文章编号：1003-1421(2026)01-0001-14
引用格式：薛锋，李佳霖，徐俊林，等. 铁路车站能力计算与协调运用研究综述[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：1-14.
XUE Feng，LI Jialin，XU Junlin，et al. Review of Research on Capacity Calculation and Coordinated Utilization of Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：1-14.

铁路车站能力计算与协调运用研究综述

薛　锋[1,2]，李佳霖[1]，徐俊林[1]，古　旭[1]，陈崇双[3]

(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 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都　611756；3.西南交通大学 数学学院，四川 成都　611756)

摘　要：能力作为衡量铁路车站设备作业效能和运输组织水平的核心指标，对提升车站运输效率、保障运输安全至关重要。围绕铁路车站能力计算、查定及协调运用的方法及发展趋势展开系统综述。在能力计算方面，传统的咽喉区、到发线与驼峰等静态指标分析逐步发展为动态模拟预测，并进一步延伸至站间能力的优化；在能力查定方面，从计算机联锁技术发展为多源信息数据融合方法；在能力协调运用方面，涵盖车站系统内部的能力协调，以及车站与衔接线路的点线能力匹配。综合既有研究成果，从车站能力计算查定、协调运用与自动化监测方面提出进一步研究的展望，为车站作业的精细化管控以及安全高效的铁路运输体系构建提供参考。

关键词：铁路运输；车站；能力计算；协调运用；查定技术
中图分类号：U292.51　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250527001

Review of Research on Capacity Calculation and Coordinated Utilization of Railway Stations

XUE Feng[1,2]，LI Jialin[1]，XU Junlin[1]，GU Xu[1]，CHEN Chongshuang[3]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Railway station capacity, as the core indicator for evaluating equipment operation efficiency and transportation organization level, is crucial for enhancing transport production efficiency and ensuring transport safety. This study systematically reviewed the methodological system and development trends of railway station capacity calculation, checking, and coordinated utilization. In capacity calculation, the traditional static analysis indicators, such as throat areas, have gradually evolved into dynamic simulation and prediction, and have been further extended to inter-station capacity optimization. In terms of capacity calculation, the traditional static indicators such as throat areas, arrival and departure lines, and humps have gradually evolved into dynamic simulation predictions and have further extended to the optimization of capacity between stations. In terms of capability checking, the evolution has taken place from computer-based interlocking techniques to multi-source information and data fusion methods. In terms of capacity coordination and application, it

收稿日期：2025-05-27
通信作者：陈崇双(1983—)，男，四川广元人，西南交通大学数学学院副教授。
基金项目：四川省自然科学基金项目(2025ZNSFSC0396)；宜宾智慧物流研究院资助项目(YW2024YB01)

includes the coordination of internal capacity within the station system, as well as the matching of point-to-line capacities between the station and the connecting lines. Based on the existing research results, further research prospects were proposed in terms of station capacity calculation and checking, coordinated operation, and automatic monitoring. This will provide a reference for the refined management of station operations and the construction of a safe and efficient railway transportation system.

Keywords: Railway Transportation; Station; Capacity Calculation; Coordinated Utilization; Checking Technique

0　引言

随着铁路运输网络规模的扩大及运输需求的多元化，车站和线路能力的高效利用已成为保障路网畅通、提升运输效益的关键。传统的车站能力评估以咽喉区通过能力、到发线利用率[1]、车站的解编能力[2]等静态指标为核心，以此来计算车站理论最大作业能力，这为早期研究车站内部作业以及路网的点线协调优化提供了重要依据。

近年来，我国铁路网不断扩大和延伸，路网结构也更加复杂，铁路车站能力面临着计算准确性低、车站整体能力利用不均衡两大难题。铁路车站对局部设备进行静态能力计算的传统方法，难以适应高密度行车、客货运量增加、解编作业量大等场景。在运输市场竞争愈发激烈，铁路运输企业降本增效双重压力下，车站能力计算和协调优化的研究重心逐步从静态指标计算转向动态模型构建，这为复杂路网下的弹性调度和运力资源优化配置提供了理论依据和前提。

基于国内外学者对铁路车站能力计算和协调运用的大量文献，对既有研究成果从能力计算与查定方法、车站整体能力协调优化2个方面进行了归纳总结，并在此基础上就复杂路网环境下的点线能力协调与车站能力自动化监测等提出了进一步的研究展望。

1　铁路车站能力研究现状

本研究聚焦于铁路运输系统中的2类关键站点，即技术站和高铁客运站。2类车站的能力体系具有显著差异，技术站能力涵盖车站通过能力和改编能力，而高铁车站能力特指其通过能力。除通过能力、解体能力与编组能力外，不少学者还提出了车站高峰时段通过能力[3]、高峰小时能力[4]、车站疏散能力[5]以及货运站卸车能力[6]等扩展概念，用于评估和计算车站在不同条件下的运输效率和资源利用情况，这为该领域的进一步研究提供了新的思路。

随着铁路运输需求的不断增加和路网规模的不断扩大，如何有效利用车站能力，进一步提高生产效率，已成为亟待解决的现实问题。自20世纪90年代起，欧美学者便开始基于计算机仿真探索铁路车站能力的动态评估方法；21世纪初，我国学者引入时空网络建模和数据挖掘技术[7]，探索适应动态环境的车站能力计算及协调优化方法。这些方法的出现，使得车站能力不受限于静态计算，开始向动态协调方向演进。当前，针对复杂路网的车站能力运用研究已逐步形成了“理论建模–技术融合–系统集成”的完整链条，涵盖了从能力计算模型、运用优化到监测预警系统整合的各个方面。尽管既有研究取得了丰硕成果，但现有方法在车站系统能力的动态评估以及跨系统协调优化方面仍显不足，尤其是在复杂运营环境下，如何实现系统能力的合理配置与运用，以保证车站作业的灵敏性和适用性，依然需要进一步深入研究。

随着智能化技术的快速发展，铁路车站能力自动化监测成为近年来研究的热点，主要是通过大数据智能监测技术实时获取车站内作业设备状态、列车到达强度、到发线占用情况等多维度数据，进行多个车站能力的实时监测和评估。此外，通过构建“监测–反馈–调控”的闭环框架，车站能力监测系统能识别出路网中作业负荷较重的车站，并及时反馈，采取相应措施。车站能力评估研究的动态转变过程如图1所示。

随着铁路运输网络规模的持续扩大以及运输组织复杂度的提升，车站能力研究正逐步从“准确评估”向“高效协调运用”转变。研究重心已由静态计算扩展到动态优化与协调，为全面把握铁路车站

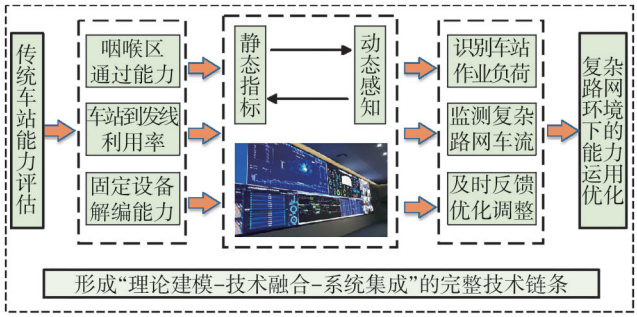

图1　车站能力评估研究的动态转变过程

Fig.1　Dynamic transformation process of railway station capacity evaluation research

