

UM Loco 模块里的几种铁路轮对模型

UM Loco 是 **UM** 软件的铁路机车车辆动力学仿真专业模块，包含一系列专用工具和算法，可用来建立单轮对、转向架、整车、多车编组和列车模型，进行各种工况的动力学仿真。

UM Loco 模块提供了用于铁路交通的多种轮对模型，按车轮属性可分为刚性轮和柔性轮两类。其中，软件自带的属于刚性轮，从外部有限元软件导入的为柔性轮。在 **UM** 软件里，虽然用柔性铰（**Bushing**）连接刚性轮也能实现一种简化的具有一定柔性的轮对，但软件里的**柔性轮对**特指采用有限元法和模态综合技术的轮对模型，这是真正意义上的柔性。

1. 标准轮对

UM Loco 里任何轮对都是以一个子系统的形式存在，基于刚性轮的轮对子系统(**Wheelset**)是全参数化的，用户直接调用修改车轮名义滚动圆半径(**Radius**)、名义跨距之半(**Semibase**)、轮对质量(**mwset**)和转动惯量(**ixwset**、**iywset**、**izwset**)等参数即可使用，必要时还可以进入子系统(**Edit subsystem**)修改模型。

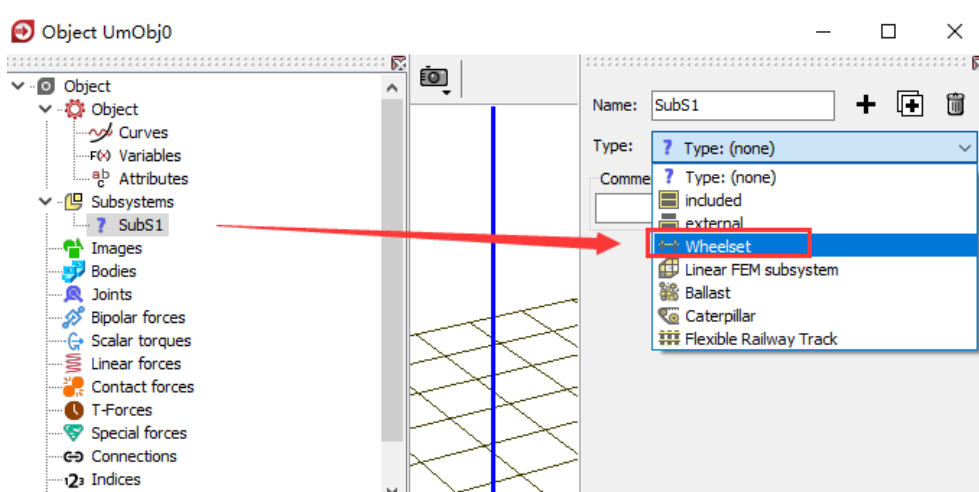


图 1 添加轮对子系统

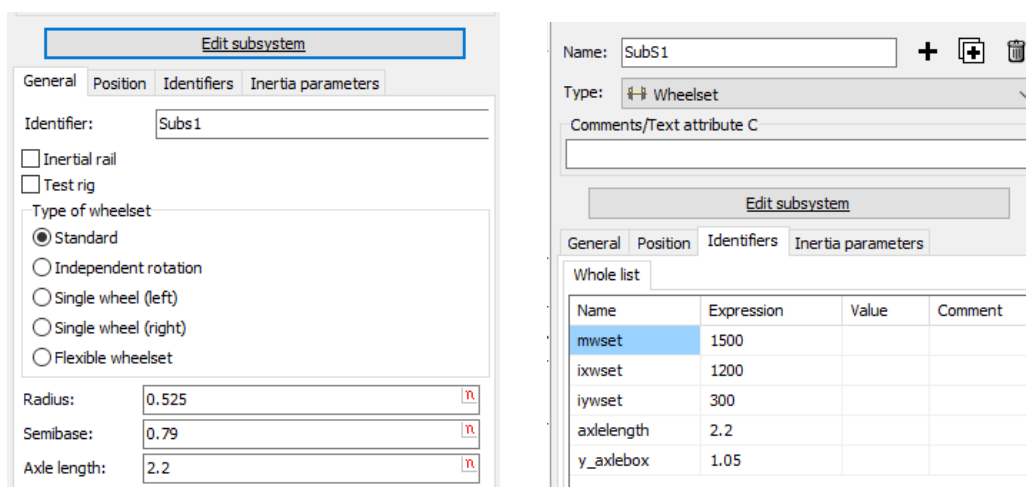


图 2 轮对选项和参数

软件缺省为常规的标准轮对（**Standard**），即两个刚性车轮和一个刚性车轴固结在一起（过盈配合），相当于一个具有 6 个自由度的刚体，如图 3 所示。

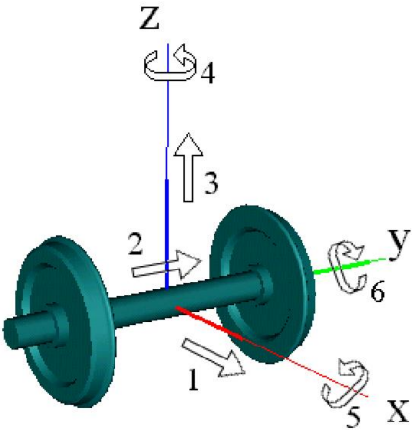


图 3 六自由度标准轮对

在标准轮对子系统模型里，软件将这 6 个自由度的刚体一分为二（5+1），这在动力学上是等效的。第一个是 **Wset**，它具有除绕 Y 轴转动（点头运动）以外的 5 个自由度；第二个是 **WSetRotat**，它没有质量，只有 1 个绕 Y 轴的转动惯量及自由度。为了显示出轮对的滚动效果，轮对的几何图形也是赋给 **WSetRotat**，而 **Wset** 没有几何图形。在早期的车辆动力学仿真时，限于硬件条件，常常忽略轴箱，UM 轮对的这种处理方式便于用一定长度的一系悬挂力元直接连接轮对和构架。在这种情况下，一系悬挂在轮对上的连接物体是 **Wset**，设想如果连接点在 **WSetRotat** 或一个 6 自由度刚体上，当轮对滚动时会发生什么情况。

