

用电容法测定松散砂质粘性 土含水量和孔隙率的规程

全苏给水、排水、水工建筑物和工程水文地质科学研究所

水利出版社

苏 联
建 筑 工 程 部
技 術 · 处

全苏給水、排水、水工建筑物和
工程水文地質科学研究所
(ВОДГЕО)

用电容法測定松散砂質粘性
土含水量

吳 兆 麟 著 國 平 譯
水利部 南京水利科学研究所
交通部

藏 书 章

水 利 出 版 社

1957年12月

本書分正文和附錄兩部分，正文是根據“Указания по применению электроемкостного метода определения влажности и пористости рыхлых песчано-глинистых грунтов”一書譯出，附錄根據“Методы определения естественной влажности и пористости песчаных грунтов”一書譯出，上述二書均系蘇聯給水、排水、水工建築物和工程水文地質研究所 Г. Я. 乞爾涅克編著。

本規程是用電容法測定砂性粘質土的含水量和孔隙率各個具體操作步驟的指南，對此法的野外工作、校準工作和測定成果的整理都作了指導性的說明。附錄介紹了用電容法測定砂土天然含水量和孔隙率的原理和方法。

本書是土壤、土壤改良、地質、水文地質、勘測和施工工作者和研究人員實際工作中的指導性書籍，亦可作為大學有關院系相應專業的參考書。

正文譯者是吳兆麟、鄧國平兩位同志，校者是鄭宜梁、陳耀祖、陳明侯三位同志，附錄譯者是前南京水利實驗處袁百匯同志，校者是曹建人、褚德珊兩位同志。

用电容法測定松散砂質粘性土含水量和孔隙率的規程

- 原 書 名 УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ЭЛЕКТРОЕМ-
КОСТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖ-
НОСТИ И ПОРИСТОСТИ РЫХЛЫХ ПЕСЧАНО-
ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ
- 原 著 者 ВОДГЕО
- 原 出 版 處 МОСКВА
- 原 出 版 年 份 1954
- 譯 者 吳兆麟 鄧國平
水利部
交通部 南京水利科學研究所
- 出 版 者 水利出版社(北京和平門內北新華街35號)
北京市書刊出版業營業許可証出字第080號
- 印 刷 者 水利出版社印刷廠(北京西城成方街13號)
- 發 行 者 新華書店

85千字 插圖2頁 850×1168 1/32開 3 5/8印張

1957年12月第一版 北京第一次印刷 印數1—1,600

統一書號: 15047·103 定價: (10)0.65元

目 錄

正 文

原出版者的話	1
序 言	2
第一章 电容法的物理基礎及应用儀器的說明	4
第二章 非飽和区内松散砂質粘性土含水狀況的研究	15
§1. 野外工作	16
§2. 校準工作	19
§3. 測定成果的整理	23
第三章 濕砂和飽和砂天然孔隙率的確定	25
§1. 野外工作	26
§2. 校準工作	31
§3. 測定成果的整理	33
結束語	37

附 錄

序 言	41
第一章 緒論	42
§1. 砂土及其性質	42
§2. 用土工試驗方法確定砂土含水量和孔隙率的一些知識	48
§3. 確定砂土含水量和孔隙率的地球物理法簡述	54
第二章 濕土的介電常數及其在實際应用中的某些嘗試	63
§1. 概述	63
§2. 土的介電常數	63
§3. 若干歷史情節的回顧	66
第三章 电容法的物理技術基礎	70
§1. 電極化	70
§2. 確定土的介電常數的电容法	73

第四章 實驗室試驗成果	30
§1. 用湿土(含水量小于飽和含水量)進行的實驗室工作.....	30
§2. 用飽和砂進行的實驗室工作.....	34
§3. 觀察砂柱体内渗透的實驗室試驗.....	86
第五章 非飽和区内土的含水量动态的野外調查	37
§1. 野外工作的方法.....	37
§2. 野外試驗的一些成果.....	89
第六章 飽和砂天然孔隙率的野外調查	92
§1. 野外工作的方法.....	92
§2. 介电电測野外試驗成果.....	96
結束語	100
參考資料	102

