

城市轨道交通列车调度指挥与运行控制一体化仿真软件

设计及使用说明书

一、引言

随着城镇化进程的逐步加速，城市轨道交通建设快速发展。数据表明，截至 2018 年底，中国大陆地区共有 35 个城市开通城市轨道交通运营线路 185 条，运营线路总长度 5761.4 公里，全年累计完成客运量 210.7 亿人次。

城市轨道交通系统规模逐渐扩大，许多城市的轨道交通已由单一线路发展为纵横交错的线路网络，随之而来的是轨道交通网络化运营管理方面的诸多难题，如城市轨道交通列车运行及调整，其非线性、连续性等特点带给相关运营单位前所未有的挑战。列车运行方案需要结合实际进行调整，考虑到经济成本和工作实施难度，并非每一个方案都可以在实际线路上进行测试研究。但若与先进的计算机技术结合，实现软件仿真与分析，将极大地降低工程难度、提高工程精度、缩短项目时间、节约能源、增加社会经济效益。

因此，在 21 世纪信息时代，对城市轨道交通来说，基于计算机仿真技术的列车运行及调整系统必将成为发展趋势。对列车运行进行分析进而不断优化调整，首先，在城市轨道交通规划建设阶段，可以精准模拟不同的运行状态，为列车运行方案的设计提供科学的数据依据；其次，还能够通过快捷方便地调整列车的运行速度，改善列车的运行方案，提高交通运行的服务质量。所以，仿真模拟城市轨道交通列车运行过程，对我国城市轨道交通而言，有十分重要的实际意义。然而，国内外相关运营商在通过计算机仿真进行分析、辅助决策等方面仍有所欠缺。以 OpenTrack 为代表的轨道交通仿真软件面向铁路设计相关施工部门，主要功能在于模拟基础设计的需求分析与规划以及线路运力仿真等，难以有效地仿真城市轨道交通的调度指挥与运行控制过程，尤其是异常条件下的列车运行调整过程。

鉴于此，本软件从可靠性、灵活性和实用性等方面出发，根据国内轨道交通列车运行特点及现状，基于 Microsoft Visual Studio 中.NET Framework 平台，以 C# 和 XAML 为编程语言，结合 Wpf 和 Winform 编程技术，建立城市轨道交通列车调度指挥与运行控制一体化平台，并选择了北京地铁亦庄线实际线路作为研究实例，根据这一线路的具体情况进行相应的仿真计算和分析，对比实际运营效果与仿真实验结果，完成本仿真系统的测试，为城市轨道交通列车运营提供参考。

二、软件设计流程

城市轨道交通列车调度指挥与运行控制一体化仿真软件主要用于轨道交通行车调度指挥与列车运行控制相关方面的研究。行车调度指挥和列车运行控制是城市轨道交通的“大脑和中枢神经”，是保证行车安全和提高轨道交通运行控制效率的关键技术。现代城市轨道交通系统自动化水平越来越高，正常情况下的行车组织作业和列车运行控制依靠先进的设备自动进行。然而，越先进的设备，由于平时很少遇到故障情况，一旦出现异常情况则更考验行车人员的应变能力和设备的灵活处置能力。然而，城市轨道交通系统延误种类多、延误场景复杂，在实际列车运营组织中，行车调度指挥系统的列车晚点自动调整功能始终难以满足实际需求。应急情况下大多仍采用人工调整手段：行车调度员调整列车运行图后，通过调度指挥系统或移动终端通信的方式依次通知司机和站务；此时列车司机将ATO模式降级为人工驾驶的方式控车，由司机人工控制列车加减速或临时停车等，以这种方式来执行调度命令。而人工调整的效果多凭调度员自身经验和能力，调整的效果很难预知，也在无形中增加了调度员的工作强度。

本软件程序主要由三个模块组成(如图 2-1 所示)：城市轨道交通列车调度指挥模块、列车运行控制仿真模块和线路基础数据模块。本软件主要仿真的过程为：列车调度指挥模块可加载预先设定好的线路信息（如车站数量、区间数量、区间运行时间等）和计划运行图（车辆数、车次数、各次列车对应的到发时刻等），并向列车运行控制仿真模块下达计划运行图(或根据相应的调度策略调整后的计划运行图)。之后，列车运行控制仿真模块根据各个列车的实时状态信息，以一定的控制逻辑按照下达的计划运行图运行。该过程对应于调度员下达命令、司机执行调度命令，行车调度指挥系统通过对线上所有列车实时信息的掌控、实现远程集中控制。

该软件可验证各种复杂延误场景下的列车调度和运行控制策略，通过集成线路列车的实时运行信息，从一体化的角度对列车运行图和驾驶策略进行综合评估，验证不同干扰下的调度与控制策略的性能。

图 2-2 显示了软件的逻辑架构和仿真流程，可看出，仿真软件首先定义了全局计时器（Global Timer）定时发送全局消息。收到消息后，软件加载计划运行图（或基于列车调度策略修改既有运行图），根据计划运行图规定的列车到发时刻，建立（或修改）Trains 数组类（结构体），进行列车运行计划下发。之后，进行车辆（或列车运行）仿真。根据车辆所在的实时位置以及下达的运行计划，判断列车是否位于车辆段或列车是否在某个区间运行。如果列车在某个区间运行，则进入下一步骤，进行列车运行控制仿真。该步骤下，依次执行 Trains 类方法 Simulation() 和 Dynamic()，其中，前者用于判断列车是否在车站发车；后者用于

计算列车在每个仿真时间内运行状态(列车实时速度、列车实时位置等)的变化。

最后，对列车运行状态进行可视化显示。

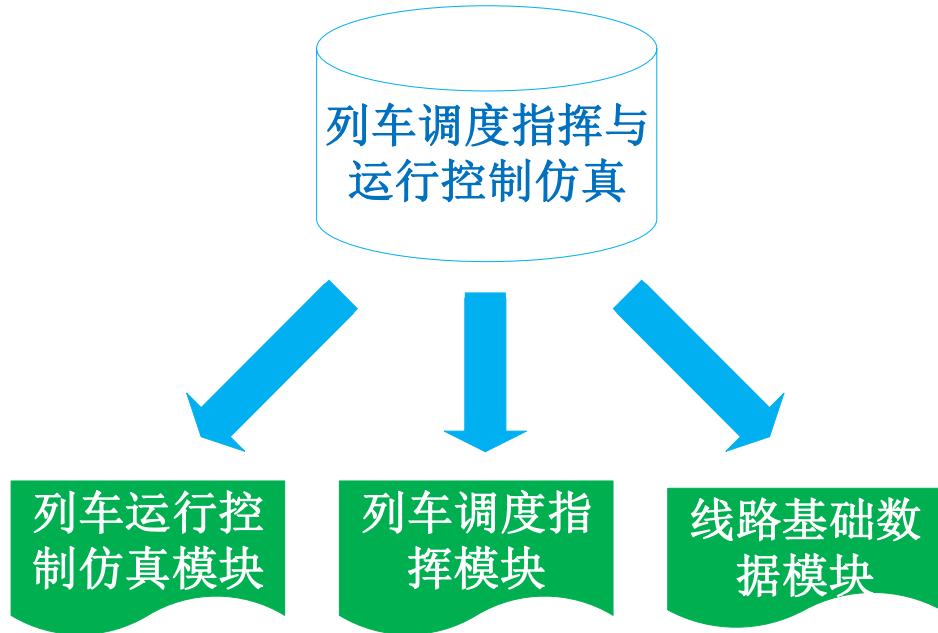


图 2-1 程序总体结构图

如图 2-2 所示，软件内，集成和封装了若干支撑的类函数，主要包括：描述列车运行图的 Line.cs，描述列车状态的 train.cs，存储离线参数的 Parameters.cs 以及可视化相关的控件（包括：信号机显示控件 MultiSignal.cs，信号灯显示控件 Signal.cs，区段显示控件 StraightLine.cs，列车 DMI 监督控件 AJBauer.xaml 等）。

