

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 生物（生命科學）科

最佳創意獎

040706

植物維管束的電模型建構

學校名稱：臺北市私立開南高級商工職業學校

作者： 高一 陳沿菖 高二 傅聖琪 高二 楊婷伊	指導老師： 江明岳 徐 冰
---	-----------------------------

關鍵詞：維管束、電阻、電模型

植物維管束的電模型建構

摘要

植物電訊號目前已在番茄、胡蘿蔔、馬鈴薯上證實可應用作為植物的健康情形、細胞內澱粉分佈甚至於地震偵測。過去文獻研究證明，電訊號可以在細胞間內以及整株植物間藉由原生質絲以及維管束傳導。在一次進行植物電訊號偵測時，**發現**樹幹有電容特性，因此我們認為必須先找出樹幹正確的等效電路模型依據，才可正確做植物電訊息應用。然而現今研究並沒有正確的喬木維管束中等效電路模型。因此**本研究建構喬木中微管束的等效電路模型**。此外，本研究也利用實際電路模型做充放電實驗比對樹幹充放電曲線證明等效電路之正確性，以及擴大偵測樹幹橫向面積，**發現此等效電路模型符合電阻電容串聯特性，更證實本等效電路的正確性。**

壹、研究動機

一、緣起:

有天在校園跑步，無意間發現學校的松樹有枯萎凋零的現象，於是我便去觀察看看，發現學校內的松樹特別是頂端的部位開始有點枯黃，就去找了老師討論為甚麼會有這樣的情形發生。現場勘查和收集文獻後發現學校松樹枯黃的原因可能有兩種：

(一)、 可能被"松材線蟲"感染：在基礎生物生物多樣性裡面有提到松材線蟲會造成松樹枯死。也有文章指出台灣的松材線蟲是在日據時期，隨著日本琉球松的引進，松材線蟲也隨著日本琉球松夾帶入台。這種病會造成大量的傳播是因為松材線蟲會藉由宿主松斑天牛到處遷移，然後趁松斑天牛取食造成樹皮傷口之際，侵入松樹裡的組織，吸食樹裡面細胞的汁液。松樹為了防禦線蟲便會大量分泌松脂，造成維管束的堵塞。因此遭線蟲感染的松樹，針葉會呈現黃褐色或紅褐色，但並不會掉落。同時，松樹的邊材會開始失水，使得其他真菌及細菌有機會大量入侵並且繁殖，造成整株乾枯死亡。(網路資料:台灣生態教育農園協會 2012年8月15日)

(二)、 淹水導致根部腐爛枯死：由於校內花圃的底部是由水泥封死的，因此當降雨量較大且較密集時，就會因為排水不良導致松樹根部無法呼吸腐爛，終至全株枯死。針對松材線蟲感染，目前現在的治療方法都是將染病的松樹燒毀、或者以化學藥劑噴灑杜絕松材線蟲幼蟲及其媒介的傳播，雖然這些方法都有效果，但都不是最好的辦法，畢竟在校園中噴灑農藥可能會照成旁邊學生身體不適，並且影響微生物之活動，繼而影響土壤品質，對環境生態造成衝擊與破壞。因此我們想到利用將植物通電，進而對松樹中松樹線蟲電擊的方式或許可以在不影響樹木生存的狀態下根除松材線蟲。此外，我們也想到，若是可以藉由偵測電訊號的變化就能知道此樹木的健康狀態，也許就可以提早對樹木進行治療，而不是只能等到病徵明顯時才進行治療，這樣對於樹木的維護也會更有效率。在一次進行植物電訊號偵測時，突然發現樹幹有電容特性，然而為了要進行有關電訊號的實驗，必須先建立樹木的等效電路模型，

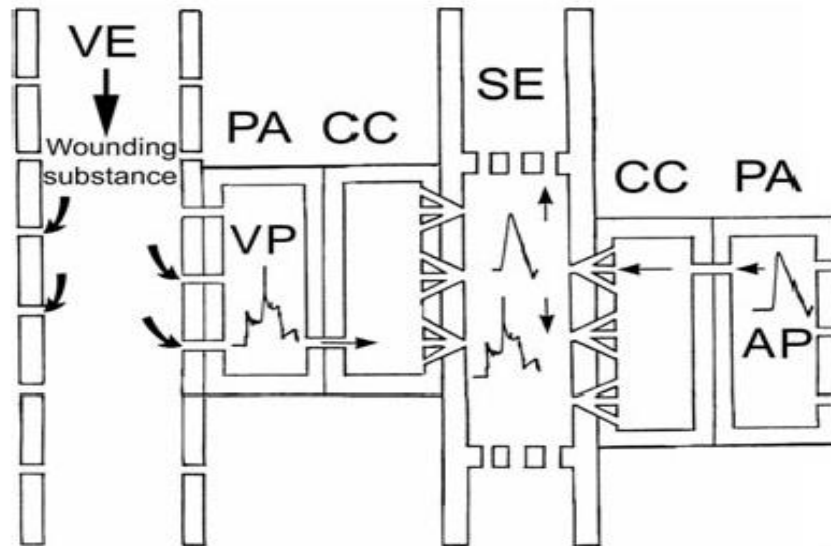
才可正確做植物電訊息應用。因此跟老師討論過後，我們決定嘗試用基礎物理中學到的電學原理來建立植物維管束的等效電路模型。

二、植物電訊號研究:

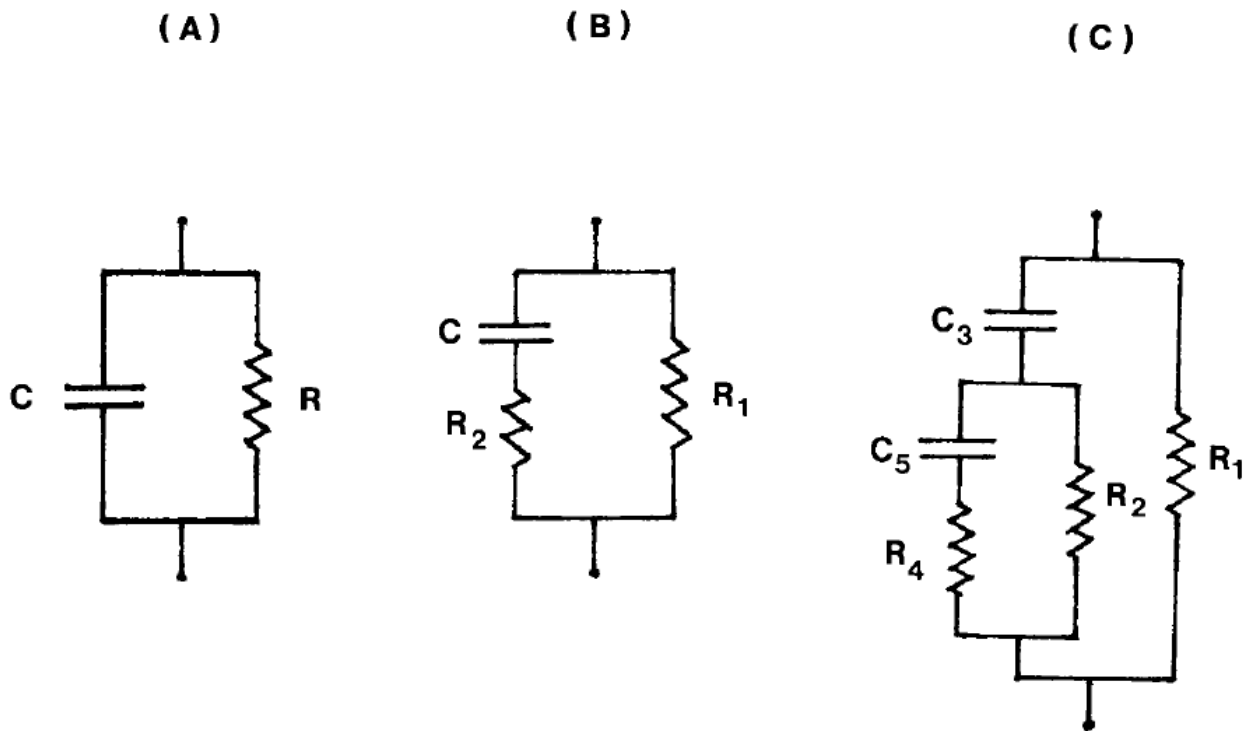
植物細胞質內含許多帶電離子，因此當原生質流動時便會帶領離子流動，因此產生電流與電訊號。1873 Sanderson 首次在捕蠅草上證明電訊號伴隨著葉片的運動（Sanderson, 1873）。接著名的植物學家 Bose（1858-1937）證實含羞草葉片的運動是由電訊號所引起（Bose, 1907; Bose, 1926）且可以持續產生系統性的電訊號。

三、植物電訊號的傳遞:

目前認為植物電訊號的傳遞，在細胞和細胞間，刺激所引發的膜電位變化是透過共質體（symplast）或質外體（apoplast）途徑，經原生質絲（plasmodesmata）在細胞間傳遞如圖一（Fromm, J. and Lautner, S., 2007）。如果是整株植物的話，植物電訊號則被認為透過既有的物質輸送通道傳遞，即韌皮部或木質部（Malone et al., 1994; Zawadzki et al., 1995; Zawadzki et al., 1991）。1992 年 Zhang and Willison 利用侵入式電阻測定模擬出胡蘿蔔塊根與馬鈴薯塊莖的等效電路模型，並藉以測量細胞澱粉分佈。如圖二（M. Zhang and J. H. M. Willison, 1992）。



圖一、植物細胞與細胞間利用原生質絲傳遞電訊號的模擬圖(Fromm, J. and Lautner, S., 2007)。



圖二、利用侵入式電阻測定模擬出胡蘿蔔塊根與馬鈴薯塊莖的等效電路模型，(A)單一電阻電容並聯模型(B)電容與電阻串並聯的模型(C)多電容電阻串並聯的模型 (M. Zhang and J.

H. M. Willison, 1992)。

在閱讀文獻中發現，在過去植物電訊號的研究中，都僅止於番茄、胡蘿蔔、馬鈴薯的植株或塊莖、塊根的等效電路模型建立，並未有大型如松樹等喬木的詳細等效電位模型討論。此外，在過去文獻中也僅有猜測樹木的等效電路模型如同圖二(A)的單一電阻電容並聯模型模型。倘若連馬鈴薯塊根的等效電位模型都會因為皮層的厚度而不同，那樹木尚有木栓層、木質部、韌皮部之分，因此我們大膽猜測其等效電路不應僅止於單一電阻電容並聯模型如此簡單。

因此本研究期望能建立一個更完整的喬木維管束等效電路模型並加以驗證，以利未來植物電訊號研究應用。

貳、 研究目的

- 一、 建置模擬等效電路的電路板，驗證喬木的等效電路模型
- 二、 探討樹的電容效應

參、 研究過程及材料方法

一、 實驗株外型觀察(樟樹)

a.



b.



c.



d.



e.



f.



g.



圖三、a.b.c.d.e.f.g.圖，以上為樟樹實驗株，分別給予編號1~7的代號。實驗樹木的外型:樟樹全株高度約9公尺，胸高直徑(高1.5m處)樟樹1為21.2公分，樟樹2為28公分，樟樹3為22公分，樟樹4為29.1公分，樟樹5為21公分，樟樹6為15.6公分，樟樹7為15.6公分。

二、實驗株外型觀察(松樹)

a.



b.



c.



d.



e.



f.



圖四、 a.b.c.d.e.f 圖:以上為松樹的實驗株，分別給予 1~6 的編號。實驗樹木的外型:松樹全株高度約 3 公尺，胸高直徑(高 1.5m 處)松樹 1 為 5.7 公分，松樹 2 為 5.6 公分，松樹 3 為 6.1 公分，松樹 4 為 6.8 公分，松樹 5 為 6.4 公分，松樹 6 為 5.3 公分。

三、使用器材

a.



b.



c.



d.



e.

