|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分类号 | **TV512** | |  | | | 密 级 | | 公开 |
| U D C |  | |  | | | 编 号 | | 10486 |
|  | | | | | | | | |
| 武汉大学logo  **硕 士 学 位 论 文** | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |
| 城市余泥渣土智能调运方案生成方法研究与系统开发 | | | | | | | | |
|  | | 研究生姓名 | | ： | 游 川 | |  | |
| 学号 | | ： | 2020202060185 | |
| 指导教师姓名、职称 | | ： | 刘 全 副教授 | |
| 校外导师姓名、职称 | | ： | 高级工程师 | |
| 专业类别（领域） | | ： | 水工结构工程 | |
|  | |  |  | |
|  | | | | | | | | |
| 二〇二三年五月 | | | | | | | | |

Research on Decision-making Method and System Development of External Material Transportation Scheme for Large-scale Water Conservancy and Hydropower Engineering

By You Chuan

：Associate.Prof. Liu Quan

May, 2022

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（签名）：

2023年 5 月 12 日

摘 要

**关键词：**

**ABSRTACT**

**Keywords:**

目 录

[摘 要 I](#_Toc123206416)

[ABSRTACT II](#_Toc123206417)

[第1章 绪论 4](#_Toc123206418)

[1.1 研究背景及意义 4](#_Toc123206419)

[1.2 问题提出及分析 6](#_Toc123206420)

[1.3 国内外研究现状 7](#_Toc123206421)

[1.3.1 城市建设余泥渣土管理问题研究现状 7](#_Toc123206422)

[1.3.2 水利工程施工土石方调配模型问题研究现状 8](#_Toc123206423)

[1.3.3 余泥渣土智能调运算法问题研究现状 9](#_Toc123206424)

[1.4 本文研究内容及思路 10](#_Toc123206425)

[1.4.1 研究内容 10](#_Toc123206426)

[1.4.2 研究方法及技术路线 10](#_Toc123206427)

[第2章 城市余泥渣土多层中转调运模型 12](#_Toc123206428)

[2.1 余泥渣土调运问题分析 12](#_Toc123206429)

[2.1.1 问题描述 12](#_Toc123206430)

[2.1.2 余泥渣土及调运网络特性分析 14](#_Toc123206431)

[2.2 构建余泥渣土多层中转调运优化模型 16](#_Toc123206432)

[2.2.1 层级模型的构建 16](#_Toc123206433)

[2.2.2 计算单位优化目标成本 17](#_Toc123206434)

[2.2.3 余泥渣土多层中转调运优化模型 18](#_Toc123206435)

[2.2.4 考虑约束条件的余泥渣土多层中转调运优化模型 21](#_Toc123206436)

[2.3 本章小结 22](#_Toc123206437)

[第3章 基于改进遗传算法的智能优化算法研究 23](#_Toc123206438)

[3.1 模型求解算法分析 23](#_Toc123206439)

[3.2 智能优化算法理论概述 23](#_Toc123206440)

[3.3 各种启发式算法择优 24](#_Toc123206441)

[3.3.1 蚁群算法框架 25](#_Toc123206442)

[3.3.2 模拟退火算法框架 25](#_Toc123206443)

[3.3.3 遗传算法框架 26](#_Toc123206444)

[3.3.4 算法优缺点分析及择优 26](#_Toc123206445)

[3.4 遗传算法的构建 27](#_Toc123206446)

[3.4.1 基因编码 27](#_Toc123206447)

[3.4.2 种群初始化与基因解码 27](#_Toc123206448)

[3.4.3 适应度函数的构建 27](#_Toc123206449)

[3.4.4 遗传操作 27](#_Toc123206450)

[3.4.5 交叉、变异算子 27](#_Toc123206451)

[3.5 遗传算法的改进 27](#_Toc123206452)

[3.5.1 基因编码的改进 27](#_Toc123206453)

[3.5.2 交叉、变异算子的改进 27](#_Toc123206454)

[3.5.3 选择算子的改进 27](#_Toc123206455)

[3.6 改进遗传算法应用与效果分析 27](#_Toc123206456)

[3.7 本章小结 27](#_Toc123206457)

[第4章 城市工程建设余泥渣土智能调运系统开发 28](#_Toc123206458)

[4.1 余泥渣土智能调运系统概述 28](#_Toc123206459)

[4.1.1 必要性分析 28](#_Toc123206460)

[4.1.2 系统框架及功能设计 28](#_Toc123206461)

[4.1.3 逻辑架构 28](#_Toc123206462)

[4.2 数据采集模块设计 28](#_Toc123206463)

[4.2.1 基于云平台的数据采集方式 28](#_Toc123206464)

[4.2.2 人工采集数据输入接口 28](#_Toc123206465)

[4.3 数据储存、管理与预处理 28](#_Toc123206466)

[4.3.1 数据库的建立与运行 28](#_Toc123206467)

[4.3.2 基于编码的数据储存与管理 28](#_Toc123206468)

[4.3.3 基于SQL的数据预处理 28](#_Toc123206469)

[4.4 智能算法程序设计 28](#_Toc123206470)

[4.4.1 连接数据库 28](#_Toc123206471)

[4.4.2 导入模型 28](#_Toc123206472)

[4.4.3 遗传算法得出最终方案 28](#_Toc123206473)

[4.5 本章小结 28](#_Toc123206474)

[第5章 工程案例分析 29](#_Toc123206475)

[5.1 工程背景 29](#_Toc123206476)

[5.1.1 工程简介 29](#_Toc123206477)

[5.1.2 交通运输网络信息 29](#_Toc123206478)

[5.1.3 各项目运转情况信息 29](#_Toc123206479)

[5.1.4 渣土字典 29](#_Toc123206480)

[5.1.5 场站信息 29](#_Toc123206481)

[5.1.6 运输车辆信息 29](#_Toc123206482)

[5.2 模型建立与智能算法参数校正 29](#_Toc123206483)

[5.2.1 多层中转余泥渣土调运优化模型的建立 29](#_Toc123206484)

[5.2.2 遗传算法预设参数校正 29](#_Toc123206485)

[5.3 系统应用 29](#_Toc123206486)

[5.3.1 系统运行过程 29](#_Toc123206487)

[5.3.2 运行结果总览 29](#_Toc123206488)

[5.4 本章小结 29](#_Toc123206489)

[第6章 结论与展望 30](#_Toc123206490)

[6.1 研究结论 30](#_Toc123206491)

[6.2 展望 30](#_Toc123206492)

[攻读硕士学位期间发表的科研成果 33](#_Toc123206493)

# 绪论

## 研究背景及意义

城市是现代人类文明的载体，城市化是现代化的重要标志之一。近年随着我国经济的快速发展，城市规模快速增长，党的二十大提出要加快构建新发展格局，着力推动高质量发展，其中的促进区域协调发展指出要提高城市规划、建设、治理水平，加快转变超大特大城市发展方式[1]。随着我国城市化进程明显加快，城市人口、功能和规模不断扩大，发展方式、产业结构和区域布局发生了深刻变化，城市运行系统日益复杂，安全风险不断增大。城市安全基础薄弱，安全管理水平与现代化城市发展要求不适应、不协调的问题比较突出[2]。

余泥渣土，是指城市建设单位、施工单位新建、改建、扩建和拆除各类建筑物建筑过程中产生的弃土，弃料以及其他废弃物，在城市建设过程中一般由城市建设的受纳场进行统一堆置及资源化处理[3,4]。随着城市快速发展，城市建设过程中的余泥渣土剧增，建设弃渣需求强烈，在人口聚集度高的大城市中，每年产生的渣土量数量惊人，例如深圳市2017-2020年预计年均产生的余泥渣土总量就达到了9150万方[5]。巨量的余泥渣土使渣土受纳场堆渣的速度远超规划预期，城市渣土处置问题日益突出，“渣土围城”的隐疾已成为很多城市发展的痛点[5,6]。近年来，一些大型城市甚至由于余泥渣土处置不当发生严重特大生产安全事故，给人民群众生命财产安全造成重大损失，暴露出城市安全管理存在不少漏洞和短板[2]，如2015年12月20日，广东省深圳市红坳余泥渣土受纳场发生滑坡，是目前世界最大的渣土场滑坡，造成77人遇难、33栋建筑物被毁，直接经济损失8.81亿元[7,8]。彼时针对此情况，建设规模较大的城市对大规模的工程渣土排放更多采取异地处置的方式，如深圳市2017年海陆外运量达到了7418万立方米，约占总量的80%[9]。然而过度地依赖异地处置，缺乏规划和实施计划，具有高度不可控的特点[10]，因此越来越多的城市开始编制渣土本地消纳计划，寻求渣土除受纳场堆渣方式以外的多元化消纳方式。

另外在城市建设中的大部分需要土石方填筑的工程，因不具备类似大型水利水电工程可择地选取料场开采土石料的工程条件，面临着料源稀缺、料量稀少的尴尬局面，只能采取从城市周边高价收购的方式，更有甚者选择铤而走险，违规盗采。

综合上述两个方面，一方面，渣土处置缺乏统筹规划，受纳场稀缺，合理调配余泥渣土困难，另一方面，城市建设填筑工程，料源稀缺。因此可考虑由城市当地填筑工程作为余泥渣土的受纳方，解决当前渣土处置困难的问题。例如上海浦东新区为解决重大工程渣土消纳出路，在浦东机场圈围工程中以渣土回填代替吹沙造地，提供大量余泥渣土的消纳容量[11]。在有多个余泥渣土产地和多个渣土中转场地和多个渣土受纳场地且受纳场限制增多、运输网络限制条件增多的情况下，能否生成在整个城市范围内全局最优、成本最低的余泥渣土调运方案成为了能否合理有效解决渣土处置问题的关键问题。