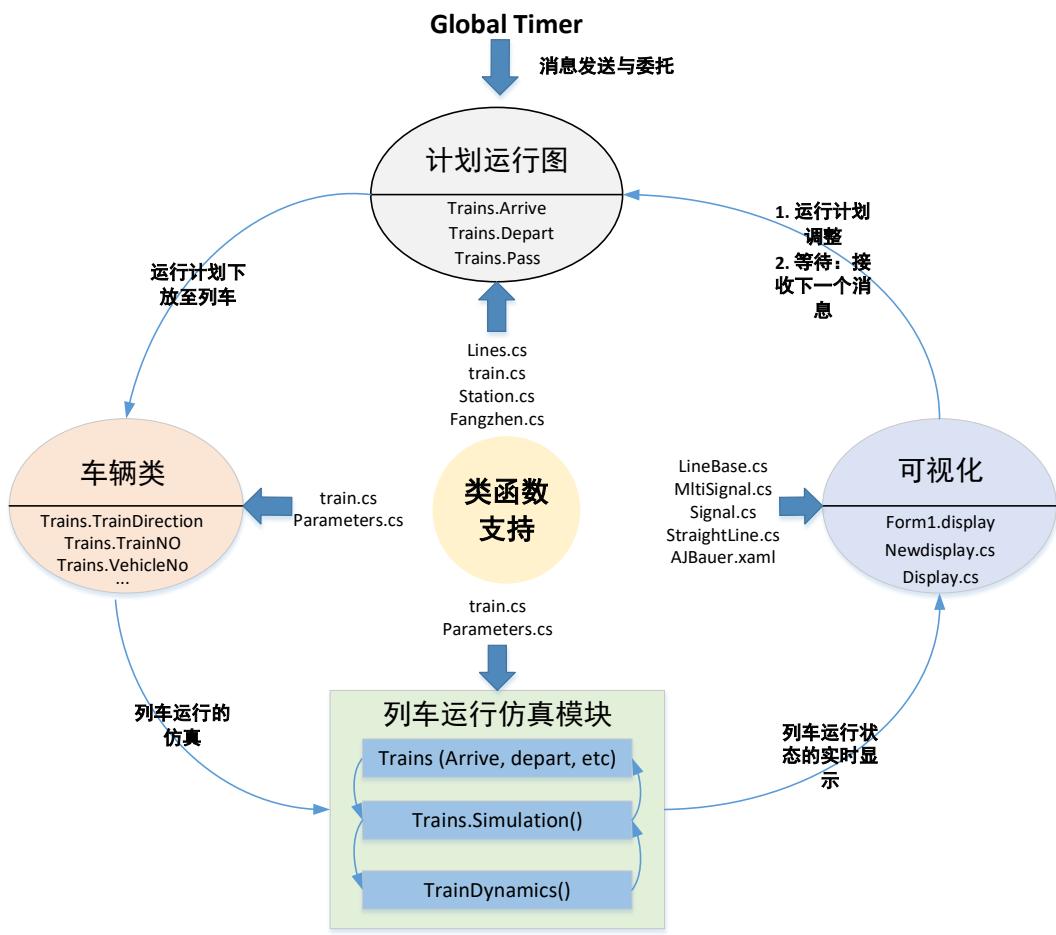


图 2-2 软件整体逻辑架构

2.1 城市轨道交通列车调度指挥模块

该软件的整体布局如图 2-3 所示：

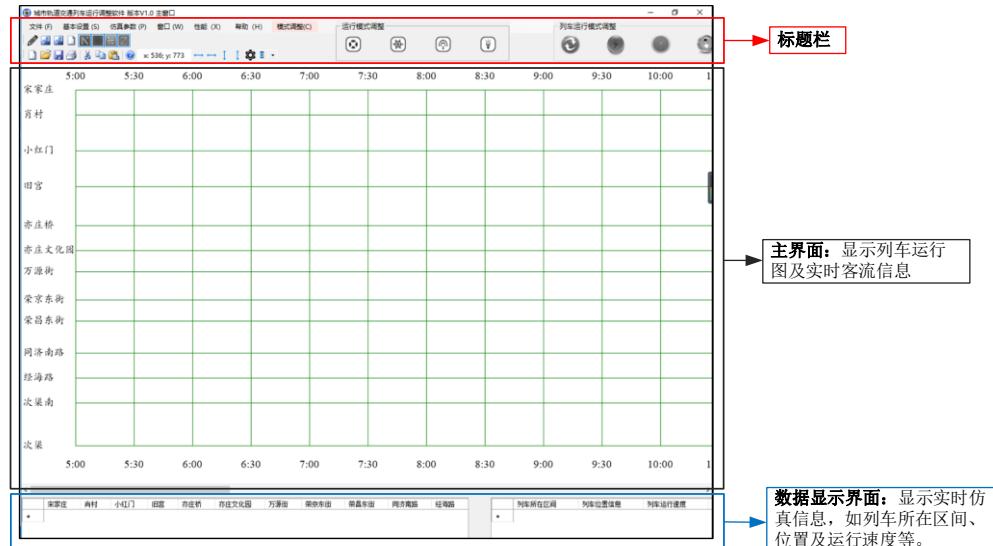


图 2-3 软件整体布局图

该模块运用 Windows Forms 界面实现可视化便捷仿真测试，配置仿真环境，输入列车运行图或设置运行线，通过控制器控制仿真时间、仿真速率和异常状态，实现自动化仿真测试，为大量的仿真测试带来了巨大的便利。这些应用程序包括传统的命令行或 Windows 应用程序。

在界面设计上，分为三部分：标题栏、主界面和数据显示界面。

标题栏分为三行，其中，第一行标题栏划分为：文件(F)、基本设置(S)、仿真参数(P)、窗口(W)、性能(X)、帮助(H)、模式调整(C)七项；第二行标题栏划分为：显示计划运行图、显示车次号、显示实际运行图、显示客流数据四项；工具栏划分为新建、打开、保存、打印、剪切、复制、粘贴、帮助、坐标显示栏、左右上下扩展运行图这十三项；主界面显示列车运行图。

