



陽山學術圖書館
Yangshan Academic Library



Express Operation Network Optimization Design and Competitive Network Equilibrium

快递营运网络优化设计 与竞争网络均衡

倪玲霖 著



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

教育部人文社会科学研究青年基金项目(12YJC630142)
浙江财经大学东方学院仰山学术文库

快递营运网络优化设计 与竞争网络均衡

Express Operation Network Optimization Design
and Competitive Network Equilibrium

倪玲霖 著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书专注于快递营运网络领域的理论研究,重点着眼于快递主干网络、取派送网络规划、运营决策问题,探求由运输企业、快递企业、消费市场构成的快递供应链竞争网络均衡和运营规律,力求为快递服务业健康发展提供理论工具。全书共分为7章,主要内容包括:快递市场与快递营运网络分析、快递主干网络结构的选择、基于多分配轴辐网络的快递主干网络优化、快递企业取派送优化策略、基于快递运输组织方案的快递竞争网络均衡等。

本书可供物流工程、供应链管理、交通规划与管理等领域的研究生、学者、规划工作者以及物流企业决策者、管理者学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

快递营运网络优化设计与竞争网络均衡 / 倪玲霖著. —北京:电子工业出版社, 2015.1

ISBN 978-7-121-24978-5

I. ①快… II. ①倪… III. ①邮件投递—邮政业务—网络—市场竞争—研究 IV. ①F618.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第276206号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:郝黎明

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×980 1/16 印张:10 字数:256千字

版 次:2015年1月第1版

印 次:2015年1月第1次印刷

定 价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

出版说明

快递是兼有邮递功能的门对门物流活动,快递公司通过铁路、公路和空运等交通工具,对客户货物进行快速投递。牛津经济研究院以 2003 年—2008 年的数据为基础,提出快递业对全球 GDP 的贡献几乎等同于造船业,而且有力地促进贸易,提高竞争力,刺激外商直接投资。同时,快递业的发展是破解网络经济发展要素制约,增强消费能力的重要手段。李克强总理更是形容“快递是中国经济的一匹黑马”。

目前,我国东部地区已形成了以沿海大城市群为中心的 4 大区域性快递圈,同时,这些速递圈又以滚动式、递进式形成扇面辐射,部分大城市已经成为区域性快递产业发展中心。而且,近 8 年我国快递业务量与快递业务收入都呈以高于 20% 的速度在快速增长,2013 年我国完成快递业务量 91.9 亿件,快递业务收入 1441.7 亿元,同比增长 36.6%,接近 GDP 增长(7.7%)的 5 倍,是第三产业增长速度(8.3%)的 4 倍以上,其业务收入占全国 GDP 总值(568 845 亿元)的 0.25%,占第三产业总值(262 204 亿元)的 0.55%,中国成为继美国和日本之后第三个快件日处理量突破 1000 万件的国家。因此,非常有必要对快递进行学习、了解和研究,以促进快递更好的发展。

由于快递诞生于地下运作,成长于街道、巷道和库房等,之前没有受到社会各界的关注,关于快递领域的专业书籍和教材都不丰富,直到 2012 年才有由国家邮政管理局牵头,成立快递职业教材编写委员会编写的立足于高职和研究生两个层次的 8 本教材,至今没有深入的量化研究快递网络的专业书籍。为此,本书在数据收集和实际调研的基础上,详细介绍了快递的整体运作流程、货物运送的特点、营运网络的结构和优化目标以及快递供应链,应用轴辐理论、消费行为理论以及纳入均衡理论对快递的主干网络、取派送网络和竞争网络进行了建模分析,重点突出以下四个方面。

(1) 研究快递主干网络的结构选择。比较分析了全连通快递网络与轴辐式快递网络的各环节的成本、效率、网络总成本和网络服务效率,分析了各种参数变化对快递服务成本和效率的影响,确定影响快递网络结构选择的决定性因素。然后,以某快递企业为实证,分析其网点布局的影响因素及其网络结构变化的影响因素,确定快递主干网络优化的结构。

(2) 满足快递运输时间约束的多分配轴辐式快递网络优化。分析快递运送路径的合并式特征,以多分配轴辐式网络结构为基础,以快递运送过程中的分拣费用、运输费用、中转费用之和最小为目标函数,建立了考虑快递运输时间预算约束的快递主干网络的枢纽选址与分配优化模型,并设计了基于条件最短路径的模拟退火算法。

