

UM 软件里用于单轨和磁浮动力学仿真的两种柔性轨道模型

1. 刚性轨道与柔性轨道

UM Monorail 是专业的胶轮单轨列车动力学仿真模块，既支持跨座式，也支持悬挂式，以及一些具有特殊结构的轮胎式轨道车辆。**UM Maglev** 是专业的磁浮列车动力学仿真模块，既支持 **EMS**（电磁悬浮），也支持 **EDS**（电动悬浮），以及一些具有特殊结构的磁浮式轨道车辆。

单轨和磁浮交通有一些共同的特征，特别是其使用的高架轨道梁，因此用户界面和部分功能也很相似。本文主要介绍在 **UM** 软件里可适用于单轨和磁浮列车-轨道梁系统动力学仿真的两种柔性轨道梁模型。

按轨道属性，可分为刚性轨道（**Undeformed**）和柔性轨道（**Flexible**），**UM** 软件里的两种轨道都支持在各个接触/作用面定义轨道不平顺。

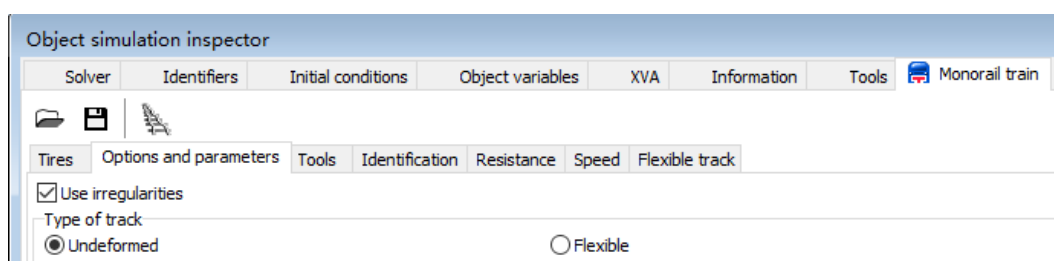


图 1 轨道模型

刚性轨道：不考虑轨道梁及下部基础的刚度和阻尼，只适用于常规的车辆系统动力学计算分析，主要用于评估车辆的曲线通过性能、运行平稳性、舒适度等指标。

柔性轨道：可考虑轨道梁及下部基础的刚度和阻尼，可以研究车辆-轨道系统相互作用引起的振动问题，这在悬挂式单轨和中低速磁浮交通系统中尤为重要。

UM Monorail 和 **UM Maglev** 都提供了两种柔性轨道模型，供用户选择使用。

- 基于铁木辛柯梁的参数化柔性轨道梁
- 从外部有限元软件导入的柔性轨道梁

值得一提的是，这两种柔性轨道模型不仅支持直线线路，也支持曲线线路。

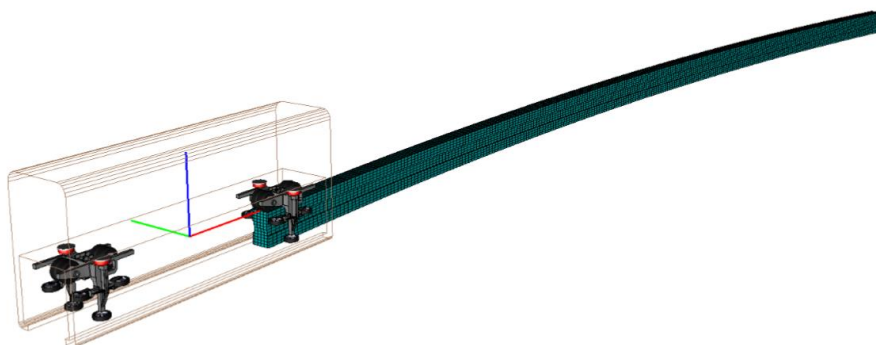


图 2 跨座式单轨车辆-柔性曲线轨道梁相互作用模型

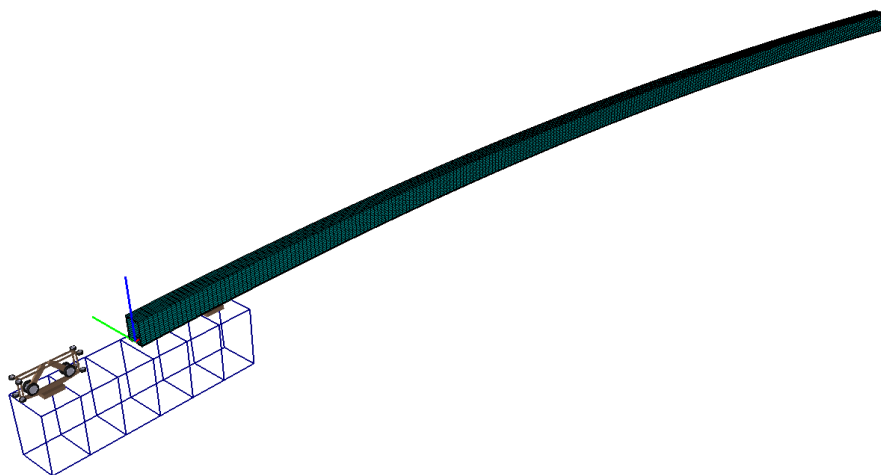


图 3 悬挂式单轨车辆-柔性曲线轨道梁相互作用模型

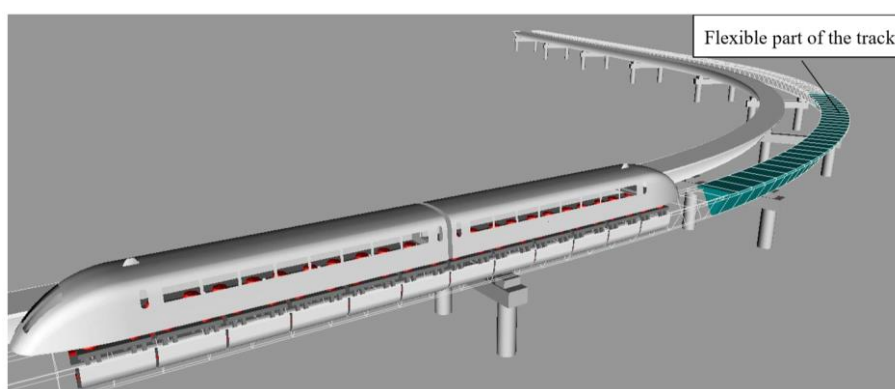


图 4 磁浮列车-柔性曲线轨道梁相互作用模型

2. 基于铁木辛柯梁的参数化柔性轨道梁

数年前，针对国内客户需求，UM 软件实验室开发了基于铁木辛柯梁的参数化柔性轨道，并用于铁路列车和轨道及下部结构的相互作用动态仿真，取得良好的效果。后来，随着单轨和磁浮模块的推出，顺势就将该模型扩展，用于模拟高架轨道梁。图 1 里的 **Flexible** 选项正是对应铁木辛柯梁模型。