第一行标题栏如图 2-4 中红框所示，其中，“文件(F)”用于打开列车运行图文件、保存运行线设置结果和仿真结果、退出仿真，如图 2-5 所示。

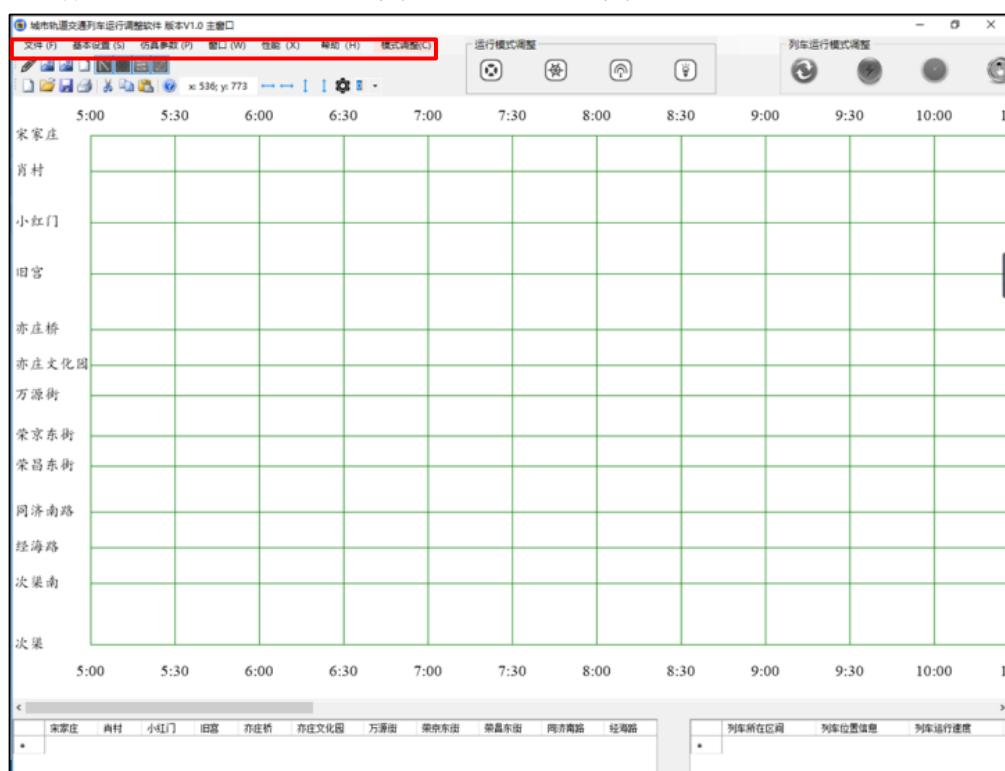


图 2-4 第一行标题栏

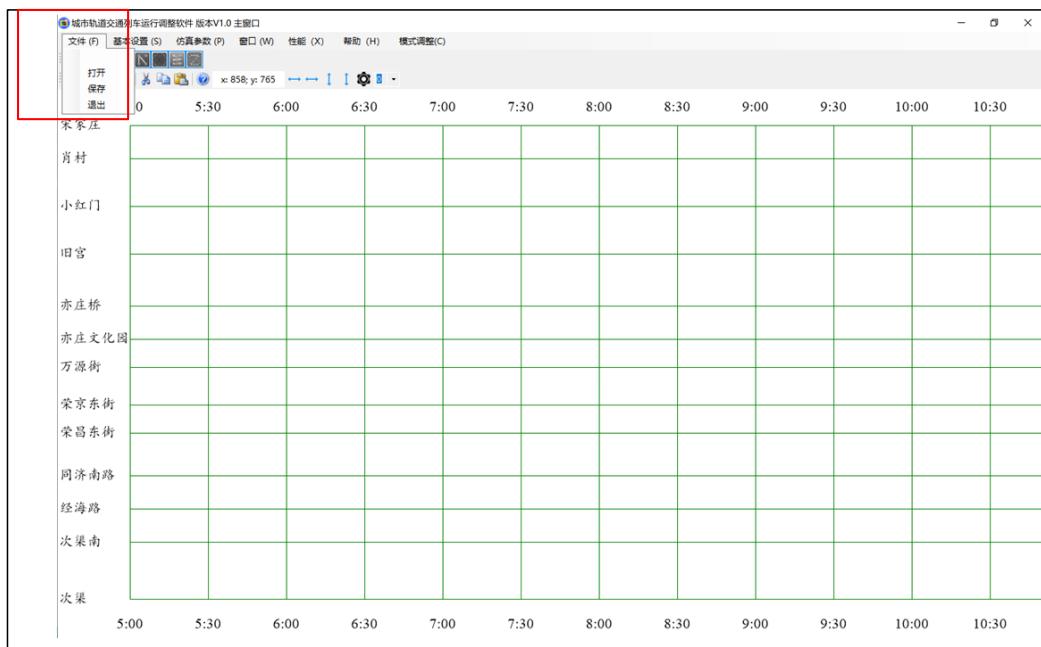


图 2-5 “文件(F)” 功能

仿真参数(P)用于调出列车运行仿真模块的控制器，如图 2-6 所示。

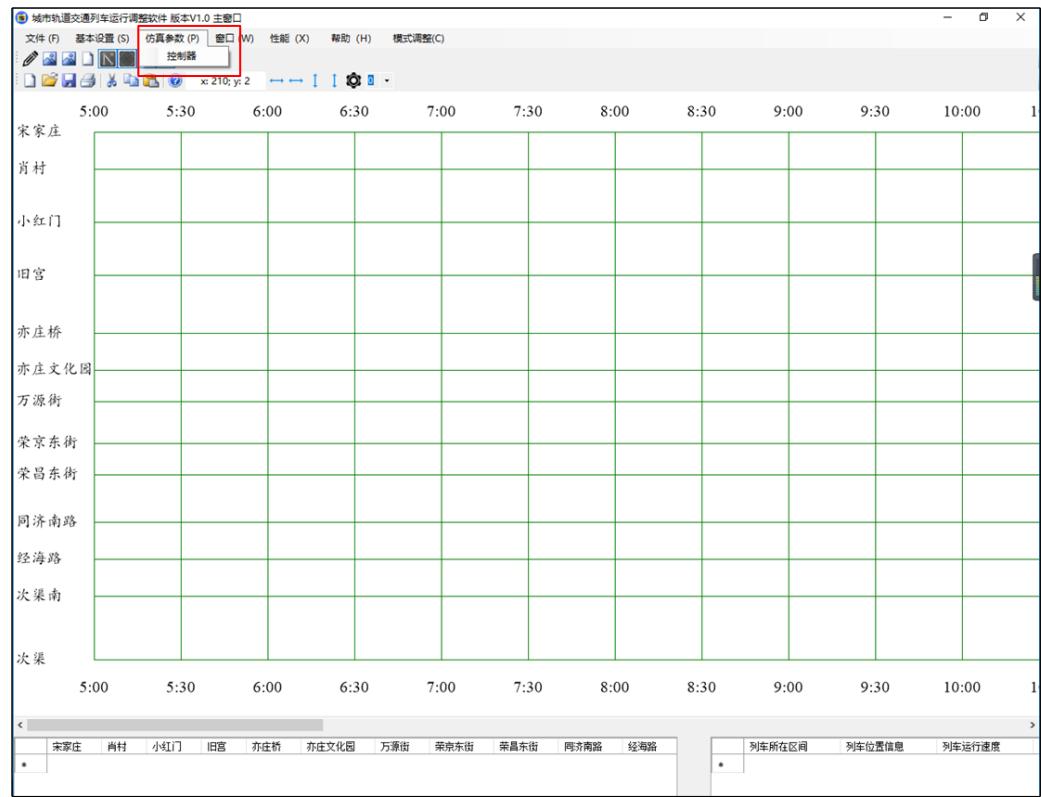


图 2-6 “仿真参数” 功能

窗口(W)用于查看速度曲线（图 2-8）、线路拓扑图（图 2-9）、客流信息、数据统计及调度监视，如图 2-7 所示。其中，调度监视用于查看列车运行过程中实

时调度情况。

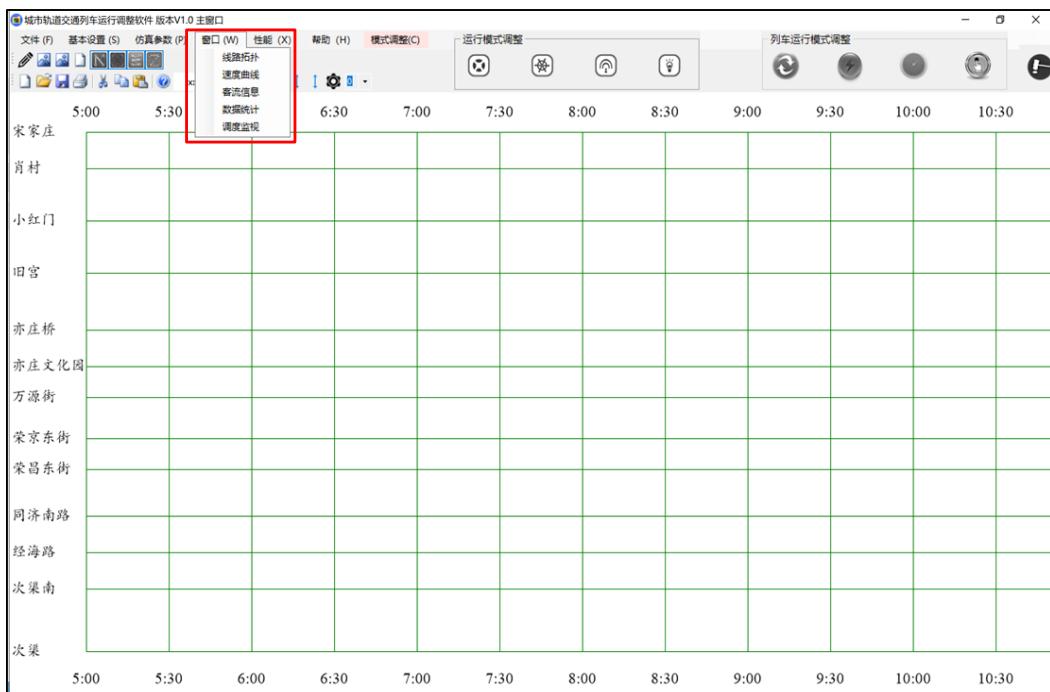


图 2-7 “窗口” 功能

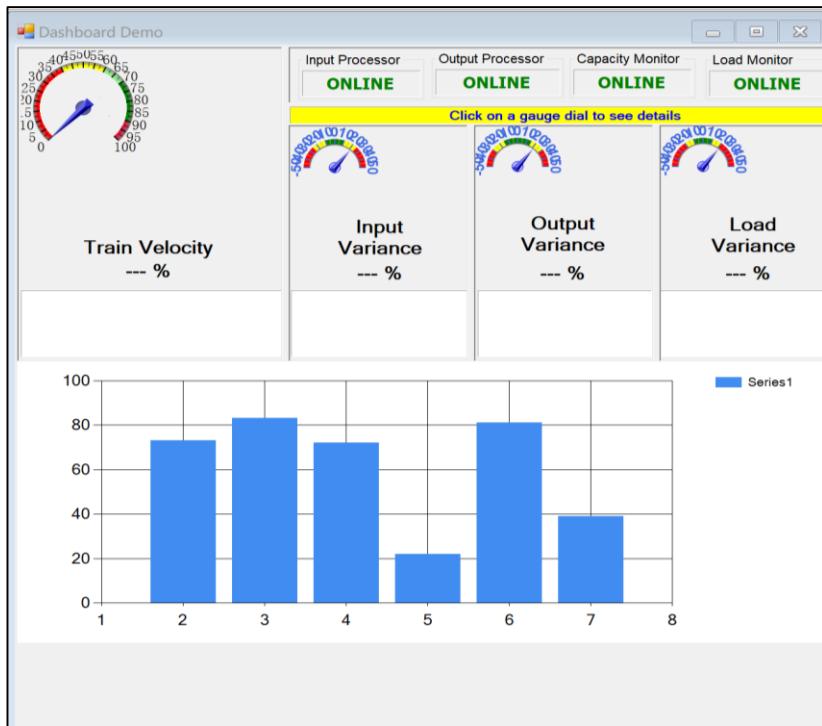


图 2-8 列车运行速度曲线界面

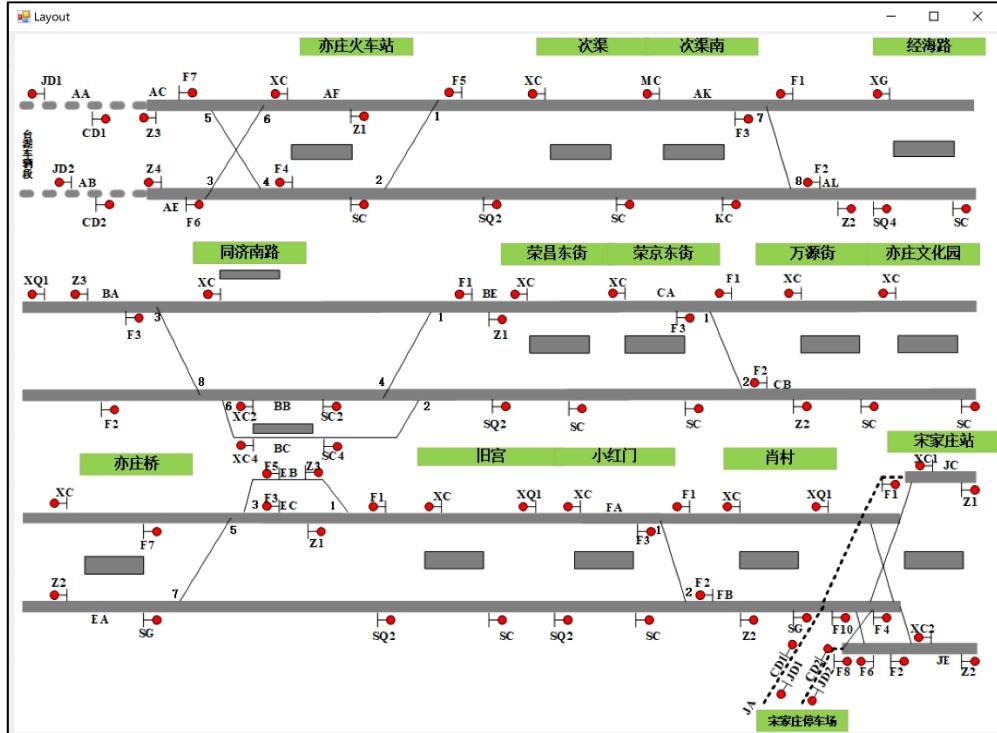


图 2-9 亦庄线线路拓扑图

性能(X)主要用于监视 CPU 使用率，点击即可随时查看仿真过程中 CPU 占用情况，如图 2-10 所示。

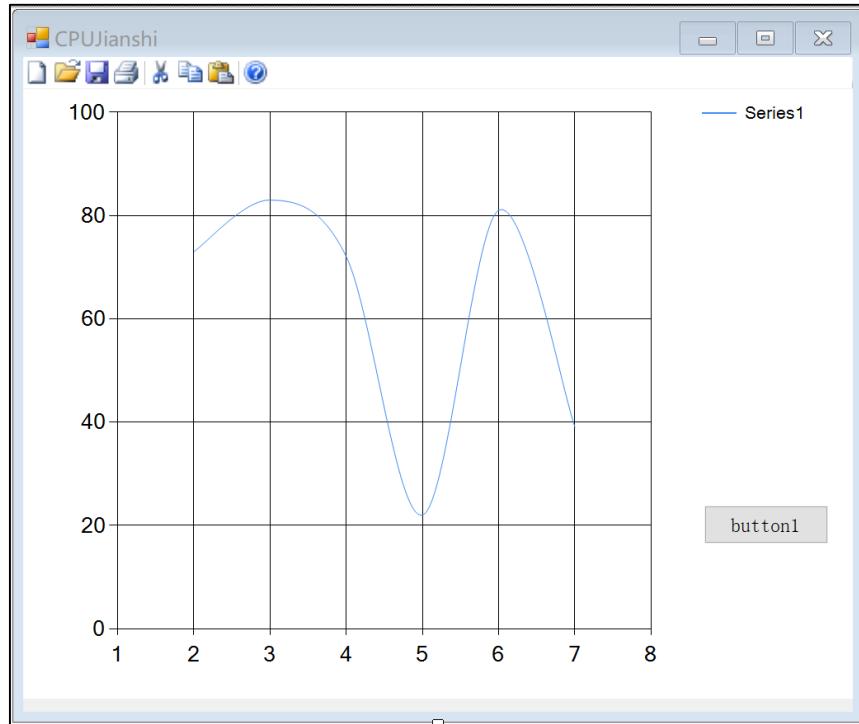


图 2-10 CPU 监视界面

模式调整(C)用于调整运行模式、列车运行模式以及显示故障，如图 2-11 所示，运行模式从左至右为正常速度、加速、减速、停车四种；列车运行模式从

左至右为准点模式、节能模式、快车模式、人工控制模式；最右侧按钮显示故障。



图 2-11 模式调整界面

第二行标题栏如图 2-12 所示，其中红框内的四个功能从左至右分别负责是否显示计划运行图、是否显示车次号、是否显示实际运行图和是否显示客流数据。

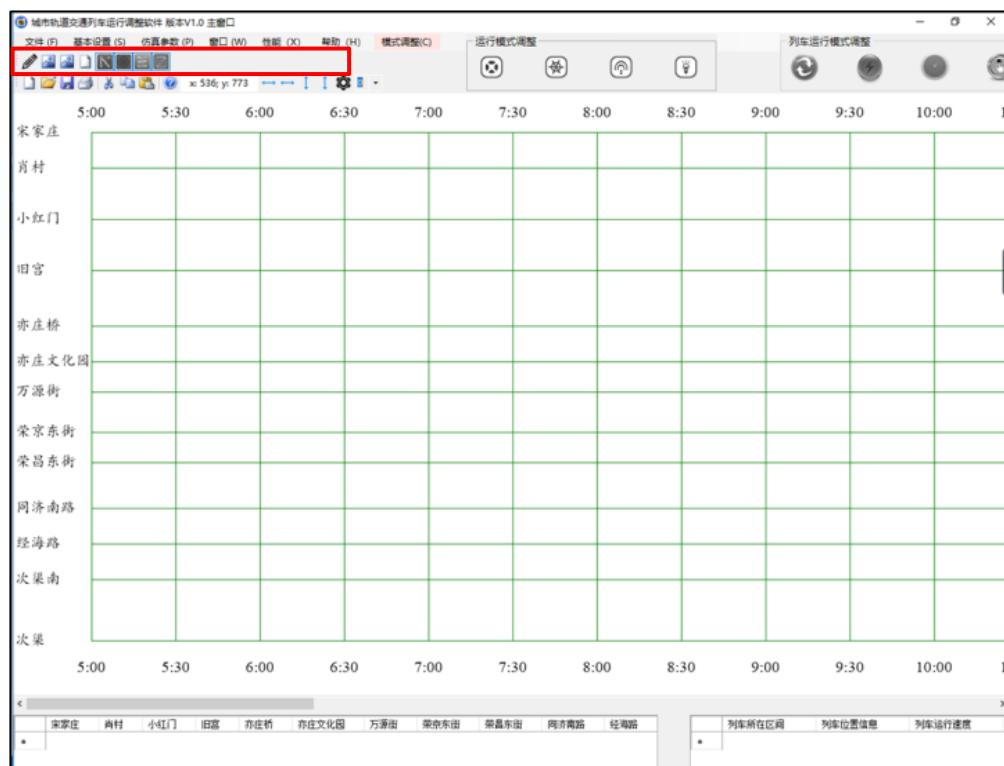


图 2-12 第二行标题栏

工具栏如图 2-13 所示，负责文件的新建、打开、保存、打印、剪切、复制、粘贴；帮助；显示坐标、左右扩展运行图界面（图 2-14）、上下扩展运行图界面（图 2-15）。其中，可以直接读取 EXCEL 表格等文件导入数据，也可以直接添加新建线路信息。

