

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.010

砂土介质中多类型土压力盒标定试验

任连伟¹, 肖 扬¹, 顾红伟²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对厂家给出的土压力盒标定系数 K 值与实际岩土工程中土压力盒 K 值之间存在误差的问题, 进行了多类型土压力盒标定试验, 并结合各类型土压力盒工作原理分析其在相同埋设环境下的差异及其产生原因。选取3类具有代表性的土压力盒(振弦式单膜土压力盒、振弦式双膜土压力盒、电阻应变式土压力盒), 采用砂标法对其进行标定试验, 将试验所得 K 值和厂家给定的 K 值做对比分析, 并依据试验结果提出线性拟合公式, 给出砂土介质中各类土压力盒的标定系数。结果表明: 振弦式土压力盒砂标 K 值小于厂家提供 K 值, 差值在50%左右; 电阻应变式土压力盒砂标 K 值大于厂家提供 K 值, 差值在3倍左右。

关键词: 土压力盒标定系数; 砂标试验; 线性拟合; K 值对比分析

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)02-0155-05

Experimental study on calibration tests of earth pressure cells in sand soil

REN Lianwei¹, XIAO Yang¹, GU Hongwei²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Compared with the calibration coefficient K of earth pressure cells in practical application in civil engineering, K values provided by manufacturers have certain errors. To solve this problem, calibration tests were performed on different kinds of earth pressure cells, and differences between K values of different kinds of earth pressure cells obtained from calibration tests under the same embedded conditions, as well as the reasons, were analyzed based on their operating principles. Three kinds of typical earth pressure cells (single-film vibrating wire, double-film vibrating wire, and resistance strain gauge earth pressure cells) were selected for calibration tests in sand soil. The test results were compared with the values provided by manufacturers, and a linearly fitting formula based on test results was used to calculate the calibration parameter of different kinds of earth pressure cells in sand soil. Test results show that the K values are 50% smaller than those provided by manufactures for vibrating wire earth pressure cells, however the K values are four times those provided by manufactures for resistance strain gauge earth pressure cells.

Key words: calibration parameter of earth pressure cell; calibration test in sand soil; linear fitting; comparative analysis of K values

土压力盒被广泛应用于土压力的测量,但是由于厂家给定的标定系数 K 值采用气压标定或油压标定或水压标定,与实际工程中测试环境有很大差异^[1]。为模拟土压力盒在实际工程应用时的工作状态,需要通过砂标试验对厂家给定参数进行修正,从而提高土压力盒的测试精度。

针对土压力传感器测量误差产生的原因,国内外学者进行了许多理论和试验研究。曾辉等^[2]从解析理论研究出发,研究分析压力传感器匹配误差,提出匹配误差定量计算公式;汪恩清等^[3]根据相关理论给出了土应力传感器动态匹配误差公式及其设计判据,并通过现场试验验证了其合理性。Wachman 等^[4]分析了传

收稿日期: 2015-03-26

基金项目: 河南省教育厅科技攻关项目(14A560015); 河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF140143)

作者简介: 任连伟(1980—),男,河南周口人,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: renhpu@163.com

传感器厚径比及其与土介质的模量比对匹配误差的影响。刘先珊等^[5]基于细观分析方法研究了砂土的力链结构及其演变规律,对压力盒标定和获得更准确的土压力值具有重要的实践价值。张立祥等^[6]基于正交设计对传感器与土介质的相互作用特性进行有限元计算,并通过标定试验验证了计算结果的合理性。Joseph^[7]介绍了土压力盒实验室的标定方法。土压力盒的标定和修正对实际测量中获得准确数据具有重要意义。张立祥^[8]通过将传感器置于与使用环境相近的土介质中进行标定,并采用非线性修正明显提高了硬土介质中土压力量测的准确性。韦四江等^[9]研究了微型土压力盒在不同介质中的工作特性。Kinya等^[10]分析了5种土介质粒径对4种类型传感器标定结果的影响。魏永权等^[11]为掌握离心力场环境下微型土压力传感器与土介质相互作用引起的匹配误差特性,进行了液体标定试验和离心力场中土介质标定试验。部分国内外学者通过研制新型压力传感器提高土压力测量的灵敏度和稳定性。陈富云等^[12]研制了一种双膜式光纤 Bragg 光栅土压力传感器,偏压试验表明,此土压力传感器可有效改善与土压力传感器接触部分土压力分布不均的问题。蒋善超等^[13]结合不锈钢膜片的特性,研制出一种精度高、体积小的微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器。崔笃信等^[14]研制出一种基于 AT 切石英晶体谐振器力-频线性关系原理研制的土层压力传感器,实现高精度数据采集。Zhu 等^[15]介绍了一种微型土压力盒在实验室的应用。

