



铁道车辆动力学仿真

UM 软件入门系列教程

(06)

四川同算科技有限公司 译

2020 年 5 月

前言

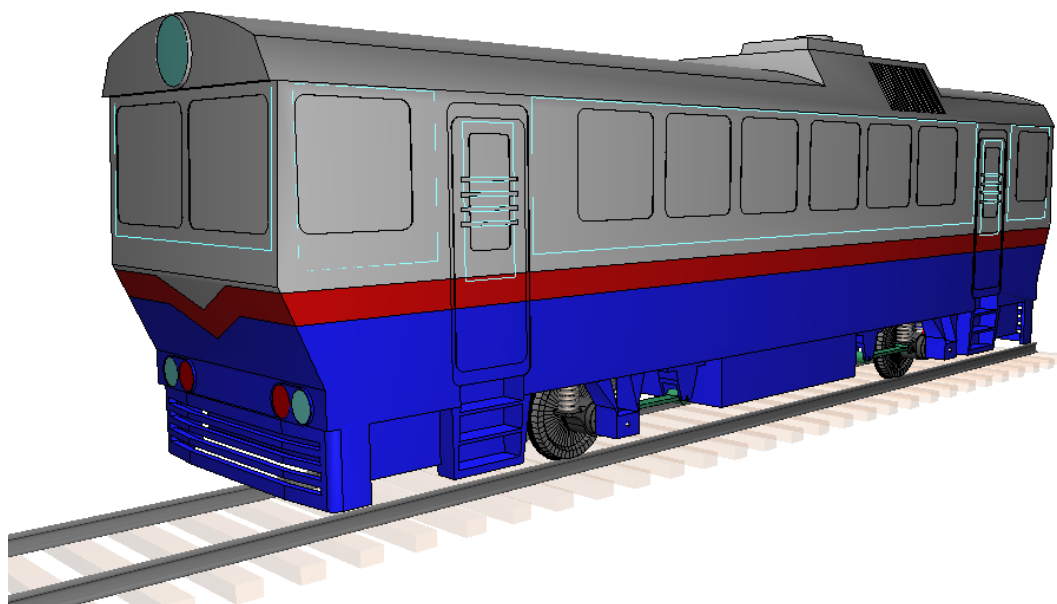
本教程介绍使用**UM Loco**模块进行铁道车辆动力学建模和仿真的基本方法和步骤。**UM Loco**模块用于铁道车辆动力学建模和仿真，包含一系列轮轨专用工具和算法，不仅可以模拟单节车辆，也可以模拟多车编组工况。

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

首先，我们学习一个最简单的轮对模型，然后建立一个只有一系悬挂的二轴车辆模型，最后使用**UM Experiments**模块的**Scanning**工具进行批处理计算，找到其非线性临界速度。

本教程只是帮助用户快速熟悉**UM Loco**模块的基本使用方法，有关更深入的详细的理论和方法介绍请查阅用户手册第八章。

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



版权和商标

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

版权所有© 2020 Computational Mechanics Ltd.

俄罗斯计算力学有限公司保留所有权利。

联系方式

最新版的UM软件和相应的用户手册下载地址：

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

在使用过程中，读者如有任何报错、疑问和建议，请发送邮件至：

um@universalmechanism.com

UM总部

Computational Mechanics Ltd.

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

Phone, fax: +7 4832 568637

www.universalmechanism.com

UM中国

四川同算科技有限公司

四川省眉山市彭山区蔡山西路2号伟业广场1911室

办公电话：028-38520556

公司网站：www.tongsuan.cn

电子邮件：um@tongsuan.cn



微信公众号



QQ 交流群

目 录

1.	单轮对模型	1
1.1	建模	1
1.2	仿真	3
1.2.1	设置轮轨型面	3
1.2.2	运动仿真	5
2.	车辆模型	10
2.1	模型组成	10
2.2	新建模型	12
2.3	创建轮对	12
2.4	创建几何图形	16
2.4.1	创建弹簧的几何图形	17
2.4.2	从文件读入几何图形	18
2.4.3	生成右侧轴箱图形	19
2.5	将轴箱引入动力学模型	20
2.6	创建车体	23
2.7	添加力元	24
2.7.1	弹簧力元	24
2.7.2	斜置减振器力元	28
2.7.3	轴箱拉杆力元	29
2.7.4	横向减振器力元	31
3.	批处理仿真	33
3.1	新建 SCANNING 项目	34
3.1.1	前言	34
3.1.2	新建 Scanning 项目	36
3.1.3	加载模型	37
3.1.4	设置变速度参数	38
3.1.5	配置轮轨	39
3.1.6	积分参数	41
3.1.7	终止条件	42
3.1.8	保存变量	43
3.2	运行批处理仿真	44
3.3	结果分析	45
3.3.1	单个工况结果	45
3.3.2	多工况统计图表	47

1. 单轮对模型

1.1 建模

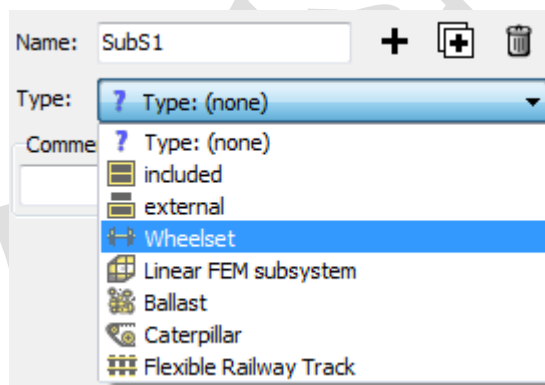
新建模型

1. 运行 **UM Input** 程序，选择菜单 **File | New object**，新建一个模型。

添加一个轮对

在 **UM** 软件里，轮对已经做成了一个标准的参数化子系统，请按以下方法操作。

2. 先在左侧模型树选中 **Subsystem**。
3. 然后点击右侧交互界面的按钮 **+**，添加一个子系统。



4. 从下拉菜单选择 **Wheelset**。

备注：

一旦添加了一个轮对子系统，参数符号 **v0**（车辆初始速度）就自动添加到左侧参数表中。

现在，动画窗口显示了一个标准轮对，如图 1.1 所示。

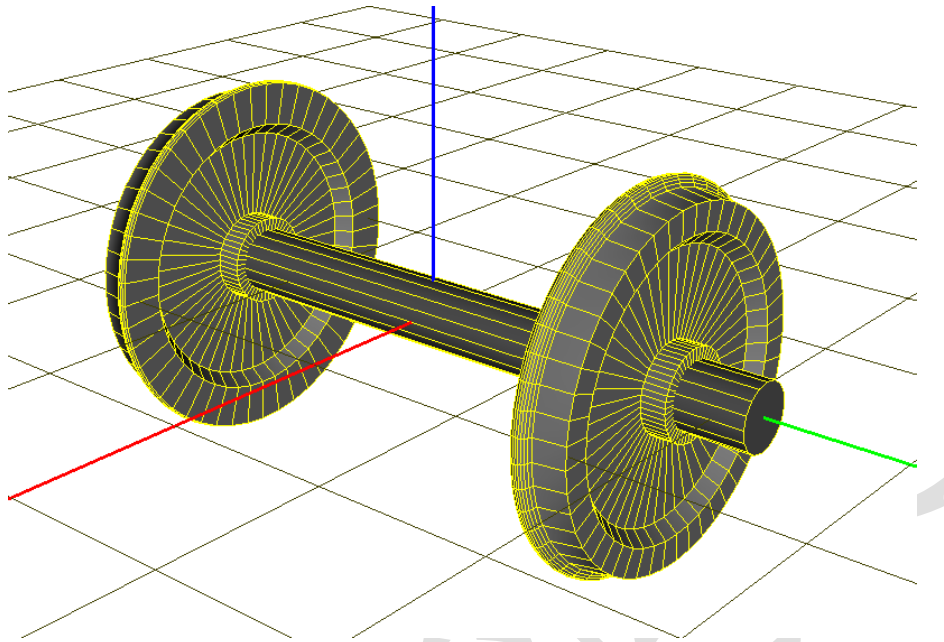


图 1.1 标准轮对

5. 重命名为 **Wheelset**。
6. 选择主菜单 **File | Save as**，保存模型，命名为 **Wset**（请读者自定义模型路径，支持中文命名和路径）。
7. 选择主菜单 **Object | Simulation** 或直接点击工具栏按钮 ，运行 **UM Simulation** 程序并自动加载当前模型。

1.2 仿真

1.2.1 设置轮轨型面

对于一个铁道车辆模型（至少包含一个轮对），必须指定车轮踏面外形和钢轨轨头廓形（以下统称“型面”），才能进行仿真。

软件缺省的车轮型面为 *newlocow.wpf*，钢轨型面为 *r65new.rpf*，均为俄罗斯标准的。

设置轮轨型面

1. 选择主菜单 **Analysis | Simulation**（或快捷键 F9）打开仿真控制界面（Object simulation inspector）。
2. 定位到 **Rail/Wheel** 页面。
3. 进而到 **Profiles | Rails** 页面，如图 1.2 所示。
4. 分别选择所需的左右钢轨型面文件（这里保持缺省设置）。

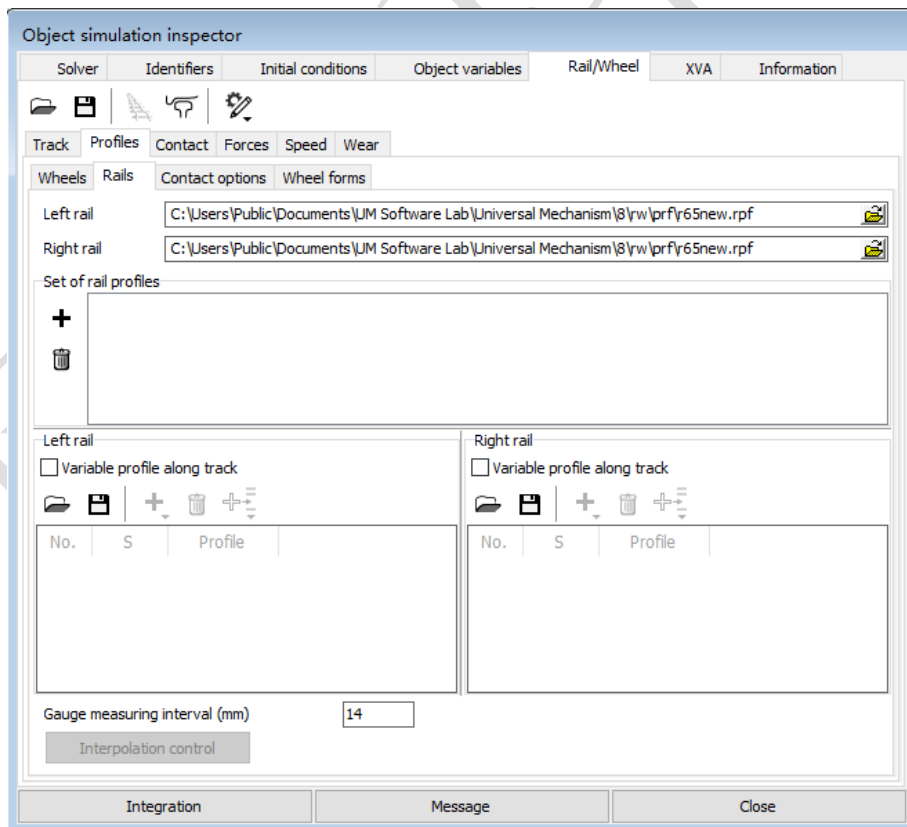


图 1.2 设置钢轨型面

5. 切换到 **Profiles | Wheels | Profiles** 页面，如图 1.3 所示。
6. 点击按钮 **+**，可将所需的车轮型面文件（比如：**newagnw.wpf**）添加至型面列表（**Set of wheel profiles**）中。

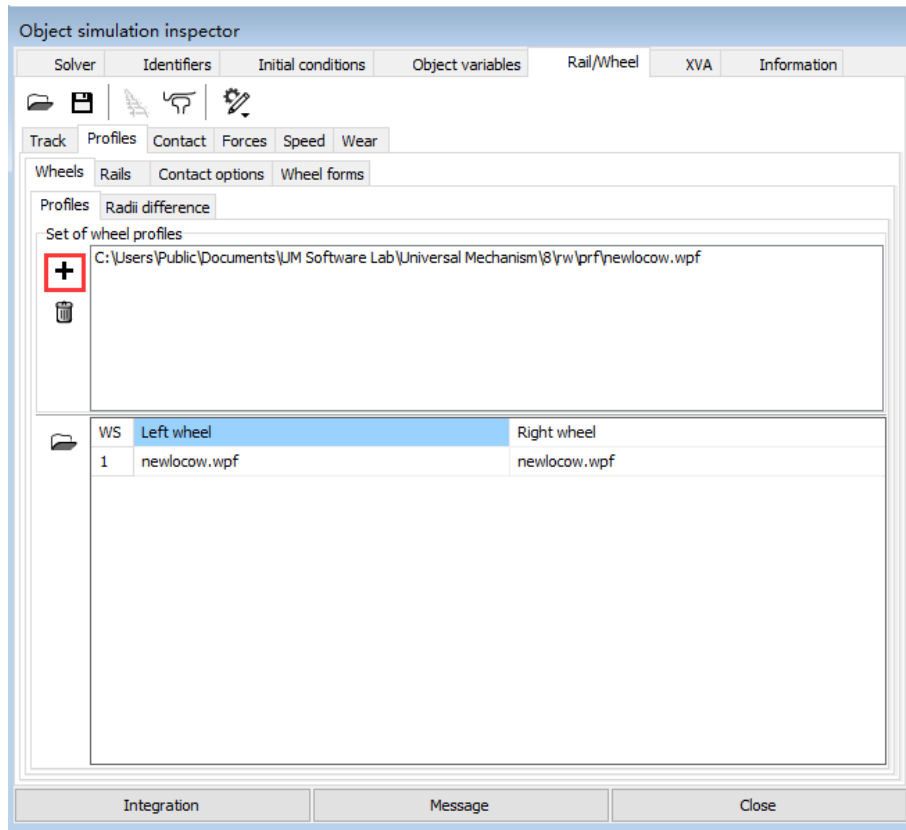


图 1.3 添加车轮型面

7. 在列表中选中上一步添加进来的型面，点右键，选择 **Assign to all**，统一赋给所有车轮（实际上每个车轮可以单独设置），如图 1.4 所示。

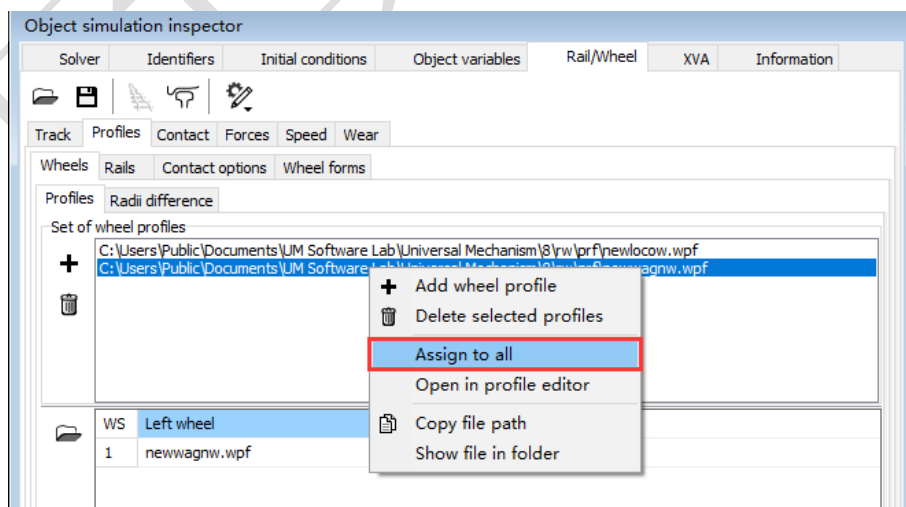


图 1.4 设置车轮型面

8. 点击按钮 ，弹出一个绘图窗口，可显示当前设置的轮轨型面。

1.2.2 运动仿真

设置理想轨道

1. 如果不小心将仿真控制界面关掉了，请按 **F9** 打开即可。
2. 定位到 **Rail/Wheel | Track | Irregularities** 页面。
3. 设置轨道类型 (**Track Type**) 为理想的平顺轨道 (**Even**)。
4. 切换到 **Rail/Wheel | Track | Macrogeometry** 页面。
5. 设置铁路线形 (**Track Type**) 为直线 (**Tangent**)。

显示轮轨接触力动画

打开轮轨接触力动画窗口，查看轮轨接触力。

1. 选择主菜单 **Tools | Animation of contact** (或点击工具栏图标 )，弹出轮轨接触力窗口。
2. 如图 1.5 所示，可调节比例使得轮轨力矢量显示合适。
3. 设置 **Scale** 为 **10** (kN/m)。

