中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組　理化科

031608

與複擺共舞

學校名稱：彰化縣立員林國民中學

作者：	指導老師：
國二 楊瑀婕 國二 張馨云	賴文振

關鍵詞： 複擺、共振、週期

與複擺共舞

摘要

本實驗主要目的是為了瞭解影響複擺運動的因素。實驗中分別以擺長、質量和擺角為操作變因，利用馬錶及電腦測量複擺的週期。在小擺角 10 度以內，複擺具有等時性，擺長的平方根與週期成正比，質量對週期沒有影響。較大的擺角對應較大的週期。電腦配合滑鼠測量複擺的運動軌跡，顯示擺動大小受阻力隨時間遞減，末端處的運動可近似地視為簡諧運動。此外我們對複擺進行強迫震盪的實驗，當強迫震盪與複擺的自然振盪兩者的週期相同時，擺動大小不會隨時間遞減反而有略微增大的現象；當兩者的週期不同時，複擺的運動軌跡變得很不規則。實驗結果說明當發生共振時，複擺本身能從外界獲得能量；而非共振時，其運動會受到干擾，無法有效地從外界獲得能量。

壹、 研究動機

許多兒童遊戲場所都有鞦韆這項遊戲設施。在公園中，我們看到許多小朋友在盪鞦韆時，他們的笑容隨著鞦韆的高度而綻放。綻放到令我們看傻了眼，模糊中只剩下鞦韆在擺盪，腦中頓時冒出了一條繩子，隨著鞦韆一前一後、一上一下地擺動著，越想越覺得有趣。擺動的特性是什麼？鞦韆的擺動和繩子的長短有何關聯？乘坐者的重量會不會影響鞦韆的擺動？一連串的問題，也充滿了整個腦子，心中的聲音正催促我們要探索其中奧妙之處。

貳、 研究目的

一、 探討擺長、質量和擺角對複擺週期的影響。

二、 探討複擺的運動軌跡。

三、 探討複擺的共振現象。

參、 研究設備及器材

器材名稱	數量	器材名稱	數量
80 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	碼錶	1 個
70 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	直尺	1 條
60 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	4 條	量角器	1 個
50 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	上皿天平	1 組
40 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	厚紙板(面積 10cm×8cm)	1 張
30 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	3 號電池	6 個
20 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	電池槽	3 個
10 公分長壓克力條(截面積 0.5cm×0.5cm)	1 條	整流變壓器	1 個
鐵架	2 座	三用電表	1 個
木架	1 座	光敏電阻	1 個
廣用夾	2 個	繼電器	1 個
長尾夾	2 個	電晶體(C9013)	1 個
細鐵條	1 條	雷射筆	1 支
熱熔膠、熱熔槍	1 組	永久磁鐵	1 顆
原子筆芯	1 段	泡棉雙面膠、透明膠帶和黑色膠帶	數捲
原子筆套	1 段	個人電腦	1 台
砂紙	1 張	筆記型電腦	1 台
漆包線	1 捲	並列埠連接線	1 條
單蕊線	3 條	雷射光學滑鼠	1 個
鱷魚夾電線	數條	LabView 軟體	1 套

肆、 研究過程或方法

一、 小擺角時擺長與週期的關係

(一) 馬錶測量

1．裝置如『圖４－１』之實驗裝置。

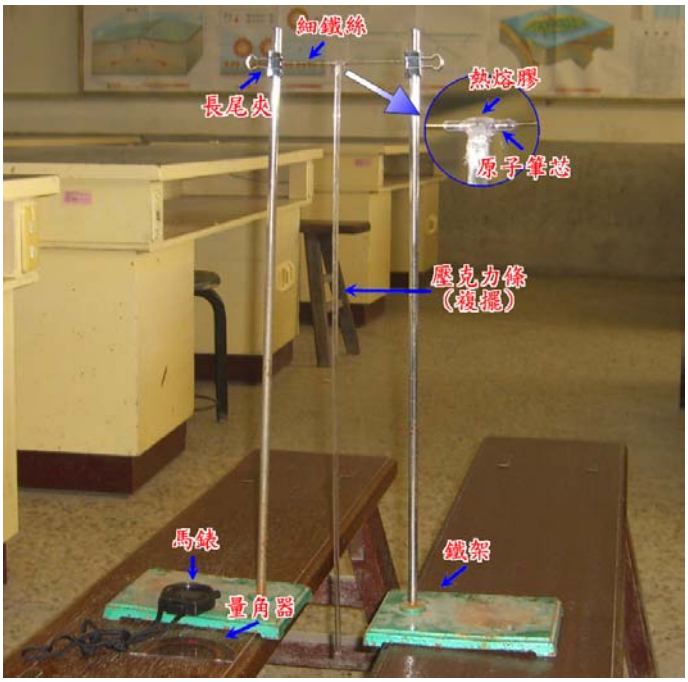


圖４－１

2．分別以擺長為 10、20、30、40、50、60、70 和 80 公分長的壓克力條為複擺，從擺角 10 度位置開始釋放，以馬錶記錄第二次到第十一次週期所需的時間。

(二) 電腦測量

1．裝置如『圖４－２』之實驗裝置。

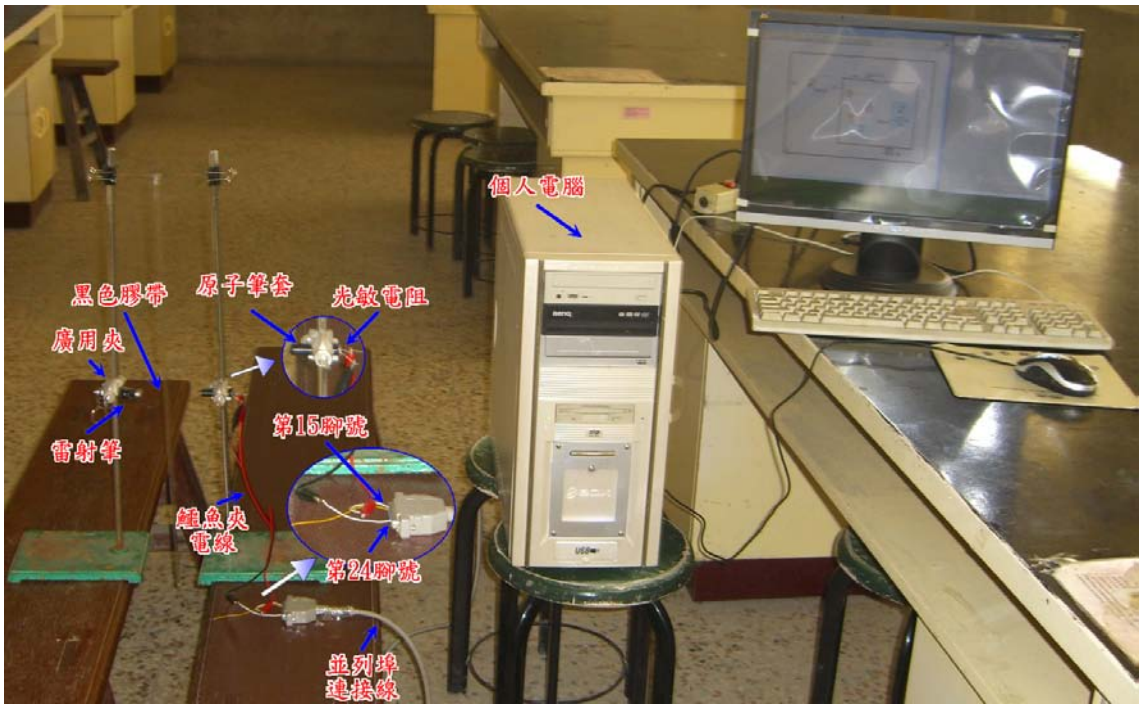


圖４－２

2．在壓克力條上貼小片的黑色膠帶，用以阻擋雷射筆發出的雷射光，控制原子筆套中光敏電阻的電阻大小。電阻的改變使並列埠接頭中腳號的電位改變，利用電腦軟體 LabView 判讀並列埠腳號的電位，記錄時間而測量複擺的週期。

3．分別以擺長為 10、20、30、40、50、60、70 和 80 公分長的壓克力條為複擺，從擺角 10 度位置開始釋放，以電腦測量每次週期所需的時間。

二、 小擺角時質量與週期的關係

(一) 馬錶測量

1．裝置如『圖４－１』之實驗裝置。

2．分別以擺長均為 60 公分的一條壓克力條、二條壓克力條並排合併、三條壓克力條並排合併和四條壓克力條並排合併為複擺，用上皿天平分別測量質量。從擺角 10 度位置開始釋放，以馬錶記錄第二次到第十一次週期所需的時間。

