文章编号：1003-1421(2025)12-0048-13
引用格式：范家铭，徐辉章，张婷钰，等. 基于列车运行图的高速铁路通过能力利用延误要素表征与量化分析[J]. 铁道运输与经济，2025，47(12)：48-60.
FAN Jiaming，XU Huizhang，ZHANG Tingyu，et al. Delay Element Characterization and Quantification Analysis of High Speed Railway Passing Capacity Utilization Based on Train Working Diagram[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：48-60.

基于列车运行图的高速铁路通过能力利用延误要素表征与量化分析

范家铭[1,2]，徐辉章[1,2]，张婷钰[2]，李 博[1,2]，张 新[1,2]，高天泽[3]

(1.中国铁路列车运行图技术中心，北京 100081；2.中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所，北京 100081；3.北京交通大学 交通运输学院，北京 100044)

摘 要：为探讨高速铁路通过能力利用与列车运行图的关系，在对高速铁路列车运行图编制相关研究进行梳理的基础上，建立基于运行图的能力利用表征体系。通过分析高速铁路通过能力概念内涵，研究能力利用要素转化机理，构建计划有效能力、计划无效能力、实际有效能力及实际无效能力等延误系列要素在运行图上的数学表达，并设定干扰场景算例进行实证分析。结果表明，能力利用要素可以通过运行图进行明确数学表征；以京沪高速铁路为例的实证量化分析显示，干扰持续时间与能力转化率呈显著负相关，干扰位置对能力转化影响具有差异性，延误传播具有累积放大效应，延误时长从20 min增至150 min时，列车的平均有效能力转化率从93.935%降至62.104%，为高速铁路运输能力优化和应急调度提供科学依据，提升运输可靠性和效率。

关键词：高速铁路；列车运行图；通过能力利用；能力损失；能力转化率；延误传播
中图分类号：U292.5 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250506004

Delay Element Characterization and Quantification Analysis of High Speed Railway Passing Capacity Utilization Based on Train Working Diagram

FAN Jiaming[1,2]，XU Huizhang[1,2]，ZHANG Tingyu[2]，LI Bo[1,2]，ZHANG Xin[1,2]，GAO Tianze[3]

(1. China Railway Train Working Diagram Technology Center, Beijing 100081, China; 2. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To investigate the relationship between passing capacity utilization and train working diagram in high speed railways, this study established a train working diagram-based characterization framework for capacity utilization through a systematic review of existing research on train working diagram compilation in high speed railways. By analyzing the conceptual connotation of high speed railway passing capacity and examining the transformation mechanism of capacity utilization elements, the study developed mathematical expressions within the train working diagram for delay-related elements including planned effective capacity, planned ineffective capacity, actual effective

收稿日期：2025-05-06 **修订日期**：2025-09-20
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X002)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2024YJ154)
通信作者：张婷钰(1995—)，女，河北唐山人，中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所工程师。

capacity, and actual ineffective capacity. Empirical analysis was conducted through designed interference scenarios. The results indicate that capacity utilization elements can be explicitly mathematically characterized through the train working diagram. Quantitative analysis of the Beijing–Shanghai High Speed Railway case reveals a significant negative correlation between interference duration and capacity conversion rate. The differential impact of interference location on capacity transformation is found, and delay propagation has a cumulative amplification effect. When the delay duration increases from 20 min to 150 min, the average effective capacity conversion rate decreases from 93.935% to 62.104%. This research provides scientific evidence for optimizing transportation capacity and emergency scheduling in high speed railways, thereby enhancing transportation reliability and efficiency.

Keywords: High Speed Railway; Train Working Diagram; Passing Capacity Utilization; Capacity Loss; Capacity Conversion Rate; Delay Propagation

截至2024年底，全国高速铁路运营里程突破4.8万km，承担着日均超1 000万人次的旅客运输任务。在“八纵八横”主通道加速贯通的背景下，如何通过运行图优化实现高速铁路运输能力挖潜，已成为制约铁路高质量发展的关键瓶颈。因此，聚焦高速铁路通过能力利用与列车运行图的紧密联系，构建基于运行图的能力利用表征体系，对于提升高速铁路运输效率、优化资源配置具有重要的理论意义和实践价值。研究提出基于运行图的能力利用表征体系，通过构建计划有效能力、计划无效能力、实际有效能力及实际无效能力的数学表达模型，揭示能力在规划与运营阶段间的转移路径；以运行图作为时空资源载体，建立能力利用要素的网格化表征方法，实现能力状态的精准量化与可视化；结合典型延误案例，分析干扰持续时间、位置及传播效应对能力转化的影响规律，为运行图弹性设计提供依据。研究在理论层面，突破传统静态能力评估模式，提出能力动态转化的系统性框架；基于京沪高速铁路(北京南—上海虹桥)的实证分析，量化不同干扰条件下的能力损失特征，为高速铁路应急调度与冗余资源动态配置提供研究参考。

1　高速铁路通过能力利用概述

1.1　高速铁路通过能力概述

能力是指工业部门、企业等在单位时间内可能生产产品的最高数量，是考虑生产设备和面积、工艺方法、生产组织、劳动组织以及其他要素下进行的宏观生产评估。铁路能力根据计算单位的差异，可以分为通过能力和输送能力。铁路通过能力主要从列车的视角对系统进行分析，也是关注的重点。

杨浩[1]对铁路通过能力进行了系统性定义：铁路通过能力是指在设定类型的机车、车辆和一定的行车组织方法条件下，以固定设备在单位时间内(通常指一昼夜)能放行通过的标准质量的最大列车数或列车对数。我国在20世纪末开展高速铁路建设和运营，能力概念也从既有铁路向高速铁路进行转变。赵鹏[2]给出高速铁路通过能力的参考定义：在一定客运需求条件下，采用一定类型的动车组和规定的运输组织方法，铁路区段及车站的各种固定设备在可以办理旅客列车作业的规定时间内所能通过或办理的最多列车数或对数。

铁路能力的本质可以理解为实际生产环节中的“效率”，当效率最大时，其取值即可以理解为能力。“效率”是指在给定条件下，一定时间的产品产量，效率η的计算方法为

$$\eta = \frac{N}{t} \tag{1}$$

式中：N为产品产量；t为生产产品的时间。

而能力是“效率”的最大值，即$\max \eta$。为表征最大效率η，一种方法为控制t不变，求N的最大值，此时N的计算结果即为能力；另一种方法为控制N不变，求t的最小值，此时t的计算结果也可以表征能力。在铁路运输能力中，前者的度量单位往往是列车数、列车对数、周转量、客流量、货运量等，后者的度量单位往往是分钟、小时等。

“一定的客运需求条件”和“规定的运输组织方法”是高速铁路能力概念的关键所在，对二者的不同理解使得不同计算方法形成差异性。

从约束条件上，需要明确以下几点。①列车的停站频率或车站的服务频率；②研究的区段范围及

是否跨区段；③行车类型、比例及优先级别(高、低速度等级)；④列车运行信号制式；⑤列车越行规则；⑥区间、车站限速规则等。

从计算方法上，需要明确以下几点。①是否基于运行图结构单元进行计算；②是否考虑开行特殊列车所形成的能力扣除(一般根据平行图上扣除标准列车的数量关系进行确定)，如采用扣除系数法计算；③是否需要计算前确定运行线的顺序，以固定运行图结构，如运行图压缩法计算；④是否需要考虑列车组比例和缓冲时间，如采用最小平均间隔时间法计算；⑤是否基于一定的作业事件序列，如仿真法进行计算；⑥是否按一定的列车开行方案生成的备选运行线，如图解法进行计算。在能力计算、利用前，除了要给出资源约束和限制条件外，还需要明确使用的行车组织计算方法，才能计算得到有实际价值的通过能力。

