

哈尔滨工业大学讲义

# 自动调节原理

上册

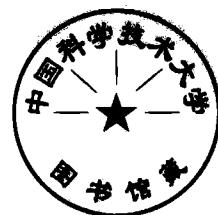
1956

# 自動調節原理

上册

李友善 譯

郭福东 校



1956

---

---

譯者: 李友善  
校者: 郭福东  
出版者: 哈爾濱工業大學  
印刷者: 哈爾濱工業大學印刷廠

---

1956年7月出版 工本費1元7角

## 前 言

苏联專家石拉姆科 (Л. С. Шрамко) 于 1955 年秋季為我校「自動與遠距操作及電測儀器和裝置」專業四年級同學講授「自動調節原理」課程，本講義是根據聽課筆記整理編譯而成。初稿由助教李友善同志邊聽課邊整理，俄文原稿經石拉姆科專家審閱同意後，再分別由李友善、郭福東二同志譯成中文。

本講義分上、下兩冊出版。上冊主要包括自動調節理論的一般概念、穩定論、自動調節系統之質量分析、自動調節系統之綜合等，其特點乃是以頻率法為講授的重點。下冊主要包括自動調節的動態準確度分析、非線性理論等。

目前我國尚缺乏較合適的「自動調節原理」課的教科書，本講義可作為「自動與遠距操作及電測儀器和裝置」專業及儀器製造系其他專業同學學習「自動調節原理」課的參考資料，上冊也可供「工業企業電氣化」、「電器製造」等專業同學學習「調節原理」時參考。

本講義俄文原稿雖經石拉姆科專家審閱，但限于譯者的水平，譯成中文後錯誤或尚難免，望讀者指正，以便修改。

哈爾濱工業大學自動裝置教研室

1956年2月

## 原 序

現代技術之發展和實現各種生產過程自動化之必要性有着緊密的聯系。自動化之最高形式則為自動控制，自動控制則是由檢量、信號、記錄、遠距操作、計算、調節等儀器及裝置所組成之自動控制系統來實現。

自動調節原理主要任務之一是擬定設計方法與調節系統之研究方法。這些調節系統在自動控制的整個過程中，擔負着極其重要的使命。

因此，自動調節原理在某種程度上成為培養各種專業工程師的一門必要課程。

遺憾的是，在今天在調節原理方面，還沒有一本有系統的教科書；雖然針對調節原理中各問題已有許多著作，論文集及專論，但都不能滿足該門課程教科書的要求。

「自動調節原理」這門課是為哈爾濱工業大學「自動與遠距操作及電測儀器和裝置」專業的学生、研究生及教師講的。

講稿系由助教李友善整理後編寫而成，而它的出版工作，則由自動裝置教研室負責組織。

希望在研究現代自動調節的基本理論時，本講稿能成為有益的教学參考資料。

列·謝·石拉姆科

一九五五年十二月十五日

# 目 錄

## 原 序

### 第一章 緒 論

1. 自动調節..... 1
2. 自动調節系統..... 4
3. 自动調節系統之結構圖..... 7
4. 設計自动調節系統之任務..... 8
5. 自动調節原理發展簡史..... 8
6. 本課之任務..... 9

### 第二章 調節原理之基本概念

1. 动态系統..... 10
2. 線性化之方法..... 11
3. 線性系統微分方程式之共同形式..... 14
4. 系統之强迫穩态振盪..... 15
5. 求頻率特性之實驗法..... 19
6. 对数頻率特性..... 20

### 第三章 傳遞函數

1. 福里哀變換..... 22
2. 拉普拉斯變換..... 26
3. 复變函數零点及極点之概念..... 28
4. 單值脉冲函數 ( $\delta$ —函數) ..... 29
5. 拉氏變換之某些性質..... 29
6. 拉氏變換对共同形式微分方程之应用..... 30
7. 有理穩定动态系統之傳遞函數的基本性質..... 31
8. 动态系統之傳遞函數与頻率特性..... 31
9. 自动調節系統之傳遞函數..... 35
10. 閉路及开路状态下之自动調節系統..... 37
11. 求系統傳遞函數之例題..... 38
12. 开路系統幅相頻率特性之繪制..... 40