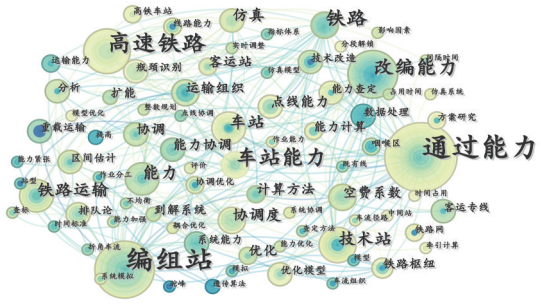

图2　铁路车站能力计算运用研究关键词云图

Fig.2　Keyword cloud map of railway station capacity calculation and utilization research

能力研究从基础理论到实用系统、从静态计算到动态协调的发展脉络，需从车站能力的评估计算到实际运用进行系统梳理。从研究内容来看，车站能力研究主要涵盖以下3个方向：首先在能力评估方法方面，最初构建于静态计算框架之上[8–9]，近年来逐步引入灰色理论、区间估计与多目标优化等方法[10–12]，形成了可适应复杂场景的动态评估体系。其次在能力查定系统方面，由早期的人工观测向计算机辅助处理转变，再发展为基于调机数据与计算机联锁系统的半自动计算系统[13–14]，至2016年后依托STP、SAM等平台实现多源数据融合与实时智能查定[15–16]。最后在能力协调优化方面，研究由车站与区间点线匹配建模展开，逐步发展出协调度模型[17]，并引入排队论[18]与双目标优化方法[19]等，进而拓展至编组站子系统与区间能力的动态匹配与系统协调。其中，能力查定作为能力计算成果的工程化落地，是连接理论研究与实际应用的重要桥梁，虽非重点讨论方向，亦在能力计算范畴内予以纳入并简要梳理。整体来看，车站能力研究正朝着理论模型系统化、计算技术工程化与能力运用智能化的方向持续推进。

2　铁路车站能力计算及查定技术研究

以中国知网(CNKI)数据库收录的文献为来源，选择“铁路车站”“车站能力运用”为主题词进行高级检索，并将文献限定于北大核心级别以上的科技期刊与硕博士论文，剔除重复文献、声明、新闻、通告等，共计得到535条有效文献，分析这些有效文献的关键词，得到铁路车站能力计算运用研究关键词云图如图2所示。

在铁路车站能力计算运用领域，学者通常将其划分为若干子领域：①传统车站能力计算研究，主要专注于早期咽喉区接发、到发线占用及技术站改编等关键作业环节的静态能力评估及其典型计算模型；②车站能力计算方法研究，主要专注于能力计算工具的多样化构建，覆盖理论模型与实用方法；③车站能力查定技术研究，主要聚焦于能力数据采集方式的演进与查定系统的自动化建设。

2.1　传统车站能力计算方法的特点与局限

早期研究多聚焦于咽喉通过能力、到发线通过能力、驼峰解体能力及峰尾编组能力4项车站作业能力的计算评估，即通过特定边界条件下对各作业环节的能力进行定量测算，形成了“车站能力计算”研究方向。研究方法延续传统理论框架，以概率论、排队论及直接计算法为核心，重点针对咽喉区通过能力、到发线通过能力、解编能力等进行理论构建。具体来看，咽喉能力计算方面的研究基于概率论与系数法量化作业冲突，典型方法包括引入平行作业系数、咽喉损失系数及进路负荷分层计算，但缺乏对多方向道岔的差异化分析，且未充分考虑空费时间等关键因素[9]。到发线能力计算则多通过空费系数修正模型，结合案例与图表分析应对运输干扰，但通常聚焦于单一作业设备而忽略多作业过程的双向影响，且作业流程过度简化导致实用性受限[9, 20–21]；改编能力计算则聚焦驼峰解体和编组作业，多依赖解体时间、设备可靠性系数等静态参数优化算法[8]。

既有车站能力计算方法具有以下共性特点：一是依赖固定参数(如空费时间、干扰系数等)，缺乏对动态复杂运营环境的适应性；二是过度简化技术

站多子系统交互影响，低估实际作业中的能力损失，操作性不足；三是未系统研究人为影响及设备可靠性对车站能力计算结果的影响。这些理论缺陷制约了传统方法在现代化高密度路网中的适用性，亟待通过动态数据融合技术与智能算法创新实现突破。当前车站作业能力计算研究主要有分析计算法、图解法与仿真模拟法3种，其在计算精度、适用场景与计算效率等维度呈现显著差异。车站作业能力计算方法特点如表1所示。

传统车站作业能力计算主要采用的是利用率法和模拟法，虽在车站能力的研究思路层面具有重要理论价值，但因涉及参数多且标定复杂，适用性受限。现有研究已对咽喉区[26-27]、到发线[28-29]、驼峰能力[30]等设备能力开展了广泛探讨，其计算方法基本沿用传统体系，分析计算法易受空费系数主观标定影响，图解法效率较低，模拟法则存在建模与实际偏差。基于此，研究符合车站实际工作且简便易行的能力计算方法，已成为提升复杂路网车站能力监测精度的关键。

2.2　车站能力计算方法及研究拓展

2.2.1　分析计算法

分析计算法作为经典车站能力计算方法，其理论框架基于铁路运输系统工程理论，通过概率统计构建数学解析式进行能力量化。分析计算法的优势体现在操作便捷性与计算效率，主要局限在于关键参数取值粗略，忽略了设备间的影响关系与作业冲突，导致计算结果存在理论值与实际值的系统性误差。分析计算法主要包含直接计算法和利用率计算法2种[8]。需特别指出，由于路网拓扑结构、运输组织模式及技术装备水平的区域差异性，分析计算法的具体公式需结合车站实际参数进行适应性修正，这导致其难以形成普适性评估标准。

近年，学者们围绕分析计算法的局限性展开了深入探讨，其突出问题包括关键参数取值主观性强、局限性明显，导致计算结果多限于理论参考[31]；车站能力随机车配置、运输组织方式动态变化[32]，计算所得静态能力值无法表征时空分布特性，因而对实际车站作业组织的指导作用有限，难以满足精细化管控需求等。部分研究从数据采集角度入手，白守明等[33-34]利用CTC、TDCS等系统对各项作业时间写实，保证采集数据的原始可靠性；方惠[35]对各种作业占用时间原始数据进行弱化处理，以降低干扰因素的影响[36-37]。也有学者从空费系数修定角度入手，如李东[10]、王月[38]采用灰色量化分析空费系数的各种影响因素；方惠[35]基于平行进路思想，通过计算咽喉道岔间接妨碍时间确定空费系数；薛贵明等[39]则克服平行进路的缺陷，直接利用咽喉道岔占用时间表计算间接妨碍时间，提高了计算精度和时效。还有部分学者通过优化改进能力公式提升计算精度，谢迎春等[40]通过考虑随机因素对改编系统作业的影响，改进传统计算公式并采用分析拟合法确定车站改编能力；陈旭斌[41]选取贴近车站作业的时间段数据，修正占用咽喉道岔时间计算公式；张艳[2]提出一种考虑列车到发不均衡性的改进利用率算法，计算技术站通过能力、改编能力及货位办理能力，进而确定车站能力。

虽然众多学者采用概率论等数理统计方法解决作业妨碍和等待时间问题，但现有改进措施仍存在以下局限性：车站作业本质是具有组织规律的可控随机过程，而改进方法多基于理想化随机假设，这种理论假设与实际作业的偏差，导致分析计算法难以根本性克服原有不足。

