

# S05J 產品實驗室-點膠製程改良之實驗 設計與資料分析方法

## 期末報告

委託單位：千如電機工業股份有限公司

執行單位：國立臺北大學統計學系

計畫主持人：蘇南誠教授

共同主持人：張升懋教授、陳秉洋教授

計畫成員：韓明澄、林孟璇、侯威志

2025 年 01 月 13 日

## 計畫目標與執行概況

本計畫針對電感器製造工藝中之塗覆磁性膠體（磁膠）製程，透過統計實驗設計及分析理論，盤點製程可控因子並規劃實驗方針，透過統計建模分析實驗所收集數據，解析改良磁膠製程之關鍵因子以達成品質目標，提升 ABC-ATEC 電感器產品於全球市場之競爭力。

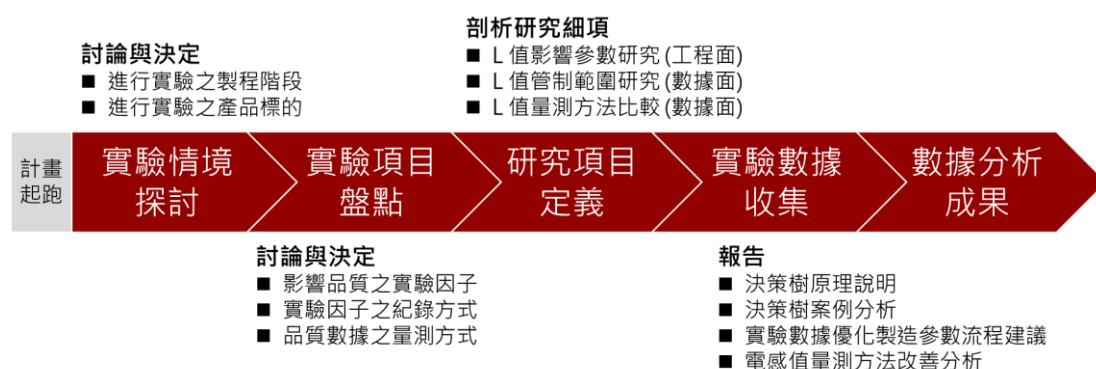


圖 1、計畫執行流程

圖 1 展示了一個完整的計畫執行過程，從「實驗情境探討」開始，基於執行時間考量，探討可行之實驗範圍，對須進行實驗之製程段及測試產品定案，為後續計畫執行制定基礎。於「實驗項目盤點」階段，基於領域專家工程專業知識，探討可能影響實驗結果的相關因子，並探討如何準確取得品質數據，根據盤點結果，在「研究項目定義」階段可明確定義本計畫的研究細項，在數據分析方面可分為兩項任務：其一為本計畫之關鍵成果，對成品電感 L 值管制範圍之研究，期望透過數據分析找出使 95% 以上產品達到感值範圍內（規格為電感 L 值 22.00uH 規格管制公差 $\pm 5\%$ ）製程控管方式；其二，由研究團隊與領域專家協作，針對成品電感 L 值之量測方式進行優化，改善過去由人工取線操作所帶來之人為變異，透過設計量測製具將量測姿態、角度、力道固定，將人為變異降至最低，忠實呈現電感 L 值量測數據，輔助前項分析取得無雜訊之實驗資料。定義完成實驗方式及目標細項後，由領域專家協助執行「實驗數據收集」階段，通過執行實驗獲得相關的量測數據至「數據分析成果」的階段，由研究團隊說明分析方法及成果，依研究細項分章節於本報告依序呈現。

## 點膠實驗資料分析

於實驗階段透過小量成本與試作樣品，嘗試各種可行之製程參數管控方式，並保留實驗過程之完整數據，透過統計分析了解最優方案，為本節育說明之重點，如何將製造經驗轉化為量產製程與機具設計的重要資訊。

### 分析方法

決策樹是一種直觀且易於解釋的機器學習方法，因其分析邏輯接近人類的決策過程且模型結構聚易解讀之視覺化效果而受歡迎，在各種實務領域中皆可見其相關應用。決策樹由兩種類型的節點所構成：

