

一、什么是控制论





（一）控制：无所不在的神灵

“什么是控制？”如果有位朋友这样问你，你一定很吃惊，又不是小孩，怎么问这种问题。是的，“控制”这个字眼几乎人人都很熟悉。当然，如果要给“控制”下一个严格的科学定义，也许并不容易。但这是写百科全书或编字典的先生们的事，我们这本小册子并不打算越俎代庖，替他们做这种事，我们就先按大家所默认的那种“控制”的意思谈起吧。或许，从实际的例子中我们可以慢慢地悟出其内涵，从而得到对“控制”的比较清晰的概括。

控制，像一个神灵，它无所不在。

当你坐在电视机前，手握遥控器，选择频道并调节声音强度时，你在控制电视机。当你坐在汽车上，看司机手握方向盘，决定行车路线；脚踩油门，掌握车速，你会想到，是司机在控制汽车。也许你在洗澡时，你靠热水阀门与冷水阀门控制水量和水的温度。也许你在吃涮羊肉时，你靠旋钮控制着火锅的火力大小……生活中处处有控制。

如果你到工厂去，在机械厂，你看到车工开车床，他们靠手柄控制进刀速度，靠变速箱控制车床转速。在炼钢厂，他们靠改变顶吹氧气的进气量调节炼钢炉内的温度，从而控制钢的还原化学反应。



如果你到水库或水电站去，你看到技术员靠调节水闸门的高低控制水流量，从而保证发电机的正常运行。

在机场的指挥塔，人们用雷达指挥飞机升降，控制跑道。在火车站的调度室，人们靠计算机统筹，控制铁路网的畅通……

在工农业生产中，控制无疑是人们最得力的助手。

也许我们可以这样描述控制系统：它不是钟摆，也不像任何一部只是不断重复一个单调动作的普通机器。它具有一定的灵活性和适应性，可以根据周围环境的变化，吸收并分析得到的信息，并据此自动调整自己的行为。而在控制系统中能够实现这种调整功能的机制就是控制，或者称之为“控制器”。

这里，我们要特别强调一类控制，它不像前面举的某些例子那样简单而显见，它们的控制功能是自动完成的。

例如你们家里的电冰箱，你从它的电动机的响声可以知道它是处于通电或断电状态。电冰箱是否需要通电制冷是根据箱内的温度来决定的。但你并不需要去测量温度，然后根据温度来决定是否打开开关，电冰箱会自动做这件事。这就是我们通常说的“自动控制”。自动控制是控制理论研究的主要对象。

在核电站，大型反应堆里有很强的辐射性，人们是不



可以接近它的。要自动控制铀棒在反应炉中的位置，才能保证反应堆安全运行。

导弹在空中飞行，必须根据地形、气流等条件调整自己的飞行轨道，没有人坐在上面驾驶它。

人造卫星、宇宙飞船、航天飞机……在超高速飞行中，全靠计算机和各种仪器仪表去实现自动控制。

在科学研究中，在高科技领域里，控制理论正扮演着越来越重要的角色。

从报纸、电视或广播中，你常常会看到或听到这样一些说法：某地的病虫害得到控制；由于大量植树，加强水土保持工作，京郊的沙漠化现象得到控制与逆转；还有如通过宏观调控，我国的通货膨胀率得到控制；等等。

这里谈到的控制，实际上是人类对生态环境、对社会经济系统的控制。这种控制就更复杂了。它涉及许多因素，难以完全由一个数学模型来刻画它，有时甚至不完全是一个自然科学的问题。可以说，人们还没有完全掌握它们的规律，许多问题还在探索之中。

也许，你正走在北京王府井大街上。在拥挤的人流中你或许会想到：这样下去还得了！我们一定要控制人口。

也许，你会因为考试考砸了，或者和朋友吵翻了，情绪失常，回家发脾气，甚至痛哭。这时，你父母会对你说：



你要控制自己的感情。

你大概听说过关于试管婴儿、精子银行所引发的种种议论与争议吧？还有遗传工程、基因再造以及克隆羊等带来的各种迷惑和猜测吧？这些都关系着人类自身的发展和未来，并引发了深刻的伦理和道德问题。

