

## 配置自動加壓調整裝置之雜糧含水率檢測系統之研製

黃懷層、蔡耀全、洪君育、陳澤民\*

**摘要** 本論文應用時間區域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)與頻率區域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)原理建置具備自動壓實機構雜糧的含水率檢測系統。壓實機構係利用直流馬達與導螺桿搭配測力元件(Load Cell)實現自動壓實的流程，以滿足 TDR 與 FDR 感測器數據測量的技術需求。對比各式雜糧測量數據與對應標準烤箱法量測之結果，本論文以回歸分析所建立校正檢量曲線為核心，並結合 HMI(Human Machine Interface)人機介面，提供雜糧品項以及語言種類的選項，設計完成非破壞式高含水率雜糧水分檢測系統，實現快速、多工與即時作業的可能性。針對紅豆、大豆、毛豆等雜糧品項之試驗結果顯示，本論文採用 TDR/FDR 量測技術搭配所建置對比於標準烤箱法之校正檢量曲線，判定係數  $R^2$  值可達到 0.9 以上，並縮短雜糧含水率檢測時間至 10 分鐘以內，節省量測時間 20 分鐘以上，含水率的量測範圍則由 35% 提高至 65%。已可充分滿足高含水率雜糧檢測之應用需求。

**關鍵詞：**含水率、快速檢測、時間區域反射法、頻率區域反射法

## Development of Moisture Content Measurement System with Automatic Compression Regulator for Upland Crops

Huai-Ceng Huang, Yao-Chuan Tsai, Jun-Yu Hong and Tse-Min Chen\*

**ABSTRACT** This study based on the techniques of TDR (Time Domain Reflectometry) and FDR (Frequency Domain Reflectometry) is to establish a prompt measurement system of moisture content for fresh upland crops mainly. The developed system with prompt, multi-variety applicable and almost real-time performance is composed of TDR or FDR sensor, auto-pressing mechanism, alternative calibration curves for various upland crops as the measurement core, an automatically feeding sample cup and a friendly human-machine interface (HMI). The validation results of red bean, soybean and edamame show that the coefficients of determination  $R^2$  of the calibration curves of the TDR and FDR to the standard oven method can reach more than 0.9, the detection time of the moisture content of miscellaneous grains is speeded up to less than 10 minutes and the measurement range of moisture content is able to be extended to 65% by this novel moisture measurement system with which made the prompt measurement of high moisture content of fresh upland crops possible.

**Keywords:** Moisture content, Prompt detection, TDR, FDR

### 一、前言

雜糧穀物為人們生活中的主副食來源，也是國計民生和各行各業極重要的經濟指標。隨著生產模式與消費習性的改變，雜糧穀物質量的內涵，正受到越來越多的關注，而水分含量正是影響貯運品質與加工程序須嚴格控管的重要指標參數[5]。雜糧穀物含水分率的確認不僅影響市場交易計價格，也將影響貯運與加工的管理模式與成本，而超標的含水率更可能導致微生物、昆蟲、黴菌等有害生物孳生，不僅造成損耗更嚴重影響貯存期限與

食安[6]。

因此本研究擬以時域反射技術與頻域反射技術做為水分檢測之原理，搭配自動壓實機構，建置雜糧含水率快速量測系統[1] [2]。再經由對比傳統的烘箱法與紅外線等破壞式的量測結果，進行回歸分析建立檢量曲線，以提升量測的準確度。最後則結合 LabVIEW 人機介面，設計試製可攜式含水率檢測儀，驗證並實踐研究結果。期待未來可做為雜糧收穫、貯儲、加工以及計價過程中即時水分檢測標準之技術選項。

國立中興大學生物產業機電工程學系。Dept. of Bio-industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 40227 Taiwan, R.O.C..

\* 通訊作者。Corresponding author, email: [tmchen@nchu.edu.tw](mailto:tmchen@nchu.edu.tw)

## 二、文獻探討

### (一) 雜糧含水率檢測

現有檢測農產品含水率的方法主要可分為破壞式的直接法與非破壞式的間接法兩種。直接法是將農產品放置於烤箱內進行烘烤，烘烤後減損的重量為農產品的含水量，據此計算含水率，通常含水率表示為重量含水率[3]。

重量含水率有兩種表示方式：

$$\text{乾基百分比(d.b.)} = \frac{\text{溼介質所含水分重}}{\text{溼介質全重} - \text{溼介質所含水分重}} \times 100\% \quad (2-1)$$

$$\text{溼基百分比(w.b.)} = \frac{\text{溼介質所含水分重}}{\text{溼介質全重}} \times 100\% \quad (2-2)$$

### (二) 介電常數

現有的非破壞式量測大部分都是應用物質在外加電場作用時介電特性的響應，而物質的介電響應可分為電荷的傳導與分子的極化兩種。傳導行為主要發生在具有

自由電荷的物質中，如電導體；但如果物質內的電荷受到原子或分子的束縛，內部沒有自由電子時，當受到電場作用時即會產生極化行為，此類物質稱為介電質。

介電常數常以相對值的複數形式表示(2-3 式)， $\epsilon_r'$ 為複數相對介常數的實部，稱為相對介電常數， $\epsilon_r''$ 為複數相對介電常數的虛部，稱為介質損耗因素。

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + \epsilon_r'' \quad (2-3)$$

其中， $\epsilon_r'$ 與物質的電容特性有關， $\epsilon_r''$ 與物質的電阻特性有關，分別代表物質儲存電場的能力與將電磁能轉換成熱能的能力 [7]。

### (三) 現有含水率量測方式

#### 1. 非破壞式量測

- (1) 近紅外線：水分子對某些波長的近紅外光吸收特別強烈，通過測量透射光或反射光的衰減程度來測量物質的水分(圖 1) [8]。
- (2) 電容式：經過電容感測器，當介質中含有水分時，其介電常數就會大幅提高，用以推測其含水率(圖 2) [4]。

