文章编号：1003-1421(2026)03-0109-11
引用格式：郝子萱，黄平，彭其渊. 数据驱动的高速铁路列车运行图冗余时间布局优化研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(3)：109-119.
HAO Zixuan，HUANG Ping，PENG Qiyuan. Data-Driven Optimization of Recovery Time Layout in Train Working Diagrams for High Speed Railways[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(3)：109-119.

数据驱动的高速铁路列车运行图冗余时间布局优化研究

郝子萱[1]，黄　平[1,2]，彭其渊[1,2]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都　611756)

摘　要：优化高速铁路列车运行图冗余时间布局对减少列车晚点时间，提升运输服务质量具有重要意义。以我国高铁列车运行实际数据为基础，研究运行图冗余时间反馈优化方法。基于列车运行实际数据分析各区间和车站冗余时间的布局和利用规律，计算得出各车站和区间冗余时间的超利用系数，并根据停站比率对列车等级进行重新划分，确定列车停站等级。基于对实际数据的统计分析结果，考虑列车停站等级权重对冗余时间利用率的影响，建立冗余时间利用率最大的冗余时间布局优化模型。案例分析结果表明：本模型相比原运行图冗余时间利用率显著提升12.70%；考虑列车停站等级权重的模型相比未考虑的模型冗余时间利用率提升2.57%，说明列车停站等级是影响冗余时间布局和利用的因素之一。

关键词：高速铁路；实际数据；列车运行图；冗余时间；优化模型
中图分类号：U292.4+1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241016002

Data-Driven Optimization of Recovery Time Layout in Train Working Diagrams for High Speed Railways

HAO Zixuan[1]，HUANG Ping[1,2]，PENG Qiyuan[1,2]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Optimizing the recovery time layout in train working diagrams for high speed railways is of great significance for reducing train delays and improving transport service quality. Based on the actual operation data of high speed railway trains in China, the feedback optimization method of recovery time in train working diagrams was studied. Based on the analysis of the layout and utilization laws of recovery time in sections and stations using actual train operation data, the over-utilization coefficients of recovery time for each station and section were calculated. Furthermore, the train grades were reclassified according to the stop ratio to determine the train stopping levels. Based on the statistical analysis results of actual data and the influence of train stopping level weights on the recovery time utilization rate, a recovery time layout optimization model maximizing the recovery time utilization rate was established. The case analysis results show that compared with

收稿日期：2024-10-16　　**修订日期**：2026-01-05
通信作者：黄平(1990—)，男，四川宜宾人，西南交通大学交通运输与物流学院副教授。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)；国家自然科学基金项目(72301221)

the original train working diagram, the recovery time utilization rate of the proposed model is significantly improved by 12.70%; the model considering train stopping level weights improves the recovery time utilization rate by 2.57% compared with the model without considering it, indicating that the train stopping level is one of the factors influencing the layout and utilization of recovery time.
Keywords: High Speed Railway; Actual Data; Train Working Diagram; Recovery Time; Optimization Model

0　引言

冗余时间是列车运行图中用于消除或减少列车运行干扰不良影响的资源，当列车在日常运行过程中受到外界干扰而发生延误时，冗余时间可以“吸收”延误时间，使列车尽量按图运行。冗余时间包括车站冗余时间、区间冗余时间、线间冗余时间等。冗余时间使运行图保持一定弹性的同时也会降低运行图能力或降低列车旅行速度[1]。合理地设置冗余时间，可以在列车受到干扰时尽快恢复晚点，提高运行图稳定性。

目前国内外对冗余时间优化的研究主要分为传统优化方法和数据驱动方法2类。文献[2-11]通过传统优化建模的方法对运行图冗余时间优化布局进行优化，在冗余时间优化思路方面各不相同。邓鹏[2]探讨冗余时间设置在旅行速度和运行图动态性能二者之间的平衡。Andersson等[3]提出了一种新的鲁棒性度量，定义了临界点测量稳健性(RCP)，认为时刻表临界点的数目、位置和相应的RCP值构成了衡量某一列车时隙或完整时刻表稳健性的有用指标。Meng等[4]根据启发式技术来寻找列车时刻表中冗余时间的最佳位置。以列车的平均延误时间最小为目标，提出了一种重新分配列车时刻表余量的模型。Burggraeve等[5]在考虑乘客数量的同时，构造一个优化列车间缓冲时间的时间表，最大化列车对之间的最小缓冲时间之和。Lee等[6]将列车时刻表的鲁棒性与效率的平衡作为优化问题，开发了基于仿真的列车时刻表改进启发式算法，有效地调整时间补充和冗余时间。蒋沐弘等[7]利用压缩列车运行图思想，建立列车运行图压缩模型，在获取列车运行图中可利用的总冗余时间容量后基于列车运行线协同优化思想，建立列车运行图冗余时间优化分配模型。刘伯鸿等[8]以列车旅行时间和列车到发站延误时间最短为优化目标，建立运行图冗余时间优化布局模型。牛宏侠等[9]提出了一种同时优化车站冗余时间与区间冗余时间的同步优化模型，该模型平衡了引起延误吸收效果不理想的冗余时间不足和双重冗余之间的关系。李智等[10]基于多线路协同优化和多目标协同优化的思想，讨论不同情况下缓冲时间的权重，研究多条线路列车运行图的协同优化。孟令云等[11]构建列车运行图冗余时间优化布局的带补偿的随机期望值的双层规划模型框架。

文献[12-16]基于列车运行数据运用数据驱动方法对运行图冗余时间进行研究。周政铎等[12]根据列车实际运行数据统计得到各区间平均运行晚点，根据历史客流数据得到各站客流权重，建立以旅客到达晚点总期望最小为目标的冗余时间布局优化模型。黄德青等[13]通过历史数据分析列车运行冗余时间与晚点恢复之间的关系，提出一种多车站延误情况下冗余时间再分配方案。Huang等[14]提出了一个岭回归模型来解释晚点恢复时间、车站冗余时间、区间冗余时间和晚点时间之间的关系，结合历史列车运行数据来优化已公布时刻表中各区间和车站的冗余时间分配。徐欣仪等[15]提出了一种基于深度强化学习模型的冗余时间布局优化方法，基于武广高速铁路列车运行实绩，探究冗余时间利用与晚点时空分布的动态影响关系。孙雅露等[16]基于列车运行实际数据，建立基于晚点恢复效率最大的高速铁路冗余时间优化模型。