(3) 分析现有三种取送模式的客户成本和快递企业成本构成及其影响因素,研究了不同取送模式的适用范围,并以门到门取送模式为例,建立了满足客户容忍时限约束的快递取送区域范围的确定模型。同时,分析了消费者对快递产品的购买决策特征,并以总线模块化为基础,结合可选择模块化设计方法对快递服务进行模块化设计。

(4) 基于合并式快递运输组织方案的快递作业流程,研究快递竞争市场中快递企业行为、消费者行为、运输企业行为及其均衡条件,应用变分不等式方法,建立了快递市场竞争网络均衡模型,并采用修正投影算法对算例进行求解分析,对多个参数进行分析,得出影响快递价格的因素,提出降低快递价格的途径以及快递企业提升市场竞争力的策略。

本书适合物流工程、供应链管理、交通规划与管理等领域的研究生、学者、规划工作者以及物流企业决策者、管理者学习、参考。

前 言

随着电子商务、网络购物等新型服务业对快递服务需求的不断增加,快递在社会经济发展中服务民生和生产的基础性作用不断增强。提高我国快递企业竞争力,降低社会快递物流成本,一方面需提高快递企业的营运能力,特别是营运网络优化能力,另一方面提高整条快递供应链的能力。快递营运网络优化设计与竞争网络均衡研究就是对快递主干运输网络、取送网络进行优化,并探究由运输企业、快递企业、消费市场构成的快递供应链竞争网络均衡问题。通过研究,将有助于降低快递企业的成本并优化快递供应链,促进整个行业运营成本的降低和竞争力的提升,进一步丰富和完善快递运营网络优化及供应链竞争网络理论与方法。

本书的特色:

(1) 针对快递行业具有代表性的全连通网络与多枢纽轴辐网络,对两种典型网络的各项快递服务环节的成本、服务效率以及网络总成本、服务效率的差异进行分析,理论成果和实证分析均表明以多分配轴辐式网络为快递主干网络结构具有明显的优势。

(2) 针对当前快递网络规划发展的需要,建立了基于快递运输时间预算约束的多分配轴辐式快递网络枢纽选址与分配模型,并设计了基于条件最短路模拟退火算法。实际算例表明,该快递网络选址理论和方法,能够与网络运作实际相结合,对快递行业的健康发展具有较好理论支撑作用。

(3) 研究了快递网络运营中不同取送模式的适用范围,并以门到门取送模式为例,建立考虑客户可容忍时限的取送区域范围优化方法,提出了基于消费者购买决策过程的取送策略并对快递服务进行模块化设计。

(4) 针对快递网络运营中运输方案选择问题,建立了基于合并式快递运输组织方案的快递市场竞争网络均衡变分不等式模型和修正投影算法求解方法。依据优化结果,提出了有效降低快递价格的途径以及快递企业提升市场竞争力的策略。

全书共分7章,主要内容包括:第1章讲述本书的研究背景和意义,介绍研究现状和主要研究内容;第2章讲述快递的定义、快递市场的发展趋势以及快递营运网络的构成;第3章将理论分析与实证分析相结合,研究快递主干网络结构。第4章建立了在运输时间预算约束下,以分拣费用、运输费用、中转费用之和为目标函数的多分配轴辐式快递网络枢纽选址与分配优化模型与算法;第5章基于客户角度研究快递取派送网络的优化策略;第6章应用变分不等式,建立基于快递运输组织方案的快递市场竞争网络均衡模型。第7章介绍本书的主要研究结论和未来研究方向。

本书是国内首部深入、定量化研究快递网络的专业书籍，通过本书，你可以

- 了解快递企业整体运作流程、网络特征及费用构成
- 认识快递网络结构类型和经营目标
- 掌握快递主干网络优化决策方法和竞争网络均衡规律
- 把握快递企业提升竞争力的方向和途径
- 知晓影响快递价格变化的规律

本书得到了我的博士导师史峰教授和硕士导师方晓平教授的辛勤指导，秦进教授和邓连波副教授对本书提出宝贵修改意见，周文梁、陈彦、徐光明、周钊等博士给予无私的帮助；在本书的撰写过程中，浙江财经大学的董永茂教授、赵广华教授、中国科学院地理科学与资源研究所副研究员王娇娥、中国交通运输协会副研究员莫辉辉给予了大力的支持与指导；电子工业出版社的王羽佳编辑为本书的出版做了大量工作。在此一并表示感谢！

