

自动控制原理

刘 豹 编 著

上海科学技术出版社

自动控制原理

劉 豹 編 著

上海科学技术出版社

內 容 介 紹

本書首先介紹自動控制的一般概念，分析自動控制需用的數學基礎，以及自動控制過程中的各種性能及組成因素。其次論述連續自動控制網的各種類型及其反應性能，並及非線性的影響等。最後乃敘述不連續控制網的兩種主要類型。

本書可供設計、裝置及管理自動控制的技术人員作為學習參考之用，亦可各大學機械製造、動力廠以及各種自動化專業系科作為補充教材之需。

自 動 控 制 原 理

劉 豹 編 著

上海科學技術出版社出版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可証出093號

上海市印刷五廠印刷 新華書店上海發行所總經售

開本787×1092 1/27 印張12 4/27 字數225,000

(原中、科技版共印3,600冊)

1959年3月新1版 1959年3月新1版第1次印刷

印數1—10,000

統一書號：15119·519

定價：(十四)1.70元

序

我們偉大的祖國，在英明的領袖毛澤東主席和共產黨的領導下，藉助於蘇聯大公無私的援助以及在我國人民共同一致的努力下，已順利地進入了第一個五年計劃經濟建設階段。在這個階段中，一切工程都以現代最新式的技術——機械化、自動化為最高準則。機械化、自動化這種最新的技術，只有在像蘇聯消滅了剝削階級的社會主義社會制度中以及像我國在人民自己掌握了政權後的社會中，才有可能得到發展，也才有可能真正為人民的福利而服務。

著者為了使一般參加祖國經濟建設的技術人員在自動化工程方面有一定的參考資料，特將自己過去曾研究過的有關自動控制的資料，編寫成自動控制原理一書。本書可供從事於原機自動調節、溫度控制、自動機械等工程的設計、製造及管理工作的技術人員作為參考，也可以供高等工業學校高年級學生在學習動力廠自動調節、原機調速、溫度控制、自動儀器製造等課程時作為參考資料。

本書共分七章。第一章介紹自動控制的一般概念。首先我們要明瞭自動控制在社會主義生產建設中所起的重大作用，它是消滅智力勞動和體力勞動的對立的技術基礎。應用了自動控制，很多笨重的體力勞動工作都可以用輕巧的自動機器管理工作代替了。自動控制的對象是極其廣泛的，凡是在生產過程中存在的任何物理和化學性質都可以被自動地控制着。所以，自動控制的應用範圍也就非常廣大，像最近藉助於蘇聯大公無私的國際主義精神的先進技術，在我國裝置的亞蘇工廠、火力發電廠、紡織工廠、煉鋼廠、

無縫鋼管廠、造紙廠等等，就是自動控制具體應用的實例。在蘇聯，自動控制的應用範圍更其廣泛，讀了馬·扎·薩布羅夫關於一九五一至一九五五年蘇聯發展第五個五年計劃的指示報告就可以了解。爲了便於進一步地研究自動控制的原理，我們在第一章中將自動控制的基本組成部分作了個簡明的介紹，同時也說明了作用在各組成部分的因素，確定了它們的名稱。在介紹各基本組成部分時，除了最常見的幾種機構我們約略地談到它們的動作原理外，其他很多機構在本書中不作詳細交待，這是由於本書的重點在於研究、分析及綜合機械自動化的動作原理，至於自動機構中各種基素的具體構造，則須參攷本書所註各參攷資料及其他專門書籍。由很多自動控制基素組成而能完成自動控制任務的機構稱作自動控制網。在概論中我們約略地談了各種形式的自動控制網，從它的控制動作上可以分成開式和閉式兩大類，前者是作爲後者的比較而言的，只有後者才是自動控制的主要形式。閉式中又按它組成基素結合的形態以及所控制的物理及化學性質的多寡而分成單網及多網兩種。如從控制的目的上講，則可以分成遠距離控制（隨動機構）、自動調節以及計算機三大類。本書主要的研究對象是前兩者。從控制性質又可以分成連續控制及不連續控制兩大類，前者是本書第五章主要內容，關於不連續控制本書不作重點討論。要研究控制原理，就必須先知道控制動作的幾個特性，所以在本章中將控制網的穩定性、反應的瞬間態及平衡態、準確性、靈敏度、各種干擾下的偏差以及控制效能先作一個簡明的說明，作以後各章理論分析的基礎。一般自動控制都是在線性的假設上工作的，所以關於控制網的線性問題就必須在本章結束之前給予適當的說明，同時也指出了在什麼因素影響下，控制網的性線就被破壞

