

控制工程

N. M. MORRIS 著

許秋年 編譯

實用出版社

控制工程

N. M. MORRIS 著

許秋年 編譯

實用出版社

控制工程

許秋年 編譯

出版者：實用出版社

澳門大興街 3 號

印刷者：精美印刷公司

★版權所有 • 不准翻印★

1979年6月版

原 序

由於工業控制工程不斷地突飛猛進，乃促使筆者撰寫此書，以爲實務工程師與年輕技師之用。本書之目的僅在於使讀者能把握系統之實際操作，而並不希望使讀者能在本書中學得高深之設計方法，故本書所涉及之數學程度亦僅調節至使能符合上述原則爲止。筆者之所以將數學程度予以局限者，旨在避免初學者對抽象之理論感到混淆不清。實務工程師多數均係從事控制系統之安裝與維持，而非從事於設計者。

筆者對於本書之編纂，盡量使之合乎邏輯，在詳細討論某種系統之前，先給予以理論之基礎。本書之前面部份，著重於電氣技術與電子技術，蓋平日大多數系統，在其發展過程之某些階段中均必須採用上述技術。類比與數位計算技術，對於控制工程具有甚大之影響。對於此種論題，本書均特闢一章，從事討論該類計算技術在控制工程上之應用。

隨著控制系統研究之成長，研究系統穩定性之特別方法，亦大有發展。本書專有一章研究頻率響應圖，使讀者有基本資料，可以體認各種組成因素，對於系統穩定性所產生之效應。在頻率響應圖之一章中，只簡單敘述尼克脫（Nyquist）之穩定規範，再加仔細之數學應用，可望以簡化之方法，達成此項目的。

本書可適用於電氣，機械，及儀器技師訓練課程之最後一年與發給證書時當年教課之用。通常，我們不可能使某一本書適用於所有各種課程，雖然如此，但筆者仍盡力設法使本書能包羅各課適用之基本知識。對於電子設備與電力設備方面而言，本書亦已符合上述之原則，關於此點，讀者當可自本書目錄中窺見之。

本書有甚多資料均得自工業界之工程師，或來自其他工業部門者。筆者特別對標準電話電纜公司（Standard Telephones and Cables Ltd.）慕拉特公司（Mullard Ltd.），紐約國際電氣公司（International General Electric Company of New York），紐麥蓋脫電晶體公司（Newmarket Transistors Ltd.）等之供給資料一事表示感謝。對

於伊利夫電氣出版公司 (Iliffe Electrical Publication Ltd.) 准許應用筆者所著無線電世界 (Wireless World) 一書內之線路圖，表示特別之謝意。筆者又感謝北斯旦福星大學 (North Staffordshire College of Technology) 諸同仁對問題討論之協助，在本書之準備階段中，貢獻甚大。

筆者對北斯旦福星大學校長魯易士 (Lewis) 博士允許採用其經驗電路，以及 H. N. D 及 H. N. C 之考試題目表示感謝，是爲序。

摩力斯

N. M. MORRIS

考試名稱簡字表

H. N. D	電氣及電子工程之國家高等證書考試。
H. N. C	電氣及電子工程之國家執照考試。
ET 4	電氣技師最後一年考試。
ET 5	電氣技師考試。
EPE	電力設備考試。
IE	工業電子考試。
TMP	電力試驗法考試。
TME	電子試驗法考試。
G	發電考試。
U	電能應用考試。
I	儀器考試。
C	工業控制系統考試。
MET-C	機械工程技師考試（應考控制系統技術者）。

目 錄

考試名稱簡字表

第一章 控制工程之簡介

1.1	導言	1
1.2	自動控制系統之要求	1
1.3	傳遞函數	4
1.4	系統之型式	7
1.5	若干實務上之限制	10
1.6	穩定性	11
1.7	安定時間之估計	14
1.8	若干其他型式之控制系統	17

第二章 電子元件之基本原理

2.1	電子元件	21
2.2	離子放射與電子放射	21
2.3	熱離子真空管	22
2.4	氣體放電元件	26
2.5	閘流管	27
2.6	水銀弧換流器	30
2.7	固態元件	33
2.8	稽納二極體	34

