

轨道交通网络化运营组织理论与关键技术

Operational Theories and Key Technologies
of Rail Transit Networks

毛保华 刘明君 黄 荣 杜 鹏 等 著



科学出版社

轨道交通网络化运营组织 理论与关键技术

Operational Theories and Key Technologies
of Rail Transit Networks

毛保华 刘明君 等著
黄荣 杜鹏

科学出版社

北京

前 言

随着我国城市轨道交通的发展,不少城市的城市轨道交通系统的运营实体正逐步从单一线路模式转变为网络化线路模式,如何在网络条件下做好轨道交通系统的运营组织与管理工作备受关注。可以说,目前关于城市轨道交通网络化运营方法与技术的研究已经成为国内轨道交通行业实践的焦点。总体上看,我国轨道交通网络化运营组织目前主要还是建立在单线或局部的运营经验基础上。网络化运营组织的研究成果比较零散,对许多关键问题的研究与认识也不够深入,可以说还未能形成完整的理论与方法体系。

在这种背景下,系统研究城市轨道交通网络化运营组织理论与关键技术,探讨城市轨道交通网络化运营组织方法与理论,对提高我国城市轨道交通运营组织水平,促进城市轨道交通健康、有序发展具有重要意义。

网络化运营是指在由多线路组成的城市轨道交通线网上建立的,旨在有效满足出行者需要的安全的、可持续的运输组织方法与经营行为的总称。网络化是世界城市轨道交通运营管理发展的趋势。相对于单条线路下的独立运营,当城市轨道交通系统规模发展到由若干条轨道交通线路有经有纬、交错衔接形成整体的“网”状系统时,系统需要更加强调自身整体功能和规模效应的客观发展要求。因此,网络化运营需要通过建立安全、高效、系统的轨道交通网络运营管理体系,统筹安排既有资源,统一协调线、网间关系,实现线、网运营的有效性、安全性和可靠性,实现网络运营的社会效益、经济效益最大化。

本书是国内第一本系统研究轨道交通网络化运营组织理论与关键技术的专著。根据在该领域内长期的研究成果,作者比较系统地阐述了城市轨道交通网络化运营组织模式、资源共享技术、运营组织理论及方法,丰富了既有的城市轨道交通运营组织理论与技术,对我国城市轨道交通网络化运营实践具有重要的指导意义。本书的重点是城市轨道交通运营管理中的典型问题,其内容结合了国内城市轨道交通发展战略以及城市轨道交通网络化运营特点,一方面从运营组织模式、票务清算技术、票价补贴技术、资源共享、应急处理、信息共享对轨道交通网络化运营组织模式与资源共享技术进行了详细论述;另一方面,作者还结合国内外经典案例,从换乘组织、过轨组织、共线运营、多交路运营、快慢车结合、可变编组等方面对网络化运营技术进行了深入探讨,并对网络化运营环境下线路通过能力计算方法、列车运行计划编制方法和网络化服务水平分析与评价方法进行了研究。作者希望通过对上述内容的研究,能够补充国内轨道交通网络化运营组织理论领域的研究不足,

为深化城市轨道交通的运营实践奠定基础。

本书是作者以多年科学研究工作为基础,在城市交通复杂系统理论与关键技术教育部重点实验室的工作中完成的。全书的具体分工为:毛保华撰写了前言、第1、2章和第14章第1、2、5节;刘智丽撰写了第3章;柏赞撰写了第4章;高利平撰写了第5、11章;刘明君撰写了第6、10、12章;杜鹃撰写了第7章和第14章第3、4节;黄荣撰写了第8、9、13章。

围绕本书著述内容开展的相关研究包括国家自然科学基金项目(60634010, 70971010),科技部基础科学研究计划项目(2006CB705507)以及铁道部科技发展计划项目(2005K003-C(X))。研究工作还得到了国家发展和改革委员会基础产业司、北京市基础设施投资有限公司、北京市城市规划设计研究院、北京市交通委员会路政局、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中国地铁工程咨询有限责任公司、铁道第三勘察设计院集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁工程设计咨询集团有限公司等单位的支持。在著述过程中,得到了王庆云、郑剑、蒋玉琨、焦桐善、全永燊、沈景炎、高世廉、田振清、郭春安、朱军、郭小磊、程先东、刘迁、边颜东、秦国栋、孙壮志、许双牛、卫和君、方琪根、苏梅、李建新、聂英杰、李凤军、刘剑锋、张凌、陈鹏、陈团生等专家的帮助和指导。研究与著述过程中,北京交通大学城市轨道交通系彭宏勤、刘海东、王保山、徐彬、丁勇以及杨远舟、赵宇刚、李泉、王冬博、马超云、黄宇、吴燕伶、蒋文、陈涛、吴珂琪等同志参加了相关项目研究工作。出版过程中得到了北京交通大学交通运输学院和科学出版社的支持。全书著述中引用了大量同行的研究成果,作者在此一并表示衷心感谢。