了，這時候就應當怎樣來處理它。

總結整個第一章，它給予我們有關自動控制的一般常識，依靠這個常識，才可能進行以後各章的研究。

第二章完全是分析自動控制網所必需的工具——基礎數學——的複習。有很多研究自動控制的學者主要應用微分方程法來分析自動控制，這個方法的好處是一般讀者都有微分方程的知識，易於進行，而它相應的缺點是微分方程方法應用起來很繁冗，而且在改善控制性能時不易得到一個明確的結果。近來在自動控制理論分析的發展上，微分方程方法已是一個比較古老的工具了，在本書主要是應用傳動函數及反應函數方法進行分析。對於一般具有工程數學知識的讀者，本章只是一個複習；而對一般沒有學過工程數學而具有初等微分方程知識的讀者，本章可以作為對自動控制工程數學學習的初步材料。當然，由於篇幅的限制，一般數學上必須的嚴密的證明和推理，在本章是不可能臚陳的，但它們都可以從所註有關材料中找到，對數學有興趣的讀者，在這裏可以得到補償。

有了工具之後，將怎樣來進行分析工作呢？這是第三章自動控制網基本分析法所要解決的問題。首先，我們了解了控制網反應的穩定的重要性，應用侯維智判別式來判斷控制網的穩定性，同時也介紹了米海依洛夫-乃闊斯特的穩定條件。我們又用偏差係數來測定了在各種擾動下控制網反應的偏差情形。應用控制面積測定了無週期反應的控制效能。在振盪穩定反應中，藉助於卡撒氏最近演化的算式，著者推演了特用的控制面積，也可以測定它的控制效能。在對付某些反應情況較複雜的控制網時，如具有死時的被控制系統，可以利用基層反應分析法，就是將反應分析成無數諧次組成，從基諧反應上來看它的性能。由於這種方法，所以只要知

道反應的數學式就可以進行分析。很多控制網可以在實驗中繪得它的反應曲線，再以一個近似的具有一定數學式的反應線去代替，而後從這個近似數學式進行分析，這種方法，稱為實驗曲線近似分析法，在分析中經常應用。

第三章可以作為自動控制理論研究的一個專門方面，由於自動控制的應用愈來愈廣泛，各種反應情形愈來愈複雜，而用以研究它們性能的方法也必須愈來愈簡便而正確，所以，這方面極有發展的餘地。在蘇聯，很多有關研究自動控制分析方法的論文都登刊在 Автоматика и телемеханика（該刊已在一九五〇年停刊）；Известия Академии Наук СССР, отделение технических наук；Прикладная математика и механика 以及專門登載國外有價值論文的 Прикладная механика и машиностроение 等期刊上。讀者可從這方面找到很多寶貴資料。

第四章將各種傳動素按它們不同的傳動性能分別加以分析，每一種傳動素都以兩件以上的具體實物作為討論的基礎，從它們的運動方程式，得到傳動函數及反應函數，再得到它們的反應性能，在討論時特別將自動調節中需用的各種原機及飛球調速儀重點地提出，以待在討論原機調節時可以有一個較深刻的印象。

由於傳動素中普遍地存在着阻滅作用，所以特別在本章的最後專門說明傳動素中各種阻滅的作用，以及如何在傳動素中釀成有利的阻滅作用，使控制反應穩定。

第五章是本書的中心內容。研究連續自動控制網的各種類型及其反應性能。我們先從最簡單的遠距離控制談起，說明傳動素中阻滅對控制網的影響，然後又用偏差導函數控制機構來控制，比較它的優劣。其後又將偏差導函數控制機構應用在一般具有阻滅作