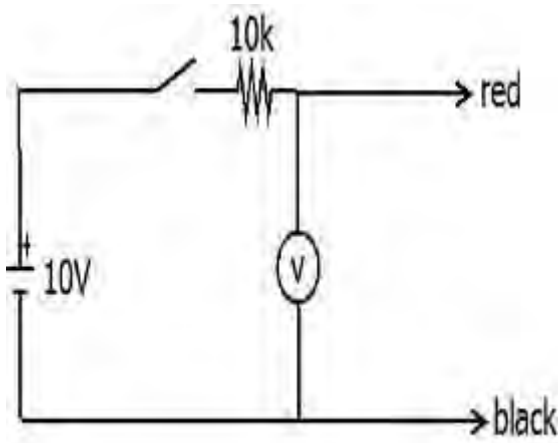


f.

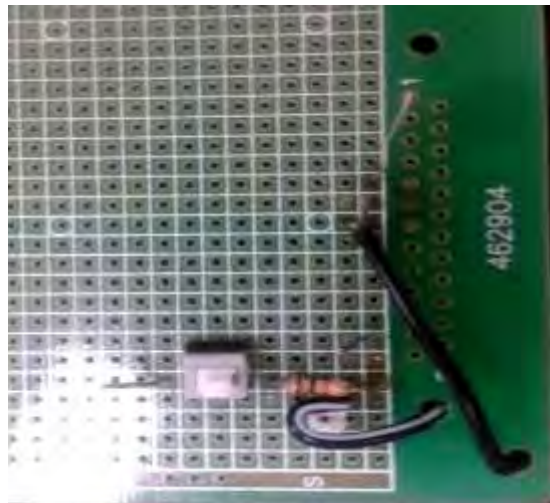


圖五、本研究使用器材。a:攝相機加腳架 b:鐵鎚 c:鐵釘 d:電路板 e:電源供應器 f:電表

四、電路板設計製作



圖六、電路板設計圖。10V 為我們給予的穩定電源。



圖七、實際製作出來的電路板。

五、實驗株的內部結構

利用電鑽鑽取實驗株內部結構，由樹皮表面往內鑽取一公分，取出觀察。如下圖九。



六、測量方法

測量方法如圖十 a~i 順序操作，開始充電以及放電後每隔 30 秒紀錄一次電表上的電壓值。由初測得知充放電飽和時間約 30 分。因此每次的充電以及放電分別各測量 30 分鐘。



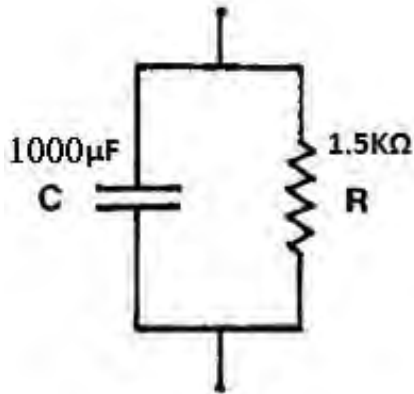
圖十、實驗方法按照 a~i 的順序操作。a:放置電源供應器於平面 b:依照電路設計圖連接電路板 c:連接電表 d:接於樹木 50 公分 e:接於樹木 100 公分 f:於電路板上短路 g:按下開關(開始充電)h:充電完後，按下開關(開始放電) i: 放電結束。

肆、 研究結果與討論

一、 不同電路模型充放電實驗:

由於目前並沒有確定的喬木等效電位模型，因此我們根據 Willison 1992 年做的研究報告中三種不同的等效電路模型，再加入第四種可能的模型，先實際製作電路板來偵測不同等效電路模型會有的充放電情形。然後藉此推導實際的維管束等效電路模型。

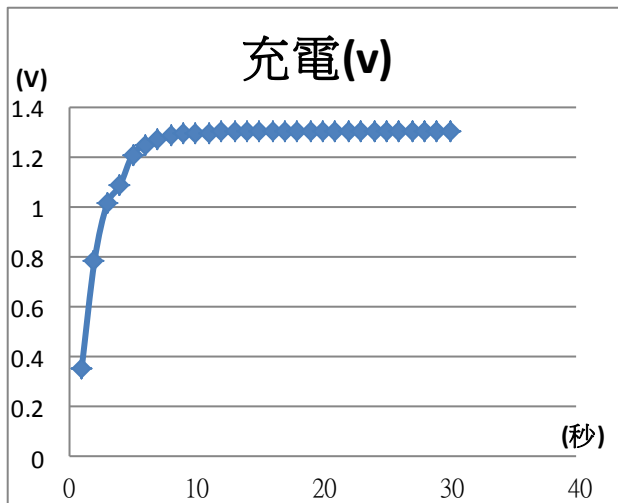
a.



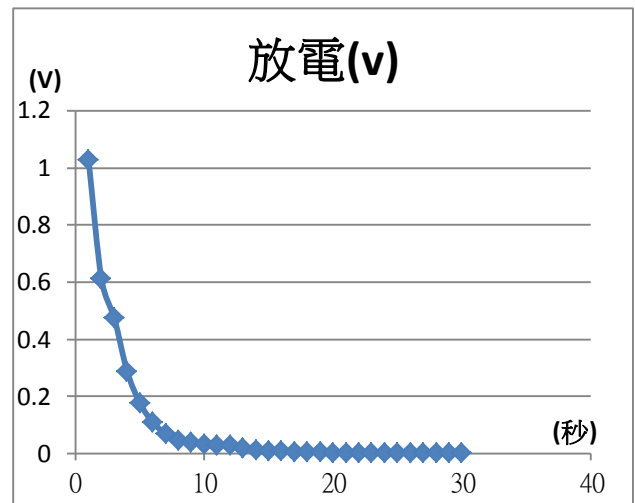
b.



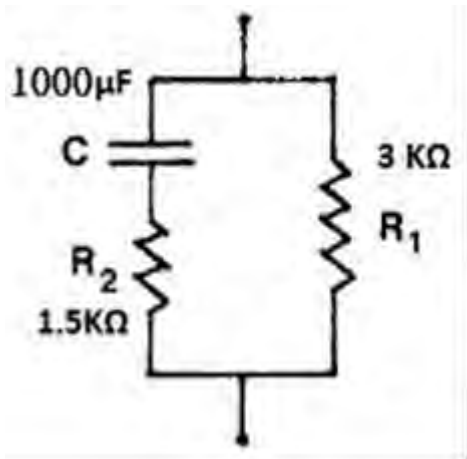
c.



d.



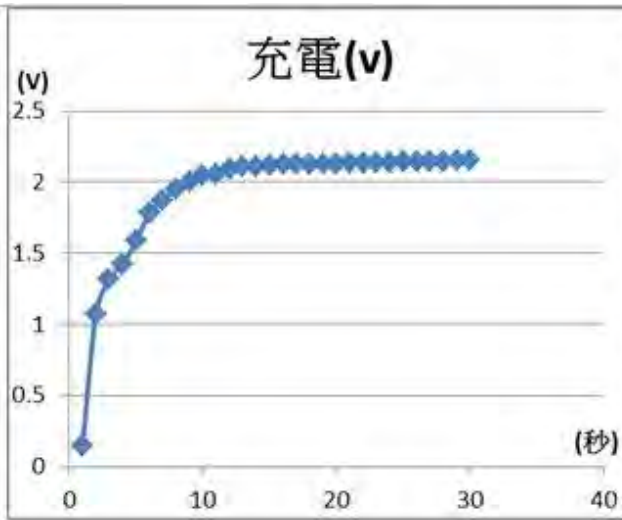
e.



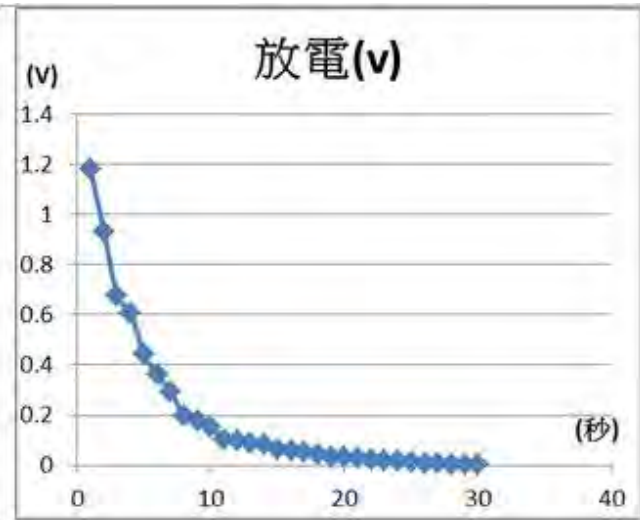
f.



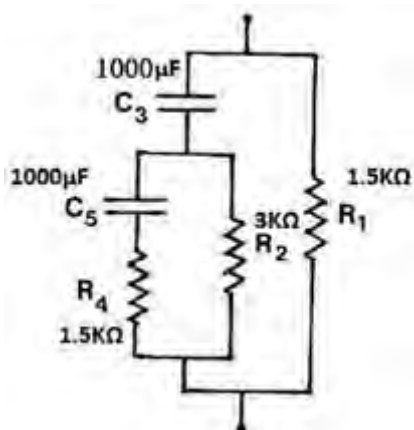
g.



h.



i.

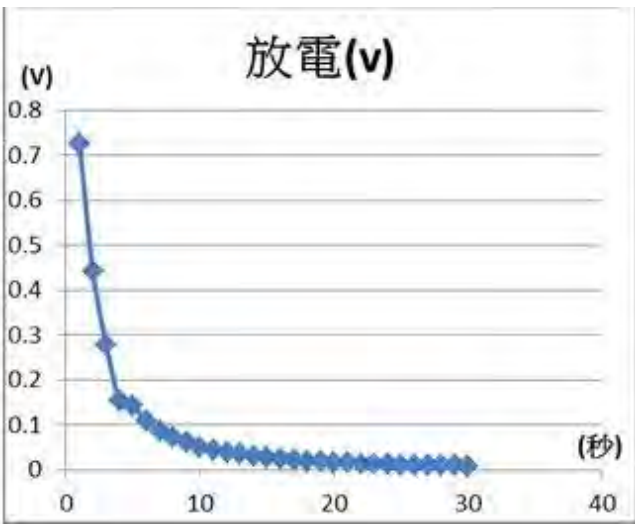
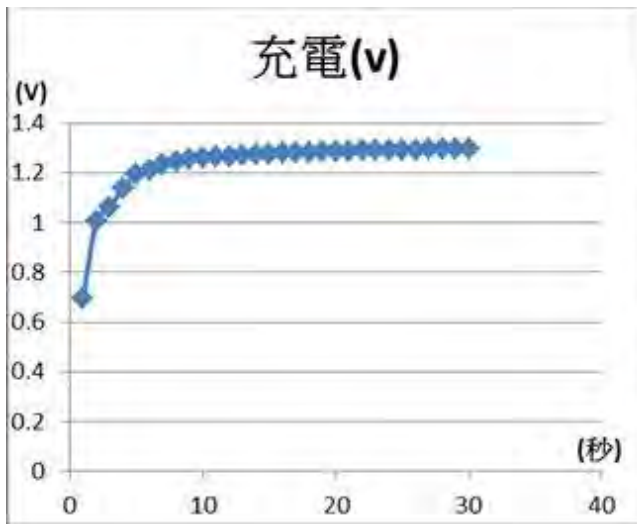


j.