原出版者的話

“用电容法測定松散砂質粘性土含水量和孔隙率的規程”一書是科学技術副博士 Г. Я. 乞尔涅克在全苏給水、排水、水工建築物及工程水文地質科学研究所 (Всесоюзный научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии 簡称 “В-ОДГЕО”) 的工程水文地質試驗室編著的, 經科学技術委员会 (Научно-технический совет) 審查, 并同意出版。

編輯 М. П. 西明諾夫教授

序 言

自然含水量和孔隙率是松散砂質粘性土最重要的特性，这些特性确定了土的承載能力和穩定性，以及一些其他性質。在苏联，巨大規模的水利和灌溉工程建設，要求在觀察和檢查土的含水量方面的大量工作進一步机械化，并要求尋找較灵活和較經濟的方法來确定潮湿土壤的，特別是地下水位以下飽和砂的天然孔隙率。

为了解决上述問題，本研究所的科学工作者、科学技術副博士 Г.Я. 乞尔涅克建議用高頻率方法來研究松散土的天然孔隙率 和 含水量的变动，这个方法將在以后說明。

上述方法，在本研究所的試驗室進行了檢驗，而有关确定飽和砂天然孔隙率的問題还在古比雪夫、卡霍夫卡、高尔基等水电站的工程中進行了試驗，結果是圓滿的。

本研究所在 1950 年出版的“用电容法觀測土含水狀況的暫行規程”現在已經售完，并已頗为陈旧了。

考慮到勘察設計單位和生產單位，今后仍需要這一規程，本研究所的編輯委员会决定刊印該書修正和增訂的第二版。

在生產条件下廣泛和普遍运用电容法來解决在各种不同的土壤和水文地質情况下的各种問題，就有可能使觀測設備各个部件的結構，以及進行工作的方法和觀測成果的整理方法得到相当的修正和改善。

無論在电容法的物理技術原理方面，或在仪器安裝及試驗方法方面，本研究所还在繼續对新方法進行研究，为此，請將在实际运

用此法于各种情况和解决各种問題时所產生的意見和建議，以及在
野外与試驗室中取得的全部电測試驗資料的副本寄給我們（Москва
131, Большие Кочки, Д. 17а）。

全苏給水、排水、水工建筑物和工程水文地質研究所

第一章 电容法的物理基礎及应用儀器的說明

1. 在弱电領域內，可用兩個基本参数來表明岩类(土)的特性：導电率 σ (或者，在交变电压时用介質損耗角 δ) 和介电常数 ϵ 。上述二参数与土所有的其它性質有着密切的关系，例如与含水量、孔隙率、結構、温度、顆粒組成和礦物成分以及溶于地下水中的电解質的成分和濃度。

在所述探測潮湿土的电容法中，同时利用了上述兩個电气特性。

这个方法的實質是用測定电容器的电容量和能量損失的方法來确定土的介电常数。在电容器中被探測的土壤起着介質的作用。此法要点如下：

a) 水的介电常数 ($\epsilon=80$) 大于土骨架的介电常数 ($\epsilon=3\sim 10$) 許多倍，这就为利用此参数來研究土的含水量創造了物理前提：

б) 地下水的介电常数，实际上与溶解于地下水中的电解質的化学成分和濃度無關；

в) 分散体系 (这里指松散湿土) 的介电常数，与其組成部分的体積比有关；換句話說，土的 ϵ 值，决定于被測体積中水的总量，也就是决定于其容積含水量 n_w ，并且，由于孔隙率 n 与容積含水量 n_w 是相互关联的，因而也决定于土的孔隙率 n 。同时僅总的孔隙率才是最本質的，而孔隙本身的大小和形狀僅起着次要的作用，这就有利于將这一参数和土的導电率区别開來。