(二) 電腦測量

1．裝置如『圖４－２』之實驗裝置。

2．分別以擺長均為 60 公分的一條壓克力條、二條壓克力條合併、三條壓克力條合併和四條壓克力條合併為複擺，以電腦測量每次週期所需的時間。

三、 擺角與週期的關係

(一) 裝置如『圖４－２』之實驗裝置。

(二) 以擺長為 60 公分長的壓克力條為複擺，分別從擺角 70、60、50、40、30、20 和 10 度位置開始釋放，以電腦測量第一次週期所需的時間。

四、 測量複擺的運動軌跡

(一) 裝置如『圖４－３』之實驗裝置。

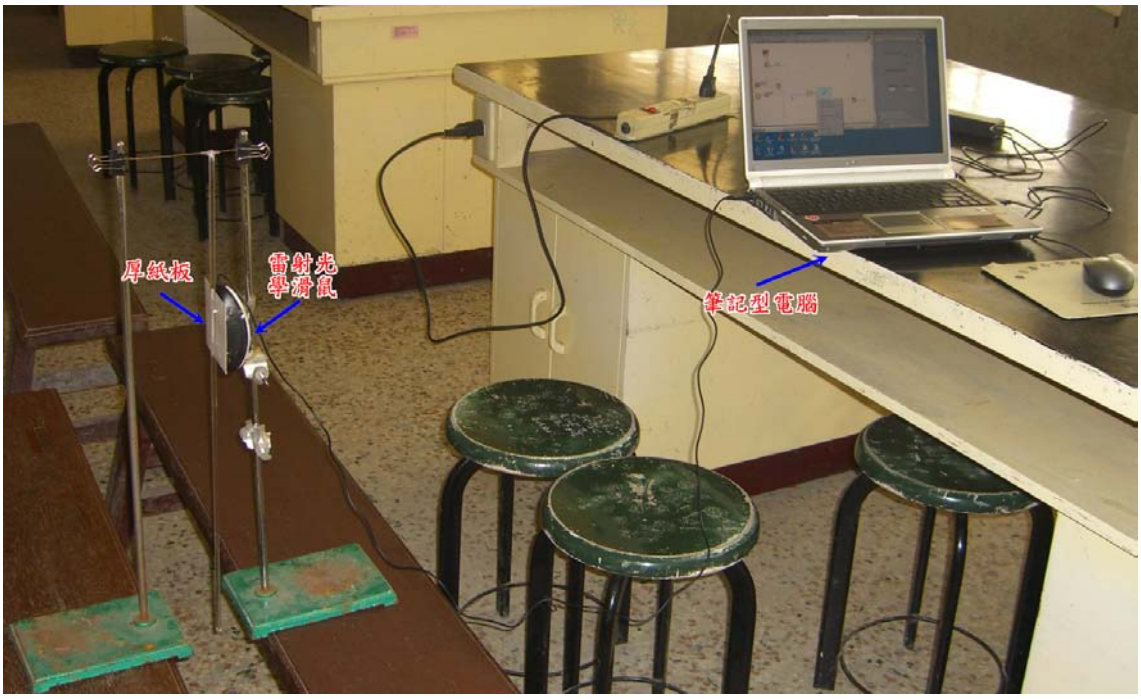


圖４－３

(二) 在擺長為 60 公分長的壓克力條上距支點 20 公分處，黏貼長 10 公分寬 8 公分的厚紙板當為複擺。厚紙板與雷射光學滑鼠距離約 0.2 公分。從擺角 10 度位置開始釋放，利用雷射光學滑鼠配合電腦每隔 50 毫秒測量 1 次複擺的運動軌跡。

五、 測量複擺的強迫振盪現象

(一) 共振現象

1．裝置如『圖４－４』之實驗裝置。

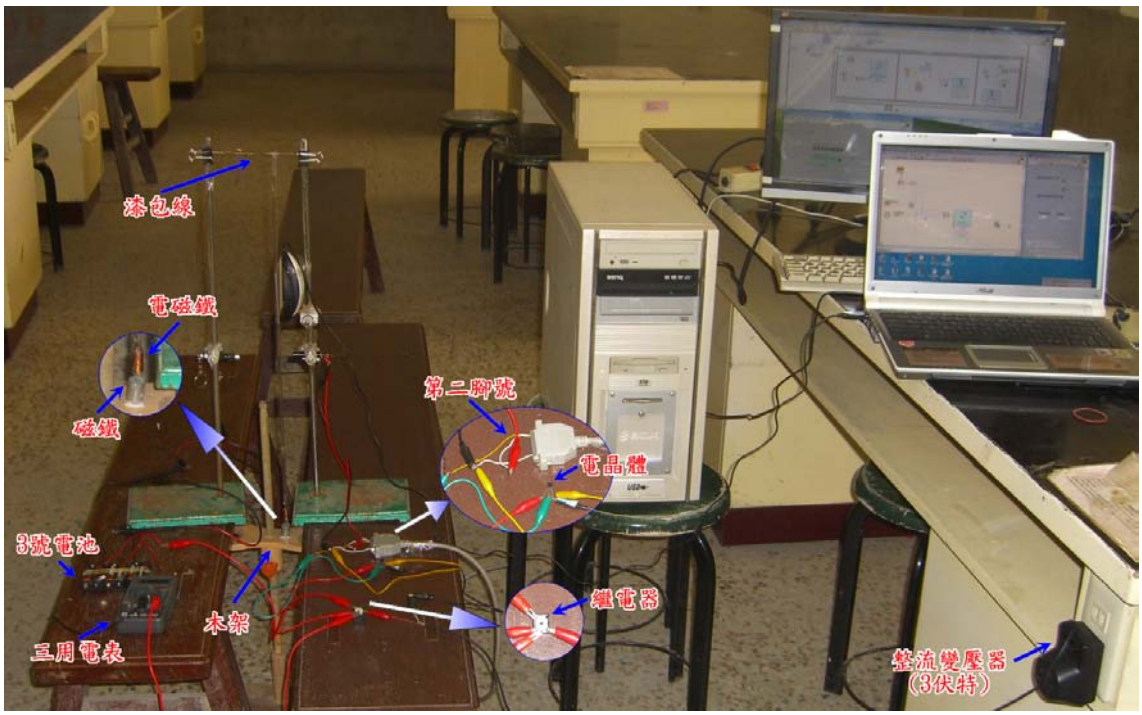


圖４－４

2．在擺長為 60 公分長的壓克力條上距支點 20 公分處，黏貼長 10 公分寬 8 公分的厚紙板，在下端用漆包線纏繞為線圈當做電磁鐵，將此壓克力條當為複擺。

3．從擺角 10 度位置開始釋放，透過雷射筆及光敏電阻的組合，用以偵測當複擺末端處距平衡點約 3 公分處時，由電腦軟體控制電路，經電晶體做電流放大以控制繼電器，繼電器決定是否讓電磁鐵通電產生磁場與下方的永久磁鐵相吸，使開始相吸的時間點配合複擺的週期，同時控制相吸時間持續 0.1 秒。

4．雷射光學滑鼠配合電腦測量複擺的運動軌跡。

(二) 非共振現象

1．置如『圖４－４』之實驗裝置。

2．從擺角 10 度位置開始釋放，由電腦軟體控制電路，分別操作強迫振盪週期為 0.3、0.4 和 0.5 秒，使電磁鐵產生磁場與下方的永久磁鐵相吸，同時控制相吸時間持續 0.1 秒。

3．雷射光學滑鼠配合電腦測量複擺的運動軌跡。

伍、 研究結果

一、 小擺角時擺長與週期的關係

(一) 測量的數據如『表５－１』、『圖５－１』和『圖５－２』所示。

(二) 馬錶測量的最小單位為 10ms，測量複擺的週期為第二次到第十一次週期的平均值，但擺長為 10cm 的複擺只擺動 5 次，只求 4 次週期的平均值。

(三) 電腦測量的最小單位為 1ms，測量複擺的週期為第二次到第十一次週期的平均值，但擺長為 10cm 的複擺只擺動 5 次，只求 4 次週期的平均值。

(四) 『表５－１』中的理論計算由『公式９－１』，以 $T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}$ 計算，l 表示擺長多少公尺，g 為重力加速度，以 9.8m/s^2 代入公式，所得的週期 T 為多少秒。

(五) 馬錶測量誤差 $= \frac{\text{馬錶測量週期} - \text{理論計算週期}}{\text{理論計算週期}} \times 100\%$。

(六) 電腦測量誤差 $= \frac{\text{電腦測量週期} - \text{理論計算週期}}{\text{理論計算週期}} \times 100\%$。

(七) 電腦測量複擺的每次週期，直到複擺靜止。數據如『圖５－２』所示，從圖形中可看出在擺角 10 度內的週期與擺動次數無關，故複擺具有等時性的特性。

擺長(cm)	10	20	30	40	50	60	70	80
馬錶測量：週期(ms)	536	746	909	1054	1178	1288	1370	1484
電腦測量：週期(ms)	522.8	738.4	896.3	1035.6	1161.1	1272.7	1376.3	1472.2
理論計算：週期(ms)	518.2	732.9	897.6	1036.5	1158.8	1269.4	1371.1	1465.8
馬錶測量：誤差(%)	3.43	1.79	1.27	1.69	1.66	1.47	-0.08	1.24
電腦測量：誤差(%)	0.89	0.75	-0.14	-0.09	0.20	0.26	0.38	0.44

表５－１

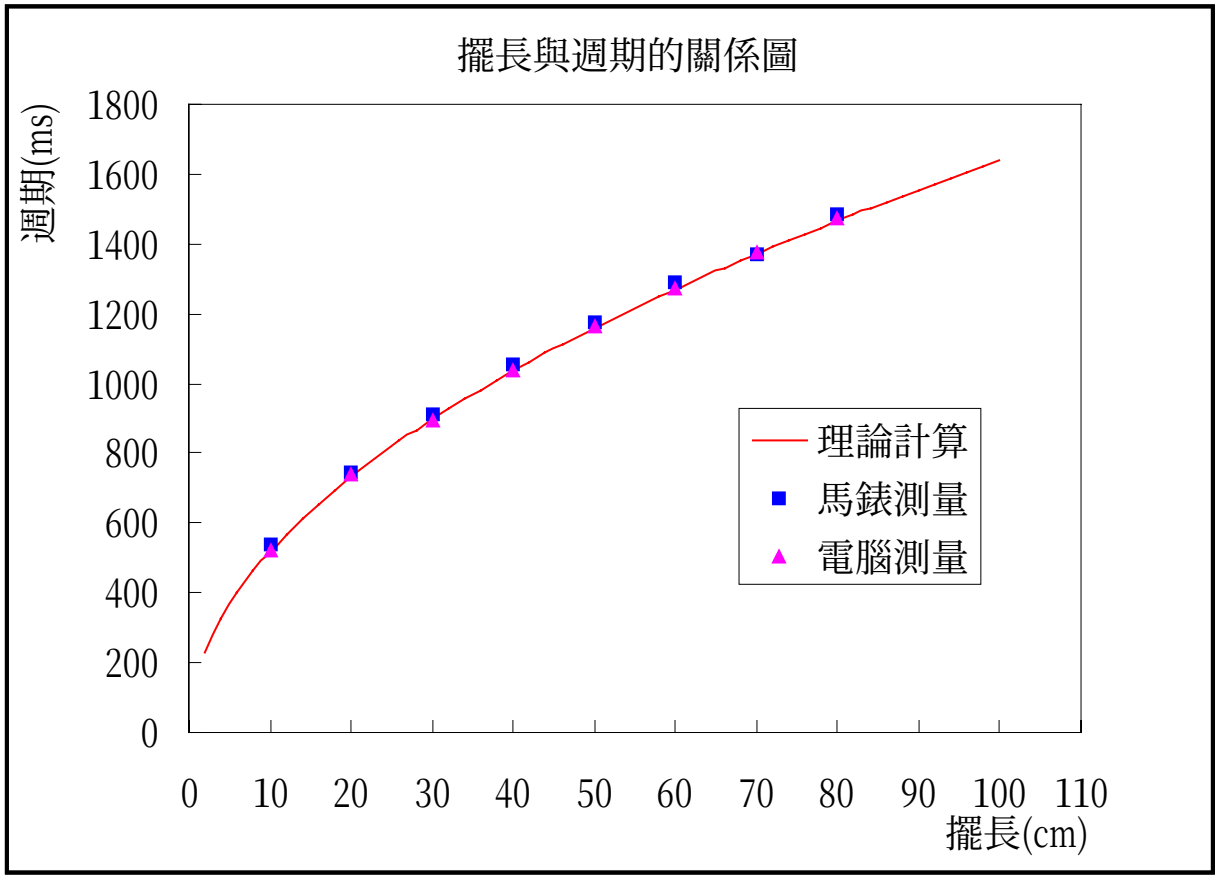

擺長與週期的關係圖
週期(ms)
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
擺長(cm)
理論計算
馬錶測量
電腦測量

