

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：環 境 學 科

組 別：高 中 組

作品名稱：斜面漸降式蓄水軌道盆栽之結構設計
與實驗探討

關 鍵 詞：牛頓力學、土壤濕度、園藝

編 號：

斜面漸降式蓄水軌道盆栽之結構設計與實驗探討

摘要

在新聞報導與相關的文獻探討中，曾經提到當盆栽壁面設計螺旋式的蓄水軌槽時，可以有效地增加土壤的濕度以達到蓄水的功效。為了定量探討這樣的物理現象，我們這一組成員利用「牛頓力學」相關的理論分析與「電子土壤分析檢測儀」來設計與觀察「斜面漸降式蓄水軌道」對土壤濕度與酸鹼值的影響，並從中計算其函數關係。從實驗的分析結果，我們可以觀察到：當盆栽內部壁面設計蓄水軌槽時，會有效地提升土壤的濕度值，且在斜面軌槽仰角達5度時，會提供植株最佳的溼度環境以輔助其成長。此外，我們也將土壤濕度對時間的函數關係以4次的多項式函數(Polynomial)展現出來，並以力學的模式來加以解釋。最後我們也希望這樣的實驗結果與數據能提供給喜愛園藝的民眾與植株盆栽製造商一個參考的依據。

關鍵字：牛頓力學、土壤濕度、園藝。

ABSTRACT

Based on news reports and literature discussions, it can effectively increase the humidity of the soil when the spiral water storage rail is designed on the surface of the pot. To investigate such physical phenomena quantitatively, the "Newtonian mechanics" and "soil analysis detector" are used to analyze the effects of falling slope rail on soil moisture and pH value. Moreover, the functional relationship between them is also systematically studied at the same time.

According to the experimental results, the humidity of the soil can be effectively raised when the water storage rail is designed on the pot. Furthermore, it will provide the best humidity environment to assist plant growth when the elevation angle of the rail reaches 5 degrees.

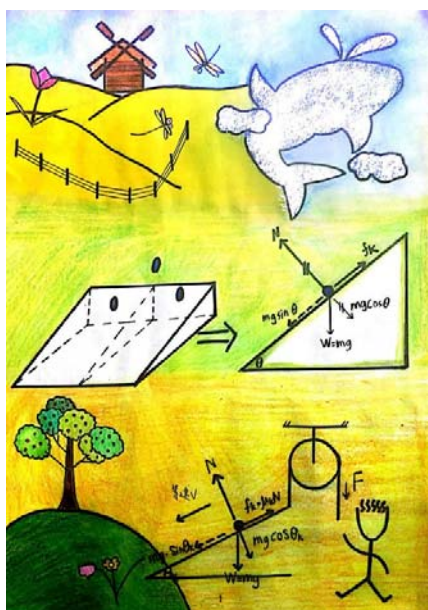
Therefore, based on the preceding experimental results and analyses, we also show the soil moisture as a function of time as a polynomial function of degree 4. Finally, we made a brief summary and provided the dynamic model to explain the phenomena. It is my hope that the researches in this paper may be helpful to the people who love gardening and pot manufacturers.

壹、研究動機

倚靠在書桌旁，看著窗外綠意盎然的一片翠綠，金門這座國家公園真的好美！剛好就跟桌上英文雜誌所提到的「gorgeous」這個字彙相互輝映，頓時課務上的煩憂消失殆盡，所感受到只有心曠神怡的寧靜與感動。

金門的美，不僅在於造物者所成就的自然美景，同時金門民眾對於園藝盆栽的植株，也具有獨特的熱情與美感，而這樣的人工造景也成為金門家家戶戶的另一種美。

然而，在霧季過後的金門，會有一段較為乾旱的時節，這時候盆栽的蓄水性能就顯得格外地重要，每每看到生氣盎然的園藝美景因環境乾旱的因素而枯萎、凋謝，心頭總是感到萬般的不捨與難過，因此腦海裡便開始萌生起改善盆栽蓄水性能的念頭與想法，底下圖一為蓄水盆栽設計之初的隨筆手札與軌槽設計圖。