书中引用和参考了国内外一些专家学者的研究成果，为本书的研究奠定了基础，除参考文献中列出的外，可能还有所遗漏，敬请谅解，在此向他们深表谢意。

由于快递业发展迅速，作者学识有限，书中误漏之处难免，望广大读者批评指正。

作者

2014年8月于杭州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究现状	3
1.2.1 快递主干网络特征研究现状	3
1.2.2 快递主干网络优化研究现状	4
1.2.3 快递终端网络研究现状	9
1.2.4 快递供应链竞争网络均衡研究现状	10
1.2.5 文献述评	13
1.3 研究内容与创新点	14
1.3.1 研究目标	14
1.3.2 主要研究内容	14
1.3.3 主要创新点	16
第 2 章 快递、快递市场与快递企业营运网络	18
2.1 快递	18
2.1.1 快递的定义与特征	18
2.1.2 快递的分类	19
2.1.3 快递与物流的区别	20
2.2 快递市场	21
2.2.1 近 8 年快递市场发展情况	21
2.2.2 快递市场的竞争态势	28
2.2.3 美、日、欧快递发展启示	32
2.2.4 我国快递市场的发展趋势	37
2.3 代表性快递企业营运概况	38
2.3.1 中国快递企业的概况	38
2.3.2 国际快递巨头的概况	42
2.4 快递企业营运网络分析	45
2.4.1 快递企业整体运作流程	46

2.4.2	快递企业营运网络	46
2.5	本章小结	49
第3章	快递主干网络结构的选择	50
3.1	轴辐式网络概念及经济性分析	50
3.1.1	轴辐式网络概念与分类	50
3.1.2	轴辐式快递网络的经济性分析	51
3.2	快递网络结构的选择——基于FC网络与HS网络的比较	52
3.2.1	FC快递网络与HS快递网络快递作业流程分析	52
3.2.2	FC与HS快递网络各环节成本与服务效率分析	53
3.2.3	FC与HS快递网络的总成本与网络平均耗时比较	59
3.2.4	快递网络组织结构的选择	61
3.3	快递网络结构的选择——基于顺丰速递的实证	62
3.3.1	顺丰速递的网点布局分析	63
3.3.2	顺丰速递即日达服务网点布局分析	66
3.3.3	多分配轴辐式快递网络组织结构的选择——基于顺丰速递节点间的关联分析	67
3.4	本章小结	68
第4章	基于多分配轴辐网络的快递主干网络优化	69
4.1	多分配快递轴辐网络设计问题分析	69
4.1.1	网络节点与连接关系	70
4.1.2	快递路径的表示形式	70
4.1.3	快递路径之间的关系	70
4.2	快递费用与约束条件	71
4.2.1	快递费用分析	71
4.2.2	约束条件	72
4.3	优化模型的建立	73
4.4	模型的求解算法设计	75
4.4.1	模拟退火算法的基本原理	75
4.4.2	快递主干网络优化模型的求解算法	78
4.5	算例分析	82
4.6	本章小结	86
第5章	快递企业取送优化策略研究	87
5.1	快递企业的取送模式及其作业流程	87
5.2	取送模式的选择	89

5.2.1	不同模式的客户成本与满意度比较	89
5.2.2	基于取送成功率的不同模式的企业成本比较	91
5.2.3	不同取送模式的选择	93
5.3	取送区域范围的确定——以门到门取送模式为例	96
5.3.1	问题分析	96
5.3.2	成本分析	96
5.3.3	模型的建立与求解	97
5.4	基于客户需求特征的快递企业优化策略	98
5.4.1	基于消费者快递购买决策特征的优化策略	98
5.4.2	基于参照群体影响力理论的优化策略	102
5.4.3	基于快递需求多样化的快递服务模块化策略	102
5.5	本章小结	106
第6章	基于快递运输组织方案的快递竞争网络均衡	107
6.1	相关理论介绍	107
6.1.1	纳什均衡	107
6.1.2	变分不等式	108
6.2	快递市场竞争网络均衡问题分析	111
6.2.1	基于运输组织方案的快递作业流程分析	112
6.2.2	快递市场竞争网络均衡分析	112
6.3	快递市场竞争网络均衡模型	113
6.3.1	消费者行为与均衡条件	113
6.3.2	运输企业行为分析与均衡条件	114
6.3.3	快递企业行为分析与均衡条件	116
6.3.4	快递市场竞争均衡模型	119
6.4	算法设计	121
6.4.1	解的特性分析	121
6.4.2	算法设计步骤	123
6.5	算例分析	124
6.6	本章小结	137
第7章	结论与展望	138
7.1	主要工作与结论	138
7.2	有待进一步研究的问题	139
参考文献		141

