

附录 2 电子式摩擦型静力触探 CPT 和孔压静力触探 CPTU 标准测试方法

目次

1 范围	1
2 参考文献	2
2.1 ASTM 标准.....	2
3 术语	3
3.1 定义	3
3.2 具体条款定义.....	3
3.3 简称	5
4 测试方法总结	6
5 意义和使用	7
6 干扰因素	8
7 装置	9
7.1 摩擦型静力触探.....	9
7.2 测量装置	13
7.3 探杆	13
7.4 减摩器	14
7.5 贯入系统和反力系统.....	14
7.6 其他传感设备.....	14
8 试剂和材料	15
8.1 O 型圈化合物.....	15
8.2 丙三醇或乙二醇.....	15
8.3 硅油	15
9 危害	16
9.1 一般的技术措施.....	16
9.2 技术措施.....	16
9.3 孔压探头	17
10 标定和标准化	18
10.1 电子式摩擦型探头.....	18
10.2 孔隙水压力传感器	19
10.3 标定其他传感设备.....	20
11 条件	21
12 步骤	22
12.1 一般要求	22
12.2 摩擦型静力触探.....	22
12.3 电子式孔压静力触探.....	23
12.4 探头的操作和数据解译指南.....	24
12.5 取回探杆	25
13 计算	26
13.1 摩擦型静力触探.....	26
13.2 锥尖阻力:	26
13.3 侧壁摩擦力:	27
13.4 摩阻比	27

13.5 孔隙水压力的数据.....	28
13.6 标准化 CPT 的测量.....	28
14 报告.....	30
14.1 报告下列信息.....	30
14.2 设备.....	31
14.3 校准认证.....	31
14.4 图表.....	31
15 精度和偏差.....	33
15.1 精度.....	33
15.2 偏差.....	33
16 关键词.....	34
附注 A 背景资料.....	35
附注 B 电子式摩擦圆锥贯入仪的常见结构.....	40
附注 C 锥体的制造和操作公差.....	41
附注 D 贯入设计配置.....	42
附注 E 传统静力触探试验示例图.....	43
附注 F 静力触探图示.....	44
本附录翻译文献 ASTM. 2007. Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. ASTM standard D5778-07. ASTM International, West Conshohocken, Penn.	

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

1 范围

1.1 本测试方法包括在圆锥探头以稳定的速率贯入到地下土中时确定锥尖阻力的过程。

1.2 本测试方法也可以用来在圆锥探头以稳定的速率贯入到地下土中确定位于圆锥后部圆柱形套筒的摩阻力。

1.3 本方法运用到电子式和电测试的摩擦型静力触探探头上。采用机械式探头进行现场测试的方法见于测试方法 D3441 中。

1.4 本测试方法能够用来确定在贯入过程中产生的孔隙水压力，因此被称为孔压静力触探。贯入后超静孔隙水压力的消散也能用来监测固结和渗透的时间。

1.5 其他传感器，例如测斜仪，地震检波计（D7400），电阻率，电导率，介电常数和温度传感器等在探头中提供有用的信息。非常推荐使用测斜仪，因为它提供了测试过程中可能出现损坏情况时的信息。

1.6 静力触探测试数据能够用来解译地面以下的地层，而且通过使用场地特定关系式，可以提供土的工程性质，从而应用于土木工程和结构物基础的设计与施工中。

1.7 所述的数值为国际单位制，并以此为标准。在第 13 部分的计算中，以国际单位制为标准，其他常用的单位，如英制单位体系以括号形式给出。若委托方或用户需要，所记录的数据应当以多种互补、兼容的单位制给出。圆锥探头顶部的截面积为方便通常以平方厘米为单位。每个单位制下的数值并不等价，因此每个单位体系必须独立运用。

注意 1：本测试方法不包括液压或气动式探头。但是，此处许多程序上的要求能够应用于那些探头中。同样，近海/海上 CPT 系统可能有步骤上的不同点，因为在那些环境中测试存在困难（例如，潮汐变化、海水、波浪）。机械 CPT 系统见于测试方法 D3441。

1.8 这项标准非旨在解决所有安全问题，如果有的话，则和它的使用相关。使用前，这一标准的使用者有责任确立适当的安全措施与健康的作业，并确定管理限制的适用性。

2 参考文献

2.1 ASTM 标准

D653 包含土、岩石和所含流体有关的术语

D3441 土体机械式 CPT 的测试方法

D3740 在工程和结构设计中岩土测试中最低要求的措施

E4 机械测试中测阻力的措施

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

3 术语

3.1 定义

3.1.1 定义符合传统术语 (D653)

3.2 具体条款定义

3.2.1 表观荷载传递—当某一荷载元件处于零荷载而另一荷载元件处于受荷状态时, 电子式静力触探探头的锥尖或侧壁摩擦筒所测得的表观阻力。表观荷载传递是串扰、减法误差和机械荷载传递的总和。

3.2.2 基线—一系列零荷载时的读数, 以表观阻力形式表述, 在现场测试与标定试验中作为参考值。

3.2.3 锥尖—静力触探探头锥形尖端部分, 承担贯入阻力的端部承载力分量。锥角为 60 度, 直径 35.7mm, 相应的投影区域 (水平面) 或锥底区域为 10cm²。加大号直径 43.7mm(基底面积)的探头同样也在使用。

3.2.4 静力触探测试—使用静力触探在某一地点进行试验, 得到整个垂直深度范围内一系列的贯入读数。同样也称为静力触探孔。

3.2.5 圆锥探头—一种前端为圆锥形的探头, 用于贯入土中, 并测量贯入阻力的端部承载力分量。

3.2.6 锥尖阻力, q_c —所测的贯入阻力端部承载力分量。贯入时的锥尖阻力等同于作用在锥头的端阻力除以锥底截面积。

3.2.7 修正的总锥尖阻力, q_{t1} —经过作用在锥尖后面孔隙水压力修正的锥尖阻力 (见 13.2.1)。对孔隙水压力的修正需要在锥尖后面 u_2 位置安装孔压元件以测量孔隙水压力 (见 3.2.26), 修正后得到总的锥尖阻力 q_{t1} 。

3.2.8 串扰—在独立的信号通道之间由于干涉引起锥尖和侧壁摩擦筒之间产生表观荷载传递。

3.2.9 电子式静力触探探头—一种摩擦型静力触探探头, 将力传感器如应变计荷载元件内置在不可伸缩的探头锥尖, 以测量贯入阻力分量。

3.2.10 电子式孔压静力触探探头—一种电子式静力触探探头, 内设有低容量的液压室、多孔元件以及在多孔元件与土界面上测量孔隙水压力的压力传感器, 同时测量端部承载力和侧壁摩阻力。

- 3.2.11 端部承载力—与锥尖阻力一样, q_c
- 3.2.12 平衡孔隙水压力 u_0 —在一定深度的静止水压力, 和静水压力一样 (见术语 D653)
- 3.2.13 超静孔隙水压力 Δu —贯入过程中产生的孔隙水压力 u 与所测得的静水压力 u_0 之差, 或 $\Delta u = (u - u_0)$, 锥肩处的超静孔隙水压力既是正的也可能是负的。
- 3.2.14 摩擦型静力触探探头—一种能够测量贯入阻力摩阻力分量的静力触探探头。
- 3.2.15 摩阻比 R_f —侧壁摩擦筒的中部与锥尖顶点位于同一深度处时侧壁摩阻力 f_s 与锥尖阻力 q_c 的比, 以百分比表示。
- 3.2.16 减摩器—贯入探杆外部一个狭窄的突起, 位于锥尖上部某个特定的距离处, 用于减少探杆受到的总侧摩阻力, 从而允许在给定的贯入压力下达到更大的贯入深度。
- 3.2.17 侧壁摩擦筒—锥尖上部独立的圆柱形部分, 在上面产生侧壁摩阻力。
10cm² 锥尖的摩擦筒表面积为 150cm², 锥尖 15cm² 的摩擦筒表面积为 225cm²
- 3.2.18 侧壁摩阻力 f_s —作用在侧壁摩擦筒上贯入阻力的摩阻力分量, 等同于作用在侧壁摩擦筒上的剪力除以其表面积。
- 3.2.19 FSO—足尺输出的缩写。当加载到 100% 容量时, 电子测力传感器的输出。
- 3.2.20 局部侧摩擦力—与摩擦阻力 f_s 一样 (见 3.2.18)。
- 3.2.21 贯入阻力测量系统—一套测量系统, 提供方法将从锥尖传出的信号传递, 并将资料呈现在地表可见或可作记录的地方。
- 3.2.22 探头—由一系列圆柱形探杆、端接体 (称为圆锥头) 和用于确定贯入阻力分量的量测仪器所组成的装置。
- 3.2.23 圆锥头—探头的端接体 (末端界面), 含有可感知贯入阻力分量的有源元件。圆锥头里可能有另外的信号调节和放大的电子设备。
- 3.2.24 孔压静力触探—和电子式孔压静力触探一样 (见 3.2.10)。
- 3.2.25 孔压静力触探孔隙水压力, u —采用孔压静力触探测试测得的流体压力。
- 3.2.26 孔隙水压力测量位置 u_1, u_2, u_3 —在孔压静力触探探头特定位置测得的孔隙水压力, 位置如下: u_1 , 多孔过滤环位于锥尖或锥面中部; u_2 , 多孔过滤

环位于锥尖后面的锥肩部（标准位置）； u_3 ，多孔过滤环位于侧壁摩擦筒后部。

3.2.27 孔隙水压力——在贯入过程中总的孔隙水压力的大小（和 3.2.25 一样）

3.2.28 孔压参数比， B_q ——标准位置测得的超静孔隙水压力 Δu_2 与修正的总锥尖阻力 q_t 和总上覆应力 σ'_{v0} 之差的比值（见式 10）。

