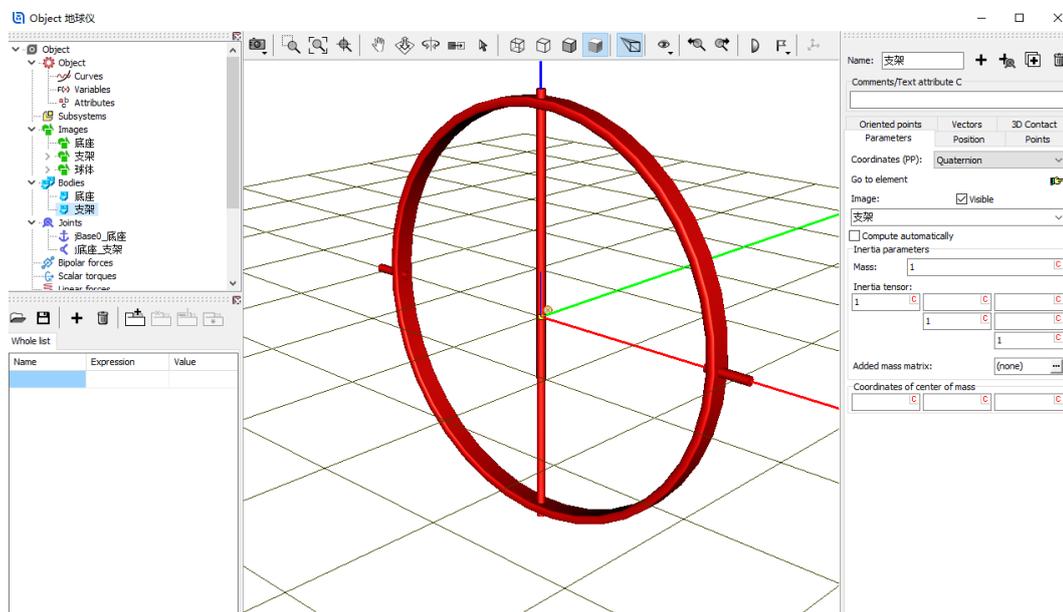


图 2-29

- 4) 这样, 我们就创建了第三个刚体, 系统自动命名为 **Body1**, 在交互界面 **Parameters** 页面 **Image** 处的下拉菜单中选择**球体**, 并保持 **Visible** 选项为勾选状态, 如图 2-30。

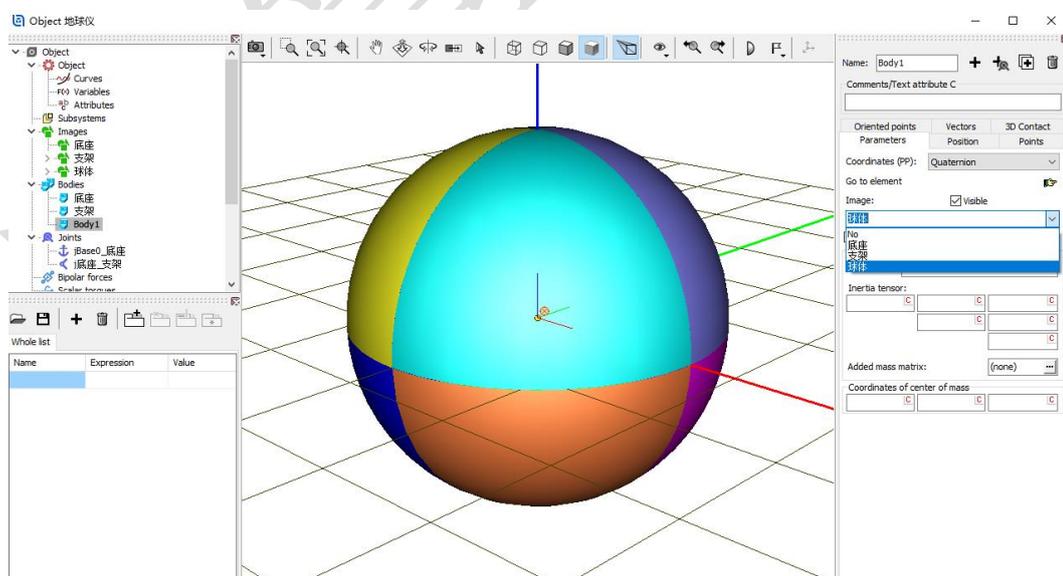


图 2-30

- 5) 在交互界面顶部 **Name** 处将该刚体重名为**球体**，在 **Parameters** 页面下部 **Mass** 处定义质量（国际单位：kg）为 **1**，在 **Inertia tensor** 处定义刚体相对其惯性主轴的转动惯量（国际单位： $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ）分别为 **1, 1, 1**，如图 2-31。

备注：每次输入参数或修改参数后，请敲一下回车键。

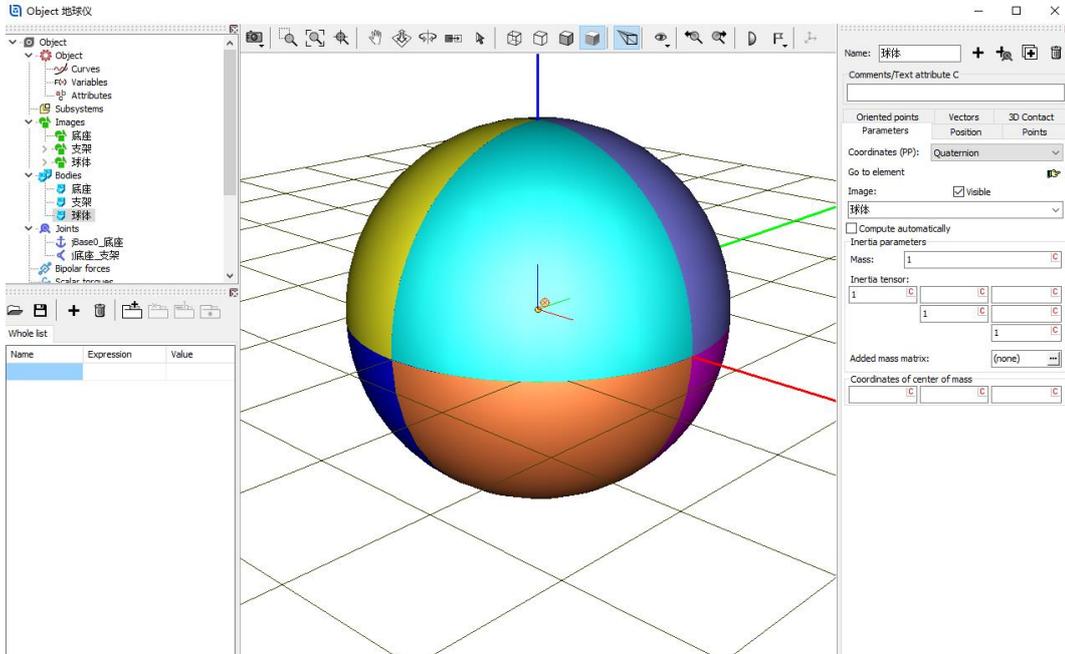


图 2-31

- 6) 选中左侧模型树中的 **Joints**（其实选中任意一个铰都行），然后在交互界面点击按钮 **+**，如图 2-32。

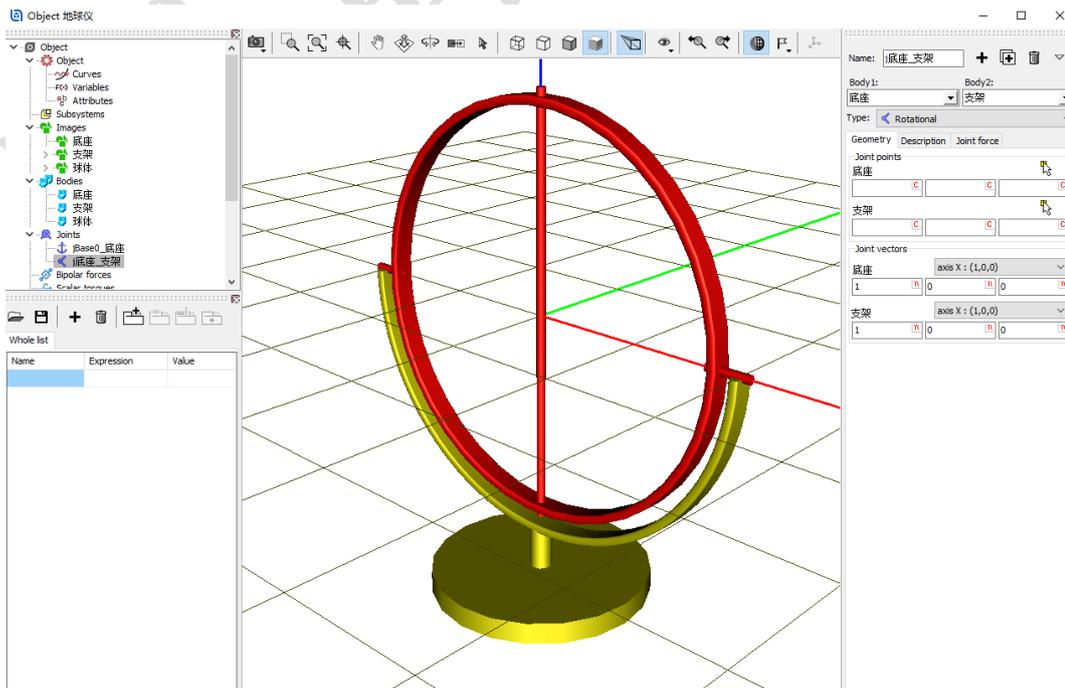


图 2-32

7) 这样，我们就创建了第三个铰，系统自动命名为 **Joint1**，如图 2-33。

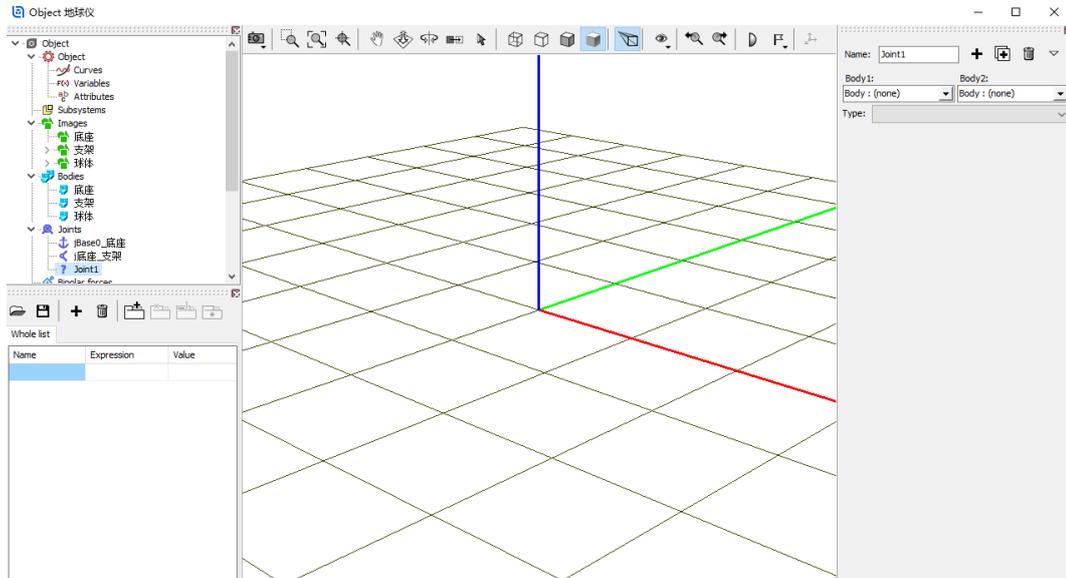


图 2-33

8) 然后从 **Body1** 下拉菜单选择**支架**，从 **Body2** 下拉菜单选择**球体**，系统会自动将该铰重命名为 **j 支架_球体**，从 **Type** 下拉菜单中选择 **Rotational**，如图 2-34。

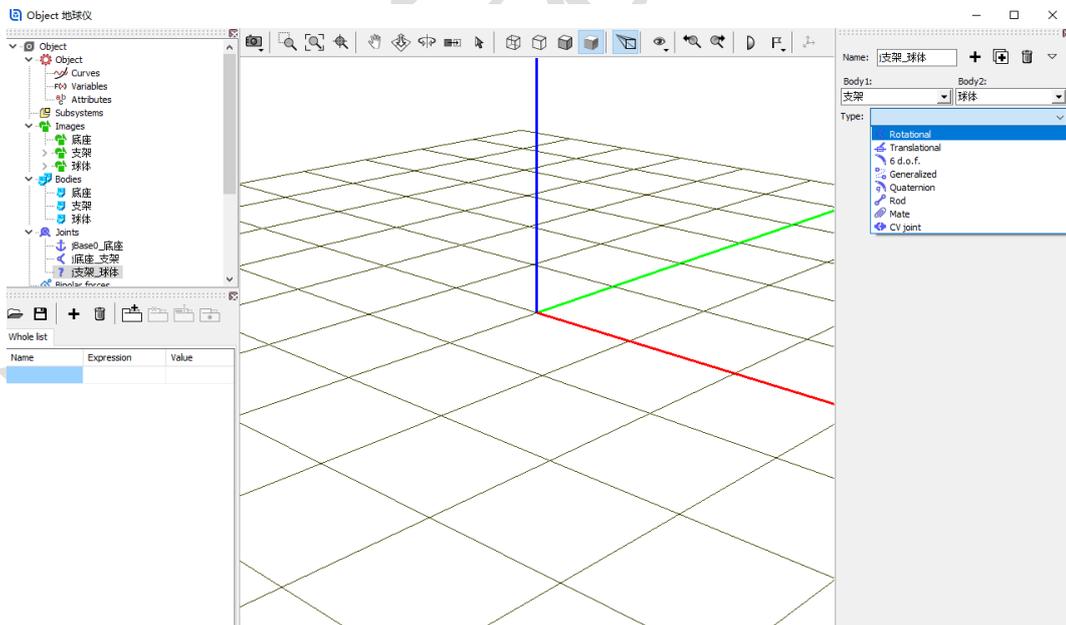


图 2-34

- 9) 在 **Joint Vector** 处对支架和球体都选择 **Z** 轴，表示物体 2 **球体** 相对物体 1 **支架** 具有一个转动自由度，铰点位于支架的**原点**，转动轴是支架的 **Z** 轴，并且球体的原点与支架的原点重合，支架的 **Z** 轴与底座的 **Z** 轴平行（重合），如图 2-35。

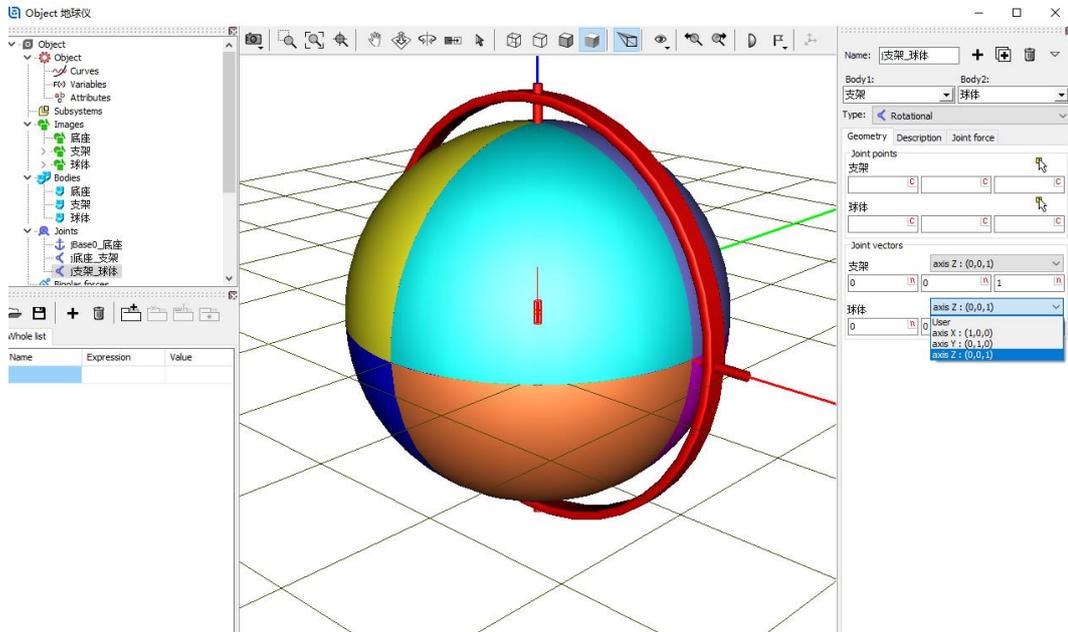


图 2-35

- 10) 在 **Description** 页面，我们可以改变 **Value** 值（转动铰对应为角度），预览球体相对支架的运动（预览后请记得归零，并敲回车键），如图 2-36。

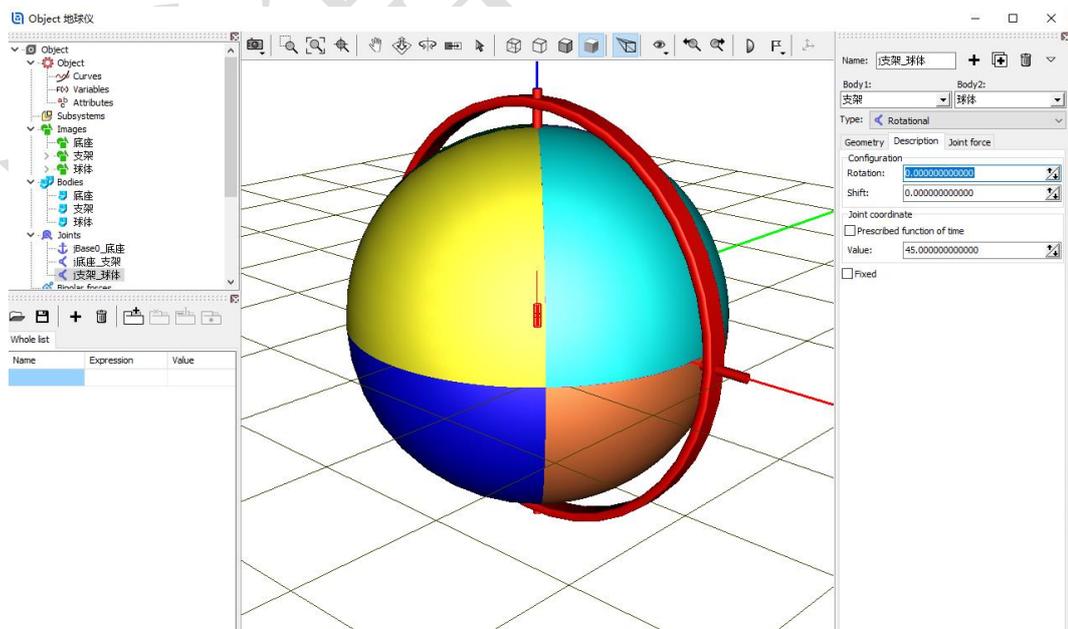


图 2-36

从第 6-9 步，也可以直接在 **Bodies**→**球体** 页面，点击按钮 ，选择菜单 **Create joint**→**Rotational**，然后选择 **Body1** 对应物体**支架**，再设置转动轴 **Z**，如图 2-37。

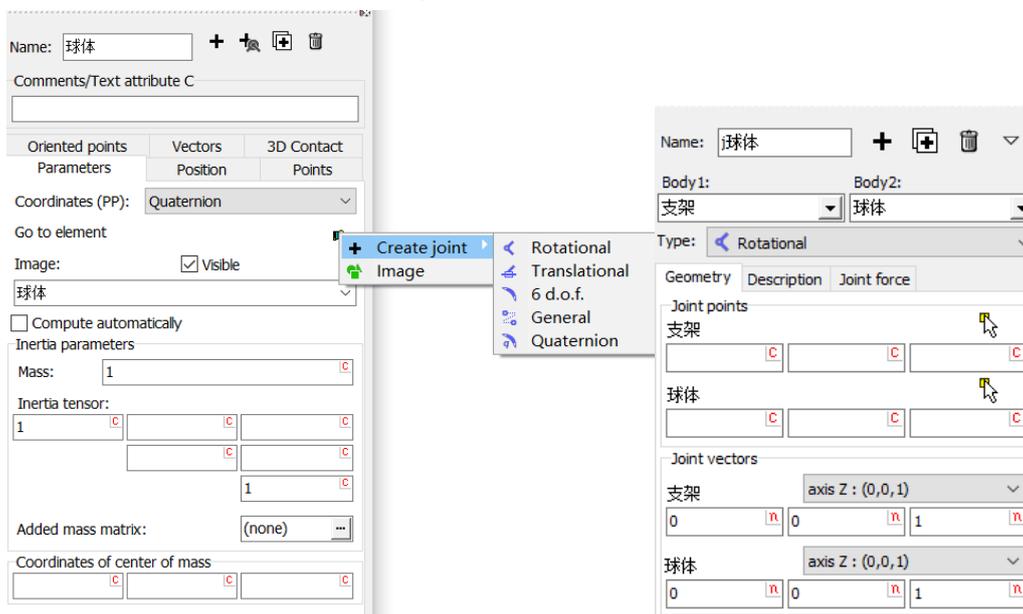


图 2-37

11) 选择主菜单 **File** → **Save**，保存模型。

通过以上操作，我们就完成了球体的建模：

- ✓ 准备几何图形
- ✓ 把几何赋给刚体
- ✓ 定义刚体的属性
- ✓ 描述刚体的运动

至此，已完成所有建模工作。

本例详细介绍了 UM 软件导入几何、创建刚体和定义较的一般方法，后续例子不再赘述，建议初学者反复练习多次。

2.1.2 仿真

2.1.2.1 进入仿真程序

- 1) 选择 **UM Input** 程序的主菜单 **Object** → **Simulation** 运行仿真程序并自动加载当前模型（或直接点击工具栏按钮）。

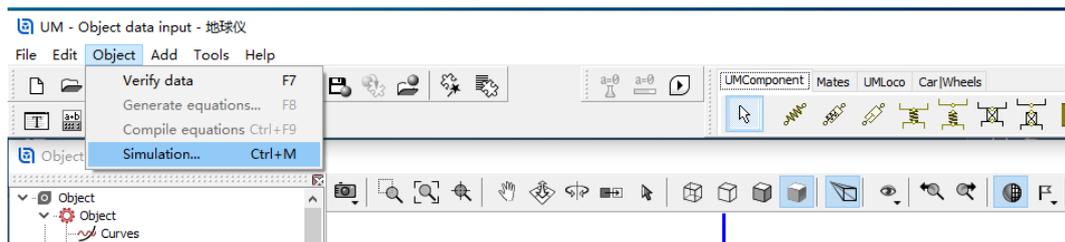


图 2-38

- 2) 待 **UM Simulation** 仿真程序运行后，关闭 **UM Input** 程序（最好不要让两个程序同时访问一个模型）。
- 3) 加载了模型的仿真程序界面如图 2-39 所示，上方为主菜单和常用工具栏，下方为程序桌面。在程序桌面上自动打开了一个动画窗口，显示当前模型，可随意调整大小和位置，可关闭也可同时打开多个动画窗口。请注意，由于 **UM Simulation** 程序采用了全新的图形引擎 **ORGE**，其动画窗口操作与 **UM Input** 程序略有不同，使用时推荐将平移图标始终保持为选中状态，则按下鼠标左键移动为平动，按下鼠标中键移动为转动，滑动鼠标滚轮为缩放。

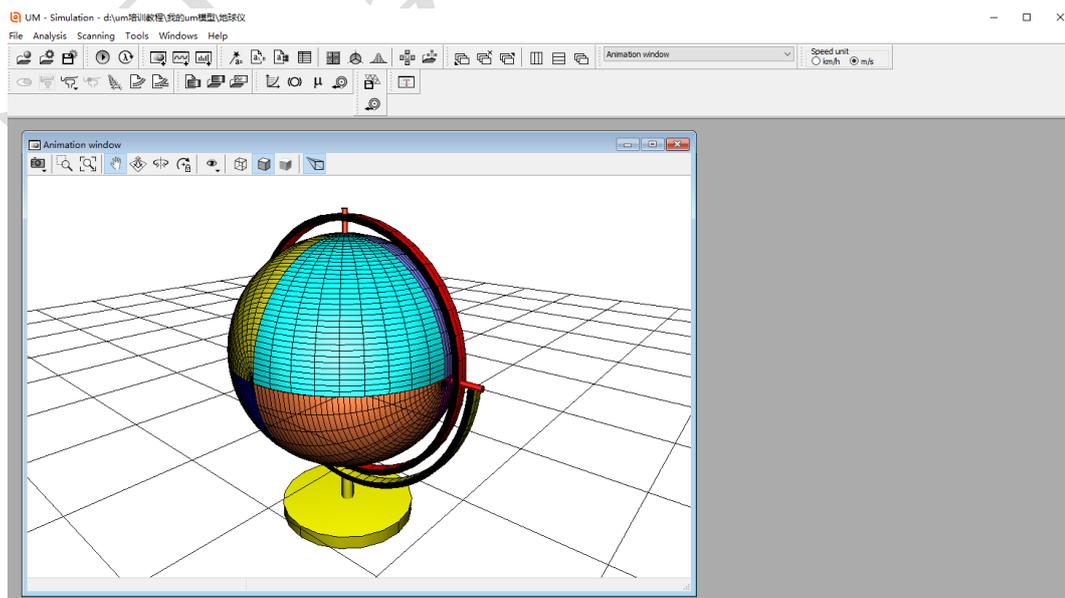


图 2-39

2.1.2.2 设置求解参数

1) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板，如图 2-40。

(或直接点击工具栏按钮 )

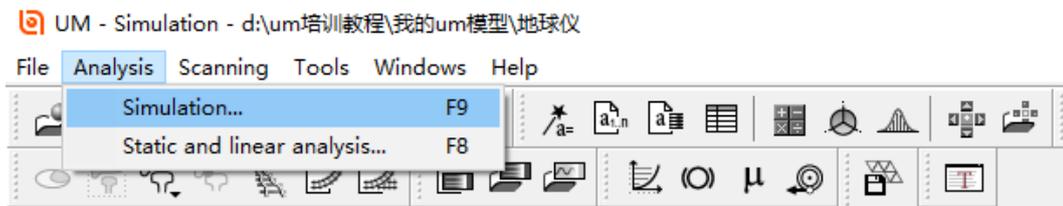


图 2-40

2) 在 **Solver** 页面，默认求解器为 **Park**，将仿真时间 **Time** 设置为 **100** (国际单位: s)，如图 2-41。

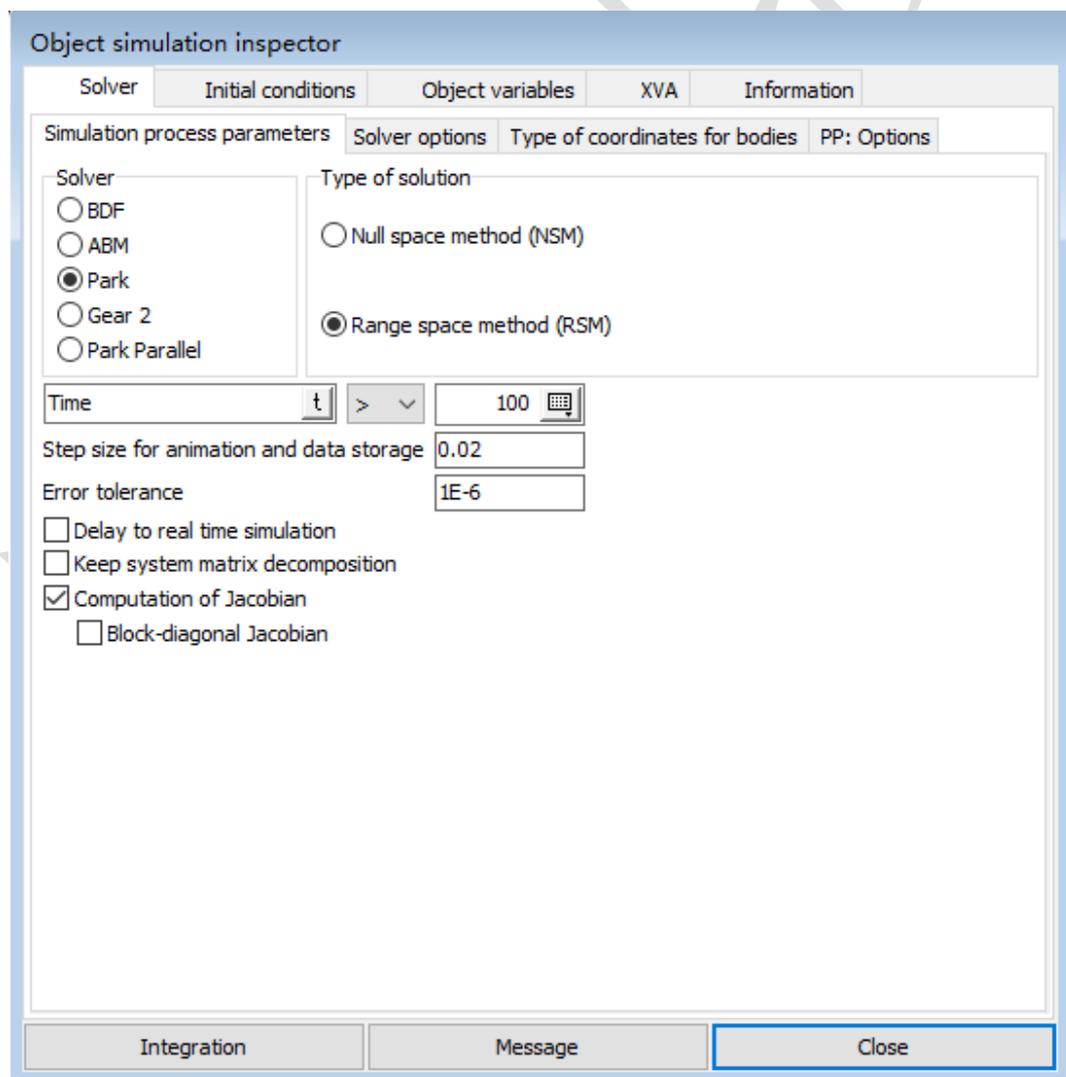


图 2-41

2.1.2.3 设置初始条件

- 1) 切换到 **Initial conditions** 页面，可以看到系统自由度数目为 **2**，设置第一个自由度的速度 **Velocity** 为 **1**（国际单位：rad/s），如图 2-42。

备注：每次输入参数或修改参数后，请敲一下回车键。

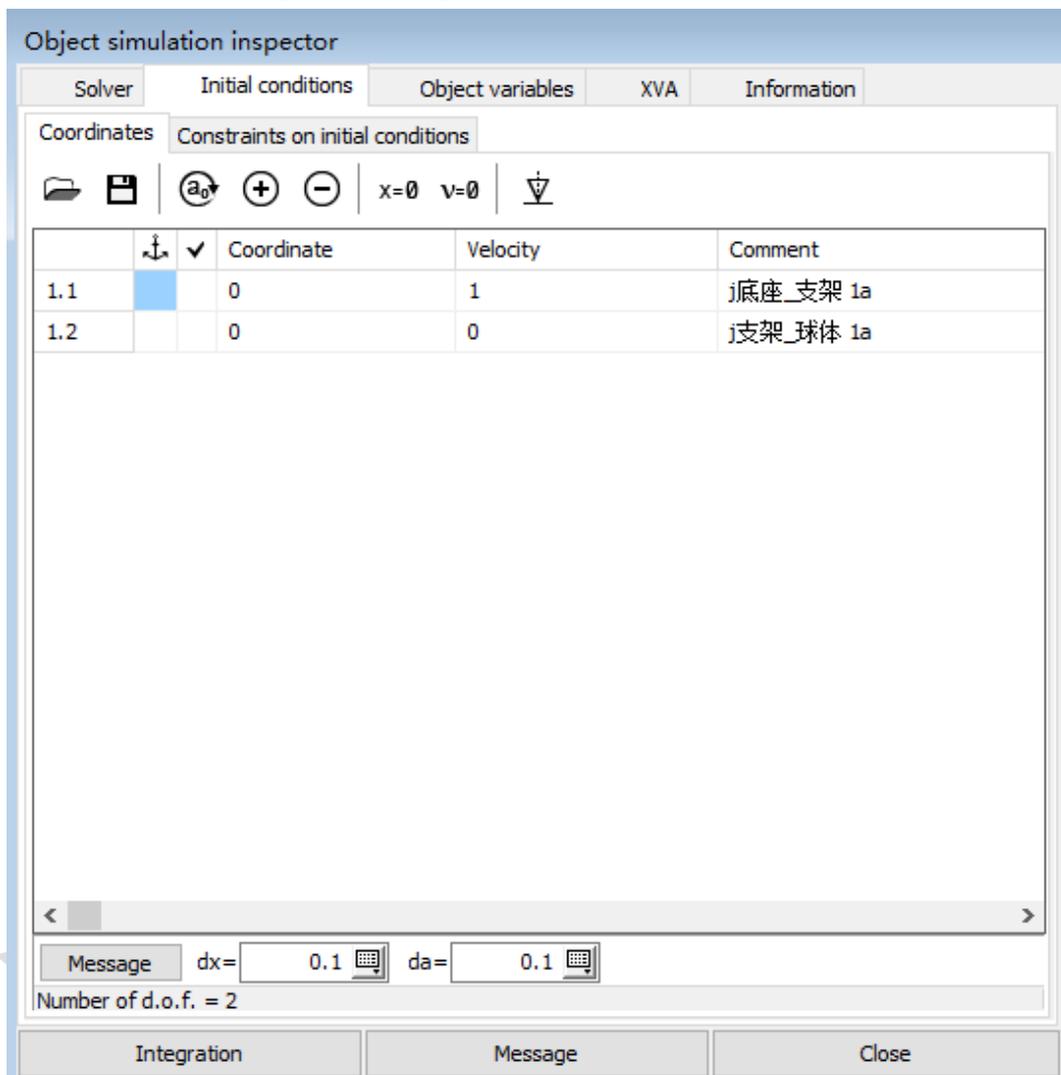


图 2-42

2.1.2.4 执行仿真计算

- 1) 点击按钮 **Integration**，执行仿真，在动画窗口可以看到球体随支架一起绕底座 **X** 轴旋转运动，如图 2-43。

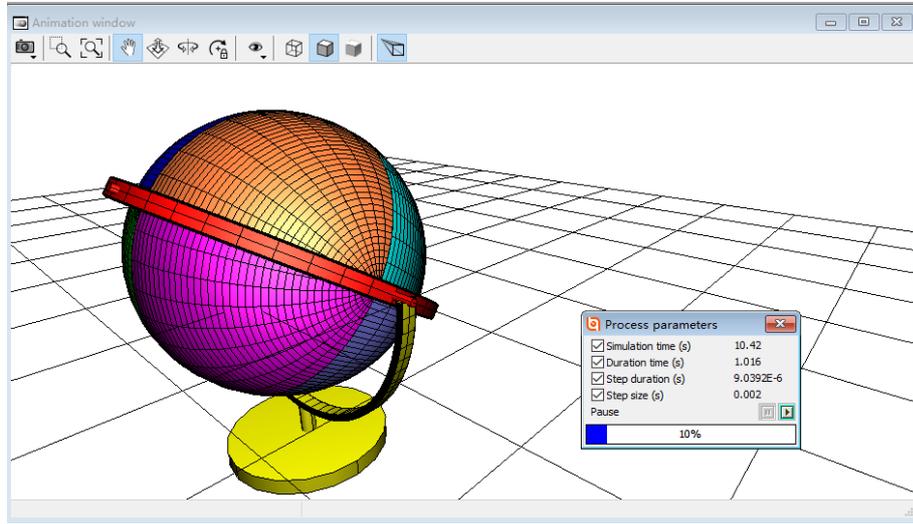


图 2-43

- 2) 计算完毕后，会自动弹出 **Simulation over** 提示；若要中途停止仿真，可点击进度条的按钮  或按 **ESC** 键。

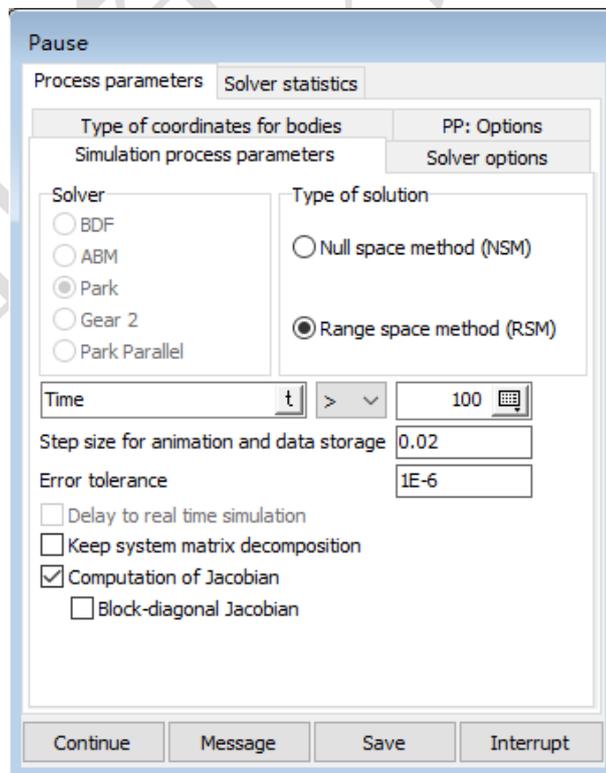


图 2-44

- 3) 在弹出界面点击按钮 **Interrupt**，终止仿真。

2.1.2.5 修改初始条件

- 1) 现在回到 **Initial conditions** 界面，将第二个自由度的速度 **Velocity** 也设置为 **1**（国际单位：rad/s），如图 2-45。

备注：每次输入参数或修改参数后，请敲一下回车键。

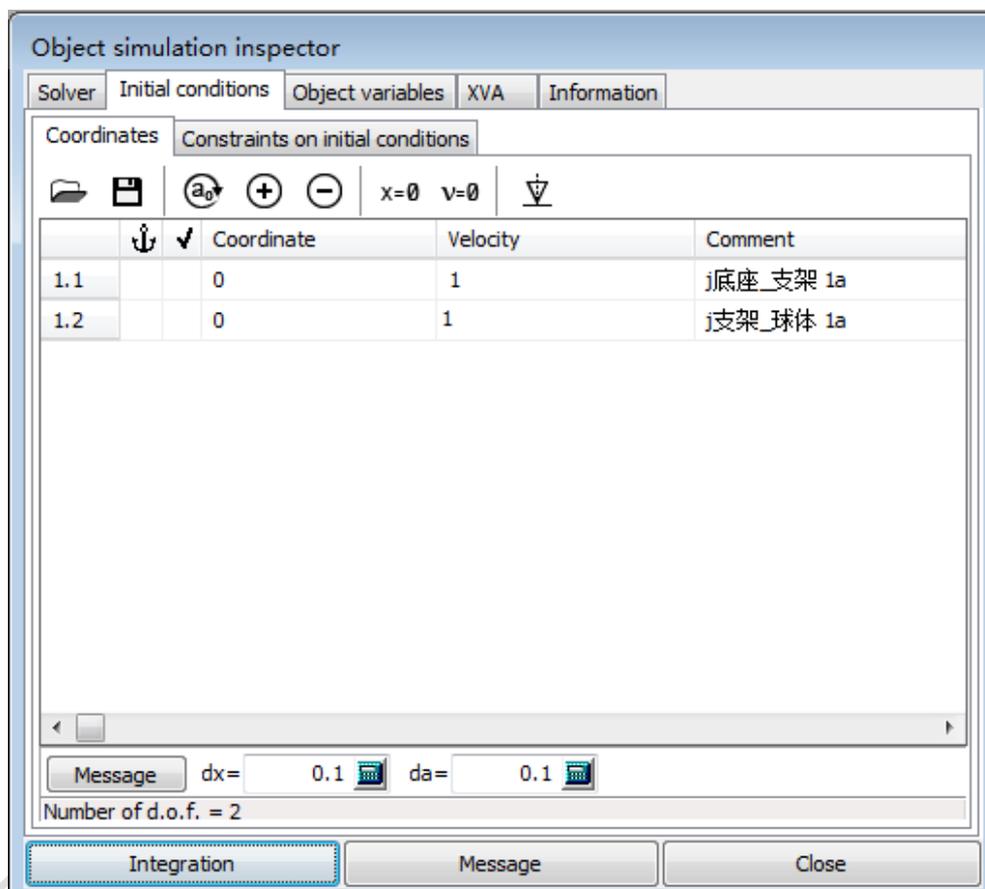


图 2-45

- 2) 如果不小心点击了按钮 **Close** 而将仿真控制面板关闭了，重新通过主菜单 **Analysis** → **Simulation** 或直接点击工具栏按钮  打开即可。

2.1.2.6 再次进行仿真

- 1) 点击按钮 **Integration**，再次执行仿真，在动画窗口可以看到球体既随支架一起绕底座 **X** 轴旋转运动，又相对支架 **Z** 轴旋转运动，如图 2-46。

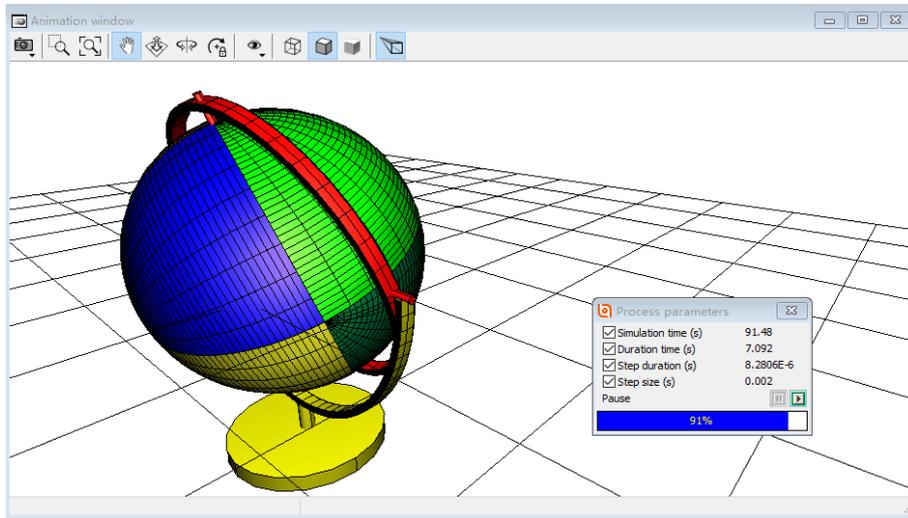


图 2-46

- 2) 如果不小心点击了按钮  而将动画窗口关闭了，可通过主菜单 **Tools** → **Animation Window...** 或工具栏按钮  重新打开。

2.1.2.7 卸载当前模型

- 1) 待计算完毕或中途暂停，在弹出页面点击按钮 **Interrupt** 终止仿真。
- 2) 点击仿真控制面板的 **Close** 按钮，将其关闭。
- 3) 选择主菜单 **File** → **Close**，卸载当前模型。
- 4) **UM Simulation** 程序仍在运行，可通过菜单 **File** → **Open** 加载其他模型，进行仿真工作。

2.2 实例二：四连杆机构

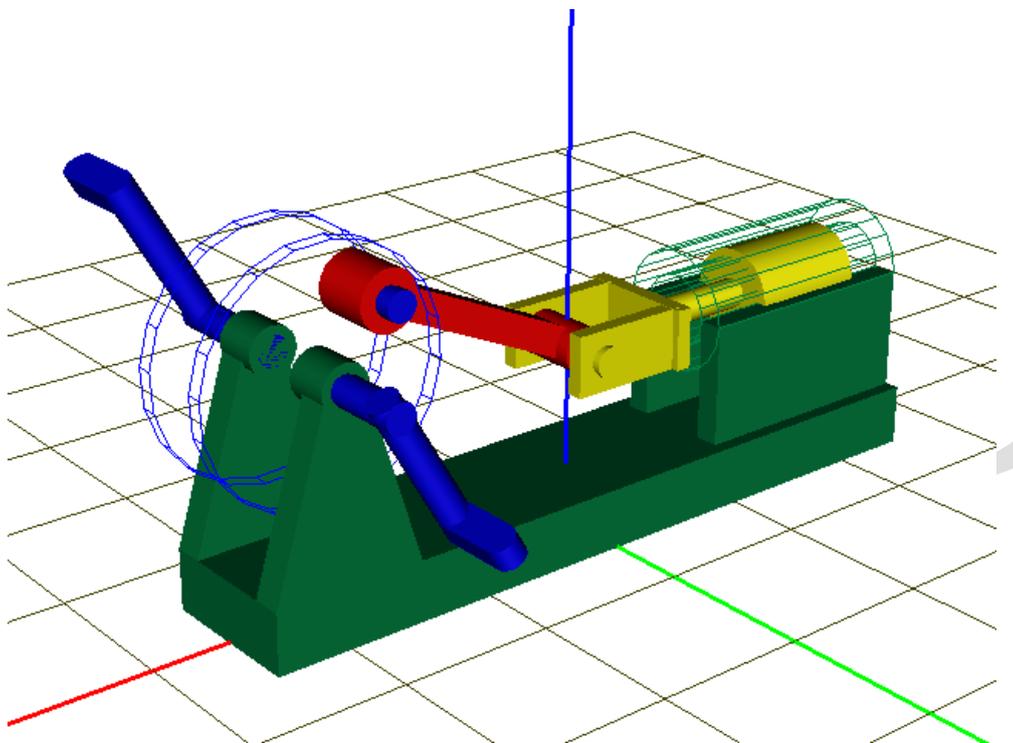


图 2-47

图 2-47 所示为一个经典的四连杆机构模型，该模型由四个刚体（机架、曲柄、连杆和滑块）组成。惯性参考系原点位于机架底面，红色为 X 轴，绿色为 Y 轴，蓝色为 Z 轴。其中机架固定在地面，没有自由度，曲柄具有绕机架 Y 轴转动的自由度，连杆具有绕曲柄 Y 轴转动的自由度，滑块具有绕连杆 Y 轴转动的自由度，同时滑块又受到机架的约束只能沿着 X 轴运动，因此形成一个闭环系统，共有一个独立自由度。

本例用到的模块：**UM Base**。

2.2.1 建模

- 1) 运行 **UM Input** 程序。
- 2) 选择主菜单 **File** → **New object**，新建一个 UM 模型。
- 3) 选择主菜单 **File** → **Save as...**，指定模型路径及名称“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\四连杆机构**”。
- 4) 选择主菜单 **Edit** → **Read from file**，依次读入“**D:\UM 培训教程\几何素材\四连杆机构**”文件夹下的**机架.img**、**曲柄.img**、**连杆.img** 和**滑块.img** 四个几何图形，如图 2-48。如遇报错，点击 **No** 即可。

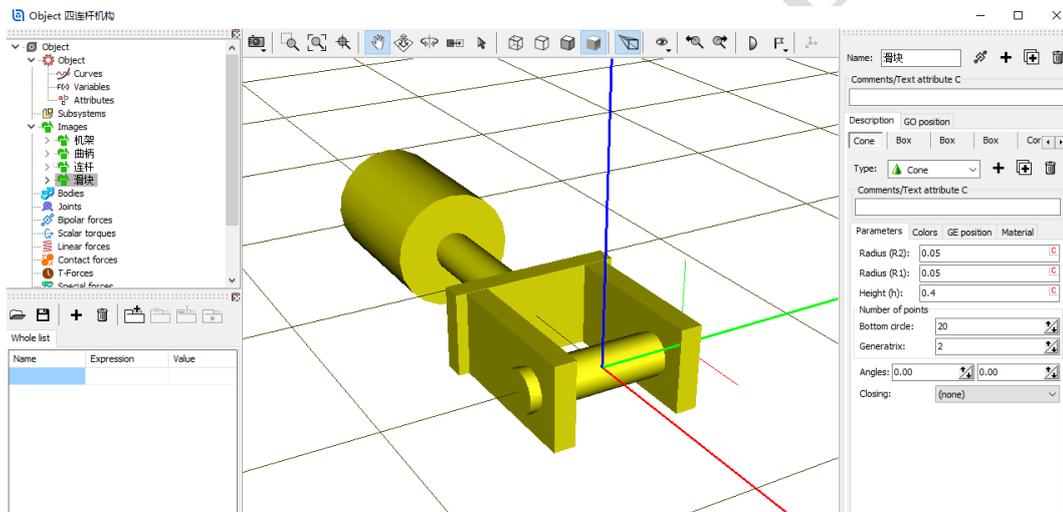


图 2-48

- 5) 由于**机架**没有自由度，所以不必要为其创建刚体，可直接将其赋给 **Base0**。如图 2-49，先在左侧模型树选中 **Object**，然后在右侧交互界面 **General** 页面下方 **Scene image** 处的下拉菜单中选择几何**机架**。

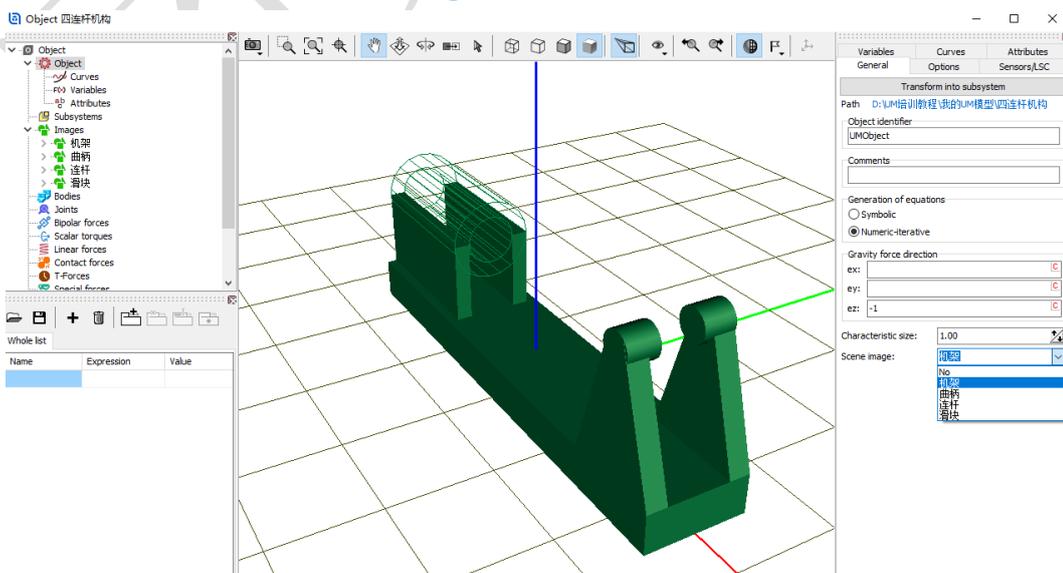


图 2-49

- 6) 创建第一个刚体**曲柄**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**曲柄**，设置它的质量 (1) 和转动惯量 (1, 1, 1) 参数，如图 2-50。

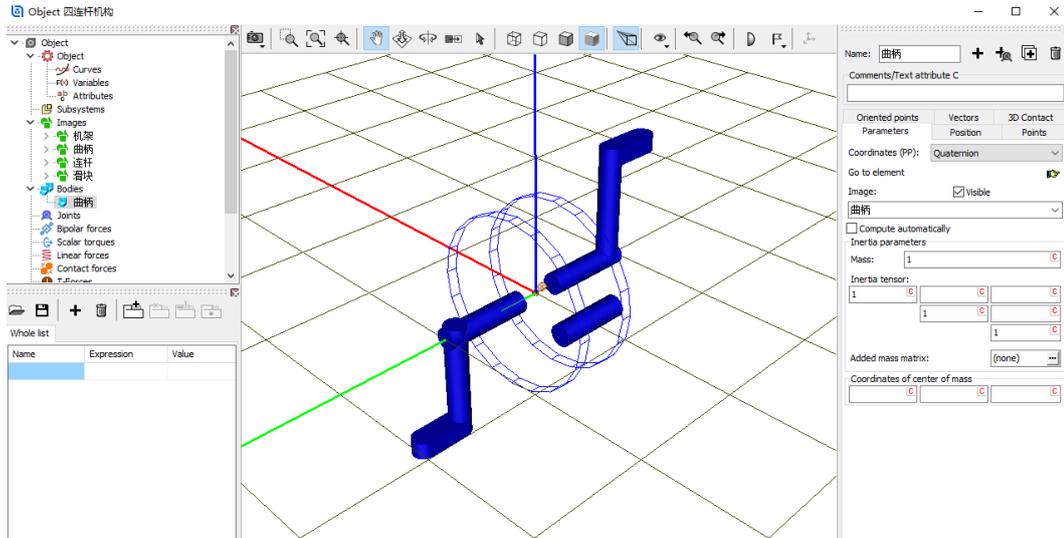


图 2-50

- 7) 创建第二个刚体**连杆**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**连杆**，设置它的质量 (1) 和转动惯量 (1, 1, 1) 参数及质心坐标 (-0.4, 0, 0)，如图 2-51。

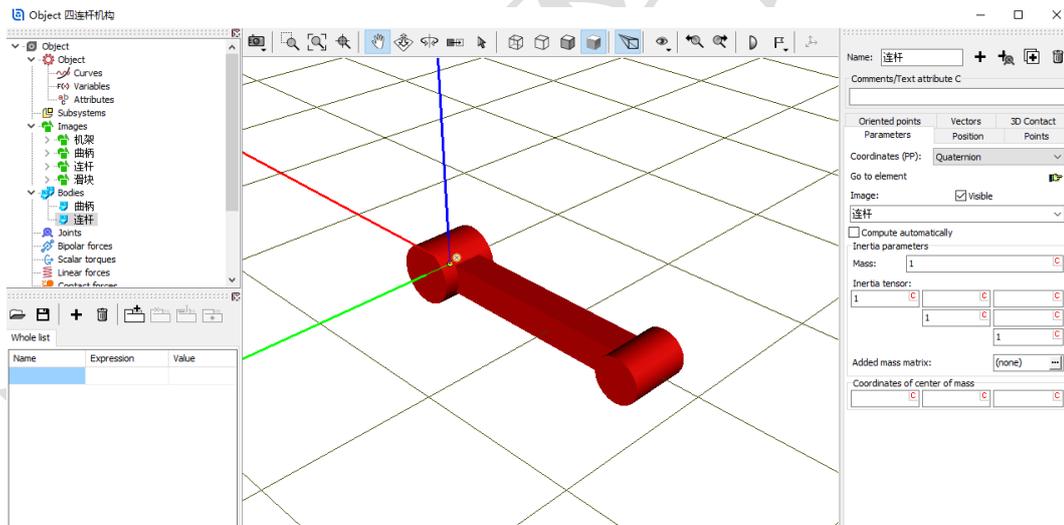


图 2-51

- 8) 创建第三个刚体滑块，从 **Image** 下拉菜单选择几何滑块，设置质量 (1) 和转动惯量 (1, 1, 1) 参数及质心坐标 (-0.4, 0, 0)，如图 2-52。

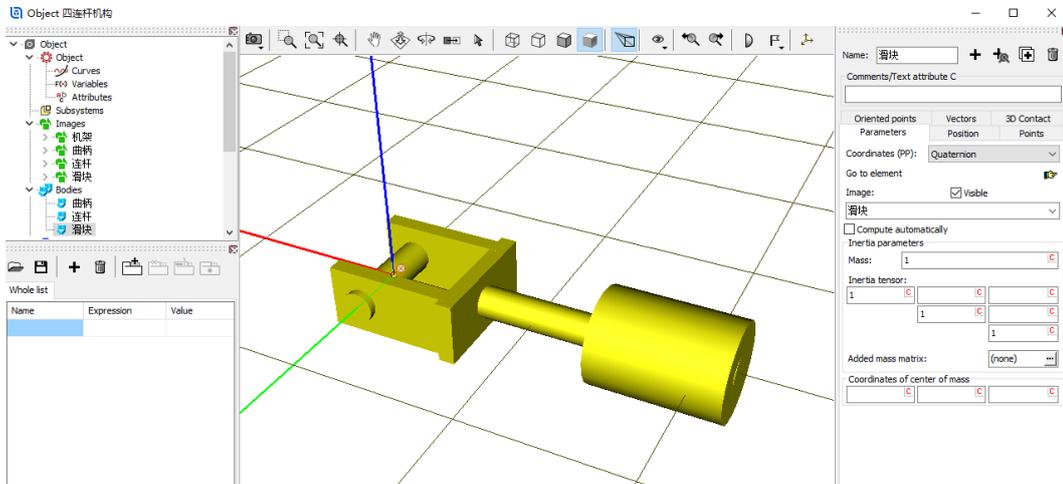


图 2-52

- 9) 创建第一个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择 **曲柄**，**Type** 选择 **Rotational**，**Joint points** 分别为 (1, 0, 0.8) 和 (0, 0, 0)，**Joint vector** 都选择 **Y** 轴，如图 2-53。表示将曲柄的原点与总体坐标系的点 (1, 0, 0.8) 重合，曲柄绕通过该点与总体坐标系 Y 轴平行的 Y' 轴可以转动，并且曲柄的 Y 轴与之平行 (重合)。

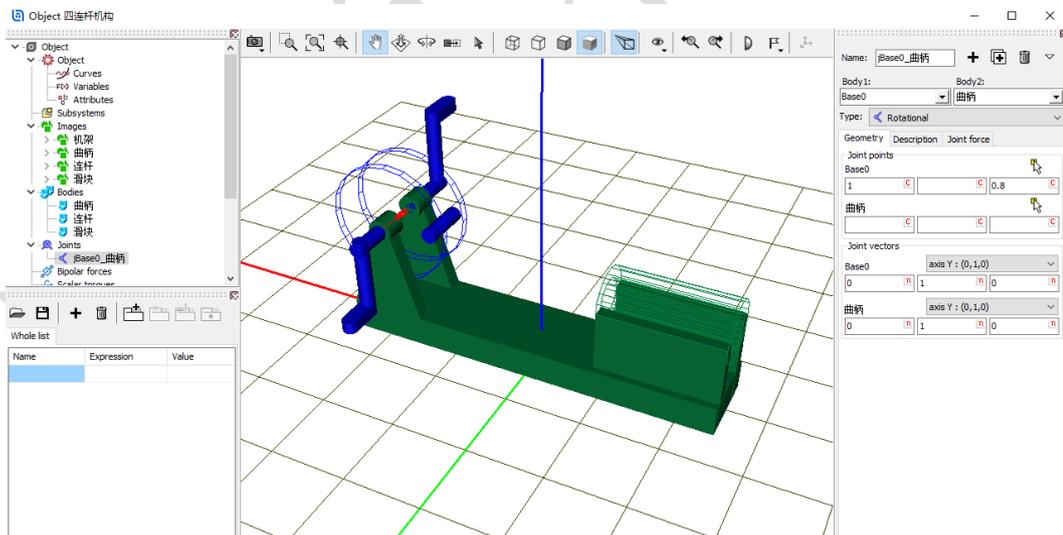


图 2-53

- 10) 切换到 **Description** 页面，设置 **Rotation** 值为 **30 (°)**，作为初始状态。然后，勾选 **Prescribed function of time**，然后在弹出对话框点是(Y)，如图 2-54。

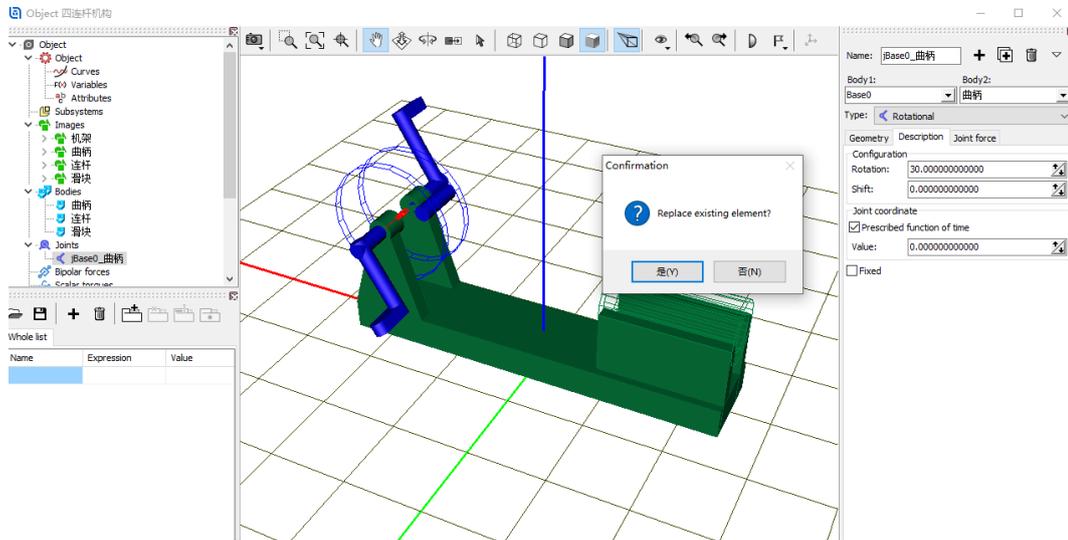


图 2-54

- 11) 在最下方数据框输入表达式 **omega*t**，回车，在弹出界面点击 **Accept**，这时新的参数符号 **omega** 会自动添加到左侧下方的参数符号列表，缺省值为 **0**，**t** 则是系统变量时间。这个表达式用来定义时间函数驱动的转动，所有带 **t** 标记的数据框都可以输入显含时间的函数表达式，如图 2-55。

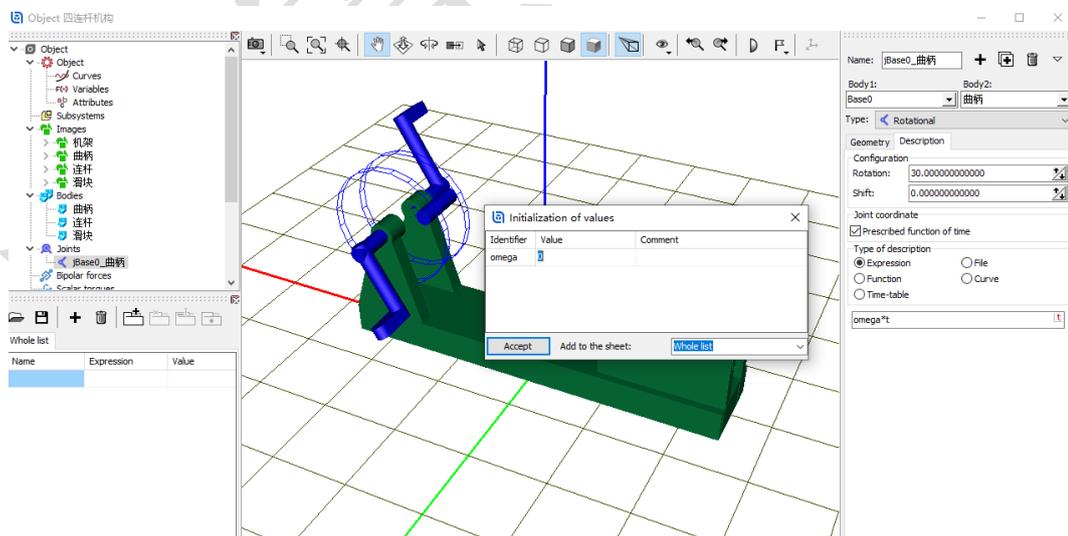


图 2-55

- 12) 创建第二个铰，**Body1** 选择**曲柄**，**Body2** 选择**连杆**，**Type** 选择 **Rotational**，**Joint points** 分别为 $(-0.3, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，**Joint vector** 都选择 **Y** 轴，如图 2-56。表示将连杆的原点与曲柄局部坐标系的点 $(-0.3, 0, 0)$ 重合，连杆绕通过该点与曲柄局部坐标系 Y 轴平行的 Y' 轴可以转动，并且连杆的 Y 轴与之平行（重合）。

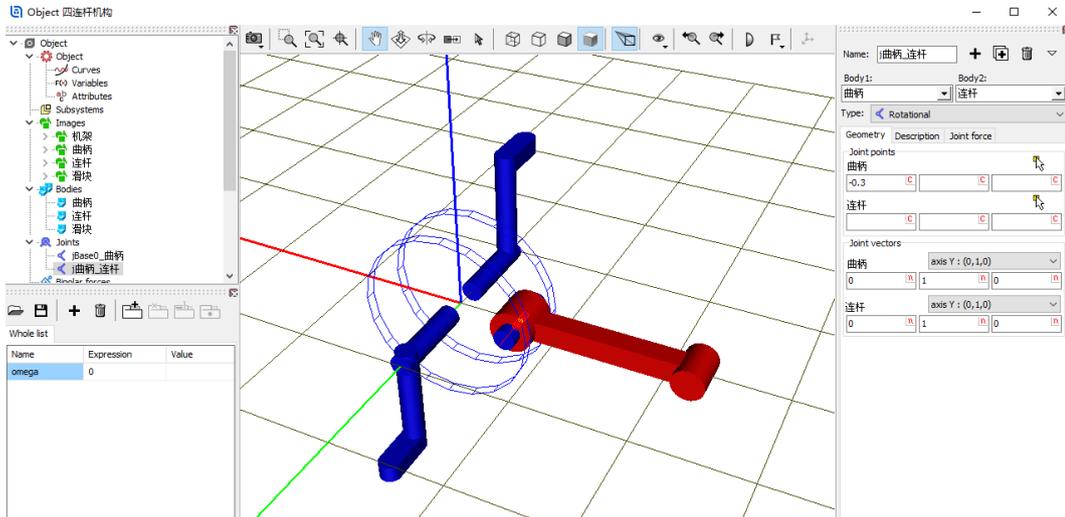


图 2-56

- 13) 切换到 **Description** 页面，将 **Value** 值设为 -55 ($^{\circ}$)，如图 2-57。表示将连杆相对曲柄转动一定角度作为初始状态。注意对于每一个 Joint，在局部视图模式下，显示的都是 Joint 连接的第一个物体的局部坐标系。

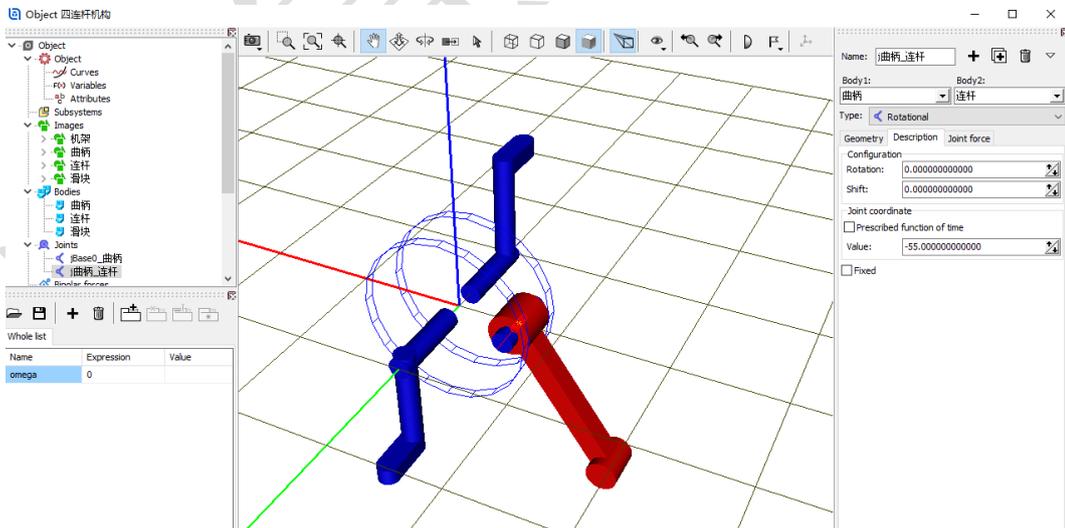


图 2-57

- 14) 创建第三个铰，**Body1** 选择**连杆**，**Body2** 选择**滑块**，**Type** 选择 **Rotational**，**Joint points** 分别为 $(-0.8, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，**Joint vector** 都选择 **Y** 轴，如图 2-58。表示将滑块的原点与连杆局部坐标系的点 $(-0.8, 0, 0)$ 重合，滑块绕通过该点与连杆局部坐标系 Y 轴平行的 Y' 轴可以转动，并且滑块的 Y 轴与之平行（重合）。

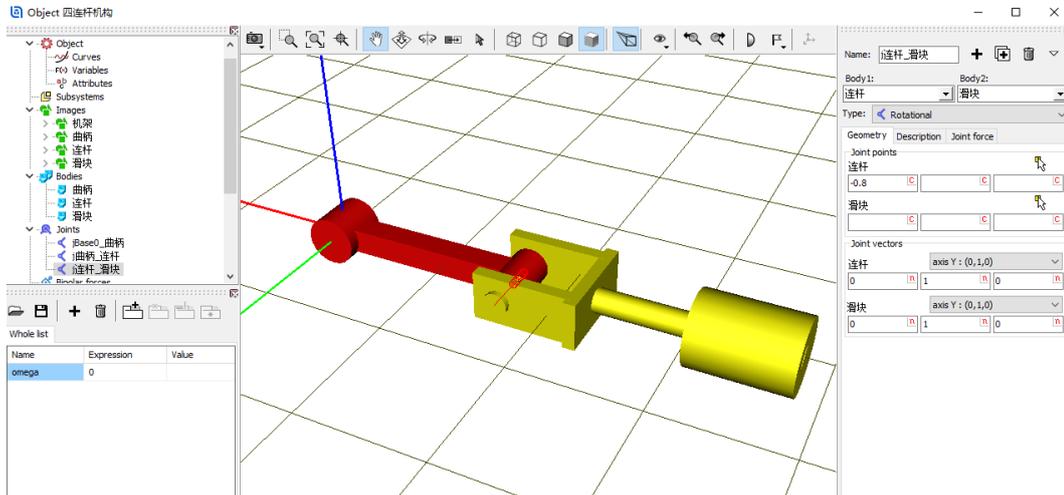


图 2-58

- 15) 切换到 **Description** 页面，将 **Value** 值设为 **25**（度），如图 2-59。表示将滑块相对连杆转动一定角度作为初始状态。注意对于每一个 Joint，在局部视图模式下，显示的都是 Joint 连接的第一个物体的局部坐标系。

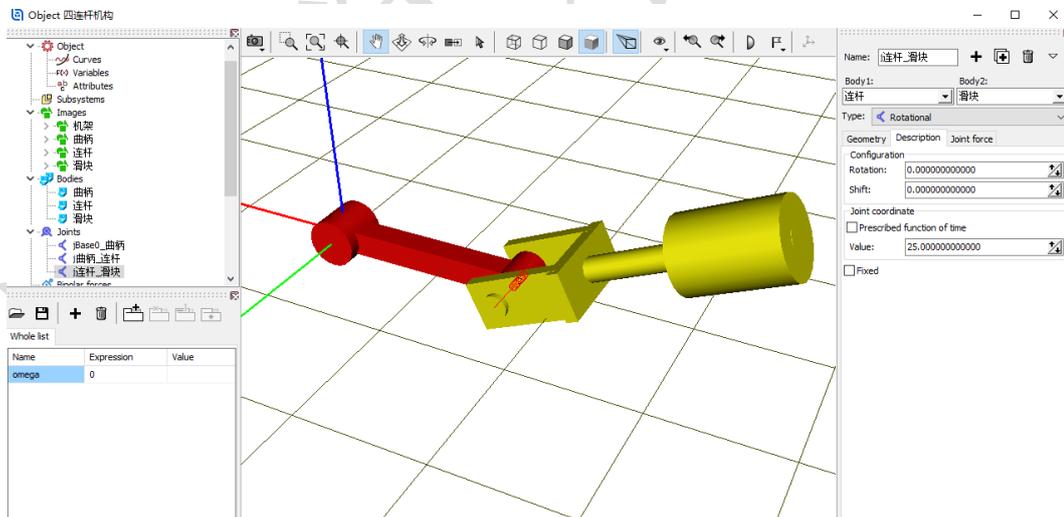


图 2-59

- 16) 创建第四个铰，Body1 选择 Base0，Body2 选择滑块，Type 选择 Translational，Joint points 分别为 (0, 0, 0.6) 和 (0, 0, 0)，Joint vector 都选择 X 轴，如图 2-60。表示将滑块的原点与总体坐标系的点 (0, 0, 0.6) 重合，滑块沿通过该点与总体坐标系 X 轴平行的 X' 轴可以平动，并且滑块的 X 轴与之平行 (重合)。

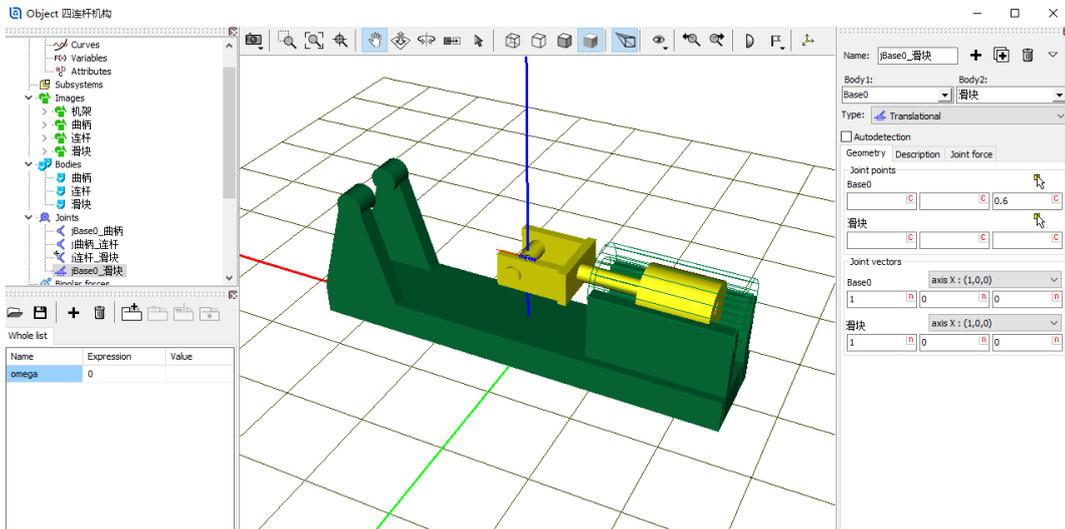


图 2-60

- 17) 在动画窗口点右键，选择 Mode → Object，可切换为整体模式，显示当前模型所有物体。也可点击动画窗口工具栏的  图标进行切换 ()，如图 2-61。

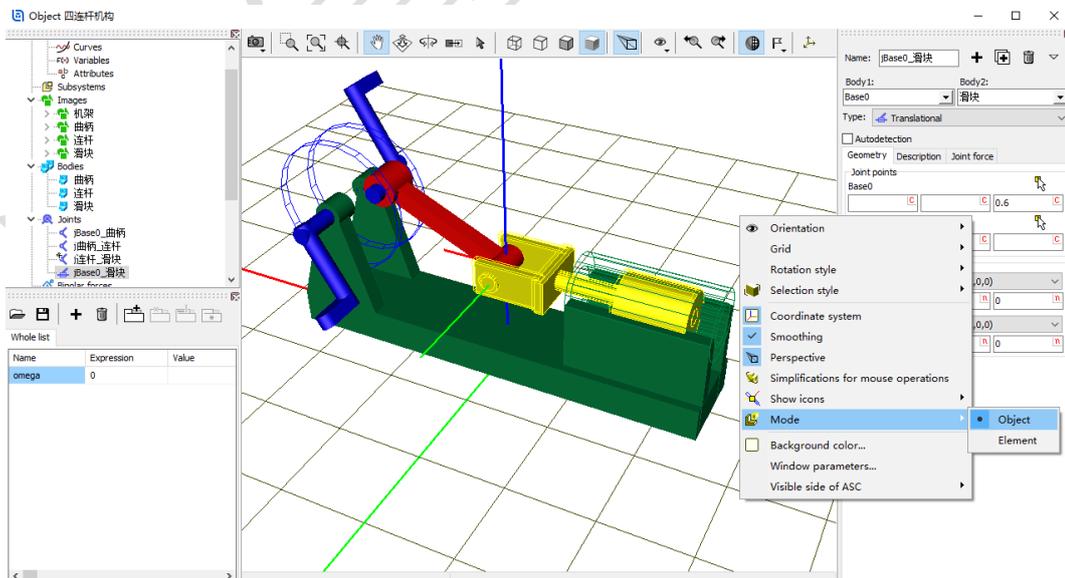


图 2-61

- 18) 在左侧模型树中，分别点击 **Images**、**Bodies** 和 **Joints** 前面的  图标可以将其中的元素折叠起来；点击 **Summary**，在右侧交互界面会有提示模型是否有逻辑错误（一般的警告可以忽略），如图 2-62。

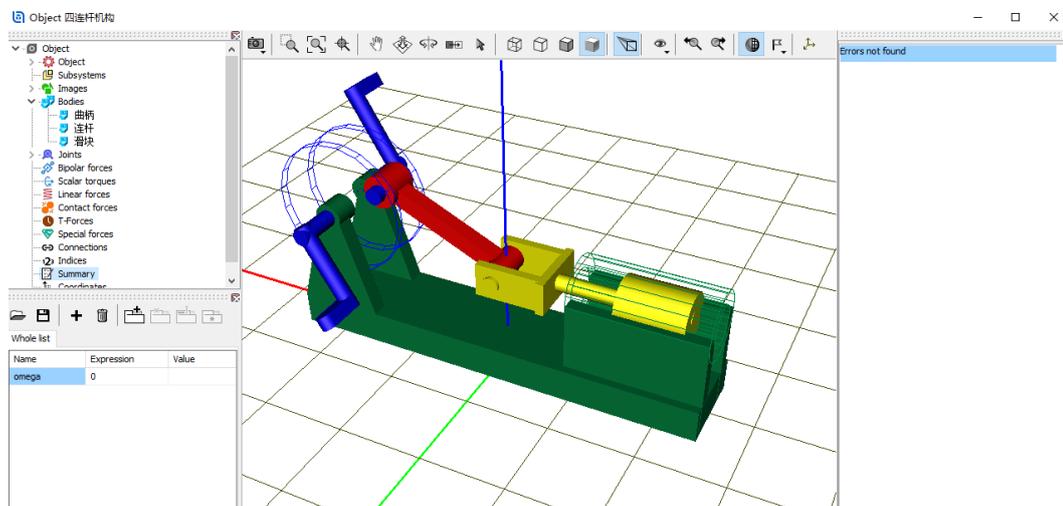


图 2-62

- 19) 选择主菜单 **File** → **Save**，保存模型。建议读者养成在建模过程中经常保存模型的习惯。

至此，我们完成了一个“曲柄滑块”机构（由四连杆演化而来）的建模。

2.2.2 仿真

- 1) 选择 **UM Input** 程序的主菜单 **Object** → **Simulation** 运行仿真程序并自动加载当前模型（或直接点击工具栏按钮 ）。
- 2) 待 **UM Simulation** 仿真程序运行后，关闭 **UM Input** 程序。
- 3) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板。（或直接点击工具栏按钮  或按 F9 键）
- 4) 在 **Solver** 页面，设置求解器为 **Park**，仿真时间 **Time** 为 **30** (s)，数据步长改为 **0.005** (s)，勾选 **Computation of Jacobian**，如图 2-63。

