

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作者說明書

高中組物理科

040110

國立新莊高級中

指導老師姓名

吳原旭

鄭琨楹

作者姓名

陳志洋

傅聖文

林鈺哲

林聖皇

網格電路之研究

壹、摘要

本實驗主要在研究等間隔的方格導線(以下均稱為「網格電路」)之電流、電場及電位的性質，進而擴展到平面導體，並驗證克西荷夫定律。首先，以 23×23 規格的鐵絲網網格通以直流電探討電流-符合「結點定律」，電壓-符合「迴路定律」。其次，由其電場分布圖修正邊界的問題。最後，測出平面導體的電位分布圖，比對網格電路電位分佈圖之相關性非常相符合，由此推論平面導體的電場分布情況。

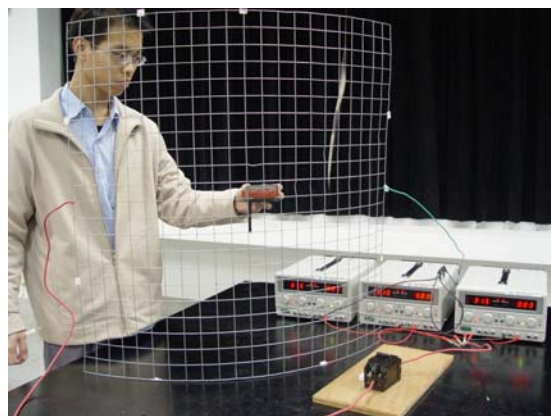
貳、實驗動機

有一次被漏電的洗衣機電到，想起在高一基礎物理中學過的接地問題，但是隨後又想到另一個問題：「電線上外露的電流是如何傳過洗衣機外殼這樣的平面導體呢？」以前學過的電學都是「導線」傳電的情形，而平面上的導電又是怎麼一回事呢？於是設計了實驗先從網格狀的電路研究起，希望能類比到平面導體的導電模式。

參、研究目的

- 一、探討網格電路中的電流分布
- 二、驗證克西荷夫結點定律
- 三、擴充探討「區塊」之結點定律
- 四、驗證克西荷夫迴路定律
- 五、描繪網格電路電流場分佈
- 六、建構網格電場模型並驗證之
- 七、探討網格電路等電位線與電流場之關係
- 八、了解平面導體之導電特性

照片(一)23×23 網格直流電裝置與測量過程



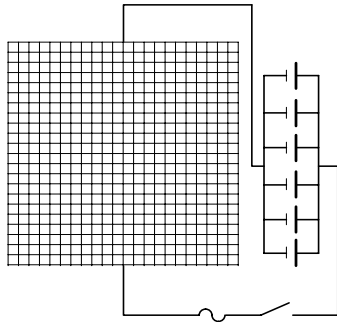
肆、研究設備及器材

一、器材

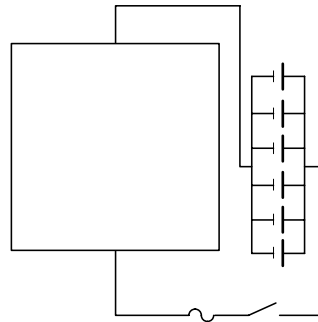
器材	規格	數量
DC 電源供應器	6A30V	6
數位式三用電表	TES 2206 200 mV \pm 0.1mV	2
鉤表	0.001~40A (AC.DC) \pm 1.5%	2
鐵絲網	87.5×87.5 (cm ²)，線徑 1.85(mm)	1
鋁片	43.5×43.5 (cm ²)	1
筆記型電腦	PIV	4
Excel，VISIO 等軟體		1
粗導線、一般導線		1

二、裝置

(一)直流電源網格電路



(二)平面導體電路



伍、研究過程與分析

一、研究直流電在 23x23 網格上的電流分布並驗證克西荷夫結點定律

(一)步驟

- 1、從鐵絲網上剪下 23 線x23 線的正方形，將電線接在鐵絲網的相對兩邊中點，定座標分別為(0,0)、(0,22)，並聯六台 DC POWER SUPPLY 供應 37A 電流，按下開關通以電流並用鉤表測量每一小段導線電流。
- 2、分析電流流向及電流強度之分佈情形。
- 3、設計 Excel 程式計算網格上每一個交叉點上進出之電流淨值。

(二)結果與分析：

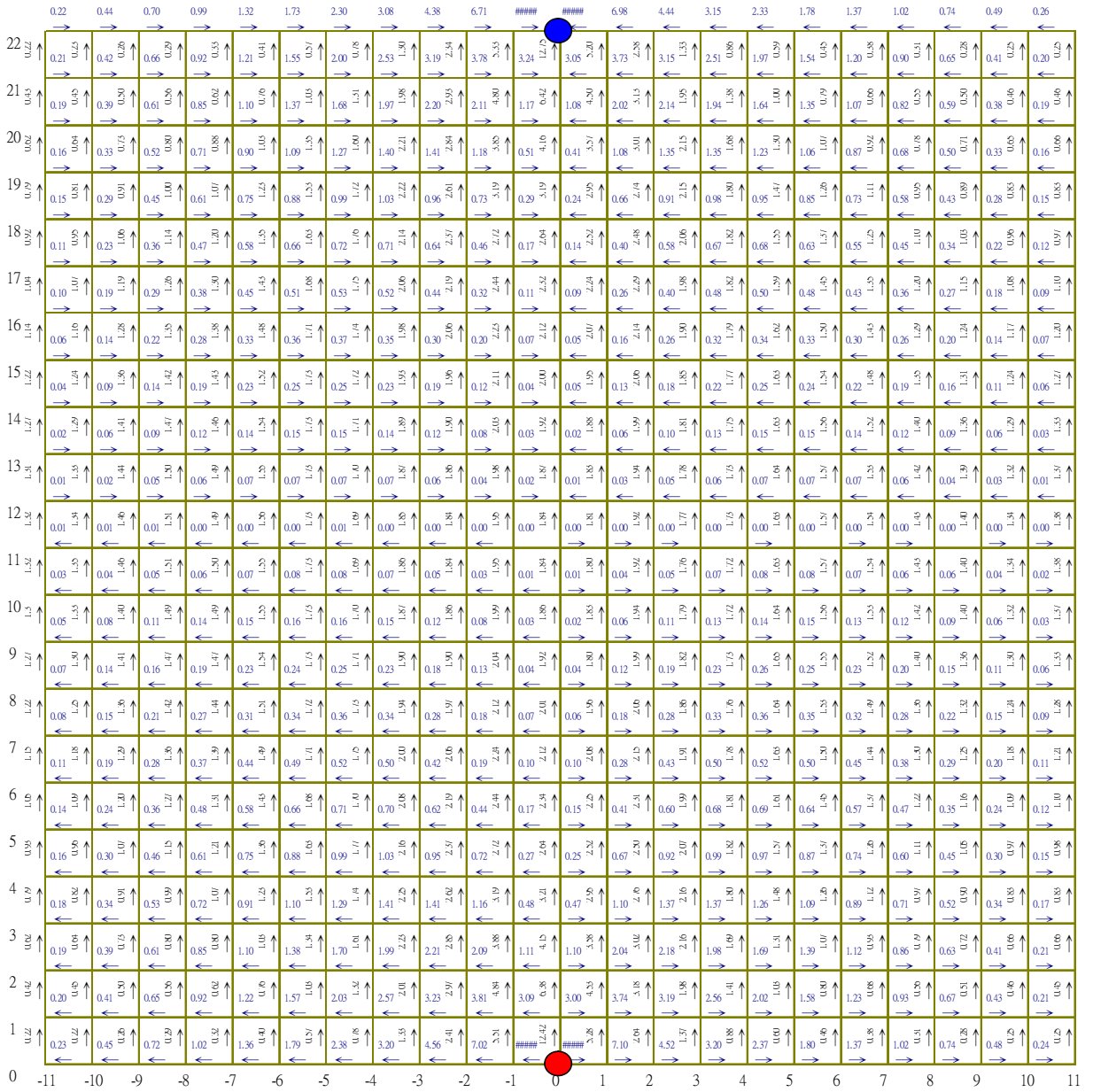
- 1、測量結果如圖(一)所示，其中紅色的點代表直流電流入網格的點，如(0,0)；藍色的點代表電流出網格電路的點，如(0,22)，箭頭的方向代表電流方向。
- 2、以 Excel 程式分析每一結點進出之電流淨值分別如表(一)所示。其中“+”代表流進電流比流出電流還多，“-”代表流進電流比流出電流還少。
- 3、理論：克西荷夫結點定律—導體任何一部分不會累積額外電荷於。即

$$\sum_i I_i = 0$$

所以淨電流的值愈接近 0 就表示愈符合克西荷夫結點定律。

- 4、各結點淨電流之方均根值為 0.014。

圖(一)23x23 網格電流分佈圖



表(一)23×23 網格結點淨電流 (接點(0,0)、(0,22))

X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流
-11	0	0.01	-9	12	-0.01	-6	1	-0.01	-4	13	0.00	-1	2	-0.02
-11	1	0.00	-9	13	0.00	-6	2	0.01	-4	14	0.01	-1	3	0.01
-11	2	-0.01	-9	14	0.00	-6	3	-0.01	-4	15	0.00	-1	4	0.02
-11	3	0.01	-9	15	0.00	-6	4	0.00	-4	16	0.00	-1	5	0.01
-11	4	0.02	-9	16	-0.01	-6	5	0.01	-4	17	0.00	-1	6	0.01
-11	5	0.02	-9	17	0.00	-6	6	-0.01	-4	18	0.00	-1	7	0.01
-11	6	0.01	-9	18	-0.01	-6	7	0.01	-4	19	-0.01	-1	8	-0.01
-11	7	0.01	-9	19	-0.01	-6	8	-0.02	-4	20	0.00	-1	9	0.00
-11	8	0.02	-9	20	0.01	-6	9	0.00	-4	21	0.00	-1	10	0.02
-11	9	0.02	-9	21	0.00	-6	10	0.01	-4	22	0.00	-1	11	0.00
-11	10	0.01	-9	22	0.00	-6	11	-0.01	-3	0	0.03	-1	12	-0.01
-11	11	0.01	-8	0	0.01	-6	12	0.01	-3	1	-0.02	-1	13	0.00
-11	12	0.00	-8	1	0.00	-6	13	0.00	-3	2	0.00	-1	14	0.00
-11	13	0.02	-8	2	0.00	-6	14	0.00	-3	3	-0.02	-1	15	0.01
-11	14	0.01	-8	3	0.00	-6	15	0.01	-3	4	0.01	-1	16	0.00
-11	15	0.02	-8	4	-0.01	-6	16	-0.01	-3	5	0.00	-1	17	0.01
-11	16	0.00	-8	5	0.00	-6	17	0.00	-3	6	0.00	-1	18	-0.03
-11	17	0.01	-8	6	0.00	-6	18	-0.01	-3	7	0.00	-1	19	0.01
-11	18	-0.02	-8	7	0.00	-6	19	0.01	-3	8	-0.01	-1	20	-0.01
-11	19	0.01	-8	8	-0.02	-6	20	0.00	-3	9	0.00	-1	21	0.01
-11	20	0.00	-8	9	0.01	-6	21	0.01	-3	10	-0.01	-1	22	0.02
-11	21	0.00	-8	10	-0.01	-6	22	0.00	-3	11	0.01	0	0	-37.36
-11	22	0.00	-8	11	0.00	-5	0	0.02	-3	12	-0.01	0	1	-0.05
-10	0	0.00	-8	12	0.00	-5	1	0.00	-3	13	0.00	0	2	0.02
-10	1	-0.02	-8	13	0.00	-5	2	0.01	-3	14	0.00	0	3	-0.01
-10	2	0.01	-8	14	0.00	-5	3	0.00	-3	15	0.00	0	4	0.05
-10	3	-0.02	-8	15	0.01	-5	4	0.01	-3	16	0.00	0	5	-0.02
-10	4	0.00	-8	16	0.00	-5	5	0.00	-3	17	-0.01	0	6	0.02
-10	5	-0.03	-8	17	0.01	-5	6	0.00	-3	18	-0.01	0	7	-0.02
-10	6	-0.01	-8	18	-0.02	-5	7	0.01	-3	19	0.00	0	8	0.01
-10	7	0.00	-8	19	0.01	-5	8	0.00	-3	20	0.00	0	9	0.01
-10	8	0.02	-8	20	0.00	-5	9	0.00	-3	21	0.02	0	10	0.00
-10	9	0.00	-8	21	0.01	-5	10	0.00	-3	22	0.00	0	11	0.00
-10	10	-0.01	-8	22	0.00	-5	11	0.00	-2	0	0.05	0	12	0.00
-10	11	0.00	-7	0	0.02	-5	12	0.00	-2	1	0.02	0	13	0.00
-10	12	0.00	-7	1	0.00	-5	13	0.00	-2	2	0.00	0	14	0.01
-10	13	0.00	-7	2	0.00	-5	14	0.00	-2	3	-0.02	0	15	0.00
-10	14	0.00	-7	3	-0.01	-5	15	0.01	-2	4	0.02	0	16	0.00
-10	15	0.00	-7	4	0.00	-5	16	0.01	-2	5	0.00	0	17	-0.01
-10	16	0.00	-7	5	0.00	-5	17	-0.01	-2	6	0.00	0	18	-0.02
-10	17	0.00	-7	6	-0.01	-5	18	-0.01	-2	7	-0.01	0	19	-0.05
-10	18	0.00	-7	7	-0.01	-5	19	0.00	-2	8	0.02	0	20	-0.01
-10	19	0.00	-7	8	0.01	-5	20	0.01	-2	9	0.00	0	21	-0.04
-10	20	-0.01	-7	9	-0.01	-5	21	0.01	-2	10	0.00	0	22	36.96
-10	21	0.01	-7	10	0.00	-4	0	0.04	-2	11	0.00	1	0	-0.03
-10	22	0.01	-7	11	0.01	-4	1	0.00	-2	12	0.00	1	1	0.01
-9	0	0.01	-7	12	-0.01	-4	2	0.00	-2	13	0.00	1	2	0.01
-9	1	0.00	-7	13	0.01	-4	3	0.00	-2	14	0.01	1	3	0.00
-9	2	-0.01	-7	14	-0.01	-4	4	-0.01	-2	15	0.00	1	4	0.01
-9	3	0.01	-7	15	0.00	-4	5	0.01	-2	16	-0.01	1	5	0.01
-9	4	0.00	-7	16	0.01	-4	6	0.00	-2	17	0.00	1	6	-0.01
-9	5	-0.01	-7	17	-0.01	-4	7	-0.01	-2	18	-0.01	1	7	0.00
-9	6	0.00	-7	18	-0.01	-4	8	0.00	-2	19	0.00	1	8	0.00
-9	7	-0.01	-7	19	0.00	-4	9	0.00	-2	20	0.00	1	9	0.01
-9	8	-0.03	-7	20	0.01	-4	10	0.00	-2	21	0.00	1	10	0.00
-9	9	0.04	-7	21	0.00	-4	11	0.00	-2	22	0.01	1	11	-0.01
-9	10	-0.05	-7	22	0.00	-4	12	0.00	-1	0	0.06	1	12	0.00
-9	11	0.00	-6	0	0.03	-4	12	-0.01	-1	1	-0.05	1	13	-0.01