城市余泥渣土调运方案智能生成是指，在城市工程建设阶段综合分析余泥渣土生产和受纳的时间、空间（距离）、质量（料性）、数量等多维工程条件和运输限制条件，从系统的观点出发，立足于方案规划的全局性及整体方案的优越性，通过智能算法的手段，生成全局最优、成本最低的调运方案。最终生成的调运方案将作为城市余泥渣土管理调运的指导性文件，以及估算余泥渣土调运、管理费用的主要依据，是保障城市余泥渣土供应调运以及运营管理的协调均衡，有力有序推进各项工作的基础性文件。可见，城市余泥渣土调运方案事关城市管理建设全局，对构建城市新发展格局，促进区域协调发展，保证城市高质量发展都有重要影响。因此，开展城市余泥渣土调运方案智能生成的系列问题的研究具有重要的工程实用意义和工程科学价值。

除此之外，城市余泥渣土调运方案智能生成还涉及大量的受纳场站网络信息采集、复杂参数计算与生成以及渣土料性信息编码存储等工作。而现有城市余泥渣土的处置和调配问题，主要依靠人工收集受纳场站网络、运输条件以及费用等各类资料数据，借助Excel、CAD等工具完成资料整理和数据参数计算，并结合工程经验完成人工规划和项目间自发协调均衡。这种方法数据采集和参数计算效率低，耗时耗力，且工程经验和项目负责人信息广度会带有较强的主观性和偶然性。对于城市区域级的大范围余泥渣土受纳场网络，数据量大，结构复杂，常需要消耗数月时间，数据储存和管理困难，且难以保证数据精度。目前，我国在大数据建设方面已经走在了世界前列，而后对于数据信息的应用，推动信息化、数字化建设转向人工智能、熟悉孪生建设将成为新一轮的科技发展趋势。在水利工程领域，加快推进水利现代化建设使当前我国实现社会主义现代化的重要战略目标。而水利信息化、智能化建设作为水利现代化的重要组成部分，传统工程技术与智能技术的结合将逐渐成为今后水利行业发展的必然趋势。因此，在国家大力推进传统工程信息化、智能化建设的背景下，本研究将新兴智能算法与传统水电工程土石方调配理论结合应用到城市余泥渣土调运问题中，结合计算机技术、数据库以及互联网等等技术，基于本文提出的调运模型和智能优化算法，开发了城市余泥渣土智能调运系统，旨在帮助本领域工程人员进行城市余泥渣土调运方案设计，实现了从受纳场站网络信息采集、数据参数计算到调运方案智能生成整个余泥渣土方案生成的信息化管理，为余泥渣土调运问题提供了一种智能化闭环解决思路。

## 问题提出及分析

城市余泥渣土调运是将区域范围内的余泥渣土从各个产渣地点统筹规划调运至相应的受纳地点。而余泥渣土调运方案生成问题需要在综合分析受纳的时间和空间、渣土料性、运输强度及受纳场站承受能力等因素的基础上，生成满足可行、经济、工程实际需求以及符合工程建设进度控制等要求的调运方案。目前，我国城市余泥渣土多采用重型卡车公路调运的方式运送至各中转处理场或受纳场站，与其他领域的调运问题不同[12]，城市余泥渣土的调运网络具有以下特征：

（1）约束性。城市轨道交通网络大多对运载余泥渣土的卡车有通行时间和限行载重的特殊要求，尤其对于载重量较大的重型卡车，其载重和尺寸往往会超过一般城市路段的限制标准，在规划调运方案时，必须考虑到城市路段的限行时间窗以及对重型卡车尺寸与载重的限制条件[13]；

（2）时变性。余泥渣土调运网络的时变性是指在不同的工程规划时段，区域范围内余泥渣土产量和受纳场站承受渣土的能力等条件是不同的，即调运网络是非静态的，随工期推进而动态变化。同时由于工程建设周期较长，在施工期内，调运网络会因为地方交通规划以及工程建设交通规划而新建或者改建公路等交通设施；也可能因交通设施被破坏，造成调运网络的改变，因此城市余泥渣土调运网络具有时变性。

（3）层次性。受纳场站除了作为余泥渣土调运的终点，还可以作为渣土调运的中转场，通过渣土回采，成为下一轮余泥渣土调运的起点。如此，余泥渣土的调运从渣土产渣地通过多层受纳中转站最后调运至无法中转与再利用的终点受纳场站，形成了一个具有层次性、彼此相互连通的多层余泥渣土调运网络。由此表现了余泥渣土调运网络的层次性。

（4）供需相对平衡性。余泥渣土在调运区域内不仅可调运至受纳场站，还可以调运至其他需要相应料性渣土的填筑工程现场进行再利用，在生成调运方案时，应首要考虑满足产渣与填筑的供需相对平衡，以减少受纳场站的处置压力和提高余泥渣土的再利用效率。

可见，城市余泥渣土调运是一个同时具有约束性、时变性、层次性及渣土供需相对平衡性的大规模区域调运问题。现有研究中，针对其他领域普通调运问题的求解方法，一般是通过构建单层或双层调运网络模型，将调运场站抽象的视为网络节点，以网络的路径边权值反映运距、时间、费用等优化目标，然后采用合适的优化方法进行求解求优。这种单层或双层的网络模型缺少了对工程项目渣土供需相对平衡的优先考虑，且网络模型过于单薄，无法反映余泥渣土可多层中转反复再利用的资源特性。因此，不能仅从物资调运的角度研究城市余泥渣土调运问题。也就是说，城市余泥渣土调运方案生成问题除了要考虑交通网络特征之外，还应该立足于整体，从系统角度出发，构建贴合余泥渣土调运网络特性的调运模型，进行余泥渣土调运方案的生成。

为此，本研究从一般的物资调运问题出发，为满足余泥渣土的层次性和供需相对平衡性，立足于水利水电工程施工中的土石方调配相关理论，引入群智能优化算法，提出一种区域级余泥渣土调运方案全局求优的生成方法，该方法框架为图 1.1。具体步骤为：首先根据渣土分级、渣土兼容性、渣土供求质—量关系，在一般的土石方平衡问题的基础上，构建考虑多料源、多目标、多料性及渣土资源化和综合利用等特点的城市余泥渣土多层调运规划模型。然后，本研究基于改进遗传算法设计了一种离散化时间轴的分层分段求解算法对模型进行全局的求解求优，最后通过数据校核得到符合工程实际需求的城市余泥渣土调运方案。案例结果表明：本研究提出的方法可以有效的求解城市余泥渣土调运方案规划问题，为相关领域的物资运输问题研究提供了新的解决思路。

图 1.1 余泥渣土调运方案生成方法框架

同时，本研究还考虑了实际工程中存在的数据采集困难、数据计算处理效率低以及余泥渣土调运方案规划周期长等问题。为此，本研究基于本文提出的余泥渣土多层调运模型和改进遗传算法，结合计算机技术、数据库技术以及物联网等技术，开发了城市工程建设余泥渣土智能调运系统。本系统将复杂的调运规划模型采用高级编程语言进行模拟实现，使用计算机对不同方案进行大量的计算、迭代、分析和比较，最后通过优化得到最优方案；各种设计数据、计算所需参数，通过T-SQL编程储存在数据库中；工程人员可以在用户界面输入数据处理指令，将复杂繁琐的计算工作交给计算机完成，并将计算产生的设计结果输出至Excel表格中，使工程人员及时对方案做出判断和修改。本系统实现了调运网络数据快速采集、数据参数自动化计算和编码化存储以及调运方案属性信息的直观展示等功能，将其应用到城市余泥渣土调运方案规划中，可以大大提高工作效率，降低时间成本，为本领域工作人员进行方案规划提供了一定技术支持。同时在国家大力推进工程数字化、信息化建设的背景下，将传统工程技术与新兴技术结合，助力水利信息化、智能化建设，也是推进水利现代化建设的重要体现。

## 国内外研究现状

* + 1. 城市建设余泥渣土管理问题研究现状

城市余泥渣土管理问题旨在探索余泥渣土科学高效的处置方式以提高城市管理的科学性。在余泥渣土管理方面，James[14]早在2004年建立了建筑垃圾管理的一般模型，模型由建筑垃圾估算、分离经济型分析和处理经济性分析三大模块组成。Ko Hyun Jeung 和 Gerald W.Evans[15]从第三方物流企业的角度构建了混合整数非线型规划物流模型。Huang[16]等针对城市渣土运输问题，利用 Pareto 算法并结合GIS系统平台，建立多目标路径优化模型，以匹配路线选择的需求标准。国内学者的研究多集中于渣土智慧运输管理上，赵坤[17]、张静[18]、王宁等[19]等学者分别研究了应用BIM+GIS技术、GPS和载重量监测等技术监测城市渣土运输过程，并可与执法管理无缝衔接，建立综合监管体系。

上述研究尝试和方法虽然进行了一些探索，然而基于前述问题分析（1.2节），我国的大中型城市建设渣料数量巨大、种类繁多；且各项目进度不一、渣料生产和需求时段多变；余泥渣土资源化技术使部分渣料在系统中会改性，变为固化弃料甚至可用料。渣料调运规划必须基于时间、空间、物料性质、物料数量、受纳场容量和当前存量等多维参数，综合考虑物料运输、加工、再利用的成本和效益，选定优化方案，达到成本最低、环境最优、安全性高等目标。现有研究虽然取得了一定的成果，但主要聚焦于城市渣土的治理、监测和管理，对余泥渣土调运模型和模型求解算法等方面的研究尚不充分，研究角度单一，全局性不足，尚未形成成熟的理论体系和方法框架。

本文着力于当前不足，从全局角度出发，针对问题本身特点，立足于水利水电工程施工中的土石方调配相关理论，引入群智能优化算法，提出一种区域级余泥渣土调运方案全局求优的生成方法。因此，本文在城市余泥渣土管理问题研究现状的基础上，从水利工程施工土石方调配模型和模型求解算法两个角度介绍了相关问题的研究现状。

