

旷世名典

KUANG SHI MING DIAN



控制论 一般系统论

中国社会科学出版社

控 制 论

(或关于在动物和机器中控制和通讯的科学)

[美] N. 维纳 著

郝季仁 译

中国社会出版社



目 录

导 读	(5)
原著第二版序言	(7)
第一部分 初版 (1948)	(19)
导 言	(19)
第一章 牛顿时间和柏格森时间	(52)
第二章 群和统计力学	(69)
第三章 时间序列, 信息和通讯	(87)
第四章 反馈和振荡	(124)
第五章 计算机和神经系统	(146)
第六章 完形和普遍观念	(165)
第七章 控制论和精神病理学	(176)
第八章 信息、语言和社会	(188)
附 注	(199)
第二部分 补充的几章 (1961)	(201)
第九章 关于学习和自生殖机	(201)
第十章 脑电波和自行组织系统	(214)



导 读

维纳 (1894—1964), 美国数学家, 控制论创始人之一。他主张改进和加强数学与工程、医学和物理等科学之间的相互作用, 社会就会获得深远的利益。由于对 20 世纪的数学作出了重大贡献而享有国际声誉。他是位神童, 3 岁即能读书、写字, 14 岁大学毕业, 18 岁在哈佛大学以数理逻辑的论文取得博士学位。此后他先去英国剑桥大学师事哲学家、数学家 B. 罗素, 再去德国格丁根大学就学于当时最伟大、最多才多艺的数学家之一的 D. 希尔伯特。1919 年到麻省理工学院数学系工作, 直至退休。20 年代, 他在现今称为随机过程的领域 (特别是布朗运动理论) 和广义调和分析领域中做了高度独创的具有基本意义的工作, 同时对数学分析的其他问题也有深入研究。1933 年获美国数学会 5 年颁发一次的博彻尔奖, 同年, 再次获得被邀请主持该会的学术讨论讲座的荣誉, 他的讲演就是 1934 年出版的《复域中傅里叶分析》(与 R.E.A.C. 佩利合作)。

第二次世界大战期间, 他研究炮火控制, 并写出《平稳时间序列的外推、内插和平滑》(1949), 这使他与苏联数学家 A.N. 柯尔莫哥洛夫一起成为平稳时间序列预测理论的建立者。1948 年, 他的名著《控制论: 或关于在动物或机器中控制或通信的科学》(简称《控制论》) 出版。

这是一本阐述控制论的理论和它在各方面应用的综合性、概论性的书。作者通过本书奠定了“控制论”这门新兴学科的基础。书中关于怎样把机械元件和电器元件组成稳定的、具有特定性能的自动控制系统，关于怎样用统计方法研究信息的传递和加工等方面的讨论，对于自动控制、通讯工程、计算技术等有关的科学工作者有重要参考价值。书中关于如何应用控制论研究人的神经和大脑的活动，研究生物的适应和生殖机制，对生理学、心理学、医学工作者亦有参考价值。关于本书诞生过程的历史叙述，对如何发展边缘学科，从方法论的角度也有意义。本书是研究控制论的重要的、基本的参考文献之一。



原著第二版序言

大约十三年前，当我写“控制论”初版的时候，我是在某些严重困难的条件下进行这一工作的，它使初版不幸产生许多排印上的错误和少数内容上的错误。现在，我相信这样的时刻已经来到，控制论已经不只是被当作要在未来某一时期方能实现的计划，它已经是一门现存的科学。因此，我借这个机会，根据读者的要求，对初版作了必要的改正，与此同时，根据这门学科的现状和初版问世以来出现的有关的新思想方法，把初版加以扩充。

如果一门新的科学学科是真正有生命力的，它的引人入胜的中心就必须而且应该随岁月而转移。当我开始写“控制论”的时候，我发现说明我的观点的主要困难在于：统计信息和控制理论的概念，对当时传统的思想来说，不但是新奇的，也许甚至是对传统思想本身的一种冲击。现在，这些概念已经成为通信工程师和自动控制设计师手中如此熟习的工具，以至我现在主要要担心的是，本书是否会被人认为已经陈旧和平庸。反馈的重要性在工程设计和生物学中都已经牢固地奠定了，信息的应用、量测和传输信息的技术成为训练工程师、生理学家、心理学家和社会学家不可少的一部分。当本书初版发行时，自动机还仅仅是一种预测，现在已经取得了自己的地位，至于我