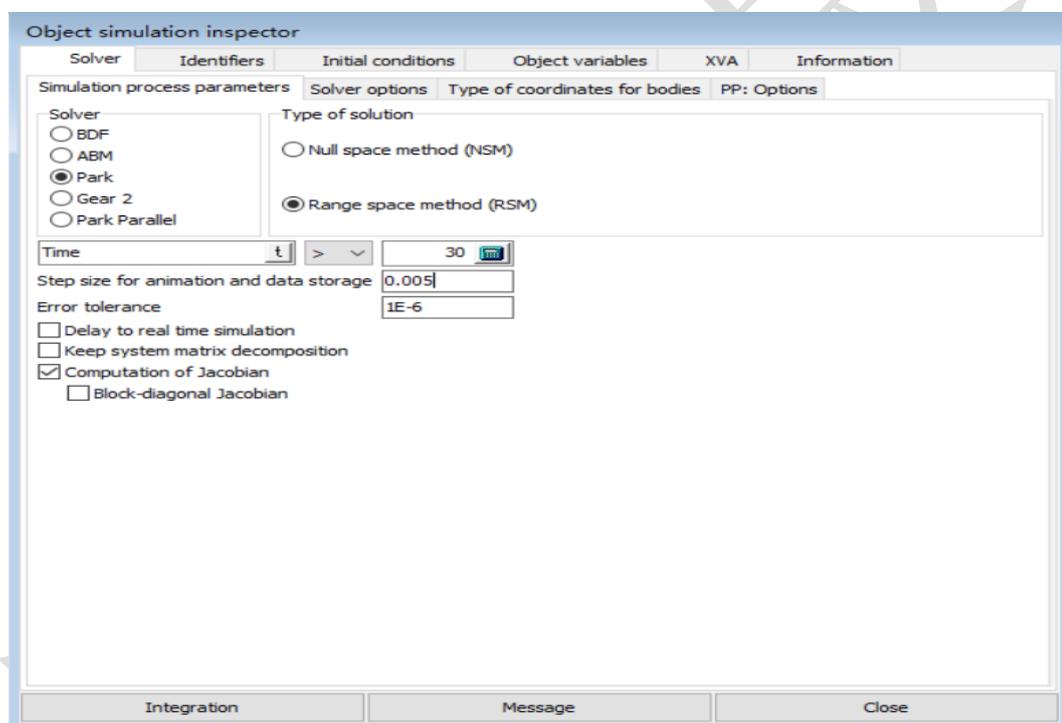


图 2-63

- 5) 切换到 **Identifier** 页面，给 **omega** 赋值 **1** (rad/s)，如图 2-64。

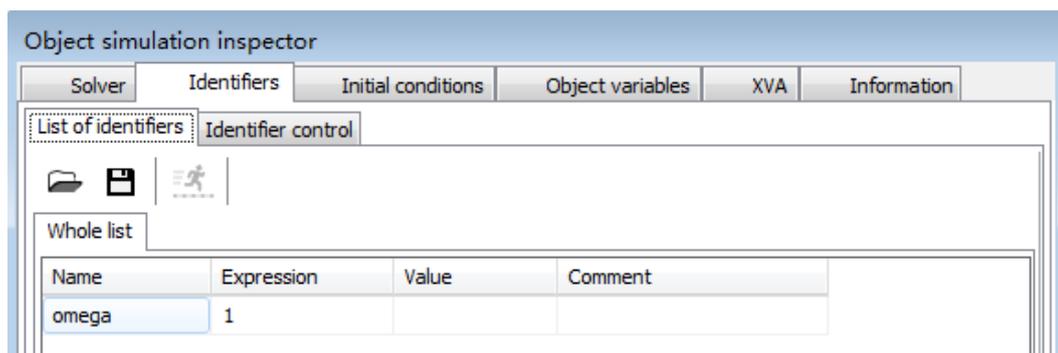


图 2-64

- 6) 切换到 **Initial conditions** 页面，可以看到有两个铰的初始坐标不为 0，这是因为我们在建模时设置了一定的初始转角。由于系统存在闭环，因此有一个铰会被切断，软件自动用约束方程描述，一般不需要处理。

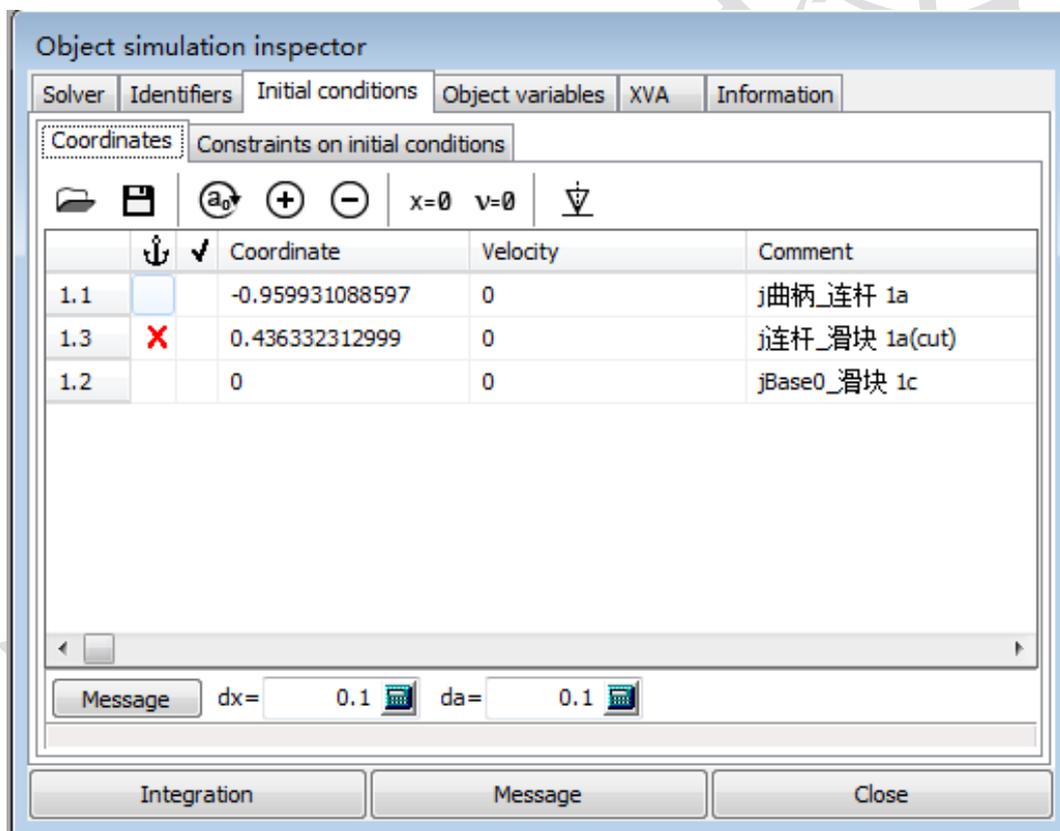


图 2-65

- 7) 点击 a_0 按钮可以通过“牛顿-拉弗逊”迭代计算出精确的初始条件。可见，这里显示系统总自由度数目为 0，这是因为曲柄的运动是用时间函数描述的，那么它的运动是已知的，由此决定了系统中每一个体的运动。

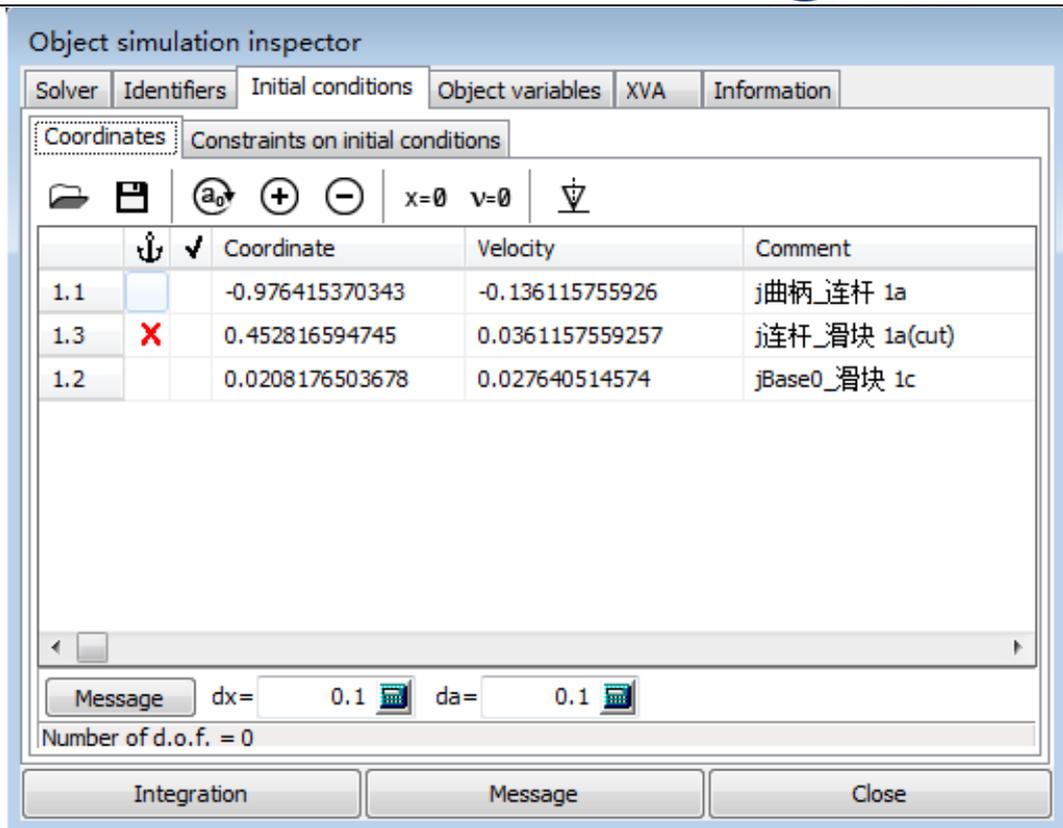


图 2-66

- 8) 按钮 **Integration**，执行仿真，在动画窗口可以看到该机构各构件的运动情况。

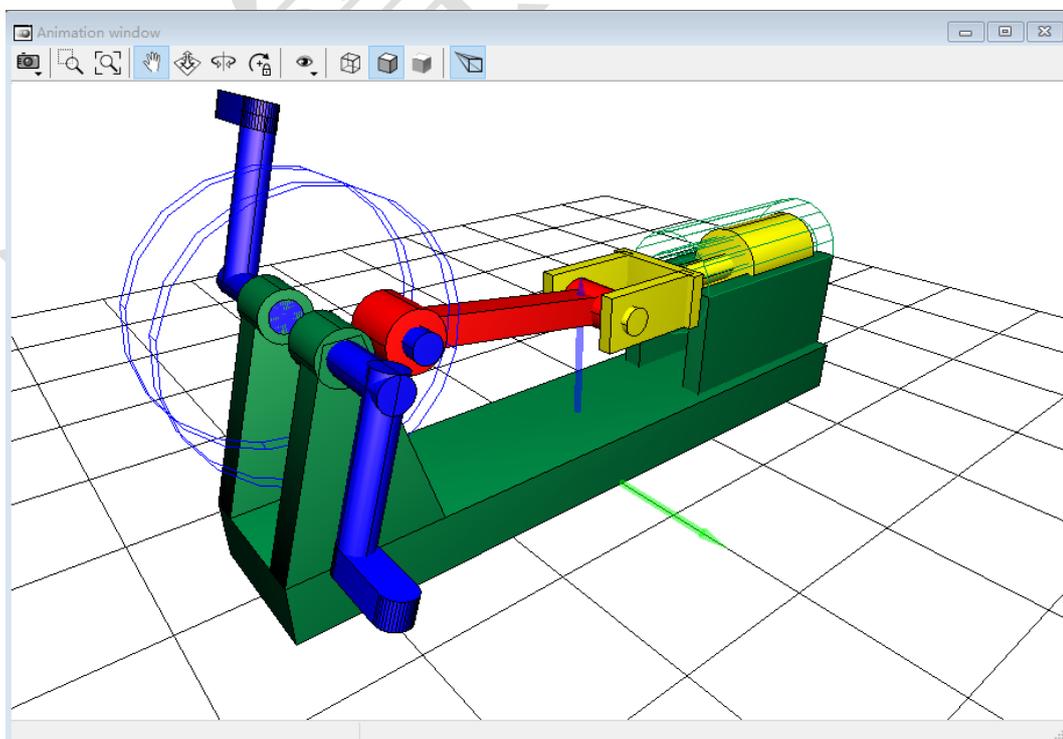


图 2-67

- 9) 计算完毕后, 会自动弹出 **Simulation over** 提示; 若要中途停止仿真, 可点击进度条的按钮  或按键 **ESC**。然后在弹出界面点击按钮 **Interrupt**, 终止仿真。
- 10) 选择主菜单 **Tools** → **Graphical window...** 打开一个绘图窗口 (或点击工具栏按钮 ) , 用鼠标调整其大小和位置, 如图 2-68。

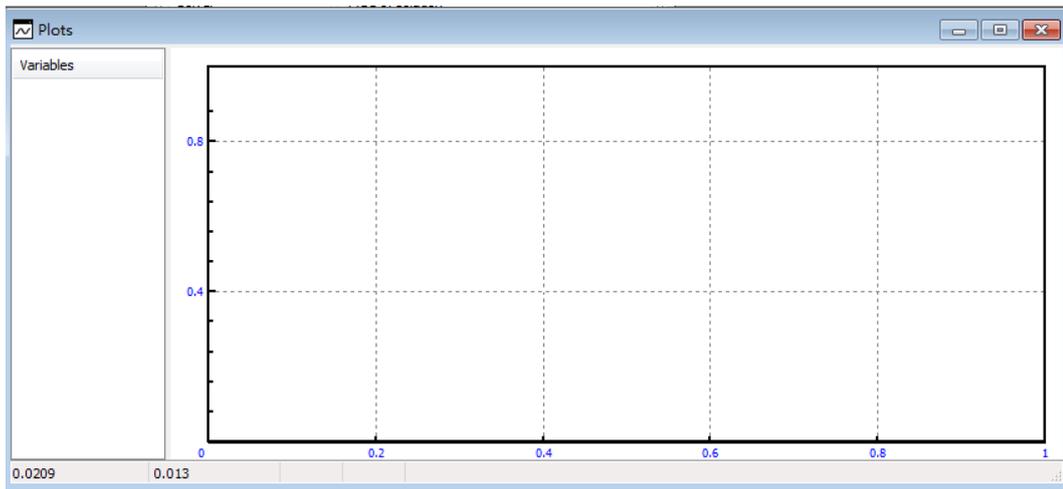


图 2-68

- 11) 选择菜单 **Tools** → **Wizard of variables...** 打开变量向导 (或点击工具栏按钮 )。
- 12) 在变量向导左侧勾选物体 **滑块**, 右侧 **Linear variables** 页面缺省选择 **Coordinate**, 分量 **X**, 然后点右侧的  图标, 创建变量 **r:x (滑块)**, 表示滑块原点相对总体坐标系 X 轴的水平动变量, 如图 2-69。

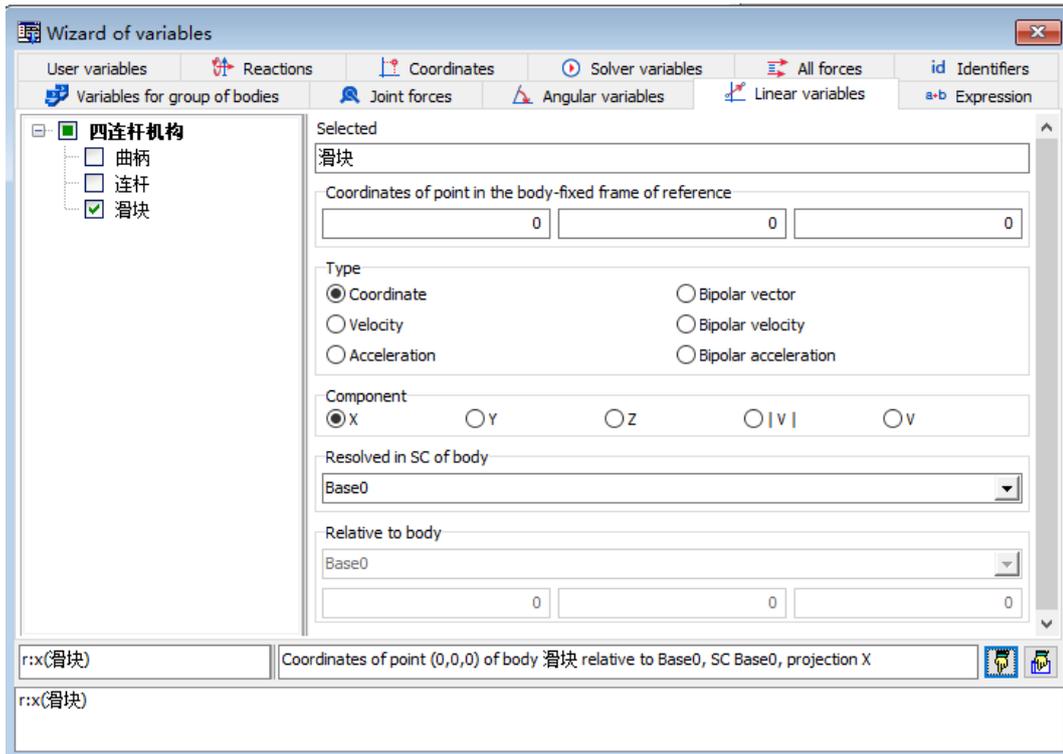


图 2-69

- 13) 将该变量选中并拖入到绘图窗口。
- 14) 点击按钮 **Integration**，再次进行仿真计算，绘图窗口显示结果如图 2-70。

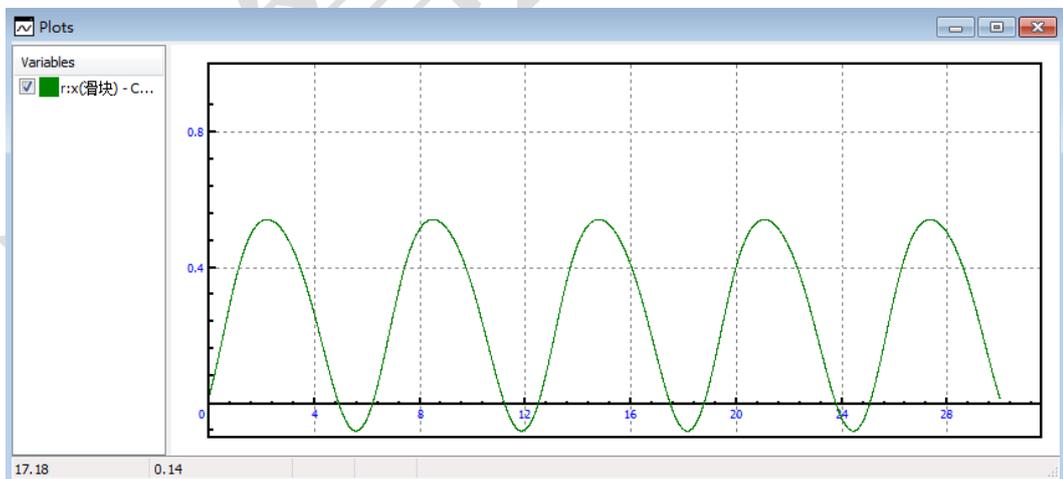


图 2-70

2.3 实例三：椭圆规

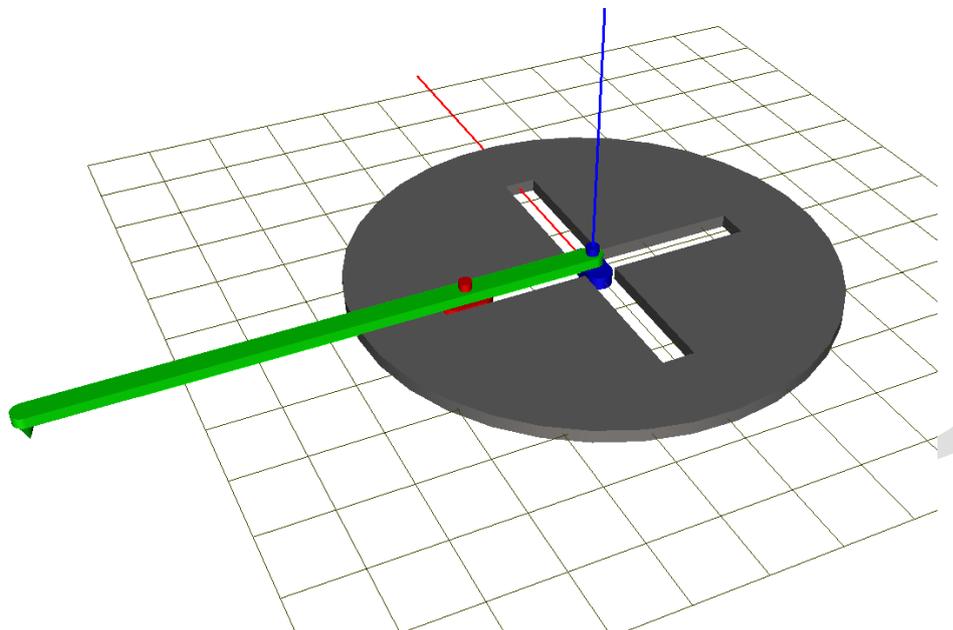


图 2-71

图 2-71 所示为一个传统的椭圆规模型，该模型由四个刚体（底板、横滑标、纵滑标和旋转杆）组成。惯性参考系原点位于底板底面，红色为 **X** 轴，绿色为 **Y** 轴，蓝色为 **Z** 轴。其中底板固定在地面，没有自由度，横滑标可沿底板 **Y** 轴向平动，纵滑标可沿底板 **X** 轴向平动，而旋转杆相对纵、横两个滑标都可转动。因此形成一个闭环系统，共有一个独立自由度。

本例用到的模块：**UM Base**。

2.3.1 建模

- 1) 运行 **UM Input** 程序。
- 2) 选择主菜单 **File** → **New object**，新建一个 UM 模型。
- 3) 选择主菜单 **File** → **Save as...**，指定模型路径及名称“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\椭圆规**”。
- 4) 选择主菜单 **Edit** → **Read from file**，依次读入“**D:\UM 培训教程\几何素材\椭圆规**”文件夹下的**底板.img**、**横滑标.img**、**纵滑标.img** 和**旋转杆.img** 四个几何图形，如图 2-72。

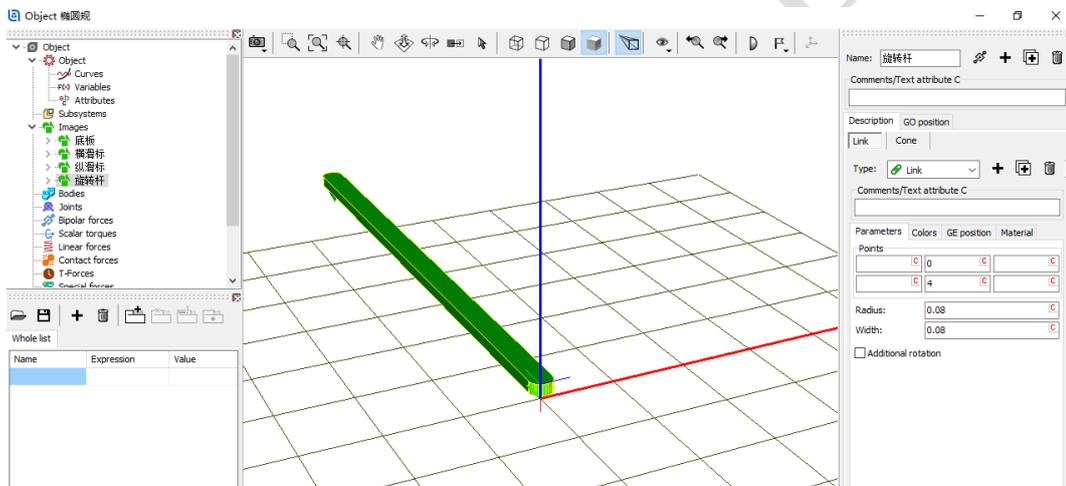


图 2-72

- 5) 由于**底板**没有自由度，所以不必要为其创建刚体，可直接将其赋给 **Base0**。如图 2-73，先在左侧模型树选中 **Object**，然后在右侧交互界面 **General** 页面下方 **Scene image** 处的下拉菜单中选择几何**底板**。

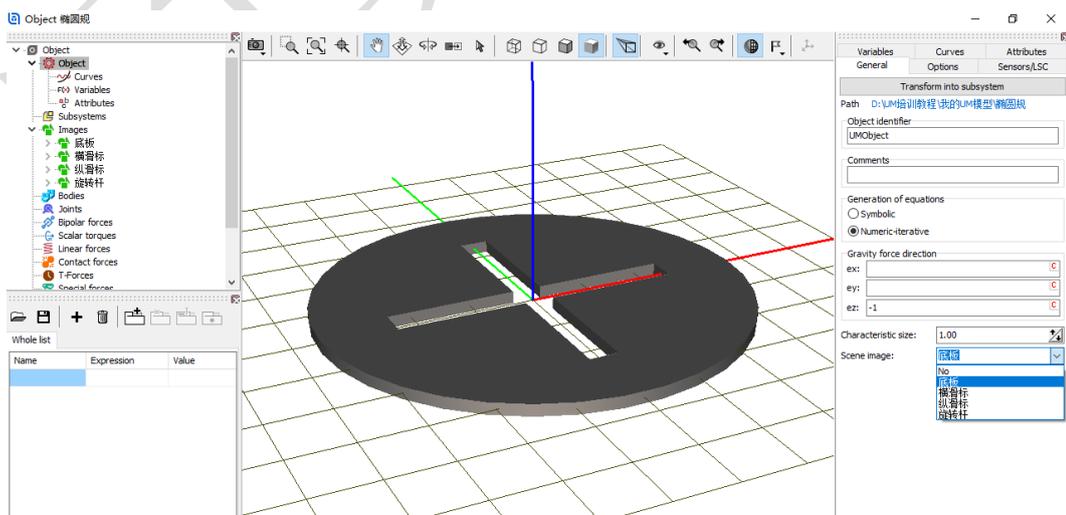


图 2-73

- 6) 创建第一个刚体**横滑标**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**横滑标**，设置质量 (1) 和转动惯量 (1, 1, 1) 参数，如图 2-74。

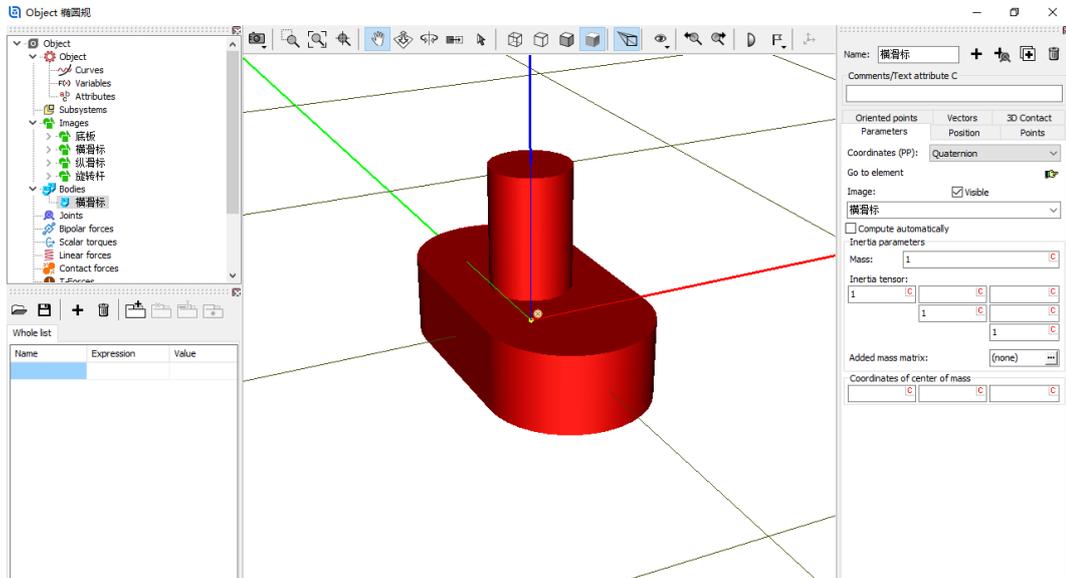


图 2-74

- 7) 点击右侧面板上方的按钮 ，复制生成第二个刚体，重命名为**纵滑标**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**纵滑标**，如图 2-75。

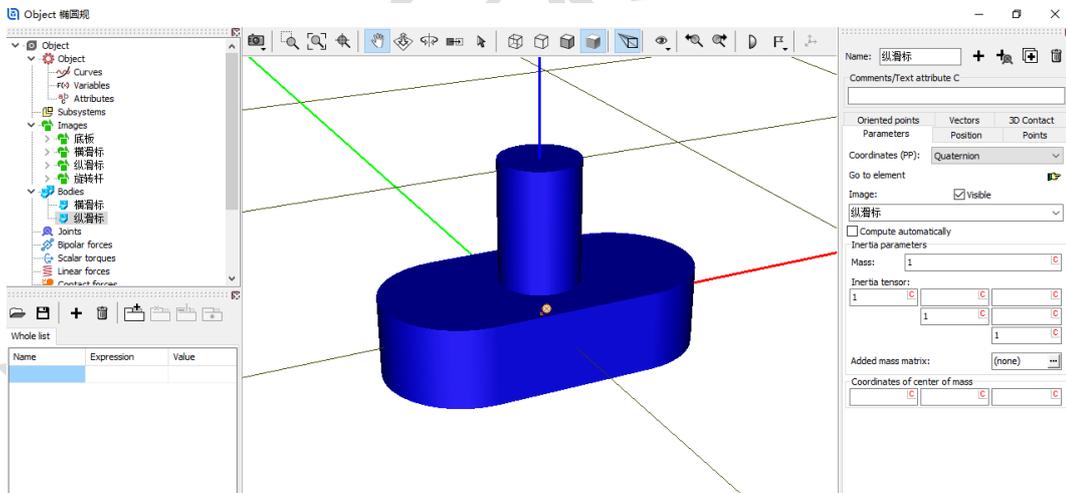


图 2-75

- 8) 点击右侧面板上方的按钮 ，复制生成第三个刚体，重命名为**旋转杆**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**旋转杆**，设置质心坐标 $(0, 2, 0)$ ，如图 2-76。

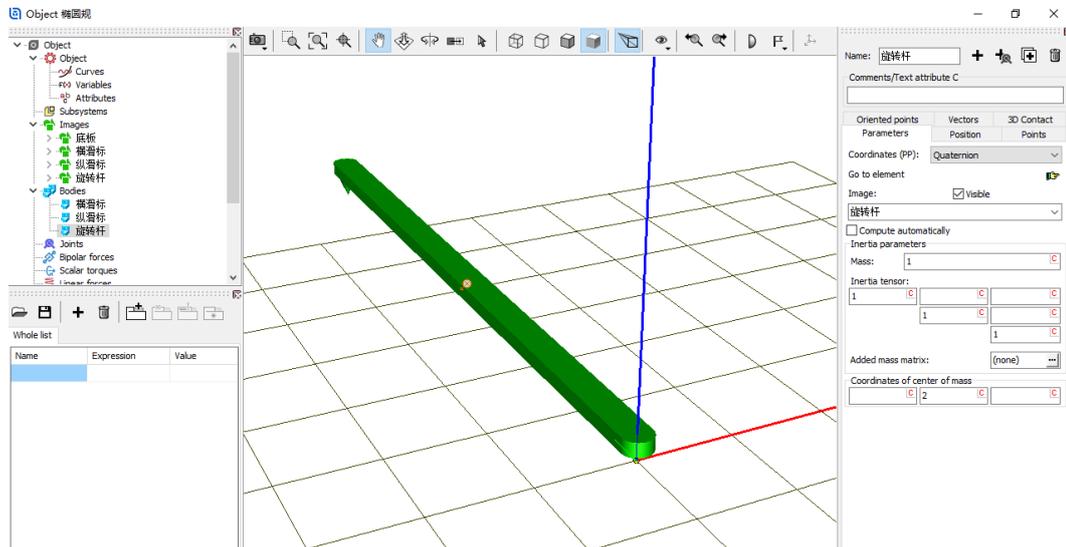


图 2-76

- 9) 创建第一个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择**横滑标**，**Type** 选择 **Translational**，**Joint points** 分别为 $(0, 1, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，**Joint vector** 都选择 **Y 轴**，如图 2-77。表示将横滑标的原点与总体坐标系的点 $(0, 1, 0)$ 重合，横滑标沿总体坐标系 Y 轴可以平动，并且横滑标的 Y 轴与之平行（重合）。

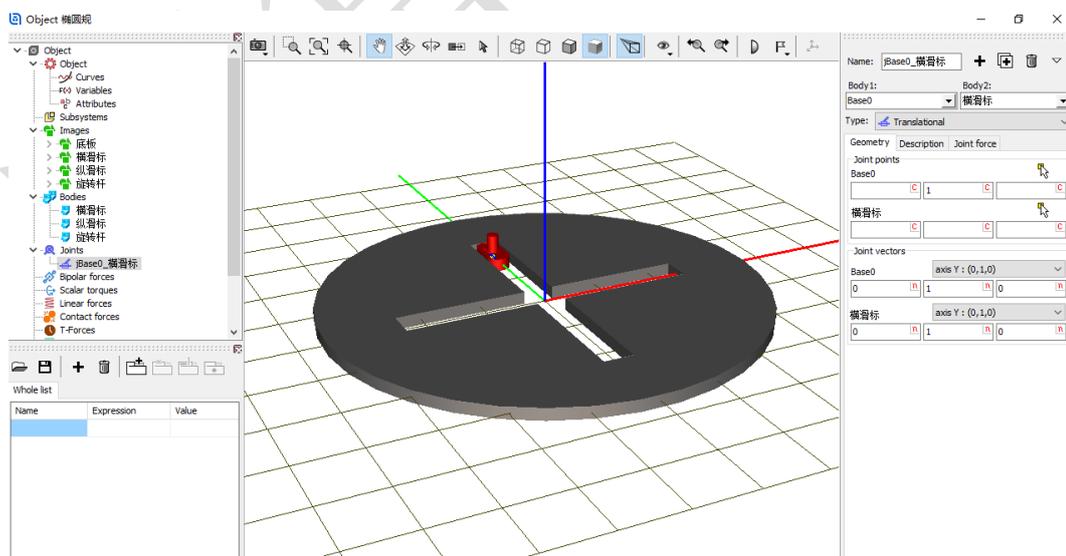


图 2-77

- 10) 点击右侧面板上方的按钮 ，复制生成第二个铰，**Body2** 选择纵滑标，**Joint points** 分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，**Joint vector** 都选择 **X** 轴，如图 2-78。表示将横滑标的原点与总体坐标系的原点重合，纵滑标沿总体坐标系 X 轴可以平动，并且纵滑标的 X 轴与之平行（重合）。

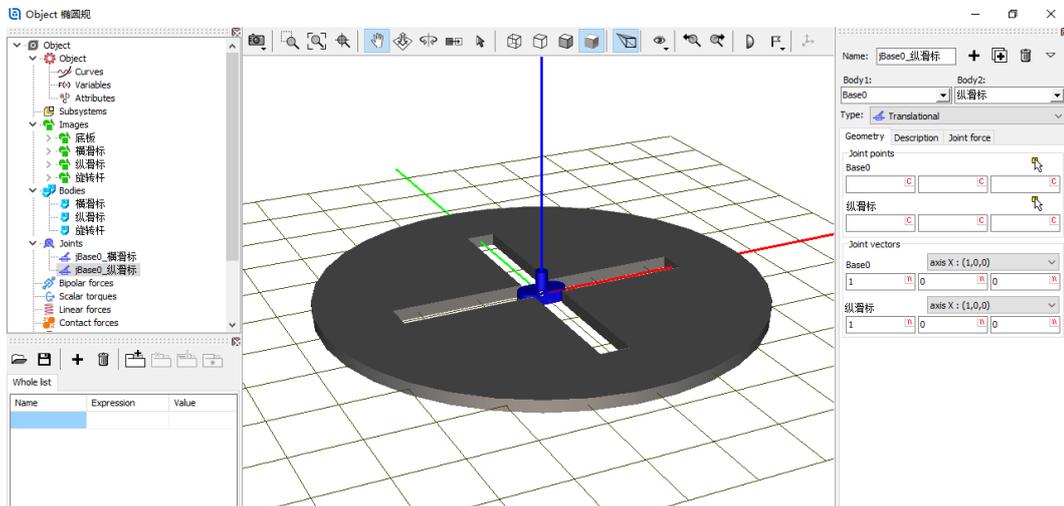


图 2-78

- 11) 切换到 **Description** 页面，勾选将 **Prescribed function of time**，在弹出窗口点击是(Y)，然后在下方数据框里输入表达式 $\sin(t)$ ，回车，定义纵滑标沿 **X** 轴做正弦运动，幅值为 **1** (m)，如图 2-79。

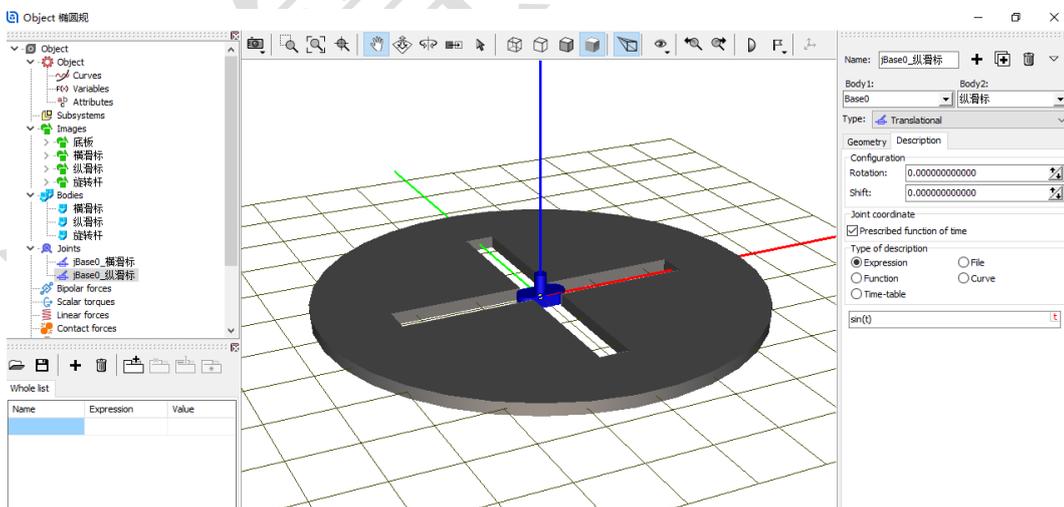


图 2-79

- 12) 创建第三个铰，**Body1** 选择横滑标，**Body2** 选择旋转杆，**Type** 选择 **Rotational**，**Joint points** 分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 1, 0)$ ，**Joint vector** 都选择 Z 轴，如图 2-80。表示将旋转杆的点 $(0, 1, 0)$ 与横滑标原点重合，旋转杆绕横滑标的 Z 轴可以转动，并且旋转杆的 Z 轴与之平行（重合）。

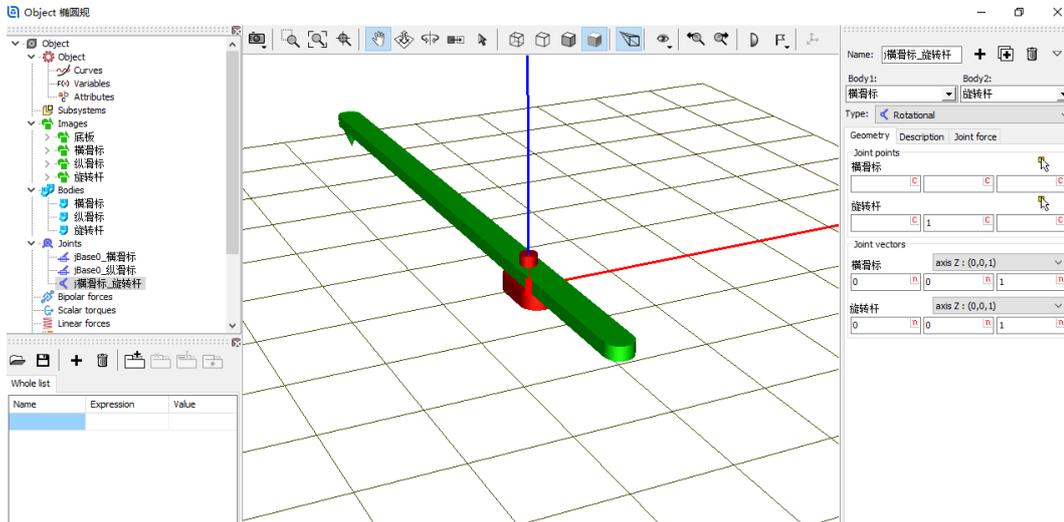


图 2-80

- 13) 点击右侧交互界面上方的按钮 ，复制生成第四个铰，**Body1** 选择纵滑标，**Joint points** 分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，如图 2-81。表示将旋转杆的原点与横滑标的原点重合，旋转杆绕横滑标的 Z 轴可以转动，并且旋转杆的 Z 轴与之平行（重合）。

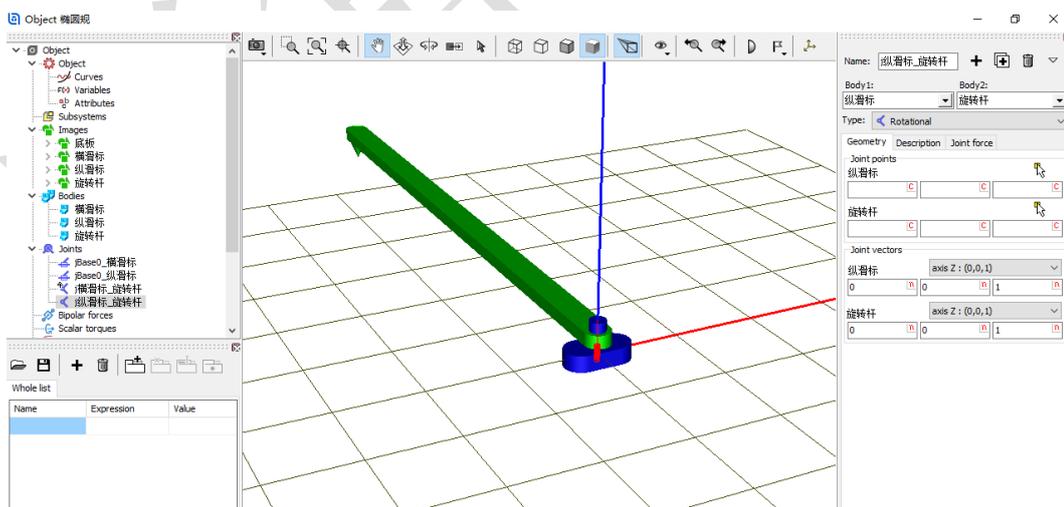


图 2-81

- 14) 在动画窗口点**右键**，选择 **Mode** → **Object**，可切换为整体模式，显示当前模型所有物体。也可点击中间窗口工具栏的  图标进行切换 ()。

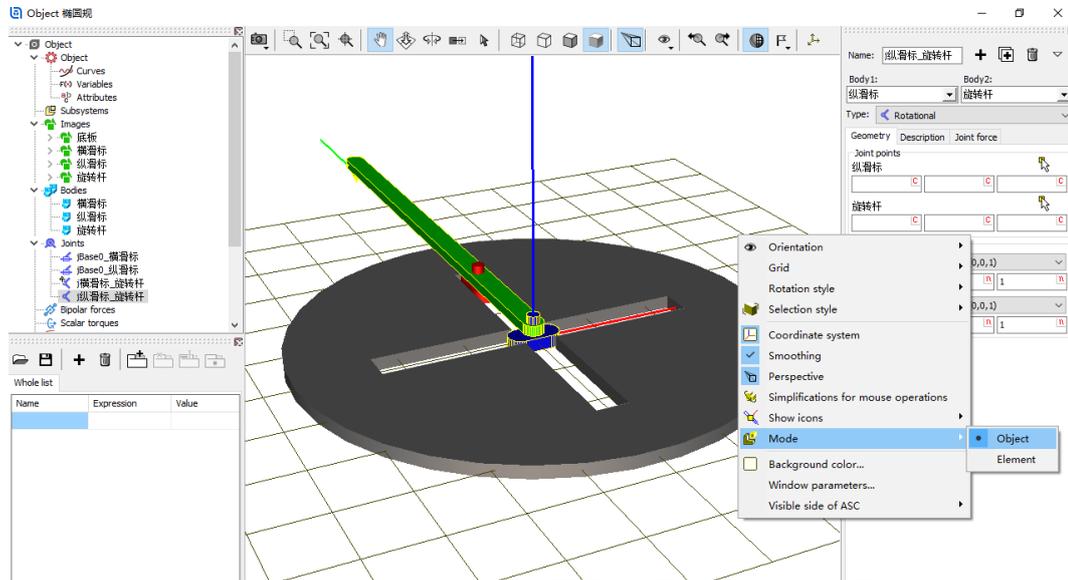


图 2-82

- 15) 在左侧模型树中，分别点击 **Images**、**Bodies** 和 **Joints** 前面的  图标可以将其中的元素折叠起来；点击 **Summary**，在右侧交互界面会有提示模型是否有逻辑错误（一般的警告可以忽略）。
- 16) 选择主菜单 **File** → **Save**，保存模型，然后关闭 **UM Input** 程序。建议读者养成在建模过程中经常保存模型的习惯。

至此，我们完成了一个椭圆规的建模。

2.3.2 仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 仿真程序。
- 2) 选择主菜单 **File** → **Open...**，弹出文件浏览器，然后定位到路径“**D:\UM 培训模型\我的 UM 模型**”，这时可以看到该路径下有三个模型，鼠标选中任意一个，可以预览模型。选中**椭圆规**，点击 **OK**。

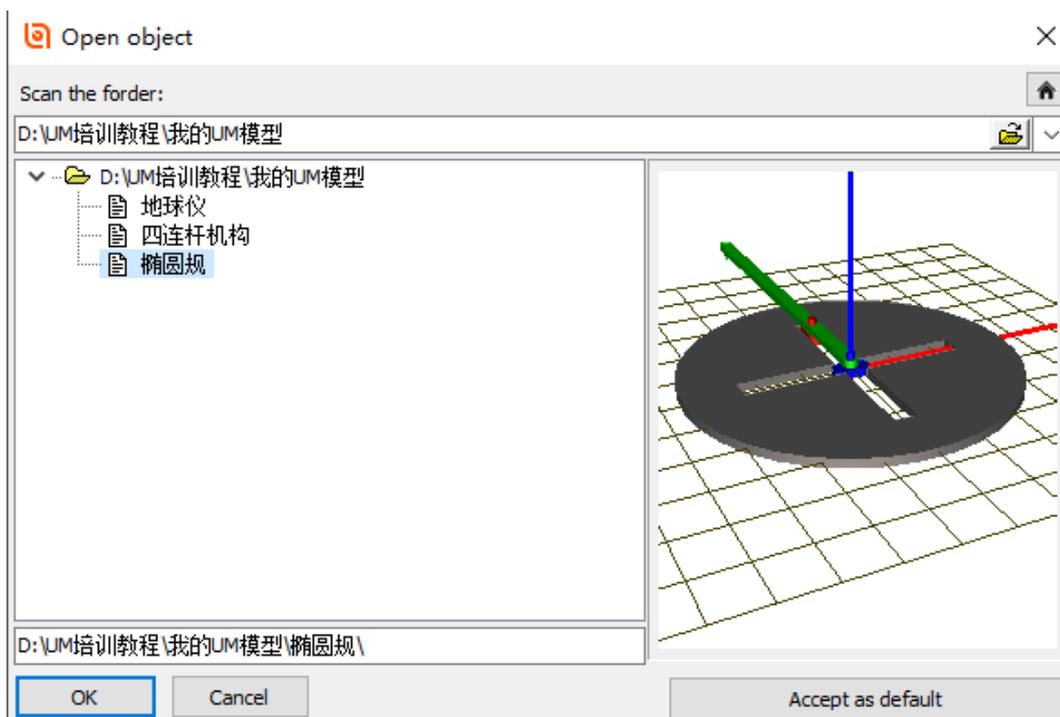


图 2-83

- 3) 拖动鼠标自由调整动画窗口的大小和位置（一般不要最大化）。
- 4) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板（或直接点击工具栏按钮 ）。
- 5) 在 **Solver** 页面，默认求解器为 **Park**，将仿真时间 **Time** 设置为 **20** (s)，如图 2-84。
- 6) 选择菜单 **Tools** → **Wizard of variables...** 打开变量向导（或点击工具栏按钮 ）。
- 7) 在变量向导左侧勾选物体**旋转杆**，右侧输入局部坐标 **(0, 4, 0)**，选择 **Coordinate**，分量 **V**，然后点右侧的  图标，创建变量 **r:v (旋转杆)**，表示旋转杆局部坐标系中的点 **(0, 4, 0)** 在总体坐标系中的运动轨迹，如图 2-85。

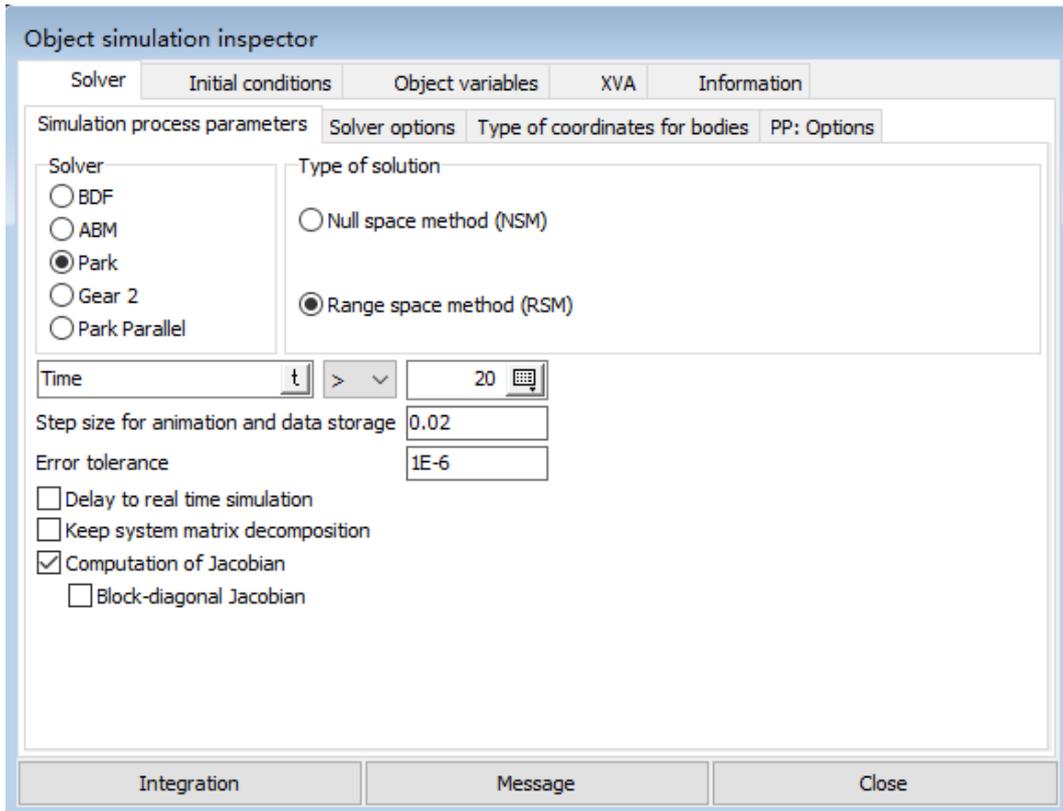


图 2-84

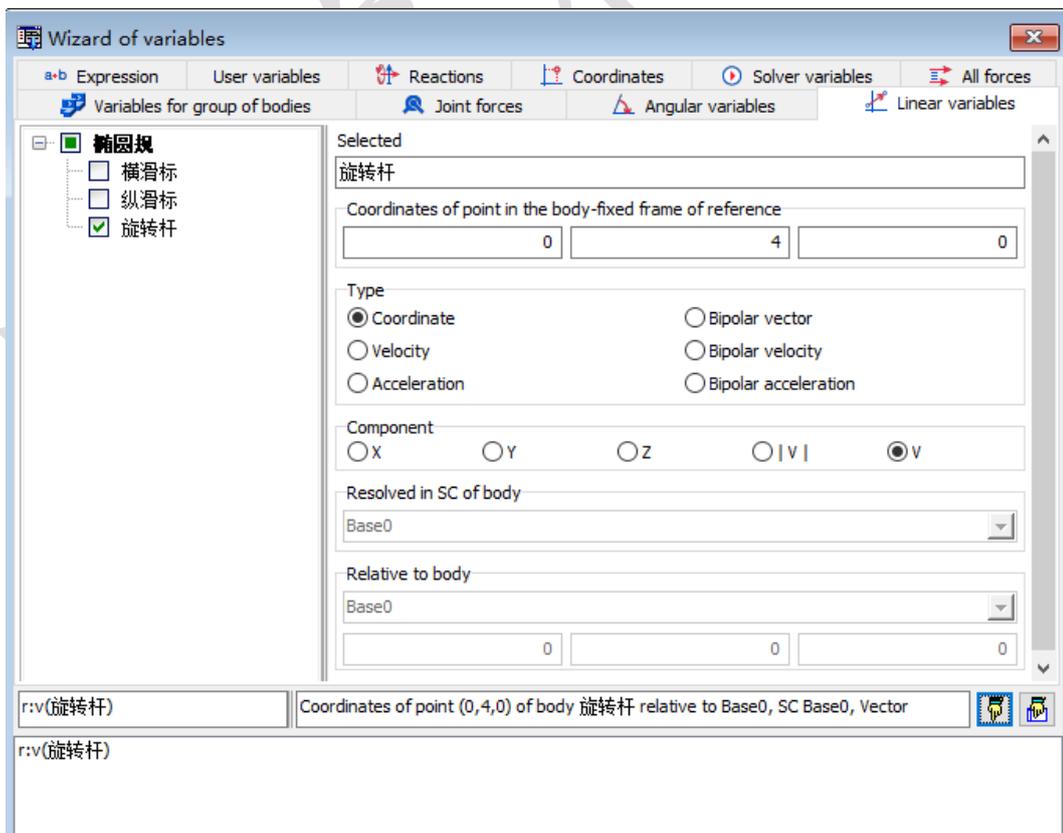


图 2-85

8) 将该变量选中并拖入到动画窗口，然后关闭变量向导。

- 9) 点击按钮 **Integration**，进行仿真计算，可以看到旋转杆上标记点的运动轨迹为一个椭圆，默认为灰色显示，如图 2-86。

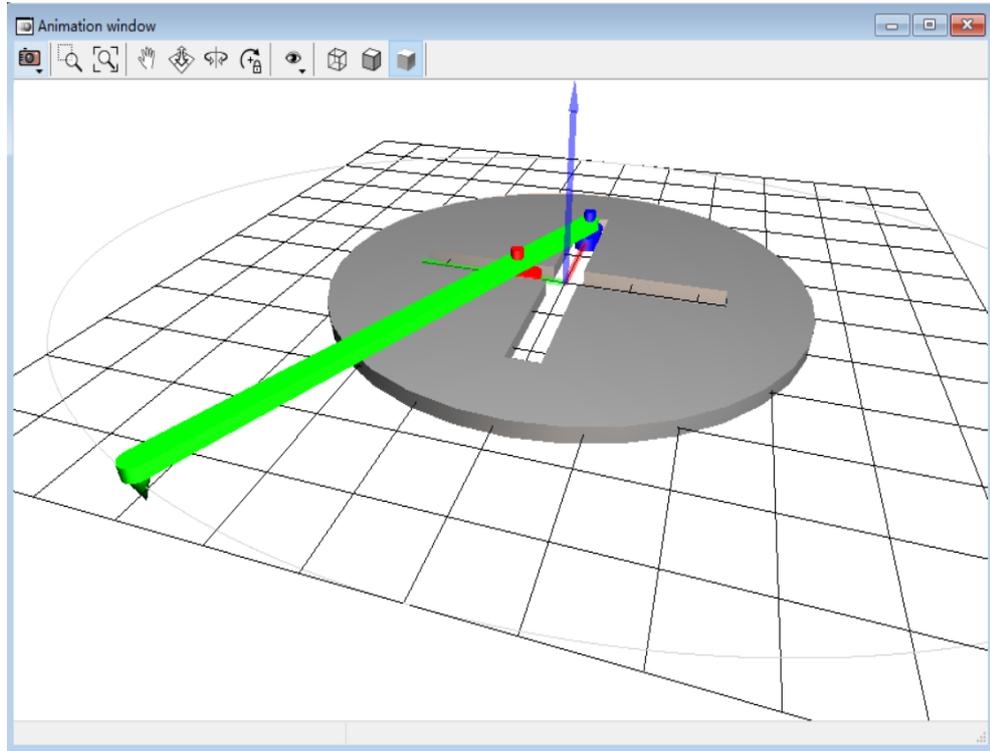


图 2-86

- 10) 暂停仿真，在动画窗口点**右键**，选择 **Position of vector list** → **Top**，这样在动画窗口上方就显示了该变量，如图 2-87。

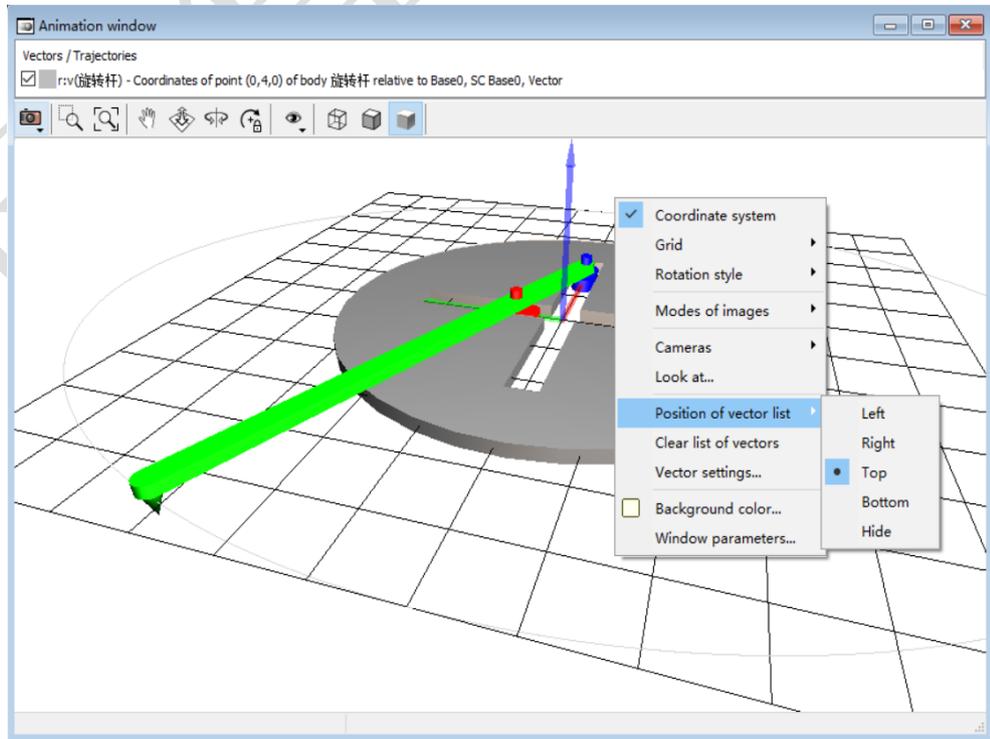


图 2-87

- 11) 双击变量 **r:v(旋转杆)**，将颜色修改为比较醒目的颜色（**红色**），然后继续仿真。
- 12) 计算完毕后，会自动弹出 **Simulation over** 提示，如图 2-88，点击**确定**，然后在弹出界面点击按钮 **Interrupt**，终止仿真。

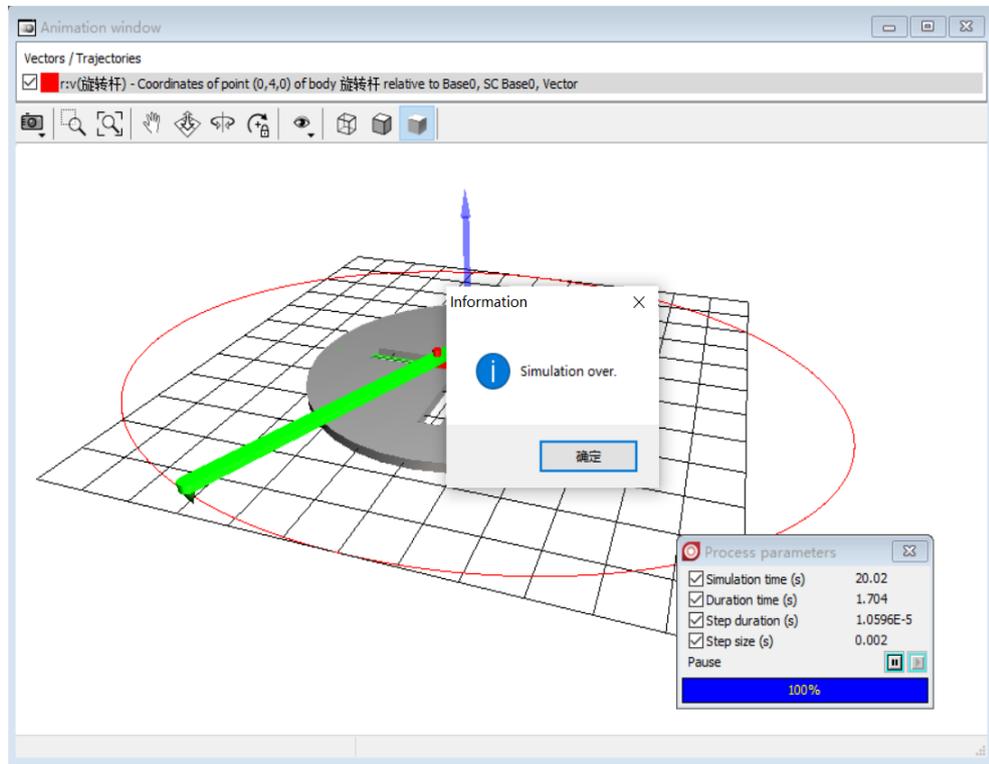


图 2-88

- 13) 这里介绍一下录制仿真动画的方法：由于当前版本的图形引擎存在非 ASCII 码兼容性问题，因此请先将 **UM Simulation** 程序关闭，然后把**椭圆规**模型（整个文件夹）复制到一个不含中文字符及空格的目录下，并以拉丁字母重命名，如：**D:\Trammel**。
- 14) 运行 UM Simulation 程序，打开 **D:\Trammel**。
- 15) 点击动画窗口工具栏第一个按钮 ，选择 **Save animation...**，如图 2-89。



图 2-89

- 16) 在弹出窗口勾选 **Save animation** 和 **Codec** 下拉菜单中选择 **Lagarith Lossless Codec** 或其他选项，然后点击 **Apply**，如图 2-90。

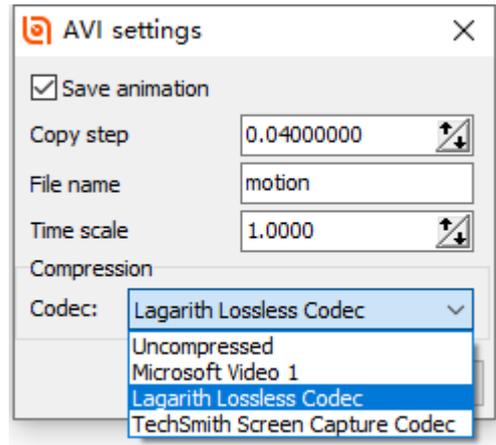


图 2-90

- 17) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板（或直接点击工具栏按钮 ），然后点击按钮 **Integration**，进行仿真计算，计算过程中不要关闭动画窗口，直到计算完毕，点击**确定**和 **Interrupt**，会自动在模型目录下生成动画文件 **motion.avi**。

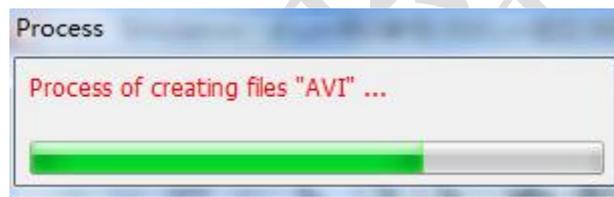


图 2-91



图 2-92

- 18) 关闭 **UM Simulation** 仿真程序（仿真界面的动画窗口不必关，否则下次打开时需要重新配置）。

2.4 实例四：刚柔耦合系统

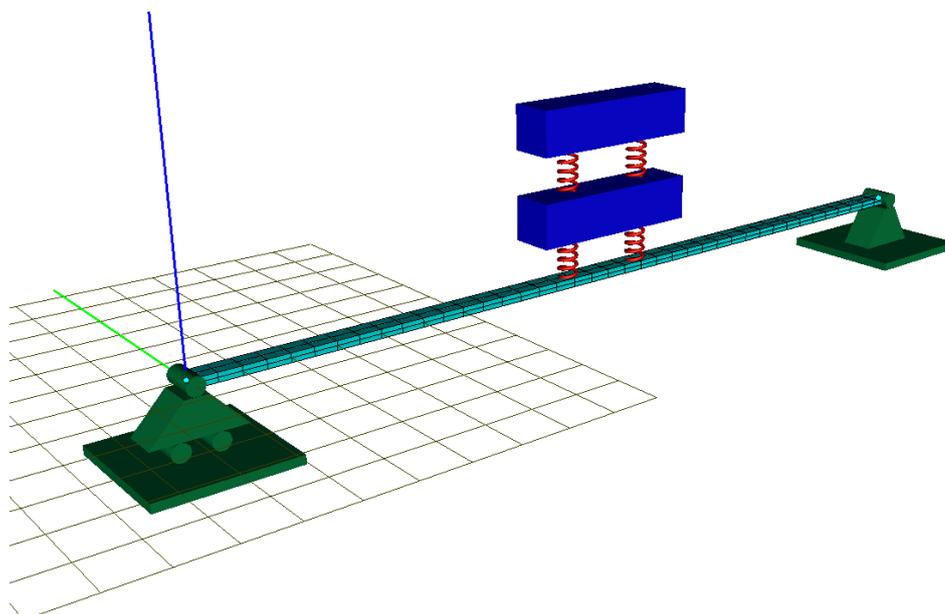


图 2-93

图 2-93 所示为一个典型的刚柔耦合系统，该模型由三个刚体（支座、刚体 A、刚体 B 和柔性梁）组成。惯性参考系原点位于柔性梁中性层一端，红色为 X 轴，绿色为 Y 轴，蓝色为 Z 轴。其中支座固定在地面，仅作示意，没有自由度，刚体 A 和刚体 B 都具有沿总体坐标系 Z 轴向平动的自由度，柔性梁与支座铰接，刚体 A 与柔性梁通过两个弹簧阻尼器连接，刚体 B 和刚体 A 也通过两个弹簧阻尼器连接。

本例用到的模块：UM Base、UM FEM。

2.4.1 准备柔性体

- 1) 运行 **UM Input** 程序，新建一个 UM 模型，另存为“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\刚柔耦合系统**”。
- 2) 复制“**D:\UM 培训教程\FEM 素材**”下的文件夹 **Beam** 到“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\刚柔耦合系统**”。**Beam** 文件夹里包含一个 UM 柔性体素材文件 **input.fum**，该文件可以由 **ANSYS**、**ABAQUS** 或其他有限元软件得到。请读者关注微信公众号“**同算科技**”，发送消息“**030**”或“**031**”，可查看从 **ANSYS** 或 **ABAQUS** 导入模型到 UM 的基本方法和流程，这里不再赘述。

备注：*ANSYS-UM 接口可直接生成最终文件 input.fss，而 ABAQUS-UM 接口目前只能生成中间文件 input.fum。*



图 2-94

- 3) 选择菜单 **Tools** → **Wizard of flexible subsystem**，打开柔性体子系统向导。

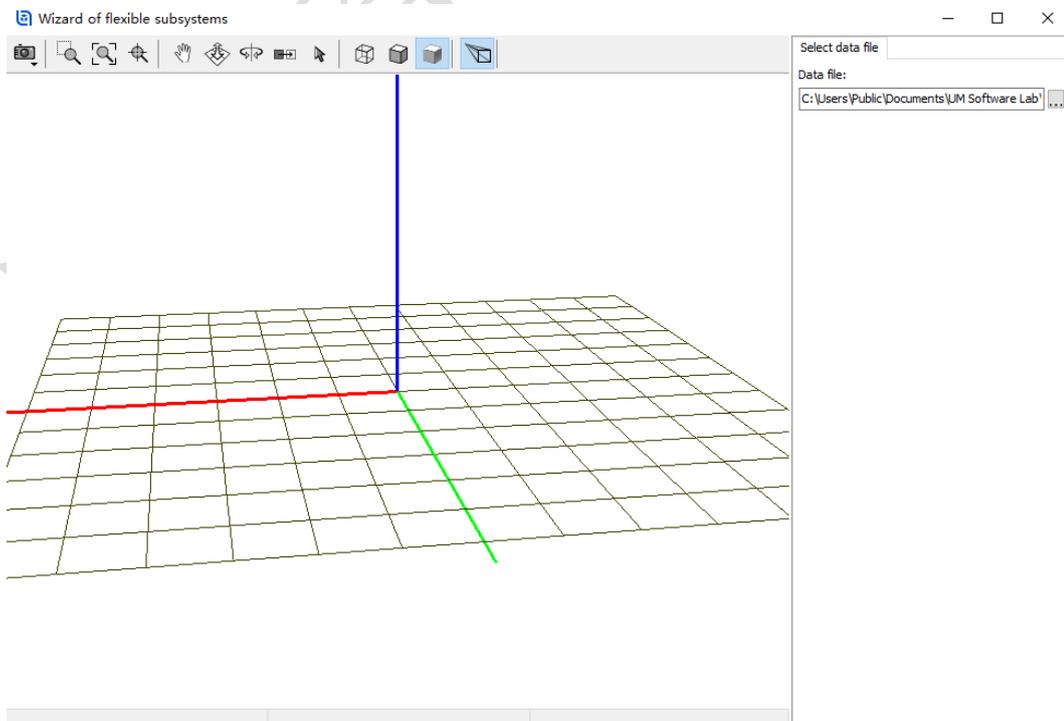


图 2-95

- 4) 在图 2-95 界面右侧点击按钮, 在文件浏览器中定位到路径“D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\刚柔耦合系统\Beam”, 选中 input.fum, 点击 OK, 如图 2-96。

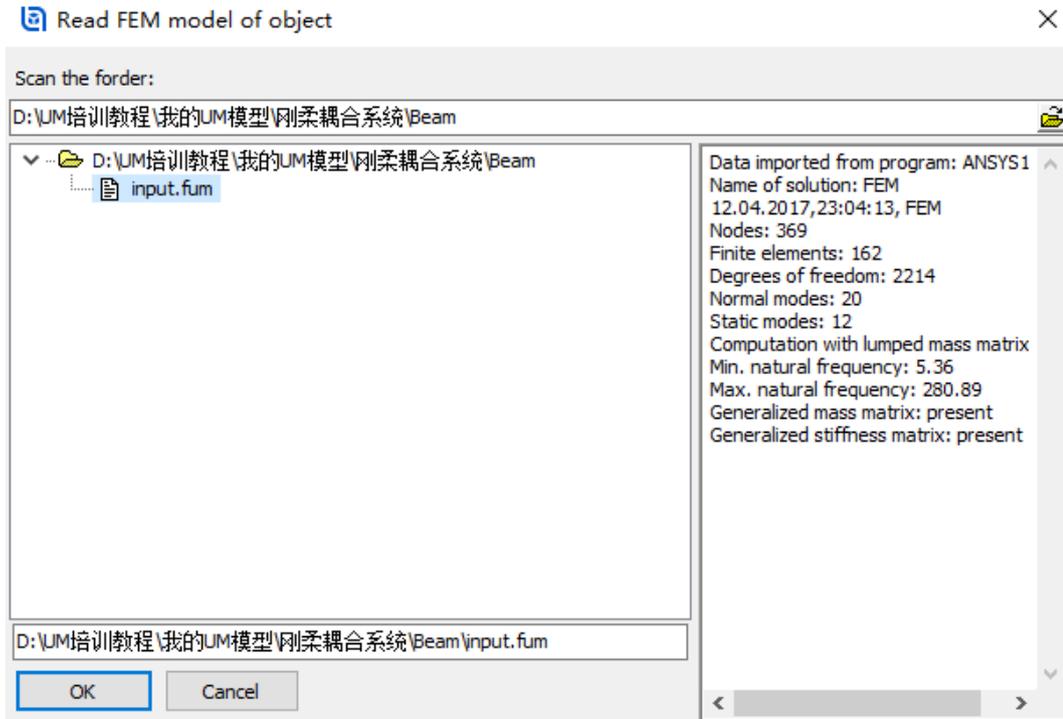


图 2-96

- 5) 加载 Beam 模型后, 这里我们可以在 General 页面看到模型的路径、有限元软件及版本、单元和节点数目等信息, 如图 2-97。

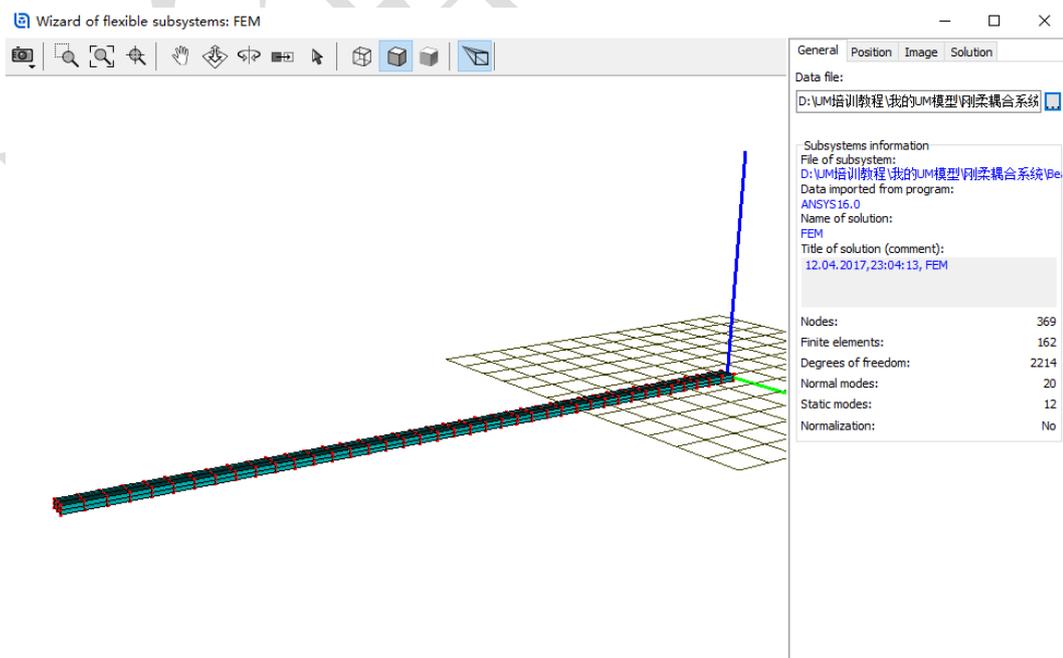


图 2-97

- 6) 切换到 **Solution** 页面，可以看到在有限元软件里计算得到的 **20** 阶固有模态和 **12** 阶静模态（2*6），选中某一阶模态，点击 **Animate** 可以预览振型，如图 2-98。

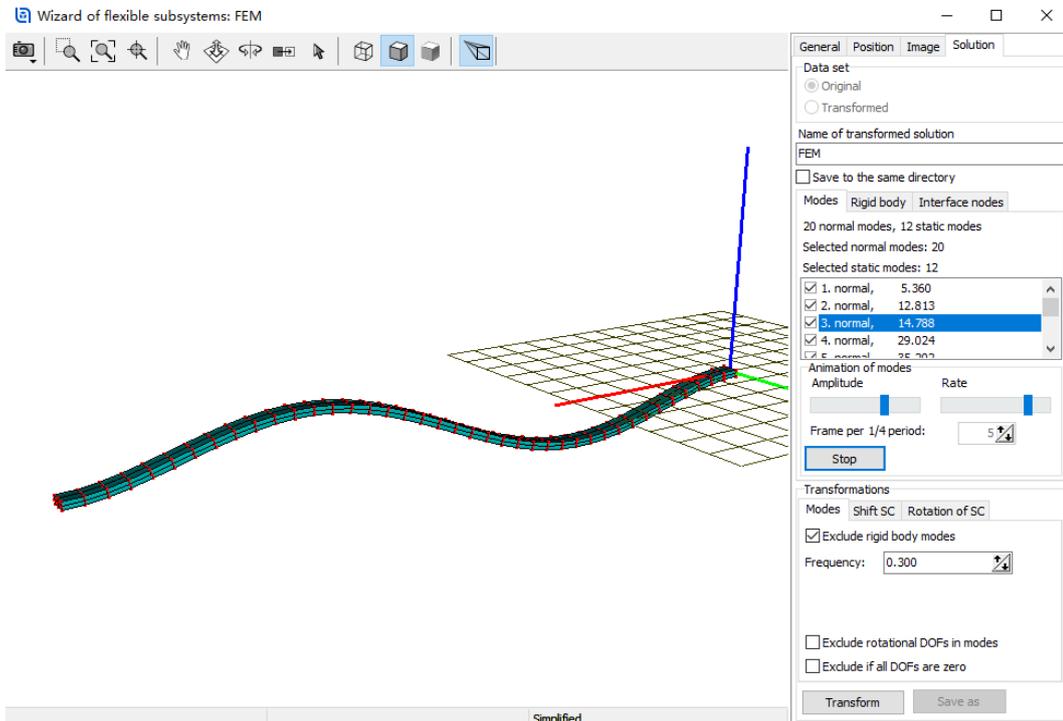


图 2-98

- 7) 勾选 **Save to the same directory**，勾选 **Exclude rigid body modes**，设置截止频率 **0.3 Hz**，点击按钮 **Transform**，进行模态正则化，如图 2-99。