用的控制網上，說明它在各種情形下的反應情況。

在一般溫度控制中，死時被控制系統是個較普遍的形式，在 5-4 節，我們應用基層反應分析法分析了它的各種反應條件。

在自動調節中，首先研究了導函數控制機構的作用，然後又分析了追隨器控制機構的效用，這兩種控制機構都可以用來調節具有一次式傳動素形式的被控制系統及死時被控制系統，在對這兩種形式的被控制系統的作用上，可以比較它們的優缺點。作為應用很普遍的追隨器控制網的分析實例，著者對水渦輪轉速調節問題作了一個較詳細的分析；一方面可以作為自動控制原理的具體應用，另一方面也可以從此對水渦輪調速問題有一個概念。

最後，扼要地介紹了多作用控制網作為本章的結束。

自動控制網實際上存有很多非線性的因素，第六章就將這些非線性的因素估計在裏面，或用近似法將它們化成線性關係來分析，或根本忽略它們。假如它們的實值很大，就必須應用微分方程方法將之逐步計算，這些計算分別在各種非線性因素：機械間隙及摩擦或機械鬆懈項目下分別陳述。

在最後一章中，我們研究了不連續自動控制網。不連續自動控制按它們的調整方式可以分成斷續控制及週期控制兩類。斷續控制則在最常見的兩種被控制系統上，死時一次式及阻容傳動素，作了較詳細的分析。而週期控制僅陳述了一般的運動方程式，讀者如對這方面有興趣，可以參閱該章所註參攷資料。

著者在寫作本書時在採用技術名詞方面曾感到非常困難，一般工程上、物理上以及數學上的專用名詞都採用國內通用的名詞，有關自動控制的專門名詞則大部分出自著者的杜撰，尚祈讀者指正。

自動控制是一門新穎而廣博的學問，著者學識淺陋，精力有限，雖然在寫作本書時化費了相當時間，搜集了各種資料，在點繪曲線計算各種數據時都經過再次的複算，當然仍不免有誤錯及不妥之處，尤祈國內專家們以及一般讀者們多加批評指教，以備今後改正。

本書初稿完成後，蒙程孝剛、張鍾俊兩位先生審閱，提出很多寶貴意見，使著者在最後整理本書時有所依據，又在本書寫作過程中，經常得到月芬同志的幫助和鼓勵，特在此一併致謝。

劉 豹

一九五三、十一月於上海

目 錄

第一章 概論.....1-25

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1-1 自動控制的意義.....1 | 1-4 控制網及其種類.....12 |
| 1-2 自動控制的對象及其應用.....4 | 1-5 控制特性.....20 |
| 1-3 自動控制的基本組成部分.....7 | 1-6 控制網的線性.....24 |

第二章 基礎數學.....26-65

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 2-1 常係數線性微分方程.....27 | 函數.....48 |
| 2-2 頻率反應函數.....31 | 2-7 杜哈滿積分.....53 |
| 2-3 富氏級數.....35 | 2-8 複逆公式.....56 |
| 2-4 階函數、富氏積分、富氏變式
及脈衝函數.....39 | 2-9 勞倫級數及留數.....59 |
| 2-5 反應函數.....46 | 2-10 差分法及常係數線性差分方
程.....62 |
| 2-6 拉氏變式、傳動函數及重量 | |

第三章 控制網基本分析法.....66-129

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 3-1 候維智穩定條件及控制網穩
定的意義.....67 | 3-9 變化遲緩主擾引起反應的近
似求法.....97 |
| 3-2 控制網反應.....71 | 3-10 共振現象及阻滅.....99 |
| 3-3 控制網的傳動函數.....73 | 3-11 基層反應分析.....101 |
| 3-4 傳動函數分析法.....79 | 3-12 控制網偏差、靈敏度及控制
數.....109 |
| 3-5 米海依洛夫-乃闊斯特穩定
條件.....80 | 3-13 控制效能.....115 |
| 3-6 控制網傳動函數軌跡.....82 | 3-14 穩定反應控制效能.....120 |
| 3-7 反應函數分析法.....86 | 3-15 實驗曲線近似分析法.....125 |
| 3-8 重量函數近似法.....88 | |

第四章 自動控制網組成要素.....130-184

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 4-1 無滯後傳動素.....132 | 4-7 慣性傳動素.....157 |
| 4-2 一次式傳動素.....135 | 4-8 無窮傳動素.....166 |
| 4-3 多次式傳動素.....141 | 4-9 恢復傳動素.....174 |

