Advances in Applied Mathematics 应用数学进展, 2026, 15(5), 435-448
Published Online May 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aam
https://doi.org/10.12677/aam.2026.155241

排队理论在各类服务系统中的应用综述

叶雨佳[1]，李裕春[2*]，王松伟[3]，李　强[3]

[1]陆军工程大学研究生院，江苏 南京
[2]陆军工程大学野战工程学院，江苏 南京
[3]中国人民解放军31678部队88分队，四川 泸州

收稿日期：2026年4月19日；录用日期：2026年5月13日；发布日期：2026年5月25日

摘　要

综合论述了排队理论在日常生活和各类服务场景中的应用，并简要介绍了3类常见的排队模型的状态方程及求解方法。对4类典型的服务场景：设备维护、能源补给、通道通行和通行能力计算进行了研究，分别论述了排队理论在4类领域的实际应用情况。最后，对排队理论在各类服务系统中的进一步应用进行了展望。

关键词

排队理论，服务系统，应用，综述

Overview of the Application of Queuing Theory in Various Service Systems

Yujia Ye[1], Yuchun Li[2*], Songwei Wang[3], Qiang Li[3]

[1]Graduate School of Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu
[2]College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu
[3]Detachment 88 of Unit 31678 of the PLA, Luzhou Sichuan

Received: April 19, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 25, 2026

Abstract

This article comprehensively discusses the application of queuing theory in daily life and military activities, and briefly introduces the state equations and solutions of three common queuing models. A study was conducted on four typical military activity scenarios: equipment maintenance, fuel

*通讯作者。

文章引用: 叶雨佳, 李裕春, 王松伟, 李强. 排队理论在各类服务系统中的应用综述[J]. 应用数学进展, 2026, 15(5): 435-448. DOI: 10.12677/aam.2026.155241

refueling, channel transportation, and capacity calculation. The practical application of queuing theory in these four fields was discussed. Finally, the direction for further research and improvement of queuing theory was discussed.

Keywords

Queuing Theory, Service Systems, Application, Review

1. 引言

在各类服务系统的组织实施与推进过程中，排队现象是贯穿始终的常见问题，广泛存在于后勤保障、资源调度、设施保障等各个关键环节。当需要接受各类服务的对象数量超出对应服务部门或设施的承载能力与服务效率时，后续抵达的服务对象无法即时获得相应服务支持，排队问题便随之产生，且若未得到合理调控，极易引发连锁反应。在资源配置过程中，服务设施的配置规模始终是核心难题：若服务设施配置过多，会造成资源的严重浪费，大量设备、人力、物力处于闲置状态，降低资源的整体利用效率；反之，若服务设施配置数量不足，排队等待的问题会持续加剧，不仅会延长服务响应时间，还会对服务任务的推进节奏、部署落实以及各项环节的衔接效率产生诸多负面影响，甚至可能影响服务任务的整体完成效果。

因此，以各类服务场景的实际需求为导向，深入探究排队理论在服务系统各环节的具体应用情况，结合场景的特殊性对排队模型进行优化改进，科学制定资源配置策略与排队调控方案，对于合理配置资源、提升服务效率、保障各类服务活动的顺利推进以及确保服务任务的圆满完成，具有至关重要的现实意义与应用价值。基于排队理论现有研究成果与实际应用经验，本文对排队理论的核心内涵、研究框架及常用排队模型进行系统梳理，重点聚焦设备维护、能源补给、通道通行和通行能力计算四大应用领域，详细阐述排队理论的应用方法与实践效果，同时针对当前研究中存在的问题，展望排队理论在数据来源与应用实践方面的改进方向，研究成果对排队理论在各类服务系统中的进一步推广与深度应用具有一定的理论指导意义和实践参考价值。

2. 排队理论简介

排队论(Queueing Theory) [1]作为运筹学领域的关键分支与重要研究方向，核心聚焦于运用数学理论、数理统计方法与系统分析思路对各类排队系统的运行规律展开系统性研究，揭示排队现象的内在形成机制，为优化排队系统配置、提升服务效率提供科学的量化依据，因此排队论也被称作等待服务问题、随机服务理论等[2]。在人们的日常生活场景中，排队现象随处可见，如商场结账、银行办理业务、交通出行等；而在各类军事行动与军事活动场景中，排队现象同样普遍存在，从装备的维修保障、油料的加注补给，到兵力的通道机动、物资的装卸运输，都会遭遇各式各样的排队状况，不同场景下的排队系统在服务对象、服务设施、服务规则等方面存在一定差异，但从系统运行的本质来看，均能借助统一的排队系统模型来进行描述与分析。其系统模型如图 1 所示。

在排队模型的构建与相关研究过程中，研究人员通常会设定两个核心关键参数，用以表征排队系统的基本运行特征，其中顾客的平均抵达速率用符号 λ 来表示，反映单位时间内抵达服务系统并需要接受

服务的对象数量，是衡量服务需求强度的重要指标；系统的平均服务速率则用符号 μ 来表征，反映单位时间内服务系统能够完成的服务数量，是衡量服务能力与服务效率的核心指标。这两个参数是构建排队模型、开展排队理论计算与系统优化的最重要的两个基础指标，其取值的准确性直接影响排队模型的有效性与计算结果的科学性。

Figure 1. Queueing system model
图 1. 排队系统模型

当前学术界普遍采用“Kendall 记号”来对各类排队模型进行标准化描述，通过统一的符号体系清晰界定排队模型的各项核心特征，其常规表达形式为：X/Y/Z/A/B/C，各记号对应的具体含义如表 1 所示，同时排队理论研究中还会涉及一系列用于表征排队系统运行状态的关键指标，如系统空闲概率、平均排队人数、平均等待时间等，这些指标共同构成了排队系统的评价体系，为排队系统的优化与决策提供量化依据。

Table 1. Meaning of various symbols in queuing theory
表 1. 排队模型各记号含义

记号	含义	指标	含义
X	顾客相继到达时间间隔的分布	P_0	系统空闲的概率
Y	服务时间的分布	P_n	平衡系统处于状态 n 的概率
Z	并联服务台的个数	L_q	队列中等待的平均顾客数
A	系统的容量	L_s	系统中的平均顾客数
B	顾客源的数目	W_q	顾客等待的期望时间
C	服务规则	W_s	顾客逗留的期望时间