圖一、蓄水盆栽設計之初的隨筆手札與軌槽設計圖

喜歡自然、喜歡探索生物之美的我，開始蒐集各類的文獻與參考資料，並希望在本篇研究主題中，發揮自己美術、工藝的巧思，搭配力學的相關原理，來設計一個「斜面漸降式」的蓄水軌道盆栽，並希望藉由這樣的設計，能讓喜愛園藝的民眾們利用簡單、環保的材料來製作屬於自己的盆栽，並期許這樣的設計能在乾旱的季節中發揮最大的蓄水成效，提供給盆栽植株一個最佳的生長環境，我想這就是我們這組成員做這份報告的初心與動機吧！

貳、設計原理

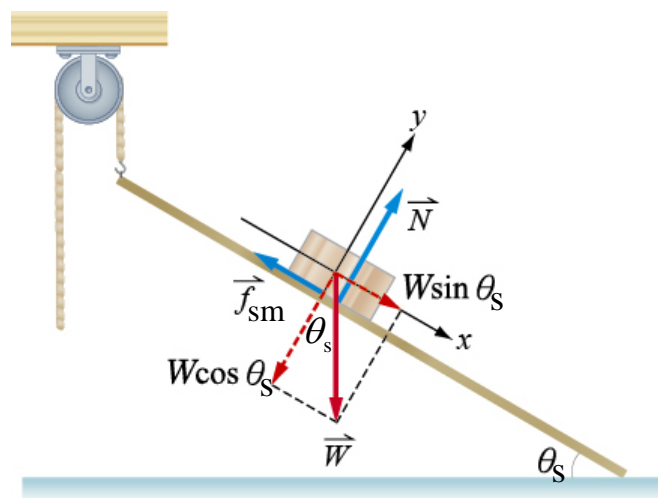
1. 在探索本次主題的過程中，我們嘗試利用防水材質的 PP 板來製作暨廉價又環保的植株盆栽，其結構設計如下圖二所示。從圖中我們可以觀察到，在紙盆栽的內緣壁面上，我們設計有斜面式的階梯由高而低地環繞著壁面徐徐落下，而這樣的設計正是利用斜面的力學結構特性[1]來達到簡易蓄水的效果，接下來我們就先針對「斜面」相關的物理特性做進一步的分析與介紹。



盆栽結構為長 20 公分、寬 20 公分及高 15 公分的立體模板；而蓄水軌道為長 10.3 公分、寬 2 公分及高 1 公分的流道

圖二、斜面漸降式蓄水軌道盆栽之結構設計圖

2. 靜力學之實驗模型：在本次的實驗分析中，斜面的力學結構設計是我們的實驗核心主軸，因此我們先簡單介紹「斜面」的物理相關特性，其示意圖如下圖三所示[2]。



圖三、斜面之力學結構分析圖

3. 在圖三的力學結構設計中，我們將重量為 W 的物體置放於仰角為 θ 的斜面上，並令平行斜面的方向為 x 軸；而垂直斜面的方向為 y 軸。由靜力學的分析中，我們可以知道：物體在斜面上共受三個力的作用，分別為物體所受的重力 W 以及斜面作用於物體的正向力 N 與摩擦力 f 。為了探究物體在斜面上的運動狀況以及測量物體與斜面間的靜摩擦係數 μ_s ，我們將物體所受的重力分解為平行斜面方向的 $W\sin\theta$ 與垂直斜面方向的 $W\cos\theta$ ，其中因為物體在 y 軸方向始終保持平衡狀態，故 $N=W\cos\theta$ 。
4. 接下來我們在定滑輪與細繩的輔助作用下，我們可以將斜面的仰角 θ 從 0° 逐漸提升。從理論與實驗的分析中，我們都可以觀察到，當斜面的仰角提升至傾斜角 θ_s 時，斜面上的物體將會由原先的靜止狀態開始滑動，這時物體所受的摩擦力為最大靜摩擦力 f_{sm} 。由靜力學的相關理論中[3]我們可以知道： $f_{sm}=\mu_s \times N$ ，其中 μ_s 為該物體與斜面間的靜摩擦係數，且由於物體在啟動瞬間，其 x 軸方向依舊保持平衡狀態，故我們可以得到 $f_{sm}=W\sin\theta_s$ 之力平衡方程式。
5. 從上述的分析中，我們可以整理出如下的數學方程式：