作 者

2011年3月

目 录

前言

上篇 网络化运营组织模式与资源共享技术

第 1 章 轨道交通网络化运营组织特征	3
1.1 概述	3
1.2 轨道交通线网形态分析	4
1.2.1 线网基本形态和特点	4
1.2.2 换乘便捷性	5
1.2.3 典型线网的换乘便捷性分析	7
1.2.4 东京与北京线网换乘便捷性分析	11
1.3 网络化运营客流特征.....	14
1.3.1 连接市郊线路的客流空间分布特征	14
1.3.2 线网中的区域客流的的空间分布特征	16
1.3.3 换乘客流结构特征	17
1.4 案例分析——上海.....	19
1.4.1 上海城市轨道交通发展阶段	19
1.4.2 线网形态分析	21
1.4.3 客流特征.....	23
第 2 章 网络化运营组织管理模式	26
2.1 概述.....	26
2.2 企业组织模式及其适用性.....	27
2.2.1 都市圈轨道交通企业组织的适用模式	27
2.2.2 国内外都市圈轨道交通企业组织的主要形式	31
2.3 网络化行车组织模式.....	32
2.3.1 分段运营.....	33
2.3.2 多交路运营	33
2.3.3 快慢车结合运营	34
2.3.4 换乘运营.....	34
2.3.5 共线运营.....	34
2.3.6 过轨运营.....	35

2.3.7 可变编组运营	35
2.4 典型案例分析	35
2.4.1 东京都市圈轨道交通	36
2.4.2 伦敦都市圈轨道交通	39
2.4.3 上海市轨道交通	42
2.4.4 广州市轨道交通	43
第3章 网络化运营的票务清分清算技术	45
3.1 概述	45
3.2 票务清分清算的 AFC 系统	46
3.3 票款清算流程	47
3.3.1 清分原则	48
3.3.2 票款清算实施流程	48
3.4 网络化运营环境下的票款清算	50
3.5 过轨运营环境下的票款清算	51
3.5.1 两种运营环境下影响票款清算的关键区别	52
3.5.2 算法改进与分析	52
3.5.3 客流路径选择影响因素分析	53
3.5.4 算例分析	55
3.6 快慢车结合过轨运营环境下的票款清分	57
3.6.1 快慢车结合的“虚拟路径”分析	57
3.6.2 流程设计	58
3.6.3 算例分析	60
第4章 网络化运营的政府补贴方法	62
4.1 概述	62
4.2 运营补贴必要性分析	62
4.2.1 城市轨道交通事业基本属性	62
4.2.2 政府补贴的必要性	66
4.3 城市轨道交通运营补贴模型	67
4.4 城市轨道交通运营补贴机制	68
4.4.1 成本加成合约	69
4.4.2 固定价格合约	69
4.4.3 激励性合约	71
4.4.4 特许经营权竞标	72
4.5 城市轨道交通运营补贴的国际经验	74
4.5.1 伦敦:成本加成合约	74

4.5.2 巴黎:激励性合约	77
4.5.3 东京:特许经营	79
第5章 网络资源运营共享技术	82
5.1 概述	82
5.2 人力资源共享	83
5.2.1 运营管理人员	83
5.2.2 培训人员	83
5.2.3 维修人员	83
5.3 运营设备与设施资源共享	83
5.3.1 车辆	84
5.3.2 主变电站	87
5.3.3 信号设备	90
5.3.4 控制中心	93
5.3.5 其他运营设备和设施	93
5.4 检修设施与设备资源共享	94
5.4.1 车辆基地	94
5.4.2 车辆基地类型	95
5.4.3 共用车辆基地类型	96
5.4.4 车辆厂和大型设备厂资源的利用	96
5.4.5 车辆基地共享的适用性	96
5.5 案例分析	97
5.5.1 上海市轨道交通网络资源共享实例	98
5.5.2 日本东京营团地铁的车辆段共享实例	100
第6章 轨道交通网络应急事件处理技术	102
6.1 概述	102
6.2 运营安全影响因素分析	102
6.2.1 人员因素	103
6.2.2 设备因素	103
6.2.3 社会灾害	104
6.3 突发应急事件处理	105
6.3.1 应急响应机制	105
6.3.2 应急组织体系	106
6.3.3 应急响应流程	108
6.3.4 应急信息管理	110
6.4 国外突发事件应急处置案例	112