目前国内工程和试验中通常采用振弦式和电阻应变式2类土压力盒,其结构形式分为双膜或单膜。不同类型的土压力盒在实际测量过程中误差产生的因素各异。本文选取3类具有代表性的土压力盒(振弦单膜式、振弦双膜式、电阻应变式),采用砂标法对其进行标定试验,通过标定曲线线性拟合求出 K 值。将砂标所得 K 值与厂家给定的 K 值进行对比分析,提出标定系数不同的原因及应注意的事项,为土压力盒的准确应用提供参考。

1 试验准备

1.1 试验装置

试验装置主体由筒体装置、加载系统、数据读取装置和待测定土压力盒等4部分组成。筒体装置为内径380 mm、高300 mm的钢壁圆桶,加载系统由配重块和千斤顶通过面积为 0.1086 m^2 (直径为372 mm)的圆形加载板垂直传递荷载。根据土压力盒的不同量程,分为自动加载系统和手动加载系统2类加载方式。

手动加载每级可加载1 kN,自动加载每级可加载10 kN,根据土压力盒量程选择使用。自动加载系统按设定程序自动加载和维荷,维荷过程中由于砂土压缩沉降等原因容易造成荷载减小的现象,自动加载系统会按照设定补偿下限自动补偿荷载;手动加载系统则需要及时手动维荷。土压力盒分为振弦式单膜土压力盒、振弦式双膜土压力盒和电阻式土压力盒3类。数据读取系统主要采用608A度数仪读取振弦式土压力盒频率值,用静态应变测试仪测读电阻式土压力盒应变值。试验装置如图1所示。

1.2 试验方案

试验共设计3组,每组有3个土压力盒,具体为:第1组试验为振弦式单膜土压力盒,量程为6 MPa,编号为ZD-1、ZD-2、ZD-3;第2组试验为振弦式双膜土压力盒,量程为4 MPa,编号为ZS-1、ZS-2、ZS-3;第3组试验为应变式土压力盒,量程为0.1 MPa,编号为Y-1、Y-2、Y-3。

1.3 试验步骤

a. 装样:在筒体内壁涂抹润滑脂,减小由于砂土和筒壁间摩擦力引起的荷载损失。在筒体底部铺设15 cm厚的标准砂,传感器和周围砂土介质之间由于刚度不匹配易产生应力集中问题,为减小这种问题引起的测量误差^[2],将底部标准砂充分夯实。在钢桶中心放置土压力盒并保证压力盒底部水平,避免土压力盒倾斜影响试验结果,然后掩埋土压力盒,填满标准砂,充分夯实。砂土基本物理力学参数:密度 $\rho = 1.45\text{ g/cm}^3$,内摩擦角 $\varphi = 35.9^\circ$,不均匀系数 $C_u = 1.22$,曲率系数 $C_c = 0.97$ 。

