文章编号：2097-5899(2026)03-0032-08　**中图分类号**：U296　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202502260002
引用格式：张永恒，石江，张进川，等. 重载铁路港前站接卸系统能力研究[J]. 铁路物流，2026，44(3)：32-39.
ZHANG Yongheng，SHI Jiang，ZHANG Jinchuan，et al. Capacity of Receiving and Unloading System in Heavy-Haul Railway Port Station[J]. Railway Logistics，2026，44(3)：32-39.

重载铁路港前站接卸系统能力研究

张永恒[1]，石　江[2]，张进川[3]，王　敏[3]

(1. 中国神华能源股份有限公司 煤炭运输部，北京　100011；2. 国能运输技术研究院有限责任公司 重载运输技术研究中心，北京　100080；3. 北京交通大学 交通运输学院，北京　100044)

摘　要：为了对重载铁路港前站接卸系统能力进行准确评估，本研究分析了重载铁路港前站接卸系统，根据港前站的技术作业过程，接卸系统分为到达子系统、转场子系统和卸车子系统3个部分，共同构成了三级串联排队系统。分析各子系统车流和服务流的规律，并利用经典排队论建立排队模型。通过研究作业时间不均衡和前后作业环节相互影响下的接卸系统能力，计算出各子系统的排队指标。最后以神港站为例，运用上述模型确定了参数和指标，计算了其接卸系统能力并分析了能力瓶颈。研究结果为重载铁路港前站接卸系统的优化设计提供了理论参考。

关键词：重载铁路；港前站；接卸系统；系统能力；排队论

0　引言

重载铁路港前站在铁路路网系统中具有重要作用，其卸车能力满足需求是重载货运专线运输畅通的关键。通过分析和优化港前站运输能力，使其与煤运通道的总能力相匹配，才能避免运力紧张或冗余，促进煤炭市场的长期稳健发展。

国外对于铁路车站，尤其是经营性质具体的车站(如港前站)的能力研究比较少见，主要原因在于多数国家和地区的铁路运输资源与能力相对充足。在排队论方面，国外学者主要使用排队系统理论研究船舶在港口卸货的能力。相比之下，由于过去我国铁路运输能力的不足，关于铁路区间、编组站以及点线系统协调能力的研究更为广泛，但将重载铁路港前站等车站视为一个排队系统的研究则很少。景菲等[1]针对铁路口岸站作业系统，引入反向虚拟车流构建闭环排队网络模型，实现了对系统作业能力的量化计算及关键制约因素的识别；肖贺荣[2]以重载铁路煤炭装车站为研究对象建立排队论模型，计算了装车站系统的能力并提出了扩能方法。白云云[3]分析了重载铁路卸车站卸车系统，提出了三级串联卸车系统排队模型，用来计算各子系统的合理设备配置。李静等[4]针对编组站货车集结过程构建了放宽条件定点集结模式下编组站车辆集结排队模型，分析了相关因素对排队系统指标的影响。在重载铁路装卸站相关研究不够丰富和充实的背景下，很少有文献考虑到卸车系统能力计算和分析的特殊性，并将服务台(翻车机)发生故障而不能为顾客(重载列车)提供服务的情形纳入研究范畴。卸车系统中翻车机在发生故障后，需要经修理工进行维修或更换才能继续进行卸车作业，若沿用经典排队模型分析卸车系统能力，则无法很好地切合现实情况，不利于深入分析排队系统中列车到达过程与卸车作业过程对系统排队和可靠性指标的影响。

因此，基于以上研究现状，对港前站的接卸作业流程及作业特点进行分析，构建港前站三级串联排队系统。根据子系统内到达车流和服务流的理论分布特征，构建相应的排队模型，并计算其排队指标，对系统性能进行量化分析。以国家能源投资集团有限责任

收稿日期：2025-02-26　**修订日期**：2026-02-09
基金项目：国家自然科学基金联合基金项目(U2368204)

公司(以下简称“国家能源集团”)神港站为例，计算接卸系统的现有能力，并比较得出车站能力瓶颈。

1　重载铁路港前站概念及特点

港前站作为重载铁路卸车站，具有特定地理位置要求，一般与港口的煤炭输送系统相连，且主要卸煤地点多为港口以及钢厂、电厂等大型能源消耗场所[5]。为了能够满足整列卸车要求，同时减少取送车作业的影响，港前站需要采用先进的卸车作业设备，实行现代化的作业组织模式。重载铁路港前站的主要任务是围绕货物接卸、卸车调度以及货物暂存等展开的，需要协调各方面的工作，确保卸货作业流程的顺畅和货物安全输送。港前站作业涵盖多个关键环节，主要分为列车到达作业、转场对位作业和翻车机卸车作业。重载铁路港前站接卸系统作业流程图如图1所示[6]。

