

TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪的研制

夏才初^{1,2}, 王伟^{1,2}, 丁增志^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪采用立体视觉法、结构光法和双目成像原理, 对被测岩石的表面进行面测量。该形貌仪主要由 2 个高精度的工业摄像头、2 个工业镜头、数字光栅投影装置、云台、三角架和用于数据采集的计算机组成。摄像头的分辨率为 1.44×10^6 pixel, 一次测量的最大面积可以人工调节, 范围为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 最高测量精度为 0.02 mm ; 测量时间短, 一次测量仅需 10 s ; 仪器仅重 10 kg , 可以拆开装入 2 个 $0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的盒子里, 方便携带至现场。仪器所配套的测量与分析软件, 可以对岩石表面的三维形貌进行图形显示与分析。与其他同类设备相比, 具有以下显著特点: (1) 每次对一个面上的数据进行测量, 既节约了时间, 又避免了多次测量产生的误差; (2) 对于岩石表面形貌的测量而言, 精度高, 可以很好地反映出岩石表面的细节; (3) 一次测量的最大有效面积可以调节, 超出最大测量面积的被测表面, 可以通过分块测量, 并利用设置特征点将多次测量结果拼接的方法实现; (4) 便于携带, 可以在现场使用。该形貌仪的成功研制为岩石表面形貌学、节理面力学性质和渗流特性等的有关理论和应用研究提供了重要的技术装备。

关键词: 岩石力学; 表面形貌; 立体视觉; 双目式光栅投影; 结构光

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)07 - 1505 - 08

DEVELOPMENT OF THREE-DIMENSIONAL TJXW - 3D-TYPED PORTABLE ROCK SURFACE TOPOGRAPHY

XIA Caichu^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, DING Zengzhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A new three-dimensional TJXW - 3D-typed portable rock surface topography system is developed for rock surface measurement, which is based on the method of stereo vision, structured light and binocular fringe projection. The apparatus consists of a couple of CCD industrial cameras with 1.44×10^6 pixel resolution, a couple of industrial lenses, a digital fringe projection device, a pan-tilt-zoom, a tripod and a computer for data collection. The maximum effective measuring area can be adjusted by operation, from $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ to $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, of which the value of precision is as high as 0.02 mm . It only takes 10 seconds for each measuring. The apparatus weighs 10 kg , which can be carried easily after being disassembled and enclosed in two boxes with a volume of $0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$. The corresponding software, which controls the measurement and records the data automatically, maintains a function of parameter analyzing and graph displaying on 3D surface topography of rock joints. Compared with traditional measurement techniques, obvious advantages of this apparatus are as follows. (1) A whole surface can be measured at a time, which not only saves working time, but also avoids repeated errors by multi-measurement. (2) The apparatus has a high precision for measuring rock surface topography that enables

收稿日期: 2007 - 11 - 26; **修回日期:** 2008 - 05 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472142, 50579088)

作者简介: 夏才初(1963 -), 男, 博士, 1984年毕业于中南矿业学院采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学、地下结构等方面的教学与研究工作。E-mail: tjxiaccb@126.com

the results to describe the detail of rock surface accurately. (3) The maximum effective measuring area can be adjusted. Furthermore, if the surface being measured is larger than the maximum effective measuring area, surface topography parameter can be obtained by multiple subdivided measurements: Firstly the large surface is divided into several small areas, then each small one is measured; at last, the data clouds of the small ones constitute the large surface by the technique of marked point automatic identifying and point cloud automatic registering. (4) It's convenient to carry, which enables its usage both in laboratory and in field. The development of this apparatus and its application is of great significance not only for the theory of surface topography but also for mechanical and seepage characteristics of rock joints.

Key words: rock mechanics; surface topography; stereo vision; binocular fringe projection; structural light

1 引言

岩体的工程性质受节理面的影响较大, 节理面的力学和渗流性质又与节理的表面形貌密切相关。只有包含节理表面形态参数的节理闭合和剪切的理论模型和经验公式, 才能正确反映节理的实际力学行为。因此, 对节理表面形貌进行精确测定, 是研究节理变形和强度的力学机制, 进而建立相应模型的先决条件^[1]。如何测试和描述表面形貌是一个十分重要的基础性课题, 其测试方法主要分为机械方法和光学方法两种。