圖５－１

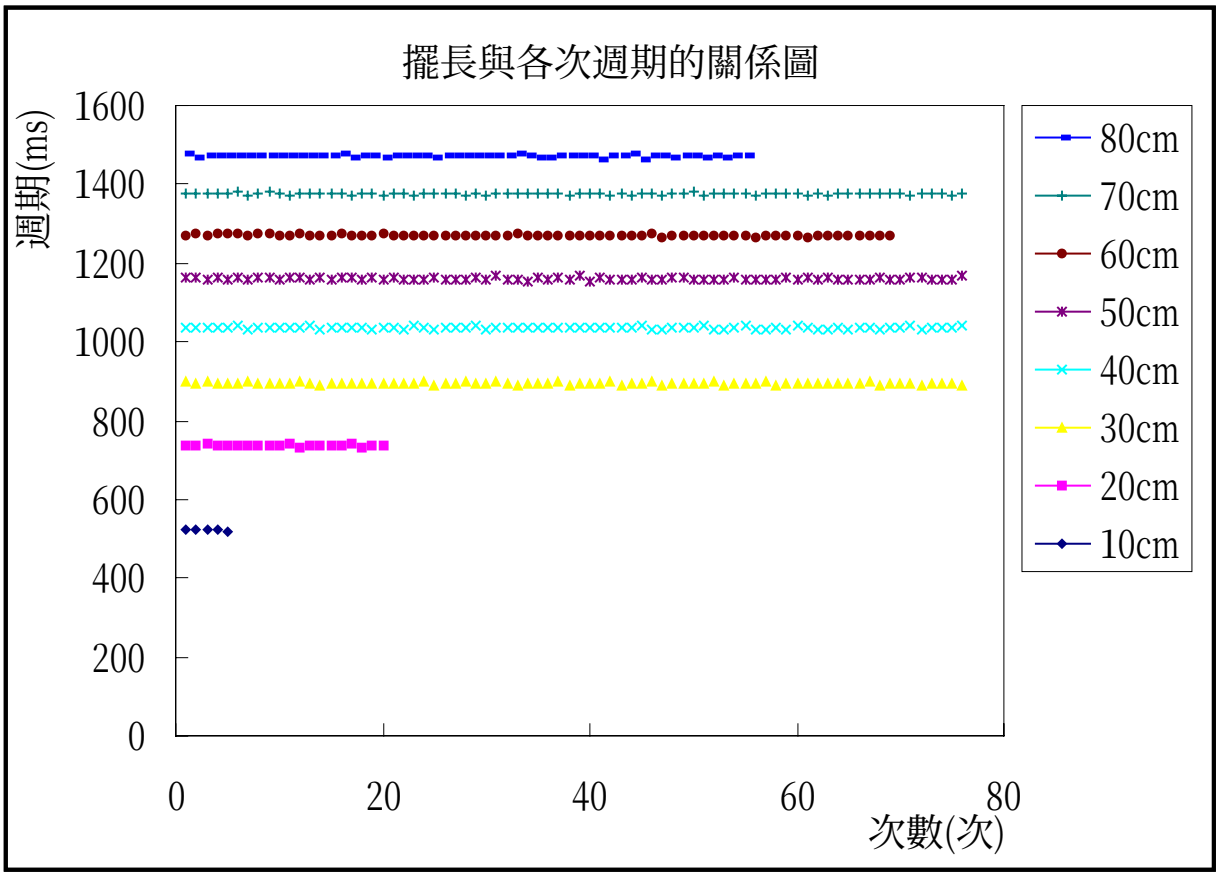

擺長與各次週期的關係圖
週期(ms)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
20
40
60
80
次數(次)
80cm
70cm
60cm
50cm
40cm
30cm
20cm
10cm

圖５－２

二、 小擺角時質量與週期的關係

(一) 測量的數據如『表５－２』、『圖５－３』和『圖５－４』所示。

(二) 馬錶測量的最小單位為 10ms，測量複擺的週期為第二次到第十一次週期的平均值。

(三) 電腦測量的最小單位為 1ms，測量複擺的週期為第二次到第十一次週期的平均值。

(四) 使用上皿天平測量壓克力條的質量，其最小的測量單位為 100 毫克。

(五) 『表５－２』中的理論計算由『公式９－１』，以 $T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}$ 計算，l 為擺長 0.6 公尺，g 為重力加速度，以 9.8m/s^2 代入公式，所得的週期 T 為 1.2694 秒，即是 1269.4 毫秒。

(六) 馬錶測量誤差 $= \frac{\text{馬錶測量週期} - \text{理論計算週期}}{\text{理論計算週期}} \times 100\%$。

(七) 電腦測量誤差 $= \frac{\text{電腦測量週期} - \text{理論計算週期}}{\text{理論計算週期}} \times 100\%$。

(八) 由實驗結果可看出複擺的質量與週期沒有關係。

壓克力條數(條)	1	2	3	4
壓克力條質量(g)	17.30	34.70	52.00	69.20
馬錶測量：週期(ms)	1288	1290	1288	1290
電腦測量：週期(ms)	1272.7	1273.6	1276.6	1275.8
理論計算：週期(ms)	1269.4	1269.4	1269.4	1269.4
馬錶測量：誤差(%)	1.47	1.62	1.47	1.62
電腦測量：誤差(%)	0.26	0.33	0.57	0.50