2.2.2　图解计算法

图解计算法是将区间与车站设备视为一个整

表1　车站作业能力计算方法特点

Tab.1　Characteristics of railway station operational capacity calculation methods

能力计算方法	精确性	优势	局限	文献来源	核心内容(方法)
分析计算法	低	操作简便，适用范围广	参数依赖强	陈　琳等[21] 杨介平[9]	利用率计算法计算通过能力 直接计算法计算编组能力
图解法	高	可视化强，适于作业方案对比	难适应复杂场景	马桂贞等[22] 高世蕊[23]	图解回归确定空费系数 图解法计算通过能力
仿真模拟法	高	精度高，适用复杂场景	建模与验证成本高	苗建瑞等[24] 刘　澜等[25]	仿真车站列车到发和调车作业 模拟车站咽喉布置和作业过程

体，依据相邻区段的列车运行图、技术作业过程和作业时间标准、技术设备的固定使用方案等基础数据，绘制车站一昼夜或繁忙阶段列车接发、集结、解编以及机车出入段等作业的图表，从而计算车站各项设备的能力及车站的综合能力[8]。该方法的优势在于：一是计算结果符合实际，精度较高；二是能直观呈现车辆停留时间分布、设备负荷量等关键信息。但该方法也存在明显局限：图表绘制过程耗时费力，图解质量依赖实施者的经验水平，且不适用于基础数据不完整的新建车站。

图解法可分为传统人工图解法和计算机图解法[42]。早期图解法依赖人工绘图方式，该方法耗时费力且精度受主观影响较大。随着计算机技术的发展，以及车站、机务、车辆等单位的跨部门协同，相关研究已转向利用计算机系统实现高精度、高效率的图解分析。尽管人工图解法在实际运营中仍作为辅助验证手段存在，但其应用场景已大幅减少。

2.2.3　计算机模拟

计算机模拟法的基本思想与图解法类似，主要是基于排队系统理论，通过计算机技术模拟车站一昼夜办理列车、机车和车辆作业的全过程，进而实现车站能力的评估查定[43-44]。相较于传统分析计算法和图解法，计算机模拟法能有效反映设备间的相互作用，同时能克服人工图解法的低效问题，其局限性表现为：①模型构建需考虑大量潜在影响因素，导致计算复杂度较高；②参数分布假设(如列车到达间隔服从泊松分布)易与实际数据产生偏差，进而影响结果可信度。

针对上述局限，学术界对仿真模拟法进行了精细化改进。彭辉等[45]构建了融合排队论、数理统计和计算机模拟的混合仿真技术框架，以反映不同站型和车流情况下的车站设备运用情况。为进一步提升模型对运营场景动态变化的刻画能力，李海鹰等[46]在计算机模拟法基础之上对模型与样本集进行了更精细的多模态划分，根据编组站到解系统列流到达特征，按照编组站繁忙期、一般繁忙期和不繁忙期对到解系统通过能力进行了分类分析。

2.2.4　其他计算方法

除了以上主流计算方法外，国内外学者还在铁路车站能力计算领域进行了多维度研究。刘澜等[25]运用网络优化技术对车站咽喉作业过程进行建模并设计了计算机求解方法；刘庆伟等[29]在利用率法基础上，提出一套按股道别分析处理数据的到发线通过能力查定与计算方法；在系统能力研究层面，李海鹰等[47]考虑不均衡运输条件对编组站作业的影响，把编组站工作时间分为3个时段，提出驼峰单位时间解体能力、编组站车流结构条件通过能力及编组站通过能力等概念。具体计算方法分析如下。

（1）图解插值法[8]。图是设备占用过程实迹图，插值是有效的占用时间。此法综合图解法和分析计算法的优点，基于查定设备使用时间序列和空闲时间序列，以各种技术作业时间间隔作为约束条件，然后确定插入占用时间、执行插入占用流程，通过线性规划模型不断修正插入结果，为使设备能力得到充分利用尽可能多地插入列车，以实现设备通过能力的最大化。

（2）数学规划法。以车站能力最大化为目标，通过构建数学模型并设计相应算法求解车站作业能力。田亚明[11]以作业综合费用最小为目标，提出改编能力配置优化模型并设计启发式算法求解，精确计算编组站解编能力；田亚明等[12]基于开行始发直达列车比重的考虑，构建编组站改编能力数学优化模型，以总成本最小为目标采用Lingo软件求解最优值。数学规划法在建模中也常引入双层结构，分层表达列车运行计划与资源冲突的优化协调过程。张嘉敏[48]、Burkolter[49]将车站能力考虑为“全局列车时序占用”“局部资源冲突”2个层面，以petri网为基础，在不考虑列车在咽喉区资源冲突情况下，确定全局列车到发的优化方案，进而求解局部冲突下的资源占用问题，计算车站通过能力，但此算法在实施过程中未考虑局部资源冲突消解对全局时序占用的影响。

（3）动态表征法。既有研究中部分学者着重研究编组站能力不确定性，方慧[50]、谢迎春等[40]、李东[10]、杨运贵[8]分别采用灰色理论、概率密度置信区间、Bootstrap估计法、贝叶斯区间估计法等多种方法动态表征编组站能力。其中，区间估计法被广泛应用，区间估计法的基本思想是在一定的置信水平α下，构造2个依赖于样本观察的不等统计量以

形成一个区间，N次独立抽样得到的N个随机区间内包含参数真值θ的频率不小于$1-\alpha$，进而推得θ属于这个可信区间的概率为$1-\alpha$[1]。该法通过对各项作业原始观测数据的处理，进而计算各项作业时间标准的置信区间，再以利用率法为基础，求得车站各项作业能力的置信区间。已有研究针对传统区间估计方法的局限性提出了多种优化策略，薛锋等[51]通过比对多种区间估计方法，采用JAB区间估计法计算技术站能力伸缩范围，并验证该法计算结果的区间宽度。

2.3　车站能力查定技术

我国铁路技术站能力查定早期主要采用人工实地观测记录法，涉及的数据采集、整合及运算处理全过程均需依赖人力完成，存在明显的效率瓶颈。随着计算机联锁和微机监测系统数字化技术大范围推广应用[8]，该领域逐步进入人机协作的评估阶段。此阶段技术革新主要体现在利用计算机设备的存储回放功能替代传统现场观测，操作人员通过后台终端调取作业时序数据实现基础信息采集，并借助专用分析软件完成自动化数据处理。相较于传统人工观测，此类技术的应用突破了数据采集的时空限制，不再依赖现场值守，而是通过调取系统历史数据库，这一改进方案有效降低了现场作业强度，现已成为我国铁路运输系统能力查定普遍采用的主流模式[52]。随着信息采集与处理技术的不断发展，车站能力查定系统也逐步向更自动化、更智能化的方向发展，国内车站能力查定系统主要文献一览表如表2所示。

