

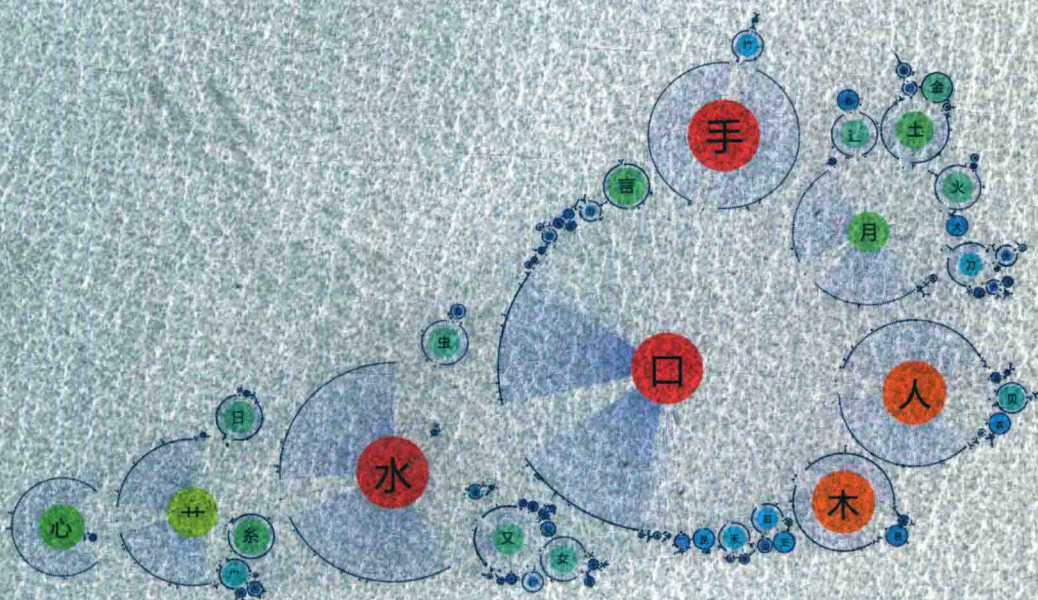
系统科学系列教材

INVITATION TO SYSTEMS SCIENCE

系统科学导引

第1卷：系统科学概论

吴金闪 著



科学出版社

系统科学系列教材

系统科学导引

(第 I 卷：系统科学概论)

吴金闪 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共3卷。《第I卷：系统科学概论》旨在通过具体研究工作的例子来展示什么是系统科学，系统科学在什么样的问题中可以发挥作用，系统科学有哪些思维方式和分析方法。

本书的读者包含系统科学的研究者、教师、学生，其他专业但是对交叉科学和复杂性研究感兴趣的研究者、教师、学生，以及对什么是科学、科学和数学与生活还有你自己的关系感兴趣的一般读者。尤其推荐给最后一个读者群体。

图书在版编目(CIP)数据

系统科学导引. 第I卷, 系统科学导论/吴金闪著. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-057143-4

I. ①系… II. ①吴… III. ①系统科学-概论 IV. ①N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第074702号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 杨 然
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018年5月第一次印刷 印张: 13

字数: 230 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

献 给

黄云弟、冯倩、吴立心、吴逸兮

心儿、逸儿，把一个问题想明白的快乐是一种非常大的快乐。

致 谢

在“系统科学导引”课程开设、教材写作和 MOOC 建设期间，作者得到了多位老师和同事的帮助，包含方福康、狄增如、李克强、裴寿镛、王有贵、王大辉、樊瑛、袁强、汪明、张鹿等，在此表示感谢。同时，本书在材料选取的原则——关注主线、“教的更少，学得更多”、关注事物之间的联系、教学要带领学生上层次、要讲就讲个明白等，受到了我在物理系的多位老师 Mona Berciu、杨展如、裴寿镛、梁灿彬、漆安慎、喀兴林等的教学和教材的影响。在此一并表示感谢。

