

基本官

40428

哈爾濱工業大學講義

自動調節原理與調節器

自動裝置教研室編譯



1955

507

5/6060

K.2

40428

哈爾濱工業大學

自動調節原理與調節器

自動裝置教研室編譯

1955

僅供參考請勿翻印

編譯者：哈爾濱工業大學自動裝置教研室

出版者：哈爾濱工業大學

印刷者：哈爾濱工業大學印刷廠

1955年11月出版

前 言

本講義是根據蘇聯專家阿·伊·圖畢誠 (А. И. Тупицын) 於1954年春季在我校給工企專業四年級同學講授「調節原理與調節器」課程時的課堂筆記整理編譯而成。初稿是由研究生黃孝誠、張岫雲、范崇惠、胡中楫、薛景瑄五同志一面聽課一面整理、分別編譯，並由教師鄭學堅同志進行校閱，最後再由進行這門課程教學實習的胡中楫、薛景瑄二同志結合備課改寫了一遍，並進行了校閱修正。

原稿沒有譯成俄文請專家審閱，錯誤難免，望讀者指出，以便修改。

哈爾濱工業大學自動裝置教研室

1955年10月

目 錄

緒 言	1
第一章 自動調節系統的特性	3
1. 自動調節系統的結構、作用及其分類	3
2. 有差調節系統	4
3. 無差調節系統	18
4. 應用炭阻調節器的線路	25
5. 隨動系統的基本線路	29
第二章 自動調節系統的穩定性	36
1. 過渡過程微分方程式的擬立	36
2. 微量偏移法	45
3. 關於穩定的概念	48
4. 特徵方程式的根與穩定性的關係	51
5. 饒斯—赫維茨鑑定法	55
6. 米海伊洛夫鑑定法	57
第三章 算子運算法	62
1. 拉普拉斯變換及其特性	62
2. 在解常係數線性微分方程中「拉普拉斯變換」的應用	65
3. 如何根據「變換函數」 $\bar{\varphi}(P)$ 倒求其「原始函數」	67
4. 「拉氏變換」用於研究電路的過渡過程	70
5. 傳遞函數	76
6. 自動調節系統的結構圖	78
7. 求放大機調速系統的結構圖和傳遞函數	81
第四章 頻率法	92
1. 頻率法的概念	92
2. 用相幅頻率特性鑑定穩定	95
3. 頻率特性和過渡過程的關係	100

4.	按實頻率特性求過渡過程的近似法.....	104
5.	按虛頻率特性求過渡過程的近似法.....	108
第五章	自動調節系統動特性的品質評價.....	114
1.	基本概念.....	114
2.	過渡過程的品質評價.....	116
3.	按幅頻率特性進行品質評價.....	117
4.	按照實頻率特性來進行品質評價.....	119
5.	按 $F_c(\omega)$ 進行品質評價.....	122
6.	維氏曲線.....	124
7.	D-域劃分.....	125
8.	由 D 域劃分作實，虛頻率特性.....	127
第六章	用積分法選擇自動調節系統的參數.....	129
1.	簡單積分法.....	129
2.	平方積分法.....	131
3.	複合積分法.....	134
第七章	自動調節系統的鎮定.....	141

緒 言

1. 自動化的意義

自動化的發展可分為兩個階段，即機械自動和電氣自動。首先發展的是機械自動，但應用機械自動時生產過程的控制、檢查和調節必須有人參加，並且不可能進行遠距操縱。以後發展的是電氣自動，它不具備上述缺點，並為加工過程之綜合自動提供了可能性。近十數年來電氣自動得到了廣泛的發展。

自動化的優點在於：

(1) 減輕體力勞動：過去許多繁重的體力操作都用機械來代替了，人們只要操縱按鈕，即可控制生產。

(2) 提高生產率：自動化可以提高過去為人類體力所限制的生產速度，而所需要的生產工人可以大大減少，生產率相應地可提高數十倍甚至數百倍以上。

(3) 促進體力勞動和腦力勞動差別的消滅：自動化對工人技術知識的要求提高了。自動化工廠值班工人的技術水平已接近於工程師、技術員的水平。工人不單應具備實際加工知識，而且還應有進一步的理論知識。生產要求促使工人去提高技術水平，同時也只在不是十分繁重的體力勞動的工作條件下，工人才有充沛的精力從事業餘進修。其結果就是工人和技術人員之間差別的消滅，就是體力勞動和腦力勞動之間差別的消滅。

