



中等專業學校教學用書

自动与远距操縱裝置中 元件的計算与設計理論

苏联B.C.索特斯克夫著

電力工業出版社

內 容 提 要

本書敘述自动和远距操縱器械中主要元件(繼电器和变換器、放大器、穩定器、分配器、隔距傳輸和同步耦合元件、执行元件)的裝置原則及其理論基础、計算基础和特性曲綫。

本書供多种專業(自动和远距操縱裝置、电机制造等)的学生在學習自动和远距操縱器械元件的原理和計算課程时,在作課程設計和畢業設計时的参考,也可供工程技術人員参考。

Б. С. СОТСКОВ

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
АВТОМАТИЧЕСКИХ И ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

根据苏联国立动力出版社1953年莫斯科版翻譯

自动与远距操縱裝置中元件的計算与設計理論

李介谷 徐俊榮譯

236D82

電力工業出版社出版(北京府右街26号)

北京市書刊出版營業許可証出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

787 × 1092 $\frac{1}{2}$ 开本 * 18 $\frac{1}{2}$ 印張 * 402千字 * 定价(第8类)2.53元

1955年11月北京第1版

1957年3月北京第3次印刷(5,131—8,160册)

序 言

國民經濟中許多最重要部門的自動化，以及自動和遠距操縱裝置中各種新的技術方法的研究都是第十九次黨代表大會所提出的最重要任務之一。

自動和遠距操縱技術是新技術的最重要發展方向之一。有了自動和遠距操縱技術就可以把檢測、控制和調整等作用轉移給相應的自動裝置而使人類從生產操作的直接參加中解放出來。

第一批自動裝置的出現還是古代的事，個別自動裝置也會在中世紀構成，但是自動裝置的實際應用開始於十八世紀的末期。到十九世紀自動機械才發展起來，在這同一時期中，能作用到較遠距離外的第一批遠距操縱裝置也出現了。

在十九世紀末和二十世紀初，在物理學範疇內所得到的巨大成就特別引起了電工學、無線電工程和電子學的蓬勃發展，他們對現代自動和遠距操縱裝置的成長奠定了廣闊的基礎。

在現代，任何生產過程幾乎都有自動化和遠距操縱化的可能。這種可能的存在是與實現自動和遠距操縱的檢測、控制、調整和保護作用等各項裝置的研究和設計分不開的。

我們國家在這領域中是處於主要和領導地位的國家之一。早在十八世紀俄國的學者、工程師和技術人員們在自己的著作裏就曾提出過一些卓越的自動和半自動裝置。如 М. В. 羅蒙諾索夫發表了關於自動記錄的氣象儀的觀念，他也提出了第一具探測大氣的儀器。他與李霍曼一起又研究出第一具靜電計。另一位俄國的著名人士 И. И. 波爾崇諾夫在他的蒸汽機內採用了自動的蒸汽分配和創造出了第一具調整器。К. Д. 傅羅洛夫在阿爾泰山建立了擁有許多機械的、半自動和自動機床的工廠。М. В. 羅蒙諾索夫的同時代人天才的機械師-自學者 И. П. 庫里賓創造了許多物理儀器，以及著名的具有一整套自動作用數字的第一座鐘。

十九世紀上半葉值得紀念的俄國人 П. Л. 施林格發明了第一具实用的電報設備系統，這種系統同時也就是第一具利用電流的遠距操縱裝置。十九世紀中葉和末葉，俄國的電工學已開始發展。在這種學問的成長中起主要作用的是我國的學者們：Б. С. 雅可比，Э. X. 楞茨，我國的工程師們：П. Н. 亞勃羅契闊夫，В. Н. 契闊列夫，Д. А. 拉契諾夫等。隨着電的應用的發展又產生了大批利用電能的儀器和機器。在各種自動裝置中也出現了控制這種裝置的要求。這裏還應該提起的儀器有：契闊列夫創造的電弧燈自動調整器，康司但捷諾夫創造的一些自動調整器等等。

