

# UM FRT 铁路车辆-轨道-下部结构相互作用动力学仿真

## 模块简介

**UM Flexible Railway Track** (以下简称 **FRT**) 模块用于智能化自动化创建铁路柔性轨道模型, 并完成车辆或列车与柔性轨道及下部柔性结构相互作用的动力学仿真计算。相比于早期的 **VBI** 模块 (查询关键词: 401), 其求解精度更高, 有效范围更广。该模块使用的柔性轨道模型已经拓展到单轨和磁浮交通领域。

**UM FRT** 模块需要用到 **UM Loco**、**UM Loco/Multi-point Contact Model** 和 **UM FEM** 模块。**UM Loco** 用于建立三维车辆、多车和列车编组模型, **UM Loco/Multi-point Contact Model** 是软件里唯一支持柔性轨道求解的轮轨接触模型 (非赫兹多点接触), 相关介绍请见用户手册第 8 章。**UM FEM** 模块用于导入轨道下部结构, 如: 轨道板、浮置板、道床、桥梁、隧道以及建筑物等, 其基本原理和各个接口使用方法请见用户手册第 11 章。

在 **UM Input** 或 **UM Simulation** 程序界面, 选择菜单 **Help | About...**, 弹出 **About** 窗口, 查看当前版本的模块列表, 其中 **UM Flexible Railway Track** 后面为 “+”, 表示这个模块可用。

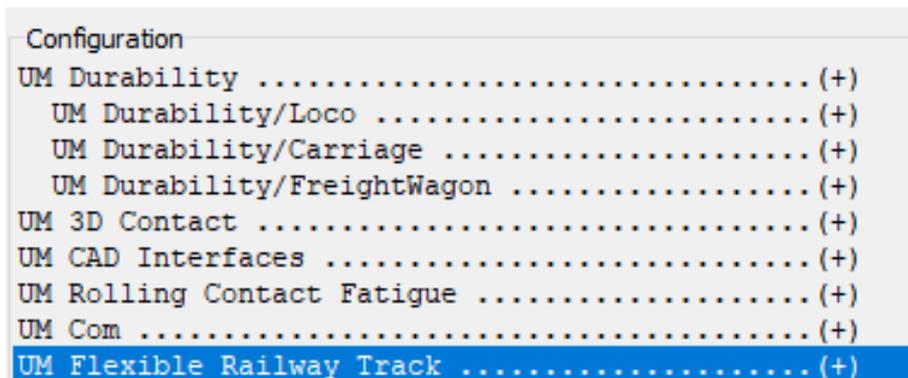


图 1 模块列表

## 轨道模型

**UM** 软件提供以下三种铁路轨道模型, 适用于不同精细程度的仿真分析。

- **Massless rail: 无质量轨道**
- **Inertial Rail: 移动质量轨道**
- **Flexible track: 柔性轨道**

第一种是无质量轨道, 它将整个轨道系统简化为一组连续支撑的弹性力元, 用户只需输入轨道总体的垂向、横向和扭转刚度及阻尼。由于忽略了钢轨的质量, 故没有独立自由度, 钢轨的变形通过力的平衡条件求解得到。这种模型主要采用 **FASTSIM** 等简化的轮轨接触算法 (一点或两点接触), 只适合研究一般的车辆系

统动力学分析，如安全性、平稳性和舒适性等，有效频率一般不超过 **20Hz**。

第二种是移动质量轨道，该模型基于连续弹性支撑的无质量轨道模型，分别在左、右车轮下方增加了一个三自由度刚体（如图 2），刚体与地面通过 **UM** 里的点弹簧力元（**Special forces-Bushing**）进行连接，也需定义轨道总体的垂向、横向和扭转刚度及阻尼参数。这种模型支持使用 **Kik-Piotrowski** 多点接触算法和 **CONTACT**（经 **Edwin Vollebregt** 改进的精确的 **J. J. Kalker** 滚动接触理论），适用于更精确的轮轨接触分析，如：车辆通过道岔和辙叉、低地板有轨电车（槽型轨）、轮轨共形接触、列车爬轨脱轨和轮轨型面磨耗等，有效频率可达 **100Hz**。

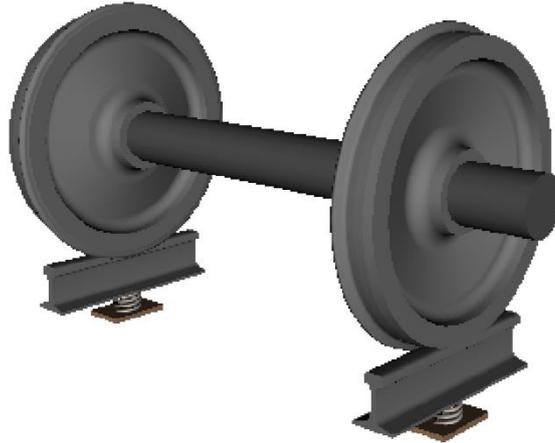


图 2 移动质量轨道模型

第三种是柔性轨道，采用更加精细化的三维空间模型，它可以由钢轨、扣件、轨枕和下部结构组成。其中，钢轨为铁木辛柯梁模型（考虑扭转和剪切），轨枕为刚体或柔性体，扣件为粘弹性力元。在当前版本中，用户可以选择忽略轨枕，或用自带的刚性轨枕。软件自带的刚性轨枕实际为两个半枕模型，分别具有垂向平动、横向平动和绕纵向转动三个自由度。对于轨枕以下的结构，既可以简化为总体刚度和阻尼，也可以考虑为详细的多层柔性结构（从外部有限元软件导入），各层结构之间通过粘弹性力元连接。采用柔性轨道模型可以进行车辆/列车与铁路轨道及下部结构相互作用的动力学分析，特别侧重于研究轨道及下部结构（如：减振轨道、桥梁、隧道和上盖物业）的动态响应、性能评估和参数优化。

