

点云几何特征在堤防抛石护岸工程中的应用研究

赵 钢¹, 徐 毅¹, 石银涛², 王茂枚¹

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017;

2. 南京工业大学 测绘科学与技术学院, 江苏 南京 211816)

摘要:堤防抛石护岸工程具有一定的隐蔽性,通常基于抛石前后的水底地形变化评估其抛投质量与实施效果。多波束测深系统获取的水底地形点云数据,实现了水底地形的精细三维表达,其包含的许多隐式信息可以用于水利工程的质量检测与效果评估。本文从点云的几何特征出发,将曲率特征与粗糙度特征用于抛石前后水底地形的变化分析,分析其用于抛石工程检测中的可行性。实验表明:将点云几何特征用于堤防抛石护岸工程的质量检测,不仅可以直观地查看抛石前后的水底地形特征变化,且可以快速定位欠抛或漏抛区域,较传统的方法具有明显的优势。

关键词:多波束测深系统;点云;几何特征;抛石护岸工程;质量检测

中图分类号:P229

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2020)06-0001-05

Study on the application of point cloud geometric features in riprap revetment project of embankment

ZHAO Gang¹, XU Yi¹, SHI Yintao², WANG Maomei¹

(1. Jiangsu Water Conservancy Science Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. College of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The riprap revetment of embankment has a certain concealment, which is usually based on the underwater topographic changes before and after the riprap to evaluate its throwing quality and implementation effect. The underwater terrain point cloud data obtained by the multi-beam sounding system realized the fine three-dimensional expression of the underwater terrain, which contained a lot of implicit information could be used for quality inspection and effect evaluation of water conservancy projects. Starting from the geometric features of point cloud, curvature characteristics and roughness characteristics were used to analyze the changes of underwater topography before and after riprap, and the feasibility of applying them on the detection of riprap engineering. The experimental results showed that the geometric features of point cloud used in the quality inspection of riprap revetment project of embankment could not only visually see the changes of underwater topographic features before and after riprap, but also could quickly locate the under-throwing or leaking areas, which had obvious advantages over traditional methods.

Key words: multi-beam sounding system; point cloud; geometric features; riprap revetment project; quality inspection

收稿日期:2019-11-12

基金项目:江苏省水利科技项目(2016015、2018005);江苏省测绘地理信息科研项目(JSCHKY201809)

作者简介:赵钢(1975—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事水下探测技术的应用与研究工作。

堤防工程是我国大江大河防洪体系中重要工程措施之一,在防洪减灾中发挥着重要作用。为了维护堤防工程的安全稳定,增强其抗风险能力,我国在江河湖海堤岸两侧实施一系列护岸工程,以保护堤岸免受水流、风浪、海潮侵袭和冲刷,而水下抛石护岸是其中较常采用的一种护岸形式。水下抛石具有很多优点,如造价低,可以就地取材且施工、维护简单,可分期施工、逐年加固,而且在坡面变形(沉降或是水浪冲刷)时能够自动调整和自动弥合。但是由于水体的掩盖,水下地形十分复杂却无法直观查看,加上抛投石料为散粒结构,受水流的影响较大,致使抛石护岸工程成为了一种水下的隐蔽工程。

由于抛石护岸的水下形态及分布情况直接影响护岸的运行效果,而由于水体的覆盖,无法直观对其质量进行评估,通常借助水下地形的变化对其抛投质量进行评价。因此,抛石前后的水下地形变化分析对工程质量的检测非常重要,目前多通过水下地形变化对抛石工程的质量进行评估。

水下地形的获取主要利用单波束、多波束等水深测量设备获取水体覆盖下的水底地形数据,并借助水深图、二维等深线图、分层设色图等特定的形式对其表达。在单波束点测深阶段,由于受作业效率、测点覆盖率等因素的制约,水下地形多以水深图、等深线图等形式表达,而利用此类成果进行抛石质量的评估主要采用抽查断面对比的方法。在多波束面测深阶段,测深技术在扫测范围、作业速度、测深精度等方面取得较大提升,从传统的点线状扩展到面状,使得水下地形成果由平面图发展为三维立体图。在此基础上,抛石工程的质量评估也将由断面式发展为全覆盖三维评估^[1]。

