

静力触探技术在海洋岩土工程中的应用研究

廖志威

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 270000

摘要：随着全球海洋资源开发进入深水时代，海洋岩土工程面临深海高压、复杂地质构造及动态环境荷载等挑战。本文聚焦于静力触探技术在海洋岩土工程中的应用研究。首先阐述静力触探技术的定义、原理、分类、设备及发展历程。接着详细探讨其在海洋岩土工程多个领域的应用，包括海洋工程地质勘察中的土层划分、地基土特性评价，桩基工程勘察中的桩端持力层确定与单桩承载力预估，土层力学参数估算以及饱和砂土液化判别等。最后展望该技术在海洋岩土工程中的发展趋势，如智能化自动化、数据处理精细化、多技术融合协同以及绿色环保可持续发展等，为海洋岩土工程实践提供参考。

关键词：静力触探技术；海洋岩土工程；应用研究

引言：海洋岩土工程作为海洋开发建设的重要基础领域，其勘察与研究的准确性至关重要。静力触探技术作为一种高效、精准的原位测试方法，在海洋岩土工程中发挥着关键作用。它通过将探头匀速压入土中，获取土体对探头的阻力等参数，进而分析土层性质与工程特性。随着海洋工程不断向深海、复杂海域拓展，对海洋岩土工程勘察技术提出了更高要求。深入研究静力触探技术在海洋岩土工程中的应用，有助于提升海洋工程勘察水平，保障海洋工程的安全性与稳定性，对推动海洋资源开发利用和海洋经济发展具有重要意义。

1 静力触探技术概述

1.1 技术定义与原理

静力触探技术是一种通过机械装置将圆锥形探头匀速压入土层，利用传感器实时测量土体对探头产生的锥尖阻力、侧壁摩阻力等参数的原位测试方法。其核心原理基于土体与探头接触面的力学平衡：当探头以恒定速率贯入时，土体对锥尖的挤压产生抗剪强度阻力，侧壁与土颗粒的摩擦形成侧摩阻力，两者共同构成总贯入阻力。通过电阻应变片或数字传感器将力学信号转化为电信号，经数据采集系统处理后，可绘制出随深度变化的阻力曲线，进而反映土层物理力学性质的垂直分布特征，为工程地质勘察提供关键参数。

1.2 技术分类与设备

静力触探设备按功能可分为基础型、高精度探头及智能化系统三类。基础型设备包括手摇式轻型触探仪（贯入力20-30kN，适用于狭小场地浅层测试）、齿轮机械式触探仪（结构简单，可组装于汽车或独立落地）及全液压传动触探仪（最大贯入力达200kN，常改装为静力触探车）。探头类型分为单桥探头（仅测量总贯入阻

力）和双桥探头（可分离锥尖阻力与侧壁摩阻力），孔压探头（CPTU）还集成孔隙水压力传感器，用于修正软土中超孔隙水压力对阻力的影响。

1.3 技术发展历程

静力触探技术起源于1932年荷兰工程师Pieter Barentsen的发明，其设计的机械式“荷兰锥”通过人工压入土体，利用杆顶压力表读取阻力，开创了原位测试新纪元。1935年，荷兰Delft土力学实验室推出10吨级人工贯入装置，测试深度突破10米；1953年，Begemann探头引入摩擦筒，实现锥尖阻力与侧壁摩阻力分离测量，摩阻比成为土层分类关键指标。20世纪60年代，电测式探头问世，消除机械摩擦误差，测试精度提升50%以上；1974年，孔压探头（CPTU）通过测量贯入过程中的孔隙水压力，可修正软黏土不排水抗剪强度并估算固结系数^[1]。

2 静力触探技术在海洋岩土工程中的应用领域

2.1 海洋工程地质勘察

2.1.1 土层划分与类别判定

在海洋工程地质勘察中，静力触探技术通过实时获取锥尖阻力、侧壁摩阻力等参数，结合阻力比值（如摩阻比Rf），可精准划分不同土层。例如，在砂土与粉土中，锥尖阻力随深度增加呈线性增长，而软黏土则表现为低阻力且波动平缓；通过对比标准贯入试验（SPT）与静力触探数据，可建立区域性经验公式，将阻力值转换为土层分类指标（如美国ASTM标准中的N值换算）。此外，孔压探头（CPTU）通过测量贯入过程中的孔隙水压力，可识别超固结土层（如古土壤层）或松散沉积物（如现代海底淤泥），结合电阻率探头联用，还能区分砂土与钙质砂、珊瑚礁等特殊土体。

