列车纵向动力学仿真

UM 软件入门系列教程

（07）

四川同算科技有限公司 译

2021 年 3 月

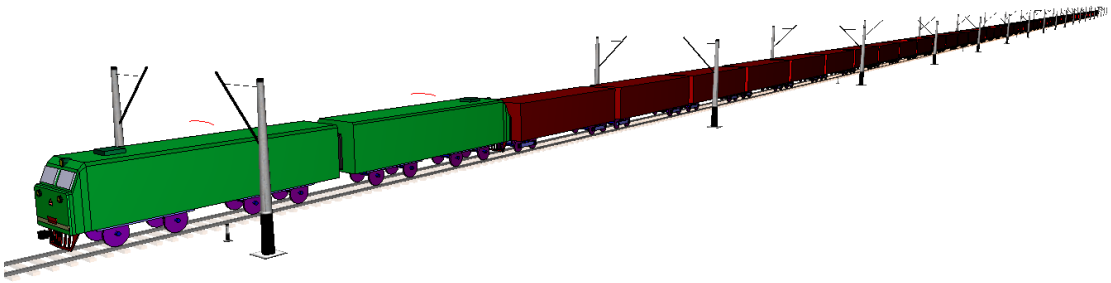
前言

本教程介绍使用**UM Train**模块进行列车纵向动力学建模和仿真的基本方法和流程。

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。

本教程只是帮助用户快速熟悉**UM Train**模块的基本使用方法，更详细的理论和方法介绍请查阅用户手册第十五章。此外，**UM软**件还支持在列车纵向动力学模型中加入若干考虑轮轨接触作用的三维车辆模型（**UM Train3D**模块），详见用户手册第十七章（要求同时具备**UM Train**和**UM Loco**建模和仿真基础）。

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 Train**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

本教程仅供读者参考，不同的版本其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。

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.

若无法访问，请点击：http://www.umlab.ru/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 www.umlab.ru

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. 列车制动模拟

1.1 课程内容

本课程将通过模拟一个简单的列车制动工况介绍 UM Train 模块的功能和使用方法，主要包含以下内容：

- 定义铁路线形；
- 定义阻力模型；
- 设置牵引和制动参数；
- 显示仿真结果；

现在，我们来创建一个俄罗斯重载列车模型，它由 2 节机车和 58 节敞车组成。

1.2 创建列车模型

首先，请运行 **UM Input** 程序。

选择主菜单 **Tools | Train wizard**，打开列车向导界面，如图 1.1 所示。

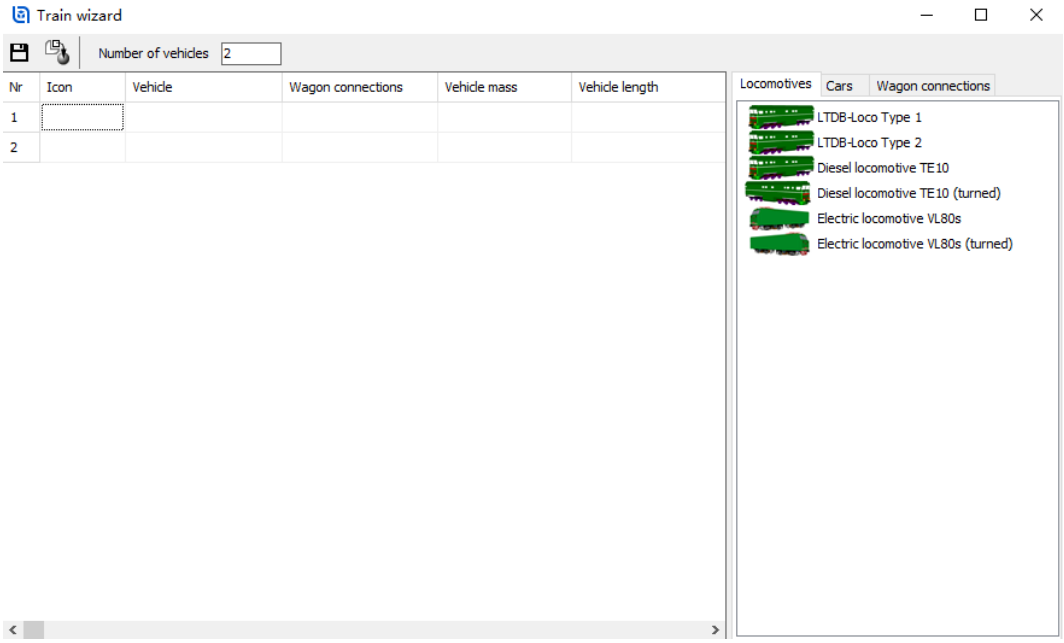


图 1.1

用户需要先指定机车和车辆的总数，然后从右侧的机车和车辆库（支持自定义）添加所需的模型以及相应的车钩缓冲器。

这里，我们设置车辆数为 **60**，敲**回车**，主界面随即显示 **60** 行元素，每一行对应一节机车或车辆，每一列为相应的参数，如图 1.2 所示。

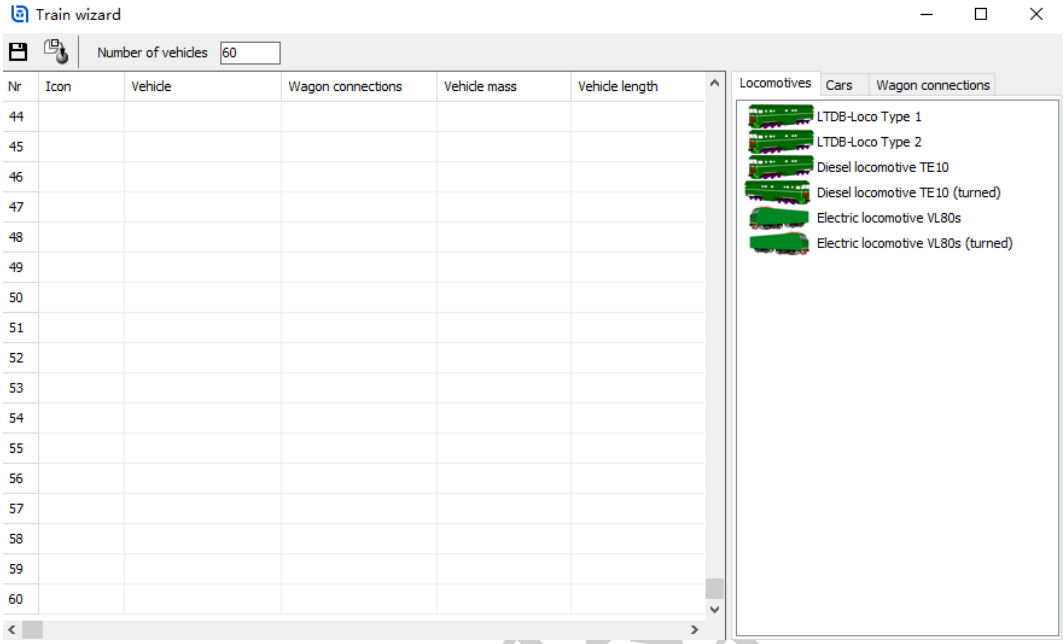


图 1.2

下一步，我们需要指定机车和车辆模型。依次双击机车模型库（**Locomotives**）里的 **Electric locomotive VL80s** 和 **Electric locomotive VL80s (Turned)**，这样就添加了列车头部的两节机车。此时，二者并未编组连接。

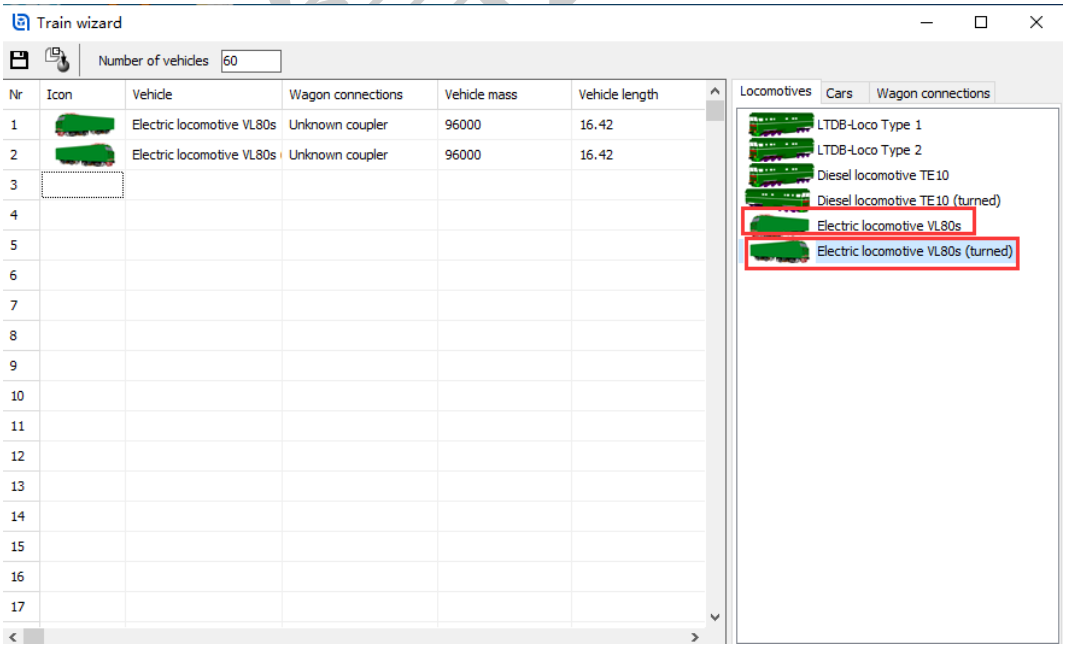


图 1.3

接下来，指定车辆模型，切换到车辆模型库（**Cars**）页面，选中敞车 **Open wagon**，然后点**右键**，选择 **Assign to selected**。

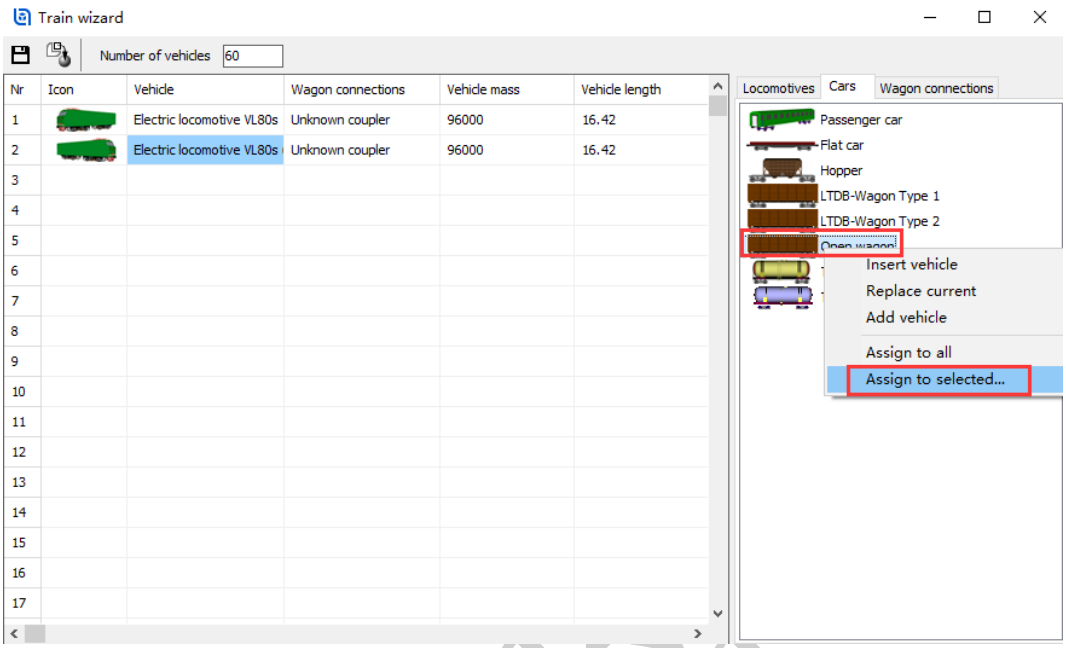


图 1.4

这一步操作缺省选择了 **3-60** 号车辆（已定义机车的 1-2 号除外），点击 **OK**。

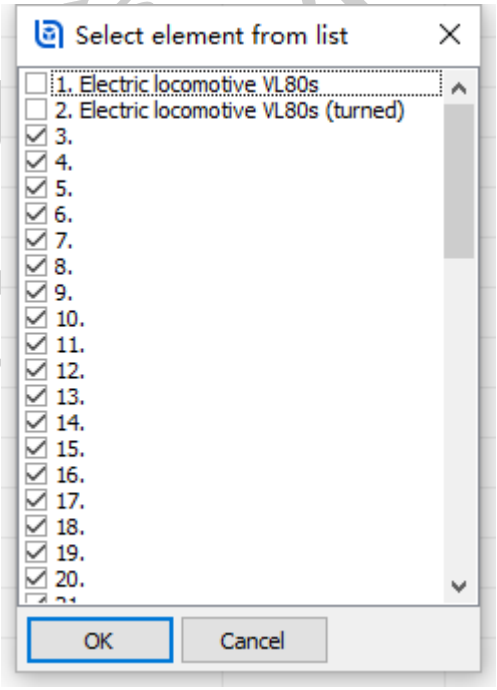


图 1.5

这样就一键完成了所有车辆模型的添加，如图 1.6 所示。

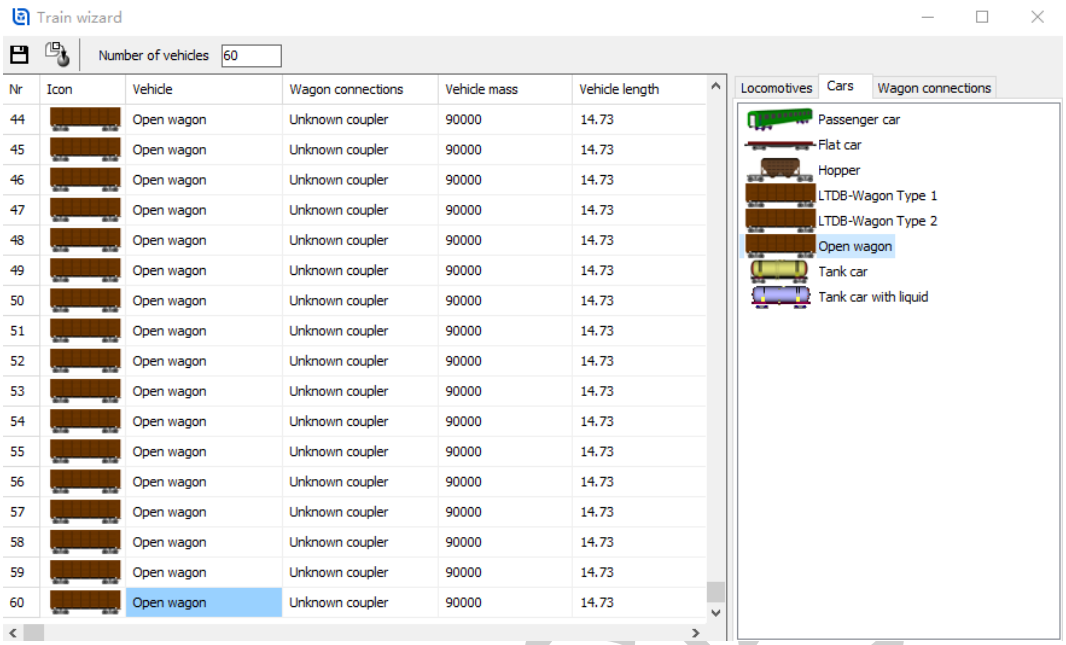


图 1.6

最后一步，指定车钩缓冲器模型（非线性磁滞特性力元）。转到钩缓模型库（**Wagon connections**）页面，选中 **Sh-2-T**，点**右键**，选择 **Assign to all**。

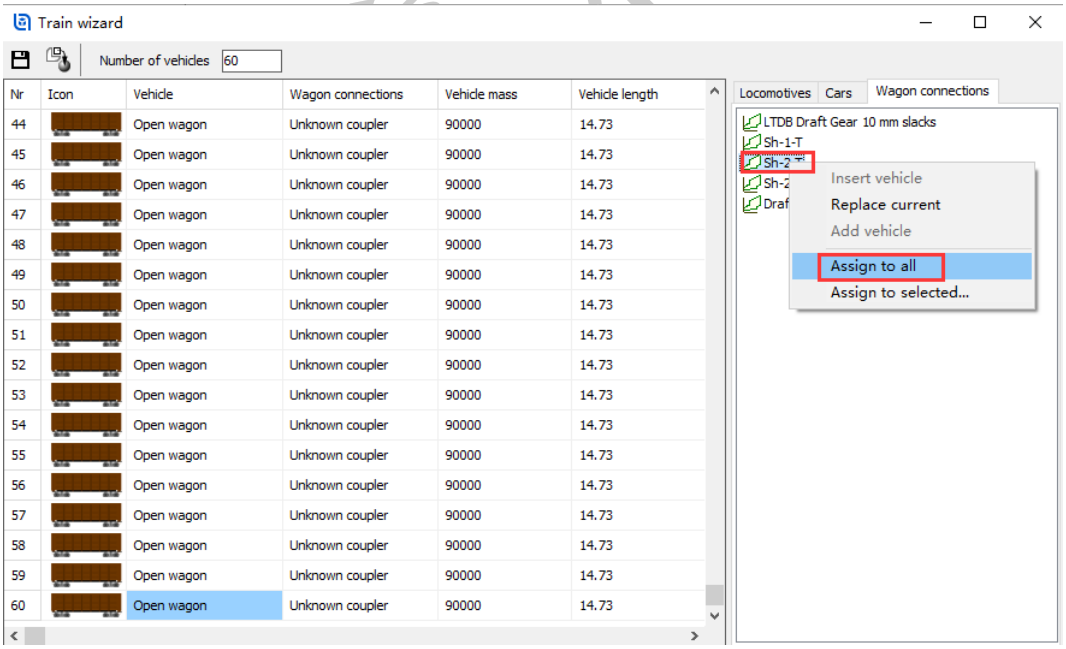


图 1.7

至此，我们就完成了列车编组模型的创建，点击按钮保存当前模型，请读者自行定义模型名称和路径，如：**{UM Data}\My models\Trains\TestTrain**。

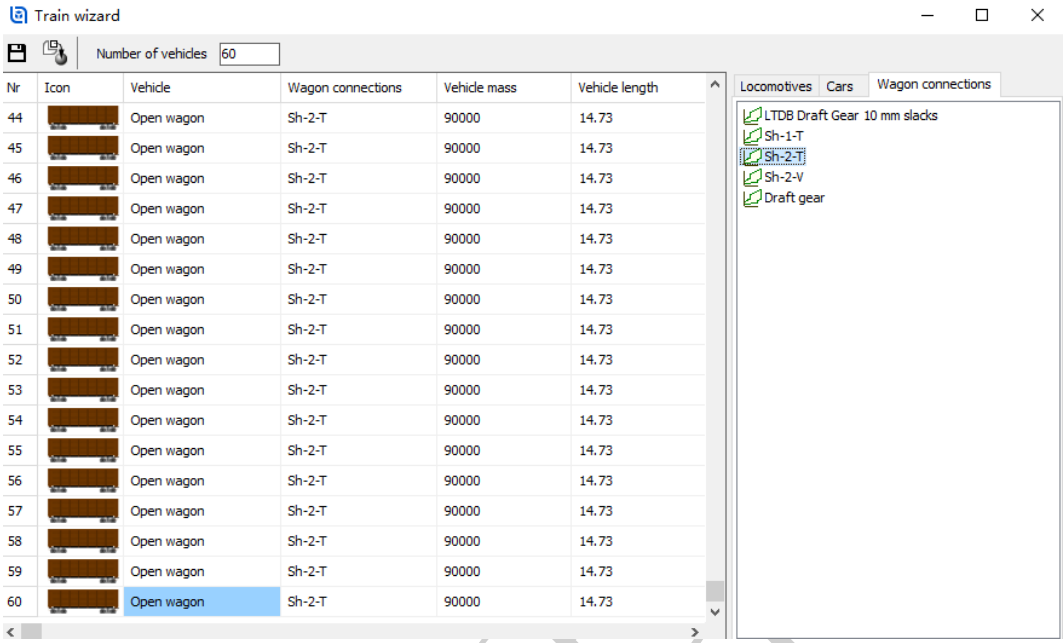


图 1.8

保存后，请关闭 **Train Wizard** 和 **UM Input** 程序。

备注：

列车向导中的机车库、车辆库和钩缓库都支持用户自定义扩展，详见用户手册第十五章。

1.3 列车动力学仿真

利用前面建立的列车模型，我们来模拟列车在一个曲线坡道上的制动工况，曲线半径为 600m，坡度为-7‰，制动初速度为 30m/s。

1.3.1 设置仿真工况参数

首先，请运行 **UM Simulation** 程序，并加载列车模型 **TestTrain**。

设置求解器

1. 选择主菜单 **Analysis | Simulation** 或按 **F9** 键，打开仿真控制界面 **Object simulation inspector**。
2. 定位到 **Solver** 页面，选择 **Park** 求解器，勾选 **Computation of Jacobian** 选项。
3. 缺省的终止条件为运行距离，点击 t 图标，切换**时间**为终止条件，并设置为 **55s**。