6.4.1 东京地铁沙林毒气事件	112
6.4.2 伦敦地铁爆炸事件	114
6.4.3 俄罗斯莫斯科地铁爆炸事件	115

下篇 网络化运营组织方法与实施技术

第7章 跨线乘客换乘组织模式	119
7.1 概述	119
7.2 换乘量分析	119
7.3 换乘影响因素分析和评价	121
7.3.1 换乘时间组成	121
7.3.2 换乘客流个数	122
7.3.3 换乘评价	122
7.3.4 改善换乘组织的措施	123
7.4 换乘客流组织方式	125
7.4.1 同站台换乘	125
7.4.2 上下交叉站台换乘	127
7.4.3 站厅换乘	128
7.4.4 通道换乘	129
7.4.5 站外换乘	129
7.5 换乘方式适应性分析	131
7.5.1 线网形态	131
7.5.2 线网规模	134
7.5.3 线路连接方式	136
7.5.4 换乘客流特征	137
7.6 案例分析	139
7.6.1 香港地铁换乘站分析	139
7.6.2 上海轨道交通中山公园站	141
7.6.3 日本东京轨道交通池袋换乘站	141
第8章 列车过轨运输组织方法	143
8.1 概述	143
8.1.1 基本概念	143
8.1.2 过轨运输的特点	143
8.2 过轨运输组织模式类型划分	144
8.2.1 按技术制式的分类	144
8.2.2 按线路经营权的分类	145

8.2.3 按付费方式与付费关系的分类	146
8.3 过轨运输组织模式的适用性分析	146
8.3.1 过轨客流特性	147
8.3.2 过轨线路通过能力	148
8.3.3 过轨车站服务水平	149
8.4 东京地铁过轨运输案例	149
8.4.1 东京地铁过轨概况	149
8.4.2 新宿—京王线过轨运输	150
8.4.3 新宿—京王线过轨运营模式分析	156
第9章 共线条件下的列车运行组织方法	164
9.1 概述	164
9.2 共线运营组织技术	165
9.2.1 支线形态	165
9.2.2 车站布线	167
9.3 共线运营适用性分析	170
9.3.1 支线沿线客流特征	170
9.3.2 共线客流特征	171
9.3.3 支线分岔地理条件	171
9.3.4 分岔点相对车站位置	171
9.4 共线运营方案制定方法	172
9.4.1 地铁线路的运营方案	172
9.4.2 “Y”形地铁运营方案优化	173
9.4.3 算例分析	176
9.4.4 敏感性分析	179
9.5 巴黎区域快线共线运营分析	180
9.5.1 案例背景	180
9.5.2 案例分析	181
9.5.3 典型站线路布置形式	182
第10章 多交路列车运营组织技术	186
10.1 概述	186
10.2 多交路运营组织方式划分	187
10.2.1 按交路组合方式	187
10.2.2 按交路是否同车辆段始发	188
10.3 多交路运营适用性分析	189
10.3.1 客流空间分布特征	189

10.3.2 经济性	190
10.3.3 乘客服务水平	192
10.4 案例分析	192
10.4.1 线路概况	193
10.4.2 交路组织	193
10.4.3 乘客引导系统	194
第 11 章 快慢列车结合运行组织方法	195
11.1 概述	195
11.2 快慢车结合运营类型	196
11.2.1 站间越行	196
11.2.2 车站越行	196
11.3 运营适用性分析	197
11.3.1 客流空间分布特征	197
11.3.2 经济性	198
11.4 开行快车的运营经济效益分析	198
11.4.1 运营成本降低	198
11.4.2 旅行时间缩短	200
11.5 快慢车开行方案确定方法研究	202
11.5.1 快车越站选择模型	203
11.5.2 算法分析	205
11.5.3 快慢车开行方案验证	206
11.5.4 算例研究	206
11.6 运营实例分析	209
11.6.1 线路概况	209
11.6.2 站停方案	210
第 12 章 可变编组与多编组技术	213
12.1 概述	213
12.2 编组类型分析	213
12.2.1 可变编组技术	213
12.2.2 多编组技术	214
12.3 编组技术适用性分析	215
12.3.1 客流需求	215
12.3.2 经济成本	215
12.3.3 车辆类型	216
12.4 案例分析	216

