



# 大学生论文检测系统

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2022R\_20220526162157465961689378

检测时间: 2022-05-26 16:21:57

篇名: 基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的相似性建模研究

作者: 高程展 (1751193;土木工程学院;土木工程)

指导教师: 黄宏伟

检测机构: 同济大学

提交论文IP: 111.\*\*\*.\*\*\*.\*\*\*

文件名: 毕业论文\_高程展v11.docx

检测系统: 大学生论文检测系统

检测类型: 大学生论文

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

大学生论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

机构自建比对库

时间范围: 1900-01-01至2022-05-26

## 检测结果

去除本人文献复制比: 5.2%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 3.9%

总文字复制比: 5.2%

单篇最大文字复制比: 2.3%

重复字数: [ 1615 ]

总段落数: [ 4 ]

总字数: [ 31183 ]

疑似段落数: [ 2 ]

单篇最大重复字数: [ 722 ]

前部重合字数: [ 580 ]

疑似段落最大重合字数: [ 893 ]

后部重合字数: [ 1035 ]

疑似段落最小重合字数: [ 722 ]



指标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

相似表格: 0

相似公式: 没有数据

疑似文字的图片: 0

8.8% (893)

基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的相似性建模研究 第1部分 (总10128字)

7.9% (722)

基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的相似性建模研究 第2部分 (总9141字)

(注释: ■ 无问题部分 ■ 文字复制部分 ■ 引用部分)

指导教师: 黄宏伟  
 审阅结果:  
 审阅意见: 指导老师未填写审阅意见

总字数: 10128

去除本人文献复制比: 8.8%(893)      文字复制比: 8.8%(893)      疑似剽窃观点 (0)

1	<u>离散裂隙网络简化方法及其在隧道稳定性分析中应用</u> 叶懿尉(导师: 张彬) - 《中国地质大学(北京)硕士论文》 - 2019-05-01	3.3% (339) 是否引证: 否
2	<u>裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究</u> 刘晓丽;王恩志;王思敬;樊赟赟; - 《岩石力学与工程学报》 - 2008-09-15	1.9% (189) 是否引证: 是
3	<u>煤体非均质随机裂隙模型及渗流-应力耦合分析</u> 于永江(导师: 王来贵) - 《辽宁工程技术大学博士论文》 - 2010-11-20	1.4% (138) 是否引证: 否
4	<u>基于刚体弹簧-等效离散裂隙网络耦合方法的水压致裂数值模型</u> 姚池;赵明;杨建华;蒋水华;姜清辉;周创兵; - 《岩石力学与工程学报》 - 2018-03-15 1	0.9% (94) 是否引证: 是
5	<u>分形理论在岩体质量评价中的研究</u> 张超;宋卫东;付建新; - 《矿业研究与开发》 - 2020-02-25	0.9% (90) 是否引证: 否
6	<u>三维离散裂隙网络管单元模型确定岩体渗透张量的尝试</u> 王俊奇;董晔;李鹏宇; - 《水利与建筑工程学报》 - 2016-06-15	0.7% (66) 是否引证: 否
7	<u>基于分形几何理论的DFN模型构建方法研究</u> 刘波;金爱兵;高永涛;肖术; - 《岩土力学》 - 2016-06-10	0.7% (66) 是否引证: 是
8	<u>基于离散裂隙网络模型的节理岩体渗透张量及特性分析</u> 王培涛;杨天鸿;于庆磊;刘洪磊;夏冬;张鹏海; - 《岩土力学》 - 2013-10-15	0.4% (40) 是否引证: 是
9	<u>复杂节理岩体力学参数尺寸效应及工程应用研究</u> 吴琼(导师: 唐辉明) - 《中国地质大学博士论文》 - 2012-05-01	0.3% (31) 是否引证: 否
10	<u>基于关联规则与聚类分析的课程评价技术</u> 范圣法;张先梅;虞慧群; - 《华东理工大学学报(自然科学版)》 - 2021-04-02 14:32	0.3% (30) 是否引证: 否

# 基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的相似性建模研究

## 摘要

岩石隧道工作面裂隙的相似性评价是工程师与科研人员在裂隙岩体建模工作中深刻关注的重要课题。当前广泛采用的测量和分析岩体裂隙的方法仍是以专业人员携带地质罗盘、标尺、测线等工具现场测量勘察绘制岩石的裂隙为主,而后整理所得数据并在图纸上绘制。显然,这类方法具有操作简单直接等优势,但人力成本高,检测效率低下,人工操作易失误等缺点不可避免。随着计算机技术的不断发展,以机器视觉为主导的非接触式测量逐步开始广泛应用于实际工程。非接触式数据获取方式也因此逐步作为岩体节理裂隙模型建立的数据源。另一方面,由接触式测量数据建立的裂隙网络由于统计的局部性和主观性等劣势,使其在准确度和效率上无法满足日益发展的视觉信息技术的发展,故亟需探寻一种更简单高效的方法来分析岩石隧道工作面裂隙建模的相似性,确保结合机器视觉提取而建立的裂隙模型的可靠性。

鉴于此,本文基于机器视觉的方法和统计学原理,利用Python编译语言,提出了一种随机生成节理裂隙迹线图的离散裂隙网络的可视化方法,并由此建立一套完整的离散裂隙网络相似性评价体系。在裂隙网络建模方面,针对以往研究中难以兼顾的离散裂隙网络建模的随机性和指标分布的确定性,即全域裂隙在随机建立的过程中需同时满足多种分布要求的问题,提出了包括节理裂隙的间距、长度、角度和节理裂隙组数等在内的二维离散裂隙网络的建模指标,通过先施加“弱约束”后施加“强约束”的方法创新性地解决了该问题。在相似度评价方面,除离散裂隙网络相似度常规考虑的迹线长度、角度和位置等指标外,还创新性地引入了节理裂隙的间距相似度这一指标,由此增加了从间距、密度分布等角度综合评价了相似性。最后,将所建立的离散裂隙网络相似性评价体系应用在实际工程中,对实际节理裂隙迹线图的模拟图中最佳的总体相似度达到了65.5%,验证了本研究方法的实际工程价值。

关键词: 机器视觉, 离散裂隙网络, 相似度, 节理裂隙, 岩石隧道

Machine Vision-based Similarity Modeling Study of Rock Tunnel Workface Fractures

ABSTRACT

Similarity evaluation of rock tunnel workface fractures is an important topic of profound concern for engineers and researchers in fractured rock modeling work. At present, the widely used method to measure and analyze the fissures of rock is still based on the professionals carrying geological compasses, rulers, measuring lines and other tools to survey and draw the fissures of rocks on site, and then collate the obtained data and draw them on the drawings. Obviously, this kind of method has the advantages of simple and direct operation, but high labor cost, low efficiency of detection, manual operation and other disadvantages are inevitable. With the continuous development of computer technology, non-contact measurement led by machine vision gradually began to be widely used in practical engineering. Therefore, non-contact data acquisition method is gradually used as the data source for rock joint fracture model establishment. On the other hand, the fracture network established by contact measurement data cannot meet the development of the growing visual information technology in terms of accuracy and efficiency due to the disadvantages of statistical localization and subjectivity, so there is an urgent need to explore a simpler and more efficient method to analyze the similarity of fracture modeling in rock tunnel working face and ensure the reliability of the fracture model established by combining machine vision extraction.

In view of this, this paper proposes a visualization method of discrete fracture network with randomly generated nodal fracture trace maps based on machine vision methods and statistical principles using Python language, and thus establishes a complete discrete fracture network similarity evaluation system. In terms of fracture network modeling, we propose a two-dimensional discrete fracture network modeling index including the spacing, length, angle and number of nodal fracture groups, which is difficult to balance the randomness of discrete fracture network modeling and the determinism of index distribution in previous studies, i.e., the full-domain fracture needs to meet multiple distribution requirements in the process of random establishment, by first applying The problem is solved innovatively by imposing "weak constraints" first and "strong constraints" later. In the evaluation of similarity, in addition to the indicators of trace length, angle and position, which are conventionally considered in the similarity of discrete fracture networks, the index of spacing similarity of nodal fractures is also innovatively introduced, thus increasing the comprehensive evaluation of similarity from the perspective of spacing and density distribution. Finally, the established discrete fracture network similarity evaluation system was applied to the actual engineering, and the best overall similarity in the simulated map of the actual nodal fracture traces reached 65.5%, which verified the practical engineering value of this research method.

Keywords: machine vision, discrete fracture network, similarity, nodal fracture, rock tunnel

目录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究文献综述.....	2
1.2.1 离散裂隙网络模型研究现状.....	2
1.2.2 岩体裂隙建模相似性评价研究现状.....	3
1.3 研究内容.....	4
1.4 论文的创新点.....	4
2 基于二维离散裂隙网络的岩体迹线自动化生成研究.....	6

2.1 离散裂隙网络建立指标.....	6
2.2 离散裂隙网络可视化.....	6
2.3 工程案例建模.....	11
2.3.1 工程背景.....	11
2.3.2 图像几何信息提取.....	12
2.3.3 离散裂隙网络生成.....	14
2.4 本章小结.....	15
3 离散裂隙网络相似度评价方法研究.....	16
3.1 引言.....	16
3.2 考虑迹线分组的相似性评价.....	17
3.2.1 节理裂隙分组配对.....	17
3.2.2 角度相似性.....	18
3.2.3 分组长度相似性.....	20
3.2.4 分组间距相似性.....	21
3.2.5 分组位置相似性.....	23
3.2.6 分组密度相似性.....	27
3.3 不考虑迹线分组的相似度评价.....	30
3.3.1 总体长度相似性.....	31
3.3.2 总体间距相似性.....	31
3.3.3 总体位置相似性.....	32
3.3.4 总体密度相似性.....	32
3.4 案例分析.....	34
3.5 本章小结.....	35
4 现场工程案例及敏感性分析.....	36
4.1 引言.....	36
4.2 工程案例应用.....	36
4.2 敏感性分析.....	39
4.3 本章小结.....	41
5. 结论.....	42
参考文献.....	43
谢辞.....	45

## 1 绪论

### 1.1 研究背景

自然界中，岩石被裂隙分割成大小不一的体块，这些裂隙的特征很大程度上决定了岩石的力学特征，对于岩体工程稳定性有着重要的影响（Rossmanith, 2014）[1]。由于地质运动的原因，不同地区的裂隙形态分布不尽相同。当前，工程人员关注的裂隙特征参数主要涉及组数、间距、尺寸、位置等。该类参数在不同程度地影响岩石的不连续性，非均质性和各向异性（Park R., 2013）[2]，也影响了岩石隧道工程岩体分级，进而引起实际工程的施工方法、参数的调整。因此，如何正确合理地探测、绘制及表征岩体裂隙特征，对于岩石地下工程施工安全稳定性的准确评价意义重大。

传统方法的测量和分析岩体裂隙的是由专业工作人员携带地质罗盘等工具现场测量勘察绘制岩石的裂隙，而后整理所得数据并在图纸上绘制。然而，在危险的施工隧道工作面条件，单凭人工手段绘制复杂的节理特征（位置、倾向、长度等）几乎是不可能的事，更无法利用获取的节理特征进一步实现隧道开挖的稳定性分析。随着计算机视觉的高速发展，工程中很多人工素描逐渐被计算机智能化识别技术所替代。而岩石裂隙的特征提取研究正不断和基于视觉统计信息的数值建模及分析相融合，为现场复杂的裂隙表征和分析提供了新思路。