电容法的基礎在于插入某种介質的电容器的电容量是这种介質

的介电常数和介質中介質損耗的函数。測定裝入土中的电容器的电容量与土中的介質損耗，即可算出土中的介电常数。

为此利用高频率（1~100兆周左右）交流電來測定最为有利。

測定工作是用“PB-6 ВОДГЕО”型輕便电測仪來進行的。

2. “PB-6 ВОДГЕО”仪用測定电容器的电容量和被測土中相应結構电容器損耗角的方法來測定松散土（砂、砂壤土、輕壤土）的介电常数。

3. 仪器是根据差拍法（外差法）的原理而設計出來的。

4. 电容的測定应按置換法來進行。

5. “PB-6 ВОДГЕО”仪器的原理圖应似圖 1 所示。圖中定頻晶体振蕩器 Γ_K 和变频工作振蕩器 Γ_D 所發生的振蕩，供給交流电

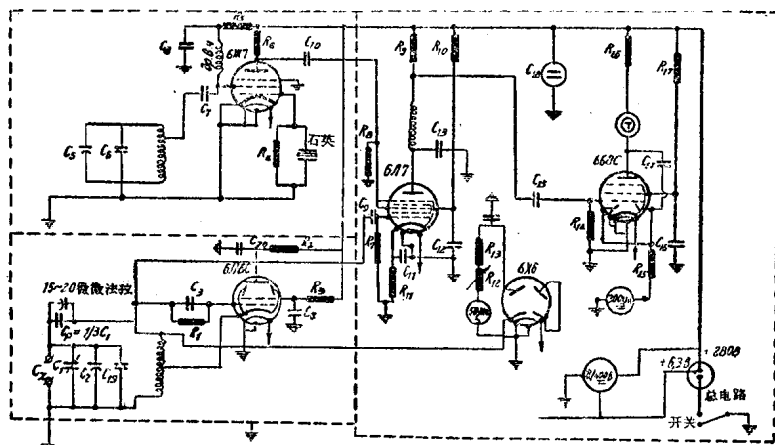


圖 1 “PB-6 ВОДГЕО” 仪原理示意图

C_1 —直接电容量可变电容器，450 微微法拉；空气式微調电容器 $C_2 = C_5 = 40$ 微微法拉；云母电容器： $C_3 = 100$ 微微法拉， $C_6 = 200$ 微微法拉， $C_7 = 30$ 微微法拉， $C_{13} = 500$ 微微法拉， $C_{20} = 300$ 微微法拉，陶瓷电容器： $C_9 = 10$ 微微法拉， $C_{10} = 10$ 微微法拉；紙質电容器： $C_4 = C_8 = C_{11} = C_{14} = 0.1$ 微法拉， $C_{16} = C_{15} = 1$ 微法拉， $C_{12} = C_{15} = 0.25$ 微法拉， $C_{17} = 0.5$ 微法拉；电阻：0.25 瓦特： $R_1 = 100$ 千欧姆， $R_4 = 1$ 姆欧， $R_7 = R_8 = 0.5$ 姆欧， $R_{13} = 7 \sim 10$ 姆欧， $R_{14} = 0.2$ 姆欧， $R_{15} = 0.3$ 姆欧；0.5 瓦特： $R_5 = R_9 = 30$ 千欧姆， $R_6 = 50$ 千欧姆， $R_{10} = 80$ 千欧姆， $R_{11} = 500$ 欧姆；1 瓦特： $R_3 = 15$ 千欧姆， $R_{16} = 100$ 千欧姆， $R_{17} = 50$ 千欧姆；5 瓦特 $R_2 = 5$ 千欧姆；电位計 $R_{12} = 2$ 姆欧。

子管 6П7，这里發生混頻和檢波，并在輸出處消除了差頻（拍頻）振蕩。電子管 6Б8С 的五極管部分是用來放大所獲得的拍頻，而在兩個雙極管部分上裝有這種拍頻指示器，它是按陰極電壓表的原理而動作的，並且在電流為“零拍頻”時指示器上的指針降到零。

將被測電容器 C_x 與振蕩器 Γ_p 電路中的精密電容器 C_1 相并聯，其結果就改變了振蕩電路的有效電容量，由此改變了振蕩器 Γ_p 的振蕩頻率，也因而改變了在指示器（電表——譯者注）輸出端上的拍頻。

為了得到零拍頻（此時振蕩器 Γ_K 和 Γ_p 的頻率相等），則電路中有效電容量的增加，可以用精密電容器 C_1 的電容量的相應減少來平衡。

6. 共同為一個混頻器工作的振蕩器 Γ_K 和 Γ_p ，相互之間不應有明顯的直接耦合。振蕩器整步頻率的容許耦合值，應以能夠聽到每秒一周（1 赫芝）的拍音為度。

7. 在電路中應安裝磁石電話耳機及 M-598 型或 M-592 型 100~500 微安培的小型微安培表來作為拍頻的指示器。

8. 精密電容器 C_1 必須是品質優良的，電容量為 400~500 微微法拉的直線電容式可變電容器。

9. 精密電容器 C_1 被安置在 1:50 的蝸杆微調機構上，該蝸杆微調機構在電容器軸上裝有一個能夠讀到 0.2 微微法拉的度盤（帶有游標）。測定的相對誤差，不得超過 1%。

