

海洋数字式多功能静力触探探头的开发与应用

陈 奇^{1 2}, 张志刚^{1 2}, 杨 楠^{1 2} 任旭光^{1 2} 石志鹏³

(1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510760; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760;

3. 武汉磐索地勘科技有限公司, 武汉 430074)

摘要: 针对我国海洋资源开发利用不断发展的需求, 研制了一种最大适水深度达 2000m 的海洋数字式多功能静力触探探头, 从探头的机械结构、防腐、耐压密封、数据校正等方面进行了详细的介绍, 在常规三桥探头的基础上扩充了探头倾斜、温度、土体摄像、电阻率等多项功能, 并在探头内部集成了数据采集电路, 实现了各通道传感器模拟输出的数字化转换, 分析了数字式探头的优缺点。近两年来, 自行研制的海洋数字式多功能静力触探探头在多个平台上获得成功应用, 验证了探头的耐压密封性能、静动载性能以及真实性、可靠性。

关键词: 静力触探; 探头; 海洋; 多功能; 数字式

中图分类号: TU415

文献标识码: B

Development and application of marine digital multi-function CPT cone

Chen Qi^{1 2}, Zhang Zhigang^{1 2}, Yang Nan^{1 2}, Ren Xuguang^{1 2}, Shi Zhipeng³

(1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China;

3. Wuhan Peneson Geological Exploration Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to meet the demand of the marine resources exploitation, a digital marine multi-function CPT cone is developed, which could work at the depth of 2000m underwater. The mechanical structure, anti-corrosion, water resist and data correction are introduced detailed in the paper. Based on the conventional three-bridged CPT cone, the multi-function including inclination, temperature, soil photography, electrical resistivity, etc. and data acquisition circuit are integrated; the analog output of every sensor could be converted to digital signal; its advantages and disadvantages are analysed. The cone is applied in several projects and it is proved successful in water resist, static and dynamic conditions, the data authenticity and reliability.

Key words: CPT; cone; marine; multi-function; digital

0 引言

静力触探 (又称锥探, 英文名 Cone Penetration Testing, 简称 CPT) 是利用一根安装了若干传感器的圆锥形探头在土体中以准静力匀速贯入时所采集的各项应力数据来实时、连续地反映土质变化特征的一项土体原位测试方法^[1]。

作为土体原位测试的突出代表, 静力触探自 1917 年由瑞典发明以来距今已有 90 多年的历史, 将其运用到海底进行土体测试虽只有 40 多年, 但静力触探却以其自身的诸多优点已经被欧美国家广泛应用于海洋工程地质调查, 部分国家甚至将其列为海洋地质工程调查的必做项目; 静力触探数据可

为海洋工程勘察 (如港口码头、航道疏浚、跨海通道、油气平台、管线路由等)、海洋资源勘查、海洋环境调查与海洋科学研究等涉及的地层信息提供重要的原始数据和依据^[2,3]。

在国家 863 计划与天然气水合物科研专项的支持下, 一种适水深度 2000m, 可采集锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、探头倾斜、温度以及土体图像的数字化多功能静力触探探头被成功研制, 并

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-12-08

基金项目: “十二五” 863 项目 (2012AA091301); 国土资源部天然气水合物科研专项 (GZH201200602)。

作者简介: 陈奇 (1981 -), 男 (汉族), 湖北宜昌人, 博士, 高级工程师。

在2015年对接“海牛号”海底钻机、ROSON海床式静力触探系统、“奋斗五号”船载海洋钻机以及坠落式触探系统等多种平台在中国南海完成了数十个孔位的海上试验,取得了一系列完整有效的数据曲线,验证了探头的准确性、稳定性和可靠性。

1 静力触探探头的原理与现状

静力触探探头是直接和土体接触并获得土体相关信息的核心部件,以常规采集锥尖阻力、侧壁摩擦力和孔隙水压力的三桥静力触探探头为例,其测量元件均为电阻应变式传感器,即利用应力—应变转换将探头受力部件的变形转换为可以测量的电信号^[3]。

