

DOI:10.13196/j.cims.2022.11.011

基于运控和调度协同仿真的列车阶段调整计划评估

杨鹏鑫, 崔东亮⁺, 代学武, 岳 鹏, 刘瑞广

(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)

摘要:当高铁列车发生晚点偏离基本运行图,无法按图运行时,需要制定 3~4 小时阶段调整计划,以减少晚点。如何评估列车运行图的有效性,以合理地选择一个较优的阶段调整计划是行车调度的核心问题,尤其是列车运行过程中会持续受各种不确定因素的影响,形成新的晚点。针对该问题,设计开发了运控调度协同快速仿真系统,提出一种不确定扰动下列车阶段调整计划的鲁棒性评估方法。该仿真系统集成机理和数据驱动结合的列车运行模型、数据驱动的列车延误不确定性扰动模型,以及交互式通信接口,具备了在各种延误扰动下列车阶段调整计划的仿真实验验证,并通过鲁棒性评估模块,对调度方案进行晚点传播情况、晚点恢复能力等性能指标的统计分析,对阶段调整计划进行全流程全场景的鲁棒性评估。以哈大高速铁路沈阳-大连北区段为例,对两种调度算法生成的调整运行图进行评估,验证了所设计的仿真器能够快速、可靠地对阶段调整计划进行评估,为未来开展智能调度,寻找晚点恢复性能和鲁棒性兼顾优化的调度算法提供准确的目标函数评估和数据支撑。

关键词:列车运行仿真器;不确定性扰动;阶段调整计划评估;智能调度

中图分类号:TP391.9 文献标识码:A

Joint scheduling and train operation simulator for rescheduled time table evaluation

YANG Pengxin, CUI Dongliang⁺, DAI Xuewu, YUE Peng, LIU Ruiguang

(State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: When the operation of high-speed train deviates from the original time table, a 3-to-4-hour regulation plan is needed to adjust the operation of the relevant trains in order to reduce the delays. How to evaluate the effectiveness of the regulation plan so that a better train operation plan is made and reasonably selected has been the core task in train dispatching and rescheduling. This is particularly true if the fact is considered that trains' operations are continuously affected by various uncertainties and it is inevitable more extra delays will be introduced. A joint fast simulator was developed for operation and dispatching, and a method to evaluate the robustness of train operation adjustment plan was proposed under the uncertain disturbance. The simulator integrated the train operation model with the combination of mechanism and data drive, the data-driven train delay uncertainty disturbance model and the interactive communication interface. Through the robustness evaluation model, the statistical analysis of delay propagation and delay recovery of the scheduling plan was carried out, and the robustness evaluation of whole process and scene of train adjustment plan was conducted. The section of Shenyang to Dalian north of Harbin-Dalian high-speed railway was selected to verify the simulator, and the results showed that it could evaluate the train adjustment plan quickly and reliably. Besides, the simulator could provide accurate objective function evaluation and data support for intelligent scheduling method in the future to find a scheduling algorithm with better robustness performance and delay optimization.

Keywords: train simulator; uncertain disturbance; regulation plan evaluation; intelligent scheduling

收稿日期:2021-10-08;修订日期:2022-04-18。Received 08 Oct. 2021;accepted 18 Apr. 2022.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61790574,U1834211,U1864206)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation,China (No. 61790574,U1834211,U1864206).

0 引言

列车运行图在铁路运输系统中占据极其重要的地位,既是保证列车安全、正点运行的基础文件,也是列车调度的基础。由于列车在运行时不可避免地会受到环境和人为因素的影响,如灾害天气、客流、设备故障等随机事件,使列车实际运行与计划运行存在一定的偏差,出现运行晚点。在线路繁忙、车次运行密集的铁路干线,单个列车受到的扰动还会横向和纵向传播至路网,因此需要可靠的调度算法帮助列车快速恢复计划运行。有效地评估列车阶段调整计划可以为列车晚点调度提供参考,尤其是随着人工智能调度算法的快速发展,如机器学习方法等需要对运行方案的解进行大量的验证与评估,来帮助智能体进行学习,并给出最优解。

鲁棒性是对调度方案进行评价的重要指标,因此在车间调度、项目调度、列车调度等问题中都具有广泛的研究^[1-2]。列车运行计划鲁棒性指的是对路网扰动的敏感程度,目前针对该问题,一般可以分为基于数学模型理论分析和基于仿真验证评估两种方法进行评估。

(1) 数学模型理论分析方法

CACCHIANI 等^[3]基于旅客需求提出 3 种新的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型,对于决策变量相关的不确定因素加入期望保护水平,优化得到鲁棒性较好的解。GOVERDE 等^[4]使用 max-plus 代数方法对列车运行计划的鲁棒性进行分析,阐述了如何将时刻表建模为离散时间动态系统,并使用荷兰铁路时刻表作为案例进行了分析。陈军华等^[5]使用着色赋时 Petri 网对列车区间行驶和车站作业进行建模与仿真,并通过适应度评价指标对京津城际客运专线的仿真结果进行稳定性评价;刘健等^[6]使用元胞自动机对突发事件下的列车运行进行仿真,提出一种稳定性分析方法,并以京沪高速铁路为例,根据仿真实绩图对列车运行图稳定性进行分析。

(2) 仿真验证评估方法

由于使用数学建模往往需要对某些复杂过程进行抽象与假设,对铁路系统进行建模的结果与实际可能存在偏差。随着计算机仿真技术的发展,越来越多的研究人员开始使用铁路仿真系统对列车运行计划进行评估。SALIDO^[7]介绍了单线铁路的调度鲁棒性影响因素以及鲁棒性衡量方法,并基于仿真

