

# 5TE

## 关于5TE

5TE的可以测定土壤水分含量、电导率和温度，震荡频率为70MHz。通过测定土壤的介电常数来确定含水量。三叉状探针基部的热敏电阻测定土温，电导率通过其中两根探针表面中部的螺丝测量。

### 背景

2006年，Decagon结合EC-5和ECH2O-TE研发了5TE。5TE应用与ECH2O-TE相同的理论基础，也可以同时测定土壤测定水分含量、电导率和温度。区别之处在于5TE采用不锈钢螺丝测定电导率，而ECH2O-TE采用的是镀金痕线。相比而言，5TE的设计更加坚固和耐腐蚀。另外，5TE对介电常数采用5点校准，比ECH2O-TE更加精准。

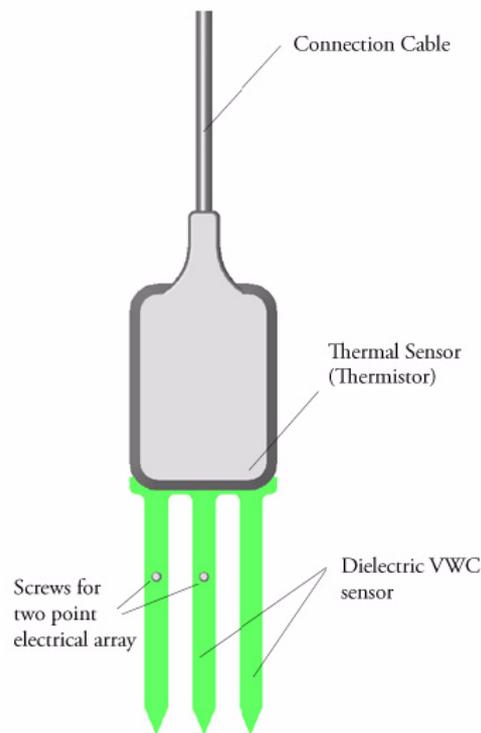


Figure 1: 5TE Components

## 测定理论

### 体积含水量

5TE通过电磁场原理测定周围介质的介电常数。传感器提供70MHz的振荡电磁波，根据介质的介电常数对传感器充电。储存的电量与土壤介电常数和体积含水量成正比。5TE的微处理器测量充电量并输出介电常数值。

### 温度

5TE采用安装在表面的热敏电阻测定温度。它位于叉状探针基部的黑色塑料外壳下面，靠近其中的一个探针，测定该探针表面的温度。5TE一般情况下输出的是单位是 °C，除非在ECH2O DataTrac 或ECH2O Utility 程序中的参数文件（preferences file）中进行了其它规定。

应当注意的是，如果探针基部黑色的塑料外壳处于阳光的直射下，温度读数会很高。同时，阳光直射也会严重影响传感器的使用寿命。建议安装传感器时不要将塑料外壳部分暴露在阳光下。

## 电导率

电导率(EC)是用来表征物质对电流传导能力的指标,可以以此推断溶液中极性分子的含量。电导率的测定是通过对两个电极施加变换的电流,测定电极间的阻抗获得的。电导率等于阻抗的倒数乘以单位常数(电极间距离/电极面积)。5TE使用双探针阵列测定EC,该阵列位于其中两个叉状探针的不锈钢螺丝上。**皮肤上的微量油脂接触到螺丝后会极大的影响EC的测定精度。**如果发生了上述情况,请参考手册最后的清洁部分对螺丝进行清洁。5TE测定的是周围介质的体积电导率(bulk EC)。bulk EC出厂时的校准值保证了在0~7dS/m的电导率范围内精度为±10%。这一精度范围完全满足绝大多数的野外、温室及苗圃测定。但含盐量高的土壤电导率会高于上述标定范围。5TE的测定范围可达23.1 dS/m bulk EC,当bulk EC高于7 dS/m时,需要用户自行校准。另外,高于7 dS/m时,EC的测定对电极表面的油脂非常敏感。如果你要测定盐渍土,请务必阅读手册最后的传感器清洁章节。