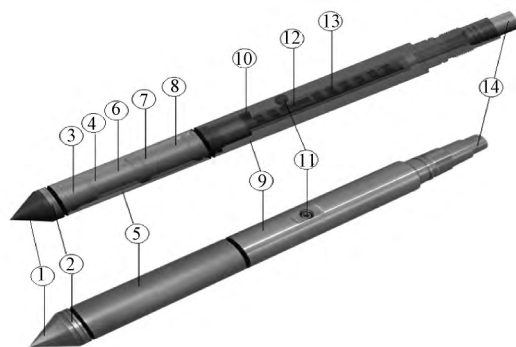
静力触探探头的发展主要经历了粗略探测、机械式探测、电测探测和无缆多参数探测四个技术阶段。欧美发达国家的推动使得其技术指标能够满足海底土体测试的需要,主要表现在:(1)测试精度高、稳定性好以及探头信号的数字化处理;(2)环境适用性强,目前的世界先进的探头已可在诸多复杂环境下开展测试工作,如水下数千米的高压腐蚀环境等;(3)测试参数多,在采集触探数据(锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力)的同时,可以得到土体的其它相关参数,如温度、剪切力、电导率、地震波等等,能为地质调查与工程勘察提供更多的技术参考;(4)无缆连续触探,通过声波、电磁波或光信号进行触探数据的上传,避免对数据传输电缆的高性能要求以及减少加接探杆时对触探操作的影响^[1]。

我国在陆地或滩涂所使用的静力触探探头大多以双桥探头为代表,即在贯入过程中获得土体的锥尖阻力和侧壁摩擦力;也有我国所独有的单桥探头,能够在贯入过程中获得土体的锥尖阻力和侧壁摩擦力的合力;为了获得触探过程中的超孔隙水压力,又产生了能够测量孔隙水压力的三桥探头;目前,测斜探头、电阻率探头、波速探头、地温探头等多功能探头也陆续被研究和开发,但大多数仅为科研成果,还未在实际的工程中大面积推广使用。

2 海洋静力触探探头的开发

在海底工作的静力触探探头需要在陆地探头有关外型尺寸、材料选择、内部结构、加工精度、传感性能、电路性能、通用接口、标定记录等方面的基础上重点考虑防腐、耐压、密封以及数据校正等问题,孔隙水压力传感器还要考虑大量程静水压力对高精度孔隙水压力测量的影响,图1所示为海洋2000m数字式

多功能静力触探探头三维图及实物照片,该探头已获得国家实用新型专利(ZL201020281748.0)。



1. 锥尖; 2. 透水圈; 3. 孔隙水压力传感器; 4. 空心顶柱;
5. 侧壁摩擦筒; 6. 端阻应变桥; 7. 侧压筒; 8. 侧阻应变桥;
9. 尾管; 10. 温度传感器; 11. 蓝宝石玻璃; 12. 摄像头;
13. 检测电路板; 14. 水密电缆接头

图1 自主研发的海洋数字式多功能静力触探探头

Fig. 1 The marine digital multi-fuction CPT cone of independent research and development

防腐方面,探头与土体和海水接触的零件在选材上除了满足高强度耐磨的要求外,还需要选择耐腐蚀的不锈钢材料,因此陆地探头选用的常规钢材难以满足要求。

耐压方面,探头的结构中锥尖、侧壁摩擦筒及尾管形成了一个密封的空腔,传感器及其检测电路在这个空腔内部与海水隔离并在结构上得到相应的保护,因此耐压设计即是要保证形成空腔的机械部件能够承受2000m海水的外压力。由于锥尖基本为一个实心部件,尾管的内部空间又可以尽量压缩电路板的尺寸而获得更大的壁厚,因此探头最为薄弱的环节就是侧壁摩擦筒的壁厚。以国际标准的10cm²三桥探头外径35.7mm为基准,国内陆地探头侧壁摩擦筒的壁厚一般为3mm左右,局部最小厚度仅有1.2mm,在2000m海底20MPa的静水压力下,根据摩擦筒的三维模型仿真计算获得材料的屈服强度需要达到600MPa以上,因此实际选用了马氏体不锈钢,固溶处理后屈服强度达到700MPa以上,韦氏硬度达到600HV以上,在综合机械强度和防腐方面均满足要求。但考虑摩擦筒还要受到复杂的土体作用,以及材料的内部缺陷、加工误差等的影响,摩擦筒最小壁厚增加至2.5mm,确保在海底复杂恶劣的环境下能够可靠工作。