### 第四章 調節系統之典型環節

1. 非周期環節..... 45
2. 極限(漸近)对数頻率特性之繪制..... 46
3. 一階微分環節..... 47
4. 積分環節..... 50
5. 振盪環節..... 53
6. 二階微分環節..... 56

7. 單相角环節及多相角环節.....	57
8. 非穩定环節.....	57
9. 多环路系統之傳遞函数.....	57

## 第五章 穩定論

1. 自动調節系統穩定之分析.....	60
2. 代数判据 (勞特——古尔維茨判据) .....	62
3. 頻率穩定判据.....	64
4. 有差与无差調節系統.....	72
5. 有差及无差系統之幅相特性.....	76
6. 幅相判据应用于开路状态时不穩定之系統.....	78
7. 按对数頻率特性分析系統之穩定.....	79
8. 穩定之貯备.....	82
9. 穩定区之划分.....	84
10. 單参数面之 $\Pi$ 域法 .....	85
11. 双参数面之 $\Pi$ 域法 .....	88
12. 滯后自动調節系統之分析.....	90
13. 用幅相判据分析系統穩定之步驟.....	93

## 第六章 自動調節系統質量之分析 (上)

1. 对自动調節系統之基本要求.....	94
2. 动态系統之質量指标.....	94
3. 頻率特性与过渡函数間之关系.....	95
4. 当函数 $x(s)$ 在右半复面及在虛軸均无奇点 (極点) 时之情况.....	97
5. 当函数 $x(s)$ 在座标原点有一極点时之情况.....	98
6. 在單值函数作用下过渡函数与系統頻率特性間之关系.....	99
7. 閉路与开路系統頻率特性間之关系.....	99
8. 閉路系統实頻特性 $P(\omega)$ 之作圖法.....	100
9. 按开路系統之对数頻率特性做閉路系統之实頻特性 $P(\omega)$ .....	101
10. 过渡过程之圖解法.....	103
11. 梯形頻率特性.....	104
12. 單值梯形特性.....	105
13. 變比定理.....	107
14. 用圖解法求过渡过程之步驟.....	107
15. 質量之間接分析法.....	107
16. 調節系統之分析步驟.....	108
17. 多环路系統对数頻率特性之作圖法.....	109

<b>第七章</b>	<b>自動調節系統質量之分析 (下)</b>	
1.	自動調節系統之質量与傳遞函数諸零点及極点之分佈間的关系	112
2.	決定傳遞函数極点之最大幅值 $M$ 及最小幅值 $m$ 之方法	133
3.	穩定度 $\eta$ 之決定	114
4.	按威氏曲線求 $\eta$	116
5.	$\xi$ 值之決定 (求距虛軸最远的特徵方程之根)	116
6.	$\mu = \operatorname{tg} \psi$ 之決定	117
7.	对傳遞函数之零点及極点的分佈与作用函数頻譜之零点的分佈关系間之一些推荐	120
8.	質量之積分評價法	121
<b>第八章</b>	<b>脈冲過度函数</b>	
1.	脉冲过渡函数 (重量函数)	123
2.	在任一作用函数之作用下过渡过程与脉冲过渡函数間的关系	124
3.	誤差系数	126
4.	誤差系数、傳遞函数之系数、系統之時間常数与交接頻率間的关系	128
<b>第九章</b>	<b>自動調節系統校正之方法</b>	
1.	系統参数改變法	130
2.	加串联校正裝置法	131
3.	加並联校正裝置法	135
4.	交流系統之並联校正裝置	136
5.	風压及液压自動調節系統之校正裝置	138
<b>第十章</b>	<b>校正裝置之綜合</b>	
1.	理想过渡过程	142
2.	校正裝置之綜合法	143
3.	希望对数幅頻特性之作圖法	146
4.	求希望对数幅頻特性之例	150
	譯名对照表	154



