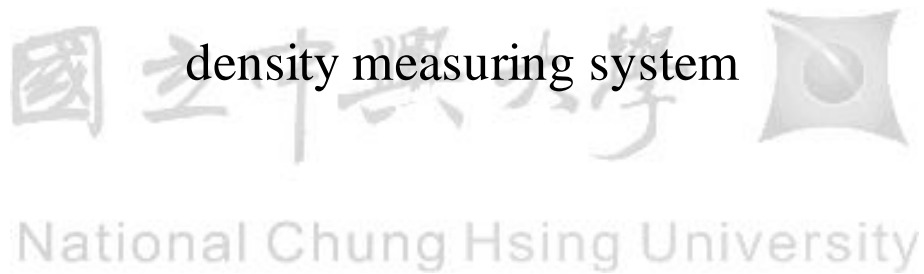


國立中興大學生物產業機電工程學研究所  
碩士學位論文

可攜式土壤總體密度量測系統之研究與發展  
Research and development of portable soil bulk  
density measuring system



指導教授：蔡耀全 Yao-Chuan Tsai

研 究 生：林秉科 Bing-Ke Lin

中華民國一百一十年七月

國立中興大學生物產業機電工程學系

碩士學位論文

題目：可攜式土壤總體密度量測系統之研究與發展

姓名：林秉科

學號：7108040205

經 口 試 通 過 特 此 證 明

論文指導教授

蔡耀全

論文考試委員

吳靖宙

陳世芳

中華民國 110 年 7 月 20 日

## 中興大學博碩士論文授權書

本授權書所授權之論文為立書人在 中興大學農業暨自然資源學院生物產業機電工程學系所，109學年度第2學期取得 碩士學位之論文。

論文題目：可攜式土壤總體密度量測系統之研究與發展

指導教授：蔡耀全

授權事項：

- 一、立書人 林秉科 同意無償授權 中興大學將上列論文全文資料之以微縮、數位化或其他方式進行重製作為典藏及網際網路公開傳輸之用。中興大學 在上述範圍內得再授權第三者進行重製或網際網路公開傳輸等其他利用。
- 二、立書人 林秉科 同意無償授權教育部指定送繳之圖書館及 中興大學將上列論文全文資料之紙本為學術研究之目的予以重製，同意全本重製，惟每人以一份為限。
- 三、立書人林秉科 同意中興大學以有償方式再授權資料庫廠商 將前條典藏之資料收錄於廠商之資料庫，並以電子形式透過單機、網際網路、無線網路或其他公開傳輸方式授權用戶進行檢索、瀏覽、下載、傳輸、列印等。立書人可選擇之權利金方案如下列二種擇一：  
※由立書人收取有償授權之權利金，其權利金額度由中興大學與再授權之廠商議定之。  
※由立書人將有償授權之權利金捐贈中興大學校務基金。
- 四、中興大學得將第三條之權利再授權予其他第三人進行網際網路公開傳輸等其他加值利用。
- 五、前四條授權均為非專屬授權，立書人仍擁有上述授權著作之著作權。立書人擔保本著作作為立書人所創作之著作，有權依本授權書內容進行各項授權，且未侵害任何第三人之智慧財產權。如有侵害他人權益及觸犯法律之情事，立書人願自行負責一切法律責任，被授權人一概無涉。

論文紙本於中興大學圖書館內公開陳列上架時間：立即  
公開

有償授權條件：享有權利金的回饋，權利金捐贈校務發展基金。

論文全文上載網路公開時間：三年後公開

立書人：林秉科

簽名：林秉科

中華民國 110 年 7 月 26 日

## 致謝

首先由衷地感謝指導教授蔡耀全教授，給予了我許多研究上的資源，讓我可以無後顧之憂的進行實驗和研究，並給予我許多學習和提升眼界的機會，像是每周例行的 Group Meeting 可以聽到同學的報告，還有提供機會讓我參加學術研討會，另外也在老師的推薦下參與了茶園專家診斷系統的計畫和資策會的前瞻計畫，這些經歷都使我得到的鍛鍊並增進自己的能力。

感謝陳世芳教授、吳靖宙在論文口試時給予的寶貴建議及指正，使得此篇論文更臻完善，並且更完整地呈現出研究的論述以及結果的呈現。

感謝茶園專家診斷系統的計畫團隊，尤其是申庸教授、陳建德教授以及王依萍博士，給予我有關土壤和作物相關知識，提供我進行試驗的場域，使我的研究內容更加的完整。感謝智造基地的協助，在開發本研究的量測系統上給予許多的建議和指導，使得量測系統可以開發完成，並進行場域的驗證。感謝水保系和土木系協助我進行有關土壤的標準試驗，並提供相關設備。

感謝鈺彥和御瑋兩位學弟陪我去進行場域實驗，在我需要協助時伸出援手，感謝同學敦議、玠佑以及景勛這兩年來與我在研究上與學業上相互扶持。感謝在同實驗室同學的學弟妹，讓實驗室充滿著歡樂的氣氛，化解研究上的沉悶。感謝其他實驗室一起奮鬥的朋友同學們，謝謝你們平時的陪伴，讓我的學生生活不會感到孤單。

最後由衷的感謝我的父母親，謝謝他們多年來辛苦的養育以及對我的支持及鼓勵，讓我能夠在求學階段無後顧之憂的完成學業，想與你們一同共享這份成果。

林秉科 謹志於

國立中興大學 生物產業機電工程學系碩士班

民國一百一十年七月

## 摘要

土壤總體密度為一項重要的土壤物理性質，其反映土壤支撐水和養分的分布能力、微生物的活性以及土壤的通氣程度，在土壤環境科學、作物科學或是水文學上，土壤總體密度都是一個很重要的參數，當學者得知田間土壤的總體密度分布情況將有助於了解不同氣候條件下，施作方式、種植作物和土地之間的交互影響。在田間場域的土壤總體密度通常透過採集土壤樣本帶回實驗室進行量測而得到，這種方式無法即時量測且耗時費力，因此本研究開發一套可攜式土壤總體密度量測系統，此系統包含三個部分分別為土壤總體密度感測器、控制系統、金屬輔具，透過量測土壤熱性質間接估算土壤總體密度，且此系統可以將量測數據上傳到雲端平台以達到智慧農業應用的即時遠端監測。本研究在實驗室中製作了土壤總體密度感測器，先對其加熱探針和感溫探針進行評估，接著使用兩種土壤種類以製備不同的土壤總體密度和體積含水率的土壤樣本進行量測，結果顯示量測土壤樣本的差異和感溫元件的溫度誤差會造成土壤總體密度量測結果的誤差為  $\pm 15\%$ 。在實際場域測試部分，本研究分別在國立中興大學的試驗田地和南投縣名間鄉茶園進行可攜式土壤總體密度量測系統的測試，搭配市售的土壤濕度儀進行即時量測，並使用環刀法作為標準對照組，量測結果顯示在國立中興大學的試驗田地的量測誤差為  $\pm 20\%$ ，在南投縣名間鄉茶園的量測誤差為  $\pm 25\%$ 。

關鍵字:土壤總體密度、熱脈衝方法、機電整合、智慧農業

## Abstract

Soil bulk density is one of the important soil physical property and reflects the water and nutrient distribution ability, the activity of microorganisms and the soil aeration. In environmental soil science, agricultural science and hydrology, the soil bulk density is an important index. According to the distribution of soil bulk density in field, researchers could study the relationship between the tillage method, the crop plant and soil change in different climate conditions. Traditionally, the soil bulk density is measured in the laboratory by collecting the soil samples from the fields. The disadvantages of this method is that it is time-consuming, laborious and couldn't measure soil bulk density immediately. Therefore, we proposed and developed a portable soil bulk density measuring system in this work. This system is consisted of a soil bulk density sensor, a microcontroller, and an assistant device. This measuring system estimates the soil bulk density by measuring the soil thermal properties. The measured soil bulk density could upload to the cloud platform for achieving real-time remote monitoring of smart agricultural applications. In this work, the soil bulk density sensor was fabricated and evaluated in the laboratory. Firstly, the heating probe and temperature sensing probe were evaluated. Then two type soils were used to prepare the soil samples with different soil densities and moisture content for the measurement. The results show that the difference in the measured soil samples and the temperature sensing probe error would result in the  $\pm 15\%$  error for the soil bulk density measurement. For the field test, the developed portable soil bulk density measuring system was carried out the test in the experimental agricultural field of National Chung Hsing University and the tea garden in Mingjian Township, Nantou County, Taiwan. A commercially soil moisture meter was used to obtain the soil moisture content in real-time. The core method is used as the standard control group to evaluate the measurement error of the portable soil bulk density

measuring system. The results show that the measurement error of the experimental agricultural field of National Chung Hsing university is  $\pm 20\%$  and the measurement error of the tea garden in in Mingjian Township, Nantou County, Taiwan is  $\pm 25\%$ .

Keywords: Soil bulk density, Heat pulse method, Electromechanical integration, Intelligent agriculture



# 目錄

摘要.....	i
Abstract .....	ii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言及研究動機.....	1
1.2 研究目標和論文架構 .....	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 土壤基本介紹.....	4
2.1.1 土壤的組成成分 .....	4
2.1.2 土壤質地.....	5
2.1.3 土壤密度.....	6
2.1.4 土壤孔徑與孔隙度.....	6
2.1.5 土壤水分含量 .....	7
2.2 量測土壤總體密度方法.....	7
2.3 應用土壤熱性質計算土壤總體密度.....	10
2.3.1 土壤熱性質介紹 .....	10
2.3.2 土壤總體密度和土壤熱性質的關係 .....	11
2.3.3 穩態熱分析(steady-state heat analysis).....	12
2.3.4 瞬態熱分析(transient-state heat analysis) .....	13
2.4 熱脈衝感測器.....	15
第三章 材料與方法 .....	18



3.1 熱脈衝方法 .....	18
3.2 可攜式土壤總體密度量測系統 .....	19
3.2.1 土壤總體密度感測器 .....	20
3.2.2 控制系統 .....	22
3.2.3 金屬輔具 .....	25
3.3 土壤總體密度感測器性能評估和校正 .....	26
3.3.1 加熱元件性能評估 .....	26
3.3.2 感溫元件校正 .....	28
3.3.3 土壤總體密度感測器的熱損耗係數 .....	29
3.4 實驗室量測 .....	31
3.4.1 土壤種類 .....	31
3.4.2 製備標準樣本 .....	31
3.4.3 土壤樣本量測 .....	32
3.5 場域量測 .....	34
第四章 結果與討論 .....	37
4.1 加熱探針性能評估的結果 .....	37
4.2 感溫元件校正的結果 .....	39
4.3 土壤總體密度感測器的熱損耗係數 .....	40
4.4 實驗室量測結果與討論 .....	41
4.5 場域量測結果與討論 .....	46
第五章 結論與未來展望 .....	51
5.1 結論 .....	51
5.2 未來展望 .....	52
參考文獻 .....	54

## 表目錄

表 2-1 土粒等級區分表 .....	5
表 2-2 土壤成分的熱性質.....	12
表 2-3 不同外型的熱脈衝感測器 .....	17
表 3-1 熱脈衝感測器的元件相關尺寸.....	21
表 3-2 嵌入式系統核心處理器的性能比較 .....	23
表 3-3 評估加熱能力所使用的施加電壓和加熱時間 .....	27
表 3-4 標準砂的相關物理性質 .....	30
表 3-5 公式(3-5)的參數設定.....	30
表 3-6 採集土壤的粒徑分布百分比.....	31
表 3-7 特定總體密度所需要的土壤重量.....	32
表 3-8 特定土壤體積含水率所需要的水分重量.....	32
表 3-9 實驗室土壤樣本的總體密度和體積含水率設定.....	33
表 3-10 場域量測規劃.....	34
表 4-1 不同電壓下，加熱探針表面的最大上升溫度(°C).....	38
表 4-2 不同電壓下，加熱探針表面到達最大上升溫度的經過時間(s).....	39
表 4-3 建立感溫元件檢量線.....	40
表 4-4 標準砂的量測結果.....	40
表 4-5 量測不同設定的土壤樣本的最大上升溫度(°C).....	42
表 4-6 量測不同設定的土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間(s).....	42
表 4-7 量測不同設定的砂質黏壤土樣本的最大上升溫度(°C).....	44
表 4-8 量測不同設定的砂質黏壤土樣本到達最大上升溫度的經過時間(s).....	44
表 4-9 國立中興大學農藝系試驗田地使用環刀法的量測結果 .....	46
表 4-10 南投縣民間鄉茶園使用環刀法的量測結果 .....	48

表 5-1 本研究與前人研究之感測器的差異 .....	52
-----------------------------	----



## 圖目錄

圖 1-1 土壤組成成分 .....	1
圖 1-2 研究架構圖 .....	3
圖 2-1 土壤質地三角圖 .....	5
圖 2-2 核子密度儀[24].....	9
圖 2-3 熱脈衝感測器 .....	10
圖 2-4 防護熱板法量測示意圖 .....	13
圖 2-5 加熱源徑向熱傳導示意圖 .....	13
圖 2-6 單探針熱脈衝感測器 .....	15
圖 2-7 雙探針熱脈衝感測器 .....	16
圖 3-1 可攜式土壤總體密度量測系統架構圖.....	19
圖 3-2 (a)加熱探針 (b)感溫探針 .....	20
圖 3-3 探針間距固定示意圖 .....	21
圖 3-4 土壤總體密度感測器 .....	21
圖 3-5 控制系統示意圖 .....	22
圖 3-6 微控制板(DSI 2598+)外觀.....	23
圖 3-7 實際完成的控制系統.....	25
圖 3-8 控制板和元件連接的腳位示意圖 .....	25
圖 3-9 (a)金屬輔具的架構圖(b)實際的金屬輔具.....	26
圖 3-10 加熱探針表面的量測位置示意圖 .....	27
圖 3-11 加熱元件性能評估實驗架構.....	27
圖 3-12 感溫元件校正實驗架構 .....	28
圖 3-13 量測樣本示意圖 .....	30
圖 3-14 製備標準土壤樣本的流程 .....	32

圖 3-15 量測土壤樣本的實驗架構 .....	33
圖 3-16 場域量測深度示意圖 .....	34
圖 3-17 場域量測流程 .....	35
圖 3-18 場域即時量測土壤總體密度的量測儀器 .....	35
圖 3-19 控制系統操作流程 .....	36
圖 4-1 加熱探針量測點示意圖 .....	37
圖 4-2 加熱探針表面的最大上升溫度 .....	37
圖 4-3 加熱探針表面到達最大上升溫度的經過時間 .....	37
圖 4-4(a)感溫元件第一次校正曲線 (b)感溫元件第二次校正曲線 (c)感溫元件第三次校正曲線 .....	39
圖 4-5 標準砂校正前後的量測結果 .....	40
圖 4-6 實驗室壤土量測結果(a)最大上升溫度(b)到達最大上升溫度的經過時間 ...	42
圖 4-7 實驗室砂質黏壤土的量測結果(a)最大上升溫度(b)到達最大上升溫度的經過時間 .....	44
圖 4-8 實驗室壤土的量測誤差 .....	45
圖 4-9 實驗室砂質黏壤土的量測誤差 .....	45
圖 4-10 使用土壤濕度儀搭配可攜式土壤總體密度量測系統在中興大學農藝系試驗田地即時量測的誤差分析 .....	47
圖 4-11 使用環刀法得到體積含水率數值分析即時量測中土壤濕度儀造成的誤差 .....	48
圖 4-12 使用土壤濕度儀搭配可攜式土壤總體密度量測系統在南投縣民間鄉茶園的誤差分析 .....	49
圖 4-13 使用環刀法得到體積含水率數值分析即時量測中土壤濕度儀造成的誤差 .....	50

# 第一章 緒論

## 1.1 前言及研究動機

土壤整體由固體顆粒、水分和空氣組成如圖 1-1 所示，其中土壤總體密度是一項重要的土壤物理性質，根據定義土壤總體密度為土壤中的固體顆粒和土壤總體積的比值[1]。在農業上，土壤總體密度對於土壤生產力方面有著巨大的影響，並反映土壤作為結構支撐水分和養分的分布能力、微生物的活性以及土壤的通氣程度。

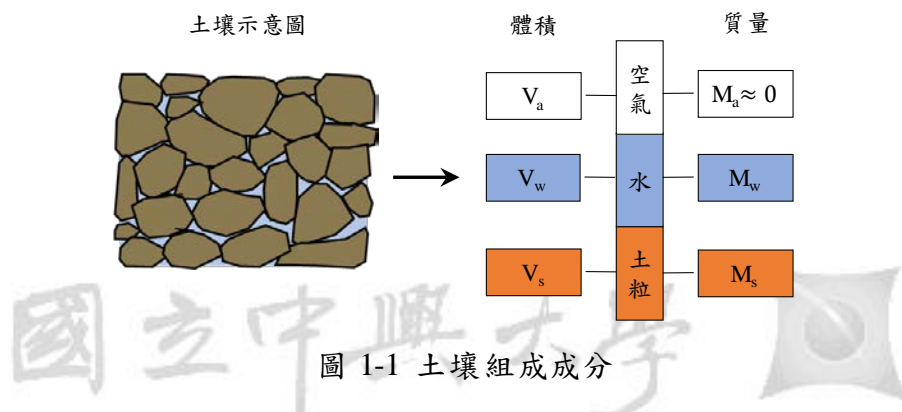


圖 1-1 土壤組成成分

在農業中種植地的土壤總體密度會受到自然或人為的因素影響，自然因素的影響有三個，分別為土壤表層的風化作用、動植物在土層中的活動、對流層的天氣變化，人為因素的影響則為不同商業用途的土地使用、種植農作物、耕作方式、以及交通工具經過土地造成的壓密作用[2]。在農業種植中，常見的人為因素是農民透過翻耕將一定深度的緊實土層變為疏鬆細碎的耕層，此作法可以降低土壤的總體密度從而增加土壤的孔隙度，並有利於土層接納和貯存雨水[3]。在土壤環境科學上，有研究顯示將植物殘渣、生物質、豬糞、牛糞、有機資材及汙水汙泥等農業廢棄物進行熱裂解，將其產生的生物炭添加於土壤中可以改變土壤結構和質地、增加土壤孔隙度、降低土壤總體密度[4,5]。在作物科學上，有學者比較不同耕作方式以及採收作物後是否留下作物殘留物於田間的做法，觀察對於玉米生長的影響，實驗長達十年以上，研究結果顯示長時間不同施作方式會改變表土層的土壤總體密度和玉米出苗率[6]。在水文學上，有學者觀察在不同耕作方式下，小麥田的土壤水

力特性在空間上的變化，其中耕作方式分別為常年耕作、減少一年耕作次數以及沒有耕作，在長達兩年的觀察下，學者發現降雨導致的土壤孔隙封閉和沉降會造成土壤表面的飽和含水率和水力傳導係數大幅度降低，並且對於耕作較頻繁的土地影響會較大，另外從採集的土壤樣本也發現表土層的土壤總體密度在三種不同耕作方式下也有明顯的差異[7]。從上述例子可以得知對於土壤環境科學、作物科學或水文學，土壤總體密度都是一個非常重要的參數，當學者得知田間土壤總體密度的分布情形，將有助於了解施作方式、種植作物和不同氣候條件對於土壤造成的交互影響。

為了達成上述目的，在進行田間試驗時，學者會採集土壤樣本並帶回實驗室來了解田間土壤總體密度的分布情形，其中帶回實驗室處理的樣本通常要經過一天的時間才能得到土壤總體密度的數據，這種方式耗時費力且無形中也增加研究人員對於場域評估的時間成本，像是往返實驗室和場域的交通時間。本研究的研究動機基於上述原因，想開發一套可攜式土壤總體密度量測系統並應用於場域的即時量測，透過在場域即時量測的土壤總體密度參數做初步評估，將有助於研究人員縮短評估場域的時間。