3.2.29 探杆——用于贯入探头的厚壁圆管或圆棍。

3.2.30 侧壁摩擦，摩阻力，摩擦阻力——与侧壁摩阻力相同。

3.2.31 减法误差——电子式减法探头中，由于两个应变计载荷变化引发微小电压差，而在圆锥头和侧壁摩擦筒之间产生的表观荷载传递。

3.3 简称

3.3.1 CPT—静力触探的简称

3.3.2 PCPT 或者 CPTU—孔压静力触探的简称（U 表示孔隙水压力测量）

3.3.3 CPT \dot{u} —带有孔隙水压力消散阶段的孔压静力触探的简称

3.3.4 SCPTU—地震波孔压静力触探，包括一个或多个允许井下地球物理波速测量的检波器

3.3.5 RCPTU—电阻率孔压静力触探（包括电导率或电阻率模块）

4 测试方法总结

4.1 锥角为 60 度，锥底面积为 10cm^2 或 15cm^2 的探头以 20mm/s 的恒定速率贯入土中。贯入土中的锥尖阻力通过电学方法以最小 50mm 间距记录。每隔 20mm 或 10mm 间隔读数能提高分辨率。锥尖阻力 q_c 通过所测得的总压力（圆锥头受到的压力）除以锥底截面积得到。

4.2 探头的摩擦筒安装在圆锥头之后，侧壁摩阻力也是通过电学方法以最小 50mm 间距记录。侧壁摩阻力 f_s 由测得的轴向压力除以侧壁摩擦筒的表面积得到。

4.3 现代的大部分探头能够用电子压力传感器记录贯入时引起的孔隙水压力。这些探头称为孔压探头。本孔压探头的贯入速度为 20mm/s ，以最小 50mm 间距记录。通过停止贯入，卸载探杆，无论是正或负孔隙水压力随时间变化的消散都能被监测到。当孔隙水压力恒定时，等于该深度处的静水压力。

5 意义和使用

5.1 用本方法提供了详细的锥尖阻力记录，有利于对土层、均匀性、距离坚硬土层的深度、孔隙、洞穴以及其他不连续体进行评价。摩擦筒和孔隙水压力元件能够提供对土分类和土工参数进行估算。当在合适的地点恰当的使用时，本测试成为确定地下情况的一种快速的方法。

5.2 本测试方法提供了可用于土工参数估算的资料，有助于土方工程的设计与施工。

5.3 本方法对土体进行原位评价，不能得到土样。本测试方法结果的解译提供了对贯入土类的评估。工程师能够通过平行钻孔的方法得到土样，但是先前的信息或经验可以免除钻孔的需要。

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

6 干扰因素

6.1 当粗粒土的最大粒径接近或超过探头的直径时，探头可能会难以贯入、探杆挠曲和损坏等情况。

6.2 部分岩石或岩土沉积物可能引起探头的难以贯入、挠曲或损坏。

6.3 标准探杆在极限荷载下可能损坏。探杆所能承担力的大小是一系列因素的函数，包括探杆的自由长度、探杆与圆锥头沿线的薄弱连接带，如探杆接头、探杆与圆锥头的连接处。探杆可能损坏时的受力是贯入过程中设备配置和地基条件的函数。偏转过大是探杆折断的大多数原因。

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

7 装置

7.1 摩擦型静力触探

锥尖应当符合 10.1 的规定。在传统的摩擦型静力触探，施加在圆锥头和侧壁摩擦筒上的力通过探头内两个载荷元件测得。无论是独立的载荷元件或者减法载荷元件均可适用（见附录 B.0.1）。

7.1.1 在减法探头中，圆锥头与侧壁摩擦筒的载荷元件均承受压应力。载荷元件焊接在一起，如此最靠近圆锥头的元件（如图 1b 中的 C 元件）测量圆锥头所受到的压应力；而第二个元件（图 1b 中的 C+S 元件）测量圆锥头与侧壁摩擦筒受到的总压应力。侧壁摩擦筒所受到的压应力通过减法计算得到。这一探头由于设计坚固而在工业中常常使用。这一设计为电子式探头的最低性能要求奠定了基础。

7.1.1.1 另一种设计采用独立、互不依赖性的载荷元件分别服务于圆锥头和侧壁摩擦筒。例如，图 1a 中，圆锥头使得锥尖载荷元件（图 1a 中的 C 元件）承受压力，而侧壁摩擦筒上，在独立的载荷元件上产生拉力（如图 1a 的 S 元）。也可设计成两个独立的锥尖和侧壁摩阻力载荷元件同时受压是。这些探头的设计促成了摩擦筒上更高的精确性，但是，在极限加载情况下，更容易损坏。

7.1.1.2 典型通用的圆锥探头制造时满量程输出(FSO)等同于净负荷 10 到 20 吨。通常在勘察时，软弱地基是最关键的一个调查项目，在一些情况下，可能需要非常准确的侧壁摩阻力数据。为得到更高的分辨率，可降低 FSO 或选择独立型探头。与标准 FSO 的独立型探头相比，较低 FSO 的减法探头能够提供更准确的信息，取决于系统设计和温度补偿等因素。如果 FSO 减小了，强度较高的土中负载过大可能使电子元件存在风险。因此，可能需要昂贵的预钻孔来避免这些情况下的损坏。探头类型和分辨率的选择应该考虑如下因素，如实用性，有效性，标定需求，花费，损害风险和预钻孔的要求。

7.1.1.3 使用者或者委托方通过咨询有经验的用户或者制造商来选择探头的设计。探头的特定设计需要取决于勘察项目的设计资料。

7.1.1.4 不管哪种探头类型，侧壁摩擦筒载荷元件系统必须确保该系统对作用在侧壁摩擦筒上的剪应力敏感，而不是正应力。

7.1.2 圆锥头——标准尺寸如附录 C.0.1 中的圆锥所示，存在制造和操作公差。圆锥的直径为 35.7mm，锥底投影面积为 $A_c=1000\text{mm}^2$ ，锥角为 60 度，误差为 2% 到 5%。一个柱面扩展， h_e ，在锥底后约 5mm 的位置，保护外边缘过度损坏。与其他按比例缩小的尺寸类型相比，以 10cm^2 为标准。

7.1.2.1 在某些情况下，为添加传感器而增大容纳空间或增强杆的强度，可能需要增加探头的直径。标准增加量是圆锥头底座直径为 43.7mm，锥底面积为 1500mm^2 ，顶角仍为 60 度。根据国际规范，面积为 15cm^2 的标准探头如附录 C.0.1 所示，存在制造和操作公差。

7.1.2.2 圆锥头由于要受到土磨损而由高强度的钢和耐磨损的硬物组成。附录 C.0.1 所示的磨损超过公差范围的圆锥头应该被替代。当圆锥头明显磨损和圆柱形范围明显减少的时候，孔压探头的圆锥头需要更换。

注意 2: 在一些应用中，缩小圆锥头直径使投影面积更小是可取的。面积为 5cm^2 的探头在一些应用中也可使用，甚至更小的 (1cm^2) 探头在实验室中也在使用，服务于研究。这些探头的设计都与 10cm^2 标准探头的设计成正比。在薄层状土壤中，直径影响感知土层的准确程度。小直径的圆锥头探测薄土层比大直径的锥体要准确。若对放大或缩小探头尺寸引起的尺寸效应存在问题，可以把它们和 10cm^2 圆锥头在场地土中的结果作比较。这是因为 10cm^2 的圆锥头参考了现场测试的标准。

7.1.3 侧壁摩擦筒——摩擦筒的外直径、操作直径等于圆锥头底部的直径，误差在 $+0.35\text{mm}$ 到 -0mm 之间。由于要受到土的磨损，侧壁摩擦筒由高强度的钢和耐磨损的硬物组成。镀铬钢由于其异样的摩擦行为而不推荐使用。侧壁摩擦筒的表面积是 150cm^2 ，误差为 2%，对于锥底面积为 10cm^2 的锥而言。如果锥底面积增加到 15cm^2 ，如 7.1.2.1 中提供的那样，摩擦筒的表面积应该按比例调整，和 10cm^2 一样有相同的长径比，对于 15cm^2 的锥尖，摩擦筒的表面积是 225cm^2 。

7.1.3.1 侧壁摩擦筒的顶部直径不得小于底部直径，否则会显著减小侧壁摩阻力。在测试期间，侧壁摩擦筒的顶部和底部需要定期地用千分尺测量磨损。一般地，侧壁摩擦筒的顶部比底部磨损的快。

7.1.3.2 侧壁摩擦筒必须设计成端部相等区域，该区域暴露于水压力之下。这可以消除作用在套筒上不平衡力的趋势。套筒的设计必须依照 A1.7 检查来确保合适的响应。

7.1.4 间隙—在圆锥头底部的柱形扩展和圆锥头其他元件之间的间隙（环形间隙）必要的为放一些感应设备而必须保持最小，而且应该设计和制造时确保能够防止土颗粒进入。间隙可能在侧壁摩擦筒的尾部或者圆锥头的其他元素上。

7.1.4.1 对摩擦型探头，在圆锥头底部的柱形扩展和圆锥头其他元件之间的间隙 e_c ，不得大于 5mm。

7.1.4.2 如果在间隙中放密封圈，应当合理地设计和制造以防止土颗粒的进入。密封圈必须具有一定的可变形性，为阻止从尖端到套筒的载荷传递负载转移，其可变形性应比传感器载荷元件的材料大两个数量级。

7.1.4.3 间隙中孔压过滤环—如果孔压探头的孔压过滤环设置在侧壁摩擦筒与圆锥头之间的间隙中，圆柱形扩展高度 h_e 与间隙中的过滤环厚度 e_c 之和的变化范围在 8 到 20mm 之间（解释见 7.1.8）。

7.1.5 直径要求——侧壁摩擦筒应设置在圆锥头底部之后的 5 到 15mm 之间。侧壁摩擦筒和圆锥头其他部件之间的间隙和密封圈必须满足 7.1.4 中的规格要求。侧壁摩擦筒之上探杆直径的变化应该保证锥尖阻力和侧壁摩阻力的测量不受直径的增加而影响。国际参考测试程序要求整个探杆具有与圆锥头相同的直径。

7.1.5.1 对于一些探头的设计，通过增大探杆直径以放置附加传感器或减少探杆上的摩擦是可取的。如果对锥尖阻力和侧壁摩阻力数据的影响不大，这些直径变化是可以接受的。如果关于直径增加特殊设计存在疑问，可以与恒定直径的探头作一些比较。探头的全部直径应当记录下来。

注意 3: 由于直径变化引起对锥尖阻力和侧壁摩阻力的影响取决于直径增加的幅度和在探杆上的位置。很多实践者认为相当于加了一个减摩器，面积增加了 15% 到 20%，被限制在侧壁摩擦筒后部 8 至 10 倍探头直径处。