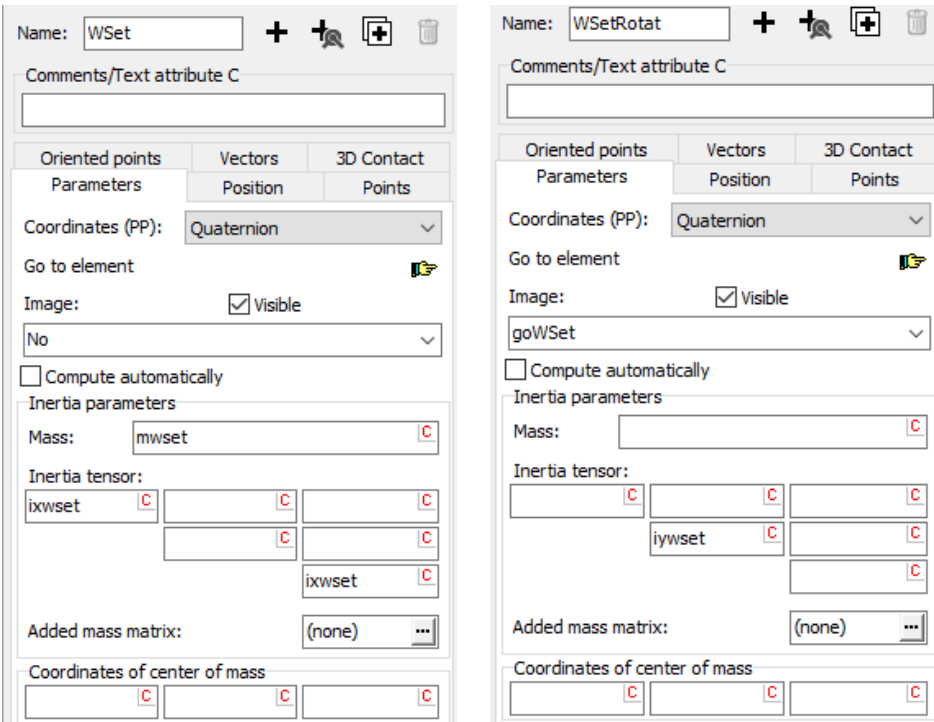


图 4 轮对的质量和转动惯量参数

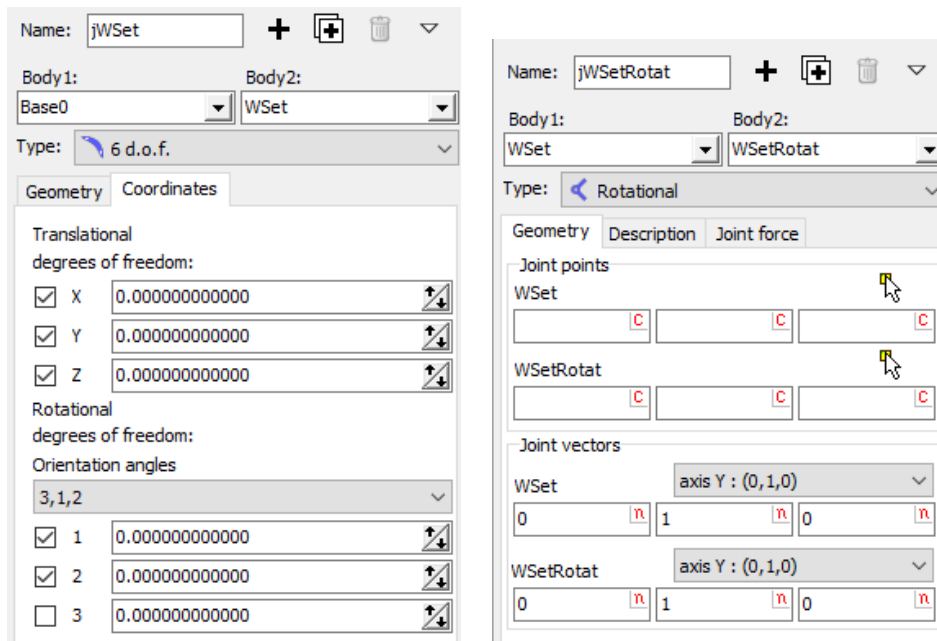


图 5 轮对的铰参数（自由度）

众所周知，一个刚体在空间定点的任意姿态可通过三次连续的转动实现，常用欧拉角坐标或卡尔丹角坐标描述（数字 **1**、**2**、**3** 分别代表转轴 **X**、**Y**、**Z**），这两种方法都会在某些特殊位置存在奇异（无唯一解）。

