

# 控制论导论

W. R. 艾什比

科学出版社

73.82  
161

# 控制论导论

W. R. 艾什比 著

張理京 譯

zk 597 / 09

科学出版社

1958

W. Ross Ashby  
AN INTRODUCTION TO CYBERNETICS  
Chapman & Hall Ltd., 1956

內 容 簡 介

本书是介绍控制论入门的一本好书，共分三篇十四章。第一篇介绍控制论中对“机构”的观点和处理方法；第二篇介绍信息论的意义及其在生物学中的应用；第三篇介绍生物系统中关于调节和控制作用的原理。

可供生物、医、农、生物物理科研及教学工作参考。

控 制 论 导 论

〔英〕W. R. 艾什比 著

張 理 京 譯

\*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

\*

1965 年 6 月 第 一 版

开本：850×1168 1/32

1965 年 6 月第一次印刷

印张：10

印数：0001—4,550

字数：260,000

统一书号：13031·2066

本社书号：3168·13—10

定价：〔科六〕1.50 元

## 序

許多生物科学工作者——生理学家、心理学家、社会学家，都对控制論发生兴趣，希望能把控制論中的方法和技术应用到自己的专业上去。然而許多人不敢钻研这門学科，因为他們觉得要运用这門学科，必須先长时期地学过电子学和高深的純粹数学。他們已經形成这么一种印象，以为控制論是和这些学科分不开的。

作者深信这种印象只是一个假象。控制論的基本概念不用电子学也能讲，而且这些概念原本都是简单的；因此，虽然在高深的应用上可能需要高深的数理技术，但是我們也可用很简单的数理技术来做很多工作，特别是在生物科学上，只要在应用时能清楚而深刻地理解其中的原理。作者认为，如果根据普通的和众所周知的知識来讲这門科学，然后再逐步深入，那末即使讀者只具有初等数学知識，也完全可以理解这門科学的基本原理。学会了这些基本原理之后，他就会确切知道再进一步研究还需要什么知識；而且尤其有帮助的是，他可以从而知道哪些知識对他的研究无关紧要，可以略而不顾。

本书的目的就是給讀者提供这样一个导論。书中先从一些普通、众所周知的概念讲起，然后逐步使讀者認識到，怎样把这些概念弄得更确切，怎样来进一步发展这些概念，直到引出“反饋”、“稳定性”、“調节”、“超稳定”、“信息”、“編碼”、“干扰”等题目和其它控制論課題。从头到尾，讀者閱讀本书所需的数学知識不超出初等代数；特别是，本书中的論証沒有一处需要用微积分（偶尔提到微积分的地方可以略去而无損于理解，因为那些地方不过是为了表明，如果需要用微积分时，它怎样用在控制論的討論上）。书中的說明和举例大都是生物学上的，而不是物理科学方面的。本书和

作者的另一本书“Design for a Brain”重复处很少，因此这两本书几乎是完全独立的。但是它们也有密切关系，因此最好把两书作为互相补充的读物；读了其中的一本，有助于更好地了解另一本。

本书分为三篇。

第一篇讲机构原理，讲怎样用变换(transformation)来表示机构，讲什么叫“反馈”，讲在一个机构内的自主性可能有哪些种形式，讲机构与机构可以怎样耦合起来。书中讲到当所研究的系统很庞大很复杂(例如大脑和社会)，以致只能用统计方法来处理时，应该遵循什么原则来研究。这里还讲到当系统的各部分并不能都让我们直接观察到的情况，这就是所谓黑箱理论。

第二篇用第一篇所讲的方法来研究什么叫做“信息”，研究它通过一个机构时是怎样编码的。书中用这些方法来研究生物学上的各种问题，并设法使读者多少认识到这方面应用的可能是多么广泛。本篇内容引向申农(Shannon)的理论(信息论)；因此，读了本篇之后，读者再去研究申农本人的著作就不会发生困难了。

