

工程實驗 原理與操作

*Theory and Operation
for Engineering Experiments*



王木榮・黃鼎貴 編著
張家歐・解德泉

局書文復

工程實驗 原理與操作

王木榮・黃鼎貴 編著
張家歐・解德泉

復文書局

工程實驗原理及操作

版權所有



翻印必究

中華民國七十二年七月再版發行

平裝特價154元 精裝特價194元

著 作 者： 王木榮・黃鼎貴
張家歐・解德泉

發 行 者： 吳 主 和

發 行 所： 復 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號
門市部地址：台南市林森路二段63號

電話：(062)370003・386937

郵政劃撥帳戶32104號

No.28. LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINA TAIWAN REPUBLIC OF CHINA
TEL：(062)370003・386937

行政院新聞局登記證局版台業字第0370號

前 言

現今大部份之大專工科學生對各種實驗儀器之原理及操作可說是一知半解，甚至是茫然無知。工程教育已逐漸地注重個人從事問題之理論分析的能力，雖大部分之學生並無充裕的時間用諸於實驗工作，但仍希望學生能早日開始有獨創論文式之研究，尤其是有志於研究方面的同學更應熟知各種實驗儀器之性能、機構，則可由一批複雜之儀器內選出若干適當之儀器加以組合，妥善運用，則彼等可在有限之時間內編出計劃，付諸實驗，從而取得適當之結果，且由於對各種精密儀器之充分了解，因而對彼等之結果與討論充滿自信。若對選擇儀器、實施計劃與讀取數據，或選擇其試驗條件與從事計算時發生錯誤，則非但浪費寶貴之時間，並日益氣餒，以致對整個實驗及研究計劃發生懷疑，終萌厭惡也。此乃由於在此等技術上未有受過基本訓練所致。

本書係以訓練觀點為出發點，其目的乃欲引導工程學生明瞭其所常用任何技術特質之普通原理與方法，其中特別注重儀器、方法以及動力測定，再繼之以各種工程科學之實際應用，並在所有討論中加入實驗度量的正確度，誤差和不準度。此外亦注重一般之目標，例如依理論、模型及物理量所作預測之證明，以及材料與系統等性質之測定亦屬之。

本書對大專學生提供一般性的實驗方法，因此所包括的範圍很廣，讀者若欲在某些主題上作更深入之研究，可參考本書後所列之參考書及期刊。

編者四人皆為研究所畢業，深感實驗計劃及了解儀器性能及操作之重要，故耗二年之時間編成此書，以做為工程實驗之參考，惟編者學疏才淺，繆誤之處，在所難免，尚祈先進諸賢不吝賜正。

編者謹識於成大

工程實驗原理及操作

目 錄

第一章 圖與表的形狀	1
1-1 作圖時注意事項.....	2
1-2 實驗點的空間位置.....	6
1-3 在試驗中隨意點及數列點.....	6
1-4 亂點.....	7
1-5 線性關係.....	8
1-6 最小平方法.....	14
1-7 實驗結果配以多項式.....	20
習 題.....	26
第二章 實驗統計與實驗數據的分析	29
2-1 測量過程.....	29
2-2 誤差起因及儀器設計.....	30
2-3 實驗誤差之形態.....	31
2-4 測量誤差對實驗結果的影響.....	32
2-5 不準度分析.....	34
2-6 實驗數據的統計分析.....	40
2-7 機率分佈.....	42
2-8 高斯分佈和正常誤差分佈.....	43
2-9 最佳配合的期方試驗.....	50
2-10 平均值的標準偏差.....	56
2-11 圖解分析及曲線配合.....	57
習 題.....	59
第三章 各種電測儀器	61
3-1 緒論.....	61
3-2 電流計.....	61

3-3	伏特計	64
3-4	毫伏特計	65
3-5	真空管伏特計 (VTVM)	66
3-6	數字伏特計	69
3-7	輸入系統	70
3-8	電橋	75
3-9	放大器	82
3-10	濾波器	84
3-11	示波器	89
3-12	示波記錄器	94
3-13	感應裝置及轉換器	96
3-14	計數器，時間及頻率之測量	113
習題		114