如图 5 所示，用于仿真计算的轨道梁有限元模型一般由多段梁（**Beam**）依次连接而成，每一段梁既可以是单跨（**Span**）的简支梁，也可以是多跨的连续梁。该模型忽略桥墩，因此通过支座（**Support**）直接连接地面，相邻两段梁可建立如指形板之类的耦合关系（**Coupling**），这两种连接方式在软件里都采用 **Bushing** 力元。用户还可以单独指定每一跨划分的单元数目。

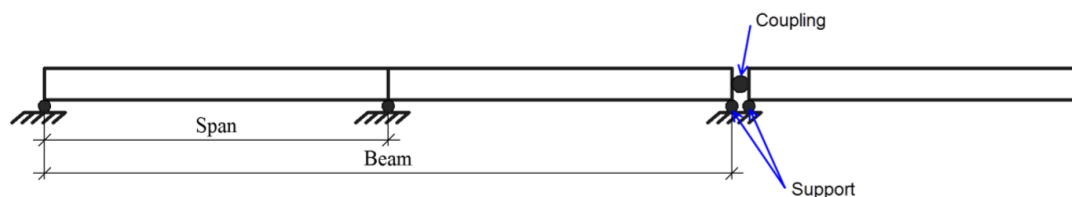


图 5 柔性轨道梁

如图 6 所示，柔性轨道梁参数化建模页面有 **Beams** 和 **Links** 两个参数组。

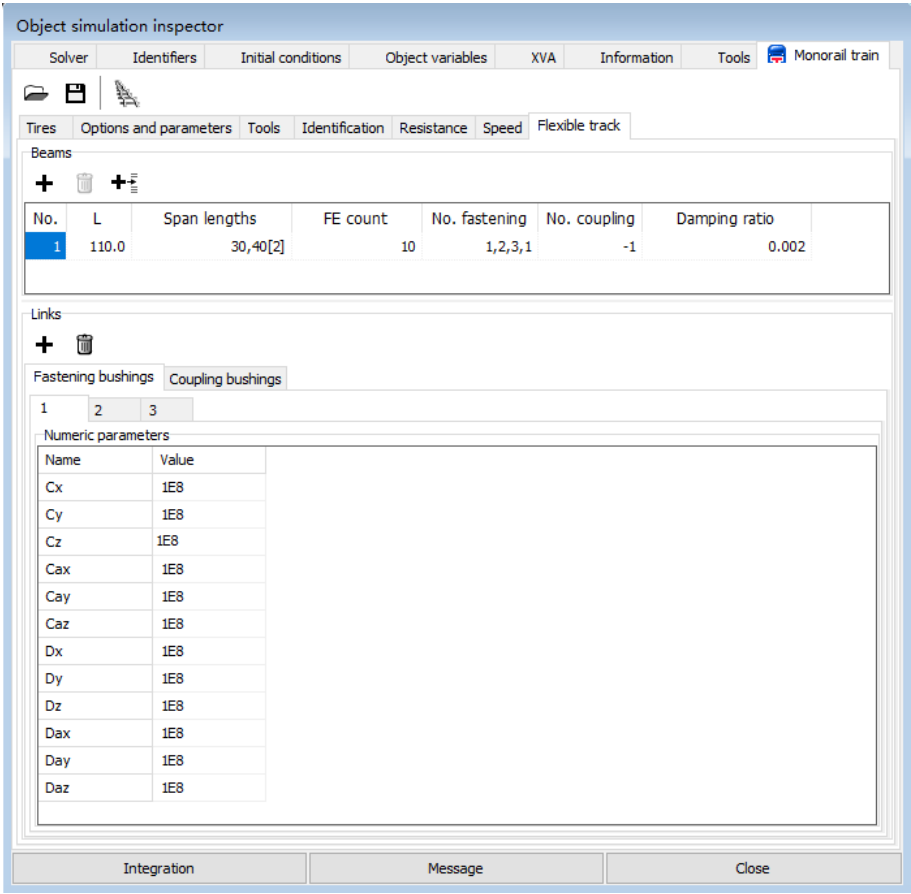


图 6 柔性轨道参数化建模页面

在 **Beams** 组，用户需定义梁、跨及单元的数目，支座和耦合力元编号，阻尼比。在 **Links** 组，可以定义多个参数不同的 **Bushing** 力元，用于模拟支座和耦合力元。

+：添加一段梁或一个连接力元（力元可重复使用）；

🗑️：删除一段梁或一个连接力元（力元可重复使用）；

+ **≡**：在选中位置之前插入一段梁。

No.：梁的序号

L：梁的长度，根据梁的跨度和跨数决定

Span length：梁的跨度及跨数，语法格式为

跨度 1[重复数 1]，跨度 2[重复数 2]，……

FE count：每跨的单元数，语法格式为

单元数 1[重复数 1]，单元数 2[重复数 2]，……

No. fastening：支座编号，一般从 **Links** 参数组里选择，语法格式为

支座 1[重复数 1]，支座 2[重复 2]，……

No. coupling：本段梁与下一段梁的耦合关系，从 **Links** 参数组里选择。特

别地，-1 表示无耦合关系。

Damping ratio: 指的是该段梁第一阶振动模态对应的阻尼比。

在 **Monorail Train | Tools** 页面，点击下拉菜单，选择 **Beam section profile**，定义轨道梁的截面属性，如图 7。