方法对时刻表进行评估,同时对受到干扰的时刻表进行修复,通过整体仿真结果对列车时刻表进行分析。CORMAN^[8]结合调度工具 ROMA 与评估方法来模拟大规模路网,并对常规时刻表与鲁棒性良好的两种时刻表进行了全面的评估。EMMA 等^[9]使用微观仿真系统 RailSys 对运行图进行评估,并研究了关键点鲁棒性指标对列车运行计划整体鲁棒性的影响。BEŠINOVIĆ 等^[10]提出一种宏观—微观相结合的鲁棒行车计划生成方法,通过宏观模型优化运行时间和鲁棒性,并通过微观模型进行验证与评估,最终得到宏观—微观均可行的时刻表。以上方法在一定程度上构建了列车运行调度系统模型,能够从微观角度模拟列车运行过程。但这些商业微观仿真软件针对性不强、交互能力差、仿真速度慢。同时,由于对轨道、列车、信号系统等都进行了十分详尽的描述,体量大、维护难,对计算资源要求很高。

本文设计开发了运控调度协同仿真器,并基于仿真数据对阶段调整计划鲁棒性进行评估,相较于其他方法,本文方法的创新点如下:

(1) 针对智能调度算法对列车阶段调整计划评估的特定需求,进行中观铁路仿真器的设计,减小计算资源并实现快速仿真,可以为鲁棒性评估提供大量仿真数据,实现多场景下的快速仿真评估。

(2) 基于 TCP/IP 协议开发了数据交互接口,定义交互数据格式,仿真器可以通过该接口接收调度命令及列车时刻表,并实时发送车路仿真状态与结果。既可以实现远程操控与列车阶段调整计划评估,又可以满足机器学习算法如强化学习算法的数据交互需求,提高了系统的交互能力。

(3) 建立了数据驱动的列车运行模型,通过引入列车牵引/制动工况下的参数化分段拟合模型,使用实际列车参数与运行数据进行参数辨识,并将模型集成到仿真器中,实现对列车运行的真实模拟,提高了评估的准确性。

(4) 对线路实际运营的晚点数据进行统计,根据晚点分布特点设计不确定性扰动模型,在仿真器中引入该模型,为阶段调整计划的鲁棒性评估创造了扰动条件。

1 运控调度协同仿真器架构

1.1 仿真器架构及仿真流程

列车运控调度协同仿真器由数据交互接口、场景设置、仿真内核、鲁棒性评估、UI 显示部分组成,

整体架构如图 1 所示。数据交互接口用于与智能调度算法进行数据交互,包括列车晚点信息、车路状态、列车时刻表及调度命令等。场景设置模块可以产生不确定性扰动模拟初始晚点,还可进行场景布局图配置。仿真内核用于快速仿真列车的实际运行过程,鲁棒性评估用于对列车多次仿真结果进行数据分析。

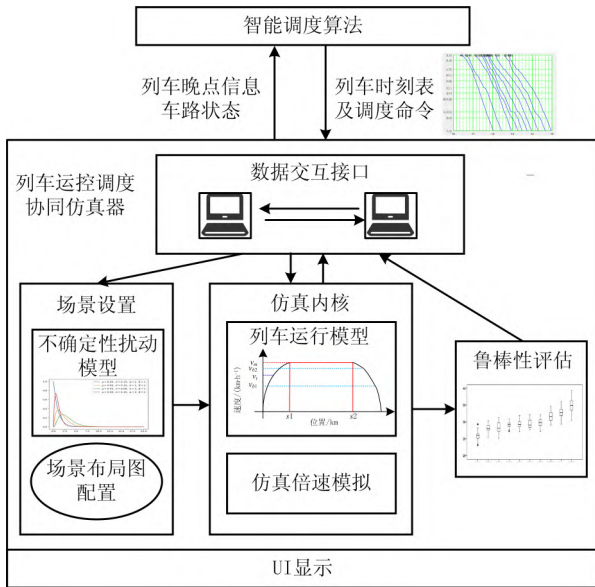


图1 运控调度协同仿真器架构

在列车基本运行图制定以及阶段调整计划运行图生成时,都可以使用仿真器进行鲁棒性评估,评估流程如图 2 所示。

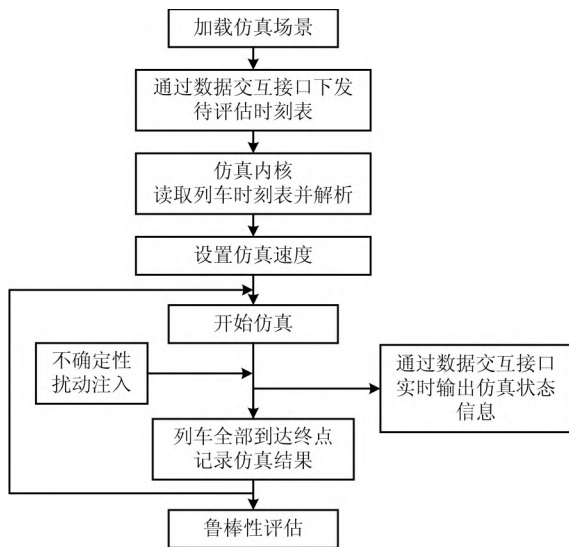


图2 列车运行图仿真评估流程

当仿真器工作时,首先根据需求加载仿真布局图,然后智能算法通过数据交互接口下达列车运行

时刻表及调度命令。仿真内核在接收到列车时刻信息后进行解析,并开始多次仿真。在仿真过程中,场景设置模块可以设置发车延误、产生不确定扰动,模拟初始晚点,同时在仿真中还可能产生晚点传播。记录每次仿真结果,并在鲁棒性评估模块中对数据进行分析。实时车路仿真状态、仿真结果可通过交互接口发送。

1.2 列车仿真数学模型描述

在仿真过程中,列车运行计划设计的不合理或行车过程中受到干扰等都会影响列车的实际到发时间,与图定到发时间产生偏差。列车运行的数学模型可以表示为

$$d_{i,j} = a_{i,j} + s_{i,j} + w_{i,j}^d, \quad (1)$$

$$a_{i,j+1} = d_{i,j} + r_{i,j} + w_{i,j+1}^a.$$

式中: $d_{i,j}$ 为第 i 辆列车在第 j 站的实际发车时间, $a_{i,j+1}$ 为第 i 辆列车在下一站第 $j+1$ 站的实际到达时间, $s_{i,j}$ 为第 i 辆列车在第 j 站的计划停车时间, $r_{i,j}$ 为第 i 辆列车在第 j 站到第 $j+1$ 站区间的计划运行时间, $w_{i,j}^d$ 为第 i 辆列车在第 j 站的发车晚点, $w_{i,j+1}^a$ 为第 i 辆列车在第 $j+1$ 站的到达晚点。