在十九世紀八十年代，И. А. 符西尼格拉茨基在蒸汽機調整器和調整理論基礎等領域中的貢獻是奠定古典調整理論基礎的傑出研究工作。

我國著名的學者 А. С. 波波夫在這十九世紀末葉就發明了無線電報，而且奠定了無線電技術的基礎。最先的無線電報裝置實質上就是最先的無線電遠距操縱裝置，在這些裝置內，收訊繼電器已能控制電報設備的電路。

二十世紀上半葉，特別在後卅年是俄國的學者和工程師在自動和遠距操縱技術領域中廣泛發展工作的時期。

目前的基本任務之一就是創立自動和遠距操縱技術中元件的構造原理，這些元件是自動和遠距操縱裝置的組成部分。

這本著作是以自動和遠距操縱設備中元件的構造原理和他們的一些主要類型的理論與計算原理為命題的。

作者對 Р. П. 柯森柯和 Ю. С. 施孟斯基在評閱原稿時提出的寶貴意見表示謝意。

作 者

目 錄

序 言

導 言 7

第一部分 自動与遠距操縱裝置中的收受元件

第一章 繼電器和變換器 11

1-1. 參數和靜態特性 11

1-2. 動態特性 12

第二章 直接變換的變換器和繼電器 17

2-1. 變換器的綫路連接。計算綫路的原理 17

2-2. 機械量值的變換器 28

1) 位移(距離, 路綫)變換器 28

2) 對力起反應的變換器 51

3) 速度變換器 58

2-3. 機械變換器的動態特性 60

2-4. 熱變換器 66

2-5. 光電變換器 77

2-6. 電的變換器 86

1) 電壓与電流的變換器 86

2) 頻率變換器 103

3) 相位變換器 105

2-7. 磁性變換器 107

2-8. 物体的物理-化學性能的變換器 109

2-9. 直接變換的變換器作繼電器運用 112

第三章 具有中間變換器的變換器和繼電器 115

3-1. 繼電器和變換器特性的配合与主要參數 115

3-2. 觸頭 118

3-3. 變換器的工作機件 149

第四章 繼電器与變換器 149

A. 電磁繼電器與變換器

4-1. 電磁系統的類型與機械特性	149
4-2. 磁性材料的特性	153
✓4-3. 磁系統的計算	158
✓4-4. 磁路各空氣段磁導的確定	169
4-5. 綫圈的計算	173
4-6. 綫圈的發熱	181
4-7. 動作磁勢與釋放磁勢的確定和標準類型電磁繼電器 綫圈數據的計算	183
4-8. $E =$ 常數時繼電器的接通與開斷	190
4-9. 電磁繼電器的定的域	197
4-10. 繼電器在動作與釋放工作中的動力學	200
4-11. 交流繼電器與變換器的電磁系統	202
4-12. 延遲繼電器動作的電的和機械的方法	211
4-13. 極化電磁系統	214
4-14. 電磁變換器	219

B. 永磁式、電動式和感應式的繼電器和變換器

4-15. 永磁式繼電器和變換器	223
4-16. 電動式繼電器	228
4-17. 感應式繼電器	229

B. 共振式、磁伸縮式與靜電式的繼電器和變換器

4-18. 共振式的繼電器和變換器	233
4-19. 磁伸縮式繼電器和變換器	240
4-20. 靜電式繼電器和變換器	240

Г. 電子與離子繼電器和變換器

4-21. 電子管及其特性	242
4-22. 電子繼電器	244
✓4-23. 閘流管	254
4-24. 輝光放電管	269
4-25. 冷陰極閘流管	270