Parameter	Value
A	1.26
Iy	0.2058
Iz	0.0851
Iyz	0
Ix	0.2044
Ky	0.8333
Kz	0.8333

No	X	Y	No. bushing
1	-0.425	-1.5	1
2	0.425	-1.5	2

图 7 轨道梁截面参数

Data Input/Edit: 输入轨道梁截面的闭合曲线。

Material: 定义轨道梁的材料参数，如：杨氏模量、泊松比、密度。

Cross-section properties: 定义轨道梁截面特性参数：截面面积、惯性矩、惯性积、圣维南常数、剪切变形系数等。

Fastening points: 自定义支座点（截面局部坐标系），如果未定义，则只有一个，缺省位置如图 8 所示。**请注意：若自定义了支座点（同时指定力元编号），则在 Beams 组应调用此处的支座编号。**

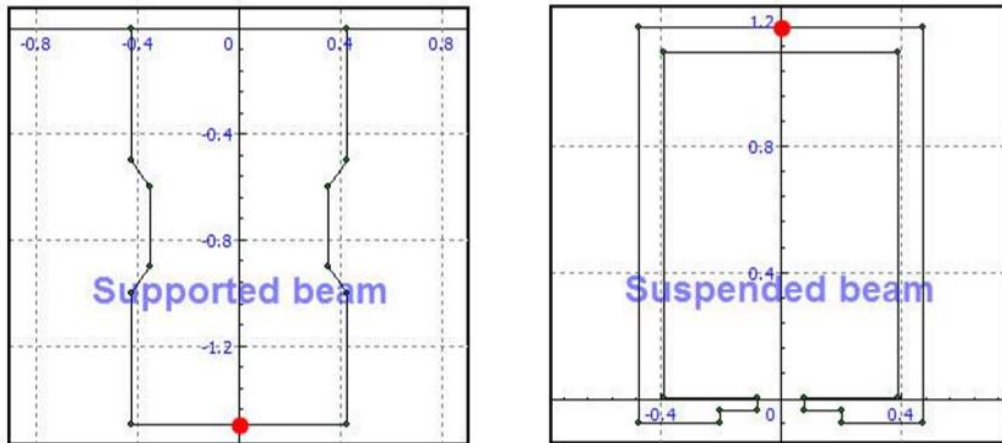


图 8 跨座式和悬挂式轨道梁缺省支座点

3. 从外部有限元软件导入的柔性轨道梁

在前面的文章（查询关键词：**401**）详细介绍了 **UM** 软件铁路列车和桥梁相互作用（**VBI**）的动力学仿真方案，该方案支持将有限元软件建立的桥梁模型（模态综合法）导入 **UM** 与车辆或列车建立相互作用关系，同样的技术也推广应用到了单轨和磁浮。相对于轮轨系统，更复杂一些的是，梁的横向单元直接受力，如图 9 所示。因此建模时车辆系统与轨道梁结构必须正确匹配。