在本书中和在“人应该象人那样来使用”^①的通俗小册子中一再警告过的、与自动化相联系的社会危机则已经从地平线上升起很高了。

因此，控制论学家应该继续走向新的领域，应该把他的大部分注意力转到近十年的发展中新兴的思想上去。各种简单的线性反馈的研究，在唤起科学家对控制论的研究方面曾经是十分重要的，但是，这些反馈现在看来已经并不象它们最初所显出的那样简单和线性的了。的确，在早期的电路理论中，系统处理线路网络的数学方法并没有超出对电阻、电容、电感的线性并置。这就是说，整个问题只要用对被传输消息的调和分析和消息所通过的线路中的阻抗、导纳及电压比就足够加以描述。

在“控制论”出版很久以前，人们就已经开始认识到，上述框子不易适于对非线性电路（如我们在许多放大器、电压限制器、整流器和其他器件所发现的）的研究。虽然如此，由于缺乏一种较好的方法，把老的电机工程的线性概念加以扩充，扩充到远远超出这些新的装置能够用这些老概念自然地加以表示的范围的种种尝试一直在进行着。

大约是1920年，当我来麻省理工学院的时候，处理与非线性装置有关的问题的一般方式是吧阻抗概念设法加以扩充，使它既包括线性系统，又包括非线性系统。结果使得非线性电机工程的研究陷入一种类似托勒密天文学系统的最后阶段所处的那种状态，那时的托勒密天文学是本轮上再套以本轮，修正上面加修正，直到那庞大的杂凑的结构最后在自身重量的作用下被压跨。

正象哥白尼系统从捉襟见肘的托勒密系统的残骸上兴起，



^① Wiener, N., *The Human Use of Human Beings, Cybernetics and Society*, Houghton Mifflin Company, Boston, 1950.



以它简单而自然的日心说代替复杂而不清楚的托勒密地心说来描述天体的运行一样，非线性结构和系统（不论它们是电气的或机械的，天生的还是人造的）的研究也需要一个新的、独立的出发点。我在“非线性问题的随机理论”^①一书中曾试图为此开辟一条新途径。现在弄清楚了，在处理线性现象时极为重要的三角分析，在我们研究非线性现象时并不要它。有一个十分明白的数学上的理由来说明这个问题，电路现象，象许多其他的物理现象一样，都存在一种不变性作为它的特征，这种不变性是对时间原点的移动为不变来说的。一个物理实验，如果从中午开始，要到2点钟才达到某一阶段，假设从12点15分开始，则要到2点15分才能达到那同一阶段，也就是说，物理定律对于时间平移群是不变式。

对于上述的平移时间群，三角函数 $\sin nt$ 和 $\cos nt$ 也有某个重要的不变式。在 t 上加 τ 的平移，使一般函数

$$e^{i\omega t}$$

变成

$$e^{i\omega(t+\tau)} = e^{i\omega\tau} e^{i\omega t}$$

的形式，这是与前一函数相同的函数。因为

$$\begin{aligned} a \cos n(t+\tau) + b \sin n(t+\tau) \\ &= (a \cos n\tau + b \sin n\tau) \cos nt + \\ &\quad + (b \cos n\tau - a \sin n\tau) \sin nt \\ &= a_1 \cos nt + b_1 \sin nt, \end{aligned}$$

也就是说，函数族

$$Ae^{i\omega t}$$

和

^① Wiener, N., *Nonlinear Problems in Random Theory*, The Technology Press of M. I. T. and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1958.

$$A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

在平移下是不变式。

还有另外一些函数族它们也是平移的不变式。我们来看看所谓随机行走，作这种行走的一个粒子的运动在任何时间间隔内都有一个分布，这个分布只与时间间隔的长度有关，而与这时间间隔的起始点无任何关系，随机行走系综经时间平移后也仍然是自己本身。