20世纪70年代，国际岩石力学协会提出对岩体中的结构面进行定量描述，之后一些学者发现结构面的几何参数满足一定的统计分布规律（A. Clauset, 2009）[3]。由此，学者们建立了一种基于随机模拟生成节理裂隙的建模方式，即离散裂隙网络（Discrete Fracture Network, DFN），其思想核心是随机建模。换句话说，离散裂隙网络模型就是对岩体节理的一种统计意义上的表征。所以自然界中同一组节理裂隙可以产生多个符合其统计规律的裂隙



网络组(汪小刚, 2010) [4]。通过这种方法建立的模型, 每一条具体的节理裂隙并不是严格按照真实岩体的节理几何属性建立的, 而是根据这些几何属性的统计参数随机生成的, 因此这样生成的节理组具有一定的随机性和不确定性。而随之而来的问题是如何综合评价模型与真实的差异性。诸多研究表明, 具有随机和不确定性的离散裂隙网络能够展现真实岩石的力学性能(王卫华, 2005; 吴斌, 2010; 吴顺川, 2012) [5] [6] [7]。但也有很多学者认为, 只有选择了合适的裂隙更能体现真实岩体可能的力学表现。离散裂隙模型主要由三种概率模型组成, 即裂缝发生概率分布模型、裂缝尺寸概率分布模型和裂缝位置概率分布模型(Ivanova等, 2014) [8]。而结构面的参数采集和数据分析又是针对每个方面选择合适的概率分布模型的基础。目前最常用的数据采集方法主要有测线法和窗口法。近年来, 一些新的自动化的方法也应用在了结构面数据采集, 如全站仪法, 摄影测量法等。但事实上, 现有自动化采集水平下的节理裂隙数值建模不可避免地会与实际岩石裂隙状况有所差异, 取出所需考察的工作面与实际情况进行比较, 相似性往往难以保证。

鉴于此, 本课题将致力于研究二维裂隙网络建模的相似性研究, 以服务于当前开挖面的安全稳定分析。结合四川省昌河大坝3号泄洪隧道实际工程, 通过摄影测量技术获取实际工作面迹线的关键特征及分布, 构建基于离散裂隙网络方法的迹线图; 提出迹线图相似度对比的主要指标, 对比统计指标出现的差异, 进而实现一套迹线图建立的可靠性综合评价体系。

## 1.2 国内外研究文献综述

课题利用机器视觉图像, 开展岩体裂隙网络建模的相似性研究, 对国内外已有研究从裂隙网络模型以及裂隙建模相似性评价两方面进行文献综述。

### 1.2.1 离散裂隙网络模型研究现状

近年来, 岩体节理裂隙的数值建模技术经历了前所未有的快速发展, 正不断地被广泛应用于岩石力学领域, 服务于诸如采矿、土木、水利、油气、地热等不同行业的实际工程。而离散裂隙网络模型以其简洁有效的岩石特性表征优势而备受岩石力学领域工程师和学者的青睐。研究表明, 离散裂隙网络建模的主要步骤包括(刘晓丽等, 2008) [9]: (1) 选取工程岩体的特征尺度为研究域, 通过测线法或统计窗方法对研究域的裂隙几何结构信息进行测量和调查; (2) 对裂隙测量数据进行统计分析, 建立各组裂隙几何结构要素的概率模型, 并通过数据拟合的方式确定概率模型中的特征参数; (3) 选用合适的概率模型对各组裂隙的条数、中心位置、迹长(半径)、产状和裂隙宽度等几何要素进行随机模拟; (4) 结合现场测量数据, 对各组裂隙的模拟结果进行有效性检验, 组合各组裂隙生成裂隙网络。

国内外学者还利用该模型的内核思想结合流体力学, 热力学等学科, 开发其耦合效应并应用于各类工程实际。如刘晓丽等(2008) [9]考虑了岩石裂隙的随机性, 采用蒙特卡罗模拟方法编制了裂隙网络的生成程序, 实现了对岩石及其裂隙特征的数值建模以及直接对接有限元和离散元方法解决实际工程问题, 同时还结合渗流力学探讨了裂隙特征对于渗流的影响。陈必光等(2014) [10]应用离散裂隙网络思想并结合固体与流体界面之间的热量交换方程, 提出了一种以裂隙单元为基础求解二维岩体渗流和传热问题的方法。他们将该方法用于裂隙岩体进行研究, 得出了基岩渗透性、热传导系数对其渗流场、温度场以及出口水温变化的影响规律。王者超等(2016) [11]利用离散裂隙网络法对黄岛地下石油洞库水封性进行研究, 将流体流动的控制方程引入裂隙网络中, 结合边界条件和质量守恒定律得到所有裂隙网络节点的水头以及各条裂隙中的水流流速。他们将该方法应用于洞库的水封性研究中, 得到了包括水幕压力、洞室间距、液面差、裂隙倾角、储油情况等因素对于洞库密封性的影响。王培涛等(2013) [12] 应用离散裂隙网络模型的思想方法, 基于VC++6.0软件平台建立了平面渗流分析方法, 分析了节理岩体不同几何分布情况下的渗透率张量特征, 通过定义渗流定向性系数对岩体渗流的定向性特征进行了定量分析。姚池等(2018) [13] 在稳定渗流状态下的水压致裂模型基础上, 引入了等效离散裂隙网络模型描述非稳定渗流过程, 推导水力耦合计算公式, 以描述多孔连续介质中的非稳定流体运动过程, 提出了一种新型刚体弹簧-等效离散裂隙网络耦合方法, 用于研究黏性多孔材料中的水力压裂问题。刘波等(2016) [14]通过测线法调查了工程现场的岩石节理, 获得了节理产状分布概率密度函数, 并从分形几何学的角度分析了节理间距及迹长的分形分布规律, 推导出能反映节理间距及迹长分布状态的分形维数及分形分布概率密度函数分形分布概率密度函数,最终建立了能反映节理裂隙分布特征的离散裂隙网络模型并验证了模型的有效性。Younes Fadakar Alghalandi (2017) [15]开发一个开源的软件包, 用于以离散公式对二维或三维的裂隙网络进行随机建模, 主要包括几何建模(例如复杂的多边形断裂面)、数值模拟、分析(例如交叉、聚类 and 连通性分析)和应用(例如模拟液体流动)等几大功能模块。

上述国内外研究成果极大地推动了离散裂隙网络理论的发展及其在复杂实际工程中的应用。然而, 这些研究多为利用离散裂隙模型建模应用于实际工程场景, 而鲜有提及和讨论离散裂隙建模自身的可靠性。毋庸置疑, 裂隙网络建模的随机性直接影响了裂隙网络表征的可靠性, 也深刻影响建立模型对实际工程的有效性。本研究将基于已有

的迹线统计指标，建立考虑建模随机性和分布确定性的离散裂隙网络建模，并在此基础上，聚焦模型与实际的岩石裂隙的差异。同时，为简化工作，本研究将着重考虑二维离散裂隙网络模型的相似度问题。

### 1.2.2 岩体裂隙建模相似性评价研究现状

尽管离散裂隙模型应用广泛，但其主要是基于随机模拟提出的模型，故该模型模拟的裂隙分布状况与真实的岩石裂隙仍不可避免地存在系统偏差。因此，如何测定这种偏差及量化它对工程的影响成了重要课题。近年来，越来越多的学者开始关注离散裂隙网络模型的验证与评价研究。目前，主要有2种模型验证方法，分别是数值验证和图形验证。

数值验证是对通过随机模型数据与实测数据统计检验分析后进行比较，如Kolmogorov - Smirnov (KS) 检验、卡方检验 (Zhang等, 2013) [16]等。检验的内容通常包括裂隙走向、密度、长度、组数等。其中，Guo等 (2015) [17]对甘肃北山岩石露头进行了裂隙调查，建立了三维随机离散裂隙模型，采用了归一化的相对误差和变异系数对模型和实际裂隙的数量、长度和走向三类数据进行定量比较，结果表明该随机模型在特定条件下具有较高的可靠性，可以满足实际工程应用的需要。Mendoza-Torres等 (2017) [18]提出了一种引入Copula理论的改进离散裂隙网络建模方法，克服了一般裂隙建模过程中不考虑几何特性（方向、长度、孔径）之间可能存在的依赖关系的缺点。

图形验证在传统意义上只是简单地基于视觉观察，即通过直接比较真实迹线图和对应的模拟迹线图来获得定性判断 (Guo等, 2015; Li等, 2017) [17] [19]。然而，由于没有可靠的标准来确定真实和模拟迹线图间的相似性，验证结果具有极大的主观判断性。随着数字图像处理技术和人工智能的发展，许多研究人员开始利用计算机研究迹线图的相似性问题。Baecher等 (1983) [20]和Vazaios等 (2018) [21]提出了利用累计曲线长度指标去评价模型和真实的迹线之间的相似性，但这显然过于片面，不足以反映迹线的全部特性（如位置、形状等）。Han等 (2016) [22]在对三维裂隙模型检验的过程中采用了多指标融合的方法，检验指标包括：平均走向和倾角，Fisher常数和节理方向的球面标准方差，测量的平均迹线长度和标准偏差，校正的平均迹线长度，体积密度和裂缝数量。尽管该研究中比较的参数众多，但其无法解释参数的重要性及最优化模型。

此后，国内外学者仍不断致力于完善裂隙网络迹线图的相似度评价体系，尽管取得了巨大的进展，但仍不可避免地存在一些局限和不足。如Han等 (2018) [23]提出了一种用于离散裂隙网络 (DFN) 的图形验证算法。该算法主要包含总灰度，灰度等级曲线，特征方向和灰度密度分布曲线四个指标。该算法首先采用预处理步骤对两个迹线图进行标准化，使其更具可识别性。随后进行全灰度比较，从宏观角度分析了两个迹线图。采用灰度曲线来检测迹线图的局部特征，提出了一种基于Radon变换的改进算法来检测两幅图像的特征方向。最终提出一组综合评价方程以评估两个迹线图之间的相似性。显然，该研究为图像预处理方面具有极大的借鉴意义，然其在评估特征方向时采取了固定四个方差最大的特征方向，而实际上迹线图的裂隙组数是未知的，显然该方法无法考虑对岩体结构特性有不可忽视影响的分组信息。Wang等 (2020) [24]提出了一种综合全面的方法来评价离散裂隙网络 (DFN) 的建模精度，核心要点是评估模拟模型与真实岩体之间的综合异同度。综合异同度是形状、位置和大小异同度的平均值，能够全面体现岩体内裂隙的方向、位置、大小和密度。尽管某案例的结果验证了所提出的综合指标的合理性，但其中采用的三个指标均只是几何上的相似性，对于大样本的综合表现仍没有得到有效验证。Alghalandis等 (2017) [25]基于Matlab实现了二维和三维离散裂隙网络模型相似性的评价方法。主要着眼于裂隙的形心坐标以及形状、位置、大小（与上一个课题类似）的统计分布情况，最后进行平均化处理得到最终的相似度指标。

