

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

第三名

(鄉土)教材獎

030106

水電砲

學校名稱： 高雄市立七賢國民中學

作者： 國三 許景祐 國三 洪銘君	指導老師： 邱靖甯
---------------------------------	------------------

關鍵詞： 歐姆定律、流體、觸電

摘要

本研究最初的發想來自於任天堂寶可夢遊戲中的招式「水電砲」，對其感到好奇的我們便想藉由操作實驗來模擬其中的情形，並對於此招式能否在現實中實現，及其達成效果的可能性，提出質疑與猜測。

我們測量不同型態的出水裝置、不同流速的水流、觀測不同噴射距離，也調整電壓大小，發現這些變因都與水電砲的可行性有關，且意外發現流速會影響水柱的型態(連續柱狀還是出現水花狀態)，同時也對結果有顯著的影響。但也發現出水裝置的水壓、承受水電砲攻擊的導體厚度皆與測量結果無關。透過研究的進行，我們也了解許多尚未聽過的有趣知識，譬如關於流體的伯努利定律；導電率是什麼；什麼程度的觸電會造成傷害，綜合以上知識讓我們得到了想要的答案。

壹、前言

一、研究動機

不久前，日本任天堂寶可夢在釋出新遊戲的同時，也帶來了最近一波的更新，在最新的版本中有一個特別的招式—水電砲，該招式描述為：「發射強力的水砲攻擊，並放電麻痺對手，造成強大的傷害。」，是種能對敵人造成巨大損傷、甚至一命嗚呼的強力手段。我們想要了解現實中能否還原此現象—使通電液體流動並導通原不相連的兩導體。曾在理化課時學過若導體的電阻愈大，則實際電流量愈小，且當電阻達到一定大小時，若是電壓不夠大，電流也無法導通。

我們想探討的便是：此種招式的情境是否會受電阻過大因而無法通電？假使能夠導通，則需要多大的電壓？若要使威力足以致傷更甚至造成麻痺暈倒，則電流需要多大？水壓是否也造成導電結果不同？同時，水柱是穩定流動的情況下，對於電流的傳遞是否也與一般靜止液體導電不同？

綜合這些疑問，讓我們對於這遊戲的可行性及真實程度感到好奇，而且在做文獻探討的過程也看到許多研究證實「水滴」確實也能載著靜電移動，那麼還需要像遊戲中用到「水砲」的程度嗎？因此我們也參考了相關實驗裝置架設，並展開了本次研究。

二、研究目的

- (一)、儲水槽內水位是否影響數據測量
- (二)、導電片(體)厚度對於電流影響
- (三)、導電液流動垂直距離對於電流影響
- (四)、流體中通電電壓對於電流影響
- (五)、導電液流量對於電流影響

三、文獻探討

(一) 歐姆定律

在電路學裡，歐姆定律（英語：Ohm's law）表示：導電體兩端的電壓 V 與通過導電體的電流 I 成正比。關係式為： $V \propto I$ ，

藉此，對於任意導電體（電路、電路元件、甚至電阻器），

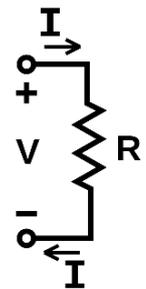
電阻 R 又定義為： $R = V / I$ ，且可得到下列方程式： $V = IR$

不論電流、電壓為何，電阻的定義都是電壓除以電流。

此外，任何導電物體都有電阻，即使超導體在一般溫度下也具有微小的電阻。

然而並不是每一種元件都遵守歐姆定律，此定律是經過多次實驗而推斷的法則，只有在理想狀況下，才會成立。凡是遵守歐姆定律的元件或電路都稱為「歐姆元件」或「歐姆電路」或「歐姆式導體」，其電阻與電流、電壓的變動無關；不遵守歐姆定律的元件或電路稱為「非歐姆元件」或「非歐姆電路」或「非歐姆式導體」，其電阻大小可能會與電流、電壓的變動有關。

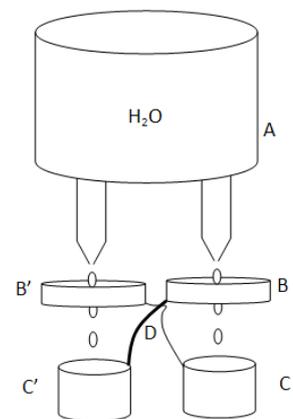
本圖取自維基百科『歐姆定律』



(二) 開爾文滴水起電機(Kelvin Water Drop)

開爾文滴水起電機是一種靜電起電機，於 1867 年由英國科學家開爾文爵士威廉·湯姆森發明。這個裝置利用靜電感應，再利用滴落的水滴，並藉著交互相關、但帶相反電荷的系統中產生電位差(電壓)。

如圖所示，裝有導電液體的容器下有兩個洞或管子，



本圖取自中文百科全書『開爾文滴水起電機』

產生兩條水流，每條水流穿過導電環後，各自落入容器中(一般容器需導電，例如金屬水桶)。兩個承接水流的容器必須彼此絕緣，且對地面絕緣，水流落入容器前，必須確保將其已散成水滴。

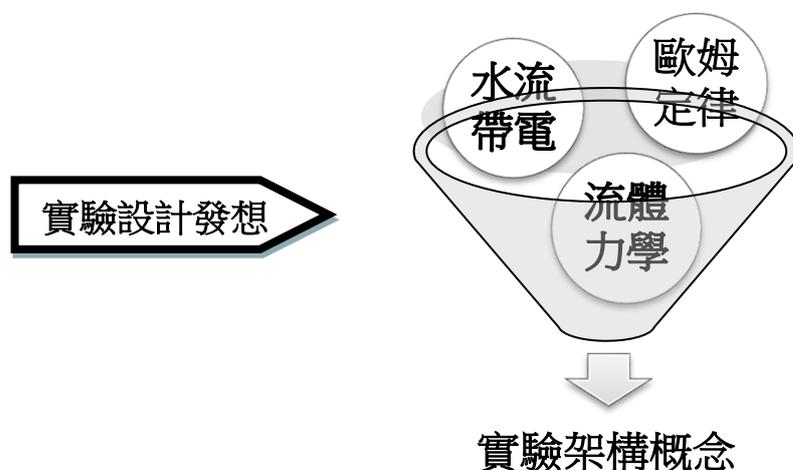
(三) 電解質水溶液會導電？

節錄自科技大觀園，清華大學化學系 邱紀良 教授 撰寫文章

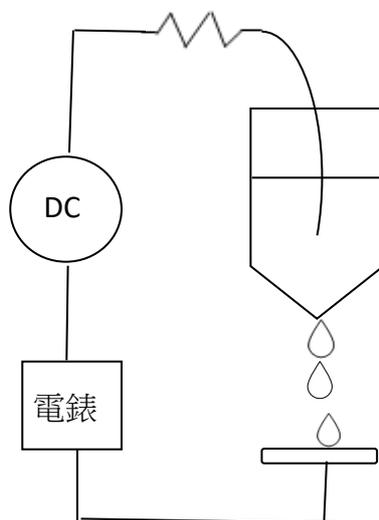
『電解質水溶液會導電嗎?』電解的反應是必要的:

電解質電路中的那杯溶液不但是一個電阻，還必須是一個能產生電化學反應的電解槽。阿瑞尼斯的兩個導電條件只定義了什麼是電解質，若要解釋外部電路上有持續的電流，就應該加入第三個條件：其溶液必須能產生電化學反應。

另外「溶液能導通電流的程度與溶液中的離子數目成正比」這句話並不完整。比較完整的說法是：「只有能被電解的溶液才能夠導通電流，溶液能被電解時，其導通電流的程度與電解反應的速率成正比。」溶液要能夠被電解，有兩個必要的條件：外部所提供的電壓差夠高，以及內部有足夠的電化學反應物質。

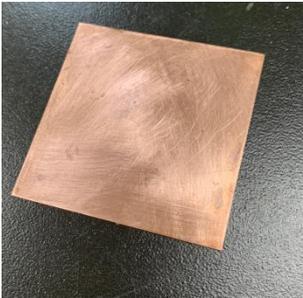
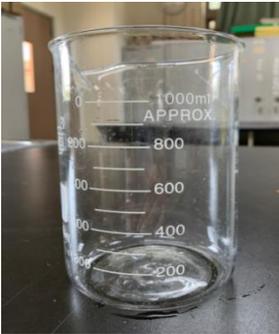
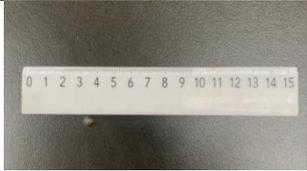


(四) 實驗架設預想圖

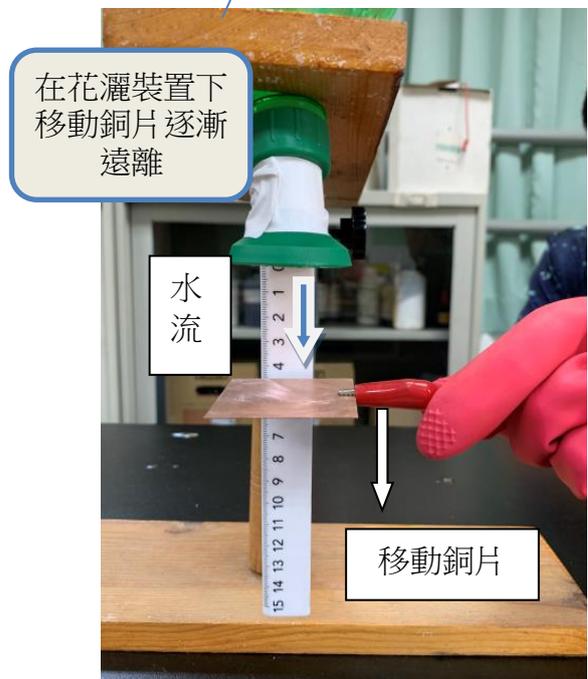


貳、研究器材與設備

一、器材 本頁照片皆由作者親自拍攝

電源供應器	三用電錶	電子秤	儲水容器
			
精鹽	銅片 1.0mm,0.2mm	1000ml 燒杯	秤量紙
			
防水膠帶	電線	橡膠手套	尺
			
2kΩ 電阻	花灑轉接頭 大花灑:37 孔	花灑轉接頭 小花灑:35 孔	水柱出水孔 (直徑 0.5cm)
			

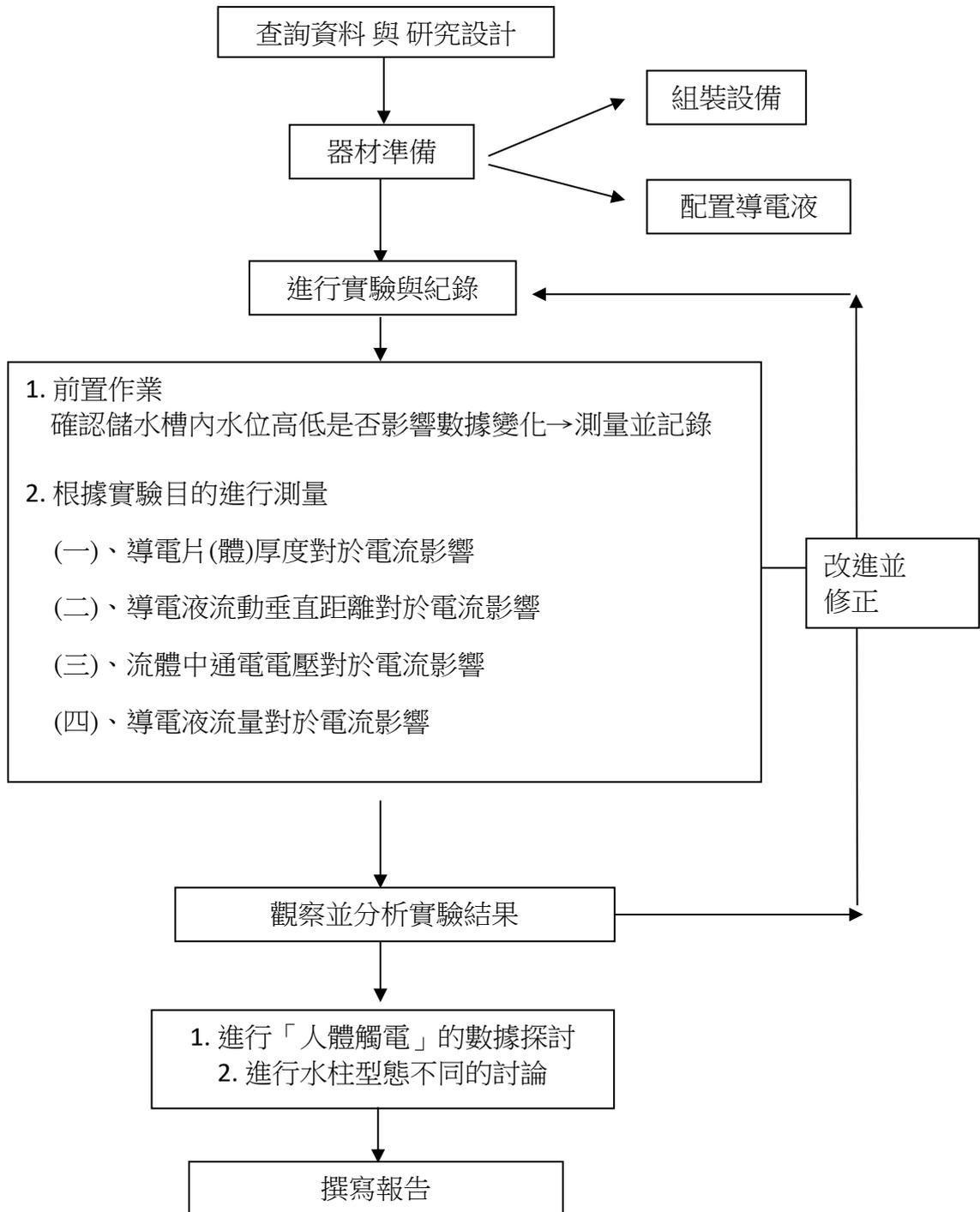
二、實驗架設與流程



本頁照片皆由作者親自拍攝

參、研究過程與方法

一、研究架構流程



二、實驗設計

共同控制變因: 導電液濃度(1M 食鹽水)、溶液溫度(常溫 26°C)

(一) 實驗一、儲水槽內水位是否影響數據測量

控制變因: 電源輸出(直流 5V)、銅片厚度(0.2mm)、出水孔大小。

操縱變因: 儲水部分水位高度(介於垂直高 5~17cm 處)。

記事: 執行此實驗時，我們將銅片維持於一定高度，待容器中的溶液水位不斷降低，觀測三用電表的即時數據。

(二) 實驗二、導電片(以下稱銅片)厚度對於電流影響

控制變因: 電源輸出(直流 5V)、水壓(定值)、花灑大小。

操縱變因: 銅片厚度(0.2mm 與 1.0mm)