第1章 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

1.1.1.1 快递市场的广阔发展前景

快递业是现代物流的重要组成部分,也是近年来发展最快的行业之一,目前我国东部地区已形成了以沿海大城市群为中心的4大区域性快递圈^[1,2]。而且,近8年我国快递业务量与快递业务收入都呈快速增长趋势(图2-2、图2-3),其中,快递业务量年增长率都大于20%,2013年完成的快递业务量最高,达到了91.9亿件。快递业务收入的增长率在2012年最高达到39.2%,2007年最低,为14.3%。2013年完成快递业务收入1441.7亿元,同比增长36.6%,接近GDP增长(7.7%)的5倍,是第三产业增长速度(8.3%)的4倍以上,其业务收入占全国GDP总值(568845亿元)的0.25%,占第三产业总值(262204亿元)的0.55%^[3]。中国成为继美国和日本之后第三个快件日处理量突破1000万件的国家,全行业得到快速发展。

国家邮政局以《邮政法》为基础,初步形成《邮政普遍服务监督管理办法》、《快递市场管理办法》、《快递业务经营许可管理办法》等相配套的邮政业法律法规体系,陆续出台了一些行业规划、政策、标准等,为邮政业发展创造了良好环境。《邮政法》明确了快递企业的法律地位,《快递市场管理办法》、《快递业务经营许可管理办法》规定了经营快递业务的基本规范,促进了快递服务的快速发展。目前我国快递市场已形成多种所有制并存、多元主体竞合、多层次服务共生的快递市场发展格局。同时,为了加快快递业的发展,2011年7月,国家邮政局制定了《邮政业发展“十二五”规划》^[4],随后,又专门编制了区域性快递服务发展规划(《长江三角洲地区快递服务发展规划(2009—2013年)》^[5]、《珠江三角洲地区快递服务发展规划(2010—2014年)》^[6]、《京津冀地区快递服务发展规划(2010—2014年)》^[7])。其中,《长江三角洲地区快递服务发展规划(2009—2013年)》^[5]明确提出将长三角打造成快递服务的国内重要基地和国际快递服务的重要门户,将快递服务培育成区域经济新的增长点,2010年9月上海提出着力将快递业务培育成战略性新兴产业^[8]。良好的行业环境,加上各地区发展规划的出台,进一步促进了快递业的蓬勃发展。

1.1.1.2 快递业是经济社会发展的重要支撑及经济新增长点

牛津经济研究院^[9]以 2003—2008 年的数据为基础,提出“快递业对全球 GDP 的贡献几乎等同于造船业,且有力地促进贸易,提高竞争力,刺激外商直接投资。同时,快递业的发展在解决就业、促进国民经济发展及结构调整等方面起重要作用。首先,快递业推动了整个地区经济的发展,一是快递业自身的发展对 GDP 有较大贡献,二是快递业的发展不但有助于其他企业更快地把握市场机会,而且快递成本的降低也有助于所有企业成本的降低,提高企业竞争力。其次,快递业的发展,有力提升了地区服务业的总体水平,促进区域经济结构调整和升级。第三,快递业也是一个劳动密集型产业,而且快递业带来的间接就业比快递业直接就业的规模还大,直接与间接就业比率是 1:1.24”^[9]。商务部研究院课题组 2006 年也做了类似研究^[10]。2010 快递市场监管报告^[3]指出 2010 年末我国快递业从业人员达到 54.2 万人,比上年增长 35%,且未来五年快递从业人员仍将保持快速增长势头。因此,快递物流业已成为我国经济社会发展的重要支撑。而且随着快递企业提供个性化快递物流服务能力增强,不断深化与电子商务、制造业等其他行业的合作与融合,快递业正积极切入社会生产与消费的产业链、供应链和服务链^[4],极大促进了制造业、服务业等行业的转型升级,使快递业成为经济发展的重要支撑和经济的新增长点。

1.1.2 研究意义

随着电子商务、网络购物等新型服务业对快递服务需求的不断增加,快递服务的民生性和生产的基础性作用不断增强^[3]。而快递网络是快递企业生产与运营的重要基础设施之一,营运网络设计的优劣对企业的竞争力和企业营运费用都会产生根本性的影响。快递企业是包含运输、配送与取送网络的一类特殊的物流企业^[11],既包含普通物流企业的主干运输网络,又包含有终端的配送网络与取送网络。其中,主干网络与配送网络为企业内部运作网络,取送网络为快递企业与客户接口网络,这两类网络具有不同的网络结构与优化目标。系统地分析快递作业流程,在对快递企业营运网络特征深入挖掘的基础上,对快递的主干网络与取送网络进行优化,使快件以较低的成本、更高的客户满意度、更快更安全到达客户手中,一方面有利于为快递企业营运网络优化提供指导,降低快递企业的成本,从而带来整个行业的运营成本降低;另一方面必将进一步丰富和完善快递运营网络设计理论与方法,从而有助于网络优化理论体系的完善。