由表2可见，既有研究主要从计算机联锁系统和多源信息数据获取2方面入手。

基于计算机联锁系统的技术站能力查定系统，通过自动采集联锁系统的数据，取代传统的人工采集方式。采集到数据后与各项作业记录相结合，最终整合为一套完整的写实数据报告。李映红等[53]结合原重庆西站的实际情况，提出了铁路技术站通过能力查定数据处理系统的设计原则，分析系统功能，设计系统数据处理流程，并进行了通过能力信息自动采集的试验；魏方华等[54]为使车站能力查定更为合理简便，研究开发了集计算、优化与信息管理于一体，适合各种站型和作业组织方式的铁路车站能力计算综合集成系统；闫婧[55]基于技术站联锁设备的运行机理，提出了一种利用车站既有设施采集原始数据的方案，通过提取计算机系统内已存有的数据信息，取代传统人工跟班采点写实作业的工作方式。随后把收集的数据输入计算机，再运用专门开发的数据处理系统，自动地对车站能力进行计算；张戬[56]提出基于图解法的铁路车站通过能力计算方式，并据此开发了铁路车站通过能力自动化计算软件平台；唐涛[13]运用“调机动态写实表”详细记录调机作业的全过程，实现改编能力的半自动核查与计算；夏超[14]聚焦于高速铁路车站通过能力计算信息系统的开发设计，以高速铁路车站调度集中系统及计算机联锁系统所存储的车站作业信息为基础数据源，通过系统化的数据采集与处理流程，构建了一套高效精准的高速铁路车站通过能力计算模型，为车站运营管理提供技术支持与决策依据。

表2　国内车站能力查定系统主要文献一览表

Tab.2　Major Chinese literature on railway station capacity checking system

分类	作者	年份	研究内容
基于计算机联锁系统的能力查定系统	李映红等[53]	2003	开发技术站通过能力查定数据处理系统
	魏方华等[54]	2004	开发集计算、优化与信息管理于一体的车站能力综合集成系统
	闫　婧[55]	2004	借助车站设备收集数据并研发系统自动对车站能力进行计算
	张　戬[56]	2009	开发铁路车站通过能力计算软件系统
	唐　涛[13]	2014	基于“调机动态写实表”设计改编能力计算系统
	夏　超[14]	2015	采集车站调度集中和计算机联锁系统中存储的车站作业信息，设计高速铁路车站通过能力计算信息系统
基于多源信息数据获取的车站能力查定系统	王　健[15]	2016	基于SAM系统中的数据，得到编组站到达、始发及中转列车技术作业时间标准
	赵　阳[16]	2018	基于STP系统中的数据，设计车站能力查定系统
	兰　涛[52]	2022	结合编组站综合自动化系统平台，设计了技术站能力自动计算系统软件

基于计算机联锁系统的技术站能力查定系统仍需人工将所采集的写实数据导入计算机系统，随后借助数据自动化处理程序，完成车站能力的自动计算工作。此类查定模式存在一定的缺陷，首先计算机联锁设备自身保存的信息量较为有限，这就导致在数据采集环节以及后续的数据录入工作中，仍有不少部分需要人工来进行操作，所以车站能力计算的全程自动化难以完全实现。而且，由于依赖人工操作，过程中极易出现漏记、错记等问题，不仅降低了查定结果的准确性与可靠性，也难以满足技术站能力查定对自动化和精准化的高标准要求。

依托多源信息数据采集的车站能力评估体系，主要通过多维数据源整合信息，以实现车站能力查定的自动化。王健[15]基于智能车站管理系统的技术作业数据采集机制，建立了符合运输组织特征的现场作业数据分析体系，采用多源异构数据融合方法获取作业流程关键节点信息，针对现场作业岗位人员，构建多维度作业写实数据结构模型，基于上述基础数据层，通过构建综合分析模型实现作业时间参数的标准化处理；赵阳[16]构建了涵盖咽喉能力、到发线能力、牵出线能力、驼峰解体能力以及整体车站运输能力的综合查定模式，并设计了基于STP系统的车站能力查定系统，实现了车站运输能力的自动实时查定；兰涛[52]结合编组站综合自动化平台，探讨了替代人工进行作业的数据采集工作，对所得数据进行规范化处理，自动核算作业能力的可行方案。在此基础上，对技术站作业能力计算系统的软件功能和架构进行了优化设计，确保其能够精确且高效地完成技术站运输效能的评估工作。

3　铁路车站能力协调运用研究

3.1　能力协调内涵

在铁路车站能力研究中，咽喉、到发线、驼峰等微观层面的设备能力计算虽能揭示局部设施作业效率，但难以刻画车站内部多作业环节交互影响、站点资源分配对路网运行的影响和制约。尤其在车流密度高、需求波动大的复杂场景下，宏观层面车站系统综合能力的协调优化研究对提升车站作业效率、缓解运能紧张具有重要作用[57]。

日本等发达国家普遍采用“规划型”运输组织模式，其核心特征是在车站与线路设计阶段便预留较高的能力冗余[58]。运输需求长期低于运输能力且列车种类相对单一，即使在高峰时段也少有能力瓶颈引发的运输作业冲突。因此，国外学者并未将点线能力协调优化作为主要研究方向，而更多关注铁路运输能力理论体系的构建。Njkamp等[59–61]对运输能力进行了系统定义，并对不同情况下的运输能力进行了分析；Reinhardt等[62]根据未来需求，采用时间离散化方法分析铁路网络扩展的影响，并提出铁路运输能力评估模型。此外，部分学者从流量分配角度入手，构建车流分配模型，实现车站整体能力的协同优化。

与国外不同，我国采用“组织型”运输组织模式，路网上客货列车混行且运行速度差异较大，进而产生车站能力不协调问题。现有研究从不同尺度与层次出发，对能力协调的内涵进行了多角度界定，孙焰等[63]系统探讨了通道能力匹配、枢纽衔接及运输模式协同问题，提出了“点线能力协调”概念，强调移动设备与固定设施运能适配；毕明凯[64]考虑客货需求的时空差异，认为理论上的协调(铁路系统内设备利用率均达成一致)难以实现，提出系统各种设备负载水平均保持在合理区间的协调新概念；赵娟[65]指出，铁路点线能力协调的关键在于编组站的改编能力与其改编作业任务相适配，编组站接发、改编作业顺畅进行，且衔接区间的列车也处于稳定运行状态，未出现过度负载或资源闲置情况，即实现能力协调。目前，国内学者对于车站能力协调的研究主要集中于车站内各环节作业协调的微观层面、车站与所衔接区间点线能力协调的宏观层面。

3.2　车站系统能力协调

微观层面以车站为对象，车站内部各子系统分为点系统(如驼峰)、线系统(如出发场和到达场的股道)，研究车站内部各子系统及其之间的协调问题。针对车站内部各环节作业的协调，国内学者采用了利用率法、图解法等，重点从2个层面展开研究，即静态层面车站硬件设备与能力的匹配、动态层面设备作业过程的协调。

在静态协调方面，学者聚焦于硬件设施规模匹配及设计优化，以解决站场设备间能力失衡问题。李磊[66]基于编组站到发场与调车场能力失调现象，分别提出了到发场咽喉区设备、车场线路与长度的

设计准则，强调设施规模适配的基础性作用；孙立军等[67]通过分析双向编组站在机列衔接、折角车流交换等制约车流组织效率的因素，提出设施要融入枢纽各站点、线路整体的思想，包括增设场间线路(建环线、机走线及站内线路立体式疏解等)、加强编组站周边设施的建设(增加列车会让设施建设、建设专用线联络等)，实现枢纽地区整体的均衡运输；张利春等[68]以济南枢纽为对象，通过改造站场设备优化车站作业能力，验证了设施适配的重要性。此类研究多基于静态设计与均衡车流假设，对动态车流波动等现实约束的适应性分析仍显不足。