感谢我的课堂上以及“大物理学 (Big Physics)”^① 研究团队的学生，你们给我很多的学习、研究和教学上的启发。除了从我的老师们那里汲取的注重主线的教学、汉字学习的研究工作、Novak 的概念地图学习方法发展而来的关注概念之间联系的思想——系联性思考，在整本书的内容选取上最重要的另一个思想——“教的更少，学得更多”，就是因为要在最短的时间里面让你们对系统科学有比较深刻的认识，并且准备一些核心的原则上最少量最必要的但是实际上也为数不少的数学物理的基础，这个目的才建立起来。因此，你们是我的教学思想发展的重要动力，尤其是考虑到你们背景学科和目标学科的多样性。另外，还要感谢我测试内容和讲法的“小白鼠们”——课程的助教和学生。

尽管大部分研究实例都来自于其他研究者的研究工作，本书也有一些我自己的研究工作的例子。这些工作大部分都是在其他合作者，例如闫小勇、沈哲思、李梦辉、Mona Berciu 等的支持下做出来的研究工作。非常感谢这些以及其他正在开展工作的合作者，并希望将来能够做出更多可以称为案例的研究工作。

感谢我的夫人冯倩对于我做各种探索的支持。感谢我的岳母姚书君对孩子们的悉心照顾，使得我有更多的时间来做这些探索并完成本书。感谢心儿和逸儿，不仅让我更加快乐和努力地工作，还时不时地当我用来自来尝试讲法和内容选取的“小白鼠”。例如，Chladeni 斑图和虹吸现象，就是这样尝试的结果之一。

^① <http://www.bigphysics.org>, 2018 年 2 月 1 日访问。

序

看到吴金闪教授这套《系统科学导引》，明显地感觉到与众不同的地方：书名不叫导论，也没有用引言这一类标题，而是用了“导引”这样一种开放性的提法。这个提法明白地告诉读者，本书要通过学习引导你考虑一些系统科学的基本问题，告诉你在哪些科学知识的基础上去思考，如何去思考。从本书的内容和结构来看，很明显的存在着三条主线，即系统科学的发展进程及其主要内容和成就，然后用大量的篇幅论述作为一门科学发展的理论基础，特别是数学和物理在建立一个理论体系中的作用，再者就是对如何进一步发展系统科学的思考。其实，这一部分发展系统科学的思想是贯穿全书的，因为“导引”的目的就是要引发读者的思考，特别是面对系统科学这一新兴学科所涉及的未知世界。

在一部篇幅有限的教材里，要完成这三项任务是困难的。这里显示了吴金闪教授与众不同的地方，他志存高远，宣称要用最少的语言、最核心的概念来阐明问题。这是一项挑战，考验的是吴金闪教授对系统科学这一学科产生和发展理解的深度，考验的是他对于系统科学赖以发展的科学基本理论掌握的程度和高度概括的能力。当我们阅读本书力学和量子力学两章，可以明显地感到吴教授为实现他的诺言所做的努力。至于系统科学的展开和后续发展的内容，则由于这门学科发展迅速，内容十分广泛，不同学者会有不同的取向和偏爱，只要把系统科学的特点予以说明就可以了，尽管会具有浓厚的个人色彩。所以，对于吴金闪教授这套“导引”教材，如果仔细体会，无论对于系统科学发展的历程，发展这门学科所需要的理论储备以及如何去发展这门学科，都会受益匪浅，而对于初涉系统科学的青年学子来说，更是能启迪他们的思维，更快更好地进入到系统科学这一广阔的领域。

作为一篇序言，也是对应作者“导引”二字的提法，下面，沿着序言中所提出的三个问题，提出一些看法，作为一种意见参与讨论，也可以算作序言的一个延伸部分。

(一)

