

## 1 CPT/CPTU 国际参考性测试标准

翻译自 ISSMGE International Reference Test Procedure for the CPT/CPTU (IRTP 1999)。适用于静力触探和孔压静力触探测试的国际参考性测试标准 (International Reference Test Procedure for the CPT/CPTU, IRTP)，由国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC-16 技术委员会的工作组所完成，名为“基于原位测试的场地特性调查”。如下人员编写了本标准：

Tom Lunne——挪威岩土研究所(NGI)，挪威；

John Powell——建筑研究院(BRE)，英国；

Joek Peuchen——辉固公司，荷兰；

Rolf Sandven——挪威科技大学，挪威；

Martin van Staveren——Delft土力学实验室，荷兰。

**摘要：**静力触探测试采用一系列的探杆将圆锥探头以恒定的速率贯入土中。在贯入过程中，记录测得的锥尖阻力和侧壁摩阻力。孔压静力触探测试(CPTU)还可测量圆锥探头附近的孔隙水压力。测试的结果可用于土层划分、土类鉴别和土工参数评价。本报告为测试设备、现场操作步骤与结果的呈现提出了推荐性指南。此外，对精度、标定程序和维护方法提出了建议。这些建议旨在取代由国际土力学与基础工程协会(ISSMFE)于1989年针对电测式CPT/CPTU提出的国际参考性测试程序(IRTP)。本程序并非标准，而是为良好的实践而提出的一系列建议。这些建议旨在为未来全国性/国际性规范的形成提供基础。对机械式CPT，1989年的版本仍将有效。

### 目录

1. 引言
2. 定义
  - 2.1 静力触探测试
  - 2.2 静力触探探头
  - 2.3 圆锥头
  - 2.4 侧壁摩擦筒
  - 2.5 孔压过滤环
  - 2.6 测量系统
  - 2.7 探杆
  - 2.8 贯入设备
  - 2.9 贯入深度和长度
  - 2.10 减摩器
  - 2.11 锥尖阻力  $q_c$
  - 2.12 侧壁摩阻力  $f_s$
  - 2.13 孔隙水压力  $u$
  - 2.14 超静孔隙水压力  $\Delta u$
  - 2.15 净面积比  $a$
  - 2.16 修正锥尖阻力  $q_t$

- 2.17 摩阻比  $R_f$
- 2.18 孔压参数比  $B_q$
- 2.19 零读数、参考读数和零漂移
- 2.20 准确性、精度和分辨率
- 2.21 孔压消散试验
- 3. 方法
- 4. 设备
  - 4.1 静力触探探头的几何尺寸
  - 4.2 圆锥头
  - 4.3 侧壁摩擦筒
  - 4.4 孔压过滤环
  - 4.5 间隙和土封圈
  - 4.6 探杆
  - 4.7 测量系统
  - 4.8 贯入设备
- 5. 步骤
  - 5.1 静力触探探头的选择
  - 5.2 根据所需的精度等级选择设备和程序
  - 5.3 贯入设备的放置和水平
  - 5.4 静力触探探头的准备
  - 5.5 静力触探探头的贯入
  - 5.6 减摩器的使用
  - 5.7 记录参数的频率
  - 5.8 贯入深度的记录
  - 5.9 孔压消散实验
  - 5.10 测试完成
  - 5.11 测量的修正
- 6. 测试结果报告
  - 6.1 一般性报告和测试结果的呈现
  - 6.2 坐标轴缩放的选择
  - 6.3 测试结果的呈现
- 7. 参考文献

**附注 A:**

**A1 维护、检查和标定**

- A1.1 概述
- A1.2 探杆的直线性
- A1.3 圆锥头的磨损
- A1.4 间隙和土封圈
- A1.5 孔隙水压力测量系统
- A1.6 维护步骤

**A2 标定**

- A2.1 一般程序
  - A2.2 锥尖阻力和侧壁摩阻力的标定
  - A2.3 孔隙水压力和净端部面积比的标定
  - A2.4 温度效应的标定
  - A2.5 深度传感器的标定
- 附注 B 贯入深度的倾斜修正**

## 1.引言

本程序研究了两种类别的静力触探测试：

1. 电子式静力触探测试(CPT)，可测锥尖阻力和侧壁摩阻力；
2. 孔压静力触探测试(CPTU)，可额外测量孔隙水压力的静力触探测试(CPT)。

注意：这个文档也适用于不含侧壁摩擦筒的 CPT / CPTU。

CPT将带有圆锥头的圆柱形探头以恒定速率贯入至场地中。贯入过程中，测量施加在圆锥头与侧壁摩擦筒上的力。

CPTU 的运用与 CPT 一样，但在探头表面有一个或多个部位可额外测量孔隙水压力。

注意：通常，采用电子式传感器和数据采集系统进行测量，且以可获得关于土层条件的详细信息的频率进行测量。

CPT测试结果大体上可用于评估：

- 土层划分
- 土类鉴别
- 土密度和原位应力条件
- 土的力学特性
  - 抗剪强度参数
  - 变形与固结特征

注意：静力触探测试的结果，也可以直接用于设计，如桩基与液化势评价（例如 Lunne 等，1997）。

与标准 CPT 相比，孔压静力触探测试（CPTU）能提供更可靠的土层划分和土类鉴别结果。此外，CPTU 测试结果在土的力学性质解译上提供了更好的基础。

本参考性测试程序为设备和测试方法明确了定义和要求，这将引导用户采用相同的国际性步骤。

本参考性测试程序很大程度上建立在 ISSMFE 贯入测试技术委员会于 1989 年所提出的方法和指南的基础上，但进行了更新以对孔隙水压力的测量（也即 CPTU）进行详细说明。本报告并非标准，而是为良好的实践而提出的一系列建议。这些建议意在为未来全国性/国际性规范的形成提供基础。对机械式 CPT，1989 年的版本仍将有效。

注意：若测试结果与根据本报告得到的测试值相比偏差不大，则允许偏离本文件的要求。

## 2.定义

### 2.1 静力触探测试

采用一系列的探杆将端部的静力触探探头以恒定的速率贯入至地下土中。

## 2.2 静力触探探头

静力触探探头是由圆锥头、侧壁摩擦筒、任何其他传感器、测量系统以及相连的探杆所组成的集成系统。图 2.1 给出静力触探探头的剖面图。



图 2.1 探头贯入仪的内部结构剖面图

静力触探探头包含测量圆锥头所受压力（锥尖阻力）与侧壁摩擦筒所受摩擦力（侧壁摩阻力）的内置载荷传感器，若合适也可测量探头表面一个或多个位置的孔隙水压力。设置有内置测斜仪以测量探头的倾斜，确保符合1级、2级和3级准确性的要求，如表5.2所给出。