以上的研究为裂隙网络的相似性评价提供了诸多有价值的思路，并在各自的研究中取得了理想的效果。然而，工程的特殊性常引发相似度评价的权重，若单纯地认定指标影响的等价性会影响最终的评价结果，甚至引起错误的裂隙网络建模，给后续的分析带来极大的难度。因此，本研究将从实际工程需求出发，统计工程人员最密切关心的指标进行采集、表征及建模。充分结合现场专家的判断标准及规范要求实现合理化的相似度指标融合，最终建立一套适合于本工程的建模相似度评价体系，为离散裂隙网络的合理化建模评价提供思路。

### 1.3 研究内容

论文主要包括三部分内容：

(1) 针对节理裂隙的赋存规律，总结并提出节理裂隙的间距、长度、角度和节理裂隙组数等在内的二维离散裂隙网络的指标，提出基于各指标建立裂隙网络的公式，介绍利用计算机根据5个指标实现二维离散裂隙网络可视化的流程，实现离散裂隙网络的建立。

(2) 在二维离散裂隙网络建立的基础上，提出一套完整的离散裂隙网络相似性评价体系。针对所比较的两组节理裂隙迹线图根据是否有相同裂隙组数提出两套不同的评价方案。系统分析从几何和工程两方面考察离散裂隙网络的相似性，具体评价指标包括迹线长度、角度、间距，以及迹线分布的位置和密度。

(3) 结合所提出的相似性评价体系应用于实际工程四川省昌河大坝3号泄洪隧道中，验证评价体系的可行性，并针对相似性评价体系中的三个指标进行敏感性分析。总结相似度评价体系的优劣势。

1.4 论文的创新点

本文创新性主要体现在以下三点：

(1) 利用Python编程语言开发一套完整的二维离散裂隙网络的建立方法。该方法能模型建立的随机性，又能同时满足包括节理裂隙长度、间距、角度以及个数在内的多项建模要求，即充分考虑分布的确定性。

(2) 提出一套考虑几何和工程特性多方面的离散裂隙网络相似性的评价模型。该模型不仅从迹线长度、角度和位置等常规方面考虑离散裂隙网络几何上的相似性，还从迹线的间距和密度分布角度强调了迹线图工程特性的相似性。尤其是引入了节理裂隙间距相似度这一指标为以往相关论文中所未曾有。

(3) 提出一种基于“点化+网格化”的用于精准计算迹线图的位置及密度相似度的算法。该算法能够快速简洁高效地将离散裂隙网络位置和密度信息转换为相关矩阵，进而用于相似性比较。

2 基于二维离散裂隙网络的岩体迹线自动化生成研究

2.1 离散裂隙网络建立指标

在三维节理裂隙网络中，常采用迹线位置（即迹线中心点位置）、尺寸、走向和倾角四个主要信息去完全确定它的信息。而对于二维节理裂隙而言，由于走向和隧道的纵向特性密切相关，因此无法表征，故倾角成为唯一表征角度的指标。而本文又特别考虑到了迹线的间距，因为在《隧道设计规范2004》和《工程岩体分级标准》中都明确提到了结构面间距分别对于施工阶段围岩级别判定和岩体完整程度定性划分承担了重要的判断依据。在以往研究中，由于建模难度较大，迹线间距指标往往无法实现在离散裂隙网络中的使用。本研究不仅将迹线间距考虑于裂隙网络的建立，同时将每组节理裂隙的数量来约束最终生成的迹线个数，从而实现更贴近于实际工程特征的裂隙建模。

综合以往研究的经验和相关规范，本文中采用以节理裂隙的迹线位置（迹线中心点坐标）、长度、角度、间距和数量作为五个主要指标。由于每条节理裂隙的信息不尽相同，所以通常需要给出一类信息的分布才能对整个离散裂隙网络进行建模。

指 标

疑似剽窃文字表述

- 1. 通过这种方法建立的模型，每一条具体的节理裂隙并不是严格按照真实岩体的节理几何属性建立的，而是根据这些几何属性的统计参数随机生成的，因此这样生成的节理组具有一定的随机性和不确定性。
- 2. 目前最常用的数据采集方法主要有测线法和窗口法，近年来，一些新的自动化的方法也应用在了结构面数据采集集中，如全站仪法，摄影测量法等。

2. 基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的 相似性建模研究\_第2部分

总字数：9141

相似文献列表

去除本人文献复制比：7.9%(722)      文字复制比：7.9%(722)      疑似剽窃观点 (0)

1	基于计算机视觉的岩石隧道工作面完整性评价 陈逸峰 - 《大学生论文联合比对库》 - 2021-06-04	7.9% (722) 是否引证：否
---	---	----------------------

原文内容

而其间距、长度和角度这三个指标需要按节理裂隙分组分别给出每组的统计分布或者统计分布的特征值（比如平均值，标准差等），位置指标则通常与每条节理裂隙的中心点坐标对应。

综上，本研究用于生成离散裂隙网络的指标主要包括如下5个：（1）同组节理裂隙之间的间距统计分布，（2）每组节理裂隙的长度的统计分布，（3）每组节理裂隙的角度的统计分布，（4）每条节理裂隙的中心点坐标，（5）每组节理裂隙的个数。

2.2 离散裂隙网络可视化

当生成裂隙网络的主要指标明确了之后，就可以根据这些指标对裂隙网络进行可视化操作。分析这些指标过后，不难发现这五个指标是互相制约和影响。回到问题最根本的地方，要想在平面上确定一条线段，只需要一个点，一个角度以及一个长度即可确定，但当我们要特别关注到节理裂隙的间距的时候，其实指标对于线段的确定是冗余的。换句话说，当我们用后三个指标确定线段之后，无法再融入裂隙之间的间距这一指标。针对以上问题，本



文所采取的策略是先用比较“弱”的约束（角度，间距）来框定一个迹线的生成基准，然后再根据额外的信息（长度）来最终确定迹线的中心点。同时还需要考虑到生成迹线的随机性，采用随机下采样的方式确定最终生成的迹线。

图2.1 离散裂隙网络可视化流程图

离散裂隙网络可视化流程如上图2.1所示，其中，图中的指标（1）-（5）分别代表：（1）同组节理裂隙之间的间距统计分布，（2）每组节理裂隙的长度的统计分布，（3）每组节理裂隙的角度的统计分布，（4）每条节理裂隙的中心点坐标，（5）每组节理裂隙的个数。具体步骤如下文所述。

#### A. 计算投影间距

首先根据2.1中的“指标（1）”间距统计分布的平均值（spacing mean）和“指标（2）”中的角度统计分布的平均值（ $\theta$ ）得到投影间距（spacing proj），如下公式（2.1）。

$$(2.1)$$

图2.2 投影间距和投影点的生成

#### B. 生成投影点

投影点的纵坐标由下式（2.2）决定：

$$(2.2)$$

其中，第一个点的坐标是在一定范围内随机产生，之后的所有点均为前一个点的坐标减去spacing proj。

投影点的个数k由下式（2.3）决定，以防止生成无限多个投影点。

$$(2.3)$$

其中，interger()函数为向下取整函数，输入为浮点数，输出为不大于该输入的最大正整数。

根据投影间距（spacing proj）在y轴上生成一系列投影点（如图2.2中红圈所示）。

#### C. 生成中心点坐标辅助参考线

根据角度统计分布的平均值（ $\theta$ ）以每一点作延长线直至生成范围边界，作为生成中心点坐标的辅助参考线。记中心点坐标辅助延长线集合（如图2.3中绿线）。

图 2.3 中心点坐标辅助延长线的生成

#### D. 生成长度和角度的序列

根据对应组节理裂隙给定的长度和角度的统计分布，进一步生成迹线的长度和角度的序列，如下： $L_i, \theta_i$ 。

图 2.4 中心点的生成

#### E. 生成中心点

根据步骤D中确定的序列信息（ $L_i, \theta_i$ ）依次在中心点坐标辅助延长线E上排布中心点，（如图2.4）。具体则按照两条规律以实现中心点的依次排布：（1）x, y的坐标从小到大；（2）y坐标的优先级高于x。其中第i条中心点坐标辅助延长线上的第一个点的坐标按如下公式2.4：

$$(2.4)$$

其中，random()函数的输入为两个界限（上限，下限），输出处于两个界限之间的随机值；是该条辅助延长线在x轴上的截距函数的功能为取较大值，意在确定中心点坐标起始点的位置；是两个波动函数，以保证生成的随机点不会完全分布在辅助延长线上，而是有些许偏差，以满足同组节理裂隙之间间距不完全相等的要求，其具体内容视该组节理裂隙间距的统计分布而定；是该条节理裂隙的长度；是本组节理裂隙所对应的角度平均值；是第i个投影点的y坐标。

而第i条中心点坐标辅助延长线上的第j（ $j > 1$ ）个点的坐标按如下公式（2.5）：

$$(2.5)$$

其中是该条和前一条节理裂隙的长度，即意味着确定一个点的坐标之后，下一个点的坐标生成是根据本条和下一条节理裂隙的长度共同决定的，同时也保证了同组相邻两条节理裂隙不会交叉，其他参数与上一组公式含义相同。

每条中心点坐标辅助延长线上生成中心点的个数根据下式（2.6）决定，以保证不会生成无数多个中心点：

$$(2.6)$$

其中，函数interger()是向上取整函数，即输入一个浮点数，输出一个不小于该浮点数的最小整数；是该条中心点坐标辅助延长线的长度；是该组节理裂隙的长度分布的平均值。

#### F. 下采样



根据步骤e中得到的线段集合C，按照生成所需数量m进行下采样，如图2.5（a）到图2.5（b）的过程，即从n条可能的节理裂隙迹线中随机采样出m条迹线进行生成线段操作。特别地，当m>n时，则不进行下采样操作，直接生成线段。最终得到该组节理裂隙的二维网络图，见图2.5（b）。

(a) 生成n条迹线的示意 (b) 由n条迹线选取m条的示意

图2.5 下采样操作示意图

E. 生成最终迹线图

如图2.6，分别对其余组的节理裂隙重复以上步骤A至步骤F操作的操作，得到最终的二维离散裂隙网络的可视化图片，由此可建立出同时考虑多个统计参量的离散裂隙网络。

图2.6 最终迹线示意图

2.3 工程案例建模

2.3.1 工程背景

本节采用的数据来源是蒙自-屏边高速公路隧道的掌子面照片。如图2.7所示，蒙自-屏边高速公路坐落于云南省东南部红河州，从蒙自市冷泉镇附近起，止于屏边县滴水苗城寨门附近，顺接国道G326线，全长40.25km。蒙屏高速公路隧道一共包括十三条隧道，总长29.2km，最长的一条隧道左右幅均达到2.7km。隧道所在地水文地质条件复杂，岩体风化作用强烈，节理裂隙发育，在地质构造发育地段岩体风化程度较大，在穿越灰岩区域时可能遭遇溶洞、地下暗河岩溶管道，且部分隧道要位于高地压区域，因此有多种灾害发生的可能。

本次研究采用的数据是课题组于2019年前往云南省高速公路隧道项目现场获取，采样方式为架设数码相机进行拍照，每张照片基本覆盖整个掌子面的70%~100%。本次研究从中挑选了部分作为数据集，挑选原则为保证岩体、节理的多样性。选取的隧道为长坡头隧道，该隧道设计为分离式双洞隧道，隧道净高5.0m，净宽10.25m，最大埋深约230m（如图2.7（c））。隧址区岩石为板岩，为极软岩~软岩，围岩级别V~IV级，隧道左右线总长4835m。IV级围岩主要分布于隧道洞身段，该级围岩的稳定性相对较好；V级围岩主要分布于隧道进、出洞口。