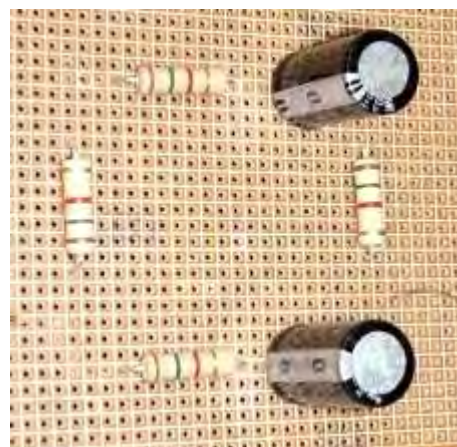
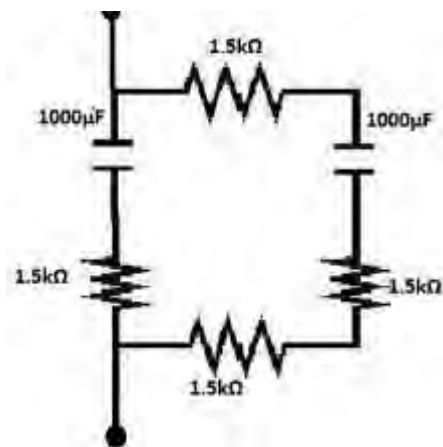
k.

l.



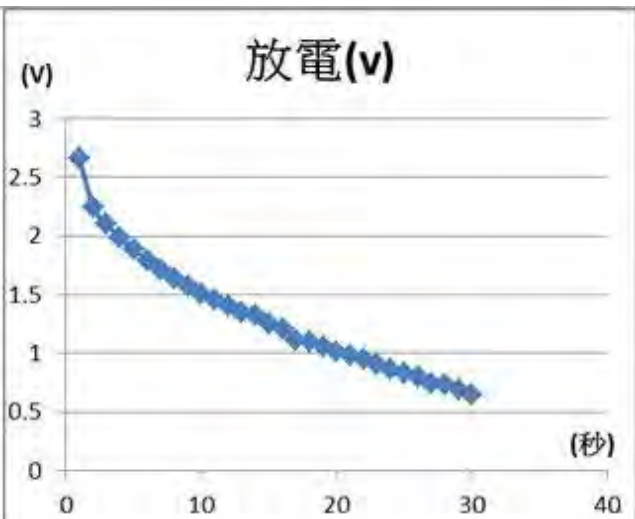
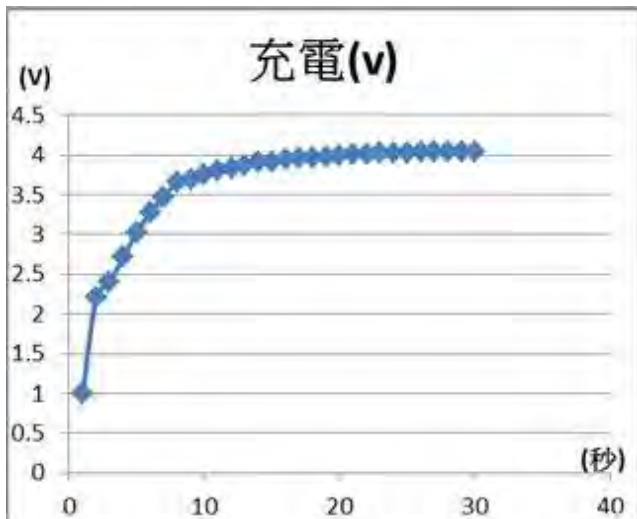
m.

n.



o.

p.



圖十一、a.b 圖:為假設的第一種電路 c.d 圖:為第一種電路的充放電數據圖 e.f 圖:為假設的第二種電路 g.h 圖:為第二種電路的充放電數據圖 i.j 圖:為假設的第三種電路充放電曲線圖 k.l 圖:為第三種電路的充放電數據圖 m.n 圖:為假設的第四種電路 o.p 圖:為第四種電路充放電曲線圖。

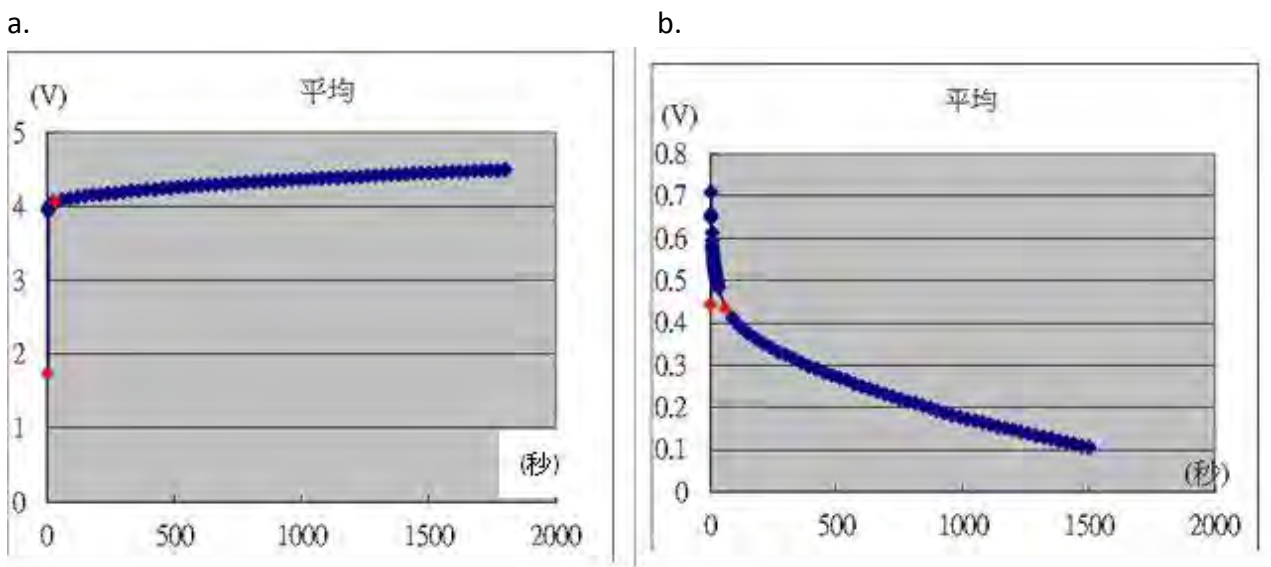
說明: 測出來的電壓會比輸入的電壓低一些,是因為電容本身並無法做到百分之百不漏電。放電時的起始電壓應該與充電的最高電壓約略相同,是因為儀器反應沒那麼靈敏所以會有誤

差。但是不同的電阻與電容個數及排列方式對電壓上升的速率及電壓下降的速率有所差別，但並不受電容漏電的影響，所以我們仍可利用此電路模型來推導喬木的等效電路模型。

小結: 因為每個電路板上電阻與電容數目不同，和不同串並聯方式也會影響電路的分壓，因此我們可看出不同電路板上升至最高電壓的時間有所不同，導致曲線的曲率有所差異。我們根據上圖曲線，我們可以用來推導比對實際喬木的等效電路模型。如果測得的喬木充放電情形比較接近 e.圖，則可推測喬木的等效電路型，依此類推。因此接下來我們就利用自行設計測量用的電路板實際測量松樹(裸子植物)、樟樹(被子植物)的充放電情形。

二、 充放電時間初測

為求得實驗最有效的充放電時間，我們測試樟樹 50cm 處充電 30min 以及放電 30min 的電壓值、各別測試三次後求平均。測得的結果如圖十三。

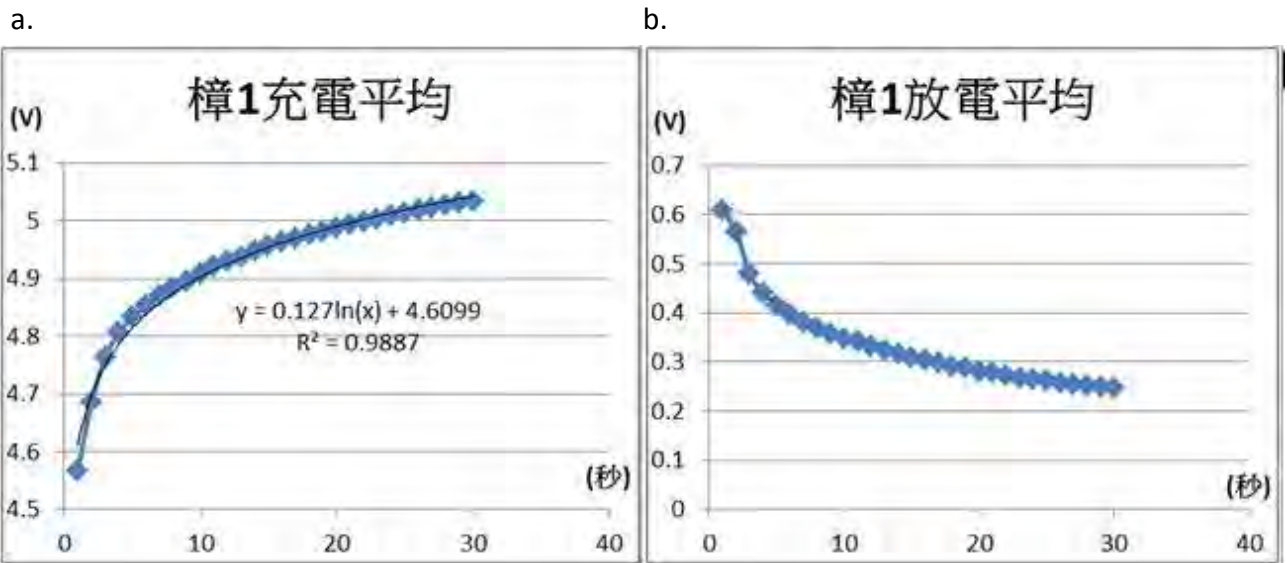


圖十三、樟樹 50CM 充電、放電、平均圖 a:樟樹 50CM 充電 b:樟樹 50CM 放電。

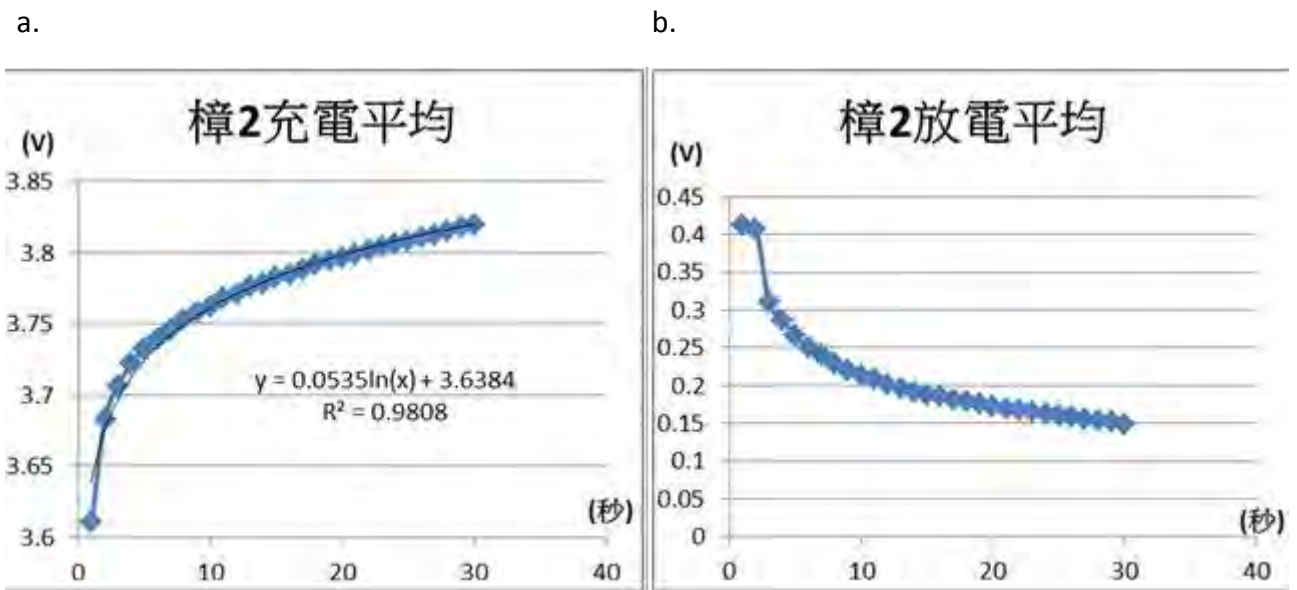
藉由測量 30 分鐘所做出的曲線，我們發現在 30 秒內充放電的曲線就可以看出從起始電位到趨近最高電位的數值，並且可利用此數值求取電阻及電容，不需到 30 分鐘。因此接下來的實驗就採用 30 秒作為我們實驗的測量時間。一來可測得有效數據，二來可縮短測量時間，是最有效率的實驗時間。

