

基于数值模拟的加筋土挡墙设筋参数优化效果分析

金康康¹, 刘泽², 楼华锋¹, 史克友³

¹浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

³河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2023年10月2日; 录用日期: 2023年11月13日; 发布日期: 2023年11月22日

摘要

文章基于FLAC3D建立加筋土挡墙数值模型, 从筋材铺设长度与铺设间距两个设计参数着手, 研究了加筋土挡墙优化设计的效果。研究表明: 两种优化方式下, 挡土墙内产生的最大水平位移均在设计允许范围内; 进行筋材铺设间距设计时, 筋材内产生的最大拉拔力会显著增大, 对筋材的抗拔力要求也更高; 综合考虑加筋土挡墙的水平位移、筋材内最大拉拔力、挡墙稳定性系数及筋材节约率等四个因素, 对筋材铺设长度进行优化较对铺设间距优化的效果要好。

关键词

加筋土挡墙, 数值模拟, 土工格栅, 筋材参数, 优化设计

Analysis of the Optimization Effect of Reinforcement Parameters for Reinforced Soil Retaining Walls Based on Numerical Simulation

Kangkang Jin¹, Ze Liu², Huafeng Lou¹, Keyou Shi³

¹Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

³College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

Received: Oct. 2nd, 2023; accepted: Nov. 13th, 2023; published: Nov. 22nd, 2023

Abstract

In this paper, based on FLAC3D, a numerical model of reinforced soil retaining wall was established, and the optimization design effect of reinforced soil retaining wall was studied from two design parameters: reinforcement laying length and laying spacing. Research has shown that under both optimization methods, the maximum horizontal displacement generated within the retaining wall is within the design allowable range; when designing the spacing between steel bars, the maximum drawing force generated within the steel bars will significantly increase, and the requirements for the drawing force of the steel bars will also be higher; taking into account four factors, including the horizontal displacement of reinforced soil retaining walls, the maximum drawing force inside the reinforcement material, the stability coefficient of the retaining wall, and the saving rate of reinforcement material, optimizing the laying length of reinforcement material is better than optimizing the laying spacing.

Keywords

Reinforced Soil Retaining Walls, Numerical Simulation, Geogrid, Reinforcement Parameters, Optimal Design

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

加筋土挡墙是常用的一种支挡结构类型,和其它挡土墙类型相比,加筋土挡墙具有施工简便、工程预算低、抗震效果好、对石材需求少等优点[1] [2]。加筋土挡墙的应用范围很广,在城市基础设施建设、边坡支护、路基处理中十分常见[3]。

国内外关于加筋土挡墙的研究范围很广,包括加筋土挡墙的强度理论[4]、筋土界面特性[5]、稳定性[6]及动力特性[7]等。杜浩源等[8]在库伦及朗肯土压力的理论基础上,考虑加筋组合材料中加筋材料的折减强度,推导了一种计算方法,用于计算不同埋深下加筋土组合材料的粘聚力及筋材拉力与挡墙位移的函数关系。廖石伟[9]研究了铁路系统中,加筋土挡墙墙顶荷载的传递模式。张子东等[10]采用有限元分析的方法,对填料性质劣化后墙体及筋材的变形受力情况进行了模拟,并在此基础上分析了加筋土挡墙的失稳破坏机理。

除了上述研究外,一些学者进行了加筋土挡墙的优化设计研究,刘泽等[11]从筋材铺设长度及筋材铺设间距两个方面对加筋土挡墙进行了优化设计;胡佳豪等[12]、朱玉明等[13]进行了加筋土挡墙不同布筋方式的模型比对试验;郑明坤进行了双面加筋土挡墙的结构优化设计研究[14]。

虽然加筋土挡墙的优化设计方法有很多,但从适用性来讲,从筋材铺设长度及筋材铺设间距着手进行优化无疑是最为实用的方法,本文在已有研究的基础上,研究加筋土挡墙的优化设计效果,以对类似加筋土挡墙的设计提供理论指导。