图2.7 长坡头隧道随址及地质分布

2.3.2 图像几何信息提取

首先对图像先对图片进行预处理，包括色阶调整和图片裁剪。其中，色阶调整（图2.8）有利于人工标注过程、稍有利于图像识别过程，同时保证留下最多的原始图片信息。图片剪裁（图2.9）为人工筛选过程，这一步骤需要挑选原始图中有代表性的部分，避免出现节理过少的图片，同时使得节理的样式比较全面

(a) 色阶调整前 (b) 色阶调整后

图2.8 色阶调整

图2.9 图片剪裁

如图2.10所示，在预处理步骤之后对图片开展标注。该步骤意在对无宽度的抽象的节理进行人工标注，赋予人为意义的宽度。鉴于图片大小为1000×1000像素，将节理设置为3像素宽度。

图2.10 数据标注

然后利用卷积神经网络对节理进行深度学习识别，然后经过简单后处理、节理链码储存、近似的多段线结点输出的过程后，自动化提取节理的几何数值化信息，并通过窗口测线法提取节理平均间距参数，采用聚类算法K-means提取节理组数参数，并计算出节理强度、节理密度，统计节理长度分布，利用最大似然估计法判断节理长度分布属于对数正态分布，然后以此求出节理长度的期望值，最后总结信息得表2.1（选取了6组数据作为示例）。

表2.1 图像信息汇总

编号	平均 间距	迹线 角度	迹线长度				组数
			平均值	sigma	lambda	EX	
1	16.51	108	4.8365	1.6237	0.003781	470.9259	2
2	9.73	126	4.7268	1.7371	0.004239	510.5856	2
3	10.39	108	4.5513	1.3962	0.005739	251.1341	2
4	9.25	108	5.6787	1.1111	0.0021055	542.3825	2
5	14.87	36	4.3045	1.6078	0.005645	269.6191	2
6	16.93	36	4.8364	0.87383	0.0060021	184.5996	2

编号平均

间距迹线

角度迹线长度组数

平均值  $\sigma$   $\lambda$  EX

1 16.51 108 4.8365 1.6237 0.003781 470.9259 2

2 9.73 126 4.7268 1.7371 0.004239 510.5856 2

3 10.39 108 4.5513 1.3962 0.005739 251.1341 2

4 9.25 108 5.6787 1.1111 0.0021055 542.3825 2

5 14.87 36 4.3045 1.6078 0.005645 269.6191 2

6 16.93 36 4.8364 0.87383 0.0060021 184.5996 2

### 2.3.3 离散裂隙网络生成

利用本章建立的离散裂隙网络可视化方法及表2.1中总结得到的参数，得到如图2.11所示的6幅对应的离散裂隙网络图。其中，三排图分别对应的岩体工作面原图，数据标注图及基于统计信息建立的离散裂隙网络图。由图可知，从视觉效果上，建立的离散裂隙网络能反映关键的裂隙信息，但也存在较多细节方面的差异。其主要原因包括：（1）标记图由于深度学习训练需要，保留了迹线的原始曲率，而生成的裂隙网络则以直线为主；（2）现场迹线的分布不确定性显著，基于不确定性建模的表现仍无法完全刻画出实际方位。因此，本研究将继续在此基础上，针对生成的迹线图进行相似度的量化分析，从而验证裂隙网络建立的可靠性和准确性。

图2.11 原图、标注图和离散裂隙网络图

## 2.4 本章小结

本章基于迹线位置（迹线中心点坐标）、长度、角度、间距和数量等五个离散裂隙网络的生成指标，建立了一套完整的计算机可视化方法用以随机生成给定指标下的二维离散裂隙网络。这套方法时可以对同时满足使用者对于节理裂隙长度、角度、间距的统计分布规律以及每组节理裂隙数量的要求。通过结合云南省蒙自-屏边高速公路的长坡头隧道实际工程数据进行实验，实现了对该现场工作面岩体迹线形态的可视化，并从定性角度验证了其应用价值，后续研究将从定量角度进一步分析建模的相似度及可靠性。

## 3 离散裂隙网络相似度评价方法研究

### 3.1 引言

工程背景下对二维离散裂隙网络相似性的衡量本质上就是从工程以及几何两种角度去评价两组线段集合的相似性。而从本文第二章建立二维离散裂隙网络的过程可知当前考察相似性时也需要考虑包括角度、长度、位置（坐标）、间距等在内的相关指标。事实上，当前相关研究（Shuai Han等人，2018；Jiongchao Wang等人，2020；Alghalandis等人，2017）[23] [24] [25]所考虑的共通的指标主要涉及角度、长度、位置三个要素。然而，《隧道设计规范2004》中指出，间距是施工阶段围岩级别判定的一大重要依据。同样地，《工程岩体分级标准》将结构面的平均间距和密度用于定性划分岩体完整程度的重要指标。Rock mass rating (RMR) 岩体分类标准也将结构面间距是一项重要评分指标。可见岩体迹线涉及的间距和密度等参数是影响岩体特性的重要因素，因此，本研究将其列入建模的主要限制指标中。鉴于此，本章将确定5类相似度指标，即：（1）角度相似性，（2）长度相似性，（3）间距相似性，（4）位置相似性和（5）密度相似性。将分别从角度，长度，间距，位置和密度五个方面去衡量两张给定的节理裂隙迹线图的相似度。显然，这五个参数指标既包含了迹线的几何意义，比如角度，长度，位置等，又考虑了工程实际另外所十分关切的密度和间距信息。

如图3.1所示，本文建立了一套完整的相似度评价模型。当两幅迹线图的节理裂隙组数相同时，可以将他们节理裂隙配对进而对每组节理裂隙——对应比较，而如果不相同只能对迹线图整体进行比较，所以该模型首先通过判断两幅给定的迹线图是否具有相同的节理裂隙组数，由此决定选择采用总体相似度指标或分组相似度指标，进而结合角度相似度计算得到最终的总体相似度，其中相关的计算公式如下式（5.1a）或（5.1b）。

图3.1 相似度模型流程图

(5.1)

其中，CS是综合相似度（Comprehensive Similarity）；DS是角度相似度；OLenS，LenSbG分别是总体长度相似度和分组长度相似度；OSS，SSbG分别是总体间距相似度和分组间距相似度；OLocS，LocSbG分别是总体位置相似度和分组位置相似度；ODS，DSbG分别是总体密度相似度和分组密度相似度。

结合图3.1所示的评价方式，本章3.2和3.3节将分别从考虑或不考虑迹线分组两种情况阐述本文建立的相似度评价体系，并结合3.3节将对所建立的相似度评价体系做案例分析，由此评价提出方法的综合表现。

### 3.2 考虑迹线分组的相似性评价

考虑分组的相似性评价是专门针对两个具有相同节理裂隙组数的迹线图所采用的相似度评价方式。其包含的指标有：角度相似性，分组长度相似性，分组间距相似性，分组位置相似性和分组位置相似性。最终的综合相似度值由上述五个指标的相似度值求平均而得。五个指标中角度相似性是考虑和不考虑分组的两种相似性评价的共用指标，其余四个是考虑迹线分组的相似性评价的特有指标。下面3.2.1首先将介绍考虑迹线分组的相似度评价的基础：节理裂隙分组配对，之后五个小节分别介绍五种指标。

3.2.1 节理裂隙分组配对

分组配对是考虑迹线分组的相似度评价的最为基础的步骤，只有在配对完成之后才能进行后续相应的指标计算（下文3.2.3至3.2.6小节）。

在本算法中，对于任意两张迹线图，若节理裂隙的组数相同，则可进行节理裂隙的分组配对。如下面以两张分别有五组节理裂隙的迹线图进行阐述，表3.1列出了两张图中节理裂隙及对应的节理裂隙角度分布的均值。

表3.1 角度分组配对

分组 迹线图	组1	组2	组3	组4	组5
图1	35	75	100	150	165
图2	140	160	80	40	95

分组  
迹线图组1 组2 组3 组4 组5  
图1 35 75 100 150 165  
图2 140 160 80 40 95

为实现客观评价，原则上需取数值上最为接近的两组配对，如图1的组1与图2的组4配对（35°对应40°），图2的组2与图2的组3进行配对（75°对应80°），图1的组3与图2的组5进行配对（100°对应95°），以此类推。考虑到一般迹线组数不超过5组，本文将采用枚举法找寻配对方法，这样既能够找到全局最优方案，同时也不会增加过度计算消耗。

具体地，默认控制图1的组数编号不变，为原来的{1,2,3,4,5}，对图2的组数编号进行排列组合，将新的编号记作 $\{j\}$ 。若想求得最为接近的配对，分别定义对确定的两个组的角度均值数据按照排列组合编号进行作差，并对其绝对值求和（如下式5.2），得到结果最小的排列组合即为最佳配对。

(5.2)

其中，GC（Group Coupling）是衡量配对是否合理的指标；其中，GC（Group Coupling）是衡量配对是否合理的指标；是图1第*i*组的角度均值；是图2第*C<sub>i</sub>*组的角度均值。对于以上的两组节理裂隙图，他们分组的对应即为图1中的{1,2,3,4,5}对应图2中的{4,3,5,1,2}。

3.2.2 角度相似性

节理裂隙的倾角和走向本身是影响岩体稳定的重要因素，也是判定节理裂隙不同分组的重要依据，而在二维的离散裂隙网络中，倾角和走向两大因素缩合成一个关键因素——角度。Jiongchao Wang等人（2020）[24]在关于角度相似性方面考察的是两幅节理裂隙图角度分布的均值和标准差，与本文中直接考察分布有着类似的效果，虽更为快捷但是明显有着过于粗糙的短板。Alghalandis等人（2017）[25]则着重采用了用倾角和走向作为分组标志，用不同倾角和走向划分组别，分别用以比较位置密度等信息，如此显然低估了角度之于节理裂隙图中的地位。Shuai Han等人（2018）[23]的方法则是利用所有角度求解出四个特征向量，并对四个特征值进行比较。之所以取4这个值是因为大多数的节理裂隙图的组数为落于区间[3-5]之内。这种做法将比较的内容由原来的整个角度分布函数变成了四个特征向量，可能会导致无法适用于其他迹线分组的案例，因此该简化潜在减弱分布信息，甚至忽视关键信息。

鉴于此，本文中所采取的方法如下：从第二章中所建立的二维离散裂隙模型获取不同裂隙迹线图（如图3.2）的角度关于数量的分布，分别记作（如图3.3角度分布）。

- (a)
- (b)

图3.2 角度分布对比图

本文采用统计分布对比经典的Wasserstein 距离法直接比较两种分布，得到角度相似性。由下式（5.3）可计算得到图3.2中所示的两种角度分布相似度。

(5.3)

其中，DS为角度相似性（Direction Similarity）；WD为Wasserstein距离函数，意在求出两个分布的距离；若两个分布越不相似则距离越大，反之则距离越小；为便于比较相似性，本文将相似度控制在[0,1]之间，故采用上式中与180作差求绝对值后除以180，因为角度分布间的差值最大为180，此时为极端情况，两个分布完全不一样，相似度为0；另一个极端情况则为两个分布完全一样，距离为0，相似度为1。