排队理论的模型类型种类众多，根据服务台数量、系统容量、顾客源规模、服务规则等不同划分依据，可分为单服务台模型、多服务台模型、有限容量模型、无限容量模型、顾客源有限模型、顾客源无限模型、混合制模型等诸多类型，不同模型适用于不同的应用场景，具有不同的构建逻辑与求解方法。在本文的研究中，将结合军事活动的实际应用需求，仅选取其中 M/M/1/∞/∞、M/M/c/∞/∞、M/M/c/∞/m 三种常用且在军事领域应用较为广泛的排队模型展开详细介绍，分析其模型假设、状态转移规律及状态方程构建方法。

2.1. 标准的 M/M/1/∞/∞模型

标准的 M/M/1/∞/∞排队模型是排队理论中最基础、最经典的单服务台排队模型，其构建基于一系列明确的假设条件，具体包括：第一，顾客来源不受数量限制，呈现无限状态，顾客以单个形式陆续抵达服务系统，各顾客的抵达行为相互独立，不存在相互影响，在特定时间段内抵达的顾客数量遵循泊松分布规律，且抵达过程具有平稳性，即单位时间内的平均抵达速率 λ 保持恒定；第二，模型为单队列排列

形式，队列的长度无上限，能够容纳无限数量的等待服务对象，服务规则严格遵守“先到先服务”的基本原则，按照顾客抵达的先后顺序提供服务；第三，属于单服务台模型，仅配备一个服务设施或服务人员，顾客的服务时间相互独立，不受其他顾客服务时长的影响，同时服务时间服从负指数分布，即服务时间的概率密度函数符合负指数特征；第四，顾客的到达过程与服务时间相互独立，二者之间不存在关联性，彼此的概率分布互不影响。该模型的状态转移规律能够通过清晰的状态转移图 2 进行直观呈现，明确不同系统状态之间的转换关系。

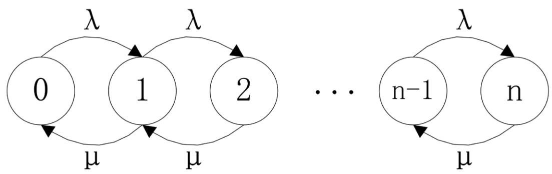

Figure 2. State transition diagram of M/M/1/∞/∞ model
图 2. M/M/1/∞/∞模型状态转移图

由模型的状态转移图可进一步推导得出 M/M/1/∞/∞模型的状态方程，该状态方程是描述模型各状态之间数量关系的核心数学表达式，通过求解状态方程能够得到系统处于各状态的概率，进而计算出队列中等待的平均顾客数、系统中的平均顾客数、顾客等待的期望时间等一系列排队指标，为分析单服务台排队系统的运行特征提供量化依据。

$$\begin{cases} \lambda_{n-1}P_{n-1} + \mu_{n+1}P_{n+1} = \left(\lambda_n + \mu_n\right)P_n \\ \sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \end{cases} \tag{2.1}$$

2.2. 标准的 M/M/c/∞/∞模型

标准的 M/M/c/∞/∞模型是经典的多服务台排队模型，在各项基础特征的假设设定上，和标准的 M/M/1/∞/∞模型保持高度一致，同样遵循顾客无限源、抵达过程服从泊松分布、单队列无上限、先到先服务、服务时间服从负指数分布、到达与服务时间相互独立等假设条件。除此之外，针对多服务台的特征，该模型还额外做出如下针对性假设：各个服务台的工作过程相互独立，彼此之间的服务行为不存在相互干扰，且所有服务台的服务能力保持一致，它们的平均服务率均相等，即 $\mu_1 = \mu_2 = \cdots = \mu_c = \mu$ 。

基于多服务台的假设特征，整个服务机构的平均服务率会根据系统内服务对象的数量呈现出不同的变化情况：当系统内的顾客数量 $n \geq c$ 时，所有服务台均处于工作状态，此时整个服务机构的平均服务率为 $c\mu$；当系统内的顾客数量 $n < c$ 时，仅有 n 个服务台处于工作状态，其余服务台处于空闲状态，此时整个服务机构的平均服务率为 $n\mu$。在 M/M/c/∞/∞模型的研究中，通常用 ρ 表示系统的服务强度，其计算公式为 $\rho = \lambda/(c\mu)$，服务强度是衡量服务系统负荷程度的重要指标，反映了服务需求与服务能力之间的匹配关系。该模型的状态转移情况同样可通过状态转移图 3 进行呈现，清晰反映不同顾客数量下系统状态的转换规律。

由模型的状态转移图可推导得到 M/M/c/∞/∞模型的状态方程，通过求解该状态方程，能够确定系统处于不同状态的概率，进而结合排队理论的基本公式，计算出该多服务台排队系统的各项运行指标，为多服务台排队系统的资源配置与优化提供科学依据，该模型在军事领域中适用于多个服务设施同时提供服务的场景，如多个油料加注点、多个装备维修工位等。

$$
\begin{cases}
\lambda P_0 = \mu P_1 \\
\lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1} = (\lambda + n\mu) P_n, n < c \\
\lambda P_{n-1} + c\mu P_{n+1} = (\lambda + c\mu) P_n, n \ge c \\
\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1
\end{cases}
\tag{2.2}
$$

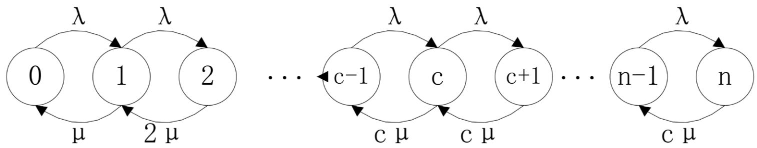

Figure 3. State transition diagram of M/M/c/∞/∞ model
图 3. M/M/c/∞/∞模型状态转移图

2.3. 顾客源有限模型 M/M/c/∞/m

顾客源有限模型 M/M/c/∞/m 是针对潜在服务对象数量有限的场景构建的排队模型，在工业生产的机器管理问题中有着较为广泛的应用，同时在军事领域的装备保障、设备维护等场景中也具有重要的应用价值。该模型的构建基于顾客源数量有限的核心假设，假设实际应用场景中有 m 台机器，同时配备 c 名维修工人，且机器的总数量 m 大于维修工人的数量 c，即服务对象的数量多于服务人员的数量，这也是排队现象产生的重要前提。