## 1.2 研究目標和論文架構

有鑒於在土壤環境科學、作物科學或水文學上，土壤總體密度都是一個非常重要的參數，本研究的目標為開發一套可攜式土壤總體密度量測系統，讓從事田間試驗的研究人員可以攜帶方便和快速操作以即時量測場域的土壤總體密度，另外在智慧農業的興起以及物連網技術的成熟，同時希望本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統具備連網能力，將量測數據上傳到雲端平台建立後端資料庫實現智慧農業的概念。圖 1-2 為本研究的架構圖，在文獻搜尋方部分會先了解土壤的相關物理性質以及量測土壤總體密度的方法。在本研究中，主要透過量測土壤熱性質來即時量測土壤總體密度，因此會先了解相關土壤熱性質的定義以及透過熱性質量

測土壤總體密度的原理，並參考之前的學者如何製作相關感測器進行量測。接著介紹本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統，其中量測系統由土壤總體密度感測器、控制系統和金屬輔具構成，考慮到可攜式總體密度量測系統在場域中進行量測的方便性，整套系統使用微控制板來相關的電子元件和處理收集的數據，其中搭配金屬輔具來量測較深土層的土壤總體密度，並減少土壤總體密度感測器的探針沒入土壤時會造成的土壤擾動。完成的可攜式土壤總體密度量測系統，會針對土壤總體密度感測器的加熱元件和感溫元件進行性能評估，並在實驗室製備標準土壤樣本進行量測評估土壤總體密度感測器的量測誤差，最後實際於場域採用隨機取樣的方式進行量測和分析討論實驗結果。



圖 1-2 研究架構圖



## 第二章 文獻回顧

### 2.1 土壤基本介紹

土壤具有非常複雜的物理、化學與生物性質，常見土壤的物理性質，像是組成成分、質地、密度、孔徑與孔隙度，常見土壤的化學性質，像是酸鹼性、導電度、陽離子交換容量、氧化還原電位，常見的土壤的生物性質，像是動物、植物、微生物，上述的土壤相關性質相互影響並造成複雜的土壤特性。本研究的重點是量測土壤總體密度，其屬於土壤物理性質之一，因此在土壤介紹上會著重在土壤的物理性質，了解土壤主要的組成成分和土壤質地分類的方式，接著介紹土壤密度、土壤孔徑與孔隙度、土壤水分含量等常見的土壤物理性質。

#### 2.1.1 土壤的組成成分

土壤整體由固、液、氣三相物質組成，其中土壤的固體成分主要為礦物及有機質，這些固體顆粒彼此堆疊形成土壤孔隙，乾燥土壤的孔隙成分主要為空氣。當水分透過灌溉或降雨進入土壤後，土壤的孔隙會逐漸填充水分至飽和(saturated)狀態，因此在土壤孔隙中水分與空氣為互補物質。土壤礦物主要是岩石風化之後形成，其中土壤礦物種類繁多，包括矽酸鹽類、氧化物、碳酸鹽、硫酸鹽、磷酸鹽、以及氯化物等[8]。土壤有機質則是來自植物的枝條或動物的排泄物和遺骸，這些有機物被土壤微生物分解成腐植質並混入土壤中[9]。土壤水分主要來自大氣、岩石或土壤之溶入成分，其中又以溶解度較大的鈣、鎂、鉀、鈉等可溶性鹽類(soluble salts)最為常見，構成土壤水分中的礦物質，因此又稱為土壤溶液(soil solution)[10]。土壤的空氣主要位於土壤的孔隙中且組成的成分和大氣相似，主要為氮、氧及二氧化碳等，但是土壤空氣的氧氣含量會比大氣的氧氣含量較低，而二氧化碳含量則會較高，該現象的發生源自於土壤中的生物活動，如植物根部、動物與微生物的新陳代謝會消耗氧氣並釋出二氧化碳[11]。

### 2.1.2 土壤質地

一般土壤由大小不一的粒子組成，根據定義組成土壤的粒子通常在 2 mm 以下，而土粒依照粒徑大小可概分為砂粒(sand)、粉粒(silt)及黏粒(clay)三類，常見的兩種分類系統和其粒徑分布範圍如表 2-1 所示[12,13]。土壤根據所含砂粒、粉粒及黏粒的重量百分比可以進行更細微的質地分類如圖 2-1 所示的質地三角圖。土壤質地是相當重要之土壤物理性質對於土壤通氣性(aeration)、導水性(conductivity)、陽離子交換容量、保水力、孔隙度、大小孔隙比例、比表面積、耕作難易度與作物根系發展度等皆有密切關係。

表 2-1 土粒等級區分表

土粒分類	粒徑範圍(mm)	
	美國系統	國際系統
砂粒	2 - 0.05	2 - 0.02
粉粒	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
黏粒	< 0.002	< 0.002

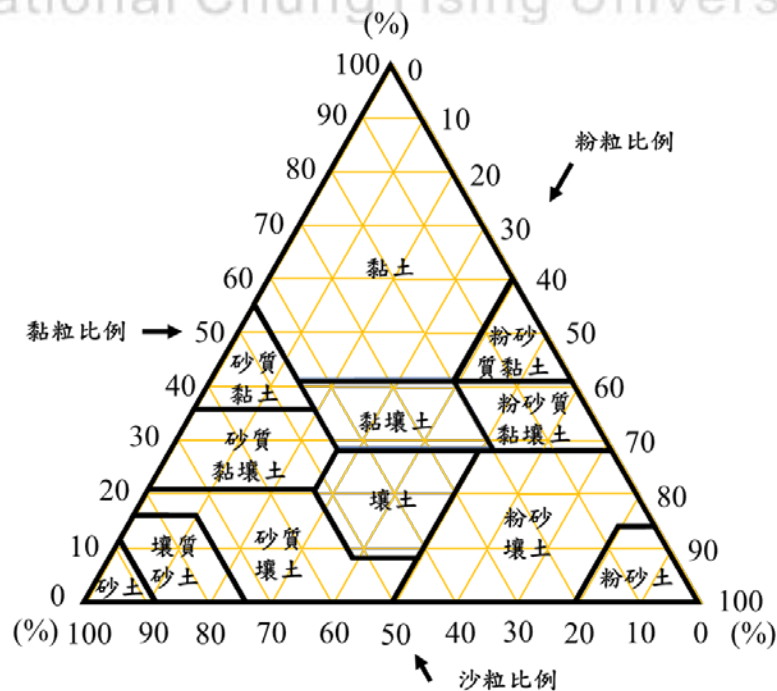


圖 2-1 土壤質地三角圖

### 2.1.3 土壤密度

根據定義土壤密度為物質之質量與體積的比值，其中土壤之總體積( $V_t$ )通常包括土壤固體粒子所佔的體積( $V_s$ )以及孔隙的體積( $V_p$ )，因此土壤密度可分為總體密度( $\rho_b$ ，*bulk density*)以及顆粒密度( $\rho_s$ ，*soil particle density*)兩種，前者為烘乾土壤重量( $W_s$ )與總體積( $V_t$ )之比值，又稱為容積比重或假比重；而後者則為烘乾土壤重量( $W_s$ )與土壤固體體積( $V_s$ )之比值，又稱為真比重，兩者常用之單位為  $\text{g cm}^{-3}$ 、 $\text{kg m}^{-3}$  或  $\text{Mg m}^{-3}$ ，通常總體密度介於  $1.0 \sim 1.8 \text{ g cm}^{-3}$ ，顆粒密度則為  $2.5 \sim 2.8 \text{ g cm}^{-3}$ ，其中總體密度和密度皆與土壤構成的礦物種類及有機質含量有密切關係，而總體密度也會受到土壤之質地、構造、深度與耕作管理方式等影響，在土壤成分相同的情況下，總體密度小的土壤會較為疏鬆，其通氣性與導水度也較佳，有利於物質之傳輸與植物根系的生長；反之土壤則會呈現緊密狀態，其通氣性與導水度也較差，物質較易於表層累積[14,15]。

### 2.1.4 土壤孔徑與孔隙度

土粒堆疊時產生大小不一之間隙，大土粒或粒團的間隙較大，粒徑越小間隙也越小，因此會形成土壤中各種孔徑之孔隙。一般孔徑大於  $50 \mu\text{m}$  的孔隙稱為大孔隙或傳導孔隙 (macropores or transmission pores)，為土壤中物質傳輸之主要管道。孔徑小於  $50 \mu\text{m}$  則為小孔隙 (micropores)，其中介於  $50 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$  者為儲存孔隙 (storage pores)，為土壤中水分、養分或其他物質之主要儲存場所；小於  $2 \mu\text{m}$  則為殘留孔隙 (residual pores)，其中的水分或其他物質受土粒之強力吸持而不易釋出。

孔隙度的定義為土壤中孔隙體積( $V_p$ )和總體積( $V_t$ )的比值，單位為百分比。土壤之孔徑與孔隙度大小會受有機質含量、質地、深度、構造及耕犁等諸多因素影響。一般而言，若其他性質相同或相似，則孔隙度較大且大孔隙較多之土壤，其通透性亦較佳，對水分、養分或其他物質之保持力 (holding capacity) 則較差。如果土壤的大小孔隙與孔隙度能維持適當比例，將有助於植物根系的伸展、土壤空氣和大氣的交換、水分與養分的傳導與儲存[16,17]。

### 2.1.5 土壤水分含量

土壤孔隙是由含量比例互為消長的空氣或水分所充滿，而由於土壤水分中還包括溶解與懸浮物質，故一般通稱為土壤溶液(soil solution)。當土壤因降水或灌溉而使全部孔隙充滿水分，此時土壤會處於最大或飽和含水量(maximum or saturated water content)狀態。當大孔隙中之水分因受重力而流失，水分主要會存於小孔隙中，此時的水分狀態稱為田間容水量(field capacity)[18,19]；若水分因植物吸收，蒸發或蒸散作用而繼續減少，最後僅剩存於微小孔隙中或土粒表面的薄層水膜，導致植物根部無法吸收足夠水分供生理之需，此時的水分狀態稱為凋萎點(wilting point)，其水分含量約為 5~35%[20]；當水分進一步散失至土壤與空氣中之水分達平衡狀態時稱之為風乾土(air-dried soil)，此時僅剩細微膠粒(colloid)表面所吸附之水分含量約為 0~3%，此等土壤即為烘乾土(oven-dried soil)。土壤水分含量除與降水或灌溉之數量及頻率相關外，亦受深度、質地、密度、孔徑、孔隙度、礦物種類與有機質含量等性質之影響，因此水分不但是植物生理所需，且可溶解土壤中之成分而增加其植物有效性[21]。

## 2.2 量測土壤總體密度方法

一般量測土壤總體密度的量測方式可以分為直接式和間接式，直接量測的方式有環刀法(core method)、土塊法(clod method)和開挖法(excavation method)；間接量測的方式則有輻射法(radiation method)、回歸統計法(regression method)、熱脈衝方法(heat pulse method)，以下將介紹這些量測土壤總體密度的方法。

環刀法(core method)透過在場域中將金屬薄環打入待量測地點的土層表面採集土壤樣本並帶回實驗室，土壤樣本需先放置於 105°C 的烤箱經過一天的時間來去除樣本中的水分，將烘乾土壤的重量除以土壤樣本的體積得到樣本的土壤總體密度。土壤樣本的體積會以金屬薄環的體積來計算土壤總體密度，因此採集土壤樣本時，需將金屬薄環連同周遭的土壤一併挖起，並使用美工刀將凸出的土塊切削掉

直至和薄環開口端齊平，最後將樣本放入夾鏈袋中防止水分散失。上述土壤樣本的採集過程仰賴操作人員的技術，並影響該方法的量測準確度，因此通常同一個地點會重複採集 3 個樣本降低人為所產生的誤差[22]。

土塊法(clod method)會從場域中取出土塊帶回實驗室，並放置在 105°C 的烤箱中經過一天的時間去除水分，將樣本靜置一段時間待其冷卻後，綁上棉繩再透過懸吊的方式將樣本完全浸泡在 60°C 到 70°C 的液態石蠟中，經過一天的時間再將表層包裹石蠟的土塊取出。冷卻的石蠟會在土塊表層形成一層防水層，因此樣本可以放入水中量測體積，在水中量測的體積減去土塊表層石蠟所佔的體積可以得到土壤樣本的體積，然後計算土壤總體密度。從場域取出的土壤樣本必須為完整塊狀，因此該方法不適合在質地鬆散的土層進行量測[23]。

挖掘法(excavation method)會在待量測的地點挖一個洞，從洞中挖出的土壤樣本會拿回實驗室放置於 105°C 的烤箱經過一天的時間來去除樣本中的水分來得到土壤樣本的乾土重，另外在得知水或沙子的密度的前提下，在挖掘出的小洞中放入塑料薄膜並填充水或沙子，並秤重可以計算土壤樣本的體積，最後得到待測地點的土壤總體密度。挖掘法是由土壤工程師開發的，是一種適用於礫質土壤的方法。當粗碎片含量在土壤組成成分中超過 25% 時適合使用此方法，因此在大多由礫質土壤組成的林地，適合使用挖掘法量測土壤總體密度[24]。

輻射法(radiation method)透過伽瑪射線(gamma ray)來間接量測土壤總體密度，土中的伽瑪射線損耗透過比爾-伯朗定律(Beer-Lamber law)來定義，如下所示：

$$\frac{l}{l_0} = \exp[-x(\mu_s \rho_b)] \quad (2-1)$$

其中  $l$  是檢測到的光子記數率， $l_0$  為放射源的光子記數率， $x$  為土壤的厚度， $\mu_s$  為質量衰減係數， $\rho_b$  為土壤總體密度，如圖 2-2 所示為使用輻射原理的總體密度量測儀器核子密度儀，操作方式為透過土鑽挖至特定深度以後，將中子密度儀的放射源沿著洞口深入到特定深度，儀器會檢測射線衰弱的程度計算土壤總體密度。該方法

即時快速，且不會受到土層顆粒大小、均勻度、物理或化學成分的不同而影響量測結果。該方法雖然具備以上優點，但是量測使用的放射源具有輻射疑慮，因此操作人員通常須受過專業訓練，並且在操作時須要穿著防護衣。基於上述因素，該方法適用於建築工地用來評估土層的牢固程度以利開發建設的安全性，但不適用於農業用來種植農作物的土地上[24-26]。

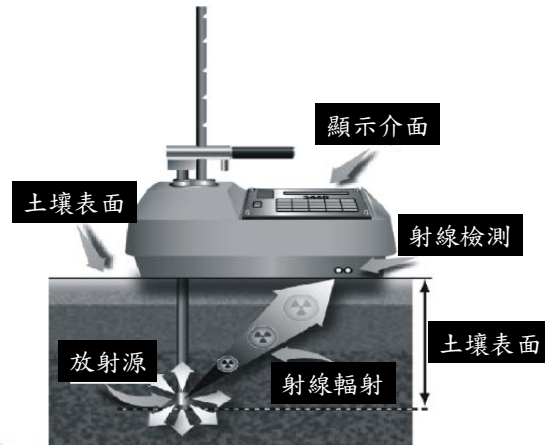


圖 2-2 核子密度儀[24]

回歸統計法(regression method)主要根據田間試驗收集土壤有機碳含量、土壤質地、結構、深度、體積含水率、孔隙率等土壤物理性質數據和氣候條件建立模型預估土壤總體密度。目前有許多種方式可以建立預測模型，像是多重線性回歸、人工神經網絡、決策數分析、支持向量機等，該方法的缺點是不同地點的土壤物理性質和氣候條件皆不相同，因此想要得到可以普遍適用各場域的預估模型所需要的參數非常多[27,28]。

熱脈衝方法(heat pulse method)透過量測土壤體積熱容量間接估算土壤總體密度，其中土壤的體積熱容量和總體密度的關係為：

$$C = \rho_b c_m + (\rho c)_w \theta_v \quad (2-2)$$

其中  $C$  為土壤各成分的體積熱容量加總， $\rho_b$  為土壤總體密度， $c_m$  為土壤礦物的比熱， $(\rho c)_w$  為水的體積熱容量， $\theta_v$  為體積含水率，使用該方法量測土壤總體密度時，需要事先知道待測地點的體積含水率，因此該方法通常會搭配時域反射法(time

domain reflectometry)量測體積含水率，並使用如圖 2-3 所示的熱脈衝感測器量測土壤中各成分的體積熱容量總和，最後可以透過(2-2)式來計算土壤總體密度[29-31]。

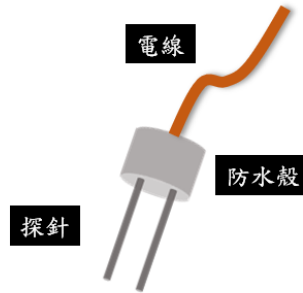


圖 2-3 熱脈衝感測器

## 2.3 應用土壤熱性質計算土壤總體密度

### 2.3.1 土壤熱性質介紹

本研究的目標為開發一套可攜式土壤總體密度量測系統來即時量測農田的土壤總體密度，只有使用間接量測方式才能達到即時量測的目的，因此使用熱脈衝方法做為量測技術。熱脈衝方法透過土壤熱性質計算土壤總體密度，因此要先了解有關土壤熱性質的定義和彼此之間的關係。土壤熱性質主要有三個，分別為土壤體積熱容量(soil heat capacity,  $C$ )、土壤導熱係數(soil thermal conductivity,  $\lambda$ )、土壤熱擴散係數(soil thermal diffusivity,  $\kappa$ )，以下將依序介紹。

土壤體積熱容量(soil heat capacity,  $C$ )用來描述每單位體積土壤所儲存的熱量( $\text{MJ m}^{-3}\text{°C}^{-1}$ )，代表著每單位溫度變化下，土壤獲得或失去的熱量。在土壤溫度每日周期的變化中，體積熱容量較大的土壤，其溫度波動較小。反之，體積熱容量較小的土壤，其溫度波動較大。土壤體積熱容量由土壤組成成分的相對比例來決定，像是空氣、水、冰、礦物材料、有機物等，因此土壤熱容量可以透過計算土壤中每種成分的熱容量和比例的總和得到[32]。

土壤導熱係數(soil thermal conductivity,  $\lambda$ )用來描述土壤傳輸熱量的能力( $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )，其定義為在單位溫度梯度下，每單位時間通過單位面積的熱量。在土壤中

的熱量可以通過傳導、對流、輻射和潛熱的方式來進行傳遞。熱傳導主要透過土壤的固體成分進行熱量的傳輸，熱對流主要透過孔隙中的水或蒸氣進行，通常熱輻射在土壤熱量傳輸中會被忽略，潛熱則是孔隙的水受溫度影響產生相位變化的熱量傳輸，像溫度升高導致孔隙中水蒸氣增加或是溫度降低導致孔隙中水蒸氣凝結，當土壤導熱係數越大，則代表在相同的溫度梯度下可以傳導更多的熱量[33]。

土壤熱擴散係數(soil thermal diffusivity,  $\kappa$ )用來描述溫度不均勻的土壤中溫度均勻化的速度 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )，像是戶外農田受陽光照射時，表層土壤的溫度會上升，但是深層土壤不會直接受到陽光的照射，因此深層土壤的溫度會比較低。當土壤上下層溫度不同的時候，就會進入非穩態的熱傳遞過程，意即從表層土壤進入的熱量會不斷沿著溫度低的方向傳遞，直到表層和深層的土壤溫度一致。如果土壤熱擴散係數較大，那麼就會花費較少時間達到平衡，反之土壤擴散係數較小，就會需要較長的時間來達到平衡[34]，另外土壤熱擴散係數( $\kappa$ )和其他土壤熱性質有以下關係：

$$\kappa = \frac{\lambda}{C} \quad (2-3)$$

其中  $\lambda$  為土壤導熱係數， $C$  為土壤體積熱容量，土壤熱擴散係數是土壤導熱係數和土壤體積熱容量兩個因子的結合，因此土壤熱擴散係數越大時，即代表土壤各點到達平衡溫度的速度越快。