列车计划停车时间 $s_{i,j}$ 与列车计划运行时间 $r_{i,j}$ 只由列车基本运行图决定,具有如下关系:

$$s_{i,j} = d_{i,j}^* - a_{i,j}^*, \quad (2)$$

$$r_{i,j} = a_{i,j+1}^* - d_{i,j}^*.$$

式中: $d_{i,j}^*$ 为第 i 辆列车在第 j 站的图定发车时间, $a_{i,j}^*$ 为第 i 辆列车在第 j 站的图定到达时间。

根据产生晚点的原因,列车的晚点主要可以分为两类:

(1) 初始晚点(primary delay) 是列车在运行过程中不可避免地受到各种因素干扰,导致列车区间运行时间或者停站时间与运行图中计划时间不一致所形成的晚点。导致初始晚点的因素通常具有不确定性,因此初始晚点也具有不确定性。不确定性因素的来源有 3 个方面:外部环境(如大风临时限速等)、人为因素(如列车司机不同的操作偏好)和设备故障^[11]。初始晚点的一种特殊情况是列车在始发站发生的晚点(如延迟发车)或者在交界口站列车转线进入当前调度区段时,就已经产生晚点的情况。

(2) 二次晚点(secondary delay) 也称作连带晚点(joint delay, knock-on delays)是在发生初始晚点后,由于晚点列车不能按计划按时释放所占用的轨道等设备资源导致运行冲突时所产生的延迟。二次晚点是由于初始晚点导致的,主要是列车运行

受行车安全间距、闭塞区间、股道运用等多种运行约束,在发生行车冲突(即上述运行约束无法满足)时,各列车需要按照调度指令排队等候股道等资源空闲,各个运行约束均满足的条件下,才能继续运行。二次晚点是一种具有传播性的晚点,通常表现为由一个列车传递给另一个列车,或者列车自身的晚点不断累积。由于高铁运行的复杂性,二次晚点的形成和传播是一个复杂的动态过程,难以建立精确的数学模型,通常需要用仿真系统来仿真才能模拟二次晚点的传播。因此,仿真方法能够更好地反映实际路网行车约束,实现对二次晚点更准确的仿真和验证。

综上所述,式(1)中晚点 $w_{i,j}^d, w_{i,j}^a$ 可以分解为两部分:

$$\begin{aligned} w_{i,j}^d &= \tau_{i,j}^d + \epsilon_{i,j}^d, \\ w_{i,j}^a &= \tau_{i,j}^a + \epsilon_{i,j}^a. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\tau_{i,j}^d$ 表示第 i 辆列车在第 j 站产生的初始晚点; $\epsilon_{i,j}^d$ 表示在第 j 站内产生的二次晚点; $\tau_{i,j}^a$ 表示第 i 辆列车在第 j 站到第 $j+1$ 站运行中在区间内受到干扰产生的初始晚点; $\epsilon_{i,j}^a$ 表示在第 j 站到第 $j+1$ 站运行中受其他列车影响导致的二次晚点。关于初始晚点的建模详见第 2.3 节。

2 运控调度协同仿真器设计

2.1 数据交互接口

在列车晚点需要进行调度时,一方面仿真器需要将晚点信息传输给智能调度算法,并接收新生成的调度调整时刻表;另一方面许多智能调度算法,如强化学习算法,是一个智能体(Agent)和环境不断交互和试错的过程,在交互中 Agent 不断学习并改善行为。因此,产生更好的调度策略需要大量的与环境(仿真器)进行交互,仿真器不断接收智能体的动作指令,仿真动作的执行结果,并将执行后的路网运行状态反馈给智能体。本文所设计的仿真器与智能体的数据交互过程如图 3 所示。本系统基于 TCP/IP 协议,利用 Socket 技术开发了数据交互接口,实现了智能调度算法与列车运控调度协同仿真器通过计算机网络进行快速信息交互。

2.2 仿真内核

仿真内核部分用于对列车的实际运行过程进行模拟,是仿真器的核心部分,其中包括列车时刻表解析、仿真速度控制以及数据驱动的列车运行模型。

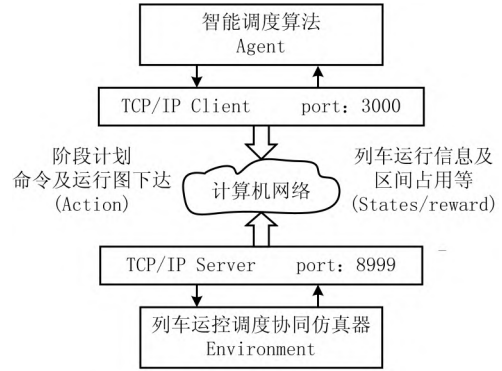


图3 仿真器与智能调度算法交互

2.2.1 仿真速度控制

仿真速度控制可以实现加速仿真,最高支持 300 倍仿真。当设置的仿真倍速为 N 后,在真实时间的 1s 内,仿真器执行 N 次循环,每次循环视为仿真时间的 1s。在每次循环内对线路状态、列车状态进行更新,以及查询并执行指令队列中的调度指令,通过仿真加速可以大大提高仿真效率。

