



# 城市轨道交通车站服务能力 计算与能力适应性评估

Calculation of Station Service Capacity and Adaptability  
Evaluation in Urban Rail Transit

◎许心越 著

# 城市轨道交通车站服务能力计算 与能力适应性评估

许心越 著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书以城市轨道交通车站为研究对象,从车站内乘客集散特性出发,围绕着车站服务能力的计算、评估及加强,开展车站服务能力概念体系的构建、车站服务能力的计算、不确定性需求下的车站服务能力适应性评估及多站协同客流组织等相关研究。

本书可供城市轨道交通相关专业的硕士研究生、博士研究生及城市轨道交通行业的管理人员、技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通车站服务能力计算与能力适应性评估 / 许心越著. —北京:北京交通大学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5121-2926-9

I. ①城… II. ①许… III. ①城市轨道交通—旅客运输—商业服务—研究  
IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第160326号

## 城市轨道交通车站服务能力计算与能力适应性评估

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG CHEZHAN FUWU NENGLI JISUAN YU  
NENGLI SHIYINGXING PINGGU

---

责任编辑:陈跃琴 助理编辑:李荣娜 特邀编辑:韩雪

出版发行:北京交通大学出版社 电话:010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街44号 邮编:100044

印 刷 者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×235mm 印张:10.25 字数:196千字

版 次:2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2926-9 / U·231

印 数:1~800册 定价:38.00元

---

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

# 前 言

城市轨道交通车站的规划设计和运营管理是建筑规划、交通工程及公共安全管理等相关领域的重要研究课题。目前,城市轨道交通车站客流剧增,限流已成常态化,如何描述车站内乘客的集散过程、系统分析计算不同服务水平(对应不同时段、不同类型的乘客)下车站的能力、定量评估不确定性需求下车站能力适应性情况,并给出对应的客流组织方法、研究多个车站的协同客流组织问题,是车站规划设计、客流组织、设备使用方案制定、列车运行组织的重要依据。本书以城市轨道交通车站为研究对象,从车站内乘客集散特性出发,围绕着车站服务能力的计算、评估及加强,开展车站服务能力概念体系的构建、车站服务能力的计算、不确定性需求下的车站服务能力适应性评估及多站协同客流组织等相关研究,并选取典型车站进行了实例分析。

本书的主要工作包括以下几个方面。

(1) 构建了城市轨道交通车站服务能力概念体系。在已有运输能力概念和定义的基础上,结合车站系统业务流程,提出了能反映不同拥挤程度及安全特性(服务水平)的车站服务能力的概念,兼顾运营者和乘客两个不同主体的需求,形成了能动态反映不同时段、不同类型乘客的车站能力理论;分析日常短期、未来中长期客流不确定性(包括总量及客流空间分布变化)的特点,研究不同客流总量及客流空间分布下的车站服务能力变化情况,提出三类不同的车站服务能力:车站最大服务能力、车站备用服务能力、车站单项可变需求服务能力,并给出每种能力的适用场景及物理意义;分析车站服务能力的影响因素,研究车站服务能力的数学表达问题,建立不同车站服务能力的数学表达模型。

(2) 建立了车站集散过程的分层排队网络模型,构建了车站服务能力的排队网络优化模型,提出了车站服务能力的解析分析方法,以地铁北京站为实例验证模型及算法的有效性,并分析单项可变进站需求服务能力的灵敏度。

(3) 研究车站的排队网络仿真模型构建技术及车站服务能力的仿真表达技术,提出车站服务能力计算的仿真分析方法,形成车站服务能力的仿真分析技术,并以地铁北京站为例,研究解析分析方法和仿真分析方法的效率及各自的适用范围。

(4) 针对车站客流需求总量波动大、客流空间分布变化大的问题,研究客流需求空间分布、需求总量与车站服务能力的关系,提出车站服务能力适应性的定义,以及不同服务水平、不同需求场景下的能力适应性的测量方法。

(5) 针对北京地铁早晚高峰小时需求远大于点线能力情况,研究客流在单线多个车站间的传播规律,在单站能力分析评估的基础上建立了多站协同限流模型,给出了相应的求解算法,并以地铁 13 号线为例进行了算例分析和模型算法有效性验证。从理论上分析相邻车站客流拥挤传播规律,评估协同限流策略的效果,为多个车站协同限流提供理论和技术支持。

