

ICS 29.240.01

F 20

备案号: 60080-2017

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1721 — 2017

电力电缆线路沿线土壤 热阻系数测量方法

Test method of thermal resistivity of soil along the
underground power cable route

2017-08-02 发布

2017-12-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 名词和术语	1
4 测量设备	1
5 现场测量	2
6 结果计算	3
7 测量报告	4
附录 A (资料性附录) 热线法热阻系数测量原理	5
附录 B (规范性附录) 土壤热阻系数测量探针校准方法	6
附录 C (资料性附录) 测量报告范例	7

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准参考 ASTM D5334—2008《热针探头法测定土壤和软石导热性的标准试验方法》。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力电缆标准化技术委员会（DL/TC19）归口。

本标准主要起草单位：中国电力科学研究院有限公司。

本标准参加起草单位：广州供电局有限公司、西安交通大学、国网厦门供电公司、国网杭州供电公司。

本标准主要起草人：樊友兵、刘松华、刘毅刚、钟力生、严有祥、李文杰、黄宏新、陈朝晖。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

电力电缆线路沿线土壤热阻系数测量方法

1 范围

本标准规定了采用热线法（参见附录 A）测量直埋电缆线路周围土壤热阻系数的现场测量方法。

本标准适用于各种埋地敷设电缆线路，包括直埋、穿管以及电缆沟回填敷设等方式下，电缆线路周围均匀回填材料的热阻系数测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 10294—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法