2.2.2 数据驱动的列车运行模型

为了更真实地反映列车运行规律,引入列车牵引/制动工况下的参数化分段拟合模型,并根据实际列车参数和运行数据对模型进行参数化,得到数据驱动的列车运行模型。

列车的运行曲线可以分为牵引加速、匀速巡航、制动减速 3 个阶段,运行曲线示意图如图 4 所示。

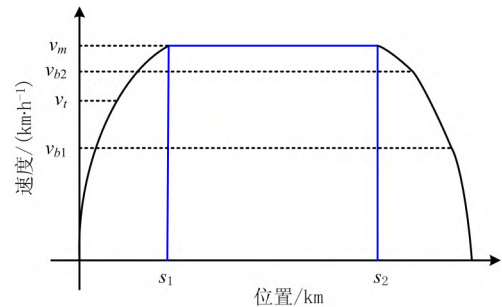


图4 列车运行曲线示意图

图中: v_T, v_{b1}, v_{b2} 分别为列车牵引过程和制动过程切换速度; v_m 为匀速巡航速度; s_1, s_2 分别为列车切换运行阶段时的列车位置。

列车运行可以看做一维空间中的单质点运动模型^[12],在牵引加速、匀速巡航和制动减速这 3 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的过程,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(4)分段函数描述:

$$F(v) = \begin{cases} k_{t,0} + k_{t,1}v & v \leq v_T \\ k'_{t,0} + k'_{t,1}v + k'_{t,2}v^2 & v > v_T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_{t,0}, k_{t,1}, k'_{t,0}, k'_{t,1}, k'_{t,2}$ 为待拟合常数,由列车设计给出; v 为列车速度; 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,制动段列车再生制动力 $B(v)$ 的大小可由式(5)分段函数近似描述:

$$B(v) = \begin{cases} k_{b,0} & v \leq v_{b1} \\ k'_{b,0} + k_{b,1}v & v_{b1} \leq v \leq v_{b2} \\ k''_{b,0} + k''_{b,1}v + k''_{b,2}v^2 & v > v_{b2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $k_{b,0}, k'_{b,0}, k_{b,1}, k''_{b,0}, k''_{b,1}, k''_{b,2}$ 为待拟合常数; v_{b1}, v_{b2} 为制动段间切换速度。

(3)列车在运行时的单位运行阻力 $w(v)$ 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(6)来描述:

$$W(v) = k_{c,0} + k_{c,1}v + k_{c,2}v^2 \quad (6)$$

式中 $k_{c,0}, k_{c,1}, k_{c,2}$ 为常数。因此,列车运行过程所受单位合力可用式(7)表示:

$$\begin{aligned} C(v) &= F(v) - W(v) - B(v) \\ &= a_0 + a_1v + a_2v^2 \end{aligned} \quad (7)$$

根据以上牵引制动模型,列车的运行模型可以用式(8)来表达:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \alpha_i + \beta_i v + \lambda_i v^2, \\ \frac{ds}{dv} &= \frac{vdt}{dv} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\alpha_i, \beta_i, \lambda_i$ 为待辨识参数; $i = 1, 2$ 表示牵引段两种特性参数, $i = 3, 4, 5$ 表示制动阶段 3 种特性参数。使用实际列车与铁路局日常运行数据进行参数辨识。辨识方法为笔者前期工作提出的小样本数据驱动参数辨识算法^[13],该方法采用结构简单并且收敛速度快的粒子群优化(Partical Swarm Optimization, PSO)算法和最小二乘法(Least Square, LS)相结合的方式,完成对列车运行模型各个参数的辨识,最后将得到的列车运行模型集成到仿真器中。

2.3 运行场景配置

2.3.1 始发站延误

为了模拟列车在始发站的延迟发车或列车进入

当前仿真调度区段时已经产生晚点的情况,可以在仿真开始前通过始发站延误设置模块,对时刻表中相应列车设置晚点时间,如图 5 所示。

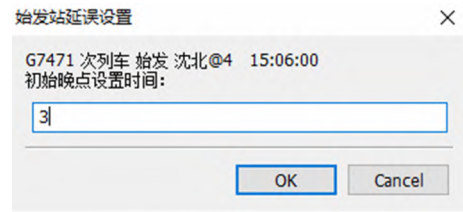


图5 列车始发站晚点设置

设置完成,列车运行时刻表更新发车时间,并按调整时间进行仿真,如图 6 所示。

15:06:00 (15:09:00)	沈北@4	锦@2	16:23:30	G7471
15:09:00	沈北@4	营@3	16:12:00	G7475
15:10:00	海城@4	铁@3	16:24:30	G7472

图6 列车仿真时刻表更新

2.3.2 列车运行的不确定性扰动模型

为了使仿真器能够模拟列车运行延迟的不确定性,更加真实地描述式(3)中 $\tau_{i,j}^d, \tau_{i,j}^a$, 本文通过对列车实际运行数据进行分析,得到了列车初始晚点所服从的分布。统计哈大线 2019 年 3 月~2019 年 5 月的共计 582 111 条列车运行数据,筛选出其中受到干扰而非晚点传播所产生的晚点数据,即晚点列车的前车正点运行,前车无晚点,自本车开始发生晚点,共得到 982 条晚点记录。

根据统计情况可以看出,晚点数据分布呈偏态特点,且当前关于列车晚点时长分布的研究主要使用常见的偏态分布,如正态分布、指数分布、伽马分布、对数正态分布进行拟合^[14],因此,本文选用这几种分布进行晚点数据拟合,并根据拟合误差,选择最佳的概率密度函数对晚点进行建模。考虑列车受外部扰动影响导致的初始晚点随机变量 τ 有 4 个备选的概率密度函数,分别如下:

(1)正态分布:

$$f_1(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中: μ 为正态分布的均值, σ 为正态分布的标准差。

(2)指数分布:

$$f_2(\tau) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda\tau) & \tau \geq 0 \\ 0 & \tau < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 λ 为指数分布的率参数。

(3) 伽马分布：

$$f_3(\tau) = \frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right), \tau > 0. \quad (11)$$

式中 α, β 为伽马分布的参数。

(4) 对数正态分布：

$$f_4(\tau) = \frac{1}{\sigma\tau\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\tau - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \tau > 0. \quad (12)$$

