

分类号 F203.9/1015
U D C _____

密级 _____
编号 10741



MBA 学位论文

论文题目 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化研究

研究生姓名: 许辉兵

指导教师姓名、职称: 林艳、教授

学科、专业名称: 工商管理

研究方向: 企业管理

提交日期: 2022年9月28日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 许辉兵 签字日期： 2022 年 12 月 16 日

导师签名： 林艳 签字日期： 2022 年 12 月 16 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意（选择“同意” / “不同意”）以下事项：

1. 学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2. 学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 许辉兵 签字日期： 2022 年 12 月 16 日

导师签名： 林艳 签字日期： 2022 年 12 月 16 日

Research on optimization of sanitation operation cost management in central and southern regions of Tus Environmental

Candidate:许辉兵

Supervisor:林 艳

摘 要

随着国家政策的出台和城市化水平的快速提升,中国环卫行业迅速发展,环卫服务市场总量不断扩张,各类市场主体纷纷涌入环卫市场,环卫市场竞争进入白热化。目前环卫行业整体利润率很低,在新冠肺炎疫情影响下,社会和政府对于环卫运营质量提出了更高的要求,面对激烈的竞争和不确定的环境因素,如何合理利用现有资源,降低环卫运营成本,提高经济效益,是每个环卫服务企业普遍面临的问题。在此背景下,本文开展对启迪环境中南区域环卫运营成本管理的优化研究具有重要的意义。

论文以启迪环境中南区域为研究对象,从该企业环卫运营现状入手,通过现场调查发现该企业环卫运营成本管理中存在人工成本和车辆作业成本偏高等问题,并采用访谈法找到问题的成因。论文依据成本管理理论,采用图论与网络、线性规划等方法,通过构建数学模型对环卫运营中的人员排班、车辆作业路线规划、垃圾站点选址进行优化,降低环卫运营成本,实现环卫运营成本管理优化的目的。本文以人工成本最小化为研究目标,考虑保洁岗位的人力需求与所处服务区域的人流量相关,使用错位轮询排班法,构建了人员排班优化模型,并采用整数规划法进行求解;以车辆作业成本最小化为研究目标,考虑了车辆作业路径距离及成本,构建了车辆作业路线规划优化模型,并采用动态规划法和中国邮递员问题求解法进行求解;以垃圾站点选址最优为目标,考虑了垃圾箱布置数量及位置、垃圾运距和运量,构建了垃圾站点选址优化模型,并采用混合整数规划法进行求解。最后,本文以启迪环境中南区域正在运营环卫项目为案例,将真实环卫运营数据带入数学模型求解,验证了优化模型的可操作性、适用性和实用性,它能有效对环卫运营成本管理进行优化,降低环卫运营成本。

研究表明,本文创新地将人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化在环卫运营成本管理中应用,有效地降低了环卫运营成本,提高了环卫运营经济效益,丰富了环卫运营成本管理优化研究的内容,对环卫行业其他企业具有借鉴意义。

关键词: 启迪环境 环卫 运营 成本管理优化

Abstract

With the introduction of national policies and the rapid improvement of urbanization, China's environmental sanitation industry has developed rapidly, the total volume of the environmental sanitation service market has continued to expand, and various market players have poured into the environmental sanitation market. The competition in the environmental sanitation market has become fiercer. At present, the overall profit rate of the sanitation industry is very low. Under the influence of the COVID-19, the society and the government have put forward higher requirements for the quality of sanitation operations. In the face of fierce competition and uncertain environmental factors, how to reasonably use existing resources, reduce sanitation operating costs, and improve economic efficiency is a common problem faced by every sanitation service enterprise. In this context, it is of great significance to carry out the research on the optimization of sanitation operation cost management in the central and southern regions of Tus Environmental.

The paper takes the central and southern regions of Tus Environmental as the research object. Starting from the current situation of the enterprise's sanitation operation, it finds that the enterprise's sanitation operation cost management has problems such as high labor costs and vehicle operation costs through on-site investigation, and uses interview to find the

causes of the problems. According to the cost management theory, the paper uses graph theory, network, linear programming and other methods to optimize the personnel scheduling, vehicle operation route planning and garbage site selection in the environmental sanitation operation by building a mathematical model, so as to reduce the environmental sanitation operation cost and achieve the purpose of environmental sanitation operation cost management optimization. This paper takes the minimization of labor cost as the research goal, considers that the human demand of cleaning posts is related to the flow of people in the service area, uses the staggered polling scheduling method to build an optimization model of personnel scheduling, and uses the integer programming method to solve it; Taking the minimization of vehicle operation cost as the research objective, considering the distance and cost of vehicle operation path, an optimization model of vehicle operation path planning is constructed, and the dynamic programming method and the Chinese postman problem solving method are used to solve it; Aiming at the optimization of garbage site selection, considering the number and location of garbage bins, garbage transportation distance and volume, an optimization model of garbage site selection was constructed and solved by mixed integer programming. Finally, this paper takes the environmental sanitation project being operated in the south central region of Tus Environmental. as a case, brings the real environmental sanitation operation data into the mathematical model for solution, and

verifies the operability, applicability and practicability of the optimization model, which can effectively optimize the cost management of environmental sanitation operation and reduce the environmental sanitation operation cost.

The research results show that this paper innovatively applies the optimization of personnel scheduling, vehicle operation route planning and garbage site selection in the environmental sanitation operation cost management, effectively reduces the environmental sanitation operation cost, improves the economic benefits of environmental sanitation operation, enriches the content of the environmental sanitation operation cost management optimization research, and has reference significance for other enterprises in the environmental sanitation industry.

Keywords: Tus Environmental;Sanitation;operate; Cost management optimization

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的背景.....	1
1.2 研究的目的与意义.....	2
1.2.1 研究的目的.....	2
1.2.2 研究的意义.....	3
1.3 国内外研究现状及发展趋势.....	4
1.3.1 国内外研究现状.....	4
1.3.2 发展趋势.....	8
1.3.3 研究述评.....	9
1.4 研究内容与思路.....	11
1.4.1 研究内容.....	11
1.4.2 研究思路.....	12
1.5 研究方法.....	14
2 相关理论及基本方法	15
2.1 相关理论.....	15
2.1.1 成本管理理论.....	15
2.1.2 作业成本管理理论.....	15
2.2 基本方法.....	16
2.2.1 图论与网络.....	16
2.2.2 线性规划.....	16
3 启迪环境中南区域环卫运营现状调查与问题分析	17
3.1 启迪环境中南区域基本情况.....	17

3.1.1 启迪环境科技发展股份有限公司简介.....	17
3.1.2 启迪环境科技发展股份有限公司中南区域简介.....	17
3.2 启迪环境中南区域环卫运营现状.....	21
3.3 针对启迪环境中南区域环卫运营出现亏损现象的调查.....	23
3.3.1 运营资料的收集.....	23
3.3.2 资料的整理与分析.....	24
3.4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面存在的主要问题.....	28
3.4.1 人工成本偏高.....	28
3.4.2 机械作业成本太高.....	30
3.4.3 垃圾箱的投入并未起到降低垃圾收运成本的效果.....	32
3.5 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面存在问题的原因调查.....	33
3.5.1 访谈提纲的设计.....	33
3.5.2 访谈人员的确定.....	33
3.5.3 访谈方案的实施.....	34
3.5.4 访谈结果的整理.....	34
3.6 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面出现问题的原因.....	38
3.6.1 人员配置固化缺乏灵活性.....	39
3.6.2 人员配置过于依赖个人经验缺乏科学方法.....	39
3.6.3 总工作量不变的盲目减员导致加班费和临时工费增加.....	40
3.6.4 作业路线规划凭个人经验缺乏科学方法.....	40
3.6.5 目前机械成本的控制方法并没有实质性地减少机械作业成本.....	40
3.6.6 总工作量不变的盲目机械设备减配导致其他成本增加.....	41
3.6.7 垃圾箱的摆放缺乏科学合理的布置.....	41
4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化案例分析及实施保障	42

4.1 优化目标.....	42
4.2 优化原则.....	43
4.3 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化案例分析.....	44
4.3.1 人员排班优化案例.....	44
4.3.2 车辆作业路线规划优化案例.....	54
4.3.3 垃圾站点选址优化案例.....	66
4.4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化实施保障.....	71
4.4.1 组织保障.....	71
4.4.2 制度保障.....	72
5 研究结论与研究展望.....	73
5.1 研究结论.....	73
5.2 研究展望.....	76
参考文献.....	78
附 录.....	86
后 记.....	103

1 绪论

1.1 研究的背景

(1) 国家政策推动了环卫服务市场化的快速发展

党的“十八大”以来，在生态文明建设思想指引下，中国的环卫行业进入了新时代，市场化步伐明显加快，新装备新工艺不断涌现，人居环境得到改善，市场总量不断扩张，环卫服务市场整体空间将超过 2500 亿元。

环卫市场化改革起步于 2000 年，随着政府购买服务而兴起。2013 年《国务院办公厅关于政府向社会力量购买服务的指导意见》（国办发〔2013〕96 号）发布，明确要求在公共服务领域更多利用社会力量，加大政府购买服务力度，从此各地环卫服务市场化力度由此明显增强，全国所有省份都走上环卫市场化改革轨道。

(2) 城市化水平快速提升带动了中国环卫行业迅速发展

随着城市的规模及数量不断增加，城市的人口数量也在快速增长，城镇生活和建筑垃圾也随之增长，人们对城市环卫的需求逐渐增加。与此同时，随着经济社会的快速发展，人们对城市环境卫生的要求也不断提高。未来随着城镇化进程的加快及环卫服务产业链的不断完善，将带动中国环卫行业快速发展。

(3) 环卫市场的激烈竞争对环卫运营提出了新的挑战

环卫服务作为一项绩效易测量、外包门槛较低、公益性较明显的基础性公共服务，它具有建设周期短、资产周转快、现金流稳定（地方政府大概率会保证按期支付，以免拖欠弱势群体工资）、劳动力密集等特点。由于环卫市场的特性及进入门槛较低，再加上目前环卫市场秩序的不规范，各类市场主体涌入环卫市场，导致竞争进入了白热化，恶意低价竞争的现象屡见不鲜。我国环卫行业仍处于劳动密集型发展阶段，这决定了行业整体平均利润率很低。在低价格和低利润的双重压力下，会倒逼中标企业降低作业标准和服务质量，从而导致“饿死同行、累死自己、坑死业主”的现象出现，使整个环卫市场发展陷入恶性循环。

随着环卫市场化改革弊端的不断暴露，促使市政府对市场化改革进行重新审视，一方面政府终止原先通过市场机制外包出去的环卫服务，重走改革前行政型供给道路，导致逆市场化现象悄然发生，环卫市场竞争环境进一步恶化。另一方面，政府通过各种措施防止恶意低价竞争现象出现，同时加强了对环卫服务质量的考核力度和惩罚力度。在

这种新形势下，如何在环卫运营中降低运营成本，提高运营效率，在激烈的竞争中求得生存是目前环卫服务企业普遍面临的问题。

（4）新冠肺炎疫情影响下社会对环卫运营质量提出了更高要求

新冠肺炎疫情持续时间长、波及范围广，使人们对健康的担忧和不确定性增加，社会对环境卫生的要求提高，政府在环卫作业质量规范标准、日常作业控制、服务质量考核等方面加大了前所未有的力度，目前对环卫运营服务的要求高于以往日常的环卫工作水平的质量要求，这些高要求最终转化为每个环卫企业、每个环卫团队及每位环卫工需要高质量完成的环卫工作任务，新冠疫情正在对环卫企业的环卫运营能力和运营效率进行前所未有的考验。

1.2 研究的目的是与意义

1.2.1 研究的目的

（1）梳理总结启迪环境中南区域环卫运营中存在的问题，提高该区域对环卫运营成本管理优化重要性的认识

启迪环境科技发展股份有限公司（简称：启迪环境）是中国大型专业环保上市公司（股票代码 000826），长期致力于废物资源化和环境资源的可持续发展。启迪环境中南区域隶属启迪环境 9 大区域（北方区域、总部直管、西南区域、西北区域、南方区域、中南区域、陕西区、华东区域、中部区域）之一，启迪环境中南区域管辖湖南、江西两省，共运营 15 个环卫项目，年营业额 27197.91 万元，由于项目相对分散，各个项目的服务内容、服务要求、所处地的人文、地理环境不一样，再加上各个项目的组织架构、规章制度和管理人员的素质等方面的差异，造成各个项目在环卫运营上并没有一套普遍适用的科学合理的方法，基本上都是简单粗暴地进行减少人工、减少作业频次、加大环卫工人作业强度、以性能低的装备代替性能好的装备来降低成本，最终体现在作业标准、服务质量的下降上，这对公司整体形象、环卫运营能力的提升及公司的整体经济效益的提高产生不利影响。本文通过对现有环卫运营中存在的问题进行梳理总结，以期引起启迪环境中南区域对环卫运营的重视，为环卫运营成本管理优化的实施打下基础。

（2）着力破除启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化中的主要障碍，提高该区域环卫运营能力

由于启迪环境中南区域各个项目的服务内容、服务要求、所处地的人文、地理环境不一样，再加上各个项目的组织架构、规章制度和管理人员的素质等方面的差异，会对环卫运营成本管理优化产生或好或坏的作用。本文通过对启迪环境中南区域员工进行访谈，针对影响环卫运营成本管理优化的主要障碍提出了解决方法和思路，从而提高启迪环境中南区域整体环卫运营能力。

(3) 探索建立科学的环卫运营成本管理机制，提高启迪环境中南区域的整体竞争力

环卫行业竞争已进入了白热化，政府部门对环卫服务质量要求逐步提高，在低价格、低利润、高要求的三重压力下，启迪环境中南区域如何利用现有资源进行合理配置，实现环卫运营的“帕累托最优”，是本文着重要探索的问题。

本文通过对启迪环境中南区域现有环卫项目运营现状进行系统分析研究，结合运筹学基本原理在环卫运营实践中的运用，对启迪环境中南区域环卫运营成本管理多方面提出优化方案，探索建立符合启迪环境中南区域各个项目的科学的环卫运营成本管理机制，降低运营成本，从而提高启迪环境中南区域的整体竞争力。

(4) 通过对环卫运营成本管理优化的研究，对环卫行业其他公司有所借鉴

环卫行业市场规模十分庞大。尽管各个公司在经济实力、管理模式、组织架构、人员结构、内部制度等方面有差异，但是在整个环卫行业的大背景下，启迪环境中南区域环卫运营中遇到的问题或多或少也是其他公司在环卫运营中遇到的问题，针对启迪环境中南区域环卫运营成本管理的优化研究，也可以为环卫行业其他公司有所借鉴。

1.2.2 研究的意义

(1) 为运筹学相关优化方法在环卫运营成本管理中的实际应用进行探索

运筹学是将实际的问题归结为不同类型的数学模型，研究各要素之间的相互关系，并将其作为一个整体来研究，从而在已有的方案基础上寻求更优的方案。本文通过分析研究启迪环境中南区域环卫项目运营的现状，结合图论与网络、线性规划等方法理论，采用整数规划、混合整数规划、动态规划、中国邮递员问题等方法，探索理论在实践中的应用，特别是在环卫运营成本管理优化中的应用，尽可能使启迪环境中南区域环卫运营管理更加科学合理、富有成效，丰富环卫运营成本管理优化研究的内容。

(2) 为优化启迪环境中南区域环卫运营成本管理，提高该区域整体经济效益提供参考

环卫运营成本管理在整个环卫项目运营过程中十分重要，它直接决定了企业收益和服务质量的高低。本文根据启迪环境中南区域目前环卫项目运营的现状和出现的问题，针对性地对其进行优化，从而使启迪环境中南区域环卫运营成本管理更加科学合理，有利于公司进一步降低运营成本，提高服务质量，使公司整体竞争力进一步加强，为启迪环境中南区域的长远发展打下良好基础。

（3）为环卫行业其他企业优化环卫运营成本管理问题提供参考

在我国，环卫行业仍处于劳动密集型发展阶段，这决定了行业平均利润率较低，但由于环卫行业的特性，各类市场主体纷纷涌入，使得环卫市场竞争进入了白热化，如何在环卫运营中有效降低成本，提高经济效益，成为环卫行业企业能否继续生存的关键。近年来随着我国环卫行业市场化率不断提升，据不完全统计，目前我国从事环卫服务的企业多达 8000 余家，环卫服务市场整体空间将超过 2500 亿元。本文中启迪环境中南区域环卫运营中所面临的问题，具有一定的行业特点，因此启迪环境中南区域环卫运营成本管理的优化研究对同行业其他企业可以提供参考，具有现实意义。

1.3 国内外研究现状及发展趋势

环卫项目运营成本主要包含人工成本、车辆成本、物料成本、管理费用及其他费用。其中人工成本主要包括含驾驶员人工成本、作业人员人工成本、管理人员人工成本。车辆成本指的是折旧费、租赁费、水电费、车辆保险、车辆维修保养、车辆油费等。物料成本主要涉及作业消耗品、维修配件、劳保用品等内容。而管理费用涵盖了办公费用、管理用车、办公场地租赁、水电费、通讯费、招待费及其他费用内容。

环卫行业是劳动密集型行业，环卫运营成本主要体现在人工成本和车辆成本上，而人工成本的高低直接反映在人员配置的数量及排班的合理性上，车辆作业成本的高低与垃圾站点（中转站）位置布置和作业路线的规划直接相关。

因此，在环卫运营中对人员排班、车辆作业线路和垃圾站点选址进行优化能有效实现环卫运营成本管理的优化。

1.3.1 国内外研究现状

为了尽可能深入全面的了解所研究题目的国内外研究现状和发展趋势，本人查阅了大量相关图书资料，并在万方数据库、中国知网、IEEE 等专业网站检索了有关垃圾站点

选址、车辆作业路线规划优化、人员排班优化等方面研究文献，对国内外研究现状和发展趋势有了一定认识。

(1) 关于垃圾站点选址优化方面的研究

在垃圾站点选址优化方面，国内外对垃圾中转站选址的研究比较多，因为垃圾中转站对整个垃圾收运系统起着重要的作用。垃圾中转站的选址问题是迄今为止研究得比较早，也是学者研究最多的，通过总结可分为以下几方面的研究：

①单因素的中转站选址研究，该研究仅从某一方面考虑优化中转站选址，不考虑其他因素。陈朱蕾(1992)以费用最低为目标，研究了生活垃圾中转站的选址问题，并用数学模型来对此进行了规划求解^[1]。Min H(1998)在研究中首次使用电脑仿真的策略，解决中转站选址和收运路线的问题，更好地确定中转站的位置^[2]。杜亚娟(2015)在研究中通过总结前人的选址理论和模型方法，通过计算机仿真的方法，对实际对象进行多次模拟，使中转站选址位置最优^[3]。刘方[2021]采用层次分析法对垃圾中转站选址研究，使得中转站的选址问题研究更方便，更贴近实际，通过对影响垃圾中转站选址因素的分析，利用层次分析法确定了各因子在选址中所占权重，并借助 ArcGIS 空间分析功能对所得数据进行分析处理，进而建立场址优选模型，科学地选出垃圾中转站最优位置^[4]。李梦琦(2021)为了得到中转站的最佳选址位置，采用定性和定量相结合的两阶段方法对垃圾中转站选址进行研究。第一阶段采用定性分析，采用 PROMETHEE II 方法进行初步选址。第二阶段考虑垃圾转运过程中的运输成本和中转站数量，建立 0-1 整数规划模型得到最优选址^[5]。

②考虑多因素的中转站选址研究。为了丰富中转站选址理论，使选址结果更加符合实际要求，出现了多目标复杂的中转站选址研究。Chang(1996)在选址规划进行研究时建立了多目标规划模型，还将交通拥堵、噪声影响、空气污染等因素考虑在内，使生活垃圾中转站的选址研究问题更贴近实际^[6]。贾传兴，彭绪亚等(2006)在研究中根据生活垃圾的特点以及当地政府居民的意见，利用集合覆盖的方法对中转站的选址进行了重新规划，采取多目标规划和混合整数规划的方法，构建模型并利用遗传算法求解，找到了中转站的最佳位置^[7]。李晓艳(2016)在研究中对中转站进行选址时，将经济、绿色、环保等理念应用其中，希望建立的中转站在满足对垃圾压缩，粗分类基础上不影响周围居民生活，中转站选址是科学、经济、绿色的^[8]。王晨顿(2018)在研究中利用排队论模型对北京原宣武区马家楼中转站进行进行了优化，解决了垃圾收运车辆进入中转站卸料时存在排队时间较长的问题^[9]。代燕(2019)在研究中建立了以总成本最小和中转站对居

民产生的环境负效用最小的双目标城市固废中转站选址优化模型,通过算例分析验证了模型的可行性^[10]。杨帆等(2020)在研究中建立了基于 Minisum(经济成本最小化)以及 Maximin(生态质量最大化)二重标准分析的垃圾中转站选址评价体系,并利用 GIS 技术,对长沙市中心城区二级垃圾中转站选址提出优化建议^[11]。李海君等(2020)在确定城镇中转设施分步优化模型方法研究时,充分考虑了城镇中转站选址经济、社会、环境负效应等相关影响因素,最后通过考虑了建设运营成本、负效应、回收效率等综合因素的多目标整数规划模型最终确定中转站位置、容纳量与服务分配方案^[12]。刘明辉(2021)在研究中通过分析 L 县的农村生活垃圾回收现状,然后根据 L 县当前发展特点,采用聚类分析的方法进行中转站选址^[13]。马艳芳(2022)等人在研究垃圾中转站和焚烧站选址问题时,为了减少垃圾回收物流成本和设施对环境的负面影响,充分考虑经济目标和垃圾设施的负面影响,设计与风向和距离有关的负效应分段函数,构建两级多目标选址-路径模型,提出鲸鱼优化算法(WOA)和模拟退火(SA)算法结合的两阶段求解算法^[14]。

(2) 关于车辆作业路线规划优化方面的研究

车辆作业路线规划优化即为车辆路径优化问题,在与环卫运营相关的车辆路径优化方面,国内外对生活垃圾收运路径优化研究比较多,本文所研究的环卫运营车辆作业路径优化包含生活垃圾收运路径优化、道路机械清扫路径优化、道路机械冲洗和洒水路径优化等,与生活垃圾收运路径优化研究极为相似,因此,国内外关于生活垃圾收运路径优化方面研究,对本文车辆作业路线规划优化研究具有重大借鉴意义。

车辆路径问题(VRP)是由 Dantzig 和 Ramsar(1959)提出的有关路径优化问题^[15],而 Beltrami 和 Bodine(1974)将其应用于废物收集和运输领域^[16]。Yadav 和 Karmakar(2020)等人使用线性规划和地理信息系统分析来确定废物收集和运输的节拍路线,并得出了更好的线性规划结论,提出了可行的数学和计算模型,用于可持续收集和运输城市固体废物^[17]。Miranda(2015)等开发并隐含了一个混合整数规划服务于农村群岛的废物收集系统的线性优化模型^[18]。Zhao(2016)等为了最小化成本和风险,研究了危险废物的位置和路线问题^[19]。Leggieri 和 Haouari(2017)在研究中建立了绿色模型考虑环境问题的 VRP,并提出了解决问题的精确方法^[20]。Delgado-Antequera(2020)等研究了废物收集和运输的路线优化,发现行进距离是主要的研究因素^[21]。梁玄晔(2015)在研究中对垃圾收运系统进行多目标优化,提出以最小化经济、环境、社会影响为目的,设计调度模型^[22]。张多雨(2016)在研究中将装卸时间造成的排队时间引入垃圾收运路线优化问题,通过案例仿真对比考虑装卸时间和未考虑装卸时间的路径优化结果,证明了

模型的有效性^[23]。符俊波、马慧民等（2017）在研究中以新方案与原方案偏差最小为目标，建立扰动恢复模型，解决垃圾收集点的垃圾量变化引起的城市生活垃圾车辆调度干扰问题^[24]。赵红霞（2018）等在研究中通过对垃圾的回收路径进行合并可以共享运输资源从而达到节约成本的作用，故将垃圾分类回收的路径规划问题假设为多源多目标的路径规划问题，并给出了路径集合中不含重复边的总长度优化模型^[25]。Nesmachnow（2018）等在研究中建立了一个废物收集模型，该模型考虑了具有两个目标的优先级，分别是最短距离和最佳服务^[26]。Mohamed, Abdallah（2019）等在研究中指出传统的运输方法和既定既定的运输路线成本太高，对废物收集路线进行了动态模拟与研究^[27]。于伟（2019）在研究中将垃圾分类运输，将多车型，排队等待时间考虑其中，研究的问题形态更复杂，更真实^[28]。HailinWu 等（2020）在研究中提出了一种废物收集和运输模型，该模型将特定废物的优先收集高度放在第一位，用动态系统代替传统的固定路线^[29]。尚春剑、马良等人（2021）在研究中构建了带时间窗异构周期性的混合车辆路径问题模型，对此问题进行了理论上的分析，将其划分为多层次的汽车路径问题，并给出了一种改进的蚂蚁算法，验证模型算法的有效性^[30]。

（3）关于人员排班优化方面的研究

人员排班问题起源于 Edie（1954）关于收费站人员分配问题的研究^[31]，随着人员排班问题被逐步研究和推广，现在被广泛应用于服务行业^[32-35]、制造行业^[36-39]、交通运输行业^[40-43]等领域，在各行各业中发挥着重要作用，随着时间的推移，人员排班问题的研究在不断发展，最早期的人员排班问题研究只涉及员工的工作分配问题，而近年来，对人员排班问题的研究，成为了企业降低人工成本、追求经济效益的动力^[44]。

在参考文献中，有许多学者对人员排班问题进行了分类研究，具体如下：

1) Baker (1976) 最早提出了人员排班问题分类方法，将人员排班问题分为三种类型：①休息日安排、②班次安排、③休息日安排与班次安排相结合的日程安排问题^[45]。

2) Alfares（2004）从人员排班问题的解决方法上对其进行分类，主要分为目标规划、整数规划、手工排班、隐式建模、元启发式等十种类别^[46]。

3) Ernst（2004）等人将人员排班过程分成多个模块，这些模块可以根据不同的应用范围进行相互组合，可将几个不同的模块组合到一个过程中去解决不同应用领域中与人员排班有关问题，模块分类具体如下：①需求建模模块、②班次安排模块、③休息日安排模块、④任务安排模块、⑤工作线构建模块、⑥人员安排模块^[47]。

4) Van (2013) 等人则根据排班问题的相关属性进行分类, 如: 班次灵活性、决策类型、人员特征等。比如根据决策类型, 可将人员排班问题分为型①基于任务排班、②基于班次顺序排班、③基于时间排班等^[48]。

排班问题作为一个经典的 NP-难问题, 很早就引起了各个领域研究学者的关注: 程元军 (2010) 等人在研究中通过分析我国银行业柜员排班的各项影响因素, 运用排队论和整数规划的方法论构建弹性排班优化模型, 通过 Cplex 求解, 为我国银行业的排班管理提供了新的可行方法^[49]。胡修武、王瑞程 (2019) 等人在研究中考虑呼叫中心工作人员加班的情况, 构建呼叫中心的排班优化模型, 采用启发式算法得到初始排班用人方案, 并基于模拟退火算法以及贪婪搜索算法, 提出一种新的邻域搜索算法, 算例结果显示两阶段求解出的方案, 在有效降低了总人力成本的基础上, 提高了员工的收入^[50]。而在医院排班领域, 许丹、刘洪未 (2018) 等人在研究中考虑医院护士存在加班的情况, 建立护士排班优化模型, 并加入是否加班的 0-1 变量, 根据场景的约束和护士的自身偏好形成班型, 再通过遗传算法进行排班计划, 对供给小于需求的情况设计相应的组合加班策略, 即综合临时加班和延时加班两种方案^[51]。在医院护士排班计划中, 王陟 (2019) 等人在研究中提出了一种新的排班算法, 首先采用启发式算法来获得模型的初始解, 其次通过邻域禁忌搜索算法来寻找最优解, 仿真实验结果证明了新方法的可行性, 更适用于大规模问题的求解^[52]。Mischek F (2021) 等人在研究中提出了著名的资源受限项目调度问题的扩展, 具有多个异构资源和非常普遍的可用性限制, 以及一个分组阶段, 其中作业必须由较小的单元组装而成, 基于实例生成器和公开的实例集, 提出并评估了不同的元启发式方法来解决已经提供装配作业的调度子问题, 结果表明, 模拟退火算法相对其他现有算法更优^[53]。

1.3.2 发展趋势

随着互联网、物联网、大数据及多种智能技术的发展, 同时受到经济发展、社会文化水平提高、国家政策等因素影响, 未来环卫运营管理工作将得到更多的智能技术和智能设备的支持, 大大减少人为操作的弊端, 让环卫运营管理工作有条不紊地、科学合理地展开, 从而减少资源的耗损, 提升工作效率, 降低运营成本, 使整个环卫运营管理工作更为科学化、制度化、流程化^[54], 使整个环卫运营工作的各个环节配合更加默契, 使环卫运营工作更加安全、高效和优质。因此, 未来环卫运营管理主要呈现出以下几个方面的发展趋势。

（1）环卫运营管理将朝着精细化和智能化发展^[54]

随着智能技术和智能设备的使用，环卫运营管理将从粗放型管理逐步向精细化管理过渡^[54]，环卫运营工作将做到细致入微、每时每刻的监管，人管人的方式逐渐模糊化，取而代之的是环卫运营管理的数字化、信息化、自动化和智能化，管理者可以随时掌握环卫运营信息，了解环卫运营工作状况，及时做出判断与应对办法，提高工作效率，避免模糊化的传统管理所引起的资源浪费，同时避免传统管理所带来的管理差错，更能避免人为隐瞒或者个人因素所引发的管理不当。从而使环卫运营管理更加精细化、科学化、制度化、流程化，有效降低环卫运营成本。

（2）物联网将在环卫运营管理中广泛使用^[55]

随着经济和技术的发展，未来在环卫运营管理工作中将广泛使用物联网，通过智能设备，将环卫运营管理工作实现网络互联，让整个环卫运营管理工作全过程实现无缝对接和管控，使环卫运营更加科学化、标准化、流程化和自动化，降低环卫运营成本，增加企业经济效益。

