

# 基于 CCD 图像处理技术实现的表面应变实时测量系统

祝连春, 蔡家骥, 谭福颖

(东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 基于 CCD 图像处理技术实现的表面应变实时测量系统, 由 CCD 数字摄像机完成对测量试件变形的动态采集, 并利用视频采集卡及相关软件实现对图像信号的处理, 最后实现对实验构件应变的实时测量, 并注重于提高计算时间和计算精度, 减少外界环境对实验结果的影响。

**关键词:** CCD; 图像分析; 非接触测试; 应变; 精度

中图分类号: O436

文献标识码: B

doi: 10.3969/j.issn.1674-3407.2010.01.012

## Surface Strain Real-time Measurement System Based on CCD Image Processing Technology

Zhu Lianchun, Cai Jiayi, Tan Fuying

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract:** The surface strain real-time measurement system based on CCD image processing technology uses CCD to capture the deformations of test piece, and uses video capture card and other related software to process the image signals, and then, the real-time measurement of the test piece strain comes true. This system attaches importance to raise the count time and count accuracy, and can reduce the influence of environment on the experimental result.

**Keywords:** CCD; image analysis; non contact measurement; strain; accuracy

### 1 引言

2009 年分享诺贝尔物理学奖金一半的是发明了 CCD (Charge coupled Device 电荷耦合元件) 影像传感器技术的 Willard Sterling Boyle (博伊尔) 和 George E. Smith (史密斯)。随着 CCD 技术的迅猛发展, 在工程实践中基于 CCD 图像处理技术已经广泛应用, 其在力学应变测量分析中具有重要的地位。本文拟应用 CCD 图像处理技术并结合数理、编程软件得到具有较高精度的算法, 编写相关的程序来实现结构表面应变的实时测量。CCD 图像处理技术利用光学成像原理测定光标运动并实时显示, 解决了用电测法对被测物体长期测量过程中的时间温度漂移问题。另外, 光学测量具有重复性好、滞后小的优点, 所以测量精度比较高, 改变 CCD 镜头放大倍

数, 既可以近距离观测又可以远距离观测。应变片虽是常规测试方法中最常用的测力学量传感元件, 但需把把应变片牢固的粘贴在测试体表面, 而有许多研究对象表面并不能贴片, 所以很有必要研究基于数字摄像机 (CCD) 图像处理技术实现的表面应变实时的非接触测试技术。

### 2 实验方法原理

#### 2.1 实验装置

CCD 是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型的固体成像器件, CCD 芯片借助必要的光学系统和合适的外围驱动与处理电路, 可以将景物图像通过输入面空域上逐点的光电信号转换、存储和传输, 在其输出端产生一时序视频信号, 并经末端监视器同步显示出人眼可见的图像。随着 CCD 技术的迅猛发

[收稿日期] 2009-12-03

[作者简介] 祝连春 (1989-), 男, 江苏扬州人, 本科生, 主要研究方向为 CCD 信号与信息处理。

[基金项目] 东南大学自然科学基金预研项目资助, 项目编号: XJ2008310; 东南大学优秀青年教师教学科研资助计划。

展,针对 CCD 信号的采集以及采集之后的信号如何与微控制器进行通信,成为 CCD 应用的一个重要问题,而能够针对 CCD 每一个像素进行高速采集并实时地传输给微控制器处理,将会大大地提高采集到的 CCD 信号的精度并解决实时处理的问题。

实验除了使用到数字摄像机 CCD 以外,为了能够将其运用到实际测量之中,实现更为方便更为精准的测量,还应与模型相结合,初步拟定制作了两套实验装置,分别配合双缝标记与单缝标记实验:双缝实验仪器,对应于橡胶等质软不易粘贴应变片的材料,对其进行非接触表面应变的测量。