* + 1. 水利工程施工土石方调配模型问题研究现状

土石方调配问题天然具有线性规划特征，因此建立线性规划（Linear Programming Model，LPM）模型是最自然的想法。周厚贵[20]建立了三峡工程二期围堰料场优化选择的LP模型，寻求各料场的最优取料数量，以最小化料物开采与运输成本。Mohamad[21]等在考虑道路工程中开挖区/弃土区容量模糊性以及费用系数模糊性的基础上，建立了道路工程模糊LP土石方调配模型。大型工程的土石方调配是一个高维的复杂系统，王晓梅[22]等根据面板堆石坝土石方调配的时空关系，将调配过程划分为空间层和时间层，通过空间层与时间层的协调建立了土石方大系统分解协调模型（Large-Scale System Resolution-Coordination Model，LSSRCM）。土石方调配需要与工程进度相协调，是空间调配关系与时间调配关系的联合优化，是一个分阶段动态逐步实施的过程，这与动态规划的背景一致。胡程顺[23]等、柳志新[24]等考虑了调配系统的时间因素，建立了土石方动态优化模型（Dynamic Programming Model，DPM）。申明亮[25]等、柳志新[24]等则考虑土石方调配系统中的道路运输强度的平衡与限制，建立了土石方调配费用与道路运输强度的多目标决策模型，在求解时将道路运输强度目标转化为约束，进而实现单目标化，所得到的土石方调配方案在满足道路系统运输能力的前提下，实现系统费用最小化。此外，还有Jayawarddane等建立了道路工程考虑时间要素的整数规划土石方调配模型[26]。胡志根等通过对砂石料场建设、开采，加工及运输费用组成及其相互关系的系统分析，建立了料场规划的混合整数规划模型，实现砂石系统费用的最小化[27]。

可以看出，土石方调配模型考虑了料物规划、料物平衡等因素，对城市余泥渣土调运有良好的借鉴意义。

* + 1. 余泥渣土智能调运算法问题研究现状

在求解土石方调配模型时，可根据土石方调运的线性特征，以单纯形法（大M法、人工变量法）及其相关分析方法（隐枚举法、分枝定界法）求解工程中的土石方调运问题，但随着计算方法与求解模型研究的深入，土石方平衡计算从仅考虑总量到其特征、特性上的均衡，到需要根据其料性和中转场数量引入匹配矩阵，解决多点多源土石方调配问题，已经属于NP-Hard问题。

近年来，随着计算机技术的不断进步，使得求解大规模复杂网络成为可能，众多学者研究设计了更有效的现代智能优化算法，如遗传算法、蚁群优化算法、模拟退火算法等。由于现代智能优化算法在求解NP-Hard问题的表现较好，被学者广泛应用到物资调运和土石方调配等领域中。王仁超等运用蚁群优化算法和粒子群算法求解土石方调配LP模型，该算法可放松模型中的线性约束，目标函数和约束条件为非线性的情况同样适用。王占中等使用多层编码遗传算法对危险品运输调度模型求解。程博等提出改进遗传模拟退火算法求解大件公路运输路径选择优化模型。曹庆奎等设计了遗传蚁群算法求解港口集卡路径成本优化模型。刘经宇等在城市交通路径选择问题中，引入蚁群算法并将其改进为可同时满足对路程和时间最优的路径搜索算法。唐加福等提出一种基于划分策略的蚁群算法PMMAS求解货物权重车辆路径问题，并与其他常用的启发式算法进行比较分析，表明了算法的有效性。李智运用蚁群算法对某一钢铁企业煤炭运输问题进行优化计算。

与传统的精确求解算法相比，现代智能优化算法具有优秀的解决NP-Hard问题的能力，当问题的规模不大时，精确算法相对比现代智能优化算法更能够快速准确的找到问题的最优解，但是当问题到达一定的量级，精确算法就会陷入N-P难问题，很难找到最优解，而现代智能优化算法可在运行一段可接受时间得到近似最优解，同时现代智能优化算法具有精确度较高、简单方便、运算速度快、反馈及时、程序简单、易于修改等优点，因此现代智能优化算法非常适合用来解决本问题。

## 本文研究内容及思路

* + 1. 研究内容

本文以城市建设余泥渣土的调运为研究对象，综合分析余泥渣土调运的运输特性、城市轨道交通网络特征，考虑中转资源化回收费用的成本投资，以工程进度控制和调运综合总成本为决定因素，从图论、土石方调配和施工组织管理等多个角度进行研究，通过引入群智能优化算法，提出一种区域级余泥渣土调运方案全局求优的生成方法。同时，基于调运方案智能生成方法，开发了城市工程建设余泥渣土智能调运系统，为本领域工程人员提供了一定技术支持。

具体研究内容包括：

（1）城市余泥渣土多层中转调运模型的构建

针对城市余泥渣土调运的中转+资源化利用的运输网络，考虑运输网络的约束性、时变性、层次性以及供需相对平衡性，根据土石方调配理论构建分层节点-路径网络异构连通图，以运输费用、中转费用、工程进度控制为优化目标建立余泥渣土多层中转调运模型。

（2）通过智能优化算法求解城市余泥渣土多层中转调运模型

针对城市余泥渣土多层调运模型，从算法准确性、可操作性、求解效率、可迁移性、可扩展推广性等多角度出发，选择现代智能优化算法中的遗传算法并针对余泥渣土模型特征做一定程度的改进来求解城市余泥渣土多层中转调运模型。

（3）城市工程建设余泥渣土调运方案智能生成系统开发

针对工程实际中的运输网络信息采集困难、数据参数计算效率低以及运输方案直观性差等问题，结合计算机技术、数据库技术以及互联网等技术开发城市工程建设余泥渣土调运方案智能生成系统，系统功能主要包括：基于云平台的数据采集；借助Python等高级编程语言实现余泥渣土多层调运模型，借助计算机完成数据参数计算、模型求解和迭代优化；采用SQL Sever数据库技术实现对复杂数据的储存与管理；通过Excel表格实现运输方案属性信息的可视化展示。实现从数据采集、数据分析及方案生成到方案迭代优化和展示整个过程的信息化管理，为余泥渣土调运问题提供一种智能化闭环解决思路。

（4）工程案例分析及系统应用

以实际工程为研究背景，运用本研究提出的模型及其求解方法，对城市区域级范围内，多个工程余泥渣土的调运进行分析计算，验证本方法的可靠性和适用性，并对城市工程建设余泥渣土调运方案智能生成系统的应用进行了说明。

* + 1. 研究方法及技术路线

本研究的技术路线如图 1.2所示：

图 1.2 论文技术路线

# 城市余泥渣土多层中转调运模型

基于上述余泥渣土调运方案全局求优的规划方法，根据土石方调配理论，将城市余泥渣土调运问题分解为建立调运模型和运用算法求解两个步骤。本章针对余泥渣土调运问题的各种特性进行分析研究，详细介绍城市余泥渣土多层中转调运模型的构建。

## 余泥渣土调运问题分析

* + 1. 问题描述

城市余泥渣土调运问题可以描述为：在城市级的区域范围内，有多个提供余泥渣土的位置，有多个需要余泥渣土填筑的位置，有多个中转处理再利用（转换料性）的位置，通过合理的调运方案使余泥渣土从产地经过中转再利用最后到达填筑场地，并使整个区域内余泥渣土调运的成本最低。其中涉及到余泥渣土的调运方式、调运路径以及中转站的选择、料性的转换，还需要考虑到不同类型余泥渣土的运输特性、城市交通的限制条件、工程进度控制等影响因素。

在余泥渣土调运网络中，从余泥渣土产渣起点到工程填筑现场，涉及到多个中转站点，多个工程填筑场地，可以组合出多种调运方案。且中转站还可能存在着不同的料性转换方式，还需考虑中转站和填筑场地对于不同料性的渣土的中转和承受能力，使得调运网络更丰富，调运方案优化也变得更复杂。

调运方案优化的影响因素主要指：余泥渣土的运输一般采用载重量较大的重型卡车，其载重和尺寸往往会超过城市路段的限行标准，即使允许通行，也会限制通行时间，因此在规划方案时，必须考虑到路段的限行时间窗以及对重型卡车尺寸与载重的限制条件；产渣场地的产渣量是随着工期变化的，填筑场地、中转场的受纳能力和受纳的料性等也会随着工期变化，于是需要统一规划特定的余泥渣土运输周期来完成余泥渣土的调运以满足工程进度控制要求；除了一般运输费用外，余泥渣土运输的相关费用还包括中转站内资源化再利用、填筑场地收益等费用。

综上，城市余泥渣土调运方案规划问题需要综合考虑余泥渣土调运网络特点以及多种影响因素，是一种带约束条件、多层中转的动态线性规划问题。为便于模型构建和后续计算，根据实际工程中城市余泥渣土调运方案规划的基本原则和通用方法，借鉴水利水电工程的土石方调配理论，做出以下合理假设、相关说明、调运网络参数表示及余泥渣土调配原则。