### 2.3.2 土壤總體密度和土壤熱性質的關係

一般土壤的組成成分可以分為固、液、氣三相，固體為石英礦物、非石英的其他礦物和有機物，液體為填充在孔隙中的水，氣體則為一般的空氣，因此土壤的體積熱容量( $C$ )可以表示為土壤中各自成分的熱容量總和[35]：

$$C = (\rho c)_q \phi_q + (\rho c)_{rm} \phi_{rm} + (\rho c)_w \theta_v + (\rho c)_a \phi_a + (\rho c)_o \phi_o \quad (2-4)$$

其中  $\rho$  為密度， $c$  為比熱， $\phi$  為在土壤中的體積百分比， $\theta_v$  為體積含水率，在公式(2-4)中的下標  $q$  為石英礦物， $rm$  為非石英的其他礦物， $w$  為水分， $a$  為空氣， $o$  為有機物，1985 年 Campbell 撰寫的“SOIL PHYSICS WITH BASIC”一書中列出常



見土壤成分的熱性質，如表 2-2 所示[35]。

表 2-2 土壤成分的熱性質

土壤成分	密度 $\text{Mg m}^{-3}$	比熱 $\text{MJ Mg}^{-1}\text{°C}^{-1}$	導熱係數 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	體積熱容量 $\text{MJ m}^{-3}\text{°C}^{-1}$
石英	2.66	0.8	8.80	2.13
黏土礦物	2.65	0.9	2.92	2.39
有機物	1.30	1.92	0.25	2.50
水	1.00	4.18	0.57	4.18
空氣	0.0012	1.01	0.025	0.0012

由於土壤中空氣的體積熱容量相對於其他土壤成分來的小很多，因此計算土壤體積熱容量時通常會被省略，另外有機物的體積熱容量和土壤中固體礦物的體積熱容量相近，因此土壤體積熱容量( $C$ )可以被簡化為[35]：

$$C = \rho_b c_m + (\rho c)_w \theta_v \quad (2-5)$$

其中  $\rho_b$  為土壤總體密度， $c_m$  為土壤礦物的比熱， $(\rho c)_w$  為水的體積熱容量，並且通常被假定為 4.18， $\theta_v$  為體積含水率，在得知土壤礦物的比熱( $c_m$ )和體積含水率( $\theta_v$ )的前提下，透過量測土壤體積熱容量( $C$ )可以得知土壤的總體密度( $\rho_b$ )。

### 2.3.3 穩態熱分析(steady-state heat analysis)

在穩態熱分析中，其中一種常用來量測體積熱容量方式為防護熱板法(guarded hot plate)[36,37]。將兩塊相同的待測物放置在加熱板和冷卻板間，中間的加熱板會發出熱量並經過待測物傳遞到冷卻板，儀器的外壁使用熱絕緣材質以確保熱流垂直通過待測物。量測的方式如圖 2-4 所示，當待測物產生穩定的溫度梯度後，裝置內的熱流密度( $q_c$ )可以表示為：

$$q_c = CR \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-6)$$

其中  $C$  為待測物的體積熱容量， $R$  為待測物的厚度， $T$  為溫度， $t$  為時間，穩態熱

分析方法常被用來量測多孔隙材料的體積熱容量或比熱，但不適合用來量測含有水分的土壤樣本。當加熱板對含有水分的土壤樣本進行長時間的加熱時，會因為水的熱對流效應而導致土壤樣本內部水分的重新分布造成嚴重的量測誤差，這種擾動現象對於不飽和的土壤樣本尤為明顯[33]。

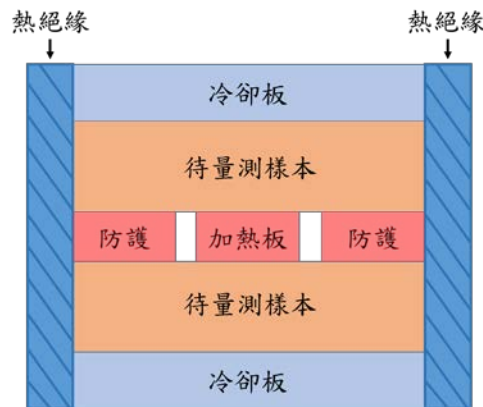


圖 2-4 防護熱板法量測示意圖

#### 2.3.4 瞬態熱分析(transient-state heat analysis)

相較於穩態熱分析對樣本長時間加熱，瞬態熱分析的加熱時間會比較短，因此進行熱性質量測時不易造成樣本中的水分擾動，其中使用瞬態熱分析的熱脈衝方法(heat pulse method)被廣泛應用在量測不飽和土壤的熱性質[38-42]。熱脈衝方法透過在不飽和土壤中插入探針式感測器來進行熱性質的量測，其量測理論是假設在均質、等向性的多孔隙材料中有一個無限長的線性熱源，並且會瞬間釋放熱量如圖 2-5 所示。

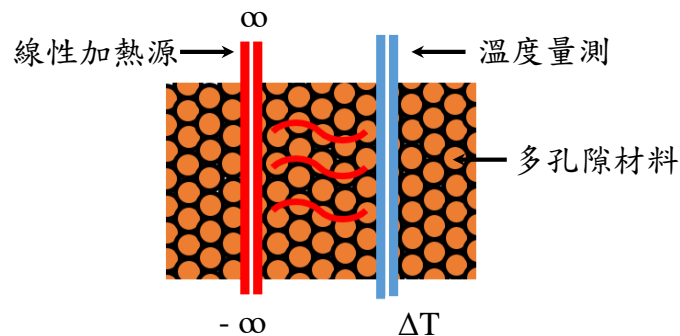


圖 2-5 加熱源徑向熱傳導示意圖

在圓柱座標系統下，徑向熱傳導(thermal conduction)方程式溫度( $T$ )對時間( $t$ )的一階導數可以表示為[43]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2-7)$$

其中  $T$  為溫度， $t$  為時間， $\kappa$  為熱擴散係數， $r$  為以加熱源為中心的徑向距離，假設線性熱源為瞬間釋放熱脈衝，則公式(2-8)中溫度變化( $\Delta T$ )的解析解可以表示為：

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\kappa t} \exp\left(\frac{-r^2}{4\kappa t}\right) \quad (2-8)$$

其中  $Q$  為加熱源的強度， $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $t$  為經過時間， $\kappa$  為熱擴散係數，另外加熱源的強度( $Q$ )可以表示為：

$$Q = \frac{q}{C} \quad (2-9)$$

其中  $q$  為加熱源每單位長度釋放的熱量， $C$  為多孔隙材料的體積熱容量，在現實中加熱源釋放熱脈衝時，通常會需要一定的時間來釋放熱脈衝，因此會有以下初始條件和邊界條件：(1)當  $t=0$  且  $r \geq 0$  時， $T=0$  代表熱平衡。(2)當  $t>0$  且  $r \rightarrow \infty$  時， $T=0$  代表沒有來自加熱源的熱流通過。(3)當  $t>0$  且  $r \rightarrow 0$  時， $-2\pi r \lambda \frac{dT}{dr} = q$ ，其中  $q$  為加熱源每單位長度每單位時間釋放的熱量可以透過焦耳定率計算，則公式(2-8)中溫度變化( $\Delta T$ )的解析解可以表示為[44,45]:

$$\text{當 } 0 < t \leq t_0 \text{ 時, } \Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\kappa\rho c} E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) \quad (2-10)$$

$$\text{當 } t > t_0 \text{ 時, } \Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\kappa C} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t-t_0)}\right) \right] \quad (2-11)$$

其中  $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $t$  為經過時間， $q$  為加熱源每單位長度每單位時間釋放的熱量， $t_0$  為加熱時間， $\rho c$  為多孔隙材料的體積熱容量， $\kappa$  為熱擴散係數， $E_1$  為指數積分函數，其中公式(2-11)中的熱擴散係數( $\kappa$ )可以表示為：

$$\kappa = \frac{r^2}{4} \left[ \frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] / \ln \left[ \frac{t_m}{t_m - t_0} \right] \quad (2-12)$$

其中  $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $t_m$  為到達最高溫度的經過時間， $t_0$  為加熱時間，將公式(2-11)進行移項，待測物的體積熱容量( $C$ )可以表示為：

$$C = \frac{q}{4\pi\kappa\Delta T(r, t)} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t - t_0)}\right) \right] \quad (2-13)$$

## 2.4 熱脈衝感測器

為了使用熱脈衝方法，需要製作相對應的感測器來進行土壤熱性質的量測，最早的熱脈衝感測器雛形由學者 de Vries 製作而成如圖 2-6 所示，使用毛細管作為外殼，並在內部放入發熱導線作為加熱元件以及熱敏電阻作為感溫元件[45]。之後的學者以此為雛形製作單探針形式的熱脈衝感測器進行土壤熱性質的量測，可以有效量測土壤導熱係數，但是無法準確量測土壤體積熱容量和土壤熱擴散係數。

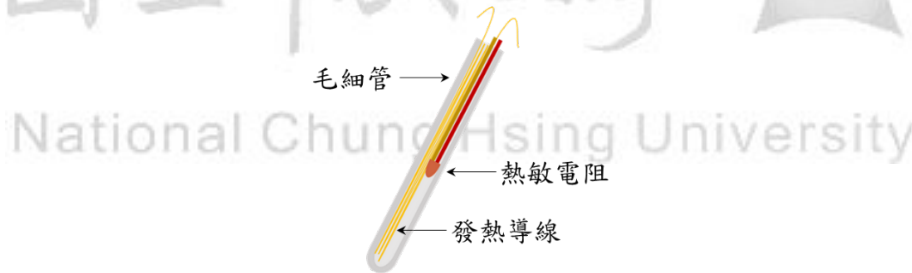


圖 2-6 單探針熱脈衝感測器

在 1991 年，學者 Campbell 製作雙探針形式的熱脈衝感測器如圖 2-7 所示，使用空心不鏽鋼探針作為加熱元件和感溫元件的外殼，並使用環氧樹脂固定兩根探針的間距。加熱元件內部放入導線來釋放熱脈衝，感溫元件內部則放入熱電偶來偵測溫度[46]，之後的學者以此感測器為雛形製作雙探針形式或者多探針形式的熱脈衝感測器進行土壤性質的量測與研究[47-50]。

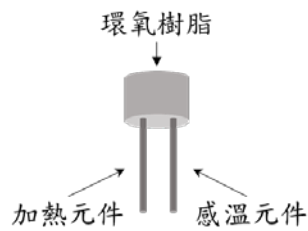
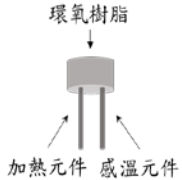
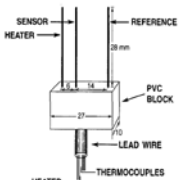

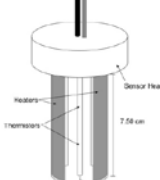


圖 2-7 雙探針熱脈衝感測器

在表 2-3 歸納統整之前學者製作的熱脈衝感測器應用在土壤各種物理性質的量測，並針對其感測器幾何構造進行討論。在探針數量上，通常熱脈衝感測器會有兩根探針，分別作為加熱元件和感溫元件，1993 年則有學者製作了 3 根探針的感測器，透過額外的感溫探針紀錄環境溫度的波動來降低量測誤差[47];2003 年則有學者製作了 6 根探針的感測器，來同時量測土壤熱性質、土壤導電率和土壤體積含水率[48]。學者們在 2003 年前製作的探針長度皆少於 30 mm、直徑則小於 1.50 mm，上述幾何尺寸的感測器有兩個缺點，一個是感測器插入較堅硬的土壤時，探針的間距容易產生改變，另一個則是埋在土裡的感測器長時間量測下，受到土壤乾溼交替造成的內部作用力影響，探針容易變形進而造成量測失準，因此有學者於 2007 年將加熱元件的幾何構造從探針改為薄環改善以往熱脈衝感測器不夠堅固的問題[49]。

表 2-3 不同外型之熱脈衝感測器

出現年代	1991	1993	2003	2007
外型				
探針數量	2	3	6	1
探針直徑 (mm)	0.813	0.813	1.27	2.79
探針長度 (mm)	28	28	26	75
導線電阻 (Ω)	38	31.9	21.3	8.1
加熱時間 (s)	1-8	8	8	10
間距 (mm)	6	6, 20	6	15.9
量測參數	土壤熱性質 土壤含水率	土壤熱性質 土壤含水率	土壤熱性質 土壤含水率 土壤導電率	土壤熱性質 土壤含水率
參考文獻 編號	[46]	[47]	[48]	[49]

## 第三章 材料與方法

### 3.1 熱脈衝方法

本研究使用瞬態熱分析的熱脈衝方法間接估算土壤總體密度，並將文獻回顧中使用的理論進行整理，其中土壤總體密度( $\rho_b$ )可以表示為：

$$\rho_b = \frac{C - (\rho c)_w \theta_v}{c_m} \quad (3-1)$$

其中  $C$  為土壤的體積熱容量， $(\rho c)_w$  為水的體積熱容量， $\theta_v$  為體積含水率， $c_m$  為土壤礦物的比熱，在得知土壤體積含水率和土壤礦物比熱的前提下，透過熱脈衝方法計算土壤體積熱容量( $C$ )並表示為：

$$C = \frac{\alpha q}{4\pi\kappa\Delta T_m} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t_m}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t_m - t_0)}\right) \right] \quad (3-2)$$

其中  $\alpha$  為熱損耗係數， $q$  為加熱源每單位長度每單位時間釋放的熱量， $\Delta T_m$  為以加熱源為中心的徑向距離處的最大溫度變化， $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $t_m$  為到達最大溫度變化的經過時間， $t_0$  為加熱時間， $\kappa$  為熱擴散係數， $E_1$  為指數積分函數。在公式(3-2)中加熱源每單位長度每單位時間釋放熱量( $q$ )表示為：

$$q = \frac{V^2}{RL} \quad (3-3)$$

其中  $V$  為加熱棒的施加電壓， $R$  為加熱棒的電阻， $L$  為加熱棒長度，另外公式(3-2)中的熱擴散係數( $\kappa$ )表示為：

$$\kappa = \frac{r^2}{4} \left[ \frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] / \ln \left[ \frac{t_m}{t_m - t_0} \right] \quad (3-4)$$

其中  $\kappa$  為熱擴散係數， $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $t_m$  為到達最高溫度的經過時間， $t_0$  為加熱時間。公式(3-2)中含有指數積分函數，在實驗室透過電腦專業軟體可以計算含有指數積分函數的公式，對於可攜式土壤總體密度量測系統而言，控制

系統透過微控制器(microcontroller)即時運算，其運算能力無法處理含有指數積分的公式，因此要將指數積分函數以泰勒展開式表示，取最前面展開的五個項次作為指數積分函數的近似值來計算土壤體積熱容量( $C$ )並表示為[51]：

$$C = \frac{\alpha q}{e\pi r^2 \Delta T_m} \left( 1 - \frac{\varepsilon^2}{8} \left\{ \frac{1}{3} + \varepsilon \left[ \frac{1}{3} + \frac{\varepsilon}{8} \left( \frac{5}{2} + \frac{7\varepsilon}{3} \right) \right] \right\} \right) \quad (3-5)$$

其中  $\alpha$  為熱損耗係數， $q$  為加熱源每單位長度每單位時間釋放的熱量， $\Delta T_m$  為以加熱源為中心的徑向距離處的最大溫度變化， $r$  為以加熱源為中心的徑向距離， $\varepsilon$  為加熱時間和到達最大溫度變化的經過時間之比值。

### 3.2 可攜式土壤總體密度量測系統

為了進行野外土壤的量測，本研究整合相關元件開發一套可攜式土壤總體密度量測系統，如圖 3-1 所示可以分成土壤總體密度感測器、控制系統、金屬輔具等三個部分。土壤總體密度感測器包含釋放熱脈衝的加熱元件、量測溫度的感溫元件以及間距固定元件，控制系統則包含電源供應、微控制板、控制土壤總體密度感測器、人機介面和資料存取，金屬輔具則用於場域中量測較深的土層以及減少土壤總體密度感測器安裝進土壤時，探針擾動所造成的人為誤差。

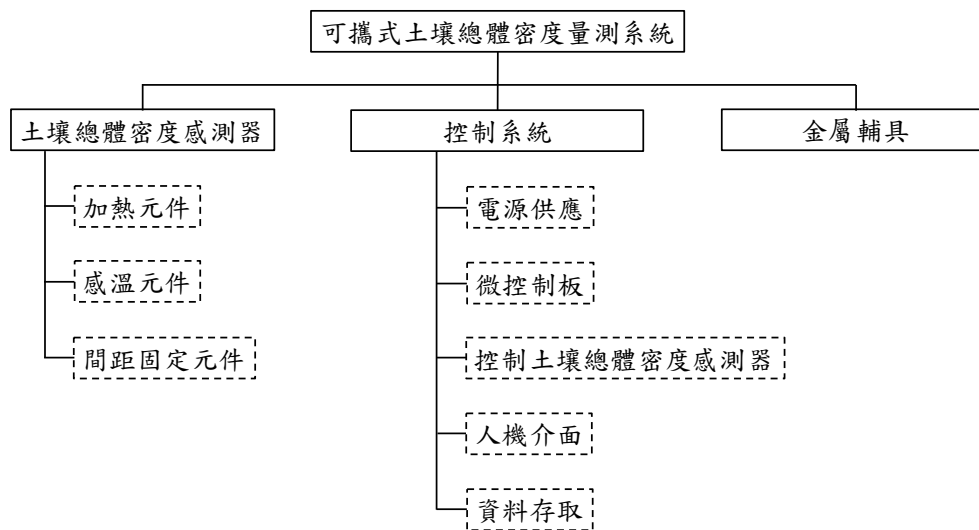


圖 3-1 可攜式土壤總體密度量測系統架構圖



### 3.2.1 土壤總體密度感測器

在本研究中，主要參考學者 Campbell 在 1991 年發表的論文中提出了使用熱脈衝方法量測土壤體積熱容量的感測器構建方式，其中包含一個加熱元件和一個感溫元件，本研究以加熱探針和感溫探針製作土壤總體密度感測器，其中如圖 3-2 (a)所示加熱探針由封裝殼和市售加熱棒(Shenglong, China)組成，加熱棒內部為耐高溫發熱線圈，發熱線圈電阻為  $18.36\Omega$  透過通電來發熱，封裝殼則是以不銹鋼管加工製作，用來提高加熱探針的機械強度，避免插入土中時造成彎曲，如圖 3-2 (b)所示為市售的感溫探針(FTC, Taiwan)，主要透過 K-type 熱電偶線來量測溫度，其中 K-type 熱電偶線由鎳鉻合金(正極)和鋁鉻合金(負極)導線連接在一起，透過賽貝克效應進行量測(Seebeck effect)，外部的不銹鋼管可以提高感溫探針的機械強度，內部填充氧化鎂粉作為熱傳導的橋樑以利溫度量測。

