

# 超重力下粒子图像测速系统性能测试与评价

徐春瑞<sup>1,2</sup>, 薛阳<sup>1,2</sup>, 郭畅<sup>1,3</sup>, 黄博<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 超重力研究中心, 浙江 杭州 310058;  
3. 香港理工大学 土木与环境工程学系, 香港 999077)

**摘要:** 粒子图像测速(PIV)技术作为一种无扰、瞬态、全速度场的测量手段,能够测量试验过程中土体的位移场变化、土体的瞬时运动速度等,具有传统的点或线式测量手段不具备的优势,近年来,已被推广应用于岩土工程离心模型试验中。然而,离心超重力的极端环境使PIV系统测速的准确性面临严峻考验。通过自行设计的一套可在超重力下提供稳定速度场的伺服调速标定装置,并以该装置提供的速度场为基准,对一套PIV系统在不同离心加速度、基准速度以及拍摄模式下的测速误差进行了测试和分析。研究结果显示:PIV系统的测速误差主要源自系统自身的时序控制误差,在50g离心加速度内,g值对系统性能的影响有限,常重力下测试结果提出的速度修正公式同样适用于超重力工况;PIV系统的测试精度与相机的工作模式相关,连续拍摄时,两幅图像间隔时间越短,测试数据的离散程度越低;双曝光工作模式测试的数据点更为集中,系统精度更高;在像场的不同区域,PIV系统均能保持较小的系统误差和变异系数,能够实现全域测量。本研究为超重力条件下PIV技术的应用提供了可靠的校准方法,也为其他PIV系统的超重力性能测试与评价提供了参考。

**关键词:** 粒子图像测速技术; 离心模型试验; 伺服调速标定装置; 系统误差; 变异系数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0547-10

## Performance testing and evaluation of PIV system in centrifugal environment

XU Chunrui<sup>1,2</sup>, XUE Yang<sup>1,2</sup>, GUO Chang<sup>1,3</sup>, HUANG Bo<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Center for Hypergravity Experimental and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Department of Civil and Environment Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** Particle Image Velocimetry (PIV) is a non-intrusive, transient, and an entire region measurement technique that is capable of measuring soil deformation behavior and the instantaneous particle velocities during testing. Compared to traditional point or line measurement methods, PIV offers distinct benefits and has been increasingly applied in geotechnical centrifugal model tests. However, the extreme environment of centrifugal hypergravity poses a severe challenge to the accuracy of PIV system speed measurements. In this study, a self-designed servo-controlled calibration apparatus was introduced, which is capable of providing stable velocity fields under hypergravity conditions. Using the velocity fields generated by this apparatus as benchmarks, the performance of a set of PIV system under various centrifugal accelerations, reference velocities, and shooting modes was tested. The measurement errors of the PIV system were analyzed and assessed. The results show that the velocity measurement error of the PIV system mainly originates from the timing control error of the system itself. Within 50g centrifugal acceleration, the g value has a limited influence on the system performance, and the velocity modification formulas proposed in the test results under normal gravity are also applicable to the hypergravity working conditions. The test accuracy of the PIV system is related to the camera's working mode. In continuous shooting, the shorter the interval between two images, the lower the degree of dispersion of the test data. The data points of the double-exposure working mode test are more concentrated, and the system accuracy is higher. In different areas of the

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LCZ19E080002); 国家自然科学基金资助项目(51988101)。

作者简介: 徐春瑞(1998—),男,云南保山人,硕士研究生,主要从事砂土渗透破坏机理方面的研究工作。E-mail: xuchunrui\_6499@zju.edu.cn。

\*通信作者: 黄博(1973—),女,江苏南通人,博士,教授,主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: cehuangbo@zju.edu.cn。

image field, the PIV system can maintain a small systematic error and coefficient of variation, and can realize the full range of measurement. This study provides a reliable calibration method for the application of PIV technology under hypergravity conditions and provides a reference for the hypergravity performance testing and evaluation of other PIV systems.

**Key words:** Particle Image Velocimetry (PIV) technology; centrifugal model test; servo-controlled calibration apparatus; systematic error; coefficient of variation

## 0 引言

粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry, PIV) 技术是一种通过前后两幅图像的灰度矩阵互相关计算实现的无扰、瞬态、全速度场测量方法<sup>[1-2]</sup>。该技术自 1984 年被 ADRIAN<sup>[3]</sup> 提出,最早应用于流体力学试验的流场测速中。2001 年,WHITE 等<sup>[4]</sup> 将该方法应用到土体模型的变形测量中。相较于岩土领域传统的点或线式位移测试手段,如:LVDT、拉线式位移计、激光位移传感器、光纤位移传感器<sup>[5-6]</sup> 等,只能通过一点或者一段区域内的变形来推断土体的变形机制,PIV 技术可以在空间尺度上对土体的位移进行连续测量,实现无扰动的位移场监测。目前,该方法已应用到边坡、隧道、断层变形和剪切带观测等诸多岩土工程物理模型试验领域,包括离心模型试验中<sup>[7-11]</sup>,对砂土、粉土以及黏土的位移或应变测量均表现出了较佳的效果。如果同时能精确控制两张图像的拍摄间隔时间,也可以实现土体速度场的测量<sup>[12-14]</sup>。

作为一种测量技术,PIV 在使用前需要标定以保证测量结果的可靠性。随着超重力物理模拟手段的研究领域不断拓宽,在超重力环境下对 PIV 系统的测速性能进行标定和评估显得尤为重要。对位移测量的标定,目前常通过标志点实现像场与物场的坐标对应<sup>[4]</sup> 以保证位移的测量精度。这一方法在离心模型试验中也同样适用。但这样的标定手段只能是静态的,对终点位移的标定,不适用于速度测量。