- **內部節點 (Internal Nodes)：**這些節點負責進行數據的分裂。每個內部節點會根據某一條件（例如圖中  $X_1$  是否小於臨界值  $t_1$ ）將數據分成兩部分。其中，左分支對應於條件成立（例如  $X_1 < t_1$ ），右分支則對應於條件不成立（例如  $X_1 \geq t_1$ ）
- **終端節點 (Terminal Nodes/Leaves)：**決策樹透過一系列的「如果-那麼」條件分裂，逐步將預測器空間 (Predictor Space) 劃分為不同的區域，這些區域即為終端節點，是決策樹的末端，代表分類結果的預測值（如圖中  $R_1$  到  $R_5$ ）。

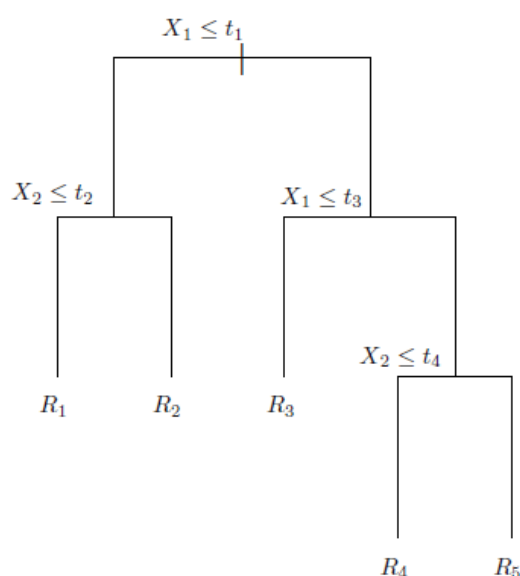


圖 2、決策樹模型示意圖

決策樹各節點分裂的目標是期待將資料分裂後可以「最大程度地降低不確定性」，從而提高模型的分類或預測準確性。另外，在實務使用情境上，一般希望分裂規則以「足以提供可供決策之方案」即可，規則數過多（模型層數高）在實務上不易應用，反之，若規則數過少則有模型準確度下降的問題，因此須將模型的複雜度控制在保持高準確度下的最精簡模型。在此雙重目標下，構建決策樹模型的具體目標函數可以表示如下：

$$\min \sum_{m=1}^{|T|} \sum_{k=1}^K \hat{p}_{mk}(1 - \hat{p}_{mk}) + \alpha|T|$$

其中，

$$\hat{p}_{mk} = \frac{1}{N_m} \sum_{i: x_i \in R_m} I(y_i = k)$$

表示在節點  $m$  中，數據屬於第  $k$  類的比例， $N_m$  為節點  $m$  中的樣本數； $K$  為分類的類別數； $T$  表示樹的節點集合， $\alpha|T|$  是用於控制樹的複雜度的正則化項，其中  $\alpha$  是超參數，表示對樹大小的懲罰力度。此目標函數的第一項衡量了每個節點內的分類不確定性（使用 Gini 不純度的形式表示），而第二項則用於防止樹的過度生長，以避免過擬合。

利用實驗資料及決策樹方法進行製程參數優化的具體步驟如圖 3 流程圖所示，從實驗設計開始，到結果應用於實際生產，每一步驟皆環環相扣。於定義優化題目後，首先由領域專家設定須要進行實驗之因子（例如本研究中的點膠重量，以及前製程半成品之電感值）在此基礎上，執行實驗並收集品質數據（例如本研究中的成品電感值）。將各項實驗之採用的因子及量測之品質對應整理，成為實驗資料，圖 4 提供實驗資料整理後之示意圖，並進一步應用決策樹進行分析，以識別出影響品質的關鍵條件和模式。基於分析結果，可判定高良率區域，即在特定條件下，實驗或生產過程達到最佳效果的操作範圍。這些分析結果可回饋至下一次的實驗，為後續實驗定義各因子的管控規範，並得到更進一步的驗證結果，也可回饋到實際生產中，優化製程參數及提升產品質量。