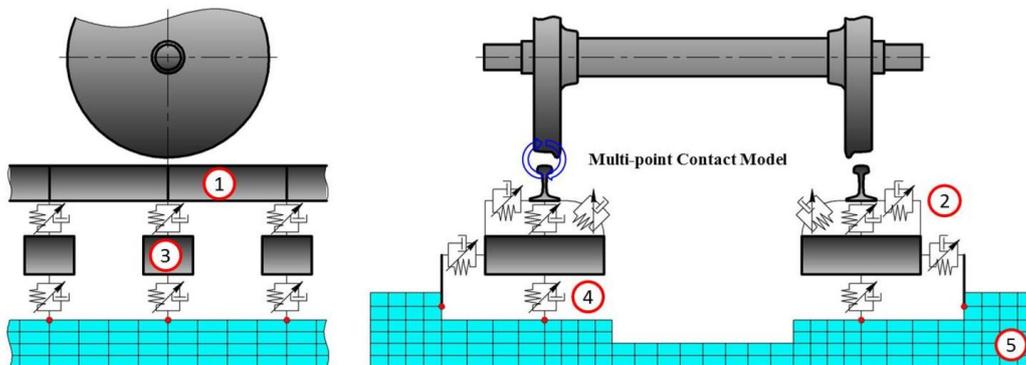


图 3 无砟轨道模型 1-钢轨，2-扣件，3-刚性半枕，4-轨枕胶垫，5-刚性/柔性基础

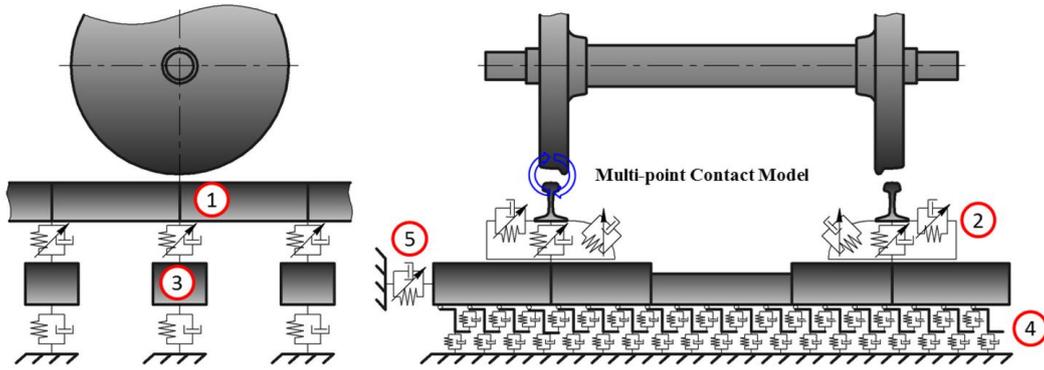


图 4 有砟轨道模型 1-钢轨，2-扣件，3-柔性轨枕，4, 5-有砟轨道

在 UM FRT 的柔性轨道模型中，钢轨采用有限单元法（**注意：既不是模态叠加法，也不是模态组合法，无需从外部导入**）描述，空间轮轨力作用下轨道系统的振动微分方程如下：

$$\begin{cases} EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F_x(t) \delta[x - x_w(t)] + \sum_{i \in \mathbb{N}} \delta(x - x_i^s) F_{x_i}^f(t) \\ k_y AG \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \rho z_s A \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = F_y(t) \delta[x - x_w(t)] + \sum_{i \in \mathbb{N}} \delta(x - x_i^s) F_{y_i}^f(t) \\ k_z AG \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho y_s A \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = F_z(t) \delta[x - x_w(t)] + \sum_{i \in \mathbb{N}} \delta(x - x_i^s) F_{z_i}^f(t) \\ EJ_y \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - k_z AG \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} + \psi \right) - \rho J_y \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \\ EJ_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + k_y AG \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \theta \right) - \rho J_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0 \\ EJ_\omega \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - GJ_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \rho J_\omega \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho z_s A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \rho y_s A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho J_p \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \\ = \delta[x - x_w(t)] M_x(t) + \sum_{i \in \mathbb{N}} \delta(x - x_i^s) M_{x_i}^s(t) \end{cases}$$

其中， $E$  为钢轨的弹性模量， $G$  为剪切模量， $\rho$  为材料密度， $A$  为截面面积， $J_y$  为相对 Y 轴的惯性矩， $J_z$  为相对 Z 的惯性矩， $J_x$  为圣维南扭转常数， $J_\omega$  为翘曲常数， $k_y$  为截面 Y 向剪切修正系数， $k_z$  为截面 Z 向剪切修正系数， $J_p$  为极惯性矩， $y_s$  为剪切中心与几何中心（重心）的横向距离， $z_s$  为剪切中心与几何中心的垂向距离， $x_w(t)$  为轮对当前纵向位置， $F_x(t)$  为车轮作用在钢轨上的纵向力， $F_y(t)$  为车轮作用在钢轨上的横向力， $F_z(t)$  为车轮作用在钢轨上的垂向力， $M_x(t)$  为车轮作用在钢轨上的绕 X 轴的扭矩， $F_x^f(t)$ ， $F_y^f(t)$ ， $F_z^f(t)$  和  $M_x^f(t)$  则对应是扣件提供的支反力和反力矩， $x_i^s$  为轨枕的纵向坐标（沿线路方向的自然坐标）。