# 第一章 緒論

「自動調節原理」是我們專業的基礎課。該課將分兩學期來講授。

由於暫時還沒有系統的自動調節原理教科書，因此，學習的主要參考資料便是我們的課堂筆記。當然，在學習過程中，還必須參閱下列有關自動調節原理之參考書：

- 1) B. B. 索洛多夫尼可夫主編的「自動調節基礎」；
- 2) П. E. 保保夫著「自動調節系統的動態學」；
- 3) B. B. 索洛多夫尼可夫著「自動控制系統的統計動態學引論」；
- 4) P. 非利蒲斯等著「隨動系統原理」。

「自動調節原理」一課所以成為我們專業之基礎課，是因為我們不僅應該研究現今已有之自動調節系統，同時還應學會如何擬定新的系統；因此必須在自動調節方面具有一定的理論基礎。

## 1. 自動調節

自動調節是在無人參與的情況下，按封閉環路對某種過程的自動控制。試看控制電動機轉速的兩個例。

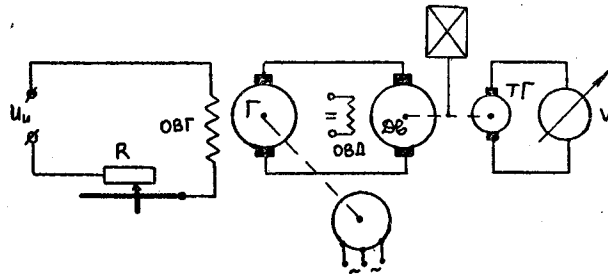


圖 1

電動機 Дв 由發電機 Г 供電。電動機 Дв 軸上帶有負載。測速發電機 ТГ 及電壓表 V 系用來測量電動機的轉速。在這種情況下我們所需要的是調節電動機的轉速，譬如，使電動機的轉速不因負載的改變而變化。

該線路為手動調節，系利用改變發電機激磁電路 OBГ 中的電阻器 R 的方法來達到調節目的。所以這種調節不是自動調節。調節環路在這種情況下不是封閉的而是斷開的，如圖 2 所示。

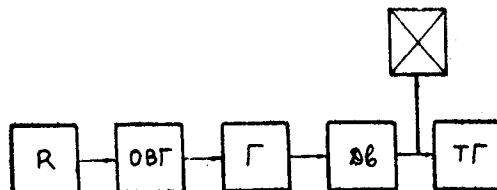


圖 2

电动机轉速之調節亦可自动，即不須人参与。这时的原理圖如圖 3 所示。

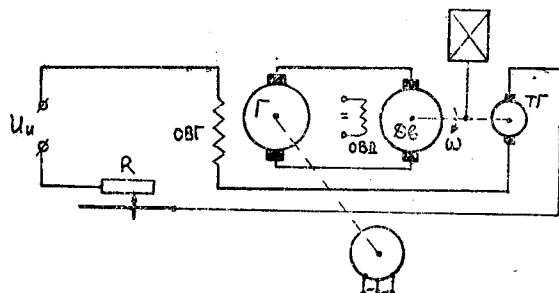


圖 3

該線路亦系由圖 1 中所用之三元件組成，但与其相異者為測速發電機 TF 此時串接于發電機之激磁電路 OBΓ 中，同時測速發電機 TF 端電壓  $U_{Tr}$  之極性應與激磁電源  $U_u$  之極性相反，並有下面關係式：

$$U_u > U_{Tr}$$

這種線路的目的，為保持電動機的轉速  $\omega$  為恒定。現詳細地看其調節過程。當電動機轉速  $\omega$  降低時，電壓差  $U_u - U_{Tr}$  將因之而增大，由此，發電機的激磁增加，於是發電機的端電壓  $U_r$  上升，從而使電動機的轉速  $\omega$  重新升高。

調節過程可用圖 5 所示之簡圖表之。

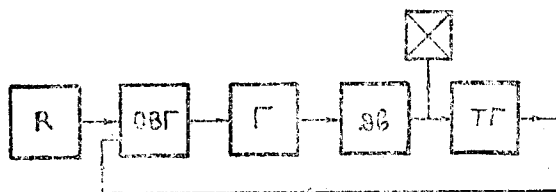


圖 4

圖 4 指出，在此種情況下，調節過程是按封閉環路實現的。這種調節即為自動調節。

利用自動調節可使調節過程較手動調節時更為準確。在某些情況下，一般說來，手動調節甚至是不可能。

自動調節在今天已被廣泛地應用於下列各部門：在冶煉部門中，用以調節高爐及平爐之溫度、壓力等，用以調節氣體的成份等；在金屬加工部門中，則用以調節進力量（如在做型銑床上）等。此外，還應用於對工作者有害之生產中，如化學及原子生產；應用以保持周溫及空氣之溫度為恒值等等。同樣，如不用自動調節，很難想象能製出許多無線電訊裝置，其中包括雷達裝置。