机械式形貌仪每次只能对一个点或者一条轮廓线进行测量, 通过对一组点或一组线的组合来描述整个被测面上的形貌。具有代表性的机械式形貌仪是针梳式和触针式机械式形貌仪, 其中触针式机械式形貌仪使用更为广泛。T. H. Huang 等^[2]和 G. Weissbach^[3]研制的机械触针式岩石表面形貌仪, 用步进电机控制触针在水平和垂直方向的移动, 完成整个面的测量; 夏才初等^[4~6]在此基础上研制了 RSP-I 型智能岩石表面形貌仪, 该设备采用计算机控制, 可以对测试结果进行采集、处理、显示和记录。由此可以看出, 触针式表面形貌仪在一定程度上可以满足节理形貌的测量要求, 但是由于触针在岩石表面上连续移动, 会被凸点卡住, 所以只能逐点测量, 且结果受测量间距的影响, 该种测试方式属于接触式测量, 触针针尖直径的大小对于测量结果的影响较大, 在接触测量过程中, 针尖也容易磨损。

在此基础上, 一些学者^[7~15]发展了以激光探头为测量元件的激光式形貌仪。激光式形貌仪属于光学方法和机械方法的结合, 将激光探头安装在机械移动平台上, 该探头分为点光源和线光源, 根据光源类型不同, 机械移动平台也有较大差别。点光源形貌仪的工作原理与机械触针式有一定近似, 只是将机械触针换成了激光探头, 激光探头每次发射一个

光点到被测物体表面, 测定被测表面上的点距离标准面的高度, 然后通过机械平台在 x 和 y 方向上的移动来实现对整个面的测量, 光点直径对于测量结果影响很大; 线光源将光点变成了由若干光点组成的光带, 一次可以测出一条轮廓线, 然后依靠机械平台在 X 方向上的移动来实现对整个面的测量。线光源的激光形貌仪, 只能逐条线测量, 理论上要布置与点距相等的测线间距才能获得整个面上的数据, 具体实施时, 很费时间。激光式形貌仪, 无论用点光源还是线光源, 测量精度都受到机械平台、移动间距以及光点直径的影响, 测量费时费力, 设备费用也较高; 而将面光源用于表面形貌的测量, 是一种比较理想的测量方法, 但目前尚未见到相关成熟产品用于岩石领域表面形貌的测量。

此外, 立体显微镜也是光学测量法的一种形式, 主要用来测量小尺寸表面。N. Rengers 等^[16, 17]利用立体显微镜对节理表面形貌进行了测量, 后者还将测量结果用数码相机拍摄出来, 并与图像分析系统连接, 以分析表面形貌特征。

以上介绍的表面形貌测量方法, 测量范围均较小, 只能测室内试验的岩石节理试样, 仪器体积较大, 一般都只能在实验室内使用。

国际岩石力学学会建议的表面形貌的现场测试方法主要有 3 种: 圆盘倾斜法^[18]、摄影测量法^[19]和剖面线法^[5]。夏才初等^[5, 20]提出了现场分段测量方法, 郑继贵等^[14]和徐智钦^[15]将激光扫描系统用于机械零件三维形貌的现场测试。

综上所述, 由于岩石表面形貌起伏大、变化较为复杂, 需寻求一种精度高、操作方便、测量时间短的表面形貌测量仪, 并有配套的数据分析软件, 可以对表面形貌参数进行计算和分析。考虑到实验室内和现场的测量同等重要, 该设备还应同时满足室内和现场的测量要求。本文介绍的 TJXW-3D 型便携式岩石三维表面形貌仪, 结合了立体视觉、结构光栅和双目成像等原理, 先将一系列不同宽度的

光栅条纹投射在被测物体表面, 受表面形状的影响形成变形条纹, 变形条纹由左右摄像头捕捉并经匹配计算, 获取被测表面上的三维坐标, 再经计算得到各表面形貌参数。该设备以微机作为控制、测试和记录核心, 实现了微机对形貌仪信号采集处理及显示和记录。该表面形貌仪具有精度高、操作方便、测量速度快且便于携带等特点, 不仅可以用于实验室内测量, 还可以在现场使用。