2.9	電晶體	36
2.10	真空管與電晶體用作開 關鍵	39
2.11	磁場效應裝置	40
2.12	閘流體	41

第三章 簡單電子調節器

3.1	電子調節器之基本要求	47
3.2	串聯線路之操作	48
3.3	不穩定之電源供應	49
3.4	過濾電路	51
3.5	穩定因子	53
3.6	電壓電源與電流電源	53
3.7	簡單分路電壓調節器線 路	54
3.8	更進步之分路電壓調節 器	57
3.9	陰極耦合器及射極耦合 器線路	58
3.10	串聯電壓調節器線路	59
3.11	電晶體調節器之保護線 路	61
3.12	串聯電流調節器	62

第四章 回授放大器之理論

4.1 應用回授之目的與方法	65
4.2 負串聯電壓回授	65
4.2.1 無負荷情況下之增益 m'	66
4.2.2 無負荷增益之穩定	66
4.2.3 無負荷輸入阻抗 Z_i'	67
4.2.4 輸出阻抗 Z_o'	68
4.2.5 非直線型失真	69
4.2.6 在放大器之噪音	69
4.2.7 加載荷之效應	71
4.2.8 時滯之減縮	73
4.3 正串聯電壓回授	75
4.4 應用星型連接電阻器之電總壓和	76
4.5 分路電壓回授	77
4.6 負串聯電流回授放大器	79
4.6.1 無負荷輸入阻抗 Z_i'	80
4.6.2 輸出阻抗 Z_o'	80
4.6.3 負荷阻抗之效應	81
4.7 正串聯電流回授	81
4.8 聯合回授線路	82
4.9 回授理論之若干限制	82
4.10 回授放大器之穩定性	83
4.11 試驗線路	84

第五章 頻率響應圖

5.1 倪奎斯圖	88
----------	----

5.2 分貝	90
5.3 運算素 j	91
5.4 時滯	93
5.5 對數增益圖與對數相位圖	95
5.5.1 $j\omega t$	95
5.5.2 $1 + j\omega t$	96
5.6 波德圖	98
5.6.1 系統之分類	101
5.7 試驗電路	101
5.8 增益與帶寬乘積	102

第六章 穩定技術與系統性能

6.1 黏度阻尼	107
6.2 輸出導數阻尼	108
6.3 暫態速度阻尼	111
6.4 誤差率阻尼	112
6.5 積分控制	113
6.6 組合電路	115
6.7 摘要	115

第七章 電氣機器

7.1 單相變壓器理論	116
7.2 同步器設施	118
7.2.1 同步發送器	118
7.2.2 同步接收器	119
7.2.3 同步控制變壓器	120
7.2.4 在同一位置控制系統之同步元件	120
7.3 E型變壓器	121
7.4 旋轉機器之理論	122
7.5 電動勢與轉矩之公式	123

7.6	交流發電機	124
7.6.1	拖杯發電機	125
7.7	多相發電機	126
7.8	旋轉磁場之產生	127
7.9	感應馬達	128
7.10	感應馬達之轉矩公式	131
7.10.1	低滑動值之轉矩	132
7.10.2	大滑動值之轉矩	132
7.11	轉矩與輸入動力之間之關係	133
7.12	單相操作	134
7.13	直流發電機	135
7.14	整流	137
7.15	補償繞組	139
7.16	直流馬達	139
7.16.1	平順電樞機器	140
7.17	直流馬達之公式	140
7.18	控制分開勵磁之馬達之普通方法	141
7.19	電樞（或轉子）、功率、速度，及容積之間之關係	142
7.20	機器之額定率	143
7.21	齒輪比之選擇	144

第八章 放大器

8.1	直流真空管放大器與電晶體放大器	149
8.1.1	漂移現象	150
8.1.2	陰極與射極耦合之放大器	151
8.2	級際耦合	153
8.3	交流放大器	154

