

# 控制论和科学方法论

金观涛 华国凡 著

科学普及出版社

# 控制论和科学方法论

金观涛 华国凡 著

科学普及出版社

## 内 容 提 要

本书从控制论和系统论基本概念的角度介绍科学方法知识。书中选用大量生动的事例，深入浅出地介绍了控制、反馈、信息、思维和组织，系统及其演化，质变的数学模型等问题。

本书是当前讲控制论和方法论的一本较好的普及读物，适合具有中等文化程度的干部、科技人员和社会科学研究人员阅读。

2176/3 06

## 控制论和科学方法论

金观涛 华国凡 著

责任编辑：田 一

封面设计：齐恩铭

插图设计：庾笑洋

\*

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京通县长城印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米1/32 印张：6<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 字数：141千字  
1983年1月第1版 1985年5月第2次印刷  
印数：58,901—83,400册 定价：0.80元  
统一书号：15051·1078 本社书号：0677

## 序 言

最伟大的东西是世界上最简单的东西，它和你自己存在一样简单。

辨 喜(19世纪印度哲学家)

这是一本试图运用控制论、系统论的某些概念来介绍科学方法论的书。

促使我们来写这本小册子的，是十年前一个偶然的事件。

有一次，我们向一位化学界的老教授谈起控制论，认为这门和电子计算机一起成长起来的边缘科学提供了许多有益的方法论启示。他不相信，他认为一切被称为方法论的东西无非是事后诸葛亮，对科学研究无济于事。在争论中，他向我们提出了挑战。当时他正在探索的确良合成的新工艺，实验遇到巨大的困难；做出来的产品的粘度总是太低，一个多月来，还没有找到失败的原因。他说，如果你们的控制论真对科学方法论有所建树，就应该拿出解决的办法来。在他的提议下，我们这些既没有做过聚合实验，又没有足够的化学知识的外行帮助他分析起问题来。我们发现，老教授虽然对这一具体的化学问题有比我们丰富的知识，然而，有一些在我们搞控制论的人看来极为简单的原则却被忽视了。比方说，反应釜是一个黑箱，实验的目的要控制化学反应朝某个方向进行，从控制论的角度来分析，很显然，为了控制反应，我

们必须获得关于反应进行程度的足够的信息，并使信息系统构成负反馈体系。在分析了实验过程后，我们认为失败的关键在于未能获得足够的信息量，因此不能形成有效的控制。这不是一个化学问题，而是一个控制方法的问题。为此，我们提出了一个简单的改进办法，例如建立一个新的仪器系统，准确及时地取得反应釜中变化的信息以及考虑信息的反馈。最初，老教授半信半疑。第二天，他和助手们开始考虑我们的方案，不到一个星期，实验成功了。从此以后，老教授对控制论的方法论发生了浓厚的兴趣。并运用有关的原理又陆续完成了一些很出色的工作。他建议我们把控制论的方法论讲一讲，认为这是一件有意义的事情。这本小册子就是在几个讲座的基础上开始写作起来的。

如果我们去追溯控制论思想的源流，就能发现它至少是三条悠长的支流汇合的结果。

一条是数学和物理的发展。特别是十九世纪末和二十世纪初，吉布斯提出了统计力学，二十世纪二十年代后，量子力学又建立起来了。有不少科学家认为：与其说我们这个世界是建立在必然性之上的，倒不如说是建立在偶然性之上的，许多物理定律仅仅是大量事件统计平均的结果。科学的发展迫使人们回答必然性和偶然性之间的关系。于是，确定性与非确定性以及它们之间关系的研究就成为科学界最热门的课题。概率论的成熟，热力学中的熵直至信息概念的提出，就是这一研究的逐步深入。

另一条支流是生物学和生命科学的进展。科学家早就发现，生物界不是一个充满必然性的机械世界，另一方面，生物个体行为也不能用统计力学和量子力学所用的纯或然语言

来刻划。生命的活动中既有或然性，也有必然性。生命是怎样把必然与偶然统一起来的？科学家对生命的机制发生了浓厚兴趣。本世纪三四十年代，生物学家提出了“内稳定”概念，意味着人类对这一问题的认识已推进到新的阶段，它直接为控制论的诞生奠定了基础。

第三条支流是人类对思维规律的探讨。它集中地反映在计算机制造和数理逻辑的进展。数学家特别是计算机的研制者们企图用数学语言来模拟人的思维过程。第二次大战前后，电子计算机的制造成为控制论成熟的前奏曲。