三、 樟樹(被子植株)充放電初測

藉由先前的實驗，我們利用測量用電路板來偵測校園外樟樹。針對我們測量的樟樹組織，我們利用電鑽取樣 1 公分的組織，如圖九 a。測得數據如下圖。

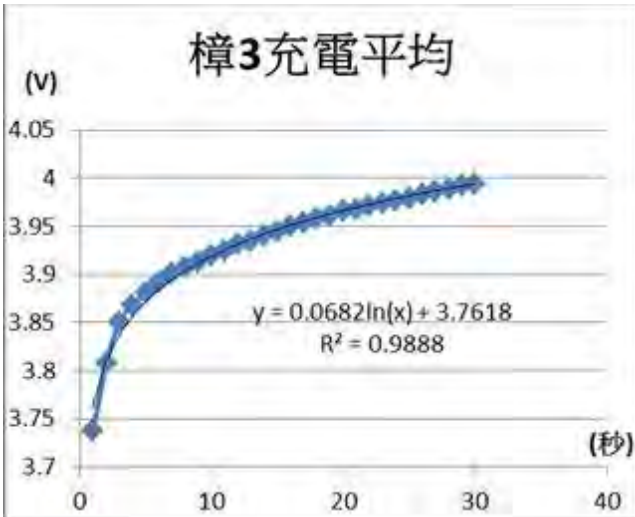


圖十四、樟樹 1-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 1 三次充電平均 b:樟樹 1 三次放電平均

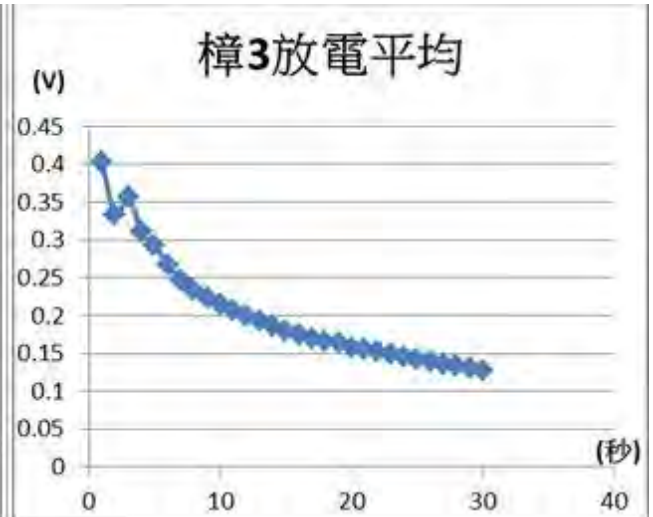


圖十五、樟樹 2-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 2 三次充電平均 b:樟樹 2 三次放電平均

a.

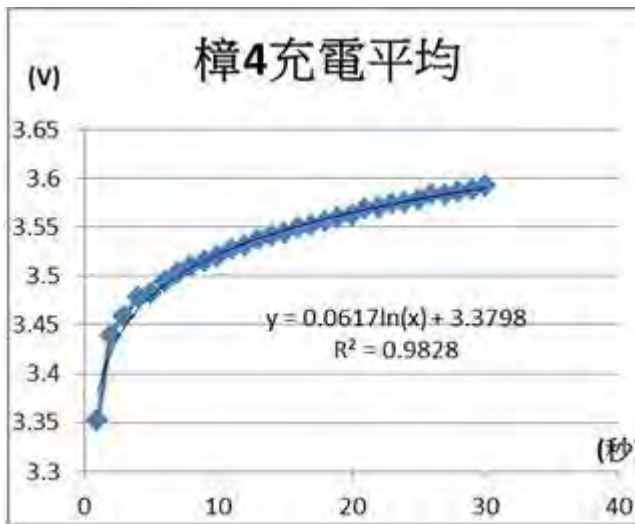


b.

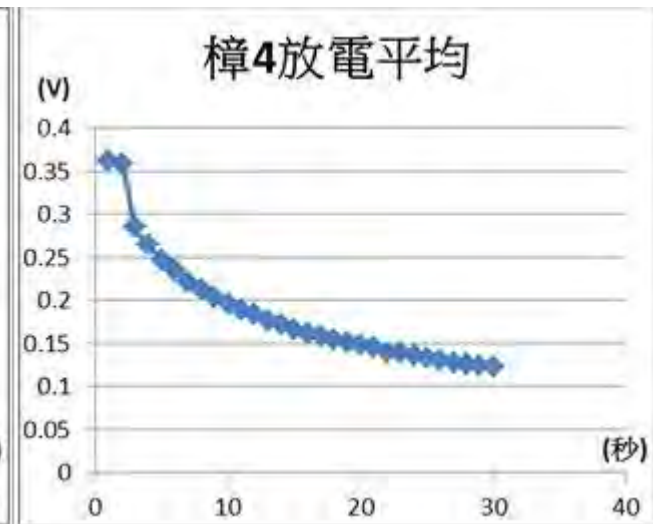


圖十六、樟樹 3-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 3 三次充電平均 b:樟樹 3 三次放電平均

a.

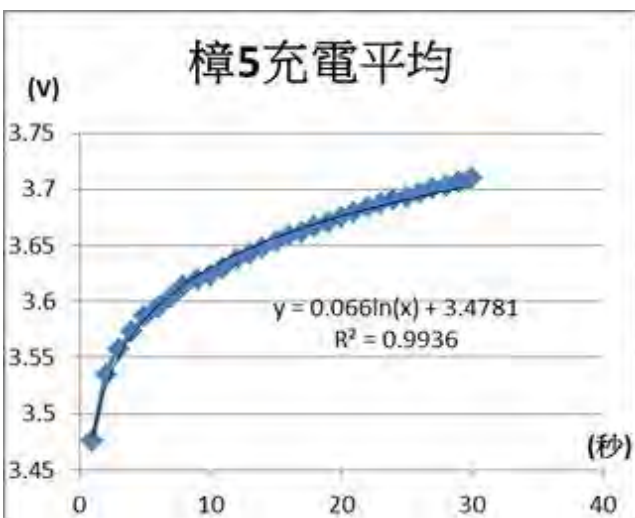


b.

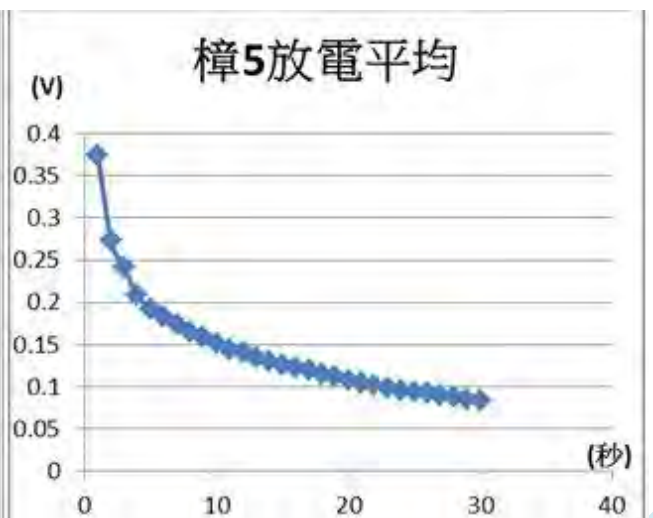


圖十七、樟樹 4-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 4 三次充電平均 b:樟樹 4 三次放電平均

a.



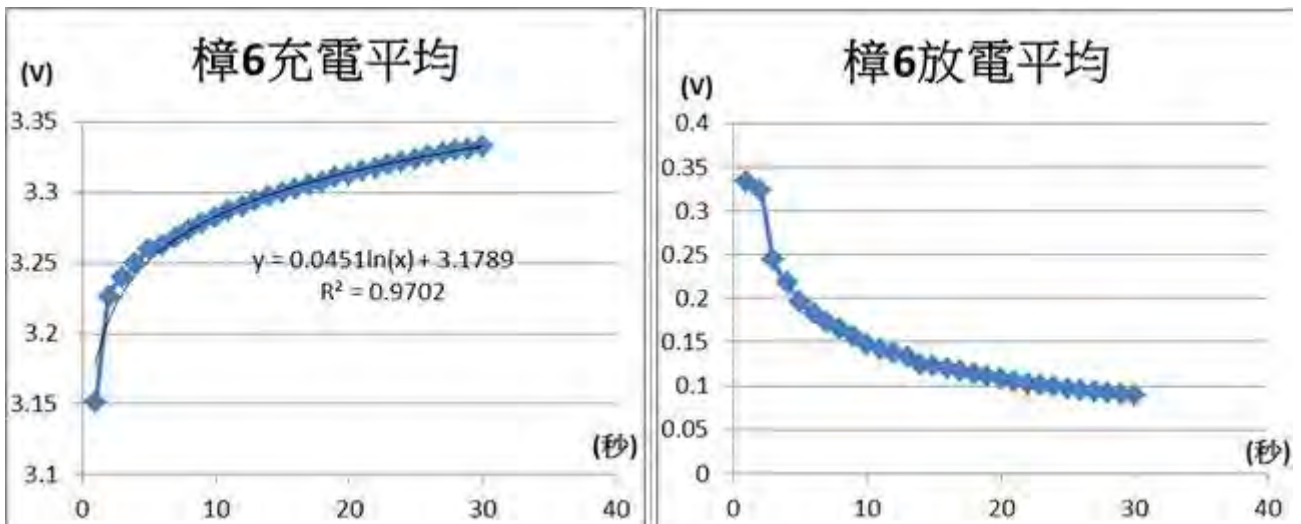
b.



圖十八、樟樹 5-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 5 三次充電平均 b:樟樹 5 三次放電平均

a.

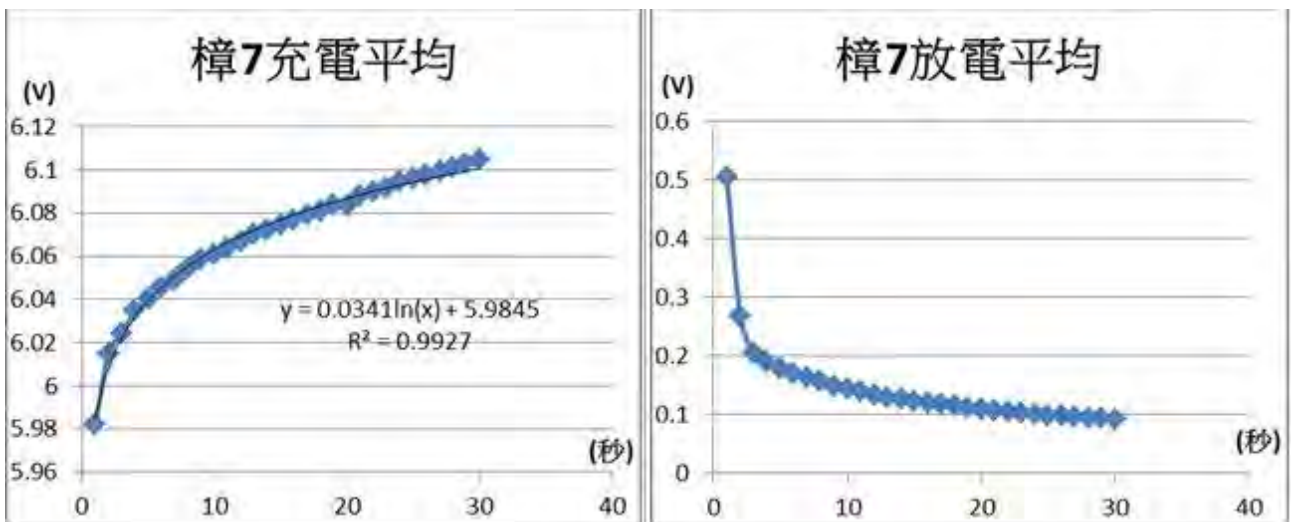
b.