GB/T 10297—1998 非金属固体材料导热系数的测定 热线法

GB/T 28418—2012 土壤水分（墒情）监测仪器基本技术条件

3 名词和术语

以下术语和定义适用于本标准。

3.1

含水率 **moisture content**

土壤所含的水分重量与干态条件下土壤的重量的比值，通常用百分比（%）来表达。

3.2

热回填 **thermal backfill**

对电缆线路周围利用特定材料进行回填，以改善电缆线路周围环境的热阻和热稳定性。

3.3

土壤水分迁移 **moisture migration in the soil**

由于热源（带负荷电缆）的作用，土壤水分发生转移的现象。

3.4

热瓶颈 **thermal bottleneck**

由于电缆线路局部散热条件较差，导致该段线路的局部温升高于线路其他段的现象。

3.5

热探针 **thermal probe**

用于测量各种材料热阻系数的金属针状物，内有线性热源、温度传感器。

4 测量设备

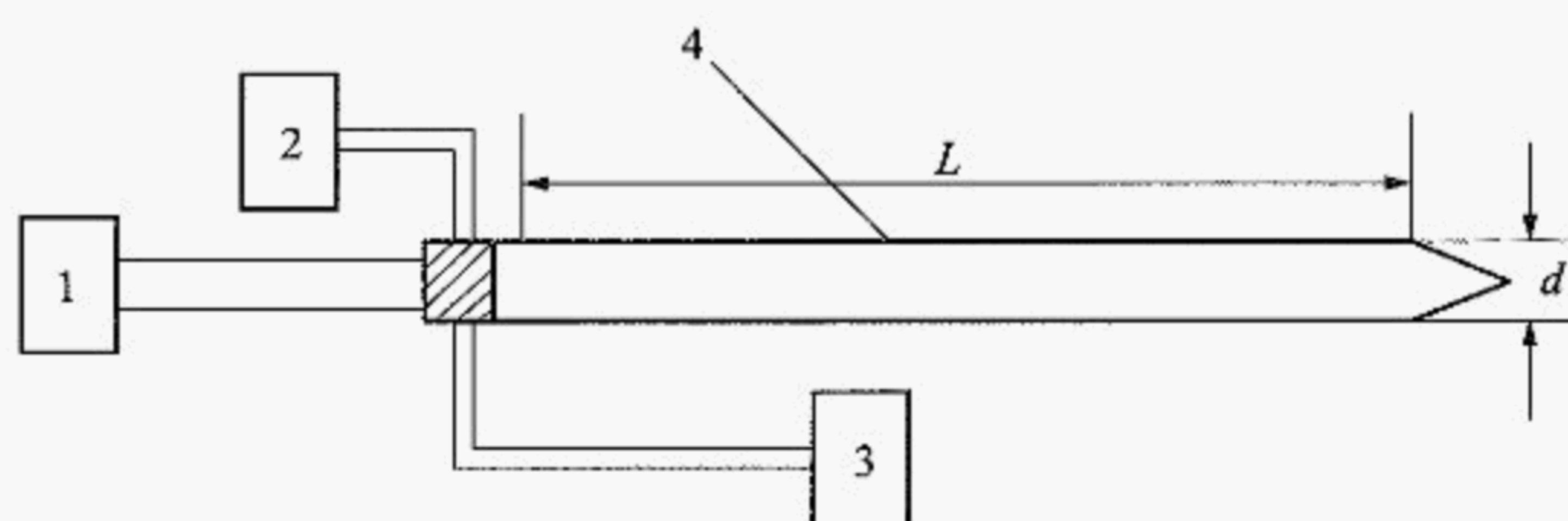
4.1 测量设备结构

采用热探针的现场土壤热阻系数测量装置如图 1 所示。

4.2 测量探头

4.2.1 测量探头可采用热探针形式。热探针外壳可采用具有一定机械强度的不锈钢管，且实际测量段

长度 (L) 和外径 (d) 之比应不小于 20。



1—电源；2—带冷端补偿的温度测量；3—功率监测；
4—热探针； L —热探针测量段长度； d —热探针直径

图 1 基于热探针的现场土壤热阻系数测量装置示意图

4.2.2 热探针内安装有测温热电偶，热电偶可采用康铜热电偶，探针内可填充高导热树脂。

4.2.3 测温热电偶应位于靠近热探针尖端部，距离实际测量段两端距离应不小于 $10d$ 。

4.2.4 测量过程中，热探针内热线的电阻值随温度的变化范围应不小于 0.5%。

4.3 现场电源

4.3.1 如果现场有电力供应，测量时应优先采用经过校准的可调直流电源，输出电流应在 1A~10A 范围内可调。

4.3.2 如果现场没有电力供应，可采用蓄电池或类似的电池作为电源，输出电流应在 1A~10A 范围内可调。

4.3.3 探针内热线的功率范围为 10W/m~80W/m。

4.4 功率监测

推荐采用 100W 的模拟功率表测量热线的功率。条件不允许时，可采用电压表/电流表联合的方式测量。测量精度优于 $\pm 0.5\%$ 。

4.5 温度监测

热电偶的分辨率应达到 0.1°C ，推荐采用可连续记录的数字式温度记录仪，记录时间分辨率应优于 15s，单次测量连续记录容量不小于 30min。温度监测应带有冷端温度补偿。

4.6 测量系统标定

测量系统组成后，应采用热阻系数在探针测量范围内的标准试样和标准测定方法进行标定和比对。推荐采用附录 B 的方法。

5 现场测量

5.1 选点

5.1.1 线路路由

测量前，应对电缆线路路径进行分析，确定合适的测量点。

热探针上测温点的位置宜和所测电缆线路保持在同一深度上，且与电缆线路的水平距离宜保持在 2m 以内。

5.1.2 相邻测量点间距不宜超过 1000m。

5.1.3 热瓶颈点

对于线路路径上可能存在的热瓶颈，应加以识别并增加测量点。包括但不限于以下情况：

- a) 埋地电缆线路的地势较高、低水位段；
- b) 已敷设线路未采用确定热阻系数的回填材料区域；
- c) 大树下等富含有机回填物区域；
- d) 线路上方有遮挡，雨水难于直接或间接到达区域；
- e) 密集敷设电缆群周围；
- f) 电缆线路附近有其他热源影响时；
- g) 电缆线路周围热回填材料性状因为水分迁移或季节、气候的变化而发生变化；
- h) 当在运线路有其他监测设施（如分布式光纤测温）结果可供参考，表明该段为热瓶颈点时。