在 2015 年北京大学的毕业典礼上, 有一个著名的演讲, 当时身为生命科学学院院长饶毅教授, 代表学校教师向毕业生致辞。总共 1500 多字的讲话, 获得了多次热烈的掌声。对于我这个读者来说, 看重是演讲中的两句话, “从物理学来说, 无机的原子逆热力学第二定律出现生物是奇迹”, “从生物学来说, 按进化规律产生遗传信息指导组装人类是奇迹”。

一位生物学家, 能够对科学的前沿作如此的概括, 确实能使人感受到他的功力。实际上, 所谈到的第一个奇迹涉及的是现代系统科学实质性的开始。这里的关键是逆热力学第二定律的提法, 当学者们认识到在逆热力学第二定律的后面, 还存在着了一幅崭新的画卷, 此时一个新的科学世界的历程就开始了。在这里有两位学者是需要提到的, 一位是 N. Wiener, 他最早对逆热力学第二定律的世界有清晰的理念。他指出“我们所做的是在奔向无序的巨流中努力逆流而上, 否则它将一切最终陷于热力学第二定律所描绘的平衡和同质的热寂之中……我们的主要使命就是建立起一块块具有秩序和体系的独立领地……我们只有全力奔跑, 才能留在原地” [1]。另一位要提到的学者是 I. Prigogine, 他给出了逆热力学第二定律的物理内容和数学形式。这就是耗散结构理论。这个理论冲破了热力学第二定律的限制, 指出对于开放系统, 在远离平衡的条件下, 能够形成一种相对稳定的结构, 称之为耗散结构。Prigogine 先是用实验确切地在流体、化学反应两个系统中让世人看到了这个相对稳定的耗散结构。再者, 他证明了在热平衡的线性区是不可能出现这种结构的, 一定在远离平衡的非线性区, 才会有相对稳定的, 称之为耗散结构的出现。然后, 在论证和讨论了耗散结构的各种性质特点之后, Prigogine 和他的 Brussels 学派, 发展了一套数学理论来定量地描述耗散结构形成的过程、性质和特点, 并将其应用到各具体系统和领域, 特别是出现了被称为奇迹的生物。耗散结构的出现, 包括实验和他的理论体系, 使得突破热力学第二定律的想法从议论变为科学。

在此之后到现在的 40 年间, 无论从研究的领域, 还是理论计算的方法都有很大的发展。研究的领域, 从最初 20 世纪 80 年代由 Science 提到的 7 个方向, 发展到 21 世纪初, 由 Hoker 的归纳, 有了 12 大门类, 28 个学科领域, 涵盖了生命、神经、人类学、社会、经济、军事、管理等一切方面。研究的方法, 也从原初的数理方

程,拓展到应用计算机、网络、大数据等现代信息工具。面对着系统科学这样一个庞大的体系,包括这门学科的兴起、发展的历程、多种数学工具的运用、涵盖内容众多的学科体系,以及这门学科仍在迅猛发展的势头,要在篇幅有限的著作里,诠释这样一件科学事件是不容易的。但在,吴金闪教授这部著作中,可以看到,他以自己独特的风格完成了一个很有特色的答案。

然而,系统科学或复杂性研究目前的进展并不令人满意。虽然有众多研究领域的展开,在研究工具上,网络和计算机发挥了强大的威力,应用于各种具体系统也取得令人欣喜的结果,但是对复杂系统基本规律的探索并没有取得实质性的进展,各个研究领域、各种研究结果,还是停留在已有的理论上,只是在外延上获得发展和展开。像饶毅教授提出的生物学奇迹的探索,涉及进化规律、遗传信息、组装人类这样一些实际上是复杂性研究核心理论问题的研究,并没有获得理论上的突破,还有待于系统科学的未来。

(二)