根据列车在港前站的技术作业流程，可将其分为到达、转场和卸车子系统。重载铁路港前站接卸系统排队系统示意图如图2所示。基于排队论，可将港前站的各个子系统视作随机服务系统，以此来计算确定车站设施的数量规模与负荷能力等优化方案，以及优化列检流程、合理安排卸车设备的布局等调整措施，并将其运用到实践运营中[7]。

2　港前站排队系统指标

根据顾客到达间隔时间、服务时间、服务台数量、系统容量、顾客源数量、服务规则6个特性的不同组合方式，采用特定的符号来表示排队服务系统的类型，符号形式是：$X/Y/Z/A/B/C$。排队模型符号定义如表1所示。

2.1　接卸系统各子系统指标计算

2.1.1　到达子系统指标计算

列车在到达子系统中的到达间隔时间与在区间内的追踪间隔时间紧密关联，为提高线路运输能力，并确保运输作业的安全性，列车到达时间往往服从负指数分布，且一般大于或等于最小追踪间隔时间[8]。

该子系统的服务时间即列检时间，列检作业时须按照车站规定完成列车技术检查任务，且可能因为天气原因和操作熟练度产生一定的延误，因此列检时间

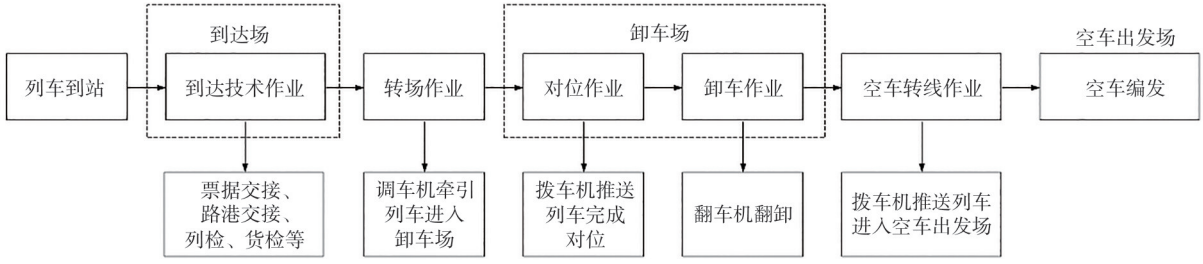


图1　重载铁路港前站接卸系统作业流程图

Fig.1　Operation process of receiving and unloading system in heavy-haul railway port station

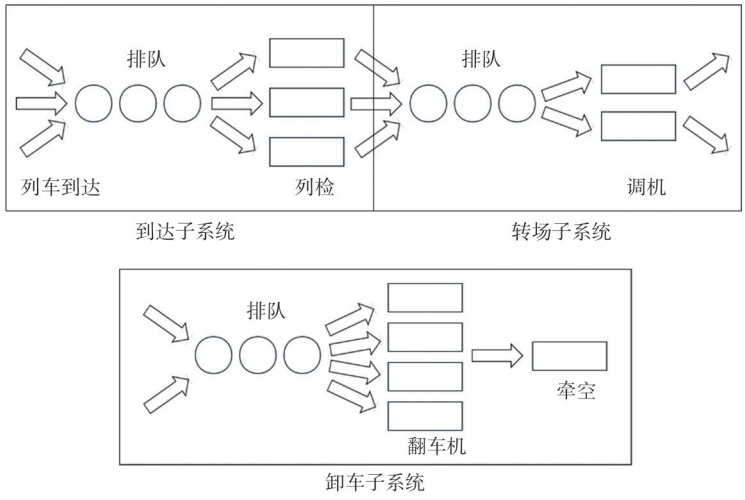


图2　重载铁路港前站接卸系统排队系统示意图

Fig.2　Queuing system of receiving and unloading system in heavy-haul railway port station

表1　排队模型符号定义

Tab.1　Definition of symbols in queuing model

符号	定义
X	顾客相继到达间隔时间的分布
Y	系统服务时间的分布
Z	并列的服务台数量
A	系统容量的限制
B	顾客源数量
C	服务的规则(先到先服务、后到先服务等)

一般是大于或等于某个最小值，也服从负指数分布。

因此，到达子系统排队模型为$M/M/s/\infty/\infty$模型，s为服务台数量。

到达子系统的输入流取决于到达列车流，输入流强度，即单位时间到达列车的平均数量$\lambda_{到}$，其计算公式为

$$\lambda_{到}=N_{到}/24 \tag{1}$$

式中：$N_{到}$为每天到达车站的列车数，列。

单位时间能被列检完成的列车数量，即平均服务率$\mu_{到}$计算公式为

$$\mu_{到}=\frac{1}{t_{检}} \tag{2}$$

式中：$t_{检}$为服务间隔时间，即列车平均列检时间，h。

到达子系统的服务强度$\rho_{到}$的计算公式为

$$\rho_{到}=\frac{\lambda_{到}}{s_{到}\mu_{到}}=\frac{N_{到}t_{检}}{24\,s_{到}} \tag{3}$$