在该模型中，将每台机器在单位运转时间内发生故障并需要维修的期望频次定义为到达率 λ，反映单位时间内产生服务需求的机器数量，由于机器的总数量有限，当部分机器处于维修状态时，剩余正常运转的机器数量会减少，进而导致单位时间内的实际抵达率发生变化，这是顾客源有限模型与顾客源无限模型的核心区别。该模型的状态转移情况可通过专门的状态转移图 4 来呈现，清晰反映不同故障机器数量下系统状态的转换关系，体现出顾客源有限对系统运行的影响。

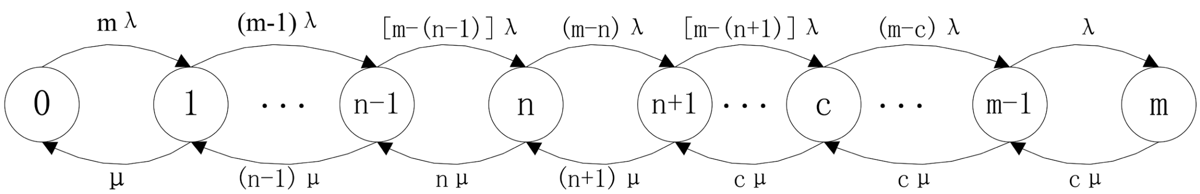

Figure 4. State transition diagram of M/M/c/∞/m model
图 4. M/M/c/∞/m 模型状态转移图

由模型的状态转移图可进一步推导得出 M/M/c/∞/m 模型的状态方程，该方程充分考虑了顾客源有限的特征，准确描述了不同系统状态之间的数量关系。

$$
\begin{cases}
m\lambda P_0 = \mu P_1 \\
(m-n+1)\lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1} = [(m-n)\lambda + n\mu] P_n, 1 \le n \le c \\
(m-c+1)\lambda P_{n-1} + c\mu P_{n+1} = [(m-c)\lambda + c\mu] P_n, c \le n \le m-1 \\
\lambda P_{m-1} = c\mu P_m \\
\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1
\end{cases}
\tag{2.3}
$$

对上述三类常用排队模型的状态方程进行科学求解，即可得到各模型对应的核心排队指标，具体数值如表 2 [3]所示，这些排队指标从不同维度反映了排队系统的运行特征，是分析排队系统性能、优化服务资源配置的重要量化依据。

Table 2. Common queuing model quantity index
表 2. 常用排队模型数量指标

	M/M/1/∞/∞	M/M/c/∞/∞	M/M/c/∞/m
P_0	$1-\rho$	$\left[\sum_{k=0}^{c-1}\frac{1}{k!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k+\frac{1}{c!}\frac{1}{1-\rho}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c\right]^{-1}$	$\frac{1}{m!}\left[\sum_{k=0}^{c}\frac{1}{k!(m-k)!}\left(\frac{c\rho}{m}\right)^k+\frac{c^c}{c!}\sum_{k=c+1}^{m}\frac{1}{(m-k)!}\left(\frac{\rho}{m}\right)^k\right]^{-1}$
P_n	$(1-\rho)\rho^n$	$\begin{cases}\frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (n\le c)\\ \left[c!(1-\rho)\right]^{-1}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (n>c)\end{cases}$	$\begin{cases}\frac{m!}{(m-n)!n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (0\le n\le c)\\ \frac{m!}{(m-n)!c!c^{n-c}}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (c+1\le n\le m)\end{cases}$
L_q	$\frac{\rho\lambda}{\mu-\lambda}$	$\frac{(c\rho)^c\rho}{c!(1-\rho)^2}P_0$	$\sum_{n=c+1}^{m}(n-c)P_n$
L_s	$\frac{\lambda}{\mu-\lambda}$	$L_q+\frac{\lambda}{\mu}$	$\sum_{n=1}^{m}nP_n$
W_q	$\frac{\rho}{\mu-\lambda}$	$\frac{L_q}{\lambda}$	$\frac{L_q}{\lambda(m-L_s)}$
W_s	$\frac{1}{\mu-\lambda}$	$\frac{L_s}{\lambda}$	$\frac{L_s}{\lambda(m-L_s)}$

通过对排队模型的各项参数进行精准设定与科学计算，得出各排队指标的具体数值，即为该排队系统的核心运行参数，能够直观反映出排队系统的排队长度、等待时间、服务效率等关键特征。尔后军事领域的决策者能够根据这些量化数据，结合军事任务的实际需求与资源配置情况，对服务设施的数量、服务人员的配置、服务规则的制定等进行科学优化，从而达到缩短排队长度、减少等候时间、提升服务效率、合理配置资源的目的，让排队系统更好地适配军事活动的开展需求。

3. 排队理论研究与应用现状

在排队理论的探索与分析方法的实际应用领域中，研究人员结合不同应用场景的特征，引入多种创新策略和技术手段，通过模型构建、仿真分析、实证研究等方式，对排队系统进行系统性分析，以确定系统的最优资源配置方案与运行优化策略，提升系统的整体效能。其中，模型仿真技术作为重要的研究手段，能够通过计算机技术模拟排队系统的实际运行过程，精准还原不同参数、不同规则下的系统运行状态，研究人员通过对仿真结果的分析与总结，系统剖析某一排队系统的性能特征，历经多次参数迭代与方案优化，最终锁定该系统的最佳配置策略，这一过程中模型仿真技术的核心优势在于能够精准模拟现实情境，有效规避实际试验的成本与风险，为决策制定提供科学、可靠的量化依据[4]。

国内众多研究团队围绕排队理论的应用展开了深入的专项研究，取得了一系列丰硕的研究成果。高志刚团队[5]聚焦于现代防控场景中防控设备配置的优化问题，针对防控设备资源有限与防控需求多样化的矛盾，巧妙地运用排队论模型构建了防控设备配置的量化分析体系，将设备的总数控制与防控成本管

控设为核心优化指标，通过对模型的求解与分析，创造性地提出了防控设备配置的“理想区”模型。该模型旨在探索达成最小设备配置总数与最低防控建设成本的最优平衡点，为实现防控设备的经济高效配置开辟了新的研究路径，有效提升了防控设备资源的利用效率与防控工作的整体效能。

郭喆[6]在通信领域的 TDMA 协议对报文传输时延的研究中，发现排队传输是导致报文传输时延的重要因素，运用排队论方法对报文传输过程中的排队现象进行深入剖析，明确了时延产生的内在机理与关键影响因素。基于此研究成果，郭喆创新性地提出了一种结合 TDMA 与码分多址的混合组网策略，通过对通信网络的组网方式与数据传输规则进行优化，显著加速了数据包的传输效率，有效缓解了排队传输过程中的时延问题，提升了通信传输的实时性与稳定性。