备注：

仿真开始后才会显示动态的接触力矢量。

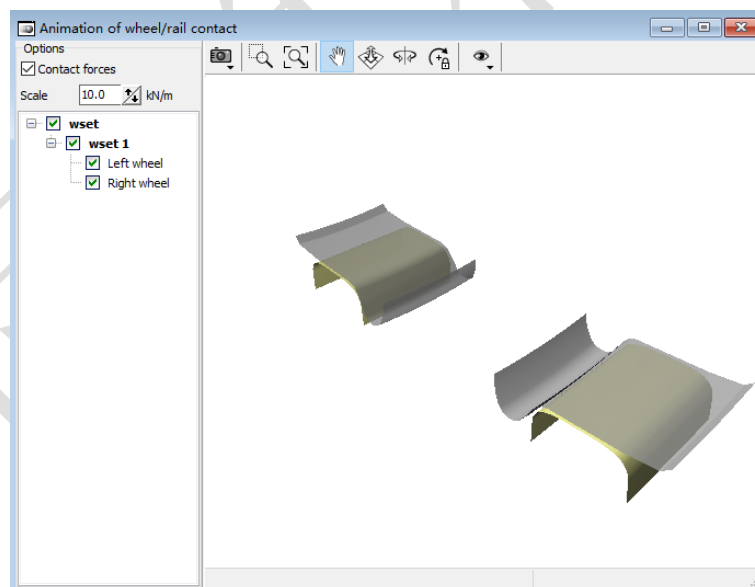


图 1.5 轮轨接触力窗口

稳态运动

在仿真前我们需要设置数值积分方法。

1. 回到仿真控制界面，如果不慎关闭，请按 **F9**。
2. 定位到 **Solver** 页面。

3. 设置求解器为 **Park**。
4. 设置容差 **Error tolerance** 为 **4E-8**。
5. 点击 **Integration**，开始仿真。

如果所有初始坐标都为 0，则轮对将进行稳态运动，不会发生横移、侧滚和摇头，轮轨接触力保持恒定。

6. 待计算完毕，出现 **Pause** 窗口，点击 **Interrupt**。

非稳态运动

现在我们来考察轮对的非稳态运动并分析其动力学行为。

1. 回到仿真控制界面，如果不慎关闭，请按 **F9**。
2. 定位到 **Initial conditions | Coordinates** 页面，如图 1.6 所示。
3. 设置第二个铰坐标（**1.2**）为 **0.001**（平动自由度，单位为 m），回车。这里，我们让轮对初始在横向稍微偏离轨道，它会引起轮对自激振动。

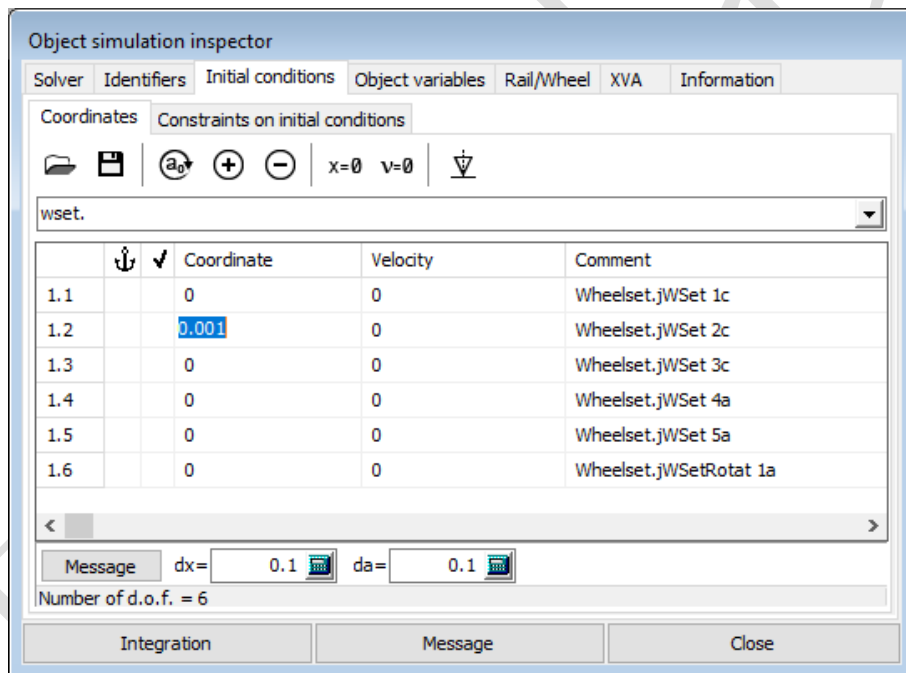


图 1.6 设置初始条件

4. 点击 **Integration**，开始仿真，可以看到轮对不再保持稳态运动。

下面，再进行一次仿真，我们来考察其动力学行为。

5. 选择主菜单 **Tools | Graphical window** (或点击工具栏图标)，打开一个绘图窗口。
6. 选择主菜单 **Tools | Wizard of variables** (或点击工具栏图标)，打开变量向导。
7. 定位到变量向导的 **Coordinates** 页面。
8. 在左侧坐标列表选择 **Wheelset | jWset | 1.2** 和 **1.5**，如图 1.7 所示。
9. 点击按钮，创建两个变量，分别表示轮对的横向位移和侧滚角(弧度)。
10. 将两个变量拖入绘图窗口。

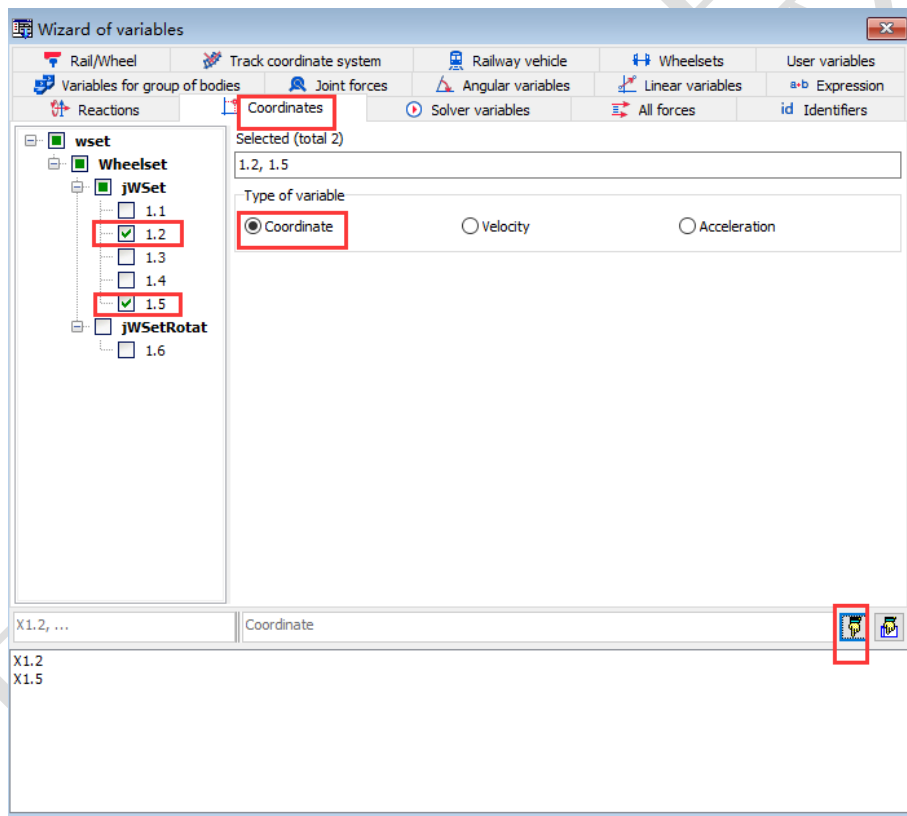


图 1.7 定义轮对坐标变量

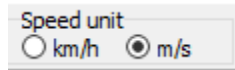
备注：

新版本使用按钮可以直接创建绘图窗口并显示变量，而无需第 5 步。

如果仿真界面打开了太多的窗口，可以通过菜单 **Windows | List of windows**，选择所需窗口，使之出现最上层。

设置初始速度和仿真时间

1. 回到仿真控制界面，定位到 **Identifier** 页面。
2. 设置初始速度 **v0** 为 **20**(缺省值)，其单位取决于工具栏的速度单位选项，这里设为 **m/s**。



3. 转到 **Solver** 页面，点击 **t** 设置时间为本次仿真终止条件，并设置为 **20** 秒，即达到 20s 后停止计算。

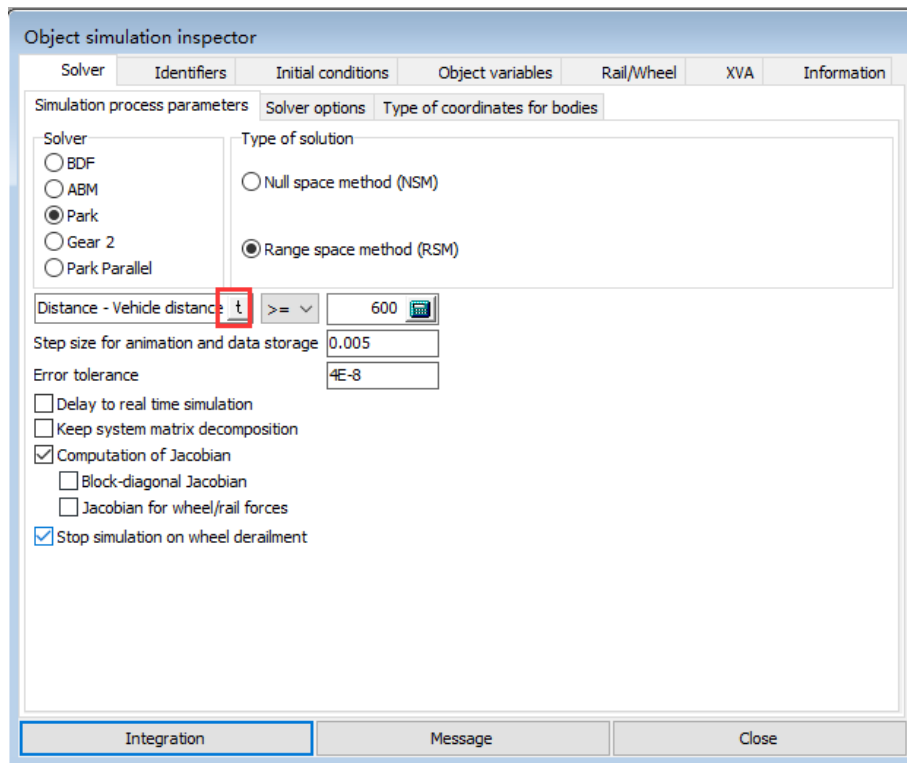


图 1.8

4. 点击 **Integration**，开始仿真。此时，可以看到轮对呈现出非稳态，振动周期逐渐变长，如图 1.9 所示。

备注：

由于轮对横向位移和侧滚角非常小，需要在绘图区右击，然后选择 **Show all**，则自动缩放匹配绘图窗口，如图 1.9 所示。

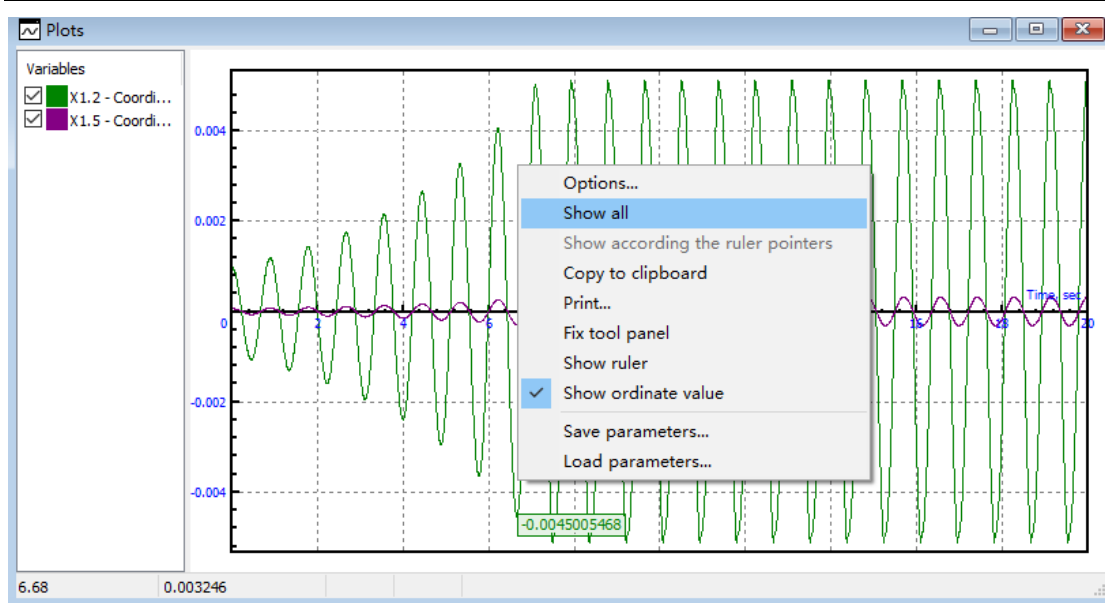


图 1.9 轮对横移和侧滚时程图

2. 车辆模型

下面我们来建立一个简单的二轴车辆模型 AC4，该模型位于 {UM Data}\SAMPLES\Rail_Vehicles\AC4 目录¹。

2.1 模型组成

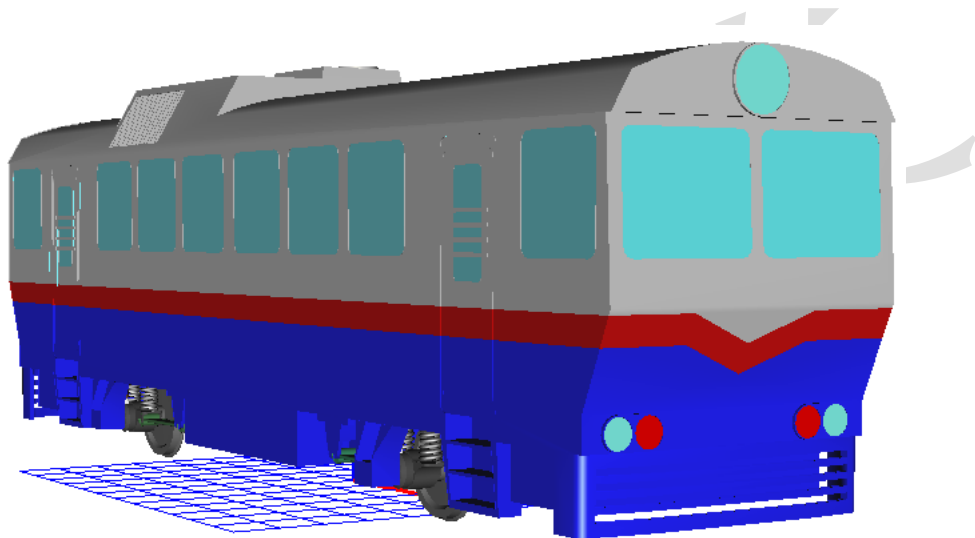


图 2.1 AC4 车辆模型

本例 AC4 车辆模型主要由以下元件组成。

1. 两个标准子系统：轮对；
2. 四个几何图形：车体、减振器、弹簧和牵拉引杆；
3. 五个刚体：车体和轴箱；
4. 五个铰：车体和轴箱；
5. 十二个 Bipolar 力元：斜置减振器、横向减振器和牵引拉杆；
6. 八个 Special 力元：弹簧。