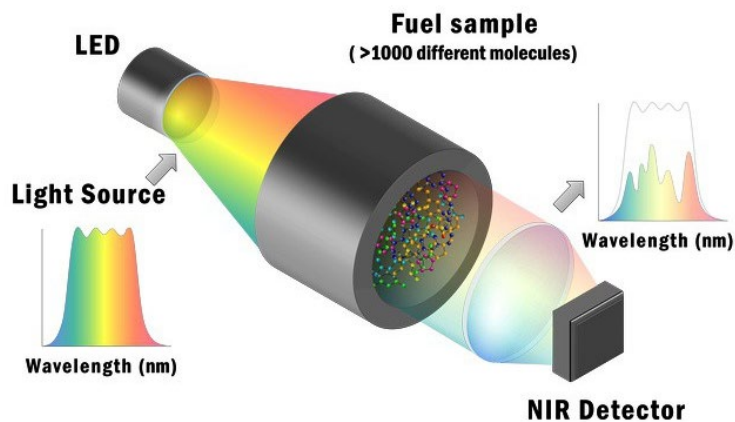


圖 1、近紅外線原理

Fig. 1 principle of Near-infrared

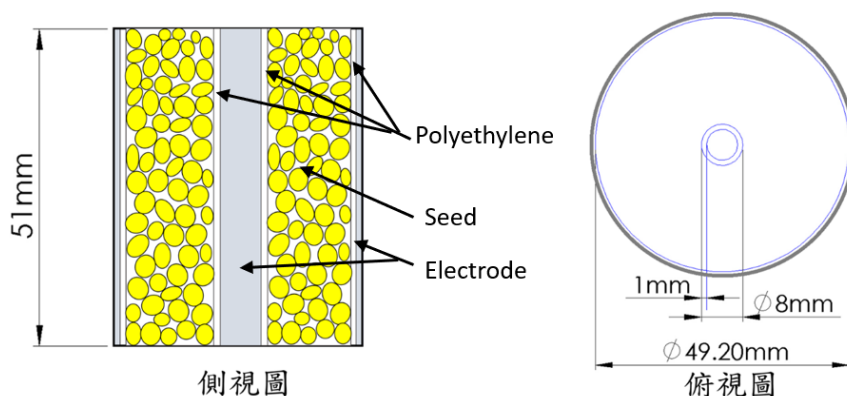


圖 2、圓筒式電容量測[4]

Fig. 2 Moisture content detection by cylindrical capacitance [4]

- (3) 阻抗式電容法: 利用傳輸通路上之阻抗不連續性在不同頻率下所造成之反射脈衝電壓改變，量測傳輸通路上介質之電學性質，又分為時域反射儀、頻域反射儀、微波量測儀(圖 3) [9]。

## 2. 破壞式量測

烘箱法與紅外線水分儀：利用高溫使雜糧樣品原有內含的水分蒸散，藉由水分的重量損失來計算雜糧樣品含水率(圖 4)。

本論文將採非破壞式之時域反射技術(TDR)與頻域反射技術(FDR)做為水分檢測之原理，並搭配自動壓實機構，建置雜糧含水率快速檢測系統。

## 三、實驗材料、設備與方法

### (一) 實驗材料

本研究選用三種雜糧品項做為含水率量測的實驗樣本，分別為市售的高雄 9 號紅豆、中都農企社提供之高雄 10 號黃豆與高雄 11 號毛豆(如圖 5)。



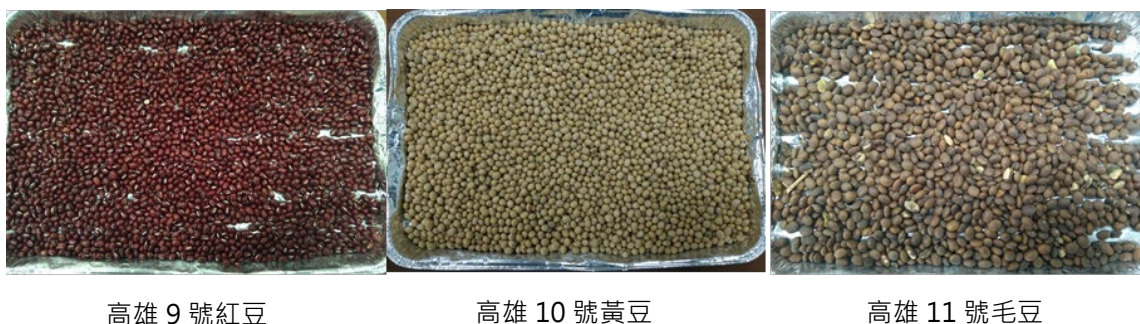
圖 3、阻抗式電容法

Fig.3 Capacitance method by impedance



圖 4、破壞式水分量測裝置

Fig. 4 Destructive moisture content measurement devices



高雄 9 號紅豆

高雄 10 號黃豆

高雄 11 號毛豆

圖 5、各品項樣本

Fig. 5 Kinds of sample grains

## (二) 實驗設備

### 1. 自行開發之高含水率雜糧含水率檢測平台

本研究自行開發量測系統，運用直流馬達搭配極限開關進行量測載台的移動、定位以及樣本的自動壓實，圖 6 為量測系統架構圖，量測平台

構造則如圖 7。含水率量測部分則是由時域反射儀(TDR)或頻域反射儀(FDR)二擇一選用，在透過 RS485 通訊取得 TDR/FDR 之讀值後，導入 PLC 控制器進行程序運作與計算整合，最後由人機介面進行系統操控與資料顯示登錄(圖 8)。