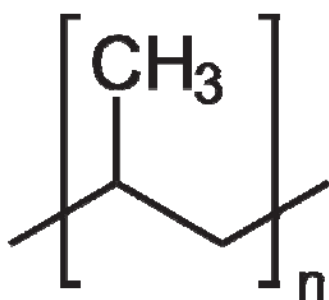
平行斜面方向的力平衡方程式： $f_{sm}=\mu_s \times N=W\sin\theta_s$(1)

垂直斜面方向的力平衡方程式： $N=W\cos\theta_s$(2)

接下來我們將第(2)式的 N 代入至第(1)式可得：

$$\mu_s \times (W\cos\theta_s) = W\sin\theta_s$$

故 $\mu_s = \tan\theta_s$(3)
6. 從式(3)中，我們可以知道：在斜面傾斜的過程中，只要能夠測量出物體正要啟動時的傾斜角 θ_s 並求出其正切值 $\tan\theta_s$ ，則可以計算推得物體與斜面間的靜摩擦係數 μ_s ，即 $\mu_s = \tan\theta_s$ 。
7. 本次實驗的主要材料 PP 板(聚丙烯 Polypropylene，簡稱 PP)是一種具有高耐衝擊性的熱塑性塑膠，亦是平常常見的高分子材料之一，其機械性質強韌，並可抗多種有機溶劑和酸鹼腐蝕的特性，其分子結構式如圖四所示[4]。接下來我們將利用前述的數學式來求得本次實驗 PP 板與雨滴或水珠間的靜摩擦係數 μ_s ，其實驗裝置如圖四所示。在圖四的裝置中，我們將多層長方形 PP 板重疊排列為一實驗用之斜面，並在其頂端打一細洞，且在細洞上繫一質量極輕之細繩以用來抬升斜面傾斜之角度。



圖四、PP 板(聚丙烯)之分子結構示意圖

8. 在測量 PP 板與水珠間的靜摩擦係數 μ_s 的過程中，我們參考一般下雨或噴灑澆水的水珠體積(以圖五的小滴管測量並平均量得)，將約莫 1 毫升的水滴滴落於 PP 板斜面上，並將斜面頂端的細繩搭配定滑輪逐漸緩慢地拉起，以致使斜面的仰角 θ 逐漸地加大。此外，我們並利用量角器測量斜面抬升時之仰角 θ 。從實驗中我們可以發現到：當斜面上的水珠正要滑動時，我們可以量得一組斜面仰角的數據，並令此時的仰角數據為傾斜角 θ_s ，我們重複進行該次實驗十次，並將其記錄以取得傾斜角 θ_s 之平均值 $\theta_{s,ave}$ ，其實驗數據如表一所示。從實驗數據中我們可以觀察到，所測得之傾斜角 θ_s 幾近落在 3 到 4 度的小角度之間，且其平均值為 3.3° 。