式中： μ 为随机变量取对数后的均值， σ 为随机变量取对数后的标准差。

根据以上备选的概率分布函数，对实际的列车初始晚点数据进行拟合，得到各分布的参数如表 1 所示，各分布拟合后概率密度函数如图 7 所示。

表 1 晚点数据各分布拟合参数值

分布	参数值
正态分布	$\mu = 27.4878 \quad \sigma = 50.7576$
指数分布	$\lambda = 27.4878$
伽马分布	$\alpha = 0.98323 \quad \beta = 27.9568$
对数正态分布	$\mu = 2.72551 \quad \sigma = 1.14846$

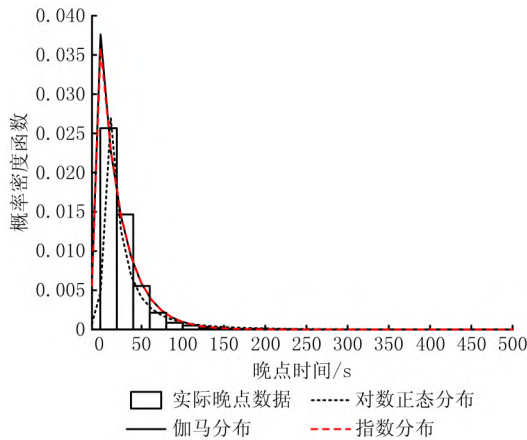


图7 实际晚点及拟合分布的概率密度

作为一种最常用的非参数检验方法，柯尔莫可洛夫—斯米洛夫 (Kolmogorov-Smirnov, K-S) 法可以在无需知道数据的分布情况时，用来判定一个分布是否符合某种理论分布，或比较两个经验分布是否有显著差异。K-S 法使用统计样本数据与理论分布的累计概率分布函数的最大差值，如式(13)所示：

$$D = \max |F(x) - G(X)|. \quad (13)$$

式中： D 为统计量， $F(x)$ 为样本数据的累积概率分布函数， $G(x)$ 为理论分布的累积概率分布函数。

本文采用 K-S 法对以上 4 种分布进行拟合优度检验，在显著性水平为 0.01 的情况下对分布进行

检验， $D_{0.01}$ 经验算法如式(14)：

$$D_{0.01} = \frac{1.64}{\sqrt{N}}. \quad (14)$$

根据式(14)得到的 $D_{0.01}$ 检验结果如表 2 所示。

表 2 各分布的 K-S 检验结果

分布	接受原假设概率(p)	统计量(D)	接受假设临界值($D_{0.01}$)
正态分布	0	0.9335	0.052
指数分布	0.012	0.0508	0.052
伽马分布	0.0128	0.0505	0.052
对数正态分布	6.929×10^{-6}	0.0798	0.052

由以上统计结果可以看出，指数分布与伽马分布的统计量都小于接收假设的临界值，因此在显著性水平为 0.01 的情况下，指数分布和伽马分布通过了检验，且指数分布接受原假设的概率更大，因此本文选取指数分布作为列车在仿真中受到不确定性干扰而产生的初始晚点分布。

将列车站间扰动和区间运行所受扰动造成的晚点均视为服从 $\lambda = 27.4878$ 的指数分布，则由不确定性扰动造成的初始晚点 τ 的概率密度函数为：

$$f_2(\tau) = \begin{cases} 27.4878 e^{-27.4878\tau} & \tau > 0 \\ 0 & \tau \leq 0 \end{cases}. \quad (15)$$

2.4 阶段调整计划的鲁棒性评估

对于高铁列车运行和行车调度来说，鲁棒性好的调度方案对于较小的扰动不敏感，能够从较小的延误中恢复，并防止干扰在铁路网络中扩散^[15]。由于列车运行的复杂性和列车运行晚点的不确定性，根据不同的需求，研究者提出了各种不同的列车运行时刻表的鲁棒性衡量指标，主要可以分为两类：①基于时刻表特性的鲁棒性指标，如冗余时间大小及分布，列车运行间隔大小及分布、冗余时间利用值^[16]、晚点临界鲁棒性^[17]等。②基于列车运行结果统计特征的鲁棒性指标，通常基于列车准点率、总晚点时间、晚点列车数、冲突数量、恢复时间等^[9,18-19]。

本文使用仿真器对列车运行进行模拟，能够得到列车阶段调整计划在具有不确定性扰动下的仿真结果，因此适用于根据仿真结果数据的统计特征进行鲁棒性评估，选取常用指标列车在各站平均晚点时间的均值方差、准点率、受影响列车进行分析。

设车站总数为 M ，车辆总数为 N ，共仿真 T 次，第 s 次仿真晚点列车数为 c_s ，阶段调整计划调整的

车辆数为 c_{adj} , 各指标可描述如下:

(1)在每次仿真中,统计各列车在各站到站时的平均晚点时间,使用统计值的均值反映列车晚点的程度,方差反映对不确定因素影响敏感程度。计算均值与方差如式(16):

$$T_{ave}(i) = \frac{\sum_{s=1}^T \sum_{j=1}^M a_{i,j} - a_{i,j}^*}{T \times M},$$

$$\sigma^2(j) = \frac{\sum_{s=1}^T \left[\frac{\sum_{j=1}^M a_{i,j} - a_{i,j}^*}{M} - T_{ave}(j) \right]^2}{T-1} \quad (16)$$

(2)统计晚点列车数量,使用列车运行正点率可以从列车数量上反映整个路网的晚点规模。列车运行正点率如式(17):

$$P = \frac{\sum_{s=1}^T N - c_s}{T \times N} \times 100\% \quad (17)$$

(3)当列车发生晚点时,由于调度算法会对部分列车进行调整,最终晚点车辆可能会大于初始晚点车辆数,但这种晚点属于计划内的列车晚点。而在不确定性扰动下,车辆间的相互影响、股道冲突或者调整时刻表的不可行都会导致原本可以准时到达的列车晚点,可以通过计划外受到影响的后续列车数来反映晚点传播情况,使用受影响列车比例 R 表示晚点传播程度,

$$R = \frac{\sum_{s=1}^T c_s - c_{adj}}{T \times N} \times 100\% \quad (18)$$

3 列车阶段调整计划运行图仿真评估验证

本文以哈大高速铁路沈阳至大连北段 11 个车站,10 点~15 点时段下行的 10 辆列车为仿真对象,对所提方法进行验证,对两种阶段调整计划生成方法得到的运行图进行仿真和鲁棒性测试分析。案例 1 是先到先服务(First Come First Service, FCFS)调度调整方法,用来模拟人工调度;案例 2 基于混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)方法,采用求解器 CPLEX 进行求解。