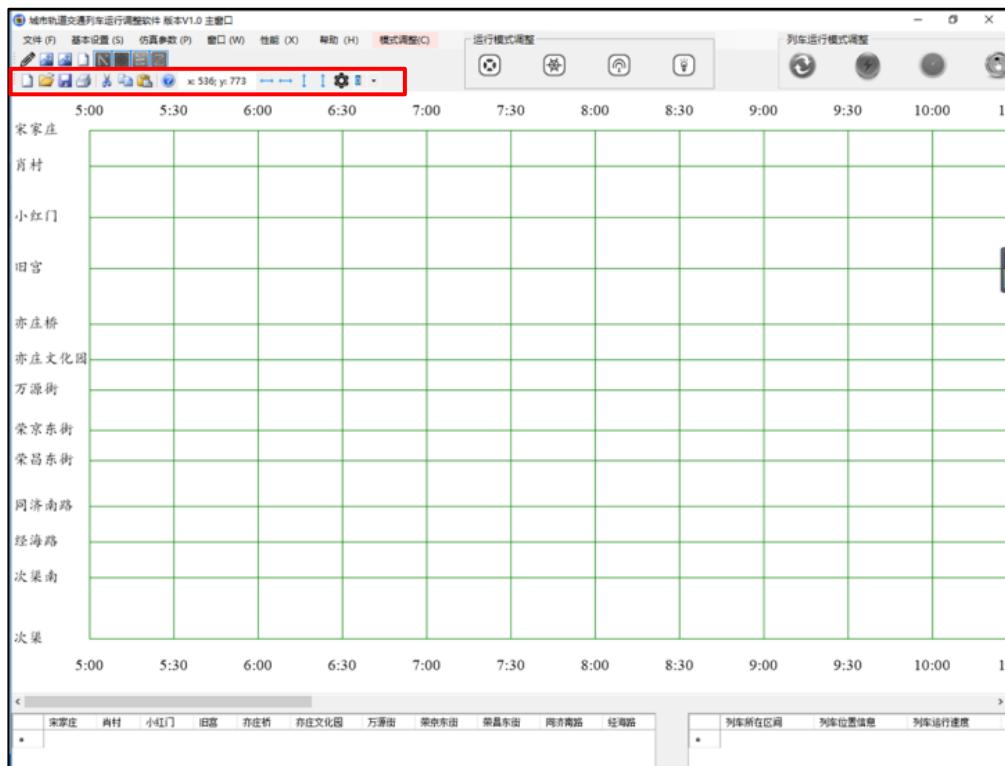


图 2-13 工具栏

点击左右箭头按钮（红色圆圈区域），即可将运行图界面进行左右扩展。

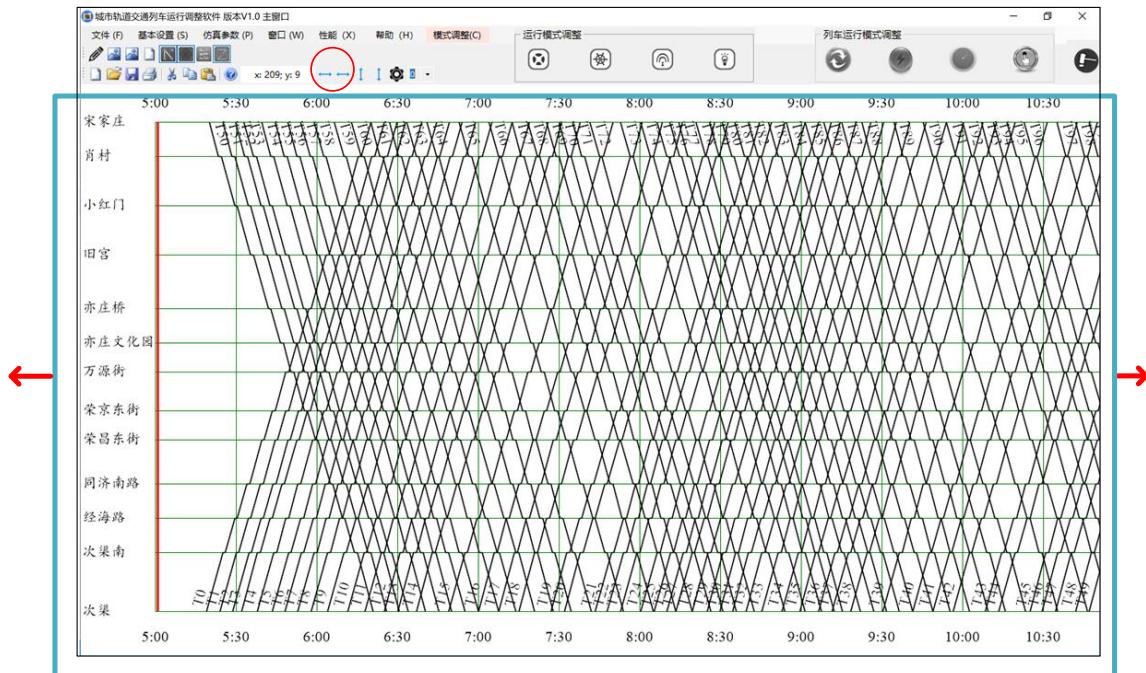


图 2-14 左右扩展运行图界面

点击上下箭头按钮（红色圆圈区域），即可将运行图界面进行上下扩展。

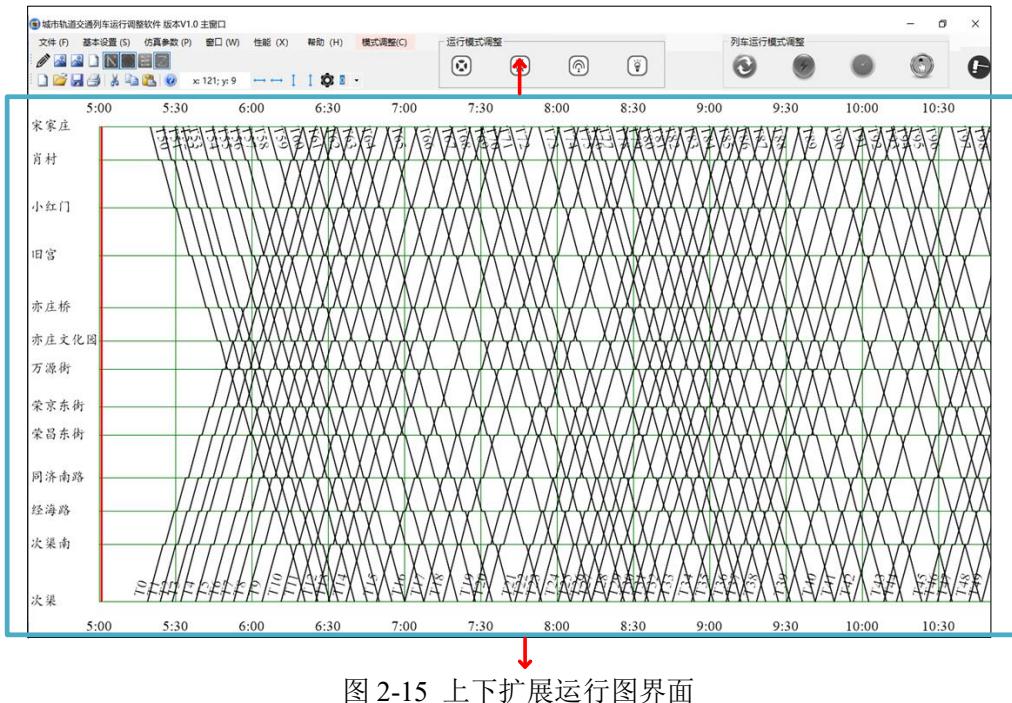


图 2-15 上下扩展运行图界面

2.2 列车运行控制仿真模块

仿真控制器包括仿真时间、仿真速率和异常状态。为了保证仿真数据更加准确，本软件在人机交互方面也更符合操作人员的操作，特别设置了人工设置仿真时间、仿真速率和调用异常状态的功能，尽可能贴近实际系统。

如果我们想要进行仿真测试，即可通过控制器设置仿真速率。启动后，仿真时间会自动显示在窗口界面中；对“异常状态”进行仿真，可以考察异常事件对轨道交通运行的影响；最下面一栏图标的功能依次为：开始仿真、暂停仿真、显示、减速、加速。控制器模块会根据设定的仿真速率确定时间周期（如每 0.1 秒），并且定时发送全局消息事件。利用消息的委托机制，在主程序中对该消息进行监视。一旦收到，则开始进入列车运行控制仿真模块（如图 2-16 所示）。



图 2-16 控制器界面

列车运行仿真模块的基本思想如下：首先，进行列车状态信息的初始化，即构建初始化数组类 `public static List<train> Trains = new List<train>()`，根据计划时刻表数据加载的信息，将各列车的计划信息存入该数组类，并将所有对象（即 `Trains[]`）的 `location` 属性赋值为“depot”，表示所有列车在仿真开始之前均位于车辆段中。之后，在收到控制器发送的全局委托信息之后，开始对所有数组类 `Trains` 中的对象元素同步进行列车运行过程的实时仿真。该仿真主要分为以下几个步骤：