2.1.2 评价地基土工程特性

静力触探技术可快速评估海洋地基土的承载力、变形模量及液化潜力等工程特性。通过锥尖阻力与侧壁摩阻力，可计算地基土的不排水抗剪强度（ S_u ），例如在软黏土中， S_u 与锥尖阻力（ q_c ）的关系为 $S_u = q_c/N_k$ （ N_k 为经验系数，通常取10-15）；对于砂土，结合摩阻比可估算内摩擦角（ ϕ ），指导桩基侧摩阻力设计。在变形分析方面，通过静力触探阻力与旁压试验、扁铲侧胀试验（DMT）的对比，可建立土体变形模量（ E_0 ）与阻力值的经验关系，如 $E_0 = \alpha \cdot q_c$ （ α 为修正系数，与土层类型相关）。此外，静力触探技术通过测量砂土在循环荷载下的孔隙水压力响应，可判别饱和砂土的液化潜力，为海洋平台、跨海大桥等结构物的抗震设计提供关键参数。

2.2 桩基工程勘察

2.2.1 确定桩端持力层

在海洋桩基工程中，持力层的合理选择直接影响桩基的承载稳定性与长期耐久性。静力触探技术通过连续测量土层贯入阻力，可清晰识别不同土层的力学特性差异，从而精准定位桩端持力层。例如，在软黏土与砂土交互沉积的海域，软黏土层表现为低锥尖阻力与高侧壁摩阻力，而砂土层则呈现高锥尖阻力与低摩阻比特征。通过分析阻力曲线的突变点（如锥尖阻力骤增或摩阻比显著降低），可确定砂土层、强风化岩层等优质持力层的顶界面深度。此外，孔压探头（CPTU）通过监测贯入过程中的孔隙水压力变化，可进一步验证持力层的密实度与排水条件，避免选择透水性强或易软化的土层作为持力层。

2.2.2 预估单桩承载力

静力触探技术通过建立贯入阻力与桩基承载力的经验关系，可高效预估海洋环境下单桩的极限承载力。其核心原理基于土体对桩身的侧摩阻力与端阻力与静力触探阻力参数的关联性。例如，侧摩阻力可通过侧壁摩阻力与土层摩擦角的转换关系估算，而端阻力则与桩端处锥尖阻力及持力层强度直接相关。对于嵌岩桩，结合孔压探头测量的孔隙水压力数据，可修正岩石的软化效应对端阻力的影响；对于摩擦桩，通过分析不同土层的阻力比值，可优化桩长与直径设计，平衡侧摩阻力与施工成本。此外，静力触探技术可快速获取大范围土层参数，相比传统载荷试验，显著缩短勘察周期并降低海上作业风险。

2.3 土层力学参数估算

2.3.1 估算粘性土参数

在海洋工程中，粘性土的力学参数（如不排水抗剪强度、灵敏度、压缩模量等）是评估地基稳定性和变形

特性的关键指标。静力触探技术通过测量锥尖阻力与侧壁摩阻力，结合土体应力历史与孔隙水压力响应，可间接估算粘性土参数。例如，软黏土的不排水抗剪强度可通过锥尖阻力与经验系数转换获得，其大小反映土体抗剪能力，直接影响桩基侧摩阻力与地基承载力；灵敏度则通过对比原状土与重塑土的阻力值推算，用于评估土体受扰动后的强度损失，指导海上施工对土层的保护措施。

2.3.2 估算粒状土参数

粒状土（如砂土、砾石）的力学参数（如内摩擦角、相对密实度、渗透系数等）是海洋桩基设计与抗液化分析的基础。静力触探技术通过分析锥尖阻力与侧壁摩阻力的比值（摩阻比），可间接推断粒状土的密实状态与颗粒级配。例如，密实砂土表现为高锥尖阻力与低摩阻比，而松散砂土则相反；通过对区域经验关系，可将阻力参数转换为内摩擦角，用于计算桩基端阻力与侧摩阻力。此外，结合孔压探头测量的贯入过程中孔隙水压力的消散速率，可估算粒状土的渗透系数，评估其在波浪、地震等循环荷载下的排水能力，进而判别饱和砂土的液化潜力。

2.4 饱和砂土液化判别

在海洋工程中，饱和砂土液化是地震、波浪等循环荷载作用下引发地基失稳的核心风险之一。静力触探技术通过实时监测贯入过程中土体的力学响应，为液化判别提供了高效且可靠的原位测试手段。其核心原理基于液化土体在循环荷载下的特殊力学行为：液化前，砂土颗粒通过接触摩擦传递应力，表现为高锥尖阻力与低侧壁摩阻力；液化时，孔隙水压力骤增导致有效应力降低，土体抗剪强度丧失，此时静力触探探头会因阻力骤减而出现“贯入突进”现象，同时孔压探头（CPTU）可捕捉到超孔隙水压力的急剧累积与缓慢消散过程。通过对比液化前后阻力参数（如锥尖阻力比、摩阻比变化）及孔隙水压力响应特征，可定性评估砂土的液化可能性^[2]。