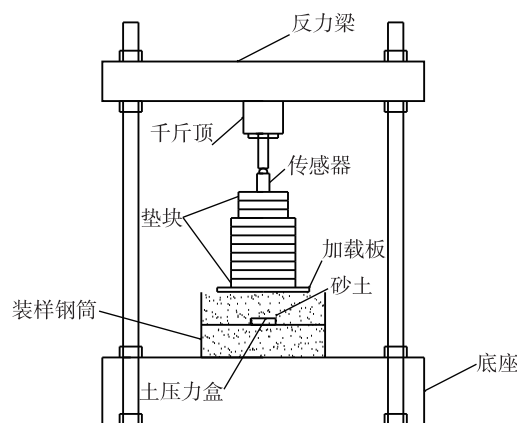


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing equipment

b. 加载:用加载系统通过加载板施加预压力,预压 5 min 后卸载。调试数据采集设备、读取初值后开始分级加载。振弦式单膜土压力盒和振弦式双膜土压力盒采用自动加载系统,每级加载 20 kN;电阻应变式土压力盒采用手动加载方式,每级加载 1 kN,每级加载后维持到读数稳定为止。累积加载到额定值后根据加载顺序逐级卸载至零点进行下一组试验。试验加载系统可根据不同土压力盒量程分别设定每级加载值和维荷时间,能准确控制加载进程并准确读取当前加载值。

c. 数据采集方面,振弦式双膜土压力盒和振弦式单膜土压力盒标定过程中可统一采用 608A 读数仪读取每级荷载下的频率值,在测量过程中可观测到频率值随荷载增加呈递增趋势。电阻式土压力盒标定过程中采用静态应变测试仪采集应变值,在加载过程中应变值逐渐增加。加载过程中每级荷载下应变值稳定后再读取当前荷载下的应变值。

2 试验结果分析

2.1 砂标 K 值线性分析

振弦式土压力盒频率随荷载增加的变化曲线如图 2(a)(b)所示,其中 f_i 为 i 级荷载状态时的频率值, f_0 为零荷载状态时的频率值;电阻式土压力盒应变随荷载增加的变化曲线如图 2(c)所示。由图 2 可知,砂标测得 K 值和厂家提供的 K 值存在较大差异。由表 1 可知,砂标试验采用最小二乘法线性拟合的相关系数 R^2 均大于 0.99,说明在测试过程中振弦式土压力盒的频率变化和电阻应变式土压力盒的应变均与施加荷载间存在较好的线性关系。砂标试验 3 种类型的土压力盒都呈现出较好的线性关系,证明了在量程范围内本次试验的可靠性、正确性。

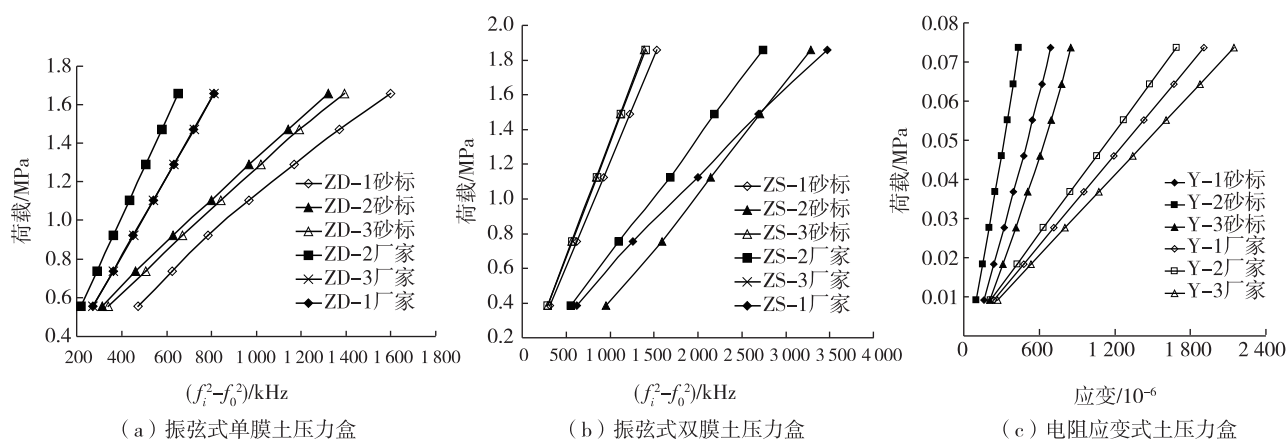


图 2 土压力盒砂标线

Fig. 2 Calibration curves for different kinds of earth pressure cells in sand soil

