

# 交互式高铁运行与调度仿真平台研究

杨鹏鑫<sup>1</sup>, 崔东亮<sup>1</sup>, 代学武<sup>1</sup>, 王星皓<sup>1</sup>, 李宝旭<sup>2</sup>

(1. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 中国铁路沈阳局集团有限公司调度所, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 为满足新兴的基于机器学习的智能调度算法等所必须的对象环境和调度方案的性能评估, 需要一种具有交互能力的, 能较为真实、快速的进行仿真的高铁运行于调度模拟平台。本文针对难以用精确模型进行求解的调度优化问题, 为满足强化学习等机器学习算法与目标对象进行实时交互的需求, 提出一种基于 TCP/IP 协议的交互式高铁运行与调度仿真平台, 所提出的体系架构支持各种运行场景配置 (如晚点, 限速, 封锁等), 可以与机器学习智能调度系统进行实时“机-机”交互, 接收调度算法自动生成的列车运行阶段调整计划, 执行该计划, 并向调度算法实时动态更新列车运行状态。为进一步提高仿真的真实度, 集成了数据驱动的列车运行时分仿真计算模型, 能够根据列车时刻表 (即站间运行时分) 生成列车运行曲线并仿真, 还可以根据动态设置的运行环境 (如临时限速等), 实时调整列车运行速度, 实现了在复杂动态场景下准确仿真列车运行时分的目的通过仿真实验, 构造多种临时限速等运行场景, 验证了本文提出的仿真系统的实时交互、真实运行时分等仿真功能, 为高铁智能调度算法提供了目标环境, 为开展强化学习等智能调度算法提供了基础平台。

**关键词:** 智能调度; 仿真平台; 交互式仿真; 列车运行控制;

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

## Research on Interactive Simulation Platform of Intelligent Train Dispatching and Operation

YANG Peng-xin<sup>1</sup>, CUI Dong-liang<sup>1</sup>, DAI Xue-wu<sup>1</sup>, WANG Xing-hao<sup>1</sup>, LI Bao-xu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China, Cui Dongliang, cuidongliang@mail.neu.edu.cn)

(2. China Railway Shenyang Group Co., Ltd, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** In order to meet the performance evaluation of the new intelligent scheduling algorithm based on machine learning and other necessary object environment and scheduling scheme, a kind of high-speed railway with interactive ability, which can simulate real and fast, is needed to run in the scheduling simulation platform. This paper is aiming at the optimization problem which is difficult to be solved by precise model, in order to meet the requirements of real-time interaction with the target object for machine learning algorithm such as reinforcement learning, an interactive high-speed railway operation and scheduling simulation platform based on TCP/IP protocol is proposed. The proposed architecture supports various operation scenario configurations (such as delay, speed limit, blocking, etc.). It can realize real-time "machine to machine" interaction with machine learning intelligent scheduling system, and receives the train operation stage adjustment plan automatically generated by the scheduling algorithm, executes the plan, and dynamically updates the train operation status in real time. In order to further improve the authenticity of the simulation, a data-driven train operation calculation model is integrated, which can generate and simulate the train operation curve according to the train schedule (station operation time), and adjust the train operation speed in real time according to the dynamic setting operation environment (such as temporary speed limit), so as to realize the accurate simulation of train operation

**基金项目:** 国家自然科学基金(6179574, U1834211)

**作者简介:** 杨鹏鑫 (1997-), 男, 河北人, 硕士研究生, 从事铁路调度优化与仿真研究;  
崔东亮 (1976-), 男, 河南人, 博士, 讲师, 主要研究多目标优化与仿真等;  
代学武 (1976-), 男, 四川人, 教授, 博士生导师, 从事网络化感知与控制优化研究;  
王星皓 (1998-), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 从事铁路调度优化算法的研究;  
李宝旭 (1972-), 男, 辽宁人, 高级工程师, 调度所主任, 从事铁路运输调度与管理;

in complex dynamic scenes. By constructing a variety of operation scenarios, such as setting temporary speed limit, through simulation experiments, to verify the real-time interaction and on time simulation of the system. The system can provide a target environment for the intelligent scheduling algorithm of high-speed railway, and to provide a basic platform for the intelligent scheduling algorithm such as reinforcement learning.