郭强等人[7]则针对电子与防控一体化拦截能力的评估难题，结合现代防控场景的多层多通道运行特征，融合拒绝制随机服务系统与有限等待时间的随机服务系统理论，构建了复杂的多层多通道防控拦截能力评估模型。该模型充分考虑了防控拦截过程中的排队现象与服务规则，通过实际应用案例的验证，不仅能够科学、精准地评估电子与防控一体化系统的拦截能力，还能为优化防控资源部署、调整防控拦截策略提供宝贵的参考依据，提升防控工作的决策科学性。

此外，RuanF 团队[8]将排队论与系统动力学相结合，充分发挥排队论在描述排队现象、系统动力学在分析系统动态运行的优势，将其应用于场外核应急公共清污场景，成功构建了核应急公共清污过程的动态模拟模型。该模型能够精准估算清污工作的整体所需时间，实时监控清污过程中各环节的执行进度及等待队列规模，为清污资源的动态调配、清污流程的优化调整提供科学依据，确保清污工作高效、有序进行，为核应急响应的科学决策提供了有力的技术支持。这些研究成果不仅充分展示了排队理论及相关分析方法在解决各类实际问题中的强大作用，也为相关领域的后续研究与发展注入了新的活力。

在国际研究领域，众多国外研究团队也围绕排队理论的应用展开了多元化的研究，将排队理论广泛应用于通信网络、服务管理、智能交通等多个领域，取得了一系列具有国际影响力的研究成果。Blesa 团队[9]依托排队论的基本原理，针对分组交换通信网络在最差运行状况下的稳定性问题，搭建起一个专门的对抗性模型，为分析分组交换通信网络的极限运行状态、优化网络配置提供了新的研究工具；S.A. Afolalu 团队[10]将目光投向服务行业的呼叫中心实际优化难题，针对呼叫中心高峰时段排队现象严重、服务效率低下的问题，借助随机排队手段展开专项研究，通过对呼叫抵达规律、服务时间分布的分析，成功算出各个高峰时段呼叫中心所需配备的最优话务员人数，为呼叫中心的人员动态配置提供了科学依据，有效提升了呼叫中心的服务效率与客户满意度。

Carolyn A. Farmer 团队运用排队论对某机构的集中化人力资源服务系统展开系统性探索，针对人力资源服务过程中存在的排队等待时间过长、服务流程不畅等问题，通过构建排队模型分析系统运行特征，找出服务系统的优化关键点，提出了针对性的优化策略，切实缩短了客户的实际等待时间，还找到了契合该机构人力资源服务需求的理想运行策略，提升了人力资源服务的整体质量。Akhil M Nair 团队[11]采用“M/G/1”排队模型，针对服务时间的分布特征进行优化，按照正态分布对服务时间进行精准校准，他们依据从 NSG-3 型火车站采集到的实际运营数据，对服务率进行正态分布拟合，通过模型计算得出的性能测量值与实际测量数据高度相符，验证了模型的有效性与适用性，为火车站等公共服务场所的服务系统优化提供了参考。

Akbash K 团队[12]针对排队系统 M/G/1 和 G/M/1 里队列长度的极值状况，以及极限定理中指数分布的收敛速率展开深入的理论研究，通过严谨的数学推导证明了再生过程极值的一般边界定理，基于该定理提出了排队系统的优化策略，达成了队列长度与排队时间的有效缩减，丰富了排队理论的理论研究成果。Mohammadi L 团队[13]基于排队论的决策方法与智能任务卸载机制，结合车载雾计算(VFC)的运行特征，运用离散时间马尔可夫链对分布式任务的行为进行建模，以此预测车辆在挑选最节能处理节点时的

未来举动。该模型能够有效解决车载雾计算(VFC)中基于车对车(V2V)通信的计算卸载难题，优化车辆的计算任务分配，进而提升交通应用的能源利用效率，为智能交通领域的发展提供了新的技术支撑。

由此可见，无论是国内还是国外，排队论都已突破传统的应用领域，在诸多民用生活场景与各类服务领域得到了广泛且深入的应用，研究成果不仅丰富了排队理论的理论体系，也为各类实际问题的解决提供了科学、有效的方法，展现出了极高的理论价值与应用价值。

4. 排队理论的典型应用

各类服务场景的活动种类繁多，涵盖运营保障、后勤支持、资源调度、设备运维等多个方面，且各类活动的组织程序复杂，涉及多部门、多环节、多资源的协同配合，任何一个环节的效率低下都可能影响整个服务活动的推进效果。在各类服务活动的开展过程中，若把每一个需要投入一定时间和资源来解决的问题或任务视为服务对象，而把用以解决该问题、完成该任务的组织、设施或人员视为服务部门，那么服务活动中的很多项目和环节都可以转化为典型的排队问题，运用排队理论进行量化分析与优化。结合各类服务场景的实际开展情况，其中比较常见且具有代表性的排队问题主要包括设备维护、能源补给、通道通行、通行能力计算四类，下文将逐一论述排队理论在这四类场景中的具体应用情况。

4.1. 设备维护问题

在各类服务活动的各个环节中，设备的正常运行是保障服务任务顺利开展的基础，而设备在使用过程中不可避免会出现故障或损伤，因此设备维护成为后勤保障的核心内容之一，在设备维护领域中，排队问题极为普遍且突出。尤其是在高负荷运行环境下，设备的损伤概率大幅提升，故障设备的数量急剧增加，维护任务繁重，而维护力量有限，维护工位、维护人员、维护物资等资源均存在一定的限制，故障设备需要排队等待维护，排队现象尤为严重，如何合理配置维护力量、提升设备维护效率，成为设备保障的核心难题。

陈威等[14]研究者在《基于排队论的工程设备现场维护力量配置策略研究》中，针对高负荷环境下工程设备故障发生率高、维护任务繁重，而维护力量相对有限的实际情况，将设备维护过程科学看作是一个完整的排队服务流程，把故障的工程设备视为排队系统的顾客，把维护工位、维护人员组成的维护力量视为服务台。他们运用排队理论的基本原理与方法，分别构建了工程设备维护力量在集中配置与分散配置这两种不同配置策略下的数学排队模型，通过对模型的求解，计算出两种配置策略下的平均排队长度、平均等待维护时间、维护资源利用率等一系列核心指标，基于这些量化指标对不同维护力量配置策略的优劣进行全面、系统的评估，进而挑选出适配高负荷环境的最优维护力量配置策略。