注意：其他传感器可以内置在静力触探探头中。

## 2.3 圆锥头

圆锥头顶角为  $60^\circ$ ，并构成静力触探探头的底部部分。当将探头贯入土中时，锥尖阻力通过圆锥头传递至载荷传感器中。

注意：本文件假设圆锥是刚性的，因此加载时相对于探头的其他部件，其相对形变是非常小的。

## 2.4 侧壁摩擦筒

侧壁摩擦筒是静力触探探头中测量侧壁摩阻力的部分。

## 2.5 孔压过滤环

孔压过滤环置于静力触探探头中的多孔元件，将孔隙水压力传递至孔隙水压力传感器，同时还需维持探头的几何形状不变。

## 2.6 测量系统

测量系统包括所有的传感器和用于静力触探测试过程中传输或存储电信号的附属部件，通常包括用于测量力（锥尖阻力和侧壁摩阻力）、压力（孔隙水压

力)和深度的元件。

## 2.7 探杆

探杆是一系列将压力或张力传递至静力触探探头的杆件。

注意：探杆也可以用于支撑或保护测量系统。在带有声学传感器的静力触探中，探杆还用于传输数据。

## 2.8 贯入设备

贯入设备是将静力触探探头和探杆以恒定速率竖直向贯入土体中的动力机械。

注意：通过负载或地锚可提供贯入设备所需的反力。

## 2.9 贯入深度和长度

贯入深度：圆锥头底部的深度，相对于固定的水平面（图 2.2）。

贯入长度：静力触探探杆与探头的总长度，减去圆锥头中圆柱形部分的高度，相对于固定的水平面（图 2.2）。

注意：固定的水平面通常为测试点的地面或水下地面。

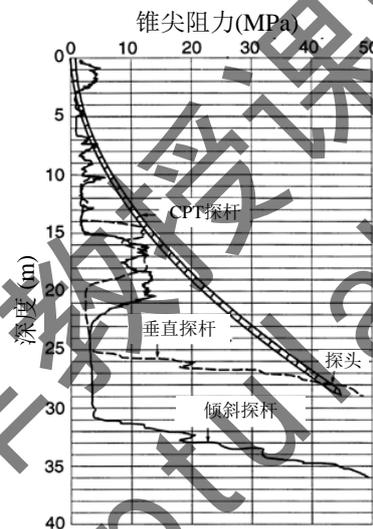


图 2.2 贯入长度和贯入深度

## 2.10 减摩器

减摩器由直径局部对称性扩大的探杆构成，以降低探杆沿线所受的摩擦力。

## 2.11 锥尖阻力

实测锥尖阻力  $q_c$  由圆锥头上测得的力  $Q_c$  除以圆锥头的截面积  $A_c$ ：

$$q_c = Q_c / A_c$$

## 2.12 侧壁摩阻力

实测侧壁摩阻力  $f_s$ ，等于作用于侧壁摩擦筒的力  $F_s$  除以侧壁摩擦筒的表面积  $A_s$ 。

$$f_s = F_s / A_s$$

### 2.13 孔隙水压力

孔隙水压力  $u$  为贯入过程与消散试验中的流体压力。孔隙水压力可以在不同的位置进行测量，如图 2.3。

使用下面的符号：

$u_1$ : 在圆锥头表面测得的孔隙水压力

$u_2$ : 在圆锥头的圆柱形扩展部位测得的孔隙水压力

$u_3$ : 紧随侧壁摩擦筒后测得的孔隙水压力

注意：实测孔隙水压力随土类、原位孔隙水压力以及静力触探探头表面孔压过滤环位置的变化而变化。孔隙水压力由 2 个部分组成，初始的原位孔隙水压力和由于贯入地下而产生的附加或超静孔隙水压力。

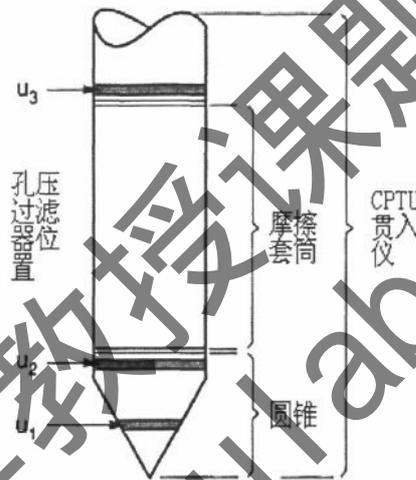


图 2.3 孔压测试单元的位置

### 2.14 超静孔隙水压力 $\Delta u$

超静孔隙水压力为  $\Delta u = u - u_0$ ， $u_0$  为贯入前探头所在水平面处场地中的原位孔隙水压力。

注意：应当根据测定孔隙水压力的位置决定采用  $\Delta u_1$ 、 $\Delta u_2$  或  $\Delta u_3$ ，参照表 2.3。

### 2.15 不等端面积比 $a$

静力触探圆锥头上部、测量孔隙水压力的间隙或凹槽部位处载荷元件或轴承的横截面积与圆锥头底座处横截面积的比值。

注意：参照 5.11 节和图 5.1。

### 2.16 修正锥尖阻力 $q_t$

修正锥尖阻力  $q_t$ ，为实测锥尖阻力  $q_c$  经过孔隙水压力影响的修正，如下计算：

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2$$

注意：5.11 节对这一修正给出了更详细的资料。

## 2.17 摩阻比 $R_f$

摩阻比为同一深度处测得的侧壁摩阻力与锥尖阻力的比值，以百分比表示。

注意：在某些情况下使用摩擦比的倒数，称为摩擦指数。在可能的情况下，应用采用修正锥尖阻力  $q_t$  来计算  $R_f$ 。

## 2.18 孔压参数比 $B_q$

孔压参数比定义为：

$$B_q = \frac{u_2}{(q_t - \sigma_{v0})}$$

其中  $\sigma_{v0}$  为探头贯入前，圆锥头同一水平面处所受到的竖向总应力。

## 2.19 零读数、参考读数和零位漂移

零读数：传感器受零荷载时测量系统的输出值，也即打开操作测量系统所需的任何辅助电源时，所有的实测值均为零。

参考读数：探头贯入土中前瞬间传感器的读数，例如在近海的情况下，在海床处水压力作用下的读数。

零位漂移：静力触探测试前后测量系统的零度数或参考读数之差。

## 2.20 准确性、精度和分辨率

准确性是指测量对象的测量值与真实值的接近程度，重点是测量系统的整体准确性，而非针对单独部分。

精度是指各组观测值之间的接近程度，与可重复性含义相近，可以采用表征离散性的标准偏差值来描述。

注意：就标定试验而言，若测量系统表现出可重复性然而非线性，则采用线性逼近来描述标定结果则会立刻导致准确性降低，然而这些结果仍然具备可重复性和精度。准确性的丧失可能与真实值和假定的标定直线之差有关。采用任何不正确的标定可能会导致具备可重复性（精度）的结果，然而存在系统误差而不准确。精度或可重复性并不能保证其准确性。

最理想的情况是仪器同时具备准确性和精度。这是在现场获得准确与精确读数的先决条件，然后有必要记录测试过程中可能影响最终读数的所有的信息，如温度和磨损等。

分辨率是测量系统所能检测到的测量对象值的最小改变量。它将影响测量的准确性和精度。

## 2.21 孔压消散试验

在孔压消散试验中，孔隙水压力的改变通过记录暂停贯入和保持静力触探探头静止时不同时刻的孔隙水压力实现。

## 3. 方法

应确定下述参考性条件：

a) 根据表 5.1 确定静力触探测试类型；

注意：应确定孔压过滤环的位置  $u_1$ ， $u_2$  或  $u_3$ 。

b) 根据表 5.2 确定准确性等级；

c) 所需的贯入长度或贯入深度；

注意：所需的贯入长度或贯入深度取决于土层条件、允许贯入压力、探杆与连接处的允许贯入压力、减摩器或探杆套管的应用以及静力触探探头的测量范围。

- d) 静力触探测试位置处地表或水下地表的海拔，以作为基准面。
- e) 静力触探测试相对于某个固定参考点的位置；
- f) 若可实现，由于静力触探测试产生的触探孔采用回填法处理；
- g) 若可实现，确定孔压消散试验的深度与持续时间。