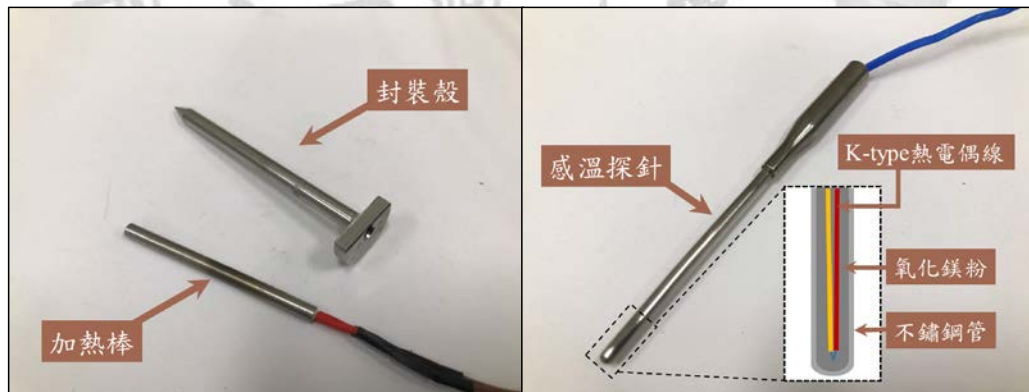


圖 3-2 (a)加熱探針 (b)感溫探針

根據文獻，探針間距的改變會使量測失準，因此本研究使用的元件外部皆有不銹鋼封裝殼提升元件剛性避免在插入土壤時彎曲改變探針間的間距，在本研究中使用 3D 印表機(2.5FX, Atom, Taiwan)製作 PLA 模具來固定加熱探針和感溫探針的間距為 8 mm 製作 PLA，並提供一個施力平台來將感測器安裝進土壤樣本中進行測量如圖 3-3 所示。製作完成的土壤總體密度感測器如圖 3-4 所示，其中表 3-1 列出有關熱脈衝感測器的加熱元件和感溫元件的相關尺寸。

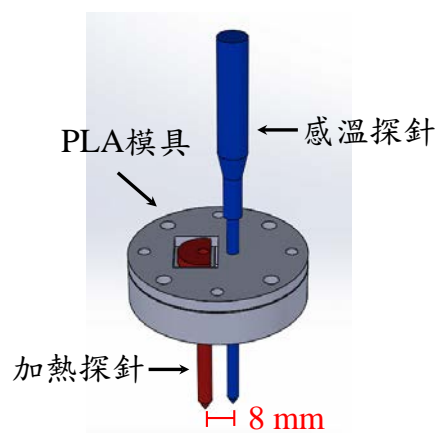


圖 3-3 探針間距固定示意圖

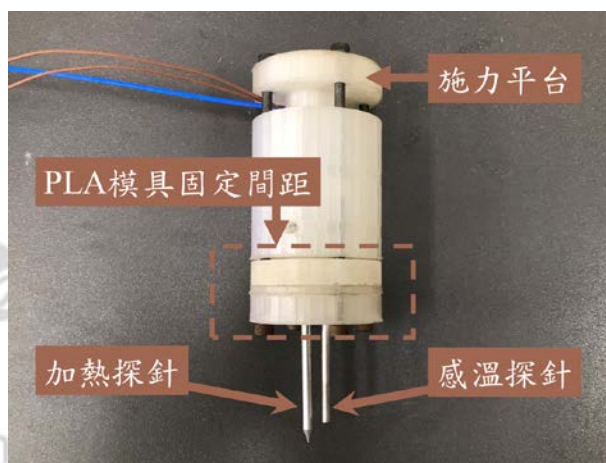


圖 3-4 土壤總體密度感測器

表 3-1 熱脈衝感測器的元件相關尺寸

加熱棒長度(mm)	40.0
加熱棒外徑(mm)	3.0
加熱棒封裝殼長度(mm)	50.0
加熱棒封裝殼內徑(mm)	3.0
加熱棒封裝殼外徑(mm)	4.0
加熱線圈電阻( $\Omega$ )	18.36
感溫探針長度(mm)	60
感溫探針外徑(mm)	3.2

### 3.2.2 控制系統

為了使用土壤總體密度感測器進行量測，本研究整合不同元件開發可攜式土壤總體密度量測系統的控制系統，達到控制土壤總體密度感測器的量測以及數據收集的目的。如圖 3-5 所示控制系統分成電源供應、微控制板、控制土壤總體密度感測器、人機介面和資料存取。本研究的電源供應是採用電壓 3.7 V 電容量 3350 mAh 的充電式鋰電池(18650, Panasonic, Japan)，分別串聯 2 顆充電式鋰電池作為微控制器的電源，以及串聯 4 顆充電式鋰電池作為土壤總體密度感測器中加熱探針的電源。

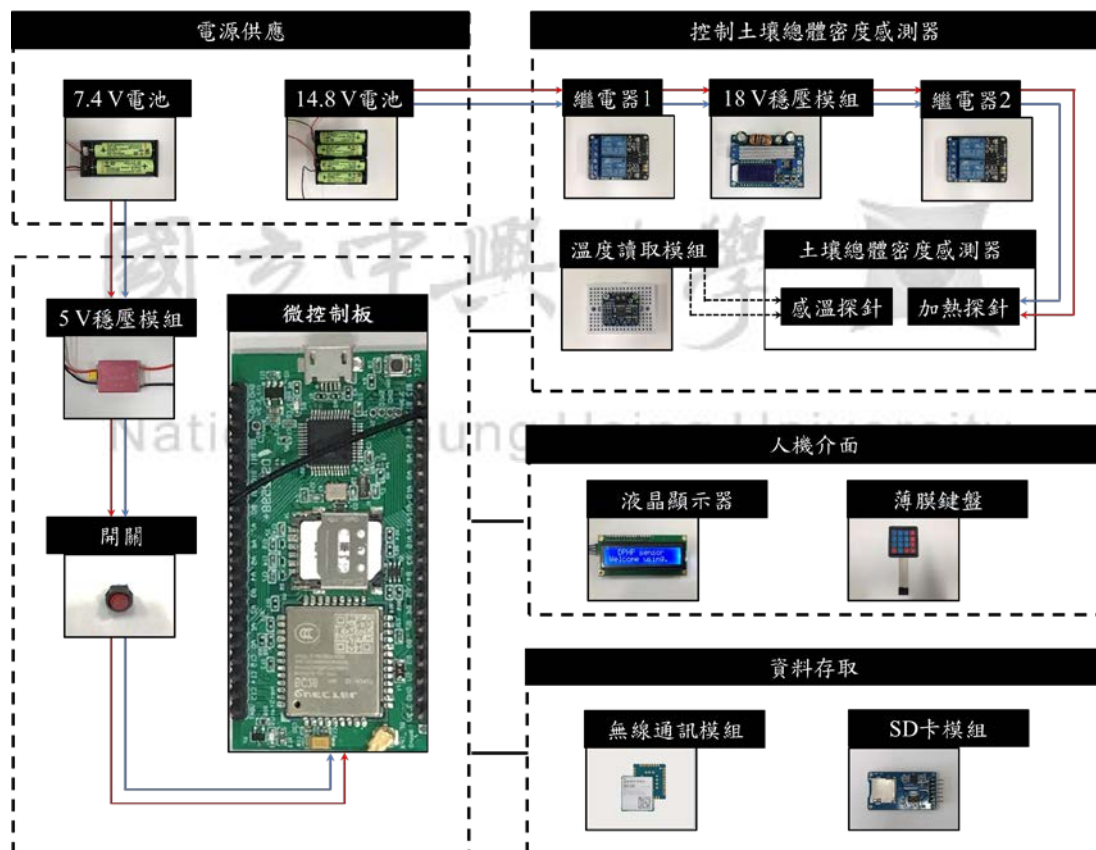


圖 3-5 控制系統示意圖

在控制系統中，微控制板負責讀取感測元件的訊號和發出控制電子元件的訊號，其中需要先透過整合開發環境將指令編譯和上傳到微控制板中，再執行微控制板內部編譯的指令才能執行上述的動作。本研究使用的開發平台為 Arduino Software IDE，並使用微控制板(DSI2598+, Institute for Information Industry, Taiwan)

作為控制系統核心，其處理器是 STM32F103 晶片，相較於同樣使用 Arduino Software IDE 開發平台的 ATmega328 晶片有更優異的性能，如表 3-2 所示為兩個晶片的性能比較，顯示 STM32F103 晶片有較快的運算速度、較低的功耗、較大的儲存空間和更多的腳位數量連接電子元件。本研究的微控制板的工作電壓為 5V，因此充電式鋰電池會連接 5V 穩壓模組穩定再透過開關連接到微控制板如圖 3-5 所示，其中微控制板的外觀如圖 3-6 所示長 6cm 寬 3cm，且硬體電路上整合無線通訊模組(BC26, Quectel, China)、SIM 卡和天線，因此微控制板可以透過無線通訊模組將資料上傳到雲端平台。

表 3-2 嵌入式系統核心處理器的性能比較

	頻率 (MHz)	快存 (kb)	SRAM (kb)	數位腳位 輸入/輸出	類比腳位 輸入	類比腳位 輸出
本研究使用 STM32F103	72	64	20	65	19	2
ATmega328	16	32	2	14	6	0

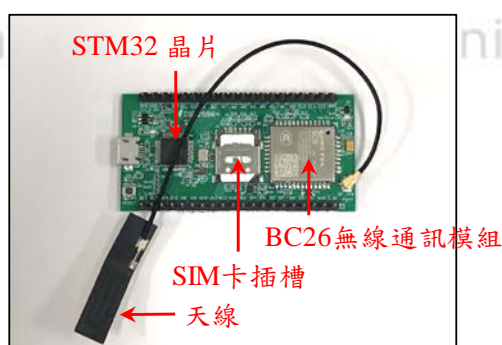


圖 3-6 微控制板(DSI 2598+)外觀

在控制土壤總體密度感測器的部分如圖 3-5 所示，分別為控制加熱探針釋放熱脈衝和收集感溫探針的溫度，在本研究中充電式鋰電池連接 18V 的穩壓模組固定施加 18V 的電壓到土壤總體密度感測器的加熱探針，其中搭配 2 個繼電器來啟動 18V 的穩壓模組進行電壓轉換和控制加熱探針釋放熱脈衝的時間。本研究使用溫度讀取模組(Max31856, Adafruit, United States)連接土壤總體密度感測器的感溫探

針收集量測溫度，溫度讀取模組在-20°C到 85°C的溫度區間準確度是  $\pm 0.15\%$ ，解析度則為 0.0078125°C，並且量測時的取樣頻率是 2Hz。在人機介面的部分，控制系統整合液晶顯示器和薄膜鍵盤來讓使用者操作量測，液晶顯示器可以顯示目前系統的運行狀態，使用者可以透過薄膜鍵盤輸入數值和操作系統進行設定。控制系統在資料存取的部分整合了無線通訊模組和 SD 卡讀取模組，在量測完畢後收集環境溫度以及釋放熱脈衝前後的土壤溫度資訊，這些資訊會存取在 SD 卡讀取模組中以利後續分析，另外量測得到的土壤總體密度和體積含水率資訊則會透過無線通訊模組上傳到雲端數據平台，本研究所使用的數據平台是由資策會所開發的 IDEAS Chain 物聯網平台，在數據上傳以後即可使用手機登入該平台即時查看量測的資訊。

控制系統使用長 20cm 寬 15cm 高 8cm 的 PVC 塑膠盒作為系統的外部封裝殼來達到防水防塵的功能，如圖 3-7 所示的控制板、電池和相關電子元件皆位於封裝殼內部，封裝殼的蓋子上則有液晶顯示器可以顯示系統的狀態和薄膜鍵盤供使用者進行操作及設定，另外還有一小截外露的 SD 卡讀取模組方便使用者進行記憶卡的安裝和卸除，在系統側邊則有控制系統的電源開關以及兩個可拆式接頭分別連接土壤總體密度感測器的感溫探針和加熱探針。零件連接微控制板的詳細腳位如圖 3-8 所示，其中繼電器和薄膜鍵盤主要透過數位腳位進行控制，液晶顯示器則是透過 I2C 介面和微控制板通訊，無線通訊模組則是透過 UART 介面和微控制板通訊，溫度讀取模組和 SD 卡讀取模組則是透過 SPI 介面和控制板進行通訊。



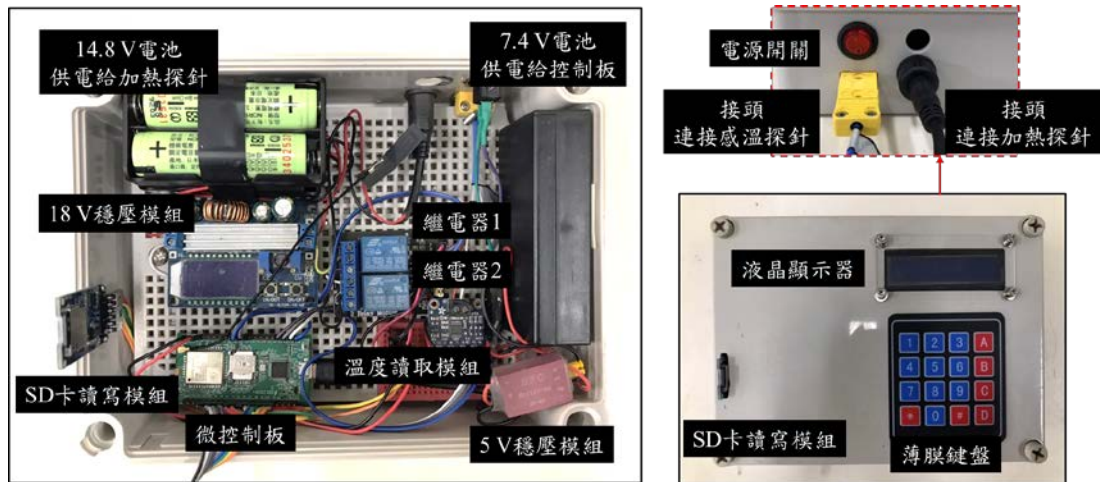


圖 3-7 實際完成的控制系統

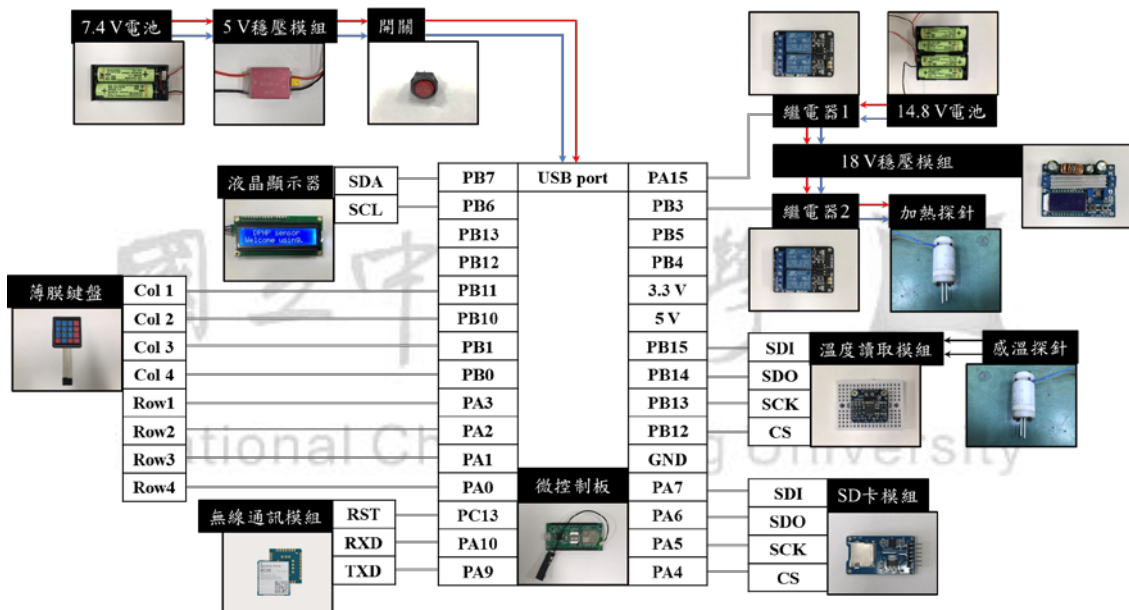


圖 3-8 控制板和元件連接的腳位示意圖

### 3.2.3 金屬輔具

為了在場域中使用土壤總體密度感測器量測不同深度，本研究設計金屬輔具適應不同場域的量測需求，其中金屬輔具的設計如圖 3-9(a)所示由三個部件組成分別為握把、長桿、感測器，彼此透過螺旋機構來連接，因此在場域中金屬輔具可以進行拆卸以方便攜帶。金屬輔具的握把由施力平台和把手組成，透過對施力平台進行敲打將土壤總體密度感測器安裝進土壤進行量測，待量測結束再經由把手將土壤總體密度從量測完成的土壤中移除，長桿的長度為 40cm，目的是使整套系統可

以量測深度在 20 公分以下的土壤總體密度分布情形。

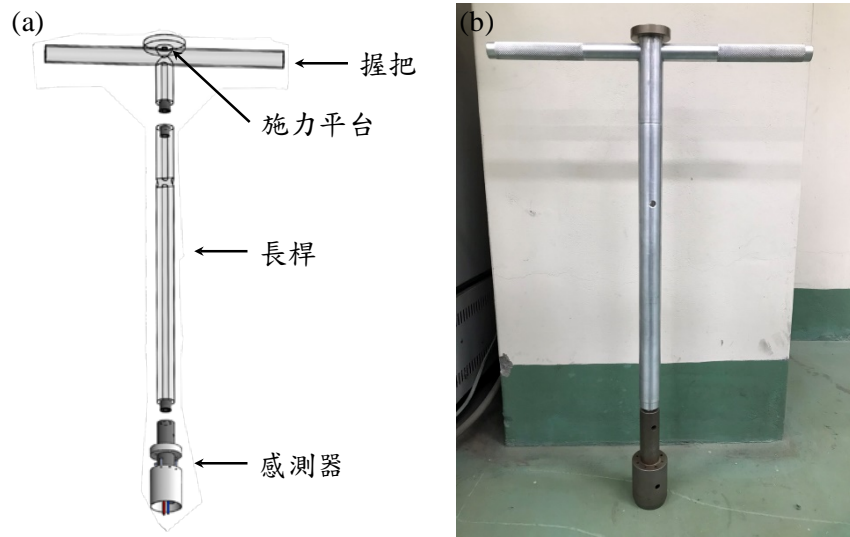


圖 3-9(a)金屬輔具的架構圖(b)實際的金屬輔具

### 3.3 土壤總體密度感測器性能評估和校正

#### 3.3.1 加熱元件性能評估

製作完成的土壤總體密度感測器會進行性能評估，首先評估加熱元件的加熱能力，目的是避免加熱功率太小導致感溫元件量測的上升溫度不顯著，表 3-3 為評估加熱能力所使用的加熱電壓和加熱時間。其次是評估加熱元件表面在加熱時溫度上升的均勻性，根據使用的前人推導公式，理論假設在待量測介質的加熱元件是無限長線性熱源，但是實際上感測器的加熱元件長度是有限的，因此本研究在加熱元件上黏附熱電偶線量測上升溫度如圖 3-10(a)所示，並且在加熱元件上總共量測五個點，每個點分別距離 1 cm 如圖 3-10(b)所示來評估加熱元件表面溫度上升的均勻性。量測實驗架構如圖 3-11 所示，穩壓直流供應器(PST-3202, Instek, Taiwan)施加電壓給加熱元件釋放熱脈衝，並使用繼電器控制釋放熱脈衝的時間，微控制板連接溫度讀取模組收集黏附在加熱元件上的熱電偶線量測的上升溫度，在量測過程加熱元件和熱電偶線皆放置於恆溫箱(S300R, Firstek, Taiwan)將環境溫度固定在 20°C。根據量測結果評估，本研究採用施加 18V 加熱 10s 作為加熱元件釋放熱脈