3 静力触探技术在海洋岩土工程中的发展趋势

3.1 智能化与自动化发展

静力触探技术的智能化与自动化正成为海洋岩土工程领域的重要趋势。随着传感器技术、物联网与人工智能的深度融合，现代静力触探设备已实现从数据采集到分析的全流程自动化。例如，荷兰Geomil公司的MANTA-200系统采用链式驱动连续贯入技术，结合高精度深度编码器与倾斜指示器，可实时监测探杆垂直度与贯入速率，并通过智能算法自动修正数据偏差。国内中交四航院引进的井下式静力触探系统，通过集成液压推进与远程控制系统，实现了深海环境下110米深度的无

人化作业。未来，智能化设备将进一步融合机器学习模型，通过历史数据训练优化参数解释逻辑，例如自动识别土层界面、预测液化风险等级，甚至生成三维地质模型，显著提升勘察效率与决策科学性。

3.2 数据处理精细化

数据处理精细化是静力触探技术发展的核心方向。传统方法依赖经验公式转换参数，而现代技术通过多参数耦合分析提升精度。例如，孔压静力触探（CPTU）可同步获取锥尖阻力、侧摩阻力与孔隙水压力，结合有效应力原理修正软土强度参数，使不排水抗剪强度估算误差降低至15%以内。在数据处理层面，数字式探头已实现多通道数据同步采集，并通过高频采样（每厘米10组数据）捕捉土层微变化。国内研究团队基于东南沿海工程数据，建立了适用于水运工程的土类划分准则，通过引入土类指数与归一化摩阻比，将土层识别准确率提升至92%。未来，精细化处理将向实时反馈方向发展，例如在海上风电桩基施工中，系统可边触探边调整勘察方案，动态优化钻孔位置与深度。

3.3 多技术融合与协同

静力触探技术正与钻探、物探及原位测试技术形成协同体系。在深水工程中，井下式静力触探（Downhole CPT）与钻探循环作业的模式已成主流：先通过钻探清除硬质土层，再利用静力触探获取软土参数，最终结合十字板剪切试验验证结果。例如，广东地区海上风电工程中，该模式成功完成110米深度的触探测试，为桩基设计提供了连续土层剖面。此外，静力触探与地震波测试的融合显著提升了液化判别能力，通过分析触探过程中的剪切波速与阻力比，可定量评估砂土液化势。在近岸工程中，海床式静力触探（Seabed CPT）与多波束测深、侧扫声呐联用，可同步获取海底地形与土层信息，为跨海大桥、人工岛等工程提供三维地质模型支持。

3.4 绿色环保与可持续发展

随着海洋生态保护要求提高，静力触探技术的绿色化转型迫在眉睫。传统触探作业可能因探杆摩擦扰动海底沉积物，而新型设备通过优化贯入方式减少环境影响。例如，链式驱动系统采用液压缓冲技术，将贯入过程中的振动能量降低40%，避免对周边土体造成二次扰动。在材料选择上，国内企业已研发可降解探杆涂层，触探完成后涂层在海水作用下自然分解，减少海洋微塑料污染。此外，智能化设备通过精准控制贯入深度与速度，可减少无效作业时间，降低燃油消耗与碳排放。未来，静力触探技术将进一步融入海洋空间规划，例如结合潮汐能供电系统实现零排放作业，或通过模块化设计支持设备重复利用，推动海洋岩土工程向低碳化、可持续化方向发展^[3]。

结束语

静力触探技术作为海洋岩土工程的核心勘察手段，正随着智能化、精细化与绿色化浪潮加速迭代。从自动化设备的深海突破到多参数耦合的数据革命，从多技术协同的体系化应用到生态友好的可持续发展，其每一次进步都在重塑海洋工程的安全边界与效率标杆。面向未来，随着人工智能与海洋新能源技术的深度融合，静力触探将不仅局限于“探知”土层，更将成为海洋空间开发的全链条智能伙伴，为跨海通道、海上风电、深海资源开发等国家战略工程提供更精准、更环保、更可持续的技术支撑，助力人类向深蓝进发。

参考文献

- [1]黄启义.静力触探在岩土工程勘探中的应用[J].建材与装饰,2022(11):242-243.
- [2]刘松玉,吴燕开.论我国静力触探技术（CPT）现状与发展[J].岩土工程学报.2022.198-199
- [3]王钟琦.我国的静力触探及动静触探的发展前景[J].岩土工程学报.2021.165-157