7.1.6 探头的轴线、侧壁摩擦筒（如果含的话）和圆锥头必须是一致的。

7.1.7 力传感设备—常用的力传感设备是一种应变加载元包含温度补偿的粘贴式应变计。应变计的配置和位置应该确保不受潜在的偏心载荷所影响。

7.1.8 电子式孔压静力触探探头—孔压探头包括多孔过滤元件（孔压过滤环）、压力传感器、连接到传感器上的充满水的端口来测量超孔隙水压力。实践中常见的设计类型见附录 D.0.1，包括：10cm² 摩擦型和 15cm² 型探头，1 型和 2 型的孔压探头。标准探头应当是 2 型孔压探头，孔压过滤环在锥肩处（有 10cm² 和 15cm² 的），以允许对锥尖阻力修正。不含孔压传感器的电测式摩擦型探头

可用于孔隙水压力较小的土中。如纯砂、粗粒土和地下水位以上的土。孔压过滤环位于圆锥表面 1 型探头在裂隙岩土材料中使用时容易脱饱和，和消散数据一样。许多设计和配置方面能影响动水压力的测量。变量如孔压过滤环的位置、端口的设计和体积、饱和的液体类型和程度、流体系统的空穴现象、再饱和和滞后时间、深度、土的饱和度等，在测试或孔压消散过程中均会影响动水压力的测量。解决这些所有的变量超出本规程的范围。为将这些影响降至最低，孔压测试系统的设计、配置和准备工作应当进行完整信息的记录。

7.1.8.1 在测试停顿时，静水压力的测量更简单。在系统中空气的存在只影响动态响应。在高渗透性土中（砂土），在几秒或几分钟后就是静水压力了。在低渗透性材料中，如高塑性粘土，消散几个小时后，才到静水压力。如果勘探的目的只是获得砂土中的静水压力，一些测动压力的程序准备可以放下了，如真空除气。

7.1.8.2 孔隙水压力的测量仅局限于圆锥顶部或表面 u_1 、圆锥头底部圆柱扩展之后的锥肩 u_2 以及侧壁摩擦筒后部 u_3 。一些用于研究的探头有多个测量位置。

7.1.8.3 将孔压过滤环位置定于圆锥头底部圆柱扩展之后锥肩 u_2 位置具有几个优势，主要是可对测得的 q_c 修正至总锥尖阻力 q_t 。另外，孔压过滤环较少损坏或磨损，同时压缩效应较少。位于 u_2 位置处的元件，在浅层密砂中可能容易产生孔穴现象，因为在排水的土中探头后部圆柱扩展高度范围内是剪胀区域。在裂隙硬粘土中类似的情况也可能会发生。在 u_1 位置处测得的孔隙水压力对于压缩性评价和土层确定更加有效，尤其是对裂缝性土壤，但受到磨损更大。在 u_2 位置，圆锥头后部至少应当保持 2mm 的圆柱扩展以保护探头。所有位置的孔压过滤环在水平面上的厚度为 5 到 20mm 范围。

7.1.8.4 微小的隔膜式电子压力传感器通常安装在圆锥头附近处。对于动压力的测量，过滤器和端口在脱气的液体中测量动水压力响应。连接端口到传感器的体积应当最小化以促进动水压力响应。这些电子传感器是非常可靠的、精确而且是线性响应的。传感器至少有上下 14kPa (± 2 psi) 误差的精度。孔隙水压力传感器必须满足 10.2 处给出的要求。

7.1.8.5 孔压元件—孔压元件是一个多孔过滤器，由塑料、烧结钢、青铜或陶瓷等材料做成。典型的孔隙大小是 20 到 200 微米之间。不同的材料有不同的优势。由硬土颗粒对金属元件造成的涂抹作用可能会降低系统的动态响应，因而

一般不用在锥面位置，而最适用于锥肩位置。陶瓷元件易碎且受压时容易产生裂缝，但是由于压缩性低而在锥面处性能很好。聚丙烯塑料元件在实践中最为常用，尤其是在锥肩位置。对需要探测污染物的环境类 CPT 探头来说，塑料元件（如高密度聚乙烯，HDPE，或高密度聚丙烯）可能不太适合。通常，过滤元契入在圆锥头顶部或者表面位置 u_1 ，或者在圆锥扩展后部间隙的锥肩处 u_2 。在这些位置，确保孔压过滤环的压缩性降低至最小对探头的设计很重要。

7.1.8.6 饱和液体—通常采用丙三醇或者硅油来为贯入探头饱和。这些粘性油类形成孔隙的可能性不大，尽管可以通过元件安装面有效孔隙大小的方式来控制孔隙。如果整个触探位于水下或动态响应不重要的话，则水可以作饱和液体。液体抽气应该用 11.2 中描述的步骤。

7.2 测量装置

测试过程中来自于探头传感器的信号以随深度连续变化的图形显示在屏幕上。数据也被电子记录用作后续处理。电子记录是数字的，在模数转换时至少 12 位分辨率（4096 中的一部分），尽管在非常软弱的地基中更倾向于采用 16 位或更高。使用磁（磁带或光盘）或光（光盘）存储。在模拟系统中，模数转换器的温度稳定性和准确性应确保整个探头-传输线-记录系统符合附录中所陈述的标定需求。

7.2.1 使用模拟系统是可接受的，但是系统分辨率可能会低于附录和第 10 节中的要求，使用一个模拟记录作为数字系统的补充是有利的，因为它可以提供系统备份。

注意 4: 取决于设备，以数字式存储在磁盘、磁带、软盘或其他媒介中的数据经常被使用。数据文件应当包括项目、地点、操作人员、数据格式信息（如频道、单位、修正与否等），以确保采用文本编辑器读取文件的时候能够为人所理解。

7.3 探杆

钢制杆件需要一个足够的横截面积来维持贯入探头时所需要的推力，而不产生弯曲。对于采用电缆的探头，缆线在测试前先穿过杆子，每根探杆长度为 1m，探杆必须彼此通过每一个关节共同承担，形成一个刚性连接的杆件。探杆与竖轴之间的偏移应该减到最小，尤其是探杆接近探头的时候，以避免过度的方向

偏移。一般地，当 1m 长的探杆发生导致中心轴杆缩短 1-2mm 的永久弯曲时，本探杆应该丢弃。这对应于一个弯曲中心发生 2-3mm 的水平偏转。探杆系列中的探杆位置应该周期性的变换以避免永久性的曲率。

7.3.1 对于 10cm² 的探头，标准强度为 20 公吨高的高张应力钢制探杆外径为 36mm，内径为 16mm，单位质量长度为 6.65 kg/m。对于 15m² 的探头，测试探杆外径为 44.5mm 或是 10cm² 的标准杆。

7.4 减摩器

经常采用减摩器以减小探杆摩擦。如果使用了减摩器，它应该位于探杆上在圆锥头底部不小于 0.5m 处。减摩器使探杆外径增加大约 25%，通常用于 10cm² 探头。如果是 15cm² 的探头，探杆外径为 36mm，这里就没必要用减摩器，因为探头本身能开一个更大的孔。减摩器的类型、大小、数量以及位置等必须记录下来。

7.5 贯入系统和反力系统

贯入设备提供一个连续的冲程，最好是距离超过一米。这个贯入设备应该能够通过水平调节系统来改变方向，使得最初的贯入为垂直的方向。这个设备必须使探头在贯入过程中保持平滑、恒定的速率（见 12.1.2），同时推力的大小可以变化。贯入设备必须被地锚固定或者有压载，或者二者都有，以提供必要的反力，在贯入过程中相对于地表表面不移动。

注意 5：圆锥贯入通常需要 100kN 到 200kN 或最大能力。重型载荷车辆可能会引起土平面变形，因此可能会对近地表的贯入阻力造成影响。

7.6 其他传感设备

在探头中安装其他传感设备可以在贯入过程中提供其他的信息。这些仪器通常以与锥尖阻力、侧壁摩阻力、孔隙水压力传感器相同的连续速率进行读取，或在在贯入停顿时（一般每米停顿一次）读取。典型的传感器为测斜、温度、电阻率（电导率）和地震波等传感器（如地震检波器可通过下孔法获得剪切波速）。如果它们的使用对勘察很重要的话，这些传感器应当经过标定。测斜仪被广泛推荐使用，因为它提供了测试过程中可能出现损坏情况时的信息。

8 试剂和材料

8.1 O 型圈化合物

密封 O 型环用的石油或硅油，若应变计表面暴露于化合物中，硅化合物的使用可能会阻碍应变计的修复。

8.2 丙三醇或乙二醇

用于孔隙水压力量测系统，从大多数药店中能获得纯度为 95% 的甘油。

8.3 硅油

用于孔隙水压力量测系统。本材料在 1400 到 10000CP 不同的粘度范围中可用。

注意 6: 关于这些液体使用的详细的比较和讨论能在其他地方找到。

9 危害

9.1 一般的技术措施

9.1.1 采用不满足公差要求或表现出肉眼可见的非对称磨损的探头组件时，可能会导致误差的贯入阻力数据。

9.1.2 以超过设备额定容量的贯入能导致设备损坏(见第 6 节)。

9.1.3 静力触探测试不可在与未回填或无套管的钻孔距离不足 25 倍钻孔直径的附近进行。

9.1.4 当在预钻孔中进行静力触探测试时，由于钻孔会对预钻孔深度以下一定深度范围内的土层造成扰动，因此应当对该深度范围进行评估，该范围内获得的贯入阻力资料应当进行备注。通常，这一扰动深度假定为至少三倍钻孔直径。

9.1.5 探杆的强烈弯曲能够影响贯入阻力的数据。这里推荐使在贯入设备的底座上采用用管状杆导向器，以防止预钻孔中探杆的弯曲。

9.1.6 探杆不满足 7.3 的要求可能会导致过度的方向偏移，可能会产生不可靠的贯入阻力数值。

9.1.7 通过障碍物时，可能使探头倾斜或导致方向漂移。注意到遇到障碍物、碎石等，可能影响到后续操作的准确性。

9.1.8 若测量间距的整个行程内，未保证以合适的速率贯入探头，则贯入阻力数据将存在误差。

9.2 技术措施

9.2.1 O 型圈密封失败可能会导致传感器读数不准确。每次触探后，需要对 O 型密封圈进行整个条件、清洁和不透水性等进行定期检查。

9.2.2 土进入探头中不同的元件之间时可能会导致不可靠的数据。特别地，土的进入会特别地影响侧壁摩阻力的数据。在每次触探后，密封圈都需检查，且必要时更换。

9.2.3 电子式摩擦型探头应是温度补偿的。如果遇到在 A1.3.3 范围外的极端温度，需要检查探头所需的温度范围以建立它们所能满足的标定需求。而且，严

酷的环境可能严重影响能源供应系统、记录系统、场地计算机和其他电子设备的数据准确性。

9.2.4 如果在从土中提取出探头之后基线读数的改变巨大，以致于在 10.1.2.1 中定义的精确度的条件不再满足，贯入阻力应该被认为是不可靠的。如果基线数据不符合 10.1.2.1 中的精度要求，探头必须修复、重新调整或替换。