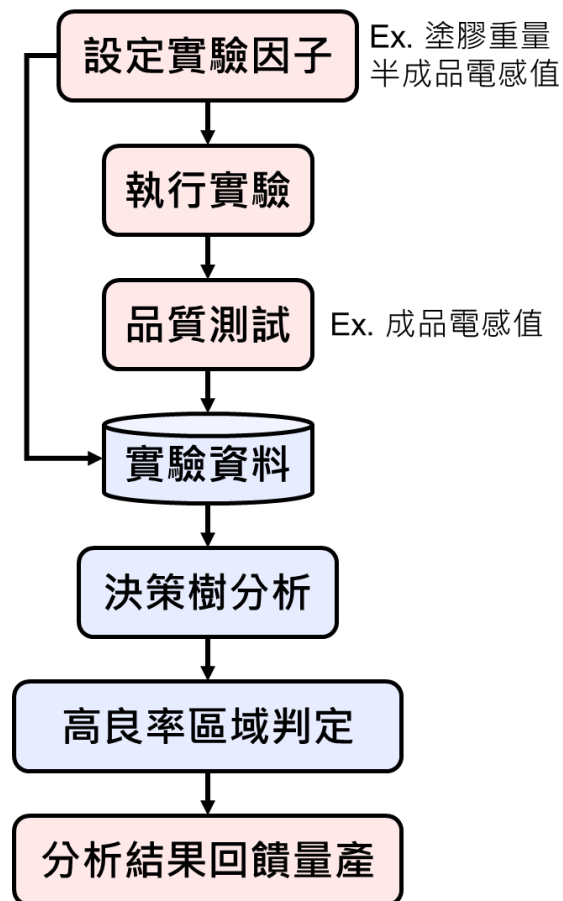


圖 3、實驗數據優化製造參數流程圖

A	半成品		成品		塗膠 重量
	電感	重量	電感	重量	
no	inproc_L	inproc_W	prod_L	prod_W	W
1	15.25	14.2	21.45	15.5	1.3
2	15.35	14.2	22.4	16.4	2.2
3	14.87	13.5	21.96	16.5	3
4	15.28	13.8	22.41	16.1	2.3
5	15.07	13.5	22.04	16.5	3
6	15.17	13.5	21.81	16.4	2.9
7	15.16	14	21.56	16.9	2.9
8	15.24	13.9	21.66	15.6	1.7
9	15.02	13.5	21.02	16.1	2.6
10	15.32	14.2	22.33	16.4	2.2
11	15.07	14.0	22.04	15.6	1.4

圖 4、實驗資料示意圖

## 分析結果

本節首先以產品 ASN2010220J2BWA1 說明使用決策樹分析點膠實驗資料，並從中解析高良率的半成品與塗膠重量之控管範圍。實驗資料如圖 5 所示，圖中每一點為一顆電桿的實驗數據，X 軸為半成品電感值（單位為  $\mu H$ ）；Y 軸為成品電感值（單位為  $\mu H$ ）並以紅色虛線標示成品品質管控界線  $22.00 \mu H \pm 5\%$  之範圍；塗膠重量（單位為  $mg$ ）以點著色深淺表示，顏色越深塗膠量則越多。從觀察圖 5 可看出，當半成品電感值較低時（約低於  $15.1 \mu H$ ），成品皆能合規，而當半成品電感值較高，則需探討點膠重量對成品是否合規之影響。