吴金闪教授这部“导引”著作的另一个显著特点是认认真真地讨论了系统科学所涉及的科学基础。系统科学作为 21 世纪的前沿学科,讨论的完全是一堆全新的复杂系统对象,从数理学科的角度来观察,是从未系统地处理过的。而从耗散结构理论开始,复杂系统的研究显然已经进入到了一个新的阶段,即用数理科学的工具和方法,来获得科学的定量化的结果。这样的研究,与早期的系统科学研究如一般系统论那样定性地讨论是完全不同的,在这里需要的是实实在在的科学理论概念和处理实际问题的数理方法。因此在教学内容的选择上,既要照顾到在科学历史上那些行之有效、有成功经验的数理科学方法,又要适当地介绍随着复杂性研究工作的进展,在近近年来新发展起来的工具和方法。这两方面都有丰富的内容,而要在—部篇幅有限的教材中完成这两项硬任务是考验吴教授的理论基础和学术功力。作者没有回避这个矛盾,他宣称要用最少的文字语言来介绍这些最经典的理论,而实际上他是很出色地完成了这个任务。在理论物理学的经典科学库中,吴教授选择了力学、量子力学和统计物理三门课程。其中量子力学是最能体现业务实力的,我们可以从作者用最少语言的描述中,看看他是如何处理量子力学这门学科的。

量子力学作为微观世界的奠基,与相对论一起,被称为 20 世纪巅峰的成就,

独领风骚达半个多世纪。但是量子力学的核心内容只不过是少数几条基本原理（常见的提法是 5 条基本原理）。正是在量子力学基本原理的基础上，搭建起了处理各类微观客体运动规律的理论框架。不仅如此，在精妙的数学描述下，量子力学的基本内容获得了十分抽象而又十分精确的数学表述。由量子力学的物理内容所揭示的微观粒子的描述，不过是 Hilbert 空间中的一个矢量，或者说是在这个空间中所描述的一个状态，算子作用于矢量，引起状态的变化，而形成运动方程。Hilbert 空间中矢量的变换或描述状态的方式变换，构成了表象理论。用物理语言颇为费力的一些内容，在精巧的数学语言下变得简单、精确。这种深刻的物理思想和精巧的数学语言的结合，正是揭示物质运动基本规律最有力的工具。在有关量子力学的章节，可以看到作者用最少的语言而做的最大的努力，竭力将量子力学的物理抽象和涉及的数学语言传递给读者。类似地，在力学这一部分，在极有限的篇幅中，不仅介绍了牛顿力学，而且要讲到分析力学。综观全书，作者始终强调物理观念和数学思想的重要性。这样的强调不仅是为了继承，更是为了发展，为的是建立一个复杂系统所需要的理论，做好必要的理论储备。

(三)

创新，是一门学科成长、壮大、发展的根本之道。系统科学的发展需要创新，而且是不断创新。目前对系统科学最需要的，是对于复杂系统这个未知世界基本规律的掌握，并由此进一步建立起各种运算体系，解决具体课题。吴金闪教授的著作将创新的理念贯彻全书并指出了必须注意的要点，一是要具体化，二是联系、联系、再联系。对于具体系统的关注，各家会有所不同，但是总体上的目标是探索和发掘复杂系统这个未知世界的基本规律。

首先会想到的问题，是世间事物的运动形式和发展规律，不应该只停留在物理世界的物质和能量的理论框架内，特别是涉及生命、神经、人类、社会这样一群复杂系统或更确切地说是复杂适应系统。信息在系统演化和发展过程中的作用已十分明显和重要。所以在理论框架上，应该建立起一个物质、能量、信息的三元素世界，在这个更宽的框架内描述它们的状态，发掘其运动规律。但是在我们的科学宝库中，并没有现成的含有物质、能量、信息三元素世界的理论框架，物理学是 20 世纪影响较大的一门学科，涉及了微观领域的各个部分和高速运行的客体等。但是，