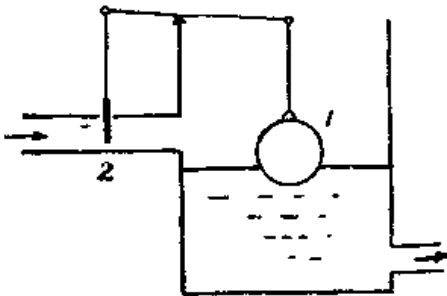


圖 1

水平，浮筒上升，活門閉塞。這種原理現在廣泛地被應用於調節器中。

2. 調節原理發展簡史

1765 年俄國機械師波爾茹諾夫 (И.И. Ползунов) 發明第一架保持鍋爐水位不變的調節器 (圖 1)，圖中 1 為浮筒，2 為活門。當水位下降時浮筒下沉，通過槓桿作用，活門打開，水位恢復至原來

1784 年瓦特發明蒸汽機離心式調速器，用以控制汽門。

1869 年齊可列夫 (В. Н. Чиколев) 發明電力調節器，可維持電弧強度不變。

1877 年達維多夫 (А. П. Довыдов) 發明第一套隨動系統 (Следящая система)。

自動調節原理的奠基者是威士涅格拉斯基 (И. А. Вышнеградский) 教授。1876 年威士涅格拉斯基發表以直接作用調節器為研究內容的論文，第一次在理論上提出了穩定問題，給以後的自動調節穩定原理奠定了基礎。

1892 年略普諾夫院士 (А. М. Ляпунов) 在著作中提出了非線性系統的穩定問題，提出了關於穩定的嚴格定義，打下了研究非線性系統問題的基礎。

在 1908--1909 年茹可夫斯基 (Н. Е. Жуковский) 第一個開出了機械行程調節的理論課程。

1938 年米哈伊洛夫 (А. В. Михайлов) 提出了穩定鑑定法，指出了頻率法可用來討論過渡過程的衰減快慢，這個方法很快地就應用了。

此後沙羅托發尼可夫 (В. В. Солодовников) 密耶洛夫 (М. В. Мееров) 與崔普金 (Я. З. Цыпкин) 對和線路系統調節過程質量有關的頻率法作了相當研究。

安達龍諾夫 (А. А. Андронов) 及其學生克雷洛夫 (Н. М. Крылов)、魯李耶 (А. И. Лурье)、安席耳門 (М. А. Айзerman) 等對現代調節原理非線性問題的解法作了卓越的貢獻。