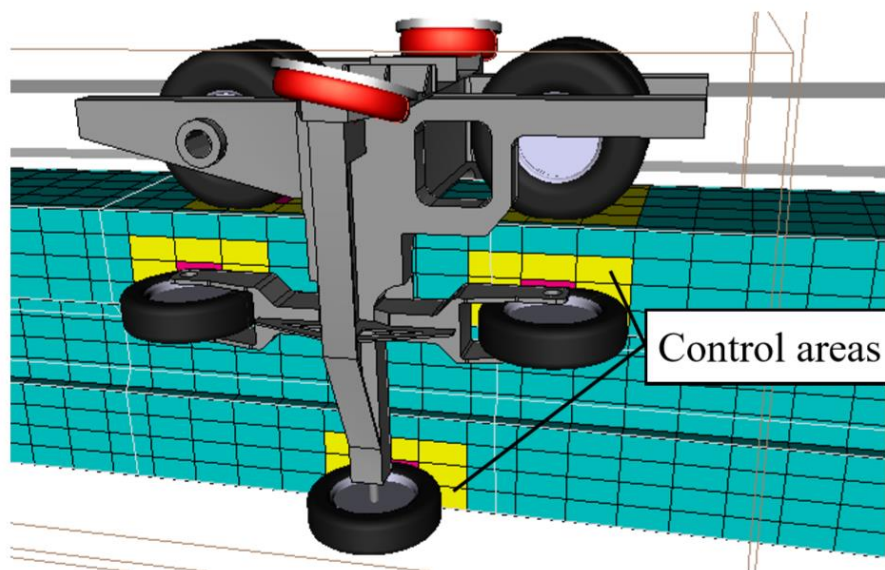


图 9 走行轮、导向轮和稳定轮对应的控制区域

显然，如果图 9 的模型里没有导向轮和稳定轮，该方案还可用于汽车-公路桥梁相互作用仿真，国内已有用户应用此方案做了相关研究工作，如图 10。

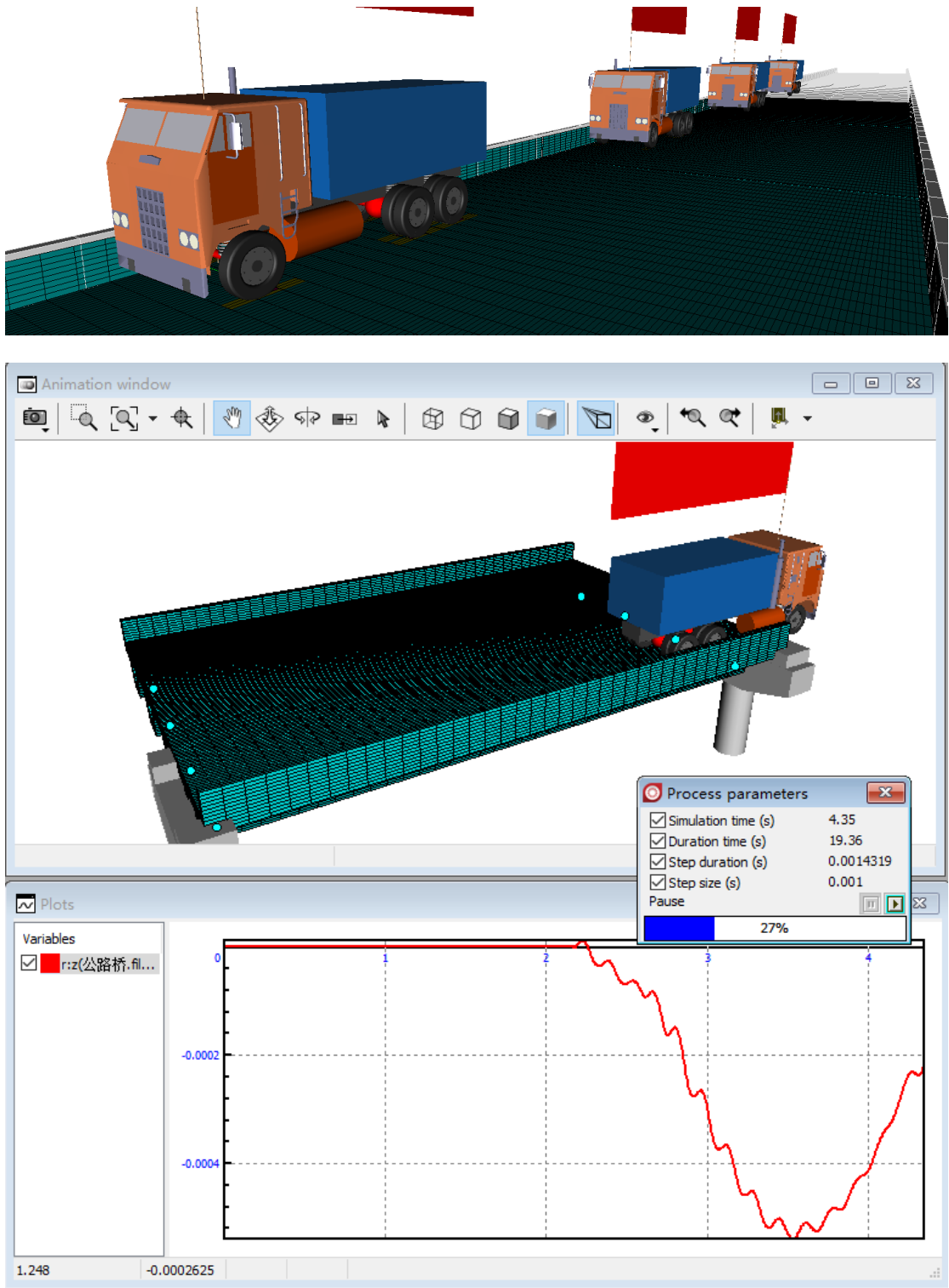


图 10 重载汽车-公路桥梁相互作用

注意：使用前请先确认有 **UM FEM/Monorail** 或 **UM FEM/Maglev** 模块的许可授权。

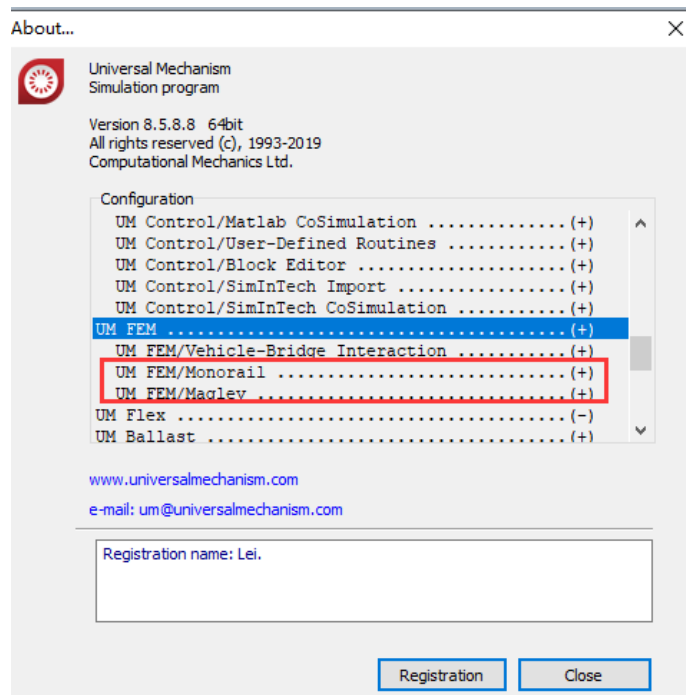


图 11 模块列表

直线梁相对比较简单，将有限元模型导入 **UM Input** 程序，在子系统页面添加备注**@monorail=true@**，用 **Joint** 或 **Bushing** 设置支座约束，保存模型。然后进入 **UM Simulation** 程序，设置直线工况，取消轨道梁自重，取消初始速度，设置阻尼比，勾选 **Subsystem is monorail** 等选项即可仿真。