式中：$s_{到}$为服务台数量，即列检组数量，个。

到达子系统的输入流间隔时间的波动系数$\upsilon_{\lambda,到}$和服务间隔时间的波动系数$\upsilon_{\mu,到}$的计算公式为

$$\upsilon_{\lambda,到}=\frac{\sigma\left(t_{到}\right)}{M\left(t_{到}\right)} \tag{4}$$

$$\upsilon_{\mu,到}=\frac{\sigma\left(t_{检}\right)}{M\left(t_{检}\right)} \tag{5}$$

式中：$M\left(t_{到}\right)$为到达间隔时间的数学期望；$\sigma\left(t_{到}\right)$为到达间隔时间的标准差；$M\left(t_{检}\right)$为列检作业时间的数学期望；$\sigma\left(t_{检}\right)$为列检作业时间的标准差。

基于以上分析，到达子系统排队指标计算公式如下。

到达子系统内的平均列车数$L_{s,到}$的计算公式为

$$L_{s,到}=L_{q,到}+s_{到}\rho_{到} \tag{6}$$

式中：$L_{q,到}$为到达子系统队列中等待的平均列车数，列/h。

到达子系统队列中等待的平均列车数$L_{q,到}$的计算公式为

$$L_{q,到}=\frac{(s_{到})^{s_{到}}(\rho_{到})^{s_{到}+1}}{s_{到}!\left(1-\rho_{到}\right)^2}P_{0,到}\frac{\upsilon_{\lambda,到}^2+\upsilon_{\mu,到}^2}{2} \tag{7}$$

式中：$\upsilon_{\lambda,到}$为到达子系统中到达流的波动系数；$\upsilon_{\mu,到}$为到达子系统中服务时间的波动系数；$P_{0,到}$为到达子系统中没有顾客的概率。

$P_{0,到}$计算公式为

$$P_{0,到}=\left[\left(1+s_{到}\rho_{到}+\frac{\left(s_{到}\rho_{到}\right)^2}{2!}+\cdots+\frac{\left(s_{到}\rho_{到}\right)}{\left(s_{到}-1\right)!}\right)+\frac{\left(s_{到}\rho_{到}\right)^{s_{到}}}{s_{到}!\left(1-\rho_{到}\right)}\right]^{-1} \tag{8}$$

到达子系统中列车的平均停留时间$W_{s,到}$计算公式为

$$W_{s,到}=W_{q,到}+\frac{1}{\mu_{到}} \tag{9}$$

到达子系统队列中列车的平均等待时间$W_{q,到}$计算公式为

$$W_{q,到}=\frac{L_{q,到}}{\mu_{到}}=\frac{s_{到}^{s_{到}}\rho_{到}^{s_{到}+1}\left(\upsilon_{\lambda,到}^2+\upsilon_{\mu,到}^2\right)P_{0,到}}{2s_{到}!\left(1-\rho_{到}\right)^2\mu_{到}} \tag{10}$$

2.1.2　转场子系统指标计算

转场子系统列车到达间隔时间和服务间隔时间受到达子系统输入流波动系数$\upsilon_{\lambda,到}$和列检组作业时间波动系数$\upsilon_{\mu,到}$的影响，需要对波动系数加以考虑，才能更接近真实分布。为简化排队模型，认为转场子系统到达间隔时间服从一般分布。

转场子系统服务时间包括转场和对位时间。调车机牵引作业流程相对固定，为保证作业安全，规定了牵引和推送速度的最大值，作业时间通常大于某个最小值，因此服务间隔时间服从负指数分布。

因此，转场子系统排队模型为$G/G/s/\infty/\infty$模型。

转场子系统输入流即到达子系统输出流，转场子系统输入流强度$\lambda_{转}$的计算公式为

$$\lambda_{转}=\frac{N_{检}}{24} \tag{11}$$

式中：$N_{检}$为一天内列检完成的列车数量，列。

转场子系统服务率$\mu_{转}$计算公式为

$$\mu_{转}=\frac{1}{t_{调}} \tag{12}$$

式中：$t_{调}$为服务间隔时间，即转场和对位作业的平均时间，h。

其中，若不考虑技术作业中断，服务间隔时间$t_{调}$的计算公式为

$$t_{调}=t_{调}^{周}\frac{T_{周}^{调}}{N_{周}} \tag{13}$$

式中：$t_{调}^{周}$为调车机进行一次调车作业所需时间，h；$T_{周}^{调}$为调车机的作业周期，即从开始作业到再次开始作业的时间，h；$N_{周}$为在调车机的作业周期$T_{周}^{调}$内对位完成的平均列车数，列。