对速度测试的标定在常重力下主要有 3 类方法:(1) 通过数值方法在电脑中生成基准速度场进行测试,这类方法针对 PIV 分析软件的算法进行标定,如 OKAMOTO 等<sup>[15]</sup> 提出基于大涡模拟生成 PIV 标准图像进行的测试;(2) 形成液体或气体的定常流场为基准速度场进行测试,如刘应征等<sup>[16]</sup> 基于轴对称旋转流场进行的速度场标定;(3) 对以已知速度运动的固体进行测试,如董明哲等<sup>[17]</sup> 通过拍摄匀速转动圆盘开展的测量误差评估。在超重力环境中进行速度标定要比常重力下更为困难。离心机转臂旋转时吊篮中的震动、超重力导致的系统变形和科氏力带来的附加运动,给超重力下标定 PIV 系

统的测速性能提出了极大的挑战。

针对上述问题,本文研发了一套能在超重力环境下提供稳定平动速度场的伺服调速装置,其调速范围为 0.002~1.600 m/s,可满足岩土工程物理模型试验中大多数岩土体运动速度的测试要求。以该装置提供的速度场为基准,利用浙江大学 ZJU400 土工离心机<sup>[18]</sup>,在不同 g 值下对一套 PIV 系统的测速性能进行了评估,分析了超重力下 PIV 系统的测试误差并提出相应的修正公式,为其他 PIV 系统的超重力性能测试与评价提供了参考。

## 1 伺服调速标定装置的构成和性能验证

超重力下 PIV 系统测速性能标定的关键在于构建能在超重力场内稳定工作的基准速度场。为避免离心机高速旋转中科氏力对物质运动的影响,未采用第 2 类生成定常流场再进行标定的方法。同时考虑到岩土工程问题中,更关心岩土体的平动而非转动<sup>[19-22]</sup>,为简化装置,仅模拟粒子单一方向的运动,不考虑其他方向速度分量的干扰,基于第 3 类方法的原理,设计了一套伺服调速标定装置,如图 1 所示。该装置主要由伺服电机、铝合金支架、传送带等部件组成,通过伺服控制电机以一定频率转动,带动传送带构建匀速运动的平动速度场。

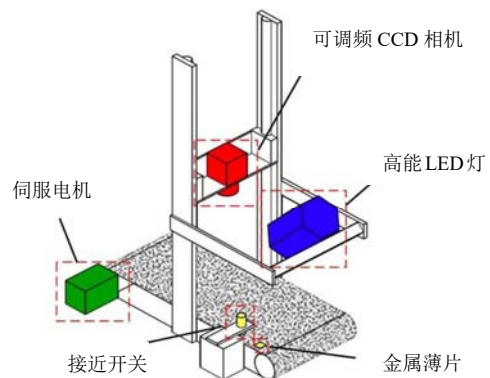


图 1 伺服调速标定装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of servo-controlled calibration apparatus

装置设计了高强度铝合金外框和支架用于架设 PIV 系统中的 CCD 相机和照明设备。使用时,将 CCD 相机置于铝合金支架之上使镜头光轴垂直

于传送带表面 (传送带运动方向与 CCD 相机像场中的  $y$  方向平行), CCD 相机与传送带间的距离可在 20~120 cm 间调节以调整视场大小。为避免在超重力环境中 CCD 相机与传送带间产生相对位移影响 PIV 测试精度, 采用高强度螺栓固定支架和铝合金外框, 并在铝合金外框的不同高度预留了螺孔以调节支架高度。照明用的高能 LED 灯同样用刚性支架置于相机一侧, 可调整照明角度使像场更清晰。

### 1.1 设定速率和实际速率的对比

为验证该标定装置提供的基准速度的可靠性, 在传送带边缘处某点粘贴一金属薄片, 并在其上方布置接近开关, 如图 1 所示。金属片靠近接近开关时会在其线圈内形成感应电流, 引起电路参数变化<sup>[23]</sup>。利用这一原理, 可记录金属薄片通过接近开关下方的时间戳, 其后根据时间戳的间隔即可获得传送带运转一周所需的时间, 据此可以计算传送带的运行速率。

考虑到一般的岩土工程模型试验中岩土体运动速度不快, 如桩的贯入试验中贯入速度一般小于 1 cm/s<sup>[24]</sup>、砂土渗流试验中达到渗透破坏时的孔隙流速一般小于 15 cm/s、滑坡模型试验中岩土体滑动速度一般在 1.5 m/s 以下<sup>[25]</sup>, 故设计时要求标定装置能提供的基准速度不低于 1.5 m/s。实际装置通过调整电机转速可提供的基准速度变化范围为 0.002~1.600 m/s。

图 2 给出了不同  $g$  值下 (考虑到 PIV 系统的承受能力, 最大测试  $g$  值为 50g), 通过接近开关采集信号进行频谱分析得到的传送带的实测速率和设定速率的关系。可以看到, 对实测值和设定值数据进行拟合, 得到两者的相关系数  $R^2 > 0.9999$ , 表明在 50g 内, 传送带在工作中不存在打滑现象, 通过电机调频控制的基准速率与传送带的实测速率高度吻合, 是可靠的。

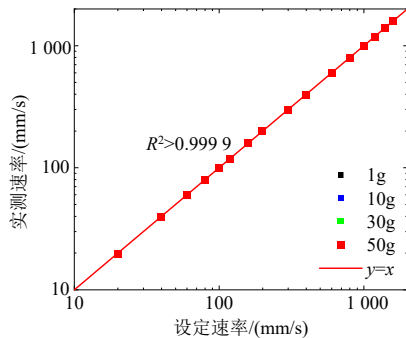


图 2 伺服调速标定装置的设定速率和实测速率的关系曲线  
Fig. 2 Relationship curve between the reference rate set by the servo-controlled calibration apparatus and the actual rate

### 1.2 装置变形

在常重力环境下, 为确定拍摄物体的实际坐标与拍摄图像的图上坐标的关系, 需要设置一组已知坐标的控制点, 结合控制点的图上坐标和已知的实际坐标来确定两者的换算关系。图 3 给出了 CCD 相机架设并固定在支架某一高度上拍摄的传送带一带刻度钢尺的图像。根据图中钢尺显示的真实距离与图像中对应长度的像素距离即可计算两者的放大系数  $M$ , 为 0.050 4 mm/pixel。