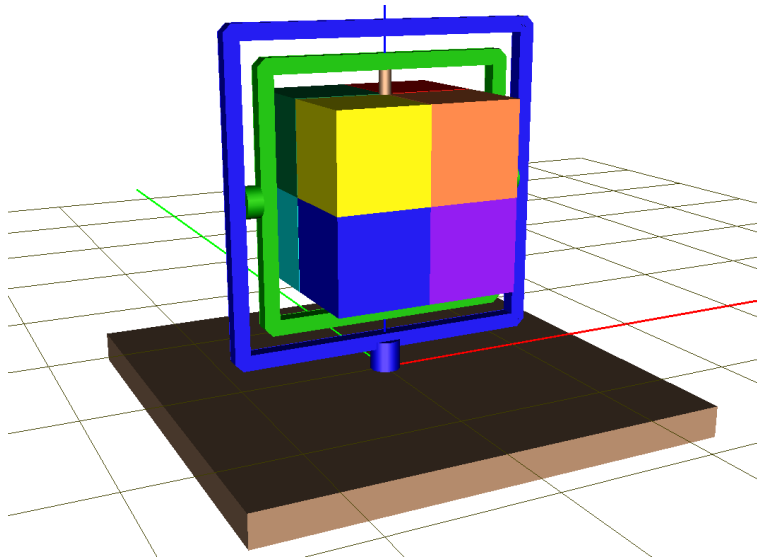


图 6 欧拉角坐标示意

对于如图 6 所示的欧拉角坐标（**3**，**1**，**3**），先让外框相对支座绕其 **Z** 轴转动一定角度，然后内框相对外框绕其 **X** 轴转动一定角度，最后中间的物体相对内框 **Z** 轴转动一定角度。显然，当第二次转动为 **0°** 或 **180°** 时，第一次和第三次转动轴在空间是重合的，无唯一解，会发生奇异。

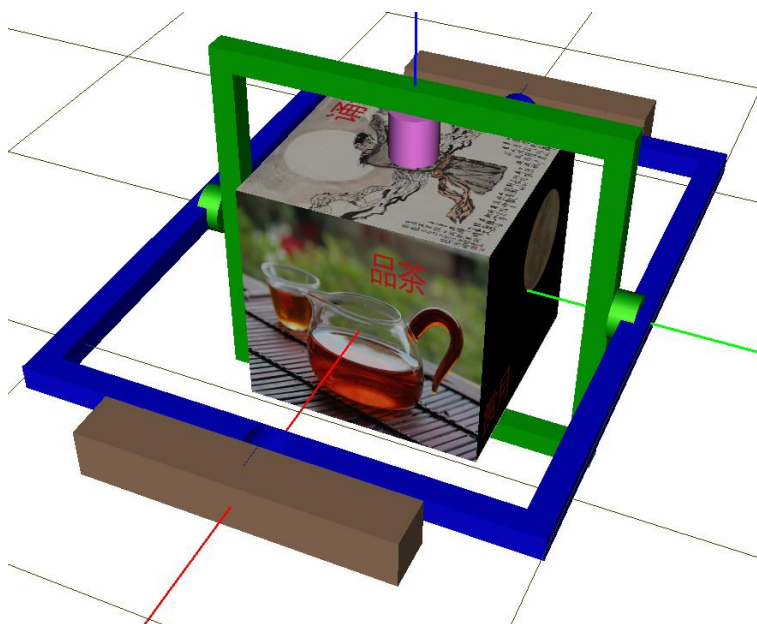


图 7 卡尔丹角坐标示意

对于如图 7 所示的卡尔丹角坐标 (1, 2, 3)，先让外框相对支座绕其 **X** 轴转动一定角度，然后内框相对外框绕其 **Y** 轴转动一定角度，最后中间的物体相对内框 **Z** 轴转动一定角度。显然，当第二次转动为 90° 或 -90° 时，第一次和第三次转动轴在空间是重合的，无唯一解，会发生奇异。

对于铁路车辆，一般不出现侧翻的工况，故使用卡尔丹角 (3, 1, 2)，如图 5，这在以后使用柔性轮对时需要特别注意。

2. 独立轮对

独立轮对 (**Independent rotation**) 是在标准轮对的基础上，将绕 **Y** 轴的转动自由度一分为二，即左右车轮可分别相对车轴转动 (解耦)，模型共 7 个自由度。这种轮对常用于低地板有轨电车。

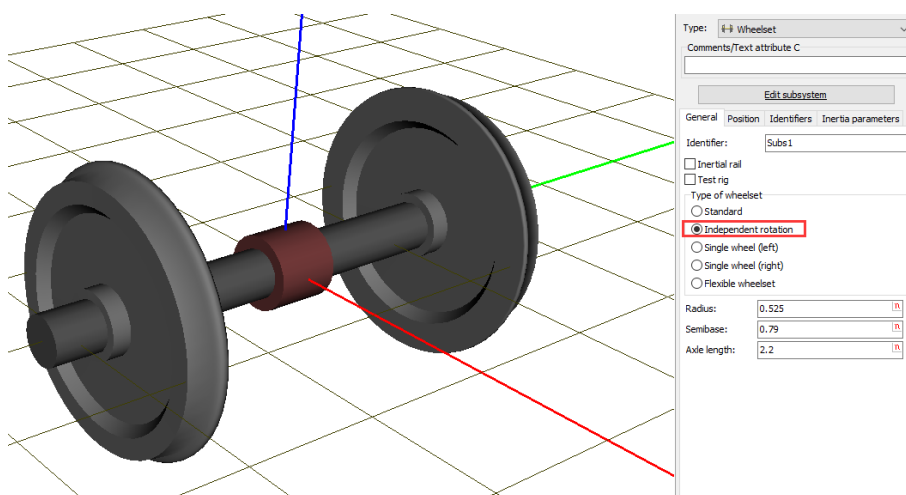


图 8 七自由度独立轮对模型

基于这种模型可以模拟车轴的扭转，如图 9 所示，给铰 **jWsetRightWheel** 添加一个 **Joint force**，并定义相应的扭转刚度和阻尼系数。