若考虑技术作业中断，服务间隔时间$t_{调}$的计算公式为

$$t_{调}=t_{调}^{周}\left(1+\frac{T_{中断}}{1\,440-T_{中断}}\right) \tag{14}$$

式中：$T_{中断}$为调车机的中断作业时间，min。

转场子系统的负荷水平$\rho_{转}$为

$$\rho_{转}=\frac{\lambda_{转}}{\mu_{转}}=\frac{N_{检}t_{调}}{24} \tag{15}$$

转场子系统输入流间隔时间的波动系数$\upsilon_{\lambda,转}$和服务间隔时间的波动系数$\upsilon_{\mu,转}$的计算公式为

$$\upsilon_{\lambda,转}=\frac{\sigma\left(t_{检完}\right)}{M\left(t_{检完}\right)} \tag{16}$$

$$\upsilon_{\mu,转}=\frac{\sigma\left(t_{调}\right)}{M\left(t_{调}\right)} \tag{17}$$

式中：$M\left(t_{检完}\right)$为列检完毕间隔时间的数学期望；$\sigma\left(t_{检完}\right)$为列检完毕间隔时间的标准差；$M\left(t_{调}\right)$为调车对位时间的数学期望；$\sigma\left(t_{调}\right)$为调车对位作业时间的标准差。

基于以上分析，转场子系统排队指标计算公式如下。

转场子系统内列车的平均数$L_{s,转}$计算公式为

$$L_{s,转}=L_{q,转}+s_{转}\rho_{转} \tag{18}$$

式中：$L_{q,转}$为转场子系统队列中等待的列车平均数，列/h；$s_{转}$为服务台的数量，即调车机的台数，台。

转场子系统队列中等待的列车平均数$L_{q,转}$计算公式为

$$L_{q,转}=\lambda_{转}W_{q,转} \tag{19}$$

式中：$W_{q,转}$为列车在转场子系统队列中的平均等待时间，h。

列车在转场子系统的平均停留时间$W_{s,转}$计算公式为

$$W_{s,转}=W_{q,转}+\frac{1}{\mu_{转}} \tag{20}$$

列车在转场子系统队列中的平均等待时间$W_{q,转}$计算公式为

$$W_{q,转}=\frac{\rho_{转}^{s_{转}}\left(\upsilon_{\lambda,转}^2+\upsilon_{\mu,转}^2\right)}{2\mu_{转}\left[\left(s_{转}-1\right)!\left(s_{转}-\rho_{转}\right)^2\sum_{i=0}^{s_{转}-1}\frac{\rho^i}{i!}+\rho_{转}^{s_{转}}\left(s_{转}-\rho_{转}\right)\right]} \tag{21}$$

2.1.3　卸车子系统指标计算

卸车子系统是港前站接卸系统中的核心模块，列车流输入间隔时间和服务间隔时间受转场子系统输入流波动系数$\upsilon_{\lambda,转}$和列检组作业时间波动系数$\upsilon_{\mu,转}$的影响。为简化排队模型，认为到达间隔时间服从一般分布。

卸车子系统的服务时间由3部分组成，即翻卸作业时间、空车转线时间和翻车机作业中断时间[9]。在卸车子系统中，翻车机的工作效率和拨车机的牵引速度恒定，其作业时间受操作员熟练度的影响，在作业时间标准上下波动，可近似服从正态分布。

因此，卸车子系统排队模型为$G/G/s/\infty/\infty$模型。

卸车子系统的输入流可用推送对位结束的间隔时间表示，其输入流强度$\lambda_{卸}$计算公式为

$$\lambda_{卸}=\frac{N_{推}}{24} \tag{22}$$

式中：$N_{推}$为每天推送对位结束的列车数，列。

服务率$\mu_{卸}$计算公式为

$$\mu_{卸}=\frac{1}{t_{卸}} \tag{23}$$

式中：$t_{卸}$为服务间隔时间，h。

$$t_{卸}=t_{翻车}+t_{转线} \tag{24}$$

式中：$t_{翻车}$为翻车机作业时间，h；$t_{转线}$为空车转线时间，h。

$$t_{翻车}=t_{翻}^{周}\left(1+\frac{T_{中断}}{1\,440-T_{中断}}\right) \tag{25}$$

式中：$t_{翻}^{周}$为没有作业中断的情况下，翻车机翻卸一列车耗费的时间，h；$T_{中断}$为翻车机作业中断时间，min。

$$t_{转线}=\frac{l_{转线}}{v_{转线}}+t_{附} \tag{26}$$

式中：$l_{转线}$为空车转线作业列车的走行距离，km；$v_{转线}$为空车转线作业时列车的平均走行速度，km/h；$t_{附}$为安全附加时间，h。

卸车子系统的负荷水平$\rho_{卸}$计算公式为

$$\rho_{卸}=\frac{\lambda_{卸}}{\mu_{卸}}=\frac{N_{推}t_{卸}}{24} \tag{27}$$

卸车子系统输入流间隔时间的波动系数$\upsilon_{\lambda,卸}$和服务间隔时间的波动系数$\upsilon_{\mu,卸}$的计算公式为

$$\upsilon_{\lambda,卸}=\frac{\sigma\left(t_{推完}\right)}{M\left(t_{推完}\right)} \tag{28}$$