（3）环卫运营管控平台化^[55]

环卫运营平台化管理是大数据、物联网、智能技术发展的必然结果，它能使整个环卫运营管控由线下为主转向线上为主，在智慧环卫物联网管控平台上实现。环卫运营管控平台化能自动获取和分析各类环卫运营数据，为环卫运营管理者做决策时提供数据支持，使环卫运营管理和决策智慧化、科学化。环卫运营管控平台化既能让环卫运营智能化，提高工作效率，节约环卫运营成本，又能时时监控环卫运营中的各项作业，保障环卫运营工作更加安全、高效和优质。

1.3.3 研究述评

（1）研究述评

通过对相关研究文献的整理和分析发现，国外对垃圾站点选址优化问题、车辆作业路线规划优化问题、人员排班优化问题的研究起步较早，相关研究也较为系统和深入，相对而言，国内关于这些方面的研究起步较晚，在这些领域的研究也在不断的发展和进步，总而言之，不论是国外还是国内关于垃圾站点选址优化问题、车辆作业路线规划优化问题和人员排班优化问题的研究都取得了良好的成果。

通过对以上国内外研究成果整理可知：

①在垃圾站点选址优化研究方面，国内外学者对垃圾中转站选址优化和垃圾中转站选址规划研究的比较多，也有很深的研究，但是对摆放灵活性比较强的垃圾箱站点选址的研究比较少，而大多数垃圾中转站选址优化和垃圾中转站选址规划研究的算法比较复杂或者是只能应用在其他领域，鉴于目前我国环卫行业的现状，在环卫实际运营中难以推广应用。

②在车辆作业路线规划优化研究方面，国内外学者对垃圾收运路径优化和其他行业的车辆路径优化研究比较多，相关算法已经很成熟，但是对于环卫运营中的机扫车、洒水车、冲洗车、质量巡查车等作业路线的优化研究很少。

③在人员排班优化研究方面，目前国内外在服务维护、呼叫中心、机场、航海、车站、火车站、医院、银行等领域应用已经十分成熟，并提供了各种模型和求解方法，但在环卫行业应用的研究相对较少。

（2）研究的空白和不足

在研究期间，本人认真阅读、学习和分析了诸多历史文献的理论、方法以及实践经验，为本文的研究奠定了基础，同时，通过整理文献也发现了一些研究空白点。

①通过对垃圾站点选址优化方面的文献进行总结，发现绝大部分的文献都是研究中转站的选址和布局，对摆放灵活性比较强的垃圾箱站点选址的研究比较少，在实际环卫市场化运营中，环卫服务项目推向市场前，政府部门已建好了中转站，而且一旦一个区域的中转站已存在，不能随意更换地址。而大多数垃圾中转站选址优化和垃圾中转站选址规划研究的算法比较复杂或者是只能应用在其他领域，鉴于目前我国环卫行业的现状，在环卫实际运营中难以推广应用。

本文借鉴以往学者研究成果，对环卫运营中的垃圾箱站点选址进行优化，垃圾箱站点的布局选址受限制的条件少，可以根据周边的垃圾量及其他要求灵活布置垃圾箱站点，相对集中地收纳周边垃圾，弥补垃圾中转站位置固定、运输距离远的不足，降低垃圾收运成本，使本文的研究更贴近环卫实际运营，本文在对垃圾站点选址时采用的算法为整数规划法和混合整数规划法，算法相对简单，便于该研究在实际环卫运营中进行推广。

②通过对车辆作业路线规划优化方面的文献进行总结，发现如下不足：首先，国内外学者对垃圾收运路径优化和其他行业的车辆路径优化研究比较多，相关算法已经很成熟，但是大多数算法在求解过程中将实际距离简化为两点间的直线距离，与现实存在出入。其次，国内外学者对环卫运营中的机扫车、洒水车、冲洗车、质量巡查车等作业路线的优化研究很少。

本文借鉴以往学者研究成果，对环卫运营中车辆作业路线进行优化，该路线优化适用于机扫车、洒水车、冲洗车、质量巡查车等作业车辆，丰富了车辆作业路线规划优化的研究内容。本文在车辆作业路线规划优化算法求解过程中所使用的距离均为实际距离，使计算结果更加精准、更贴近现实，所采用的求解方法为动态规划法和中国邮递员问题求解法，数学模型求解简便灵活，具有较强的适用性和推广价值。

③通过对人员排班优化研究方面的文献进行总结，发现关于人员排班优化方面的应用，国内外在医院、车站、机场、银行等方面运用的比较多，而对环卫行业人员排班优化的研究很少。

环卫行业是劳动密集型行业，作业人员的排班优化研究对于控制人工成本具有重要意义。本文借鉴以往学者研究成果，对环卫运营中人员排班进行优化，降低环卫运营中的人工成本，本文在人员排班优化中所采用算法为整数规划法，便于掌握，适应性强，便于该研究在实际环卫运营中进行推广。

1.4 研究内容与思路

1.4.1 研究内容

本文通过对国内外相关文献进行梳理、分析和总结，结合启迪环境中南区域环卫运营现状，确定了论文的研究方向是从人员排班优化、车辆作业路线规划优化、垃圾站点选址优化三个方面着手，本文通过对这三个方面的数学模型的建立，将现有环卫运营资源进行合理配置和规划，降低环卫运营成本，从而达到启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的目的。论文从启迪环境中南区域环卫运营现状入手，通过实地调研及数据分析发现该企业环卫运营成本管理中存在人工成本和车辆作业成本偏高等问题，并通过访谈法找到了出现问题的原因，最后本文依据成本管理理论，结合图论与网络、线性规划等相关方法，以启迪环境中南区域正在运营项目为案例，通过构建数学模型对启迪环境中南区域环卫运营中的人员排班、车辆作业路线和垃圾站点选址进行优化，实例验证了数学优化模型能有效降低环卫运营成本，提高启迪环境中南区域环卫运营经济效益。本文还在组织和制度上提出了相关建议，以保障启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的实施能持续有效进行。

研究表明，启迪环卫中南区域环卫运营成本管理的优化主要体现在人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化三个方面，本文在这三个方面建立的数

学模型具有实用性、适用性和可操作性。本文创新地将人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化在环卫运营成本管理中应用，有效地优化了环卫运营成本管理，丰富了环卫运营成本管理优化研究的内容，对环卫行业其他公司具有借鉴意义。

1.4.2 研究思路

(1) 论文结构

本文研究的内容分五部分进行，具体如下：

第一章 通过文献研究、案例研究、实地调研，确定论文选题的意义及背景，并对国内外相关文献进行梳理、分析和总结，结合启迪环境中南区域环卫运营现状，明确了论文的研究方向为人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化。

第二章 对人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化的相关理论及方法进行阐述，为后续的研究奠定了基础。

第三章 对启迪环境中南区域环卫运营现状进行调查与分析，发现了启迪环境中南区域环卫运营成本管理中出现的问题，并通过访谈法找到了出现问题的原因。

第四章 针对启迪环境中南区域环卫运营成本管理中出现的问题及出现问题的原因，本文依据成本管理理论，结合图论与网络、线性规划等相关方法，以启迪环境中南区域正在运营项目为案例，通过构建数学模型，采用整数规划法、混合整数规划法、动态规划法、中国邮递员问题求解法等求解方法对启迪环境中南区域环卫运营中的人员排班、车辆作业路线、垃圾站点选择进行优化，将真实环卫运营数据带入模型求解，通过实例验证了人员排班优化模型、车辆作业路线规划优化模型和垃圾站点选址优化模型的可操作性、适用性和实用性，它能有效对环卫运营成本管理进行优化，降低环卫运营成本。

第五章 对前四章的研究进行总结，得出结论，展望不足。

(2) 研究思路图

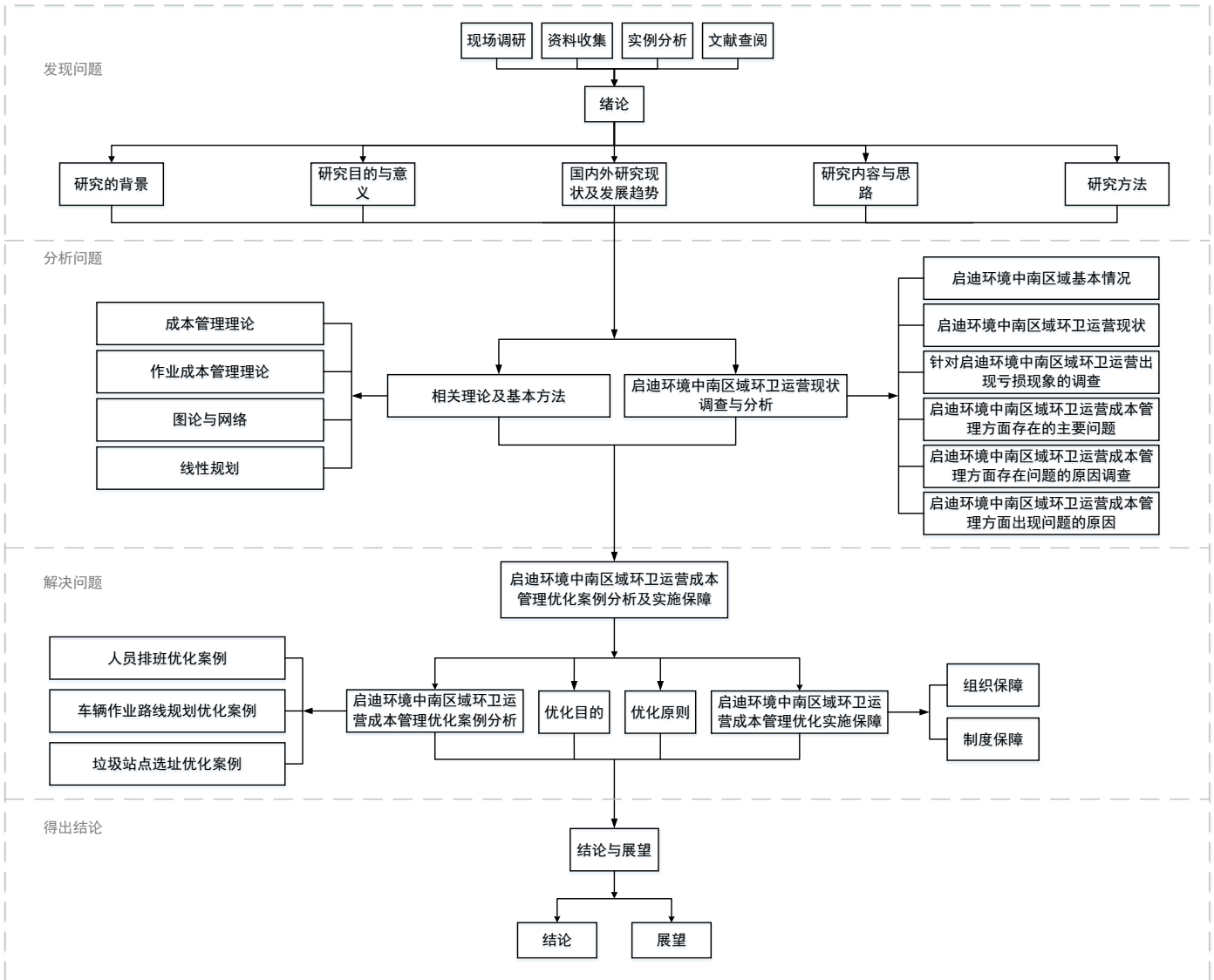


图 1.1 研究思路图

1.5 研究方法

针对研究的内容和对象特征，本文主要采取了以下研究方法。

（1）文献研究法

本文通过查阅环卫运营成本管理优化方面相关的文献资料，对环卫运营成本管理优化研究的历史和现状有了较深刻的了解，梳理总结了以前学者对环卫运营成本管理优化的研究成果，确定了论文的研究方向，结合启迪环境中南区域环卫运营实际情况，提出了适合本企业实际情况的环卫运营成本管理优化方案。

（2）案例研究法

本文认真调查了启迪环境中南区域目前环卫项目的运营现状，分析了存在的问题及其成因，并以启迪环境中南区域正在运营项目为案例，结合相关理论和方法，有针对性的提出了环卫运营成本管理优化方法。

（3）现场调查法

本文通过对启迪环境中南区域环卫运营项目的调研，了解环卫项目的运营情况，收集相关数据和资料，通过实地调研以及数据资料的整理和分析，发现了启迪环境中南区域目前所运营环卫项目存在的问题及成因，从而使本文研究的主要问题更加贴切现实，具有较强的现实指导意义。

（4）数学建模分析法

本文针对目前启迪环境中南区域环卫运营成本管理中存在的问题及出现问题的原因，采用数学语言分别构建了人员排班优化、车辆作业路线规划优化、垃圾站点选址优化三种数学模型，并结合实例进行定量分析，最后采用 lingo 软件对数学模型进行求解。

（5）访谈法

为找到启迪环境中南区域环卫运营存在的问题的原因，本文采取一对一的访谈形式，与启迪环境中南区域的员工进行了多次交流。在访谈的内容上，通过合理设计访谈问题，尽可能避免个人主观偏见，力求访谈结果客观公正。在访谈的范围上，与高、中、低各层员工都进行了访谈，尽可能做到了全面深入。

2 相关理论及基本方法

本文对启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的研究，主要集中在人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化三个方面，下面对启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化中所使用到的相关理论及基本方法进行概述。

2.1 相关理论

2.1.1 成本管理理论

20 世纪以前，成本管理理论尚处于萌芽状态，其重点是对各项成本进行事后核算和反映。20 世纪中期，随着管理理论的发展，成本管理理论的核心由事后消极的成本核算转向事中的成本控制，并逐步形成了传统的成本管理理论。近一二十年来，企业经营环境的变化使得传统的成本管理面临挑战，成本管理的重心也由事中的成本控制向前进一步扩展到事前的成本预测、计划阶段，并与企业发展战略相匹配，形成了一种新型的成本管理模式——战略成本管理，它标志着成本管理理论日趋成熟。

成本管理就是运用管理学的理论和方法，对企业资源的耗费和使用进行预算和控制的理论、程序和方法的总称。它源于一定的社会经济环境。并由当时社会生产力的发展状况所决定。

随着人类社会的不断进步和科技水平的不断提高，成本管理理论思想和内容也日臻完善。自 15 世纪中叶成本会计的产生之日起，成本管理的思想大致经历了萌芽期、形成期、发展期和成熟期四个成长阶段，其核心内容相应地从最初的成本核算、成本节约和控制，过渡到全面成本管理，直至最后的战略成本管理，成本管理的侧重点也由事后反映、事中控制转向事前预测，直至目前的事前、事中、事后的全方位、多环节相结合的战略化成本管理阶段。

2.1.2 作业成本管理理论

上世纪 70 年代初 Staubus 教授首次提出了作业和作业会计的概念，但是当时未引起人们的足够重视。80 年代以后，随着生产自动化程度的提高，人们认识到传统的成本核算方法已经越来越不适应生产实际。Cooper 和 Kaplan 等人在分析了传统成本会计的

弊端后，提出了作业成本计算方法。这种方法可以将企业发生的各种费用通过成本动因更为精确地分摊到产品成本中，从而为企业决策者提供更为准确的产品成本信息。

作业成本计算是作业成本管理的基础。作业成本管理使用作业成本的信息，其目的不仅要使所销售的产品和服务合理化，更重要的是明确改变作业与过程以提高生产力。它将成本管理的重心深入到供应链作业层次，尽可能消除“非增值作业”，改进“增值作业”，优化“作业链”和“价值链”，从成本优化的角度改造作业和重组作业流程；并且对供应链中的各项作业进行成本效益分析，确定关键作业点，对关键作业点进行重点控制。应该说作业成本管理的出现使人们眼前一亮，它突破了传统的人们对于成本的种种认识，并为管理者拓展了企业降低成本的途径。

2.2 基本方法

2.2.1 图论与网络

图论与网络是主要研究图论和网络理论中有关最优化问题的理论和方法。为运筹学与组合数学及代数等的交叉学科，属运筹学的分支。图论是离散数学的一个分支，以图作为研究对象。图是用来描述事物之间关系的数学结构，图通常由节点和边构成，其中节点表示事物，边表示事物之间的联系。用 G 表示图， $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 表示点的集合， $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 表示边的集合，则 $G = (V, E)$ 。通常在图中，点集是有限元素的非空集合，边集是有限元素的集合。权重是图论中一个非常重要的概念，图中的每条边 e_i 都会分配有一个实数 w_i ，这个实数称为权重。若以点集 V 代表平面上分布的点的集合，则权重为站点之间的距离。网络是图与权重的结合，网络可以表示为 $G(V, E, W)$ ，其中 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为边的权重集合。网络在研究实际问题中的应用很广泛，例如最短路径问题、旅行商问题、中国邮递员问题等。

2.2.2 线性规划

线性规划是运筹学中研究较早、发展较快、应用广泛、方法较成熟的一个重要分支，是辅助人们进行科学管理的一种数学方法，是研究线性约束条件下线性目标函数的极值问题的数学理论和方法。线性规划作为运筹学的一个重要分支，以数学方法帮助人进行科学管理和决策。线性规划是求一个线性函数最值的优化问题，其决策变量受到线性约

束。线性规划包含了整数规划、混合整数规划和动态规划等，线性规划可以将复杂问题以线性函数的形式进行简化和描述，在实际生活中有着广泛的应用，例如排班问题、选址问题、车辆调度问题、运输问题、资源分配问题等。

3 启迪环境中南区域环卫运营现状调查与问题分析

为了更好地了解启迪环境中南区域环卫运营情况，本文将从启迪环境中南区域基本情况开始着手，通过运营数据分析及现场实地调研发现启迪环境中南区域环卫运营中出现的问题，并通过访谈法寻找出现问题的原因。

3.1 启迪环境中南区域基本情况

启迪环境科技发展股份有限公司中南区域是启迪环境科技发展股份有限公司 9 大区域之一，具体情况如下：

3.1.1 启迪环境科技发展股份有限公司简介

启迪环境科技发展股份有限公司（以下简称：启迪环境）是一家深圳主板上市公司，证券简称：启迪环境，证券代码：000826。截至 2020 年 12 月 31 日，公司总资产为 423.73 亿元，净资产为 134.17 亿元，下辖控参股子公司近 500 家。启迪环境是国家首批高新技术企业，在能源环保一体化的战略布局下，构建了零碳能源平台、固废及再生资源平台、水务生态平台、城市环境服务平台、环卫专用车及环保装备平台。以“零碳无废城市建设者”为使命，依托启迪控股“产业+技术+资本”三螺旋的发展模式，通过技术集成创新打通能源与环保的边界，为生态环境服务。

3.1.2 启迪环境科技发展股份有限公司中南区域简介

启迪环境中南区域为启迪环境 9 大区域（北方区域、总部直管、西南区域、西北区域、南方区域、中南区域、陕西区、华东区域、中部区域）之一，启迪环境中南区域管辖湖南、江西两省，共运营 15 个环卫项目（分别成立了 15 个项目公司），年营业额 27197.91 万元（表 3.1），中南区域设立了人力资源部、财务部、综合管理部、运营管理部、市场部，区域总经理 1 名，区域副总经理 3 名（图 3.1 启迪环境中南区域组织架构图），共有员工 1153 人（表 3.2）。

启迪环境中南区域环卫服务的主要内容为：道路清扫保洁、道路洒水、道路冲洗、道路降尘、绿化养护及保洁、城市公共设施维护及保洁、垃圾收（清）运、垃圾中转站管理、公厕管护、水域保洁和垃圾分类等。

从表 3.1《中南区域目前正在运营项目汇总表》可以看出，中南区域服务期 8 年以上的项目占了 73%，合同总金额达到 56.47 亿元，由此可见，启迪环境中南区域环卫运营成本的管理不是短期行为，启迪环境中南区域如何实现环卫运营成本的长期有效、科学的管理是值得探索和研究的。

表 3.1 中南区域目前正在运营项目汇总表

序号	区域	省份	区/县	项目名称	服务内容	经营期(年)	年合同额(万元)	总合同额(万元)
1	中南区域	湖南	新邵县	新邵县生活垃圾收集转运系统特许经营项目	12 座中转站生活垃圾收集转运	30	934.40	28032.00
2	中南区域	湖南	邵阳市区	邵阳经济开发区生活垃圾清运、道路清扫保洁等项目特许经营权出让项目	生活垃圾清运、道路清扫保洁	15	1791.26	26245.21
3	中南区域	湖南	衡山县	衡山县城乡生活垃圾收集、压缩、转运一体化建设 PPP 项目特许经营项目	城乡生活垃圾收集、压缩、转运一体化	25	739.76	18494.00
4	中南区域	湖南	祁阳县	祁阳县城乡环卫一体化 PPP 项目	城乡环卫一体化（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	30	6263.00	187890.00
5	中南区域	湖南	溆浦县	溆浦县城乡环卫一体化特许经营项目	城乡环卫一体化（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	30	2047.06	61411.80
6	中南区域	湖南	雨湖区	湘潭雨湖区环卫服务一体化项目	环卫服务一体化（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	3	2899.58	8698.75
7	中南区域	湖南	宜章县	宜章县生活垃圾收转运系统建设运营项目	生活垃圾收转运系统建设	25	1200.00	50000.00
8	中南区域	湖南	茶陵县	茶陵县农村生活垃圾收集转运项目特许经营项目	农村生活垃圾收集转运	30	486.90	14688.00
9	中南区域	湖南	攸县	攸县城乡生活垃圾收集转运系统项目	城乡生活垃圾收集转运	20	807.93	16158.55

10	中南区域	湖南	道县	道县城乡环境卫生设施一体化 PPP 项目	生活垃圾清运、道路清扫保洁	30	4043.27	121298.10
11	中南区域	湖南	永兴县	永兴县城乡生活垃圾收集转运系统 BOT 特许经营项目	城乡生活垃圾收集转运	30	1206.69	36200.70
12	中南区域	湖南	永定区	张家界永定区环卫服务政府采购项目	清扫保洁、垃圾收运	8	536.10	4288.80
13	中南区域	江西	南昌县	南昌县城市管理委员会环卫保洁、园林绿化管护市场化服务外包采购项目	环卫保洁、园林绿化管护	3	1235.69	2471.38
14	中南区域	江西	八一乡	南昌县八一乡环卫一体化服务外包采购项目	环卫一体化服务（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	3	1266.70	3800.10
15	中南区域	江西	南昌县	赣江昌南外滩公园（一期）及象湖片区东岳大道、东莲路、东祥路、等 15 条道路清扫保洁、园林绿化管护市场化服务外包项目	环卫保洁、园林绿化管护	3	1739.57	5218.70

启迪环境中南区域共有员工 1153 人，从表 3.2 可知，启迪环境中南区域从事环卫工作的人员大部分年龄偏高，学历较低，拥有专业技能的人员相对而言较少，一线作业人员占 86%以上，男性员工占比比较大，这与环卫工作大都与体力劳动为主相关，环卫工作人员整体素质偏低。工作年限在 0-2 两年占了 63%左右，人员变动较大。

表 3.2 中南区域人员情况表

学历	数量	百分比	工作年限	数量	百分比
硕士研究生以上学历	4	0.35%	1 以内年	262	22.72%
本科学历	27	2.34%	1-2 年	466	40.42%
大专学历	68	5.90%	2-3 年	235	20.38%
高中毕业	267	23.16%	3-5 年	116	10.06%
其他	787	68.26%	5 年以上	74	6.42%
合计	1153	100.00%	合计	1079	100.00%
年龄	数量	百分比	职位	数量	百分比
20-35 岁	134	11.62%	管理人员	156	13.53%
35-45 岁	274	23.76%	司机	118	10.23%

45-55 岁	492	42.67%	技术人员	34	2.95%
55 岁以上	253	21.94%	保洁员	845	73.29%
合计	1153	100.00%	合计	1153	100.00%
性别	数量	百分比	技术职称	数量	百分比
男	697	60.45%	有技术职称	140	12.14%
女	456	39.55%	无技术职称	1013	87.86%
合计	1153	100.00%	合计	1153	100.00%

为了更好地了解启迪环境中南区管理模式，本文在此提供了启迪环境中南区域组织架构图（图 3.1）。

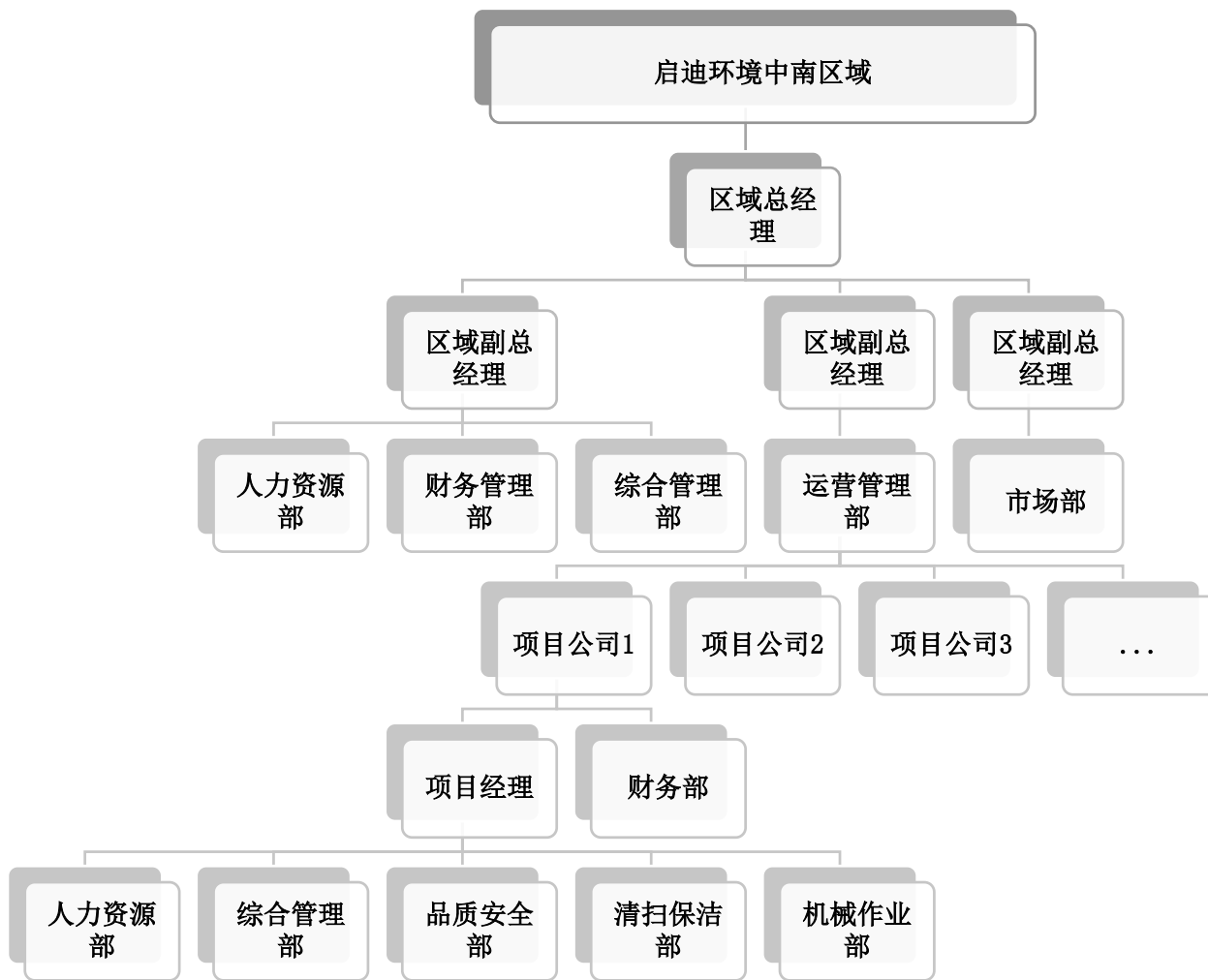


图 3.1 启迪环境中南区域组织架构图

3.2 启迪环境中南区域环卫运营现状

从 2021 年启迪环境的年度环卫运营情况汇总表（表 3.3）可知，启迪环境中南区域在 2021 年处于亏损状态。

表 3.3 启迪环境 2021 年度环卫运营情况汇总表

区域	分区域	2021 年运营情况
	华东区域	盈利
	西北区域	盈利
	陕西区	盈利
	南方区域	盈利
	西南区域	盈利
总部直管	保定善美	盈利
	浙江利珉	盈利
	重庆启迪	盈利
	成都行建	盈利
	其他	亏损
中部区域	河南	亏损
	山东	亏损
	中南区域	亏损
	北方区域	亏损

从启迪环境 2021 年环卫运营成本构成表（表 3.4）可知，启迪环境 2021 年环卫运营主要成本主要集中在人工成本（平均占收入比例 57.02%）和机械作业费用（平均占收入比例 23.90%）两方面，其中，启迪环境中南区域 2021 年人工成本占了中南区域收入的 57.32%，机械作业费用占了中南区域收入的 50.07%，导致 2021 年启迪环境中南区域整体上处于亏损状态。

表 3.4 启迪环境 2021 年环卫运营成本构成表

区域	分区域	人工成本占收入比例	机械作业费用占收入比例				物料费占收入比例	管理费占收入比例	招待费占收入比例
			折旧摊销占收入比例	油料费占收入比例	租赁费占收入比例	维修费占收入比例			
	北方区域	61.01%	15.89%	8.16%	6.59%	2.58%	2.60%	7.37%	0.40%