調節原理是一門較年輕的科學，在電氣化自動化日益發展的同時必將出現更多的理論來滿足生產過程所提出的要求。

第一章 自動調節系統的特性

1. 自動調節系統的結構、作用及其分類

試以直流電動機自動調速（圖 2）為例，來說明調節器之基本工作原理。

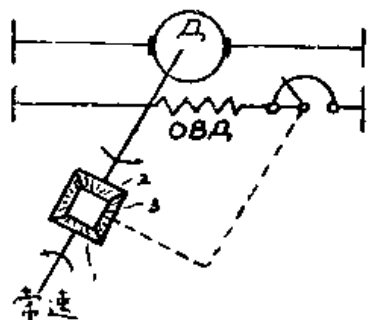


圖 2

圖中直流電動機軸上連接一差動齒輪，傘輪 2 與電動機軸相連，傘輪 1 與某機構相連（如同步機），其速度為恆定，作為比較速度。

若輪 1 與輪 2 之轉速相同，則輪 3 的軸位置不變。若電動機轉速有變化，輪 2 與輪 1 之轉速差使輪 3 的軸偏轉，輪 3 的軸通過傳動機構和磁激

迴路中之電阻動觸頭相連，因而改變磁激以維持電動機轉速不變。

一切機械的工作狀態有二類：

(1) 穩定狀態：即當一切量均為定值時之情況。

(2) 過渡狀態：由於存在着轉動慣量、電感等，當外來干擾促使某些量（如電壓、電阻等）發生變化時，從一個穩定狀態變到另一穩定狀態間之工作狀態為過渡狀態。

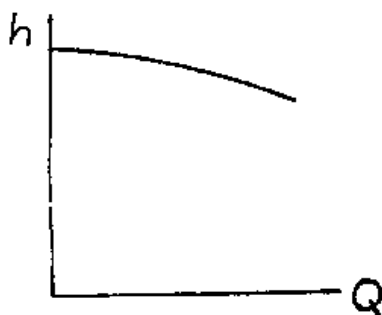


圖 3

調節系統依其性能可分屬於兩種作用原理的系統：

(1) 有差調節 (Статическое регулирование)：具有傾斜的調節特性（圖 3），被調節量在調節過程中有一定變化。上述之水位調節器即屬此類。h 是水位的高度，Q 是流量。因為要使水門在流量大時打開，就要求浮筒下沉，要使浮筒下沉，就要求水位低於原始水位；所以在一定流量時就有一定的水位差存在，水門才能打開以調節水位的下

降。

(2) 無差調節 (Астатическое регулирование): 調節特性具有絕對硬度 (圖 4), 調節量保持絕對不變。圖 2 直流電機的調速即屬此類。

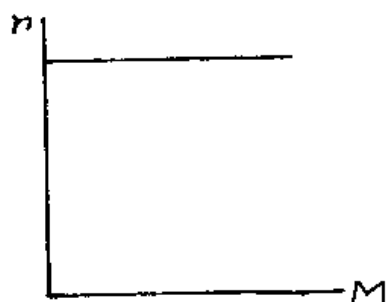


圖 4

以上所討論的是穩定狀態。現在再看一下過渡過程。可以調速為例，當由於某種原因 (如負載增加)，速度降低了，調節器動作，減少磁激，速度恢復到原來值 n_0 時，由於電感關係激磁仍在減少，故 n 增加過頭，接着調節器又起減速作用，如此反覆即產生振盪。

若過渡過程是按曲線 1 (圖 5) 進行的，系統工作是穩定的，但如

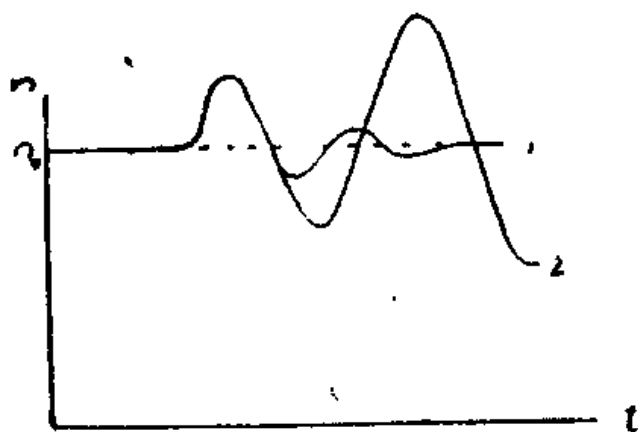


圖 5

按曲線 2 進行，系統工作不穩定，必須附加穩定裝置以達到穩定工作的目的。

2. 有差調節系統 (Статические системы регулирования)