1. 判断列车是否出库：根据全局委托信息中的 `CurrentTime` 参数（即时钟当前时间），结合列车收到的运行计划信息（即 `Trains[].Depart[0]`，表示列车从车辆段始发的时间）进行逻辑判断，如果当前时刻大于列车出库的计划时刻，则不进行任何操作；否则列车需按照运行计划下线运行，将 `location` 属性置为列车所在区段（如次渠至次渠南区段）；
2. 判断列车是否发车：根据全局委托信息中的 `CurrentTime` 参数（即时钟当前时间），结合列车当前位置（即 `Trains[].CurrentLocation`）以及列车收到的运行计划信息（即 `Trains[].Depart[i]`，表示列车从该车站始发的时间）以及列车在车站最短的停车时间进行逻辑判断，是否满足发车要求，如果满足，则将 `location` 属性加 1，表示列车进入下一区间，并将 `velocity` 和 `position` 属性置为 0，`RemainTime` 属性置为下一区间的计划运行时间；
3. 更新列车运行状态：以列车当前位置、当前速度、采样时间和牵引/制动指令为输入，根据列车动力学方程（即 $v(t + 1) = v(t) + a(t) - f(t)$, $s(t + 1) = s(t) + v(t)\Delta t + 0.5a(t)\Delta t^2$, $f(t)$ 表示列车运行阻力）计算列车在采样时间内的运行状态变化
4. 判断列车是否到达下一站：根据全局委托信息中的 `CurrentTime` 参数（即时钟当前时间），结合列车当前位置（即 `Trains[].CurrentLocation`）以及列车运行速度（即 `Trains[].velocity`）进行逻辑判断，如果列车位置已越过停车标且列车速度为 0，则满足停车条件；之后，列车进入站停阶段，更新列车停车的累计时间。
5. 判断列车是否回库：根据全局委托信息中的 `CurrentTime` 参数（即时钟当前时间），结合列车当前位置（即 `Trains[].CurrentLocation`）以及列车运行速度（即 `Trains[].velocity`）进行逻辑判断，如果列车已经到达最后一站，则该列车回库，将其属性重新置为 `depot`，表示该车次已经完成其全周转作业流程。

2.3 线路基础数据模块

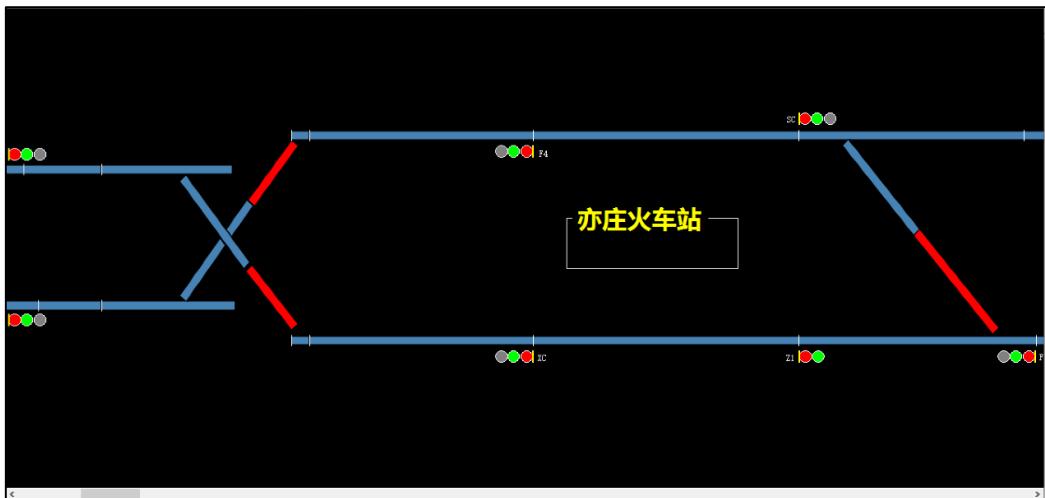


图 2-17 线路基础数据界面

线路基础数据模块（图 2-17 所示）用来存储线路数据，可以对城市轨道交通的线路进行添加、修改和删除等。

线路数据模块主要使用三个控件，对整条线路进行铺画：

- (1) 轨道控件(StraightLine 控件)负责铺画线路轨道，可以通过调整“LineType”参数控制其走向，其中，“Horizontal”代表水平方向轨道，“DiagonalAscending”代表倾斜由右下至左上方向轨道，“DiagonalDecending”代表倾斜由左上至右下方向轨道，通过调整“Size”调整其长度和宽度，通过调整“ForeColor”参数改变轨道的颜色，如图 2-18 所示，紫色框中为轨道及其对应属性参数。
- (2) 信号灯控件(MultiSignal 控件)负责铺画信号灯，可以通过调整“SignalNum”参数控制个数，通过改变“Direction”参数调整方向，通过改变“Size”参数调整其半径，通过“LeftColor”“MiddleColor”“RightColor”参数调整颜色，如图 2-19 所示。
- (3) 站台控件(MyGroupBox 控件)负责铺画站台，可以通过调整“Text”参数改变站台名称，通过调整“Font”参数改变站台名称的字体、字号，调整“ForeColor”参数以改变站台名称的颜色，如图 2-20 所示。

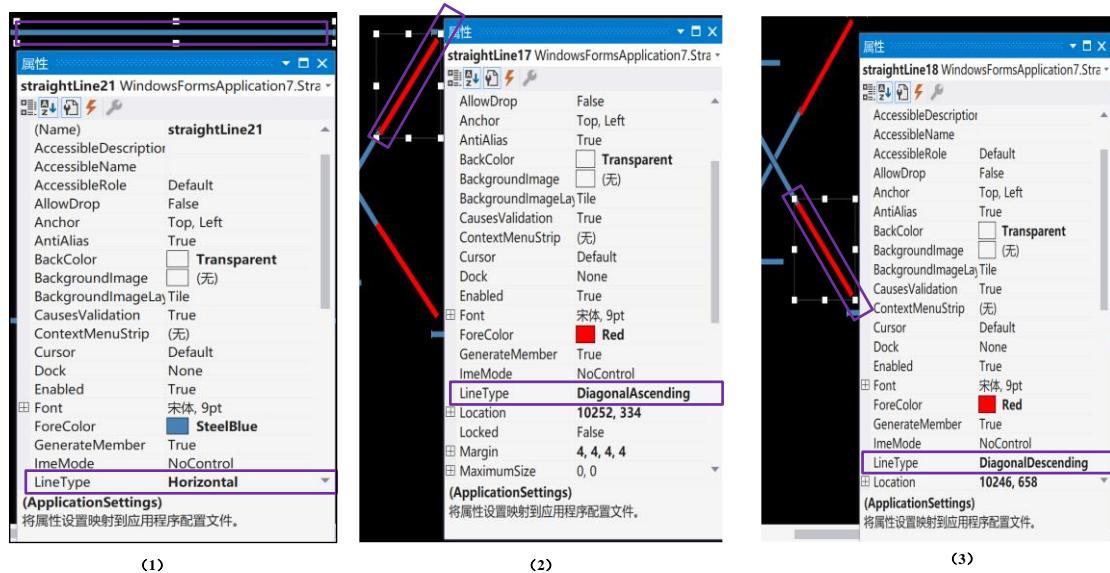


图 2-18 轨道控件示意图

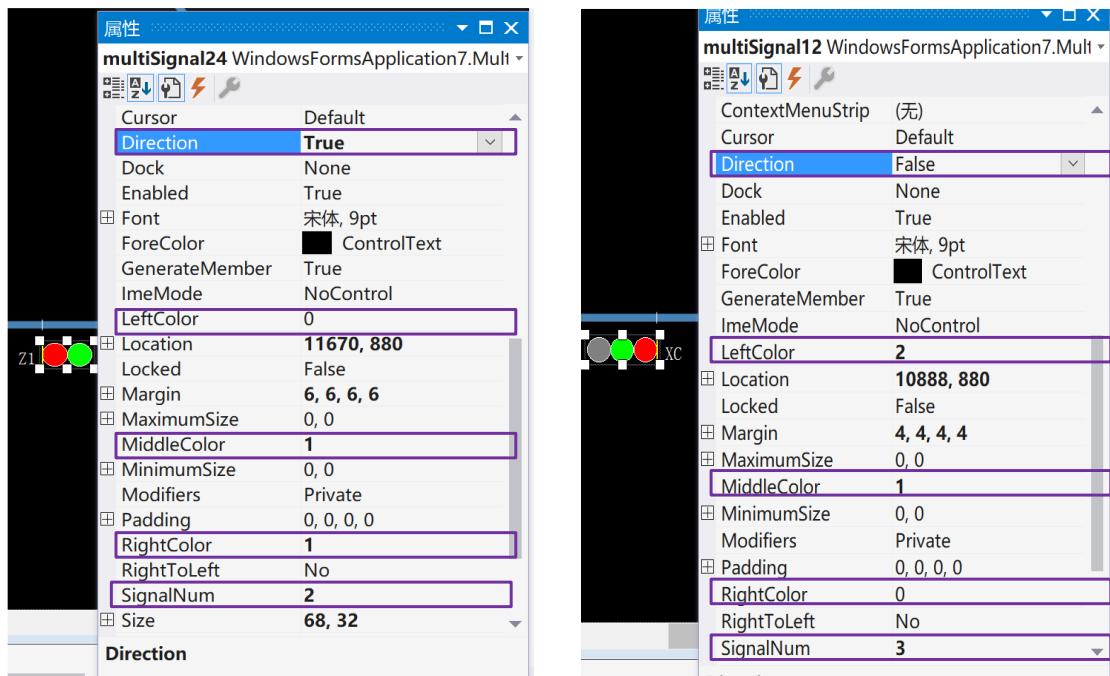


图 2-19 信号灯控件示意图

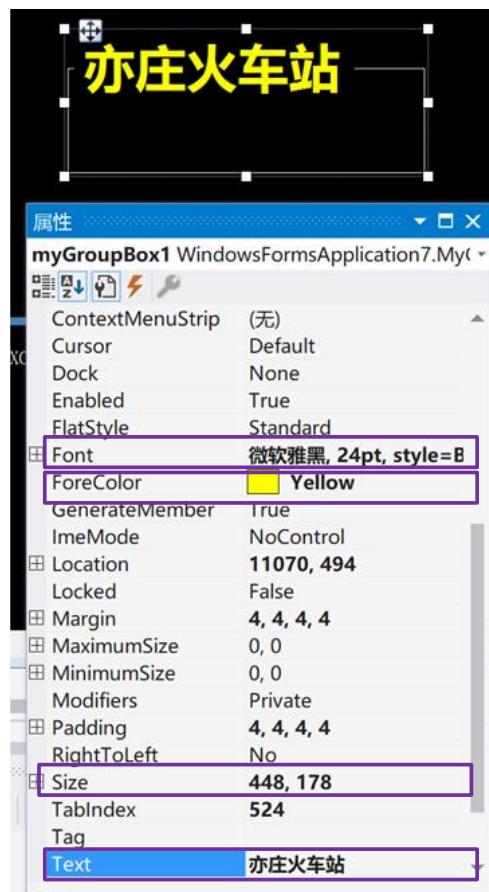


图 2-20 站台控件示意图

仿真开始后，该模块可以实时显示列车运行过程（图 2-21）

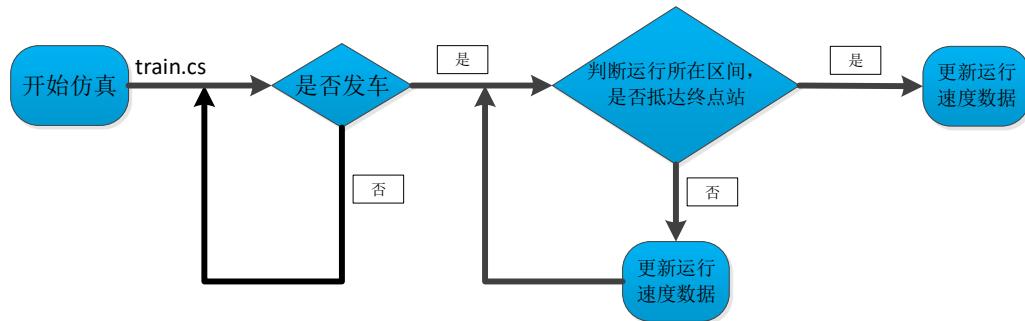


图 2-21 列车运行仿真流程图

基础数据包括静态数据和动态数据，其中，静态数据包括线路数据（线路数据包括线路长度，各个车站名称，各站停车点位置，车站长度）、车辆数据及计划运行图数据（计划运行图数据包括车次号、每个车次的计划到/离站时间）等固定参数数据，是列车运行仿真所必需的输入数据。本软件实现了对静态数据的查看，添加，删除，修改功能，可对任意线路的列车运行情况进行仿真，只要将其数据库添加到该模块即可。如果某线路的数据库已过时，也可将其删