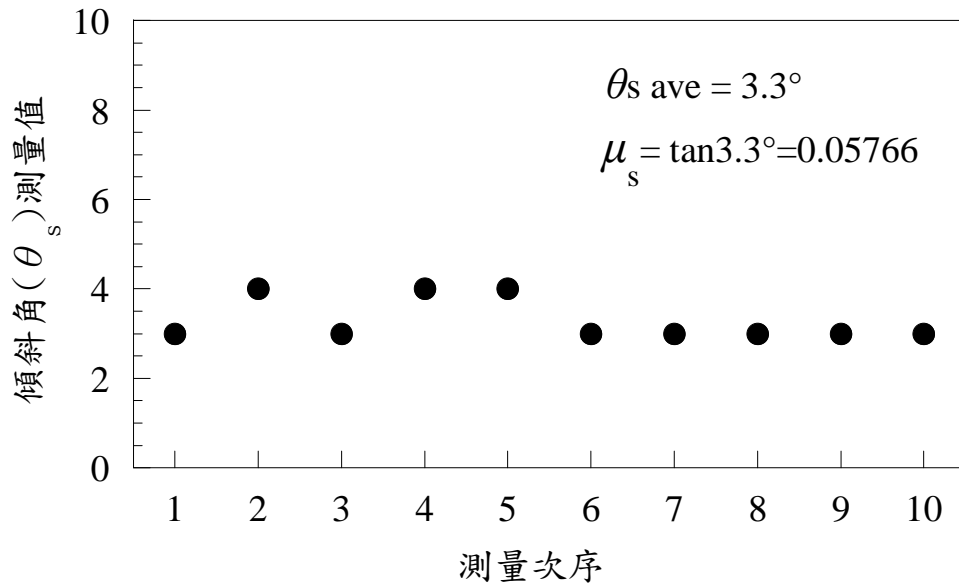


圖五、盆栽用 PP 板與水珠間靜摩擦係數 μ_s 之測量裝置圖

表一、在不同測量次序下，所測得傾斜角 θ_s 的角度測量值

| 測量次序 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | (1 ml 水珠) |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| 傾斜角 θ_s | 3° | 4° | 3° | 4° | 4° | 3° | 3° | 3° | 3° | 3° | 平均值 $\theta_{s,ave}=3.3^\circ$ |

9. 我們將表一所得到的傾斜角(θ_s)測量值設定於 y 軸上，而將測量次序分佈於 x 軸，可得到如下圖六之函數分佈曲線。從圖六中我們可以觀察到，所測得之傾斜角 θ_s 並無太大的劇烈變化，我們將所求得之平均值 $\theta_{s\text{ ave}}$ 取正切值，並利用前述(3)的數學關係示，可順利獲得 PP 板與水珠間的靜摩擦係數 $\mu_s = \tan \theta_{s\text{ ave}} = \tan 3.3^\circ$ ，其數值可利用工程用計算機求得為 0.05766。



圖六、傾斜角(θ_s)測量值對測量次序之函數關係圖

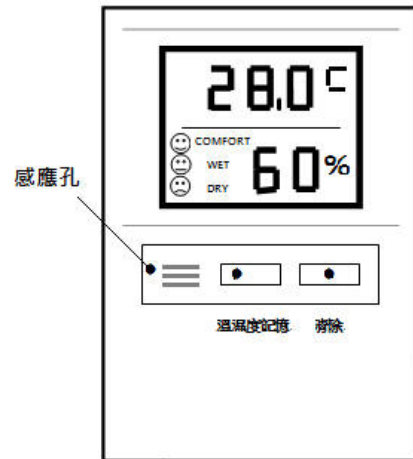
10. 從以上的實驗數據我們可以知道，相較於雨滴僅受重力落於盆栽土壤中，落於斜面上的雨滴或水珠因受重力分解以及摩擦力之因素，可具有簡易的蓄水功效，且為了讓水珠順利於斜面滑軌中流動，斜面之仰角需大於前述實驗所求得之傾斜角 θ_s (平均為 3.3°)，故我們在接下來的實驗探討中，我們採取一組對照組(盆栽內壁無斜面滑軌之設計)以及三組實驗組(盆栽內壁具有斜面滑軌，且其仰角分別以等差的方式設計為 5° 、 10° 以及 15°)進行蓄水性能的比較，並藉此求得其結構設計的最佳值，而其實驗步驟與分析將在接下來的文章中進行討論。

參、研究過程

1. 為了探索「斜面滑軌」對盆栽蓄水效能所造成的影響，我們設計了如下的實驗裝置與測量儀器，如圖七與圖八所示，其中包含利用「電子土壤分析檢測儀」來定量觀察蓄水軌道對土壤濕度與酸鹼值的影響，以及應用溫、濕度計來記錄實驗時環境的相關變因，以期達到測量數據的客觀性與準確性。