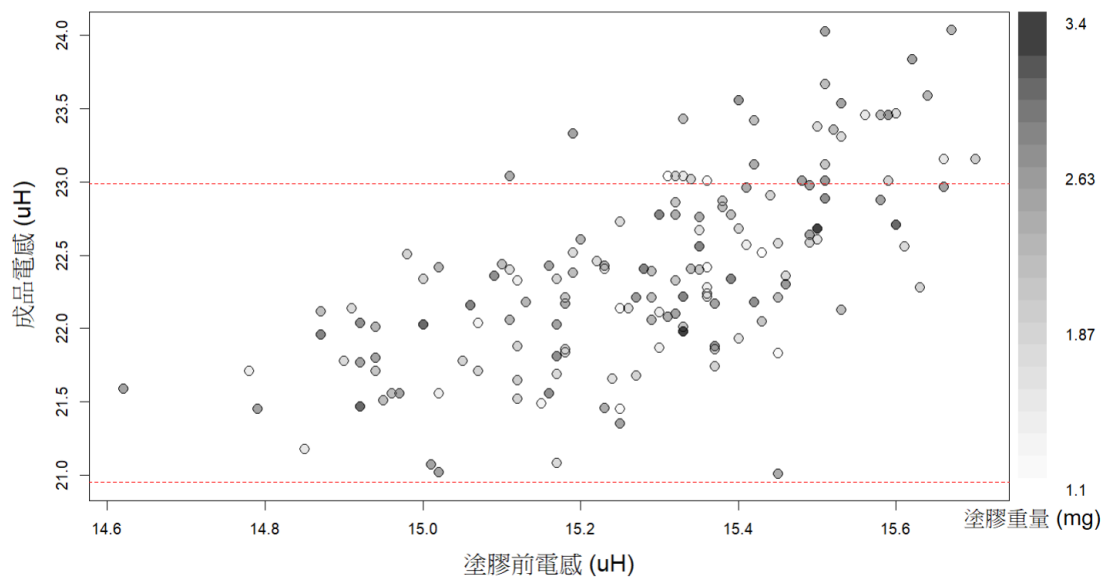


圖 5、ASN2010220J2BWA1 資料散布圖

使用前節介紹之決策樹方法分析 ASN2010220J2BWA1 實驗資料，決策樹模型圖如圖 6（圖中 inproc\_L 為半成品電感值、W 為點膠重量），決策樹模型將實驗資料分為三個良率區塊，如表 1 所示，其中高良率對應之參數範圍為：

- 半成品電感值卡控門檻 ( $14.62 - 15.51 \mu H$ )，預測良率 90%
- 半成品電感值超過門檻時，點膠重量  $2.65 - 4.20 mg$ ，預測良率接近 60%

表 1、ASN2010220J2BWA1 製程管控範圍決策樹分析結果

規則編號	半成品電感值範圍 (uH)	膠點重量範圍 (mg)	預測良率 (%)
1	14.62 – 15.51	1.10 – 4.20	90.00
2	15.51 – 15.70	2.65 – 4.20	57.14
3	15.51 – 15.70	1.10 – 2.65	17.65

