

软件说明书

一、设计说明

1. 基本概念

1.1 编写目的

编制车桥耦合振动分析软件是进行车桥耦合振动相关研究的基础,传统的车桥耦合动力分析软件是根据车桥耦合系统动力方程和轮轨关系并结合相关的软件平台编制。传统的车桥耦合动力分析软件存在不可视化、封闭性和不便于考虑车桥耦合系统中的非线性等局限性。为此开发了本软件《基于 CS 技术高速列车-轨道-桥梁系统空间耦合振动分析软件》(SIMPACK and OpenSees cosimulating high-speed Train-Track-Bridge spacing coupling vibration system,简称 SOTTB 软件)。本软件实现了多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 两类不同软件的数据交互,搭建了基于多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 的高速列车-轨道-桥梁耦合振动计算平台。本软件结合了两类不同软件(多体动力学软件与有限元软件)的优势,克服了传统编制软件建立车桥耦合振动分析软件的缺点。多体动力学软件 SIMPACK 能够快速建立精细的高速列车模型,充分的考虑车辆模型中的非线性因素;有限元软件具有丰富的非线性材料库和单元库以及强大的非线性分析功能,能够方便考虑车桥耦合系统中桥梁在地震作用下的非线性行为。同时,鉴于商业软件 SIMPACK 和开源有限元软件 OpenSees 两者的特点,本软件具有开放性、开源和通用性以及可视化等优点。

1.2 编写背景

1.2.1 软件的名称:

软件名为基于 CS 技术高速列车-轨道-桥梁系统空间耦合振动分析软件(SIMPACK and OpenSees co-simulating high-speed Train-Track-Bridge spacing coupling vibration system,简称 SOTTB)。

1.2.2 开发者:

本软件由中南大学土木工程学院国巍、李君龙共同自主开发。

1.2.3 用户:

软件面向用户为高速铁路工程中的桥梁设计工程师,从事铁路结构抗震安全

方向及铁路列车行车平稳性、安全性方向的科学研究人员。

1.2.4 运行软件的计算站:

软件的运行需要计算机有多体动力学软件 SIMPACK、有限元软件 OpenSees 和 MATLAB 的环境支持。同时要求计算机具有主频 2.0G 以上的 CPU 以及 20GB 以上的内存, 20GB 以上的存储空间。

1.3 定义

高速铁路桥梁: 桥梁结构是高速铁路中常采用的结构形式, 其具有高平顺性、高稳定性和高可靠性等特点。

MBS: 多体系统动力学是计算动力学的基础, 根本目的是应用计算机技术进行复杂机械系统的动力学分析与仿真。

无砟轨道: 采用混凝土、沥青混合料等整体基础取代散粒碎石道床的轨道结构。

轨道不平顺激励: 轨道几何不平顺是引起轮轨动力作用变化, 进而诱发整个列车-轨道-桥梁系统耦合振动的主要激励, 包括轨距、方向、高低、水平不平顺。

地震的一致激励: 对于小跨度桥梁的地震反应分析, 通常忽略地震地面运动随空间变化的特性, 即假定所有支承点的地震动输入是相同的, 也就是一致激励法 (单点输入法)。

轮轨相互作用: 车辆在铁路线路上运行时, 受线路不平顺的影响产生振动; 车辆的重力和运行中产生的其他载荷通过车轮作用在轨道上, 又引起钢轨弹性变形和轨道下沉, 从而使线路的不平顺加剧。

联合仿真: 在不同的软件间创建接口, 共同实现数值模型的计算。本软件利用 SIMAT 接口实现 SIMPACK 与 MATLAB 的联合仿真, MATLAB 仿真控制, SIMPACK 仿真动力学, 二者实时交换数据。

标记: 位于刚体上的特定位置的点。

2. 总体设计

2.1 需求规定

高速列车-轨道-桥梁耦合系统的输入参数包括：

- 1) 车辆参数：车体、转向架、轮对的质量与转动惯量；一、二系悬挂系统的刚度与阻尼。
- 2) 轨道参数：轨道结构各组成部分的几何尺寸、质量、转动惯量和刚度等信息参数。
- 3) 桥梁参数：桥梁的几何尺寸、质量、配筋等信息参数。
- 4) 地震动参数：根据结构频率、阻尼比、设防等级、场地类别和分组选取的地震波时程。
- 5) 轨道不平顺参数：定义功率谱密度（PSD）所需参数；
- 6) 列车运行时速。

高速列车-轨道-桥梁耦合系统的输出参数包括：

- 1) 桥梁自振频率及振型；
- 2) 不同时速下桥梁跨中位移振幅峰值、加速度振幅峰值；
- 3) 不同时速下车辆加速度峰值；
- 4) 不同时速下 SPERLING 指标（列车运行平稳性指标）；
- 5) 不同时速下的脱轨系数、轮重减载率、轮对横向力（列车运行安全性指标）。

软件计算要求所有参数统一采用国际单位制，精确到小数点后两位，数据类型为双精度字符和矩阵形式。在计算过程中，可依据计算输出精度的需求调整计算变量，从而提高软件运行的精确性与效率。

2.2 运行环境

软件的运行需要计算机有多体动力学软件 SIMPACK、有限元软件 OpenSees 和 MATLAB 的环境支持。同时要求计算机具有主频 2.0G 以上的 CPU 以及 20GB 以上的内存，20GB 以上的存储空间。

2.3 基本设计概念和处理流程

本软件实现了多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 两类不同软件的数据交互,搭建了基于多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 的高速列车-轨道-桥梁耦合振动计算平台。本软件结合了两类不同软件(多体动力学软件与有限元软件)的优势,其中多体动力学软件 SIMPACK 能够快速建立精细的高速列车模型,充分的考虑车辆模型中的非线性因素;有限元软件具有丰富的非线性材料库和单元库以及强大的非线性分析功能,能够方便考虑车桥耦合系统中桥梁在地震作用下的非线性行为。同时,鉴于商业软件 SIMPACK 和开源有限元软件 OpenSees 两者的特点,本软件具有开放性、开源和通用性以及可视化等优点。

软件计算模型主要包括三个模块,上部结构子系统、下部结构子系统、MATLAB 联合仿真模块:

(1) 上部结构子系统,利用 SIMPACK 建立车辆模型、双块式无砟轨道模型和线弹性梁体模型构成上部结构子系统,同时考虑了轮轨相互作用以及梁轨相互作用。在上部结构子系统中,可输入轨道不平顺激励以及地震激励。

(2) 下部结构子系统,利用有限元软件 OPNESEES 建立纤维桥墩模型和支座模型构成下部结构子系统。在地震荷载作用下,桥梁的梁体通常保持弹性,而桥墩和支座容易进入弹塑性状态,因此在上部结构子系统中建立线弹性梁体模型,在下部结构子系统中建立支座模型和纤维桥墩模型,考虑桥墩与支座的非线性行为。同时,基于 Client-Server 模式的技术将 OpenSees 改造为服务器,实现“计算服务器”的功能。

(3) MATLAB 联合仿真模块。首先,通过在 MATLAB 中调用 SIMAT 模块,可实现 SIMPACK 与 MATLAB 的联合仿真;其次,在 MATLAB 中编写 OpenSees.m (S 函数),可实现实现 OpenSees 与 MATLAB 数据交换的。

用户根据研究对象或者研究需求在 SIMPACK 中创建由车辆、轨道、梁体组成的上部结构子系统;在 OpenSees 中创建由桥墩和支座组成的下部结构子系统。上、下部结构子系统以支座上节点为边界,基于边界处的力的平衡和位移协调条件通过边界处的数据交互实现两者耦合计算。

用户根据自己的研究需求在 SIMPACK 中创建输入和输出接口。创建输入接口以接受下部结构子系统传递的位移实现边界的强迫振动,创建输出接口以将边界处的荷载传递至下部结构。