注意：孔压消散试验所需的深度和最小持续时间取决于土层条件和测量目的。为避免不适当的长时间中断，最大消散持续时间也是通常作为参考条件。

注意：如果对土的排水或固结特征进行评价，可在该土层预先选定的深度处进行孔压消散试验。在孔压消散试验中，通过记录不同时刻的孔隙水压力来记录孔隙水压力的衰减。在低渗透性的细粒土中，采用孔隙水压力的记录来评估固结系数  $c$ 。在排水条件良好的土中，孔压消散试验可额外用来测量原位孔隙水压力。

应当根据第 5 节确定土的锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力、CPT 长度和 CPT 探头相对于铅垂线的倾斜量，根据表 5.2 对准确性分级、所需贯入深度和探头相对于铅垂线的最大允许倾斜量加以考虑

测试所需的设备应符合第 4 节的要求。

#### 4. 设备

##### 4.1 静力触探探头的几何形状

静力触探探头所有部件的轴线应重合。

注意：静力触探探头的设计应当以较高的净面积比，且侧壁摩擦筒的顶部截面积应优先选择等于或稍微大于底端的截面积。

##### 4.2 圆锥头

圆锥头由锥形部分和圆柱形扩展组成。圆锥头的公称顶角为  $60^\circ$ ，圆锥头公称截面积为  $1000\text{mm}^2$ ，对应于直径为  $35.7\text{mm}$ 。

注意：为特殊用途可采用直径位于  $25\text{mm}$  ( $AC=500\text{mm}^2$ ) 和  $50\text{mm}$  ( $AC=2000\text{mm}^2$ ) 之间的探头，而不施加修正因子。所推荐的几何尺寸与公差应根据直径按比例调整。

圆柱形部分的直径应位于公差要求的范围内，如在图 4.1 中示出：

$$35.3\text{mm} \leq d_c \leq 36.0\text{mm}$$

圆柱形扩展部分的长度应在公差要求的范围内：

$$7.0\text{mm} \leq h_c \leq 10.0\text{mm}$$

圆锥头的高度应位于公差要求的范围内：

$$24.0\text{mm} \leq h_c \leq 31.2\text{mm}$$

注意：如果  $u_2$  位置的孔压过滤环包含在则其自身的直径范围内，则该孔压过滤环应比上述适用于钢制元件的尺寸要大。另参见第 4.3 和 4.4 节。

圆锥头表面应当是光滑。

注意：表面的粗糙程度  $R_s$ ，通常应该是小于 5 微米。这定义为探头的真实表面与沿探头表面放置的介质参考曲面的平均偏差。另参见第 4.3 节备注。

若探头存在不对称磨损，即使满足的公差要求，也不得使用。

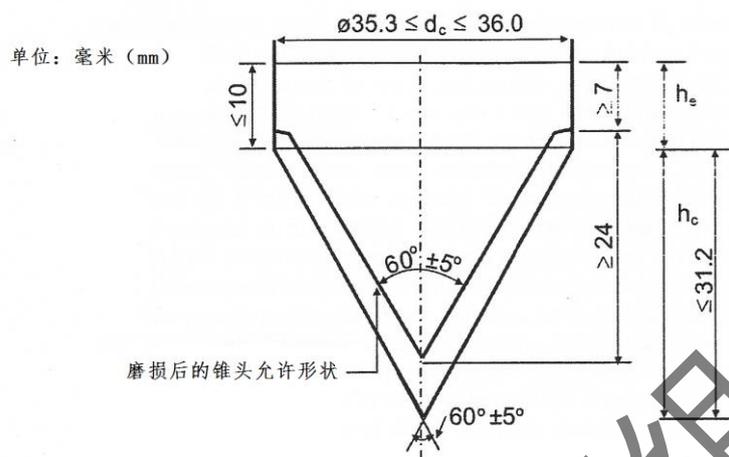


图 4.1 用于圆锥探头的公差需要

#### 4.3 侧壁摩擦筒

侧壁摩擦筒应放置在紧随圆锥头的上部，由于存在间隙和土封圈，两者最大间距为 5.0mm。

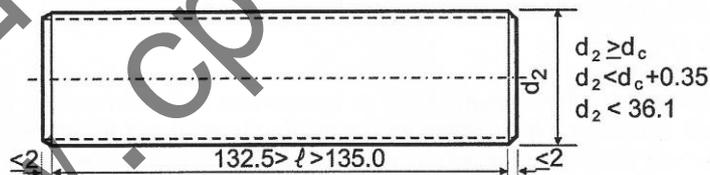
公称表面积应为  $150000\text{mm}^2$ 。公差要求如图 4.2 所示。

注意：其他直径位于 25mm 至 50mm 之间的侧壁摩擦筒可用于特殊目的，同时应配套直径相符的圆锥头使用，且不施加修正因子。所推荐的几何形状与公差应根据圆锥头底座直径按比例调整。侧壁摩擦筒的长度与圆锥体直径的最佳比值为 3.75，但在 3.5 和 4.0 之间的值是可允许的。

注意：锥形磨损会影响侧壁摩阻力的测量，为确保侧壁摩阻力测量的准确性，应考虑这一点。

侧壁摩擦筒的直径应等于圆锥头的最大直径，公差要求为 0 至 +3.5 mm。

单位：毫米 (mm)



$$A_s = 15000 \text{ mm}^2$$

图 4.2 摩擦筒的几何尺寸与公差

侧壁摩擦筒沿经线方向的表面粗糙度应位于  $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$  之间。

注意：表面粗糙度是指平均粗糙度  $R_a$ ，根据 ISO 8503(1988) 或同等标准规定的表面粗糙度比较板确定。平均粗糙度是“实际剖面与中心线距离绝对值的算术平均值”，且适用于特定的测试长度(一般范围在 2.0 毫米到 4.0 毫米，取决于所应用的标准)。表面粗糙度要求意在防止使用“异常光滑”和“异常粗糙”侧壁摩擦筒。钢，包括硬化钢，在土(尤其是砂土)中贯入时容易磨损，使用中使侧壁摩擦筒表面产生自有的粗糙度。因此保证制造产生的粗糙度接近

于实际应用时的粗糙度是非常重要的。则相信对表面粗糙度的要求将与实践中常见制造探头的钢材与场地土层条件相符合。因此实践中可能会对计量确认形成限制。岩土应用中参数  $R_a$

的使用是有所依据的，然而参数  $R_y$  的使用则可能更为中肯。表面粗糙度  $R_y$  为某个评定长度范围内最高峰值与最低波谷之间的距离，评定长度为单个试验长度中一系列评定长度的最大值。为确定几何尺寸对侧壁摩擦阻力准确性的影响，定义合适的参数并深入研究是有必要的。