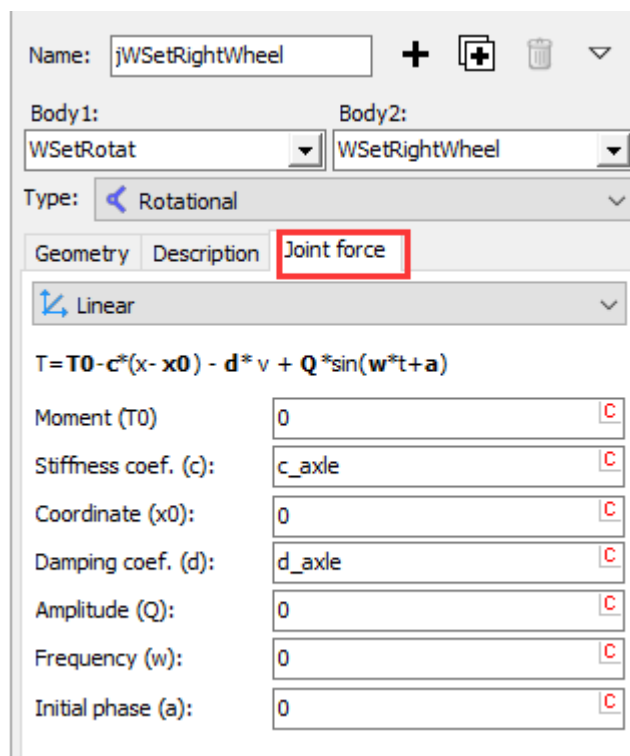


图 9 考虑车轴扭转刚度和阻尼
扭转刚度和阻尼系数可以通过以下公式计算得到。

$$c = \frac{I_y(2\pi f)^2}{2}, d = 2\beta \sqrt{\frac{I_y c}{2}}$$

式中, c 是扭转刚度, d 是扭转阻尼, f 是一阶扭转频率, I_y 是车轮转动惯量, β 是阻尼比。

3. 单轮

单轮 (**Single wheel**), 其左、右车轮分别具有六个自由度, 这种模型可用于独立悬挂系统建模 (解耦更多自由度)。

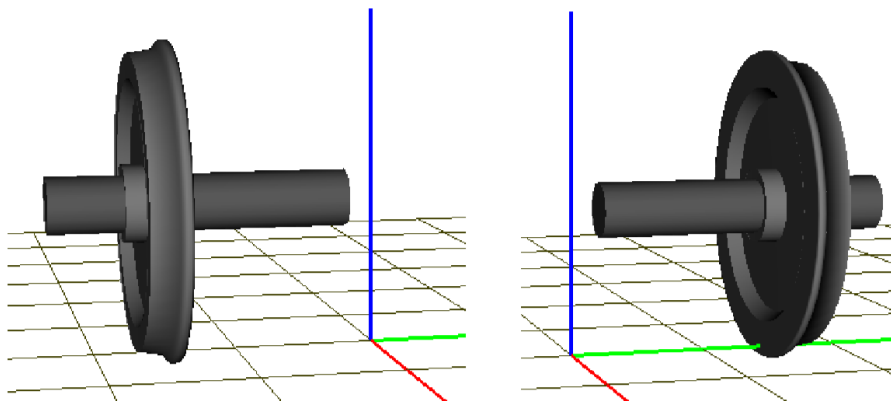


图 10 单轮模型

显然，如果用 **Bushing** 力元（柔性铰）将左、右独立车轮连接起来，就可以简化地模拟车轴的扭转和弯曲特性。

4. 柔性轮对

采用前述基于刚性车轮的传统轮对模型进行车辆动力学仿真分析时，一般有效频率都低于 **50Hz**。由于未考虑车轮本身的柔性，有些研究工作如是无法合理有效地进行的，如：轮轨高频振动分析、轮对应力应变状态分析、车轮非圆化和钢轨波浪形磨耗研究等。**2017** 年，**UM** 软件推出基于有限元法和模态综合法的 **Flexible Wheelset** 柔性轮对专业模块，联合使用之前发布的 **Flexible Railway Track** 柔性轨道模块，其计算结果的有效频率可达 **5000Hz**。**UM** 的柔性轮对可完全替换刚性轮对，通过踏面上轮轨接触点附近的网格节点传递轮轨力，相比刚性轮对有更高的计算精度，相比完全有限元法有更高的计算效率。

由于轮对和钢轨本身具有较大的刚度，轮轨接触力又通常集中在很小的一个区域，因此即使接触点位置和相对速度发生很小的变化，都会引起接触力发生大的变化。只有同时考虑轮对和钢轨的柔性，才能更精确地计算轮轨接触力、预测轮轨磨耗和分析高频振动问题。基于各种工况下轮对的应力应变载荷，还可进一步做疲劳耐久性分析。