三个模块的具体处理流程可参考图 1、图 2、和图 3：

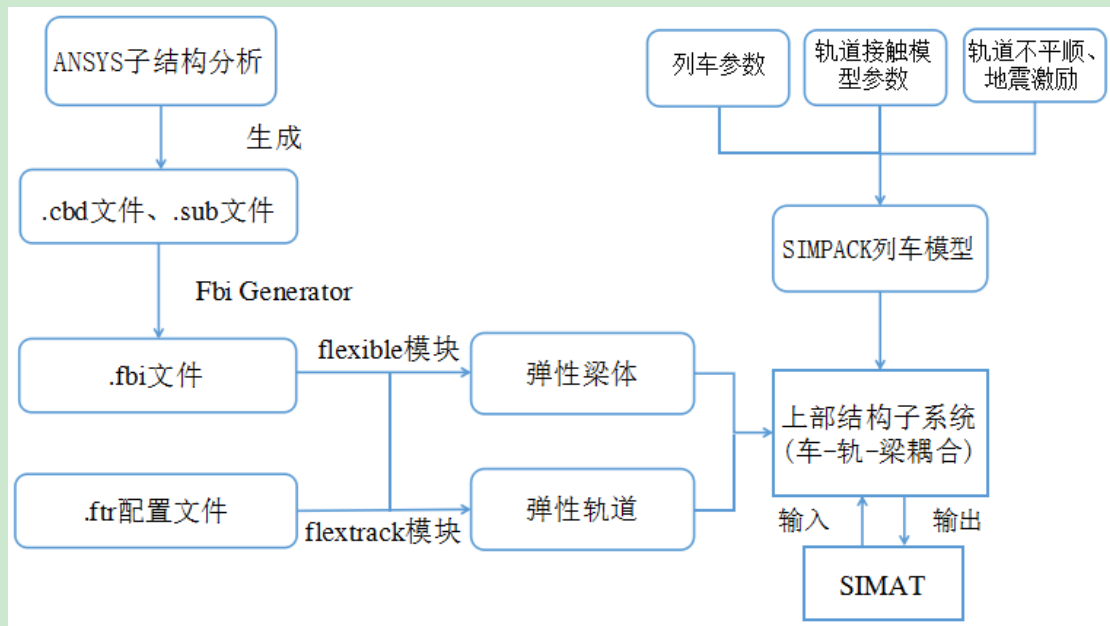


图 1 上部结构子系统

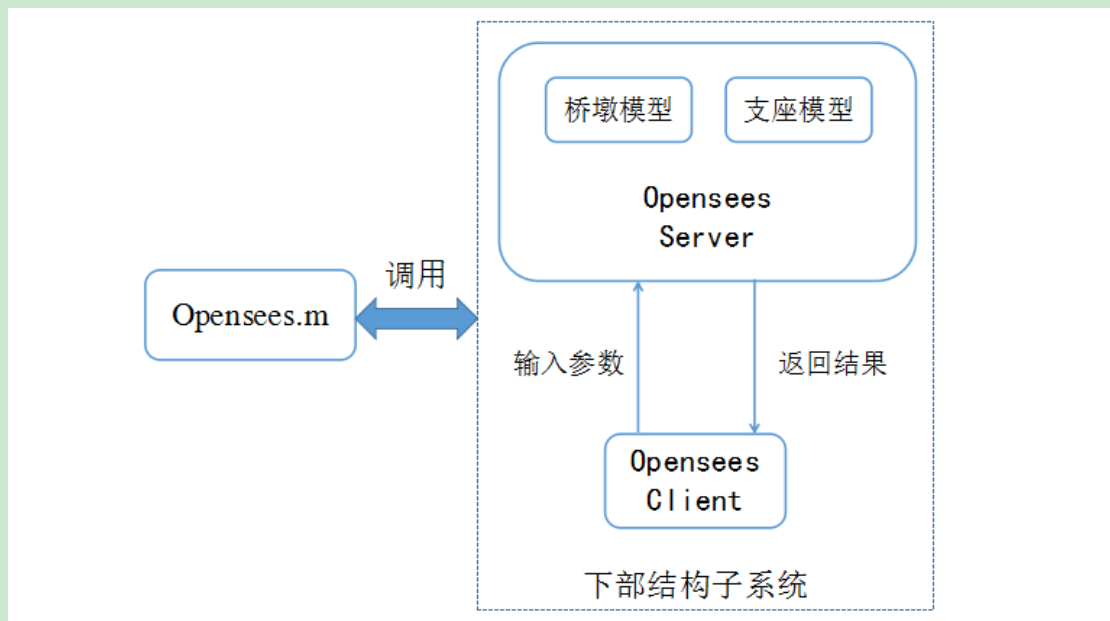


图 2 下部结构子系统

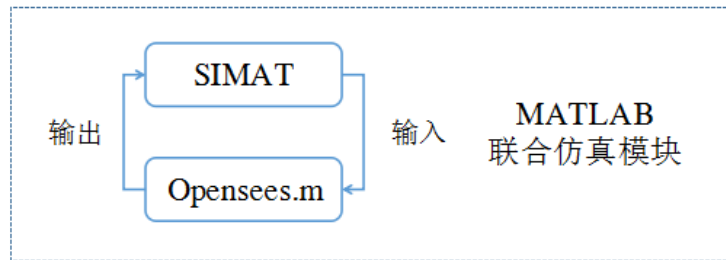


图 3 MATLAB 联合仿真模块

2.4 结构

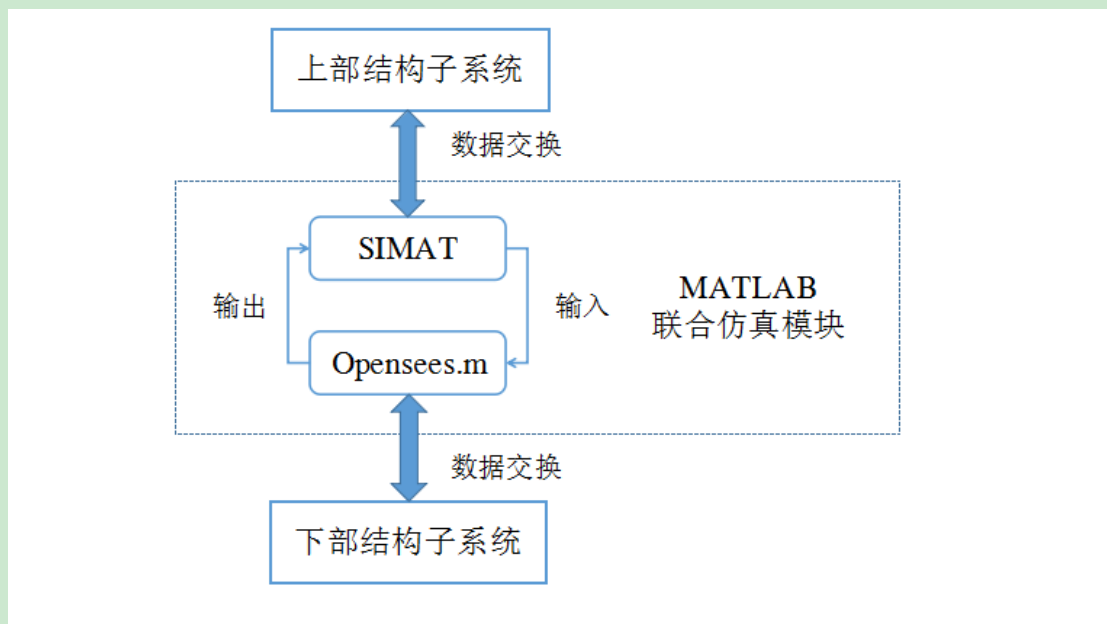


图 4 软件结构

2.5 功能需求与程序之间的关系

功能需求	上部结构子系统	下部结构子系统	MATLAB 联合仿真模块
车辆模型的建立	✓		
弹性轨道的建立	✓		
弹性梁体的建立	✓		
桥墩模型的建立		✓	
桥梁支座的建立		✓	
联合仿真			✓