1.2　高速铁路通过能力利用转化关系

能力利用在铁路运输能力问题系列研究中有着重要的定位[3]。以“能力利用”为体系的研究于1994年由胡安洲等[3]提出。在该能力利用体系中，铁路运输能力计算、利用、加强和发展四大核心组成被详细定义和讨论，是后续铁路运输能力相关研究的出发点[4-5]。徐瑞华[6]运用动态系统理论，将能力区分为有效能力与无效能力，分析了有效能力的确定方式与无效能力的传递特性，为能力利用动态分析奠定了理论基础。徐辉章等[7]基于邻域核密度估计方法，针对京沪高速铁路沿线车站列车运行实绩数据，进行列车到达的正晚点分析，为能力利用研究提供理论依据。然而，既有研究多侧重于静态能力配置分析，缺乏对能力在运营过程中动态转化过程的量化表征，需在此基础上重点探讨动态能力转化的量化表征方法。

高速铁路运输系统属于复杂的动态大系统，有效能力和无效能力是能力利用体系最核心的2类要素，二者可进一步细分为计划有效能力、实际有效能力、计划无效能力、实际无效能力。具体来说，在计划阶段，计划有效能力是在实际生成作业基础上，根据运输需求制定能力利用计划所对应的能力；而计划无效能力一方面考虑了由于设备和组织方式的限制所造成的无法利用的能力(如三角区能力、旅客列车扣除能力等)，即扣除能力；另一方面，也包括了对运量波动、作业延误等不确定因素预估后预留的能力，即冗余能力。其中冗余能力(储备能力)是一个关键概念。计划执行进入运营阶段后，由于各种突发事件的影响，原有的能力配置会发生重新分配：一方面，预设的冗余能力部分得到有效利用，部分则被闲置浪费；另一方面，部分计划有效能力会转化为实际无效能力。在这个转化过程中，实际有效能力是指最终能够兑现并投入使用的能力，而实际无效能力则包括2个组成部分：扣除能力和损失能力(即无法被有效利用的冗余能力)。上述过程体现了运营中有效能力与无效能力之间的动态转移转换机制。

根据运营中是否出现晚点延误，能力转换呈现2种不同模式。

第1种模式是正常运营状态。当系统运行中无晚点延误现象时，列车完全按照既定计划运行，此时计划有效能力顺利转换为实际有效能力，实现了预期的能力运用效果；同时，计划无效能力转换为实际无效能力，表现为能力扣除和能力冗余现象。

第2种模式是运营受到干扰时的状态。当系统出现晚点延误时，为了恢复列车正常运行秩序，原本的计划有效能力往往被迫转化为实际无效能力，从而产生能力损失；作为补偿机制，系统会调用部分计划无效能力使其转化为实际有效能力，通过这种能力调配实现能力恢复，以弥补前期的能力损失。能力损失是能力转换过程中的重点。铁路运输能力的利用是以计划进行的，在实际作业组织的任一时间段中，受各种因素影响，作业发生延误或中断造成计划没有完成，设备能力被空费，影响了生产任务的完成，计划有效能力向实际无效能力转化，这种转化为该时间段中的能力损失，其具体表现形式为给定时间段中输入输出车流数量减少或车流的输入输出时刻延后。

1.3　高速铁路通过能力利用延误要素

在铁路运输系统中，合理配置和高效利用运输能力是提升运营效率的关键所在[8-9]。能力利用系列要素是指在铁路运输过程中影响运输能力配置、转换和利用效果的各种相互关联的因素，主要涵盖规划阶段的计划有效能力和计划无效能力，以及运

营阶段的实际有效能力、实际无效能力，还包括能力运用、能力恢复、能力损失、能力扣除和能力冗余等动态转换要素。铁路能力利用延误要素示意图如图1所示。

能力的转移转化伴随着列车的时空运行，因此“能力”和“运行图”存在一定的对应关系。能力反映时空资源的利用状态，列车运行图是时空资源的二维载体，有效能力和无效能力可以通过列车占用的时空资源在“运行图”中进行表达。能力利用要素转换过程的运行图表达如图2所示。

能力损失的根本原因是作业中的延误和设备的故障中断，其发生具有随机性；能力损失的具体表现形式是在计划安排前提下，给定时间段中运输数量指标的减少和运输质量指标的降低，最终结果将导致动车组周转时间延长、旅行速度减慢以及运行线丢失；能力损失的时间进程具有故障及排除期和系统恢复期两阶段特征，而能力损失的完全恢复主要取决于后续时间段中的计划无效能力。

能力损失按损失阶段可分为直接能力损失和间接能力损失。直接能力损失是指本阶段任务没有完成时，依靠“借用”后续阶段的计划无效能力弥补所造成的能力损失，导致列车最终到达时间滞后。直接能力损失不仅占用了后续运营时间，还对运输计划的组织和正常运行产生了负面影响。在研究的时间范围内，存在延误现象且最终计划到达的车流量小于实际到达车流量。直接能力损失车流变化示意如图3所示。间接能力损失是指系统虽完成既定时间内的运输任务，但存在至少某一时刻发生列车延误，计划到达的车流量小于等于实际到达车流量造成的损失现象。其后果是延长了动车组的周转时间与旅客的送达时间。间接能力损失车流变化示意如图4所示。

综上所述，能力利用要素主要包含规划层面和运营层面2方面的指标，规划层面为计划有效能力和计划无效能力的指标测算与优化；运营层面为实际有效能力、实际无效能力及能力转换过程中的能力运用、能力恢复、能力损失、能力扣除和能力冗余等要素的测算与优化。从运输组织规划层面的研究而言，以高速铁路的运输效率和能力利用率最大化的研究或者考虑服务水平提升因素(开行标杆车、调整列车停站方案等)的优化研究会对计划有效能力和计划无效能力的分布带来影响[10-11]，进而影响能力利用结果；从运输组织运营阶段的研究而言，在基本运输作业完成的同时进一步考虑运营阶段服务水平提升因素(储备能力分配、冗余时间布局等)的优化研究会对实际有效能力、实际无效能力及能力转换过程中的能力损失、能力恢复过程带来影响，进而影响能力利用结果。