在物理学中只讨论物质和能量，不涉及信息。另外一门专门讨论信息的学问——信息论，则是专门研究信息传递过程的，从信息源、信道，到信宿，讨论的是信息如何准确传递，如何解决抗干扰。在信息论中，也没有涉及物质和能量的相互关系。所以在现有的科学库中，信息与物质没有现成的交集，更谈不到信息与物质相互作用的方式与内容。在这个领域内，无论是理论概念，还是计算方法，目前还没有形成被大家所公认并可被大家接受的理论成果。

尽管信息与物质的相互作用规律还没有被充分揭示，但已经有很多学者和实际工作者关注和讨论了信息的重要作用，并得到了许多有意义的成果，为进一步解决这个问题提供了准备。早期有生物学家汤佩松，后来钱学森、徐光宪也有过论述，周光召还提出了信息与物质的相互作用在社会系统中会起主要的作用。之后，随着对信息研究的展开，徐光宪先生提出了人工信息量的概念，并进行了量值的初步估算。不同于依靠生物自然进化而形成的自然信息量，人工信息量是指人类由于有了语言以后所生成的信息。徐先生估算人类自然信息量的总量为 10^{35} bit 量级，而全球人工信息总量估算是 10^{20} bit 量级，且每年约以 30% 的速度增长 [2]。徐先生的人工信息量的概念实际上是为人类建立了一套完全不同于生物自然进化而形成的信息系统，不妨称之为第二信息系统。这套建立在语言发展基础上的人类所特有的第二信息系统，在人类的发展壮大和人类社会的形成和进步起到了决定性的作用。首先，由于语言的产生和第二信息系统的形成使人类与动物界彻底分离开来，逐步成为自然界的主宰 [3;4]。然后，由于第二信息系统的不断发展与完善，并与物质生产、社会体制相互结合逐步完善，使得人类从一些弱小的种群，发展壮大成为强大的族群，直到形成社会和国家，成为在地球上目前最为强大的生命体。

信息与物质相互作用的重要性是清楚的，但是迄今为止还没有一个信息与物质相互作用关系的数学表述形式，需要作一些试探。遵循着达尔文所指出的语言对人类发展的关键作用，最近我们讨论了语言作为信息对人脑这类物质的发展作用。在实验数据的支持下，我们得到了这一类包含信息物质运动的数学表达形式，可以用一个非自治的动力学方程来描述，其中信息与物质的相互作用是方程中含时间 t 的驱动项。这样的一个计算结果仅是一个单例。它虽然给出了信息与物质相互作用在这个具体问题中的表达式，但并不一定显示出是一种普适的形式，因为信息与物质相互作用是复杂的，存在多种表现形式，现在我们还未能窥测它的全貌。但无论如何，在这里我们找到了一种具体的信息与物质相互作用的数学表述形式及其所反

映的科学内容,希望能成为一个好的开始,在探索复杂系统的基本规律上获得进步。

方福康

2018年4月

参考文献

- [1] Wiener N. I Am a Mathematician: The Later Life of a Prodigy. 1964, 324.
- [2] 徐光宪. 化学分子信息量的计算和可见宇宙信息量的估算. 中国科学 B 辑: 化学, 2007, 37(4): 313.
- [3] 达尔文. 人类的由来. 1887, 第三章.
- [4] Nowak M A. Evolutionary Dynamics. Harvard University Press, 2006.

前 言

这是一个非同一般的(长、复杂、混乱)前言,或者更应该看做是整本书的内容和背后思考的总结。在这里,我们先来简要和不自量力地讨论一下系统科学这个学科的最关键的问题——什么是系统科学,然后说明一下本书的目的和定位。目的是帮助你决定是否值得仔细阅读这本书。

整本书我们都在展现本书封底上的几句话:

联系¹, 联系², 联系³

从具体系统中来, 到具体系统中去

从孤立到有联系, 从直接到间接, 从个体到整体

More is Different, More is The Same

(一片两片三四片, 构成系统出涌现; 五片六片七八片, 飞入系统都不见)