2.6 人工处理过程

软件运行前需要将需要输入或更改的参数值输入至软件代码的指定位置。

3. 接口设计

3.1 用户接口

用户根据自己的研究需求在 SIMPACK 中创建输入和输出接口。在边界处创建移动的标记，通过输入接口控制移动标记的移动，输入接口接受下部结构子系统传递的位移，实现边界的强迫振动；创建输出接口以将边界处的荷载传递至下部结构。输入接口传入数据由输入向量读取。

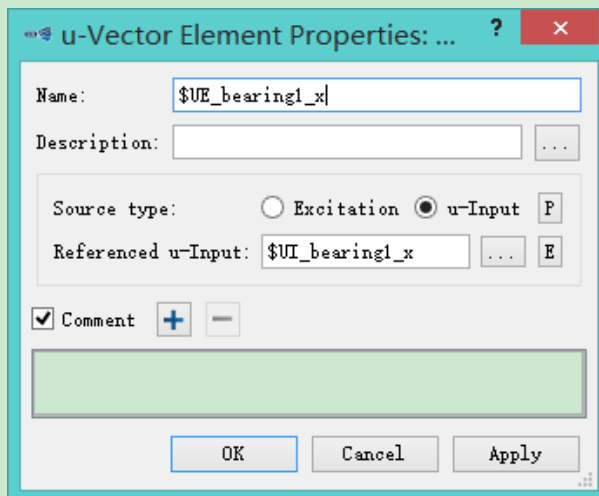


图 5 输入向量

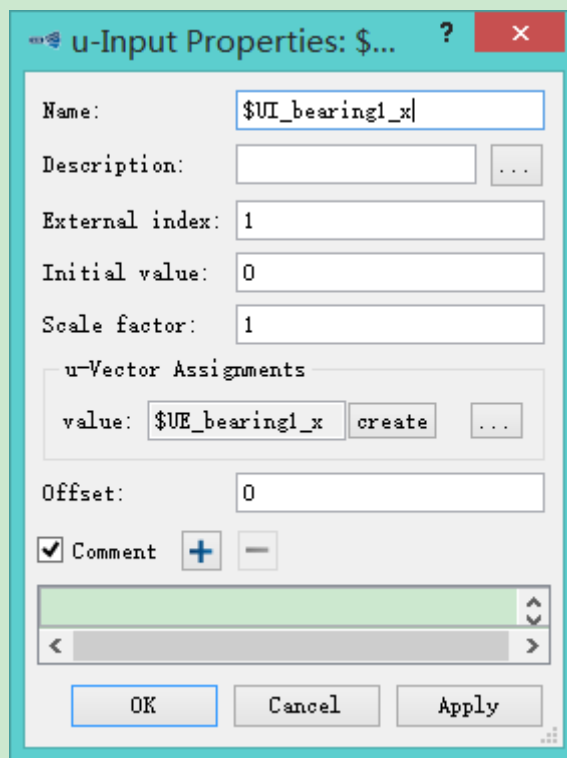


图 6 输入接口

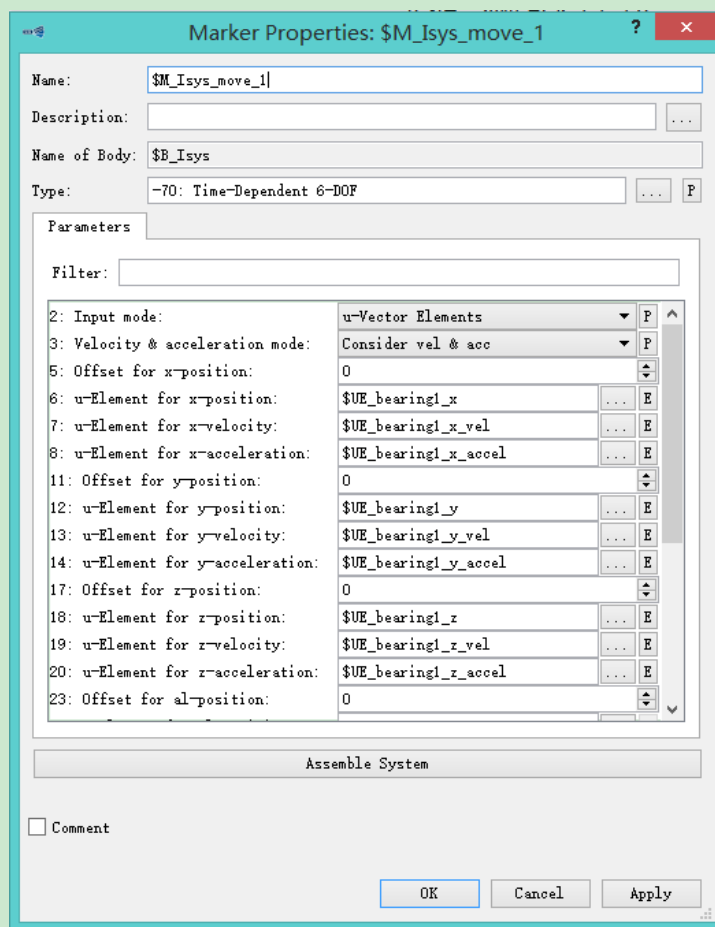


图 7 移动标记

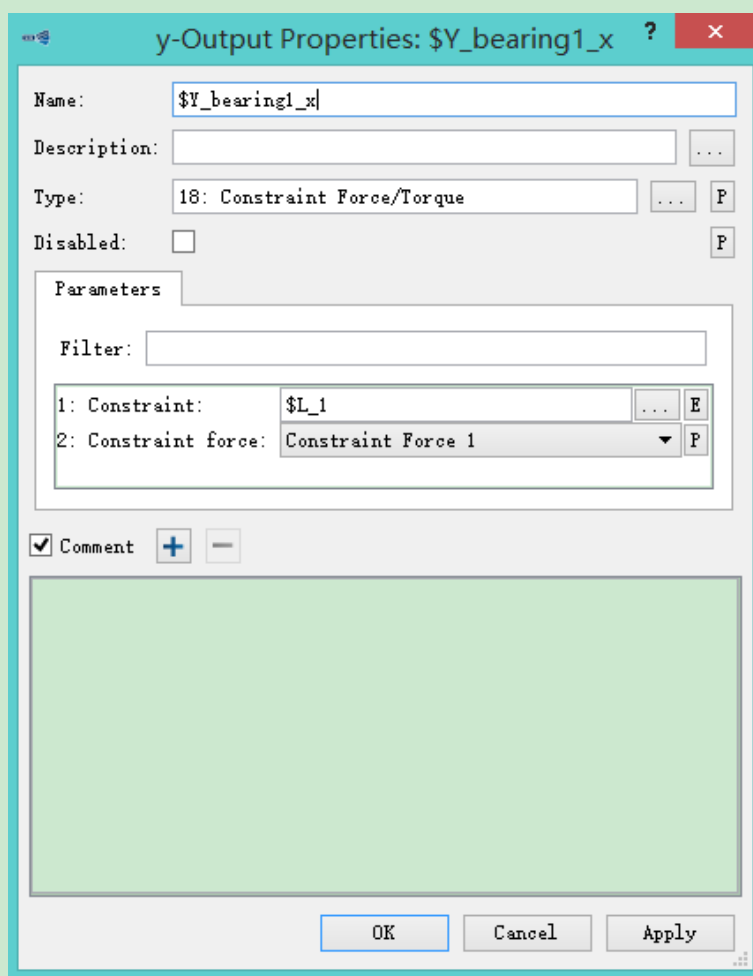


图 8 输出接口

3.2 外部接口

输出结果为 .spr 文件与 .m 文件，分别可用 SIMPACK 后处理软件和 MATLAB 软件打开。

3.3 内部接口

软件各部分按照图 4 中所示方式调用，调用参数均为双精度字符。

4. 运行设计

4.1 运行模块组合

用户根据研究对象在多体动力学软件 SIMPACK 中建立车辆、轨道和梁体模型并创建输入、输出传参接口，作为上部机构子系统；在有限元软件 OpenSees 中建立桥墩和支座有限元模型，作为下部结构子系统。在 MATLAB 中添加多体动力学软件联合仿真模块 SIMAT 所在路径，在 MATLAB 中输入 SIMAT 命令以打开 SIMULINK 同时调用多体动力学软件联合仿真模块 SIMAT，SIMAT 是 SIMPACK 与 MATLAB 的接口之一，可以实现 MATLAB 与 SIMPACK 的实时数据交换。同时，在 SIMULINK 中调入 OpenSees.m 文件，OpenSees.m 文件用以实现 MATLAB 与 OpenSees 的数据交换。建立 SIMAT 和 OpenSees.m 文件的连接以实现多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 之间的数据交互。