为实现能力动态转化过程的精确量化与可视化表征，创新性地提出了高速铁路通过能力利用延误

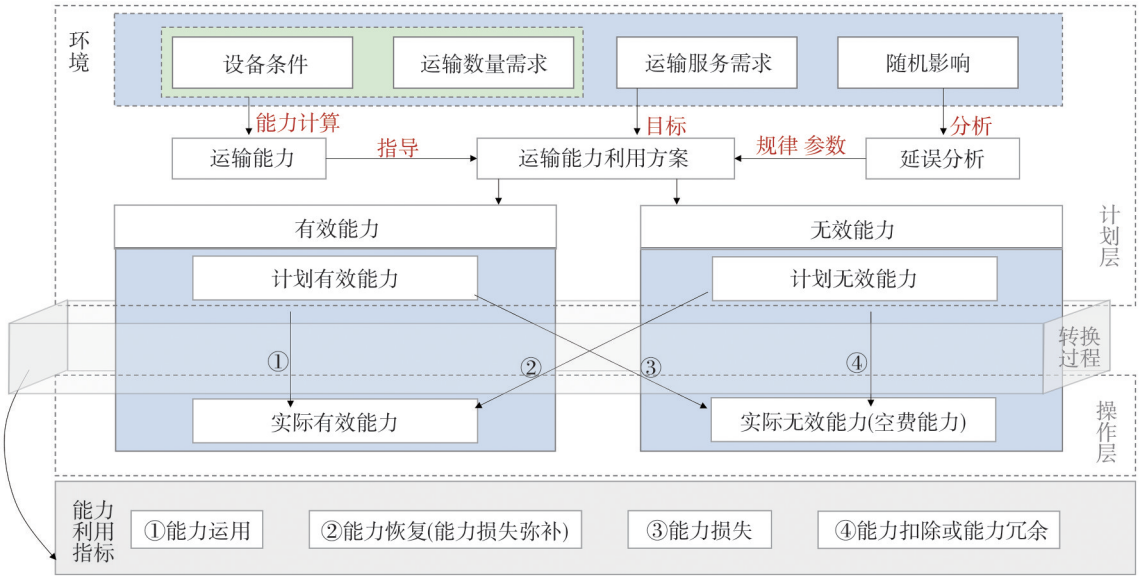


图1　铁路能力利用延误要素示意图

Fig.1　Elements of railway capacity utilization delays

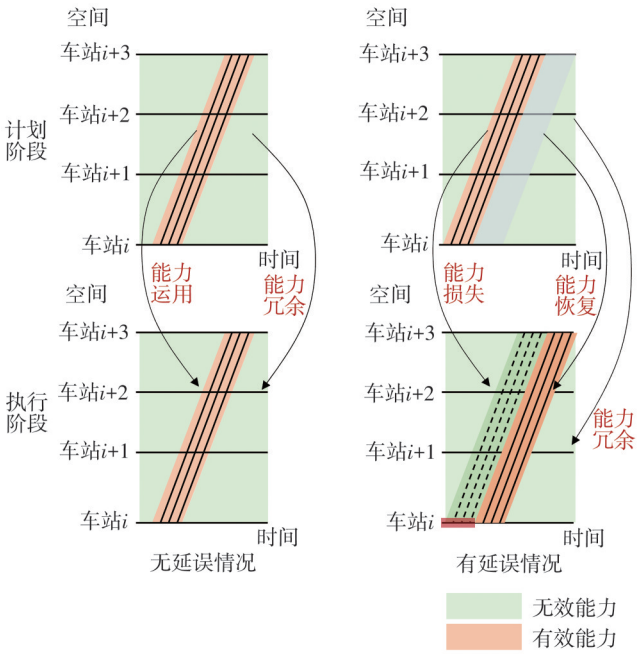


图2　能力利用要素转换过程的运行图表达

Fig.2　Train working diagram expressions during conversion of capacity utilization elements

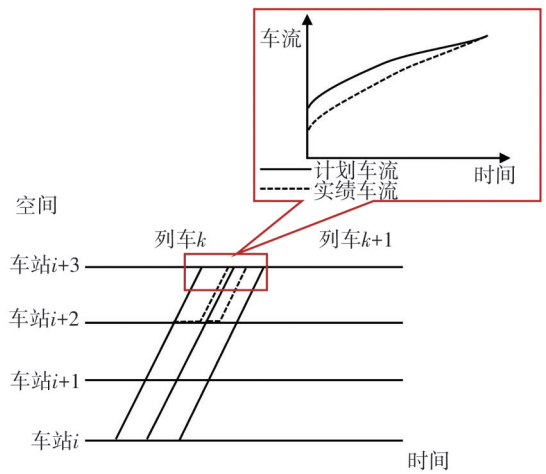


图3　直接能力损失车流变化示意

Fig.3　Changes in train flow for direct capacity loss

要素，基于运行图网格化的分析方法，将运行图按时间和空间维度划分为细粒度的网格单元，采用图像像素级别的精度进行分析，通过比较计划运行图与实绩运行图在相同时空位置的资源占用状态，识别并统计各类能力转换类型。这种创新性的表征方法不仅能够直观展现能力利用要素在运行图上的分布特征，更重要的是建立了从微观时空单元到宏观系统层面的多尺度量化分析体系。该方法将为后续深入研究延误扰动特征(如干扰位置、持续时间、强度等)与能力转化规律之间的内在关联提供有力

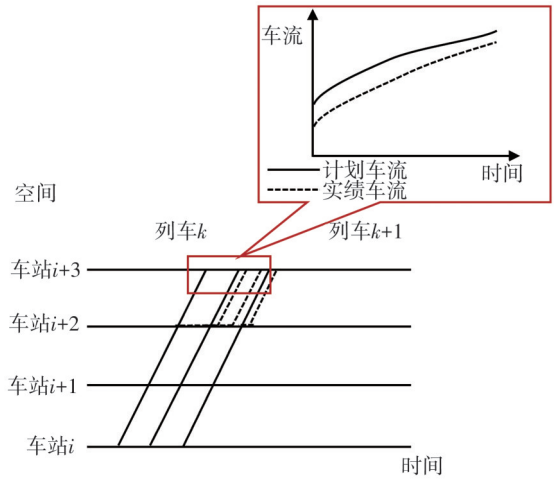


图4　间接能力损失车流变化示意

Fig.4　Changes in train flow for indirect capacity loss

的分析工具，进而为高速铁路运营管理中的能力优化决策提供科学支撑。

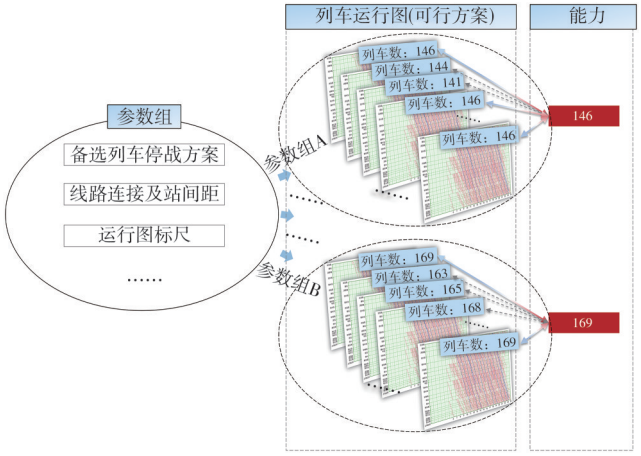
2　高速铁路通过能力表征方法与列车运行图的关系

高速铁路通过能力的科学表征是实现精细化运营管理的理论基础。本章从运行图这一核心载体出发，构建能力分析的架构体系。研究的逻辑起点是厘清“能力”这一抽象概念与“运行图”这一具体表现形式之间的对应关系，故首先将“能力”概念与运行图相关指标建立联系。在此基础上，厘清能力计算的数学方法与指标的联系，涉及理论模型的图形化转换，更关系到能力分析方法的实用性和可操作性。最后，在能力计算的基础上深入到能力利用层面，特别是建立能力利用过程中延误传播、能力损失、能力恢复等动态要素的运行图量化表达方法，从而实现从静态能力计算到动态能力管理的理论跨越。

2.1　能力和运行图指标的关系

本章基于通过能力计算图解法开展研究探讨，“能力”是一定空间和时间范围内，铁路运输系统在给定运行条件下所能承担的最大运输工作量，通常以列车对数作为量化指标进行表达。“运行图”是由时间和车站或空间组成的二维平面表达，“运行图”可以成为“能力”表达的有效介质和载体。在设定的行车组织方法和参数设置下，“能力”和“运行图”可以形成强关联匹配关系，即一张满表

运行图可以匹配对应一个能力值，一个能力值可能匹配对应多张满表运行图，每张满表运行图都包含了确定的列车对数和具体的时刻安排，因此对应唯一的能力值；而对于某个特定的能力值(如146对列车)，可以通过调整列车的具体发车时间、到达时间、停站时间等要素，在不改变总列车对数的前提下，形成多种不同的时刻表安排方案，从而产生多张不同的满表运行图。这种一对多的关系体现了在满足最大能力约束条件下，运行图编制的灵活性和多样性。“运行图”(示例)与“能力”的匹配关系如图5所示。不同的参数输入条件可以形成不同批次的列车运行图，在参数组A(给定列车停站方案、线路条件、运行图标尺等)设定下生成的一系列运行图中，存在141对、144对、146对等不同列车数的运行图，其中已知可行方案运行图中最大列车数为146对列车，则146对即为该运行图在该参数组下的最大能力，该能力可以匹配多张满表运行图。然而在另一套参数组B的设置下，能力结果变成169对列车。