其中最后一句是对那句英文的翻译。在任何一个具体例子的讨论之后, 包含这个前言里面的例子, 请亲爱的读者一定要来体会一下这几句话和那些例子的联系。

■ 真的前言

经常听到“这是一个系统工程”, 什么什么“是一个系统性问题”这样的说法, 来形容某件事情或者某个东西比较复杂, 有的时候也意味着这个事情或者这个东西应该用某种适合“系统性问题”的方式来解决。如果这个说法有意义, 其实就要求我们必须先有一些这样的解决方法。我们有吗? 甚至, 我们有什么样的问题是系统性问题的一个比较科学完整的说法或者定义吗? 如果这些都没有, 那么, 当我们说什么什么是系统工程或是系统性问题的时候, 也就是我们无能为力、问题太过复杂的代名词。作为科学家, 我们显然不能满足于这样的代名词: 系统科学就是实在太复杂的我们没有办法的研究对象的代名词。因此, 本书的最主要的目的就是讨论什么是系统科学, 系统科学有哪些比较有自己学科特点的思维方式和分析方法, 有

哪些有特点的研究实例。我们也会稍微回答一下，需要哪些数学物理的知识、思维方式和分析方法的基础。

本书是我在北京师范大学开设“系统科学概论”和“系统科学数理基础”两门课的教材。为了能够让学生体会什么是系统科学，并且从欣赏研究实例和做练习中学会一些系统科学的思维方式和研究方法，我必须自己先有一个反映什么是系统科学的概念体系以及相应的研究实例的体系。这本书就是这样一个不断挑战我自己对系统科学的认知，不断整理体系所得到的一个结果，不能算是这个学科的一个完整的阐释。

在本书第一部分还会有关于什么是系统科学的更加详细的讨论。这里仅仅做一个相当粗略的讨论。系统科学目前还不是一门成熟的学科，因此这样的讨论很难，但是很有必要。我们希望通过阅读本书的前言，读者可以大概了解什么是系统科学，这样看起来后面的部分会有一个更好的整体思路，或者叫做学科大图景：一个学科的典型对象、典型问题、典型思维方式、典型分析方法、和世界以及其他学科的关系。当然，我们梦想中的目标是，就算读者不再去花时间学习本书剩下的章节，你也能够明白系统科学大概是什么。不过，我们只能尽力去向着这个目标努力，本书也仅仅是一个这样的尝试。如果能够启发读者来思考这个问题，那么，就不算完全失败了。

在一边编写一边使用这个教材六年之后，我觉得，尽管还是很成熟，但也有必要和大家分享，接受大家的批评了，于是就有了本书的出版。本书的电子版以及所用的课堂讲稿可以通过访问“吴金闪的书们”^①来获得。课程“系统科学导引”^②已经录制成 MOOC 课程的形式在网易云课堂、网易公开课上线。本书、讲稿和视频课程的主要目的是给学生一个什么是系统科学的导引，给专家一个可以批判的系统科学入门课程。正是由于系统科学还不是一个成熟的学科，这样供批判的体系和材料才更加重要。希望使用本书的专家和学生能够帮助我一起来把这本书写得更好，这个课上得更好，这个学科发展得更好。

由于篇幅关系，本书打算按照 I、II、III 三卷本的形式出版。但是，由于后面两卷的内容目前还没有定稿，实际上，本书目录中的后两卷只提供章名，具体内容也可能在后续的写作过程中修改，但是主体结构应该是差不多了。