总部 直管	保定善 美	54.07%	6.50%	7.82%	2.97%	2.08%	1.75%	8.14%	0.84%
	浙江利 珉	62.78%	2.29%	5.60%	0.21%	2.40%	2.10%	7.88%	1.89%
	重庆	60.60%	6.45%	10.58%	1.25%	3.98%	0.83%	4.85%	0.19%
	四川	57.21%	5.82%	4.47%	5.01%	2.14%	1.94%	6.99%	1.46%
	其他	63.38%	15.92%	5.11%	2.95%	1.22%	3.02%	19.11%	1.22%
西南区域		58.94%	12.40%	9.32%	0.65%	1.91%	0.57%	5.51%	0.47%
西北区域		57.76%	9.16%	6.16%	1.71%	2.45%	2.02%	5.30%	0.62%
南方区域		56.77%	8.61%	8.75%	0.84%	2.35%	1.60%	3.77%	0.42%
中南区域		57.32%	29.49%	14.41%	2.36%	3.81%	1.24%	9.12%	0.84%
陕西区		52.77%	11.65%	7.92%	3.40%	1.60%	1.34%	10.23%	0.62%
华东区域		52.03%	7.85%	5.17%	1.62%	0.81%	0.94%	4.45%	0.40%
中部 区域	山东	56.76%	13.72%	8.64%	2.90%	1.68%	1.79%	10.12%	0.22%
	河南	46.83%	14.29%	5.79%	3.43%	1.69%	2.32%	6.58%	0.32%
平均占比（小 计）		57.02%	11.43%	7.71%	2.56%	2.19%	1.72%	7.82%	0.71%
平均占比（合 计）		57.02%	23.90%				1.72%	7.82%	0.71%

根据表 3.5《启迪环境中南区域 2021 年各类机械作业费用占总机械作业费用比例表》可知，垃圾收运、道路机扫、道路冲洗、道路洒水、道路机械巡回保洁作业费用占了总机械作业费用的 93.88%。环卫运营服务中垃圾收运费用与垃圾站点（或中转站）位置和运输路径直接相关，道路机扫、道路冲洗、道路洒水、道路机械巡回保洁作业等作业费用与作业路径直接相关。

表 3.5 启迪环境中南区域 2021 年各类机械作业费用占总机械作业费用比例表

机械作业种类	占总机械作业费用比例
垃圾收运	30.43%
道路机扫	25.52%
道路冲洗	14.25%
道路洒水	18.42%
道路机械巡回保洁	5.26%
中转站机械作业	4.37%
公厕机械作业	1.06%
其他机械作业	0.69%
合计	100.00%

3.3 针对启迪环境中南区域环卫运营出现亏损现象的调查

从启迪环境中南区域 2021 年环卫运营现状可知启迪环境中南区域环卫运营项目 2021 年总体上处于亏损状态，主要体现在人工成本和机械作业费用过高，环卫行业是劳动密集型行业，人工成本的高低直接反映在人员配置的数量及排班的合理性上，机械作业成本的高低与垃圾站点（中转站）位置布置和作业路线的规划有直接关系。

本文针对启迪环境中南区域环卫运营出现亏损的现象，在启迪环境中南区域正在运营的环卫项目中着重对各项目上的人员配置及排班、车辆作业路线规划和垃圾站点选址情况三个方面进行实地调研，试图找到环卫运营成本管理中存在的问题及产生问题的原因。

3.3.1 运营资料的收集

环卫运营主要包含人工清保洁、机械清扫保洁和垃圾收集运输，因此，本文对于运营数据的收集主要针对这三个方面进行。

（1）中南区域目前运营项目基本信息。包括所在市县、项目名称、服务内容、经营期、年合同额、总合同额等。

（2）收集各个项目人员信息数据。人员信息包括：性别、年龄、学历、工作年限、职位、技术职称等。

（3）人员作业安排信息收集。人员作业安排信息收集主要包括：路段（服务区域）名称、人员配置数量、每日人流量是否有较大变动、每日的不同时段人流量是否有较大变动、甲方或者合同是否有强制要求固定配置人员数量、人员数量配置是固定还是变动、工作量是否饱和、是否加班、每周休息几天、人员配置依据等。

（4）机械作业安排信息收集。车辆类型、用途、作业线路、作业路线规划依据等。

（5）中转站、垃圾站（箱）信息收集。因为中转站和垃圾站点（箱点）位置、垃圾容量直接关系到垃圾收运车的运输路径和运输距离，要有效规划垃圾收运路线，必须要有详细的垃圾中转站、垃圾站（箱）信息，信息主要包括：垃圾中转站或垃圾站（箱）位置、垃圾量、距离垃圾处理厂距离等。

（6）近 2 年的环卫运营数据收集。包含但不限于人工成本、机械作业成本等。

3.3.2 资料的整理与分析

通过对启迪环境中南区域正在运营项目的实地调研，收集到了大量的环卫运营数据和资料，数据、资料的整理与分析如下：

(1) 启迪环境中南区域目前正在运营项目情况

从表 3.6《启迪环境中南区域目前正在运营项目情况汇总表》可以看出，中南区域服务期 8 年以上的项目占了 73%，合同总金额达到 56.47 亿元，由此可见，本文对环卫运营成本的优化研究不仅是为解决当前环卫运营所面临的问题，更是为启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的长期有效实施提供优化思路。

在经营状况方面，从表 3.6 可知，2020 年至 2021 年启迪环境中南区域的环卫运营项目近一半处于亏损状态，而且处于亏损状态的项目大多数为服务期比较长的环卫项目，因此，启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化必须持续进行，形成企业与员工都受益的良性循环。

表 3.6 启迪环境中南区域目前正在运营项目情况汇总表

序号	区域	省份	区/县	项目名称	服务内容	经营期(年)	年合同额(万元)	总合同额(万元)	2020年经营状况	2021年经营状况
1	中南区域	湖南	新邵县	新邵县生活垃圾收集转运系统特许经营项目	12 座中转站生活垃圾收集转运	30	934.4	28032	盈利	盈利
2	中南区域	湖南	邵阳市区	邵阳经济开发区生活垃圾清运、道路清扫保洁等项目特许经营权出让项目	生活垃圾清运、道路清扫保洁	15	1791.26	26245.2	盈利	亏损
3	中南区域	湖南	衡山县	衡山县城乡生活垃圾收集、压缩、转运一体化建设 PPP 项目特许经营项目	城乡生活垃圾收集、压缩、转运一体化	25	739.76	18494	亏损	亏损
4	中南区域	湖南	祁阳县	祁阳县城乡环卫一体化 PPP 项目	城乡环卫一体化(清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运)	30	6263	187890	亏损	亏损

5	中南区域	湖南	溆浦县	溆浦县城乡环卫一体化特许经营项目	城乡环卫一体化（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	30	2047.06	61411.8	亏损	亏损
6	中南区域	湖南	雨湖区	湘潭雨湖区环卫服务一体化项目	环卫服务一体化（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	3	2899.58	8698.75	盈利	盈利
7	中南区域	湖南	宜章县	宜章县生活垃圾收转运系统建设运营项目	生活垃圾收转运系统建设	25	1200	50000	亏损	亏损
8	中南区域	湖南	茶陵县	茶陵县农村生活垃圾收集转运项目特许经营项目	农村生活垃圾收集转运	30	486.9	14688	亏损	亏损
9	中南区域	湖南	攸县	攸县城乡生活垃圾收集转运系统项目	城乡生活垃圾收集转运	20	807.93	16158.6	亏损	盈利
10	中南区域	湖南	道县	道县城乡环境卫生设施一体化 PPP 项目	生活垃圾清运、道路清扫保洁	30	4043.27	121298	盈利	亏损
11	中南区域	湖南	永兴县	永兴县城乡生活垃圾收集转运系统 BOT 特许经营项目	城乡生活垃圾收集转运	30	1206.69	36200.7	亏损	亏损
12	中南区域	湖南	永定区	张家界永定区环卫服务政府采购项目	清扫保洁、垃圾收运	8	536.1	4288.8	亏损	亏损
13	中南区域	江西	南昌县	南昌县城市管理委员会环卫保洁、园林绿化管护市场化服务外包采购项目	环卫保洁、园林绿化管护	3	1235.69	2471.38	盈利	盈利
14	中南区域	江西	八一乡	南昌县八一乡环卫一体化服务外包采购项目	环卫一体化服务（清扫保洁、垃圾收运、垃圾转运）	3	1266.7	3800.1	盈利	盈利

15	中南区域	江西	南昌县	赣江昌南外滩公园（一期）及象湖片区东岳大道、东莲路、东祥路、等 15 条道路清扫保洁、园林绿化管护市场化服务外包项目	环卫保洁、园林绿化管护	3	1739.57	5218.7	盈利	盈利
----	------	----	-----	------------------------------------------------------------	-------------	---	---------	--------	----	----

(2) 人员信息方面的整理。启迪环境中南区域共有员工 1153 人，从表 3.7 可知，启迪环境中南区域从事环卫工作的人员大部分年龄偏高，学历较低，拥有专业技能的人员相对而言较少，一线作业人员占 86%以上，男性员工占比比较大，这与环卫工作大都与体力劳动为主相关，环卫工作人员整体素质偏低。工作年限在 0-2 两年占了 63%左右，人员变动较大。

表 3.7 启迪环境中南区域人员信息情况分析表

学历	数量	百分比	工作年限	数量	百分比
硕士研究生以上学历	4	0.35%	1 以内年	262	22.72%
本科学历	27	2.34%	1-2 年	466	40.42%
大专学历	68	5.90%	2-3 年	235	20.38%
高中毕业	267	23.16%	3-5 年	116	10.06%
其他	787	68.26%	5 年以上	74	6.42%
合计	1153	100.00%	合计	1079	100.00%
年龄	数量	百分比	职位	数量	百分比
20-35 岁	134	11.62%	管理人员	156	13.53%
35-45 岁	274	23.76%	司机	118	10.23%
45-55 岁	492	42.67%	技术人员	34	2.95%
55 岁以上	253	21.94%	保洁员	845	73.29%
合计	1153	100.00%	合计	1153	100.00%
性别	数量	百分比	技术职称	数量	百分比
男	697	60.45%	有技术职称	140	12.14%
女	456	39.55%	无技术职称	1013	87.86%
合计	1153	100.00%	合计	1153	100.00%

(3) 通过对各项目路段（服务）信息及人员作业安排信息的整理得知，各项目均有 12%-28%左右的路段（服务区）每日人流量有较大变动，各项目有 17%-36%左右的路段（服

务区)每日的不同时段人流量有较大的变化,93%以上路段(服务区)甲方或者合同没有强制要求固定配置人员数量,只要卫生质量达标,环卫服务公司可以根据自身实际运营情况适当增减作业人员。据统计,目前95%以上的路段(服务区)人员数量的配置是固定不变的,保洁员经常加班,96%的保洁员周末没有休息时间(公司给加班费),路段(服务区)人员配置的依据80%以上是按照甲方及合同要求配置,20%左右是项目经理根据自己的工作经验对人员进行配置和排班。通过实地调研得知,启迪环境中南区域所有的环卫项目都进行过裁员,裁减对象主要是保洁员和司机,据悉,这是中南区域公司对项目上的硬性要求,每年都有裁员指标,并将其列入到项目经理的绩效考核当中,以期通过裁员的方式来降低环卫运营人工成本。

(4)通过对机械作业安排信息整理可知,项目上主要的作业车辆类型有洗扫车(冲洗并清扫路面)、洒水车(路面洒水)、冲洗车(高压冲洗路面)、机扫车(清扫路面)、路面养护车(辅道和人行道冲洗)、护栏清洗车(道路护栏清洗)、垃圾收运车(垃圾收运)、勾臂车(专门用来运输垃圾箱)、电动保洁车(保洁员用来进行快速保洁及垃圾收运)、炮雾车(用来降尘),其中,洗扫车(冲洗并清扫路面)、洒水车(路面洒水)、冲洗车(高压冲洗路面)、机扫车(清扫路面)作业线路基本相同,路面养护车(辅道和人行道冲洗)、护栏清洗车(道路护栏清洗)、垃圾收运车(垃圾收运)、勾臂车(专门用来运输垃圾箱)、电动保洁车(保洁员用来进行快速保洁及垃圾收运)、炮雾车(用来降尘)根据具体作业需要选择相应的作业路线。

(5)通过垃圾站(箱)信息整理可知,垃圾箱分为带压缩功能和不带压缩功能两种,装载垃圾的容量为1吨至10吨,它的布局灵活性很强,可以根据周边的垃圾量及相关要求灵活布置相应的垃圾箱,而且摆放地址也相对容易选择,只要不影响交通,不影响附近居民的出行和生活都可以摆放,运输也方便,使用与箱体相对应的勾臂车直接将垃圾箱拖走,并放置一个空的垃圾箱(勾臂车在来运输此垃圾箱时,勾臂车上会带一个空的垃圾箱)在原来位置,继续进行垃圾收集。垃圾箱中的垃圾可以运到中转站进行倾倒(转运模式),也可以直接运到垃圾处理场进行处理(直运模式),垃圾箱的主要作用就是相对集中地收集周边的垃圾,减少垃圾车的巡回垃圾收集,降低垃圾收运成本。

(6)在人员成本方面,2020年至2021年中南区域各岗位的人员数量都在一定程度上进行了减少,特别是保洁员和司机减员相对比较多,而从2020年至2021年的人工成本却在增加,增幅约为5.3%左右。

(7) 在机械作业成本方面, 2020 年至 2021 年启迪环境中南区域大部分车辆都在一定程度上进行了减少, 特别是电动保洁车、路面养护车和勾臂车, 相对减少比较多, 而 2020 年至 2021 年的机械作业成本却在增加, 增幅约为 3% 左右。

(8) 在垃圾箱投入方面, 垃圾箱的主要作用就是相对集中地收集周边的垃圾, 减少垃圾车的巡回垃圾收集, 降低垃圾收运成本。2020 年至 2021 年中南区域垃圾箱投入数量从 756 个增加到了 945 个, 在垃圾运输总量相对持恒的情况下, 2020 年至 2021 年中南区域垃圾收运成本并没有相应降低, 反而在增长。

(9) 启迪环境中南区域 2021 年环卫运营成本总体情况

启迪环境环卫运营成本主要体现在人工成本(平均占总收入的 57.02%)和机械费用成本(平均占总收入的 23.9%)上, 而启迪环境中南区域的机械费用成本占了该区域总收入比例的 50.07%, 远远超过了启迪环境全国所有环卫项目机械费用成本的平均值(23.9%), 在人工成本方面, 启迪环境中南区域也超过了启迪环境全国所有环卫项目的人工成本平均值。

3.4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面存在的主要问题

通过对启迪环境中南区域正在运营环卫项目的实地调查, 通过相关数据的收集、整理和分析, 发现了启迪环境中南区域在环卫运营成本管理方面存在如下几个问题。

3.4.1 人工成本偏高

从启迪环境 2021 年环卫运营成本统计表(表 3.8), 启迪环境中南区域人工成本占了本区域总收入的 57.32%, 超过了启迪环境全国所有环卫项目的人工成本平均值 57.02%(表 3.8)。

表 3.8 启迪环境 2021 年环卫运营成本统计表

区域	分区域	人工成本占总收入比例	折旧摊销占总收入比例	油料费占总收入比例	租赁费占总收入比例	维修费占总收入比例	物料费占总收入比例	管理费占总收入比例	招待费占总收入比例
北方区域		61.01%	15.89%	8.16%	6.59%	2.58%	2.60%	7.37%	0.40%
总部直管	保定善美	54.07%	6.50%	7.82%	2.97%	2.08%	1.75%	8.14%	0.84%
	浙江利珉	62.78%	2.29%	5.60%	0.21%	2.40%	2.10%	7.88%	1.89%

	重庆	60.60%	6.45%	10.58%	1.25%	3.98%	0.83%	4.85%	0.19%
	四川	57.21%	5.82%	4.47%	5.01%	2.14%	1.94%	6.99%	1.46%
	其他	63.38%	15.92%	5.11%	2.95%	1.22%	3.02%	19.11%	1.22%
西南区域		58.94%	12.40%	9.32%	0.65%	1.91%	0.57%	5.51%	0.47%
西北区域		57.76%	9.16%	6.16%	1.71%	2.45%	2.02%	5.30%	0.62%
南方区域		56.77%	8.61%	8.75%	0.84%	2.35%	1.60%	3.77%	0.42%
中南区域		57.32%	29.49%	14.41%	2.36%	3.81%	1.24%	9.12%	0.84%
陕西区		52.77%	11.65%	7.92%	3.40%	1.60%	1.34%	10.23%	0.62%
华东区域		52.03%	7.85%	5.17%	1.62%	0.81%	0.94%	4.45%	0.40%
中部区域	山东	56.76%	13.72%	8.64%	2.90%	1.68%	1.79%	10.12%	0.22%
	河南	46.83%	14.29%	5.79%	3.43%	1.69%	2.32%	6.58%	0.32%
平均占比		57.02%	11.43%	7.71%	2.56%	2.19%	1.72%	7.82%	0.71%

由图 3.2 可知，2020 年至 2021 年中南区域各岗位的人员数量都在一定程度上进行了减少，特别是保洁员和司机减员相对比较多，而从图 3.3 可以看到，2020 年至 2021 年的人工成本却在增加，增幅约为 5.3% 左右。

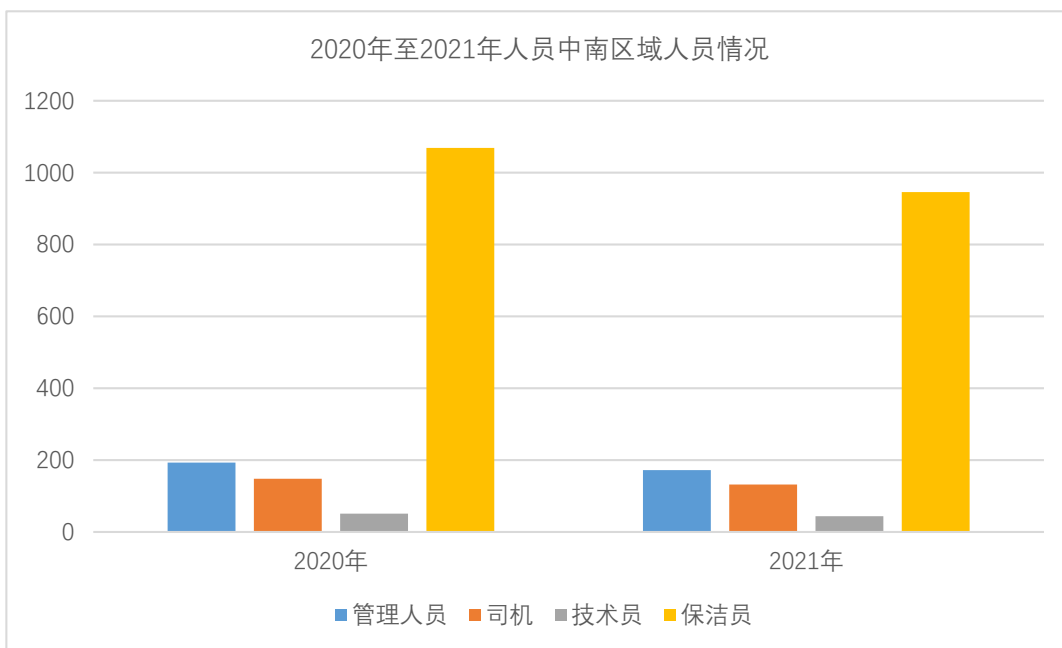


图 3.2 2020 年至 2021 年人员中南区域人员情况

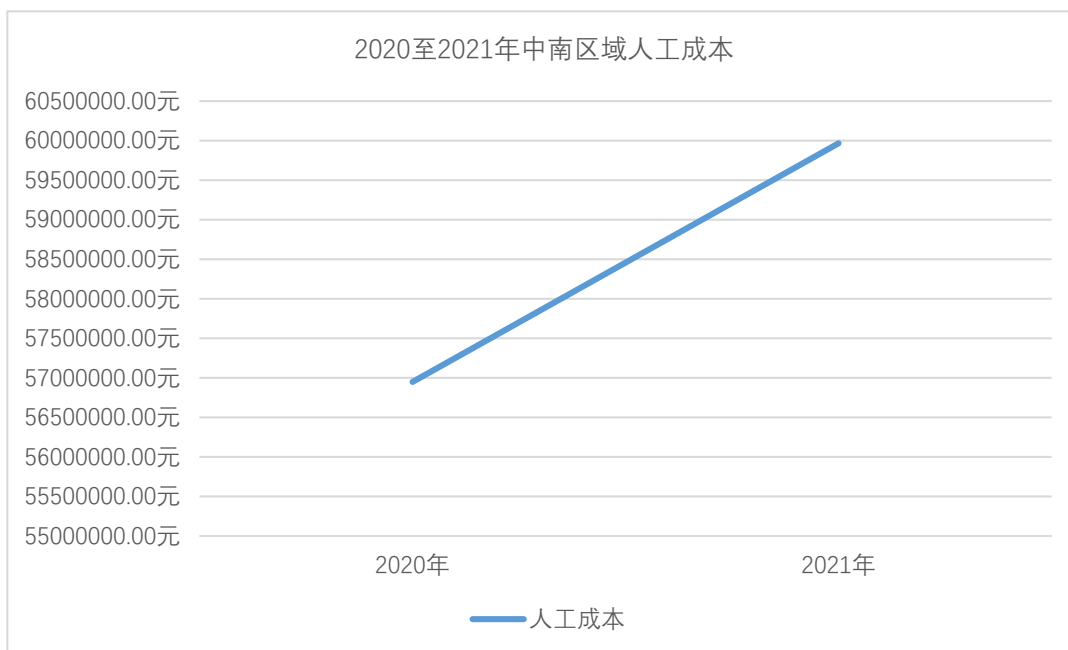


图 3.3 2020 至 2021 年中南区域人工成本

3.4.2 机械作业成本太高

从启迪环境 2021 车辆机械作业费用占比表（表 3.9）可知，启迪环境中南区域的机械费用成本占了本区域总收入的 50.07%，远远超过了启迪环境全国所有环卫项目的机械作业费用平均值（23.9%），在启迪环境中南区域的机械费作业费用中折旧费、油料费和维修费整体偏高。

表 3.9 启迪环境 2021 车辆机械作业费用占比表

区域	分区域	折旧摊销 占总收入 比例	油料费占 总收入比 例	租赁费占 总收入比 例	维修费占 总收入比 例	车辆机械费 用占总收入 比例
北方区域		15.89%	8.16%	6.59%	2.58%	33.22%
总部直管	保定善美	6.50%	7.82%	2.97%	2.08%	19.37%
	浙江利珉	2.29%	5.60%	0.21%	2.40%	10.50%
	重庆	6.45%	10.58%	1.25%	3.98%	22.26%
	四川	5.82%	4.47%	5.01%	2.14%	17.44%
	其他	15.92%	5.11%	2.95%	1.22%	25.20%
西南区域		12.40%	9.32%	0.65%	1.91%	24.28%
西北区域		9.16%	6.16%	1.71%	2.45%	19.48%
南方区域		8.61%	8.75%	0.84%	2.35%	20.55%
中南区域		29.49%	14.41%	2.36%	3.81%	50.07%

陕西区		11.65%	7.92%	3.40%	1.60%	24.57%
华东区域		7.85%	5.17%	1.62%	0.81%	15.45%
中部区域	山东	13.72%	8.64%	2.90%	1.68%	26.94%
	河南	14.29%	5.79%	3.43%	1.69%	25.20%
平均占比		11.43%	7.71%	2.56%	2.19%	23.90%

由图 3.4 可知，2020 年至 2021 年启迪环境中南区域大部分车辆都在一定程度上进行了减少，特别是电动保洁车、路面养护车和勾臂车，相对减少比较多，而从图 3.5 可以看到，2020 年至 2021 年的机械作业成本却在增加，增幅约为 3%左右。

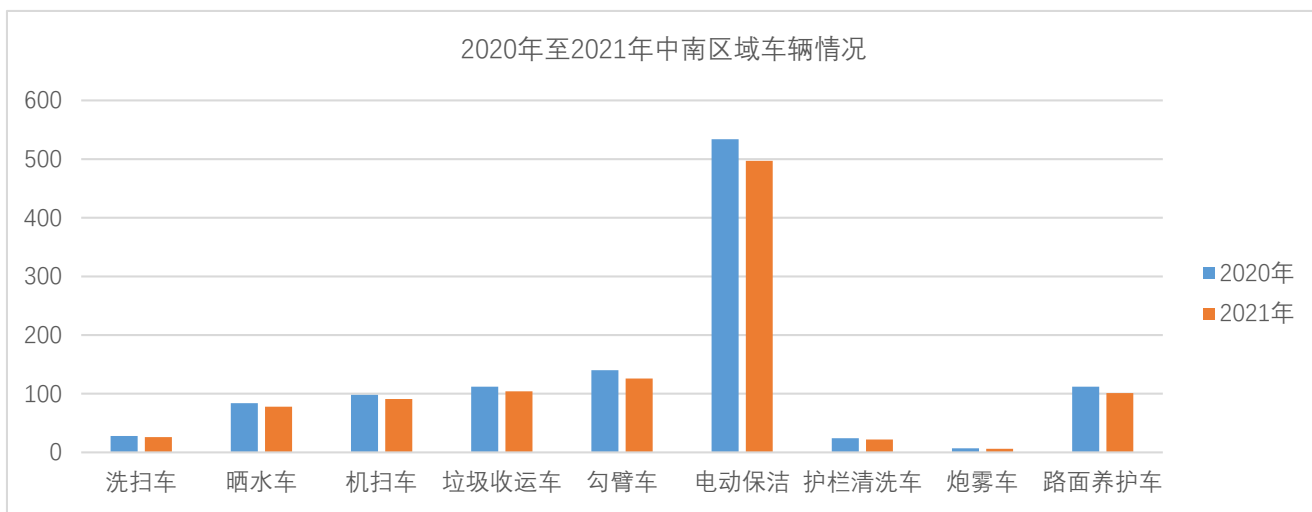


图 3.4 2020 年至 2021 年中南区域车辆情况

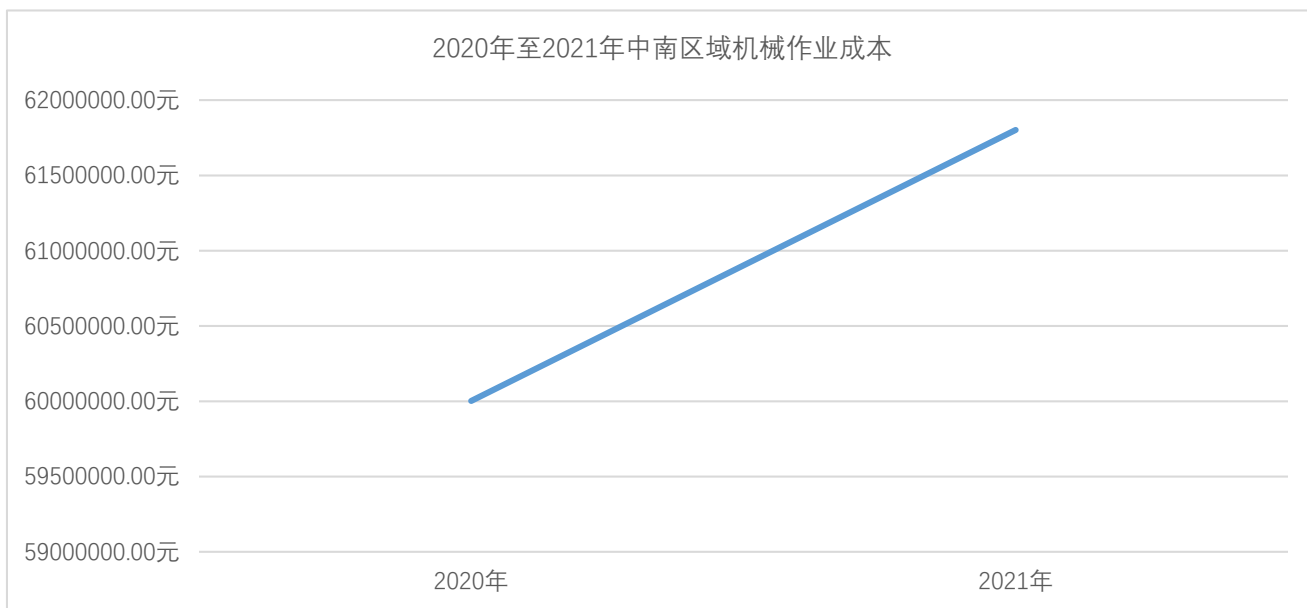


图 3.5 2020 年至 2021 年中南区域机械作业成本

3.4.3 垃圾箱的投入并未起到降低垃圾收运成本的效果

垃圾箱的主要作用就是相对集中地收集周边的垃圾，减少垃圾车的巡回垃圾收集，降低垃圾收运成本。从图 3.6 可知，2020 年至 2021 年中南区域垃圾箱投入数量从 750 多个增加到了近 950 个，在实地调研中得知 2020 年至 2021 年中南区域垃圾运输总量相对持恒，而图 3.7 则表明 2020 年至 2021 年中南区域垃圾收运成本并没有相应降低，反而在增长。