X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流	X	Y	淨電流
1	14	0.01	4	3	0.00	6	15	0.01	9	4	0.00	11	16	0.01
1	15	-0.01	4	4	0.00	6	16	0.00	9	5	0.00	11	17	0.01
1	16	0.00	4	5	0.00	6	17	0.00	9	6	0.00	11	18	-0.01
1	17	-0.02	4	6	0.01	6	18	-0.01	9	7	0.00	11	19	0.01
1	18	-0.01	4	7	-0.01	6	19	0.00	9	8	0.00	11	20	0.01
1	19	0.05	4	8	0.00	6	20	0.00	9	9	-0.01	11	21	0.01
1	20	0.01	4	9	0.00	6	21	0.00	9	10	0.02	11	22	-0.01
1	21	-0.02	4	10	-0.01	6	22	0.04	9	11	0.00			
1	22	-0.01	4	11	-0.01	7	0	-0.03	9	12	0.00			
2	0	-0.06	4	12	0.01	7	1	0.00	9	13	0.00			
2	1	0.01	4	13	0.00	7	2	0.01	9	14	0.00			
2	2	0.02	4	14	0.01	7	3	-0.01	9	15	0.01			
2	3	-0.01	4	15	0.00	7	4	0.00	9	16	0.00			
2	4	0.01	4	16	-0.01	7	5	-0.01	9	17	0.00			
2	5	0.00	4	17	0.01	7	6	0.00	9	18	-0.01			
2	6	0.01	4	18	-0.01	7	7	-0.01	9	19	0.01			
2	7	-0.01	4	19	0.00	7	8	0.00	9	20	0.00			
2	8	0.00	4	20	0.00	7	9	0.00	9	21	-0.02			
2	9	0.00	4	21	-0.02	7	10	0.00	9	22	0.03			
2	10	0.01	4	22	0.04	7	11	0.00	10	0	-0.01			
2	11	0.00	5	0	-0.03	7	12	0.00	10	1	0.01			
2	12	0.00	5	1	0.01	7	13	-0.01	10	2	0.00			
2	13	-0.01	5	2	0.02	7	14	0.01	10	3	0.00			
2	14	-0.02	5	3	0.00	7	15	0.01	10	4	0.01			
2	15	0.02	5	4	0.01	7	16	0.01	10	5	0.00			
2	16	-0.01	5	5	0.01	7	17	0.00	10	6	0.00			
2	17	-0.01	5	6	0.00	7	18	-0.01	10	7	0.00			
2	18	-0.01	5	7	0.00	7	19	0.00	10	8	-0.01			
2	19	0.00	5	8	0.00	7	20	0.01	10	9	0.01			
2	20	0.00	5	9	0.00	7	21	-0.02	10	10	0.00			
2	21	-0.03	5	10	0.01	7	22	0.03	10	11	0.00			
2	22	0.04	5	11	0.00	8	0	-0.03	10	12	0.00			
3	0	-0.05	5	12	-0.01	8	1	0.01	10	13	0.00			
3	1	0.02	5	13	0.01	8	2	0.00	10	14	0.00			
3	2	0.02	5	14	-0.01	8	3	0.01	10	15	0.00			
3	3	0.00	5	15	0.00	8	4	0.01	10	16	0.00			
3	4	0.02	5	16	0.01	8	5	0.01	10	17	0.02			
3	5	0.00	5	17	-0.01	8	6	0.01	10	18	0.00			
3	6	0.01	5	18	-0.02	8	7	0.00	10	19	0.01			
3	7	0.00	5	19	0.00	8	8	0.01	10	20	0.00			
3	8	0.00	5	20	0.01	8	9	0.01	10	21	0.00			
3	9	0.01	5	21	-0.02	8	10	-0.01	10	22	0.02			
3	10	0.01	5	22	0.04	8	11	0.00	11	0	-0.01			
3	11	-0.01	6	0	-0.03	8	12	-0.01	11	1	0.01			
3	12	0.00	6	1	0.01	8	13	-0.01	11	2	0.00			
3	13	0.00	6	2	0.00	8	14	0.02	11	3	0.00			
3	14	0.00	6	3	0.01	8	15	0.00	11	4	0.00			
3	15	0.01	6	4	0.02	8	16	0.00	11	5	0.00			
3	16	0.00	6	5	-0.01	8	17	-0.01	11	6	0.00			
3	17	0.01	6	6	0.00	8	18	0.00	11	7	0.02			
3	18	-0.02	6	7	0.00	8	19	-0.01	11	8	0.01			
3	19	0.00	6	8	0.00	8	20	0.00	11	9	-0.01			
3	20	0.00	6	9	0.01	8	21	-0.01	11	10	0.01			
3	21	-0.02	6	10	0.00	8	22	0.03	11	11	0.00			
3	22	0.04	6	11	0.00	9	0	-0.02	11	12	0.00			
4	0	-0.05	6	12	0.00	9	1	0.01	11	13	0.01			
4	1	0.01	6	13	0.00	9	2	0.01	11	14	0.00			
4	2	0.01	6	14	0.00	9	3	0.00	11	15	0.00			

二、驗證「區塊」結點定律

(一)步驟：

- 1、提出假設：根據克西荷夫結點定律，若每一結點淨電流為0，則同一區塊的總進出電流淨值應該也要為0。
- 2、由過程一測得之數據：在圖(二)中任取一些區塊，計算進出此區塊之所有電流淨值。

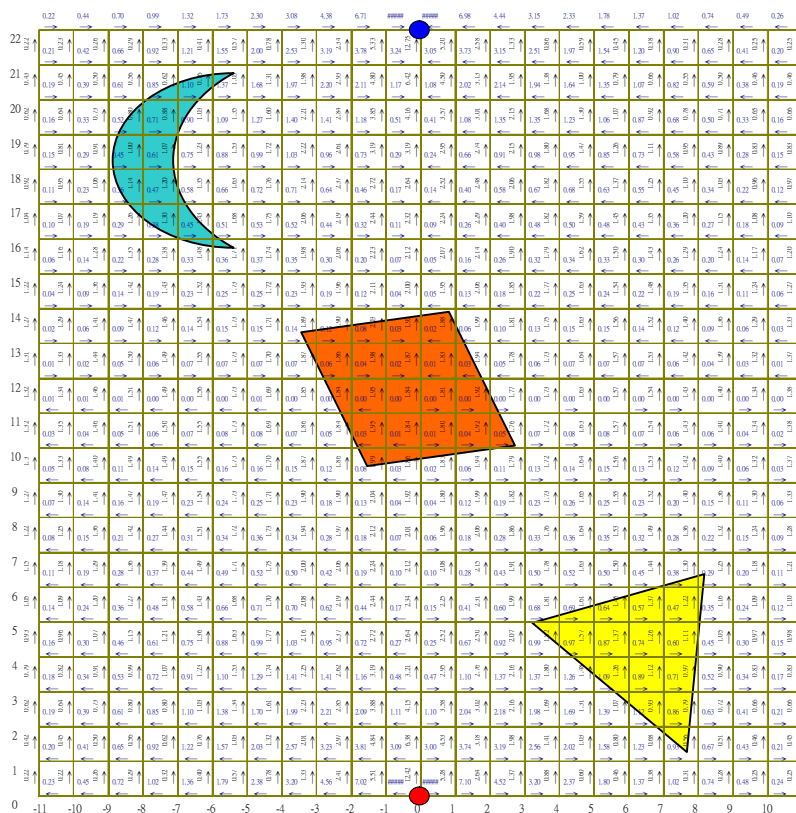
(二)結果

- 1、各取樣區淨電流分別為：

月亮 計算結果為-0.03A 三角形 計算結果為 0.05A 四邊形 計算結果為 0.00A

- 2、各取樣區塊的淨電流均接近0，可見假設成立。

圖(二) 三種「區塊」取樣圖



三、驗證克西荷夫迴路定律

(一) 步驟

- 1、理論推導：

克西荷夫迴路定律：任一迴路，沿途電位的總變化量等於0

$$\sum_i \Delta V_i = 0$$

每一段導線中 $\Delta V_i = I_i \times R_i$ 。

假設每一小段鐵絲長度、粗細、材質均相同且焊接點之電阻可忽略，因此設每一小段電阻均為 R。

$$\sum_i (I_i \times R_i) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_i (I_i \times R) = 0 \Rightarrow R \times \sum_i I_i = 0$$

$$\therefore \sum_i I_i = 0$$

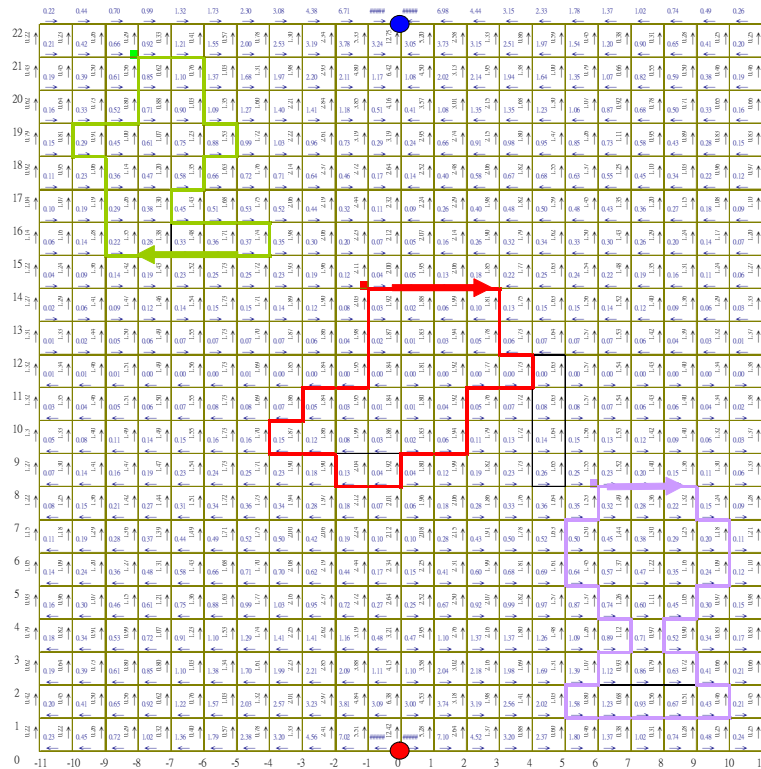
所以只要在網格上任取一封閉曲線，循指定方向將每一小段電流相加，若總和為0便驗證了克希荷夫迴路定律。(其中電流方向與指定方向相同時為正，反向時為負)