^① <http://www.systemsci.org/jinshanw/books>, 2018 年 2 月 1 日访问。

^② 请在各自平台上搜索“系统科学导引”就可以找到本课程。

再一次强调，本书仅仅是在说明“系统科学是什么”这个问题上的一个探索，主要为了提供一些例子和观点供研究者进一步讨论，促进这个学科的成熟和发展。

■ 什么是系统科学

粗略地说，系统科学就是具有系统特征的科学。什么是系统特征，下面会展开讨论。但是，首先，我们要注意，系统科学是科学，不是哲学，不是数学。科学是需要为实际问题提出一个可计算的模型，并且所算出来的答案还要可验证或者至少可证伪^①。因此，仅仅停留在典型思维方式的层面不会让一个学科成熟，我们必须从对具体对象、具体问题的研究中总结出来典型分析方法，甚至找到这些典型分析方法背后的数学结构，更进一步让这个学科来解决实际社会的问题，才是科学。讨论科学，就不能不讨论数学和具体学科的科学的关系问题。因此，我们把前言分成了如下几个部分：什么是系统科学，系统科学的还原论和整体论，系统科学和数学、物理的关系，系统科学自己的典型分析方法，以及本教材的目的和定位。

实际上本书的整体结构也遵循了同样的逻辑结构。首先是通过具体研究例子来做一个系统科学的导论，然后通过更多的例子来总结和展示可以认为是系统科学的典型思维方式和分析方法，接着是学习一些数学和物理的分析方法思维方式甚至具体知识，最后是再一次来提炼大概可以算是系统科学的典型分析方法。同时在系统科学导论那一章，也是类似的思路：什么是系统科学、系统科学和数学以及物理的关系、系统科学的典型思维方式和典型分析方法以及一些例子。从这个角度看，本书就是按照系统科学的思维方式来组织的，例如结构上的自相似性、每一个章节之内和之间的关系。甚至，我们还给本书做了一个主要内容和主要概念的概念地图。在本书的最后，我们还整理了一个系统科学的概念地图，供读者参考。

传统的学科基本上按照研究对象来分类的，例如物理学研究物理过程，生命科学研究生命体，地理科学研究地理现象，脑科学研究大脑的活动，经济学研究经济行为。有的实际问题可以一定程度上独立出来成为某个学科的研究对象。但是，大量的实际系统的问题，实际上，是多学科的。有的时候有的问题粗粗看起来不是

^① 科学的可证伪性是指一个论断（命题）——例如“天下乌鸦都是黑的”——可以是错的，如果出现了某个现象的话——例如出现了一只不是黑色的乌鸦，但是实际现象中迄今为止都没有观测到那个可以推翻这个论断的现象——例如，如果迄今为止所有能够看到的乌鸦确实都是黑的，那么这个论断就是科学的。更多关于可证伪性以及什么是科学的讨论可以参考文献 [1]。

多学科的，但是运用多学科的角度和分析方法可能可以回答得更好。例如决策和对策是经济行为，于是也是经济学的基础，但是实际上决策和对策过程本身是脑科学的研究对象。经济学中的简化处理——理想经济个体追求自身经济利益最大化——在很多时候能够给出大致准确的描述，但是大量的问题其实不能通过这个简单假设来处理。这样的问题就不是单个学科能够解决的问题。当然，对于这个具体的例子，实际上需要进一步研究决策的大脑活动基础。于是，正好就是神经经济学^[2]的研究对象。也就是说，只要建立一个新的交叉学科就可以解决这样的传统学科边界之外的问题了。也就是说，尽管我前面提到的“问题是跨越学科边界的”是对的，但是，我们仍然没必要有一个“系统科学”，只要有一个个的传统学科的交叉学科们就好了。那是我这个例子没有举好。