注：图中数字单位为“对”。

图5　“运行图”(示例)与“能力”的匹配关系

Fig.5　Correspondence between “train working diagram” (example) and “capacity”

2.2　能力计算方法与运行图指标表达

能力计算是在能力概念的基础上讨论铁路运输能力取值计算的一系列研究，是能力利用研究的前提。从能力计算方法角度分析，亦可以用列车运行图进行部分可视化表达。既有基于时间占用类、以解释法为主的能力计算方法，如扣除系数法、最小列车间隔时间法等，计算结果与运行图之间没有准确的对应关系。从数学模型的角度理解，基于优化图解法的通过能力计算方法本质是一类特殊的0/1背包问题[12](Knapsack Problem)或车间调度问题[13](Job-Shop Scheduling Problem，JSP)。

背包问题是一个经典的组合优化问题，通过选择合适的物品放入背包，使得物品的价值最大化，而不超过背包的容量限制。基于背包问题的能力计算图解法示意如图6所示。类比到高速铁路的能力计算问题中，可以将铁路系统的列车运行线视为物品，将运行图时空资源设定为背包容量，通过合理安排和分配选择的运输产品和列车到发时刻，最大化列车数量。此时，基于运行图刻画能力的标量是列车数或列车对数等产品指标。

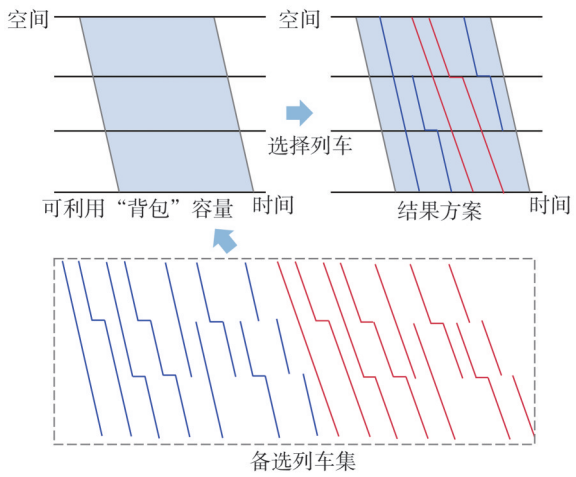


图6　基于背包问题的能力计算图解法示意

Fig.6　Graphical approach to capacity based on knapsack problem

车间调度问题是一种经典的生产调度问题，通过合理安排和调度工件的顺序和时间，以最小化生产过程的总时间。基于车间调度问题的能力计算图解法示意如图7所示。类比到高速铁路的能力计算问题中，可以将铁路系统的各个要素视为工件，将能力利用的目标视为生产过程的总时间，通过优化列车的运行顺序和时间，以最小化最晚列车的到达时间。此时，基于运行图刻画能力的标量是小时、分钟或秒等时间指标。

基于这2种数学模型，李海鹰等[14]提出了兼顾算力和成效的启发式方法——压力测试法。基于压力测试法的能力计算图解法示意如图8所示。其本质是基于车间调度问题的能力计算图解法，通过不断加入新车，判断是否满足时间窗要求来获取最大列车数。

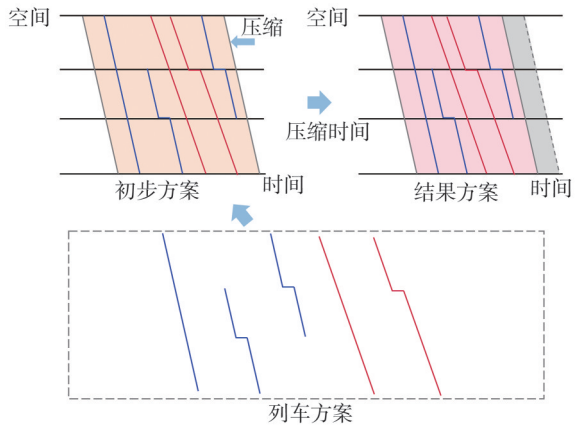


图7　基于车间调度问题的能力计算图解法示意

Fig.7　Graphical approach to capacity based on train scheduling problem

2.3　能力利用延误要素的运行图指标表达

基于运行图优化图解法的能力计算以运行图为载体形成合理的匹配关系，能力利用同样可以实现与运行图的匹配关系。能力利用是在能力计算的基础上侧重多目标的优化研究，给出不同阶段服务水平和服务质量优化目标设置下的运行图优化结果[15-16]。其中服务水平侧重列车在计划编制阶段的研究，如开设整点标杆车、优化列车OD可达性等；服务质量侧重列车在运营阶段的研究，如增加缓冲时间、减少能力损失等。能力利用与运行图图解法示意如图9所示。

研究将侧重列车服务质量有关的能力利用要素作为能力利用延误要素。通过建立能力利用指标体系，对运行图进行可视化表达和量化分析，重点阐述能力利用延误要素在运行图上的数学表征方法[17-19]及其计算原理[20-22]，以刻画能力利用要素的量化表达。运行图作为铁路时空资源的二维表达，横轴表示时间，纵轴表示空间即车站，能有效反映列车运行过程中的资源占用情况。

在高速铁路运行组织中，能力利用的核心要素可定义如下。计划有效能力是指依据运输需求而生成的能力利用计划所对应的能力。在运行图表征中，即为计划运行图中列车运行线及其所需缓冲区域(安全间隔)所覆盖的时空资源面积。计划无效能力是指在总体能力中未被计划利用的部分，包括扣除能力和冗余能力。在运行图表征中，表现为计划运行图中除计划有效能力以外的剩余时空资源面积。计划无效能力可进一步细分为扣除能力与冗余能力。扣除能力指由于三角区限制、基础设施维护等因素必然导致的无法利用的能力；冗余能力指为