8.4	相敏感整流器	155
8.5	閘流體作為放大器	158
8.5.1	閘波之擊發	158
8.5.2	相移之控制	159
8.5.3	簡單脈波發生器	161
8.5.4	脈衝之同步	162
8.5.5	閘流體電路	162
8.5.6	高電壓工作	165
8.5.7	高電流工作	166
8.5.8	保護	166
8.6	磁力放大器	167
8.6.1	自行勵磁之放大器	168
8.6.2	自行飽和之磁力放大器	169
8.7	旋轉放大器	170
8.7.1	電動放大器與勵磁電動放大器	171
8.8	閘流管及水銀弧光換流器	173
8.9	試驗	174

第九章 速度控制調節器與自動電壓調節器

9.1	電氣煞車	177
9.2	直流馬達速度控制	178
9.2.1	華德李及速度控制法	178
9.2.2	保護線路或限制線路	182
9.2.3	閘流體之應用	185
9.2.4	閘流體之反操作	187

9.2.5	換流器之電樞與磁場電流之反向.....	188
9.2.6	直流開關.....	189
9.2.7	水銀弧換流器系統.....	191
9.2.8	磁力放大器系統.....	191
9.3	交流馬達控制.....	191
9.3.1	恆定頻率驅動.....	192
9.3.2	可變頻率之驅動.....	193
9.4	自動電壓調整器.....	194

第十章 位置控制系統

10.1	導言.....	200
10.1.1	摩擦之特性.....	200
10.1.2	齒隙.....	201
10.1.3	彈性能.....	201
10.2	小型系統之位置控制.....	202
10.2.1	交流系統之誤差率之穩定.....	205
10.3	大型系統之位置控制.....	207
10.3.1	可操縱之無線電望遠鏡.....	207
10.3.2	自動旋下控制.....	209
10.3.3	捲軸驅動.....	210
10.4	交流伺服系統.....	212
10.5	機器工具之控制.....	214
10.6	「水平位準」之控制.....	217

第十一章 類比電腦計算技術

11.1	類比電腦之元件.....	221
11.2	線型數學操作.....	221

11.2.1	加法與減法.....	221
11.2.2	對時間之積分.....	223
11.2.3	對時間之微分.....	225
11.2.4	時間延遲之模擬.....	225
11.2.5	電位計之應用.....	226
11.3	閉環迴線系統之模擬.....	226
11.4	最初之條件.....	228
11.5	非直線數學操作.....	228
11.5.1	飽和或分路限度線路.....	228
11.5.2	比測儀.....	229
11.5.3	死角或串聯限制線路.....	230
11.5.4	斜坡函數之產生.....	230
11.6	對一控制系統之應用.....	232
11.7	伺服乘數器.....	232
11.8	其他性能.....	234

第十二章 數位電腦技術

12.1	邏輯功能.....	236
12.1.1	及 (AND) 閘.....	236
12.1.2	或 (OR) 閘.....	238
12.1.3	非 (NOT) 閘.....	239
12.1.4	薛密脫觸發器電路.....	241
12.1.5	時間延遲.....	242
12.1.6	記憶線路.....	243
12.2	通用邏輯元件.....	246
12.2.1	NOR 閘.....	246
12.2.2	NAND 閘.....	248
12.2.3	積分線路.....	248
12.3	二進位符號.....	250
12.3.1	格雷符號.....	250
12.4	數位對類比之變換.....	252

12.5	數位式轉發器.....	255
12.6	氣力邏輯元件.....	258
12.6.1	擷流放大器.....	258
12.6.2	附於壁上之設施.....	259
12.6.3	控制漏耗元件.....	259
12.7	其他型式之邏輯元件.....	260

第十三章 液力系統

13.1	液力液體.....	263
13.1.1	液力液體之性質.....	263
13.2	基本液力系統.....	265
13.3	液力邦浦.....	267
13.3.1	齒輪邦浦.....	268
13.3.2	葉板邦浦.....	268
13.3.3	活塞邦浦.....	269
13.4	控制閥.....	269
13.4.1	活塞型閥.....	270
13.4.2	擋板及噴嘴閥.....	270
13.4.3	噴射嘴管閥.....	271
13.5	追逐同步器.....	272
13.6	液力操作器.....	273
13.7	液力系統之應用.....	274
13.7.1	具有機械回授之簡 單直線伺服系統.....	274