圖 6 是一個交磁電力放大機的調速線路。交磁電力放大機發出電壓，使電動機 D 轉動，放大機有兩個磁激線圈 I 和 II，它們的磁激方向

相反。測速發電機 π 把轉速轉換為電壓。

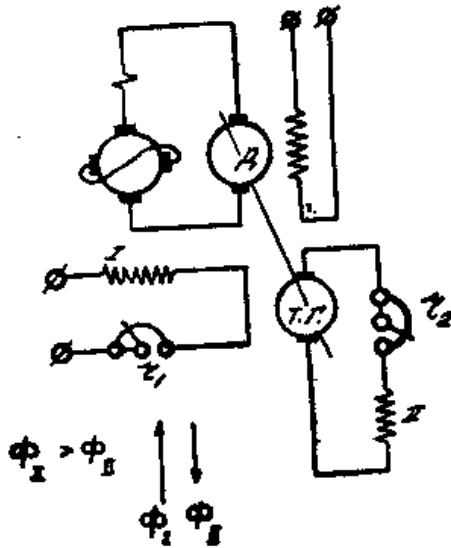


圖 6

如果負載增加，電動機 π 轉速減低，使測速發電機 π 電壓也減低，因而線圈 II 的磁激減少，提高了放大機的電壓，這樣可以減少電動機轉速的降落。

這一點可以在下面從靜特性很清楚地看出。為了研究方便起見，我們把整個系統分成調節對象和調節器兩部份來分別處理。

首先分析調節對象的特性 (Характеристика Объекта регулирования)。在這兒調節的對象是電動機的轉速 n ，在一定不

變的負載轉矩 M 時，轉速 n 是由放大機的激磁 ΣAW_y 來決定的。因此我們來求出在不同轉矩 M 時的調節對象特性曲線 $n = f_1(\Sigma AW_y)$ 。

這一套曲線可以由實驗求得：保持轉矩不變，給予放大機以不同激磁 ΣAW_y 就得到不同轉速 n ；改變轉矩 M 就得到調節對象的特性曲線族。

現在用分析圖解法來求調節對象的特性曲線。我們可以得到發電機的激磁特性曲線 $E_y = f(\Sigma AW_y)$ ，此外，可由下式找到電動機轉速和發電機電壓的關係：

$$n = \frac{E_y}{K_E \Phi_{ДВ}} - \frac{RM}{K_E K_M \Phi_{ДВ}^2}$$

由式子可以看出，當 $M=0$ 時，轉速 n 與發電機電壓 E_y 成正比，因此特性曲線 $n = f_1(\Sigma AW_y)$ 也具有飽和曲線的形式。在轉矩 M 不等於零而有不同數值 M_1, M_2, M_3 時，特性曲線形式不變，僅比 $M=0$ 時的特性曲線低一段距離，這段距離 d 可由下式表示：

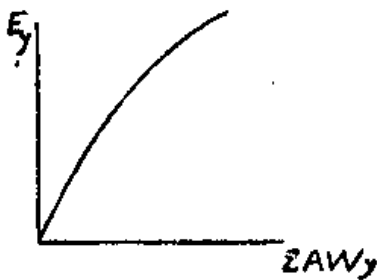


圖 7 發電機的激磁特性曲線 $E_y = f(\Sigma AW_y)$

當 $M = M_1$ 時, $d_1 = \frac{RM_1}{K_E K_M \Phi_{DB}^2}$

當 $M = M_2$ 時, $d_2 = \frac{RM_2}{K_E K_M \Phi_{DB}^2}$

當 $M = M_3$ 時, $d_3 = \frac{RM_3}{K_E K_M \Phi_{DB}^2}$

由於 M_1, M_2, M_3 都是定值並且 $M_1 < M_2 < M_3$, 因此 d_1, d_2, d_3 也是定值並且 $d_1 < d_2 < d_3$ 。

所以說: 調節對象的特性曲線族是

平行地向下移動而得出的。

其次, 我們分析調節器的特性曲線 $\Sigma AW_y = f_2(n)$ 。這兒調節器環節是測速發電機與激磁線圈 II 的迴路, 它能反映速度的變化並隨而改變發電機的電壓。現在求發電機激磁 ΣAW_y 和轉速 n 的關係, 已知:

$$\Sigma AW_y = AW_I - AW_{II}$$

其中 AW_I 激磁固定, 不隨測速發電機的電壓變動, 僅決定於 r_I 的數值。另外第二部份 AW_{II} 可由下式表示:

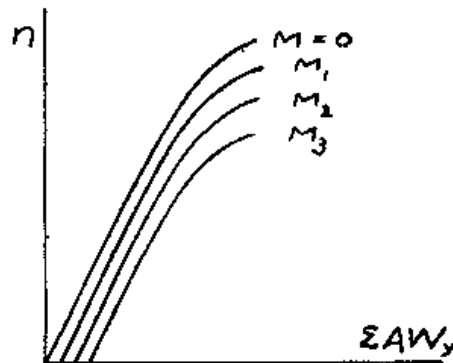


圖 8

$$AW_{II} = W_2 \frac{E_T}{r_{II}} \dots \dots \dots (1-1)$$

其中 E_T 是測速發電機的電動勢, 可表示如:

$$E_T = Kn \dots \dots \dots (1-2)$$

r_{II} 是線路 II 的全部電阻, 包括有測速發電機的電樞電阻、激磁線圈 II 的電阻和附加電阻 r_2 。

由公式 (1-1) 及 (1-2) 得:

$$\Sigma AW_y = AW_1 - \frac{W_2}{r_{II}} K_{II} \dots \dots \dots (1-3)$$

這是直線方程式（如圖 9 所示）。

來分析一下變動附加電阻 r_1 及 r_2 的影響。變動 r_1 之值就改變 AW_1 之值，於是特性曲線平行移動（虛線所示）。而變動 r_2 之值就改變特性曲線的斜率而另得一組曲線族（如實線所示）。

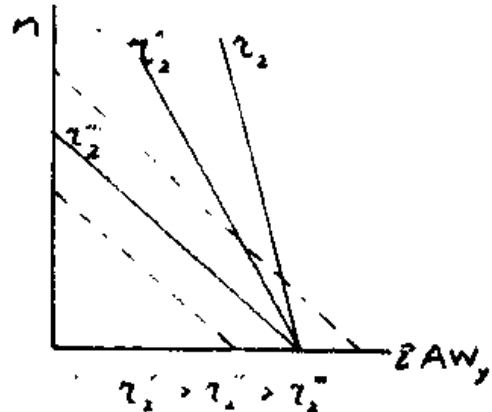


圖 9

同樣地，調節器特性曲線也可由實驗求得。在圖 6 中若電動機由其他電源供電，並改變其轉速，就能求得 AW_{II} 的變化，而 AW_I 是定值，因此即可得出特性曲線族 $\Sigma AW_y = f_2(n)$ 。

有了這兩套曲線族，我們就可以用圖解法從他們的交點來得到電動機的機械特性（如圖 10 所示）。

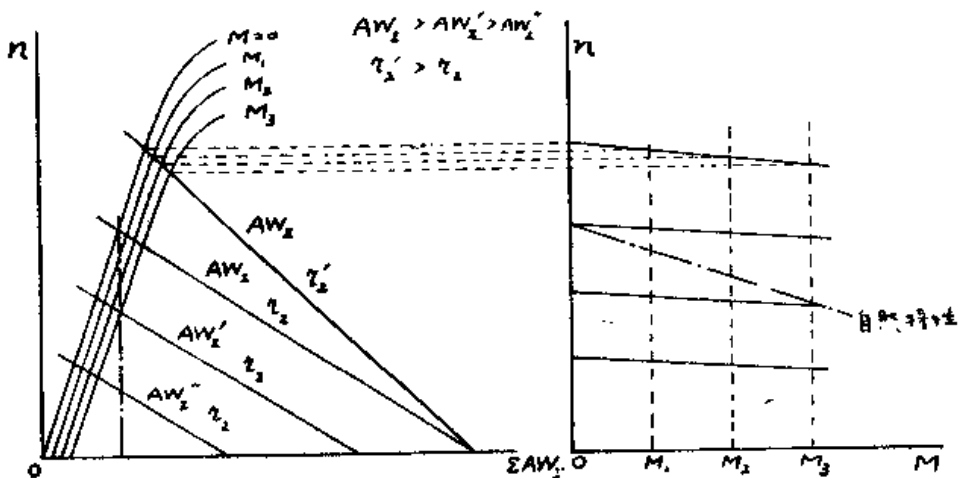


圖 10

再來研究一下各種電阻參數對電動機特性的影響。從上面知道要調速可以改變 r_1 或 r_2 的數值，但從圖 9 及 10 可以看出，增加 r_2 就

使 r_{II} 增大，因而增加了調節特性曲線的斜率，同樣地減小了機械特性的硬度；所以一般調節都是先使 $r_2=0$ 以取得最大硬度，此時調節器特性曲線是平行轉動的，因此機械特性曲線也是平行地上下移動（圖10）但由於線圈 I 所允許流過電流有限，電阻 r_1 不能減至零值，當還須增大調速範圍時，就須加入電阻 r_2 以得更高轉速，而機械特性硬度也就差了。如果把線路 II 拉斷，此時 $r_{II}=\infty$ ，調節器已不起作用，電動機的機械特性曲線已是自然特性，當然特性硬度就減低很多（如圖10的點線所示）。把它們加以比較就可以看出調節器的作用。