在动态协调方面，我国学者普遍通过构造协调度模型对车站子系统能力进行研究，计算确定的协调度值。彭桢[57]基于CIPS系统对编组站上、下行子系统及子系统之间的协调性进行研究；曹云[17]通过分析编组站系统静态能力协调与动态能力负荷情况，构建耦合协调度模型定量计算芜湖东站系统能力协调度，识别编组站能力瓶颈环节；张磐[69]基于不均衡车流，对车场能力影响因素进行分析，针对二级四场编组站区别于传统编组站的特殊性，构建以影响因素为指标的系统能力协调评价体系，计算各子系统及编组站系统能力协调程度并验证合理性；刘海岩[18]基于排队论计算了编组站到解、解编和编发系统的合理负荷，建立了能力负荷最小与扩能成本最优的编组站点线能力协调双目标模型；袁野等[70]综合考虑编组站能力的波动性、动态适应性，构建了以系统静态、动态协调为目标的编组站子系统能力协调模型，利用区间占优及区间分析理论对不确定性区间参数进行处理。同时也有研究采用仿真技术[71]、灰色关联分析[72]、分时段差异化建模[73]等方法，以增强对实际作业的适应性。车站系统能力协调研究如表3所示。

3.3　车站与衔接线路能力协调

宏观层面以路网为对象，将车站视为点系统，线路区间视为线系统，以车站、线路能力负荷均衡为优化目标，对车站与衔接区间的点线能力协调问题进行研究。国内既有文献从微观车站作业、枢纽节点至宏观路网等不同层级对点、线能力协调进行分析，普遍利用随机过程理论、排队论与系统协调理论等手段展开研究。

表3　车站系统能力协调研究

Tab.3　Research on railway station system capacity coordination

分类	典型文献	核心理论	方法与贡献
数理建模	姚加林等[74]	系统协调理论	构建协调方程，识别能力薄弱环节
	朱晓立等[73]	随机过程理论	定量分析到解系统饱和状态条件
动态仿真	张　青[71]	离散事件仿真	Arena建模仿真编组站到解子系统
	薛　锋等[75]	动态协调理论	量化车站-运行图能力的动态协调关系
系统优化	刘海岩[19]	双目标优化	构建能力负荷最小与扩能成本最优模型
	唐　睿[76]	排队网络理论	对编组站内部协调、到解系统与区间能力匹配统一建模

在车站与区间点线能力协调研究中，薛贵明等[39]认为车站与区间协调可分2类：静态协调聚焦设计阶段能力预测，为新建或改造服务系统提供依据；动态协调则通过寻找最优运营策略，实现编组站与区间既有系统负荷均衡；杨颖[77]通过分析编组站能力紧张原因，构建了以编组站内部均衡性、各方向接发车数最多以及各衔接区间车流分布均衡为目标的接发车能力优化模型，以解决车站设备负荷不均和各区间车流比例失调问题；李光晔等[78]研究了考虑线路能力协调利用的车站能力优化问题，提出了基于车流径路的优化模型，分析车站与线路的能力匹配性及车流分布规律。研究表明，通过建立的协调优化模型，不仅可以缓解车站能力瓶颈问题，还能够提升整个路网的运行效率。在复杂路网背景下，单节点能力优化已不能满足铁路运输需求，需要从区域路网的整体协调角度进行多节点协同优化研究。

在路网点线能力协调研究中，孙琦[79]提出路网点线能力协调可以理解为点能力负载均衡、线能力负载均衡，并设计了启发式算法求解模型；刘明玮[58]从技术站的改编能力以及线路能力负荷差值出发，提出了一个车流分配点-弧模型，该模型旨在优化整体路网点线能力协调性，并将车流运输总费用控制在最小范围内，基于微进化设计车流分配算法高效求解；韩军[80]同样基于传统车流分配理论，以路网点线能力协调性、车流运输时间最少为目标构建车流分配优化模型。

路网点线能力的协调优化可以总结为4类：①交通运输枢纽内各干线运输能力要相互协调配合；②车站与线路的负载应均衡分布；③在路网系

统内部，设备水平须与作业能力相适配；④在建设及扩能改造阶段，通过完善设施设备、优化运输组织方案等手段，达到点线能力的协调统一。因此，铁路网点线协调可界定为通过一系列方法与手段，使路网点线能力处于协调的同时，又能促进铁路系统各点、线子系统向协调目标发展。

现有点线能力协调研究多以编组站为对象，对高铁车站点线能力协调的研究较少，且考虑到高铁车站与编组站在功能定位与作业特征上的本质差异，这里对高铁车站点线能力协调进行单独说明。对高铁车站点线能力协调的研究同样可以划分为3种类型：①直接计算车站通过能力与线路区间通过能力，再根据能力间的数量关系分析协调关系；②将车站、线路看作整体，通过构建数学模型测算协调性[81]；③运用计算机仿真软件构建高铁站模型，通过模拟还原铁路系统的运营场景来评估其协调性[82−83]。对于第1类，高铁车站区别于编组站，不以车站子系统协调能力进行评估，而是评估车站的通过能力及线路通过能力[15]。对于第2类，由于目前针对高铁点线系统能力的研究不多，且考虑到既有铁路领域的成果具有一定参考性，因此与编组站不做区分。其中，前2类不能反映点、线能力在现实场景中相互影响与转移的情形，而且难以评估车站衔接多个区间时的点线能力协调度；第3类方法从微观角度仿真模拟车站系统，反映系统能力利用情况，精度更高、适用范围更广，具有实际指导作用，但目前国内外相关研究都较少。

3.4　能力协调优化作用

车站系统内部的能力协调，以及车站与衔接线路之间的能力协调，是确保铁路运输高效运作的关键。前者涉及解体、编组、调车等作业环节的顺畅衔接，后者则影响车流的接续效率与路网的整体承载能力。已有研究表明，能力协调优化对于提升车站运行效率、缓解运输瓶颈、实现资源均衡配置具有重要意义。

运输组织层面，江海潮[84]构建高铁枢纽点线协调优化模型，揭示了枢纽车站资源利用效率对经济效益与网络运行稳定性的直接影响。随着铁路网的扩展，车流波动和路网的点线能力协调成为铁路运输效率提升亟待解决的难题，通过优化车流的路径选择，能够有效减少车站运输能力瓶颈。张旭昇[85]从路网车流角度出发，揭示了枢纽车站资源利用效率对网络运行稳定性的直接影响，以提升铁路网的承载能力与灵活性；孙琦[79]考虑负荷均衡和点线能力约束，设计车流径路选择模型，分析了不同车站系统作业配置方案对点线能力协调的影响，合理规划路网中的点线运输作业任务，为车站资源优化配置提供相应的技术支持。

编组站场景下，内部子系统的能力协调优化对提升作业效率与整体系统稳定性表现出明显价值。汪敏[86]将编组站划分为3个作业子系统，针对列车提速后导致的不均衡到达现象，通过确定各作业过程之间的关系及制约因素，提出作业衔接优化措施以提升车站整体作业效率；陈鹏[87]针对列车均衡到达与繁忙期超量到达情况，提出了改进股道计算方法，以避免某一条到发线超负荷运作或其他到发线利用低效的现象，保证了站内作业的平衡高效，有助于提升到解系统协调性；赵海宽等[88]提出实施铁路运输“短平快”(即工期短、投资小、见效快)型项目解决路网能力瓶颈制约问题，协调车站与枢纽的点线能力，实现路网集疏运系统的高效运转；陈晓竹等[89]利用仿真技术分析高铁车站到发线数量与车流强度对能力协调性的影响，研究表明，随着车站到发线数目增加，车站能力提升，协调性相应改善；而车流到达强度减小时，发车间隔增大，也为能力协调提供了更大的调整空间。