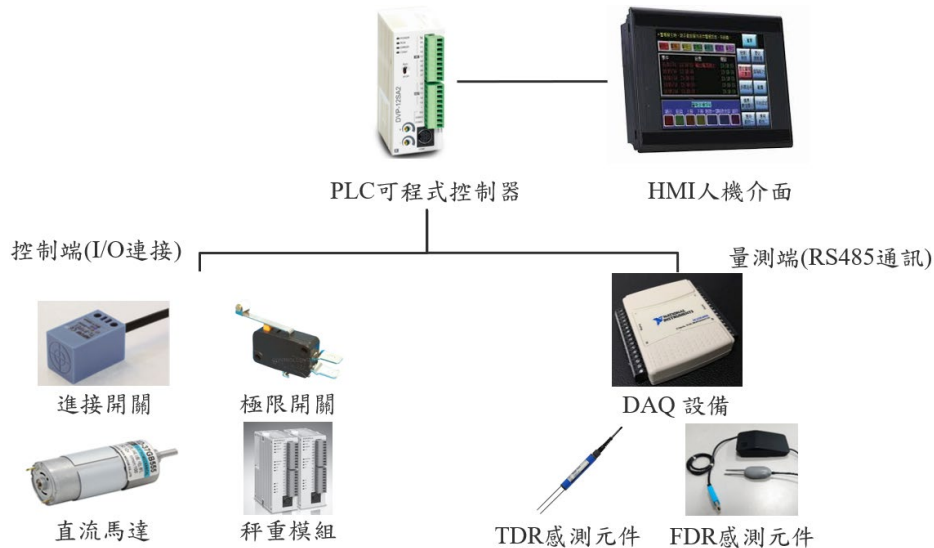


圖 6、量測系統架構圖

Fig.6 Architecture of measurement system

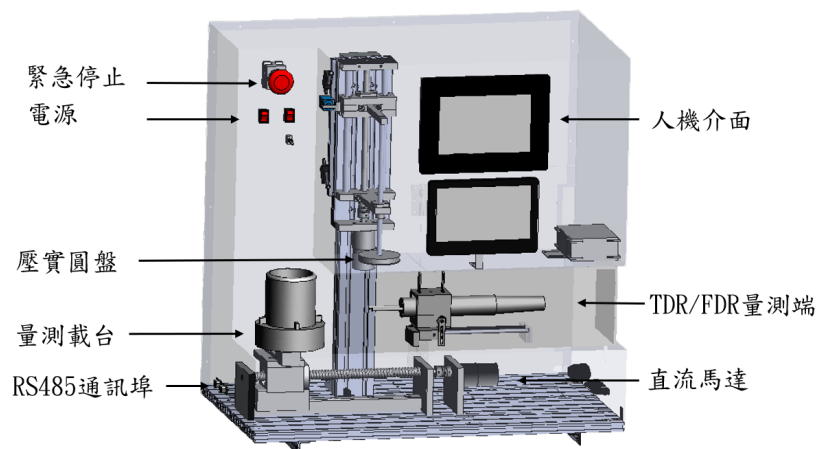


圖 7、量測平台構造圖

Fig.7 The schematic diagram of developed measurement platform

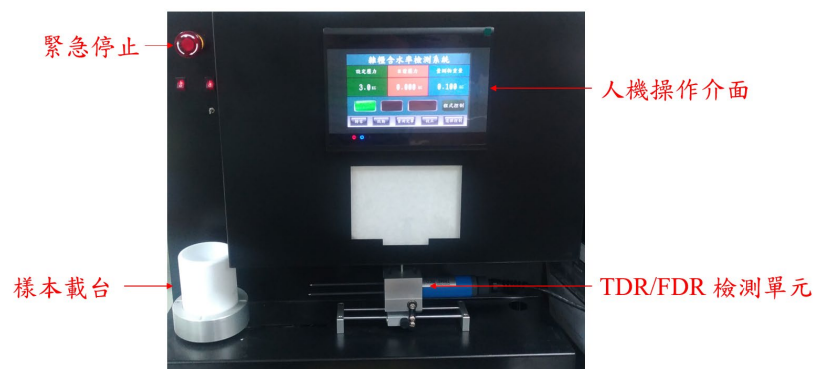


圖 8、量測平台實體圖

Fig.8 The developed measurement platform



## 2. 含水率量測設備

### (1) GAC®2500 INTL 微波水分測量儀(圖 9):

美國 DICKEY-john 製造，係根據電容測量原理搭配 149MHZ 技術，可在 10 秒內量測完畢並獲得穀物相關含水率，為市售含水率檢測比較組。

### (2) LDS-1G 穀物水分測定儀(圖 10)

中國 Zhengzhou Sunshine Machinery 所製造根據電容傳感器原理，可進行大範圍且快速的雜糧含水率測量，為市售含水率檢測比較組。

### (3) TRIME-PCIO 32 時域反射水分計(TDR)(圖 11)



圖 9、GAC®2500 INTL 穀物分析儀

Fig.9 GAC®2500 INTL Grain Analysis Computer



圖 10、LDS-1G 水分測定儀

Fig. 10 LDS-1G grain moisture meter



圖 11、TRIME-PCIO 32 土壤水分計

Fig.11 Sensor with integrated TDR electronics for moisture measurement in soil

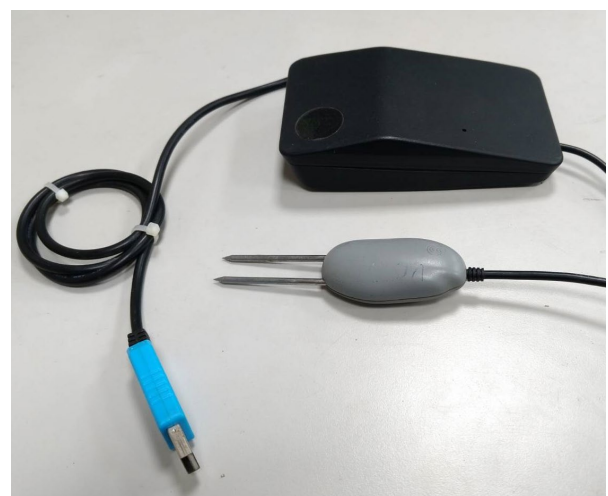


圖 12、FDR 頻域反射儀

Fig.12 Frequency domain reflectometry, FDR

由德國 IMKO 所製造，基於 TDR 時域反射技術，藉由水分含量會影響介電常數的特性量測含水率，為含水率量測實驗組。

### (4) FDR 頻域反射儀(圖 12)

利用電磁波的脈衝原理測量電磁波在介質中的傳播頻率，進而取得介質的介電常數，再進行介質含水率的換算，可快速的量測含水率。

### (5) 恆溫烤箱 DK-43(圖 4)

百特公司出品 DK-43 恆溫烤箱，2.5 立方英尺容量，溫度範圍：環境溫度 40°C 至 250 °C，用以執行標準烤箱法水分檢測，為 TDR/FDR 檢量線建立標準對照組。

### (三) 實驗方法與步驟

#### 1. 樣本備製

本研究以紅豆、大豆、毛豆等雜糧品項作為實驗樣本，並進行分批實驗，每一種雜糧分為六大組，每一大組再細分成三小組，並進行泡水處理，所有樣本皆先泡水並放置於冰箱(溫度為 3~6°C)24 小時，再進行烘烤(烤箱溫度 105°C)，每一大組之間烘烤間隔 20 分鐘，第一組不烘烤，製備不同含水率之樣本組。

實驗步驟：

- (1) 將待量測雜糧分成六等份，每份約 450g
- (2) 所有樣本皆先泡水 24 小時再進行烘烤
- (3) 將六等份進行烘烤，烘烤時間每份間隔 20 分鐘，第一份不烘烤，第二份 20 分鐘，第三份 40 分鐘....以此類推
- (4) 再將烘烤完的每一等份分成三小等份，每一小等份 150 ± 5g/組