不过，该研究在实际数据选取上存在一定的不足，所采用的故障设备数量、设备维护时间等数据过于理想化，未明确故障设备数量数据的实际来源，与高负荷环境下的实际情况存在一定偏差；并且，研究忽略了高负荷环境下故障设备数量有限这一客观现实情况，模型构建基于顾客源无限的假设，导致其研究成果在实际操作中的可应用性和对实践的指导性欠佳，难以直接应用于设备维护的实际决策。

郭聪等[15]研究者在《基于排队论的船艇设备现场维护力量配置》中，充分考虑到高负荷环境下故障船艇设备数量有限这一现实因素，突破了传统顾客源无限模型的限制，结合船艇设备维护的实际特征，构建了船艇设备维护系统的“M/M/c/m/m/LCFS”排队模型，该模型充分贴合现场船艇设备维护的实际场景，更能准确反映实际排队系统的运行特征。随后研究者选取实际的船艇设备维护案例，将模型计算结果与实际维护情况进行对比分析，验证了模型的正确性及算法的可行性。此模型的实际应用有效缩短了船艇设备的维护等待时间与整体维护时间，提升了维护资源的利用率，实现了维护效益的最大化。该模型更贴合现场设备维护的客观实际状况，能够为各类服务活动中设备维护的组织安排、维护力量的科学

配置提供有益的参考。

张东等[16]研究者针对相关机构在设备需求论证过程中存在的定量分析困难、缺乏科学量化依据的问题，以高负荷运行下设备的运用特性为核心依据，结合设备保障的实际需求，区分伴随保障与定点保障两种不同的设备保障模式，针对两种模式的特征分别构建了不同的定量分析模型。研究基于高负荷运行下设备的实际故障数量预测数据建立模型，通过模型计算科学确定不同保障模式下所需的保障设备数量，同时结合实际案例给出了具体的计算结果与应用方法。该研究为技术保障设备在高负荷场景下的数量需求论证提供了科学的方法层面的支持，有效提升了设备保障资源配置的科学性与合理性。

4.2. 能源补给问题

能源作为各类设备的重要动力来源，是服务活动顺利开展的重要物质保障，能源补给问题是后勤保障工作的关键环节，直接关系到各类设备的运行能力与服务效能，因此也是各类服务机构后勤保障研究的重点问题。在各类服务活动中，快速、及时、有效地为各类设备补充能源，能够保障设备的正常运行，对服务活动的迅速展开、部署的及时调整具有重要意义。而能源补给过程中，由于补给设施数量有限、各类设备的补给需求不同，能源补给问题成为一个典型的排队问题，补给效率的高低直接影响设备的出动效率。

补给站(车)的配置数量、待补给设备的排队顺序，以及不同设备对能源容量、能源品种的不同需求等，都会对能源补给的效率产生重要影响，进而关系到服务活动的成效。利用排队理论研究能源补给问题，能够通过构建排队模型分析补给系统的运行特征，找出补给过程中的优化关键点，对补给队列进行科学优化，合理调整补给设施配置，缩短设备的排队补给时间，达到能源补给资源利用率的最大化，提升能源补给的整体效率。

各类服务机构的设备类型繁多、型号各异，不同类型的设备对能源的需求存在显著差异，能源补给的难度与复杂度较高。如大型机械装备所需能源量较大，补给时间相对较长；而小型作业车辆所需能源量较少，补给时间相对较短。在能源补给保障过程中，如何根据不同设备的能源需求特征，合理选配补给站(车)的数量，科学设置不同类型能源补给设施的比例，成为提升能源补给效率的核心问题，这就需要用到排队理论的相关知识进行量化分析与科学决策。

闫寒等[17]研究者针对民用道路交通中各类车辆的加油需求特征进行了系统分析，结合服务区的实际运营情况，提出了各服务区加油站的优化配置措施。该文献将服务区的车辆区分为大型车、中型车与小型车，根据不同车型的加油特征，分别定义了不同类型车辆的加油率和加油周转率，通过排队理论构建了单队多服务台排队系统的数学模型，对加油站的最优加油岛数量进行了科学计算。同时，文献以大广高速衡大段威县服务区为实际研究实例，通过模型计算得出了该服务区应开设 9 台加油岛的具体结论，有效提升了该服务区的加油效率。该文献中所使用的研究方法和排队理论模型对研究各类设备的能源补给问题具有重要的指导意义，能够为能源补给设施的配置提供科学的参考方法。

此外，随着新能源技术的快速发展，新能源设备在各类服务场景中的应用日益广泛，充电桩的合理设置问题已然成为各国科研领域聚焦的重点问题。若将新能源设备类比为各类新型能源动力装备，把充电桩视作能源补给点，那么充电桩的设置问题便能够转化为各类运营场景中补给点的布局设置问题，民用领域的充电桩设置研究成果能够为能源补给点的布局优化提供有益的借鉴。当前，围绕充电桩选址与定容的研究范围颇为广泛，研究方法也日趋成熟。

李志等[18]研究者针对不同类型电动车的充电特性展开深入剖析，结合电动汽车在高速公路上的行驶规律与充电需求，运用蒙特卡洛模拟方法，对电动汽车在高速公路上产生的充电需求在时间和空间上的分布情况进行精准预测。随后，研究者对高速公路网络中的选址点、用户的充电行为模式以及建设充

电站所需成本等关键因素展开细致分析，从规划者的视角出发，以实现建设充电站的总成本最小化以及充电站所能覆盖的充电需求点数量最大化作为双重优化目标，基于最大覆盖模型，将排队论的相关理论融入其中，构建了充电站在高速公路上的定容选址模型。该模型经过进一步的改进与优化，能够为长途运营过程中的能源补给点选址、补给设施配置问题提供有益的参考。

Pourvaziri H 等[19]国外研究者为有效解决民用领域充电站的位置规划与容量确定问题，以最小化建立充电站的总成本以及平均客户等待时间为目标函数，建立了非线性规划模型。他们将排队理论与数学规划模型有机融合，通过排队理论精准估算充电站的平均等待时间，以此作为模型的重要约束条件。该方法不仅能够精准确定充电站的最优位置和合理容量，即充电桩的具体配置数量，还能依据电动汽车的实时充电水平为其合理分配充电桩，提升充电桩的利用率。这些民用领域的研究成果均能够在理论与方法上为各类服务活动中的能源补给点布局、补给设施配置等相关行动提供有力的支持。