在現代的發動機、汽輪發電機等中所產生之各種過程，如不為自動調節則亦為不可想象之事。在航空領域中，高速飛機是在具備自動調節條件下進行飛行的。飛機在霧中降落，也必須借助於自動調節。總之，可以肯定的說，自動調節在今天已被應用於各種不同的技術領域中。

各种科学研究所、設計机关、車間試驗室、及工厂均在進行研究、計算、設計及制造各种可能的自动調節系統。在这个事業中需要大量的專家，而你們在將來便將積極地參加到上述各部門的工作中去。

\* \* \* \*

大約在二百年前（1765年），波勒足諾夫第一个实现了鍋爐水位的自动調節。該自动調節如圖 5 所示。

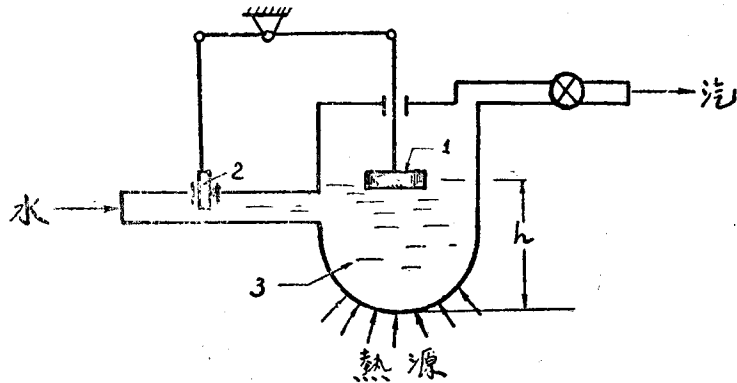


圖 5

系統由浮筒 1，調節閥 2 及調節对象 3 組成。設欲自鍋爐中取得更多的蒸汽，即当負載增加时，則鍋爐中之水位下落，浮筒 1 隨之而下降，此时由于槓桿機構之作用，調節閥 2 被提起，由是進入鍋爐的水量增加，从而使水位又复上昇。

在波勒足諾夫之后十九年，瓦特發明了蒸汽机的离心調速圖，其原理示于圖 6。

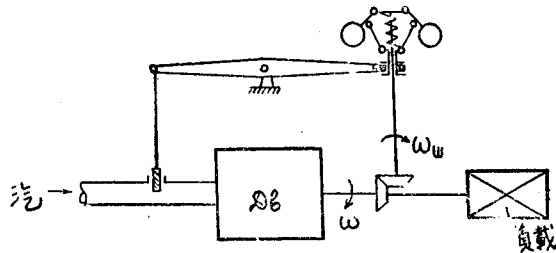


圖 6

瓦特的离心調速器之动作原理与波勒足諾夫水位調節器的原理相同。在瓦特的离心調速器中，測量元件为測速器。設若蒸汽机的速度  $\omega$  增高（如当負載減少时），則調速器軸的速度  $\omega_m$  亦随之而增高，于是飛錘機構向上移动，調節閥由此將开得小些，即通汽截面減小，其結果使蒸汽机的速度  $\omega$  又复下降。