## Bulk EC 和 Pore EC的转换

对很多测定来说,很有必要知道土壤孔隙中溶液的电导率( $\sigma_p$ ),该值可以反映出土壤溶液的浓度。传统的做法是从土壤中提取孔隙溶液,直接测定 $\sigma_p$ 。这项工作既费时又费力。5TE测定的是传感器周围土壤的电导率( $\sigma_b$ )。已经有很多研究工作涉及到 $\sigma_b$ 和 $\sigma_p$ 的关系。Hilhorst (2000)采用了线性方程表示体积介电常数 $\epsilon_b$ 和 $\sigma_p$ 的关系,如果已知 $\epsilon_b$ ,就可以精确的将 $\sigma_b$ 转换成 $\sigma_p$ 。5TE几乎同时测定出土壤的 $\epsilon_b$ 和 $\sigma_b$ 。土壤孔隙中水的电导率 $\sigma_p$ (dS/m)可以由下列参数计算得到: $\epsilon_p$ 是土壤孔隙水的介电常数; $\sigma_b$ 是5TE直接测得的体积电导率(dS/m); $\epsilon_b$ 是体积介电常数; $\epsilon_{\sigma_b=0}$ 是干土的介电常数。

$$\sigma_p = \frac{\epsilon_p \sigma_b}{\epsilon_b - \epsilon_{\sigma_b=0}} \quad (1)$$

$\epsilon_p$  可以通过土壤温度求出:  $\epsilon_p = 80.3 - 0.37 * (T_{soil} - 20)$  (2)

$T_{soil}$ 是5TE测定出的土壤温度。 $\epsilon_b$ 也由5TE测定。VWC的原始读数可以换算成体积介电常数。 $\epsilon_{\sigma_b=0}$ 是一个偏移量,大致代表干土壤的介电常数。Hilhorst (2000)推荐 $\epsilon_{\sigma_b=0} = 4.1$ 作为一般的偏移量。但我们通过对农田土壤、有机土壤和无机生长基质的测定发现, $\epsilon_{\sigma_b=0} = 6$ 时,对 $\sigma_p$ 的估计更加准确。Hilhorst (2000)提出了一个对特定土壤类型的简单易行的方法,这将在大部分情况下提高 $\sigma_p$ 的计算精度。我们的测试表明,湿润土壤和其它生长基质中,由上面公式得出的 $\sigma_p$ 精度可达±20%。在干燥土壤中,当VWC低于10%时,公式(1)的分母会很小,造成很大的潜在误差。我们认为最好不要对VWC <10%的土壤应用该公式。

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_{Raw}}{50} \quad (3)$$

## 孔隙水(Pore Water)和溶液电导率(ES)

正如前部分所述,通过传感器测得的介电常数, Pore EC可以经由bulk EC换算得出。但Pore EC不等同于土壤溶液的EC。Pore EC是土壤孔隙空间中水的电导率。可以通过高压将水从土壤中挤压出来的方法直接测定土壤溶液的EC。Solution EC是饱和泥浆中分离出来的孔隙水的电导率。在这种情况下,向土壤中加入蒸馏水直至饱和,然后将泥浆置于真空漏斗中的滤纸上。测定滤出液的电导率即得到溶液电导率。理论上来说,Pore EC和Solution EC通过容重联系起来。下面是一个例子:A土壤的体积含水量为10%, pore EC 0.7 dS/m, 容重1.5 Mg/m<sup>3</sup>。

solution EC通过下式得出:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} = 1 - \frac{1.5}{2.65} = 0.43$$

$$\text{Solution EC} = \frac{\sigma_p \theta + \sigma_d (\phi - \theta)}{\phi} = \frac{0.7(0.1) + 0}{0.43} = 0.162 \text{ dS/m}$$

$\phi$ : 孔隙度

$\rho_b$ : 容重

$\rho_s$ : 矿物质密度(假设2.65 Mg/m<sup>3</sup>)

下标d: 蒸馏水

$\theta$ : 体积水分含量

假设蒸馏水的电导率为0 dS/m。经由此公式得出的Solution EC和实验室测定的Solution EC会有很大的差异，这是因为土壤水分饱和的过程难以精确控制。