5.2 测量频率

5.2.1 对于规划线路，宜在施工前在电缆规划路径上分别于冬、夏两季开展两次测量。

5.2.2 对于已投运线路，应在以下情况时增加测量频率。

- a) 当电缆线路周围运行环境发生变化时。
- b) 当电缆线路载流量接近设计值，且未掌握当前电缆线路周围土壤热性能时。

5.3 测量步骤

5.3.1 将热探针插入到所测土壤中，并保持良好接触。应保证热探针的测温点与被测（规划）电缆线路在同一水平位置上。当热探针难于直接到达指定深度时，可采用辅助工具打孔，打孔至所需深度后，再将热探针插入。

5.3.2 将热探针插入打孔后的土壤内，保持 5min~10min，使热探针与周围土壤达到热平衡。

5.3.3 将热探针内的热线连接至电源，并同时记录探针温度。

5.3.4 施加电流加热探针，同步记录时间、温度、加热功率。整个加热测量时间宜控制在 30min 以内，加热期间探针最高温度不应超过 50℃。

5.3.5 热阻系数测量完成后宜对测量点附近的土壤含水率进行现场测量或取样进行实验室测量。含水率的测量可参考 GB/T 28418—2012 标准执行。

6 结果计算

6.1 探针加热功率的计算见式（1）

$$q = I \cdot V / L \quad (1)$$

式中：

q ——探针单位长度的加热功率，W/m；

I ——加热电流，A；

V ——加热电压，V。

6.2 以时间对数 $\ln t$ 为横坐标，以温升 θ 为纵坐标，绘出 $\ln t \sim \theta$ 曲线，确定其线性区域。

6.3 选取 $\ln t \sim \theta$ 曲线的线性区域，计算土壤的热阻系数见式（2）：

$$\rho = \frac{4\pi}{2.303q} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad (2)$$

式中：

ρ ——热阻系数，K·m/W；

θ_1 ——在任意时刻时间 t_1 探针的温度，℃；

θ_2 ——在任意时刻时间 t_2 探针的温度，℃；

q ——热探针单位长度的加热功率，W/m；

t_1 ——到达温度 θ_1 所需的时间, min;

t_2 ——到达温度 θ_2 所需的时间, min。

6.4 选取线性区域的三组时间、温度数据, 进行重复计算, 测量结果为三次测量的算术平均值。计算测量结果的均方差, 要求均方差不得大于 0.05, 否则可以判定结果存在较大的误差, 应在测量点附近重新选点, 进行测量。

6.5 测量系统应定期进行校准。校准方法参照附录 B。

7 测量报告

测量报告应包含如下内容:

- a) 测量地点和日期;
- b) 测量者信息;
- c) 所测线路概况;
- d) 测量点情况描述;
- e) 各测量点热回填材料组分描述;
- f) 各测量点的测量结果;
- g) 测试仪器型号及编号。

测量报告参照附录 C。

附录 A
(资料性附录)
热线法热阻系数测量原理

热线法的基本原理是在均质均温的试样中放置一根均匀电阻丝,即所谓的“热线”,当热线在恒定功率的作用下放热,则热线和热线附近试样的温度将会升高。根据温度随时间的变化关系,即可确定试样的热阻系数。这种方法不仅适用于干燥材料,而且还适用于含湿材料如土壤的热阻系数测量,具体测量过程见 GB/T 10297—1998。

设半径为 r_0 的无限长热线置于无限大的待测介质中,被测介质具有一致的初始温度,热物性各向同性且为常数。在忽略接触热阻的情况下,热线表面温升的解析见式 (A.1):

$$\theta = \frac{2q\omega^2}{\pi^3\lambda} \int_0^\infty \frac{1 - \exp\left(-\frac{\alpha\tau}{r_0^2}\right)}{u^3 \Delta(u, \omega)} du \quad (\text{A.1})$$

其中:

$$\Delta(u, \omega) = [uJ_0(u) - \omega J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - \omega Y_1(u)]^2$$

式中:

- r_0 —— 热线半径, m;
- q —— 热线的加热功率, W/m;
- λ —— 待测样品的导热系数, W/(m·K);
- α —— 待测样品的热扩散系数, m^2/s ;
- ω —— 待测样品与热线比热容之比的 2 倍;

$J_0(u)$ 、 $J_1(u)$ —— 第一类贝塞尔的零阶、一阶函数;

$Y_0(u)$ 、 $Y_1(u)$ —— 第二类贝塞尔的零阶、一阶函数。

定义无量纲时间 $F_0 = \alpha t / r_0^2$, 当时间足够长时, 即 F_0 足够大时, 对上式简化后级数展开并忽略高次项, 可简化为:

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} [\ln(4\alpha t / r_0^2) - C] \quad (\text{A.2})$$

式中:

$C \approx 0.5772$, 为欧拉常数。

当加热时间大于某一 t_{\min} 时, 可认为 $\theta \sim \ln t$ 数据呈线性, 加热过程中任意两个不同时间 t_1 、 t_2 时温升的差值为:

$$\Delta\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t_2/t_1)$$

即待测试样的导热系数为:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{A.3})$$

应用式 (A.3) 时, 需满足以下假设条件:

- a) 热线无限长;
- b) 热线无限细;
- c) 热线热容量为零;
- d) 不考虑热线与待测样品之间的接触热阻。

附 录 B
(规范性附录)

土壤热阻系数测量探针校准方法

B.1 热探针的校准可以采用两种方法进行校准：标准试样对比法；防护热板法。

B.2 标准试样对比法。

B.2.1 利用已知其热阻系数的标准试样进行对比，得到校准系数 C 。

$$C = \frac{\rho_s}{\rho_m} \quad (\text{B.1})$$

式中：

ρ_s ——用于校准的标准试样的热阻系数；

ρ_m ——利用探针测量得到的标准试样热阻系数。

B.2.2 后续所有利用热探针进行测量的结果都需要乘以系数 C 。

B.2.3 校准标准——单个或者多个已知热阻系数的材料 ($0.2\text{K} \cdot \text{m/W} < \rho < 5.0\text{K} \cdot \text{m/W}$)。合适的材料包括甲级硅氧烷、甘油等。校准桶的直径不小于 40mm，或者 10 倍的电缆外径。对于固体试样，需要在圆柱体中心开孔，开孔直径与探针外径相等。对于已经钻孔的试样，可以在探针表面涂抹一层热油脂，减小阻力。