相关假设：

1）余泥渣土产渣起点、产渣位置已知，中转站、填筑工程位置已知，且在规划调运的一个余泥渣土运输周期内不发生改变；

2）由于中转站的存在，余泥渣土可能会经过多次中转，中转再利用的次数不作限制；

3）城市轨道交通对运输余泥渣土车辆的限行标准已知，且在规划调运的一个余泥渣土运输周期内不发生改变；

相关说明：

对于余泥渣土调运问题，可根据图论将运输网络转化为层状二维拓扑关系，如图 2.1所示。为便于理解，对相关名词做如下说明：

节点：指运输网络中的场站节点，包括余泥渣土运输起点、终点、途经场站节点及中转站节点；

路段：不同层节点间的连线，表示两节点间存在余泥渣土运输路径；

边权值：边权值是拓扑关系路段线上的权值，它不仅指欧氏空间中的距离，也可以指时间、费用、风险等指标，在本章中指路段上余泥渣土运输的各种费用。

图 2.1 运输网络层状拓扑关系示意图

运输网络参数：

*G*(*O*,*E*)表示余泥渣土调运网络，其中*O*表示运输网络中所有场站节点的集合，*E*表示运输网络中所有路段的集合；

*i*,*j*表示运输网络中两个不同层的节点，则*i*,*j*∈*O*；

(*i*,*j*)表示节点*i*到*j*的运输路径，则(*i*,*j*)∈*E*；

*T*:{1,2,···,*t*}表示余泥渣土料性的集合；

在常规水利水电工程土石方调配问题中，土石方调配的总体原则为综合总进度要求，结合工程设计、施工程序和方法等对可利用料进行分配，在质量、数量、时间、空间上对料源和填筑部位进行统筹规划，确保填筑进度并保证填筑料质量，尽量提高有效挖方利用率和减少物料中转，缩短运距，提高经济效益。基本原则为：一是物料匹配协调原则。料物从一处转移到另一处时，物理性质必须保持一致。二是道路最近调配原则。按道路最近原则选择物料流向。三是优先原则。开挖料优先直接利用，其次是中转料，最后是开采料[28]。

与水利水电工程土石方调配不同，将余泥渣土的调运至中转站或填筑场地往往是有收益的，中转站或填筑场地会出资购买余泥渣土中的可再利用土石料，有效降低余泥渣土调运的成本费用。且在经过中转站前后，经过资源化再利用余泥渣土的料性可能会发生变化。因此，余泥渣土的调运原则需在大致遵循土石方调配的总体原则的基础上，针对余泥渣土调运的自身特性，对土石方调配的基本原则做一定的调整。

余泥渣土调运原则：

1）物料匹配原则。余泥渣土从一处转移到另一处的途中，物理性质必须保持一致，但在经过中转站时，余泥渣土的料性可以发生变化；

2）道路最近原则。在不超过受纳场地承受能力的条件下，按道路最近原则选择物料流向；

3）收益优先原则。余泥渣土的去向优先考虑可资源回收利用的中转站或填筑工程。且优先考虑就地利用，减少弃方现象；

4）总量平衡原则。确保必须产渣地外排的余泥渣土全部得到妥善处理。

* + 1. 余泥渣土及调运网络特性分析

基于上述问题描述，余泥渣土调运与一般物资调运问题不同，应该对余泥渣土类型、基本特征、调运方式以及限制条件进行分析。

* + - 1. 余泥渣土类型

余泥渣土从字面上可解读为主要涵盖了三个方面的内容：即城市建设施工过程中所产生并剩余的或多余的“泥”、“渣”和“土”。这里的“泥”可理解为泥浆，一般为流体状，多产生于地基开挖过程；“渣”可理解为废弃的混凝土块、砖瓦、石头等，一般为坚硬的固体状，多产生于建筑物、构筑物或城市道路的拆除过程中；“土”可理解为纯土方，一般为可塑性较强的固体状，多产生于地基开挖或大型地下构筑物建设过程中。

余泥渣土按来源的不同一般可分为纯净余土、新建筑物建设施工垃圾、旧建筑物拆除垃圾、道路改造垃圾、建材生产垃圾和装修垃圾等六大类。

纯净余土（又称为土地开挖垃圾）是指在城市建设过程中因对土地或山体的开挖而产生的剩余土方，主要包括基坑土和大型市政工程弃土。纯净余土又可分为砾石、砂、泥、风化岩屑和砂土石砾混合物等，一般可直接回用于种植、回填或造景等。

新建筑物建设施工垃圾是指在建设新建筑物过程中产生的剩余混凝土和建筑材料，主要由碎石、混凝土、砂浆、桩头和包装材料组成，一般不能直接回用。

道路改造垃圾是指在城市道路、市政道路以及居住区、工业区的道路进行扩建、改建或整体改造过程中产生的废弃混凝土块和废弃沥青混凝土块，一般不能直接回用。

旧建筑物拆除垃圾（又称为建筑废弃物）是指在旧城改造、旧工业区改造或其他废旧建筑物改造过程中产生的废弃混凝土块、屋面废料、废弃砖块、木材、塑料、石膏、灰浆、钢铁和非铁金属等，一般不能直接回用。旧建筑物拆除垃圾是余泥渣土中组成最为复杂的一类，但也是回用价值较高的一类，具有典型的污染和资源二重属性。

建材生产垃圾是指为生产各种建筑材料所产生的废料、废渣，也包括建材成品在加工和搬运过程中所产生的碎块、碎片等。如在生产混凝土过程中难免产生的多余混凝土以及因质量问题不能使用的废弃混凝土，长期以来一直是困扰着商品混凝土厂家的棘手问题。经测算，平均每生产100m3的混凝土，将产生1~1.5m3的废弃混凝土。

装修垃圾是指房屋装饰装修产生的废料，主要由碎石、混凝土、砂浆和装饰材料等组成，与新建筑物建设施工垃圾较为相似，但涂料、油漆等成分更多，一般不可直接回用。

将剔除余土、金属类和可燃物后的余泥渣土（主要为混凝土、石块和砖）等按强度分类：标号大于C10的混凝土和块石，命名为Ⅰ类余泥渣土；标号小于C10的非砖块和砂浆砌体，命名为Ⅱ类余泥渣土；为了能更好地利用余泥渣土，还进一步将Ⅰ类分为ⅠA和ⅠB类，将Ⅱ类细分为ⅡA类和ⅡB类。各类余泥渣土的分类标准及用途如表2.1所示。

表2.1 各类余泥渣土的分类标准及用途

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 大类 | 亚类 | 标号 | 标志性材料 | 用途 |
| Ⅰ | ⅠA | ≥C20 | 4层以上建筑物的梁、板、柱 | C20混凝土骨料 |
|  | ⅠB | C10~C20 | 混凝土垫层 | C10混凝土骨料 |
| Ⅱ | ⅡA | C5~C10 | 砂浆或砖 | C5砂浆或再生砖骨料 |
|  | ⅡB | ＜C5 | 低标号砖 | 回填土 |

* + - 1. 余泥渣土基本特征

1）产生地点分散，产生源多而广

产生地点分散是城市固体废弃物的基本特征，主要表现为：产生源多而广，市域范围内的任何建设工程（包括居民家庭、公众会所）都有可能成为余泥渣土的产生源头。

2）产生时间不确定，产生量相对较难预测

产生时间不确定，产生量相对较难预测是余泥渣土不同于生活垃圾的典型特征。人均生产垃圾产生量具有较稳定、易预测的特征。而较为稳定的余泥渣土产生量只能通过统计一定时间市域范围内的所有余泥渣土来得到，事先不能准确预测到每个建设工程产生余泥渣土的时间和数量。

3）成分复杂，具有污染和资源并存的二重属性

余泥渣土的成分是比较复杂的，除新开挖的土石方比较单一；建筑拆装物料成分十分复杂，包括混凝土块、钢筋、木料、石料、沙土、化工材料等等。余泥渣土从可利用的角度说是难得的资源，用途比较广泛。通过采取合适的管理和技术可从余泥渣土中回收有用的物质和能源。例如，从余泥渣土中回收二次物质加以循环利用，或者将余泥渣土中的惰性部分用于回填以及将其用于填海填料。

* + - 1. 调运方式及限制条件分析

余泥渣土的调运方式一般采用货车经由城市轨道交通运输，运输余泥渣土的车辆属于工程运输专用车辆，必须符合当地城市运输余泥渣土专用车辆的统一标准。一般来说，专用车辆由城市市容环境卫生行政部门会同公安交警部门审验合格后，发给专用车辆标志牌。余泥渣土运输需使用密封式运输车辆，定期保养，使其保持良好的运行状态；泥土采用晾晒、减少装载量等渣土降水、防漏措施，以最大限度减少渗漏事件的发生。

根据相关法律法规，进一步加强城区货运车辆通行管理工作，对货运车辆禁限行规定进行调整，货运车辆类型为轻型货车（含专项作业车）、中重型货车（含专项作业车）、工程运输车、危险品运输车等重点货车。运输余泥渣土的货运车辆属于工程运输车，全国各城市对工程运输车的交通管制不尽相同。普遍而言，运输渣土、砂石、混凝土等建筑材料的工程运输车货车在城市限行区域全天禁止通行。因此对于余泥渣土调运的限制条件来说，最关键的是得到城市的货运车辆限行区域部署信息。

## 构建余泥渣土多层中转调运优化模型

基于上述问题分析，可根据动态规划的思想离散化时间轴并构建余泥渣土调运网络拓扑关系层级结构，考虑约束条件建立余泥渣土多层中转调运优化模型。

* + 1. 层级模型的构建

基于上述问题分析，可知城市余泥渣土调运网络是一个具有层次性、彼此相互连通的多层调运网络。即各种场站除了作为余泥渣土调运的终点，还可以作为渣土调运的中转场，通过渣土回采，成为下一轮余泥渣土调运的起点。同时城市余泥渣土调运网络随着工程工期的推进表现出动态变化的特征。即在不同的工程规划时段，区域范围内余泥渣土产量和受纳场站承受渣土的能力等条件是不同的。

因此，本文基于离散数学的思想以离散化时间轴的方式将需要规划调运的工期离散为多个时间区间，每个时间区间内，认为调运网络及场站属性不发生改变，并分别在每个时间区间内建立数学模型表征当前时间区间的调运网络特性，以此满足调运网络的时变性特征，如图 2.2所示。