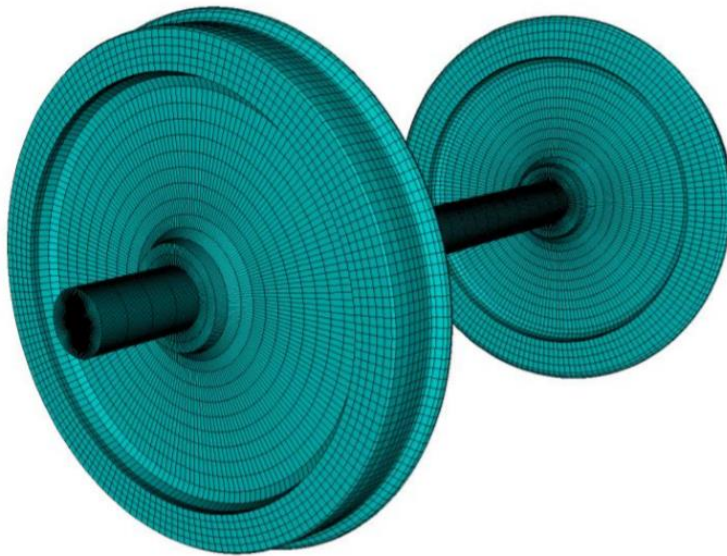


图 11 柔性轮对模型

使用**柔性轮对**模块（在 **UM** 里特指从有限元软件导入），需要用到 **UM Loco** 和 **UM FEM** 模块。从有限元软件将柔性轮对模型导入 **UM** 的方法与一般柔性体无异，在用户手册第 11 章有详细介绍。这里需要特别提醒的是：应先建立整个轮对的二分之一截面（YZ 平面，如图 12），踏面的线条应与实际的踏面外形（wpf 文件）吻合，且在名义滚动圆处必须有节点（K）；然后以固定的步长（角度增量 $\Delta\alpha$ ）旋转扫掠生成轮对的三维回转体模型，这样便于 **UM** 程序自动根据有规则的节点编号判定接触区域；一般选取轴箱的铰接点作为界面节点，需定义两个质量单元，并做局部刚化（具体操作方法请见用户手册第 11 章）。

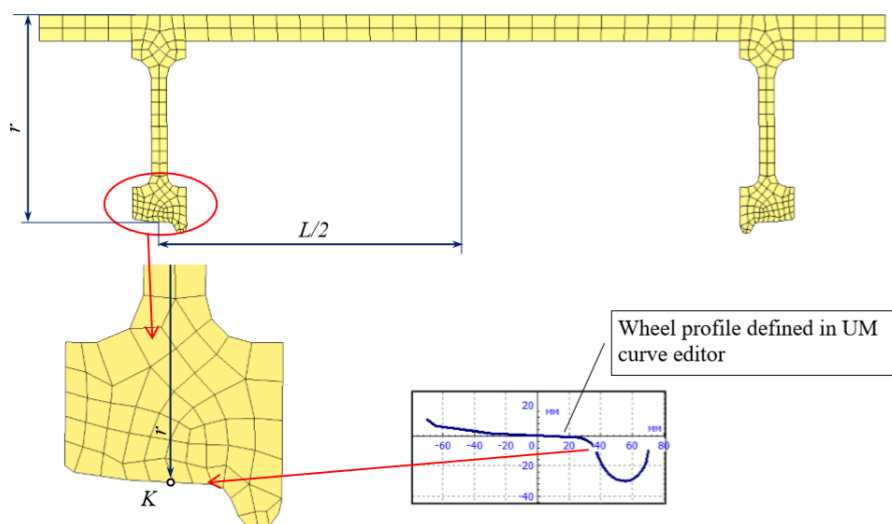


图 12 轮对二分之一截面

请注意，在 **UM** 软件里使用柔性轮对时，必须首先添加一个轮对子系统，并选择 **Flexible wheelset**，设置与模型一致的名义滚动圆半径和横向跨距之半参数值，然后点击 **Edit subsystem** 进入子系统，再以柔性子系统的形式导入柔性轮对模型。

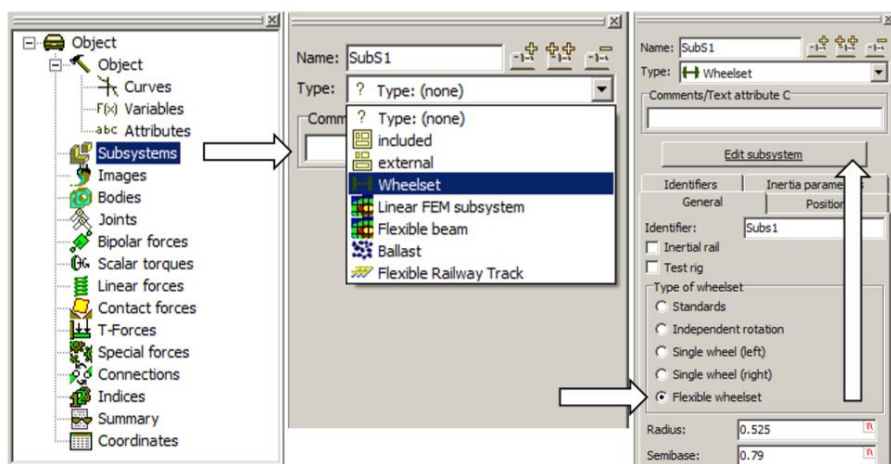


图 13 柔性轮对选项

请注意，在柔性轮对子系统的 **General** 页面，必须选择卡尔丹角坐标 (**3, 1, 2**)，如图 14，否则无法计算。

如果需要，用户还可以在该子系统里添加其他物体和力元（若齿轮箱等结构通过铰连接柔性轮对的车轴，那么相应位置也应设有界面节点）。

请注意，在 **UM** 软件里，每个刚体都至少要定义一个铰，而对于柔性体则没有严格要求，即柔性轮对无需单独建立相对总体坐标系 (**Base0**) 的六自由度铰。然而，如果轴箱和柔性轮对用铰连接，则需要额外增加一个轴箱相对总体坐标系的六自由度铰，以满足多体系统拓扑结构的基本要求，否则无法求解。