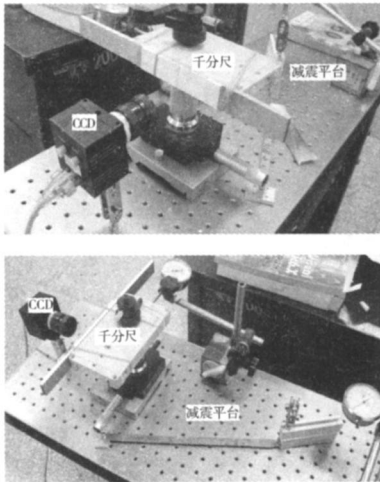


图 1 工程结构表面应变实时测量系统标定装置

工程结构表面应变实时测量系统标定装置(见图 1)由减震平台、CCD、千分尺及电脑组成。具体到标定时,旋转千分尺,移动单位长度,然后由 CCD 采集单缝标记移动的距离,经过软件处理(软件界面见图 2)得到单缝标记移动的距离,并与标准值比较。

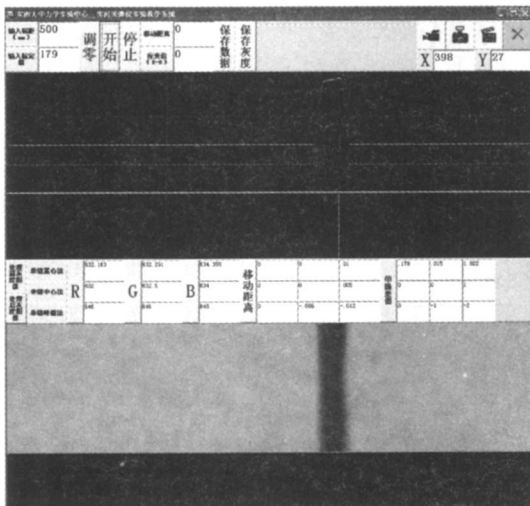


图 2 软件界面

## 2 2 理论分析

实验过程中利用 picture 的 point 属性获取每一点的灰度,并绘制图像灰度值随坐标的变化曲线,结果发现得到的灰度曲线不太理想,因外界光强的变化而引起的变化比较敏感,故需对得到的灰度进行处理,滤掉下面比较粗糙的部分,使曲线变平滑,并避免光强变化对实验结果产生过大的影响。查阅各种资料以及进行深入的思考,确定实现应变的实时测量有三种方法,即重心法、中心法、峰值法。

重心法利用图形重心的算法获取灰度曲线的重心,从而利用重心实现对这条直线的实时追踪,通过这条直线的坐标变化反应构件的变形,然后经过数据处理得到这条直线的实际位移及应变。中心法通过滤波条件,检测到这条直线的两条边缘,然后以该直线两边缘的中心实现对该直线的实时追踪,当中涉及到对比度的问题,需要对图像的对比度进行调节,使边缘更加明显、更加突出。峰值法利用冒泡排序法获取灰度的最小值,然后依靠该极值对该直线实现实时的追踪。

## 3 实验结果及分析

通过预实验得到相同位移量在不同光强下的数据,以及在相同光强下不同位移量的数据(见表 1),初步认定光强、CCD 的节圈数目(即放大倍数)等因素对系统的精度有着较大的影响。为了对系统做出精确的评定,现测得在外加光源及 4 个节圈下系统多次正反行程的数据,并分析其静态特性,主要指标有:线性度、灵敏度、迟滞性、重复性、分辨力等。

### 3 1 线性度

线性度又称非线性,是表征传感器输入-输出的实际标定曲线与理论直线(或拟合直线)的不一致性。通常以满量程(FS)的相对误差来表示,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta L_{\max}$  是在满量程的范围内,实测曲线与理论直线间的最大偏差;  $Y_{FS}$  为理论满量程输出。

当进行多次校准循环时,以最差的线性为准。通常直线拟合法有理论直线法、端点直线法、最佳直线法、最小二乘法直线法。因为  $x, y$  为一组离散数据,故采用最小二乘法拟合(线性回归分析),此时拟合的直线其非线性误差最小。