調速的準確度可表示如下式：

$$\delta = \frac{n_0 - n_H}{\frac{n_H + n_0}{2}}$$

此處被稱為系統特性的相對靜差率（Относительный статизм），可參閱圖 11。

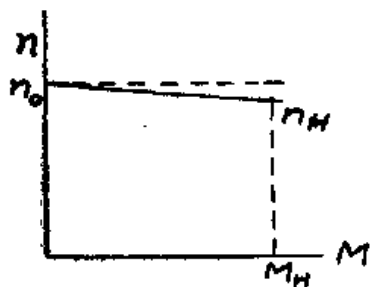


圖 11 系統特性的準確度

當主迴路的電阻 R 增加時，電動機的機械特性硬度也就減低，因為

$$d = \frac{RM}{K_E K_M \Phi^2_{\text{ДВ}}}$$

d 隨着 R 的增加而增加。

再研究一下怎樣選擇參數以便獲得最硬的機械特性。從圖 10 可以看出，機械特性的硬度決定於調節器特性曲線 $\Sigma AW_y = f_2(n)$ 的斜率。已知：

$$\Sigma AW_y = AW_1 - \frac{W_2}{r_T + r_{062}} K n$$

其中 r_T 是測速發電機的電樞電阻， r_{062} 是激磁線圈 II 的電阻，此時外加電阻 $r_2=0$ 。可以看出，當 $\frac{W_2}{r_T + r_{062}} K$ 之值最大時機械特性之硬度也將最大。

這可由兩方面來努力：第一，可想法儘量加大 K 的數值。由於測

速發電機飽和程度已固定，要靠增加測速發電機激磁的方法來加大K的值是做不到的；唯一辦法是加大電動機與測速發電機間的傳動比，把測速發電機的轉速提得愈高，則K的值就愈大。這樣辦法在機床中被採用。

第二，可設法正確選擇參數 W_2 ， r_{062} 來取得 $\frac{W_2}{r_T + r_{062}}$ 的最大值。放大機的容量既已選定後，磁場線圈所能佔據的體積也就一定。此時：

$$V = ls = \text{const}$$

其中 l 是激磁線圈導線長度。

S 是導線截面積。

如加大 W_2 ，即加大長度 l ，就須縮小截面 S 。可以寫做

$$l = W_2; \quad S = \frac{l}{W_2}$$

結果 $r_{062} = \frac{l}{S}$ 就增加得很快，因為

$$r_{062} = W_2$$

由此看出，增加 W_2 不一定能得到最好的效果，反而可能起相反的作用。來找一下最恰當的參數，由上已知：

$$r_{062} = \alpha (W_2)^2, \quad \alpha \text{ 是線圈常數。}$$

可寫做：

$$W_2 = \beta \sqrt{r_{062}}$$

此時：

$$\frac{W_2}{r_T + r_{062}} = \frac{\beta \sqrt{r_{062}}}{r_T + r_{062}}$$

要使這個係數最大，可把它對 r_{062} 微分並求得最大值的條件：

$$\frac{d \left(\frac{\beta \sqrt{r_{062}}}{r_T + r_{062}} \right)}{d r_{062}} = 0$$

從上式解得：

$$\Gamma_{062} = \Gamma_T, \text{ 此時 } \frac{W_2}{\Gamma_T + \Gamma_{062}} \text{ 之值最大, 也即機械特性硬度}$$

最大。這個概念相當於電路中輸出功率最大時的必要條件：電路中內電阻等於外電阻。

現在看下一個線路，（圖 12），其中測量元件迴路是用電路作比較的。

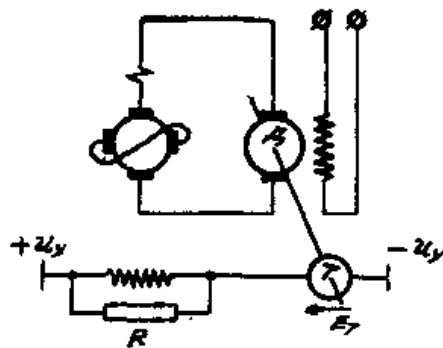


圖 12

在此線路中放大機只有一個激磁線圈，激磁電流係由控制電壓 u_y 與測速發電機電動勢 E_T 之差所獲得。當負載增加時，轉速 n 及電動勢 E_T 都減低，於是激磁電流增加，相應地提高了放大機電壓而減少了轉速降落。