9.2.5 在侧壁摩擦筒上具有端部面积不等效应的电子式摩擦型探头，会导致误差的 f_s 读数，因为动水压力不均匀的作用在侧壁摩擦筒上。侧壁摩擦筒的设计应当根据 A1.7 进行检查，以保证平衡响应。本响应同样取决于封水圈的位置。若在测试期间 O 型封水圈损坏，侧壁摩阻力的数据受到影响，触探数据也应认为是不可靠的，密封圈需要修理。

9.3 孔压探头

电子式孔压探头测量在探头表面处的孔隙水压力，通过脱气流体系统将压力传递至探头内部的压力传感器。对于合适的动态响应，测量系统（包括流体端口和孔压元件）在测试前必须完全饱和。气体必须从充满液体的系统中排出，否则在探头贯入期间，由于气泡的压缩滞后性导致孔隙水压力是不正确的。（见 11.2, 12.3.2, 12.3.3）。对于动力学响应非常重要的触探，在每次测试后，准备的过滤器应及时更换。

10 标定和标准化

10.1 电子式摩擦型探头

10.1.1 对于新制造或者新修复圆锥探头的要求是很重要的。新制造或修复的电子式探头应当检查以满足附录中描述的最低要求。这些标定包括不平衡流体静力加载、热学和力学试验。附录中的标定程序和要求适用于减法探头。独立型探头的标定要求应同于或者高于这些要求。这些标定记录为确保质量，必须被注册专业工程师或其他在材料测试方面有理论和经验的工程师进行校验。标定施加的力或质量应当按照国家标准与技术研究所(NIST)（原国家标准局）发布的要求。标定术语和方法参见根据附录。

10.1.2 基线读数—每次触探前后必须同时对锥尖阻力载荷元件、侧壁摩阻力载荷元件和孔隙水压力传感器进行基线读数或零荷载读数。基线读数可靠地指示了输出的稳定性、温度引发的表观何在、土侵入、内部摩擦、灵敏度阈值以及未知荷载。根据制造商的说明，在加热电路至尽可能接近于触探材料的温度环境下，读取初始的基线读数，一般需要 15 到 30 分钟。如果温度是值得关注的问题，把探头浸没在一桶新鲜的自来水中，或者把探头插入到地下，同时电暖化电路来稳定温度，快速测定初始基线读数。当触探结束了，确定最终的基线读数。对锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力传感器，初始和最终的基线读数不应超过 2%的 FSO。

10.1.2.1 在生产测试过程中保持连续的初始和最终基线读数记录。在每次触探之后，对最终和初始的基线读数进行对比，确保其符合上述的公差要求。在一些繁重的生产测试等情况下，每次触探后探头不拆分和清洗，前一次触探的最后基线能作为下一次触探的初始基线，只要求位于允许范围之内。

10.1.2.2 如果触探后基线漂移超出上述标准，通过检查圆锥头和手动旋转侧壁摩擦筒以查看探头是否损坏。如果有明显的损坏，根据需要更换零件。清洗锥体并允许温度补偿而获得一个新的基线读数。如果这个值在与初始基线读数符合上述标准，则不需进行负载范围标定检查。如果之前的和之后的基线不在上述标准之内，则这一改变可能是由障碍物引起的，应进行负载范围标定线性化。

10.1.2.3 如果基线读数改变仍然超过了上述标准，执行在 10.1.2.1 中的负载范围标定。如果探头载荷元件的基线读数改变超过了 2% 的 FSO，则探头可能受损且将不能满足 10.1.2.2 中的负载范围标定。

10.1.2.4 对于触探中出现不可接受的基线读数改变时，测试报告的数据是不可靠的。在一些情况下，损坏发生的地方可能很明显，损坏之前的点可被认为是可靠的。损坏发生的位置在报告中应该清楚的指出。

10.1.3 探头的磨损和使用

10.1.3.1 探头制作期间日常使用时，应进行周期性负载范围的检查。检查的时间长度可以基于生产长度例如触探时每线性 3000 米（大约 10^4 线性英尺）。如果现场加载设备不可用，则可在项目结束时在实验室对探头进行检查。

10.1.3.2 对于较少使用的探头，应根据时间段定期检查，如每年一次。如果一个探头很长时间未使用，则建议在使用前进行检查。

10.1.3.3 对于项目需要一个高水平的质量保证，则在项目前后可能需要进行负载范围检查。

10.1.3.4 如果触探时初始和最后基线不满足 10.1.2.1 中的要求，则负载范围需要校准。

10.1.3.5 为维持性能评价，应记录单独探头的历史。

10.2 孔隙水压力传感器

根据附录中的要求，对新制造或修复的传感器进行标定。在生产期间，每当线性特征受到质疑的时候，均需有计划地定期进行传感器的标定。标定仪表可以是弹簧管压力比或每年按照 NIST 负载装置（固定负载检测装置）进行标定过的电子压力传感器。

10.2.1 在测试前，读取周围大气压力下孔隙水压力传感器的基线或初始零荷载读数。以类似于锥尖阻力和侧壁摩阻力的形式持续记录孔隙水压力传感器的基线值。如果基线值发生显著改变，通常为 1% 到 2% 的 FSO，则进行负载范围测试以检测可能存在的损坏和非线性的响应。

10.3 标定其他传感设备

探头中其他传感器的标定数据需要根据附录中载荷元件和压力传感器相似的方法进行标定。标定与否取决于单个勘察项目的要求。对于非关键项目，合理的读数可能就足够了。在关键的项目上，可能需要根据参考标准对传感器进行研究范围内的加载标定，以确保准确的读数。

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

11 条件

11.1 在进行触探前，以最短的时期为电子式静力触探和数据采集系统供电以稳定电路。在获得参考基线值前，根据制造商的建议为系统供电。对大多数电子式系统，这一时间为 15 至 30 分钟。

11.2 电子式孔压静力触探需要特殊的准备来运输流体和多孔元件，以将系统中携带的空气去除。对于动力学响应很重要的触探，需要更换准备好的孔压过滤环元件和并在每次触探结束后清洗端口。下面讨论的一些技术已被成功地用于元件准备。无论所使用的何种技术，均需报告所测试的设备和方法。

11.2.1 如果需要的话，可以进行现场或实验室测试以评估集成系统的响应。将圆锥头和元件放置在加压室，并施加快速变化的压力。将系统作出的响应与所施加的压力变化进行比较，若两种响应匹配，则系统已合理准备。

11.2.2 将孔压过滤环元件放置在纯甘油或硅油池中的至少 90% 的一个大气压真空（-90kPa）下。保持真空，直至气泡的生成减少到最低限度。超声波振动和低发热量（ $T < 50^{\circ}\text{C}$ ）的应用有助于除去空气。一般来说，在真空法、超声波振动和低热量联合应用时，过滤元件可以在约 4 小时内确保脱气，虽然 24 小时下性能最佳。饱和结果将取决于流体的粘度和孔压过滤环元件的孔隙尺寸。

11.2.3 可以通过水下煮沸元件至少 4 小时来在水中准备孔压过滤环，虽然在本方法（1）中可能由于持续暴露而造成损坏。

11.2.4 其他合适的手段—记录其他的技术，如可用的商业性预饱和孔压过滤环元件，或润滑脂填充槽（2，5）。

11.2.5 保存—将预备好的孔压过滤环浸没在预备好的流体中进行存储，直到可直接使用。将容器充满并在存储过程中抽真空。允许存储时间取决于流体。如果元件在水中准备的，它们必须在容器被打开和接触空气后持续脱气一天。孔压过滤环存储在甘油或聚硅氧烷时，可存储较长的时间，可长达数月，超出允许存储时间后，容器已经暴露在空气中。

12 步骤

12.1 一般要求

12.1.1 开始触探之前，先进行现场调查，以确保如架空和地下公用设施不会遇到危险。将贯入设备放置在触探孔试验点上方，降低杠杆起重机以将贯入设备从悬架系统中举起。尽可能竖直地放置探头贯入系统的液压油缸。探杆的轴线必须符合贯入方向。

12.1.2 对所有电子式静力触探，设置液压油缸的贯入速率为 20 ± 5 毫米/秒。在探头贯入和记录的整个行程中必须保持该速率恒定。

12.1.3 检查探杆的平直度和永久弯曲（参见 7.3 节）。手动组装和固定探杆，但需要注意的是，开口端可能需要进行清洗以确保探杆紧密对接和防止损坏。对采用电缆的电子式静力触探，电缆是预先穿过探头的。在探杆链上按照要求添加减摩器，通常安装在紧接探头之后的第一根探杆上。

12.1.4 在探测前后检查探头是否有损坏、土侵入和磨损。在需要提供准确侧壁摩阻力资料的非常软和灵敏性土中，每次触探后需要拆卸电子式探头的圆锥头和侧壁摩擦筒，并进行清洁和润滑。若触探后发现损坏，在触探资料记录或报告中备注并记录此信息。

12.2 摩擦型静力触探

12.2.1 使用前按照制造商的建议对探头和数据采集系统供电，通常需要 15 至 30 分钟。

12.2.2 在未受荷和温度尽可能接近地面环境的条件下，获得一个探头的初始基线读数。将探头自由地挂在空中或水中并避免阳光直射，读取基线读数。根据 10.1.2.1 给出的要求将此次基线读数与前次基线读数对比。若需保证热稳定性，则把探头浸入到与地面温度接近的水中；或进行初始的短程贯入试验，停止贯入使得探头达到土体的温度，并取回探头。

12.2.3 读数处深度的精度至少为 ± 100 毫米。

12.2.4 确定随深度连续变化的锥尖阻力和侧壁摩阻力，并以深度间隔不超过 50mm 的间距记录数据。

12.2.5 在触探过程中，采用合适操作的信号连续监测锥尖阻力和侧壁摩阻力的变化。对其他指标如冲压力或测斜的监控有助于确保探头在遇到高阻力土层或障碍物时不会损坏。测斜是一个非常有助于指示系统即将遭受损坏的指标（看 12.4）。