2. 筋材铺设参数优化设计

加筋土挡墙之所以能够发挥支挡作用,其一是在土工格栅等加筋材料的作用下,加筋体自身的抗剪强度得到极大提高,从而保证加筋体内部稳定性;其二在加筋体内部稳定性得到有效保证的基础上,加

筋体作为一个支挡整体，类似于重力式挡土墙的作用，来保证墙后填土的稳定性。因此，保证加筋体的抗剪强度是加筋土挡墙有效发挥作用的关键。

按目前规范设计方法进行加筋土挡墙的设计，往往会有很大的安全余量，就设计角度而言，只要筋材具有足够的抗拉及抗拔稳定性，加筋体的内部稳定性就能得到保障，另外受加筋土挡墙内部侧土压力分布形式的影响，下层筋材的铺设长度往往富余。文献[1] [11]便以此为出发点，从筋材铺设长度和筋材铺设间距两方面着手对加筋土挡墙进行了优化设计。

文献[1] [11]以5米加筋土挡墙为例进行了优化设计的实例研究。在实例分析中，优化前，土工格栅一共铺设9层，每层铺设长度为6 m，层间铺设间距为0.5 m。文献[1] [11]中的实例分析结果表明，对筋材铺设长度进行优化后，筋材节约了约51%，对铺设间距进行优化后，筋材节约了约33%，优化效果明显。

3. 模型建立

优化设计的目的，是在保证加筋土挡墙稳定性的前提下达到降低工程造价的目的。这里同样以文献[1] [11]中的实例为准，利用有限差分软件 Flac3D 建立相应的数值分析模型，研究加筋土挡墙优化设计后的支挡效果及稳定性。

图1为所建立的数值分析模型，模型y方向长度为8 m，为消除边界效应的影响，适当增大路基深度及墙后填土长度，模型中土工格栅用工格栅单元(geogrid)进行模拟，面板用壳单元(shell)进行模拟，图1(b)为作为对比分析的3中加筋方式，长度优化及间距优化的加筋参数皆以文献[1] [11]为准。模型计算前对模型的边界条件进行设定，即固定模型底部全部节点所有方向的速度，以及固定x方向两端面所有节点在x方向速度和y方向两端面所有节点在y方向速度，只留墙面及模型顶面作为自由面。