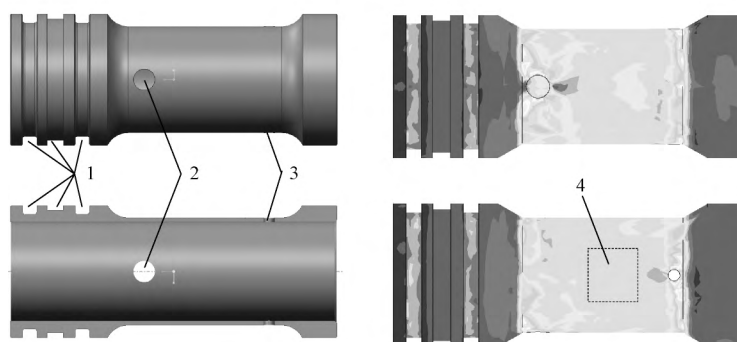
密封方面,探头内部近20处无相对运动的零件多采用O型圈加组合垫的密封形式,但侧壁摩擦筒由于与其它零件存在相对运动,因此除仍采用O型圈加组合垫的密封形式外,在摩擦筒两端灌注了

3M 固化弹性密封胶,既确保了密封的可靠性,又保持了侧壁摩擦筒的自由运动,还可以在土体中防止泥沙进入摩擦筒内部的空隙。与探头尾管连接的电缆也采用拥有专利技术 (ZL201320746443.6) 的灌封式一体化电缆,确保探头本身及其连接电缆均具备水深 2000m 的适应能力。

数据校正方面,主要包括静水压力校正和温度校正。一般来说,海底地层中超孔隙水压力与静水压力的比值较小,随着海水深度的增加,该比值甚至显得微乎其微,因此探头内部的孔隙水压力传感器需要选择大量程、高精度的产品,量程 25MPa,精度 0.01% 的压力传感器也只能获得 2.5kPa 的有效分辨率。同时,孔隙水压力传感器的体积、密封和螺纹接口还必须符合探头内部的总体结构设计,因此孔压传感器目前只能依靠国外技术量身定做。温度校正是应变式传感器通常

需要考虑的问题,由于探头标定(率定)时大多在常温 20℃ 左右的环境下进行,而海底温度一般在 4℃ 左右,实际地层的温度还会有所变化,因此在探头的内壁上增加了温度传感器用以消除温度的影响,还能够在定点测试时采集地层的实际温度值及温度消散曲线。

与此同时,在耐压、密封方面通过增加密封也改变了探头变形柱的结构,使得适合于应变片粘贴的位置也需要重新选取,以测量侧壁摩擦力的侧压筒为例,如图 2 所示,由于密封沟槽的增加,将应变片的粘贴区域进一步压缩,再加上定位孔和过线孔的影响,使得侧压筒在受到轴向力时均匀变形的区域较难估计,为此在 Pro/E 环境下,对侧压筒在受到轴向力时的应力应变情况进行了仿真分析,图中“4. 应变片粘贴区”所指示的即为变形均匀适合应变片粘贴的位置。



1. 密封沟槽; 2. 定位孔; 3. 过线孔; 4. 应变片粘贴区

图 2 探头侧压筒及其应变片粘贴区

Fig. 2 Friction hollow column of the CPT cone and its strain gauge pasted area

3 多功能静力触探探头的开发

常规的三桥静力触探探头一般只能获得锥尖阻力、侧壁摩擦力和孔隙水压力三个土体力学指标,为了在锥进的过程中获得更多的参数,自主研发的多功能探头增加了温度、探头倾斜、土体摄像、电阻率等功能,其中温度、探头倾斜与土体摄像的传感器安装位置如图 1 所示,均位于力学检测传感器的后部,温度传感器采用导热硅胶紧贴于探头尾管的内壁;探头倾斜传感器采用 X、Y 双轴倾斜芯片直接安装在电路板之上,通过 X 和 Y 轴的倾角即可计算出探头轴线 Z 与铅垂线的倾斜夹角;土体摄像的照明和图像采集部分安装在电路板上,对应的尾管处安装有高强度玻璃并做耐压密封处理;电阻率探头则采用四个环型电极的方式进行测量,与之对