在二十世纪四十年代，标志着这三条支流汇合的科学著作终于出现了。1947年，维纳的《控制论》就是作为它们统一的最初尝试。尽管维纳的这本书中有许多错误，有很多大胆的但后来被证明是不妥切的设想，但这本书震动了科学界。科学家们被建立各门学科的统一方法论的雄心所吸引。一大批各个领域中的专家纷纷互相对话，控制论、系统论成为二次大战后直至今天的不可忽视的科学思潮。

由于控制论中含有把各门科学分支统一起来的科学方法论，它在各个领域中的运用都取得了辉煌的成果。经济控制论、社会控制论、工程控制论、生物控制论、信息论、教育控制论……一座座新兴的科学大厦在迅速建造中。但另一方面，对控制论方法的本身的研究，特别是从科学方法论角度来清晰地阐述和总结它，反而显得薄弱了。这就造成一种印象：控制论方法是一种极度抽象高深的东西。特别是初学控制论的人，在碰到控制论中“信息”、“通道容量”“滤波”、“超稳定系统”等一大堆名词时，往往被弄得晕头转向。控制论所运用的数学工具，往往令人望而生畏。那么是不是不

懂高等数学，就无法掌握控制论的基本方法呢？不是，控制论不是一门只能用数学来表达的科学。这本书我们就打算撇开数学，从科学方法论的角度来谈谈控制论。我们力求使所涉及的问题以通俗的方式得到说明，以便让从来没有接触过高等数学的读者也能毫不费力地跟大家一起参加讨论，不至因数学语言的隔阂而妨碍他对方法论的兴趣。

我们的讨论不一定局限在经典控制论和系统论中，而是拓展到整个科学领域。比如我们花了很大篇幅讨论了近年来出现的突变理论及其对哲学的贡献。而突变理论的出发点，是控制论中有关系系统稳定性的问题。

读者显然不能指望从这本小册子了解到控制论的全貌。书中所引述的例子，一部分来自科学和生活等各种领域，一部分来自中国古典哲学。这是因为现代科学的某些思想往往在今天我们能够以精确的方式表达之前，就被我们的祖先注意过，有的甚至还被认真地研究过。

我们赞同一句格言：“与其不断重复一句不会错的话，不如试着讲一句错话。”它经常鼓励我们去考察那些虽不成熟但富有吸引力的新鲜思想，并把它们收集起来跟大家一起讨论。

我们并不鼓励读者完全接受书中的每一个观点，但希望本书所提供的思考方式会有助于打开读者的思路。希望读者在读完本书后能提出更多的问题并斧正本书的种种谬误。

# 目 录

第一章 控制和反馈 .....	( 1 )
1.1 可能性空间 .....	( 1 )
1.2 人通过选择改造世界 .....	( 5 )
1.3 控制能力 .....	( 8 )
1.4 随机控制 .....	( 13 )
1.5 有记忆的控制 .....	( 18 )
1.6 共轭控制 .....	( 20 )
1.7 负反馈调节 .....	( 23 )
1.8 负反馈如何扩大了控制能力 .....	( 26 )
1.9 正反馈与恶性循环 .....	( 30 )
第二章 信息、思维和组织 .....	( 33 )
2.1 什么是知道 .....	( 33 )
2.2 信息的传递 .....	( 37 )
2.3 信息是一种客体吗 .....	( 42 )
2.4 通道容量 .....	( 44 )
2.5 滤波：去伪存真的研究 .....	( 49 )
2.6 信息的储存 .....	( 58 )
2.7 信息加工和思维 .....	( 62 )
2.8 信息和组织 .....	( 68 )
第三章 系统及其演化 .....	( 72 )
3.1 系统研究方法中的因果联系 .....	( 72 )
3.2 相对孤立系统 .....	( 77 )
3.3 系统的稳态结构 .....	( 81 )
3.4 稳态结构和预言 .....	( 86 )