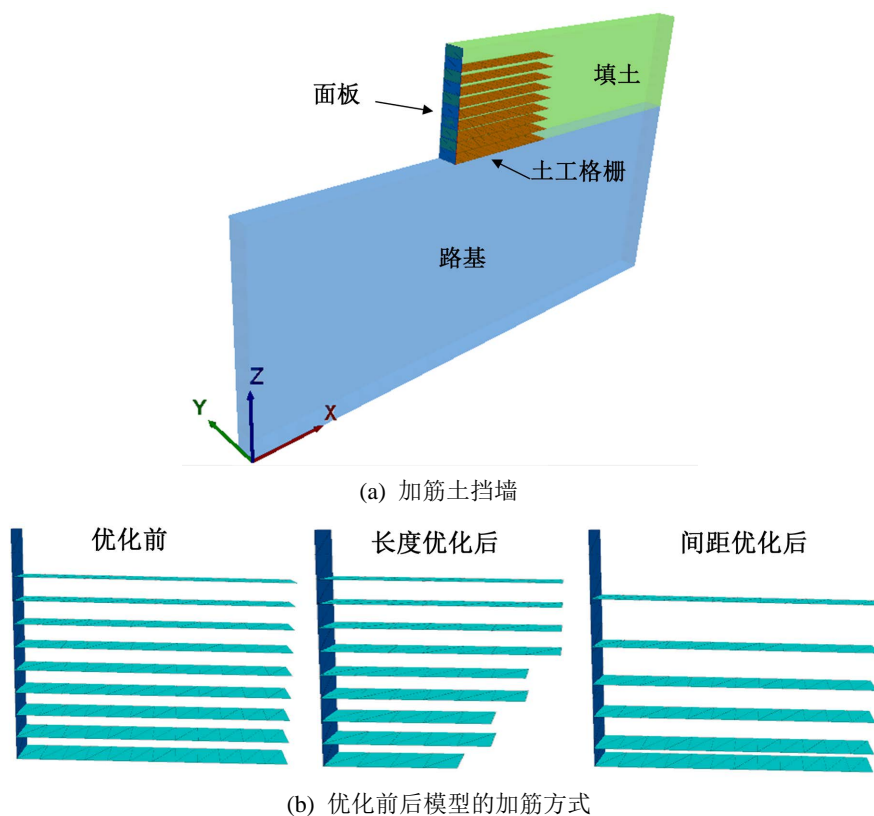


Figure 1. Numerical analysis model
图1. 数值分析模型

模型参数见表 1~3。其中壳单元用来模拟加筋土挡墙的面板，以 C30 钢筋混凝土的参数为准。

Table 1. Mechanical parameters of foundation and wall

表 1. 地基及墙体的力学参数

类型	体积模量(MPa)	剪切模量(MPa)	密度(kg/m ³)	摩擦角(°)	黏聚力 kPa
墙体	29.4	11.3	1950	21	25
地基	73.2	28.1	2350	35	28

Table 2. Mechanical parameters of geogrid

表 2. 土工格栅的力学参数

弹性模量(kPa)	泊松比	耦合弹簧的黏聚(kPa)	耦合弹簧的摩擦角(°)	厚度(mm)
6×10^8	0.33	1.5×10^3	27	3

Table 3. Mechanical parameters of shell element

表 3. 壳单元的力学参数

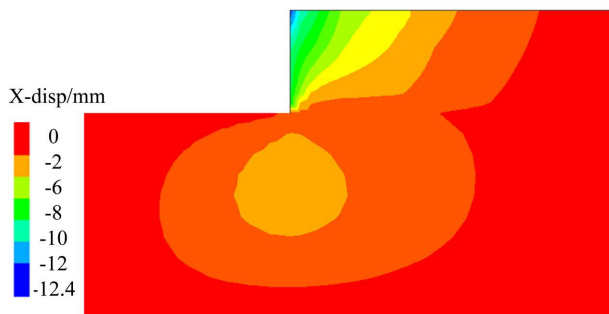
弹性模量(MPa)	泊松比	密度(kg/m ³)	厚度(cm)
3×10^4	0.27	2400	10

4. 加筋土挡墙优化效果分析

4.1. 水平位移对比分析

图 2 为优化前后挡土墙的水平位移云图。从云图来看，无论是优化前还是铺设长度及铺设间距优化后，三种加筋方式下挡土墙的云图形式是一致的，面板后加筋体内的水平位移均呈现为倾斜的层状曲线，在加筋土挡墙墙趾下方会有一个相对较大的水平位移区，这就说明，在进行加筋土挡墙的设计时，地基处理及加筋体抗滑移验算十分重要，如重视不够，对于地基土强度不高的地区，如软土地区，很容易造成加筋土挡墙的滑移失稳。另外，无论是优化前还是优化后，加筋土挡墙的最大水平位移均产生于面板顶处，这是由于顶处筋材的水平约束不够造成的。

从数值大小来看，优化前，加筋土挡墙的最大水平位移为 12.4 mm，产生的最大水平位移最小，铺设长度优化后，加筋土挡墙的最大水平位移为 12.8 mm，产生的最大水平位移与优化前相差不大，铺设间距优化后，加筋土挡墙的最大水平位移为 16.1 mm，产生的最大水平位移最大，这就说明，相比铺设间距的变化，改变筋材的铺设长度对挡土的水平位移影响更为明显。就产生的最大水平位移量而言，三种加筋方式下，挡墙的水平位移均不大，都在设计允许范围内，因此，单就水平位移角度而言，设计时三种筋材铺设方式均可采用，具体情况可参考筋材的节省率加以选择。