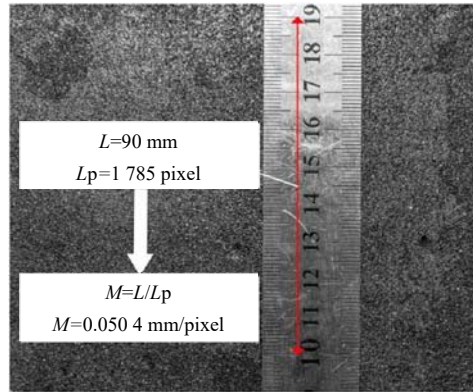


图 3 拍摄图像中像素距离与物理距离的对应关系  
Fig. 3 Correspondence between pixel distance and physical distance in captured images

离心机通过高速旋转的离心力模拟超重力, 离心场内所有物质的自重是常重力场下的  $N$  倍。即使标定装置进行了加固处理, 在超重力环境下, 这些结构件, 包括相机支架和外框仍有可能产生变形, 从而改变相机与拍摄物间的距离, 造成放大系数  $M$  的误差。为测试超重力环境下装置构件的变形及其对放大系数  $M$  的影响, 在超重力下进行了以下测试。

在传送带表面拍摄区域内绘制了若干控制点, 如图 4 所示的白点。首先在常重力下测量并记录控制点的坐标, 之后在不同  $g$  值下拍摄传送带静止状态的图像, 获得图像中控制点间的像素距离, 对比不同  $g$  值下控制点物理坐标的变化, 从而推算相机与传送带间是否存在相对位置的变化。

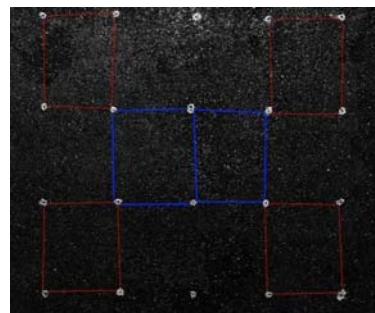


图 4 传送带控制点图  
Fig. 4 Control point of the conveyor belt



为考察传送带上不同区域的放大系数是否存在差异，对图4中蓝色、红色线段的真实距离和像素距离分别进行了计算。蓝色线段代表中心区域，红色线段代表四周区域。各区域在不同g值下的放大系数M的计算结果如图5所示。图5同时给出了根据M反算得到的相机与传送带之间距离（物距）的变化量。计算结果表明，在施加超重力后，物距是增大的，到50g时，物距共增大了约3mm。这可能是超重力下传送带有一定沉降造成的。但是，这种程度的物距变化相对于物距的绝对值是很小的，因此不同g值、不同区域的放大系数基本与常重力下的放大系数相同。50g超重力内，伺服调速标定装置的变形很小，不影响放大系数。

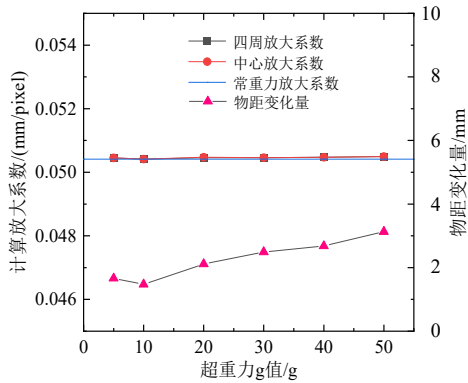


图5 1g~50g环境下放大系数与物距变化

Fig. 5 Magnification factor and object distance change in 1g-50g environment

## 2 超重力下PIV系统测速性能标定

### 2.1 PIV系统构成

本文所测试的PIV系统由控制、照明、拍摄3个模块组成。控制模块包括控制器、时间同步器等，在试验时置于离心机旋转中心的下仪器舱内，照明的LED灯组和拍摄图像的CCD相机则与伺服调速标定装置一起置于离心机吊篮内，设备构成如图6所示。传送带的运动方向为离心机旋转平面的切向。



图6 设备构成图

Fig. 6 Equipment composition diagram

### 2.2 PIV测速原理

PIV分析原理（引自WHITE等<sup>[4]</sup>）如图7所示。在PIV分析中，采用高清相机记录拍摄物的变形位移过程，得到观察面上物体变形前后的一系列照片1、2、...、n。拍摄的图像被分为若干个判读区（Patch），判读区是PIV计算的基本单位，其单元内的纹理特征（如颗粒颜色、灰度、亮度等）以矩阵的形式进行存储，默认该矩阵信息在小变形条件下不会改变。

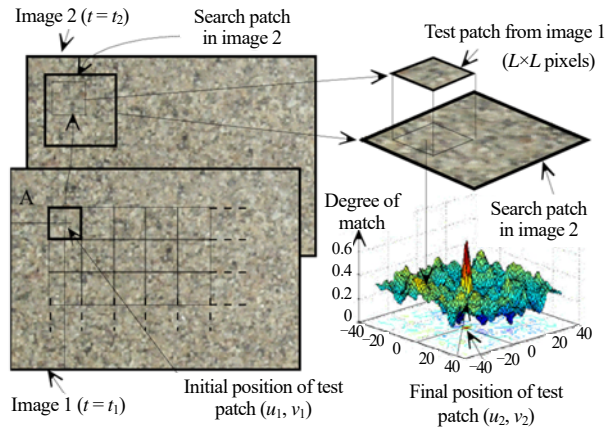


图7 PIV分析原理（引自WHITE等<sup>[4]</sup>）

Fig. 7 Principles of PIV analysis (cited in WHITE et al.<sup>[4]</sup>)