10. 為了接入被測電容器 C_x ，用一段長為 1.0~1.2 公尺的同軸電視電纜 Γ_{3-75} 作成活絡插頭，電纜的一端，牢固地插入儀器，把電纜的外皮焊于儀器的外殼上，而電纜的芯線焊接于電容器 C_1 的定片上。在電纜的另一端，裝置普通的電插頭。為了防潮起見，從插頭腳端將插頭灌以純石蠟。

為了便于使用，建議盡力設法標明與電纜芯線相接連的插腳（例如，用某種鮮明的顏色塗插頭）。

電纜和插頭裝竣以後，才可調整儀器，並進行儀器的全部校準

工作。

11. 电路中的介質損耗（其中包括被測电容器的介質損耗），可用二極电压表測定电路中交流电压振幅 U 的方法來進行計算。二極电压表系裝在 6×6 电子管上，并于其电路中裝上 $50 \sim 200$ 微安培的微安培表。微安培表应具有一个長度不小于 7 公分的度盤。

12. 晶体振蕩器的振蕩頻率应为每秒 1,500 仟周左右，而工作振蕩器則須相应为每秒 3,000 仟周，以便使在振蕩器 Γ_p 的基本頻率及振蕩器 Γ_R 的二次諧波之間發生拍頻。此时在仪器的調整过程中，振蕩器 Γ_p 的振蕩电路，在开始时不接入电容器 C_n ，并調整到晶体振蕩器的頻率，然后接入电容器 $C_n \cong \frac{1}{3} C_1$ ，結果振蕩器 Γ_p 的頻率增加了一倍。

13. 仪器的电源，应由蓄電池及干電池組或經由分开裝置的穩定整流器的交流电源來供給。

14. 在仪器的电路中，規定使用 $0 \sim 8/400$ 伏的 M-61 型小型二極伏特計來檢查电源的电压。

15. 所有的度盤，控制旋鈕和接綫柱，僅接到仪器的机盤面板上。

16. 仪器的底架安置在大小約 $45 \times 35 \times 20$ 公分的特置鋁箱里，鋁箱裝着具有螺絲的安裝板，以便將仪器固定于水平儀式的三角架上。

17. 电容器 C_1 的度盤（度盤 a）的校准工作，是由接入仪器接綫柱的高頻率标准电容箱來進行，并列成表格（表 1）貼于仪器上。

18. 微安培表的度盤，須根据損耗來校准兩次：一次在土未飽和时，另一次在土的空隙完全为水飽和时。

進行校准时，須使用試驗室用的电容器和先在热蒸餾水中仔細洗淨然后又烘干的均匀細砂。

19. 在处于飽和状态下的土中，其損耗的校准工作按下述方法進行：

表1 “PB-6 ВОДТЕО” № 仪器度盘 α 接电容的校准表 (微微法拉)