## Calibration校准

### 介电常数

每个5TE传感器都经过了出厂校准，可以精确测定1（空气）~80（水）范围内的介电常数( $\epsilon_a$ )。5TE输出的未经处理的原始数值单位为 $\epsilon_a * 50$ 。

### 矿质土壤校准

无数研究者都对介电常数和体积含水量的关系进行了深入研究。结果，土壤学文献中到处都充斥着各种各样通过介电常数估算VWC的公式。我们可以自由选择公式进行介电常数和VWC的换算。在Decagon的ProCheck数采/读表和DataTrac、ECH2O Utility软件中，如果选中矿质土壤选项，将采用著名的Topp方程(Topp et al, 1980)来计算VWC:

$$\text{VWC} = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_a - 5.3 \times 10^{-2}$$

我们的研究表明，5TE恰当的安置于一般的矿质土壤中时（土壤饱和浸出液电导率<10 dS/m），Topp方程得到的VWC精度可达±3%。如果你希望获得更高的精度，或者测定高电导率的土壤、特殊的矿物，那就需要对5TE进行特定土壤类型的校准，校准后的精度将达到1-2%。请登陆<http://www.decagon.com>获得更多关于特定土壤校准的信息。

### 非土壤介质的校准

本手册出版时，Decagon还没有对介电常数和土壤介质VWC的关系进行过研究。我们计划发布常见的非土壤介质，如花盆土、岩棉纤维、珍珠岩等的校准参数。如果用户愿意自己进行校准的话，5TE可以精确的测定任何多孔介质。

## 传感器连接

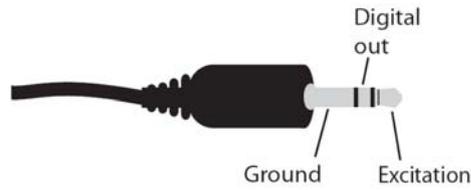
5TE连接的主要数据存储和读数设备是Decagon的Em50, Em50R数采或者ProCheck手持式数采/读表。当然，它也可以连接其它厂家的数据采集设备，例如Campbell Scientific等。5TE需要3-16V范围内的激发电压。

### 5TE与Em50/50R

5TE最方便的数据采集设备是Em50/50R数采。下载数据前，需要在您的电脑里安装ECH2O Utility, ECH2O DataTrac软件或者终端通讯程序。ECH2O Utility 1.10或更高版本的ECH2O Utility Mobile 1.17, 或ECH2O DataTrac 2.77及更高的版本都可以支持5TE。在<http://www.decagon.com/home/downloads.php>可以下载到最新版本的软件。只需把立体声插头插入数采5个端口中的一个即可，使用ECH2O Utility, ECH2O Utility Mobile, DataTrac Mobile, or DataTrac 软件中的一个对该端口的5TE设置采样间隔等。

### 3.5mm 立体声插口

5TE和Decagon数采间的插头都是3.5mm的立体声插头，可快速连接Em50、Em50R和ProCheck。下图是插头的配线图。

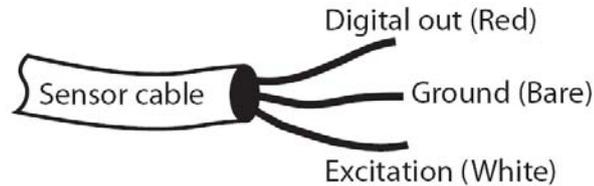


### 传感器电缆

Decagon为立体声插口的5TE传感器配备了3m和15.25m两种长度的延长电缆，可以连接4条15.25m电缆而没有信号衰减。在野外安装仪器时，一定要注意密封电缆间的连接部分，防止侵蚀状况发生。注意：埋下传感器前一定要检查电缆间的连接部分。