圖十九、樟樹 6-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 6 三次充電平均 b:樟樹 6 三次放電平均

a.

b.



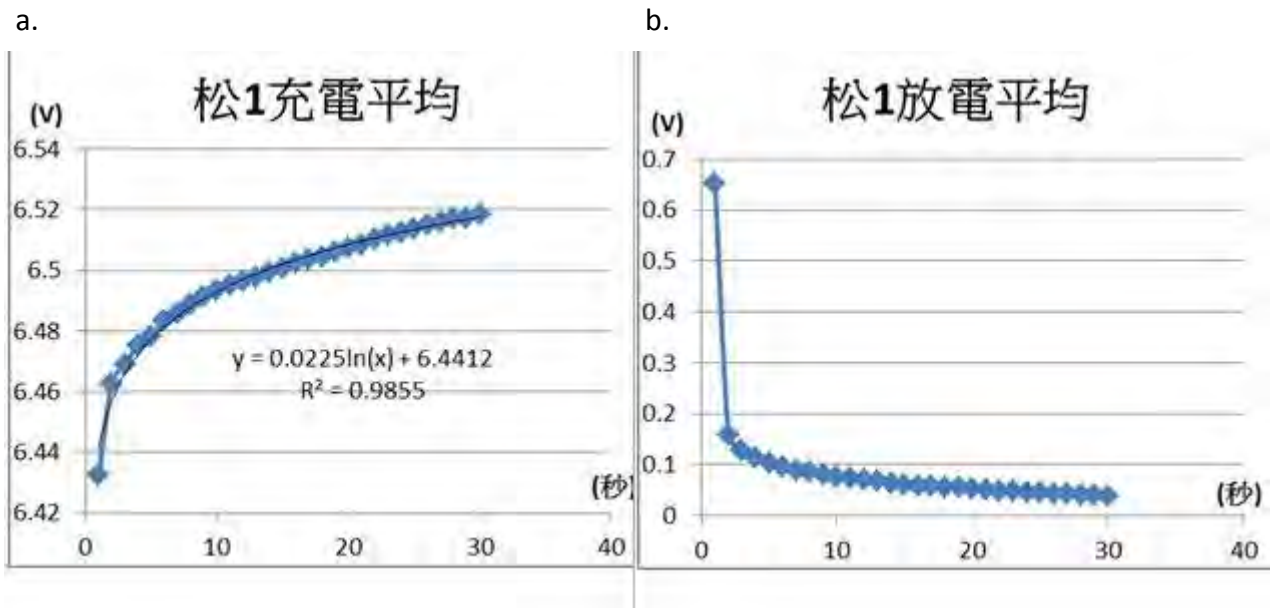
圖二十、樟樹 7-30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 7 三次充電平均 b:樟樹 7 三次放電平均

說明:根據測量充放電的曲線圖,我們發現電壓上升的時間比較接近圖十一 e,另外我們測得數據求得趨勢線,且趨勢線的 R^2 皆大於 0.95。利用此趨勢線求得 T 趨近於零時的電壓。

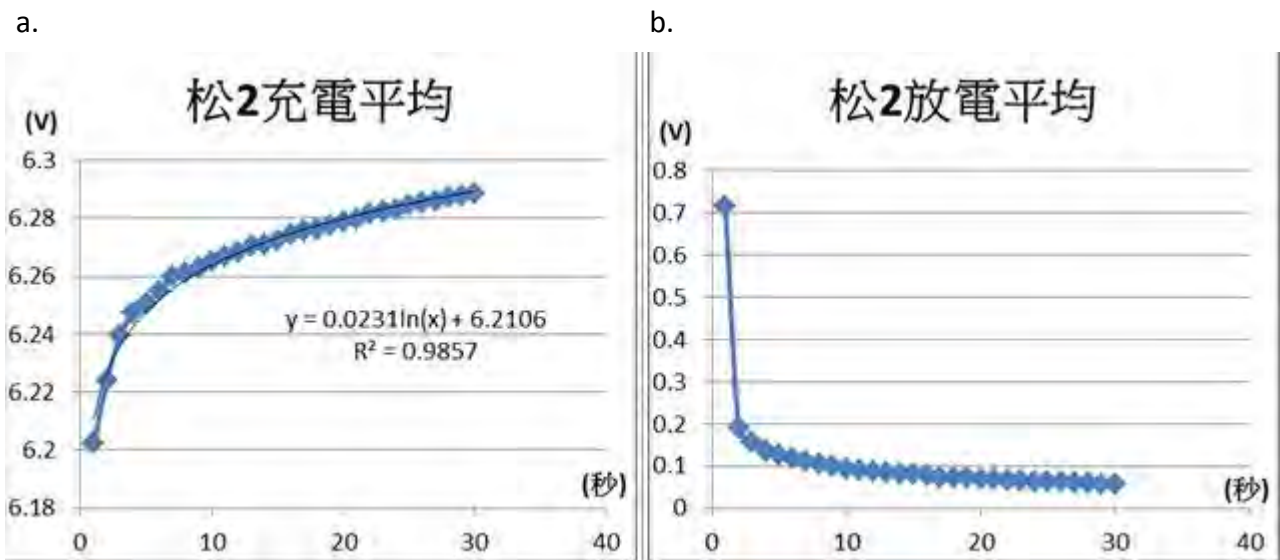
小結:由此可知被子植物喬木的維管束組織等效電路為圖十一 e。

四、 松樹(裸子植物)初測

藉由先前的實驗，我們利用測量用電路板來偵測校園松樹。針對我們測量的松樹組織，我們利用電鑽取樣 1 公分的組織，如圖九 b。測得數據如下圖。

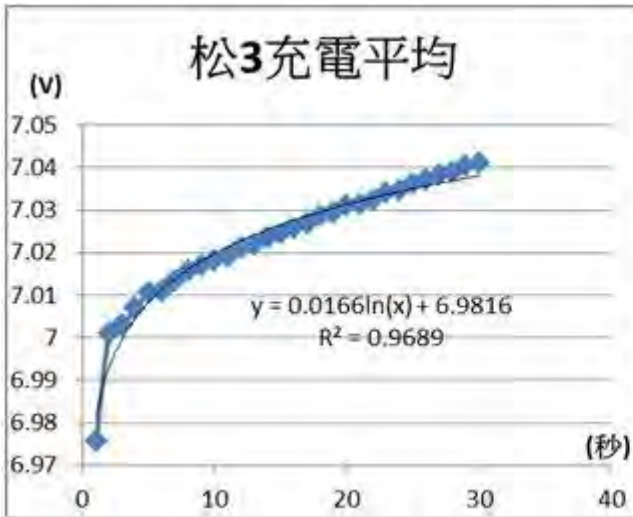


圖二十一、松樹 1-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 1 三次充電平均 b:松樹 1 三次放電平均

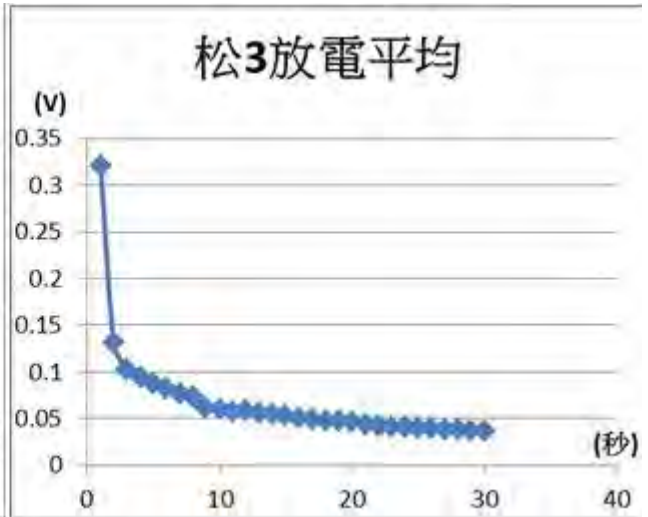


圖二十二、松樹 2-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 2 三次充電平均 b:松樹 2 三次放電平均

a.

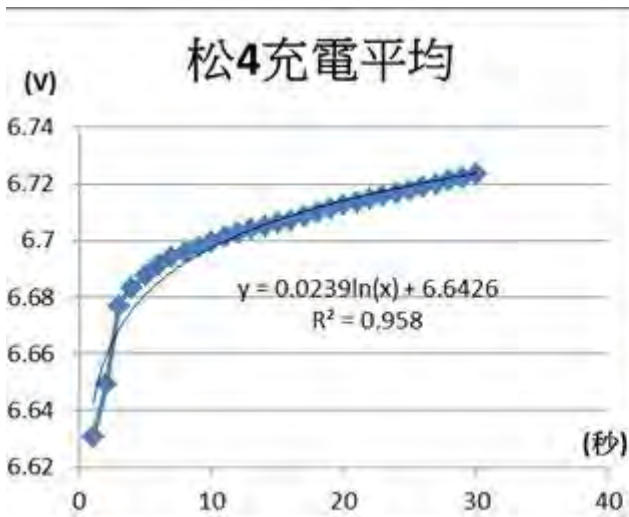


b.

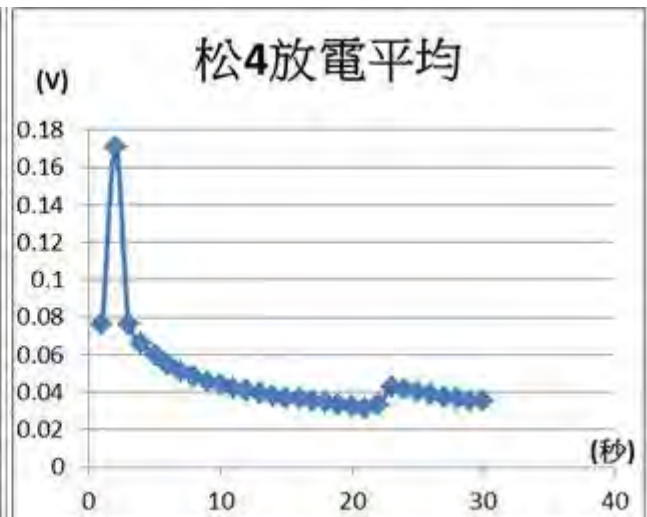


圖二十三、松樹 3-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 3 三次充電平均 b:松樹 3 三次放電平均

a.

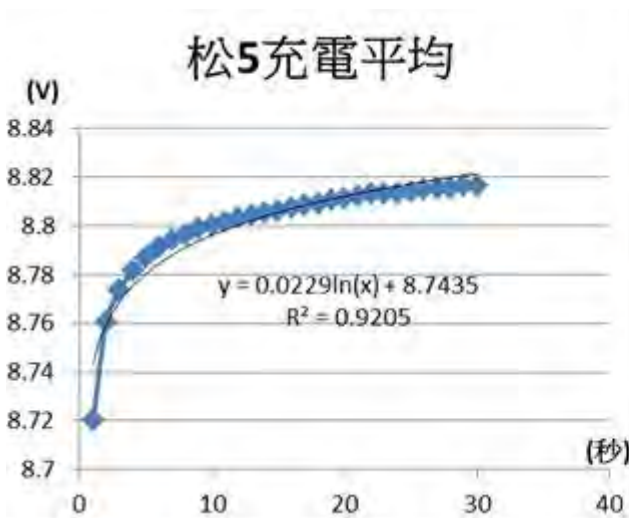


b.