同樣可以寫出調節對象的特性曲線（1—4）和調節器的特性曲線（1—5）並用圖畫出（圖 13）。

$$n = \frac{E_y}{K_E \Phi_{dB}} - \frac{RM}{K_E K_M \Phi_{dB}} \dots\dots\dots (1-4)$$

$$AW_y = W_y \frac{U_y - Kn}{\Gamma_y} \dots\dots\dots (1-5)$$

從圖 13 可以看出，在不同的控制電壓 U_y 時有不同的調節器特性曲線，它們是彼此平行的；變動 U_y 就得到不同速度，機械特性的斜率

也無改變，並且調速很平滑。欲使電動機反轉，只須改變 U_y 的特性。因此並不因速度的提高而改變了機械特性的斜率，因此避免了圖 6 線路的缺點。

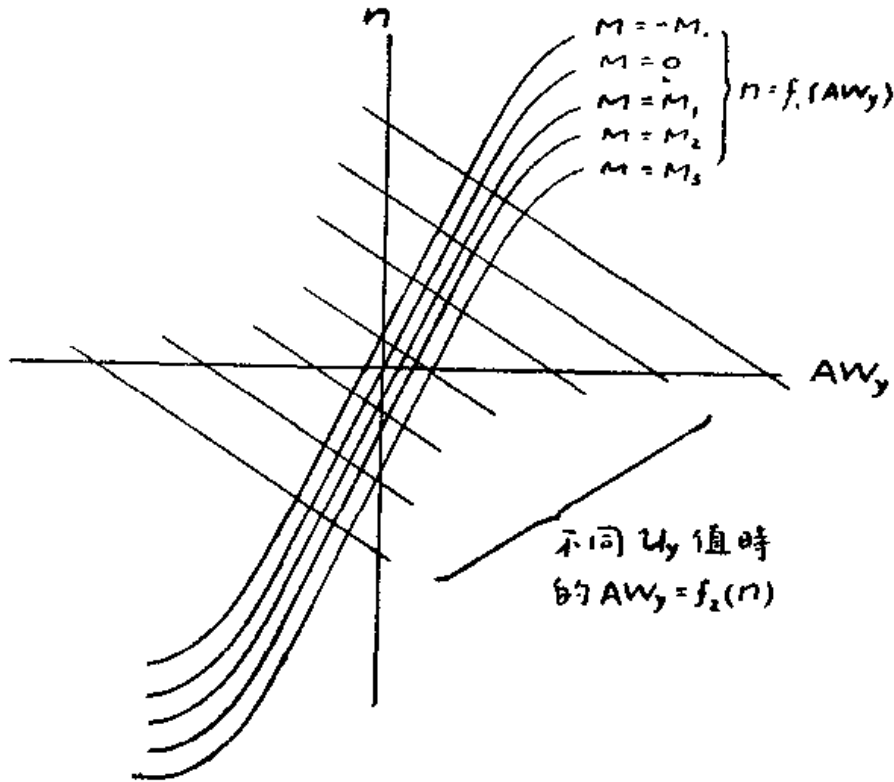


圖 13

在這線路中起動時須特別注意，因為此時電機尚未轉動， $E_r = 0$ ，如果直接把控制電壓全部加上，幾十倍的電流將把放大機激磁線圈燒壞。為了避免這點，可以採用下列方法：

- (1) 起動時慢慢加大控制電壓 U_y ；
- (2) 在激磁線圈上並列一個非線性電阻 R ，它的高電壓時電阻很小，在低壓時電阻很大，差不多相當於斷路，有些相似於避雷器。這樣，在起動時大電流就主要經過電阻 R ，激磁線圈不受損傷，測速發電機電樞線圈可以忍受這個大電流，並無妨礙。