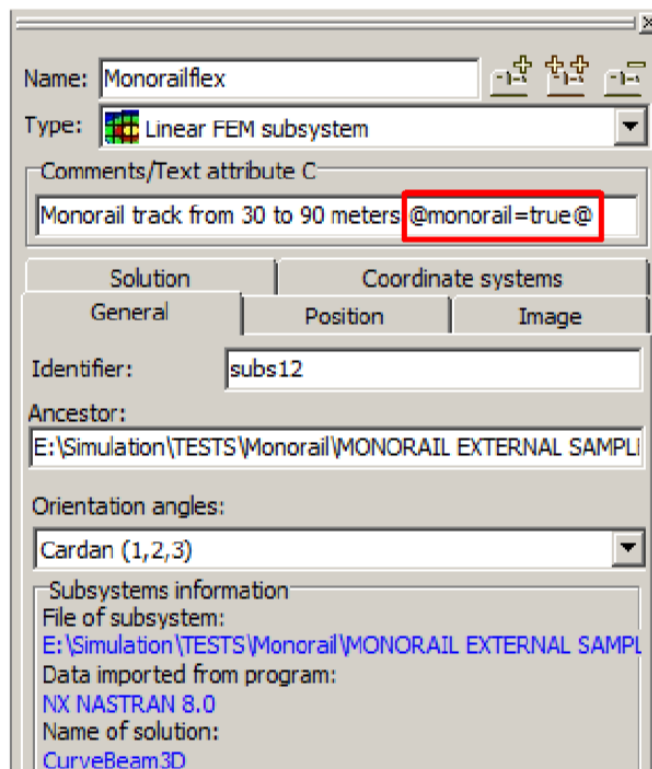


图 12 轨道梁备注

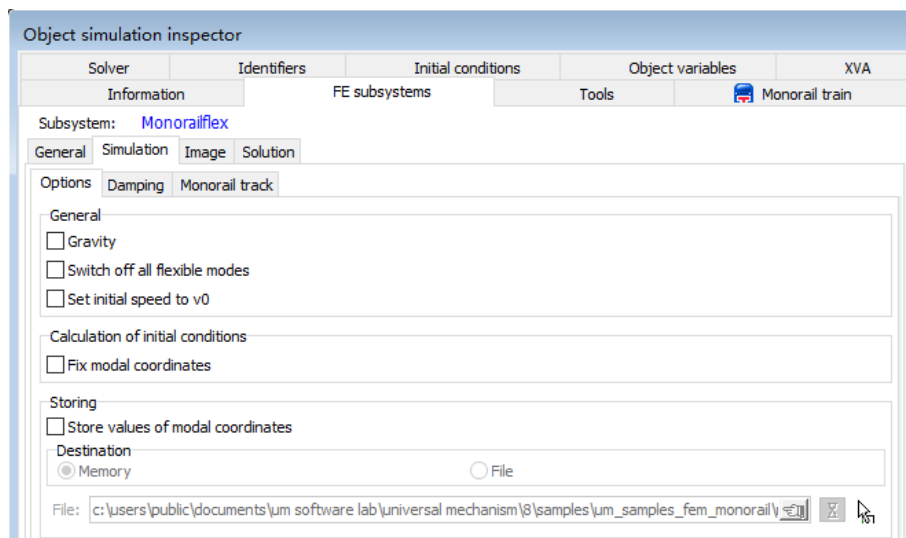


图 13 柔性体通用选项

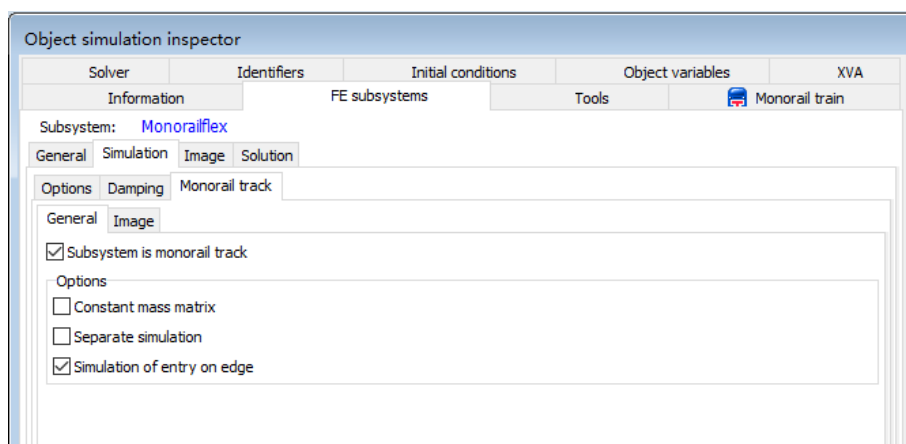


图 14 轨道梁专用选项

注意: 使用外部导入的柔性轨道梁时, 在图 1 里的轨道应选为 *Undeformed*, 这是因为 *Flexible* 选项特指软件自带的铁木辛柯梁模型。

对于自由度较大的模型, 可勾选 **Constant mass matrix**, 这样不必在每一步重新计算质量矩阵, 以提高计算效率。

- 勾选 **Separate simulation** 表示单向作用, 即轮胎/电磁力只作用于柔性轨道梁, 梁的振动不会影响车辆系统。
- 勾选 **Simulation of entry on edge**, 会显著减小车辆进桥时的冲击。
- 勾选 **Draw control areas**, 可显示控制区域, 如图 9 所示。
- 勾选 **Scale up flexible displacements** 并设置放大系数, 可放大显示轨道梁的弹性变形。