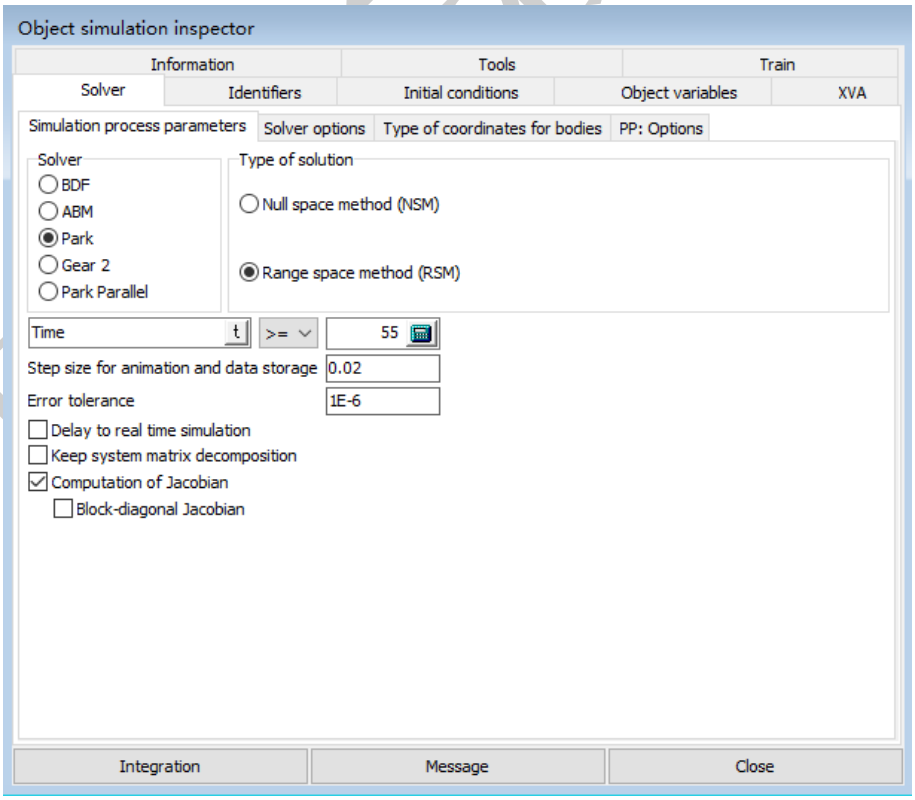


图 1.9

缺省状态，列车位于平直线路。

1. 选择主菜单 **Tools | Macrogeometry Editor | Railway or monorail track** 或点击工具栏图标，打开线形制作工具，如图 1.10 所示，系统缺省创建了 100m 的直线段。

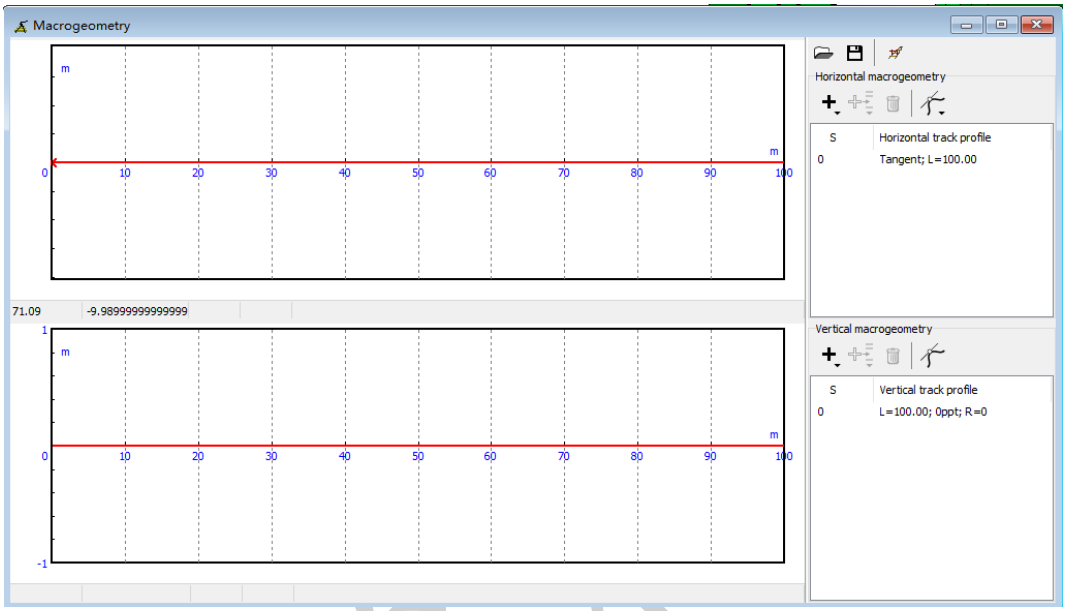


图 1.10

2. 窗口界面由上下两部分组成，其中上部用于描述铁路平面曲线，下部用于描述纵断面。在上部窗口右侧点击按钮，选择 **Add curve**，添加一段标准曲线（缓和曲线-圆曲线-缓和曲线），如图 1.11 所示。

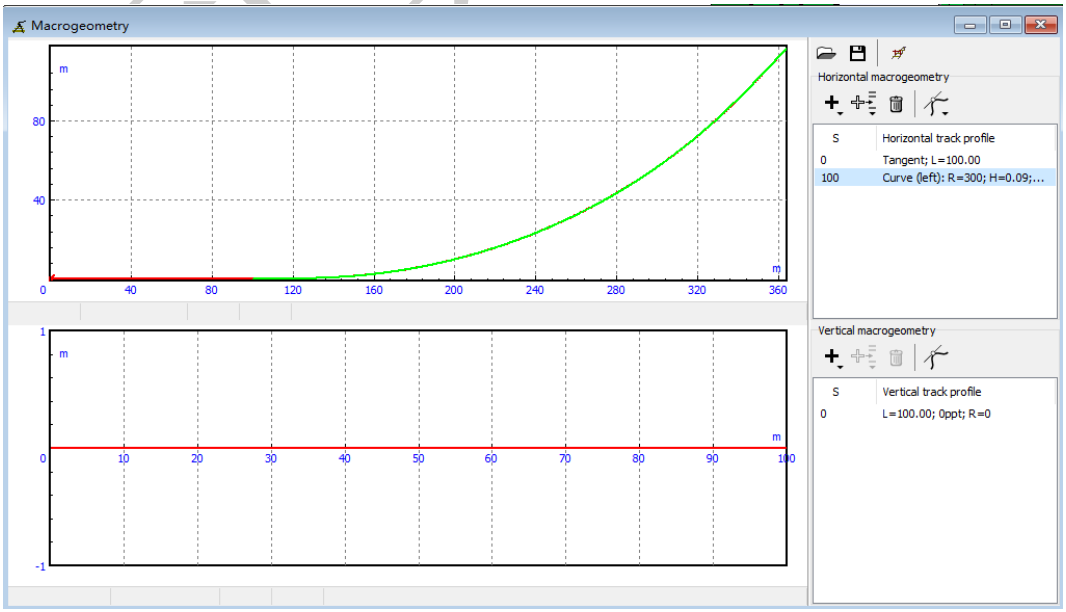


图 1.11

3. 曲线半径默认为 300m，在图 1.11 中双击 **Curve** 一栏，弹出曲线参数页面。修改曲线半径为 **600m**，点击 **Apply**。

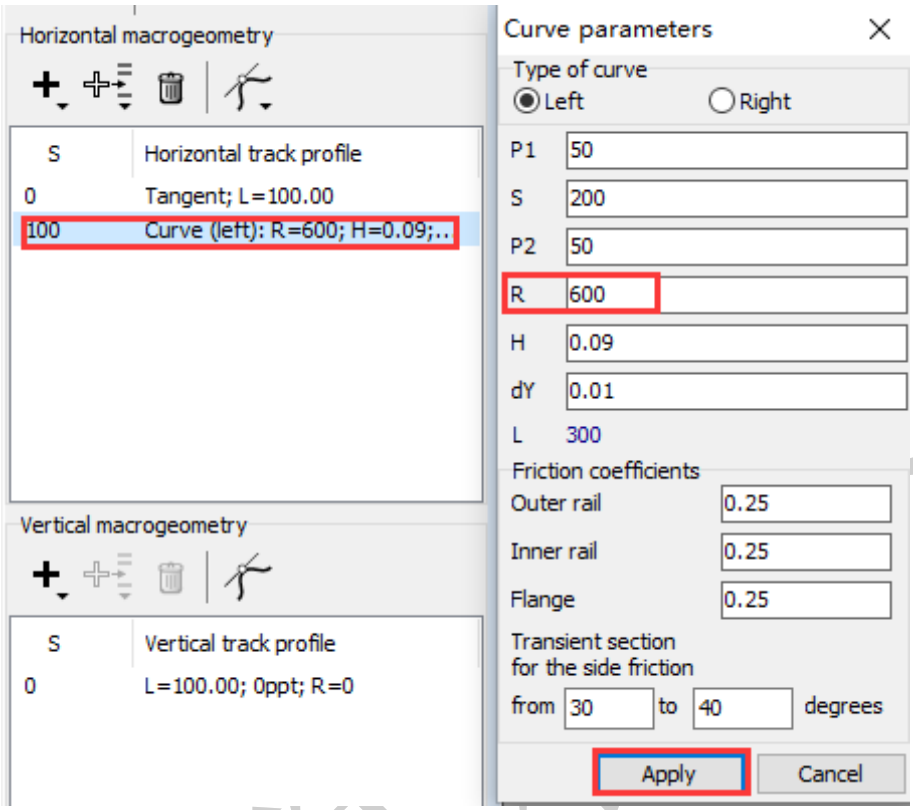


图 1.12

4. 到下部窗口右侧双击直线段（由于仅仅是模拟一个下坡工况，因此无需添加其他线形），在弹出界面修改长度为 **600m**，坡度为-7‰（输入**-7**）。

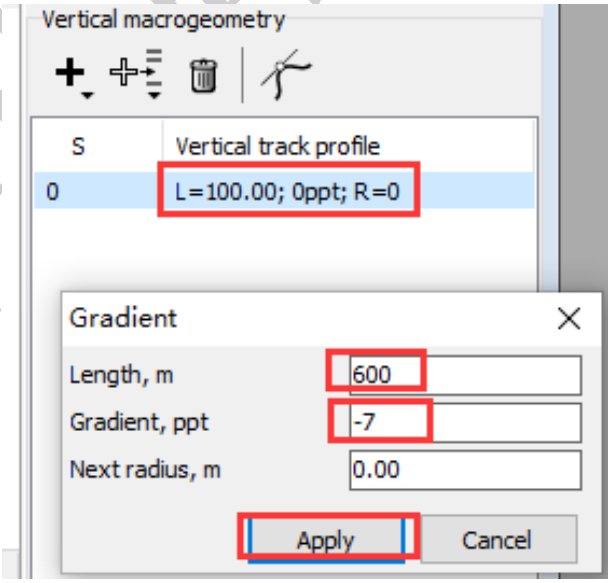


图 1.13

5. 点击 **Apply**，最终得到如图 1.14 所示的铁路线形。

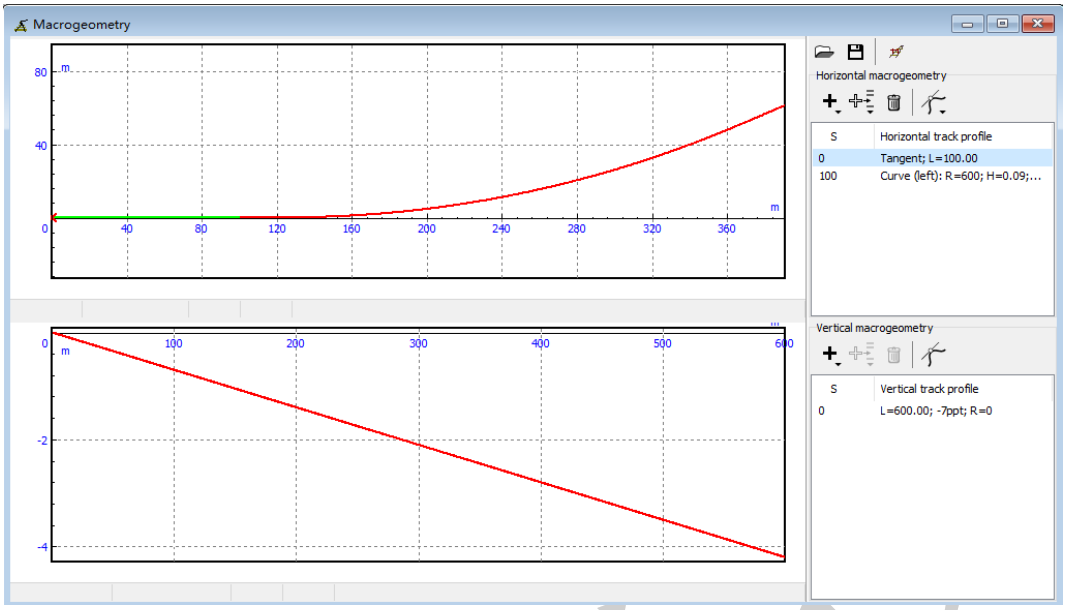


图 1.14

6. 点击按钮，保存线形文件，最好保存在模型目录下，命名为 **r600.mcg**，然后关闭线形工具。

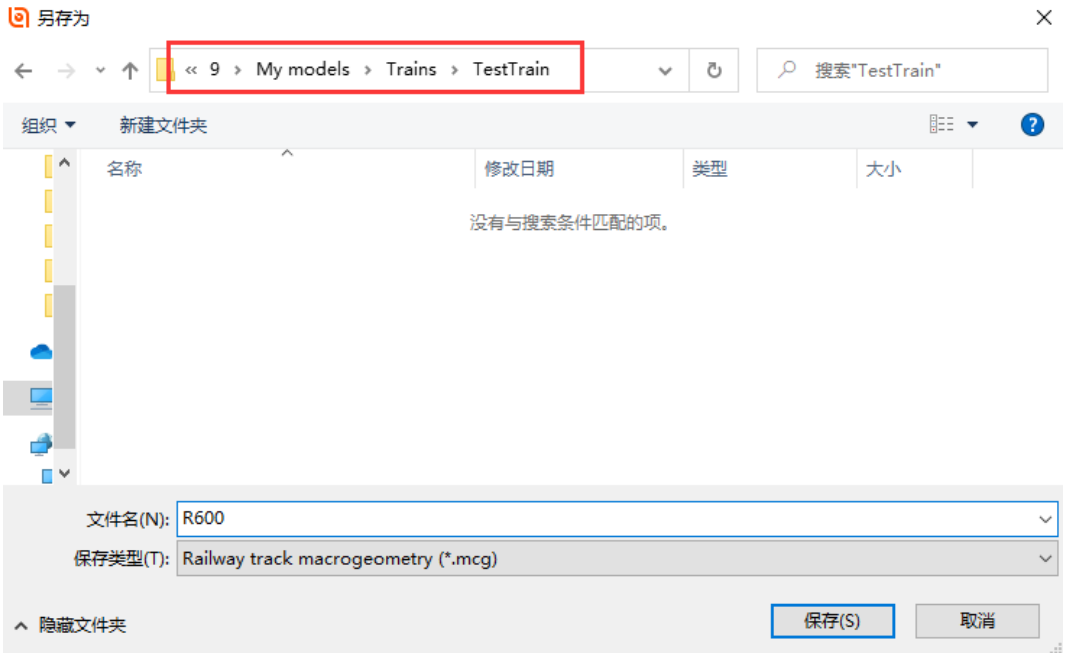


图 1.15

7. 回到仿真控制界面（Object simulation inspector），如果不慎关闭，请按 **F9** 打开。定位到 **Train | Option | Track** 页面，点击按钮加载刚才制作的线形文件 **r600.mcg**。

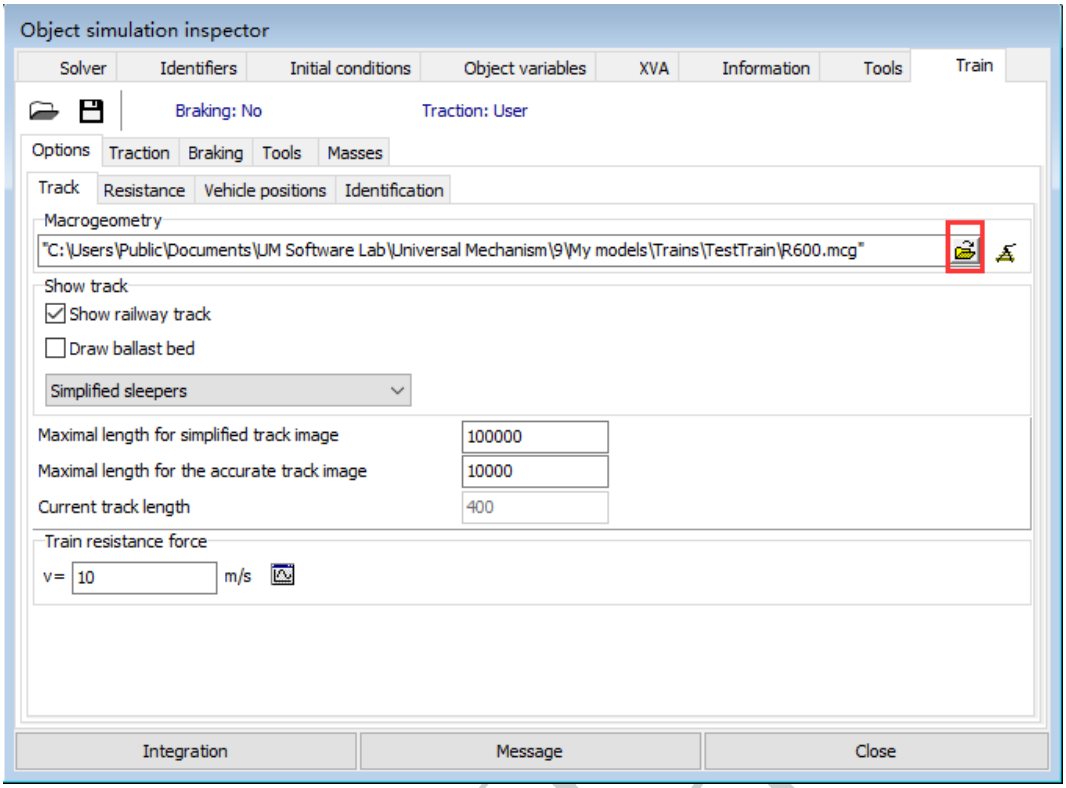


图 1.16

设置阻力模型

所有列车相关的参数设置选项都位于图 1.16 的 **Train** 页面。

定位到 **Train | Options | Resistance | Propulsion** 页面，这里显示了两个列表。

位于上部的是当前模型可用的阻力模型库，可以通过按钮 ✚ 和 🗑 来添加和删除，软件缺省的四种俄罗斯标准的阻力模型不支持删除操作。在上部列表选中某个阻力模型，点右键，选择 Assign to all 可以一键分配给所有的机车和车辆。

位于下部的显示当前模型里每个机车和车辆已经分配的阻力模型。在下部列表某车辆一栏对应的 Resistance model 单元格，通过双击操作可以切换阻力模型（双击一次，变换一次，在上面的模型库里依次循环）。

这里我们保持缺省即可，不做任何修改。

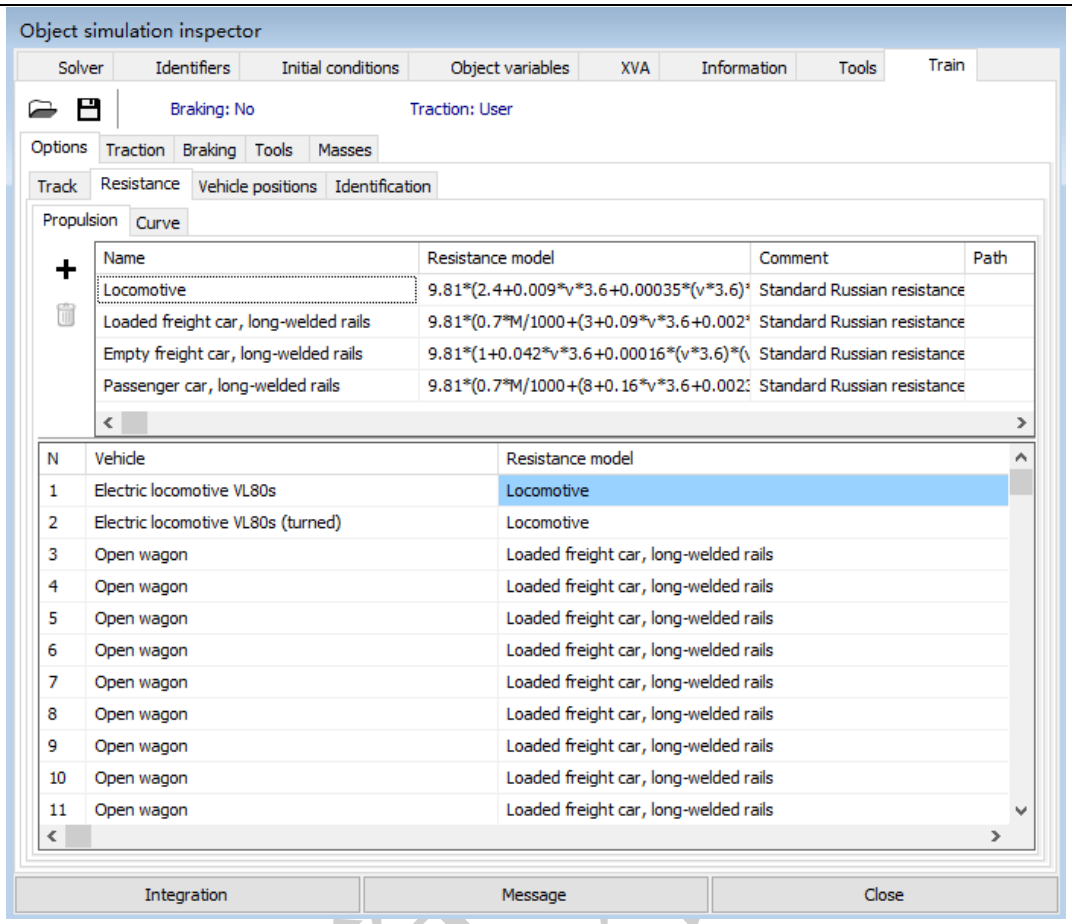


图 1.17

设置制动系统

下面来设置列车制动系统参数，选项位于 **Train | Braking | Brake equipment** 页面。

制动系统主要包括车轮与闸瓦/制动盘的摩擦系数、制动模式、制动倍率和空气波速等参数。

其中，制动力定义为摩擦系数与闸瓦力（正压力合力）的乘积。

$$F_B = f \cdot F_N$$

因此需要定义每个车辆的摩擦系数和闸瓦力模型。

在 **Train | Braking | Brake equipment** 页面，我们可以先定义常用制动的空气波速为 **280m/s**，如图 1.18 所示。