第五章 光繼電器

5-1. 光電繼電器	273
------------------	-----

5-2.	光化学繼電器	280
5-3.	全輻射光繼電器	280
5-4.	利用光压的光繼電器	281
第六章	声繼電器与變換器	281
6-1.	声變換器	282
6-2.	声繼電器	284
第七章	熱力(熱)繼電器与 變換器	285
7-1.	利用物体綫膨脹的熱繼電器与變換器	285
7-2.	双金屬繼電器与變換器	293
7-3.	具有膨脹性液体或氣体的熱繼電器与變換器	300
7-4.	具有可溶性固体的熱繼電器	301
7-5.	具有揮發性液体的熱繼電器与變換器	302
第八章	机械繼電器与變換器	305
8-1.	具有可變的机械与液力机械參数的液体和氣體繼電器与 變換器	305
8-2.	机械位移繼電器与變換器	316
8-3.	对速度起反应的繼電器与變換器	317
8-4.	对加速度的大小起反应的繼電器和變換器	323
第九章	物理-化学的繼電器与變換器	327
9-1.	具有輔助發熱过程的變換器	328
9-2.	具有輔助光学过程的繼電器与變換器	330
9-3.	具有輔助机械过程的繼電器与變換器	332
第二部分 自動和遠距操縱裝置的中間和工作元件		
第十章	放大器	334
10-1.	磁放大器	335
10-2.	電氣机械放大器	343
10-3.	电机放大器	343
第十一章	穩定器	346
11-1.	具有非綫性電阻的穩定器	347
11-2.	電子管穩定器	352
11-3.	穩流管	354
11-4.	有飽和磁導体的穩定器	356

第十二章 分配器	361
12-1. 一般知識	361
12-2. 步進分配器	362
12-3. 連續運動的分配器	367
12-4. 電子-射綫分配器	369
第十三章 變換作用值的元件	372
13-1. 使作用相加的元件	373
13-2. 作用的相乘和相除元件	376
13-3. 作用的微分和積分元件	379
第十四章 隔距傳輸和同步耦合元件	388
14-1. 電的隔距傳輸和同步耦合系統	388
14-2. 非機械參數的隔距傳輸系統	390
14-3. 同步耦合系統	392
1) 脈衝式同步系統	394
2) 連續供電的參變數系統	398
3) 橋接系統	400
4) 感應式同步耦合系統	408
第十五章 自動與遠距操縱裝置中的工作元件	414
15-1. 作斷續控制用的工作元件; 接觸器	414
15-2. 作電路平滑控制用的工作元件	416
15-3. 機械裝置上用的電力工作元件	417
附 錄	435
中俄文譯名對照表	447

導 言

各种形式的自动化都是建立在某一(被控制的、被调整的)过程与另一初始的或控制的过程的联系上,而这种联系却利用着一些特殊的、所谓自动的装置。

自动装置按照他们所完成的功用可分成:

- 1) 自动检测装置;
- 2) 自动控制装置;
- 3) 自动调整装置;
- 4) 自动保护装置。

所有的自动装置都是由许多元件组成,这些元件在装置中实现单独的、完全被规定的特殊作用。往往一组(若干)完成一定任务的元件,为方便计可连接成自动装置的组件。

用独立元件和组件构成自动装置的原理,应在自动调整 自动检测、自动控制和自动保护等课程内讨论。

现在这门课程专门讨论自动和远距操纵装置的元件和组件。

虽然各种元件在动作过程中的特性和作用的原理各異,他们仍可按照用途和在自动装置中所处的位置分成:

- 1) 收受(初始)元件;
- 2) 中间(变换)元件;
- 3) 终端(工作)元件。

现代的自动装置照例都是利用電能的。

電能所以能优先採用是由於以下原因:可实行多种多樣的变换、能將作用遠距離傳遞和有很高的準確度和靈敏度。因此,这门课程主要將討論控制電路用的元件。不用電能的元件和组件就得另外提出討論。

我們試來討論元件的幾种基本類型:

A. **收受(初始)元件** 凡接受初始(控制的、輸入的)參數作用的

元件都屬於這類。

收受元件能辨別出這種參數的變化，並使這種變化轉變成另一種（電的）便利於以後工作的參數變化。

如收受元件能將所辨別的量的變化按比例地轉變成新的（如電的或其他的）量的變化時，這種收受元件稱爲變換器。

如收受元件在所辨別的量達到預先整定的一定數值時能使另一（如電的或其他的）量發生跳躍式的突變，這類元件就稱做繼電器。

在任何自動裝置中，收受元件是必需的。裝置中這種元件採用的數目和種類決定於所辨別參數的數目和種類。

5. **中間元件或變換元件** 他們用來接受收受元件所產生的作用，並把這種作用加以放大、變換、沿着不同的路線作進一步傳遞和保持個別參數爲恒值等。

我們現在按照這類元件所完成的功用來分別討論：

1. **〔放大器〕**。凡接受一個（輸入的）物理參數的變化，並產生另一個（輸出的）與初始參數同一種類但屬於被控制線路的參數變化的元件稱做放大器。

放大器可以是中間變換器或是中間繼電器（或許多串級的變換器或繼電器），這要根據它的作用的特性是成比例的還是跳躍的來決定，這些變換器或繼電器的輸入和輸出參數的能量是同一類型的。

當收受元件或上述中間元件的輸出能量不夠使自動裝置中接受這能量的元件發生動作時，能量就要加以放大。

2. **〔穩定器〕**。凡在自動裝置工作的過程中穩定某一物理參數（例如電壓、電流等）變化的元件稱做穩定器。

穩定器往往用以穩定輔助能源的參數或用以限制自動裝置中由一個組件到另一組件所傳送的作用值，使不致有不正常的上昇。

3. **〔分配器〕**。這種元件用來使作用從一個收受元件或中間元件分配到幾個工作元件。

4. **〔計算元件〕**。用來導出參數間一定的數值上的關係。屬於這類元件的有微分和積分元件，以及把幾個參數相加或相乘的元件，這些參數是從與所辨別的各项參數有關的各種變換器得來的。

這裏須把這類實行初等數學運算的計算元件與解複雜問題、而由大量元件和裝置組成的計算裝置加以區別。屬於後一類計算裝置的有電器積分器、解複雜微分方程的電子裝置和控制炮火的儀器等等。對於這些裝置的討論已超出在這門課程的範圍。

B. 工作元件 是從最後的中間元件接受作用並使被調整或被控制參數產生需要的變化的一些元件。

各種工作元件在構造上有很大的差別。

假使被控制的是一個電氣量，則在討論各組收受元件或中間元件時提起過的一些元件——如繼電器、變換器、放大器等都可當做工作元件。在某些情形中，工作綫路操作所需的控制功率較大時，工作元件在構造上須有一定的差別，例如作為工作元件的放大器往往採用電機放大器，大功率的磁放大器（製成可飽和扼流圈的形式）等等，工作繼電器則常常採用大功率的接觸器。

假使被控制的是機械量，則可採用電動機、大功率的電磁鐵、各種壓縮空氣和水力原動機等等。

由此可見，工作元件不是自動和遠距操縱裝置中任何新奇和特殊的元件，而是在其他技術裝置中通用的元件，他們用來產生和傳送強力的（能的）作用。

所以，除了某些例外的情況，在這門課程中對工作元件將不作特殊和詳細的討論。

除自動和遠距操縱裝置中的各項元件以外，還須研究由一組元件組成而在裝置中完成獨立任務的若干系統。這些元件的系統，或者通常稱為組件，就由上面所列舉的一些元件組成，但為了解決一定的問題，所應用的元件以特殊方式連接起來，屬於這種元件的首先是：隔距耦合系統、隨動系統和一些其他的系統。

隔距耦合系統包括傳送元件、耦合綫路和收受元件，在現代差不多無例外地採用電的隔距耦合系統。把某些機械的參數（如綫性的或角度的位移）傳送到遠距離外的隔距耦合系統現在廣泛地採用着。在這種場合下，傳送元件把機械的位移轉變成可以沿耦合綫路輸送出去的電氣量的變動，而收受元件卻進行相反的變換。這情況稱為同步耦

合系統。隨動系統可分成兩個主要的組別：有比例作用特性和間歇作用特性的兩組系統。

爲了要得到有給定作用的自動裝置而配合一些元件時，必須計算元件的特性和參數，而且他們彼此間一定要配合得得當。

要使元件配合得當，必須知道他們的靜態特性，這些靜態特性決定着元件在作用速率接近於零時、它和它的某些部分的工作情況；同時須知道他們的動態特性，動態特性決定着元件在速度不等於零時它和它的某些部分的工作。