本书在撰写过程中,得到了北京交通大学交通运输学院刘军教授、李海鹰教授及其他老师的帮助和支持,在此表示衷心的感谢。本书获得了北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室和北京市自然科学基金项目(编号:9164033)资助,特此感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误,敬请广大读者批评指正。

作者

2016 年 6 月

# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 选题背景和研究意义 .....	1
1.1.1 选题背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	2
1.2 研究综述 .....	3
1.2.1 轨道交通车站能力理论研究概述 .....	4
1.2.2 车站内乘客集散特性研究概述 .....	8
1.2.3 车站能力计算方法研究概述 .....	12
1.2.4 车站能力适应性评估研究概述 .....	15
1.2.5 轨道交通多站协同限流方法研究概述 .....	16
1.2.6 现有研究的不足 .....	17
1.3 研究目标及主要研究内容 .....	18
1.3.1 研究目标 .....	18
1.3.2 主要研究内容 .....	18
第 2 章 轨道交通车站服务能力概念理论框架 .....	21
2.1 轨道交通车站系统描述 .....	21
2.1.1 业务过程描述 .....	21
2.1.2 车站内客流分类 .....	22
2.1.3 车站功能描述 .....	23
2.2 轨道交通车站能力概念体系 .....	23
2.2.1 轨道交通车站能力的定义 .....	23
2.2.2 轨道交通车站能力概念体系 .....	24
2.3 轨道交通车站能力概念体系的扩展 .....	25
2.3.1 车站服务能力概念 .....	25
2.3.2 车站能力概念体系扩展的意义 .....	26

2.4	车站服务能力影响因素分析	27
2.4.1	车站设备设施能力	28
2.4.2	车站设备设施网络设计及运用方案	29
2.4.3	车站客流需求	30
2.4.4	车站内乘客的交通流特性	34
2.4.5	运营参数	36
2.4.6	服务水平	36
2.5	基于客流需求的车站服务能力概念细化	37
2.6	车站服务能力数学表达	39
2.6.1	符号定义	39
2.6.2	车站最大服务能力模型	40
2.6.3	车站备用服务能力模型	43
2.6.4	车站单项可变客流需求服务能力模型	44
2.6.5	模型相关问题分析	45
2.6.6	求解分析	50
2.7	本章小结	51
<b>第3章</b>	<b>车站服务能力解析分析方法研究</b>	<b>52</b>
3.1	模型假设	52
3.2	单个节点(设备设施)建模及能力分析	52
3.2.1	单个节点(设备设施)建模	52
3.2.2	单个节点(设备设施)通过能力分析	54
3.3	基于 M/G/C/C 状态依赖排队网络的车站分析模型	56
3.3.1	进(出)站过程子网络建模	57
3.3.2	上下车过程子网络建模	59
3.3.3	模型适用性和局限性	60
3.4	可变进站需求服务能力的数学优化模型	62
3.5	基于响应曲面法的可变进站需求服务能力求解算法	63
3.6	实例分析——地铁北京站服务能力的计算及分析	65
3.6.1	车站系统描述和系统建模	65
3.6.2	RSM 试验设计和最优解	67
3.6.3	车站服务能力解析分析方法的相关分析	70
3.6.4	可变进站需求服务能力敏感性分析	70
3.7	本章小结	72