文献分析表明：传统优化方法和数据驱动方法在研究运行图冗余时间优化上各有优劣。现有传统方法没有实际大数据技术作为支持，且在大规模问题上求解效率低，但模型目标及约束考虑全面；数据驱动方法以列车运行实际数据作为支持，求解效率高，但冗余时间优化部分通常模型较为简单，考虑因素较为单一。因此，冗余时间布局优化需要结合2种方法的优点。研究基于列车运行实际数据挖掘冗余时间布局和利用规律，全面考虑优化目标和影响因素，建立冗余时间布局数学优化模型，并以中大规模实例验证模型的可行性。

1　问题描述

列车运行过程如图1所示，设某一高速铁路线路具有N个车站，K个区间，K=N−1。车站依次编号为1，2，…，N；区间依次编号为1，2，…，K；在列车i运行过程中受干扰影响发生延误后，通过吸取车站冗余时间$ST_{i,\,n}$和区间冗余时间$RT_{i,\,k}$来吸收晚点，使列车尽快恢复晚点。由于干扰发生的不确定性、区间横纵断面差异以及车站客流量差异，各区间和各车站冗余时间的实际需求可能不同。因此，冗余时间分配需根据各区间和车站冗余时间需求合理分配。列车运行实际数据中包含了各区间和车站冗余时间利用信息，以列车运行实际数据为基础，挖掘各区间和车站冗余时间利用率，基于利用率优化运行图中冗余时间布局，将可进一步提升冗余时间利用率，提升运行图鲁棒性，减少列车晚点。因此，本研究中，列车运行图冗余时间布局优化问题为在不改变列车停站、越行、始发终到时间的条件下，考虑列车晚点频率、冗余时间利用率等因素，通过改变运行图中车站和区间冗余时间的分布，使列车发生晚点后的冗余时间利用率最大。

2　冗余时间布局优化

2.1　超利用率和超利用系数的定义和计算

冗余时间利用量为用于恢复列车晚点的冗余时间量，一般可表示为晚点恢复时间；现有对运行图冗余时间布局优化的研究通常以提升冗余时间利用量为目标，但忽略了冗余时间的利用效率；利用量高可能是因为冗余时间设置过长，但冗余时间利用率可能较低，导致运行图资源的浪费。而以提升冗余时间利用率为优化目标可以综合评估冗余时间的利用效率，避免通过单纯延长冗余时间的资源浪费，更加高效地减少列车晚点时间。

冗余时间利用率是衡量运行图冗余时间利用的核心指标，是列车发生晚点后利用的冗余时间占运行图中布局的冗余时间的百分比。冗余时间利用量和冗余时间利用率示意图如图2所示，蓝色为列车标准作业时分，黄色为运行图布局的冗余时间，红色为列车实际运行时发生延误后利用的冗余时间，冗余时间利用率为红色占黄色的比例；列车延误时间不同可能导致冗余时间利用程度不同，范围在[0，1]区间，0表示未利用冗余时间，1表示完全利用了冗余时间，区间内的数值表示具体利用的程度。冗余时间利用率是列车冗余时间利用量与运行图中布局的冗余时间之比，如公式(1)所示。

$$\varphi = \frac{T}{R} \times 100\% \tag{1}$$

式中：φ表示冗余时间利用率；T表示晚点恢复时间，min；R表示冗余时间，min。

因此，最大化冗余时间利用量优化冗余时间布局存在一定的局限性，研究以最大化冗余时间利用率为优化目标，使运行图冗余时间更加布局合理化，进而提出冗余时间超利用率的概念；冗余时间超利用率用来表示冗余时间利用率的提升效率(冗余时间利用率的变化速度)。超利用率在现有冗余时间利用率计算公式的基础上进行推导，通过冗余时间利用率和冗余时间之比计算，如公式(2)所示。

$$\eta = \frac{\varphi}{R} \tag{2}$$

式中：η表示冗余时间超利用率；φ表示冗余时间利用率；R表示冗余时间，min。

由于冗余时间超利用率是基于每列车在每个车站和区间计算的指标，只能体现出单列车的运行状态，以此优化冗余时间布局受偶然因素影响较大，随机性较强。因此，研究在冗余时间超利用率的基础上，结合数据驱动思想提出超利用系数的概念。在大量列车运行实际数据中，超利用系数通过统计不同车站和区间的冗余时间超利用率与列车数的关系，得到冗余时间的空间利用规律和特点，受单列车的偶然因素影响较小。另外，超利用系数与运行图冗余时间相乘可以估算运行图冗余时间的总利用

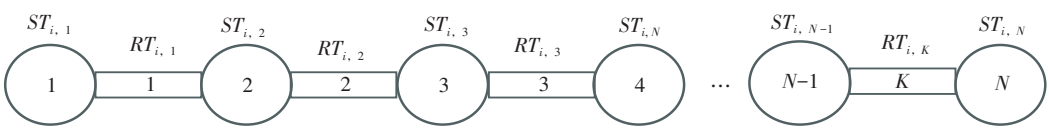

图1　列车运行过程

Fig.1　Train operation process

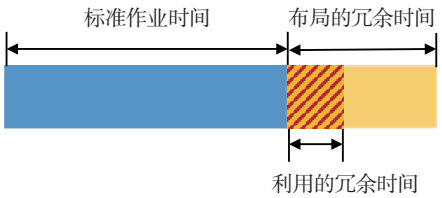

图2　冗余时间利用量和冗余时间利用率示意图

Fig.2　Schematic diagram of recovery time usage and utilization rate

率。超利用系数分为车站和区间的超利用系数分别计算。车站超利用系数为当列车在车站停站且列车发生晚点时，在本车站参与计算的列车车站冗余时间超利用率之和除以参与计算的列车数，如公式(3)所示。区间超利用系数为当列车在区间运行发生晚点时，在本区间参与计算的列车区间冗余时间超利用率之和除以参与计算的列车数，如公式(4)所示。

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^{N} SU_{i,\,n}}{N_n} \tag{3}$$