圖七、實驗裝置與測量儀器



圖八、溫、濕度計之結構示意圖

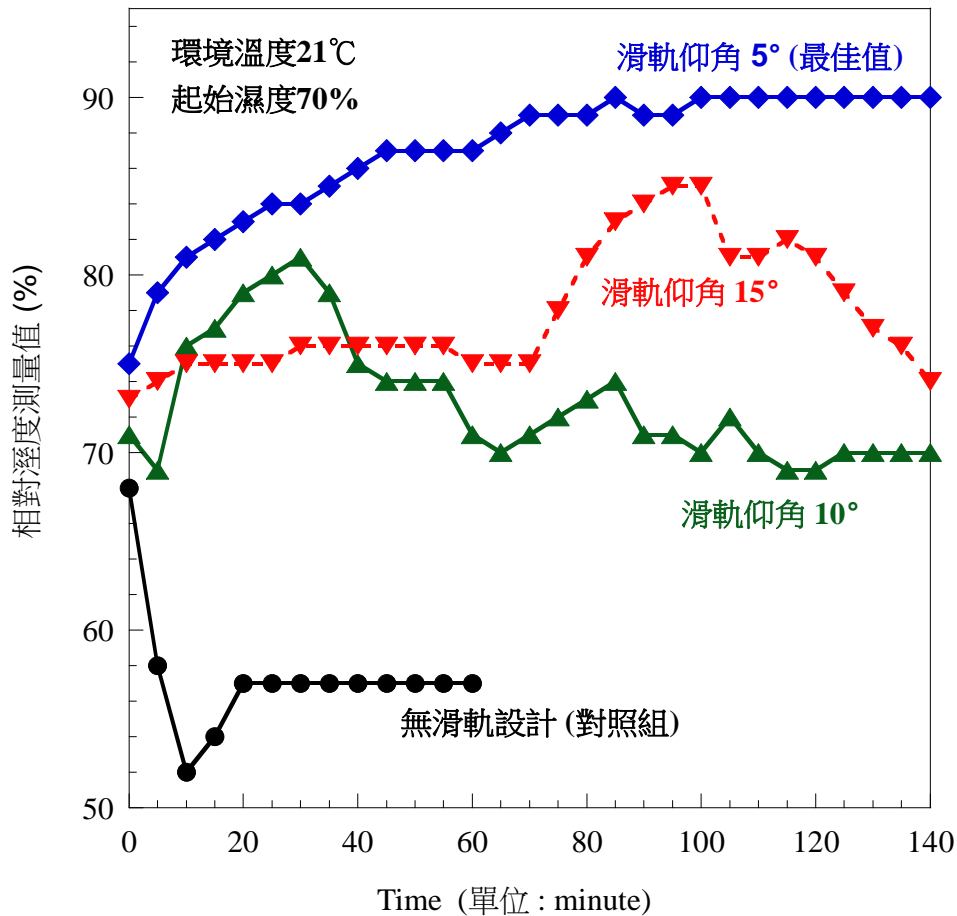
2. 在實驗進行的過程中，為了不受到環境因素的影響，我們各組實驗盆栽都固定在溫度為 21°C，且起始相對濕度約略為 70% 的條件下(約莫噴灑 15 毫升的水滴)進行測量。
3. 在接下來的分析與討論中，「相對溼度」是我們重點測量的物理量，故在此我們也針對「相對溼度」這個物理量在學術上的定義做詳細的介紹，其內容如下[5]：

所謂「相對濕度」是指在一定的環境溫度下，空氣中所含的實際水氣量與該溫度下飽和水氣量的比值，其數學計算式如下：

$$\text{相對溼度} = \frac{\text{實際水氣含量}}{\text{飽和水氣量}} \times 100\% \dots\dots\dots \text{相對濕度數學計算式}$$