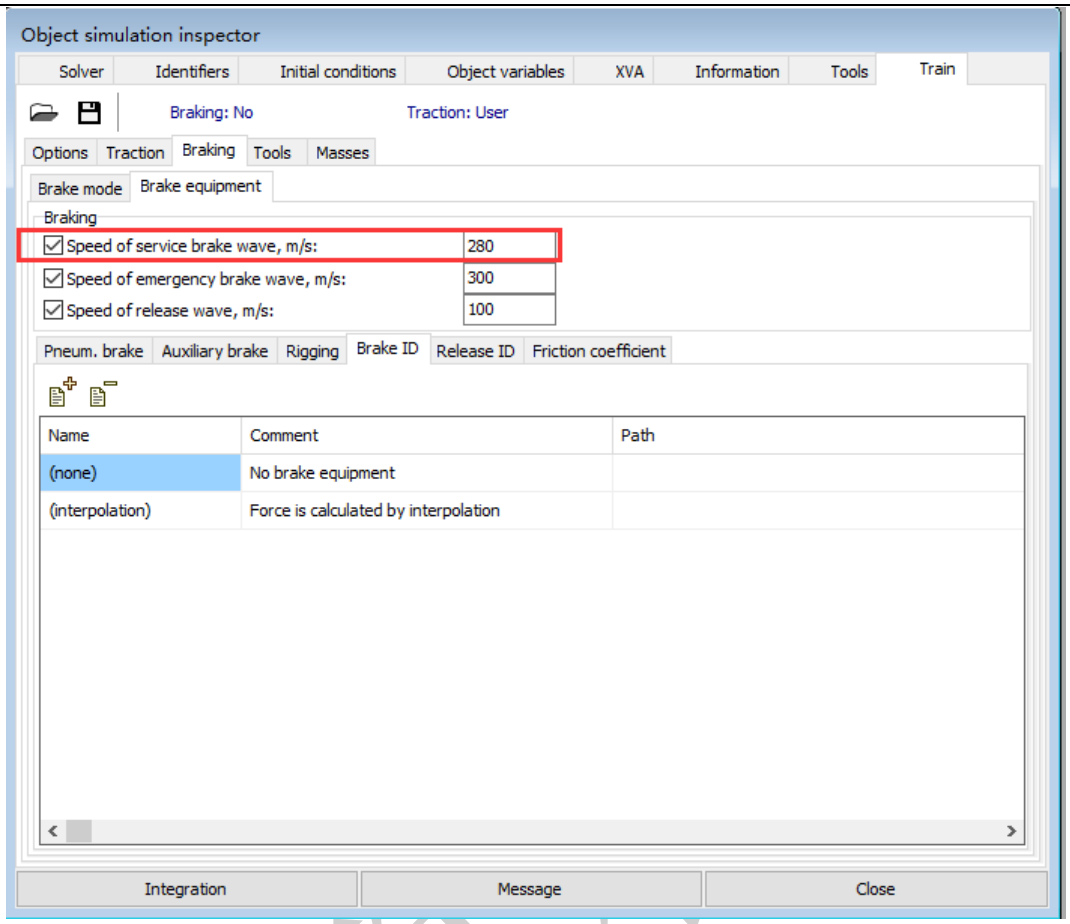


图 1.18

在 **Train | Braking | Brake equipment | Rigging** 页面，可以选择制动装置类型。点击 按钮，从本地库添加适用于机车的 **VL80，grey iron.pf**，适用于货车的 **Freight car，grey iron.pf**。

选中列表中的 **Freight car，iron shoes**，点**右键**，选择 **Assign to all**，分配给所有车辆。

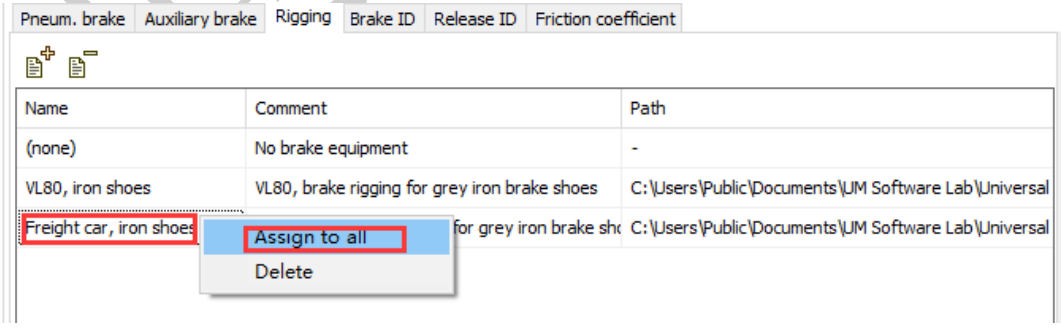


图 1.19

转到 **Train | Braking | Brake equipment | Pneum.brake** 页面，你会发现包括机车在内的所有车辆都设置成了 **Freight car，iron shoes**。请分别双击两个机车对应的制动装置 **Freight car，iron shoes** 两次，使之切换为 **VL80，iron shoes**。

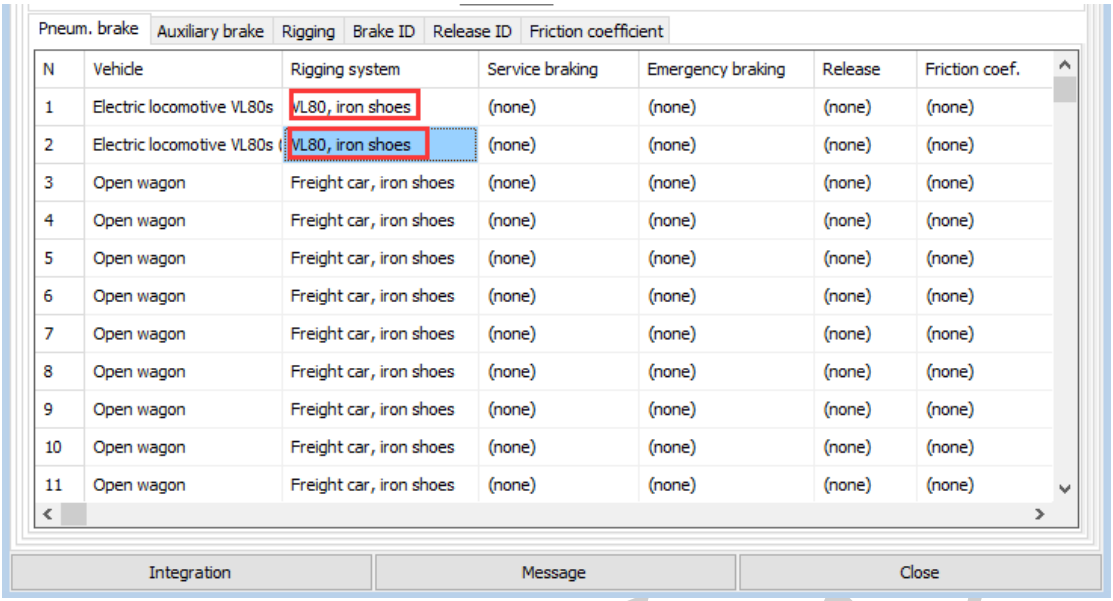


图 1.20

转到 **Train | Braking | Brake equipment | Brake ID** 页面，点击按钮，从本地库添加一个空气压力时程曲线，**service_braking_25s_example.id**。在列表中选中，点**右键**，选择 **Assign as service braking to all**，将其分配给所有机车和车辆。

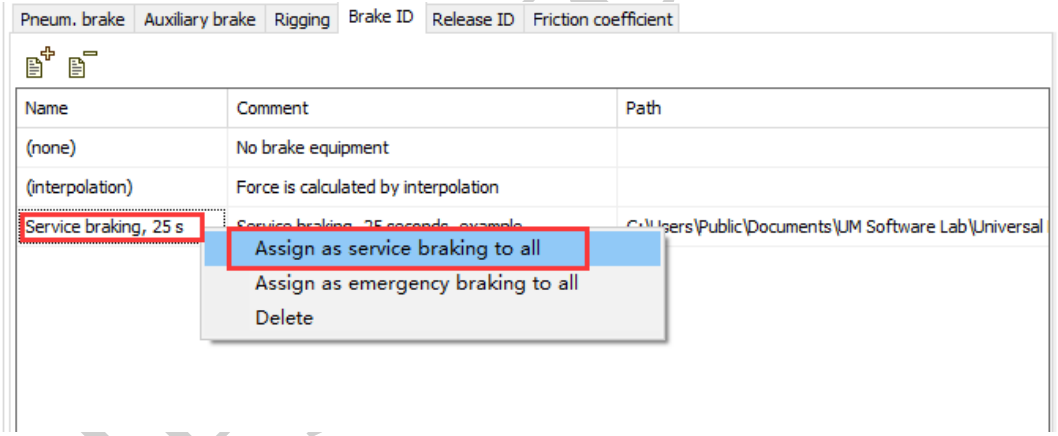


图 1.21

转到 **Train | Braking | Brake equipment | Friction coefficient** 页面，点击按钮，从本地库添加一个摩擦系数模型 **Composite.cf**。在列表中选中，点**右键**，选择 **Assign to all**，将其分配给所有机车和车辆。

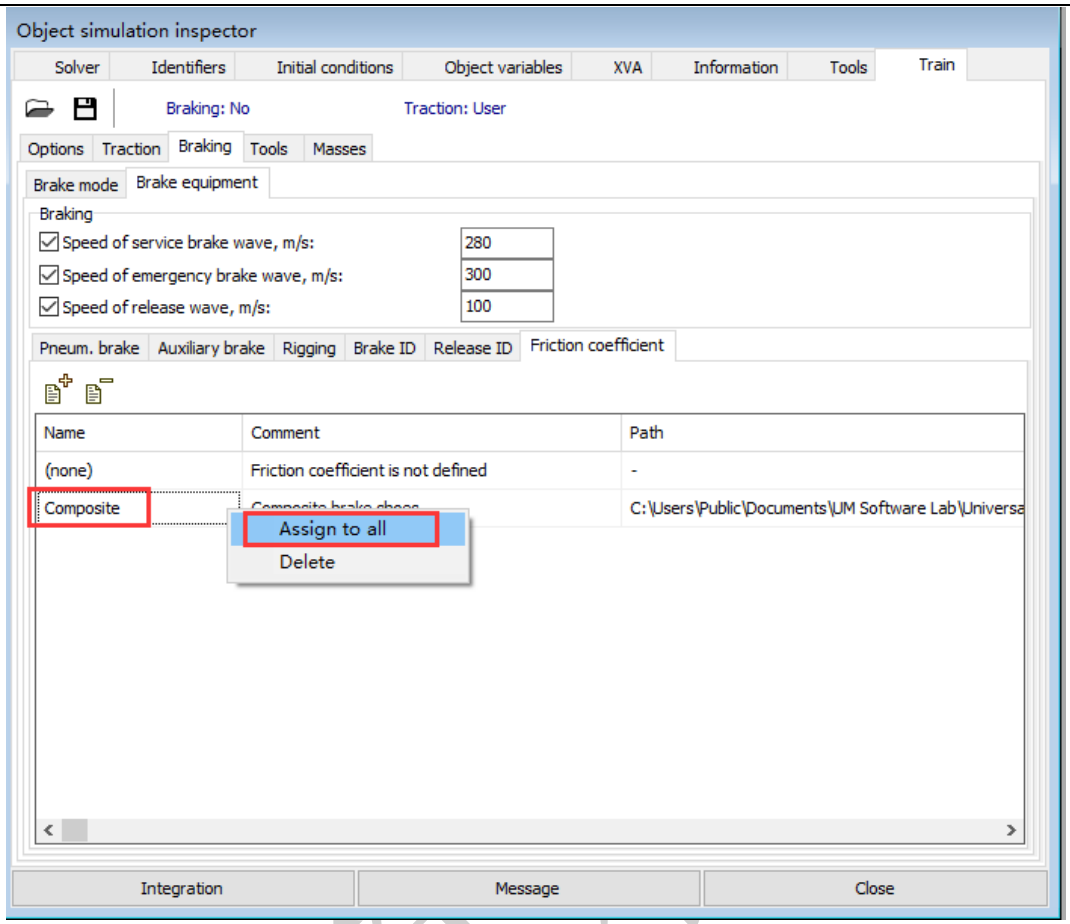


图 1.22

转到 **Train | Braking | Brake mode** 页面，点击✚按钮，添加一个制动工况，缺省设置开始时间为 **0s**，制动类型为 **Brake pipe**，制动模式为 **Service braking**，制动机车为 **1.Electric locomotive VL80s**。

请注意，在 **Braking** 处有个选项，只有**勾选**上才开启制动模式，否则无效。

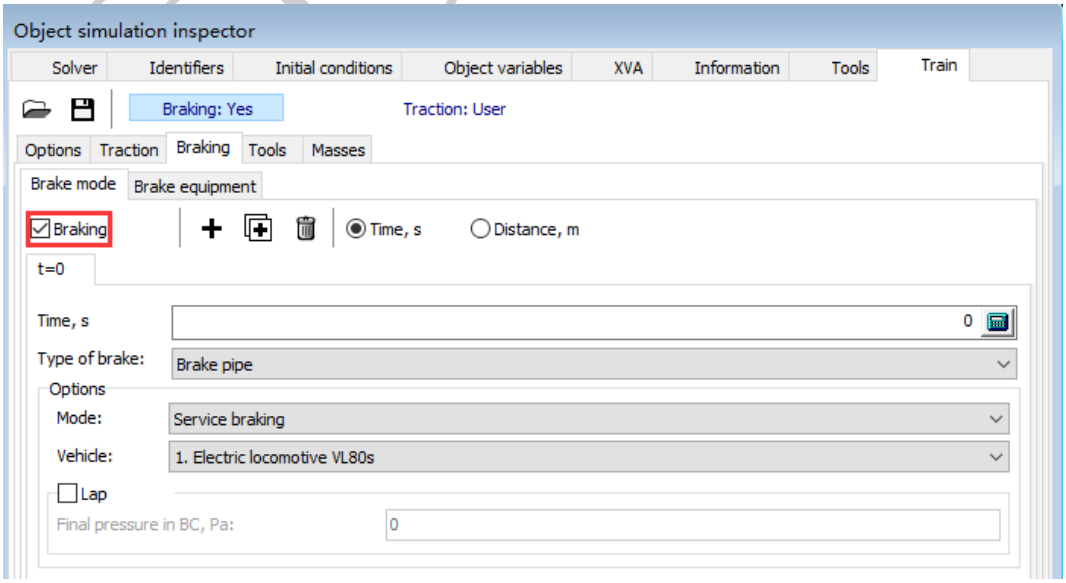


图 1.23

在 **Identifiers** 页面设置初始速度为 **30m/s**，请在工具栏检查速度单位是否为 **m/s**。

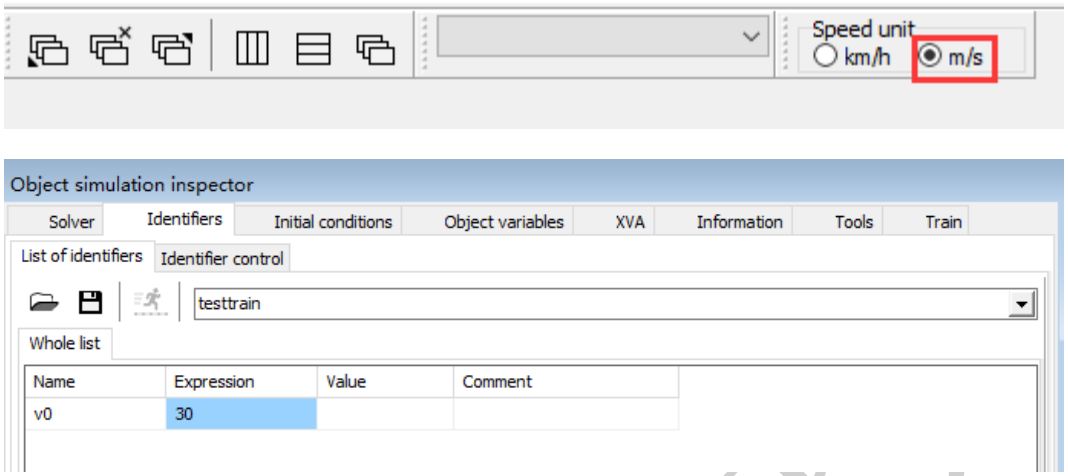


图 1.24

下面，我们来创建一些变量，用于分析列车的动力学行为。

选择菜单 **Tools | Wizard of variables**，打开变量向导。

定位到 **Train** 页面，在左侧**全选**机车和车辆，在右侧选择标准变量 **FBrake**，然后点击按钮，生成每个车的制动力变量并显示在同一个绘图窗口。