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^{k} RU_{i,\,k}}{N_k} \tag{4}$$

式中：α_n表示车站n的超利用系数；$SU_{i,\,n}$表示列车i在车站n的超利用率；N_n表示在车站n停站且发生晚点的列车数，列；β_k表示列车i在区间k的超利用系数；$RU_{i,\,k}$表示列车i在区间k的超利用率；N_k表示在区间k发生晚点的列车数，列。

2.2　冗余时间布局优化模型

为了便于表述，模型参数变量如表1所示。

冗余时间利用率作为衡量冗余时间设置合理化的关键指标，直接反映出运行图冗余时间布局和利用的程度。如上文所述，研究以列车冗余时间利用率最大为优化目标，目标函数表示为公式(5)—(6)。

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{M_n}\alpha_n(ST_{i,\,n} + SV_{i,\,n}) + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{M_k}\beta_k(RT_{i,\,k} + RV_{i,\,k}) \tag{5}$$

目标函数同时考虑列车停站等级对冗余时间布局的影响。对车站和区间分别加入列车停站等级权重系数，对应不同列车停站等级乘以相应的权重，如公式(6)所示，并对权重进行归一化处理，权重之和为1，与公式(5)对比列车停站等级权重对目标函数的影响。

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{M_n} SW_i\alpha_n(ST_{i,\,n} + SV_{i,\,n}) + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{M_k} RW_i\beta_k(RT_{i,\,k} + RV_{i,\,k}) \tag{6}$$

表1　模型参数变量

Tab.1　Model parameter variables

参数	说明
i	列车顺序，1，2，…，I
n	车站顺序，1，2，…，N
k	区间顺序，1，2，…，K(K=N−1)
$ST_{i,\,n}$	列车i在车站n的冗余时间，min
$RT_{i,\,k}$	列车i在区间k的冗余时间，min
$SV_{i,\,n}$	列车i在车站n的冗余时间调整量(决策变量)
$RV_{i,\,k}$	列车i在区间k的冗余时间调整量(决策变量)
α_n	车站n的超利用系数
β_k	区间k的超利用系数
M_n	车站n停站的列车数，列
M_k	区间k经过的列车数，列
SW_i	列车车站等级权重系数
RW_i	列车区间等级权重系数
$t^d_{i,\,n}$	列车i在车站n的出发时刻
$t^a_{i,\,n}$	列车i在车站n的到达时刻
$t^d_{i,\,k}$	列车i在区间k前站的出发时刻
$t^a_{i,\,k}$	列车i在区间k后站的到达时刻
$d^{\min}_n$	车站n的最小停站时间，min
$d^{\min}_k$	区间k的最小运行时间，min
$ST^{\max}_n$	车站n的最大冗余时间，min
$RT^{\max}_k$	区间k的最大冗余时间，min
$I_{\min}$	列车最小追踪间隔，min

研究基于列车运行实际数据建立冗余时间布局优化模型，目标函数中车站和区间的超利用系数基于列车运行实际数据计算确定，列车停站等级权重也根据数据中车站和区间的冗余时间利用率所占比例计算得来，体现了数据驱动与优化模型结合的思想。

模型具有以下约束条件。

（1）车站约束。车站出发时刻等于到达时刻加停站时间，停站时间计算方法为车站最小停站时间加车站冗余时间，如公式(7)所示。同时，车站冗余时间不小于0，且不大于列车在车站的最大冗余时间，如公式(8)所示，最大冗余时间通过列车运行实际数据确定。

$$t^d_{i,\,n} = t^a_{i,\,n} + d^{\min}_n + (ST_{i,\,n} + SV_{i,\,n}) \tag{7}$$

$$0 \leqslant ST_{i,\,n} + SV_{i,\,n} \leqslant ST^{\max}_n \tag{8}$$

（2）区间约束。区间出发时刻等于到达时刻加区间运行时间。区间运行时间计算方法为区间最小

运行时间加区间冗余时间，如公式(9)所示。另外，区间冗余时间不小于0，且不大于列车在区间的最大冗余时间，如公式(10)所示，最大冗余时间通过列车运行实际数据确定。

$$t^{a}_{i,k} = t^{d}_{i,k} + d^{\min}_{k} + (RT_{i,k} + RV_{i,k}) \tag{9}$$

$$0 \leqslant RT_{i,k} + RV_{i,k} \leqslant RT^{\max}_{k} \tag{10}$$

（3）冗余时间总和不变约束。本研究在原运行图的基础上提升弹性，不改变运行图中列车的始发、终到时刻，可保证运行线路的总运行时长保持不变，使优化前后每列车的区间和车站冗余时间总量保持不变，如公式(11)所示。该约束可使模型不通过额外增加列车运行时间提升运行图弹性。

$$\sum_{n=1}\sum_{k=1}(ST_{i,n} + RT_{i,k}) = \sum_{n=1}\sum_{k=1}\left[(ST_{i,n} + SV_{i,n}) + (RT_{i,k} + RV_{i,k})\right] \tag{11}$$

（4）冗余时间调整量约束。由于超利用系数大小有明显差异，冗余时间布局容易受到超利用系数大小的影响而优先分配给系数大的车站和区间；因此设定车站和区间的冗余时间调整量不超过原冗余时间的50%，如公式(12)—(13)所示。

$$SV_{i,n} \leqslant 0.5ST_{i,n} \tag{12}$$

$$RV_{i,k} \leqslant 0.5RT_{i,k} \tag{13}$$

（5）追踪间隔约束。同一车站的相邻2列车的到达间隔和出发间隔大于等于列车最小追踪间隔，如公式(14)—(15)所示。

$$t^{a}_{i,n} - t^{a}_{i-1,n} \geqslant I_{\min} \tag{14}$$

$$t^{d}_{i,n} - t^{d}_{i-1,n} \geqslant I_{\min} \tag{15}$$

2.3　模型求解

研究建立的冗余时间布局优化模型属于线性整数规划问题，此类问题由于线性和整数规划的特点，通常采用商业求解器求解。选用Python软件中强大的线性规划(LP)和混合整数线性规划(MILP)建模工具PuLP的默认CBC求解器求解，算法流程如图3所示。