由上述的定義及數學計算式我們可以知道，環境的潮濕程度可以「相對濕度」來表示，當相對濕度愈高時，則代表此時環境愈潮濕。

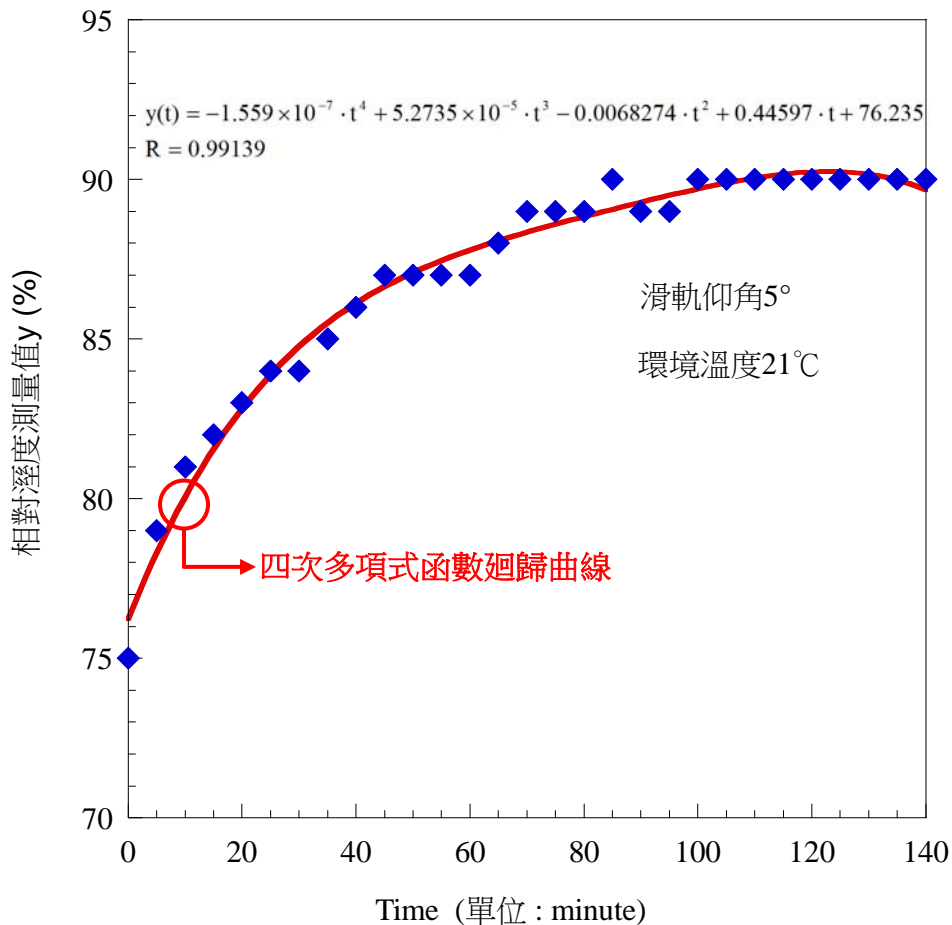
4. 在實驗中，我們採取一組對照組(盆栽內壁無斜面滑軌之設計)以及三組實驗組(盆栽內壁具有斜面滑軌，且其仰角分別為 5°、10° 以及 15°)進行蓄水性能的比較，如圖九所示，其中我們利用「電子土壤分析檢測儀」在每經過 5 分鐘的時距下，精確地測量盆栽土壤環境的溼度與酸鹼值(pH 值)，並將其數據記錄下來以供比較分析，以期求得本次實驗中，滑軌結構設計的最佳值。此外，我們也將各組實驗的相對濕度值與時間作多項式函數(Polynomial)的迴歸分析，並求取其相關係數 R 值。



圖九、各組盆栽土壤環境溼度對時間之關係曲線圖

5. **數據分析與探討(1)**: 從圖九的數據曲線中，我們可以觀察到，在盆栽完全沒有斜面滑軌的設計下(對照組)，落入土壤的水份在很短的時間內(約為十分鐘)，即產生急劇的衰減，且其相對溼度大幅下落 17%，後因盆栽壁面的水滴落下，其相對溼度又稍稍提升約 5%而維持一穩定值，但就整體比較而言，在沒有斜面滑軌的蓄水輔助下，無滑軌設計的盆栽其水份流失最快，而蓄水效能亦是最差的一組。
6. **數據分析與探討(2)**: 此外，從圖九的曲線中，我們也可以觀察到，相對於沒有滑軌設計的對照組(水滴僅受重力落於土壤內)，另外三組有斜面滑軌設計的實驗組盆栽，其相對溼度值不但沒有降落的趨勢，且因落於斜面上的水滴受重力分解以及摩擦力的因素(請參閱圖三)，可拖緩水份流入土壤的時間，而達到具有簡易蓄水性能的功效。然而從函數圖形的探索中，我們也可以發現到，在滑軌仰角為 10°及 15°的盆栽中，因仰角過大的因素(PP 板傾斜角 $\theta_s = 3.3^\circ$)，水珠重力沿斜面的分量($W \sin \theta$)亦過大，而導致實驗後期滑軌上的水份亦快速流失而逐漸失去蓄水的性能。

7. **數據分析與探討(3)**：最後，從圖九的實驗曲線中，我們可以很明顯地觀察到，滑軌仰角為 5° 的盆栽設計擁有最佳的蓄水性能，在經過長時間(140 分鐘)的實驗測量後，其土壤的相對溼度值在斜面滑軌的輔助下，有緩慢上升的趨勢，而藉此達到節能、省水並保持土壤濕度的最佳生長環境。
8. 接下來我們針對最佳的蓄水結構設計(滑軌仰角 5°)作獨立並進一步的分析與探討，如下圖十所示。