从早期的无质量轨道到移动质量轨道，再到现在的柔性轨道，力学和数学模型越来越复杂和精确，计算效率自然越来越低。经大量测试，移动质量轨道比无质量轨道慢约 2-3 倍，柔性轨道比无质量轨道慢约 50-80 倍。不过，总的来说，UM 软件的计算效率是相当可观，能够胜任诸多大规模系统的计算分析。移动质量轨道可以粗略地得到钢轨的位移、速度和加速度响应。柔性轨道能更精确地计

算钢轨、轨枕和下部结构任意测点的位移、速度和加速度响应，每个扣件力元的响应，以及外部导入的柔性体的应力应变状态。

## 在 UM Input 程序里的操作

在已有车辆或列车模型的基础上，用户只需如下两步主要操作。

- 添加一个柔性轨道子系统
- 导入一个或多个外部有限元模型，并定义边界约束

运行 **UM Input** 程序，新建或打开一个现有的铁道车辆/列车模型，在左侧模型树选中子系统，从右键菜单选择添加新的子系统（或在右边交互界面点击加号按钮），从列表中选择标准子系统 **Flexible Railway Track**。

对于自带的柔性轨道模型，用户在 **UM Input** 程序中只需这一步简单操作，其具体结构和参数将在 **UM Simulation** 程序中设置。

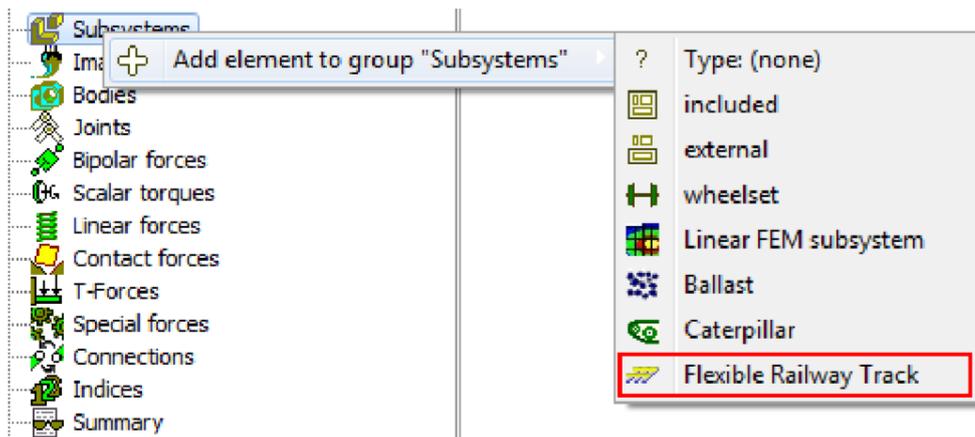


图 5 添加柔性轨道子系统

从有限元软件导入柔性下部结构的基本方法与一般柔性体一样，请见用户手册第 11 章。这里，请务必注意几点基本要求：

- 1) 柔性体的中心线应与轨道中心线（X 方向）重合；
- 2) 柔性体的上表面（与钢轨直接作用的）应与轨面（XY 平面）平行；
- 3) 柔性体与钢轨、轨枕、地面和其他结构的所有连接点处必须有相应节点。

## 在 UM Simulation 程序里的操作

运行 **UM Simulation** 程序，加载一个包含柔性轨道子系统的车辆或列车模型，打开仿真控制界面 **Object Simulation Inspector**，在 **Rail/Wheel | Track | Model and parameters** 页面，选择柔性轨道模型 **Flexible track**，缺省为 **Massless rail**。