CBC是一个开源的混合整数线性规划求解器，算法原理是使用启发式算法生成初始可行解，再基于分支定界法逐步缩小可行解的范围，最终找到全局最优解。使用启发式算法可以减少分支定界的分支数，大幅度提升求解的速度和效率，但其算法的核心仍然是基于分支定界法的精确求解。CBC求解器计算时间短，配置灵活，广泛兼容多种编程语言

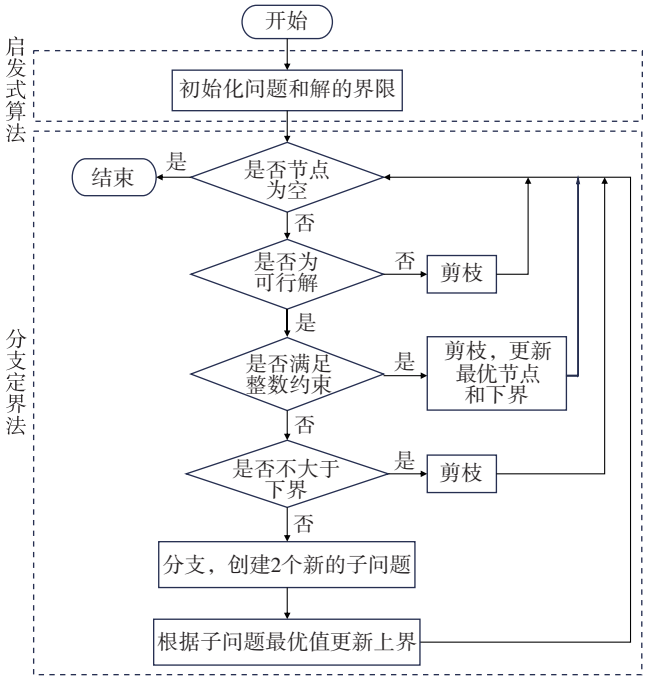

图3　算法流程

Fig.3　Algorithm flow

和建模工具，在中小规模问题表现较好，适用于求解研究建立的优化模型。

3　案例分析

3.1　数据描述与分析

研究选取2018年1—6月厦深铁路(厦门北—深圳北)中国铁路广州局集团有限公司管内12个车站上行的列车运行实际数据。数据包含每天各列车在各车站的到达、出发或通过时间。部分原始数据如表2所示。

表2　部分原始数据

Tab.2　Partial raw data

车次	车站	实际到达时间	实际出发时间	图定到达时间	图定出发时间
列车1	深圳北	2018-02-27 14:31:00	2018-02-27 14:31:00	2018-02-27 14:33:00	2018-02-27 14:33:00
列车2	潮汕	2018-04-05 13:07:00	2018-04-05 13:07:00	2018-04-05 13:11:00	2018-04-05 13:11:00

列车停站时间、区间运行时间、冗余时间、晚点恢复时间等参数均由原始数据计算得出。列车停站时间为列车出发时间与到达时间的差值；区间运行时间为后站到达时间与前站出发时间的差值，同时考虑区间两端是否停站，停站则额外考虑列车起停时分；车站冗余时间为车站停站时间和最小停站

时间的差值，最小停站时间通过列车运行实际数据获得；区间冗余时间为区间运行时间和最小运行时间的差值，最小运行时间通过列车运行实际数据获得；晚点恢复时间为列车出发晚点和到达晚点的差值，晚点恢复时间小于0，则列车恢复晚点，大于0则列车增加晚点。

3.2　冗余时间布局规律及利用分析

高速铁路列车运行图的冗余时间布局通过各车站和区间的平均冗余时间体现，而冗余时间利用通过平均晚点恢复时间体现。列车在运行过程中通过区间冗余时间和车站冗余时间吸收晚点，但区间冗余时间主要影响列车速度，而车站冗余时间主要影响列车在车站的停站时间。此外，车站停站时间主要受到旅客乘降的影响，因此车站冗余时间利用往往较低。车站冗余时间布局及利用如图4所示，区间冗余时间布局及利用如图5所示，分别显示了基于列车运行实际数据挖掘的各车站和区间的平均冗余时间和平均晚点恢复时间情况，由图直观地看出车站冗余时间和晚点恢复时间相比区间明显偏小，且车站和区间都存在冗余时间和晚点恢复时间不匹配的情况。以车站冗余时间为例，深圳北站的车站冗余时间相比平均晚点恢复时间明显偏小，说明该站冗余时间设置不足，而潮汕站的车站冗余时间相比平均晚点恢复时间明显偏大，说明该站冗余时间设置过多，区间也存在类似情况，说明冗余时间布局存在可优化的空间。