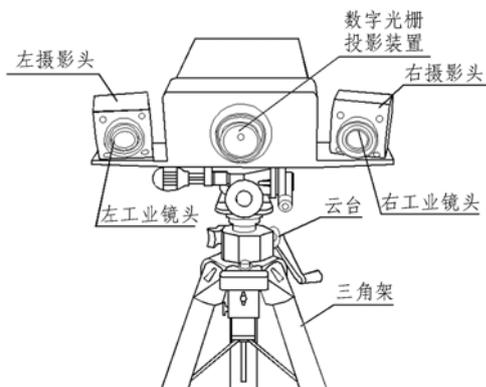
2 形貌仪的结构和原理

2.1 形貌仪系统的组成

TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪由硬件和软件两部分组成。硬件主要指机头、机架以及高配置计算机, 其中机头为光学测量结构, 是形貌仪的核心部件, 包括 2 个高精度的工业 CCD 摄像头、2 个工业镜头和数字光栅投影装置; 机架包括云台和三角架, 用来调节形貌仪相对于被测物体的距离和角度; 计算机内置了数据采集卡。整套系统(见图 1)携带方便, 可以用于现场测试。



(a) 形貌仪及被测物体照片



(b) 硬件组成图

图 1 岩石三维表面形貌仪照片及示意图

Fig.1 Photo and schematic diagram of 3D rock surface topography measurement system

软件指的是岩石表面形貌仪控制软件和岩石表面形貌分析计算软件。在使用过程中, 表面形貌数据的测试及分析均由计算机及软件来实现。一次拍摄即可测得被测表面形貌的三维数据。

2.2 形貌仪的光学结构及测量原理

TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪, 是一种主动的三角测量方法, 结合了立体视觉法^[21, 22]、结构光法^[21, 22]和双目成像^[21, 22]方法。其测量原理为: 通过数字光栅投影装置, 在物体表面投射一系列连续的宽度不同的光栅条纹, 受表面形状的影响形成变形条纹, 由左右摄像机捕捉并记录下来, 经过计算和对左右摄像机的计算结果进行匹配, 来获取被测表面上点的三维坐标, 再利用表面形貌参数的计算公式, 获得物体表面各个形貌参数。

(1) 单个摄像头的测量原理

投影装置将光栅条纹投射在被测表面上, 分别由左右摄像头捕捉。单个摄像头测量原理如图 2 所示, 以 R 为绝对平整的参考平面, C 为 CCD 摄像机镜头光心, O 为投影系统中心。

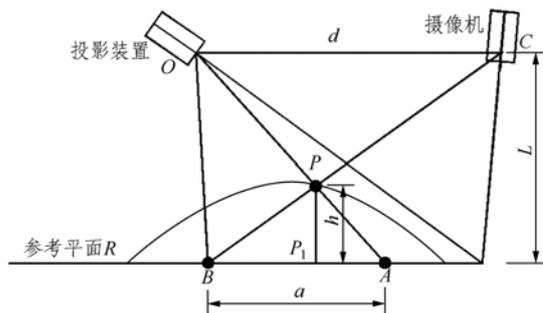


图 2 单个摄像头测量原理

Fig.2 Principle of one-camera fringe projection sensor

被测表面上任一点 P 在参考面上的投影为 P_1 , 线段 PP_1 的长度为 h , 为点 P 距离 R 平面的高度。点 A 为点 O 与点 P 连线与参考面 R 的交点, 点 B 为点 C 与点 P 连线与参考面 R 的交点。入射光线照射到参考平面 R 上的点 A , 放上被测物体后, 该光线照射到被测物体表面的点 P , 此时从成像面观察, 点 A 就移到新的位置点 B 。因此, AB 的距离 a 携带了高度信息 $h(X, Y)$, 即受到了表面形状的调制, 而 a 与系统的几何参数有关, 即摄像机光心到参考面的距离 L 、投影系统中心与摄像机光心的距离 d 有关, 即

$$h(X, Y) = f(L, d, a) \tag{1}$$

(2) 同名点的匹配

同名点的匹配^[23, 24], 指在测量过程中, 先由左

右摄像头分别对被测表面上同一点进行测量，将测量结果转入同一坐标系下，然后进行比较，检查两者误差是否在允许范围内。对同名点进行匹配，采用了双目成像原理(见图 3)。