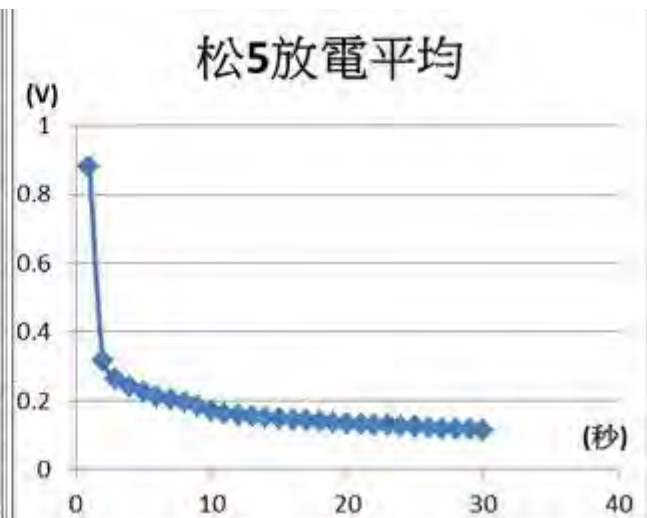


圖二十四、松樹 4-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 4 三次充電平均 b:松樹 4 三次放電平均

a.



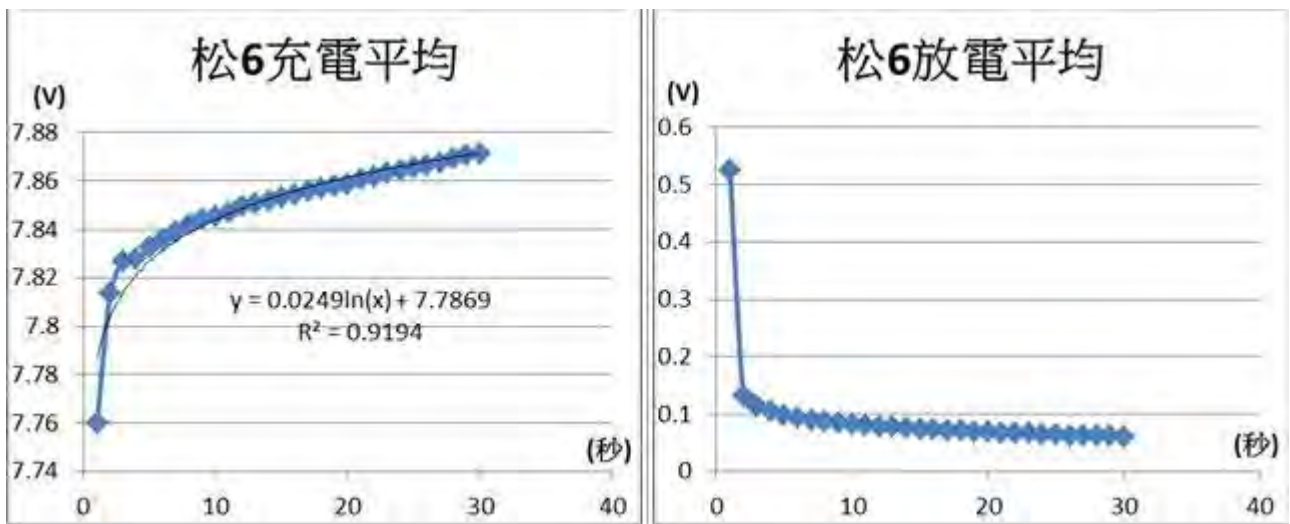
b.



圖二十五、松樹 5-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 5 三次充電平均 b:松樹 5 三次放電平均

a.

b.

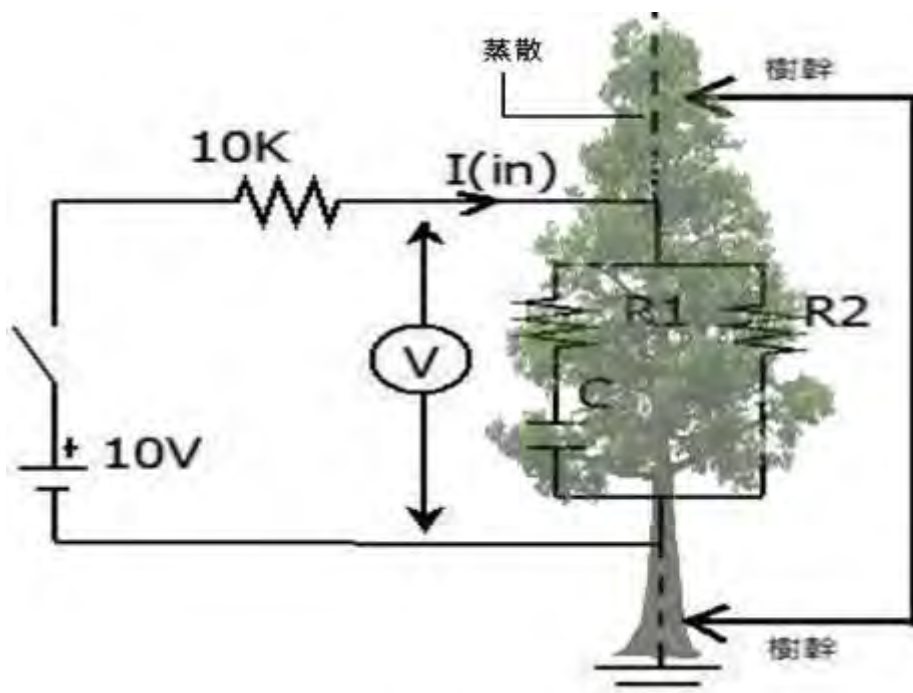


圖二十六、松樹 6-30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 6 三次充電平均 b:松樹 6 三次放電平均
 說明:根據測量充放電的曲線圖，我們發現電壓上升的時間比較接近圖十一 e，另外我們測得數據求得趨勢線，且趨勢線的 R^2 皆大於 0.9。利用此趨勢線求得 T 趨近於零時的電壓。
 小結:由此可知被子植物喬木的維管束組織等效電路為圖十一 e。

五、 建立的喬木等效電路模型以及公式推導

建立的喬木等效電路模型以及公式推導

參考 Zhang 和 Willison 在 1992 建置的等效電路(圖二 B)以及測得的充放電曲線，我們設定樹木的維管束等效電路為第二種模型，含有 R_1 、 R_2 和 C ，其中 C 為維管束電容， R_1 、 R_2 為維管束電阻 (M. Zhang and J. H. M. Willison, 1992)。根據此特性我們建置了喬木維管束的等效電路模型(圖二十七)



圖二十七、我們設立的等效電路模型。10V 和 10K 為我們架設的電路板電路圖，右側 R_1 、 R_2 為維管束的電阻值， C 為維管束的電容值。

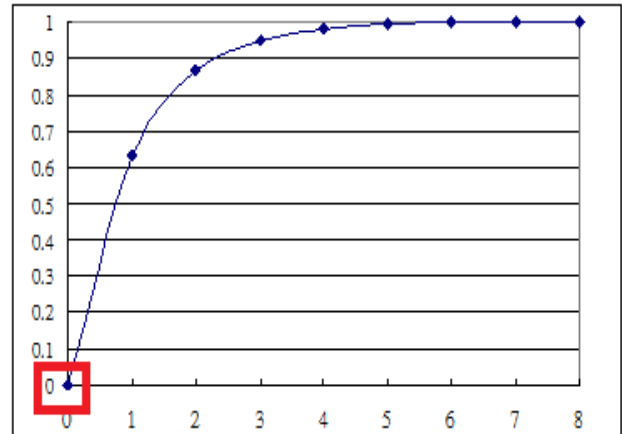
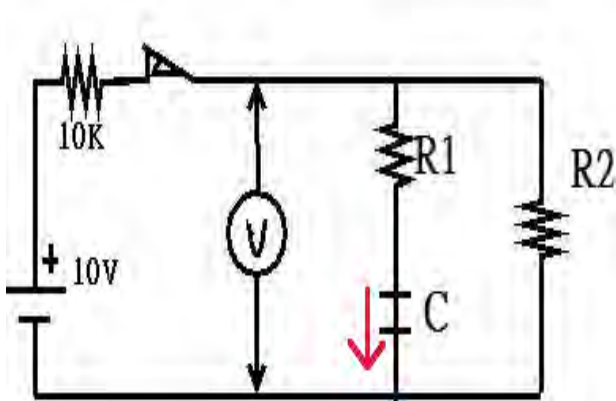
(一)R1//R2 公式

因為電容開始充電瞬間，電容為短路狀態，所以可求出(R1//R2)

測出 V(t=0 初)=_____ 帶入

$$V(t = 0 \text{ 初}) = 10v \times \left[\frac{(R_1 // R_2)}{(R_1 // R_2 + 10K)} \right]$$

求出 R1//R2=_____。



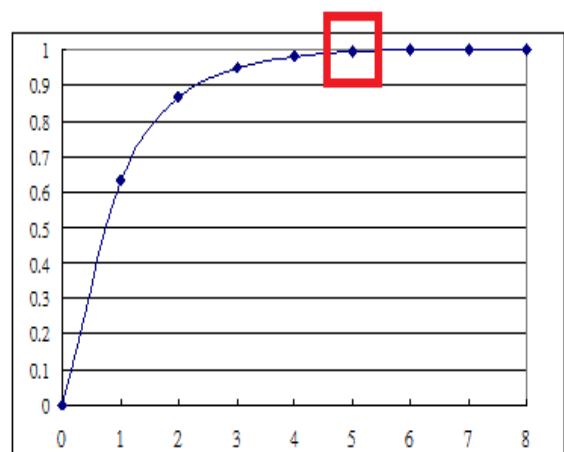
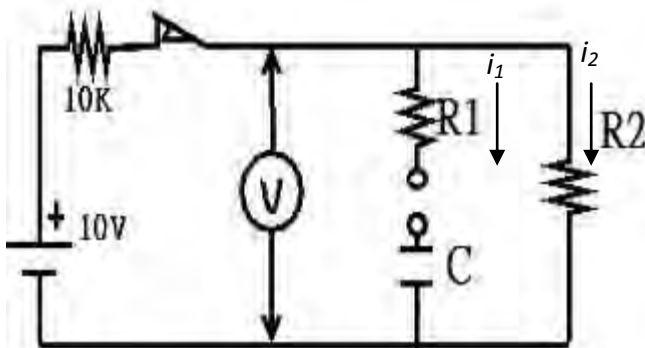
當電容一開始充電時，電容為短路狀態