应地将增加探头的长度,具体的测量原理及实现方式详见文献 [4]。后续还将开展波速探头、磁力探头、光谱分析探头、环境评估探头等的研究和开发。

需要说明的是,由于温度传感器的安装位置会受到探头摩擦及尾管热传导的影响,贯入过程中测试的实时数据往往只能反映地层温度的变化趋势,通过理论模型计算虽然能够得到一系列修正值,但还需要大量的实践用于检验理论计算的正确性,因此折中的办法是将探头贯入至预定地层后滞留,通过定点法开展温度消散试验来获得地层的真实温度。

4 数字式静力触探探头的开发及优缺点分析

以往的电测式静力触探探头将其内部传感器感

应的外界物理力学等参数以模拟电信号的方式通过电缆传递给地面的数据采集仪器,数据采集仪器也通过电缆将电源或激励信号送给探头,使得探头与数据采集仪器有一个十分明显的界限;随着静力触探测试的精确化要求以及电子技术的发展,电测式探头也逐步进入了数字化时代,经过两年的技术攻关,自主开发的数字化探头获得了成功,如图1所示,机械结构上主要的变化在于延长了探头尾管用于安装电路板,电路板实现的功能如图3所示。

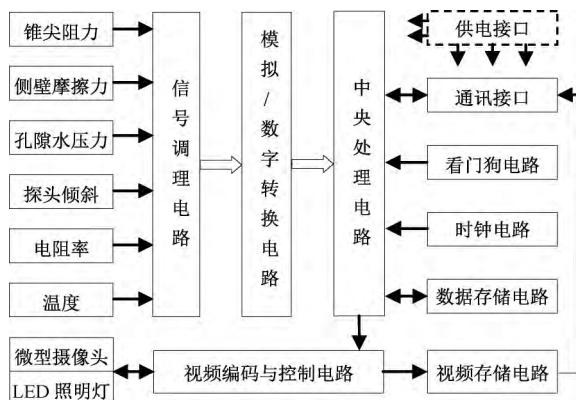


图3 数字式静力触探探头电路原理框图

Fig.3 Circuit block diagram of digital multi-fuction CPT cone

其中,探头尾管通过水密接插件的对接,实现了数据采集仪器对探头的供电和通讯,由于整个采集电路大多为+5VDC的供电需求,考虑到电缆较长时的电压损失,数据采集仪器端供电输出+12VDC,至探头接口再降压、稳压至+5VDC对所有器件供电,通讯接口则包含探头锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力等的常规数据通讯和土体摄像的视频通讯两大功能;中央处理电路采用MCS-51系列单片机最小应用系统,虽然目前的单片机大多具有片内看门狗复位电路,但为了提高采集电路在恶劣环境下的可靠性和稳定性,在片外再次扩展一个看门狗电路,确保单片机在出现程序异常的情况下及时地发出复位命令;时钟电路用于在数据存储和视频存储时提供时间标志,时钟电路的纽扣电池也可以在外部供电中断后为整个探头提供大约10min的电量,因此即使在极端情况下电缆损坏,供电和通讯中断也可以在探头回收后读取存储电路内部的信息;数据存储电路分为两个片区,一个片区存储探头编号和标定文件,另一个片区存储检测数据,而土体的视频图像因为数据量较大,直接采用一张Micro-SD卡作为存储介质。模拟/数字转换电路选用 $\Sigma-\Delta$ 型24位8通道AD转换芯片,转换通道、转换速率和转换精度均满足多功能探头的整

体需求^[5~7]。

数字式探头是在模拟探头的基础上增设数据采集与通讯电路而发展起来的,因此其产品成本会有所增加,然而不论是在数据采集、电缆需求、数据通讯、使用便利等方面数字式探头都显示了模拟式探头不可比拟的优越性,主要表现在以下几个方面。