图 2.2 离散化时间轴的余泥渣土调运优化模型示意图

图中：

*G*表示多式联运网络；

为工程工期离散后的时间节点，表示时间区间；

表示工程工期。

基于动态规划的思想，本文将每个时间区间内建立的数学模型视为多层中转调运优化模型的一层，前一层调运优化的终点作为后一层调运优化的起点，以此满足调运网络的层次性特征。

* + 1. 计算单位优化目标成本

基于上述分析，区域余泥渣土调运的总费用为区域范围内各种余泥渣土按规划路线调运后各路段调运成本的总和，与调运网络、规划方案紧密相关，可以恰当的反应调运网络及路段的特性；更重要的是，在同一调运网络下，区域余泥渣土调运的总费用可以反应不同余泥渣土方案规划的优劣，是方案选择的重要指标，直接影响了决策者的最终选择，好的方案必须要首要考虑区域余泥渣土调运的总费用。因此，选取区域余泥渣土调运的总费用作为优化目标。

在方案规划阶段，某条调运路线各个路段的单位余泥渣土调运成本主要考虑单位运输费用、单位中转费用以及单位资源再利用收益三个方面，其对应的内容及计算方法如下：

1）单位运输费用。单位运输费用是指将单位方量余泥渣土用工程运输车由场站节点*i*运输到*j*所产生的费用，由运输距离和运输费率决定。其计算方法见式2.1：

 （2.1）

式中：

是路段(*i*,*j*)上运输单位方量第*t*种余泥渣土所产生的运输费用；

表示采用工程运输车从节点*i*到节点*j*的运输距离；

表示采用工程运输车从节点*i*到节点*j*的运输费率；

2）单位中转费用。中转费用是指运输单位方量余泥渣土过程中在中转场站内进行临时存储、料性转换、余泥渣土收纳等工作，进而带来的装卸费、物资储存管理费等费用，可通过调查分析进行估计，以表示单位方量第*t*种余泥渣土的在节点*i*的中转费用。

3）单位资源再利用收益。资源再利用收益是指运输至中转场站、受纳场站或填筑工程的余泥渣土符合填筑等再利用条件，进而由中转场站、受纳场站或填筑工程支付的回收费、运输费等费用，因此可视为余泥渣土运输的收益，可通过调查分析进行估计，以表示单位方量第*t*种余泥渣土的在节点*i*的资源再利用收益。

综上，可知各个路段上余泥渣土的调运成本可以通过分别估计计算运输费用、中转费用以及资源再利用收益，然后进行加减得到，其计算公式如下：

 （.2）

式中：

是在路段(*i*,*j*)上工程运输车运输单位方量第*t*种余泥渣土的调运成本。当路段(*i*,*j*)上没有运输第*t*种余泥渣土时，则。

因此，区域余泥渣土调运的总费用通过区域范围内规划路线的各个路段上余泥渣土的调运成本累加可得，因此总费用的计算方法见式2.3：

 （2.3）

式中：

是区域第*t*种余泥渣土调运的总费用；

是在路段(*i*,*j*)上运输第*t*种余泥渣土的渣土方量。

* + 1. 余泥渣土多层中转调运优化模型
       1. 多层中转网络异构连通图

基于上述分析，可知城市余泥渣土调运网络是由产渣地+中转站+受纳场站彼此连通而构成的复杂调运网络。对比一般物资调运问题，可将余泥渣土调运问题抽象为图论问题，以节点表示产渣地、中转站和受纳场站，节点间的边连线表示场站间可进行余泥渣土的调运，建立单层的节点-调运通道网络连通图表示调运网络。由此带来的问题是，由于产渣地、中转站、受纳场站彼此的属性分类可相互转化，且余泥渣土的料性可能会在中转站发生转换，单一单层的路网节点形式不能反映在节点场站位置发生的料性转换、属性变换关系。为此，需要构建一种场站属性可变、料性可变的多层中转网络异构连通图来表征考虑中转站的余泥渣土调运网络，如图 2.2所示。图中，将余泥渣土调运网络进行分层，构建中转层作为料性转换、属性变换的衔接点；不同层级的同一节点位置用虚线连接，实线表示余泥渣土调运的可行通道；并以节点表示产渣地、中转站以及受纳场站，不同层级间的实线

边权值表示调运优化目标。

图 2.2 多层中转网络异构连通图

通过上述方法，可将产渣地+中转站+受纳场站彼此连通而构成的复杂调运网络抽象为节点-调运通道网络拓扑关系层级结构，符合城市余泥渣土调运网络的实际空间特征，为城市余泥渣土调运的实际工程问题转化为可解的数学问题奠定基础。

* + - 1. 多层中转调运优化模型

通过构建分层节点-调运通道网络异构连通图表征产渣地+中转站+受纳场站彼此连通而构成的复杂调运网络，将余泥渣土调运问题转化为互为依托、彼此链接的线性规划土石方平衡问题，基于土石方调配相关理论，将整个余泥渣土调运系统描述为：

1）余泥渣土产渣。城市余泥渣土产渣部位的余泥渣土一般以余泥渣土料性和渣土方量等参数的元组构成，即某个产渣部位的余泥渣土可用式2.4表达。

 （2.4）

式中：

表示余泥渣土的料性；

是余泥渣土的产渣方量；

表示余泥渣土开始产渣的时间；

表示余泥渣土产渣部位的空间位置。

2）余泥渣土中转资源再利用。余泥渣土在中转站进行加工或者处理后可进行资源化再利用，加工可以视为余泥渣土料性的转换过程。由于加工后的余泥渣土料性发生了变化，前后的余泥渣土不具有相容性，因此，余泥渣土的中转资源再利用的过程可用式2.5表达。

 （2.5）

式中：

是余泥渣土中转加工厂的可接受料性，即可以运入中转场的余泥渣土料性；

是余泥渣土中转加工厂的输出料性，即中转场转出的余泥渣土料性；

是余泥渣土中转场输入日最高强度，即每日可以运入中转场的最高强度；

是余泥渣土中转场输出日最高强度，即每日可以转出中转场的最高强度。

3）余泥渣土的存储和中转。余泥渣土存储和中转场的输入与输出料性相同，因此，类似余泥渣土中转资源再利用的数学表达，如式2.6表达。

 （2.6）

式中：

是存储或中转场的当前储量。

4）余泥渣土受纳场。余泥渣土受纳场可以看作是仅有输入的余泥渣土中转场。因此，受纳场为简化的余泥渣土中转场来描述，如式2.7所示。

 （2.7）

式中：

为空值，受纳场无输出余泥渣土；

是余泥渣土受纳场的堆渣量。

对于特定的城市余泥渣土运输周期，从个产渣地产出种料性的余泥渣土，针对每一种料性的余泥渣土可运至场站，（这里的产渣地与场站均是广义的，包括产渣场、可资源再利用的中转站、存储中转站、受纳场站）。此过程可视为余泥渣土多层中转模型的一层，当本层的余泥渣土中转消纳结束后，对于下一个城市余泥渣土运输周期，场站中可中转输出渣土的场站即是产渣地，可中转输出的料性即为，如此继续中转消纳直至整个区域范围内所有余泥渣土不能再进行中转再利用为止。

因此，余泥渣土多层中转调运优化模型的构建关键点在于构建单层调运的数学模型，有了单层调运的数学模型后，即可根据上述动态规划思想建立多层中转的数学模型。

对于特定的城市余泥渣土运输周期，从个产渣地产出种料性的余泥渣土，针对每一种料性的余泥渣土可运至场站这一单层的调运过程，可进一步将其抽象为线性规划的物资调运问题。

不失一般性，假设在城市余泥渣土运输周期，料性的余泥渣土有个产渣地，可中转处理或存储该料性余泥渣土的场站有个，可建立如表2.2所示的调运数学模型。

表2.2 单层的调运数学模型

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 场站1 | 场站2 | … | 场站 | 产渣量 |
| 产渣地1 |  |  | … |  |  |
| 产渣地2 |  |  | … |  |  |
| … | … | … | … |  | … |
| 产渣地 |  |  |  |  |  |
| 场站承受能力 |  |  | … |  |  |

表中：

表示由产渣地运送至场站的余泥渣土方量；

表示产渣地一共产出的余泥渣土总量；

表示场站能够受纳输入的余泥渣土方量。

由此，可结合2.2.1提出的调运优化目标函数，针对单一料性的余泥渣土单层调运优化模型为：

 （.8）

与一般的线性规划物资调运问题不同，余泥渣土调运需满足现实条件并实际解决工程难题，因此其约束条件有别于普通的物资调运问题，如下所示：

1）每个产渣地产生的余泥渣土应全部处置干净。即：

 （2.9）

2）每个可受纳余泥渣土的场站都有其可以承受输入的强度上限。即：

 （2.10）

3）如果产渣地在模型的上一层中为受纳余泥渣土的中转场站，则有：

 （2.11）

4）由于模型中的数据均有其工程现实含义，因此不允许其出现负数，即有：

 （2.12）

余泥渣土多层中转调运优化模型即是在单层调运优化模型的基础上，以上一层的输出经过一定转换后作为下一层的输入，结合动态规划的思想，达到中转多层的效果。与单层不同的是，多层优化模型应更注重全局整体的优化，首先，其多层优化模型的每一层都应该满足式2.9-式2.12提出的约束，然后其优化目标函数应考虑全局：

 （2.13）

* + 1. 考虑约束条件的余泥渣土多层中转调运优化模型
       1. 考虑料性相容的约束条件

根据上述问题分析与优化模型，余泥渣土在中转站存储转运或资源化再利用时需要考虑余泥渣土的料性与中转站的料性是否相容、中转站在相容情况下能承受多少余泥渣土、中转站能受纳多少种不同料性的余泥渣土等约束条件。而且这些约束条件一般为中转站是否可用的控制性条件，若选择了料性不相容的中转站，轻则中转站不受纳，徒然造成经济财产损失，重则中转站处理不当甚至爆仓，危及工作人员生命安全。