如果需要, 还可以根据车辆下方轨道梁变形量和放大倍数的乘积来驱动车辆几何图形的位移, 以获得与桥梁变形合拍的车辆运动效果。

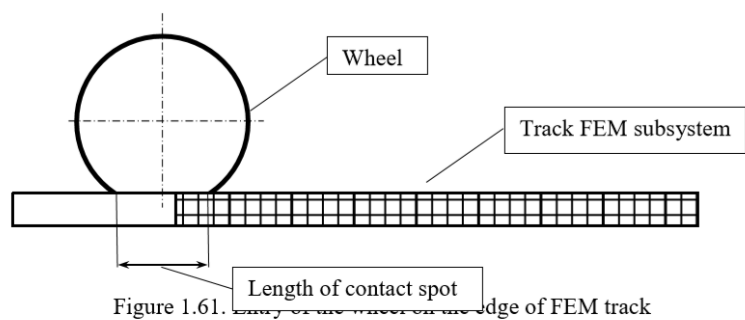


Figure 1.61. Length of the contact spot on the edge of FEM track

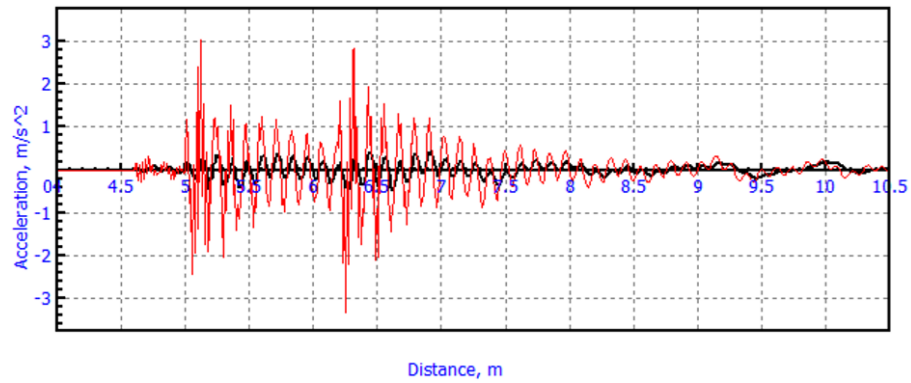


图 15 减小进桥冲击

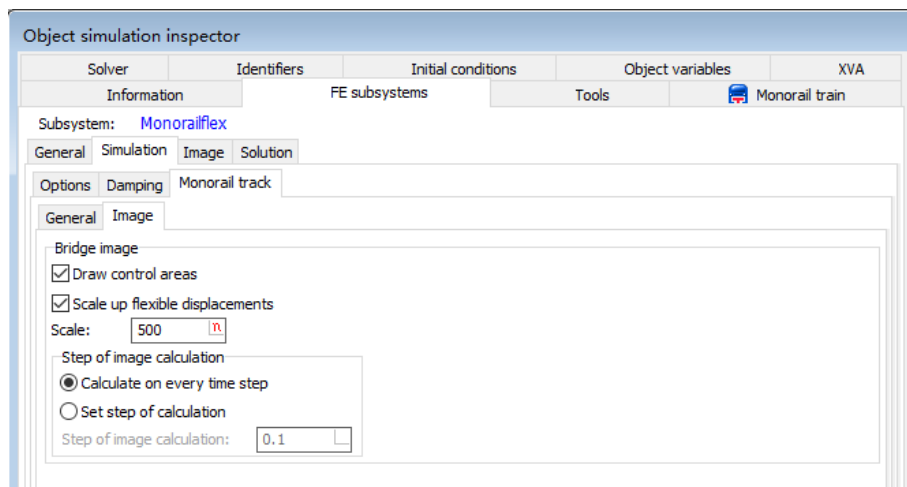


图 16 显示效果设置



图 17 放大显示轨道梁变形

而对于曲线梁，在建模时请注意，应该将面网格沿着给定曲线以固定的增量步长拉伸扫掠而成，仿真时采用的轨道线路文件也应与之一致。因此需要一些特别的操作（**对于铁路曲线梁桥的模拟，也应按如下操作方法进行**）。

- 1) 在动画窗口，调整合适的视图方向和显示比例，点右键选择 **Select FE nodes**，打开有限元节点选择窗口。
- 2) 通过坐标/编号/手动选择轨道中心线投影在梁上的始端节点。
- 3) 沿着中心线再选择第二个节点。
- 4) 在右侧节点列表区点右键，选择 **Choose nodes on line of regular mesh**。
- 5) 输入增量步长，程序会自动沿着中心线将所有经过的节点选取。
- 6) 在节点列表区点右键，选择 **Save macrogeometry profiles to file *.crv**，自动保存这一段线路的平面和纵断面曲线。
- 7) 打开线路工具，分别以离散点（**Pointwise**）的读入文件。注意要对应好坐标，并平滑连接。