圖十、相對溼度測量值(y)對時間(t)之迴歸分析圖(滑軌仰角 5°)

9. 從上圖十中我們可以知道，此最佳化的盆栽滑軌設計(滑軌仰角為 5°)的相對溼度測量值(y)會隨著時間(t)的進行而逐漸提昇，我們將兩者的關係以四次的多項式函數(Polynomial)做迴歸分析，可以得到底下的數學方程式(其相關係數 R 趨近於 1)：

$$y(t) = -1.559 \times 10^{-7} \cdot t^4 + 5.2735 \times 10^{-5} \cdot t^3 - 0.0068274 \cdot t^2 + 0.44597 \cdot t + 76.235$$

10. 從上列的方程式，我們即可推導出該最佳化的盆栽結構設計在不同的時間點下，其相對溼度值的分佈關係，在此也提供給喜愛園藝的民眾與植株盆栽製造商一個參考的依據。

肆、研究結果

金門民眾對於園藝盆栽的植株，具有獨特的熱情與美感，而這樣的人工造景也成為金門家家戶戶的一種美。

然而在霧季過後的金門，會有一段較為乾旱的時節，此時盆栽的蓄水性能就顯得格外地重要，因此我們這一組成員開始蒐集各類的文獻與參考資料，並希望發揮自己美術、工藝的巧思，搭配力學的相關原理，來設計一個「斜面漸降式」的蓄水軌道盆栽。

在本次的實驗過程中，我們嘗試利用防水材質的 PP 板(聚丙烯 Polypropylene，簡稱 PP)來製作暨廉價又環保的植株盆栽，並嘗試應用斜面的力學結構特性來探索其蓄水性能。實驗中我們發現，相較於水滴僅受重力落於盆栽土壤中，落於斜面上的水滴因受重力分解以及摩擦力等因素，可具有簡易的蓄水特性與效能。

此外，我們也利用靜力學之模型計算推導出水珠與 PP 板斜面間的傾斜角 θ_s (平均為 3.3°) 以及其靜摩擦係數 ($\mu_s = \tan \theta_{s, ave} = \tan 3.3^\circ = 0.05766$)，並採取一組對照組(盆栽內壁無斜面滑軌之設計)與三組實驗組(盆栽內壁具有斜面滑軌，且其仰角分別為 5° 、 10° 以及 15°) 進行蓄水性能的比較。

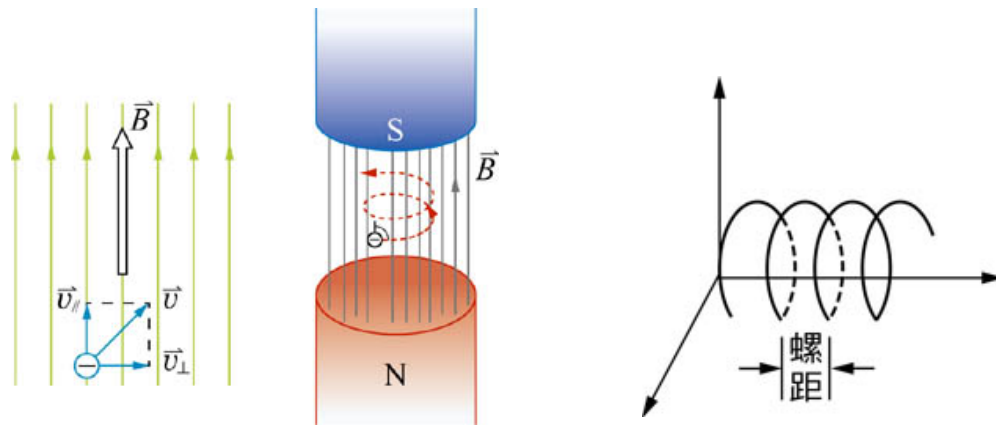
從實驗的數據曲線中，我們可以觀察到，在盆栽完全沒有斜面滑軌的設計下(對照組)，落入土壤的水份在很短的時間內(約為十分鐘)，即產生急劇的衰減，且其相對溼度大幅下落 17%；而擁有斜面滑軌設計的實驗組盆栽，其相對溼度值不但沒有降落的趨勢，且因落於斜面上的水滴受重力分解以及摩擦力等因素，可拖緩水份流入土壤的時間，而達到具有簡易蓄水性能的功效。