13.7.2	應用電子回授之直 線系統.....	275
13.7.3	速度控制系統.....	276

第十四章 氣力控制系統

14.1	導言.....	278
14.2	術語.....	278
14.3	氣力系統.....	279
14.4	控制器.....	279
14.4.1	應用於控制器之氣 力閥.....	280
14.4.2	運動平衡控制器.....	281
14.4.3	強制平衡控制器.....	282
14.5	氣力時滯網路.....	283
14.5.1	積分作用.....	283
14.5.2	三項功能控制器.....	284
14.6	控制器對負荷擾動之效 應.....	284
14.7	操作器.....	285
14.8	混合系統.....	286
14.9	電傳信號之選擇.....	286
14.10	電子三項功能控制器.....	287
14.11	暫態響應試驗.....	288

第一章 控制工程之簡介

1-1 導言 (Introduction)

人類具有控制地球上其他事物之能力，因而將世界改觀。此種進步，首先極為緩慢，但以後則以驚人之發明而加速之。在早先代表文明進步之標記為輪子，而代表更為現代之文明進步之記號則為電晶體。

無數之文化發展成果，今已視之為尋常。電機工程中最初的幾步不穩的進展，竟導致今日的龐大的發電廠。

在早先實驗室中的若干個基本試驗，對於今日電子計算機時代之產生，貢獻甚大。新式生產技術與理論的發展，促進控制工程學的形成，進而即可指日完成純粹自動化工廠之計劃。

人工操作所能達到的精度與速度是有限度的。在設計一機器或設計一工廠時，若欲使其能自動操作，且能達到某種適當之精確度、精光度，以及生產率，則其所涉及之問題，乃是對技術師與工程師之一種挑戰。一控制工程師，必須是對電力廠、機械配件，以及電子線路，具有全般瞭解之全能工程師。其尤關重要者彼必須充分瞭解在閉環系統中各部門之效應。

1-2 自動控制系統之要求

(Requirements of An Automatic Control System)

在任何變數能予以精確控制之前，我們必須先度量之。此種用以度量其輸出之儀器，稱為電功率轉送器 (transducer)。[註：英國標準 BS 1523 將電功率轉送器定義為可將一信號或物理量轉換成另一相對應之物理量的一種設施。電位表 (potentiometer)，亦為一電功率轉送器，通常用於位置控制系統，以便將「角度位移」(軸之位置)變成一種電壓。]

事實上，任何設備，若用以將一種信號變換為另一種信號者，統稱為電

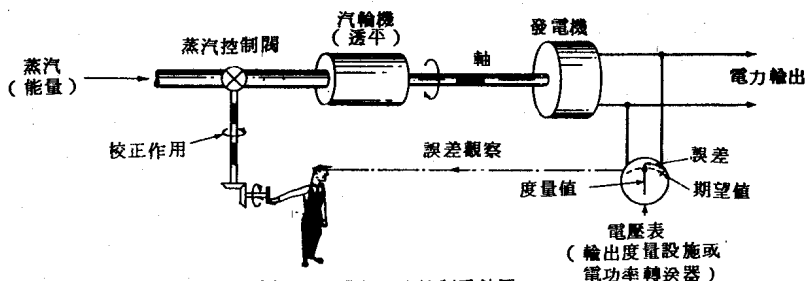


圖 1.1 最初步之控制系統圖。

功率轉送器。圖 1.1 所示，為最初步之電壓調節器，其中含有「閉環系統」(closed-loop) 或「閉循環系統」(closed-cycle system) 之基本元件。

此圖指出，一直流發電機，乃由一蒸汽透平所驅動，其速度則由一與手輪所連接之閥門所控制，操作者則以肉眼來觀察度量值（或輸出值）與期望值（或參考值）之間之差異。此項差異，則稱為誤差，或偏差。