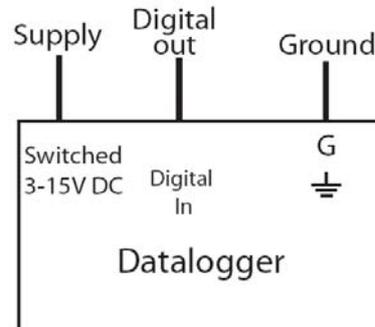
### 连接非Decagon数采

如果用户需要使用非Decagon生产的数采，我们可以提前将电缆线接口进行剥离和镀锡处理，下面是接口处线缆的说明图



5TE的电缆的长度可以订制的最大长度为76.2m（最小单位为英尺）。下图说明了各线端的连接情况，

Supply(白线)连激发端，Digital out(红线)接输入端，Ground(裸线)接地。



*注意：5TE的激发电压范围是3-15V DC。如果要使用Campbell数采，需要通过12V开关电压端口供电。*

如果5TE使用的是3.5mm标准插头，并想连接非Decagon数采上，有两种方式可以解决。第一，可以剪掉插头，剥离电线并在线头上镀锡，直接接到数采上。这样做的好处是保证了传感器一直与数采相连，但以后再使用Decagon数采时会比较麻烦。还有一种方法是采用Decagon的适配电缆，该电缆一端是传感器插孔，另一端是三根电线，可以直接接到数采上。

### 数采通讯

当激发电压开启时，5TE开始测定。50ms的激发时间内，3个测定参数以ASCII码输入数采。1200波特率8位异步连续输出，无奇偶性，一个停止位。电压范围是0-3.6V，晶体管逻辑电路。测定间隔内要断电。ASCII数据串内使用空格分隔三个参数。数据串以回车结束。第一个数值是原始介电常数，第二个是原始电导率值，第三个是原始温度值。下面的内容说明了原始值如何转化成标准单位的值。

### 介电常数

原始介电常数( $\epsilon_{Raw}$ )在0~4094范围内。对应的介电常数范围为0.00 ~ 81.88。5TE采用 $\epsilon_{Raw}$  4095代表传感器工作不正常。 $\epsilon_{Raw}$ 采用下式转换成介电常数

$$\text{Dielectric Permittivity} = \epsilon_a = \frac{\epsilon_{Raw}}{50}$$

### 电导率

原始电导率值( $\sigma_{Raw}$ )的范围为0~1022。5TE采用压缩算法延伸电导率的范围,该值可达10位。 $\sigma_{Raw}$ 可以通过下面的公式换算成体积电导率。5TE以23.1作为电导率测定的最大值。 $\sigma_{Raw}$ 以1023表示传感器工作异常。

$$\text{If } \sigma_{Raw} \leq 700 \text{ then EC (dS/m)} = \frac{\sigma_{Raw}}{100}$$

$$\text{If } \sigma_{Raw} > 700 \text{ then EC (dS/m)} = \frac{700 + 5(\sigma_{Raw} - 700)}{100}$$

### 温度

原始温度值( $T_{Raw}$ )的有效范围为0~1022。5TE采用压缩算法延伸温度的范围,该值可达10位。-40~50.0°C内的分辨率为0.1°C。50.5~111.0°C内的分辨率为0.5°C。超过111°C或低于-45°C的值被记录成111°C或-45°C。5TE以 $T_{Raw}$  1023表示传感器工作异常。

$$\text{If } T_{Raw} \leq 900 \text{ then } T_{Raw2} = T_{Raw}$$

$$\text{If } T_{Raw} > 900 \text{ then } T_{Raw2} = 900 + 5(T_{Raw} - 900)$$

$$\text{Temperature}(^{\circ}\text{C}) = \frac{T_{Raw2} \angle 400}{10}$$

## 安装传感器

**注意:** 1. 安装前检查5TE上的两个螺丝电极是否清洁。请参见手册中关于清洁的部分。

2. 建议安装前用数采和相关程序对传感器进行测试。

在选择安装地点前,一定要清楚:传感器紧挨着的土壤对读数的影响最大。传感器和土壤之间的空隙或者土壤压实的太紧都将造成读数不准。安装时要避免附近有大的金属物体,因为金属物体会削弱传感器的电磁场,造成读数失真。因为传感器的叉状探头间有距离,所以还要考虑传感器插入的土壤体积。土壤中的木棍、树皮、树根或其他东西都可能卡在探头间,造成读数不准。最后要注意的是,插入紧实土壤时要把握好力度,避免用力过火把传感器折断。