表５－２

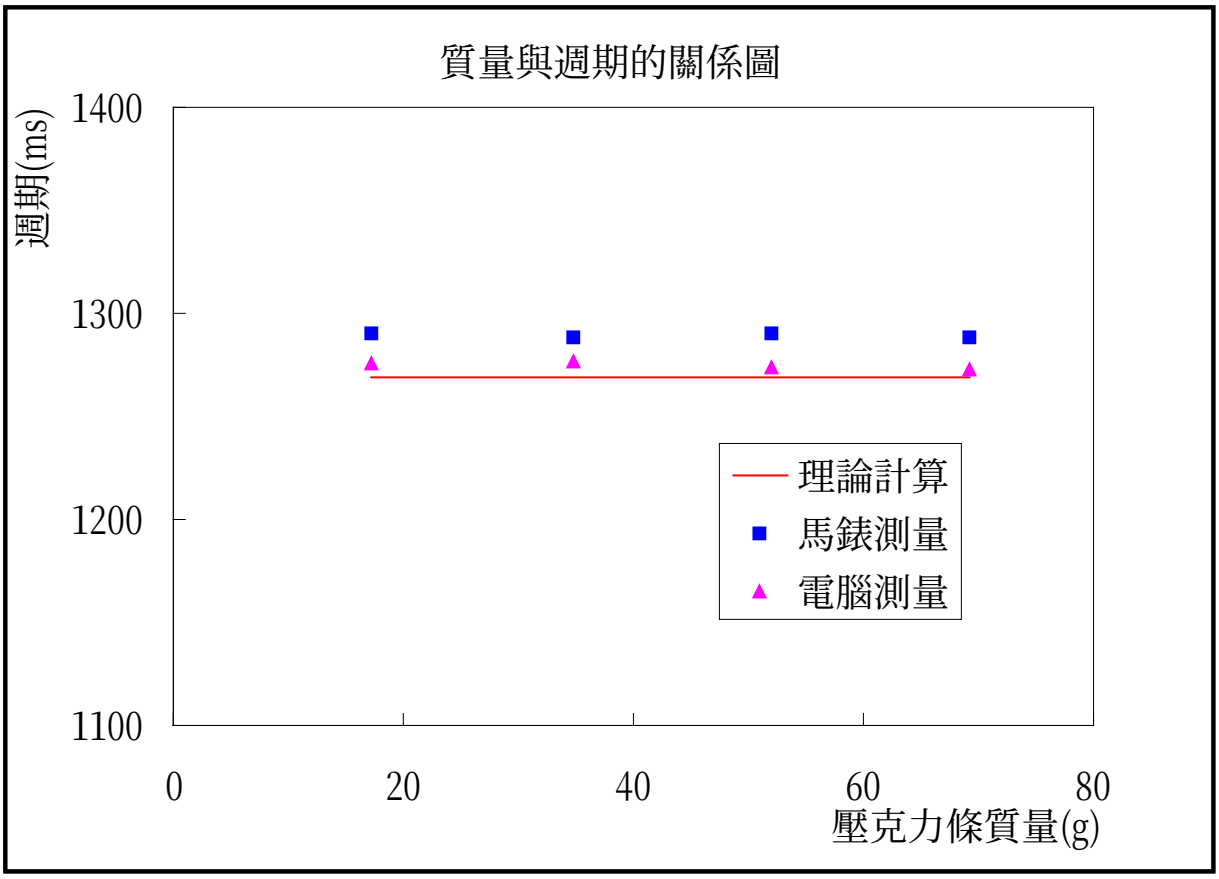

質量與週期的關係圖
週期(ms)
1400
1300
1200
1100
0
20
40
60
80
壓克力條質量(g)
理論計算
馬錶測量
電腦測量

圖５－３

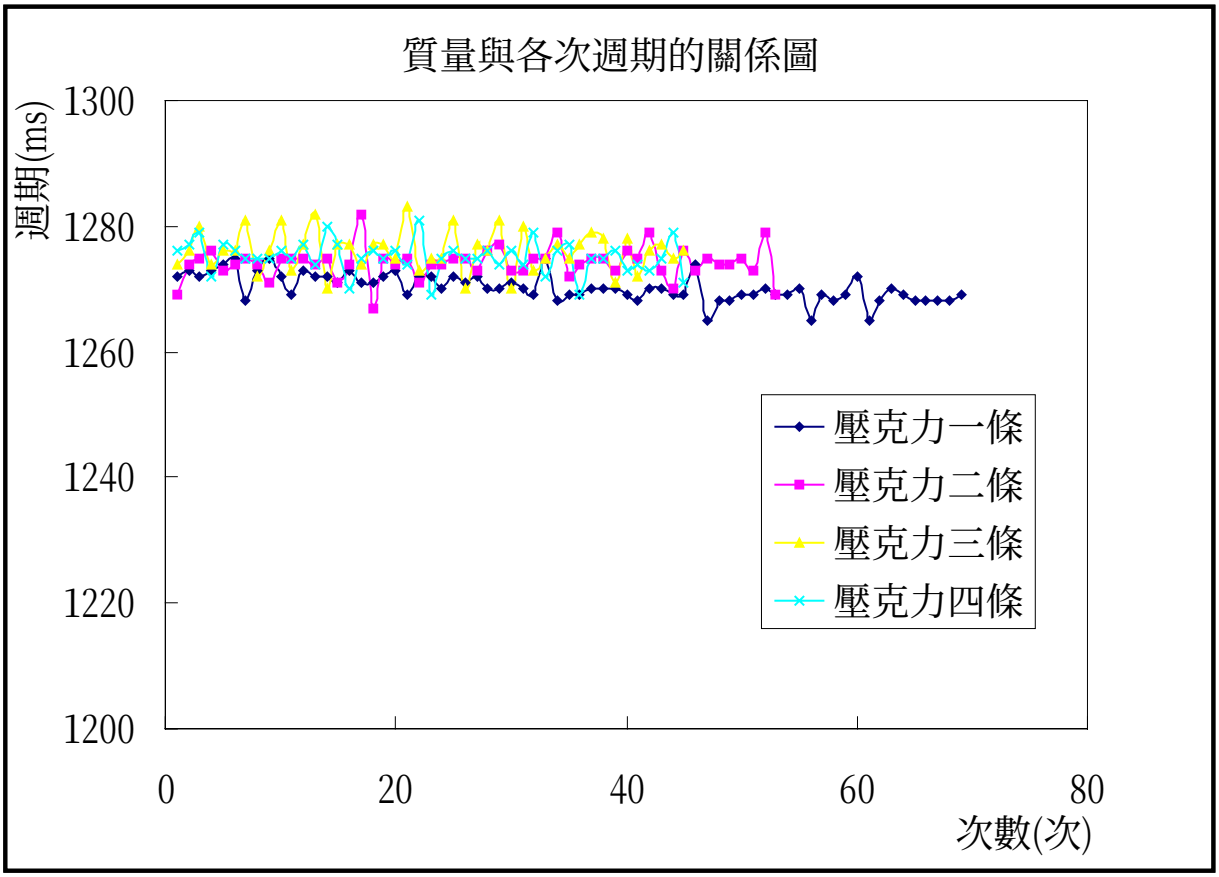

質量與各次週期的關係圖
週期(ms)
1300
1280
1260
1240
1220
1200
0
20
40
60
80
次數(次)
壓克力一條
壓克力二條
壓克力三條
壓克力四條

圖５－４

三、 擺角與週期的關係

(一) 測量的數據如『表５－３』、『圖５－５』和『圖５－６』所示。

(二) 實驗過程中發現大擺角的複擺擺動的擺角遞減很快，所以以電腦測量各擺角的第一次週期為該擺角所對應的週期。

(三) 『表５－３』中的理論計算由『公式９－２』，以 $T = 2\pi\sqrt{\frac{2\ell}{3g}}(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2})$ 計算，

l 表示擺長多少公尺， g 為重力加速度，其值為 9.8m/s^2， θ 表示擺角為多少弧度，所得的週期 T 為多少秒。

(四) 電腦測量 誤差 $= \frac{\text{電腦測量週期} - \text{理論計算週期}}{\text{理論計算週期}} \times 100\%$。

(五) 『圖５－６』表示複擺的起始擺角為 70 度，擺動後擺角開始遞減，以電腦測量每次的週期大小。

擺角(度)	70	60	50	40	30	20	10
電腦測量：週期(ms)	1366	1324	1318	1307	1293	1284	1272
理論計算：週期(ms)	1373.80	1348.73	1326.08	1306.52	1290.65	1278.96	1271.81
電腦測量：誤差(%)	-0.57	-1.83	-0.61	0.04	0.18	0.39	0.01