$$\upsilon_{\mu,卸}=\frac{\sigma\left(t_{卸}\right)}{M\left(t_{卸}\right)} \tag{29}$$

式中：$M\left(t_{推完}\right)$为推送对位完毕间隔时间的数学期望；$\sigma\left(t_{推完}\right)$为推送对位完毕间隔时间的标准差；$M\left(t_{卸}\right)$为卸车作业时间的数学期望；$\sigma\left(t_{卸}\right)$为卸车作业时间的标准差。

基于以上分析，卸车子系统排队指标计算公式如下。

卸车子系统内列车的平均数$L_{s,卸}$计算公式为

$$L_{s,卸}=\lambda_{卸}W_{s,卸} \tag{30}$$

式中：$W_{s,卸}$为列车在卸车子系统的平均停留时间，h。

卸车子系统队列中等待的列车平均数$L_{q,卸}$计算公式为

$$L_{q,卸}=\lambda_{卸}W_{q,卸} \tag{31}$$

式中：$W_{q,卸}$为列车在卸车子系统队列中的平均等待时间，h。

列车在卸车子系统的平均停留时间$W_{s,卸}$计算公式为

$$W_{s,卸}=W_{q,卸}+\frac{1}{\mu_{卸}} \tag{32}$$

列车在卸车子系统队列中的平均等待时间计算公式为

$$W_{q,卸}=\frac{\rho_{卸}^{s_{卸}}\left(\upsilon_{\lambda,卸}^2+\upsilon_{\mu,卸}^2\right)}{2\mu_{卸}\left[\left(s_{卸}-1\right)!\left(s_{卸}-\rho_{卸}\right)^2\sum_{i=0}^{s_{卸}-1}\frac{\rho^i}{i!}+\rho_{卸}^{s_{卸}}\left(s_{卸}-\rho_{卸}\right)\right]} \tag{33}$$

2.2　接卸系统的能力计算

港前站到达子系统能力反映了车站接收列车的能力，即车站能够处理的最大到站列车数；转场子系统能力反映了列车调度的能力，包括列车转场和对位的时间；而卸车子系统能力则体现了翻车机卸货的能力。这3个部分能力最小值将决定整个港前站接卸系统的总体能力。

因此，港前站的系统能力是一个综合考虑到达、转场和卸车等多个方面的指标，需要在保证每个部分的最佳运行的基础上进行计算和优化。通过确定3个部分的最小值，并针对薄弱系统采用有效的设备配置和行车组织方法优化措施，可以提高整个港前站的系统能力，并提高系统的效率和可靠性。

当设备类型和设备数量确定，且行车组织方式固定的前提下，港前站接卸系统能力可以用各子系统一昼夜能够服务的平均列车数表示，计算公式为

$$C_i=\frac{T_{周}-T_{无效}}{W_{s,i}}\times s_i \tag{34}$$

式中：$T_{周}$为能力计算的周期，一般取24 h；$T_{无效}$为无效作业时间，h；$W_{s,i}$为列车在第i个子系统的停留时间，h，其中，到达子系统$i=1$，转场子系统$i=2$，卸车子系统$i=3$；s_i为第i个子系统的服务台数量。

3　以神港站为例的重载铁路港前站接卸系统能力分析

3.1　神港站概述

神港站成立于2006年8月，隶属于朔黄铁路肃宁分公司管辖，地处天津市滨海新区天津港南疆港区内，是国家能源集团西煤东运的第二大出海口站，神港站位置示意图如图3所示[10]。