2、設計 Excel 程式，輸入任意封閉路徑，根據過程二測得之數據計算電流總和。

(二)結果

1、取樣路徑如圖(三)：

圖(三) 三種「迴路」路徑圖



2、其電流總和分別為：

(1)綠色： 0.24A (2)紅色： 0.22A (3)淺紫色： -0.05A

各路徑的電流總和均接近0，可驗證克希荷夫迴路定律。

四、探討網格電路上的電流向量場

(一)步驟：

- 1、想法：若以一個向量來表示結點周圍電流的向量和是否能說明各結點處的電場特徵？
- 2、理論：將每一小段鐵絲視為均勻導體，電流通過時電場E、兩端電位差ΔV、鐵絲長度d、電流I 應滿足以下關係：

$$E \cdot d = \Delta V = I \cdot R$$

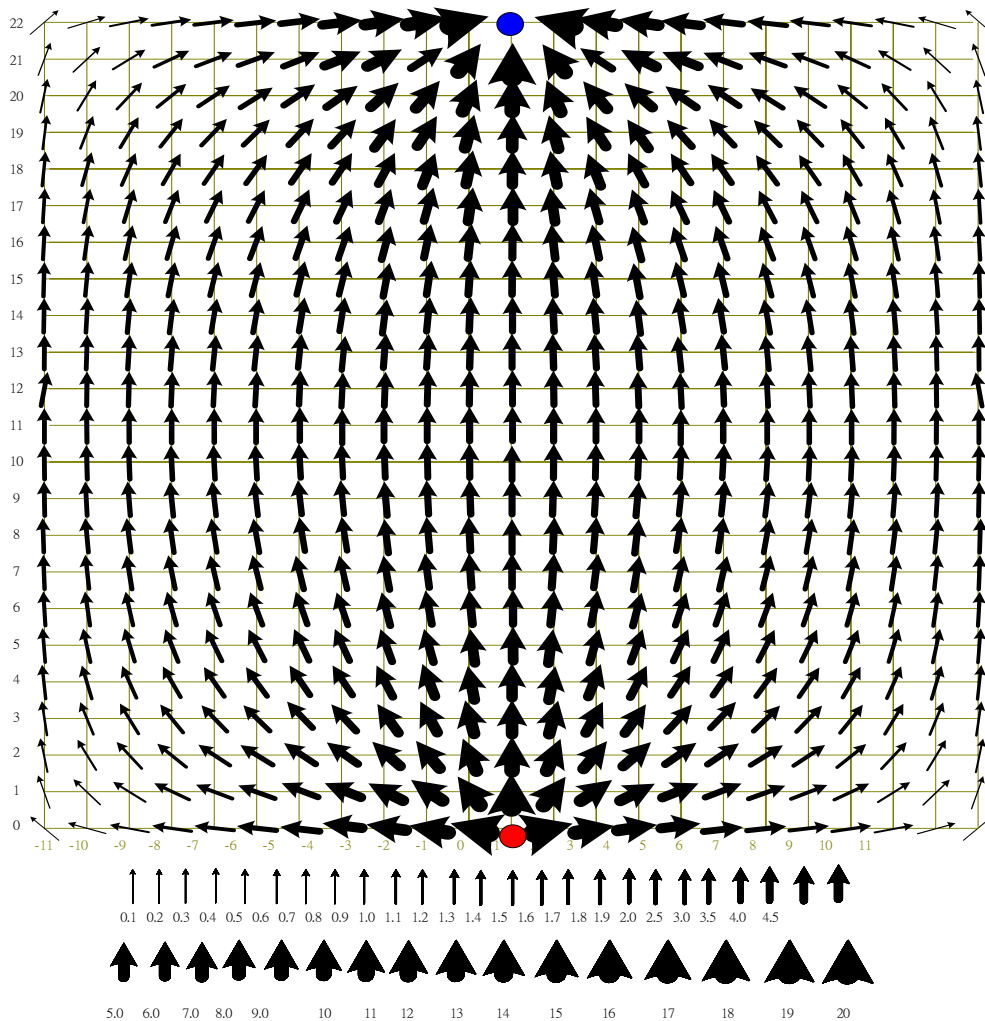
$$\Rightarrow E = \frac{R}{d} \cdot I \quad \therefore E \propto I \quad \text{且方向一致}$$

- 3、以一個向量來表示結點周圍電流的向量和，則此向量正比於此結點之電場向量。
- 4、設計 Excel 程式分析過程一中所測得之數據，算出每一結點處之電流向量和之大小及方向(與 X 軸夾角)，做圖表示。

(二)結果與分析

- 1、網格上各結點處電流向量和如圖(四)所示，其中向量大小以箭號粗細表示。
- 2、由箭號粗細變化可看出電流由一端進入，分散以後又會合之情形。

圖(四)導線兩端接(0,0)(0,22)之 23x23 網格電流場



五、修正兩點電荷靜電場建構網格電路之電流場

由圖(四)電流場分佈圖可知與正、負兩點電荷所建立的靜電場類似。

(一) 理論分析：

如圖(五)在 XY 平面 (0,0) 置一 +Q 電荷，(0,22) 置另一 -Q 電荷，則任一點 (Xi, Yj) 的電場 E

$$E = E_x + E_y$$

$$\text{其中 } E_x = E_{+Q} \cos \theta_1 + E_{-Q} \cos \theta_2$$

$$E_y = E_{+Q} \sin \theta_1 + E_{-Q} \sin \theta_2$$

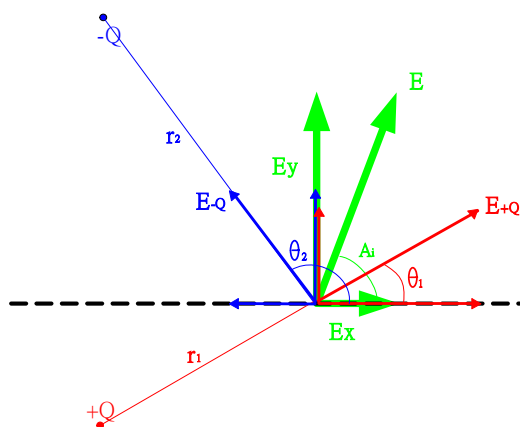
$$\text{設 } +Q \text{ 點電荷在空間中建立的電場爲 } E_{+Q} = +\frac{kQ}{r^2} = +\frac{C}{r^2} \quad (C \text{ 爲一常數})$$

$$-Q \text{ 點電荷在空間中建立的電場爲 } E_{-Q} = -\frac{kQ}{r^2} = -\frac{C}{r^2}$$

$$\text{而電場 } E \text{ 與 } X \text{ 軸之水平夾角 } A_i = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x}$$

由此理論算出每個座標點電場強度方向，與實際測得知電流向量和大小與方向做比較。

圖(五)兩帶電點電荷在空間中某處之電場



(二) 結果與分析：

- 1、如表(二)所列為(-11,0)~(-8,22)各點之相關數據(限於篇幅未全部列出)，其中電流向量與電場之方向角度相差仍很大，誤差平均值為 48.4°。
- 2、角度誤差(*越多表示誤差越大)呈現規律性變化，如在相同 X 座標時，Y 座標在靠近邊界時誤差較大，中間處誤差則較小。

表(二)兩異性點電荷建立之電場與實測電流場之比較

Xi	Yi	電場 Ei	夾角 Ai	電流 向量和	夾角 (度)	電流 電場	角度差		Xi	Yi	電場 Ei	夾角 Ai	電流 向量和	夾角 (度)	電流 電場	角度差	
-11	0	1.23	168.9	0.32	136.3	0.26	-32.6	***	-9	0	0.13	172.0	1.20	167.5	9.50	-4.5	
-11	1	1.23	162.5	0.67	107.4	0.54	-55.1	****	-9	1	0.13	164.7	1.30	144.4	10.35	-20.3	**
-11	2	1.22	155.9	1.06	100.4	0.87	-55.5	****	-9	2	0.12	157.3	1.59	129.1	12.86	-28.2	**
-11	3	1.19	149.1	1.42	97.3	1.19	-51.8	****	-9	3	0.12	149.9	1.86	117.9	15.67	-31.9	***
-11	4	1.15	142.2	1.73	95.3	1.50	-46.9	****	-9	4	0.11	142.4	2.12	111.0	18.89	-31.4	***
-11	5	1.11	135.2	1.98	94.0	1.79	-41.1	****	-9	5	0.11	135.0	2.35	104.8	22.24	-30.2	***
-11	6	1.06	128.0	2.20	92.9	2.07	-35.1	***	-9	6	0.10	127.7	2.53	100.7	25.58	-27.0	**
-11	7	1.02	120.7	2.37	91.9	2.32	-28.7	**	-9	7	0.09	120.3	2.67	97.7	28.69	-22.5	**
-11	8	0.99	113.2	2.49	91.6	2.53	-21.6	**	-9	8	0.09	112.8	2.79	96.2	31.51	-16.6	*
-11	9	0.96	105.5	2.57	91.1	2.68	-14.4	*	-9	9	0.08	105.3	2.82	93.9	33.18	-11.4	*
-11	10	0.94	97.8	2.62	90.7	2.79	-7.1		-9	10	0.08	97.7	2.86	91.8	34.59	-5.8	
-11	11	0.94	90.0	2.64	90.3	2.82	0.3		-9	11	0.08	90.0	2.92	90.3	35.61	0.3	
-11	12	0.94	82.2	2.63	89.8	2.80	7.6		-9	12	0.08	82.3	2.90	88.6	35.07	6.3	
-11	13	0.96	74.5	2.58	89.6	2.69	15.1	*	-9	13	0.08	74.7	2.85	87.0	33.62	12.2	*
-11	14	0.99	66.8	2.49	89.1	2.53	22.3	**	-9	14	0.09	67.2	2.78	85.3	31.43	18.1	*
-11	15	1.02	59.3	2.36	88.5	2.31	29.2	**	-9	15	0.09	59.7	2.66	82.2	28.58	22.5	**
-11	16	1.06	52.0	2.18	87.4	2.05	35.4	***	-9	16	0.10	52.3	2.52	79.0	25.40	26.7	**
-11	17	1.11	44.8	1.96	86.8	1.77	42.0	****	-9	17	0.11	45.0	2.33	75.3	22.03	30.4	***
-11	18	1.15	37.8	1.72	85.0	1.49	47.2	****	-9	18	0.11	37.6	2.10	69.4	18.75	31.9	***
-11	19	1.19	30.9	1.42	83.5	1.19	52.6	****	-9	19	0.12	30.1	1.85	62.6	15.60	32.5	***
-11	20	1.22	24.1	1.07	79.7	0.88	55.6	****	-9	20	0.12	22.7	1.59	50.9	12.86	28.2	**
-11	21	1.23	17.5	0.68	72.1	0.55	54.6	****	-9	21	0.13	15.3	1.32	35.1	10.47	19.8	*
-11	22	1.23	11.1	0.31	45.0	0.25	33.9	***	-9	22	0.13	8.0	1.17	12.8	9.27	4.9	
-10	0	1.51	170.5	0.71	162.1	0.47	-8.4		-8	0	0.16	173.5	1.76	170.5	10.92	-2.9	
-10	1	1.51	163.7	0.91	132.3	0.60	-31.4	***	-8	1	0.16	165.5	1.79	151.6	11.10	-14.0	*
-10	2	1.49	156.7	1.23	118.0	0.83	-38.7	***	-8	2	0.16	157.5	2.00	137.0	12.80	-20.5	**
-10	3	1.44	149.6	1.55	109.6	1.07	-40.0	****	-8	3	0.15	149.6	2.18	124.9	14.78	-24.7	**
-10	4	1.38	142.5	1.84	104.5	1.33	-38.0	***	-8	4	0.14	141.9	2.39	116.6	17.36	-25.3	**
-10	5	1.32	135.3	2.08	100.5	1.58	-34.8	***	-8	5	0.13	134.3	2.56	109.1	20.10	-25.2	**
-10	6	1.25	128.0	2.29	97.5	1.83	-30.5	***	-8	6	0.12	126.9	2.71	103.9	23.02	-23.0	**
-10	7	1.19	120.6	2.44	95.4	2.05	-25.2	**	-8	7	0.11	119.5	2.82	99.8	25.83	-19.7	*
-10	8	1.14	113.1	2.56	94.7	2.24	-18.4	*	-8	8	0.10	112.2	2.91	96.9	28.42	-15.3	*
-10	9	1.10	105.5	2.63	92.8	2.39	-12.7	*	-8	9	0.10	104.8	2.97	94.8	30.46	-10.0	*
-10	10	1.08	97.8	2.68	91.5	2.48	-6.3		-8	10	0.09	97.4	3.00	92.1	31.75	-5.3	
-10	11	1.07	90.0	2.69	90.5	2.51	0.5		-8	11	0.09	90.0	3.02	90.2	32.28	0.2	
-10	12	1.08	82.2	2.67	89.4	2.47	7.1		-8	12	0.09	82.6	3.01	87.9	31.86	5.3	
-10	13	1.10	74.5	2.62	88.3	2.38	13.7	*	-8	13	0.10	75.2	2.98	86.0	30.53	10.8	*
-10	14	1.14	66.9	2.53	87.1	2.22	20.2	**	-8	14	0.10	67.8	2.91	83.5	28.40	15.7	*
-10	15	1.19	59.4	2.41	85.2	2.02	25.8	**	-8	15	0.11	60.5	2.81	79.8	25.77	19.3	*
-10	16	1.25	52.0	2.25	82.6	1.80	30.6	***	-8	16	0.12	53.1	2.69	75.6	22.90	22.5	**
-10	17	1.32	44.7	2.05	80.4	1.55	35.7	***	-8	17	0.13	45.7	2.54	70.9	19.93	25.3	**
-10	18	1.38	37.5	1.81	76.0	1.31	38.5	***	-8	18	0.14	38.1	2.39	63.6	17.33	25.6	**
-10	19	1.44	30.4	1.53	71.3	1.06	41.0	****	-8	19	0.15	30.4	2.18	55.7	14.76	25.3	**
-10	20	1.49	23.3	1.23	62.0	0.83	38.7	***	-8	20	0.16	22.5	2.00	43.0	12.80	20.5	**
-10	21	1.51	16.3	0.93	47.2	0.61	30.9	***	-8	21	0.16	14.5	1.79	28.3	11.15	13.8	*
-10	22	1.51	9.5	0.70	19.2	0.46	9.7		-8	22	0.16	6.5	1.71	9.7	10.61	3.2	