#### 4.4 孔压过滤环

推荐孔压过滤环位于圆锥头圆柱形扩展之间或后部，而其他位置的孔压过滤环也是可取的，如图 2.3。

**注意：**位于所推荐探头之外的其他孔压过滤环位置可以提供有关土层条件的有用信息。

孔隙水压力  $u_2$ ：

孔压过滤环应放置在圆锥头的圆柱形扩展部位之间或之后。孔压过滤环的直径须符合圆锥头和侧壁摩擦筒的直径，公差限制于 0.0 到 +0.2mm。孔压过滤环可以更大，但绝不可小于圆锥头的直径。孔压过滤环直径不得大于侧壁摩擦筒。

**注意：**下面的关系式适用

$$d_{\text{侧壁摩擦筒}} \geq d_{\text{孔压过滤环}} \geq d_{\text{圆锥头}}$$

**注意：**该孔压过滤环位置也为土分类和解译目的提供了更一致的结果。

**注意：**为达到修正孔隙水压力对锥尖阻力的影响，孔压过滤环最佳位置应当在圆锥头与侧壁摩擦筒之间。推荐采用位于圆锥头的圆柱形扩展部位之间的位置，以获得并维持孔隙水压力体系的饱和状态。

孔隙水压力  $u_1$ ：

孔压过滤环的直径须符合圆锥头和侧壁摩擦筒的直径，公差限制于 0.0 到 +0.2mm。孔压过滤环的形状应当适应于圆锥头的形状，也即，孔压过滤环的尺寸应当等于而非大于过滤环位置处圆锥部分的直径。

**注意：**建议将孔压过滤环放置于圆锥头中间三分之一处。

孔隙水压力  $u_3$ ：

孔压过滤环的直径须符合圆锥头和侧壁摩擦筒的直径，公差限制于 0.0 到 +0.2mm。孔压过滤环的形状应当适应于圆锥头的形状，也即，孔压过滤环的尺寸应当等于而非大于侧壁摩擦筒的直径。

**注意：**建议将孔压过滤环置于侧壁摩擦筒与 CPT 探杆之间的间距中。

在测试开始时孔压过滤环应是饱和的。

**注意：**即便静力触探穿过了上部非饱和土层，孔压过滤环仍然应当是饱和度，这一点非常重要。

**注意：**多孔过滤环的孔隙尺寸为 2 和 20 微米之间，对应于  $10^{-4}$  至  $10^{-5}$ m/s 的渗透系数。应避免细颗粒造成过滤环材料堵塞。

**注意：**以下类型的材料已在正常固结软粘土具有良好的应用经验：烧结不锈钢或青铜，碳化硅，陶瓷，多孔聚乙烯和高密度聚乙烯。

静力触探探头的设计应便于过滤环的更换和液体室的饱和（见第 5.3 节）。

**注意：**至于饱和流体的选择、孔隙水压力测量系统的饱和以及凹槽处孔压过滤环的使用，见第 5.4 节。

#### 4.5 间隙和土封圈

静力触探探头不同部件之间的间隙应不超过 5mm。应采用土封圈保护间隙，阻止土颗粒的进入。

**注意：**相对于探头中的载荷元件和其他元件，土封圈必须是易变形的。

#### 4.6 探杆

对 1m 长的探杆，其两端偏离直线的偏移量应当在允许的极限范围内。探杆线性度的检查应当符合如下标准：

-每 5 根较低探杆对中心线的最大偏移量为 1mm。

-两根连接杆（5 根较低探杆中）最大偏移量为 4mm。

其它的探杆的最大偏移量为 2mm。（剩下）两根连接杆最大偏移量为 8mm。

**注意：**上述要求适用于 1m 长的探杆，若其他长度的探杆用于特殊目的，则上述要求应当相应调整。

**注意：**可通过保持杆垂直并旋转来检查探杆的线性度。如果出现摆动，则线性度不可取。

**注意：**沿探杆的摩擦可通过局部增加探杆的直径（减摩器）来降低。探杆涂抹润滑剂也可降低摩擦，例如测试期间灌注泥浆。

**注意：**地面以上的探杆，应通过滚筒、套管或相似的设备进行引导，以降低弯曲的风险。在水中或软土中打设套管同样也可避免探杆遭受弯曲。

**注意：**探杆的选择应参考所需的贯入压力和所选择的数据信号传输系统。

#### 4.7 测量系统

测量系统的分辨率应高于表 5.2 给出的准确度分级表中准确度的三分之一。

**注意：**电缆可用于将传感器的信号传输到在地面上的记录单元，或通过探杆进行声学传输棒，或电子传输至探头内部的记忆单元。

##### 锥尖阻力和侧壁摩阻力传感器

载荷传感器应能弥补潜在的偏心轴力。应设置记录侧壁摩擦力的传感器，使其测量侧壁摩擦筒沿线的摩擦力，而非法向的土压力。

**注意：**通常采用应变计记录锥尖阻力和侧壁摩阻力。

##### 孔隙水压力传感器

受荷时该传感器不应当表现出明显的变形。该传感器通过流体室与探头表面的孔压过滤环相交流。

**注意：**孔隙水压力传感器一般是薄膜类型的压力传感器。

**注意：**该系统测量贯入过程中周围土层的孔隙水压力。

##### 测斜仪

测斜仪应该有相对于竖轴至少 20°的测量范围。

##### 贯入长度的测量系统

该测量系统应包括用于记录贯入长度的深度传感器。

**注意：**如果相关，深度测量系统应当还包括对测量值的修正方法，这一修正来自于由于探杆卸荷而引起探杆相对传感器的上行。

#### 4.8 贯入设备

贯入设备应当可使静力触探探头以 20mm/s±5mm/s 的标准速度贯入土中。应当可对其加载或施加地锚反力，以限制其在贯入中相对地表移动。

**注意：**在测量中，不应使探杆悬空或旋转。

**注意：**贯入设备所给出的行程至少为 1000mm。特殊情况下可采用其他行程长度。

### 5. 程序

#### 5.1 静力触探探头的选择

根据表 5.1 选择一个满足测试要求的静力触探探头。

表 5.1 静力触探测试的种类

静力触探测试的种类	测量参数
A	锥尖阻力
B	锥尖阻力和侧壁摩阻力
C	锥尖阻力和孔隙水压力
D	锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力

注意：在多处测量孔隙水压力的静力触探测试是 C 类和 D 类的变异体。

## 5.2 根据要求的精度等级选择设备和步骤

试验使用的设备和步骤应该根据表 5.2 规定的精度等级来选择。

如果考虑所有的误差来源，试验记录的误差应该比表 5.2 中规定的误差最大值要小。

注意：误差来源可能包括设备内摩擦、数据采集误差、偏心荷载以及温度影响。

表 5.2 精度等级表

精度等级	测量参数	允许的最小精度*	测量之间的最大长度
1	锥尖阻力	50kPa 或 3%	20 mm
	侧壁摩阻力	10kPa 或 10%	
	孔隙水压力	5kPa 或 2%	
	倾斜	2°	
	贯入深度	0.1 m 或 1%	
2	锥尖阻力	200kPa 或 3%	20 mm
	侧壁摩阻力	25kPa 或 15%	
	孔隙水压力	25kPa 或 3%	
	倾斜	2°	
	贯入深度	0.2 m 或 2%	
3	锥尖阻力	400kPa 或 5%	50 mm
	侧壁摩阻力	50kPa 或 15%	
	孔隙水压力	5kPa 或 5%	
	倾斜	5°	
	贯入深度	0.2 m 或 2%	
4	锥尖阻力	500kPa 或 5%	100 mm
	侧壁摩阻力	50kPa 或 20%	
	贯入深度	0.1 m 或 1%	