对于建模逻辑上的严重问题，软件会自动检查出，如图 15 所示。

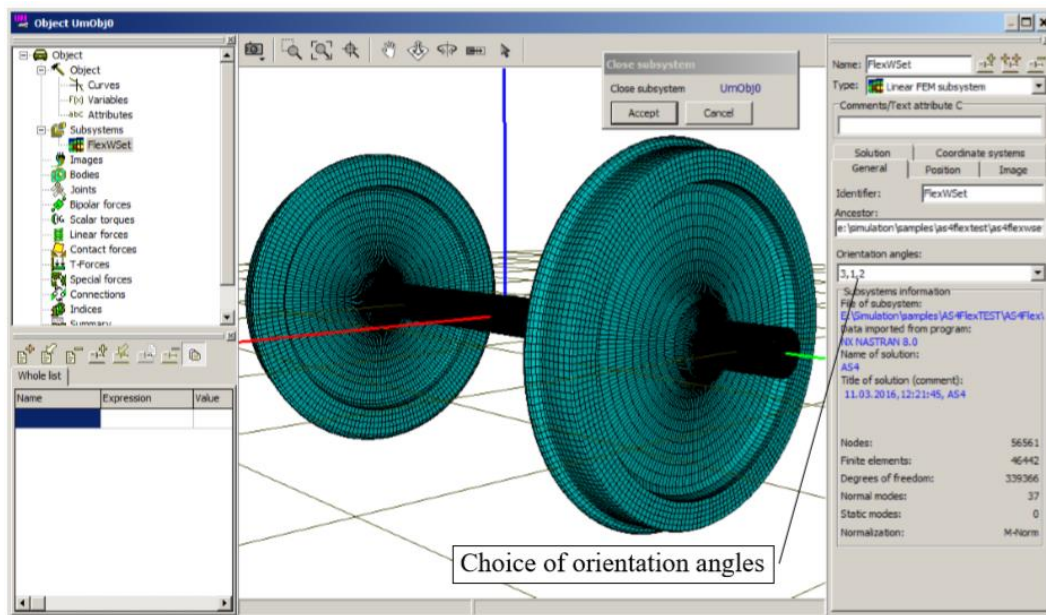


图 14 选择方向角坐标

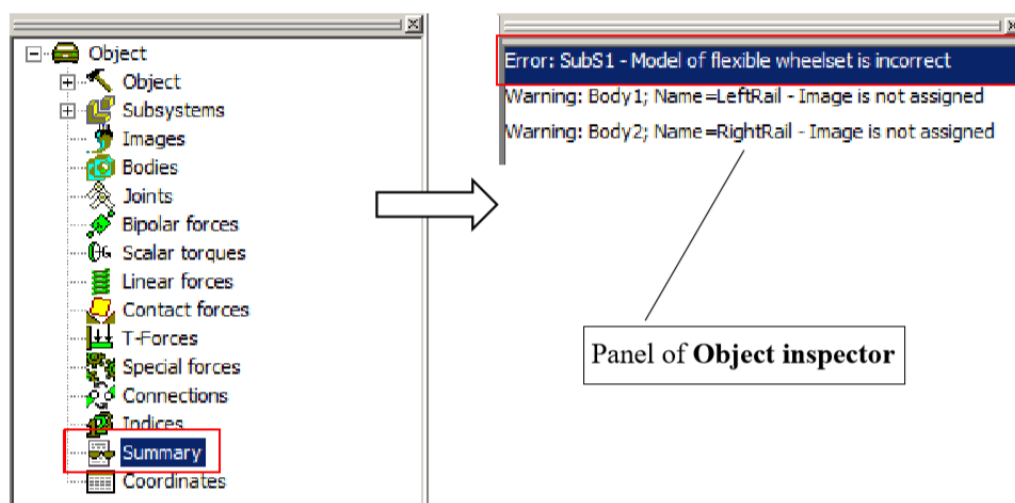
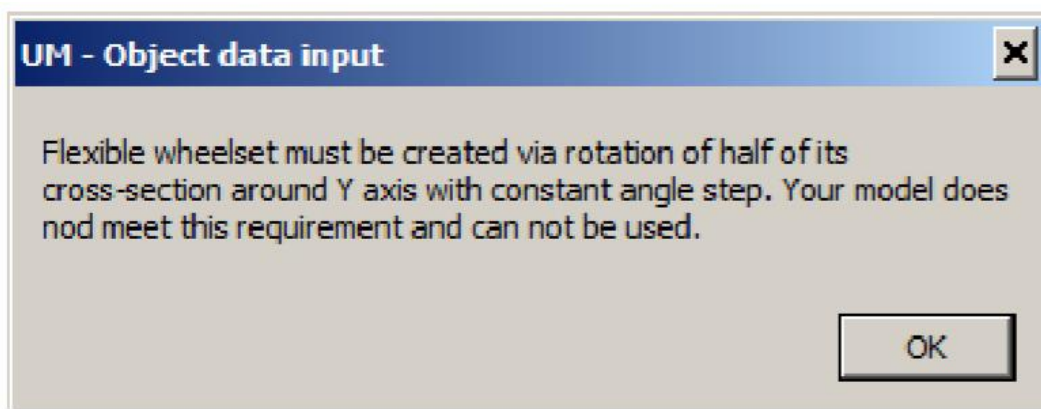