#### 2. 自動壓實流程

利用人機介面設定設備壓實壓力值(本論文皆以 8 kg 為施壓基準)，並放置待測樣本進行壓實與含水率量測，步驟如下：

- (1) 將待測樣本置入量測載台並放置於壓實設備上。
- (2) 將待測樣本測載台移至量測端。
- (3) 設定壓力(本論文設為 8kg)並啟動自動壓實流程。
- (4) 等待壓實完成即可同步自動記錄量測值與加壓實重。

#### 3. 含水率檢測

##### (1) TDR/FDR 檢測：

將每一雜糧樣本，放入樣本檢測杯中，紀錄體積與重量，並分別以 TDR/FDR 探針插入檢測杯導孔中，再進行壓實，直到 TDR/FDR 數據浮動值落於設定的誤差範圍內，紀錄當前壓力值及其含水率，每一樣本相同程序重複進行 5 次。

##### (2) 市面上販售之水分測定儀檢測

將待測雜糧樣本置放於市售 LDS-1G 與 GAC®2500 INTL 水分檢測儀的量測樣本容器內，依照雜糧種類選取量測模式並進行量測，並紀錄顯示含水率，每一樣本相同程序重複進行 5 次。

##### (3) 標準烤箱法檢測：

紀錄每一雜糧樣本的重量，記錄完後放置於 105°C 的烤箱 24 小時後，量測樣本的餘重，即可計算求得樣本之標準含水率。

#### 4. 數據分析

本論文採用回歸分析法建置 TDR 與 FDR 含水率讀值對應於標準烤箱法含水率計算值之校正方程式。回歸分析是一種預測建模技術，可於用研究自變數(TDR 與 FDR 含水率讀值)和依變數(此為標準烤箱法計算值)間之關係，常見於預測建模、時間序列建模和查找變數間關係等應用。有多種回歸技術可用於進行預測，這些技術主要有三個指標：自變量數量、依變量類型和回歸線的形狀。常用方法則有：線性回歸、Logistic 回歸、多項式回歸等。本論文選擇線性回歸與多項式回歸法技術建模並進行比較分析。

## 四、結果與討論

### (一) 含水率檢量線建置與殘差圖

圖 13~15 為紅豆、黃豆、毛豆三種不同雜糧品項 TDR/FDR 的檢測結果與所建立之檢量線。

無論是 TDR 或 FDR 的量測方式， $R^2$  皆可達 0.9 以上，而在回歸檢定中，殘差圖描繪點皆在以 0 為橫軸(紅線)上下隨機散佈(圖 16-18)，代表回歸直線對各個觀測值的擬合情況佳，擬合情況理想，已可滿足實務應用之需求。

### (二) 與市售含水率量測商品機之比較

採 TDR 與 FDR 測值經過回歸校正後與市售的穀物水分儀與微波水分儀等商品級設備進行比較時，當樣本含水率低於 40%時，TDR 與 FDR 的量測誤差皆低於 5%，而市售的穀物水分儀與微波水分儀之量測誤差皆高達 18%以上，在樣本含水率超過 50%時，微波水分儀更已無法進行量測，顯見已不適用(圖 19-21)。

### (三) 含水率檢測系統之設計與建置

本研究所研發之雜糧高含水率檢測系統，整合水分檢測各項功能與友善操作介面(圖 8)，使用者可以透過人機介面設定選取壓實壓力值、語言、TDR 或 FDR 檢測方式、雜糧穀物品項等(圖 22)。在試驗階段時，亦可以依照試驗結果來進行適用物種品項及檢量線的拓增與修改(圖 23)，已具備發展商品機之潛力。

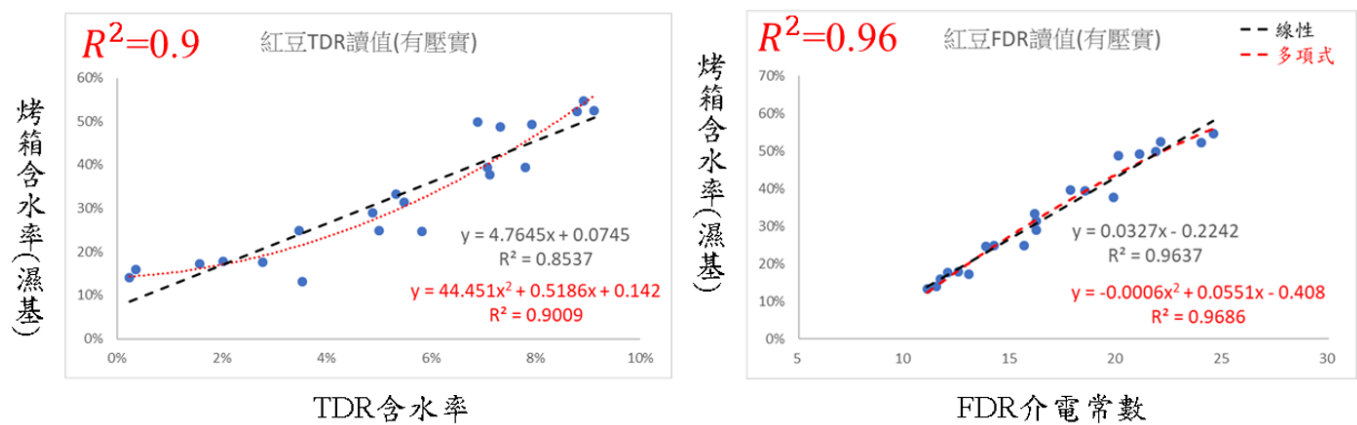


圖 13、紅豆 TDR/FDR 與烤箱法量測對比結果與回歸檢量線建立  
Fig. 13 Detection results of red bean and the calibration equations for TDR/FDR