衝的功率參數來進行實驗室和場域的量測，有關施加不同電壓的比較和分析在第四章有較詳細的結果與討論。

表 3-3 評估加熱能力所使用的施加電壓和加熱時間

施加電壓(V)	加熱時間(s)
6	10
12	10
18	10

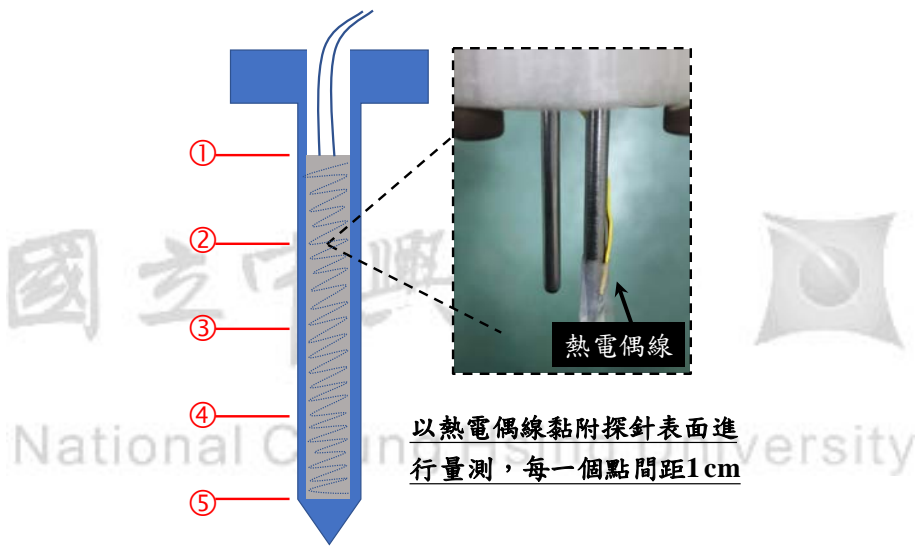


圖 3-10 加熱探針表面的量測位置示意圖

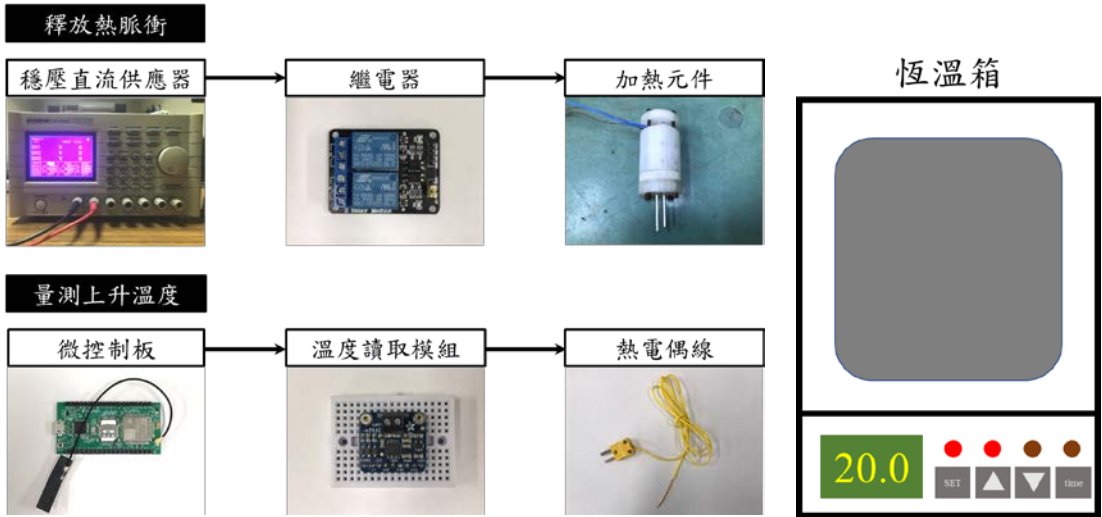


圖 3-11 加熱元件性能評估實驗架構



### 3.3.2 感溫元件校正

在本研究中使用 K-type 熱電偶作為土壤總體密度感測器的感溫元件，熱電偶由不同金屬各自的兩端分別連接形成封閉迴路，如果彼此連接的兩種不同金屬接觸端溫度不同，會產生電動勢進而產生電流，這種現象稱為賽貝克效應(seebeck effect)，因此透過量測熱電偶正負極的電動勢可以計算溫度。

當在不同的使用環境和條件下，熱電偶正負極所量測的電動勢隨著長時間使用會有誤差，加上不同品牌的熱電偶品質不一致，即使是專業廠商製作的熱電偶量測值和實際值仍會有  $0.1^{\circ}\text{C}$ - $1^{\circ}\text{C}$  的誤差。為了獲得準確的量測結果，需要在已知的環境溫度中進行熱電偶的校正，一般而言理想的 K-type 熱電偶在  $0^{\circ}\text{C}$  到  $100^{\circ}\text{C}$  的溫度區間中，產生的電動勢和溫度為線性關係，因此常見簡便的校正方法是將 K-type 熱電偶放在  $0^{\circ}\text{C}$  的冰塊和水的混合溶液中以及  $100^{\circ}\text{C}$  的沸水進行校正，如果要使用 K-type 熱電偶獲得更精確的量測結果，則可以使用溫度校正儀控制溫度環境在不同溫度下進行校正。

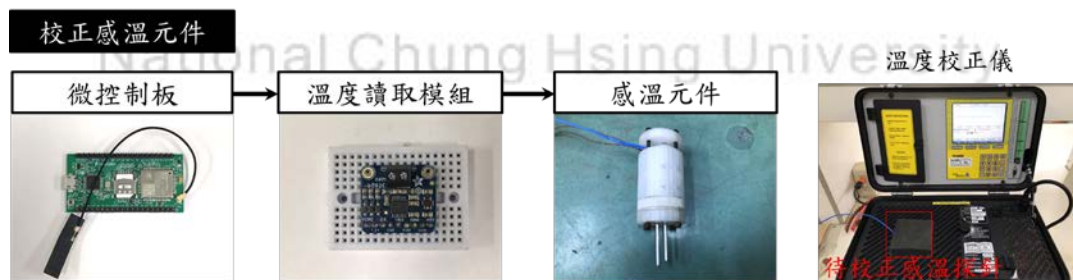


圖 3-12 感溫元件校正實驗架構

本研究使用溫度校正儀(TC-2000, ScanSense, Norway)進行 K-type 熱電偶的校正程序，標準溫度校正儀使用 T 型熱電偶作為控制內部腔室溫度的感測器，根據官方文件顯示在  $-100^{\circ}\text{C}$  到  $125^{\circ}\text{C}$  的解析度為  $0.01^{\circ}\text{C}$ ，且對於溫度控制的精度為  $0.2^{\circ}\text{C}$ ，校正熱電偶的實驗架構如圖 3-12 所示將感溫元件放置於溫度校正儀控制溫度的腔室中，並透過微控制板連接溫度讀取模組來收集熱電偶線的量測數值，校正的流程是先設定溫度校正儀內部腔室的溫度，等待 1 個小時讓腔室溫度達到穩定，

再收集感溫元件的量測值，總共量測 30 分鐘，取樣頻率為 1Hz。溫度校正儀的內部腔室溫度一開始設定在 0°C，待量測結束後調高腔室的溫度，並每隔 10°C 校正一次直到腔室的溫度上升到 100°C，接著再降低腔室的溫度同樣每隔 10°C 校正一次直到溫度下降到 0°C，透過校正的環境溫度上升下降的不同路徑有助於觀察使用的熱電偶是否有明顯的遲滯現象，品質較差的熱電偶在透過不同路徑到達相同的環境溫度時，其量測到的溫度會有較大的差異。

### 3.3.3 土壤總體密度感測器的熱損耗係數

本研究使用公式(3-2)計算加熱源周圍土壤的體積熱容量，該公式描述熱脈衝從加熱源釋放後，透過土壤傳遞到距離加熱源特定位置的上升溫度，在此過程中熱脈衝的能量只會被土壤吸收而耗損，但在真實狀況中本研究使用的土總體密度感測器釋放的熱脈衝能量不只會被周圍的土壤吸收，加熱元件和感溫探針的封裝殼也會吸收熱脈衝能量，因此要先知道公式(3-2)的熱損耗因子( $\alpha$ )，將公式(3-1)和公式(3-2)整理可以將土壤的體積熱容量( $C$ )表示為：

$$C = \frac{\alpha q}{4\pi k \Delta T(r, t)} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t-t_0)}\right) \right] = \rho_b c_m + (\rho c)_w \theta_v \quad (3-5)$$

透過公式(3-5)對樣本進行量測可以計算使用土壤總體密度感測器本身的熱損耗因子。在實驗室使用標準砂(C-109, Summit, Taiwan)作為量測物，標準砂為高純度的二氧化矽粉末，產地為美國渥太華，是一種經常用於土木工程試驗的材料，表 3-4 為廠商提供有關標準砂的相關物理性質。本研究製作總體密度為 1.4 Mg m<sup>-3</sup>、體積含水率為 0% 的樣本放置於溫度設定為 20°C 的恆溫箱進行量測，其中樣本容器的體積為 100 cm<sup>3</sup> 圓柱體。圖 3-13 為土壤總體密度感測器量測樣本的示意圖，在裝土容器上方有穩固裝置和卡榫固定土壤總體密度感測器以避免產生晃動，當土壤總體密度感測器安裝進樣本時產生晃動，將造成探針表面和樣本有間隙進而導致量測失準，該穩固裝置也可以避免土壤總體密度感測器的訊號線拉扯造成探針擾動

樣本。使用公式(3-5)計算熱損耗因子的相關參數設定如表 3-5 所示，本研究針對單一樣本重複量測十次，量測間隔為一個小時，根據使用標準砂評估有關土壤總體密度感測器的熱損耗係數為 0.71，有關量測結果將於第四章進行討論和分析。

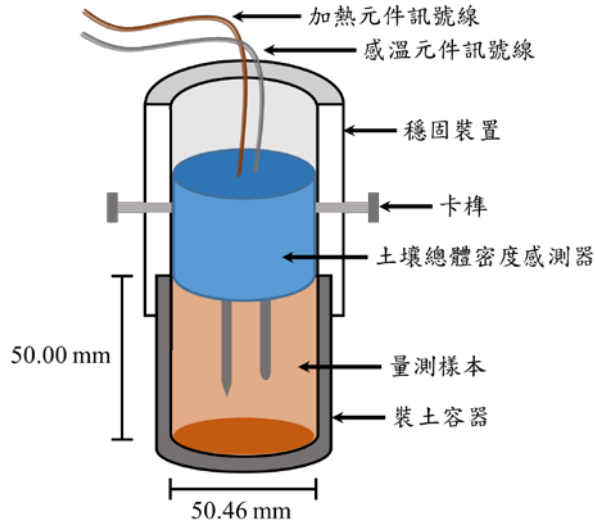


圖 3-13 量測樣本示意圖

表 3-4 標準砂的相關物理性質

顆粒密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	2.65
平均粒徑(mm)	0.33
比熱( $\text{MJ Mg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )	0.68
導熱係數( $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )	1.3

表 3-5 公式(3-5)的參數設定

樣本的總體密度 $\rho_b$ ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.4
樣本的含水率 $\theta_v$ (%)	0
樣本比熱 $c_m$ ( $\text{MJ Mg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ )	0.68
探針的間距 $r$ (mm)	8
加熱探針單位長度釋放熱量 $q$ ( $\text{J m}^{-1}$ )	440
加熱時間 $t$ (s)	10

### 3.4 實驗室量測

#### 3.4.1 土壤種類

本研究收集兩種野外常見的土壤來製備標準土壤樣本，於實驗室進行量測來評估土壤總體密度感測器的量測誤差，使用的兩種野外土壤分別來自國立中興大學的農藝系試驗農田和南投縣名間鄉的一處茶園，透過比重計法得知兩處採集地點的土壤成分中砂粒、黏粒、粉粒的比例，如表 3-6 所示，並根據圖 2-1 土壤質地三角圖可以得知從國立中興大學農藝系試驗農田收集的土壤種類為壤土，從南投縣名間鄉收集的土壤種類為砂質黏壤土。

表 3-6 採集土壤的粒徑分布百分比

土壤採集地點	砂粒百分比 (%)	粉粒百分比 (%)	黏粒百分比 (%)	土壤種類
國立中興大學	42.62	44.71	12.59	壤土
南投名間鄉	55.14	15.41	29.45	砂質黏壤土

#### 3.4.2 製備標準樣本

從野外採集的土壤需要經過處理才能進行量測，為了製備標準土壤樣本我們參考國際材料試驗協會(ASTM International)提出的土壤樣本製備標準程序，圖 3-14 為本研究製備標準土壤樣本的流程圖[52]。首先從野外採集的土壤會含有水分，因此採集的土壤會先放置於 105°C 的烤箱內經過一天的烘乾以達到去除土壤水分的目的。在高溫下水分去除會造成土壤收縮，原本細小的土壤顆粒形成膠結的土塊而不利於土壤樣本的製備，因此需要將較大的土塊打散成顆粒粉末，上述因膠結作用導致的團聚過程是可逆的，將膠結的土塊連同數顆鐵球放置於磨損試驗機(4108J, YenStron, Taiwan)，機器在 30 rpm 的轉速下持續運作 10 分鐘，藉由在圓筒內部滾動的鐵球將土塊打散。接著根據表 3-7 和表 3-8 秤取製作特定總體密度和體積含水率樣本所需要的土壤和水分重量，並放入攪拌器充分混合均勻。最後使用夯槌搭配

壓實輔具將混合均勻的土壤壓縮進直徑為 5cm、體積為 100cm<sup>3</sup>的圓柱容器中，其中使用壓實輔具可以讓土壤樣本受到夯槌撞擊的力道是均勻分散的。

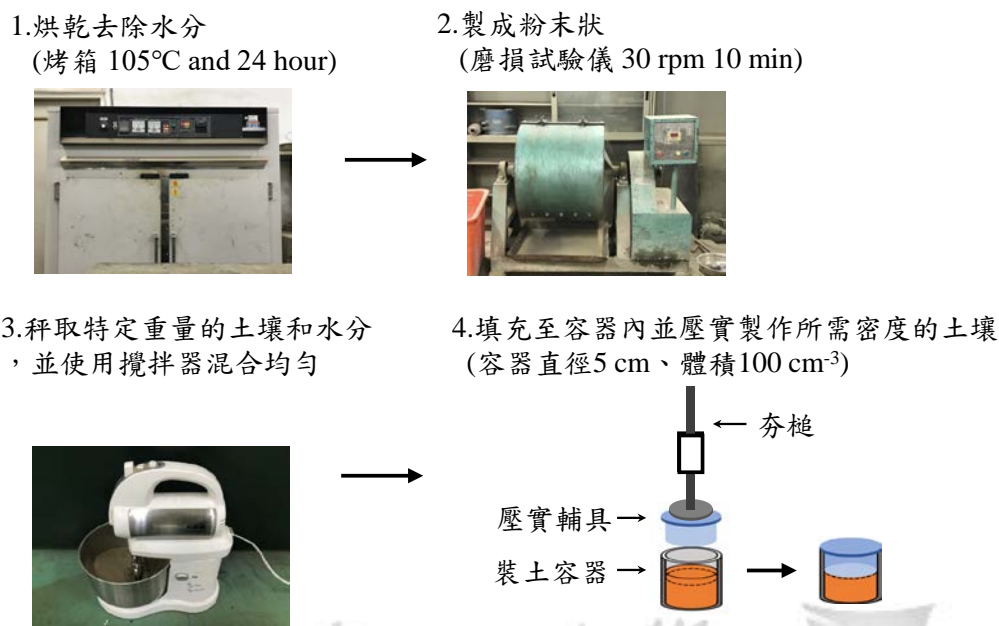


圖 3-14 製備標準土壤樣本的流程

表 3-7 特定總體密度所需要的土壤重量

總體密度(Mg m <sup>-3</sup> )	1.2	1.4	1.6
裝土容器體積(cm <sup>3</sup> )	100	100	100
土壤重量(g)	120	140	160

表 3-8 特定土壤體積含水率所需要的水分重量

土壤體積含水率(%)	10	20	30
裝土容器體積(cm <sup>3</sup> )	100	100	100
水分重量(g)	10	20	30

### 3.4.3 土壤樣本量測

本研究在實驗室的环境使用壤土和砂質黏壤土分別製備不同總體密度和不同體積含水率的土壤樣本進行量測，其中對於不同設定的土壤樣本，皆會製備十個相

同條件的標準樣本進行量測。量測土壤樣本的實驗架構如圖 3-15 所示，土壤總體密度感測器連同土壤樣本放置於恆溫箱固定量測的環境溫度為 20°C，接著使用穩壓直流供應器施加 18 V 給加熱元件釋放熱脈衝，並使用繼電器控制加熱的時間為 10 s，最後透過微控制板連接溫度讀取模組記錄感溫元件的量測數據。本研究在野外採集土壤的同時量測土壤深度 0cm 到 40cm 的土壤總體密度和體積含水率分布情形，兩處採土地點的土壤總體密度均分布在 1.20 Mg m<sup>-3</sup> 和 1.60 Mg m<sup>-3</sup> 之間，土壤體積含水率則分布在 10% 和 30% 之間，因此在實驗室量測土壤樣本的總體密度會介於 1.20 Mg m<sup>-3</sup> 和 1.60 Mg m<sup>-3</sup> 之間如表 3-9 所示，另外我們也嘗試製作總體密度高於 1.60 Mg m<sup>-3</sup> 的土壤樣本進行量測，發現土壤總體密度太高時，感測器的探針不易插入樣本且有造成探針彎曲的風險，另外製作總體密度小於 1.20 Mg m<sup>-3</sup> 的土壤樣本進行量測，發現土壤總體密度太低時，感測器探針的表面和土壤樣本之間會有空隙導致釋放的熱脈衝無法順利傳遞到土壤樣本進而造成量測誤差。

表 3-9 實驗室土壤樣本的總體密度和體積含水率設定

土壤總體密度(Mg m <sup>-3</sup> )	1.2	1.4	1.6
土壤體積含水率(%)	10	20	30

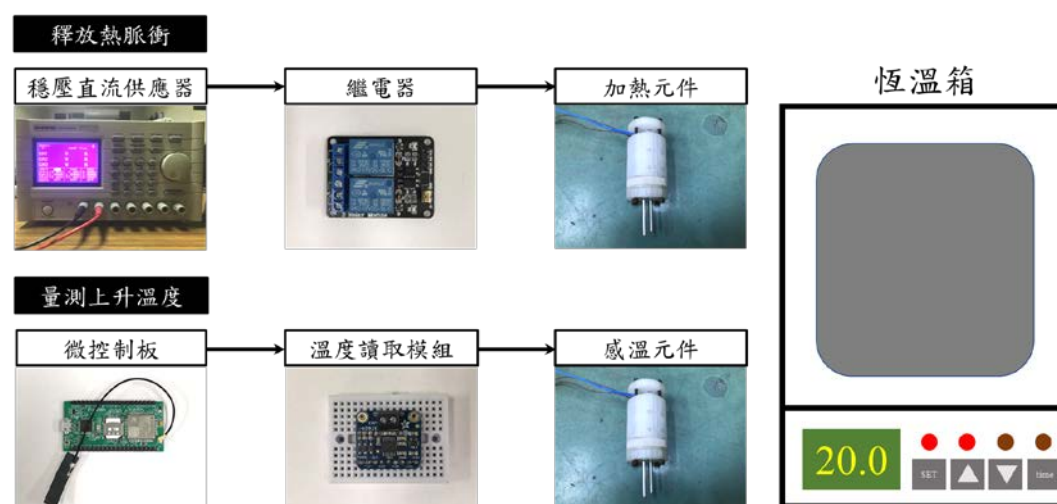


圖 3-15 量測土壤樣本的實驗架構



### 3.5 場域量測

本研究實際前往採土地點進行場域驗證，分別在 4 月 20 日前往南投縣名間鄉的茶園進行場域實驗，並在 5 月 20 日前往國立中興大學的農藝系試驗田地進行場域實驗。位於南投縣名間鄉的茶園其土壤種類為砂質黏壤土，茶園於西元 2021 年的一月進行翻耕，在場域中的種植作物為大葉種茶樹，平時透過水鳥進行灌溉。位於國立中興大學的農藝系試驗田，其土壤種類為壤土，田地為期兩年以上沒有進行翻耕，在場域中的種植作物為大葉種茶樹，平時透過滴灌和水鳥進行灌溉。在每個場域中會選擇三處位置進行量測，為了使量測具有代表性，位置彼此距離 5 m 以上，圖 3-16 所示為量測深度示意圖，使用土鑽挖至土表以下 10cm、20 cm、30 cm 的土層，使用土壤總體密度感測器量測如表 3-10 所示土層深度的土壤總體密度和土壤體積含水率，其中同一個位置的不同土層皆會量測 3 次。