也就是说，有别的函数集也具有三角曲线的那种纯平移不变性。

三角函数在这种不变性上还附带有一种性质作为它的特征，这就是

$$Ae^{iat} + Be^{iat} = (A + B) e^{iat}$$

因此，这些函数形成一极简单的线性集。请注意这种性质与直线性有关；也就是我们可以把频率一定的所有振动都化为两个振动的线性组合。正是这一特性使调和分析在处理电路的线性性质时具有价值。函数

$$e^{iat}$$

是平移群的特征标，从这函数得出这种群的线性表示。

当我们要进行的函数组合不只涉及常系数相加时——如当把两函数互乘时——简单三角函数不再有这种初等群的性质。另一方面，随机行走中显示出来的随机函数却具有某种非常适合于用来讨论非线性组合的性质。

我不想在这里详细讨论这个问题，因为它在数学上过于复杂，在我的“随机理论的非线性问题”书中涉及了这个问题。书中的材料已经在讨论特殊的非线性问题时发挥很大的作用，但是要实现书中提出的计划，还有许多工作要做。它在实践中的结论就是：在研究非线性系统时，布朗运动的特征标比三角函数集更适于用来作为测试用的输入。在研究线路时，布朗运



动的函数可以用物理方法靠散粒效应来产生。散粒效应是电流中的一种不规则现象，它是由于电流并不是由一连续的电流所引起的，而是由一系列可分开的、相等的电子的流动所引起的。因此，电流具有统计的无规则性。电流本身有一定的均匀特性，但当它被放大到某一倍数时，就显出它包含有相当大的随机噪声。

我将在第九章中表明，随机噪声的这种理论不只是可在电路和其他非线性过程的分析上加以实际应用，而且在它们的综合上同样可以加以应用^①。用来实现这些目的仪器，把有随机输入的非线性装置的输出，化为一由某些规格化正交函数组成的特定系列，这些函数与厄米特多项式很相近。非线性线路的分析问题在于用平均的方法，从输入的某些参数来定这些多项式的系数。

这种方法的说明是非常简单的。用黑箱表示一个尚未分析出来的非线性系统，还有，我把某些具有已知结构的物体叫做白箱，用它们表示所求展开式的各项^②。我把同一随机噪声加进黑箱和一给定的白箱。在黑箱的展开式中，给定白箱的系数由黑箱和那白箱的输出的乘积的平均值来给定。这个平均值是对散粒效应输入的整个系综的平均值，但是有一条定理允许我们一般都可以用一个对时间的平均值来代替这个对系综的平均

① 我在这里用“非线性系统”一词并不排除线性系统，而是包括很大一类系统。用随机噪声来对非线性系统加以分析的方法也适用于线性系统，而且已经这样用了。

② “黑箱”和“白箱”两词是一种方便而形象的说法，它们的含义还不十分确定。我把黑箱了解为这样一种装置，它是有两个输入端和两个输出端的四端网络，它对输入电压的现在和过去实行一确定的操作，但是关于它靠什么结构来执行这种操作，我们并不必须知道任何信息。另一方面，白箱也具有类似的网络，它是我们为了获得输入——输出间一事先确定的关系，根据特定的构造计划，在输入和输出电压之间建立起联系的那种网络。

值，只有一组概率为零的情形不允许这样做。要得到这个对时间的平均值，我们只需一个随便什么乘法器，用它得到黑箱和白箱输出的乘积，至于平均器，不用说我们可以利用下述事实，即电容器上的电压与电容器中的电量是成比例的，因之，也是与通过电容器的电流的时间积分成比例的。

构成黑箱的等价表示式的各相加白箱的系数不但可以逐一确定，而且可以同时定出来。甚至还可以利用适当的反馈装置，使每一个白箱自动调节自己到与黑箱展开式中它的系数相应的水平。这样我们就能制造一个多用白箱，当这个白箱与一黑箱恰当地联接起来，并使两箱接上同一随机输入时，这个白箱将会自动地使自己成为那个黑箱的运算上的等价体，虽然它们的结构可以有很大的不同。

这些分析，综合的操作和白箱把自己自动调节到和黑箱相等的操作都可以用另外一种由亚玛·博丝（Amar Bose）教授^①和格博（Gabor）教授^②提出的方法来实现。在所有这些方法中，用了一套发动和学习的程序，这些程序是通过为黑箱和各自白箱选择恰当的输入并把两种箱子加以比较来实现的；在许多这类的程序中，包括格博教授的方法所用的程序中，乘法装置都起着重要作用。用电的方法使两个函数相乘的问题虽然有许多途径可走，但在技术上却不容易实现。一方面，一个好的乘法器必须在一个很大的振幅范围内工作。另一方面，为了使它在高频时保持准确，它的操作必须几乎是立即瞬时完成的。格

① Bose, A. G., "Nonlinear System Characterization and Optimization", *IRE Transactions on Information Theory*, IT-5, 30-40 (1959) (Special Supplement to *IRE Transactions*).