第四章 尺度、位移和面積測量 117

4-1	長度的標準與測量	117
4-2	規塊	119
4-3	光學測量法	120
4-4	氣力位移規	123
4-5	表面積的測量問題	125
4-6	面積 $\int y dx$ 的圖解法和數計法	126
4-7	表面面積的測量	127
4-8	極面積儀	128
習題		131

第五章 時間的測量與率 133

5-1	緒論	133
5-2	高精度之比較 (頻率標準)	133
5-3	電子振盪器	134
5-4	頻率、週期、時段及相角之測量	134
5-5	轉速計	137
5-6	離心式轉速計	137
5-7	轉速儀 (Tachoscope)	138
5-8	轉速計試驗器	139

5-9	共振簧.....	139
5-10	電子轉速計.....	140
5-11	電動計數器.....	140
5-12	閃光測頻轉速計 (Strobotac)	142
5-13	示波器曲線.....	143
5-14	光電轉速計.....	144
習題		145

第六章 壓力度量..... 146

6-1	緒論.....	146
6-2	壓力計.....	148
6-3	氣壓計.....	152
6-4	靜重檢驗器.....	153
6-5	波登管壓力計.....	154
6-6	彈性規.....	154
6-7	膜片壓力計及風箱壓力計.....	155
6-8	低壓度量之介紹及其儀器.....	158
6-9	其他類型壓力計之介紹.....	164
6-10	動態反應之考慮.....	166
6-11	氣壓計所使用流體之性質.....	169
6-12	氣壓計之修正.....	170
6-13	各種壓力計使用之範圍.....	172
習題		172

第七章 溫度的測量..... 175

7-1	溫度計的使用劑.....	175
7-2	溫度標.....	176
7-3	玻璃式溫度計.....	177
7-4	溫度計的浴器.....	178
7-5	溫度計的溫度落後.....	179
7-6	溫度計的校準.....	179
7-7	理想氣體溫度計.....	180
7-8	雙金屬溫度計.....	181
7-9	流體脹縮式溫度計.....	182

7-10	溫度計的精確度	183
7-11	溫度計的修正	184
7-12	熱電偶之作用原理	185
7-13	測量溫度之高溫計或毫伏儀表	186
7-14	高溫計的調整及核驗	187
7-15	中間金屬的效應	187
7-16	熱電偶的金屬材料	188
7-17	熱電偶的應用	188
7-18	熱電偶的金屬組合	188
7-19	熱電偶的製做	189
7-20	熱電偶的再裝性與校準的不變性	191
7-21	熱電偶的安裝	191
7-22	電路的電位降	191
7-23	電位計的作用原理	192
7-24	測量電勢的方法	193
7-25	熱電偶參考接合點	193
7-26	應用電效應的溫度量度	203
7-27	應用輻射的溫度量度	207
7-28	熱傳播對溫度量度的影響	211
7-29	熱系統的瞬變反應	216
7-30	熱電偶的補償	218
7-31	高速溫度測量	221
7-32	濕球溫度計	222
7-33	露點偵測器	224
7-34	利用濕及乾熱變電阻小珠的測濕器	225
7-35	摘要	226
問題及習題		227

第八章 熱及輸送特性的量度與氣體分析 232

8-1	緒論	232
8-2	熱傳導率的量度	232
8-3	液體和氣體的熱傳導率	236
8-4	黏性的測量	238
8-5	氣體擴散	246

8-6	量熱學.....	249
8-7	氣體分析.....	252
8-8	對流熱傳播的測量.....	262
8-9	熱通量計.....	264
	問題及習題.....	264

第九章 流量之度量..... 268

9-1	緒論.....	268
9-2	流體流動之分類.....	268
9-3	流動方程式及其應用.....	272
9-4	流口噴嘴及文氏管.....	275
9-5	文氏管、噴嘴、流口的實際情況.....	276
9-6	皮氏管.....	285
9-7	正向位移法.....	286
9-8	境界層.....	288
9-9	流動系統內之摩擦損失.....	290
9-10	聲音噴嘴.....	293
9-11	應用曳力效應的流量度量.....	294
9-12	渦輪流量計及磁流儀.....	296
9-13	熱力流量計.....	298
9-14	流況能見法.....	301
9-15	陰影圖及修禮連.....	302
9-16	干涉儀.....	305
9-17	噴嘴噴射及壓力試探具.....	308
9-18	超音速流內的撞擊壓力.....	312
9-19	摘要.....	313
	習題.....	316