¹ 官网下载地址：<http://www.universalmechanism.com/download/80/ac4.zip>

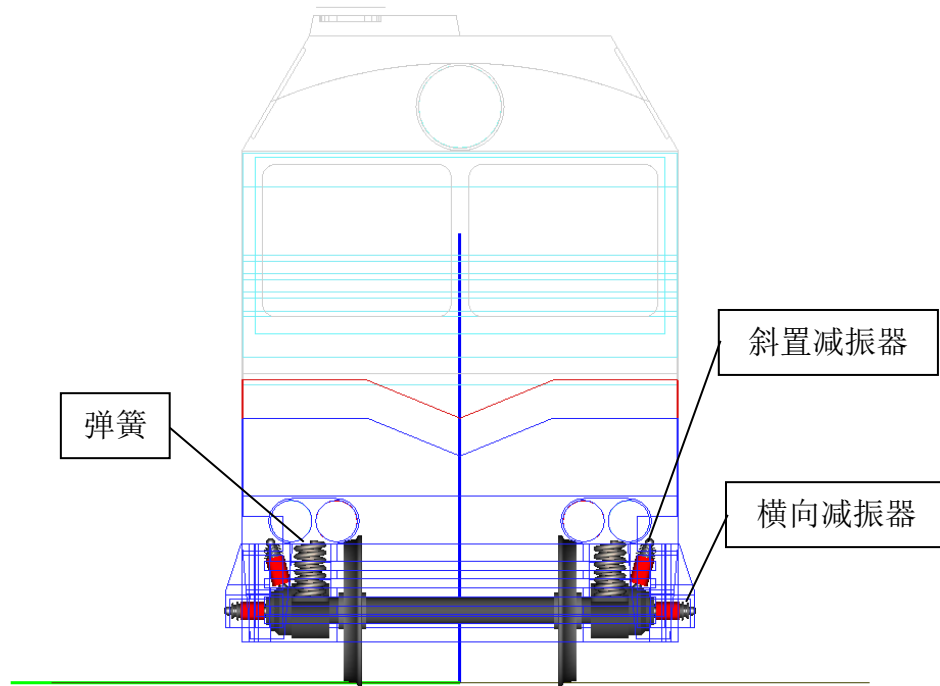


图 2.2 前视图

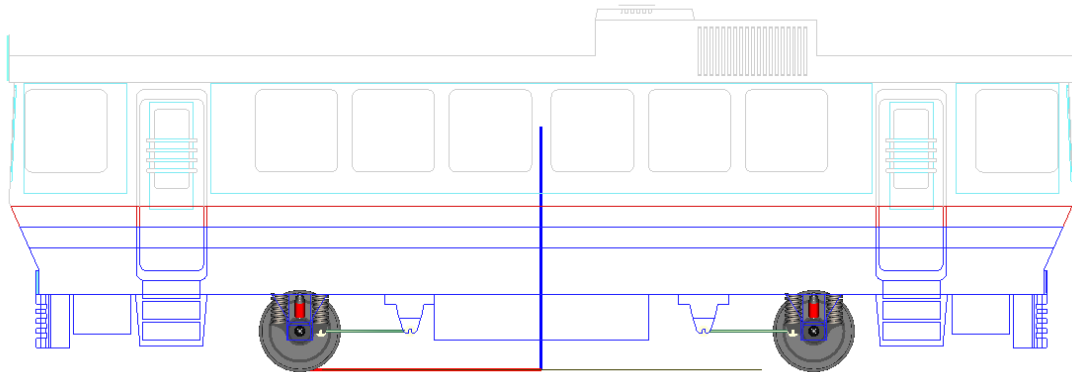


图 2.3 左视图

2.2 新建模型

1. 运行 **UM Input** 程序。
2. 选择主菜单 **File | New Object** 或点击工具栏按钮  新建一个模型。
3. 选择主菜单 **File | Save as**，选择要保存的文件目录进行保存（注意要包含模型名称 **ac4**），如图 2.4 所示。

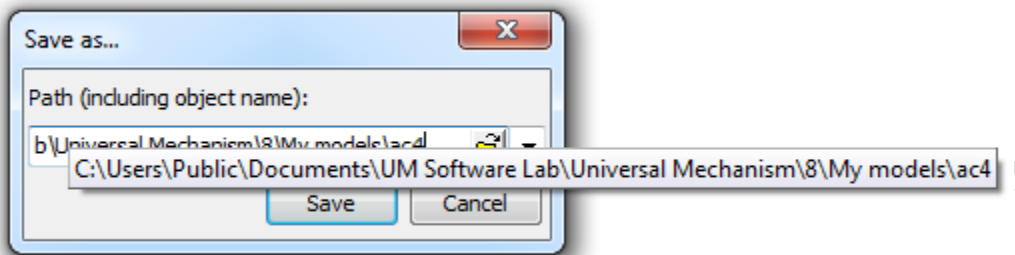


图 2.4 保存模型

备注：

动画窗口工具栏图标  /  分别表示显示完整或局部模型（左侧模型树选中的当前元素）。

2.3 创建轮对

在 UM 软件里，轮对已经做成了一个标准的参数化子系统，在用户手册第八章有相关说明，请按以下方法操作。

1. 先在左侧模型树选中 **Subsystems**，然后在右侧交互界面点击按钮 ，添加一个子系统，重命名 **Wheelset1**，从 **Type** 下拉菜单选择类型为 **Wheelset**。动画窗口将显示一个轮对，交互界面显示相应的几何和惯量参数，参数符号 **v0** 自动添加到参数表。有些参数可以直接在这里修改，比如滚动圆半径和横向跨距之半，如图 2.6 所示。
2. 设置轮对的纵向位置：切换到 **Position** 页面，设置 **Translation | X** 为 **L1**，回车，赋初值 **3.29 m**，参数符号 **L1** 添加到参数表 **v0** 参数下方。双击参数表某一参数，可以修改其数值或表达式。
3. 设置轮对垂向位置：用户在建模时要考虑好总体坐标系原点位于轨面高度（推荐）或者轮轴高度。缺省状态，总体坐标系原点位于轮轴轴心高度，不过我们更习惯将其设置在轨面高度。这里，我们设置 **Translation | Z** 为 **0.525 m**。

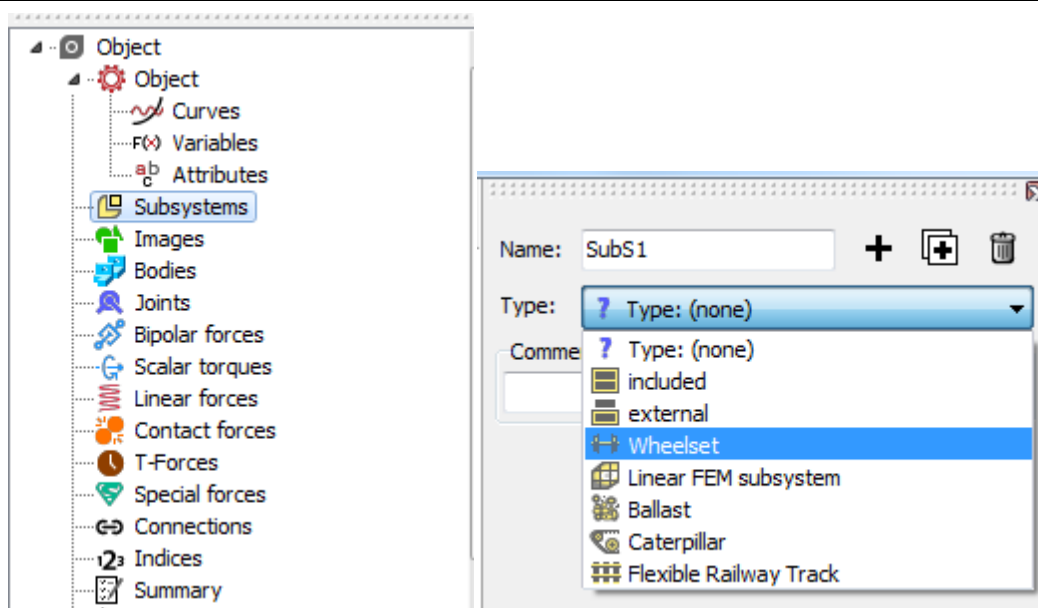


图 2.5 添加标准轮对子系统

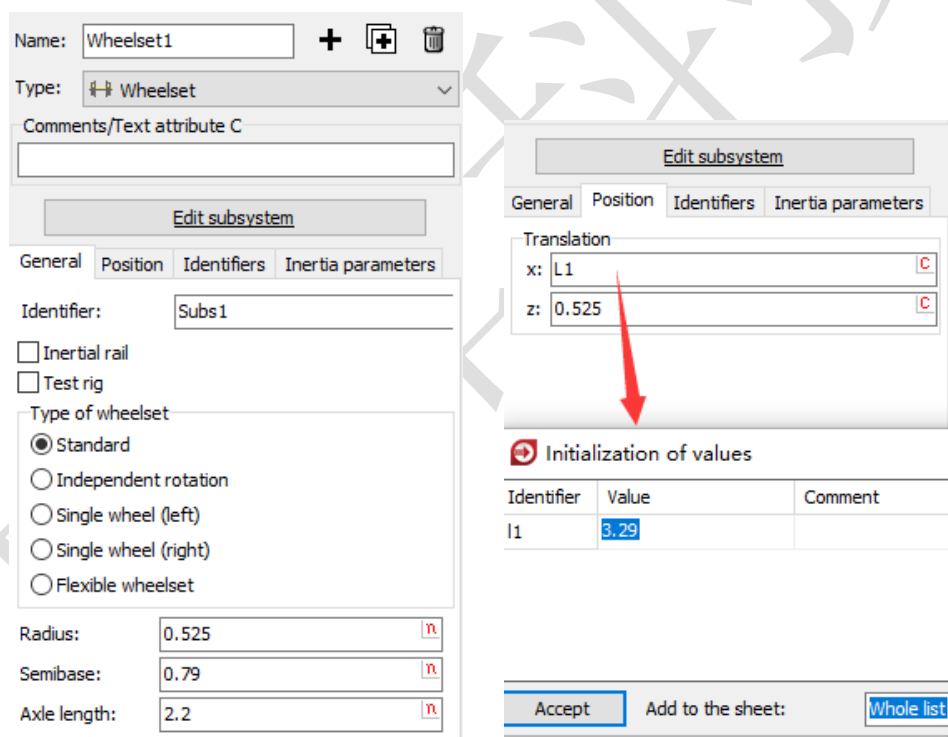


图 2.6 设置轮对参数

轮对惯量参数

切换到 **Identifiers** 页面修改轮对的质量和惯量参数，如图 2.7 所示。

1. 修改质量参数 $mwset = 3650 \text{ kg}$ 。
2. 修改轮对绕 X 轴和 Z 轴的转动惯量（侧滚和摇头）参数 $ixwset = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。
3. 修改轮对绕 Y 轴的转动惯量参数（点头） $iywset = 500 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

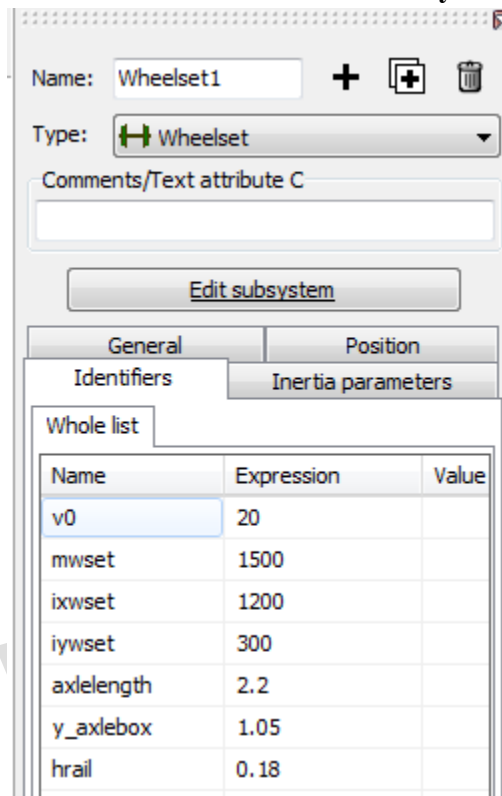


图 2.7 修改轮对惯量参数

创建第二个轮对

1. 此时，我们只需点击按钮 ，即可复制一个轮对子系统，重命名为 **Wheelset2**，设置纵向位置为 **-L2**，**L2** 参数初始赋值 **3.71m**。
2. 选择主菜单 **File | Save**，保存模型。

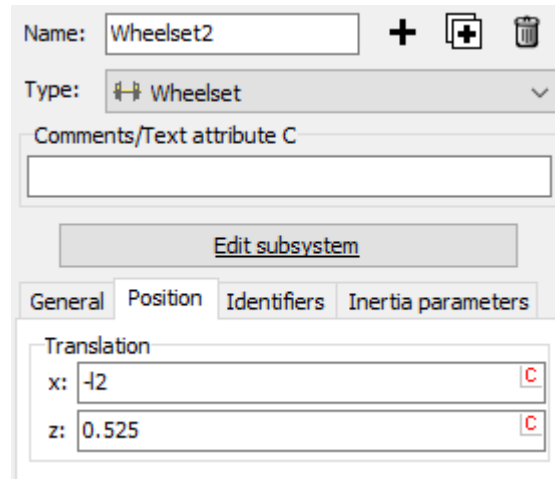


图 2.8

2.4 创建几何图形

在 UM 软件里，一个几何图形（GO）可以赋给许多个具有相同形状的元素（刚体和力元）。例如，一个弹簧图形可以赋给四个弹性悬挂力元，而不必为每个力元单独创建几何图形。

UM 软件不仅可以直接创建各种形状的几何体，还支持从外部三维 CAD 软件导入几何体。**UM CAD Interfaces** 模块提供了几种主流的三维软件接口，以及 STEP 和 IGES 中间格式转换器。本例中，我们将使用到从外部 CAD 软件导入的几何图形。

定位到左侧模型树的 **Images**，就可以在右侧交互界面添加几何图形，如图 2.9 所示。

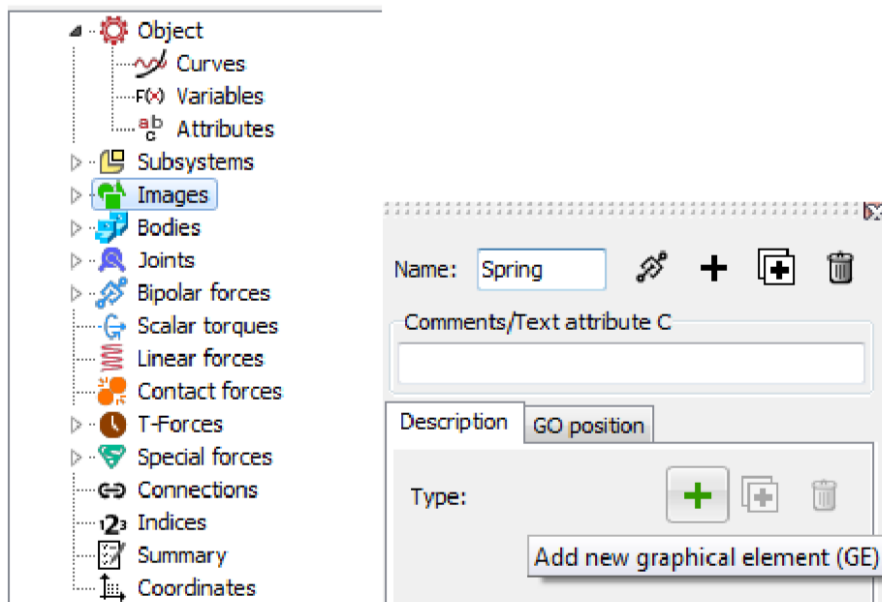


图 2.9

2.4.1 创建弹簧的几何图形

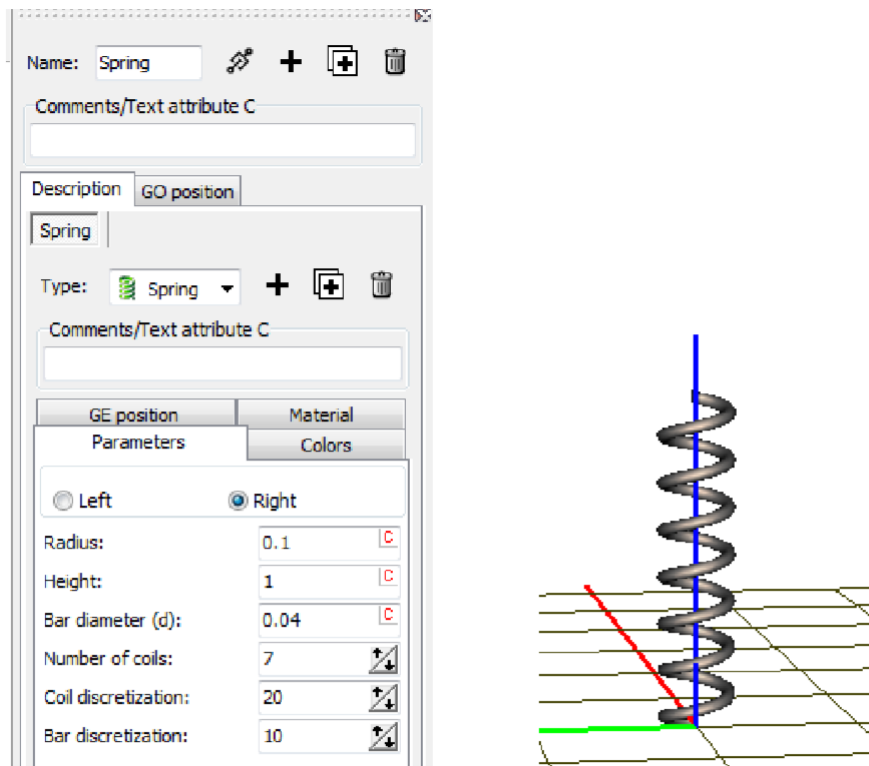


图 2.10

1. 在左侧模型树选中 **Images**，到右侧交互界面点击按钮 **+**，添加一个几何图形，重命名为 **Spring**。
2. 点击第二行的 **+** 按钮，添加一个基本图形元素，从下拉菜单中选择 **Spring** 类型，设置弹簧半径为 **0.1m**，圈数为 **7**，如图 2.10 所示。

备注：

对于弹性元件的几何图形，最好是设置为沿着 Z 轴方向且长度为 1m，这样在连接具体物体时，程序会自动匹配其长度和空间方位。

2.4.2 从文件读入几何图形

用户可以通过菜单 **Edit | Read from file** 或工具栏图标  读入事先准备好的几何图形文件（扩展名为）。

本例需要导入的几何图形位于目录{UM Data}\rw\Images，请逐个导入以下图形文件：

- AC4_CarBody;
- AC4_TractionRod_F (前轴箱拉杆);
- AC4_TractionRod_R (后轴箱拉杆);
- AC4_AxleBox_LF (前轮对左侧轴箱);
- AC4_AxleBox_LR (后轮对左侧轴箱);
- Damper.