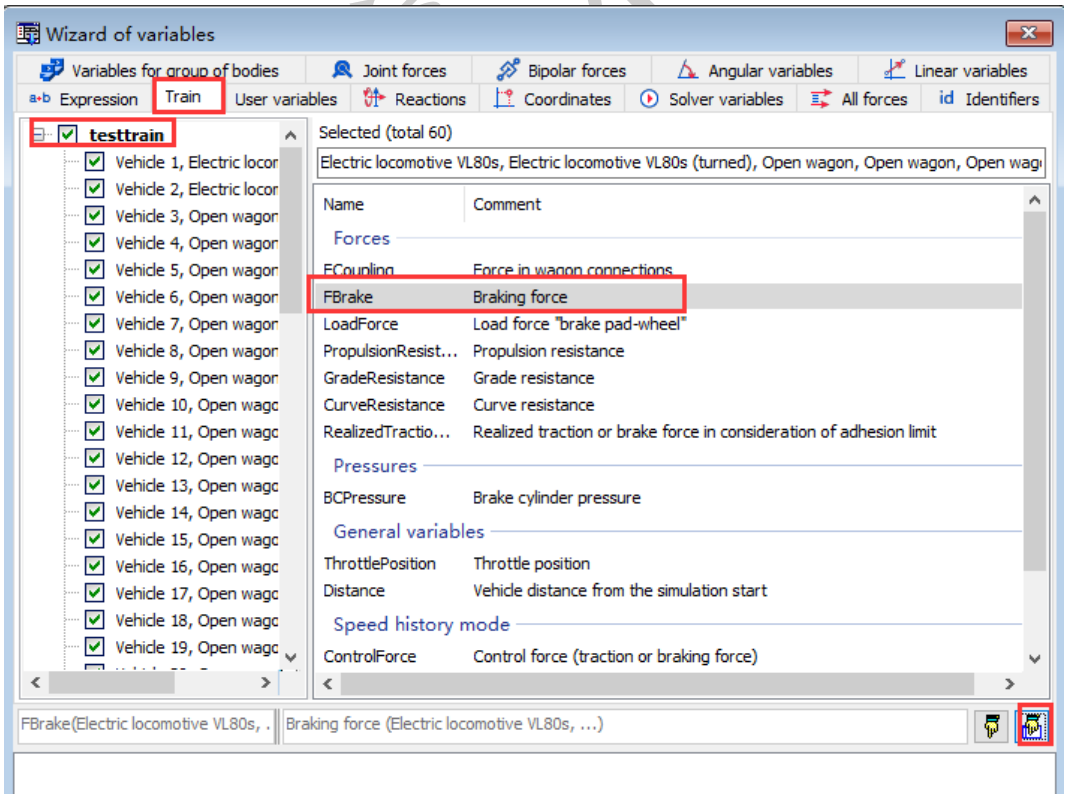


图 1.25

用同样的方法，创建车钩力 **FCoupling** 和距离 **Distance** 变量，分别显示在不同窗口。

切换到 **Linear variables** 页面，定义头部机车的纵向速度变量，并显示在一个独立的绘图窗口，如图 1.26 所示。

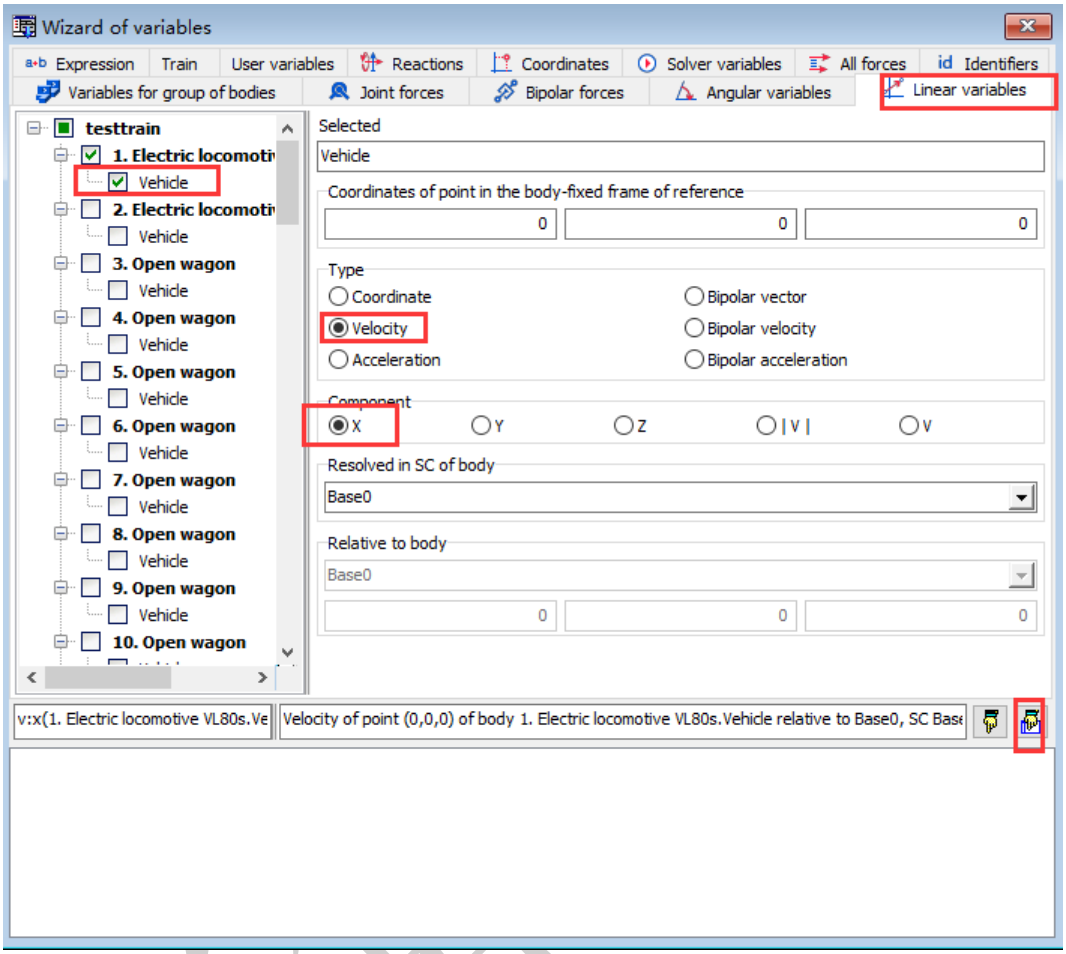


图 1.26

最后，仿真程序界面布置如图 1.27 所示。

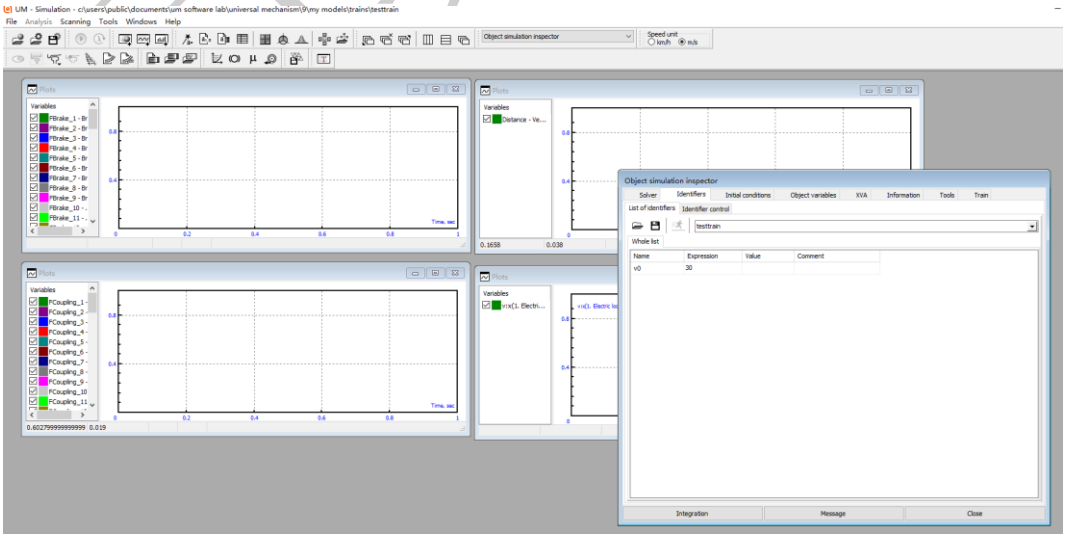


图 1.27

1.3.2 列车动力学仿真

在仿真控制界面点击 **Integration** 或按 **F9** 开始仿真。

由于钩缓力元位于每节车辆尾部，而最后一个车钩后面没有连接其他车辆，因此会出现如下提示。勾选 **Do not show this window anymore**，点击 **Continue** 即可。

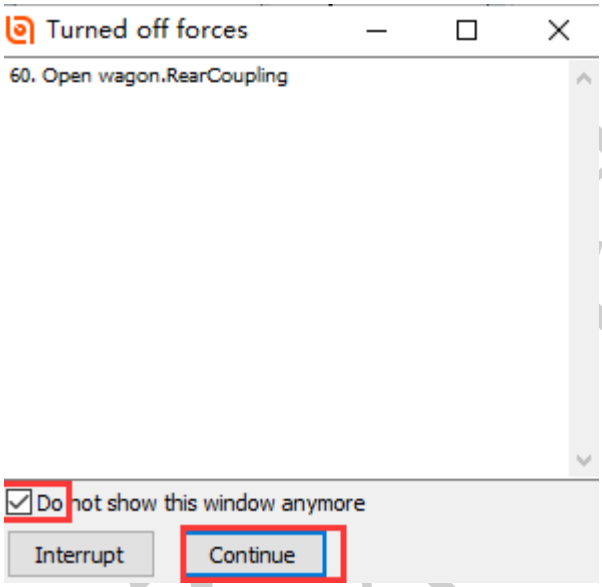


图 1.28

仿真完毕后，得到制动力时程曲线如图 1.29 所示，很明显，有两种特征波形，分别对应机车和车辆。

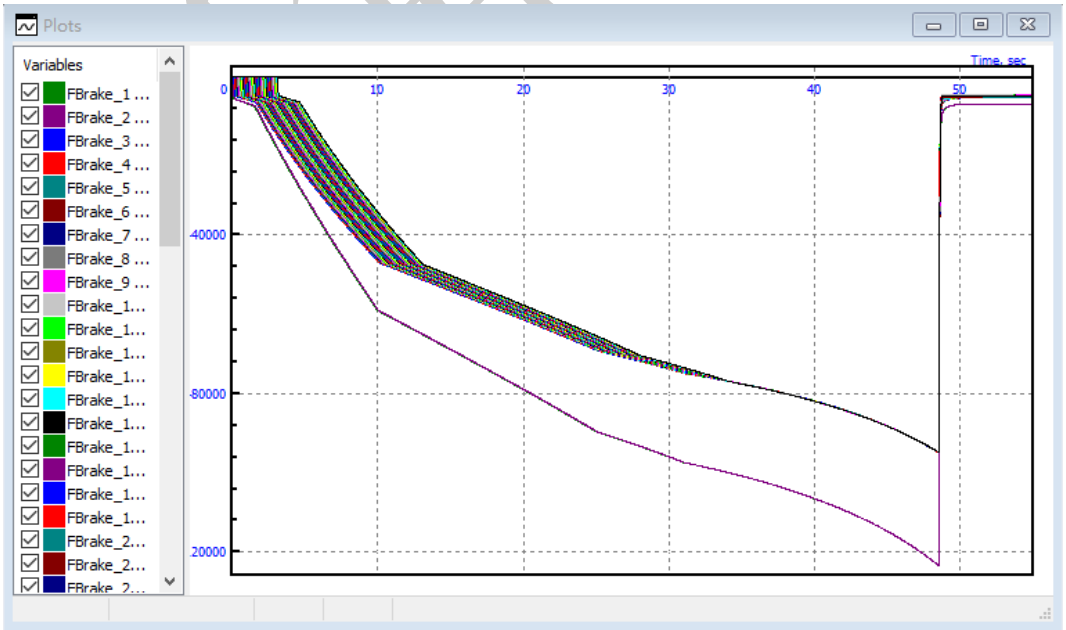


图 1.29

车钩力如图 1.30 所示，最大值约为 **362kN**，发生在第 **44** 节车辆。

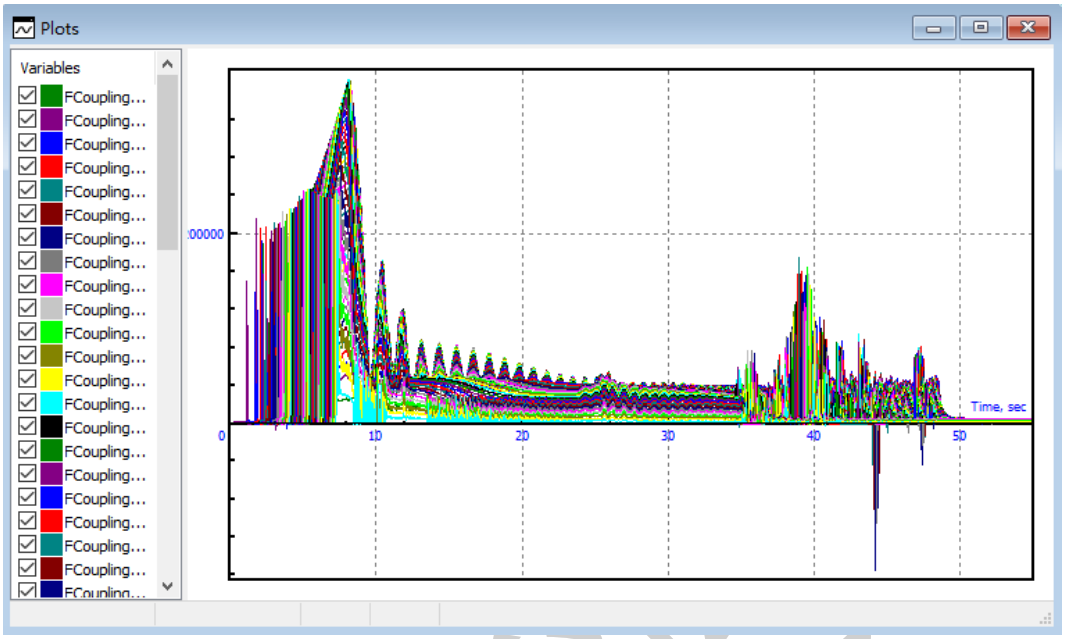


图 1.30

头部机车的速度如图 1.31 所示。

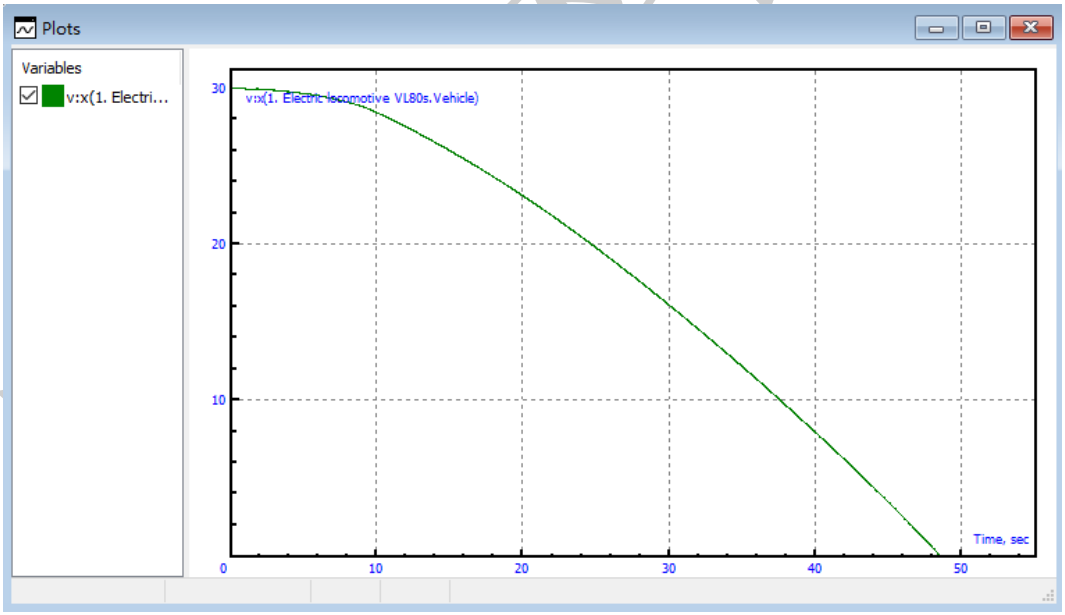


图 1.31

其实，对于车钩力，采用柱状图（**Tools | Histogram**）显示更为直观，效果如图 1.32 所示。可通过工具栏上的 按钮进行曲线动画的播放、暂停和停止操作。

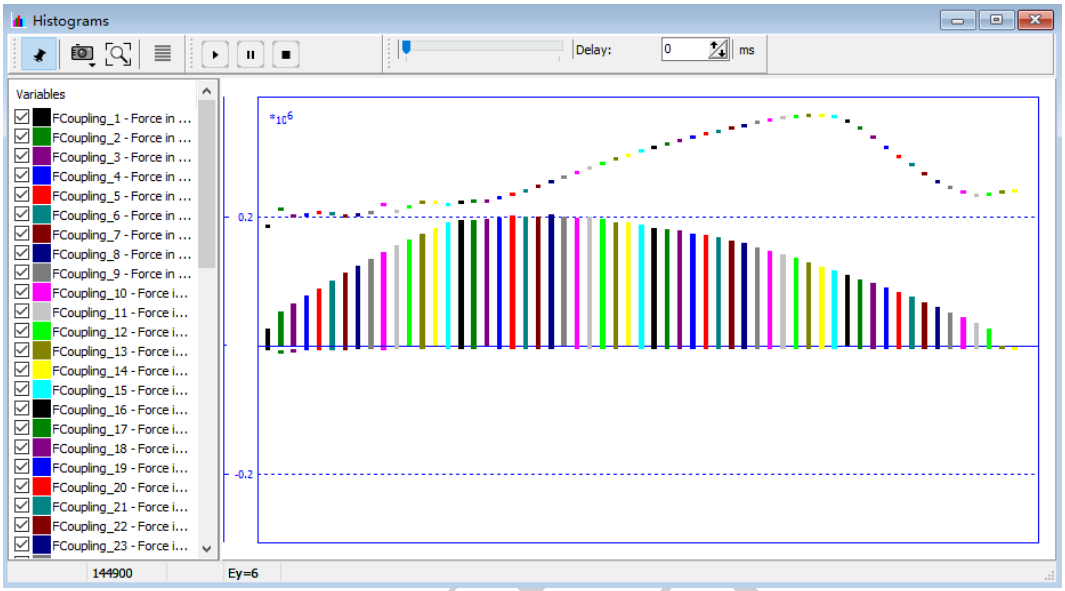


图 1.32

2. 列车纵向动力学国际考题测试

2.1 课程内容

2016 年，UM 软件参与了由澳大利亚中央昆士兰大学铁路工程中心组织的列车纵向动力学仿真软件考题测试。来自澳大利亚、中国、意大利、荷兰和法国的共计 9 个仿真软件参与了这个测试，详细报告请见文献[1-3]。

本次考题测试主要有以下目的：

- 通过不同软件计算结果的对比，让开发者对各自软件有进一步的认识；
- 体现不同软件计算结果的差异，为后续研究提出新的问题；
- 为现有的和开发中的计算软件提供评估参考；

考题测试对象为四个不同工况配置的重载列车模型，其中机车轴重有 22 吨、33 吨和 32.5 吨三种，货车轴重有 32 吨和 40 吨两种。

工况设置包括：机车和车辆参数、编组配置、钩缓特性、铁路线形、初始速度、牵引和制动特性。

计算后输出结果：头部机车的位移和速度、指定车辆的车钩力和钩缓变形量，以及每个车钩的最大压钩力和拉钩力。

从结果对比看，UM 软件和其他软件总体上都很吻合，因此使用 UM Train 模块进行纵向动力学分析是可靠可信的。

本课程选取考题测试的第一个工况配置进行建模和仿真的演示。列车编组形式为两节机车牵引五十节货车。

读者可以从本地目录 **{UM Data}/SAMPLES/Trains/LTDB-Train Configuration 1** 找到该模型。

2.2 创建列车模型

运行 **UM Input** 程序，按以下步骤创建列车编组动力学模型。

1. 选择菜单 **Tools | Train wizard**，打开变量向导，如图 1.21 所示。

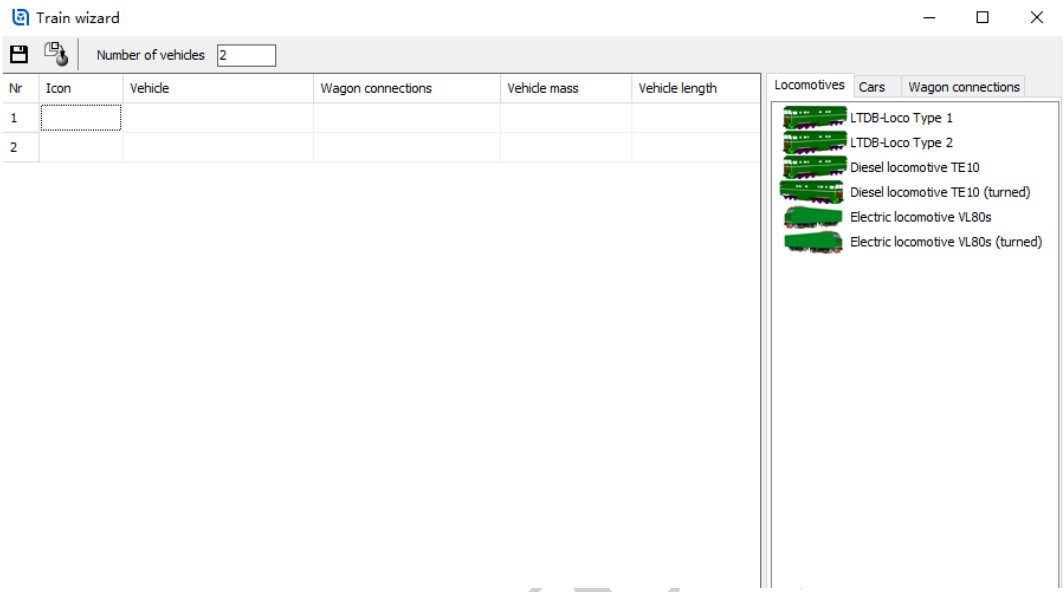


图 2.1

2. 设置机车和车辆总数为 **52**。

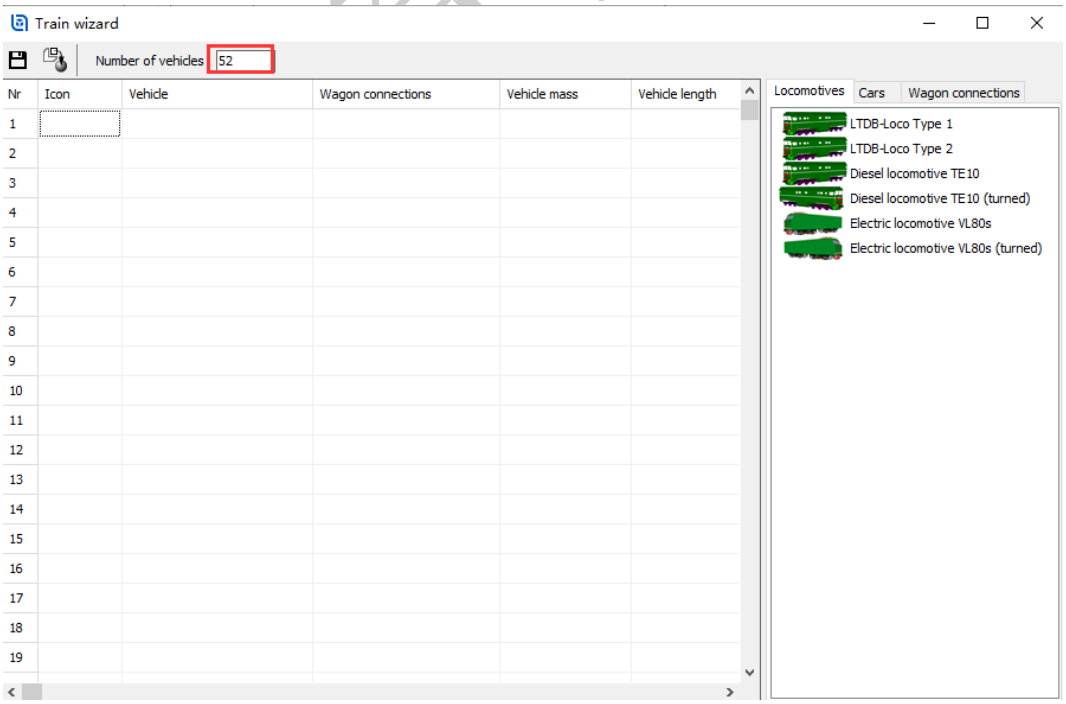


图 2.2

3. 从机车模型库 **Locomotives** 双击 **LTDB-Loco Type1** 两次，添加两个机车模型。
4. 转到车辆模型库 **Cars**，选中 **LTDB-Wagon Type 1**，点**右键**，选择 **Assign to selected**，点击 **OK**，自动设置为剩下的 **50** 节车辆。