以判读区A为例，首先在1号照片（ $t=t_1$ ）中计算并存储判读区A的初始像素坐标（ $u_1, v_1$ ），然后以判读区A的矩阵信息为基准，在2号照片（ $t=t_2$ ）中初始坐标附近进行该矩阵信息的全场匹配和相关性运算，通过矩阵的自相关函数峰值对其位移矢量进行定位，从而搜索出判读区A在 $t_2$ 时刻的新像素坐标（ $u_2, v_2$ ），对比这两个坐标可得到判读区A的像素位移矢量。对所有判读区进行上述分析计算，可获得观察面上被测物体的像素位移矢量场，再经过与实际坐标的比较，就能将照片上的像素位移转化为实际位移。由位移和相邻图像间的时间间隔便可获得观察面上各判读区的速度矢量分布。

### 2.3 PIV系统测速性能标定测试方案

本文中采用的PIV系统的拍摄模块，即CCD相机有连续与双曝光两种工作模式。连续模式适用于低速场测量，该模式下照明模块常亮而拍摄模块以2~16 fps的帧率工作，对应的两幅图像时间间隔为62.5~500 ms。双曝光模式在拍摄时以两幅图像为一组，这两幅图像拍摄的间隔时间非常短，可在0.5~50 ms范围内调控，适用于高速场测量。

对PIV系统的性能测试考虑连续和双曝光两类工作模式下的测速精度，测速性能测试工况如表1所示。

表 1 PIV 系统测速性能测试工况

g 值	工作模式	标定装置速率/(m/s)
1g	连续拍摄	0.002、0.004、0.006、 0.008、0.010、0.012
	双曝光拍摄	0.020、0.080、0.200、 0.400、0.800、1.600
10g、20g、30g、	连续拍摄	0.002、0.010
40g、50g	双曝光拍摄	0.080、0.800、1.600

试验时, 在传送带表面涂抹 JM-853a 油性胶水与黑色闪粉的混合物(闪粉粒径为 0.1 mm, 胶粉比为 7:3), 形成人工纹理, 便于 PIV 分析。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 系统性能评价方法和指标

以下简要说明对某一工况下 PIV 系统测试结果的处理方法。

图 8 给出了 50g 下 1.6 m/s 工况的典型测速结果。其中, 图 8 (a) 的两幅图为前后相邻的两张图像, 图 8 (b) 为这两张图像经 PIV 软件处理得到的速度场, 箭头的方向指示了判读区的运动方向, 箭头长度代表速度的快慢, 箭头越长, 该位置处的速

度越快。

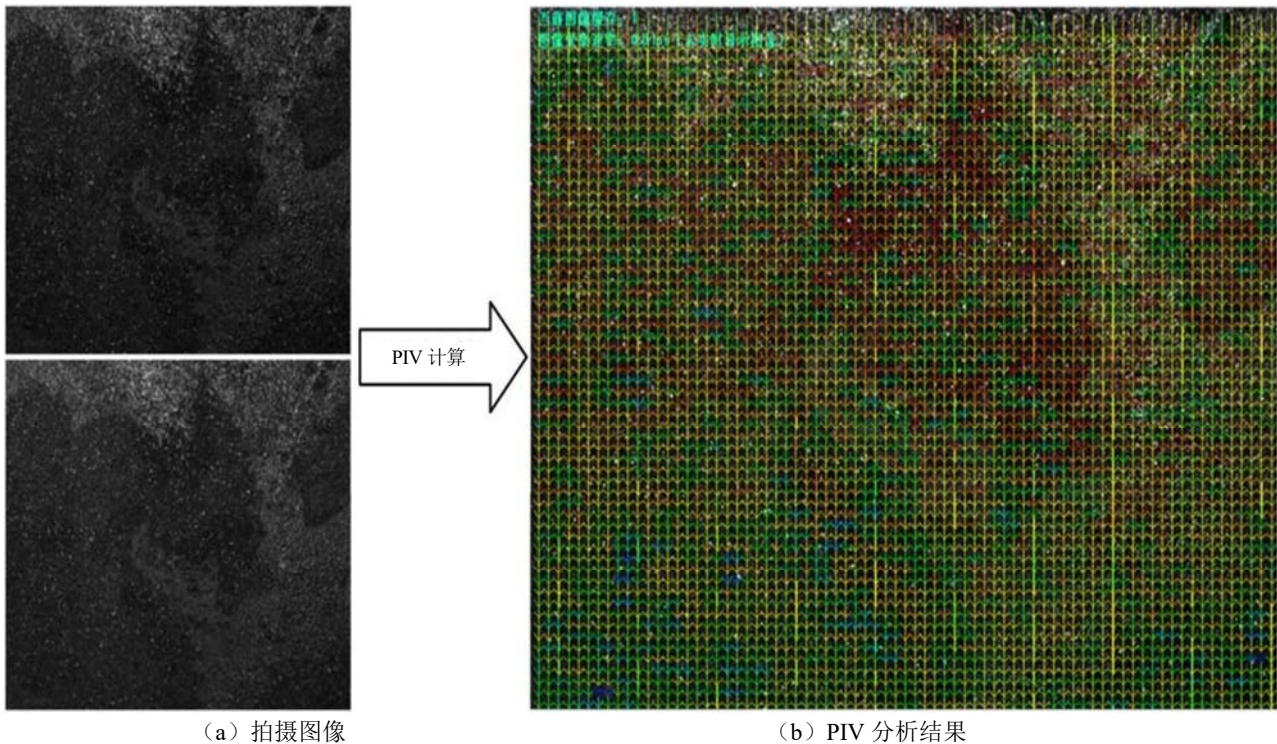
根据设置的判读区大小, 从图 8 (b) 中可以提取到 4 725 个速度矢量。由于伺服调速标定装置难以在超重力环境下改变速度方向, 故仅对速度幅值进行分析。将提取到的速度按大小进行排序, 绘制概率密度分布图, 如图 9 所示。速度大小的分布遵循正态分布模式, 可以采用均值、标准差和变异系数等参数对测试结果进行分析<sup>[26]</sup>。其计算式分别为:

$$v^{N,V,n} = \sum_{m=1}^{4725} v_m^{N,V,n} / 4725 \quad (1)$$

$$\sigma^{N,V,n} = \sqrt{\frac{1}{4725} \sum_{m=1}^{4725} (v_m^{N,V,n} - v^{N,V,n})^2} \quad (2)$$

$$CV^{N,V,n} = \frac{\sigma^{N,V,n}}{v^{N,V,n}} \quad (3)$$

式中: 上标  $N$ 、 $V$ 、 $n$  分别代表测试 g 值 (1g~50g)、基准速度 (0.002~1.600 m/s) 和该工况下的速度场序号 (1~480)。速度场的编号共计 480 个, 由于测试时在每一个工况下均拍摄了 960 幅图片, 在 PIV 分析时, 将相邻两幅图像配对处理、图像不重复利用, 共得到 480 个速度场。下标  $m$  代表其为该速度场中的第  $m$  (1~4 725) 个向量。