注：轨底坡、轨距、轨道线路、轮轨型面（轮轨几何接触计算）、轮径差、车轮不圆、轨道不平顺和摩擦系数等选项与车辆动力学设置无异，详见用户手册第 8 章。

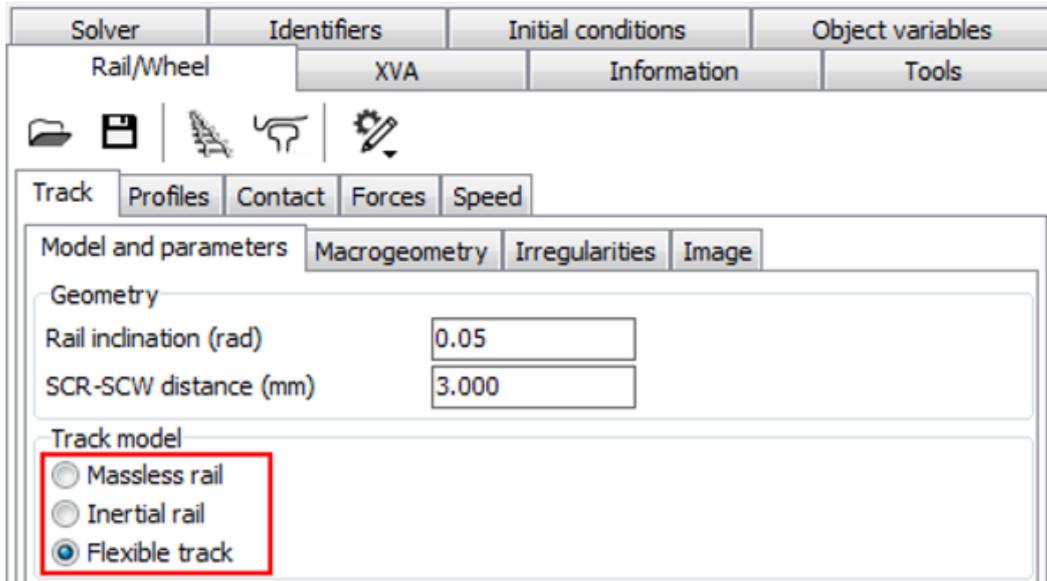


图 6 选择轨道模型

定义钢轨的材料参数（杨氏模量、泊松比、密度和阻尼比），从钢轨截面库选择钢轨铁木辛柯梁模型所需的截面（左右钢轨可不同）。

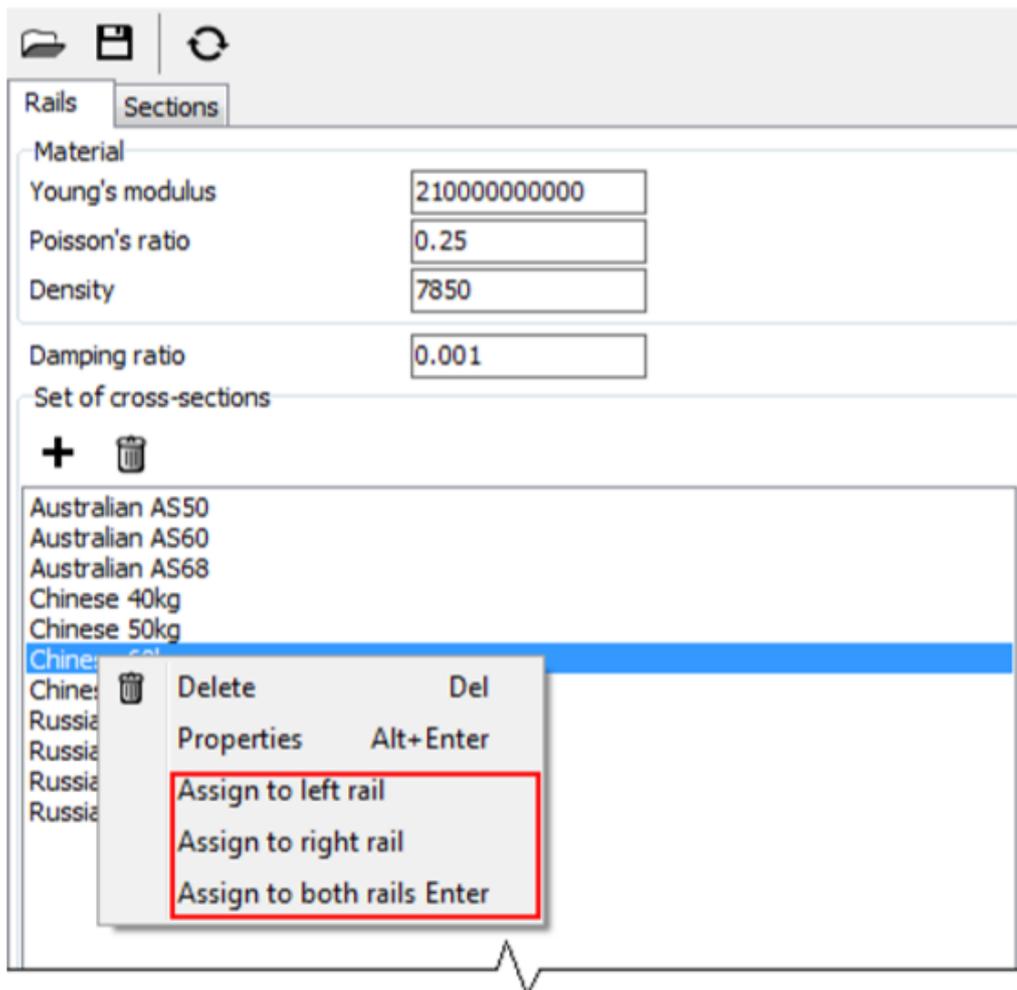


图 7 定义钢轨参数

钢轨的阻尼矩阵  $\mathbf{D}$  由下面的式子计算得到：

$$\mathbf{D} = \frac{2\xi}{\omega} \mathbf{K}$$



图 8 Pinned-Pinned 振型

其中,  $\xi$  是阻尼比,  $\omega$  是第一阶 **Pinned-Pinned** 振型频率,  $\mathbf{K}$  是刚度矩阵。

用户可以自定义钢轨截面 (图 7 里的加号按钮), 截面的各个参数示意和说明请见图 9 和表 1。

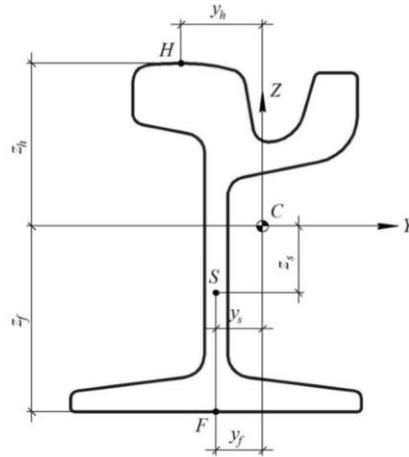


图 9 典型钢轨截面

表 1 钢轨截面参数

参数	参数说明	单位
Name	截面名称	-
$A$	截面面积	$\text{cm}^2$
$I_y$	截面相对 Y 轴的惯性矩	$\text{cm}^4$
$I_z$	截面相对 Z 轴的惯性矩	$\text{cm}^4$
$I_{yz}$	截面惯性积	$\text{cm}^4$
$I_x$	圣维南扭转常数	$\text{cm}^4$
$I_\omega$	翘曲常数	$\text{cm}^6$
$k_y$	截面 Y 向剪切修正系数	-
$k_z$	截面 Z 向剪切修正系数	-
$y_s$	剪切中心相对几何中心的横向位置	cm
$z_s$	剪切中心相对几何中心的垂向位置	cm
$y_h$	轨头中心点相对几何中心的横向位置	cm
$z_h$	轨头中心点相对几何中心的垂向位置	cm
$y_f$	轨底中心点相对几何中心的横向位置	cm
$z_f$	轨底中心点相对几何中心的垂向位置	cm