在瓦特后的一百年，已將电能用于自动調節中。

二十世紀初叶，自动調節主要用于機構及机器之調節。在二次世界大战期間及到目前为止，自动調節已得到了飛躍的發展，且已普及到各种不同的技術領域中。

## 2. 自動調節系統

凡具有能源的封閉的動系統，而其能源系在測量信號差的基礎上進行控制的，稱為自動調節系統。

自動調節系統可分為三類：

- 1) 自動鎮定系統；
- 2) 做型調節系統（或稱定規調節系統）；
- 3) 隨動系統。

茲對上述三種系統分別舉例如下：

### 1) 自動鎮定系統示例。

前述之波勒足諾夫及瓦特系統，均屬自動鎮定系統。在該種情況下，自動鎮定系統系用以保持調節量為恒定，如鍋爐中之水位及汽輪機之轉速是也。

### 2) 做型調節系統示例。

圖7所示即為屬於做型調節系統之做型銑床。

工作台按圖7中箭頭所示方向移動。工作台上卡着做型及工件。模指在做型上滑動。當模指在做型上移動時，通過槓桿機構使滑閥移動，因而使滑閥上面或下面的油門開啓，於是油在壓力的作用下，經過打開的油門進入油缸，從而推動活塞，使銑刀隨模指的動作而動作，即進行模制。

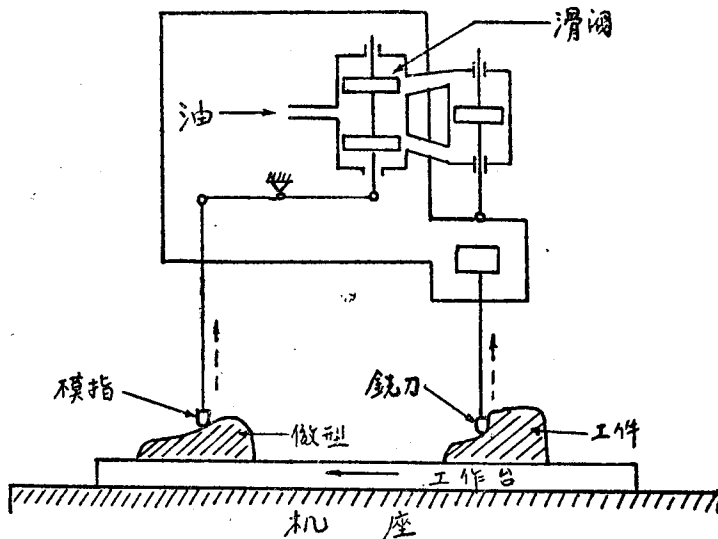


圖 7

這種系統即為做型調節系統。在做型調節系統中，被調量（銑刀的移動）系按預先給定之規律（做型的外形）而改變。

### 3) 圖8所示之原理圖，為隨動系統之一例。

該系統由電源B，放大器，電動機，變速器P，負載及兩個電位計所組成；其中，電位計與電源B接成橋形。

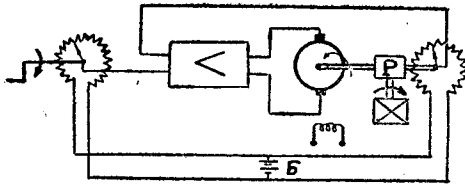


圖 8

当二电位計滑动触头之位置不相对应时，則在放大器的輸入端出現电压，从而使电动机轉动，直到放大器之輸入电压又复到零时为止，即直到电桥重新达到新的平衡时为止。

在該种系統中輸出軸与輸入軸做同步旋轉。

随动系統与做型調節系統之間的差別，就表面看來似乎无甚差異。实則，随动系統与做型調節系統間；有着原則上的差別。为了說明这个差別，首先研究一下自动調節系統的一般結構圖（圖 9），並預先闡明几个概念。

圖中：⊗ —— 測量裝置（浮筒，測速計，滑閥，电桥）；

< —— 放大器；

И.Э. —— 执行元件。

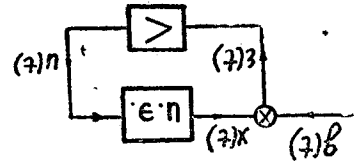


圖 9

按給定之規則借助于自動調節系統所欲改變的或保持恒定的量稱為被調節量（以后簡稱為被調量）。被調量为時間之函數，用  $x(t)$  表示之。在上述各系統中，被調量分別为电动机之轉速  $\omega$ ，水位  $h$  等等。