12.4.1 可变编组	216
12.4.2 多编组	219
第 13 章 基于网络运营的线路通过能力计算	221
13.1 概述	221
13.2 多交路的线路通过能力计算	221
13.2.1 城市轨道交通线路最大通过能力的计算	221
13.2.2 一般多交路形式的线路通过能力的损失	222
13.2.3 多交路线路通过能力最大化	225
13.3 共线运营结合多交路的线路通过能力计算	228
13.3.1 共线运营结合多交路的一般形式	228
13.3.2 共线运营结合多交路的两线通过能力的损失	229
13.3.3 结合共线运营的多交路线路通过能力最大化	231
13.4 算例研究	233
13.4.1 算例设定	233
13.4.2 数值计算	233
第 14 章 网络列车运行计划一体化编制方法	237
14.1 引言	237
14.2 编制方法的历史沿革	239
14.2.1 列车运行图编制	239
14.2.2 设备运用与人员周转计划编制	240
14.2.3 列车运行调整计划	240
14.2.4 计划实施的模拟验证方法	242
14.3 列车运行计划集成编制方法研究	243
14.3.1 技术需求分析	243
14.3.2 理论与技术难点	244
14.3.3 编制思路研究	244
14.4 列车运行计划集成编制系统的实现	246
14.5 结论	248
参考文献	250

上篇 网络化运营组织模式 与资源共享技术

资源的共享与运行过程的协调是提高轨道交通网络整体运营效率的基础。服务于城市社会运转与居民日常生活的城市轨道交通系统具有明显的公益性。随着我国城市轨道交通网络规模的扩大与运输组织网络环境的形成,研究轨道交通网络化运营组织理论与应用技术具有重要的现实意义。本篇结合对轨道交通网络化运营组织基本特征的分析,在借鉴国内外轨道交通系统运营管理经验的基础上,从宏观上探讨了网络化运营组织管理模式,研究了网络化运营环境下多运营商的票务清算方法与技术。鉴于轨道交通的公益性与企业经营上的实际困难,本篇还探讨了政府对轨道交通企业运营的补贴技术。最后,本篇讨论了轨道交通网络环境下的运营资源共享技术,研究了网络化运营条件下应急事件的处理技术。

第 1 章 轨道交通网络化运营组织特征

1.1 概 述

随着城市化进程的迅速推进以及大城市人口的急剧膨胀,城市交通需求与交通供给日益突出的矛盾所导致的交通拥堵及其伴生的交通安全、环境污染、交通能耗等问题已成为世界各国普遍面临的社会问题,严重影响着城市的经济建设和运转效率,并成为制约城市可持续发展的主要瓶颈。在此背景下,优先发展公共交通成为有效缓解城市交通问题的首选;城市轨道交通以其大运量、低能耗、高效率、高环保的特有优势,在大城市公共交通体系中占有重要地位,布局合理、公众欢迎的轨道交通已成为城市交通现代化的重要标志之一。

21 世纪以来,我国各大城市的轨道交通已经进入一个新的快速发展时期,以北京、上海、广州为代表的一批大城市先后规划了较大规模的远景线网并相继建设与投入运营。截至 2010 年年底,北京、上海、广州等 12 个城市已经开通轨道交通运营线路长度近 1400km,再加上已批准建设的哈尔滨、长沙、杭州、西安、苏州等城市在建和规划线路,到 2015 年将建成 87 条线路约合 2495km 城市轨道交通线路,在建线路总投资接近 1 万亿元。根据国务院国办发[2003]81 号文提出的建设地铁的 3 个指标,即城市人口超 300 万、GDP 超 1000 亿元、地方财政一般预算收入超 100 亿元,目前全国有近 50 个城市符合条件,我国轨道交通发展潜力巨大。伴随着北京奥运会、上海世博会、广州亚运会的筹备与承办,这三个城市已经成为我国内地城市轨道交通网络化运营的先驱,2010 年年底运营里程均超过了 200km。

