

第四屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA4-288

作品名稱：我看見電流在流動

姓名：徐英綺

關鍵字：電流、水流、電阻

壹、摘要

本實驗原理主要利用水流來模擬電流的狀況，並利用可見的固體顆粒模擬電荷的移動，讓人們更容易理解電流、電壓以及電阻之間的相互關係，同時亦可示範流體的各項性質。

貳、研究動機及目的

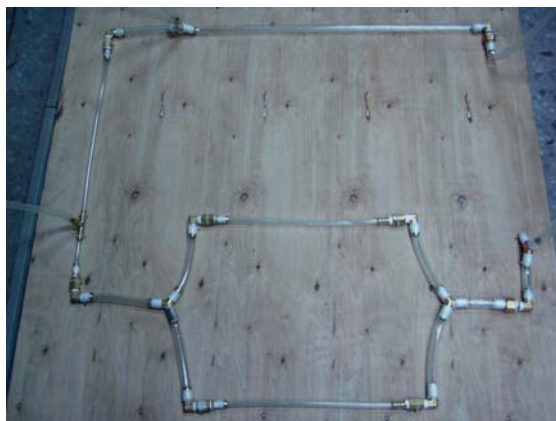
電對人類生活的影響無遠弗屆，舉凡身邊的電燈電視，以及遠在天邊的衛星通訊，都跟電有著密切關聯。雖然從小就耳濡目染非常熟悉，但是卻因為電荷載子非常的小，無法以肉眼看到，因此總覺得遙不可及，再加上有關電的各種現象，繁多又神奇，有些課堂上老師講授的觀念似乎不容易理解想像，於是我們便想到了是否能利用日常生活中隨處可見的水，來模擬電荷載子在電路中的運動，讓我們更增進對電的了解。

另外本模擬實驗同時亦可示範流體的各項性質，如：連續方程式、壓力...等。

參、研究設備及器材

器材 名稱	數 量	圖 片	器材 名稱	數 量	圖 片
沉水 馬達 A	1 個		銅製 三通 4分	數個	
沉水 馬達 B	1 個		銅製 三通 2分半	數個	
沉水 馬達 C	1 個		T通 2分半 專用	數個	
透明 水管 口徑 4分	約 5 公尺		彎頭 4分及 4分互 轉	數個	
透明 水管 口徑 2分半	約 4 公尺		彎頭 4分及 2分半 互轉	數個	

器材名稱	數量	圖 片	器材名稱	數量	圖 片
止洩帶	2 個		小黑珠	1 包	
緊束帶	1 包		板手及各式工具	1 批	
木條及長鐵尺	各數把		保存盒	1 個	
透明水管 口徑 3/8"	約 5 公尺		T 通 3/8" 專用及 銅製轉接頭	彎頭 3/8"	