**Key words:** intelligent dispatch; simulation platform; interactive simulation; train operation;

## 1 引言

随着中国高速铁路建设的迅速发展，里程不断增长，车次数量逐渐增多，对铁路运输能力提出了更大的考验，通过智能调度算法进行列车调度成为重要的研究课题。铁路行车调度是一个列控、连锁、调度等多子系统耦合在一起多重联动的复杂系统，尤其是随着高速铁路建设成网，难以建立准确模型来描述复杂路网下的高铁列车智能调度，因此基于仿真平台的调度优化是解决复杂路网下高铁调度的有效手段。

伴随计算机模拟技术的发展，铁路仿真平台在调度分析、风险评估、业务培训等领域具有广泛的应用。针对不同层次的问题，铁路仿真模型按规模可分为三类：微观仿真平台、中观仿真平台、宏观仿真平台<sup>[1]</sup>。文献[2]提出的微观平台较为详细地描绘了线路元素，考虑了轨道的相关信息、不同车辆特性、信号系统以及限速条件等。这种对基础信息进行详建模的方法，常用于计算行驶时间、制定时刻表、检测列车冲突等。宏观仿真通常对线路模拟进行抽象化，对线路细节进行忽略，文献[3]提出的 Simone 仿真环境能够对大规模的复杂网络进行分析，评估网络稳定性；中观平台介于微观与宏观之间，在保留了相关的微观信息同时满足一定规模的仿真，文献[4]提出了一种宏观-微观混合模型，可以模拟大型区域网络，同时可以非常详细地捕获网络特定部分的信息。

由于铁路仿真平台能够更好地反应线路真实信息，越来越多的科研工作人员将铁路仿真技术应用在调度算法验证中。在目前的铁路调度仿真平台的研究中，大多数侧重调度集中一体化平台的研究<sup>[5-7]</sup>，其中周妍等人提出的高速铁路行车调度指挥一体化仿真实验平台<sup>[7]</sup>，依据管控一体化的思想，能够实现列车实时运行的全过程半实物仿真。但由于对真实铁路的还原度很高，数据量和计算量都非常大，同时仿真时间与真实时间同步，仿真速度很慢，难以对调度策略进行快速验证。文献[8]通过仿真工具 RTC 和 RailSys 混合仿真的方法，利用时刻表管理的特性分析运输的服务水平。文献[9]介绍了基于

列车、基础设施和时刻表开发的仿真软件 OpenTrack，可以较好的进行列车运行仿真和数据生成，可用于对线路运输能力的分析<sup>[10]</sup>。以上仿真软件在仿真中能够较好的反应线路的运行信息，但与其他系统的实时交互能力不足，不能适应调度算法与仿真器的多次数据交换。

综上所述，针对仿真速度慢、交互能力差等缺点，本文首先在 Train Director 的基础上，基于 TCP/IP 协议，利用 socket 实现了对仿真器在同一局域网下的远距离操控和实时信息交互。同时，通过数据驱动的方式，对列车运行原有的简单逻辑进行改进，建立了更能真实反映列车运行状态的模型。最终得到了一种列车智能调度运行交互式中观仿真平台。

## 2 交互式高铁运行调度仿真平台架构

### 2.1 智能调度与仿真平台的交互式体系架构

列车智能调度运行交互式仿真平台包括列车智能调度算法子系统和运行仿真子系统，智能调度算法部分包括参数配置模块、智能调度策略生成模块和通讯模块；运行仿真部分包括列车运行、仿真内核、通讯模块、UI 显示部分等。