2.2 砂标 K 值和厂家 K 值对比及线性拟合

因为砂标存在介质刚度匹配问题,从而造成土压力盒产生应力集中和应力重分布,产生拱效应^[2]。而厂家提供 K 值为气标或水标或油标,土压力盒受力更加均匀。另外温度、边界摩擦等因素的影响造成砂标 K 值和厂家 K 值存在一定差异。通过砂标试验线性拟合的公式见表 1,从表 1 可以看出,振弦式单膜土压力盒和振弦式双膜土压力盒的砂标 K 值和厂家 K 值差值在 50%左右,厂家 K 值偏大;而电阻应变式土压力盒差异更大,砂标 K 值约为气标 K 值的 3~4 倍。因此,土压力盒用不同的介质标定得出的系数差别较大,特别是应变式土压力盒。如果条件允许,应优先选择振弦式土压力盒,尽量避免周围介质的不同导致测试数据的不准确性。

2.3 3 类土压力盒对比

为了对工程中常用的 3 类典型土压力盒进行对比,要求所有土压力盒砂标试验时埋设环境、埋设深度和试验温度等试验条件相同。砂标试验中所有土压力盒均水平埋置于距装样钢桶底 15 cm 处。振弦式土压力盒分为单膜式和双膜式 2 类,单膜式利用膜片挠曲变形程度变化原理,双膜式采用 2 片钢膜间密封液体均匀传递压力。所以单膜式土压力盒对介质粒径更敏感。为了减小介质粒径对两类土压力盒的影响,砂土采用小粒径标准砂,使土压力盒受压有效直径大于砂土最大粒径 50 倍以上。2 类振弦式土压力盒砂标对比曲线如图 3 所示。

表 1 砂标试验结果

Table 1 Results of calibration tests in sand soil

组号	砂标 k 值	厂家 k 值	差异系数	拟合公式	相关系数 R^2
				$p_n = k(f_i^2 - f_0^2) \pm b$ 或 $p_n = k(\varepsilon_i - \varepsilon_0) \pm b$	
ZD-1	0.0009755104	0.002045002	0.477022	$P_n = 0.0097551043 \times (f_i^2 - f_0^2) + 131.44$	0.9951
ZD-2	0.0010931703	0.002547236	0.429159	$P_n = 0.0010931703 \times (f_i^2 - f_0^2) + 226.07$	0.9995
ZD-3	0.0010563885	0.002040695	0.517661	$P_n = 0.0010563885 \times (f_i^2 - f_0^2) + 226.05$	0.9992
ZS-1	0.0005160038	0.001212252	0.425657	$P_n = 0.0005160038 \times (f_i^2 - f_0^2) + 86.64$	0.9991
ZS-2	0.0006734775	0.001323141	0.508999	$P_n = 0.0006734775 \times (f_i^2 - f_0^2) + 9.25$	0.9994
ZS-3	0.0006350271	0.001338214	0.474533	$P_n = 0.0006350271 \times (f_i^2 - f_0^2) - 234.13$	0.9996
Y-1	0.1214094922	0.038610000	3.144509	$P_n = 0.1214094922 \times (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + 11.01$	0.9994
Y-2	0.1892856273	0.043540000	4.347396	$P_n = 0.1892856273 \times (\varepsilon_i - \varepsilon_0) - 10.30$	0.9986
Y-3	0.0988098675	0.034320000	2.879075	$P_n = 0.0988098675 \times (\varepsilon_i - \varepsilon_0) - 12.55$	0.9971

注: P_n 为土压力, kPa; f_i 、 f_0 单位为 Hz; ε_i 为 i 级荷载状态时的应变值, ε_0 为零荷载状态时的应变值, 单位为 10^{-6} 。