(1) 模拟式探头的信号输出需要经过几十米甚至几百米的电缆联接到数据采集仪器,其实质为远距离微弱模拟信号数据采集,这种采集方式很容易受电缆阻容效应和外界干扰的影响,为减少长缆传输的影响往往需要在进行探头标定(也称“率定”)时连同联接电缆一起标定;为减少模拟信号传输途中的电磁干扰往往需要联接电缆带屏蔽层,增加了电缆成本。而即使是采用了探头与电缆一起标定和电缆屏蔽的措施,微弱信号的长距离传输仍然在大多数场合不被推荐使用。相反,数字式探头的数据采集电路本身为探头的一个部分,与探头传感器的距离完全可以忽略不计,因此采集后转换得到的数字量能最真实地反映传感器检测到的土体参数。

(2) 模拟式探头中各个传感器需要数据采集仪单独提供电源与信号接口,使得连接电缆的芯数随桥路的增加成倍增长,一般国内普通的三桥探头就需要10或12芯电缆与数据采集仪连接;数字探头中各个传感器可由数据采集与通讯电路板集中供电,信号输出经模拟—数字转换后以数字量形式发送到通讯总线上,因此数字探头仅需要4~5芯(电源2~3芯,通讯总线2芯)电缆即可,并且电缆芯数不会因为多参数探头桥路的增加而有所变化。若采用探头内部电池供电,则通讯电缆仅需要普通双绞线电缆作为信号传输介质,大大降低了对电缆的性能要求。

(3) 模拟探头的标定数据一般以纸质身份卡的形式随探头一起配送,开始静力触探试验前需要将探头的标定数据输入数据采集仪以便于数据采集仪进行内部计算,将模拟电信号转换为实际物理量,由于探头与其标定数据具有一一对应的关系,当探头数量较多且更换频繁时该项工作相对复杂;数字探头中的数据采集与通讯电路板中可以在电路上增加身份编号识别、标定数据存储、倾斜传感测量、实时时钟校正等功能,能够在探头电路上直接得到经过转换后的实际物理量,且整个过程不涉及任何人为操作,保证了数据采集的真实性。

(4) 模拟探头一般为精密机械加工件与应变式

压力传感器（单桥和双桥）、硅油式或振弦式压力传感器（孔压）的组合；数字探头则在模拟探头的基础上增加了数据采集与通讯电路，因此作为消耗品，数字探头在成本上要高于模拟探头。与此同时，由于数字探头中已经包含了数据采集电路，使得与之相配合的数据采集仪可以将重点集中在系统功能与人机界面等其它方面，因此可以在一定程度上降低数据采集仪的成本。

5 海洋数字式多功能静力触探探头的应用

2014 年至 2015 年，自主研发的海洋数字式多功能静力触探探头在北部湾、台湾海峡、珠江口及南海东沙群岛海域（水深超过 2000m）完成多个孔位的海上试验，如图 4 所示，获得了探头在海底环境下的第一手应用资料，也获得了上述区域的第一手静力触探数据。