② Gabor, D., "Electronic Inventions and Their Impact on Civilization", *Inaugural lecture*, March 3, 1959, Imperial College of Science and Technology, University of London, England.



博要求他的乘法器频率变化范围近1,000周。在他担任伦敦大学科学和工艺皇家学院电机工程教授的就职演说中，他没有明显地说出他的相乘方法适用的频率范围，也没有说出它们能达到的准确度。我迫切等待着这些性质的明显说明，以便能对这种乘法器用在与它有关的其它仪器上的价值作出可靠的估计。

所有这些装置里面都有一个仪器能根据过去的经验使自己采取特定的结构或功能，这样的装置引起工程学和生物学中一种非常新的看法。在工程学中，具有类似性质的装置，不但能够用来作游戏和作其他有目的的行动，而且它在作这些事情时，还可以根据过去的经验来不断地改进自己的行为。我将在本书第九章讨论这方面的某些可能性。生物学上，我们至少也遇到类似的现象，它们可能是生命的主要现象。遗传之所以可能，细胞之所以繁殖，必须靠细胞中携带遗传的部分——即所谓基因——能够建造另一个和自己相象的同样的携带遗传的结构。因此，如果有一种方法，使得人造的结构能够生产出另一与自己的功能相同的结构出来，这将是非常激动人的事。我将以第十章专门研究这个问题，特别要讨论一给定频率的振荡系统怎样来把另一些振荡系统变成与它的频率相同的振荡系统。

人们常说产生任何一特殊种类的分子使它和一现存分子相同的问题与工程中使用样板的问题相类似，因为我们用一部机器的一个功能元件作样子，靠它把另一个相同的元件做出来。样板的阴模是一个静态的东西，而一个基因分子控制另一个基因分子则必须有某个过程。我有一个尝试性的意见：频率（例如分子谱线的频率）可以是样板元件，生物物质的相同由它来实现；基因的自繁殖可能是我要在后面讨论的频率自繁殖的一种表现。

我已经一般地谈到过学习机。我将用一章来详细地讨论这些机器、实现它的可能性和涉及它的应用的某些问题。这里我

只打算作一点一般性的说明。

如第一章中将看到的，学习机的概念与控制论本身是同时出现的。在我提到的防空预测器中，预测器的线性特性决定于我们对打算预测的那个时间序列的统计系综的长期认识。当对这些线性特性的知识能够根据我在该章中给出的原则从数学上计算出来时，我们就完全能够设计一种计算器，用它算出这些统计特性，把预测器的短期特性用这同一个机器在进行预测中已经得到的经验来表示，而且这种表示是自动地完成的，这种方法能远远超出纯粹的线性预测器的范围。在卡里安帕尔 (Kallianpur)，马塞里 (Massani)，亚郭托维奇 (Akutowicz) 和我自己^① 的许多论文中，已经发展了一种非线性预测的理论，这种预测想必至少可以用相同的方法来机械化，即利用长期观察为短期预测建立一统计基础。

线性的和非线性的预测理论都涉及预测的切合程度的某种判定标准。最简单的判定准则就是使误差的均方值减到最小，虽然这个准则决不是唯一有用的准则。这个准则以一种特殊的形式联系布朗运动的汎函加以应用，我用这些汎函来构造一个非线性仪器，只要我的展开式中有许多项具有一定的正交性。这些正交性使得有限数目的这些项的部分和就是那要仿造的仪器的最好的模仿，只要保持住误差的均方判定准则的要求，我们就能用这些项来制造那仪器，格博的工作也是建立在误差的均方判定准则上，但是通过一种更普遍的方法，它能够应用到由经验获得的时间序列上。

^① Wiener, N., and P. Masani, "The Prediction Theory of Multivariate Stochastic Processes", Part I, *Acta Mathematica*, 98, 111-150 (1957); Part II, *ibid*, 99, 93-137 (1958). Wiener, N., and E. I. Akutowicz, "The Definition and Ergodic Properties of the Stochastic Adjoint of a Unitary Transformation", *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, Ser. II. VI, 205-217 (1957).