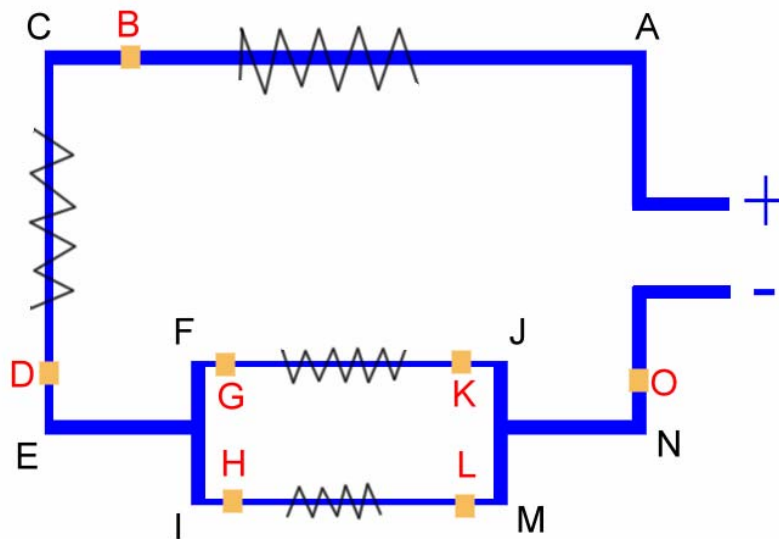
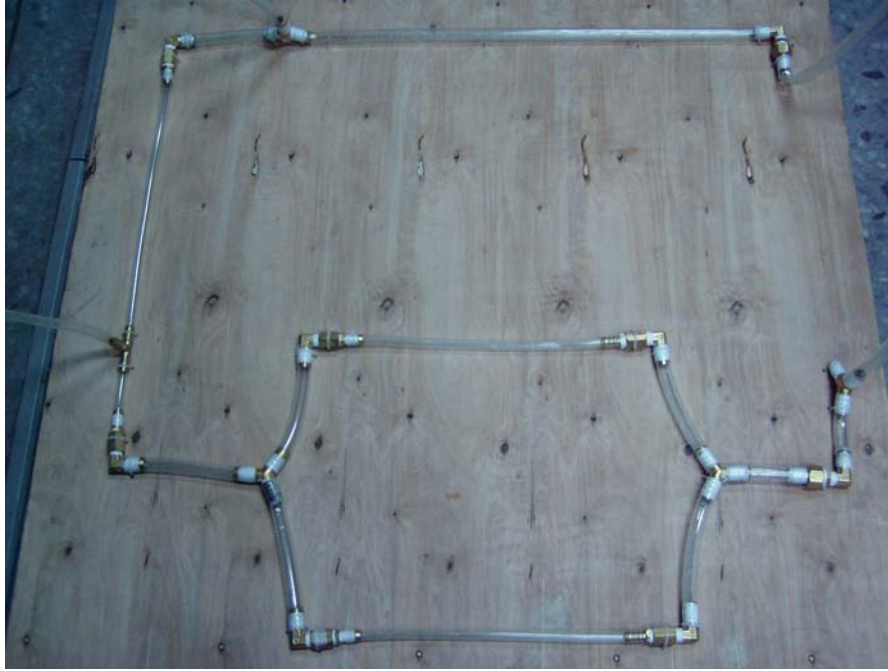
肆、研究過程或方法

一、研究過程

- 1.在經過我們與老師的想法溝通後，先畫出我們欲表達的電路簡圖，再依照所畫的電路圖，討論出所需準備的相關器材，包含直角彎頭、三通接頭之數量，水管口徑及長度...等等。原則上，我們希望相關的器材都是隨手可得的，不需另外專門去訂做，只要去五金材料行即可很容易購得，這樣就可以讓科學更平易近人、更生活化。
- 2.待我們到了五金材料行實際了解後，發現若要使用透明水管，則需使用 2 分~4 分之間口徑大小的水管可利用現成的直角彎頭及 T 通接頭，於是我們決定了使用 2 分半及 4 分的透明水管，一方面不希望水管口徑太小，以避免將來在管中放入固體顆粒之後造成管路阻塞或現象不易觀察，另一方面不希望水管口徑太大，否則需要很大的抽水馬達去運作。
- 3.接著我們需要一個抽水馬達來讓水流動，一開始我們準備了功率 28 瓦特，最大流量 12L/min 的沉水馬達 A，但是等到我們將管路按照原先設計的線路圖接好進行實驗後發現所造成的水壓太大，讓我們當初為了要了解各點水壓的支管內水柱之水面太高，甚至比一個大人的高度還高，如此實在不方便進行觀察。於是我們又準備了一個功率 4 瓦特，最大流量 3L/min 的沉水馬達 B，但是又發現馬力不足，造成現象不明顯。於是最後我們決定使用功率 9.5 瓦特的沉水馬達 C，如此可獲得較佳的效果。
- 4.待我們獲得大致的成效後，發現水在透明水管中不易觀察，所以想到在水中添加少量顏料或墨水，讓水有顏色便於觀察。可是在添加有色顏料後，又產生另一個問題，就是在粗管與細管之中水的流速不易明顯看出其差異。於是我們又想到了要在水中添加深色固體顆粒，讓觀察更容易。
- 5.至於要放哪一種顆粒呢？我們想到了很多種可能，譬如：
 - (a)綠豆、紅豆：但顆粒似乎太大。又怕久了豆子會發芽，
 - (b)糯米粒或米粒：狹長的顆粒流動不順暢，
 - (c)亮片：大小不一，且薄片狀流動不順暢又容易在通過彎頭處造成阻塞，
 - (d)亮粉：會浮在水面上，馬達抽取不易，且亮粉太小不易觀察又容易附著在管壁，
 - (e)黑芝麻：浸泡久了會膨脹，且經過一段時間會有味道、分泌油脂，
 - (f)小黑珠：在水中不膨脹、不腐敗、不出油、不會浮在水面上，
- 6.我們實際用小黑珠開始試驗，但此時又產生另一問題，就是在水管轉彎處有時會阻塞，原因是小黑珠一下子進入管路的數量太多容易堵住，於是我們改採控制小黑珠單位時間進入管路的數量，如此便得到最佳狀況。
- 7.為了測出各點水壓，我們安裝 3 個銅製 T 通於水管不同位置處，並使 3 根水管直立。一旦開啟馬達推動水流，3 根水管內的水會因為水壓的不同而有高低之分，如此一來便可直接觀察出水壓的高低了。
- 8.當我們確定大致雛型無啥大問題後，再進一步進行抓漏的工作。因為在水管接合處常會有水滴從中洩漏出來，我們重新一一拆開管路接頭，用止洩帶加以包紮後接妥，再利用緊束帶將每一關節處固定在木板上，如此便大功告成。