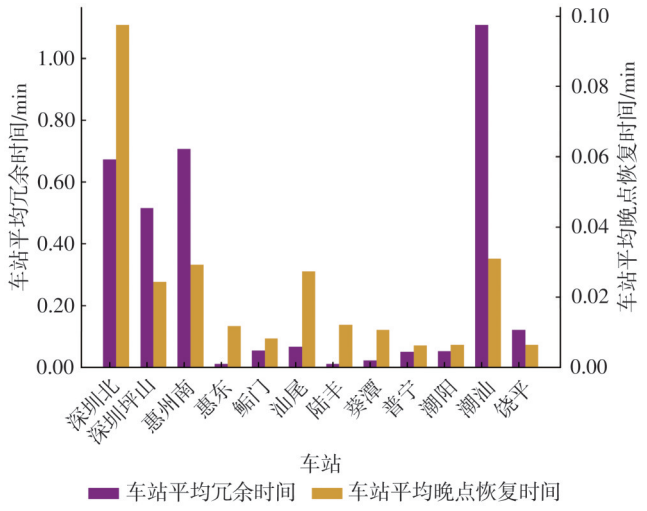

图4　车站冗余时间布局及利用

Fig.4　Station recovery time layout and utilization

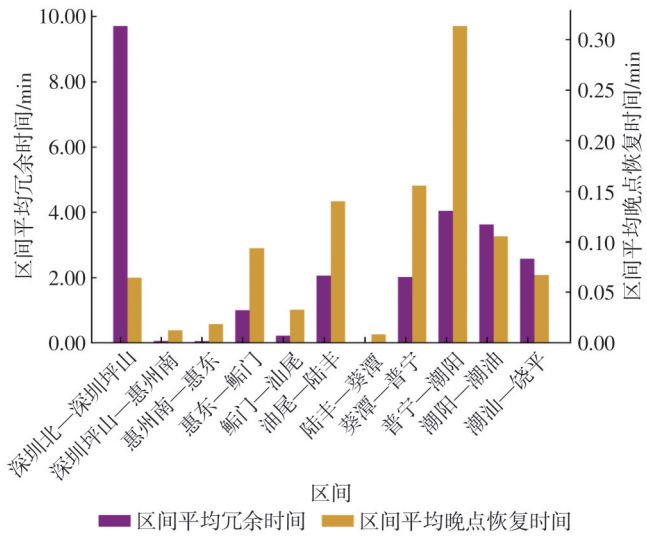

图5　区间冗余时间布局及利用

Fig.5　Section recovery time layout and utilization

高速铁路由于旅客出行习惯和通勤需求通常会有明显的高峰和非高峰时段，研究考虑不同运营时段中冗余时间布局和利用的差异，体现高峰期与非高峰期对高速铁路列车在冗余时间布局的影响。高速铁路列车运营时间通常在6:00—24:00之间，研究以1 h为间隔划分列车运营时段。不同运营时段中区间冗余时间布局及利用如图6所示，区间冗余时间布局高峰期主要集中在6:00—8:00，但利用情况几乎为0，其余时间段内冗余时间布局和利用差异较小，说明运营时段对于区间冗余时间布局和利用的影响不大。不同运营时段中车站冗余时间布局及利用如图7所示，车站冗余时间布局高峰期主要

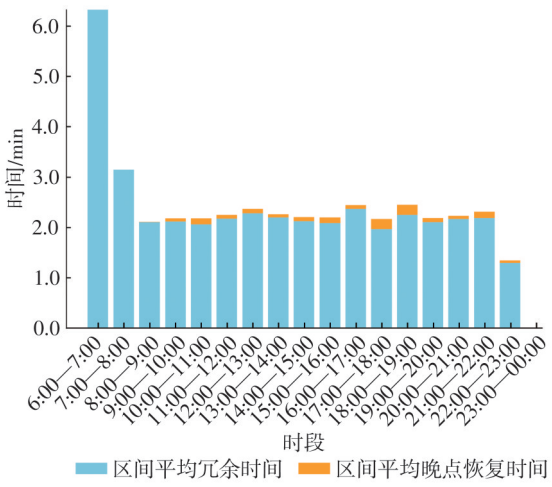

图6　不同运营时段中区间冗余时间布局及利用

Fig.6　Layout and utilization of section recovery time in different operating periods

集中在8:00—9:00、12:00—13:00和18:00—19:00，其余时间段内冗余时间布局和利用情况差异明显，说明车站冗余时间布局和利用一定程度上受运营高峰时段的影响，且车站和区间对于运行图冗余时间布局和利用的高峰期不同。

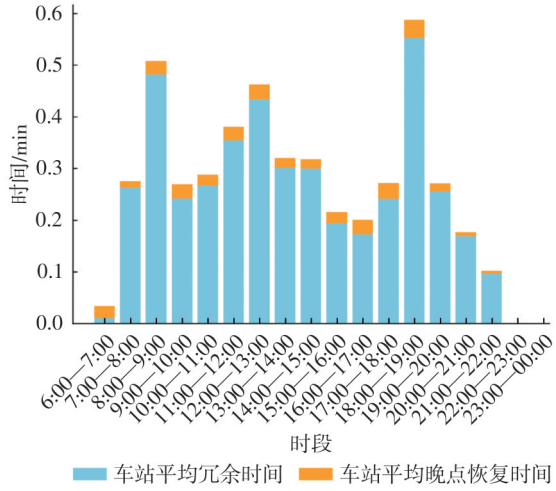

图7　不同运营时段中车站冗余时间布局及利用

Fig.7　Layout and utilization of station recovery time in different operating periods

高速铁路列车运行图冗余时间的利用情况最直观的反映就是利用率大小，车站平均冗余时间利用率如图8所示，区间平均冗余时间利用率如图9所示，各车站和区间的平均冗余时间利用率都明显偏小，车站平均冗余时间利用率分布在0%~5%之间，区间平均冗余时间利用率分布在0%~10%之间，利用率不足十分之一，说明冗余时间利用率普遍偏低，运行图冗余时间布局存在很大的优化空间，本研究具有一定的理论和现实意义。

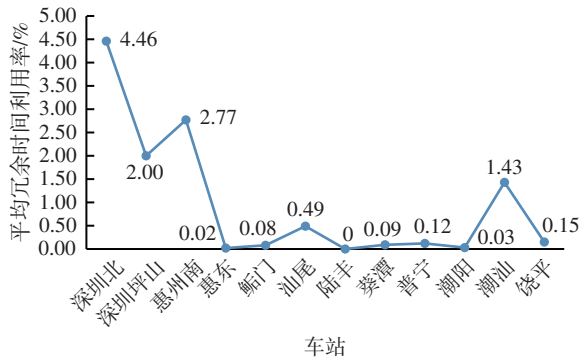

图8　车站平均冗余时间利用率

Fig.8　Average recovery time utilization rate of station

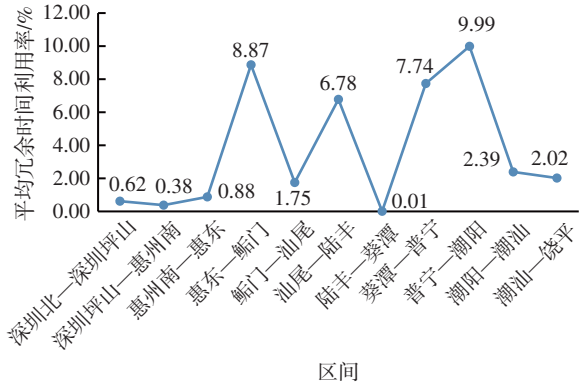

图9　区间平均冗余时间利用率

Fig.9　Average recovery time utilization rate of section

另外，区间平均冗余时间利用率普遍大于车站，也存在部分车站和区间利用率明显偏小的情况。冗余时间利用率偏小的原因主要是冗余时间设置不足和晚点发生较少2个原因导致，结合图4、图5的冗余时间布局和利用可知，各车站和区间的晚点恢复时间相比冗余时间较多，说明车站和区间冗余时间利用率偏小主要是因为冗余时间设置不足导致，如惠东、陆丰、葵潭站，鲘门—汕尾、陆丰—葵潭区间，冗余时间相比晚点恢复时间明显偏小，导致利用率偏小。但也存在虽然冗余时间设置足够但利用率仍偏小，如深圳北—深圳坪山区间，说明此区间设置冗余时间过多。因此，合理地设置冗余时间对提高冗余时间利用率至关重要。