(a) 拍摄图像

(b) PIV 分析结果

图 8 PIV 典型测速结果 (50g, 1.6 m/s 工况)

Fig. 8 Typical velocimetry results of PIV (50g, 1.6 m/s condition)



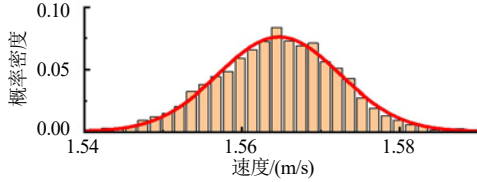


图9  $v_m^{50g,1.6,1}$  概率密度分布

Fig. 9 Probability density distribution of  $v_m^{50g,1.6,1}$

类似的,对同一工况480个速度场的平均速度  $v^{N,V,n}$  再进行概率密度分析,可以发现,  $v^{N,V,n}$  ( $n=1\sim 480$ ) 同样符合正态分布,与图9类似,限于篇幅,不给出图示。

对同一工况下的  $v^{N,V,n}$  ( $n=1\sim 480$ ) 进行均值、标准差和变异系数计算,计算式分别为:

$$v^{N,V} = \sum_{n=1}^{480} v^{N,V,n} / 480 \quad (4)$$

$$\sigma^{N,V} = \sqrt{\frac{1}{480} \sum_{n=1}^{480} (v^{N,V,n} - v^{N,V})^2} \quad (5)$$

$$CV^{N,V} = \frac{\sigma^{N,V}}{v^{N,V}} \quad (6)$$

式中:  $v^{N,V}$ 、 $\sigma^{N,V}$ 、 $CV^{N,V}$  分别表示  $g$  值为  $N$ 、基准速度为  $V$  时所有速度场的速度平均值、标准差和变异系数。

可以用式(6)给出的变异系数  $CV^{N,V}$  表示 PIV 系统在此工况下多个测量值间的一致程度,以此评估系统测试的精度。

此外,定义系统误差  $E^{N,V}$  为测量平均值与真值间的差异,用于评估系统测试的正确度,如式(7)所示:

$$E^{N,V} = (v^{N,V} - |v_{\text{true}}|) / |v_{\text{true}}| \quad (7)$$

式中:  $|v_{\text{true}}|$  为此时标定装置提供的基准速度。

### 3.2 不同拍摄模式和基准速度下的 PIV 系统性能

常重力不同拍摄模式和速度工况下的系统误差  $E^{1g,V}$  变化如图10所示。常重力下  $E^{1g,V}$  均为负值,表明实测的  $v^{1g,V}$  小于标定装置提供的  $|v_{\text{true}}|$ 。当  $|v_{\text{true}}| < 0.1$  m/s 时,系统误差  $E^{1g,V}$  基本不变,约为  $-1.1\%$ ; 当  $|v_{\text{true}}| > 0.1$  m/s 时,系统误差  $E^{1g,V}$  逐渐增大,至试验的极限速度 1.6 m/s 时,系统误差  $E^{1g,V}$  达到  $-3.5\%$ ,与相机拍摄的工作模式关系不大。根据 PIV 计算原理分析,误差的来源仅可能是两帧图像间判读区的计算位移,或是两帧图像间的间隔时间。但

前者随基准速度变化的可能性不大,因此判断系统误差来源于 PIV 系统的时间控制误差。图10中实测的  $v^{1g,V}$  偏小,说明真实的两幅图像间的间隔时间要小于系统的设定值。

图10也给出了常重力不同工况下速度的变异系数  $CV^{1g,V}$  的变化。在连续工作模式下,  $CV^{1g,V}$  基本随  $|v_{\text{true}}|$  的增大而逐渐减小,从  $3.1\%$  逐步降低到  $1.5\%$ ,说明连续拍摄时,间隔时间越短,测试数据的离散程度越低;而双曝光工作模式下,  $CV^{1g,V}$  随  $|v_{\text{true}}|$  的增大在  $1\% \sim 2\%$  之间波动,说明双曝光工作模式下测试的数据点更为集中,系统精度更高。整体而言,系统的变异系数均远小于  $10\%$ ,属弱变异性系统<sup>[26]</sup>。

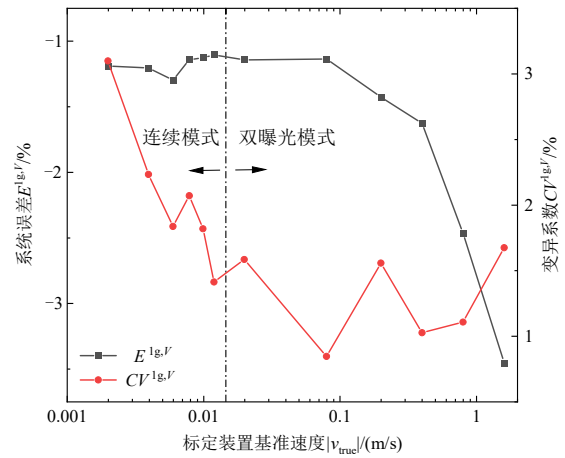


图10 常重力不同工况下  $E^{1g,V}$  和  $CV^{1g,V}$  变化

Fig. 10 Variation of  $E^{1g,V}$  and  $CV^{1g,V}$  for different conditions in normal gravity