9. 至於惠斯同電橋模擬的部分，為了改良之前在實際操作過程中會遭遇到小黑珠阻塞在彎頭部分以致實驗中斷，必須將實驗裝置阻塞的部分拆開，將阻塞的小黑珠清除後重新裝上，再繞上止洩帶然後才能繼續進行實驗的困擾，在經過與指導老師仔細研究討論後，決定將水管部分改成 3/8" 並改用塑膠 T 通及塑膠彎頭。一來，在實際設置裝置時比較快速而方便，不需使用止洩帶來防止漏水；二來，可多次拆裝，不會造成材料的浪費，並且材料的購買成本較低，僅有金屬接頭的三到四分之一而已。
10. 因為改換較粗的水管故沈水馬達亦改成 A 馬達。
11. 惠斯同電橋模擬的部分，原構想將裝置組成兩個 Δ 相接的形狀，但市面上購買不到雞爪形狀的接頭，故改成矩形來進行實驗。

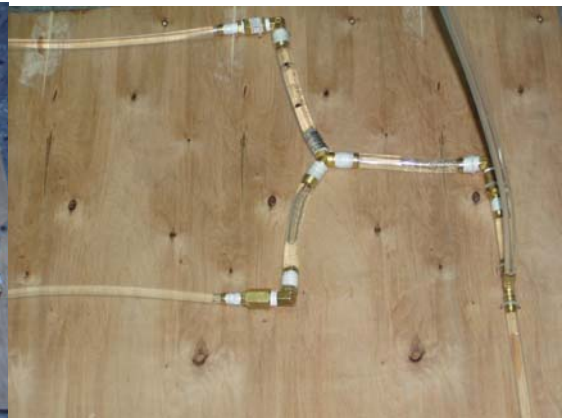
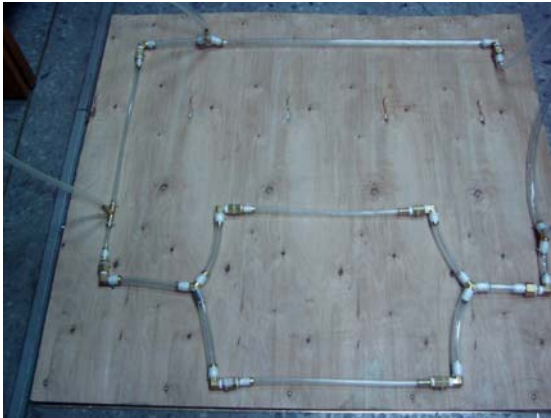
二、實驗方法