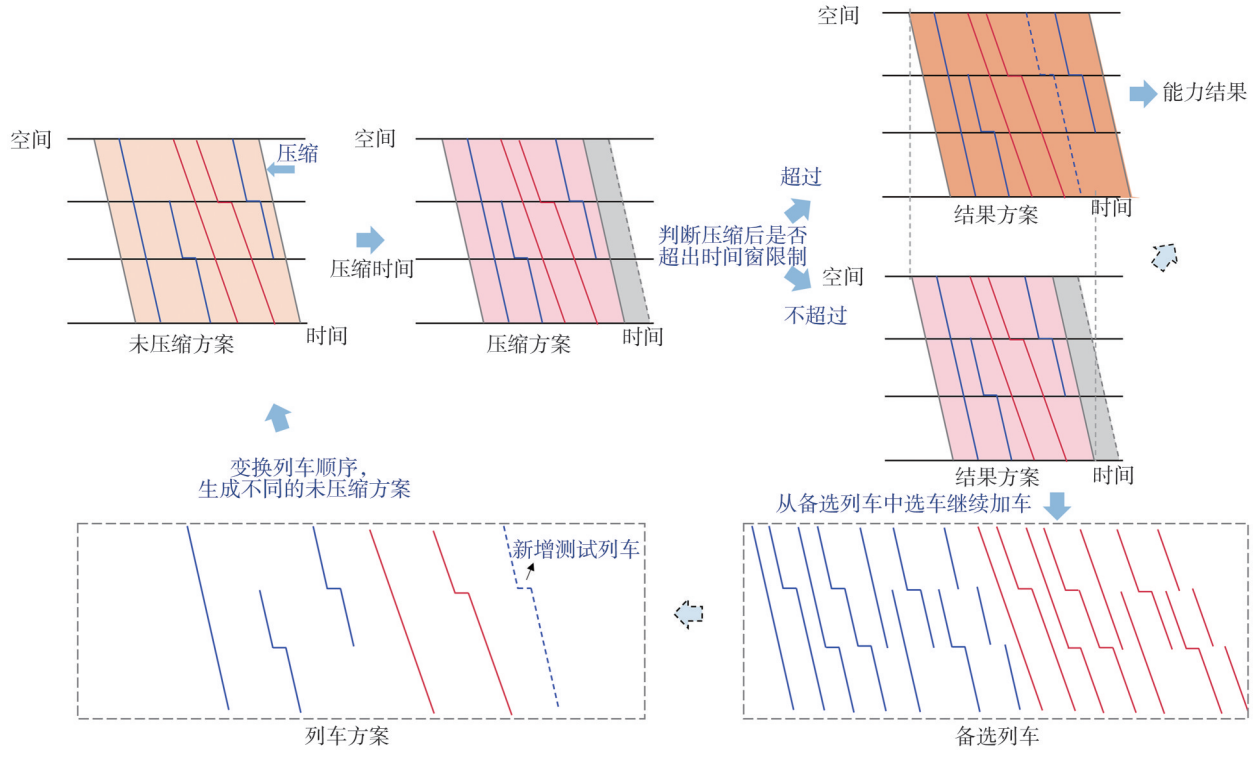


图8　基于压力测试法的能力计算图解法示意

Fig.8　Graphical approach to capacity based on stress testing method

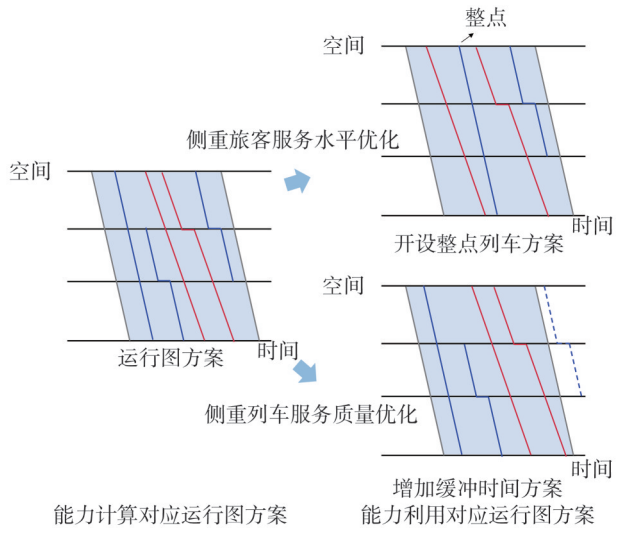


图9　能力利用与运行图图解法示意

Fig.9　Graphical approach to capacity utilization and train working diagram

应对运行过程中的延误及不确定性而预留的能力储备。实际有效能力是指在实际运营过程中被列车实际占用并有效利用的能力。在运行图表征中，表现为实绩运行图中列车实际运行线及其安全间隔所覆盖的时空资源面积。实际无效能力是指在实际运营过程中未被有效利用的能力。在运行图表征中，表现为实绩运行图中除实际有效能力以外的剩余时空资源面积。根据该定义，可以有效刻画能力损失和能力恢复过程，基于运行图网格化表征的能力转化关系示意如图10所示。

令S_{total}表示研究时段内运行图的总时空资源面积；$S_{p,\,e}$表示计划有效能力面积，即图中蓝色阴影部分所示；$S_{p,\,i}$表示计划无效能力面积；$S_{a,\,e}$表示实际有效能力面积，即图中橙色阴影部分所示；$S_{a,\,i}$表示实际无效能力面积。假设列车运行未受到干扰，如图10中列车G101所示，其完全按图行车，故$S_{p,\,e}=S_{a,\,e}$，$S_{p,\,i}=S_{a,\,i}$；对于列车G103，其虽发生延误产生了能力损失，但之后的运行过程中有足够的计划无效能力供其能力恢复，故$S_{p,\,e}=S_{a,\,e}$，$S_{p,\,i}=S_{a,\,i}$；对于列车G105，其同样发生延误，但其在规定时间内没有完成作业任务，故$S_{p,\,e}>S_{a,\,e}$，$S_{p,\,i}<S_{a,\,i}$；延误最终导致列车G107次被取消，计划有效能力全部转化为实际无效能力，$S_{a,\,e}=0$。在能力的损失转化中，上述案例均满足式(2)。

$$S_{\text{total}}=S_{p,\,e}+S_{p,\,i}=S_{a,\,e}+S_{a,\,i} \tag{2}$$

式中：$S_{p,\,e}$为计划有效能力面积，即图中蓝色阴影部分所示；$S_{p,\,i}$为计划无效能力面积；$S_{a,\,e}$为实际有效能力面积，即图中橙色阴影部分所示；$S_{a,\,i}$为实际无效能力面积。

由于列车在实际运行中，可能受到运行干扰影响，导致能力利用状态发生转化，故制定能力转换量表征方法，用于量化计划能力与实际能力之间的转化关系。为有效分析研究结果，研究采用列车有效能力转化量、列车无效能力转化量和列车有效能力转换率作为能力利用结果的衡量标准。

列车有效能力转化量：同一列车的实际有效能力

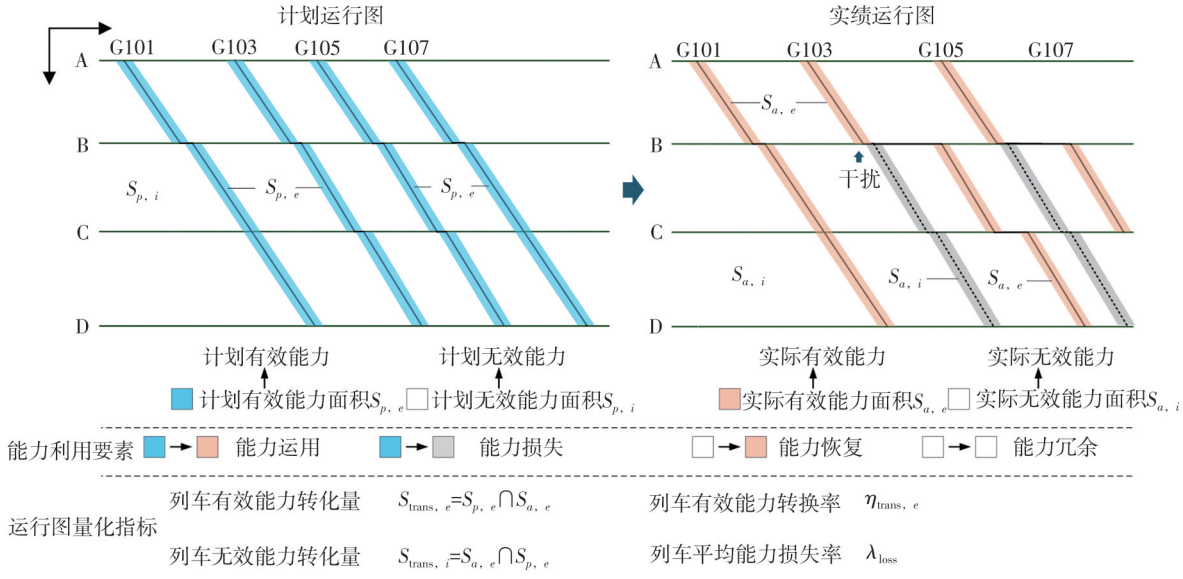


图10　基于运行图网格化表征的能力转化关系示意

Fig.10　Capacity conversion relationship based on grid-based characterization of train working diagram

面积与其计划有效能力面积的交集，记为$S_{\text{trans},\ e}=S_{p,\ e}\cap S_{a,\ e}$，表示计划有效能力中在实际运行中依然有效的部分。

列车无效能力转化量：同一列车的实际有效能力面积与其计划有效能力面积的差集，记为$S_{\text{trans},\ i}=S_{a,\ e}-S_{p,\ e}$，表示计划无效能力中在实际运行中被利用的部分。