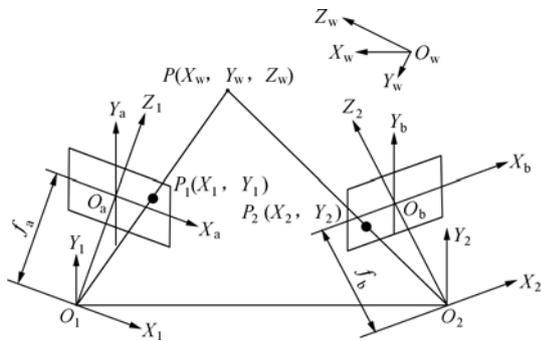


图 3 双目成像原理

Fig.3 Principle of binocular fringe projection measuring method

空间中一点 P ，在左摄像机坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 下的坐标为 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ，在右摄像机坐标系 $O_2X_2Y_2Z_2$ 下的坐标为 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 。点 P_1 和 P_2 存在以下关系式：

$$\begin{Bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{Bmatrix} = \mathbf{R} \begin{Bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{Bmatrix} + \mathbf{T} \quad (2)$$

式中： \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 分别为旋转和平移矩阵，均由摄像机内部参数确定。

(3) 大面积岩石表面测量原理

大面积岩石表面测量原理^[25]如图 4 所示，采用人工设定特征点自动拼接技术，首先对岩石表面进行分块，要求相邻的两块必须有公共区域，在区域内设置至少 3 个、不共线的特征点(见图 4 中点 A 、 B 、 C 和 D)。对两块区域分别进行三维坐标测量，可以得出这些特征点在 2 次测量中的坐标值；不同次测量中，特征点之间间距是相同的，利用特征点间距不变原理，进行坐标的空间变换，将 2 次测量结果转换到同一个坐标系下，删除重合区域，即完成了 2 个区域的拼合过程。利用该方法可以对大面积的岩石表面进行多次测量，将测量结果进行转换、组合，以获得整个表面的三维形貌特征。

为方便特征点的提取，特征点被设计成外方内圆、外黑内白的样式，仪器在测量时通过识别黑白相交的边界捕捉圆心坐标。设置特征点时应使特征点位于 2 个视角的重叠区域，并且任意 3 个特征点不共线；为减少拼合误差，通常在公共测量区域布

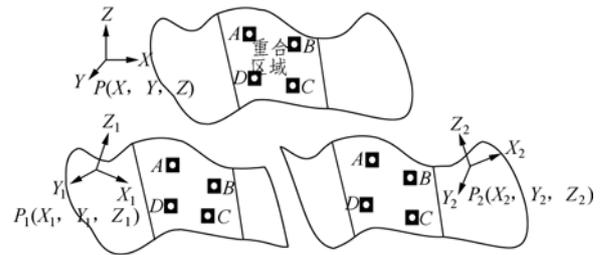


图 4 大面积分块测量原理

Fig.4 Principle of subdivided shapes measuring for large area

置 4 个或 4 个以上的拼接特征点，通过多次计算，降低因拼接点的测量误差带来的拼接误差。

2.3 形貌仪测量方法的步骤

对岩石表面形貌的测量主要分如下步骤进行：

(1) 通过标定，确定形貌仪系统内部参数。标定块上各特征点之间的空间距离是固定的。利用标定块进行标定时，将左右摄像头拍摄的标定块特征点图像的像点空间坐标与特征点点距进行比较，通过摄影测量学原理确定形貌仪内部参数，并建立像点空间坐标和实际空间坐标的函数关系。

(2) 测量空间信息的获取。采用空间编码的方法对测量空间进行划分，通过投影装置投射栅距不同的一系列平行光栅到被测对象，在对象表面形成变形的光条纹，这些变形光条纹由左右 2 个摄像头记录，根据记录的一系列投影光栅，对测量空间的每个空间点进行编码，经过解码计算获得每个空间点的编码信息和相位信息，从而确定其空间位置，获得测量空间信息。用二进制编码 1 和 0 表示光栅条纹的明暗(即黑白)，1 种宽度的光栅条纹将空间划分为 2^1 个， n 种宽度的光栅条纹经过 n 次划分，得到 2^n 个空间，即可获得 2^n 个经划分的空间(见图 5)。

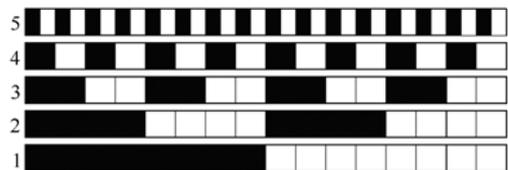


图 5 二进制编码光栅

Fig.5 Binary encoding gratings

(3) 将左右摄像头各自所拍摄图像的像点进行同名点的匹配，以获得各测量点在所拍摄图像中的相应像点坐标，即找出在同一时间和条件下，同一测量对象在左右摄像机中的对应的像点。