第三篇研究用于生物的调节和控制系统(包括生理学上所研究的先天系统和心理学上所研究的后天系统)中的机构和信息这两个概念。它告诉我们怎样把这些调节器和控制器的各部分一级接一级地，一环套一环地建立起来，从而可以看出怎样使调节的放大成为可能。书中以新的而且简单得多的方式讲解了超稳定性原理，为复杂调节系统的一般理论奠定了基础，并进一步发挥了作者在“Design for a Brain”一书中所提出的思想。这样，书中一方面说明了大脑为什么会具有这样卓越的调节功能，另一方面又给想制造具有同等功能机器的人提出了设计原理。

本书虽然是作为一本浅近的入门书而写的，但并不打算只作为跟读者随便聊聊控制论的一本书，它是为那些想深入钻研控制论，想确实懂得控制论内容的读者而写的。因此，书中包含了许许多多容易做的练习题，都是由浅入深、经过周密安排的，此外还附有提示和解答，当读者一步步做下去时，就可借以测验自己对读过的材料掌握到什么程度，并可借此锻炼他所获得的新本领。少

数几个須用特殊技巧来解的练习题标有星号(\*)。如果略去这些练习题,并不会妨碍讀者理解本书后面的内容。

为了使讀者在閱讀过程中便于查考前后的材料,本书的内容是分节来讲的。书中所有提示参閱之处都指的是节,节碼是这样来編的:例如 9-14 表示第九章第十四节。图表以及练习题的号碼都是按各节分編的;例如图 9-14-2 表示 9-14 节里的第二图。如果书中仅仅提到“題4”,那就是指本节的第四題。凡給予正式定义的术语,都下加着重点。

本书内容虽然涉及了許多問題,但這些問題本身并非本书主要目的;全书的目的在于說明:当我们打算使一个非常复杂的有病机体,例如病人,恢复他的正常机能时,我們應該遵循什么原則去做。我深信如果(医务工作者)对这些原則有了新的理解,那就会得出新的与有效的治疗方法,因为这方面的需要是很大的。

W. R. 艾什比

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 序.....                       | iii |
| 第一章 緒論(談談控制論中的新观点和新方法) ..... | 1   |
| 控制論的特点 .....                 | 1   |
| 控制論的用处 .....                 | 4   |

## 第一篇 机 构

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第二章 变化 .....     | 7   |
| 变换 .....         | 9   |
| 重复变化 .....       | 16  |
| 第三章 确定性机器 .....  | 24  |
| 矢量 .....         | 30  |
| 第四章 有輸入的机器 ..... | 42  |
| 耦合系統 .....       | 48  |
| 反饋 .....         | 53  |
| 整体內部的独立性 .....   | 56  |
| 特大系統 .....       | 62  |
| 第五章 稳定性 .....    | 73  |
| 干扰 .....         | 77  |
| 部分平衡和全平衡 .....   | 82  |
| 第六章 黑箱 .....     | 86  |
| 同构型机器 .....      | 93  |
| 同态机器 .....       | 101 |
| 特大黑箱 .....       | 110 |
| 部分可察黑箱 .....     | 114 |

## 第二篇 变 异 度

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第七章 变异度的数量 .....       | 119 |
| 变异度 .....              | 123 |
| 約束 .....               | 126 |
| 約束的重要性 .....           | 129 |
| 机器中的变异度 .....          | 133 |
| 第八章 变异度的傳輸 .....       | 140 |
| 密碼消息的还原 .....          | 145 |
| 信息从一个系統到另一个系統的傳輸 ..... | 152 |
| 第九章 信息的持續傳輸 .....      | 163 |
| 馬尔可夫鏈 .....            | 167 |
| 熵 .....                | 178 |
| 噪声 .....               | 192 |

## 第三篇 調 节 与 控 制

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第十章 生物系統中的調节 .....   | 198 |
| 維持生存 .....           | 200 |
| 第十一章 必需的变异度 .....    | 206 |
| 必需变异度律 .....         | 211 |
| 控制 .....             | 218 |
| 几种不同的說法 .....        | 221 |
| 第十二章 受誤差控制的調节器 ..... | 225 |
| 馬尔可夫型机器 .....        | 231 |
| 馬尔可夫型的調节作用 .....     | 238 |
| 确定性調节 .....          | 243 |
| 功率放大器 .....          | 246 |
| 博弈游戏和对策 .....        | 248 |
| 第十三章 特大系統的調节 .....   | 252 |
| 重复干扰 .....           | 256 |
| 調节器的設計 .....         | 260 |
| 選擇量 .....            | 264 |
| 選擇与机器 .....          | 268 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第十四章 調節作用的放大 ..... | 274 |
| 什么是放大器? .....      | 274 |
| 大腦中的放大作用 .....     | 279 |
| 智力的放大 .....        | 281 |
| 参考文献 .....         | 283 |
| 习题解答 .....         | 284 |
| 譯后記 .....          | 301 |
| 內容索引 .....         | 303 |