通过对比分析可知,重心法、中心法的线性度都较好,线性度为 0.59%,而峰值法的线性度相对来说较差,线性度为 0.9%,并且变化幅度较大(见表

2), 故选取重心法、中心法作为参照较为精确、稳定。

表 1 满量程测试数据

移动距离 (mm)	重心法 R 的灰度值	重心法 G 的灰度值	重心法 B 的灰度值	中心法 R 的灰度值	中心法 G 的灰度值	中心法 B 的灰度值	峰值法 R 的灰度值	峰值法 G 的灰度值	峰值法 B 的灰度值
0.000	55.329	56.730	58.048	54.000	56.000	58.000	56.000	63.000	61.000
0.500	225.505	226.849	228.140	226.000	226.000	227.000	226.000	229.000	233.000
1.000	387.981	389.102	390.214	388.000	389.000	389.000	394.000	393.000	393.000
1.500	553.784	554.767	555.603	554.000	555.000	555.000	554.000	557.000	553.000
2.000	713.081	714.116	714.589	713.000	715.000	715.000	708.000	713.000	717.000
2.500	881.483	882.287	882.501	881.000	883.000	883.000	882.000	881.000	881.000
2.500	881.595	882.285	882.517	881.000	883.000	883.000	884.000	883.000	883.000
2.000	711.521	712.324	712.932	712.000	713.000	713.000	714.000	713.000	713.000
1.500	551.517	552.491	553.226	552.000	553.000	553.000	550.000	550.000	557.000
1.000	382.353	383.427	384.447	382.000	383.000	384.000	384.000	388.000	389.000
0.500	219.766	221.074	222.225	220.000	220.500	221.000	220.000	224.000	225.000
0.000	51.356	52.748	54.087	51.000	53.000	54.000	54.000	55.000	59.000

表 2 不同应变测量方法的线性度

组次	重心法 R	重心法 G	重心法 B	中心法 R	中心法 G	中心法 B	峰值法 R	峰值法 G	峰值法 B
$Y_L$	0.587%	0.594%	0.605%	0.663%	0.590%	0.578%	0.903%	0.691%	0.900%

3.2 灵敏度

灵敏度即被测量的单位变化引起的输出变化量。

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

当输入/输出完全呈线性关系时, S 为常数; 当

输入/输出呈曲线关系时, S 为变数。灵敏系数大, 表示传感器对被测量的敏感程度高(灵敏度好)。

通过对灵敏度的对比分析可知, 除峰值法 B 外, 其余各种方法的灵敏度都差不多(见表 3), 故可以排除峰值法 B, 因其线性度和灵敏度都较差。

表 3 不同应变测量方法的灵敏度

组次	重心法 R	重心法 G	重心法 B	中心法 R	中心法 G	中心法 B	峰值法 R	峰值法 G	峰值法 B
S	330.663	330.393	329.920	330.810	330.740	330.267	329.063	328.163	327.390

3.3 迟滞性

迟滞性即传感器在正反行程之间, 输入/输出曲线的重合程度。

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta H_{max}$  是最大迟滞误差。

产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存

在不可避免的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材质的内摩擦、积层等。

通过对迟滞性的对比分析可知, 重心法、中心法的迟滞性比较不错, 而峰值法的迟滞性较差(见表 4), 究其原因是峰值法只是用到灰度值最大的一个点, 故受环境影响比较大, 而重心法和中心法都用到了不止一个点, 故较为精确。

表 4 不同应变测量方法的迟滞性

组次	重心法 R	重心法 G	重心法 B	中心法 R	中心法 G	中心法 B	峰值法 R	峰值法 G	峰值法 B
$Y_H$	1.018%	0.993%	0.993%	0.908%	0.907%	1.019%	1.131%	1.133%	1.362%

3.4 重复性

重复性即当传感器的输入按同一方向连续多次变动时所得的特性曲线不一致的程度, 通常算法为:

$$\gamma_R = \frac{\Delta R}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中,  $\Delta R$  为同一输入量对应多次循环的同向

行程输出量的分散程度。可以根据实验标准偏差来计算  $\Delta R$ :

$$\Delta R = KS/\sqrt{n}$$

式中,  $S$  为子样实验标准差;  $K$  为置信因子。

$K = 2$  时, 置信度为 95%;  $K = 3$  时, 置信度为

99.73%。

按贝塞尔公式计算子样的实验标准差  $S$

$$S_{jD} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiD} - \bar{y}_{jD})^2}$$

$$S_{jI} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiI} - \bar{y}_{jI})^2}$$