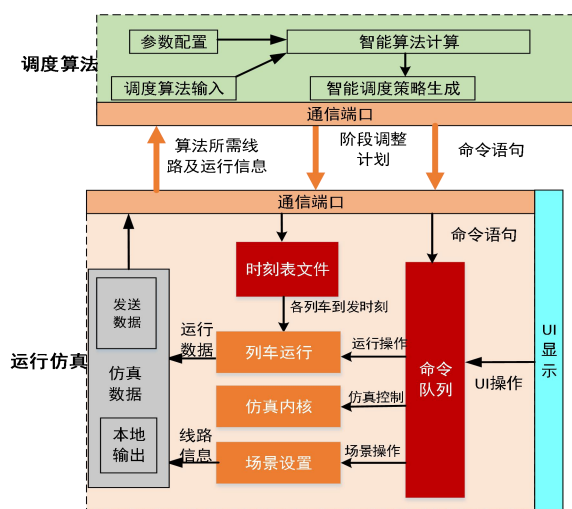


图 1 仿真平台框架结构

智能调度算法子系统主要通过接收当前仿真状态信息（如晚点信息、车辆位置、区间占用情况

等），根据参数设置，经过算法计算得到智能调度策略，并生成阶段调整计划。由于调度算法子系统与运行仿真子系统具有相对独立性，因此可根据不同的调度算法进行设计，包括机器学习、深度学习、启发式算法等。

运行仿真子系统可以进行布局图的绘制、运行状态显示、时刻表导入、运行仿真、仿真数据输出等功能，仿真功能均基于命令操作实现。首先通过UI界面进行布局图设计、轨道限速、时刻表导入等。当产生晚点后，将晚点信息传输给算法系统，通过接收算法生成的阶段调整计划，得到列车的时刻表文件，根据在各站的到发时刻计算列车运行的速度位置曲线，运行仿真部分根据曲线与实际线路状态（区间占用、轨道限速等）进行仿真。同时可以调节仿真速率，利用系统内部模拟时钟进行模拟计算，通过设置加速倍数，对模拟时间进行加倍，达到快速仿真的目的。仿真数据以链表形式存储，可以保存至本地，同时算法可以根据需求查询特定列车的信息。

## 2.2 交互式仿真设计

在实际运行中，由于天气因素（大风限速）、异物侵线（如接触网异物）等，会引起线路临时限速。造成列车区间运行时间增加，不能按照原行车计划到站，出现晚点。为此需要将晚点信息传输给智能调度算法，进行列车运行计划的重新计算调整，将得到的时刻表文件传回仿真系统。同时，为保证对机器学习算法进行验证，也便于对算法进行开发，将调度算法独立为子系统具有更好的效果。因此，需要对仿真平台进行交互式设计。另一方面，由于许多算法如强化学习算法是一个 Agent 和环境不断交互和试错的过程<sup>[1]</sup>，其目的是得到最大化回报值。环境能够在交互中不断地改善行为，从而产生更好的行为，得到更好的策略，如图 2 所示：

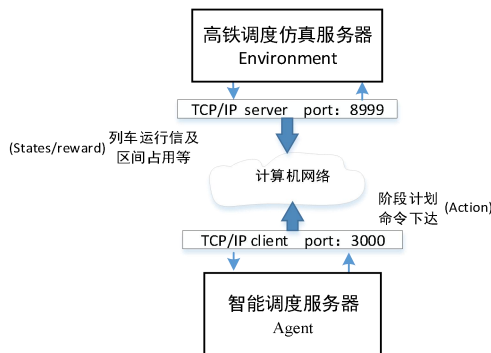


图 2 算法与仿真交互过程

为及时的接收调度系统的指令及阶段调整计划，同时将列车、线路运行信息等调度系统所需数据反馈回给调度系统，使得仿真平台具有良好的

“机-机”交互能力，基于 TCP/IP 协议对仿真系统通讯接口进行设计。

TCP/IP 协议体系是目前最为通用的网络传输协议，TCP/IP 技术有着良好的使用实用性和开放性，它拥有两个具有代表性的传输层协议，即面向连接的 TCP 协议和无连接的 UDP 协议。由于 UDP 不建立连接，不关心对方是否正确接收数据，且没有拥塞控制，可靠性不高，而 TCP 协议会建立可靠的连接，适用于对传输数据有较高可靠性要求的系统设计，因此选择 TCP 协议进行传输。

在智能调度服务器与仿真系统服务器设置 TCP/IP 通信端口，仿真系统服务器是 TCP/IP 服务器端，仿真开始时即开启 server 线程监听 8999 端口状态，调度服务器是 TCP/IP 客户端，当调度服务器工作时，客户端通过端口 3000 向服务端发送连接请求，服务端收到请求后建立连接。此时，双方可以进行数据交互。