除。另外本模块具有人性化的数据修改选项，可对一些必要参数进行设置。

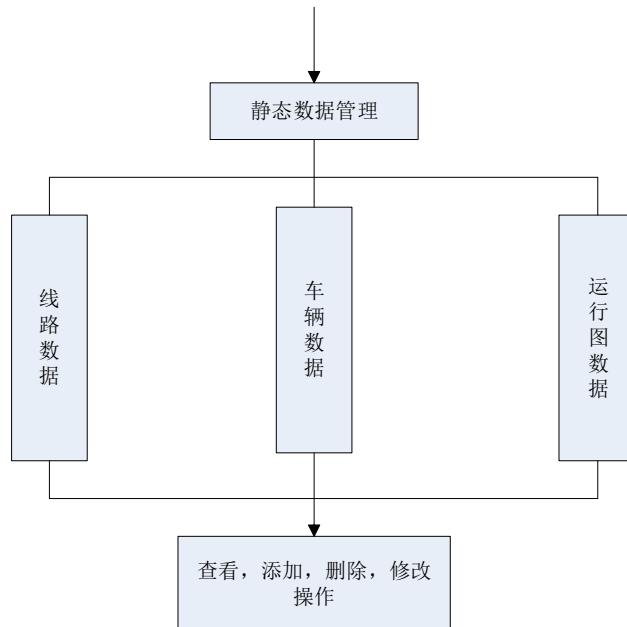


图 2-22 静态数据管理功能框图

动态数据是列车运行仿真过程中随列车运行动态变化的参数，包括客流数据、列车速度位置信息以及实际运行图数据等随时间或实际情况变化的数据。

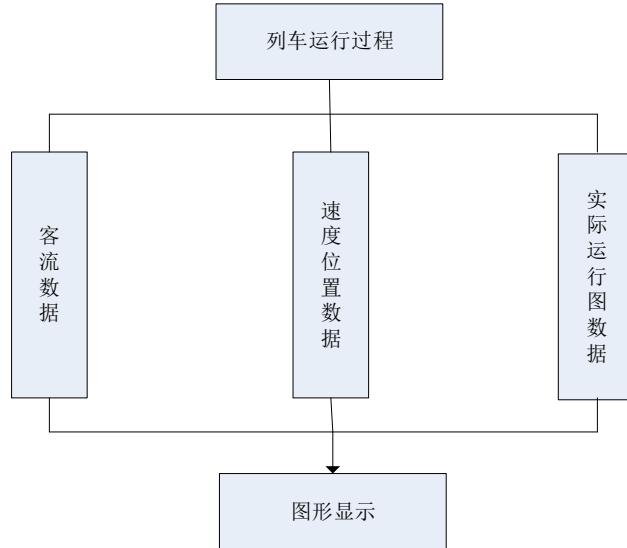


图 2-23 动态数据管理功能框图

动态数据是系统仿真列车运行过程中产生的数据，可以更好了解列车运行状态(行车时间，速度，位置等)等。客流数据包括各个车站实际上下车乘客量； 列车运行数据包括每一列车的计划速度时间、速度距离曲线，实际速度时

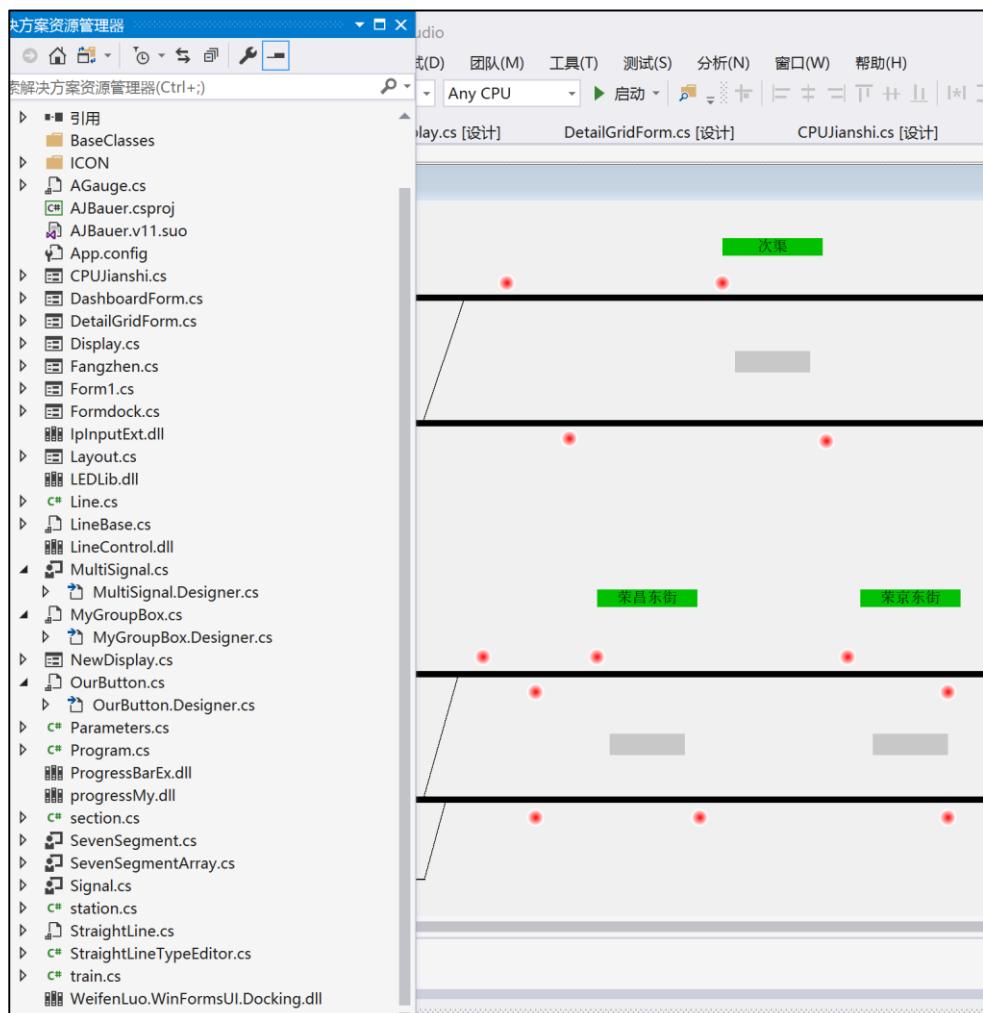
间、速度距离曲线等；实际运行图数据包括实际到/离站时间（或站间运行时间和停站时间）。本软件提供良好的人机接口界面，可以按照用户的需要，以图形显示详细的列车状态信息。

表 2-1 数据汇总表

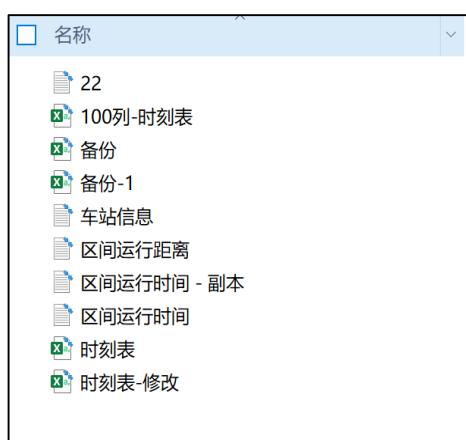
序号	主要输入数据			主要输出数据	
	静态数据		动态数据		
1	线路数据	车站名称 <i>String</i> Station Name Yizhuang	客流数据 Class RecordPassVolume; Int flow Int time{}	各个车站上下车乘客 数量 RecordPassVolume{ Int flow Int time{}}	
		各区间长度 Int RubLen			
		区间运行时间 Int RubTime			
		线路长度 Int Length			
2	车辆数据	车辆数量 Class train	列车速度位置 train {velocity, position ...{}}	列车实际速度、位置 信息；CPU 使用率； 仿真时间	
3	计划运行图数据	车次号 ServiceNo	实际运行图数据		
		每个车次的计划到/离站时 Arrive/Depart			
		起始时间、运营总时间、当前时间 Int StartTime, TimeSec, CurrentTime			

三、软件应用实例

软件运行前，需将各模块的文件(.cs)和存有待仿真的线路信息的 EXCEL 文件(格式见图)放在文件夹下（如图 3-1 所示）。



(1)



(2)

图 3-1 程序开发文件夹

图 3-1 表示的是文件夹内运行程序所需要的文件，主要包括以下几个文件：
 1) Form1.cs：城市轨道交通列车运行调整界面文件；2) Fangzhen.cs：运行控制
 仿真界面文件；3) NewDisplay.cs：线路基础数据文件；4) CPUjianshi.cs：CPU 监
 视；5) DashboardForm.cs：速度曲线文件；6) Display.cs：线路拓扑图文件；7)
 LEDLib.dll、MultiSignal.cs：信号灯控件；8) StraightLine.cs：轨道控件 9)
 SevenSegment.cs：站台控件。

步骤 1：输入运行图：点击“开始执行”，启动软件，可以通过点击“文件”
 -“打开”选择本次仿真所用列车运行图；也可以在界面空白处点击鼠标右键，
 点击“输入运行图”。如果希望灵活调整运行线位置或增删运行线个数，则点击“运
 行线设置”，如图 3-2。本次仿真实例输入结果如图 3-3，点击第 2 行标题栏中“是
 否显示车次号”，可以隐藏车次号。