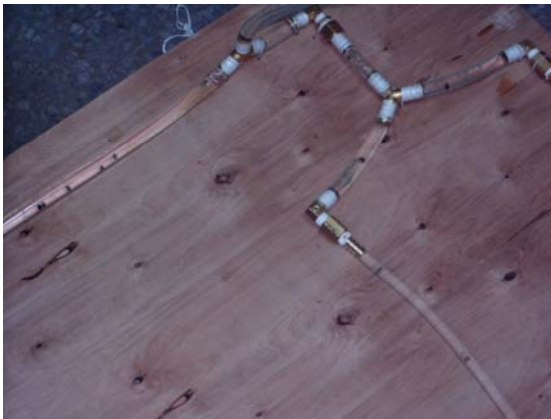
- 1.如圖接好管路，接上沉水馬達（沉水馬達需在有水時啟動，無水空轉會導致馬達過熱燒毀）。
- 2.在水中加入少量有色顏料，使水呈現淺淺的顏色，但不致妨礙小黑珠流動的觀察。
- 3.打開電源，先測試是否有漏水，有則暫停，先進行補漏，無漏水情形則進行下一步。
- 4.逐步少量放入小黑珠，切勿一次放入太多，否則會導致堵塞。待小黑珠在管路中流動順暢並明顯容易觀察現象後，停止增加小黑珠，讓小黑珠的數量固定。
- 4.觀察小黑珠在各分段的運動快慢情形，紀錄下來。
- 5.計算小黑珠在固定時間間隔內通過 B、D 的數量，觀察其之間關係。
- 6.計算小黑珠在固定時間間隔內通過 D、G、H 的數量，觀察其之間關係。
- 7.觀察各直立分支水管的水面高度，比較其關係。



直角彎頭處須以止洩帶包紮以防止水流滲出



模型的整體外觀，其中有少量小黑珠測試流動情形



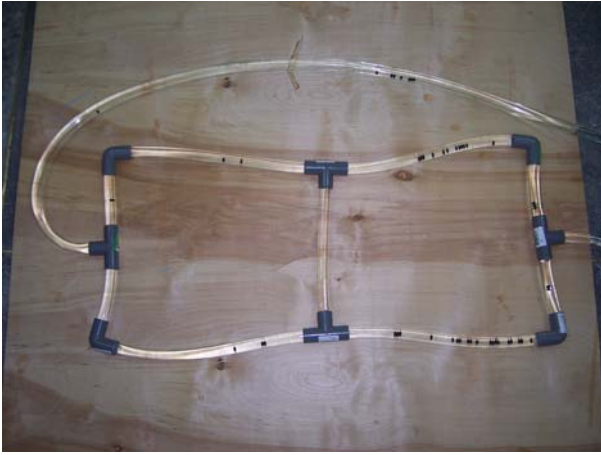
小黑珠流動及透明支管處可由水面高度來觀察水壓大小



直角彎頭及透明支管銜接處



用長鐵尺測量水壓



惠斯同電路模擬模型的整體外觀，其中有少量小黑珠測試流動情形。



沈水馬達與小黑珠在運作前的情形



惠斯同電路模擬在運作中可明顯看出中間的管線內部完全沒有小黑珠通過；但若將其一個管線改變長度有較大差異或明顯的粗細不同則可看出其中的管線會有小黑珠通過。

三、原理探討：

(A) 漂移速度(drift velocity)

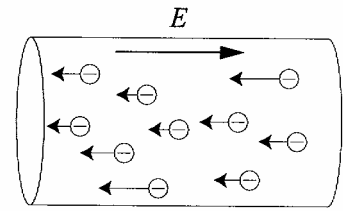
導體中的自由電子進行著類似氣體分子一般的熱運動，由於質量很小，因此其速率甚大。電子不停地與固定的原子發生碰撞，使得其軌跡就像鋸齒狀的折線一般，不過其平均速度為零，故不形成電流。若在導體內施加電場，則電子將在電場的反方向受力，其運動軌跡仍為鋸齒狀，但平均速度不再是零，此平均速度稱為漂移速度。金屬導體中的電流便是由電子的漂移速度所造成。

若金屬導線的截面積為 A ，導線中每單位體積之電子的數目為 n ，電子所帶電量為 e ，其漂移速度為 V_d ，

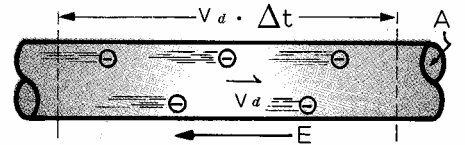
則根據電流之定義，可得 $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{neAV_d\Delta t}{\Delta t} = neAV_d$

自由電子之漂移速率 $V_d = \frac{I}{nAe}$

一般而言，電子漂移速度比其熱運動的速度小得多。以截面積為 $3 \times 10^{-6} \text{m}^2$ 的一般銅線為例，其自由電子密度約為 $8.5 \times 10^{28} \text{m}^{-3}$ ，當載流 10A 時，電子漂移速度約為 $2.4 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 或 0.24mm/s。但是在室溫下，電子熱運動的平均速率卻高達 $2 \times 10^5 \text{m/s}$ 。