第十章 質量、重量之度量..... 319

10-1	緒論.....	319
10-2	重量之定義及重量和力之關係.....	319
10-3	重量之度量.....	321
10-4	等臂天平.....	321
10-5	天台秤及擺動秤.....	321

10-6	標準重量	323
10-7	密度(比重)之度量	324
10-8	可壓縮性及彈性	325
10-9	韋氏天平	326
10-10	氣體之比重	327
習題		327

第十一章 運動與振動之測量 329

11-1	緒論	329
11-2	機械振動與陡震	329
11-3	兩種簡易的振動裝置	330
11-4	地震儀之原理	333
11-5	地震儀之實際應用	338
11-6	陡震之測定	340
11-7	聲音之度量	340
11-8	噪音簡化系數	352
11-9	噪音及其度量	353
習題		355

第十二章 輻射之度量 357

12-1	緒論	357
12-2	輻射定律	358
12-3	熱輻射之測定	361
12-4	測量輻射常用之儀器及設備	362
12-5	發射率之度量	368
12-6	發射率之修正	370
12-7	反射率和穿透率的度量	372
12-8	核輻射	374
12-9	蓋格——彌勒計數器	374
12-10	游離室	375
12-11	照相探測法及閃爍計數器	376
12-12	中子的探測	376
12-13	計數統計法	377
習題		380

第十三章 力、轉矩、和應變的測量..... 382

13-1	力、轉矩和應變的定義.....	382
13-2	質量的測量.....	383
13-3	測力用的彈性元件.....	386
13-4	轉矩的測量.....	388
13-5	應力.....	389
13-6	應變.....	391
13-7	應變與應力的相互關係.....	394
13-8	應變的測量.....	399
13-9	應變規的基本特性及種類.....	400
13-10	電阻式應變規.....	401
13-11	電阻式應變規輸出的測量.....	403
13-12	溫度補償.....	404
13-13	應變規菊形裝置.....	406
習題		411

附 錄..... 414

表A-1	國際單位制.....	414
表A-2	標準字首和倍數.....	416
表A-3	換算因數.....	417
表A-4	在 70°F 的金屬性質.....	418
表A-5	在 70°F 的非金屬熱特性.....	418
表A-6	在 68°F 的飽和液體性質.....	419
表A-7	在一大氣壓下 68°F 的氣體特性.....	419
表A-8	在一大氣壓下的乾燥空氣特性.....	420
表A-9	〔飽和液體〕水的特性.....	421
表A-10	在 25°C 一大氣壓下空氣中一些氣體和蒸汽的擴散系數.....	422
表A-11	各種表面在 70°F 的總常態發射率之近似值.....	422
表A-12	一些幾何面積之轉動慣量.....	423

參考書及參考期刊..... 424

第一章 圖與表的形狀

圖及表在工程上最極其重要。一位工程師在其實驗報告中如果缺少圖與表，則此份報告書在其重要性上將大打折扣，所以學生工程師們必須勤於學習圖與表的功用，以作為未來更進一步研究的工具。

圖形可分為兩種，一種稱為計量式 (quantitative)，一種稱為計質式 (qualitative)。計質式的圖形很少在工程上使用；但是當此份實驗報告書為一般人所閱讀時，則計質式圖形偶可使用。計質式圖形兩座標軸上的變數彼此互無關係，這種圖形又稱為點對點曲線，如圖 1 - 1 所示。