(三) 修正邊界誤差

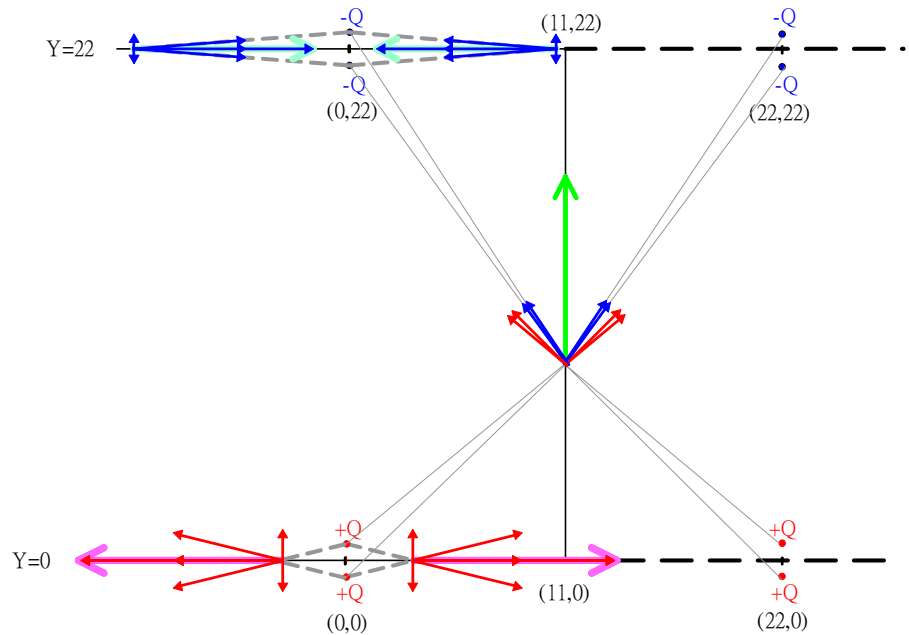
上述正、負兩點電荷所建立的靜電場並無邊際，但網格電路卻有邊界的問題，因此想利用類似『鏡面』效果來滿足邊界（X=-11、X=+11、Y=0、Y=+22）電流場的方向問題。

1、上、下邊界 Y=0 及 Y=+22 之修正方法：

如圖(六)在 (0,0) 附近 (0,0±y) 各置兩點電荷+Q，即可滿足下邊界 Y=0 的電流及電場實際之方向【由 (0,0) 往 (+11,0)、(-11,0) 流動】。

分析如下：在 $Y=0$ 軸上任一點 $(X_i, 0)$ 與兩點電荷 $+Q$ 等距離，因此此點電場大小僅剩 X 方向分量。

圖(六)修正邊際誤差分析圖



同理，在 $(0,22)$ 附近 $(0,22 \pm \Delta y)$ 各置兩點電荷 $-Q$ ，即可滿足上邊界 $Y=22$ 的電流及電場實際之方向【由 $(+11,22)$ 、 $(-11,22)$ 往 $(0,22)$ 流動】。

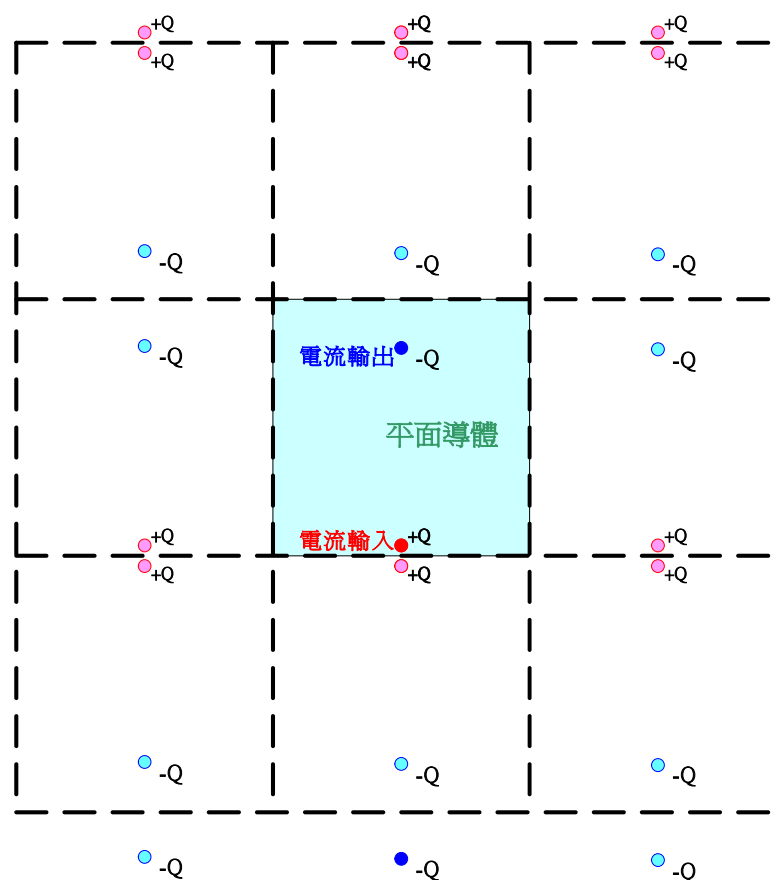
分析如下：在 $Y=22$ 軸上任一點 $(X_i, 22)$ 與兩 $-Q$ 點電荷等距離，因此此點電場大小僅剩 X 方向分量。

- 2、左、右邊界 $X=-11$ 及 $X=11$ 修正方法：(以右邊界 $X=11$ 為例說明如下)
 在 $(0,0 \pm \Delta y)$ 、 $(22,0 \pm \Delta y)$ 各置兩點電荷 $+Q$ ， $(0,22 \pm \Delta y)$ 、 $(22,22 \pm \Delta y)$ 各置兩點電荷 $-Q$ ，即可滿足邊界 $X=11$ 的電流及電場實際之方向【由 $(11,0)$ 往 $(11,22)$ 流動】。

分析如下：在 $Y=11$ 軸上任一點 $(11, Y_i)$ 與左右 $+Q$ 電荷等距離，也與左右 $-Q$ 電荷等距離，左邊界情況亦同，因此此點電場大小僅剩 Y 方向分量，如圖(十一)所示。

- 3、考慮各邊界的鏡面性質，我們以圖(七)之點電荷分佈所形成的電場來建構網格電路的電場。

圖(七)點電荷建構網格電路電場邊界效應之模型



(四) 修正平面電場：

- 1、在以上修正之後，電場的方向與電流場的方向大致相同了，但是電流與電場的比值愈接近兩端差距愈大(限於篇幅未列出數據)，此誤差可能是與距離有關。
- 2、於是想到點電荷在空間中建立的電場強度與距離平方成反比，但是當電場的作用侷限在一平面上時此關係是否還正確？將電場修正為與距離一次方成反比帶入比對，結果如表(三)所列為(-11,0)~(-8,22)部份資料。其中角度差除了角落處(電流較小處)誤差較大外，其餘角度幾乎一致，且電流/電場比值幾乎為一定值。
- 3、將 C 值嘗試以某一數值代入使「電流向量和/電場」值之平均為 1，以方便比較。
- 4、若以電流向量之大小來加權乘上角度差，取絕對值後再平均，所得之平均加權角度誤差較能反映出主要電場的角度誤差情形。

$$\text{即平均加權角度誤差 } \overline{\Delta A} = \frac{\sum_i |I_i \times \Delta A_i|}{\sum_i I_i}$$

- 5、結果：經上式計算結果，電流向量場與電場之 $\overline{\Delta A} = 2.5^\circ$ ；「電流向量和/電場」值之平均調為 1.00 時，標準差為 0.10。
- 6、由電流向量與電場成正比之特性及電流向量與電場方向的一致性，說明了我們所建構的電場模型與實際上網格所測得結果一致。