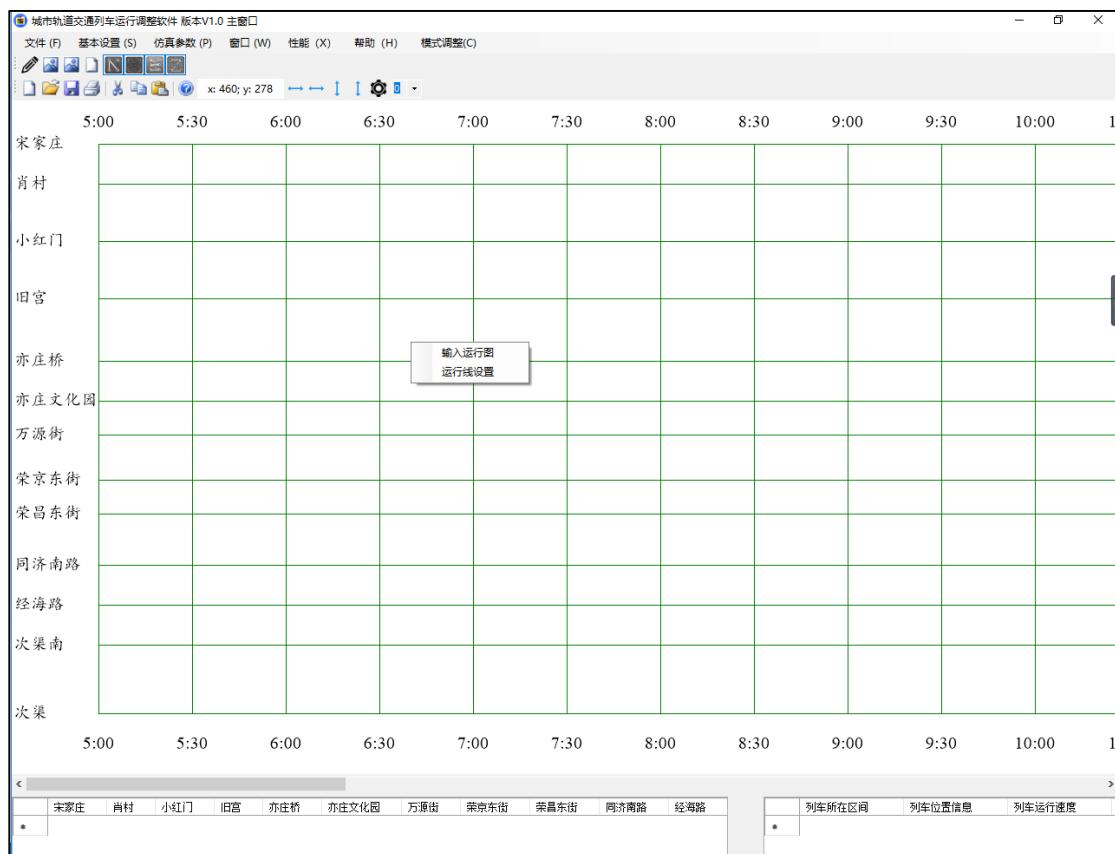


图 3-2 输入运行图界面

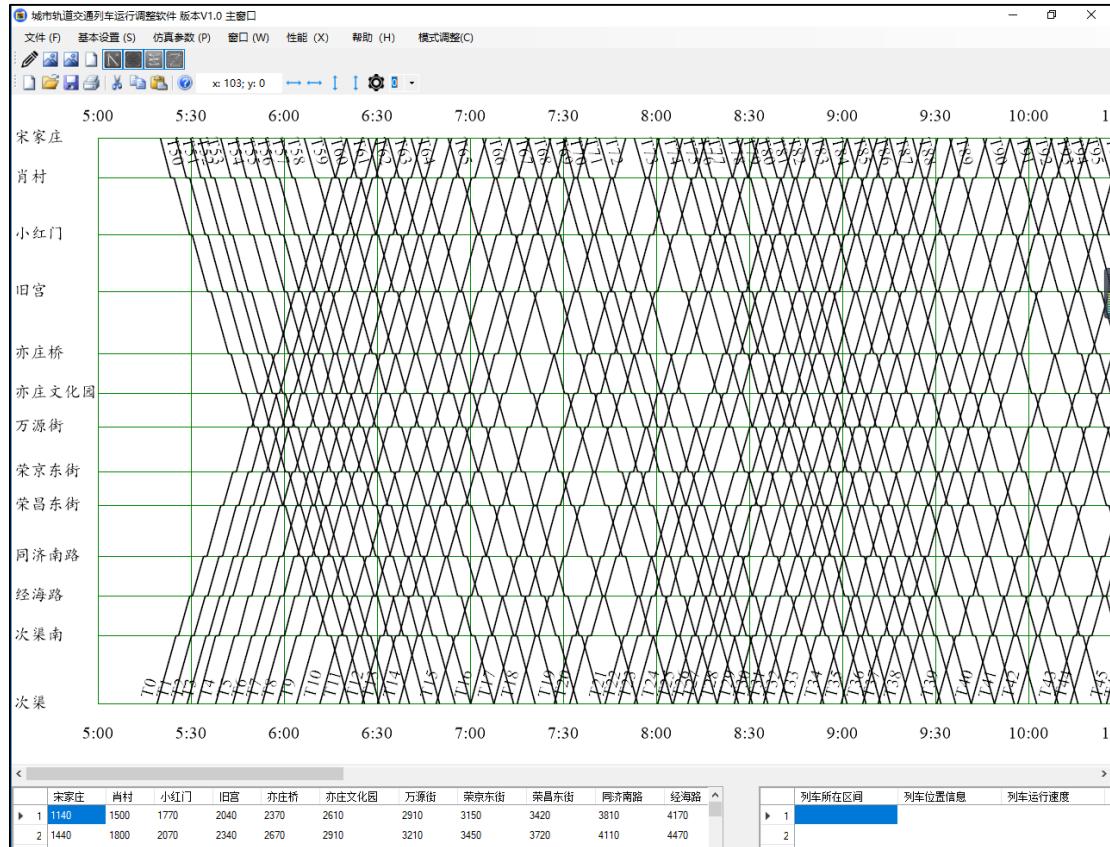


图 3-3 运行图输入结果

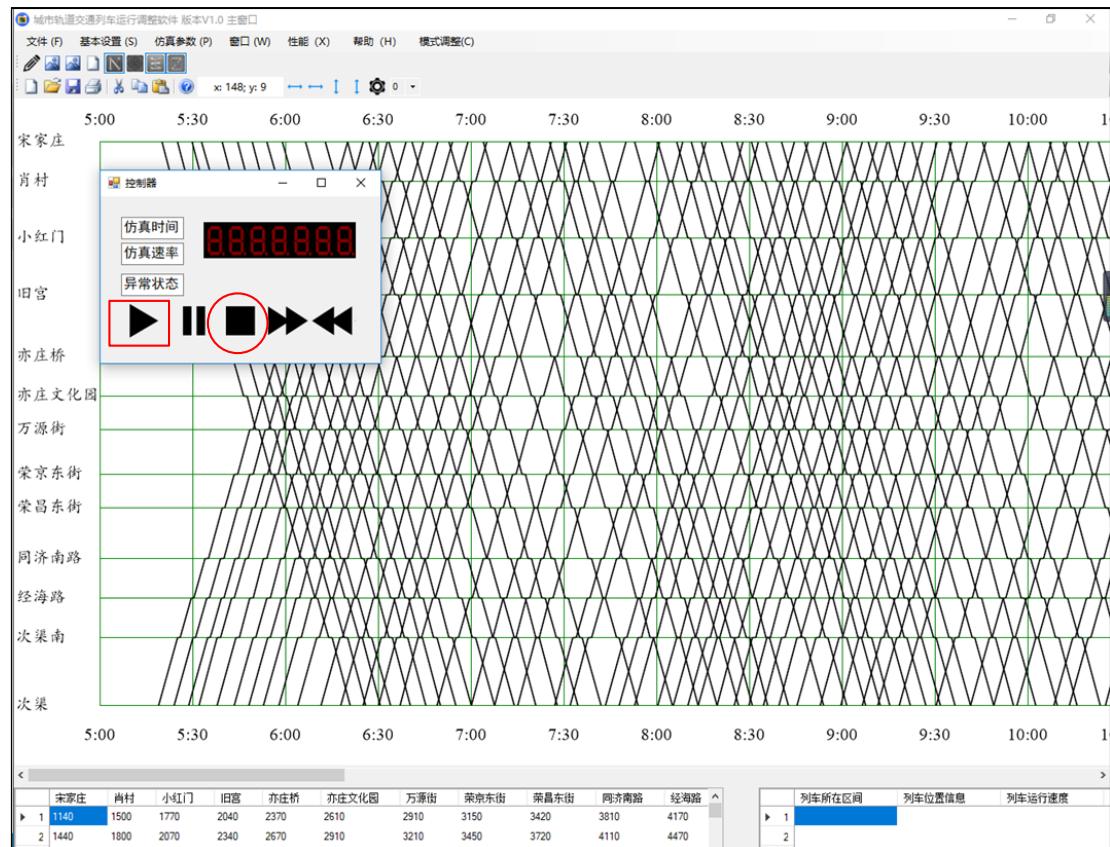


图 3-4 仿真参数设置

步骤 2：设置仿真参数：设置优仿真参数，包括仿真时间、仿真速率和异常状态。点击第一行标题栏中的“仿真参数”，调用“列车运行仿真控制模块”，即仿真控制器，仿真控制器可以在界面上灵活拖动。点击红色方框中三角形按钮即可开始仿真，显示界面会自动显示仿真时间；点击红色圆框中正方形按钮可对仿真时间进行清零处理；其右侧两个按钮分别对仿真时间、速率进行减加：若点击“仿真时间-右侧倒数第二个按钮”，则仿真计时会减小；若点击“仿真时间-最右侧按钮”，则仿真计时会增加；同理可对仿真速率进行控制。

步骤 3：开始仿真：点击仿真控制器中三角形按钮，开始仿真，线路基础数据模块同时开始运行。在列车运行图中，已通过的列车会由黑线变为红线，数据显示界面不仅可以显示各站位置信息，还可以实时显示列车位置、速度信息，如图 3-5。