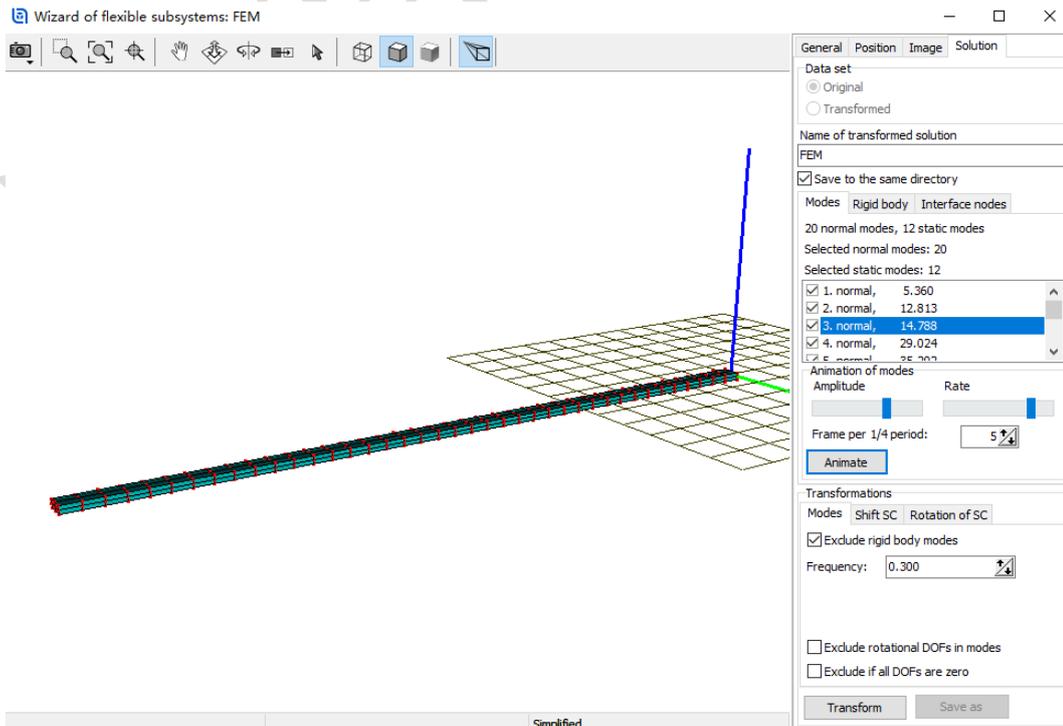


图 2-99

8) 在弹出界面点击是(Y)。

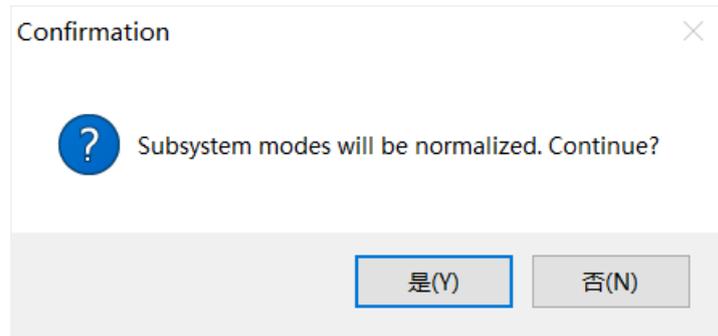


图 2-100

9) 然后弹出如下提示，连续点击 OK 即可。

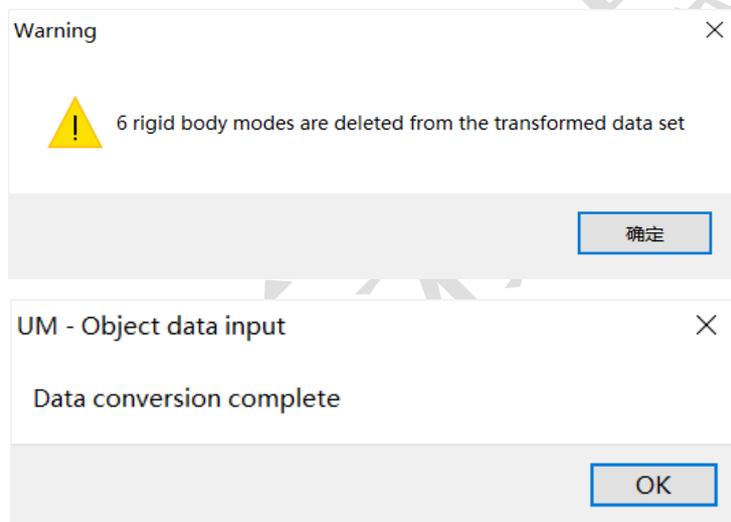


图 2-101

10) 然后点击按钮 **Save as**，在弹出窗口点击 **Save**，然后点 **OK**。这样我们就转换得到了 UM 仿真所需的格式文件 **input.fss**，并存于路径“D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\刚柔耦合系统\Beam”，如图 2-102

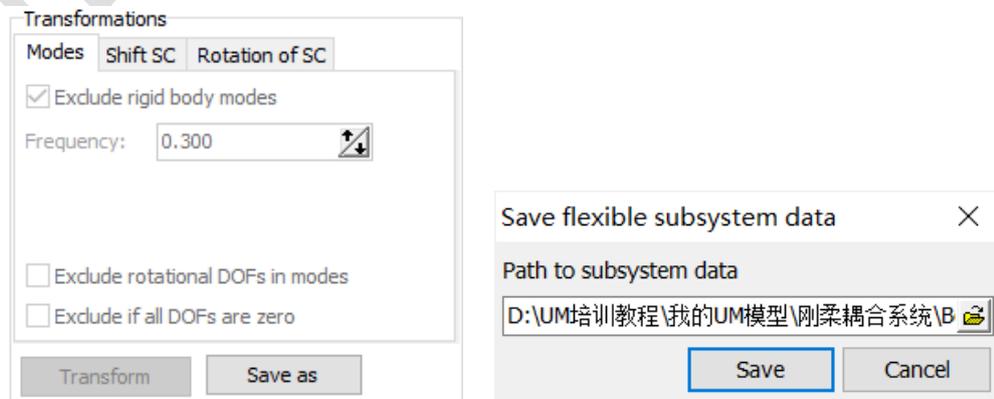


图 2-102

11) 关闭柔性体子系统向导 **Wizard of flexible subsystem**。

2.4.2 刚柔耦合系统建模

- 1) 回到 **UM Input** 程序主界面，从路径“**D:\UM 培训教程\几何素材\刚柔耦合系统**”依次导入几何素材**支座.img**，**刚体 img** 和**弹簧.img**，将**支座.img** 设置为 **Scene image**，重力方向默认为 Z 轴向下，重力加速度 $g = -9.81\text{m/s}^2$ ，如图 2-103。

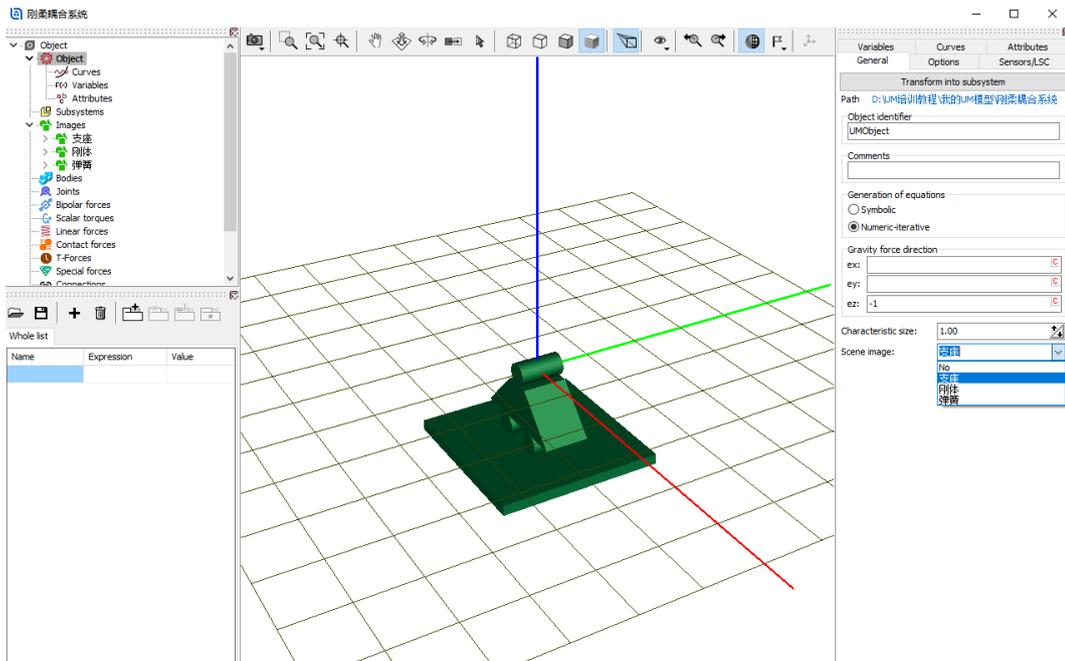


图 2-103

- 2) 创建第一个刚体，命名为**刚体 A**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**刚体**，勾选 **Compute automatically**，程序会自动根据几何图形计算出物体的质量、转动惯量和质心位置，如图 2-104。

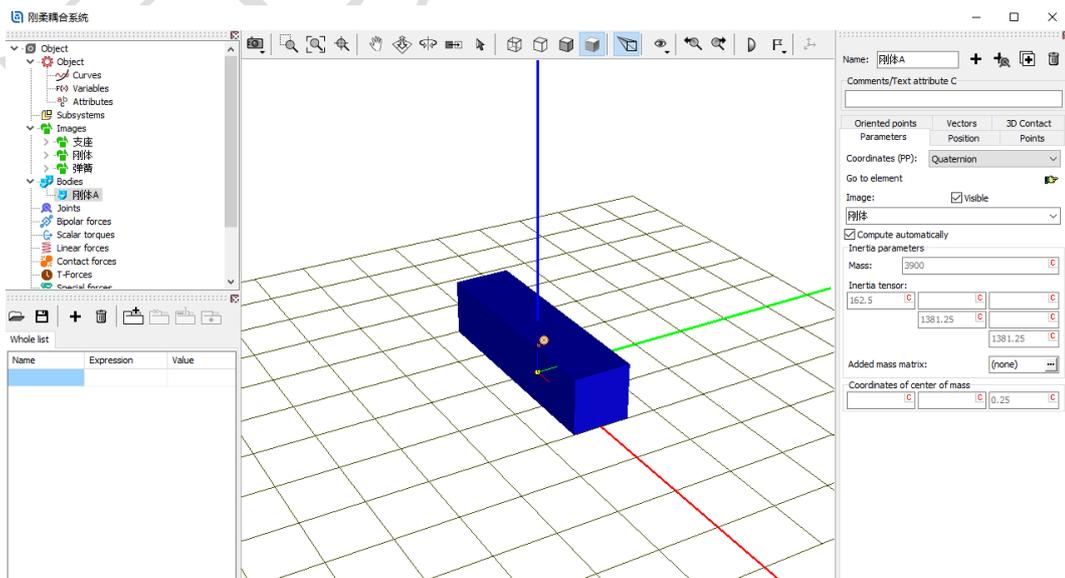


图 2-104

- 3) 复制生成第二个刚体，命名为**刚体 B**，参数与刚体 A 相同。

- 4) 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，从 **Type** 下拉菜单中选择 **Linear FEM subsystem**，如图 2-105。

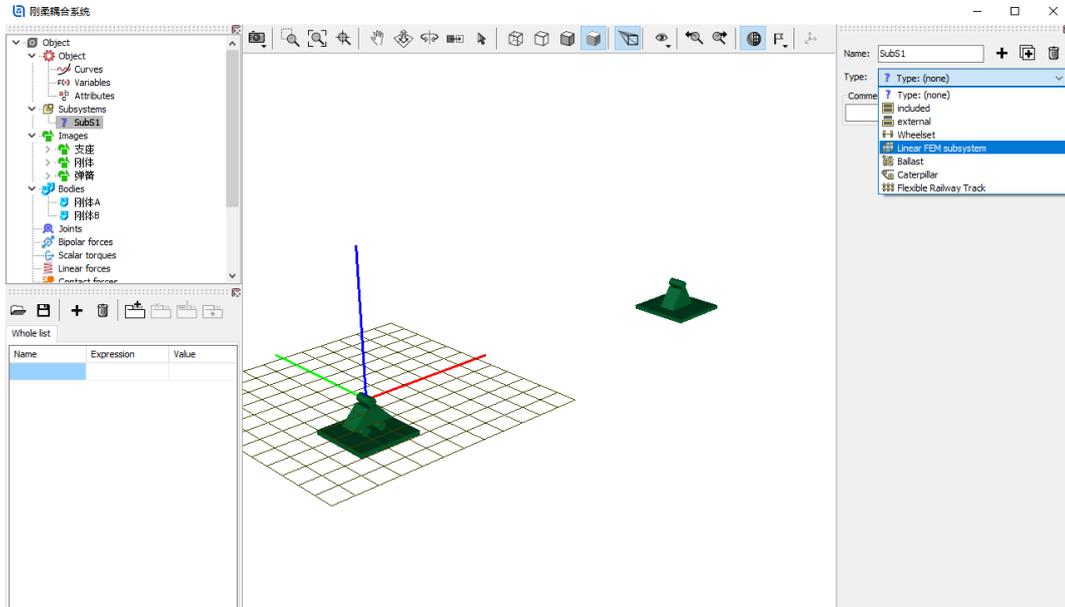


图 2-105

- 5) 在弹出的文件浏览器窗口，定位到路径“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\刚柔耦合系统**”，选中 **Beam**，点击 **OK**，将 **Beam** 以子系统方式导入当前 UM 模型，如图 2-106。

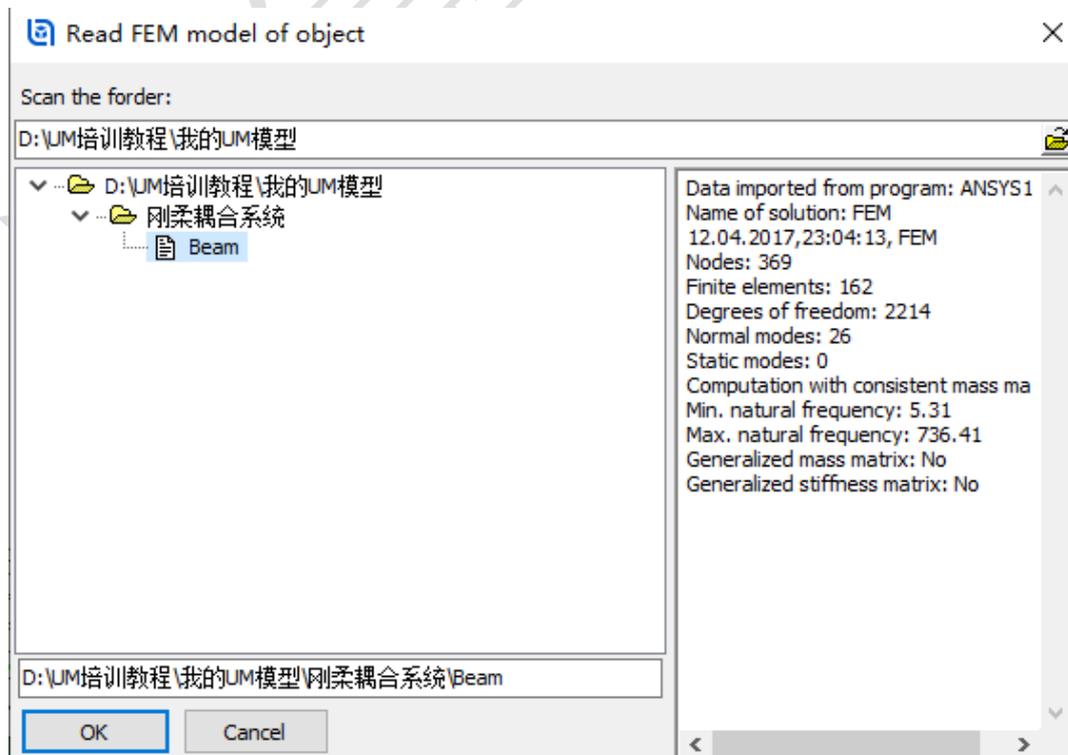


图 2-106

- 6) 重命名为**柔性梁**，在 **Image** 页面可选择 **Simplified** 或 **Full** 模式，可选择是否显示节点和单元，以及颜色和尺寸，如图 2-107。

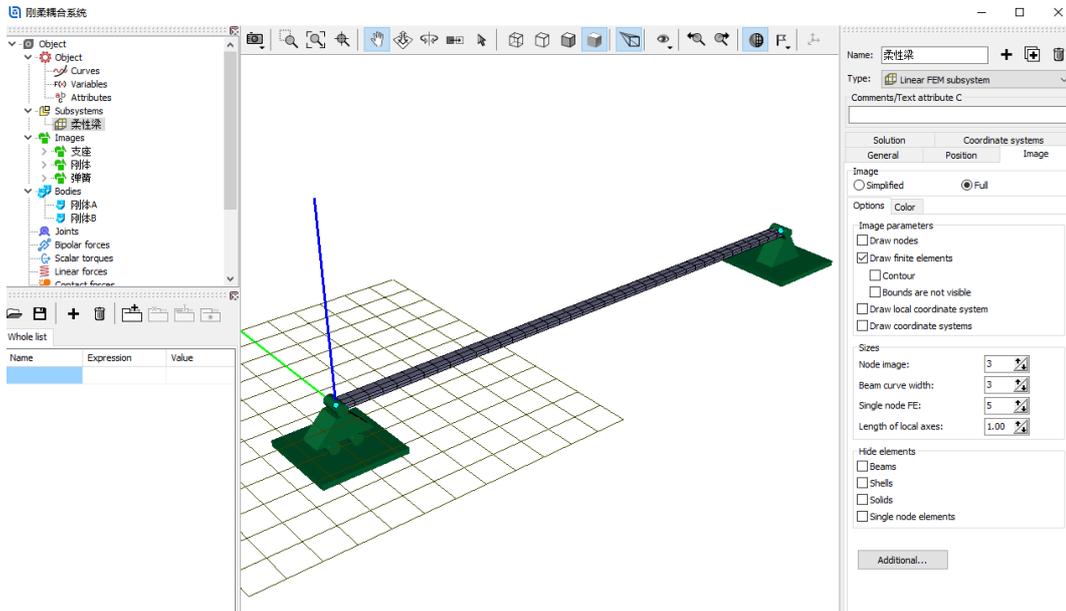


图 2-107

- 7) 创建第一个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择**柔性梁.FEM**，**Type** 为 **6 d.o.f.**，**Body1** 和 **Body2** 的铰点坐标都是**原点**，在 **Coordinate** 页面定义三个自由度，分别是沿 **X** 轴平动和绕 **Y**、**Z** 轴转动，如图 2-108。

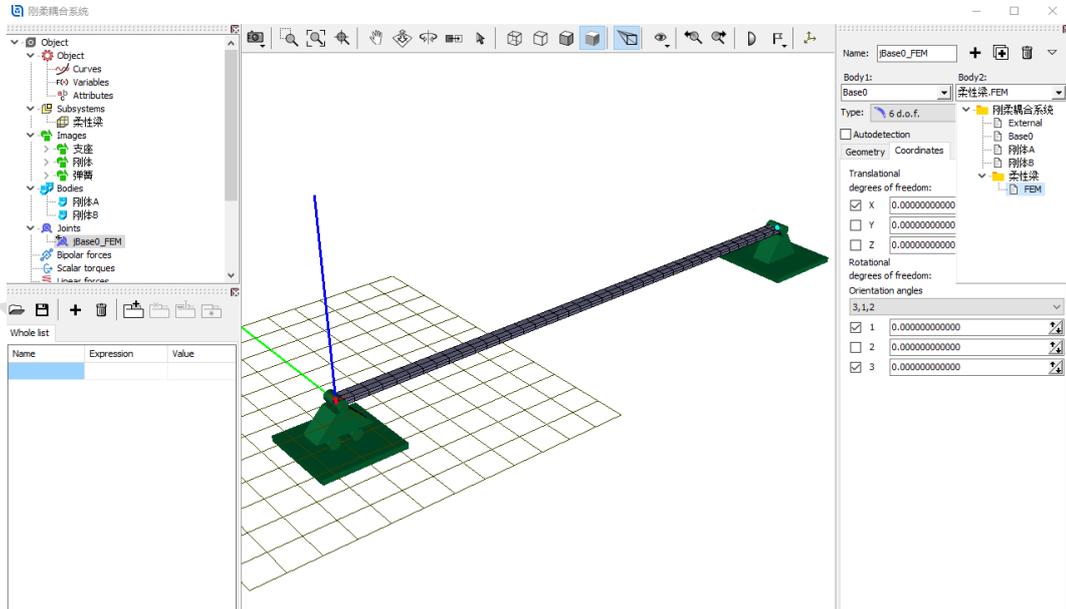


图 2-108

- 8) 复制生成第二个铰，重命名为 **jBase0_FEM_2**，修改 **Body1** 和 **Body2** 的铰点坐标都为 **(10, 0, 0)**，取消 **X** 方向平动的自由度，如图 2-109。

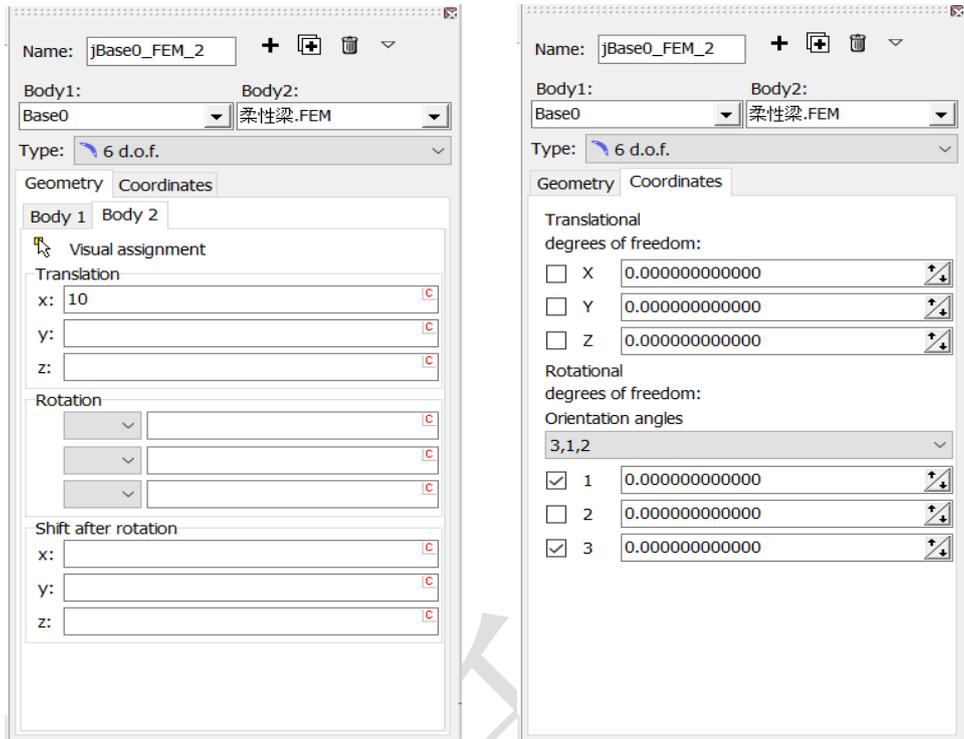


图 2-109

- 9) 创建第三个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择**刚体 A**，**Type** 为 **Translational**，**Body1** 的铰点坐标 **(5, 0, 0.5)**，**Body2** 的铰点坐标为**刚体 A** 局部坐标系的**原点**，定义**刚体 A** 相对总体坐标系有沿 **Z** 轴平动的自由度，如图 2-110。

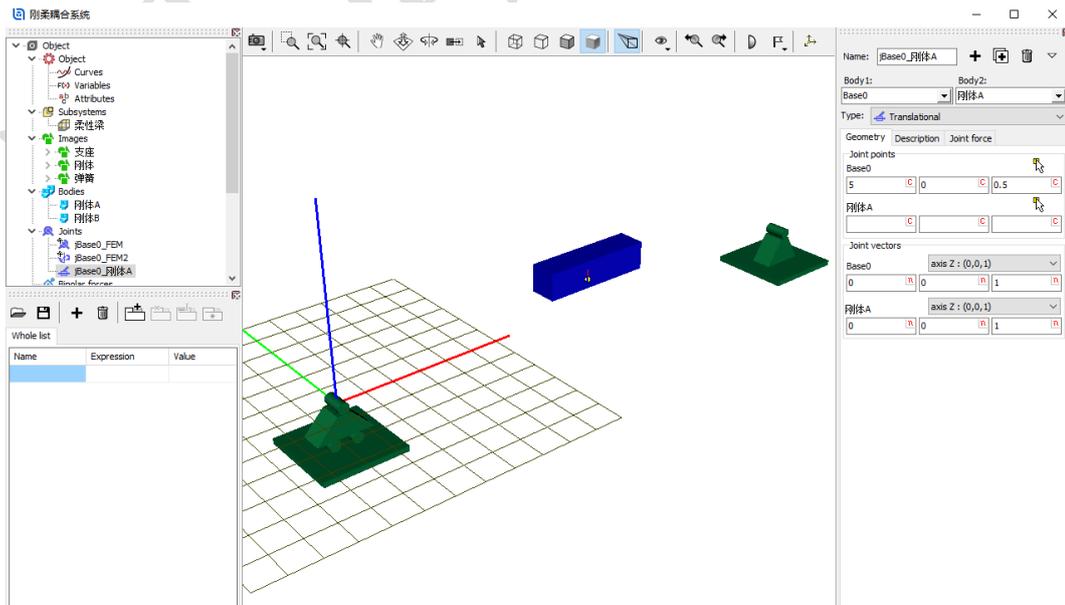


图 2-110

- 10) 复制生成第四个铰， **Body2** 选择**刚体 B**， **Type** 为 **Translational**， **Body1** 的铰点坐标 **(5, 0, 1.5)**， **Body2** 的铰点坐标为**刚体 B** 局部坐标系的原点， **刚体 B** 相对总体坐标系也具有沿 **Z** 轴平动的自由度， 如图 2-111。

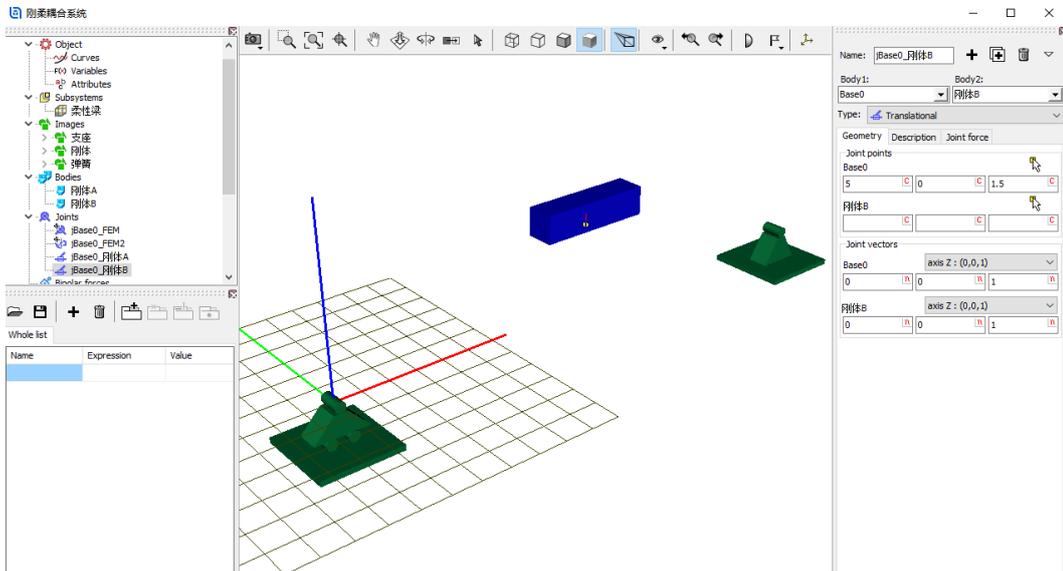


图 2-111

- 11) 先选中左侧模型树 **Bipolar forces**， 然后点击右侧按钮 **+**， 添加一个力元， 这种力元只作用于两个物体的两点连线上， 力的数值是相对速度或位移的函数， 常用于模拟各种线性和非线性阻尼器， 这里我们用它来模拟简单的弹簧阻尼元件， 如图 2-112。

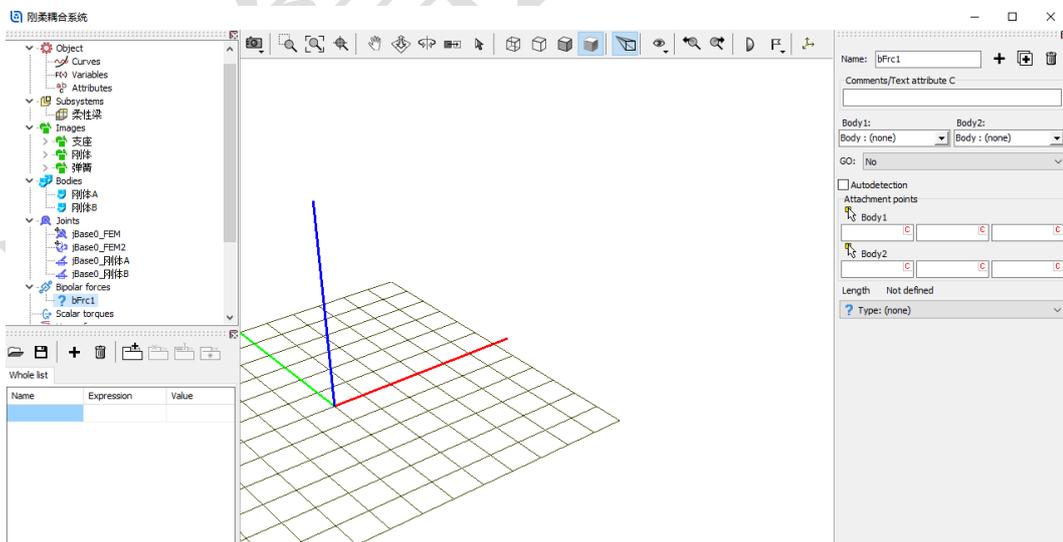


图 2-112

- 12) **Body1** 选择**柔性梁.FEM**，**Body2** 选择**刚体 A**，从 **GO** 下拉菜单选择**弹簧** 赋给力元，连接点坐标分别为 **(4.5, 0, 0)** 和 **(-0.5, 0, 0)**，从 **Type** 下拉菜单选择 **Linear**，如图 2-113。

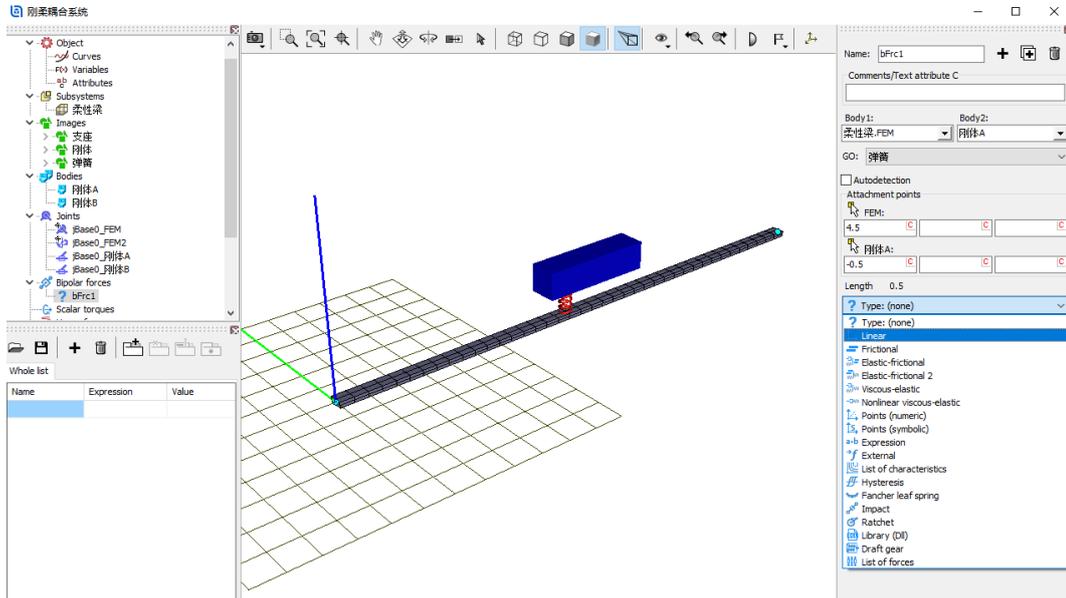


图 2-113

- 13) 定义刚度系数为 **k1** (赋值 **1.0e6 N/m**)，阻尼系数为 **c1** (赋值 **1.0e4 Ns/m**)，定义弹簧自然长度为 **0.5 m**，如图 2-114。

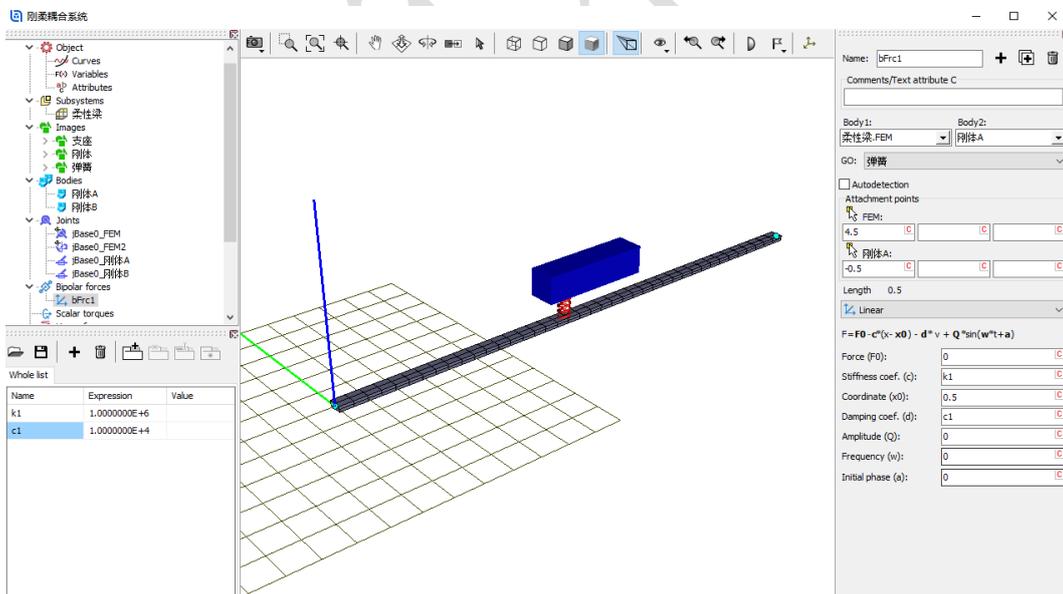


图 2-114

- 14) 复制生成第二个力元，将 **Body1** 连接点坐标修改为 **(5.5, 0, 0)**，**Body2** 连接点坐标修改为 **(0.5, 0, 0)**，其余不变。

- 15) 复制生成第三个力元，将 **Body1** 改为**刚体 A**，**Body2** 改为**刚体 B**，连接点坐标分别为 **(-0.5, 0, 0.5)** 和 **(-0.5, 0, 0)**，定义刚度系数为 **k2**（赋值 **5.0e5 N/m**），阻尼系数为 **c2**（赋值 **4.0e3 Ns/m**），如图 2-115。

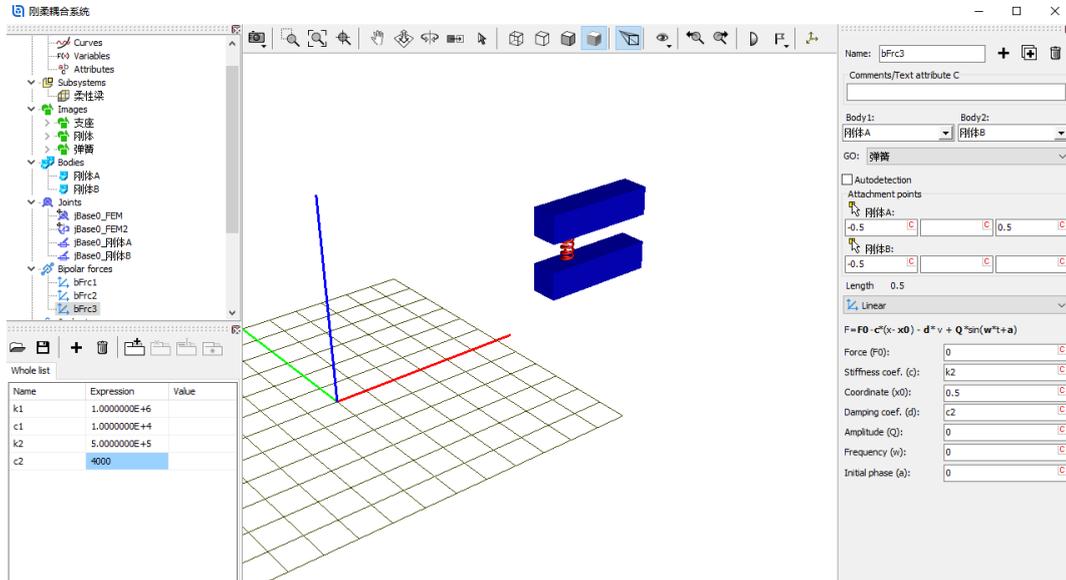


图 2-115

- 16) 复制生成第四个力元，将 **Body1** 连接点坐标修改为 **(0.5, 0, 0.5)**，**Body2** 连接点坐标修改为 **(0.5, 0, 0)**，其余不变。
 17) 点击左侧模型树的 **Summary**，检查模型是否有逻辑错误。
 18) 保存模型，关闭 **UM Input** 程序。

至此，我们完成了一个刚柔耦合振动系统的建模。

2.4.3 动力学仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 仿真程序，选择菜单 **File** → **Open...**，加载模型。
如果在安装软件时勾选了“**Associate files *.dat with UM**”选项，那么我们可以通过双击模型文件 **input.dat** 直接打开模型，如图 2-116。

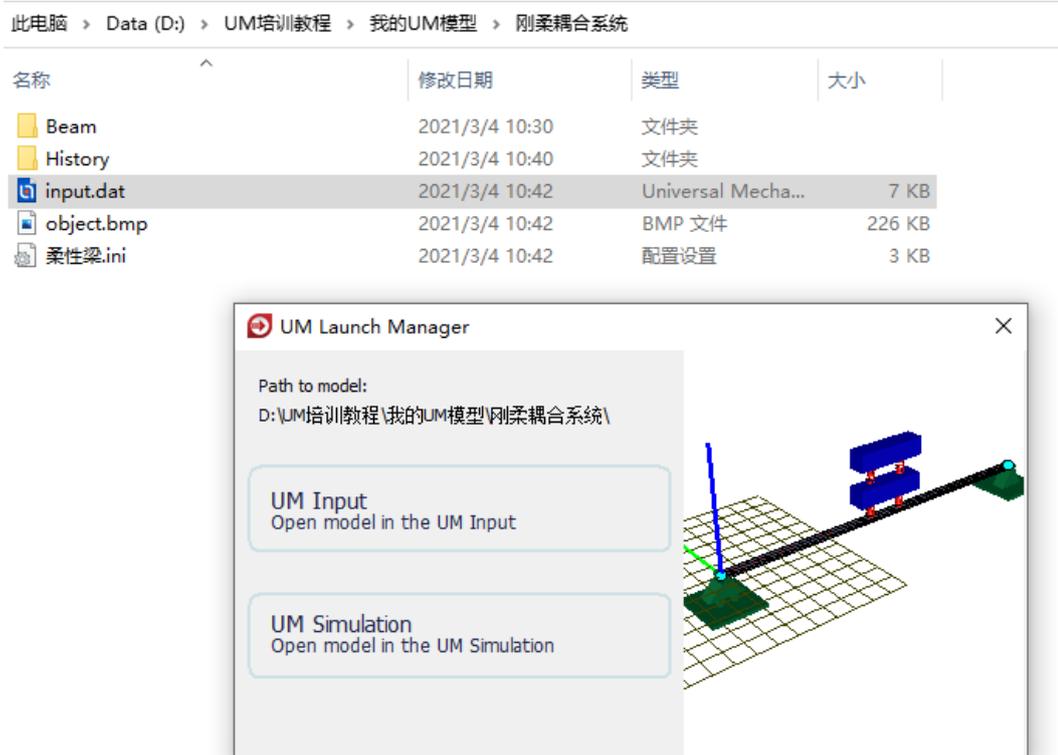


图 2-116

- 2) 拖动鼠标自由调整动画窗口的大小和位置（一般不要最大化），在动画窗口通过鼠标和工具栏按钮自由调整模型视图。

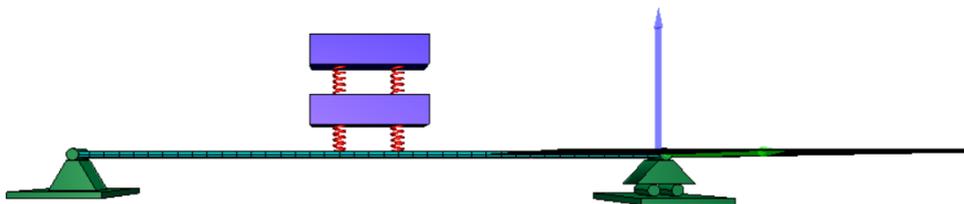


图 2-117

- 3) 选择主菜单 **Tools** → **Wizard of variables...** 打开变量向导（或点击工具栏按钮 ），定义柔性梁 FEM 的垂向位移变量（从点 $(0, 0, 0)$ 到点 $(10, 0, 0)$ 每米取一个点，共计 11 个），如图 2-118。

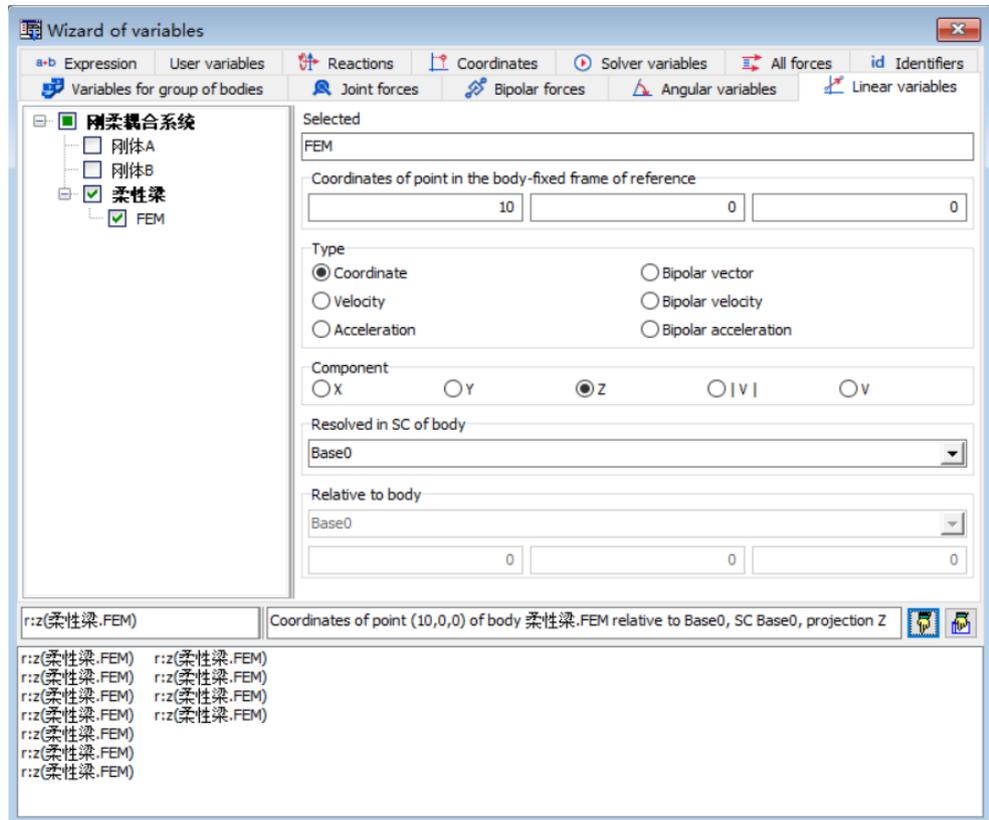


图 2-118

- 4) 选择主菜单 **Tools** → **Histogram...**，打开一个柱状图窗口，将上一步创建的 11 个变量全选并拖入其中。
- 5) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板（或直接点击工具栏按钮 ）。选择求解器 **Park**，设置仿真时间为 **20** (s)，数据采样步长为 **0.005** (s)，勾选选项 **Computation of Jacobian**。点击 **Integration**，开始计算，如图 2-119。

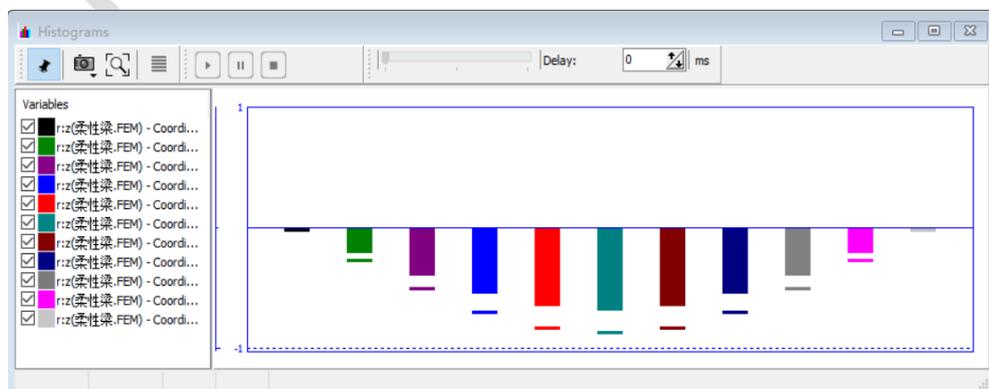


图 2-119

- 6) 等待仿真完成，点击**确定**和 **Interrupt**。
- 7) 将 11 个变量从变量向导或柱状图窗口拖入仿真控制面板的 **Object variables** 界面；点击按钮 ，将该组变量保存为文件**刚柔耦合系统.var**，便于以后计算调用；保持“**Automatic saving of variables**”为勾选状态，这样才能以文件形式保存该组变量的计算结果，如图 2-120。

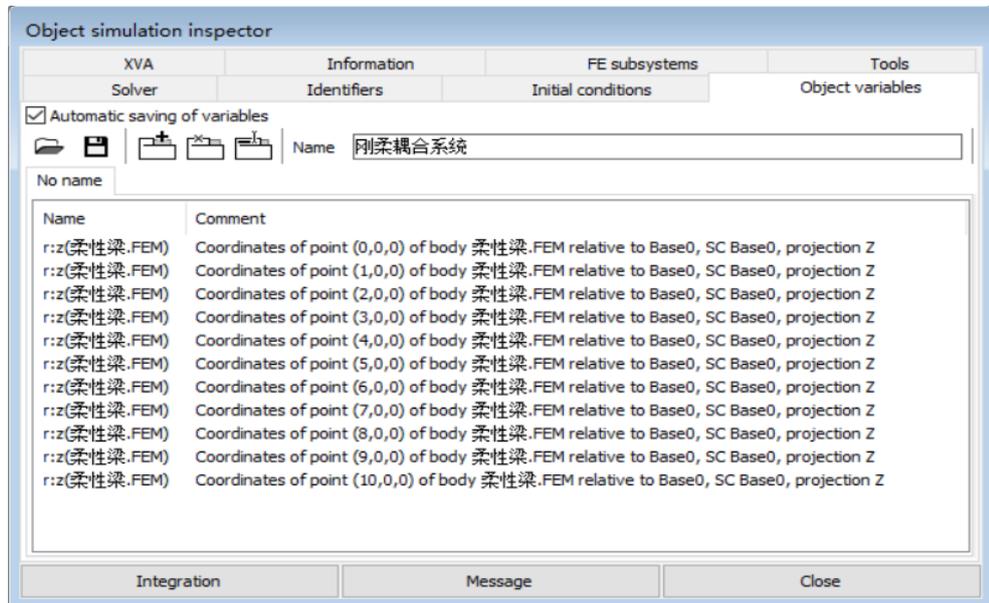


图 2-120

- 8) 点击 **Integration**，执行计算，计算完毕，这样 11 个变量的结果都保存了下来，如图 2-121。

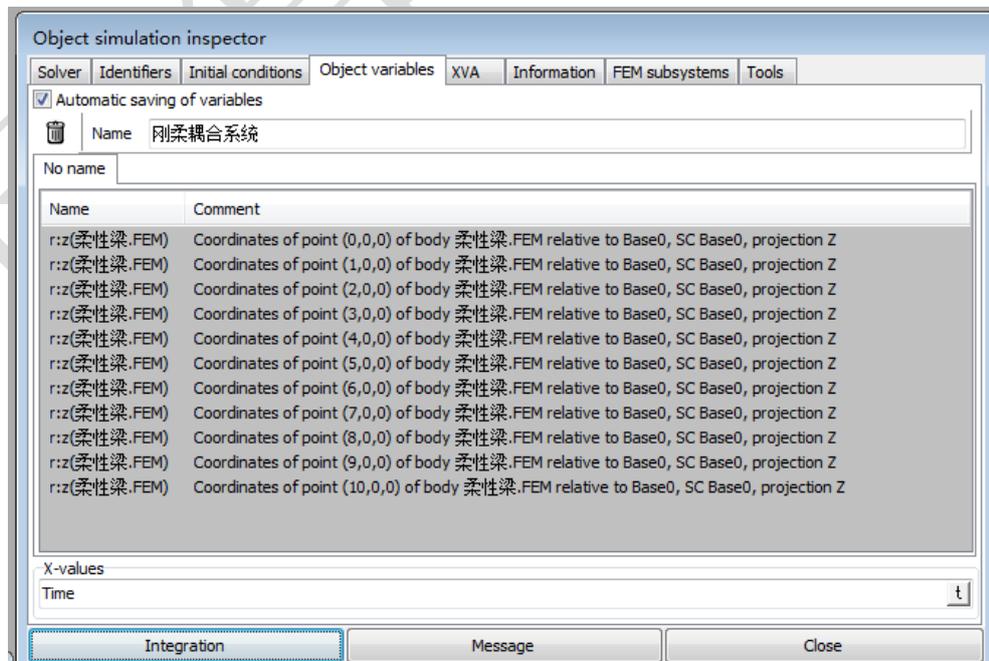


图 2-121

- 9) 选择主菜单 **Tools** → **Graphical window...**, 打开一个绘图窗口, 将图 2-121 所有计算结果拖入绘图窗口。

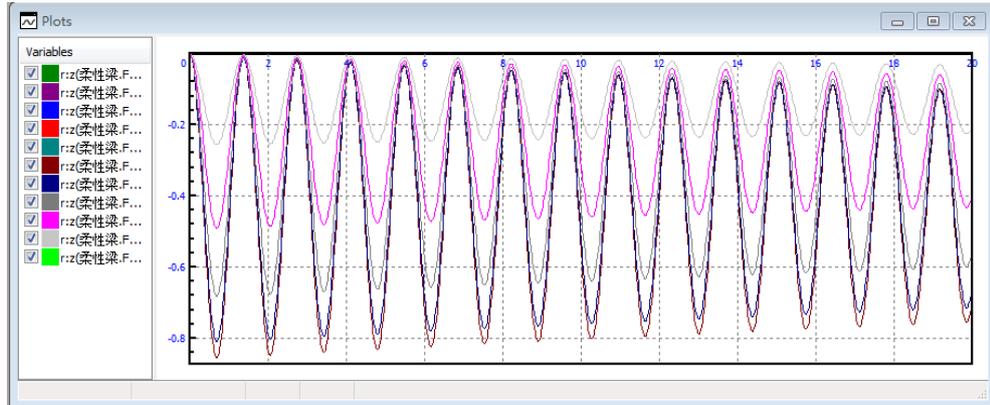


图 2-122

- 10) 在绘图窗口左侧列表框选所有曲线, 点**右键**, 可以选择输出数据至记事本或 MS Excel 表格, 如图 2-123。

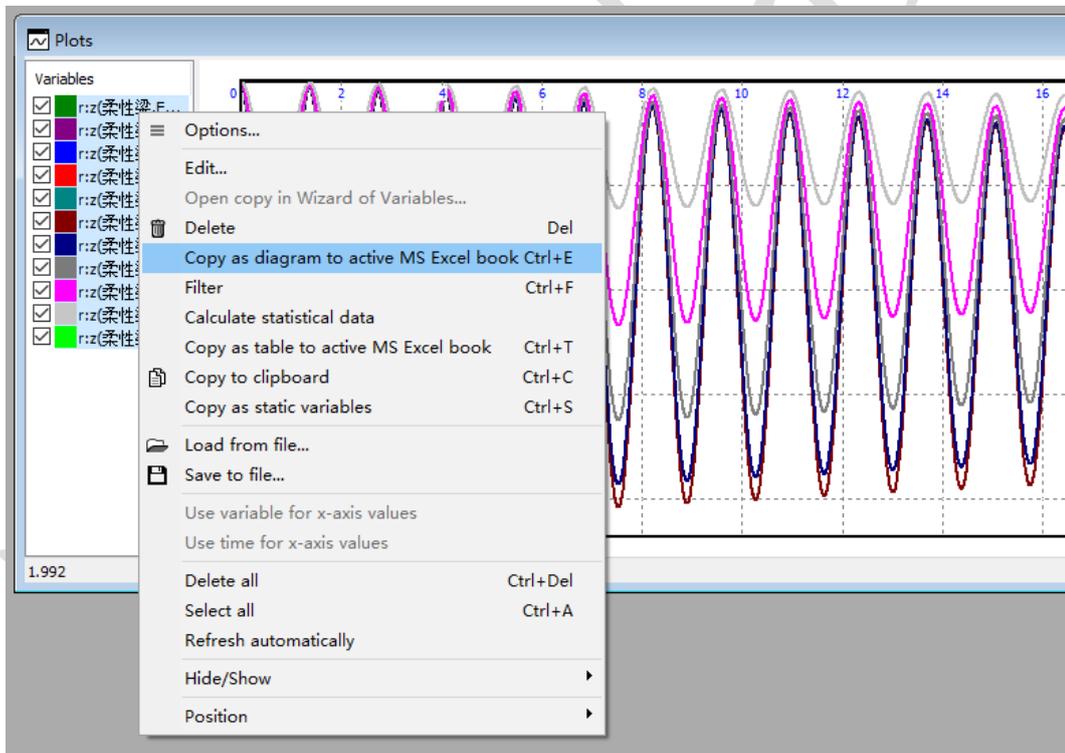


图 2-123

- 11) 选择主菜单 **Tools** → **Table Processor...**，打开一个变量处理窗口，将图 2-121 所有计算结果从仿真控制面板或绘图窗口拖入变量处理窗口，这里内置了一些数据处理函数，勾选 **MaxAbs** 和 **Std_Dev**，如图 2-124。

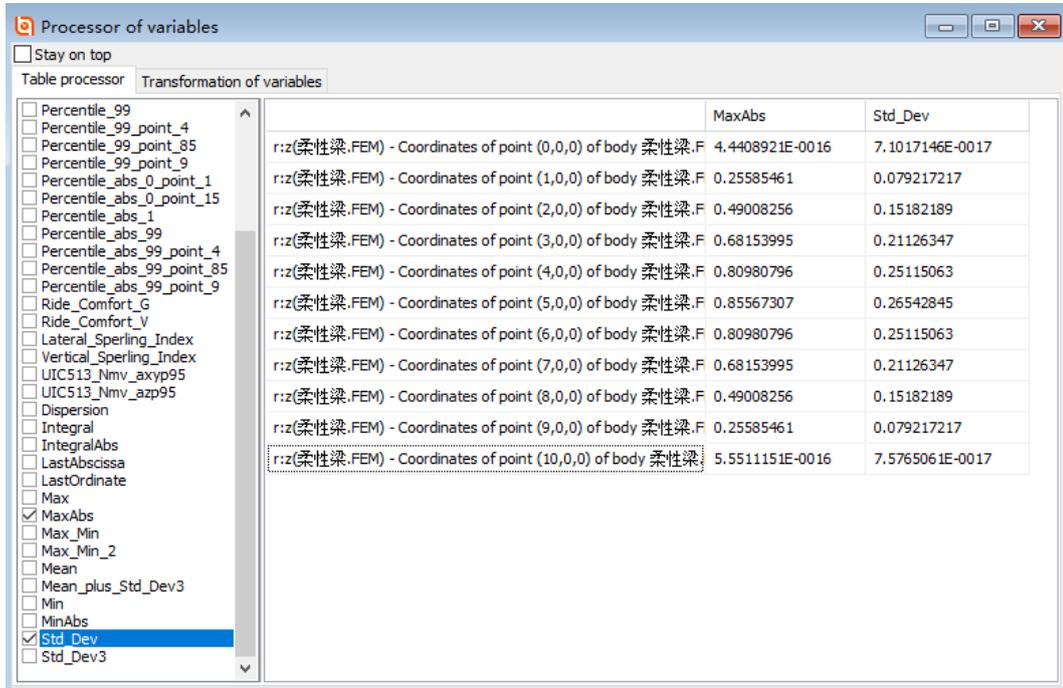


图 2-124

- 12) 选择主菜单 **Tools** → **Statistics...**，打开一个统计窗口，将图 2-121 所有计算结果从仿真控制面板或绘图窗口拖入统计窗口，可查看其功率谱密度分布图，如图 2-125。

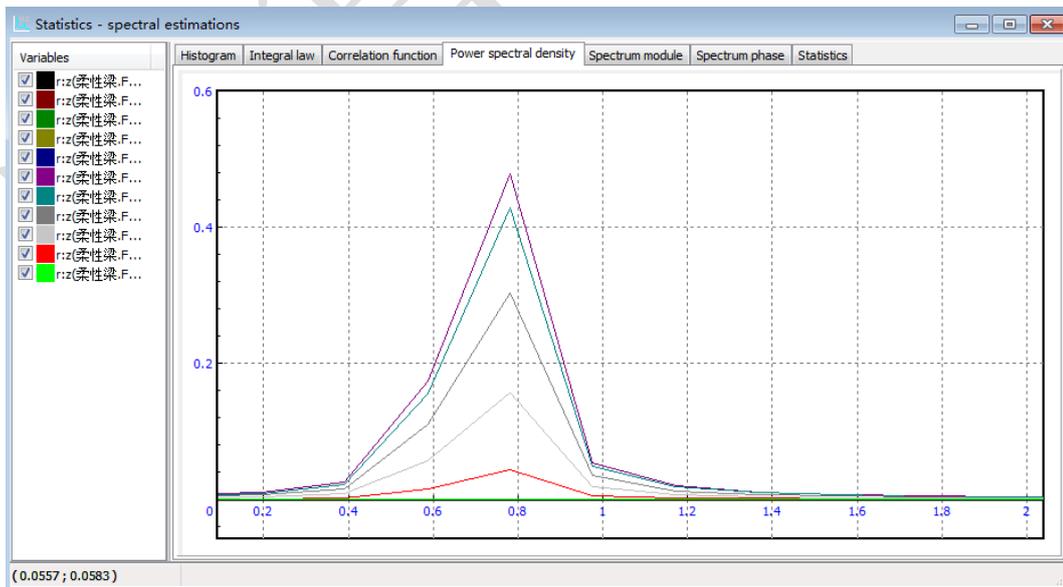


图 2-125

- 13) 现在，请点击仿真控制面板的 **Close** 按钮，将其关闭，再关闭前面两步打开的变量处理窗口和统计窗口。
- 14) 选择主菜单 **Analysis** → **Static and linear analysis**，弹出线性分析控制面板（或直接点击工具栏按钮 ），如图 2-126。

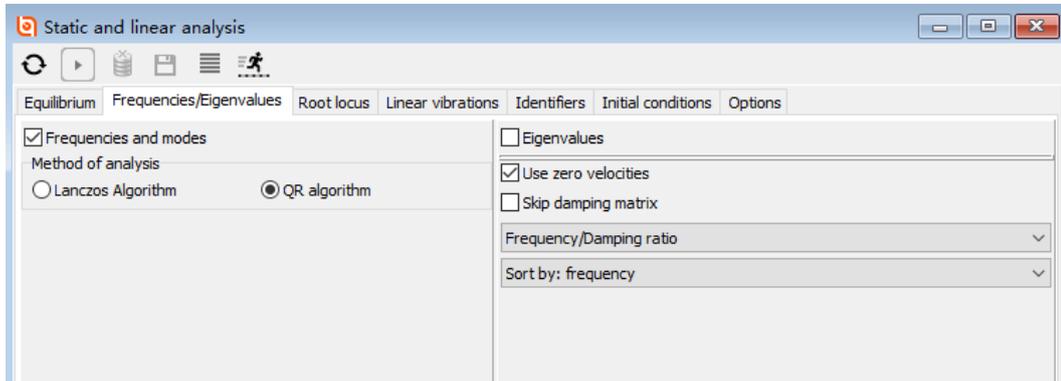


图 2-126

- 15) 勾选左侧的 **Frequencies and modes** 和右侧的 **Eigenvalues**，点击按钮 ，可计算系统的各阶固有模态的频率及阻尼比，如图 2-127（左侧无阻尼，右侧有阻尼）。

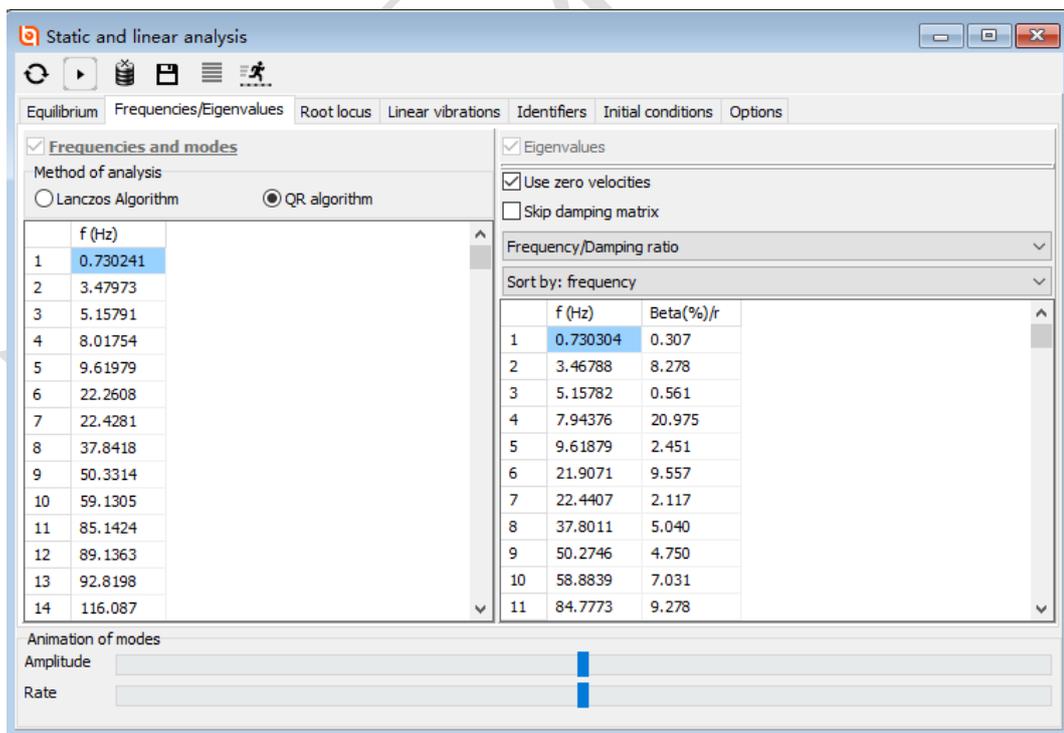


图 2-127

16) 选中某一阶频率，点击按钮  可以在动画窗口观察其模态振型。

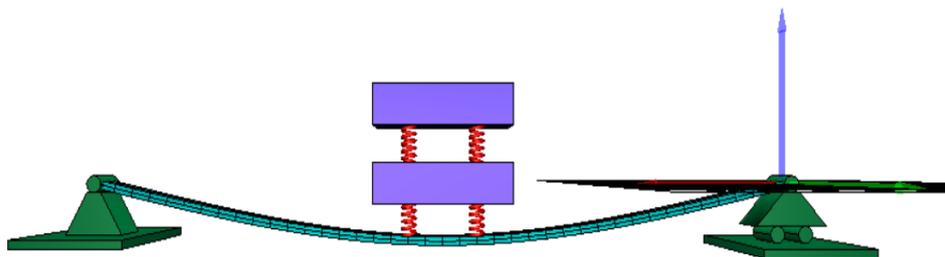


图 2-128

- 17) 关闭线性分析工具。
- 18) 关闭 **UM Simulation** 程序。
- 19) 最后，在计算机上打开模型文件夹，你会发现增加了很多文件，其中名为 **last** 的系列文件是最后一次的仿真配置文件，名为**刚柔耦合系统**的系列文件则对应计算变量及其结果。

此电脑 > Data (D:) > UM培训教程 > 我的UM模型 > 刚柔耦合系统

名称	修改日期	类型	大小
Beam	2021/3/4 10:44	文件夹	
History	2021/3/4 10:42	文件夹	
input.dat	2021/3/4 10:42	Universal Mechanism Data File	7 KB
input.xv	2021/3/4 11:00	UM Document. Initial conditions.	1 KB
object.bmp	2021/3/4 10:42	BMP 文件	226 KB
刚柔耦合系统.imc	2021/3/4 10:47	UM Document. Binary file of modal coordinates for FEM subsystems.	212 KB
刚柔耦合系统.sgr	2021/3/4 10:47	UM Document. Binary file of calculated variables.	47 KB
刚柔耦合系统.tgr	2021/3/4 10:47	UM Document. List of calculated variables.	4 KB
刚柔耦合系统.tmc	2021/3/4 10:47	UM Document. Description file for modal coordinates for FEM subsystems.	1 KB
刚柔耦合系统.var	2021/3/4 10:46	UM Document. List of variables.	4 KB
柔性梁.ini	2021/3/4 11:00	配置设置	3 KB

图 2-129

2.5 实例五：自动控制系统

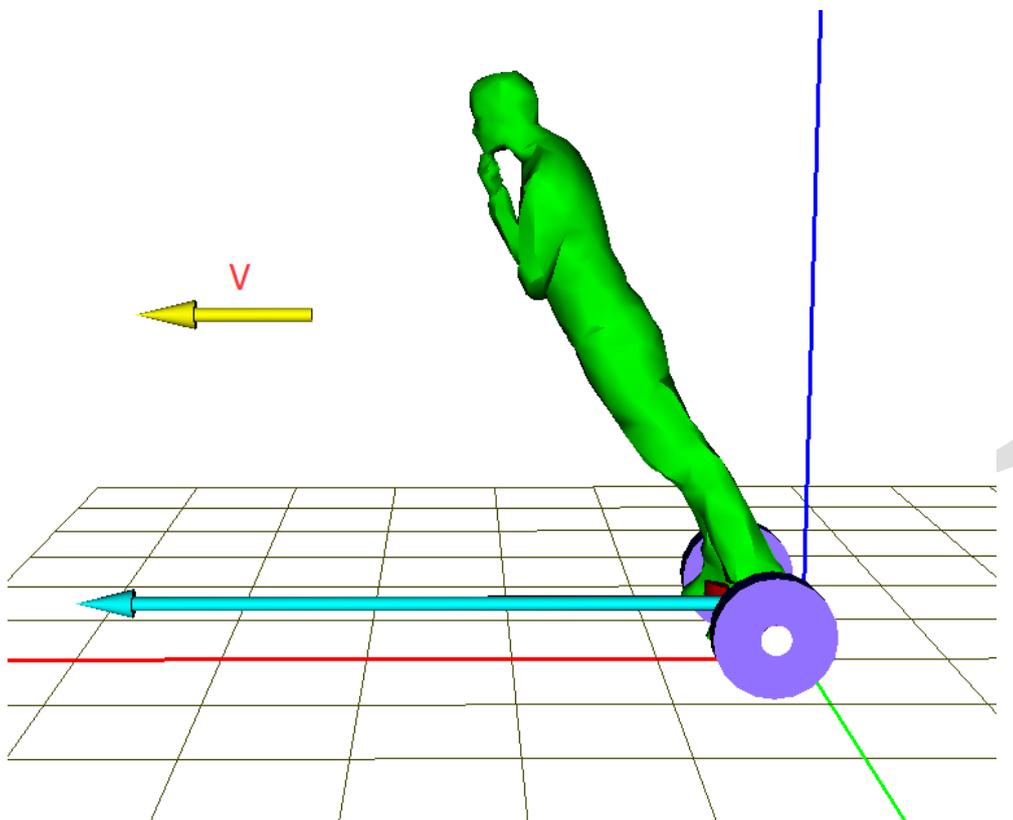


图 2-130

图 2-130 所示为一个典型的自动控制系统，该模型由两个刚体（人体和平衡车）组成。惯性参考系原点位于平衡车走行面，平衡车沿 X 轴有平动自由度，初始速度 V 。人体相对平衡车具有绕 Y 轴转动自由度，初始转动一定角度。在重力作用下，人体会向下倾，系统靠作用在平衡车上的时变控制力维持平衡。

本例用到的模块：**UM Base**、**UM Control**。

2.5.1 机械系统建模

- 1) 运行 **UM Input** 程序，新建一个 UM 模型，另存为“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\自动控制系统**”。
- 2) 从路径“**D:\UM 培训教程\几何素材\自动控制系统**”依次导入几何素材 **平衡车.img** 和 **人体.img**，如图 2-131。

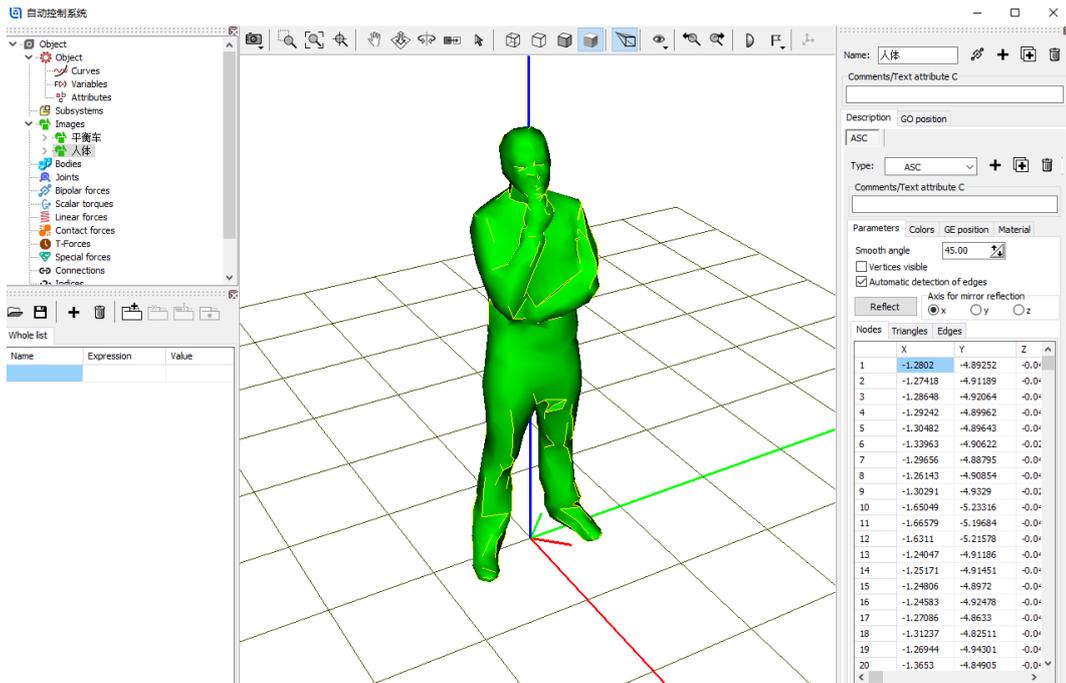


图 2-131

- 3) 创建第一个刚体，命名为**平衡车**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**平衡车**，设置质量为**5**，如图 2-132。

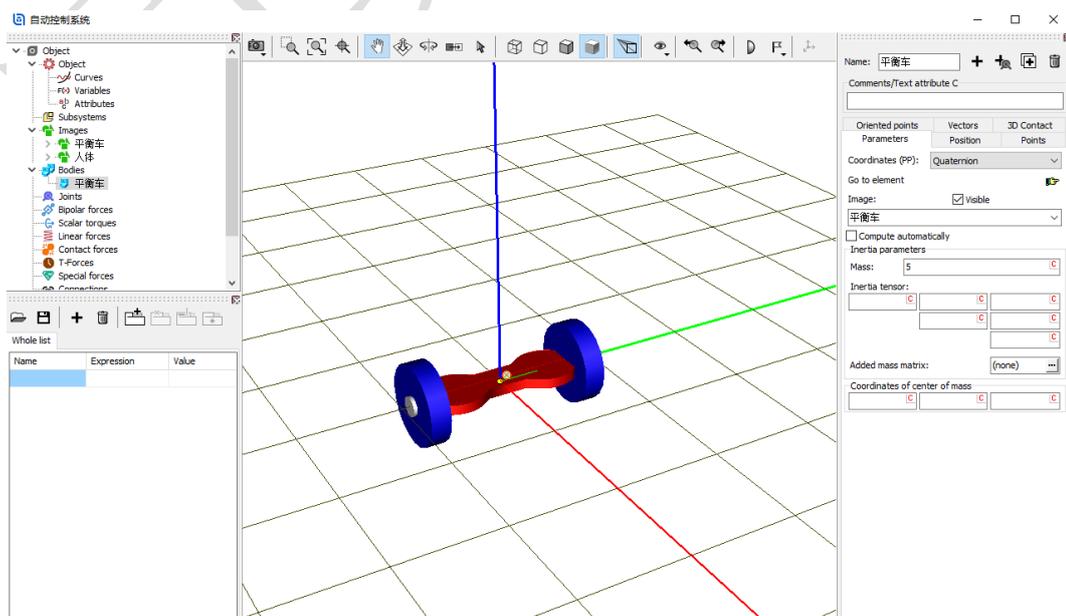


图 2-132

- 4) 创建第二个刚体，命名为**人体**，从 **Image** 下拉菜单选择几何**人体**，设置质量为**75**，转动惯量为 $(0, 20, 0)$ ，质心坐标为 $(0, 0, 1)$ ，如图 2-133。

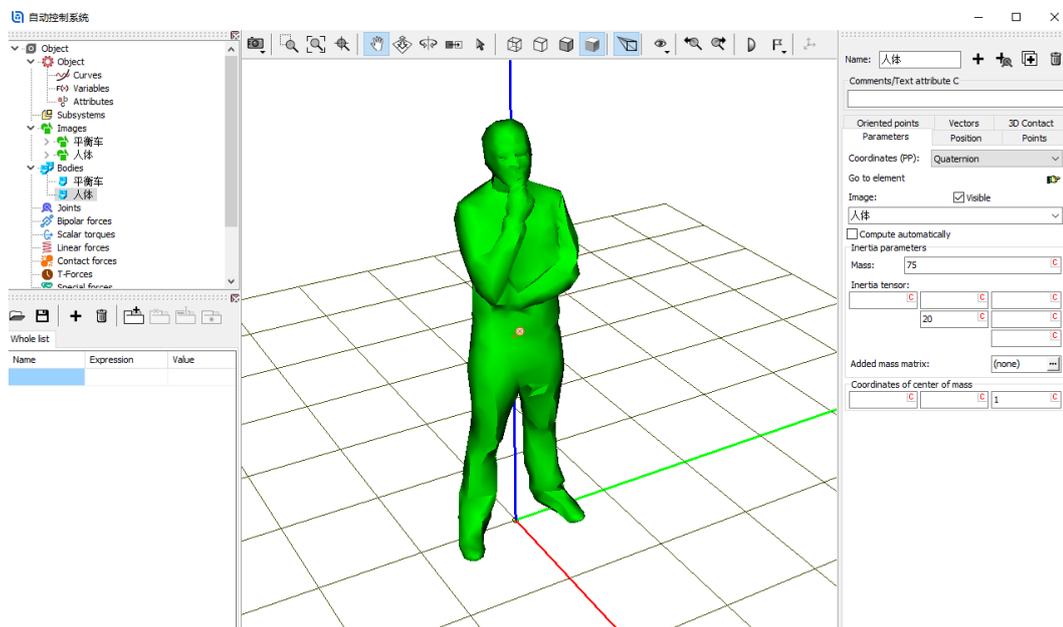


图 2-133

- 5) 创建第一个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择平衡车，**Type** 为 **Translational**，**Body1** 的铰点为 $(0, 0, 0.2)$ ，**Body2** 的铰点为原点，平动自由度方向为 **X** 轴，如图 2-134。

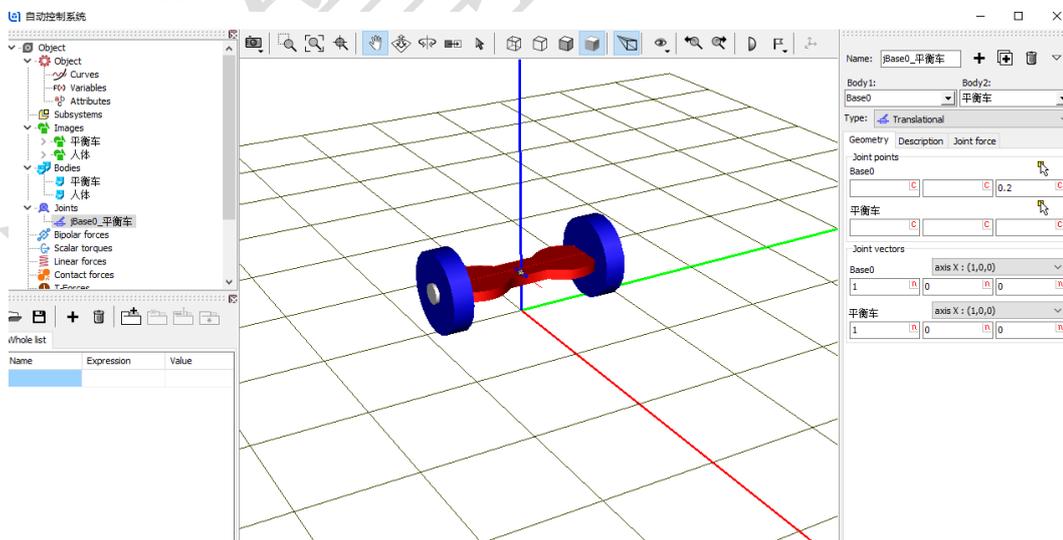


图 2-134

- 6) 创建第二个铰，**Body1** 选择平衡车，**Body2** 选择人体，**Body1** 和 **Body2** 的铰点坐标都为 $(0, 0, 0)$ ，转动自由度方向为 **Y** 轴，如图 2-135。

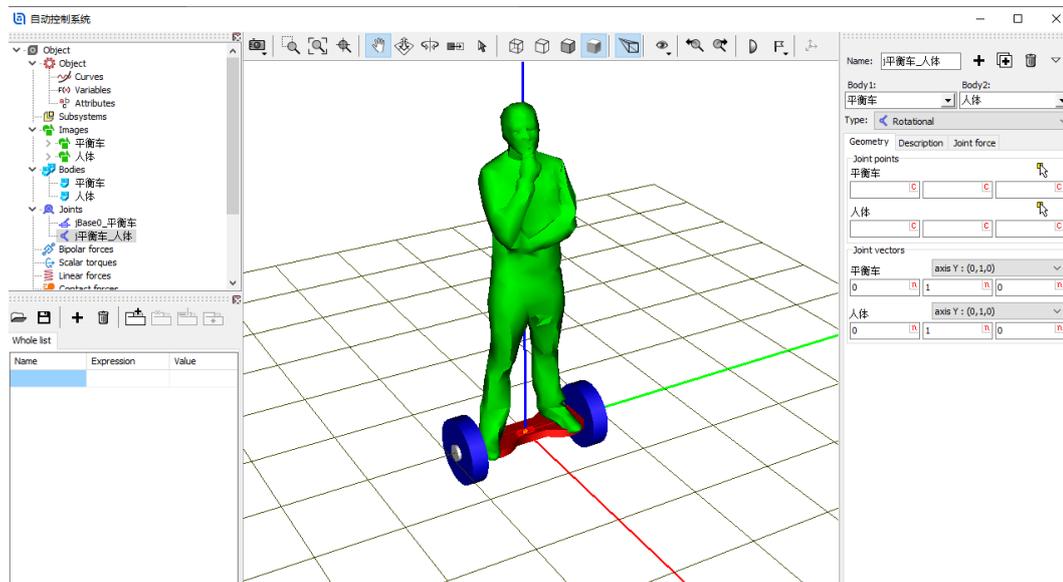


图 2-135

- 7) 先选中左侧模型树 **T-forces**，然后点击右侧按钮 **+**，添加一个时变力元，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择平衡车，在 **Force** 第一栏定义一个符号 **fx**，初始值为 **0**，如图 2-136。