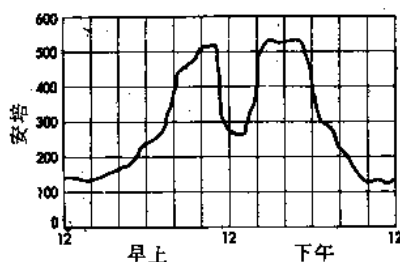


圖 1 - 1 計質式圖形

計量式圖形常為工程師們使用，其兩變數互有關係，其一變數稱為自變數而另一變數稱為應變數。

作圖時，將數據描點於紙上，然後以一特性曲線連接起來，如圖 1 - 2 所示。

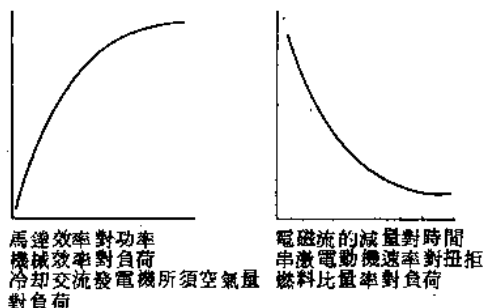


圖 1 - 2 工程上常見的典型特性曲線

1—1 作圖時注意事項

- (1)選擇作圖紙。
- (2)選擇坐標軸刻度 (scale) 。
- (3)標示坐標軸刻度。
- (4)標示數據點於坐標圖上。
- (5)連結數據點成一圓滑曲線。
- (6)標示曲線名稱。
- (7)適當的標題。

(1)選擇作圖紙：

選擇作圖紙時必須注意下列幾項：

(I)所使用的作圖紙是直角座標？半對數座標？還是對數一對數坐標？依所需要而選擇適當的作圖紙。

(II)所繪的座標線是否達到所需要的準確度？所繪的直線是否很直及對稱？

(III)作圖紙上是否太多曲線而使讀者混淆？所繪的曲線是否足夠需要以致不需再利用內插法求其值？

(IV)所繪的曲線是否能製成藍圖？所繪的線的顏色為何？其大小及粗細為何？所用的墨水量是否適當？

(2)選擇坐標軸刻度：

坐標軸的刻度，通常包括有幾個不同的單項，亦即不同的變數。但是如何選擇適當的坐標軸刻度方才能使得這個圖形具有重要性？下列幾點原則。

(I)自變數的坐標刻度繪於 x 軸，即水平軸。實驗中到底那一個變數是自變數而那一個變數是應變數呢？關於這一點常令人混淆不清。假如實驗中牽涉到好幾個變數，那麼可將其中任何一個當成固定值而依實驗將其他另外幾個求出，那麼這個當成固定值的變數就是自變數而其他的變數就是應變數。如圖 1—3 (a) 所示。

(II)座標軸刻度的選擇必須使得任何一點很快、很精確的標點出來，而且也要使閱讀該圖的人很輕易的看出來。通常刻度的連續分隔線為10的倍數，或者可為 1、2 或 5 依其實際需要而定。

(III)刻度的選擇是儘可能的使座標紙充分使用，但是原本數據的精確度必須予以注意。譬如壓力計的讀數必須比該計的可讀數稍大些；換言之，所求出數值的不準確度不應大於刻度的較小分度 (division) 。

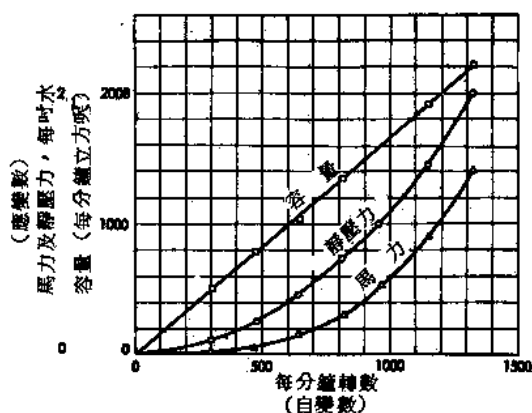


圖 1-3 (a) 自變數與應變數之用法

(IV)在座標軸上主要點以數值標記之，但不需對每一點予以數值的標記，所標記之值規則性的排列。零座標在座標軸上並不一定要標記出來，當此試驗在零座標時無其值。下例中零座標必須標出：引擎在制動馬力 (Brake horse power) 爲零時其熱效率 (thermal efficiency) 爲零，所以熱效率對制動馬力的曲線可以延伸到零座標。