### (A) 数据格式

在智能调度算法服务器与仿真服务器之间的数据交互是双向的，分别是智能调度算法服务器到仿真服务器；从仿真服务器到智能调度服务器，所采用的数据格式不一样，分别设计如下：

●**智能调度算法服务器到仿真服务器数据交换格式：**主要用于将智能调度算法生成的列车运行阶段调整计划下发给仿真服务器。阶段调整计划就是机器学习生成的动作（action），仿真服务器接收到阶段调整计划后，开始按照新的运行计划进行仿真，实现列车运行的动态调整。通过 TCP/IP 传输的阶段调整计划数据格式定义如图 3 所示：



图 3 阶段调整计划数据传输格式

●**仿真服务器到智能调度算法服务器数据交换格式：**主要是将仿真服务器产生的列车运行数据线路信息发送给算法服务器，用于提供调度算法所需输入，即环境的状态信息（state）。算法服务器根据反馈的状态及回报进行不断调整，得到更好的调度策略。仿真运行数据的传输格式定义如图 4 所示：

...	end	仿真数据	TCP头部
↓			
25200	G381	1	0 0
25211	G381	1	1 0.2778
25212	G381	1	2 0.8333
...			
仿真时间 车次号 速度 加速度 行驶距离			

图 4 列车运行数据传输格式

(B) 仿真系统接口函数及命令

仿真系统是基于命令进行操作的，通过 TCP/IP 远程发送命令语句，执行相应的接口函数可以对仿真系统进行操作。仿真系统的接口函数主要包括三类：一类是场景控制，例如限速和道岔控制等；一类是列车控制，例如加减速和启动/停止等；一类是仿真软件控制，例如加减速仿真、退出仿真、更新时刻表等。主要接口函数及命令如表 1 所示：

表 1 主要接口函数及命令

接口函数类别	命令语句	接口函数	主要功能
场景控制	script	script_edit()	为 track 添加脚本，列车行驶至此 track 触发相应动作
	switch	switch_change()	改变道岔状态
列车控制	accelerate	accelerate_train()	运行加速
	reverse	Reverse_train()	列车反向运行
仿真系统控制	newsch	update_sch()	将接收到的新时刻表更新至链表
	check	check_train()	查询特定车辆的运行信息

当列车产生晚点后，算法根据得到的晚点信息经过计算将阶段调整计划返回。仿真系统接收到数据后，首先对命令语句进行判断。若为时刻表更新命令，则将 end 之前的时刻表信息读取并更新。数据传输过程如图 5 所示：

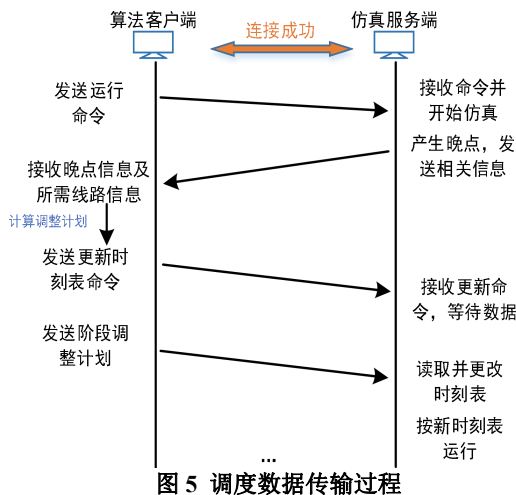


图 5 调度数据传输过程

两系统通信接口程序采用 Socket 套接字编程规范，Socket 为 TCP/IP 通信协议提供了独立于协议的网络编程接口，通过 Socket 提供的网络编程接口，应用层就可以通过 Socket 接口来读取来自网络 IP 通信报文，从而获取数据信息。

### 3 列车运行时分仿真

#### 3.1 牵引/制动模型建立

为了使仿真平台更加真实的反映实际列车运行规律，引入列车/牵引制动工况下的运行模型，并根据实际数据对模型进行参数化，将最终结果与仿真器结合，使得列车运行仿真更具真实性。