本例中，除了减振器 **Damper** 是由 UM 直接创建外，其余均来自其他三维软件，如图 2.11 所示。

需注意，车体的几何图形由多个几何体组装而成（搭积木）；而同一轮对左右两侧轴箱的几何图形并不完全相同，故需要做个处理。

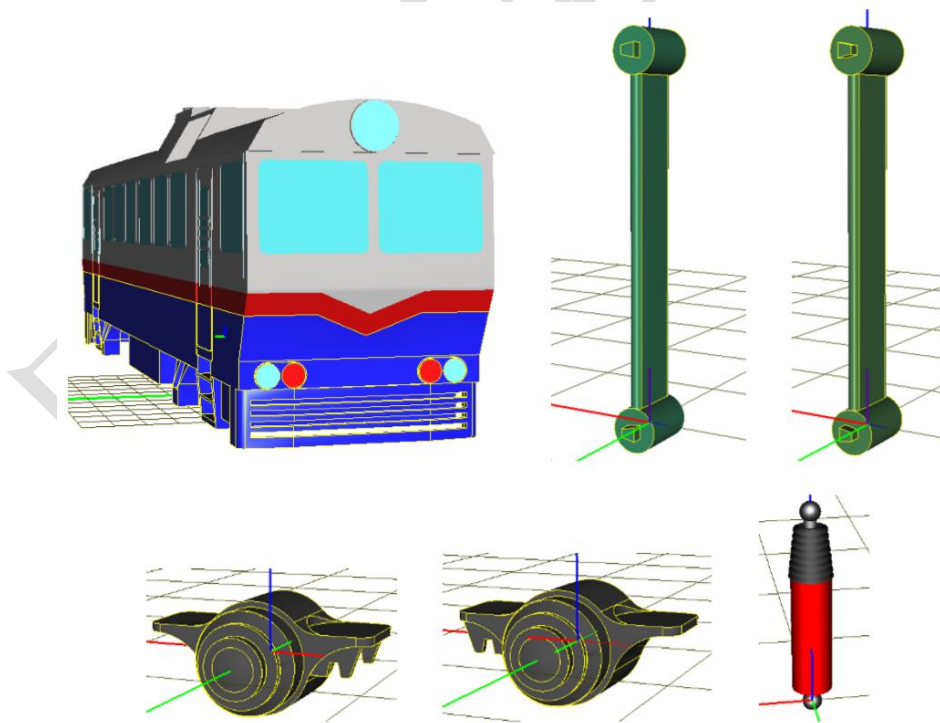


图 2.11

2.4.3 生成右侧轴箱图形

前面的步骤中已经直接从文件读入了左侧的两个轴箱几何体，而右侧的轴箱可通过将左侧轴箱绕 Z 轴旋转 180° 得到。

1. 左侧选中 **Images**，右侧单击按钮 **+**，添加一个几何图形，重命名为 **Axle-box-RF**，作为前轮对右侧轴箱。
2. 单击第二行的按钮 **+**，添加一个基本图形元素（GE）。
3. 从下拉菜单选择类型 **GO**，表示调用已有的几何图形。再从下拉菜单选择 **Axle-box LR**，如图 2.12 所示。
4. 在 **GE position** 页面，设置绕 **Z** 轴旋转 180° 。

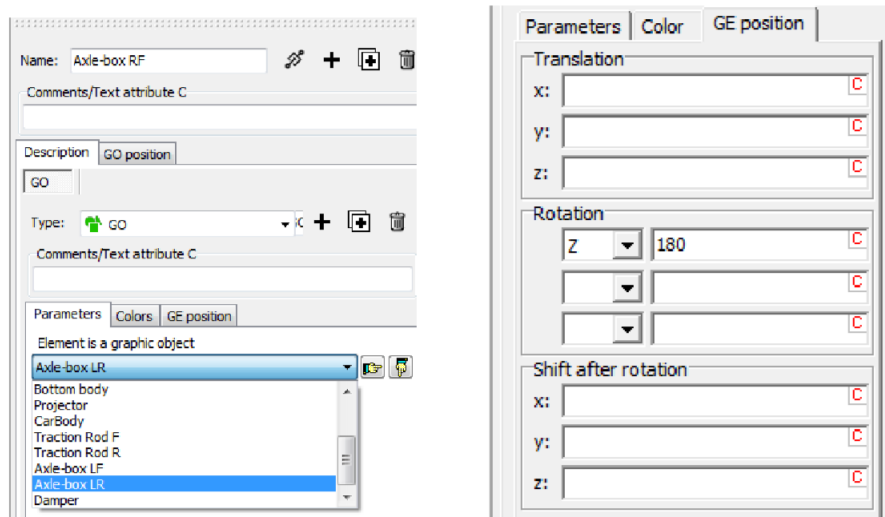


图 2.12

5. 用同样的方法，生成后轮对右侧的轴箱几何图形 **Axle-box RR**。

2.5 将轴箱引入动力学模型

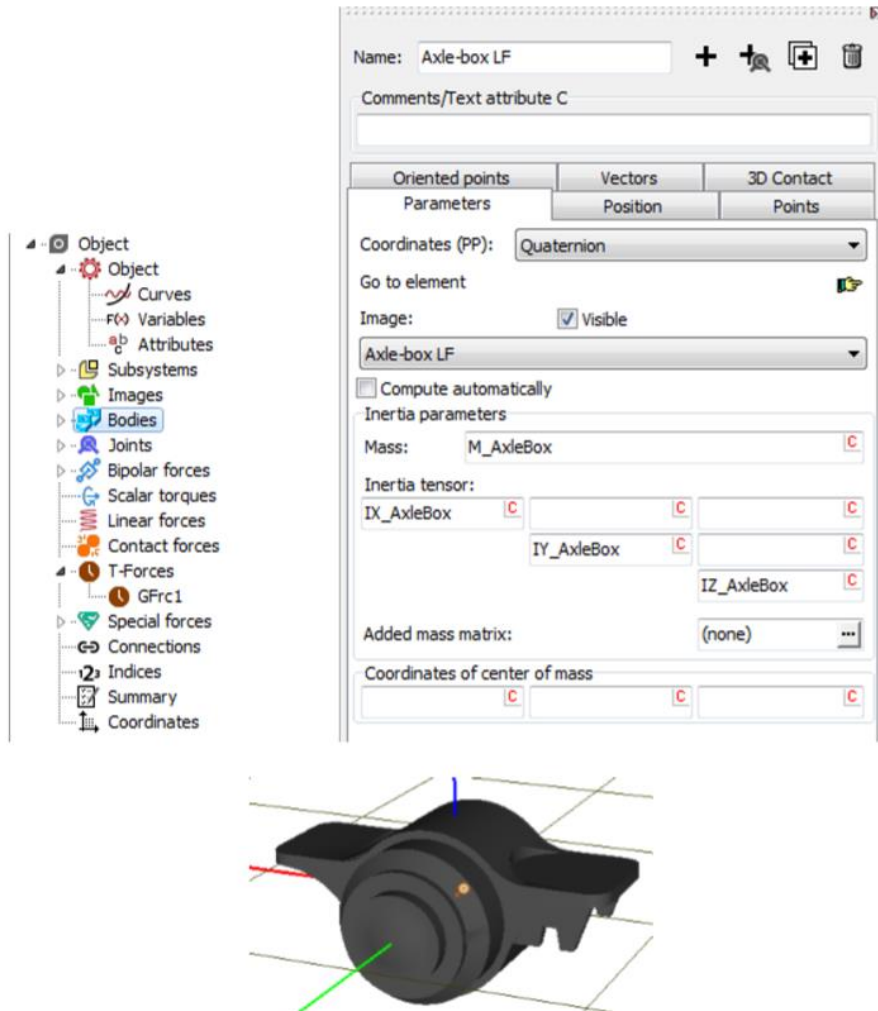


图 2.13

将一个轴箱引入现有的动力学模型，主要有两步操作。第一步，创建一个刚体；第二步，定义轴箱刚体相对与轮对的转动铰。

1. 在左侧模型树选中 **Bodies**，点击右侧的 **+** 按钮，添加一个刚体。
2. 重命名为 **Axle-box LF**，（L 表示 Left，F 表示 Front）。
3. 从 **Image** 下拉菜单选择相应的（同名）几何图形。
4. 设置轴箱刚体的质量和转动惯量， $M_{Axlebox} = 50 \text{ kg}$ ， $IX_{Axlebox} = IY_{Axlebox} = IZ_{Axlebox} = 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

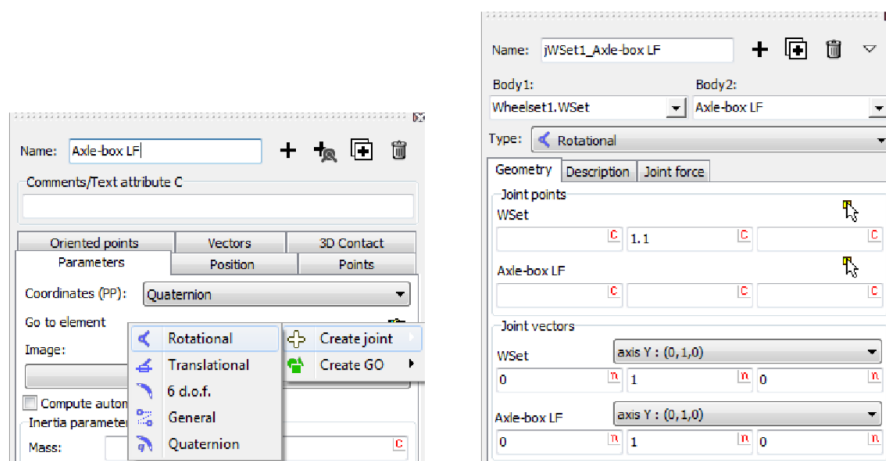


图 2.14

下面，我们用一个转动铰将轴箱和轮对建立连接。

1. 在图 2.13 右上界面，点击 按钮，依次选择菜单 **Create joint | Rotational**，这样就自动为轴箱创建了一个铰。
2. 在铰的界面，更改 **Body1** 为 **Wheelset1.Wset**（下拉菜单），如图 2.14 右上所示。
3. 设置轴箱相对轮对中心的横向距离为 **1.1m**。
4. 设置两个刚体的转轴都为 **Y** 轴，即两个局部坐标系保持平行。

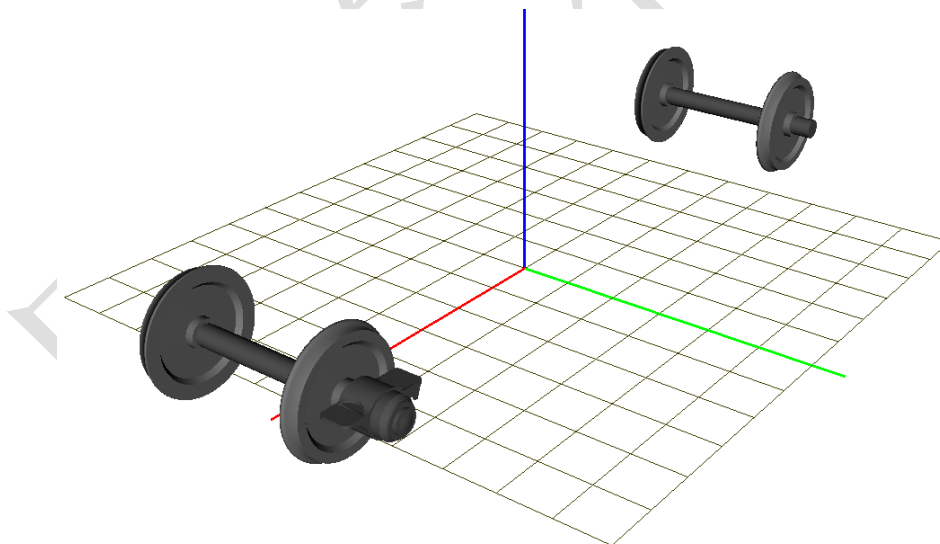


图 2.15

需注意，标准轮对子系统刚体 **Wheelset1.Wset** 并没有几何图形，故此动画窗口并未显示轮对，请点击动画窗口工具栏的 按钮切换为全局模式 ，如图 2.15 所示。

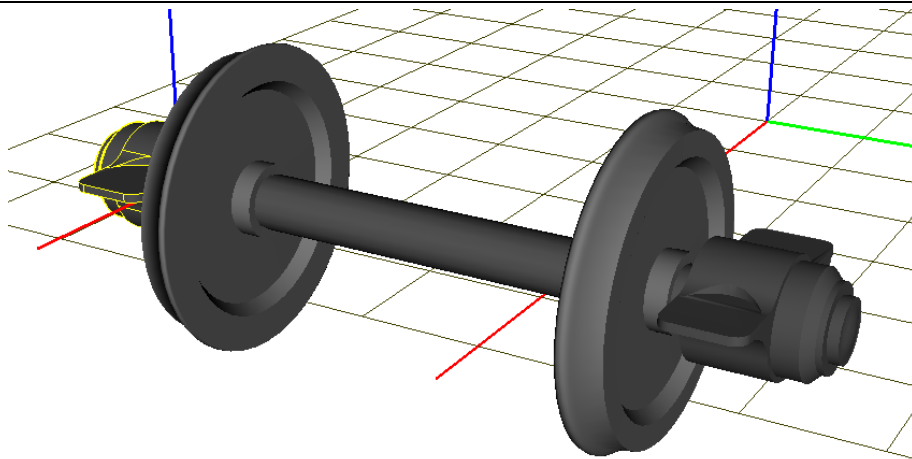


图 2.16

推荐使用刚体和铰的复制功能，添加第二个轴箱。

1. 定位到 **Bodies** 里的 **Axle-box LF**，在右侧界面点击  按钮，复制生成一个刚体，重命名为 **Axle-box RF**，并从 **Image** 下拉菜单选择同名的几何图形。
2. 定位到 **Joints** 里的 **jWSet1_Axle-box LF**，在右侧界面点击  按钮，复制生成一个转动铰，从下拉菜单中选择 **Axle-box RF** 作为 **Body2**，设置横向位置为 **-1.1m**，结果如图 2.16 所示。
3. 用同样的方法创建后轮对的两个轴箱 **Axle-box LR** 和 **Axle-box RR** 以及其相对后轮对的转动铰，最后效果如图 2.17 如所示。

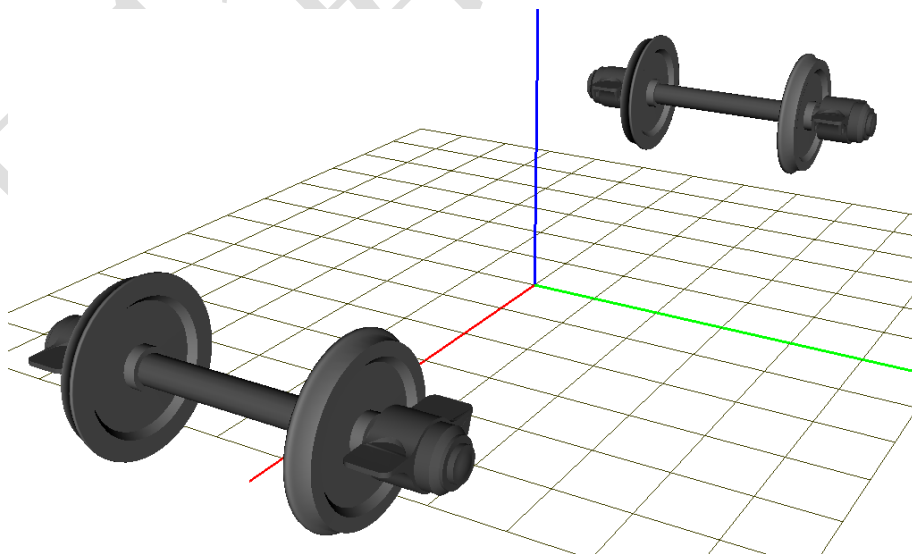


图 2.17

2.6 创建车体

接下来我们创建车体。请注意，虽然在前面已经导入了车体的几何图形，但并不意味着将其引入了动力学系统，这实际只是导入了一张图片而已。只有定义了刚体属性和它与系统内其他物体的连接关系才表示引入了动力学系统或模型。