### 3.3 像场不同区域 PIV 系统的测速性能

为进一步评估 PIV 系统对像场不同位置的测速精度,将拍摄图像按图11所示划分为5个区域(A—E),A到E依次外推,A为像场中心区域,E为像场最外围区域。分别提取各区域的速度矢量,按3.1节所述方法分区进行数据处理。通过这种分区分析,可以量化由光学畸变或系统性能波动等因素引起的局部测速偏差,为 PIV 系统全域测量的性能评估提供依据。

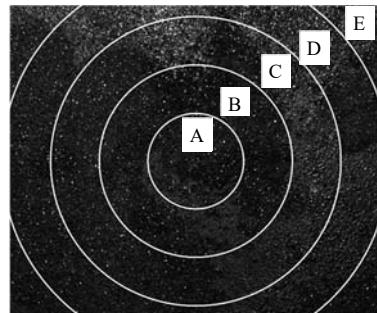


图11 像场分区示意图

Fig. 11 Schematic diagram of field partition

常重力下不同区域的系统误差  $E^{1g,J}$  和变异系数  $CV^{1g,J}$  随基准速度的变化分别如图 12、图 13 所示。

由图 12 可见, 无论是连续还是双曝光工作模式, A 区域系统误差最小, 越向拍摄图像的外围扩展, 系统误差越大; 但同一工况下, A 区域与 E 区域的  $E^{1g,J}$  相差不超过 0.4%。从图 13 来看, 不同工作模式下的  $CV^{1g,J}$  与基准速度相关,

但几乎不随区域变化, 即使在基准速度 1.600 m/s 工况下,  $CV^{1g,J}$  略有随测试区域向外围扩展而增大的趋势, 但其增大幅度也不超过 0.3%。超重力下不同区域的系统误差和变异系数的差异同样较小, 限于篇幅, 不一一给出。这说明 PIV 系统对像场不同区域的测试差异很小, 能很好地实现全域测量。

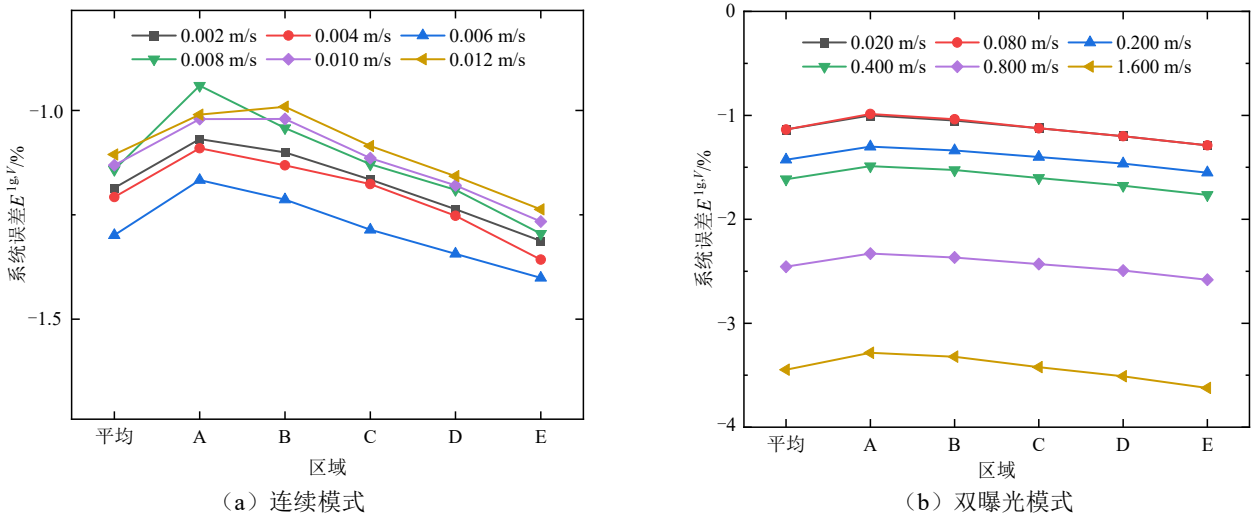


图 12 常重力下不同区域的系统误差随基准速度的变化

Fig. 12 Variation of systematic errors with reference velocity in different regions under normal gravity