2003 年,北京市对城市轨道交通线网进行了第五轮调整,编制完成了《北京市轨道交通线网调整规划(2050 年)》,规划线网由 22 条线路组成(其中地铁线路 16 条,轻轨线路 6 条),规划线路总长度 700.6km。2010 年 12 月,开通运营的线路有 1 号线、2 号线、八通线、4 号线、5 号线、13 号线、10 号线一期、奥运支线、机场轨道线、亦庄线、房山线、昌平线、大兴线以及 15 号线等 14 条线路,运营总里程达到 336km。

2007 年,上海市对城市轨道交通线网进行了最新一轮的调整,编制完成《上海市轨道交通线网规划(2020 年)》,规划线网由 18 条线路组成,规划线路总长度 877km;到 2010 年 6 月,开通运营的线路有 1~10 号线以及 13 号线等 11 条线路,

运营总里程达到 410km。

2008 年,广州市对城市轨道交通线网进行了最新一轮的调整,编制完成《广州市轨道交通线网规划(2040 年)》,规划线网由 20 条线路组成,规划线路总长度 761km。到 2010 年 11 月,开通运营的线路有 1~5 号线、广佛线等共计 8 条线路,运营总里程 236km。

我国的轨道交通建设虽然始于 20 世纪 60 年代,但在很长一段时期内,由于开通的轨道交通线路数量少,各城市均以单线模式进行城市轨道交通线路运营组织。随着轨道交通网络规模的扩大,这种运营组织模式已难以适应网络化的运营需求。

网络化运营是指在由多线路组成的城市轨道交通线网上建立的,旨在有效满足出行者需要的安全的、可持续的运输组织方法与经营行为的总称。相对于单条线路下的独立运营来说,网络化运营实际上是在城市轨道交通系统规模发展到由若干条轨道交通线路有经有纬、交错衔接形成整体的“网络”状态时,系统强调自身整体功能和规模效应的一种客观发展要求。

线网是城市轨道交通网络化运营的基础设施。从整体看,线网本身的物理结构形态,决定了网络的服务区域与辐射范围;从局部看,线路中的换乘站、折返线、越行线、联络线等基础设施的设置情况,从根本上制约着网络化运营组织方法与技术的应用。同时,服务对象的实际需求是确定网络化运营组织方法的基本依据,即列车开行方案必须适应线网覆盖区域内不同客流特征。

综上所述,本章将主要从线网形态和客流特征两方面来研究城市轨道交通网络化运营特征。线网形态研究着重分析线路几何形态和换乘站衔接线路模式两方面;客流特征研究主要探讨网络状态下的客流空间分布特征和换乘客流特征。

1.2 轨道交通线网形态分析

不同城市其城市功能、区位、用地布局、人口分布等存在差异,轨道交通线网规模大小、线路走向也有所不同,从而轨道交通线网的整体结构形态也各不相同。可以说,世界上任何一个城市的轨道交通线网形态和规模都是独一无二的,鉴于此,这里不考虑线网规模、线路走向、车站设置等因素,单纯从线网几何形态角度探讨网络化运营环境下城市轨道交通线网特征。

1.2.1 线网基本形态和特点

轨道交通线网结构的几何形态,是轨道交通系统在城市空间布局中的点、线、面的组合。线路是最基本的要素,线路越长,线路数越多,所构成的线网形态就越复杂。若干条线路的交汇、衔接所形成的节点一般就是线网的换乘枢纽,交织成“网”的轨道交通线路所覆盖的区域,决定了线网的服务和辐射范围。

将轨道交通线网的形态抽象化,可以得到最常见、最基本的线网整体形态结构类型,即网格型(棋盘型)结构和放射型结构。在此基础上,考虑增加环线,则又可形成“环线+网格型”和“环线+放射型”两类形态。