多波束获取的测深数据是对水下地形的高分辨率采样,其测点数量通常在百万或千万级以上,故通常将其称为“水下地形点云”。这种数据不仅实现了对水下地形的精细表达,且包含有许多隐式信息,如曲率、法向变化率、粗糙度等,这类信息在水利工程的质量检测中可以且也应该加以利用,以提高成果的综合利用率及质量评价的准确性。

1 水下地形点云的获取

目前,水下地形点云多利用多波束测深系统获取,它是一种高精度全覆盖式测深系统,采用多组阵和广角发射接收,并形成条幅式高密度测深数据,是计算机技术、导航定位技术和数字化传感器

技术等多种高新技术的高度集成。多波束测深系统主要由声学系统、数据采集系统、数据处理系统以及外围辅助传感器等子系统组成。其中,声学系统负责波束的发射和接收;数据采集系统完成波束的形成和将接收到的声波信号转换为数字信号,将波束进行滤波后反算其测量距离或记录其往返时间;数据处理系统以工作站为代表,综合声波测量、定位、船姿、声速剖面 and 潮位等信息,计算波束脚印的坐标和深度;外围设备主要包括定位传感器(如 GPS)、姿态传感器(如姿态仪)、声速剖面仪和罗经等。图 1 为多波束测深系统的配置示意图。

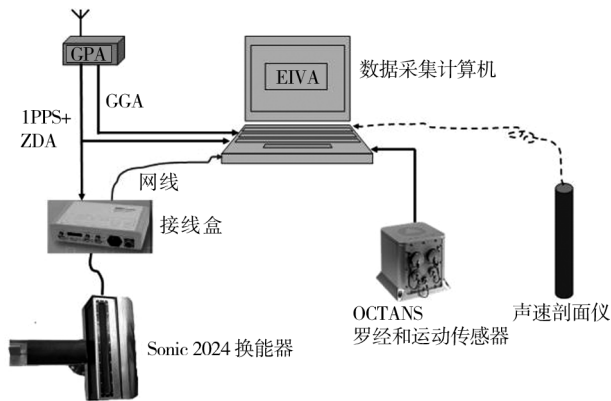


图 1 多波束测深系统的配置示意图

多波束与单波束从回声测深原理上讲没有本质的区别,但是,单波束测深仅发射一个声波束,测的也只是换能器正下方的水深,而多波束测深采用发射、接收指向性正交的两组换能器阵获得一系列垂直航向分布的扇形窄波束,从而实现对水下地形的条带式测量^[3]。与单波束测深系统的数据采集与处理流程相比,多波束系统由于其组成的复杂性,其数据处理流程有其自身的特点,如图 2 所示。

2 点云几何特征的估算

点云的几何特征是指用来描述点云的空间几何属性的指标特性,如点云的曲率、点云的仿射不变性等。从表达方式来分,可以分为显式特征与隐式特征,前者指清楚的、明确的属性特征,如垂直方向的高程特征、测点的空间位置特征等;后者是指隐匿的、不言明的属性特征,如法向量特征、曲率特征等。从尺度上来分,一般分为局部特征和全局特征,例如局部的法线特征、曲率特征等,全局的拓扑特征等。对于空间拓扑结构明确的流形几何体,其几何特征量可以精确地计算,但对于多波束获取的散乱点云,其几何特征量无法精确评估,而多通过局部拟合进行估算^[4]。

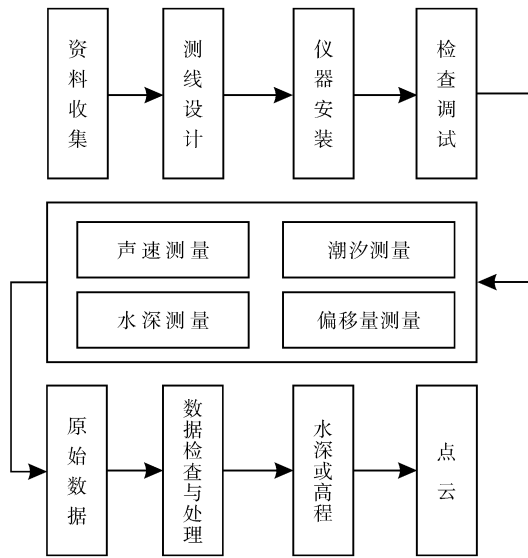


图2 多波束点云的获取流程

多波束点云是对水下地形的精细表达,测点的几何特征直接反映了地形特征,如曲率特性,在抛石工程实施前,水下地形较为平坦,此时地形的曲率变化较小,而抛石后,抛石掩盖区域的曲率则变化较大,而未抛或漏抛的区域则曲率变化不大。基于此类点云几何特征可以直观地查看水下抛石的施工质量。