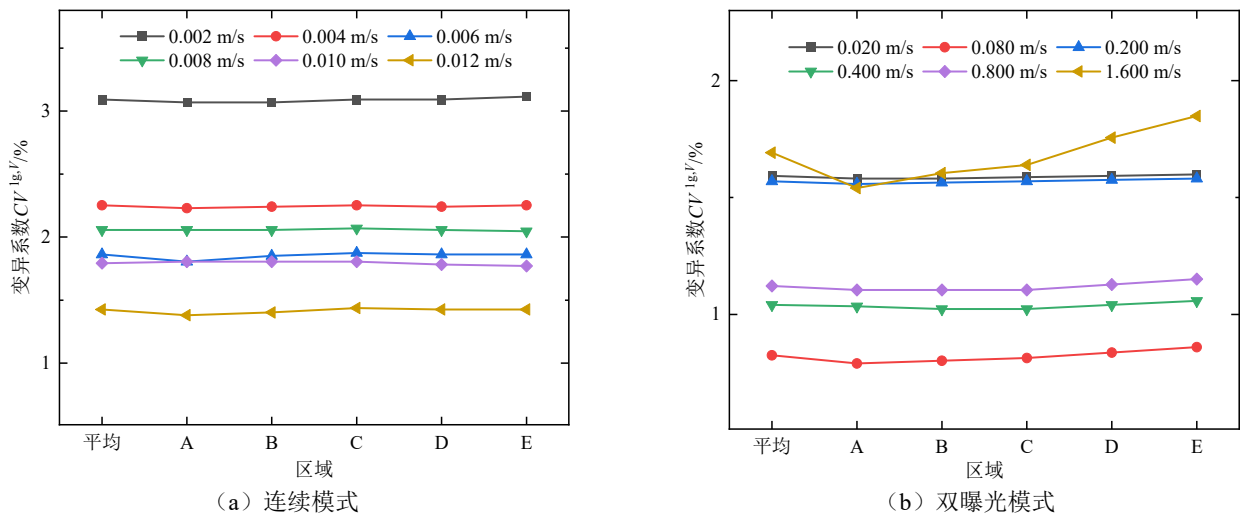


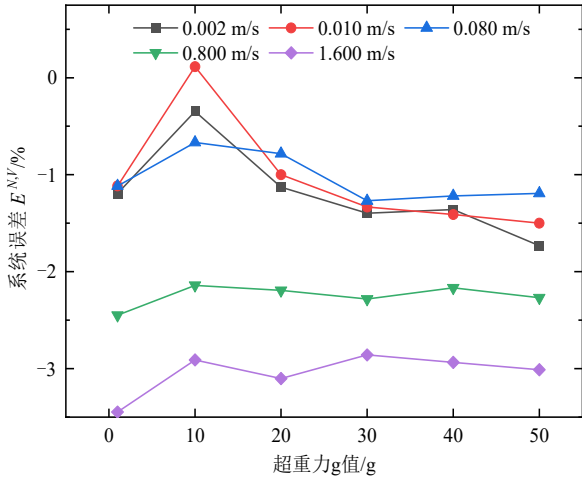
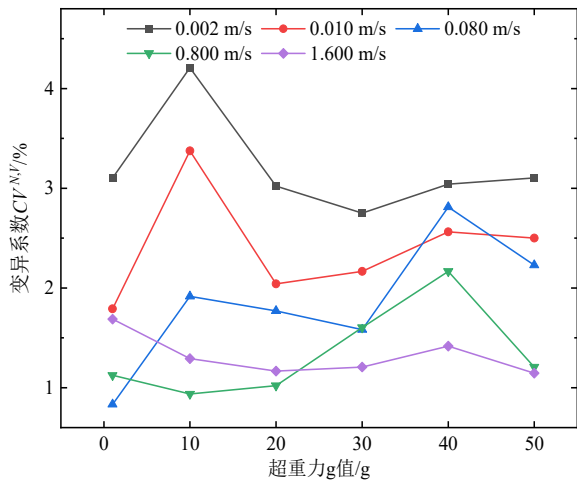
图 13 常重力下不同区域的变异系数随基准速度的变化

Fig. 13 Changes in the coefficient of variation with reference velocity in different regions under normal gravity

### 3.4 超重力对系统性能的影响

不同  $g$  值下系统误差  $E^{N,J}$  变化如图 14 所示。不难发现, 在较小的基准速度下 (0.002 m/s、0.010 m/s、0.080 m/s), 在测试的所有  $g$  值中, 10g 下的  $E^{N,J}$  最小, 其他  $g$  值下,  $E^{N,J}$  与常重力时没有明显区别; 而在较大的基准速度下 (0.800 m/s、1.600 m/s),  $E^{N,J}$  基本稳定。结合图 15 给出的不同  $g$  值下系统的变异系数来看, 10g 时几个较小

的基准速度下  $CV^{N,J}$  反而是最高或次高的。这说明, 此时数据离散程度较高, 对系统误差的影响可能具有随机性。系统测速性能与  $g$  值之间没有发现明显的规律。总体来看, 不同  $g$  值下  $E^{N,J}$  的变动在 1.5% 以内, 同一基准速度、不同  $g$  值下  $CV^{N,J}$  的波动也低于 1.5%。可见,  $g$  值对系统性能的影响有限。PIV 测试系统在超重力下的测速性能是可靠的。

图 14 不同  $g$  值下系统误差  $E^{N,V}$  变化Fig. 14 Variation of systematic error  $E^{N,V}$  for different values of  $g$ 图 15 不同  $g$  值变异系数  $CV^{N,V}$  变化Fig. 15 Changes in the coefficient of variation  $CV^{N,V}$  for different values of  $g$ 

### 3.5 误差修正

基于以上测试和分析,考虑到常重力与超重力下系统测试误差差异不大,误差来源主要是 PIV 系统的时序控制误差导致真实的两幅图像时间间隔偏小。根据常重力测试结果给出如下修正公式:

$$E^{1g,V} = -0.038e^{(-\Delta t/0.93)} - 0.011 \quad (8)$$

$$v_{\text{corr}}^{N,V} = \frac{v^{N,V}}{1 + E^{1g,V}} \quad (9)$$

式中:  $E^{1g,V}$  为根据常重力测试结果拟合的不同基准速度下的系统误差;  $\Delta t$  是名义拍照间隔时间;

$v_{\text{corr}}^{N,V}$  为各工况修正后的平均速度。

将常重力下得到的速度修正公式,即式(8)~(9)应用于超重力工况,对得到的平均速度进行修

正,结果如图 16 所示,修正后的平均速度与基准速度的相关关系  $R^2 > 0.999$ ,该修正公式同样适用于超重力情况。

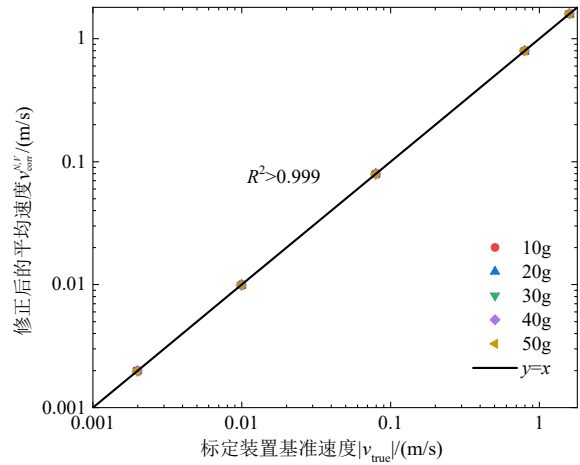


图 16 修正后的平均速度

Fig. 16 Corrected average speed

## 4 结论

利用研发的伺服调速标定装置和浙江大学 ZJU400 离心机,以该装置提供的速度场为基准,在 50g 离心加速度内,对不同基准速度和拍摄模式下 PIV 系统的测速性能进行了评估,测试分析表明:

(1) 研发的伺服调速标定装置在超重力环境下能够提供稳定的速度场,在 50g 内标定装置的变形对物距影响仅约 3 mm,不影响放大系数,为 PIV 系统在超重力条件下的测速性能标定提供了可靠的基准。

(2) PIV 系统的测速误差主要来源于系统自身的时序控制误差,测试的速度值要低于基准值。根据常重力下测试结果提出的速度修正公式,同样适用于超重力工况。

(3) PIV 系统的测试精度与相机的工作模式相关,连续拍摄时,两幅图像间隔时间越短,测试数据的离散程度越低;双曝光工作模式测试的数据点更为集中,系统精度更高。但两种工作模式下,系统的变异系数均远小于 10%,属弱变异性系统。

(4) PIV 系统在像场的不同区域均能保持较小的系统误差和变异系数,能够实现全域测量。

(5) 同一基准速度、不同  $g$  值下的系统误差和变异系数的波动在 1.5% 以内,系统测速性能与  $g$  值之间没有观察到规律性的变化,  $g$  值对系统性能的影响有限。



## 参考文献

- [1] KEANE R D, ADRIAN R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images[J]. *Applied Scientific Research*, 1992, 49: 191-215.
- [2] XU L F, CHEN G, LI J Z, et al. Research progress of particle image velocimetry[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(4): 533-540.
- [3] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1): 261-304.
- [4] WHITE D J, BAREFOOT A J, BOLTON M D. Centrifuge modelling of upheaval buckling in sand[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2001, 1(2): 19-28.
- [5] MURTHY S A N, PADHY B B. Fiber optic displacement sensor[J]. *Journal of Optics*, 2000, 29(4): 179-191.
- [6] ZHANG D, XU Q, BEZUIJEN A, et al. Internal deformation monitoring for centrifuge slope model with embedded FBG arrays[J]. *Landslides*, 2017, 14: 407-417.
- [7] HUANG B, LIU J W, LING D S, et al. Application of particle image velocimetry (PIV) in the study of uplift mechanisms of pipe buried in medium dense sand[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015, 5: 599-614.
- [8] ZHUANG P Z, YUE H Y, SONG X G, et al. Uplift behavior of pipes and strip plate anchors in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(11): 04021126.
- [9] TANAKA T, SANNABE S, NAGAI S, et al. Experimental findings of soil particle movement in 2D seepage failure of soil using Particle Image Velocimetry[C]//8th International Conference on Scour and Erosion. 2016.
- [10] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(2): 121-132.
- [11] BLACK J A. Centrifuge modelling with transparent soil and laser aided imaging[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 631-644.
- [12] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(6): 1133-1140.
- [13] LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(6): 1133-1140.
- [14] HUANG S, HUANG W R, ZHONG G H. PIV-based experiments on density-induced flow in an estuarine navigation channel constricted by a groin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 275: 107994.
- [15] PENG M Z, TIAN Y H, GAUDIN C. Investigations into the uplift of skirted foundations on clay at varying rates[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2024, 150(2): 04023137.
- [16] OKAMOTO K, NISHIO S, SAGA T, et al. Standard images for particle-image velocimetry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 685-691.
- [17] 刘应征, 罗次申, 陈汉平. LDV/PIV全场速度测量的误差分析[J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(10): 1404-1407.
- LIU Yingzheng, LUO Cishen, CHEN Hanping. Error analysis of the whole field velocity measurement results via LDV/PIV[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002, 36(10): 1404-1407.
- [18] 董明哲, 汪洋, 蒋宁涛, 等. PIV系统测量误差的实验评价方法以及实验参数的优化[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(2): 79-83.
- DONG Mingzhe, WANG Yang, JIANG Ningtao, et al. An experimental method for evaluating the PIV measurement error and its application in optimizing PIV experiment parameters[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(2): 79-83.
- [19] 陈云敏, 韩超, 凌道盛, 等. ZJU400离心机研制及其振动台性能评价[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1887-1894.
- CHEN Yunmin, HAN Chao, LING Daosheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(12): 1887-1894.
- [20] 张俊然, 王俪锦, 姜彤, 等. 基于PIV技术的高吸力下压实膨润土径向劈裂试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(3): 691-701.
- ZHANG Junran, WANG Lijin, JIANG Tong, et al.

- Diametric splitting tests on compacted bentonite at different high suctions based on PIV technique[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(3): 691-701.
- [20] 倪钰菲, 乔仲发, 朱泳, 等. 基于粒子图像测速的锚板抗拔破坏机理试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 24-30.  
NI Yufei, QIAO Zhongfa, ZHU Yong, et al. Experimental study on uplift failure of anchor plate based on PIV technology[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 24-30.
- [21] GANJU E, GALVIS-CASTRO A C, JANABI F, et al. Displacements, strains, and shear bands in deep and shallow penetration processes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(11): 04021135.
- [22] NAKATA Y, HYODO M, HUI Q, et al. Shear band development in sandy soil beneath strip footing using PIV[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2009, 1145(1): 157-160.
- [23] 李维波, 马伟明, 胡安, 等. 涡流接近开关结构和电磁参数的影响[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(5): 29-36.  
LI Weibo, MA Weiming, HU An, et al. Influences of structural and electromagnetic parameters of eddy current proximity switch[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(5): 29-36.
- [24] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(8): 1564-1568.  
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(8): 1564-1568.
- [25] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1798-1803.  
JIA Guanwei, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1798-1803.
- [26] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
MAO Shisong, CHENG Yiming, PU Xiaolong. *Course of Probability Theory and Mathematical Statistics*[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2011.