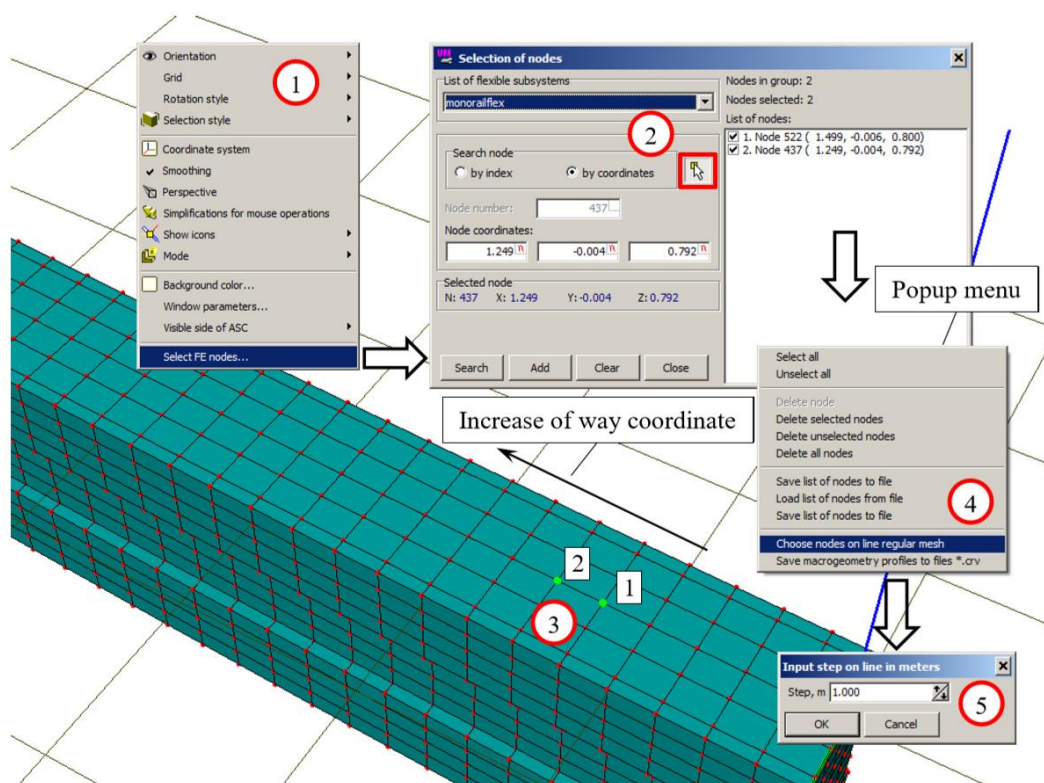


图 18 选择中心线节点

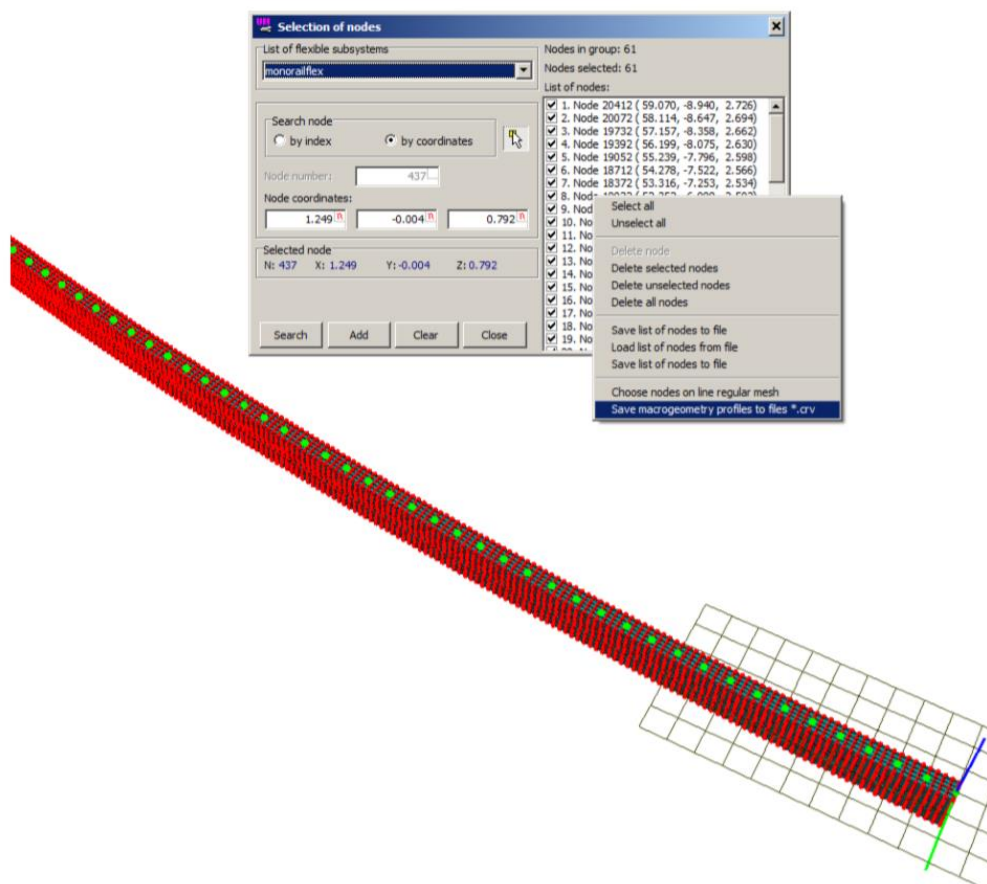


图 19 保存中心线数据点

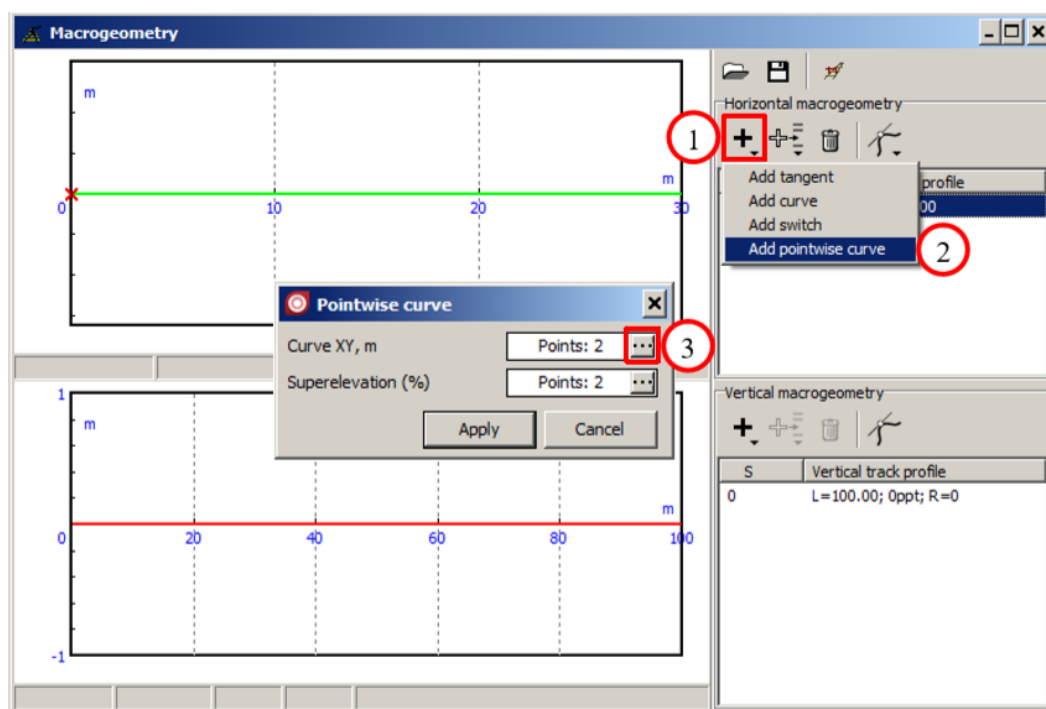


图 20 导入中心线数据点

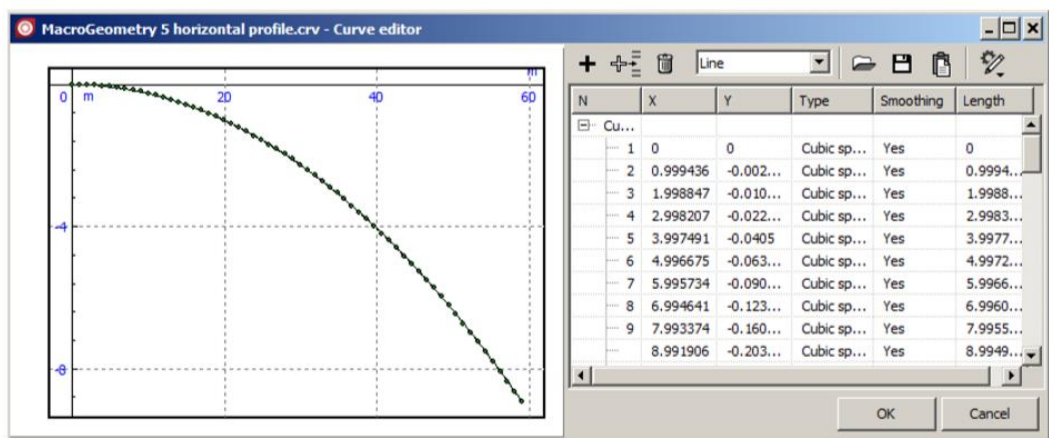


图 21 平面曲线

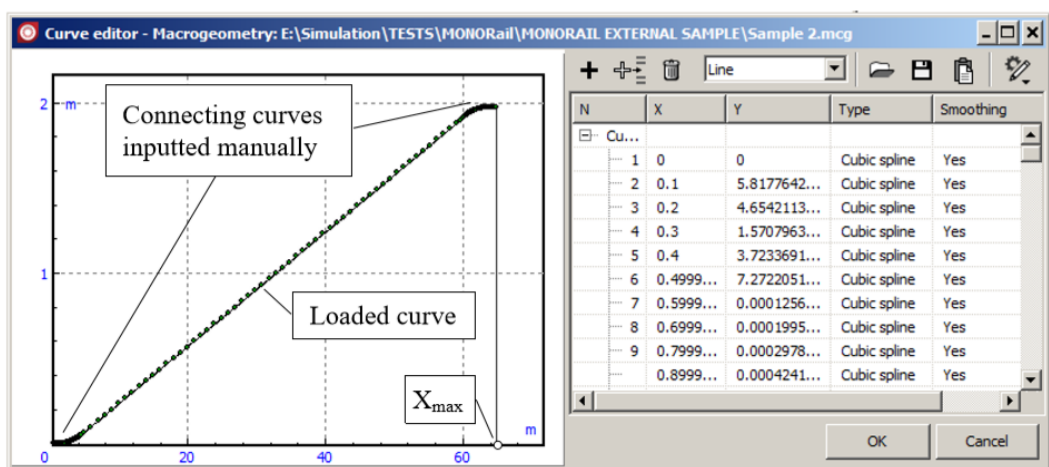


图 22 纵断面曲线

将最终得到的线路文件保存在本地，在后续仿真时就可以使用。

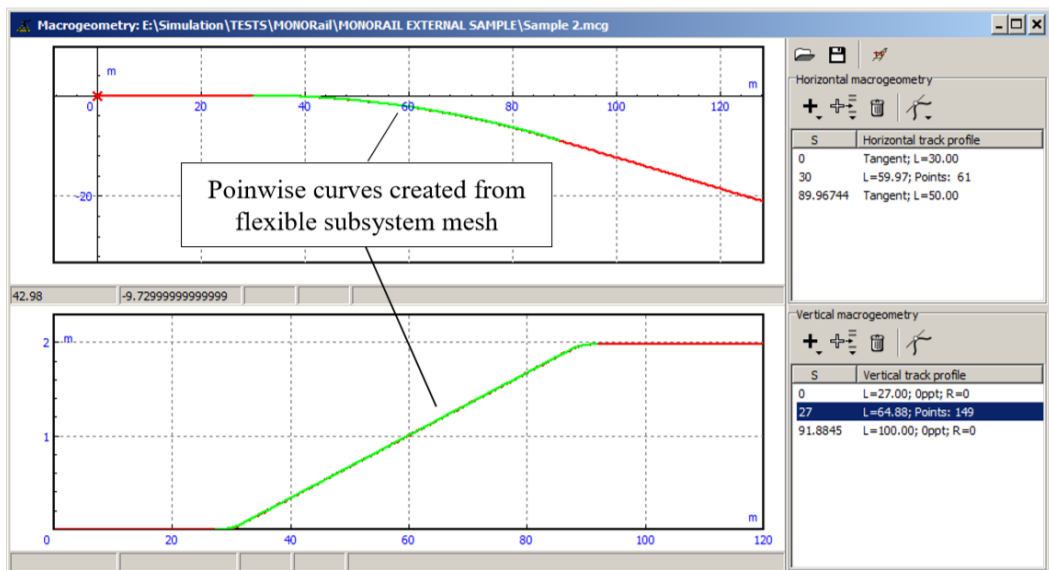


图 23 最终的线路