度 盘 α 的 分 度										
个 位	小 数 点 一 位									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.8	1.3	1.4	1.4
3	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.1
4	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1
5	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2
6	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4
7	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6
8	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8
9	8.0	8.1	8.2	8.4	8.5	8.7	8.7	8.8	9.0	9.1
10	9.2	9.4	9.6	9.7	9.9	10.0	10.2	10.3	10.5	10.6
11	10.8	10.9	11.1	11.3	11.4	11.6	11.7	11.9	12.0	12.2
12	12.4	12.5	12.7	12.9	13.0	13.2	13.3	13.5	13.6	13.8
13	14.0	14.2	14.3	14.5	14.6	14.8	14.9	15.1	15.2	15.4
14	15.6	15.8	15.9	16.1	16.3	16.4	16.6	16.7	16.8	17.0
15	17.2	17.3	17.5	17.6	17.8	17.9	18.1	18.2	18.3	18.5
16	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.9	20.0	20.2
17	20.4	20.5	20.7	20.8	21.0	21.1	21.3	21.5	21.6	21.8
18	22.0	22.2	22.3	22.4	22.6	22.7	22.9	23.0	23.2	23.4
19	23.6	23.8	24.0	24.1	24.2	24.4	24.5	24.7	24.8	25.0
20	25.2	25.3	25.5	25.7	25.9	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8
21	27.0	27.1	27.3	27.5	27.7	27.9	28.0	28.2	28.4	28.6
22	28.8	28.9	29.1	29.3	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3	30.5
23	30.7	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4
24	32.6	32.7	32.9	33.1	33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3
25	34.5	34.7	34.8	35.0	35.2	35.4	35.6	35.8	36.0	36.2
26	36.4	36.6	36.8	37.0	37.1	37.3	37.5	37.7	37.9	38.1
27	38.3	38.4	38.6	38.8	39.0	39.2	39.4	39.6	39.8	40.0
28	40.2	40.4	40.6	40.8	41.0	41.1	41.3	41.5	41.7	41.9
29	42.1	42.3	42.5	42.6	42.8	43.0	43.2	43.4	43.6	43.8
30	44.0	44.2	44.4	44.6	44.8	45.0	45.2	45.4	45.6	45.8
31	46.1	46.3	46.5	46.8	47.0	47.2	47.4	47.6	47.8	48.0
32	48.2	48.4	48.6	48.8	49.0	49.2	49.4	49.6	49.8	50.0
33	50.3	50.5	50.8	51.0	51.2	51.4	51.6	51.8	52.0	52.2
34	52.5	52.7	53.0	53.2	53.4	53.6	53.8	54.0	54.2	54.4
35	54.6	54.8	55.0	55.2	55.4	55.6	55.8	56.0	56.2	56.4
36	56.7	57.0	57.2	57.4	57.6	57.8	58.0	58.2	58.4	58.6
37	58.8	59.0	59.2	59.4	59.6	59.8	60.0	60.2	60.4	60.6
38	60.9	61.2	61.4	61.6	61.8	62.0	62.2	62.4	62.6	62.9
39	63.1	63.3	63.5	63.7	63.9	64.1	64.3	64.5	64.7	65.0
40	65.3	65.5	65.8	66.0	66.3	66.5	66.7	66.9	67.1	67.3
41	67.5	67.8	68.0	68.2	68.4	68.6	68.8	69.0	69.2	69.4
42	69.7	70.0	70.2	70.4	70.6	70.8	71.0	71.2	71.4	71.7
43	71.9	72.1	72.3	72.5	72.7	72.9	73.1	73.3	73.5	73.8
44	74.1	74.4	74.6	74.8	75.0	75.3	75.5	75.7	75.9	76.1
45	76.3	76.9	76.8	77.0	77.2	77.4	77.6	77.8	78.0	78.2
46	78.5	78.8	79.0	79.2	79.4	79.6	79.8	80.0	80.2	80.5
47	80.7	81.0	81.2	81.4	81.6	81.8	82.0	82.2	82.4	82.6
48	82.8	83.1	83.3	83.5	83.7	83.9	84.1	84.3	84.6	84.9
49	85.1	85.4	85.6	85.8	86.0	86.2	86.4	86.6	86.8	87.0

a) 以各种不同濃度 q 克/公升的食鹽水，逐次地將砂飽和，用实验的方法，确定并繪制其 $k_1 = \frac{C}{C_K} = f(q)$ 与 $\frac{U_0}{U} = \varphi_1(q)$ 的关系曲綫；整个測定須在砂的極緊密狀態下進行。 q 值为 0 到 4 克/公升，其間隔为 0.5 克/公升，盛着为蒸餾水所飽和的砂的电容器，取其电容量作为 C 值。

6) 根据这两根曲綫，对一定的 q 值，取与其相应的 k_1 和 $\frac{U_0}{U}$ 值，然后作 $k_1 = \Phi_1\left(\frac{U_0}{U}\right)$ 曲綫；將此曲綫以 1 公分 = 0.05 單位的比例尺（縱橫坐标相同）繪于米厘紙上。