4.3. 通道通行问题

通道通行问题是各类服务活动中资源调度、设备投送环节的一类核心问题的统称，在各类机动调度过程中，凡涉及到在某一特定方向上以某种特定方式运输或通过人员、设备、物资的问题，都可以划归为通道通行问题的范畴。各类服务场景中比较常见的通道通行问题有复杂路况的设备通过问题、水域区域的渡运问题、障碍区域的通路使用问题等，这些问题均存在明显的排队现象，若处理不当，会严重影响人员与设备的通行效率，延误部署的时机。

在各类通道通行问题中，排队系统的核心参数能够通过服务活动的实际数据进行科学确定：设备或人员的平均抵达速率 λ 可根据调度计划、投送安排求出，反映单位时间内抵达通道入口并需要通过通道的装备或人员数量；通道的平均通过率 μ 可根据通路的长度、水域的宽度除以设备或人员的平均行进速度求得，反映单位时间内能够通过通道的装备或人员数量。通过确定核心参数，各类通道通行问题能够成功转化为经典的排队问题，其中单通路的通行问题可转化为“M/M/1/∞/∞”排队问题，多通路的通行问题可转化为“M/M/c/∞/∞”排队问题。运用排队理论对转化后的模型进行科学求解，可以精准得出排队长度及排队等待时间等核心指标，为相关负责人定下通行决心、科学指挥调度提供精准的定量依据，提升通行决策的科学性。

潘成生[20]研究者在港口航运领域的研究中，把船舶看作排队系统的顾客，把泊位看作服务窗口，航道则作为排队的通道，基于排队理论，把“船舶－泊位－航道”这一复杂的航运系统简化为一个多窗口单通道的排队模型，也就是经典的“M/M/c”模型。研究者通过对模型进行严谨的数学计算，确定了模型的各项运行指标，并以广州港伶仃航道南沙口以南航段的通过能力为实际研究对象展开专项研究和分析，根据模型计算结果提出了航道运行的优化策略，不仅有效提升了该航道的通航效率，还切实保障了航行船舶的通航安全。该研究的模型构建方法与分析思路能够为各类通道通行问题的研究提供有益的借鉴。

叶雨佳等[3]研究者在《基于排队理论的通道使用问题研究与应用》中，对障碍区域的通道使用问题进行了专项研究，结合各类演练活动中的实际案例，通过实地调研与数据统计确定了排队模型的核心参数，运用排队理论计算出模型的各数量指标，清晰反映了障碍区域通道使用过程中的排队特征，为相关负责人定下通过障碍区域的决心提供了精准的定量依据。利用这些排队模型，服务活动的负责人能够对人员的集结、通道通过和现场展开等环节进行科学的分析与优化，合理规划行进路线与通过顺序，有效缩短通行时间，提升快速通行能力，为后续服务任务的顺利展开打下坚实的基础。

4.4. 通行能力的计算

在各类服务活动的规划与执行过程中，通行能力的精准计算是负责人必须着重考量的关键问题，尤

其是在资源调度、设备投送、物资运输等环节，通行能力直接决定了人员的通行效率与物资的运输效率。通行能力作为交通系统的关键性特征指标，不仅是民用公路规划、交通管理、道路养护以及工程改建工作的重要核心依据[21]，在各类服务活动中，对运力计算、通行时间的精准调控、后勤保障的高效落实等诸多方面都有着至关重要的影响，精准的通行能力计算能够为调度计划的制定、后勤保障资源的配置提供科学的量化依据。

在民用交通领域，关于通行能力的研究已经较为成熟，李家杰等人[22]对城市道路通行能力的影响因素进行了系统、全面的分析，通过实地调研与数据分析，总结梳理出道路条件、交通条件以及服务水平三类核心影响因素，其中道路条件包括道路宽度、路面质量、道路线型等，交通条件包括车辆类型、交通流量、行驶速度等，服务水平包括行车舒适度、通行效率等，为城市道路通行能力的研究奠定了重要的理论基础。张亚平等人[23]基于层次分析法，构建了城市快速路通行能力的综合评估体系，对城市快速路的通行能力进行了科学的评估与研究，为城市快速路的规划与优化提供了参考。而排队理论的出现，为通行能力的研究开辟了另一条全新的途径，提供了更为科学、精准的研究方法和数学模型。

付南南[24]以民用交通中交通事故导致车道被占用这一常见情况作为研究对象，针对车道被占用后通行能力大幅下降的问题，运用数据拟合技术对实际交通数据进行分析处理，并结合排队论的思想理念，构建了车道被占用情况下的排队模型，深入探究了车道的实际通行能力，并系统分析了其与上游车流量、车辆堵塞长度、事故持续时间之间的内在关联关系，探索总结了占用车道对城市道路通行能力的具体影响规律。该模型不仅能够为民用交通的事故处置、交通疏导提供科学依据，也能够为各类服务活动中因通道被意外损坏、自然灾害损毁等原因而引发的通行拥堵问题提供具有建设性的思路和解决方案，为通行疏导与通行能力恢复提供参考。

在各类服务活动情境下，民用交通系统中的收费站可类比为调度过程中的补给点、休息区或中转点等关键节点，这些关键节点的通行能力直接影响整体的通行效率，武景顺等[25]研究者针对收费站通行能力的研究为此提供了科学的量化分析工具。他们以车辆分布特性与排队论分析为理论基础，通过深入剖析车辆经过收费站时的交通流状态与排队特征，采用理论模型优化与仿真分析相结合的研究方法，分别运用排队论等工具计算了 MTC 车道和 ETC 车道的单独通行能力，并据此构建了收费站系统的整体通行能力模型，精准反映了收费站的整体运行效率。

该模型具有良好的迁移性，可直接迁移应用于各类调度场景，将补给点、休息区等关键节点类比为收费站，通过计算关键节点的通行能力，确定节点的最优服务设施配置与人员安排，为服务活动的顺利实施提供定量化的决策参考依据。Wu N 等[26]国外研究者基于排队论的基本原理，结合交通流的运行特征，推导了道路的速度–流量关系模型，通过现场实地测量获得道路上车辆的自由流动速度、嵌入式排队系统的潜在容量以及排队系统的随机参数等基础数据，并充分考虑不同的道路几何条件、交通流条件和交通控制条件，用以精准模拟道路的速度–流量的关系，并能够根据不同的交通流量预测车流的实际行驶速度。该模型能在服务活动的准备阶段，根据调度规模、道路条件计算出理论上的通行速度，还可用于调度过程中根据实际通行状况进行实时调整和控制，对提升服务活动的通行效率、科学制定调度计划具有重要的意义。