企业营运网络的优化设计,可以通过降低快递企业的营运成本,使整个行业的营运成本下降。如果进一步将优化范围扩展至由快递企业、运输企业和消费市场构成的快递供应链,研究快递供应链竞争网络均衡,进而分析影响快递价格的因素,在更大范围内明确降低快递价格的途径和快递企业提升市场竞争力的策略,将有助于快递行业整体竞争力的提升,更有力地促进国民经济的快速发展和产业竞争力的提高。

1.2 研究现状

1.2.1 快递主干网络特征研究现状

快递网络结构特征研究是进行网络优化设计方法选择和主干网络优化结构选择的前提。Megan Smirti, Arnaud Boubert (2007)^[12]研究了层级式联邦快递网络,对联邦快递的分拣成本和运输成本分别进行测算,比较现有网络与再增加一层即增加一个超级枢纽(super hub)的轴辐网络的运作成本的变化,最后得出增加一层反而使成本增加的结论。Alexandre Lafaye (2007)^[13]分析了 DHL、FedEx、TNT、UPS 在欧洲市场的战略与网络结构,确定各快递巨头枢纽选址所考虑的因素:市场和产业集中度是主要因素,枢纽机场分拣的时间、地理位置等也影响枢纽选址。Hua Yang (2009)^[14]应用复杂理论分析了快递运输网络的拓扑特征,发现其具有小世界、异配混合行为特征和富人俱乐部(rich club)现象。文章同时比较了快递运输网络和航空网络的差异,比如边缘密度(edge density)和平均最短路径(average shortest path),通过对相应的距离加权网络的分析显示,距离分布有截断幂律特征(truncated power-law behavior),最后建立了同时考虑地理约束和偏好的进化模型,模型结果与经验结论相一致。张洪斌、聂玉超(2009)^[15]提出快递网络是依附于交通网络上的一种特殊的网络,其中,取送点和中转点是网络的节点,运输工具按规定路线和班期运行时形成的无形连线是网络的边。快递网络在结构上整体呈混合轴辐式形态,在功能上具有层次性,可划分为区间干线网、区内干线网和市内网三个层级。匡旭娟(2008)^[16]基于演化视角分析了快递业网络形态,运用运输经济学、演化经济学的相关理论,从资源、产品和网络角度确定了快递业演进的重要特征,并以这些特征为基础,分析快递网络的形态变迁及决定过程的内在经济机理。黄建华(2009)^[17]以快递企业的公路配送网点作为节点、配送线路为边,构建了一个公路配送的复杂网络图,通过对网络特征和鲁棒性的分析发现,公路快递网络具有无标度和小世界网络的特征,且对随机破坏表现出鲁棒性,对蓄意破坏则表现出脆弱性;当网络遭遇蓄意攻击,整体性遭到破坏后,ASPL 值将急剧下降;介数较大的节点和度值较大的节点是快递网络的重要节点,这些节点遭遇破坏时,对网络的影响较大,甚至可能导致网络瘫痪,因此,应给予重点保护。周敏、黄福华(2010)^[18]应用复杂网络对长株潭城市群快递服务网络进行分析,表明长株潭城市群快递服务网络具备一定的小世界特性,具有较短的平均路径长度和较大的聚类系数,其长度分布服从幂律分布且具有典型的无标度网络特性。张润生(2009)^[19]以邮政快递为案例,利用 GIS 技术对其网络结构、混合网络模式实施的可行性、网络节点选择、运输网络构建等方面进行了较为详细的论证。向先文、张锦(2012)^[20]从快递供给和需求的角度,分析了快递网络的网络效应,发现快递供需两个层面的网

络都表现出直接网络效应和间接网络效应。葛雪、于波、靳志宏(2013)^[21]分析国际快递业在区域内运输网络结构及干、支线的运输方式,据此构建国际快递区域运输网络基本模式。