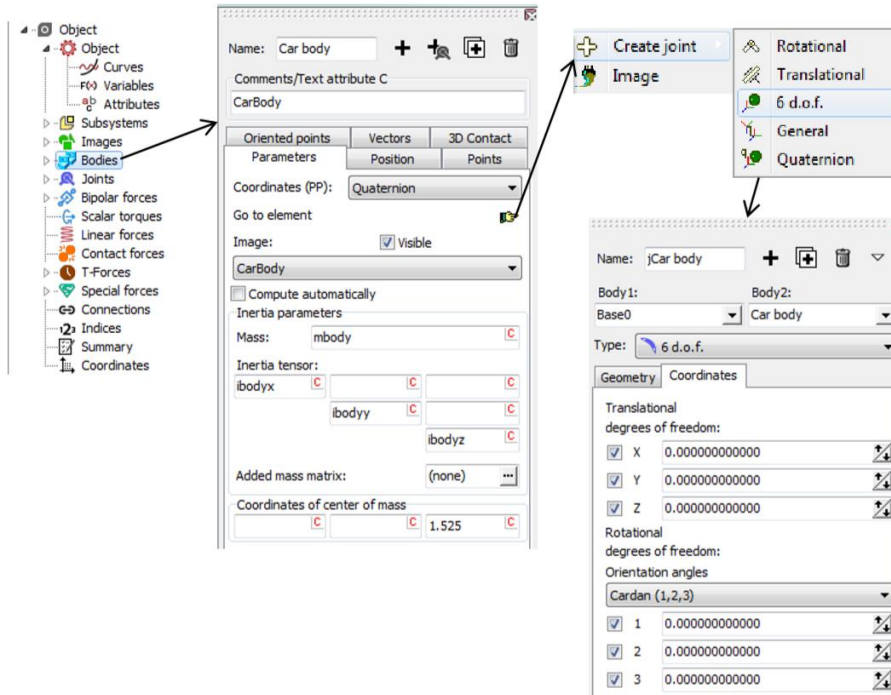


图 2.18

1. 在左侧模型树选中 **Bodies**，点击右侧的 **+** 按钮，添加一个刚体，重命名为 **Car body**。
2. 从 **Image** 下拉菜单选择相应的（同名）几何图形。
3. 通过参数化的符号设置车体的刚体属性如下：
 $m_{body} = 38300 \text{ kg}$,
 $i_{bodyx} = 14000 \text{ kg.m}^2$,
 $i_{bodyy} = 626000 \text{ kg.m}^2$,
 $i_{bodyz} = 599000 \text{ kg.m}^2$
 质心坐标 $(0, 0, 1.525) \text{ m}$ 。
4. 点击 按钮，依次选择菜单 **Create joint | 6 degrees of freedom**，创建一个六自由度铰，连接车体 **Car body** 和地面 **Base0**，表示车体相对地面有三个平动和三个转动自由度。

2.7 添加力元

2.7.1 弹簧力元

最简单的方法是使用特殊力元里的空间弹簧模型, 关于其原理和详细使用方法可以在用户手册第二章和第三章查阅。

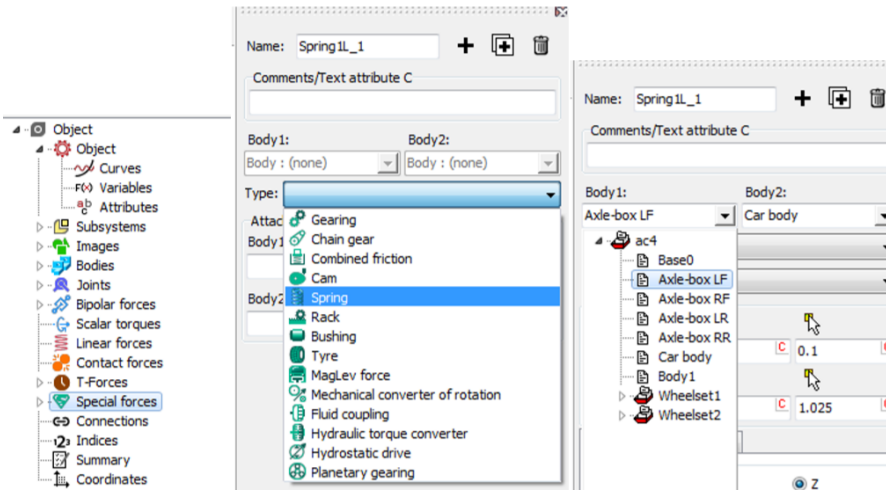


图 2.19

1. 在左侧模型树选中 **Special forces**, 点击右侧的 **+**按钮, 添加一个力元, 重命名为 **Spring1L_1**, 从 GO 下拉菜单中选择 **Spring** 类型, 如图 2.19 所示。
2. 选择 **Axle-box LF** 作为 **Body1**, **Car Body** 作为 **Body2**, 并指定几何图形 **Spring**。
3. 设置轴箱的连接点坐标为(0.28, 0, 0.1), 保持缺省方向 **Z**, 长度为 0.4m, 点击 **Compute for the 2nd body**, 这样程序自动计算出车体连接点的坐标(3.57, 1.1, 1.025)。

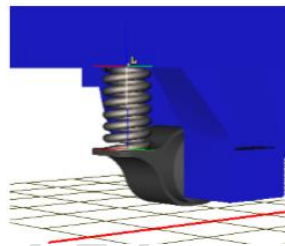
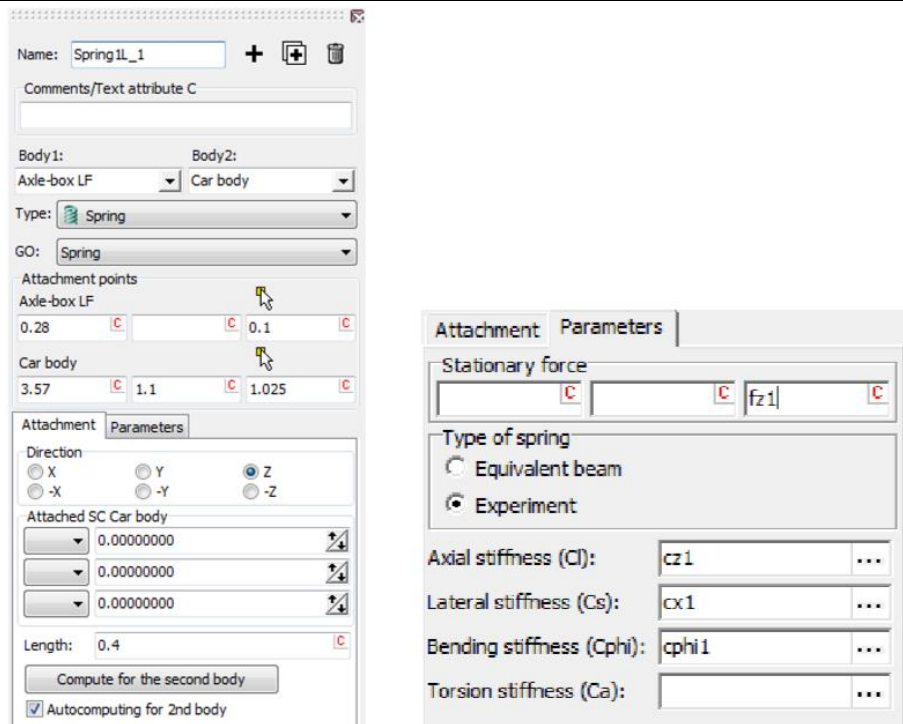


图 2.20

4. 选择弹簧参数类型为 **Experiment**，分别定义轴向刚度、剪切刚度和弯曲刚度，**cx1=370000N/m**，**cz1=377000N/m**，**cphi1=5500N*m/rad**。
5. 再到 **Stationary force** 设置弹簧预压力（即：此时弹簧长度对应静力压缩状态），设置 **Z** 分量为 **fz1**，初始赋值为 **0**。

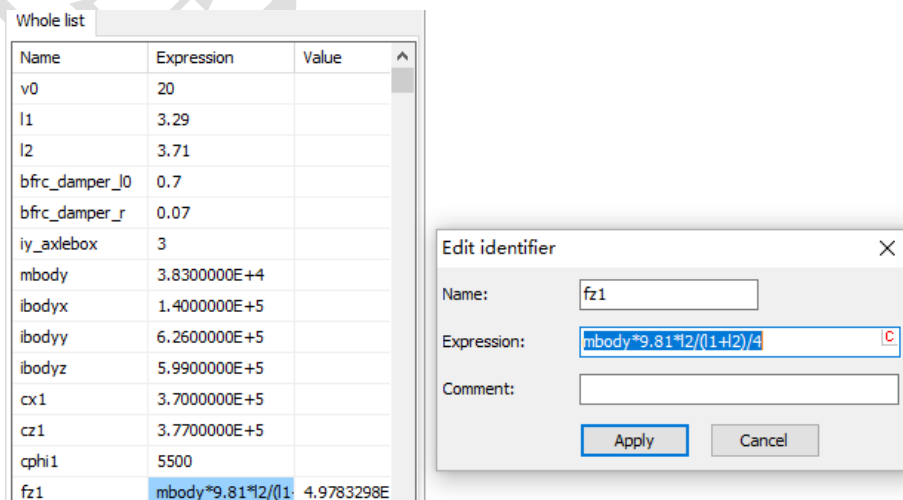


图 2.21

显然，弹簧预压力与车体质量和轮对与车体中心距离有关，相关参数为 **mbody**, **L1** 和 **L2**，根据静力学平衡方程可得： $\mathbf{fz1}=\mathbf{mbody*9.81*L2/(L1+L2)/4}$ 。

6. 到左侧下方的参数列表找到 **fz1**，双击，弹出参数编辑窗口，在 **Expression** 框输入表达式 $\mathbf{mbody*9.81*L2/(L1+L2)/4}$ ，这样就完成了一个弹簧力元的定义。
7. 在右侧交互界面点击  按钮，复制生成一个弹簧力元，其参数与第一个相同，重命名为 **Spring1L_2**。
8. 将弹簧连接点 **X** 坐标由 **0.28** 改为 **-0.28**，点击 **Compute for the 2nd body**，这样程序自动计算出车体连接点的坐标(3.01, 1.1, 1.025)。
9. 将这两个弹簧力元分别复制一个，重命名为 **Spring1R_1**、**Spring1R_2**，选择 **Body1** 为 **Axle-box RF**，点击 **Compute for the 2nd body**，更新车体连接点坐标。这样，就完成了前轮对的四个弹簧。
10. 复制第一个弹簧力元，重命名为 **Spring2L_1**，选择 **Body1** 为 **Axle-box LR**，并设置一组新的弹簧刚度参数，**cx2=330000N/m**，**cz2=370000N/m**，**cphi2=5250N*m/rad**。
11. 设置新的预压力参数 **fz2**（很明显，前后轮对受力不同），初始赋值 **0**，然后到参数列表双击修改，输入表达式： $\mathbf{mbody*9.81*L1/(L1+L2)/4}$
12. 将这个弹簧力元复制三次，分别命名为 **Spring2L_2**，**Spring2R_1**，**Spring2R_2**，注意修改相应的坐标符号(前后对称)和连接物体（左右不同），并更新车体连接点坐标(一键自动计算)。

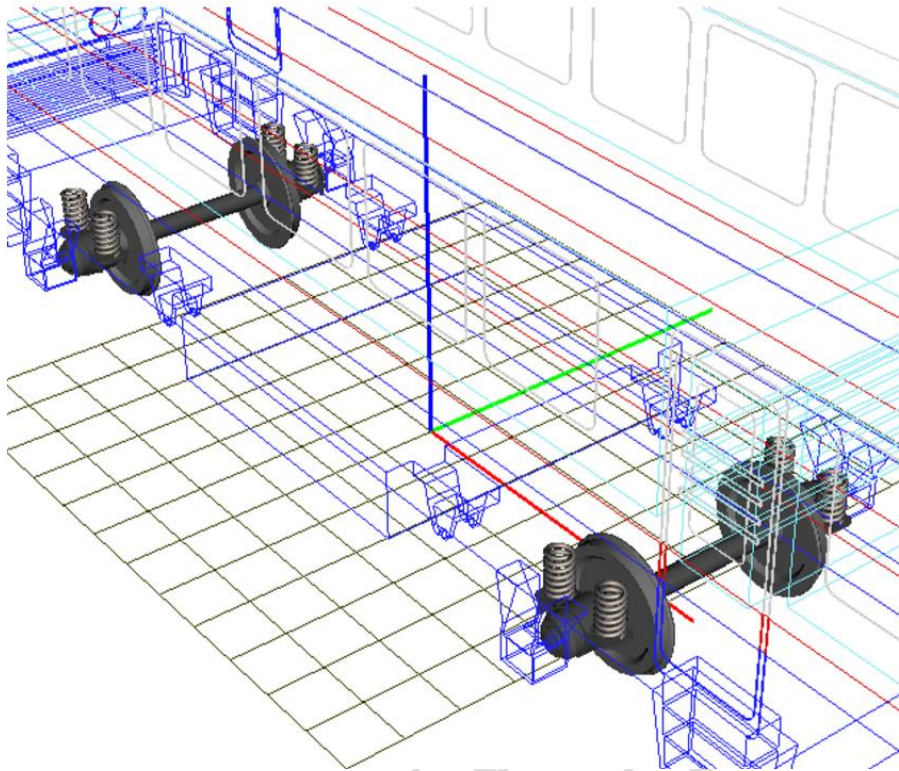


图 2.22

备注：

在左侧模型树选中某个刚体（如：Car body），点右键，选择 **Body wired**，可以设置其为线框显示模式。

2.7.2 斜置减振器力元

减振器一般采用 Bipolar forces 模拟，关于其原理和详细使用方法可以在用户手册第二章和第三章查阅。

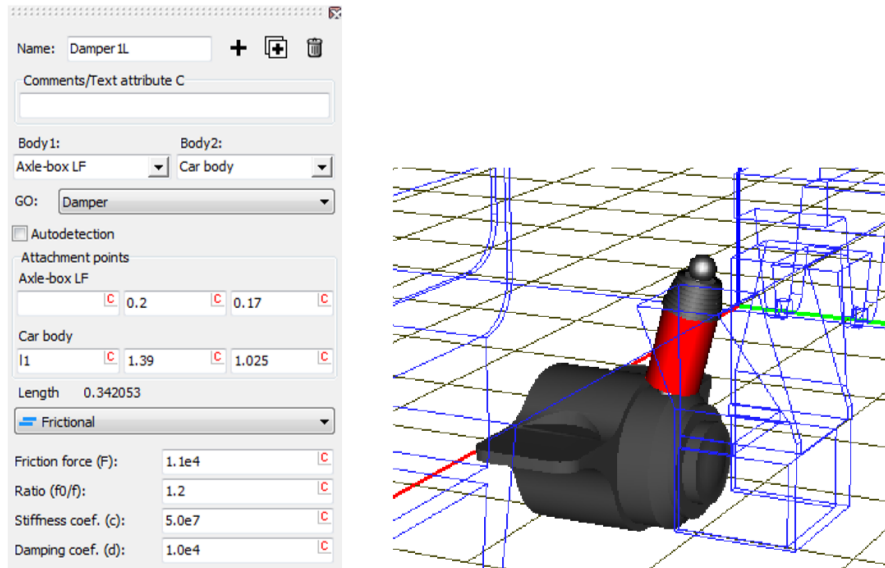


图 2.23

1. 在左侧模型树选中 **Bipolar forces**，点击右侧的 **+** 按钮，添加一个力元，重命名为 **Damper1L**，选择 **Axle-box LF** 作为 **Body1**，**Car body** 作为 **Body2**。
2. 从 **GO** 下拉菜单选择 **Damper** 作为几何图形，定义轴箱连接点坐标(0, 0.2, 0.17)，车体连接点坐标(L1, 1.39, 1.025)。
3. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Frictional** 力元，按图 2.23 所示定义阻尼参数。

另外三个减振器力元可以通过简单的复制和修改操作得到。

4. 第二个减振器命名为 **Damper1R**，**Body1** 为 **Axle-box RF**，连接点坐标分别为(0, -0.2, 0.14)和(L1, -1.39, 1.025)。
5. 第三个减振器命名为 **Damper2L**，**Body1** 为 **Axle-box LR**，连接点坐标分别为(0, 0.2, 0.14)和(-L2, 1.39, 1.025)。
6. 第四个减振器命名为 **Damper2R**，**Body1** 为 **Axle-box RF**，连接点坐标分别为(0, -0.2, 0.14)和(-L2, -1.39, 1.025)。