3.1 仿真配置

利用仿真器搭建哈大高速铁路沈阳-大连北段布局图如图 8 所示。

列车基本运行图如图 9 所示,红色线表示选取

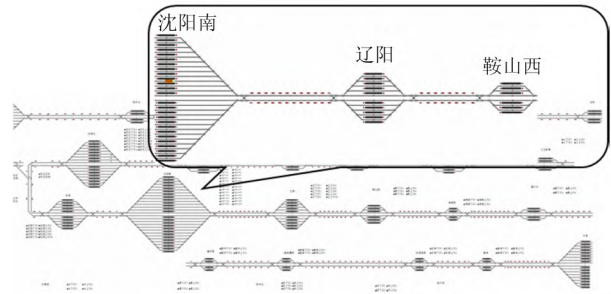


图8 仿真系统中的高铁线路布局图

列车。本文设置 G8008 次列车在沈阳站始发时的初始晚点为 30 min,分别使用两种调整策略进行调整得到图 10 和图 11。

由于案例 2 使用的方法允许列车发生越行,因此具有初始晚点的列车 G8008(图 11 中红色线)为恢复计划运行,在鞍山站发生越行,导致列车行车间隔改变。

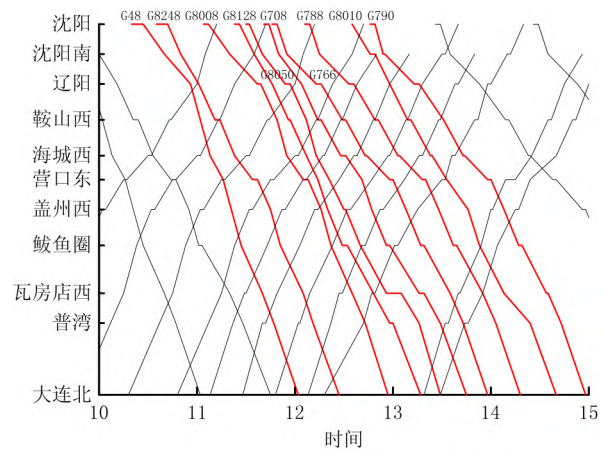


图9 沈阳至大连北段基本运行图

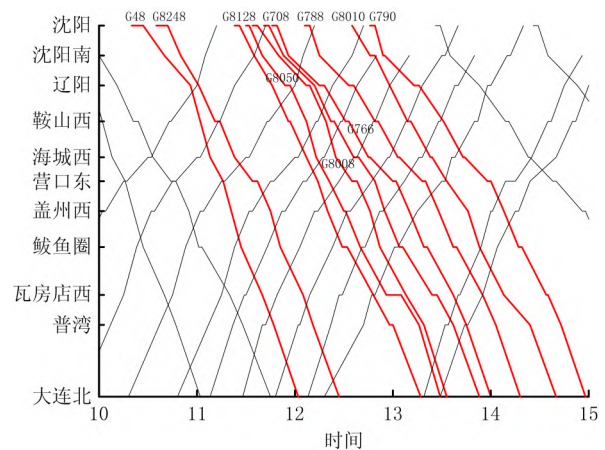


图10 案例1(FCFS)阶段调整计划运行图

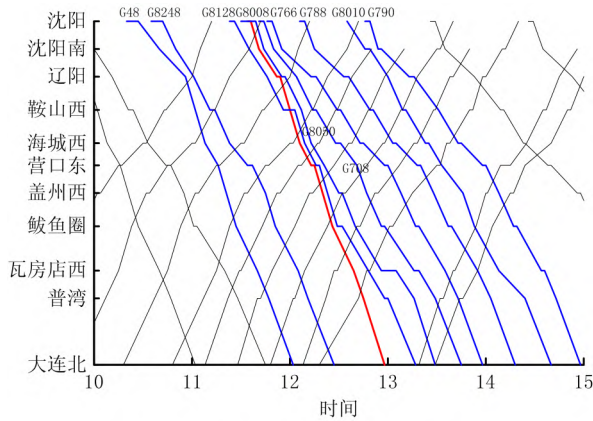


图11 案例2(MILP)阶段调整计划运行图

3.2 阶段调整计划运行图鲁棒性分析

将上述两种案例的阶段调整计划运行图下达至运控调度协同仿真器,加入不确定性扰动,分别对两运行图仿真 50 次,并对仿真结果进行分析。

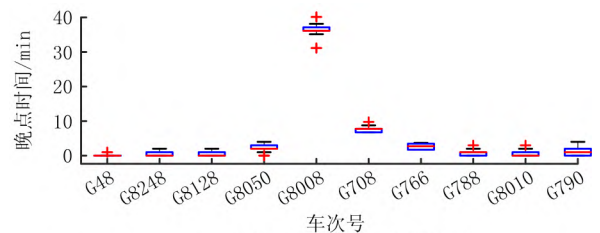
3.2.1 各列车总晚点时间

统计每次仿真得到的列车总晚点时间,根据式(16)对各列车的仿真结果分别取均值和方差得到表 3,并根据仿真结果得到箱线图,如图 12 所示。

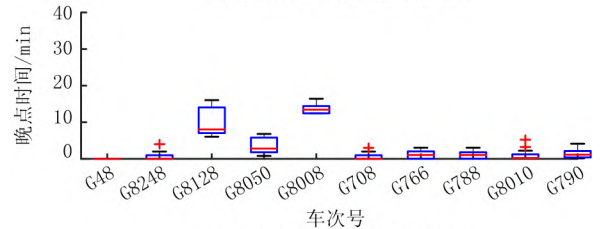
由表 3 和图 12 可以看出,案例 2(MILP)在不同扰动下列车整体晚点均值、中位数较小,但方差较大;而案例 1(FCFS)中列车晚点均值较大,方差较小。由图 11 可以看出,案例 2 为减小列车晚点时间,采取越行、赶点等方式,导致列车行驶较为密集,冗余时间小,因此在不同扰动下,仿真结果具有较大的差异,波动性大。而案例 1 不改变列车行车顺序,不压缩区间运行时间,因此冗余时间较大,在不同扰动下,仿真结果差异性小,较为平稳。