<b>第 4 章 车站服务能力仿真分析方法研究</b> .....	73
4.1 车站乘客集散过程仿真建模 .....	73
4.1.1 单个乘客的节点动态选择行为建模 .....	74
4.1.2 排队网络与单个乘客节点动态选择行为相结合的仿真模型 .....	75
4.1.3 仿真模型特性分析 .....	81
4.2 车站服务能力的仿真优化模型 .....	83
4.2.1 车站最大服务能力仿真优化模型 .....	85
4.2.2 车站备用服务能力仿真优化模型 .....	85
4.2.3 车站单项可变客流需求服务能力仿真优化模型 .....	86
4.3 集成 DEA 和 GA 的车站服务能力仿真优化算法 .....	87
4.3.1 遗传算法模块 .....	89
4.3.2 DEA 适应度评估模块 .....	90
4.3.3 算法详细步骤 .....	92
4.4 案例分析——地铁北京站服务能力的仿真分析 .....	94
4.4.1 仿真系统构建及参数取值 .....	94
4.4.2 SDGA 算法的参数标定 .....	95
4.4.3 基于 SDGA 算法的车站服务能力分析 .....	96
4.4.4 两类算法效率及适用性分析 .....	99
4.5 本章小结 .....	100
<b>第 5 章 车站服务能力适应性评估</b> .....	101
5.1 车站服务能力适应性的概念及意义 .....	101
5.2 车站服务能力适应性评估 .....	103
5.2.1 车站服务能力适应性评估方法 .....	104
5.2.2 车站服务能力适应性评估分析 .....	104
5.3 地铁北京站服务能力适应性综合评估 .....	105
5.3.1 评估场景设计 .....	105
5.3.2 车站服务能力适应性评估分析 .....	108
5.4 地铁西二旗站单项可变客流需求服务能力适应性评估 .....	110
5.4.1 车站系统参数 .....	110
5.4.2 评估场景设计 .....	112
5.4.3 单项可变客流需求服务能力适应性评估 .....	116
5.5 本章小结 .....	118



第 6 章 高峰时段地铁单线多站协同限流策略研究 .....	119
6.1 单线多站协同限流描述 .....	119
6.1.1 单线多站协同限流必要性分析 .....	119
6.1.2 单线多站协同限流的内涵及目标 .....	121
6.1.3 单线多站协同限流的常用策略分析 .....	122
6.2 单线多站协同限流影响因素分析 .....	123
6.2.1 单线多站系统的乘客转移过程描述 .....	123
6.2.2 单线多站协同限流的影响因素分析 .....	125
6.3 单线多站协同限流模型构建及算法研究 .....	130
6.3.1 单线多站协同限流过程的状态变量描述 .....	130
6.3.2 模型假设 .....	131
6.3.3 符号定义 .....	131
6.3.4 模型决策变量 .....	132
6.3.5 单线多站协同限流模型及求解 .....	133
6.4 单线多站协同限流案例分析 .....	136
6.4.1 北京地铁 13 号线及车站的基本情况 .....	136
6.4.2 单线多站协同限流的大站停车方案初步设计 .....	139
6.4.3 单线多站协同限流方案生成及分析 .....	140
6.5 本章小结 .....	141
第 7 章 结论及展望 .....	142
参考文献 .....	144

# 第1章 引言

## 1.1 选题背景和研究意义

### 1.1.1 选题背景

随着我国社会经济水平的快速发展、城市空间及人口规模的急剧增大，交通需求与交通供给之间的矛盾更加突出，交通拥堵现象日益加剧。轨道交通作为一种缓解城市交通压力的有效方式，具有运量大、速度快、时间准、污染少、安全性好等优点，目前已成为缓解城市交通拥堵的交通方式之一。

作为网络节点的城市轨道交通枢纽，客运需求大且分布不平衡，存在运力资源与客运需求不匹配的情况，特别是高峰时期一些客运枢纽的设备设施能力严重不足，拥堵严重，乘客在车站内的等待时间急剧增长，在一些特定的设施区域容易诱发突发事件和意外事故，例如通道及站台过度拥挤、自动扶梯及出入口出现踩踏事件等。再加上地铁枢纽站担负着多种交通方式的衔接与换乘等功能，更加剧了客运枢纽内部设施能力不足、服务水平低下的情况。

为有效应对大客流冲击，降低客流过度拥挤引发安全事故的风险，地铁车站运营管理部门不得不临时采取各种限流措施。而对于需要常态化限流的车站，则需要重新评估该车站的服务能力、识别能力瓶颈、判断是否需要对其进行更新改造。因此，为有效解决大客流冲击与地铁车站服务能力之间的矛盾，更好地规划设计轨道交通车站，实现科学的轨道交通运营管理，轨道交通设计者和运营管理者需要解决以下问题：