\*定义详见章节 2.20

注意：测量参数的允许最小精度是两个规定值的较大值。

注意：用贯入长度和测得的倾斜计算贯入深度的相关内容请查看附录 B。

注意：等级 1 试验成果用来作为成层和土的类型精确评价以及包括软土或松散土的简介中作为参数说明。等级 3 和 4 的测量成果应当只能作为成层以及硬土的参数评价。等级

2 更适用于硬质粘土和沙土。

**注意：**在极端气温条件下，探头应该收存起来，因为他的适宜工作温度为 0-25℃。探测期间，零点读数应该在探头温度和地面温度尽可能接近时进行。并且数据采集系统中所有的传感器和其他电子元件应该处于稳定的工作温度。

**注意：**普遍认为等级 1 试验（见表 5.2）的探头传感器温度敏感性应该优于：

探头传感器	温度敏感性
锥尖阻力	2.0 kPa/°C
侧壁摩阻力	0.1kPa/°C
孔隙水压力 (测量范围 1-2MPa)	0.05~0.1kPa/°C

这些稳定性要求应适用于 5 吨承载力的探头。对于不同承载力的探头，考虑到对测量值精度的影响，上述要求可以按比例改变。

**注意：**对于所有的精度等级，温度敏感性是表 5.2 规定的 CPT 精度等级表的必要组成部分。

静力触探测试中使用的测量学内容参见 ISO 10012-1:1992(E)

### 5.3 位置和贯入设备等级

贯入设备的位置离上次静力触探测试位置至少为 1 m，或者与上次钻孔的距离至少为钻孔直径的 20 倍。

**注意：**过低的距离可能会影响到测量。

贯入设备应该推动探杆使压力的轴线尽可能竖直。压力的轴线偏离铅垂线的角度应少于 2°。探头的轴线应符合贯入起始的荷载轴线。

### 5.4 静力触探探头的准备工作

圆锥底部实际横截面面积以及摩擦套筒的实际外柱面表面积应根据表 5.2 规定的精度等级来测量和记录。

对孔压静力触探探头，在现场使用之前，孔压过滤环和孔隙水压力测量系统的其他部件应在液体中饱和。

**注意：**通常当在饱和土中进行测量时要使用脱气蒸馏水。当在非饱和土、干土以及膨胀土（如密实沙土）中进行贯入测试时，孔压过滤环应该在甘油或类似液体中进行饱和，这使探头在试验过程中维持饱和。当使用脱气水时，孔压过滤环应该至少煮 15 分钟。孔压过滤环保存在封存容器中之前应先在水中冷却。应该准备更大容积的脱气水，这些水在设备使用之前是必需的。某些类型的孔压过滤环不能煮沸（如高密度聚乙烯 HDPE）。如果使用甘油或者硅油，干燥的孔压过滤环应直接浸泡在液体中并且抽真空近 24 小时。大容积的液体应该作相似处理并且封存在容器中。传感器室通常浸泡在与孔压过滤环饱和和液体相同的液体中。可以通过直接将液体注入传感器室或将拆卸的探头置于真空室中完成。在气泡不再从探头中出来之前应一直保持真空（大约 15~30 分钟）。最终设备应该是孔压过滤环和封存设备以及探头浸泡在液体中完成组装。完成组装后应该检测孔压过滤环是否合适。孔压过滤环的应充足高使其不会松动，但要足够小使其能被指尖旋转。这将使孔压过滤环连接处没有过多的压力产生，也可以减少一些对测量的影响。完成孔压过滤环的组装后，将孔压过滤环元件用橡胶膜包起来，在探头进入土中后，橡胶膜就会破裂。其他可选方案也是可以的。如果怀疑有堵塞，那么需要更换新的孔压过滤环后

重新进行各个试验。

**注意：**在浸泡和安装橡胶膜期间，探头将会受到一些较小的压力，所以传感器会显示非零值。

**注意：**狭缝孔压过滤环

在这个系统中，通过紧靠在圆锥之后的带有一个 0.3 mm 狭缝的开放系统来测量孔隙水压力（如 Larsson, 1995）。因此土和压力室之间的多孔过滤环元件是多余的。这个狭缝通过几个通道连接压力室。压力室浸泡在无空气水、防冻液或者其他液体中，但是通道浸泡在甘油、硅油或类似液体中。甘油和硅油都能很好地满足现场使用。当使用硅油时，硅油被直接从软管注射入通道中，这会导致孔隙水压力系统的不充分浸泡，因为油里面可能有气泡。这可以通过使用甘油避免，但是更多时候需要准备使用这种浸泡介质。狭缝孔压过滤环的使用可能减少探头准备所需的时间。另外，当探头通过土中非饱和区域时，这种孔隙水压力系统也能更好地保持饱和。饱和系统的压力变化通过压力传感器记录下来，类似于传统的有孔过滤孔压传导器。至于其他圆锥探头，对于充分浸润的要求是相同的，这样在贯入期间可以获得充足的孔隙水压力反应。

**注意：**预钻孔

当贯入粗颗粒的材料时，如果贯入停在了密实、粗粒或者石头富集的土层，可能需要在部分层面进行预钻孔。预钻孔可能用在粗粒顶层，有时候结合套管使用，避免钻孔崩塌。在软土或松散土层，预钻孔应该用来通过硬层到达地下水面。如果孔压通过水饱和系统测量，则预钻孔内应该充满水。如果地下水面在较深处，孔隙水压力系统应该用甘油饱和。在某些情况下，预钻孔可以通过打入一根直径为 45~50mm 的模拟钻杆完成，模拟钻杆穿过密实层提供一个开孔并且减小贯入阻力。

**注意：**温度稳定

开始试验前，应在圆锥探头未加载并且温度理想地稳定于地面温度时，进行所有传感器的初始读数。当圆锥探头低于地面时，如果空气温度与地面温度不同，则小的温度梯度将会出现。这将影响传感器，因此探头达到平衡是重要的，目的是温度梯度可以被减小到零在贯入开始之前。通常，2~3 分钟后会出现最大的梯度。圆锥探头通常在 10~15 分钟后达到完全的温度稳定。