因此需要将料性相容作为约束条件考虑到优化模型中，根据式2.5对中转站的数学表示，假设将料性为，产量为的余泥渣土调运至中转站，其应该满足的料性相容约束条件应为式2.14所示：

 （2.14）

* + - 1. 考虑交通限制的约束条件

根据上述问题分析，城市余泥渣土调运优化问题除了需要考虑调运网络本身的特点，还需要考虑城市轨道交通网络对运载余泥渣土的工程运输车尺寸和载重的特殊要求。因此，城市余泥渣土调运路径的选择应该充分考虑交通设施的最低限制标准，一般情况下，交通设施的限制条件应从允许通过尺寸和运输重量两个方面考虑，其中限制尺寸包括限高和限宽，重量反映了交通设施承载力条件，将其作为路径选择的约束条件，排除超过交通设施限制尺寸和限重的运输路径。

将交通限制作为约束条件考虑到优化模型中，约束条件如下式2.15：

 （2.15）

式中：

表示运载料性的工程运输车的高度；

表示运载料性的工程运输车的宽度；

表示运载料性的工程运输车的重量；

表示当地重力加速度；

表示路段(*i*,*j*)的限高；

表示路段(*i*,*j*)的限宽；

表示路段(*i*,*j*)的限重。

## 本章小结

本章节针对城市余泥渣土调运优化问题，基于动态规划思想构建了模型的层级结构，提出了多层中转网络结构的异构连通图，综合考虑运输费用、中转费用和资源化再利用收益组成了单位调运总成本，并将其作为优化目标，建立余泥渣土多层中转调运优化模型。然后分析研究了料性相容、交通限制等约束条件和调运网络动态性，构建了约束条件下时变性的余泥渣土多层中转调运优化模型。

# 基于改进遗传算法的智能优化算法研究

在第2章所构建的数学模型属于约束条件下的动态规划土石方调配问题。与经典的物资调运或土石方调配问题不同，该问题需要根据余泥渣土调运网络拓扑结构和优化目标，考虑约束条件和时变性，动态地同时对调运方向和调运方量进行调运方案规划。因此，需要根据问题性质，对模型求解算法进行分析研究。

## 模型求解算法分析

模型求解的实质就是寻求成本最低的余泥渣土调运方案。由于调运系统复杂，涉及的决策变量随着工程项目的扩张而呈几何倍数的增多，难以构造可行解，且遍历选择最优解困难，传统分析往往根据调运的线性特征，以单纯形法（大M法、人工变量法）及其相关分析方法（隐枚举法、分枝定界法）求解工程中的调运问题。虽然原理简单计算简便，但是简化了调运过程，将非线性因素进行了线性化处理，而且在第2章所构建的数学模型属于多维空间、多维约束下的目标优化问题，具有很强的动态性，是典型的NP-Hard问题，传统的精确求解算法很难准确解决此类问题。

与传统的精确求解算法相比，启发式的智能优化算法具有优秀的解决NP-Hard问题的能力，当问题的规模不大时，精确算法相对比启发式智能优化算法更能够快速准确的找到问题的最优解，但是当问题到达一定的量级，精确算法就会陷入N-P难问题，很难找到最优解，而启发式智能优化算法可在运行一段可接受时间得到近似最优解，同时启发式智能优化算法具有精确度较高、简单方便、运算速度快、反馈及时、程序简单、易于修改等优点，因此启发式智能优化算法非常适合用来解决本问题。

## 智能优化算法理论概述

智能优化算法又被称为“软计算”，是人们通过对已发现的自然规律和一些自然现象进行总结，根据其原理，模仿求解实际问题的计算方法。作为人工智能的新生领域，智能算法是智能理论和技术发展的崭新台阶，其分支领域主要包括了自然计算、启发式方法、量子、神经网络等计算方法。

自然计算方法主要通过模仿自然界中的群体智能等特点，建立具有自适应、自组织、自学习能力的模型与算法，用于解决传统计算方法受制于复杂问题时的限制问题。启发式优化算法也属于自然计算方法的范畴，其主要相对于传统最优化算法提出，其基于经验和数学建立模型，在可接受的计算时间和空间下给出逼近最优解的可行解。

量子计算利用量子的并行性、指数级存储容量和指数加速特征展示了其强大的运算能力。量子计算智能的研究建立在物理基础上，有效利用量子理论的原理和概念，在人工智能领域的应用中取得明显优于传统计算模型的结果，因此量子计算智能具有很高的理论价值和发展潜力。

神经网络作为一种模仿动物神经网络行为特征的方法，通过分布式并行信息处理调整内部“神经元”之间的连接关系，进行信息处理。随着计算机处理速度和存储能力的提高，深层神经网络的设计和实现也逐渐成为可能，通过对神经网络中最为常见的链式结构的模仿，诞生了深度学习。

针对本文提出的模型，量子计算的可操作性和简便性不佳，其对计算机的性能要求较高，普通计算机难以达到，而且其在求解的准确度上也没有绝对的优势；神经网络和深度学习的网络结构很难针对本模型的特性进行构建。相比于上述方法，启发式智能优化算法，操作简便，求解算法构建清晰，能够在可接受的计算时间和空间下给出逼近最优解的可行解。因此，本文选择启发式智能优化算法作为求解模型的算法。

## 各种启发式算法择优

针对一个问题的传统精确最优化算法往往根据逻辑推理和数值计算求得该问题每个实例的最优解。当求解组合优化类问题时，若问题的规模不大，精确算法往往能够快速准确的找到问题的最优解，但是若问题到达一定的量级，精确算法就会陷入N-P Hard困境，很难找到最优解；然而，启发式智能优化算法能在可接受的花费（指计算时间和空间）下给出待解决组合优化问题每一个实例的一个逼近最优解的可行解。

上世纪50年代中期创立了 仿生学，许多科学家从生物中寻求新的用于人造系统的灵感。一些科学家分别独立地从生物进化的机理中发展出适合于现实世界复杂问题优化的模拟进化算法。在现阶段，启发式算法仍以仿自然体算法为主，主要有蚁群算法、模拟退火法、遗传算法等。

现阶段的启发式算法尽管在优化机制方面存在一定的不同，但在优化流程上却具表现出了较大的相似性，采取的均是一种“邻域搜索”策略。大多算法都是从一组初始解出发，在算法的关键参数的控制下通过波动函数在邻域内寻找若干邻域解，按不同的接受准则(确定性、概率性或混沌方式)更新当前状态，而后按关键参数修改准则调整关键参数。如此重复上述搜索步骤直到满足算法的收敛准则，最终得到问题的优化结果。

本文在求解模型时一共采取了启发式算法中具有代表性的三种算法进行准确率与效率的择优，分别是粒子群算法、模拟退火算法和遗传算法。本研究分别根据三种算法编写程序对单层调运模型进行求解，然后通过求解过程的效率与准确率进行分析及择优。

* + 1. 单层调运模型的求解

首先可根据2.2.3.2提出的单层调运模型及约束条件针对模型欲解决的主要问题可建立在算法择优阶段的单层调运模型与欲求解的线性方程组，如下所示：

假设在城市余泥渣土运输周期，料性的余泥渣土有个产渣地，可中转处理或存储该料性余泥渣土的场站有个，采用的单层调运数学模型如表3.1。

表3.1 算法择优阶段单层调运模型

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 场站1 | 场站2 | … | 场站 | 产渣量 |
| 产渣地1 |  |  | … |  |  |
| 产渣地2 |  |  | … |  |  |
| … | … | … | … |  | … |
| 产渣地 |  |  |  |  |  |
| 场站承受能力 |  |  | … |  |  |
| 场站结余 |  |  |  |  |  |

表中：

表示由产渣地运送至场站的余泥渣土方量；

表示产渣地一共产出的余泥渣土总量；

表示场站能够受纳输入的余泥渣土方量。

表示场站受纳余泥渣土后的结余。

此阶段选取针对单一料性的余泥渣土单层调运优化模型为：

 （3.1）

在算法择优阶段针对模型的主要矛盾，基于运筹学原理引入场站结余分量，考虑建立如下三个约束：

1）每个产渣地产生的余泥渣土应全部处置干净。即：

 （3.2）

2）每个可受纳余泥渣土的场站都有其可以承受输入的强度上限。即：

 （3.3）

3）由于模型中的数据均有其工程现实含义，因此不允许其出现负数，即有：

 （3.4）

由数学模型与运筹学原理可知，需要规划调运的决策变量一共有个，而根据约束3.2和3.3可列出的约束方程一共有个，显然决策变量个数大于约束方程的个数，因此根据线性代数知识可知[29]，线性方程组有无穷多组解：

设有非齐次线性方程组

 （3.5）

其可写作向量方程

 （3.6）

向量方程（3.6）的解也就是方程组（3.5）的解向量，其对应的齐次线性方程组为：

 （3.7）

于是根据线性代数可知，假设方程（3.6）的一个特解为，秩为，那么向量方程（3.6）的通解为

 （3.8）

其中是方程（3.7）的基础解系，为未知数的个数，因此可得非齐次线性方程组（3.5）的解的结构：非齐次方程的通解=对应的齐次方程的通解+非齐次方程的一个特解。

将模型的约束条件转换为非齐次线性方程组后，可以得到：

 （3.9）

将（3.9）的非齐次线性方程组写作

 （3.10）

其中系数矩阵为由0，1组成的矩阵，其秩为，由于秩小于决策变量个数，因此该线性方程组有无穷多组解，且解的形式可表达为：

 （.11）

其中是方程（3.10）对应的齐次线性方程组的基础解系，为方程（3.10）的一个特解，秩，故。得到非齐次线性方程组的通解后，通过不断变换的取值即可遍历方程组的解空间。