接下來，在實驗數據的分析中，我們可以很明顯地觀察到，滑軌仰角為 5° 的盆栽設計擁有最佳的蓄水性能，該結構設計在經過長時間(140 分鐘)的實驗量測後，其土壤的相對溼度值在斜面滑軌的輔助下，有緩慢上升的趨勢，而達到節能、省水並保持土壤濕度的最佳生長環境。

因此我們也針對最佳的蓄水結構設計(滑軌仰角 5°) 作進一步的分析與探討。我們將此結構的相對溼度測量值(y)隨著時間(t)的分佈曲線以四次的多項式函數(Polynomial)做迴歸分析，並求得其相關係數 R 值，藉此我們即可推導出該最佳化的盆栽結構設計在不同的時間點下，其溼度值的分佈關係。最後我們也希望本篇主題的研究內容與實驗數據能提供給喜愛園藝的民眾與植株盆栽製造商一個參考的依據。

伍、未來展望

1. **展望(1)**: 在本篇主題的研究過程中，我們的盆栽內壁是以「斜面」漸降的方式來達成簡易的蓄水功效。然而，在某次探索極光的單元中，我們也認識到，當帶電粒子的運動方向與磁場方向既不平行也不垂直時，其運動軌跡呈現一種「螺旋線」的路徑，如下圖十一所示[6]，有鑑於此，我們的腦海裡也萌生起這樣的一個念頭，如果我們將盆栽內壁的斜面改以「螺旋軌道」的方式來製成蓄水軌槽，是否能將盆栽的蓄水效能做更進一步地提昇？這樣的構思與想法在我的腦海中縈繞徘徊許久，然而受限於這樣的螺旋軌道設計需要更精密的工藝與製程技術，因此也成為將來我們想要探索的重心以及克服的主題。



圖十一、帶電粒子在磁場中運動所呈現的「螺旋線」路徑

2. **展望(2)**: 此外，在本篇主題的研究過程中，我們是以防水材質的PP板(聚丙烯 Polypropylene, 簡稱PP)來製作暨廉價又環保的植株盆栽以及其蓄水軌槽，然而PP板的材質較適合室內盆栽的結構設計，若要將蓄水盆栽置於室外的話，則需要硬度較高且能抗風雨的材質，因此，我們也嘗試利用陶土(或稱陶泥，是燒製陶瓷器的原料)來製成斜面漸降式的蓄水軌道盆栽。我們採用「土條成型法」來塑造陶土花盆的基礎架構，並輔以「土片成型法」來架設盆栽內壁的蓄水斜面軌槽(可得到較平滑的表面與較精準的斜坡坡度)，且在經由高溫1100度的釉燒淬鍊下，可得到完全防水的蓄水陶土盆栽，如下圖十二所示。然而由於陶土盆栽的製程過程相當地曠日費時，且陶土的礦物成份相當地複雜(主要由高嶺石、水白雲母、蒙脫石、石英與長石等組合而成)，故在本次的實驗探索中，並未針對陶土盆栽的蓄水性能與物理特性(如靜摩擦係數 μ_s)作定量的分析的探討，因此，我們這一組成員也

希望在未來的研究主題中，能有機會針對陶土盆栽的蓄水特性做進一步的認識與更深層的研究。



圖十二、完全燒結並上釉的蓄水陶土盆栽，其容器的吸水性低，且兼具有美觀與實用的功效

陸、參考文獻

1. 徐白 (2005 年 8 月二版)。普通物理。發行人：徐白。
2. 吳隆枝、李政廷 編著；曲輔良、陳昱統、李孟修、許翠珍 編修。高中點線面 學習講義 基礎物理(二)B 上 (頁 192)。出版者：南一書局企業股份有限公司。
3. 陳正昇 編著。基礎物理(二)B 上冊講義 (頁 123-124)。出版者：康熹文化事業股份有限公司。
4. 維基百科，自由的百科全書：聚丙烯(Polypropylene)的介紹，取自：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%81%9A%E4%B8%99%E7%83%AF>。
5. 游鎮烽 (2011)。基礎地球科學 (上) (初版三刷)。新北市：泰宇。
6. 吳隆枝、李政廷 編著。點線面高中學習講義 選修物理(下) (電流磁效應，頁 56 與頁 61)。出版者：南一書局企業股份有限公司。