4.2 运行控制

配置软件进行运算时，多体动力学软件 SIMPACK 和有限元软件 OpenSees 会根据计算情况不同会出现不同的提示，如果输入参数或者软件配置存在错误，两者都会给出错误的提示。如果参数正确无误且计算满足精度要求，则软件提示计算结束。

4.3 运行时间

运行时间取决于高速列车-轨道-桥梁耦合振动计算模型的大小。一般精度条件下，单跨（32m 标准跨）简支梁桥的高速列车-轨道-桥梁耦合振动计算模型计算时长 45~90 分钟。10 跨（32m 标准跨）的模型计算时长为 8~10 天。

5. 系统数据结构设计

5.1 逻辑结构设计要点

软件当中计算步定义为整数形式，其他参数均定义为双精度字符数，表示变化过程的参数均用矩阵形式存储。各个计算模块的耦合和调用都使用双精度字符数参数的格式进行。调用过程的中间参数存储为 TXT 文本文档格式。

5.2 物理结构设计要点

本系统的基于 SIMPACK 前处理界面，通过输出结果设置，可以选择输出数据。输出文件可为 SIMPACK 二进制结果文件（.spr 文件），MATLAB 数据文件（.mat 文件）。

5.3 数据结构与程序的关系

使用 MATLAB 打开后缀名为.mat 的文件，或者使用 SIMPACK 后处理软件打开后缀为.spr 的文件。

二、操作说明

1. 1. 软件安装

① 创建传参接口

用户根据自己的研究需求在 SIMPACK 中创建输入和输出接口。在边界处创建移动的标记，通过输入接口控制移动标记的移动，输入接口接受下部结构子系统传递的位移，实现边界的强迫振动；创建输出接口以将边界处的荷载传递至下部结构。输入接口传入数据由输入向量读取。