4　结论与展望

4.1　结论

通过对铁路车站能力计算与协调运用既有研究的梳理可知，现阶段研究形成了较为清晰的理论框架和方法体系，并取得了显著的应用成果，但仍存在一些亟待解决的问题。具体而言，目前的研究主要集中于能力计算从静态向动态与数据驱动转变；能力协调由站内匹配扩展至点线及区域路网协同；能力运用则由传统人工管理发展为“规划–仿真–智能决策”的综合应用。目前，仍面临三大核心挑战：一是现有模型对复杂运营环境下动态车流适应性仍显不足；二是车站与线路、区域路网的多层级能力协调策略尚未完善；三是能力评估结果与实时

调度决策之间的反馈仍有待加强。这些问题是制约车站能力精细化管控与路网效能全面提升的瓶颈，也是未来研究的重点方向。

4.2　展望

为应对复杂路网与高密度行车条件下车站能力精准评估与高效运用的挑战，既有研究方法在动态适应性、系统协调性与调度支持能力方面仍存在明显不足，亟待从以下方面进一步深入探索。

（1）车站能力建模与查定方法的融合创新。当前能力计算方法大多针对单一环节进行静态评估，难以满足实际运营中车流波动与系统耦合下的精细化识别要求。未来研究应在现有分析计算、图解与仿真方法的基础上，引入多因素、可变参数的建模思路，构建适用于不同站型、不同作业模式的动态计算模型。同时，应结合调度系统、计算机联锁、自动化监测等多源数据，推动能力查定方法向数据驱动、动态更新方向发展，增强模型对能力变化趋势的刻画能力，并提升评估结果的时效性。

（2）车站能力协调优化的智能化推进。随着铁路网规模扩大与列车运行密度提升，单点能力优化已难以满足整体效率提升的要求。未来应注重从车站与区间的协同视角出发，研究多节点能力协调策略和多方向车流组织模式，构建以负荷均衡与资源约束为核心的能力协调优化模型。同时应结合实际调度约束与车站作业逻辑，引入自动化监测等实时信息获取手段，增强模型对运行状态变化的感知能力与动态调整能力，为复杂网络下的列车调度和路径分配提供理论依据。

（3）能力评估与调度工作的衔接拓展。能力研究成果的实际价值，最终应体现在对作业组织的支持与服务上。未来研究应注重将能力计算与查定结果嵌入调度指挥和作业组织过程中，为运行图编制、列车接续、路径调整等环节提供技术参考。特别是在作业资源紧张或运输需求波动显著的场景下，能力评估结果可作为辅助判断依据，以提升调度方案和作业计划的适应性与合理性，推动能力研究从静态评估工具向动态辅助功能拓展。

参考文献：

[1] 刘嘉河．高速铁路车站通过能力计算及动态指标评价研究[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[2] 张　艳．铁路技术站能力查定及其技术改造研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[3] 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.

[4] 丁晓晓．大站快车开行比例对市域(郊)列车高峰小时能力的影响研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(4)：44-52.
DING Xiaoxiao. Research on the Influence of Express Train Proportion in Major Stations on the Rush Hour Capacity of Suburban Railways[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(4)：44-52.

[5] 林　静，魏振宇，胡盛斌，等．基于改进社会力模型的地铁大客流疏散能力研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(7)：207-212.
LIN Jing，WEI Zhenyu，HU Shengbin，et al. Research on Evacuation Capacity of Large Passenger Flow in Subway Based on Improved Social Force Model[J]. Journal of Safety Science and Technology，2022，18(7)：207-212.

[6] 辜　刚．基于数理统计的车站卸车能力优化研究[J]. 铁道运营技术，2023，29(4)：9-12.
GU Gang. Optimization of Unloading Capacity of Panji Coal Preparation Plant Station[J]. Railway Operation Technology，2023，29(4)：9-12.

[7] DAI H. Railway Freight Volume Prediction Based on Spatiotemporal Graph Convolutional Neural Network[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science，2024，7(6)：69-74.

[8] 杨运贵．铁路车站能力的计算方法与查定技术研究[D]. 成都：西南交通大学，2010.

[9] 杨介平．铁路运输能力的计算与利用[M]. 北京：中国铁道出版社，2001.

[10] 李　东．重载铁路技术站通过能力研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.

[11] 田亚明．铁路网编组站改编能力配置优化模型[J]. 铁道学报，2013，35(6)：6-12.
TIAN Yaming. Railway Marshalling Yards Reclassification Capacity Configuration Optimization Model[J]. Journal of the China Railway Society，2013，35(6)：6-12.

[12] 田亚明，林柏梁，王志美．考虑始发直达比重的编组站

改编能力优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息，2011，11(3)：65-70.
TIAN Yaming，LIN Boliang，WANG Zhimei. Optimization Model for Resorting Capacity of Marshalling Station under Considering Proportion of Direct Trains[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2011，11(3)：65-70.

[13] 唐　涛. 技术站改编能力查定及软件开发研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.

[14] 夏　超. 高速铁路车站通过能力查定及软件开发研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.

[15] 王　健. 基于编组站综合自动化系统的列车到发技术作业过程查定方法研究[J]. 铁道运输与经济，2016，38(5)：31-35，55.
WANG Jian. Study on Examination & Determination Method of Train Receiving-Departure Technical Operation Process Based on SAM[J]. Railway Transport and Economy，2016，38(5)：31-35，55.

[16] 赵　阳. 基于STP系统的车站运输能力查定方法研究[J]. 铁道运输与经济，2018，40(5)：36-40，45.
ZHAO Yang. A Research on the STP-Based Approach to Assessing Transport Capacities of Train Stations[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(5)：36-40，45.

[17] 曹　云. 芜湖东编组站系统能力协调优化研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2023.

[18] 刘海岩. 编组站点线能力协调研究[D]. 北京：北京交通大学，2012.

[19] 刘海岩. 编组站与衔接区间能力协调模型研究[J]. 铁道建筑技术，2013(10)：103-105.
LIU Haiyan. Research on Capacity Coordination Model of Marshaling Station and Adjacent Section[J]. Railway Construction Technology，2013(10)：103-105.

[20] 崔炳谋，王天顺. 确定客运到发线空费系数的模拟方法[J]. 兰州铁道学院学报，1995，14(2)：42-46.

[21] 陈　琳，钟友平，冯凡卡. 缓解车站到发线通过能力紧张的途径[J]. 铁道运营技术，2004，10(1)：15-17，19.
CHEN Lin，ZHONG Youping，FENG Fanka. An Approach to Alleviate the Shortage of Passing Capacity of Receiving-Departure Tracks[J]. Railway Operation Technology，2004，10(1)：15-17，19.

[22] 站场学科组，马桂贞，曹若玉，等. 客运站能力计算方法[J]. 北方交通大学学报，1989(4)：11-21.