5. 排队理论的改进

随着各类服务活动的不断发展与复杂化，对排队理论的应用要求也日益提高，传统的排队理论模型与应用方法在面对复杂的服务场景时，逐渐暴露出一些不足，如数据来源缺乏科学性、排队策略未考虑场景特殊性等。为了让排队理论更好地适配各类服务活动的开展需求，提升其在各类服务领域的应用效果，众多研究者围绕排队理论的改进展开了深入研究，主要集中在数据来源的改进与排队策略的改进两

个方面，下文将对这两方面的改进成果进行详细阐述。

5.1. 数据来源的改进

在排队理论的实际应用中，模型参数的精准确定是构建有效排队模型的核心前提，而如何精准确定服务对象的平均抵达速率 λ 始终是排队模型构建的核心难点，λ 的取值准确性直接决定了排队模型的计算结果是否可靠，进而影响决策的科学性。特别是在复杂多变的服务场景下，λ 直接对应着需要维护的故障设备数量、需要补给能源的设备数量或需要接受服务的人员数量，这些数据受运行环境、工作强度、服务任务等多种因素的影响，具有高度的动态性与随机性，难以通过传统方法进行精准确定，这也是制约排队理论在各类服务领域深度应用的重要因素。

经典的兰彻斯特方程作为描述特定场景下对象数量变化规律的数学工具，能够精准反映工作强度、对象规模与故障或需求数量之间的内在关系，为解决复杂服务场景下λ的取值问题提供了重要的突破口。研究人员通过将排队理论与兰彻斯特方程进行深度融合，把兰彻斯特方程计算得出的相关数据作为排队系统的服务对象抵达数据，不仅能科学量化特定场景下服务对象的数量变化规律，精准确定平均抵达速率 λ，还能实现对 λ 的动态更新，显著提升了排队理论在各类服务领域的可操作性与适用性。这种跨学科的结合方式，打破了排队理论与相关应用理论之间的研究壁垒，为动态场景下的资源调配提供了科学的量化分析框架。

郭一鸣等[27]研究者在《基于排队论和兰彻斯特方程的高负荷场景下维护保障设备数量确定》研究中，针对高负荷场景下维护保障设备配置缺乏科学量化依据、难以适配动态变化的难题，创新性地构建了排队论与兰彻斯特方程的耦合模型，实现了两大理论的深度融合。研究团队通过仿真模拟传统兰彻斯特方程的运行过程，结合不同的工作场景与工作强度，首次揭示了设备在高负荷运行下的动态故障规律，精准计算出不同工作阶段的设备故障概率，并将该动态故障概率作为排队系统的关键输入参数，实现了平均抵达速率 λ 的动态确定。

这种建模方式突破性地建立了设备故障进程与维护资源需求之间的量化关联，成功破解了复杂服务场景下服务对象数量 λ 的动态确定难题，让排队模型能够实时适配环境的变化。该研究成果不仅为高负荷场景下维护保障设备的精准配置提供了科学的理论支撑，更开创了资源优化领域跨学科方法论的先河，为其他服务场景下排队理论的参数确定提供了有益的借鉴。

5.2. 排队策略的改进

在传统的排队理论研究中，通常假设服务对象具有相同的优先级，服务规则多为“先到先服务”，但在实际的排队场景中，无论是民用领域还是各类服务领域，“优先级服务”现象都普遍存在，其本质并非无序的违规行为，而是服务对象因自身属性、需求紧急程度不同而存在的优先级差异，进而导致的资源分配动态调整。当部分服务对象享有服务优先权时，排队系统会自发形成分级服务机制，优先群体能够获得更快速的服务，等待时间被大幅压缩，而普通群体的排队时长则会相应延长，这种动态平衡是排队系统适配实际需求的重要体现。

这种优先级服务机制在民用领域的快递派送、紧急医疗等场景中尤为常见，例如加急文件优先投递、危重病人优先救治等案例，均体现了优先级管理对传统排队规则的突破与优化；而在各类服务领域，这种优先级差异同样显著，如紧急故障设备优先进行维护、关键设备优先进行能源补给、紧急物资优先进行运输投送等，都是基于服务需求的优先级服务策略。为了让排队理论能够更准确地描述此类带有优先级的排队现象，排队理论的研究需要引入优先级变量，构建能反映多级服务特征的数学模型，从而为资源的优化配置提供更科学的理论支撑。

张怡通等[28]研究者在《具有两类优先权顾客 M/M/1 排队的优化分析》中，创新性地构建了包含强占优先权、非强占优先权及普通顾客的三级服务排队模型，充分考虑了不同优先级顾客的服务需求差异。研究团队通过补充变量法建立多维马尔可夫过程，系统解析了 M/M/1 排队系统在三级服务模式下的状态转移规律，通过严谨的数学推导，成功推导出各类顾客的平均队列长度、服务台占用概率及闲置率等关键指标，精准反映了不同优先级对排队系统运行特征的影响。

该模型在各类服务场景的紧急处置方面具有重要的应用价值，可通过差异化的资源配置实现不同紧急程度需求的分级处理，让高优先级需求获得优先服务，在有限的服务条件下最大化服务效能，提升服务保障的整体水平。值得注意的是，实际服务环境具有高度的动态性，优先级的判定并非一成不变，需要根据实际情况的变化进行动态调整：例如在任务间隙，短周期服务需求因处理效率高、能快速释放资源，其优先级可能随场景变化而适当提升，这对服务资源的精准调度提出了更高的要求，也成为当前服务管理与排队理论交叉研究的重点课题。

6. 结论与展望

排队理论作为运筹学的核心分支，凭借其科学的量化分析方法与系统的模型构建思路，在保障各类服务活动有序、高效推进方面发挥着至关重要的作用，已成为资源配置、服务系统优化、决策制定的重要科学工具。本文在对排队理论的核心内涵、模型体系及国内外研究与应用现状进行全面综述的基础上，结合各类服务活动的实际需求，着重阐述了排队理论在设备维护、能源补给、通道通行、通行能力计算四个关键应用领域的应用情况，详细分析了不同场景下排队模型的构建方法、应用路径及实际效果，同时针对当前排队理论在各类服务应用中存在的参数确定不精准、排队策略缺乏动态性等问题，从数据来源与排队策略两个方面介绍了相关的改进成果与研究方向，为后续排队理论在各类服务领域的进一步研究与应用明确了方向。