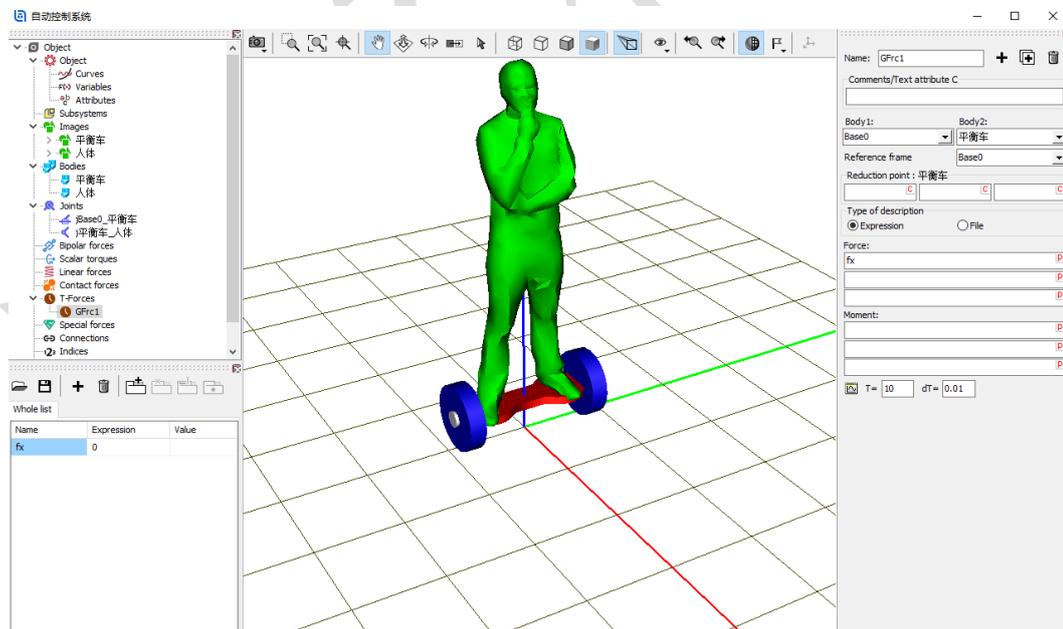


图 2-136

2.5.2 控制系统建模

- 1) 选择开始菜单 → **Universal Mechanism 9 x64** → **Tools** → **UM Block Editor**（或在 UM 安装路径找到程序 **BlockEditor.exe**，双击运行）。
- 2) 从 **Inputs and Outputs** 模块分别将 **Input** 和 **Output** 拖入图板一次，分别对应控制系统的输入和输出信号，如图 2-137。

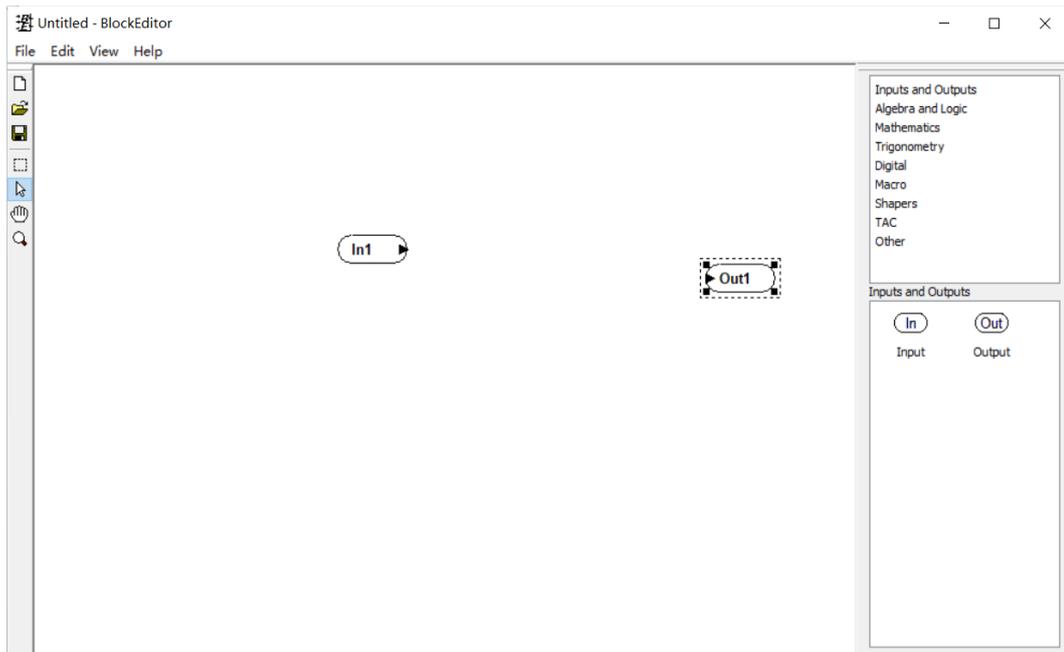


图 2-137

- 3) 从 **Algebra and logic** 模块将 **Gain** 比例环节拖入图板三次，分别双击设置系数（增益）为 **50**，**20**，**200**，如图 2-138。

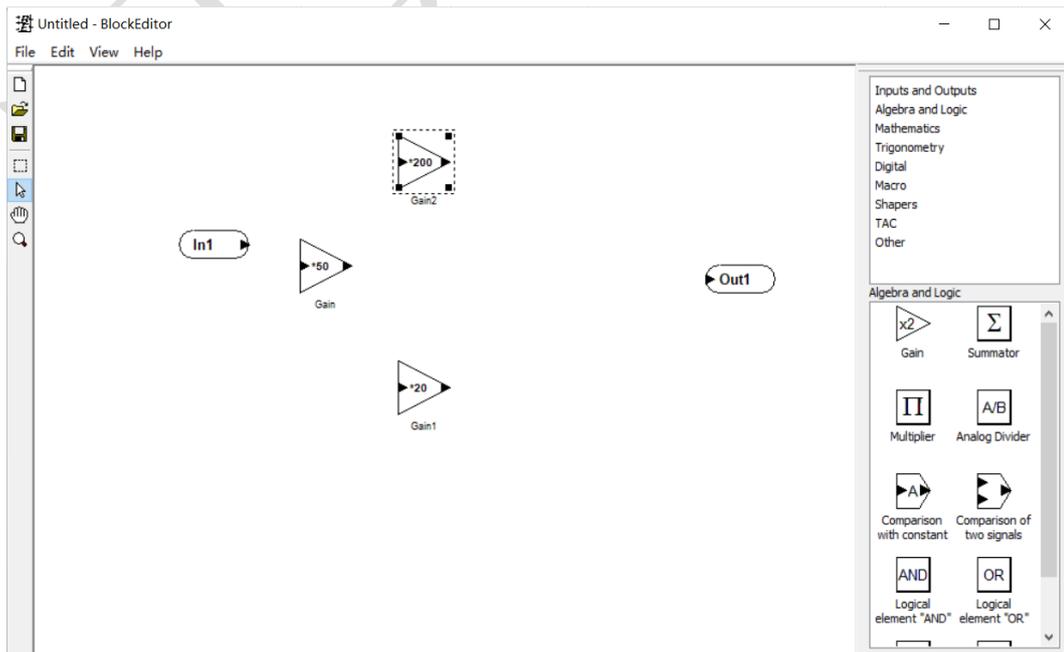


图 2-138

4) 从 TAC 模块将 **Integrator** 积分器拖入图板一次, 如图 2-139。

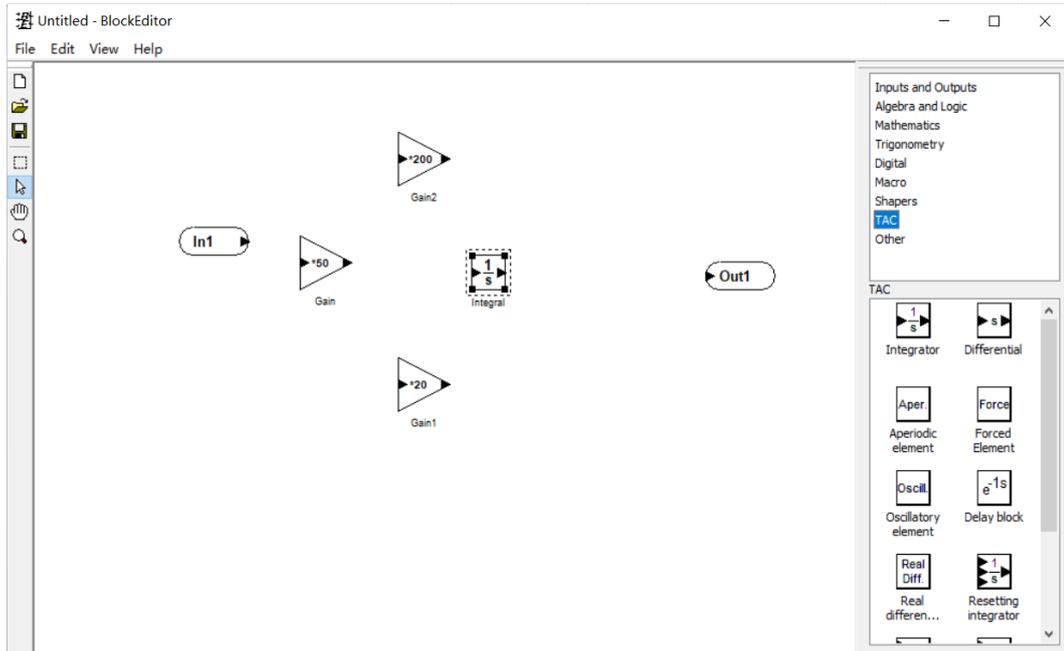


图 2-139

5) 从 TAC 模块将 **Real Differential** 微分器拖入图板一次, 双击设置时间常数 **0.001**, 如图 2-140。

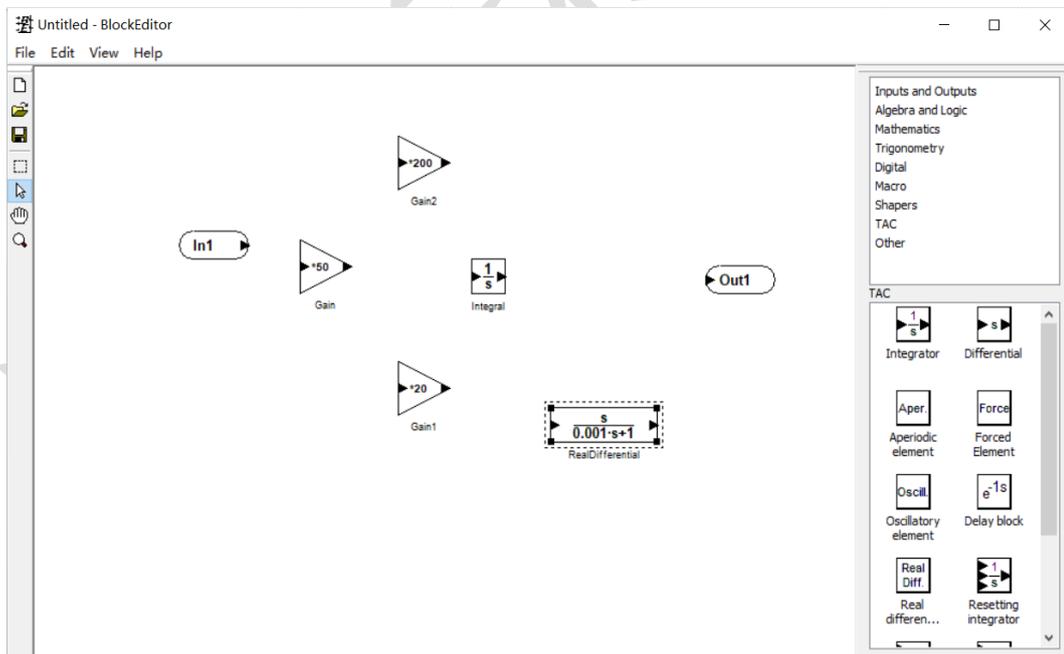


图 2-140

- 6) 从 **Algebra and logic** 模块将 **Summator** 加法器拖入图板一次，双击设置输入通道为 **3**，如图 2-141。

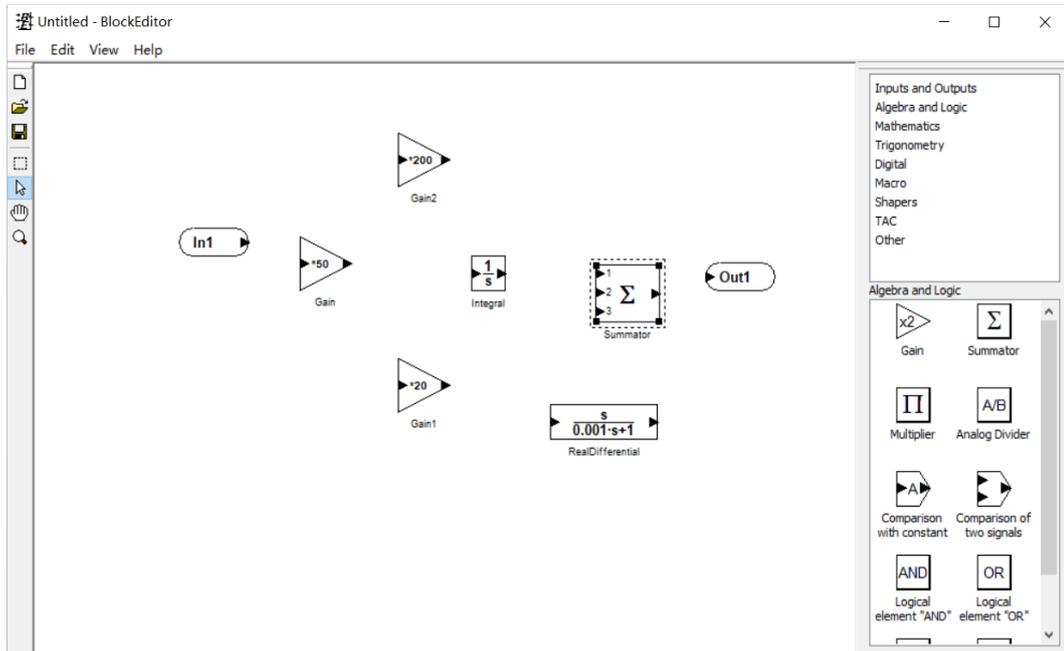


图 2-141

- 7) 按图 2-142 所示将各个环节连接起来。

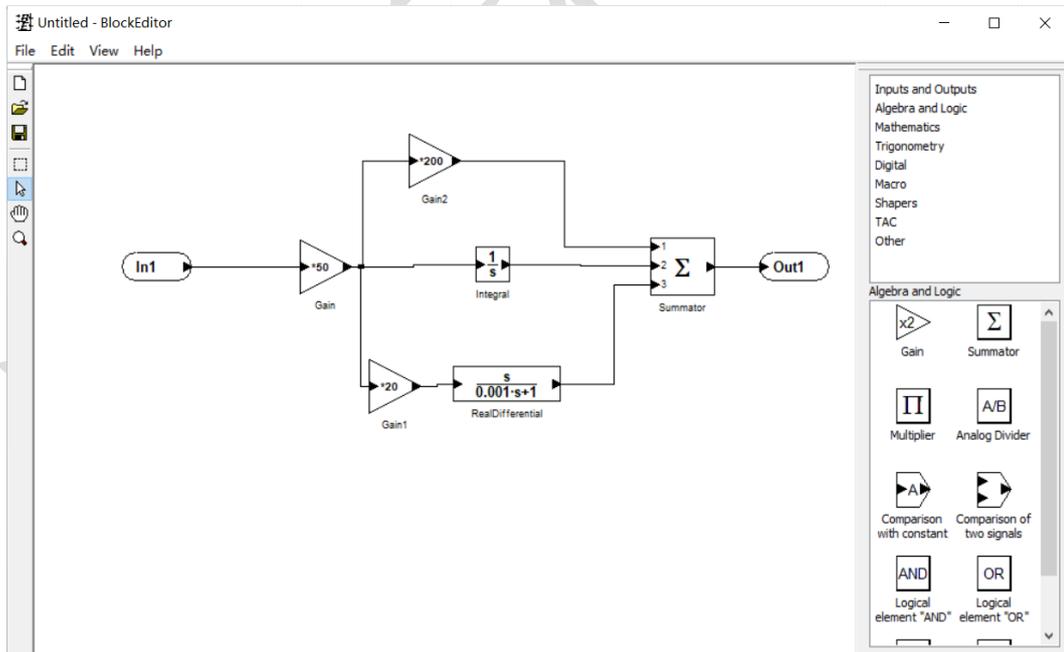


图 2-142

- 8) 保存到自动控制系统模型目录下，命名为 **control.be**，然后关闭 **Block Editor**。

2.5.3 动力学仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 仿真程序，选择菜单 **File** → **Open...**，加载模型。也可通过双击模型文件 **input.dat** 直接打开模型。拖动鼠标自由调整动画窗口的大小和位置（一般不要最大化），在动画窗口通过鼠标和工具栏按钮自由调整模型视图，如图 2-143。

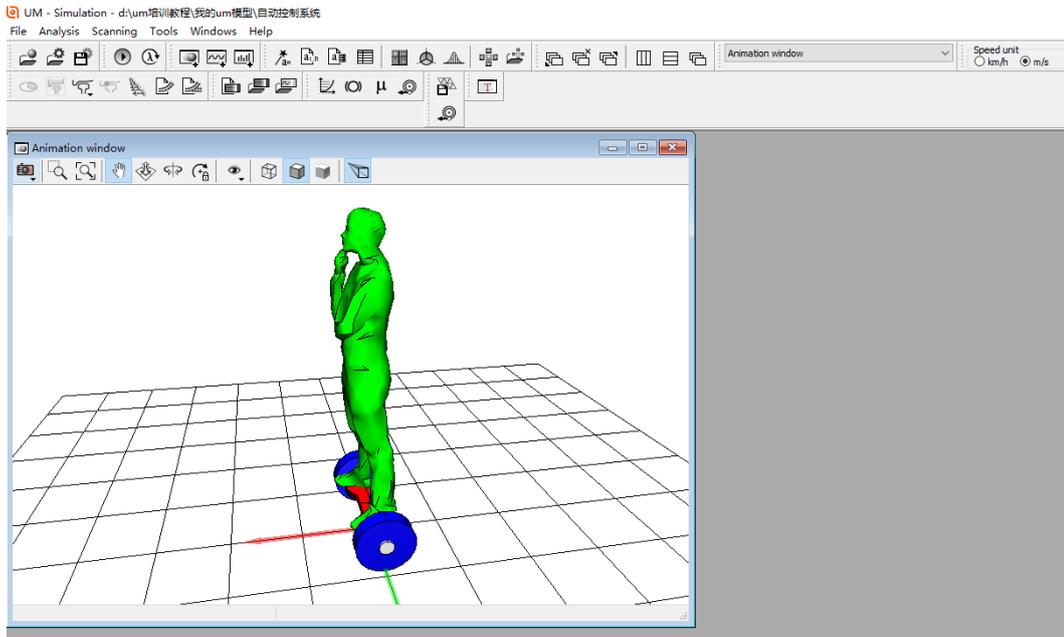


图 2-143

- 2) 选择主菜单 **Tools** → **External library Interface**，弹出外部库向导界面。

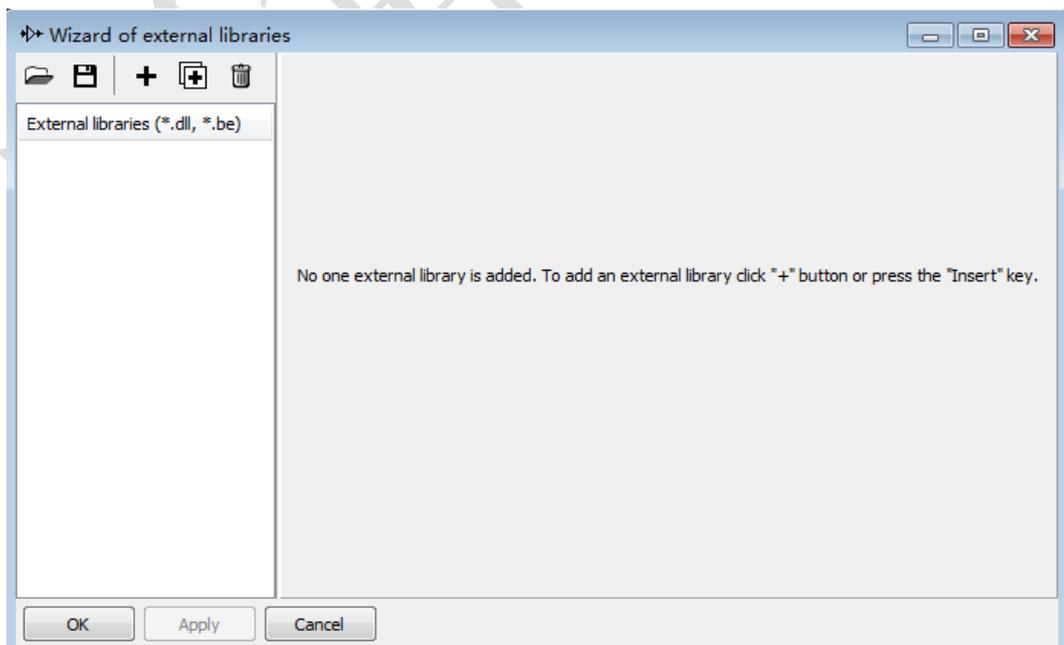


图 2-144

3) 点击按钮 ，添加一个外部库，如图 2-145。

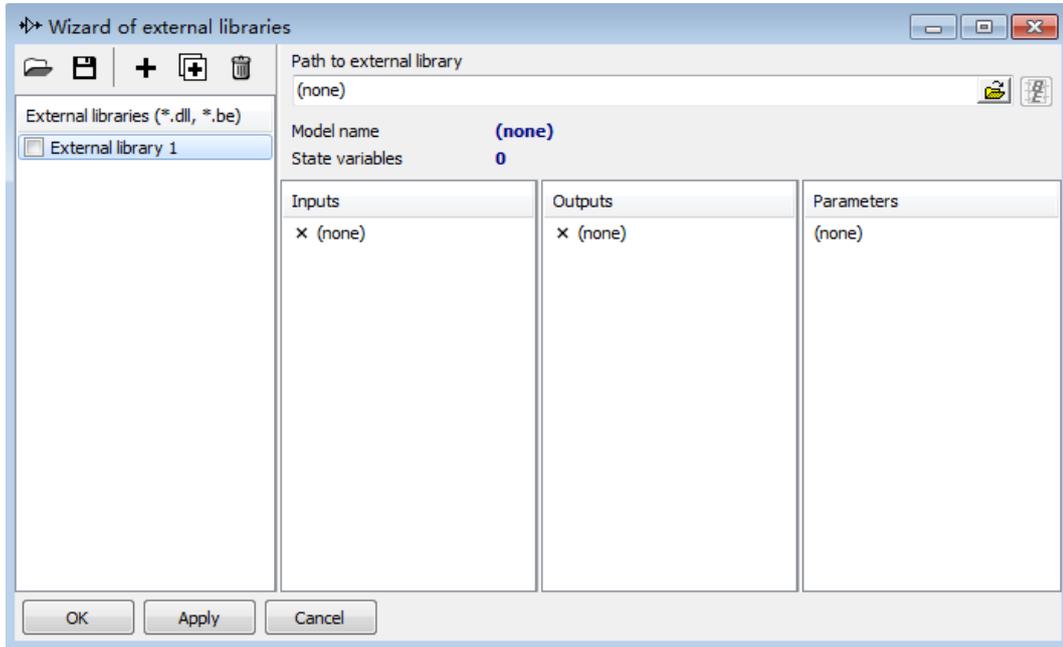


图 2-145

4) 点击按钮 ，加载控制系统“D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\自动控制系统\control.be”，如图 2-146。

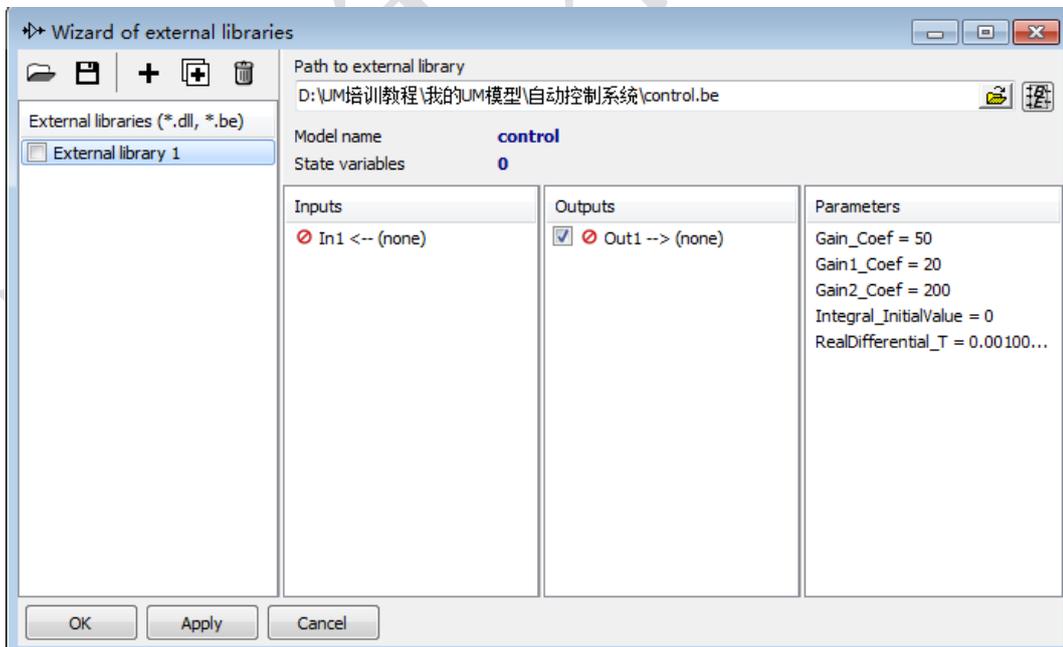


图 2-146

- 5) 选择主菜单 **Tools** → **Wizard of variables...** 打开变量向导（或点击工具栏按钮 ），定义人体绕 **Y** 轴转动的角度变量，并拖入控制系统的 **Inputs** 下方的 **In1**，作为输入信号，如图 2-147。

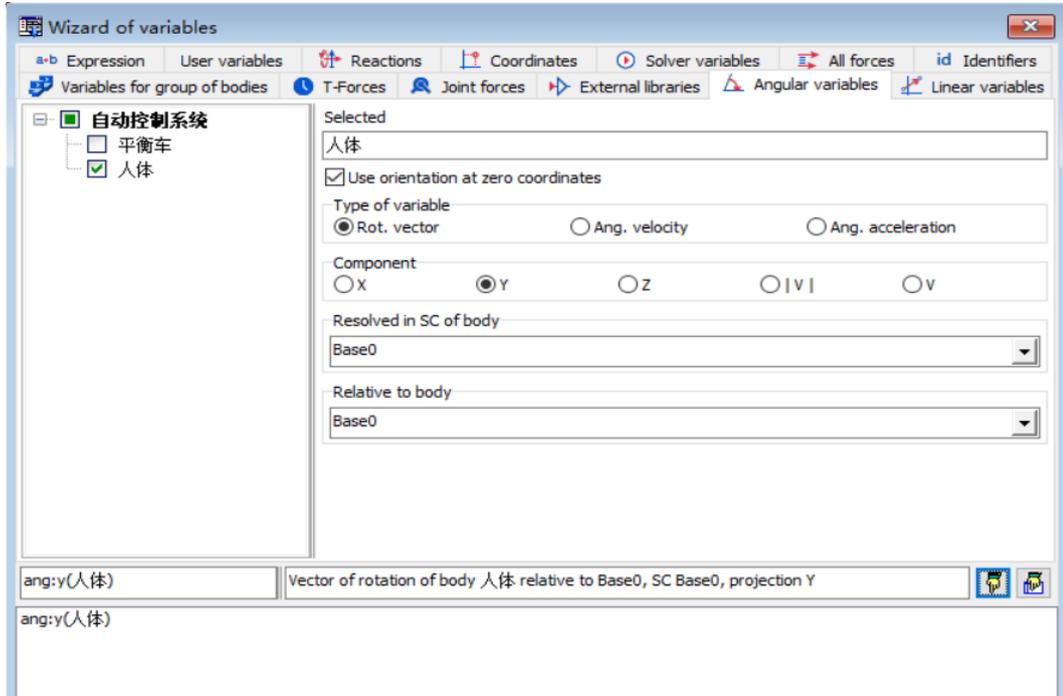


图 2-147

- 6) 双击控制系统的 **Outputs** 下方的 **Out1**，从下拉菜单中选择符号 **fx**，作为输出信号，如图 2-148。

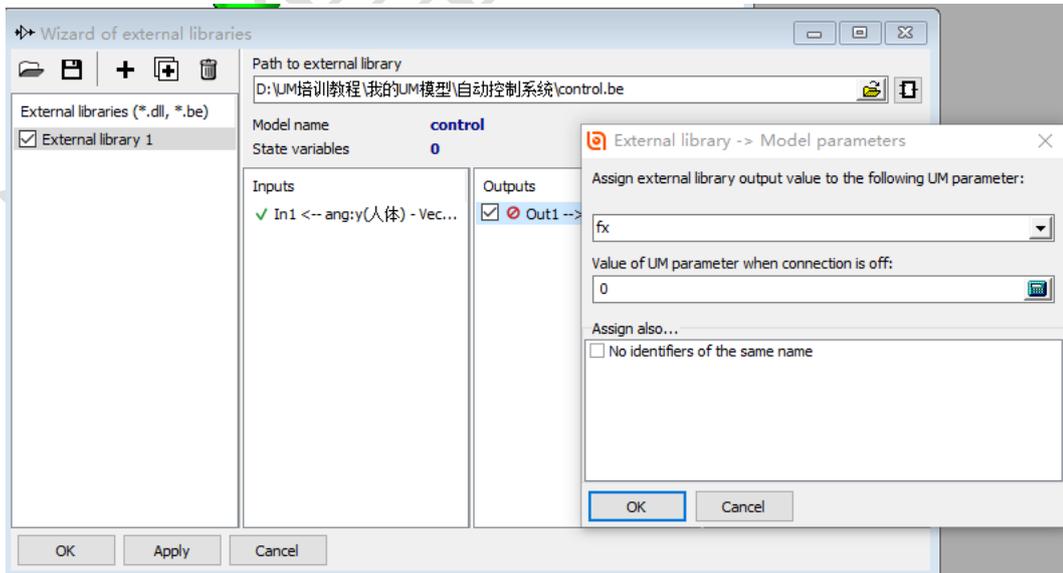


图 2-148

7) 勾选 **External library 1**，并保存，如图 2-149。

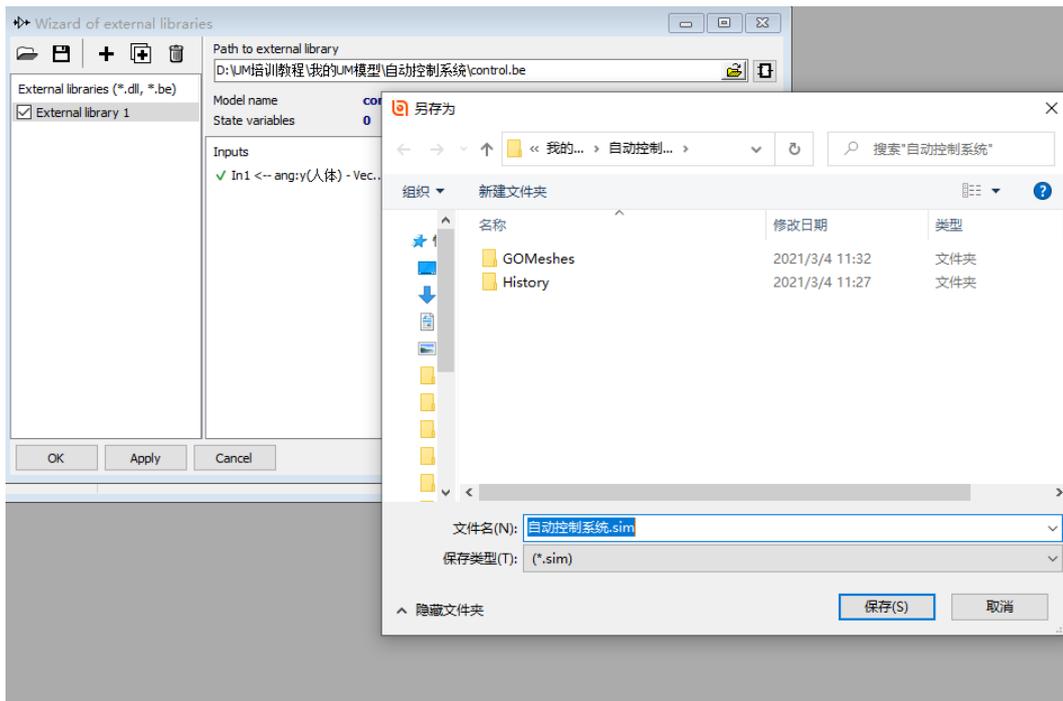


图 2-149

8) 创建控制力元的矢量 **Fv**，并拖入动画窗口，如图 2-150。

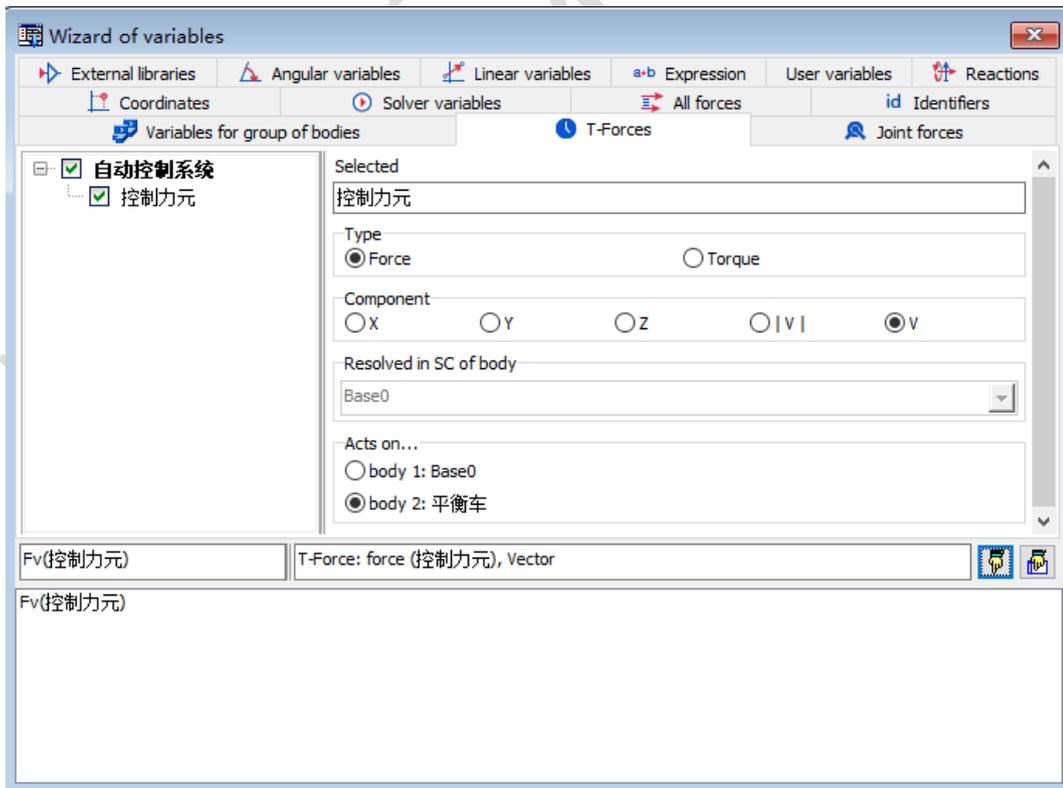


图 2-150

9) 选择主菜单 **Analysis** → **Simulation**，弹出仿真控制面板。选择求解器 **Park**，设置仿真时间为 **1 s**，数据步长为 **0.0002 s**，容差为 **1e-7**，勾选

项 **Computation of Jacobian**，如图 2-151。

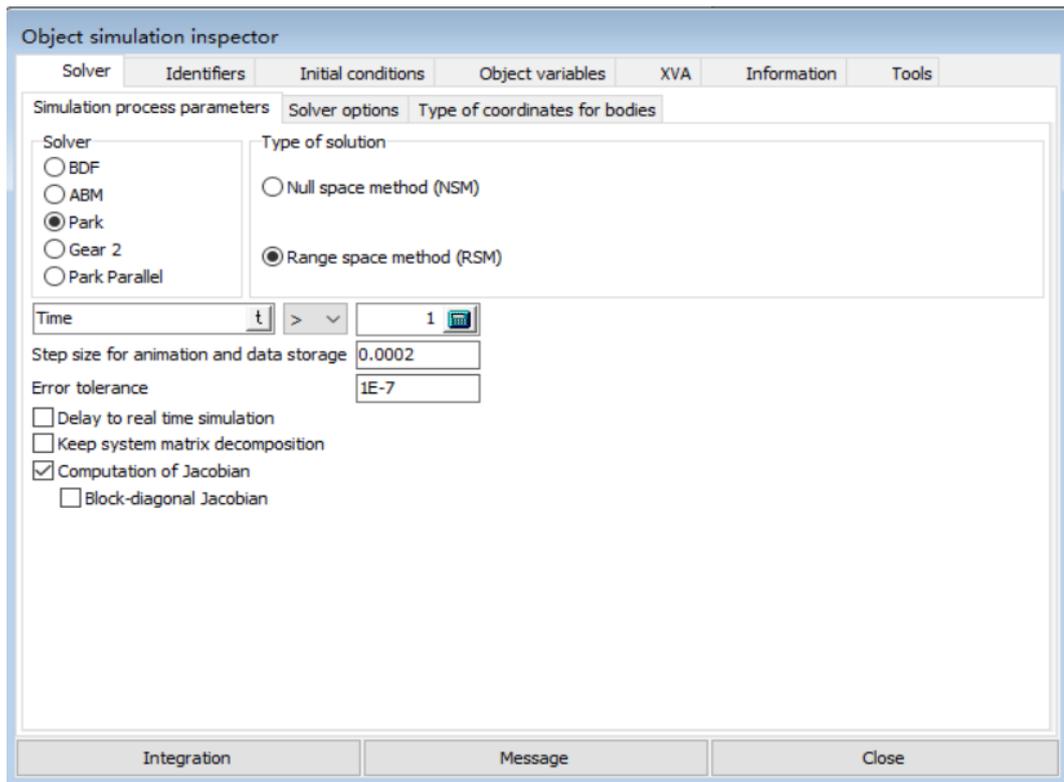


图 2-151

10) 切换到 **Initial conditons** 页面，设置平衡车初始速度 2 m/s，人体相对平衡车初始角度 0.5 rad，如图 2-152。

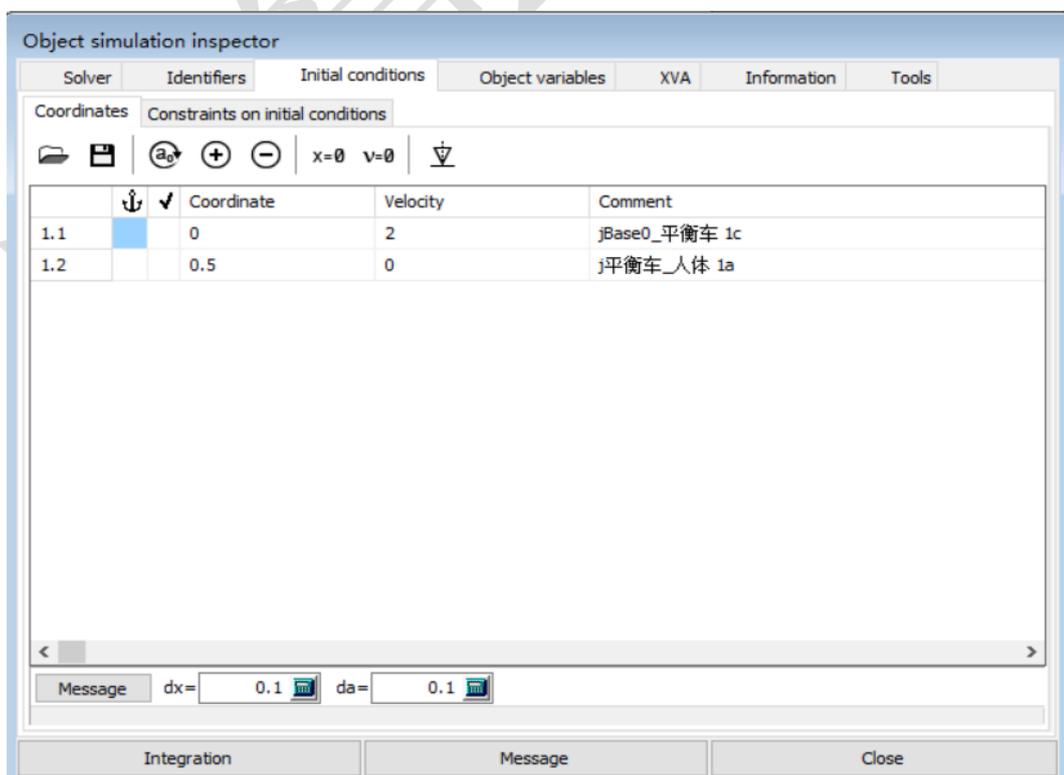


图 2-152

11) 点击 **Integration**，开始计算。

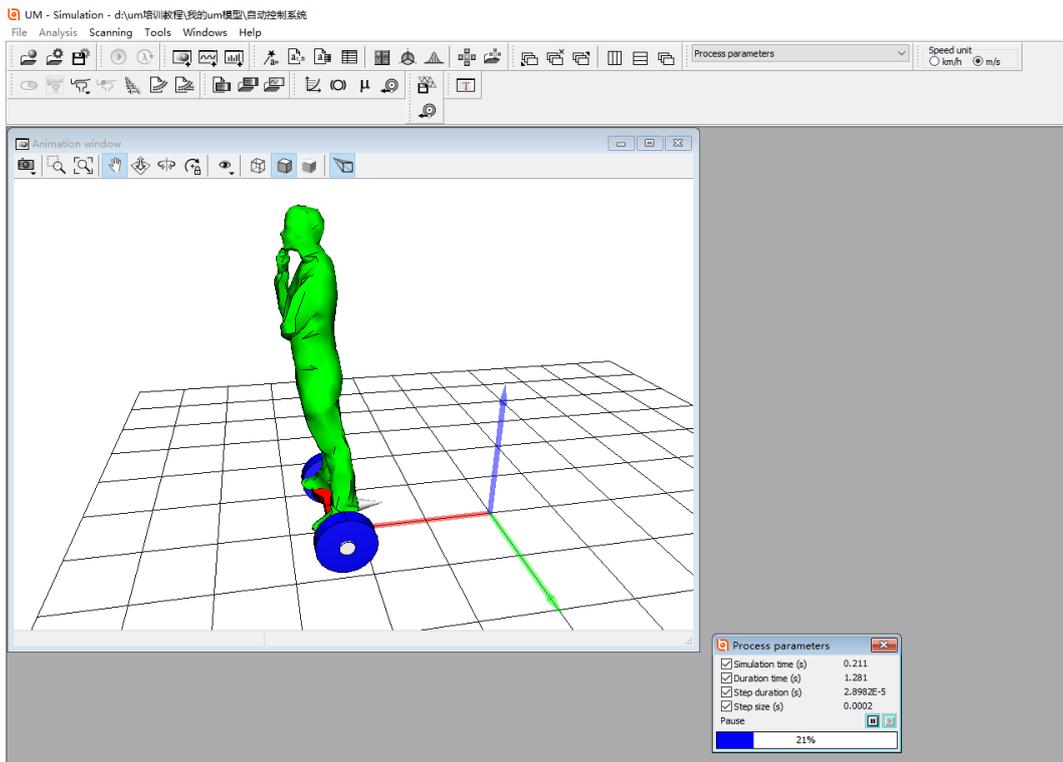


图 2-153

12) 请读者自行尝试不加控制系统的仿真工况，如图 2-154。

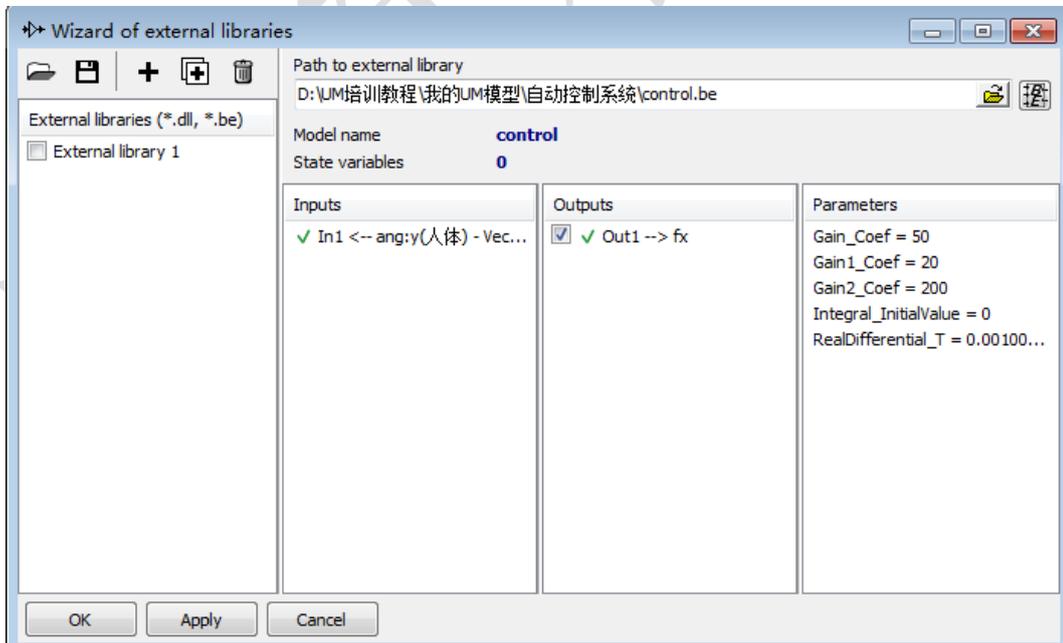


图 2-154

3. 轨道交通系统动力学建模与仿真

3.1 铁路交通

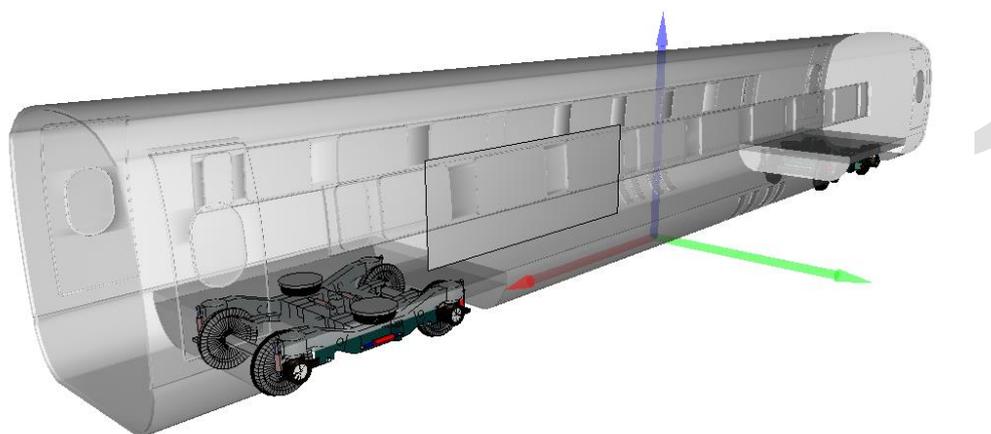


图 3-1

图 3-1 所示为一个典型的铁道车辆多刚体系统模型，该模型由一个车体和两个转向架子系统组成。其中转向架子系统里有一个构架、两个轮对和四个轴箱，构架与轮对之间有一系悬挂，车体和构架之间有二系悬挂，模型共计 50 个自由度。

本例用到的模块：**UM Base**、**UM Subsystem**、**UM Loco**。

3.1.1 多刚体车辆动力学建模

3.1.1.1 刚体与铰

- 1) 运行 **UM Input**，新建模型，保存为“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\铁道车辆多刚体模型**”。
- 2) 从“**D:\UM 培训教程\几何素材\铁道车辆多刚体模型**”依次导入建模所需的几何素材**轴箱.img**，**构架.img**，**一系弹簧.img**，**二系弹簧.img** 和**减振器.img**。
- 3) 将**轴箱**几何重命名为**轴箱 F**，复制生成第二个，命名为**轴箱 R**，将其绕 **Z** 轴旋转 **180°**，如图 3-2。

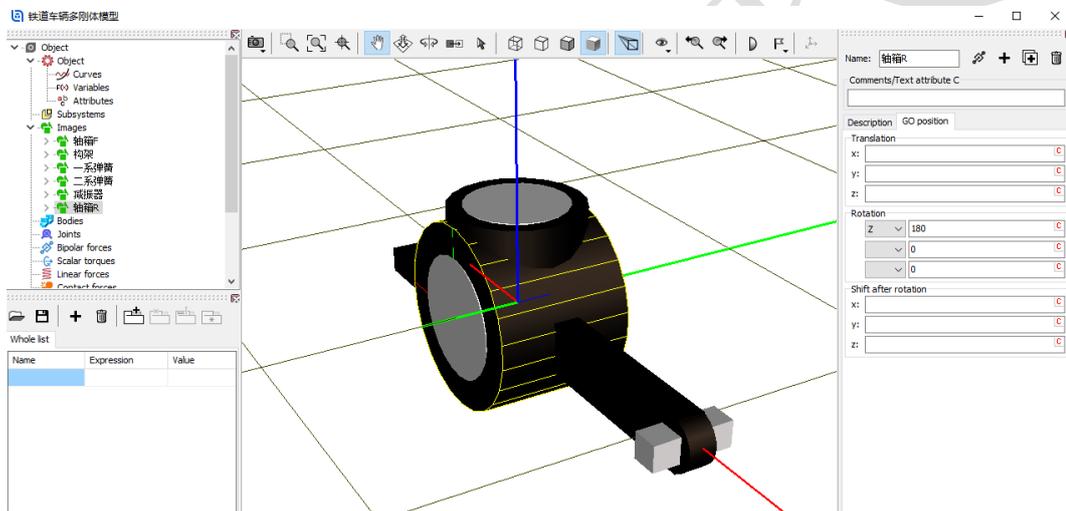


图 3-2

- 4) 创建第一个刚体，命名为**轴箱 FL**，选择几何**轴箱 F**，定义质量**50**，转动惯量 (**1, 5, 5**)，如图 3-3。

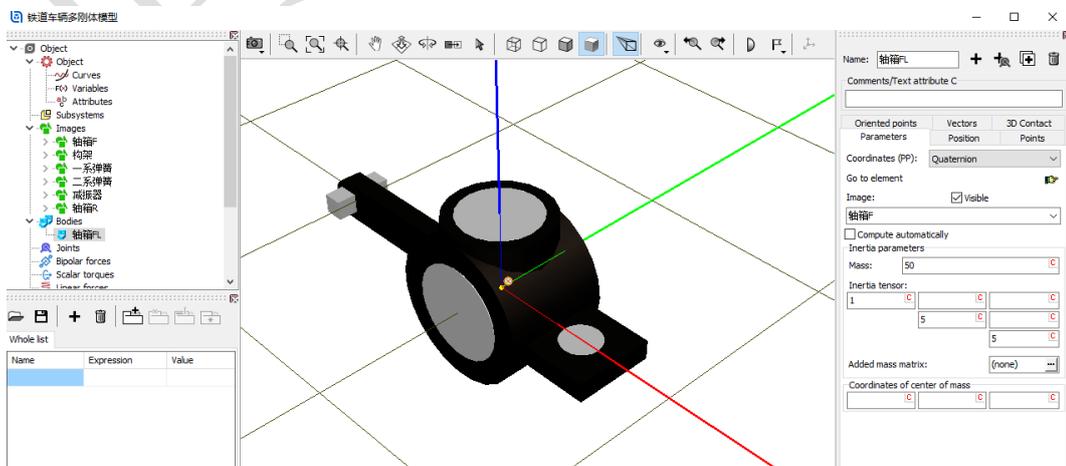


图 3-3

- 5) 复制生成第二个刚体，命名为**轴箱 FR**。
- 6) 复制生成第三个刚体，命名为**轴箱 RR**，选择几何**轴箱 R**。
- 7) 复制生成第四个刚体，命名为**轴箱 RL**。
- 8) 创建第五个刚体，命名为**构架**，选择几何**构架**，定义质量参数 **mframe** (**1605**)，转动惯量 (**1216**, **1136**, **2219**)，质心坐标 (**0**, **0**, **-0.09**)，如图 3-4。

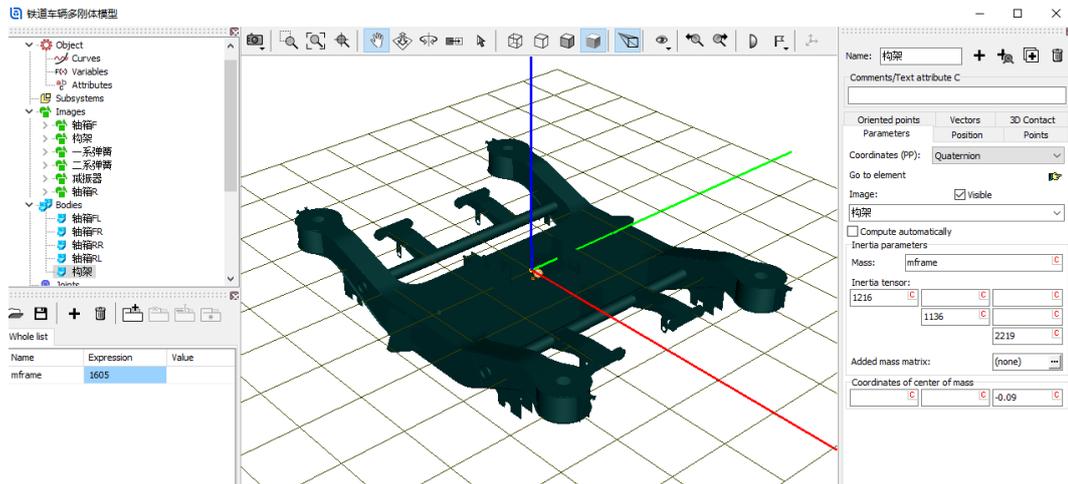


图 3-4

- 9) 选中左侧模型树 **Subsystems**，点击右侧按钮 **+**，添加一个子系统，从下拉菜单中选择 **Wheelset**，命名为**轮对 F**，在 **General** 页面设置名义半径 **0.45**，滚动圆跨距之半 **0.7465**，如图 3-5。

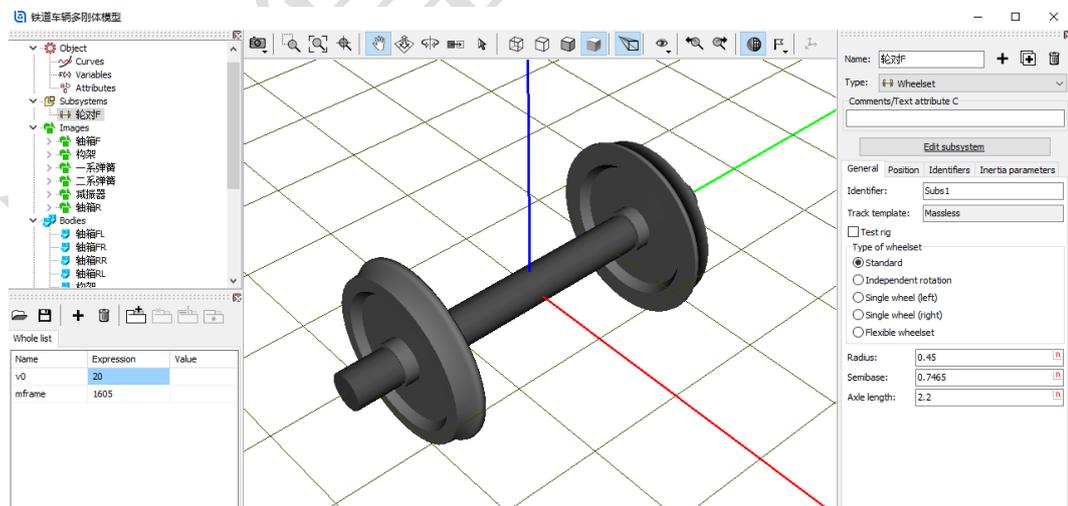


图 3-5

- 10) 切换到 **Identifiers** 页面，设置轮对质量 **1000**，侧滚和摇头转动惯量 **800**，点头转动惯量 **100**，如图 3-6。

Name	Expression	Value
mwset	1000	
ixwset	800	
iywset	100	
axlelength	2.2	
y_axlebox	1.05	

图 3-6

- 11) 切换到 **Position** 界面，设置轮对 F 子系统在总体坐标系中的位置，纵向前移 **1.5**，垂向上移 **0.45**，如图 3-7。

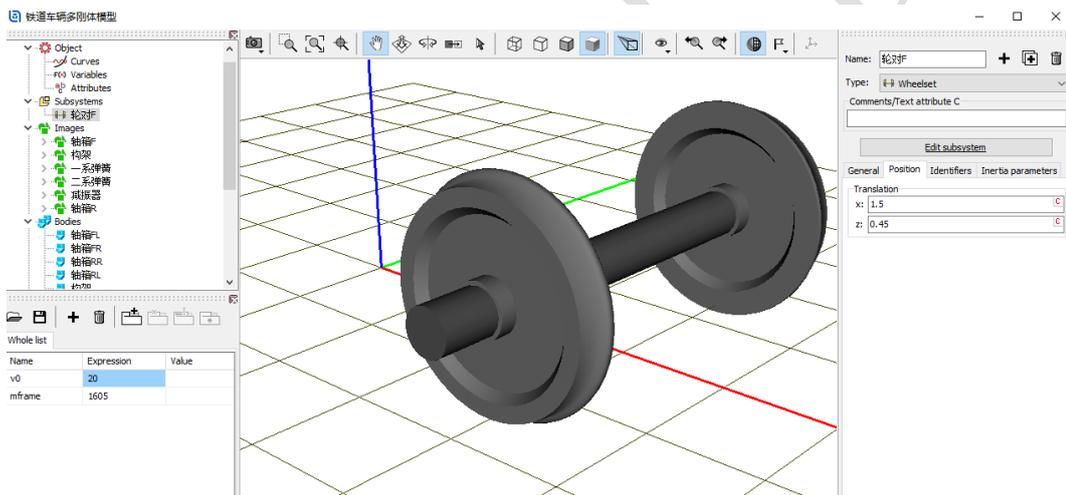


图 3-7

- 12) 复制生成第二个子系统，重命名为轮对 R，设置 **Position**，**X = -1.5**。

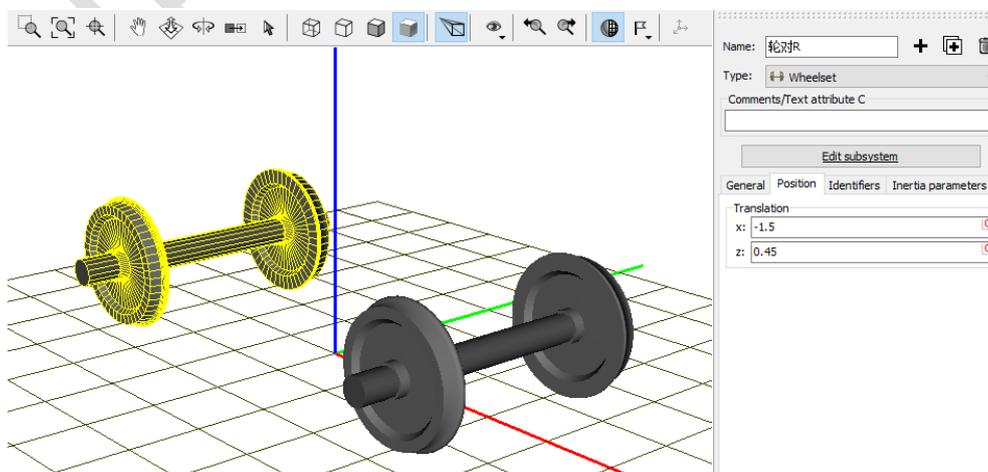


图 3-8

- 13) 创建第一个铰，**Body1** 选择轮对 **F.Wset**，**Body2** 选择轴箱 **FL**，类型为 **Rotational**，铰点坐标分别为 $(0, 1.025, 0)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，转动轴都选择 **Y** 轴，如图 3-9。

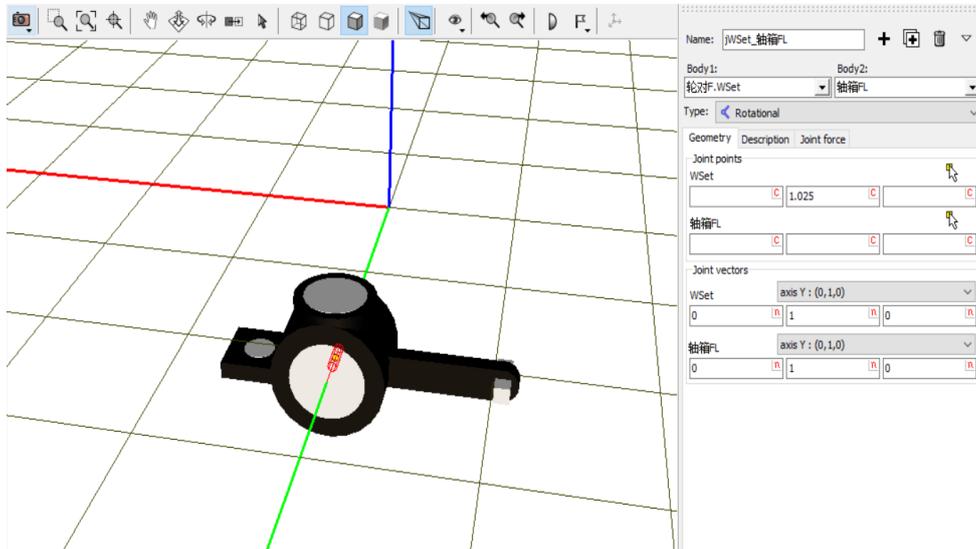


图 3-9

- 14) 复制生成第二个铰，**Body2** 更改为轴箱 **FR**，**Body1** 铰点坐标修改为 $(0, -1.025, 0)$ 。
- 15) 复制生成第三个铰，**Body1** 更改为轮对 **R.Wset**，**Body2** 更改为轴箱 **RR**。
- 16) 复制生成第四个铰，**Body2** 更改为轴箱 **RL**，**Body1** 铰点坐标修改为 $(0, 1.025, 0)$ 。
- 17) 创建第五个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择构架，类型为 **6 d.o.f.**，铰点坐标分别为 $(0, 0, 0.73)$ 和 $(0, 0, 0)$ 。切换到整体视图，如图 3-10。

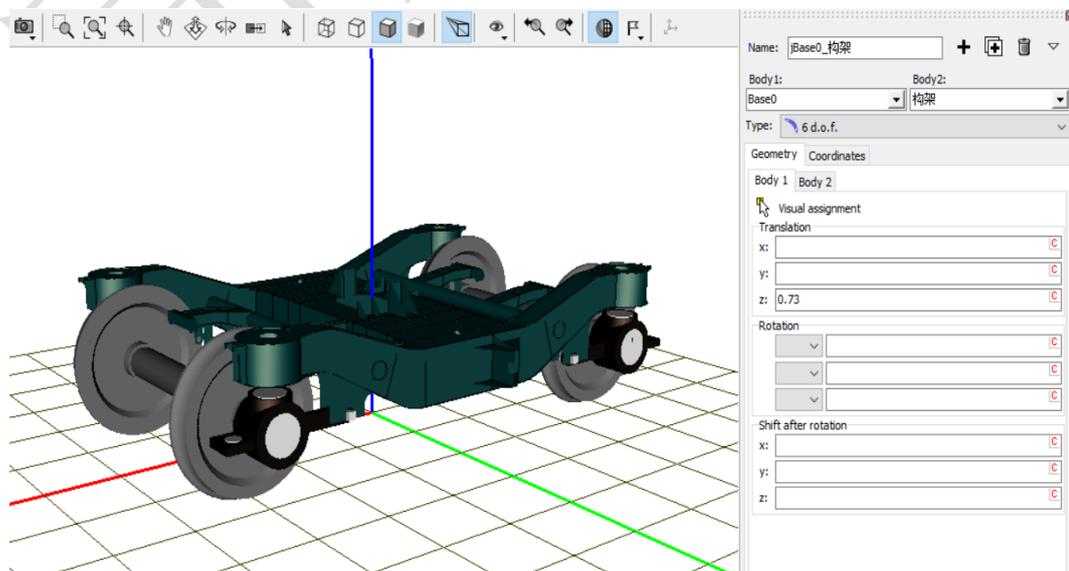


图 3-10

3.1.1.2 一系悬挂

- 选中左侧模型树 **Linear forces**，点击右侧按钮 **+**，创建第一个一系弹簧力元，命名为**一系弹簧 FL**。**Body1** 选择**轴箱 FL**，**Body2** 选择**构架**，选择几何**一系弹簧**，勾选 **Automatic computation for 2nd body**，输入弹簧下点和上点坐标 **(0, 0, 0.2)** 和 **(0, 0, 0.5)**，如图 3-11。

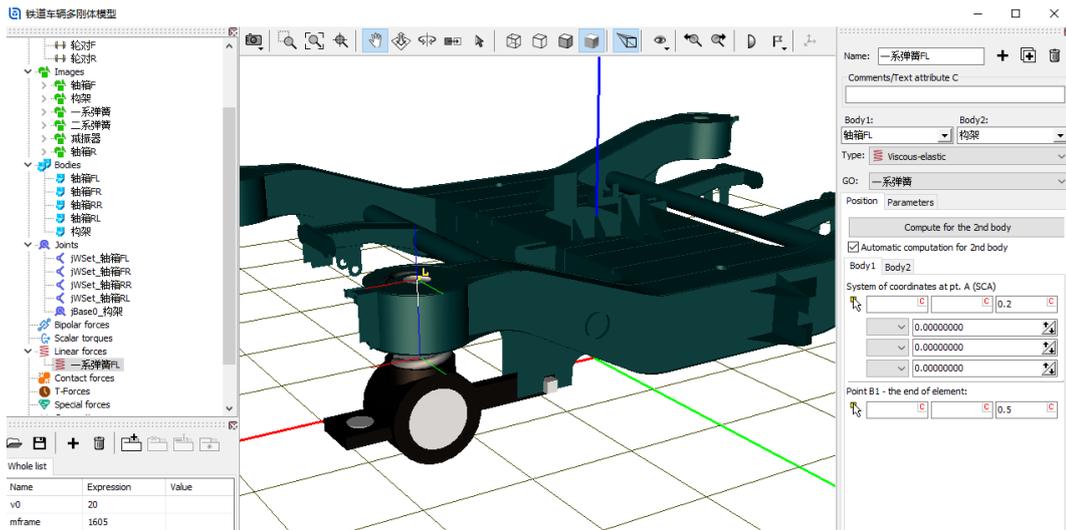


图 3-11

- 在 **Parameters** 页面，定义弹簧预压力 **fz1**，回车，在弹出窗口点 **Accept**，然后到左侧符号列表双击 **fz1**，在弹出窗口定义表达式： **$9.81 * (mcarbody/8 + mframe/4)$** ，这时程序会自动创建新的符号参数 **mcarbody**，保持缺省值为 **0** 即可。

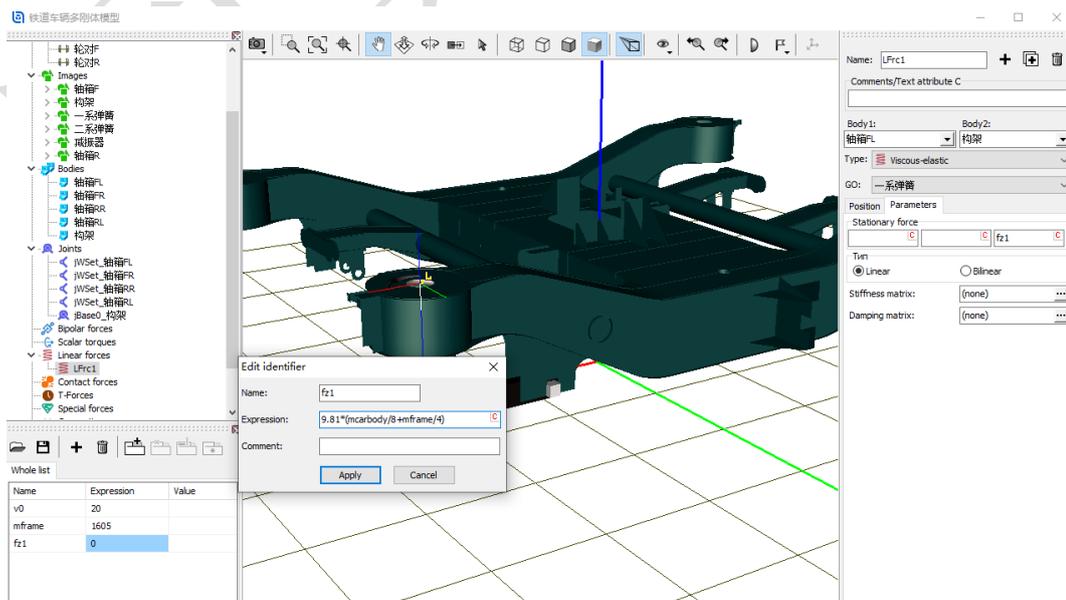


图 3-12

- 3) 点击 **Stiffness matrix** 栏的按钮，输入刚度矩阵，如图 3-13，其中 k_{xy_1} 为纵向和横向刚度 ($9.5e5$)， kz_1 为垂向刚度 ($9.0e5$)。

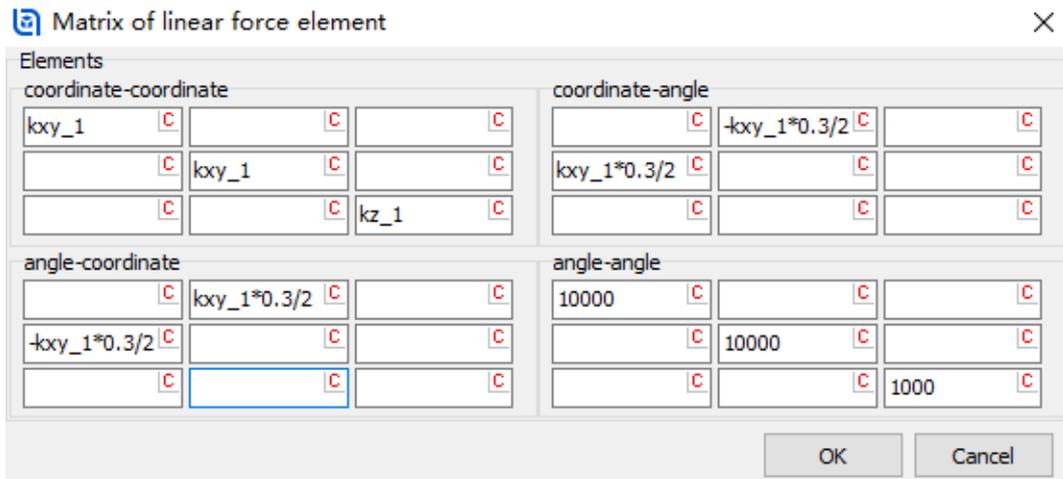


图 3-13

- 4) 复制生成第二个一系弹簧力元，重命名为一系弹簧 FR，更改 **Body1** 为 **轴箱 FR**。
- 5) 复制生成第三个一系弹簧力元，重命名为一系弹簧 RR，更改 **Body1** 为 **轴箱 RR**。
- 6) 复制生成第四个一系弹簧力元，重命名为一系弹簧 RL，更改 **Body1** 为 **轴箱 RL**。切换到整体视图，如图 3-14。

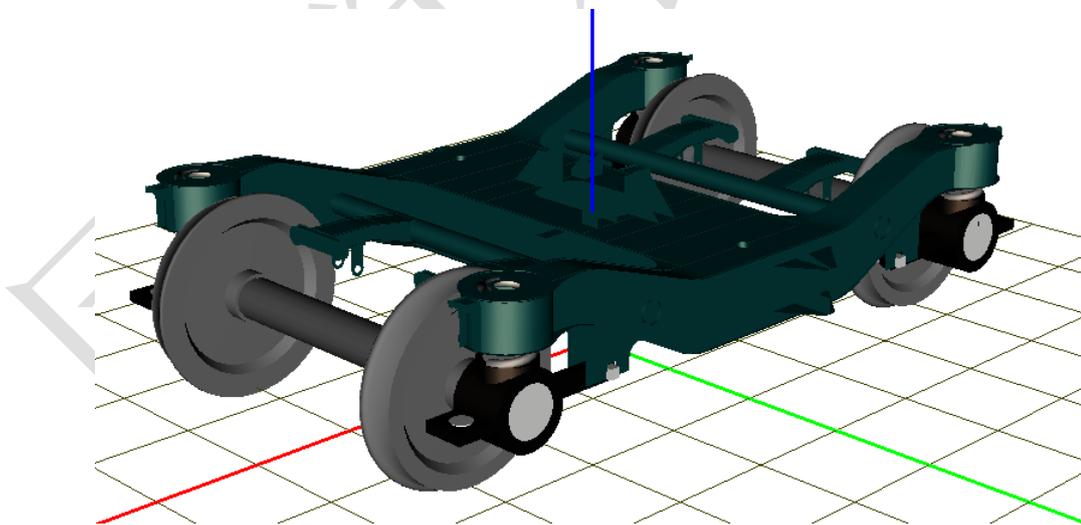


图 3-14

- 7) 选中左侧模型树 **Bipolar forces**，点击右侧按钮 **+**，创建第一个一系减振器力元，命名为**一系垂向减振器 FL**，**Body1** 选择轴箱 **FL**，**Body2** 选择**构架**，选择几何**减振器**。
- 8) 定义减振器下点和上点坐标分别为 **(0.25, 0, -0.04)**，**(1.76, 1.025, 0.215)**，选择力元类型 **linear**，定义阻尼系数 **1e4**，如图 3-15。

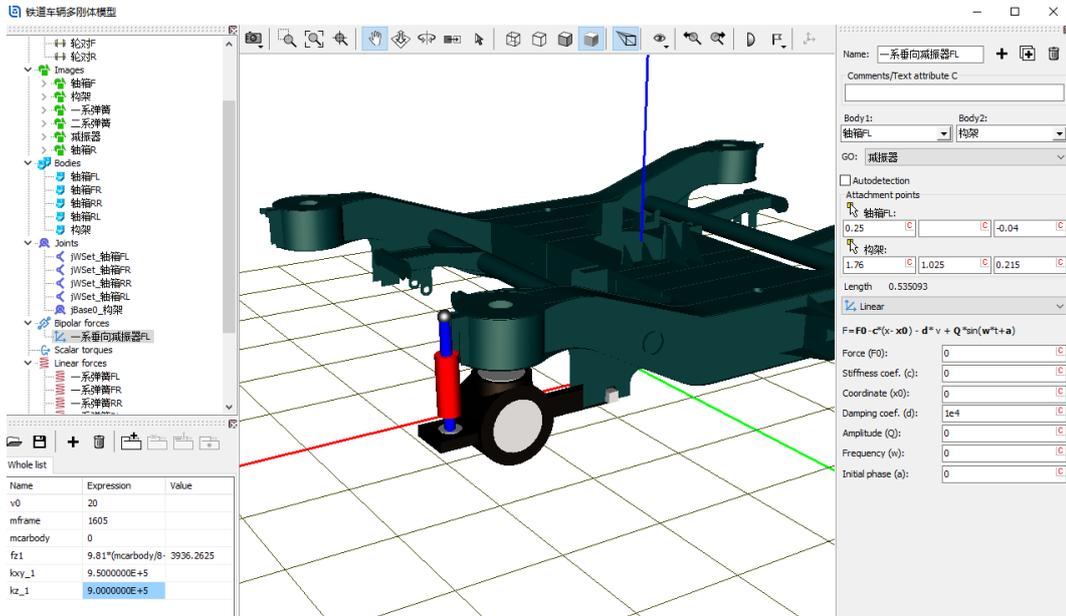


图 3-15

- 9) 复制生成第二个一系减振器力元，更改 **Body1** 为轴箱 **FR**，修改减振器上点坐标为 **(1.76, -1.025, 0.215)**。
- 10) 复制生成第三个一系减振器力元，更改 **Body1** 为轴箱 **RR**，修改减振器下点和上点坐标分别为 **(-0.25, 0, -0.04)**，**(-1.76, -1.025, 0.215)**。
- 11) 复制生成第四个一系减振器力元，更改 **Body1** 为轴箱 **RL**，修改减振器上点坐标为 **(-1.76, 1.025, 0.215)**。切换到整体视图，如图 3-16。

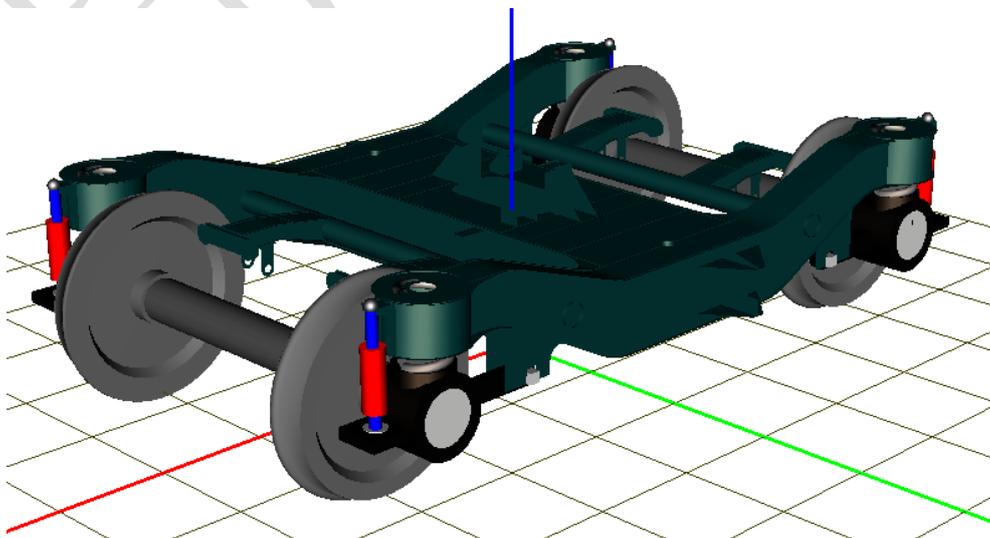


图 3-16

- 12) 选中左侧模型树 **Special forces**，点击右侧按钮 **+**，创建第一个转臂节点力元，命名为**转臂节点 FL**，从下拉菜单中选择 **Bushing**，**Body1** 选择**轴箱 FL**，**Body2** 选择**构架**，如图 3-17。

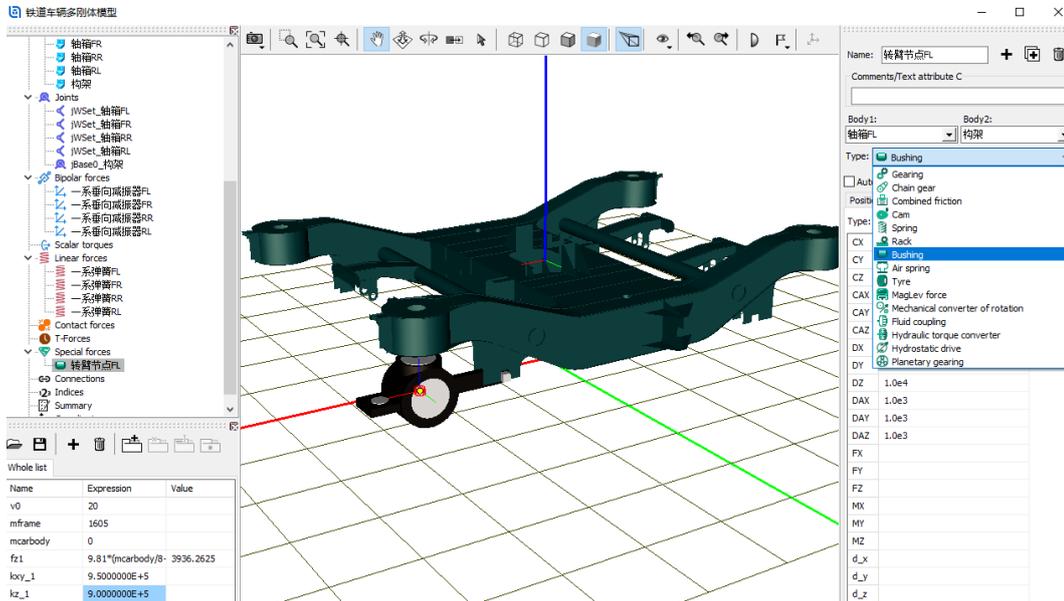


图 3-17

- 13) 在 **Position\Body1** 页面输入连接点坐标 **(-0.53, 0, -0.04)**，然后勾选 **Autodetection**；在 **Description** 页面定义刚度，**纵向**平动刚度 **1e7**，**横向**平动刚度 **5e6**，**垂向**平动刚度 **1e7**，绕 X 轴转动刚度 **1e4**，绕 Z 轴转动刚度 **1e4**，如图 3-18。

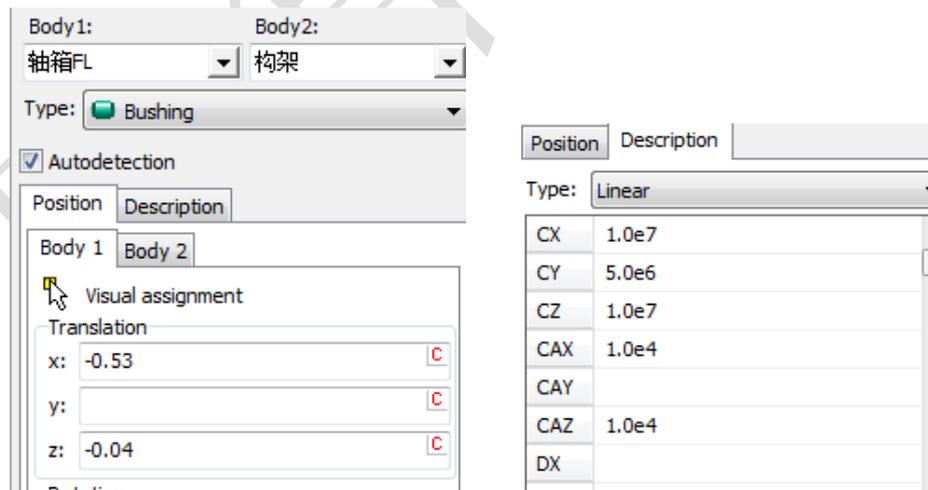


图 3-18

- 14) 复制生成第二个转臂节点力元**转臂节点 FR**，更改 **Body1** 为**轴箱 FR**。
 15) 复制生成第三个转臂节点力元**转臂节点 RR**，更改 **Body1** 为**轴箱 RR**，修改连接点坐标为 **(0.53, 0, -0.04)**。
 16) 复制生成第四个转臂节点力元**转臂节点 RL**，更改 **Body1** 为**轴箱 RL**。

3.1.1.3 二系悬挂

- 选中左侧模型树 **Linear forces**，点击右侧按钮 **+**，命名为**二系弹簧 L**，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择 **External**，选择几何**二系弹簧**，勾选 **Automatic computation for 2nd body**，在 **Body1** 页面输入弹簧下点和上点坐标 **(0, 0.94, 0)** 和 **(0, 0.94, 0.2)**，如图 3-19。

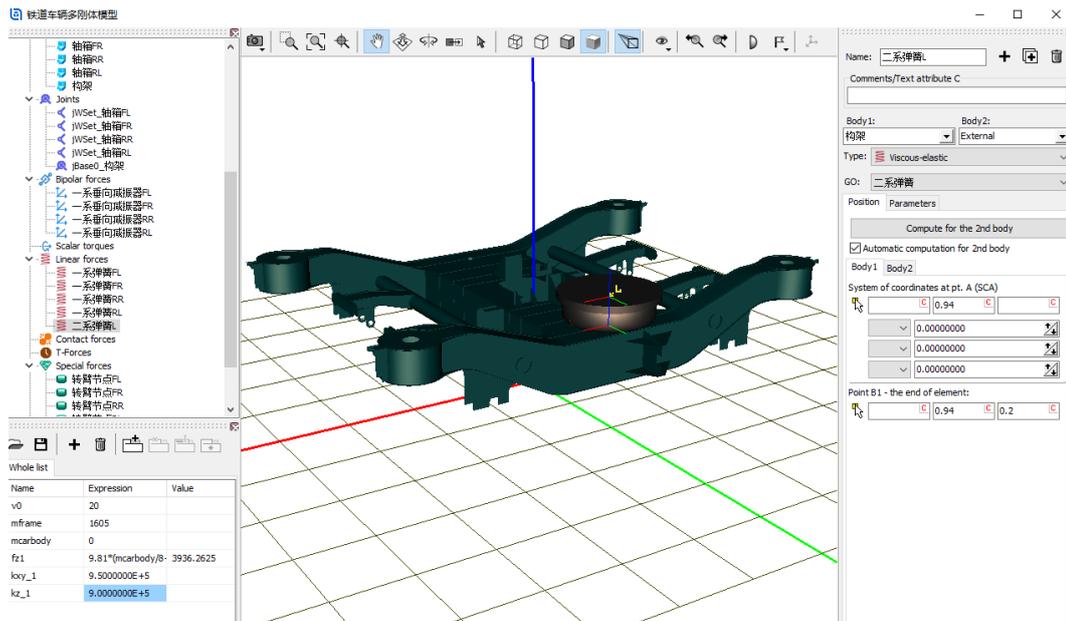


图 3-19

- 在 **Parameters** 页面，定义弹簧预压力 **fz2**，回车，在弹出窗口点 **Accept**，然后到左侧符号列表双击 **fz2**，在弹出窗口定义表达式： **$9.81 * mcarboby/4$** ，如图 3-20。

Name	Expression	Value
v0	20	
mframe	1605	
mcarboby	0	
fz1	$9.81 * (mcarboby/8 + 3936.2625)$	
kxy_1	$9.5000000E+5$	
kz_1	$9.0000000E+5$	
fz2	$9.81 * mcarboby/4$	0

Position Parameters

Stationary force

Linear Bilinear

Stiffness matrix: (none) ...