表 3 在指数扰动下各列车晚点统计

车次号	案例 1(FCFS)		案例 2(MILP)	
	均值/min	方差/min	均值/min	方差/min
	$T_{ave}(j)$	$\sigma^2(j)$	$T_{ave}(j)$	$\sigma^2(j)$
G48	0.095	0.090	0	0
G8248	0.57	0.56	0.61	0.89
G8128	0.57	0.56	10.09	11.50
G8008	36.76	1.65	13.43	1.27
G8050	2.29	0.71	3.81	4.36
G708	7.62	0.83	0.65	0.87
G766	2.67	0.65	1.18	1.03
G788	0.95	0.75	0.92	0.85
G8010	0.67	0.93	1.11	1.57
G790	1.38	1.25	1.40	1.20



a 案例1各列车晚点情况箱线图



b 案例2各列车晚点情况箱线图

图12 各列车晚点情况箱线图

3.2.2 正点率与受影响列车数

由于列车的晚点会影响其他车辆运行,因此两种案例均对除 G8008 次列车外的其他列车进行了调整。根据仿真结果对晚点车辆进行统计,并据式(17)和式(18)计算得到表 4,其中总晚点列车数为 50 次仿真中的晚点列车总和。

由表 4 可以得到,案例 1(FCFS)在调度时调整的列车数较少,晚点车辆数也较少,准点率高,由于调整车辆较少,在计划外的晚点传播相对较大;而案例 2(MILP)为尽快恢复计划运行,调整的车辆较多,再加上对扰动较为敏感,导致仿真时晚点车辆数较多,准点率低,由于调整涉及到的车辆数多,在计划外影响的列车相对较少。

表 4 两种调度方法下的晚点车辆统计

	案例 1 (FCFS)	案例 2 (MILP)
调度算法调整列车数 c_{adj}	3	7
总晚点列车数	202	234
平均每次仿真晚点列车数	6.7	7.8
正点率 $P/\%$	32.67	22.00
受影响列车比例 $R/\%$	37.33	8

3.2.3 晚点恢复

为更好地反映列车的仿真过程,仿真器还可将每辆列车在每站的晚点进行记录,根据这些数据可以更好地反映每辆列车的晚点恢复情况以及晚点程度。

选取某次仿真结果,根据每站晚点信息可以得

到案例 1(FCFS)和案例 2(MILP)在实际仿真中,各列车在各站的晚点热力图,如图 13 和图 14 所示。其中纵横坐标分别表示车站与列车车次号,右侧颜色条表示列车晚点时间。

由热力图可以看出,案例 1(FCFS)在仿真时,各列车晚点没有得到恢复,具有初始晚点的 G8008 次列车在后续仿真中晚点逐渐增大,其他列车也具有不同程度的晚点,且没有恢复的趋势;而案例 2(MILP)在仿真时,具有初始晚点的 G8008 次列车晚点逐渐减小,且各列车晚点均有减小的趋势。

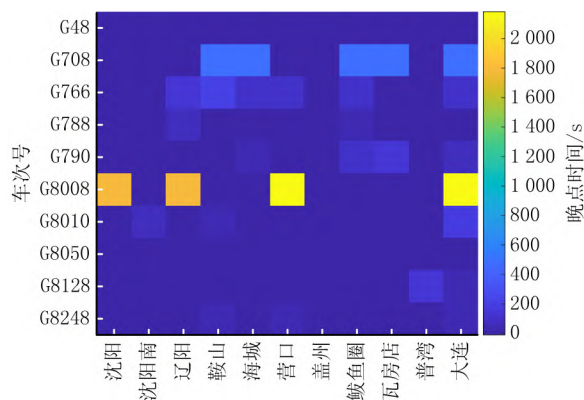


图13 案例1的晚点热力图

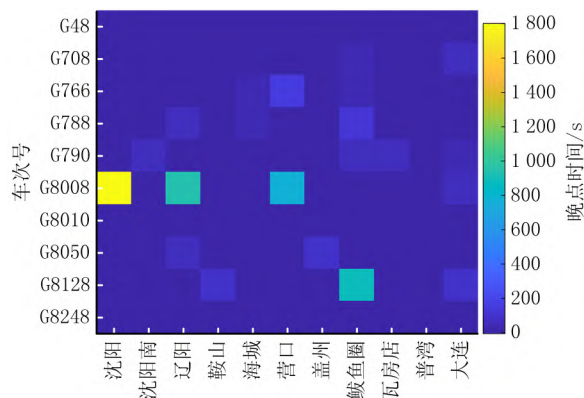


图14 案例2的晚点热力图

综上所述,案例 1 不确定扰动带来的影响较小,鲁棒性较好,但晚点的恢复能力差;案例 2 在不确定性扰动下,波动较大,晚点影响的列车较多,鲁棒性较差,但能够较好地恢复到正常运营。

在实际调度中,列车调整计划不仅需要具有一定的抗干扰能力,防止晚点传播至路网,影响其他车辆正常运行,对于晚点的恢复能力也十分重要,并非冗余时间越大越好。因此,一个好的调度策略应该能够兼顾两者,综合考虑并选取调整方案。

4 结束语

本文通过对晚点实际数据分析建模,结合数据驱动的列车运行模型、数据交互接口等设计了一种快速中观交互式仿真器,并根据仿真器的仿真结果进行列车阶段调整计划鲁棒性评估。

由于本文提出的仿真器考虑了行车安全区间、股道运用等因素,并基于实际数据加入不确定性扰动,更加贴合实际,可信度更高,同时能够快速仿真、交互能力强,对铁路调度方案选择、智能调度算法的设计等工作具有指导意义。