記事: 為使水壓固定，我們在儲水容器中不斷加水，使其維持在一定高度，使數據維持於較理想狀態，如下圖中所示。



此項目照片皆由作者親自拍攝
圖 1-1，水壓定值示意

(三) 實驗三、導電液流動垂直距離(灑水部分)對於電流影響

控制變因: 電源輸出(直流 5V)、銅片厚度(0.2mm)、出水孔大小、水壓。

操縱變因: 出水孔與銅片距離。

(四) 實驗四、通電電壓對於電流影響

控制變因:銅片厚度(0.2mm)、出水孔大小、水壓。

操縱變因:電源輸出電壓(3V、5V、7V)。

記事:更換出水孔，再次進行實驗。

(五) 實驗五、導電液流速對於電流影響

控制變因:電源輸出(直流 3V、5V、7V)、銅片厚度(0.2mm)、水壓

操縱變因: 出水孔 (流速不相同的大小花灑以及水柱，導電截面積相同)

記事:先利用空燒杯在出水口下方接水，計算單位時間流量(流速)。

肆、研究結果

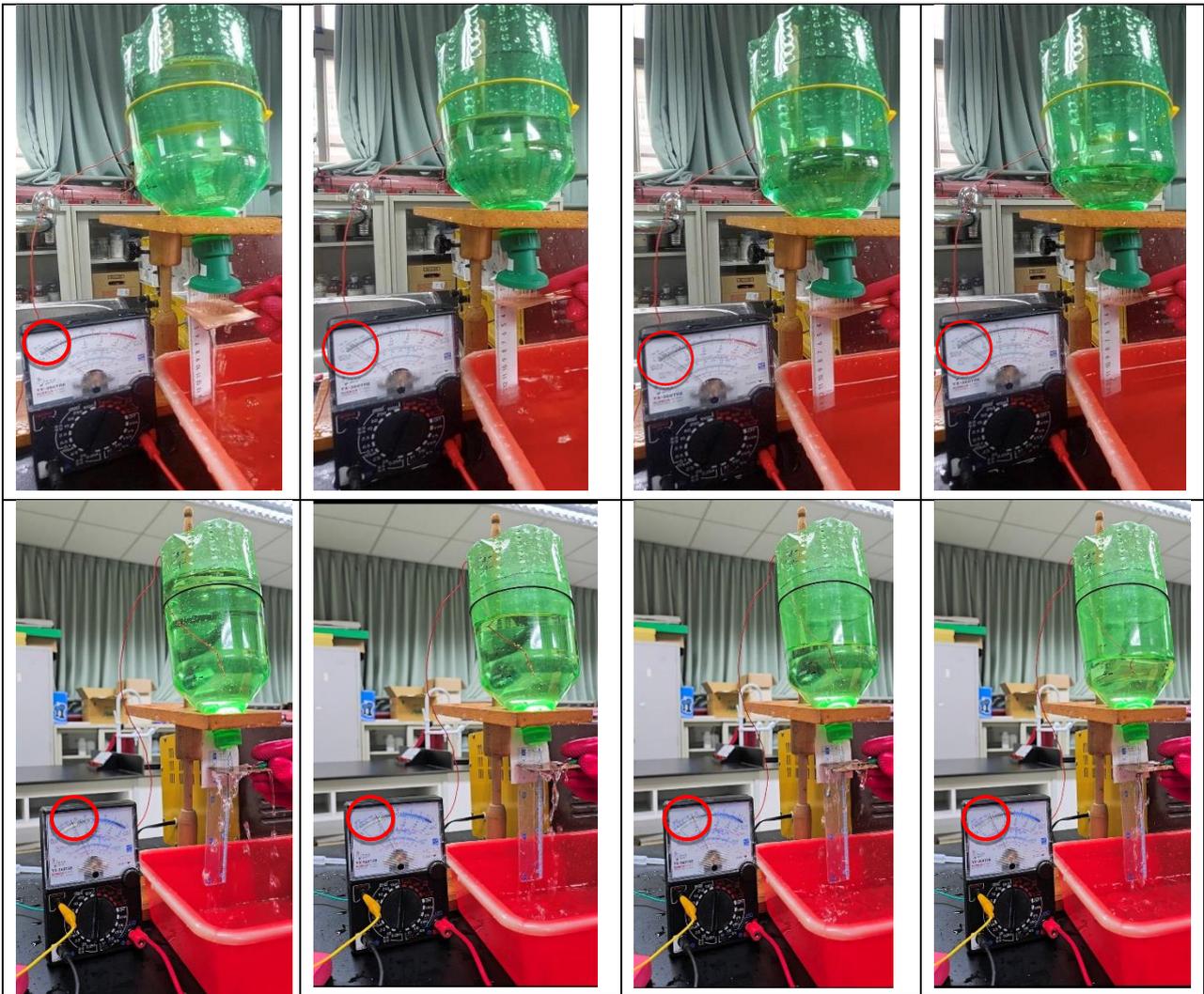
一、實驗一: 儲水槽內水位是否影響數據測量

由於儲水槽具有一定的體積與深度，為確認不同水位高度是否會影響我們在下方測量同一定點時的電流數據，我們設計了以下實驗: 將銅片固定位置，使水流自儲水槽由水位高到低不斷流出(約 17cm 水位差)，我們錄影觀察電流數據是否會變化。

(一) 實驗過程錄影 此項目照片皆由作者親自拍攝

(第 1 行: 直流電壓 5V ; 第 2 行: 直流電壓 3V ; 第 3 行: 水柱 5V)





(二) 結果分析

從左至右為不同條件下自高水位至低水位時，銅片固定擺放於距出水口 2cm 處，我們拍攝電流變化的影片並截圖，仔細觀察指針(紅色圈圈內) 可以發現電錶數值並沒有明顯起伏，不論是較高的電壓 5V、較小的電壓 3V，亦或是水柱下落，不同的電壓與出水型態下，皆可在固定位置測量到水位高度不影響電流值，對此，我們認為：儲水槽內水位高低對於電流大小的測量值沒有影響。 也因此我們可以利用此裝置完成後續實驗。

二、實驗二: 導電片厚度對於電流影響

(一) 實驗數據

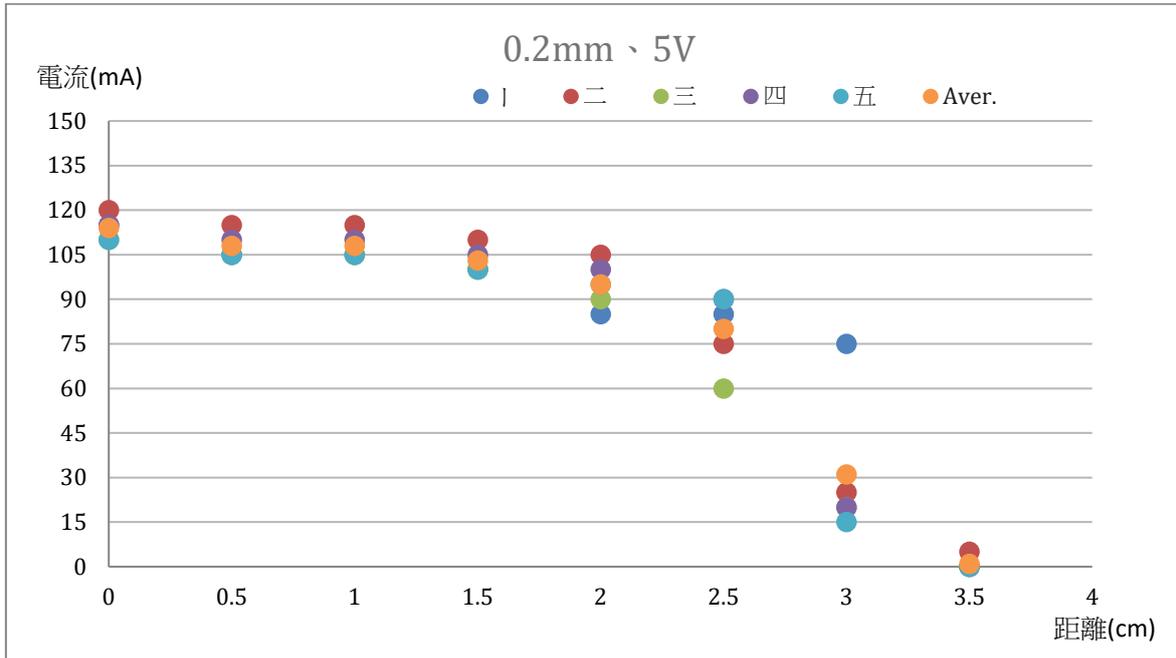


圖 2-1, 0.2mm 銅片(橫坐標為距出水口距離 cm, 縱坐標為毫安培 mA)

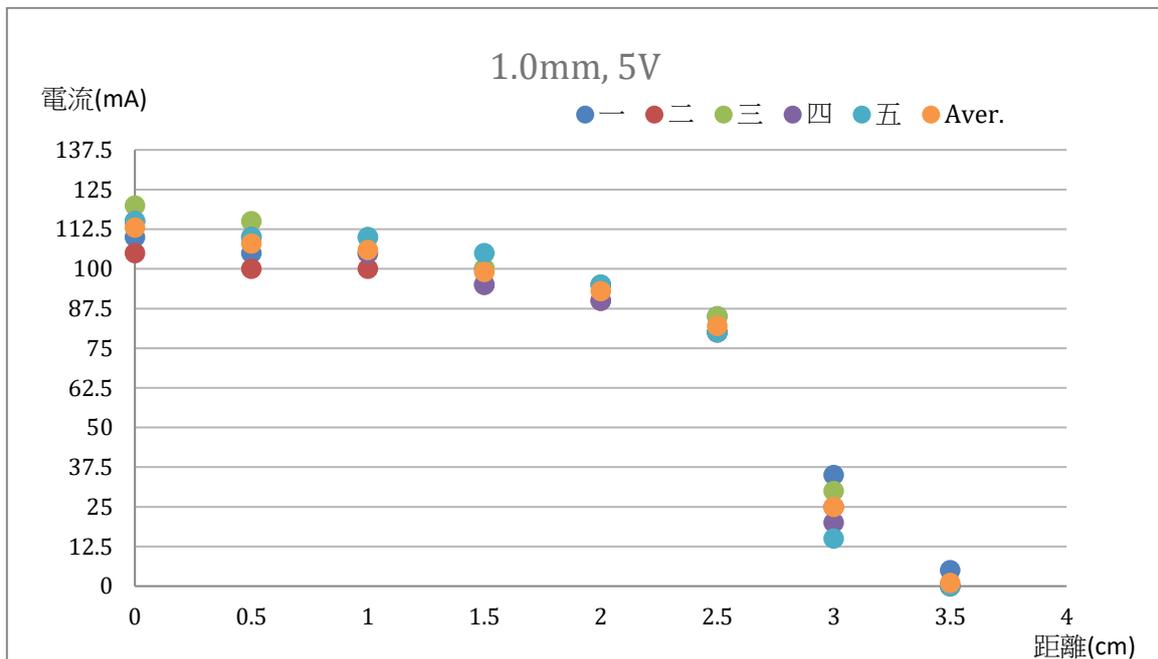


圖 2-2, 1.0mm 銅片(橫坐標為距出水口距離 cm, 縱坐標為毫安培 mA)

備註:圖例中「線性 Aver.」為數據平均值的趨勢

電阻 $R = V/I$ ($\Omega = V / A$) (以平均值計算，四捨五入至小數點後二位)

	0cm	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm
0.2mm 銅片	43.86	46.30	46.30	48.54	52.63	62.50	217.39	5000
1.0mm 銅片	44.40	46.47	47.71	50.61	54.00	60.68	200.00	4166.6

(二) 結果分析

根據兩者的對比，不難發現，圖表中數據的分布非常接近，並且電阻數值也是相去不遠的。對此，我們認為銅片(承受水流衝擊的物體)厚薄並不會對電流造成明顯的影響。

三、實驗三:導電液流動垂直距離對於電流影響

(一)實驗數據- 1: 大小花灑數據 (皆以平均值作圖)

(大花灑)

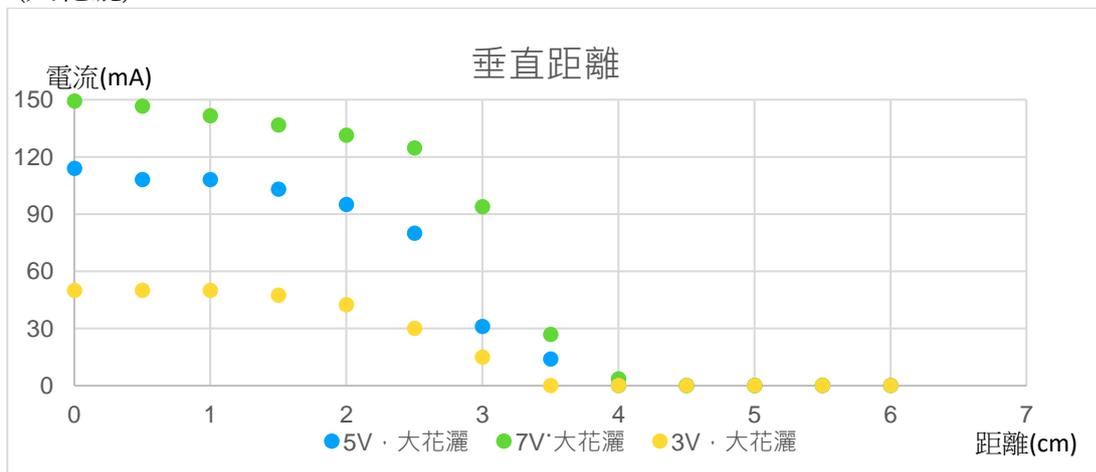


圖 3-1，流動距離(橫坐標為距出水口距離 cm，坐標為毫安培 mA)

(小花灑)