Damping matrix: (none) ...

图 3-20

- 3) 点击 **Stiffness matrix** 栏的按钮，输入刚度矩阵，如图 3-21，其中 k_{xy_2} 为纵向和横向刚度（ $1.25e5$ ）， k_{z_2} 为垂向刚度（ $1.5e5$ ），如图 3-21。

图 3-21

- 4) 点击 **Damping matrix** 栏的按钮，输入垂向阻尼系数 **10000**，如图 3-22。

图 3-22

- 5) 复制生成第二个二系弹簧力元**二系弹簧 R**，修改弹簧下点和上点坐标（ $0, -0.94, 0$ ）和（ $0, -0.94, 0.2$ ）。

- 6) 选中左侧模型树 **Bipolar forces**，点击右侧按钮 **+**，命名为**二系横向减振器 F**，**Body1** 选择构架，**Body2** 选择 **External**，选择几何**减振器**。
- 7) 定义减振器左点和右点坐标分别为 **(0.24, 0.24, 0.105)**，**(0.24, -0.36, 0.105)**，勾选 **Autodetection**。
- 8) 选择力元类型 **Viscous-elastic**，定义刚度系数 **5e6**，阻尼系数 **5e4**。

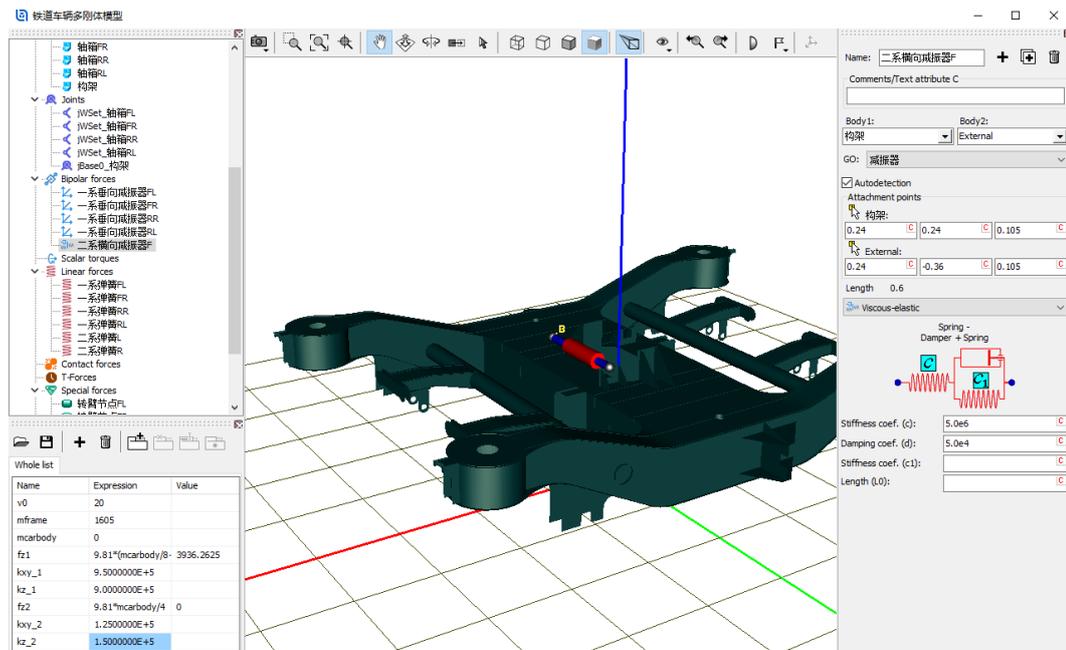


图 3-23

- 9) 复制生成第二个横向减振器力元**二系横向减振器 R**，修改减振器两个连接点坐标分别为 **(-0.24, -0.24, 0.105)**，**(-0.24, 0.36, 0.105)**。

- 10) 复制力元，重命名为**抗蛇行减振器 L**，修改减振器两个连接点坐标分别为 **(-0.16, 1.315, -0.17)**，**(0.54, 1.315, -0.17)**。
- 11) 更改力元类型为 **Nonlinear viscous-elastic**。

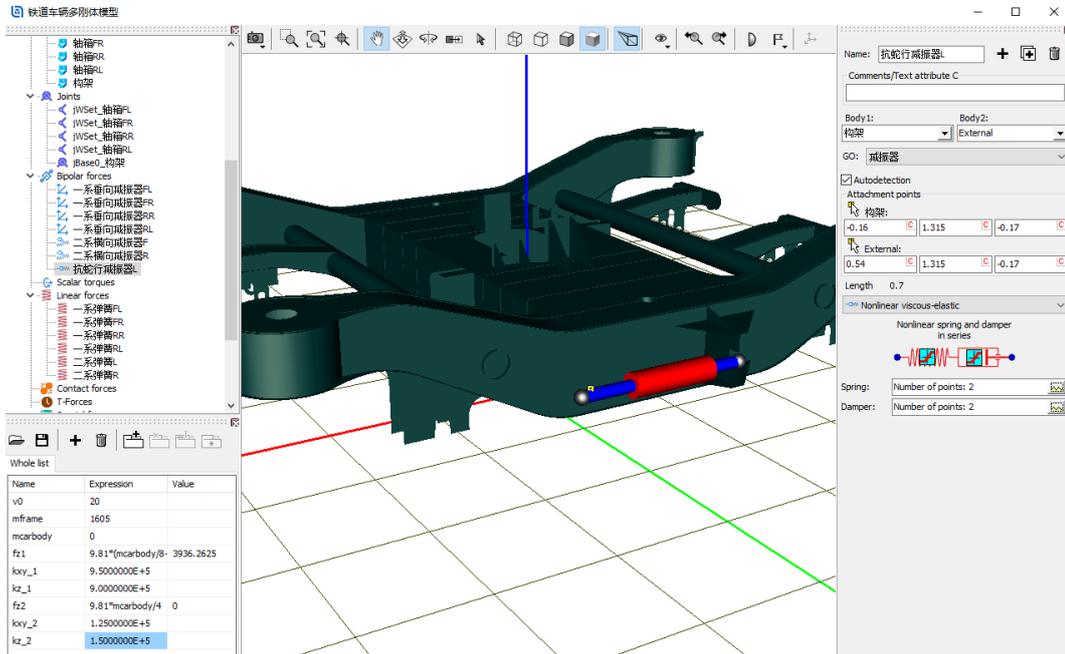


图 3-24

- 12) 点击 **Spring** 栏的按钮 ，定义减振器串联接头刚度 **1e7 (N/m)**（横坐标为弹簧变形，纵坐标为弹簧力）。

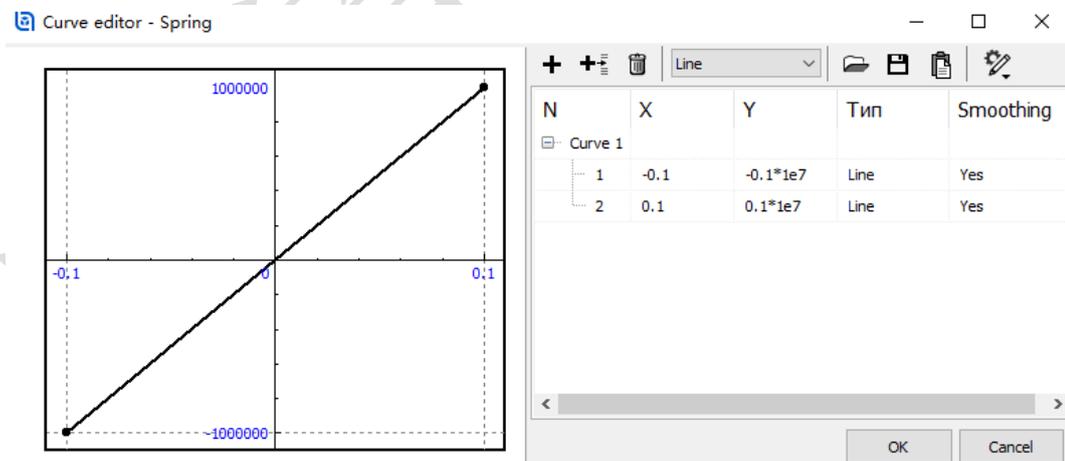


图 3-25

- 13) 点击 **Damper** 栏的按钮 ，定义减振器非线性特性（横坐标为相对速度）。

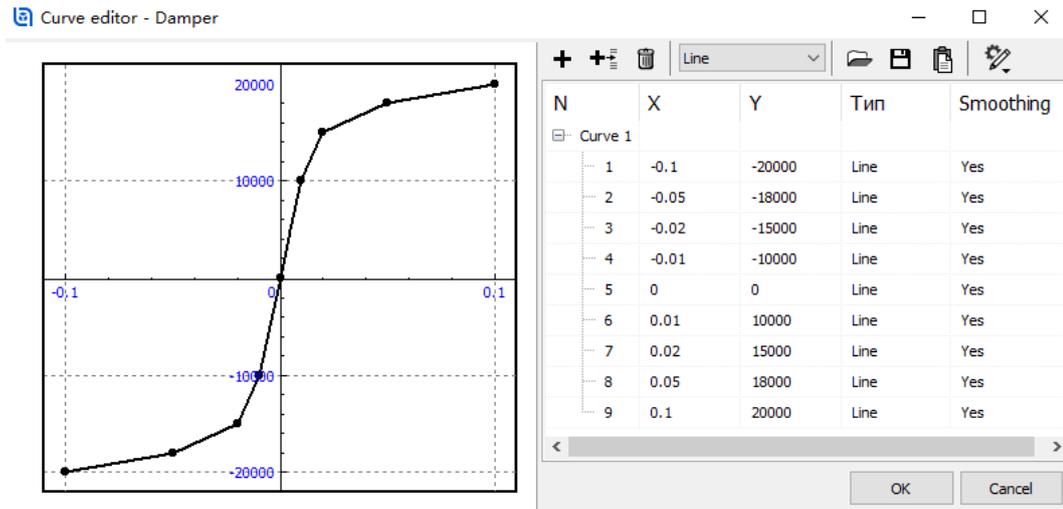


图 3-26

- 14) 复制力元，重命名为**抗蛇行减振器 R**，修改减振器两个连接点坐标分别为 $(-0.16, -1.315, -0.17)$ ， $(0.54, -1.315, -0.17)$ 。
- 15) 点击  切换到整体视图，点击中间动画窗口工具栏图标 ，从下拉菜单选择 **Show all**，可看到每个元素都有相应标记。

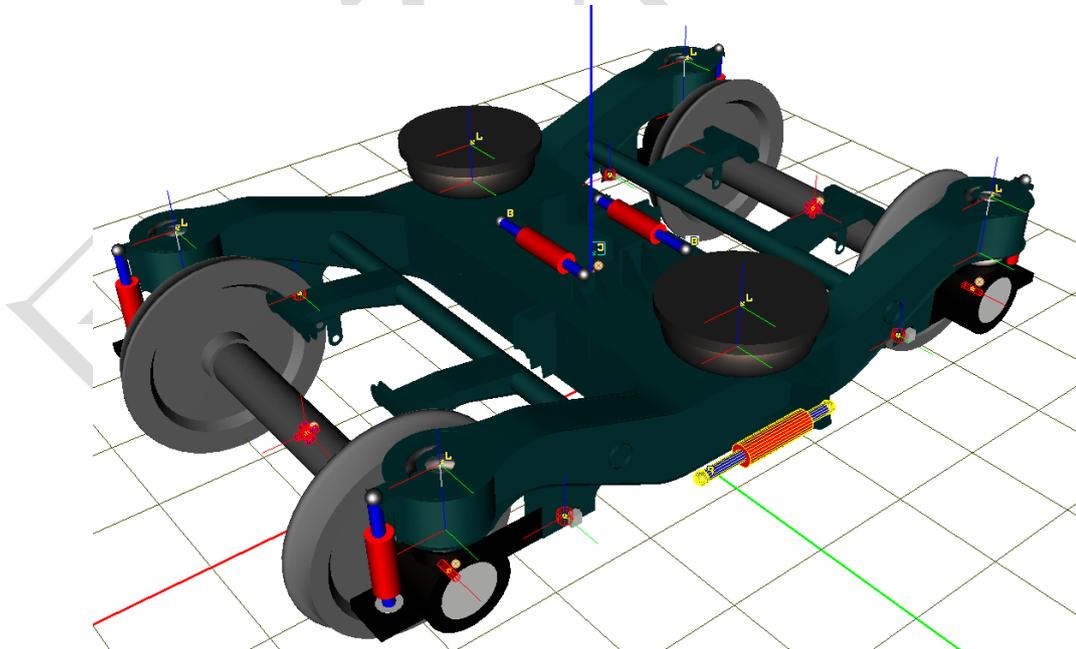


图 3-27

至此，我们完成了转向架系统一系和二系的建模，记得保存一下。

3.1.1.4 整车装配

- 1) 左侧选中模型树 **Object**，在右侧 **General** 页面点击按钮 **Transform into subsystem**，这样就把一个转向架模型压缩成了一个子系统，便于整体操作。

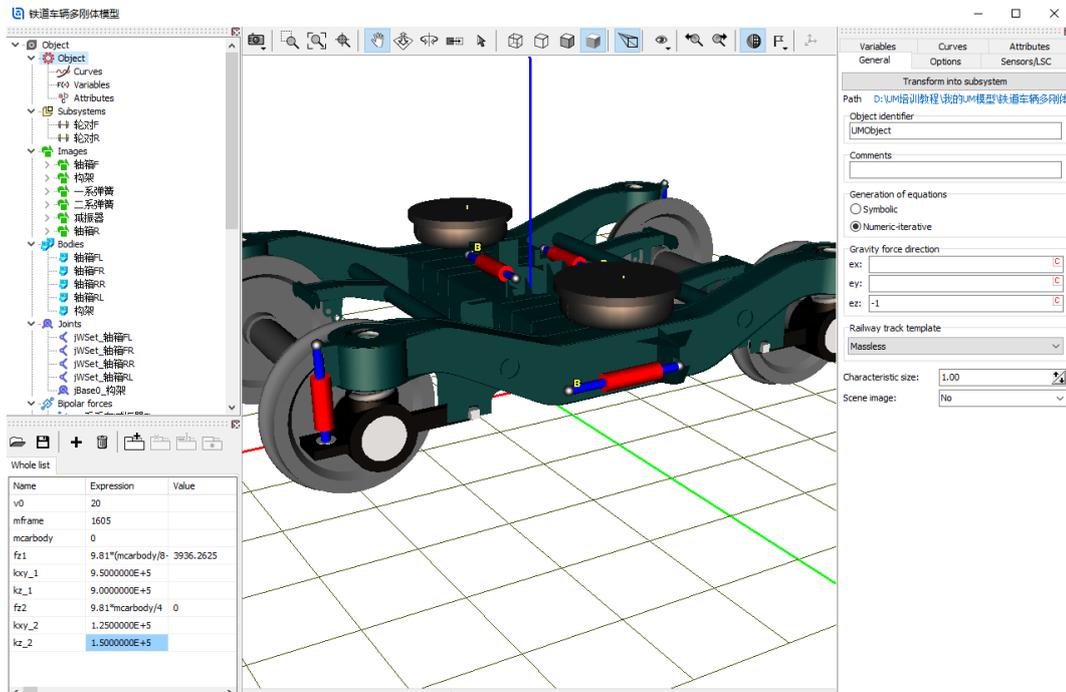


图 3-28

- 2) 重命名为**转向架 F**，在 **Position** 定义 **X** 平动 **9**。

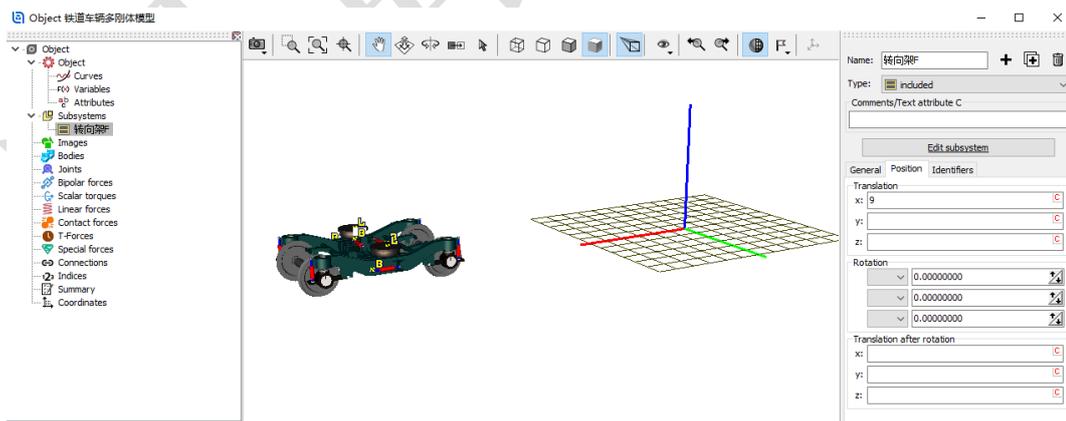


图 3-29

- 3) 复制生成第二个子系统，重命名为**转向架 R**，**Position** 定义 **X** 平动**-9**。
- 4) 点击 **Edit subsystem**，进入**转向架 R** 子系统。
- 5) 将构架几何绕 **Z** 轴旋转 **180°**。

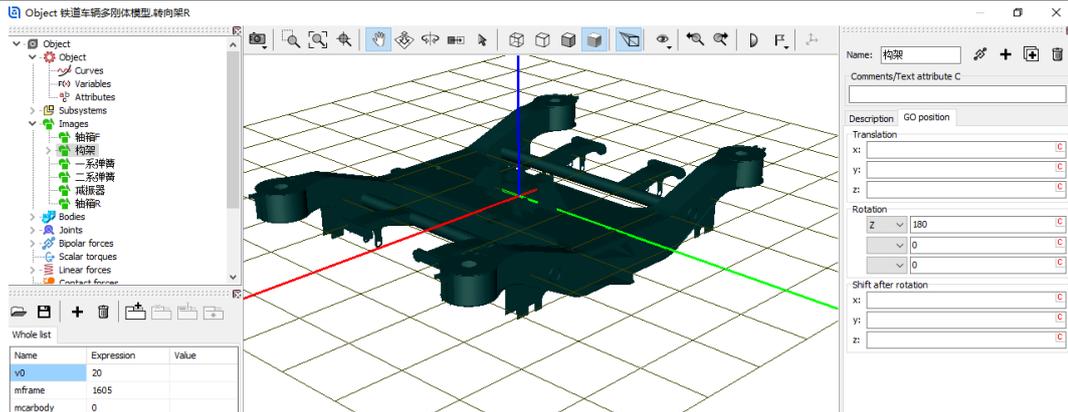


图 3-30

- 6) 点开 **Bipolar forces**，修改第一个抗蛇行减振器力元的连接点坐标为 $(0.16, 1.315, -0.17)$ ， $(-0.54, 1.315, -0.17)$ ；修改第二个抗蛇行减振器力元的连接点坐标为 $(0.16, -1.315, -0.17)$ ， $(-0.54, -1.315, -0.17)$ 。
- 7) 点击 **Accept**，完成修改，退出子系统。
- 8) 从“D:\UM 培训教程\几何素材\铁道车辆多刚体模型”导入几何素材车体。
- 9) 在左侧参数符号列表区点右键，选择菜单 **Add from subsystem...**，从列表中选择转向架 F 子系统里的 **mcarbody** 参数，将其设置为 **40000** (kg)，弹出提示，点击 **OK**，这样将两个转向架子系统里的 **mcarbody** 参数也都赋值 **40000**，如图 3-31。

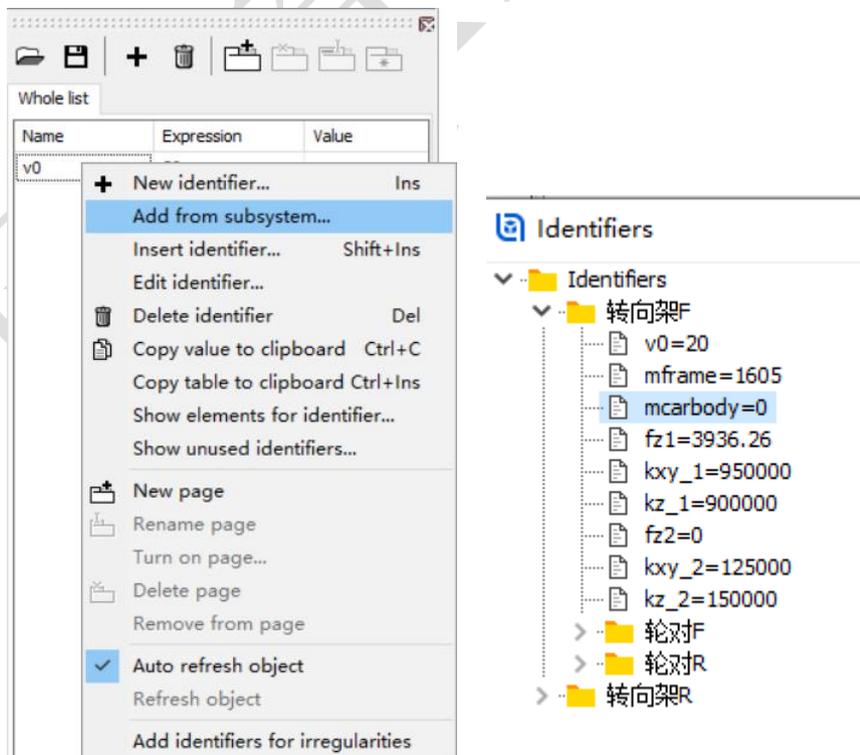


图 3-31

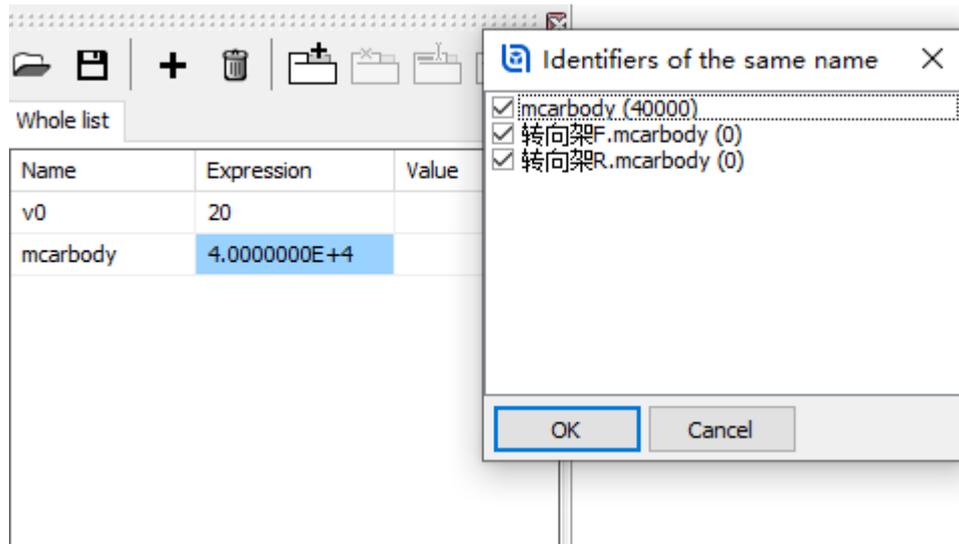


图 3-32

- 10) 创建车体刚体，定义质量 **mcarbody**，转动惯量 (**1e5**, **2e6**, **2e6**)，质心坐标 (**0**, **0**, **1.75**)；点击按钮 ，创建一个六自由度铰。

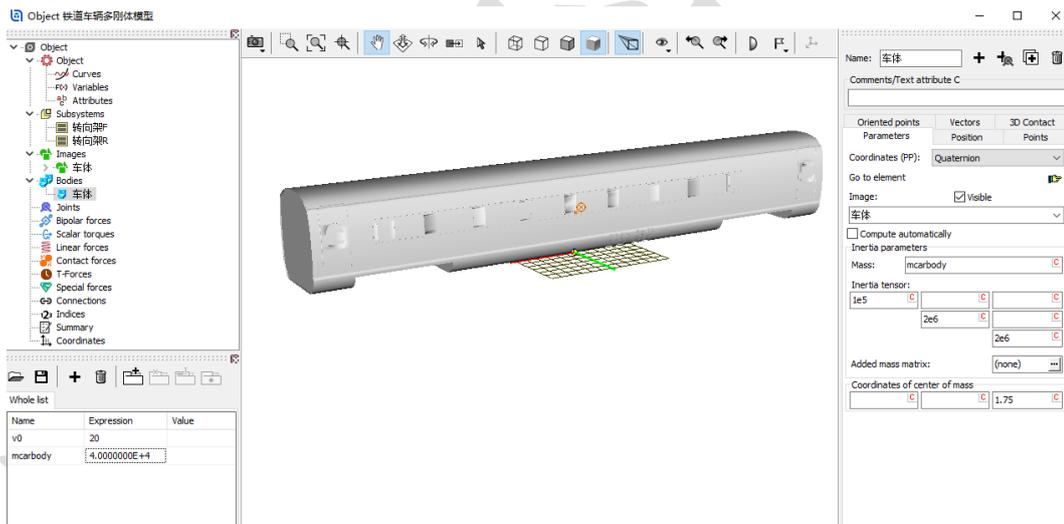


图 3-33

- 11) 最后，我们需要将车体和两个转向架子系统建立连接。在二系力元建模时，还没有车体这个物体，因此所有的 **Body2** 都选择一个虚拟物体 **External**，两个连接点的坐标都在 **Body1** 坐标系中定义的。在左侧模型树选择 **Connection**，右侧交互界面选中任意一个力元，点右键，选择 **Assign to all**，然后选择车体局部坐标系原点（其实车体上任意点都行），这样就用车体替换了子系统里的 **External** 虚拟体。

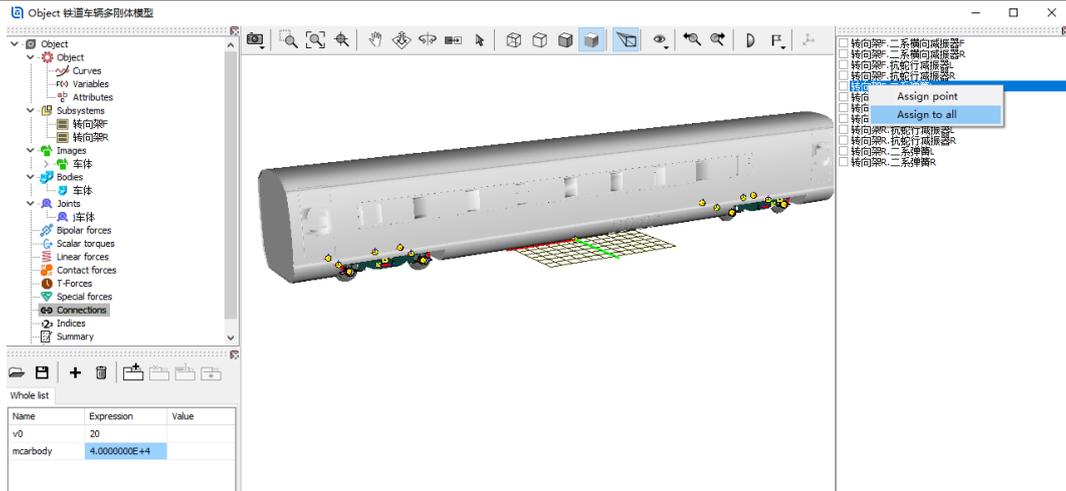


图 3-34

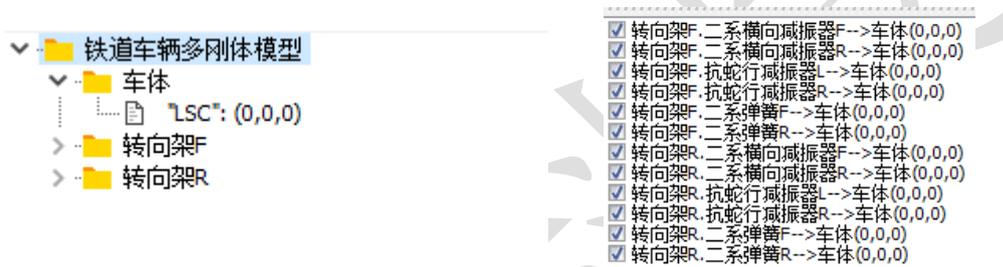


图 3-35

12) 点击 **Summary**，检查是否有逻辑错误，保存模型，关闭 **UM Input** 程序。

3.1.2 多刚体车辆动力学仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 程序，加载铁道车辆多刚体模型。自由调整动画窗口大小、位置和视图方向。

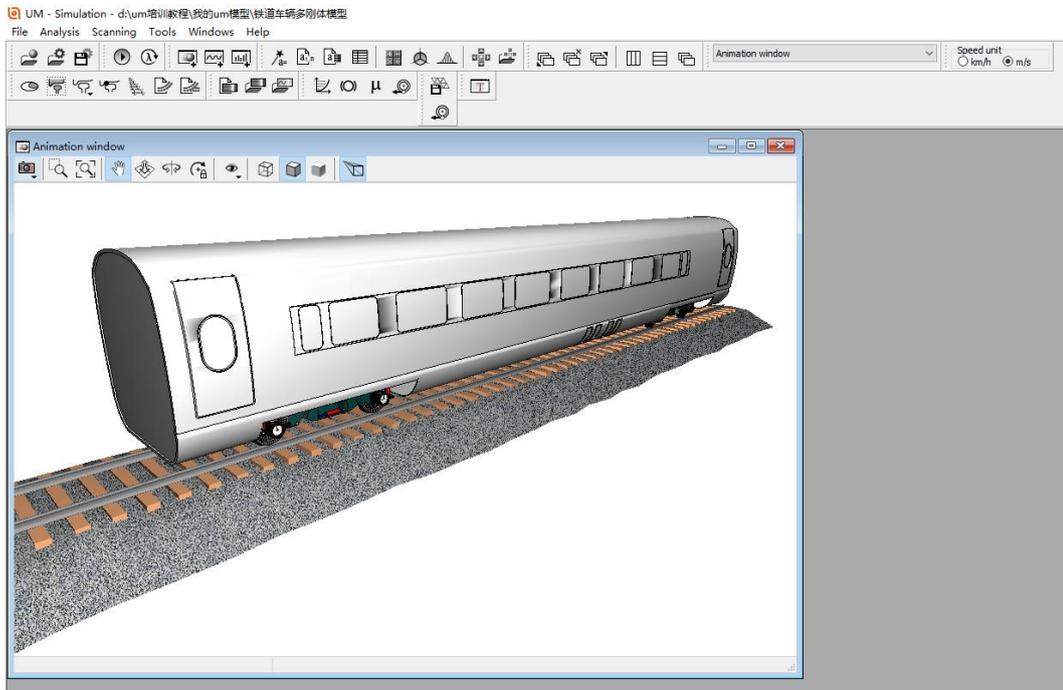


图 3-36

- 2) 打开仿真控制面板，选择 **Park** 求解器，设置仿真距离 **1500m**，设置数据采样步长为 **0.005s**，勾选 **Computation of Jacobian**。

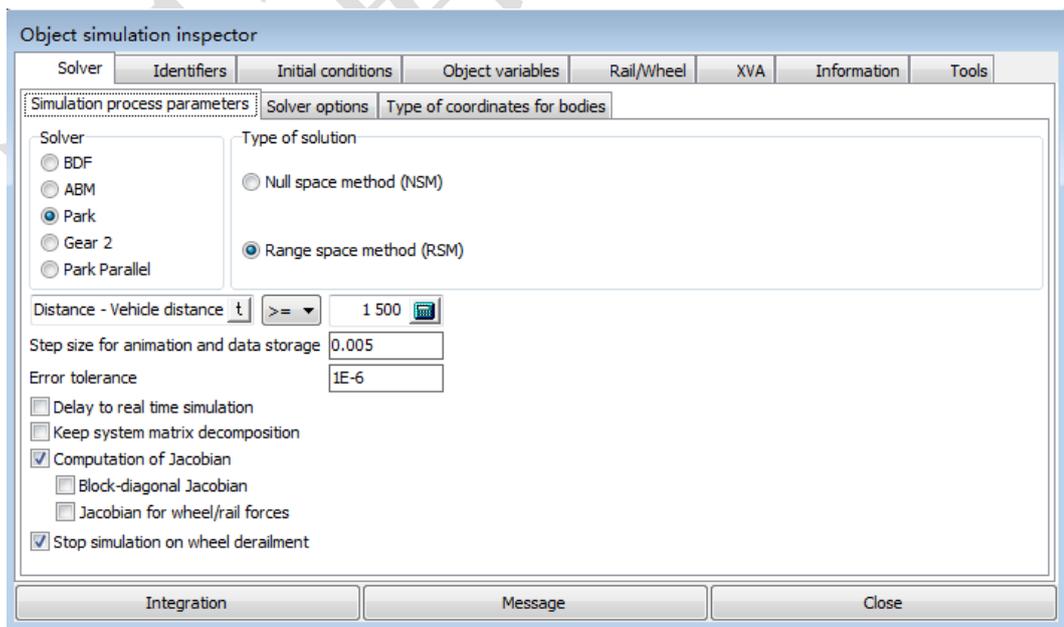


图 3-37

- 3) 切换到 **Railvehicle**→**Track**→**Model and parameters** 页面，设置轨底坡 **0.025rad**，轮轨型面坐标原点横向间距 **6.05mm**，轨道模型为无质量钢轨，下方可定义轨道整体刚度和阻尼。

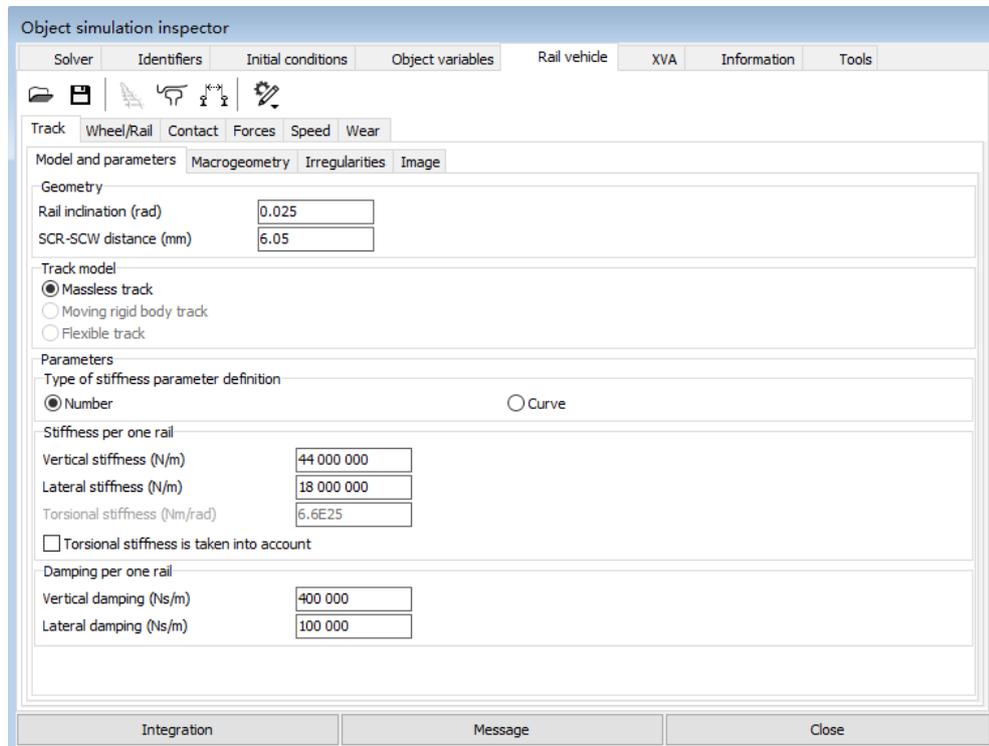


图 3-38

- 4) 切换到 **Track**→**Macrogeometry** 页面，选择 **Curve** 类型轨道，定义直线段长度 **60m**，缓和曲线长度 **440m**，圆曲线长度 **500m**，圆曲线半径 **5500m**，超高 **0.15m**。

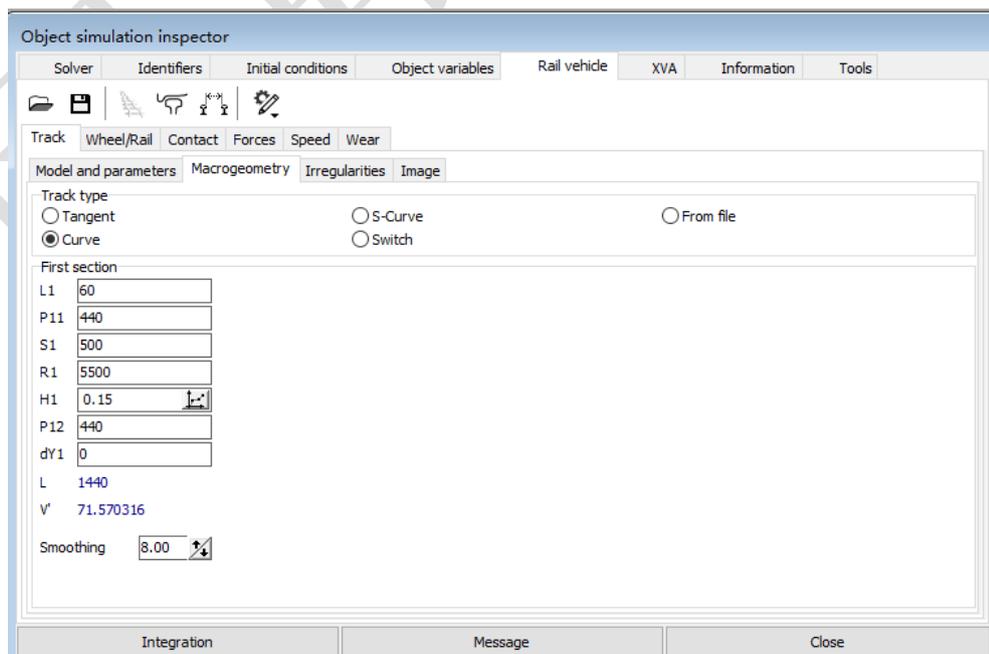


图 3-39

- 5) 切换到 **Track** → **Irregularities** 页面，选择 **Uneven**，不平顺类型为 **From file**，然后分别设置左、右轨垂向和横向的不平顺，如图 3-40。

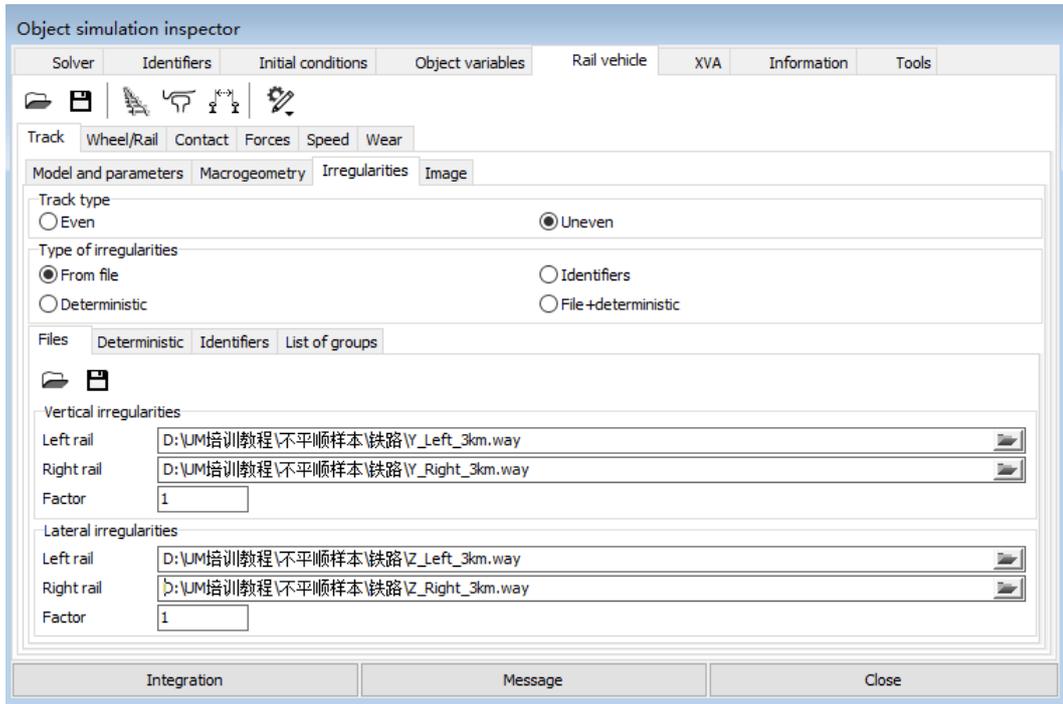


图 3-40

- 6) 切换到 **Wheel/Rail** → **Wheels** → **Profiles** 页面，点击 **+** 按钮，将 **Chinese LMA.wpf** 车轮踏面添加进来，然后将其选中，点 **右键**，选择菜单 **Assign to all**，赋给每个车轮。

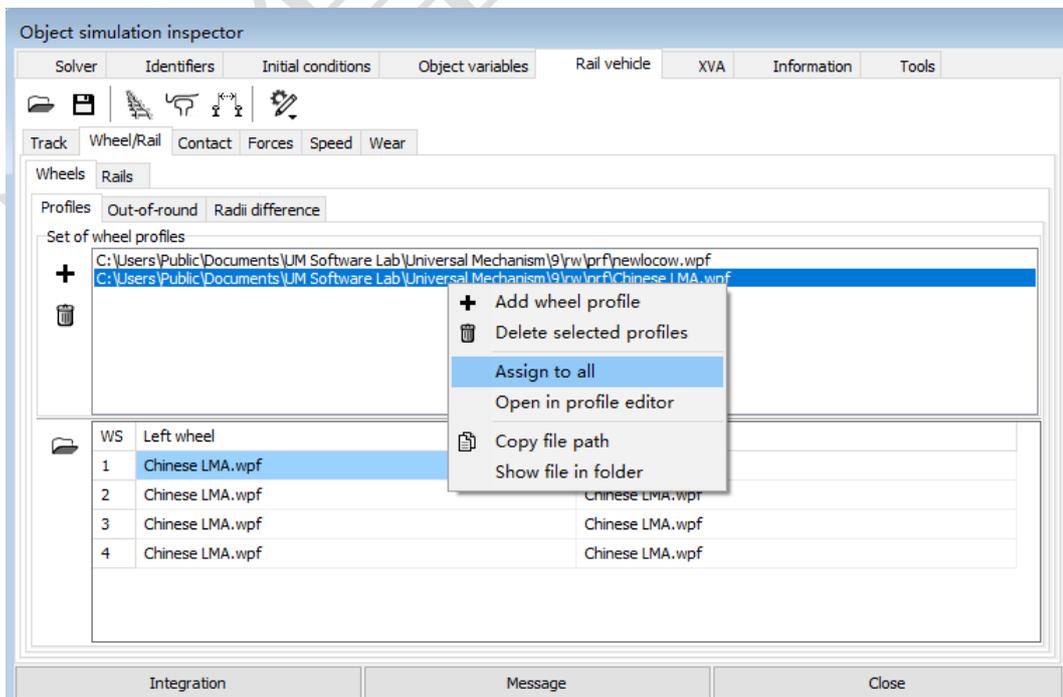


图 3-41

- 7) 切换到 **Wheel/Rail** → **Rails** 页面，点击+按钮，将 **CN_Rail_60.rpf** 钢轨外形添加进来，然后将其选中，点**右键**，选择菜单 **Assign to both rails**，赋给左右轨。

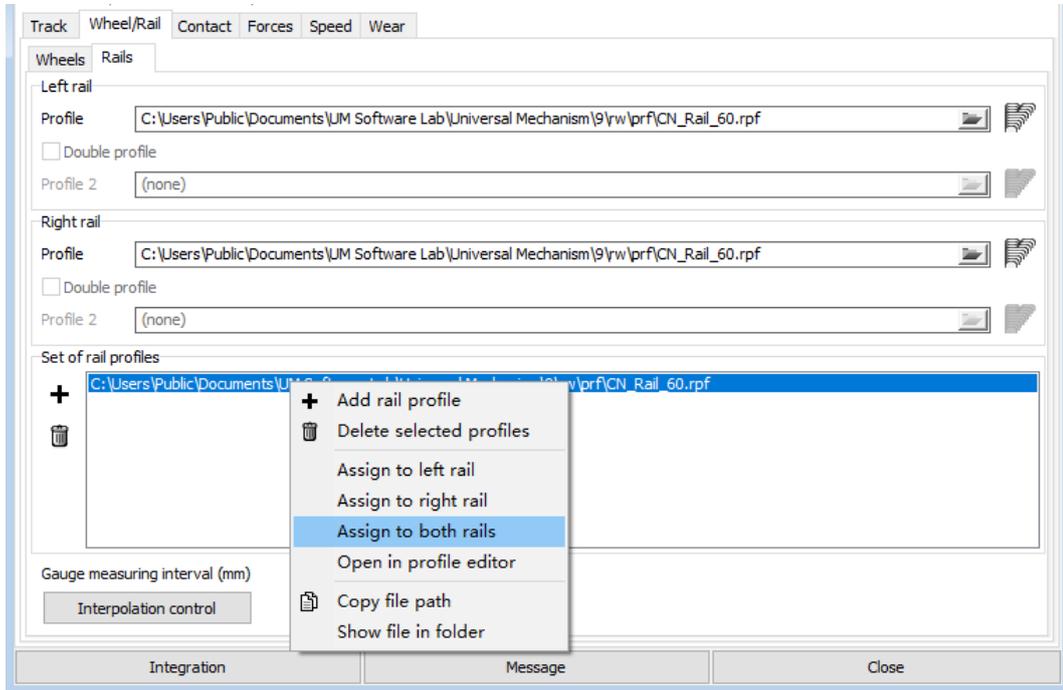


图 3-42

- 8) 切换到 **Rail vehicle** → **Contact** → **Contact forces** 页面，选择 **FASTSIM** 蠕滑模型。

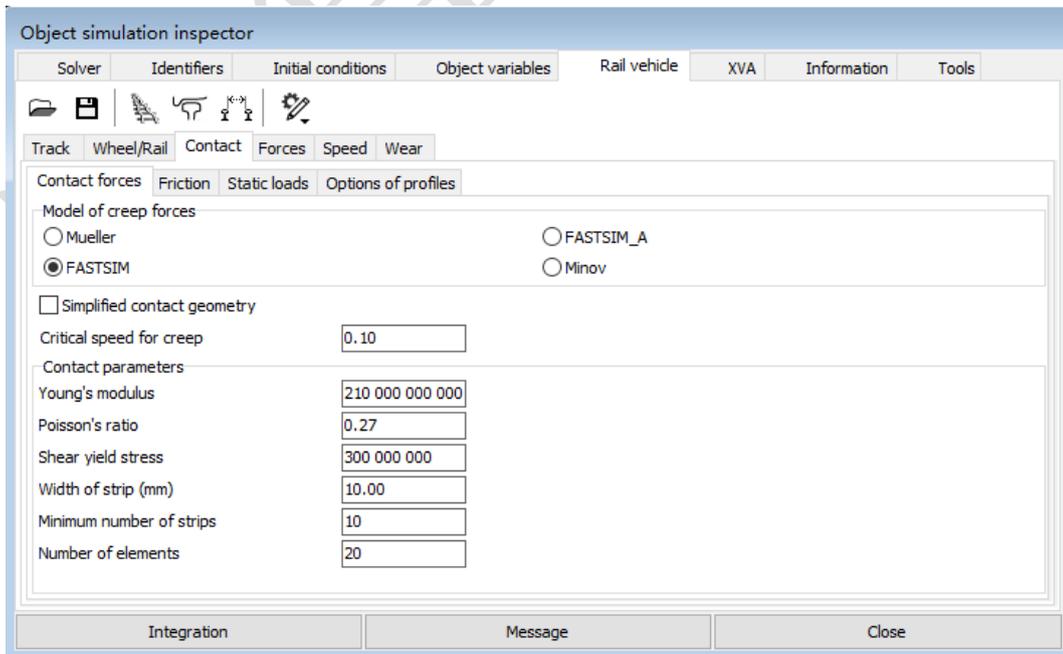


图 3-43

- 9) 切换到 **Rail vehicle** → **Speed** 页面，选择匀速模式 **v=const**，并设置速度控制力作用于**车体**，如图 3-44。

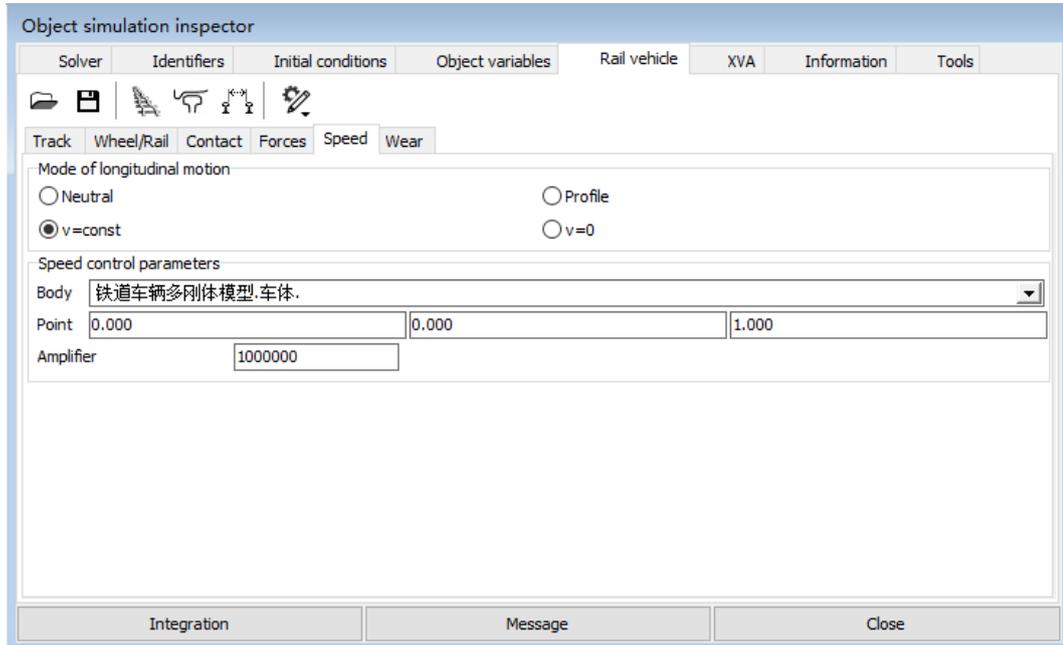


图 3-44

- 10) 切换到 **Identifiers** → **List of identifiers** 页面，设置车辆初始速度 **v0** 为 **300**，在弹出窗口点击 **OK**，如图 3-45。

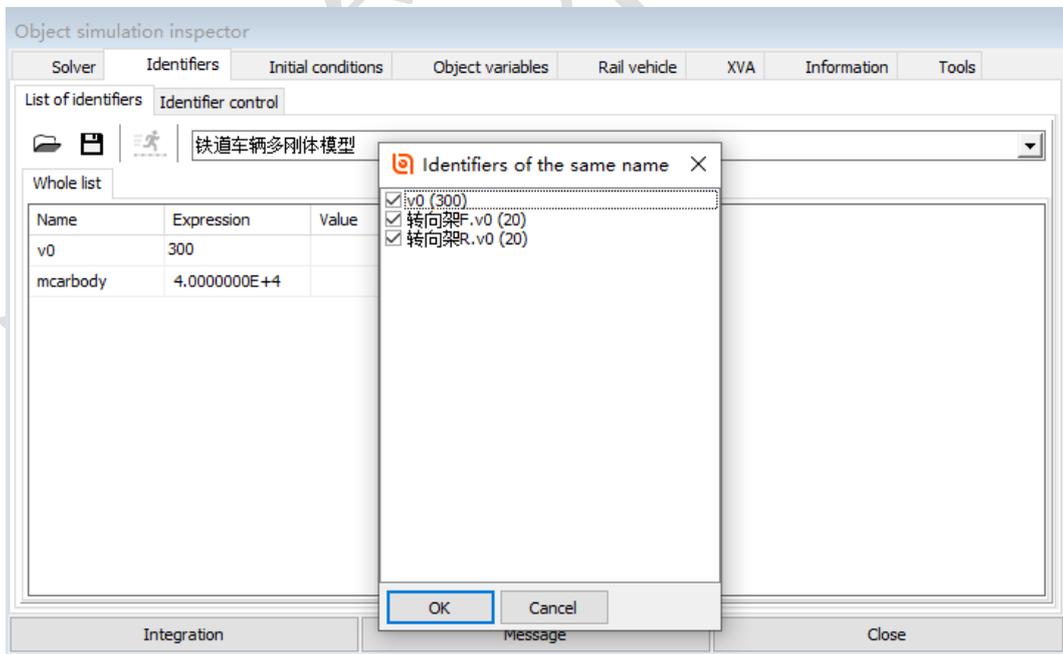


图 3-45

- 11) 选择主菜单 **Tools**→**Options**，或直接在工具栏上修改车辆初始速度单位为 **km/h**。这里的单位只对 **v0** 参数有效，计算结果均为国际单位（**m**，**rad**，**kg**，**s**，**N**），如图 3-46。

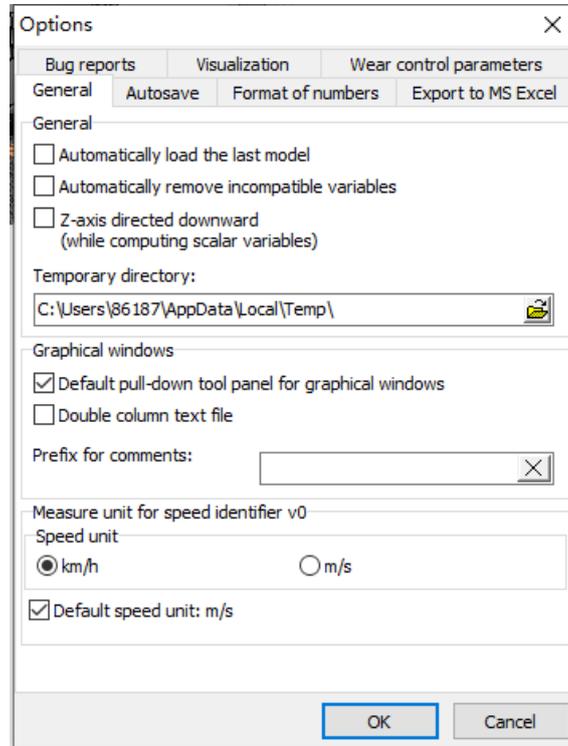


图 3-46

- 12) 打开**变量向导**，在 **Wheel/Rail** 页面创建第一轮对左轮**脱轨系数**变量，并拖入一个**绘图窗口**。

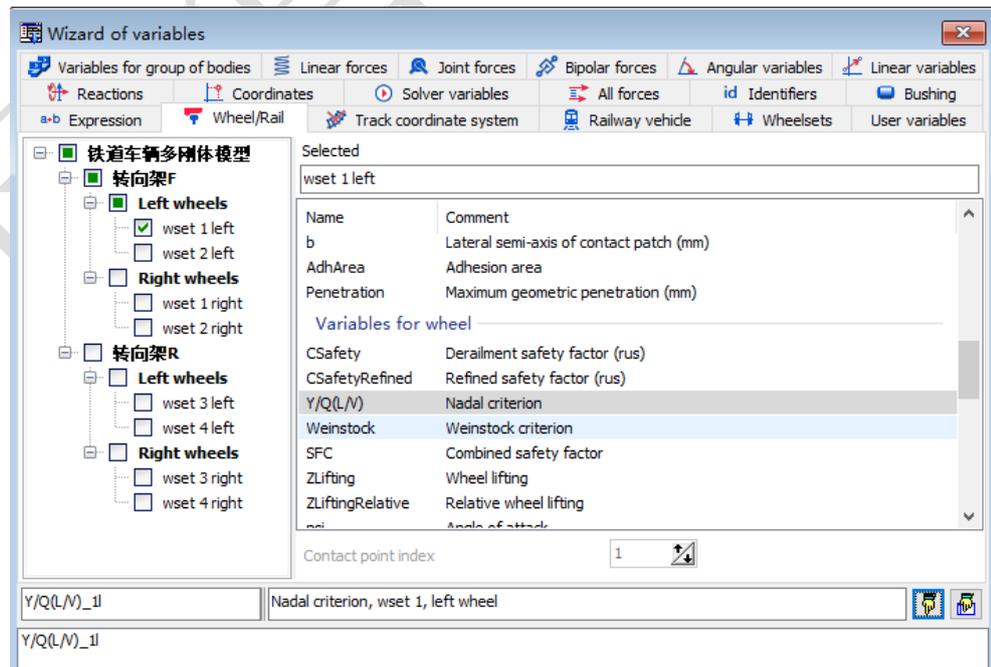


图 3-47

- 13) 点击工具栏图标 ，打开**接触斑**动画窗口，勾选 **Contact patches**，并调整大小和位置；
- 14) 点击工具栏图标 ，打开**轮轨接触力**动画窗口。
- 15) 在模型动画窗口，将鼠标光标移动到车体上，点**右键**，选择菜单 **Camera follows (车体)**可使窗口始终跟随**车体**，如图 3-48。

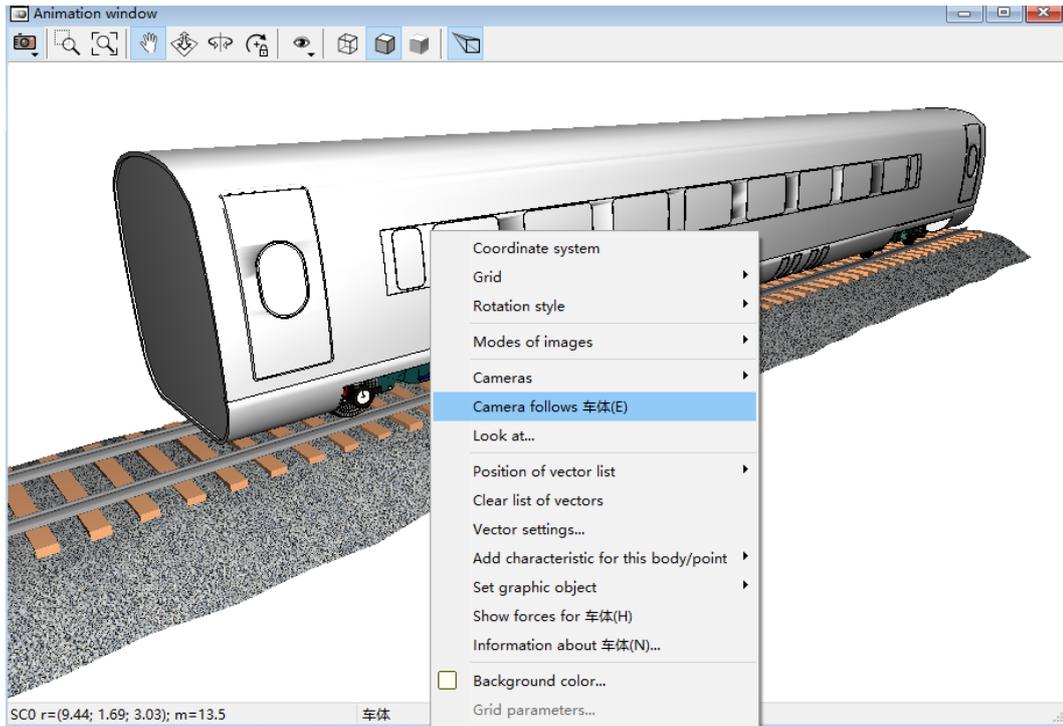


图 3-48

- 16) 点击仿真控制面板 **Integration** 按钮开始仿真。
- 17) 在绘图窗口点**右键**，选择菜单 **Show all**，可自动调节以适应窗口。

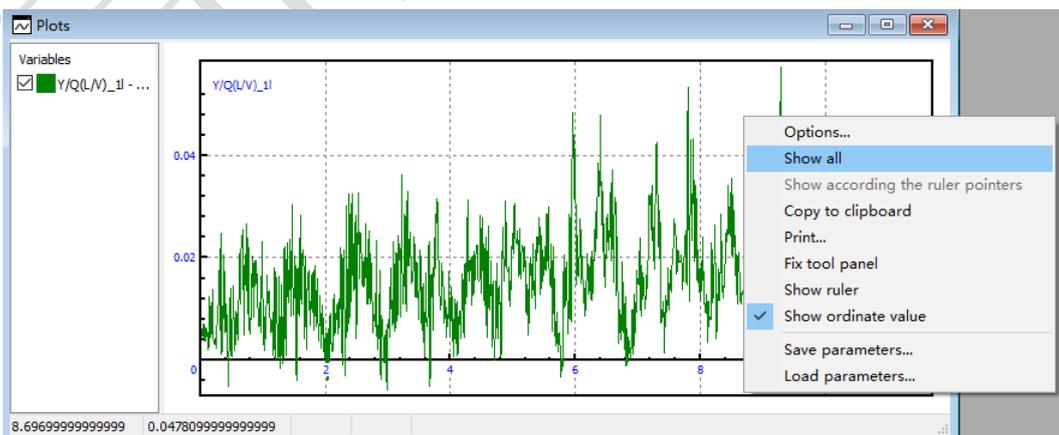


图 3-49

- 18) 在轮轨接触力动画窗口，可设置矢量箭头单位长度表示力的大小，缺省状态动画窗口里最近处为一位轮对，可根据个人习惯转动视角。

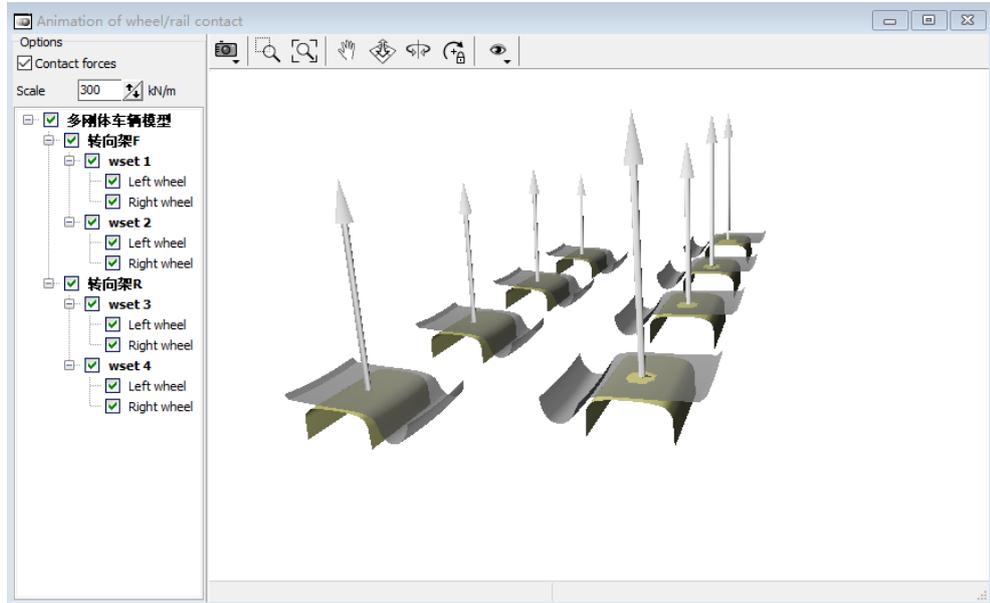


图 3-50

- 19) 仿真过程如图 3-51，如果将动画窗口最小化，计算会非常快。

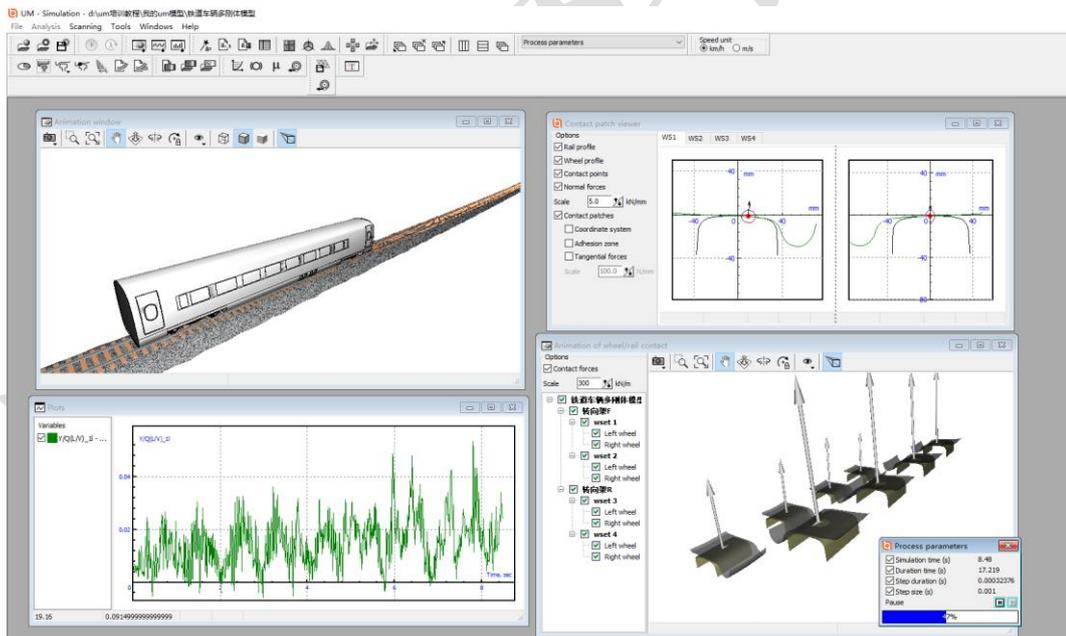


图 3-51

3.1.3 构建刚柔耦合车辆系统

本节介绍将刚性构架替换为柔性构架的方法，操作如下：

- 1) 复制前一节建立的**铁道车辆多刚体模型**（整个文件夹），重命名为**铁道车辆刚柔耦合模型**。
- 2) 将“**D:\UM 培训教程\FEM 素材**”目录下的**Frame**文件夹整体复制到“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\铁道车辆刚柔耦合模型**”。

此电脑 > Data (D:) > UM培训教程 > 我的UM模型 > 铁道车辆刚柔耦合模型 >

名称	修改日期	类型	大小
Frame	2021/3/3 10:23	文件夹	
GOMeshes	2021/3/4 16:35	文件夹	
History	2021/3/4 16:35	文件夹	
ascdata.ge	2021/3/4 15:56	UM Document. ...	1 818 KB
input.dat	2021/3/4 15:56	Universal Mecha...	60 KB
input.xv	2021/3/4 16:01	UM Document. I...	1 KB
last.ecf	2021/3/4 16:34	UM Document. ...	1 KB
last.fin	2021/3/4 16:34	FIN 文件	1 KB
last.icf	2021/3/4 16:34	ICF 文件	5 KB
last.par	2021/3/4 16:34	PAR 文件	1 KB
last.rwc	2021/3/4 16:34	RWC 文件	4 KB
last.xv	2021/3/4 16:34	UM Document. I...	1 KB
mesh.cfg	2021/3/4 16:34	CFG 文件	1 KB
object.bmp	2021/3/4 15:56	BMP 文件	226 KB

图 3-52

- 3) 运行 **UM Input** 程序，加载刚柔耦合车辆模型。
- 4) 在左侧模型树选中子系统**转向架 F**，然后在右侧面板点击 **Edit subsystem**，进入前转向架子系统。

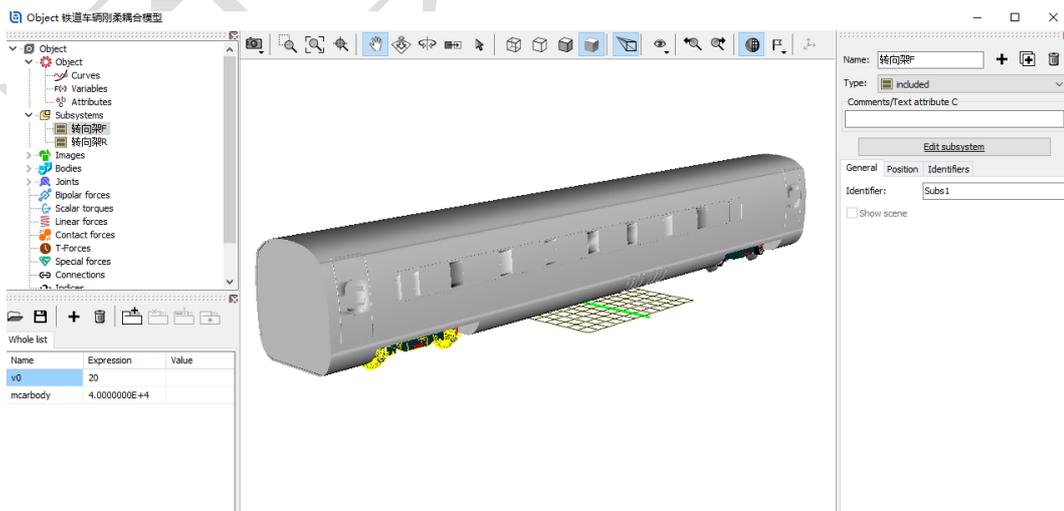


图 3-53

5) 删除刚体**构架**和相应的**铰**。

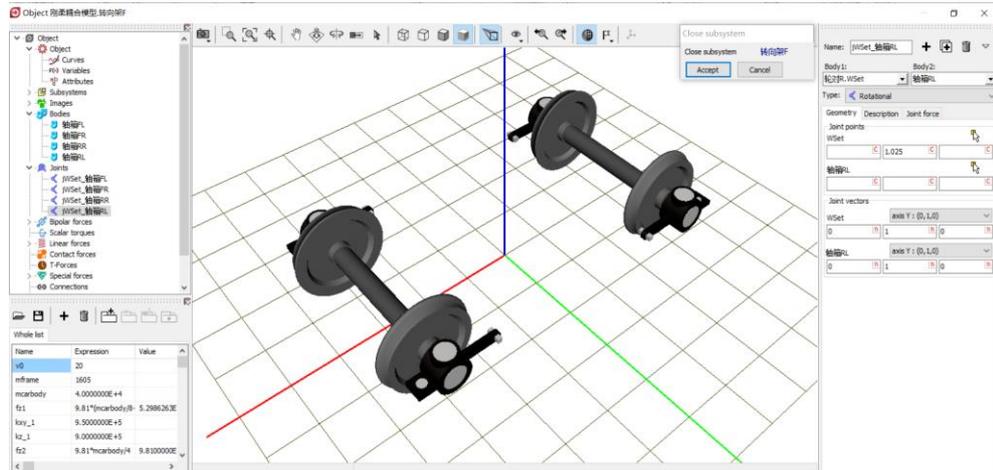


图 3-54

6) 添加一个子系统，选择 **Linear FEM Subsystem**，定位到路径“D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\铁道车辆刚柔耦合模型”，选中 **Frame**，点 **OK**，导入柔性体，命名为**构架**。