(1) 在日常地铁车站运营过程中，地铁管理部门不仅需要从管理者角度考虑车站运营的效率及安全，还需要从乘客需求的角度衡量实际运营组织的服务水平；

(2) 在给定车站网络拓扑结构及固定列车运行条件下，车站管理部门应该能够掌握不同服务水平条件下车站的最大服务人数信息，并能采取有效的客运组织措施及设备使用配置方案来运输最大服务人数；

(3) 在现有车站结构及既有客流需求下，地铁管理部门应该能够评估当前客流需求与车站服务能力的适应性情况，以掌握车站还能服务的最大乘客数；

(4) 在中远期客流总量、客流空间分布变化及短期客流特性波动的情况下，

如何分析评估既定网络结构下车站服务能力的适应性,给出车站服务能力能够满足的客流需求总量范围,以及总量固定下的各类客流的变化范围;

(5) 在既有需求超过能力供给的前提下,研究点、线的能力协同优化和客流配置方法,实现线路多站的安全、均衡运输,给出一条线路上多个车站的协同限流策略。

轨道交通车站的服务能力,与所属区域的客流特征密切相关,而不同车站的客流特征在空间分布上差异很大,因此需要对轨道交通车站的客流特征进行深入研究,提出系统的轨道交通车站服务能力计算方法,评估不确定需求下车站服务能力的适应性,建立点线能力协同优化模型,并给出多站协同限流方案,为轨道交通设计、更新改造和运营管理提供理论依据和辅助决策支持。

### 1.1.2 研究意义

在车站设计阶段,目前我国城市轨道交通主要采用车站的超高峰设计客流量(预测远期高峰小时客流量或客流控制期高峰小时客流量乘以取值为1.1~1.4的超高峰系数)来确定车站各设施(站台、站厅、出入口通道、楼梯、自动扶梯)及各设备(售票机、检票机等)的通过能力,采用超高峰设计换乘量来确定车站换乘设施的通过能力,并根据车站各部位最大通过能力标准,确定进出站设备、乘降设施及换乘设施的物理参数和站内配置,最终完成车站工程的总体设计和评估<sup>[1]</sup>。换言之,现有的车站设计采用孤立、静态的方法,还没有从系统的角度设计各类设备数量、设施规模及设备设施之间的布局,未考虑乘客在各类设备设施间的运动特性,难以使整个车站系统的能力最大化。

在运营管理阶段,城市轨道交通运营管理部门采用运营指标体系<sup>[1]</sup>(包括基础指标、客流及安全指标等)来评估整体运营情况,缺少车站服务能力与既有需求匹配情况的定量分析、动态评估技术,无法掌握车站能力利用情况,难以识别能力薄弱环节。同时,在经济发展及其他外部因素影响下,车站客流需求总量波动较大,客流空间分布变化明显,需要分析、评估车站在既有网络结构和设备设施条件下能够实现的由不同客流空间分布决定的客流需求的总量。另外,在网络化运营情况下,城市轨道交通车站的日常客流组织大多依靠实际现场经验单站组织客流,缺少制定单站及多站协同客流组织的方法和理论依据。

因此,本书以站内乘客集散运动特性为出发点,以轨道交通车站服务能力概念体系为基础,研究车站服务能力建模及不同类型能力的计算方法、车站服务能力的需求适应性评估方法,以及多站协同客流组织方法。本书的研究意义如下。

(1) 城市轨道交通车站服务能力的概念体系尚未建立,进行深入的理论研究很有必要。随着城市轨道交通网络化运营的实现,乘客数量呈爆炸式增长,乘客

的安全性和舒适性要求越来越迫切。传统的城市轨道交通能力理论主要从运营者角度出发,分析不同条件下运输的最大乘客数量,无法动态反映不同时段、不同乘客需求下车站最大服务人数差异性的特点,忽略了乘客的舒适性和效率性。因此,提出能动态反映不同乘客需求的车站服务能力,构建基于服务水平的车站服务能力(车站动态能力)体系,对于日常不同时段车站客流组织具有重要的理论支持和现实指导意义。

(2) 在车站服务能力计算方面,车站服务能力理论的研究将为车站服务能力的计算提供有效的方法。车站服务能力不是组成车站的各设备、设施能力的简单加总,孤立地分析设备、设施的能力,局限性较大。因此,如何系统、动态地分析计算车站服务能力,还有待从概念和理论体系等方面进行系统的研究与深化。