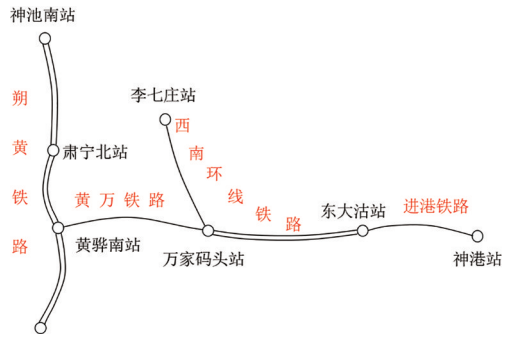


图3　神港站位置示意图

Fig.3　Location of Shengang Station

神港站作为铁水联运的重要衔接站，由港前作业区和港口作业区2个核心部分组成。其中，神港站港前作业区主要办理5 000 t列车的机车换挂、列检等作业，为横列式布置站型，车站中心里程位于黄万线延续里程113 km 377 m、李港线79 km 300 m处。神港站港口作业区主要办理重车卸车作业和清煤作业。港口作业区由铁路Ⅲ场、Ⅳ场和Ⅴ场组成，神港站站场平面布置示意图如图4所示。

车站为混合式一级三场，神港站车场功能和线路分工如表2所示。

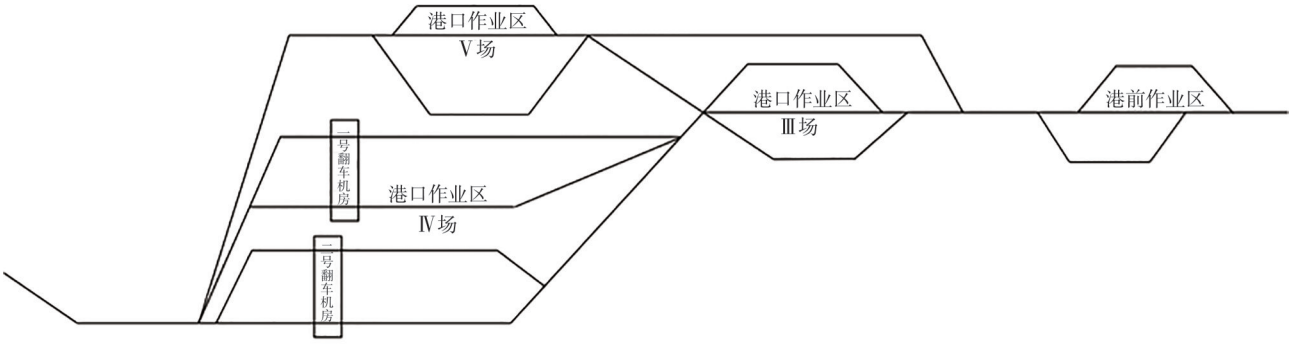


图4　神港站站场平面布置示意图

Fig.4　Planar layout of Shengang Station yard

表2　神港站车场功能和线路分工

Tab.2　Functions and line division of Shengang Station yard

车场	功能	线路分工
Ⅲ场	重车到达场	到达线5条，机待线1条(45 m)
Ⅳ场	卸车场	卸车线8条，空车集结线4条，走行线1条，牵出线2条和装车线1条(930 m)
Ⅴ场	空车编发场	编发线5条，走行线1条、货1线1条(1 180 m)和边修线1条(155 m)

国家能源集团天津煤码头公司设有4台C型转子双翻翻车机，神港站翻车机技术参数如表3所示。

表3　神港站翻车机技术参数

Tab.3　Technical parameters of car dumper of Shengang Station

翻车机	适用车型	一次作业车数/辆	翻卸质量/t	回转周期/s
1#	C_{80}	2	2×100	22
2#	C_{80}	2	2×100	22
3#	C_{80}，C_{64}，C_{70}	2	2×100	22
4#	C_{80}	2	2×100	22

目前，神港站每条卸煤线都配备翻车机房、卸煤坑和地面开关门碰头装置。根据铁水联运产品的技术研发方向和发展趋势预测[11]，自卸式漏斗车将在未来成为提高港前站卸车效率的一大助力，与专用敞车共同用于煤炭、矿石及其他大宗货物的运输。因此，将卸煤坑与翻车机进行一体化配置，有利于提高卸车线运用计划的执行效率。

3.2　神港站接卸系统能力计算

根据2021年1—10月数据计算，神港站日均接车29.2列(其中进港二线接车16列，进港三线接车13.2列)，则接卸系统列车到达流量为1.2列/h。列车到达港前作业区后，依次进入Ⅲ场、Ⅳ场和Ⅴ场的折返型接卸系统进行卸车作业。

该系统由Ⅲ场到达子系统、Ⅳ场的卸车子系统及两场间的转场子系统组成。各子系统服务台数量和服务时间如下。

(1) 在港口作业区的Ⅲ场中，有3个列检组进行列检作业。列车到达港口作业区，并完成摘机和列尾摘解共需4 min，其后列检作业将持续48 min，因此到达子系统的服务时间为52 min。

(2) 港口作业区的Ⅲ场和Ⅳ场使用一调调车机进行转场和对位作业。调车机牵引列车从Ⅲ场到Ⅳ场所需时间为5 min，接着将列车推进到Ⅳ场重车卸车线进行对位作业，该过程需15 min。因此，转场子系统服务时间为20 min。