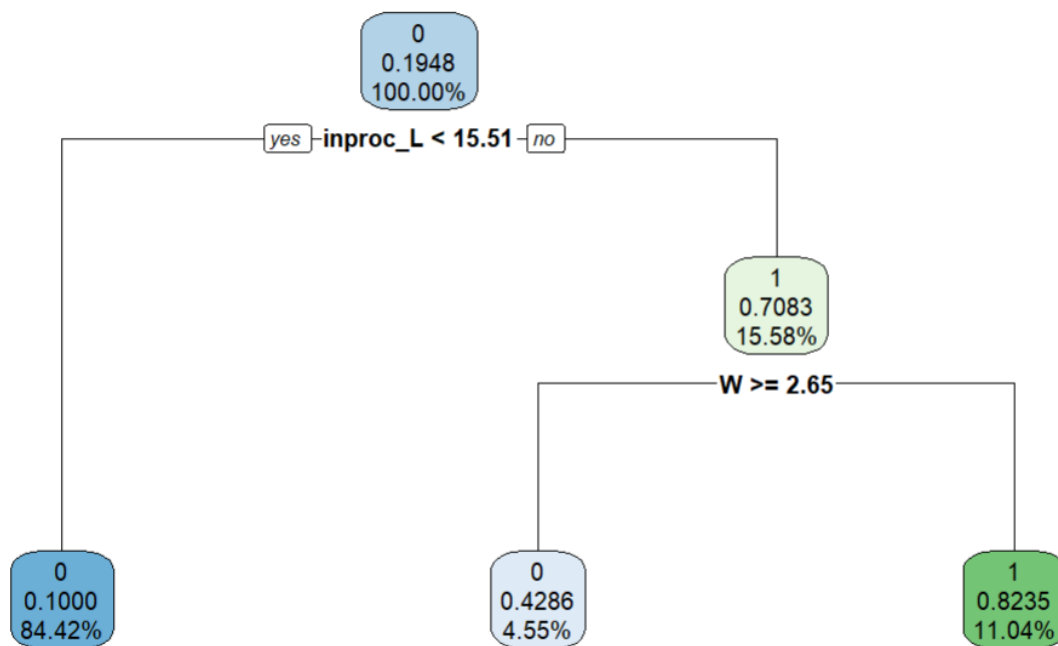


圖 6、ASN2010220J2BWA1 製程管控決策樹模型

本節另外呈現產品 MSN4020220 透過實驗及資料分析將製程參數優化之結果。該產品之實驗資料如圖 7 所示，圖形解讀方法同圖 5。從本次實驗結果可見，將半成品電感值管控於 15.78–16.66  $\mu H$  之間，且點膠重量設定於 12.7–17.6  $mg$ ，實驗結果說明此製程參數管控下之產品良率為 97%。

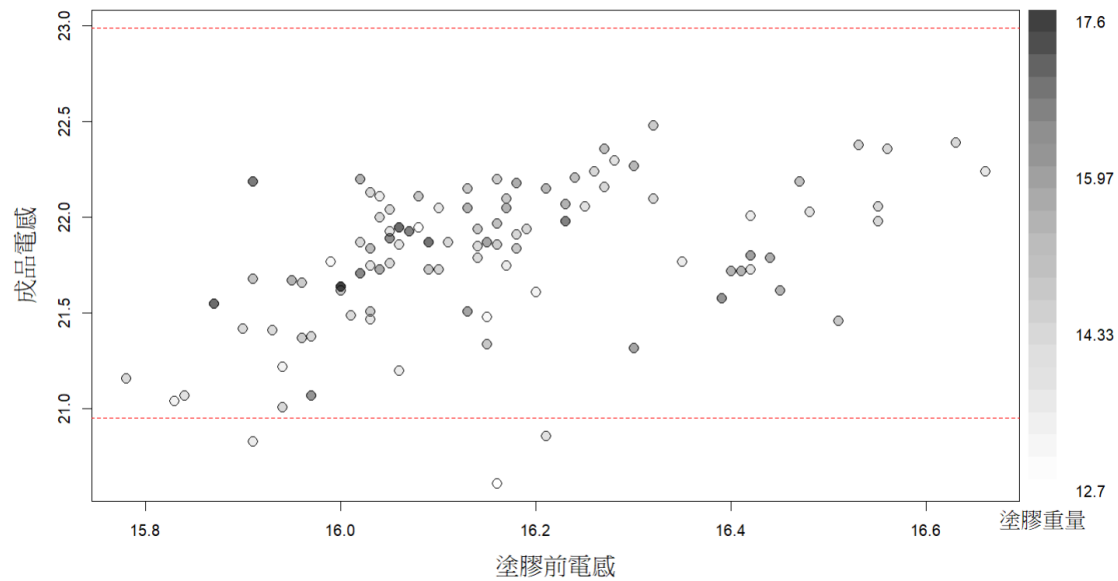


圖 7、MSN4020220 資料散布圖

## 電感值量測手法改善分析

實驗階段的電感值量測手法為人工施作，人員量測時的姿態、角度與力道等皆有可能對品質數據產生額外且不必要之量測變異，進而製造製程不穩定的假象。解決量測變異之常用手法為設計特殊專用之夾製具進行品質量測，將人為因素降至最低，透過量測改善提升防呆等級後，操作速度與穩定度皆能提升，忠實呈現品質數據，且可為未來量產製程中檢測流程設計留下寶貴經驗。本節針對前節之實驗情境，由領域專家設計夾製具收集品質數據，以統計檢定方法分析夾製具量測之數據變異是否相對於人工量測存在明顯改善。

圖 8 為人工量測電感值之實驗室現場施作照片，人員以手工操作測試線量測，此時不同量測人員可因其操作熟悉程度而影響量測精準度。圖 9 為量測手法改善後，使用夾製具量測電感值之施作照片，將待測電感置於測試桌並以夾製具固定電感，下壓手把時，透過製具之機件結構達成同方向、同角度之電感量測，量測精準度便可不受操作人員經驗影響。