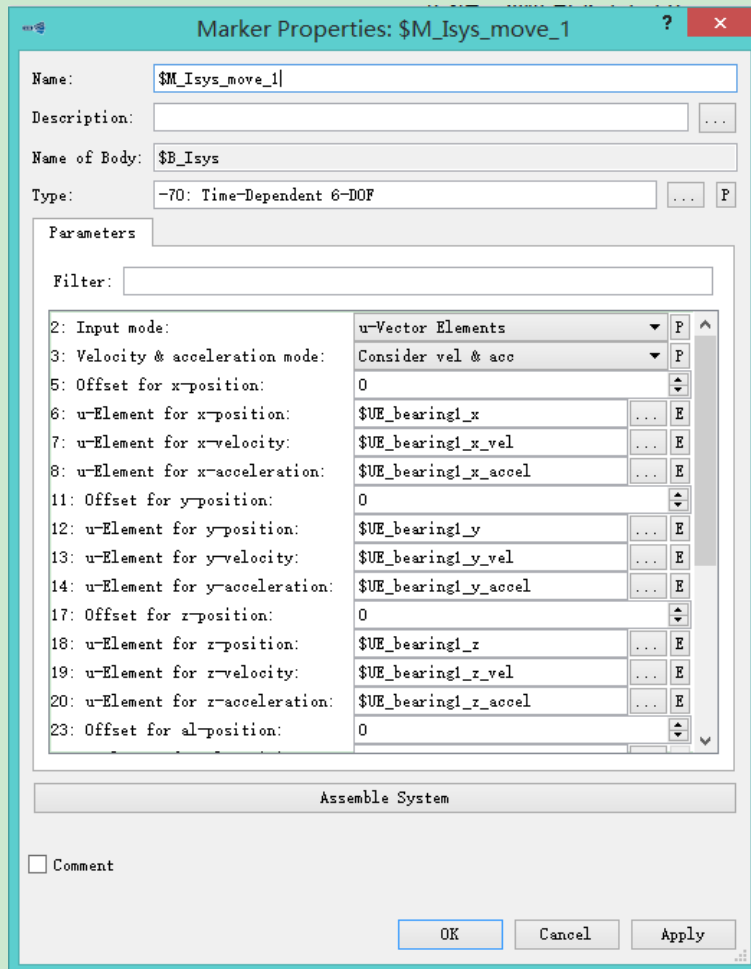


图 9 移动标记

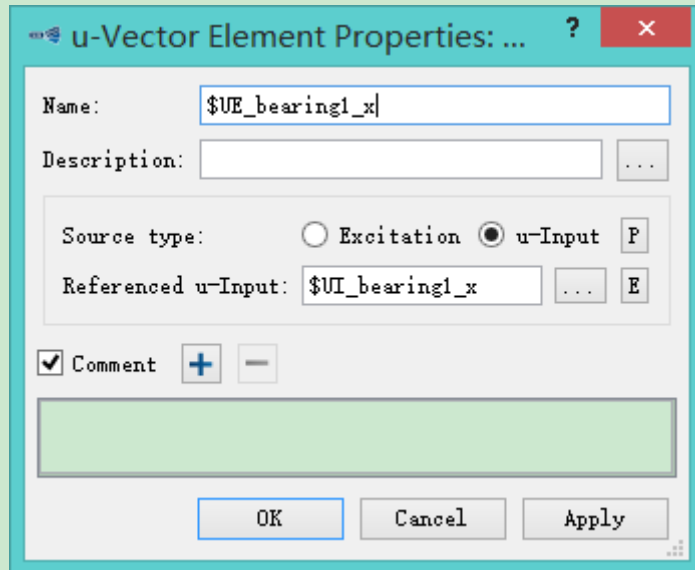


图 10 输入向量

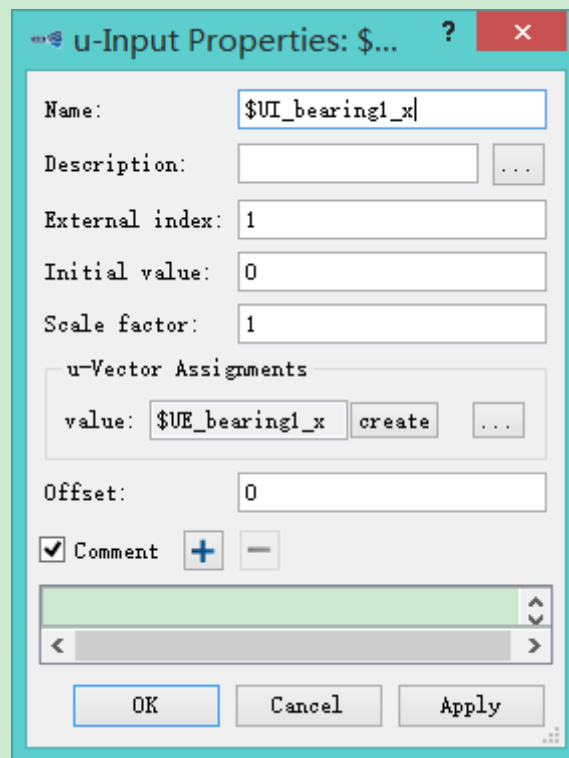


图 11 输入接口

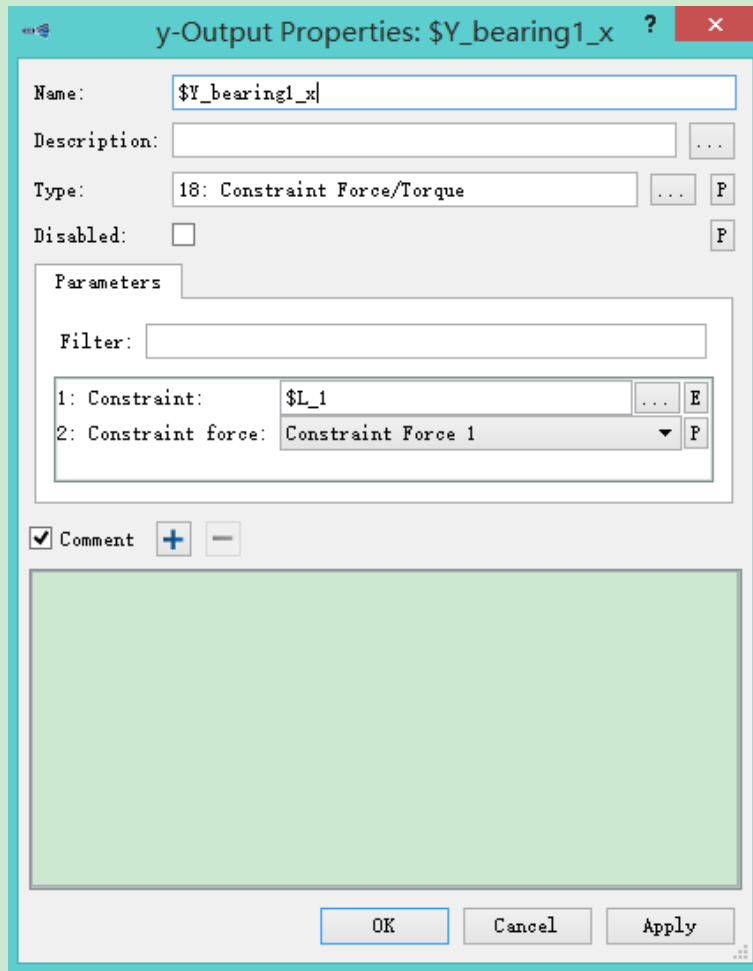


图 12 输出接口

② 在 SIMPACK 中进入求解器配置 (solver setting)，配置 SIMAT 联合仿真 (Cosimulation) 的相关设置，包括端口号和通信类型等信息。

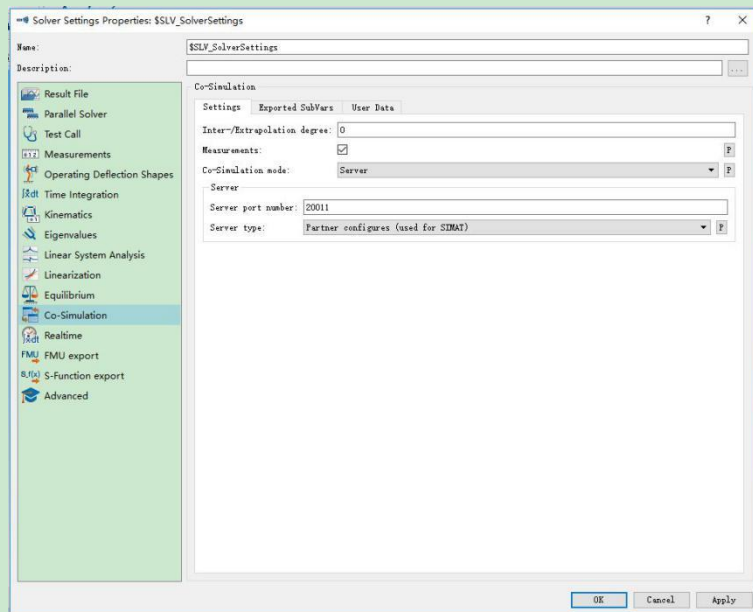


图 13 SIMPACK 服务端口设置

③ 在 MATLAB 中添加多体动力学软件联合仿真模块 SIMAT 所在路径，在 MATLAB 中输入 SIMAT 命令以打开 SIMULINK 同时调用多体动力学软件联合仿真模块 SIMAT，SIMAT 是 SIMPACK 与 MATLAB 的接口之一，可以实现 MATLAB 与 SIMPACK 的实时数据交换。