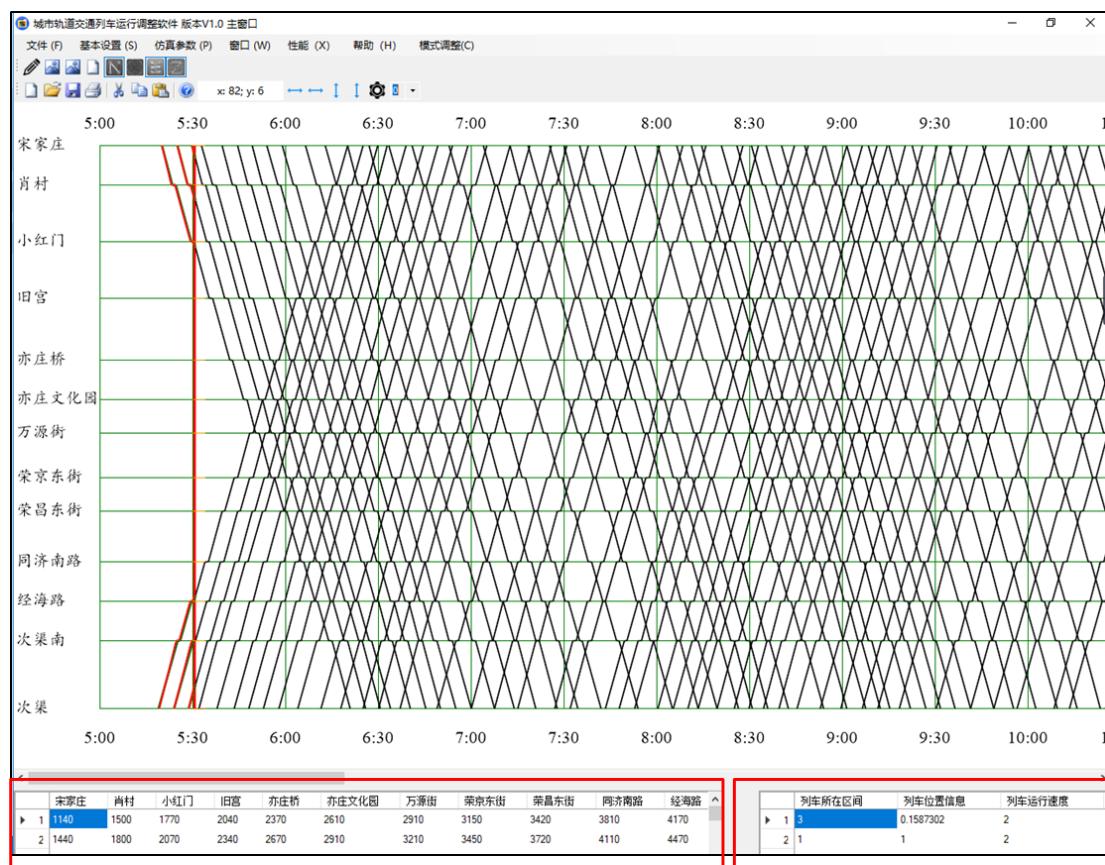


图 3-5 仿真过程中列车运行图界面

在仿真过程中，线路基础数据模块会实时显示列车运行位置，当列车运行到某一区段，该区段的地铁轨道会标红，如图 3-6 所示。

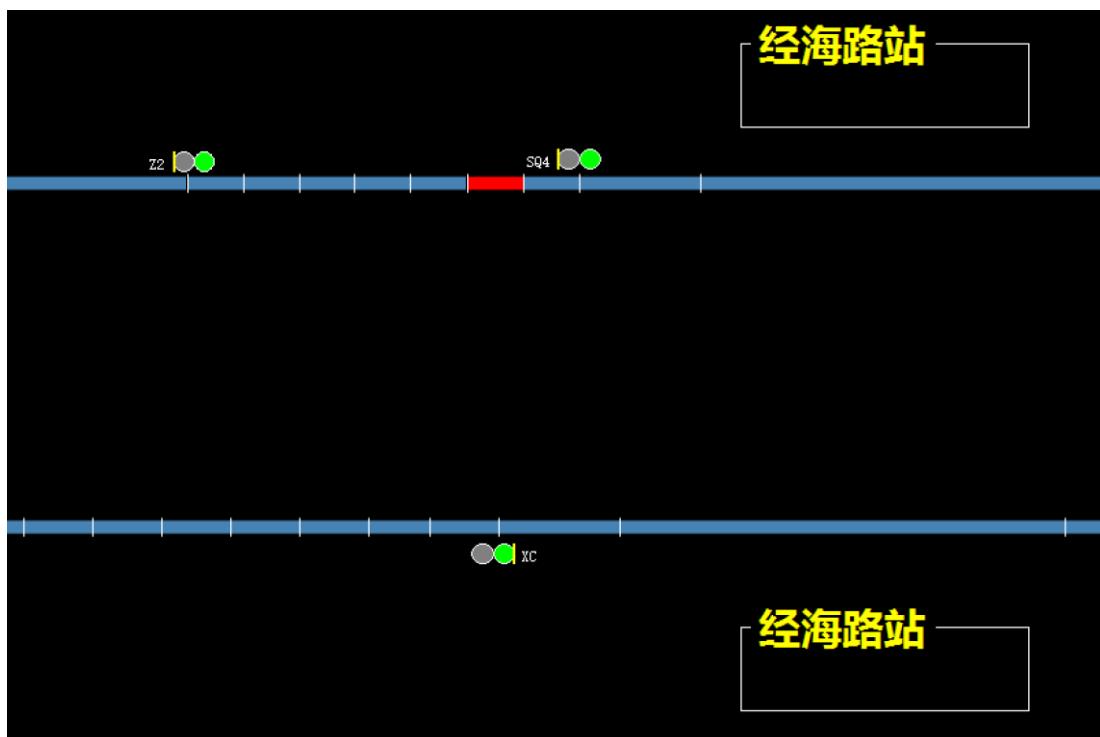


图 3-6 仿真过程中线路基础数据模块界面

此外，主界面可以实时显示列车已经过的各站客流情况，将其中一处放大，如图 3-7 所示。

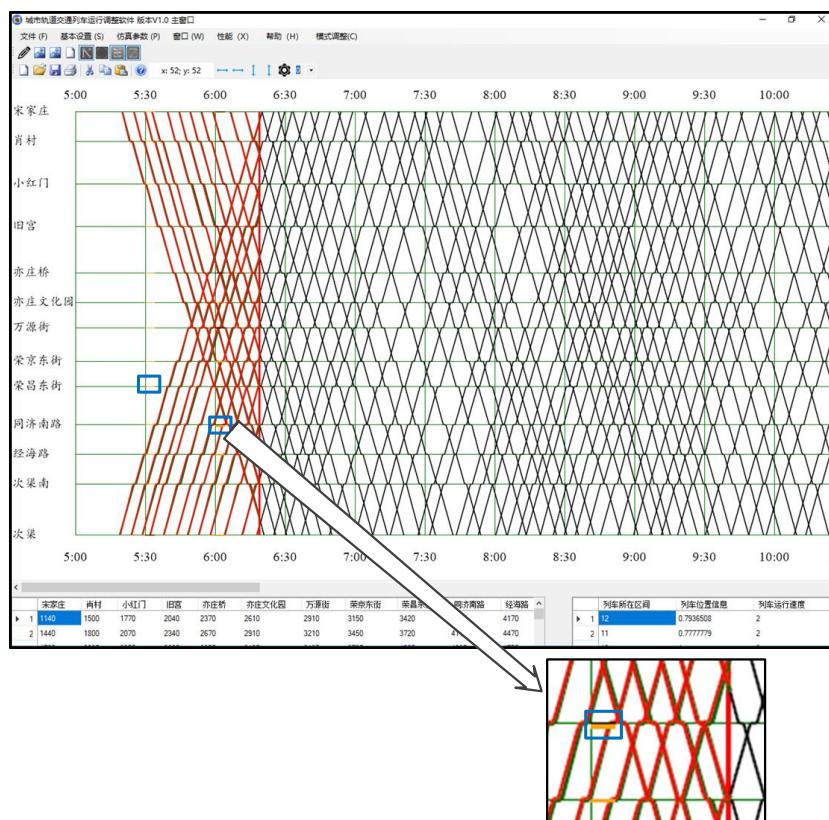


图 3-7 实时客流情况

在仿真过程中，点击“窗口-调度监视”，可以在线路拓扑图中实时显示列车的运行位置情况，其中红色矩形代表各列列车，红色圆圈代表信号灯，如图 3-8 所示。

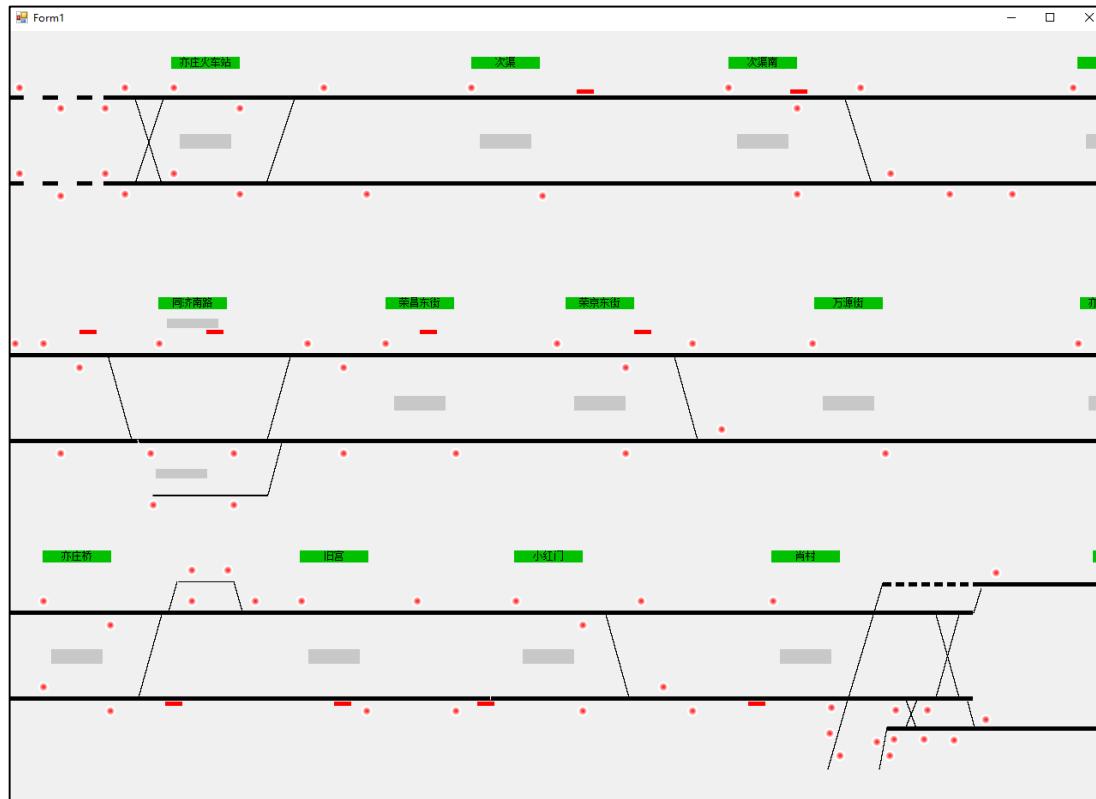


图 3-8 仿真过程中调度监视界面

在仿真过程中，点击“窗口-速度曲线”，可以实时显示列车运行速度曲线，如图 3-9。

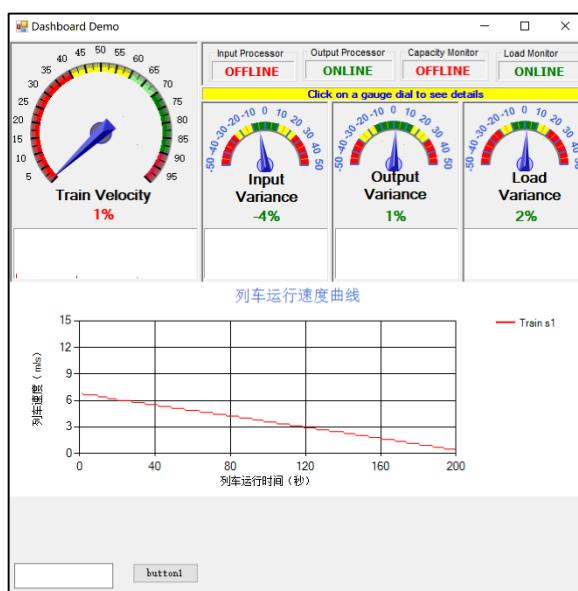


图 3-9 仿真过程中速度曲线界面

上述作为实例演示，由于篇幅有限，软件其他功能不一一展示。