4-4 阻容傳動素.....	145	4-10 導函數傳動素.....	179
4-5 死時傳動素.....	150	4-11 傳動素的阻減.....	182
4-6 n 串聯傳動素.....	154		
第五章 連續自動控制網.....	185-276		
5-1 應用阻減穩定的自動控制網.....	185	在死時被控制系統上的反應.....	232
5-2 應用偏差導函數控制機構的 自動控制網.....	196	5-7 追隨器在控制網中的作用.....	239
5-3 應用偏差導函數控制機構及 阻減穩定的自動控制網.....	206	5-8 追隨器在死時控制網中的作 用.....	248
5-4 死時被控制系統的控制網.....	211	5-9 追隨器控制網實例——水力 渦輪轉速調節分析.....	253
5-5 導函數控制機構自動調節器.....	216	5-10 多作用控制網的分析.....	267
5-6 導函數控制機構調節器作用.....			
第六章 非線性的影響.....	277-300		
6-1 影響控制網線性的各種因素.....	277	6-4 摩擦及機械鬆懈的影響.....	287
6-2 估計初始條件的線性控制網.....	279	6-5 傳動素受摩擦影響的計算.....	293
6-3 機械間隙的影響.....	282	6-6 摩擦和機械間隙的近似法.....	297
第七章 不連續自動控制網.....	301-312		
7-1 概論.....	301	7-3 阻容式被控制系統的斷續控 制.....	308
7-2 死時一次被控制系統的斷續 控制.....	303	7-4 週期控制及其運動方程式.....	309
參考資料.....	313		

第一章

概 論

1-1 自動控制的意義 消滅智力勞動和體力勞動間的對立的技術基礎，是生產的全部自動化。生產自動化就是高度的機械化。自動化就是說要建立這樣一種機械，由於這種機器，整個生產過程——由原料的初步加工到成品的製出——都是自動進行的，不用人直接參加⁽¹⁾。自動化可以加速生產過程，操縱效力強大和速度很高的機器，提高生產質量，並改善勞動衛生⁽²⁾。

在蘇聯，已經建立了世界上第一個全部自動化的金屬加工企業。在這個工廠中採用電氣熔解，熱力加工，各色的機器加工，利用各種工作母機作成許多如摩擦、乾燥、過秤、檢驗硬度等等輔助工作⁽³⁾。在蘇聯，已經創造出很多並正在創造更多的自動機器，利用這些機器就可以消滅非熟練勞動和笨重勞動。在蘇聯偉大的社會主義建設中，自動化的應用及發展是突飛猛進的。最近，聯共黨十九次代表大會上馬·扎·薩布羅夫在關於一九五一年到一九五五年蘇聯發展第五個五年計劃的指示報告中提到要廣泛展開生產過程的自動化。在電站中，將廣泛採用生產過程自動化，增加輕工業和食品工業用的自動裝備。在五年間，操縱儀器和檢查儀器的生產大約增加 2.7 倍……等。在新中國，過去三年經濟建設恢復的過程中，

(1) 尤金：論蘇聯由社會主義逐漸過渡到共產主義。

(2) 拉特貝茲尼科夫：“發展自動化和遠距離自動操縱的道路”一九五二年十一月十八日北京人民日報。

(3) 關於蘇聯自動金屬加工廠，可參考科學畫報一九五二年九、十月的通俗介紹。

藉助於蘇聯政府無私的偉大的國際主義精神的援助，已有部分的廠礦裝配了最新型的自動化機器。在今後，大規模的計劃經濟建設中，自動化的應用必然是愈來愈廣，它的規模也必然是愈來愈大。愈靈敏愈完善的自動化機器，它的組成也必然愈精巧複雜，對於管理人員講，對自動化的理論知識的要求也愈將提高，在另外一方面，爲了發展我們在自動化方法方面的創造能力，自動化的理論的學習對我們是愈來愈成爲必要的了。

自動控制原理就是研究機械自動化的學問。它包括兩個主要的對象。第一，研究、分析及綜合機械自動化的動作原理。研究一個機械或一整套機械在工作過程中需要配以何種性質的自動控制機構才能使該機械達到自動化工作的要求。或分析一個已成的自動化機械，研究其各部分對自動化工作的作用；從而可以測定自動化機械各部分的效用。或綜合各自動控制機構的基素而組成有一定動作的自動化機械。第二，研究自動控制機構中各種基素的具體構造及機械設計。本書的重點是在第一類。