表(三)修正後之電場與實測電流場之比較

Xi	Yi	電場 Ei	夾角 Ai	電流向 量和 Ii	夾角 (度)	電流 電場	角度差 ΔA_i			電場 Ei	夾角 Ai	電流向 量和 Ii	夾角 (度)	電流 電場	角度差 ΔA_i	
-11	0	0.25	106.3	0.25	146.3	1.02	40.0	****	-9	0	0.76	161.5	1.03	168.3	1.35	6.8
-11	1	0.56	96.9	0.44	111.3	0.79	14.4	*	-9	1	0.92	140.3	1.00	144.7	1.09	4.5
-11	2	0.86	94.2	0.77	102.8	0.90	8.5		-9	2	1.13	125.8	1.20	131.6	1.07	5.8
-11	3	1.13	93.0	1.14	97.1	1.00	4.1		-9	3	1.35	116.1	1.41	118.9	1.04	2.8
-11	4	1.38	92.2	1.41	95.3	1.02	3.1		-9	4	1.55	109.3	1.66	111.6	1.07	2.3
-11	5	1.59	91.7	1.64	93.8	1.04	2.1		-9	5	1.73	104.3	1.85	105.7	1.07	1.4
-11	6	1.76	91.3	1.86	92.8	1.06	1.4		-9	6	1.88	100.5	1.99	101.3	1.06	0.8
-11	7	1.89	91.0	2.03	92.0	1.08	1.0		-9	7	1.99	97.6	2.12	97.9	1.07	0.3
-11	8	1.99	90.7	2.16	91.1	1.09	0.3		-9	8	2.08	95.2	2.23	95.1	1.07	-0.1
-11	9	2.06	90.5	2.21	90.8	1.07	0.3		-9	9	2.13	93.3	2.27	93.5	1.07	0.2
-11	10	2.10	90.2	2.24	90.3	1.07	0.0		-9	10	2.17	91.6	2.28	91.8	1.05	0.2
-11	11	2.11	90.0	2.25	89.7	1.07	-0.3		-9	11	2.18	90.0	2.31	90.0	1.06	0.0
-11	12	2.10	89.8	2.22	89.7	1.06	0.0		-9	12	2.17	88.4	2.33	89.0	1.07	0.6
-11	13	2.06	89.5	2.15	89.5	1.04	-0.1		-9	13	2.13	86.7	2.27	87.5	1.06	0.8
-11	14	1.99	89.3	2.07	88.6	1.04	-0.7		-9	14	2.08	84.8	2.20	85.0	1.06	0.3
-11	15	1.89	89.0	1.98	88.3	1.05	-0.7		-9	15	1.99	82.4	2.09	83.1	1.05	0.7
-11	16	1.76	88.7	1.83	87.5	1.04	-1.2		-9	16	1.88	79.5	1.95	80.0	1.04	0.5
-11	17	1.59	88.3	1.63	86.5	1.03	-1.8		-9	17	1.73	75.7	1.80	75.9	1.04	0.2
-11	18	1.38	87.8	1.42	84.7	1.03	-3.0		-9	18	1.55	70.7	1.65	69.4	1.06	-1.4
-11	19	1.13	87.0	1.15	83.0	1.01	-4.0		-9	19	1.35	63.9	1.41	62.5	1.05	-1.4
-11	20	0.86	85.8	0.83	78.1	0.97	-7.6		-9	20	1.13	54.2	1.19	48.4	1.05	-5.8
-11	21	0.56	83.1	0.49	68.6	0.89	-14.5	*	-9	21	0.92	39.7	0.97	32.4	1.06	-7.4
-11	22	0.25	73.7	0.22	39.5	0.89	-34.3	***	-9	22	0.76	18.5	0.84	11.7	1.10	-6.8
-10	0	0.46	148.3	0.63	167.1	1.37	18.7	*	-8	0	1.12	167.4	1.46	171.3	1.30	4.0
-10	1	0.68	124.0	0.63	139.5	0.93	15.5	*	-8	1	1.24	149.3	1.33	152.3	1.08	2.9
-10	2	0.94	112.3	0.90	123.2	0.95	10.9	*	-8	2	1.40	134.9	1.52	139.3	1.09	4.4
-10	3	1.20	105.6	1.20	109.9	1.00	4.3		-8	3	1.57	123.8	1.67	125.5	1.06	1.7
-10	4	1.43	101.3	1.49	104.8	1.04	3.4		-8	4	1.74	115.4	1.88	116.6	1.08	1.2
-10	5	1.63	98.4	1.70	100.5	1.04	2.2		-8	5	1.89	109.0	2.02	109.3	1.07	0.3
-10	6	1.79	96.2	1.86	97.7	1.04	1.6		-8	6	2.01	104.0	2.13	104.1	1.06	0.1
-10	7	1.92	94.5	2.00	95.5	1.04	1.0		-8	7	2.10	100.1	2.22	100.1	1.06	0.0
-10	8	2.02	93.1	2.11	93.3	1.05	0.2		-8	8	2.17	97.0	2.30	96.8	1.06	-0.3
-10	9	2.08	92.0	2.18	92.4	1.05	0.4		-8	9	2.22	94.4	2.34	94.4	1.06	0.0
-10	10	2.12	90.9	2.20	91.0	1.04	0.1		-8	10	2.24	92.1	2.35	92.2	1.05	0.1
-10	11	2.13	90.0	2.19	89.2	1.03	-0.8		-8	11	2.25	90.0	2.36	91.0	1.05	1.0
-10	12	2.12	89.1	2.17	89.2	1.02	0.2		-8	12	2.24	87.9	2.35	89.0	1.05	1.1
-10	13	2.08	88.0	2.12	88.4	1.02	0.3		-8	13	2.22	85.6	2.32	86.5	1.05	0.9
-10	14	2.02	86.9	2.05	86.4	1.02	-0.5		-8	14	2.17	83.0	2.27	83.7	1.05	0.7
-10	15	1.92	85.5	1.97	85.3	1.02	-0.2		-8	15	2.10	79.9	2.19	81.1	1.04	1.2
-10	16	1.79	83.8	1.83	83.1	1.02	-0.7		-8	16	2.01	76.0	2.08	77.2	1.04	1.3
-10	17	1.63	81.6	1.66	80.3	1.02	-1.3		-8	17	1.89	71.0	1.96	72.5	1.04	1.5
-10	18	1.43	78.7	1.47	75.4	1.03	-3.3		-8	18	1.74	64.6	1.83	64.4	1.05	-0.2
-10	19	1.20	74.4	1.22	70.8	1.02	-3.6		-8	19	1.57	56.2	1.64	55.9	1.04	-0.3
-10	20	0.94	67.7	0.96	59.1	1.01	-8.6		-8	20	1.40	45.1	1.48	41.4	1.06	-3.7
-10	21	0.68	56.0	0.69	42.0	1.01	-13.9	*	-8	21	1.24	30.7	1.30	25.6	1.05	-5.1
-10	22	0.46	31.7	0.51	15.9	1.11	-15.7	*	-8	22	1.12	12.6	1.23	8.4	1.10	-4.3

六、以電流在不同接點的情況來驗證電場模型

(一)步驟：

- 1、同樣的 23 線x23 線正方形網格鐵絲網，改變電源正負極接法如下，重複前面之測量與分析。(前述負極接(0,22)者為【甲接法】)

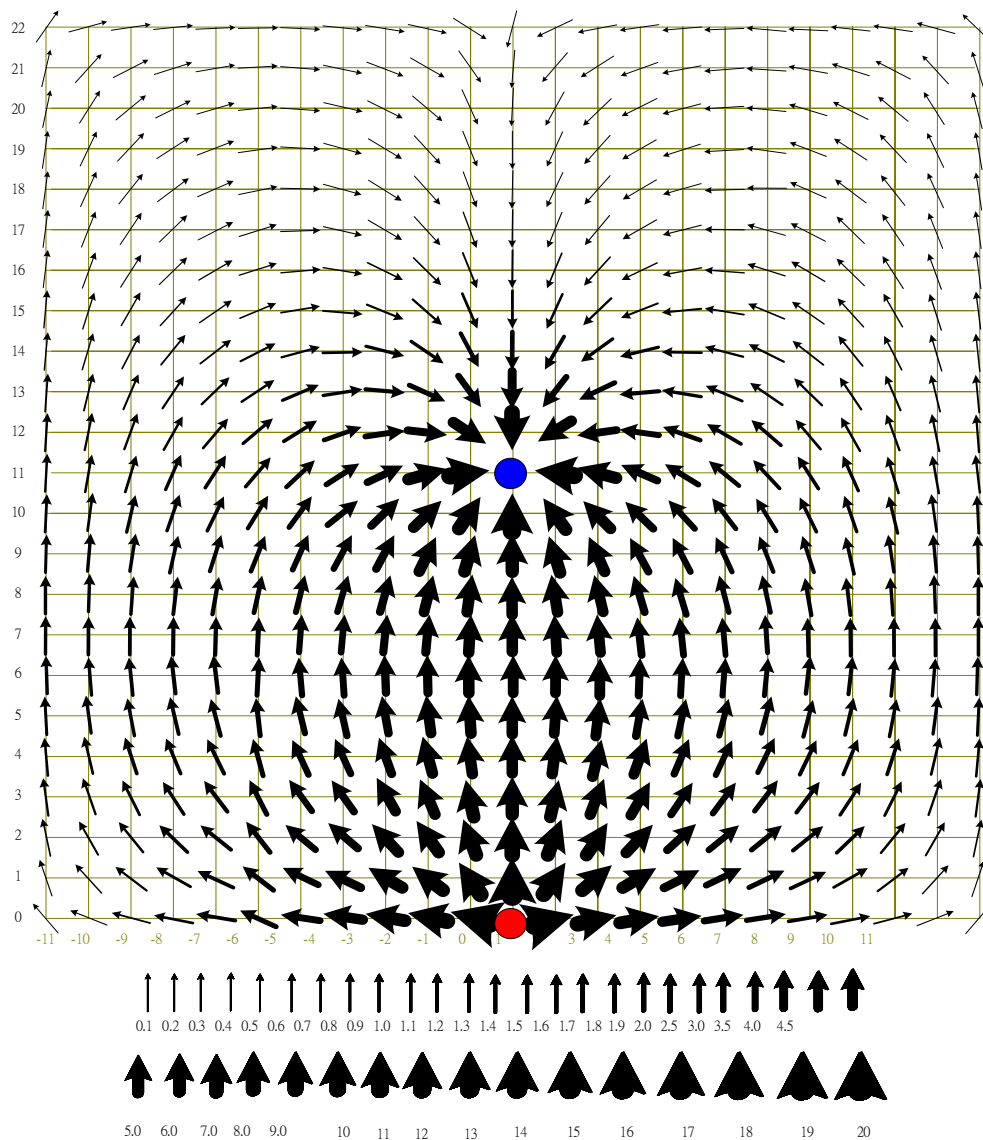
乙接法	正極接 (0,0)	負極接 (0,11)
丙接法	正極接 (0,0)	負極接 (11,11)
丁接法	正極接 (0,0)	負極 1 接 (-9,9) 負極 2 接 (7,12)