12.2.6 触探结束时，取出探头，锥尖自由悬挂在空气或水中，读取最终一系列的基线读数，并与初始基线值对比检查。在所有文件中记录与触探有关的初始和最终基线值。

12.3 电子式孔压静力触探

12.3.1 使用前按照制造商的建议对探头和数据采集系统供电，通常需要 15 至 30 分钟。

12.3.2 在所有浸没了脱气介质的流体室中组装孔压元件。采用流体冲洗所有封闭的区域以消除气泡。拧紧圆锥头以有效地密封表面。对水饱和系统，将探头和多孔元件置入充满流体的塑料袋或帽中密封，以避免组装的系统产生蒸发。

12.3.3 如果首先贯入的是非饱和土，并预期在地下水位线以下获得准确的动孔隙水压力响应，则可能需要进行预钻孔或导孔至地下水位线。许多情况下，贯入至非饱和土或地下水位线以下的剪胀性砂土层时，孔压流体系统可能会形成空隙，这可能对动力学响应造成不利影响。探头贯入更深时，根据玻义耳定律，气泡被驱回至溶液中，而饱和度可能会恢复。对动力学响应合理解译的评估需要经验。采用两阶段方法预冲孔或预钻孔可以有助于缓解去饱和问题。

12.3.4 将探头自由地挂在空中或水中并避免阳光直射，读取基线读数。根据 10.1.2.1 和 10.2 给出的要求将此次基线读数与参考基线读数进行对比。组装完成后马上读取孔隙水压力传感器的基线值，以避免蒸发效应。若存在蒸发问题，临时将探头浸没在水桶中直至可读取基线读数。获取传感器基线值时，不得采用保护帽或盖，因其可能会在系统中引起压力。观测来自压力传感器的压力，视其所采用的仪器和组装技术是否为合理值。

12.3.5 参考 12.2.4-12.2.6 中电测式摩擦型探头的操作步骤，同时额外记录孔隙水压力读数。

12.3.6 消散试验—如果在测试期间需要进行孔压消散试验，则在所需研究的位置暂时停止贯入。如果测量的孔隙水压力在 u_2 或 u_3 位置，通常需要首先释放施

加在探杆上的力。如果测量的孔隙水压力在锥面位置 u_1 ，则需要维持施加在探杆上的力。记录消散试验中孔隙水压力随时间的变化。监控孔隙水压力，直到达到静水压力或消散达到初始超孔隙水压力的 50%。在渗透性非常低的细粒土中，可能需要很长的时间以达到 50% 的消散。根据项目的需求和任何探杆摩擦的增强，消散试验在消散达到 50% 之前就被终止。以孔隙水压力随时间变化或更常见的 u 随时间对数变化的形式，记录消散测试数据会形成报告。

12.3.7 静孔隙水条件：

如果进行彻底的孔压消散，则孔隙水压力传感器将最终记录静水压力条件，因此提供了对地下水位线或潜水面位置的评估

12.4 探头的操作和数据解译指南

12.4.1 定向漂移的探头：

12.4.1.1 探头可能偏离铅垂线方向产生漂移。倾斜中大偏差可产生不均匀荷载，并导致不可靠的贯入阻力数据。通过精确设置贯入方向和使用满足 7.3 中公差标准的探杆可减少漂移。

12.4.1.2 穿透或沿边穿过障碍物，如巨石、卵石、粗砾石、土结核、薄岩石层或倾斜的致密层，将损坏锥尖，并引起方向偏转。注意并记录遇到这样的障碍任何迹象，并警惕由于严重定向漂移而可能随后发生的探头操作不当。

12.4.1.3 通常在探头内部检测探头的倾斜。在系统中强行设置倾斜的极限值以阻止探杆损坏和探头的非对称性受荷。一般情况下，贯入 1 米超过 5° 的倾斜变化可以对探杆产生不利的弯曲。在贯入 10 米时总计的漂移超过 12° 可能产生了非对称加载和不可靠的贯入阻力数据。

12.4.2 添加探杆时的中断—每根新探杆的添加过程中，贯入速率的短期停顿会影响下一次贯入时的初始锥尖阻力和侧壁摩阻力读数。如果有必要，注意并记录在增加探杆时的深度和长时间的停顿可能会影响初始开始时的读数。

12.4.3 孔隙水压力消散中断—对触探暂停和探杆荷载释放的不同持续时间，孔隙水压力消散研究可能会影响重新开始贯入时最初的锥尖阻力和侧壁摩阻力和孔隙水压力读数。如果进行了消散试验，要注意可能出现的初始超孔隙水压力回弹效应的影响。注意并记录采取的深度和消散所持续的时间。

12.4.4 由于障碍物引起中断—如果遇到障碍物，正常的贯入停止下来，并采用钻孔穿透障碍物，则仅仅当探头已经穿过受钻孔扰动影响的区域后，后续的锥尖阻力数据才可记录。作为另一种方法，可继续进行读数，而不进行额外的贯入，也不依据这些数据对扰动区进行评价。

12.4.5 过高的贯入能力—如果过高的贯入压力开始阻碍了测试进程，则有必要撤回和改变减摩器。或者，通过取回探头和探杆至三分之一到一半的贯入深度，然后重新贯入到摩擦停止的深度，则有时可以减少造成停顿的摩擦力。继续从停止点采集触探数据。注意并记录延迟时间和探头移除处的深度。长时间的延迟和停顿可能导致探杆摩擦力的增加。进行孔压消散试验或设备维修时应当将延迟将至最小。

12.4.5.1 如果遇到高阻力土层且在贯入过程中液压贯入设备可能会产生物理移动，则终止触探。达到最大贯入能力另一个指标是探杆被释放后的回弹。回弹幅度取决于贯入设备和探杆的灵活性。操作者必须成为熟悉系统的安全挠度并确定何时达到了过大的挠度。

12.4.6 不同寻常的情况—当数据被记录时，重要的是要注意在测试中的不寻常的情况。当穿透砾石时，重要的是需要注意当粗颗粒尺寸与百分比含量开始影响贯入时，可能会出现“嘎吱嘎吱”的声音。记录和报告所有出现的粗砾石。

12.5 取回探杆

12.5.1 在到达完整的触探深度时取回探杆和探头。

12.5.2 在完全撤出探头时，采用正确的操作检查探头。摩擦筒应该能够用手通过 360° 的旋转而未检测到捆绑。

12.5.3 将探头自由地挂在空中或水中并避免阳光直射，读取基线读数。根据 10.1.2.1 给出的要求将此次基线读数与初始基线读数对比。

12.6 封孔—在某些情况下，依据各省法律和规范，在触探完成后钻孔应当被填满、密封或灌浆封闭。例如，在复杂的地下水系统内，需要封孔以保护含水层。封孔的多种方法详细信息可在其它地方提供。

13 计算

13.1 摩擦型静力触探

目前正在使用的大部分电子式静力触探探头测量应变计元件在电压上的变化，以确定应变计元件的长度该变量。对应变计元件采用已知的应力-应变本构关系式，可以确定对圆锥头或侧壁摩擦筒所施加的力。其后，所施加的力采用基本方程式 13.2 和 13.3 换算为应力。由于目前采用电子式静力触探可以获得大量附加、可选的测量，且新的测量仍在持续不断的发展，因此对这些可选测量组成、调整和计算的详细计算超出了本规程的范畴。

13.2 锥尖阻力：

$$q_c = Q_c / A_c \quad (1)$$

其中：

q_c = 锥尖阻力 Mpa（例如，ton/ft²， kgf/cm²， 或者 bar），

Q_c = 锥体力 kN（例如， ton， 或者 kgf）

A_c = 锥尖后横截面积，通常为 10 cm² 平方厘米或 15 cm²。

13.2.1 修正的总的锥尖阻力（需要的）——修正总的锥尖阻力的修正需要测量超孔隙水压力，在 u_2 位置

$$q_t = q_c + u_2(1 - a_n) \quad (2)$$

其中：

q_t = 修正总的锥尖阻力（ton/ft²， kgf/cm²， bar， 或者合适的单位压力）

u_2 = 锥肩位置测试孔隙水压力， kPa（例如， tsf， kgf/cm²， bar， 或合适的压力单位） a_n = 净面积比（见 A1.7）。

13.2.1.1 在贯入过程中当孔隙水压力产生时总的锥尖阻力的修正特别重要（例如饱和土，粉土，细粒土），通常对于 CPTs 在砂土，密实到坚硬的岩土材料，干土，校准不是那么重要。这个修正是因为孔隙水作用在锥尖接触面和联合环相反的两边。

注意 7: 在任何情况下, 应该使用总的 q_t 值, 代替 q_c (或两者), 在可能的情况下。在任何情况下 q_c 能够通过方程, 表格, 公式或其他方法从 q_t 中得到。首选修正锥尖阻力是个前进的过程。

13.2.1.2 在 u_1 位置为压力元件已经找到了基于土壤类型的经验调整因素, 但是这些都是不可靠的。针对一个站点的基础上, u_1 和 u_2 之间的关系是可能的。

13.3 侧壁摩擦力:

$$f_s = Q_s / A_s \quad (3)$$

其中:

f_s = 侧壁摩擦力 kPa (ton/ft², kgf/cm², bar, 或其他合适的应力单位),

Q_s = 摩擦筒的上力 (ton, kgf, 或其他力的合适的单位)

A_s = 摩擦筒的面积, 对于锥尖 10cm² 为 150cm², 对于锥尖面积 15cm² 的摩擦筒的面积为 200 到 300cm²

注意 8: 一个修正摩擦阻力也能得到 f_t , 还需要同时测量 u_2 , u_3 。然而由于实际原因初始 f_s 已经被接受。已经采用了简化的修正。

13.4 摩阻比

$$R_f = (f_s / q_c) 100 \quad (4)$$

其中:

R_f = 摩阻比, %

f_s = 侧壁摩擦力 Kpa, (ton/ft², kgf/cm², bar, 或其他合适的压力单位),

q_c = 锥尖阻力, (ton/ft², kgf/cm², bar, 或其他合适的压力单位)