操作者根據此項資料採取動作，將蒸汽控制閥門予以變更，使誤差減至零。此一系統的輸出量可為幾百萬瓦特，但却祇需要出力能量僅為幾分之一馬力之操作者來控制。因之，欲達所期望之控制效果，其閉環系統必須能擴大其信號，此種信號之擴大，常稱之為放大作用。自動控制系統，含有負回授原理，在此負回授設施中，其度量值則自參考值中減去之。所採取之校正作用，則端視誤差之大小，以及度量值大於或小於所期望之數值而定，亦即以誤差為正或為負而定。

任何控制系統之一重要原理，則為其輸出量乃根據控制操作而定，亦即其系統乃係由誤差所操縱。

自動系統，可應用若干個“方塊箱”表示之，甚為方便，基本電壓調節器之方塊圖，已示於圖 1.2 (c)。此系統首予以簡化至下列各基本要求：

- (a) 輸出量之測度（有時稱為重校信號）。
- (b) 輸入量信號或參考信號（有時稱校正信號）。
- (c) 輸入量信號與輸出量信號之比較設施（誤差偵察器）。
- (d) 控制器。

操作者必須包括於閉環系統中，作為其中之一份子。但在實際之系統中，則操作者往往是被一「自動誤差偵察及校正設施」(automatic error

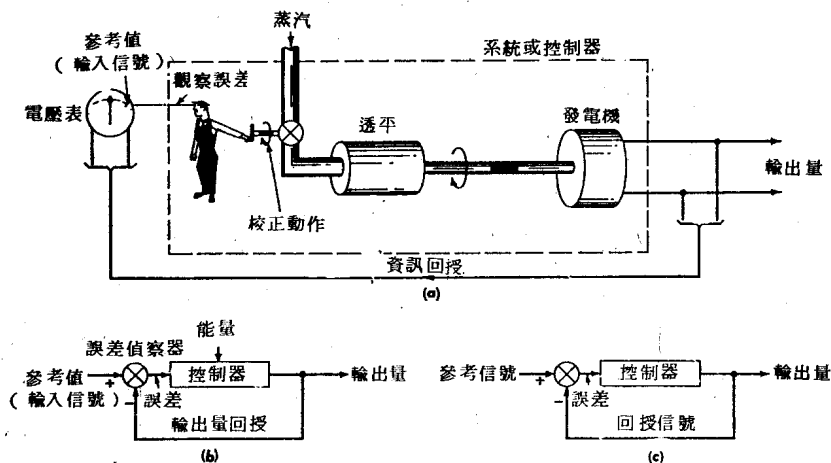


圖 1.2 (a)所示為手動電壓調節器之通俗說明。在(b)圖中已予簡化至基本方塊圖(c)係比較更為常見之方塊圖。

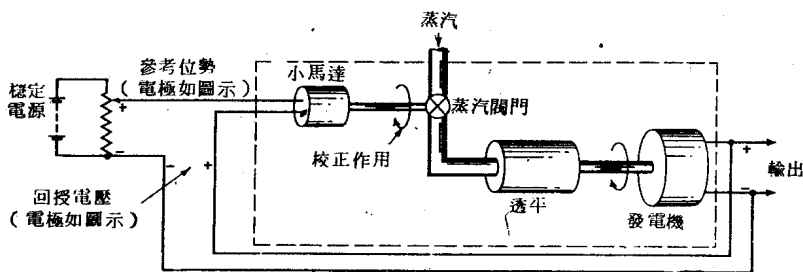


圖 1.3 具有自動誤差校正之簡單調節器圖。

detecting and correcting device) 所代替。圖 1.3 中所示，乃其中之一種可能方法。操作者乃被一穩定之電源（一電位器）及一小型馬達所代替。此時之輸入量信號則為一電壓，且必須與輸出量信號作直接之比較。其誤差已

非指針與標尺上之記號之差異，而是一電壓。此項電壓施於一小電氣馬達，此馬達則驅動蒸汽閥門，其方向，務使誤差趨向於零。此乃瓦特調節器（James Watt governor）之現代化改良型式之基本原理。