(4) 基于匹配结果和测量原理，根据测量的各

像点坐标及所述函数关系, 计算各测量点的实际空间坐标。

(5) 对于大尺寸或者要进行多次测量的对象, 对测量结果进行拼合。

(6) 根据被测物体表面的空间坐标, 计算其三维形貌数据。

2.4 形貌仪系统软件的开发

形貌仪系统软件包括岩石表面形貌仪控制软件和岩石表面形貌分析计算软件, 由 C++ 语言编写, 具有如下功能:

(1) 能对各种岩石表面的三维表面形貌进行测量、图形显示与分析; 能对均方根坡度、峰点平均密度以及峰顶平均半径等与节理剪切性质相关的参数进行计算和分析; 能对中线平均高度、高度均方根以及 10 点平均高度与节理初始开度和闭合性质相关的参数进行计算和分析。

(2) 可对测量数据实现包括调平、旋转、任意方向坐标缩放、从三维数据中抽取任意二维信息、设置高低极值、两组数据之间相减和移动接触等多种功能。

(3) 可将多个单幅测量的三维数据结果进行自动拼接整合成一个数据文件; 通过对被测表面或者参考面上的特征点进行自动识别以及三维测试, 保证对多次测量数据的快速、自动和精密的拼接。

(4) 可实现多种表面几何参数的计算, 并可根据用户要求随时扩充; 可以对单个节理的三维形貌和某个剖面线处的二维形貌进行计算和分析; 可以对一对节理的组合形貌进行计算、统计和分析。

3 主要技术性能指标及仪器优势

3.1 主要技术性能指标

(1) CCD 摄像头分辨率为 1.44×10^6 pixel。

(2) 单面测量的有效测量面积可以通过调节两摄像头的角度改变, 调节范围为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

(3) 具有对被测表面分块测量, 并通过将测量结果拼接获得整个表面形貌数据的功能。对超过有效测量面积的被测表面, 可以通过分块测量, 然后将测量结果拼合的方法获得, 故该仪器理论上可以测量无限大的表面。

(4) 单面测量面积越小, 单面测量精度越高: 当有效测量面积为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 时, 单面测量精度达 0.03 mm ; 当有效测量面积为 $200 \text{ mm} \times 150$

mm 时, 单面测量精度达 0.02 mm 。

(5) 有效测量面积越大, 数据点的点距越小: 测量面积为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 时, 点距为 0.28 mm ; 测量面积为 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 时, 点距为 0.14 mm 。

(6) 拼接精度: 小于 $0.03 \text{ mm}/\text{幅}$ 。

(7) 单面扫描速度: 小于 $10 \text{ 幅}/\text{s}$ 。

(8) 拼接方式: 全自动特征点拼接技术。

(9) 质量约为 10 kg , 可以拆开装入 $2 \text{ 个 } 0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的盒子里, 装卸过程只需 5 min 。

3.2 精度验证

方法 1: 对长度为 200 mm 的标准块进行单次测量和多次拼接测量, 重复测量 10 次, 取平均值计算其精度。

方法 2: 将 2 个标准球固定, 用精度为 0.002 mm 的三坐标测量机测量 2 个标准球的球心距离, 然后分别用单次测量和多次拼接测量的方式测量并获得点云, 用点云拟合 2 个球心, 计算出球心的距离, 将结果与三坐标测量机测出的结果进行比较, 重复测量 10 次, 取平均值来验证精度。

利用上述方法, 获得的尺寸精度达到 0.01 mm , 故认为该仪器满足精度要求。

3.3 与同类设备相比存在的优势

早期的表面形貌仪主要用于机械零件的测量, 目前市面上存在的表面形貌仪也主要用于机械领域。相比较之下, 专门用于测量机械零件的表面形貌仪, 测量范围小, 通常在 $2 \sim 200 \text{ mm}$, 但是要求具有较高的测量精度, 根据不同的使用需求, 精度为 $0.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$; 而用于测量岩石表面的形貌仪, 精度要求较低, 精度为 $0.02 \sim 0.10 \text{ mm}$, 即可满足使用要求, 但是测量范围比较大, 常规试验的试件尺寸多为 $100 \sim 400 \text{ mm}$, 非常规试验和现场测量可达几米。所以, 本文仅将 TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪同用于岩石领域的其他表面形貌仪进行了比较, 以分析其优势, 分析结果见表 1。

综合起来, TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪具有如下几点优势:

(1) 每次对一个面上的形貌数据进行测量, 而不是只对一个点或者一条线上的数据进行测量, 既节约了测量时间, 又避免了多次测量产生的误差。

(2) 精度完全满足使用要求, 虽然略低于机械触针式表面形貌仪的精度, 但这个精度等级对于岩石表面形貌的测量已经算是比较高的, 完全可以反映出岩石表面的细节。

(3) 一次测量的最大有效面积可以通过调整摄

表 1 不同测量原理岩石表面形貌仪的比较

Table 1 Comparison of rock surface topography system with different measurement principles

比较项目	扫描方式	测量精度/mm	测量范围	机械磨损	测量速度快慢	工作环境	适用范围	系统体积大小	系统轻重情况	
机械式 (接触式)	触针式	点	0.01	受设计尺寸限制	存在	很慢	受温度影响大	中小硬物体的测量	大	重、不可移动
	针梳式	线	0.05	受设计尺寸限制	存在	很慢	受温度影响大	中小硬物体的测量	小	重、不可移动
光学式 (非接触式)	激光式	点、线	0.05~0.10	受设计尺寸限制	存在	一般	受环境光、温度、湿度影响	中小硬物体的测量	随不同产品而不同	随不同产品而不同
	结构光式 (本产品)	面	0.02~0.04	不受设计尺寸限制	不存在	最快	不严格	大中小硬物体的测量	小	轻、可移动

像头的角度进行调节，所以测量范围也可以根据被测表面的大小进行调整；对于超出一次最大测量面积的被测表面，可以通过分块测量，利用特征点将测量结果拼接的方法实现。

(4) 质量轻、体积小、拆卸和安装方便，可以携带至现场使用。

4 测试结果

对取自雅砻江水电站锦屏二期工程的大理岩节理试样，用 TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪对节理的表面形貌进行测试(见图 6~8)。整个节理面三维形貌的计算结果见表 2。



图 6 节理表面照片

Fig.6 Photo of a joint surface

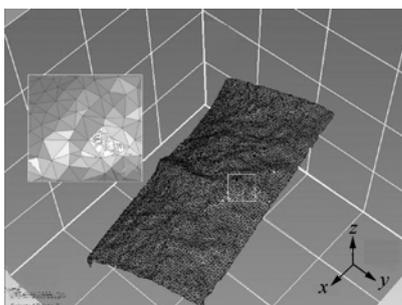
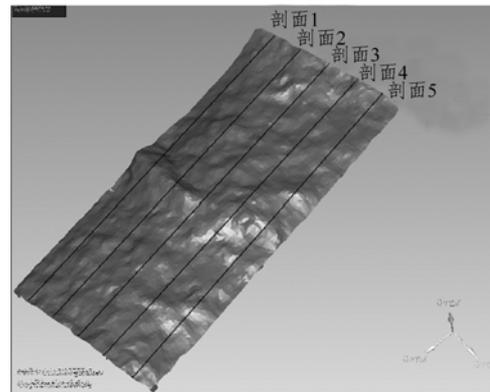
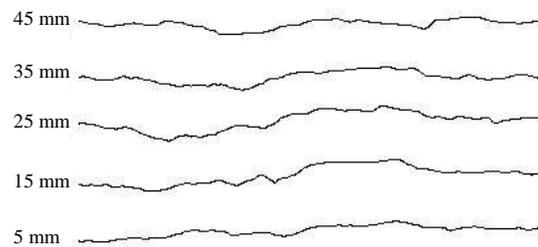


图 7 通过测量数据三角化重构节理面

Fig.7 Reconstruction of the joint surface by triangulation of the experimental data



(a) 剖面位置



(b) 二维轮廓线

图 8 不同剖面轮廓线

Fig.8 Profile of different sections

用间距为 10 mm 的 5 个相互平行剖面 1~5 去截取形貌数据(见图 8)，得到 5 条剖面上的轮廓线，计算其二维形貌参数，并与整个节理面上的三维形貌进行比较，计算结果见表 2(表中参数的定义见相关研究成果^[5])。

不同位置的轮廓剖面所计算出的二维参数均有所不同，有时相差很大，如偏态系数，其 5 mm 剖线的偏态系数为 -1.432 8，而 25 mm 处剖线的偏态系数却变为 1.069 3，说明不同位置处的二维参数仅能反映其局部特征，体现了二维评定的局限性。