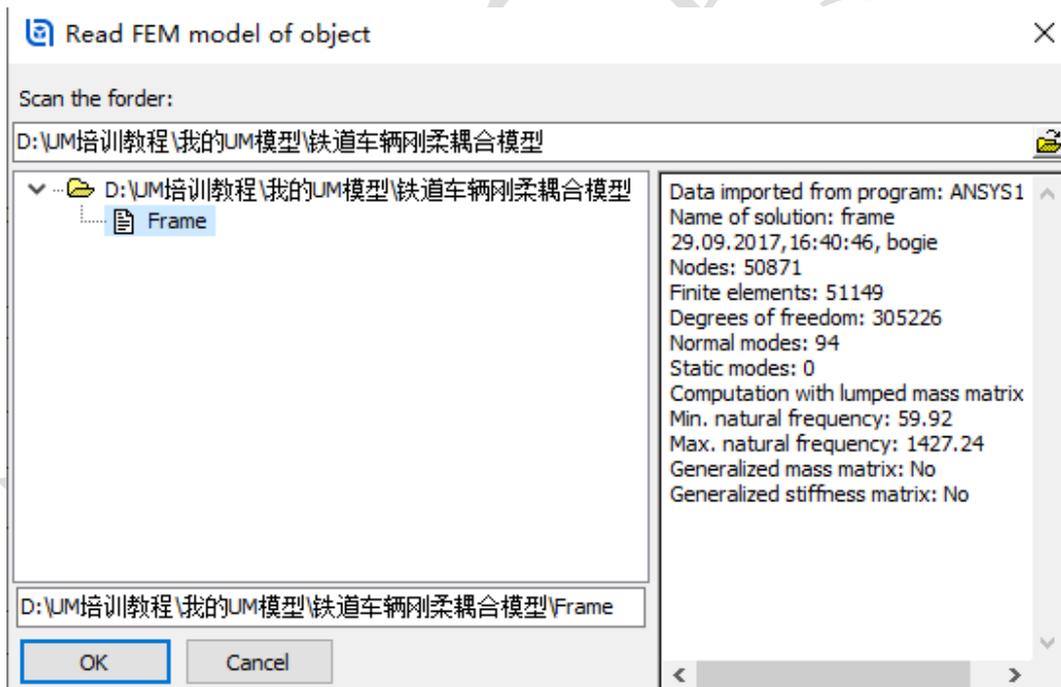


图 3-55

- 7) 在构架子系统 **Position** 页面，设置高度 **0.73m**，在 **Image** 页面可以设置显示模式。

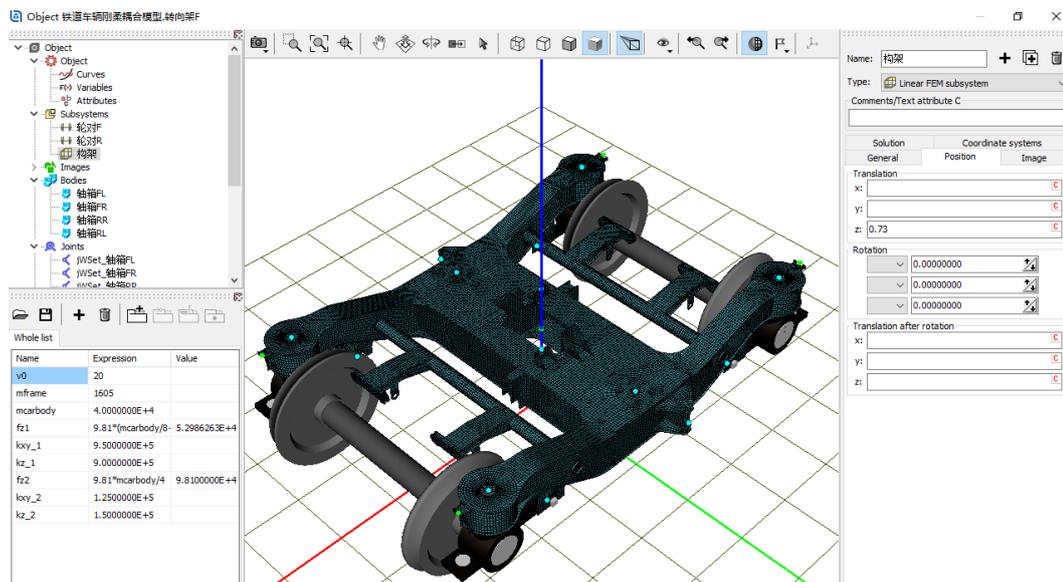


图 3-56

- 8) 将所有一系力元的第二个 Body 设置为 **构架.frame**。

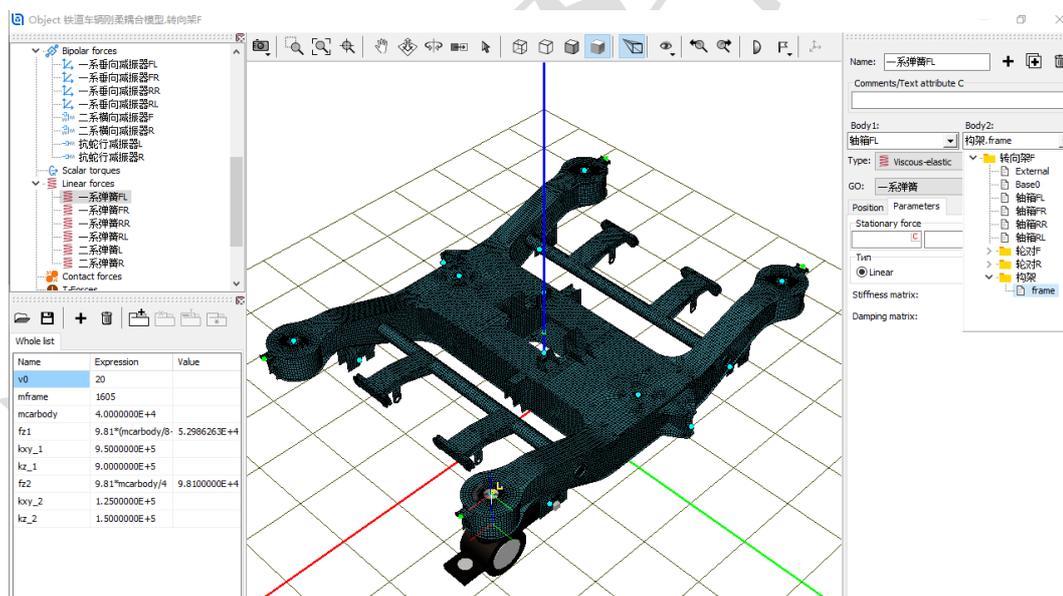


图 3-57

9) 将所有二系力元的第一个 Body 设置为**构架.frame**。

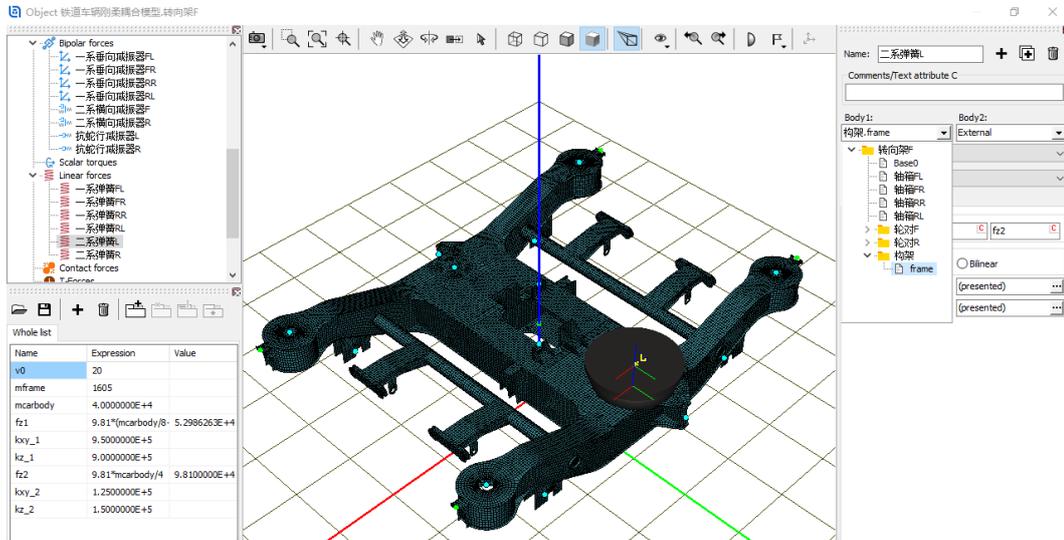


图 3-58

10) 点击 **Summary**，如果某些力元没有设置作用的物体，会有 **Error** 提示，根据提示找到这些力元，并完成设置即可。

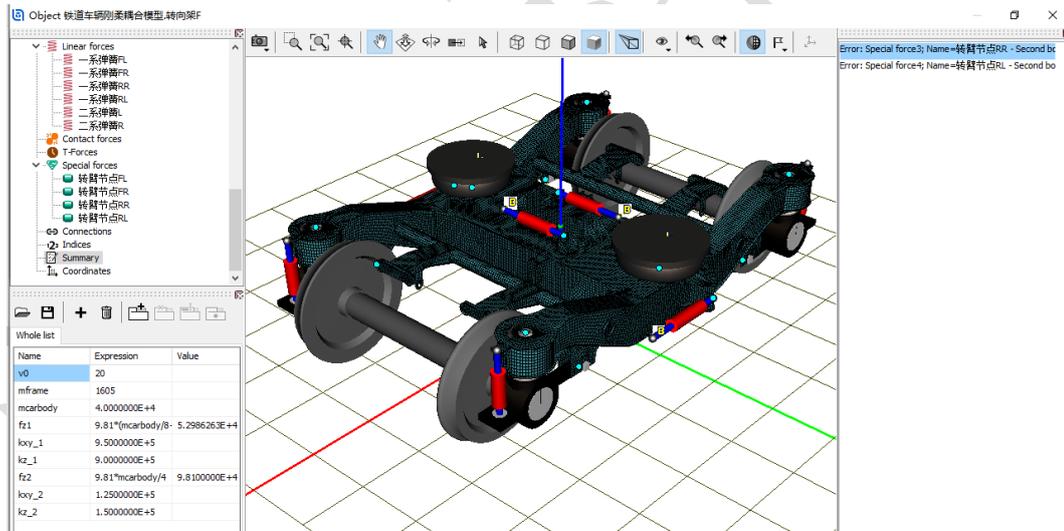


图 3-59

11) 点击 **Accept**，保存对**转向架 F** 子系统的修改，并退出子系统。

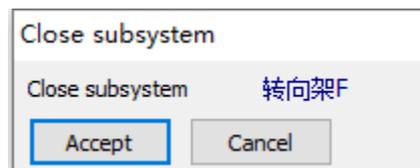


图 3-60

12) **保存模型**，关闭 **UM Input** 程序，然后就可以用 **UM Simulation** 进行仿真了。

3.2 单轨交通

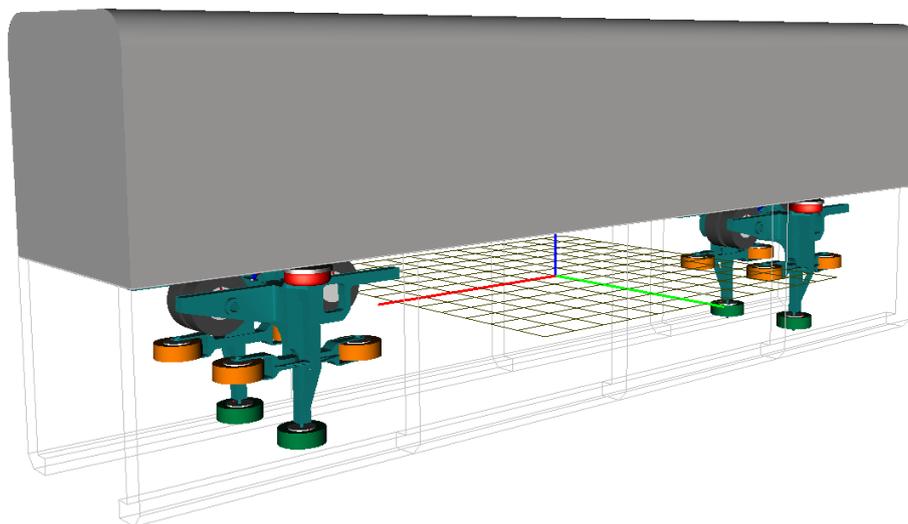


图 3-61

图 3-61 所示为一个典型的跨座式单轨车辆模型，该模型由一个车体和两个转向架子系统组成。其中转向架子系统里有一个构架、四个走行轮、四个导向轮和两个稳定轮，轮胎作为一系悬挂，车体和构架之间有二系悬挂，模型共计 38 个自由度。

本例用到的模块：**UM Base**、**UM Subsystem**、**UM Monorail Train**。

3.2.1 跨座式单轨车辆动力学建模

3.2.1.1 刚体与铰

- 1) 运行 **UM Input**，新建模型，保存为“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\跨座式单轨车辆模型**”。
- 2) 从“**D:\UM 培训教程\几何素材\跨座式单轨车辆模型**”依次导入建模所需的几何素材**构架.img**，**走行轮.img**，**导向轮 img**，**稳定轮.img**，**空气弹簧.img** 和**减振器.img**。



图 3-62

- 3) 创建第一个刚体，命名为**构架**，选择几何**构架**，定义质量 **2000**，转动惯量 (**1000**, **800**, **1200**)，质心坐标为 (**0**, **0**, **0.2**)。

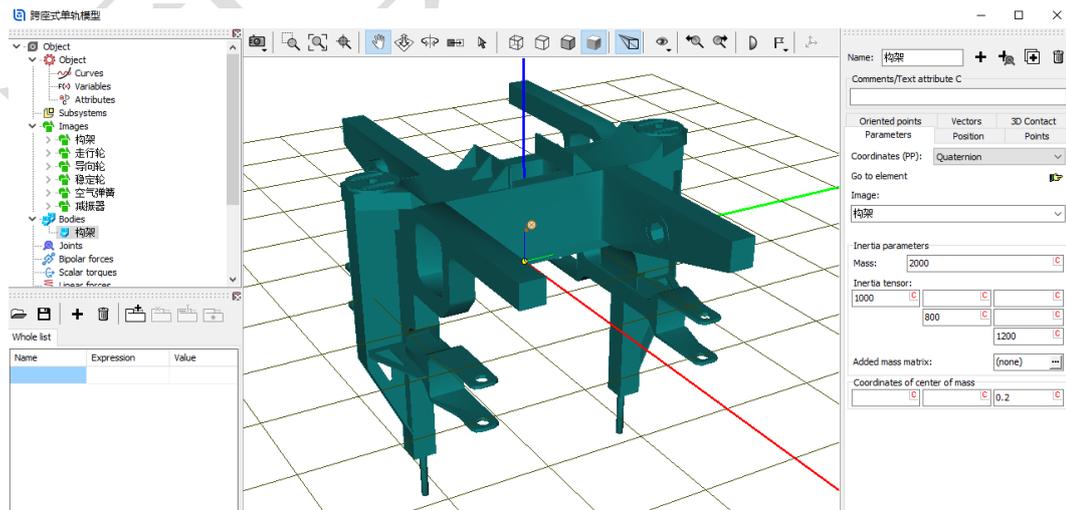


图 3-63

- 4) 创建第二个刚体，命名为**走行轮 FL**，选择几何**走行轮**，定义质量 **40**，转动惯量 (**1.5, 3.0, 1.5**)。

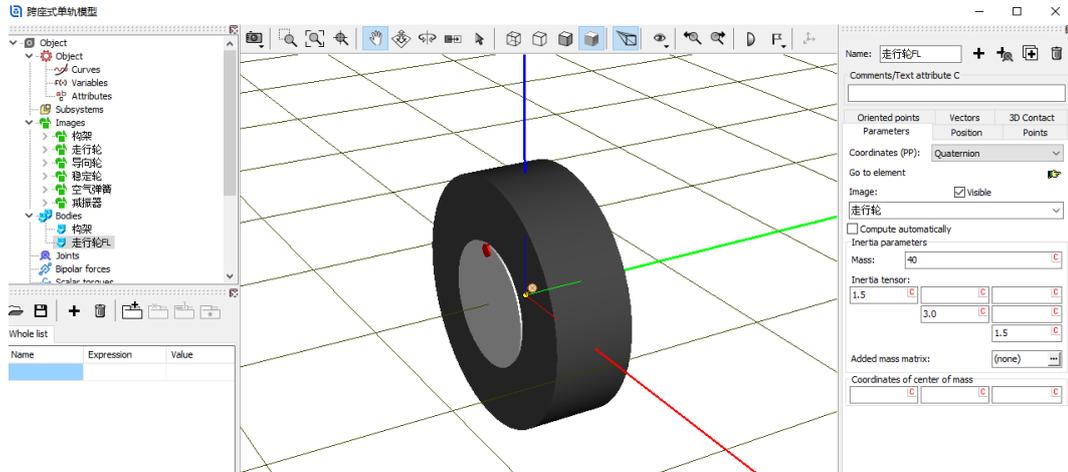


图 3-64

- 5) 将刚体**走行轮 FL** 复制三次，分别重命名为**走行轮 FR**、**走行轮 RR** 和**走行轮 RL**。
- 6) 创建第六个刚体，命名为**导向轮 FL**，选择几何**导向轮**，定义质量 **20**，转动惯量 (**0.5, 1.0, 0.5**)。

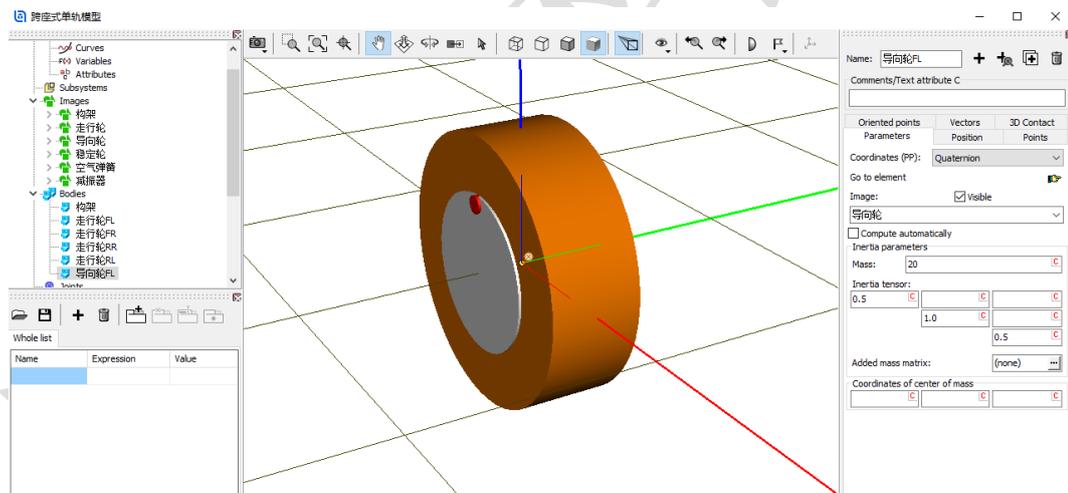


图 3-65

- 7) 将刚体**导向轮 FL** 复制三次，分别命名为**导向轮 FR**、**导向轮 RR** 和**导向轮 RL**。
- 8) 创建第十个刚体，命名为**稳定轮 L**，选择几何**稳定轮**，定义质量 **20**，转动惯量 (**0.5, 1.0, 0.5**)。

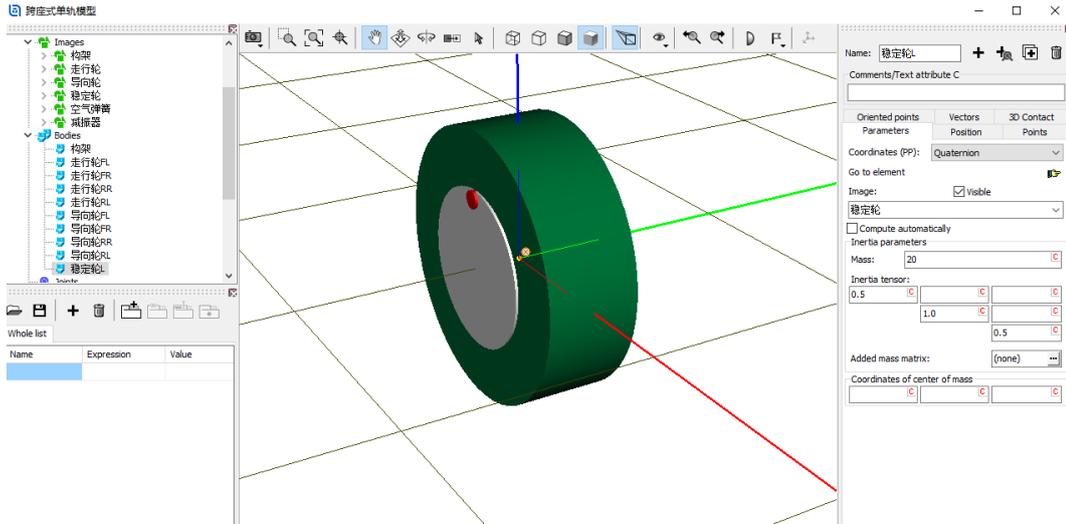


图 3-66

- 9) 将刚体**稳定轮 L**复制一次，命名为**稳定轮 R**。
- 10) 创建第一个铰，**Body1**选择**Base0**，**Body2**选择**构架**，类型为**6 d.o.f.**，铰点坐标都为各自的原点，无需修改。

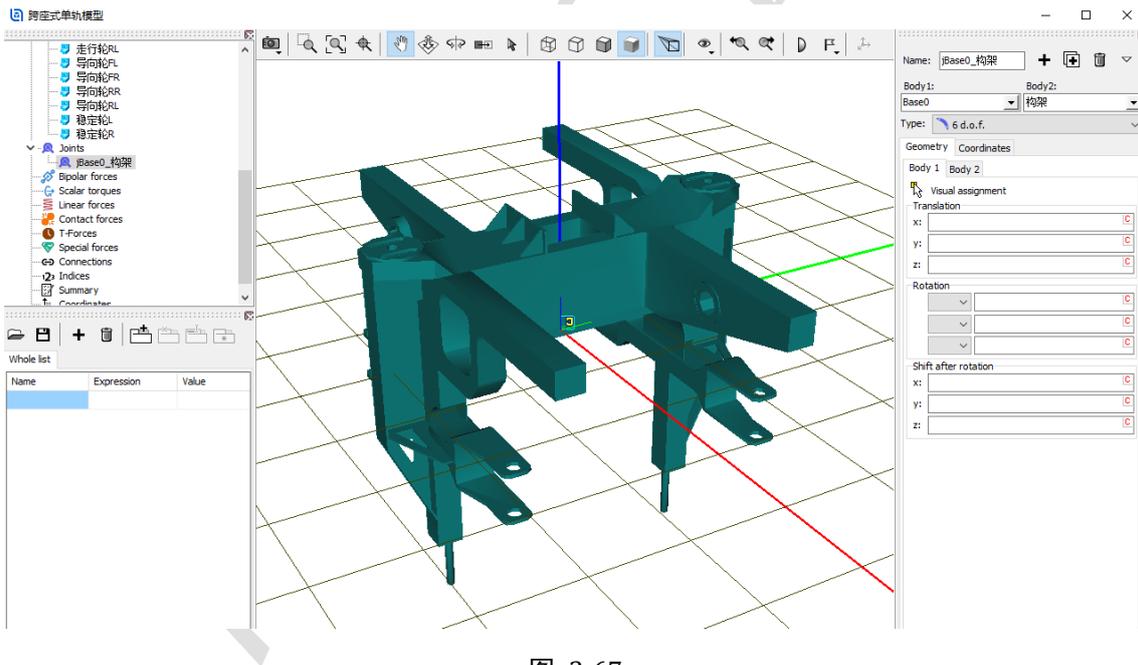


图 3-67

- 11) 创建第二个铰，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择**走行轮 FL**，类型为 **Rotational**，两个物体铰接点坐标分别为 **(0.8, 0.17, 0.4)** 和 **(0, 0, 0)**，转动轴都为 **Y 轴 (0, 1, 0)**。

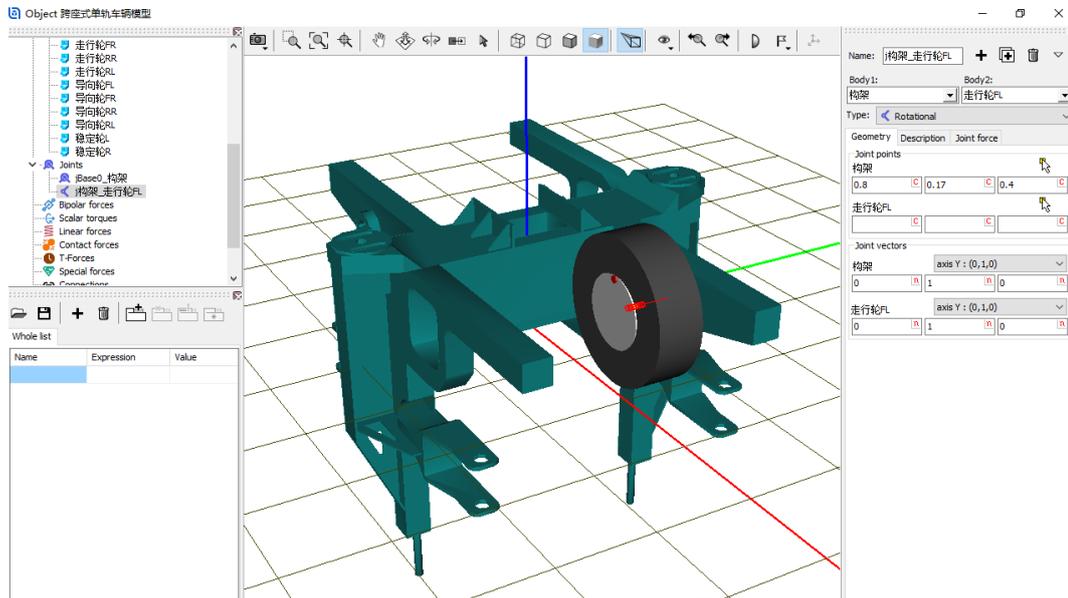


图 3-68

- 12) 在 **Joint force** 页面选择 **Expression** 类型的力元，定义 **F=M_control**（对于转动铰，这里的 F 表示转矩），用于仿真速度控制。

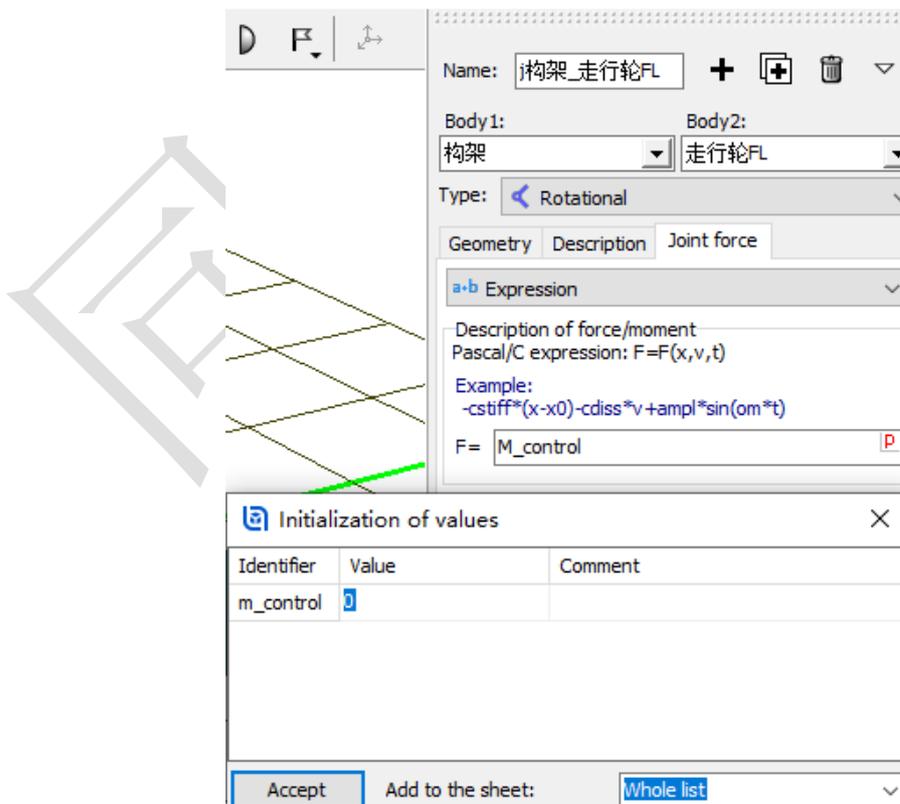


图 3-69

- 13) 复制生成第三个铰，**Body2** 更改为**走行轮 FR**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(0.8, -0.17, 0.4)$ 。
- 14) 复制生成第四个铰，**Body2** 更改为**走行轮 RR**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(-0.8, -0.17, 0.4)$ 。
- 15) 复制生成第五个铰，**Body2** 更改为**走行轮 RL**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(-0.8, 0.17, 0.4)$ ，切换到整体模式。

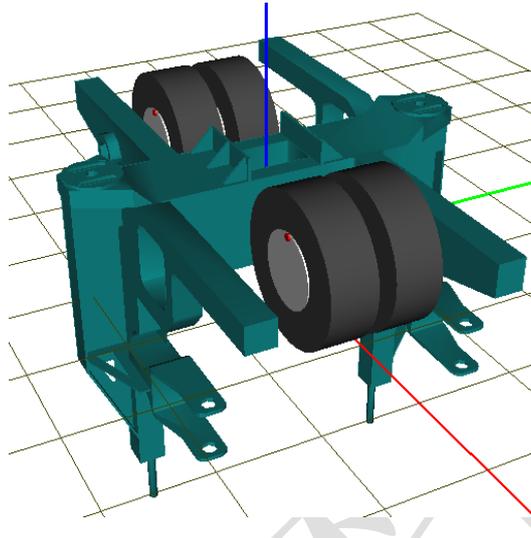


图 3-70

- 16) 创建第六个铰，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择**导向轮 FL**，类型为 **Rotational**，两个物体的铰接点坐标分别为 $(0.85, 0.745, -0.335)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，转动轴分别为 **Z 轴负向** $(0, 0, -1)$ 和 **Y 轴** $(0, 1, 0)$ 。在 **Description** 页面可预览该自由度，确保导向轮铰坐标增加时对应车辆前进方向。

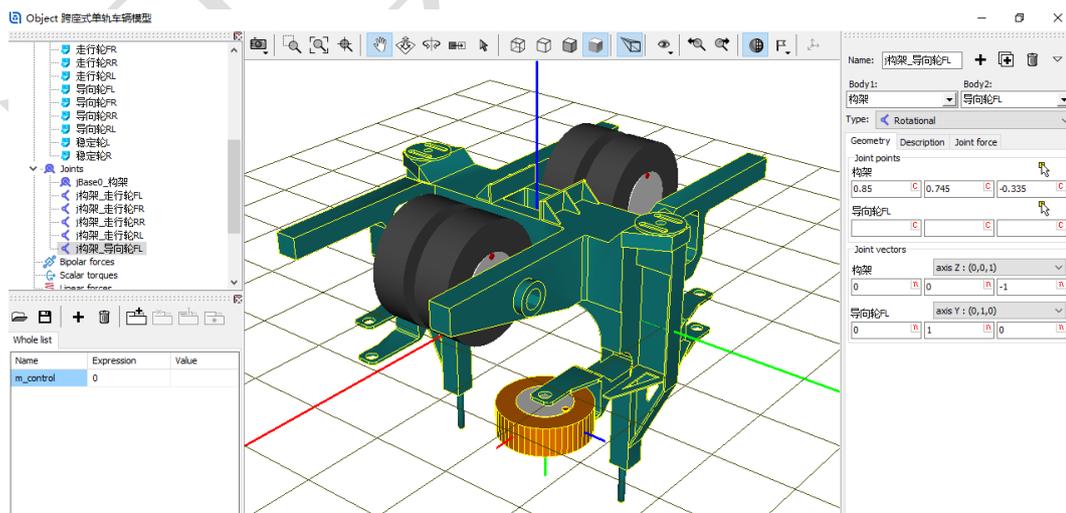


图 3-71

- 17) 复制生成第七个铰，**Body2** 更改为**导向轮 FR**，**Body1** 的连接点为 $(0.85, -0.745, -0.335)$ ，**Body1** 的转动轴为 **Z 轴正向** $(0, 0, 1)$ ，与左侧相反。

- 18) 复制生成第八个铰，**Body2** 更改为**导向轮 RR**，**Body1** 的连接点为 $(-0.85, -0.745, -0.335)$ 。
- 19) 复制生成第九个铰，**Body2** 更改为**导向轮 RL**，**Body1** 的连接点为 $(-0.85, 0.745, -0.335)$ ，**Body1** 的转动轴为 **Z 轴负向** $(0, 0, -1)$ ，与右侧相反。

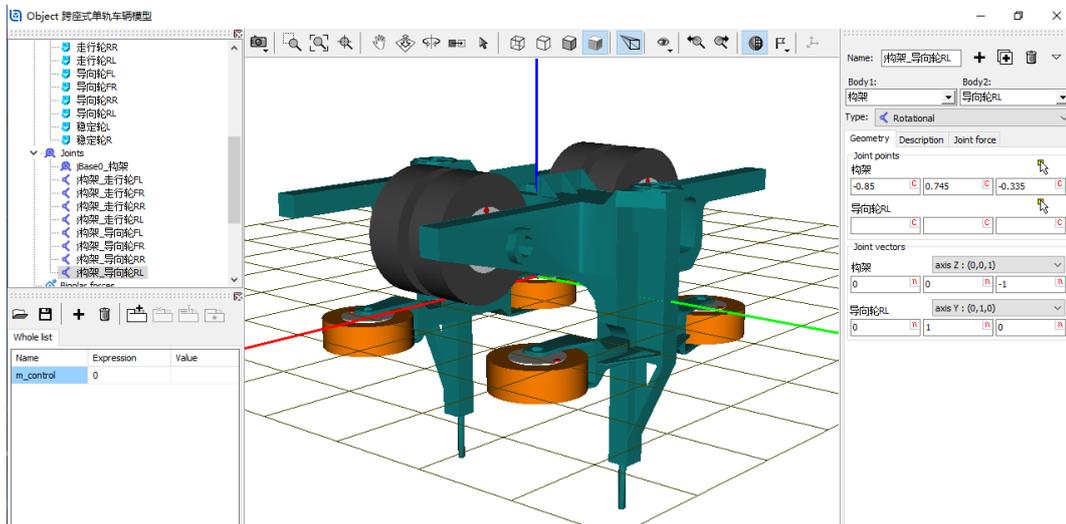


图 3-72

- 20) 复制生成第十个铰，**Body2** 更改为**稳定轮 L**，**Body1** 的连接点为 $(0, 0.745, -1.3)$ ，**Body1** 的转动轴为 **Z 轴负向** $(0, 0, -1)$ 。
- 21) 复制生成第十一个铰，**Body2** 更改为**稳定轮 R**，**Body1** 的连接点为 $(0, -0.745, -1.3)$ ，**Body1** 的转动轴为 **Z 轴正向** $(0, 0, 1)$ ，与左侧相反。

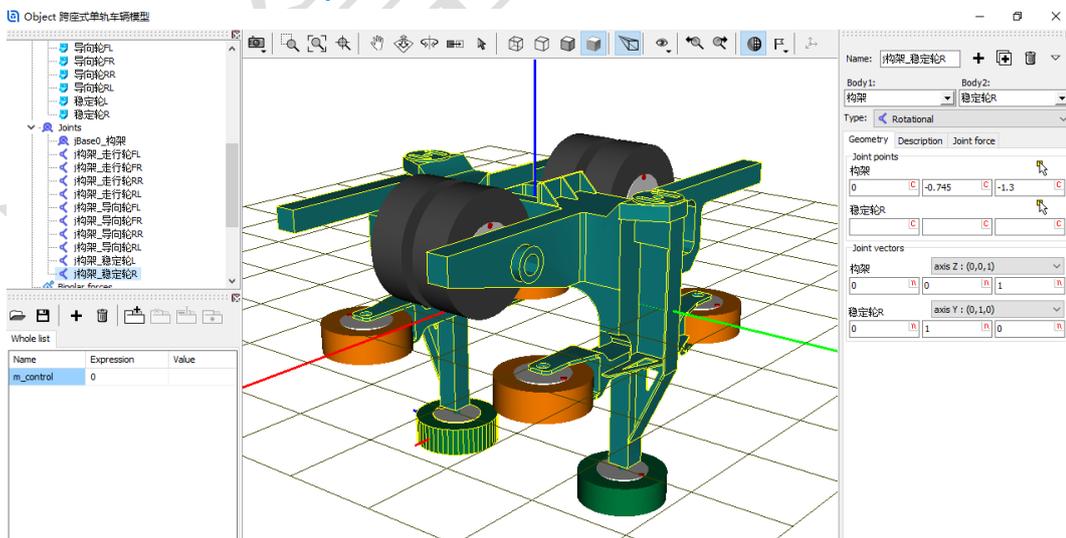


图 3-73

3.2.1.2 悬挂力元

- 1) 选中左侧模型树 **Special forces**，点击右侧按钮 **+**，从下拉菜单中选择 **Tyre** 轮胎力元，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择 **走行轮 FL**。

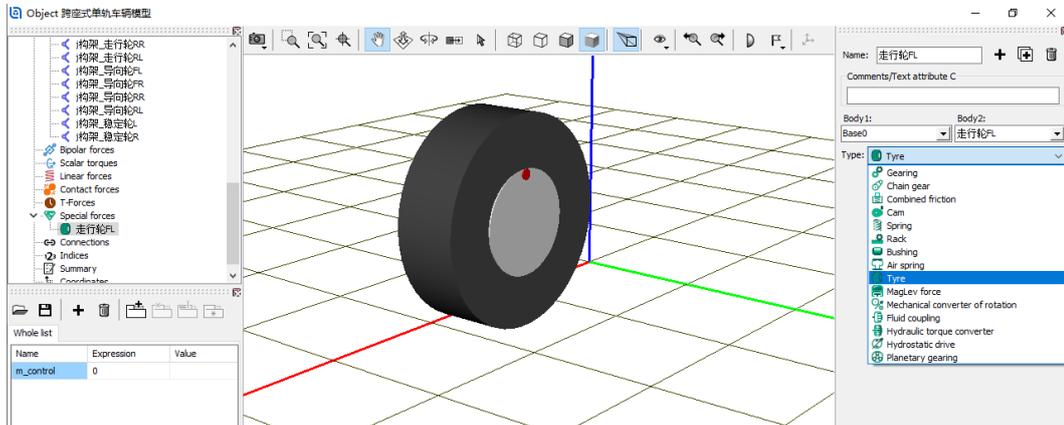


图 3-74

- 2) 将轮胎力元 **走行轮 FL** 复制 9 次，依次选择 **Body2** 为 **走行轮 FR**、**走行轮 RR**、**走行轮 RL**、**导向轮 FL**、**导向轮 FR**、**导向轮 RR**、**导向轮 RL**、**稳定轮 L** 和 **稳定轮 R**（并无严格的先后顺序）。
- 3) 选中左侧模型树 **Linear forces**，点击右侧按钮 **+**，创建左侧的空气弹簧力元，**Body1** 选择 **构架**，**Body2** 选择 **External**，选择几何 **空气弹簧**，勾选 **Automatic computation for 2nd body**，输入弹簧下点和上点坐标 **(0, 0.95, 0.6)** 和 **(0, 0.95, 0.8)**。

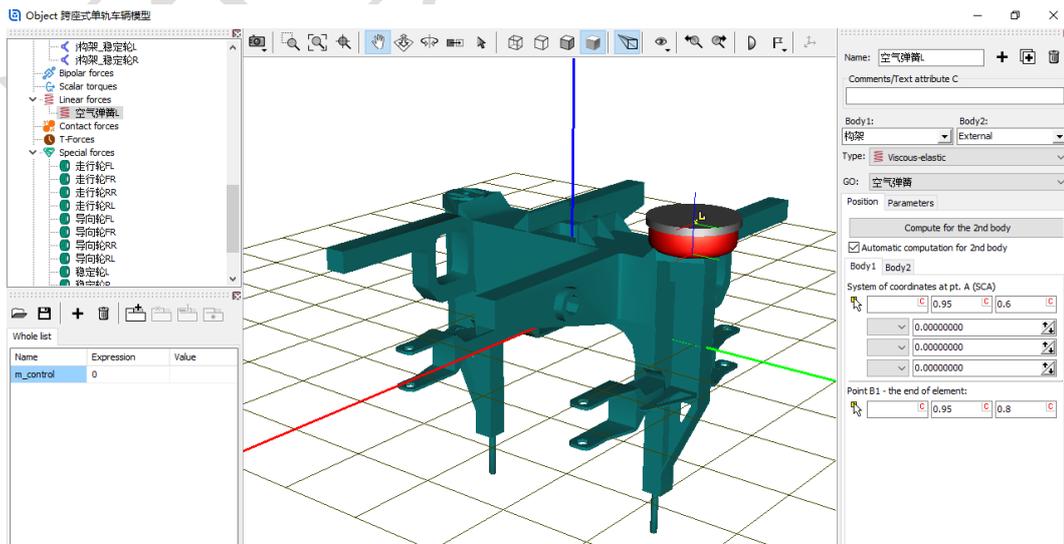


图 3-75

- 4) 在 **Parameters** 页面，定义弹簧预压力 **fz2**，回车，在弹出窗口点 **Accept**，然后到左侧符号列表双击 **fz2**，在弹出窗口定义表达式：**9.81*mcarbody/4**，这时程序会自动创建新的符号参数 **mcarbody**，保持缺省值为 0。

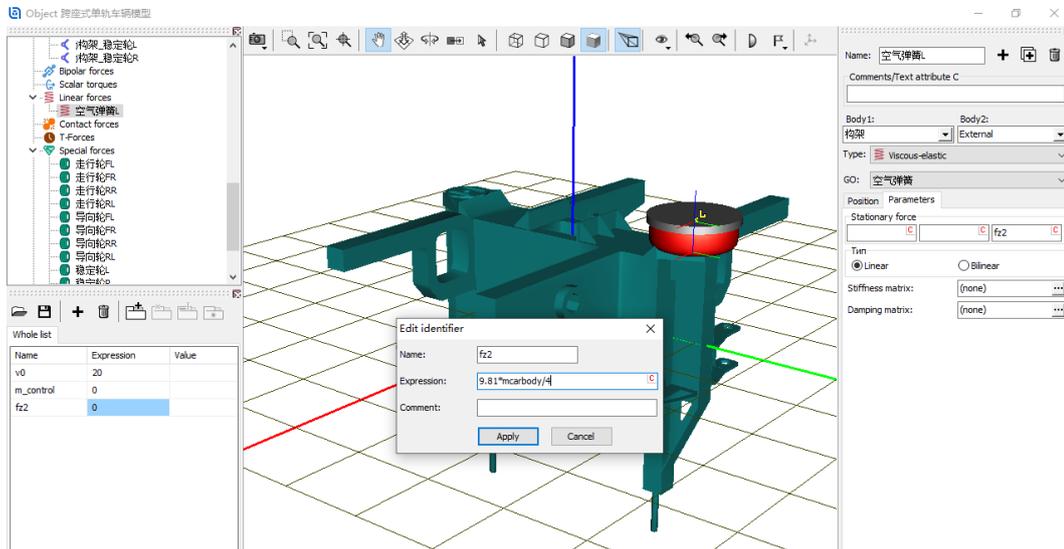


图 3-76

- 5) 点击 **Stiffness matrix** 栏的按钮，输入刚度矩阵，如图 3-77，其中 **kxy_2** 为纵向和横向刚度 (**1.25e5**)，**kz_2** 为垂向刚度 (**1.5e5**)。

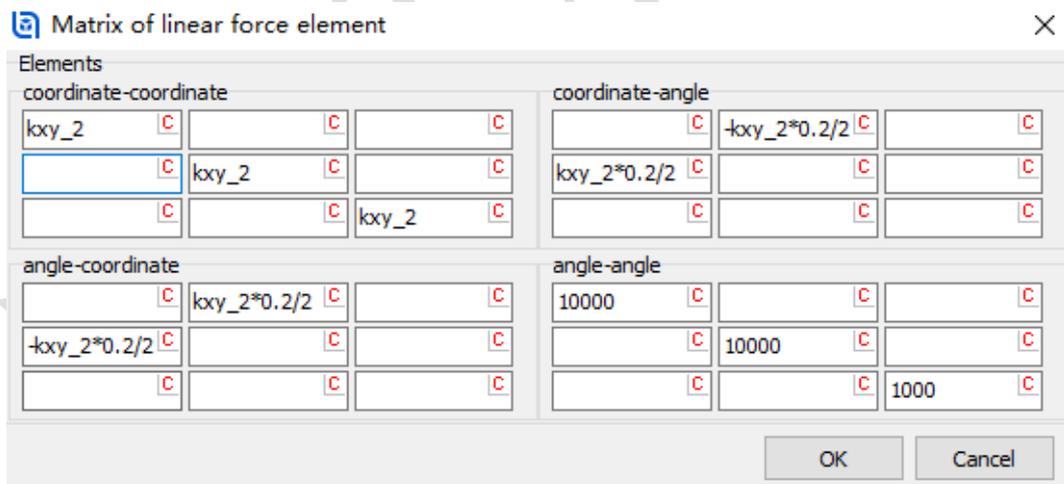


图 3-77

- 6) 复制生成右侧的空气弹簧力元，修改弹簧下点和上点坐标 (**0, -0.95, 0.6**) 和 (**0, -0.95, 0.8**)。

- 7) 选中左侧模型树 **Bipolar forces**，点击右侧按钮 **+**，创建左侧的减振器，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择 **External**，选择几何**减振器**，勾选 **Autodetection**，**Body1** 连接点坐标 **(0.25, 0.1, 0.6)**，**Body2** 连接点坐标 **(0.25, 0.4, 0.9)**。
- 8) 从下拉菜单选择力元 **Points(numeric)**，横坐标设为速度 **v**，勾选压缩为正 **Positive: compression**，点击 **Force** 栏按钮  打开曲线编辑器，定义非线性的阻尼特性，如图 3-78。

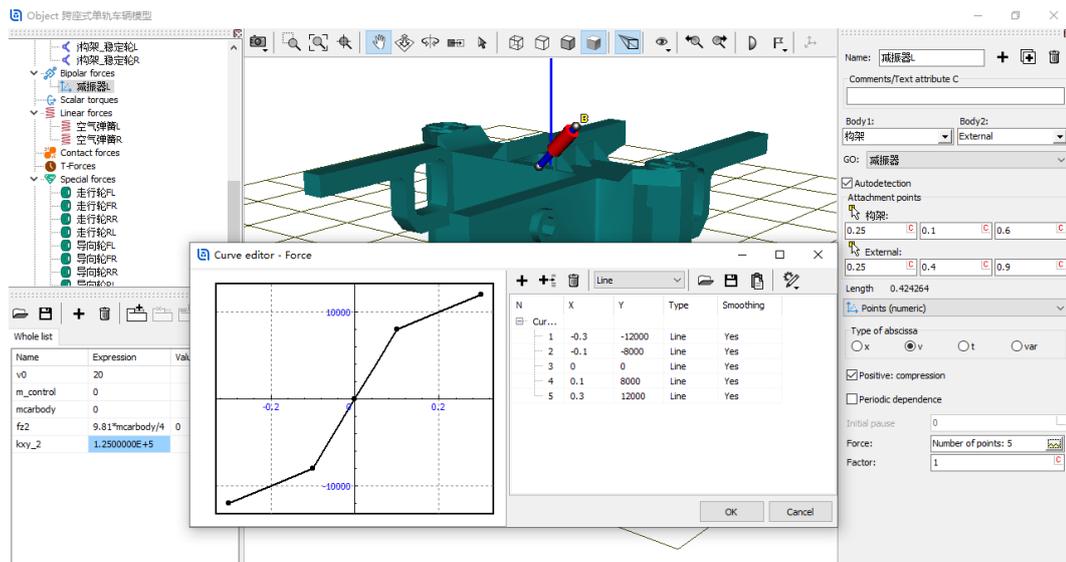


图 3-78

- 9) 复制生成右侧的减振器，修改 **Body1** 连接点坐标 **(-0.25, -0.1, 0.6)**，修改 **Body2** 连接点坐标 **(-0.25, -0.4, 0.9)**。

- 10) 选中左侧模型树 **Special forces**，点击右侧按钮 **+**，添加一个力元，选择类型 **Bushing**，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择 **External**，勾选 **Autodetection**，在 **Body1** 界面设置连接点(0, 0, 0.5)，在 **Description** 页面设置线性牵引刚度 **CX=1e7**。

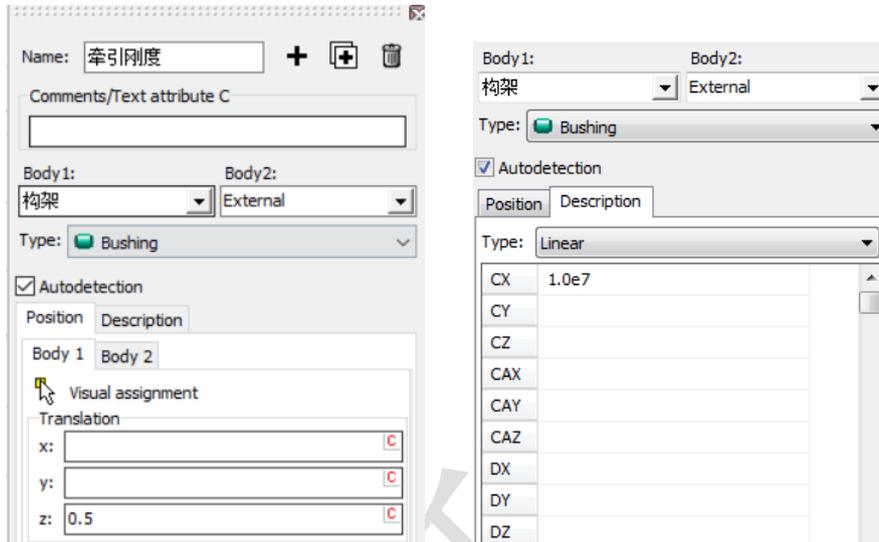


图 3-79

- 11) 复制生成第二个 **Bushing** 力元，在 **Body1** 界面设置连接点(0, 0, 0.7)，在 **Description** 页面设置线性抗侧滚刚度 **CAX=1e6**。

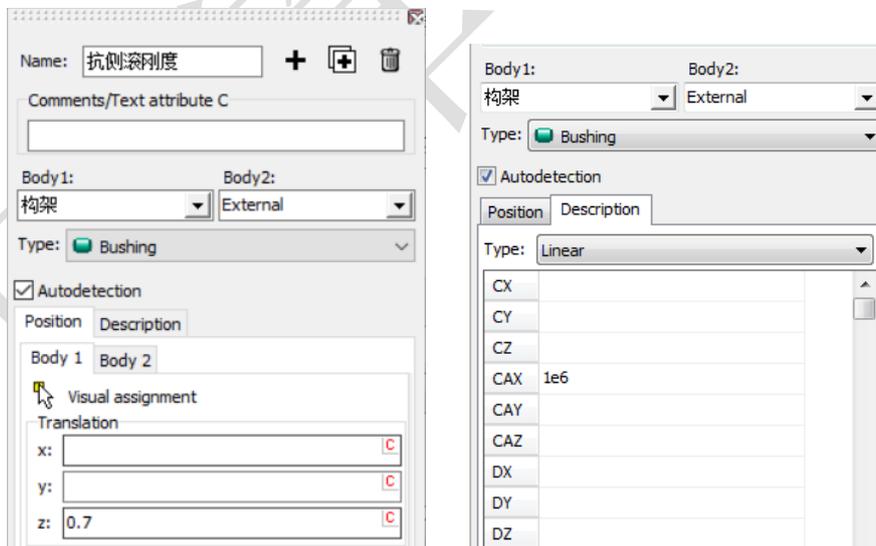


图 3-80

- 12) 复制生成第三个 **Bushing** 力元，在 **Body1** 界面设置连接点(0, 0, 0.65)，在 **Description** 页面下拉菜单选择类型 **Generalized**，然后到 **Fy** 页面，选择 **Point(numeric)**，横坐标设为位移 **x**，勾选压缩为正 **Positive: compression**。

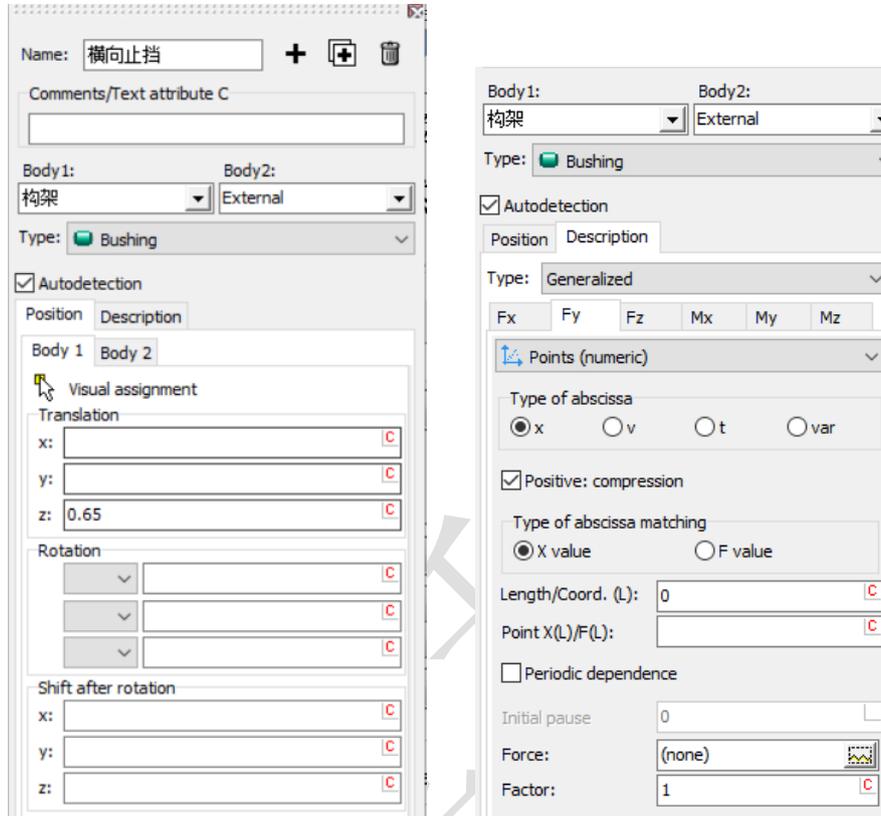


图 3-81

- 13) 点击 **Force** 栏按钮  打开 **曲线编辑器**，点击按钮 ，读取“D:\UM 培训教程\曲线素材”路径下的 **横向止挡.crv** 文件，其非线性特性如图 3-82。

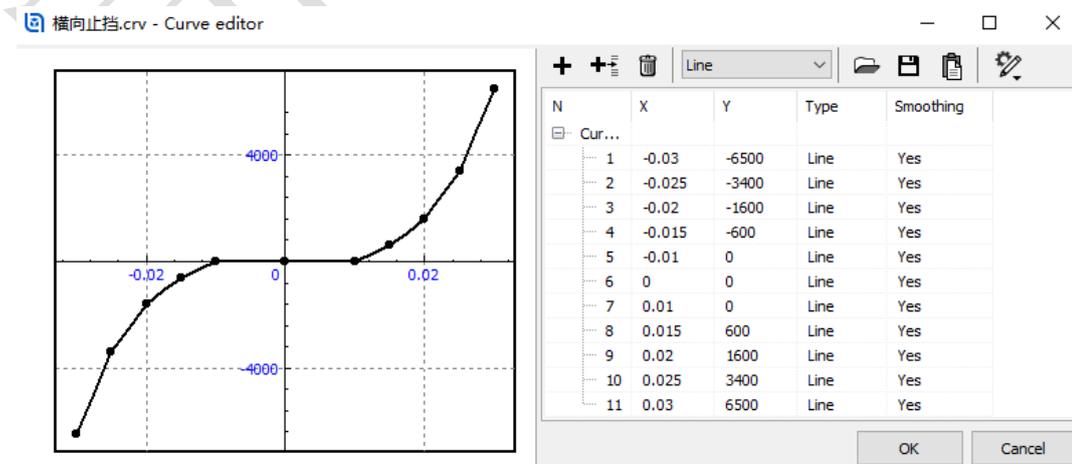


图 3-82

至此，我们完成了转向架系统的建模，记得保存一下。

3.2.1.3 整车装配

- 1) 左侧选中模型树 **Object**，在右侧 **General** 页面点击按钮 **Transform into subsystem**，这样就一个转向架模型压缩成了一个子系统，便于整体操作。

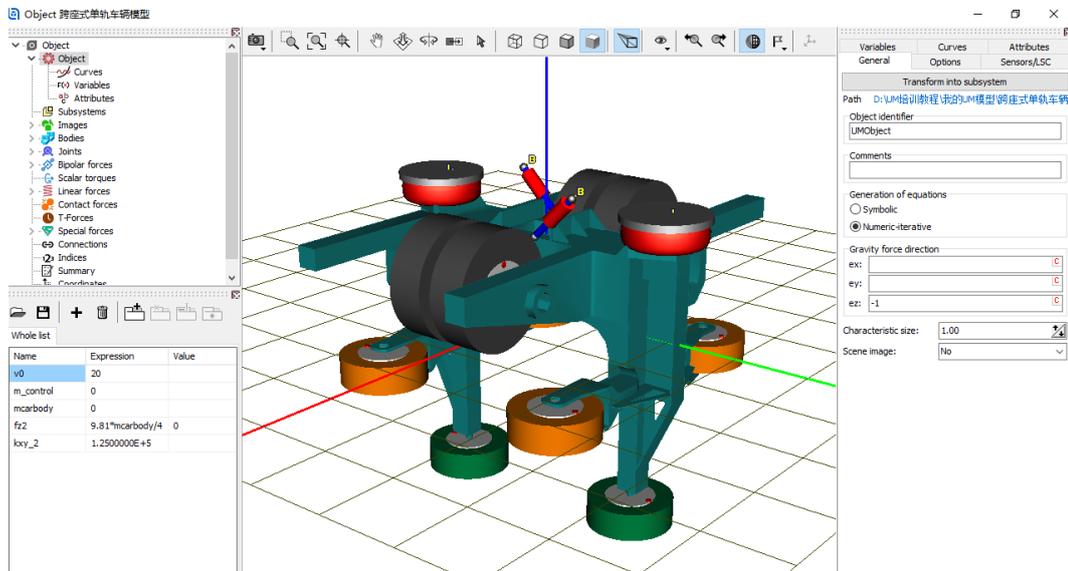


图 3-83

- 2) 重命名为**转向架 F**，在 **Position** 定义 **X** 平动 **5m**。

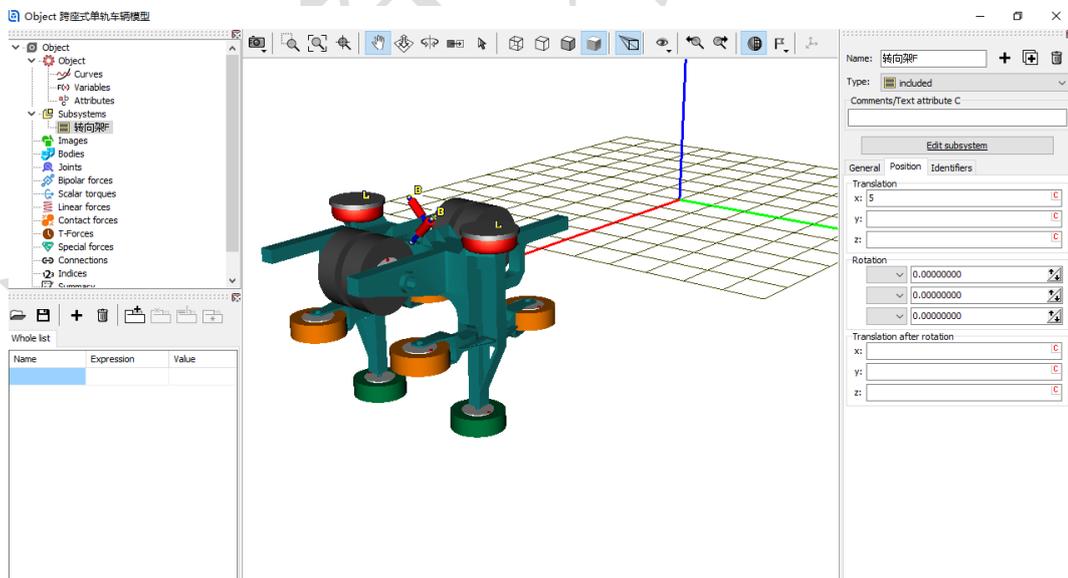


图 3-84

- 3) 复制生成第二个子系统，重命名为**转向架 R**，**Position** 定义 **X** 平动**-5m**。

- 4) 从“D:\UM 培训教程\几何素材\跨座式单轨车辆模型”导入几何素材车体。
- 5) 在左侧参数符号列表区点右键，选择菜单 **Add from subsystem...**，从列表中选择**转向架 F** 子系统里的 **mcarbody** 参数，将其设置为 **15000kg**，弹出提示，点击 **OK**，这样将两个转向架系统里的 **mcarbody** 参数也都赋值 **15000 kg**。

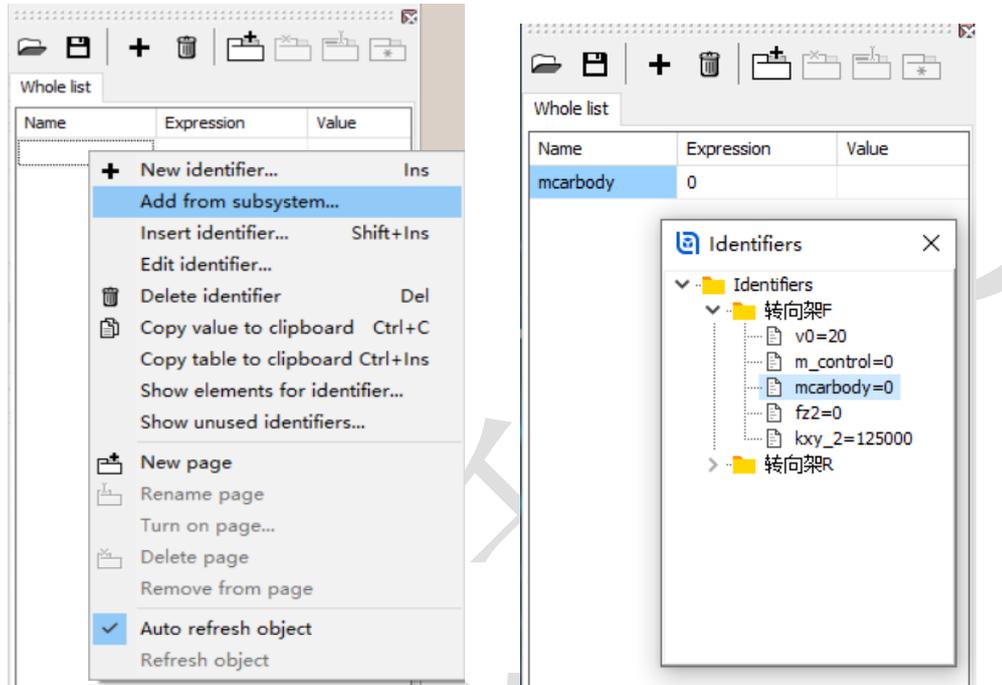


图 3-85

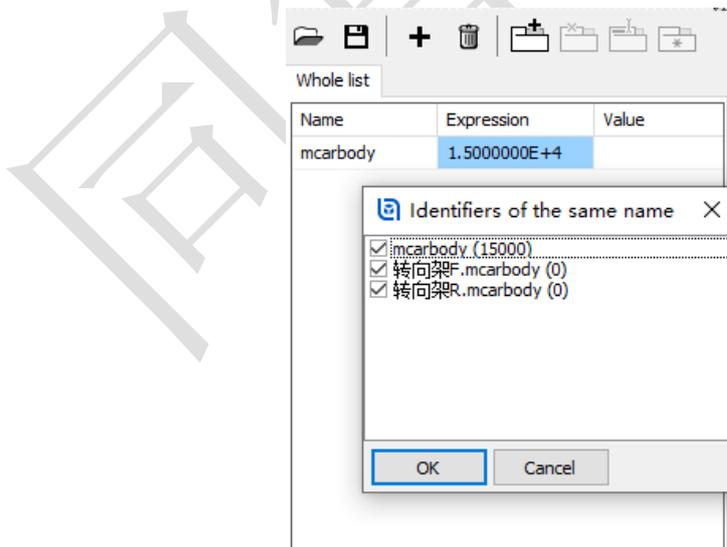


图 3-86

- 6) 创建**车体**刚体，定义质量 **mcarbody**，转动惯量 (**2e4**, **2e5**, **2e5**)，质心坐标 (**0**, **0**, **1.75**)；点击按钮 ，创建一个六自由度铰。

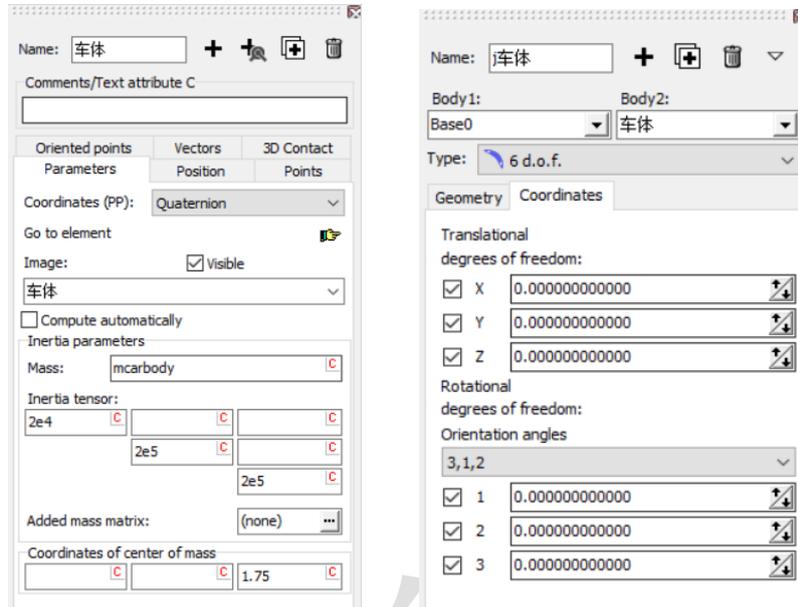


图 3-87

- 7) 然后，我们需要将**车体**和两个**转向架**子系统建立连接。在二系力元建模时，还没有车体这个物体，因此所有的 **Body2** 都选择一个虚拟物体 **External**，两个连接点的坐标都在 **Body1** 坐标系中定义的。在左侧模型树选择 **Connection**，右侧交互界面选中任意一个力元，点右键，选择 **Assign to all**，然后选择**车体**局部坐标系，这样就用**车体**替换了子系统里的 **External** 虚拟体。

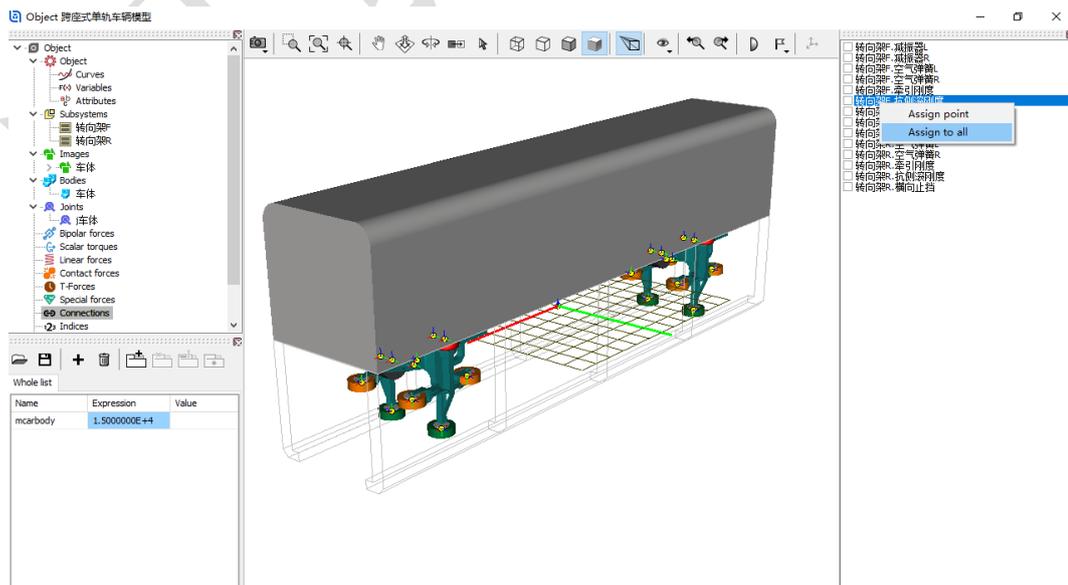


图 3-88

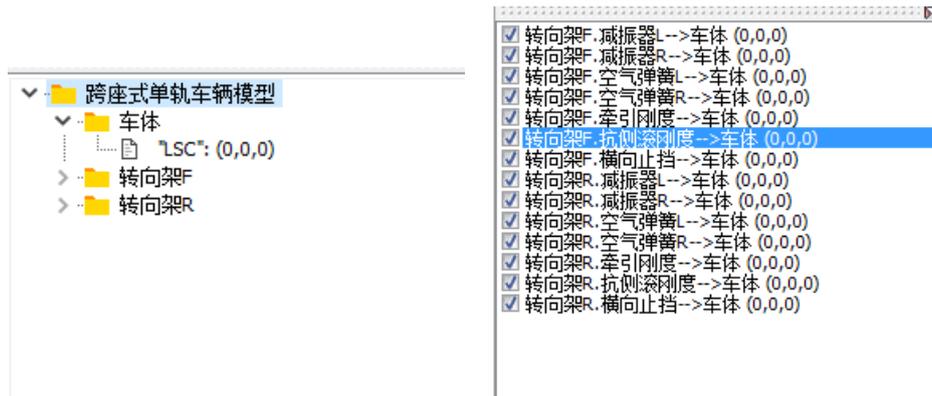


图 3-89

- 8) 最后，在左侧模型树选中 **Object**，右侧面板 **General** 界面 **Comments** 处输入备注 **Monorail**，这样仿真程序才能调用单轨模块的功能，否则是汽车模块。

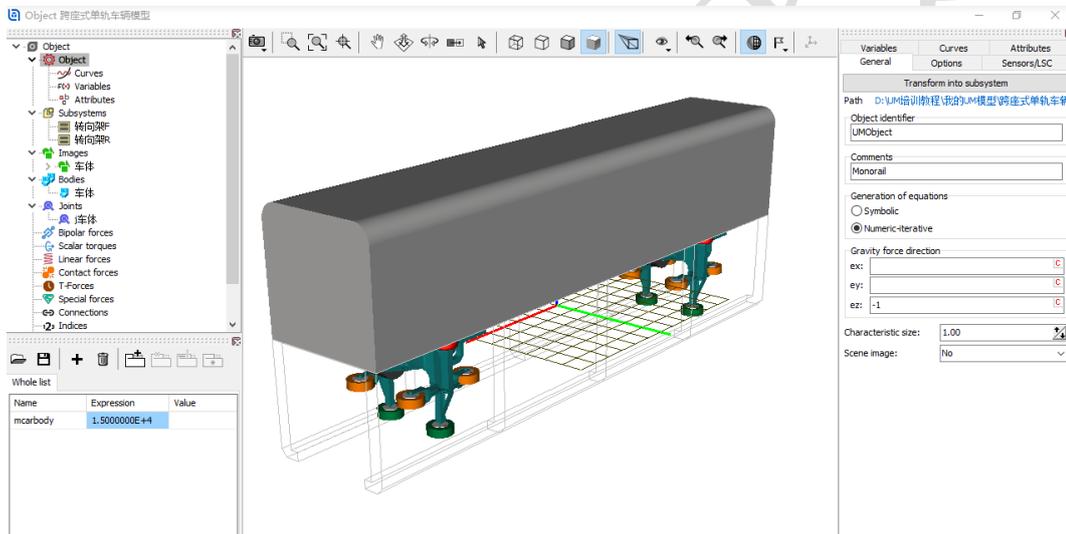


图 3-90

- 9) 点击 **Summary**，检查是否有逻辑错误，**保存**模型，关闭 **UM Input** 程序。

3.2.2 跨座式单轨车辆动力学仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 程序，加载**跨座式单轨车辆模型**。自由调整动画窗口大小、位置和视图方向。

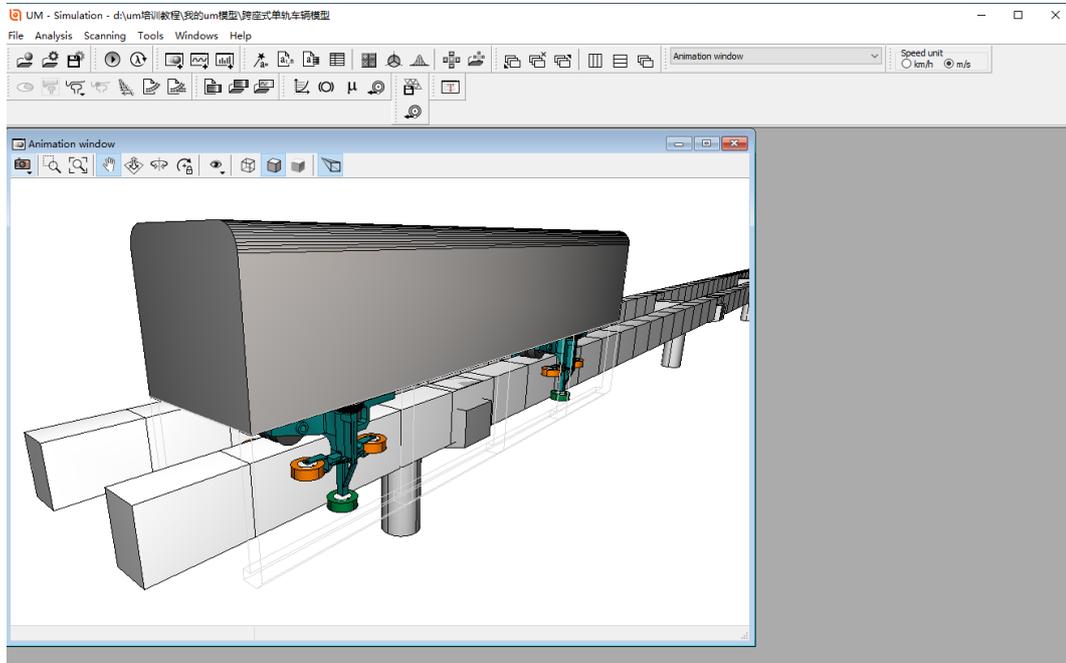


图 3-91

- 2) 打开仿真控制面板，选择 **Park** 求解器，设置仿真时间 **30s**，设置数据采样步长为 **0.005s**，勾选 **Computation of Jacobian**。

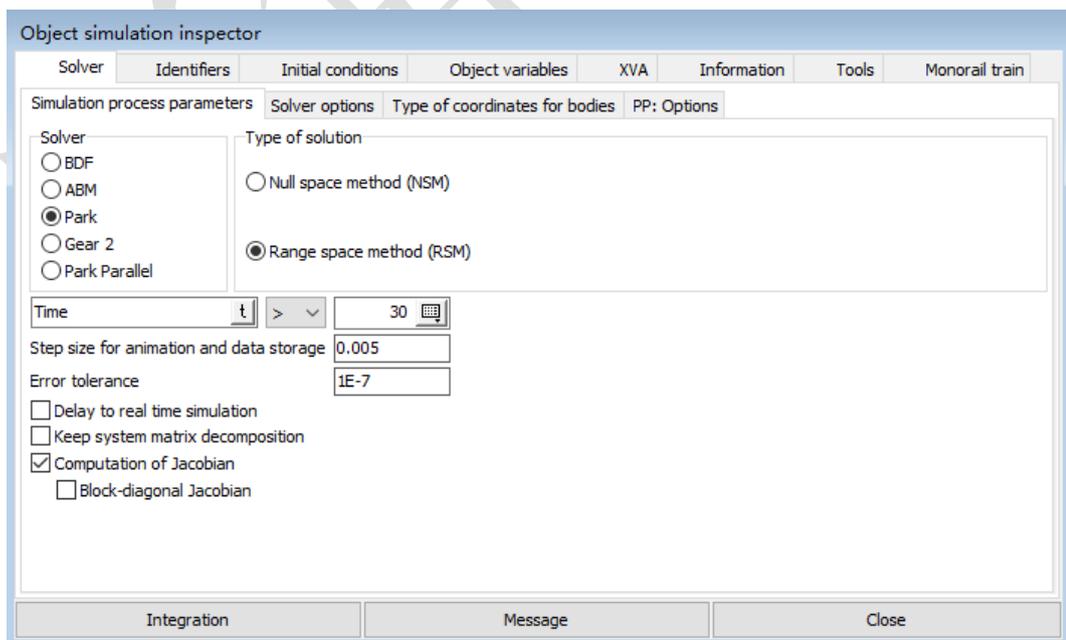


图 3-92

- 3) 切换到 **Monorail train** → **Tires**, 点击按钮 **+**, 添加 “D:\UM 培训教程\轮胎模型” 路径下的三个轮胎模型。

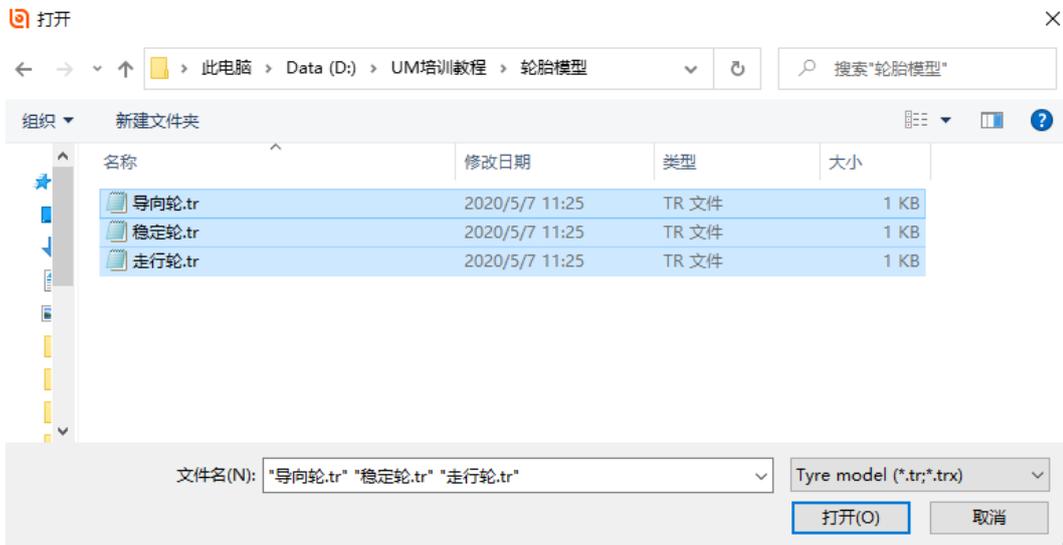


图 3-93

- 4) 在页面下方点**右键**, 选择菜单 **Assign to all driving wheels** → **走行轮.tr**, 这样就给每一个走行轮定义了轮胎模型。