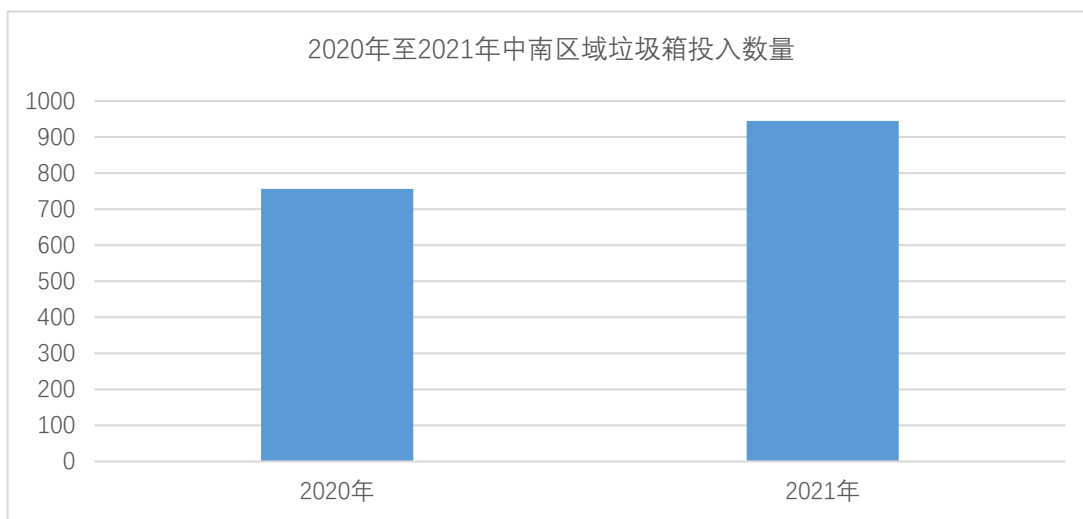


图 3.6 2020 年至 2021 年中南区域垃圾箱投入数量图

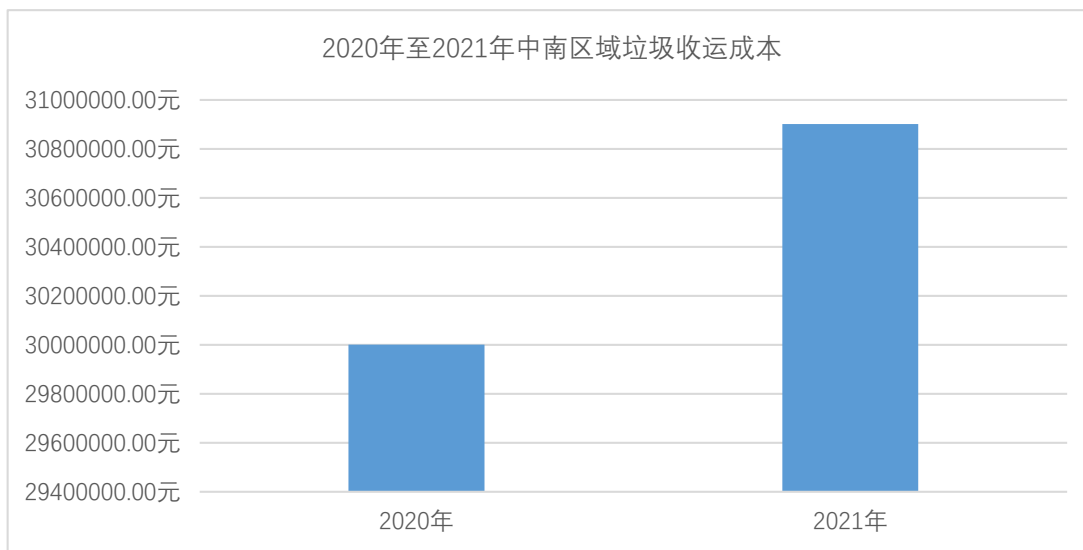


图 3.7 2020 年至 2021 年中南区域垃圾收运成本图

3.5 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面存在问题的原因调查

本文在启迪环境中南区域环卫运营出现亏损现象的调查发现了环卫运营成本管理方面三个问题：①人工成本偏高；②机械作业成本太高；③垃圾箱的投入并未起到降低垃圾收运成本的效果。为了找到以上问题出现的原因，本文在启迪环境中南区域进行了一次访谈调查。

3.5.1 访谈提纲的设计

为了使访谈更具有操作性，本文按岗位类别（①项目经理、项目运营主管、②司机、③保洁员）分别设计了访谈提纲，使访谈得到信息更可靠、更具有可借鉴性。（具体访谈提纲内容详见《附录》）

3.5.2 访谈人员的确定

本次访谈为了涵盖所有岗位层级信息来源，本次访谈对象的选取包含了项目经理、项目运营主管、司机、保洁员五个层级，为了使本次访谈更具有操作性和有效控制访谈成本，本次访谈的环卫项目数量占中南区域环卫运营项目总数量的 1/3，即从中南区域正在运营的 15 个项目中选择 5 个项目，然后在选中的项目中，分别选项目经理 1 名、项目运营主管 1 名、司机 1 名、保洁员 1 名，在同一个岗位级别中，选取访谈对象的时候在性别上力求做到性别比例均衡，由于中南区域环卫项目经理和司机这两个岗位没有女员工，这个两个层级的访谈对象均选择了男性员工，具体访谈对象情况如下：

表 3.10 启迪环境中南区域访谈对象情况表

职位	性别	平均年龄	在启迪平均工作年限	数量
项目经理	男	45	4	5
	女	/	/	0
项目运营主管	男	42	3	3
	女	41	4	2
司机	男	36	3	5
	女	/	/	0
保洁员	男	56	4	3
	女	52	3	2
合计				20

3.5.3 访谈方案的实施

本次访谈工作在实地调研中进行，共进行了 5 次访谈（每个项目一次），为了不影晌访谈对象的正常工作，本次访谈时间均在工作休息时间进行，访谈地点为项目部会议室，采用一对一的沟通方式进行访谈，并对访谈对象对访谈提纲所表达的观点和感受进行逐一记录。

3.5.4 访谈结果的整理

访谈结束后，本文对访谈内容进行了整理与分析，具体如下：

（1）对于人员配置标准，访谈对象普遍承认公司有人员配置标准，但是都是参照国家的通用标准，跟项目上的实际情况不符合，如果按照公司的标准配置人员，要远远超过目前项目上所配置的人员数量，公司审核肯定通不过，所以，项目上的人员配置基本上都是按照合同或者甲方要求再结合项目经理的工作经验进行配置，人员配置完毕之后，每个服务区（路段）的保洁员数量基本上是固定（每天和每个时段都是固定人数）的，据反映是便于管理，如果遇到迎检、创卫等突击检查，再统一进行调整安排。

从该问题的访谈分析可知：

固化的人员配置方法无法灵活地根据各路段的实际情况合理的精简作业人员，在遇到迎检、突击检查和突发事件时，也无法灵活地进行人员调配，只能通过增加机动应急队伍或者聘请临时工来解决问题，导致人员数量配置偏高，人工成本居高不下。固化的人员配置通常会出现非饱和和工作量下加班的情况，更是隐性地增加了人工成本。

由于公司缺乏科学的人员配置方法，项目运营管理者因自身素质原因无法根据项目路段每天或者每个时段工作量的变动而科学地配置作业人员，导致人员数量配置偏高，非饱和和工作量下加班的情况出现，增加了人工成本。

同时，因为项目管理者之间工作经验和自身素质差异，有的项目运营管理者的人员配置相对合理（接近最优），有的项目运营管理者的人员配置严重超标，给启迪环境中南区域管理者造成了中南区域环卫项目人员配置总体超标的误判，从而出现了一刀切的减员政策，盲目减员导致加班费和临时工费增加，人工成本不降反升。

（2）当问到项目上人员配置是否合适及减员问题时，项目经理、运营主管都认为在公司不断要求减员的情况下，项目上的人员配置明显不足，工作安排捉襟见肘，特别是甲方有重大活动或者检查的时候，项目经理、运营主管都在为人员调动疲于奔命，拆

东墙补西墙，人员不足的情况下，迫于甲方压力，还要聘用大量临时工进行协助完成保洁任务，项目经理、运营主管普遍觉得公司不应该盲目地减员，要考虑项目上的实际工作量，若服务质量不达标，就会被甲方罚款，而环境卫生罚款金额往往比较大（按服务费的百分比进行罚款），得不偿失。

面对同样的问题，司机和保洁员则认为公司安排的工作量太大，基本上没有休息的时间，个人有私事处理只能找人换班，虽然公司给了加班费，但是他们认为公司还是要给予他们相应的休息时间，否则长期处于高强度、高压力的工作环境之下很容易使员工出现负面情绪，甚至造成员工离职。

从该问题的访谈分析可知：

启迪环境中南区域没有充分利用随着人流量的变动（工作量变动）而变动调整上岗人数的人员配置方法，而是一味盲目地要求项目上进行减员，并将减员任务的完成度计入到项目经理的绩效考核当中，与项目经理的工资直接挂钩。通过强制减员人虽然减少了，但是工作量并没有减少，特别是在疫情影响下，社会对环境卫生质量要求普遍提高，政府也加强了对环卫服务质量的考核力度，由于环卫服务质量的判断具有即时性，服务质量的好坏肉眼即可辨别，所以要想达到甲方的质量要求，就必须完成相应的工作量，人手不够的情况下，只能给加班费让现有保洁员加班或者请临时工帮忙，避免甲方罚款，大量加班费和聘请临时工的费用是导致人工成本上升的直接原因，再加上由于减员增加了现有员工的工作量，长时间无休息的高强度工作，导致了部分员工离职，间接性地增加了人力资源成本。

（3）当问到甲方如何看待公司不断减员时，访谈对象普遍认为甲方虽然在合同中明确了人员配置数量，同时甲方也允许乙方采用先进的机械设备代替保洁员，或者采用科学的管理方法适当减少人员配置数量，甲方关注更多的是服务质量，如果服务质量达标，甲方不会太关注公司的减员政策，如果服务质量不达标，甲方就会以此为理由，加大惩罚力度。

从该问题的访谈分析可知：

在环卫项目服务中，甲方更多关注的是环卫服务质量，合同规定的人员配置数量只是一个参考数值，在服务质量得到保障的情况下，服务商完全可以根据自己实际运营情况，通过提高人机结合作业效率和根据路段情况合理排班来精简人员，实现降低人工成本的目的。

(4) 对于保洁员数量是否跟环卫服务质量直接相关这个问题, 访谈对象都认为有直接关系, 因为环卫行业是劳动密集型行业, 目前很多环卫服务地段(服务区)机械设备是无法作业的, 还得靠人工去保洁, 如果保洁人员数量不足, 就会导致出现卫生死角, 环境卫生的服务质量肉眼就可以判断, 可以说环卫行业的服务质量验收是即时性, 立竿见影, 因此, 保洁人员是否足额配置和服务质量有很大关系。

从该问题的访谈分析可知:

目前而言, 我国环卫行业是劳动密集型行业, 主要的工作还是需要人工去完成, 人员数量与环卫服务质量具有直接的关系, 在服务工作量一定的情况下, 如果人员配置不足, 将会直接导致服务质量下降。

(5) 当问到公司减员了, 人工成本为何增加时, 访谈对象都提到了加班工资和临时工, 人虽然减少了, 但是工作量并没有减少, 特别是在疫情影响下, 社会对环境卫生质量要求普遍提高, 政府也加强了对环卫服务质量的考核力度, 由于环卫服务质量的判断具有即时性, 服务质量的好坏肉眼即可辨别, 所以要想达到甲方的质量要求, 就必须完成相应的工作量, 人手不够的情况下, 只能给加班费或者请临时工, 否则甲方就会罚款。对此, 项目经理也表示很无奈, 不执行公司的减员政策, 他们要被公司处罚, 如果项目上因质量问题被甲方罚款了, 他们也要被公司处罚, 为了既执行公司政策又不被甲方罚款, 只能给保洁员加班费和请临时工救场了。

从该问题的访谈分析可知:

启迪环境中南区域一刀切式的盲目减员, 虽然人减少了, 但是工作量并没有减少, 特别是在疫情影响下, 社会对环境卫生质量要求普遍提高, 政府也对环卫服务质量更加重视, 要在人手不够的情况下完成相应的工作量, 只能给加班费让现有保洁员加班或者请临时工帮忙, 大量加班费和聘请临时工的费用是导致人工成本上升的直接原因。

(6) 对于作业路线, 访谈者都说没有看到过公司的路线规划指导手册, 项目上的作业路线都是项目上根据具体的服务需求, 结合车辆自身情况和具体的路况规划相应路线, 更多的是凭借项目经理、车队长或者司机的工作经验进行路线规划, 虽然有借用 GPS 导航进行路线规划, 但是导航提供的作业线路, 并未考虑到机械作业的其他因素, 仅能作为一种参考, 作业路线的优良无法考量。

从该问题的访谈分析可知:

启迪环境中南区域没有作业路线规划指导手册, 项目运营管理者按照自身工作经验所规划的作业路线所考虑的因素不够全面, 未能从整体上做出最优车辆作业路线规划,

而车辆作业路线的优劣直接决定了车辆作业成本（车辆油耗、车辆损耗、路费等）的高低，因每天有多辆车、多趟次按照作业路线反复运行，不合理的车辆作业路线规划将大大增加车辆作业成本。

（7）当问到机械作业成本时，访谈者提到的都是如何加强监控，防止公车私用，防止司机拉私活，防止项目上的人偷油，防止油卡私用，严查违规维修，严查在车上开空调睡觉，规范行驶等，与公司采取的管理措施如出一辙，并没有突破性的降低成本的建议。对于减少车辆设备或者不买新设备，租用旧设备为何没有降低机械作业成本这个问题，访谈者普遍认为跟减员现象很像，设备减少了，工作量没减少，在服务质量要求没降低的情况下，只是用更少的设备做更多的工作量，随之而来的是人员和车辆设备的超负荷工作，人员加班费、机械维修费、油耗等都上来了，老旧设备的租用，虽然看起来比新设备划算，但是老旧设备作业效率低，而且维修费高，油耗也比新设备高，而且机械设备的减少，意味着机械作业率下降，在服务质量不变的情况下，人工作业率就得增加，这就意味着人工成本会随之增加。

从该问题的访谈分析可知：

对于车辆机械成本的控制，目前启迪环境中南区域依然处于“节流”状态，还没有跳出对作业车辆加强监控和管理的固定思维，并没有过多关注车辆作业路线规划是否科学合理，忽略了不合理的车辆作业路线规划将大大增加车辆作业成本这个因素。只有将加强对作业车辆监控和管理的“节流”和科学合理规划车辆作业路线的“开源”相结合，才能有效降低车辆机械作业成本。

启迪环境中南区域想通过减少车辆设备或者不买新设备，租用旧设备来降低机械作业成本，但还是忽略了设备减少了，工作量并没有减少，在服务质量要求没降低的情况下，人员和车辆设备的超负荷工作反而使车辆作业成本和人工成本增加了。

（8）对于垃圾箱（点、桶）布置的问题，访谈者都说公司没有相应的布置标准，都是项目上根据服务区（路段）的垃圾量自行布置，然后在运营中根据实际情况在做适当增减调整，有些垃圾站点是为了应急突发事件或其他原因，临时增加了垃圾站点，事件处理完毕后，相应的垃圾站点却没有撤除，成了固定的垃圾站点，这也许是导致垃圾箱投入逐渐增多的原因，虽然垃圾箱在逐渐投入，但是还是有垃圾清运不及时被甲方罚款的现象。

从该问题的访谈分析可知：

启迪环境中南区域环卫项目上垃圾箱的放置过于随意，要么过于密集，浪费资源，增加成本。要么过于稀疏不能有效覆盖垃圾收集范围，使得垃圾收运成本增加，甚至因垃圾清理不及时而导致罚款。垃圾箱的投入和摆放缺乏科学合理的整体规划，直接或间接地造成了垃圾收运成本的增加。

(9) 当问到工作经验分享时，访谈者都表示愿意分享自己的工作经验，都提到了在周例会、月度会议、季度会议和年度会议上都有机会分享自己的工作经验和想法，也都认为在分享自己工作经验的同时也能从别人那里学到知识和经验。

在提到对环卫运营的建议的时候，访谈者都觉得自己所从事的工作还可以改进，但是基于自己能力的原因，又不知道如何更有效地改进，只能凭借自己的工作经验或者公司的管理规定去做。

从该问题的访谈分析可知：

启迪环境中南区域的员工都愿意分享自己的工作经验，公司也有一定的分享平台，但是公司的分享平台和分享渠道并不完善，再加上环卫工人的整体素质偏低，不能科学有效地总结出自己的工作经验，无法为公司提出具有建设性的建议，导致工作经验的分享和推广受阻。由此可见，如何完善分享、沟通渠道，加强员工培训，提高员工整体素质是启迪环境中南区域需要着重考虑的问题。

(10) 对于公司是否有专门的部门或者岗位来收集、整理、推广工作经验或者管理方法，访谈者普遍认为没有，但公司会不定期召集公司管理层进行集中培训和经验分享。

从该问题的访谈分析可知：

为了在环卫运营管理中更好地收集、整理、推广工作经验或者管理方法，启迪环境中南区域在调整组织结构、完善管理制度、构建信息收集和反馈渠道方面需要不断跟进。

3.6 启迪环境中南区域环卫运营成本管理方面出现问题的原因

本文通过在实地调研中的 5 次访谈（共访谈了 20 个对象，包含了项目经理、项目运营主管、司机、保洁员五个层级），并对访谈内容进行了整理与分析，最终找到了环卫运营成本管理中出现问题的原因，具体如下：

3.6.1 人员配置固化缺乏灵活性

由于启迪环境中南区域的人员配置标准跟项目上的实际情况不符合，项目上的人员配置基本上都是按照合同或者甲方要求再结合项目经理的工作经验进行配置，人员配置完毕之后，每个服务区（路段）的保洁员数量基本上都是固定（每天和每个时段都是固定人数）的，这使得人员配置的灵活性很差，会经常出现非饱和和工作量下加班的情况。

固化的人员配置方法无法灵活地根据各路段的实际情况合理的精简作业人员，在遇到迎检、突击检查和突发事件时，也无法灵活地进行人员调配，只能通过增加机动应急队伍或者聘请临时工来解决问题，导致人员数量配置偏高，人工成本居高不下。固化的人员配置通常会出现非饱和和工作量下加班的情况，更是隐性地增加了人工成本。如某个服务区的保洁时间是 8:00-20:00,法定工作时间是 8 小时,16:00-20:00 属于加班时段，而 16:00-20:00 这个时段的保洁工作量并不大，由于人员配置固化，该时段所配置的保洁员工作量并不饱和，但是全员都在加班，隐性地增加了人工成本。

3.6.2 人员配置过于依赖个人经验缺乏科学方法

各项目均有 12%-28%左右的路段（服务区）每日人流量有较大变动，有 17%-36%左右的路段（服务区）每日的不同时段人流量有较大的变化，93%以上路段（服务区）甲方或者合同没有强制要求固定配置人员数量。对人流量变动的路段（服务区）完全可以采用灵活的错位排班法来使得保洁员的工作达到 100%的饱和，避免非饱和和工作量下加班的情况出现，但无奈项目运营管理者因自身能力原因无法做到人员配置的进一步优化，再加上公司没有专门的部门或者岗位去研究和推广人员优化配置，只是给一个通用版的人员配置标准，项目运营管理者只能按照自身工作经验和规定配置人员。

由于公司缺乏科学的人员配置方法，项目运营管理者因自身素质原因无法根据项目路段每天或者每个时段工作量的变动而科学地配置作业人员，导致人员数量配置偏高，非饱和和工作量下加班的情况出现，增加了人工成本。

同时，因为项目管理者之间工作经验和自身素质差异，有的项目运营管理者的人员配置相对合理（接近最优），有的项目运营管理者的人员配置严重超标，给启迪环境中南区域管理者造成了中南区域环卫项目人员配置总体超标的误判，从而出现了一刀切的减员政策，盲目减员导致加班费和临时工费增加，人工成本不降反升。

3.6.3 总工作量不变的盲目减员导致加班费和临时工费增加

启迪环境中南区域没有充分利用随着人流量的变动（工作量变动）而变动调整上岗人数的人员配置方法，而是一味盲目地要求项目上进行减员，并将减员任务的完成度计入到项目经理的绩效考核当中，与项目经理的工资直接挂钩。通过强制减员人虽然减少了，但是工作量并没有减少，特别是在疫情影响下，社会对环境卫生质量要求普遍提高，政府也加强了对环卫服务质量的考核力度，由于环卫服务质量的判断具有即时性，服务质量的好坏肉眼即可辨别，所以要想达到甲方的质量要求，就必须完成相应的工作量，人手不够的情况下，只能给加班费让现有保洁员加班或者请临时工帮忙，避免甲方罚款，大量加班费和聘请临时工的费用是导致人工成本上升的直接原因，再加上由于减员增加了现有员工的工作量，长时间无休息的高强度工作，导致了部分员工离职，间接性地增加了人力资源成本。

3.6.4 作业路线规划凭个人经验缺乏科学方法

启迪环境中南区域没有作业路线规划指导手册，项目上的作业路线都是项目上根据具体的服务需求，结合车辆自身情况和具体的路况规划相应路线，更多的是凭借项目经理、车队长或者司机的工作经验进行路线规划，虽然有借用 GPS 导航进行路线规划，但是导航提供的作业线路，并未考虑到车辆作业的其他因素，仅能作为一种参考。由于项目运营管理者因自身能力原因无法做到作业路线的进一步优化，再加上公司没有专门的部门或者岗位去研究和推广作业路线优化，项目运营管理者按照自身工作经验所规划的作业路线所考虑的因素不够全面，未能从整体上做出最优车辆作业路线规划。

车辆作业路线的优劣直接决定了车辆作业成本（车辆油耗、车辆损耗、路费等）的高低，因每天有多辆车、多趟次按照作业路线反复运行，不合理的车辆作业路线规划将大大增加车辆作业成本。

3.6.5 目前机械成本的控制方法并没有实质性地减少机械作业成本

对于车辆机械作业成本，启迪环境中南区域更多的是加强对作业车辆的监控，防止公车私用，防止司机拉私活，防止项目上的人偷油，防止油卡私用，严查违规维修，严查在车上开空调睡觉，要求规范行驶等，这些措施只能是将机械作业成本维持在正常情

况下机械作业所产生的作业成本范围内，并没有实质性、突破性地减少车辆机械作业成本。

对于车辆机械成本的控制，目前启迪环境中南区域依然处于“节流”状态，还没有跳出对作业车辆加强监控和管理的固定思维，并没有过多关注车辆作业路线规划是否科学合理，忽略了不合理的车辆作业路线规划将大大增加车辆作业成本这个因素。只有将加强对作业车辆监控和管理的“节流”和科学合理规划车辆作业路线的“开源”相结合，才能有效降低车辆机械作业成本。

3.6.6 总工作量不变的盲目机械设备减配导致其他成本增加

启迪环境中南区域想通过减少车辆设备或者不买新设备，租用旧设备来降低机械作业成本，但还是忽略了设备减少了，工作量并没有减少，在服务质量要求没降低的情况下，只是用更少的设备做更多的工作量，随之而来的是人员和车辆设备的超负荷工作，人员加班费、机械维修费、油耗费等费用的增加，老旧设备的租用，虽然看起来比新设备划算，但是老旧设备作业效率低，而且维修费高，油耗也比新设备高，而且机械设备的减少，意味着机械作业率下降，在服务质量不变的情况下，人工作业率就得增加，这就意味着人工成本会随之增加。

3.6.7 垃圾箱的摆放缺乏科学合理的布置

对于垃圾箱的布置启迪环境中南区域并没有相应的布置标准，都是项目上根据服务区（路段）的垃圾量自行布置，然后在运营中根据实际情况在做适当增减调整，没有做科学合理的整体规划，有些垃圾站箱是为了应急突发事件或其他原因，临时增加了垃圾箱站点，事件处理完毕后，相应的垃圾箱站点却没有撤除，成了固定的垃圾箱站点，导致该区域垃圾箱的布置过于密集（浪费资源，增加成本），有些垃圾箱的放置过于随意，不能有效覆盖垃圾收集范围，使得垃圾收运成本增加，或者因距离太远造成垃圾清理不及时，导致罚款。垃圾箱的投入和摆放缺乏科学合理的整体规划，直接或间接地造成了垃圾收运成本的增加。

综上所述，由于环卫项目的运营管理者的工作经验及自身能力均有限，对环卫运营成本管理的优化有局限性，再加上启迪环境中南区域对环卫运营没有明确的标准，或者标准与项目实际运营不符合，而公司又没有专门的部门或者岗位去研究和推广环卫运营

管理优化，从而出现人员配置和排班不合理、车辆作业路线规划不科学、垃圾箱摆放不合理等环卫运营管理问题，直接导致了人工成本和车辆机械作业成本整体偏高，使启迪环境中南区域环卫项目整体上处于亏损状态。目前在疫情影响下，社会对环境卫生质量要求普遍提高，政府也加强了对环卫服务质量的考核力度，再加环卫服务质量肉眼可判断，具有即时验收的特性，要想在环卫服务质量上偷工减料很难，在工作量并没有减少的情况下，想通减少人员、减少车辆设备来降低运营成本，几乎不现实。

因此，在现有的资源情况下，对环卫运营中的人员排班、车辆作业线路和垃圾站点选址进行优化不失为实现环卫运营成本管理优化的有效方法。

4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化案例分析及实施保障

本文通过实地调研及数据分析发现了启迪环境中南区域环卫运营中出现的问题，并通过访谈法找到了出现问题的原因，本章以启迪环境中南区域正在运营项目为案例，根据成本管理理论，运用图论与网路、线性规划等科学方法，对环卫运营成本进行控制和优化，同时应用作业成本管理理论，将成本管理的重心深入到整个环卫服务运营的作业层次，优化“作业链”和“价值链”，从成本优化的角度改造作业和重组作业流程，并且对环卫项目运营中的各项作业进行成本效益分析，确定关键作业点，对关键作业点进行重点控制，从而优化环卫运营成本管理，提高企业经济效益。

本文运用图论与网络、线性规划等相关方法和原理，构建环卫运营成本管理优化数学模型，采用整数规划法、混合整数规划法、动态规划法、中国邮递员问题求解法等求解方法对启迪环境中南区域环卫运营中的人员排班、车辆作业路线和垃圾站点选址进行优化，实例验证了数学优化模型能有效降低环卫运营成本，提高启迪环境中南区域环卫运营经济效益。本文还在组织和制度上提出了相关建议，以保障启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的实施能持续有效进行。

4.1 优化目标

本文将根据启迪环境中南区域实际情况，采用一系列优化方法，达到环卫运营成本管理优化的目的，具体如下：

- (1) 通过人员排班优化，降低人工成本。
- (2) 通过车辆作业路线规划优化，降低机械作业成本及减少设备损耗。

(3) 通过垃圾站点选址优化,降低垃圾收运成本,同时减少垃圾收集设备的投入量及相关设备维护费用。

总之,通过人员排班优化、车辆作业路线规划优化及垃圾站点选址优化来实现启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的目标。

4.2 优化原则

在环卫行业日益激烈的市场竞争之下,启迪环境中南区域要想获得长期稳定的发展,环卫运营成本管理的优化迫在眉睫,环卫运营效率直接关系到企业的发展,降低成本,提高经济效益,是启迪环境中南区域提升市场竞争力的渠道。因此,为了使启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化能有效实施,必须遵循以下优化原则:

(1) 目的性原则

环卫运营成本管理优化要服务于目的,优化的目的始终是为了实现企业整体功能和综合效益的理想化,保证企业生产经营战略总目标的实现。

(2) 整体性原则

从全局出发,进行系统分析,统一规划、统一领导、统一实施,环卫运营成本管理优化服从和服务于企业管理整体优化,做到局部优化保证整体优化目标的实现,寻求提高整体效能。

(3) 协调性原则

环卫运营是个复杂的过程,公司各部门之间存在着互为依附和互相制约的联系,以及经济上、技术上的因果关系,只有在环卫运营成本管理优化上讲求集中、统一、协调和配套,才能真正达到系统优化,形成整体优势。

(4) 适应性原则

环卫运营成本管理优化,既要适应环境变化的需要,注重实效,也要适应公司的特点和实际情况,把环卫运营成本管理优化中好的方式、方法、手段与目前环卫运营管理方式相结合,使环卫运营成本管理优化建立在坚实的基础上。

(5) 动态性原则

在一定时期和条件下建立起来的环卫运营成本管理优化具有相对的稳定性,但不是一成不变的。随着公司经营战略目标的更新、技术进步、管理进步和外部环境的变化,现场生产要素及其组合与配置也需要不断更新,因此,环卫运营成本管理优化也需要不断进行调整、充实与重新组合,使环卫运营始终保持优化状态,追求实现新的目标。

4.3 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化案例分析

根据启迪环境中南区域环卫运营成本管理中出现的问题及成因,本文以该区域正在运营项目为案例,根据成本管理理论,运用图论与网路、线性规划等科学方法,对环卫运营成本进行控制和优化,同时应用作业成本管理理论,将成本管理的重心深入到整个环卫服务运营的作业层次,优化“作业链”和“价值链”,从成本优化的角度改造作业和重组作业流程,并且对环卫项目运营中的各项作业进行成本效益分析,确定关键作业点,对关键作业点进行重点控制,从而优化环卫运营成本管理,提高企业经济效益。

本文运用图论与网络、线性规划等相关方法与原理,构建环卫运营成本管理优化数学模型,采用整数规划法、混合整数规划法、动态规划法、中国邮递员问题求解法等求解方法对启迪环境中南区域环卫运营中的人员排班、车辆作业路线和垃圾站点选址进行优化,其中,人员排班优化案例为降低人工成本提供了优化方法和研究思路,车辆作业路线规划优化案例为降低车辆机械作业成本提供了优化方法和研究思路,垃圾站点选址优化案例为降低物料成本、垃圾收运成本、车辆机械作业成本提供了优化方法和研究思路,具体如下:

4.3.1 人员排班优化案例

轮询排班是指将员工分成多个班组,各班组在每个循环周期内上班及休息遵循轮换模式。通过将班组错开按照某种轮询模式上班,可以使得每天或者某个时段的上班人数既能满足实际需求又能达到人员配置优化的目的。

轮询排班是目前普遍使用的排班方式,在环卫作业中,由于保洁岗位的人力需求与所处服务区域的人流量有关,这使得保洁人员的岗位配置可以根据人流量的变动而进行调整。启迪环境中南区域环卫项目上目前采用的排班模式均为固定岗位、固定人员数量,这就导致在实际环卫保洁过程中,人流量多的时候,该区域的保洁员工作量超负荷,导致加班费和聘用临时工的费用产生,人流量少的时候,保洁员的工作不饱和,出现人员闲置现象。因此,本文通过改变排班方式,实行轮询模式排班来达到人员配置优化的目的。

经过实地调研得知,适用于启迪环境中南区域轮询排班的主要有两种模型:①一周休息两日的人员排班优化模型;②一周休息一日每日分六个时段的人员排班优化模型。本文主要对这两种人员排班优化模型进行研究。

(1) 一周休息两日的人员排班优化案例

以启迪环境中南区域南昌县项目为例，南昌县永通商业街属于启迪环境公司在南昌县环卫服务项目中的一个服务范围，它的保洁要求是一周七天都需要有保洁员进行不间断保洁，由于商业街每天的人流量不一样，所以商业街每天工作量也不一样，因此保洁人员的每日人数配置可以根据人流量的变动而进行调整，据现场调研和统计，永通商业街周一至周日每天所需要的保洁人员数量为：周一 16 人、周二 13 人、周三 12 人、周四 14 人、周五 16 人、周六 20 人、周日 19 人。南昌县项目公司严格遵守南昌县城市管理局（甲方）要求，保洁员每周休息两天，公司要求保洁员加班的按 1.5 倍工资计算加班费（法定节假日按法定节假日标准计算）。