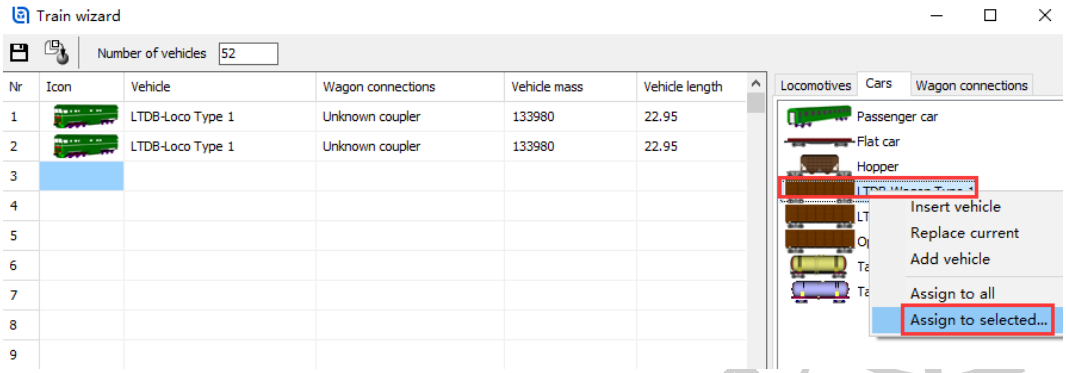


图 2.3

5. 转到钩缓模型库 **Wagon connections**，选中 **LTDB Draft Gear 10mm slacks**，点**右键**，选择 **Assign to all**，将这种钩缓模型赋给所有机车和车辆，其力学特性如图 2.5 所示（可以在 UM Input 里进入子系统查看）。

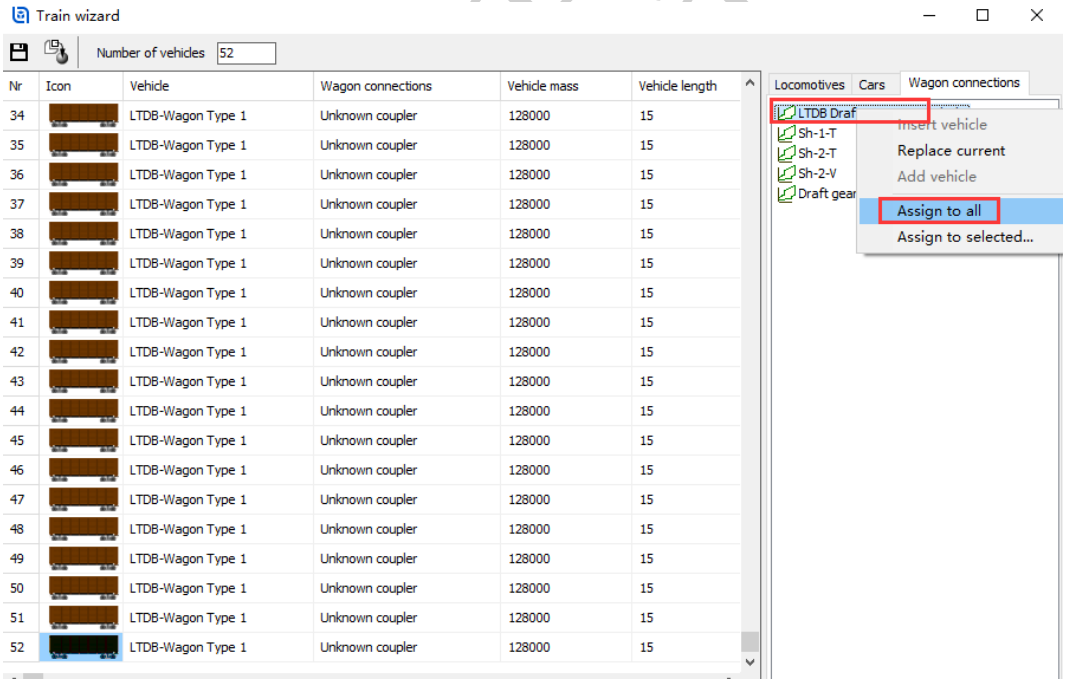


图 2.4

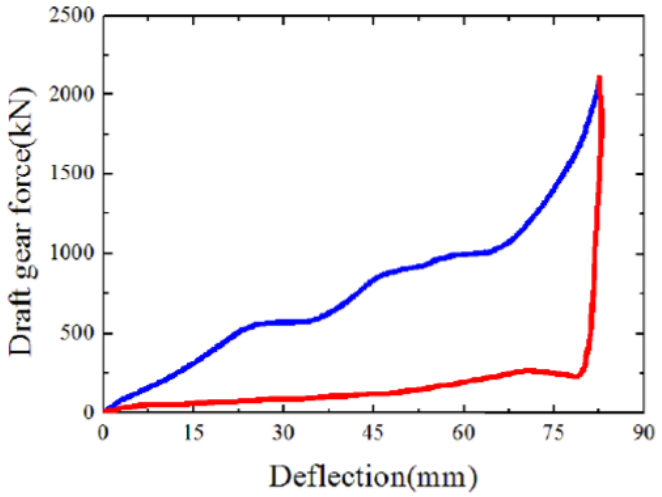


图 2.5

6. 至此，完成列车编组模型，如图 2.6 所示。

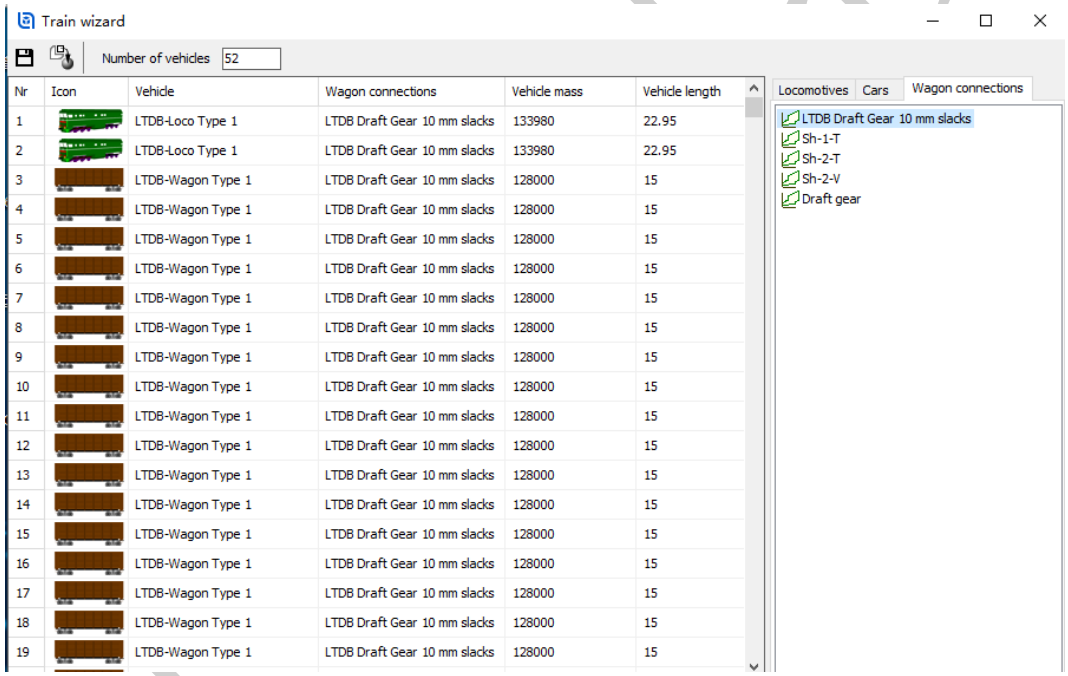


图 2.6

7. 点击按钮，保存模型，指定名称和路径，如：**{UM Data}\My Models\Trains\LTDBTrain**。
8. 关闭列车向导界面，关闭 **UM Input** 程序。

2.3 设置仿真工况参数

运行 **UM Simulation** 仿真程序，加载 **LTDBTrain** 模型。

设置求解器参数

打开仿真控制界面，在 **Simulation process parameters** 页面选择 **Park** 求解器，**Type of Solution** 为 **Range space method (RSM)**，勾选 **Computation of Jacobian** 和 **Block-diagonal Jacobian**，仿真距离为 **50 000m**，如图 2.7 所示。

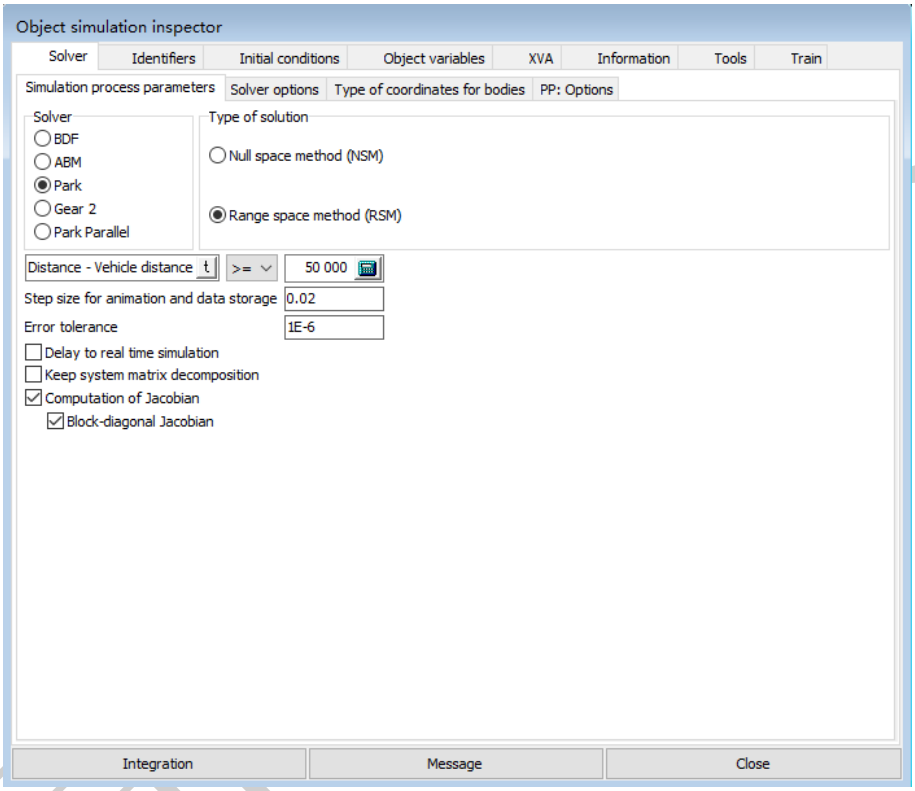


图 2.7

设置制动模式

机车的制动特性如图 2.8 所示。制动力与制动把位对应，而制动把位又随时间变化。我们需要一些特别的操作来定义这种复杂的特性曲线。

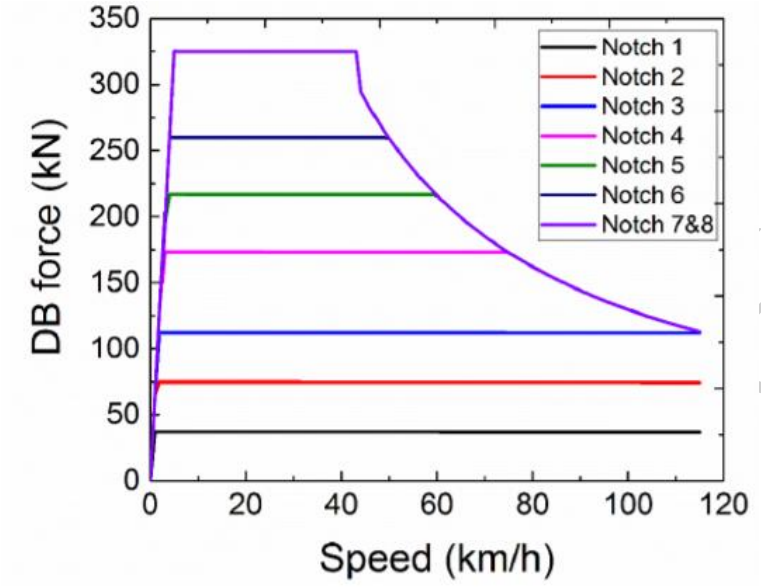


图 2.8

9. 在仿真控制界面，定位到 **Identifiers | Identifier control** ，点击✚按钮，添加一个控制符。
10. 在弹出窗口点击按钮，从列表中选择头部机车子系统里的标识符 **dynamic_brake_position**。

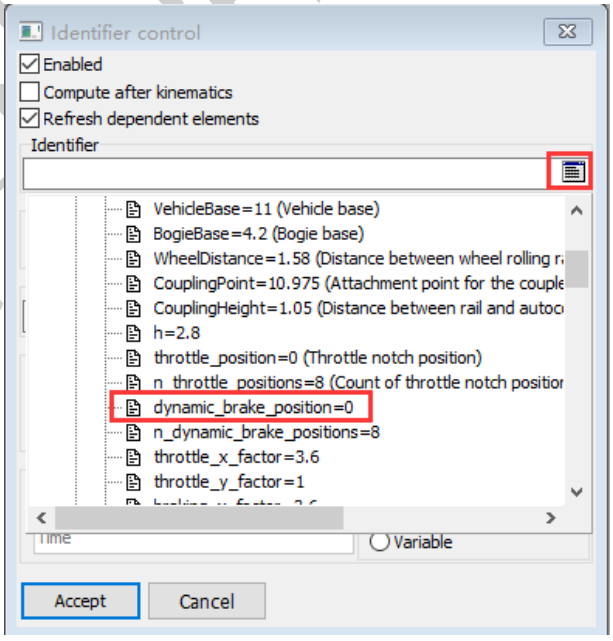


图 2.9

11. 在 **Assign value to identifiers with the same name** 下选择 **All**，表示将所有机车都设置为同一制动把位。

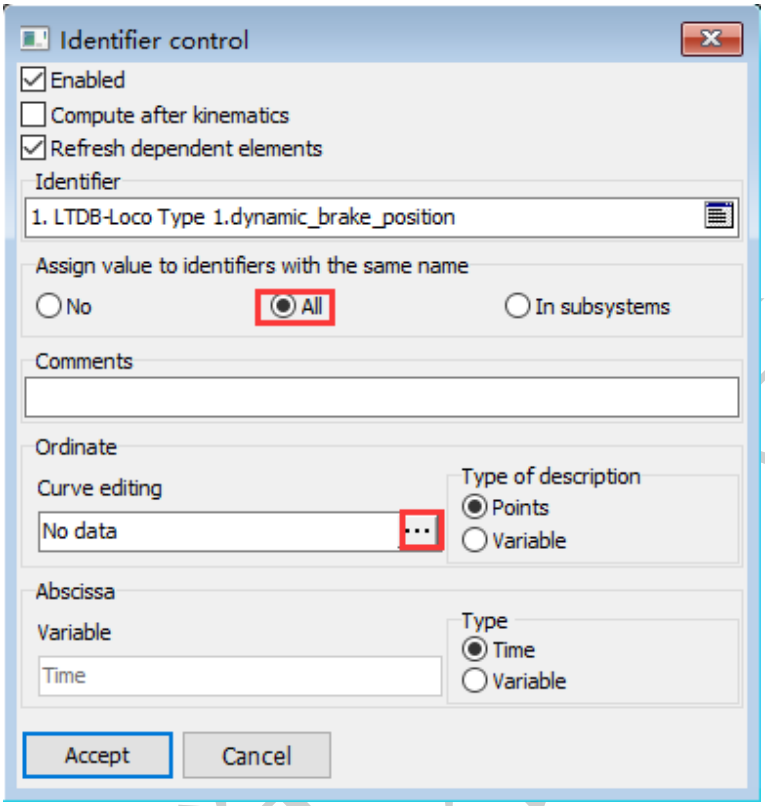


图 2.10

12. 点击 **Curve editing** 下的按钮…，弹出曲线编辑器窗口，通过点击按钮📂，加载位于本地目录的制动把位时程曲线 **{UM Data}\Samples\Trains\LTD-Train Configuration 1\Dynamic brake position.crv**，如图 2.11 所示。

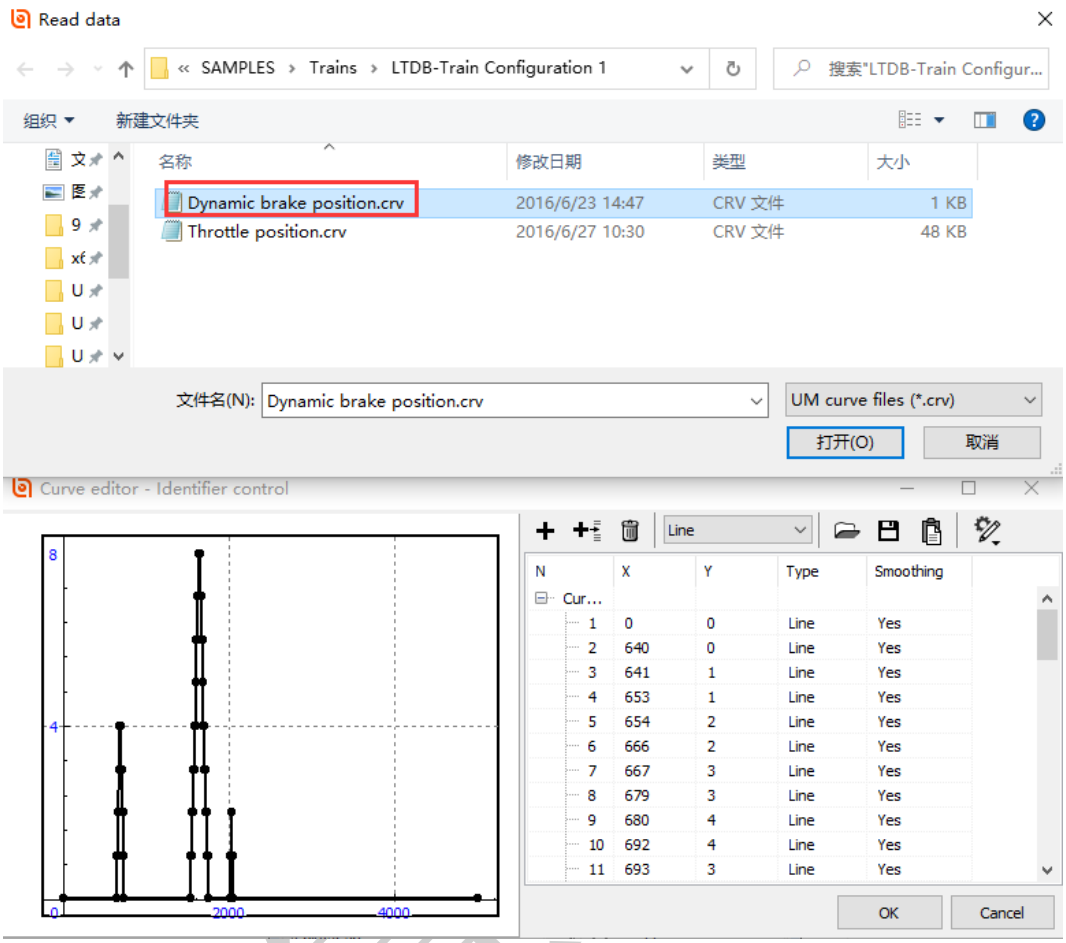


图 2.11

13. 点击 **OK**，关闭曲线编辑器。
14. 点击 **Accept**，完成对控制符 **dynamic_brake_position** 的定义。

设置牵引模式

机车牵引力与车辆速度的关系如图 2.12 所示。前面已经定义了制动把位的时程曲线，下面来定义牵引力特性曲线。

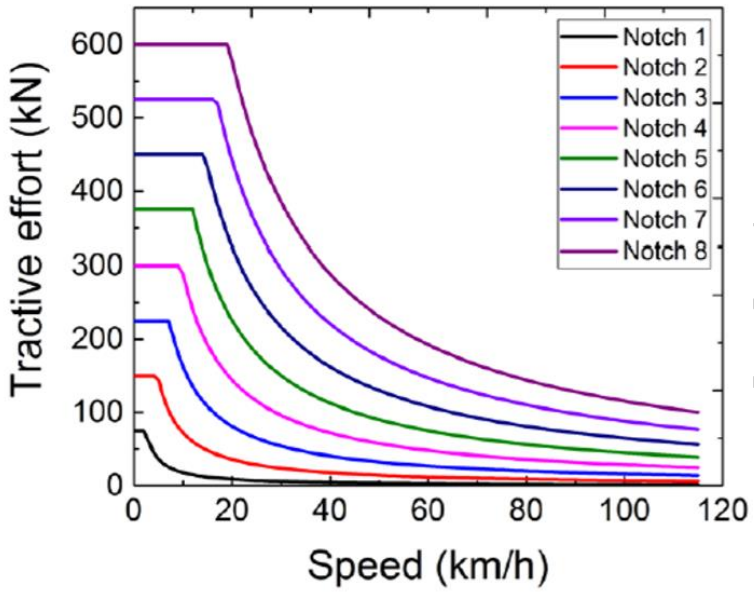


图 2.12

1. 用同样的方法再添加一个控制符，选择机车模型的 **Throttle_position** 标识符，并选择 **All**。

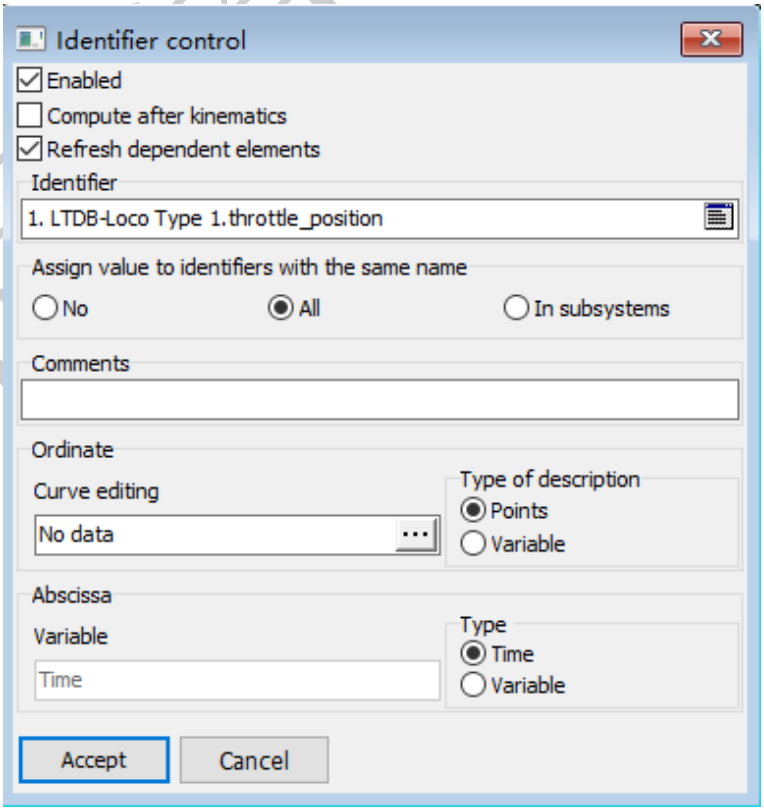


图 2.13

2. 再打开曲线编辑器，读入位于本地目录**{UM Data}\Samples\Trains \LTDB-Train Configuration 1\Throttle position.crv** 的牵引级位时程曲线文件。