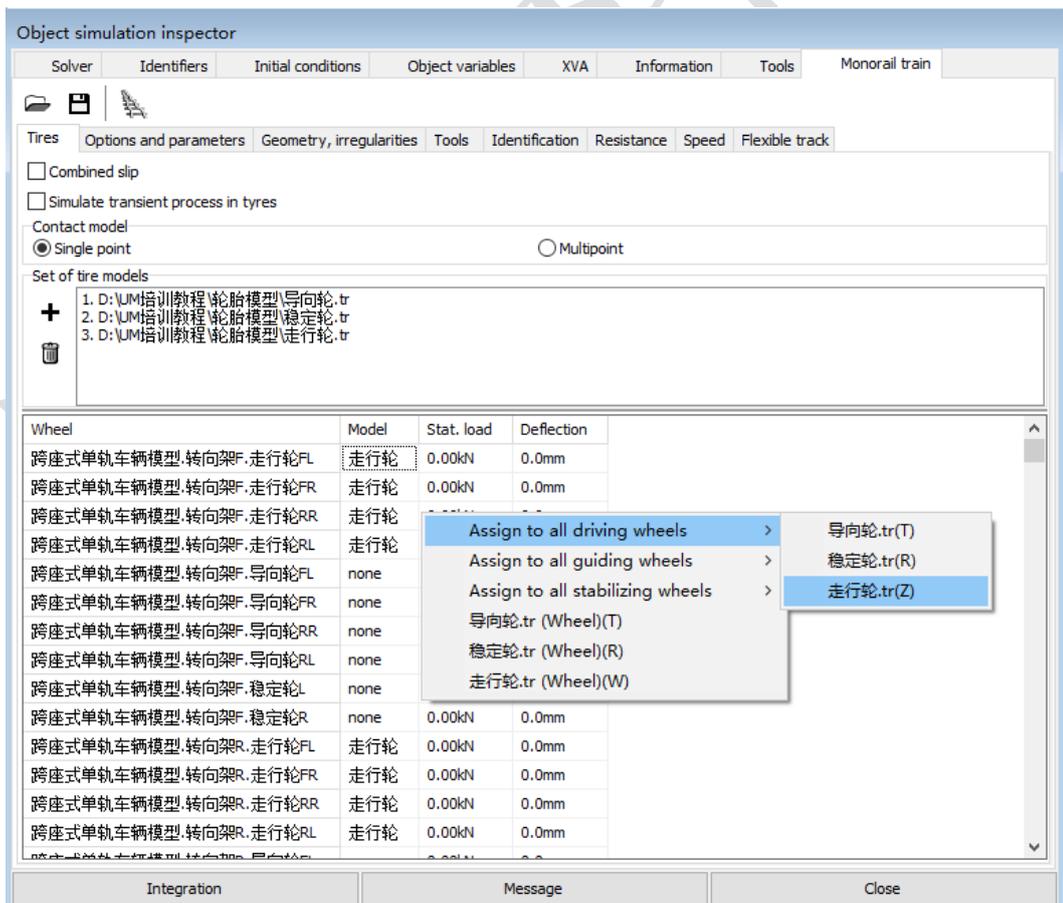


图 3-94

- 5) 在页面下方点**右键**，选择菜单 **Assign to all guiding wheels** → **导向轮.tr**，这样就给每一个导向轮定义了轮胎模型。
- 6) 在页面下方点**右键**，选择菜单 **Assign to all stabilizing wheels** → **稳定轮.tr**，这样就给每一个稳定轮定义了轮胎模型。
- 7) 切换到 **Options and parameters** 页面，设置导向面和稳定面的横向距离之半均为 **0.45m**。

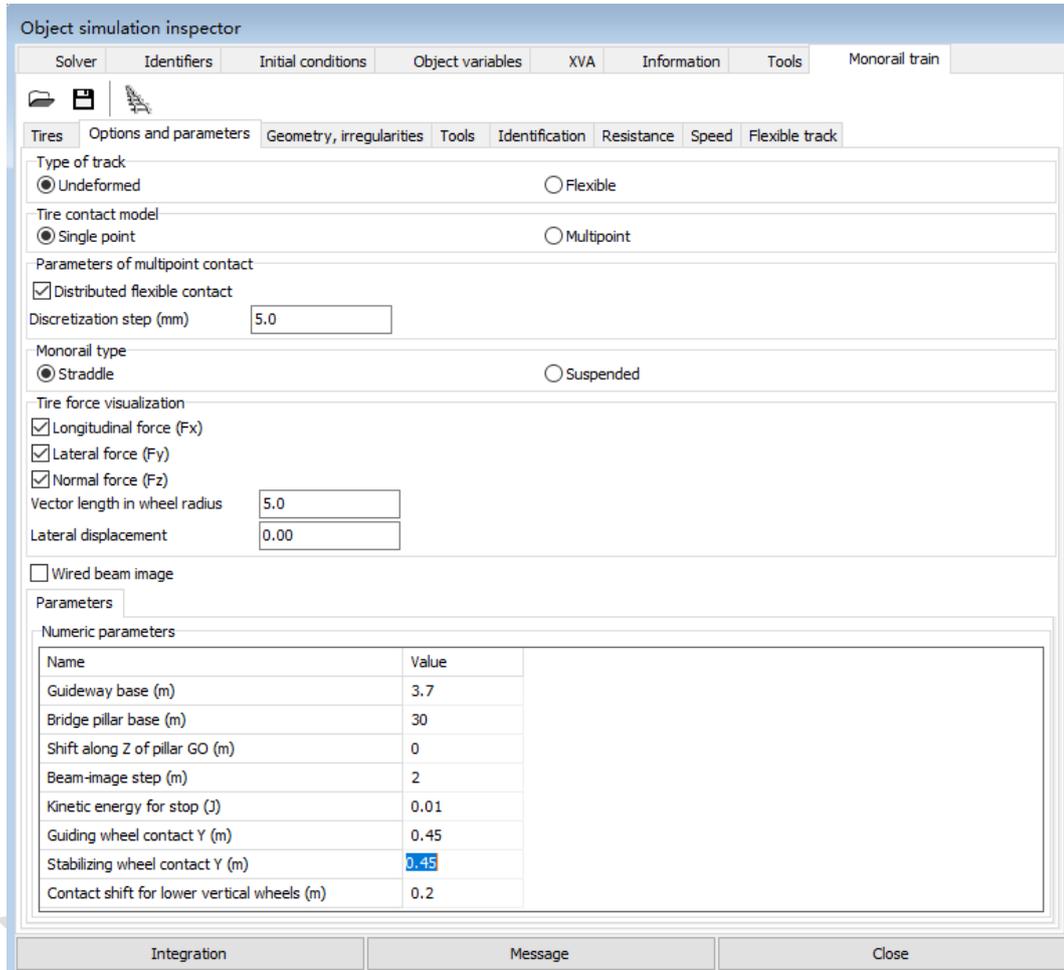


图 3-95

- 8) 切换到 **Tools** 页面，从下拉菜单选择 **Beam section profile**。

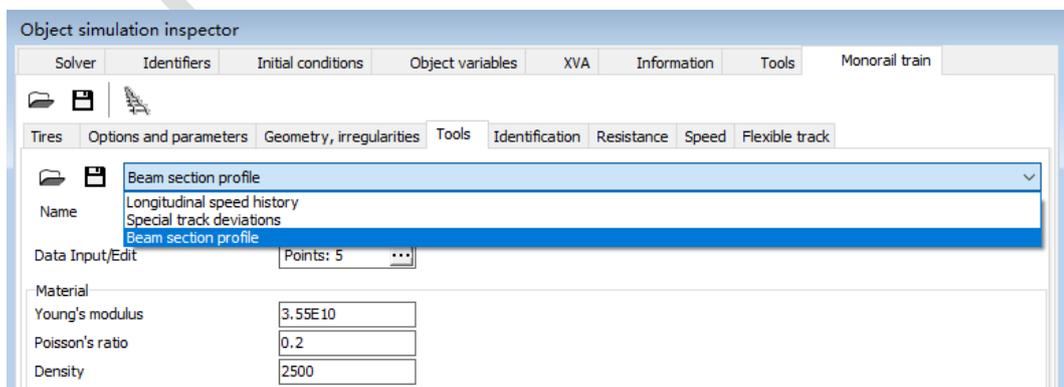


图 3-96

- 9) 然后点击 **Data Input/Edit** 栏的  按钮，弹出 **曲线编辑器**，点击曲线编辑器工具栏按钮 ，读取“D:\UM 培训教程\曲线素材”路径下的 **跨座式单轨梁.crv** 文件。

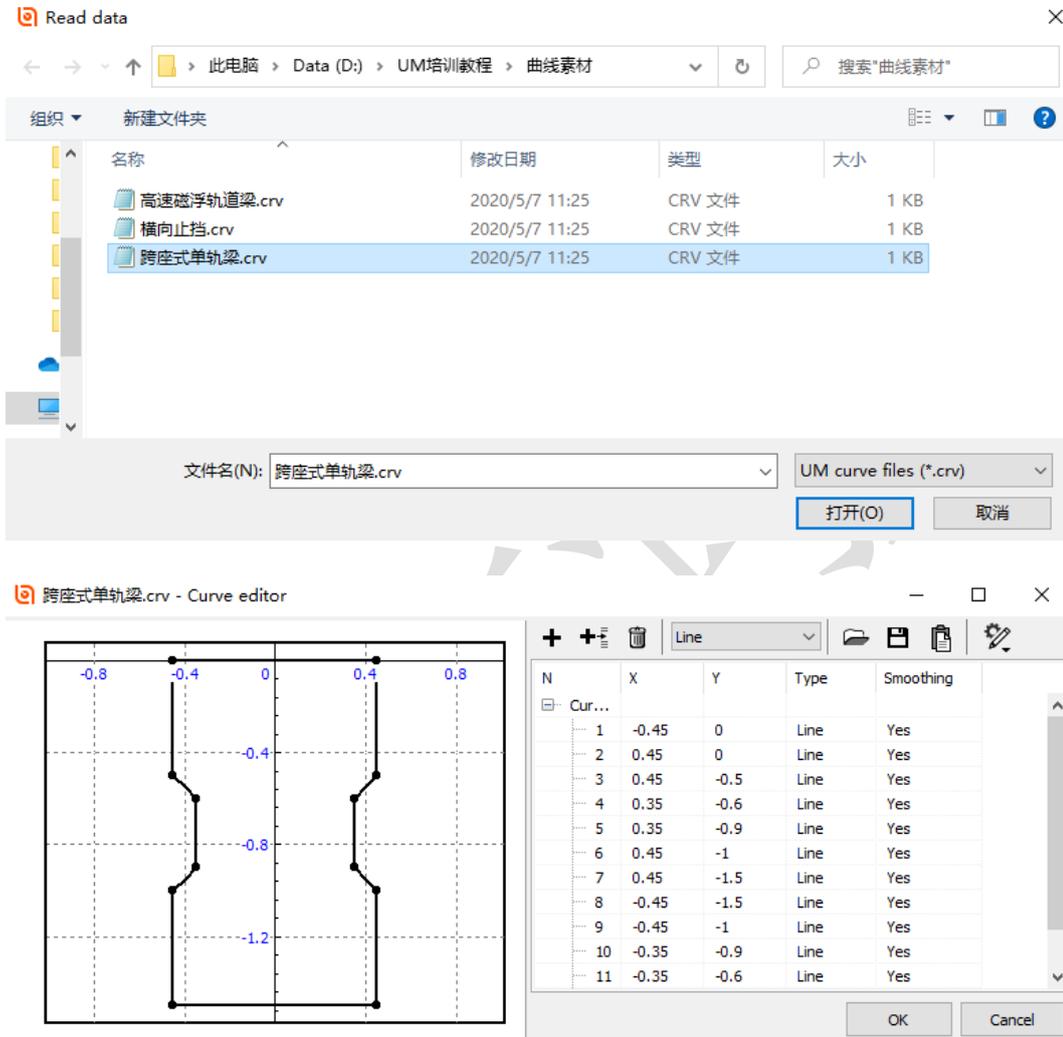


图 3-97

- 10) 切换到 **Speed** 页面，选择 **v=0** 模式。

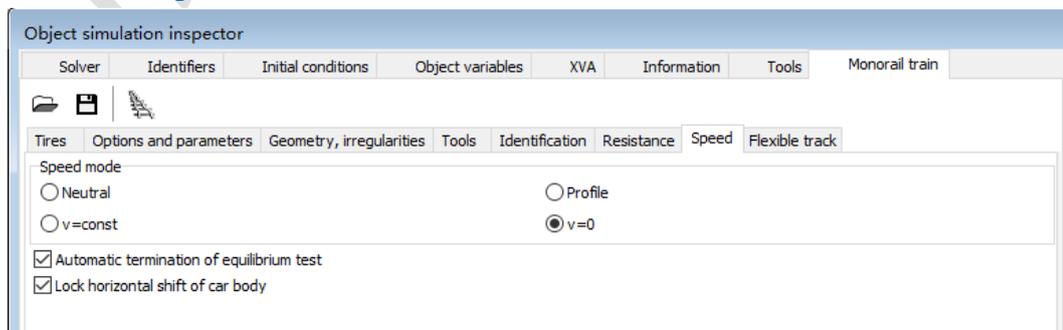


图 3-98

- 11) 点击 **Integration**，进行静平衡计算，经过约 5s，程序提示 “Test succeed. Accept results? ”,点击是(Y)。

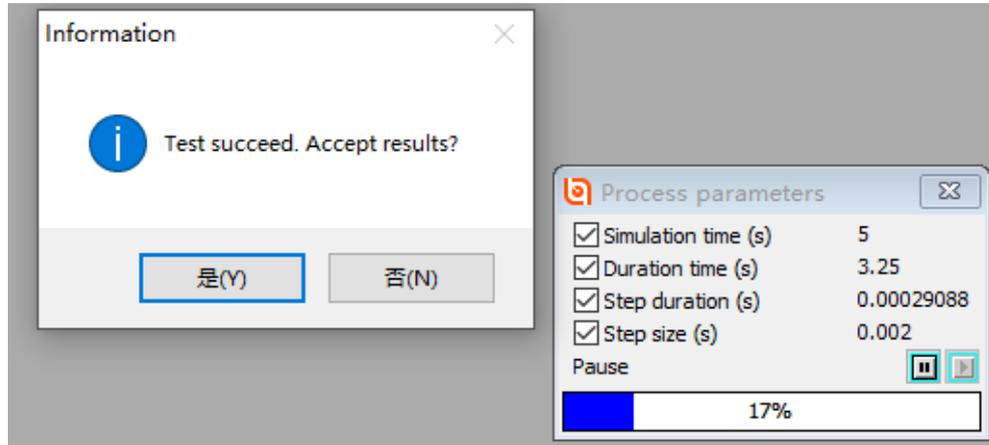


图 3-99

- 12) 在 **Monorail Train | Tires** 页面，可以看到各个轮胎的预压力与压缩量；在 **Initial conditions** 页面，可以看到每个物体在各方向的位移量（相对与建模位置）。

Wheel	Model	Stat. load	Deflection
跨座式单轨车辆模型.转向架R.走行轮FL	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.走行轮FR	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.走行轮RR	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.走行轮RL	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.导向轮FL	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.导向轮FR	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.导向轮RR	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.导向轮RL	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.稳定轮L	稳定轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架R.稳定轮R	稳定轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.走行轮FL	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.走行轮FR	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.走行轮RR	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.走行轮RL	走行轮	23.99kN	24.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.导向轮FL	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.导向轮FR	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.导向轮RR	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.导向轮RL	导向轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.稳定轮L	稳定轮	2.50kN	5.0mm
跨座式单轨车辆模型.转向架L.稳定轮R	稳定轮	2.50kN	5.0mm

跨座式单轨车辆模型.						
	↓	✓	Coordinate	Velocity	Comment	
1.1	<input type="checkbox"/>		0	0	车体 1c	
1.2	<input type="checkbox"/>		0	0	车体 2c	
1.3	<input type="checkbox"/>		-0.0239855837984	0	车体 3c	
1.4	<input type="checkbox"/>		6.97799968655E-7	0	车体 4a	
1.5	<input type="checkbox"/>		0	0	车体 5a	
1.6	<input type="checkbox"/>		0	0	车体 6a	
1.7	<input type="checkbox"/>		7.04267340014E-8	0	转向架R.机架_构架 1c	
1.8	<input type="checkbox"/>		1.548421157E-6	0	转向架R.机架_构架 2c	
1.9	<input type="checkbox"/>		-0.0239854512558	0	转向架R.机架_构架 3c	
1.10	<input type="checkbox"/>		6.67461478128E-6	0	转向架R.机架_构架 4a	
1.11	<input type="checkbox"/>		-1.01182849236E-6	0	转向架R.机架_构架 5a	
1.12	<input type="checkbox"/>		3.60349534065E-9	0	转向架R.机架_构架 6a	
1.13	<input type="checkbox"/>		-2.34412842189E-6	0	转向架R.构架_走行轮FL 1a	
1.14	<input type="checkbox"/>		2.68780189687E-6	0	转向架R.构架_走行轮FR 1a	
1.15	<input type="checkbox"/>		2.68780274647E-6	0	转向架R.构架_走行轮RR 1a	
1.16	<input type="checkbox"/>		-2.34412821142E-6	0	转向架R.构架_走行轮RL 1a	
1.17	<input type="checkbox"/>		-1.8384561354E-5	0	转向架R.构架_导向轮FL 1a	
1.18	<input type="checkbox"/>		2.89337706691E-5	0	转向架R.构架_导向轮FR 1a	
1.19	<input type="checkbox"/>		3.03165290858E-5	0	转向架R.构架_导向轮RR 1a	
1.20	<input type="checkbox"/>		-1.64940498364E-5	0	转向架R.构架_导向轮RL 1a	
1.21	<input type="checkbox"/>		-1.09865552428E-5	0	转向架R.构架_稳定轮L 1a	
1.22	<input type="checkbox"/>		3.54952634557E-5	0	转向架R.构架_稳定轮R 1a	

图 3-100

- 13) 切换到 **Speed** 页面，选择 **v=const** 模式。

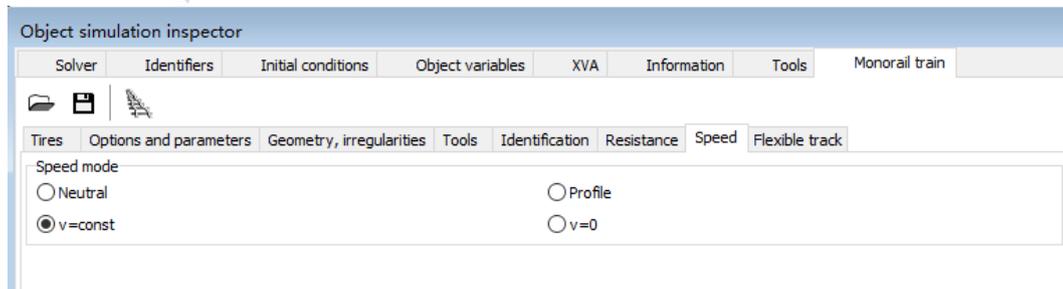


图 3-101

- 14) 切换到 **Identification** 页面，双击 **Longitudinal control torque** 右边的单元格，选择转向架子系统里的参数符号 **m_control**，并在下方 **Gain** 右边的单元格将参数设置为 **3000**。

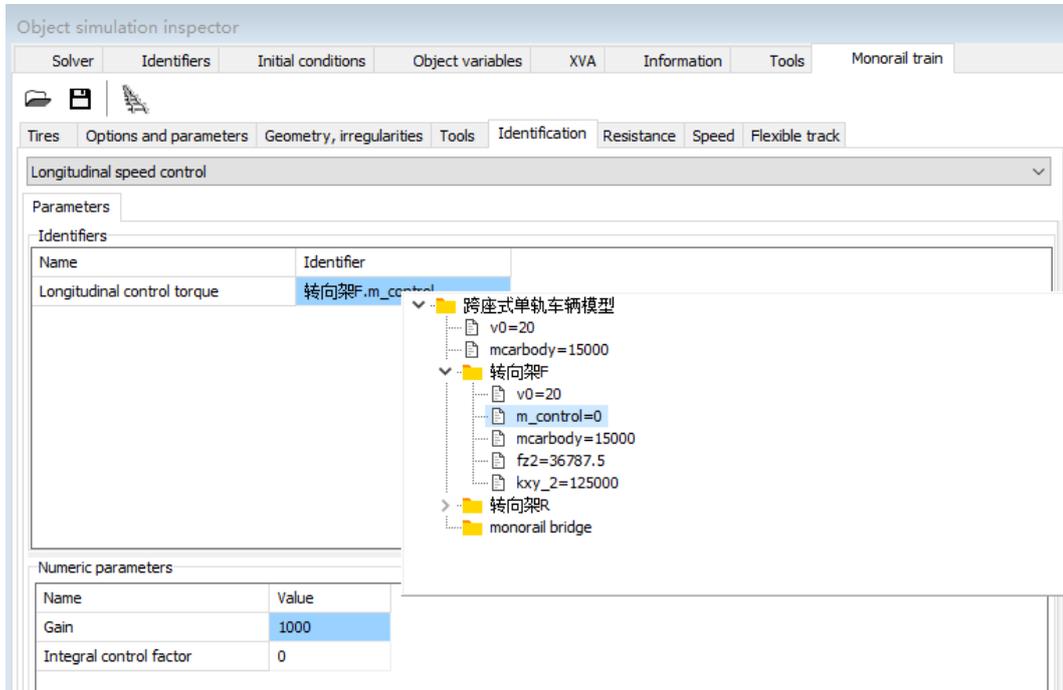


图 3-102

- 15) 切换到 **Geometry, irregularities** 页面，勾选 **Use irregularities**，设置轨道线路“**D:\UM 培训教程\曲线素材\R300.mcg**”，设置路面不平度如图 3-103，设置 **Factor=0.5**，勾选 **Coherent right irregularities**。

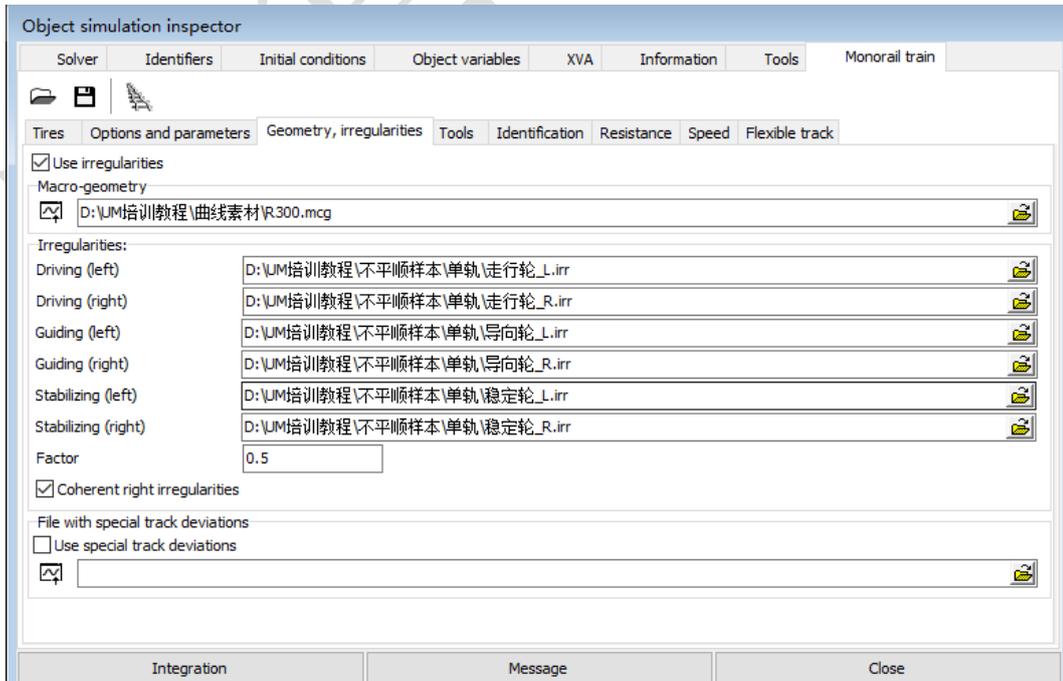


图 3-103

- 16) 切换到 **Identifiers** → **List of identifiers** 页面，设置车辆初始速度 v_0 为 40，在弹出窗口点击 **OK**。

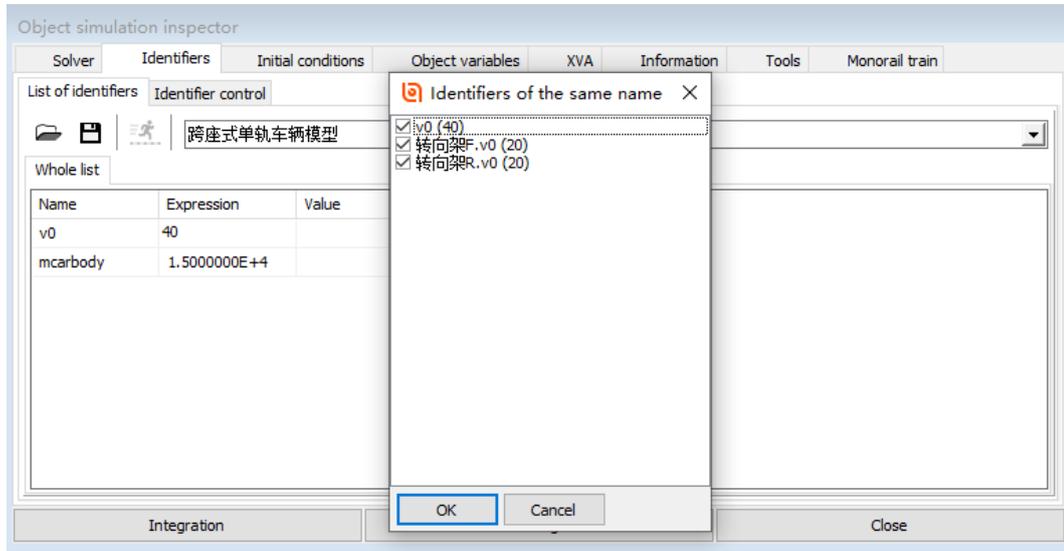


图 3-104

- 17) 选择主菜单 **Tools** → **Options**，或直接在工具栏上修改车辆初始速度单位为 **km/h**。这里的单位只对 v_0 参数有效，计算结果均为国际单位 (**m**, **rad**, **kg**, **s**, **N**)。

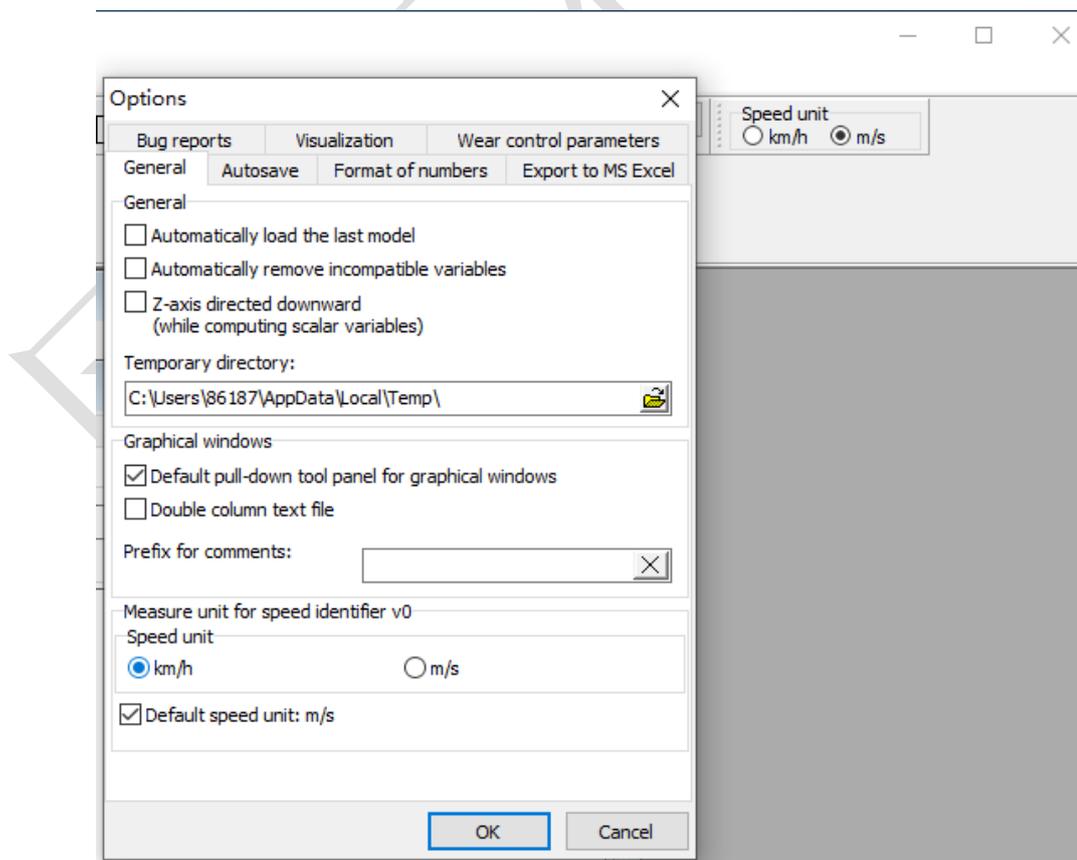


图 3-105

- 18) 打开**变量向导**，创建前转向架四个**走行轮**的**法向力**变量，并拖入一个绘图窗口。

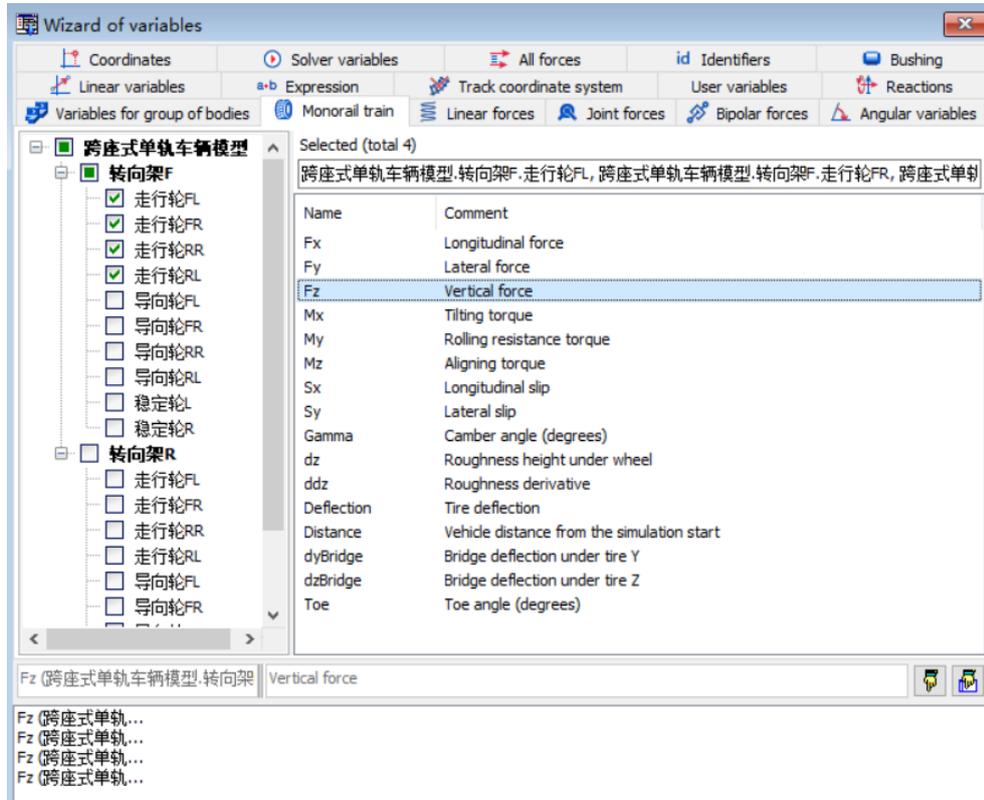


图 3-106

- 20) 在模型动画窗口空白处点**右键**，选择菜单 **Cameras** → **Add camera in current position**，再通过右键菜单 **Cameras** → **Camera settings**，在 **Camera follows the body** 可选择镜头跟随**车体**。

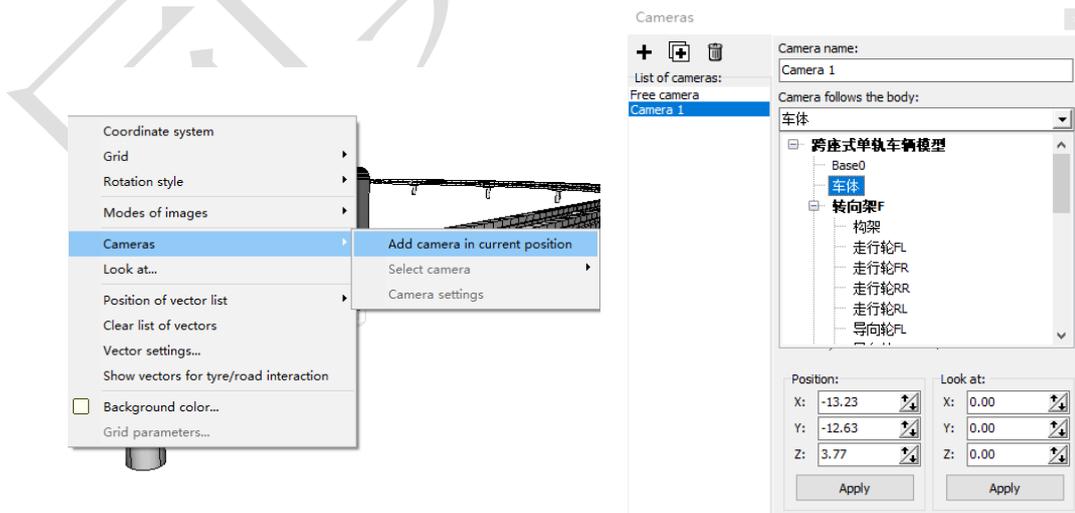


图 3-107

- 21) 点击仿真控制面板 **Integration** 按钮开始仿真。

22) 在动画窗口点击**右键**，选择 **Show vectors for tyre/road interaction**，可显示**轮胎力**矢量。

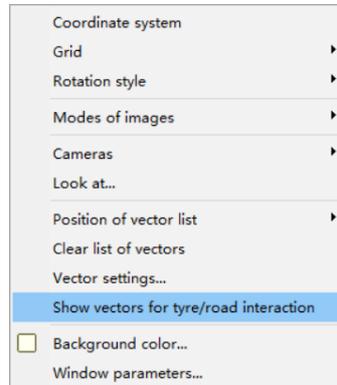


图 3-108

23) 在绘图窗口点**右键**，选择菜单 **Show all**，可自动调节以适应窗口。

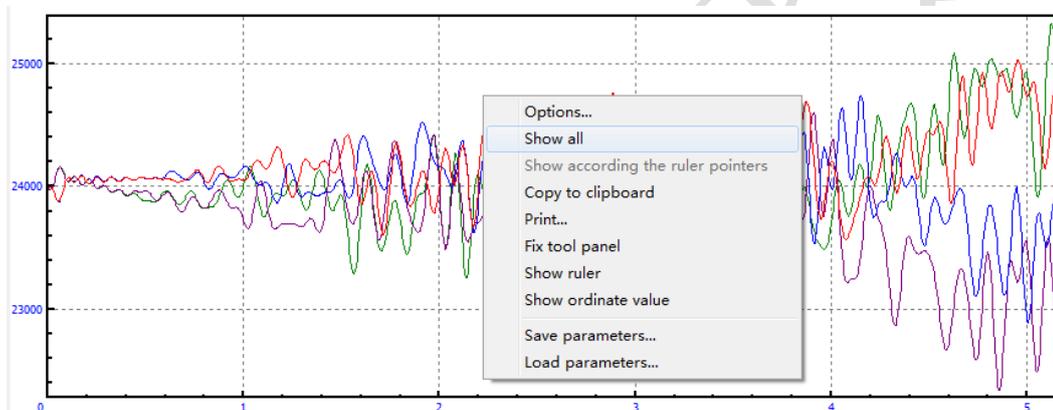


图 3-109

24) 仿真过程如图 3-110，如果将动画窗口最小化或关闭，计算会非常快。

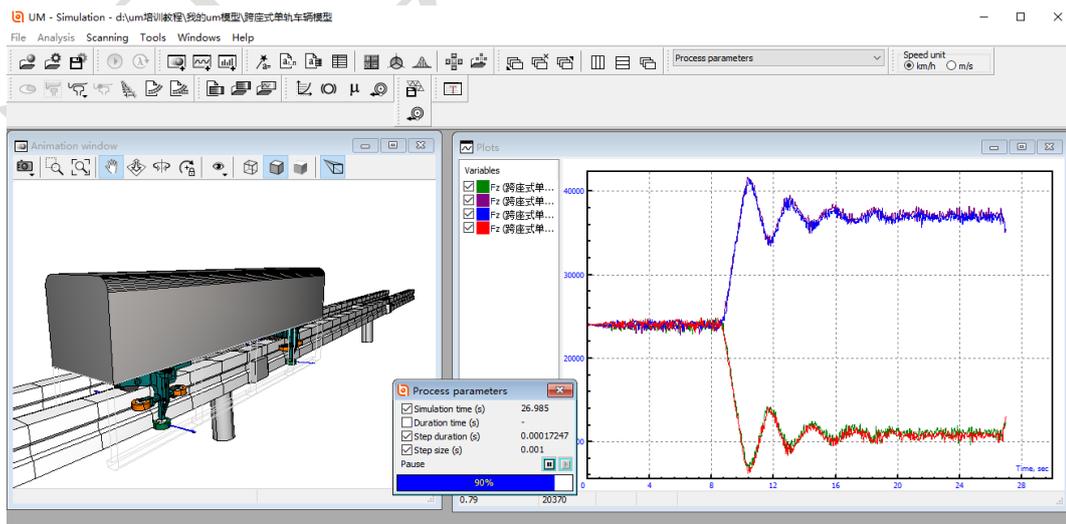


图 3-110

3.3 磁浮交通

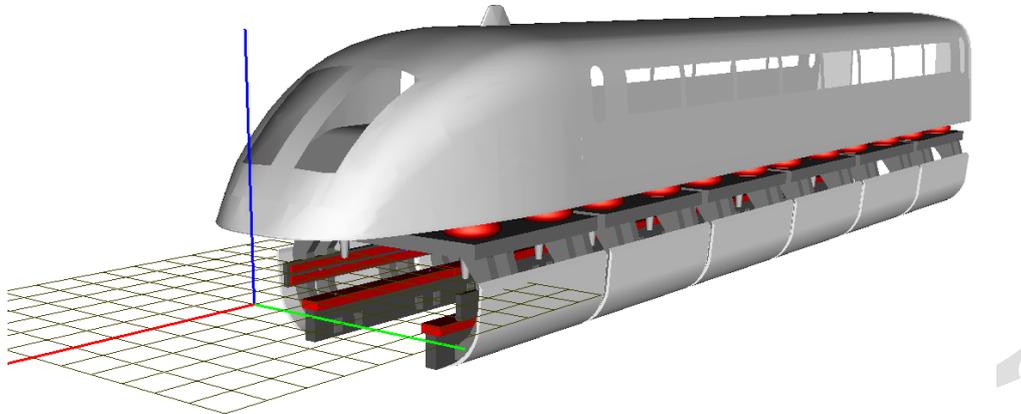


图 3-111

图 3-111 所示为一个典型的高速磁浮车辆模型，该模型由一个车体和六个悬浮架子系统组成。其中悬浮架子系统里有一个构架、两个悬浮电磁铁和两个导向电磁铁，每个电磁铁上有四个加速度传感器，电磁铁与构架之前有一系悬挂，车体和构架之间有二系悬挂，模型共计 114 个自由度。

本例用到的模块：**UM Base**、**UM Subsystem**、**UM Maglev**。

3.3.1 高速磁浮车辆动力学建模

3.3.1.1 刚体与铰

- 1) 运行 **UM Input**，新建模型，保存为“**D:\UM 培训教程\我的 UM 模型\高速磁浮车辆模型**”。
- 2) 从“**D:\UM 培训教程\几何素材\高速磁浮车辆模型**”依次导入建模所需的几何素材**构架.img**，**悬浮电磁铁.img**，**导向电磁铁 img**，**空气弹簧.img**。



图 3-112

- 3) 将**导向电磁铁**几何重命名为**导向电磁铁 L**，新建一个几何，重命名为**导向电磁铁 R**，选择类型 **GO**，从下拉菜单中选择几何**导向电磁铁 L**，在 **GO Position** 页面设置绕 **Z** 轴旋转 **180°**。

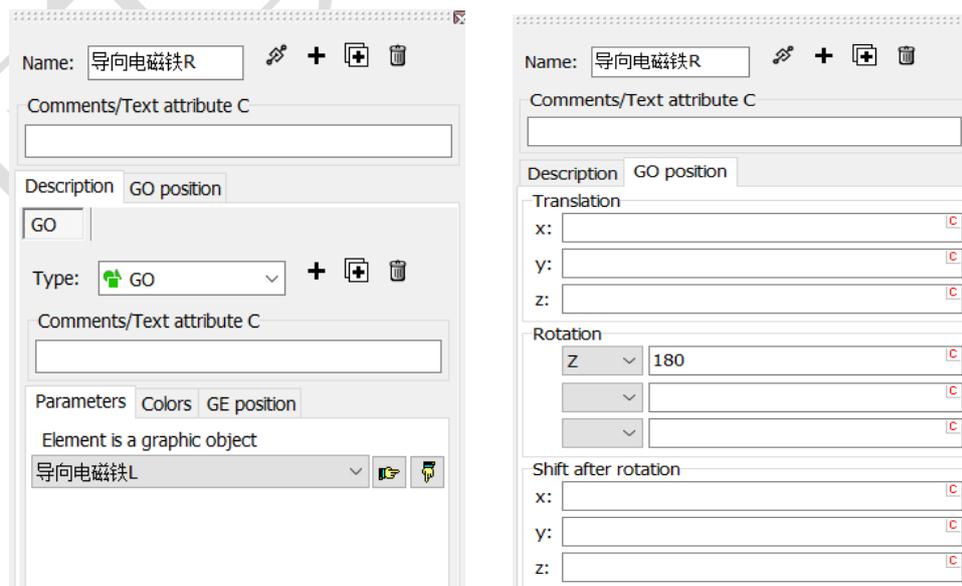


图 3-113

- 4) 创建第一个刚体，命名为**构架**，选择几何**构架**，定义质量参数 $m_frame = 1000$ ，转动惯量 ($1000, 1000, 1000$)，质心坐标为 ($0, 0, 0$)。

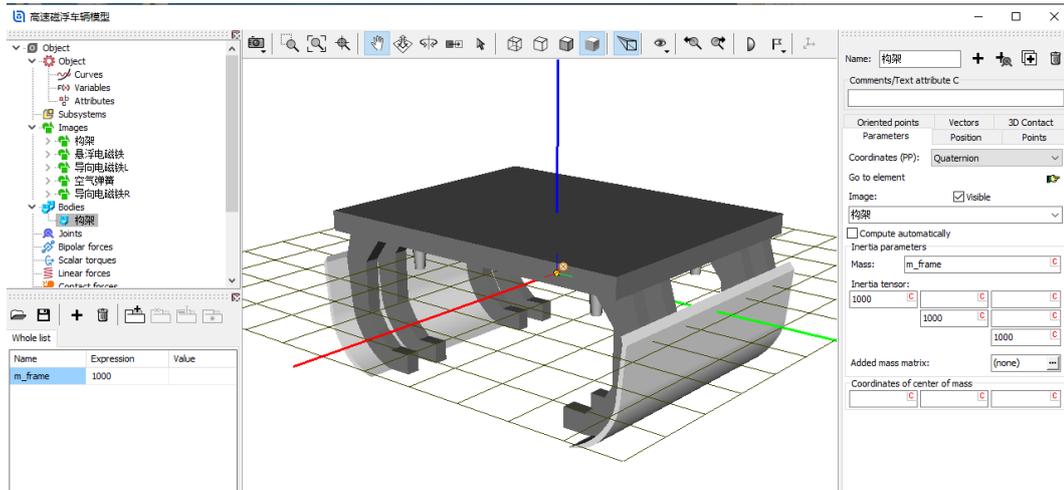


图 3-114

- 5) 创建第二个刚体，命名为**悬浮电磁铁 L**，选择几何**悬浮电磁铁**，定义质量 $m_magnet = 600$ ，转动惯量 ($20, 600, 600$)，质心坐标 ($0, 0, -0.25$)。

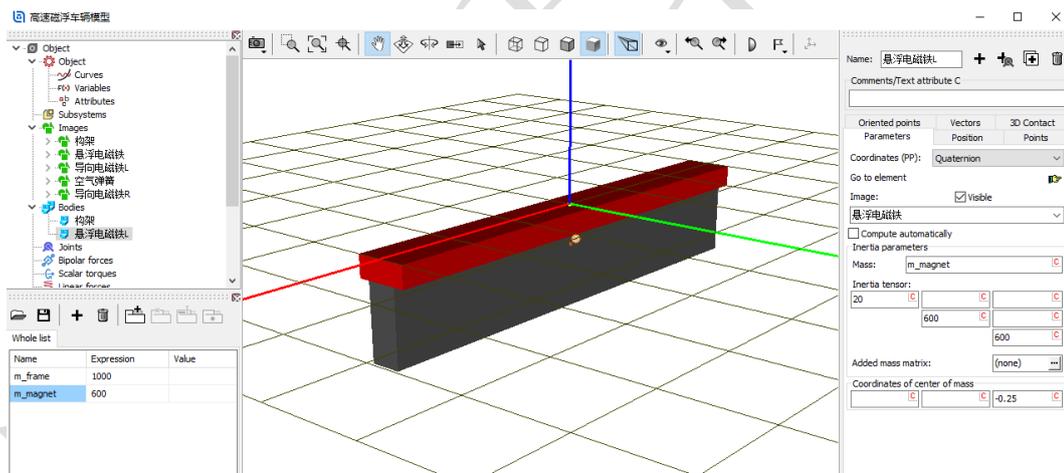


图 3-115

- 6) 复制刚体**悬浮电磁铁 L**，重命名为**悬浮电磁铁 R**。
 7) 复制刚体**悬浮电磁铁 R**，重命名为**导向电磁铁 L**，选择几何**导向电磁铁 L**，修改质心坐标 ($0, 0.08, 0$)。
 8) 复制刚体**导向电磁铁 L**，重命名为**导向电磁铁 R**，选择几何**导向电磁铁 R**，修改质心坐标 ($0, -0.08, 0$)
 9) 创建第一个铰，**Body1** 选择 **Base0**，**Body2** 选择**构架**，类型为 **6 d.o.f.**，铰点坐标都为各自的**原点**，无需修改。

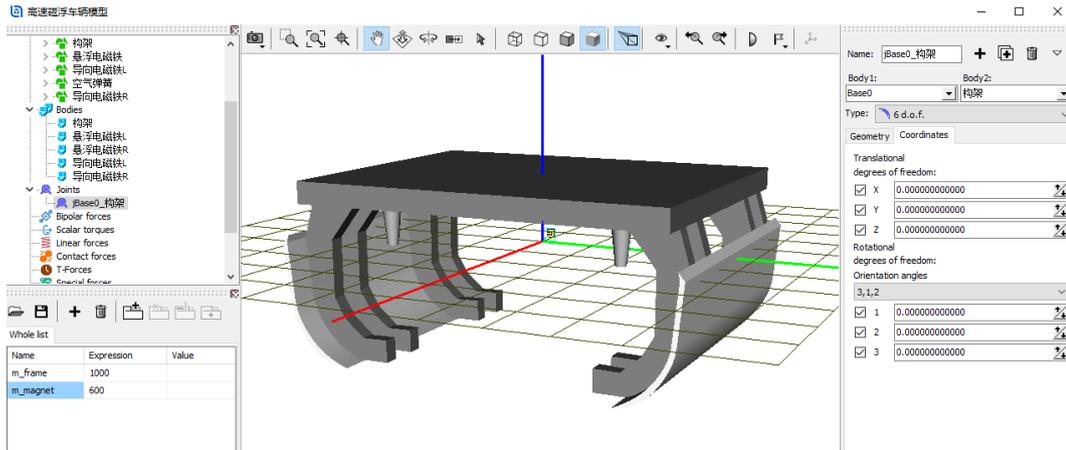


图 3-116

- 10) 创建第二个铰，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择**悬浮电磁铁 L**，类型为 **6 d.o.f.**，两个物体铰接点坐标分别为 $(0, 1.1, -0.475)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，悬浮电磁铁相对构架具有沿 **X**、**Z** 轴平动及绕 **Y** 轴转动的自由度。

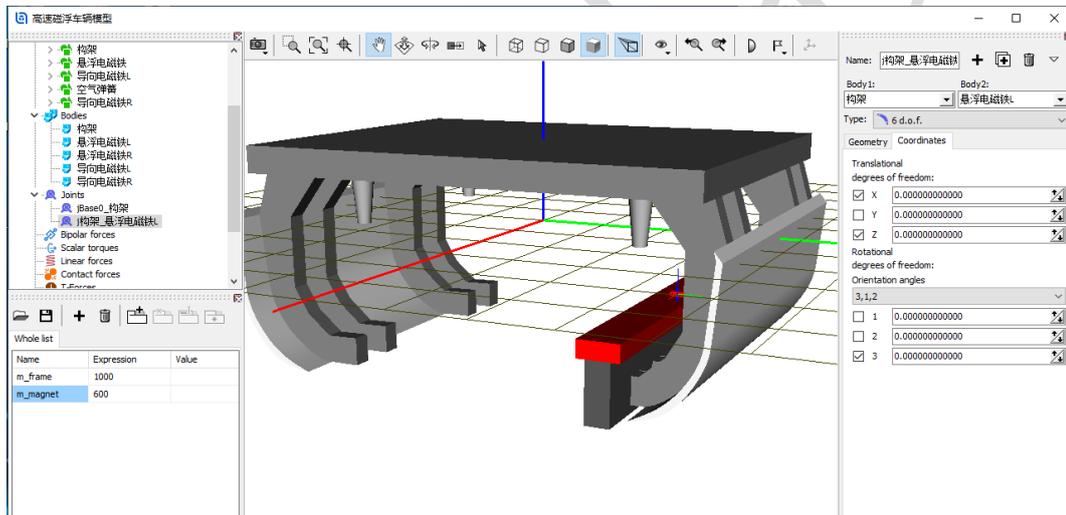


图 3-117

- 11) 复制生成第三个铰，**Body2** 更改为**悬浮电磁铁 R**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(0, -1.1, -0.475)$ 。

- 12) 复制生成第四个铰，**Body2** 更改为**导向电磁铁 L**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(0, 1.465, -0.18)$ ，导向电磁铁相对构架具有沿 **X**、**Y** 轴平动及绕 **Z** 轴转动的自由度。

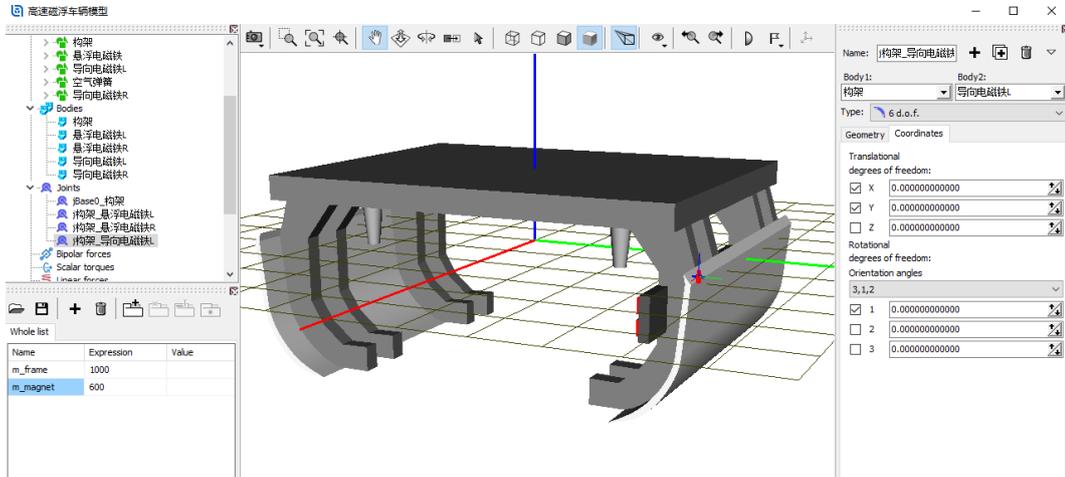


图 3-118

- 13) 复制生成第五个铰，**Body2** 更改为**导向电磁铁 R**，**Body1** 的铰接点坐标为 $(0, -1.465, -0.18)$ 。切换到整体视图模式，如图 3-119。

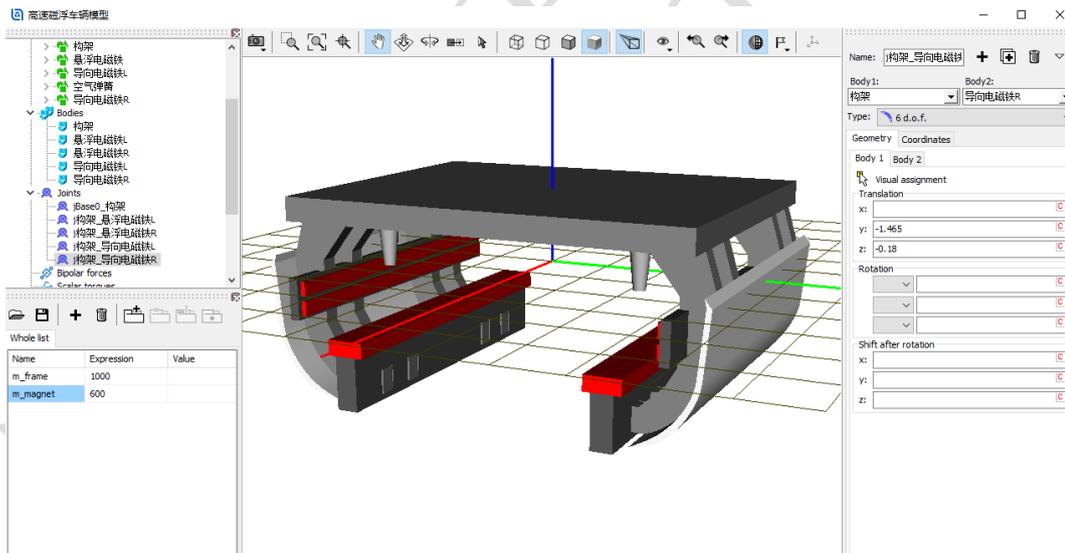


图 3-119

3.3.1.2 悬挂力元

- 选中左侧模型树 **Special forces**，点击右侧按钮 **+**，添加一个力元，命名为**悬浮电磁铁 LF**，选择类型 **Bushing**，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择**悬浮电磁铁 L**，勾选 **Autodetection**，在 **Position | Body1** 界面设置连接点 **(1, 1.1, -0.8)**。

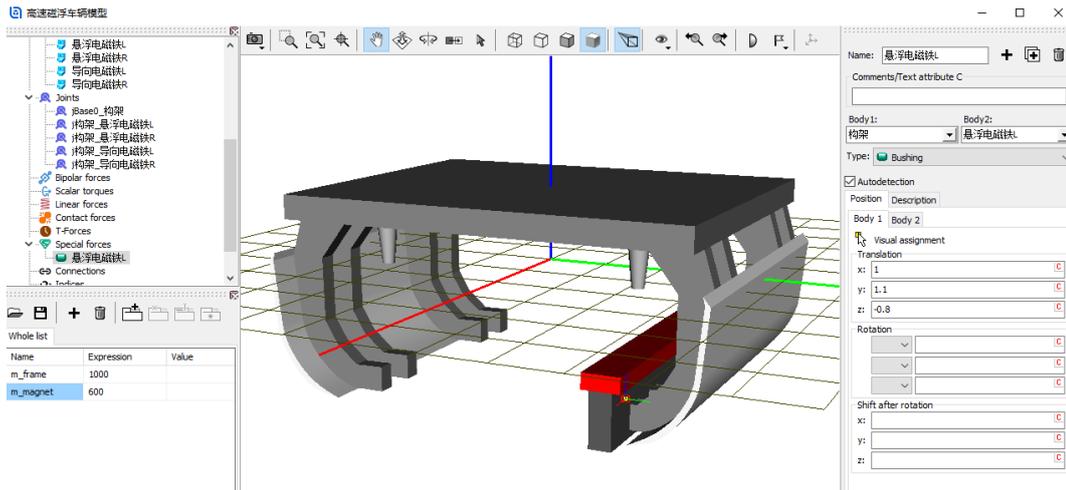


图 3-120

- 在 **Description** 页面设置线性刚度 **CX = 5e6**，**CZ = 5e6**，**CAY = 1e5**，**DX = 5e4**，**DZ = 5e4**，**DAY = 1e3**，定义初始悬浮力 **FZ = -fz1**，缺省赋值 **0**。
- 在左侧下方的参数列表窗口，双击参数符号 **fz1**，定义表达式：**9.81*(m_carbody/n_bogies+m_frame+2*m_magnet)/4**，程序会自动创建 **m_carbody** 和 **n_bogies** 两个符号，分别输入数值 **15000** 和 **6**。

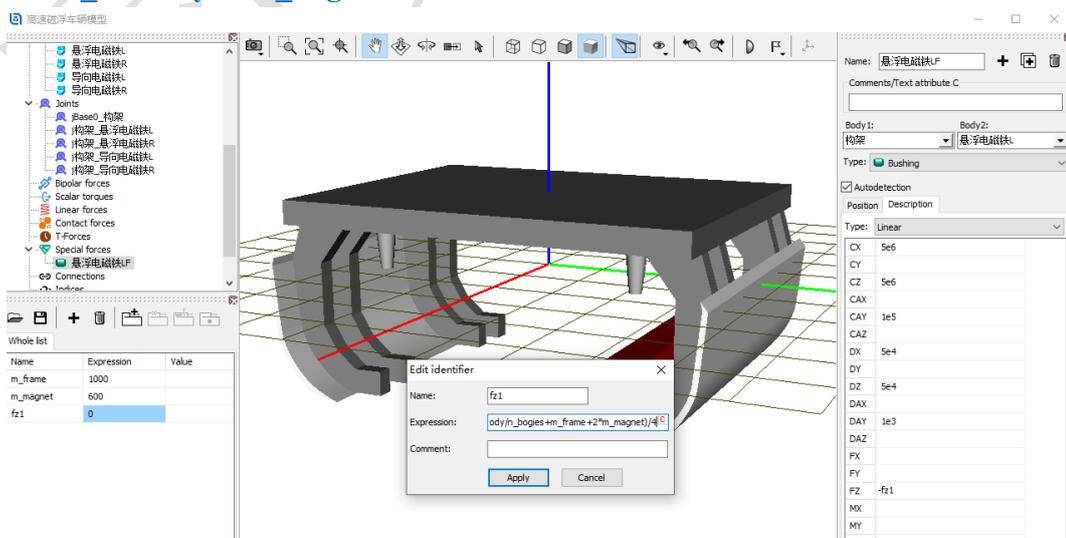


图 3-121

- 4) 复制生成第二个 **Bushing** 力元，命名为**悬浮电磁铁 LR**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 **(-1, 1.1, -0.8)**。
- 5) 复制生成第三个 **Bushing** 力元，命名为**悬浮电磁铁 RR**，将 **Body2** 更改为**悬浮电磁铁 R**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 **(-1, -1.1, -0.8)**。
- 6) 复制生成第四个 **Bushing** 力元，命名为**悬浮电磁铁 RF**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 **(1, -1.1, -0.8)**。
- 7) 复制生成第五个 **Bushing** 力元，命名为**导向电磁铁 LF**，将 **Body2** 更改为**导向电磁铁 L**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 **(1, 1.6, -0.18)**。

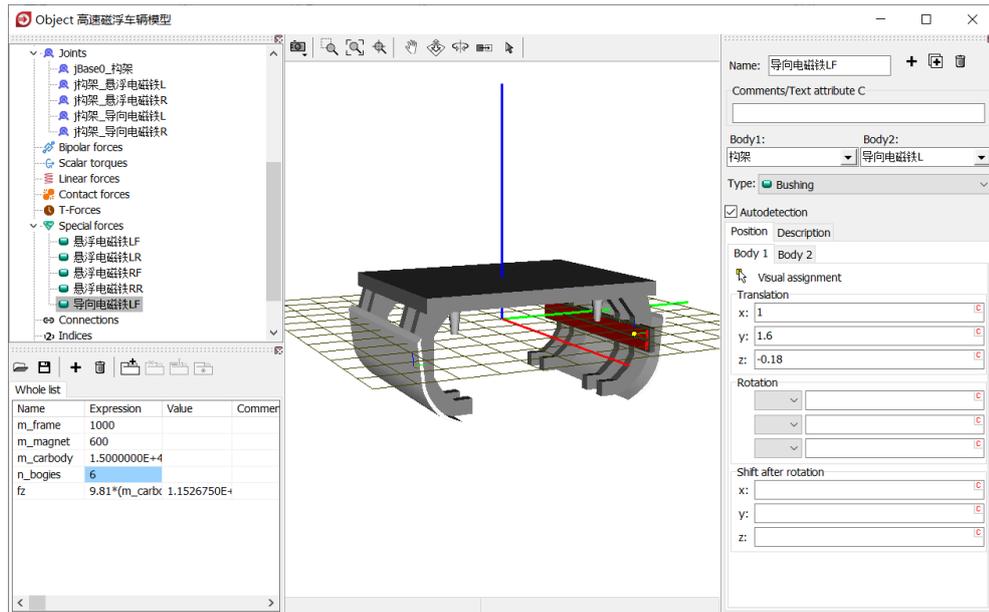


图 3-122

- 8) 在 **Description** 页面设置线性刚度 **CX = 5e6, CY = 5e6, CAZ = 1e5, DX = 5e4, DY = 5e4, DAZ = 1e3**，定义初始导向力 **FY = fy0*1000**，设置 **fy0** 初值为 **5**。

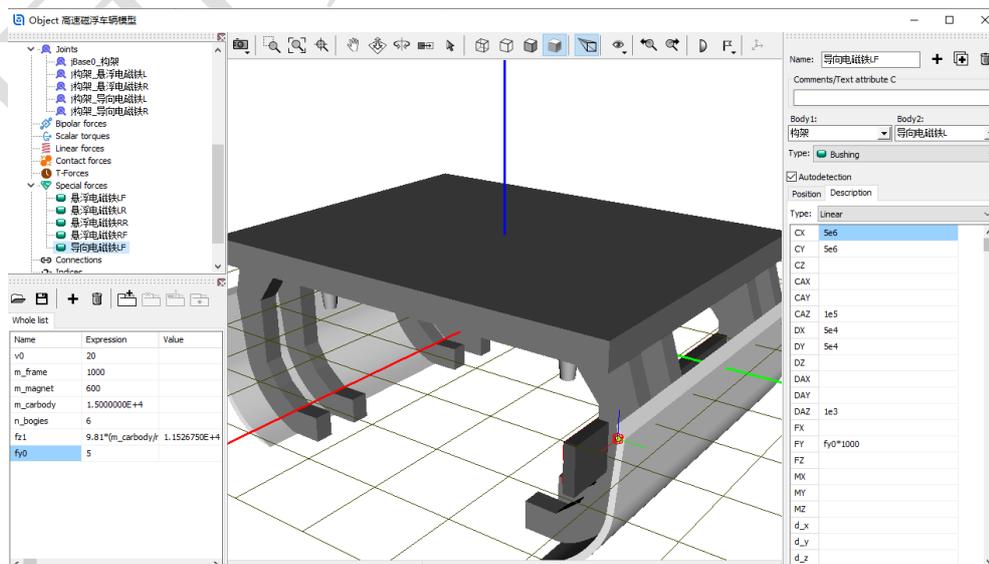


图 3-123

- 9) 复制生成第六个 **Bushing** 力元，命名为**导向电磁铁 LR**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(-1, 1.6, -0.18)$ 。
- 10) 复制生成第七个 **Bushing** 力元，命名为**导向电磁铁 RR**，将 **Body2** 更改为**导向电磁铁 R**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(-1, -1.6, -0.18)$ ，修改横向预压力 $FY = -fy0*1000$ 。
- 11) 复制生成第八个 **Bushing** 力元，命名为**导向电磁铁 RF**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(1, -1.6, -0.18)$ 。
- 12) 选中左侧模型树 **Linear forces**，点击右侧按钮 **+**，创建第一个空气弹簧力元，命名为**空气弹簧 LF**，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择 **External**，选择几何**空气弹簧**，勾选 **Automatic computation for 2nd body**，输入弹簧下点和上点坐标 $(0.8, 1.2, 0.6)$ 和 $(0.8, 1.2, 0.9)$ 。

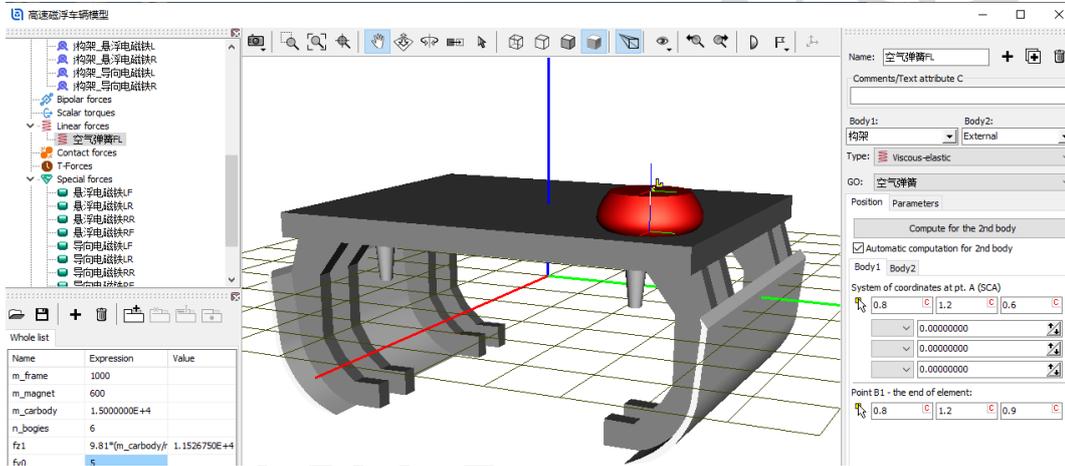


图 3-124

- 13) 在 **Parameters** 页面，定义弹簧预压力 **fz2**，回车，点击 **Accept**，然后到左侧参数列表双击 **fz2**，在弹出窗口定义表达式：
 $m_carbody*9.81/n_bogies/4$ 。

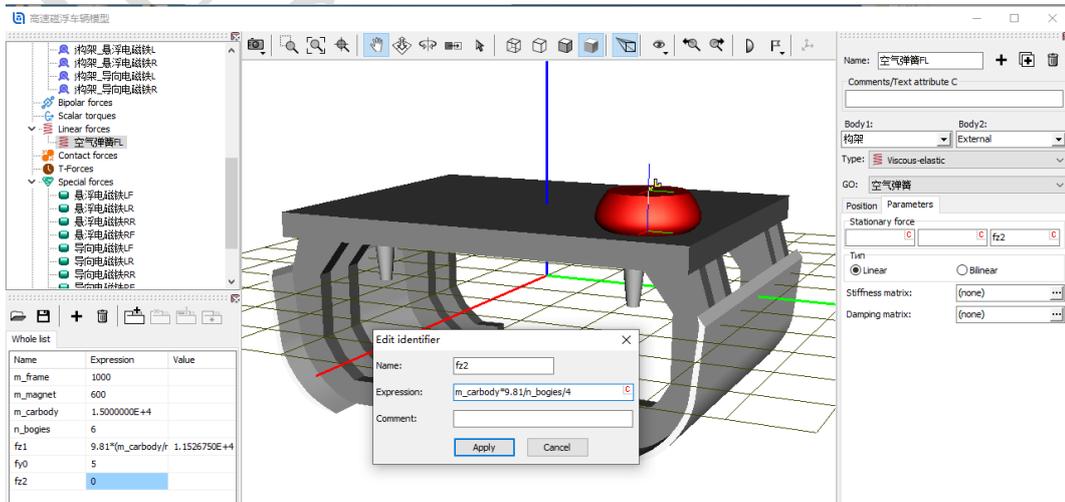


图 3-125

- 14) 点击 **Stiffness matrix** 栏的按钮，输入刚度矩阵，如图 3-126，其中 **kxy_2** 为纵向和横向刚度（ $1e4$ ），**kz_2** 为垂向刚度（ $2e5$ ）。

图 3-126

- 15) 点击 **Damping matrix** 栏的按钮，输入阻尼矩阵，如图 3-127，其中 **cxy_2** 为纵向和横向阻尼（ $2e3$ ），**cz_2** 为垂向阻尼（ $3e3$ ）。

图 3-127

- 16) 复制生成第二个空气弹簧力元，命名为**空气弹簧 LR**，修改弹簧下点和上点坐标（**-0.8, 1.2, 0.6**）和（**-0.8, 1.2, 0.9**）。
- 17) 复制生成第三个空气弹簧力元，命名为**空气弹簧 RR**，修改弹簧下点和上点坐标（**-0.8, -1.2, 0.6**）和（**-0.8, -1.2, 0.9**）。
- 18) 复制生成第四个空气弹簧力元，命名为**空气弹簧 RF**，修改弹簧下点和上点坐标 **0.8, -1.2, 0.6**）和（**0.8, -1.2, 0.9**）。

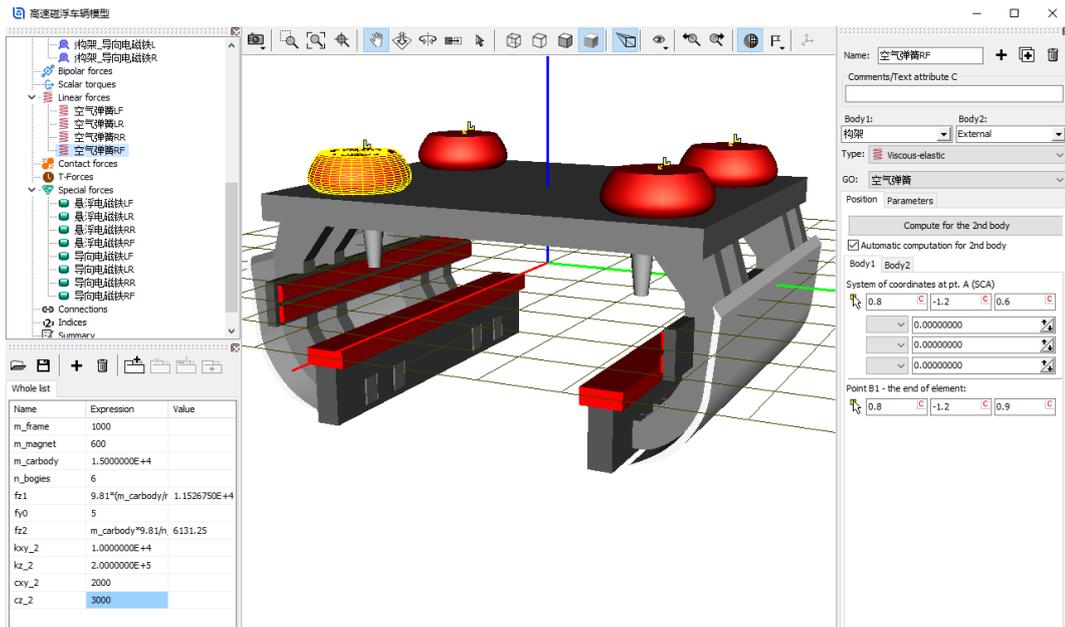


图 3-128

- 19) 选中左侧模型树 **Contact forces**，点击右侧按钮 **+**，创建一个接触力元，**Body1** 选择**构架**，**Body2** 选择 **Base0**，选择类型 **Point-Plane**，定义 **Body1** 的某些点与 **Body2** 的某平面有接触关系。
- 20) 在 **Parameters** 页面设置动摩擦系数 **0.3**，静摩擦系数 **0.36**，接触刚度 **1e8**，接触阻尼 **1e4**，勾选单侧接触 **Unilateral contact** 和无限平面 **Unlimited plane**。

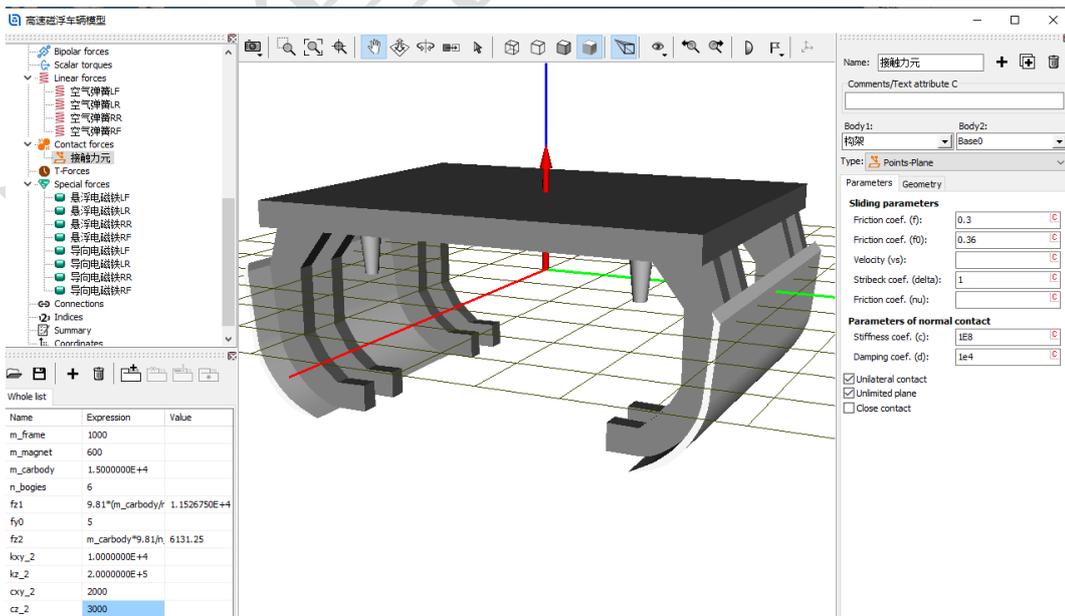


图 3-129

- 21) 在 **Geometry** 页面, 定义 **Body1** 的点: $(0.8, 1.1, 0.02)$, $(0.8, -1.1, 0.02)$, $(-0.8, -1.1, 0.02)$ 和 $(-0.8, 1.1, 0.02)$, 定义 **Body2** 的平面: 通过点 $(0, 0, 0)$ 法向为 $(0, 0, 1)$ 。

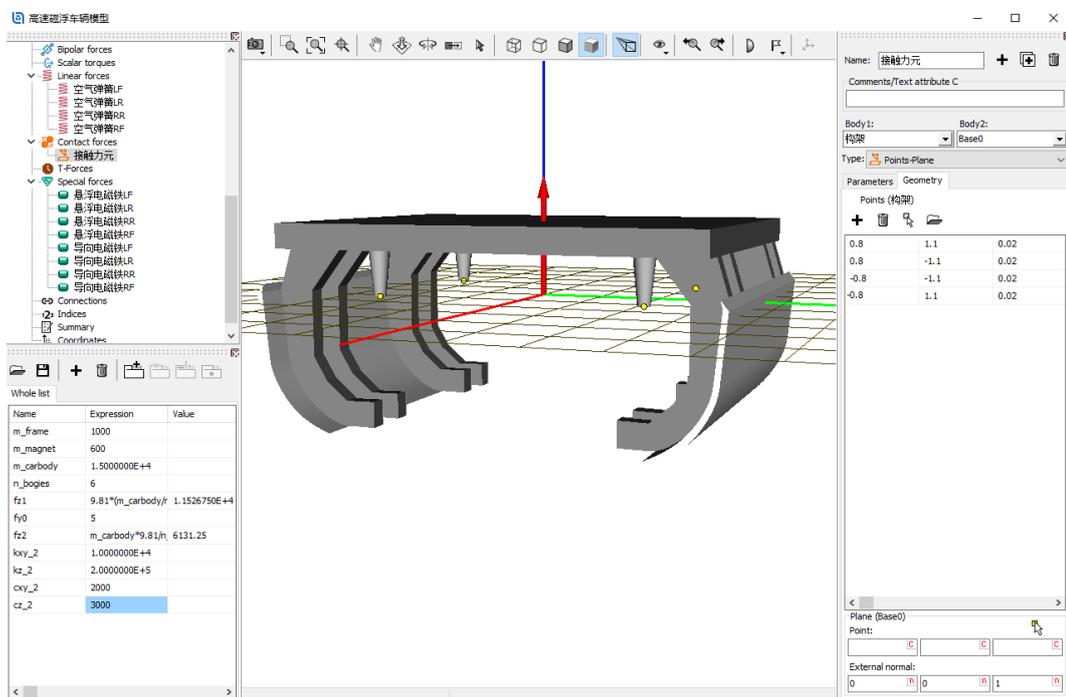


图 3-130

3.3.1.3 加速度传感器

- 选中左侧模型树 **Subsystems**，点击右侧按钮 **+**，添加一个子系统，重命名为**垂向传感器 LF**，从下拉菜单中选择 **Included**，然后在文件浏览器中选择“**D:\UM 培训教程\子系统\传感器**”。

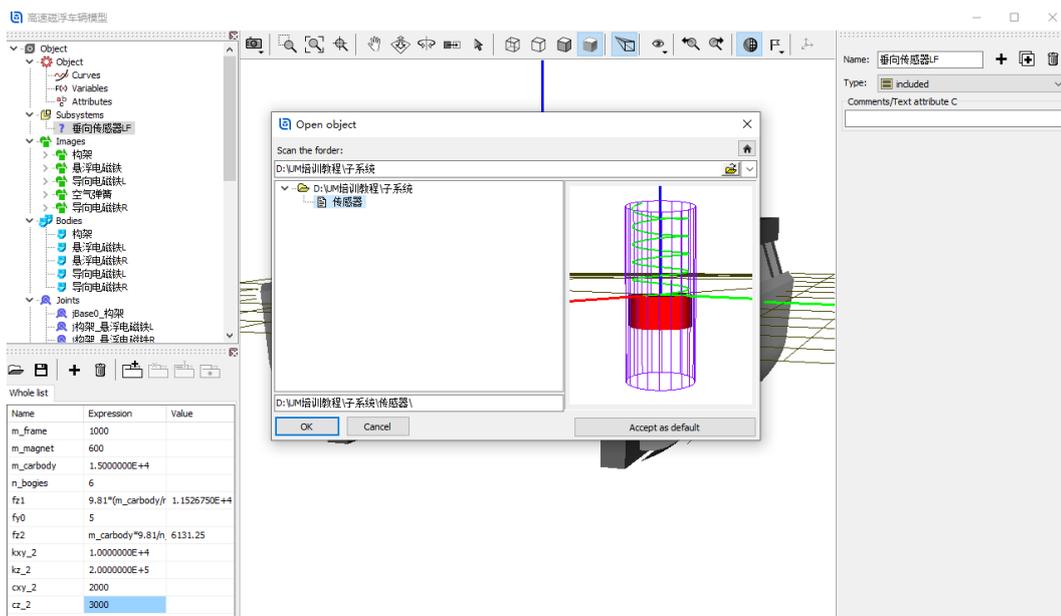


图 3-131

- 将子系统**垂向传感器 LF**复制七次，分别重命名为**垂向传感器 LR**、**垂向传感器 RR**、**垂向传感器 RF**、**横向传感器 LF**、**横向传感器 LR**、**横向传感器 RR** 和**横向传感器 RF**，并将四个横向传感器里的 **p0** 设置为 **0**。

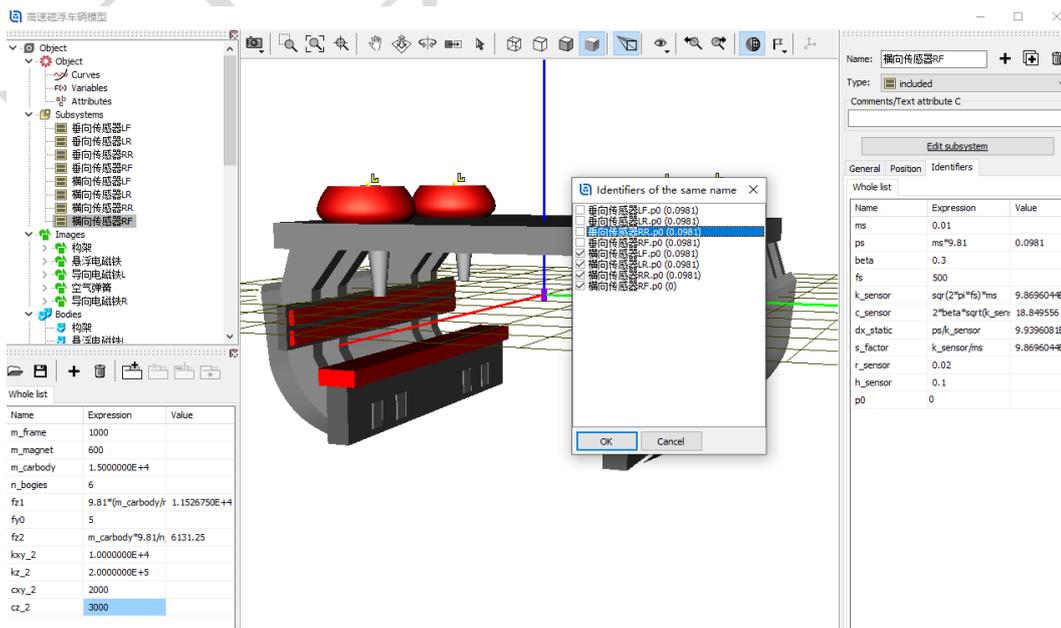


图 3-132

- 3) 创建第六个铰，**Body1** 选择**悬浮电磁铁 L**，**Body2** 选择**垂向传感器 LF.Sensor**，类型为**6 d.o.f.**，两个物体铰接点坐标分别为 $(1, 0, -0.01)$ 和 $(0, 0, 0)$ ，约束其六个自由度。