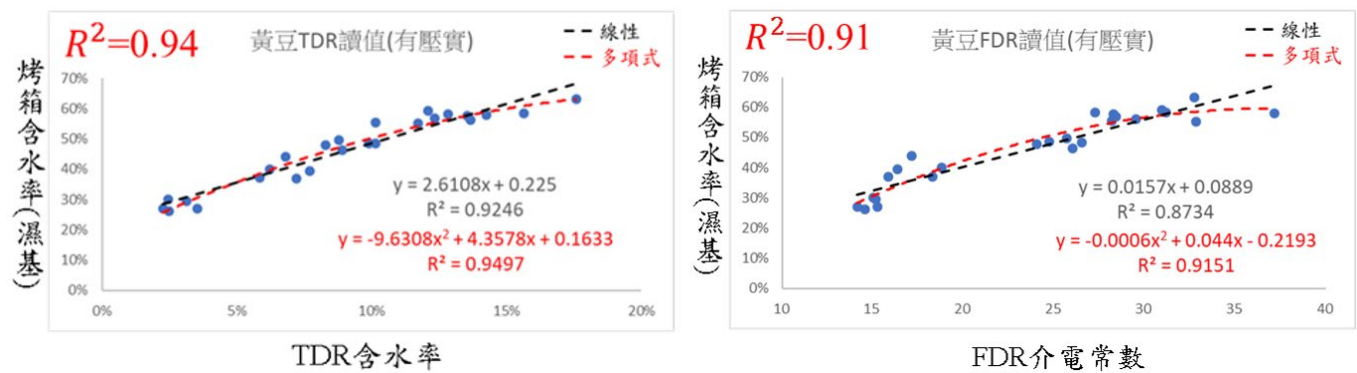


圖 14、黃豆 TDR/FDR 與烤箱法量測對比結果與回歸檢量線建立  
Fig. 14 Detection results of soybean and the calibration equations for TDR/FDR

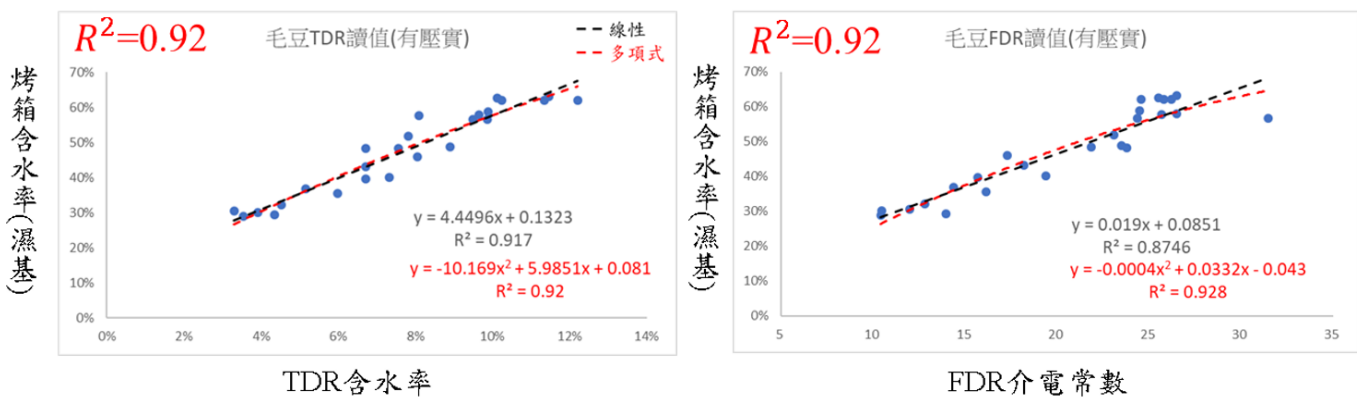


圖 15、毛豆 TDR/FDR 與烤箱法量測對比結果與回歸檢量線建立  
Fig. 15 Detection results of edamame and the calibration equations for TDR/FDR