表５－３

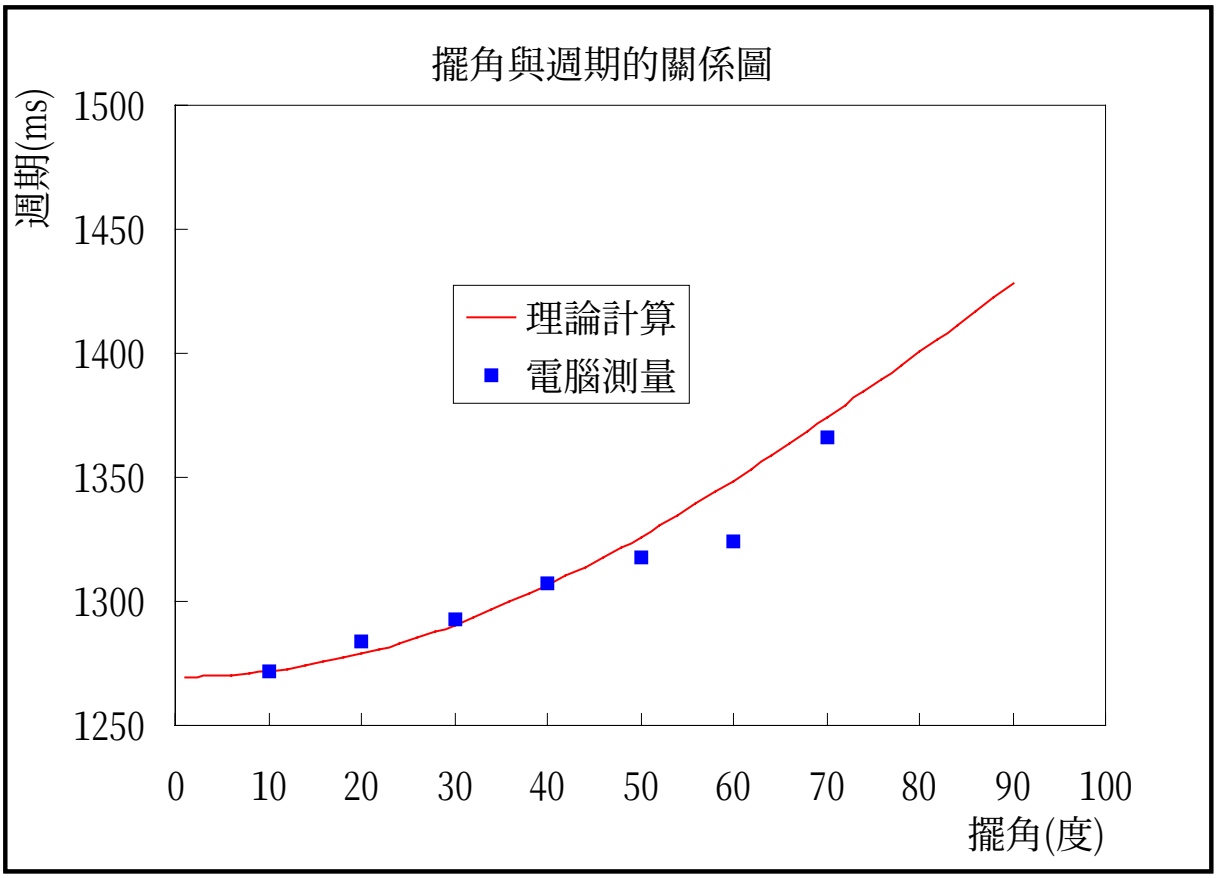


圖５－５

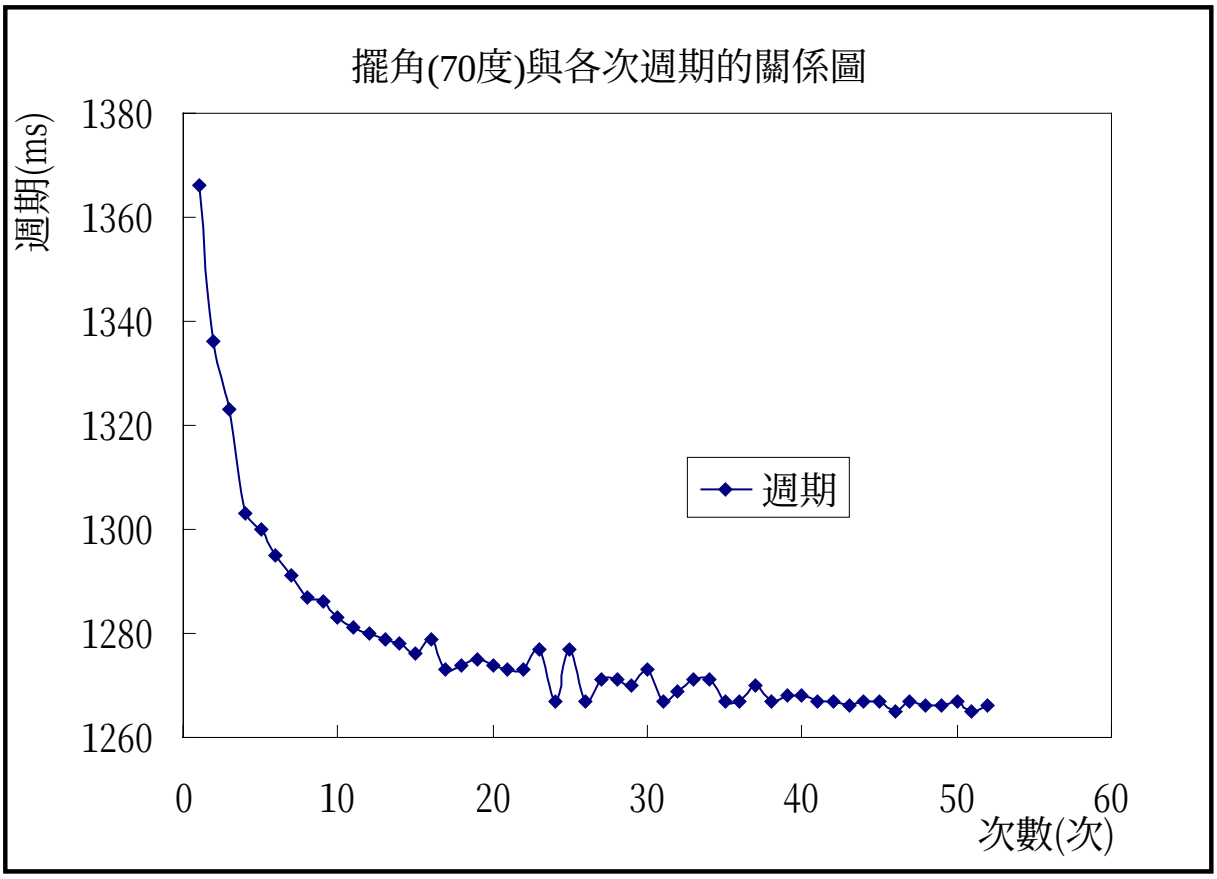


圖５－６

四、 測量複擺的運動軌跡

(一) 測量的數據如『圖５－７』、『圖５－８』和『圖５－９』所示。

(二) 由『圖５－７』可看出複擺的運動軌跡在 X 軸位置比在 Y 軸位置的運動更明顯。

(三) 『圖５－８』中的理論計算由『公式９－３』，以 $X = A\cos(\omega t + \varphi)$ 計算， A 以複擺第一個週期中的最大振幅 547 像素， $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ 以內差法求得前五次週期 T 的平均值 1194.92 毫秒，相角 φ 為 0 代入公式。

(四) 由『圖５－８』中可看出複擺的振幅有很明顯的遞減現象，最後靜止在 X 軸位置 712 像素處。由複擺的運動軌跡可發現當擺動到平衡點處速度較大，而在各個週期的最大振幅處速度較小，因此畫『圖５－９』，探討速度與時間的關係。

(五) 『圖５－９』中的理論計算由『公式９－４』，以 $V = -Aw\sin(\omega t + \varphi)$ 計算。從圖形上也可看出複擺的速度有很明顯的遞減現象。

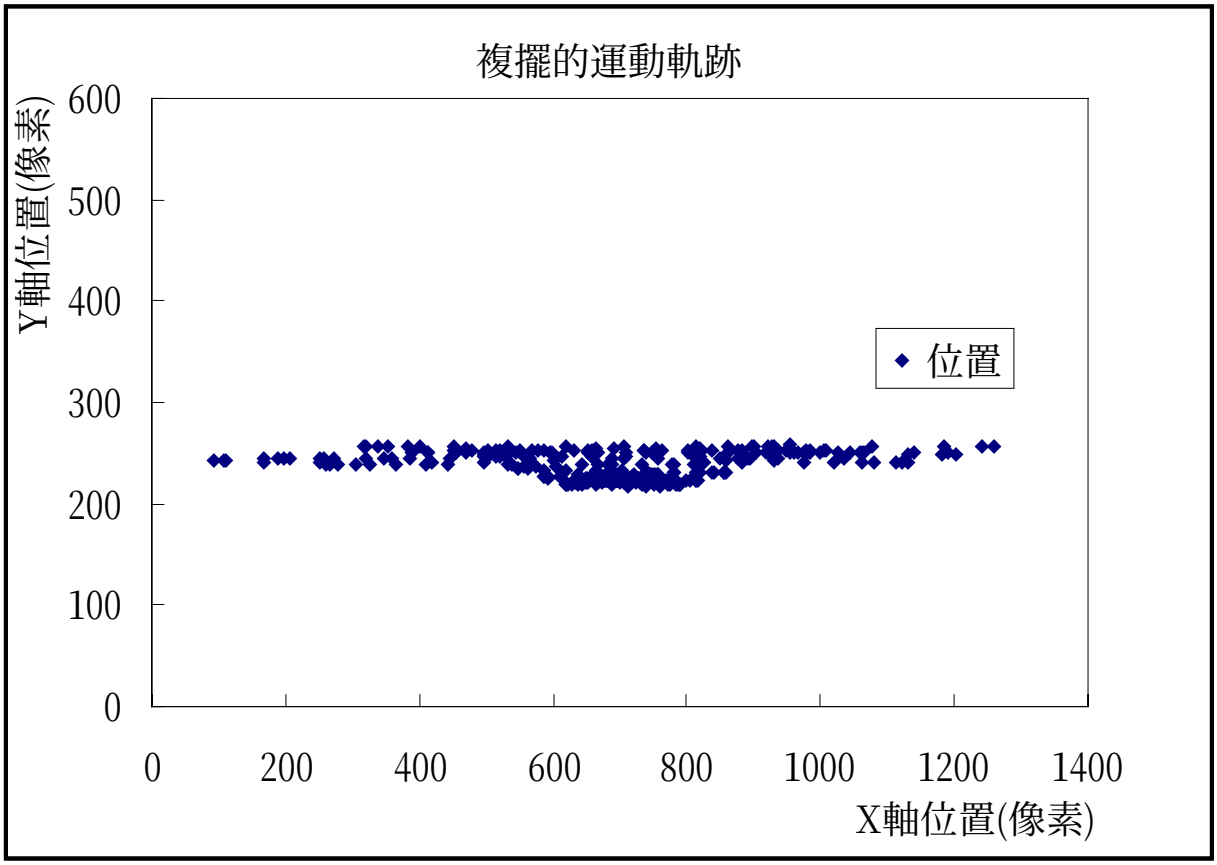

複擺的運動軌跡
Y軸位置(像素)
600
500
400
300
200
100
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
X軸位置(像素)
位置

圖５－７

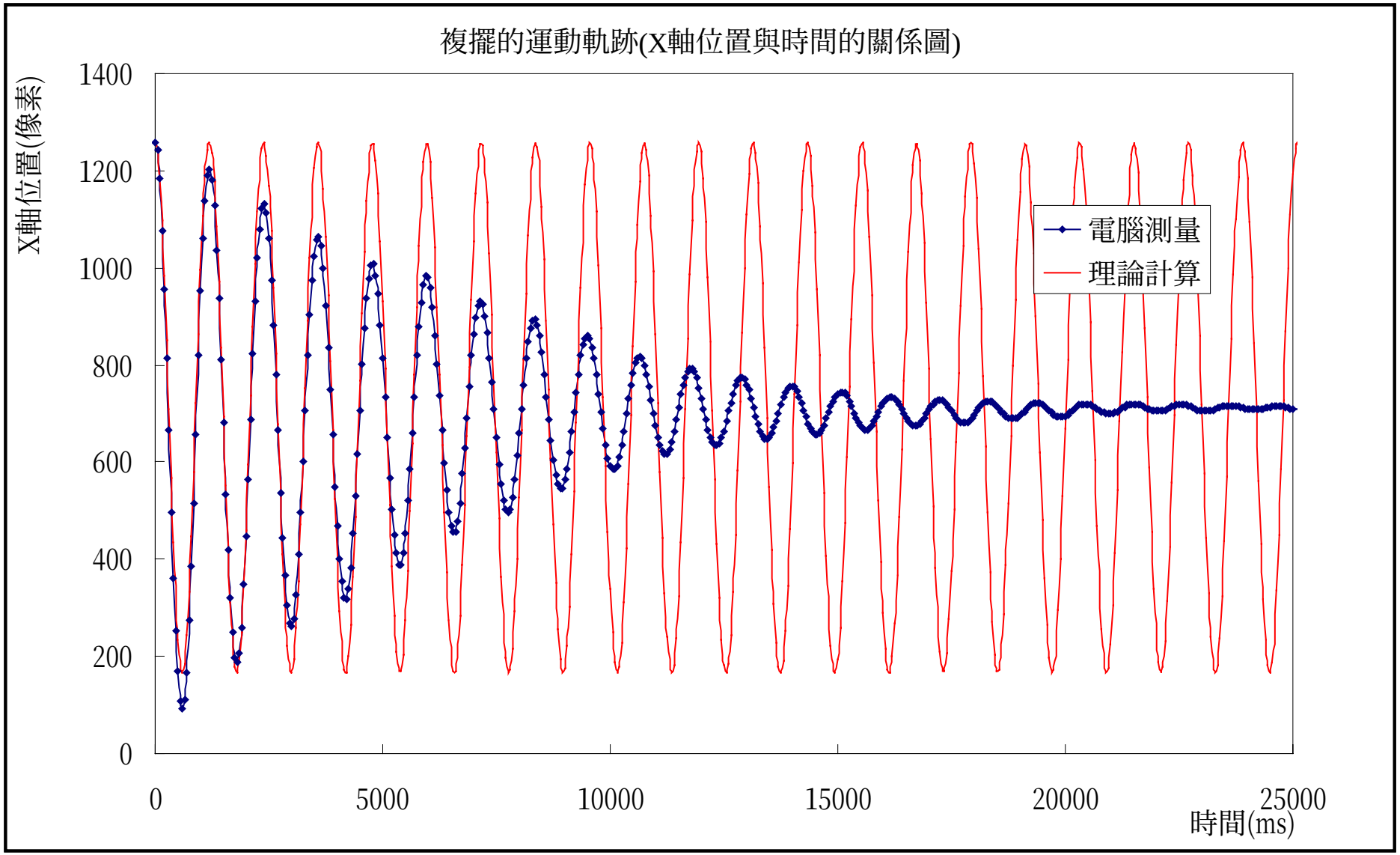

複擺的運動軌跡(X軸位置與時間的關係圖)
X軸位置(像素)
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
5000
10000
15000
20000
25000
時間(ms)
電腦測量
理論計算