列车的运行曲线可以分为牵引加速、匀速巡航、制动减速三个阶段，运行曲线如图 7 所示。

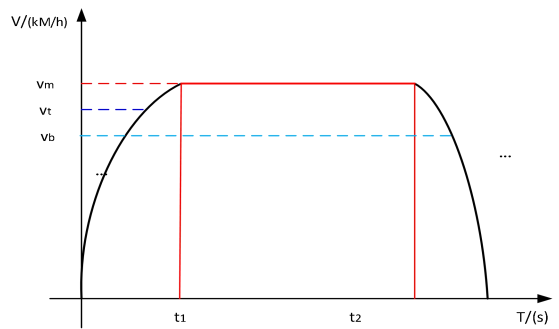


图 6 列车运行曲线

图中  $v_t, v_b$  分别为列车牵引过程切换速度和制动过程转换速度。 $v_m$  为匀速巡航速度。 $t_1, t_2$  分别为列车切换运行阶段的时间。

列车运行可以看做一维空间中的单质点运动模型<sup>[13]</sup>，在牵引加速、匀速巡航和制动减速这三个阶段分别建模如下：

(1) 牵引模型用于描述列车在牵引力作用下加速运行过程，牵引特性曲线可分为两段：恒转矩区和恒功率区。牵引力  $F(v)$  的大小可用式(1)分段函数描述：

$$F(v) = \begin{cases} k_{t,0} + k_{t,1}v & v \leq v_t \\ k'_{t,0} + k'_{t,1}v + k'_{t,2}v^2 & v > v_t \end{cases} \quad (1)$$

式中  $k$  为常数，由列车设计给出， $v_t$  为恒转矩区和恒功率区之间的切换速度。

(2) 制动模型用于描述列车减速运行过程，列车制动情况较为复杂，制动段列车制动力  $B(v)$  的大小可由式(2)分段函数描述<sup>[12]</sup>：

$$B(v) = \begin{cases} k_{b,0} + k_{b,1}v & v \leq v_b \\ k'_{b,0} + k'_{b,1}v + k'_{b,2}v^2 & v > v_b \end{cases} \quad (2)$$

式中  $k$  为常数， $v_b$  为两模型间切换速度。

(3) 列车在运行时的单位运行阻力  $W$  主要受线路情况影响，在高铁线路设计和建设中已将影响因素纳入考虑，列车运行阻力通常用式(3)来描述：

$$W = k_{c,0} + k_{c,1}v + k_{c,2}v^2 \quad (3)$$

式中,  $k$  为常数。因此可以得到列车运行过程所受单位合力的数学表达式为:

$$\begin{aligned} c &= f - w - b \\ &= a_0 + a_1v + a_2v^2 \end{aligned} \quad (4)$$

根据以上牵引制动模型, 列车的运行模型可以用式(5)来表达:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \alpha_0 + \alpha_1v + \alpha_2v^2 \\ \frac{ds}{dv} = \frac{vdt}{dv} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  为常数。采用我们前期工作提出的算法, 利用 CRH380 列车参数及某铁路局日常运行数据<sup>[14]</sup>, 完成对列车运行模型各个参数的辨识, 根据列车运行速度  $v$  与牵引/制动工况切换速度之间的关系得到列车牵引和制动运行加速度公式为式(6):

$$\begin{aligned} a &= \begin{cases} a_0 + a_1v + a_2v^2 & v \leq v_t \\ a'_0 + a'_1v + a'_2v^2 & v > v_t \end{cases}, \\ b &= \begin{cases} b_0 + b_1v + b_2v^2 & v \leq v_b \\ b'_0 + b'_1v + b'_2v^2 & v > v_b \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

对应的牵引加速度拟合值为:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.503005489128561 \\ a_1 &= -0.005211658702312 \\ a_2 &= 3.296544635650221 \times 10^{-5} \\ a'_0 &= 0.836854002358601 \\ a'_1 &= -0.048332516546312 \\ a'_2 &= 0.000635896635384 \end{aligned}$$