式中,  $S_{jD}$ 、 $S_{jI}$  为正、反行程各标定点的分散性, 用单次测量标准差表征;  $\bar{y}_{jD}$ 、 $\bar{y}_{jI}$  为正、反行程各标定值的算术平均值;  $j$  为标定序号,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $i$  为标定的循环次数,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $y_{jiD}$  为正、反行程各标定点的输出值。

再取  $S_{jD}$ 、 $S_{jI}$  的均方根为子样的标准差  $S$  为:

$$S = \sqrt{\left[ \sum_{j=1}^m S_{jI}^2 + \sum_{j=1}^m S_{jD}^2 \right] \frac{1}{2m}}$$

由表 5 可知, 重心法、中心法的重复性比较好, 达 0.85%; 峰值法的重复性较差, 为 1.03%。

表 5 不同应变测量方法的重复性

重心法 R	重心法 G	重心法 B	中心法 R	中心法 G	中心法 B	峰值法 R	峰值法 G	峰值法 B
0.861%	0.864%	0.855%	0.809%	0.764%	0.887%	1.030%	0.882%	1.048%

### 3.5 精确度

精确度的简化表示: 作为一项技术指标来表征该产品的准确程度。通常精确度  $A$  由线性度  $y_L$ 、迟滞性  $y_H$ 、重复性  $y_R$  之平方和根得出:

$$A = \sqrt{y_L^2 + y_H^2 + y_R^2}$$

由表 6 可知, 重心法、中心法的重复性比较好, 达 1.4%; 峰值法较差, 为 1.9%。

表 6 不同应变测量方法的精确度

重心法 R	重心法 G	重心法 B	中心法 R	中心法 G	中心法 B	峰值法 R	峰值法 G	峰值法 B
1.457%	1.444%	1.443%	1.385%	1.325%	1.469%	1.776%	1.593%	1.940%

### 3.6 分辨力

分辨力即传感器在规定范围内所能检测出被测量输入量的最小变化量。有时对该值用满量程输入

值的百分数表示, 则称为分辨率。每移动 0.01mm 测得的灰度值见表 7。

表 7 每移动 0.01mm 测得的灰度值

移动距离 (mm)	重心法 R 的灰度值	重心法 G 的灰度值	重心法 B 的灰度值	中心法 R 的灰度值	中心法 G 的灰度值	中心法 B 的灰度值	峰值法 R 的灰度值	峰值法 G 的灰度值	峰值法 B 的灰度值
0.00	430.302	431.375	432.518	430.000	431.000	432.000	430.000	433.000	435.000
0.01	434.042	435.184	436.241	434.000	435.000	436.000	436.000	435.000	437.000
0.02	436.826	438.217	439.107	437.000	438.000	439.000	440.000	439.000	437.000
0.03	440.316	441.558	442.507	440.000	441.000	442.000	438.000	444.000	443.000
0.04	442.681	443.821	444.740	443.000	443.500	445.000	444.000	448.000	445.000
0.05	446.241	447.361	448.373	446.000	447.000	449.000	446.000	448.000	453.000
0.06	449.755	450.884	451.932	450.000	451.000	452.000	450.000	454.000	455.000
0.07	452.743	454.028	454.866	453.000	454.000	455.000	454.000	454.000	459.000
0.08	457.332	458.437	459.497	457.000	459.000	459.000	458.000	460.000	459.000
0.09	460.040	461.406	462.264	461.000	461.000	463.000	458.000	463.000	465.000
0.10	463.104	464.268	465.212	463.000	465.000	465.000	464.000	464.000	467.000

由表 7 可知, 重心法、中心法每 1mm 输出 330 个像素或平均一个像素代表 0.003mm, 故该系统可达到 0.001mm 的精度。若取 1m 的标距可以较为