本文所采用的分布比较方法Wasserstein 距离。对于两个给定的分布 $u, v$ ，一阶的Wasserstein距离由下列公式(5.4)给出，由此上图3.2可得到最终的角度相似度0.423，因为两者的分布并不十分相似，图1（蓝色）：

(5.4)

其中， $\Gamma(u, v)$ 是一组在范围 $R \times R$ 上的概率分布集合，其边界分别是 $x$ 和 $y$ ；即表示从 $x$ 到 $y$ 的改变成本； $\inf$ 表示下确界，即取最小。不失一般性，假设 $u$ 是原始分布， $v$ 是目标分布，即意味着原来在位置 $x$ 处的具有量的值，意味着最终目标在 $x$ 处有量的值。如果则要把 $x$ 处的量值移动到别处，反之则要从别处移动量值到 $x$ 处。左式中的意思是从 $x$ 处移动大小为 $u(x)$ 的量值到 $y$ 处。最终，该式也即意味着要计算将概率分布变成的所有方案中，最小的一个。

当然计算改变成本不仅可以用1范数，也可推广到 $p$ 范数：

(5.5)

另外，Wasserstein距离具有诸多优点（Panaretos等，2018）[26]：（1）能够自然地度量离散分布之间的距离；（2）不仅能度量两个分布间的距离，同时可给出把一个分布变为另一个分布的方案；（3）能连续地把一个分布变为另一个分布，且能够保持分布自身的几何形态特征。

### 3.2.3 分组长度相似性

节理裂隙的长度是评价节理裂隙的重要指标。RMR岩体分类标准中，不连续结构面长度是一项重要的分类指标。当节理裂隙位置确定时，节理裂隙的长度越长，峰值剪切强度和粘聚力越低，岩体的稳定性也就越差（周辉等，2015）[27]。Jiongchao Wang等人（2020）[24]从两个方面考察了长度这一指标。一个是采用分箱计数的方法将迹线的长度大小纳入相似度评价体系之中，另一个是直接比较两张节理裂隙图长度的均值、标准差以及加和这三个特征的相似度。其内核与本文中比较长度分布的方法大同小异。Alghalandis等人（2017）[25]也同样采用了直接比较长度分布的方法。Shuai Han等人（2018）[23]则并没有将长度这一指标以显式的方式放在主要的评价体系中。

分组长度相似性即首先对两张图进行分组合对（见3.2.1节），然后对每一对分组的两个长度分布求相似性（下式(5.7)），此处依旧使用Wasserstein距离来衡量两者的差异性。最后进行加权平均得到最终的分组长度相似性（下式(5.6)），由此求得最终的分组长度相似性。其局限性在于只适用于两张具有相同分组数量的迹线图。在已知节理裂隙图1的迹线长度统计分布、图2的统计分布及3.2.2小节中求得的分组映射 $C$ 后，可根据下列公式(5.6)和(5.7)计算分组长度相似度：

(5.6)

(5.7)

其中， $LenSbG$ 是分组长度相似性（Length Similarity by Group）；分别为图1中第 $i$ 组节理裂隙的长度分布及图2中第 $C(i)$ 组（与图1中第 $i$ 组相对应）的长度间距分布； $n$ 是组数；WD为Wasserstein函数，具体见3.2.2中所述；当求得两个长度分布的距离之后，式(5.7)意在把距离转化成数值分布在区间[0,1]上的相似度；当利用WD函数求得两个长度分布的距离之后，将所得距离与两个分布均值的较大值作差，然后除以该均值以将最终的相似度数值分布在区间[0,1]上。同时考虑到有可能出现距离过大的情况，分子上最外层利用 $\max()$ 函数保证最小值为0。

(a)

(b)

图3.3长度分布对比图

图3.3 (b) 是针对图3.3 (a) 中两幅迹线图的分组长度相似度比较的一个可视化。由此可见，在分组长度相似度比较过程中，可揭露一些长度对比的问题，如尽管两幅迹线图长度分布中在单位长度7.5和15附近都有一定数量分布，但图1中的分别是角度47.2°和6.9°的两组裂隙，而图2中的则分别是角度8.3°和96.4°的两组裂隙，对于实际工程中岩体稳定性的影响是不同的，但在综合长度相似性中这种差异会被掩盖（见3.3.1节）。

### 3.2.4 分组间距相似性

国内外研究表明，裂隙间距对于评判岩体完整性同样有着重要的影响，故本研究将定义间距相似性指标以衡量节理裂隙图之间间距的相似性。然而，在现有研究中，间距相似性还未以显式方式展现在相似度评价体系中。本文将首次将间距列入评价指标中，并由此评估其影响相似度的重要性。



本文针对节理裂隙组数相同的两张迹线图所提出了分组间距相似性。与前文中分组长度相似性类似，求分组间距相似性时也需要将两幅迹线图的节理裂隙分组——对应，这里仍采用3.2.1中所描述方法，具体过程不再赘述。而后对每个配对组的两个间距分布分别比较并最终求得分组间距相似性。由于统一分组内的节理裂隙之间的间距分布非常集中，故可直接用间距平均值作为特征代表该组的间距分布情况，进而直接采用最后采用两者较小的比值（保证数值上小于1）作为单个配对组的间距相似度。完整的分组间距相似性公式如下式（5.8）。

(5.8)

其中，SSbG代表分组间距相似性（Spacing Similarity by Group）； $\bar{d}_i$ ，分别表示图1中第i组节理裂隙的间距的平均值以及图2中第组（与图1中第i组相对应）的间距平均值；n表示图1和2的共同裂隙组数。

指 标

疑似剽窃文字表述

1. 背景 本节采用的数据来源是蒙自-屏边高速公路隧道的掌子面照片。如图2.7所示，蒙自-屏边高速公路坐落于云南省东南部红河州，从蒙自市冷泉镇附近起，止于屏边县滴水苗城寨门附近，顺接国道G326线，全长40.25km。蒙屏高速公路隧道一共包括十三条隧道，总长29.2km，最长的一条隧道左右幅均达到2.7km。隧道所在地水文地质条件复杂，岩体风化作用强烈，节理裂隙发育，在地质构造发育地段岩体风化程度较大，在穿越灰岩区域时可能遭遇溶洞、地下暗河岩溶管道，且部分隧道要位于高地压区域，因此有多种灾害发生的可能。本次研究采用的数据是课题组于2019年前往云南省
2.  $\bar{d}_i$ ，每张照片基本覆盖整个掌子面的70%~100%。本次研究从中挑选了部分作为数据集，挑选原则为保证岩体、节理的多样性
3. 隧址区岩石为板岩，为极软岩~软岩，围岩级别V~IV级，隧道左右线总长4835m。IV级围岩主要分布于隧道洞身段，该级围岩的稳定性相对较好；V级围岩主要分布于隧道进、出洞口
4. 标注，赋予人为意义的宽度。鉴于图片大小为1000×1000像素，将节理设置为3像素宽度

3. 基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的 相似性建模研究\_第3部分

总字数：9440

相似文献列表

去除本人文献复制比：0%(0)      文字复制比：0%(0)      疑似剽窃观点 (0)

原文内容

(a)  
(b)

图3.4 分组间距相似性对比

上图3.4 (b) 是针对图3.4 (a) 中两幅迹线图的分组间距相似度比较的一个可视化。由此可清晰地看到分组间距相似性意在每个配对的两组节理裂隙的间距进行比较。

3.2.5 分组位置相似性

位置是评判两幅裂隙图相似的最基本的方面，它不仅关乎岩石的工程力学的特性，同时也主要反映的是两幅迹线图几何方面特性。但其实两幅图的几何相似性是非常难以把握的，如果过于严格，往往将原本服务于工程的模型转向关注几何相似性的方面，而忽略工程方面的因素；但如果过于放松，则会连基本的几何相似性也难以衡量，进而影响对于工程角度下相似性的评价。

在以往的研究中，学者们采用了诸多不同的方法：Jiongchao Wang等人（2020）[24]提出了一种绝对位置相似性和一种总体位置相似性，绝对位置相似性即直接采用点化后坐标的差异去衡量位置相似性，这一指标明显具有计算量过大以及过分追求几何相似性的弊端。而他们所提出的总体位置相似性则是将迹线区域划分成不同的圆形和扇形分区，以所能框选住目标百分比数量的迹线来定义每个分区的半径，然后通过直接比较分区半径大小的方式来计算总体位置相似性，此种评价方法具有一定参考性，它极大地简化了位置信息的比较，但是其不足之处在于，所划分的区域非常具有主观性，其圆心是事先决定好的位置，有一种事先判断好此处会有迹线聚集的事先推断，而实际上用以比较的两张迹线图完全可能呈现出不同的分布。Alghalandis等人（2017）[25]则采用中心点的方式简化表示了迹线的位置信息，然后直接通过密度相似性代替了位置相似性，该方法显得过于简化，没有很好地体现位置信息。Shuai Han等人（2018）[23]则是通过将图像单方向（x轴方向或y轴方向）进行切片，而后将每个小分区进行灰度图处理，然后比较每个沿该方向像素值的函数变化，该方法比较适用于具有一个主要方向的迹线图，本文对

其改进方法是在两个方向对原迹线图进行位置信息分析。综合以上研究的优点和缺点，同时考虑到本文所提出的模型最终目的旨在服务于工程实际，本文提出了一种“点化+网格化”的手段去简化衡量位置信息。

本文中具体采取的方法包含如下步骤（如图3.5）：

步骤I：用2.2中所述方法生成二维离散裂隙网络；

步骤II：将每条连续的节理裂隙（线段）进行点化操作，即将每一单位长度的线段用间隔一定距离的点代替；

步骤III：将原完整的节理裂隙区域划分网格，之后将对每个网格（小区域）进行分析

步骤IV：对每个区域内的点进行求重心操作，第(i, j)个区域的信息记录为该区域所有点的重心坐标。

此处的一个问题转化操作是将原来要求求解的一定区域内线段集合的重心转化为了求解点集的重心。由于原文题中线段被区域分割成更加细小的分线段，如果不将问题转化，需要重新求解每个区域内所框选线段的中点坐标以及各分线段的长度，最后将中点坐标乘以线段长度作为权重求平均得到最终的重心坐标，如下式（5.9）。

(5.9)

其中，分别是第i行、第j列个区域中所框选的第k个分线段的中点横坐标、纵坐标以及长度；是第i行、第j列个区域中所框选的分线段的个数。

这样的过程过于繁琐，而只要点化操作合理，单位线段被足够多的点表示（本文中默认将单位1长度的线段用10个点表示），这样求解出的点集的重心与原线段集合的重心两者的偏差即可被忽略。

图3.5 位置相似性评价流程图

假设将整个迹线图区域划分成n×m的网格，然后对每个网格区域中的所有点（由线段点化操作）计算他们的重心坐标。最终得到两个矩阵，矩阵中的每个元素该元素所代表的区域的重心横坐标和纵坐标两个信息，如下式（5.10）。

(5.10)

最后我们对这两个矩阵的每个对应的向量分别求他们的余弦相似性，最终可以得到这两个矩阵的相似性。余弦相似性是一种通过计算两个向量的cosine值来衡量他们的相似性的方法（Yonggui Dong等，2006；Jun Ye等，2011）[28][29]。他的取值范围是[-1,1]。如果给定的两个向量有相同的方向，则能取到1，如果方向相反则是-1，而如果他们相互垂直则结果为0。如果已知两个向量 $\vec{a}$ ， $\vec{b}$ ，则他们的余弦相似度根据下式（5.11）计算：