(a) 优化前

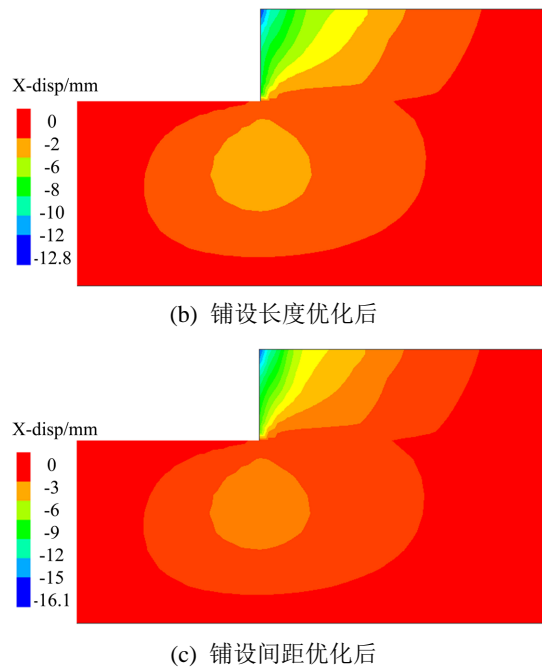


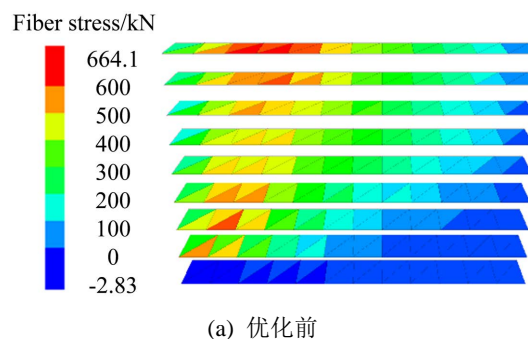
Figure 2. Cloud map of horizontal displacement of retaining wall before and after optimization
图 2. 优化前后挡土墙水平位移云图

4.2. 筋材拉拔力对比分析

筋材抗拔力是保证加筋体内部稳定性的关键，在很强的拉拔力作用下，筋材会断裂破坏，随后加筋体丧失支挡功能，所以每层筋材最大拉拔力点位置的连线，即为加筋体内的潜在破裂面。

图 3 为优化前后筋材中所产生的拉拔力云图。从云图来看，筋材内拉拔力云图均与 0.3 H 理论分析法描述的一致。说明，无论是铺设长度优化还是铺设间距优化，每层筋材的受力分布形式均是一致的，即埋深越深，筋材产生最大的拉拔力位置越靠近筋材端部。

就筋材中产生的最大拉拔力而言，优化前，筋材中产生的最大拉拔力为 664.1 kN，铺设长度优化后，筋材中产生的最大拉拔力为 651.2 kN，与优化前相差不大，二者相差同样不大。但铺设间距优化后，筋材中产生的最大拉拔力为 1004.7 kN，增幅明显，这主要是因为，和上层筋材相比，下层筋材发挥的抗拔作用相对较低，减小下层筋材的铺设长度，对筋材内产生的最大拉拔力影响也相应不大，但对筋材的铺设间距进行优化时，减少了筋材的铺设层数，加筋体内的侧土压力不变，当更少的筋材发挥同样的抗拔力时，筋材中产生的最大拉拔力也就明显增大。因此，虽然单从水平位移角度而言，三种加筋方式皆可取，但就从筋材中产生的最大拉拔力角度而言，铺设间距的优化效果不佳。