精确测得 1 个微应变。图 3 给出了实时应变测量系统各种测量方法的标定参数。

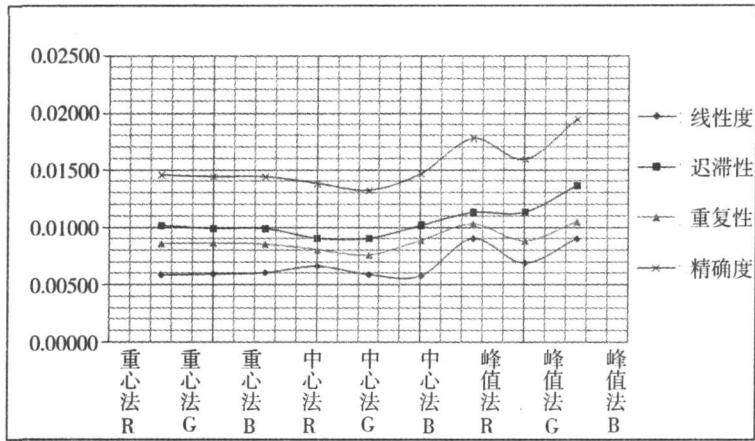


图3 实时应变测量系统标定参数

## 4 应用实例

为了测试系统,对一混凝土构件施加预应力过

程进行测试,测得该混凝土在施加预应力过程中平均每米缩短了0.396mm,而由于是不连续加载,故曲线随时间没有固定的关系(见图4)。

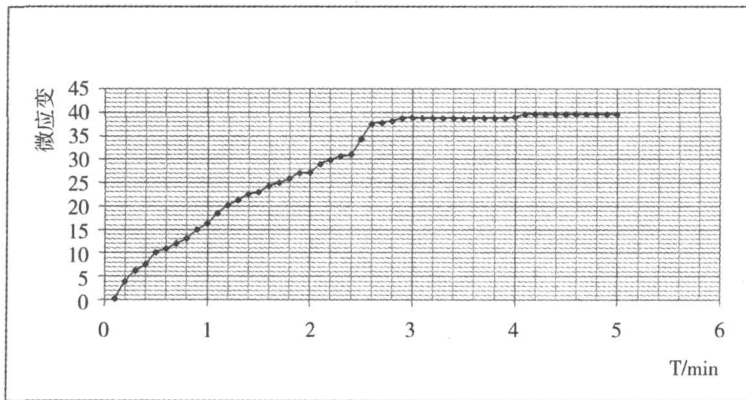


图4 某混凝土梁预应力张拉过程中应变-时间曲线

## 5 结束语

通过上述初步的分析,可以舍弃峰值法,故下面对重心法、中心法进行更深入的分析。

重心法的精确度分别为 1.457%、1.444%、1.443%,表明重心法具有较高的精确度和稳定性,而中心法的精确度分别为 1.385%、1.325%、1.469%,此法也具有较高的精度,单相对重心法来说稳定性稍有些欠缺。重心法的重复性分别为 0.861%、0.864%、0.855%,中心法的重复性为 0.809%、0.764%、0.887%,两者都有着较高的重复性。重心法的线性度分别为 0.587%、0.594%、0.605%,中心法的线性度 0.663%、0.590%、0.578%,从稳定性角度来说,重心法更稳定。重心法、中心法每 1mm 输出 330 个像素或平均一个像素

代表 0.003mm,故该系统可达到 0.001mm 的精度,若取 1m 的标距,可以较为精确测得 1 个微应变。

实验前进行分析,重心法运用到了图像上所有的灰度值,其受到的影响应该最低,偏差最小,中心法与峰值法误差较大,中心法只用到了 2 个点,而峰值法只用到了 1 个点,偏差较大,而最终试验结果也验证了这一观点,即:重心法最为准确。

试验中,还通过了强光照射,日常光照与弱光照射的方法进行多次测量。最后通过实验数据得出,重心法最为稳定,数值波动不大;中心法也比较稳定,偏差略高于重心法;而峰值法受影响最大,在很多情况下,实验数据不能被采用。

本实验装置最终能够实现对单缝标记的实时追踪,实现应变的实时测量,并能够测量一些微小变化,如:测定机械振动的阻尼系数并绘出衰减振动的运动图像。总之,对于微小位移变化的测量方面具有很高

的精度,可应用到土木工程很多方面以及水力学上。

## 参考文献

[1] 刘炳文. Visual Basic 程序设计简明教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

- [2] 黎燕,赵望达,甘方成. 基于 VC++ 6.0 的火灾实验构件图像处理系统[J]. 基础自动化, 2002.
- [3] 孙骏,黄跃平. 基于面阵 CCD 与 CPLD 实现的图像采集系统[J]. 现代电子技术, 2004.
- [4] 孙骏,黄跃平. 基于面阵 CCD 与 CPLD 实现的位移实时监测系统的研究[J]. 光电子技术与信息, 2005.