(5.11)

(5.12)

为了能更直观地和相似度等价，本文将原[-1,1]区间上的取值转化到区间[0,1]上，如上式（5.12）。最后对这个[m×n]的矩阵中每一个[1×2]的向量都进行上述操作后求平均，即可得到最终的相似度。

分组位置相似性是首先将两幅迹线图的节理裂隙进行3.2.1小节中所述的分组配对，然后每次针对一个分组中两张图对应的那一组节理裂隙迹线进行上文所述的位置相似度分析。分组比较对于的位置信息的衡量更为苛刻，更能够深入剖析两张图的位置信息（见图3.6）。它的局限性在于只能够针对两张具有相同节理裂隙组数的迹线图进行比较。

图3.6中案例的两幅节理裂隙迹线图的信息（所列特征均为分布的平均值）如下表3.2：

表3.2节理裂隙迹线图信息

分组	迹线图	分布 特征	组1	组2	组3	组4	组5
图1		间距	6	5	8	7	4
		角度	55	130	150	100	10
		长度	5	10	20	15	9
		数量	20	20	20	25	17
图2		间距	6	5	8	7	4
		角度	155	125	45	5	105
		长度	20	15	8	11	4
		数量	20	20	20	30	30

分组

迹线图分布

特征组1 组2 组3 组4 组5

图1 间距 6 5 8 7 4

角度 55 130 150 100 10

长度 5 10 20 15 9

数量 20 20 20 25 17

图2 间距 6 5 8 7 4

角度 155 125 45 5 105

长度 20 15 8 11 4

数量 20 20 20 30 30

图3.6 分组位置相似性比较示意图

### 3.2.6 分组密度相似性

节理裂隙的密度是衡量岩体稳定性的一项重要指标。节理裂隙越密集代表岩体的风化程度越高，越为破碎，所以岩体越不稳定。在二维空间中密度又是一个关于二维空间坐标的函数，本文中把他作为一个单独的相似性指标以凸显其重要性。Jiongchao Wang等人（2020）[24]并没有明确地将密度相似性指标纳入最终的评价体系。Alghalanda等人（2017）[25]则恰恰相反：他们的整个相似度评价体系中最主要的三个指标中有两个是关于密度的。一个是用节理裂隙走向为分组标准的密度矩阵，一个是用节理裂隙的倾角为分组标准的密度矩阵，通过比较两组节理裂隙的两个矩阵以得到其相似度。Shuai Han等人（2018）[23]也没有将密度作为一项重要的考察对象，其被隐约地表现在他们对于位置的考察上，因为其位置信息被简化成了灰度值关于单方向上坐标的函数。

对上述论文的研究成果进行深入剖析之后，本文依旧沿用3.2.5小节中所述的“点化+网格化”的方法，只是每个网格区域内记录的信息由原来的坐标变成了点的个数。本文对于密度相似度的考察具体采取的方法包含如下步骤（如图3.7）：

步骤I：用2.2小节中所述方法生成二维离散裂隙网络；

步骤II：将每条连续的节理裂隙（线段）进行点化操作，即将每一单位长度的线段用间隔一定距离的点代替；

步骤III：将原完整的节理裂隙区域划分网格，之后将对每个网格（小区域）进行分析；

步骤IV：对每个区域内的点进行计数操作，第*i*个区域的信息记录为该区域中所有点的个数。

图3.7 密度相似性评价操作步骤

类似在3.4.1中我们的到了重心矩阵，此处我们将原迹线图区域划分成 $[m \times n]$ 的网格，然后对任意第*i*行、第*j*列个网格区域中的点（由线段点化操作）计数，得到。最终得到包含了每个区域中点的数量的矩阵，如下式（5.13）。

$$(5.13)$$

这里有一个转化操作，即将原来需要求解的单位面积内的线段长度信息转化为了求解一定区域内点的数量的问题。之所以说原来的密度问题是求解单位面积内的线段长度是因为本模型中并没有对节理裂隙的宽度作特别定义。而如果点足够密集的话（本文中默认将单位1长度的线段用10个点表示），点的个数即可看作是线的长度的线性映射结果，完全可以用来表示区域内的节理裂隙的密度。

分组密度相似性是首先将两幅迹线图的节理裂隙进行3.2.2中所述的分组建对，然后每次针对一个分组中两张图对应的那一组节理裂隙迹线进行密度相似度分析。其操作步骤与上述3.5.1中的流程完全相同，仅仅多了一个分组比较的过程。与之前所有的分组相似度指标一样，分组比较的结果对于相似度的衡量更为严格。将迹线以节理裂隙组别进行分类，更能够深入剖析两张图的位置和密度信息（见图3.8）。它的局限性同样是只能够针对两张具有相同节理裂隙组数的迹线图进行比较。

在得到密度矩阵（计数矩阵）之后，本文采用如下公式（5.14）计算密度相似度：

$$(5.14)$$

其中，DS是密度相似度（Density Similarity），分别是第1和第2幅迹线图所生成的密度矩阵中第*i*行和第*j*列的元素值。

分组密度相似性是首先将两幅迹线图的节理裂隙进行3.2.1小节中所述的分组建对，然后每次针对一个分组中两张图对应的那一组节理裂隙迹线进行密度相似度分析。其每一次配对后的操作步骤与上述流程完全相同。与之前所有的分组相似度指标一样，分组比较的结果对于相似度的衡量更为严格。将迹线以节理裂隙组别进行分类，更能

够深入剖析两张图的位置和密度信息（见图3.5.3）。它的局限性同样是只能够针对两张具有相同节理裂隙组数的迹线图进行比较。

下面仍然以具有表3.2所列出的各项分布特征的两幅节理裂隙迹线图为例：

图3.8 分组密度相似度可视化

3.3 不考虑迹线分组的相似度评价

不考虑分组的相似性评价是针对两个具有不同节理裂隙组数的迹线图所采用的相似度评价方式。其包含的指标有：角度相似性，总体长度相似性，总体间距相似性，总体位置相似性和总体位置相似性。最终的综合相似度值由上述五个指标的相似度值求平均而得。由于其中的角度相似性是考虑和不考虑分组的两种相似性评价的共用指标，此小节中不再赘述，详见3.2.2小节。下面四个小节分别介绍其余四个是不考虑迹线分组的相似性评价的特有指标。

3.3.1 总体长度相似性

总体长度相似性只需知道节理裂隙图1的迹线长度统计分布以及图2的统计分布（如图3.9）即可对这两个分布（如图3.9）进行比较。对式（5.7）进行变更即可得到计算总体长度相似性的式（5.15）：

(5.15)

其中，OLenS是总体长度相似性（Overall Length Similarity）；WD为Wasserstein函数，具体见3.2.2中所述；当利用WD函数求得两个长度分布的距离之后，将所得距离与两个分布均值的较大值作差，然后除以该均值以将最终的相似度数值分布在区间[0,1]上。同时考虑到有可能出现距离过大的情况，分子上最外层利用max()函数保证最小值为0。

图3.9 总体长度相似性

由上图3.9可以看出总体长度相似性只考虑了总体长度的分布上的相似和差异，实际上当节理裂隙的角度不同时，长度对于岩石稳定性的影响是不同的（周辉等，2015）[27]。这也是总体长度相似性的一大弊端。

3.3.2 总体间距相似性

与3.2.6小节类似，依旧直接采用每组间距分布的平均值作为特征代表该组的间距分布情况。考虑到不同迹线图的节理裂隙的组数可能不同，所以采用加和平均的方式求得该迹线图的平均特征间距。最后采用两者较小的比值（保证数值上小于1）作为综合间距相似度，见下式（5.16）。

(5.16)

其中，OSS代表综合间距相似性（Overall Spacing Similarity），分别表示图1和2中第i组节理裂隙的间距的平均值，n,m分别表示图1和2中的裂隙组数。

3.3.3 总体位置相似性

总体位置相似性是将整个迹线图中的所有迹线，不管分组情况，都进行上面3.2.5所述的操作而进行位置相似性评价（见图3.10）

图3.10 总体位置相似性示意图

3.3.4 总体密度相似性

总体密度相似性的操作步骤与3.2.6小节中密度相似性操作步骤类似，唯一区别在于不用进行分组配对操作，即直接将整个迹线图中的所有迹线，不管分组情况，都进行上面3.2.6小节所述的操作而进行密度相似性评价。

以下所列举的图3.11中的6幅图都具有相同的节理裂隙各特征（长度、间距、角度）的分布规律，只是由于随机性的缘故迹线分布并不完全一样。

图3.11 总体密度相似性示意图

由上图我们引入探讨密度矩阵网格划分问题。我们大致可以将密度矩阵分为“细致”，“中等”和“粗糙”三个等级，分别对应着上图中从上至下三行矩阵的三种情况。细致地划分能够展现出小区域的情况，能够进行更为精细化地比较，适用于两张本身在迹线分布上差别不大的节理裂隙图，甚至仅有细节差异的节理裂隙图。而粗糙地划分能够反映节理裂隙的大致分布，他很难反映细节上的相似度问题，所以特别适用于两张本就具有很大差异的节理裂隙图，比如其节理裂隙的长度、角度、间距、位置分布差异较大。

表3.3 矩阵尺寸和总体密度相似度的关系

矩阵尺寸	30×30	15×15	6×6	4×4	2×2
综合密度相似度	0.224	0.420	0.669	0.778	0.915

矩阵尺寸 30×30 15×15 6×6 4×4 2×2

综合密度相似度 0.224 0.420 0.669 0.778 0.915



结合上表3.3所列出的情况来看，网格划分的越细致，综合密度相似度越低，网格划分得越粗糙，综合密度相似度越高，这与上文所分析的推断完全一致。

表3.4 分组密度相似度与矩阵尺寸的关系

组号 矩阵尺寸	组1	组2	组3	组4	组5
4×4	0.669	0.743	0.680	0.089	0.435
6×6	0.436	0.662	0.389	0.086	0.123
15×5	0.085	0.191	0.167	0.014	0.011

组号

矩阵尺寸组1 组2 组3 组4 组5

4×4 0.669 0.743 0.680 0.089 0.435

6×6 0.436 0.662 0.389 0.086 0.123

15×5 0.085 0.191 0.167 0.014 0.011

再对3.2.6小节中的分组密度相似性也进行类似的矩阵尺寸分析，结果如上表3.4所示。由于分组过后，每组比较所涉及的节理裂隙的迹线都较少，所以当采取较细的网格划分时可能会对于密度信息显得过于严苛，所以此时建议使用“中等”或“粗糙”的密度矩阵。

3.4 案例分析

本小节我们对2.3小节中建立的离散裂隙网络进行相似度分析。利用上述建立的相似度评价体系分别将图（b） - （f）和图（a）进行共计5次比较，所得结果如下表3.5。

（a） （b） （c）

（d） （e） （f）

图3.12 节理裂隙图

表3.5 相似度分析结果汇总

对比次数 编号	角度 相似度	长度 相似度	间距 相似度	位置 相似度	密度 相似度	综合相似度
1	92.6	85.9	88.3	70.1	65.4	80.5
2	90.3	89.6	80.3	65.2	50.9	75.3
3	85.6	75.6	87.6	59.6	59.3	73.5
4	87.7	32.1	65.4	68.5	67.2	64.2
5	91.4	40.2	66.4	69.9	62.1	66.0
平均值	89.5	64.7	77.6	66.7	61.0	-
标准差	2.5	23.9	10.0	3.9	5.7	-

对比次数

编号角度

相似度长度

相似度间距

相似度位置

相似度密度

相似度综合相似度

1 92.6 85.9 88.3 70.1 65.4 80.5

2 90.3 89.6 80.3 65.2 50.9 75.3

3 85.6 75.6 87.6 59.6 59.3 73.5

4 87.7 32.1 65.4 68.5 67.2 64.2

5 91.4 40.2 66.4 69.9 62.1 66.0

平均值 89.5 64.7 77.6 66.7 61.0 -

标准差 2.5 23.9 10.0 3.9 5.7 -

由上表3.5可以看出（b） - （f）五张图与（a）的相似度均较高，综合相似度均在60%以上，最高的是第1次对比组，即图（a）与图（b）相似度最高，综合相似度达到了80.5%。在五大指标中，角度相似度最高（平均为89.