对应的制动工况下列车加速度参数拟合值为:

$$\begin{aligned} b_0 &= -1.23552179465812 \\ b_1 &= -0.00196236559175239 \\ b_2 &= 0.000634753648211531 \\ b'_0 &= -1.22300215846246 \\ b'_1 &= 0.0118537502543254 \\ b'_2 &= 0.000170915389765821 \end{aligned}$$

### 3.2 列车运行算法实现

根据列车加速度的参数值即可对仿真平台的列车运行仿真进行改进, 从而得到更为真实的运行情况。列车运行控制部分可以分为两部分, 一是根据给定的列车速度位置运行曲线进行仿真; 二是完成列车根据准确按照时刻表运行时分进行仿真, 使列车按时到站。

(A) 列车按给定曲线运行

通过设置最大运行速度, 据上述运行模型计算得到速度位置曲线, 将已知列车速度位置曲线导入仿真内核, 根据列车当前位置改变运行速度。程序实现伪代码如下:

列车按给定曲线仿真

```

1:      通过 TCP 端口读取给定曲线
2:      将曲线导入仿真内核
3:      If 列车准备或停站状态
4:          判断列车所在车站
5:          读取相关区间曲线
6:      end
7:      If 列车为运行状态
8:          判断列车当前位置
9:          根据曲线给出速度值
10:     end

```

(B) 列车准时完成区间运行

根据位移、时间计算公式(7), 由于已知运行时间、距离, 首先计算匀速段速度  $v_{max}$ , 根据  $v_{max}$  可以得到加速、减速段路程, 生成速度位置曲线。

$$\begin{cases} s = s_t + s_c + s_b \\ = s_t(v_0, v_{max}) + s_c + s_b(v_{max}, v_1) \\ t = t_t + t_c + t_b \\ = t_t(v_0, v_{max}) + (s - s_t - s_b) / v_{max} + t_b(v_{max}, v_1) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $s_t, s_c, s_b$  表示加速、匀速、减速段位移,  $t_t, t_c, t_b$  表示加速、匀速、减速段运行时间。

算法程序实现伪代码如下:

列车准时完成仿真

```

1:      读取区间运行时间 t 和距离 s
2:      If 列车为准备或停站状态
3:          If 区间有限速点
4:              根据限速点位置、时间 t、距离 s,
                计算分段匀速运行速度
5:          end
6:      Else 根据运行时间、距离计算匀速
                段速度  $v_{max}$ , 匀速段始末时间  $t_t, t_c$ 
7:      根据牵引制动模型, 生成速度位置曲线
8:      end
9:      If 列车为运行状态
10:     判断列车当前位置

```

1.1: 根据曲线给出速度值  
1.2: end

列车初始状态为准备状态，在准备状态及每次停站时，可对即将运行的站间距离进行测量，同时根据时刻表得到站间运行时间。假定列车在区间运行中连续进行牵引加速、匀速、制动减速三种行为，通过时间、距离两个参量，可以对匀速段速度即最大运行速度进行计算，并确定匀速段始末位置，即可得到列车运行速度位置曲线。

#### 4 仿真验证

由于原 Train Director 仿真系统在列车仿真运行上逻辑简单，牵引制动过程加速度恒定且会出现提前到达情况。引入上述模型，首先对列车按时刻表时间准确运行进行验证，根据时刻表的列车到发时间计算列车运行速度位置曲线，并进行仿真。同时，为验证交互式仿真，将已知列车速度位置信息导入仿真系统，并按其进行仿真。

##### 4.1 列车按图定时间运行的仿真验证

利用仿真系统搭建秦沈线铁路（以秦皇岛至葫芦岛北站区间为例，区间线路布局图如图 8 所示）测试 G381 次列车在线路上的运行情况，G381 次列车时刻表见表 2：