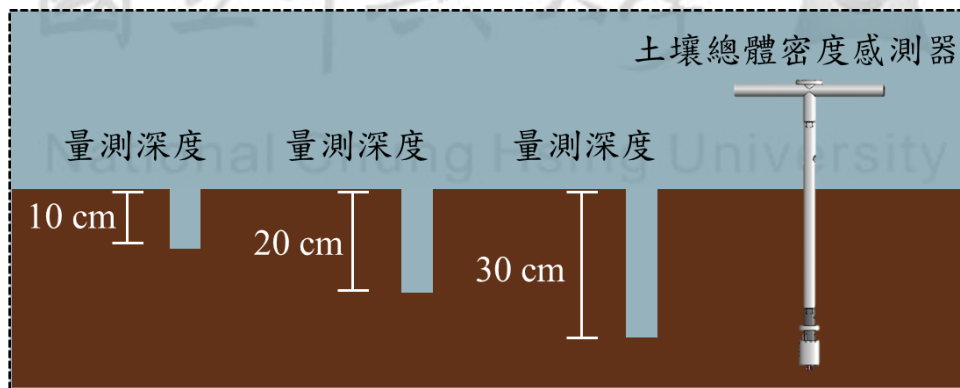


圖 3-16 場域量測深度示意圖

表 3-10 場域量測規劃

土壤總體密度感測器量測深度	位置 A	位置 B	位置 C
10 - 15 cm	樣本數 : 3	樣本數 : 3	樣本數 : 3
20 - 25 cm	樣本數 : 3	樣本數 : 3	樣本數 : 3
30 - 35 cm	樣本數 : 3	樣本數 : 3	樣本數 : 3

在場域的量測流程如圖 3-17 所示，我們使用環刀法依照國際標準化組織(ISO)提出的步驟採集土壤樣本帶回實驗室量測，其量測土壤總體密度和體積含水率的結果作為標準對照組評估即時量測方法的量測誤差[53]。接著進行即時量測先使用市售的土壤濕度儀(TDR350, Spectrum, United States)量測土壤體積含水率，接著操作可攜式土壤總體密度量測系統量測土壤總體密度，如圖 3-18 所示為場域即時量測使用的土壤濕度儀和可攜式土壤總體密度量測系統的外觀，其中土壤濕度儀依照官方操作文件進行測試和校正，並在實驗室製備不同體積含水率的樣本進行量測，測試結果顯示量測土壤體積含水率的準確度為  $\pm 2\%$ 。

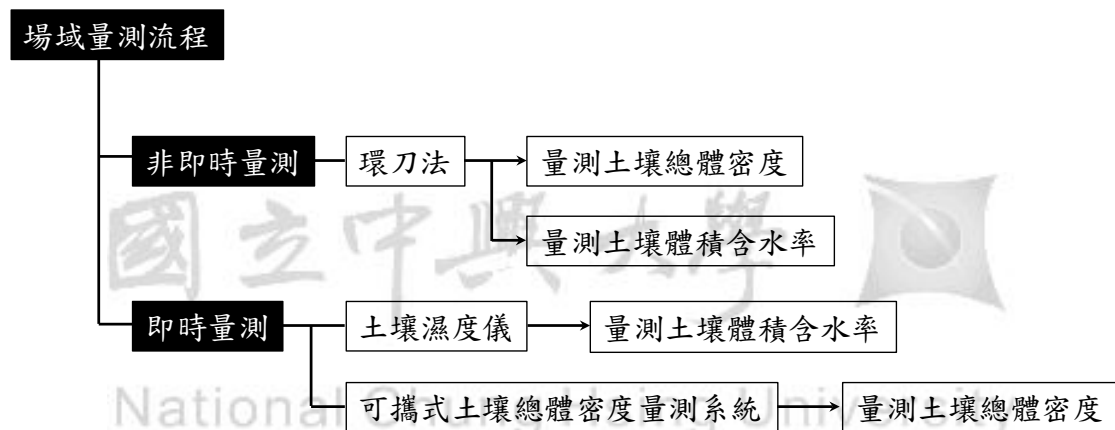


圖 3-17 場域量測流程



圖 3-18 場域即時量測土壤總體密度的量測儀器



使用可攜式土壤總體密度量測系統時，先透過金屬輔助裝置將土壤總體密度感測器安裝進待量測位置，接著操作控制系統進行量測，如圖 3-19 所示首先啟動電源開關，5V 穩壓模組會輸出 5V 給微控制板，並啟動液晶顯示器顯示系統的運行狀態以及薄膜鍵盤以供使用者操作。步驟一，透過薄膜鍵盤將使用土壤濕度儀量測的體積含水率數值輸入系統中。步驟二，啟動溫度讀取模組進行溫度的量測，液晶顯示器會先顯示當下的土壤溫度，待使用者確認無誤後再執行量測，當量測開始會啟動 18V 穩壓模組進行電壓的轉換，等待收集環境溫度 30s 過後再啟動加熱探針釋放 10s 的熱脈衝。當熱脈衝釋放以後，感溫探針所在的位置不會立刻到達最高溫度，因此在熱脈衝釋放完畢後控制系統會再收集 80 s 的土壤溫度數據。步驟三，控制系統透過收集完畢的溫度數據計算最大上升溫度和經過時間，接著使用公式(3-1)和(3-4)估算土壤總體密度，並啟動 SD 卡讀寫模組和無線通訊模組，透過 SD 卡讀寫模組將收集的溫度數據和相關參數儲存在記憶卡已供後續分析，並透過無線通訊模組將量測的土壤總體密度和土壤體積含水率上傳到 IDEAS Chain 雲端平台建立智慧農業數據庫。

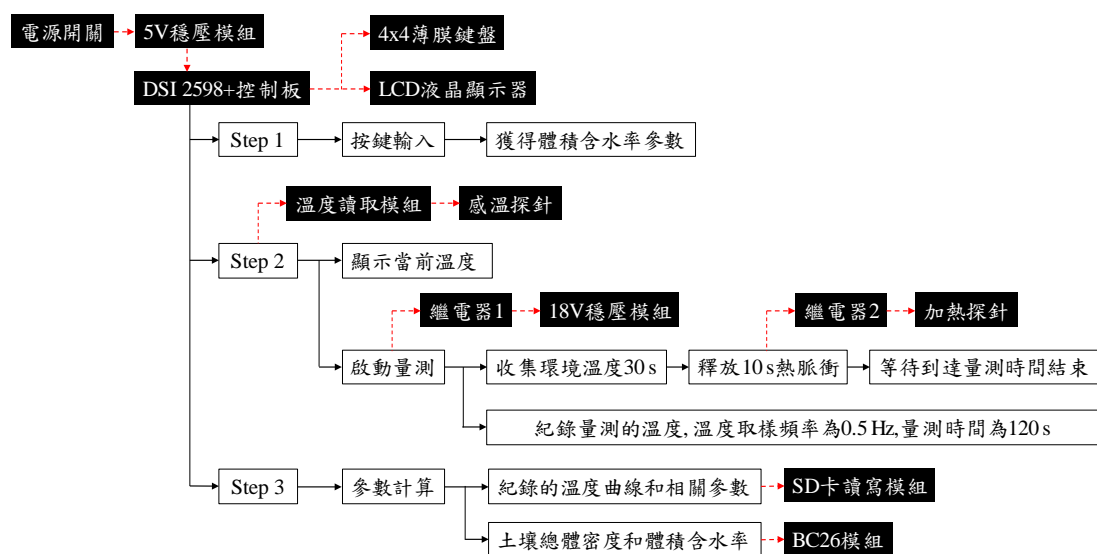


圖 3-19 控制系統操作流程

## 第四章 結果與討論

### 4.1 加熱探針性能評估的結果

使用穩壓直流供應器分別輸出 6 V/12 V/18 V 並持續 10 s 評估加熱探針的加熱能力，其中加熱探針表面的量測位置編號如圖 4-1 所示，其中施加不同電壓下加熱探針表面的最大上升溫度如圖 4-2 所示，探針表面到達最大上升溫度的經過時間如圖 4-3 所示，圖中顯示的量測曲線皆為同一位置重複量測 5 次取平均的結果。

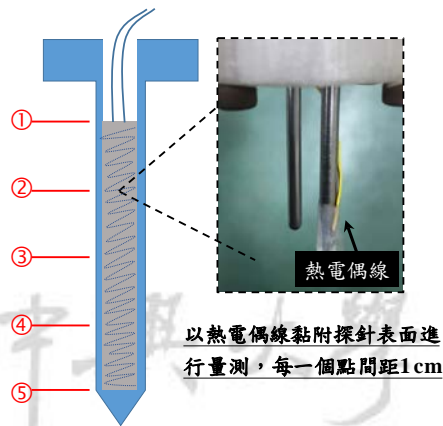


圖 4-1 加熱探針量測點示意圖

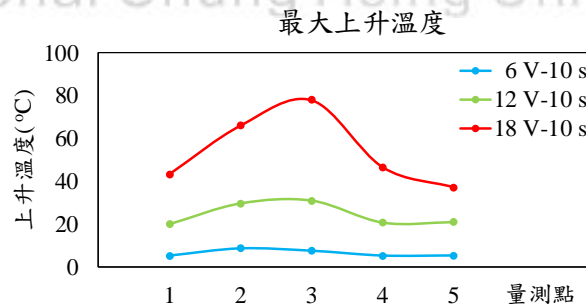


圖 4-2 加熱探針表面的最大上升溫度

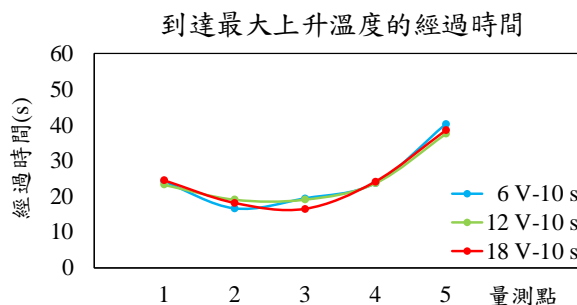


圖 4-3 加熱探針表面到達最大上升溫度的經過時間

在評估加熱探針的加熱能力上，從圖 4-2 的量測結果可以觀察到隨著穩壓直流供應器提高輸出電壓，加熱探針表面量測點的最大上升溫度皆提高，當輸出電壓為 6 V，加熱探針表面的最大上升溫度介於 5.26°C-8.93°C之間，輸出電壓為 12 V 時，加熱探針表面的最大上升溫度介於 20.17°C - 30.89°C之間，輸出電壓為 18 V 時，加熱探針表面的最大上升溫度則介於 37.12°C-78.11°C之間，其中不同輸出電壓下加熱探針表面重複量測結果以平均值和標準差表示如表 4-1 所列。比較上述三個輸出電壓的量測結果，可以發現輸出電壓為 18 V 有最優異的加熱性能，因此本研究將輸出 18 V 持續 10s 作為加熱探針釋放熱脈衝的設定，讓土壤總體密度感測器的感溫探針可以量測到較明顯的上升溫度。

表 4-1 不同電壓下，加熱探針表面的最大上升溫度(°C)

	量測點 1	量測點 2	量測點 3	量測點 4	量測點 5
<b>6 V</b>	5.26±0.05	7.74±0.04	8.93±0.08	5.34±0.08	5.30±0.07
<b>12 V</b>	20.17±0.22	29.60±0.21	30.89±0.10	20.90±0.12	21.15±0.12
<b>18 V</b>	43.24±0.46	66.14±0.68	78.11±2.03	46.54±0.04	37.12±0.82

熱脈衝方法假設加熱元件為無限長的線性熱源，因此加熱探針表面的最大上升溫度和到達最大上升溫度的經過時間理論上會一致，但本研究使用的加熱探針長度有限，所以實際情形不會如同理論的假設，如圖 4-2 所示在相同輸出電壓下，位於加熱探針表面中間位置的上升溫度較高，位於探針表面末端的上升溫度較低，其中當輸出電壓提高位於加熱探針中間和末端位置的最大上升溫度差異有擴大的趨勢，從上述量測結果顯示隨著輸出電壓的提高，由於加熱探針有限長度而導致表面加熱的不均勻性會越發明顯。相同輸出電壓下，圖 4-3 顯示加熱探針表面不同位置到達最大上升溫度的經過時間相異，其中位於加熱探針中間的量測點 3 到達最大上升溫度的經過時間最少，位於加熱探針末端的量測點 1 和 5 到達最大上升溫度的經過時間會較長，並且不同施加電壓下加熱探針表面不同位置到達最大上升

溫度的經過時間趨勢沒有顯著地變化，其中不同輸出電壓下加熱探針表面重複量測結果以平均值和標準差表示如表 4-2 所示。

表 4-2 不同電壓下，加熱探針表面到達最大上升溫度的經過時間(s)

	量測點 1	量測點 2	量測點 3	量測點 4	量測點 5
6 V	24.20 ±1.08	16.60±0.66	19.40±0.58	23.70±1.36	40.30±3.12
12 V	23.30±0.60	19.10±0.20	19.10±0.49	23.70±0.93	37.60±1.20
18 V	24.50±0.46	18.10±0.37	16.40±1.20	24.10±0.58	38.60±1.56

## 4.2 感溫元件校正的結果

土壤總體密度感測器的感溫元件透過溫度校正儀建立的檢量線如圖 4-4(a)(b)(c)所示，其中圖中每一個溫度點皆為量測 30 分鐘取樣頻率 1Hz 並取平均的量測結果，圖中箭頭方向為溫度校正的量測順序。本研究使用 excel 的回歸分析建立檢量線，其中檢量線為線性方程並透過決定係數  $R^2$  評估檢量線和量測值的穩合程度。有關感溫元件 3 次校正結果的迴歸分析結果如表 4-3 所示，其中檢量線的決定係數  $R^2$  皆大於等於 0.99，顯示在 0°C 到 100°C 的量測區間中感溫元件的電動勢和溫度響應為理想的線性關係，另外透過檢量線中  $x$  的斜率可以評估感溫元件是否有明顯的遲滯現象，表 4-3 建立的三個檢量線  $x$  的斜率皆相同，代表透過不同路徑到達相同設定溫度下，感溫元件對於環境溫度的響應皆一致，在本研究中使用表 4-3 中第一次量測建立的檢量線來對感溫元件進行校正。

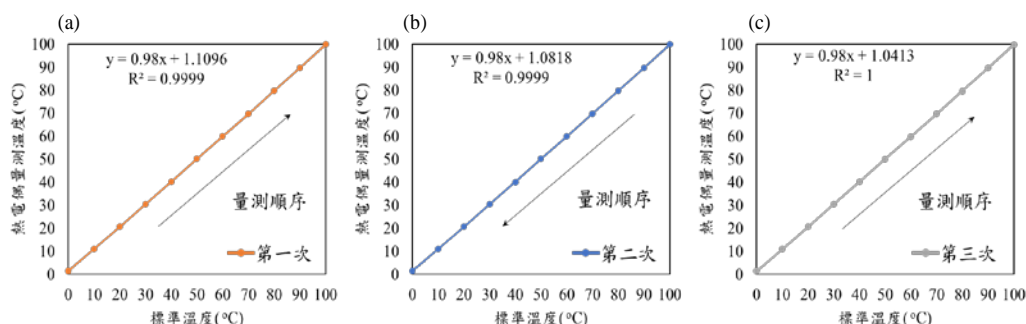


圖 4-4(a)感溫元件第一次校正曲線 (b)感溫元件第二次校正曲線 (c)感溫元件第三次校正曲線

表 4-3 建立感溫元件檢量線

量測	檢量線	決定係數 $R^2$
第一次	$y = 0.98x + 1.1096$	0.99
第二次	$y = 0.98x + 1.0818$	0.99
第三次	$y = 0.98x + 1.0413$	1.00

### 4.3 土壤總體密度感測器的熱損耗係數

我們在實驗室的環境中使用標準砂作為量測物，並估算土壤總體密度感測器的熱損耗係數，其中樣本的總體密度為  $1.4 \text{ Mg m}^{-3}$ 、固體比熱為  $0.68 \text{ MJ Mg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。針對單一樣本重複十次的量測結果以平均值和標準差表示如表 4-4 所列。將表 4-4 的平均值和表 3-5 的參數代入公式(3-5)估算土壤總體密度感測器的熱損耗係數為 0.71，並透過熱損耗係數對標準砂的量測結果進行校正如圖 4-5 所示。

表 4-4 標準砂的量測結果

量測參數	重複量測的平均值和標準差
最大上升溫度( $^\circ\text{C}$ )	$6.14 \pm 0.07$
到達最大上升溫度的經過時間(s)	$39.91 \pm 1.52$

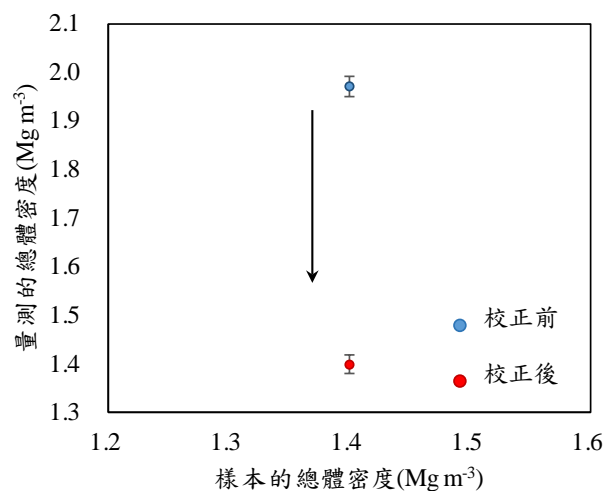


圖 4-5 標準砂校正前後的量測結果

#### 4.4 實驗室量測結果與討論

本研究使用兩種土壤進行量測，第一種為壤土，其土壤礦物比熱( $c_m$ )為  $0.90 \text{ MJ Mg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，第二種為砂質黏壤土，其土壤礦物比熱( $c_m$ )為  $0.75 \text{ MJ Mg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，在每個不同土壤總體密度和土壤體積含水率的設定下皆製備 10 個相同條件的標準土壤樣本進行量測，透過土壤總體密度感測器量測土壤樣本的最大上升溫度和到達最大上升溫度的經過時間。在實驗室使用土壤總密度感測器量測壤土的結果如圖 4-6 所示為 10 個相同條件的土壤樣本取平均的數值，其中圖 4-6(a)為土壤樣本在不同總體密度和體積含水率設定下的最大上升溫度，圖 4-6(b)為土壤樣本在不同總體密度和體積含水率設定下到達最大上升溫度的經過時間。從圖 4-6(a)中可發現當固定土壤樣本的體積含水率，隨著總體密度變大，量測到的最大上升溫度呈現下降的趨勢，而當固定土壤樣本的總體密度，隨著體積含水率增加，量測到的最大上升溫度也會下降。量測不同設定的土壤樣本的最大上升溫度如表 4-5 所示，其中十個相同條件土壤樣本的量測結果以平均值和標準差表示，在樣本體積含水率相同的情況下，土壤總體密度相差  $0.2 \text{ Mg m}^{-3}$  的樣本其最大上升溫度相差  $0.20^\circ\text{C}$ - $0.35^\circ\text{C}$ ，在樣本總體密度相同的情況下，土壤體積含水率相差 10% 的樣本其最大上升溫度相差  $0.40^\circ\text{C}$ - $0.80^\circ\text{C}$ ，顯示了土壤樣本在不同總體密度下的溫度差異很小，該差異主要來自製備土壤樣本的個體差異還有土壤總體密度感測器的感溫元件對於溫度響應的浮動，代表使用熱脈衝方法量測土壤總體密度的溫度量測非常重要。另外從圖 4-6(b)土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間，可以發現在體積含水率為 10% 時，當樣本的總體密度提高，到達最大上升溫度的經過時間有降低的趨勢，但是在體積含水率提高為 20%、30% 時，當樣本的總體密度提高，到達最大上升溫度的經過時間並沒有太大的變化。量測不同設定的土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間如表 4-6 所示，其中十個相同條件土壤樣本的量測結果以平均值和標準差表示。