(3) 研究轨道交通车站乘客集散过程的解析及仿真模型,从中观的角度定量描述乘客集散过程,深化行人数学及仿真建模领域的理论,建立以排队网络为基础的车站服务能力动态分析、计算方法,完善车站设备(数量及位置)和设施(物理参数)的设计与评价技术,充分适应目前城市轨道交通车站规划、设计、运营的实际需求。

(4) 研究面向不确定性客流需求(客流总量及需求空间分布)的车站服务能力的适应性,提出车站服务能力适应性的定义及测量方法,形成不确定性需求下车站服务能力适应性评估方法,提供不同服务水平下车站客流总量控制的条件和各类客流(进站、出站及换乘客流)的控制及组织方法,并为不同需求场景下车站内设备、设施的优化,限流提供理论及方法支持。

(5) 在单个车站服务能力计算的基础上,对多个车站的客流需求与服务能力匹配情况进行协同分析,形成多站协同限流技术,为合理制定线路列车运行方案及车站客流组织(限流)提供理论基础,为减少乘客在出行过程各环节上所花费的时间、提高线路整体运营效率、减少车站内的乘客拥堵提供方法支持。

## 1.2 研究综述

为研究车站服务能力的内涵,分析建立车站服务能力理论体系的必要性和迫切性,本书对交通领域相关的车站能力定义及分类进行综述。乘客是城市轨道交通车站系统服务的主要对象,服务水平是乘客在车站的主观感知,必须先对乘客在车站内的运动特性进行分析,识别乘客在单个设备设施上的运动特性及车站网络中的运动特性,才能进一步研究并提出车站服务能力的计算方法。为研究车站服务能力能够满足的不同类型客流的需求量,需要对既有的能力评估技术和方法进行掌握。限流技术相关研究属于一个较热点的问题,单个车站限流成果显著,

多站协同限流可以在既有的研究基础上开展。因此,本书从以下5个方面对既有研究成果进行综述。

### 1.2.1 轨道交通车站能力理论研究概述

目前,国内外没有对轨道交通车站能力进行系统定义。城市轨道交通领域与其直接相关的定义有:美国交通研究委员会(TRB)2003年发布的Transit Capacity and Quality of Service Manual(TCQSM)<sup>[3]</sup>规定地铁车站能力为正常情况下通过或占用设备设施的最大乘客数,单位为每平方米人数或单位时间通过人数;WMATA<sup>[4]</sup>定义了地铁车站能力为通过车站各种设施间最大的乘客数量。我国在轨道交通车站设计时采用车站最大通行能力作为车站设计依据<sup>[1]</sup>,即根据《地铁设计规范》,计算车站各部位的最大通行能力,不考虑客流特性,也不区分安全等级,只考虑最大通行能力。毛保华<sup>[5]</sup>等提出城市轨道交通系统运输能力概念,并把其分为设计能力和可用能力两类:设计能力定义为某一条线路某一方向1小时内通过某一点的旅客数量,而可用能力被定义为乘客需求到达不均衡条件下的设计能力,可用能力等于设计能力乘以高峰能力利用系数。胡清梅等<sup>[6]</sup>基于车站安全性定义了车站最大承载能力及车站安全客流承载能力。

国内外在城市轨道交通领域与车站能力间接相关的定义相对比较,具体如下。

DeLeeu<sup>[7]</sup>、Kneafsey<sup>[8]</sup>、Manheim<sup>[10]</sup>分别从不同的侧面分析生产系统的能力特性,把生产系统能力分为最大承载能力(ultimate capacity)、实际能力(practical capacity)和经济能力(economic capacity)三种。最大承载能力是考虑在物理拓扑结构限制下运输系统的最大生产能力,而实际能力和经济能力则分别强调实际日常运营条件下和最经济运营模式(最小边际成本和最短路径)下运输系统的生产能力。运输系统最大承载能力最大,而运输系统经济能力最小。

苏联学者首先提出了实际可利用能力的概念,指出由作业中断造成的通过能力损失使实际可利用能力比现有的计算通过能力要小得多,通过能力的主要损失不在于运行中断本身,而在于中断所引起的扰动,但他们并未对扰动规律做深入研究<sup>[9]</sup>。