B.3 利用防护热板法进行校准。

B.3.1 防护热板法测量应符合 GB/T 10294—2008 的规定。通过防护热板法得到未知试样的热阻系数。

B.3.2 利用探针测量得到该种材料的热阻系数。通过对比，得到校准系数 C 。

$$C = \frac{\rho_s}{\rho_m} \quad (\text{B.2})$$

式中：

ρ_s ——平板法测量得到的未知试样的热阻系数；

ρ_m ——利用探针测量得到的未知试样热阻系数。

B.3.3 后续所有利用热探针进行测量的结果都需要乘以系数 C 。

B.4 对于大直径探针，应在测量范围内，利用不同热阻系数的标准材料进行校准，得出不同热阻值下的校准系数，得出热阻系数的校准曲线。

B.5 校准试样测量结果必须和试样的公布值的标准偏差相吻合，或者和通过热护板法得到的热阻值的偏差相一致。

B.6 对于在指定范围内，测量值需要四舍五入，一般保留一位小数。

附录 C
(资料性附录)
测量报告范例

电缆线路沿线土壤热阻系数测量报告

被测量线路名称：_____ 测量时间：_____

测量员：_____

测试设备：_____。

线路概况：_____。

测量点描述：本次测量沿线选取 2 个测量点进行了测量。

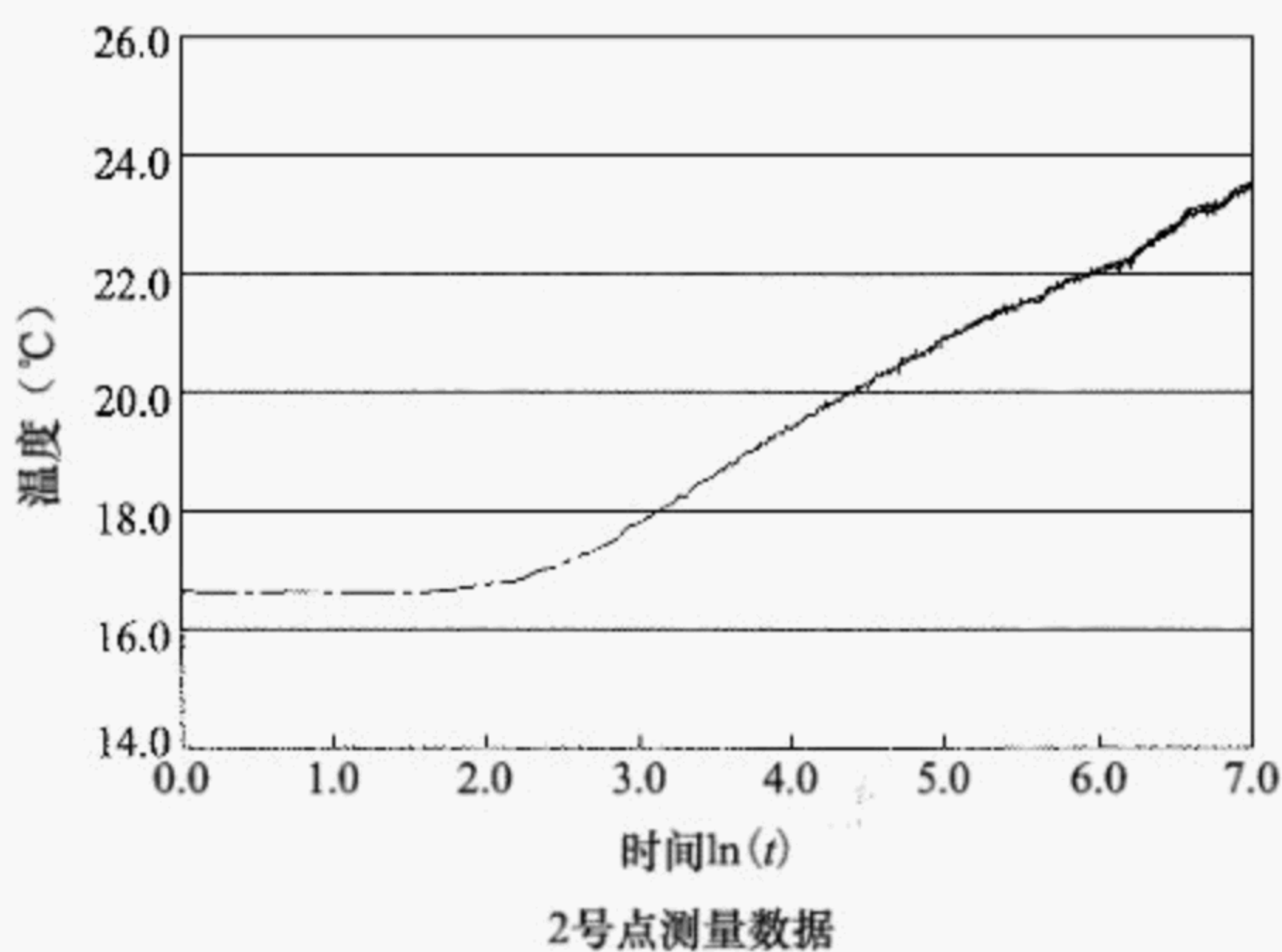