這門課程的目的在於敘述元件中一些最主要類型的計算和設計原理。

爲此將要研究最主要類型元件作用的物理原理，決定計算用的關係式以及對這些元件的設計提供初步見解。

第一部分 自動与遠距操縱裝置中的 收受元件

第一章 繼電器和變換器

1-1. 參數和靜態特性

繼電器和變換器是用來使原始(起始的或控制的)过程中某一參數 x 的變化与後一过程中另一參數 y 的變化發生作用上的联系的, 而後一过程对收受元件說是一個被控制的过程; 這時變換器能使參數 x 和 y 的變化实行連續的联系, 但繼電器則使參數 x 和 y 实行間斷而跳躍的联系, 圖 1-1 和 1-2 表示控制的靜態特性(圖 1-1 是變換器的靜態特性, 圖 1-2 是繼電器的靜態特性)。

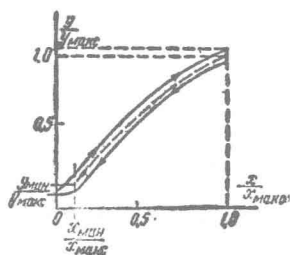


圖 1-1

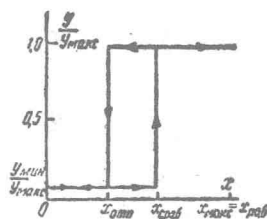


圖 1-2

在變換器的情況下, 參數 x 从 x_{min} 到 x_{max} 的連續變化与參數 y 从 y_{min} 到 y_{max} 的連續變化相對應, 但變換器的控制特性曲線往往具有滯延迴綫, 即在參數 x 增大和減小時, 參數 $y = f(x)$ 的變化並不是重合的, 變換器控制特性曲線的滯延迴綫按理講是不好的, 在設計變換器時須估計到這點, 並避免採用具有磁滯, 電氣或机械滯延和乾磨擦很大的元件。

數值 x_{min} 和 x_{max} 稱做變換器的靈敏度下限和上限(範圍), y_{min} 和 y_{max} 則稱做變換器的控制參數 下限和上限。比值 $\frac{y}{x} = k$ 稱做變

換器的控制係數： $\frac{\Delta y}{\Delta x} = k_d = S$ ——稱做變換器的控制靈敏度或微分係數。通常，這些數值都是根據控制的平均特性曲線 $y = f(x)$ 求得（如圖 1-1 中虛線所示）。

在繼電器中，參數 x 從 $x=0$ 到 $x=x_{\text{сраб}}$ 間連續變動時，參數 $y = y_{\text{мин}}$ 的值是不變的（或近乎不變），通常 $y_{\text{мин}} = 0$ 。當參數 x 的值達到 $x=x_{\text{сраб}}$ 時，參數 y 的值突然從 $y=y_{\text{мин}}$ 變到 $y=y_{\text{макс}}$ ，從 $y_{\text{мин}}$ 過渡到 $y_{\text{макс}}$ 的時間決定於參數 y 所在線路中（即在被控制線路中）過渡歷程的時間。以後 x 增加到 $x=x_{\text{макс}}$ 時，參數 y 的值將保持不變（或近乎不變）。當參數 x 從 $x_{\text{макс}}$ 降到 $x=x_{\text{сраб}}$ 時，通常甚至降到 $x_{\text{омн}} < x_{\text{сраб}}$ ， $y=y_{\text{макс}}$ 的值仍舊不變，但當 $x=x_{\text{омн}}$ 時， y 將突然降到 $y=y_{\text{мин}}$ 。

$x=x_{\text{сраб}}$ 這數值稱做繼電器的動作參數，而 $x=x_{\text{омн}}$ 則稱做繼電器的釋放參數。

比值 $\frac{x_{\text{омн}}}{x_{\text{сраб}}} = k_{\theta}$ 稱做繼電器的返回係數，而 $\frac{x_{\text{макс}}}{x_{\text{сраб}}} = k_s$ 稱做安全係數（對控制參數 x 而言）。