### 安装过程

5TE可以直接插入土壤或其其它培养基质中。传感器探头端部锋利,注意不要伤到手指。传感器整体都要埋入土中,如下图所示。

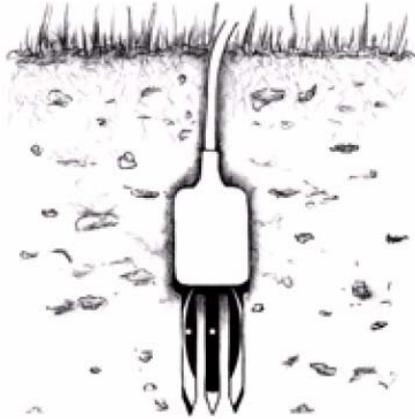


Figure 2: 5TE installed correctly

如果测定的土壤非常紧实或者非常干燥，插入传感器会比较困难。可以适当的弄松或湿润土壤。一定不要用工具撞击传感器。

#### 方法1. 水平安装

挖凿一个比传感器安装深度深几厘米的坑或沟。刮掉土壤纵剖面上安装部位的土壤，漏出没有被扰动的土层。将传感器的整个感应部位都插入土中。回填土壤的时候要依照土壤的自然发生层次，使5TE黑色塑料部位周围的土壤保持原状密度。

#### 方法2. 垂直安装

在地面钻一个直径4英寸的孔洞，直到传感器要插入的深度。用手或者其它工具将传感器插入孔洞的底部的未被扰动的土壤中。很多人都采用PVC管作为工具，管子底端刻的凹槽可以固定传感器，电缆线放置在管子中。插入传感器后，拿掉PVC管，回填土壤时保持土壤的自然容重。注意不要损伤传感器黑色塑料部位和电缆。

#### 角度

5TE由于采用叉状探针而不是像EC-10和EC-20那样的片状结构，所以可以按照试验需要以任意角度插入土壤。

#### 拔出传感器

拔出传感器的时候一定不要拽拉电缆，这样会弄断电缆内部的电线，造成故障。

## 安装多个传感器

5TE测定电导率(EC)是通过激发传感器上的一个螺丝，测定该螺丝与另外一个接地螺丝间的电流强度来实现的。两个螺丝的间距是计算EC的重要参数。如果两个5TE安放的距离太近（小于20cm），其中一个传感器上被激发螺丝的电流会通过另一个传感器上接地的螺丝，导致错误读数产生。只要地线是接着的，不管什么数采都会面临这种问题。如果试验中传感器不可避免的要离的很近，可以通过一种安装方式来分隔开各条地线。例如，需要在垂直剖面上的短距离内安装多个传感器时，不要把它们插在同一垂线位置上，而要错开排列，这样就可以满足间距的要求了。

## Campbell 程序

因为传感器采用的是数字式而非模拟通信方式，在连接Campbell数采时需要特别注意。以下是采用Campbell数采连接5TE时的注意事项：

- 连接CR10X数采
- 连接CR1000数采

- 使用 AM16/32复路器

<http://www.decagon.com/home/downloads.php> 下载Campbell程序

## 常见问题及解答

5TE经常会遇到的问题是读数错误。请您按照下面的内容进行检查，如果仍不能解决，请联系我们。

### 数据采集器

- 1 检查传感器电缆的插头正确连接到数采插孔中。
- 2 保证数采电池电量充足。
- 3 在ECH2O Utility 或者 ECH2O DataTrac软件里确认数采中已配置成功5TE。

### 传感器

- 1 按照本手册中“传感器安装”部分的要求进行安装。
- 2 检查传感器电缆没有划痕和断裂。
- 3 检查传感器上螺丝没有损坏，螺丝表面清洁。

## 清洁传感器

不清洁的传感器螺丝表面对EC的准确测定影响很大，特别是EC很高的介质更是如此。最常见的问题就是手指上的油质粘污了传感器螺丝表面。图3a和3b分别表示出了传感器污染后测定低EC和高EC土壤时的简化电路图。可以看出，对于低EC的土壤，污染的影响相对较小，这是因为土壤本身的电阻很大。但对于高EC的土壤，污染的影响就非常大了。这就说明了保证螺丝清洁的重要性，尤其在测定高EC土壤时更要注意。螺丝污染后会影响到厂家校准值的有效性 ( $>8 \text{ dS/m}$ )，当然用户可以自己进行校准，测定结果仍然准确。