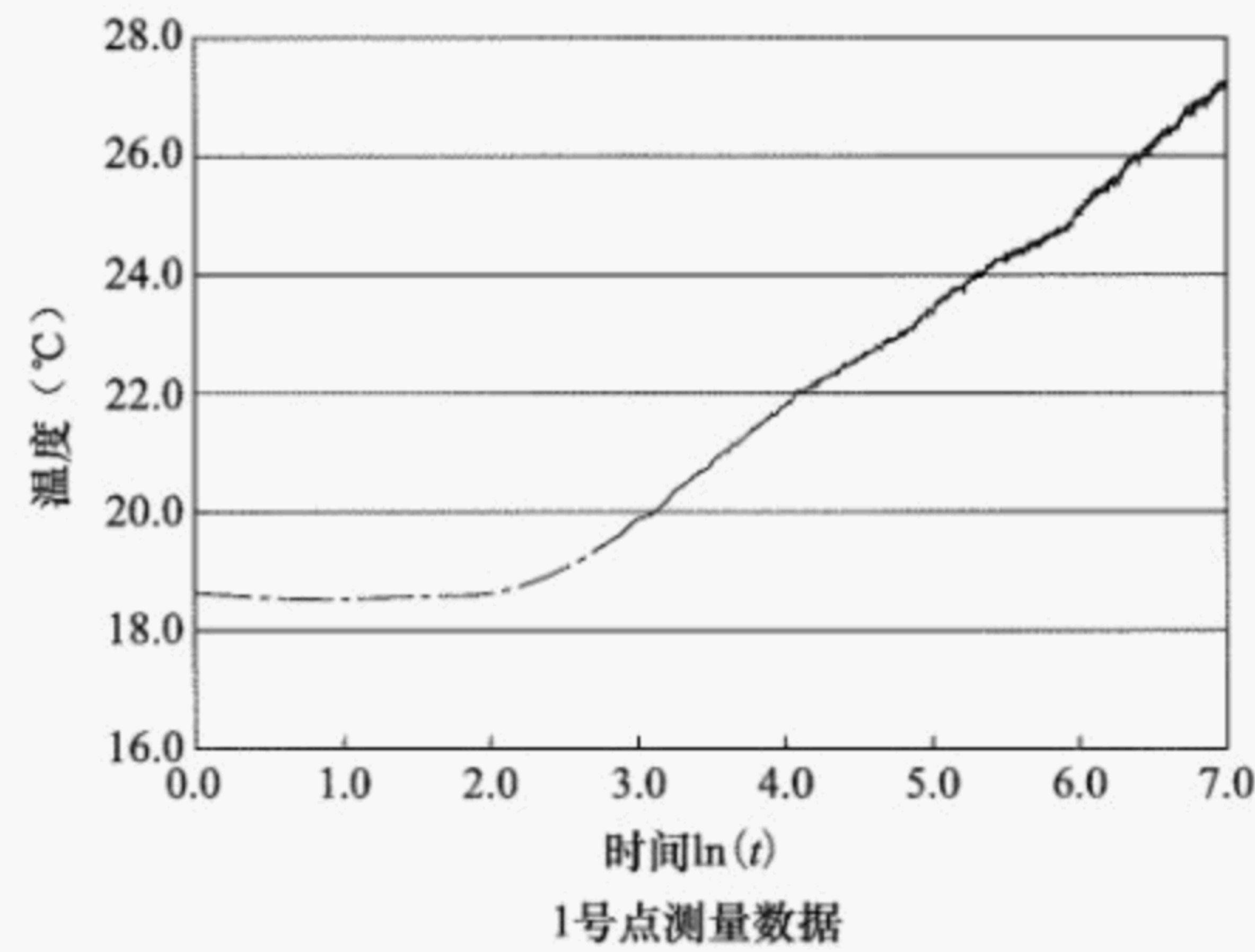
1) 1 号点：测量深度_____m；相对位置：_____；土壤含水率_____%；主要组分_____。

2) 2 号点：测量深度_____m；相对位置：_____；土壤含水率_____%；主要组分_____。

测量结果：

测量点编号	热阻系数 $K \cdot m/W$
1 号	
2 号	

附录：测量数据记录（示例）



中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
电力电缆线路沿线土壤热阻系数测量方法
DL/T 1721—2017

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京传奇佳彩印刷有限公司印刷

*

2018年6月第一版 2018年6月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 0.75印张 16千字
印数 001—500册

*

统一书号 155198·576 定价 11.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.576