2、將測量結果帶入修正後之電場模型，步驟同上過程五的步驟(四)。

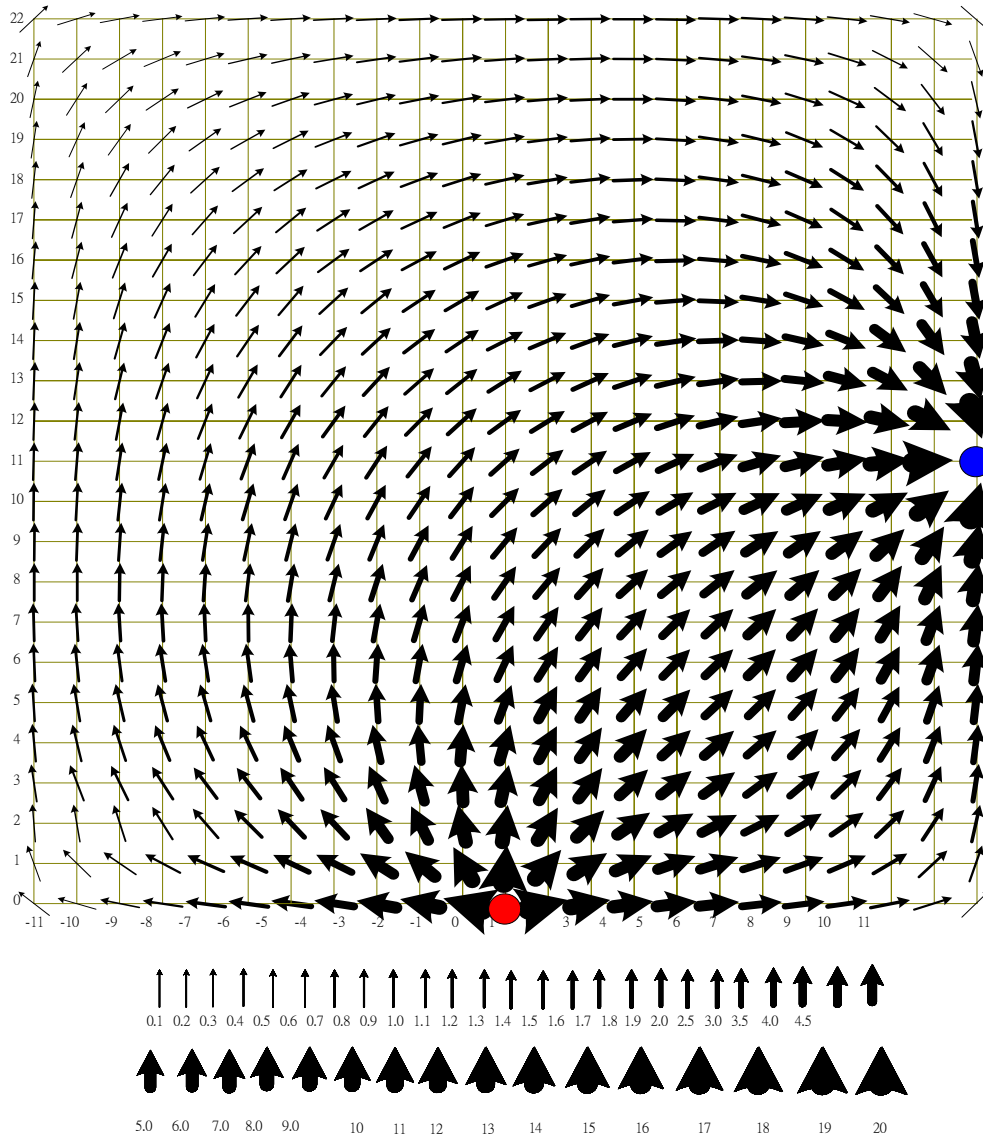
(二)結果與分析

1、網格上各結點處電流向量和如圖(八)、(九)、(十)所示。

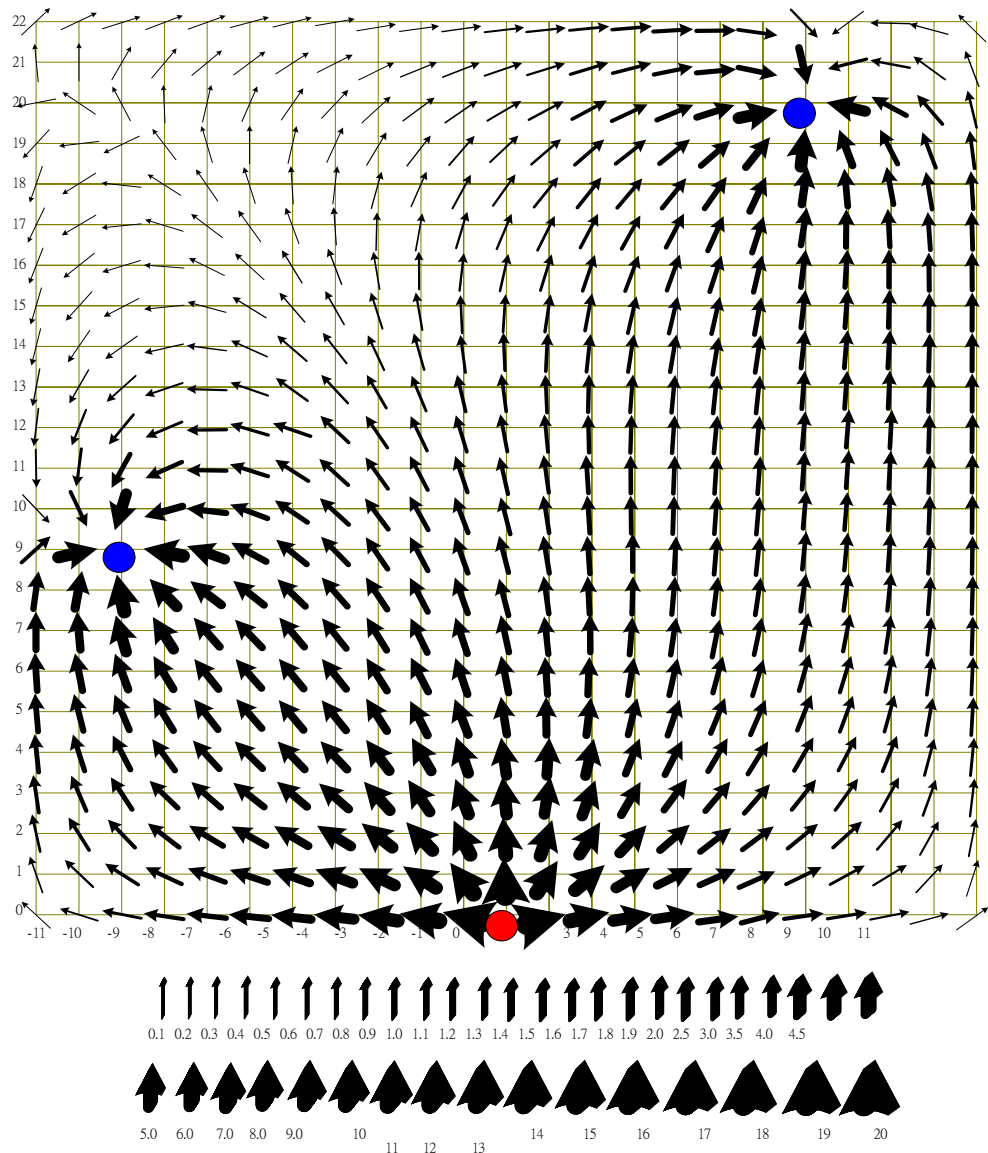
圖(八)導線兩端接(0,0)(0,11)之 23x23 網格電流場【乙接法】



圖(九)導線兩端接(0,0)(11,11)之 23x23 網格電流場【丙接法】



圖(十)導線正極接(0,0)負極接(-9,9) (7,20)之 23x23 網格電流場【丁接法】



2、將數據帶入電場模型比較後，調整 C 值使(電流向量/電場)值之平均=1.00。三種接法之平均加權角度誤差 $\overline{\Delta A}$ 及(電流向量/電場)值之標準差分別如下：

- (1) 乙接法： $\overline{\Delta A} = 4.6^\circ$ ；(電流向量/電場)值之標準差=0.23。
- (2) 丙接法： $\overline{\Delta A} = 7.0^\circ$ ；(電流向量/電場)值之標準差=0.22。
- (3) 丁接法： $\overline{\Delta A} = 3.4^\circ$ ；(電流向量/電場)值之標準差=0.26。

由以上統計結果可看出角度誤差的平均值都很小，且電流/電場比值也幾乎為一定值，故也可以說明我們所建立的電場模型之適用性。

七、探討網格電路之電位分布

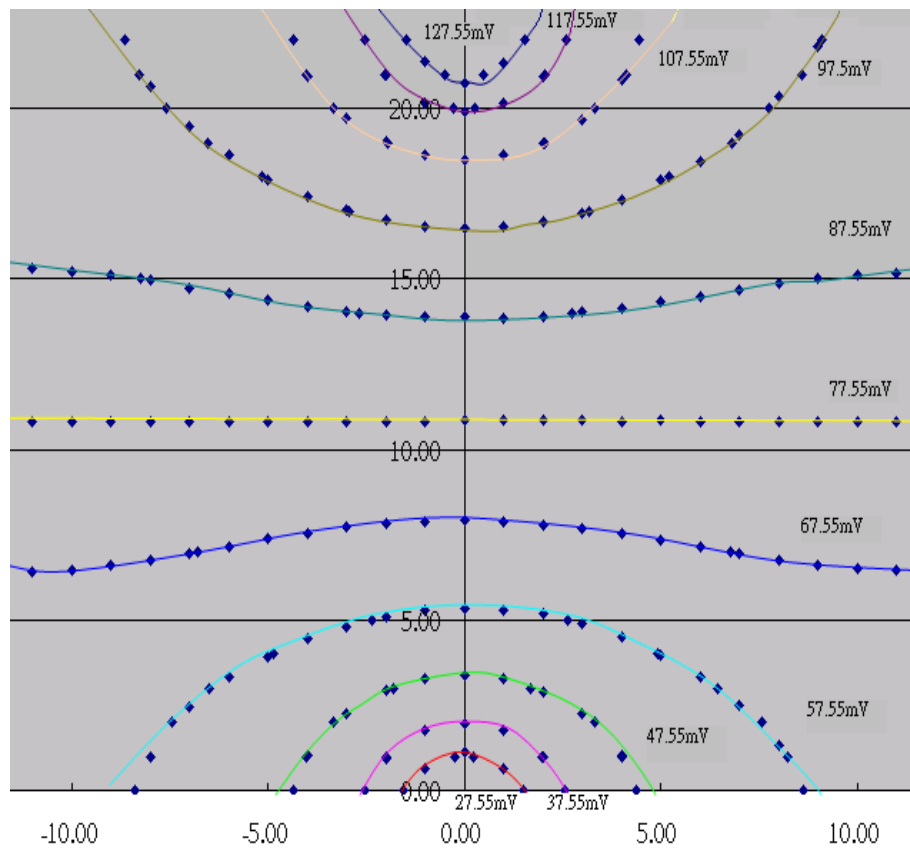
(一)步驟：

- 1、甲、乙、丙、丁四種接法分別將三用電表正極探針固定在(0,0)結點上，將功能鈕轉至 200mV 位置，以負極探針接觸每一個結點，測量每一結點與(0,0)結點之電位差。

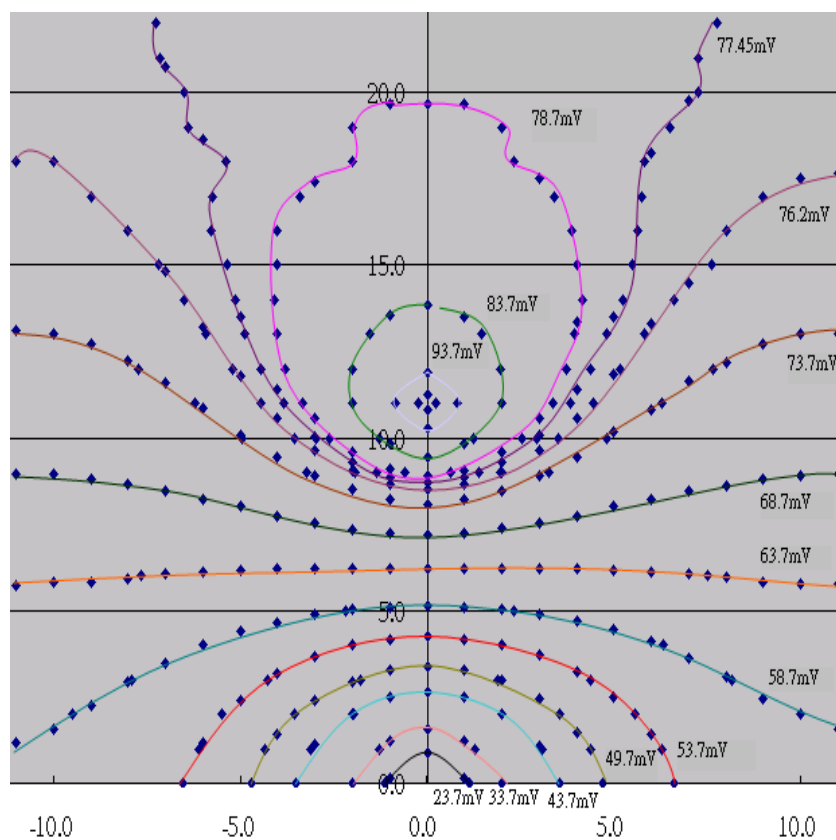
(二)結果與分析

- 1、根據以上測量畫成等電位線圖如圖(十一)、(十二)、(十三)、(十四)。
- 2、兩接點附近電位變化極大，等位線較具規律，在離兩接點較遠處，等位線較不規則。
- 3、將等電位線圖(圖十四)與電流向量分佈圖(圖十)重疊作比對如圖(十五)為例，可看出電流向量(電場)方向與等位線大致垂直之特性，也看得出等電位線愈密集處電場愈強。其餘三種接法也都有同樣的性質。