在實務上，系統常受到外在與內在之雙重擾動。典型之內在擾動，可為蒸汽壓力之突然變化，此種變化可導致透平速度之變動，以及變更其輸出電壓。至於外在擾動，則可能為大量電氣負荷之突然增加或減輕。此等擾動以及其他不規律之擾動均可能同時發生，吾人必須具有調節系統，不管環境如何變化均能產生相當合理之穩定輸出。若此系統係以開環系統操作者（亦即其輸出量未經監視而即採取校正作用者），則所有之混亂擾動，在輸出量電壓中將產生無節制之變化。在一閉環之負回授系統中，其輸出量經常予以監視，同時施以校正作用，使出量保持一定所需之標準。在此階段讀者必須體認，負回授固有甚多優點，但並非完美無缺，而能達到校正任何誤差之目的。

在若干應用上，需要應用正回授，在正回授中，其出量信號乃係與入量信號相加。一般言之，正回授具有與負回授相反之效應，在磁力放大器中有特殊之應用，又常應用於某種放大器中，其輸出阻抗需予減少者。關於此點，將在後文適當之處另予詳細討論。

1-3 傳遞函數 (Transfer Functions)

上面所討論之基本系統，包括一透平，一發電機，一蒸汽發生工廠，一電壓表及操縱者（或：一穩定電源，一電位表，及一馬達。）對於上述系統中之每種設施，我們如欲予以了解，勢非具有極為廣博之技術知識不可。如進一步欲將此等設施予以聯合而融會貫通，則對任何工程師或學生而言，乃是一項龐大而艱鉅之工作。為着簡化此項問題起見，工程師對工廠之甚多項目，均應用傳遞函數作為表達之工具。某一系統中之某一個部門之傳遞函數，可以給予我們一種指示，用來說明如果以不同型式之信號作為輸入，則該部門可作何種功用；舉例說，若施以一正弦信號，則可得到輸出量對輸入量大小之比例之指示（即「增益」，gain），及「相移」（phase-shift）之指示（落後或導前）。當工廠建造完成，正式運轉時，此項知識對於操作之校正，甚為重要。在設計階段中，整個工廠通常係在一電腦上作模擬試驗，看此工廠究竟如何操作，其設計即係以所涉及之各部門之傳遞函數為基礎。

工廠中若干部份零件之傳遞函數，由於某種特別之效應，諸如「飽和」（saturation）與「滯滯性」（hysteresis），甚難求得其正確數值。當一放

大器飽和時，縱然其輸入量增加，但輸出信號則並不變動（見圖 1.4），故當輸入信號值較大時，可導致一非直線之性能曲線。〔線型組件之輸出量，係與其輸入量成比例。由於大多數之組件，均具有某種程度之非直線性，故其直線性能之操作範圍，通常均予指定（如圖 1.4 情況中之 AB 即是）〕。若干機械組件，如齒輪等，其輸出量與輸入量性能，有如磁力線路中之 B-H 曲線所表示者，則亦可稱為能產生磁滯效應（圖 1.5）。後者之性能，乃是由於使用某種齒輪，而該齒輪之齒又未能經常接觸所致。

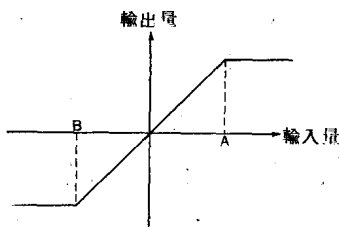


圖 1.4 典型之飽和性能圖

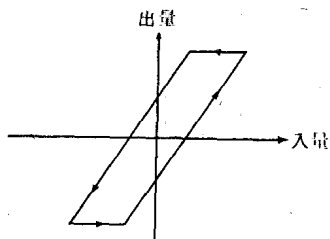


圖 1.5 磁滯性能圖

此等問題及其他非直線性問題，使得「線性」（linear）理論之應用被限定在某一種程度，超過此一程度，其理論之預測值與實際之度量值具有顯著之差異。凡是各種電氣設施，其所產生之輸出，具有脈動之型式、正方形波形之型式，或校正後之正弦波型式者，則均難以應用簡單之傳遞函數而予以處理。典型之實例則為水銀弧換流器（convertors），「閘流體」（thyristors），及磁力放大器。幸而，甚多此等非直線性問題，潛在地含有系統中之其他特性，使得我們往往可以應用比較簡單之技術來解決問題。其理論甚為深奧，但非屬本書之範圍，僅在此處予以提及之。至於有關該論題之其他資料，則可在書後所列之參考文獻中獲得之。