2.7.3 轴箱拉杆力元

本例中的轴箱拉杆起牵引作用，其作用力始终沿着拉杆长度方向，因此可以选择 Bipolar forces。这里假设它未受载时的自由长度为 1.215m。

1. 在左侧模型树选中 **Bipolar forces**，点击右侧的 **+** 按钮，添加一个力元，重命名为 **Traction rod 1L**，选择 **Axle-box LF** 作为 **Body1**，**Car body** 作为 **Body2**。
2. 选择 **Traction Rod F** 作为几何图形，定义轴箱连接点坐标(-0.285, 0, 0)，车体连接点坐标(L1-1.5, 1.1, 0.525)。
3. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Linear** 力元，按图 2.24 所示定义刚度和初始长度参数， $c_{rod} = 2.5E7$ N/m。

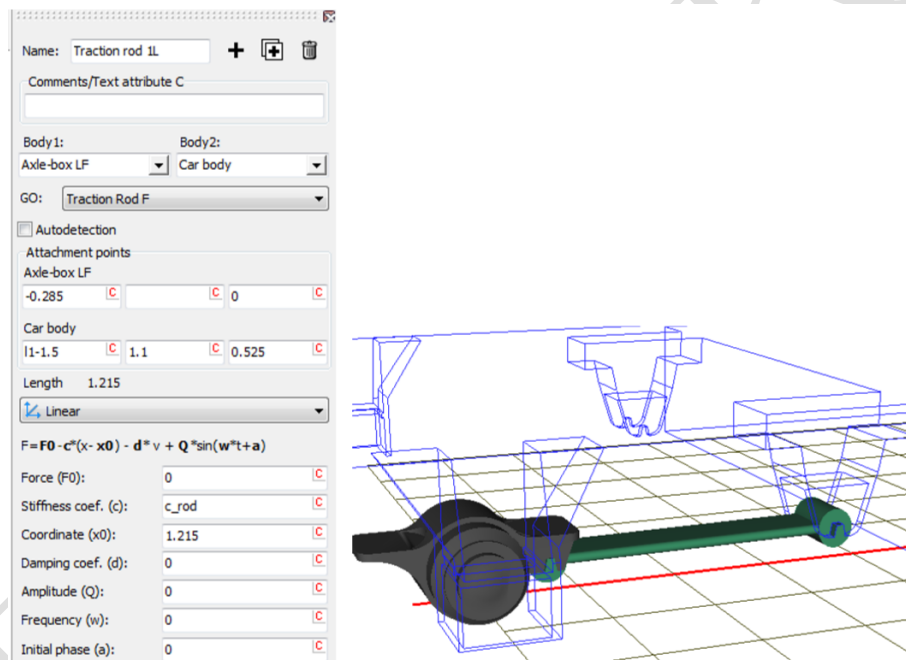


图 2.24

另外三个轴箱拉杆力元可以通过简单的复制和修改操作得到。

4. 第二个轴箱拉杆命名为 **Traction rod 1R**，**Body1** 为 **Axle-box RF**，连接点坐标分别为(-0.285, 0, 0)和(L1-1.5, -1.1, 0.525)。
5. 第三个轴箱拉杆命名为 **Traction rod 2L**，**Body1** 为 **Axle-box LR**，连接点坐标分别为(0.285, 0, 0)和(-L2+1.5, 1.1, 0.525)。
6. 第四个轴箱拉杆命名为 **Traction rod 2R**，**Body1** 为 **Axle-box RR**，连接点坐标分别为(0.285, 0, 0)和(-L2+1.5, -1.1, 0.525)。

请注意，后轮对的两个拉杆使用 **Traction Rod R** 几何图形。

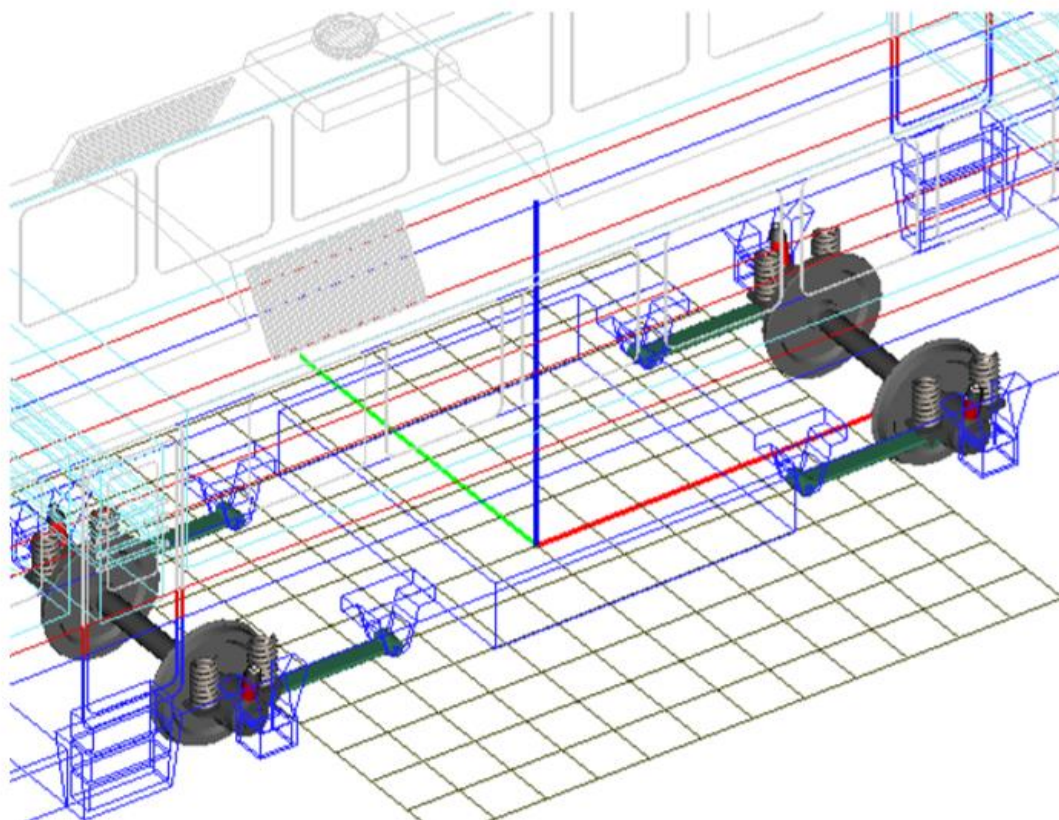


图 2.25

2.7.4 横向减振器力元

横向油压减振器也通常用 Bipolar forces 来描述阻尼特性，与之前的斜置摩擦减振器和轴箱拉杆建模方法类似。

1. 在左侧模型树选中 **Bipolar forces**，点击右侧的 **+** 按钮，添加一个力元，重命名为 **DamperY1L**，选择 **Axle-box LF** 作为 **Body1**，**Car body** 作为 **Body2**。
2. 选择 **Damper** 作为几何图形，定义轴箱连接点坐标(0, 0.32, 0)，车体连接点坐标(L1, 1.7, 0.525)。
3. 从 **Type** 下拉菜单选择 **Linear** 力元，按图 2.26 所示定义阻尼参数， $d1y = 16400 \text{ N*s/m}$ 。

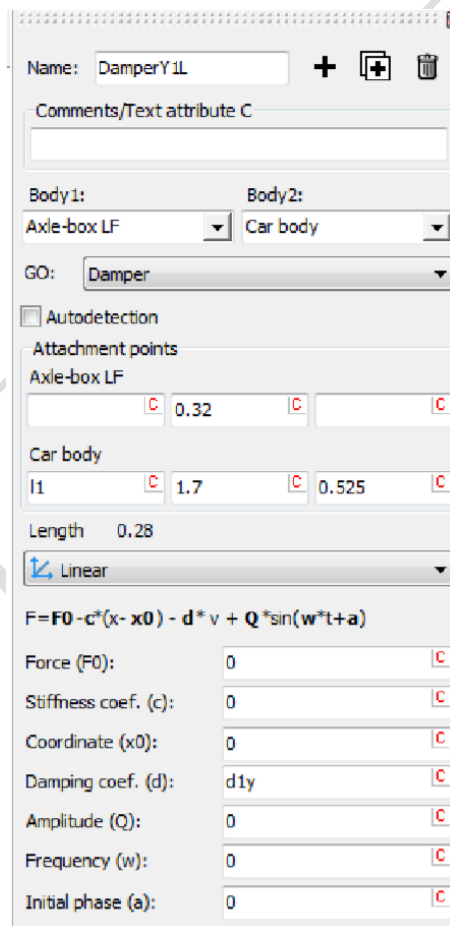


图 2.26

另外三个横向减振器力元可以通过简单的复制和修改操作得到。

4. 第二个横向减振器命名为 **DamperY1R**，**Body1** 为 **Axle-box RF**，连接点坐标分别为(0, -0.32, 0)和(L1, -1.7, 0.525)。

5. 第三个横向减振器命名为 **DamperY2L**, **Body1** 为 **Axle-box LR**, 连接点坐标分别为(0, 0.32, 0)和(-L2, 1.7, 0.525)。
6. 第四个横向减振器命名为 **DamperY2R**, **Body1** 为 **Axle-box RR**, 连接点坐标分别为(0, -0.32, 0)和(-L2, -1.7, 0.525)。

至此，我们完成了 **AC4** 二轴小车的建模工作，如图 2.27 所示。

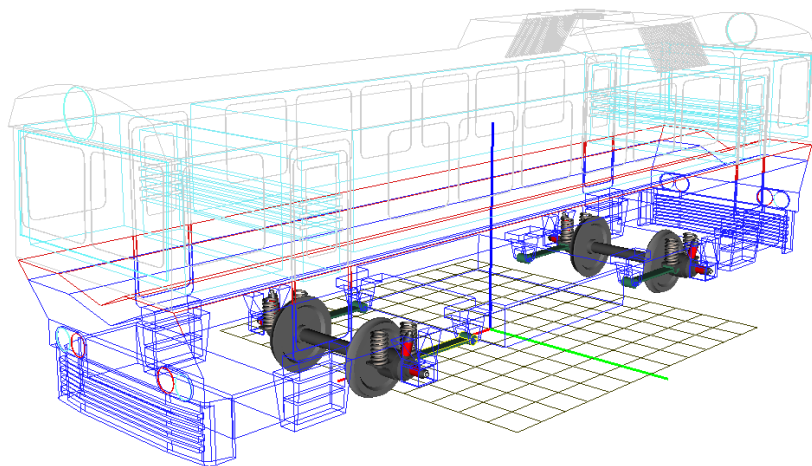


图 2.27

3. 批处理仿真

下面我们用 UM Experiments 模块的 Scanning 工具对 AC4 小车模型进行批处理仿真，在教程《UM 软件入门教程：批处理仿真》里已经介绍过该工具的基本使用方法。

备注：

多体动力学模型完成建模后一般进入仿真程序（普通模式）进行测试计算，如果出现异常，需要再回到建模程序修改。因此，译者不建议直接使用读者自己建的车辆模型进行批处理仿真，以免发生不明错误，这里最好使用 UM 软件自带的例子，它位于{UM Data}\SAMPLES\Rail_Vehicles\ac4。

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

3.1 新建 Scanning 项目

本次仿真的目标是通过 Scanning 批处理工具仿真找到 AC4 小车的非线性临界速度。

3.1.1 前言

对于铁道车辆动力学性能研究和参数优化，各个国家都有一些标准和指标。稳定性是其中最重要的一个评价指标，一般使用非线性临界速度来衡量。

使用计算机仿真技术可以快速找到车辆的临界速度。我们可以施加一个特殊的轨道不平顺激励，让车辆在轨道上以不同的速度运行，通过分析其横向振动特性就可以判断临界速度。

备注：

通过仿真手段求解铁道车辆临界速度的方法有多种，读者可查阅用户手册第八章以及其他参考文献，本例只是采用其中一种简单方法。

车辆横向振动特性可以通过轮对相对轨道的横向振动位移的标准差来分析。

如图 3.1 所示，黑色曲线对应车速 30m/s 下的第一位轮对横向位移时程，绿色曲线则对应 90m/s 车速。显然，车辆在 30m/s 速度运行是稳定的，而在 90m/s 时为失稳状态。

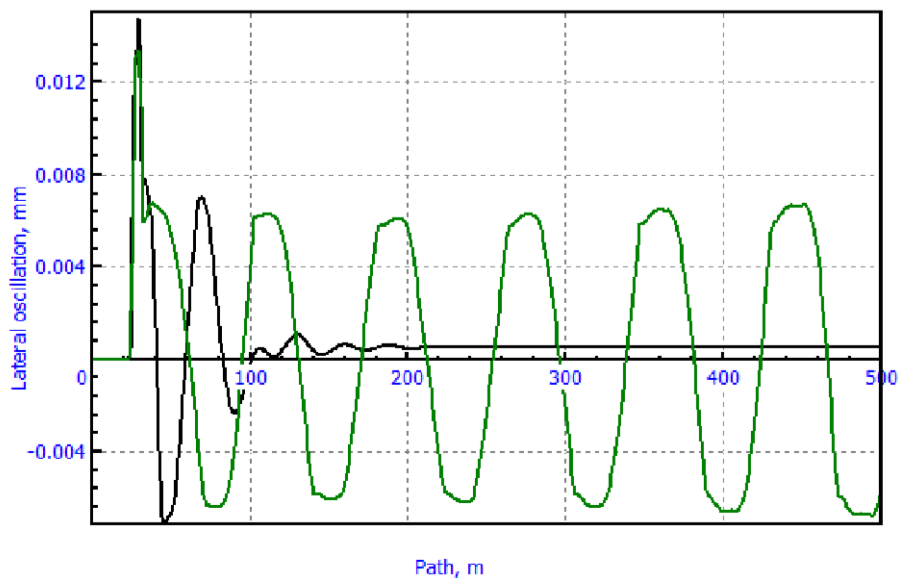


图 3.1

如果在 30m/s 和 90m/s 速度区间选取一系列速度值进行仿真计算，统计出每个速度下轮对横向振动位移的标准差，最后以速度为横坐标，可以得到轮对横移标准差随速度变化的关系，如图 3.2 所示，该图就能反应车辆振动随着速度增加由稳定到失稳的过程。