1-2. 動態特性

在變換器的情況下，因控制量（參數） x 的變化而引起的被控制量（參數） y 的變化並不立刻發生，而是有一些時延的，這時延決定於這元件（變換器）和參數 y 所控制線路內進行物理過程的時間。這種被控制量值的變化與時間的關係可用一些特殊的特性曲線來表示，這些特性曲線總稱為動態特性。

變換器的動態特性有兩種表示方法。第一種方法是：用圖解繪出 $x=f_1(t)$ 變動的規律，並作出 $y=f_2(t)$ 的數值變化圖。通常這時所取的參數 x 的變化，或是跳躍的，即在 $t \leq 0$ 時 $x=0$ ，而在 $t > 0$ 時 $x=X = \text{常數}$ ；或是按直線律 $x=kt$ 變化的。在躍變情況下的 x 表示在圖 1-3 內，按直線律變化的 x 則表示在圖 1-4 內。根據變換器中進行過程的複雜程度，被控制量（參數） y 的變化規律與圖 1-3 或 1-4 所示情況的

一种相应。

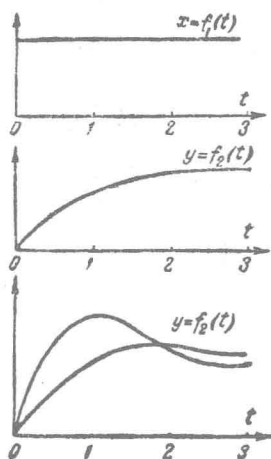


圖 1-3

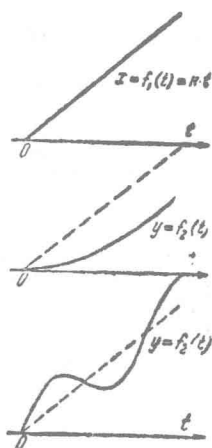


圖 1-4

第二种方法是：考慮控制量(參數) x 是正弦變化的，即

$$x = X_M \sin \Omega t$$

並可得出被控制量(參數) y 的穩態(強迫的)變化(由試驗或計算)如下：

$$y = Y_M \sin(\Omega t + \varphi),$$

式中 Y_M ——幅度；

φ ——相角差。

比值 $\left| \frac{Y_M}{X_M} \right|$ 和角 φ 都与參變數 x 的頻率 Ω 有關，即

$$\frac{Y_M}{X_M} = f_a(\Omega), \quad \varphi = f_\varphi(\Omega).$$

通常，這種關係用幅度特性(幅度-頻率特性更正確) $\frac{Y_M}{X_M} = f_a(\Omega)$ 和相角特性(相角-頻率特性更正確) $\varphi = f_\varphi(\Omega)$ 來表示。這種特性表示在圖 1-5, a 內，他們總稱為元件的頻率特性。

尚有另一種形式的頻率法，就是在縱軸上代替 $\frac{Y_M}{X_M}$ 標以 $\lg\left(\frac{Y_M}{X_M}\right)$ 值，而在橫軸上代替 Ω 標以 $\lg \Omega$ 或 $\lg(\Omega \tau)$ 值，這裏 τ 為過渡歷程的時間常數。這種特性稱為對數頻率特性(圖 1-5, b)。

最後，還採用這樣的頻率特性表示法：用矢量的方式把相應於每一指定頻率 Ω 的 $\frac{Y_M}{X_M}$ 值沿與這頻率相應的角度 φ 標出。 Ω 在 $\Omega=0$ 和 $\Omega=\infty$ 範圍內變動時，就可得到所謂幅度-相角特性(圖1-5, a)。