2.1 曲率的估算

曲率是指曲线或者曲面上某个点的切线方向角对弧长的转动率,通过微分来定义,表明曲线或曲面偏离的程度。曲率越大,表示曲线或者曲面的弯曲程度越大。因此曲率常用于表征曲线或曲面形状变化的特征量^[5]。针对多波束获取的水下地形点云,采样点的曲率越大,该点所在局部曲面越有可能是被测物体的尖锐特征所在,往往包含着重要的信息,如抛石所在区域。

曲率值的计算对于用参数形式表示的曲面来说比较完备,计算结果也较准确,而对于仅含三维坐标信息的点云来说,其曲率只能近似估算^[6,7]。针对多波束点云的曲率,目前主要利用局部曲面拟合的方法估算,即利用测点近邻域内的点集拟合一个局部二次曲面,然后在局部曲面参数化的基础上,根据拟合曲面的曲率性质来估算被测曲面在测点处的曲率值。

根据三维流形几何的理论,任意曲面的局部形状可由二次曲面

$$S(u, v) = (u, v, w(u, v)) \quad (1)$$

$$w(u, v) = au^2 + buv + cv^2 + eu + fv \quad (2)$$

来近似描述,若一次项的系数 e, f 为零,则该二次曲

面就是一个二次抛物曲面,即为局部坐标下的参数表示^[8]。

对多波束点云中的任一测点 P_i , 利用近邻域搜索, 可以获取其邻域点集 $P_j(x_j, y_j, z_j) \in N(P_i)$, $j = 1, 2, \dots, k$ 。将邻域点 $P_j(x_j, y_j, z_j)$ 带入公式(1)与(2), 当 k 大于 3 时, 得到一超定方程组, 利用最小二乘法求解, 得到最佳拟合二次曲面的参数 a, b, c , 见图 3。

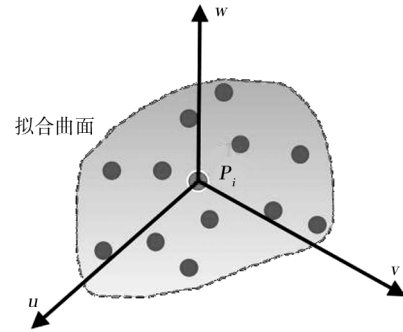


图3 曲率估算

得到拟合二次曲面的参数方程后, 根据参数曲面的曲率性质可得测点 P_i 的高斯曲率 K 与平均曲率 H 。

$$\begin{cases} K = 4ac - b^2 \\ H = a + c \end{cases} \quad (3)$$

拟合的二次曲面是对被测面的局部估计, 因此可以用拟合二次曲面的曲率值近似代替被测面的曲率, 并认为是采样点的曲率^[9]。

2.2 粗糙度的估算

在地质学中, 地面粗糙度是指在一个特定的区域内, 地球表面积与其投影面积之比。它是反映地表形态的一个宏观指标^[10]。针对多波束获取的水下地形点云, 评估其粗糙度主要利用测点与局部表面模型间的标准中误差估算。针对多波束点云的粗糙度, 本文通过正交距离回归法建立表面模型, 计算每个点至模型的正交间距, 解算点云数据中每个点的正交距离的标准中误差。计算过程如下:

(1) 利用近邻域搜索获取测点的邻域测点集。

(2) 将局部参考基准面定义为标准平面, 通过正交距离回归法确定平面方程。

$$z = \alpha x + \beta y + \gamma \quad (4)$$

式中: x, y, z 为测点的三维坐标值, α, β, γ 为通过正交距离回归法得到的平面方程系数^[11-12]。

(3) 将近邻域内的全部测点进行转换, 使其基准面相同。

(4) 计算转换之后的观测向量投影到平面的法

向量。因为 Z 回归平面的截距 (γ) 已确定, 所以将其选作为新的矢量。单位长度由缩放平面的法向量 n 确定,

$$D_i = |n_u \cdot v_i|, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: D_i 为测点与平面之间的正交间距; n_u 为标准回归平面的单位法矢; v_i 为点云在方向 Z 上的截距^[13-15]。

(5) 当估算出全部点与平面的正交距离之后, 即可确定点云的粗糙度 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (6)$$

3 工程应用实例

3.1 水下地形点云的获取

南京新济州河道整治是长江中下游重点项目之一, 河段位置如图 4 所示。南京河段的水动力及泥沙情况直接影响着新济州河段的河床演变过程。南京段河流的稳定性和防洪安全性对两岸经济社会的发展起着举足轻重的作用, 一直备受重视, 历史上该段河道已经进行了多次整治工程以确保河流稳定性和对于洪水的抵抗性。然而近年来, 随着三峡工程的建成使用, 上游水沙并下的情况有所变化, 使新生洲汊道出现的一些不利变化加速发展, 这些新变化危害防洪的稳定性、破坏河势稳定、并且阻碍了两岸水土资源的开发利用, 基于上述情况, 南京市水利局开展了新济州河段的整治工程, 其中护岸工程以水下抛石护岸形式为主。

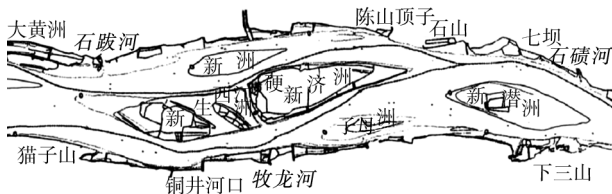


图4 南京新济州河段示意图

水下抛石工程具有一定的隐蔽性, 无法直接查看, 为了检测与分析其施工质量与护岸效果, 采用多波束测深系统对其抛前与抛后水下地形进行了全覆盖扫测。相关的仪器设备选用 R2Sonic 2024 多波束、Trimble GPS、Octans 光纤罗经以及 SV Plus 声速剖面仪等。如图 5 所示, (a) 为利用 Trimble R10 架设的地面基准站, (b) 为多波束整体安装后的扫测场景。

3.2 水下地形变化分析

利用多波束获取抛石前后的水下地形点云后, 分别利用点云的曲率特征与粗糙度特征对水下地



(a) 地面基准站

(b) 多波束扫测

图5 多波束点云采集

形进行了分析, 分析结果如图 6 与图 7 所示。图 6 中, 蓝色部分为曲率小于 0.02 的区域, 绿色部分为曲率 0.15 的区域, 从抛石前后的曲率对比可以看出, 靠近堤岸区域的地面曲率发生了明显的变化。图 7 中, 蓝色部分为粗糙度小于 0.05 的区域, 绿色部分为粗糙度 0.12 的区域, 从粗糙度的前后对比可以看出, 抛石前后水下地形的粗糙度发生了明显的变化。这说明抛石工程对水下地形产生了明显的影响, 造成了地表几何特征的变化。

从图 6 和图 7 的对比可以看出: 抛石前, 水下地形比较平坦, 地表曲率与粗糙度变化均比较小, 而抛石后, 水下新增了许多比较尖锐的抛石对象, 导致水下地形的曲率与粗糙度特征发生了明显改变, 尤其在靠近堤岸的抛石堆积区域。通过水下地形点云的几何特征分析, 不仅可以直观地查看水下抛石的抛投位置及堆积情况, 且可以直观地检查欠抛及漏抛区域, 从而更加直观地评定抛石工程的实施质量。

4 结 语

随着多波束测深技术的发展, 水下地形的扫测越来越趋于精准化、全覆盖, 这使得水下地形的精细化变化分析趋于可能, 这必将推动测绘作业模式与水利工程质量检测方法的革新。针对水下抛石工程的质量检测, 在充分挖掘多波束点云信息的基础上, 既可以实现抛投质量的宏观分析, 也可以实现抛投量与水下地形变化的精准量化分析。