[23] 高世蕊. 客运专线车站通过能力计算方法的研究[J]. 铁道运输与经济，2005，27(10)：92-94.
GAO Shirui. Study on the Calculation Method of Through Capacity for Passenger Dedicated Line[J]. Railway Transport and Economy，2005，27(10)：92-94

[24] 苗建瑞，蒋　熙，于　勇，等. 铁路车站(场)列车到发与调车作业过程仿真的研究[J]. 北方交通大学学报，2000，24(3)：50-54.
MIAO Jianrui，JIANG Xi，YU Yong，et al. Study of the Simulation System of Train and Shunting Operation Process at Railway Station (Yard)[J]. Journal of Northern Jiaotong University，2000，24(3)：50-54.

[25] 刘　澜，王　南，杜　文. 车站咽喉通过能力网络优化模型及算法研究[J]. 铁道学报，2002，24(6)：1-5.
LIU Lan，WANG Nan，DU Wen. A Study of Network Optimization Model and Algorithm for Carrying Capacity of Station Throat[J]. Journal of the China Railway Society，2002，24(6)：1-5.

[26] 党杨瑞. 基于道岔分组的高速铁路车站咽喉通过能力计算[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：9-18.
DANG Yangrui. Calculation of Throat Capacity of High Speed Railway Station Based on Turnout Grouping[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(4)：9-18.

[27] 汤　波，雷定猷，张英贵，等. 铁路车站咽喉通过能力计算方法[J]. 交通运输工程学报，2010，10(6)：69-74.
TANG Bo，LEI Dingyou，ZHANG Yinggui，et al. Calculating Method of Carrying Capacity for Railway Station Bottleneck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2010，10(6)：69-74.

[28] 邓珺文，张永祥. 列车到发分布对高速铁路车站到发线通过能力利用的影响分析[J]. 交通运输工程与信息学报，2017，15(3)：63-70.
DENG Junwen，ZHANG Yongxiang. Analysis of the Influence of Arrival and Departure of Trains on the Carrying Capacity of Express Railway Station[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2017，15(3)：63-70.

[29] 刘庆伟，王慈光. 工业站到发线通过能力查定方法研究[J]. 铁道运输与经济，2004，26(6)：76-78.
LIU Qingwei，WANG Ciguang. Study on the Determining Method of Through Capacity for the Departure/Arrival Track of Industrial Station[J]. Railway Transport and Economy，2004，26(6)：76-78.

[30] 刘其斌，王能豪，郑时德，等. 铁路编组站驼峰解体能力及其影响因素的计算方法[J]. 铁道科技动态，1989(9)：20-25.

[31] 陈　韬. 高速铁路车站通过能力计算理论与方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[32] 代科建. 编组站系统结构分析及能力协调研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.

[33] 白守明，岳永强，汪彦军. 企业铁路车站通过能力通用计算方法[J]. 交通科技与经济，2012，14(1)：100-101.
BAI Shouming，YUE Yongqiang，WANG Yanjun. The Calculation of the Enterprise Railway's Through Capacity[J]. Technology & Economy in Areas of Communications，2012，14(1)：100-101.

[34] 费安萍. 广州南站咽喉通过能力查定研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(4)：32-38.
FEI Anping. A Study on Throat Area Through Capacity Checking of Guangzhou South Railway Station[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(4)：32-38.

[35] 方　惠. 车站通过能力计算方法若干问题的研究[D]. 成都：西南交通大学，2012.

[36] 赵王梓，王慈光. 车站通过能力计算中的数据处理方法[J]. 中国铁道科学，2006，27(6)：113-116.
ZHAO Wangzi，WANG Ciguang. Method for Data Processing in Calculating Station Carrying Capacity[J]. China Railway Science，2006，27(6)：113-116.

[37] 赵王梓. 车站能力计算数据处理的理论探讨[D]. 成都：西南交通大学，2006.

[38] 王　月. 铁路技术站通过能力研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[39] 薛贵明，李树章. 咽喉道岔组间接妨碍时间计算方法研究[J]. 铁道运输与经济，2018，40(12)：33-37.
XUE Guiming，LI Shuzhang. A Research on a Computing Method about Throat Turnout's Indirect Impediment Time[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(12)：33-37.

[40] 谢迎春，佟　罡，冯俊杰. 考虑随机因素的编组站改编能力计算方法[J]. 铁道运输与经济，2016，38(10)：48-52.
XIE Yingchun，TONG Gang，FENG Junjie. The Computation Method about Sorting Capacity of Marshalling Station Considering Stochastic Factors[J]. Railway Transport and Economy，2016，38(10)：48-52.

[41] 陈旭斌. 乌海西车站能力分析与运输组织优化[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2022.

[42] 陈昂扬. 基于多阶段图解的高速铁路繁忙干线通过能力计算方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[43] 张　戬，何世伟，王　炜. 基于图解法的编组站能力综合系统研究[J]. 铁路计算机应用，2009，18(3)：1-3.
ZHANG Jian，HE Shiwei，WANG Wei. Research on Integrated System of Marshalling Station Capacity Based on Graphic Method[J]. Railway Computer Application，2009，18(3)：1-3.

[44] 王国君. 京张铁路清河站到发线规模优化及图解验证[J]. 交通与运输，2022，38(3)：41-44.
WANG Guojun. Configuration Optimization and Simulation Verification of Arrival-Departure Track Scale in Qinghe Station of Beijing-Zhangjiakou Railway[J]. Traffic & Transportation，2022，38(3)：41-44.

[45] 彭　辉，任保国. 计算机模拟方法计算铁路编组站到发线通过能力的研究[J]. 微机发展，1996，6(3)：38-41.

[46] 李海鹰，杨肇夏. 基于不均衡运输的编组站能力计算方法探讨[J]. 北京交通大学学报，2005，29(6)：9-12.
LI Haiying，YANG Zhaoxia. Computation of Capacity at Marshalling Yard Based on Imbalanced Transport Circumstances[J]. Journal of Northern Jiaotong University，2005，29(6)：9-12.

[47] 李海鹰，张　超. 编组站到解系统通过能力计算方法[J]. 中国铁道科学，2010，31(3)：120-125.
LI Haiying，ZHANG Chao. Calculation Method for the Carrying Capacity of the Arriving and Breaking up System in Marshalling Yard[J]. China Railway Science，2010，31(3)：120-125.

[48] 张嘉敏. 高速铁路能力计算与评估之理论与方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2012.

[49] BURKOLTER D. Capacity of Railways in Station Areas Using Petri Nets[D]. Zurich：Swiss Federal Institute of Technology Zurich，2005.

[50] 方　惠，王慈光，赵　亮. 基于灰色系统理论的车站通过能力计算方法研究[J]. 铁道运输与经济，2012，34(4)：28-34.
FANG Hui，WANG Ciguang，ZHAO Liang. Research on Calculation Method of Station Passing Capacity Based on Grey System Theory[J]. Railway Transport and Economy，2012，34(4)：28-34.

[51] 薛　锋，袁　野，户佐安，等. 基于三参数区间泛灰数的技术站能力表示与估计方法[J]. 西南交通大学学报，2021，56(5)：953-959.
XUE Feng，YUAN Ye，HU Zuoan，et al. Representation and Estimation Method for Technical Station Capacity Based on Three-Parameter Interval Gray Numbers[J]. Journal of

Southwest Jiaotong University，2021，56(5)：953-959.

[52] 兰　涛. 基于多源信息数据的铁路技术站能力自动计算技术研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2022.