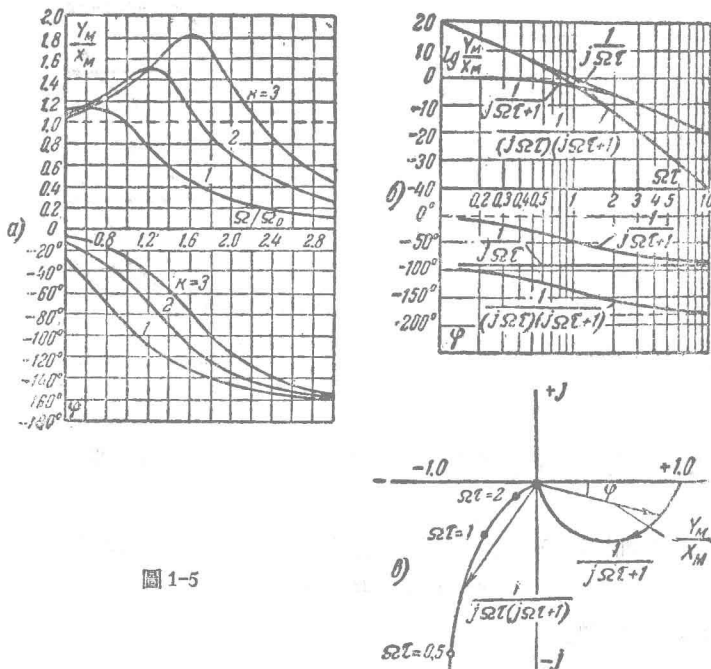


圖 1-5

必須指出，繼電器的 x_{cpab} 和 x_{omn} 值並不是固定不變的。由於各種原因，他們可以使自己的數值改變。不過須對有規則的變動和意外的變動加以區別，有規則的變動是由一些外在和內在因素變動的影響所引起，這些因素為：溫度、機械加速度和振動、在空間的偏轉等；而意外的變動是由繼電器內部所有現象的各種不同併合所引起。

元件的動態特性，可用把時間函數的參數 y 和 x 聯繫起來的微分方程來確定，這種方程式的最簡單形式為：

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k_1 x,$$

式中 τ ——過渡歷程的時間常數，這常數可決定變動過程的初速 $\left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=0} = \frac{kx}{\tau}$ ，或在週期性過程中決定 x 和 y 變動間的相移角： $\varphi_{xy} = \arctg \Omega \tau$ 。

在許多元件串聯起來的情況下，要得到總的靜態特性和動態特性，必須把第一元件參數的輸出值作為第二元件的輸入參數，並依次類推。例如，倘已知兩個元件的靜態特性和動態特性如下：

第 一 元 件

靜態特性

$$y_1 = f_1(x_1)$$

動態特性

$$\tau \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k_1 x_1$$

第 二 元 件

靜態特性

$$y_2 = f_2(x_2)$$

動態特性

$$\tau' \frac{dy_2}{dt} + y_2 = k_2 x_2$$

則總的特性可根據 $y_1 = x_2$ 的條件求得。總的靜態特性為：

$$y_2 = f_2(x_2) = f_2[f_1(x_1)] = f_3(x_1);$$

總的動態特性為：

$$\tau \tau' \frac{d^2 y_2}{dt^2} + (\tau + \tau') \frac{dy_2}{dt} + y_2 = k_1 k_2 x_1.$$

在許多自動裝置中，各種元件是連續工作着的。假設這時參數 x 按照如下的規律變動

$$x = X_M \sin \Omega t \text{ 或 } x = X_M e^{j\Omega t},$$

而動態特性的方程式為

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx;$$

這時微分方程的解如下：

$$y = \dot{Y}_M e^{j\Omega t} = Y_M e^{j(\Omega t + \varphi)};$$

把 y 微分，並以 y 和 $\frac{dy}{dt}$ 代入方程式，得：

$$j\Omega \tau \dot{Y}_M e^{j\Omega t} + \dot{Y}_M e^{j\Omega t} = k X_M e^{j\Omega t}$$

$$\text{或 } \dot{Y}_M = \frac{k X_M}{j\Omega \tau + 1} \quad \text{或} \quad \frac{\dot{Y}_M}{X_M} = \frac{k}{j\Omega \tau + 1}.$$

所得的方程式就是幅度-相角的特性的解析式。

繪出各不同頻率的矢量 $\frac{k}{j\Omega \tau + 1}$ ，並把各矢量的頂端連接起來，就得到元件的幅度-相角特性圖（圖 1-5， θ ）。