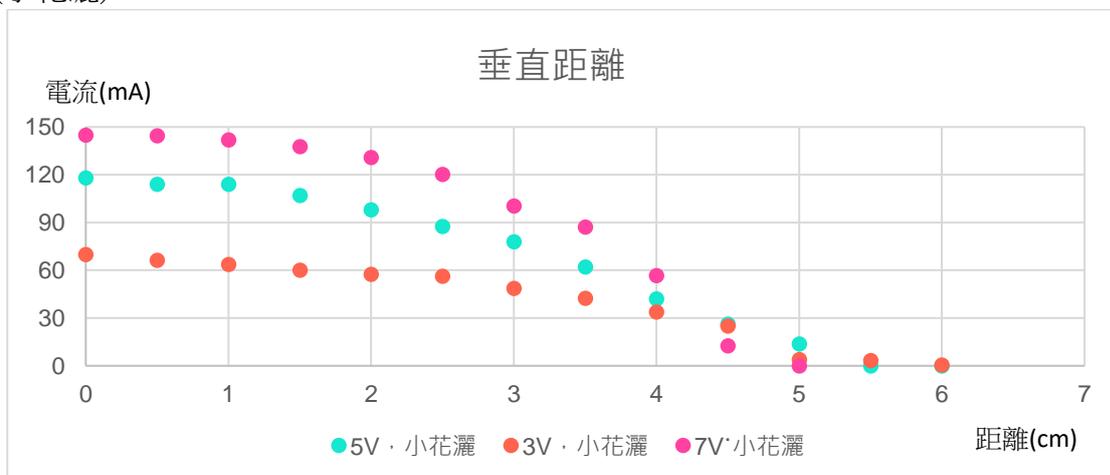


圖 3-2，流動距離(橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

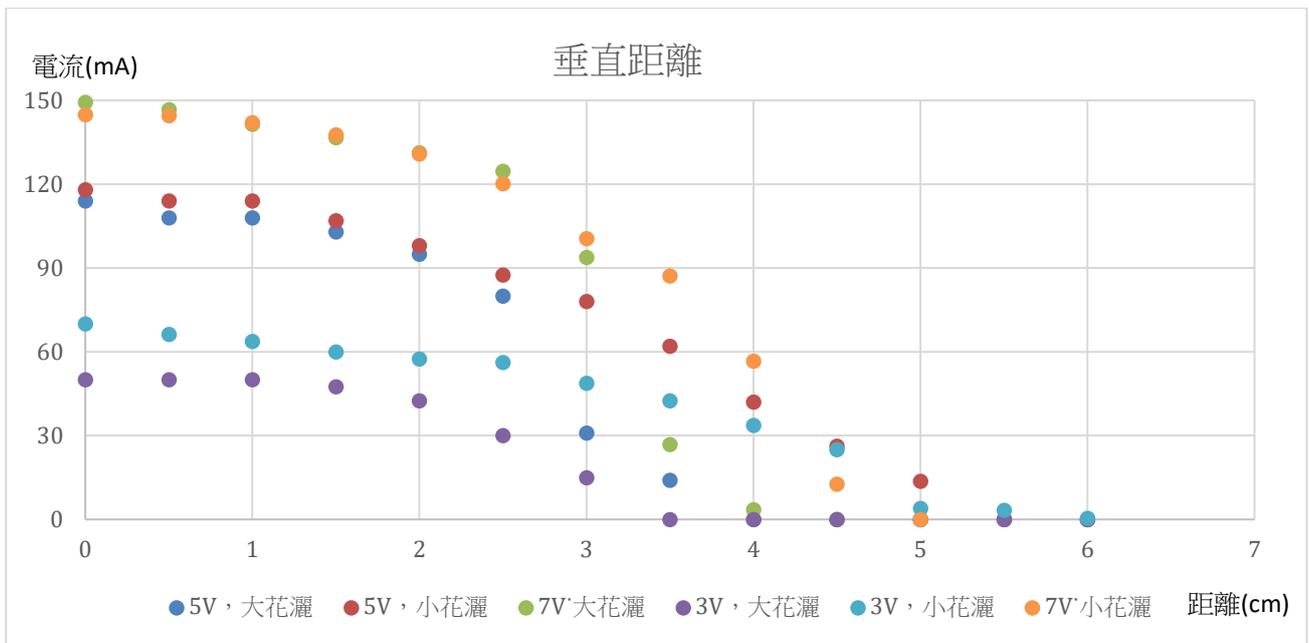


圖 3-3，流動距離(橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

(二)結果分析- 1

根據上圖可以得知:

1. 隨著導電液流動垂直距離(出水口與銅片相對距離)逐漸拉長，實際電流大小也會逐漸下降，差異約是 10mA。
2. 但大花灑在大約 2.5cm 後，電流值下降非常明顯，而小花灑卻在 4.5cm 後才有明顯斷層的現象，且電壓的變化看起來不影響斷層的位置。
3. 大花灑在銅片距出水口約 4cm 處、小花灑在銅片距出水口約 5cm 處，會開始測量不到電流值。

(三)實驗數據- 2：水柱數據

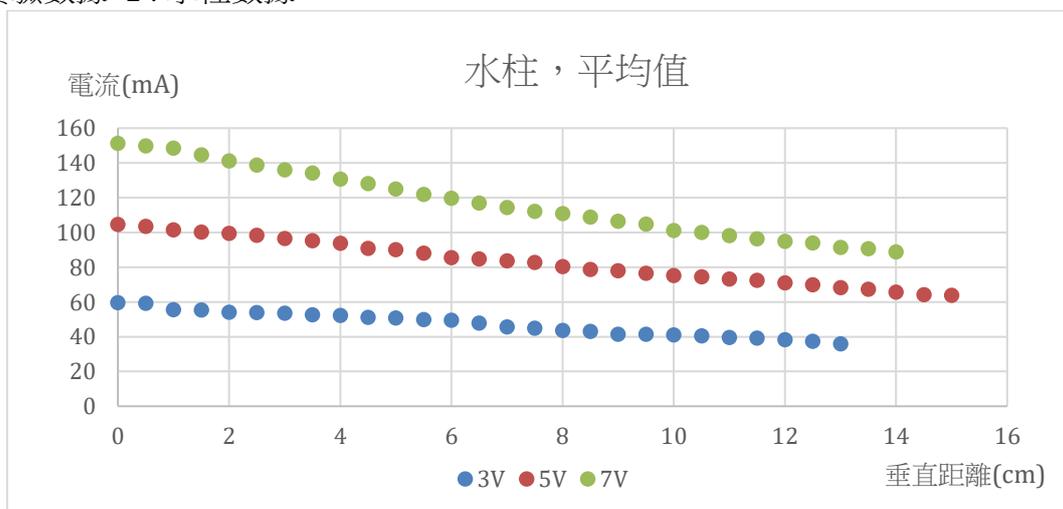


圖 3-4，流動距離(橫坐標為距出水口距離 cm，坐標為毫安培 mA)

(四)結果分析- 2

根據上圖可以得知:

1. 水柱的電流變化呈現連續性、無斷層現象，且至銅片接觸到最下方水盆前 (約距離出水口 15cm 處) 仍能測量到數據，不像花灑裝置會在特定距離開始測不到電流。
2. 每增加 0.5cm 的距離，電流差值不超過 3mA。

四、實驗四:流體中通電電壓對於電流影響

(一) 實驗數據-1 : 大花灑

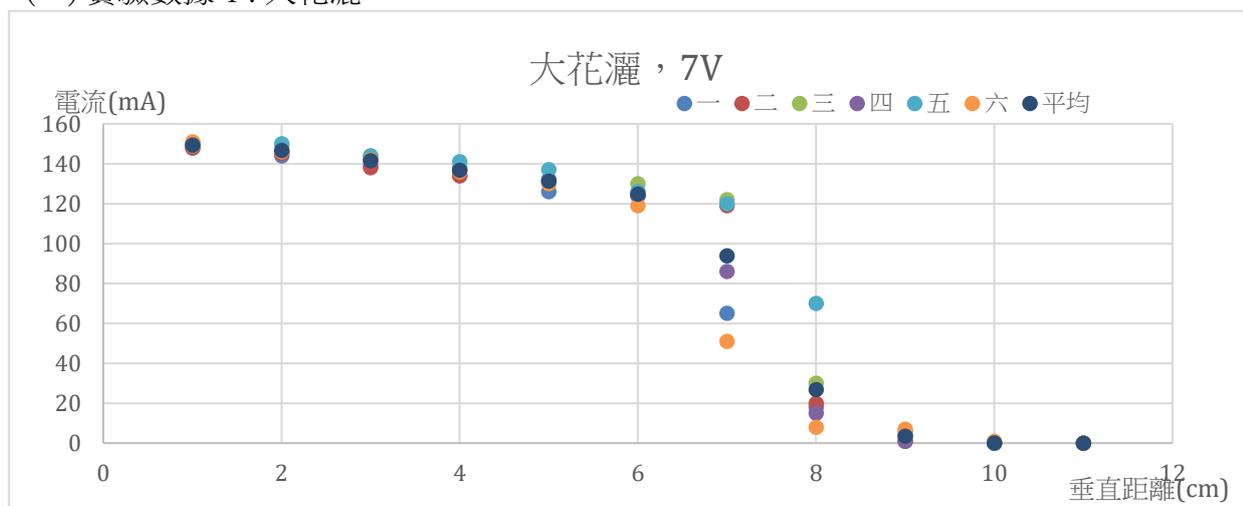


圖 4-1，大花灑電壓 7V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

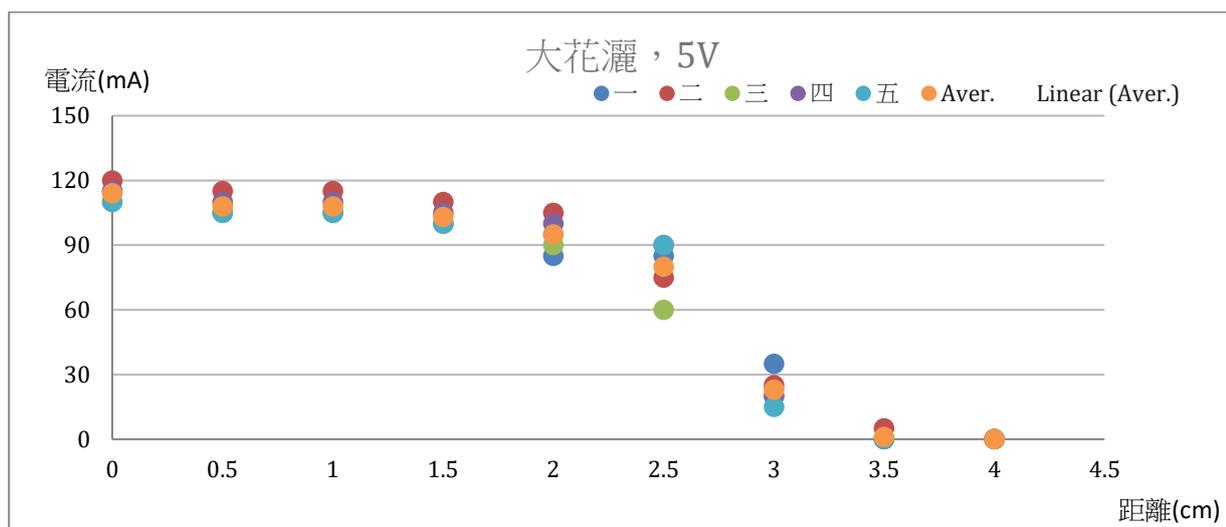


圖 4-2，大花灑電壓 5V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

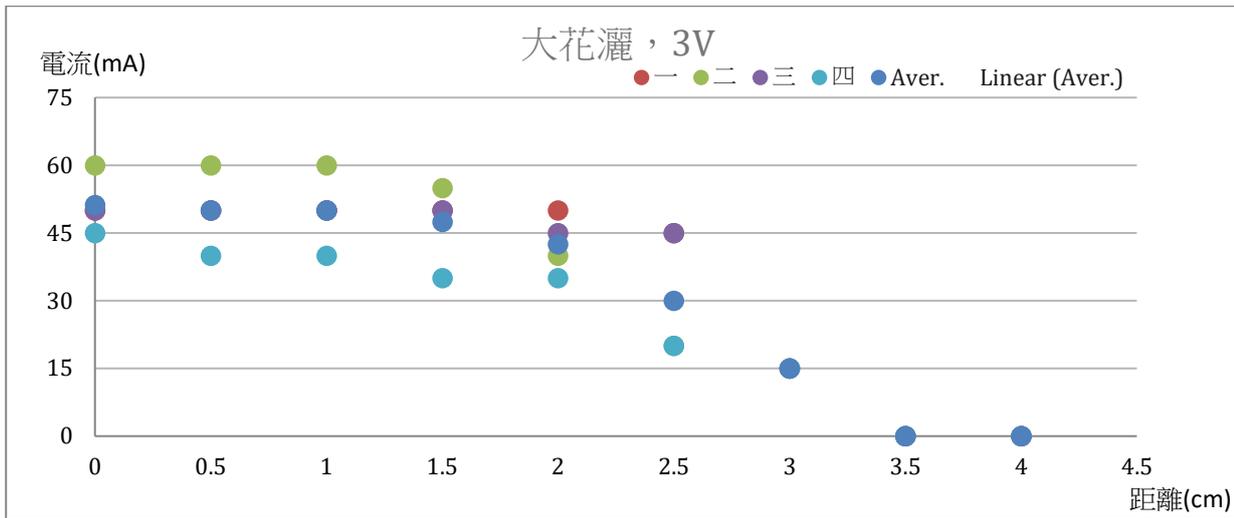


圖 4-3，大花灑電壓 3V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

電阻 $R = V/I$ ($\Omega = V / A$) (以平均值計算，四捨五入至小數點後二位)

Ω	0cm	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm
大花灑 7V	46.88	47.73	49.47	51.22	53.30	56.15	74.60	260.87
大花灑 5V	43.86	46.30	46.30	48.54	52.63	62.5	217.39	5000.0
大花灑 3V	58.54	60.00	60.00	63.16	70.59	100.00	200.00	--

(-- 表示分母 I 為零，無法進行運算。)

(1) 結果分析-大花灑

- 在計算數值時，發現 5V 組的電阻在除以 3V 組的電阻後，再乘上 5V 組的電阻除以 3V 組的電阻後得到的數值(係數)，約為 1.666 倍至 1.667 倍。對此，我們認為，電壓和電流在此實驗中確實存在正比關係。

e.g. 0cm: $(114\text{mA}/51.25\text{mA}) \times (43.86\ \Omega / 58.54\ \Omega) = 1.6665878266$ (約為 5V/3V 之值)

2.5cm: $(80\text{mA}/30\text{mA}) \times (62.5\ \Omega / 100\ \Omega) = 1.666\cdots$ (即為 5V/3V 之值)