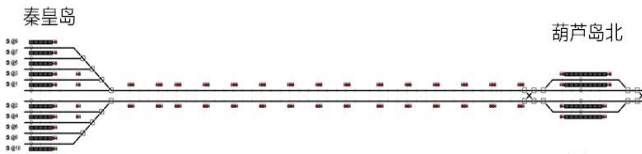


图 7 区间布局图

表 2 G381 次列车时刻表

车站	到站时刻	发车时刻
秦皇岛	09:53	09:55
葫芦岛北	10:48	10:49
锦州南	11:06	11:08
沈阳北	12:23	12:25

根据以上数据，将时刻表导入运行仿真平台，根据仿真系统根据距离、到发时刻进行计算，得到列车速度位置运行曲线，仿真系统根据曲线进行列车运行控制。将行进方向错误、列车晚点、闭塞区间阻塞等考虑为惩罚项，对列车运行结果进行计算，各项惩罚数值如表 3 所示：

表 3 仿真结果评价惩罚数值表

惩罚项	惩罚数值
行驶方向错误	Wrong destinations 100
停在错误站台	Wrong platforms 10
晚点列车数	Late trains 5

命令被拒绝	Command denied	1
打开道岔	Thrown switches	1
打开信号灯	Cleared signals	1

按上述规则得到对列车运行结果的评价,仿真结果如图 9 所示：

#### 仿真结果



图 8 仿真结果图

上图仿真结果描述了列车的运行结果，根据结果可以看到，G381 次列车按时到达，总晚点时间为 0，惩罚项均为 0。列车能够按照时刻表规定时间准确进行仿真。

G381 次列车葫芦岛北-锦州南区间运行曲线如图 10 所示，全程仿真运行曲线如图 11 所示。

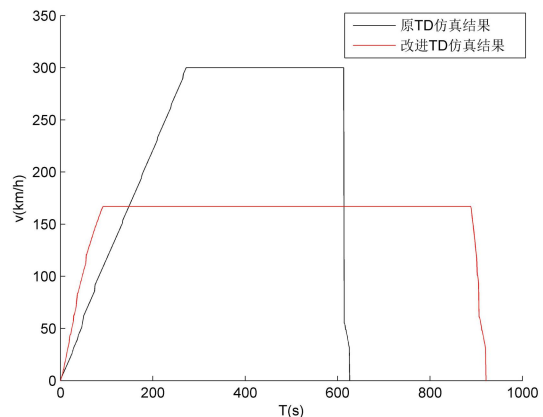


图 9 葫-锦段区间运行图

上图黑线为原 Train Director 仿真结果，红线为改进后的能够按时刻表时间完成运行的系统仿真结果。

对比可以看到：

(1) 原 Train Director 以区间最大限速行车，提前到站时间长，到站后一直等待发车，不符合实际且浪费股道资源。改进后的仿真系统能够根据时刻表时间对匀速巡航速度进行计算，使列车按照规定的运行时间运行完成到站。

(2) 原 Train Director 的运行逻辑简单，牵引段为加速度为 1 的匀加速运动，在即将进站时，速度骤减跳变，不符合实际列车运行规律。改进后的系统能够按照列车牵引制动模型进行仿真，更加真实的还原列车运行。

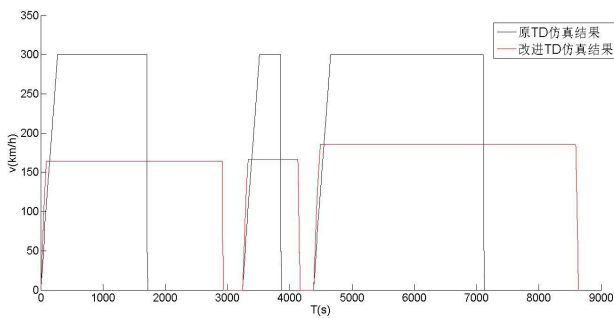


图 10 G381 次列车仿真运行图

#### 4.2 临时限速下按列车运行仿真

为了验证仿真平台的交互能力，且仿真平台提供接口供运行曲线导入，因此可用于对外部列车运行模型进行仿真。通过系统通讯接口将给定的运行模型曲线导入仿真内核，控制列车运行。以本文所提运行模型在外部进行计算，并可得到理论模型结果，再根据仿真系统进行列车控制，得到仿真运行结果。