(上接第 17 页)

$$u(\delta) = \sqrt{u(\delta_1)^2 + u(\delta_2)^2}$$

$$= \sqrt{0.02^2 + 0.00017^2} = 0.02$$

### 4.2.4 温度 $t_1$ 引入的不确定度

热电偶温度测量扩展不确定度为  $U = 1^\circ\text{C}$ , 按均匀分布处理

$$u(t_1) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577^\circ\text{C}$$

### 4.2.5 温度 $t_2$ 引入的不确定度

同 4.2.4,  $u(t_2) = 0.577^\circ\text{C}$

## 4.3 合成不确定度

$$u_c^2(a) = \sum_{i=0}^5 c_i^2 u_i^2 = 0.000211^2 + 0.27369^2 \times 0.005^2 + 0.00560^2 \times 0.021^2 + 0.01068^2 \times 0.02^2 + (-0.00079)^2 \times 0.577^2 + 0.00079^2 \times 0.577^2$$

$$= 4.46 \times 10^{-8} + 1.87 \times 10^{-6} + 1.38 \times 10^{-8} + 4.56 \times 10^{-8} + 2.08 \times 10^{-7} + 2.08 \times 10^{-7} = 2.39228 \times 10^{-6}$$

$$u_c(a) = 0.00155$$

## 4.4 扩展不确定度

取置信概率为 95% 时, 包含因子  $K_c = 2$

$$U_{95} = K_c \cdot u_c = 2 \times 0.00155 = 0.003$$

(上接第 29 页)

表 1 中的承载力  $R$  为附加质量法测试承载力,  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_{21}$  号的试验点又做了静载荷试验, 由表 1 中“动-静”对比结果来看, 附加质量法的测试精度相对静载荷试验能达到 90% 以上。

## 4 结 语

附加质量法是建立在单自由度线性振动体系模拟之上的一种方法, 故实体与模型是否有较好的等效性是决定该方法能否应用的关键。凡是实测地基系统与该方法的理论模型足够相似或等效, 采用该方法就能获得良好的效果, 故该方法适用于弹性较好, 满足单自由度体系的天然地基、各种复合地基及单桩承载力的测定; 对于橡皮土、板结层、横向弹性

## 5 结 论

由上述分析可以看出, 轻质高铝砖导热系数的不确定度主要是由中心量热器水温升高引入的标准不确定度确定的, 其次取决于试样冷面和热面温度引入的标准不确定度、试样厚度引入的标准不确定度、重复测量引入的不确定度和中心水流量引入的标准不确定度。分析表明, 当试样达到热稳定状态时, 导热系数的偏差主要取决于水流量的稳定, 水流量不稳定, 引起中心量热器水温升高不稳定, 致使测量偏差增大。

## 参考文献

- [1] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M].
- [2] YB/T4130-2005 耐火材料 导热系数试验方法(水流量平板法)[S].
- [3] JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 中国计量科学研究院.

不对称等类地基, 效果不太理想。这种方法具有广泛的适用性、足够的可靠性、设备简单、测试速度快等优点, 但是该方法毕竟是一种间接方法, 是通过测定动参数去测定承载力的, 不能测出相应某一承载力的地基静变形, 因此它不能代替静载荷试验, 而恰恰相反, 它还必须借助于静载荷试验, 去建立动静关系, 才可提供较为准确的承载力值。

## 参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [2] 李丕武, 郭玉松. 堆石体密度测定的动力学参数法研究报告[R]. 2008.
- [3] 李丕武, 郭玉松. 堆石体密度测定的附加质量法[J]. 地球物理学报, 1999.