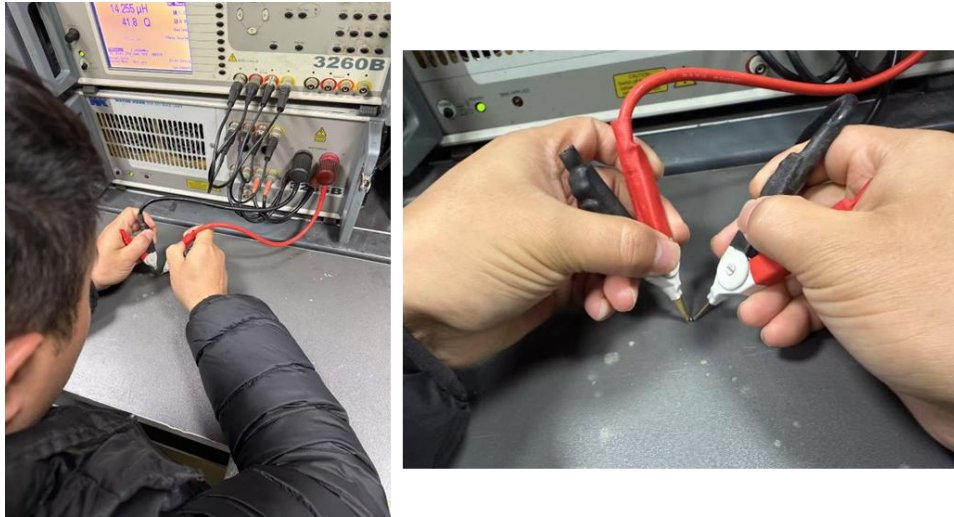


圖 8、人工量測電感值之量測方法

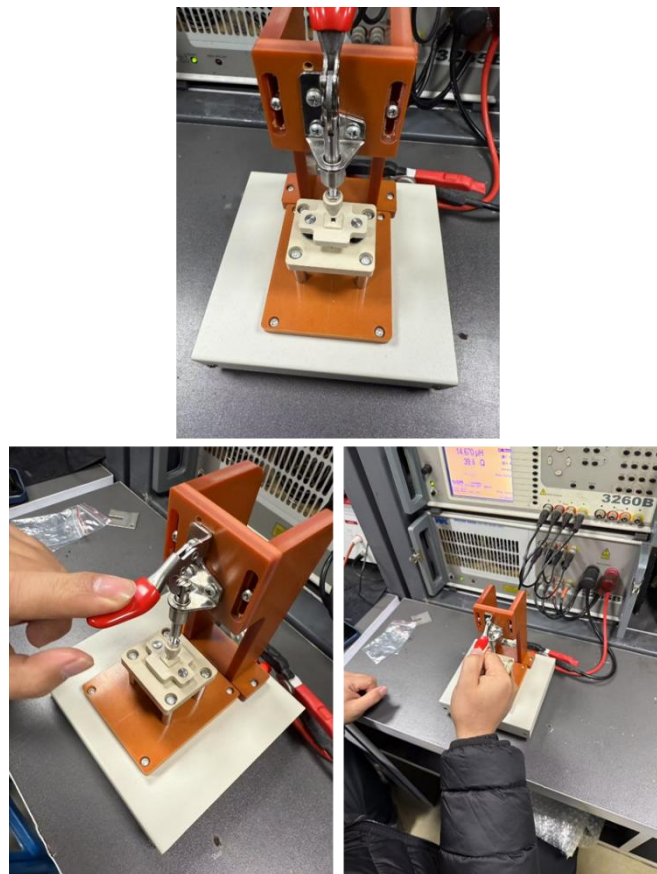


圖 9、使用夾製具量測電感值之量測方法

欲研究夾製具量測之數據變異是否相對於人工量測有所改善，本節之實驗方式如下：首先於實驗現場隨機取樣 154 顆電感，選取一位操作人員來執行量測手法比較實驗，針對每一顆電感皆執行 3 次手工量測電感值、3 次製具量測電感值，並將量測結果紀錄。接著進行資料前處理，同樣針對每一顆電感的各三筆量測電感值分別計算變異數，即每一顆電感各有一筆手工量測變異數（計算自該電感的 3 次手工量測）以及一筆製具量測變異數（計算自該電感的 3 次製具量測）。