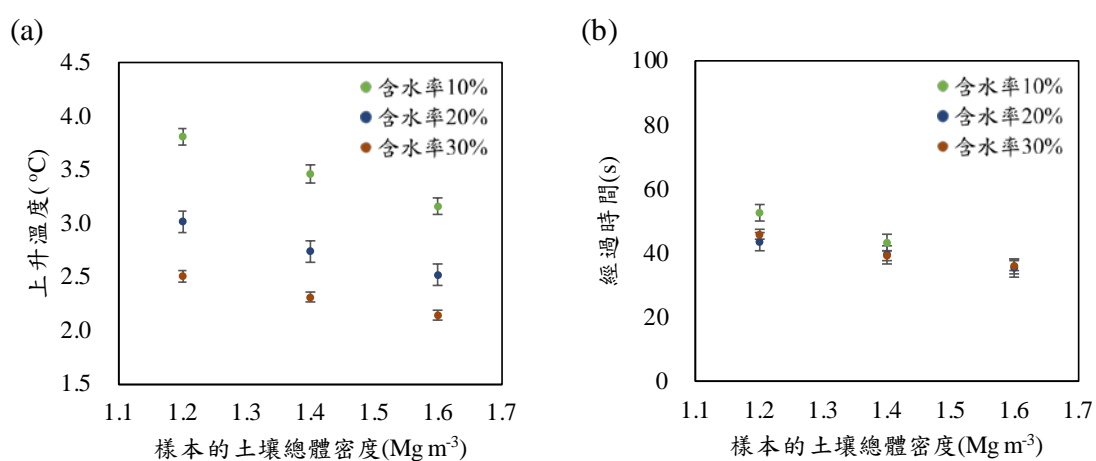


圖 4-6 實驗室壤土量測結果(a)最大上升溫度(b)到達最大上升溫度的經過時間

表 4-5 量測不同設定的土壤樣本的最大上升溫度(°C)

體積含水率(%) 總體密度(Mg m <sup>-3</sup> )	10	20	30
1.20	3.82 ± 0.08	3.02 ± 0.09	2.51 ± 0.07
1.40	3.47 ± 0.10	2.74 ± 0.06	2.31 ± 0.07
1.60	3.16 ± 0.05	2.52 ± 0.05	2.14 ± 0.05

表 4-6 量測不同設定的土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間(s)

體積含水率(%) 總體密度(Mg m <sup>-3</sup> )	10	20	30
1.20	52.75 ± 2.56	43.67 ± 2.30	45.92 ± 4.98
1.40	43.42 ± 3.82	39.75 ± 1.95	39.33 ± 2.76
1.60	36.00 ± 1.08	35.58 ± 4.41	36.17 ± 1.62

在實驗室使用土壤總密度感測器量測砂質黏壤土的結果如圖 4-7 所示為 10 個相同條件的土壤樣本取平均的數值，其中圖 4-7(a) 為土壤樣本在不同總體密度和體積含水率設定下的最大上升溫度，圖 4-7(b) 為土壤樣本在不同總體密度和體積含水率設定下到達最大上升溫度的經過時間。從圖 4-7(a) 中可發現當固定土壤樣本的體積含水率，隨著總體密度變大，量測到的最大上升溫度呈現下降的趨勢，當固定土壤樣本的總體密度，隨著體積含水率增加，量測到的最大上升溫度也會下降。量測不同設定的土壤樣本的最大上升溫度如表 4-7 所示，其中十個相同條件土壤樣本的量測結果以平均值和標準差表示，在樣本體積含水率相同的情況下，土壤總體密度相差  $0.2 \text{ Mg m}^{-3}$  的樣本其最大上升溫度相差  $0.20^{\circ}\text{C} - 0.40^{\circ}\text{C}$ ，在樣本總體密度相同的情況下，體積含水率相差 10% 的樣本其最大上升溫度相差  $0.50^{\circ}\text{C} - 1.00^{\circ}\text{C}$ ，顯示了土壤樣本在不同總體密度下的溫度差異很小，推測原因來自製備土壤樣本的個體差異還有土壤總體密度感測器的感溫元件對於溫度響應的浮動，從砂質黏壤土的量測結果再次凸顯使用熱脈衝方法需要精準量測溫度的重要性。另外圖 4-7(b) 為土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間，可以發現在體積含水率為 10% 時，當樣本的總體密度提高，到達最大上升溫度的經過時間有降低的趨勢，但是在體積含水率提高為 20%、30% 時，當樣本的總體密度提高，到達最大上升溫度的經過時間並沒有太大的變化，量測不同設定的土壤樣本到達最大上升溫度的經過時間如表 4-7 所示，其中十個相同條件土壤樣本的量測結果以平均值和標準差表示。



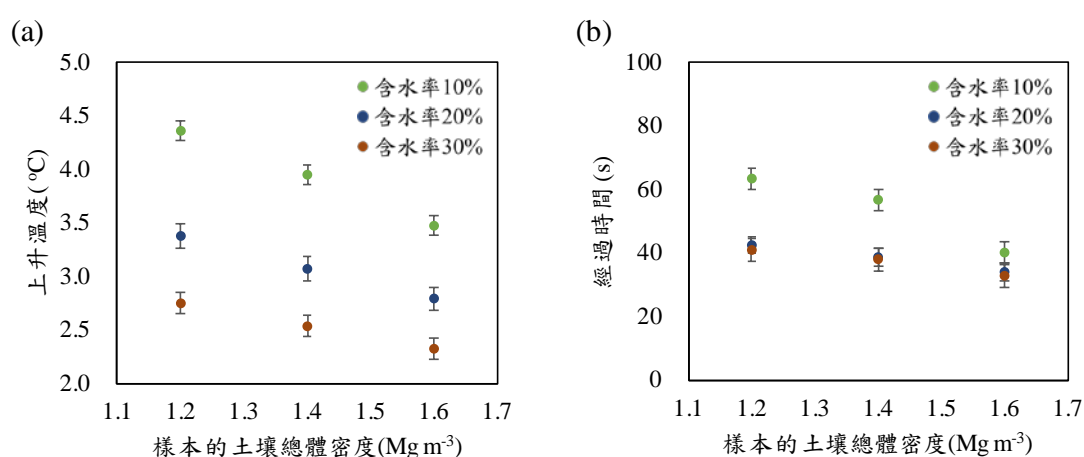


圖 4-7 實驗室砂質黏壤土的量測結果(a)最大上升溫度(b)到達最大上升溫度的經過時間

表 4-7 量測不同設定的砂質黏壤土樣本的最大上升溫度(°C)

總體密度(Mg m <sup>-3</sup> ) \ 體積含水率(%)	10	20	30
1.20	4.36 ± 0.09	3.38 ± 0.09	2.75 ± 0.08
1.40	3.95 ± 0.11	3.07 ± 0.11	2.54 ± 0.09
1.60	3.48 ± 0.10	2.80 ± 0.09	2.33 ± 0.08

表 4-8 量測不同設定的砂質黏壤土樣本到達最大上升溫度的經過時間(s)

總體密度(Mg m <sup>-3</sup> ) \ 體積含水率(%)	10	20	30
1.20	63.50 ± 3.40	42.50 ± 3.11	41.00 ± 3.25
1.40	56.83 ± 2.64	38.75 ± 4.78	38.08 ± 2.21
1.60	40.17 ± 3.86	34.08 ± 1.46	32.83 ± 3.62

比較壤土和砂質黏壤土的量測結果，顯示在實驗室中使用土壤總體密度感測器量測的結果皆符合使用的理論公式，並且根據圖 4-6(a)和圖 4-7(a)可以發現土壤樣本在相同總體密度和體積含水率設定下，壤土和砂質黏壤土的最大上升溫度的分

布區間不同，主要是因為兩種土壤的固體比熱不同造成最大上升溫度的分布區間差異。根據量測的最大上升溫度和經過時間，並計算得到土壤總體密度。在實驗室使用土壤總體密度感測器量測土壤的誤差顯示在圖 4-8 和圖 4-9，分別為壤土和砂質黏壤土的量測誤差結果。本研究認為誤差來自製備土壤樣本的個體差異以及土壤總體密度感測器的感溫元件對於溫度響應的浮動，其中上述因素所造成的量測誤差大多介於  $\pm 10\%$ ，少數則在  $\pm 15\%$  的區間中。

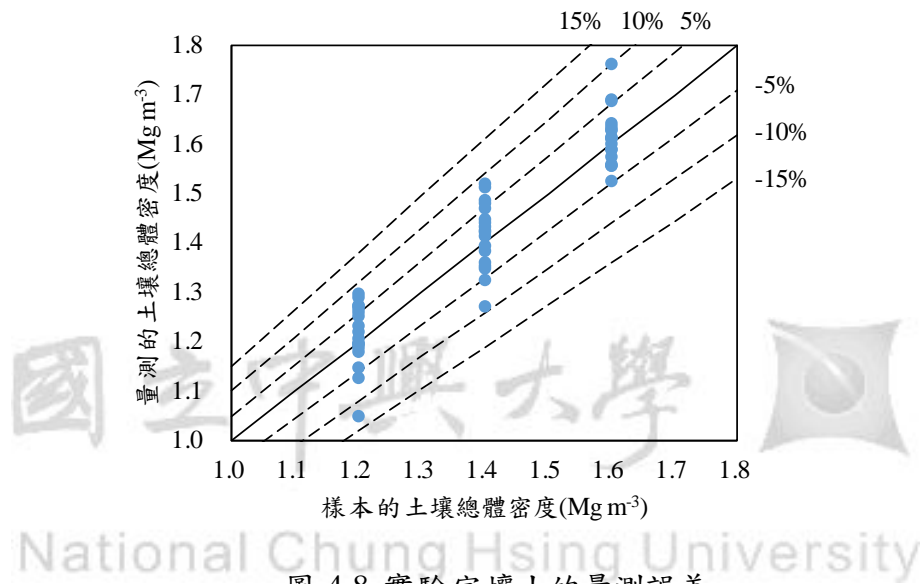


圖 4-8 實驗室壤土的量測誤差

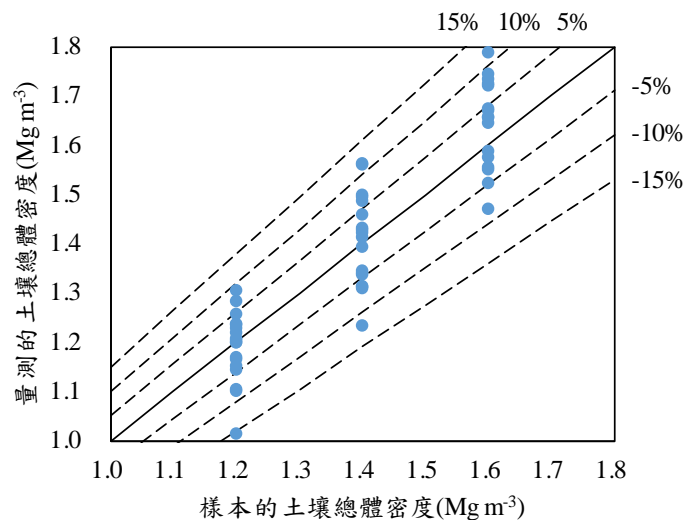


圖 4-9 實驗室砂質黏壤土的量測誤差

#### 4.5 場域量測結果與討論

本實驗分別在中興大學農藝系試驗田地和南投縣民間鄉茶園進行場域實驗，本章節將分別就這兩處場域的量測結果進行討論，首先是在中興大學農藝系試驗田地分別量測 3 處的位置，並量測同一地點不同深度的土壤總體密度和土壤體積含水率分布狀況，其中深度分別為 10 - 15 cm、20 - 25 cm、30 - 35 cm 的土層。在量測位置上先透過環刀法採集土壤樣本作為對照組，其量測結果如表 4-9 所示，根據環刀法得到三個位置不同深度的土壤總體密度和土壤體積含水率數據，量測結果顯示深度和土壤總體密度以及土壤體積含水率皆呈現梯度關係，且深度和土壤總體密度為正相關，深度和土壤體積含水率則為負相關。量測位置深度和土壤總體密度為正相關主要是因為試驗田地沒有定期翻耕，因此深層土壤受到淺層土壤長時間的擠壓會比較密，量測位置深度和土壤體積含水率則為負相關主要是因為底下土層的土壤總體密度較高，會導致土壤的孔隙變少使得水分不易向下滲透。

表 4-9 國立中興大學農藝系試驗田地使用環刀法的量測結果

A	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.39 - 1.48	1.49 - 1.53	1.54 - 1.64
含水率(%)	22% - 29%	19% - 25%	14% - 17%
B	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.39 - 1.44	1.30 - 1.42	1.50 - 1.57
含水率(%)	24% - 30%	19% - 25%	18% - 19%
C	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.34 - 1.48	1.49 - 1.53	1.54 - 1.62
含水率(%)	22% - 29%	19% - 25%	14% - 17%

在中興大學農藝系試驗田地的即時量測結果如圖 4-10 所示，其中 Y 軸的量測密度使用土壤濕度儀和可攜式土壤總體密度量測系統量測，X 軸的標準密度則透過環刀法量測，並使用環刀法量測的土壤總體密度作為標準對照組評估即時量測

方式的誤差，根據圖 4-10 顯示即時量測方式的誤差為  $\pm 20\%$ 。本研究認為可能的誤差來源有三個，分別是量測時感測器沒入土壤造成土壤擾動的人為誤差、可攜式土壤總體密度量測系統的系統誤差、使用土壤濕度儀量測土壤體積含水率的誤差。針對誤差來源逐一進行討論，對於感測器沒入土壤造成土壤擾動的人為操作誤差，無法明確地量化所造成的潛在誤差，只能在進行場域實驗時盡可能確保感測器是平穩沒入土表來降低潛在人為操作誤差。對於可攜式土壤總體密度量測系統的系統誤差，可以從實驗室量測不同土壤的結果圖 4-8 和圖 4-9 得知可攜式土壤總體密度量測系統的系統誤差為  $\pm 15\%$ 。對於使用土壤濕度儀量測土壤體積含水率的誤差，可以將環刀法量測的土壤體積含水率代入計算公式進行評估，如圖 4-11 所示的量測密度為使用環刀法量測的土壤體積含水率計算得到的，本研究發現當土壤體積含水率的參數是準確的時候，可以有效降低即時量測的誤差，其中量測誤差從原本的  $\pm 20\%$  降低到  $\pm 10\%$ 。

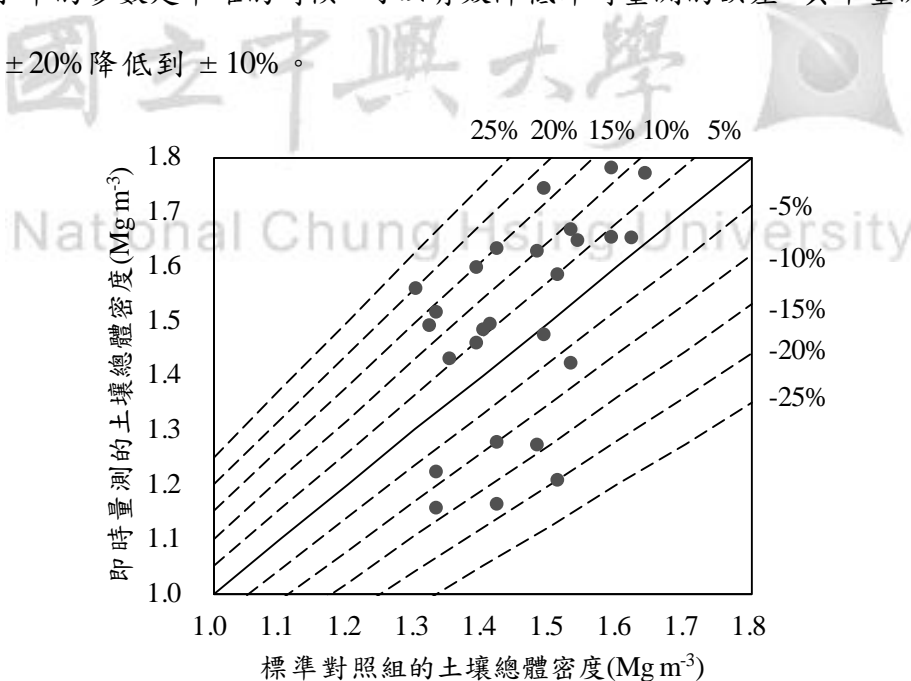


圖 4-10 使用土壤濕度儀搭配可攜式土壤總體密度量測系統在中興大學農藝系試驗田地即時量測的誤差分析

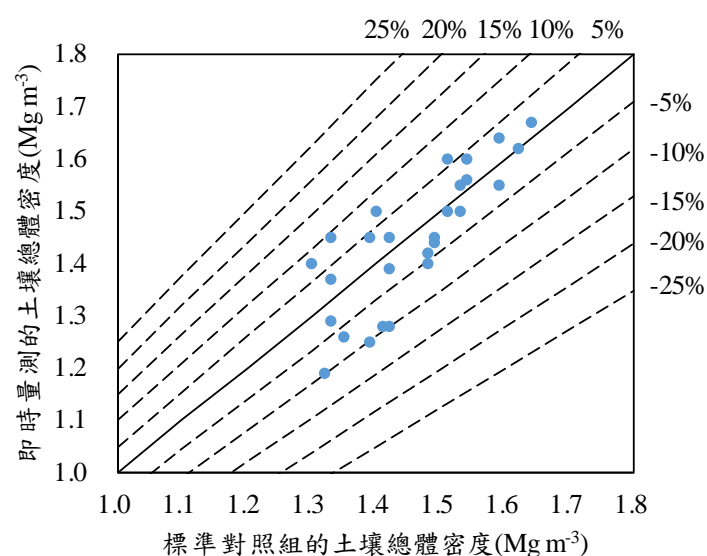


圖 4-11 使用環刀法得到體積含水率數值分析即時量測中土壤濕度儀造成的誤差

表 4-10 南投縣民間鄉茶園使用環刀法的量測結果

A	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.31 - 1.39	1.26 - 1.40	1.31 - 1.42
含水率(%)	15% - 20%	14% - 17%	16% - 17%
B	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.33 - 1.41	1.30 - 1.42	1.33 - 1.40
含水率(%)	14% - 18%	16% - 18%	12% - 20%
C	10 - 15 cm	20 - 25 cm	30 - 35 cm
總體密度( $\text{Mg m}^{-3}$ )	1.33 - 1.41	1.26 - 1.36	1.29 - 1.35
含水率(%)	14% - 18%	15% - 16%	15% - 17%