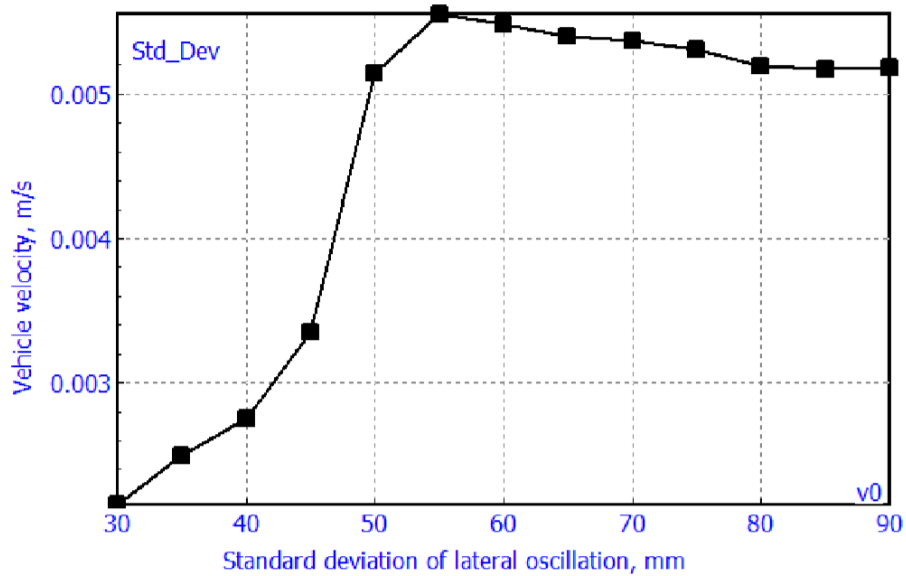


图 3.2

3.1.2 新建 Scanning 项目

1. 运行 **UM Simulation** 仿真程序。
2. 选择菜单 **Scanning | New project**。

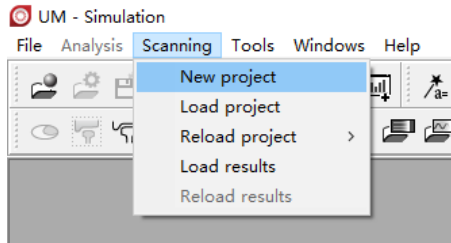


图 3.3

3. 定义 Scanning 批处理项目的名称(**Scan1**)和路径。

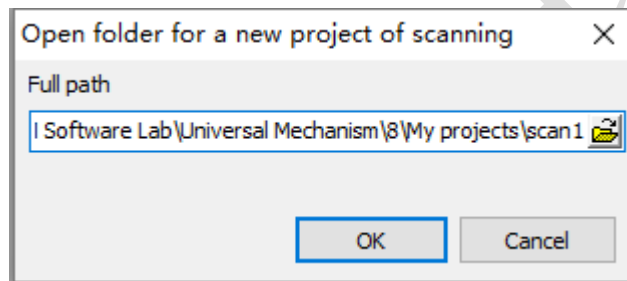


图 3.4

4. 点击 **OK** 和是(Y)，创建目录，弹出 Scanning 界面，如图 3.5 所示。

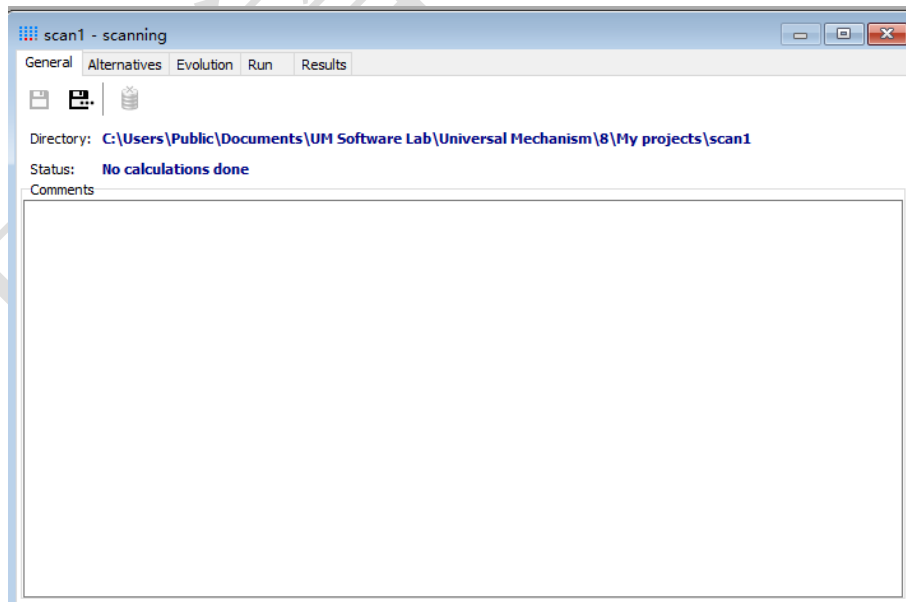


图 3.5

3.1.3 加载模型

1. 定位到 **Alternatives** 页面。
2. 点击按钮 **+**，添加一个模型到 Family of Alternatives。
3. 在弹出对话框，找到 AC4 模型，如图 3.6 所示。

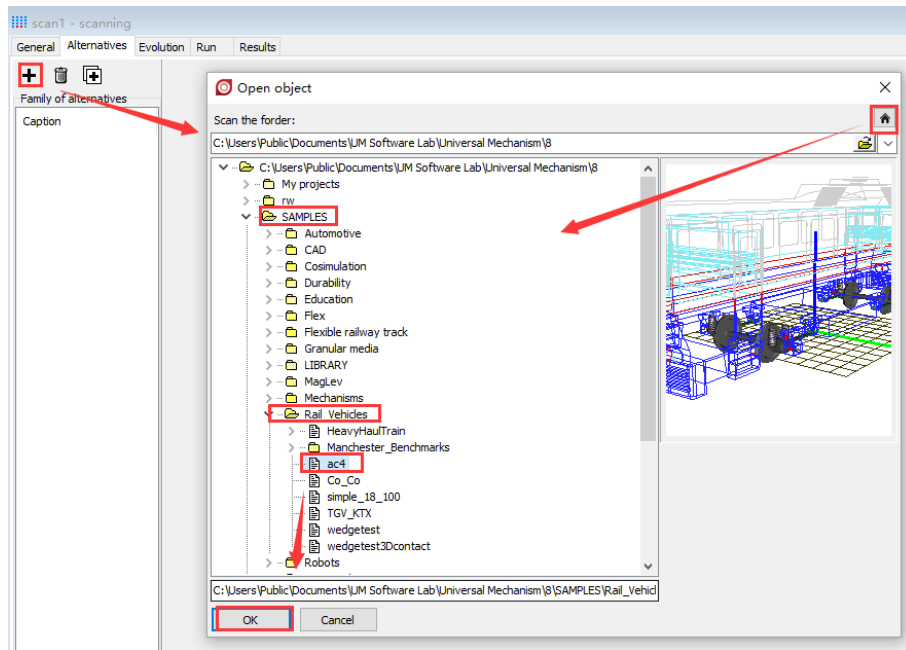


图 3.6

4. 关闭所有动画窗口和绘图窗口。

3.1.4 设置变速度参数

1. 在本例中，我们只研究车辆速度这一个参数的变化对系统动力学性能的影响。
2. 请先检查速度单位是否设置为 **m/s**（工具栏）。



图 3.7

3. 在 Scanning 界面右侧参数列表，点击 **Whole list | v0**。
4. 在弹出窗口选择 **Loop** 循环模式，设置 Execute 数为 **13**，区间为**[30, 90]**，点击 **Convert to list of values**，就得到从 30m/s 到 90m/s 相邻间隔 5m/s 的 13 个速度值（亦可手动输入）。

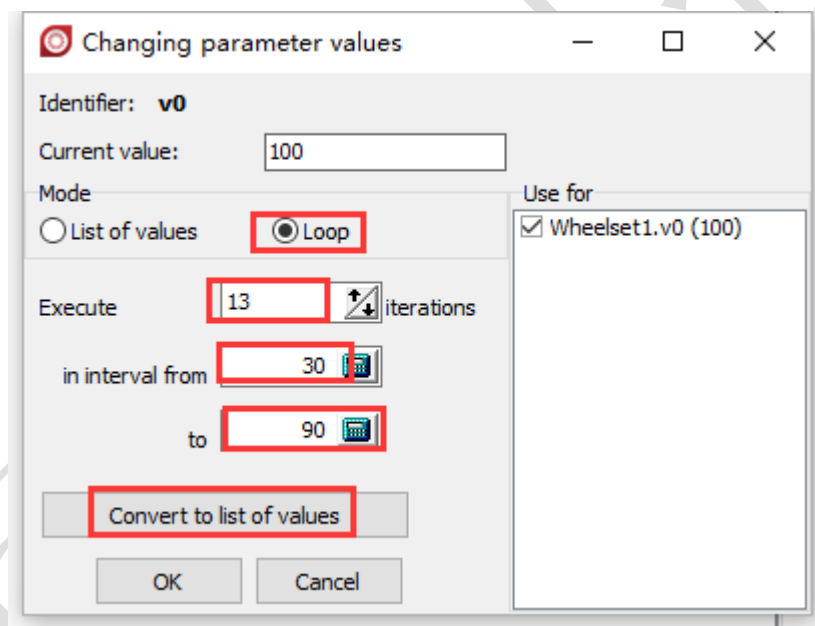


图 3.8

5. 在 **Hierarchy of parameters** 页面选中 **Group1**，点右键，重命名为 **v0**。

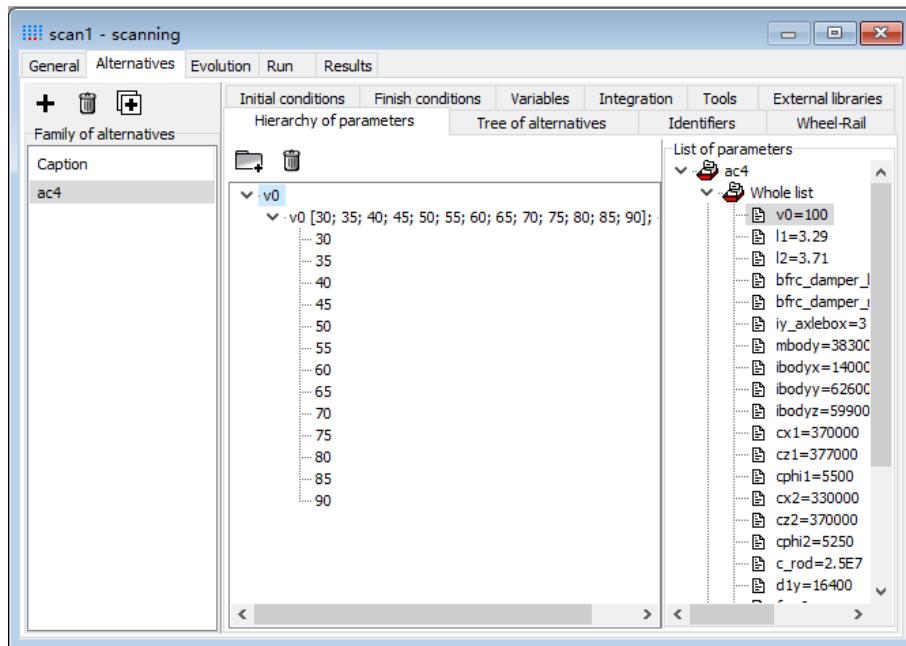


图 3.9

3.1.5 配置轮轨

1. 先定位到 **Alternatives | Wheel-Rail | Track | Model and parameters** 页面，选择轨道模型 **Massless rail**。
2. 然后到 **Alternatives | Wheel-Rail | Track | Macrogeometry** 页面，设置铁路线形为 **Tangent**。
3. 再到 **Alternatives | Wheel-Rail | Track | Irregularities** 页面，设置轨道类型为 **Uneven**，不平顺类型为 **From file**。
4. 设置左右轮垂向不平顺样本文件为 **NoIrregularities.way**，左右轮横向不平顺样本文件为 **g10_20.way**。
5. 切换到 **Alternatives | Wheel-Rail | Profiles** 页面，设置车轮型面为 **newlocow**，钢轨型面为 **r65new**。
6. 切换到 **Alternatives | Wheel-Rail | Contact | Contact forces** 页面，选择轮轨蠕滑模型 **FASTSIM**。

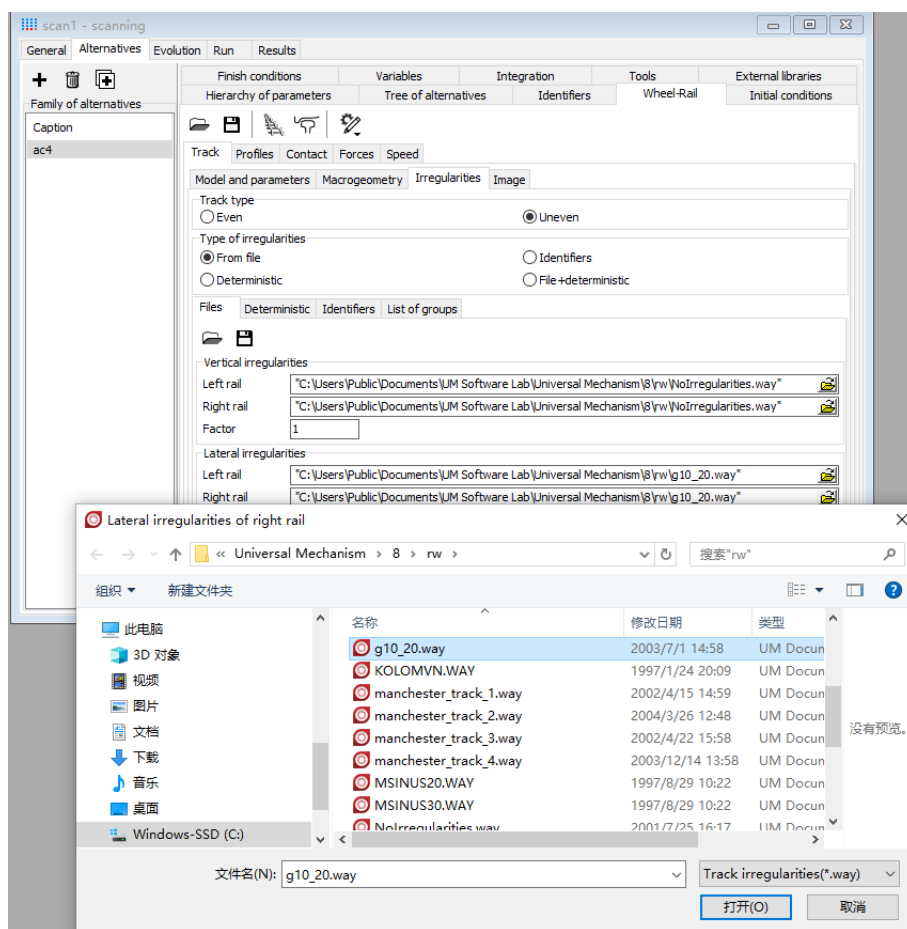


图 3.10

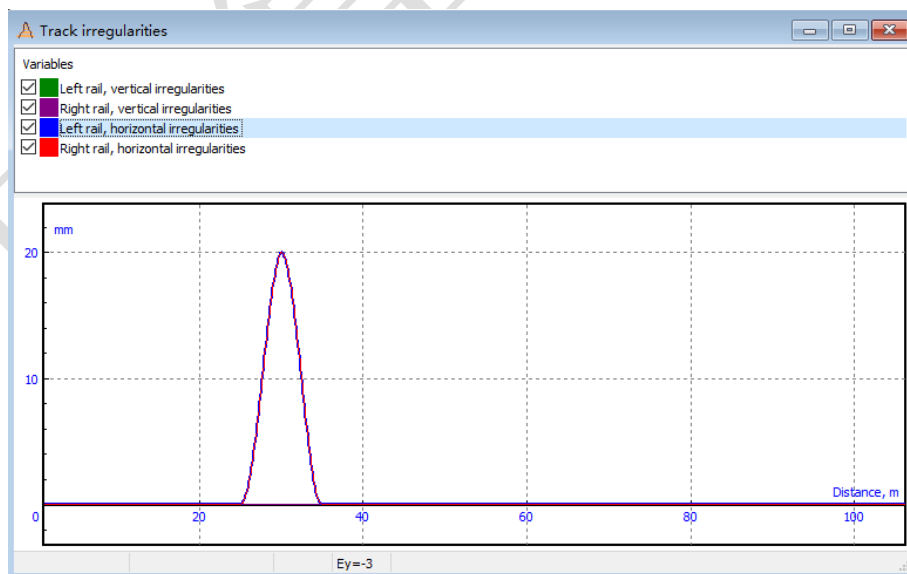


图 3.11

3.1.6 积分参数

1. 定位到 **Alternatives | Integration | Simulation process parameters** 页面。
2. 选择 **Park** 求解器。
3. 设置容差为 **1E-6**。
4. 勾选 **Computation of Jacobian** 和 **Jacobian for wheel/rail forces**。

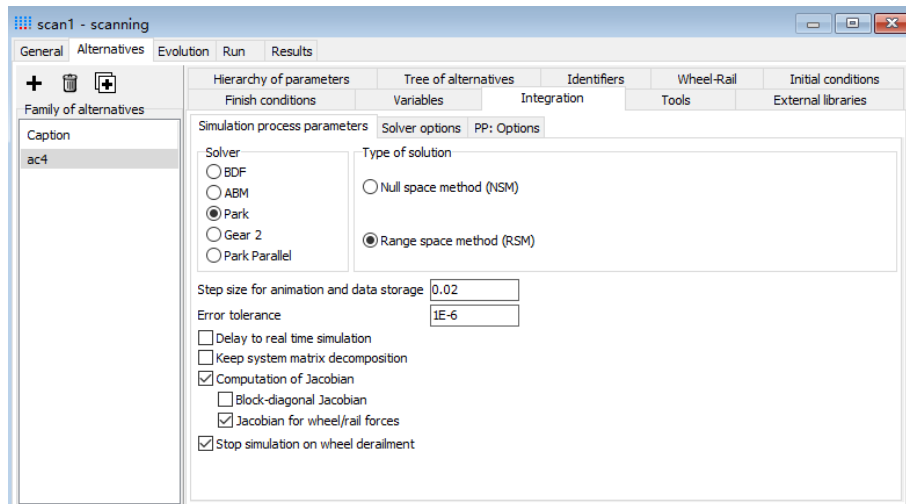


图 3.12

3.1.7 终止条件

我们在普通模式进行单次工况仿真时需要设定仿真终止条件，现在 Scanning 批处理时同样也需要。在这里可以统一为所有工况设定一个相同的终止条件，理论上任意变量都可以。对于车辆动力学仿真，常用的是时间和距离变量。

1. 定位到 **Alternatives | Finish conditions** 页面。
2. 缺省终止条件为车辆运行距离，修改数值为 **500m**。

备注：

如果需要定义其他变量作为终止条件，请在变量向导 **Wizard of variables** 里创建并拖入替换当前的 **Distance** 变量，并设定相应的数值。