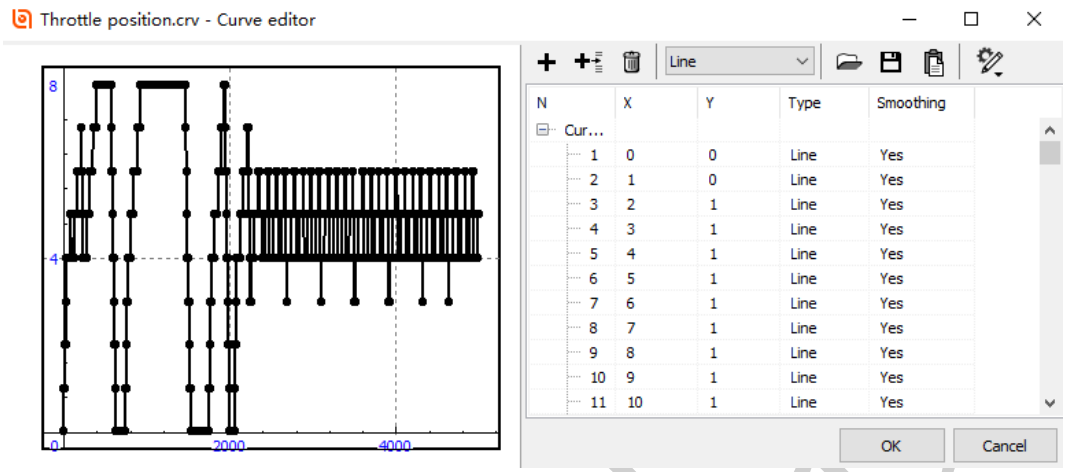


图 2.14

3. 点击 **OK** 和 **Accept**。

设置铁路线形文件

给定的铁路纵断面（高程）和曲率（平面）原始数据分别如图 2.15 和图 2.16 所示。

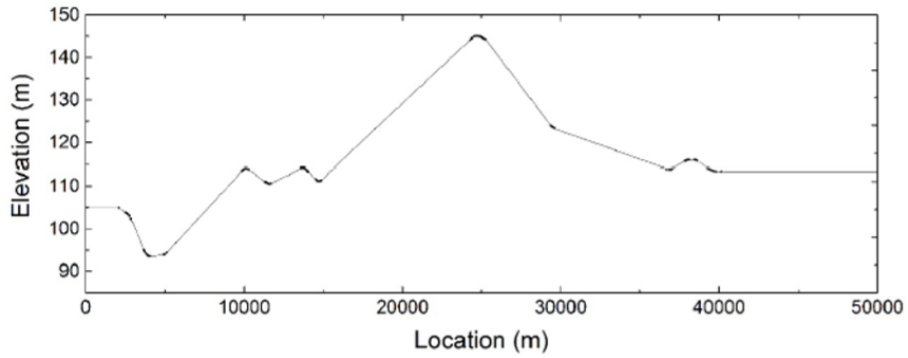


图 2.15

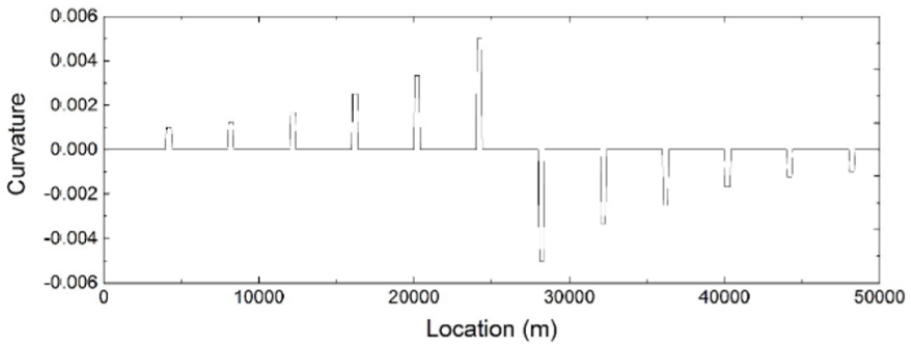


图 2.16

经转换格式导入 UM 后，如图 2.17 所示。

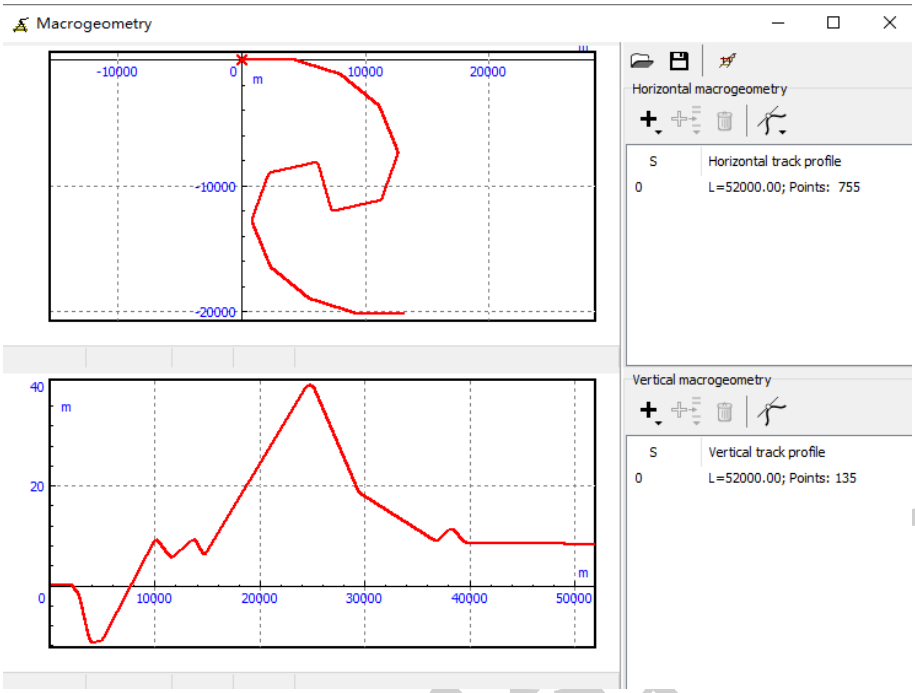


图 2.17

定位到 **Train | Options | Track** 页面，从本地目录读入已准备好的线形文件 **{UM Data}\rw\MacroGeometry\LTDB-MacroGeometry.mcg**，如图 2.18 所示。

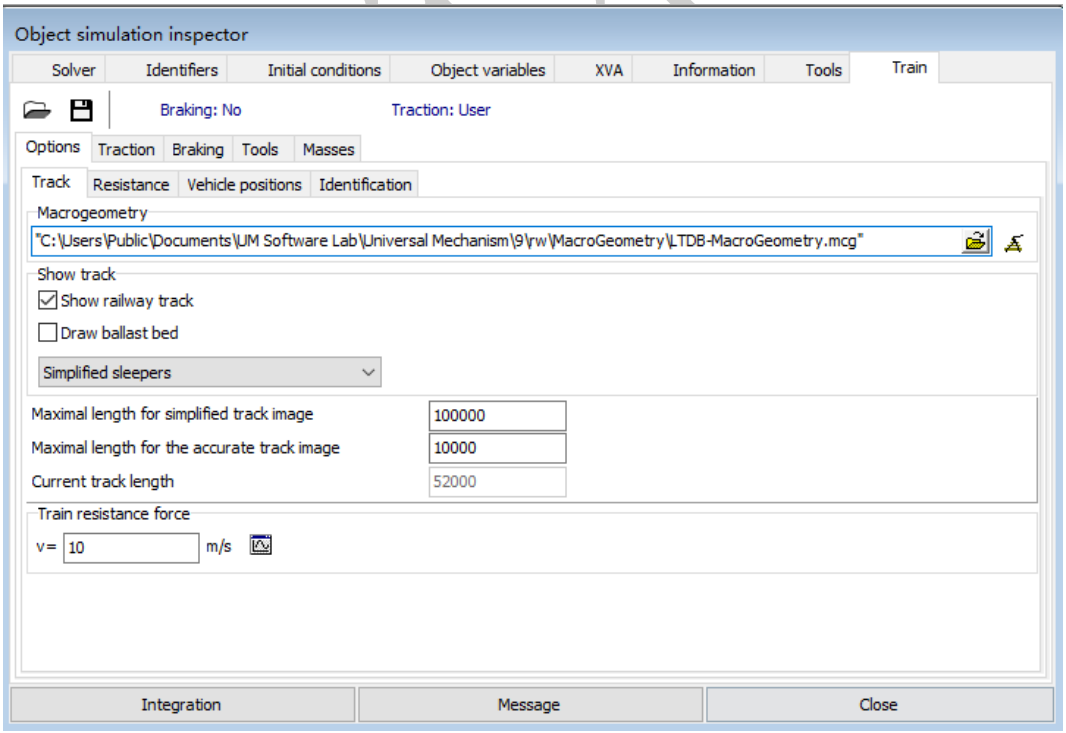


图 2.18

阻力模型

运行阻力模型按以下公式定义：

$$F_{rr} = m_w\left(2.943 + \frac{89.2}{m_a} + 0.0306v + \frac{0.122v^2}{m_w}\right),$$

其中，m_w 是车辆质量，单位为吨；m_a 是轴重（32 吨），v 是车辆速度。

曲线阻力模型定义为：

$$F_{cr} = m_w\frac{6116}{R},$$

其中，R 表示曲线半径。

定位到 **Train | Options | Resistance | Propulsion** 页面，点击➕按钮，添加机车和车辆运行阻力模型，这里需要一共需要添加三个阻力模型：**LTDB-Leading Locomotive.rf**，**LTDB-All Other Locomotive.rf**，**LTDB-All Wagons.rf**。

添加完成后，选中 **LTDB-All Wagons.rf**，点**右键**，选择 **Assign to all**，分配给所有机车和车辆。

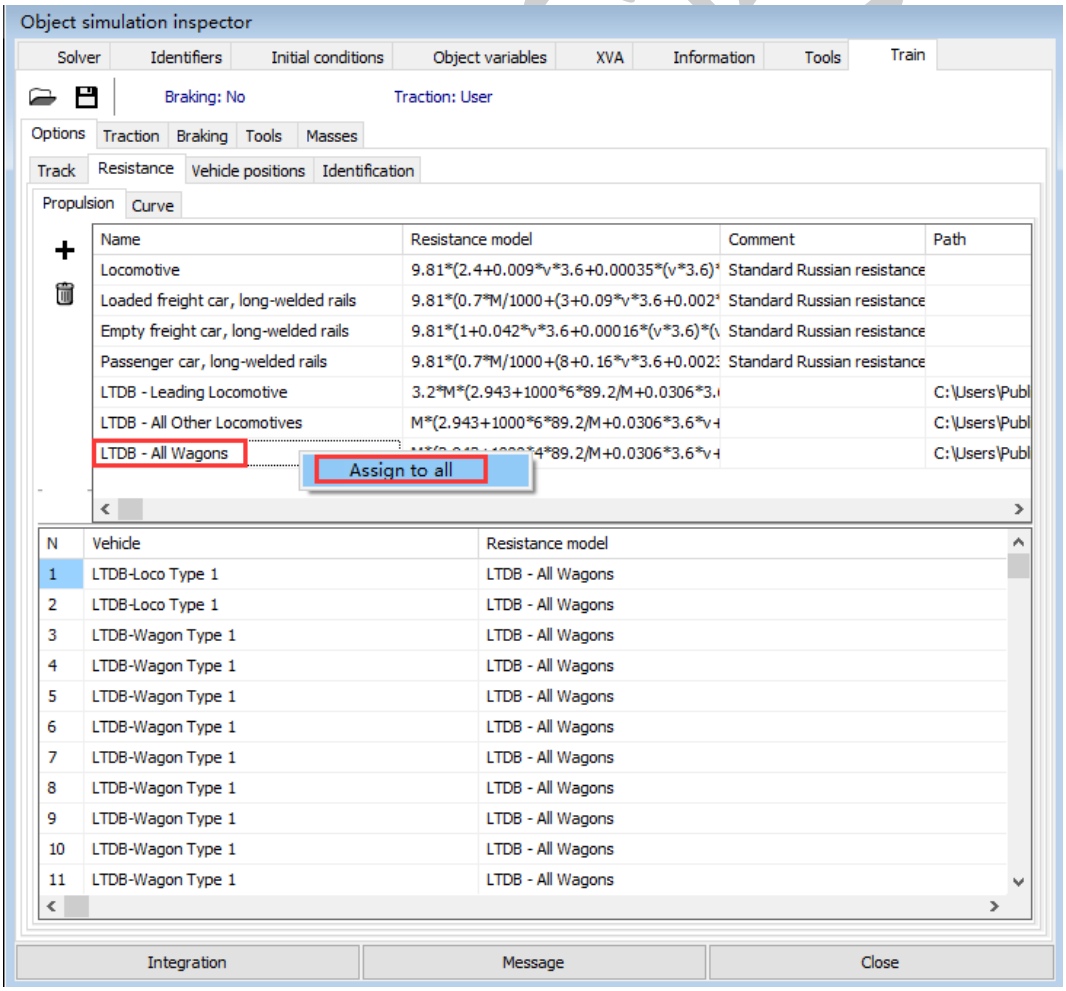


图 2.19

在下部列表，通过双击单元格操作分别将两个机车的阻力模型设置为 **LTDB-Leading Locomotive.rf** 和 **LTDB-All Other Locomotive.rf**，如图 2.20 所示。

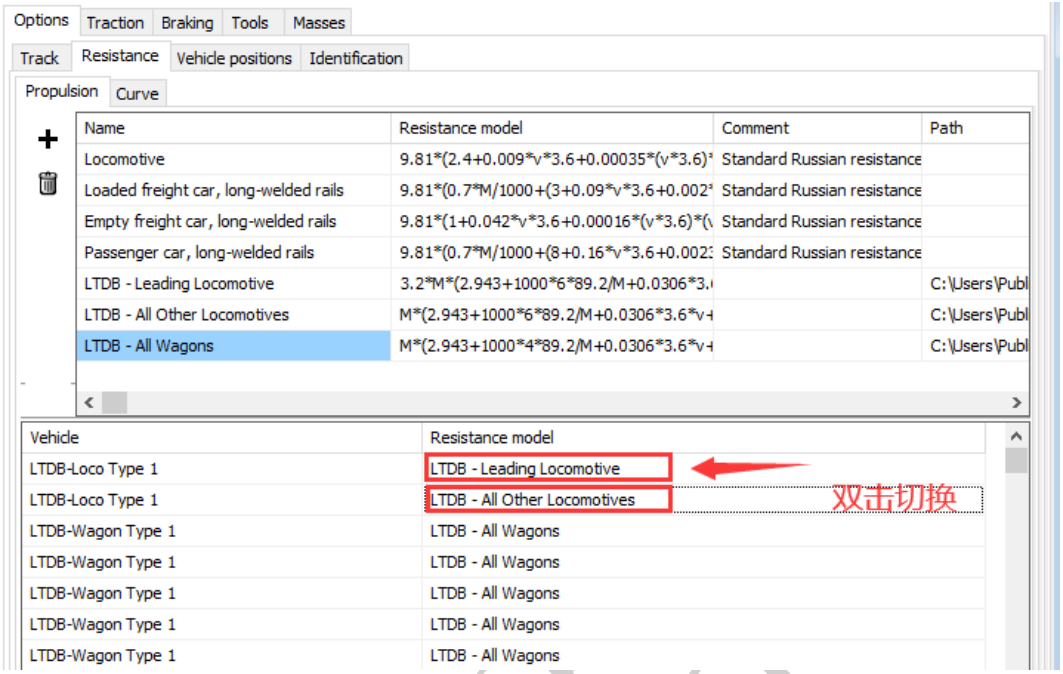


图 2.20

转到 **Train | Options | Resistance | Curve** 页面，选择曲线阻力模型 F=a/(R-b)，设置系数 **a=6116**，**b=0**。