柔性轨道可由多段轨道顺序无缝连接而成，每一段（**Section**）具有相同的结构参数。在不同的轨道段，扣件、轨枕及下部结构等参数可以设置为不同。

如果模型不包含下部结构，则程序会将用户定义的轨道（**Section1-SectionN**）在两端自动延伸，使得轨道模型长度长于仿真距离，并覆盖车辆和列车模型。也就是说，实际轨道在**-X**方向应超过最末位轮对一段距离，在**+X**方向应超过最末段轨道（**SectionN**）一定距离。这个距离缺省为轨枕间距的**32**倍，用户可以通过打开 **last.rwc** 轮轨配置文件进行修改，建议取值范围为**[32, 64]**。当线路类型为曲线时，柔性轨道会自动沿曲线布置。

如果模型包含从有限元软件导入的下部结构（当前版本只支持直线型），则应为其单独设置一段轨道（**注意：不可能是第一段或最末段**），勾选 **FE foundation** 选项，并从 **Flexible subsystems** 列表中选择相应的子系统。如果在垂向有多个柔性体，则只需勾选最上层的与钢轨直接作用的柔性体，用于自动生成一组 **Bushing** 力元（扣件），其他层的结构则通过 **UM Input** 手动建立（必要时，可以通过编程批量生成）粘弹性力元进行连接。

为了让程序能自动找到下部结构上每个轨枕/扣件作用点，用户需要先指定轨道中心线投影在下部结构上的两个端点（**Point1**，**Point2**）的坐标（柔性体的局部坐标系），然后在 **General parameters** 参数框设置第一个轨枕/扣件相对于始端 **Point1** 的纵向距离（**Start Point**：一般不为**0**），再设置两股钢轨轨底中点的横向距离（**Distance between rails**：不是轨距，有限元建模时应设计好网格）。如此，在给定轨枕间距（缺省为**0.6m**，可修改）的前提下，柔性体上所有轨枕/扣件作用点坐标都能自动确定。