(3) 港口作业区的Ⅳ场有4台翻车机。每列车翻卸作业时间为88 min，加上每辆空车转线所需的25 min，卸车子系统的服务时间为113 min。

通过应用上文能力计算模型进行计算，Ⅲ场、Ⅳ场和Ⅴ场子系统的参数、排队指标及能力如表4所示。

基于表4数据，按照公式(34)可以计算出各子系统每天能够服务列车的平均列数。

3.2.1　到达子系统到达能力

按照黄万铁路(黄骅南—万家码头)平均每周4.5次天窗，每次3 h计算，每日的施工维修天窗固定时间为1.928 h。因此，$T_{\text{无效,到达}}=1.928$ h。

对于顾客到达时间和服务时间都服从负指数分布的排队系统，列车延误概率的计算公式为

表4　Ⅲ场、Ⅳ场和Ⅴ场子系统的参数、排队指标及能力

Tab.4　Parameters, queuing indicators, and capabilities of yards Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ

系统类别	到达子系统	转场子系统	卸车子系统
所属排队模型	$M/M/3/\infty/\infty$	$G/G/1/\infty/\infty$	$G/G/4/\infty/\infty$
λ_i	1.2	1.2	1.2
μ_i	1.15	3.00	0.53
s_i	3	1	4
ρ_i	0.348	0.400	2.264
$\upsilon_{\lambda,\,i}$	0.540	0.677	0.789
$\upsilon_{\mu,\,i}$	0.506	0.471	0.172
$M\left(t_{服}\right)$	46.828	15.330	107.736
$\sigma\left(t_{服}\right)$	23.693	7.226	18.504
$L_{q,\,i}$/(列/h)	0.015	0.091	0.104
$L_{s,\,i}$/(列/h)	1.058	0.491	2.368
$W_{q,\,i}$/h	0.013	0.076	0.087
$W_{s,\,i}$/h	0.883	0.409	1.974

$$P_{延}=1-\sum_{n=0}^{s}P_n=1-\sum_{n=0}^{s}\left\{\frac{1}{n!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\cdot\left[\sum_{k=0}^{s-1}\frac{1}{k!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k+\frac{1}{s!}\cdot\frac{1}{1-\rho}\cdot\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s\right]^{-1}\right\} \tag{35}$$

则到达子系统的列车延误概率为$P_{延,到达}=3.40\%$。

由公式(34)计算可得，到达子系统到达能力$C_1=75.0$列，故该系统的利用率$K_1=\dfrac{28.8}{75.0}\times100\%=38.4\%$。

3.2.2　转场子系统到达能力

根据《神港站车站行车工作细则》，每台调车机应扣除吃饭、交班和整备所需的辅助生产时间195 min(吃饭早、中、晚各30 min；交班早、晚各30 min；整备每4天1次，加走行共180 min，平均每天45 min)，且空费系数按0.1计算(考虑车型影响、煤种影响、交叉干扰等)。因此，$T_{无效,转场}=5.325$ h。

针对服务时间服从一般分布的排队系统，可以采用近似计算的方法，得到排队系统内的列车延误概率为

$$P_{延}=\sum_{n=m+1}^{\infty}P_n\approx\left(\frac{\rho}{s}\right)^{s+1}\times\frac{\upsilon_\lambda^2+\upsilon_\mu^2}{2} \tag{36}$$

则转场子系统的列车延误概率为$P_{延,转场}=5.44\%$。

由公式(34)计算可得，转场子系统对位能力$C_2=45.7$列，故该系统的利用率$K_2=63.0\%$。

3.2.3　卸车子系统到达能力

通过统计和整理神港站2021年1—10月翻车机故障数据记录，4台翻车机的平均中断时间(包括故障、检修及等待时间)为284.0 min。因此，$T_{无效,卸车}=4.733$ h。

由公式(36)，卸车子系统的列车延误概率为$P_{延,卸车}=1.89\%$。

由公式(34)，卸车子系统卸车能力$C_3=39.0$列，故该系统的利用率$K_3=73.8\%$。

3.3　神港站接卸系统能力分析

由接卸系统各子系统能力计算可知，神港站接卸系统中能力最小的是卸车子系统，为39.0列/d。由于列车在翻车机上进行卸车作业时通常需要耗费较长时间，且神港站翻车机的数量有限，该系统的利用率已经达到了73.8%。从排队现象来看，卸车子系统最容易拥堵，排队时间较长，等待服务的列车数较多，列车延误率相对较高。与之相对的是，到达子系统和转场子系统各项指标较好，几乎没有形成排队现象。