随着大数据技术、人工智能技术与深度学习算法的蓬勃发展，为排队理论的研究与应用带来了全新的方法与路径，将大数据技术与排队理论结合，能够实现对各类服务场景下海量数据的收集、分析与处理，为排队模型参数的精准确定提供更丰富的数据支撑；将人工智能与深度学习算法融入排队理论，能够构建动态、智能的排队模型，实现对排队系统运行状态的实时预测与动态优化，让排队理论更好地适配复杂多变的服务环境。

然而，在排队理论与新兴技术融合的过程中，也面临着诸多挑战与困难，例如服务数据的保密性与获取难度较大、复杂场景下模型的泛化能力不足、动态优先级排队模型的求解难度较高等问题，这些问题都需要后续研究人员进行深入探索与解决。因此，对排队理论的深入研究与优化改进依然任重而道远[29]，未来的研究应进一步加强排队理论与各类应用理论、大数据、人工智能等多学科的交叉融合，结合各类服务活动的新特征、新需求，构建更贴合实际的排队模型，提升排队理论在各类服务领域的应用深度与广度，为各类服务活动的科学组织与高效推进提供更加强有力的理论支撑与技术保障。

参考文献

[1] 胡运权，郭耀煌．运筹学教程[M]．北京：清华大学出版社, 2018.

[2] 黄飞，曹亚．排队论在局域网规划设计中的应用分析[J]．网络安全技术与应用, 2022(10): 10-12.

[3] 叶雨佳，李裕春，于海宝，等．基于排队理论的通道使用问题研究与应用[J]．应用数学进展, 2024, 13(5): 2366-2372.

[4] 宋振之，韩道文，吴中伟，等．基于排队论的光电对抗系统作战效能模型[J]．火力与指挥控制, 2022: 180-184.

[5] 高志刚，刘艳彬，陈长远，等．基于排队论的反无人机集群武器部署优化方法[J]．装备环境工程, 2022, 19(6): 68-74.

[6] 郭喆. 基于排队论的战术通信混合接入方法[J]. 电讯技术, 2021, 61(1): 58-62.

[7] 郭强, 王敬华, 魏伟, 等. 基于排队论的电火一体多层防空拦截能力研究[J]. 现代防御技术, 2024, 52(3): 20-25.

[8] Ruan, F., Chen, C., Cheng, Y. and Sun, Y. (2024) Evaluation Method Investigation of Public Decontamination Time in Off-Site Nuclear Emergency under the Influence of Human Factors. *Nuclear Engineering and Design*, **426**, Article 113378. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113378

[9] Blesa, M.J. and Fernández Anta, A. (2021) Maria Serna's Contributions to Adversarial Queuing Theory. *Computer Science Review*, **39**, Article 100348. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100348

[10] Afolalu, S.A., Ikumapayi, O.M., Abdulkareem, A., Emetere, M.E. and Adejumo, O. (2021) A Short Review on Queuing Theory as a Deterministic Tool in Sustainable Telecommunication System. *Materials Today*: *Proceedings*, **44**, 2884-2888. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.092

[11] Akhil, M.N., Sreelatha, K.S. and Ushakumari, P.V. (2021) Application of Queuing Theory to a Railway Ticket Window. 2021 *International Conference on Innovative Practices in Technology and Management*, Noida, 17-19 February 2021.

[12] Akbash, K., Doronina, N. and Matsak, I. (2024) On Extreme Values of the Queue Length in Some Queuing Systems. *Georgian Mathematical Journal*, **31**, 1-16. https://doi.org/10.1515/gmj-2023-2055

[13] Mohammadi, L. and Khajehvand, V. (2024) Queuing-Based Energy-Efficient Processing Algorithm for Smart Transportation through V2V Communication. *Concurrency and Computation*: *Practice and Experience*, **36**, e8235. https://doi.org/10.1002/cpe.8235

[14] 陈威, 鲁冬林, 沈溥淏, 等. 基于排队论的工程装备战场抢修力量配置策略研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(4): 4-6.

[15] 郭聪, 冯柯, 赵小康, 等. 基于排队论的船艇装备战场抢修力量配置[J]. 军事交通学报, 2022, 1(4): 23-27.

[16] 张东, 牛刚, 梁伟杰, 等. 基于战损预测和排队论的技术保障装备数量需求分析[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(8): 40-44.

[17] 闫寒, 李霞, 崔洪军, 等. 基于排队论的服务区加油区合理用地规模计算[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 150-153.

[18] 李志. 高速公路电动汽车充电站选址与定容研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2023.

[19] Pourvaziri, H., Sarhadi, H., Azad, N., Afshari, H. and Taghavi, M. (2024) Planning of Electric Vehicle Charging Stations: An Integrated Deep Learning and Queueing Theory Approach. *Transportation Research Part E*: *Logistics and Transportation Review*, **186**, Article 103568. https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103568

[20] 潘成生. 基于排队论的广州港伶仃航道南沙口以南航段通过能力计算[J]. 广州航海学院学报, 2021, 29(3): 15-19.

[21] 胡国峰, 王修光, 刘川. 无路侧干扰条件下公路基本路段通行能力计算方法[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(4): 7-13.

[22] 李家杰, 郑义. 影响城市道路通行能力因素分析[J]. 城市道桥与防洪, 2006(3): 19-21+132.

[23] 张亚平, 胡章立. 应用层次分析法评判快速路路段通行能力[J]. 公路工程, 2007(6): 1-3+29.

[24] 付南南. 基于排队论模型分析交通事故对城市道路通行能力的影响[J]. 商, 2016(5): 264+258.

[25] 武景顺, 朱高祥, 武同乐, 等. 基于排队论模型的高速公路收费站通行能力研究[J]. 综合运输, 2023, 45(12): 77-81.

[26] Wu, N. and Geistefeldt, J. (2024) Novel Speed-Flow Model Based on Queuing Theory and Its Potential Application in Highway Capacity Guidelines. *Transportation Research Record*: *Journal of the Transportation Research Board*, **2678**, 324-334. https://doi.org/10.1177/03611981241230303

[27] 郭一鸣, 陈春良, 曹艳华, 等. 基于排队论和兰彻斯特方程的战时维修保障装备数量确定[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11): 124-129.

[28] 张怡通, 徐秀丽. 具有两类优先权顾客 M/M/1 排队的优化分析[J]. 应用概率统计, 2021, 37(5): 449-460.

[29] 刘翔宇, 赵洪利, 杨海涛. 作战方案评估方法综述[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 79-84.