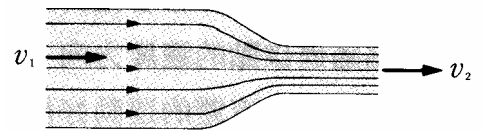
金屬內自由電子運動方向與電場方向相反



自由電子在金屬導體中的漂移速度，其方向與電場方向相反，圖中 E 係指導體內的電場

(B) 連續方程式(equation of continuity)

當流體從左端面流入時，同大的質量將在同一時間內從右端面流出，即 $\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t$ 式中 A_1 、 v_1 和 A_2 、 v_2 分別為流體的截面積和速率。化簡可得 $A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$ 這個關係式稱為連續方程式，它是質量守恆定律的另一種說法。



流體在截面積不同的導管內流動時的流線圖。在截面積較小的通道處，流速較快。

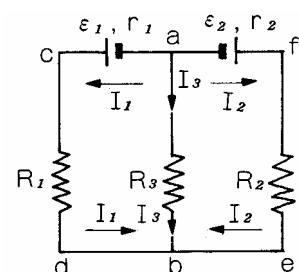
(C) 克希荷夫定律(drift velocity)

第一定律(結點定律)：在電路中任一結點(即電路中，兩條以上導線的交點)，流入的總電流等於流出的總電流，即 $\sum I = 0$ 。

※結點定律為電荷守恆定律的結果。

第二定律(迴路定律)：沿電路中的任一迴路(封閉路徑)，其電位變化量的代數和等於 0，即 $\sum V = 0$ 。

※迴路定律為能量守恆定律的結果。



(1) b 點： $I_1 + I_2 + I_3 = 0$,

(2) acdb 迴路：

$$\epsilon_1 = I_1 r_1 + I_1 R_1 - I_3 R_3$$

(D) 惠斯同電橋

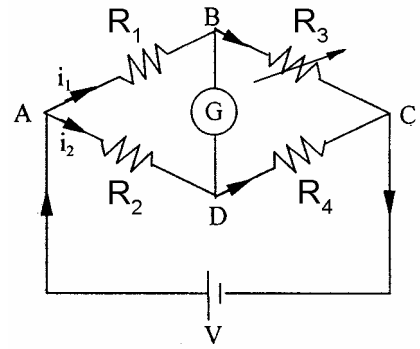
已知電阻 R_1 、 R_2 、可變電阻 R_3 、待測電阻 R_4

調整 R_3 ，使得 \textcircled{G} 讀數為0 \therefore B、D等電位

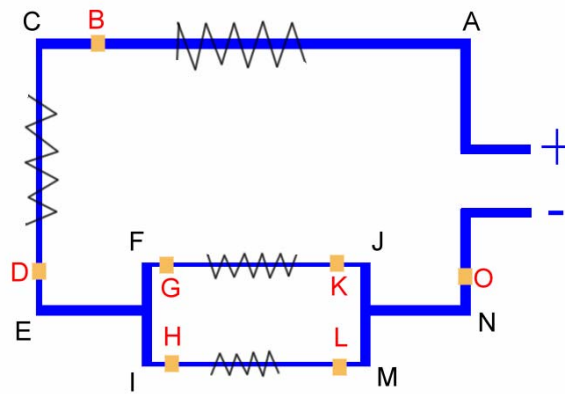
$$V_{AB} = V_{AD} \quad \therefore i_1 R_1 = i_2 R_2 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$V_{BC} = V_{DC} \quad \therefore i_1 R_3 = i_2 R_4 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$$\text{由 } \textcircled{1}、\textcircled{2} \text{ 得 } \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad \therefore \boxed{R_1 R_4 = R_2 R_3}$$



伍、研究結果



1、

次數 \ 小黑珠的運動速率	AC 段粗管	CE 段細管	備註
1	較慢	較快	
2	較慢	較快	
3	較慢	較快	
4	較慢	較快	
5	較慢	較快	
6	較慢	較快	
7	較慢	較快	
8	較慢	較快	
9	較慢	較快	
10	較慢	較快	