1.2.2 快递主干网络优化研究现状

快递网络系统的基本网络结构主要由需求网络、组织网络、路径网络及其基础架构的实体(设施)网络构成^[22]。其中,需求网络由用户快递需求构成,其网络结构在一定范围内呈现为完全图(Complete Graph)式网络结构,需求网络是决定组织网络、路径网络以及实体网络的先决因素。对于需求网络,主要是通过一些数据获取和分析方法,来确定需求网络结构及其特征,为后续的网络优化奠定基础。组织网络主要指由快递班车开行方案所构成的网络,需确定载运工具运行路径、载运工具类型和数量以及出发到达时刻表。设施网络是完成快递任务和发挥功效的必要条件,由转运中心(或称枢纽)、中转场和营业点等基础设施构成。路径网络是指由快递货物从起点至迄点所经的路径所构成的网络,路径网络优化即快递货物运送路径优化。所以,快递网络优化是在需求网络已知的情况下,给定一定的服务水平,优化其实体设施网络、组织网络和路径网络。

1.2.2.1 快递主干实体网络优化研究综述

自20世纪80年代国际四大快递公司之一的美国联邦快递率先使用轴辐式网络系统(hub-and-spoke network system,即H&S network system),大幅地降低了运输成本、机队数目并提高负载率后,其他快递业者逐渐跟进,轴辐网络成为快递货物运输系统的主要网络形态,较多学者将轴辐网络优化理论和模型应用于快递系统。

Morton E. O'Kelly(1987)^[23]首次建立了轴辐网络枢纽选址的二元整数规划模型,其中,模型中的枢纽(hub)间的运输折扣率 α 和枢纽个数 p 事先确定,枢纽与节点间是单分配关系,确定枢纽选址与分配问题。随后,大量学者对轴辐网络进行模型和算法的研究,研究内容大体分两类:一类是改进O'Kelly(1987)提出的模型中的参数。①枢纽间的运输折扣率随流量的增加而增加,体现规模经济性^[24-27]。O'Kelly和D.Bryan(1998)^[24]提出,不仅仅枢纽间运输具有规模经济性,节点至枢纽间的运输单价也随着运量增加而减少的,规模经济性体现在轴辐网络中的每一条边;②枢纽个数 p 由模型自动生成^[25-30];③枢纽是否有能力约束可分成有能力约束的轴辐网络(the capacitated H&S system)^[29-35]和无能力约束的轴辐网络(the uncapacitated H&S system)^[34],其中有能力约束的轴辐网络设计还需考虑拥堵的影响(H&S network design under hub congestion)^[30],由此延伸出流量是否可分的轴辐网络设计^[32]。第二类是对轴辐网络结构进行扩展研究,如根据枢纽个数有单枢纽网络(single hub network)和多枢纽网络(multiple hub network);根据节点是否只允许分配给一个枢纽还是多个枢纽,有单分配轴辐网络(single allocation H&S network)^[22,25,26,36-37]和多分配轴辐网络(multiple allocation H&S network)^[32,34,36-43],其中单分配轴辐网络又称为纯

轴辐网络 (pure H&S network); 还有允许沿途停靠和支线接驳的轴辐网络 (H&S network with stopovers and feeders) [35,44]、层级轴辐网络 (the hierarchical H&S network) [37,45,46] 以及允许部分节点直达的轴辐网络 [27,47] 等。还有部分文献研究了随机需求下的轴辐网络设计 [48], 竞争环境下的轴辐式网络枢纽选址与分配问题 (Lüer-Villagra, Marianov, 2013 [49]; Sasaki, Campbell, Krishnamoorthy, Andreas T. Ernst, 2014 [50]), 具体的代表性文献如表 1-1 所示。