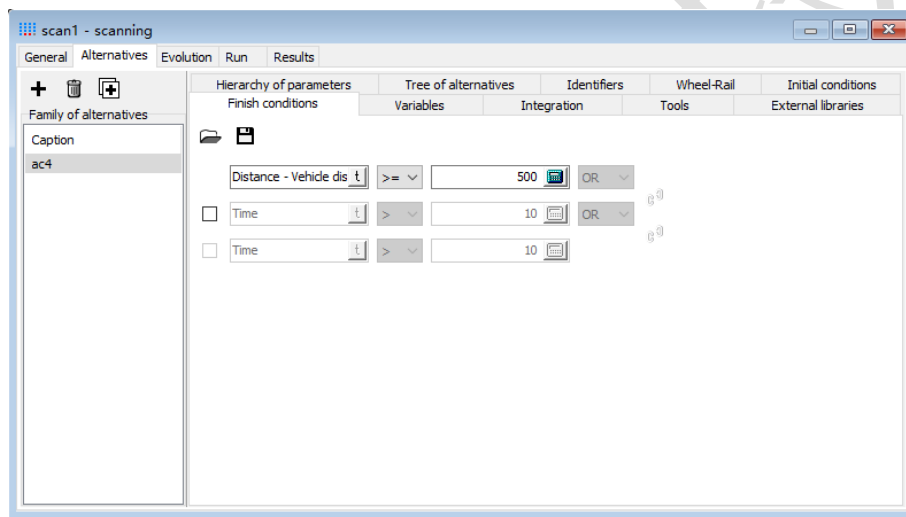


图 3.13

3.1.8 保存变量

1. 定位到 **Alternatives | Variables** 页面。在这里可以加载一个变量列表，用于储存每个工况的计算结果，详细操作请查阅用户手册第四章。
2. 点击  按钮，将列表名称修改为 **Stability**。
3. 选择菜单 **Tools | Wizard of variables**，打开变量向导。
4. 定位到 **Linear variables** 页面，在左侧选中刚体 **Wheelset1.West**，在右侧界面选择 **位移（坐标）的 Y 分量**，点击按钮 ，创建一位轮对横移变量，并拖入 **Stability** 列表。
5. 定位到 **Railway vehicle** 页面，创建 **Distance** 变量，拖入 **Stability** 列表。

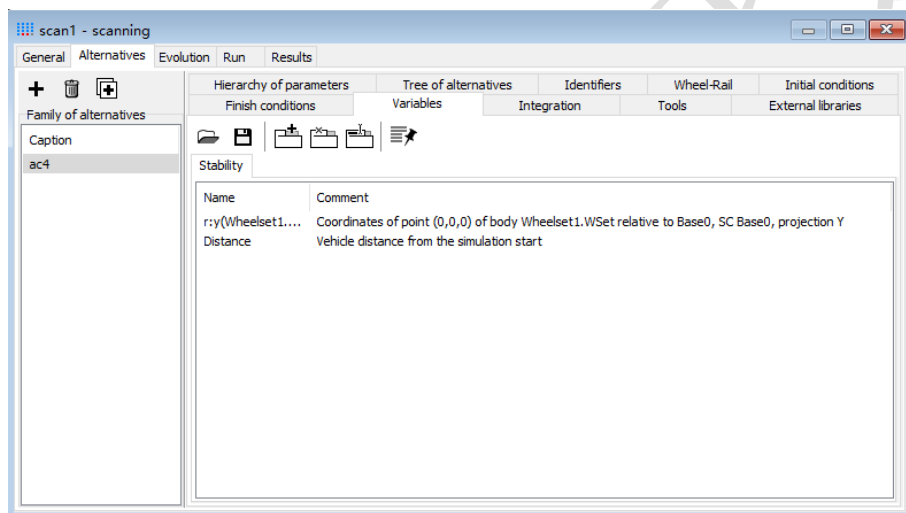


图 3.14

至此，完成了 Scanning 批处理仿真工况的配置。

3.2 运行批处理仿真

1. 定位到 **Run** 页面。
2. 如果批处理工况设置没有严重的逻辑问题，在消息区会显示 “**Error not found**”。
3. 点击 **Run**，开始仿真。

批处理仿真支持多线程并行计算，程序自动判断出计算机可用的最大线程数，可自由分配数量，如图 3.16 所示，全部工况的仿真工作在 10s 之内全部完成。

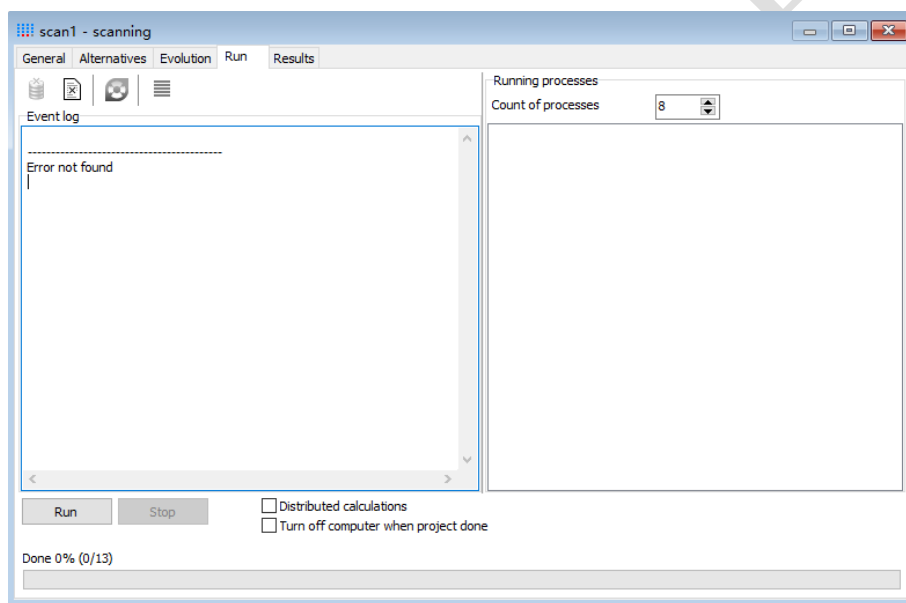


图 3.15

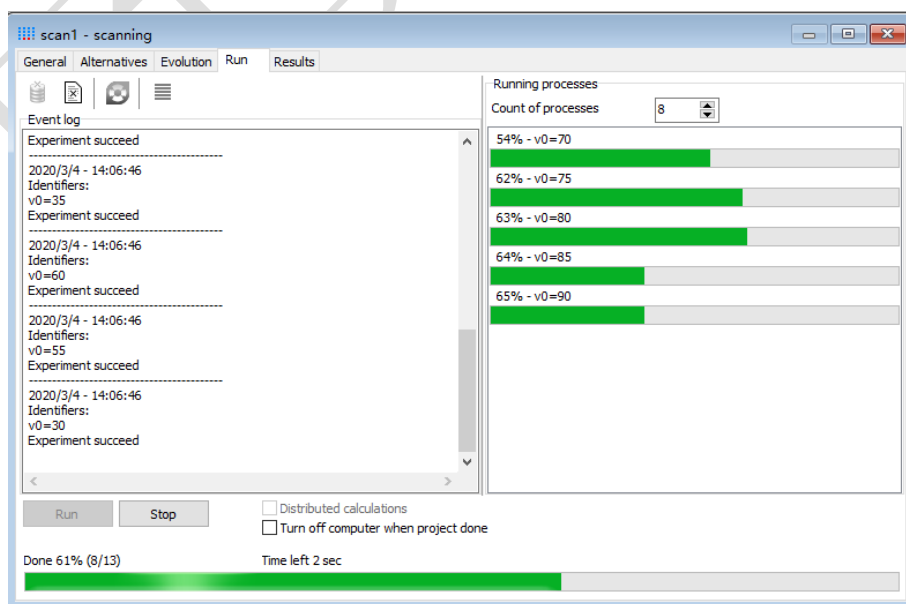


图 3.16

3.3 结果分析

3.3.1 单个工况结果

最后，我们分析车辆动力学仿真计算的结果。

1. 定位到 **Results | Families | AC4** 页面。

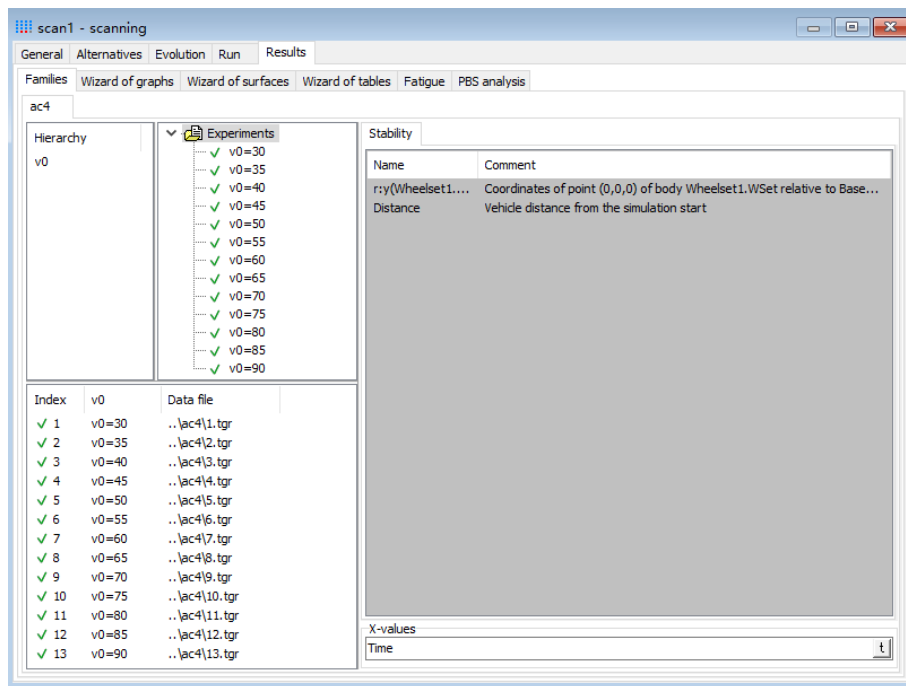


图 3.17

我们先来对比 30m/s 和 90m/s 两个速度工况的结果。由于终止条件是运行距离，因此使用 Distance 作为横坐标会更便于对比。

2. 在 **Stability** 变量列表选择 **Distance**，并拖入 **X-values**，作为横坐标（缺省为时间），如图 3.18 所示。

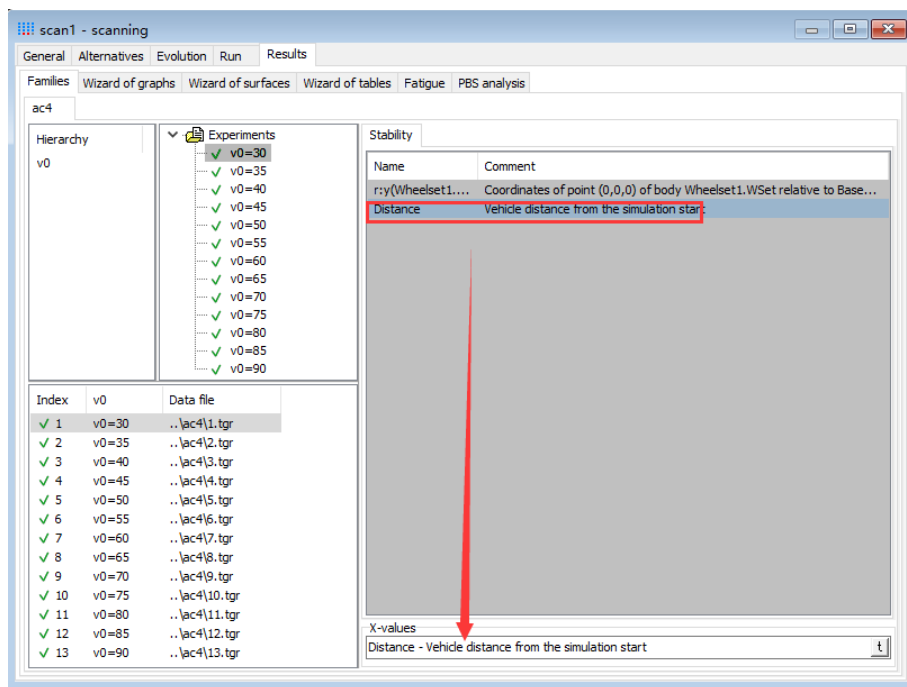


图 3.18

3. 选择菜单 **Tools | Graphical window**，打开一个绘图窗口。
4. 在 Scanning 仿真结果界面，选中 **v0=30** 工况，再选择变量 **r:y(Wheelset1.Wset)**，将其拖入绘图窗口。
5. 以同样的方法，再将 **v=90** 工况的 **r:y(Wheelset1.Wset)**变量拖入绘图窗口，如图 3.19 所示。

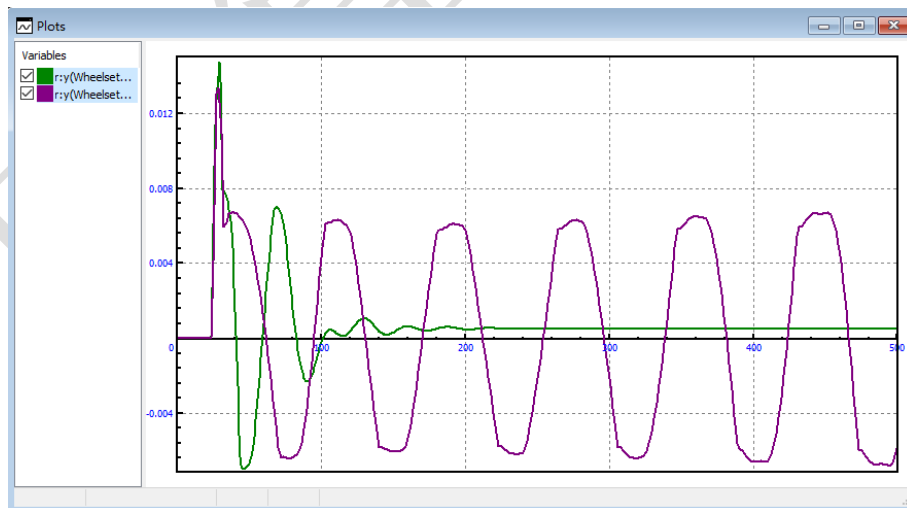


图 3.19

很明显，速度 30m/s 时，车辆运动稳定收敛，而在 90m/s 时则失稳。

3.3.2 多工况统计图表

Scanning 模块提供了多个后处理工具，如：统计图、统计表和响应曲面。

下面我们来绘制一位轮对相对轨道横向振动位移的标准差随车辆速度变化的统计图。

1. 定位到 **Results | Wizard of graphs** 页面。
2. 在左侧变量列表选中 **r:y(Wheelset1.Wset)**。
3. 在 **Functional** 下拉菜单选择统计函数 **Std_Dev**（标准差）。
4. 在右侧图表区下方选择横坐标参数 **v0**。
5. 点击图表区上方的  按钮，绘制出横向位移标准差随车速变化的统计图。

由图 3.20 可知，临界速度大约位于 45-50m/s 区间。

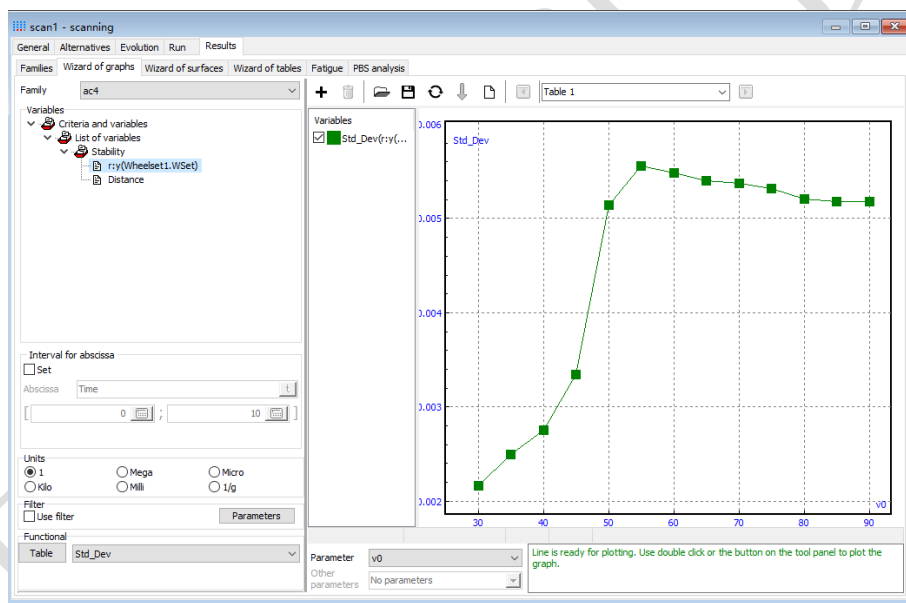


图 3.20