(二)R2 公式

由於電容充飽造成 R1 形成斷路，所以，

$$V(t = \text{電容穩態}) = \frac{(10v \times R_2)}{10K + R_2}$$

求 R2=_____。



當電容充電到了5個充電時間常數時，電容會形成斷路

(三)R1 公式

$$R_1 // R_2 = \frac{(R_1 \times R_2)}{(R_1 + R_2)}$$

求得 R1=_____。

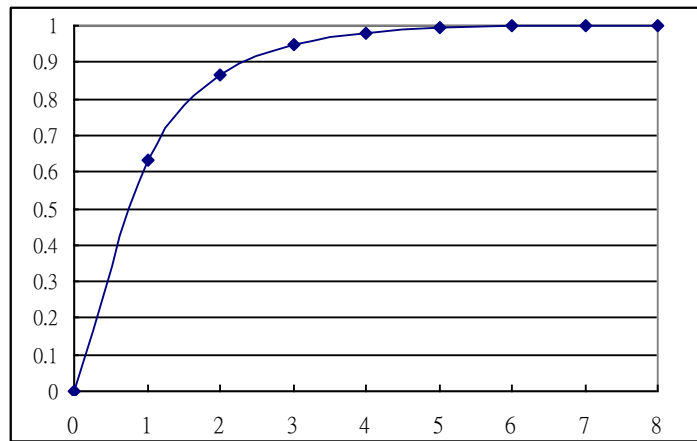
(四)電容公式

t=放電放完為 5 個放電時間常數=_____

因此 5 個放電時間常數 = [5 (R1 + R2)] x C ，求 C=_____。

$$\tau = RC$$

$$1 - e^{-1} = 0.63$$



根據電容特性，當電容充飽電後即形成斷路，此時電流不流經 R1 與 C 因此帶入此時測得的電壓可以求得 R2(R2 公式)。當求出 R2 後，因為當剛充電時(t = 0)，此時 V 值可測得 R1 並聯 R2 的數值(R1//R2 公式)。當求出 R1 並聯 R2 的值後，即可帶入並聯公式求得 R1(R1 公式)。當求出 R1 以及 R2 後，帶入時間常數(放完電的時間值)即可求得維管束電容值 C(電容公式)。

表一、被子植物電阻值及電容值

	充飽 (單位=V)	充電(t=0) (單位=V)	t=1 時間常數 (放電)	R2(kΩ)	R1//R2 (kΩ)	R1(kΩ)	C (單位=法拉 F)放 電
樟樹 1	5.03	0.2234754	3	10.14	0.23	0.23	0.31
樟樹 2	3.82	0.0659392	2	6.18	0.07	0.07	0.39
樟樹 3	3.99	0.149965	3	6.65	0.15	0.16	0.37
樟樹 4	3.59	0.1122015	2	5.61	0.11	0.12	0.35
樟樹 5	3.71	0.1347464	2	5.90	0.14	0.14	0.33
樟樹 6	3.33	0.0635024	2	5.00	0.06	0.06	0.40
樟樹 7	6.11	0.1712321	4	15.67	0.17	0.18	0.25

表二、裸子植物電阻及電容值

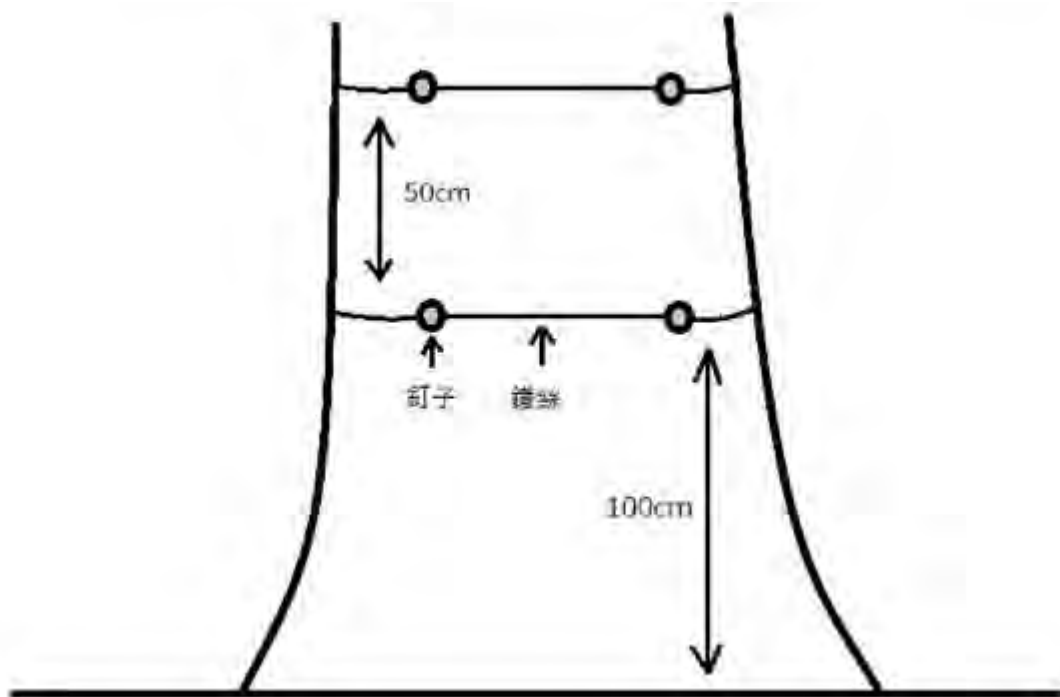
	充飽 (單位=V)	充電(t=0) (單位=V)	t=時間常數 (放電)	R2(kΩ)	R1/R2 (kΩ)	R1(kΩ)	C (單位=法拉 F) 放電
松樹 1	6.519	0.0169876	4	18.73	0.02	0.02	0.21
松樹 2	6.29	0.040593	4	16.94	0.04	0.04	0.24
松樹 3	7.04	0.0250299	4	23.80	0.03	0.03	0.17
松樹 4	6.723	0.038786	4	20.52	0.04	0.04	0.19
松樹 5	8.816	0.0431822	6	74.46	0.04	0.04	0.08
松樹 6	7.871	0.0467602	3	36.97	0.05	0.05	0.08

說明：利用此公式能推導出喬木的維管束電容及電阻值，我們使用三用電表來測量，該電表每一秒可記錄一次電壓變化，因此我們利用第一秒到三十秒求得趨勢線公式。X 值為時間，Y 值為該時間的電壓。由於此曲線為指數曲線，X 值無法帶入 0，但正常喬木電壓不可能為負值。因此本研究以 X 趨近於 0 時所求得的最小正值電壓作為 t=0 的電壓。將 t 趨近於零的值帶入後可得 R1 並聯 R2 的值。電容充飽時可求得 R2，利用此兩值進一步求電容與 R1。

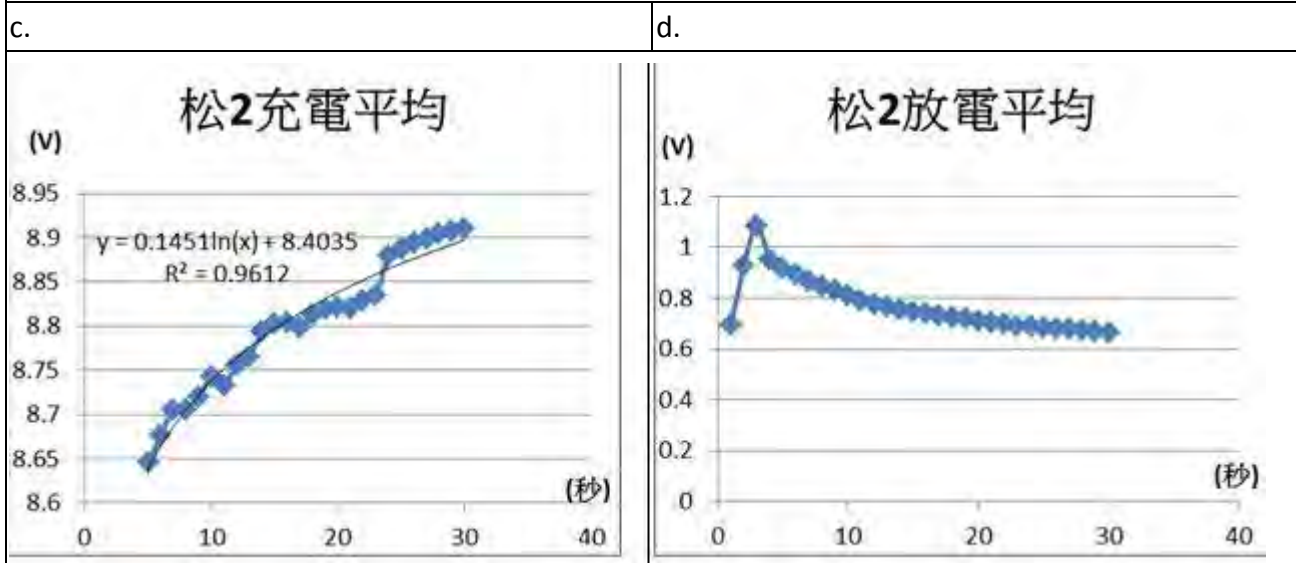
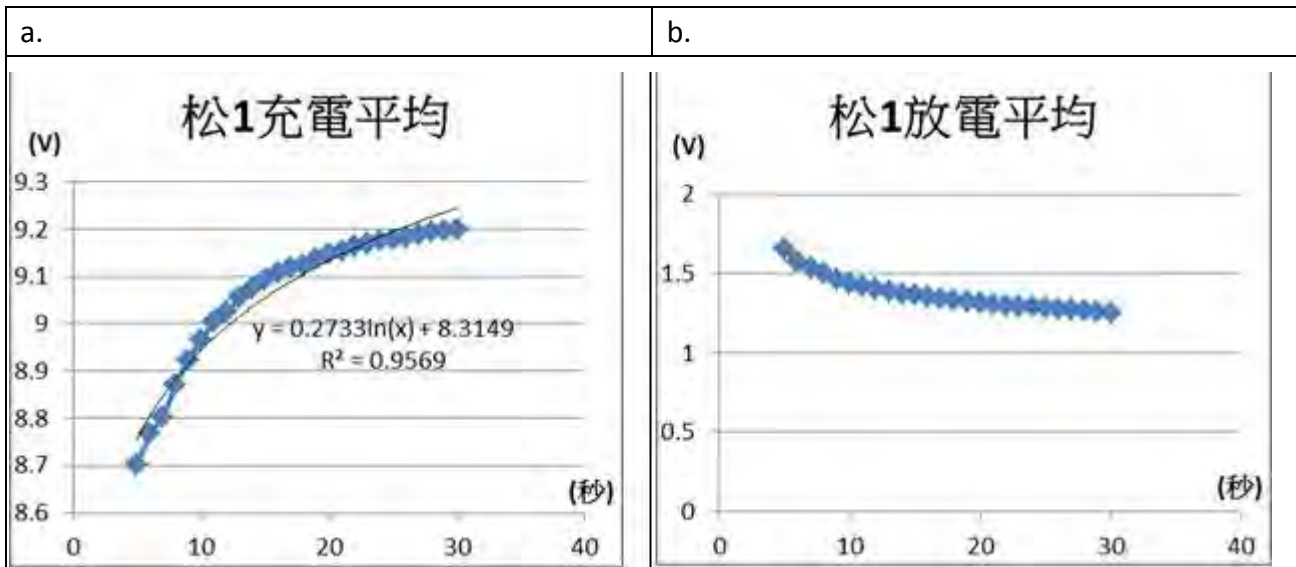
小結：證實我們的等效電路是正確的，且推導公式也正確。