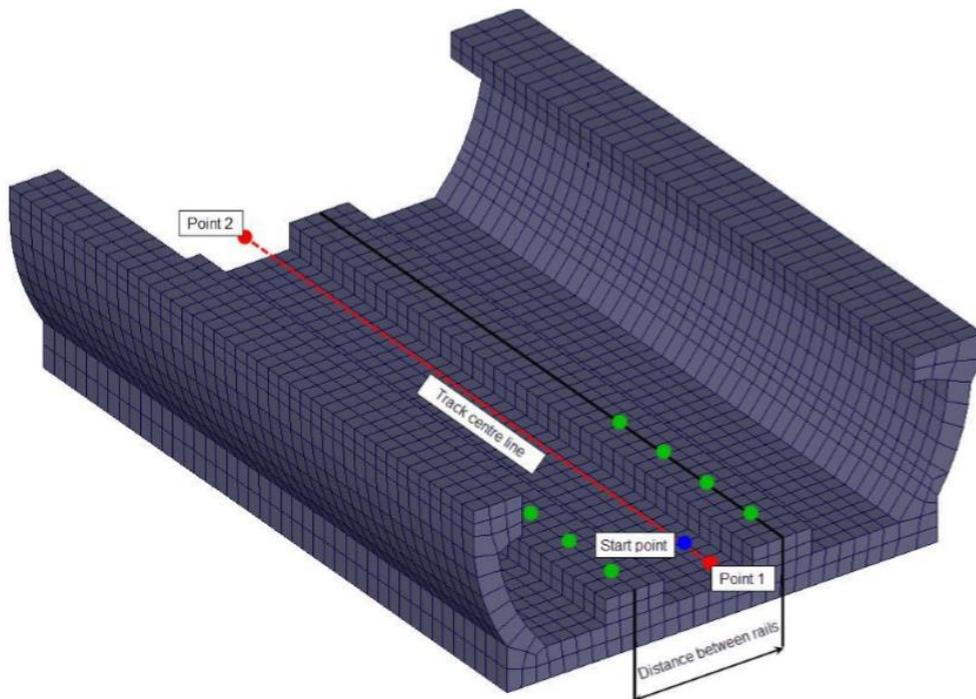


图 10 下部结构上的轨枕/扣件作用点

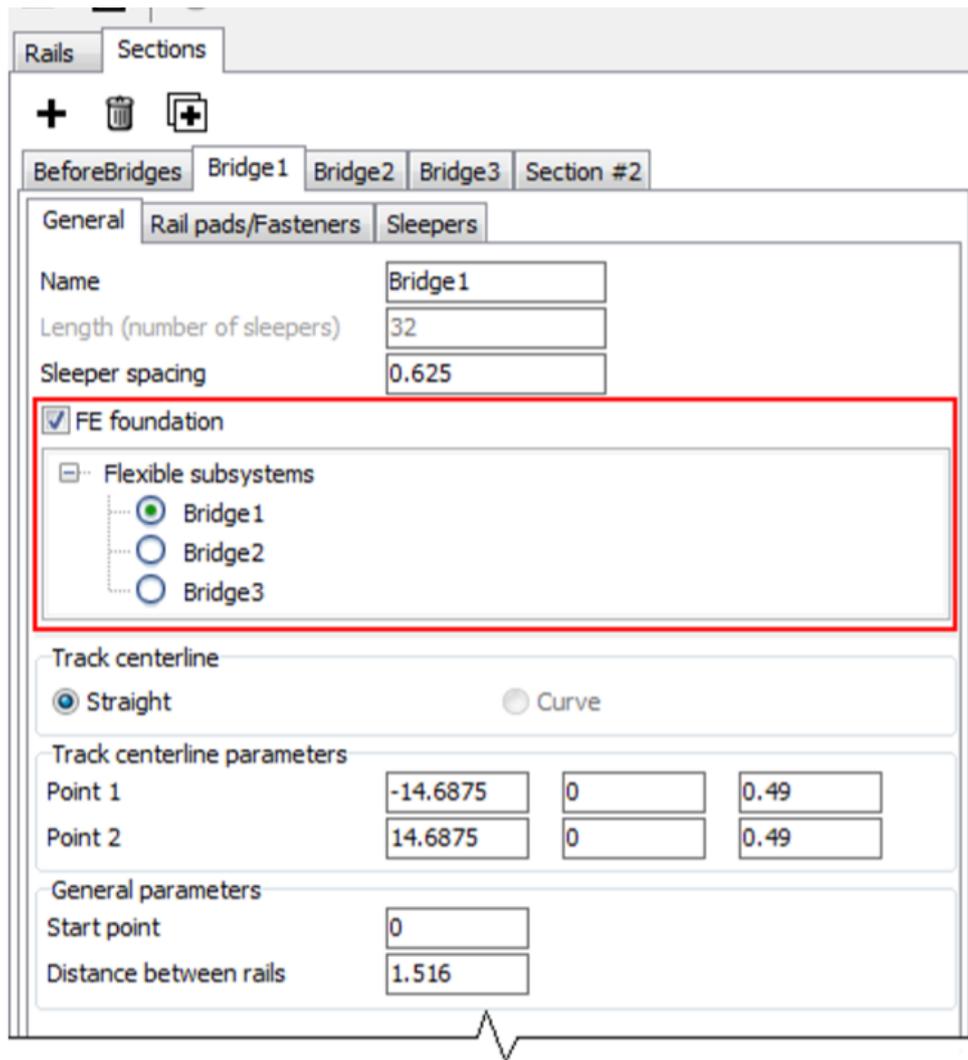


图 11 设置下部结构

为避免出现边界异常，应将第一段轨道（一般在第一个下部结构之前）设置的足够长，如图 12 中的 **Section1**。其合理的长度应为

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

式中， $L_1$  为车辆或列车第一位轮对到下部结构的纵向距离， $L_2$  为车辆或列车第一位和最末位轮对之间的距离， $L_3$  则应该为轨枕间距的 32-64 倍（**注意：这种情况程序没有向两端自动延伸轨道，用户必须设计好轨道模型长度，否则计算会出错**）。

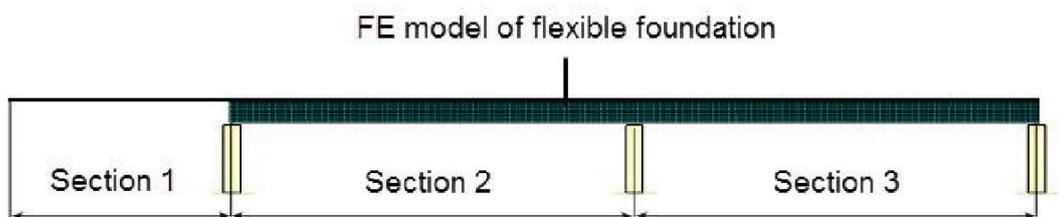


图 12 纵向轨道布置

在开始计算前，务必要在 **FEM subsystems | Simulation | Options** 页面，对所有下部结构（对于柔性车体、构架和轮对则不用）取消勾选 **Set initial speed to**

$v_0$ , 否则初始与车辆具有相同的速度, 一般对轨下结构的动力分析不计结构自重, 取消勾选 **Gravity**。

为避免初始出现较大的瞬态波动, 建议设置好轨道模型等参数后, 先进行一次静平衡计算。在 **Rail/Wheel | Speed** 页面, 设置  $v=0$  模式, 勾选 **Finish test automatically**, 必要时可以锁定轮对的一些自由度 (**Block wheelset shift**)。程序通过判断系统总的动能在持续 1s 内都低于一个设定值, 则认为达到平衡。