2、

次數	通過 B 點數量 (個/分鐘)	通過 D 點數量 (個/分鐘)	次數	通過 B 點數量 (個/分鐘)	通過 D 點數量 (個/分鐘)
1	175	175	11	227	227
2	232	232	12	345	345
3	305	305	13	301	301
4	224	224	14	285	285
5	268	268	15	186	186
6	228	228	16	248	248
7	194	194	17	494	494
8	301	301	18	341	341
9	295	295	19	335	335
10	196	196	20	296	296

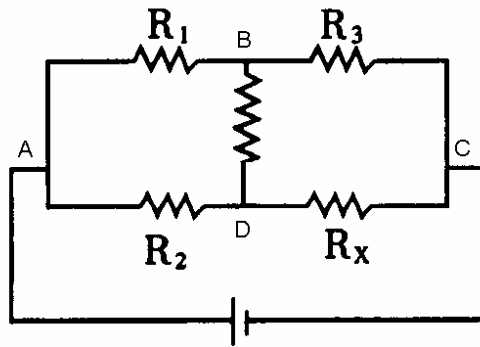
3、

次數	通過 D 點數量 (個/分鐘)	通過 G 點數量 (個/分鐘)	通過 H 點數量 (個/分鐘)	備註
1	308	156	152	
2	225	110	115	
3	169	85	84	
4	221	108	113	
5	258	134	124	
6	254	121	123	
7	278	139	139	
8	268	134	134	
9	224	117	107	
10	278	141	137	
11	214	107	107	
12	270	138	132	

4、

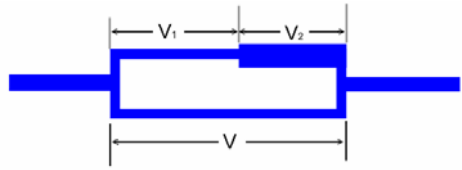
次數	B 點高度(cm)	D 點高度(cm)	O 點高度(cm)	備註
1	137.3	85.5	26.7	
2	134.4	82.8	21.6	
3	129.2	78.8	17.4	
4	131.3	82.7	21.6	
5	134.3	83.5	23.7	
6	130.4	79.6	20.6	
7	121.2	70.8	10.4	
8	135.3	84.7	26.6	
9	147.3	95.5	36.7	
10	130.8	81.8	23.6	
11	126.2	75.5	19.4	
12	130.4	81.3	20.2	

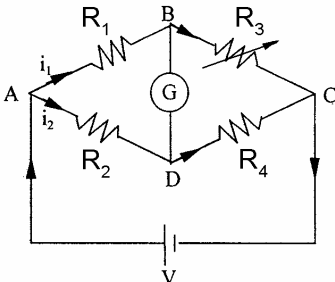
5、



次數	AB 段管徑	AD 段管徑	BC 段管徑	DC 段管徑	BD 段是否有小黑珠通過
1	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
2	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
3	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
4	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
5	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
6	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
7	3/8"	3/8"	3/8"	3/8"	無
8	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
9	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
10	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
11	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
12	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
13	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
14	3/8"	3/8"	4 分	4 分	無
15	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有
16	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有
17	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有
18	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有
19	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有
20	3/8"	4 分	3/8"	4 分	有

陸、討論

觀察主題	系統模擬	物理意義
電源	沉水馬達在水管兩端產生水壓推動水流流動。	導線兩端施加電壓，可使電荷流動形成電流，可連續提供電位差並產生電流的裝置，稱為電源。
電流的方向	小黑珠在管路中隨著水流方向流動，彷彿是帶正電荷的載子。	電荷載子的移動形成了宏觀的電流，雖然真正在導線內流動的電荷載子是負電荷，但傳統上我們習慣規定正電荷流動的方向為電流的方向。
電流的大小	由小黑珠在單位時間內通過某一截面積的數量來表示。	電流強度的定義 $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ， 單位時間內通過的電量多寡。
電壓的變化	由直立的透明支管可明顯觀察出水面的高度不同，沿著水流方向遞減。代表水流由高水位流向低水位，同時模擬電流由高電位流向低電位。	電流由高電位流向低電位。 靠近電源的正極處的電位最高。
飄移速率	小黑珠的流動速率可模擬。因為小黑珠是由水分子流動所帶動的，水分子在水壓為零的情況下，也會作熱運動，不過其平均速度為零，故不形成水流；當有水壓產生時，水分子平均速度不再是零，這就形成水流。	如原理探討所述， $V_d = \frac{I}{nAe}$ 。
電壓並聯	由透明分支管路的水位變化可觀查出：並聯水管的水位兩端相同。	並聯電阻兩端的電位差相同。
電壓串聯	由並聯的兩側之個別的透明分支管路的水位變化可觀查出：串聯水管側的水位會接連地越來越低，水位的總變化量會等於另一側。	 <p style="text-align: center;">$V = V_1 + V_2$</p>
電阻定律	由通過的小黑珠數量可知：粗水管較易讓小黑珠通過，阻力較小，代表低電阻；細水管阻力較大，代表高電阻。	$R = \rho \frac{\ell}{A}$ 電阻大小與截面積成反比
電阻串聯	因為是串聯，所以在單位時間內通過粗水管的小黑珠數量與通過細水管的小黑珠數量相同。	代表在高低電阻中相同時間內通過相同電量，因此電流也相同 $I_{\text{總}} = I_1 = I_2$