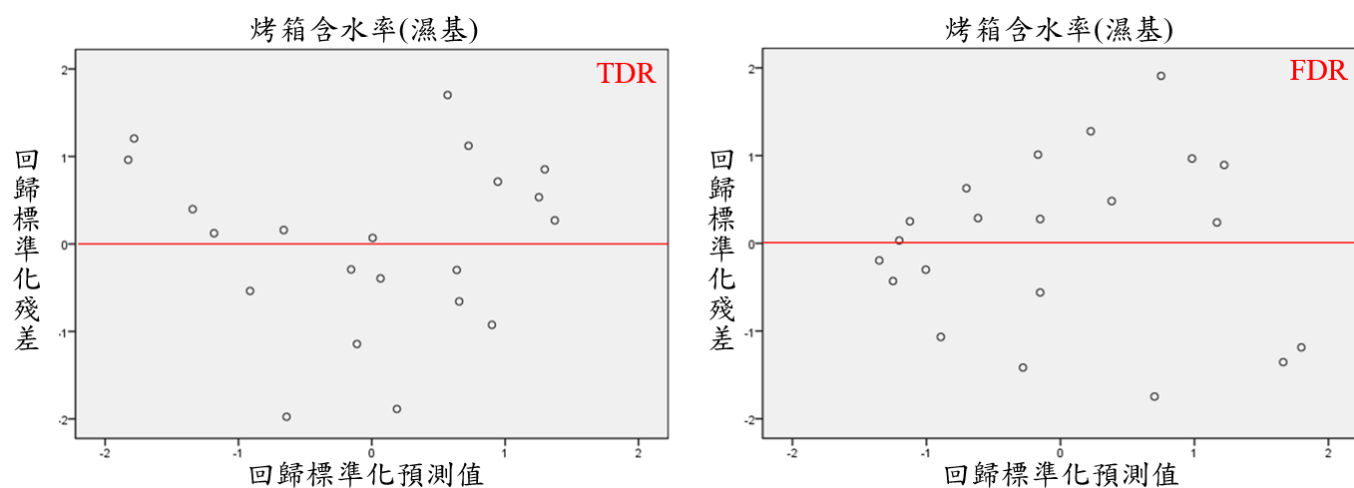


圖 16、紅豆 TDR/FDR 殘差圖

Fig. 16 Residual plot for red bean detected by TDR/FDR

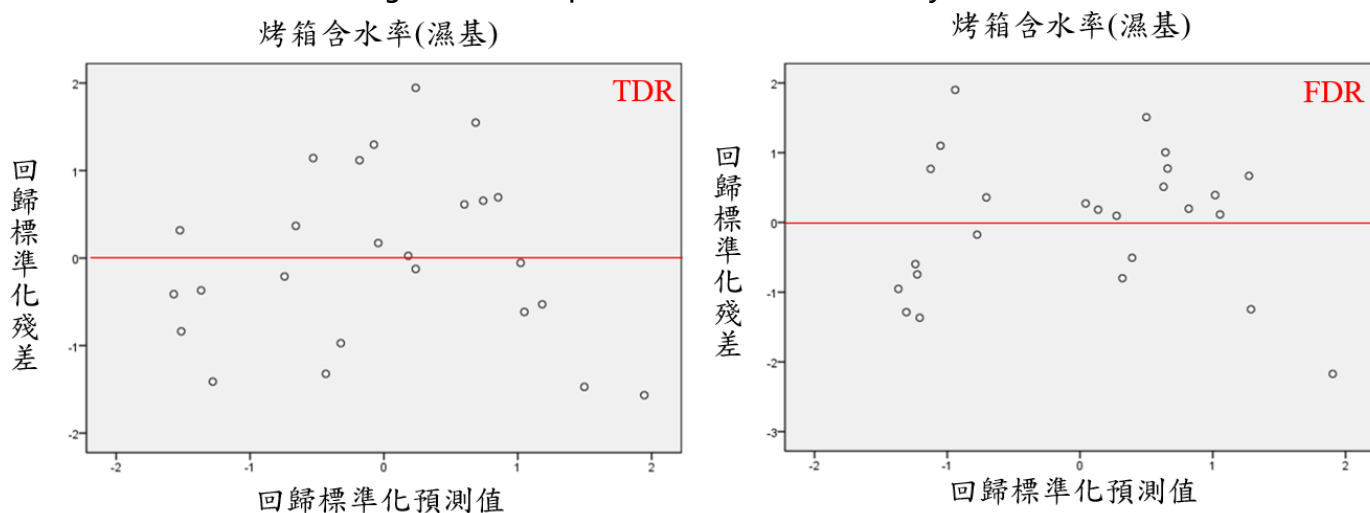


圖 17、黃豆 TDR/FDR 殘差圖

Fig. 17 Residual plot for soybean detected by TDR/FDR

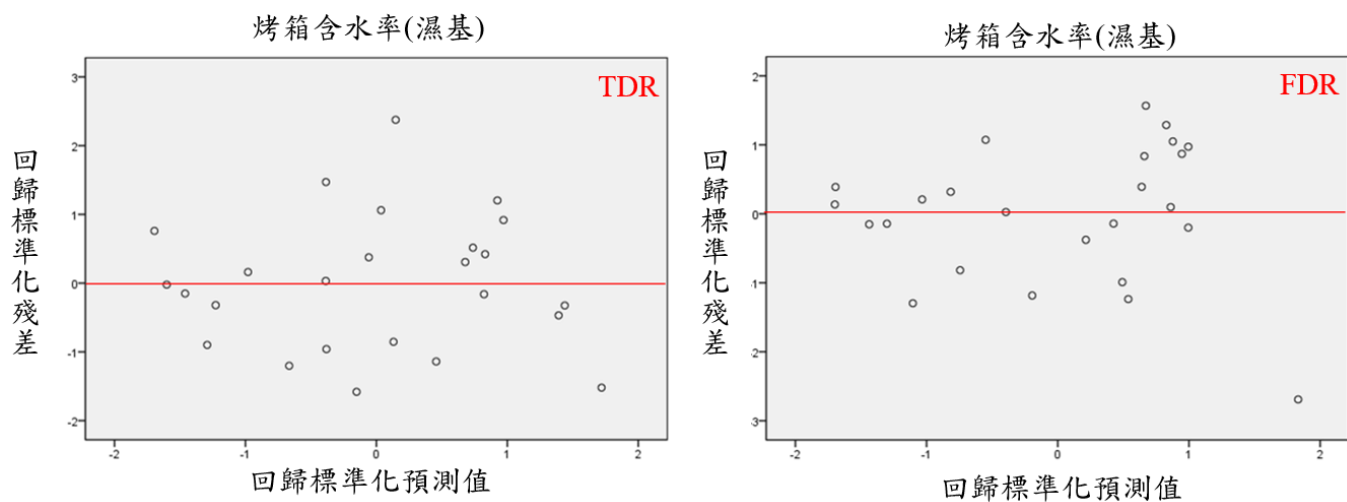


圖 18、毛豆 TDR/FDR 殘差圖

Fig. 18 Residual plot for edamame detected by TDR/FDR