运行结果如图 12 所示：

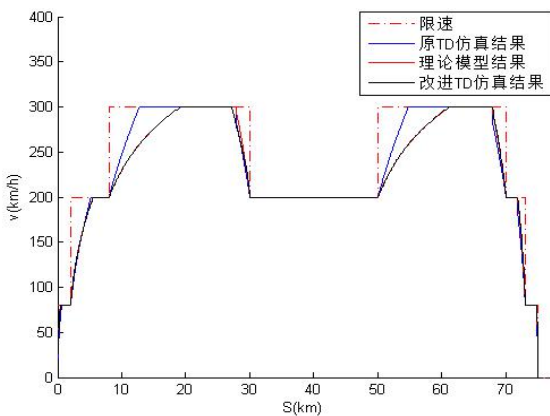


图 11 运行结果图

对以上运行结果进行分析：

(1) 根据本文所提运行模型计算，将理论模型的数值进行拟合，再将数据导入仿真系统，对运行后的数据拟合得到黑色曲线，对比可以看到，二者基本重合，说明仿真系统的运行仿真具有较高的准确性，能够对已知曲线进行模拟验证，同时验证了系统与外界的交互性。

(2) 由图中蓝色曲线与黑色曲线对比得到，原 Train Director 仿真软件在牵引工况下的运行与实际相差较大，改进后的模型更加真实的反映出列车运行规律。

### 5 结语

本文通过改进 Train Director 仿真软件，并结合智能调度算法系统，提出一种具有交互式的仿真运行平台，通过开发通信端口，完成调度子系统与仿真运行子系统的实时数据交流，对算法产生的阶段调整计划进行仿真验证，得到更好的调度策略。同时，为了能够使仿真运行更加接近实际运行情况，

引入高速列车牵引制动模型，并根据实际运行数据进行参数辨识，将得到的模型与仿真系统结合，得到较为真实的运行。由于铁路路网复杂，列车数量大，本文作为初步工作，仅对路网简单且车辆有限情况进行验证。在下一步工作中，将会对具有限速和临时限速情况下的列车运行曲线进行求解，同时考虑车辆数量增多后，对计算资源带来的压力。

### 参考文献 (References)

- [1] Botte M, D'Acerno, Luca. Dispatching and Rescheduling Tasks and Their Interactions with Travel Demand and the Energy Domain: Models and Algorithms[J]. *Urban Rail Transit*, 2018,4(4):163-197.
- [2] Quaglietta, Egidio. A microscopic simulation model for supporting the design of railway systems: development and applications[D]. University of Naples Federico II, 2011.
- [3] Dick Middelkoop, Michiel Bouwman. Simone: Large Scale Train Network Simulations.[C]*Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [4] Wilco Burghout. Hybrid microscopic—mesoscopic traffic simulation[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2004.
- [5] 段雯誉, 杨扬, 李毓磊. 基于 CTCS-3 级列车控制场景下的 CTC 仿真系统研究与设计[J]. *铁路计算机应用*, 2020,29(2):53-57.
- [6] 杜晓旭, 何涛. 基于 CTC 的行车调度作业仿真培训平台[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(02):156-160+185.
- [7] 周妍, 周磊山. 高速铁路行车调度指挥一体化仿真实验平台设计与研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(06):1-7.
- [8] Pouryousef H, Lautala P. Hybrid simulation approach for improving railway capacity and train schedules [J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2015, 5(4):211-224.
- [9] Nash, A, Huerlimann, D. Railroad simulation using OpenTrack. [J]. *Publication of Wit Press*, 2004. 74:45-54.
- [10] Chen Z, Han B M. Simulation Study Based on OpenTrack on Carrying Capacity in District of Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 505-506:567-57.
- [11] Semrov, D, Marsetic R, Zura, M, et al. Reinforcement learning approach for train rescheduling on a single-track railway[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 86:250-267.
- [12] Li L, Dong W, Ji Y, Zhang Z, Tong L. Minimal-energy Driving Strategy for High-Speed Electric Train with Hybrid System Model [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013, 14(4), 1642-1653.
- [13] 朱晓敏, 徐振华. 基于单质点模型的城市轨道交通列车动力学仿真[J]. *铁道学报*, 2011,33(6):14-19.
- [14] 李宝旭. 高寒高速铁路列车运行调整方法研究[J]. *中国铁路*, 2016(08):11-14.