不同位置轮廓剖面二维评定参数结果的平均值与三维评定参数结果差别较为明显，其中，高度特

表 2 某试件不同剖面线的二维参数与整个表面三维参数的对比

Table 2 2D and 3D parameters of different profiles on the whole surface for a same joint surface

参数取值类型	轮廓/表面	轮廓/表面	轮廓/表面	中心线平	高度均方 根 z_1/mm	偏态 系数 S	峰态 系数 K	轮廓长度比 $l_0/面积比 a_0$	坡度均方 根 z_2/mm	正反向差 异系数 z_4		
	最大高度 R_y/mm	最大峰高 R_p/mm	最大谷深 R_m/mm	均高度 z_0/mm								
二维	剖面 1	3.01	0.85	2.16	0.757 9	0.926 8	-1.432 8	2.429 5	1.028 0	0.278 2	0.003 6	
	轮廓剖面 位置(y 方 向截距)	剖面 2	5.54	3.11	2.43	1.210 0	1.510 8	0.709 2	2.480 8	1.042 2	0.300 8	-0.018 0
	剖面 3	6.33	3.82	2.51	1.505 5	1.852 8	1.069 3	2.360 5	1.049 0	0.327 4	-0.035 8	
	剖面 4	4.64	2.27	2.37	0.961 5	1.176 5	0.576 0	2.357 8	1.044 3	0.311 1	-0.105 5	
	剖面 5	3.37	1.16	2.21	0.685 7	0.865 4	-1.251 3	2.910 9	1.041 1	0.296 1	-0.075 5	
	最大值	6.33	3.82	2.51	-	-	-	-	-	-	-	
	均值	-	-	-	1.024 1	1.266 5	-0.065 9	2.507 9	1.040 9	0.302 7	-0.046 2	
三维	7.23	4.38	2.85	1.013 0	1.297 0	0.623 1	3.146 4	1.068 0	0.393 0	-0.049 3		

注：“轮廓长度比 $l_0/面积比 a_0$ ”中二维参数值为长度比，三维参数值为面积比。

征参数如偏态系数和峰态系数，起伏度特征参数如坡度均方根等参数值相差悬殊，表明二维评定的质量较差。

由此可知：二维评定参数具有局部依赖性，评定质量较差，不能准确地从整体上反映表面的微观特性；三维参数则从整体上，对节理表面特征进行描述，提供出高度特征、起伏度特征和各向异性等全面和准确的信息，对表面形貌的评价较为全面。

5 结 论

(1) 基于立体视觉法、结构光法和双目成像原理的 TJXW - 3D 型便携式岩石三维表面形貌仪，可以通过一次拍摄就实现对岩石节理三维表面形貌的测量，具有测量时间短，操作简单、方便等特点。

(2) 该形貌仪的最大单次测量面积可以调节，范围为 200 mm×150 mm~400 mm×300 mm，该形貌仪的最高精度可达 0.02 mm，完全可以满足岩石力学领域的表面形貌分析要求。

(3) 对现场大面积岩石表面进行测量时，可以通过分块测量的方法，利用设置特征点，将多次测量结果拼合在一起来完成。

(4) 该形貌仪的底座采用了三角架和云台，便于拆卸和安装，且质量轻、体积小，方便携带，可以分别用于室内和现场测量。

(5) 所配备的测量软件 and 数据分析软件，功能

强大，可以对三维形貌和二维形貌进行图形显示与分析，使用方便，且具有较高的精度和灵敏度。

用该形貌仪对取自工程现场的试样进行测量，结果说明其研制成功且为岩石表面形貌学及节理面力学性质和渗流特性等的有关理论和应用研究提供了重要的技术装备，并对相关课题的研究起着重要的推动作用。

参考文献(References):

[1] KULATILAKE P H S W, SHOU G, HUANG T H, et al. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 673 - 697.

[2] HUANG T H, DOONG Y S, SHENG J. Measurement of rock joints roughness and its directional shear strength[C]// Proceedings of the International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990: 337 - 343.

[3] WEISSBACH G. A new method for the determination of the roughness of rock joints in the laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3): 131 - 133.