機械自動化的種類很多，有的是在一個產品的整個製造過程中完全自動化，像活塞製造過程中從熔化鋁塊，一直到製成成品，分批包裝；像火力發電廠的自動控制，要控制燃油量、上水量，要調節煙道及通風等。有的是在一個操作過程中全部自動化，像圖 1-1 中，利用一塊樣板進行複雜面的切削工作；像飛機在兩個航站間的無線電定向飛行。有的則僅維持製作過程中所需的一定的物理量，像很多原動機上的調速器，化學工業中的流量、溫度控制等。也有的必須藉人力的操縱才能完成一定的任務，而機構本身僅傳達和加強人的指揮而已，這種機構我們給它一個特殊的名稱，作叫遠距離控制，在飛機和船舶的駕駛機構中，在笨重機身的轉移上都

常應用。這些都是自動控制的具體內容，它們的構造，應用方法和應用場所雖然不同，但它們所基的自動控制原理却是相同的，都是從最基本的自動控制原理演變及綜合而成的。

自動控制可以簡單地解釋成一種機械技能。這技能可以從測量儀器得來的指示，而去完成在某一過程中維持某一定需要量的任務。或者說，自動控制是在外界擾動的影響下，趨向於減少機構動作和所需動作之差而完成的控制動作。總的來說，自動控制是在一定的預計的意圖下，利用機構減少機構本身動作與意圖動作之差的趨勢，來完成一定的強力的控制動作的技能。

如在圖 1-1 中的自動切削過程中，樣板 A 使指示桿 C 沿着一定的預計的意圖而上下昇降，當指示桿上昇時，切削刀 D 因受工作物 B 的阻力而不能即時深入工作物進行切削。這時

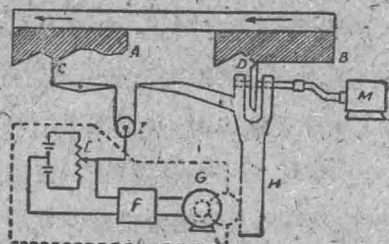


圖 1-1

在機構動作(切削刀)和意圖動作(指示桿)之間有動作差，使 E 上昇移動，遂有更強烈的電流流過放大器 F，激動馬達轉動使刀架 H 上昇，自動控制機構具有使這個動作差減小的趨勢，在很短時間中，機構產生足夠壓力使切削刀深入到工作物去完成切削過程。又如利用電爐來維持一定室溫時，假如由於外界的影響，如開啓門窗，攜入大批寒冷物件，天氣驟冷驟熱等，使室溫低於預計溫度時，溫度計讀數降低，使電流接通；電熱爐發熱提高室溫。又當室溫高於預計溫度時，即在機構動作(室溫)⁽¹⁾和意圖動作(溫度計預定的電

(1) 嚴格地說室溫是機構動作(爐溫)的後果，不能直接算作意圖動作，具體內容將在以後各章詳述。

路接通溫度)有差時,電路就接通或斷開,電爐就發散熱能,或停止發散熱能,機構就減低了機構動作和意圖動作之差。如此,就在一定的溫度範圍內維持了室溫。

自動控制是一門新穎而複雜的科學。早在 1763 年,俄國天才發明家波爾卓諾夫 И. И. Ползунов 擬制了他的全世界第一部蒸汽機同時就設計了自動上水調節器。至 1877 年俄國科學家范世聶格拉特斯基 И. А. Вышнеградский 用理論分析了原動機的直接調節問題⁽¹⁾,但自動控制的廣泛應用和它的理論的進一步的研究揮發還是本世紀三十年代以後的事。說它是一門複雜的科學因為它的應用範圍非常廣泛,凡是使用機器工作的地方都可以應用自動控制,所以它的原理也就牽涉到各種型式的機器原理,在無線電控制、電子控制方面,就必須要有無線電及電子方面的理論知識,由於無線電、電子的特殊性質,在這方面的自動控制原理也有它的特殊性及特別適合的分析綜合方法⁽²⁾。由於作者對無線電及電子方面的無知,本書不涉及有關這方面的自動控制問題。其他各種控制,雖然具體對象不同,但分析和綜合的方法都一樣,將在本書中說明它們的基本原理,至於有關各種控制的具體研究,還需參攷各種控制的專業書籍及論文。

1-2 自動控制的對象及其應用 廣義的說,凡是在生產過程中存在的任何物理和化學性質都是自動控制的對象。所謂生產過程

(1) И. А. Вышнеградский "О регуляторах прямого действия".