圖５－８

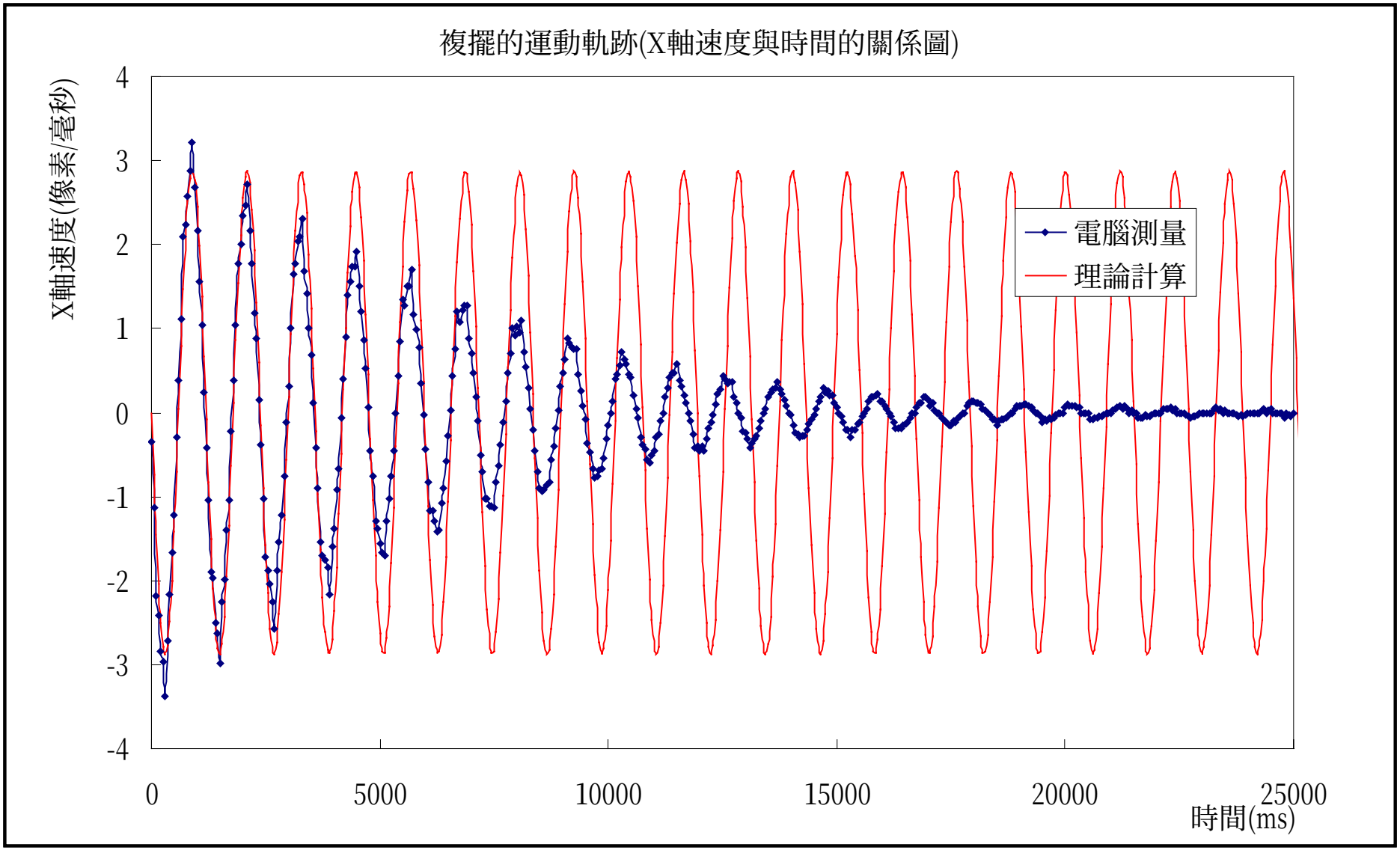

複擺的運動軌跡(X軸速度與時間的關係圖)
X軸速度(像素/毫秒)
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
0
5000
10000
15000
20000
25000
時間(ms)
電腦測量
理論計算

圖５－９

五、 測量複擺的強迫振盪現象

(一) 共振現象

1. 測量的數據如『圖５－１０』所示。
2. 在『圖５－１０』中看出複擺的平衡點在 X 軸位置 558 像素處。在共振期間平衡點兩邊的振幅大小並不相同，這是實驗中只在複擺的一邊控制電磁鐵與永久磁鐵相吸所導致。
3. 實驗中由三用電表讀出每次通電時，流經電磁鐵的電流在 0.90　1.10 安培之間。
4. 因為實驗中強迫振盪與擷取複擺的運動軌跡是分別由個人電腦和筆記型電腦控制，所以在『圖５－１０』中的自然振盪期間與共振期間的時間點判定只能由實驗數據變化推估。

(二) 非共振現象

1. 測量的數據如『圖５－１１』、『圖５－１２』和『圖５－１３』所示。
2. 由『圖５－１１』、『圖５－１２』和『圖５－１３』看出當強迫振盪的週期不等於複擺本身的週期時，複擺的運動變得很不規則，振幅也變小。
3. 『圖５－１１』、『圖５－１２』和『圖５－１３』中的自然振盪期間與共振期間的時間點判定是由實驗數據變化推估。

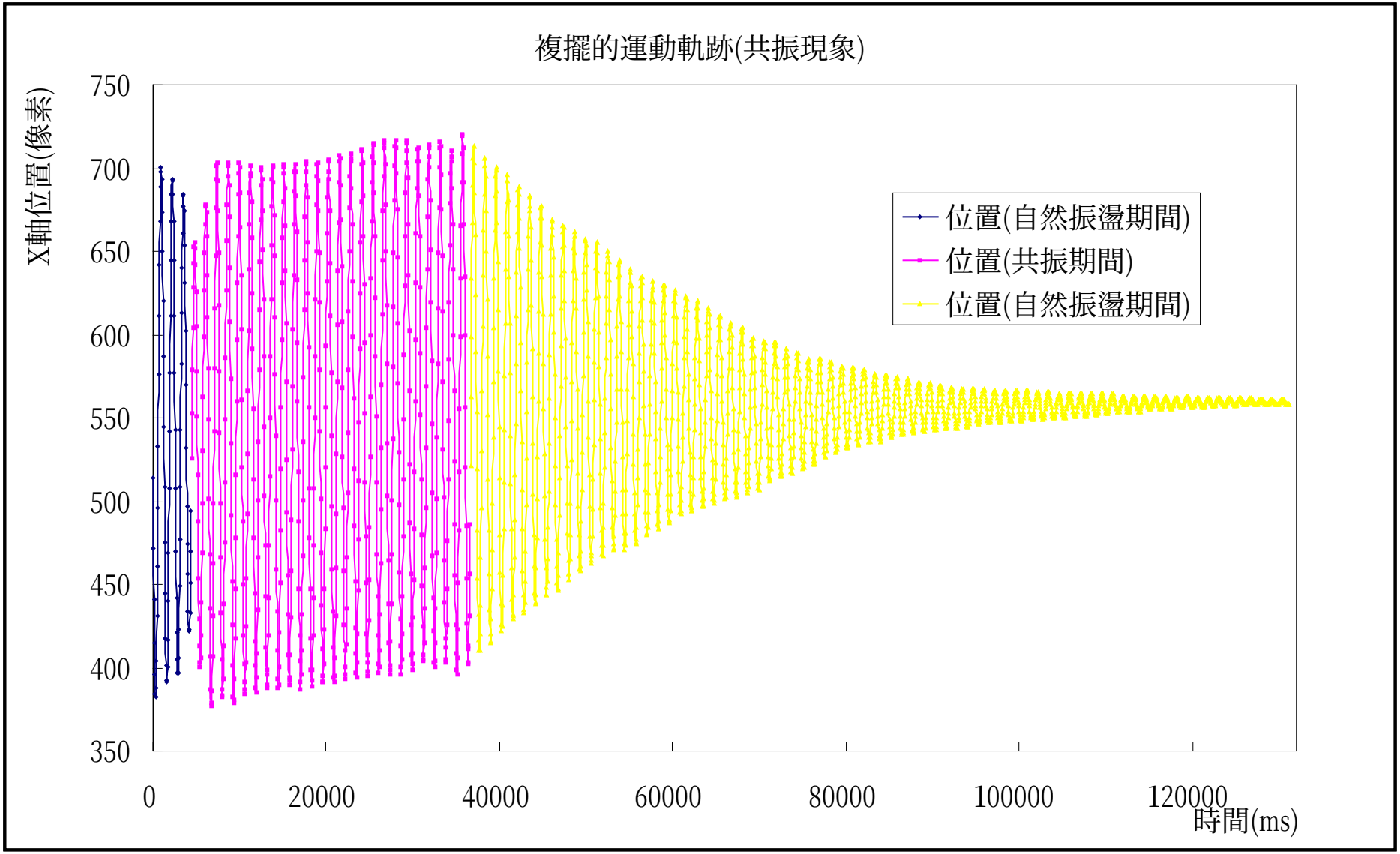

複擺的運動軌跡(共振現象)
X軸位置(像素)
750
700
650
600
550
500
450
400
350
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
時間(ms)
位置(自然振盪期間)
位置(共振期間)
位置(自然振盪期間)