## 第一章 緒論(談談控制論中的新觀點和新方法)

1-1. 維納(Wiener)把控制論定義為“(關於)動物和機器中控制和通信的科學”，簡言之，這是講掌舵術的學問，本書就要講這方面的東西。本書要討論的問題是：協調、調節、控制，因為從生物學的以及從實用的觀點講，這些都是極重要的問題。

因此我們必須研究機構這一概念；但最好先讓我講几句開場白，因為控制論是從新的、不同於平常的角度來看機構的。如果不讀這些開場白，一開始就看第二章就會覺得很别扭。讀者必須對新觀點有明確的理解，因為如果在新舊兩種觀點之間有任何無意識的搖擺，都會引起混亂和誤解。

1-2. 控制論的特點 有許多書的書名叫“機器理論”，講的往往是些機械方面的物件，如杠桿和齒輪之類。控制論也是一種“機器理論”，但它講的不是物件而是動作方式。它並不深究“這是什麼東西？”而要研究“它做什麼？”因此，控制論中很重視象“這個變量作簡諧振蕩”之類的話，而對於這個變量究竟是一個點的位置還是電路中的電勢，卻遠沒有那樣重視。因此，控制論本質上是研究機能和動態的。

控制論興起之初在許多方面與物理學有關，但它在本質上並不依賴於物理定律和物質的性質<sup>1)</sup>。控制論研究一切形式的動態，只要它們是有規則的，或者說是一定的，或者說是可以再現的。至於物質實體是什麼，並無關係，同樣，平常的物理定律之成立與否對它也無關宏旨（讀者從4-15節的例子<sup>2)</sup>可以明白這句話的意

1) 控制論中的定律誠然不依賴於物理定律，但顯然要依賴於物質的性質，而且它們也象任何科學定律一樣，都是從物質的性質推出來的——俄譯本編者注。

2) 那個例子實際上也並不是完全脫離現實生活的，例如作者工作範圍內所接觸的那個精神病院裡，很可能就會遇到類似的情況，在4-15節中我們將以附注對該例另作一種解釋——譯者注。

思).控制論的真理不需要以其他科学为依据.控制論有它自己的基础.本书的部分目的也在于說明这些基础.

**1-3.** 控制論与现实机器——电子管的、机械的、神經的或經濟的机器——之間的关系,也正象几何学与现实空間中具体对象的关系一样.在以前,所謂“几何学”是研究三維空間物体之間与平面图形之間的关系的.但地球上的空間形式,無論是动物界的、植物界的以及矿物界的,其性质远比初等几何所能提供的空間形式复杂得多.在那时,几何上所提出的空間形式,如果不能在平常的空間中表現出来,那末这种形式就无人相信,或是不能被人接受.那时,几何学所研究的,完全是普通空間.

現在,情形大不相同了.几何学有它独立的地位,有它本身存在的价值.現在它能准确而系統地研究那些远非地球上的空間所能提供的空間和形式.在今日,几何包括了现实世界的空間形式,而不是现实世界的空間形式包括了几何,因为现实世界的种种空間形式,不过是这包罗万象的几何的特例而已.

几何进展过程中所获得的成就是无待贅言的.現今,几何学好比一个大框架,在这里面,所有现实世界的空間形式都可找到它們合适的位置.并且在这里面使我們很易于看出这种形式之間的关系.对空間形式有了这样更多的理解,自然就会相应地有更多的本領来控制它們.

控制論与现实机器之間的关系也是这样的.‘它是以“一切可能的机器”为其研究对象的,至于其中有的机器有沒有被人或在自然界創造出来,对它來說倒是次要的事.控制論給我們提供一个框架,在它里面可以把一切个别的机器排列配置起来,使人易于了解它們.