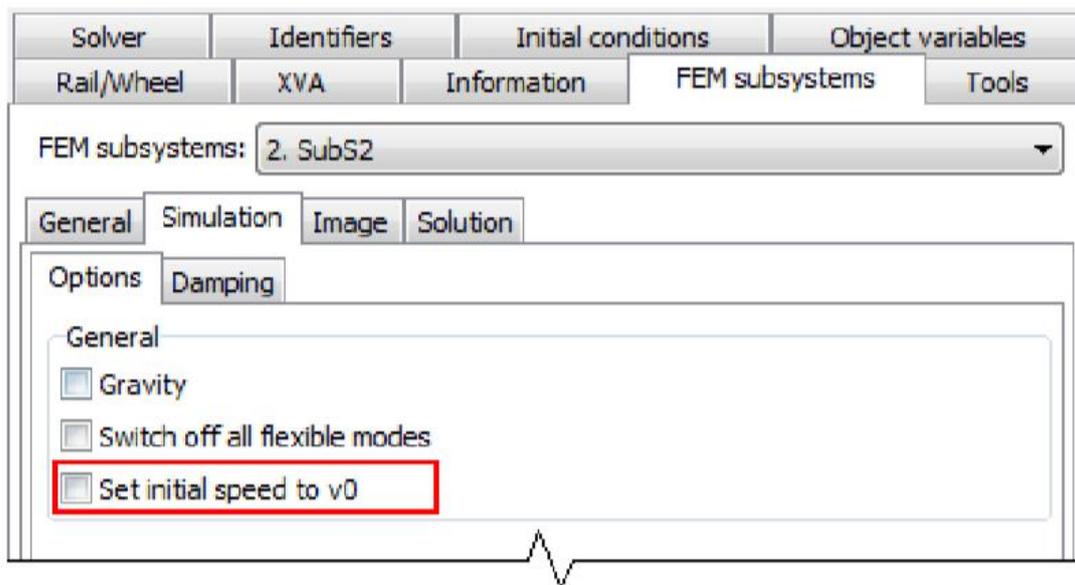


图 13 仿真设置

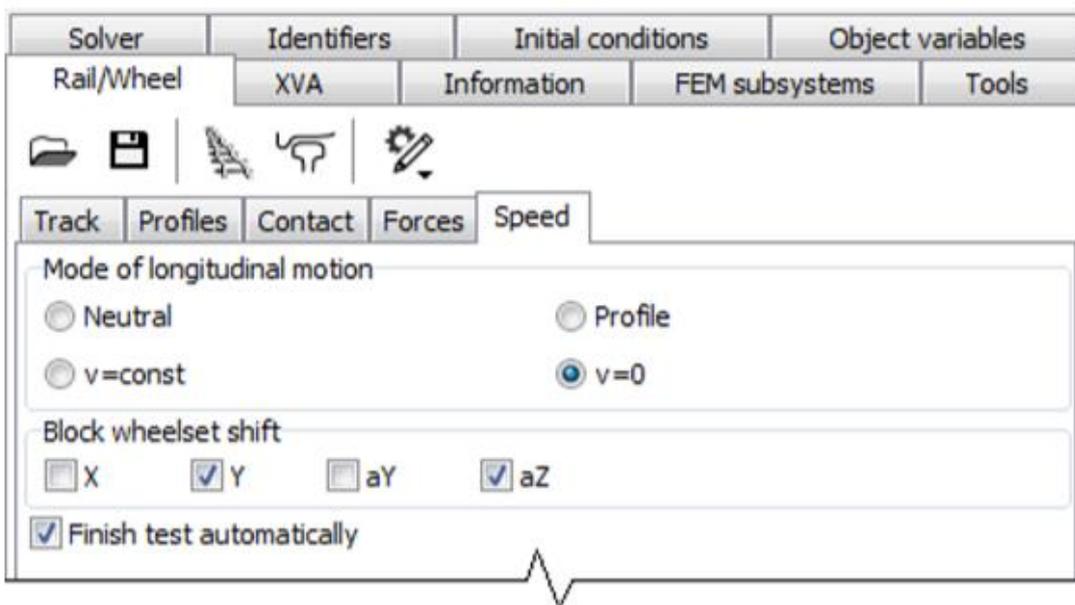


图 14 平衡位置计算

使用柔性轨道模块时，由于模型自由度较大（每个枕跨为 1 个单元，每个节点 6 个自由度），只可采用 **Park Parallel** 求解器，推荐参数设置如图 15。

**译者提醒：**

- 1) 柔性轨道只支持 **Kik-Piotrowski** 多点接触算法，因此在 **Rail/Wheel | Contact** 界面无其他选项；
- 2) 柔性轨道是有限长度的，算完为止，一般小于给定的仿真时间或距离终止条件；
- 3) 数据输出步长（定步长，用户指定） $\neq$  积分步长（变步长，程序自动），决定了结果的频率范围；
- 4) 优先使用 **CGM**，若遇到问题，则切换为 **BDJ**；
- 5) 计算效率与核数并非成线性关系，不同的模型的最优核数不同，要进行多次测试；
- 6) 更改轨道模型后，相应的考察变量也会发生变化，应删除原有变量；
- 7) 建议在每次更改轨道模型后，卸载模型一次（**File | Close**），这样会强制更新 last 文件，再加载模型（**File | Reopen**）进行计算，以免出现异常错误。