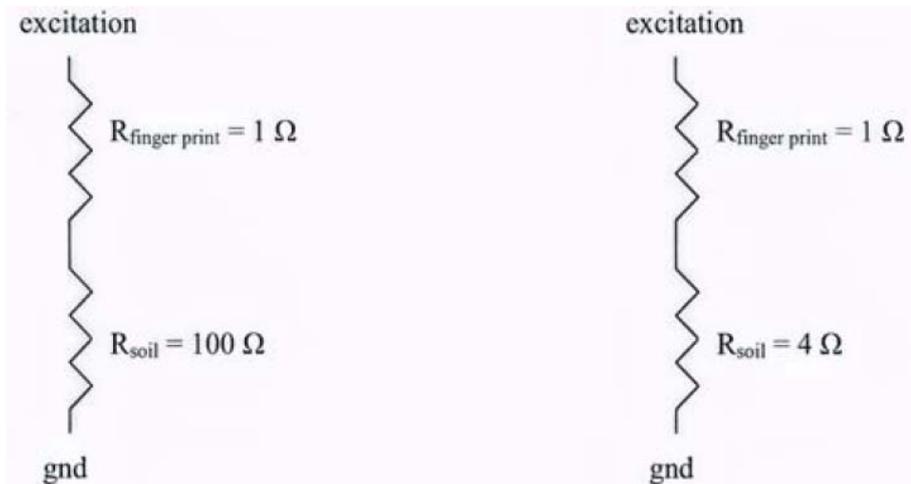


Figure 3a: 低EC的土壤,  $R_{total}=101\Omega$ , 污染造成的误差为1%

Figure 3b: 高EC的土壤,  $R_{total}=5\Omega$ , 污染造成的误差为25%

### 清洁方法

1. 用一滴Dawn或者其它的洗涤肥皂和温水清洁螺丝。肥皂中不要含有乳液和保湿剂成分。
2. 用自来水把传感器上的肥皂冲洗干净。
3. 用干净纸巾把传感器上的水吸干净，来回擦拭，保证所有的杂质都被清洁掉。纸巾上一定不能含有乳液和保湿剂成分，要不然前面的步骤就白做了。不要再碰触到任何油脂和阻碍导电的物质。

## 技术指标

### 体积含水量(VWC)

范围: 表观介电常数( $\epsilon_a$ ): 1 (空气) ~80 (水)

分辨率:  $\epsilon_a$ : 0.1  $\epsilon_a$  @ 1~20, <0.75  $\epsilon_a$  @ 20~80

VWC: 0.08% @ 0~50% VWC

精度: ( $\epsilon_a$ ):  $\pm 1 \epsilon_a$  @ 1~40,  $\pm 15\%$  @ 40~80

- Topp 方程:  $\pm 3\%$  VWC, 电导率小于 10 dS/m 的典型矿质土
- 特定介质中的校准:  $\pm 1-2\%$  VWC, 任何多空渗水介质中

### 电导率(bulk)

范围: 0-23 dS/m (bulk)

分辨率:  
0.01 dS/m @ 0-7 dS/m,  
0.05 dS/m @ 7-23 dS/m

精度:  $\pm 10\%$  @ 0-7 dS/m, 高于 7 dS/m 时, 用户校准

### 温度

范围: -40~50°C 分辨率: 0.01°C

精度:  $\pm 1^\circ\text{C}$

### 其它指标

尺寸: 10×3.2×0.7 cm

探针长度: 5.2 cm

测量频率: 70 MHz

测量时间: 150 ms

电源:

3.6 - 15 VDC, 0.3 mA (测量间隔), 10 mA (测量中)

输出: RS232 或 SDI 12

操作环境: -40~50°C

电缆接口: 3.5 mm 立体声插口或剥开的镀锡导线

数据采集器 (多种):

电缆长度: 5m(标配), 其它长度可向厂家定制

*Decagon*: Em50, EM50R, ProCheck

*Campbell* 数采: CR10X, 21X, 23X, CR1000, CR3000 等