要求精度见表 5.2，校准步骤见附录 A。

锥尖阻力、贯入长度、侧壁摩阻力、孔隙水压力和圆锥探头相对铅垂线倾斜的起始读数应该记录下来。

**注意：**无论何时，起始读数应该在圆锥探头温度与地面温度相同或接近时读取。

**注意：**水下静力触探测试的参考读数适用于紧靠地下水面的表面。

## 5.5 静力触探探头的贯入

在贯入测试期间，探头应该以恒定贯入速率  $20 \pm 5 \text{ mm/s}$  贯入地下。贯入速率可以通过记录时间来检查。

**注意：**贯入被视为是连续的，即使由于等待新一轮的行程或者为了组装新的探杆而有规律地停止。一些贯入设备能进行没有任何停止的真实连续贯入，这是一个优点之处，尤其应用成层的粉质和粘土层中时。

**注意：**如果有较大的停顿，例如孔压消散试验（见章节 2.21）或者由于意外的机器故障

时贯入认为是不连续的。

## 5.6 减摩器的使用

减摩器（定义详见章节 2）的使用是允许的。在减摩器的引入之前，圆锥探头和相关探杆至少应有 400mm 的长度段具有相同的直径。

## 5.7 参数记录频率

最低参数记录频度应该与表 5.2 相关。对于表 5.2 规定的精度等级 1 和等级 2 记录应该包括时间。

注意：不同测量值的记录间隔也可以根据介绍的要求细节来选择，例如薄层的探测。通常，锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力的记录间隔是相同的。

注意：超过 20mm 测量间隔的测量平均值是可用的，即使测量更多次。最大记录间隔应该根据表 5.2 决定。

## 5.8 贯入深度的记录

圆锥底座的水平面应根据表 5.2 确定，与地面或其他固定的参考体系（并非贯入设备）有关。深度传感器的分辨率至少应为 0.01m。

贯入长度应该至少每 5m 测量并记录一次，并根据表 5.2 规定的精度等级 1 确定，而非采用深度传感器。

当达到第 3 节规定的贯入长度或贯入深度或者圆锥探头相对铅垂线的倾斜达到 20°时，圆锥探头和探杆的贯入应该终止，不能使用深度传感器测量和记录贯入长度。

注意：当圆锥探头倾斜较大时，测量所得参数值会与圆锥探头在竖直状态下的测量值有所偏差。附录 B 给出了利用贯入长度和倾斜测量值计算贯入深度的方法。

注意：在贯入测试期间与本标准不符的试验细节应该记录下来，这会影响到测量成果以及对应的贯入长度。

## 5.9 孔压消散试验

应测量随时间变化的孔隙水压力和贯入阻力，在孔压消散试验开始阶段进行频繁的读数尤为重要。

注意：孔压消散试验开始的第一分钟记录频率至少为 2Hz，试验进行到 1~10 分钟时记录频率应为 1Hz，试验开始的 10 分钟到 100 分钟内记录频率为 0.5Hz，之后的试验中记录频率为 0.2Hz。

注意：孔压消散试验的持续时间通常至少为对应孔隙水压力消散达到 50% ( $t_{50} > u_t = u_0 + 0.5u_i$ ) 的时间，因为  $t_{50}$  是解译方法中最常用的。

注意：在孔压消散试验中，当锥尖阻力达到恒定值时可以停止贯入过程。实际试验中锥尖阻力的变动是不可避免的，这取决于设备类型、土层情况等因素。

## 5.10 测试完成

各测量参数的起始读数应该在圆锥探头从土中取出之后测量和记录，如果有必要可在圆锥探头清洗后测量和记录。起始读数的浮动应该满足表 5.2 规定的精度等级的最小允许精度。

应该对探头进行检查，任何过度磨损或毁坏都应该记录下来。

### 5.11 测量成果修正

由于贯入中断而产生的不具代表性的测量值应该进行修正。当测量参数的起始浮动可以近似满足表 5.2 规定的精度等级时，测量参数的修正就完成了。

当探头处于完全的水压力中时会对锥尖阻力、侧壁摩阻力的测量造成影响。这可以由圆锥头与侧壁摩擦筒之间凹槽中的孔隙水压力和侧壁摩擦筒上部凹槽中的孔隙水压力来解释。当使用表 5.1 给的类型 C 和 D 的探头并且过滤元件位于圆锥头的圆柱形扩展部位 ( $u_2$ ) 上时，使用下述修正公式来修正这种影响（如 Campanella et al., 1982）：

锥尖阻力：

$$q_t = q_c + u_2(1-a)$$

$q_t$  经过修正的锥尖阻力

$q_c$  锥尖阻力

$u_2$  圆锥头圆柱形扩展部位测得的孔隙水压力（假设与圆锥头与侧壁摩擦筒之间的孔隙水压力相等）

$a$  净面积比  $a = A_n / A_c$ （见图 5.1）

$A_c$  圆锥投影面积

$A_n$  加载单元或探杆面积

注意：仅当测量  $u_2$  时推荐使用此修正。在某些土中为确定非  $u_2$  位置的孔压过滤环而需要  $q_t$  时，可采取近似计算步骤。

注意：对常用的圆锥探头净面积比  $a$  的取值范围是 0.3~0.9。面积比不能仅仅通过几何方法测定，还需要通过压力室试验或类似方法确定。

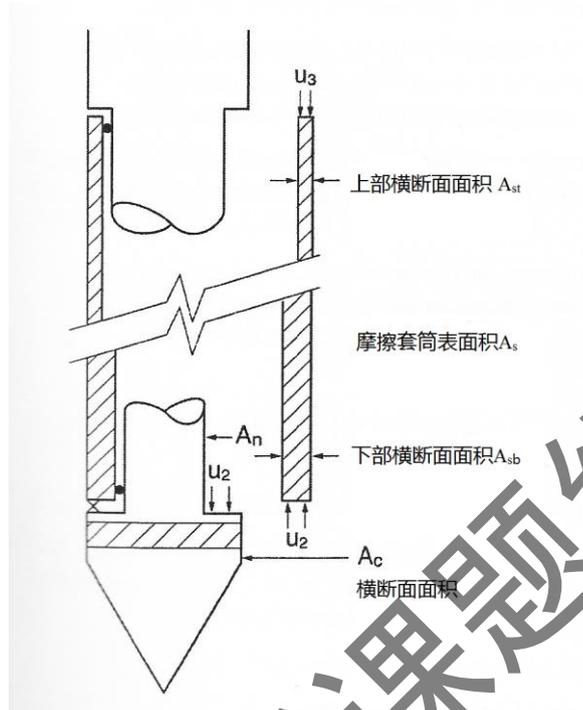


图 5.1 由于端部面积不等效应造成的锥尖阻力和侧壁摩阻力修正

注意：测得的侧壁摩阻力受到相同因素的影响。然而由于侧壁摩擦筒上部的孔隙水压力不常测量，故通常使用未经修正的侧壁摩阻力  $f_s$ 。下面给出对记录的侧壁摩阻力可用的修正方法。见图 5.1:

侧壁摩阻力:

$$f_f = f_s - \frac{(u_2 A_{sb} - u_3 A_{st})}{A_s}$$

式中

$f_f$  经过修正的侧壁摩阻力

$f_s$  侧壁摩阻力

$A_s$  侧壁摩擦筒表面积

$A_{sb}$  侧壁摩擦筒底部横截面面积

$A_{st}$  侧壁摩擦筒顶部横截面面积

$u_2$  圆锥头和侧壁摩擦筒之间测得的孔隙水压力

$u_3$  侧壁摩擦筒上部测得的孔隙水压力

仅当  $u_2$  和  $u_3$  同时测出时可以使用这个修正方法。

注意: 细粒土的贯入过程中存在明显的超静孔隙水压力, 因此这些修正方法是很重要的。当试验成果用于解释和土分类时推荐使用修正值。

倾斜的修正也应该根据附录 B 中给定的步骤进行, 以满足表 5.2 规定的精度等级 1、2、3。在利用贯入长度计算贯入深度时需要用到倾斜修正。

注意: 为满足表 5.2 规定的精度等级要求, 还要用到多种其他修正方法, 例如: 温度影响、圆锥横截面积、探杆压缩以及贯入设备回弹等修正。

## 6 试验成果报告

### 6.1 试验成果的一般提交和展示

静力触探测试的成果报告应包含下面内容 (标有\*的内容应该在报告的每一节中都有包含):