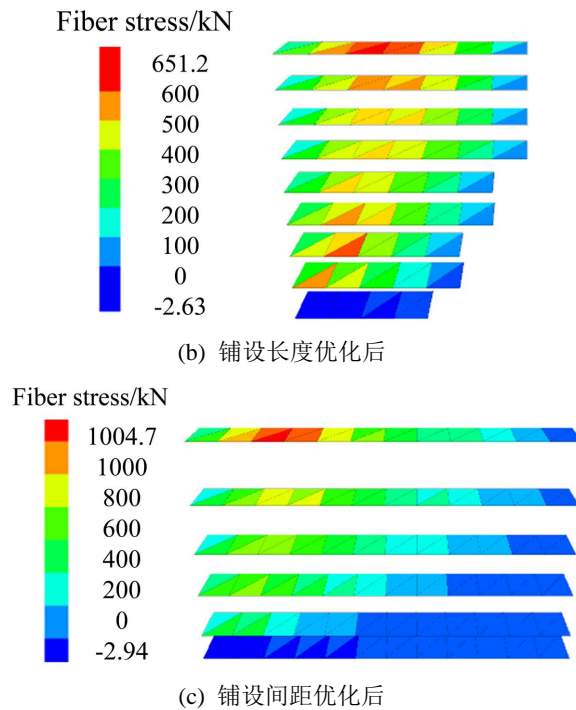


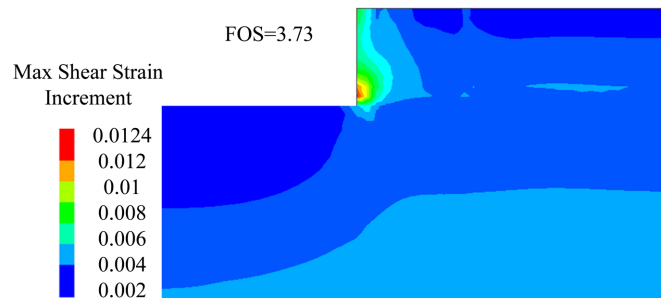
Figure 3. Cloud map of reinforcement drawing force before and after optimization
图 3. 优化前后筋材拉拔力云图

4.3. 挡土墙稳定性对比分析

墙体内部的剪应变增量与挡墙的稳定系数密切相关，墙体内部的剪应变增量越大，挡墙的稳定系数越低。因此，对挡土墙的稳定系数进行对比分析时，也应分析墙体内部的剪应变增量情况。

图 4 给出了优化前后挡土墙剪应变增量云图及稳定性系数。从剪应变增量云图来看，三种加筋方式下，加筋体内剪应变增量云图形式一致，从剪应变增量的数值来看，三种加筋方式下，加筋土挡墙远未达到屈服状态。

从稳定性系数来看，优化前，加筋土挡墙的稳定系数为 3.73，铺设长度优化后筋土挡墙的稳定系数为 2.76，铺设间距优化后，土挡墙的稳定系数为 2.71。与优化前相比，两种优化方式后，加筋土挡墙的稳定系数均有明显下降，但仍均有足够的安全性。这也说明，对加筋土挡墙进行优化设计后，虽然减少了筋材的使用量，在合理的优化设计下，仍可保证加筋土挡墙的稳定系数，也就是说，对加筋土挡墙进行优化设计是可行的。



(a) 优化前

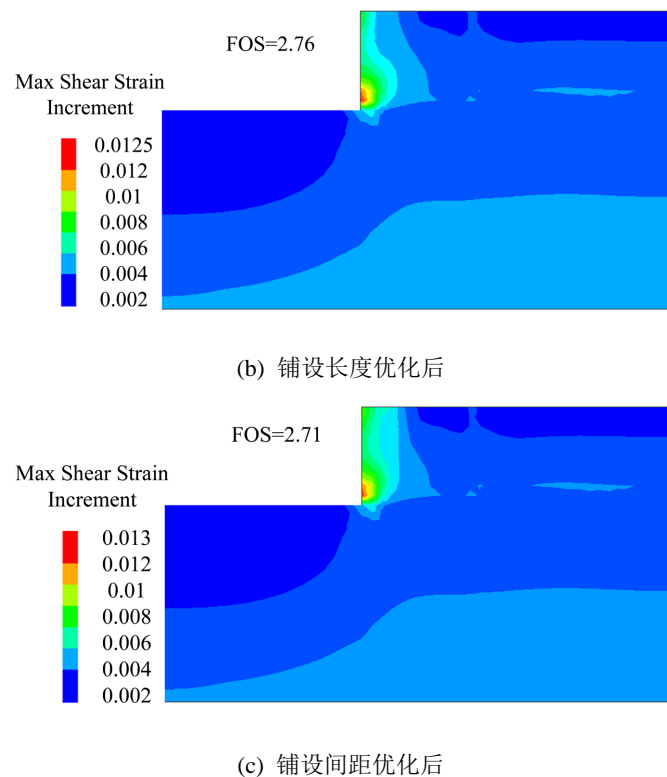


Figure 4. Cloud map of maximum shear strain of retaining wall before and after optimization