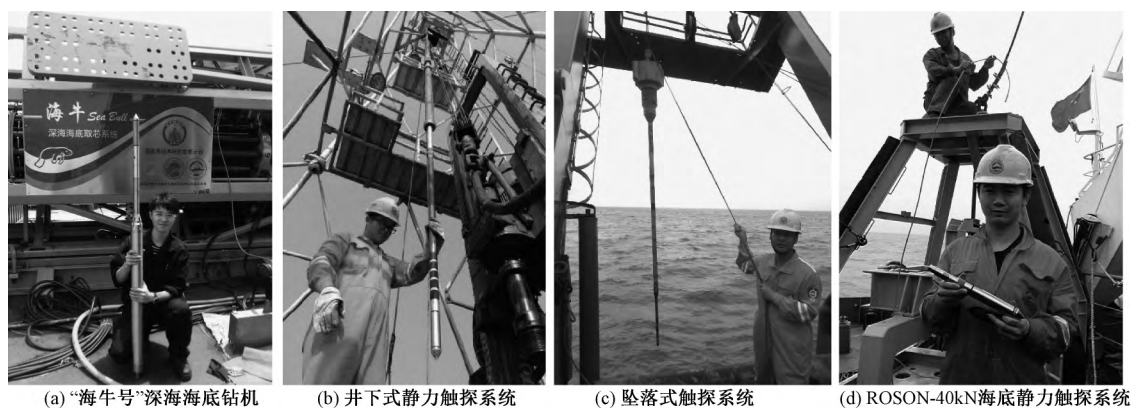


图 4 海洋数字式多功能静力触探探头在各种触探平台上的应用

Fig. 4 The application of marine digital multi-fuction CPT cone on different penetration platforms

其中搭载“海牛号”海底钻机工作最大水深处达到 3100m，验证了探头的耐压密封性能；搭载井下式静力触探系统与“奋斗五号”海洋钻机^[8]结合最大探测深度 31m，并获得超过 50MPa 的锥尖阻力，验证了探头的静载性能；搭载坠落式触探系统在离底 25m 深度自由落体下放 18 次，均取得完整的触探

数据，验证了探头的动载性能；搭载 ROSON-40kN 海床式静力触探系统^[9]，与荷兰范登堡公司原厂的探头进行对比试验，其数据曲线具有一致性，验证了探头数据的真实性和可靠性，如图 5 所示，对比试验于北部湾涠洲岛附近海域实施，水深 30m 左右，探测深度均设置至 12.8m 保护性停机。

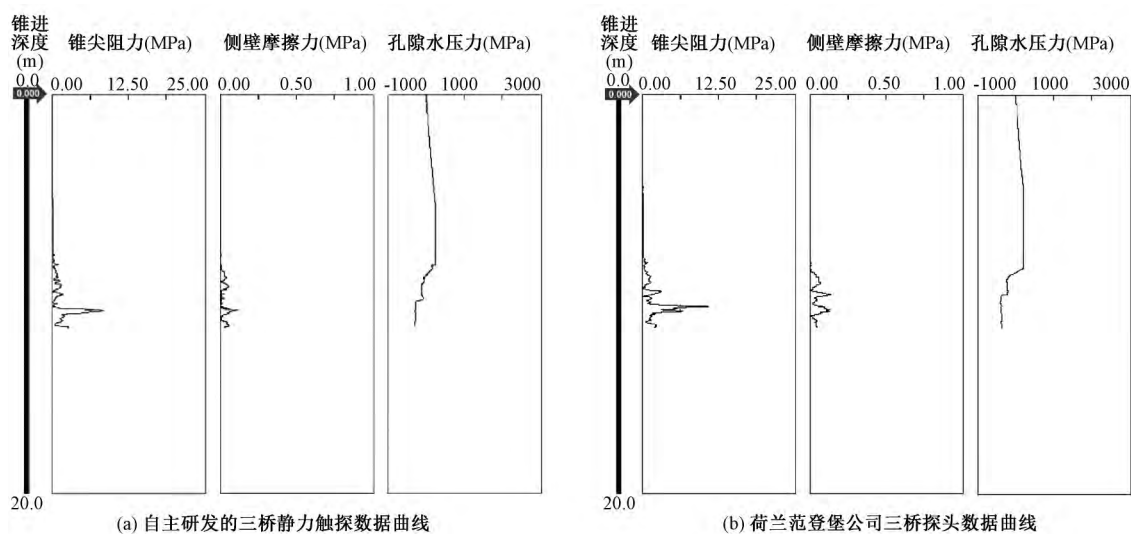


图 5 基于 ROSON-40kN 海床式静力触探系统的探头海上对比试验曲线

Fig. 5 Comparison sea test curves of CPT cones based on ROSON-40kN seabed CPT system

6 结论

大量的海上试验证明,海洋数字式多功能静力触探探头具有耐压密封和力传导的机械结构,耐磨且高强度的材料选择与热处理工艺,高精度的内部传感器及其检测电路,多功能的测试参数和数据校正功能,大容量的数据存储和实时通讯能力,在不同的测试平台均获得成功应用,是一种集成度高、性能优异的岩土测试仪器,为中国独立自主地开展高精度、多参量的海洋(水域)静力触探提供了技术保证,值得在全国地质调查和工程勘察等领域推广使用。