- 圆锥探头类型、几何度量规格、孔压过滤环位置、净面积比。  
注意: 圆锥头和侧壁摩擦筒的实际度量规格应在任何时候都适用。
- 选用的贯入设备类型、承载力、相关的千斤顶和地锚系统
- 所使用的地锚 (数量和类型)
- 测试日期\*
- 测试类型\*
- 静力触探测试的坐标和高度\*
- 参考高度
- 距离地下水位线的深度
- 原位孔隙水压力的测量
- 预钻孔深度  
注意: 可能的话要包括遇到的材料类型
- 挖掘深度 (如果有挖掘)  
注意: 可能的话要包括遇到的材料类型
- 起始贯入深度
- 孔隙水压力系统中使用的饱和液体 (对孔压静力触探测试而言)
- 贯入过程中停止的深度以及可能的原因 (如孔压消散试验)
- 试验开始和结束时锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力的零读数以及机器的零位漂移 (以工程单位计量)
- 使用的停止标准, 如目标深度、最大贯入力等
- 数据处理中使用的修正方法, 如零位漂移
- 参考的标准, 如 IRTP 或其它标准
- 试验类型 (见表 5.1) 及精度等级 (见表 5.2)
- 如有可能, 对贯入深度最大间距为 1m 时, 圆锥探头偏离垂直轴线的倾斜

注意: 在试验成果报告中, 信息要易于读取, 如使用表格或标准归档方案。

注意: 除了上述信息外, 报告中还推荐包含下面内容:

- 静力触探探头制造商
- 测试中的一些观察情况, 如石块、探杆噪音、倾斜、扣杆、非正常磨损或起始读数以及参考读数的变化
- 探头的序列号和传感器的量程
- 传感器最后标定时间

## 6.2 坐标轴比例尺的选择

在试验成果的图表报告中如需要可选择下列坐标轴比例尺：

贯入深度 $z$	1 cm=1 m
锥尖阻力 $q_c$ 、 $q_t$	1cm=2MPa
侧壁摩阻力 $f_s$ 、 $f_f$	1cm=0.05MPa=50kPa
孔隙水压力 $u$	1cm=0.2MPa=200kPa
摩擦比 $R_f$	1cm=2%
孔压参数比 $B_q$	1cm=0.5

注意：如果在附加的章节里使用了推荐的坐标轴比例尺，在报告中则可以使用一个不同的坐标轴比例尺。例如可以在一般报告中使用的推荐的坐标轴比例尺，而在某些用来详细研究的特定章节中使用不同的坐标轴比例尺。在粘土中并且试验成果用来作土参数的说明（精度等级为表 5.2 规定的等级 1 和 2）时，在成果报告中使用放大的坐标轴比例尺非常重要。

孔压消散试验成果的坐标轴比例尺应适合测量数据（如锥尖阻力  $q_c$ 、孔隙水压力  $u$  和时间  $t$ ）。

注意：通常的报告格式是对  $q_c$  和  $u$  使用线性坐标轴比例尺，而对时间  $t$  使用对数坐标轴比例尺。

## 6.3 试验成果提交

试验成果应该按以下连续剖面形式提交：

-锥尖阻力—深度  $q_c$  (MPa)- $z$  (m)

-侧壁摩阻力—深度  $f_s$  (MPa)- $z$  (m)

-孔隙水压力—深度  $u_2$  (MPa)- $z$  (m)

-其他孔隙水压力—深度  $u$  (MPa)- $z$  (m)

（应给出孔隙水压力测试位置）

当需要测量倾斜时，这里的深度应该是根据表 5.2 修正过的。

根据章节 6.1 若静力触探测试的提交成果满足精度等级 1 和 2 则要包含表列数据。根据表 5.2 每单位贯入长度距离的表列数据要包括时间  $t$  (s)、贯入深度  $z$  (0.01m)、锥尖阻力  $q_c$  (0.01MPa)，并且如果需要的话还要包含侧壁摩阻力 (1kPa)、孔隙水压力 (1kPa)、摩擦比  $R_f$  (0.1%)、修正的锥尖阻力  $q_t$  (0.01MPa)、圆锥探头的倾斜 ( $^\circ$ )。

有关的锥尖阻力和侧壁摩阻力 ( $f_t$ ) 修正值 ( $q_t$ ) 应额外绘制曲线图，并且在后期数据处理中优先使用。在端部面积修正影响可以忽略的粗粒土中进行测试时可以例外。

注意：原位孔隙水压力可以用地下水面位置以及局部孔隙水压力测量值来合理评价。它也可以通过透水层的孔压消散试验来评估。总的附加应力剖面可以通过原位密度测量来确定，也可以在实验室用未扰动样本来确定。如果缺乏足够的信息，密度估计值可通过基于静力触探测试成果和当地经验的土分类图表来确定。

注意：测量数据的后期处理可利用下列关系进行：

-超孔隙水压力	$\Delta u = u - u_0$
-净锥尖阻力	$q_n = q_t - \sigma_{v0}$
-摩擦比	$R_f = (f_s / q_c) \times 100\%$
-孔隙水压力比	$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0}) = \Delta u_2 / q_n$
-超孔隙水压力的标准化	$U = (u_t - u_0) / (u_i - u_0)$

$u_t$  孔压消散试验中  $t$  时刻的孔隙水压力

$u_i$  孔压消散试验开始时的孔隙水压力

注意：另外，下面的公式可用于有效应力的计算：

-锥尖阻力数  $N_m = q_n / (\sigma_{v0} + a)$  ( $a = \text{attraction}$  吸引力)

注意：在试验数据处理中需要下列参数信息：

-原位初始孔隙水压力 - 深度  $u_0$  (MPa)- $z$  (m)

-总上覆应力 - 深度  $\sigma_{v0}$  (MPa)- $z$  (m)

-有效上覆应力 - 深度  $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$

注意：这些参数或者衍生值以及归一化值可用于土层鉴别、土分类以及作为工程解译的基本输入。

## 7 参考文献

Campanella R G, Gillespie D, Robertson P K. Pore pressure during cone penetration testing. Proceedings of the European Symposium On Penetration Testing II, 1982, 2: 507-512. Rotterdam: Balkema.

ISO 1988. Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast-clean steel substrates. ISO 8503 (1988).

ISO 1992. Quality Assurance Requirements for Measuring Equipment - Part 1: Metrological Confirmation System for Measuring Equipment, ISO 10012-1:1992(E). ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing (1989) Report on Reference

Test Procedures, TC 16. Swedish Geotechnical Society (SGF), Information No.7.

Larsson R. Use of a thin slot as filter in piezocone test. Proceedings of the Cone Penetration Testing, 1995, 2: 35-40.