在控制系統中所用之設備，可自小型「變換器」（transducers）之千分之幾瓦特之額定率，乃至馬達之幾千馬力之額定率。但如系統中之輸出與輸入之比率相同，則某一小設施之性能，可能與大於其數千倍之設施之性能相類似。因之，傳遞函數之觀念，對控制系統工程而言，乃極重要。圖 1.6 及圖 1.7 所示，乃係傳遞函數型式完全相同之兩種設施及其特性曲線，其中之一係 R-C 線路，所通過之電流僅為若干毫安（milliamperes），而另一則為

發電機，可發生高達幾千瓦特之電力。

一設施之傳遞函數，可定義為輸出量與輸入量之比，以此為基準，只要傳遞函數為已知，即可預測其性能。此項步驟，可以導致系統之定量分析；在此兩種線路中，我們也可應用簡單之定性分析，以便達成類似的更有利之結果。

若施於 $R-C$ 線路之電壓自零增加，見圖 1.6 (b)，則電容器即開始荷電，首先甚為迅速，然後比較緩慢，直至達到其最後之值（在理論上則應在無窮長之時間後方可達到最後之值。）為止。〔圖 1.6 及圖 1.7，其 V_2 之值，在相當於 4.6 倍之「常數時間」之後，方始達到 99 % 之最後值。此處之「時間常數」，在圖 1.6 中為乘積 CR ，在圖 1.7 中則為比例 L/R 。在實務上，通常均應用一數字 5 為常數。〕在此時間，輸出電壓之升高率為零，電容器則具有全電荷。若施電壓於圖 1.7 之發電機之磁場，並使其突然自零增加，則其磁場電流，即由於感應效應而以指數升高之。在電樞所誘導之電動勢，則與磁力線成比例，從而與磁場電流成比例；故其輸出電壓升高之情形，與磁場電流之升高情形相類似，如圖 1.7 (c) 所示。

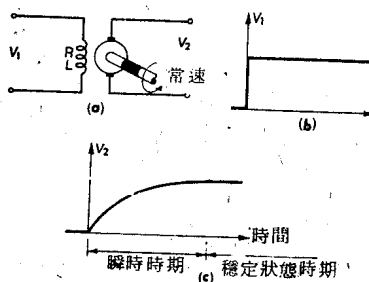


圖 1.7 當 (b) 圖中之輸入信號呈梯形之變化時，圖 (a) 中之直流發電機之反應情況，有如 (c) 圖中的曲線所示。在圖 1.6 及圖 1.7 中所示之線路網狀圖，各具有類似之傳遞函數。

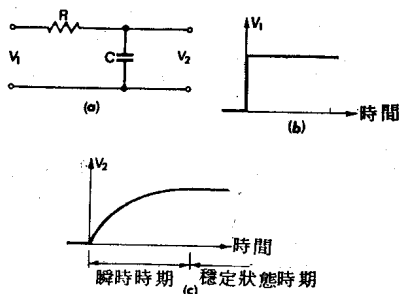


圖 1.6 (a) 係一 $R-C$ 線路，(b)、(c) 係其特性曲線，該圖等指出。當 (b) 圖中之輸入電壓呈梯形之變化時，其所顯示之反應情況有如 (c) 圖中的曲線所示。

由於上述兩種線路在相同型式之輸入情況下，均呈類似之反應狀態，故吾人有足夠之理由相信此兩線路具有相同或類似之傳遞函數。在上述例子中，其輸入函數呈階梯形之突然變化（就理論上而言，此種突然變化所需之時間為零），所以這一種突然由某一數值變化至另一個數值之輸入，可以稱之謂「階梯形輸入」（step input）。由於此兩線路對於某一種形式的輸入，