(2) 關於這方面的自動控制原理可參閱 В. В. Солодовников, Введение в статистическую динамику систем автоматического управления, Гостехиздат, 1952, 以及 M. H. James, N. B. Nichols and R. S. Philips, Theory of Servomechanisms, McGraw Hill, 1947.

不單指機械製造的生產過程，像製造活塞或切削推進器葉片，而是指所有的生產過程，像化學工業的操作過程，像動力廠或原動機產生動力的過程，像船舶、飛機的航行，像室溫的控制，像雷達的搜索等。所以自動控制的對象是極其廣泛的。下面我們僅羅列其中比較普遍的幾種以作說明。

位移 在機械製造過程中位移的控制是比較普遍而重要的，使切削刀追隨一定的位移，就可以利用樣板切削出一定式樣的作業。控制印刷品的安置位置，可以得到五色精印的畫片。控制駕駛輪角位移，可以使船舶在大洋中遵循一定的航向航行。控制一定的操縱桿位置，可以使大炮炮口指向一定的目標。這些都是位移控制的實例。這些位移控制假如不應用自動控制而直接用人力操縱，有的則由於作業複雜，操縱不夠精確；有的則由於所需力量過大，人力不濟；有的則由於動作變化迅速，人力追隨莫及；有的則人力無反應能力，使操縱完全不可能。

速度 在動力廠生產過程中，速度是個主要控制對象，自動控制的最早應用也是在蒸汽機的調速上的。最簡單的調速器是飛球式的，由於它構造簡單，到目前為止，在低速中速的範圍內還是很廣泛地被採用着。在高速廻轉機構上，現在都採用離心式油壓調速器及電速器。在運輸工程中，速度的自動控制是一個主要問題。

溫度 在化學過程中溫度是最常被控制的物理性質之一。很多化學過程只有在一定不變的溫度下才能得到最好的結果及變化量，而這個一定不變的溫度範圍却又往往是很微細的。故在化學過程中，溫度必須用自動控制才能得到最好的結果。在冶金工業中，一定溫度的控制也是首要的問題。此外，在實驗室中、在醫藥上、在製冷工程中、在暖氣工程中溫度控制都是主要的問題。

流量 在連續化學過程中必須控制各化學成分進入混合體的量。在這一方面，現有的一般流量自動控制設備在某些場合其精密程度尚够不上化學反應所必需的精密度。流量不單是液體或氣體的量，也有的是固體的，前兩者控制較易，後者則較難。在動力廠中，燃油或煤粉、上水及蒸汽、空氣及烟氣流量及時而精確的控制，是得到最安全最經濟的效果的主要條件。

壓力 在很多連續化學過程中，尤其是高溫反應過程中，壓力的控制也是很重要的。在動力廠中，一定的鍋爐通風壓力及一定的蒸汽壓力都需藉自動控制而在各種不同工作情況下保持不變。各種機器的滑潤油壓力及風機中的空氣壓力都是自動控制的對象。

液面 在動力廠中鍋爐的液面、蒸發器的液面以及很多化學容器的液面都必須保持在一定限度以內。最通常的簡單的液面控制是抽水馬桶的水箱及暖水系統的水箱。

除上面所提到的幾種外，還有很多控制對象，如濕度、粘度、比重、pH 值、電流、電壓、光強、聲音……等。

可被自動控制的對象既然是這麼繁多，則自動控制應用範圍也一定非常廣泛，它的應用場合大致可分成下列諸方面。

家用 家用電壓控制、無線電、自動電梯、暖汽通風設備、冰箱、衛生設備。

運輸工業

(1) 航空 主機轉速調節、全機各處油壓控制、機件各部分遠距離指示儀、自動駕駛儀。

(2) 航海 電羅經、舵機、自動駕駛儀、鍋爐系統控制、發電機電壓控制、冷藏室溫度控制、自動通風設備……等。