- 電壓在 5V 時電阻值較小，電壓在 7V 時電阻值又增加，推測是電流值雖有增加，但在高電壓時電流增加並未等比例上升，代表此狀態下可導通的電流是有極限的。

(二) 實驗數據-2: 小花灑

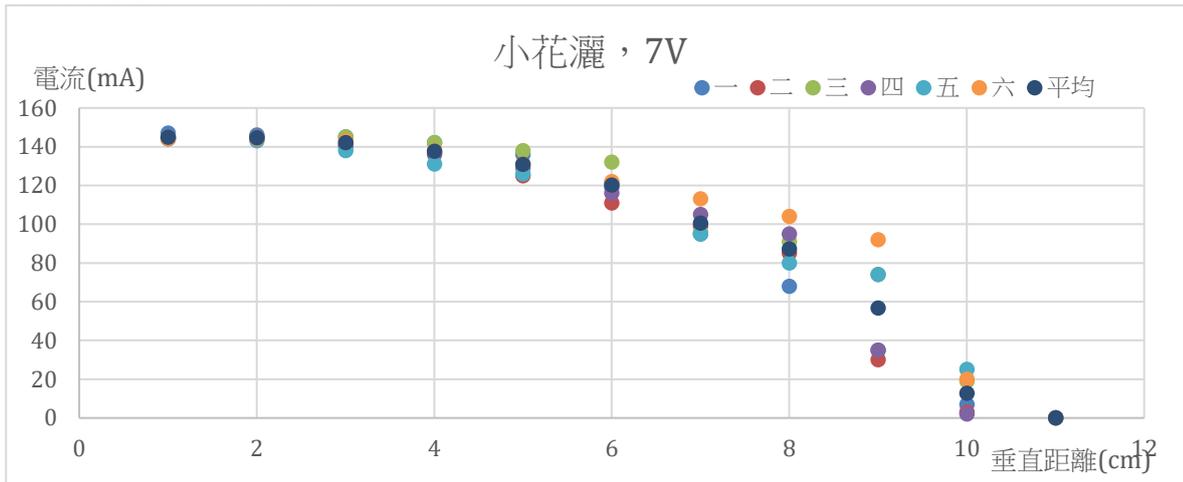


圖 4-4, 小花灑電壓 7V (橫坐標為距出水口距離 cm, 縱坐標為毫安培 mA)

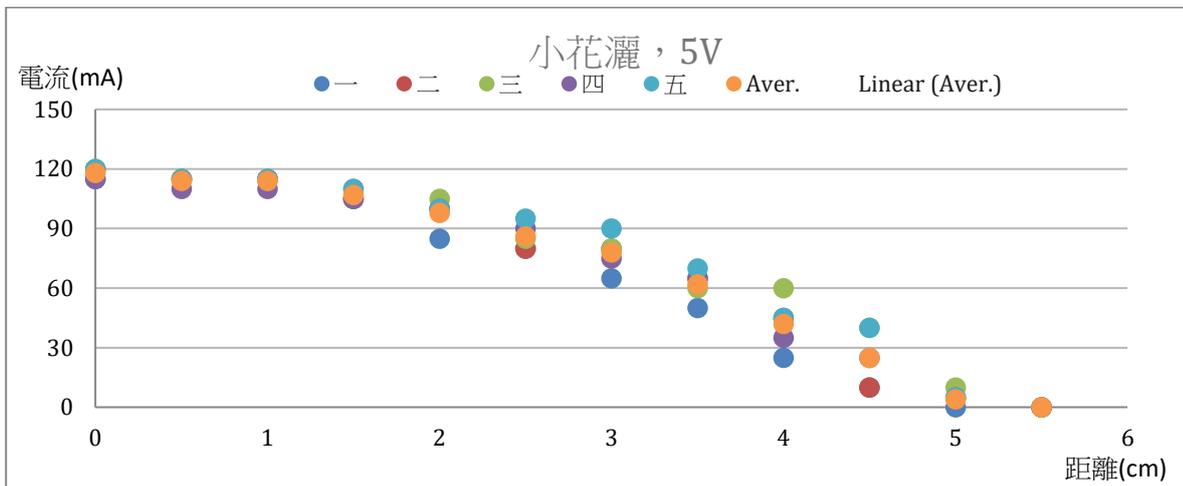


圖 4-5, 小花灑電壓 5V (橫坐標為距出水口距離 cm, 縱坐標為毫安培 mA)

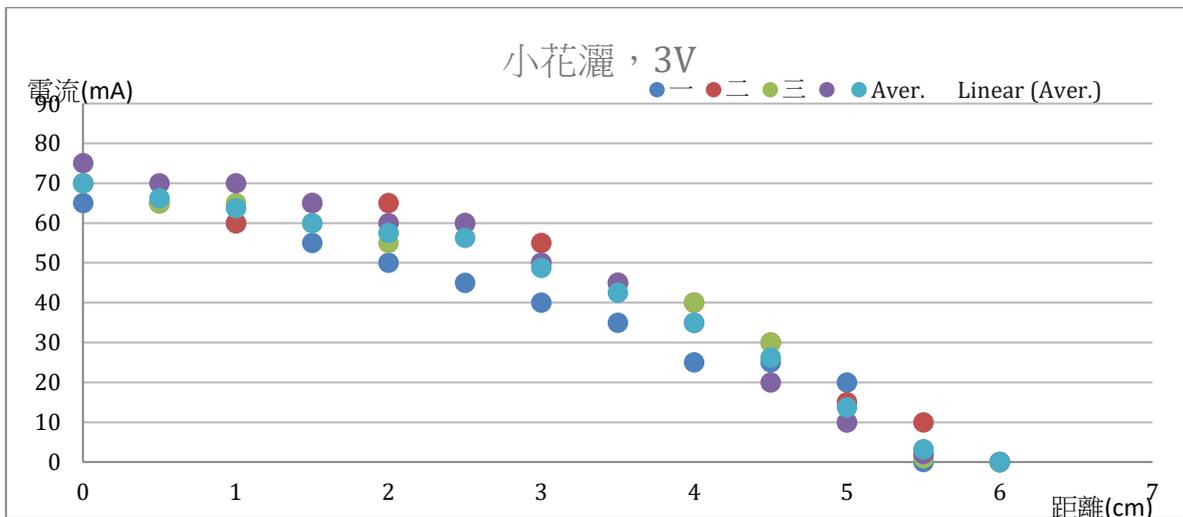


圖 4-6, 小花灑電壓 3V (橫坐標為距出水口距離 cm, 縱坐標為毫安培 mA)

電阻 $R = V/I$ ($\Omega = V / A$) (以平均值計算，四捨五入至小數點後二位)

	0cm	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm	4.0cm	4.5cm	5.0cm
小花灑 7V	48.33	48.44	49.30	50.85	53.50	58.25	69.65	80.31	123.53	552.64	--
小花灑 5V	42.37	43.86	43.86	46.73	51.02	58.14	80.65	80.65	119.04	200.00	1250.00
小花灑 3V	42.86	45.28	47.06	50.00	52.17	53.33	61.54	70.59	85.71	114.28	218.18

(-- 表示分母 I 為零，無法進行運算。)

(1) 結果分析-小花灑

1. 在計算數值時，發現 5V 組的電流在除以 3V 組的電流後，再乘上 5V 組的電阻除以 3V 組的電阻後得到的數值(係數)，約為 1.666 倍至 1.667 倍。對此，我們認為，電壓和電流在此實驗中確實存在正比關係。

e.g. 0cm: $(118\text{mA}/70\text{mA}) \times (42.37\Omega / 42.86\Omega) = 1.66644223717$ (約為 5V/3V 之值)

2.5cm: $(86\text{mA}/56.25\text{mA}) \times (58.14\Omega / 53.33\Omega) = 1.66678417399$ (約為 5V/3V 之值)

2. 電壓在 5V 時電阻值較小，電壓在 7V 時電阻值又增加，推測是電流值雖有增加，但在高電壓時電流增加並未等比例上升，代表此狀態下可導通的電流是有極限的。

(三) 實驗數據-3：水柱

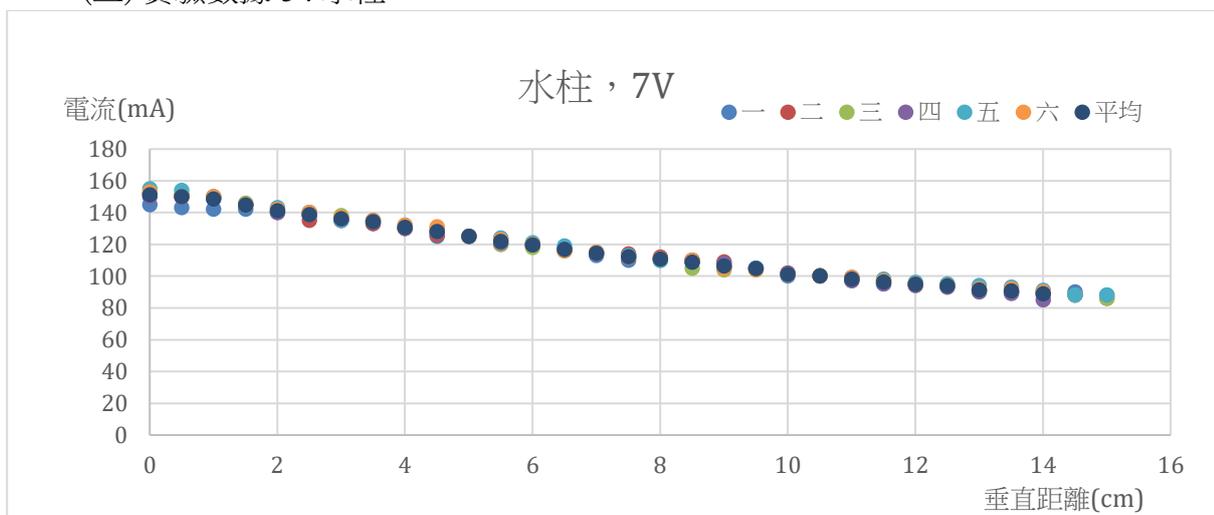


圖 4-7，水柱電壓 7V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

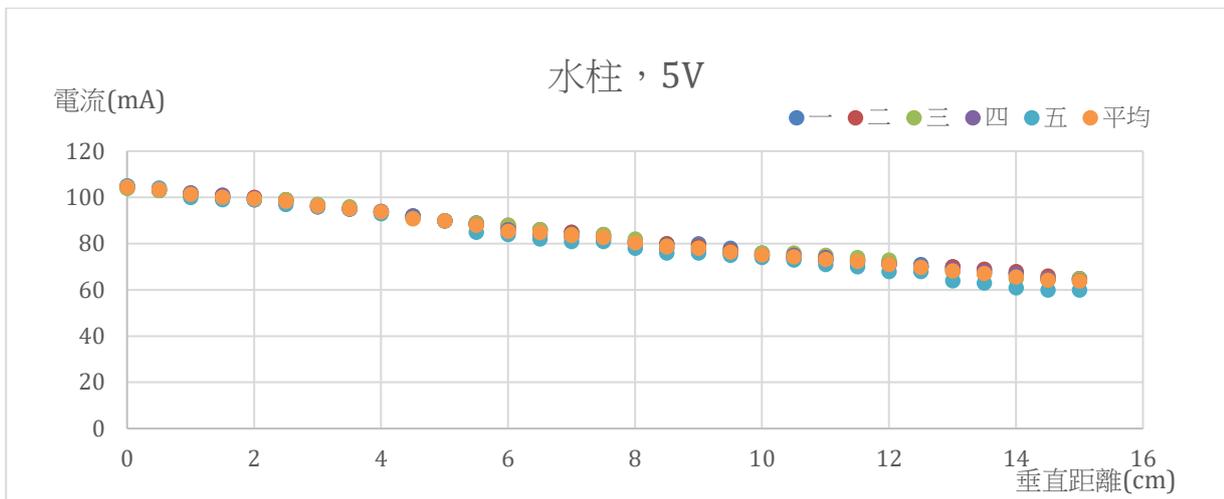


圖 4-8，水柱電壓 5V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

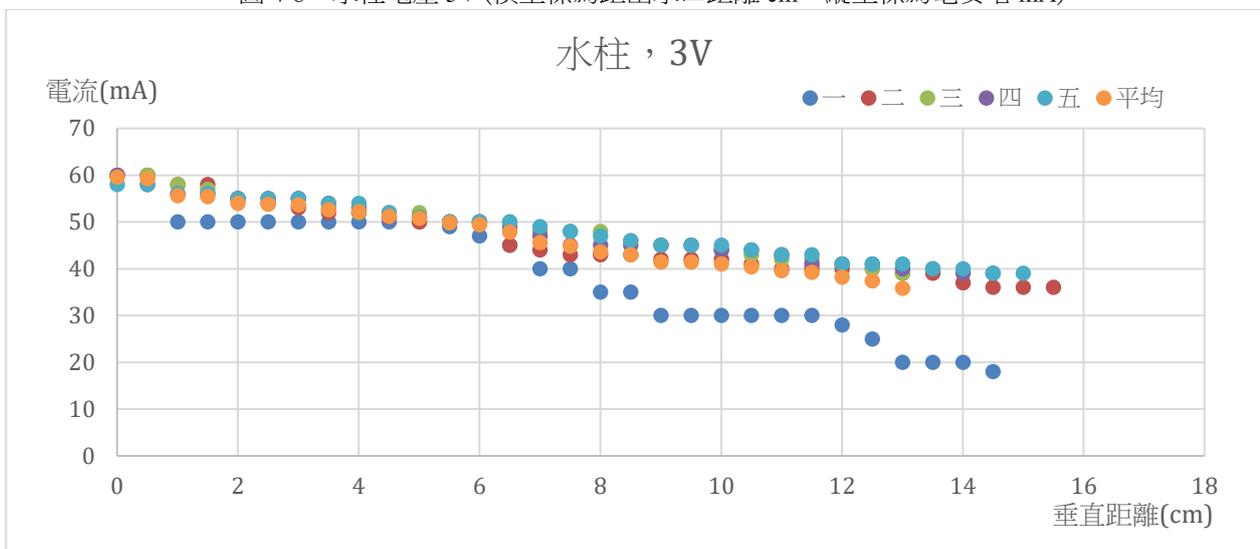


圖 4-9，水柱電壓 3V (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

電阻 $R = V/I$ ($\Omega = V / A$) (以平均值計算，四捨五入至小數點後二位)

	0cm	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm	4.0cm	4.5cm	5.0cm
水柱 7V	46.31	46.72	47.14	48.39	49.59	50.48	51.47	52.17	53.57	54.59	56.00
水柱 5V	47.80	48.36	49.31	49.90	50.30	50.81	51.87	52.52	53.30	55.07	55.56
水柱 3V	50.34	50.68	53.96	54.15	55.56	55.76	55.97	57.03	57.47	58.59	59.11

(1) 結果分析- 水柱

1. 水柱流動較穩定，測量後的電流與電阻值與花灑裝置的前段數據相去不遠。
2. 電壓增加時，電流值也穩定增加。

五、實驗五：導電液流量對於電流影響

(一) 此部份我們針對兩種狀況進行實驗測量

1. 對照組:靜止液體，改變導電片距離及電壓，進行電流測量。
2. 不同出水裝置流量測量: 流量計算方式如下

測量相同水量通過我們架設的裝置所需時間(各測量 10 次)，並計算平均值得知:

- (1). 大花灑單位時間流量 = $250\text{mL}/14.637\text{s} \approx 17.08\text{mL/s}$
- (2). 小花灑單位時間流量 = $250\text{mL}/10.666\text{s} \approx 23.44\text{mL/s}$
- (3). 水柱單位時間流量 = $250\text{mL}/11.386\text{s} \approx 21.96\text{mL/s}$

