|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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](#_Toc121418475)

[ABSRTACT II](#_Toc121418476)

[第1章 绪论 4](#_Toc121418477)

[1.1 研究背景及意义 4](#_Toc121418478)

[1.2 问题提出及分析 6](#_Toc121418479)

[1.3 国内外研究现状 7](#_Toc121418480)

[1.3.1 城市建设余泥渣土管理问题研究现状 7](#_Toc121418481)

[1.3.2 物资调运问题和土石方调配问题研究现状 8](#_Toc121418482)

[1.3.3 余泥渣土智能调运算法问题研究现状 8](#_Toc121418483)

[1.4 本文研究内容及思路 8](#_Toc121418484)

[1.4.1 研究内容 8](#_Toc121418485)

[1.4.2 研究方法及技术路线 8](#_Toc121418486)

[第2章 余泥渣土多层调运模型及求解算法 9](#_Toc121418487)

[2.1 余泥渣土多层调运问题分析 9](#_Toc121418488)

[2.1.1 问题描述 9](#_Toc121418489)

[2.1.2 余泥渣土及调运网络特性分析 9](#_Toc121418490)

[2.2 构建余泥渣土调运方案优化模型 9](#_Toc121418491)

[2.2.1 方案优化目标函数 9](#_Toc121418492)

[2.2.2 多层中转余泥渣土调运优化模型 9](#_Toc121418493)

[2.2.3 考虑约束条件的多层中转余泥渣土调运优化模型 9](#_Toc121418494)

[2.3 求解算法 9](#_Toc121418495)

[2.3.1 传统算法分析 9](#_Toc121418496)

[2.3.2 智能优化算法分析 9](#_Toc121418497)

[2.3.3 算法框架 9](#_Toc121418498)

[2.3.4 求解步骤 9](#_Toc121418499)

[2.3.5 求取最优解 9](#_Toc121418500)

[2.4 本章小结 10](#_Toc121418501)

[第3章 基于改进遗传算法的智能优化算法研究 11](#_Toc121418502)

[3.1 智能优化算法理论概述 11](#_Toc121418503)

[3.2 各种算法对比分析 11](#_Toc121418504)

[3.3 遗传算法的构建 11](#_Toc121418505)

[3.3.1 基因编码 11](#_Toc121418506)

[3.3.2 种群初始化与基因解码 11](#_Toc121418507)

[3.3.3 适应度函数的构建 11](#_Toc121418508)

[3.3.4 遗传操作 11](#_Toc121418509)

[3.3.5 交叉、变异算子 11](#_Toc121418510)

[3.4 遗传算法的改进 11](#_Toc121418511)

[3.4.1 基因编码的改进 11](#_Toc121418512)

[3.4.2 交叉、变异算子的改进 11](#_Toc121418513)

[3.4.3 选择算子的改进 11](#_Toc121418514)

[3.5 改进遗传算法应用与效果分析 11](#_Toc121418515)

[3.6 本章小结 11](#_Toc121418516)

[第4章 城市工程建设余泥渣土智能调运系统开发 12](#_Toc121418517)

[4.1 余泥渣土智能调运系统概述 12](#_Toc121418518)

[4.1.1 必要性分析 12](#_Toc121418519)

[4.1.2 系统框架及功能设计 12](#_Toc121418520)

[4.1.3 逻辑架构 12](#_Toc121418521)

[4.2 数据采集模块设计 12](#_Toc121418522)

[4.2.1 基于云平台的数据采集方式 12](#_Toc121418523)

[4.2.2 人工采集数据输入接口 12](#_Toc121418524)

[4.3 数据储存、管理与预处理 12](#_Toc121418525)

[4.3.1 数据库的建立与运行 12](#_Toc121418526)

[4.3.2 基于编码的数据储存与管理 12](#_Toc121418527)

[4.3.3 基于SQL的数据预处理 12](#_Toc121418528)

[4.4 智能算法程序设计 12](#_Toc121418529)

[4.4.1 连接数据库 12](#_Toc121418530)

[4.4.2 导入模型 12](#_Toc121418531)

[4.4.3 遗传算法得出最终方案 12](#_Toc121418532)

[4.5 本章小结 12](#_Toc121418533)

[第5章 工程案例分析 13](#_Toc121418534)

[5.1 工程背景 13](#_Toc121418535)

[5.1.1 工程简介 13](#_Toc121418536)

[5.1.2 交通运输网络信息 13](#_Toc121418537)

[5.1.3 各项目运转情况信息 13](#_Toc121418538)

[5.1.4 渣土字典 13](#_Toc121418539)

[5.1.5 场站信息 13](#_Toc121418540)

[5.1.6 运输车辆信息 13](#_Toc121418541)

[5.2 模型建立与智能算法参数校正 13](#_Toc121418542)

[5.2.1 多层中转余泥渣土调运优化模型的建立 13](#_Toc121418543)

[5.2.2 遗传算法预设参数校正 13](#_Toc121418544)

[5.3 系统应用 13](#_Toc121418545)

[5.3.1 系统运行过程 13](#_Toc121418546)

[5.3.2 运行结果总览 13](#_Toc121418547)

[5.4 本章小结 13](#_Toc121418548)

[第6章 结论与展望 14](#_Toc121418549)

[6.1 研究结论 14](#_Toc121418550)

[6.2 展望 14](#_Toc121418551)

[攻读硕士学位期间发表的科研成果 16](#_Toc121418552)

# 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。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规划特征，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。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；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，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*；

*K*:{1,2,···,*k*}表示工程物资种类的集合；

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，构建余泥渣土调运网络拓扑关系，考虑约束条件建立余泥渣土多层中转调运优化模型。

* + 1. 调运优化目标函数

基于上述分析，区域余泥渣土调运的总费用为区域范围内所有余泥渣土按规划路线调运后运输费用的总和，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。

首先，区域余泥渣土调运的总费用为区域范围内所有余泥渣土按规划路线调运后运输费用的总和，因此总费用的计算方法见式2.1：

 （2.1）

式中：

是区域余泥渣土调运的总费用；

是第条规划路线上余泥渣土的运输费用；

在方案规划阶段，某条调运路线的余泥渣土调运费用主要考虑运输费用、中转费用以及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）运输费用。运输费用是指将余泥渣土用工程运输车由

* + 1. 多层中转余泥渣土调运优化模型
    2. 考虑约束条件的多层中转余泥渣土调运优化模型
       1. 考虑道路的约束条件
       2. 考虑时变性的约束条件

## 本章小结

# 基于改进遗传算法的智能优化算法研究

## 智能优化算法理论概述

## 各种算法对比分析

## 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.

# 攻读硕士学位期间发表的科研成果

**发表论文：**

**参与项目：**