此曲綫就是根据飽和土中的損耗而得的仪器校准曲綫。为簡便起見，根据此曲綫編成系数 k_1 的表格（表 2）。

表 2 “PB-6 ВОДГЕО” № 仪器电路中电压 U 度盤
按損耗系数 k_1 的校准表

比 值 U_0/U										
个位及小 数点一位	小 数 点 二 位									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	1.000	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996
1.1	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991	0.990	0.989	0.988	0.986	0.984
1.2	0.982	0.980	0.978	0.976	0.974	0.972	0.970	0.968	0.966	0.964
1.3	0.962	0.960	0.958	0.956	0.954	0.952	0.950	0.948	0.946	0.944
1.4	0.942	0.940	0.938	0.936	0.934	0.932	0.930	0.928	0.926	0.924
1.5	0.922	0.920	0.918	0.916	0.914	0.912	0.910	0.908	0.906	0.904
1.6	0.902	0.900	0.898	0.896	0.894	0.892	0.890	0.888	0.886	0.884
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

20. 按未飽和土中的損耗進行校准的程序如下：

a) 用实验方法确定蒸餾水浸湿的砂的 $C = f(n_w)$ 关系，并繪成相应的曲綫；獲得上述关系的方法，在以后說明校正方法时述及；

6) 被礦化度为 5 克 NaCl/公升之水所浸湿的同一砂样，用相似

圖2 測量儀器損耗度盤的校準曲綫
 k_1 —孔隙完全被水充滿的土壤
 k_2 —孔隙局部被水填充的土壤

此曲綫就是根据含水量小于飽和水量的土中的損耗而求得的仪器校准曲綫。为了簡便計算起見，根据此曲綫編成系数 k_2 的表格（表 3）。

表3 “PB-6 ВОДГЕО” №__ 仪器电路中电压 U 度盘
按损耗系数 k_2 的校准表

[illegible]

a—总形；б—柱体（不銹鋼，1个）；в—底板（硬橡膠，塑性玻璃，1塊）；г—銷（黃銅，不銹鋼，1个）；д—薄片（或板）（硬橡膠，塑性玻璃，1塊）；e—插孔（黃銅，2个）。

試驗室用電容器裝竣以後，確定其重量 p_0 、體積 v 及所謂電容器電極工作部分的“幾何”電容——電容器的特性；後者可用測定電容器被數種已知介電常數的純淨液體（例如：蓖麻油 $q=4.6$ ，丙酮—21.5，甲醇—31，甘油—56，蒸餾水—81）充滿 $\frac{3}{4}$ 時的電容量來求得，並根據這些資料，繪成 $C=C_0\varepsilon+b$ 直綫（圖 4），直綫的角係數，即所求的電容器的特性值 C_0 。

22. 野外條件下土的探驗，用探針式電容器來進行。這種探針式電容器可以探測在地面以下任何深度的天然狀態的土。在同一軸的兩端相距某一距離的兩個直徑相同的金屬柱作為電容器的極片（“地氣片”及“有效片”）。在這種結構下，電容器極片兩平行面的面積遠小於其側面積。因此，電容器的電場不局限於探針本身之內，而或多或少地侵占到探針周圍的頗大空間。這個空間，可以極粗略地認為是具有與探針式電容器同軸的柱形體，其高度約等於 4 倍“有效片”圓柱的長度，其直徑則接近於 25 倍探針的直徑。

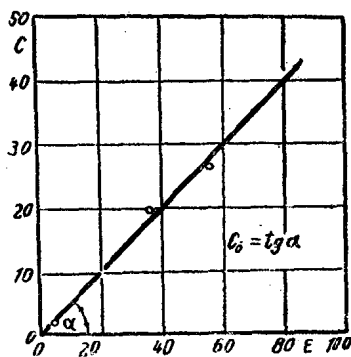


圖 4 探針電容器的特性

探針的形狀和尺寸，須能保證對探針周圍介質的性質給以必要的中和，並減小介質中微小的不均勻性之值。

23. 研究在不大深度內（地面下五公尺深以內）土含水量動態的探針式電容器的構造介紹於圖 5。在鑽孔中測定砂空隙率的探針式電容器的構造如圖 6 圖 7 所示。在後者的情況下，要使探針與測量儀器相聯，須用同軸電視電纜。該電纜的長度，應為儀器中工作振蕩器振蕩頻率半波長的倍數。

注：1. 圖 5e 的長度 L ，依探針安置的深度來選擇。

2. 圖 6e 上的 $\phi 13.5$ 和 ϕD 的尺寸，依圓管（圖 6a）和杆（圖 6b）