

同濟大學

毕业设计(论文)开题报告

(适用于工科类、理科类专业)

课题名称 基于机器视觉的岩石隧道工作面裂隙的
相似性建模研究

副 标 题

学 院 土木工程学院

专 业 土木工程

学生姓名 高程展 学 号 1751193

2022 年 03 月 08 日

一、毕业设计（论文）课题背景（含文献综述）

1.1 研究背景和必要性

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统计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性分析。结合云南蒙自-屏边高速公路的山区隧道实际工程，通过计算机视觉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；提出基于权值的指标评价体系，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）离散裂隙网络模型在岩石力学及工程中的研究现状

近年来，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。研究表面，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。

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,实现了对于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、洞室间液面差、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。因此,本文将在离散裂隙网络建模基础上,聚焦模型与实际的岩石裂隙的差异,同时为简化讨论情况着重考虑二维离散裂隙网络模型的相似度问题。

(2) 岩体裂隙建模相似性评价的研究现状

尽管离散裂隙模型应用广泛,但其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其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,学术界主要有数值和图形 2 种模型验证方法:一种是数值验证,另一种是图形验证。

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轨迹图和对应的模拟轨迹图来获得定性判断(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轨迹图间的相似性，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轨迹图的相似性问题。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轨迹之间的相似性，但这显然过于片面，不足以反映轨迹的全部特性（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。虽然比较的参数众多，但是作者无法解释哪些参数更具有重要的意义，哪一类模型才是最优的模型。

在此之后，更多的学者提出了完整的裂隙网络轨迹图的相似度评价体系，但是仍存在一些局限和不足之处。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轨迹图进行标准化，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轨迹图。采用灰度曲线来检测轨迹图的局部特征，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。并在此基础上提出一组综合评价方程以评估两个轨迹图之间的相似性。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，而显然轨迹图的裂隙组数是位置的，故采用这样的方式不妥。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。该方法的核心要点是评估模拟模型与真实岩体之间的综合异同度。而综合异同度又是形状异同度，位置异同度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。此外，还对一些三维裂隙网络进行了分析以验证所提出的综合异同度方法。但其中采用的三个指标能否真正反映节理裂隙的工程性质还存有疑问，因为形状、位置和大小都是轨迹几何上的相似性。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。

二、毕业设计（论文）方案介绍（主要内容）

本课题研究内容主要包括以下三部分：

2.1 基于二维离散裂隙网络的迹线生成技术

（1）明确二维离散裂隙网络主要指标，包括但不限于裂隙的组数，每组裂隙的长度均值及变异系数，每组裂隙的角度均值及变异系数，每组裂隙的位置分布区域，每组裂隙的数量等。

（2）结合二维离散裂隙网络建模方法，实现一般裂隙网络的可视化，提出完善和改进建模以满足课题要求。

2.2 裂隙网络相似度评价方法

（1）根据实际工程需要，确定离散裂隙评价指标；结合国内外广泛应用的围岩质量评价标准（如 RMR 围岩分级法，Q-System 岩石分级法，RQD 值分级法以及工程岩体分级 BQ 法）修正评价指标；确定如常见的裂隙长度、位置、走向等指标，并考虑裂隙间距、裂隙密度强度等工程关心的指标。

（2）依据各个指标的定义，推导各指标的标准计算公式；结合图形学方法，实现各指标定义下的图形表征可视化。

2.3 离散裂隙网络综合相似度评价体系

（1）利用统计学原理，选择适用的数据融合方式；量化各指标权重，揭示指标的影响机制。

(2) 依托云南山岭隧道工程实际, 检验建立的综合相似度评价体系进行, 综合评价相似度体系的适用性。

三、毕业设计(论文)的主要参考文献

- [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, 樊赞赞. 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, Volume 102, 2017, Pages 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, Volume 115, 2018, Pages 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, Volume 119, 2020, 103381
- [25] Alghalandis Y F, Elmo D, Eberhardt E. Similarity analysis of discrete fracture networks[J]. arXiv preprint, 2017, arXiv:1711.05257

四、审核意见

指导教师审核意见：（针对选题的价值及可行性作出具体评价）

该课题为我处一实际科研项目的部分内容。岩体是天然存在物，在形成过程中，出现裂隙的分布，清楚裂隙的实际分布对于岩石隧道或边坡等开挖稳定性以及支护对策选择具有重要的实用价值。本课题基于计算机视觉图像，结合我处已有的实际岩石隧道工程，获取隧道开挖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，开展迹线图的可靠性综合评价。该研究是在我处已有隧道工作面裂隙识别基础上开展的机器视觉识别裂隙网络建模的相似性评价，具有可行性。该研究路线清楚可行，能在预期内完成规定内容，达到预期目标。同意开题报告！

指导教师签名 黄宏伟

2022 年 03 月 11 日

专业审核意见：

负责人签名_____

_____年_____月_____日