通常在實驗數據點上附加理論值曲線，必須在各曲線旁加以明確指示以免混淆不清。所連結的曲線不能超出實驗數據點的範圍，如果需要向外延伸那麼加以點線以表示爲外插法所得出之值。當有數個項譬如制動馬力，指示馬力 (indicated horse power) 及磨阻馬力同時在一張座標紙上繪出必須

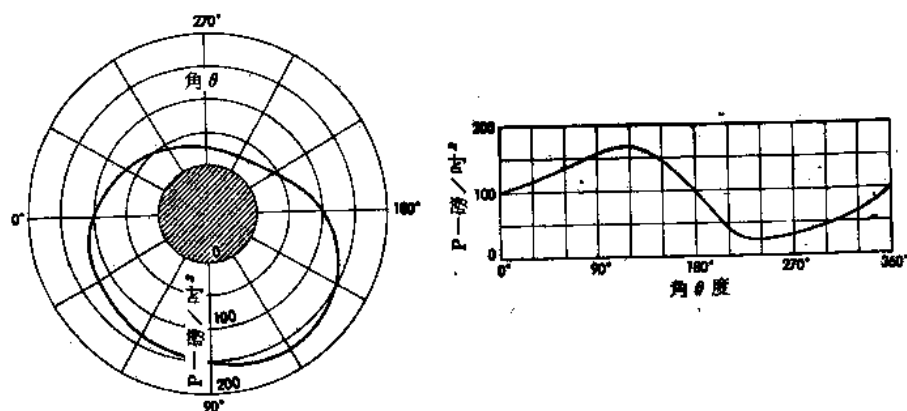


圖 1-3 (b) 極座標繪圖法

繪以相同的刻度並標以“馬力”兩字，這種繪圖法有一種好處就是能同時比較出其間的正确關係。如果對以效率或任何變數在各種不同的操作情況下也可得其關係值。

圖 1-3(b) 所示為極座標的繪圖法，左圖直接以圓形指出而右圖將其展開為直角座標的形狀。

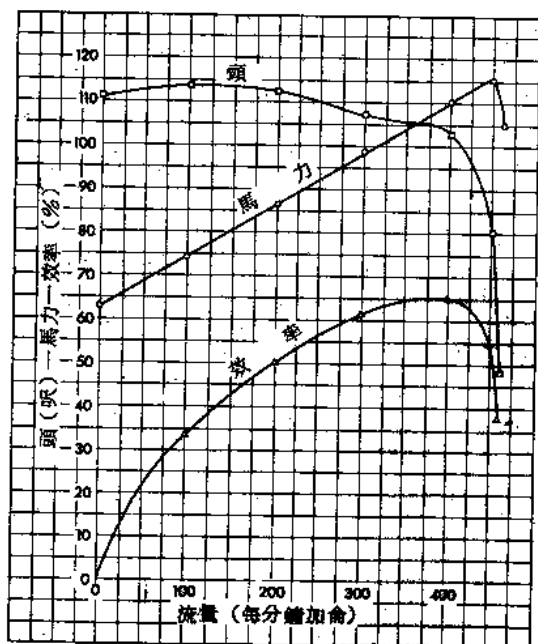


圖 1-4 圖形結果的變態表示

圖 1-4 所示為三種曲線表示實驗的結果，圖形(○)，方形(□)及三角形(△)表示各種不同曲線的觀測點，每一曲線為連結相同符號的點所成，其曲線旁必須加以標記以分別各曲線方免混淆並能知道每一曲線所代表的意義。