1. 网格型线网

线网由两组或两组以上的平行线正交而成,得到多个交叉点,基本几何形态为“#”字形[如图 1-1(a)所示]。

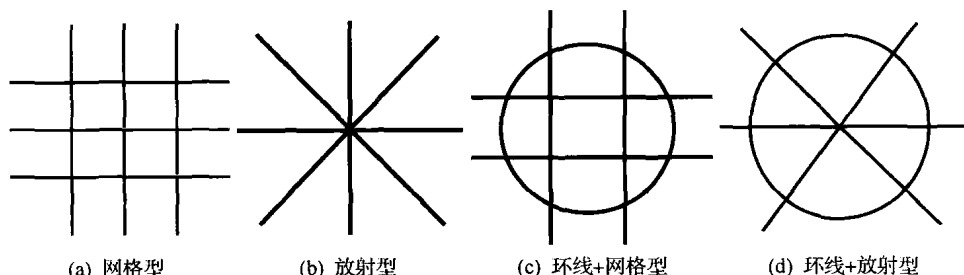


图 1-1 轨道交通线网基本类型

这种线网形态的特点是多点四方向,在每个点上均有可通往四个方向的路径;平行线之间的点需要二次换乘到达,而任意两点之间也最多仅需二次换乘。

2. 放射型线网

线网自某中心点(从城市空间布局上看,一般位于市中心区)出发,向周边放射形伸展,基本几何形态为“米”字形[如图 1-1(b)所示]。

这种形态的特点是交叉点上向各处的出行最为便捷,即一点多方向、轮轴辐射特点;而交叉点以外各点到其余各处都需要到中心点换乘,因此中心点换乘压力很大,为解决此问题,通常做法是将一个中心分散为几个连接点。

3. 增加环线线网

分析上述两种基本形态,存在一个共同的弊端:任意两条线路的远中心端之间的 OD 对必须通过迂回路径才能到达,为提高线网的便捷性,一般在这两种基本形态上增加弧线或环线[如图 1-1(c)和(d)所示]。

由于远中心端往往位于城市边缘地区,必须当远中心端之间的客流数量大到一定程度时才考虑增加相应的弧线或环线,以便适应这些地区之间的交通需求。

1.2.2 换乘便捷性

城市轨道交通线网的形态决定了乘客能否通过轨道交通线路完成出行以及是

否需要换乘。随着城市轨道交通线网规模的扩大,线网内换乘总量大幅提高,由此对乘客的出行时间效益及线网的服务水平造成的影响随之增大。从乘客的个体出行行为上看,随着出行距离的增大,换乘次数对于路径选择的影响也随之增大。因此,从线网层面考查换乘能力的优劣应成为选择线网形态的一个重要依据。

一般而言,城市轨道交通线网敷设于城市地下,一旦建成,线网形态难以发生改变。因此,不同线网形态的换乘能力的差异性,必须在线网规划阶段予以充分考虑,通过合理地选择线网形态,尽可能减少乘客的换乘次数,达到提高线网换乘能力的目的。

线路之间换乘能力的评价,一般可通过一定换乘组织方式下完成的换乘客流量(数量)以及考虑时间价值的出行者总广义费用(质量)来实现。不过,在线网规划阶段探讨这些问题似乎并不现实。

对于城市轨道交通的规划线网,线网换乘节点越多,乘客可选择的出行路径就越多,相应可降低线网的总换乘次数。这里,引入“线网换乘便捷性”概念以探讨规划线网的换乘能力的差异性,与之直接相关联的是线网中的换乘节点数。

以线网中两两线路间的换乘节点数可定义线网的换乘便捷性矩阵,即

$$D_{m \times m} = (d_{ij}) \quad (1-1)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} \lambda_{ij} & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m \quad (1-2)$$

式中, m 为线路条数(单位:条); λ_{ij} 为线路 i 可换乘到线路 j 的站点数(单位:个); d_{ij} 为线路 i 和线路 j 之间的直接换乘节点的数目(单位:个),当两条线路不存在直接换乘关系时, $d_{ij} = 0$ 。

以矩阵元素和与线路数量的比值 K , 即线网中各线路与其他线路的换乘点数量的平均值,可定义线网的换乘便捷性(可称之为线网换乘便捷性指数) K :

$$K = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij} / m \quad (1-3)$$

显然,当线网的规模一定时,换乘便捷性指数 K 越大,乘客的平均换乘次数越少,即线网的换乘便捷性越好。

假设一个由 5 条线路组成的简单线网,如图 1-2 所示。

统计得到线网的换乘便捷性矩阵,如表 1-1 所示。矩阵的行标与列标表示对应的线路标号,行数与列数均等于线网内的线路数目;得到的线网换乘便捷性矩阵是一个对称矩阵,即 $d_{ij} = d_{ji}$ 。

线网的换乘便捷性为: $K = 3.2$ 。