圖５－１０

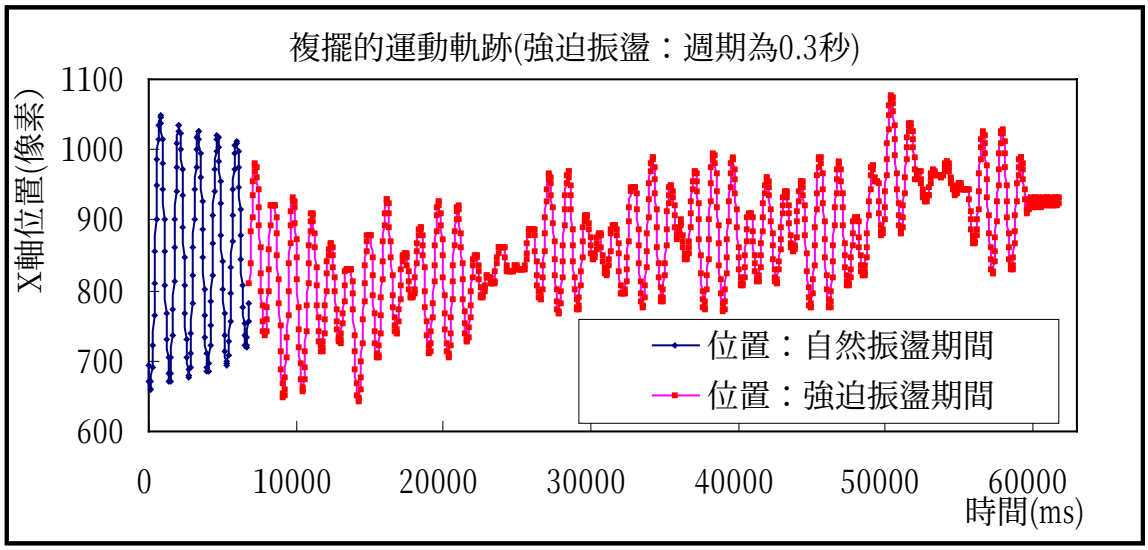


圖５－１１

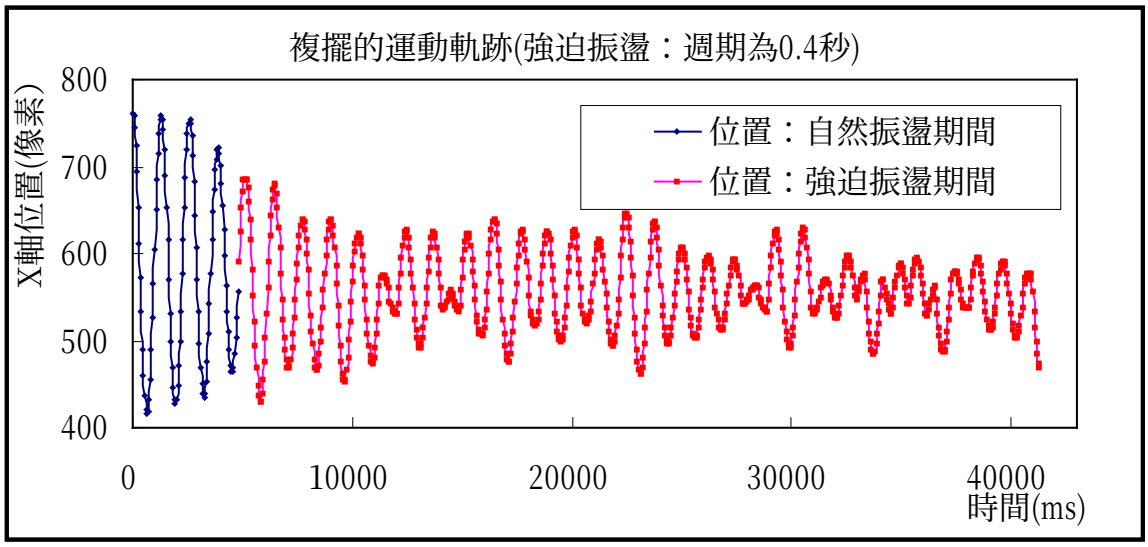


圖５－１２

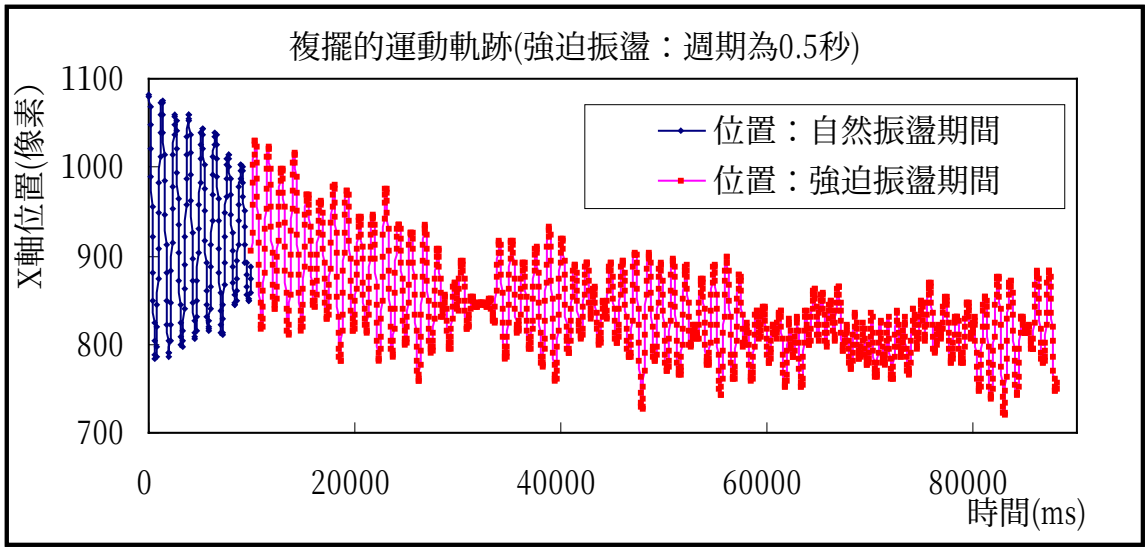


圖５－１３

陸、 討論

一、 小擺角時擺長與週期的實驗：

(一) 我們使用馬錶測量週期時，因無法準確測量單一次的擺動週期，所以測量連續十次週期再求平均值。又因為複擺第一次擺動的起始時間不容易確定，而採用第二次到第十一次的週期。

(二) 馬錶測量擺長 10 公分的複擺，其誤差為 3.43%，比其它不同擺長的複擺大，可能是因為週期太短及人的反應太慢。馬錶和電腦測量其餘不同擺長的複擺，它們的誤差都在 2%以內。由實驗結果可驗證複擺擺長的平方根與週期成正比。

(三) 利用電腦測量複擺每次擺動的週期，實驗數據如『圖５－２』，可以清楚地看出複擺具有等時性。

二、 小擺角時質量與週期的實驗：

(一) 從實驗數據可看出質量與週期無關。同時馬錶和電腦的測量結果，均顯示實驗週期較理論計算大一些。推測原因是由於壓克力條是用熱熔膠和原子筆芯連接，複擺的支點是在原子筆芯的中間，而不是在壓克力條的上方。

三、 擺角與週期的實驗：

(一) 在實驗過程中發現當複擺從大擺角開始釋放，因為受阻力導致擺動幅度大小迅速遞減。因此測量各擺角所對應的週期，將以電腦測量第一次擺動的週期。

(二) 在『圖５－５』中，可看出在大擺角時所測量的結果比理論值小而且誤差較大，推論這是因為大擺角的擺動幅度遞減較快，所測量到的週期不是剛好對應到原先的大擺角而是較小的擺角，因此導致週期較理論值小。

(三) 由實驗結果看出複擺的擺角愈大，其對應的週期愈大。

四、 測量複擺的運動軌跡實驗：

(一) 實驗一開始，我們使用紅光 LED 光學滑鼠測量，但滑鼠與厚紙板必須距離很接近約 0.1 公分，否則會偵測不到。後來改用雷射光學滑鼠，即使距離大至 0.3 公分也可以偵測。

(二) 由『圖５－８』中實驗數據以內差法的方法，推算複擺的週期。複擺的週期為 1194.92 毫秒，比之前未黏貼厚紙板的複擺週期 1272.7 毫秒小，可以看出黏貼厚紙板使得複擺的週期變小。

(三) 複擺的擺動幅度隨時間遞減，推測原因是由於複擺支點處的摩擦力和本身受到空氣阻力。

(四) 由『圖５－８』看出複擺的速度在最低點處較大，而在最高點處較小。進一步分析複擺速度與時間的關係，發現在小擺角時，複擺上某點的運動軌跡可以近似地視為簡諧運動。

五、 測量複擺的強迫振盪實驗：

(一) 起初本實驗以鉛條當複擺，但是發現鉛條會被電磁鐵磁化為永久磁鐵，而影響複擺與下方永久磁鐵的相吸與不相吸的控制。因此改以不會被磁化的物質壓克力條

為複擺。

(二) 為了確保相吸過程是增加複擺的能量，其相吸時間必須限制在複擺由高處擺動到最低點處這段時間內。由先前的實驗，推估複擺的週期約為 1.2 秒，因此當複擺末端處距平衡點約 3 公分處時，開始相吸而且時間持續 0.1 秒。

(三) 本實驗過程中發現複擺與下方的永久磁鐵相吸，有時會造成複擺左右擺動平面的移動，因此使用長 2 公分原子筆芯套在細鐵絲上，限制複擺只在固定的平面擺動。

(四) 實驗結果顯示當複擺發生共振時，擺動大小不會隨時間遞減反而有略微增大的現象，表示複擺本身從外界獲得能量；而非共振時，複擺的運動會受到干擾，無法有效地從外界獲得能量。

六、 未來的展望：

(一) 本實驗起初的想法是固定厚紙板，而將滑鼠的感測器固定在複擺上，但是發現目前的感測器大小約為 1cm×2cm×0.5cm 的晶片，若固定在複擺上將明顯影響複擺本身的構造。希望往後能夠找尋更小的感測器，或另一種更好的測量方法。

(二) 彈簧擺是結合彈簧及單擺的裝置，它的運動軌跡很特別。期待往後設計實驗探討它的運動現象。

(三) 物體在地球上運動會因為地球自轉所產生的科氏力而受影響，從文獻上得知擺的擺動將不會固定在一個平面上，左右擺動的平面會旋轉。期待往後設計實驗探討科氏力對擺動的影響。

柒、 結論

一、 在小擺角 10 度以內，複擺具有等時性，擺長的平方根與週期成正比，質量對週期沒有影響。較大的擺角對應較大的週期。

二、 在小擺角 10 度以內，複擺上某點的運動可近似地視為簡諧運動。

三、 強迫震盪與複擺的自然振盪兩者的週期相同時，擺動大小不會隨時間遞減反而有略微增大的現象；當兩者的週期不同時，複擺的運動軌跡變得很不規則。

捌、 參考資料及其他

一、 參考資料

(一) 書藉著作

1. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walke 原著; 田麗文、王行達、莫定山(民 94)編譯。物理(上)第七版 FUNDAMENTALS OF PHYSICS, 7th EDITION。台北市：全華。
2. 杜先智(民 86)。數學在中學物理中的應用。台北市：九章。
3. 惠汝生(民 95)。LabView 8.X 圖控程式應用。台北市：全華。
4. 蕭子健、林俊宏、彭宇豪(民 91)。LabView 硬體介面篇。台北縣：高立。

(二) 網路資料

1. 李雨靜、林孟潔、林怡君(民 95)。當彈簧遇見滑鼠。中華民國第四十六屆中小學科學展覽說明書。民 97 年 3 月 12 日，取自：http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/46/index.htm。
2. 維基百科。擺。民 97 年 2 月 12 日，取自：http://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E6%93%BA&variant=zh-tw#.E8.A4.87.E6.93.BA。
3. 黃福坤。Demolab 物理教學示範實驗教室。民 97 年 2 月 13 日，取自：http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/。