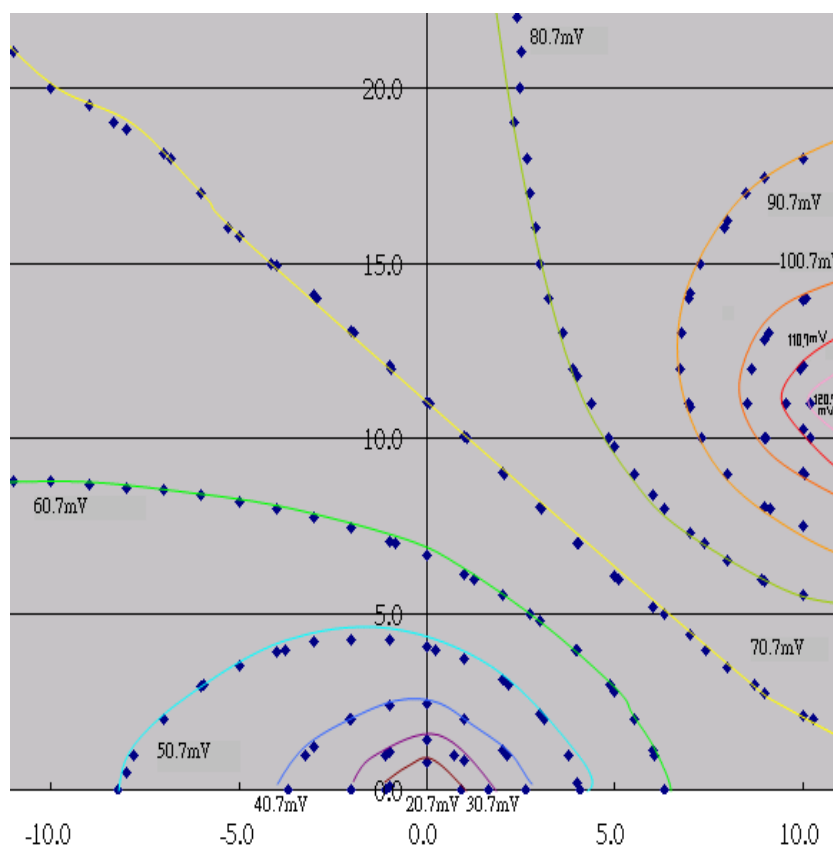
圖(十一) 導線兩端接(0,0)、(0,22)之 23×23 網格等位線圖【甲接法】



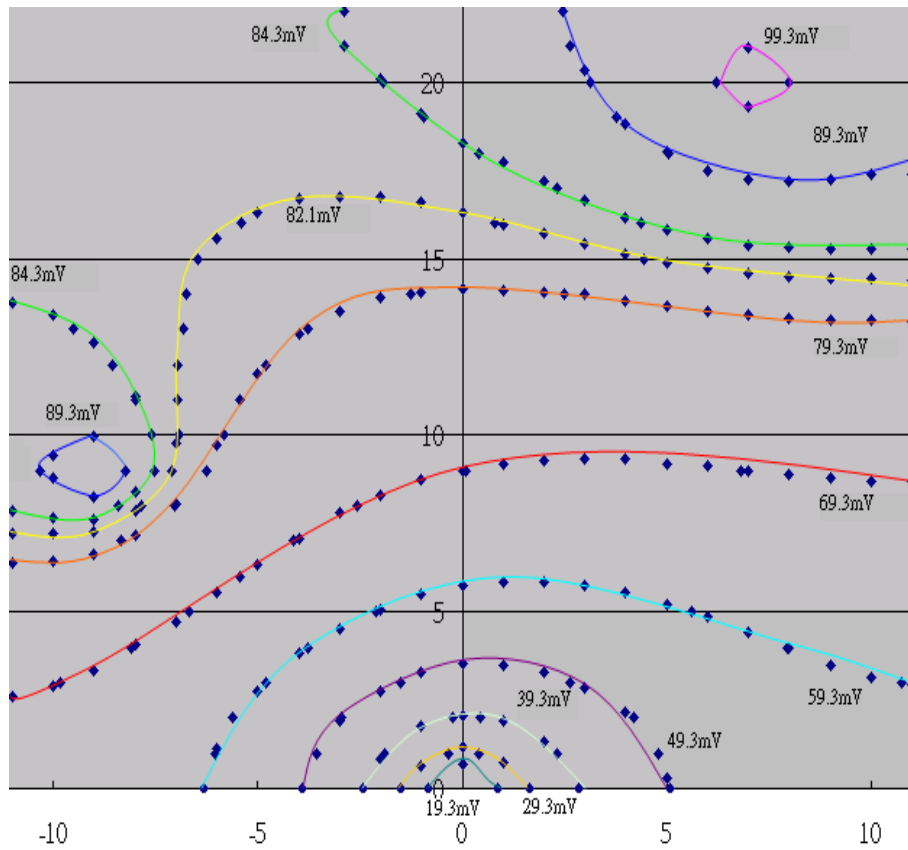
圖(十二) 導線兩端接(0,0)、(0,11)之 23×23 網格等位線圖【乙接法】



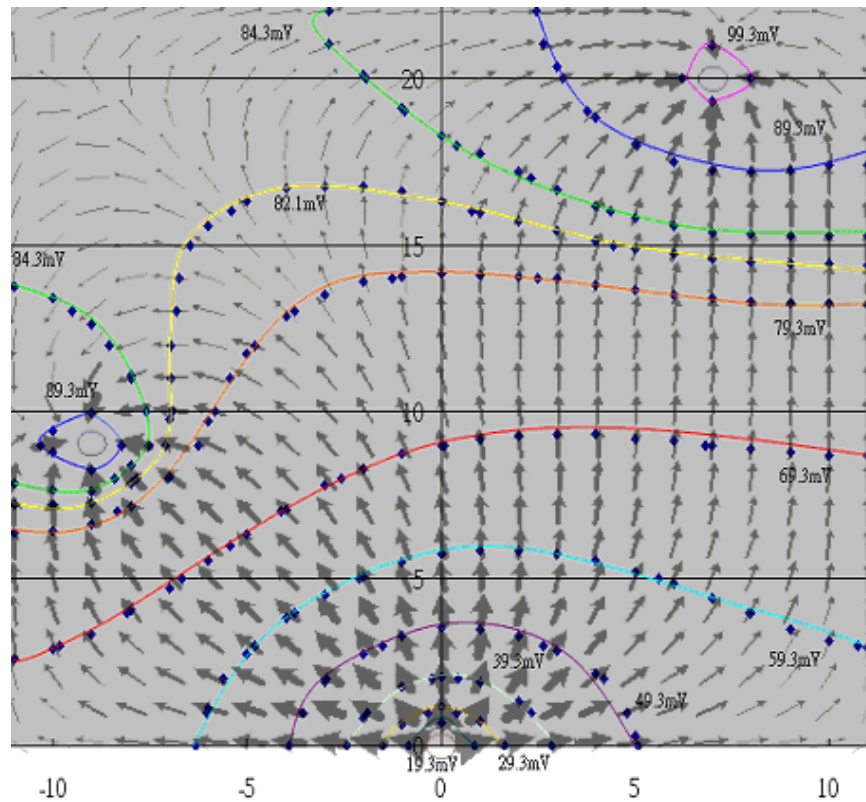
圖(十三) 導線兩端接(0,0)、(11,11)之 23×23 網格等位線圖【丙接法】



圖(十四) 導線正極接(0,0)負極接(-9,9)之 23x23 網格等位線圖【丁接法】



圖(十五) 等電位線圖(圖十四)與電流向量分佈圖(圖十)重疊比較【丁接法】

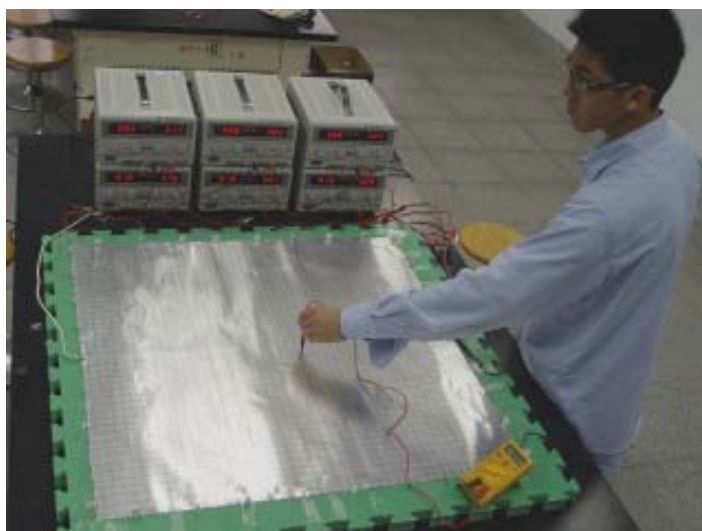


八、研究平面導體之等位線分布

(一) 步驟

- 1、取一塊邊長約 86x86 公分的金屬鋁板固定在一塑膠墊子上，沿著四周以每兩公分為單位插上大頭針再用棉線拉出可當成座標系的格線。
- 2、並聯 6 台 DC POWER SUPPLY 供應約 36A 直流電，導線兩端接於鋁板相對兩邊之中點。
- 3、三用電表功能鈕旋至 200mV 位置，將負極探針固定於鋁板負極，再以正極在鋁板上探測等電位差之點，紀錄其座標值。如照片(二)所示

照片(二)測量鋁片電壓的過程

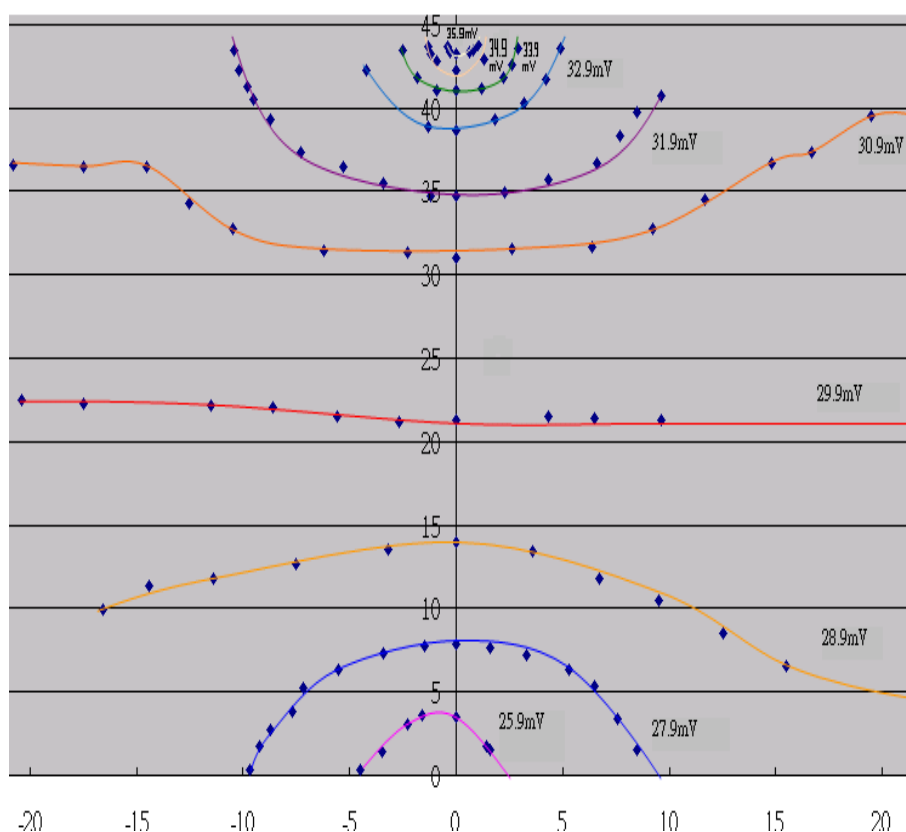


- 4、同以上 3 之操作，探測數條等位線。作圖分析。
- 5、在鋁板上放一個薄壓克力製成之淺槽，均勻灑上鐵粉，通入電流後輕敲淺槽邊緣以震動鐵粉。
- 6、觀察鐵粉排列圖樣，根據電流磁效應，分析鋁片上電流分佈之特性。
- 7、將其中一條導線接到鋁板正中央，同上 6 之操作觀察鐵粉排列圖樣分析電流分佈之特性。

(二)結果與分析

- 1、鋁板上的等位線分布如下圖(十六)所示。平面鋁板上之等電位線分布與網格鐵絲網上之等電位線分布特徵類似。其實如果將平面當成無數細密的網格來想，這兩種類型的導體導電特性應該是一致的。