磁浮系统不像单轨的轮胎与轨面为常接触的，其车上的电磁铁和轨道本身有间隙，而且在对轨道梁建模的时候经常忽略一些细部结构，模型里间隙值会更大，因此在软件仿真界面还有一个 **Control gap** 选项，如图 24-25 所示，使用时应特别注意。

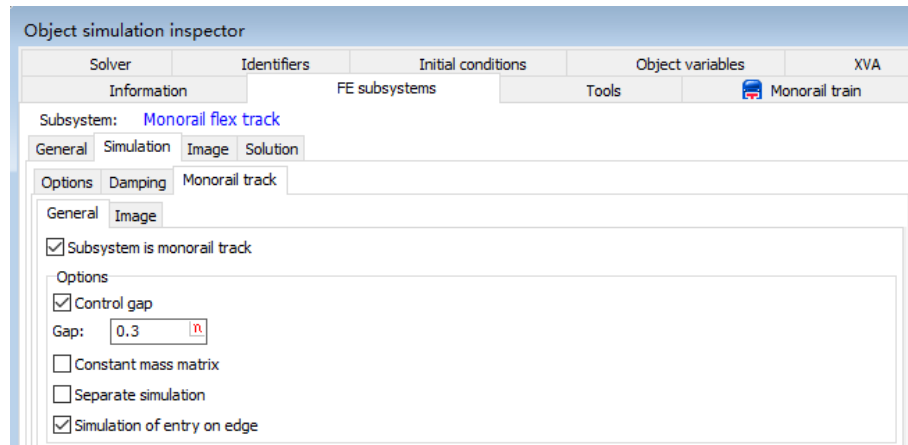


图 24 磁浮轨道梁选项

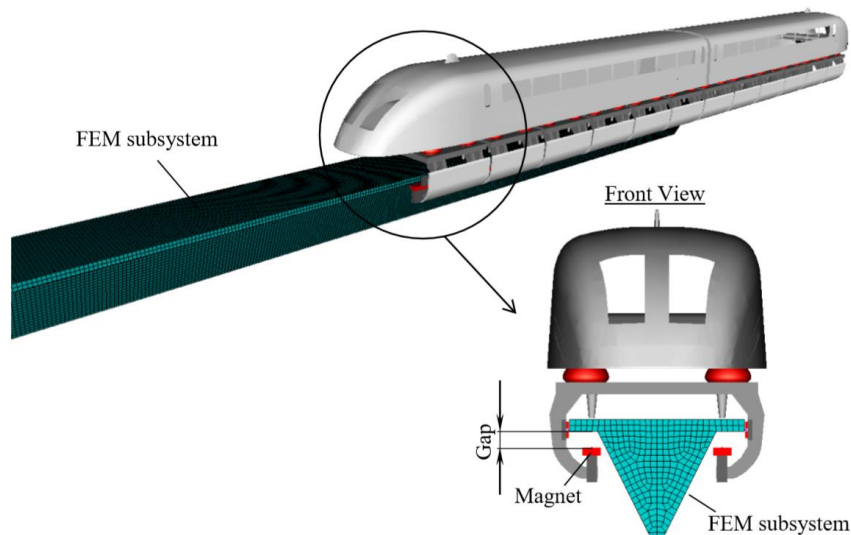


图 25 高速磁浮车辆-轨道梁相互作用模型

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

德米特里·波戈列洛夫, 雷强, 根纳季·米克希夫, & 亚历山大·罗迪科夫. (2019). 基于 UM 的磁浮列车-轨道梁耦合振动仿真程序开发. *计算机辅助工程*, 28(01), 34-41.