**1-4.** 因此,尽管有人說控制論中所研究的机器在现实世界里是找不到的,我們对这些批評也并不介意.在这方面,数学物理曾經走过同样的道路,获得显著的成就.在数学物理中,很早以来就注重研究一些并不存在的系統,例如研究沒有质量的彈簧,有质量而沒有体积的质点,具有理想性质的气体等等.如果說这些东

西不存在，那倒是千真万确的；但尽管它們不存在，这却并不意味着数学物理仅仅是些空談；物理学家也不会因此把他研究无质量彈簧的論文撕掉，因这种理論对他的实际工作是有莫大意义的。这是因为，尽管现实世界中不存在无质量的彈簧，但这种彈簧的某些性质，对帮助我們去了解甚至象钟表那样简单的系統也有很大作用。

生物学家对蛞蝓或对某一已絕种的生物作詳細研究时，也是懂得这个道理并且按照这种原則来做的，尽管从生态学或經濟方面的观点來說，对这些研究所花的力气是远远超过对象本身价值的。

同样，控制論中特別提出某些类机构（見 3-3 节），把它們看作一般理論中的重要对象；而它之所以要特別研究这些机构，并不是因为现实世界的机器大都具有这种形式。只是在充分研究了机器与机器間可能有的关系之后，控制論才来考察某一門科学中确实有的机器形式。

**1-5.** 由于控制論的这种方法是处理全面的和一般的，所以控制論在研究某一給定的机器时，照例并不关心这机器在“此时此刻的变动形式是什么”，而要关心“它可能有的全部变动形式是什么？”

基于这一情况，信息論对控制論中的問題就有了重大的意义；因为信息論的主要特点，正在于它总是研究“一批”可能性的；在它的原始数据和最后結論中，总是对整个集合本身來說的，而不是只对集合中某一个別对象（元素）來說的。

有了这种新的观点，就得考虑一类新的問題。按照旧的观点，比方說看到一个卵子成长为兔，那就会問：“为什么它成长为兔？为什么它不能永远保持卵子的形式？”要想解决这个問題，就得去研究动能方面的問題，从而找出何以卵子会起变化的許多理由：它会使所含脂肪氧化，从而放出自由能量；它有磷酸化酶，能使它的新陈代謝物作 Krebs 循环，等等。在作这些研究时，能量这一概念是必不可少的。

控制論的观点却大不相同，然而也是同样可靠的。它承认卵子具有很多自由能量，而且这自由能量处于这样一种差一点点就不能保持新陈代谢平衡的状态，以至在某种意义上来说是具有爆炸性的。结果卵子一定会生长成某种形式；这时，控制論中要問的是：“为什么要变到兔的形式，而不变到狗的形式、魚的形式，甚或一种畸形生物？”控制論要考虑到比现实范围大得多的一批可能性，然后研究为什么具体情形会受具体条件的限制。在这种討論中，能量問題几乎不起作用，能量只假定是已存在的。甚至对于所研究的系統，从能量方面来讲是开放的还是封閉的（系統的能量是否受外界影响），也常认为无关紧要；重要的只是該系統受决定因素或主导因素所影响的程度。因此，从系統中一部分傳到另一部分的任何信息或訊号或者說决定因素，都要认为是个重要事件记录下来，因此，控制論也确实可以定义为：它是研究这样一类系統的科学，在这类系統中能量无关紧要，而信息及控制却非常重要，换言之，它研究的系統是“不透信息”的（見 9-19 节）。

**1-6. 控制論的用处** 在叙述了控制論的梗概之后，就可以来讲讲控制論能有哪些用处。这里只讲控制論在生物学上最有前途的一些用处，而且只能作些簡略与籠統的論述。有許多应用已經有人实际做过了，而且大家都很清楚，这里无需再詳述；将来控制論无疑还会有更多的应用。但是控制論在科学上有两点重要的价值，特別值得一提。