表 1-1 轴辐网络枢纽选址与分配相关文献表

Tab.1-1 Literature table of Hub location and allocation of hub-and-spoke network

研究侧重点	代表性文献
运输折扣因子 α	O'Kelly (1998); Horner, O'Kelly (2000); Cunha, Silva (2007)
枢纽个数 p 内生	Aykin (1995); Horner, O'Kelly (2001); Seung-Ju Jeong, Chi-Guhn Lee (2007); Cunha, Silva (2007)
枢纽有能力约束	Ebery, Krishnamoorthy, Andreas Ernst 等 (2000); Elhedhli, Xiaolong Hu (2005); V. Rodri'guez, M.J. Alvarez, L. Barcos (2007); Campbell, J. Lowe (2007); R.S. de Camargo, G. Miranda Jr. (2009); De Camargo, R. S., Miranda, G. (2012), Rafay Ishfaq a, Charles R. Sox (2012),
单枢纽轴辐网络	Kuby, Gray (1993)
多枢纽单分配轴辐网络	O'Kelly (1987); O'Kelly, D.Bryan, Skorin-Kapov (1996); Klinecicz (1998); Horner, O'Kelly (2000); Cunha, Silva (2007); Campbell, J. Lowe (2007); Andreas T. Ernst (2009); De Camargo, R. S., Miranda, G. (2012).
多枢纽多分配轴辐网络	Skorin-Kapov (1996); O'Kelly, D.Bryan, Skorin-Kapov (1996); T.Ernst, Krishnamoorthy (1996, 1998); Ebery, Krishnamoorthy et al. (2000); Mari'n, La'zaro Ca'novas, Mercedes Landete (2006); Campbell, J. Lowe (2007); R.S. de Camargo, G. Miranda Jr. (2009); Andreas T. Ernst (2009)
允许沿途停靠与支线接驳	Kuby, Gray (1993); 李红启, 刘鲁 (2007)
层级式轴辐网络	Klinecicz (1998); Thomadsen, Jesper Larsen (2007); Thomadsen, Thomas Stidsen (2007)
部分节点直达	Aykin (1995); Jiyin Liu, Chung-Lun Li, Chun-Yan Chan (2003)
随机需求网络的枢纽选址	Cheng-Chang Lin et al (2007)
竞争性轴辐网络	Lüer-Villagra, Marianov, 2013; Sasaki, Campbell, Krishnamoorthy, Andreas T. Ernst, 2014

由表 1-1 可知, 现有学者已经对轴辐网络从纯轴辐网络向混合轴辐网络延伸, 且对轴辐网络的经济内涵进行了一定的挖掘, 轴辐网络理论也日趋完善, 但针对快递网络枢纽选址与分配的文献较少, 文献[32,39]将轴辐理论模型应用到了澳大利亚邮政系统、巴西的零担货物运输网络, 文献[33]将轴辐理论应用到了法国、意大利、德国、10 国欧洲铁路货运网络, 文献[49]将轴辐理论应用到了海上集装箱运输网络的设计, Jeong-Hun Lee a, Ilkyeong Moon (2014) [52]以混合轴辐式网络结构为基础, 分别以运输成本和车辆使用固定成本总和最小为目标函数的整数规划模型和以运输成本、车辆使用固定成本和转运中心固定成本总和最小为目标函数的混合整数规划模型, 同时确定转运中心的选址、运输网络组织和车辆运行计划, 最后, 以韩国邮政为实例进行了模型和算法的有效性检验, 并分析了 6 种转运中心选址方案。李莉、丁以中 (2012) [53]以多分配轴辐式网络为基础, 以快递运输成本、

分拣成本、节点固定成本和变动成本之和最小以及快递运送时间最短为双目标,建立了相应多目标轴辐式快递网络的枢纽选址和分配模型,通过对2个目标函数的标准化处理,设置合理的枢纽邻域搜索操作和非枢纽邻域搜索操作,设计了相应的模拟退火(Simulated Annealing, SA)求解算法。算例研究表明:在同一折扣率下,随着权值增大,成本目标值递减,时间目标值递增;成本目标和时间目标的取值均具有多样性;该算法能够得到更接近帕累托最优前沿面的近似集。葛雪、于波、靳志宏(2013)^[21]以多枢纽轴辐网络为基础,基于快递业时间阈值的特点以及干线和支线运输的运价折扣因素,建立区域性快递网络优化的混合整数规划模型。

从以上研究可以看出,针对快递网络本身所建立的优化模型较少,对快递问题特性的考虑不够全面,特别是快递时限的约束和成本的函数表达。因此,有必要通过分析快递网络的特征,将已渐趋成熟的轴辐理论应用到快递网络,建立相应的快递网络枢纽选址与分配模型,使快递实体网络优化更符合实际。

1.2.2.2 快递组织网络与路径网络研究综述

在快递组织网络与路径网络优化方面的文献,较多文献都是基于轴辐网络结构,在确定实体网络的基础上,求快递的货物运送路径、选用的载运工具的类型和数量、载运工具的开行方案以及快递货物装柜优化等,只有部分文献没有假定快递网络的轴辐结构。

Michael J. Kuby、Robert Gordon Gray(1993)^[35]建立了枢纽选址确定下的,以成本最小为优化目标的单枢纽混合整数规划模型,求解货物运送路径、各路段上所采用的机型及所需飞机数。文章考虑了三种机型,在目标成本上计算了飞机的燃油、维修成本以及劳工成本和折扣,各起讫点间运量是在搜寻公开资料的基础上整理的,文章将允许支线接驳的轴辐网络与纯轴辐网络以及FEDEX实际网络相比较,得出允许支线接驳的轴辐网络比纯轴辐网络总运输成本更低,负载率更高,所需飞机数更少。针对货物时效性的处理方面,文章直接生成能满足时效要求的路径,没有关于时间的约束条件。