齐次线性方程组的基础解系和非齐次线性方程组的特解可基于线性代数通过简单的线性变换后得到，因此如何取得最优解的问题现在转化成了在解空间内选取一组合适的值使调运成本式（3.1）最小。

下面即可分别采用三种算法对的取值进行迭代优化求解，随后即可通过对比三种算法求解过程的效率与准确率，完成算法的择优。

* + 1. 粒子群算法框架

粒子群优化（ParticleSwarm Optimization，PSO）算法，简称粒子群算法，最早是由美国社会心理学家J. Kennedy和电器工程师R. Eberhart于1995年共同提出的。它起源于对简单社会系统的模拟，也是一种基于迭代的优化工具。其通过个体间的协作和竞争实现全局搜索，概念简单，算法中需要调整的参数少，便于计算机编程实现，并且算法中粒子在解空间中追随最优的粒子进行搜索，其优化是有方向性的。因此，它既保持了传统进化算法的群体智慧背景，同时又有许多独有的良好的优化性能。

PSO算法的理论基础是人工生命和人工生命计算。人工生命的主要研究领域之一就是探索自然界生物的群体行为，从而在计算机上构建其群体模型。与其他基于群体的进化算法相比，它们均初始化为一组随机解，通过迭代搜寻最优解。进化计算遵循适者生存原则，而PSO算法源于对简单社会系统的模拟。

PSO算法的基本思想受到许多对鸟类的群体行为进行建模与仿真研究结果的启发，最初设想是模拟鸟群觅食的过程，想象这样一个场景：一群鸟随机的分布在一个区域，在这个区域只有一块食物，但是所有的鸟都不知道这块食物的具体方位，只知道自己当前的位置距离食物还有多远。找到食物最简单有效的方式就是搜索目前离食物最近的鸟的周围区域。如果把食物当作最优点，而把鸟离食物的距离当作函数的适应度，那么鸟寻觅食物的过程就可以当作函数寻优的过程。由此受到启 发，经过简化提出了PSO算法。

在PSO算法中，把种群中的每个个体称为“粒子”（Particle），由维搜索空间中的一个点表示，代表着每个优化问题的一个潜在解。所有的粒子都有一个用来评价当前位置好坏的属性值叫作适应度值（fitness value），由一个针对具体优化问题抽象出的目标函数决定。每个粒子还有另外一个属性值叫作速度，用来决定粒子飞翔的方向和距离，粒子们将追随当前的最优粒子在解空间中搜索。

粒子群优化算法通过模拟鸟类群体的竞争和合作实现了对优化问题的搜索。该算法仅仅是粒子在解空间上做追寻当前最优粒子的搜索，所以其操作更加简单，同时还具有运算复杂度低、参数少等特点。

PSO算法采用“群体”和“进化”的概念，根据个体的适应度值大小进行操作。尽管PSO算法有“进化”的概念，但其实算法本身不包含相应的进化算子，而是将每个个体看作搜索空间中没有重量和体积的微粒，并在搜索空间中以一定的速度飞行，该飞行速度由个体飞行经验和群体的飞行经验进行动态调整。

将粒子群算法运用至欲求解的模型中，可设为第个粒子的维位置向量，在模型中即是，则有；为粒子的飞行速度；为粒子迄今为止搜索到的最优位置。

根据优化函数式（3.1）可设定适应度函数计算该粒子当前的适应度值，即可衡量粒子位置的优劣：

 （.12）

在本模型中，为最小化的目标函数，则微粒的当前最好位置为：

 （.13）

设群体中的微粒数为，为整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置，则：

 （.14）

 （.15）

在每次迭代中，粒子根据式（3.16）更新速度，式（3.17）更新位置：

 （3.16）

 （3.17）

其中，表示粒子的第维，；表示第个粒子，；是迭代次数；和是为的随机数，这两个参数用来保持群体的多样性；和为学习因子，也称加速因子，调节粒子飞向自身最好位置方向的步长，调节粒子飞向全局最好位置方向的步长，这两个参数对粒子群算法的收敛起的作用不是很大，但是适当调整这两个参数，可以减小局部最小值的困扰，当然也会使收敛速度变快。由于粒子群算法没有实际的机制来控制粒子速度，值太大会导致粒子跳过最优解，太小又会导致对搜索空间的不充分搜索，所以有必要对速度的范围进行限制，即，位置的取值范围限定在内。

在粒子的速度更新公式（3.16）中，第一项表示粒子当前速度对粒子飞行的影响，这部分提供了粒子在搜索空间飞行的动力；第二项是“个体认知”部分，代表粒子的个人经验，粒子本身的思考促使粒子朝着自身所经历的最好位置移动；第三项是“群体认知”部分，代表粒子互相之间的信息共享与合作，体现群体经验对粒子飞行轨迹的影响，促使粒子朝着群体发现的最好位置移动。式（3.16）正是粒子根据上一次迭代的速度、当前位置，以及自身最好经验和群体最好经验之间的距离来更新速度，然后粒子根据式（3.17）飞向新的位置。

至此，本研究在算法择优阶段运用粒子群算法构建了求解单层调运模型的算法框架，具体实现步骤如下：

1）初始化粒子群及参数。对微粒的随机位置和速度进行初始设定，即在内均匀分布产生，在内均匀分布产生。并初始化对应的个体最优值，设置粒子种群规模、最大迭代次数、加速常数和。

2）进入迭代，迭代次数。

3）计算每个微粒的适应度值，即粒子的余泥渣土调运成本。

4）对于每个微粒，将其适应度值与所经历过的最好位置的适应度值进行比较，若较好，则将其作为当前最好位置。如果<，则=。

5）根据速度和位置更新公式对微粒的速度和位置进行进化。

6）根据单层调运模型约束条件设计边界处理策略：非负约束、产渣量、场站受纳承受能力等对应的值就是粒子各个维度的最大位置限制，当超出限制时，再次在约束范围内随机生成速度和位置，将粒子限制在粒子可飞行空间内，避免粒子违反模型约束。

7）判断算法当前迭代次数与，如果，返回2)；否则，结束迭代输出最优值对应的单层模型余泥渣土调运方案和单层模型余泥渣土调运最小成本。

* + 1. 模拟退火算法框架

模拟退火算法（Simulate Anneal Algorithm，SAA）是一种适合解决大规模组合优化问题的随机搜索算法。与一般的局部搜索算法不同的是，SAA以一定的概率选择邻域中目标值相对较小的状态，从理论上来说，它是一种全局最优算法。SAA的思想源自对固体退火这一热力学过程的模拟，固体退火过程是指将固体加热到熔化，再徐徐冷却使之凝固成规整晶体的热力学过程，主要由加温过程、等温过程以及冷却过程3个阶段组成。

1）加温过程：对固体加热时，随着温度的升高，粒子的热运动不断加强，逐渐偏离平衡位置，粒子排列也呈现出随机状态，此时，宏观上物体表现为液态，这就是熔化现象。熔化过程消除了系统内原先可能存在的非均匀状态，同时系统的能量也随着温度升高而增大。

2）等温过程：退火过程要求温度缓慢降低，使得系统在每个温度下都达到平衡状态。这一过程可以根据自由能减少定律给出解释：对于与环境发生热量交换而温度保持不变的封闭系统，系统状态的自发变化总是朝着自由能减少的方向进行，当自由能达到最小值时，系统达到平衡态。

3）冷却过程：温度的降低使得粒子热运动慢慢减弱，粒子排列渐趋有序，系统能量不断减小，最终得到低能的晶体结构。当液体凝固成固体的晶态时，退火过程完成。

SAA是用来在一个大的搜寻空间内找寻最优解的基于概率的算法，采用类似于固体退火的过程，先将固体加温至充分高（相当于算法的随机搜索），然后徐徐冷却（相当于算法的局部搜索），在每一个温度（相当于算法的每一次状态转移）达到平衡态，最终达到物理基态（相当于算法找到最优解）。

在SAA中，利用优化问题与固体退火过程的相似性，根据Metropolis抽样准则模拟热力学退火过程，具体来说：当温度为时，系统从状态1变化到状态2，对应的内能为和，则接受状态2的概率为

 （.18）

 （.19）

其中，为衰减系数；当产生的新状态能量减小则接受此状态作为局部最优解，如果能量增加则随机地按一定概率接受或舍弃此状态，这就是Metropolis准则，是一种可以按概率来舍弃或接受状态的重点抽样法。

用固体退火模拟组合优化问题，将内能模拟为目标函数值，温度演化成控制参数，即可用模拟退火的思想求解组合优化问题：由初始解和控制参数初值（一个充分大的初始温度）开始，对当前解重复“产生新解→计算目标函数差→接受或舍弃”的迭代，并逐步衰减值，算法终止时的当前解即为所得近似最优解，这是基于蒙特卡洛迭代求解法的一种启发式随机搜索过程。退火过程由冷却进度表控制，包括控制参数的初值及其降温衰减系数、每个值时的马可夫链长度（即迭代次数）、Metropolis的步长和停止条件等。

通过Metropolis抽样准则的原理和模拟退火算法的求解过程，可以看出：在迭代初期，温度较高，可以接受较差的劣质解，但随着迭代次数增大，逐渐降低温度，只可以接受较好的劣质解。在迭代足够多次后，系统趋于稳定，达到平衡态。也就是说，对于优化问题，SAA从给定初始解出发，减小温度值，重复循环Metropolis准则，最终会在温度近似零时，不再接受新解，寻找到优化问题的全局最优解。

本研究在算法择优阶段运用模拟退火算法构建了求解单层调运模型的算法框架，具体实现步骤如下：

1）初始化。随机产生一个满足调运约束条件的值作为当前解，同时也是初始全局最优解。设置初始控制参数，马可夫链长度为，降温衰减系数，Metropolis的步长以及算法终止条件。