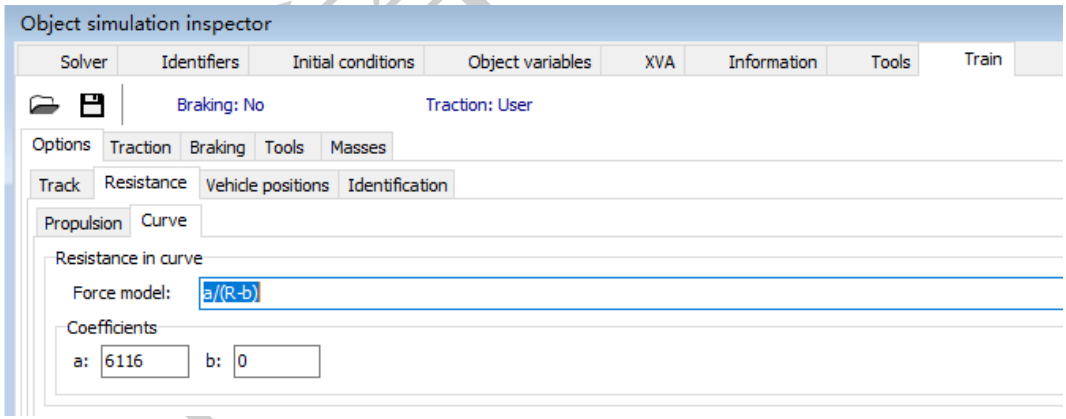


图 2.21

设置车辆位置

定位到 **Train | Options | Vehicle positions** 页面，设置头车的初始位置为 **3011.475m**。

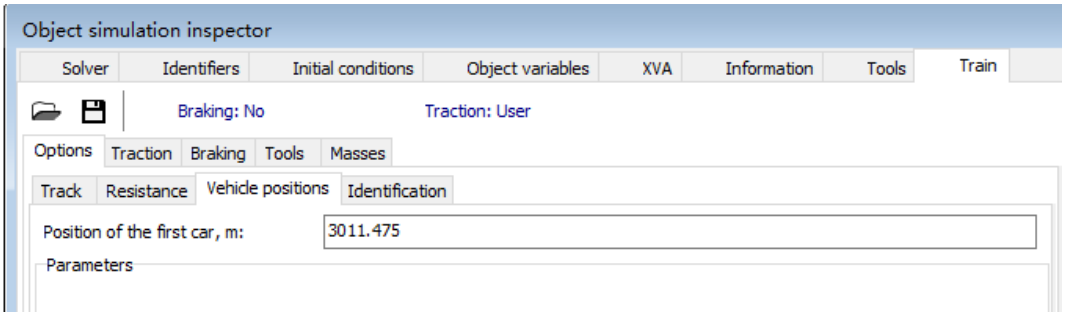


图 2.22

创建变量列表

选择主菜单 **Tools | List of variables**，出现一个列表，用于储存变量，可以分组管理，如图 2.23 所示。

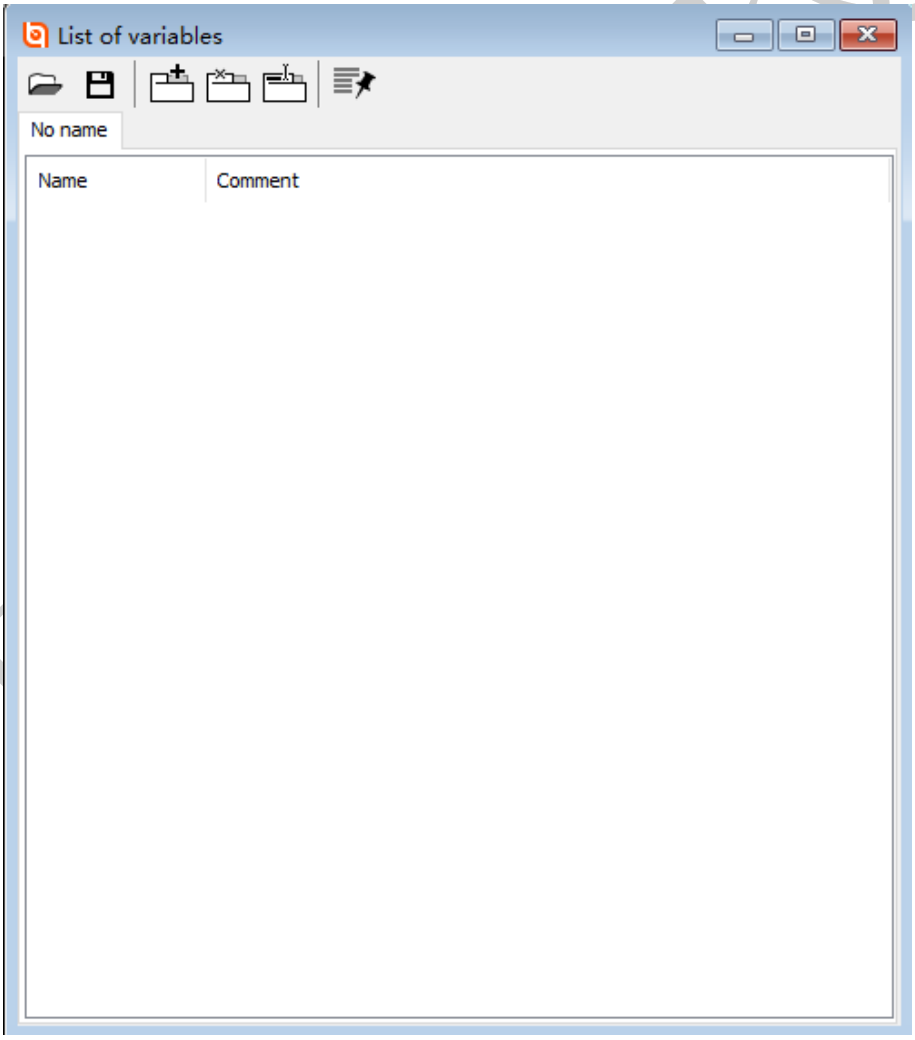


图 2.23

点击  按钮，修改列表缺省变量组名称为 **Locomotives**，点击 **OK**，如图 2.24 所示。

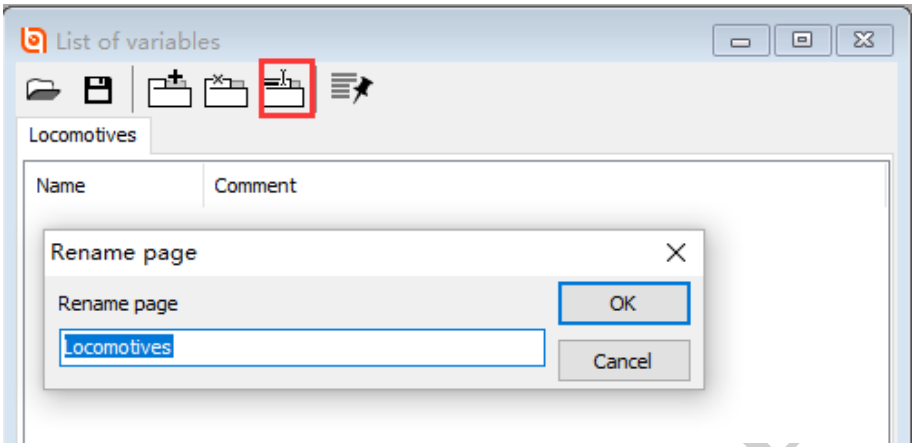


图 2.24

选择菜单 **Tools | Wizard of variables**，打开变量向导，在 **Linear variables** 页面依次定义两节机车的**位移（Coordinate）**、**速度（Velocity）**和**加速度（Acceleration）**变量，如图 2.25 所示。

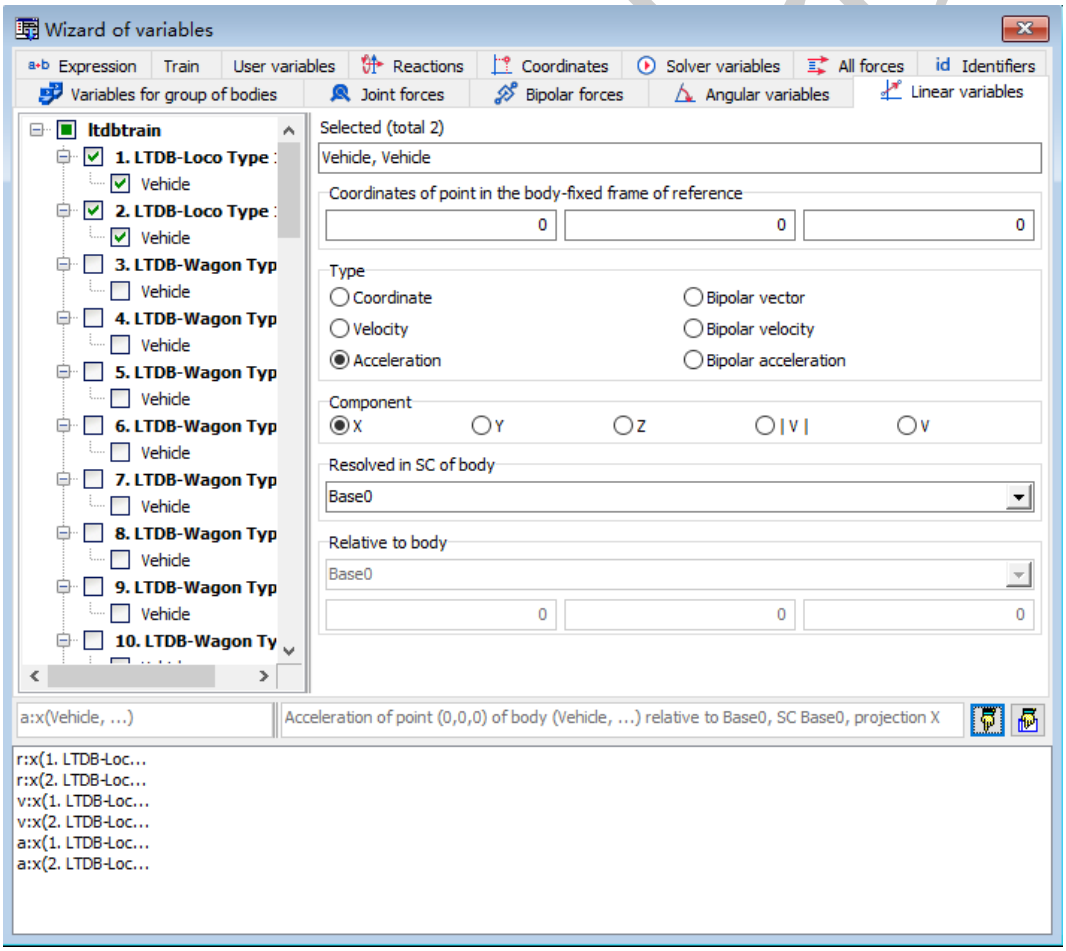


图 2.25

将这些变量全部框选，并拖入变量列表 **Locomotives** 变量组，如图 2.26 所示。

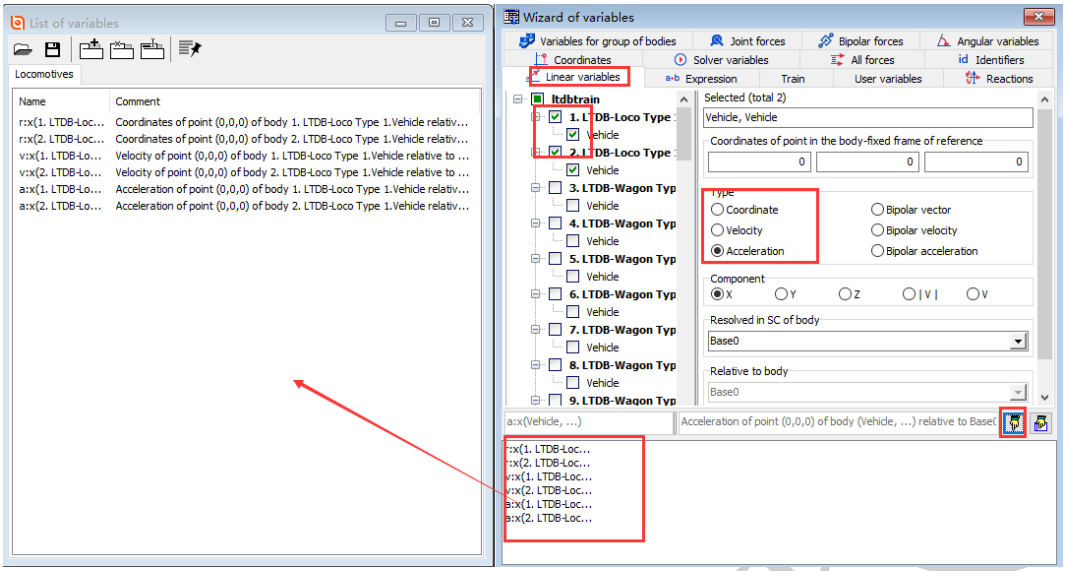


图 2.26

在变量列表窗口，点击按钮，添加一个变量组，命名为 **Coupler forces**。

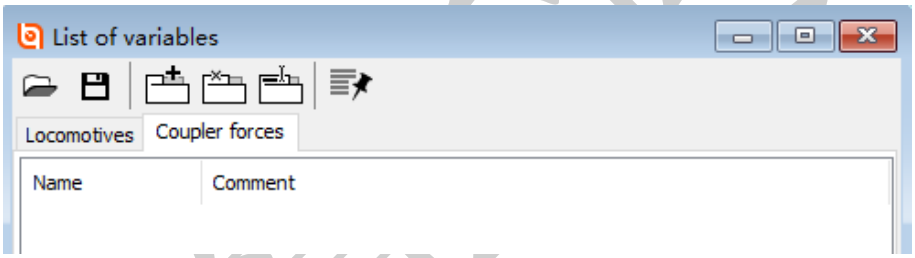


图 2.27

回到变量向导窗口，切换到 **Train** 页面，定义第 **2**、**25** 和 **51** 三个车的车钩力（**FCoupling**），并拖入变量列表中的 **Coupler forces** 变量组。

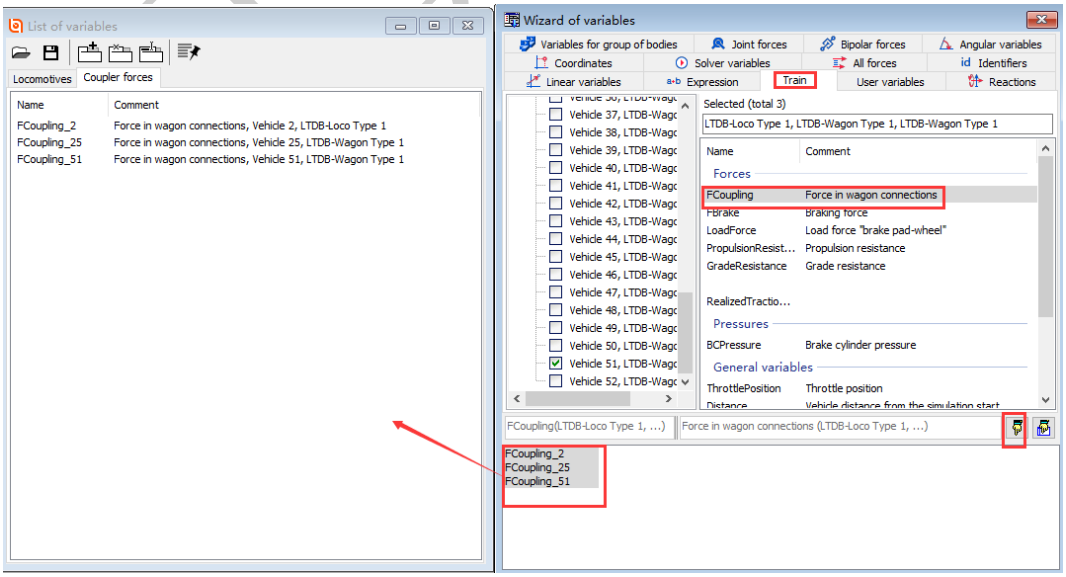


图 2.28

接下来我们还要创建 **Traction force**，**Resistance** 和 **Throttle position** 三组变量。

请按上面介绍的方法在变量列表添加三个变量组，分别命名为 **Traction force**，**Resistance** 和 **Throttle position**。

然后，从变量向导定义两个机车的相应变量，如图 2.29-图 2.31 所示，分别拖入所属的变量组。

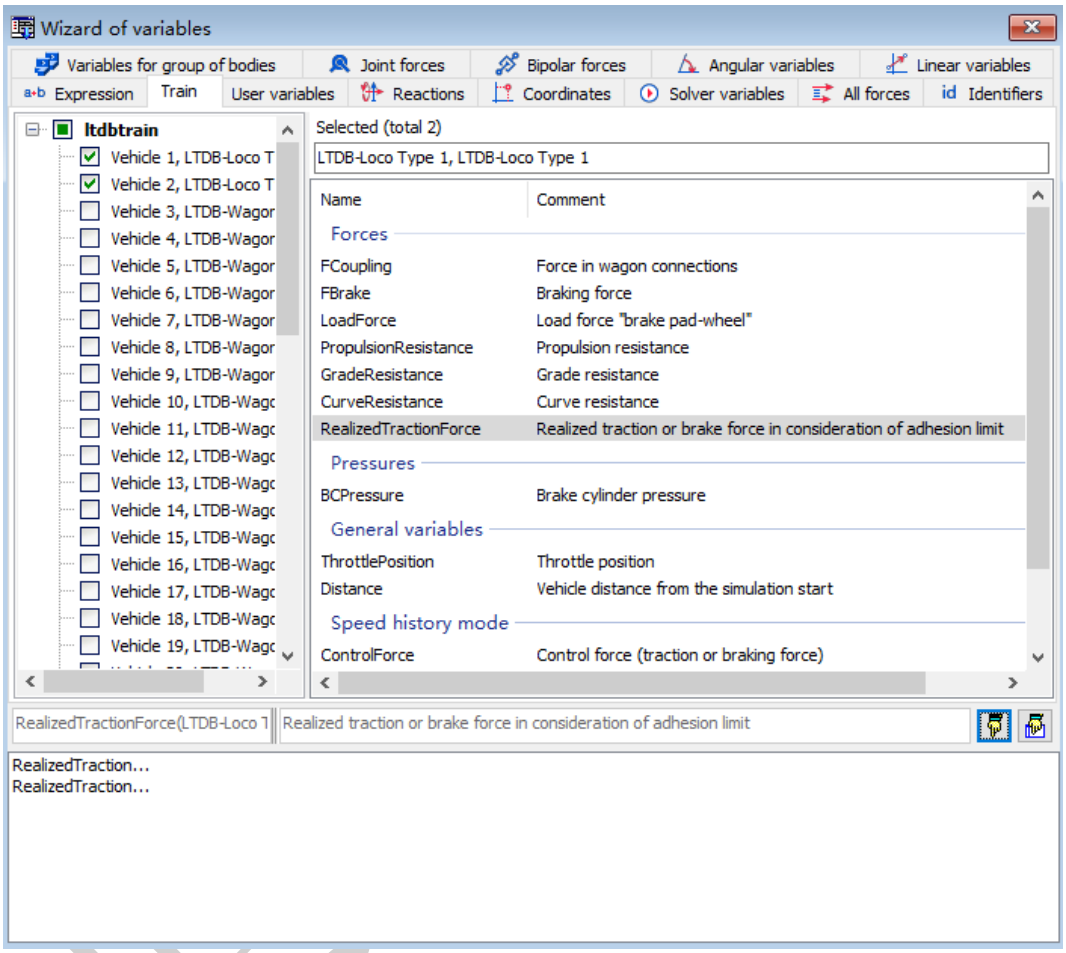


图 2.29

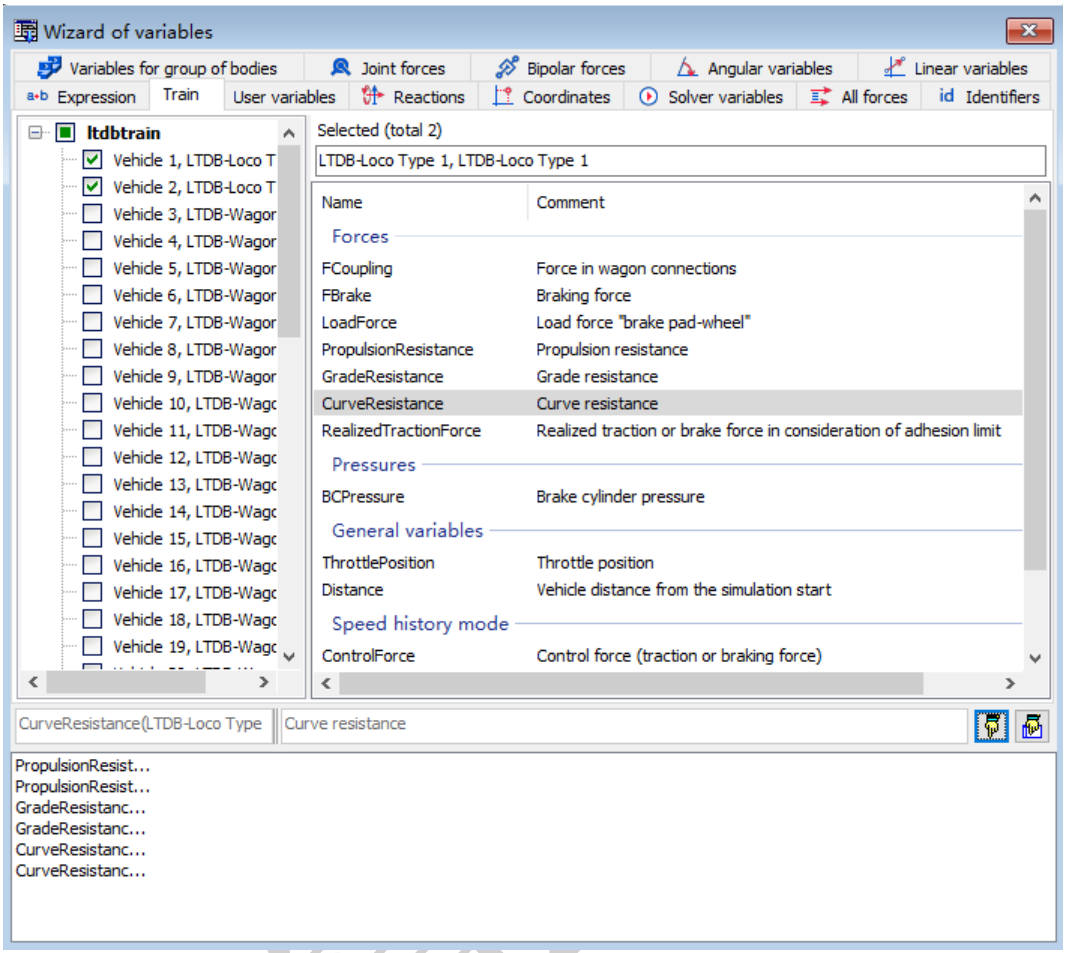

Wizard of variables
Variables for group of bodies
Joint forces
Bipolar forces
Angular variables
Linear variables
Expression
Train
User variables
Reactions
Coordinates
Solver variables
All forces
Identifiers
ltdbtrain
Vehicle 1, LTDB-Loco T
Vehicle 2, LTDB-Loco T
Vehicle 3, LTDB-Wagor
Vehicle 4, LTDB-Wagor
Vehicle 5, LTDB-Wagor
Vehicle 6, LTDB-Wagor
Vehicle 7, LTDB-Wagor
Vehicle 8, LTDB-Wagor
Vehicle 9, LTDB-Wagor
Vehicle 10, LTDB-Wagc
Vehicle 11, LTDB-Wagc
Vehicle 12, LTDB-Wagc
Vehicle 13, LTDB-Wagc
Vehicle 14, LTDB-Wagc
Vehicle 15, LTDB-Wagc
Vehicle 16, LTDB-Wagc
Vehicle 17, LTDB-Wagc
Vehicle 18, LTDB-Wagc
Vehicle 19, LTDB-Wagc
Selected (total 2)
LTDB-Loco Type 1, LTDB-Loco Type 1
Name
Comment
Forces
FCoupling
Force in wagon connections
FBrake
Braking force
LoadForce
Load force "brake pad-wheel"
PropulsionResistance
Propulsion resistance
GradeResistance
Grade resistance
CurveResistance
Curve resistance
RealizedTractionForce
Realized traction or brake force in consideration of adhesion limit
Pressures
BCPressure
Brake cylinder pressure
General variables
ThrottlePosition
Throttle position
Distance
Vehicle distance from the simulation start
Speed history mode
ControlForce
Control force (traction or braking force)
CurveResistance(LTDB-Loco Type
Curve resistance
PropulsionResist...
PropulsionResist...
GradeResistanc...
GradeResistanc...
CurveResistanc...
CurveResistanc...