Morlok和Riddle<sup>[11]</sup>提出从两个宏观角度研究生产系统的能力:物理能力(physical capacity)和经济能力。其中物理能力包括最大承载能力和实际能力,最大承载能力指仅考虑设备限制条件下系统的最大生产能力,实际能力为系统在一定成本或可接受的服务水平下系统最大的生产能力。

Webster和Cobbe<sup>[12]</sup>在研究单个有信号灯的路口的通行能力问题时,提出备用能力(reserve capacity)的概念。Wong<sup>[13]</sup>将有信号灯控制的路口备用能力的概念扩展到给定路径选择模型、有信号灯控制的道路网络的最大能力计算上,他把道路路网备用能力定义为当前OD需求矩阵的倍数 $\mu$ ,该倍数大小等于网络能实现

的最大 OD 需求量除以初始 OD 需求量。该最大 OD 需求量是在各路段流量不超过路段能力、需求总量等比例分配到当前 OD 需求矩阵的情况下计算得到的。

Kasikitwivat<sup>[14-15]</sup>在已有的道路网络能力分类（最大承载能力和实际能力）基础上<sup>[11-12]</sup>提出了最大承载能力、实际能力和备用能力的概念，用来评估需求与供给的适应性情况，三类能力与初始 OD 需求关系示意图如图 1-1 所示。

(1) 最大承载能力为满足路段和区域能力约束下道路系统能够加载的最大需求量，道路网络中需求特性（如图 1-1 中的细实线上带菱形的五边形为不同 OD 分布比例）和路径可以与既有需求完全不同（动态变化），以达到全网用户成本最低。

(2) 实际能力为在完成当前 OD 需求总量的基础上，满足路段和区域能力约束下，网络实际能完成的最大 OD 需求量（包括既有需求和新增需求两部分）。这个概念被用来估算反映当前需求特性的既有城市道路路网能力，只允许新增需求的空间分布和路径选择发生变化。图 1-1 中的粗实线上带三角形的五边形就代表实际能力，它是在细实线上带菱形的五边形基础上动态放大，但并不一定等比例放大。

(3) 备用能力概念借鉴了 Wong<sup>[13]</sup>的相关理论，进一步指出其物理意义：当  $\mu > 1$  时，表示在当前 OD 需求矩阵基础上，网络还有  $100(\mu - 1)\%$  的空闲能力；否则，表示当前网络已超载  $100(1 - \mu)\%$  的能力。图 1-1 中的粗实线上带方框的五边形代表备用能力，它是细实线上带菱形的五边形的等比例放大。

以上三种能力分类定义表明：实际能力和备用能力均与既有需求有关，最大承载能力与既有需求无关，备用能力对应的需求空间分布与既有需求的空间分布相同，而实际能力对应的需求空间分布可能与既有需求的空间分布不同。

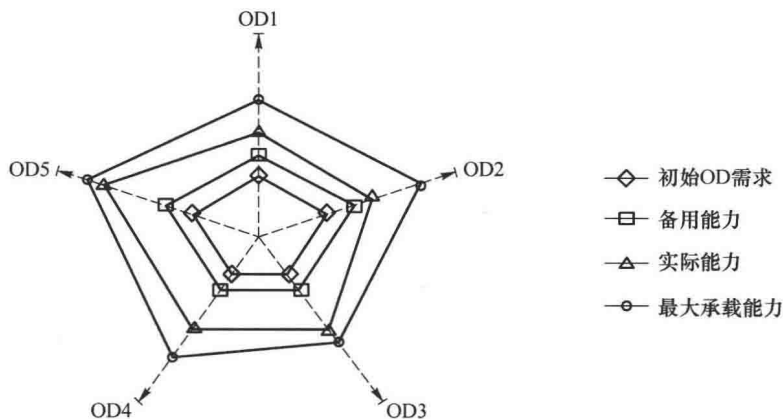


图 1-1 三类能力与初始 OD 需求关系示意图

Krueger<sup>[16]</sup>、Park<sup>[17]</sup>、Abril<sup>[18]</sup>定义铁路系统能力为：在特定服务计划给定运输资源情况下，通过既有铁路线路运输一定交通量的能力，并把铁路能力分为理论