圖(十六)鋁片等位線圖



2、在鋁板上的壓克力槽上方之鐵粉排列圖樣如照片(三)所示。近兩極附近可明顯看出鐵粉排列成同心圓狀，與等電位線類似。愈遠離兩極處鐵粉的排列愈不規則。

照片(三)在鋁片一邊及中央通入直流電、鋁片上方鐵粉分佈



- 3、導線附近有很明顯的磁場存在，可以說明該處電流較大。
- 4、理論分析：電流磁效應—電流通過處附近會產生垂直方向之磁場。所以與鐵粉排列方向(磁力線方向)垂直之方向即為鋁板上電流方向。
- 5、由於地磁及導線磁效應的影響，所以只能在部分區域分析鋁板上電流方向。其特

徵與圖(四)之網格上的電流流向類似。

陸、討論

一、用電安全：實驗中爲了能分辨每一網格的電流，或爲了使鋁板上的電位差明顯、磁效應明顯所以使用的電流強度調至 36A、37A 等大電流。在此需求下我們特別注意用電安全，且均未超過科展安全規則之範圍：

- (一)使用直流電源時，使用多台 POWER SUPPLY 並聯供電，每一台均有電流上限的保護裝置，且因爲鐵絲網和鋁板電阻都非常小，所以即使將每一台 POWER SUPPLY 電流調至最大(約 3A+3A)其輸出電壓也不超過 2V。
- (二)總電流經過處使用 1mm，7 芯的導線可負荷 40A 電流。
- (三)鐵絲網和鋁板是實驗中有可能碰觸身體的，雖然通過的的電流很大，但是感覺不到發熱，因爲電阻太小，功率太小的緣故。而碰到身體也完全沒有危險，因爲電位差很小且人體電阻太大，所以通過人體的電流很小。

二、誤差之探討：

- (一)實驗之初使用(微)安培計測量網格電流時總是測到 0 安培，推究其原因可能是(微)安培計本身電阻遠大於鐵絲電阻。改用鉤表後爲了確定測量時是否對線路造成過大影響，所以做了一些檢測：先以第一支鉤表勾住某一段導線紀錄電流值，再將第二支鉤表勾在同一段導線上，看看第一支鉤表測量值有沒有改變。經過數次比較，發現幾乎沒有造成影響。
- (二)鉤表可能是利用電流磁效應或磁場變化產生感應電流的原理來測電流強度，所以是否可能同時受到鄰近鐵絲不同電流磁效應的影響？爲了驗證這個疑點我們做了以下的檢測：將鉤表勾在電流變化最大的(0,0)-(0,1)之間(即電流輸入端之第一段鐵絲處)，改變輸入導線的角度，看看是否影響測量值，結果都沒有影響。
- (三)導線通電之後會因熱效應使溫度升高，電阻也會變大，是否會對實驗造成影響？我們做了以下檢測：我們測量包含電阻在內的整個線路各部份達到熱平衡所需的時間及這過程中電壓或電流的變化。發現開電源不到 5 分鐘，溫度、電壓或電流就已接近穩定。所以每一次實驗前都先通電 10 分鐘以上才開始測量。
- (四)實驗中發現導線連接處若不夠緊密會產生很明顯的電阻，所以接點處儘可能以焊接方式連接。

三、建構網格電路的電場模型過程：

- (一)首先是覺得電流場某些特徵很像兩個帶異性電點電荷的電場。在比對理想電場方向與電流場方向時發現在邊界處完全不一致。
- (二)考慮如何使邊界處的電場方向順著邊界，所以假想以邊界爲對稱軸，在對稱處放置同樣點電荷的方式使其電場和之方向符合實際情形。如此一來方向的一致性改善許多，但是，電流與電場的比值卻仍誤差很大。
- (三)發現電流與電場的比值之誤差離電荷愈遠處差距愈大，可見問題可能是出在

距離之因素。想到電場強度的距離平方關係通常適用在空間中，與我們研究的平面分佈不一樣，所以將電場強度改成與距離成反比，結果不但電流向量與電場的比值幾乎完全一樣，角度也幾乎完全一樣(除了電流小的角落處)。

(四) 靜電力常數、電量及單位間的倍數關係、每一段鐵絲的電阻等定值的部分，嘗試以一個常數 C 帶入，使電流向量與電場比值接近 1 較易比較。

四、三種不同電源線接點之網格電路之研究：

(一) 實際測量所得的電流向量場與建構的電場比較，由方向的一致性與強度比值接近一定值，成功驗證了電場模型的適用性。

(二) 此三種電路都符合克西荷夫結點定律，其各結點淨電流之標準差如下：

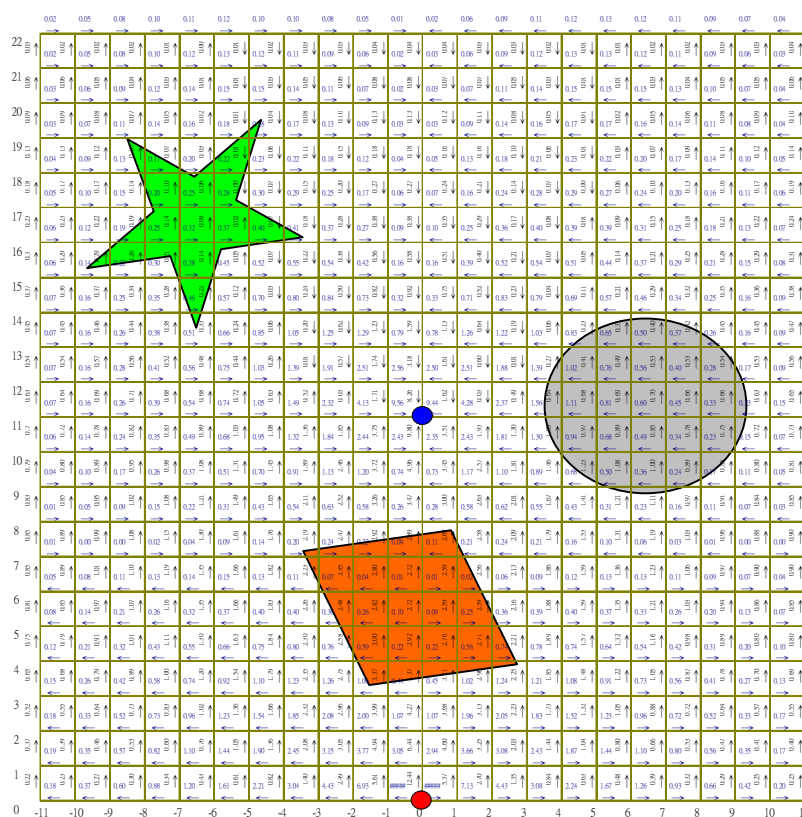
- 1、乙電流輸出端接(0,11)，方均根值為 0.016
- 2、丙電流輸出端接(11,11)，方均根值為 0.019
- 3、丁電流輸出端接(-9,9)、(7,20)，方均根值為 0.014

(三) 此三種電路都符合區塊結點定律和克西荷夫迴路定律，以乙接法為例說明：

1、區塊結點定律：如圖(十七)任取三個樣區淨電流分別為：

星星：淨電流為 -0.07A 圓形：淨電流為 0.07A 四邊形：淨電流為 0.08A
各取樣區塊的淨電流均接近 0，可見假設成立。

圖(十七) 三種「區塊」取樣圖

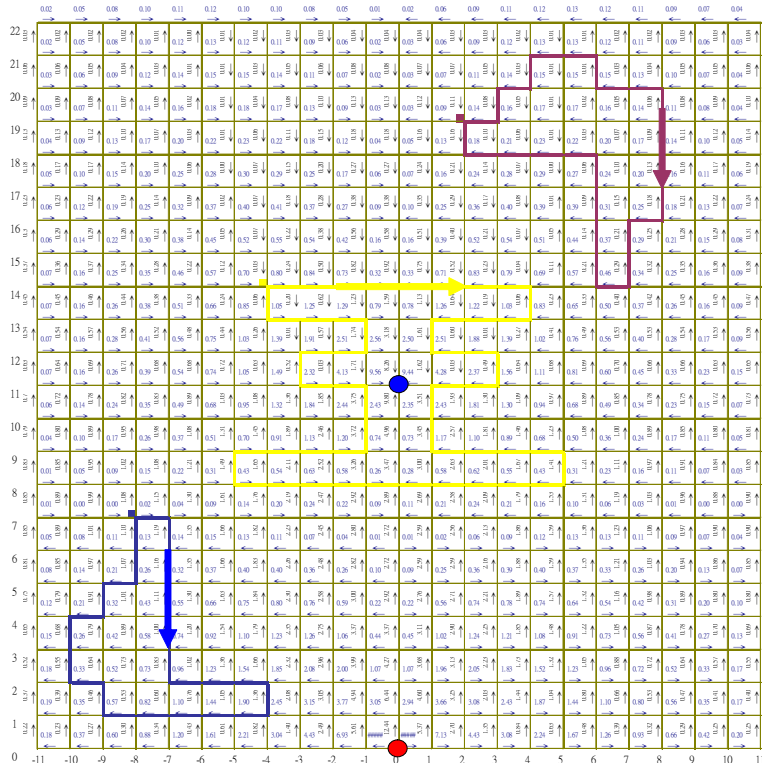


2、克西荷夫迴路定律：如圖(十八)所取的三種路徑電流總和分別為：

深紫色：-0.01A 黃色： 0.79A 藍色： 0.15A

各路徑的電流總和均接近 0，可驗證克希荷夫迴路定律。

圖(十八) 三種「迴路」路徑圖



五、網格電路之各種特性能否說明平面導體的特性呢？

- (一)在過程五中建構電場模型時原本就沒有設限在網格點上，所以在網格上的電流場分佈特徵可以代表平面上的電流分佈。
- (二)在平面鋁板上測到的等電位線形狀與網格上測到的一樣，可見網格上的電位特徵可以代表平面上的電位特徵。
- (三)鋁板上的鐵粉排列方向代表磁場方向，在靠近接點附近電流較強處磁場的垂直方向代表電流方向與網格上電流場的方向一致，也可以間接說明網格電路與平面導體的相通性。

柒、結論

- 一、本實驗以通電的網格分析每一結點或選取區進出之電流，成功的驗證克西荷夫結點定律。
- 二、在網格上任意選取封閉曲線，沿曲線的電流和接近 0，在假設每一段網格電阻固定之下，驗證了克西荷夫迴路定律。
- 三、由測量結果描繪出四種不同電源接法時的網格電(流)場如圖(七)、(八)、(九)、(十)。
- 四、建構網格平面上電場之模型。其步驟如下：
 - (一)在電源接點附近分別放置正、負點電荷。電荷的電量依照進出電流比例設定。

- (二)以每個邊界為對稱線，放置與上述電荷位置對稱之同樣電荷。
- (三)每一電荷所建立之電場強度與距離一次方成反比。
- (四)網格上每一位置之電場與以上所有點電荷所建立電場之向量和成正比。

五、等電位線與電流向量垂直，等電位線愈密集的区域電(流)場愈強。

六、網格電路之特性可類比至平面導體之特性，由以下研究結果得到支持：

- (一)理論上：建構電場模型時並未設限在網格點上，所以此模型也能適用在平板導體上，也就是說網格電路上的電(流)場和平板導體是一樣的。
- (二)直接測得：網格上的等電位線分佈與平板導體相似。
- (三)間接測得：平板導體在電流比較大、磁效應明顯處，由鐵粉排列形狀間接可判斷電流方向與網格電路一致。

捌、參考資料

高中基礎物理	康熙出版社	作者 陳文典 等
高中選修物理	康熙出版社	作者 陳文典 等
高中選修物理	南一出版社	作者 林明瑞 等

玖、附記

本研究實際測量的原始數據超過 15000 筆，為了分析數據而設計的 Excel 程式有 4 種以上，分析後得到結果的檔案超過 50 個。若將說明書裡的圖表和統計結果都改用精簡的表格表示至少須 200 頁。限於篇幅僅列出最後精簡的圖形。

評語

040110 高中組物理科 佳作

網格電路之研究

1. 構想佳，內容步驟嚴謹。
2. 內容有深度，但缺廣度。