3.3　冗余时间超利用系数及列车停站等级确定

（1）冗余时间超利用系数计算。根据2.1节超利用系数的计算方法，对2018年1—6月厦深铁路列车运行实际数据分别计算各车站和区间的超利用系数。计算时排除个别异常数据，如冗余时间利用率大于1的数据不参与超利用系数的计算。最终得到厦深铁路车站超利用系数如表3所示，厦深铁路区间超利用系数如表4所示。冗余时间超利用系数作为冗余时间布局优化模型的关键，将作为模型目标函数系数参与求解，并以此计算案例中初始的冗

表3　厦深铁路车站超利用系数

Tab.3　Over-utilization coefficients of stations on Xiamen-Shenzhen Railway

车站	深圳北	深圳坪山	惠州南	惠东	鲘门	汕尾	陆丰	葵潭	普宁	潮阳	潮汕	饶平
超利用系数	0.001 0	0.424 9	0.368 8	0.001 6	0.010 7	0.029 1	0	0.006 5	0.022 2	0.003 2	0.216 5	0.092 0

表4　厦深铁路区间超利用系数

Tab.4　Over-utilization coefficients of sections on Xiamen-Shenzhen Railway

区间	深圳北—深圳坪山	深圳坪山—惠州南	惠州南—惠东	惠东—鲘门	鲘门—汕尾	汕尾—陆丰	陆丰—葵潭	葵潭—普宁	普宁—潮阳	潮阳—潮汕	潮汕—饶平
超利用系数	0.024 6	0.025 5	0.065 1	0.553 1	0.110 1	0.205 8	0.000 7	0.254 9	0.195 9	0.138 1	0.120 3

余时间利用率。

（2）基于停站比率的列车停站等级确定。本冗余时间优化模型将考虑不同列车等级的影响。通常列车等级以城际、动车、高铁划分，但列车冗余时间的布局和利用与列车停站密切相关。通过分类统计不同列车等级的停站比率，分类统计停站如表5所示，发现列车等级与停站比率有一定关系但不密切相关。因此，在冗余时间优化过程中，研究提出列车停站等级，即以列车停站比率对列车停站等级进行重新划分，并在后续的冗余时间布局优化模型中应用，通过考虑不同列车停站等级的影响进而提高高速铁路列车运行图冗余时间利用率。

表5　分类统计停站　%

Tab.5　Classified statistics of stopping

列车等级	停站比率			
	0~25	25~50	50~75	75~100
G字头列车	8.2	91.8	0	0
D字头列车	18.8	79.9	1.3	0
C字头列车	44.3	47.9	7.8	0

由于原始数据集中列车停站比率都集中在0%~75%，因此列车停站等级划分为3个等级。当列车停站比率在0%~25%时，列车停站等级为1；当列车停站比率在25%~50%时，列车停站等级为2；当列车停站比率在50%~75%时，列车停站等级为3。在优化模型建立时，对不同停站等级的列车相应确定不同的权重。

根据列车运行实际数据计算不同列车停站等级下车站和区间的平均冗余时间利用率，车站和区间平均冗余时间利用率对比如图10所示。由图可知，列车停站等级越高车站冗余时间利用率越大，区间冗余时间利用率越小，说明在停站比率较小时，列车更多地利用区间冗余时间，随着停站比率增加，列车利用车站冗余时间越来越多。因此，在确定列车停站等级权重时要综合考虑车站和区间冗余时间利用率的利用规律，列车停站比率越大，即列车停站等级越高的列车，在冗余时间布局优化时车站赋予更高的权重，区间赋予更低的权重，权重具体数值根据列车运行实际数据中不同列车停站等级的平均冗余时间利用率确定。

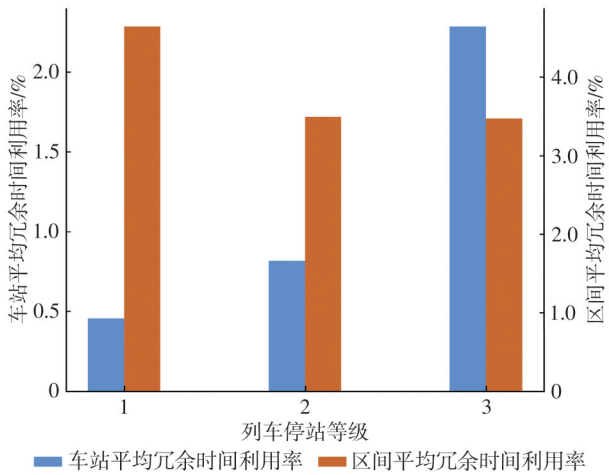

图10　车站和区间平均冗余时间利用率对比

Fig.10　Comparison of average recovery time utilization rates between stations and sections

3.4　案例介绍及参数确定

研究以厦深铁路深圳北—饶平段上行列车运行图为研究对象，选取厦深铁路2018年3月3日开行的104列上行列车对建立的运行图冗余时间优化模型进行验证。

根据列车运行实际数据得到最小和最大停站时间、最小和最大区间运行时间，停站参数如表6所示，区间参数如表7所示。厦深铁路列车起停时间为2 min，最小追踪间隔为3 min。

表6　停站参数　min

Tab.6　Stopping parameters

车站	深圳北	深圳坪山	惠州南	惠东	鲘门	汕尾	陆丰	葵潭	普宁	潮阳	潮汕	饶平
最小停站时分	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2
最大停站时分	25	16	7	7	7	6	3	7	7	8	10	9