据现场调查，目前的人员配置方案为：每天配置 16 人进行保洁，保洁人数达不到工作量要求的，请临时工进行补充，临时工费用为 25 元/小时，每日工作 8 小时，保洁员 7 天连续工作，每周给每位保洁员 2 天加班工资（为方便计算，加班工资统一按 1.5 倍计算）。

表 4.1 南昌县永通商业街正在使用的人员排班表

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
每日人员配置数量 (人/日)	16	16	16	16	16	16	16
聘用临时工数量 (人/日)	0	0	0	0	0	4	3
临时工每日费用 (元/日)	0	0	0	0	0	800	600
实际需要保洁人员 数量 (人/日)	16	13	12	14	16	20	19

根据表 4.1 可知，周二、周三、周四保洁人员工作量不饱和，周六、周日保洁人员不足，需要聘请临时工进行人员补充，说明目前所使用的人员配置方案并不是最优的，接下来，本文采用整数规划的方法对永通商业街的保洁人员配置进行优化。

根据永通商业街的人员配置要求，假设星期一至星期日上午上班的人数分别用 x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 表示，因每人一周连续工作 5 天，休息 2 天，可模拟人员排班表（表 4.2）如下：

表 4.2 南昌县永通商业街人员排班模拟表

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
星期一上班人数	x_1	x_1	x_1	x_1	x_1		

星期二上班人数		x2	x2	x2	x2	x2	
星期三上班人数			x3	x3	x3	x3	x3
星期四上班人数	x4			x4	x4	x4	x4
星期五上班人数	x5	x5			x5	x5	x5
星期六上班人数	x6	x6	x6			x6	x6
星期日上班人数	x7	x7	x7	x7			x7
每日上班总人数	16	13	12	14	16	20	19

根据表 4.2 建立数学模型如下：

目标函数： $\min z=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7$

$$\text{约束条件: } s.t. \begin{cases} x1 + x4 + x5 + x6 + x7 \geq 16 \\ x1 + x2 + x5 + x6 + x7 \geq 13 \\ x1 + x2 + x3 + x6 + x7 \geq 12 \\ x1 + x2 + x3 + x4 + x7 \geq 14 \\ x1 + x2 + x3 + x4 + x5 \geq 16 \\ x2 + x3 + x4 + x5 + x6 \geq 20 \\ x3 + x4 + x5 + x6 + x7 \geq 19 \\ x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7 \geq 0, \text{且为整数} \end{cases}$$

用 lingo 软件编程求得结果如下（具体求解代码详见论文中的《附录》部分）：

$x1=0, x2=3, x3=3, x4=6, x5=4, x6=4, x7=2$ ，共需配置 22 人。

因此，南昌县永通商业街优化后人员排班表（表 4.3）如下：

表 4.3 南昌县永通商业街优化后人员排班表

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
星期一上班人数	0	0	0	0	0	休息	休息
星期二上班人数	休息	3	3	3	3	3	休息
星期三上班人数	休息	休息	3	3	3	3	3
星期四上班人数	6	休息	休息	6	6	6	6
星期五上班人数	4	4	休息	休息	4	4	4
星期六上班人数	4	4	4	休息	休息	4	4
星期日上班人数	2	2	2	2	休息	休息	2
优化后每日上班总人数	16	13	12	14	16	20	19

实际要求每日上班总人数	16	13	12	14	16	20	19
-------------	----	----	----	----	----	----	----

根据表 4.3 《南昌县永通商业街优化后人员排班表》可以看出，周一至周日每日配置的人数与实际要求的每日上班人数是吻合的，保洁员的工作量均能达到饱和状态。

经过人员配置优化之后，不仅使每个保洁员的劳动效用发挥到最大，而且保障了每个保洁员的正常休息时间，既符合甲方要求，更关怀了员工的身心健康，环卫行业的保洁员年龄普遍偏高，而且工作强度大，工作环境恶劣，保障保洁员的正常休息时间，非常必要。

通过表 4.3 的人员配置可以做出南昌县永通商业街保洁人员的具体作业排班表（表 4.4 南昌县永通商业街优化后保洁人员排班表）。

表 4.4 南昌县永通商业街优化后保洁人员排班表

序号	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
1	休息	保洁员 1	保洁员 1	保洁员 1	保洁员 1	保洁员 1	休息
2	休息	保洁员 2	保洁员 2	保洁员 2	保洁员 2	保洁员 2	休息
3	休息	保洁员 3	保洁员 3	保洁员 3	保洁员 3	保洁员 3	休息
4	休息	休息	保洁员 4	保洁员 4	保洁员 4	保洁员 4	保洁员 4
5	休息	休息	保洁员 5	保洁员 5	保洁员 5	保洁员 5	保洁员 5
6	休息	休息	保洁员 6	保洁员 6	保洁员 6	保洁员 6	保洁员 6
7	保洁员 7	休息	休息	保洁员 7	保洁员 7	保洁员 7	保洁员 7
8	保洁员 8	休息	休息	保洁员 8	保洁员 8	保洁员 8	保洁员 8
9	保洁员 9	休息	休息	保洁员 9	保洁员 9	保洁员 9	保洁员 9
10	保洁员 10	休息	休息	保洁员 10	保洁员 10	保洁员 10	保洁员 10
11	保洁员 11	休息	休息	保洁员 11	保洁员 11	保洁员 11	保洁员 11
12	保洁员 12	休息	休息	保洁员 12	保洁员 12	保洁员 12	保洁员 12
13	保洁员 13	保洁员 13	休息	休息	保洁员 13	保洁员 13	保洁员 13
14	保洁员 14	保洁员 14	休息	休息	保洁员 14	保洁员 14	保洁员 14
15	保洁员 15	保洁员 15	休息	休息	保洁员 15	保洁员 15	保洁员 15
16	保洁员 16	保洁员 16	休息	休息	保洁员 16	保洁员 16	保洁员 16
17	保洁员 17	保洁员 17	保洁员 17	休息	休息	保洁员 17	保洁员 17
18	保洁员 18	保洁员 18	保洁员 18	休息	休息	保洁员 18	保洁员 18
19	保洁员 19	保洁员 19	保洁员 19	休息	休息	保洁员 19	保洁员 19
20	保洁员 20	保洁员 20	保洁员 20	休息	休息	保洁员 20	保洁员 20
21	保洁员 21	保洁员 21	保洁员 21	保洁员 21	休息	休息	保洁员 21

22	保洁员 22	保洁员 22	保洁员 22	保洁员 22	休息	休息	保洁员 22
上班总人数	16	13	12	14	16	20	19

现在对人员排班优化前和人员排班优化后的人工成本进行对比。目前，南昌县保洁员的平均成本为 2800 元/月/人左右（工资约 2300 元/月/人，社保等费用约 500 元/月/人），临时保洁工费用为 25 元/小时，临时工每天工作 8 小时，保洁员的日加班工资 = 2300 / 21.75 * 1.5 = 158.62 元/日，每月每人按加班 2 * 4 = 8 天计算。

南昌县永通商业街人员排班优化前的每月人工成本为：16 * 2800（人工总成本） + 16 * 158.62 * 8（加班费） + （800 + 600） * 4（聘请临时工费用） = 70703.36 元/月。

南昌县永通商业街人员排班优化后的每月人工成本为：22 * 2800（人工总成本） = 61600 元/月。

综上所述，人员排班优化后比优化前每月节省人工成本：70703.36 元/月 - 61600 元/月 = 9103.36 元/月，一年节省人工成本 109240.32 元/年。

通过本案例的人员排班优化可知：①作为劳动密集型产业的环卫行业，科学合理配置作业人员可以大量节省运营成本；②工作量一定的情况下，人员配置少并不一定节省成本；③目前环卫行业盛行的通过一刀切式的减员、减配来降低成本的方法还需慎行，项目运营经理也不要一味地迎合公司的减员要求或者为了完成减员绩效考核盲目地去减员，而是要根据实际情况，合理配置人员，要以最终的经济效益为导向，不能为减员而减员。⑤公司要不断提高运营管理人员的综合素质，懂得运用各种方法和工具来合理配置人员，达到降低成本的目的。

（2）一周休息一日每日分六个时段的人员排班优化案例

以启迪环境中南区域邵阳经开区项目为例，邵阳大道属于启迪环境中南区域在邵阳经开区环卫服务项目中的一个服务范围，该大道的部分路段（2 片区）（项目部根据环卫项目的服务类型或者服务范围，将整个项目划分成若干个片区，便于运营管理）经过商业繁华地段和产业园，上下班高峰期和休闲时段，人流量比较大，保洁的工作量增加，其他时段，人流量相对稳定，保洁工作可以按照常规作业计划正常进行。按照甲方要求，该路段是繁华路段，保洁时间为上午 8:00 至晚上 20:00，每天都需要有保洁员进行保洁，保洁人员每天工作时间不超过 8 小时，保洁员每周至少休息 1 天，公司要求保洁员加班的按 1.5 倍工资计算加班费（法定节假日按法定节假日标准计算）。根据现场调研和作业统计，该路段每天不同时段所需要的保洁人员数量为：8:00-10:00 需要 18 人，

10:00-12:00 需要 22 人，12:00-14:00 需要 24 人，14:00-16:00 需要 22 人，16:00-18:00 需要 26 人，18:00-20:00 需要 20 人，详见（表 4.5《邵阳大道（2 片区）每日不同时段保洁人员需求表》）。

表 4.5 邵阳大道（2 片区）每日不同时段保洁人员需求表

时段	8:00-10:00	10:00-12:00	12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00
作业人数要求	18 人	22 人	24 人	22 人	26 人	20 人

邵阳大道（2 片区）目前的人员配置方案为：每天配置 22 人进行保洁，不聘用临时工，工作量达到高峰期时，由巡检人员和片区管理员进行协助完成作业，保洁人员每周 7 天连续上班，每周给每位保洁员 1 天加班工资（为方便计算，加班工资统一按 1.5 倍计算），每天给每位保洁人员 4 个小时加班费。

表 4.6 邵阳大道（2 片区）正在使用的人员配置方案表

时段	8:00-10:00	10:00-12:00	12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00
目前配置保洁人员数量	22 人	22 人	22 人	22 人	22 人	22 人
现场调研分析所需人员数量	18 人	22 人	24 人	22 人	26 人	20 人

根据表 4.6 可知，8:00-10:00 时段、18:00-20:00 时段保洁人员工作量不饱和，12:00-14:00 时段、16:00-18:00 时段保洁人员工作量超负荷，虽然由巡检人员和片区管理人员进行协助，但是协助作业的同时，耽误了巡检人员和管理人员的本职工作，有可能引发该片区总协调不到位，服务质量监察缺失的现象发生。说明目前所使用的人员配置方案并不是最优的，接下来，本文采用整数规划的方法对邵阳大道（2 片区）的保洁人员排班进行优化。

根据邵阳大道（2 片区）各时段的人员配置要求，假设 8:00-10:00 时段、10:00-12:00 时段、12:00-14:00 时段、14:00-16:00 时段、16:00-18:00 时段、18:00-20:00 时段上班的人数分别用 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 表示，因每人连续工作 8 小时，可模拟人员排班表（表 4.7）如下：

表 4.7 邵阳大道（2 片区）各时段模拟人员排班表

	8:00-10:00	10:00-12:00	12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00
8:00-10:00 时段上班人数	t_1	t_1	t_1	t_1		
10:00-12:00 时段上班人数		t_2	t_2	t_2	t_2	

12:00-14:00 时段上班人数			t3	t3	t3	t3
14:00-16:00 时段上班人数	t4			t4	t4	t4
16:00-18:00 时段上班人数	t5	t5			t5	t5
18:00-20:00 时段上班人数	t6	t6	t6			t6
时段上班总需求人数	18	22	24	22	26	20

根据表 4.7 建立数学模型如下：

目标函数： $\min z=t1+t2+t3+t4+t5+t6$

$$\text{约束条件: } s.t. \begin{cases} t1 + t4 + t5 + t6 \geq 18 \\ t1 + t2 + t5 + t6 \geq 22 \\ t1 + t2 + t3 + t6 \geq 24 \\ t1 + t2 + t3 + t4 \geq 22 \\ t2 + t3 + t4 + t5 \geq 26 \\ t3 + t4 + t5 + t6 \geq 20 \\ t1, t2, t3, t4, t5, t6 \geq 0, \text{且为整数} \end{cases}$$

用 lingo 软件编程求得结果如下（具体求解代码详见论文中的《附录》部分）：

t1=8, t2=6, t3=10, t4=2, t5=8, t6=0, 每天最少配置人数为 34 人。

因此，邵阳大道（2 片区）各时段人员配置优化后的人员排班表（表 4.8）如下：

表 4.8 邵阳大道（2 片区）各时段人员配置优化后的人员排班表

	8:00-10:00	10:00-12:00	12:00-14:00	14:00-16:00	16:00-18:00	18:00-20:00
8:00-10:00 时段上班人数	8	8	8	8	0	0
10:00-12:00 时段上班人数	0	6	6	6	6	0
12:00-14:00 时段上班人数	0	0	10	10	10	10
14:00-16:00 时段上班人数	2	0	0	2	2	2
16:00-18:00 时段上班人数	8	8	0	0	8	8
18:00-20:00 时段上班人数	0	0	0	0	0	0
优化后各时段上班总人数	18	22	24	26	26	20
各时段上班实际需求人数	18	22	24	22	26	20

根据表 4.8《邵阳大道（2 片区）各时段人员配置优化后的人员排班表》可以看出，除了 14:00-16:00 时段保洁员的工作量略有饱和之外，其他时段上班总人数与实际需求人数均能吻合，保洁员的工作量均能达到饱和状态。

经过第一阶段邵阳大道（2 片区）各时段人员排班优化后，接下来将进行第二阶段的人员排班优化，即每周人员作业配置。根据第一阶段求解可知，邵阳大道（2 片区）每天作业人数是固定的 34 人（每天各时段的保洁人数是变动的，而每天的保洁总人数是固定的）。

根据第一阶段的人员排班优化结果，假设星期一至星期日上午上班的人数分别用 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ 表示，因每人一周连续工作 6 天，休息 1 天，可模拟人员排班表（表 4.9）如下：

表 4.9 邵阳大道（2 片区）每周人员排班模拟表（每周休息 1 天）

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
星期一上班人数	x_1	x_1	x_1	x_1	x_1	x_1	
星期二上班人数		x_2	x_2	x_2	x_2	x_2	x_2
星期三上班人数	x_3		x_3	x_3	x_3	x_3	x_3
星期四上班人数	x_4	x_4		x_4	x_4	x_4	x_4
星期五上班人数	x_5	x_5	x_5		x_5	x_5	x_5
星期六上班人数	x_6	x_6	x_6	x_6		x_6	x_6
星期日上午上班人数	x_7	x_7	x_7	x_7	x_7		x_7
每日上班总人数	34	34	34	34	34	34	34

根据表 4.9 建立数学模型如下：

目标函数： $\min z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7$

约束条件： $s.t.$ $\begin{cases} x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 34 \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 34 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 34 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 \geq 34 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 \geq 34 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 34 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 34 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \geq 0, \text{且为整数} \end{cases}$

用 lingo 软件编程求得结果如下（具体求解代码详见论文中的《附录》部分）：

$x_1=6, x_2=5, x_3=5, x_4=6, x_5=6, x_6=6, x_7=6$ ，共需配置 40 人。

因此，我们可编制邵阳大道（2 片区）每周人员排班表（每周休息 1 天），详见表 4.10。

表 4.10 邵阳大道（2 片区）每周人员排班表（每周休息 1 天）

	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
星期一上班人数	6	6	6	6	6	6	休息
星期二上班人数	休息	5	5	5	5	5	5
星期三上班人数	5	休息	5	5	5	5	5
星期四上班人数	6	6	休息	6	6	6	6
星期五上班人数	6	6	6	休息	6	6	6
星期六上班人数	6	6	6	6	休息	6	6
星期日上班人数	6	6	6	6	6	休息	6
优化后每日上班总人数	35	35	34	34	34	34	34
实际每日配置人数	34	34	34	34	34	34	34

通过表 4.10 可知，每日各时段最优人员配置总和是 34 人，而通过每周人员排班的进一步优化不但满足了周一至周日的实际配置人数需求，而且周一和周二的上班总人数比实际配置人数还多出 1 人，使邵阳大道（2 片区）当天更有富余的人力去处理突发事件或者是应急事宜，提高工作效率，节约人力成本。

根据表 4.8《邵阳大道（2 片区）各时段人员配置优化后的人员排班表》和表 4.10《邵阳大道（2 片区）每周人员排班表》可知，8:00-10:00 时段上班人数 8 人，10:00-12:00 时段上班人数 6 人，12:00-14:00 时段上班人数 10 人，14:00-16:00 时段上班人数 2 人，16:00-18:00 时段上班人数 8 人，每日共需配置保洁员 34 人，每周共需配置 40 人，由此得出每周各时段的排班表（表 4.11 邵阳大道（2 片区）每周各时段人员排班表），表中时段 1 至时段时段 6，分别对应 8:00-10:00、10:00-12:00、12:00-14:00、14:00-16:00、16:00-18:00 时段，B1 至 B40 代表不同的 40 名保洁员，“/”代表休息，从排班表（表 4.11）可以看出，B40 保洁员只上了 4 天的班，还有两天（一周上六天班）的排班可以根据需要机动派位。

以上人员优化方案充分利用每日不同时段不同工作量（人流量）合理配置保洁人员，经过对邵阳大道（2 片区）各时段人员配置及每周人员配置两个阶段的人员优化配置之后，不仅使每个保洁员的劳动效用发挥到最大，而且保障了每个保洁员的正常休息时间，既满足了服务质量要求，更体现了对员工的人文关怀，合理的休息时间有益于员工的身心健康，特别是在环卫行业这种工作强度大，工作环境恶劣的情况下，显得尤为重要。

表 4.11 阳大道（2 片区）每周各时段人员排班表

Table with 48 columns (12 segments per day for 4 days) and 48 rows (B1-B40). Each cell contains a segment ID or a slash indicating a break. The table shows a repeating pattern of assignments for each segment across the days.

现在对人员配置优化前和人员配置优化后的人工成本进行对比。目前，邵阳市保洁员的平均成本约为 2500 元/月/人左右（工资约 2100 元/月/人，社保等费用约 400 元/月/人），保洁员的日加班工资=2100/21.75*1.5=144.83 元/日，每小时加班费=144.83/8=18.10 元/小时，每月每人按加班 4 天计算，每月按 30 天计算。

邵阳大道（2 片区）人员排班优化前的每月人工成本为：22*2500（人工总成本）+22*144.83*4（日加班费）+22*18.10*4*30（每天 4 小时加班费按 30 天/月计算）=115529.04 元/月。

邵阳大道（2 片区）人员配置优化后的每月人工成本为：40*2500（人工总成本）=100000.00 元/月。

综上所述，本案例人员排班优化后比优化前每月节省人工成本：115529.04 元/月-100000.00 元/月=15529.04 元/月，一年节省人工成本 186348.48 元/年。

4.3.2 车辆作业路线规划优化案例

对于车辆作业路径问题，根据起始点与终点的不同以及作业要求的不同，可以分为点对点运输问题、回路问题（中国邮递员问题），点对点运输问题可以看作最短路径问题，即寻求两点间最短的通过路径；回路问题（中国邮递员问题），即从某点出发经过作业所要求的每一条街道，然后返回该点，从中找出一条行走距离最短的作业回路。

(1) 点对点的运输路线规划优化案例

在环卫服务运营作业中，点对点的作业路线，在垃圾清运（将垃圾中转站的垃圾清运到垃圾处理厂进行处理）中用的比较多，其他车辆作业路线，比如垃圾收运（将各个垃圾堆放点或收集点的垃圾用垃圾收运车收集并运输到垃圾中转站或者直接运输到垃圾处理厂进行处理）、路面洒水、路面冲洗、路面机扫、护栏清洗、质量巡检车进行巡检等都是点对点型和回路型作业路线相结合的比较多。

根据甲方及合同要求，永州市道县的生活垃圾收运模式为户投放→组保洁→村收集→镇转运→市（县）处理，居民将日常生活垃圾定点投放垃圾点（池），各村保洁人员负责每天对垃圾进行收集和初步分类，公司派垃圾收运车到各行政村进行收运，运送到乡镇垃圾中转站进行压缩处理。垃圾经压缩后公司统一安排车辆、人员，将乡镇中转站的垃圾统一转运至市（县）垃圾处理厂进行无害化处理。

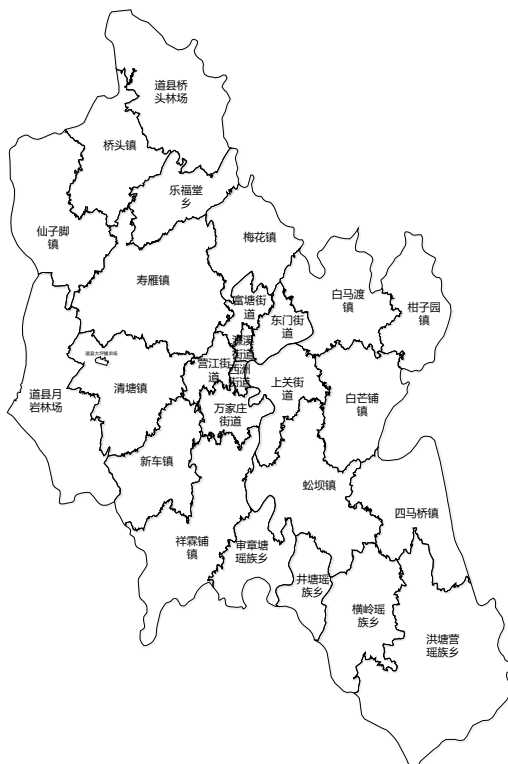


图 4.1 道县乡镇行政区域划分图

道县共有 7 个街道、12 个镇、3 个瑶族乡、2 个林场，1 个农场，甲方（道县城市管理和综合执法局）在各个乡镇和街道共建设了 18 个中转站，目前由我公司负责运营管理，道县所有乡镇中转站压缩的垃圾都是运往光大环保能源(道县)有限公司进行处理，在此以道县火车站垃圾中转站为例进行点（道县火车站垃圾中转站）对点（光大环保能源公司）的运输路线优化，为了便于展示、书写和编程，运输路线经过的城市名称均用字母代替，其中 S 为运输路线的起点（火车站垃圾中转站），F 为运输路线的终点（光大环保能源公司），点 A1 至点 E2 代表运输路线经过的各个城市名称，各城市之间用直线连接（本案例所使用的各城市之间的距离值是实际环卫运营中的真实值）展示，如图 4.2。

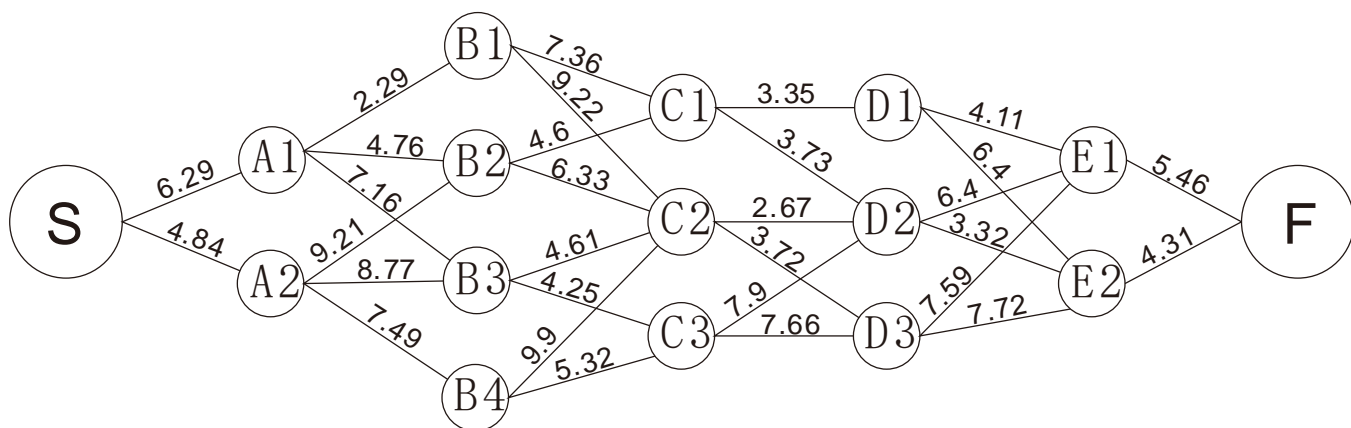


图 4.2 道县火车站垃圾中转站垃圾转运路线图

根据图 4.2 可以得到相邻城市之间的距离表（表 4.12）：

表 4.12 相邻城市之间的距离表（单位：公里）

S-A1	S-A2						
6.29	4.84						
A1-B1	A1-B2	A1-B3	A2-B2	A2-B3	A2-B4		
2.29	4.76	7.16	9.21	8.77	7.49		
B1-C1	B1-C2	B2-C1	B2-C2	B3-C2	B3-C3	B4-C2	B4-C3
7.36	9.22	4.6	6.33	4.61	4.25	9.9	5.32
C1-D1	C1-D2	C2-D2	C2-D3	C3-D2	C3-D3		
3.35	3.73	2.67	3.72	7.9	7.66		
D1-E1	D1-E2	D2-E1	D2-E2	D3-E1	D3-E2		
4.11	6.4	6.4	3.32	7.59	7.72		
E1-F	E2-F						
5.46	4.31						

本案例的优化研究不仅仅是选择最短运输路径，还要考虑不同路况对运输成本的影响，根据现场调研得知，垃圾转运的运输成本约为 4 元/公里/车，垃圾转运车在高速路

上的收费标准为 1.6 元/公里/车, B2-C1-D1-E1 是高速公路, 各相邻城市之间的路况系数如下表 (表 4.13) (1 表示路况最好, 数值越大, 路况越差):

表 4.13 相邻城市之间的路况系数表

S-A1	S-A2						
1.03	1.08						
A1-B1	A1-B2	A1-B3	A2-B2	A2-B3	A2-B4		
1.13	1.07	1.11	1.09	1.06	1.09		
B1-C1	B1-C2	B2-C1	B2-C2	B3-C2	B3-C3	B4-C2	B4-C3
1.05	1.08	1	1.07	1.11	1.1	1.08	1.07
C1-D1	C1-D2	C2-D2	C2-D3	C3-D2	C3-D3		
1	1.1	1.09	1.11	1.12	1.03		
D1-E1	D1-E2	D2-E1	D2-E2	D3-E1	D3-E2		
1	1.1	1.09	1.06	1.12	1.1		
E1-F	E2-F						
1.1	1.13						

各相邻城市之间每公里运输路费用如下表 (表 4.14):

表 4.14 各相邻城市之间每公里运输路费用表 (单位: 元)

S-A1	S-A2						
4	4						
A1-B1	A1-B2	A1-B3	A2-B2	A2-B3	A2-B4		
4	4	4	4	4	4		
B1-C1	B1-C2	B2-C1	B2-C2	B3-C2	B3-C3	B4-C2	B4-C3
4	4	5.6	4	4	4	4	4
C1-D1	C1-D2	C2-D2	C2-D3	C3-D2	C3-D3		
5.6	4	4	4	4	4		
D1-E1	D1-E2	D2-E1	D2-E2	D3-E1	D3-E2		
5.6	4	4	4	4	4		
E1-F	E2-F						
4	4						

综合以上各因素, 将表 4.12、表 4.13、表 4.14 各相邻城市之间的系数相乘, 得到各相邻城市之间的权重表 (表 4.15)。

表 4.15 各相邻城市之间的权重表 (单位: 元)

S-A1	S-A2						
25.91	20.91						
A1-B1	A1-B2	A1-B3	A2-B2	A2-B3	A2-B4		
10.35	20.37	31.79	40.16	37.18	32.66		
B1-C1	B1-C2	B2-C1	B2-C2	B3-C2	B3-C3	B4-C2	B4-C3
30.91	39.83	25.76	27.09	20.47	18.7	42.77	22.77
C1-D1	C1-D2	C2-D2	C2-D3	C3-D2	C3-D3		
18.76	16.41	11.64	16.52	35.39	31.56		

D1-E1	D1-E2	D2-E1	D2-E2	D3-E1	D3-E2		
23.02	28.16	27.9	14.08	34	33.97		
E1-F	E2-F						
24.02	19.48						

现要根据表 4.15 《各相邻城市之间的权重表》，找到一条权重值之和最小的一条运输路径。

本案例采用动态规划法进行求解，使用 lingo 软件编程求得结果如下（具体求解代码详见论文中的《附录》部分）：

最小运费为 117.14 元，最优运输路径为 S→A1→B1→C1→D2→E2→F（图 4.3）；

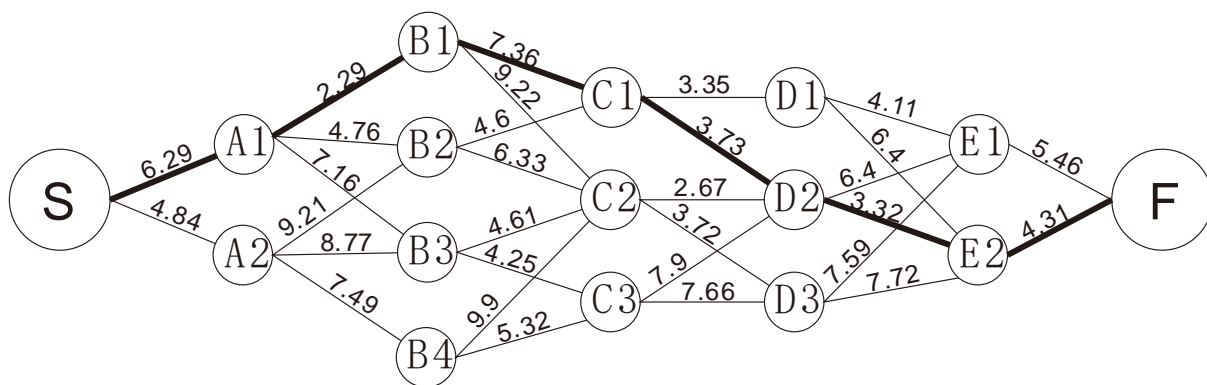


图 4.3 火车站中转站垃圾转运最优运输路线图

为了验证从火车站中转站到光大环境公司的最短运输路线是否为刚才所求解的最优运输路线，用各相邻城市之间的距离值，采用动态规划法进行求解，使用 lingo 软件编程求得结果如下（具体求解代码详见论文中的《附录》部分）：