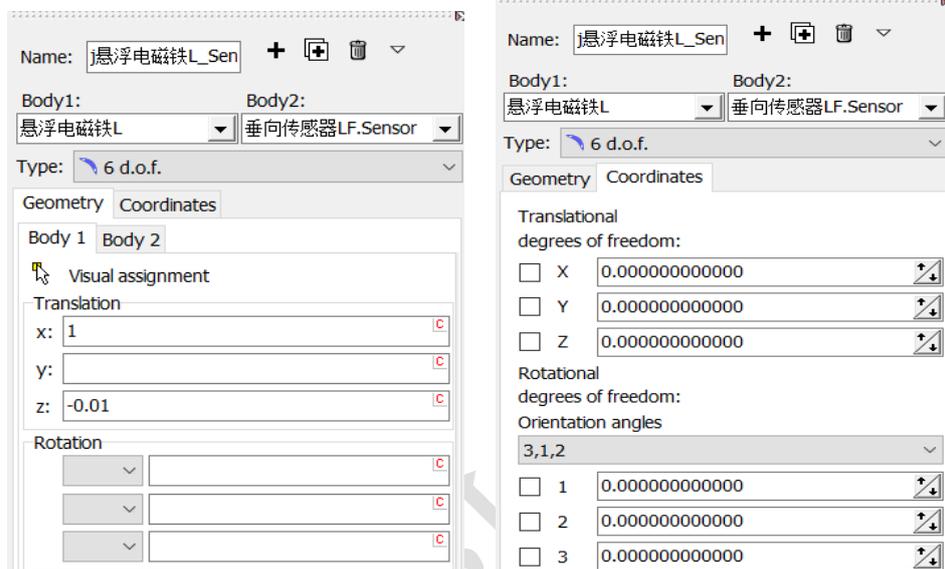


图 3-133

- 4) 复制生成第七个铰，更改 **Body2** 为**垂向传感器 LR.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(-1, 0, -0.01)$ 。
- 5) 复制生成第八个铰，更改 **Body1** 为**悬浮电磁铁 R**，更改 **Body2** 为**垂向传感器 RR.Sensor**，**Body1** 的连接点坐标为 $(-1, 0, -0.01)$ 。
- 6) 复制生成第九个铰，更改 **Body2** 为**垂向传感器 RF.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(1, 0, -0.01)$ 。
- 7) 复制生成第十个铰，更改 **Body1** 为**导向电磁铁 L**，更改 **Body2** 为**横向传感器 LF.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(0.9, 0.03, 0)$ ，设置绕 **X** 轴转动 90° 。

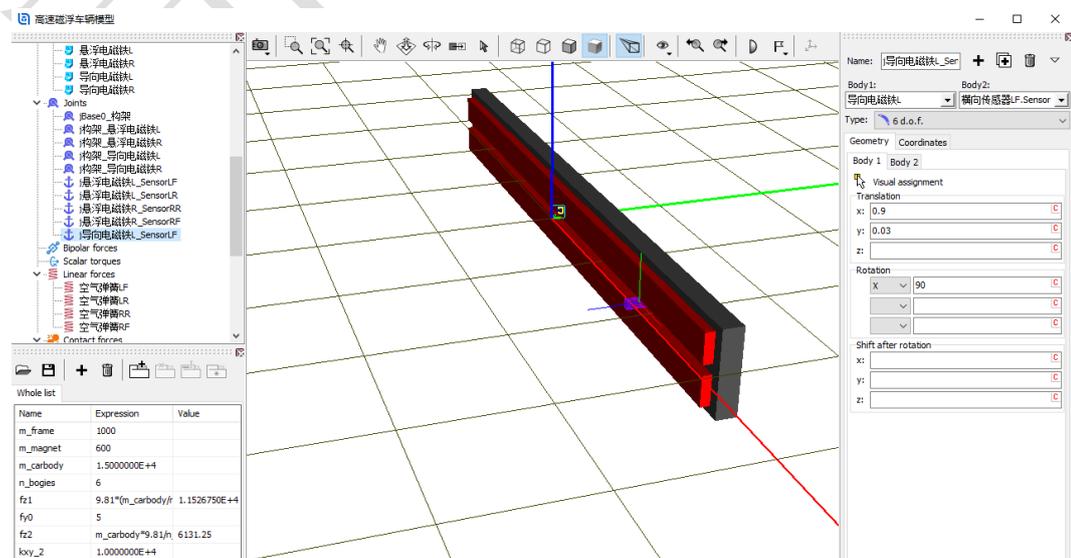


图 3-134

- 8) 复制生成第十一个铰，更改 **Body2** 为横向传感器 **LR.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(-0.9, 0.03, 0)$ 。
- 9) 复制生成第十二个铰，更改 **Body1** 为**导向电磁铁 R**，更改 **Body2** 为**横向传感器 RR.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(-0.9, -0.03, 0)$ ，设置绕 **X** 轴转动 -90° 。
- 10) 复制生成第十三个铰，更改 **Body2** 为**横向传感器 RF.Sensor**，修改 **Body1** 的连接点坐标为 $(0.9, -0.03, 0)$ ，切换到完整视图，如图 3-135。

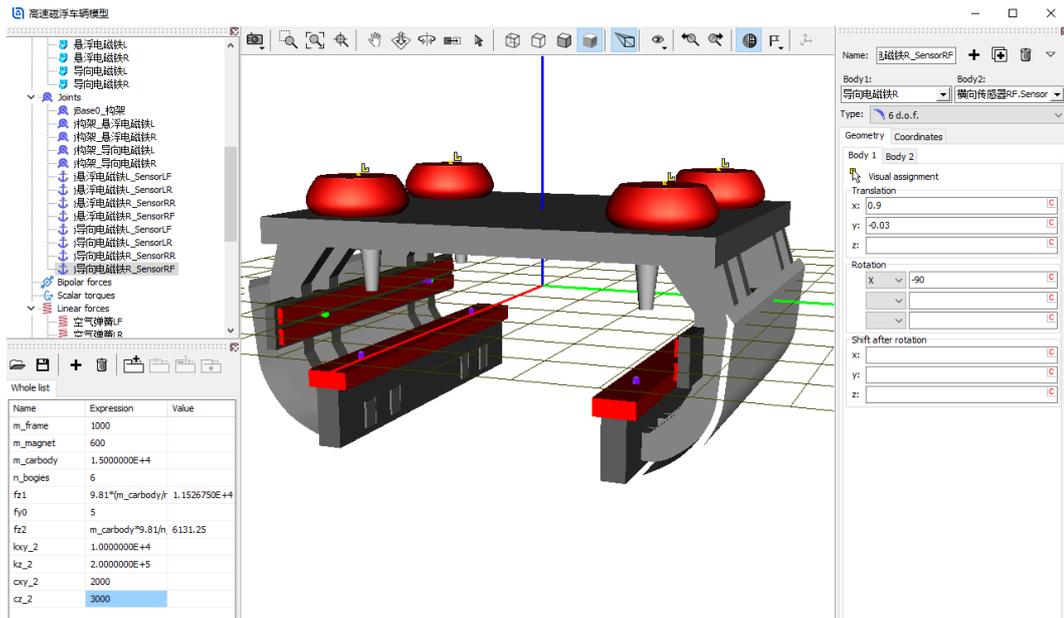


图 3-135

3.3.1.4 磁浮力元

- 1) 选中左侧模型树 **Special forces**，点击右侧按钮 **+**，添加一个力元，命名为**悬浮力 LF**，选择类型 **Maglev force**，**Body1** 选择**悬浮电磁铁 L**，**Body2** 选择 **Base0**，设置作用点 $(1, 0, 0)$ ，选择悬浮力 **Levitation magnet**，作用方向为 **Z 轴正向** $(0, 0, 1)$ ，选择传感器**垂向传感器 LF.a_sensor**，定义垂向悬浮力 **FZ_LF**，赋初值 **0** 即可。

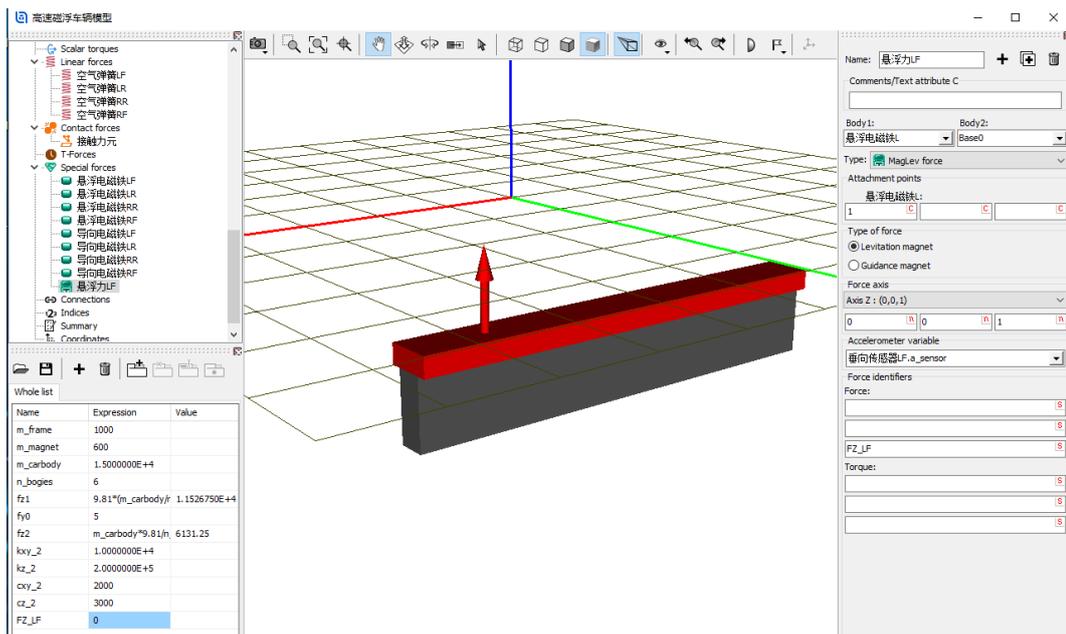


图 3-136

- 2) 复制生成第二个悬浮力，命名为**悬浮力 LR**，作用点 $(-1, 0, 0)$ ，选择传感器**垂向传感器 LR.a_sensor**，定义垂向悬浮力 **FZ_LR**。
- 3) 复制生成第三个悬浮力，命名为**悬浮力 RR**，更改 **Body1** 为**悬浮电磁铁 R**，作用点 $(-1, 0, 0)$ ，选择传感器**垂向传感器 RR.a_sensor**，定义垂向悬浮力 **FZ_RR**。
- 4) 复制生成第四个悬浮力，命名为**悬浮力 RF**，作用点 $(1, 0, 0)$ ，选择传感器**垂向传感器 RF.a_sensor**，定义垂向悬浮力 **FZ_RF**。

- 5) 复制生成第一个导向力，命名为**导向力 LF**，更改 **Body1** 为**导向电磁铁 L**，作用点 $(0.9, 0, 0)$ ，作用方向为 **Y 轴负向** $(0, -1, 0)$ ，选择传感器**横向传感器 LF.a_sensor**，定义横向导向力 **FY_LF**。

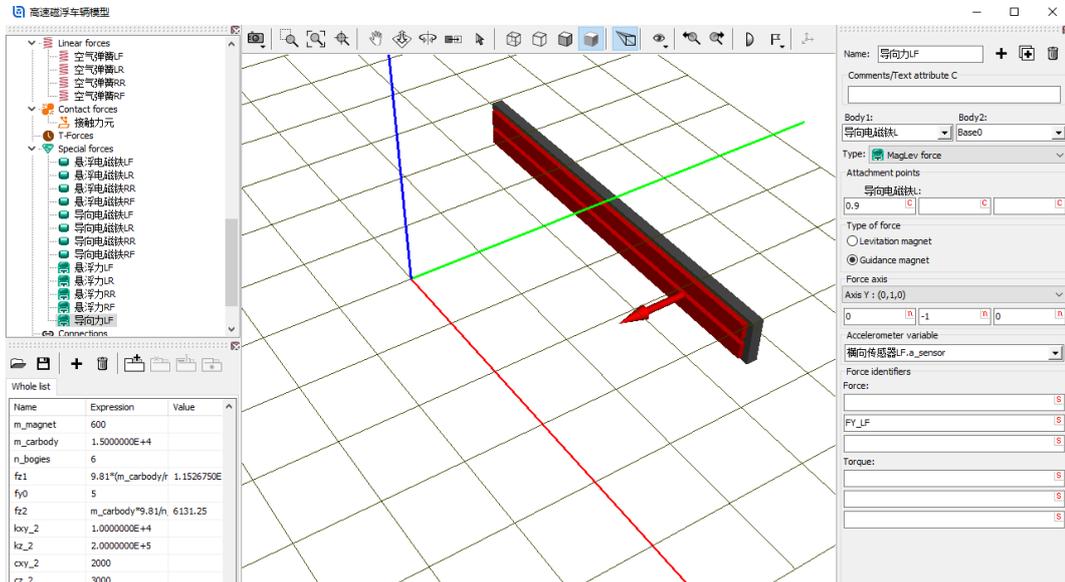


图 3-137

- 6) 复制生成第二个导向力，命名为**导向力 LR**，作用点 $(-0.9, 0, 0)$ ，选择传感器**横向传感器 LR.a_sensor**，定义横向导向力 **FY_LR**。
- 7) 复制生成第三个导向力，命名为**导向力 RR**，更改 **Body1** 为**导向电磁铁 R**，作用点 $(-0.9, 0, 0)$ ，作用方向为 **Y 轴正向** $(0, 1, 0)$ ，选择传感器**横向传感器 RR.a_sensor**，定义横向导向力 **FY_RR**。

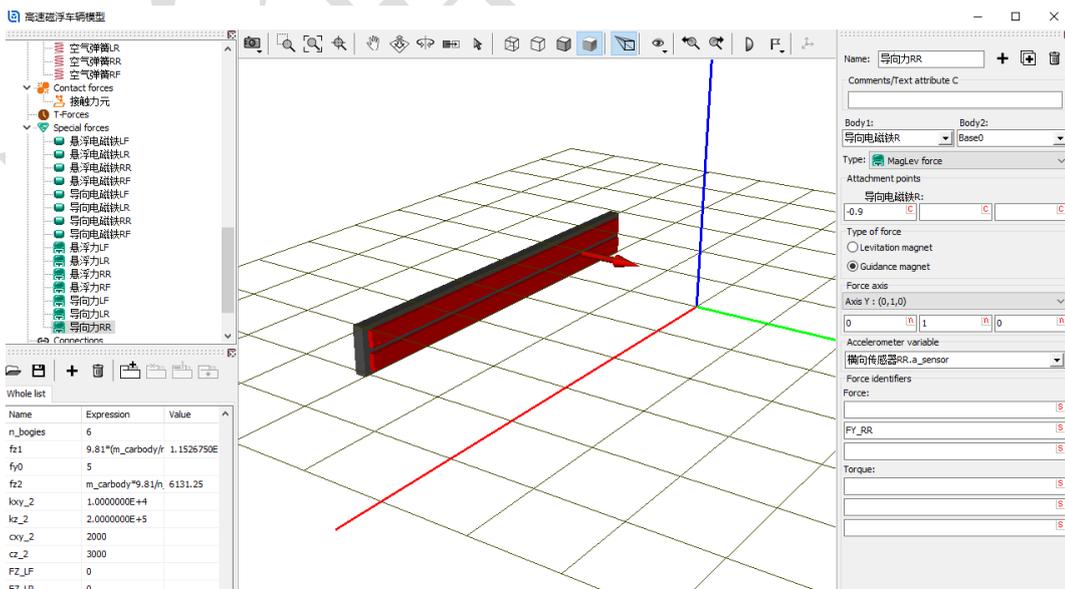


图 3-138

- 8) 复制生成第四个导向力，命名为**导向力 RF**，作用点 $(0.9, 0, 0)$ ，选择传感器**横向传感器 RF.a_sensor**，定义垂向悬浮力 **FY_RF**。

3.3.1.5 整车装配

- 1) 左侧选中模型树 **Object**，在右侧 **General** 页面点击按钮 **Transform into subsystem**，这样就吧一个悬浮架模型压缩成了一个子系统，便于整体操作。

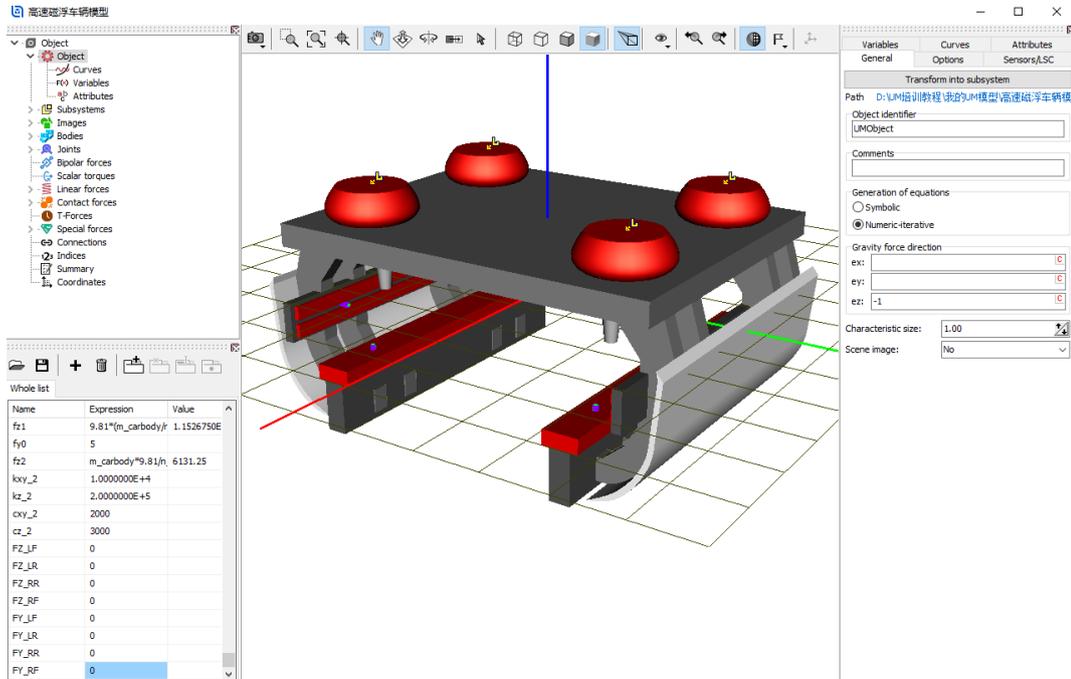


图 3-139

- 2) 重命名为**悬浮架 1**，在 **Position** 定义 **X** 平动 $-2-2.9*0.5\text{m}$ 。

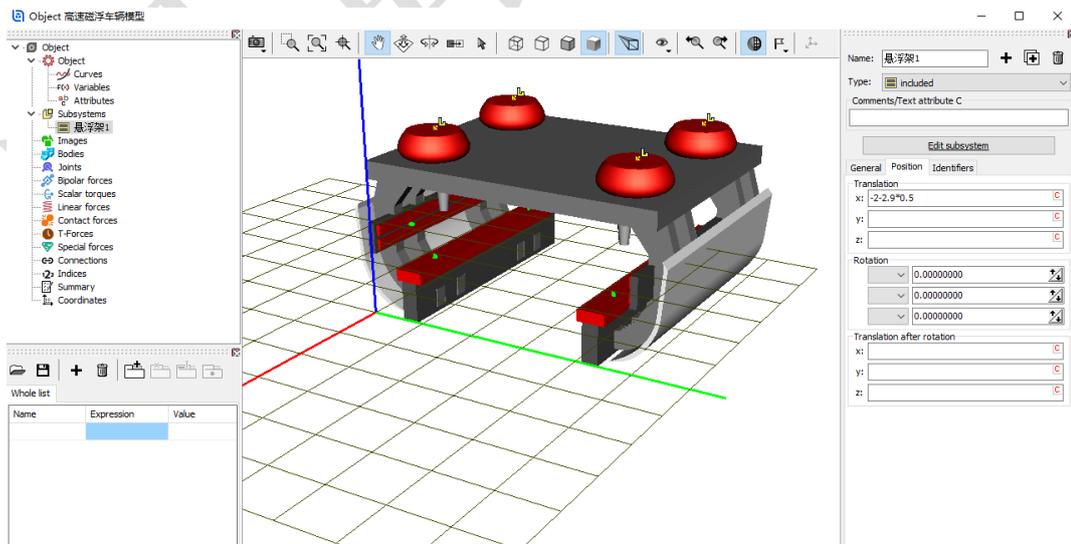


图 3-140

- 3) 将子系统**悬浮架 1**复制五次，分别重命名为**悬浮架 2**、**悬浮架 3**、**悬浮架 4**、**悬浮架 5**和**悬浮架 6**，**Position**分别定义 **X** 平动为 $-2-2.9*1.5\text{ m}$ 、 $-2-2.9*2.5\text{ m}$ 、 $-2-2.9*3.5\text{ m}$ 、 $-2-2.9*4.5\text{ m}$ 和 $-2-2.9*5.5\text{ m}$ 。

- 4) 从“D:\UM 培训教程\几何素材\高速磁浮车辆模型”导入几何素材车体。
- 5) 在左侧参数符号列表区点右键，选择菜单 **Add from subsystem...**，从列表中选择**悬浮架 1** 子系统里的 **m_frame**、**m_magnet**、**m_carbody** 和 **n_bogies** 参数。

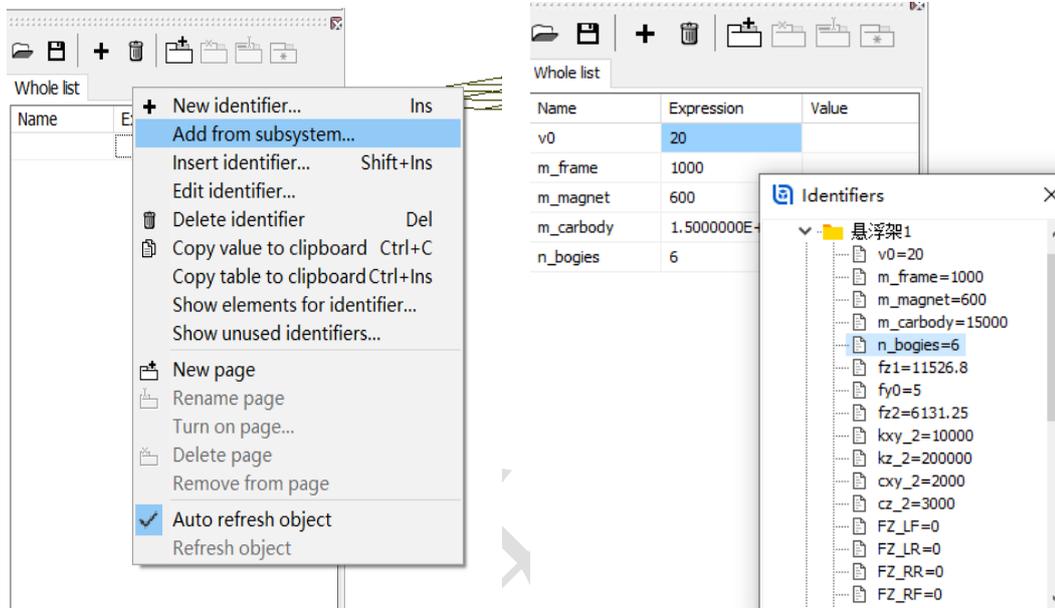


图 3-141

- 6) 创建**车体**刚体，定义质量 **m_carbody**，转动惯量 (**5e4**, **3e5**, **3e5**)，质心坐标 (**-10.7**, **0**, **1.5**)；点击按钮 ，创建一个六自由度铰。

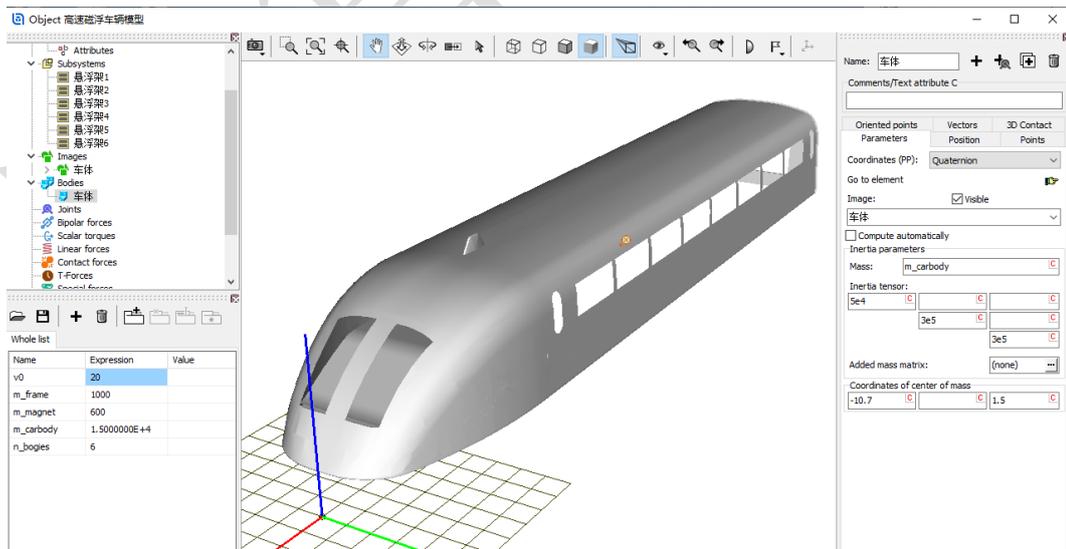


图 3-142

- 7) 然后，我们需要将车体和六个悬浮架子系统建立连接。在二系力元建模时，还没有车体这个物体，因此所有的 **Body2** 都选择一个虚拟物体 **External**，两个连接点的坐标都在 **Body1** 坐标系中定义的。在左侧模型树选中 **Connection**，到右侧交互界面选中任意一个力元，点右键，选择 **Assign to all**，然后选择车体局部坐标系的原点（实际车体上的任意点均可），这样就用车体替换了子系统里的 **External** 虚拟体。

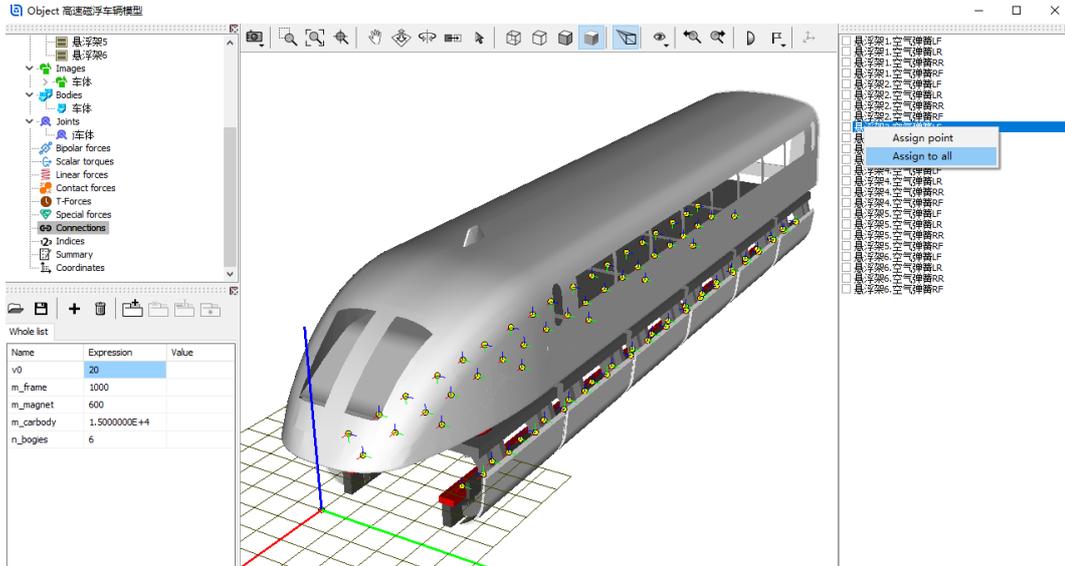


图 3-143

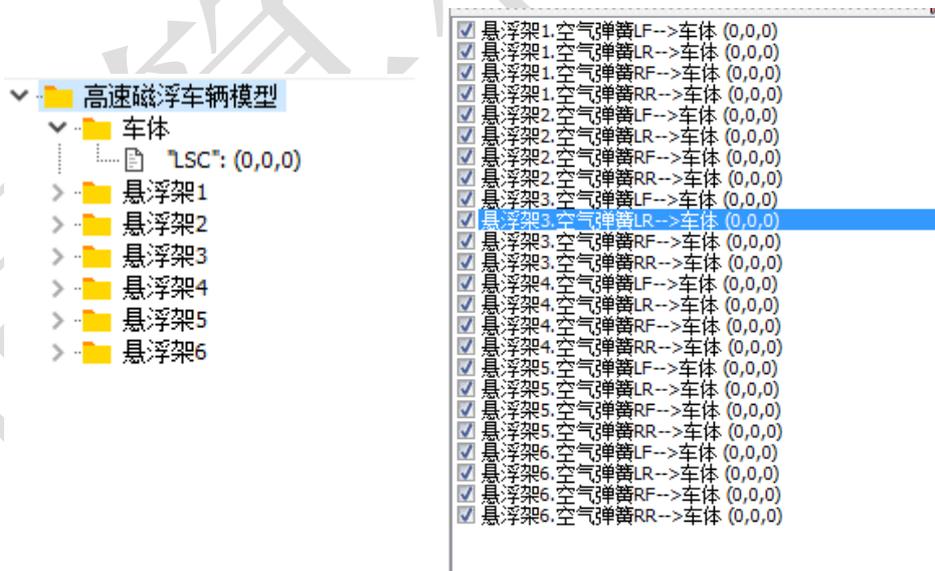


图 3-144

- 8) 为了便于后期仿真控制，我们在这里单独定义一个名义悬浮力 $fz0$
 $= 9.81*(m_carbody/n_bogies/4+m_frame/4+m_magnet)/1000$ 。

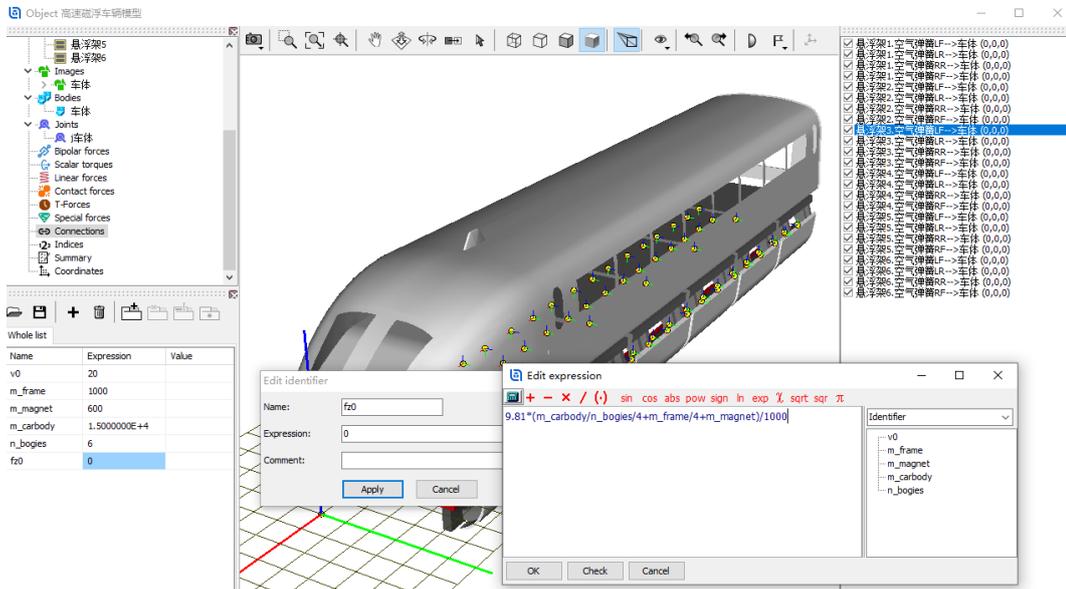


图 3-145

- 9) 最后，在左侧模型树选中 **Object**，右侧 **General** 界面 **Comments** 处输入备注 **Monorail**（如果模型中无轮胎力元，这一步可略去）。

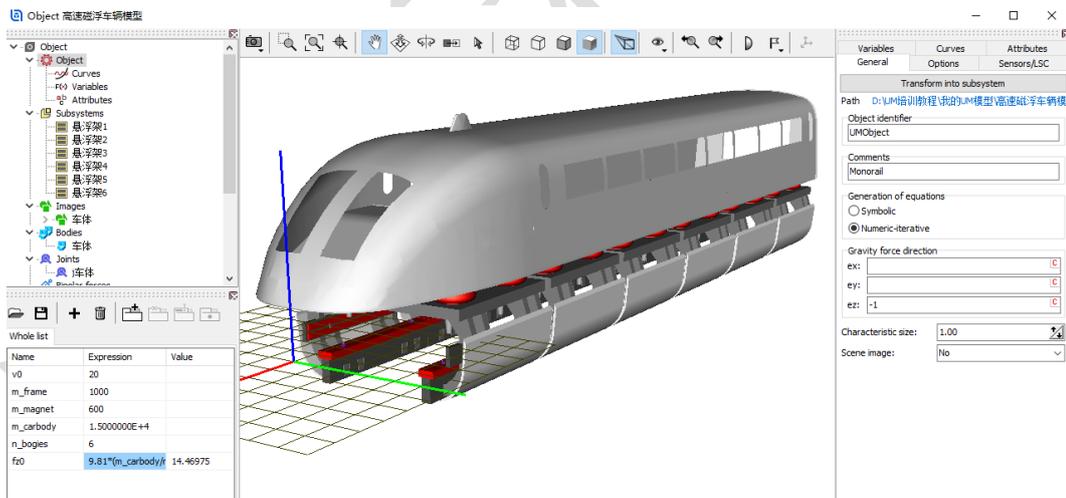


图 3-146

- 10) 点击 **Summary**，检查是否有逻辑错误，**保存模型**，关闭 **UM Input** 程序。

3.3.2 高速磁浮车辆动力学仿真

- 1) 运行 **UM Simulation** 程序，加载**高速磁浮车辆模型**。自由调整动画窗口大小、位置和视图方向。

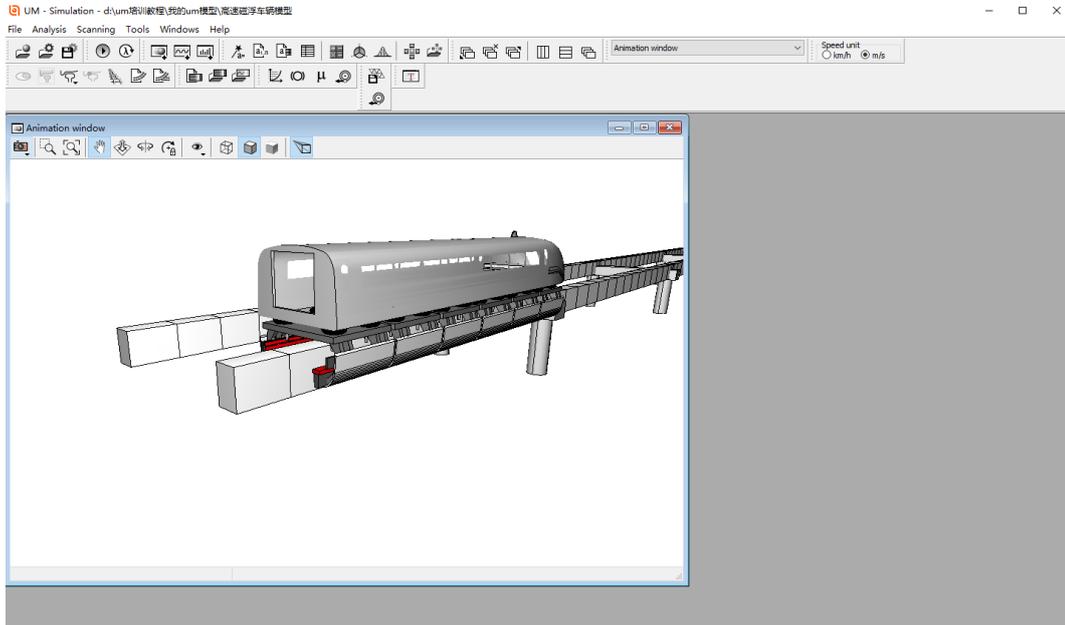


图 3-147

- 2) 打开仿真控制面板，选择 **Park** 求解器，设置仿真时间 **30s**，设置数据采样步长为 **0.005s**，容差为 **1e-7**，勾选 **Computation of Jacobian**。

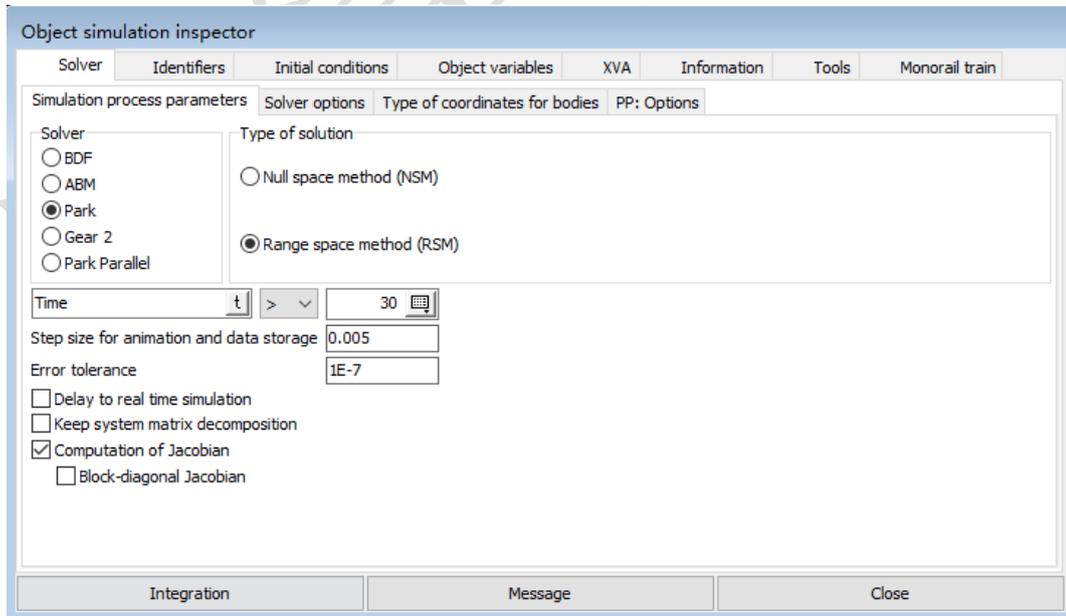


图 3-148

- 3) 切换到 **Monorail train** → **Tools** 页面，从下拉菜单选择 **Beam section profile**。然后点击 **Data Input/Edit** 栏的...按钮，弹出**曲线编辑器**，点击曲线编辑器工具栏按钮，读取“D:\UM 培训教程\曲线素材”路径下的高速磁浮轨道梁.crv 文件。

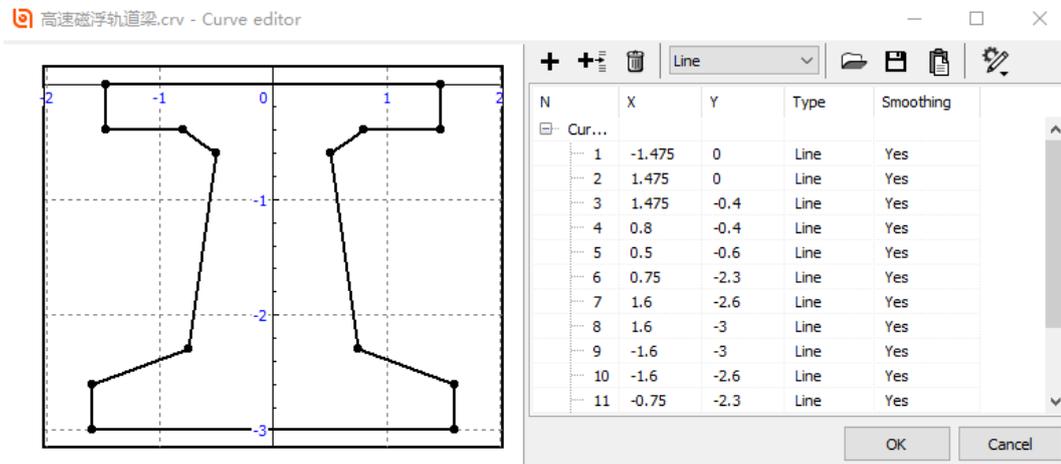


图 3-149

- 4) 切换到 **Geometry, irregularities** 页面，设置轨道线路和不平顺等参数如图 3-150。

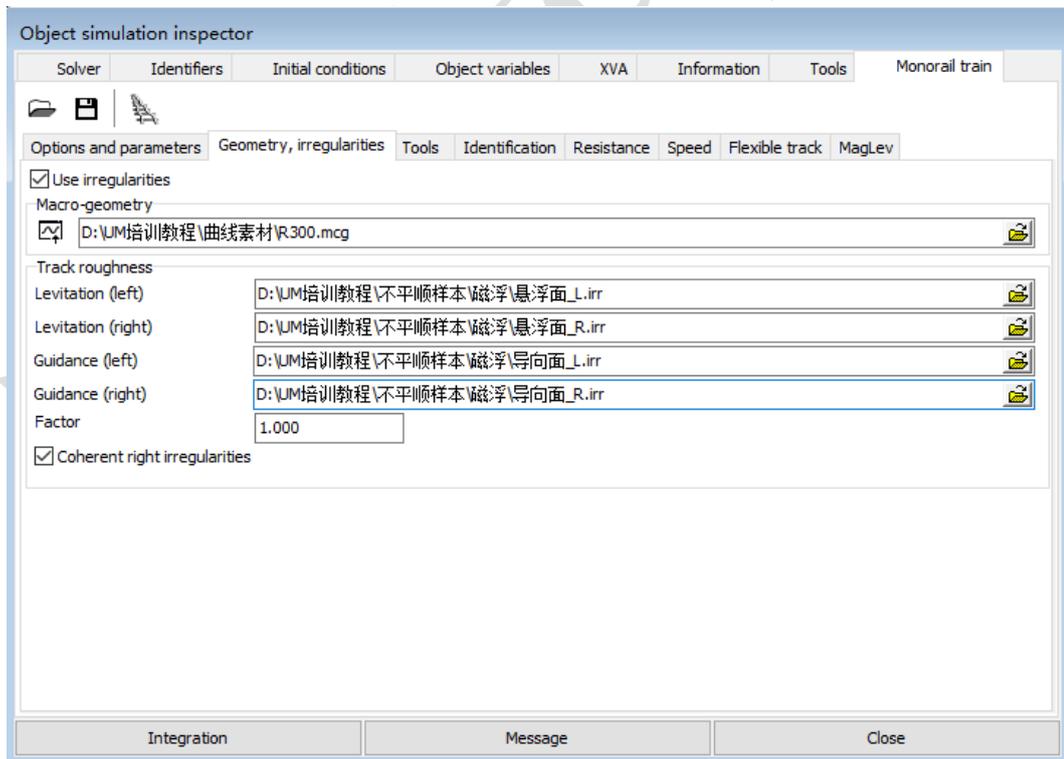


图 3-150

- 5) 切换到 **Maglev**→**Levitation** 页面，选择悬浮控制模型 **Spring/Damper**，并设置名义悬浮间隙 **10mm**，名义悬浮力 **fz0=14.46975**（可双击单元格从符号列表读取），电磁铁控制质量 **300kg**，位移反馈系数 **1e8N/m**，速度反馈系数 **1e4 Ns/m**。

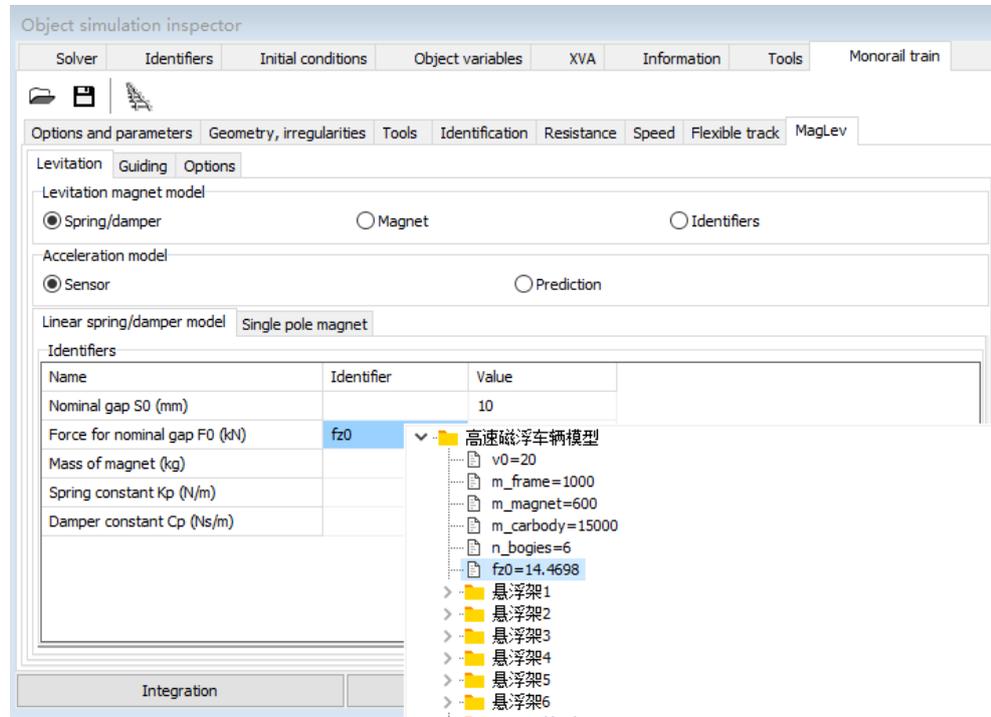


图 3-151

- 6) 切换 **Maglev**→**Guiding** 页面，设置如图 3-152。

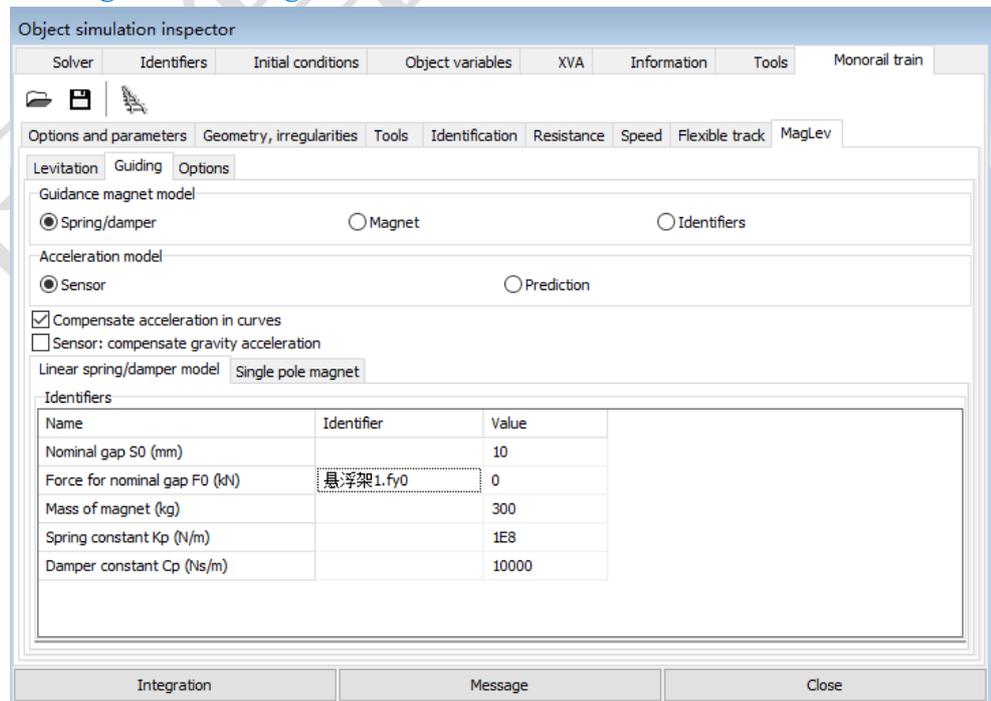


图 3-152

7) 切换到 **Speed** 页面，选择 **v=0** 模式。

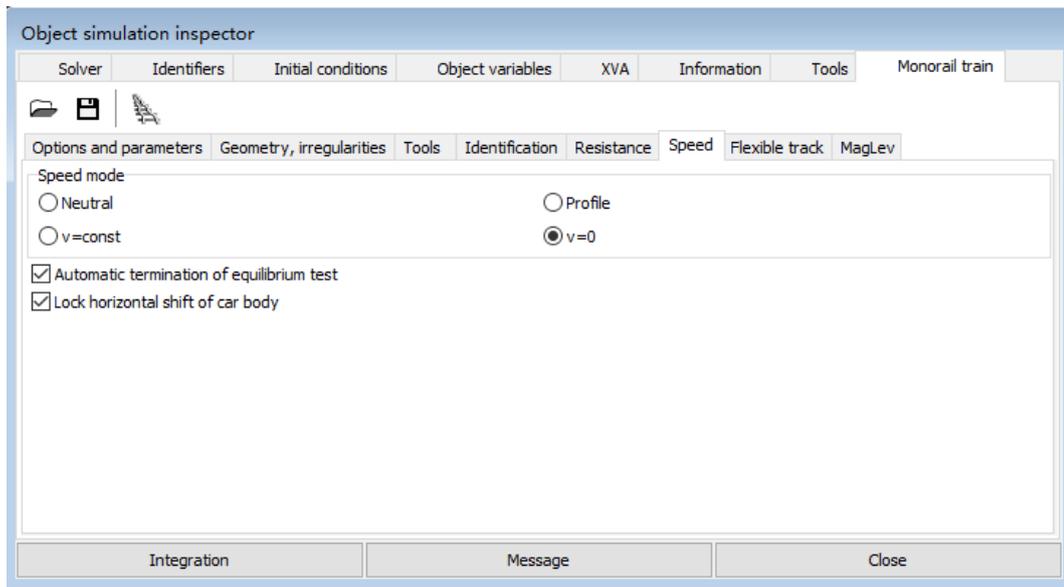


图 3-153

8) 点击 **Integration**，进行静平衡计算，经过 1s，提示“**Test succeed. Accept results?**”，点击是(Y)。

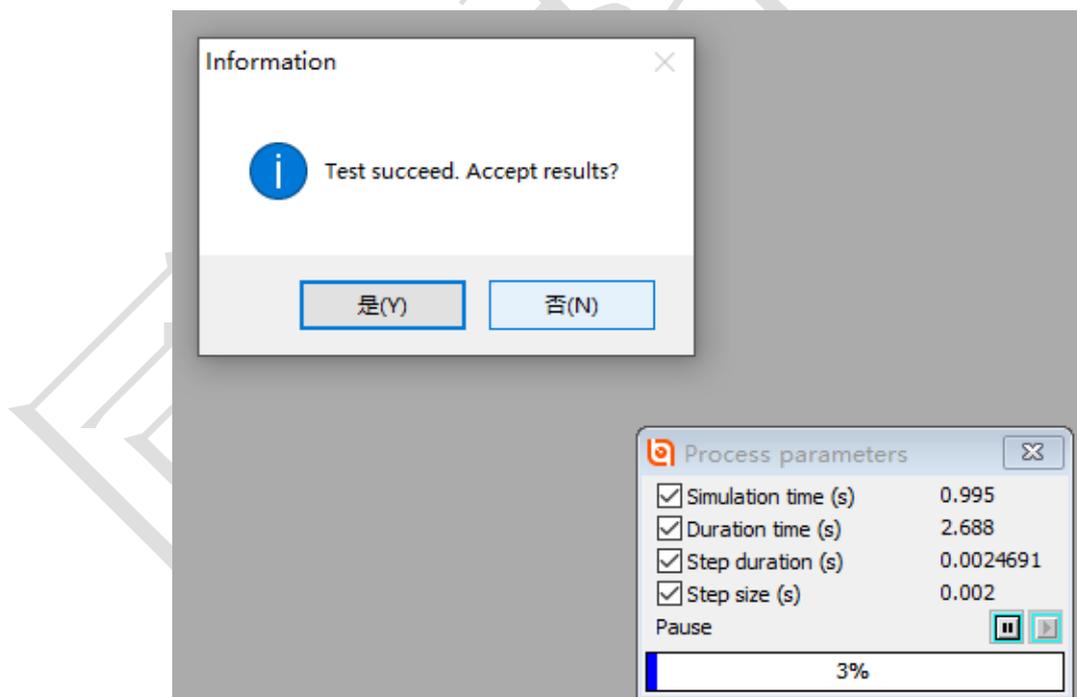


图 3-154

- 9) 切换到 **Speed** 页面，选择 **v=const** 模式。
- 10) 切换到 **Identification** 页面，在下方 **Gain** 右边的单元格将参数设置为 **5000**。

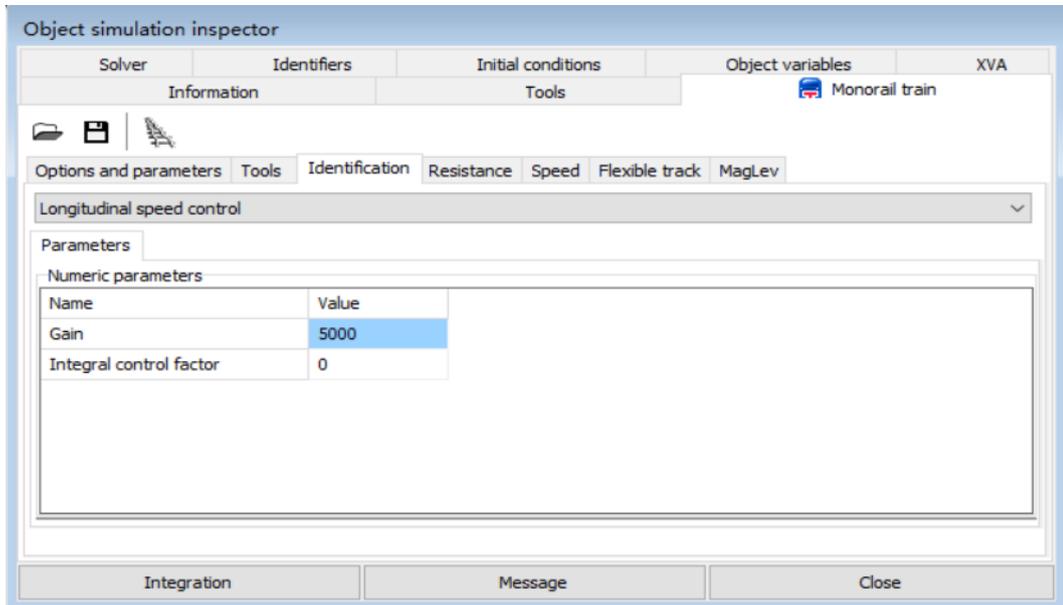


图 3-155

- 11) 切换到 **Identifiers** → **List of identifiers** 页面，设置车辆初始速度 **v0** 为 **40**，在弹出窗口点击 **OK**。

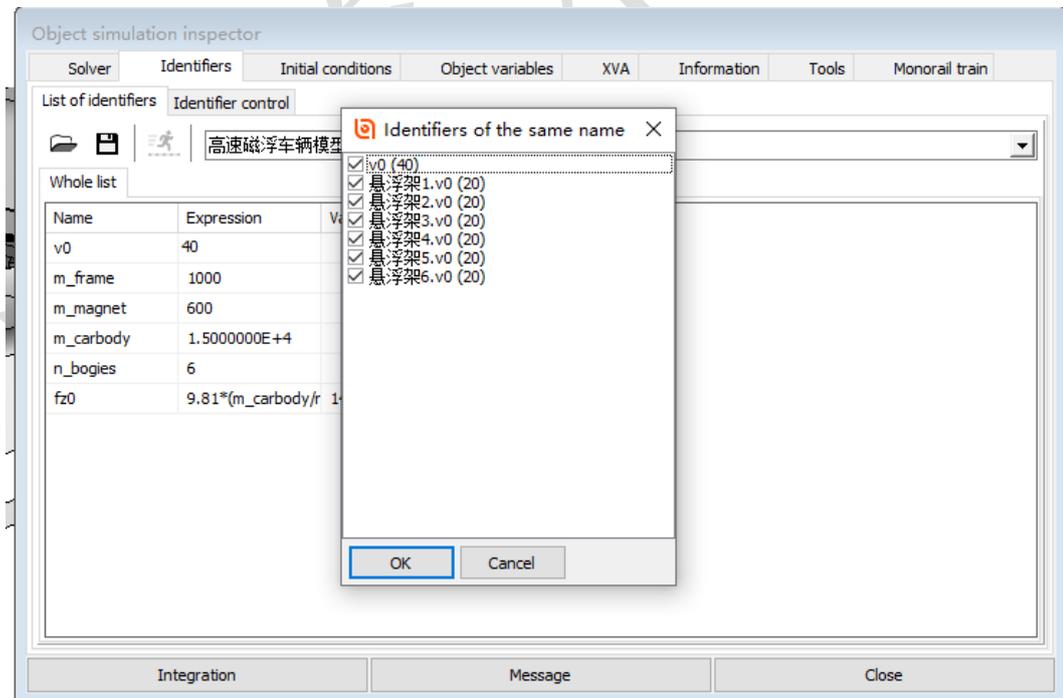


图 3-156

- 12) 选择主菜单 **Tools** → **Options**，或在工具栏上修改车辆初始速度单位为 **km/h**。这里的单位只对 **v0** 参数有效，计算结果均为国际单位 (**m**, **rad**, **kg**, **s**, **N**)。

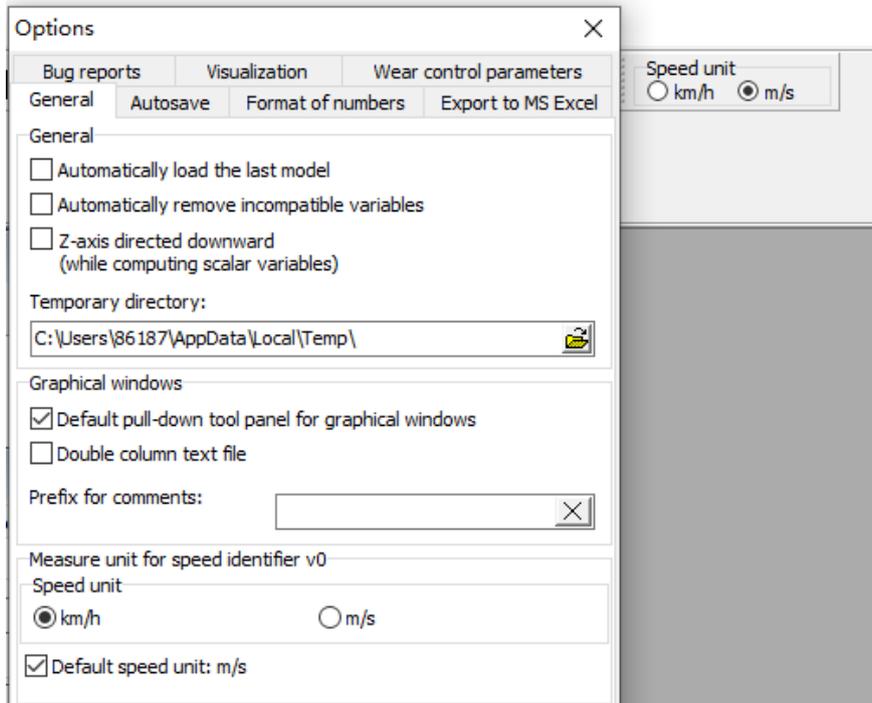


图 3-157

- 13) 打开**变量向导**，在 **Maglev forces** 页面，设置长度单位 **mm**，创建第一个悬浮架的四个悬浮力的悬浮间隙变量 **Gap**，并拖入一个绘图窗口。

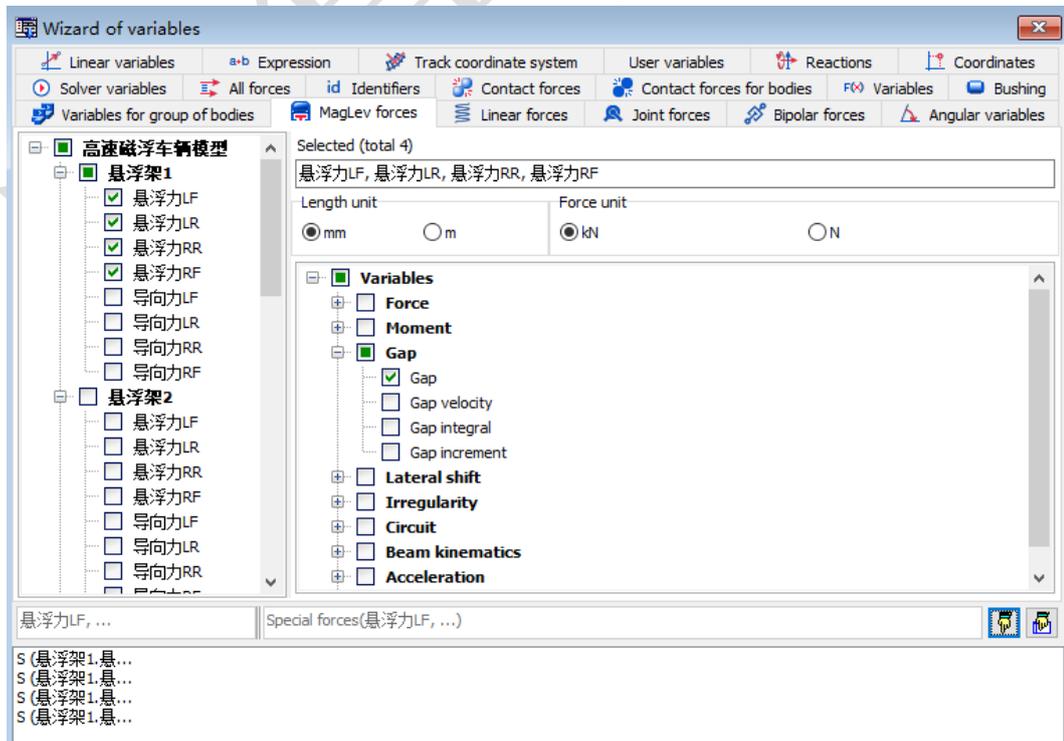


图 3-158

- 14) 在 **Maglev forces** 页面，设置力的单位 **N**，创建第一个悬浮架的四个悬浮力的悬浮力矢量 **Fv**，并拖入动画窗口。

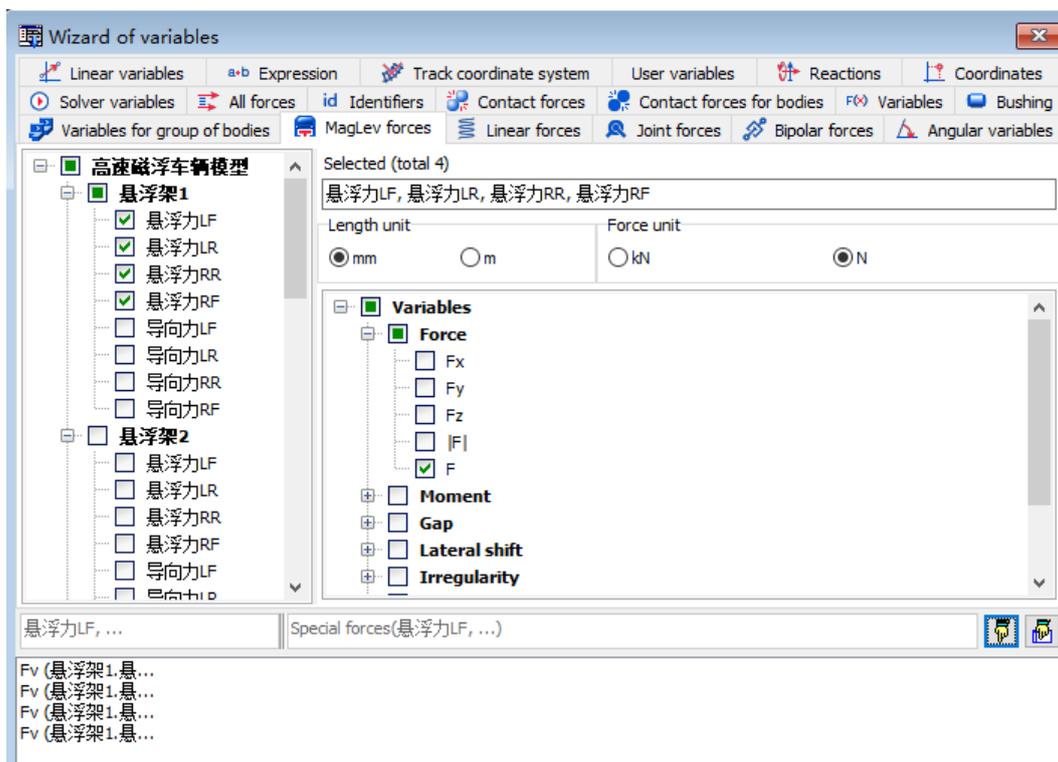


图 3-159

- 15) 在动画窗口空白处点**右键**，选择 **Position of vector list** → **Left**，这样就在动画窗口左侧显示列表。

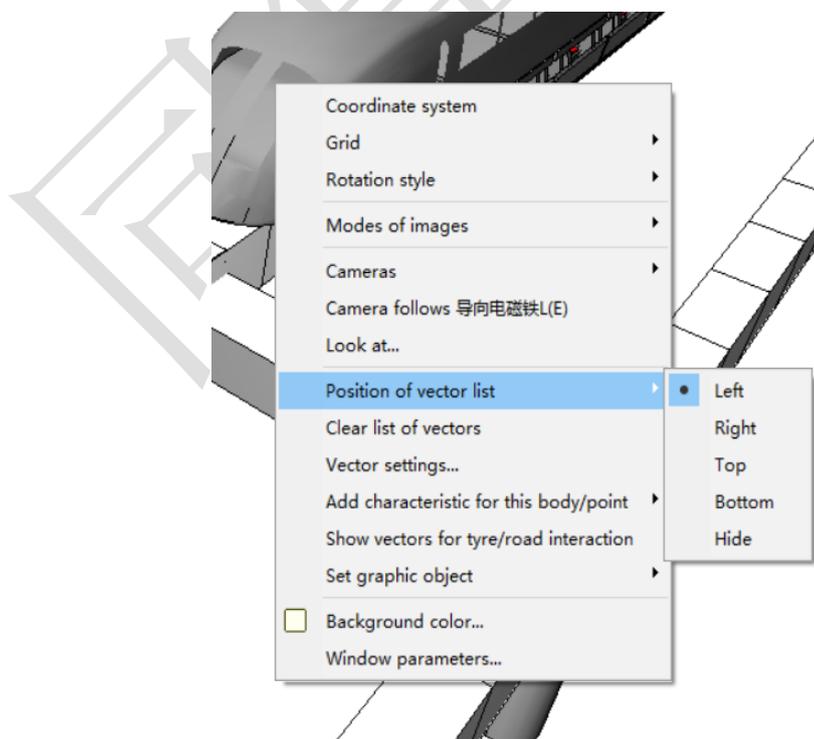


图 3-160

16) 双击悬浮力矢量 **Fv**，修改颜色。

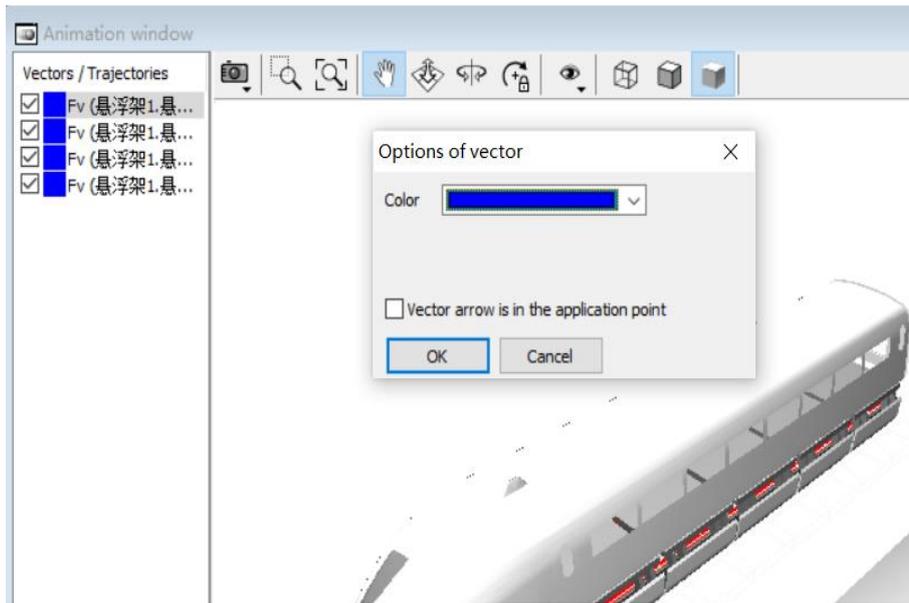


图 3-161

17) 在动画窗口点**右键**，选择 **Vector setting**，设置力矢量单位长度表示的大小为 **15000**，在 **Size** 页面可以调节箭头大小。

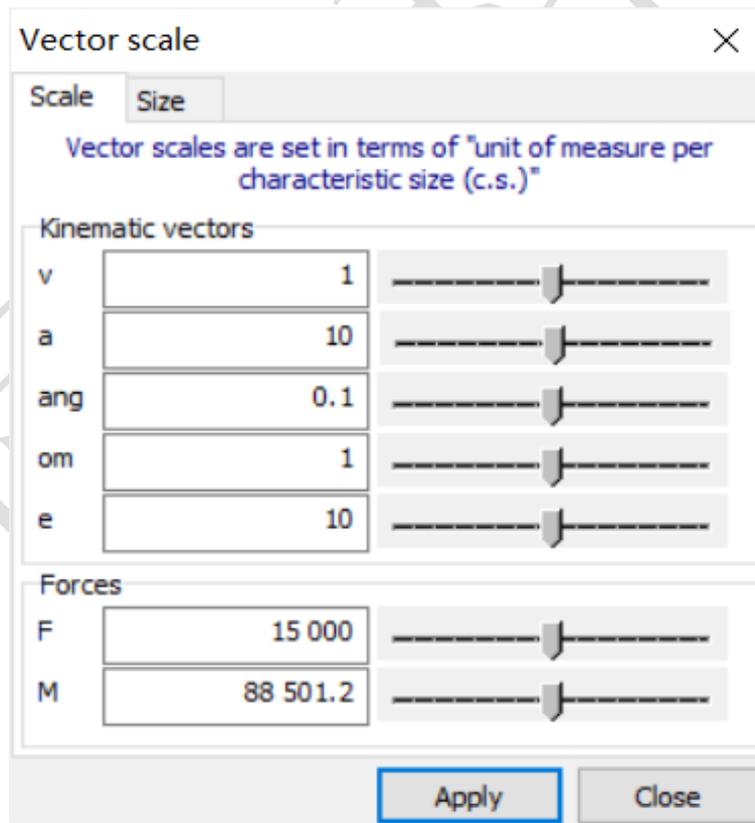


图 3-162

- 18) 在模型动画窗口点**右键**，选择菜单 **Cameras** → **Add camera in current position**，再选择右键菜单 **Cameras** → **Camera settings** → **Camera1**，在 **Camera follows the body** 可选择镜头跟随**车体**。

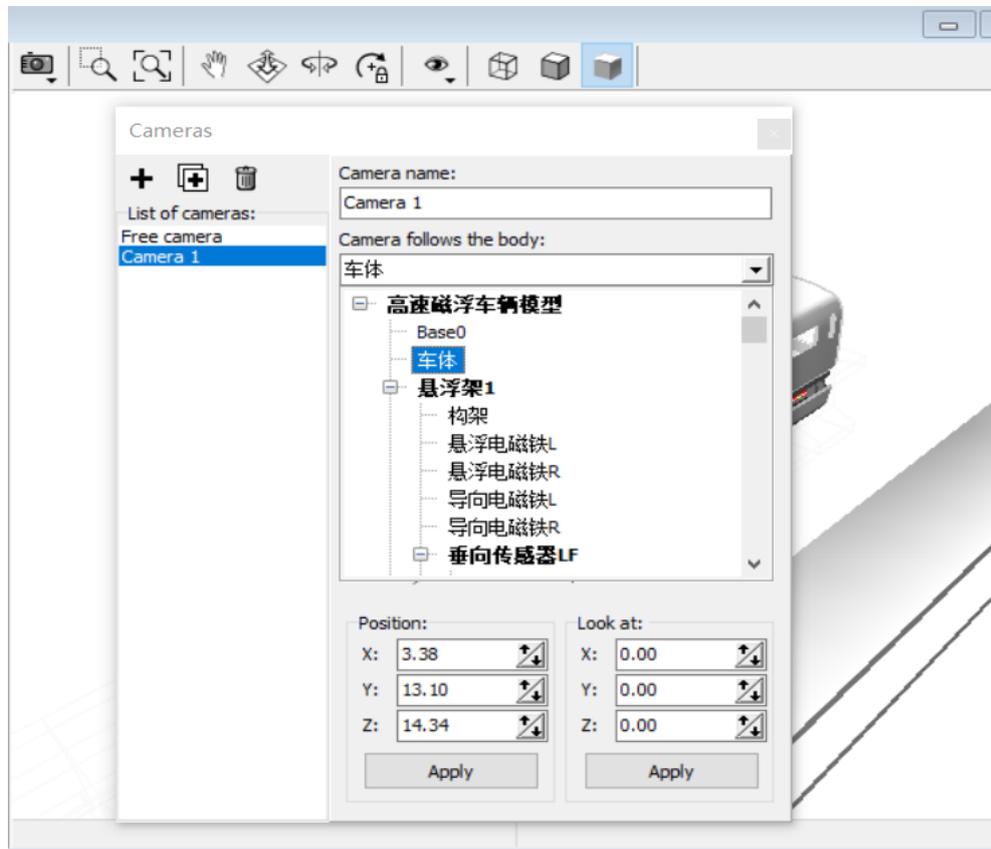


图 3-163

- 19) 点击仿真控制面板 **Integration** 按钮开始仿真。
20) 在绘图窗口点**右键**，选择菜单 **Show all**，可自动调节以适应窗口。

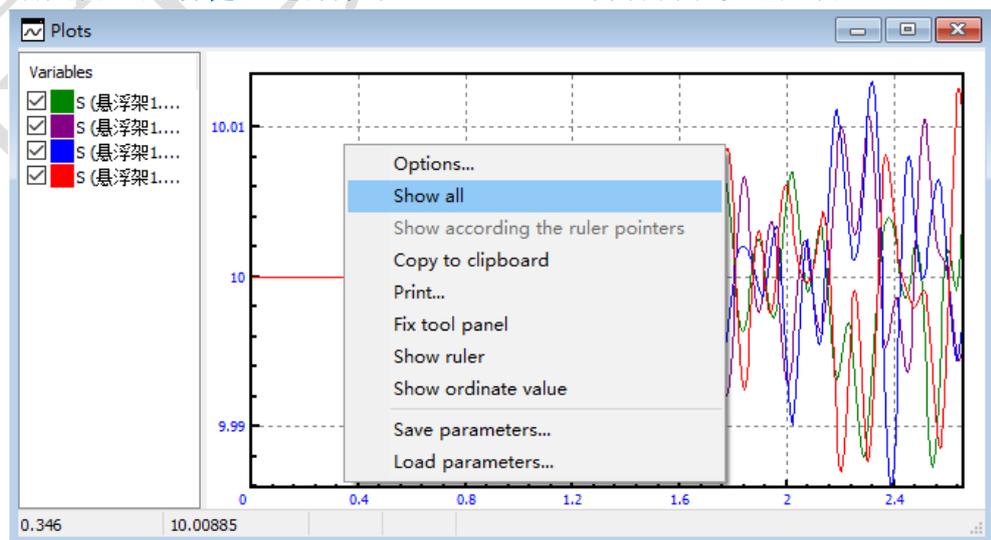


图 3-164

21) 仿真过程如图 3-165，如果将动画窗口最小化或关闭，计算会非常快。

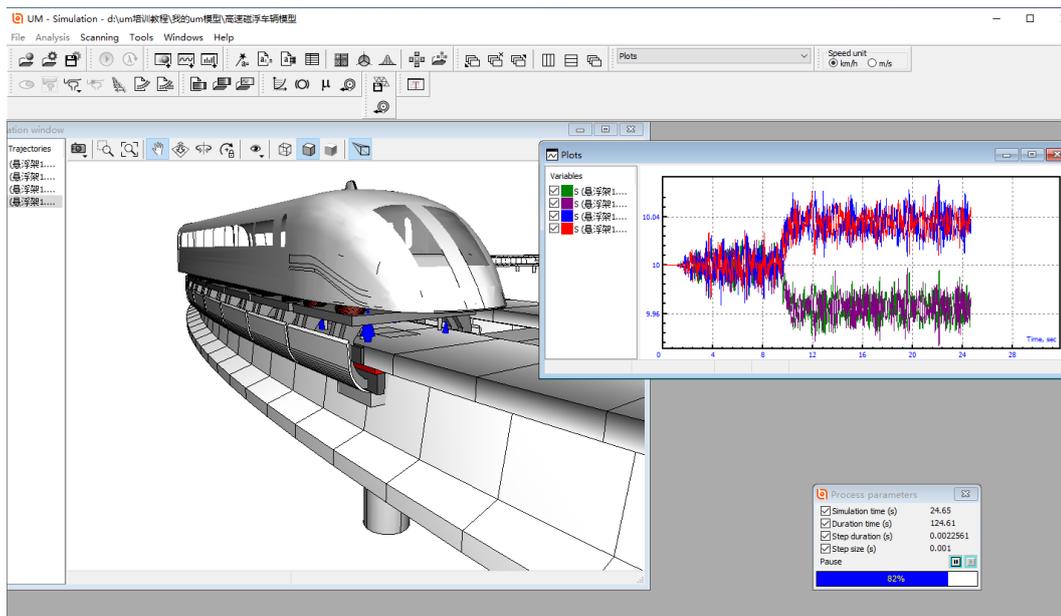


图 3-165

注：读者可以选择软件自带的单极电磁铁控制模型或自定义控制模型（Matlab/Simulink、UM Block Editor）进行仿真计算。