根据神港站2021年1—10月列车到达数据记录，神港站到达车辆中C_{80}，C_{70}，C_{64}型货车数量比例约为10∶1∶0.25，由此算得每辆车平均载重78.8 t，又每列车平均编组55辆，最后算出列车平均净载质量4 334 t。因此，以卸车线作业天数360 d计算，神港站年卸车能力约为4 334×39.0×360/10 000=6 085.0万t。而拟建的神华煤炭码头二期工程吞吐量将达到8 000万t/a，神港站已无法满足二期工程需求。

因此，为应对车站扩建方案实施的过渡期，应当提高对既有卸车设备的利用率，在不新增车场和设备的条件下提升接卸系统能力。结合本研究经典排队模型的参数和指标计算，神港站接卸系统的能力主要受到卸车子系统的能力制约，需要进一步针对卸车子系统中翻车机的数量与布置等提出合理的改进措施，以提高整个接卸系统的能力。

4　结束语

研究提出的排队论模型能够有效应用于不同重载铁路港前站的能力分析与优化。模型基于典型的三级串联排队系统结构，通过合理描述车站各作业环节的排队特征与相互关系，对神港站接卸系统进行了量化分析，揭示了其系统能力瓶颈。随着未来需求的变化，模型的适用性和扩展性具有较强的潜力，在系统改造方案的动态调整上更具优势。

参考文献：

[1] 景　菲，李春丽. 铁路口岸站作业系统能力研究[J]. 铁道货运，2024，42(6)：60-67.
JING Fei，LI Chunli. Research on Operation System Capabilities of Railway Port Stations[J]. Railway Freight Transport，2024，42(6)：60-67.

[2] 肖贺荣. 基于排队论与系统模拟的煤矿装车站系统能力分析[D]. 长沙：中南大学，2010.

[3] 白云云. 重载铁路卸车站到卸系统能力计算及优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[4] 李　静，帅　斌，许旻昊，等. 放宽条件定点集结模式下编组站车辆集结排队系统分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2019，19(4)：193-201.
LI Jing，SHUAI Bin，XU Minhao，et al. Performance Analysis of Car Assembly Queuing Model of Marshalling Station in the Time-Fixed Mode with Softened Terms[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2019，19(4)：193-201.

[5] 杨　浩. 铁路运输组织学：第2版[M]. 北京：中国铁道出版社，2006.

[6] 付立斌. 采用翻车机系统的铁路卸车站规模及能力研究[J]. 铁道货运，2023，41(7)：32-38.
FU Libin. Study on Scale and Capacity of Railway Unloading Stations Using Dumper System[J]. Railway Freight Transport，2023，41(7)：32-38.

[7] KANG S，MEDINA J C，OUYANG Y F. Optimal Operations of Transportation Fleet for Unloading Activities at Container Ports[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2008，42(10)：970-984.

[8] 崔光宇. 重载铁路煤炭装车站系统能力优化研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[9] 张　怡. 折返式翻车机重车牵车线优化布置研究[J]. 铁道货运，2023，41(8)：20-24，31.
ZHANG Yi. Optimized Layout of Heavy-Vehicle Pulling Line for Turn-back Dumper[J]. Railway Freight Transport，2023，41(8)：20-24，31.

[10] 刘英伟. 神港站运输能力优化的研究[J]. 铁道货运，2015，33(4)：6-11.

[11] 丁　敏，刘　健，李　妲. 我国集装箱铁水联运高质量发展对策建议[J]. 中国港口，2024(9)：15-18.

（责任编辑：魏　然）

Capacity of Receiving and Unloading System in Heavy-Haul Railway Port Station

ZHANG Yongheng[1]，SHI Jiang[2]，ZHANG Jinchuan[3]，WANG Min[3]

(1. Coal Transportation Department，China Shenhua Energy Company Limited，Beijing 100011，China；2. Technical Research Center of Heavy Haul，National Energy Transportation Technology Research Institute Co.，Ltd.，Beijing 100080，China；3. School of Traffic and Transportation，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China)

Abstract: To accurately assess the capacity of the receiving and unloading system in the heavy-haul railway port station, the research divided the system into three parts according to the technical operation process of the port station: the arrival subsystem, the transfer subsystem, and the unloading subsystem, which together constituted a three-stage tandem queuing system. The distribution law of the traffic flow and service flow in each subsystem was analyzed, and a queuing model was built using queuing theory. By studying the system capacity under the influence of unbalanced operating time and the interaction of the previous and next operating links, the parameters and queuing indicators of each subsystem were calculated. Finally, taking Shengang Station as an example, the parameters and indicators were determined using the proposed model. Its capacity was calculated and bottlenecks were analyzed. The research results provide a theoretical reference for the capacity optimization of the receiving and unloading system in the heavy-haul railway port station.

Keywords: Heavy-Haul Railway; Railway Port Station; Receiving and Unloading System; System Capacity; Queuing Theory