最短运输路线为：S→A1→B2→C1→D2→E2→F，最短运输距离为 27.01 公里。

根据表 4.15 《各相邻城市之间的权重表》运算可得最短运输路线的运输费用为：122.01 元，比最优运输路线高出 4.87 元/车/单程，由此可知，在不考虑其他因素的情况下单纯地选择最短运输路线，并不一定是最优运输路线。

目前道县项目部对于火车站垃圾中转站采用的运输路线为：S→A2→B3→C2→D2→E2→F，根据表 4.15 《各相邻城市之间的权重表》运算可得运输费用为：123.76 元。

综上所述，该案例车辆作业路径优化前的运输费用为 123.76 元/车/单程；车辆作业路径优化后的运输费用为 117.14 元/车/单程。车辆作业路径优化后可节省 6.62 元/车/单程，据悉，垃圾转运车每天至少 2 趟次，采用最优运输路线每天至少节省 26.48 元/车，每月至少可节省 794.4 元/车，每年至少可节省 9532.8 元/车。

(2) 回路型车辆作业路线规划优化案例

在环卫运营作业中，很多作业路线都是回路，即从某个地点出发，作业完毕之后，返回到出发点，类似中国邮递员问题，比如垃圾收集车作业路线、洒水车作业路线、洗扫车作业路线、品质安全员巡检路线、保洁员作业路线等等，本案例以南昌县象湖项目第 6 片区为例，采用中国邮递员问题的优化方法，求解最优作业路线图。以下是南昌县象湖项目第 6 片区的服务范围地图(图 4.4)，东以金沙大道为界，南以小蓝大道为界，西以桃新大道为界，北以芳湖路为界。

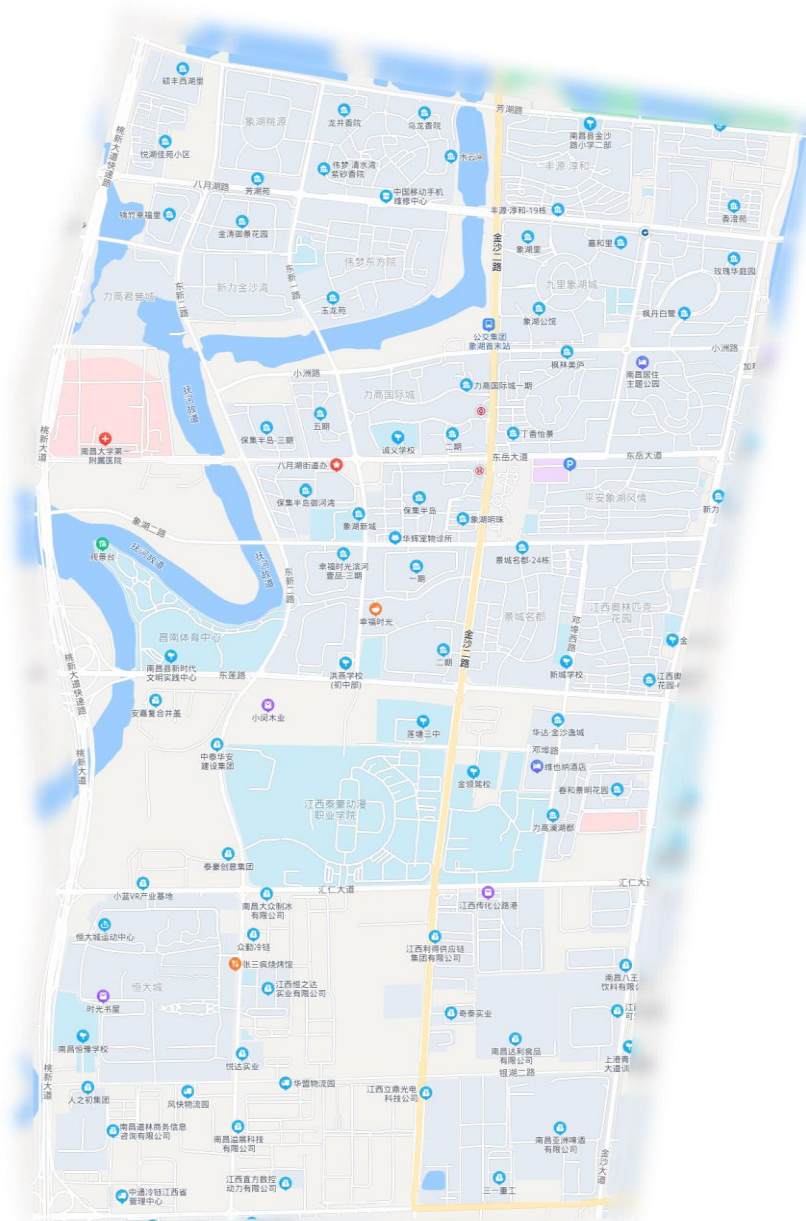


图 4.4 南昌县象湖项目第 6 片区的服务范围地图

根据甲方和服务合同要求，启迪环境南昌县项目公司对该片区的主要城市道路（不包含社区、产业园等内部的小街小巷）进行道路清扫保洁、道路洒水冲洗作业、垃圾收集运输等，要求机械作业率达到 80%以上。根据甲方的作业要求和本片区的服务体量，启迪环境南昌县项目部在该片区配置了 1 台洗扫车、1 台洒水车、1 台冲洗车、1 台压缩密闭式垃圾收运车，快速保洁电动车 4 辆，巡检皮卡车 1 辆。为了便于展示和描述，现将南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路图简化如下（图 4.5）：

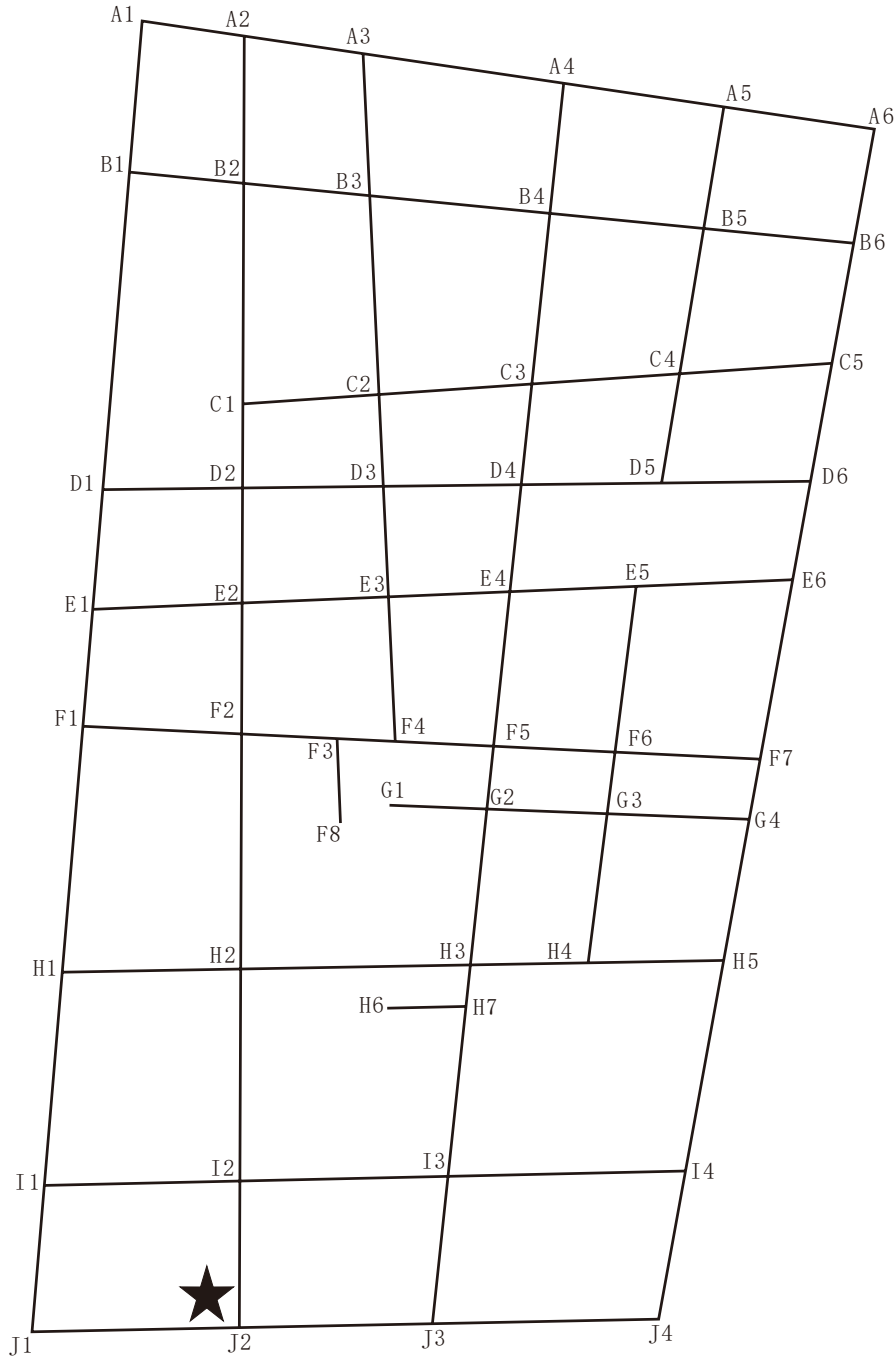


图 4.5 南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路简化图

据统计，南昌县象湖项目第 6 片区主要道路各相邻点之间的距离如下（表 4.16）：

表 4.16 南昌县象湖项目第 6 片区主要道路各相邻点之间的距离表（单位：米）

路段	距离	路段	距离	路段	距离
A1-A2	530	C5-D6	615	F5-G2	346
A1-B1	777	D1-D2	718	F6-F7	746
A2-A3	633	D1-E1	643	F6-G3	318
A2-B2	755	D2-D3	723	F7-G4	313
A3-A4	1042	D2-E2	590	G1-G2	501
A3-B3	729	D3-D4	709	G2-G3	618
A4-A5	815	D3-E3	567	G2-H3	821
A4-B4	671	D4-D5	725	G3-G4	731
A5-A6	781	D4-E4	552	G3-H4	771
A5-B5	632	D5-D6	765	G4-H5	736
A6-B6	595	D6-E6	513	H1-H2	917
B1-B2	589	E1-E2	768	H1-I1	1097
B1-D1	1634	E1-F1	634	H2-H3	1180
B2-B3	650	E2-E3	753	H2-I2	1087
B2-C1	1131	E2-F2	671	H3-H4	605
B3-B4	930	E3-E4	624	H3-H6	214
B3-C2	1021	E3-F4	742	H4-H5	696
B4-B5	794	E4-E5	667	H5-I4	1098
B4-C3	880	E4-F5	797	H6-H7	405
B5-B6	774	E5-E6	808	H7-I3	876
B5-C4	755	E5-F6	858	I1-I2	1005
B6-C5	626	E6-F7	935	I1-J1	754
C1-C2	701	F1-F2	816	I2-I3	1069
C1-D2	431	F1-H1	1266	I2-J2	752
C2-C3	815	F2-F3	491	I3-I4	1220
C2-D3	472	F2-H2	1205	I3-J3	760
C3-C4	761	F3-F4	291	I4-J4	772
C3-D4	519	F3-F8	433	J1-J2	1065
C4-C5	784	F4-F5	506	J2-J3	992
C4-D5	568	F5-F6	625	J3-J4	1162

图 4.5《南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路简化图》中的黑色五角星“★”所标记的地方是该片区的中转站也是项目部的一个办事处，现根据简化图，通过中国邮路模型的“奇偶点图上作业法”（具体求解方法详见论文中的《附录》部分），寻找该片区的最优作业路径。

要想寻找该片区的最优作业路径，先要把图 4.5 《南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路简化图》转换成欧拉图，根据“奇偶点图上作业法”的方法，具体操作步骤如下：

(1) 将图中的奇点两两相连，使其变成偶点；

(2) 奇点之间的连线最多重复一次，图中的每个回路中，有重复边的边长不能超过回路总长度的一半。

根据以上要求，图 4.5 《南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路简化图》的奇点共有 30 个，分别是 A2, A3, A4, A5, B1, B6, C1, C5, D1, D5, D6, E1, E5, E6, F1, F3, F4, F7, F8, G1, G4, H1, H4, H5, H6, H7, I1, I4, J2, J3 如下图（图 4.6 黑圆圈标记的点）：

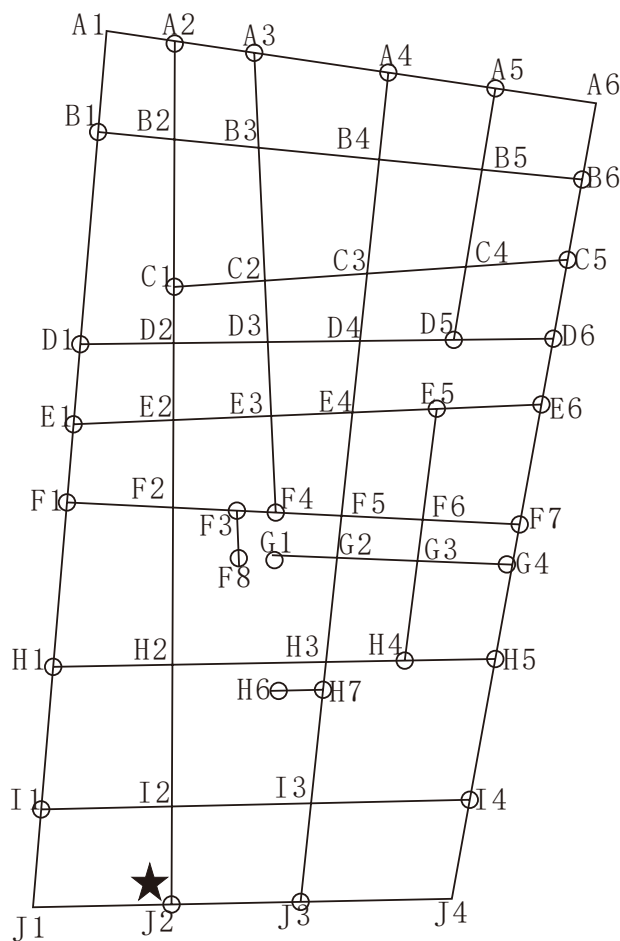


图 4.6 南昌县象湖项目第 6 片区主要城市道路简化图奇点标识图

根据“奇偶点图上作业法”的具体要求，将图 4.6 中的 A2-A3 相连，A4-A5 相连，B1 和 C1 相连，D1 和 E1 相连，B6 和 C5 相连，由于 B1-D1 比 B1-B2-C1 总长度短，此处选择点 B1 与点 D1 连接。B6 与 C5 连接，D5 和 D6 相连，E5 和 E6 相连，F1 和 F4 相连，F3 与 F8 连接，F1-F4、F3-F8 的长度刚好等于他们自身所形成的回路的一半，满足“奇偶点图上作业法”所要求的“奇点之间的连线最多重复一次，图中的每个回路中，有重

复边的边长不能超过回路总长度的一半”。G1 与 H4 连接，F7 与 G4 连接，H1 与 I1 连接，H5 与 I4 连接，H6 与 H7 连接，最后，J2 与 J3 连接，最终形成图 4.7《南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路作业回路图》，经查验，所有奇点的连线（虚线）都不超过所在回路总长度的一半。因此环卫作业车辆沿着图 4.7《南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路作业回路图》中的路线（画有虚线部分走两遍）进行作业，就是最优作业路线。

为了便于推广该优化模型的使用及验证优化方案的准确性，采用 lingo 软件进行编程求解最优路线，在 lingo 软件求得结果如下（具体求解方法及求解代码详见论文中的《附录》部分）：

最优路径的总长度为 80863 米，需要行走两次的路段为：A2-A3，A4-A5，B1-B2，B2-C1，B6-C5，D1-E1，D5-D6，E5-E6，F1-F2，F2-F3，F3-F4，F3-F8，F7-G4，G1-G2，G2-G3，G3-H4，H1-I1，H5-I4，J2-J3。与之前用“奇偶点图上作业法”所求得的结果完全一致。

该最优作业路线，适合该片区所有回路型的作业模式，即从某起点开始作业，走遍服务范围内的所有路径，作业完毕之后回到起点位置的作业模式。该最优作业路线均适合南昌县象湖项目第 6 片区的洗扫车作业、洒水车作业、冲洗车作业、压缩密闭式垃圾收运车作业，快速保洁电动车作业和品质安全巡查，保洁员的作业范围相对较小，其作业路线，可以根据该最优回路分解成若干个小的最优回路，使保洁员的作业路线实现最优化。

南昌县象湖项目第 6 片区作业主干道道路总长 67432 米，在未规划作业路线的情况下，随机作业一个回路，最坏的情况是将所有道路走两遍，即 $67432 \times 2 = 134864$ 米，优化后的最短回路作业路线总长为： 67432 （道路总长）+ 13431 （重复路段总长）= 80863 米。

据项目部作业数据统计，按目前该片区现有作业路线，平均每趟次（一个回路）行驶总公里数平均约为 98.56 公里，优化后的作业路线要比优化前的作业路线少 $98.56 \times 1000 - 80863 = 17697$ 米，即 17.7 公里。洗扫车、洒水车、冲洗车、压缩密闭式垃圾收运车作业费用按平均每公里 2 元计算，电动车、巡检车按平均 0.3 元/公里计算，按照最优路线作业，所有车辆一个回路作业可节省 $2 \times 17.7 \times 4 + 0.3 \times 17.7 \times 2 = 152.22$ 元/趟次，按照每天作业一趟次计算（实际作业不止一趟次），一个月可节省 $152.22 \times 30 = 4566.6$ 元，一年可节省 $4566.6 \times 12 = 54799.2$ 元。

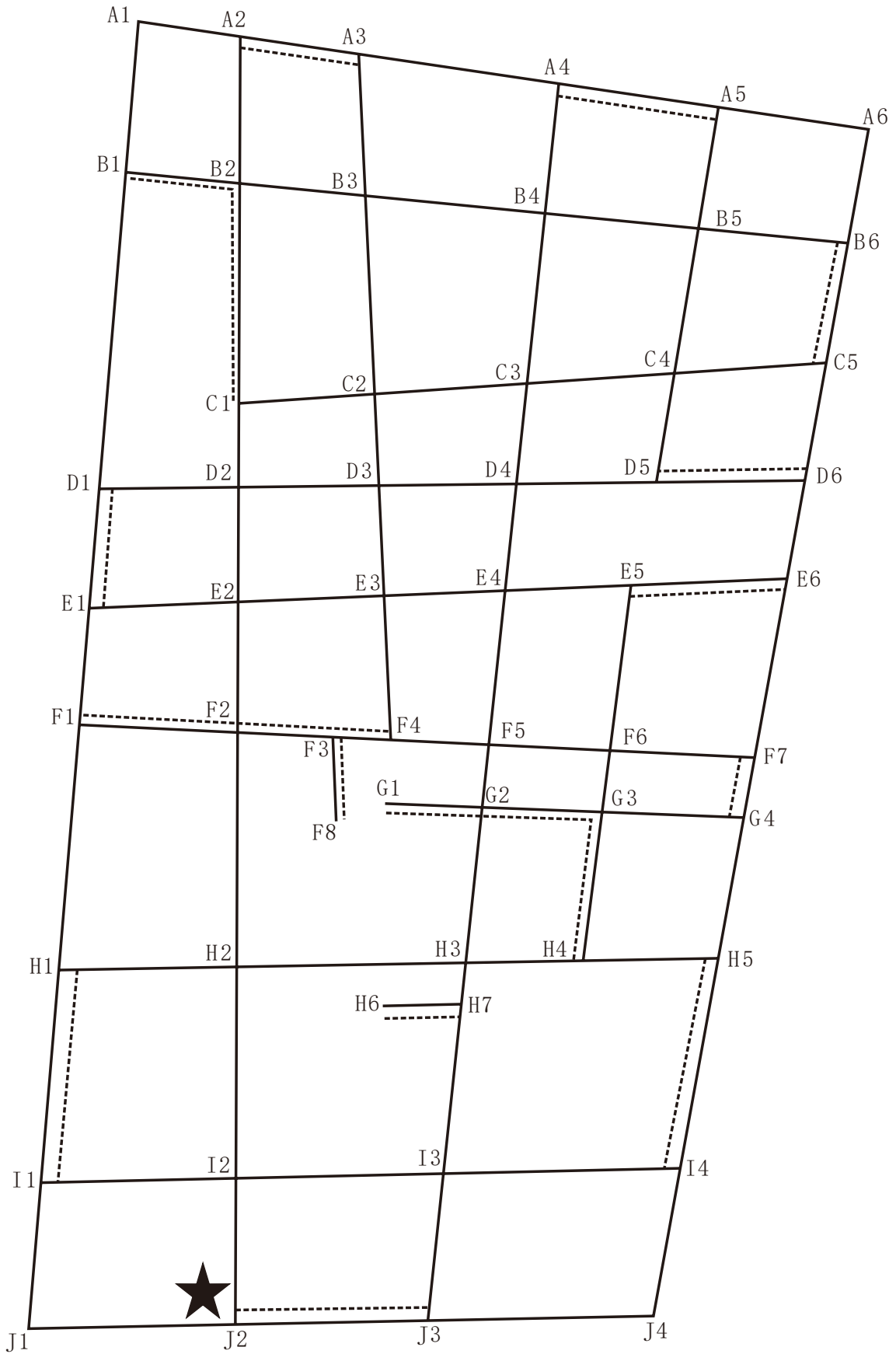


图 4.7 南昌县象湖项目第 6 片区服务范围内的主要城市道路作业回路图

为了更好的了解和应用最优路线，在此将最优路线演示一遍：从 J2 出发，运行路径如下（图 4.8 南昌县象湖项目第 6 片区最优作业路线演示图）：

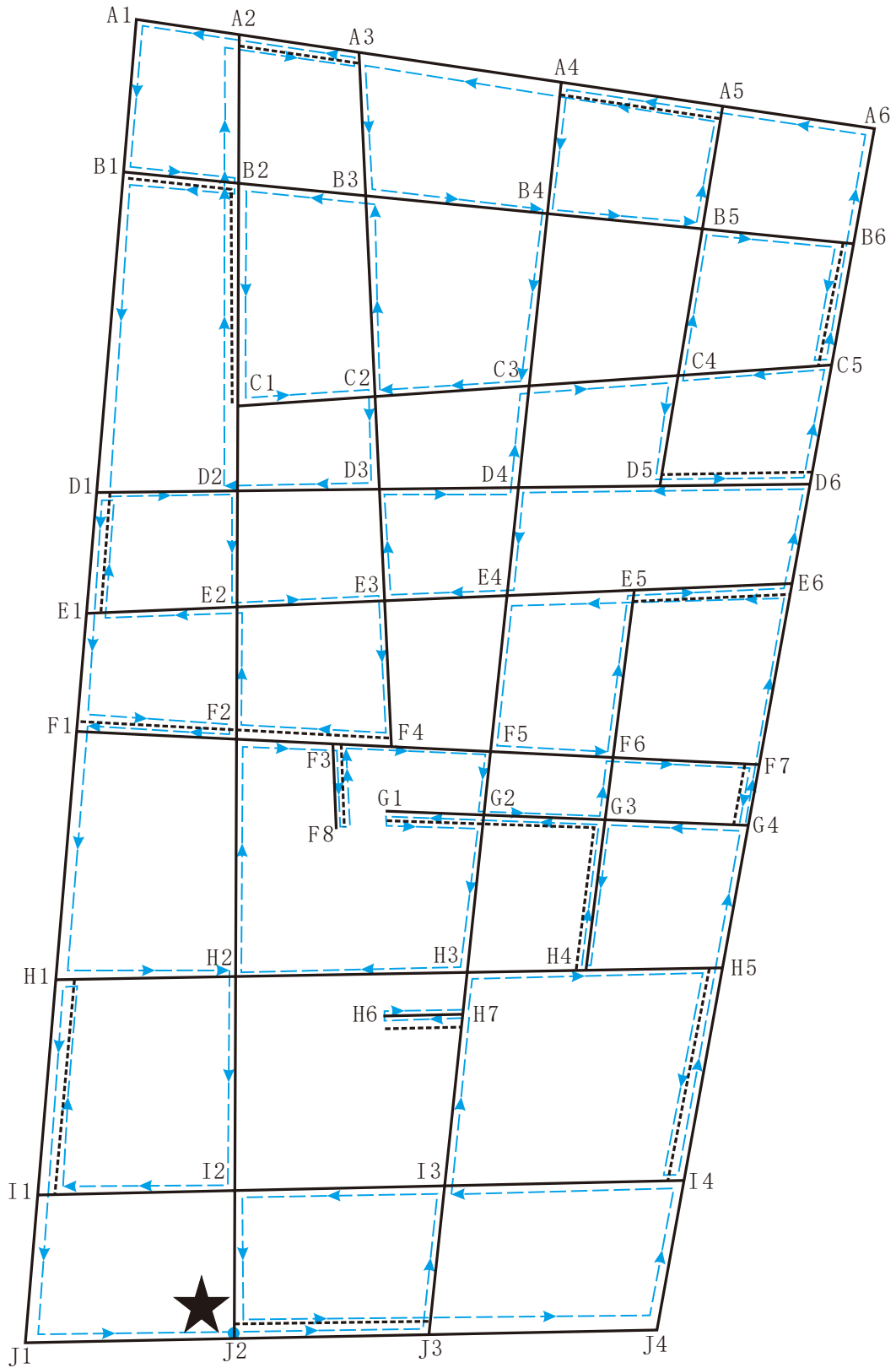


图 4.8 南昌县象湖项目第 6 片区最优作业路线演示图

在南昌县象湖项目第6片区案例中,中转站和办公地点在一起而且就在服务区域内,形成了一个回路,但是还有很多服务片区是图 4.9《情形模拟图 1》和图 4.10《情形模拟图 2》这样的情形,图 4.9《情形模拟图 1》是办公地点不在服务片区内,作业车辆需要从其他地方行驶过来,但是中转站在服务片区内,图 4.10《情形模拟图 2》的情形是办公地点和中转站都不在服务片区内,对于这里两种情形处理方式具体如下:

第一步,用中国邮路问题求解办法找出最优作业路径回路。

第二步,找到一条最优的行驶路线(可参考本文中的“点对点的运输路线优化案例”),将车辆行驶到服务区入口,然后按照第一步找到的最优路径图进行回路作业,作业完毕,从入口处将车辆按最优路线返回办公地点,如果不是垃圾收运作业,其他作业车辆在第二步就算完成了最优路线作业,如果是垃圾收集车辆,还要进行第三步。

第三步,垃圾收运车辆完成所有沿路的垃圾收集后会返回到入口处,垃圾收运车除了办公地点到服务区的最优行驶路线外还要规划“服务入口→垃圾中转站”,“垃圾中转站→办公地点”最优行驶路线(可参考本文中的“点对点的运输路线优化案例”),垃圾收运车按照规划的最优行驶路线将垃圾倾倒完毕并返回办公地点,完成最优路线作业。

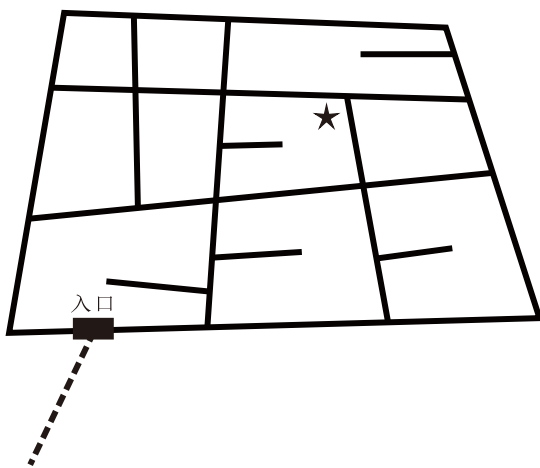


图 4.9 情形模拟图 1

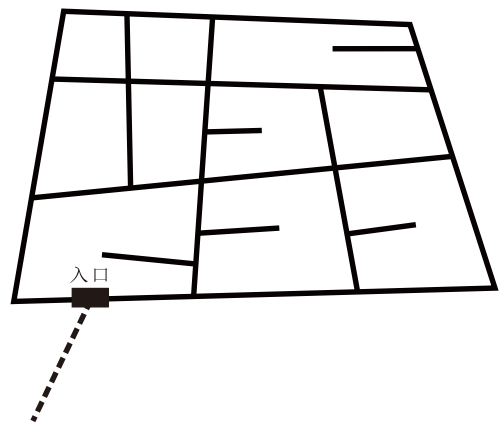


图 4.10 情形模拟图 2



4.3.3 垃圾站点选址优化案例

垃圾站点选址和其他设施选址本质上没有很大区别，都是研究怎样通过科学的方法来确定设施的位置，实现规划的目标，从而使得系统的运行达到最优的状态。

在启迪环境中南区域目前运营的环卫项目中，由自己进行垃圾中转站功能设计并选址建设的项目很少（据悉启迪环境其他区域的项目也一样），因为垃圾中转站的设计、选址和建设在环卫项目推向市场化之前政府相关部门就已经规划好了，即使在中标的环卫服务项目中有建设垃圾中转站的服务内容，这些中转站的建设地址、规模、功能等政府部门都已经在招标文件或者合同中规定好了，环卫服务公司只需要按照甲方要求建设好就行，留个环卫服务公司发挥的余地不大。