图 15 不正确建模的错误提示

为了正确测量出轮对上节点的弹性位移、速度、加速度、应力和应变等参数，需要建立相应的局部坐标系，如图 16 所示。

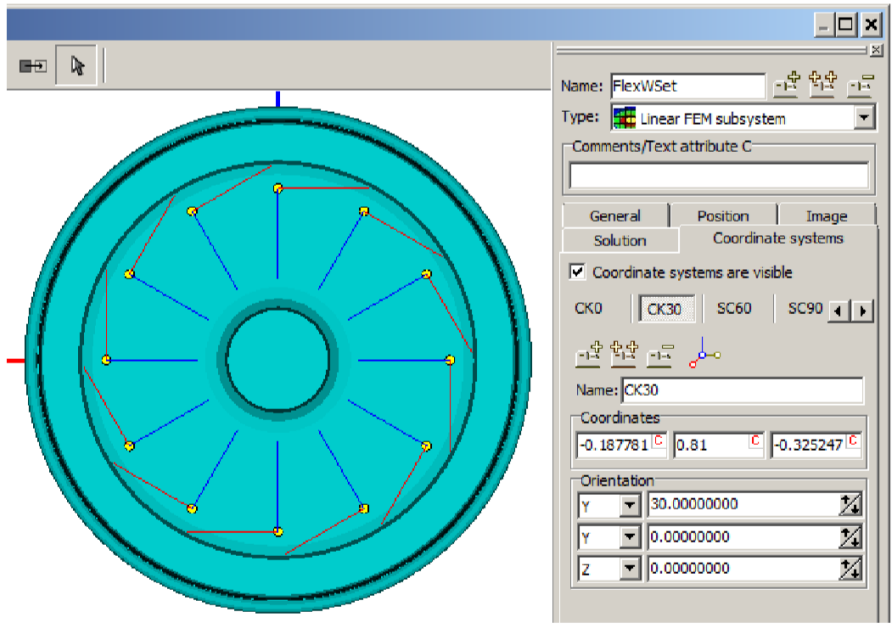


图 16 局部坐标系

对于像轮对这种旋转体的有限元仿真，一般有拉格朗日法（网格随质点转动）和欧拉法（网格不随质点转动）两种描述，**UM** 柔性轮对模块提供这两种方法供用户选择使用。

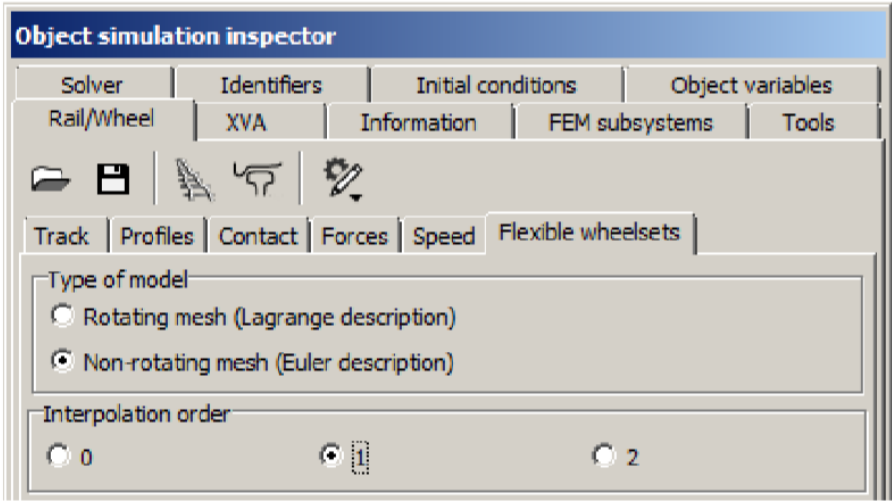


图 17 拉格朗日法和欧拉法

对于轮对来说，轮轨接触力是一种移动载荷，随着车轮的滚动，接触力作用点在轮对局部坐标系中是不断变化的。而且，作用点并非位于若干个有限元节点，事实上，大部分时候都不在任何节点上。这也是柔性轮对仿真需要解决的一个重要问题，否则与轮对实际受力情况相差甚远。**UM** 柔性轮对模块可自动插值找到任意时刻轮轨接触点所在踏面（图 18），并将轮轨力等效作用（考虑单元形函数）于六面体单元网格节点（图 19），这种方法具有较高的求解效率和精度。

另外一个是，考虑到轮对的柔性后，在轮轨接触力作用下，轮对不仅发生刚性位移，还有弹性变形。**UM** 考虑了弹性变形对踏面空间位置和方向的影响（通过最小二乘法确定），不过用于轮轨几何接触计算的踏面本身还是视为刚性的。