刻度值及名稱都位於方格區域內，通常橫軸（水平軸）的名稱都寫在底部，由左而右。縱軸的名稱寫在左邊，由下而上。

圖 1-5 所示與圖 1-4 類似，所不同的是本圖的繪製乃為印刷方便，其刻度及刻度名稱皆位於方格區域外，且刻度的分度也較上圖為疏，易為讀者清晰知悉。

圖 1-6 所示為半對數座標圖形，利用半對數所得的雷諾數其區間可較

用對數座標所得者爲大。

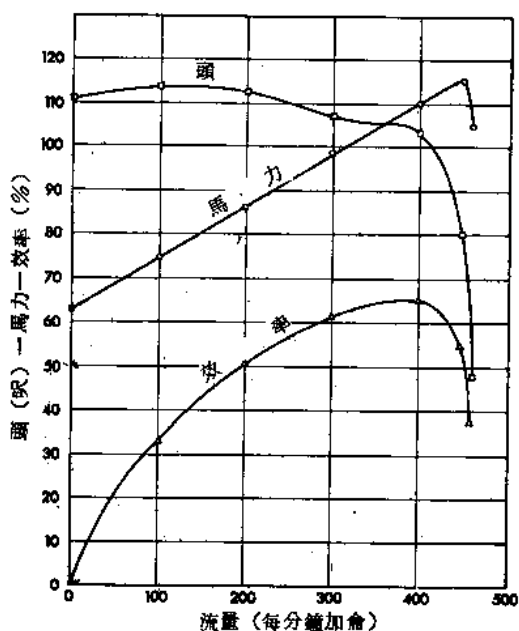


圖 1—5 爲印刷方便所繪的曲線圖

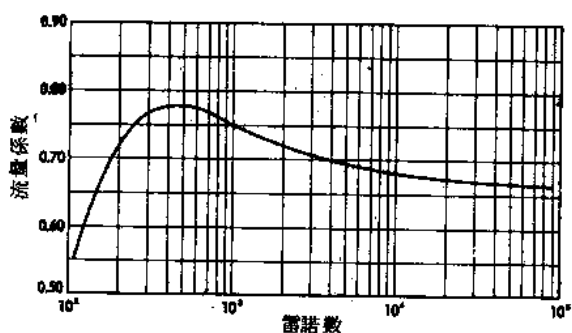


圖 1—6 半對數圖

1—2 試驗點的空間位置

作試驗前，我們必須先想到我們需要很多試驗點及其空間位置，其間自變數 x 與應變數 y 之間有其基本關係，此關係可以用 x ， y 座標軸上的曲線或方程式表示。

至於如何選擇試驗中的試驗點：在熱交換器的試驗中，其中存在有強制對流，各種不同的因素的相互關係可以以下式表示：

$$N_{Nu} = k (N_{Re})^m (N_{Pr})^n \dots\dots\dots (1-1)$$

其中 k ， m ， n 為實驗決定的常數。

(N_{Nu}) 為魯謝數 (Nusselt Number) 是實驗所需要的應變結果，雷諾數 (Reynolds Number) 與普蘭陀數 (Prandtl Number) 是兩個自變數。在相當大的溫度區間變化下，普蘭陀數只作些許的改變，加上 n 次的關係，其中 $n = 0.3$ 更使得其變化影響微乎其微。另一方面，雷諾數包含有流體的流動速度一項，因此能產生很大幅度的變化量。總之，當試驗牽涉到方程式 (1) 時，普蘭陀數隨溫度僅作小幅度的變化，而雷諾數隨溫度却作大幅度的變化。事實上，普蘭陀數因受 0.3 次的影響其變化極微而可視為常數，因此該數可以忽略，故強制對流的關係式可由方程式 (1) 改寫為下式：

$$N_{Nu} = k' (N_{Re})^m \dots\dots\dots (1-2)$$

其中 (2) 式的 k' 與 (1) 式的 k 不同，此乃因普蘭陀數的不計所引起的。

1—3 在試驗中隨意點及數列點

在試驗中，試驗點可採隨意形態或數列形態。試驗的性質將決定其過程為何，如果在靜態的材料試驗中其選擇將與試驗中有熱力現象時不同。

在一些例子中可顯示試驗點的空間位置以對等區間分佈的需要性，在某些情況下，尤其在數學解析上，如此的對等空間位置分佈更顯其方便。但是欲求得此種分佈有時很容易有時却很困難。當試驗點對等分佈，必須知道變數與變數之間的關係，尤其是當我們的目的是去決定變數間數學關係式的常數。

現在舉一例題：

我們假設有一蒸汽對水的熱交換器，其中總包熱傳係數 (overall coefficient of heat transfer) 為 U ，水流為 W ，溫度為 T ，其數學關係式為：

$$\frac{T_{\text{水流出}} - T_{\text{水流入}}}{T_{\text{蒸汽}} - T_{\text{水流入}}} = 1 - e^{-UA/WC_p} \dots\dots\dots (1-3)$$