本文垃圾站点选址优化的对象主要是垃圾箱，垃圾箱分为带压缩功能和不带压缩功能两种，装载垃圾的容量为 1 吨至 10 吨，它的布局灵活性很强，可以根据周边的垃圾量及相关要求灵活布置相应的垃圾箱，而且摆放地址也相对容易选择，只要不影响交通，不影响附近居民的出行和生活都可以摆放，运输也方便，使用与箱体相对应的勾臂车直接将垃圾箱拖走，并放置一个空的垃圾箱（勾臂车在来运输此垃圾箱时，勾臂车上会带一个空的垃圾箱）在原来位置，继续进行垃圾收集。垃圾箱中的垃圾可以运到中转站进行倾倒（转运模式），也可以直接运到垃圾处理场进行处理（直运模式）。

本文的垃圾站点选址优化研究就是根据不同的垃圾收运要求，合理选址并布置垃圾箱，通过优化来节省垃圾箱数量、缩短运输路程和减少运输量，从而达到节省运营成本的目的。

（1）对有垃圾收运时间要求的垃圾站点选址布局优化案例

本案例以南昌县象湖项目第 2 片区为例，该片区中的繁华地段比较多，甲方的服务质量要求比较高，对于果皮箱、垃圾桶中的溢出的垃圾或者裸露在地面上的垃圾，30 分钟之内必须清理干净，否则巡检员将会进行罚款。象湖项目部准备在该片区 6 个繁华区（均有合适位置可以摆放垃圾箱）布置垃圾箱，具体要求是这些繁华区的保洁员将收集到的垃圾 15 分钟内（一个来回要少于 30 分钟）送到垃圾箱，确保各繁华区的垃圾能得到及时的清理，此处用 F1, F2, F3, F4, F5, F6 分别代表 6 个繁华区，6 个繁华区之间保洁车的行驶时间如下：

表 4.17 各繁华区之间保洁车的行驶时间表 (单位: 分钟)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0	9	18	26	25	20
F2	9	0	22	32	19	8
F3	18	22	0	13	27	18
F4	26	32	13	0	12	24
F5	25	19	27	12	0	11
F6	20	8	18	24	11	0

象湖项目目前的垃圾箱布置方案是两个相邻的繁华区放置一个垃圾箱, 共配置 3 个垃圾箱, 垃圾收运车对三个垃圾箱点的垃圾收运行程约为 10.2 公里。

现根据实际要求, 对本案例进行数学建模, 采用混合整数规划法进行求解, 对垃圾站点选址进行优化。

假设 F1, F2, F3, F4, F5, F6 繁华区放置的垃圾箱数量为 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$, $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 的取值为 1 或者 0, 把表 4.17 中小于等于 15 的数值标为 1, 其余数值标为 0, 转换成下表 (表 4.18):

表 4.18 数学建模演示表

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	垃圾箱放置数量
F1	1	1	0	0	0	0	x_1
F2	1	1	0	0	0	1	x_2
F3	0	0	1	1	0	0	x_3
F4	0	0	1	1	1	0	x_4
F5	0	0	0	1	1	1	x_5
F6	0	1	0	0	1	1	x_6

根据表 4.18 构建数学模型如下:

目标函数: $\min z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6$

$$\text{约束条件: } s.t. \begin{cases} x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_6 \geq 1 \\ x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_4 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ x_2 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ x_i = 0 \text{ 或者 } 1, i = 1, \dots, 6 \end{cases}$$

使用 lingo 软件进行编程求得结果如下(具体求解代码详见论文中的《附录》部分):

$$Z=2, x_1=0, x_2=1, x_3=0, x_4=1, x_5=0, x_6=0$$

根据运算结果可知, 总共配置 2 个垃圾箱即可, 垃圾箱放置地点为 F2 繁华区放置 1 个, F4 繁华区放置 1 个, 可以满足各繁华区的保洁员将收集到垃圾 15 分钟内送到垃圾箱。通过对比, 垃圾站点选址优化后比优化前节省 1 个垃圾箱, 垃圾收运车收运行程减少约 5.5 公里/趟次(节省 5.5 公里*2 元/公里=11 元/趟次), 并相应地节省了该垃圾箱的维护管理成本。

(2) 垃圾运输总距离最短或总运输量最小的垃圾站点选址布局优化案例

本案例以道县项目农村垃圾收运为例, 在道县项目垃圾收运服中, 有 7 个村距离乡镇垃圾中转站比较远, 用垃圾收运车每天每个村去收集, 成本非常高, 为了便于垃圾收集和整体运输, 道县项目部准备在 7 个村中选一个村放置一个垃圾箱(该垃圾箱可以收容 7 个村的垃圾), 其他 6 个村的垃圾由各村保洁员运输到这个垃圾箱中, 道县项目部只要派一辆车将垃圾箱中的垃圾清运即可。为了便于展示和编程, 此处用 A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 代表 7 个村, 7 个村的位置及相关参数示意图如下(图 4.11):

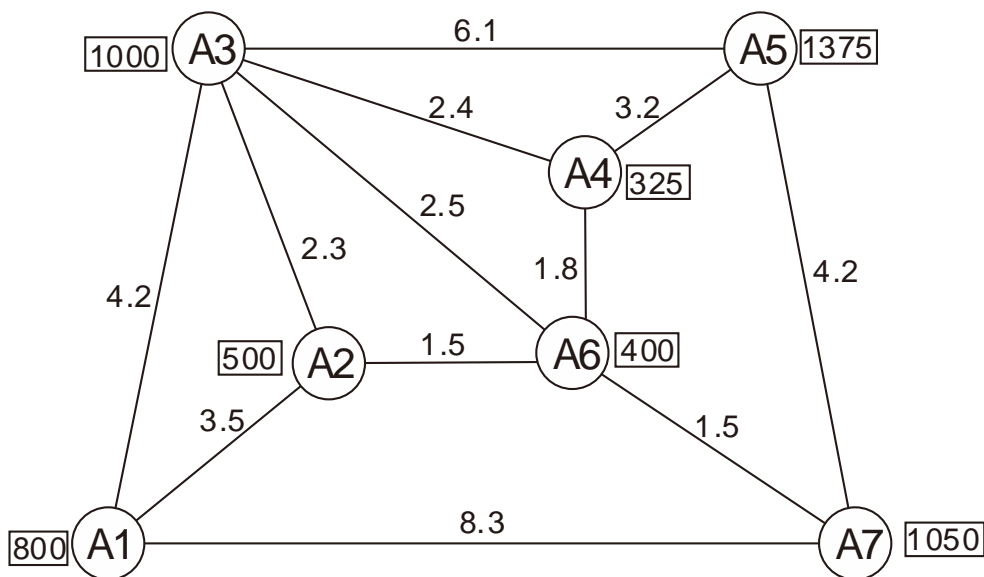


图 4.11 道县项目农村垃圾收运示意图

根据图 4.11 整理后, 7 个村中两两相邻的距离表如下(不相邻的村庄距离用“∞”表示):

表 4.19 各村之间距离表(单位: 公里)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0	3.5	4.2	∞	∞	∞	8.3

A2	3.5	0	2.3	∞	∞	1.5	∞
A3	4.2	2.3	0	2.4	6.1	2.5	∞
A4	∞	∞	2.4	0	3.2	1.8	∞
A5	∞	∞	6.1	3.2	0	∞	4.2
A6	∞	1.5	2.5	1.8	∞	0	1.5
A7	8.3	∞	∞	∞	4.2	1.5	0

为了便于用 lingo 程序求出各个点之间的最短距离，将表 4.19，转换成表 4.20，即将不相邻的村庄的距离填写上一个极大数，这里选择 1000，转换后的表如下：

表 4.20 各村之间距离转换表

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0	3.5	4.2	1000	1000	1000	8.3
A2	3.5	0	2.3	1000	1000	1.5	1000
A3	4.2	2.3	0	2.4	6.1	2.5	1000
A4	1000	1000	2.4	0	3.2	1.8	1000
A5	1000	1000	6.1	3.2	0	1000	4.2
A6	1000	1.5	2.5	1.8	1000	0	1.5
A7	8.3	1000	1000	1000	4.2	1.5	0

各村之间的最短距离可使用动态规划法逐一求解，此处使用 lingo 软件编写代码（具体求解代码详见论文中的《附录》部分），对表 4.20 进行运算求解，根据运算结果可得到各个村之间的最短距离表（表 4.21）：

表 4.21 各村之间最短距离表（单位：公里）

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0	3.5	4.2	6.6	9.8	5	6.5
A2	3.5	0	2.3	3.3	6.5	1.5	3
A3	4.2	2.3	0	2.4	5.6	2.5	4
A4	6.6	3.3	2.4	0	3.2	1.8	3.3
A5	9.8	6.5	5.6	3.2	0	5	4.2
A6	5	1.5	2.5	1.8	5	0	1.5
A7	6.5	3	4	3.3	4.2	1.5	0

根据表 4.21 统计各村到其他村的距离总和，统计结果详见表 4.22：

表 4.22 各村到其他村的距离总和表（单位：公里）

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	各村到其他村的距离总和
A1	0	3.5	4.2	6.6	9.8	5	6.5	35.6
A2	3.5	0	2.3	3.3	6.5	1.5	3	20.1
A3	4.2	2.3	0	2.4	5.6	2.5	4	21
A4	6.6	3.3	2.4	0	3.2	1.8	3.3	20.6
A5	9.8	6.5	5.6	3.2	0	5	4.2	34.3
A6	5	1.5	2.5	1.8	5	0	1.5	17.3
A7	6.5	3	4	3.3	4.2	1.5	0	22.5

观察表 4.22 可知，A6 村到其他各个村的距离总和最短，总距离为 17.3 公里，因此，将垃圾箱放置在 A6 村使得 7 个村的总运输距离最短。

该优化方案在优化过程中，算出来了每个村到其他各个村的最短运输距离，不仅为此次垃圾箱选址布局提供了优化建议，还为后续各村的垃圾运输提供了最优路径优化。

在运输距离最短的基础上，在考虑运输量的情况下，还可以进一步研究总运输量最小的垃圾站点选址布局优化。

根据图 4.11 和各村之间的最短距离表（表 4.21）可以组合成各村每日垃圾量和各村之间的最短距离的结合表（表 4.23）：

表 4.23 各村每日垃圾量及各村之间的最短距离表

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	各村每日垃圾量 (kg)
A1	0	3.5	4.2	6.6	9.8	5	6.5	800
A2	3.5	0	2.3	3.3	6.5	1.5	3	500
A3	4.2	2.3	0	2.4	5.6	2.5	4	1000
A4	6.6	3.3	2.4	0	3.2	1.8	3.3	325
A5	9.8	6.5	5.6	3.2	0	5	4.2	1375
A6	5	1.5	2.5	1.8	5	0	1.5	400
A7	6.5	3	4	3.3	4.2	1.5	0	1050

将表 4.23 中的“各村每日垃圾量 (kg)”列中的数据，分别与“A1”列，“A2”列，“A3”列，“A4”列，“A5”列，“A6”列，“A7”列中的数据一一对应相乘，得到如下数据表（表 4.24）：

表 4.24 各村运输量汇总表

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
A1	0	2800	3360	5280	7840	4000	5200
A2	1750	0	1150	1650	3250	750	1500
A3	4200	2300	0	2400	5600	2500	4000
A4	2145	1072.5	780	0	1040	585	1072.5
A5	13475	8937.5	7700	4400	0	6875	5775
A6	2000	600	1000	720	2000	0	600
A7	6825	3150	4200	3465	4410	1575	0
总运输量	30395	18860	18190	17915	24140	16285	18147.5

观察分析表 4.24 可知，经过计算，总运输量最少的是 17915kg，即将垃圾箱放置在 A4 村可使得 7 个村的总体运量最少，可降低总体运输成本。

目前道县项目垃圾箱所放置的村庄是 A5 村，放置理由是 A5 村垃圾量最大，可以减少垃圾运输量。通过优化分析可知，不管是从垃圾运输总距离最短还从总运输量最小方面来考虑，A5 都不是最优选择。

从运输总距离最短来看，垃圾箱放置在 A5 村的总运输距离 34.3 公里，垃圾箱放置在 A6 村的总运输距离 17.3，优化后比优化前运输总距离少了 $34.3-17.3=17$ 公里；

从总运输量来看，垃圾箱放置在 A5 村的总运输量 24140kg，垃圾箱放置在 A4 村的总运输量 17915kg，优化后比优化前总运输量少了 $24140-17915=6225$ kg。

因此，通过该模型的优化，能有效降低垃圾收运成本。

4.4 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化实施保障

除了数学优化模型，本文还在组织和制度上提出了相关建议，以保障启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的实施能持续有效进行，具体如下：

4.4.1 组织保障

本文通过对启迪环境中南区域环卫运营现状调查与分析可知，正是因为启迪环境中南区域缺乏专门的部门或者岗位去研究和推广环卫运营成本管理优化，才导致项目公司出现环卫运营成本管理的各种问题，因此，为了能使环卫运营成本管理优化方案能不断完善和推广，启迪环境中南区域须建立专门的部门或者设置专门的岗位，配备专门的人才，各个项目公司也要设立同样的部门或者岗位，由专职人员负责收集运营管理中遇到

的问题，然后反馈给区域，区域通过总结、分析、研究运营中遇到的问题，找出解决问题的优化方案，优化方案通过实际运营检测可行后，由专门的部门组织人员进行培训，或者进行点对点的推广，该组织的主要作用就是加强区域和项目公司之间的协调和联系，及时收集运营管理中遇到的问题或者好的运营管理建议，然后形成运营成本管理优化方案，在全公司内进行推广，在推广中不断完善优化方案，使启迪环境中南区域运营成本管理的优化始终处于良性循环当中，从而降低环卫运营管理成本，提高经济效益，增强公司竞争力。

总而言之，在组织上，启迪环境中南区域应该设立相应的机构和部门，或者在现有的机构和部门当中设立相应的岗位，组织相应的人力、物力和财力研究和推广成本管理优化方案，形成“推广优化方案→根据实际情况实施优化方案→发现问题→改进优化方案→推广优化方案”的良性循环，形成“自下而上的问题反馈”和“自上而下的优化对策”之间的良性沟通，不断优化环卫运营成本管理，降低环卫运营总成本。

4.4.2 制度保障

启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化方案的执行需要通过运营管理制度来实现，因此，完善环卫运营管理制度，是环卫运营成本管理优化能够持续推进的重要保障。

奖励机制。对于在环卫运营管理中能够积极发现管理问题并给出优化方案的员工，区域公司应予以奖励，同时奖励该项目公司和该项目的管理员。在优化方案推广和实施过程中，对那些能坚持落实到位，实质性降低了运营成本的员工予以奖励，同时奖励该项目公司和该项目的管理员。

惩罚机制。对于在环卫运营过程中发现问题，不汇报，私自隐瞒的员工予以惩罚，同时惩罚该项目公司和该项目的管理员。对于不是优化方案本身原因，个人、部门、项目公司不能将运营成本管理优化方案落实到位的，对个人、部门、项目公司进行相应的惩罚。区域运营管理部 and 项目公司品质安全部共同进行监督和考核，保障环卫运营成本管理优化方案的实施。

培训机制。启迪环境中南区域应建立完善的环卫运营成本管理优化培训制度，让员工认识到环卫运营成本管理优化的重要性，通过培训让员工正确掌握环卫运营成本管理优化的使用方法，明白环卫运营成本管理优化的原理，使员工能够根据自身环卫项目的特性，灵活使用环卫运营成本管理优化方法，甚至改良环卫运营成本管理优化方法，使环卫运营成本管理优化得到持续有效的良性发展。

总而言之，在制度上，启迪环境中南区域应为环卫运营成本管理优化建立相应的考核、激励、培训等相关制度，通过培训制度和考核制度来保障各项优化方案保质保量地落实到位，通过激励制度来实现公司、管理层、执行层三方受益，使环卫运营成本管理优化得到长久有序进行。

5 研究结论与研究展望

5.1 研究结论

本文通过对国内外相关文献进行梳理、分析和总结，结合启迪环境中南区域环卫运营现状，确定了论文的研究方向为人员排班优化、车辆作业路线规划优化、垃圾站点选址优化。本文从启迪环境中南区域环卫运营现状入手，通过实地调研及数据分析发现该企业环卫运营成本管理中存在人工成本和车辆作业成本偏高等问题，并通过访谈法找到了出现问题的原因。本文依据成本管理理论，采用图论与网络、线性规划等科学方法，通过构建数学模型对环卫运营中的人员排班、车辆作业路线规划、垃圾站点选址进行优化，降低环卫运营成本，实现环卫运营成本管理优化的目的。本文以人工成本最小化为研究目标，考虑保洁岗位的人力需求与所处服务区域的人流量相关，使用错位轮询排班法，构建了人员排班优化模型，并采用整数规划法进行求解；以车辆作业成本最小化为研究目标，考虑了车辆作业路径距离及成本，构建了车辆作业路线规划优化模型，并采用动态规划法和中国邮递员问题求解法进行求解；以垃圾站点选址最优为目标，考虑了垃圾箱布置数量及位置、垃圾运距和运量，构建了垃圾站点选址优化模型，并采用混合整数规划法进行求解。最后，本文以启迪环境中南区域正在运营环卫项目为案例，将真实环卫运营数据带入数学模型求解，验证了优化模型的可操作性、适用性和实用性，它能有效对环卫运营成本管理进行优化，降低环卫运营成本。

研究表明，本文创新地将人员排班优化、车辆作业路线规划优化和垃圾站点选址优化在环卫运营成本管理中应用，有效地降低了环卫运营成本，提高了环卫运营经济效益，丰富了环卫运营成本管理优化研究的内容，对环卫行业其他企业具有借鉴意义。

本文的研究结论及研究成果如下：

- (1) 一周休息两日的人员排班优化

在环卫运营中，所在服务范围内有许多服务片区（服务点）因为该片区的自身属性原因，该片区（服务点）一周内每日的人流量不一样，众所周知，环卫运营中，人流量大小跟环境卫生保洁的工作量成正比，本文选取了启迪环境中南区域南昌县象湖项目中的南昌县永通商业街为实例，根据现场调研，采用整数规划法对南昌县永通商业街进行了人员优化配置，根据每日的工作量不同，变动地配置每日上班人数，使保洁员每天的工作量达到饱和。本文研究的一周休息两日的人员排班优化，一年可节省人工成本 109240.32 元。

（2）一周休息一日每日分六个时段的人员排班优化

在环卫运营中，很多路段或者繁华区因其自身属性原因，该路段或者繁华区每日不同时段的人流量不一样，如早中晚的上下班高峰期等，众所周知，环卫运营中，人流量大小跟环境卫生保洁的工作量成正比，本文选取了启迪环境中南区域邵阳经开区环卫服务项目中的邵阳大道（2 片区）为实例，根据现场调研，采用整数规划法对邵阳大道（2 片区）进行了人员优化配置，根据每日不同时段的工作量不同，变动地配置每个时段上班人数，通过求解出每天的最优上班人数进一步求解出每周的最优上班人数，最终使保洁员每个时间段的工作量达到饱和。本文研究的一周休息一日每日分六个时段的人员排班优化，一年可节省人工成本 186348.48 元。

（3）点对点的运输路线优化

在环卫服务运营作业中，点对点的作业路线，在垃圾清运（将垃圾中转站的垃圾清运到垃圾处理厂进行处理）中用的比较多，点对点的作业路线优化就是在两点之间的众多路线中选择一条最优作业路线，该最优路线使得整体运输成本最低。本文选取了启迪环境中南区域道县垃圾收运项目为实例，根据现场调研，采用动态规划法对道县项目垃圾点对点清运路线做出了优化，该优化从两点之间的最短路径、不同路线的路况及不同路线的运输成本进行综合考虑，最终选择出最优运输路线。本文研究的点对点的运输路线优化，每年一辆车至少可节省 9532.8 元。

（4）回路型作业路线优化

在环卫运营作业中，很多作业路线都是回路，即从某个地点出发，作业完毕之后，返回到出发点，类似于欧拉回路，比如垃圾收集车作业路线、洒水车作业路线、洗扫车作业路线、品质安全员巡检路线、保洁员作业路线等，本文选取了启迪环境中南区域南昌县象湖项目第 6 片区为实例，根据现场调研，采用中国邮路问题的优化方法，求解最

优作业路线图，使得整体作业路线最短。本文研究的回路型作业路线优化，每年可节省机械作业成本 54799.2 元。

(5) 对有垃圾收运时间要求的垃圾站点选址布局优化

在环卫运营作业中，很多服务片区对垃圾的处理时间有明确要求，即在规定的时间内要把垃圾清理干净。垃圾桶和果皮箱的垃圾容量是有限，垃圾桶装满了，就会导致垃圾外溢和洒落街头，还有许多门店将垃圾堆放在路边也需及时清理，采用垃圾收运车不间断巡回收集，显然不现实，成本太高，此时在合适的地点放置垃圾收集箱，使各服务点的垃圾能在有限的时间内得到集中放置，再统一安排车辆对垃圾箱进行收运，显得十分必要。本文选取了启迪环境中南区域南昌县象湖项目第 2 片区为实例，根据现场调研，采用混合整数规划法对垃圾箱的摆放位置进行优化，既能使各服务点的垃圾在有限时间内均能得到有效投放，又能最小化垃圾箱的投放总量，从而节省了购买垃圾箱的费用、垃圾收运费用及垃圾箱的后期维护费用。本文研究的对有垃圾收运时间要求的垃圾站点选址布局优化，垃圾站点选址优化后比优化前节省 1 个垃圾箱，垃圾收运车收运行程减少约 5.5 公里/趟次（节省 5.5 公里*2 元/公里=11 元/趟次），并相应地节省了该垃圾箱的维护管理成本。

(6) 垃圾运输总距离最短或总运输量最小的垃圾站点选址布局优化

在环卫运营作业中，很多服务片区对垃圾的处理时间要求不是那么严格，只要在当天的某个时段把垃圾清理干净就行，特别是农村生活垃圾收运，而农村垃圾收运有个特点，就是村与村比较分散，垃圾收运车一个一个村去收集成本太高，此时在各村之间选择一个村放置垃圾收集箱，其他村的保洁员将垃圾运到该村去投放，项目部再统一安排车辆对垃圾箱进行收运可节省运输成本。本文选取了启迪环境中南区域道县垃圾收运项目为实例，根据现场调研，采用动态规划法和整数规划法，分别从垃圾运输总距离最短或总运输量最小两个方面对垃圾箱的放置进行了优化。本文研究的垃圾运输总距离最短或总运输量最小的垃圾站点选址布局优化，使垃圾总运输距离减少了 17 公里，垃圾总运输量减少了 6225kg。

(7) 启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化实施保障

为了保障启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的实施能持续有效进行，本文在组织和制度上提出了相关建议。

在组织方面，启迪环境中南区域应该设立相应的机构和部门，或者在现有的机构和部门当中设立相应的岗位，组织相应的人力、物力和财力研究和推广成本管理优化方案，

形成“推广优化方案→根据实际情况实施优化方案→发现问题→改进优化方案→推广优化方案”的良性循环，形成“自下而上的问题反馈”和“自上而下的优化对策”之间的良性沟通，不断优化环卫运营成本管理，降低环卫运营总成本。

在制度方面，启迪环境中南区域应为环卫运营成本管理优化建立相应的考核、激励、培训等相关制度，通过培训制度和考核制度来保障各项优化方案保质保量地落实到位，通过激励制度来实现公司、管理层、执行层三方受益，使环卫运营成本管理优化得到长久有序进行。

综上所述，本文在启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化中所使用的数学优化模型，给出的实际优化案例，以及在组织保障和制度保障上提出的相关建议，为环卫运营成本管理优化提供了一定的理论、方法和思路，能有助于启迪环境中南区域降低环卫运营成本，提高经济效益，同时对环卫行业其他公司的环卫运营成本管理优化有所借鉴。

5.2 研究展望

本文的研究虽然取得了一些成果，但是由于篇幅和能力的限制，本文研究中还有一些不足，有待日后在此基础上做进一步的分析和研究。

(1) 本文对人员排班优化的研究主要是针对一周内每日保洁人员数量可变动和每日不同时段保洁人员数量可变动的路段或服务区，而这些保洁人数可变动的路段或者服务区在整个环卫项目服务总量中只占 30%左右，只能实现局部最优，其他 70%左右的服务岗位的人员配置并未纳入到人员排班优化方案之中，例如应急队伍人员配置、巡查人员配置等，后续研究可以将整个项目的服务岗位的人员排班根据实际情况进行整体优化，实现整个项目人员排班的整体最优。

(2) 在点对点的车辆作业路线规划优化研究中，只考虑了运输成本和路况（道路条件），未将交通状况、通行时间等其他实际限制因素考虑在内。同时，因为条件限制和时间限制，在点对点的作业路线优化研究中的网路图并不是最全的网路图，或许还有更优的路线图未纳入其中，后续研究还可以将 GIS 技术应用到研究中，使网路图更全，研究更贴近现实情况。

(3) 在回路型作业路线优化研究中，本文以一个服务片区为研究对象，一种类型的作业车辆一辆车在该片区完成整个回路作业，未考虑到一种类型的作业（比如垃圾收运）需多辆车（两辆以上）在该片区回路中进行作业的情况，在后续研究中，可以进一步完善。

(4) 在垃圾站点选址布局优化中, 本文所选服务区域垃圾量是已知且固定的, 但是在许多情况下, 垃圾量是不断变动的, 在后续的研究中, 可在垃圾量不确定的情况下, 对垃圾站点的选址优化做进一步的研究。

(5) 在组织保障和制度保障方面, 由于完善的组织设计和制度的建立涉及到各个方面, 因为篇幅和条件的限制, 本文在启迪环境中南区域环卫运营成本管理优化的组织保障和制度保障方面, 只提供了大概的思路, 在后续研究中, 可以进一步完善和细化。

参考文献

- [1] 陈朱蕾.城市垃圾转运站调运及选址的线性规划[J].武汉城市建设学院学报,1990(03):90-94.
- [2] Min H , Jayaraman V , Srivastava R . Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions[J]. European Journal of Operational Research, 1998,108(1):1-15.
- [3] 杜亚娟,郭强.垃圾中转站最优选址及垃圾最优转运方案研究[J].计算机工程与应用,2015,51(10):252-256.
- [4] 刘方.基于层次分析法的垃圾中转站选址研究[J].河南科技,2021,40(34):135-138.
- [5] 李梦琦,耿秀丽.基于两阶段方法的垃圾中转站选址研究[J].软件导刊,2021,20(06):166-172.
- [6] Chang Ni-Bin, Wang S.F.. Solid Waste Management System Analysis by Multiobjective Mixed Integer Programming Model [J]. Journal of Environmental Management,1996,48(1):17-43.
- [7] 贾传兴,彭绪亚等.城市垃圾中转站选址优化模型的建立及其应用[J].环境科学学报,2006,26(11):1927-1931.
- [8] 李晓艳.浅析垃圾中转站的绿色设计[J],环境卫生工程,2016,24(3):55-57.
- [9] 王晨顿,基于分类的北京市生活垃圾清运路径优化研究[D].北京交通大学,2018.
- [10] 代燕,陈宁.城市生活固废中转站选址优化模型[J].物流技术,2019,38(02):68-71.
- [11] 杨帆,陶蕴哲."双M"导向下城市垃圾中转站选址的经济与生态二维评估:以长沙市为例[J].生态经济,2020,36(5):80-84.
- [12] 李海君,张耀文,杨月巧.考虑回收-补偿约束的卫星城镇生活垃圾中转站选址研究[J].运筹与管理,2020,29(4):30-35.
- [13] 刘明辉.L 县农村垃圾分类回收路径优化及中转站选址研究[D].北京交通大学,2021. DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.003368.
- [14] 马艳芳,应斌,周晓阳等.基于冲突合作关系的生鲜选址-路径多主体优化模型与算法[J].系统工程理论与实践,2020,40(12):178-193.
- [15] Dantzig G B , Ramser R H . The Truck Dispatching Problem[J]. Management e-nce,1959,6(1):80-91.

- [16] Beltrami E J , Bodin L D . Networks and vehicle routing for municipal waste collection[J]. Networks,1974,4(1):65-94.
- [17] Vinay Yadav,Subhankar Karmakar. Sustainable collection and transportation of municipal solid waste in urban centers[J]. Sustainable Cities and Society,2020,53(C).
- [18] Miranda P A , Blazquez C A , Vergara R , et al. A novel methodology for designing a household waste collection system for insular zones[J]. Transportation Research Part E,2015,77(may):227-247.
- [19] Zhao J , Huang L , Lee D H , et al. Improved approaches to the network design problem in regional hazardous waste management systems[J]. Transportation Research Part E Logs & Transportation Review,2016,88(apr.):52-75.
- [20] Valeria Leggieri,Mohamed Haouari. A practical solution approach for the green vehicle routing problem[J]. Transportation Research Part E,2017,104.
- [21] Laura Delgado-Antequera,Rafael Caballero,Jesús Sánchez-Oro,J Manuel Colmenar,Rafael Martí Iterated greedy with variable neighborhood search for a multiobjective waste collection problem[J]. Expert Systems With Applications,2020,145(C).
- [22] 梁玄晔.城市生活垃圾收运智能管理研究——以大连市为例[D].大连理工大学,2015.
- [23] 张多雨.引入装卸时间的垃圾收运路线优化[J].物流工程与管理,2016,38(007):125-127.
- [24] 符俊波,马慧民,张爽,雷悦.有垃圾量变动的生活垃圾收运车辆调度干扰管理研究[J].上海理工大学学报,2017,39(04):368-375.DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2017.04.011.
- [25] 赵红霞,刘高森,李愈.基于随机游走的分类垃圾回收最优路径规划[J].交通运输工程与信息学报,2018,16(03):103-108.
- [26] Nesmachnow S , Rossit D , Toutouh J . Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms for Prioritized Urban Waste Collection in Montevideo, Uruguay[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics,2018,69:93-100.
- [27] Mohamed, Abdallah, Mohamad, et al. Simulation and optimization of dynamic waste collection routes.[J]. Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2019:734242X19833152.
- [28] 于伟.基于中转站 DEA 的 Q 市生活垃圾收运优化研究[D].北京交通大学,2019

- [29] HailinWu, Fengming Tao, Bo Yang, Optimization of Vehicle Routing for Waste Collection and Transportation, International Journal of Environmental Research & Public Health, July 2020,17(14). (SSCI/SCI/EI,IF: 2.948, JCR 一区)
- [30] 尚春剑,马良,刘勇.垃圾分类下带时间窗异构周期性混合车辆路径问题模型及算法[J].系统工程,2021,39(06):131-145.
- [31] Edie L C. Traffic delays at toll booths[J]. Journal of the operations research society of America,1954,2(2):107-138.
- [32] Bai R, Burke E K, Kendall G, et al. A hybrid evolutionary approach to the nurserostering problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2010,14(4):580-590.
- [33] Atlason J, Epelman M A, Henderson S G. Call center staffing with simulation andcutting plane methods[J]. Annals of Operations Research,2004,127(1):333-358.
- [34] 杨凯,曹淑卿.基于整数规划和变换规则优化算法的手术室护士排班模型研究[J].医院管理论坛,2020,37(07):65-68.
- [35] 胡修武,徐悦,王秀丽.呼叫中心坐席人员排班问题优化模型与算法研究[J].运筹与管理,2021,30(08):44-51.
- [36] Bard J F, Wan L. Workforce design with movement restrictions between workstationgroups[J]. Manufacturing & Service Operations Management,2008,10(1):24-42.
- [37] Kyngs N , Goossens D , Nurmi K , et al. Optimizing the Unlimited Shift Generation Problem[C]//Proceedings of the 2012t European conference on Applications of Evolutionary Computation. Springer-Verlag, 2012:508-518.
- [38] 张毕西,张万里,宋静.基于蚁群算法的中小手工制造企业人员调度[J].工业工程,2011,14(04):119-123+153.
- [39] 赵亚玲,葛茂根,扈静,张铭鑫,张玺.柔性生产中基于人员任务匹配度的人员调度[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(02):270-273.
- [40] Gong X, Wang S, Jiao R. An Efficient 2D Genetic Algorithm for Optimal Shift Planning Considering Daily-Wise Shift Formats: A Case of Airport Ground Staff Scheduling[C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE,2019:1440-1444.