图 4. 优化前后挡土墙最大剪应变云图

5. 讨论

前面分别从加筋土挡墙的水平位移、筋材内最大拉拔力、挡墙稳定性系数三个方面对加筋土挡墙的优化效果进行了分析。从本次实例的分析结果来看，无论是进行筋材铺设长度的优化，还是进行筋材铺设间距的优化，两种方式优化后挡墙的稳定性能得到保证，且二者数值相差不大。同样地，两种方式优化后，面板处产生的最大水平位移也均在设计允许范围之内。但相比筋材铺设长度的优化，筋材铺设间距优化后筋材内产生的最大拉拔力会显著增大，这就需要在采用这种优化方式时提高加筋材料的质量，加筋材料质量提高的同时，采购单价也会随之增加。另外，对比表 1、表 2 中的计算结果，筋材铺设长度进行优化后，筋材可节约 51%，铺设间距进行优化后，筋材只节约了 33%。综合对比下来，虽然在保证筋材有足够抗拔力的情况下，两种优化方式皆可采用，但与铺设间距优化方法相比，铺设长度的优化效果更为明显。

6. 结论

- 1) 无论是采用优化筋材铺设长度的方式，还是采用优化筋材铺设间距的方式，挡墙内产生的最大水平位移均在设计允许范围内，因此，单就水平位移角度而言，设计时两种优化方式均可采用。
- 2) 与优化筋材铺设长度相比，进行筋材铺设间距设计时，筋材内产生的最大拉拔力会显著增大，这就需要增加筋材的抗拔力，筋材的采购单价也会随之增加，因此采用何种优化方式也应考虑工程实际情况。
- 3) 综合考虑加筋土挡墙的水平位移、筋材内最大拉拔力、挡墙稳定性系数及筋材节约率四个方面，与铺设间距优化方法相比，铺设长度的优化效果更好。

基金项目

浙江省交通科技项目(2020004); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30257)。

参考文献

- [1] 史克友. 车辆荷载作用下加筋土挡墙的力学响应分析[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- [2] 王云和, 朱爱山, 徐友樟. 高边坡多级柔性加筋土挡墙施工及稳定性分析研究[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(12): 13-16.
- [3] 杨玲琴. 静载作用下双面加筋土挡墙性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2023.
- [4] 陈永辉, 夏波, 王江波. 土工合成材料加筋砂土的破坏模式和强度理论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 120-123.
- [5] 赖汉江, 郑俊杰, 甘甜, 等. 土工格栅加筋拉拔试验界面特性细观分析[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(4): 45-54.
- [6] 周春儿, 何光春, 龙丽吉. 台阶式土工格栅加筋土挡墙结构优化设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 713-717.
- [7] 王丽艳, 周亚军, 陈国兴. 地震中整体面板式土工格栅加筋土挡墙动土压力研究[J]. 防震减灾工程学报, 2012, 34(3): 353-358.
- [8] 杜浩源, 宋玲, 刘杰, 等. 重力式加筋土挡墙土压力的计算方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2023, 41(3): 291-297.
- [9] 廖石伟. 铁路加筋土挡墙顶部荷载传递模式研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [10] 张子东, 任鹏, 唐印, 等. 某高填方边坡加筋土挡墙失稳破坏机理研究[J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48(3): 63-70+85.
- [11] 刘泽, 廖鹏, 何矾, 等. 加筋土挡墙筋材铺设参数优化研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 135-139.
- [12] 胡佳豪, 曹咏鑫, 石浩田, 等. 考虑不同布筋方式的加筋土挡墙试验分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30(3): 109-111.
- [13] 朱玉明, 张飞, 贾世林, 等. 筋材布置方式对加筋土挡墙地震稳定性的影响[J]. 振动与冲击, 2022, 41(24): 88-96.
- [14] 郑明坤. 双面加筋土挡墙作用机理及结构优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.