人类正在设法了解和控制自身，控制人类的未来。自从20世纪50年代染色体DNA分子双螺旋结构被发现以后，生命的奥妙正在被破译。生物工程、分子动力学……这些与生命及遗传有关的科学正在飞速发展。有人说：生命科学将是21世纪最具挑战性的学科。而控制论必将在其中发挥举足轻重的作用。

总之，从生活到工农业生产、科学研究、国防建设，无处不留下“控制”这个神灵的足迹。从社会生活，经济运行，生态到生命科学，人类对环境、对自身命运、对未来的探索，到处都是控制论的用武之地。

（二）系统与控制的理论——控制论

“控制论”顾名思义，就是研究控制的理论。控制，有点像打仗。中国有句古话：“兵来将挡，水来土掩。”控制正是如此，它的基本特点就是：要针对不同的情况采用不同的策略。打仗要研究兵法，要实现高质量的控制就

要研究控制系统的性质及控制规律。这门学科就叫控制论。

也许有人会问：对于本书前面所谈到的那么广泛的、几乎无所不包的控制，我们究竟能找出多少规律？这话问得不无道理，现有的控制理论，在对付许多控制问题上还力不从心。在某些方面，例如对生命科学等，我们能做的事情还十分有限。况且，这本小册子也不可能对控制论做面面俱到的介绍。这里仅介绍目前控制论的主要研究对象和比较成熟的结果。

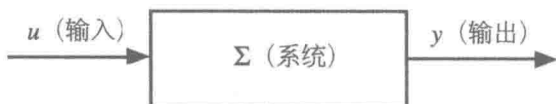


图 1 控制系统

图 1 是一种典型系统的图示法：用一个方匣子表示一个系统。 Σ 是这个系统的模型。方匣子有一个输入，我们通常把它称为控制输入，用 u 表示。 u 经过系统加工，得到一个输出，记作 y ， y 也称为观测输出。我们不能直接看到匣子里的东西，只能看到 y 。这有点像电子游戏机。 u 像手柄，你可以把它放到不同位置。 y 像图像，比如小人。不同的 u （即手柄转到不同位置），小人就会有不同的动作，而游戏机的内部结构一般是不能直接看到的。

当然，控制论要研究系统。它的任务不是玩游戏机，



而多少有点像研究和制造游戏机。因此，它要将系统 Σ 刻画出来进行研究。那么，应该怎样描述一个系统呢？我们举一个有趣的例子来说明它。

你听说过斐波那契 (Fibonacci) 数吗？斐波那契是 12 世纪意大利的数学家，他提出过这样一个问题：一对小兔子，过了一个月长成一对大兔子；一对大兔子，每个月生一对小兔子。由一对小兔开始，问 n 个月以后，共有多少对兔子？（假如兔子不死）

如果我们用 B (Baby) 表示一对小兔子， R (Rabbit) 表示一对大兔子，那么，很容易得到如图 2 所示的兔子增长图。

由图 2 可以看出，兔子的对数是这样的：1, 1, 2, 3, 5, ……如果我们用 F_n 表示第 n 个月的兔子对数，那么，容易看出这样的规律：每个月的兔子对数都是前两个月兔子对数之和。用式子表示就是

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad (1-1)$$

我们知道，头两个月都只有一对兔子，即

$$F_1 = F_2 = 1$$

那么，用公式 (1-1) 就可以算出 $F_3, F_4, \dots$ 用计算机计算这个序列

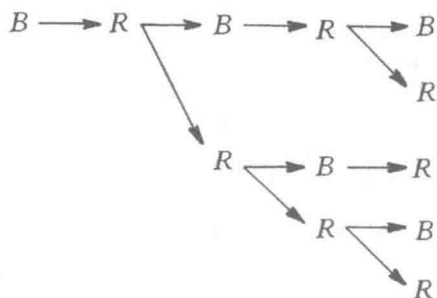


图 2 斐波那契数



是最容易不过了。如果你学过 C 语言，就可以用一个简单的函数来实现它，即

```
int F(int n){  
    if (n ≤ 2) return(1);  
    return  $F_{(n-1)} + F_{(n-2)}$ ; }
```