此時便可利用統計檢定比較各有 154 筆的手工量測變異數及製具量測變異數。在此，因每顆電感因其材料、製程等的些微差異，各電感的感值略有不同，在統計上應將 154 顆電感視為區集效果，將因電感不同造成之感值不同的因素抽離統計分析，真實呈現量測手法對感值穩定性（變異數）的差異。因此，所使用之統計檢定方法為成對樣本 T 檢定，令  $X_1$  為使用製具量測電感三次之數據變異數， $X_2$  為使用手工量測電感三次之數據變異數，且定義  $d = X_1 - X_2$ ，此檢定之假設為

$$\begin{cases} H_0 : d = 0 \\ H_1 : d < 0 \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} H_0 : \text{製具量測與手工量測之數據穩定度無差別} \\ H_1 : \text{製具量測較手工量測更能穩定量測數據} \end{cases}$$

針對  $n = 154$  筆實驗資料，給予樣本編號  $i = 1, 2, \dots, 154$ ，令  $X_{1i}$  為第  $i$  顆電感使用製具量測三次之數據變異數， $X_{2i}$  為第  $i$  顆電感使用手工量測三次之數據變異數，計算第  $i$  顆電感於製具量測及手工量測變異數之差  $d_i = X_{1i} - X_{2i}$ ，成對樣本 T 檢定之檢定統計量為

$$T = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}}$$

其中，

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \text{及} \quad S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$$

當虛無假設  $H_0$  成立時，此檢定統計量  $T$  服從自由度為  $n-1$  之  $t$  分布，在指定常用之顯著水準  $\alpha = 0.05$  下，若從實驗資料計算而得之  $p$ -value 小於顯著水準，則表示此時的  $\bar{d}$  值應遠小於 0，也就是製具量測明顯較手工量測穩定。

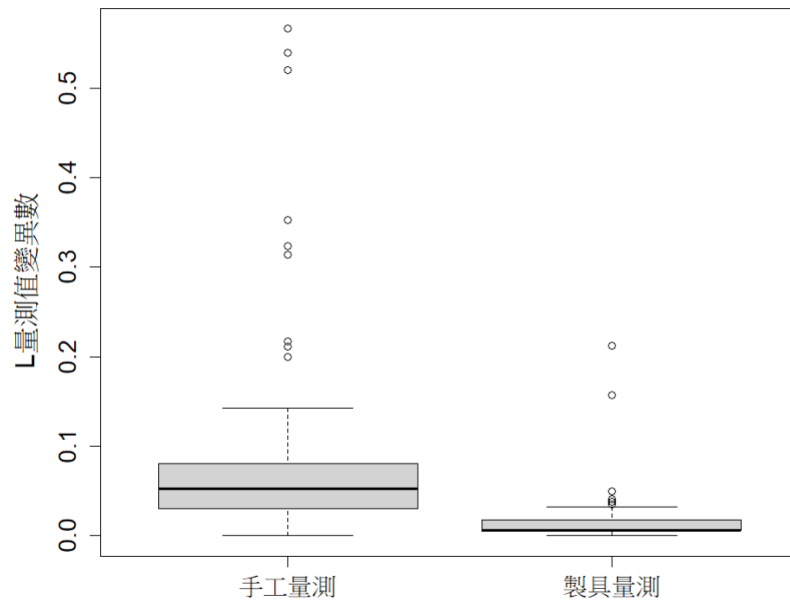


圖 10、手工量測與製具量測之量測變異數分布盒鬚圖

實驗資料之視覺化結果如圖 10 盒鬚圖 (boxplot) 所呈現，圖中 Y 軸為三次電感值後所計算之量測變異數，此圖分別呈現手工量測與製具量測之量測變異數的數值分布，肉眼可見製具量測的變異數明顯較手工量測之變異數低。透過前段描述之成對樣本 T 檢定可得 P-value 為  $1.74 \times 10^{-13}$ ，為極度接近 0 之數字且小於常用之顯著水準  $\alpha = 0.05$ ，表示此實驗結果得到之結論：製具測量之電感值顯著地較手工測量之電感值穩定，得到統計推論之支持。