2）进入当前温度下的迭代，令迭代次数。

3）在当前值的邻域内生成一个满足调运约束条件的新值，计算与当前解间的成本差值。

4）判断新解是否是全局最优解，如果，则更新全局最优解并保留次优解。

5）按照Metropolis准则接受方案，如果，接受作为新的当前解，否则，以概率选择是否接受，接受后令。

6）如果，则等温条件下得迭代尚未进行完，跳转至2）；否则进入7）。

7）进入降温函数，更新，再次跳转执行2）；否则，算法结束，输出最优值对应的单层模型余泥渣土调运方案和单层模型余泥渣土调运最小成本。终止条件通常取为连续若干个新解都没有更新时终止算法。

* + 1. 遗传算法框架

生物在自然界的生存繁衍，经历了一代又一代的更替，新旧物种的淘汰或进化展示了生物在自 然界的自适应能力。受此启发，遗传算法模拟生物遗传和进化过程，成为求解极值问题的一类自组织、自适应的人工智能技术。其理论来源包括拉马克进化学说（Lamarckism）、达尔文进化学说和孟德尔遗传学（Mendelian inheritance），主要借鉴的生物学基础是生物的遗传、变异和进化。

1809年，拉马克出版了《动物哲学》一书。此书首次提出并系统阐述了生物进化学说。其重要内容包括：①物种都是由其他物种演变和进化而来的，而生物的演变和进化是一个缓慢而连续的过程；②环境的变化能够引起生物的变异，环境的变化迫使生物发生适应性的进化。生物对环境的适应是发生变异的结果，环境变了，生物会发生相应的变异，以适应新的环境。

达尔文于1859年完成了《物种起源》一书。与此同时，Wallace发表了题为《论变种无限地离开 其原始模式的倾向》的论文。他们提出的观点被统称为达尔文进化学说，其要点是适者生存原理。该学说认为每一物种在发展中越来越适应环境；物种内每个个体的基本特征由后代继承，但后代又会产生一些异于父代的新变化。

拉马克和达尔文的观点有许多相似之处，他们都认为物竞天择，适者生存。这一理论是遗传算法（Genetic Algorithm，GA）能够成功实现函数优化的重要内容。

孟德尔则通过豌豆杂交实验，总结了以下两条定律（孟德尔定律）。

1）分离定律：基因作为独特的独立单位而代代相传。细胞中有成对的基本遗传单位，在杂种的生殖细胞中，一个来自雄体亲本，另一个来自雌体亲本。

2）自由组合定律（又称独立分配定律）：一对染色体上的基因对中的等位基因能够独立遗传。

基于上述理论基础，对比生物遗传过程中的群体、种群、染色体、基因及适应能力，遗传算法 也相应地创造了搜索空间，选择得到新群体、可行解、解的编码单元、解的适应度函数。解的适应度函数相当于环境，当适应度值达到要求，即生物性状达到对环境的适应能力时，即可停止进化，此时遗传算法也就求出了目标极值。

有了上述定义，遗传算法便可以模拟生物的遗传方式——复制、交叉和变异——来实现对数据的“进化”。顾名思义，复制就是将父代基因复制给子代。交叉即是两个染色体在某一位置处被剪断后的重新组合。变异是染色体上的某一基因发生了突变，变异的概率很小，它可以使染色体表现出新的形状。

* + 1. 算法优缺点分析及择优

## 遗传算法的构建

* + 1. 基因编码
    2. 种群初始化与基因解码
    3. 适应度函数的构建
    4. 遗传操作
    5. 交叉、变异算子

## 遗传算法的改进

* + 1. 基因编码的改进
    2. 交叉、变异算子的改进
    3. 选择算子的改进

## 改进遗传算法应用与效果分析

## 本章小结

# 城市工程建设余泥渣土智能调运系统开发

## 余泥渣土智能调运系统概述

* + 1. 必要性分析
    2. 系统框架及功能设计
    3. 逻辑架构

## 数据采集模块设计

* + 1. 基于云平台的数据采集方式
    2. 人工采集数据输入接口

## 数据储存、管理与预处理

* + 1. 数据库的建立与运行
    2. 基于编码的数据储存与管理
    3. 基于SQL的数据预处理

## 智能算法程序设计

* + 1. 连接数据库
    2. 导入模型
    3. 遗传算法得出最终方案

## 本章小结

# 工程案例分析

## 工程背景

* + 1. 工程简介
    2. 交通运输网络信息
    3. 各项目运转情况信息
    4. 渣土字典
    5. 场站信息
    6. 运输车辆信息

## 模型建立与智能算法参数校正

* + 1. 多层中转余泥渣土调运优化模型的建立
    2. 遗传算法预设参数校正

## 系统应用

* + 1. 系统运行过程
    2. 运行结果总览

## 本章小结

# 结论与展望

## 研究结论

Ii

## 展望

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗 ——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]//新华社. (2022). http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content\_5721685.htm.

[2] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 《关于推进城市安全发展的意见》[EB/OL]//新华社. (2018). http://www.gov.cn/zhengce/2018-01/07/content\_5254181.htm.

[3] 蔡永红. 深圳水径余泥渣土受纳场设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2011(10): 5.

[4] 黄志斌. 深圳市余泥渣土处理设施现状和对策[J]. 环境卫生工程, 2013(1): 3.

[5] 陈盛达, 张文琦, 李孝安等. 快速城市化背景下工程渣土处置与再利用[C]//2019年中国城市规划年会论文集. 2019: 1-7.

[6] 萧辉, 涂重航, 谷岳飞等. “渣土围城”隐疾成为很多城市痛点[J]. 安全与健康, 2016(1): 4.

[7] 中央政府门户网站. 滑坡山体为堆积的余泥渣土——深圳山体滑坡灾害追踪[EB/OL]//新华社. (2015). http://www.gov.cn/xinwen/2015-12/21/content\_5026040.htm.

[8] 中央政府门户网站. 广东专项整治建筑余泥渣土受纳场 “禁区”内的限期搬迁[EB/OL]//新华社. (2015). http://www.gov.cn/xinwen/2015-12/27/content\_5028238.htm.

[9] 深圳市城市规划设计研究院有限公司. 深圳市余泥渣土受纳场专项规划[R]. 2015.

[10] 深圳市住建局. 深圳市2018年度余泥渣土受纳场实施规划[R]. 2018.

[11] 浦东新区管委会. 浦东新区独辟蹊径给渣土“找出路”实施浦东机场外侧滩涂工程渣土回填消纳[R]. 2014.

[12] 郑茂, 颜世伟, 初秀民等. 舰载机典型调运方案推演与时序优化[J/OL]. 中国舰船研究, 2021, 16(03): 1-8+23. DOI:10.19693/j.issn.1673-3185.01945.

[13] 蒋珊珊. 考虑路段限行时间窗与灵活子路径的车辆径程优化问题研究[D/OL]//北京交通大学. 2020. DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001574.

[14] WANG J Y, TOURAN A, CHRISTOFOROU C等. A systems analysis tool for construction and demolition wastes management[J/OL]. Waste Management, 2004, 24(10): 989-997. DOI:10.1016/J.WASMAN.2004.07.010.

[15] KO H J, EVANS G W. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs[J/OL]. Computers & Operations Research, 2007, 34(2): 346-366. DOI:10.1016/J.COR.2005.03.004.

[16] HUANG B, CHEU R L, LIEW Y S. GIS and genetic algorithms for HAZMAT route planning with security considerations[J/OL]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 18(8): 769-787[2022-12-08]. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810410001705307. DOI:10.1080/13658810410001705307.

[17] 赵坤. 渣土运输管理中应用GPS和载重量监测技术的探讨[J]. 城市管理与科技, 2014, 16(1): 2.

[18] 张静. 城市渣土管理中的GIS技术应用与研究[J]. 科技风, 2014(18): 2.

[19] 王宁, 楼岱, 陈大庆等. 基于"BIM+GIS"技术的建筑垃圾精准管控信息管理平台研究初探[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 5.

[20] 周厚贵, 曹生荣, 申明亮. 土石方调配研究现状与发展方向[J]. 土木工程学报, 2009(2): 8.

[21] KARIMI S M, SEYED, MOUSAVI J等. Fuzzy Optimization Model for Earthwork Allocations with Imprecise Parameters[J/OL]. Journal of Construction Engineering and Management, 2007, 133(2): 181-190[2022-12-08]. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282007%29133%3A2%28181%29. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:2(181).

[22] 王晓梅, 梁轶. 大系统理论在面板堆石坝工程土石方平衡规划中的应用[J]. 水利水电快报, 2001(17): 4.

[23] 胡程顺, 钟登华, 张静等. 土石方动态调配模型与可视化研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(12): 73-79.

[24] 柳志新, 王忠耀, 胡志根等. 堆石坝料物调运多目标动态优化模型研究[J]. 水电能源科学, 2004, 22(2): 60-63.

[25] 申明亮, 刘新刚, 陈钢等. 堆石坝土石方调配与道路运输强度的联合优化模型[J]. 武汉大学学报：工学版, 2006, 39(5): 5.

[26] JAYAWARDANE A K W, HARRIS F C. Further Development of Integer Programming in Earthwork Optimization[J/OL]. Journal of Construction Engineering and Management, 1990, 116(1): 18-34[2022-12-11]. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%281990%29116%3A1%2818%29. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:1(18).

[27] 胡志根, 肖焕雄. 砂石料料场规划模型研究[J]. 水电站设计, 1995, 11(2): 16-21.

[28] 姜韶阳, 李晓伟, 董索等. 基于大系统理论的面板堆石坝土石方调配平衡研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(06): 128-130+92.

[29] GILBERT S. Introduction to linear algebra[M]. 2019.

# 攻读硕士学位期间发表的科研成果

**发表论文：**

**参与项目：**