100 = 从十进制到百分比的转换

13.4.1 摩阻比的测定需要得到在土体内同一点的锥尖阻力和摩阻力。锥尖点位置作为参考深度。通常用摩擦筒中点位置处的先前的锥尖阻力读数来计算。

10cm² 的探头的标准偏移量是 100mm。如果偏移量超出标准值, 则必须报告。

注意 9: 在土层中某点如果有软硬材料的互层, 那么从数据中可反映出不稳定的摩擦比。这是因为探头感应到了在探头前不同程度的锥尖阻力。不稳定的数据可能无法表示土壤目前的实际状态。

注意 10: 由机械摩擦静力触探得到的侧壁摩擦力和摩阻比与由电子摩擦静力触探得到的值相差很大。当使用土壤分类表 (参数是 R_f 和 q_c) 时, 使用的探头种类和所用表的关联性则会很大。

13.5 孔隙水压力的数据

13.5.1 国际单位制规定孔压的单位是 kPa。

13.5.2 将所测得的孔压转换成相等高度的水压—如果想要用水头来表示孔压, 那么就用孔压除以重度得到的水头高度来转换孔压表示方法, $\gamma_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$ (62.4 lb_f/ft³)。对于盐水, $\gamma_w = 10.0 \text{ kN/m}^3$ (64.0 lb_f/ft³)。

13.5.3 平衡孔隙水压的估计 (静水压力)—超静孔压只能通过平衡水压来计算, u_0 (见 3.2.14)。静水压力可以通过消散试验来测定或者用如下公式来计算 (见专业术语 D653):

$$u_0 = \text{估计的静水压力} = h_w * r_w \quad (5)$$

位于地下水位以下的饱和土, 其静水压力可用以下公式:

$$U_0 = (z - z_w) \gamma_w \quad (6)$$

对于地下水位以上由毛细作用而饱和的土壤, 公式 (6) 仍可适用。对于地下水位以上的土壤, 通常取 $u_0 = 0$ 。在部分饱和土中 (包气带区域), u_0 值的瞬时变化很大。

其中:

h_w = 水的高度, 米, 从现场条件获得

r_w = 水的重度 = 9.8 kN/m³

z = 地下水面的深度

z_w = 地下水位的深度 (潜水面)

在多个含水层的层状土中, 水的高度假设可能是错误的。

13.6 标准化 CPT 的测量

在最新的土壤行为分类图表和 CPT 解释方法中, 利用锥尖阻力, 侧壁摩擦力, 孔隙水压力定义如下:

13.6.1 归一化锥尖阻力:

$$Q=(q_t-\sigma_{vo})/\sigma_{vo}' \quad (7)$$

13.6.2 归一化孔隙水压力参数, Bq 此参数通常计算锥尖孔隙水压力测量 (紧随锥尖其后的位置), 指定的 u_2 。

$$Bq = u/(q_t-\sigma_{vo}) \quad (8)$$

13.6.3 归一化摩阻比:

其中:

Δu =超静孔隙水压力 (u_2-u_0) (见 3.2.13),

u_0 =平衡的水压力, 或静孔隙水压力 (见 13.5.3),

σ_{vo} =总垂直上覆压力, 并

σ_{vo}' =有效上覆压力= $\sigma_{vo}-u_0$

总覆盖层应力的计算方法:

$$\sigma_{vo}=\sum(r_{ij}\Delta z_i) \quad (10)$$

其中:

Δz_i =土层厚度

r_{ij} =总的土层重度

14 报 告

14.1 报告下列信息

14.1.1 一般每个探孔记录应提供最小值:

14.1.1.1 操作者的名字,

14.1.1.2 项目信息,

14.1.1.3 特点说明,

14.1.1.4 地面高程, 水面高程 (如果有的话),

14.1.1.5 测试地点, 包括坐标

14.1.1.6 探测号码, 和

14.1.1.7 探测日期。

14.1.2 报告应包含相关信息:

14.1.2.1 所使用的装备——设备上所有传感器设计图纸和数据,

14.1.2.2 图形数据,

14.1.2.3 电子数字数据或表格数据 (可选),

14.1.2.4 遵循的程序, 和

14.1.2.5 校准信息, 所有的传感器, 第 10 条中所含的信息

14.1.3 报告应该包含一个探讨项目要求在 14.2 和 14.3 的文本。每个探孔应该记录:

14.1.3.1 探孔绘图

14.1.3.2 同步表格输出——由于它的容量大表格输出被认为是可选的。它是可选的, 只要计算机数据文件保存并存档供以后使用。

14.1.3.3 计算机数据文件——以 ASCII 格式提供, 表格文件或文本, 或其他常见的文件格式。计算机数据文件必须包含在 14.1 中要求的数据头, 探孔记录的信息。某些解释程序需要在一个特定的格式的数据。用户的职责是来确定满意的格式。

14.1.3.4 评论应该包含关于设备和程序的注释, 尤其是独立的探孔。

14.2 设备

14.2.1 探头制造商，

14.2.2 锥尖的使用类型，

14.2.3 探头的细节如净面积比、摩擦筒端区域，传感器的位置和类型，减阻剂的位置和类型，

14.2.4 尖端和套管阻力之间的抵消用于摩阻比测定，

14.2.5 锥尖的序列号，

14.2.6 推力机的类型，

14.2.7 提供反作用力的方法——记下可能的表面变形，

14.2.8 减阻系统位置和类型 (如果有)，

14.2.9 记录数据的方法，

14.2.10 取出后探杆和探头的状态，

14.2.11 任何特殊困难或其他有关设备的性能观测值，

14.2.12 孔压探头的设计，过滤环，流体调节程序的细节，和

14.2.13 在探测过程中其他传感设备使用的信息。

14.3 校准认证

每个项目报告应该包括锥形体使用的负载范围使用校准，按照第 10 节。每个触探的报告都应包括初始的和最终的基线数据。孔隙水压力传感器的校准记录是需要的，如在 10.2 中给出。如果项目需要校准其他传感器，在最终报告中它们也应被提交。

14.4 图表

每一个摩擦锥贯入触探孔的报告包括一个锥尖阻力的图， q_c MPa，最好是总的锥尖阻力， q_t MPa(或吨/ft²，kgf/cm²，bar，或其他可接受的单位压力)在地面以下(英尺)与深度的关系，摩阻力， f_s ，kPa(吨/英尺² 公斤/平方厘米，bar，或其他可接受的单位的压力)，摩阻比、 $R_f(\%)$ ，在同一个图（见附录 E.0.1 和附录 F.0.1）。作为最低限度，图表应该提供就如 14.1 概述的一般信息。电子孔压探头触探应该提供一个额外的孔隙水压力 kPa(或 lb_f/in.²，kgf/cm²，bar，或其他

可接受的单位压力)与深度、米(英尺)的关系图。孔隙水读数可以绘制为压力,或者,压力可能转化为等效高度的水(即 $h_w = u_2 / \gamma_w$)。

14.4.1 国际社会的土力学及岩土工程承认 q_t 代表锥尖阻力, f_s 代表摩擦阻力。

14.4.2 为统一的数据表达,垂直轴(纵坐标)应该显示深度和水平轴(横坐标)应该显示测试值。在绘图过程中有许多的参数选择,这样统一的比例尺度和描述是不需要的。

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

15 精度和偏差

15.1 精度

有关这个测试方法的精度的直接资料很少，特别是由于自然中地面的百变性。委员会 d 18 正积极寻求比较研究。从观察到的近似均匀沉积的重复性显示，熟悉这个测试的人估计其精度如下：

15.1.1 锥尖阻力—校准是为不规则的地区而作的如 13.2.1 中描述，一个标准偏差的约 2%的 FSO(即，与基本的机电结合的准确性，非线性和滞后)。

15.1.2 套筒摩擦—减法锥—15%FSO 的标准偏差。

15.1.3 套筒摩擦—独立锥—5%FSO 的标准偏差。

15.1.4 动态孔隙水压力—强烈依赖于操作程序和适当的饱和度如 11.2 所述。当仔细进行了标准偏差可获得 2%的 FSO。

15.2 偏差

这个测试方法没有偏差，因为数值仅仅可以从这个测试方法定义决定。

注意 11: Jefferies 和 Davies 曾报告了同一家制造商用两种不同圆锥在致密洁净砂中使用两种不同探孔时 q_t 的可重复性。有大约 50%的数据在两个测试平均数据 8%的范围内，有 90%的数据在 15%的平均水平。在这个试验中传感器被加载到 FSO 的十分之一到五分之一之间，所以确认一个标准偏差优于 2%FSO。

16 关键词

圆锥，勘察，现场测试，摩阻力，岩土测试，原位测试，贯入测试，探头，孔压探头，锥尖阻力，侧壁摩阻力，孔隙水压力，摩擦套筒，场地调查

蔡国军教授课题组
WWW.CPTULAB.COM

附注 A 背景资料

A1.对最新制造或修复的电子式摩擦型静力触探和孔压静力触探的标定要求

A1.1 简介:

A1.1.1 本附件描述了标定电子式静力触探的程序和要求。本附件中所描述的对静力触探标定的评价,是对新制造和修复的探头的一种质量保证标准。在现场操作条件下许多标准可能是不切实际。因此,确定这些标定误差对于任何锥尖,应该在实验室环境理想的条件下由制造商或其他拥有必要的知识、经验和设施的合格人员执行。

A1.1.2 电子式静力触探是一个可以在恶劣现场条件下开展试验的精密仪器。正确使用这种仪器需要详细的生产后标定和连续现场标定。静力触探的数年设计和性能提高使得圆锥体的设计和标定程序精制化,使电子式静力触探是一个高度可靠的仪器。这些经验的报道形成了本附件基础的要求(2, 3, 4, 5, 11)。

A1.1.3 这个附件中所需的标定公差是基于减法式电子式静力触探。这些探头比有独立锥尖和摩擦元件的电子式静力触探更坚固,是最广泛使用的设计。然而,减法式探头由于减法过程精确度变低(5, 11)。因此,这里的标定公差被认为是最大值和需求,更敏感的电子式静力触探意味着较小的公差有更高的精度。标定过程包括参考阻力与压力加载锥尖,然后对比测量输出和参考值。

A1.1.4 在实验室环境中应进行完整的在实地进行的探头系统进行标定。同样的制造和模型计算机、电缆、信号调节系统,和现场要用的探头应在实验室标定。根据系统的组件的一些组件可以用可接受的替代品替代。每个单独的探头必须经过一系列的负载测试来保证足够的性能。