5%)，相似度最差的是密度指标（平均61.0%）。五张图本身角度分布非常接近，但由于（e）（f）两组图的长度分布关于组数恰好与（a）-（c）三图相反，所以第4,5次对比长度相似度特别低。

3.5 本章小结

本文建立了一套完整的相似度评价模型，着重阐述了5种相似度指标，即从角度，长度，间距，位置和密度五个方面去衡量两张节理裂隙迹线图的相似度，以及两套针对两种不同比较情况的相似度评价体系。最后结合了2.3节中对云南省蒙自-屏边高速公路的长坡头隧道实际工程数据的建模结果进行了相似度分析，验证了本评价模型的可靠性。

4 现场工程案例及敏感性分析

4.1 引言

为进一步验证上一章提出的离散裂隙网络相似度评价方法的有效性，本章将结合Liu等人（2017）[30]研究的四川省昌河大坝边坡的研究中岩石不连续介质面的现场地质数据作为案例，分别对裂隙网络涉及的角度相似性、长度相似性、间距相似性、位置相似性、密度相似性及综合相似度进行综合分析，并在此基础上对涉及的多项指标作敏感性分析，以全面分析影响裂隙网络相似度的表现。

4.2 工程案例应用

昌河大坝是四川省境内的一座土石坝，高240m。昌河大坝水电站总装机容量达2600兆瓦，其泄水系统主要包括三个引水洞、一个泄水洞和三个泄洪洞。所有隧道都布置在大渡河的右岸。为全面分析大坝坡体的裂隙网络分布，Liu等人（2017）[30]使用图像摄影测量技术和三维重构技术实现了坡体表观结构的重构，并在坡体周边布置了4个主要测窗以统计域内迹线的分布，本研究选取了4个测窗中的第四个作为对象，即该项目的3号泄洪隧道坡面（如图4.1）。其中，该坡面的地质成分主要由中粗粒花岗岩和石英闪长岩两种岩性的岩石组成。两种岩体都坚硬完整，且由于受到长期的地质构造运动的影响，断面发育良好。据现场地质调查，这些不连续介质面均不含填充物。岩体的主要结构为碎裂块状，重度为。

图4.1 3D空间中3号泄洪道隧道坡面参考点和取样窗口视图

该坡面由两个垂直的断面组成，其走向大约为283°和13°。这两个斜坡的倾角范围为78°至84°，坡面的高度约为500-600米。本文采用Liu等人（2017）[30]使用的第四个采样窗口。该窗口中不连续介质面的走向和倾角分别为102.6°和83.1°，其窗口大小为30m×10m。根据他们的走向和倾角，该窗口的不连续介质面可分为3组。由于此采样窗口的顶部和底部的迹线数量不足，所以本文采用同Wang 等人（2020）[24]等取样方法，仅研究y坐标2m至9 m处的窗口采样，所以最终的实际节理裂隙迹线图的大小为30m×7m（如图4.2（a）的红色选框）。

根据张国强等人（2011）[31]所提出的公式对Wang 等人（2020）[24]的得到的地质数据演算得到各组的分布特征（总结结果见表4.1）。而后据此作得图4.2（b）—（f）5幅模拟节理裂隙迹线图。

表4.1

内容	角度		长度		间距		数量
组号	平均值（°）	Fisher分布 常数K	Gamma分布k	Gamma分布θ	平均值（m）	标准差	个数
1	43.3	2.59	10.4	0.5	0.3	0.05	40
2	150.2	3.76	20.0	0.3	0.2	0.02	100
3	175.6	6.35	4	0.4	0.9	0.01	40

内容角度长度间距数量

组号平均值

（°） Fisher分布

常数K Gamma分布k Gamma分布θ 平均值

（m） 标准差个数

1 43.3 2.59 10.4 0.5 0.3 0.05 40

2 150.2 3.76 20.0 0.3 0.2 0.02 100

3 175.6 6.35 4 0.4 0.9 0.01 40

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)  
(f)

图4.2 真实图和模拟裂隙迹线图对照

最终利用建立的相似度评价模型得到各类相似度以及最终的总相似度如下表4.2所示：

表4.2 模拟图相似度比较结果

模拟图 编号	角度 相似度	长度 相似度	间距 相似度	位置 相似度	密度 相似度	总相似度
图1	72.8	60.4	57.4	56.9	52.3	60.0
图2	65.3	69.8	48.4	49.6	45.1	55.6

模拟图

编号角度

相似度长度

相似度间距

相似度位置

相似度密度

相似度总相似度

图1 72.8 60.4 57.4 56.9 52.3 60.0

图2 65.3 69.8 48.4 49.6 45.1 55.6

续表4.2

模拟图 编号	角度 相似度	长度 相似度	间距 相似度	位置 相似度	密度 相似度	综合相似度
图3	79.5	72.3	55.5	54.3	55.1	63.3
图4	74.4	80.1	64.5	45.2	63.5	65.5
图5	68.3	69.5	66.4	53.1	33.2	58.1
平均值	72.1	70.4	58.4	51.8	49.8	-
标准差	4.9	6.3	6.5	4.1	10.2	-

模拟图

编号角度

相似度长度

相似度间距

相似度位置

相似度密度

相似度综合相似度

图3 79.5 72.3 55.5 54.3 55.1 63.3

图4 74.4 80.1 64.5 45.2 63.5 65.5

图5 68.3 69.5 66.4 53.1 33.2 58.1

平均值 72.1 70.4 58.4 51.8 49.8 -

标准差 4.9 6.3 6.5 4.1 10.2 -

从上表4.2结果可以看出，总体而言角度、长度的相似度数值相对较高，相似度数值大致分布在[60%, 80%]之中，平均值分别达到了72.1%和70.4%。而位置、密度两项指标的相似度较低，平均值只有51.8%和49.8%。这是由于前两项相似度指标可以通过输入的统计分布直接控制，而随机下采样之后得到的具体的每一个节理裂隙则难以控制，所以进而在此基础上得到的位置和密度相似度数值上偏低，数值大致分布在区间[40%, 60%]之中。

从各项指标的标准差可以看出，5幅模拟图所模拟得到的位置相似度是最为稳定的，变异性较小，可推测是由于本模型中采用的网格化的方式去比较重心的坐标，预先设定了每个考察区域，所以其偏差不会很大，这也是本模型中值得改进的地方。除了密度相似度指标外，其他指标的标准差也相对较小，数值都在7以下。结果中显示密度相似度的标准差最大，可见由于随机采样造成的模拟结果的不稳定性和随机性可以通过这一指标体现。

在这5幅模拟图之中，角度相似度指标数值最大的是图3，最小的是图2；长度相似度指标数值最大的是图4，最小的是图1，间距相似度指标数值最大的是图5，最小的是图2，位置相似度指标数值最大的是图1，最小的是图

3，密度相似度指标数值最大的也是图4，最小的是图5。综合所有五项指标，最佳的模拟迹线图是图4，其总体相似度达到了65.5%。

另外从结果中可以发现同样是在随机下采样后才能判断的指标，位置和密度两项相似度指标的相关性并不高。例如图5的位置相似度相对较高，达到了53.1%，但是密度相似度却极低，图4的位置相似度很低（45.2%），密度相似度却较高（63.5%），同时也有两者较为接近的案例，如图1-3，这足以证明这两项指标是具有一定互相独立性的。

事实上，要想通过肉眼观察来确定两幅节理裂隙迹线图的相似度非常困难，本文所提供的相似度评价模型，能够从多个角度并且深入剖析迹线图的特征，无疑是一种合理而值得推崇的方式。

4.2 敏感性分析

本小节我们对节理裂隙的敏感性做分析。本文采用单变量控制的方法，当两张节理裂隙图所有特征（长度，间距，角度）的分布规律和节理裂隙的数量都相同时，改变单个所要分析的变量的分布规律，以检验总体相似性对于该变量敏感性。

由于在相似度指标中，位置和密度在可视化时不便控制，本文仅对角度、长度和间距三个特征进行敏感性分析。在每次对单个特征进行敏感性分析时，本文仅改变该特征统计分布的平均值，而保持其他统计分布特征（比如标准差）不变，每次改变的步长为0.5%。记录从0%到50%变化浮动时总体相似度的值，最终作得下图4.3。

- (a)
- (b)
- (c)

图4.3 敏感性分析

同时，对每张图中总体相似度关于单个特征值分布规律浮动的变化作线性回归分析，其结果（包括斜率和截距）如下表4.3所列。

表4.3 线性回归分析

	角度	长度	间距
斜率	-1.205	-0.878	-0.697
截距	81.344	81.853	82.343

角度长度间距

斜率 -1.205 -0.878 -0.697

截距 81.344 81.853 82.343

可以从图4.3和表4.3中观察到，在三个特征中角度的线性拟合所得到的直线斜率的绝对值最大，而间距最小，说明迹线的角度对于总体相似性的影响虽大，长度的影响次之，而间距相对最小。

相似文献列表

去除本人文献复制比：0%(0)

文字复制比：0%(0)

疑似剽窃观点 (0)

原文内容

同时由图中可以看出，随着角度的分布规律的变化，总体相似度的变异性较小，而相较之间距的分布规律变化时，总体相似度的变异性最大。这表明迹线的角度能够非常稳定地影响总体相似度，而间距的影响时高时低。其背后的原因可推测为角度的变化严重影响了生成的迹线的数量，进而影响到另外两项相似度指标，即位置相似度和密度相似度，所以对于最终的总体相似度的影响最大。而间距的作用没有那么明显，长度又处在这两者之间。

4.3 本章小结

本章通过对实际工程——四川省昌河大坝3号泄洪隧道坡面岩石节理裂隙的模拟以及相似度评价分析，表明了本文建立的相似度评价体系在工程实际中应用的可行性。另外，本章还进行了模型的敏感性分析，发现在角度、长度、间距三大要素中，角度是对于最终的总体相似度影响最大的特征，长度次之，而间距影响最小。

5. 结论

本文针对岩石隧道工作面节理裂隙的相似性问题，利用机器视觉手段，提出了一种随机生成节理裂隙迹线图的离散裂隙网络的可视化方法，同时建立了一套完整有效的二维离散裂隙网络的相似度评价体系。