Lunne T, Robertson P K, Powell J J M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. London: E&FN Spon, an imprint of Routledge,1997.

## 附注 A 维护、检测以及标定

### A1 维护和检测

#### A1.1 总则

本附录包含关于维护、检测以及标定的指导信息。这些准则用于实现良好的工程实践。

#### A1.2 探杆的线性度

在开始试验前应检测探杆的线性度。在平台表面滚动探杆会获得探杆线性度的粗略结果。如果探杆有任何弯曲，则应该按照章节 4.6 列出的步骤来检测探杆的线性度。

#### A1.3 探头的磨损

圆锥头和侧壁摩擦筒的磨损情况应定期检查，确保满足几何公差。此项控制中会用到一个类似于全新的未使用的探头的标准几何模型。

#### A1.4 凹槽和密封圈

探头不同组件之间的凹槽和密封圈应定期检查。尤其是应检查密封圈确保没有土颗粒，保持干净。

#### A1.5 孔隙水压力测量系统

在进行孔隙水压力测量前应确保孔压过滤环有充分的渗透性以获得合适的响应。测试前应保证孔压过滤环在液体中饱和。在贯入开始前，孔隙水压力系统应该确保完全饱和，并且这种饱和应在圆锥探头到达地下水面或饱和土之前一直保持。

#### A1.6 维护步骤

进行设备维护和标定时，应使用表 A1.1 中的检测计划，对于特殊设备还应该参考制造商的操作手册。

表 A1.1 日常维护推荐管理计划

常规检测项	项目开始	试验开始	试验结束	每三个月
贯入设备的竖直性		X		
贯入速率		X		
深度传感器				X
安全功能	X			X
探杆	X	X		

磨损	X	X	X	
凹槽和密封圈	X	X	X	
孔压过滤环	X	X	X	
零位漂移		X	X	
标定	X			X*
功能控制	X			X

标\*的也要在长期试验的间隔时进行

## A2 标定

### A2.1 一般程序

一个新的圆锥探头必须进行下述标定：

- 净面积比，用来修正测量所得的锥尖阻力侧壁摩阻力
- 内摩擦影响-限制独立部件的移动
- 可能的干扰影响（如电气串扰等）
- 短期温度影响

应对每个圆锥探头进行单独检测和标定。在探头的使用期间，功能和圆锥探头几何上的一些改变会有不同表现。在这种情况下应对探头进行再次标定。对数据采集系统应根据下列标准进行定期标定：

圆锥探头连续使用时至少每三个月进行一次标定，或者进行约 100 次触探（约 3000 m）后进行一次标定。

在困难条件下探测后，探头已接近其最大承载力，这时需要进行一次标定。

标定时应使用与现场测试相同的数据采集系统包括线缆，对系统的每一项可能的内在错误进行检测。在现场工作期间应进行设备的正常功能管理。这些应该每个位置或者每天至少进行一次。而且如果操作员认为荷载传感器过载时应该进行功能管理以及重新标定。

一般应遵守 ISO 10012-1:1992(E)规范中陈述的要求。

### A2.2 锥尖阻力和侧壁摩阻力的标定

锥尖阻力和侧壁摩阻力的标定通过对圆锥头和侧壁摩擦筒逐步加载和轴向卸载进行。单独对侧壁摩擦筒加载时，圆锥头应该用适合测试的专用单元替换。这个单元使轴向力传递到侧壁摩擦筒的低端。锥尖阻力和侧壁摩阻力的标定应该分开进行，需要检测其他传感器以确保它们不被施加的荷载影响。要对不同的测量范围进行标定，特别是实验中将会用到的测量范围。标定一个新的探头之前，需要将传感器进行 15~20 次加载循环直到最大荷载。对圆锥和侧壁摩擦筒的分开标定要求通常不用于消减圆锥探头。

应该检测非轴向加载对圆锥探头以及测量参数的影响。

### A2.3 孔隙水压力和净面积比的标定

对孔隙水压力测量系统的标定应该在压力室内完成。由于孔隙水压力对锥尖阻力和侧壁摩阻力有影响，对净面积比  $a$  的标定应该在特制的压力室（如图 A1）内进行，这样的设计可以是探头的低端部分进入压力室并且被密封入侧壁摩擦筒中。探头密封的部分会受到逐渐增加的腔内压力，此时锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力会被记录下来。用这种方法孔隙水压力传感器会获得一条标定曲线，

净面积比可以通过锥尖阻力和侧壁摩阻力的反馈曲线确定。压力室也可以很好地用于检测孔隙水压力传感器对循环压力变化的反应。

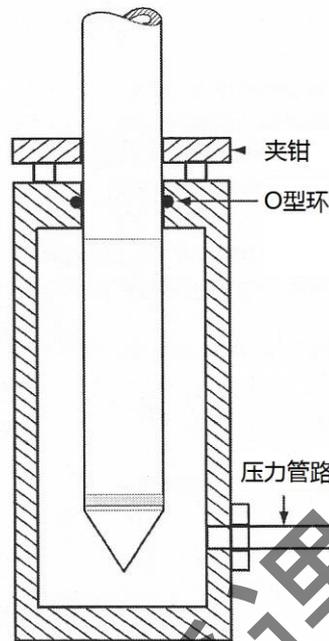


图 A1 确定末端面积比  $a$  和  $b$  的压力室（引自 Lunne 等，1997）

#### A2.4 温度影响的标定

探头还需要在不同温度在下标定温度效应，例如将圆锥探头沉入不同温度的水箱中。传感器信号稳定时将其值记录下来。从这些结果中可以获得不同温度下的零点读数变化，也可以大致了解在现场试验时需要达到温度稳定的时间。

上述规定只适用于环境温度，不适用于瞬态温度。

#### A2.5 深度传感器的标定

深度传感器应该至少每 3 个月标定一次，或者在维修后要进行标定。

#### 附注 B 贯入深度的倾斜修正

根据表 5.2 规定的精度等级 1、2 和 3，静力触探测试的深度可以按下式由倾斜作修正：

$$z = \int_0^l C_h dl$$

$z$  贯入深度，m

$l$  贯入长度，m

$C_h$  圆锥探头相对竖直轴线的倾斜的修正因子

圆锥探头相对竖直轴线的倾斜的修正因子  $C_h$  的计算公式：

a) 对于当前方向的测斜仪：

$$C_h = \cos \alpha$$

$\alpha$  圆锥探头轴线和垂直轴线之间夹角的测量值， $^{\circ}$

b) 对于双向轴向测斜仪

$$C_n = (1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta)^{-1/2}$$

$\alpha$  垂直轴线和圆锥探头在垂直平面上投影的修正轴线的夹角

$\beta$  垂直轴线和圆锥探头在垂直于角  $\alpha$  平面的平面的投影的夹角

注意：对 CPT 深度还需要额外的修正

注意：贯入深度修正系数的确定应考虑一个复杂的加载序列。附加因数包括：弯曲、探杆的压缩、探杆的连接、地面或水下地面的垂直运动以及深度传感器相对地面或水下地面的垂直运动。在某些情况下，如贯入中断时，可能使用升降补偿来修正弯曲、探杆的压缩以及探杆的连接。

蔡国军教授课题组  
WWW.CPTULAB.COM