表7　区间参数　　min

Tab.7　Section parameters

区间	深圳北—深圳坪山	深圳坪山—惠州南	惠州南—惠东	惠东—鲘门	鲘门—汕尾	汕尾—陆丰	陆丰—葵潭	葵潭—普宁	普宁—潮阳	潮阳—潮汕	潮汕—饶平
最小运行时分	9	6	10	10	10	10	9	9	9	9	13
最大运行时分	27	10	12	12	16	14	10	14	20	25	26

权重的设置根据列车运行实际数据确定，计算不同列车停站等级下车站和区间冗余时间平均利用率，进行归一化处理确定不同列车停站等级下的权重。由于车站和区间在不同停站等级下的冗余时间利用率不同，对车站和区间分别计算冗余时间利用率所占比例，发现车站平均冗余时间利用率随着列车停站等级增加而变大，而列车停站等级越大，区间平均冗余时间利用率越小。综上，为了同时考虑车站和区间的影响，将车站和区间所占比例按大小取平均，计算得到权重大小分别为0.21，0.26，0.53，再根据列车停站等级分配权重，列车等级越高的权重越大。车站和区间列车平均利用率及权重如表8所示。

表8　车站和区间列车平均利用率及权重

Tab.8　Average utilization rate and weight of trains at stations and sections

列车停站等级	1	2	3
车站平均冗余时间利用率	0.004 6	0.008 2	0.022 8
车站平均冗余时间利用率所占比例	0.130 0	0.230 0	0.640 0
区间平均冗余时间利用率	0.045 0	0.037 1	0.036 3
区间平均冗余时间利用率所占比例	0.410 0	0.300 0	0.290 0
权重	0.530 0	0.260 0	0.210 0

3.5　模型求解及结果分析

冗余时间布局优化模型采用Python软件建模工具PuLP的默认CBC求解器求解，根据求解器的输出分析求解结果如下：单次求解时间为CPU时间与实际时间之和，约为57 s，但是由于其他因素(如读取数据、加载问题、初始化等)，单次总求解时间约为86 s。此外，模型在限定的迭代次数20次，收敛阈值为1e~6内得到收敛。

（1）求解结果。经过求解研究建立的冗余时间布局优化模型，得到冗余时间优化前后运行图对比如图11所示，图中优化前后的列车运行(轨迹)线不重叠，表明模型优化了冗余时间分配方案；同时，该图满足最小追踪间隔、停站和区间运行的限制，

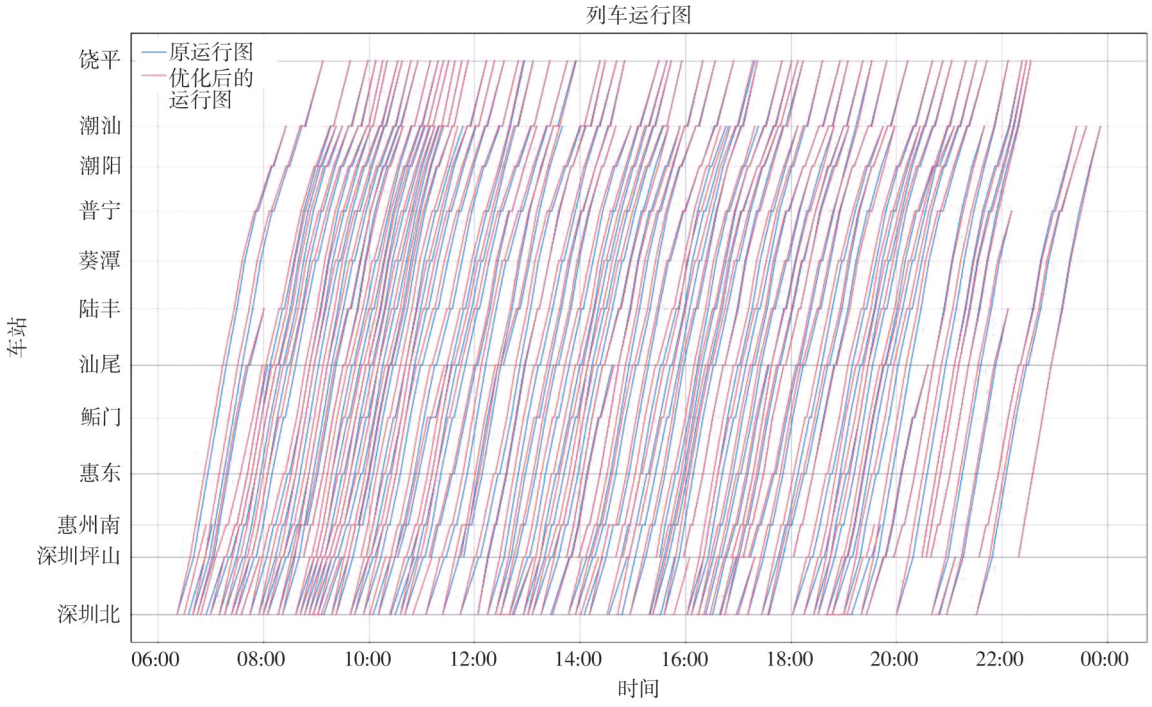

图11　优化前后运行图对比

Fig.11　Comparison of train working diagrams before and after optimization

验证了模型的可行性。

（2）模型对比分析。求解结果中，各车站和区间不同情况下冗余时间利用对比如表9所示。原运行图冗余时间布局根据超利用系数计算得到的目标函数值冗余时间利用率之和为337.37，优化后的目标函数为380.21，冗余时间利用率提升了12.70%。同时可以看出区间相比车站优化后提升幅度更大，这也与前文分析区间的冗余时间和晚点恢复时间都明显大于车站相匹配，说明以冗余时间利用率角度对冗余时间布局优化，主要对区间冗余时间布局进行优化。

表9　不同情况下冗余时间利用对比

Tab.9　Recovery time utilization comparison under different scenarios

冗余时间利用	原运行图冗余时间利用	优化后的冗余时间利用	考虑列车等级权重的冗余时间利用
车站	71.05	81.69	81.52
区间	266.32	298.52	308.48
总和	337.37	380.21	390.00

同时，考虑列车停站等级权重的目标函数值为390.00，相比原运行图提升了15.60%，相比没有考虑权重的目标函数提升了2.57%，说明考虑列车停站等级权重对优化运行图冗余时间布局、提高冗余时间利用率有一定作用。