能力、实际能力、已使用能力及可用能力（储备能力）四种，其详细定义如下：

(1) 理论能力  $C_r$  为系统理论上的最大能力，这种情况下假定所有列车构成及等级都相同，系统没有任何外部扰动，不考虑实际运营中外部需求及运营条件的变化；

(2) 实际能力  $C_p$  为考虑外部需求变化及日常运营条件满足一定系统性能条件下的铁路最大运输能力；

(3) 已使用能力  $C_u$  为实际运营中已实现的运输量；

(4) 可用能力（储备能力）为实际能力与已使用能力的差值，其大小表示铁路系统在保持一定效率和安全情况下还能附加完成的运输量。

上述四种能力中，最常用的是实际能力，它能给出铁路运输资源与需求间的最优配置方案。另外，还用已使用能力与实际能力的比值作为衡量铁路系统能力利用率的重要指标，并分析指标大小代表的实际意义。四种能力之间的关系如图 1-2 所示。

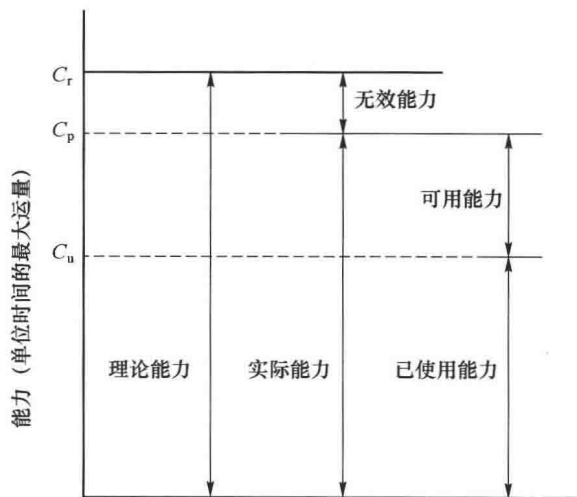


图 1-2 不同类型的能​​力

UIC（国际铁路联盟）2004 年出版的 UIC406<sup>[19]</sup> 能力手册，将铁路能力定义为“在定义的时间段内，考虑实际的列车混合径路等条件下所有可能的列车径路的总数”。它认为：铁路线路能力与能力利用场景密切相关，能力利用场景主要包括列车数量、列车速度、运行图结构、运行图稳定性要求等内容。但 UIC406 能力手册未对理论能力、实际能力等提出具体的定义和计算方法，也未对车站的通过能力计算和能力利用率评估提出具体的建议。

国内铁路领域相关研究包括以下几方面。

胡安洲<sup>[20]</sup>系统地讨论了铁路运输能力的概念、计算、利用和加强等问题,为全面深入开展铁路运输能力问题的系列研究奠定了基础。

徐瑞华<sup>[21]</sup>研究了运输能力利用中无效能力的概念特性及其转化规律,建立了运输系统能力利用的动态数学模型,系统地阐述了能力损失在各子系统间的传递和恢复过程,并运用计算机模拟的方法分析列车区间运行延误的影响,并通过具体实例说明能力负荷的转移是可行的。

张星臣<sup>[22]</sup>在现有铁路运输能力计算、利用与加强等有关概念和理论的基础上,深入研究了铁路运输系统储备能力的有关概念和理论,给出了储备能力的计算公式,以及它与各种能力利用率之间的关系。

施其洲<sup>[23]</sup>从系统理论和运输需求的理念出发,提出了路网系统运输能力的概念模型,其定义的路网系统运输能力是指在现有固定设备、活动设备、人力、一定运输需求及车流径路分配方案和行车组织水平条件下,单位时间内铁路网络系统在整体上最大可能的运输生产能力,其计算单位是万  $t \cdot km/a$ 。

孔庆铃、刘其斌<sup>[24]</sup>定义铁路车站能力为:车站在现有设备和合理使用技术设备条件下,将通过能力和改编能力进行综合分析,针对车站薄弱环节,重新调整各项设备分工,最后确定的一昼夜能够通过的最多货物(旅客)列车数和运行图规定的旅客(货物)列车数。