→ 流量大小依序為: 小花灑 > 水柱 > 大花灑

(二)實驗數據:

1. 對照組 (靜止液體)

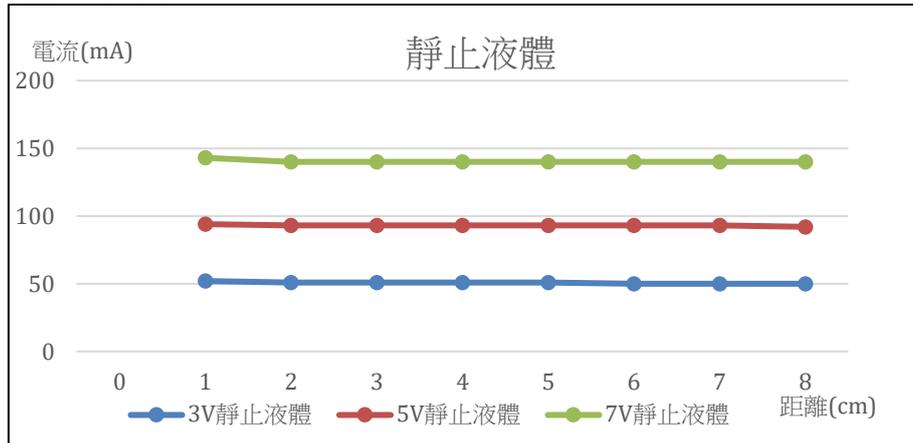


圖 5，靜止液體，不同電壓下，導電片距離與電流關係 (橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

2. 流速組: 相同電壓下，比較電流關係 (皆以平均值作圖，水柱只取到 5cm 處)

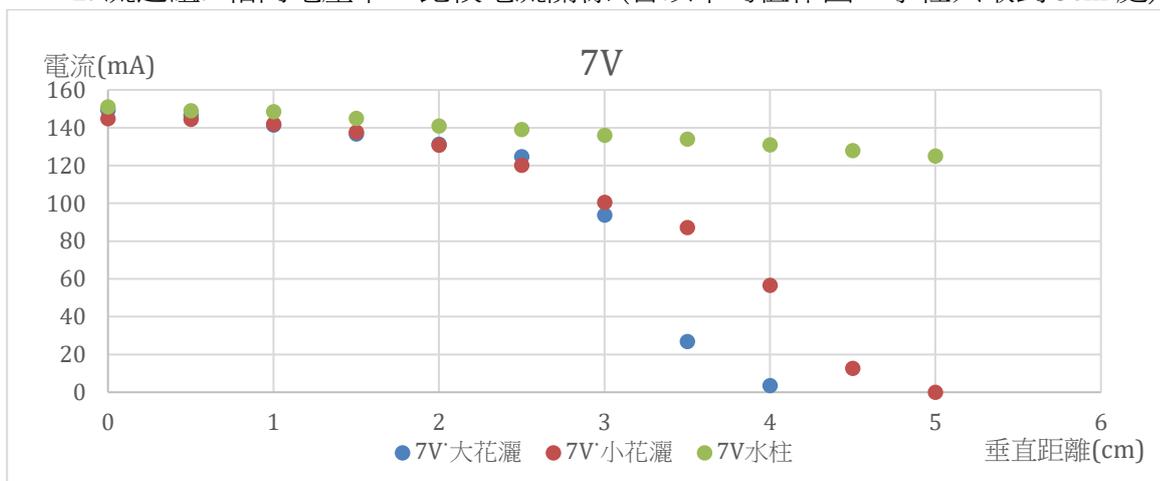


圖 5-1，電壓 7V、不同出水裝置(橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

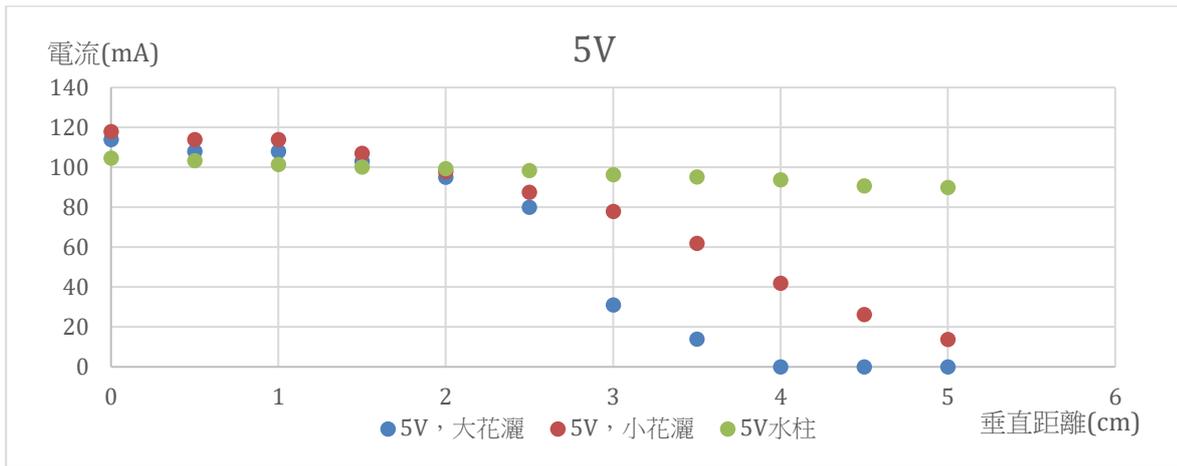


圖 5-2，電壓 5V、不同出水裝置(橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

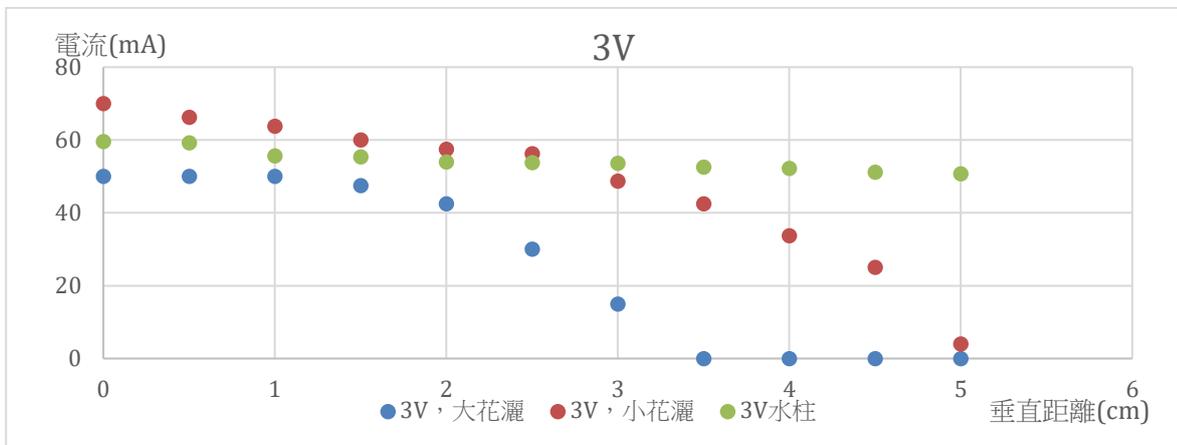


圖 5-3，電壓 3V、不同出水裝置(橫坐標為距出水口距離 cm，縱坐標為毫安培 mA)

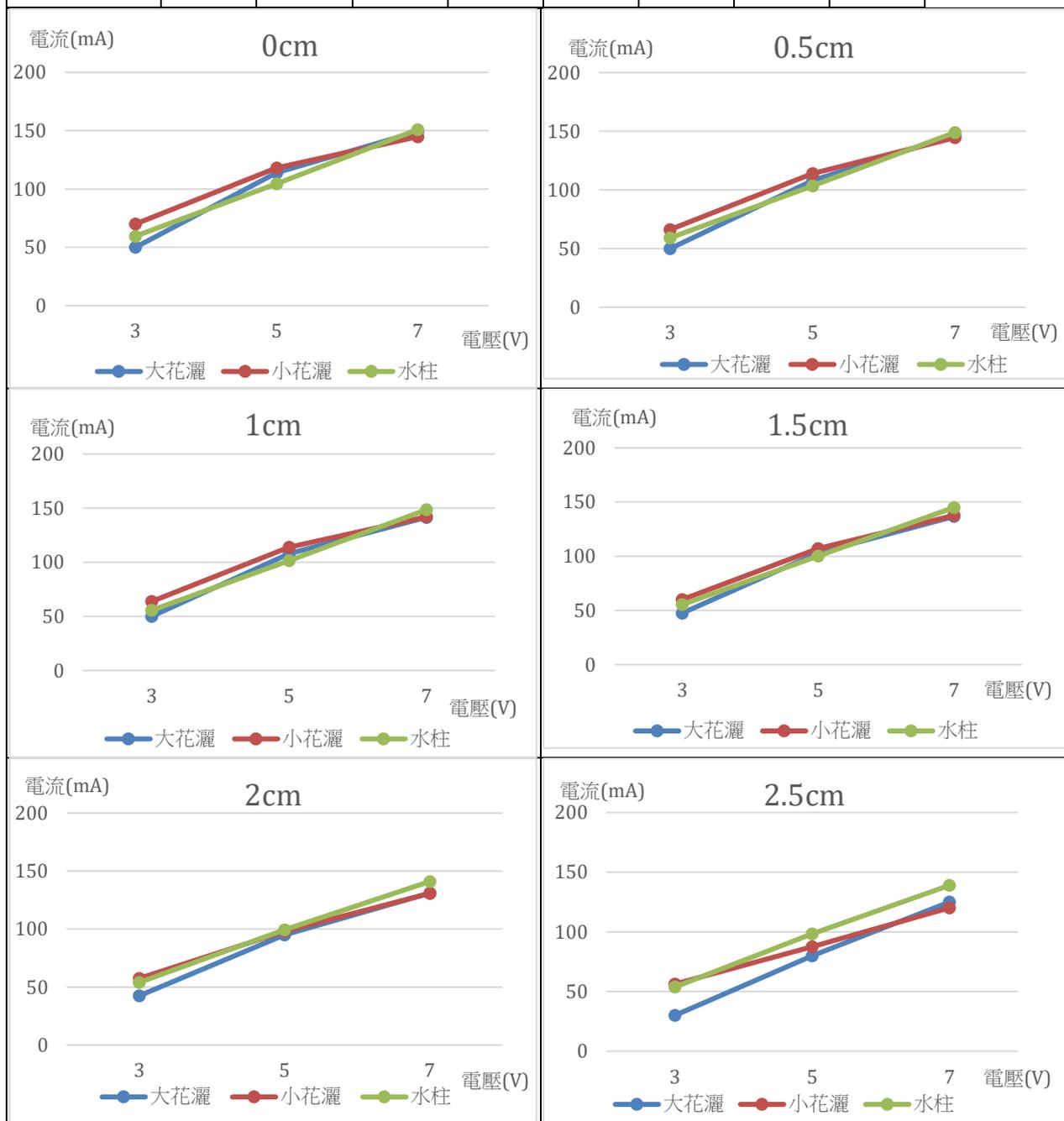
(三)結果分析

1. 由數據圖表前半部可觀察到:

\mA\cm	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
3V，小花灑	70	66	64	60	58	56	49	43	34	25	4
3V 水柱	60	59	56	55	54	54	54	53	52	51	51
3V，大花灑	50	50	50	48	43	30	15	0	0	0	0
\mA\cm	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
5V，小花灑	118	114	114	107	98	88	78	62	42	26	14
5V 水柱	105	103	101	100	99	98	96	95	94	91	90
5V，大花灑	114	108	108	103	95	80	31	14	0	0	0
\mA\cm	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
7V，小花灑	145	145	142	138	131	120	101	87	57	13	0
7V 水柱	151	149	149	145	141	139	136	134	131	128	125
7V，大花灑	149	147	142	137	131	125	94	27	4	0	0

並對照靜止液體所測得的電流值(mA):

銅片距離	cm	1	2	3	4	5	6	7	8
3V		52	51	51	51	51	50	50	50
5V		94	93	93	93	93	93	93	92
7V		143	140	140	140	140	140	140	140



此部份我們取銅片距出水口 0~2.5cm 的數據討論，此段數據不論出水裝置型態(大、小花灑、水柱) 皆未出現斷層 (斷層原因在下段討論)，水流狀態穩定。

發現以下現象:

1. 靜止液體在兩電極相距大約 8 公分內，不論我們如何移動電極，所測得的電流值幾乎沒有變化。

2. 相同電壓下:

3V 及 5V 的情況下，流量大的小花灑電流較大，其次是流量第二名的水柱，尤其在 3V 時明顯可見到這項電流差異。到了 7V 時，雖然所有的裝置電流值都增大，但原先流量大的小花灑數值不再是最高，反而是水柱為最大值。此目前可推測電流的導通與流量大小較有關。

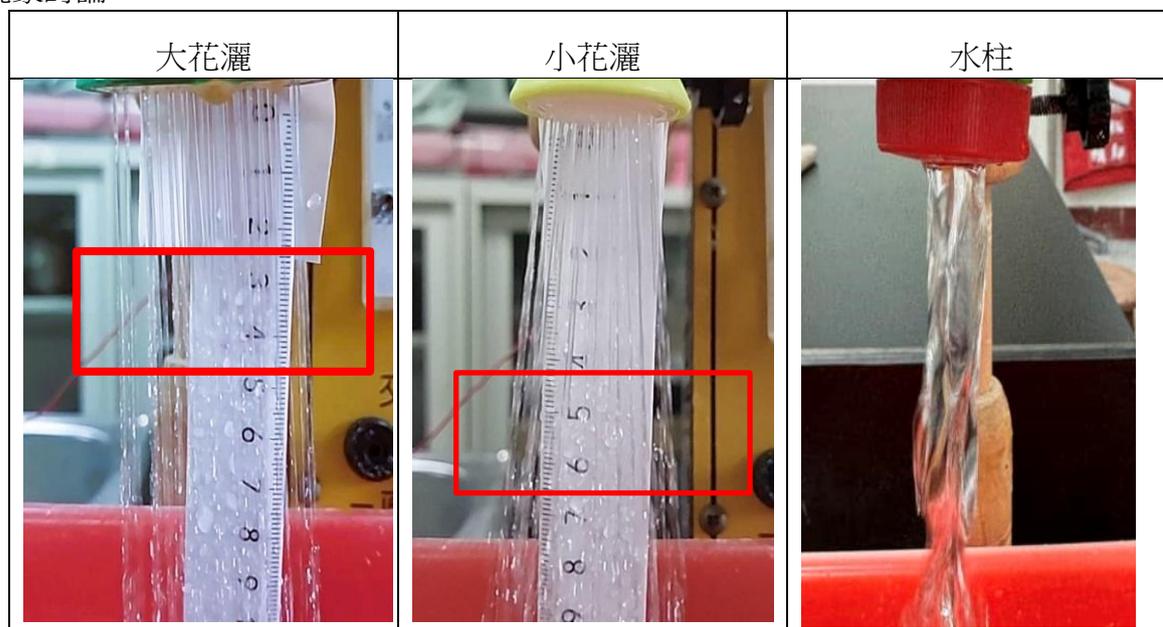
3. 相同距離下:

觀察相同距離的折線圖比較，流量大的小花灑明顯呈現電流數值稍微高一點的情況，但隨著電壓增大，折線圖的上升趨勢減緩，取而代之的是水柱所測得的電流在較高電壓下也能等比例上升。

4. 三種不同的水流出水裝置下，電流值皆比靜止液體還要高。

5. 觀察圖表可以發現，流速較慢的大花灑在 2.5cm 至 3.0cm 間，電阻數值增幅上升，而流量較大的小花灑則在 4.5cm 至 5.0cm 間才發生此現象。對此，我們利用手機的慢動作攝影觀察水流，發現了值得探討的現象(如下)。

(四)現象討論 此項目照片皆由作者親自拍攝



透過觀察紅框中的水流，我們發現:在電阻迅速上升的位置，經由花灑撒落的水皆會開始形成不連續的水珠，因此我們認為:水珠與水珠的間隙，便是造成電流迅速下降，電阻迅速上升的原因。而流量小的大花灑裝置較容易出現水珠的型態。

伍、研究討論

一、各組實驗觀察

(一)實驗一、儲水槽內水位是否影響數據測量

在觀察錄影畫面後，我們認為：實驗中，上方儲水容器於一定範圍內，因水位高度差所造成的水壓變化，對於定點所測得電流值大小並無直接關係，使電流數值在實驗過程中皆無明顯變化。也因此後續實驗中，除了可確保儲水裝置的水量不會影響測量值之外，我們也控制使水位高度於一定範圍內(持續加入 1M 氯化鈉水溶液)。

(二)實驗二、導電片厚度對於電流影響

經過實驗後，我們認為導電片的厚薄程度，對於電流大小並無直接關係，因而使得計算出的電流數值、電阻數值皆無明顯差異。此現象亦可確認後續實驗設計中，導電片大小不會影響到實驗結果。

(三)實驗三、導電液流動垂直距離對於電流影響

1. 將大小花灑的實驗數據製成圖表並比較後，我們發現：當導電液流動的垂直距離愈長，測量出的實際電流量愈小，而電阻也相對的變大，差異約在 10 歐姆左右，但是在某一特定距離電流會急遽下降(倍數下降)，應是除了長度之外，花灑的出水型態較易形成散亂狀，使得帶電粒子流通不易。

2. 根據出水裝置的不同，電流驟降的位置不同。

3. 水柱的流動液體集中，使得電流值變化穩定、且差異不大。

(四)實驗四、通電電壓對於電流影響

1. 在經過實驗以及計算後，我們發現：通電電壓與電流成固定比例關係。

2. 在閱讀過『電解質水溶液會導電嗎?』這篇文獻後，我們認為較高的電壓會驅使水溶液中的粒子解離程度更高，使得帶電粒子更多，也就造成數據中 5V 時的電流值明顯大於 3V 時的電流值，但為何 7V 時電流的增值不明顯呢? 推測是在較高電壓時已造成溶液中粒子大量解離，使得 7V 時帶電粒子的量與 5V 時差異不大。

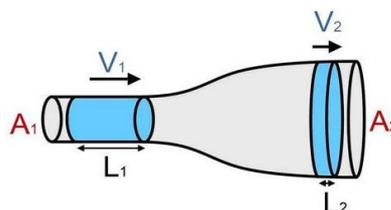
3. 水柱裝置的電流值在 7V 時仍能維持穩定成長，我們認為是因水柱的液體較集中，使其能均勻被高電壓驅動而分解所導致。大小花灑的水流分散，且出水口雖是許多小孔，但花灑呈現漏斗狀，使得出水前先流通到一較大平面，應是在此位置使電壓無法均勻驅動粒子分解。

(五)實驗五、導電液流量對於電流影響

計算單位時間流量並比較結果後，我們發現：

1. 流量愈大，則導電效果越好，但增加電壓可減少因流量不同造成的差異。
2. 單位時間流量大，連續水流可流動距離也較遠。當達到一定距離後，水流逐漸變成水珠狀，同時導致測得電流迅速下降，電阻也隨之攀升。因此以大小花灑為例，水流量愈大者，位於相同距離所測得電流也愈大；且水珠狀也不利於電流的導通，因此若要達成水電砲的效果，純粹是水滴帶電看起來的確是無法達成。
3. 而對於大小兩花灑，為何會因出水口範圍的直徑不一，而造成兩者單位時間出水量有落差呢？在查閱資料時我們找到了「伯努利定律」(或稱白努利定律)。

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$



本圖取自中山大學物理系 物理演示網站

而對於這個現象圖，詳細說明是：

「在流經管徑較大處時，流體流速較小；在流經管徑較小處，流體流速則較大。」

就像是小時候在玩塑膠水管時，擠壓出水口的部分，水的流速突然的上升了，而傾瀉而出的水柱也能夠噴灑到更遙遠的地方，一定就是因為「伯努利定律」了吧!

同時我們計算了單位時間流量和流速的關係式如下：

「單位時間流量(mL/s)=截面積(cm²)*流速(cm/s)」 註：流量(cm³/s)

得知：當截面積(cm²)相同時，流量(cm³/s)與流速(cm/s)呈現正比關係。

我們推論，流量大的小花灑同時流速也較快，因此若純粹比較大小花灑，可以知道：

流速快的狀態下，加上高電壓驅使粒子解離，單位時間流過截面的帶電粒子多，的確可造成電流值較大的現象。但仍需考慮解離粒子數量的極限，因此電流值也不會成正比的成長。

二、水電砲是否可行？

根據上述實驗，我們認為水電砲這個招式是有機會在現實生活中實現的，但需滿足許多條件。

(一)人體因素：

人體皮膚在乾燥情況下，電阻可高達十萬至六十萬歐姆(Ω)，但此時情況為「水電砲」，皮膚的電阻在此情況下便會降至僅一千歐姆(Ω)左右。

(二)電流強度：

以下為參照網路資料製成的表格。

感電影響	電流毫安培(mA)					
	直流電		60Hz 交流電		100Hz 交流電	
	男	女	男	女	男	女
1.感知電流	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
2.可脫逃電流	62	41	9	6	55	37
3.無法逃脫電流	74	50	16	10.5	75	50
4.休克電流	90	60	23	15	94	63
5.心臟麻痺電流	500	500	100	100	500	500

(三)水流、水壓需求：

僅需要在一定距離內持續提供快速水流且須為連續狀水流(或是水柱)，使導電中途形成水珠的現象減少甚至不發生。

(四)電壓強度：

以皮膚電阻一千歐姆(Ω)計算，若要產生遊戲中「麻痺」的效果(上表 3.無法逃脫電流)，直流電電壓需達 $1000\Omega * 0.074A = 74$ 伏特(V)；60Hz 交流電電壓需達 $1000\Omega * 0.016A = 16$ 伏特(V)；而 100Hz 交流電電壓需達 $1000\Omega * 0.075A = 75$ 伏特(V)，以上計算為成年男性數據，而對於男性或女性受水電砲攻擊，並造成傷害所需電壓僅需參考此式： $1000\Omega * \text{造成傷害所需電流安培(A)} = \text{所需電壓伏特(V)}$

陸、結論

一、實驗條件：

- (一) 使用溶液：1M 氯化鈉水溶液
- (二) 溶液溫度：26°C
- (三) 受體金屬片：面積相同、厚度不同的銅片
- (四) 裝置容器與電線位置固定。

二、實驗結果：

- (一) 儲水容器出水水位不同，對於下方定點的電流測量值沒有造成影響。
- (二) 承受水流的導電片(體)厚度對於測量到的電流沒有影響。
- (三) 1. 導電液流動垂直距離越遠，會使電阻變大、測量到電流下降。

同一組實驗中觀察到無論是連續水柱或是水珠狀都有電流，但水珠狀的電阻值相較於水柱差異達 100 倍。

2. 集中水柱的出水裝置可以至 15cm 處仍能量測到穩定電流值。

- (四) 1. 花灑裝置的流體中，通電電壓愈大則測得電流也相對較大，且兩者呈現比例關係，推測與電解程度有關。但持續電壓不會使得電流值無止盡成長。
- 2. 水柱出水口的電流值隨著電壓增加目前在 7V 內可穩定成長，推測與水柱整齊流動有關。

- (五) 導電液流量愈大，導電效果愈好，但增加電壓後流量所造成的差異會減少；且流量大時水柱狀流動的距離較遠，位於相同距離所測得電流也愈大，流量小易形成水珠，水珠狀雖能導電但電阻大，不利於電流的導通。

柒、參考資料

一、參考資料

- (一) 流體性質—伯努利定律(<https://www.slideserve.com/odessa-valenzuela/6957886>)
- (二) 54 屆科展作品(高中組物理科第二名)—水電交融
(<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/040104.pdf>)
- (三) 58 屆科展作品(國中組物理科第三名)—電場下的極限運動-水滴帶電量之探討
(<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/58/pdf/NPHSF2018-030107.pdf>)
- (四) 克氏滴水發電機 (Kelvin Water Drop) (<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=19066>)
- (五) 電死人是電壓還是電流？觸電推理(<https://www.strongpilab.com/current-kills-people/>)
- (六) 手濕別碰插頭！皮膚電阻與觸電的關聯
(<https://helloyishi.com.tw/health/general-health-knowledge/all-you-need-to-know-about-electrical-shock/>)
- (七) 伯努利定律圖片來源(<https://www2.nsysu.edu.tw/physdemo-high/oldVersion/2012/8/8.htm>)
- (八) 電解質水溶液會導電？
(<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=a202b457-ff22-4206-959f-9ba3fa41d5e1>)

【評語】 030106

本作品探討水電砲的設計與各項物理變因影響，從動漫啟發到科學實踐，充分體現了科學動手做的精神。研究中驗證了多數課內所學知識，並觀測不同電壓受噴射距離和水柱型態的影響，測量流程邏輯性強且連貫具完善細節，最後有引用資料探討可行性。建議進一步系統性的結合引用資料再去分析實驗結果，或是在討論中加入更多相關資料比較以提升作品完整性。

作品簡報

水

雷
電

石
砲

摘要

本研究最初的發想來自於任天堂寶可夢遊戲中的招式「水電砲」，對其感到好奇的我們便想藉由操作實驗來模擬其中的情形，並對於此招式能否在現實中實現，及其達成效果的可能性，提出質疑與猜測。我們測量不同型態的出水裝置、不同流速的水流、觀測不同噴射距離，也調整電壓大小，發現這些變因都與水電砲的可行性有關，且意外發現流速會影響水柱的型態(連續柱狀還是出現水花狀態)，同時也對結果有顯著的影響。但也發現出水裝置的水壓、承受水電砲攻擊的導體厚度皆與測量結果無關。透過研究的進行，我們也了解許多尚未聽過的有趣知識，譬如關於流體的伯努利定律；導電率是什麼；什麼程度的觸電會造成傷害，綜合以上知識讓我們得到了想要的答案。

壹、前言

一、研究動機：

不久前，日本任天堂寶可夢在釋出新遊戲的同時，也帶來了最近一波的更新，在最新的版本中有一個特別的招式—水電砲，該招式描述為：「發射強力的水砲攻擊，並放電麻痺對手，造成強大的傷害。」，是種能對敵人造成巨大損傷、甚至一命嗚呼的強力手段。我們想要了解現實中能否還原此現象—使通電液體流動並導通原不相連的兩導體。曾在理化課時學過若導體的電阻愈大，則實際電流量愈小，且當電阻達到一定大小時，若是電壓不夠大，電流也無法導通。

我們想探討的便是：此種招式的情境是否會受電阻過大因而無法通電？假使能夠導通，則需要多大的電壓？若要使威力足以致傷更甚至造成麻痺暈倒，則電流需要多大？水壓是否也造成導電結果不同？同時，水柱是穩定流動的情況下，對於電流的傳遞是否也與一般靜止液體導電不同？

綜合這些疑問，讓我們對於這遊戲的可行性及真實程度感到好奇，而且在做文獻探討的過程也看到許多研究證實「水滴」確實也能載著靜電移動，那麼還需要像遊戲中用到「水砲」的程度嗎？因此我們也參考了相關實驗裝置架設，並展開了本次研究。

二、研究目的：

- (一)、儲水槽內水位是否影響數據測量
- (二)、導電片(體)厚度對於電流影響
- (三)、導電液流動垂直距離對於電流影響
- (四)、流體中通電電壓對於電流影響
- (五)、導電液流量對於電流影響

三、文獻探討：

(一) 歐姆定律

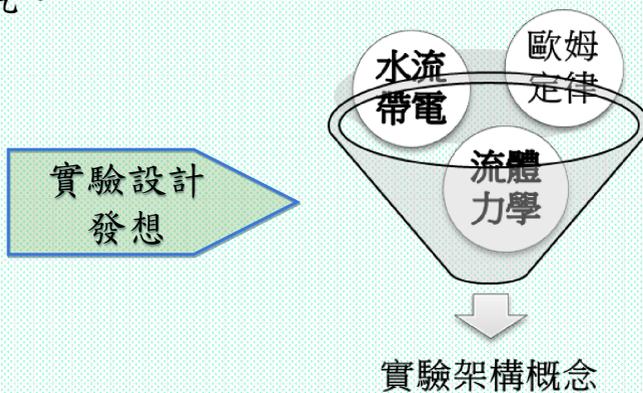
在電路學裡，歐姆定律(英語:Ohm's law)表示：導電體兩端的電壓 V 與通過導電體的電流 I 成正比。關係式為： $V \propto I$ ，藉此，對於任意導電體，電阻 R 又定義為： $R = V/I$ ，且可得到下列方程式： $V = IR$

(二) 開爾文滴水起電機(Kelvin Water Drop)

開爾文滴水起電機是一種靜電起電機，於1867年由英國科學家開爾文爵士威廉·湯姆森發明。這個裝置利用靜電感應，再利用滴落的水滴藉著交互相關、但帶相反電荷的系統中產生電位(電壓)。

(三) 電解質水溶液會導電？ 節錄自科技大觀園，清華大學化學系 邱紀良 教授 撰寫文章

電解質電路中的那杯溶液不但是一個電阻，還必須是一個能產生電化學反應的電解槽。若要解釋外部電路上有持續的電流，則其溶液必須能產生電化學反應。另外「只有能被電解的溶液才能夠導通電流，溶液能被電解時，其導通電流的程度與電解反應的速率成正比。」溶液要能夠被電解，有兩個必要的條件：外部所提供的電壓差夠高，以及內部有足夠的電化學反應物質。