多波束点云在提升水下地形测量精度, 涵括更多信息的同时, 伴随的是测点数量的激增(测点通常在百万或千万级以上), 这既带来了机遇, 同时也带来了挑战。如何将这信息更好地用于水利工

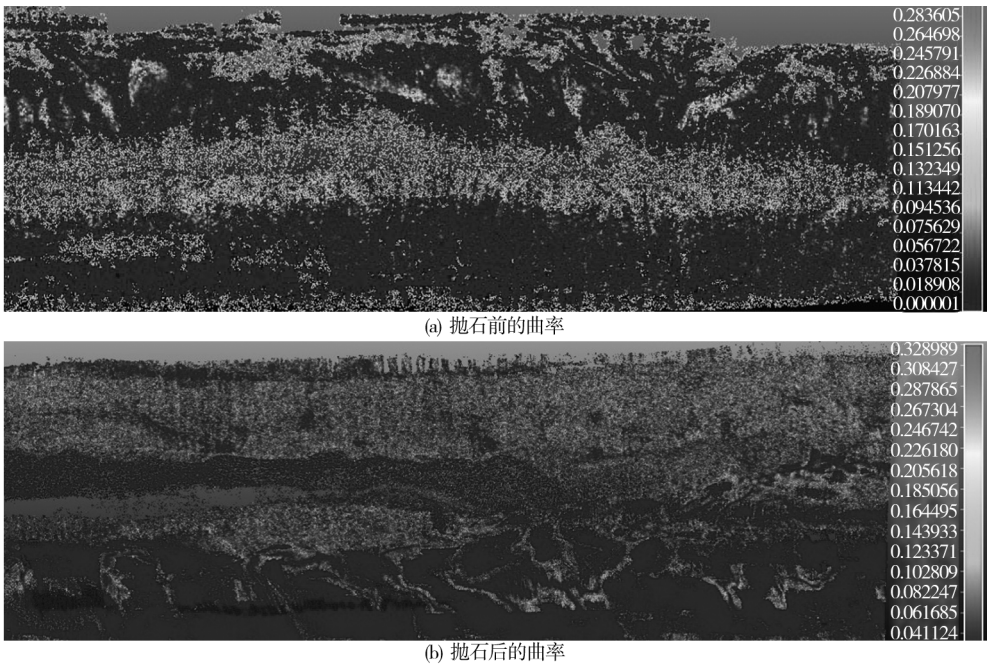


图 6 抛石前后的曲率变化对比

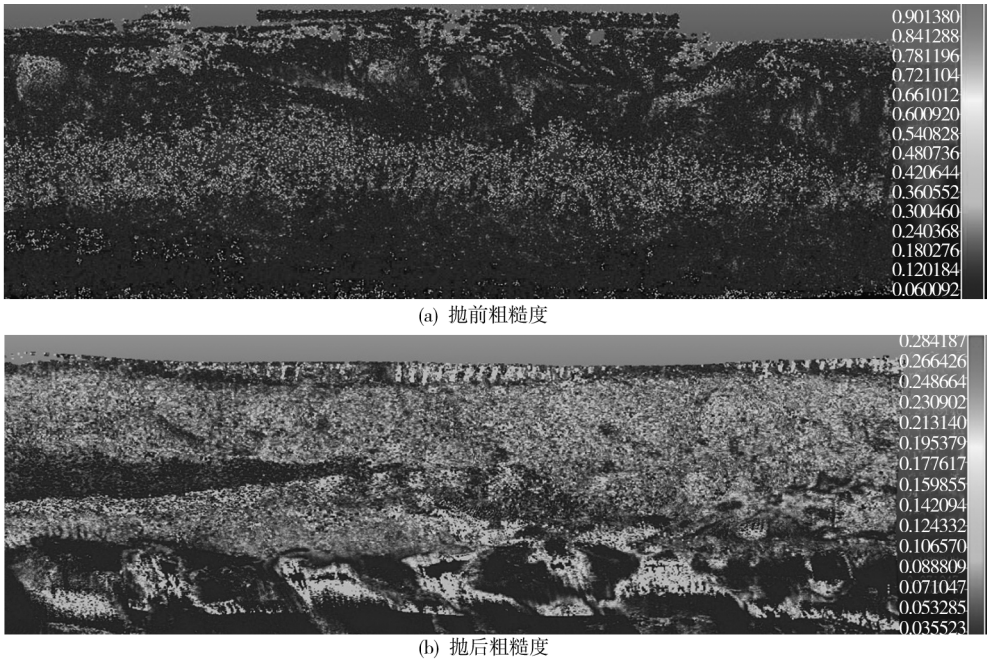


图 7 抛石前后的粗糙度对比

程建设与检测,后面还有许多问题去解决,例如,如何平衡有用信息与测点数量之间的关系、如何提升海量点云的处理效率、如何更直观、准确地表达检测分析成果等。

参考文献:

[1] 赵钢,王茂枚,徐毅. 水利工程水下探测技术[M]. 北京:水利水电出版社,2018.

[2] 陆秀平,黄谟涛,翟国君,等. 多波束测深数据处理关键技术研究进展与展望[J]. 海洋测绘,2016,

(4):1-6.

[3] 程秀丽. 多波束测量数据处理关键技术研究[D]. 济南:山东建筑大学,2014.

[4] 石银涛. 基于点云的真实树木三维仿真理论与技术[M]. 上海:同济大学出版社,2018.

[5] 黄宣国. 空间解析几何与微分几何[M]. 上海:复旦大学出版社,2003.

[6] 张威,王国瑾. 以离散曲线为曲率线构造拟可展离散曲面[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2015,(10):1950-1955.

(下转第 10 页)

表 6 中墩结构拉应力最大值汇总

方向	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置
S_{11} (X 向)	0.153	中墩底板中心与 岩石交界处	0.175	底板下侧、油缸 安装板下侧	0.015	帆与顶板 接触处	0.288	底板下侧、油缸 安装板下侧
S_{22} (Y 向)	0.084	中墩顶板中心 处梁的下侧面	0.066	中墩顶板中间 梁的下侧	0.144	顶板	0.430	中墩顶板中间 梁的下侧
S_{33} (Z 向)	0.046	中墩结构顶板上 表面,底板上表面	0.037	闸门支座处	0.118	廊道处	0.734	帆与中墩 顶板接触处

能够为此类复杂结构的设计及配筋方案提供科学的技术支撑和经验参考。

参考文献:

- [1] 王俊杰, 杨东辉, 周小飞. 基于 ABAQUS 软件的模拟重力坝静力分析[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(6):69-74.
- [2] 赵廷红, 王诗玉, 王宁波. 基于 ABAQUS 的碾压混凝土重力坝三维非线性静力分析[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(6):119-123.
- [3] 梁景奇, 王振华, 刘建军, 等. 基于 ABAQUS 的闸室结构有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(1):91-93.