<p>電阻 並聯</p>	<p>1.當水流遇到叉路時，水會適切地分流沿著管路流動，然後再匯合成原先的總水流。由模型可觀察出：若兩並聯的管路相同粗細時，小黑珠分別流過兩條路徑數量大約相同，代表相同電阻並聯時，兩者之分電流相等。若兩並聯的管路粗細不同時，流往粗水管的小黑珠數量會比細水管的多，代表不同電阻並聯時，流經低電阻的電流較大。</p> <p>2.若再裝上透明分支管路，更可發現並聯的粗細水管兩端的水壓變化相同，代表並聯電阻兩端的電位差相同。</p>	<p>1.相同電阻並聯時，兩者之分電流相等；不同電阻並聯時，流經低電阻的電流較大</p> $I_{\text{總}} = I_1 + I_2$ <p>2. 並聯電阻兩端的電位差相同。</p>
<p>克希荷夫 定律</p>	<p>1.在管路上的任一結點，流入的小黑珠總數量會等於流出的總數量。</p> <p>2.沿著管路上的任一封閉迴路，經過每一水管兩端的水位差的總和為零。</p>	<p>1st.結點定律—在電路上的任一結點(電路中兩條以上導線之交點)，流入的總電流必等於流出的總電流。</p> <p>2nd.迴路定律—沿著電路上的任一封閉迴路，經過每一元件的電位差的總和必為零。</p>
<p>連續 方程式</p>	<p>在粗水管內的小黑珠移動速率較慢，而在細水管內的小黑珠移動速率較快。</p>	<p>$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$，流速與截面積成反比</p>
<p>惠斯 同 電橋</p>	<p>水管的粗細代表電阻的大小，當四個部分的水管粗細均一樣，而長度有適當比例關係時，中間的管線完全沒有小黑珠通過，表示兩端的壓力相同不造成水流；若四個部分的管線的粗細或長度未達成適當比例時，中間的管線有小黑珠通過，表示兩端的壓力不相同會造成水流，而使小黑珠在其中流動。</p>	<p>若電阻R_1、R_2、R_4及可變電阻R_3，連接如圖。調整R_3，使得 $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$</p> <p>則B、D兩點等電位，其中無電流通故Ⓖ讀數為0</p> 

柒、結論

- 1、本模型在模擬電流的各種現象上有很好的演示效用，不僅可以讓肉眼不可見的電流現象具體化，並能讓學習者產生各種新的啟發。
- 2、本模型除了能模擬演示物理學上有關電流的各種現象外，稍作改裝後並能演示流體力學上的諸多現象，如：連續方程式、液體的壓力、白努利方程式...等等。另外也可以演示生物學上的人體的血壓、人體的循環系統、植物的根壓、植物的營養及水分循環系統以及地球科學或地理學上的大氣壓力、河流現象..等等，啟發及應用性極高。

捌、參考資料及其他

- 一、高中基礎物理課本 南一出版社
- 二、高中物質物理(下) 南一出版社
- 三、高中選修物理(上) 南一出版社
- 四、<http://www.ntsec.gov.tw/index-spring.asp> 國立台灣科學教育館
- 五、<http://www.nstm.gov.tw/chinese/home/3/index11.htm> 國立科學工藝博物館
- 六、<http://pei.cjih.tc.edu.tw/index.html> 科學與藝術的對話