第一是控制論給予我們一套統一的詞汇和概念，使我們足以用来描述形形色色、一切类型的系統。在这以前，比方說要把有关伺服机构的和有关小腦的許多事实联系起来加以比較，就会有很多不必要的困难，因为伺服机构的性质是用那些自动駕駛、无綫电接收机、液压制动器等等的術語来描述的，而有关小腦作用的事实則是用解剖室和临床实践等術語来描述的，但所用術語尽管不同，伺服机构与小腦的反射作用却有相似之处。控制論給了我們一整套統一的概念，它在每門学科中都有相应的概念，因此可以建立各門学科之間的准确关系。

如果发现了兩門学科之間的关系，結果就会使两者互有显著的促进，这类事例在科学史上是屡見不鮮的（参閱 6-8 节）。如无穷小分析与天文学，病毒与蛋白分子，染色体与遺傳，便是我們馬上就会想到的一些例子。当然，各門科学之中不能用任何一門科学来証明另一門科学的定律，但它們彼此間可以提供很有用和很重要的綫索。到 6-8 节中我們还要回头再来談这个問題。这里只要指出，控制論能告訴我們机器、大脑和社会之間，有許多有趣且有意义的相似之处。它給我們一种共同語言，使我們能把一門学科中的发现和研究成果立即应用到另一門学科上去。

**1-7. 复杂系統** 控制論第二个独特的好处是，对于那些以复杂著称而其复杂性不容忽視的系統，控制論給出一种新的科学研究方法。而复杂系統在生物界中則是司空見慣的。

对比較簡單的系統來說，控制論方法并不比那些早已熟知的方法有什么特別了不起的优点。只有当所研究的系統很复杂，这种新方法才显出它的功效。

今日科学正处于一种分水岭的时代。兩世紀以来，科学所研究的系統，如果不是本身就是簡單的，那也是可以分解为簡單組成部分的系統。一个世紀以来，人們一直接受了“每次变动一个因素”这种教条式的研究方法，这一事实足以說明，为什么迄今为止，科学家所重視的大多是許可用这种方法来研究的那些系統；因为对复杂系統來說，这种方法是根本不适用的。一直到了二十年代，出現了費歇爾（Ronald Fisher）的著作，再加上在农田上的实验，人們才認識到有些复杂系統是不可以用每次变动一个因素的办法来研究的，因为各种因素具有这样大的能动性，而且彼此間又有这样密切的联系，以至只要变动一个因素，就会立即引起別的一些（甚或很多很多）因素的变动。直到最近，科学上还是回避这类的系統，而只注重研究那些簡單的，特別是那些可約的系統（見 4-14 节）。

但在研究某些系統时，复杂性是不可能完全回避的。动物的大脑皮质組織、过着一种社会生活的蟻穴、乃至人类的經濟系統，

就其在实践上的重要性而論，都是非常突出的。因此現今我們眼看着精神病患者不得治愈，眼看着社会衰退經濟失調，而科学家除了对其研究对象的复杂性咋舌之外別无他法。但今日的科学已开始把“复杂性”本身作为一个題目来研究了。

研究复杂系統的种种方法里，控制論是数一数二的。我們平常从那些简单机器如鬧钟和自行車等得来的关于机器的概念，是含糊的，限于感性方面的，控制論对这都舍弃不用，而另树严格的基础。剛学的时候（例如讀本书的头几章时），也許你会觉得所讲的尽是一些老生常談和妇孺皆知的道理，但这不过是为了使控制論的基础显得寬广而且牢靠。打好了这些基础，就可以一步步深入学控制論，不致于象过去搞复杂系統特别是打算研究象活的大脑这种对象时，一开始就夹杂許多模糊不清的概念。

对于想研究并控制那些本身极端复杂的系統的人，控制論有可能提供有效的方法。首先它可以告訴我們什么是办得到的（因为过去許多研究之所以失敗，可能就是由于试图做那些明明是办不到的事），其次是它給出能用来对付各种特殊情况的一般策略，其价值是可用試驗来証实的。現今由于其本身的复杂性而使我們束手无策的許多病变，如心理上的、社会上的以及經濟上的許多病变，我們有可能从控制論中得出对付它們的根本办法<sup>1)</sup>。在本书的第三篇中，作者并不自詡能完善給出这一类方法，但作者打算給出建立这种方法的基础，并指引讀者往正确的方向去找。