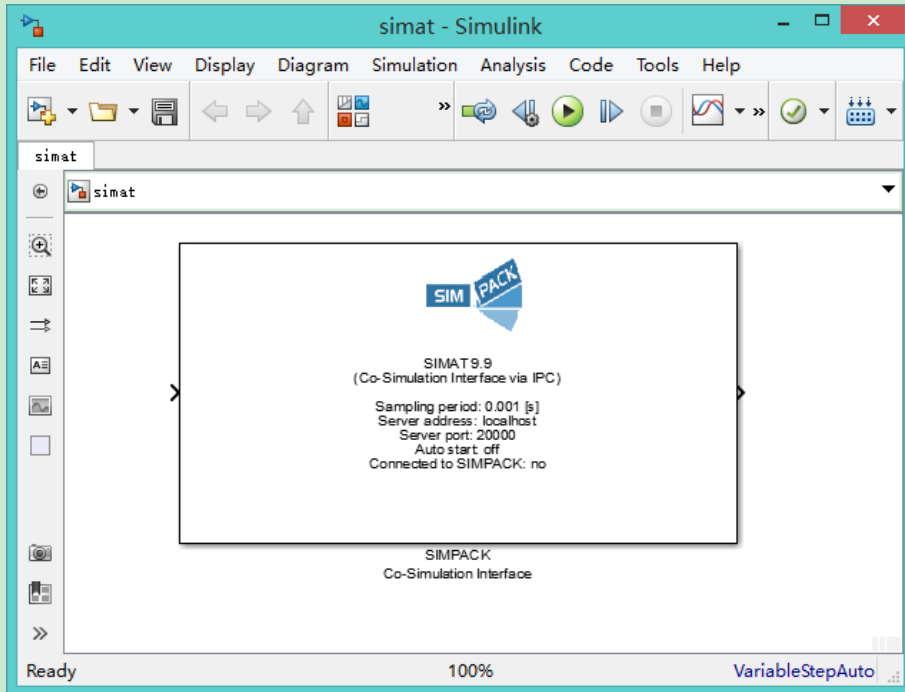


图 14 联合仿真模块调用

④ 在 MATLAB 中配置 SIMAT 联合仿真用户端口，包括采样间隔与端口号等，注意此处输入的端口号需要与 SIMPACK 中设置的端口号保持一致。

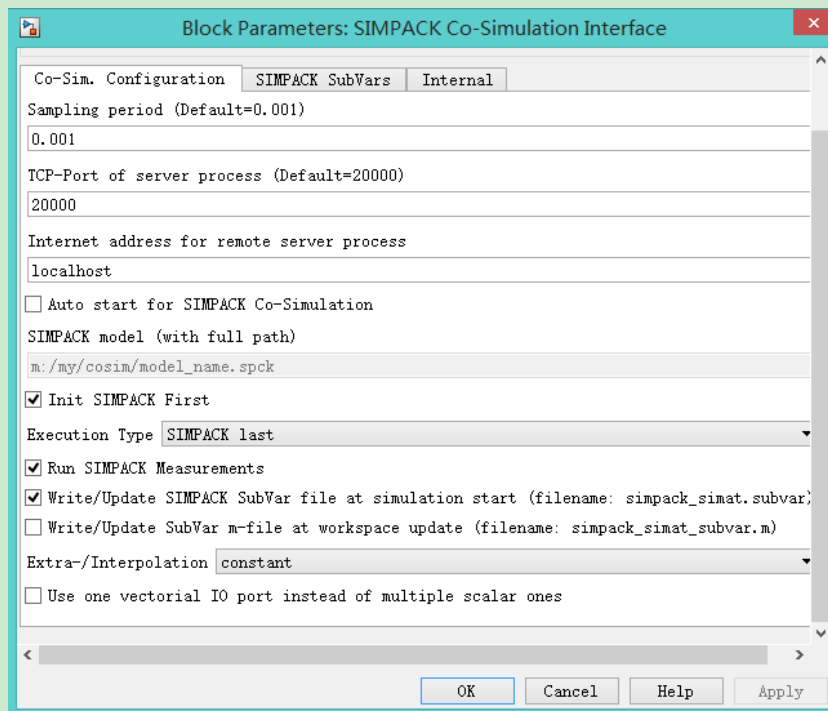


图 15 MATLAB 用户端口设置

⑤ 使用 MATLAB 打开 OpenSees.m 文件，调用 Client.tcl 与 Server.tcl，实现 OpenSees 与 MATLAB 的实时数据交换。

```

1 function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = opensees(t,x,u,flag)
2     switch flag,
3
4         % Initialization %
5         %~~~~~%
6         case 0,
7             [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
8
9
10        % Derivatives %
11        %~~~~~%
12        case 1,
13            sys=mdlDerivatives(t,x,u);
14
15
16        % Update %
17        %~~~~~%
18        case 2,
19            sys=mdlUpdate(t,x,u);
20
21
22        % Outputs %
23
    
```

图 16 OpenSees.m 文件

⑥ 激活 SIMPACK 的联合仿真，一旦激活，则 SIMPACK 处于等待状态；使用 OpenSees 打开 Server.tcl，下部结构子系统服务器处于等待状态；点击 MATLAB 中的计算选项图标，计算开始进行。

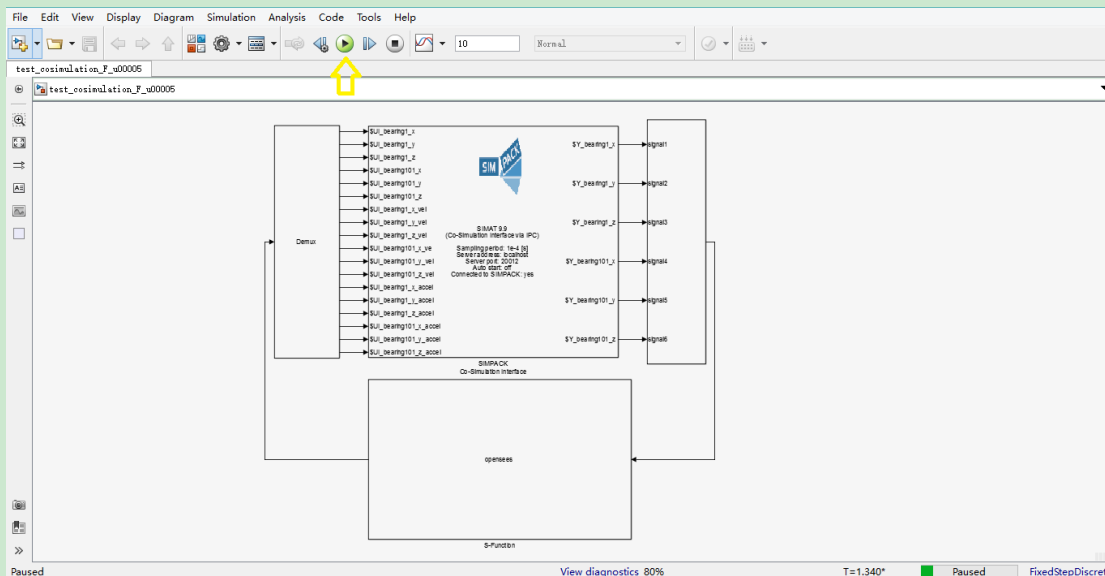


图 17 MATLAB 联合仿真

2. 2. 操作简介

此处以 CHR2 列车以 50km/h 的运行速度通过单跨简支梁桥模型为例，进行操作介绍。

1) 创建上部子结构子系统

① 车辆模型的建立

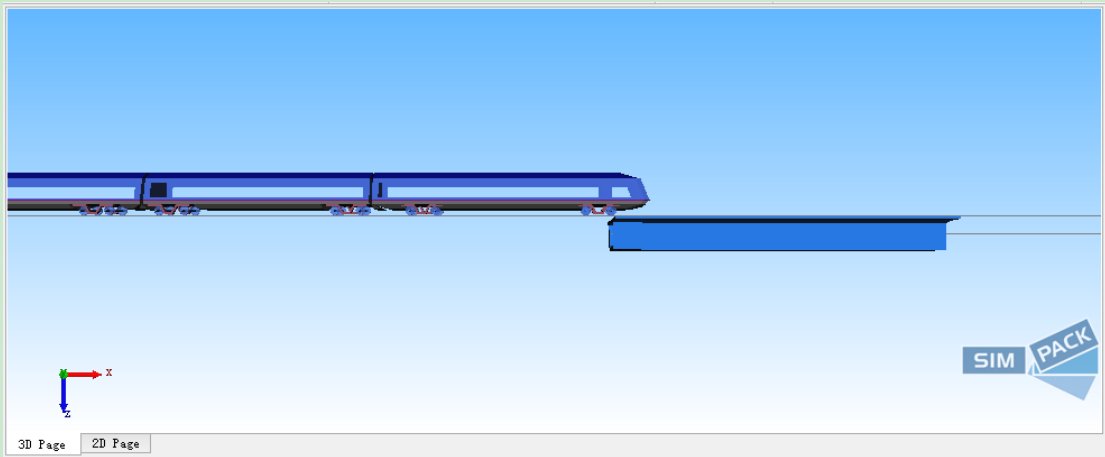


图 18 车辆模型示意图

② 轨道模型的建立

SIMPACK 中弹性轨道的建立，通过 flextrack 模块来实现。首先，在 ANSYS 中建立轨道的有限元分析模型，进行子结构分析，生成 .sub 与 .cdb 文件（.sub 文件包含轨道的刚度、质量、阻尼信息；.cdb 文件为轨道外形文件）；在 SIMPACK 前处理界面下选择 **Fbi File Generation**，输入 .sub 及 .cad 文件，点击 **Generate** 完成 .fbi 文件的生成；编辑弹性轨道配置文件 .ftr；将 .fbi 与 .ftr 放置在文件名为 flextrack 的文件夹下，完成创建准备；设置路径；最后，实现弹性轨道的生成。