公式 (1-1) 就像一个钟摆，它简单地生成一个数列。这里没有控制，所以不是一个控制系统。

现在假定，养兔人每月根据兔子的多少买进或卖出 u_n 对小兔，买进时取 u_n 为正，卖出时取 u_n 为负。那么，公式 (1-1) 就变成了

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} + u_n \quad (1-2)$$

这样，兔子的对数就可以由 u_n 来控制了。如果我们把实际兔子数看作输出。这样，我们就得到了一个控制系统。我们把这样造出来的系统称为斐波那契系统。可以用

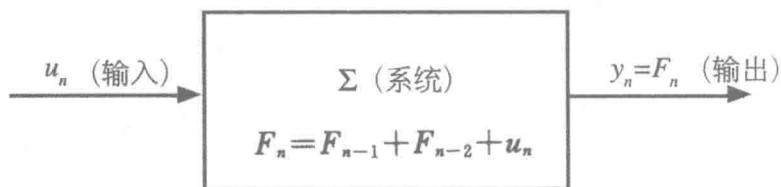


图 3 斐波那契系统



图 3 来描述它的结构。

上面提到的方程 (1-2) 称为差分方程。在上述方程中, 时间间隔是一个月。即兔子个数一个月才变一次。有些变量, 变化很快, 例如细菌繁殖。这时, 时间间隔应取得非常小。当时间间隔趋于零时, 差分方程会变成另一种方程, 即微分方程。差分方程与微分方程是用来描述控制系统最常用的两种方程。

上面讨论过的那种输入-输出系统是目前控制理论研究的主要对象。输入-输出关系也常常被称作系统的动力学行为。美国“控制理论未来方向”专门研究小组在 20 世纪 90 年代的一份研究报告这样描述这种形式的控制系统: “可以这样来描述控制这个概念, 它是影响动力学系统的行为以达到预定目标的过程。很多物理系统的控制是根据对输出的观测而由输入的作用来实现的, 其方式与飞机驾驶员根据仪表与视觉观测进行控制差不多完全相同。所谓控制就是基于可获得的数据确定实现给定目标所必须的输入。”

建立数学模型, 然后根据模型找出不同的控制以实现给定目标, 这是控制论的基本任务。建立模型是非常重要的, 它必须能反映实际情况。例如, 我们前面讨论的那个系统, 如果养兔人每个月买进或卖出的是 u_n 对大兔子而

非小兔子，方程会变成什么样子？如果小兔子要两个月才能长成大兔子，方程又是什么样子？聪明的中学生应该能把它们列出来。不过，如果你暂时列不出来也没关系，因为直接在输入-输出模型下做这件事比较困难，等我们将斐波那契系统用状态方程表达出来时，问题就变得十分容易了。

上面提到，如果没有控制， F_n 很容易用计算机算出来。其实，如果控制 u_n 或其规律已知， F_n 也容易找出。计算机还可以帮我们找 u_n ，使相应的 F_n 满足要求。用计算机实现控制是现代控制理论的一个基本方法。

用数学的方法研究系统的规律是控制理论的核心。作为一个初等的例子，你不妨想一想，能不能用一个数学公式直接将斐波那契数列的通项公式 F_n 写出。这个问题不是很简单，但如果你已经是高年级学生而又对数学感兴趣，不妨试一试。其正确答案是

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n$$

再考虑控制。例如，设 $u_n = 2$ ，还能把 F_n 的通项公式写出来吗？这个要求就更高了，可能要等你上了大学才会演算。

用数学公式分析系统是十分重要的。就像斐波那契数列，它有许多重要性质。为了弄清这些性质，光靠计算机



给出一组数是不够的。例如，它相邻两项比的极限是0.618。也许你听说过这个数，它是优选法的实验点。这不是偶然的巧合。斐波那契数列可用以安排有限次实验的最优实验点，而0.618正是有限次最优实验点的极限。有了通项公式，极限是很容易找出来的。