3.5	均匀和稳定 .....	( 89 )
3.6	不稳定和周期性振荡 .....	( 93 )
3.7	超稳定系统 .....	( 98 )
3.8	系统的演化 .....	( 101 )
3.9	系统的崩溃: 自繁殖现象 .....	( 109 )
3.10	自组织系统 .....	( 115 )
3.11	智力放大与超级放大器 .....	( 122 )
<b>第四章</b>	<b>质变的数学模型 .....</b>	<b>( 125 )</b>
4.1	哲学家和数学家共同的难题 .....	( 126 )
4.2	质变可以通过飞跃和渐变两种方式实现 .....	( 129 )
4.3	事物为什么具有确定的性质 .....	( 133 )
4.4	稳定机制: 稳态结构的数学表达 .....	( 136 )
4.5	事物性质的不变、渐变和突变 .....	( 143 )
4.6	怎样判别飞跃 .....	( 145 )
4.7	飞跃和渐变的条件 .....	( 150 )
4.8	关节点: 蝴蝶、燕尾及其他 .....	( 152 )
4.9	矫枉必须过正吗 .....	( 159 )
4.10	极端共存 .....	( 162 )
4.11	共同的使命 .....	( 164 )
<b>第五章</b>	<b>黑箱认识论 .....</b>	<b>( 166 )</b>
5.1	认识对象和黑箱 .....	( 166 )
5.2	认识论模式 .....	( 173 )
5.3	可观察变量和可控制变量的限制 .....	( 176 )
5.4	理论的清晰性 .....	( 179 )
5.5	模型逼近客观真理的速度 .....	( 184 )
5.6	反馈过度 .....	( 187 )
5.7	可判定条件 .....	( 190 )
5.8	科学和人 .....	( 196 )
<b>附录</b>	<b>关于十二个乒乓球问题 .....</b>	<b>( 200 )</b>

# 第一章 控制和反馈

有始也者，有未始有始也者，有未始有夫未始有始也者。

庄 周

## 1.1 可能性空间

一切科学研究都必须有一个出发点。几何学的大厦是建立在公理基础上的，控制论和系统论的研究则开始于可能性空间。

什么是可能性空间呢？我们先来举一个化学方面的例子。很久以来，化学家发现有两种氨基酸分子，它们的化学组成完全相同，不同的是原子的排列方式，化学家分别把它们称为L型和D型旋光异构体。它们的化学性质是相同的，照理说它们都可能组成蛋白质。奇怪的是，人们发现今天地球上所有生物的蛋白质都是由L型氨基酸组成的，这是怎么回事儿呢？原来，D型氨基酸只能与D型氨基酸组成蛋白质，L型也只能与L型组成蛋白质，D型不能与L型组成混合的蛋白质链。同一型氨基酸组成的生物才能形成一个生命系统。这样，在生命起源的最初阶段，大自然就面临着一个重要的选择：是选择D型呢还是选择L型？看起来这有点象掷硬币游戏，掷中正面还是掷中反面往往可以决定赌棍的命运。也许，后来发展出生命的那个原始的核蛋白凑巧是L型

氨基酸构成的，它通过自我复制和生存竞争，繁衍出了清一色的后代。L型氨基酸具有左旋的光学性质。有人开玩笑地说，上帝在创造生物时单选中了L型，看来上帝是个左撇子。

不过这件事给我们一个启发：世界上许多事物并不是从一开始就注定要发展成现在这个样子的，在事物发展的初期，它们往往有多种发展的可能性，由于条件或者纯粹机遇的关系，最终才沿着某一个特定的方向发展下去。既然事物的发展都是从最初的可能性开始的，就不能不使人们对它发生浓厚的兴趣，如果对它作更深的研究，可以发现它跟控制论中“控制”这个概念有着密切的关系。

顾名思义，控制论是关于控制的理论。“用计算机控制宇宙飞船”，“基因控制着遗传”，“这个病人的癌症已经不可控制了”……，现在“控制”这个词，已成为人们习以为常的口语了。如果我们仔细地分析各种不同的控制过程，发现虽然“控制宇宙飞船”、“控制遗传”、“控制癌症”的控制对象不同，但作为控制过程，有几点却是它们共有的：

1. 被控制的对象必须存在着多种发展的可能性。如果事物的未来只有一种可能性，就无所谓控制了。比如光在真空中的传播速度是确定的，每秒299,793公里，既不会高于这个速度也不会低于这个速度，只有一种可能性。因此人们不会说“控制了光在真空中传播速度”之类的话。某一事物在发展变化中的未来有哪些可能性，是由事物本身决定的。对于鸡蛋，它下一时刻面临的发展可能有鸡蛋、小鸡、碎鸡蛋等几种，而石头面临的可能性就完全不同。

2. 被控制的对象不仅必须存在多种发展的可能性，而

且，人可以在这些可能性中通过一定的手段进行选择，才谈得到控制。比如一座火山，它在下一时刻面临着爆发或不爆发两种可能性，但目前人类的能力还不能在这两种可能性中选择。所以，我们也不会说“控制了火山爆发”这样的话。所谓我们不能控制，就是无法选择或不存在选择的余地。

由此可见，控制的概念与事物发展的可能性密切相关。我们将事物发展变化中面临的各种可能性集合称为这个事物的可能性空间。它是控制论中最基本的概念。

任何事物，都有它一定的可能性空间，但这仅仅是可能性而已，至于事物具体发展成为可能性空间中哪一个状态，要看条件而定。当事物变到某一状态后，它又面临着新的可能性空间。鸡蛋一旦变成小鸡，它下一时刻面临的就活鸡、死鸡等可能性了（图1.1）。因此，一个事物发展过程中的可能性空间就象树枝一样向无限远处伸展开去。