本文首先通过对于相关研究以及规范标准的研读,提出了五项建立二维离散裂隙网络的指标:1.同组节理裂隙之间的间距统计分布;2.每组节理裂隙的长度的统计分布;3.每组节理裂隙的角度的统计分布;4.每条节理裂隙的中心点坐标;5.每组节理裂隙的个数。这五项指标综合确定了最终生成的二维离散裂隙网络的特征。相比起以往的相关研究,本文重点考虑了间距在各规范中对于岩体稳定性评价的所扮演的重要角色,创新性地将间距的分布特征纳入了网络生成指标中。同时为了兼顾节理裂隙迹线生成的随机性和数量的要求,本文在网络图生成过程中采用先密布生成迹线,后随机下采样的方式决定最终生成的迹线。

本文接着提出了一套完整的离散裂隙网络相似度评价体系。不仅从传统的迹线长度、角度和位置方面考虑了离散裂隙网络几何上的相似性,还从迹线的间距和密度分布角度强调了迹线图工程角度的相似性。在评价长度,间距,位置和密度相似度时,本文创新性地提出了综合相似度和分组相似度两种不同的评价方法以应对不同的情况。当两幅离散裂隙网络图的节理裂隙组数不同时,即采用综合相似度;当两幅离散裂隙网络图的节理裂隙组数相同时,即采用分组相似度。两者的主要区别在于综合相似度是不区分分组的情况下将两幅离散裂隙网络图的所有迹线进行比较,而分组相似度需要首先将两幅离散裂隙网络的分组仅仅分组配对,再一一对应比较后确定各相似度。另外本文在计算位置和密度相似度时,提出了一种“点化+网格化”的方法,既能够快速计算出各区域内所包含线段的重心和长度之和,又能够有效地传递位置信息和密度信息。

另外,本文还利用四川昌河大坝3号泄洪隧道坡面岩石的地质信息对上述提出的相似度评价体系做了工程实际应用和相关分析,证明了该评价体系的有效性。最后,本文还对评价体系中的角度、长度和间距三大指标做了模型敏感性分析。结果表明对于本模型最终的总体相似度的影响从大到小依次为:角度,长度和间距。

尽管取得了上述成果,本文也有诸多改进的空间。比如在得到最终的总体相似度指标之时,本文采用了线性融合方式对提出的五项相似度指标进行了求平均的处理手段。事实上这样的方法缺乏说服力。另外在实际工程案例应用的时候发现位置相似度指标对于不同离散裂隙网络的迹线位置分布的区别能力有所欠缺,网格化的方法还有值得优化的地方。

#### 参考文献

- [1] Rossmanith, Hans-Peter, et al. Rock fracture mechanics[M]. Springer, 2014.
- [2] Park R. Foundation of structural geology[M]. Routledge, 2013.
- [3] Clauset, A., Shalizi, C.R. & Newman, M.E.J. Power-law distributions in empirical data [J]. SIAM Rev., 2009, 51(4): 671-703.
- [4] 汪小刚, 贾志欣, 张发明等.岩体结构面网络模拟原理及其工程应用[M]. 中国水利水电出版社, 2010.
- [5] 王卫华, 李夕兵, 胡盛斌. 模型参数对3DEC 动态建模的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(s1):4790-4797.
- [6] 吴斌, 唐洪, 张婷, 张峰铭. 两种新颖的离散裂缝建模方法探讨—DFN模型和DFM 模型[J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 484-487.
- [7] 吴顺川, 周喻, 高永涛, MISRA. A. 等效岩体随机节理三维网络模型构建方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(s1): 3082-3090.
- [8] Ivanova VM, Sousa R, Murrihy B, Einstein HH. Mathematical algorithm development and parametric studies with the GEOFRAC three-dimensional stochastic model of natural rock fracture systems [J]. Comput Geosci, 2014, 67: 100-109
- [9] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 樊赟赟. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(09):1814-1821.
- [10] 陈必光, 宋二祥, 程晓辉. 二维裂隙岩体渗流传热的离散裂隙网络模型数值计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(01):43-51.
- [11] 王者超, 张振杰, 李术才, 毕丽平, 方水鑫, 钟克诚. 基于离散裂隙网络法的地下石油洞库洞室间水封性评价[J].山东大学学报(工学版),2016,46(02):94-100+115.
- [12] 王培涛, 杨天鸿, 于庆磊, 刘洪磊, 夏冬, 张鹏海. 基于离散裂隙网络模型的节理岩体渗透张量及特性分析[J].岩土力学, 2013,34(S2)
- [13] 姚池, 赵明, 杨建华, 蒋水华, 姜清辉, 周创兵. 基于刚体弹簧—等效离散裂隙网络耦合方法的水压致裂数值模型[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(06): 1438-1445.
- [14] 刘波, 金爱兵, 高永涛, 肖术. 基于分形几何理论的DFN模型构建方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 625-630+638.

- [15] Younes Fadakar Alghalandis, ADFNE: Open source software for discrete fracture network engineering, two and three dimensional applications [J], Computers & Geosciences, 2017, 102: 1-11
- [16] Zhang W, Chen JP, Cao ZX, Wang RY. Size effect of RQD and generalized representative volume elements: a case study on an underground excavation in Baihetan dam [J], Southwest China. Tunn Undergr Space Technol, 2013, 35: 89–98
- [17] Guo, L., Li, X., Zhou, Y. et al. Generation and verification of three-dimensional network of fractured rock masses stochastic discontinuities based on digitalization [J]. Environ Earth Sci, 2015, 73: 7075–7088.
- [18] Mendoza-Torres F, Díaz-Viera M A, Erdely A. Bernstein copula modeling for 2D discrete fracture network simulations [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 156: 710-720.
- [19] Li Y, Chen J, Shang Y. Connectivity of three-dimensional fracture networks: a case study from a dam site in southwest China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(1): 241-249.
- [20] Baecher GB. Statistical analysis of rock mass fracturing [J]. Math Geol 1983;15(2):329–348.
- [21] Vazaios I, Farahmand K, Vlachopoulos N, Diederichs MS. Effects of confinement on rock mass modulus: A synthetic rock mass modelling (SRM) study [J]. Int J Rock Mech Min, 2018, 10(3):436–456.
- [22] Han, X., Chen, J., Wang, Q. et al. A 3D Fracture Network Model for the Undisturbed Rock Mass at the Songta Dam Site Based on Small Samples [J]. Rock Mech Rock Eng, 2016, 49: 611–619.
- [23] Shuai Han, Gang Wang, Mingchao Li, A trace map comparison algorithm for the discrete fracture network models of rock masses [J], Computers & Geosciences, 2018, 115: 31-41.
- [24] Jiongchao Wang, Jun Zheng, Tiexin Liu, Jichao Guo, Qing Lü, A comprehensive dissimilarity method of modeling accuracy evaluation for discontinuity disc models based on the sampling window [J], Computers and Geotechnics, 2020, 119, 103381.
- [25] Alghalandis Y F, Elmo D, Eberhardt E. Similarity analysis of discrete fracture networks[J]. arXiv preprint, 2017, arXiv:1711.05257.
- [26] Panaretos, Victor M., and Yoav Zemel. Statistical aspects of Wasserstein distances[J]. Annual Review of Statistics and Its Application, 2018, 405-431.
- [27] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 卢景景, 徐荣超. 不同位置和尺寸的裂隙对岩体破坏影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3018-3028.
- [28] Yonggui Dong, Zhaoyan Sun, Huibo Jia. A cosine similarity-based negative selection algorithm for time series novelty detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6): 1461-1472.
- [29] Jun Ye. Cosine similarity measures for intuitionistic fuzzy sets and their applications[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(1–2): 91-97.
- [30] Tiexin Liu, Jianhui Deng, Jun Zheng, Lu Zheng, Zhenghu Zhang, Hongchun Zheng. A new semi-deterministic block theory method with digital photogrammetry for stability analysis of a high rock slope in China[J]. Engineering Geology, 2017, 216: 76-89.
- [31] 张国强, 费文平, 张茹, 邓建辉. 节理泊松圆盘模型直径分布推断的解析方法[J].岩土力学,2011,32(04):1149-1156.

谢辞

本科论文至此即将画上句号，心中感慨万千，特作此片以书感怀。

遥记得当初2017年怀着一颗无比好奇而又稚嫩的心来到同济大学就读土木工程专业，一晃已经5年过去了，大学生活已经接近尾声。我想我做了无比正确的选择，在这里我遇到了良师益友，遇到了挚爱，也系统性地学到了土木工程专业的知识。

首先我要对我的导师黄宏伟老师表达最诚挚的谢意。尽管黄老师事务繁忙，但他总能够把握我们课题组同学的论文进度。在疫情学校封闭管理的背景下，每每开会时，黄老师最首要关心的都是我们疫情期间的的生活有没有得到保障，有没有身心健康方面的障碍。黄老师非常善于营造轻松活泼的科研氛围，无论是线上还是线下会议，黄老师常常逗得同学们笑声朗朗。同时在科研方面，黄老师对我们循循善诱，在各类问题上严格把关。能够遇到黄老师并接受黄老师的指导，实属幸运。

其次我还要感谢张东明老师，张老师虽然名义上并非我的指导老师，但同样对我的毕业论文展现出了极大的关心。张老师在毕业论文的各个时间点都及时告知我们相关事宜并定期组织召开会议为我们把关。他在我们汇报工作

时总是细细聆听，总能发现我们科研过程中的问题，并为我们出谋划策，寻找解决方案。

我还要特别感谢陈佳耀学长。陈学长从确立课题到书写论文一路以来都给予了我极大的帮助。每每遇到问题之后，只要与陈学长讨论，就仿佛吃了一颗定心丸。由于陈学长远在国外读书，我们每次交流只能通过线上会议，但陈学长丝毫没有因此减少对我的关心。我们在线上交流时不仅会讨论科研课题，还经常会畅谈各自的生活感怀。特别是当我在宿舍隔离，长期禁足不能外出活动，身心备受煎熬的时候，陈学长给了我极大地鼓励，让我一步步克服生活上以及科研上的困难。他给我大四下学期单调闭塞的生活带来了许多轻松与快乐。

同时我也要感谢我的舍友，虽然我们住在一栋老旧的建筑中，设备破败但人有活力。他们不仅在日常生活中给予了极大的关怀与帮助，也甚至对我的人生道路产生了重要的影响。舍友朱峻驻时长和我畅谈人生理想，他总在我迷茫不知所措时给我很多真诚的建议。舍友高致远专攻计算机，他在计算机方面的成绩也坚定了我转码的信念，我常常想他请教计算机方面的问题，他也始终不厌其烦地为我解答。舍友吴庆晖是我们宿舍的开心果，有他在的时候我们最不缺的就是笑声。

最后我还要感谢我的女朋友任子桐，遇见子桐是我在同济最大的幸运。虽然我行将赴美求学，但我相信我们的故事还有很长的篇幅可以让我们共同书写。

时光飞逝，白驹过隙。路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。

高程展

2022年5月26日

- 
- 说明：**
- 1.总文字复制比：被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例
  - 2.去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例
  - 3.去除本人文献复制比：去除作者本人文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例
  - 4.单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比
  - 5.指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的
  - 6.红色文字表示文字复制部分；绿色文字表示引用部分；棕灰色文字表示作者本人已发表文献部分
  - 7.本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 [amlc@cnki.net](mailto:amlc@cnki.net)

 [check.cnki.net](http://check.cnki.net)

---

<http://check.cnki.net/>