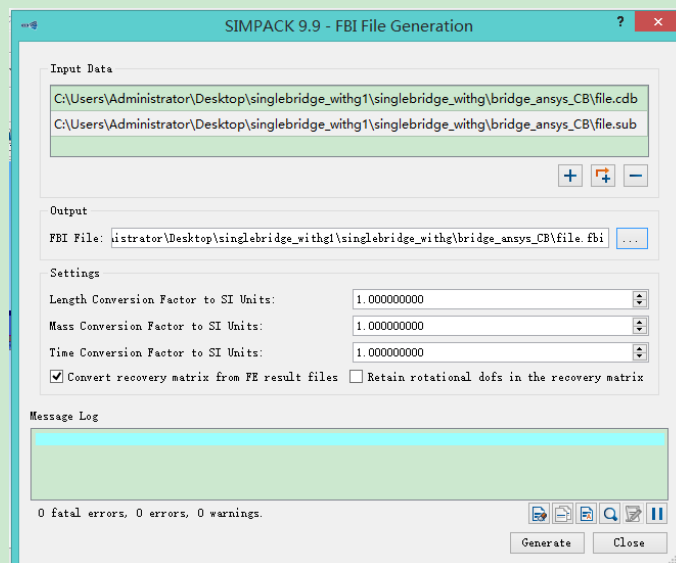


图 19 生成.fbi 文件

```

se, file.fbi, 0, 0, 100, 0.753152, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1
se, file.fbi, 0, 0, 100,-0.753152, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1
.....
n , 10001 , 100 , 0.753152 , 0
n , 10002 , 100.65 , 0.753152 , 0
.....
n , 10205 , 164.35 , 0.753152 , 0
n , 10207 , 165 , 0.753152 , 0

stiffness minimum, 10
mass minimum, 0.01
node tolerance, 0.025
echo nodes, 10001
    
```

图 20 .ftr 文件示例

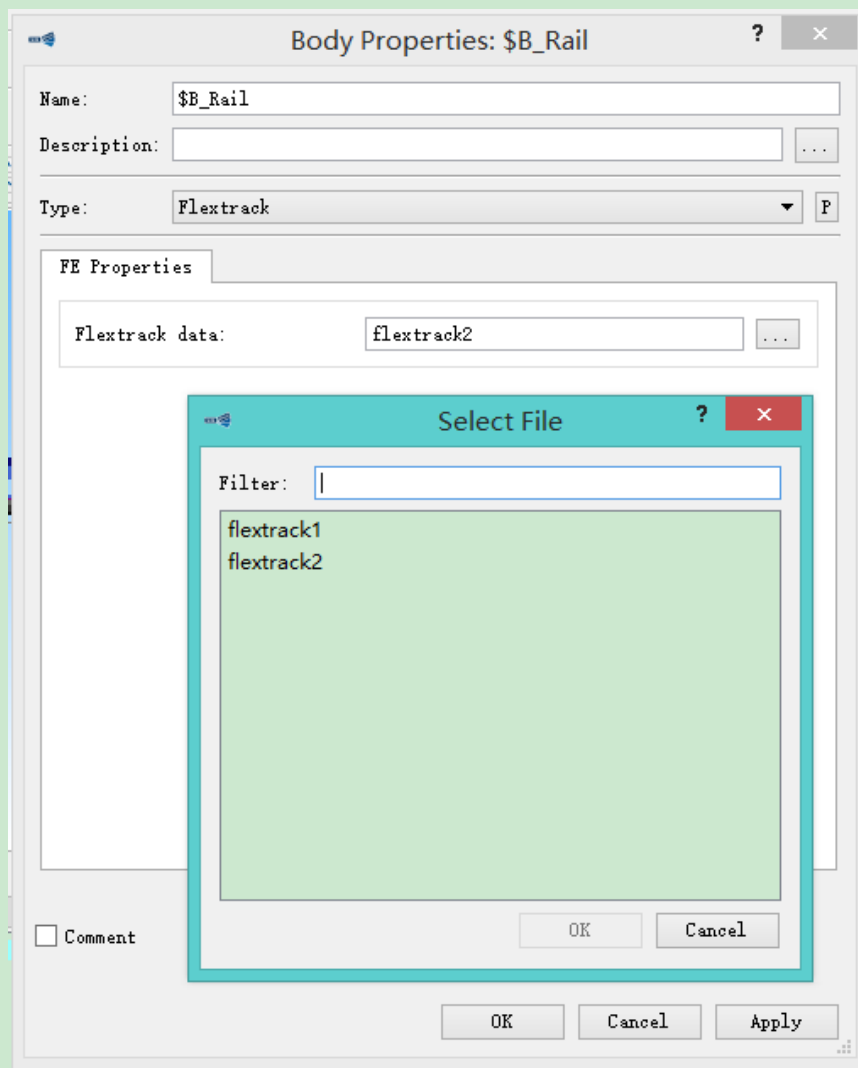


图 21 弹性轨道的生成

③ 梁体模型的建立

弹性梁体的建立同弹性轨道的建立相似。首先，在 ANSYS 中建立轨道的有限元分析模型，进行子结构分析，生成 .sub 与 .cdb 文件（.sub 文件包含梁体的刚度、质量、阻尼信息；.cdb 文件为梁体外形文件）；在 SIMPACK 前处理界面下选择 **Fbi File Generation**，输入 .sub 及 .cad 文件，点击 **Generate** 完成 .fbi 文件的生成；设置路径；最后，实现弹性梁体的生成。

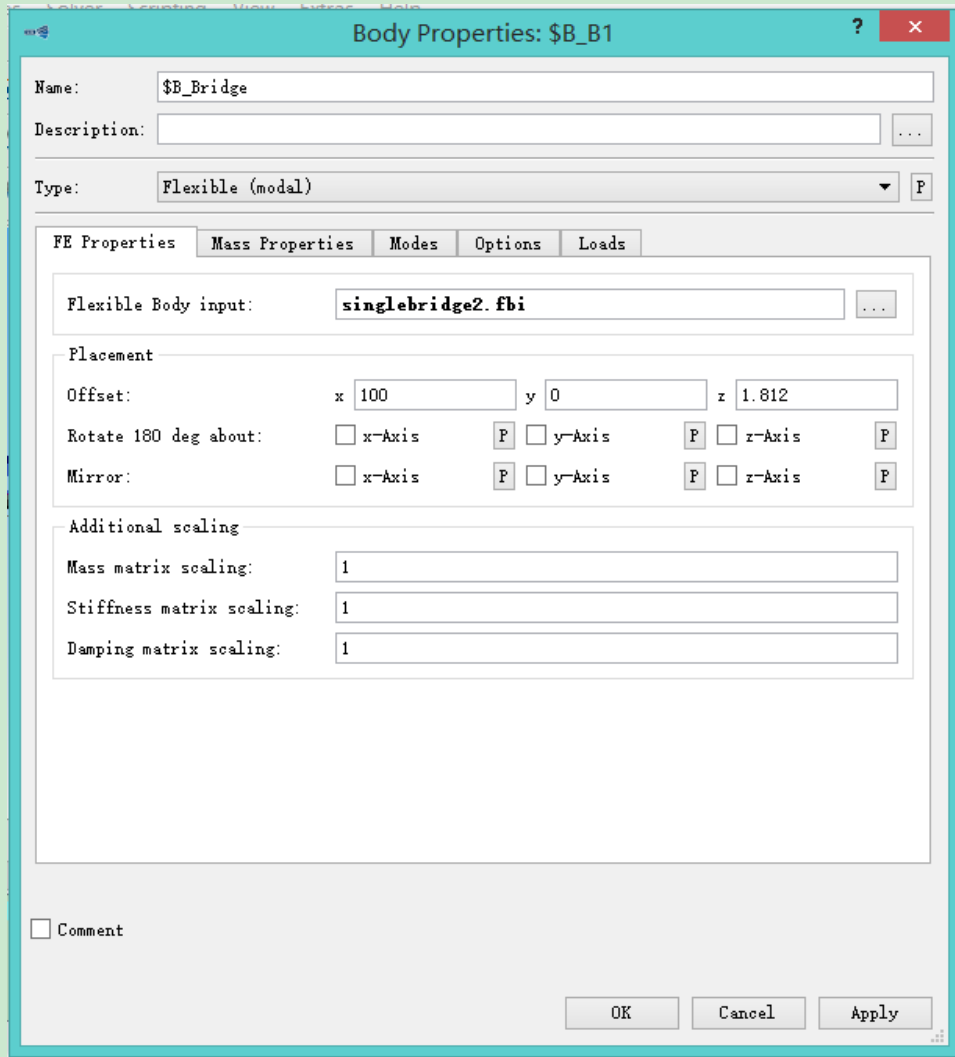


图 22 弹性梁体的生成

④ 配置轮轨关系

轮轨关系的定义在 SIMPACK 前处理界面中实现，包括 **General** 定义、**Wheel** 定义、**Rail** 定义、**Contact Normalforce** 定义、**Tangential Forces** 定义。用户可以根据自己的需求，选择相应的参数。