- [4] 徐远杰, 楚锡华, 陈龙. 高混凝土重力坝孔口应力非线性数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2010(2).

(上接第 5 页)

- [7] CHEN Sheng, WU Jyh - yang. Estimating normal vectors and curvatures by centroid weights[J]. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(5):447-458.
- [8] JEFFREY M L. Manifolds and differential geometry [M]. New York: American Mathematical Society, 2009.
- [9] DEY T K, GIESEN J. Detecting under sampling in surface reconstruction [C]//Proceedings of the 17th ACM Symposium Computational Geometry. Berlin: Springer, 2001:257-263
- [10] GRUBESIC T H, NELSON R. UAVs and urban spatial analysis[M]. Berlin:Springer, 2019.
- [11] ALT HELMUT. Computational DiscreteMathematics [M]. Berlin:Springer, 2001.
- [12] 林虎, 石照耀, 薛梓, 等. 基于正交距离回归齿面的齿轮误差评定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11):3192-3199.
- [13] PAULY M, KEISER R, GROSS M. Multi - scale feature extraction on point - sampled surfaces[C]. Eurographics'03, 2003, 22(3):32-41.
- [14] ANTONICHIC A. Visibility - based feature extraction from discrete models[J]. Stony Brook, 2008(2):347-353.
- [15] STEFAN H, ALEXANDER T, ANTONIO D G, et al. Numerical investigation of roughness effects on transition on spherical capsules [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(2):388-404.