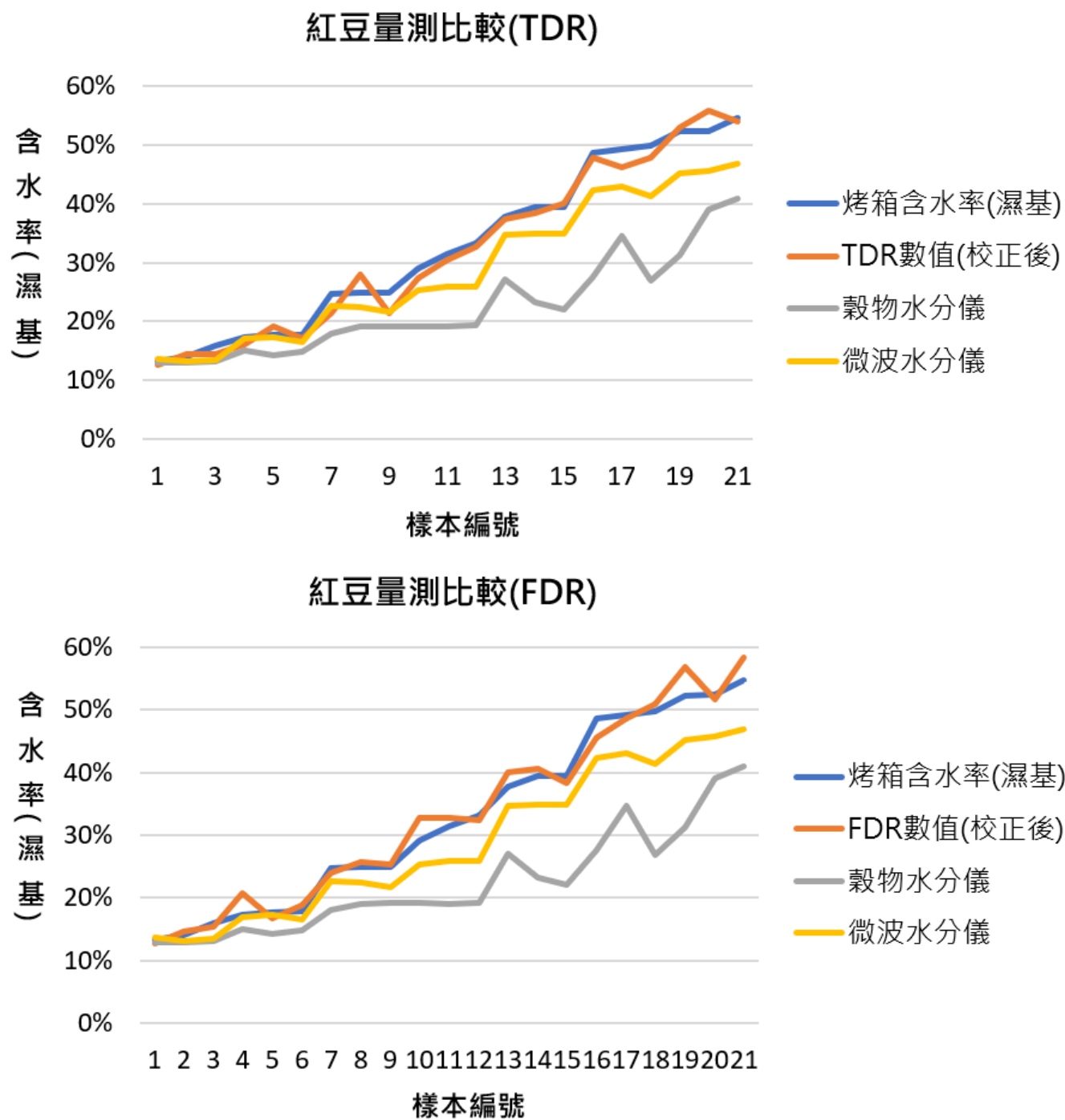


圖 19、紅豆 TDR/FDR 量測與市售含水率量測儀比較

Fig. 19 Measurement performance compared among TDR/FDR technology and grain moisture meters for rea bean

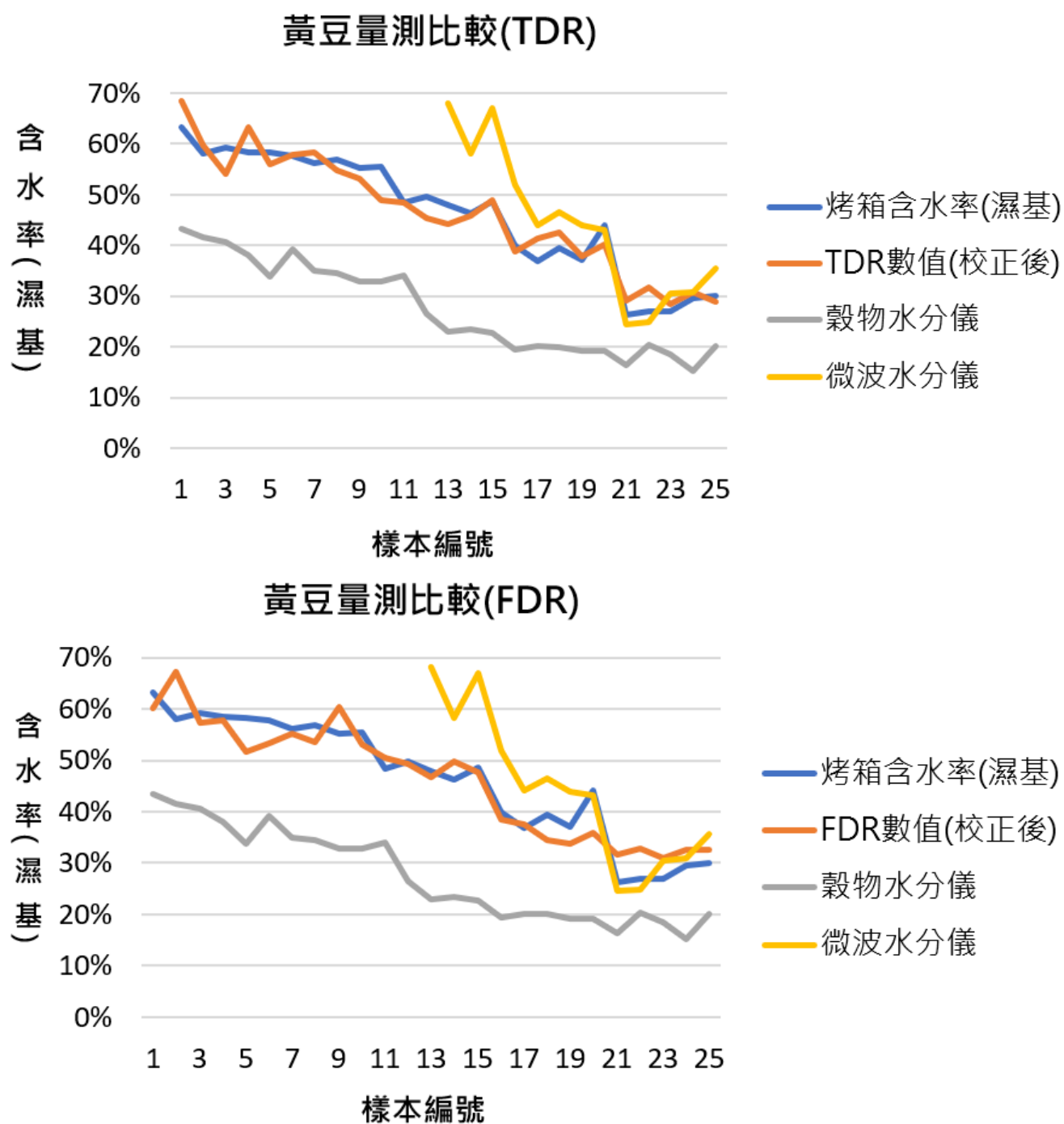


圖 20、黃豆 TDR/FDR 量測與市售含水率量測儀比較

Fig. 20 Measurement performance compared among TDR/FDR technology and grain moisture meters for soybean