在南投縣民間鄉茶園分別量測 3 處的位置，並量測同一地點不同深度的土壤總體密度和土壤體積含水率分布狀況，其中量測深度分別為 10-15 cm、20-25 cm、30-35 cm 的土層。在量測位置上，透過環刀法採集土壤樣本作為對照組，其量測結果如表 4-10 所示，根據環刀法得到三個位置不同深度的土壤總體密度和土壤體積含水率數據，量測結果顯示不同量測的 3 個深度的土壤總體密度和體積含水率分布區間是重疊的。相較於中興大學農藝系試驗田地量測位置深度和土壤總體密

度梯度關係，南投縣民間鄉茶園的量測位置深度和土壤總體密度沒有相關性，其原因為茶園在西元 2021 年 1 月進行過翻耕，其中翻耕的深度約為一公尺，因此本研究量測土壤深度範圍內的土壤壓密作用不明顯，並且深淺層土壤的孔隙率均勻分布，因此深淺層土壤的土壤體積含水率的分佈區間也會重疊。

在南投縣民間鄉茶園的即時量測結果如圖 4-12 所示，其中 Y 軸的量測密度使用土壤濕度儀和可攜式土壤總體密度量測系統得到，X 軸的標準密度則是透過環刀法量測，並使用環刀法量測的土壤總體密度作為標準對照組評估即時量測方式的誤差，根據圖 4-12 即時量測方式的誤差為  $\pm 25\%$ 。對於土壤濕度儀量測土壤體積含水率的誤差，同樣將環刀法量測的土壤體積含水率代入計算公式進行評估。如圖 4-13 所示為透過環刀法量測的土壤體積含水率計算得到的量測密度，同樣發現當當使用準確的土壤體積含水率，可以有效降低即時量測的誤差，其中量測誤差從原本的  $\pm 25\%$  降低到  $\pm 15\%$ 。

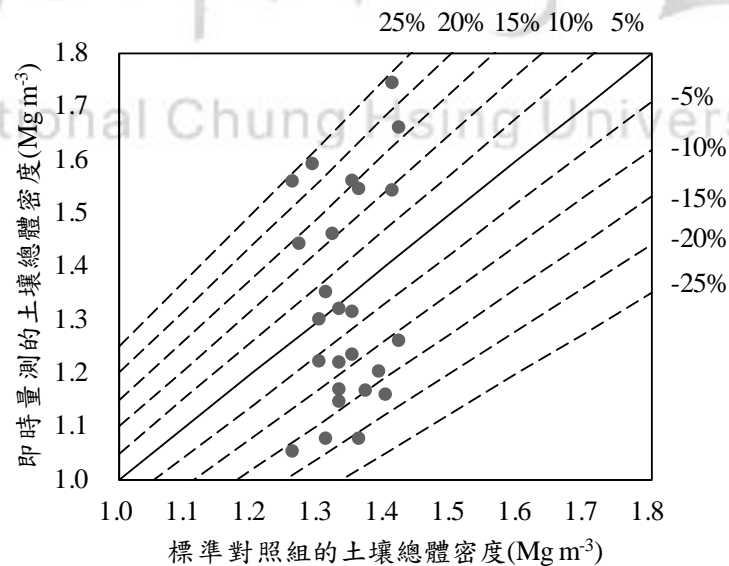


圖 4-12 使用土壤濕度儀搭配可攜式土壤總體密度量測系統在南投縣民間鄉茶園的誤差分析

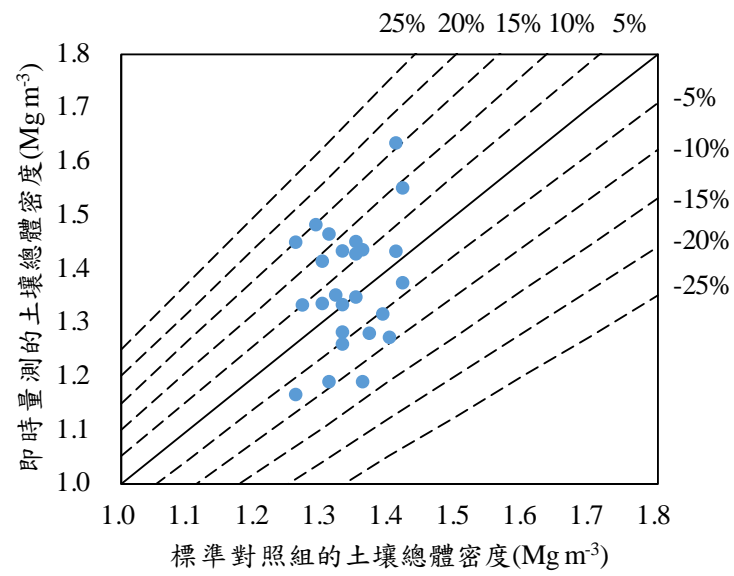


圖 4-13 使用環刀法得到體積含水率數值分析即時量測中土壤濕度儀造成的誤差

## 第五章 結論與未來展望

### 5.1 結論

本研究成功開發了可攜式土壤總體密度量測系統，可攜式土壤總體密度量測系統由前端的土壤總體密度感測器、控制系統和金屬輔具組成，本研究先在實驗室的环境進行評估，再到場域進行測試，最後針對可攜式土壤總體密度量測系統進行誤差分析。在實驗室針對使用熱脈衝方法的土壤總體密度感測器進行性能評估，在三個不同的熱脈衝設定下，加熱元件的量測結果顯示當輸出電壓為 18 V 持續時間為 10 s 有最好的加熱能力，感溫元件透過溫度校正儀進行校正，其中校正溫度區間為 0°C 到 100°C，根據校正結果得到感溫元件的決定係數  $R^2$  為 0.99，代表感溫元件的電壓對於溫度的響應為線性關係。另外在實驗室分別使用壤土和砂質黏壤土製備不同總體密度和體積含水率的土壤樣本量測並評估製作的土壤總體密度感測器的量測誤差，從量測結果發現由於自製備土壤樣本的個體差異以及土壤總體密度感測器的感溫元件對於溫度響應的浮動等影響，對於兩種土壤的量測誤差介於  $\pm 15\%$  的區間。

本研究選擇在國立中興大學的農藝系試驗田地以及南投縣名間鄉茶園實際測試本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統。場域的即時量測使用市售的土壤濕度儀搭配本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統進行土壤總體密度的，並使用環刀法作為標準對照組。通過和標準對照組比較，其結果顯示在國立中興大學的農藝系試驗田地的即時量測誤差為  $\pm 20\%$ ，在南投縣名間鄉茶園的即時量測誤差為  $\pm 25\%$ 。分析即時量測的誤差來源，發現有部分來自於土壤濕度儀量測土壤體積含水率的準確度為  $\pm 2\%$ ，在可攜式土壤總體密度量測系統獲得準確的土壤體積含水率為前提，實驗室進行的數據分析結果顯示在國立中興大學的農藝系試驗田地的量測誤差可以從  $\pm 20\%$  降低為  $\pm 10\%$ ，在南投縣名間鄉茶園的量測誤差則可以從  $\pm 25\%$  降低為  $\pm 15\%$ 。



本研究和前人研究的差異如表 5-1 所示，最一開始的學者開發雙探針熱脈衝的原型[46]，接著有學者藉由探針的不同間距降低環境溫度造成的量測誤差，也有學者整合其他類型的探針使得感測器可以同時量測多種參數，另外有學者將感測器的加熱探針幾何形狀從探針改為薄環提升感測器的耐用性，而本研究的感測器則是藉由增加探針的直徑提升感測器的耐用性，且感測器外部有鐵環包覆提升感測器插入土壤的穩定性避免在感測器探針和土壤之間產生間隙，並降低人為操作的量測誤差，本研究除了製作的感測器與前人有所差異外，我們也整合微控制板並成功開發一套可攜式的量測系統，且量測系統具備連網能力，其中量測系統主要適用於農田，且土壤總體密度介於  $1.2 \text{ Mg m}^{-3}$  和  $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$  之間、土壤體積含水率介於 10% 和 30% 之間的場域較佳，因此可以先根據以往在特定場域使用環刀法收集的土壤總體密度和體積含水率的數據做為參考，來進一步評估是否適合應用本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統。

表 5-1 本研究與前人研究之感測器的差異

文獻	貢獻
[46]	開發雙探針熱脈衝的原型
[47]	藉由探針的不同間距降低環境溫度造成的量測誤差
[48]	整合其他類型的探針使得感測器可以同時量測多種參數
[49]	感測器的加熱探針幾何形狀為薄環，可提升感測器的耐用性
本研究	增加探針的直徑提升感測器的耐用性，且感測器外部有鐵環包覆提升感測器插入土壤的穩定性

## 5.2 未來展望

本研究成功開發了可攜式土壤總體密度量測系統，並實際應用在場域的即時量測上，未來希望可以提高可攜式土壤總體密度量測系統量測土壤總體密度的準確性，其中主要的量測誤差來自於使用市售儀器量測土壤體積含水率的不確定性

和本研究製作的土壤總體密度感測器量測時的溫度浮動，因此在量測土壤體積含水率上，希望隨著量測技術愈成熟，市面上有更高準確率的量測土壤體積含水率儀器以供選用，另外土壤總體密度感測器的部分，則希望可以透過跑模擬的方式來進行優化，像是探針幾何構造尺寸的影響或是不同土壤物理性質導致熱傳遞上的不穩定性。



## 參考文獻

- [1] A.R. Dexter, “Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth,” *Geoderma*, vol. 120(3-4), pp. 201-214, 2004.
- [2] X. Liu, S. Lu, R. Horton and T. Ren, “In situ monitoring of soil bulk density with a thermo-TDR sensor,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 78(2), pp. 400-407, 2014.
- [3] O. Oduma, C. G. Okeke, M. F. Umunna, P. Ehiomogie and F. N. Orji, “Effect of tillage operation on the physical and mechanical properties of soil in south-east Nigeria,” *Futo Journal*, vol. 6(2), pp. 1-13, 2020.
- [4] Z. Tan, C. S. Lin, X. Ji and T. J. Rainey, “Returning biochar to fields: A review,” *Applied Soil Ecology*, vol. 116, pp. 1-11, 2017.
- [5] J. Pranagal, P. Oleszczuk, D. Tomaszewska-Krojańska, P. Kraska and K. Różyło, “Effect of biochar application on the physical properties of Haplic Podzol,” *Soil and Tillage Research*, vol. 174, pp. 92-103, 2017.
- [6] R. F. Dam, B. B. Mehdi, M. S. E. Burgess, C. A. Madramootoo, G. R. Mehuys and I. R. Callum, “Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada,” *Soil and Tillage Research*, vol. 84(1), pp. 41-53, 2005.
- [7] P. Chandrasekhar, J. Kreiselmeier, A. Schwen, T. Weninger, S. Julich, K. H. Feger and K. Schwärzel, “Why we should include soil structural dynamics of agricultural soils in hydrological models,” *Water*, vol. 10(12), pp. 1-18, 2018.
- [8] T. Whitman, R. Neurath, A. Perera, I. Chu-Jacoby, D. Ning, J. Zhou and M. Firestone, “Microbial community assembly differs across minerals in a rhizosphere microcosm,” *Environmental microbiology*, vol. 20(12), pp. 4444-4460, 2018.
- [9] I. Kögel-Knabner and C. Rumpel, “Advances in molecular approaches for understanding soil organic matter composition, origin, and turnover: a historical overview,” *Advances in Agronomy*, vol. 149, pp. 1-48, 2018.
- [10] L. Yong, G. Zhu, Q. Wan, Y. Xu, Z. Zhang, Z. Sun and Y. Zhang, “The soil water evaporation process from mountains based on the stable isotope composition in a headwater basin and northwest China,” *Water*, vol. 12(10), pp. 2711-2730, 2020.
- [11] C. Qu, S. Albanese, A. Lima, D. Hope, P. Pond, A. Fortelli and B. De Vivo, “The occurrence of OCPs, PCBs, and PAHs in the soil, air, and bulk deposition of the Naples metropolitan area, southern Italy: Implications for sources and environmental processes,” *Environment international*, vol. 124, pp. 89-97, 2019.
- [12] U. Barman and R. D. Choudhury, “Soil texture classification using multi class

- support vector machine,” *Information Processing in Agriculture*, vol. 7(2), pp. 318-332, 2020.
- [13] J. Jadczyzyn, J. Niedźwiecki and G. Debaene, “Analysis of agronomic categories in different soil texture classification systems,” *Polish Journal of Soil Science*, vol. 49(1), pp. 61-72, 2017.
- [14] F. Gschwend, M. Hartmann, J. Mayerhofer, A. Hug, J. Enkerli, A. Gubler and F. Widmer, “Core and indicative bacterial and fungal taxa define characteristic soil communities of arable land, grassland, and forest,” *bioRxiv*, vol. 10(2), pp.1-49, 2021.
- [15] E. E. Austin, K. Wickings, M. D. McDaniel, G. P. Robertson and A. S. Grandy, “Cover crop root contributions to soil carbon in a no-till corn bioenergy cropping system,” *Gcb Bioenergy*, vol. 9(7), pp. 1252-1263, 2017.
- [16] D. Holthusen, A. A. Brandt, J. M. Reichert and R. Horn, “Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping,” *Soil and Tillage Research*, vol. 177, pp. 113-124, 2018.
- [17] I. L. Pepper and M. L. Brusseau, “Physical-chemical characteristics of soils and the subsurface,” *Environmental and pollution science*, pp. 9-22, 2019.
- [18] M. A. Ghorbani, S. Shamshirband, D. Z. Haghi, A. Azani, H. Bonakdari and I. Ebtehaj, “Application of firefly algorithm-based support vector machines for prediction of field capacity and permanent wilting point,” *Soil and Tillage Research*, vol. 172, pp. 32-38, 2017.
- [19] B. Minasny and A. B. McBratney, “Limited effect of organic matter on soil available water capacity,” *European journal of soil science*, vol.69(1), pp. 39-47, 2018.
- [20] L. H. Wiecheteck, N. F. Giarola, R. P. de Lima, C. A. Tormena, L. C. Torres and A. L. de Paula, “Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (–15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures,” *Agricultural Water Management*, vol. 230, pp. 32-38, 2020.
- [21] R. O. S. I. A. Rowe, “Soil moisture,” *Biosystems Engineering*. Auburn University, Auburn, Alabama, United States, 2018.
- [22] A. Solgi, R. Naghdi, E. R. Labelle, P. A. Tsioras and A. Salehi, “Comparison of sampling methods used to evaluate forest soil bulk density,” *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, vol. 39(2), pp. 247-254, 2018.
- [23] A. A. G. Al-Shammary, A. Z. Kouzani, A. Kaynak, S. Y. Khoo, M. Norton and W. Gates, “Soil bulk density estimation methods: a review,” *Pedosphere*, vol. 28(4), pp. 581-596, 2018.
- [24] M. F. Jurgensen, D. S. Page-Dumroese, R. E. Brown, J. M. Tirocke, C. A. Miller, J.

- B. Pickens and M. Wang, "Estimating carbon and nitrogen pools in a forest soil: influence of soil bulk density methods and rock content," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 81(6), pp. 1689-1696, 2017.
- [25] J. M. Davidson, J. W. Biggar and D. R. Nielsen, "Gamma-radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials," *Journal of Geophysical Research*, vol. 68(16), pp. 4777-4783, 1963.
- [26] R. J. Reginato, "Gamma radiation measurements of bulk density changes in a soil pedon following irrigation," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 38(1), pp. 24-29, 1974.
- [27] M. Á. Martín, M. Reyes and F. J. Taguas, "Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture," *Geoderma*, vol. 287, pp. 66-70, 2017.
- [28] J. Shiri, A. Keshavarzi, O. Kisi, S. Karimi and U. Iturraran-Viveros, "Modeling soil bulk density through a complete data scanning procedure: Heuristic alternatives" *Journal of Hydrology*, vol. 549, pp. 592-602, 2017.
- [29] W. Zhang, W. Gao, T. Ren, and W. R. Whalley, "A novel approach to estimate soil penetrometer resistance from water content, bulk density, and shear wave velocity: A laboratory study on a loamy sand soil," *Geoderma*, vol. 368, 114276, 2020.
- [30] Z. Tian, T. Ren, R. Horton and J. L. Heitman, "Estimating soil bulk density with combined commercial soil water content and thermal property sensors," *Soil and Tillage Research*, vol. 196, 104445, 2020.
- [31] X. Liu, T. Ren and R. Horton, "Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72(4), 1000-1005, 2008.
- [32] G. J. Kluitenberg, "5.2 Heat capacity and specific heat," *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, vol. 5, pp. 1201-1208, 2002.
- [33] K. L. Bristow, "5.3 Thermal Conductivity," *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, vol. 5, pp. 1209-1226, 2002.
- [34] R. Horton, "5.4 Soil Thermal Diffusivity," *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, vol. 5, pp. 1227-1232, 2002.
- [35] G. S. Campbell. *Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems*. Elsevier, 1985.
- [36] I. Yang, D. Kim and S. Lee, "Construction and preliminary testing of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements at high temperatures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 122, pp. 1343-1352, 2018.
- [37] M. Rottmann, T. Beikircher and, H. P. Ebert, "Thermal conductivity of evacuated expanded perlite measured with guarded-hot-plate and transient-hot-wire method at temperatures between 295 K and 1073 K," *International Journal of Thermal*

- Sciences*, vol. 152, 106338, 2020.
- [38] T. Ren, T. E. Ochsner, R. Horton and Z. Ju, "Heat-pulse method for soil water content measurement: Influence of the specific heat of the soil solids," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 67(6), pp. 1631-1634, 2003.
  - [39] Y. Lu, X. Liu, J. Heitman, R. Horton and T. Ren, "Determining soil bulk density with thermo-time domain reflectometry: A thermal conductivity-based approach," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 80(1), pp. 48-54, 2016.
  - [40] T. E. Ochsner, R. Horton, and T. Ren, "Simultaneous water content, air-filled porosity, and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65(6), pp. 1618-1622, 2001.
  - [41] H. He, M. Dyck, and J. Lv, "The heat pulse method for soil physical measurements: A bibliometric analysis," *Applied Sciences*, vol. 10(18), 6171, 2020.
  - [42] J. Wang, D. He, M. Dyck, and H. He, "Theory and solutions of heat pulse method for determining soil thermal properties," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 440(5), 052039, 2020.
  - [43] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger. *Conduction of heat in solids*, (2nd ed.). London: Oxford University Press, 1959.
  - [44] K. L. Bristow, "Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes," *Agricultural and forest meteorology*, vol. 89(2), pp. 75-84, 1998.
  - [45] D. A. De Vries, "A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ," *Soil Science*, vol. 73(2), pp. 83-90, 1952.
  - [46] G. S. Campbell, C. Calissendorff and J. H. Williams, "Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 55(1), pp. 291-293, 1991.
  - [47] K. L. K. Bristow, G. S. Campbell and K. Calissendorff, K. "Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 57(4), pp. 930-934, 1993.
  - [48] Y. Mori, J. W. Hopmans, A. P. Mortensen and G. J. Kluitenberg, "Multi-functional heat pulse probe for the simultaneous measurement of soil water content, solute concentration, and heat transport parameters," *Vadose Zone Journal*, vol. 2(4), pp. 561-571, 2003.
  - [49] O. K. Olmanson and T. E. Ochsner, "A partial cylindrical thermo-time domain reflectometry sensor," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 72(3), pp. 571-577, 2008.
  - [50] H. He, M. F. Dyck, R. Horton, T. Ren, K. L. Bristow, J. Lv and B. Si, "Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements," *Reviews*

*of Geophysics*, vol. 56(4), pp. 567-620, 2018.

- [51] J. H. Knight and G. J. Kluitenberg, "Simplified computational approach for dual-probe heat-pulse method," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68(2), pp. 447-449, 2004.
- [52] ASTM D7263. Standard test methods for laboratory determination of density (unit weight) of soil specimens, 2009.
- [53] ISO 11272. Soil Quality - Determination of Dry Bulk Density, 2017.