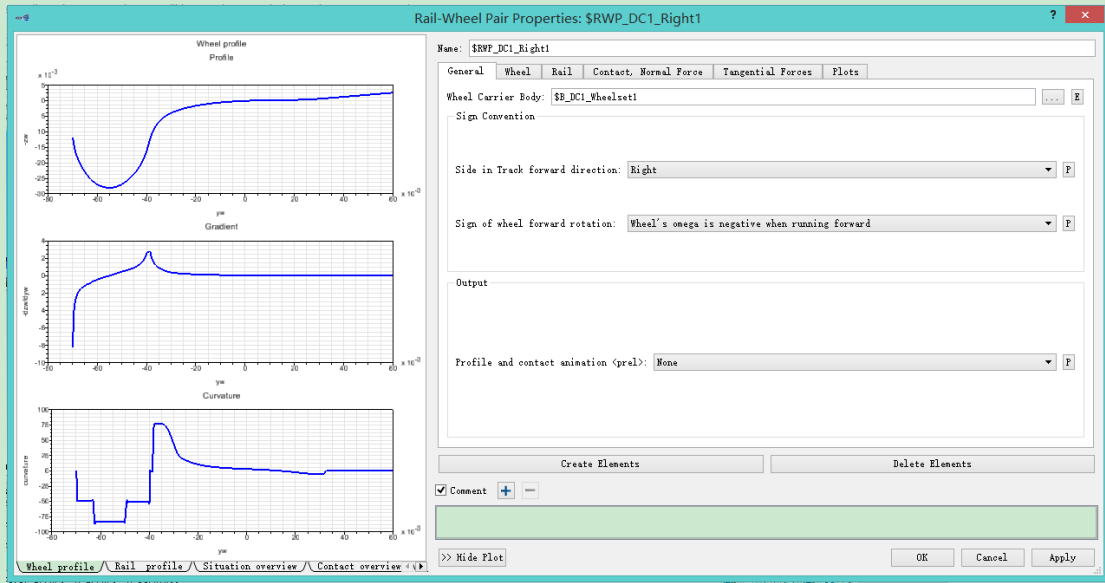


图 23 轮轨关系的配置

2) 创建下部结构子系统

以命令流的方式建立桥墩与支座模型。此处，桥墩建模采用纤维截面梁单元，支座建模采用两节点单元。

3) 启动软件

按照软件安装的步骤，启动软件。

4) 计算所需时间随桥梁跨度增大而增加，一跨简支梁的计算时间约为 90min，计算完成后，得到 SIMPACK 结果文件.spr 文件。使用 SIMPACK 后处理软件打开.spr 文件，如下图示。在右侧结果树中选择需要显示的数据，将其拖入到页面中，数据以曲线的形式展现。下图分别为梁体竖向加速度和左侧轮轨横向力的时程曲线。

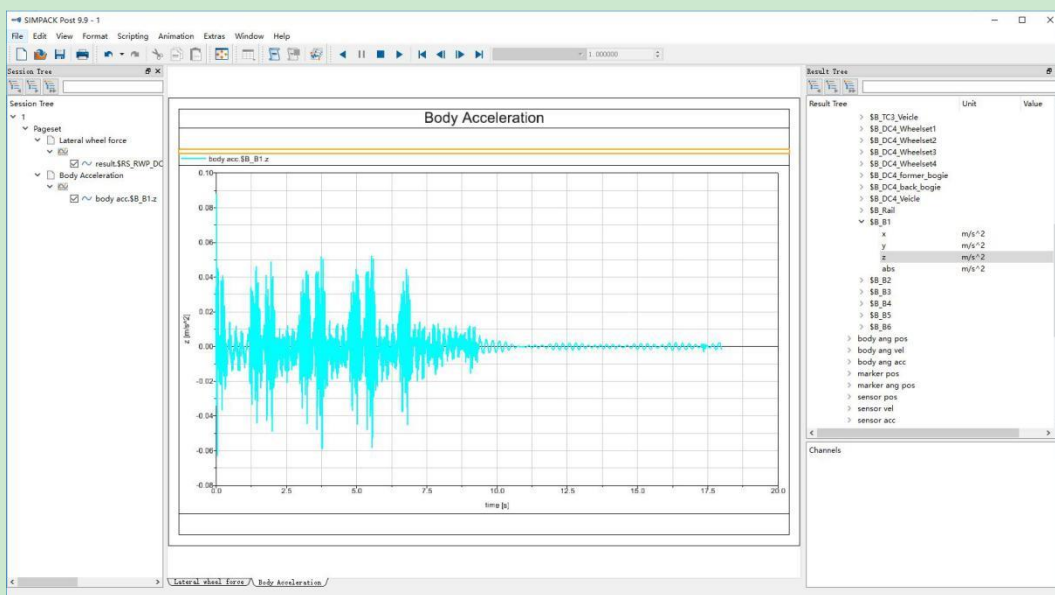


图 24 梁体竖向加速度时程曲线

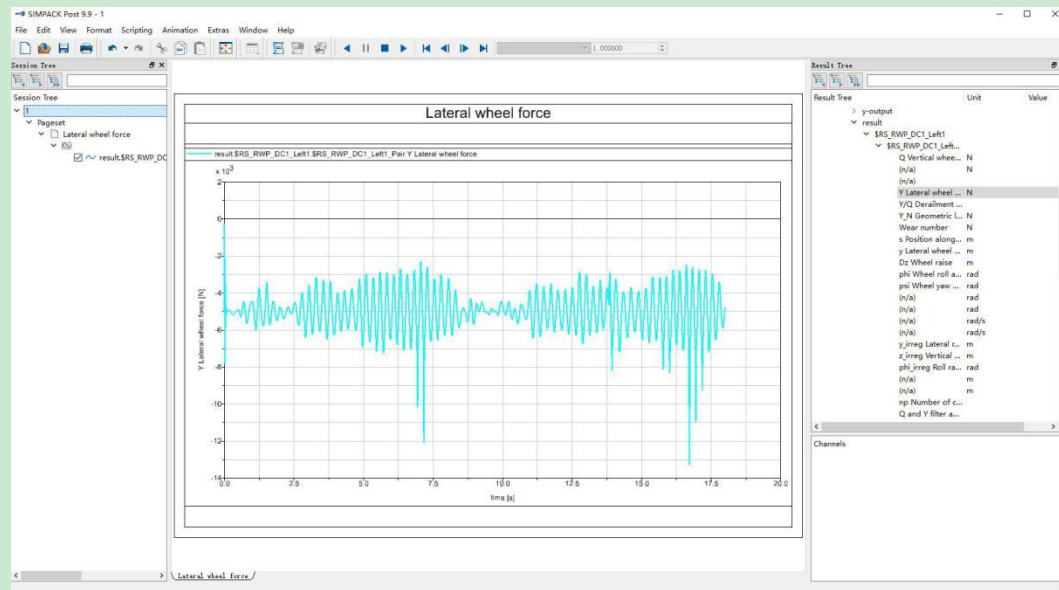


图 25 左侧轮轨横向力时程曲线