参 考 文 献

- [1] 陈奇,徐行,石要红等.国内外海底静力触探的技术研究与进展[J].南海地质研究,2009,14~16.
Chen Qi, Xu Xing, Shi Yaohong et al. The status and development of offshore cone penetration testing at home and abroad [J]. Geological Research of South China Sea, 2009, 14~16. (in Chinese)
- [2] 陈奇.海底静力触探若干关键技术研究[D].武汉:中国地质大学博士学位论文,2008.
Chen Qi. Research on several key technologies of offshore CPT [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- [3] 孟高头.土体原位测试机理方法及其工程应用[M].北京:地质出版社,1997.
Meng Gaotou. Mechanism method for in-situ testing of soil and its engineering application [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1997. (in Chinese)
- [4] 马斌,罗柏文,陈奇等.互相关技术在海底沉积物电阻率测量中的应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(3):31~34.
Ma Bin, Luo Bowen, Chen Qi et al. Application of cross-correlation detection in submarine sediment resistivity measurement [J]. Journal of Hunan University of Science Technology (Natural Science Edition), 2013, 28(3): 31~34. (in Chinese)
- [5] 王焕平.多功能数字式静力触探仪的开发与应用[J].工程勘察,2011,(增刊2):242~246.
Wang Huanping. Development and application of digital multifunction CPT cone [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, (Suppl. 2): 242~246. (in Chinese)
- [6] 史红叶.基于无缆传输的数字式孔压静力触探系统研究与设计[D].南京:东南大学硕士学位论文,2013.
Shi Hongye. Wireless digital piezocone penetration test system research and design [D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese)
- [7] <http://www.epcn.com/product/novajinglichutan.html>
- [8] 陈奇,石要红,潘毅等.基于Downhole工艺的海底静力触探及其设备研制[J].海洋工程,2007,25(4):74~75.
Chen Qi, Shi Yaohong, Pan Yi et al. Downhole technology for submarine CPT and its equipment development [J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 74~75. (in Chinese)
- [9] 陈奇,徐行,张志刚等.用于海洋地质调查的ROSON-40kN型海底CPT设备[J].工程勘察,2012,40(9):30~34.
Chen Qi, Xu Xing, Zhang Zhigang et al. The ROSON-40kN offshore CPT equipment for marine geological survey [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(9): 30~34. (in Chinese)

(上接第4页)

- [15] 侯哲生,李晓,王思敬等.金川二矿某巷道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):406~410.
Hou Zhesheng, Li Xiao, Wang Sijing et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rock for a tunnel in Jinchuan deposit II [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 406~410. (in Chinese)
- [16] 倪恒,刘佑荣,龙治国.正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):989~992.
Ni Heng, Liu Yourong, Long Zhiguo. Applications of orthogonal design to sensitivity analysis of landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 989~992. (in Chinese)
- [17] 翟远征,王金生,苏小四.正交试验法在地下水数值模拟敏感性分析中的应用[J].工程勘察,2011,39(1):46~50.
Zhai Yuanzheng, Wang Jinsheng, Su Xiaosi. Sensitivity analysis of groundwater numerical simulation using orthogonal experiment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,

- 2011, 39(1): 46~50. (in Chinese)
- [18] 夏元友,熊海丰.边坡稳定性影响因素敏感性神经网络分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2703~2707.
Xia Yuanyou, Xiong Haifeng. Sensitivity analysis of slope stability based on artificial neural network [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2703~2707. (in Chinese)
- [19] 邓华锋,李建林,黄建文等.影响卸荷岩体边坡稳定性的参数敏感性分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2004,26(6):517~519.
Deng Huafeng, Li Jianlin, Huang Jianwen et al. Sensitivity analysis of some parameters that affected the stability of unloading rock mass slope [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2004, 26(6): 517~519. (in Chinese)
- [20] 盛骤,谢式千,潘承毅.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2008,395~405.
Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008, 395~405. (in Chinese)