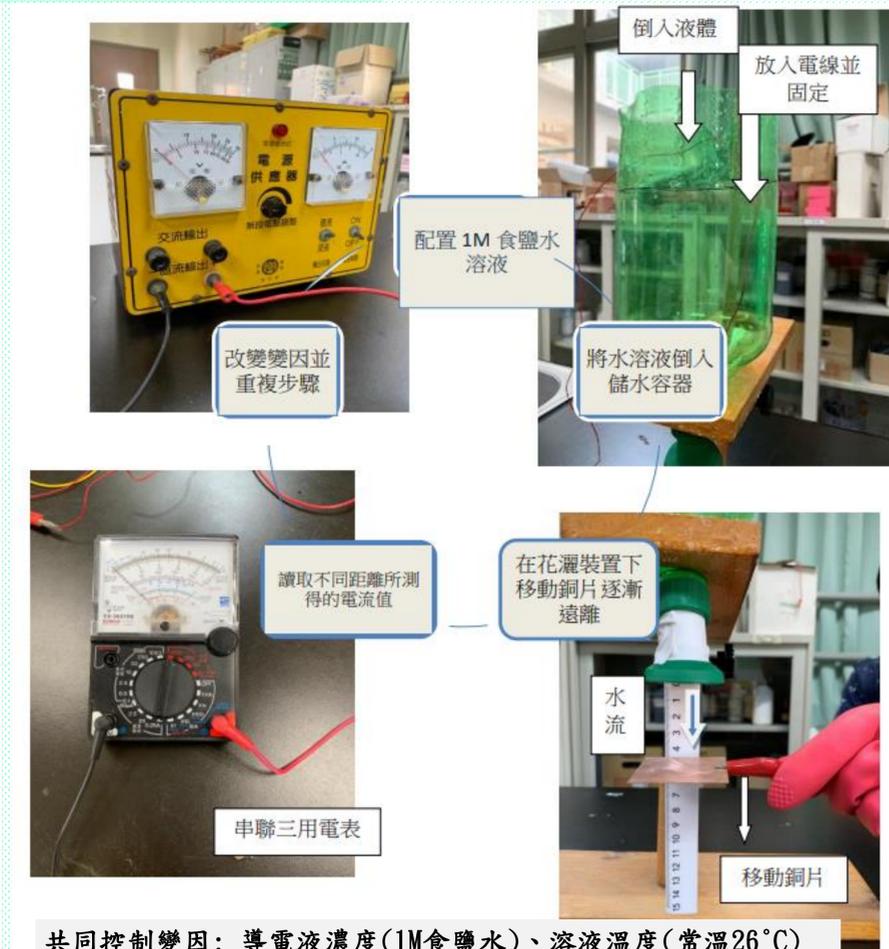


貳、研究器材與設備

一、器材：

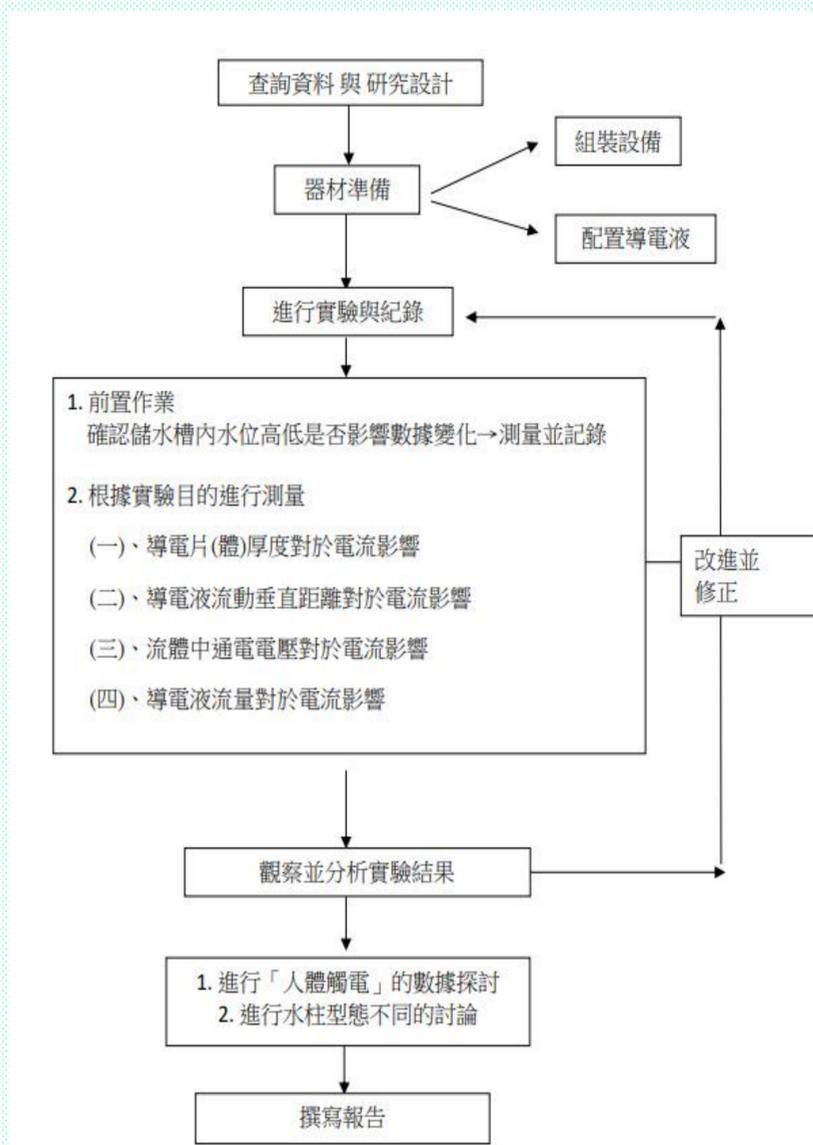
電源供應器、三用電表、電子秤、儲水容器、精鹽、銅片(厚度1.0mm、0.2mm)、防水膠帶、電線、2kΩ電阻、出水口轉接頭(共三種)、橡膠手套

二、實驗架設與流程：



共同控制變因：導電液濃度(1M食鹽水)、溶液溫度(常溫26°C)

參、研究過程與方法



本頁照片與圖表皆由作者親自製作

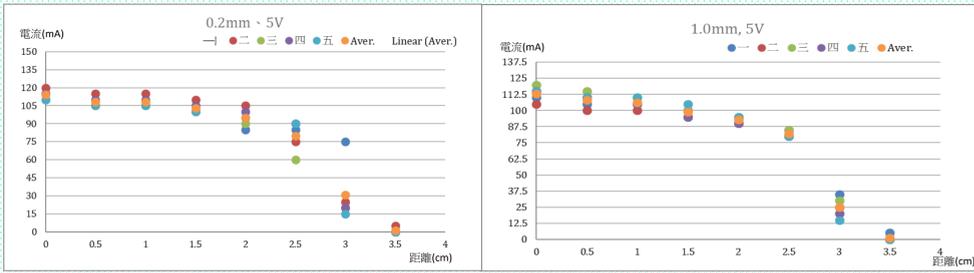
肆、研究結果

一、實驗一：儲水槽內水位是否影響數據測量

銅片固定擺放於距出水口 2cm 處，我們拍攝電流變化的影片並截圖，仔細觀察指針（紅色圈圈內）可以發現電錶數值並沒有明顯起伏。對此，我們認為：儲水槽內水位高低對於電流大小的測量值沒有影響。也因此我們可以利用此裝置完成後續實驗。



二、實驗二：導電片厚度對於電流影響

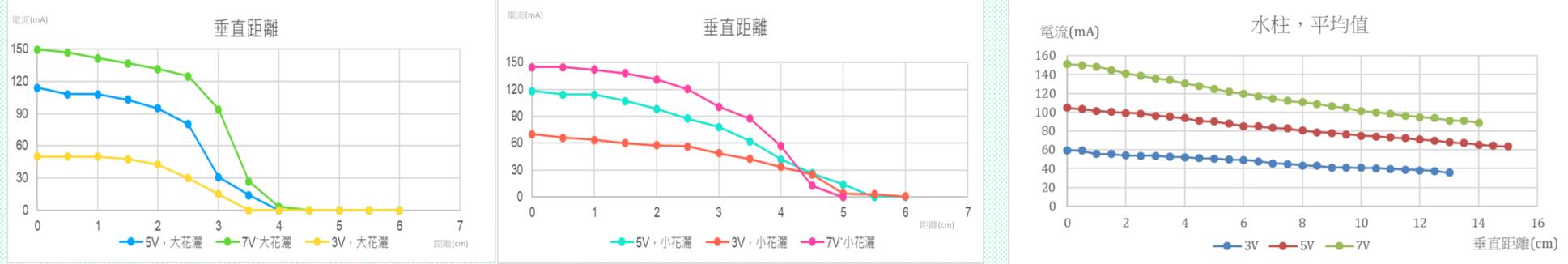


電阻 $R = V / I$ (以平均值計算，四捨五入至小數點後二位)

Ω	0cm	0.5cm	1.0cm	1.5cm	2.0cm	2.5cm	3.0cm	3.5cm
0.2mm 銅片	43.86	46.30	46.30	48.54	52.63	62.50	217.39	5000
1.0mm 銅片	44.40	46.47	47.71	50.61	54.00	60.68	200.00	4166.6

根據兩者的對比，圖表中數據的分布非常接近，且電阻值也相差不多。對此，我們認為銅片(承受水流衝擊的物體)厚薄並不會對電流造成明顯影響。

三、實驗三：導電液流動垂直距離對於電流影響

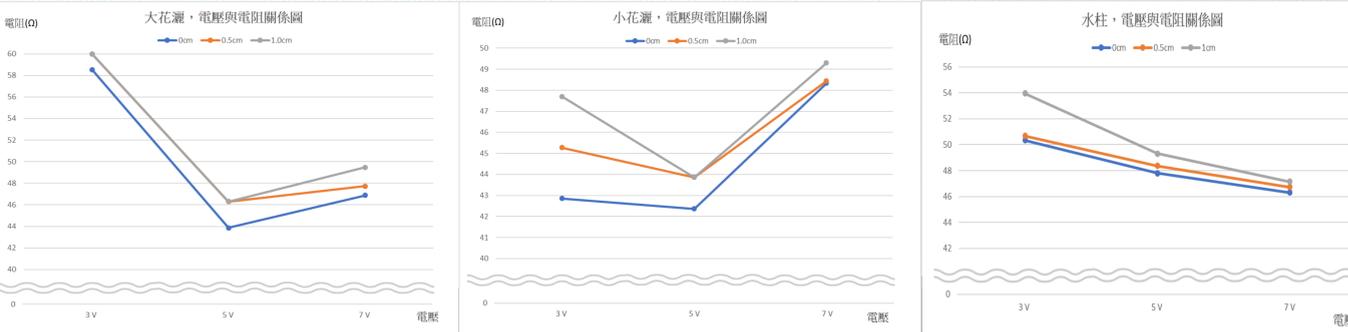
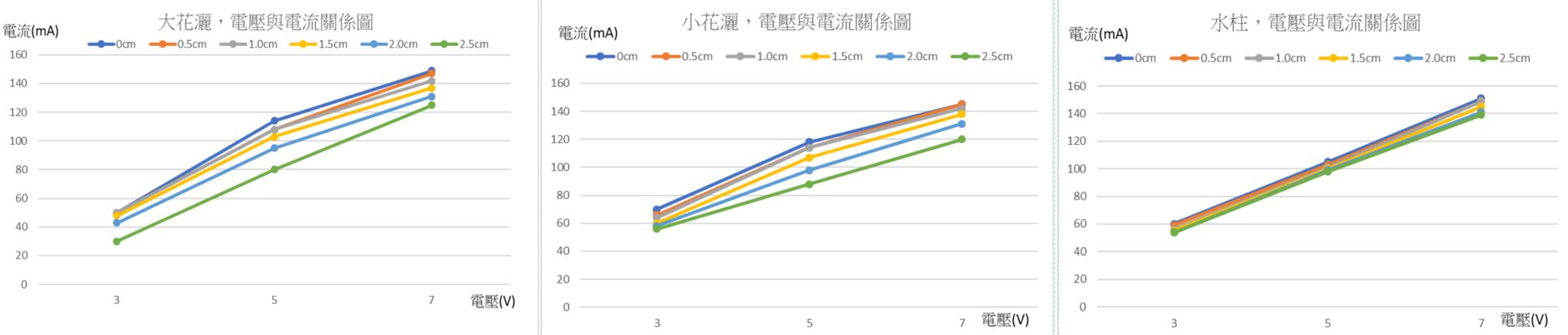


- 花灑：
- 隨著導電液流動垂直距離(出水口與銅片相對距離)逐漸拉長，實際電流大小也會逐漸下降，差異約是 10mA。
 - 大花灑在大約 2.5cm 後，電流值下降明顯，而小花灑卻在 4.5cm 後才有明顯斷層的現象，且電壓變化看起來不影響斷層的位置。
 - 大花灑在銅片距出水口約 4cm 處、小花灑在銅片距出水口約 5cm 處，會開始測量不到電流值。

水柱：

- 水柱的電流變化呈現連續性、無斷層現象，且至銅片接觸到最下方水盆前(約距離出水口 15cm 處)仍能測量到數據，不像花灑裝置會在特定距離開始測不到電流。
- 每增加 0.5cm 的距離，電流差值不超過 3mA。

四、實驗四：流體中通電電壓對於電流影響

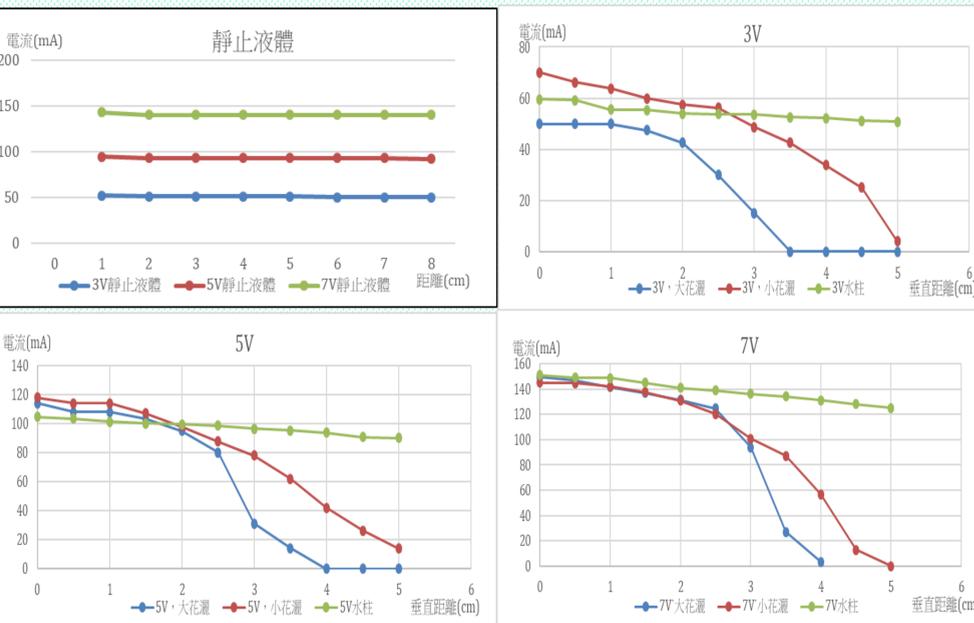


- 在計算數值時，發現 5V 組及 3V 組的電流比值乘上電阻比值約為 1.666 倍至 1.667 倍。對此，我們認為：電壓和電流在實驗中確實存在正比關係。
- 電壓在 5V 時電阻值較小，電壓在 7V 時電阻值又增加，推測是電流值雖有增加，但在高電壓時電流增加並未等比例上升，代表此狀態下可導通的電流是有極限的。
- 水柱流動較穩定，測量後的電流與電阻值與花灑裝置的前段數據相去不遠。