Daeki Kim(1997)^[54]在枢纽选址、节点位置、OD流以及各枢纽的分拣时间窗都给定的情况下,求解载运车辆运行路径与时刻表以及快递货物运送路径。

Daeki Kim和Cynthia Barnhart(1999)^[55]建立了给定严格的服务时间窗、有限的包裹分拣能力和有限车辆和飞机数量的基础上,包裹从起点至终点的总成本最小的大规模快递包裹运送网络设计模型,求解航班航程及时刻表、地面运输路径和时刻表。

Tore Grunert和Hans-Jürgen Sebastian(2000)^[56]详细介绍了Deutsche Post AG的全球运输网络、快递的运送流程和路径优化时应考虑的约束条件,指出由于快递司机必须同一天返回且很多快递公司都是租航班而不是自己组织航空运输的,所以快递企业较公路及铁路运输企业在网络优化上需考虑得更详细。快递全球网络优化需要在车辆、司机以及需求等约束下整体求解,以目前的优化手段是不可能综合解决这些问题的,因此文章分别建立了货机的航程航班优化模型、地面载运车辆运输路径和时刻表优化模型。

Andrew P. Armacost (2000)^[57]采用复合变量建立了大规模隔日快递航空网络设计模型,模型同时确定路径网络、每条路径上的飞机类型及每条路径上的包裹量,并将模型应用于UPS网络的优化。

Cynthia Barnhart (2002)^[58]分别建立了车辆路径优化和快递运送路径优化模型,由于这两个问题相互影响,因此,在求解时将两个问题反复互相求解,得整体最优解。

Gunther Zapfel、Michael Wasner (2002)^[59]在详细介绍快递取送流程的基础上,建立了结合直达运输的单枢纽轴辐式快递运送路径网络优化模型,其中由于假定各枢纽已经具有自动分拣能力,将分拣成本视为固定的,且节点和枢纽的分拣成本视为相等,所以目标函数仅考虑了运输成本,求解方面,首先确定直达运输线路,再用专家系统缩小搜索空间,然后用遗传算法求解,通过实证分析可知,允许直达运输的混合轴辐网络较纯轴辐网络成本降低10.16%,混合轴辐网络弥补了轴辐系统的劣势,而且直达运输大部分发生在相近的节点间。文章随后提出,到客户处的取送件服务的成本是长途运送成本的2~4倍,且取送线路决定了快递运营网络的成本,节点的覆盖范围的变化导致各节点的包裹量发生变化,从而影响货物运送路径。因此,应将取送路径和长途运输服务综合优化,所以,文章在前一个模型的基础上建立了同时考虑取送件成本的综合优化模型。

Michael Wasner, Gunther Zapfel (2004)^[60]将取送件货物路径优化和长途干线运输路径优化视为一体,实行全局系统优化,即同时确定枢纽与节点的位置、数量、服务的范围以及路径。

Subrat Mahapatra (2005)^[61]研究了不同网络战略下(即有无中转的轴辐式网络),以飞机的固定成本和变动(运行)成本的总成本最小为优化目标,建立了快递车辆开行方案和货物运送路径优化的混合整数规划模型,并评估了不同模型的绩效,同时对需求变化、固定成本和变动成本等做了敏感性分析。具体文献汇总如表1-2所示。

表 1-2 快递组织网络与路径网络优化国外文献汇总表

Tab.1-2 Foreign literature table of express organization network and routing network

文献	已知条件、方法或目标函数	求解结果
Kuby, Gray (1993)	给定枢纽确定; 假设为允许支线接驳的轴辐网络或纯轴辐网络; 飞机的燃油、维修、劳工成本和折扣之和最小	货物运送路径, 各路段上所采用的机型及飞机数
Kim, Barnhart (1997)	给定枢纽选址、节点位置、OD流, 以及各枢纽的分拣时间窗	车辆运行路径与时刻表以及快递货物运送路径
Kim, Barnhart (1999)	给定严格的服务时间窗、有限的包裹分拣能力和有限车辆和飞机; 目标函数: 起点至终点的成本最小	航班航程及时刻表、地面运输路径和时刻表
Grunert, Sebastian (2000)	分别建立货机的优化模型、地面载运车辆运输路径和时刻表优化模型	求得航程航班、地面车辆运输路径和时刻表
Armacost (2001)	应用复合变量; 目标函数为节线的运输固定成本加变动成本	路径网络、每条路径上的飞机类型和包裹量, 并将模型应用于UPS网络的优化