言归正传，总之，控制论处于数学、工程学和计算机科学的前沿。利用这些学科，控制论将自己强有力的理论结果立足于先进技术之上。作为控制系统工程的基础，有力地推动着包括自动化、计算机及机器人的新产业革命。

控制论的贡献不胜枚举：控制论对阿波罗登月计划的成功起了关键作用，控制论是研制带遥控的自动驾驶仪的现代飞机的关键科学，当代制造业高度依赖于精确的过程与机器控制。利用控制理论设计的系统遍布于我们的技术社会：汽车及商用飞机的导向，大型建筑物的振动问题及建筑物中的温度、湿度的调节，录像机、摄像机及各种电器设备的自动运行……在人类行为的许多领域，从技术、医学、经济学到生命科学，到处都存在着对系统控制与过程控制的要求。当今许多运行良好的系统大都是控制理论的数学原理在工程上的成功应用。

（三）维纳与控制论

维纳 (Wiener) 是控制论的创始人之一。他在 1948 年写了一本书，书名叫《控制论（或关于在动物和机器中控制和通信的科学）》。他就是通过这本书奠定了控制论这门新兴学科的基础。他或许可以被尊为控制论的开山鼻祖。

该书的英文名字叫“Cybernetics”。维纳在书中说：“这个字我们是从希腊词语‘掌舵人’变来的。其实，这不是一个新词，它在柏拉图的著作中是常见的。在那里它的本意通常是驾船术、操舵术，但是不止一次地变义为管理的艺术。”我们这本书的名称“控制论——人类对万物的驾驭术”也来源于此。

在第二次世界大战中，通信技术和自动控制技术都得到了迅速发展，而无线电通信技术在当时已相当普遍。在这些技术的各自领域都积累了丰富的经验。但是，抓住通信与各种控制工程所共同具有的特性，将其与现代生物学所发现的生物机体中的某些控制机制以及人类行为及思考方式类比，站在一个更概括的理论高度，综合并发展各个领域的经验和学说，形成控制理论这样一门独立的专门学科，则首推维纳的功绩。

维纳在他的《控制论》一书中，对以后控制论研究中的许多重要概念做了说明或者给出有高度预见性的描述。



我们在这里对《控制论》一书中提到的一些主要概念逐一介绍，这些概念至今仍是控制论的基本出发点。

对于控制形式，维纳非常强调反馈控制。什么是反馈？举一个简单的例子：假如我们要捡起一支掉在地上的铅笔。要完成这一个动作，每一瞬间我们通过眼睛，将手与铅笔的位置报告给神经系统，然后，神经系统再来指挥手的动作。尽管这个过程不完全是有意意识的，但如果眼睛不能将手与铅笔的位置正确地反馈给大脑或中枢神经，我们就无法捡起铅笔。

当我们希望按照一个给定的式样来运动的时候，给定式样与实际完成的运动之间的差异，被当作新的输入来调节这个运动，使之更接近于给定的式样，这种形式的控制就叫反馈控制。

维纳举的一个反馈控制的典型例子是船舶的导向。船舶上有一类操舵机，它将驾驶盘的转动作用到一个与舵柄连接的装置上，通过这个装置调节操舵机的一些气门，使得舵柄朝着把这些气门关闭的方向转动。舵柄这样转动后，就使气门调节装置的另一端回到正中的位置。这样，驾驶盘的角位置就再现为舵柄的角位置。显然，任何妨碍舵柄运动的摩擦力或其他阻力，都会增加某一边气门的蒸汽量，而减少进入另一边气门的蒸汽量。这样就增加了使舵柄到