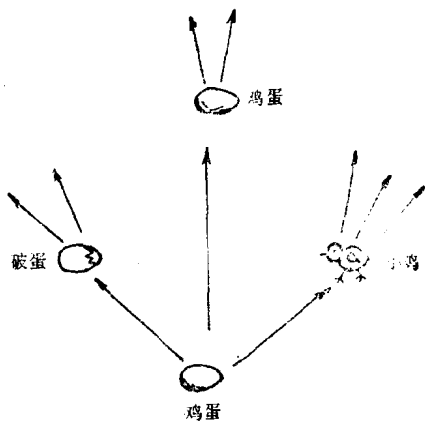


图 1.1

世界上第一个认真考虑过事物可能性空间性质的可能是中国战国时期著名的哲学家杨朱。《列子》里有一个“歧路亡羊”的故事，说有一天杨朱的邻居走失了一只羊，许多人去找也没找回来。杨朱问邻居是怎么回事儿，邻居说：“岔路太多

了，而且岔路之中又有岔路，不知道它到底跑到哪条路上去了。”杨朱听了很有感触，终日沉默无言，闷闷不乐。“歧路之中，又有歧焉”，这位哲学家所感叹和研究的，正是事物可能性空间这种重要的展开方式。

这方面最令人感兴趣的例子便是生物进化。如果我们不

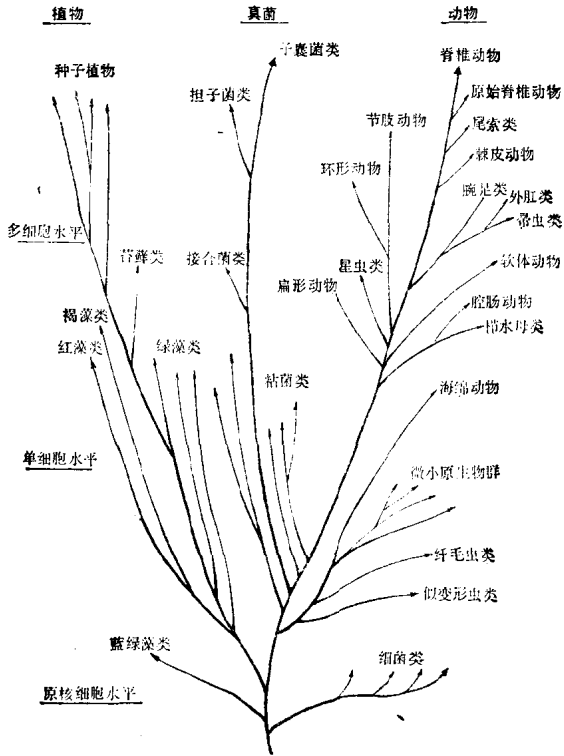


图 1.2 生命之树

否认生命在地球上只起源过一次，我们就得承认所有的物种，包括蚊子、牡丹、企鹅、人类和酵母都有着共同的祖先。生命的多样性来自连续不断的进化过程，在这过程中一个种产生几个后代种。这实际上就是生物发展和适应环境的几种可能性。生物学家常常用生命之树（图1.2）来表达生物的进化过程，这种生命之树正是物种在其发展过程中按可能性空间展开的形象体现。人们估计现在生存着约五百万到一千万种生物，其中每个种都跟它最近的亲族有显著的差异，每一个种内的千万个成员又有不同的遗传特征，这还不包括地球上曾经生存过但已灭绝的为数更多的物种。生物界众生纷纭变异多端的可能性空间，凭人的想象几乎难以琢磨。研究生物在一定条件下按可能性空间展开的方式，成为群体生物学的中心问题。它回答现有动物、植物、真菌的种类和数量是如何来的，什么力量作用于这些群体使它们保持现状或发生变化，以及对某些物种发展的可能性可以作出哪些预测等等。

## 1.2 人通过选择改造世界

事物的可能性空间为什么总象图 1.2 那样是树枝状的，而不会象图 1.3 那样呈一条直线呢？很明显，这是因为事物面临的可能性空间往往不止一个状态。那为什么事物的可能性空间不止一个状态呢？这是因为事物变化具有“不确定性”。

不确定性也就是事物的矛盾性。“矛盾”一词来自一个古老的寓言。一个商人夸口说，他的盾十分坚牢，什么东西也戳不穿它。过了一会儿，又吹嘘他的矛说，他的矛是最锋利的，随便什么东西，一戳就穿。有人听了，便接口问他：“如