五、實驗五：導電液流量對於電流影響

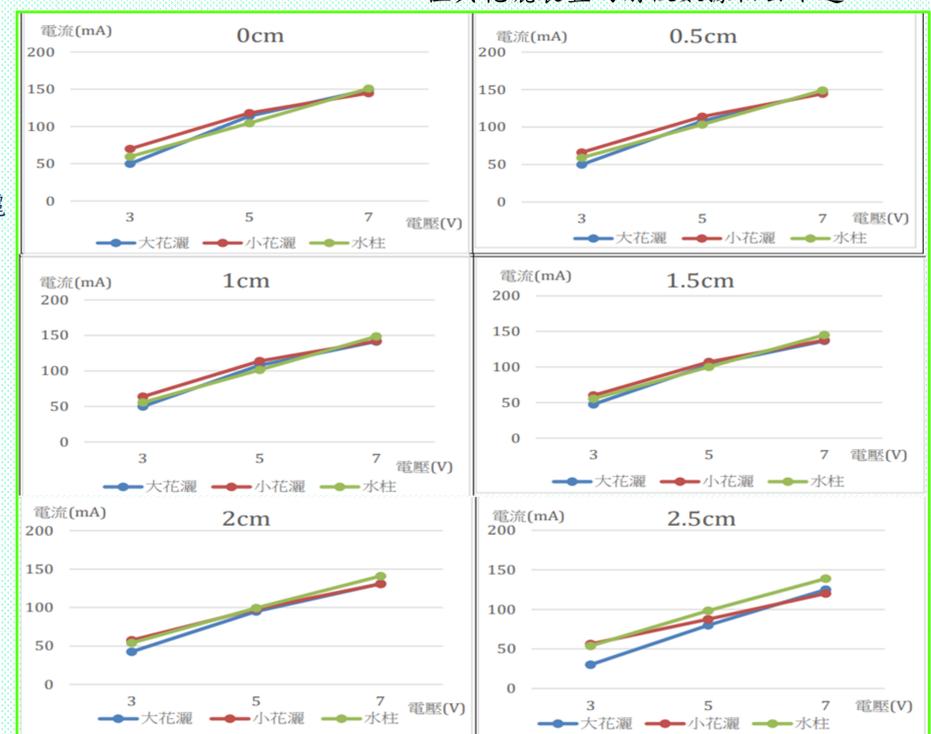
此部份針對兩種狀況進行實驗

- 對照組：靜止液體，改變導電片距離及電壓，進行電流測量。
- 不同出水裝置測量流量，計算方式如下：
測量相同水量通過裝置所需時間，並計算平均值得知：
 (1) 大花灑單位時間流量 = $250\text{mL} / 14.637\text{s} \approx 17.08\text{mL/s}$
 (2) 小花灑單位時間流量 = $250\text{mL} / 10.666\text{s} \approx 23.44\text{mL/s}$
 (3) 水柱單位時間流量 = $250\text{mL} / 11.386\text{s} \approx 21.96\text{mL/s}$
 流量大小依序：小花灑 > 水柱 > 大花灑



此部份我們取銅片距出水口 0~2.5cm 的數據討論，此段數據不論出水裝置型態(大、小花灑、水柱)皆未出現斷層(原因下段詳述)、水流狀態穩定。

- 靜止液體在兩電極相距大約 8 公分內，不論如何移動電極，所測得的電流值幾乎沒有變化。



- 相同電壓下：3V 及 5V 的情況下，流量大的小花灑電流較大，其次是流量第二的水柱，在 3V 時明顯可見這項電流差異。到了 7V 時，雖然所有的裝置電流值都增大，但原先流量大的小花灑數值不再是最高，反而是水柱為最大值。目前推測電流的導通與流量大小較有關。
- 相同距離下：觀察相同距離的折線圖(綠框部分)比較，流量大的小花灑呈現電流數值稍微高一點的情況，但隨著電壓增大，折線圖的上升趨勢減緩，取而代之的是水柱所測得的電流在較高電壓下仍維持等比例上升。
- 三種不同的水流出水裝置下，電流值皆比靜止液體還要高。
- 觀察圖表可以發現，流量較小的大花灑在 2.5cm 至 3.0cm 間，電阻數值增幅上升，而流量較大的小花灑則在 4.5cm 至 5.0cm 間才發生此現象。

伍、研究討論

一、各組實驗觀察

(一)實驗一、儲水槽內水位是否影響數據測量

在觀察錄影畫面後，我們認為：實驗中，上方儲水容器於一定範圍內，因水位高度差所造成的水壓變化，對於定點所測得電流值大小並無直接關係，使電流數值在實驗過程中皆無明顯變化。也因此後續實驗中，除了可確保儲水裝置的水量不會影響測量值之外，我們也控制使水位高度於一定範圍內(持續加入1M氯化鈉水溶液)。

(二)實驗二、導電片厚度對於電流影響

經過實驗後，我們認為導電片的厚薄程度，對於電流大小並無直接關係，因而使得計算出的電流數值、電阻數值皆無明顯差異。此現象亦可確認後續實驗設計中，導電片大小不會影響到實驗結果。

(三)實驗三、導電液流動垂直距離對於電流影響

1. 將大小花灑的實驗數據製成圖表並比較後，我們發現：當導電液流動的垂直距離愈長，測量出的實際電流量愈小，而電阻也相對的變大，差異約在10歐姆左右，但是在某一特定距離電流會急遽下降(倍數下降)，應是除了長度之外，花灑的出水型態較易形成散亂狀，使得帶電粒子流通不易。
2. 根據出水裝置的不同，電流驟降的位置不同。
3. 水柱的流動液體集中，使得電流值變化穩定、且差異不大。

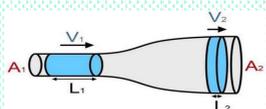
(四)實驗四、通電電壓對於電流影響

1. 在經過實驗以及計算後，我們發現：通電電壓與電流成固定比例關係。
2. 在閱讀過『電解質水溶液會導電嗎?』這篇文獻後，我們認為較高的電壓會驅使水溶液中的粒子解離程度更高，使得帶電粒子更多，也就造成數據中5V時的電流值明顯大於3V時的電流值，但為何7V時電流的增值不明顯呢? 推測是在較高電壓時已造成溶液中粒子大量解離，使得7V時帶電粒子的量與5V時差異不大。
3. 水柱裝置的電流值在7V時仍能維持穩定成長，我們認為是因水柱的液體較集中，使其能均勻被高電壓驅動而分解所導致。大小花灑的水流分散，且出水口雖是許多小孔，但花灑呈現漏斗狀，使得出水前流到一較大平面，應是在此位置使電壓無法均勻驅動粒子分解。

(五)實驗五、導電液流量對於電流影響

計算單位時間流量並比較結果後，我們發現：

1. 流量愈大，則導電效果越好，但增加電壓可減少因流量不同造成的差異。
2. 大小兩花灑，為何會因出水口範圍的直徑不一，而造成兩者單位時間出水量有落差呢? 在查閱資料時我們找到了「伯努利定律」。



本圖取自中山大學物理系 物理演示網站

$$A1 \cdot V1 = A2 \cdot V2$$

而對於這個現象圖，詳細說明是：
「在流經管徑較大處時，流體流速較小；
在流經管徑較小處，流體流速則較大。」

同時我們計算了單位時間流量和流速的關係式如下：

「單位時間流量(mL/s)=截面積(cm²)*流速(cm/s)」 註：流量(cm³/s)

得知：當截面積(cm²)相同時，流量(cm³/s)與流速(cm/s)呈現正比關係。我們推論，流量大的小花灑同時流速也較快，因此若純粹比較大小花灑，可以知道：

流速快的狀態下，加上高電壓驅使粒子解離，單位時間流過截面的帶電粒子多，的確可造成電流值較大的現象。但仍需考慮解離粒子數量的極限，因此電流值也不會成正比的成長。

二、水電砲是否可行?

根據上述實驗，我們認為水電砲這個招式是有機會在現實生活中實現的，但需滿足許多條件。

(一)人體因素:

人體皮膚在乾燥情況下，電阻可高達十萬至六十萬歐姆(Ω)，但此時情況為「水電砲」，皮膚的電阻在此情況下便會降至僅一千歐姆(Ω)左右。

(二)電流強度:

以下為參照網路資料製成的表格。

感電影響	電流毫安培(mA)					
	直流電		60Hz 交流電		100Hz 交流電	
	男	女	男	女	男	女
1.感知電流	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
2.可脫逃電流	62	41	9	6	55	37
3.無法逃脫電流	74	50	16	10.5	75	50
4.休克電流	90	60	23	15	94	63
5.心臟麻痺電流	500	500	100	100	500	500

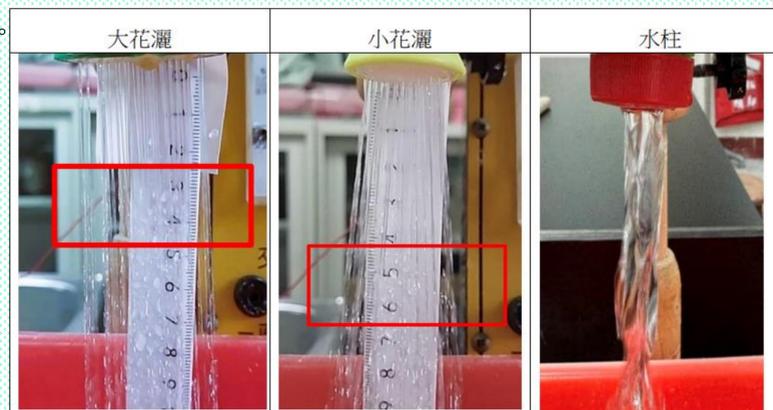
(三)水流、水壓需求:

僅需要在一定距離內持續提供快速水流且須為連續狀水流(或是水柱)，使導電中途形成水珠的現象減少甚至不發生。

(四)電壓強度:

以皮膚電阻一千歐姆(Ω)計算，若要產生遊戲中「麻痺」的效果，直流電電壓需達1000Ω*0.074A=74伏特(V)；60Hz交流電電壓需達1000Ω*0.016A=16伏特(V)；而100Hz交流電電壓需達1000Ω*0.075A=75伏特(V)，以上計算為成年男性數據，而對於男性或女性受水電砲攻擊，並造成傷害所需電壓僅需參考此式：
1000Ω*造成傷害所需電流安培(A)=所需電壓伏特(V)

3. 另外我們也觀察了不同出水裝置下，電流值驟降(斷層)的位置不同，因此將水流錄影播放後發現一個有趣的現象：



此實驗照片由作者親自拍攝

斷層原因：

觀察紅框中的水流，我們發現：在電阻迅速上升的位置，經由花灑撒落的水會形成不連續的水珠，因此我們認為：水珠與水珠的間隙，便是造成電流迅速下降，電阻迅速上升的原因。而單位時間流量最小的花灑裝置較容易出現水珠的型態。

單位時間流量大(小花灑)，連續水流可流動距離也較遠。當達到一定距離後，水流逐漸變成水珠狀，導致測得電流迅速下降，電阻也隨之攀升。因此以大小花灑為例，水流量愈大者，位於相同距離所測得電流也愈大；且水珠狀也不利於電流的導通，因此若要達成水電砲的效果，純粹是水滴帶電看起來的確是無法成功。

陸、結論

一、實驗條件:

- (一) 使用溶液：1M氯化鈉水溶液
- (二) 溶液溫度：26°C
- (三) 受體金屬片：面積相同、厚度不同的銅片
- (四) 裝置容器與電線位置固定。

二、實驗結果:

- (一) 儲水容器出水水位不同，對於下方定點的電流測量值沒有造成影響。
- (二) 承受水流的導電片(體)厚度對於測量到的電流沒有影響。
- (三) 1. 導電液流動垂直距離越遠，會使電阻變大、測量到電流下降。
同一組實驗中觀察到無論是連續水柱或是水珠狀都有電流，但水珠狀的電阻值相較於水柱差異達100倍。
2. 集中水柱的出水裝置可以至15cm處仍能量測到穩定電流值。
- (四) 1. 花灑裝置的流體中，通電電壓愈大則測得電流也相對較大，且兩者呈現比例關係，推測與電解程度有關。
但持續電壓不會使得電流值無止盡成長。
2. 水柱出水口的電流值隨著電壓增加目前在7V內可穩定成長，推測與水柱整齊流動有關。
- (五) 導電液流量愈大，導電效果愈好，但增加電壓後流量所造成的差異會減少；且流量大時水柱狀流動的距離較遠，位於相同距離所測得電流也愈大，流量小易形成水珠，水珠狀雖能導電但電阻大，不利於電流的導通。

柒、參考資料

一、參考資料

- (一) 流體性質—伯努利定律(<https://www.slideserve.com/odessa-valenzuela/6957886>)
- (二) 54屆科展作品(高中組物理科第二名)—水電交融
(<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/040104.pdf>)
- (三) 58屆科展作品(國中組物理科第三名)—電場下的極限運動-水滴帶電量之探討
(<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/58/pdf/NPHSF2018-030107.pdf>)
- (四) 克氏滴水發電機(Kelvin Water Drop) (<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=19066>)
- (五) 電死人是電壓還是電流? 觸電推理(<https://www.strongpilab.com/current-kills-people/>)
- (六) 手濕別碰插頭! 皮膚電阻與觸電的關聯
(<https://hellyoshi.com.tw/health/general-health-knowledge/all-you-need-to-know-about-electrical-shock/>)
- (七) 伯努利定律圖片來源(<https://www2.nsysu.edu.tw/physdemo-high/oldVersion/2012/8/8.htm>)
- (八) 電解質水溶液會導電? (<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=a202b457-ff22-4206-959f-9ba3fa41d5e1>)