[53] 李映红，唐优华，王慈光. 技术站通过能力查定方法及数据处理系统的研究[J]. 铁道运输与经济，2003，25(8)：54-56.
LI Yinghong，TANG Youhua，WANG Ciguang. Study on Examination & Determination Method and Data Processing System for the Through Capacity of Technical Station[J]. Railway Transport and Economy，2003，25(8)：54-56.

[54] 魏方华，刘　澜. 铁路车站能力计算综合集成系统的研究[J]. 铁道运输与经济，2004，26(7)：75-77.
WEI Fanghua，LIU Lan. Study on the Comprehensive and Integrated Calculation System for Railway Station Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2004，26(7)：75-77.

[55] 闫　靖. 技术站能力查定与计算方法的研究[D]. 成都：西南交通大学，2004.

[56] 张　戬. 铁路车站通过能力计算方法研究与系统开发[D]. 北京：北京交通大学，2009.

[57] 彭　桢. “CIPS”环境下成都北编组站能力协调研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[58] 刘明玮. 基于车流分配的铁路路网点线能力协调优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2021.

[59] NJKAMP P D，VLEUGEL A M，KREUTABERGER E. Assessment of Capacity in Infrastructure Networks：A Multidimensional View[J]. Transportation Planning and Technology，1992，17(4)：301-310.

[60] CLARKE D B. An Examination of Railroad Capacity and Its Implication for Rail-Highway Intermodel Transportation[D]. Knoxville：University of Tennessee，1995.

[61] CHEN A，YANG H，LO H K，et al. A Capacity Related Reliability for Transportation Networks[J]. Journal of Advanced Transportation，1999，33(2)：183-200.

[62] REINHARDT L B，PISINGER D，LUSBY R. Railway Capacity and Expansion Analysis Using Time Discretized Paths[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal，2018，30(4)：712-739.

[63] 孙　焰，姜　磊. 具有能力限制的路网重车流径路优化方法[J]. 铁道运输与经济，2005，27(12)：82-84.
SUN Yan，JIANG Lei. Route Optimizing Method of Loaded Car Flow with Capacity Limit in Railway Network[J]. Railway Transport and Economy，2005，27(12)：82-84.

[64] 毕明凯. 考虑运输时间和改编费用的铁路路网车流分配优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2019.

[65] 赵　娟. 考虑车流组织模式的铁路车流径路优化模型研究[J]. 铁道学报，2017，39(7)：18-24.
ZHAO Juan. Research on Optimizing Model for Car Routing Considering the Pattern of Car Flow Organization[J]. Journal of the China Railway Society，2017，39(7)：18-24.

[66] 李　磊. 编组站各车场能力协调的研究[J]. 铁道运输与经济，2012，34(3)：80-82.

[67] 孙立军，周士超，赵志刚. 基于设施配置完善的双向编组站效能提升研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：171-180.
SUN Lijun，ZHOU Shichao，ZHAO Zhigang. Research on Improving Efficiency of Bidirectional Marshalling Stations Based on Improved Facility Configuration[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：171-180.

[68] 张利春，赵忠生，李新凯，等. 济南铁路枢纽点线能力协调的分析与对策[J]. 铁道运输与经济，2015，37(5)：15-20.
ZHANG Lichun，ZHAO Zhongsheng，LI Xinkai，et al. Analysis on Point-Line Capacity Coordination of Ji’nan Railway Hub and Its Countermeasures[J]. Railway Transport and Economy，2015，37(5)：15-20.

[69] 张　磐. 侯马北编组站系统能力协调优化研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2020.

[70] 袁　野，薛　锋，户佐安，等. 基于三参数区间数的编组站子系统能力协调研究[J]. 交通运输工程与信息学报，2020，18(3)：83-92.
YUAN Ye，XUE Feng，HU Zuoan，et al. Marshalling Station Subsystem Capacity Coordination Based on Three-Parameter Interval Numbers[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2020，18(3)：83-92.

[71] 张　青. 编组站驼峰解体能力影响因素仿真分析[D]. 兰州：兰州交通大学，2015.

[72] 薛　锋. 铁路编组站改编能力影响因素的灰色关联分析[J]. 西华大学学报(自然科学版)，2007，26(6)：89-92，115.
XUE Feng. Grey Relation Theory Is Applied to Analyze Resorting Capacity of Marshalling Station[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition)，2007，26(6)：89-92，115.

[73] 朱晓立，李夏苗. 提速干线上编组站到解系统匹配与协调关系的研究[J]. 中国铁道科学，2004，25(4)：112-115.
ZHU Xiaoli，LI Xiamiao. Research on the Matching and

Coordinating Relationship of the Declassification System in Marshalling Station on Trunk Line with Increased Speed[J]. China Railway Science，2004，25(4)：112-115.

[74] 姚加林，赵　鹏，吴仲文．编组站系统能力协调度的计算分析[J]. 铁道科学与工程学报，2010，7(1)：74-78.
YAO Jialin，ZHAO Peng，WU Zhongwen. Calculation Analysis of Coordination Capacity for the Marshalling System[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2010，7(1)：74-78.

[75] 薛　锋，罗　建．编组站能力与运行图能力的动态协调关系[J]. 铁道运输与经济，2008，30(7)：76-79.
XUE Feng，LUO Jian. Dynamic Coordination Relationship between Marshalling Station Capacity and Train Diagram Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2008，30(7)：76-79.

[76] 唐　睿．编组站能力协调研究[D]. 成都：西南交通大学，2009.

[77] 杨　颖．编组站综合能力分析与研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[78] 李光晔，何世伟，迟居尚，等．考虑线路能力协调利用的车流径路与配空组织优化模型[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(5)：1783-1792.
LI Guangye，HE Shiwei，CHI Jushang，et al. Optimization Model on Loaded & Empty Car Flow Routing Considering Coordinated Utilization of Railway Capabilities[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(5)：1783-1792.

[79] 孙　琦．基于铁路货物运输作业过程的点线能力协调问题研究[D]. 北京：北京交通大学，2010.

[80] 韩　军．基于点线能力协调的铁路货运通道车流分配优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[81] 殷　洁．高速铁路点线系统能力协调性分析研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2019.

[82] 陈晓竹．高速铁路点线能力协调仿真分析[D]. 成都：西南交通大学，2013.

[83] 谢恩雨．基于串并联型点线结构的高铁点线能力协调仿真研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[84] 江海潮．高铁枢纽点线能力协调优化研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[85] 张旭昇．考虑车流量波动和路网能力协调的车流径路优化研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2024.

[86] 汪　敏．编组站子系统能力协调及优化研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2015.

[87] 陈　鹏．编组站列车到达规律及到解系统能力协调研究[D]. 北京：北京交通大学，2014.

[88] 赵海宽，王　涛，宋　锴．实施“短平快”项目提高铁路点线能力协调水平的研究[J]. 铁道运输与经济，2014，36(12)：1-6.
ZHAO Haikuan，WANG Tao，SONG Kai. Study on Implementing “Rapid Spike” Projects and Increasing Coordination Level of Railway Point-Line Capacity[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(12)：1-6.

[89] 陈晓竹，曾　诚．高速铁路车站-区间能力协调性的重要影响因素分析[J]. 交通运输工程与信息学报，2014，12(2)：65-69.
CHEN Xiaozhu，ZENG Cheng. Important Factors Analysis on High Speed Rail Station-Interval Capability Coordination[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2014，12(2)：65-69.

(责任编辑　金　晶)