学习机的概念可以扩充到远远超出应用预测器、过滤器和其他类似仪器的范围。研究和制造出能玩象棋之类的竞争性游戏的机器是特别重要的。这方面萨美埃尔 (Samuel)^① 和瓦坦拉比 (Watanabe)^② 在国际商业机器公司的实验室已经进行了重要的工作。在过滤器和预测器的情况下, 时间序列的某些函数都由一大类本身能够被展开的函数来表示。这些函数对于决定游戏取胜有意义的量都有一数值计算。这些量包括例如双方棋子的数目, 这些棋子的总活动范围, 它们的机动性等等。在开始使用机器时, 各种不同的走法上的考虑都被给定一尝试性的权重 (tentative weightings), 机器选择一种规则上容许的, 总权重为最大值的走法。到此为止机器还是按定死的计划来工作, 还不是一部学习机。

但是, 有时机器执行另一种不同的任务。它试着把那个函数 (该函数值在游戏取胜时为 1, 失败时为 0, 平局时可能为 1/2) 用许多函数来展开, 这些函数代表的是机器能够认识到的那些方案。这样, 机器重新确定这些方案的权重, 使自己能玩更复杂的游戏。我将在第九章中讨论这类机器的某些性质, 但是我在这里要指出, 已经非常成功地使机器在经过 10 到 20 小时的学习和工作后, 能够击败它的设计者, 我还想在那一章中提到在类似的机器上进行的研究工作, 这些机器设计来证明几何定理和在有限的程度内模拟逻辑推理。

所有这种工作都是自动程序设计的理论和实践的一部分, 在麻省理工学院电子系统实验室, 对于自动程序设计进行过深

① Samuel, A. L., "Some Studies in Machine Learning, Using the Game of Checkers", *IBM Journal of Research and Development*, 3, 210-229 (1959).

② Watanabe, S., "Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation", *IBM Journal of Research and Development*, 4, 66-82 (1960).

人的研究。现在已经发现，除非用上某种学习机器，要设计出一部严格模仿其他机器的机器是一件非常困难的事，而现在却迫切需要有能设计这种程序的机器。

现在，学习机的概念不但应用于我们制造出来的机器，而且适用于我们叫做动物的那些活机器，因此，有可能给生物控制论以新的希望。在许多最近的研究工作中，我愿意指出斯坦莱-约里斯论生命系统的控制论（Cybernetics of living systems, 请注意控制论一词的拼法）一书^①。在这本书中，他们对神经系统的反馈给予了很大的注意，这些反馈工作水平，又象其它对特殊刺激起反应的反馈一样能保持神经系统的工作水平。既然系统的工作水平与特殊反应的组合在很大范围内是乘性的，这种组合也就是非线性的而且具有我们已提及的那种种性质。这个领域的工作最近非常活跃，希望它在不久的将来变得更为活跃。

我曾经提出过的记忆机和自繁殖机的方法在很大程度上要靠具有高度专门化的装置，或者我叫它兰图式的装置才能实现。同一过程的生理方面必然更多地符合生命机体某些特有的机能，在生命机体中，照兰图行事的过程为另一较不专门化的，但使系统能组织自己的过程所代替。本书第十章专门研究了自行组织过程的一个实例，即由于这种过程，在脑电波中出现狭窄的，高度分化的频率。因此，第十章大部分是前一章在生理学上的补充，前一章中我在较为兰图式一点的基础上讨论了同一过程。脑电波中有谱线很细的频率以及我提出的解释它们是怎样产生出来的理论，它们能起什么作用，它们可以有什么医学上的应用，所有这些，在我看来，都是生理学中重要的

^① Stanley-Jones, D., and K. Stanley-Jones, *Kybernenecs of Natural Systems, A Study in Patterns of Control*, Pergamon Press, London, 1960.