何世伟<sup>[25]</sup>、雷中林<sup>[26]</sup>在对铁路运输能力有关概念和定义进行简要回顾和全面综述的基础上,从系统理论、运输需求及车流径路的理念出发,提出了路网系统运输能力的系列概念:路网系统总体运输能力、路网系统有效使用运输能力、路网系统潜在运输能力,各种能力的说明如下。

(1) 路网系统总体运输能力是指在现有固定设备、活动设备、人力、一定运输组织方法和行车组织水平条件下,单位时间内铁路路网系统在整体上运输产品最大可能的运输能力,其计算单位是吨公里/单位时间;铁路路网系统总体运输能力可采用各线路长度与该线路单位时间内输送能力的乘积,再将所有线路能力以求和的方式确定,它是建立在一定设备和运输组织方法的基础上,与运输需求(车流量、车流径路)变动无直接联系的相对客观量,它在原有运输能力概念基础上考虑了运距因素,将线路运能和运距统一考虑在路网系统意义下以同一计量单位处理。

(2) 路网系统有效使用运输能力是指在现有设备、人力、一定运输需求、车流径路分配方案和行车组织水平条件下,考虑到各子系统相互协调及日常随机因素的影响,铁路路网系统单位时间实际可能完成的运输产品的运输能力,其计算单位是吨公里/单位时间。

(3) 路网系统潜在运输能力是指路网中已经具备使用条件,但由于客货流、车流结构、路网线路中其他关联线路尚未建成、运输组织方法限制或者线



路若干区段中限制区间运输能力相差较大等原因,在路网中尚未被使用的能力。路网系统潜在运输能力与储备能力、无效运输能力相关,储备能力是指在一定时期给定运量的基础上,考虑运量波动、施工天窗、技术改造及系统发展等因素,运输系统完成运输任务所必需的最小日常使用能力以外的附加能力,储备能力强调的是根据需要进行能力目的性预留。无效运输能力是指由于固定设备检修、施工天窗、复杂的外部环境和气候变化、人为的失误等原因不能被利用的部分能力。

铁路运输能力按照设备类型可分为通过能力和输送能力两类,取决于固定设备设置条件的能力称为通过能力,取决于活动设备数量和配置的能力称为输送能力<sup>[27-28]</sup>。通过能力一般用单位时间内能放行通过的标准重量的最大列车数量来表示,实际工作中按照不同的管理主体分为:设计通过能力、现有通过能力和需要通过能力三种<sup>[27-29]</sup>;输送能力按照使用情况分为理论能力、实际有效能力和无效能力三种。采用能力利用率指标分析运输能力负荷情况,提出运输能力储备概念研究系统的可靠性<sup>[27,29]</sup>。

## 1.2.2 车站内乘客集散特性研究概述

国外针对城市轨道交通枢纽内客流的研究主要集中在对行人行为的仿真,通过软件的开发对枢纽内行人的拥挤程度进行评价,并广泛应用到新建车站的设计和对现有车站的改建和安全评估。这些研究以分析乘客流的速度、流量和密度之间的关系为基础。行人密度  $D$ 、速度  $V$  和流量  $S$  之间的关系可描述为

$$S=V \cdot D$$

该关系模型是行人流的宏观特性的基本规则,它包括以下三个模型:流量-密度模型、速度-密度模型、速度-流量模型。这三个模型的机理类似,可由其中一个关系式推导出另外两个关系式。本书重点关注速度-密度模型,以分析乘客集散特性。

### 1. 线性模型

针对速度-密度关系最早进行研究的是 Greenshield,他在 1933 年首先提出了速度-密度的线性模型;而后 Greenberg 提出了对数模型,Underwood 提出了指数模型,Edie 提出了多段式模型,Pipes、Munjaj 及 Drake 提出了一组单段式模型曲线族来描述速度-密度关系<sup>[30]</sup>。这些模型均是在对机动车交通流的研究中建立的,但可将模型借鉴到行人交通流研究中,具体研究如下。

(1) Polus<sup>[31]</sup>等人把模型应用于行人交通流,分析了单段式和三段式模型的特点,指出三段式模型在定义服务水平时较容易理解。

(2) Virkler<sup>[32]</sup>研究了各类模型的适用性,认为两段式的 Edie 模型适合大型