列车有效能力转换率：$\eta_{\text{trans},\ e}$，表示计划有效能力在实绩运行图中被转化为实际有效能力的比率。

列车平均能力损失率：$\lambda_{\text{loss}}=1-\eta_{\text{trans},\ e}$，表示计划有效能力在实绩运行图中未被转化为实际有效能力的比率。为了实现对铁路运输能力利用状况的精确量化分析，本研究构建了基于网格化表征的能力计算理论框架和算法体系。该方法的核心思想是将连续的时空运行图离散化为标准化的网格矩阵，通过单列车因各种安全间隔时间所占用的时空面积实现复杂运输能力状态的精确描述计算。具体而言，该方法将运行图的时间范围[0，T]和空间范围车站集合$P=\{p_1,\ p_2,\ \cdots,\ p_n\}$系统性地划分为$m\times n$维的网格矩阵$G$，其中时间维度按照$\Delta t=T/m$的等间隔原则进行切分，取值为1 min以确保计算精度与计算效率的平衡，空间维度则以相邻车站间的区间作为基本划分单位，使每个网格单元$g(i,\ j)$精确对应第i个时间段在第j个空间段内的资源占用状态。通过引入状态函数$\varphi(g(i,\ j))$，系统地将每个网格单元的占用状态进行标准化编码：当网格被列车运行线占用时赋值为1，表示该时空资源正在产生运输效益；当网格处于空闲状态时赋值为0，表示存在可利用的剩余能力；当网格因维修天窗等原因不可用时赋值为−1，表示该时空资源暂时不允许进行运营服务。基于这一网格化表征模型，计划有效能力面积可通过式(3)进行精确计算，实际有效能力面积则表示为式(4)。

$$S_{p,\ e}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\varphi_{\text{plan}}\left(g\left(i,\ j\right)\right)\cdot A_{\text{unit}} \tag{3}$$

$$S_{a,\ e}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\varphi_{\text{actual}}\left(g\left(i,\ j\right)\right)\cdot A_{\text{unit}} \tag{4}$$

式中：A_{unit}为单位网格面积，代表基本时空资源单元的容量；$g(i,\ j)$表示第i个时间段在第j个空间段内的资源占用状态。

在能力转化率的深层计算机制方面，算法首先通过轨迹提取技术分别获得单列车k的计划运行轨迹$S_{p,\ e,\ k}$(列车k在计划图中占用网格数)和实际运行轨迹$S_{a,\ e,\ k}$(列车k在实绩图中占用网格数)，这2个轨迹集合完整记录了列车在理论设计状态和实际运营状态下的全部时空资源占用情况。随后通过式(5)计算2个轨迹集合的交集面积，量化单列车计划能力向实际运输效益的成功转化程度，进而得到单列车有效能力转化率式(6)。

$$S_{\text{trans},\ e,\ k}=\left|S_{p,\ e,\ k}\cap S_{a,\ e,\ k}\right|\cdot A_{\text{unit}} \tag{5}$$

$$\eta_{\text{trans},\ e,\ k}=\frac{S_{\text{trans},\ e,\ k}}{\left|S_{p,\ e,\ k}\right|\cdot A_{\text{unit}}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：$S_{p,\ e,\ k}$为列车k在计划图中占用网格数；$S_{a,\ e,\ k}$为列车k在实绩图中占用网格数；$\eta_{\text{trans},\ e}$为整体运输系统的能力转化水平。

该指标直观反映了单列车运行计划的执行效果和资源利用效率。在全图层面的能力转化评估中，通过计算平均有效能力转化率$\eta_{\text{trans},\ e}$获得整体运输系统的能力转化水平，如式(7)所示。

$$\eta_{\text{trans},\ e}=\frac{1}{|K|}\cdot\sum_{k=1}^{K}\eta_{\text{trans},\ e,\ k} \tag{7}$$

式中：K为列车k的集合；$\eta_{\text{trans},\ e,\ k}$为列车$k$的能力转化水平。

在此基础上引入能力损失率$\lambda_{\text{loss}}=1-\eta_{\text{trans},\ e}$来量化因延误、故障等因素导致的能力损失程度，构建涵盖计划制定、实际执行、能力转化、损失评估等全过程的完整分析体系，为铁路运输能力的科学配置、动态调整和持续优化提供了坚实的理论基础和可操作的量化工具。

3　基于运行图的能力利用表征实例验算

为验证能力利用转换体系在列车运行图指标量化表达中的有效性，以京沪高速铁路计划运行图为基础，设计了8个不同的延误场景进行实例验证。当运输组织过程中不存在扰动延误时，列车运行按图行车，在能力转移阶段中几乎不存在能力损失，列车平均能力损失率近乎为0，故选取延误案例对运行图指标量化方法进行验算并分析，讨论不同延误场景下的能力表征结果是否符合客观规律。这些实例主要针对区间运行干扰造成的列车晚点进行验证分析，干扰的位置与持续时长存在差异，可能导致列车晚点、取消或运行顺序改变等。京沪高速铁

路计划运行图示例如图11所示。不同延误场景的干扰特征如表1所示。

对于以上8个实例，分别计算单个列车的有效能力转化率，并将趋势变化绘制成图表。不同延误场景下列车有效能力转化率比较如图12所示。

在各干扰场景中，实际受影响的列车数量通常大于干扰区域所直接影响的列车数量，这是由于在晚点传播与恢复机理中，受影响列车的延误尚未在其缓冲时间内被吸收，故对后续列车造成一定影响。在该验证实验中，有效能力转化率反映了计划有效能力在实际运行过程中被保留的比例，是评估延误影响的重要指标，通过对全图列车的有效能力转化率进行统计，给出各场景实绩运行图中能力转化统计指标。不同延误场景的能力转化统计指标如表2所示。各延误场景下全图平均列车有效能力转化率如图13所示。

通过实例验证表明，运行图能够有效表征能力利用要素，验证结果显示以下几点。①经验证得出列车平均能力损失率与干扰持续时间呈显著正相关关系。从表2和图13的数据可明显看出，随着干扰时间从20 min增加至150 min，列车平均能力损失率从6.07%提升至37.90%。这表明干扰持续时间越长，对系统能力利用的影响越严重，计划有效能力向实际有效能力的转化率越低。②验证了能力损失率与干扰强度呈正相关关系。从表2可见，随着干扰时间延长，能力损失率呈递增态势，从轻微干扰时的6.065%增至严重干扰时的37.896%。这一变化趋势与能力转化率的下降形成完美互补，进一步验证了干扰时长对系统能力利用效率的决定性影响。同时，不同区段间的损失率差异也印证了干扰位置的重要性，德州东—济南西区段在相同条件下表现出更高的损失率。③验证了能力损失的非线性增长特征。损失率并非随干扰时间线性增长，而是呈现加速上升趋势，表明系统在长时间干扰下的抗干扰能力急剧下降，损失效应呈现指数级放大。④验证了干扰位置对能力转化的影响具有差异性。在相同

表1　不同延误场景的干扰特征

Tab.1　Interference characteristics of different delay scenarios

场景编号	干扰区间	干扰时长/min	直接影响列车数量/列
1	沧州西—德州东	20	5
2	德州东—济南西	20	6
3	沧州西—德州东	40	7
4	德州东—济南西	40	8
5	沧州西—德州东	60	8
6	德州东—济南西	60	11
7	德州东—济南西	100	14
8	德州东—济南西	150	18