4　结论

研究提出了一种新的高速铁路列车运行图冗余时间反馈优化方法，基于列车运行实际数据的统计分析结果建立冗余时间布局优化模型，得到的结论如下。

（1）通过分析列车运行实际数据得到冗余时间的布局和利用规律，根据统计分析方法计算各车站和区间的超利用系数，为优化模型的建立奠定基础。

（2）引入列车停站等级，以停站比率对列车类型进行重新划分，在目标函数中通过是否考虑列车停站等级权重进行对比，体现列车停站等级对冗余时间布局的影响。优化结果表明，考虑列车停站等级权重相比未考虑的目标函数，冗余时间利用率提升了2.57%；相比原运行图，冗余时间利用率提升了15.60%。说明列车停站等级是提高运行图冗余时间利用率的影响因素，未来可以作为编制高速铁路列车运行图冗余时间布局的考虑因素。

（3）以厦深铁路上行深圳北—饶平段1 d的运行图进行优化，优化结果显示相比原运行图，冗余时间布局更加合理，冗余时间利用率大幅度提升。说明本方法对优化运行图冗余时间布局起到一定作用。但本方法只在不改变列车停站和越行前提下对冗余时间进行重新分配和优化，未来可以从改变运行图结构入手对运行图冗余时间布局进行进一步的优化。

参考文献：

[1] 宁骥龙，马　驷. 多种冗余时间并存对运行图能力的影响分析[J]. 铁道运输与经济，2014，36(3)：17-22.
NING Jilong，MA Si. Analysis on Influence of Coexistence of Diversified Redundant Time on Train Working Diagram Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(3)：17-22.

[2] 邓　鹏. 关于我国高速铁路列车运行图缓冲时间的研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2014，12(3)：68-74.
DENG Peng. Study on High Speed Train Diagram Buffer Time of China[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2014，12(3)：68-74.

[3] ANDERSSON E V，PETERSON A，TÖRNQUIST KRASEMANN J. Quantifying Railway Timetable Robustness in Critical Points[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management，2013，3(3)：95-110.

[4] MENG L Y，MUNEEB ABID M，JIANG X G，et al. Increasing Robustness by Reallocating the Margins in the Timetable[J]. Journal of Advanced Transportation，2019，2019(1)：1382394.

[5] BURGGRAEVE S，VANSTEENWEGEN P. Optimization of Supplements and Buffer Times in Passenger Robust Timetabling[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management，2017，7(3)：171-186.

[6] LEE Y，LU L S，WU M L，et al. Balance of Efficiency and Robustness in Passenger Railway Timetables[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2017，97：142-156.

[7] 蒋沐弘，郑屹桐，李　帅，等. 普速铁路列车运行图缓冲时间优化分配研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(6)：6-14.
JIANG Muhong，ZHENG Yitong，LI Shuai，et al. Research on Optimal Allocation of Buffer Time for Train Timetable of Conventional Railway[J]. Railway Transport and Economy，

2021，43(6)：6-14.

[8] 刘伯鸿，令小宁，吕振扬．高铁列车运行图冗余时间优化布局方法研究[J]. 计算机工程与应用，2016，52(7)：248-252.
LIU Bohong，LING Xiaoning，LYU Zhenyang. Research of Model and Algorithms for Redundant Time Optimized Layout in Train Timetabling Process on High Speed Railway[J]. Computer Engineering and Applications，2016，52(7)：248-252.

[9] 牛宏侠，宁　正，张肇鑫．高铁列车运行图车站与区间冗余时间同步优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息，2019，19(3)：96-102.
NIU Hongxia，NING Zheng，ZHANG Zhaoxin. Synchronous Optimization Model of Station Redundant Time and Interval Redundant Time in High Speed Railway Train Working Diagram[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2019，19(3)：96-102.

[10] 李　智，张　琦，孙延浩，等．高速铁路列车运行图鲁棒性协同优化模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2019，19(5)：169-176.
LI Zhi，ZHANG Qi，SUN Yanhao，et al. Robustness Collaborative Optimization Model for High Speed Railway Train Timetable[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2019，19(5)：169-176.

[11] 孟令云，冉　锋，王志强．高速铁路列车运行图冗余时间优化布局系统研究[J]. 铁路计算机应用，2012，21(6)：28-30，34.
MENG Lingyun，RAN Feng，WANG Zhiqiang. Research on Redundant Time Optimized Layout System in Train Timetabling Process on High Speed Railway[J]. Railway Computer Application，2012，21(6)：28-30，34.

[12] 周政铎，周　黎，李　博．面向旅客到达晚点最小的高速铁路列车运行图冗余时间布局优化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(2)：25-32.
ZHOU Zhengduo，ZHOU Li，LI Bo. Optimization of Buffer Time Layout of High Speed Railways' Train Working Diagram for Minimizing Passengers' Arrival Delay[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(2)：25-32.

[13] 黄德青，倪陈佳，秦　娜，等．考虑最小延误状态的车站冗余时间再分配研究[J]. 中国安全科学学报，2022，32(6)：66-72.
HUANG Deqing，NI Chenjia，QIN Na，et al. Research on Redundant Time Reallocation at Stations for Purpose of Minimum Delay[J]. China Safety Science Journal，2022，32(6)：66-72.

[14] HUANG P，WEN C，PENG Q Y，et al. A Data-Driven Time Supplements Allocation Model for Train Operations on High Speed Railways[J]. International Journal of Rail Transportation，2019，7(2)：140-157.

[15] 徐欣仪，黄　平，文　超，等．基于深度强化学习的列车运行图冗余时间布局优化研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2023，21(3)：161-176.
XU Xinyi，HUANG Ping，WEN Chao，et al. Time Supplements Allocation Model for Railway Timetables Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2023，21(3)：161-176.

[16] 孙雅露，田文华，冯丽萍，等．基于晚点恢复效率最大的高速铁路冗余时间优化模型[J]. 综合运输，2022，44(12)：84-91.
SUN Yalu，TIAN Wenhua，FENG Liping，et al. Optimization Model of High Speed Rail Buffer Time Based on Maximum Delays Recovery Efficiency[J]. China Transportation Review，2022，44(12)：84-91.

(责任编辑　吴文娟)