达所要求的位置上去的转矩。这样，这个反馈系统就使得操舵机的动作相对地独立于其荷载。

在“反馈与振荡”一章中，维纳对稳定性问题做了清晰的描述。一般地说，一个不稳定系统在工程上是不可行的，因为一个装置会因失稳而被破坏。利用反馈使系统稳定的方法在控制理论中称为镇定问题。假如，在前面举的导航的例子中，我们可以用实际航向与舵角位置间的差别来调节舵机活阀位置，这样，舵的角位置就非常精确地和船的偏航度成比例。这种反馈系统使船的实际航向保持稳定，而不致产生左右反复偏航的振荡。

在“计算机和神经系统”一章中，维纳将计算机的学习功能和记录功能与人和动物的神经系统的运作进行比较，指出它们在机理上的相似性。当然，当时的计算机还难以完成类似于人脑的思维和分析的运作。半个多世纪过去了，今天，人工智能、神经网络方法等已经得到了广泛的应用，许多观念当时在维纳书中已经做出了描述及预测。

在“时间序列、信息和通信”一章中，维纳对信息的量测与处理做了介绍。他首次提出了用“熵”来度量信息量的思想。“熵”本是热力学中的一个概念，用以描述一个系统的混乱程度。维纳提出的方法，今天已在信号处理



中被广泛采用。

滤波是控制理论中进行数字或信号处理的一个重要方法。维纳对滤波器做了如下描述：“假定消息和噪声以一定方式混合成一个被扰动了的消息，而我们知道这被扰乱消息的现在，也知道其过去，我们还知道作为时间序列的这消息与噪声的分布。我们要找出一种数学方法，它能在一定统计意义下最优地给出真实消息。最后，还可以计算由这消息获得的信息量。”维纳的滤波思想反映在以他名字命名的“维纳滤波”中，后面我们会对它做较详细的介绍。

13年后，维纳在他的《控制论》(第二版)中，对非线性系统、复杂系统的自组织现象等做了许多探索。这些概念，在以后的复杂系统的控制理论中得到进一步的发挥。

这里，我们并非要给维纳写书评，而是希望通过介绍这本书对控制论中的一些基本观念做一粗略的勾画。使你对控制论的目的、对象及由来有一个初步的了解。

工程上控制技术的应用可以追溯到19世纪，甚至更早。但维纳的《控制论》一书被认为是控制理论这一新学科的第一声婴啼。书中提出的思想、概念和方法，结合工程技术得到了很快的发展。我国著名科学家钱学森1954年在美国出版的专著《工程控制论》是这一时期的一本名著，在国际上有巨大影响。在苏联，相应的工作被称为“自

动调节原理”。

到 20 世纪 50 年代末及 60 年代初，由于工程技术的发展，特别是航天技术的要求，对控制提出了快速、精确、实时的目标，而计算机的发展为实现这种要求提供了可能。和这种形势相适应，控制理论从它的经典阶段“自动调节原理”发展到称为“现代控制理论”的新阶段。标志这个转折的公认的三个里程碑式的工作是：庞特里亚金（Pontryagin）的极大值原理，别尔曼（Bellman）的动态规划以及卡尔曼（Kalman）的线性系统状态空间理论及卡尔曼滤波。引人注目的是这三方面的工作都属于数学范畴，这就不难理解数学对系统控制的作用，以及反过来控制工程技术对数学发展的推动作用。

在控制论的形成中，还有一位值得一提的人物，就是维纳在他的书中一再提到的冯·诺伊曼（Von Neumann），他是一个天才的数学家、物理学家和计算机专家。这里，我们不想对他做全面的介绍，只想介绍他与控制论相关的工作。

冯·诺伊曼与维纳等人保持长期的联系和合作，他参加了有关信息论与控制论的系列会议。控制论的许多概念和论点正是在这些会议和讨论中生成的。在分析人脑（天然自动机）与计算机（人造自动机）的逻辑过程的基础上，



他提出了自动机理论。这成了以后自动化与人工智能研究的基础。他也是对策论（也称博弈论）的创始人之一。对策论不仅在当时对控制论的形成起了一定作用，而且，至今仍是一些控制方法（如 H_∞ 控制）的设计基础。