二、 附錄

(一) 複擺的週期

1. 小擺角時複擺的週期

由參考資料的『物理(上)』，可知小擺角時複擺的週期如下，

$T = 2\pi\sqrt{\dfrac{I}{mgh}}$，其中 T 為週期，I 為複擺的轉動慣量，m 為複擺的質量，g 為重力加速度，h 為力矩長度。

本實驗複擺的支點在壓克力條的上方端點上，故轉動慣量 $I = \dfrac{1}{3}ml^2$，其中 l 為複擺擺長，又 $h = \dfrac{1}{2}l$，

所以 $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{2l}{3g}}$．．．公式９－１。

2．大擺角時複擺的週期

由參考資料的『維基百科』，週期 T 與擺角 θ 的關係如下表示，

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}(1+(\frac{1}{2})^2\sin^2\frac{\theta}{2}+(\frac{1\cdot 3}{2\cdot 4})^2\sin^4\frac{\theta}{2}+(\frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6})^2\sin^6\frac{\theta}{2}+\cdots)。$$

本實驗取近似公式做為擺角與週期關係的理論公式如下式，

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2l}{3g}}(1+\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta}{2})．．．公式 9－2。$$

(二) 複擺的運動

1．對於小擺角時複擺的運動，本實驗中的壓克力條的末端的運動軌跡可近似地視為簡諧運動。由參考資料的『數學在中學物理中的應用』，可知簡諧運動公式如下：

(1) 位置與時間的關係

$$X = A\cos(\omega t+\varphi)．．．公式 9－3。$$

其中 X 為水平位置，A 為振幅，ω 為角速度($\omega = \frac{2\pi}{T}$，T 為週期)，φ 為相角。

(2) 速度與時間的關係

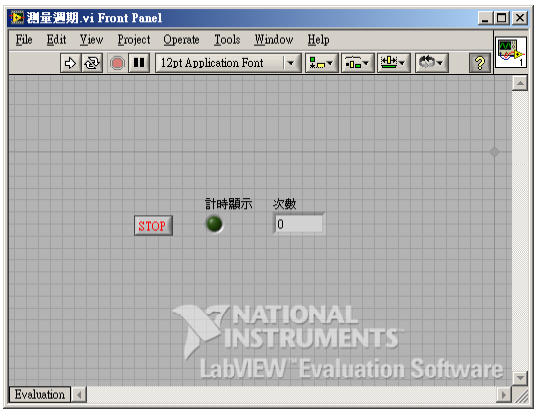
$$V = -Aw\sin(\omega t+\varphi)．．．公式 9－4。$$

其中 V 為水平速度，A 為振幅，ω 為角速度($\omega = \frac{2\pi}{T}$，T 為週期)，φ 為相角。

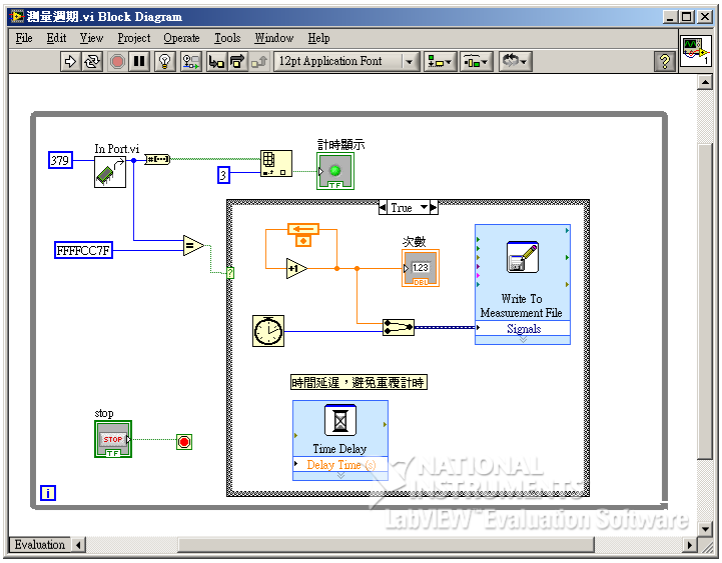
(三) 電腦軟體 LabView 程式

1．測量複擺的週期

前置面板

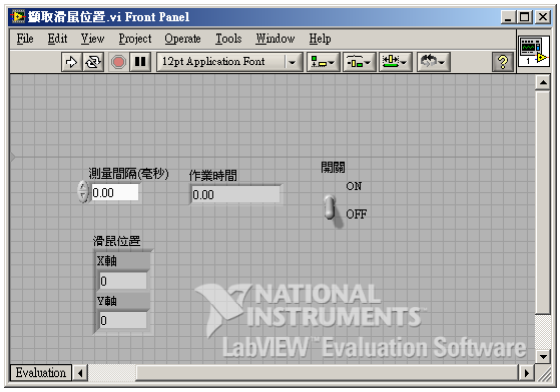


程式控制區

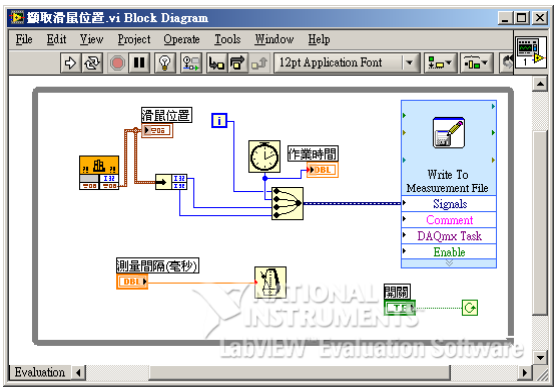


2．測量複擺的運動軌跡

前置面板

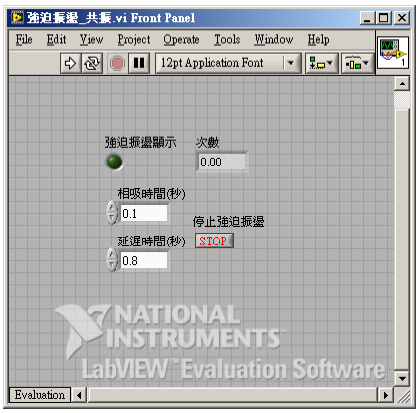


程式控制區

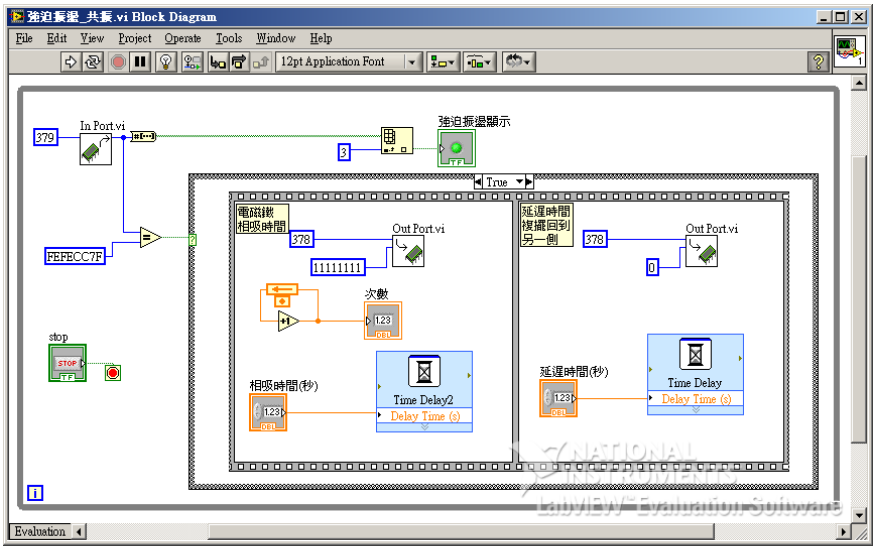


3．測量複擺的強迫振盪現象(共振現象)

前置面板

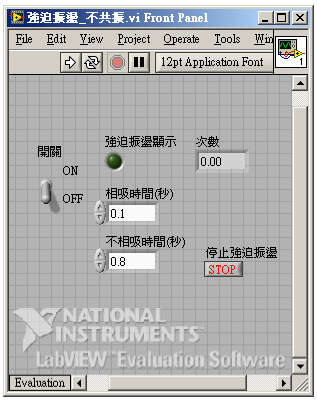


程式控制區

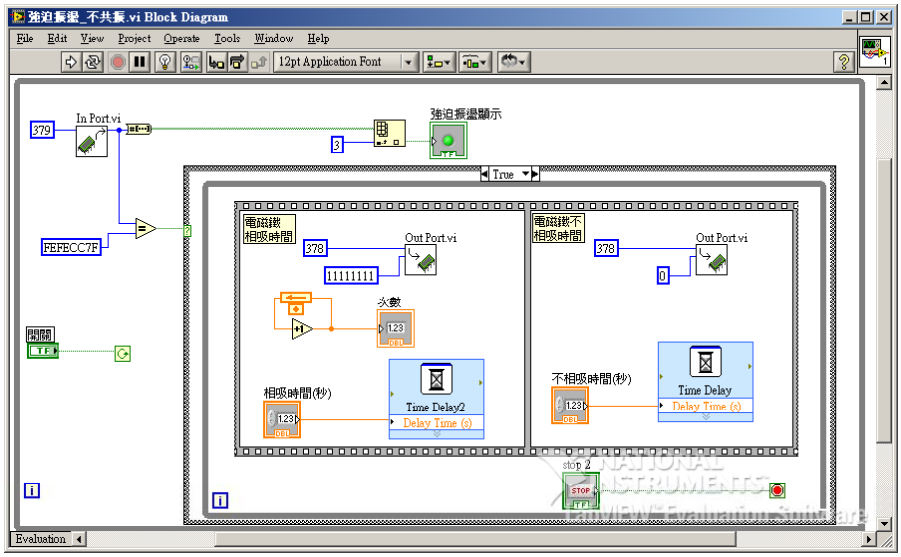


4．測量複擺的強迫振盪現象(不共振現象)

前置面板



程式控制區



【評語】031608

優點：明瞭複擺之基本特性及共振現象。

缺點：均爲已知之現象，系統設計不夠精密，未能討論影響實驗一致性之各因素。