A1.2 力传感器标定相关术语:

A1.2.1 图 A1.1 是相关传感器的标定图形化的描述术语,定义零荷载、非线性、滞后和标定误差的概念(2, 4, 10)。

A1.2.2 评估几个这些值,探头尖端的 FSO(满量程输出)是需要的。制造商应提供系统的全量程输出信息。静力触探尖端通常可在标称容量的 2、5、10 和 15 吨。这些圆锥头典型的全量程输出范围如下:

额定容量 公吨	锥尖阻力 q_c 量程		侧壁摩阻力 f_s 量程	
	ton/ft ²	MPa	ton/ft ²	MPa
2	200	20	2	200
5	500	50	5	500
10	1000	100	10	1000
15	1000	100	10	1000

A1.2.3 检查制造商的电子式静力触探的最大输出量是很重要的，可以避免圆锥头的超载和损坏。

A1.3 零荷载基线值：

A1.3.1 在测试和标定时，探头的零荷载输出变化的是一个输出稳定性内部 O 形环摩擦，温度诱导负载的可靠指标。零荷载输出变化受温度波动影响，因为粘贴应变片温度补偿不能弥补材料和系统组件的影响（2，3，4，5，10）。

A1.3.2 系统与微处理器提供了传感器的参考基线值，这个值不为零，但测量正值或负值取决于电子系统。特殊的探头和探头系统使用的基线值应保持相对恒定在探头使用过程中。测试是在野外进行，要监测基线抗性的变化。如果发生了显著的大变化，探头应该被加载以检查线性和可能的伤害。评估无载误差在荷载范围标定以区别初始的和最终的基线值。如果指出了大变化，探头应该被加载以检查线性和可能的伤害。在加载范围标定期间通过取初始和最终值上的评价零荷载误差。

A1.3.3 热稳定性——为了确保热稳定性，在温度条件范围下评价一个新制造商的圆锥的特定的设计。在室温下在新制造的圆锥头首先被循环到 FSO 的 80% 最小值五次。循环之后，建立在室温下一个初始的参考基线，在锥体被通电大约 30 分钟后，为了评价热稳定性，稳定锥尖温度为 30 度，获得新的基线值。基线值的改变一定小于的 FSO 的 1.0% 在圆锥体或摩擦筒阻力上。

A1.4 加载范围标定

A1.4.1 在生产或修理之后，标定新生产或修理的静力触探探头的加载范围。在一般测试仪器中静力触探加载测试系统或特意设计的静力触探标定设备，这种设备能独立地加载圆锥体或侧壁摩擦筒。如果使用一般的测试机械，和练习 E4 中一致的标定证明（和去年一样）一定有用的。如果使用了锥体标定，也应当

有一个与去年一样的标定文件。标定文件表面运用力和质量可以追溯到国家标准技术研究所所采用的，一般的测试机械或锥体标定设备一定能加载到锥尖到100%FSO。

A1.4.2 加载步骤的区和最大加载值的变化取决于需要和使用。选择加载步骤和所需加载范围的最大加载（不一定是圆锥头的最大承载能力）。一些标定更加频繁地强调加载步骤以更低的荷载来评价差的材料。更少加载步骤的选择会导致更高层次的标定误差。因为最佳拟合线更受低范围数据的影响。

A1.4.3 在探头经过五次循环压缩加载后，再次加载，在室温下获得参考基线。在探头上加载六种最小值大小为 FSO 的 0.2%、5%、10%、25% 及 75%，对于每一种力记录锥尖阻力和侧壁摩阻力。计算实际的锥尖阻力通过作用力除以锥底面积。侧壁摩阻力被当作是在摩擦区域上的轴向力。通过对力和测量输出的线性回归来决定最佳拟合直线。线性度是指实测锥尖阻力与最佳直线锥尖阻力阻力与探头 FSO 之商的差别。通过比较在同一层次下加载和卸载时作用力除以探头 FSO，锥尖阻力的不同点来评价滞后。通过在最佳适合直线锥尖阻力和实际的锥尖阻力，除以实际的圆锥阻力来计算校核误差。对于更小的测量结果校核误差可能变得更大。因此，在不到 FSO 的 20% 的加载时，它没被评价。

A1.4.3.1 当标定探头时，监测侧壁摩阻力以评价明显的荷载传递。减法型电子探头锥尖明显的侧壁摩阻力是由电子减法误差、干扰和其它任何从机械到摩擦锥的荷载传递所引起的。圆锥探头，提供了独立的锥尖阻力和摩擦阻力的测量，明显的侧壁摩阻力是由电子干扰和机械荷载转移确定的，明显的荷载转移一定小于侧壁摩阻力 FSO 的 1.5%。

A1.4.3.2 最大的非线性值应当是 0.2%，最大的标定误差应当是 0.5%，而且最大明显传递应当是 1.2%。对于这项标定，零加载误差是零。在这样的例子下因为测试机械不能生成在加载和卸载中生成相同的阻力，滞后是不被评价的。

A1.4.4 对于摩擦元件的标定，施加 7 个部分的力，大小为 FSO 的 0.2%，5%，10%，25%，50%，75%。非线性、滞后性和标定误差被评价以和标定锥尖读数相同的方式。在侧壁摩擦筒标定时，监测锥尖阻力去评价明显的荷载传递，在这项标准中是不明显的。

A1.5 阻力传感器标定要求

A1.5.1 电子式静力触探的标定要求是基于减法型电子式静力触探的以前的经验，作为这个经验的结果，代表了最小精度要求。在要求更高精度的情况下，更加严格的标定要求需要得到，新制造或新修理的电子式静力触探需要满足下列要求：

标定项	参数	精度要求
空载误差	锥尖阻力/侧壁摩阻力	$\leq \pm 0.5\% \text{FSO}$
空载热稳性	锥尖阻力/侧壁摩阻力	$\leq \pm 1.0\% \text{FSO}$
非线性	锥尖阻力	$\leq \pm 0.5\% \text{FSO}$
	侧壁摩阻力	$\leq \pm 1.0\% \text{FSO}$
迟滞性	锥尖阻力/侧壁摩阻力	$\leq \pm 1.0\% \text{FSO}$
标定误差	锥尖阻力	$\leq \pm 1.5\% \text{MO} (> 20\% \text{FSO})$
	侧壁摩阻力	$\leq \pm 1.0\% \text{MO} (> 20\% \text{FSO})$
视在负载	锥尖作用荷载	$\leq \pm 1.5\% \text{FSO} (\text{侧壁})$
	侧壁作用荷载	$\leq \pm 0.5\% \text{FSO} (\text{锥尖})$

A1.6 压力传感器标定

A1.6.1 新生产或修复的压力传感器应当满足加载范围标定要求。加载范围要求应该由 6 个点加载到至少 FSO 的 75% 的最小值。应用应力应当追溯到由 NIST 所提的 NIST 标准。标定应当满足制造者允许的规定的公差，最小要求线性比 FSO 的 1% 要好，零加载误差少于 7kPa。

A1.6.2 传感器应当进行正常的周期性的检查，满足 A1.6.1 中的要求。

A1.7 锥尖和摩擦区域的修正。

A1.7.1 图 A1.2 所示为水压力作用在锥尖和摩擦筒上元件的理论区域。作用在锥尖后的水压力将使测得锥尖阻力 q_c 减小，通过大量的水压力作用在锥尖处不同的区域内。因此，这里用有网格率 $a_n=0.80$ 的探头是为了减少修正的影响。水压力也可能作用在摩擦筒的两端，从而导致力的不平衡，如果摩擦筒不设计相等的有效端区域。作用在摩擦筒端部的水压力不只是形状的函数它们也是饱和水的位置的函数。贯入期间的水压力在摩擦筒两端不经常测量（也就是，相同时的 u_2 和 u_3 ），所以修正不一定为 f_s 。

A1.7.2 摩擦筒相等端部区域应当需要使用，也应当被生产者所设计。最好的评价摩擦不平衡的方法是压力锥中饱和探头运用力测量摩擦阻力在系统调零后，制造者应该进行这项检查特定的设计去保证最小不平衡性。

A1.7.3 为了计算修正过的总的锥尖阻力 q_t ，如 13.2.1 所示，有必要去确定圆锥的净面积比。探头可以防止饱和的压力室中（例如，三角形的），如图 A1.3 中的例子显示的那样应当加水压。净面积率然后用来计算修正后的总的锥尖阻力。

A1.8 其它标定 要求—其它传感器，如测斜仪、温度传感器等，可能需要根据调查需要的标定。用在附录中给出的相似的技术或参考其它过程来进行标定。当需要的时候报告这些标定。

A1.9 标定的文件

A1.9.1 实验的标定文件中由在测试方法和装备上的一个短的报告组成，还有些表格，数据和在一些附录中的那些类似，需要以下几点。

A1.9.1.1 当收到锥尖数据时

A1.9.1.2 当损坏的锥尖修好的时候

A1.9.2 这个报告需要被在材料测试中注册专业的工程师或有理论知识和经验知识的有责任的工程师质量保证证明。标定文件来自于官方对测深负责的文件中，在需要的阶段应该被更新。对于合同测试，标定文件应该先于合同验收得到。

A1.9.3 如果电子式静力触探满足 10.1.3 中的场地标定要求。在相近的基础上有必要调整锥尖适应实验室要求。使用之前静力触探应当用实验室过程标定每一个新的项目，但是它们真的不需要满足新制造的圆锥仪要求的标定公差。