为了按給定規則改變被調量，則須借助于所謂給定裝置，以便將某种規則加到系統上。在上述各系統中，离心測速計中之彈簧，做型調節系統中之做型及随动系統中之輸入軸（該軸由另外的裝置帶动旋轉）皆为給定裝置。

由給定裝置加到系統輸入端之量，稱為給定量或輸入量，但通常稱為控制量，用  $g(t)$  來表示，它也是時間之函數。

在自动調節系統中，給定量  $g(t)$  与被調量  $x(t)$  在測量裝置中系相減，其差称为信号差。

信号差以  $e(t)$  表示，即

$$g(t) - x(t) = e(t).$$

这便是信号差方程式。由此可見，信号差  $e(t)$  亦为時間之函數。

信号差  $e(t)$  加在放大器的輸入端，經放大至  $u(t)$  后，加到执行元件 И.Э. 上（見圖 9）。

自动鎮定系統，做型調節系統及随动系統彼此間原則上之差別在于：

1) 自动鎮定系統中給定量  $g(t)$  为常数，即

$$g(t) = \text{const};$$

2) 在做型調節系統中給定量  $g(t)$  为預先給定之函數；

3) 在随动系統中給定量  $g(t)$  为任意時間函數。

我們已講过，自动調節系統为动态系統。这意味着在系統的各元件中產生动态現象，即任一系統都处于外界影響之下，該影響称为擾动量，用  $f(t)$  表示之。自动調節之任务即为补偿該种影響。

从使用能量观点來分，自动調節系統可分为：

- 1) 电动系統（机电系統）；
- 2) 电子系統；
- 3) 風动系統；
- 4) 液压系統；
- 5) 机械系統。

自动調節系統从动态观点分，可分为兩大类：

- 1) 有差系統；
- 2) 无差系統。

有差与无差調節系統之概念已形成现代自动調節原理之基礎。无差系統在自然界中是不存在的，但正如热工学中的絕热过程一样，在理論上是可以成立的。

为了解釋有差与无差調節系統，在圖 10 及圖 12 中举出兩種不同調節之情况。

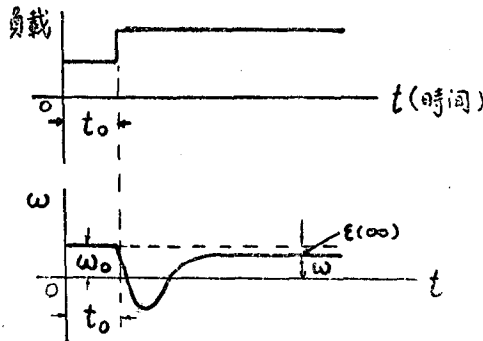


圖 10

### 1) 瓦特离心調速器（圖 6）。

設若負載在  $t_0$  时有一突變（然而在  $t_0$  之前負載为恒定），則速度  $\omega$  因負載的增大而減小。但当速度  $\omega$  改變时（在上述情况下为速度  $\omega$  降低），由于調節系統动作之結果，使調節閥开得大些，于是進入汽机之蒸汽量便因而增加，由此蒸汽机的速度  $\omega$  便重新上昇。

在这种系統中，負載改變后之轉速  $\omega$  將異于負載變化前之轉速值  $\omega_0$ ，因为，为了使調節閥动作，則必須移动离心調速之飛錘，而这又必然是速度  $\omega$  改變的結果。所以当負載改變时，速度  $\omega$  將經常是改變的，即重新穩定的速度值  $\omega$  必將不再等于負載變化前之值  $\omega_0$ 。这个速度差称为調節的靜差率，或称調節的靜誤差，它用  $\varepsilon(\infty)$  來表示。

上述系統为有差調節系統。

### 2) 現在來看属于无差系統之一例。

圖 11 为其原理圖。

仍要研究当負載變化时被調量的變化情况。

当負載增大时速度  $\omega$  即行降低，由是飛錘向下，滑閥也隨之而向下移动，由此，油缸的活塞向上推，从而使調節閥开得大些，結果使進入汽机的蒸汽增加，此时速度  $\omega$  便复又上昇，直到与原有值相等为止。由是觀之，在这种系統中，被調量的新的穩定值