由表 1 和图 3 可知,与 ZS-3 相比,ZD-3 拟合的线性斜率更接近,稳定性更强,体现了振弦式单膜土压力盒变形原理的优越性,土压力盒径厚比越小所测得的应力与该点的真应力越相近。试验采用的振弦式双膜土压力盒厚径比大于振弦式单膜土压力盒,拱效应更加明显,因此 ZS-1 差异系数小于 ZD-1。ZS-2 的稳定性高于 ZD-2,体现了振弦式双膜土压力盒通过钢膜间密封液体均匀传递压力这一工作原理,一定程度弥补了厚径比大的不足。电阻应变式土压力盒尺寸较小,应力集中更明显,厚径比较大,受力膜和介质接触欠佳,导致砂标 K 值明显大于厂家标定 K 值。另外,电阻式土压力盒的高灵敏度使每个土压力盒砂标后线性拟合后的 K 值与厂家 K 值差异较大。

卸载过程中由于非弹性体砂土保留上级荷载和摩擦作用,卸载曲线和加载曲线不重合,形成滞回环。卸载荷载标定试验如图 4 所示,振弦式双膜土压力盒比振弦式单膜土压力盒厚,拱形效应较明显,摩擦作用较大,导致振弦式双膜土压力盒的卸载曲线非线性更大。

可见,土压力盒的尺寸及周围土体介质都会影响加卸载滞回环曲线,所以为更准确标定土压力盒系数,应多次重复进行加卸载试验,取稳定后的滞回环上下点直线斜率作为标定系数。

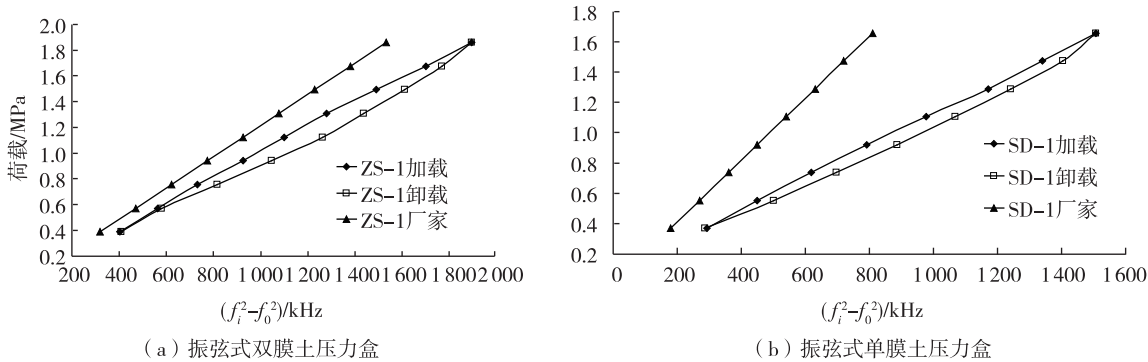


图 4 土压力盒卸载砂标线

Fig. 4 Calibration curves of earth pressure cells obtained from unloading tests in sand soil

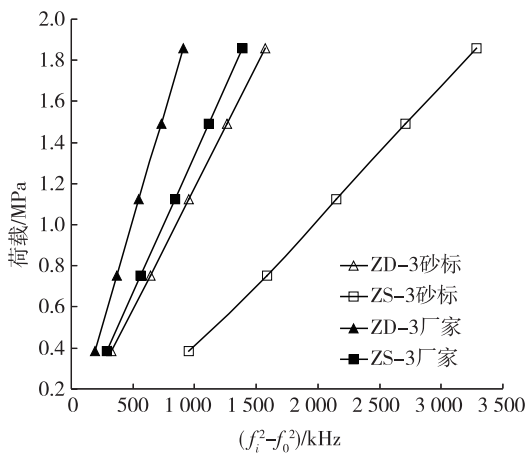


图 3 振弦式单膜和振弦式双膜砂标试验结果对比

Fig. 3 Calibration curves of single and double film vibrating wire earth pressure cells in sand soil