[4] 夏才初, 孙宗顺. RSP - I 型智能岩石表面形貌仪[J]. 水利学报, 1995, (6): 62 - 66.(XIA Caichu, SUN Zongqi. RSP - I type intelligent profile meter of rock surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (6): 62 - 66.(in Chinese))

[5] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社,

- 2002.(XIA Caichu, SUN Zongqi. Joint mechanics of engineering rock mass[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.(in Chinese))
- [6] XIA C C, YUE Z Q, THAM L G, et al. Quantifying topography and closure deformation of rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(2): 197 - 220.
- [7] BROWN S R, SCHOLZ C H. Broad band width study of the topography of natural rock surfaces[J]. *International Journal of Geophysical Resources*, 1985, 90(B14): 12 575 - 12 582.
- [8] IWANO M, EINSTEIN H H. Stochastic analysis of surface roughness, aperture and flow in a single fracture[C]// *Proceedings of the ISRM International Symposium*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993: 135 - 141.
- [9] HSIUNG S M, KANS D D, AHOLA M P, et al. Laboratory characterization of rock joints[R]. Washington, D C: Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1994.
- [10] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(5): 641 - 650.
- [11] 周宏伟, 谢和平, KWASNIEWSKI M A, 等. 岩体节理表面形貌的各向异性研究[J]. *地质力学学报*, 2001, 7(2): 123 - 129.(ZHOU Hongwei, XIE Heping, KWASNIEWSKI M A, et al. On anisotropy of surface topography of rock joint[J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(2): 123 - 129.(in Chinese))
- [12] FARDIN N, FENG Q, STEPHANSSON O. Application of a new in-situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 329 - 335.
- [13] SON B K, LEE Y K, LEE C I. Elastoplastic simulation of a direct shear test on rough rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(Supp.1): 191 - 196.
- [14] 郝继贵, 王浩, 任同群, 等. 便携式激光扫描三维形貌测量系统[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(2): 166 - 169.(ZHU Jigui, WANG Hao, REN Tongqun, et al. Portable laser scanning system for 3D contour measure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(2): 166 - 169.(in Chinese))
- [15] 许智钦. 便携式彩色三维激光扫描系统的研究[博士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2002: 31 - 45.(XU Zhiqin. Study on portable color 3D laser scanning system[Ph. D. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2002: 31 - 45.(in Chinese))
- [16] RENGERS N. Influence of surface roughness on the friction properties of rock planes[C]// *Proceedings of the 2nd International Congress of Rock Mechanics*. Belgrade: [s. n.], 1978: 229 - 235.
- [17] HAKAMI E, LARSSON E. Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1996, 33(4): 395 - 404.
- [18] FECKERS E, RENGERS N. Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass[C]// *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*. [S. l.]: [s. n.], 1971: 1 - 18.
- [19] CRAVERO M. Analysis of large joint profiles related to rock slope instabilities[C]// *Proceedings of the 8th Int. Congr. on Rock Mech.* Tokyo, Japan: [s. n.], 1995: 423 - 428.
- [20] 夏才初, 孙宗硕. 节理表面形貌的室内和现场量测及其应用[J]. *勘察科学技术*, 1994, (4): 27 - 31.(XIA Caichu, SUN Zongqi. Laboratory and field measurements of the superficial morphology of joints and their applications[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1994, (4): 27 - 31.(in Chinese))
- [21] BERALDIN J A, BLAIS F, COURNOYER L, et al. Active 3D sensing[R]. Pisa, Italy, NRC: National Research Council Canada, 2000.
- [22] 潘伟. 反向工程中光栅投影测量系统关键技术的研究[博士学位论文][D]. 上海交通大学, 2004: 5 - 18.(PAN Wei. Research on key technique for fringe projection measuring system in reverse engineering [Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004: 5 - 18.(in Chinese))
- [23] 潘伟, 赵毅, 阮雪榆. 采用光栅投影的三维测量方法[J]. *光电工程*, 2003, 30(2): 28 - 31.(PAN Wei, ZHAO Yi, RUAN Xueyu. A 3D measuring method with grating projection[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2003, 30(2): 28 - 31.(in Chinese))
- [24] YU X Y, QIANG X F, ZHANG J, et al. Structured light 3D vision based on laser scanning space-encoding and its synchronic control[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1997, 4(2): 20 - 24.
- [25] 顾元亮, 李新军, 吕晓东, 等. 标志点拼接技术在大型薄壁件型面非接触测量中的应用[J]. *塑性工程学报*, 2004, 11(6): 26 - 28.(GU Yuanliang, LI Xinjun, LU Xiaodong, et al. Application of marked point registration in non-contact surface measurement of large dimension sheet parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2004, 11(6): 26 - 28.(in Chinese))