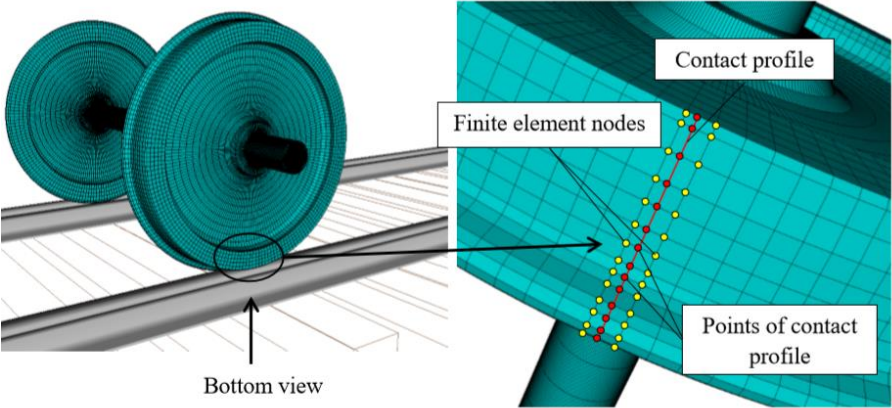


图 18 插值得到接触踏面

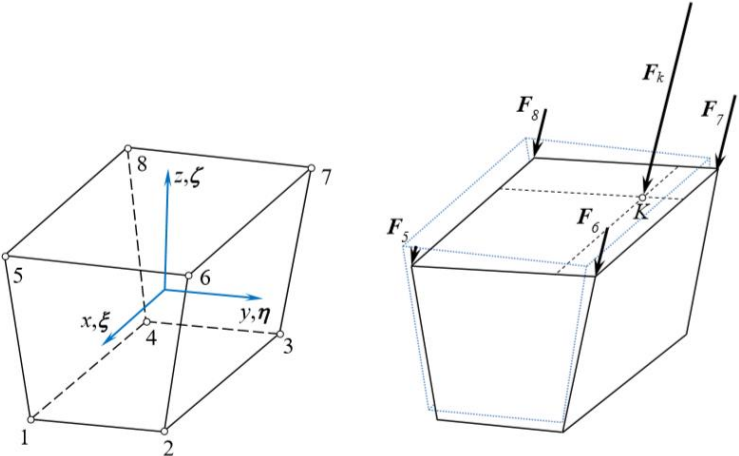


图 19 轮轨力的等效分配

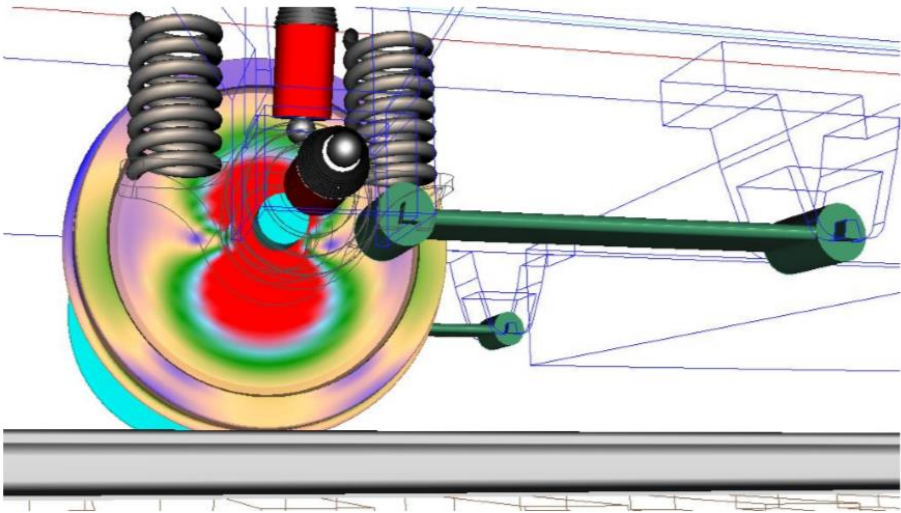


图 20 仿真过程

读者可能注意到，在轮对子系统界面还有两个选项 **Inertial rail** 和 **Test rig**，缺省状态都未勾选。此时若进入仿真程序，则程序自动调入无质量轨道模型，当勾选 **Inertial rail** 时，则为移动质量轨道模型，前一篇微文（查询关键词：**403**）已经做了详细介绍。以标准轮对为例，子系统里增加了两个钢轨体（轮下质量），每个体具有三个自由度（垂向、横向和扭转），因此子系统自由度总数为 **12**。

Test rig 选项用于支持轮轨滚动振动台的模拟，既支持单轮对模型，也支持整车模型；既支持刚性车轮，也支持柔性车轮；在用户界面有滚轮选项，支持用户自定义各种传动结构、不平顺激励以及变轨距模拟。

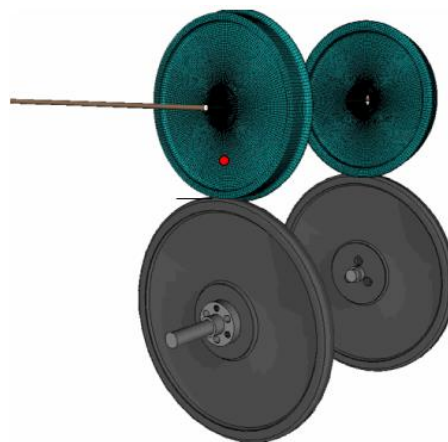
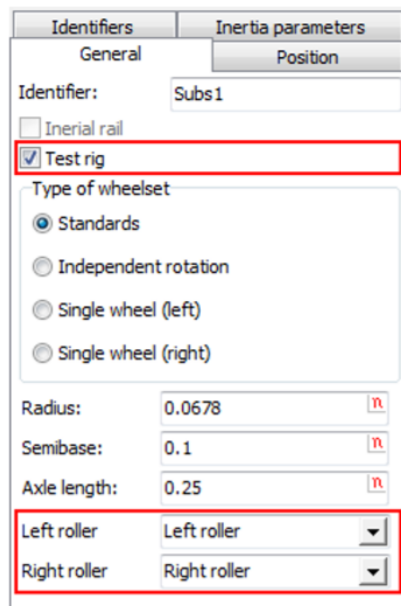


图 21 滚动台模拟

参考文献

Mikheev, G., Pogorelov, D., & Rodikov, A.. Methods of Simulation of Railway Wheelset Dynamics taking into account Elasticity[C]. First International Conference on Rail Transportation, Chengdu, China, 2017.