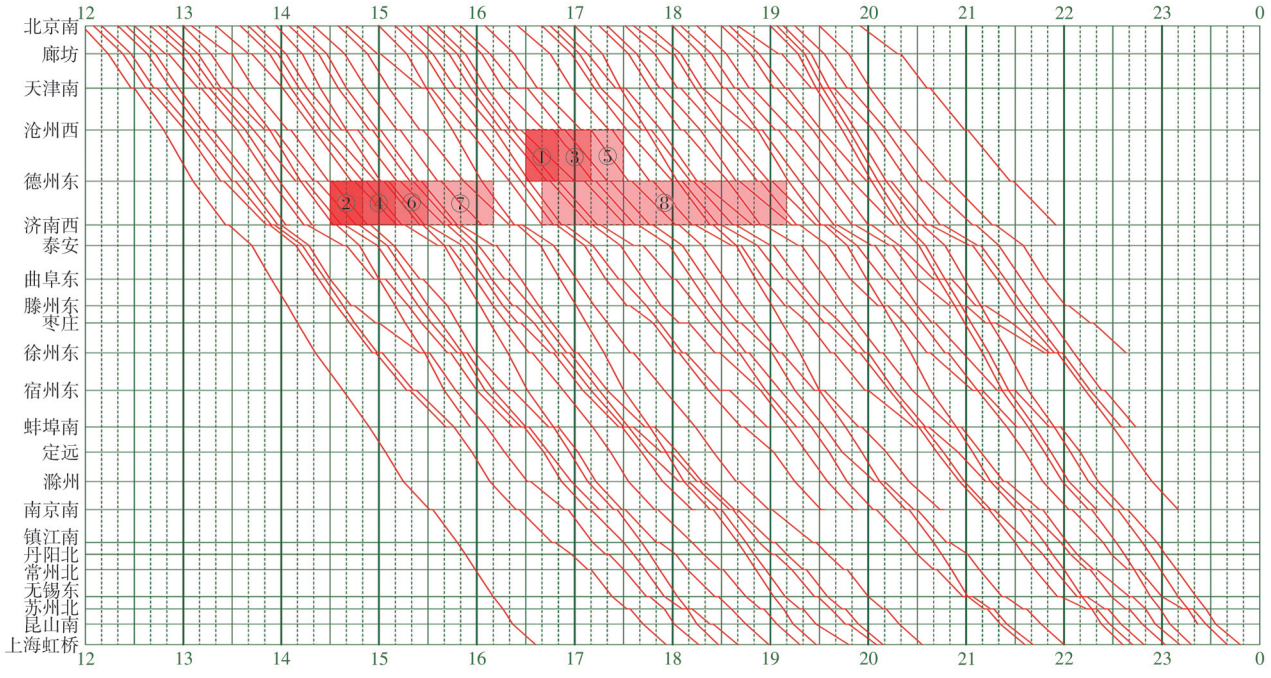


图11　京沪高速铁路计划运行图示例

Fig.11　Example of planned train working diagram for Beijing–Shanghai High Speed Railway

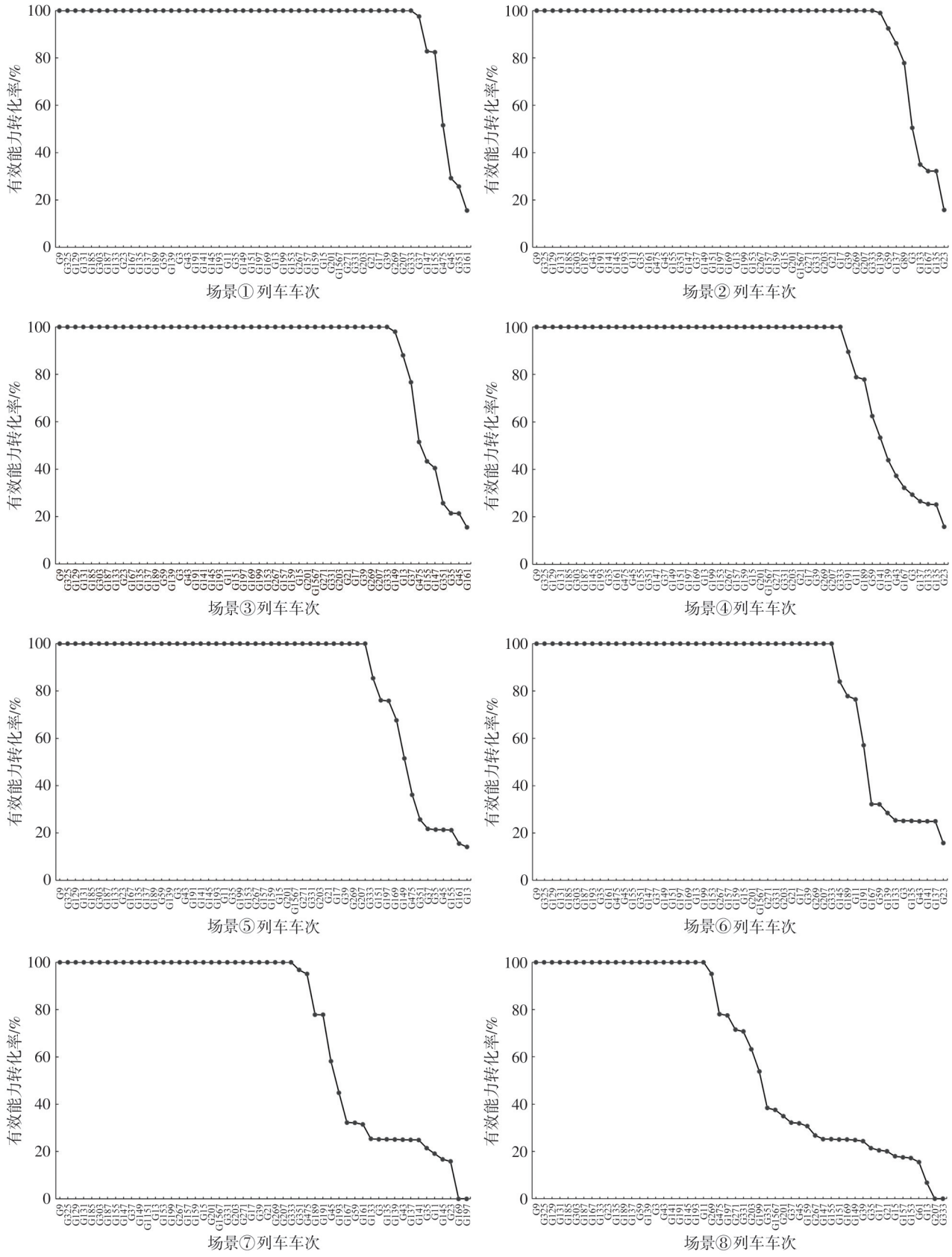


图12　不同延误场景下列车有效能力转化率比较

Fig.12　Comparison of train effective capacity conversion rates in different delay scenarios

表2　不同延误场景的能力转化统计指标

Tab.2　Statistical indicators of capability conversion in different delay scenarios

场景编号	直接影响列车数量/列	实际影响列车数量/列	取消列车数量/列	列车平均有效能力转化率/%	列车平均能力损失率/%
①	5	7	—	93.935	6.065
②	6	9	—	92.715	7.285
③	7	10	—	90.038	9.962
④	8	13	—	86.493	13.507
⑤	8	13	—	85.539	14.461
⑥	11	14	—	83.741	16.259
⑦	14	22	2	72.978	27.022
⑧	18	30	2	62.104	37.896

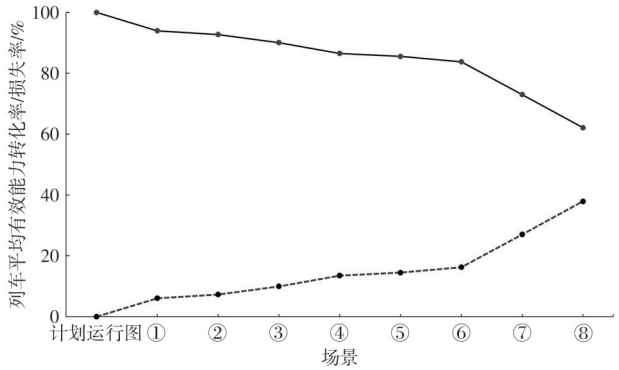


图13　各延误场景下全图平均列车有效能力转化率

Fig.13　Comparison of average effective capacity conversion rates in different delay scenarios