附注 B 电子式摩擦圆锥贯入仪的常见结构

B.0.1 电子式摩擦圆锥贯入仪的常见结构见图 B.0.1。

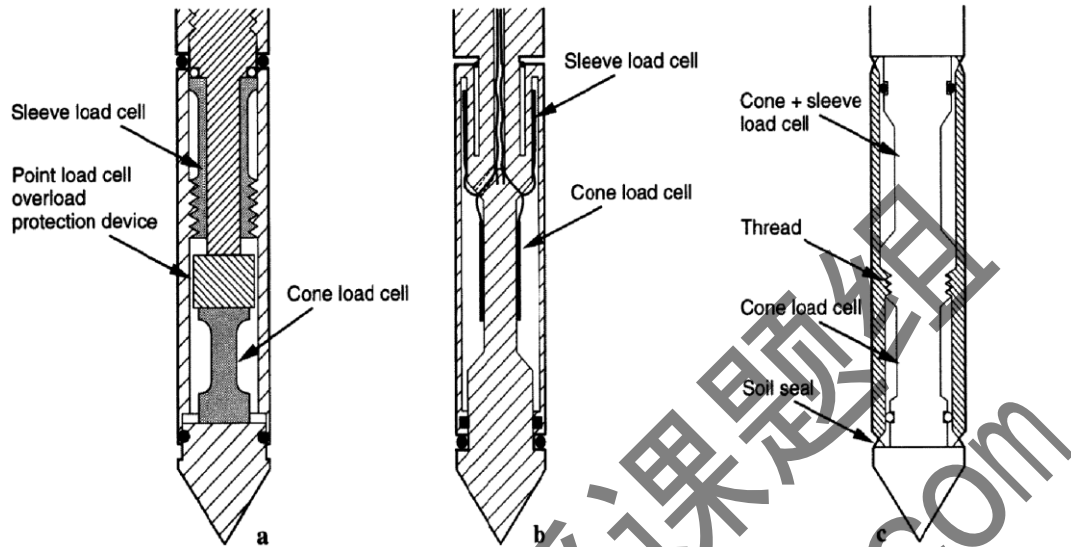


图 B.0.1 电子式摩擦圆锥贯入仪的常见结构 (a) 锥尖阻力和侧壁摩阻力均以压缩模式的压力传感器; (b) 锥尖阻力以压缩模式的和侧壁摩阻力以拉伸模式的压力传感器; (c) 减法模式的贯入仪

附注 C 锥体的制造和操作公差

C.0.1 锥体的制造和操作公差见图 C.0.1。

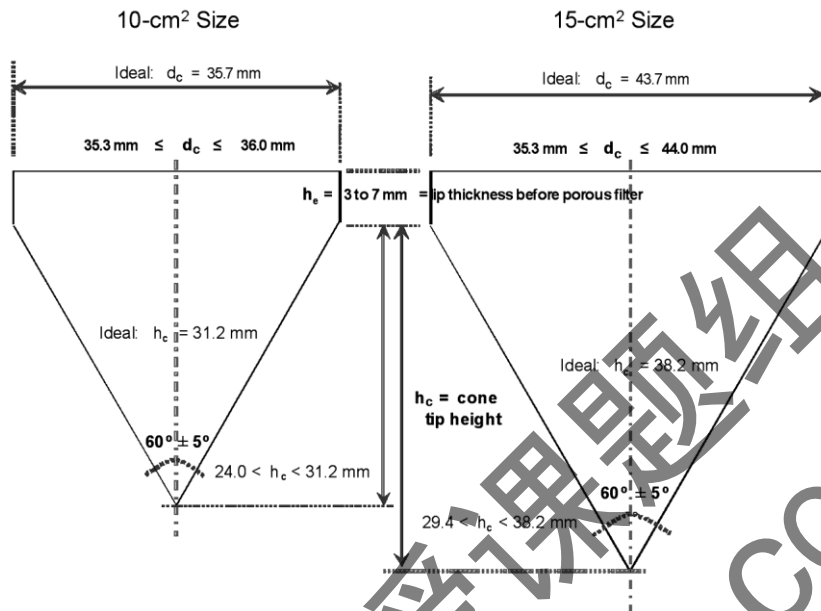


图 C.0.1 锥体的制造和操作公差

附注 D 贯入设计配置

D.0.1 贯入设计配置见图 D.0.1。

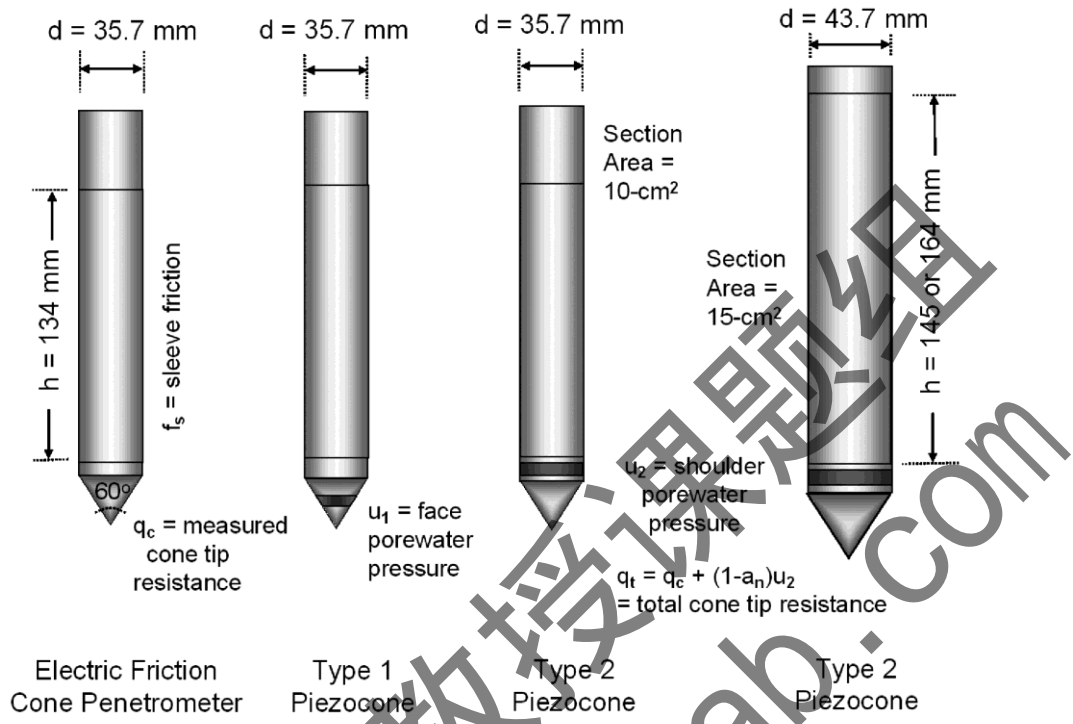


图 D.0.1 贯入设计配置: (a) Electronic Friction-type, (b) Type 1 Piezocone, (c) Standard 10-cm² Type 2 Piezocone, and (d) 15-cm² Type 2 Version (5)

附注 E 传统静力触探试验示例图

E.0.1 传统静力触探试验示例见图 E.0.1。

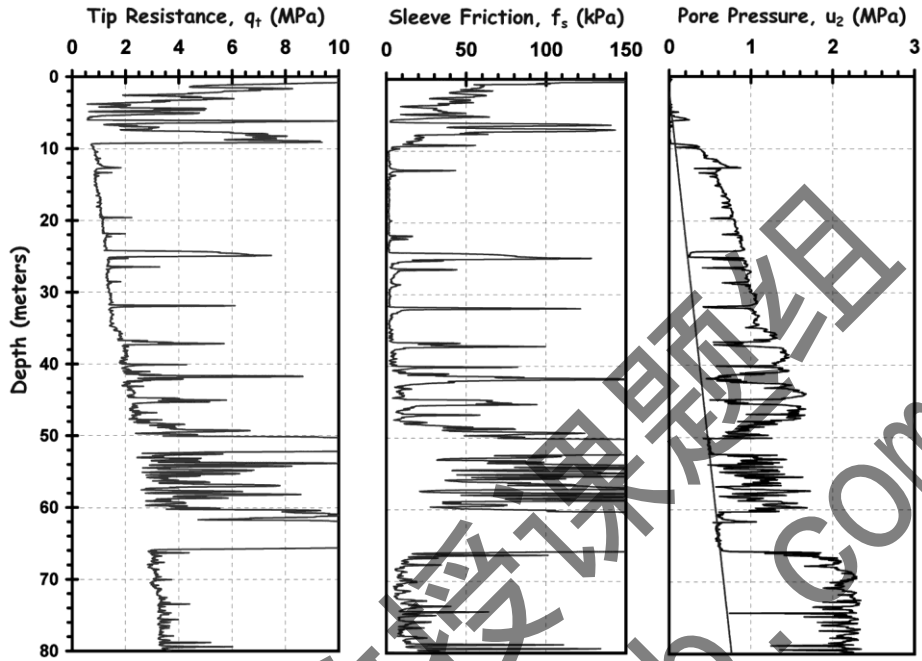


图 E.0.1 传统静力触探试验示例图

附注 F 静力触探图示

F.0.1 静力触探图示见图 F.0.1。

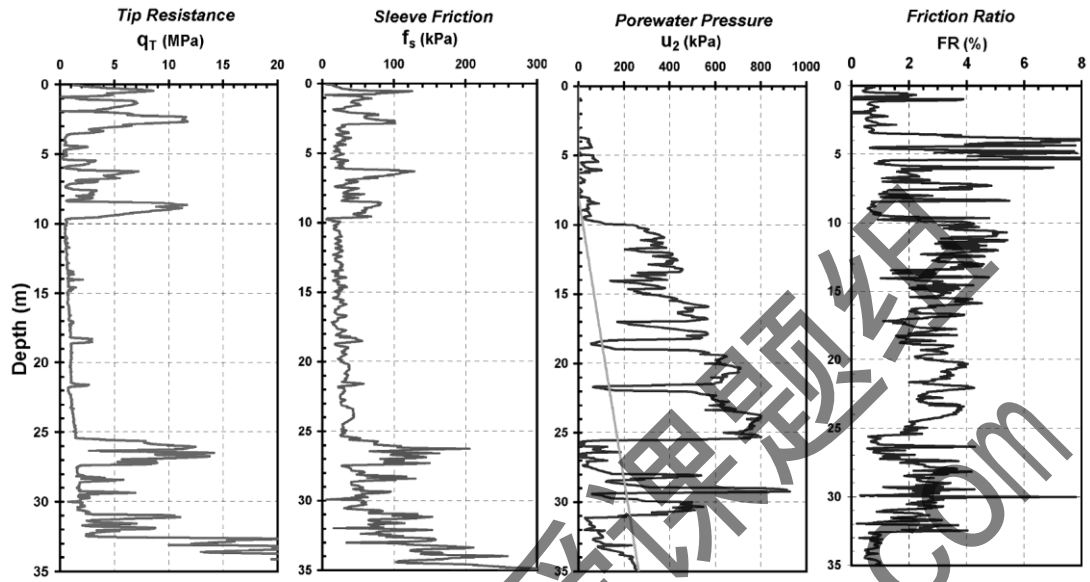


图 F.0.1 静力触探图示