尽管仿真器可以对阶段调整计划运行图进行多指标评估,但需要基于多次仿真的结果进行统计分析,这会消耗一定的时间。在智能调度算法的验证阶段这样的时间成本是可以接受的,但针对强化学习等算法的训练阶段,仿真器无法为算法生成的调度策略提供快速的评估反馈,如何提高评估速度,或更好地与机器学习算法进行结合还有待研究。

参考文献:

- [1] GU Zeping, YANG Jianjun, ZHOU Yong. Multi-objective flexible job-shop robust scheduling optimization under disturbance of uncertainties[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 66-74(in Chinese). [顾泽平, 杨建军, 周勇. 不确定因素扰动下多目标柔性作业车间鲁棒调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 66-74.]
- [2] WANG Bing, LI Qiaoyun, YIN Lei. Robust-satisfying project scheduling based on artificial immune algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(5): 1089-1095. [王冰, 李巧云, 尹磊. 基于人工免疫算法的鲁棒满意项目调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 1089-1095.]
- [3] CACCHIANI V, QI J G, YANG L X. Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 136: 1-29.
- [4] GOVERDE R. Railway timetable stability analysis using max-plus system theory[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(2): 179-201.
- [5] CHEN Junhua, ZHANG Xingchen, XU Bin. Research on evaluation of railway timetable stability based on colored-timed Petri net[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(4): 770-773(in Chinese). [陈军华, 张星臣, 徐彬. 基于着色赋时 PETRI 网的运行图稳定性评价研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(4): 770-773.]
- [6] LIU Jian, MENG Xuelei, WANG Jinxia. Stability analysis of train diagram in emergency[J]. Railway Computer Application. 2015, 24(9): 1-5(in Chinese). [刘健, 孟学雷, 王金霞.]

- 突发事件下的列车运行图稳定性分析[J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(9):1-5.]
- [7] SALIDO M A, BARBER F, INGOLOTTI L. Robustness for a single railway line: Analytical and simulation methods[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(18):13305-13327.
- [8] CORMAN F, D'ARIANO A, HANSEN I A. Evaluating disturbance robustness of railway schedules[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2014, 18(1):106-120.
- [9] EMMA S, GEMMA N, ANDERS P. A microscopic evaluation of railway timetable robustness and critical points[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2017, 7(4):207-223.
- [10] BEŠINOVIĆ N, GOVERDE R M P, QUAGLIETTA E, EGIDIO Q, et al. An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 87:14-32.
- [11] CHEN Junhua, ZHANG Xingchen, XU Bin, et al. Research on high-speed railway timetable stability and its effect on railway transportation[J]. Logistics Technology, 2011, 30(15): 81-84 (in Chinese). [陈军华, 张星臣, 徐彬, 等. 高速铁路列车运行图稳定性及其影响因素分析[J]. 物流技术, 2011, 30(15):81-84.]
- [12] ZHU Xiaomin, XU Zhenhua. Dynamic simulation of urban rail transit train based on single-particle model[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(6):14-19 (in Chinese). [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.]
- [13] XU Peng, FENG Guoqi, DAI Xuewu, et al. Small-data driven modeling and simulation of high-speed train running time under limited speeds [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8):1892-1904 (in Chinese). [徐鹏, 冯国奇, 代学武, 等. 高铁限速运行时的小数据驱动建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8):1892-1904.]
- [14] HUANG Ping, PENG Qiyuan, WEN Chao, et al. Study on high-speed railway disruption classification and model of its influence on train number[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(S2):46-53 (in Chinese). [黄平, 彭其渊, 文超, 等. 高速铁路故障分类及其影响列车数模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(S2):46-53.]
- [15] EMMA A, ANDERS P, JOHANNA T K. Improved railway timetable robustness for reduced traffic delays—A MILP approach, international conference on railway operations modelling and analysis [EB/OL]. (2015-03-30) [2021-10-11]. [https://www. diva-portal. org/smash/get/diva2: 799362/ FULLTEXT01. pdf](https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:799362/FULLTEXT01.pdf).
- [16] WEN Chao, PENG Qiyuan, CHEN Yuhong. Running conflict mechanism of high-speed railway train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2):119-126 (in Chinese). [文超, 彭其渊, 陈芋宏. 高速铁路列车运行冲突机理[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2):119-126.]
- [17] ANDERSSON E V, PETERSON A, KRASEMANN J T. Quantifying railway timetable robustness in critical points [J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2013, 3(3):95-110.
- [18] KHOSHNIYAT F, PETERSON A. Robustness improvements in a train timetable with travel time dependent minimum headways [EB/OL]. [2021-10-11]. [https://www. diva-portal. org/smash/get/diva2:803444/ FULLTEXT01. pdf](https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:803444/FULLTEXT01.pdf).
- [19] KHADIKAR H. Data-enabled stochastic modelling for evaluating schedule robustness of railway networks [J]. Transportation Science, 2017, 51(4):1161-1176.

作者简介:

杨鹏鑫(1997—),男,河北承德人,硕士研究生,研究方向:高铁调度仿真系统, E-mail: yang_pengxin@163.com;

崔东亮(1976—),男,河南平顶山人,讲师,博士,研究方向:高铁智能调度与仿真,通讯作者, E-mail: cuidongliang@mail.neu.edu.cn;

代学武(1976—),男,四川内江人,教授,博士,博士生导师,研究方向:高速列车智能调度、动态系统鲁棒状态估计、无线传感测量与控制、工业物联网等, E-mail: daixuewu@mail.neu.edu.cn;

岳鹏(1994—),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,研究方向:高铁智能调度优化算法, E-mail: pyue515@gmail.com;

刘瑞广(1998—),男,河北辛集人,硕士研究生,研究方向:高铁调度优化, E-mail: liuruiguang111@163.com.