干扰时长条件下，德州东—济南西区段的干扰相比沧州西—德州东区段造成的影响更大，表现为更低的有效能力转化率。例如，20 min干扰下，前者为92.715%，后者为93.935%；60 min干扰下，前者为83.741%，后者为85.539%。

综上所述，通过8个典型延误场景的实例验证，充分证明了运行图能够有效表征能力利用要素，验证了能力利用转换体系在不同干扰条件下的有效性和适用性。

4　结束语

研究聚焦高速铁路通过能力利用与列车运行图的内在关联，构建了基于运行图的能力利用延误要素表征体系，主要结论如下。

（1）梳理高速铁路通过能力利用延误要素的理论框架。系统梳理了计划有效能力、计划无效能力、实际有效能力和实际无效能力等核心要素的概念内涵，阐明了能力在规划与运营阶段的动态转化机理，为能力利用的定量分析奠定了理论基础。

（2）提出了基于网格化运行图的能力量化表征方法。将运行图时空资源离散化为标准网格矩阵，通过状态函数编码实现了能力利用要素的精确计算，构建了包含能力转化率、能力损失率等关键指标的量化评价体系，实现了从定性描述到定量分析的方法创新。

（3）通过京沪高速铁路的实证分析，验证了所提方法的有效性。结果表明：干扰持续时间与能力损失率呈显著正相关，延误时长从20 min增至150 min时，列车平均能力损失率从6.07%提升至37.90%；不同区段的干扰影响存在差异性，德州东—济南西区段较沧州西—德州东区段表现出更高的能力损失率；延误传播呈现非线性累积放大效应，为运行图弹性设计和应急调度提供了定量依据。

本研究在理论层面突破了传统静态能力评估模式，建立了能力动态转化的系统性分析框架；在应用层面为高速铁路运输能力优化配置、运行图编制质量评估和应急调度决策提供了科学工具。后续可深入研究不同延误恢复策略对能力转化的影响机理，同时拓展至高速铁路网络层面，研究跨线运行条件下的能力协同利用机制，探索基于大数据与人工智能技术的能力转化预测模型，构建面向不同运营场景的通过能力评估体系，提高高速铁路系统对干扰的评价与应对能力。

参考文献：

[1] 杨　浩. 铁路运输组织学：第3版[M]. 北京：中国铁道出版社，2011.

[2] 赵　鹏. 高速铁路运营组织[M]. 北京：中国铁道出版社，2009.

[3] 胡安洲，杨　浩. 关于铁路运输能力问题的系列研究[J]. 铁道经济研究，1994(1)：39-41，43.

[4] 胡安洲，杨　浩，刘　凯，等. 铁路运输方案编制自动化若干问题的初步探讨[J]. 铁道学报，1986(3)：42-50.

[5] 胡安洲，徐瑞华，胡　克. 论能力损失的传递及其弥补[J]. 铁道经济研究，1992(1)：30-33.

[6] 徐瑞华. 铁路运输能力利用问题研究[D]. 北京：北方交通大学，1995.

[7] 徐辉章，陈军华，李崇楠，等. 基于邻域核密度估计的高速铁路列车正晚点分布模型研究[J]. 铁道学报，2022，

44(5)：1-9.
XU Huizhang，CHEN Junhua，LI Chongnan，et al. Research on Distribution Model of Early and Delayed Deviation for High Speed Trains Based on Neighborhood Kernel Density Estimation[J]. Journal of the China Railway Society，2022，44(5)：1-9.

[8] 高　宝，李世飞，程大龙，等. 宁西线西合段运输组织优化分析与探讨[J]. 铁道货运，2023，41(9)：21-26.
GAO Bao，LI Shifei，CHENG Dalong，et al. Discussion on Optimization of Transportation Organization of Xihe Section of Yongningzhen-Xinfengzhen Line[J]. Railway Freight Transport，2023，41(9)：21-26.

[9] 赵广富. 提高临哈铁路货运能力对策研究[J]. 铁道货运，2024，42(5)：1-5，11.
ZHAO Guangfu. Countermeasures to Improve Freight Capacity of Linhe-Hami Railway Line[J]. Railway Freight Transport，2024，42(5)：1-5，11.

[10] 蒋　辉，李　博，贺俊源. 基于人工智能的列车运行图智能编制技术体系框架研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(1)：1-9.
JIANG Hui，LI Bo，HE Junyuan. Research on the Framework of Intelligent Train Working Diagram Compilation Technology System Based on Artificial Intelligence[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(1)：1-9.

[11] 夏铭泽，李　博，张　博，等. 基于均衡性和能力利用的高速铁路标杆车运行图编制方法研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(6)：2162-2171.
XIA Mingze，LI Bo，ZHANG Bo，et al. Research on Benchmark Train Working Diagram Based on Equilibrium and Capacity Utilization[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(6)：2162-2171.

[12] CACCHIANI V，IORI M，LOCATELLI A，et al. Knapsack Problems：An Overview of Recent Advances. Part Ⅱ：Multiple，Multidimensional，and Quadratic Knapsack Problems[J]. Computers & Operations Research，2022，143：105693.

[13] LIU S Q，KOZAN E. Scheduling Trains with Priorities：A No-Wait Blocking Parallel-Machine Job-Shop Scheduling Model[J]. Transportation Science，2010，45(2)：175-198.

[14] 李海鹰，栾晓洁，孟令云，等. 铁路既有线释放能力计算方法[J]. 中国铁道科学，2014，35(3)：113-119.
LI Haiying，LUAN Xiaojie，MENG Lingyun，et al. Calculation Method for Released Capacity of Existing Railway[J]. China Railway Science，2014，35(3)：113-119.

[15] CORMAN F，D' ARIANO A，MARRA A D，et al. Integrating Train Scheduling and Delay Management in Real-Time Railway Traffic Control[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2017，105：213-239.

[16] KÖNIG E. A Review on Railway Delay Management[J]. Public Transport，2020，12(2)：335-361.

[17] 王　晓，张星臣，陈军华. 基于TDCS数据分析的铁路区间通过能力利用研究[J]. 铁道运输与经济，2015，37(7)：21-25，41.
WANG Xiao，ZHANG Xingchen，CHEN Junhua. Study on Utilization of Railway Section Passing Capacity Based on TDCS Data Analysis[J]. Railway Transport and Economy，2015，37(7)：21-25，41.

[18] 单杏花. 基于运行图压缩的高速铁路区段通过能力研究[J]. 铁道运输与经济，2020，42(S1)：15-20.

[19] 孙　民. 面向货车车流径路的铁路网点线通过能力数字化分析方法[J]. 铁路物流，2025，43(3)：1-8.
SUN Min. Digital Analysis Method for Railway Network Point and Line Passing Capacity for Freight Wagon Flow Routing[J]. Railway Logistics，2025，43(3)：1-8.

[20] 熊　亚，李海鹰，廖正文，等. 高速铁路车站高峰时段通过能力计算方法[J]. 铁道学报，2021，43(8)：1-9.
XIONG Ya，LI Haiying，LIAO Zhengwen，et al. Calculation Method of Carrying Capacity High Speed Railway Station during Peak Period[J]. Journal of the China Railway Society，2021，43(8)：1-9.

[21] 郭根材，王洪业，潘　跃，等. 基于运行图分区的高速铁路通过能力损失计算方法研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：133-139.
GUO Gencai，WANG Hongye，PAN Yue，et al. Calculation Method for Carrying Capacity Loss of High Speed Railways Based on Train Working Diagram Partitioning[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：133-139.

[22] 叶海昌. 通辽西站北京端咽喉区通过能力分析[J]. 铁道货运，2022，40(10)：12-20.
YE Haichang. Analysis of Passing Capacity at Beijing End Throat of Tongliaoxi Railway Station[J]. Railway Freight Transport，2022，40(10)：12-20.

(责任编辑　魏　然)