---

<sup>1)</sup> 在一种新的科学方法剛产生和获得初步成功的时候，人們往往对之寄予过奢的希望，如 Laplace 之对于微分方程那样。控制論的确可以提供一种新的极有效的工具，但是不大可能专靠它来找出解决社会問題和經濟問題的根本办法。N. Wiener 对这方面曾发表过相当清醒的見解（参看 N. Wiener 著“Cybernetics”，34 頁及 181—191 頁）——譯者注。

# 第一篇 机 构

我們认为某一事物所具有的种种性质，归根到底无非是給它的行为起些名字。

(Herrick)

## 第二章 变 化

**2-1.** 控制論中最基本的概念是“差异”。不但是两个事物之間可以分辨出差异来，就是同一事物也会随着時間的推移发生变化。差异这一概念的应用范围，現在不必多讲，以后各章中会有許多事实來說明的。随着時間的推移而产生的一切变化，自然都属于差异之列，因为无论是植物的生长，行星的衰老，机器的运转，这里面都含有从一种状态轉到另一种状态的变化。所以我們第一步是要讲“变化”这一概念，不但要把它讲得更确切，还要丰富它的内容，而且进一步把这概念提炼成一种数学形式，因为根据經驗，若要从这概念得出有用的結果，非得把它化成数学形式不可。

变化往往是渐进的或者說是連續产生的，也就是說，常常是无穷小的步伐进行的。但是，若我們要考察无穷小的变化步伐，那就要用到純粹数学上較难的一些概念，因此我們要根本避免讲这样的变化。反之，在本书的任何地方，我們都假定所讲的变化是在一段時間內分成有限步跳着产生的，而且每变一次（或者說跳动一次），所产生的差异也是有限的，而不是无穷小的。我們假定，变化是每次跳过一定数量而发生的，好比銀行存折里的存款数目，每次变化的数額起碼是一分錢。通常在这个世界中变化都是連續发生的，我們这样把变化都当作是一步步跳着发生的，看来似乎很不自然，但在这本导論中，这样假定之后有很大的好处，而且也不象初步所設想的那样不自然。因若差异是以有穷的大小跳着发生的，

那末以后可以看到，所有重要的問題，就都可用簡單的計算来解决，就容易断定所得的解答是对还是不对。如果我們一开头就来研究連續的变化，那我們就常要拿无穷小与无穷小相比，或者要考察无穷多个无穷小加起来会得到什么，而这些問題并不都是很容易回答的。

分步跳动的变化(或离散变化)可以轉到連續的变化，这有一个简单的办法，并且在实用上足够准确，就是作一个图，用一个个的点来表示分步变化中的各个数值。然后只要設想这样作出的点无限增多并且彼此无限靠攏，就容易看出，所考察的分步变化如果化成連續变化，它会取什么样的形式。

事实上，即使我們只限于讲有穷的分步变化这种情形，也可以把事情面面都讲到，一点不会遗漏。因为，如果我們确切知道每步按一定大小的差异来变会得出什么結果，那也就可以考察差异小得多时的情形。确切掌握了这一情形，又可进一步考察差异更小的变化。对每一步的情形都有了把握之后，我們就可以一直推下去，直到我們能掌握变化的趋势为止；然后我們可以說出每一步变化的差异趋于零时的极限情形是怎么样的一种情形。事实上，数学家要想确切知道連續变化究竟是怎样进行的时候，也常是用这个方法来研究的。

所以，单讲有穷差异这种情形，还是什么都能学到手的；它可以提供简单而又明确的基础知識；而且，如果需要的话，还总可以把它化为連續变化的形式来讲。

这个問題我們在 3-3 节中还要再談。

**2-2.** 其次，提一下以后不断要用到的几个概念。拿皮肤被阳光晒黑这个简单的例子来讲吧。这里，有一件东西——皮肤，受到一种因素——太阳——的作用，从而变黑了。那个受到作用的东西——皮肤，我們叫它做原象或被映元素，那个起作用的因素叫做算子或作用素，而由原象或即被映元素(皮肤)所变成的那个东西(晒黑的皮肤)，叫做映象(变换象)。所发生的这一变化，可以明确地記为