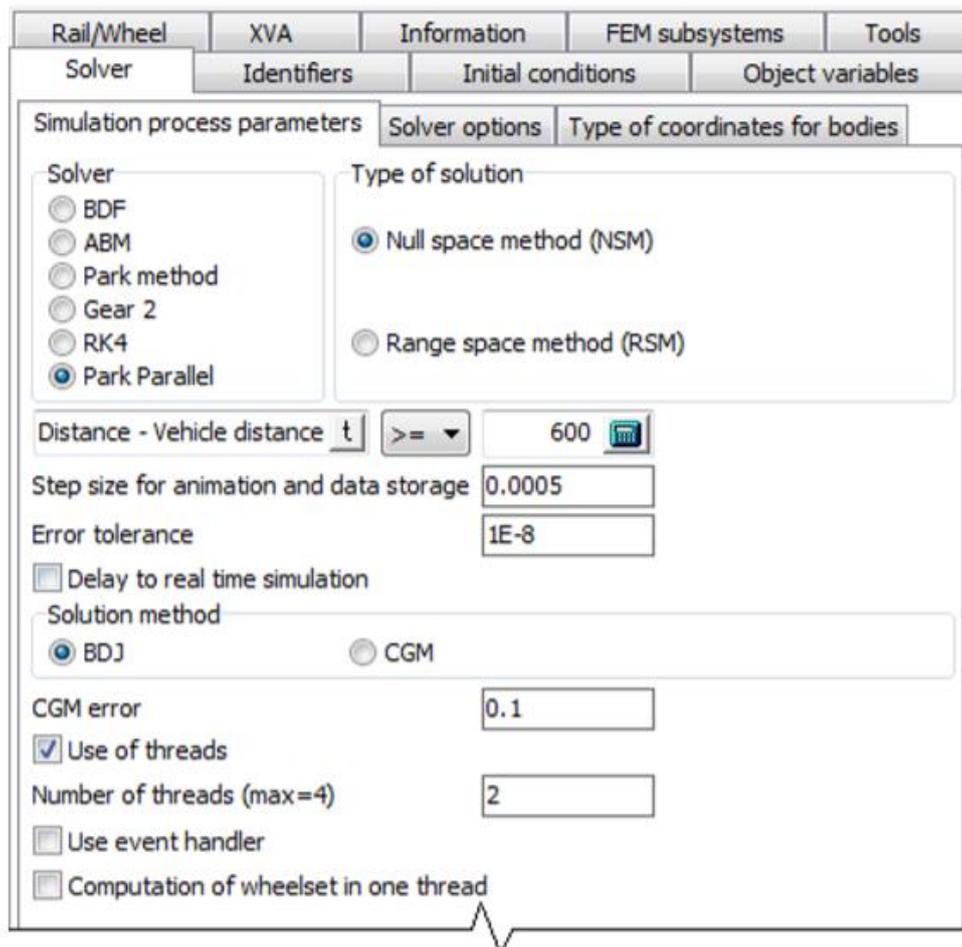


图 15 求解器参数

图 16 为测量钢轨上某点响应的操作示意。

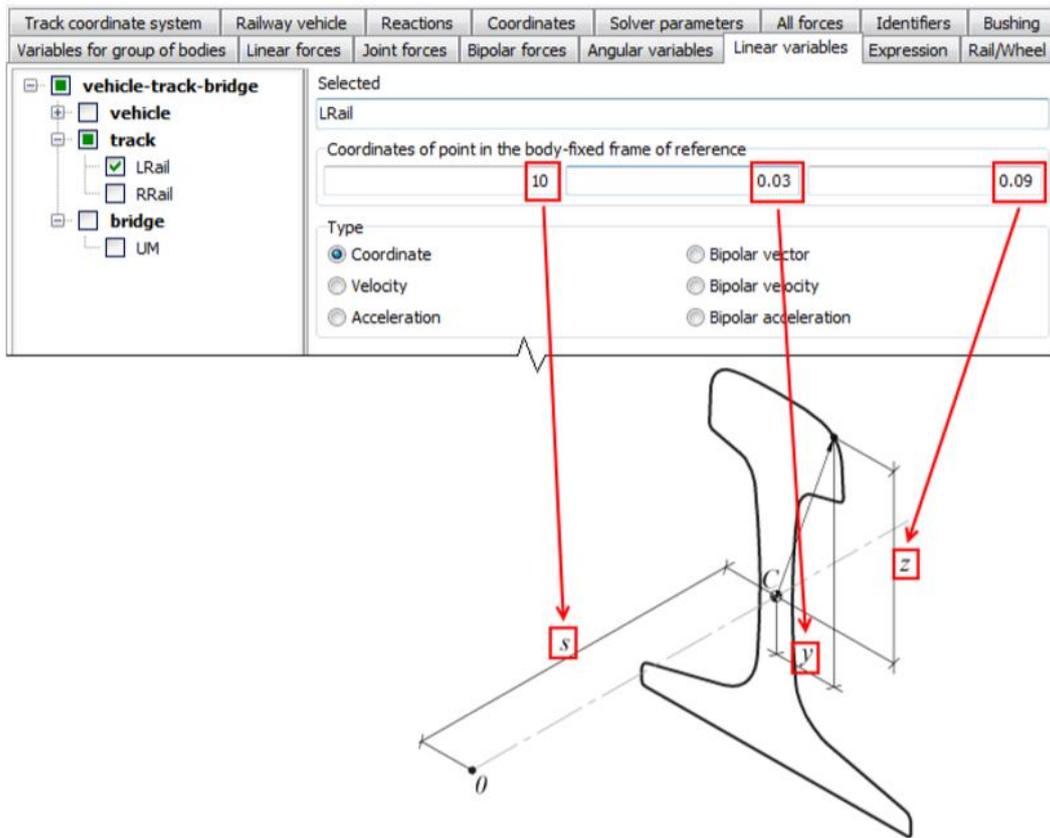


图 16 定义测量点

## 参考文献

Rodikov, A., Pogorelov, D., Mikheev, G., Kovalev, R., Lei, Q., & Wang, Y.. Computer simulation of train-track-bridge interaction. // Conference on railway excellence: Maintaining the Momentum. – Melbourne, 2016, 348-354