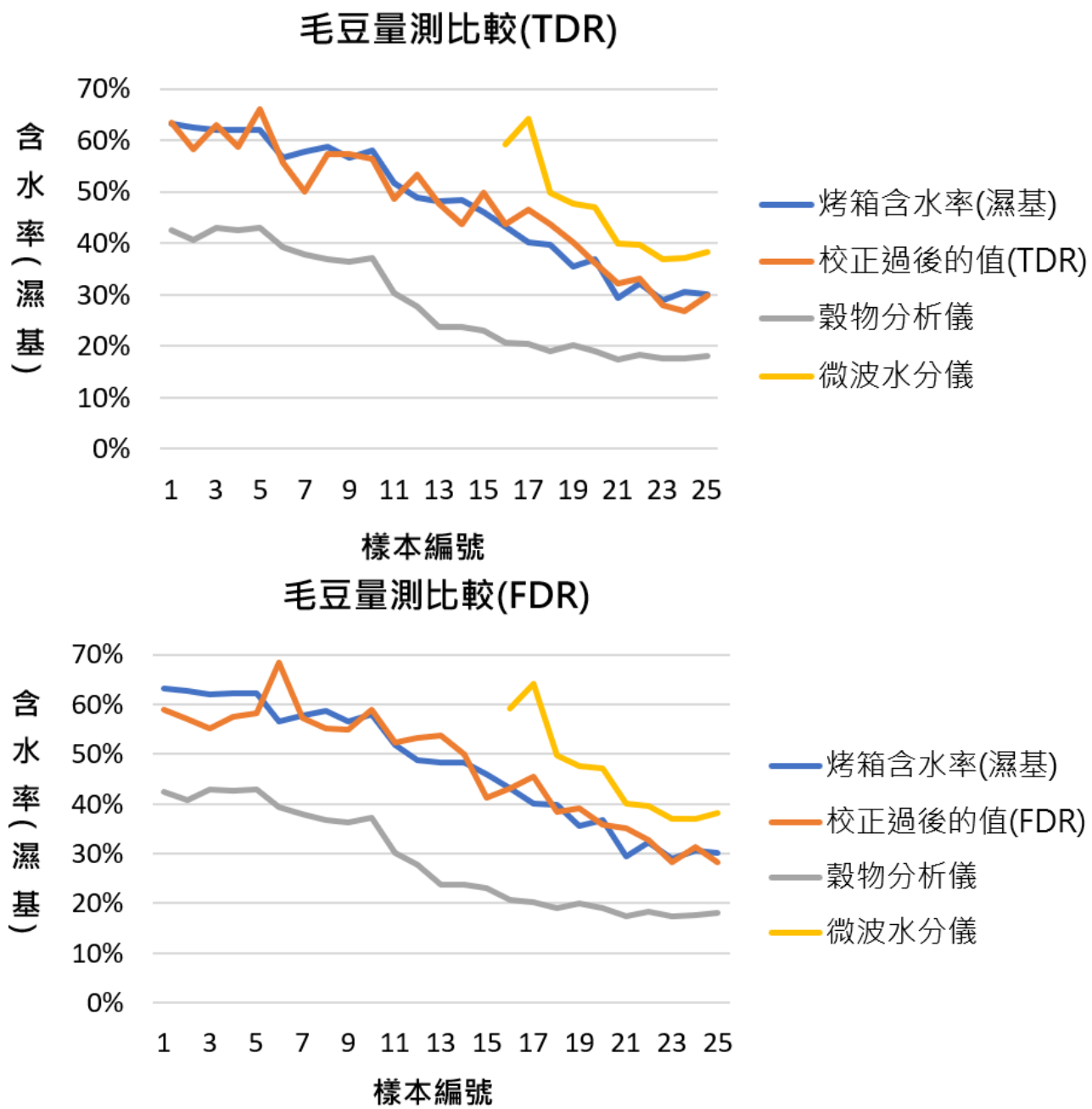


圖 21、毛豆 TDR/FDR 量測與市售含水率量測儀比較

Fig. 21 Measurement performance compared among TDR/FDR technology and grain moisture meters for edamame



圖 22、含水率系統頁面(a)含水率量測系統主頁面(b) 含水率量測系統功能選擇頁面

Fig. 22 User' s interface of the developed system (a) main operation page (b) function items selecting page



圖 23、檢量線設定介面 (a) 檢量線頁面(b) 檢量線數值設定

Fig. 23 Interface page for calibration equations (a) online calibration equations page (b) coefficient setting page for calibration equations

## 五、結論

本論文成功驗證 TDR 與 FDR 技術應用於非破壞式高含水率量測的可行性。實驗結果顯示，採用 TDR/FDR 量測技術搭配所建置對比於標準烤箱法之校正檢量曲線進行雜糧含水率檢測，判定係數  $R^2$  皆可高達 0.9 以上，並縮短雜糧含水率檢測時間至 10 分鐘以內，節省量測時間 20 分鐘以上，含水率的量測範圍則由 35% 提高至 65%。最後，根據實驗之結果，本論文除建置完成定置型雜糧水分檢測系統外，並同步進行輕量化系統的開發，期能做為雜糧現地及時含水率檢測之重要技術與標準量具選項。

## 六、謝誌

本研究感謝行政院農業委員會農糧署 108 農科-16.2.1-糧-Z2 計畫經費補助與支持。

## 七、參考文獻

- [1] 牛勝鵬 (2018)，「時間區域反射法應用於落花生含水率檢測之研究」。碩士論文。台中:國立中興大學生物產業機電工程研究所。
- [2] 許家瑞 (2019)，「使用頻域反射儀於快速檢測雜糧含水率」。碩士論文。台中: 國立中興大學生物產業機電工程研究所。
- [3] 百科知識 (2020, Jun. 21)。含水率計算公式。檢自: <https://tinyurl.com/ya4whv7r>
- [4] 陳加忠、曹之祖、雷鵬魁 (1996)，「應用電容式水份計量測濕穀含水率之研究」，農業工程學報 42(2): 79-87。
- [5] Zhang, Y. Wu, W. J. Li and Wu, G. (2011) "Research of intelligent grain moisture content measuring system based on virtual instruments

- technology," *Proc. of the IEEE Int. Conf. Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, pp.1077-1078.
- [6] Jiang, Y. and Zhang, Y., "Research on microwave measurement for grain moisture content in granary," *Proc. of the IEEE Int. Conf. Control, Automation and Systems Engineering*, pp 327-329, 2009
- [7] Mander G. and Arora, M. (2014) "Design of capacitive sensor for monitoring moisture content of soil and analysis of analog voltage with variability in moisture," *Proc. of the IEEE Int. Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, 978-1-4799-2291.
- [8] Liang, X. Li, X. and Lei, T. (2012) "A new NIR technique for rapid determination of soil moisture content," *Proc. of the IEEE Int. International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, pp.16-20.
- [9] Paul, R. M. B. Mridula, S. and Mohanan, P. (2015) "Measurement of soil moisture content at microwave frequencies," *ScienceDirect Procedia Computer Science*, pp 1238-1254.
- 

2020 年 07 月 21 日 收稿

2020 年 10 月 04 日 修正

2020 年 12 月 15 日 接受