- [41] Girardin S, Baumann F, Dornberger R, et al. Multiobjective Optimization of the Train Staff Planning Problem Using NSGA-II[C]//20215th International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence.2021:37-43.
- [42] 王红,张蕾.遗传算法在航空公司飞行人员排班中的应用研究[J].计算机工程与应用,2006(10):220-222.
- [43] 林红,饶云波,李勇.遗传算法在乘务员排班系统中的应用[J].计算机技术与发展,2007(01):199-202+209.
- [44] Özder E H, Özcan E, Eren T. A systematic literature review for personnel scheduling problems[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making,2020,19(06):1695-1735.
- [45] Baker K R. Workforce allocation in cyclical scheduling problems: A survey[J]. Journal of the Operational Research Society,1976,27(1):155-167.
- [46] Alfares H K. Survey, categorization, and comparison of recent tour scheduling literature[J]. Annals of Operations Research,2004,127(1):145-175.
- [47] Ernst A T, Jiang H, Krishnamoorthy M, et al. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models[J]. European journal of operational research,2004,153(1):3-27.
- [48] Van den Bergh J, Beliën J, De Bruecker P, et al. Personnel scheduling: A literature review[J]. European journal of operational research,2013,226(3):367-385.
- [49] 程元军,罗利.基于排队论和整数规划的银行柜员弹性排班模型[J].管理学报,2010,7(10):1558-1565.
- [50] 胡修武,王瑞程,王秀利.呼叫中心坐席人员可加班的优化排班问题[J].系统工程,2019,37(05):139-149.
- [51] 许丹,刘洪伟,齐二石.基于护士排班问题的加班策略比较研究[J].系统工程学报,2018,033(002):279-288.
- [52] 王陟,李雁妮.一种智能高效的并行护士排班算法[J].西安电子科技大学学报,2019,46(02):47-53.
- [53] Mischek F, Musliu N. A Local Search Framework For Industrial Test Laboratory Scheduling [J]. Annals of Operations Research,2021,302(2):533-562.
- [54] 赵晓兴.谈我国智能环卫发展现状与未来趋势[J].品牌研究,2018,(02):179+181.

- [55] 王淑宝,曹曼.我国智慧环卫的发展现状与趋势[J].建设科技,2016,(21):26-28.
- [56] 王丽.连云港市连云区智慧环卫监管模式探索与实践[J].环境卫生工程,2017,25(1):94-96.
- [57] 蒋宇,谭任君,张海波.城市成活垃圾收运作业跟踪调查分析[J].城市管理与科技,2018.3(14)50-52.
- [58] 张多雨.引入装卸时间的垃圾收运路线优化[J].物流工程与管理,2016,38(7):125-127.
- [59] 李文锴.浅谈城市环卫机械设备现状及发展趋势[J].科技风,2017,(05)137.
- [60] 王利娟,韩雪芳,徐东洋.城市地下垃圾中转站选址-分配问题研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(2):12-21.
- [61] 衡婷,韩世莲.城市生活垃圾分类转运站选址指标体系分析[J].市场周刊,2020,33(12):130-134.
- [62] 朱超平,潘方杰,姚秉伟.基于 GIS 和 AHP 的垃圾中转站选址评估与优化研究[J].安庆师范大学学报(自然科学版),2018,24(1):78-82.
- [63] 刘方.基于层次分析法的垃圾中转站选址研究[J].河南科技,2021,40(34):135-138.
- [64] 陈熠民,江辉仙,骆泳婷,叶福伟,赖春雨.基于 AHP 的福州市垃圾中转站空间布局分析与评价[J].海南师范大学学报(自然科学版),2021,34(03):315-322.
- [65] 赵佳虹,凌雅婷.新冠疫情下医疗废物管理的选址-分配优化[J].交通科技与经济,2020,22(6):1-7.
- [66] DARVISH M, ARCHETTI C, COELHO L C, et al. Flexible twoechelon location routing problem[J]. European Journal of Operational Research,2019,277(3):1124-1136.
- [67] AMIRI M, AMIN S H, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. A lagrangean decomposition approach for a novel two-echelon nodebased location-routing problem in an offshore oil and gas supply chain[J]. Transportation Research,2019,128(8):96-114.
- [68] 胡大伟,刘成清,胡卉等.基于低碳视角的两阶段开放式选址路径问题-燃油车与电动车对比[J].系统工程理论与实践,2020,40(12):214-226.
- [69] Xin Xu,Jiang Qiangqiang,Li Sihang,Gong Shuaiyu,Chen Kang. Energy-efficient scheduling for a permutation flow shop with variable transportation time using an improved discrete whale swarm optimization[J]. Journal of Cleaner Production,2021,293(5).

- [70] Zeng Nianyin, Song Dandan, Li Han, You Yancheng, Liu Yurong, Alsaadi Fuad E.. A Competitive Mechanism Integrated Multi-objective Whale Optimization Algorithm with Differential Evolution[J]. *Neurocomputing*, 2020, 432(12):170-182.
- [71] 董海, 吴瑶, 齐新娜. 基于改进鲸鱼优化算法的血液供应链网络多目标鲁棒优化设计[J]. *计算机应用*, 2021, 41(10):3063-3069.
- [72] Alejandro Teran-Somohano, Alice E. Smith. Locating multiple capacitated semi-obnoxious facilities using evolutionary strategies[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 133(JUL.):303-316.
- [73] Majdi M. Mafarja, Seyedali Mirjalili. Hybrid Whale Optimization Algorithm with simulated annealing for feature selection[J]. *Neurocomputing*, 2017, 260:302-312.
- [74] Khosro Pichka, Amirsaman H. Bajgiran, Matthew E.H. Petering, Jaejin Jang, Xiaohang Yue. The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 121:97-112.
- [75] Fan Houming, Wu Jiabin, Li Xin, Jiang Xiaodan. Presenting a Multi-Start Hybrid Heuristic for Solving the Problem of Two-Echelon Location-Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery (2E-LRPSPD)[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 2020(1-2):1-24.
- [76] 胡文, 范强, 史月. 基于 AHP 和 GIS 的垃圾中转站选址研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(8):102-105, 109.
- [77] 朱超平, 潘方杰, 姚秉伟. 基于 GIS 和 AHP 的垃圾中转站选址评估与优化研究[J]. *安庆师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 24(1):78-82.
- [78] 肖迟仓, 孙宇博, 张至鑫. 基于 GIS 的农村生活垃圾回收中转站的选址——以徐州市铜山县为例[J]. *价值工程*, 2018, 37(24):109-111.
- [79] 张佳伟, 董春芳, 杨霄, 等. 东北林业大学垃圾中转站选址优化研究[J]. *经济师*, 2020, 34(7):253-254.
- [80] 王利娟, 韩雪芳, 徐东洋. 城市地下垃圾中转站选址—分配问题研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(2):12-21.
- [81] 杨帆, 陶蕴哲. "双 M" 导向下城市垃圾中转站选址的经济与生态二维评估——以长沙市为例[J]. *生态经济*, 2020, 36(5):80-84.

- [82] 席芳娟,张玉斌,秦婷.城市垃圾收运中转站选址分析[J].现代商业,2018,17(29):177-178.
- [83] 李倩茜,马慧民,陈一军,等.村镇生活垃圾中转站选址优化研究[J].环境卫生工程,2017,25(1):66-69.
- [84] BIAN T,HU J,DENG Y. Identifying influential nodes in complex networks based on AHP[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications,2017,479(4):422-436.
- [85] YANG Y,GANG X. Mining important nodes in directed weighted complex networks[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society,2017,97(5):1-7.
- [86] 杨帆,陶蕴哲.“双 M”导向下城市垃圾中转站选址的经济与生态二维评估——以长沙市为例[J].生态经济,2020,36(05):80-84.
- [87] 李海君,张耀文,杨月巧.考虑回收-补偿约束的卫星城镇生活垃圾中转站选址研究[J].运筹与管理,2020,29(04):30-35.
- [88] 王晨頔,穆东.考虑排队等待时间的北京市城市生活垃圾清运车辆调度优化[J].物流工程与管理,2018,40(5):68-70+51.
- [89] Hannan M A,Akhtar M,Begum R A. Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm[J]. Waste Management,2018,71(1):31-41.
- [90] 张爽,马慧民,雷悦,符俊波.考虑居民满意度的城市生活垃圾上门收运路线优化[J].系统管理学报,2019,28(03):545-551.
- [91] 符俊波,马慧民,张爽,雷悦.有垃圾量变动的生活垃圾收运车辆调度干扰管理研究[J].上海理工大学学报,2017,39(4):368-375.
- [92] 赵红霞,刘高森,李愈.基于随机游走的分类垃圾回收最优路径规划[J].交通运输工程与信息学报,2018,16(03):103-108.
- [93] 郭春玲,瞿昭晖,刘伟权,邓娟.新型冠状病毒肺炎疫情防控期间重症医学科护理排班模式[J].护理研究,2020,34(08):1476-1477.
- [94] Fairbrother J, Zografos K G, Glazebrook K D. A Slot-Scheduling Mechanism At Congested Airports That Incorporates Efficiency, Fairness, And Airline Preferences [J]. Transportation Science,2020,54(1):115-138.
- [95] Jacquillat A, Vaze V S. Interairline Equity In Airport Scheduling Interventions [J]. Transportation Science,2018,52(4):941-964.

- [96] Chavaillaz A, Schwaninger A, Michel S, et al. Work Design For Airport Security Officers: Effects Of Rest Break Schedules And Adaptable Automation [J]. *Applied Ergonomics*,2019,79:66-75.
- [97]冯霞,唐菱,卢敏.基于禁忌搜索算法的机场外航服务人员班型生成研究[J].*电子与信息学报*,2019,41(11):2715-2721.
- [98]冯霞,唐菱,卢敏.面向层次资质的机场外航服务人员排班研究[J].*交通运输系统工程与信息*,2019,19(02):235-241.
- [99]任新惠,尹晓丽.民航值机人员动态排班问题研究[J].*数学的实践与认识*,2019,49(01):26-33.
- [100]卢敏,王莉,唐菱.基于 Block Gibbs 的航空公司外航服务人员排班算法[J].*电子与信息学报*,2018,10:2513-2520.
- [101]李丹,罗军,徐伟彬,笪令.一种基于模拟退火算法的机场智能排班方法 [P].G06Q10/10:CN109377192A,2018-11-30.
- [102] Zeng L, Zhao M, Liu Y. Airport Ground Workforce Planning With Hierarchical Skills: A New Formulation And Branch-And-Price Approach [J]. *Annals of Operations Research*,2019,275(1):245-258.
- [103] Ner N, Gultekin H, Ko A. The Airport Shuttle Bus Scheduling Problem [J]. *International Journal of Production Research*,2020,59(24):7400-7422.
- [104] Han X, Zhao P, Meng Q, et al. Optimal Scheduling Of Airport Ferry Vehicles Based On Capacity Network [J]. *Annals of Operations Research*,2020,295(1):163-182.
- [105] Cacchiani V, Salazar-Gonzalez J J. Optimal Solutions To A Real-World Integrated Airline Scheduling Problem [J]. *Operations Research*,2018,58(3):215-217.
- [106] Ertogral K, Öztürk F S. An integrated production scheduling and workforce capacity planning model for the maintenance and repair operations in airline industry[J].*Computers & Industrial Engineering*,2019,127:832-840.
- [107]赵振武,李新源,崔文岳.机场旅客安检人员排班优化模式研究[J].*工业工程与管理*,2019,24(05):81-86+96.

附 录

一、访谈提纲

本文针对启迪环境中南区域环卫运营方面存在问题，设计如下访谈提纲：

（一）针对项目经理、项目运营主管的访谈提纲

（1）启迪环境中南区域是否有人员配置标准？是否适用于本项目的人员配置？如果不适用，项目上通常是如何进行人员配置和排班的？依据是什么？

（2）你觉得目前项目上的人员配置和排班合理吗？如果不合理，有什么改进建议？

（3）启迪环境中南区域每年都要求减员，减员之后，项目上的人员数量能满足作业需求吗？如果不满足，是如何实现作业需求的？

（4）你如何看待减员，有什么建议？甲方是如何看待公司不断减员的？

（5）保洁员的数量与服务质量是否有直接关系？

（6）为什么区域公司每年都进行了减员，而人工成本却增加了？你有什么建议？

（7）启迪环境中南区域是否有车辆作业路线规划指导手册吗？是否适用于本项目的作业路线规划？如果不适用，项目上通常是如何进行车辆作业路线规划的？依据是什么？

（8）你觉得目前项目上的作业路线是合理的吗？如果不是，有什么改进建议？

（9）为什么采取众多措施，甚至是减少了车辆设备，可为什么机械作业成本还是无法降低？你有什么建议？

（10）启迪环境中南区域是否有垃圾箱（点、桶）布置标准？是否适用于本项目的垃圾箱（点、桶）布置要求？如果不适用，项目上通常是如何进行调整的？依据是什么？

（11）区域公司是否有专门的部门或者岗位来统一收集各个项目的工作经验分享，然后经过整理进行推广？或者将公司先进的管理方法推广到各个项目中去？

（12）如果你有好的工作想法是否愿意分享？公司是否有良好的工作经验分享渠道？你是否在别人工作经验分享中收益？

（二）针对司机的访谈提纲

（1）你如何看待减员，有什么建议？

（2）你觉得目前司机的人员配置和排班合理吗？如果不合理，有什么改进建议？

(3) 启迪环境中南区域是否有车辆作业路线规划指导手册吗？是否适用于本项目的作业路线规划？如果不适用，项目上通常是如何进行车辆作业路线规划的？依据是什么？

(4) 你觉得目前项目上的作业路线是合理的吗？如果不是，有什么改进建议？

(5) 如果你有好的工作想法是否愿意分享？公司是否有良好的工作经验分享渠道？你是否在别人工作经验分享中收益？

(三) 针对保洁员的访谈提纲

(1) 你如何看待减员，有什么建议？

(2) 你觉得目前你所服务区域的人员配置和排班合理吗？如果不合理，有什么改进建议？

(3) 如果你有好的工作想法是否愿意分享？公司是否有良好的工作经验分享渠道？你是否在别人工作经验分享中收益？

二、一周休息两日的人员排班优化案例求解代码

$\min = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7;$

$x_1 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 16;$

$x_1 + x_2 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 13;$

$x_1 + x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \geq 12;$

$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_7 \geq 14;$

$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 16;$

$x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 20;$

$x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \geq 19;$

@gin(x1);

@gin(x2);

@gin(x3);

@gin(x4);

@gin(x5);

@gin(x6);

@gin(x7);

三、每日不同时段保洁人员数量可变动的人员配置优化案例求解代码

(1) 每日最少人数求解代码

$$\min=t1+t2+t3+t4+t5+t6;$$

$$t1+t4+t5+t6 \geq 18;$$

$$t1+t2+t5+t6 \geq 22;$$

$$t1+t2+t3+t6 \geq 24;$$

$$t1+t2+t3+t4 \geq 22;$$

$$t2+t3+t4+t5 \geq 26;$$

$$t3+t4+t5+t6 \geq 20;$$

$$@gin(t1);$$

$$@gin(t2);$$

$$@gin(t3);$$

$$@gin(t4);$$

$$@gin(t5);$$

$$@gin(t6);$$

(2) 每周最少人数求解代码

$$\min=x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7;$$

$$x1+x3+x4+x5+x6+x7 \geq 34;$$

$$x1+x2+x4+x5+x6+x7 \geq 34;$$

$$x1+x2+x3+x5+x6+x7 \geq 34;$$

$$x1+x2+x3+x4+x6+x7 \geq 34;$$

$$x1+x2+x3+x4+x5+x7 \geq 34;$$

$$x1+x2+x3+x4+x5+x6 \geq 34;$$

$$x2+x3+x4+x5+x6+x7 \geq 34;$$

$$@gin(x1);$$

$$@gin(x2);$$

$$@gin(x3);$$

$$@gin(x4);$$

$$@gin(x5);$$

```
@gin(x6);
```

```
@gin(x7);
```

四、点对点的运输路线优化案例代码

(1) 最小成本代码

```
model:
```

```
!点对点运输路线优化数学模型求解;
```

```
sets:
```

```
!录入运输路线经过的所有节点，节点的顺序不能乱（从左到右，从上到下）；
```

```
cs/S, A1, A2, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, D1, D2, D3, E1, E2, F/;
```

!用节点描述路径走向图，即罗列稀疏集，路径走向表达方式为：路径两点之间用空格隔开，不同路径用逗号隔开如：A1 B1, A1 B2，每个阶段用回车符分开。并附带 w, x 属性值，具体如下；

```
dl(cs, cs)/
```

```
S A1, S A2,
```

```
A1 B1, A1 B2, A1 B3, A2 B2, A2 B3, A2 B4,
```

```
B1 C1, B1 C2, B2 C1, B2 C2, B3 C2, B3 C3, B4 C2, B4 C3,
```

```
C1 D1, C1 D2, C2 D2, C2 D3, C3 D2, C3 D3,
```

```
D1 E1, D1 E2, D2 E1, D2 E2, D3 E1, D3 E2,
```

```
E1 F, E2 F/: w, x;
```

```
endsets
```

```
data:
```

```
!w 是以路径相对应的度系数矩阵，排列方式与路径一一对应；
```

```
w=25.91 20.91
```

```
10.35 20.37 31.79 40.16 37.18 32.66
```

```
30.91 39.83 25.76 27.09 20.47 18.7 42.77 22.77
```

```
18.76 16.41 11.64 16.52 35.39 31.56
```

```
23.02 28.16 27.9 14.08 34 33.97
```

```
24.02 19.48;
```

!列出满足条件的 x 路径组合, @NEWLINE(1) 函数是换行符, 括号中的参数为换行行数, @NAME(x) 函数是显示 x(i, j) 实际代表元素, 例如矩阵中通用表示 x(2, 1)=1, 实际元素是 x(A, B1)=1;

```
@TEXT() = @WRITE('最优运输径组合如下:', @NEWLINE(2));
@TEXT() = @WRITE('-----
-----', @NEWLINE(1));
@text()=@writefor(d1(i, j)|x(i, j)#GT# 0:@NAME(x), '=' , x(i, j), ' ; ');
@TEXT() = @WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT() = @WRITE('-----
-----', @NEWLINE(2));

enddata

!求节点(城市)总数;
n= @size(cs);

!求最小权数总值;
min= @sum(d1:w*x);

!约束条件;
@for(cs(i)|i #ne# 1 #and# i #ne# n:
    @sum(d1(i, j): x(i, j))= @sum(d1(j, i): x(j, i)));
@sum(d1(i, j)|i #eq# 1: x(i, j))=1;

End
```

(2) 最短距离代码

```
model:

!点对点运输路线优化数学模型求解;

sets:

!录入运输路线经过的所有节点, 节点的顺序不能乱(从左到右, 从上到下);
cs/S, A1, A2, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, D1, D2, D3, E1, E2, F/;

!用节点描述路径走向图, 即罗列稀疏集, 路径走向表达方式为: 路径两点之间用
空格隔开, 不同路径用逗号隔开如: A1 B1, A1 B2, 每个阶段用回车符分开。并附带
w, x 属性值, 具体如下;
```

```
d1(cs,cs)/
S A1,S A2,
A1 B1,A1 B2,A1 B3,A2 B2,A2 B3,A2 B4,
B1 C1,B1 C2,B2 C1,B2 C2,B3 C2,B3 C3,B4 C2,B4 C3,
C1 D1,C1 D2,C2 D2,C2 D3,C3 D2,C3 D3,
D1 E1,D1 E2,D2 E1,D2 E2,D3 E1,D3 E2,
E1 F,E2 F/: w,x;
```

```
endsets
```

```
data:
```

!w 是以路径相对应的度系数矩阵，排列方式与路径一一对应；

```
w=6.29 4.84
2.29 4.76 7.16 9.21 8.77 7.49
7.36 9.22 4.6 6.33 4.61 4.25 9.9 5.32
3.35 3.73 2.67 3.72 7.9 7.66
4.11 6.4 6.4 3.32 7.59 7.72
5.46 4.31;
```

!列出满足条件的 x 路径组合，@NEWLINE(1)函数是换行符，括号中的参数为换行行数，@NAME(x)函数是显示 x (i, j) 实际代表元素，例如矩阵中通用表示 x(2,1)=1, 实际元素是 x (A, B1) =1;

```
@TEXT() = @WRITE('最短运输径组合如下:',@NEWLINE(2));
@TEXT() = @WRITE('-----
-----',@NEWLINE(1));
@text()=@writefor(d1(i,j)|x(i,j)#GT# 0:@NAME(x),'=',x(i,j),' ');
@TEXT() = @WRITE(@NEWLINE(1));
@TEXT() = @WRITE('-----
-----',@NEWLINE(2));
enddata
!求节点(城市)总数;
n= @size(cs);
```

```

!求最小权数总值;
min= @sum(d1:w*x);
!约束条件;
@for(cs(i) | i #ne# 1 #and# i #ne# n:
    @sum(d1(i, j): x(i, j))= @sum(d1(j, i): x(j, i)));
@sum(d1(i, j) | i #eq# 1: x(i, j))=1;
End

```

五、回路型车辆作业路线规划优化方案相关资料

（一）中国邮递员模型的奇偶点图上作业法

中国邮递员问题是邮递员在某一地区的信件投递路程问题，即邮递员每天从邮局出发，走遍该地区所有街道再返回邮局，他应如何安排送信的路线可以使所走的总路程最短。这个问题由中国学者管梅谷提出，并给出了解法——“奇偶点图上作业法”。

把环卫作业区域看作一个连通的带权无向图 G ，其中结点对应街道叉口，边对应街道，权对应街道的长度，那么优化环卫作业路径问题 G ，就是在连通带权无向图 G 中，寻找经过每边至少一次且权和最小的回路。

中国邮递员模型的奇偶点图上作业法：

①把 G 中所有奇点配对，将每对奇点之间的一条路上的每边改为二重边，得到一个新图 G_1 ，新图 G_1 中没有奇点，即 G_1 为多重欧拉图。

②若 G_1 中每一对顶点之间有多于 2 条边连接，则去掉其中的偶数条边，直到每一对相邻顶点至多由 2 条边连接，得到图 G_2 。

③检查 G_2 的每一个回路 C ，若 C 上重复边的权和超过此圈权和的一半，则把其中的重边改为单边，单边改为重边。直到所有回路都复合要求，得到图 G_3 。

④ G_3 为对应 G 的欧拉回路，即为最优解。

（二）回路型车辆作业路线规划优化方案最优路线代码求解方法

本案例通过中国邮路问题的求解办法找到了南昌县象湖项目第 6 片区最优作业路线，为了便于推广该优化模型的使用及验证优化方案的准确性，此处采用 lingo 软件进行编程求解最优路线，具体操作如下：

附表 2 连通判断系数矩阵表

Table with 34 columns (A1 to J4) and 34 rows, containing binary connectivity coefficients between nodes.

将编制好的数据矩阵，复制到 lingo 代码中进行求解，在 lingo 软件求得结果如下：

最优路径的总长度为 80863 米，需要行走两次的路段为：A2-A3, A4-A5, B1-B2, B2-C1, B6-C5, D1-E1, D5-D6, E5-E6, F1-F2, F2-F3, F3-F4, F3-F8, F7-G4, G1-G2, G2-G3, G3-H4, H1-I1, H5-I4, J2-J3。与“奇偶点图上作业法”所求得的结果完全一致。

求解代码如下：

```
model:
sets:
!将各节点按如下格式和顺序填写到代码中;
city/A1, A2, A3, A4, A5, A6, B1, B2, B3, B4, B5, B6, C1, C2, C3, C4, C5, D1, D2, D3, D4, D5, D6, E1, E2, E3, E4, E5, E6, F1, F
2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, G1, G2, G3, G4, H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, I1, I2, I3, I4, J1, J2, J3, J4/;
!将距离矩阵系数赋值给 a、连通判断矩阵系数赋值给 c;
path1(city, city):a, c;
!x 表示我们需要求出的各点之间行走的路径和次数;
path2(city, city):x;
endsets
data:
!将距离矩阵系数赋值给 a、连通判断矩阵系数赋值给 c;
a=100000 530 100000 100000 100000 100000 777 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
530 100000 633 100000 100000 100000 100000 755 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 633 100000 1042 100000 100000 100000 100000 729 100000 100000 100000 100000 100000 100000
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000
```


六、对有垃圾收运时间要求的垃圾站点选址布局优化案例代码

```
min=x1+x2+x3+x4+x5+x6;
```

```
x1+x2>=1;
```

```
x1+x2+x6>=1;
```

```
x3+x4>=1;
```

```
x3+x4+x5>=1;
```

```
x4+x5+x6>=1;
```

```
x2+x5+x6>=1;
```

```
@bin(x1);
```

```
@bin(x2);
```

```
@bin(x3);
```

```
@bin(x4);
```

```
@bin(x5);
```

```
@bin(x6);
```

七、垃圾运输总距离最短或总运输量最小的垃圾站点选址布局优化案例代码

```
sets:
```

```
w/A1..A7/:d1;
```

```
link(w,w):g,f,t;
```

```
endsets
```

!列出各点之间的直接距离，即两点之间的直线距离（不跨点，两点之间没有其他间隔点），凡事两点之间没有直接连线，即两点之间有跨点或其他间隔点，都用 ∞ 表示，这里取用一个极大值 1000 代替，所取值可以随意，但是要远大于现有距离值；

```
data:
```

```
f=0 3.5 4.2 1000 1000 1000 8.3
```

```
3.5 0 2.3 1000 1000 1.5 1000
```

```
4.2 2.3 0 2.4 6.1 2.5 1000
```

```
1000 1000 2.4 0 3.2 1.8 1000
```

```
1000 1000 6.1 3.2 0 1000 4.2
```

```
1000 1.5 2.5 1.8 1000 0 1.5
```

```
8.3 1000 1000 1000 4.2 1.5 0;  
@TEXT()=@table(t);  
enddata  
CALC:  
@for(w(k1):  
  @for(w(i) | i #eq# k1:@for(w(j):d1(j)=f(i,j))); !逐行（一行代表一个点到所  
有点的距离）赋值给 d1,即逐步求各个点到所有点的最短距离;  
  @for(w(k2): !通过 k2 循环参数,执行集合 w 元素个数次数,求出已经赋值(给定  
点,即一行)的 d1 到所有点的最短距离;  
  @for(w(j):@for(w(i):g(i,j)=f(i,j)+d1(i));  
  d1(j)=@min(w(i):g(i,j)));  
  @for(w(i) | i #eq# k1:@for(w(j):t(i,j)=d1(j)));!用矩阵 t 来记录每一次求出  
的给定点到所有点的距离,即用矩阵 t 来记录已经求出的每行的数值;  
);  
endcalc
```


后 记

光阴似箭，日月如梭，3 年的 MBA 研究生求学即将结束。回想两年多的学习生活，面对培育我的母校，心中无限感慨。

衷心感谢我的导师林艳教授，在论文的写作过程中，导师给予了我很多的建议，感谢导师在忙碌的教学工作中挤出时间来审查、修改我的论文。是导师的指引和鼓励让我摆脱了恐惧，树立了信心，使我得以战胜前行中的一个一个困难，没有她，我的论文完成几乎是不可想象的。导师林艳教授治学严谨，勤奋敬业，严肃的外表下有一颗对学生负责的炽热的心。同时感谢在论文写作过程中给予我教导和帮助的所有老师。

感谢同学们对我的帮助，特别是疫情期间，兰州的同学帮我们到学校找老师签字，递交相关资料，减少了我们很多的麻烦，特别是距离兰州很远的我。

感谢亲戚朋友对我的支持，才能使我顺利完成学业。

感谢公司对我的支持和帮助，让我在上班时间能顺利完成学业，在论文写作阶段，公司领导予以了我很大的支持，让我能顺利到各个项目上去调研，并且拿到相关数据，在这里也非常感谢中南区域各个项目公司的项目经理和管理人员对我的支持和帮助。

最后，我要感谢百忙之中抽空评阅论文以及参加答辩的各位专家、教授，诚挚的希望给予批评和指正。

作者：许辉兵

2022 年 9 月 28 日