六、 證實電阻及電容串並聯效應

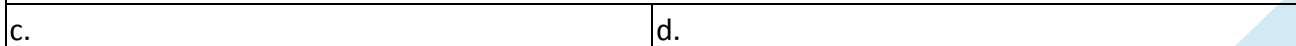
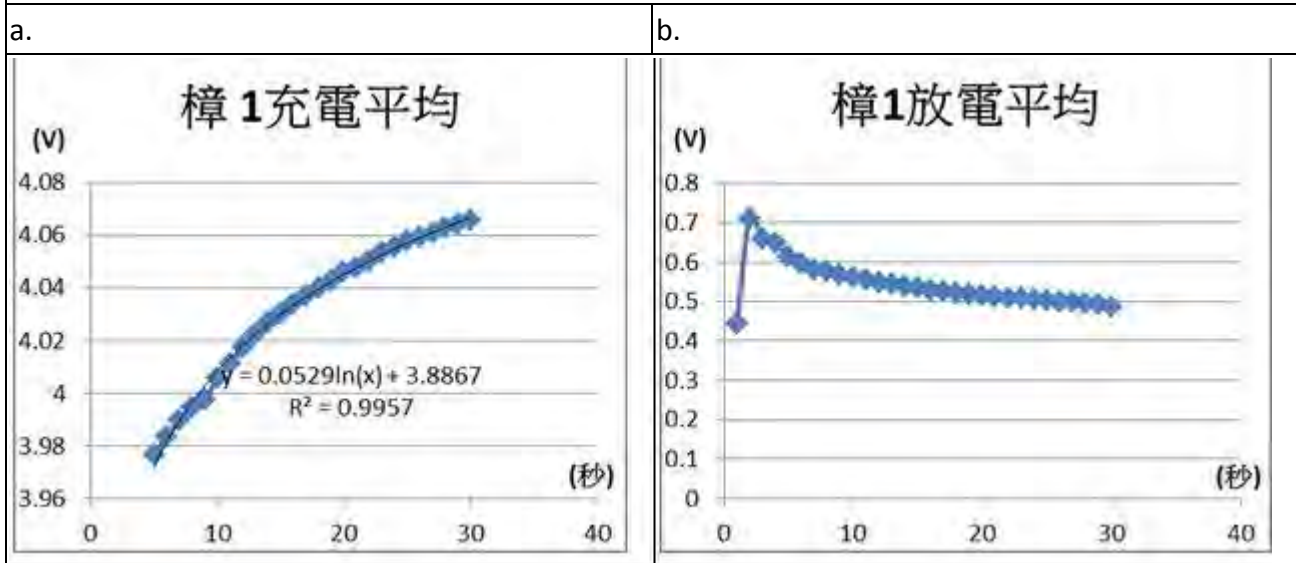
由上述實驗我們已知喬木有電容特性並驗證植物維管束的等效模型，可求得電容及電阻值，因此我們將釘子與釘子中間是為一個等效電路，進行串聯的實驗，實驗設置如下圖。

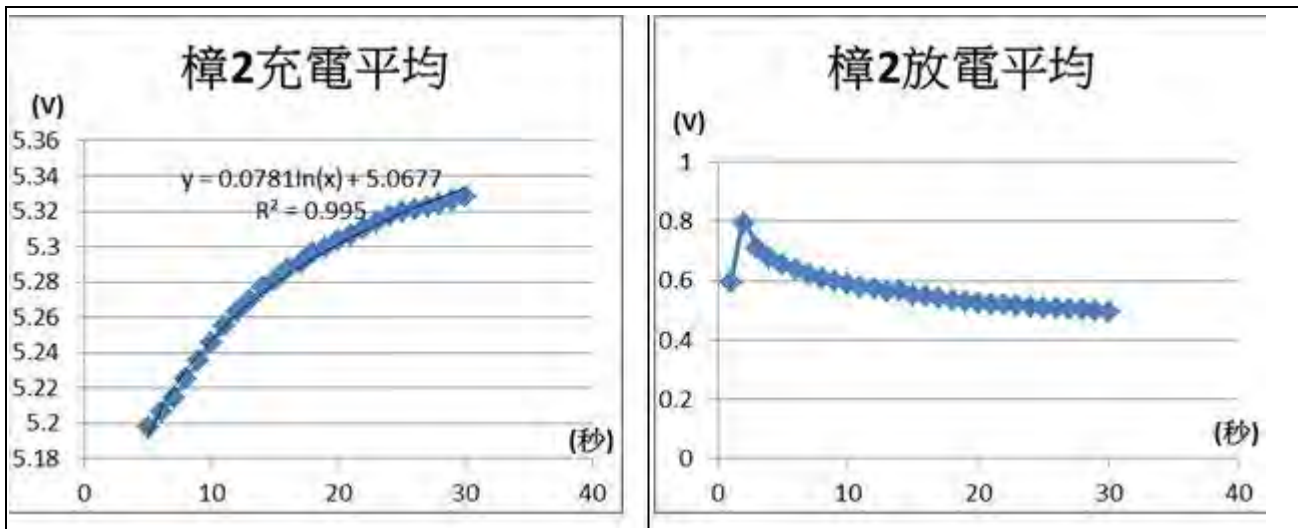


圖二十八、樟樹與松樹釘子串聯擺放示意圖。樟樹每 28 公分一支釘子，共 6 支；松樹每 9 公分一支釘子，共 5 支。(每根釘子彼此水平，上下垂直)(電路板接頭為“紅上黑下”的方式連接)。



圖二十八、松樹 1、2 串聯 30 秒充電、放電、平均圖 a:松樹 1 三次充電平均 b:松樹 1 三次放電平均 c: 松樹 2 三次充電平均 d:松樹 2 三次放電平均





圖二十九、樟樹 1、2 串聯 30 秒充電、放電、平均圖 a:樟樹 1 三次充電平均 b:樟樹 1 三次放電平均 c:樟樹 2 三次充電平均 d:樟樹 2 三次放電平均

表三、裸子植物串聯電阻值及電容值

NEW	充飽 (單位=V)	充電(t=0) (單位=V)	(單 t=1 時間常數 (放電))	R2(kΩ)	R1/R2 (kΩ)	R1(kΩ)	C (單位=法拉 F) 放電
松樹 1	8.911	0.050873	5	81.83	0.05	0.05	0.06
松樹 2	9.20	0.134045	6	114.84	0.14	0.14	0.05

表四、被子植物串聯電阻值及電容值

NEW	充飽 (單位=V)	充電(t=0) (單位=V)	(單 t=1 時間常數 (放電))	R2(kΩ)	R1/R2 (kΩ)	R1(kΩ)	C (單位=法拉 F) 放電
樟樹 1	4.05	0.110691	3	6.81	0.11	0.11	0.46
樟樹 2	5.32	0.032407	3	11.37	0.03	0.03	0.26

說明:不論是在被子或裸子植物都符合圖十一“e 圖”之電路模型，若喬木的確為此等效路模型，則會發現到串聯時電容變小，電阻變大，而在我們測得數據以及推導的結果的確符合此現象。

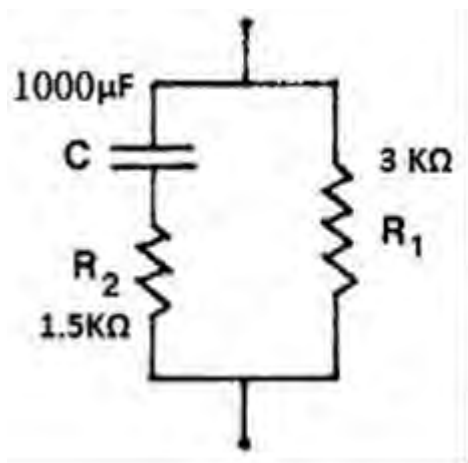
小結:由測得的數據得知，可以看出樟樹 2 測得的電阻以及電容值都較樟樹 1 高。電阻和電容有累加(串聯)的效應，確定我們的等效電路模型是正確的並且可以串聯。

下一步我們可以進行此等效電路的並聯實驗，來進一步驗證。

伍、 結論

植物維管束的電模型建構研究中，我們至目前為止確立了以下幾個事項：

- 一、 **探討喬木的電容效應**：從樹木的充放電曲線中的緩慢上升及下降的曲線變化，可以看出喬木中確實有電容效應，也促使我們進一步驗證喬木的等效電路模型。
- 二、 **首次建立喬木維管束的等效電路模型**：我們先利用自己假設的電路板來模擬植物內的等效電路，再藉由實測植株，觀察假設的電路板與植物實際的電位曲線變化，來判別到底何種假設才是正確的。經由電路板裝置偵測，**利用簡單的電子學原理推導出維管束的等效電路模型並確立電容特性**。本研究為第一次使用電路板來確立喬木內的等效電路模型。經由本研究確立的模型(如圖三十)以及公式推導可明確求出維管束的電阻值以及電容值。

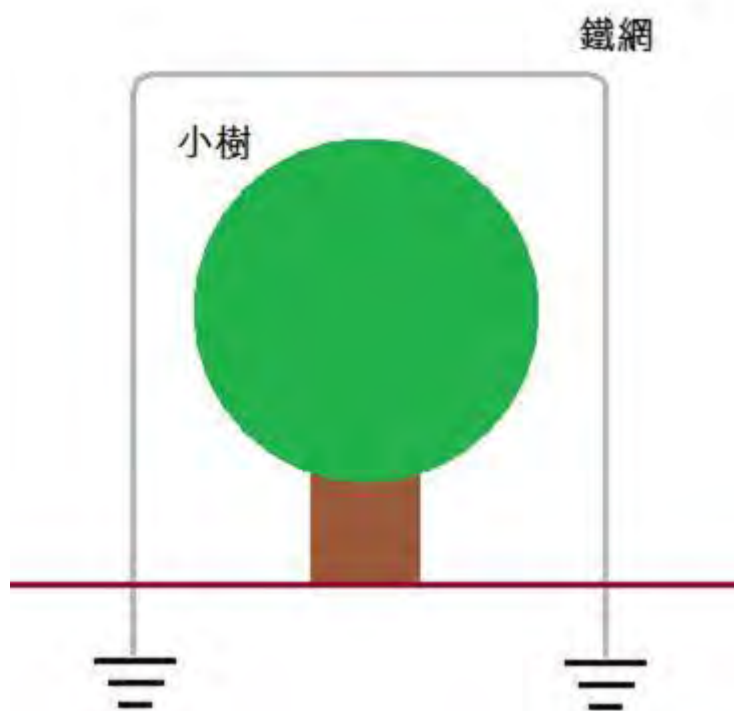


圖三十：本次實驗驗證的等效電路模型

- 三、 **探討喬木的串並聯效應**：在基本電學中可得知，串聯時電容變小，電阻變大，而在本研究中也可看出數據有此特性，因此我們可以進一步驗證此等效電路模型的正確性並有串並聯的效應。

陸、未來展望

- 一、利用此等效電路模型偵測植株健康情形，利用電訊號分析出，倘若發現數據與我們的實驗結果差異甚大，就可以推測它裡面是否有其他因素干擾導致數據不穩，再來探索。
- 二、利用此等效電路模型判斷植株有未接地，我們預測數據中會發現有接地的訊號較為穩定。
- 三、在不碰觸植株的情況下，利用鐵網將植株包圍並接地、隔離雜訊，使測量樹時無外在干擾，若加入鐵網隔離雜訊後測量植株的放電、可放電至零伏，就可得知未加以隔離雜訊裝置前的樹有外界干擾等因素。示意如下圖三十一



圖三十一:電離層相關實驗設計

柒、參考資料

Bose, J. C., 1907. Plant response as a means of physiological investigation.

Longman, Green & Co.

Bose, J. C., 1926. The nervous mechanism of plants. Longman, Green & Co.

Fromm, J. and Lautner, S., (2007), Electrical signals and their physiological significance in plants, *Plant, Cell and Environment*, 30: pp.249-257.

M. Zhang and J. H. M. Willison, "Electrical impedance analysis in plant tissues: the effect of freeze-thaw injury on the electrical properties of potato tuber and carrot root tissues," *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 72, pp. 545-553, 1992.

Sanderson, B., 1873. Note on the electrical phenomena which accompany stimulation of the leaf of *Dionea muscipula*. *Proc. Roy. Soc.*, 495-496.

台灣生態教育農園協會 2012年8月15日 台灣四季如春！外來種生物不是猛龍不過江！入台後不斷殘害原生種在台稱王稱后！http://www.eco-farm.org.tw/libary_02.asp?seq=15

【評語】 040706

題目具有創意巧思，但相關分析探討不足，可再進一步探究分析，以求結構的完整性。