与負載變化前的数值相同。

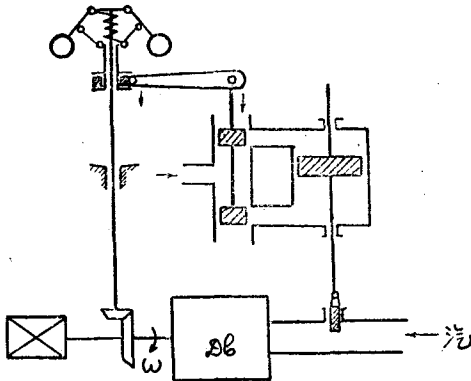


圖 11

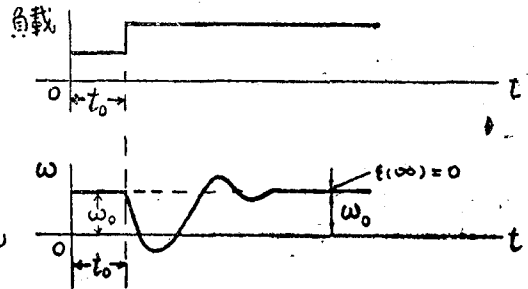


圖 12

在該系統中當達到新的穩態時，設若靜誤差不為零，即  $\epsilon(\infty) \neq 0$ ，亦即  $\omega \neq \omega_0$ ，這便意味着滑閥中之一油閥仍在开着，因此离心調速器及槓桿將繼續移動，因而調節閥也將繼續移動，所以在這種情況下，調節過程將繼續到直到  $\omega$  等於  $\omega_0$  時為止。

這便是無差調節系統。

由圖 6 所示為調節閥與离心調速器直接相連，但圖 11 所示者，為二者並非直接相連。在圖 11 所示的結構中，當穩態的情況時滑閥必須佔有中間位置。由此可見，這時靜誤差為零。

無差調節系統較有差調節系統工作的更準確。

自動調節系統又可分为：

- 1) 直接作用自動調節系統；
- 2) 間接作用自動調節系統。

在自動調節系統中，如果使調節機構動作之能量系取自測量元件，則稱為直接作用自動調節系統。

如果利用外在能源使調節機構動作時，便稱為間接作用自動調節系統，如第二例中用以供給油缸用油之油泵即為外在能源。

### 3. 自動調節系統之結構圖

前面我們所畫過的圖均稱為原理圖，而用方塊來表示的圖，則稱為結構圖。

圖 13 所示為一典型結構圖。

- 圖中：
- И.Э. —— 測量元件；
  - P —— 調節器；
  - И.сн. Э. —— 執行元件；
  - Э.О.С. —— 反饋元件；

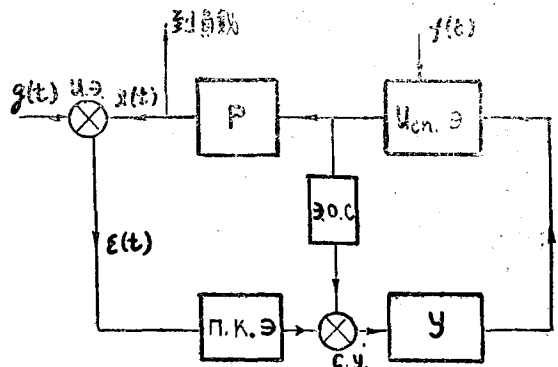


圖 13

$Y$  —— 放大器 (或變換器) ;

$C.Э.$  —— 相加裝置;

$\Pi.K.Y.$  —— 串聯校正裝置。

在測量元件中,  $g(t)$  与  $x(t)$  相減得信号差  $\varepsilon(t)$ 。該信号差經過串聯校正裝置  $\Pi.K.Y.$   $Y$  之變換及放大器  $Y$  之放大后, 加到执行元件之輸入端。該执行元件用相应的方式改變被調量  $x(t)$  並將其送到測量元件上。

反饋元件用需要的方式變換执行元件的輸出量, 該變換过的輸出量与信号差相加 (或相減)。反饋用來改善系統的动特性。

擾動量  $f(t)$  可加在系統的任一元件上。

#### 4. 設計自動調節系統之任務

自動調節系統之所以需要研究, 是為了能正確地对它們進行計算和設計。

对自動調節系統提出的基本技術要求为:

1) 調節系統應該是穩定的。当負載變化时, 或一般說來当有擾動量  $f(t)$  作用时, 被調量  $x(t)$  經一定時間后或恢复到原有值  $x_0$ , 或达到新的穩定值  $x_1$  (見圖14中1及2曲線)。設若当負載變化时被調量  $x(t)$  或增到无穷大或減到零 (見圖14曲線3); 則系統皆称为不穩定。

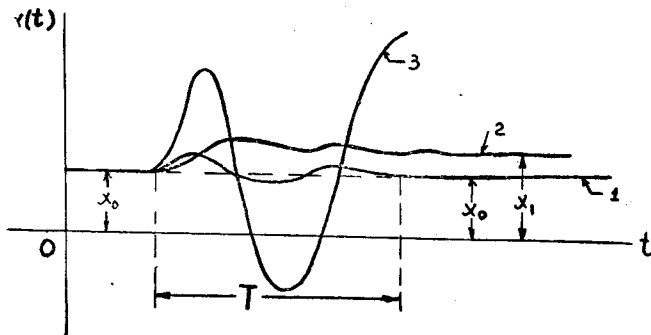


圖 14

2) 对靜誤差  $\varepsilon(\infty)$  的要求。靜誤差  $\varepsilon(\infty)$  应不大于技術上之要求值。

3) 动态时之被調量与穩态时之被調量相較, 其偏差量应滿足預先規定之要求。

在技術要求 (或技術条件) 中, 还常常規定有对过渡过程時間  $T$  (見圖14) 的要求。

自動調節系統線路圖, 按上述各技術条件 (或要求) 選擇之, 然后选出自動調節系統線路中之所有元件, 最后計算調節的靜誤差及动誤差。在某些情况下对复雜的自動調節系統还必须做出模拟。

自動調節原理所研究者即为上述各問題。

#### 5. 自動調節原理發展簡史

1887年,  $\Pi. A.$  威斯涅格拉德斯基首先奠定了自動調節原理之基礎。應該指出, 在



威斯涅格拉德斯基之先，已有人曾經進行了這種嘗試，但他們並沒有得到結果，因為他們對調節器的動態學的研究是在與調節對象分開的情況下進行的。而威斯涅格拉德斯基則視自動調節系統為一單一的動態系統而進行研究，在這個系統中既包括了調節器也包括了調節對象。

在威斯涅格拉德斯基之後，斯拉夫工程師兼教授 A. 斯托道拉研究了有關穩定的問題，並與古爾維茨共同創立了古爾維茨穩定判據。

1938 年 A. B. 米海依洛夫發表了自己的著作「調節系統的諧波分析法」，並因此而獲得獎金。他首先給出用頻率法分析調節系統的概念，而在这以前只有調節系統的古典分析法。索洛多夫尼可夫在促進頻率法發展中做了許多工作。

A. A. 安德洛諾夫及其學派研究了非線性系統原理諸問題。

如今談到自動控制理論，實際則為研究自動化系統的理論，在這些系統中包括自動調節系統，計算器，遠距操作系統等，質言之即為所有自動控制之總和。

## 6. 本課之任務

本課任務並不是研究所有在今日存在之方法，而僅是研究其中最基本的，譬如頻率法，我們將詳細地加以研究。

歸根結底，自動調節原理是用以確立解決兩個基本問題：自動調節系統的綜合與分析的方法。

調節系統的綜合解決這樣的問題：

提出技術要求。根據要求擬定出能滿足所提各項技術要求之線路圖及調節系統。

分析法則與綜合法相反，它解決下列問題：根據已有之調節系統或調節系統之設計，決定該系統之質量如何。

自動調節原理基於下列數學基礎：

- 1) 復變函數論；
- 2) 算子運算法（拉普拉斯及福里哀變換）；
- 3) 或然率；
- 4) 非線性研究。

我們的第一個任務是利用現有的科學成就來研究自動調節原理基礎，以便在該領域中使我們的學識有可能更加深入。