3 结 论

a. 振弦式土压力盒砂标 K 值小于厂家提供 K 值,差值在 50%左右;电阻应变式土压力盒砂标 K 值大于厂家提供 K 值,差值在 3 倍左右。

b. 与振弦式单膜土压力盒相比,双膜土压力盒的厚径比较大,稳定性应更强。但在砂标试验中双膜土压力盒测试的稳定性强的优点并未充分体现。

c. 3 类土压力盒砂标试验 K 值和厂家 K 值都有一定的差异。在实际工程中应综合考虑土压力盒的类型、尺寸和埋设状态等,在试验前模拟工程环境进行砂标试验,计算相应标定系数后再使用。

参考文献:

- [1] 李春林,陈青春,丁启朔. 用于土壤压实监测的土压力传感器标定[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(4): 63-66. (LI Chunlin, CHEN Qingchun, DING Qishuo. Calibration of soil pressure sensors for soil compaction monitoring[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(4): 63-66. (in Chinese))
- [2] 曾辉,余尚江. 岩土压力传感器匹配误差的计算[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 99-105. (ZENG Hui, YU Shangjiang. The calculation of matching error of rock-soil pressure transducer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 99-105.(in Chinese))
- [3] 汪恩清,丁世敬. 土应力传感器动态匹配误差理论研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 78-83. (WANG Enqing, DING Shijing. The investigation for dynamic matching error in the registration of soil pressure cells[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 78-83. (in Chinese))
- [4] WACHMAN G, LABUZ J. Soil-structure interaction of an earth pressure cell[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(9): 843-845.
- [5] 刘先珊,董存军. 砂土介质中土压力盒的力学响应特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 12-18. (LIU Xianshan, DONG Cunjun. Mechanical response characteristics of the earth pressure cell in sand[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 12-18. (in Chinese))
- [6] 张立祥,罗强,刘钢. 基于正交设计的土压力传感器匹配误差分析[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 50-53. (ZHANG Lixiang, LUO Qiang, LIU Gang, et al. Analysis of matching error of soil pressure transducer based on orthogonal design[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(3): 50-53. (in Chinese))
- [7] JOSEPH F L, BRENT T. Laboratory calibration of earth pressure cells[J]. Geotechnical Testing, 2005, 28(2): 188-196.
- [8] 张立祥,罗强,张良,等. 土压力传感器在硬土介质中的非线性响应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3633-3640. (ZHANG Lixiang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis of nonlinear response of soil pressure transducer in high-modulus soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3633-3640. (in Chinese))
- [9] 韦四江,王大顺,郜进海,等. 微型土压力盒的标定及修正[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 1003-1006. (WEI Sijiang, WANG Dashun, GAO Jinhai, et al. Calibration and correction of miniature earth pressure cell[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 1003-1006. (in Chinese))
- [10] MIURA K, OTSUKA N, KOHAMA E, et al. The size effects of earth pressure cells on measurement in granular materials[J]. The Japanese Geotechnical Society, 2003, 43(5): 133-147.
- [11] 魏永权,罗强,张良,等. 离心力场中微型土压力传感器非线性响应分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 286-292. (WEI Yongquan, LUO Qing, ZHANG Liang, et al. Study of nonlinear response of miniature earth pressure transducer in centrifugal force field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 286-292. (in Chinese))
- [12] 陈富云,李川,陈尔阔,等. 双膜式光纤 Bragg 光栅土压力传感器的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3340-3344. (CHEN Fuyun, LI Chuan, CHEN Erkuo, et al. Dual-diaphragm fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3340-3344. (in Chinese))
- [13] 蒋善超,曹玉强,隋青美,等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 1-6. (JIANG Shanchao, CAO Yuqiang, SUI Qingmei, et al. Research on the micro and high-precision fiber bragg grating soil pressure sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 1-6. (in Chinese))
- [14] 崔笃信,王庆良,陶茂盛,等. 基于石英晶体三分量土层压力传感器研制[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 372-375. (CUI Duxin, WANG Qingliang, TAO Maosheng, et al. Development of quartz crystal soil pressure sensor with three components [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(3): 372-375. (in Chinese))
- [15] ZHU B, JARDINE R. The use of miniature soil stress measuring cells in laboratory applications involving stress reversals[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(5): 675-688.