果用你的矛来戳你的盾，结果怎样呢？”这个富有哲理的故事实际上包含了事物不确定性的道理。商人先夸他的盾好，什么东西也戳不穿，就是说事物 A 只面临着  $B_1$ （盾不穿），这样一种可能性（图 1.4a）。接着他说他的矛什么都能戳穿，也就是 A 只面临着  $B_2$ （盾穿）这样一种可能性（图 1.4b）。“以子之矛，陷子之盾”的时候，却出现了一种新的情况，A 可能发展为  $B_1$ ，也可能发展为  $B_2$ ，具体变到哪一种是有条件的，不能在事先完全确定，这就是事物的不确定性（图 1.4c）。那个商人面对着对立的矛盾，却不承认事物的不确定性，把话说得这么死，结果闹了一场笑话。

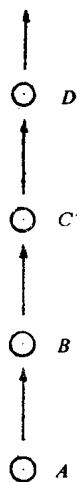


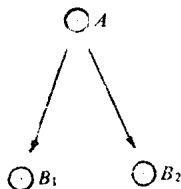
图 1.3



a



b



c

图 1.4

事物的矛盾性，使事物的可能性空间至少面临着肯定自身和否定自身两种状态。事物在发展的过程中这样分化是不

断进行着的，这样终究要形成“歧路之中，果。

从不确定性的角度来看待事物的发生和发展，是现代科学和经典决定论的一个重要区别。今天的物理学已不再仅仅处理那些必然发生的事情，而是处理那些最可能发生的事情了。今天的生物学也不再把某个物种的出现看作进化过程中必然的现象，而只把它们理解为可能发生的种族中的一员。这样一种思想从本世纪初统计物理学创立以来已经扎根于科学家的头脑。粗看之下它也许并不难于理解，但它确实是本世纪科学思想的一次革命。在经典的牛顿物理学里，宇宙被描述成一个结构严密的确定性机器，一切都是按照某种定律精确地发生的，未来的一切都是由过去的一切严格决定的。科学家意识到矛可能戳穿盾也可能戳不穿盾这个简单的真理，是走过了漫长道路的。

事物发展的可能性空间，或事物的不确定性，是由事物内部的矛盾决定的。人们根据自己的目的，改变条件，使事物沿着可能性空间内某种确定的方向发展，就形成控制。控制，归根结底是一个在事物可能性空间中进行有方向的选择的过程。我们不难发现，人类从衣、食、住、行到变革自然的实践活动都和选择密切相关，走路是不断选择自己在空间的位置。制造工具是选择各种材料及材料的某种组合。现代生产是更复杂更严格的选择过程。有人会问，人制造出自然界原来没有的东西，如人造纤维，这是不是选择过程呢？人类在制造人造纤维时进行的工作也仅仅是选择：选择了自然界本来有的物质（基本原料），选择了适当的温度、压力、催化剂。正是人类选择的条件的结合才制成了自然界不存在的物



质人造纤维。如果没有人的选择作用，这么多条件的适当配合在自然界出现的可能性是极小的。这种纤维的合成，只是原来物质变化的可能性空间的一种。

因此，一切控制过程，实际都是由三个基本环节构成的：（1）了解事物面临的可能性空间是什么。如一个人得了病，他可能好转、恶化、死亡。（2）在可能性空间中选择某一些状态为目标。如治病的目标是使病情好转。（3）控制条件，使事物向既定的目标转化。

对于一个复杂的过程，事物的可能性空间不仅有许多状态，而且这些状态有复杂的展开方式，影响事物发展的条件也错综复杂。与之相应的选择过程也是复杂的，需要在事物发展的不同阶段控制不同的条件，同时注意各种条件之间的配合和状态的相关作用。

### 1.3 控制能力

最后一个天花病例发生以后，经过两年观察，人们终于在1979年宣布天花病绝迹了。这种在几个世纪前曾经夺去无数人生命的可怕疾病，可以说已经完全地被人类控制住了。只要世界上几个保留天花病毒的研究机构不把它们逸漏出来，人类将永远保持在“没有天花病人”这样唯一的状态里。可以说这是一个非常理想的控制过程。有人也许会想，一切控制过程如果都象人类控制天花那样完全就好了。可是实际上这是办不到的。对于绝大多数控制过程，人们并不是把事物的可能性空间精确地缩小到某个唯一的状态，而只是把可能性空间缩小到一定的范围就达到控制的目的了。如果任何控制过程都想以某个唯一状态为目标，不但没有必要，而且还会使控制失灵。