图 2.30

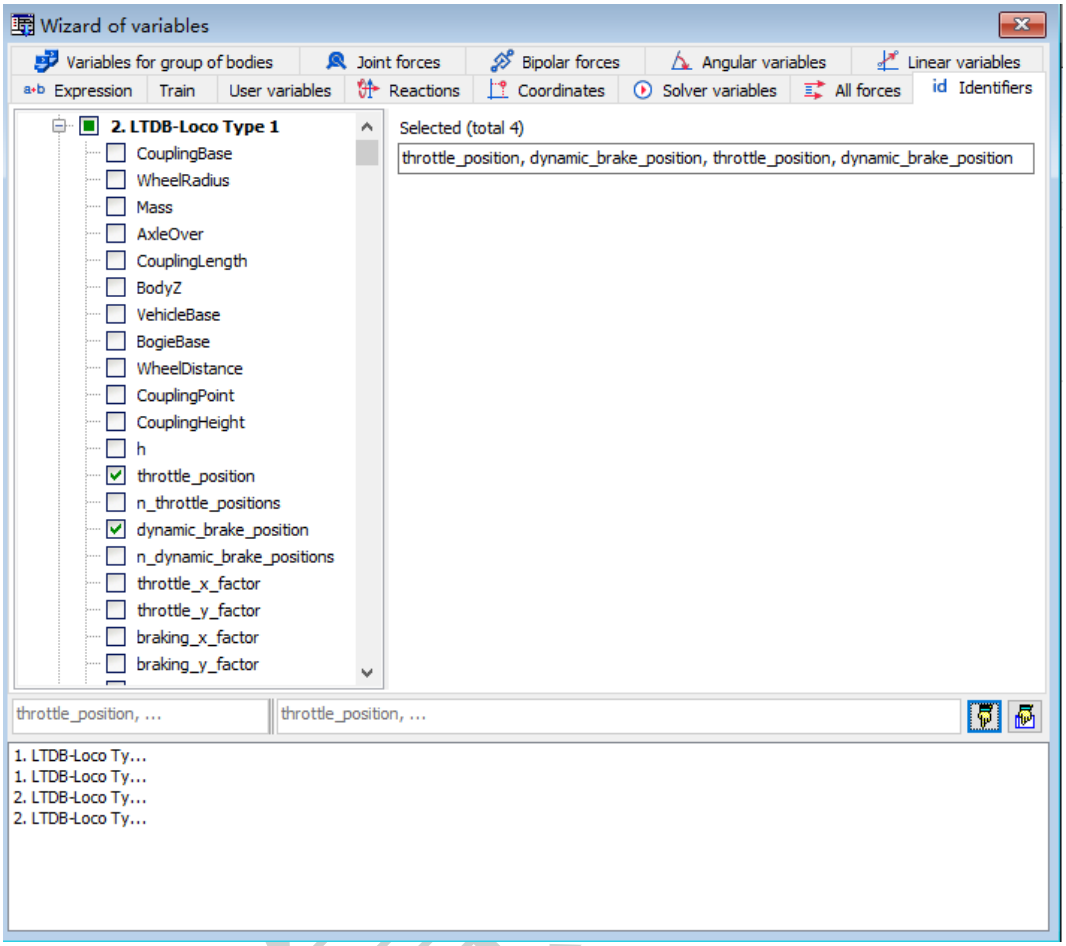


图 2.31

点击 按钮，保存变量列表，缺省与模型同名（**LTDBTrain.var**）。

关闭变量列表和变量向导。

现在，请回到仿真控制界面，定位到 **Object variables** 页面，加载刚才定义的变量列表，并确认 **Automatic saving of variables** 选项为勾选，否则计算过程中不会保存任何数据。

为了在仿真过程中实时观察各个指标，可以添加五个绘图窗口，并将之前定义的五组变量分别拖入，如图 2.32 所示。

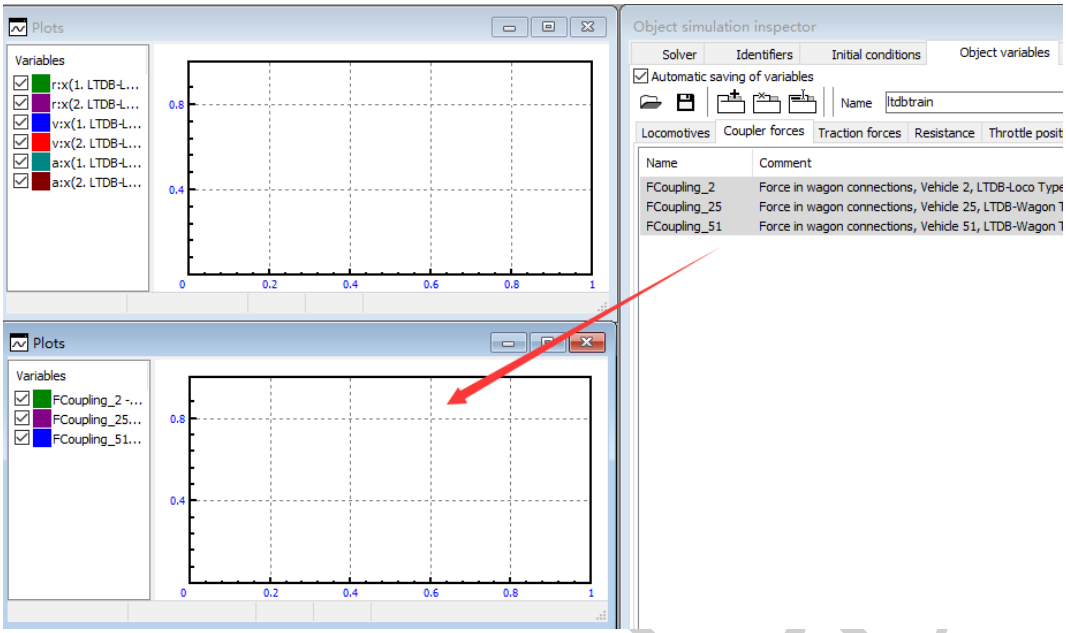

Plots
Variables
r:x(1. LTDB-L...
r:x(2. LTDB-L...
v:x(1. LTDB-L...
v:x(2. LTDB-L...
a:x(1. LTDB-L...
a:x(2. LTDB-L...
0.8
0.4
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Plots
Variables
FCoupling_2 -...
FCoupling_25...
FCoupling_51...
0.8
0.4
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
Object simulation inspector
Solver
Identifiers
Initial conditions
Object variables
Automatic saving of variables
Name
ltdbtrain
Locomotives
Coupler forces
Traction forces
Resistance
Throttle posit
Name
Comment
FCoupling_2
Force in wagon connections, Vehicle 2, LTDB-Loco Type
FCoupling_25
Force in wagon connections, Vehicle 25, LTDB-Wagon T
FCoupling_51
Force in wagon connections, Vehicle 51, LTDB-Wagon T

图 2.32

2.4 列车动力学仿真

通过前面的一系列操作，就完成了列车模型仿真工况的配置，仿真界面如图 2.33 所示。

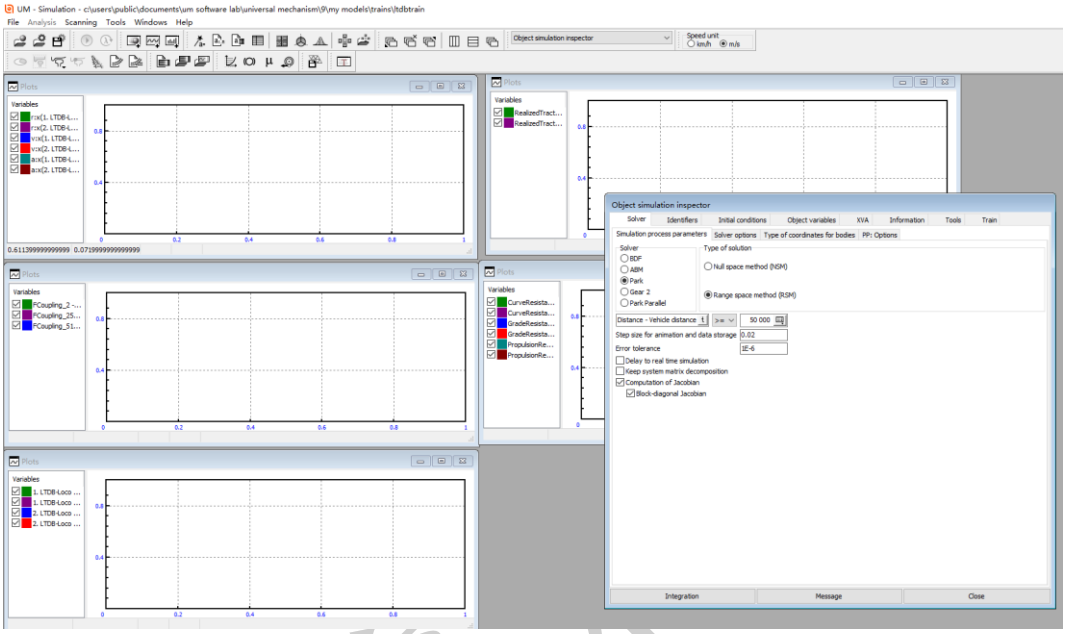


图 2.33

点击 **Integration** 或按 **F9** 键，开始仿真。

第一次计算会遇到图 2.34 所示的提示窗口，这是因为最后一节车辆尾部的钩缓力元未其他连接物体，勾选 **Do not show this window anymore**，并点击 **Continue**。

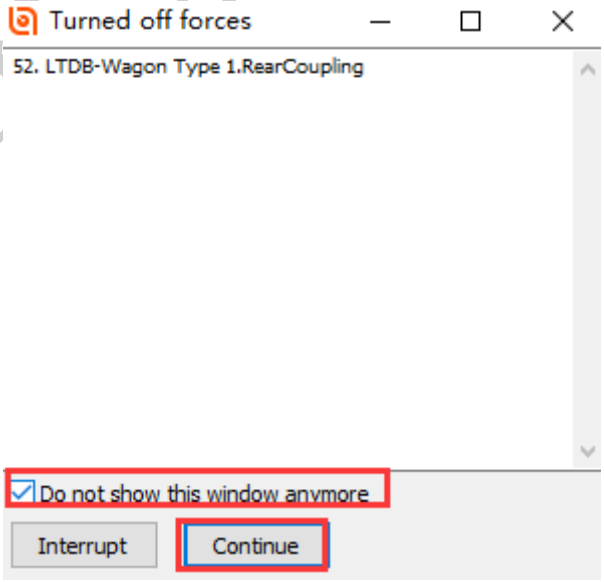


图 2.34

2.5 仿真结果

计算完毕后，机车速度、实际的牵引/制动力、阻力以及牵引级位和制动把位如图 2.35-图 2.39 所示。

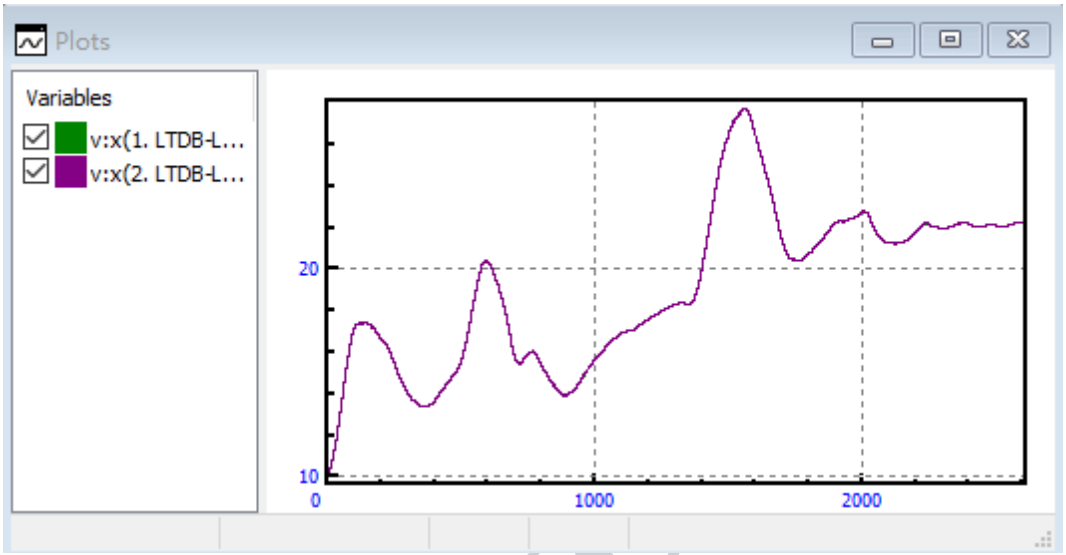


图 2.35

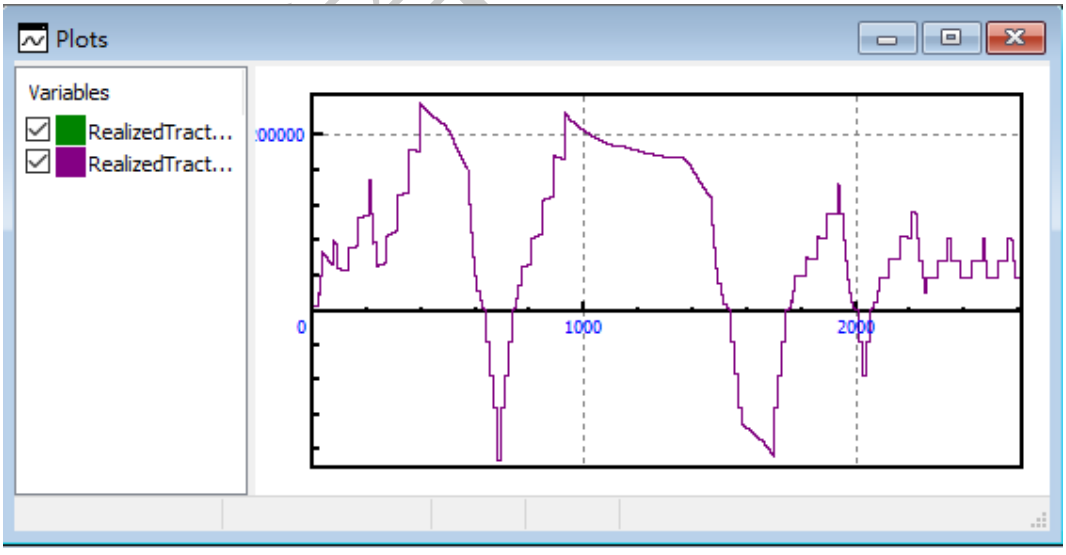


图 2.36

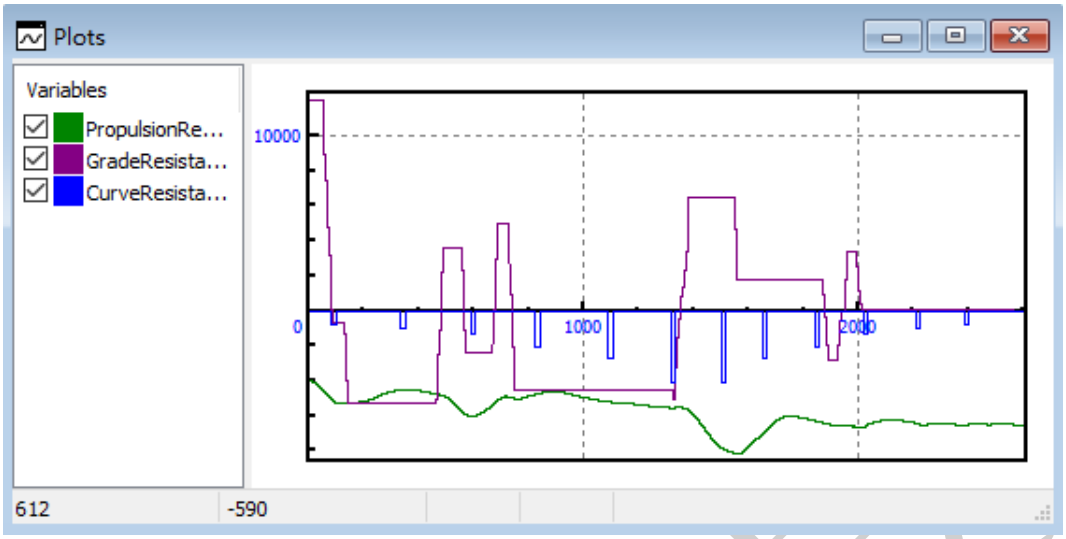

Plots
Variables
PropulsionRe...
GradeResista...
CurveResista...
10000
0
1000
2000
612
-590

图 2.37

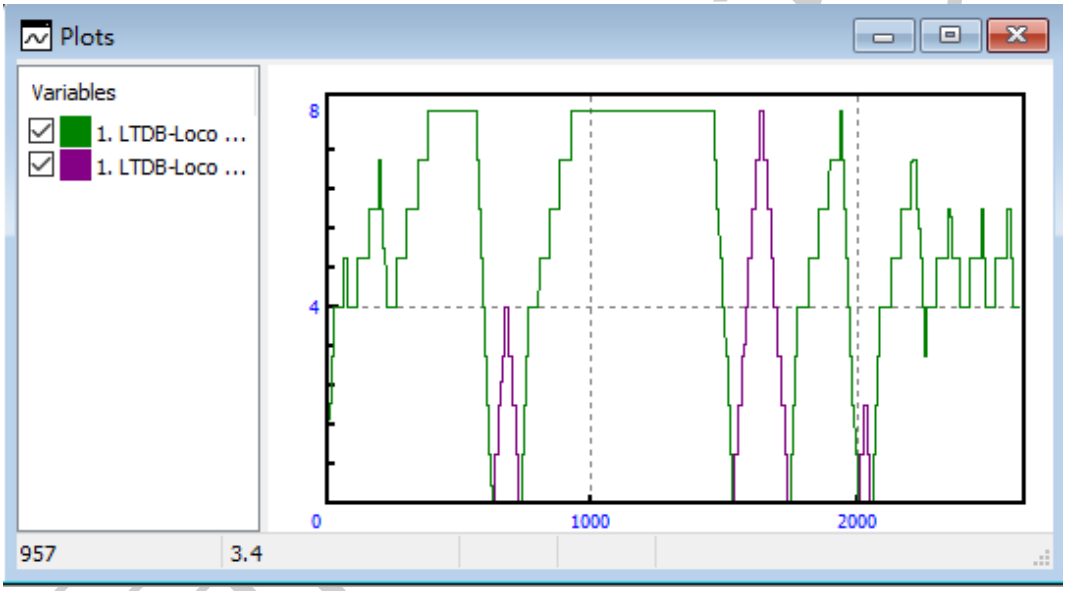

Plots
Variables
1. LTDB-Loco ...
1. LTDB-Loco ...
8
4
0
1000
2000
957
3.4

图 2.38

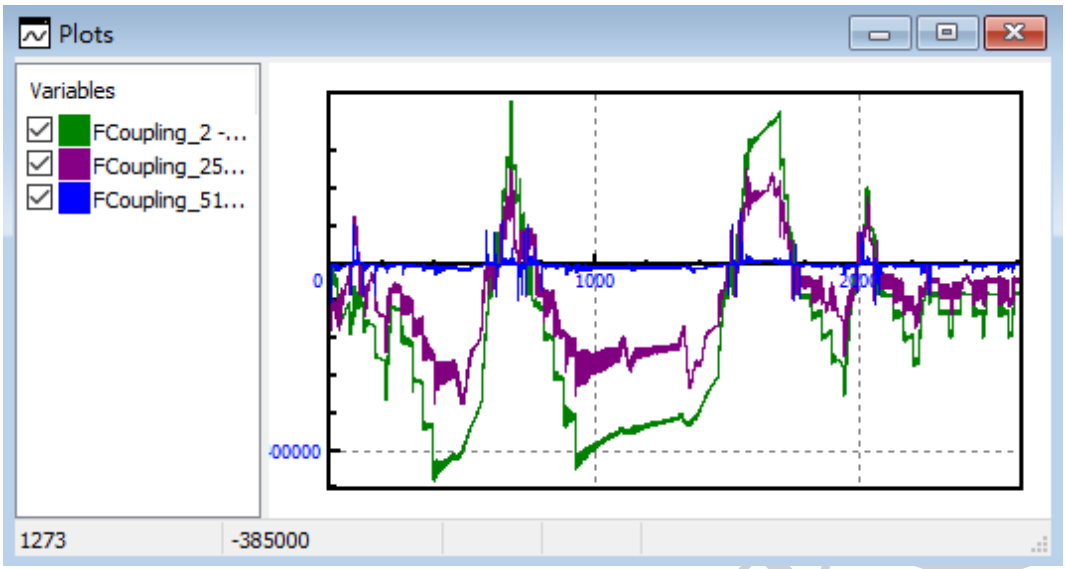


图 2.39

参考文献

[1] Maksym Spiryagin, Qing Wu & Colin Cole, (2017) Longitudinal train dynamics, Vehicle System Dynamics, 55:4, 449-449, DOI: 10.1080/00423114.2017.1285510.

[2] Maksym Spiryagin, Qing Wu, Colin Cole., (2017) International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: benchmarking questions. Vehicle System Dynamics 55:4, pages 450-463.

[3] Qing Wu, Maksym Spiryagin, Colin Cole, Chongyi Chang, Gang Guo, Alexey Sakalo, Wei Wei, Xubao Zhao, Nico Burgelman, Pier Wiersma, Hugues Chollet, Michel Sebes, Amir Shamdani, Stefano Melzi, Federico Cheli, Egidio di Gialleonardo, Nicola Bosso et al., (2018) International benchmarking of longitudinal train dynamics simulators: results, Vehicle System Dynamics, 56:3, 343-365, DOI: 10.1080/00423114.2017.1377840.