我们来换几个例子，希望从中看到一些共性。我们来看一个通过广告和身边朋友的选择来影响你买一个什么品牌的手机的问题。如果我们不考虑朋友关系，那么，这个问题就是一个在产品质量、社会风气和广告影响下的个体决策问题。当然，如果仔细考量，实际上社会风气和广告传播途径的背后有网络和相互作用的因素——社会风气还是通过周围的朋友或者某种其他物理途径才能影响到你，广告传播也必须考虑介质和介质的地理位置等因素。这些因素对于每一个人可能是不一样的。让我们先忽略这个可能有个体差别的需要考虑相互作用的介质和地点的因素，把社会风气和广告当做作用在每一个潜在购买者身上的平均效益——实际上，以后我们会看到，这个叫做“平均场理论”：忽略相互作用的来源和个体差别，看做所有这些作用对你的作用的某种平均。现在，剩下的影响你决策的因素就只剩下周围的朋友的选择了。当然，实际上，以后我们还会看到，这些朋友们的影响也可以不区分来自于哪个朋友而看做某种平均。你的朋友的选择从两个方面影响你的决策：首先，你希望跟你的朋友一样，这样抱团取暖也能相互交流更好；其次，你可能相信你的朋友的选择是考虑过产品的质量，于是你也认为如果他们选择某个手机越多这个手机的质量也就越好。这两个因素都起到使你更加从众的作用，尽管两者实际上有区别，并且前者仅仅局限在朋友圈之中，后者其实朋友圈之外的其他人也应该考虑。好，有了这个考虑，我们发现，我们相当于在平均场的基础上需要考虑每一个人的朋友圈的结构，并且有的时候不同朋友圈的人也可以通过传播来实现间接相互影响（ A 直接影响在同一个朋友圈的 B ，但是不能直接影响不在同一个朋友圈的 C ，但是可以通过先影响 B 从而影响 C ，如果 B 和 C 属于

同一个朋友圈的话)。在产品广告的设计和投放的单位看来，他们就需要把所有的潜在用户的朋友圈的结构都收集整理出来，然后考虑如何在这个朋友圈上设计一个好的广告策略。实际上，这个问题被称为“网络上的社会学习问题”^[3]，不仅有学术价值，还有重要的商业价值。顺便，以后我们会提到的一个我们自己的工作^[4]给这个模型提供了一个精确求解的方法，并对模型做了整理和推广。

在这里有几个因素是重要的：平均场或者外场来描述其他人的影响，网络的描述个体有差异的相互作用圈子，基于这个平均场加上网络的模型的计算分析方法，在计算中还可能需要考虑间接影响，同时这个问题牵涉到很多很多个体。更进一步，这样的受环境和邻居影响的模型可能同时也能描述很多其他现象，而这些现象可能来自于传统上不同的学科。更更进一步，求解这个模型的方式，尽管在不同的系统上可能还需要进一步调整，但是可能是具有一般性的。于是，这样的模型和方法，以及把这样的模型用于来自于不限定学科的问题的角度，就很难算到某个具体学科或者某个传统学科的交叉学科里面。在这个意义上，我们说需要一个叫做“系统科学”的学科。

下一个例子是森林科学的问题。中文的“木、林、森”告诉我们一大片树就可以看做森林。但是，森林科学家的研究告诉我们，单纯的一大片树不能构成森林，树木之间的相互作用才构成森林。不同的植物，甚至包含动物，生长在一起有什么整体的效果或者整体的问题，这些是森林科学和实际生活关心的问题。对于这个森林的场景，局部来说，我们可以把一颗大树和依赖与和帮助这个树的其他具有互生关系的动植物放在一起考虑，还可以从平均场的角度来考虑局部环境条件下的森林火灾或者生长加速或抑制的问题。我们也可以考虑从局部到整体的问题——疾病或者害虫在大量的树之间的传播——这个问题就很像上一个需要考虑个体之间的相互影响的社会学习问题，不过我们在这个例子里面不再重复谈这一方面。最近，不列颠哥伦比亚大学的森林科学家 Simard 研究了森林中树和树之间的“对话”^[5-7]。她发现，树和树之间通过根菌网络相连，并且这个链接能够作为物质和信息交流的通道，例如通过这个交流通道，“母树”能够向其他同种或者异种的树输送糖或者防御信号，并且在这个过程中还能够做到给自己的后代输送更多养分。因此，森林之所以构成森林，关键就在于能够实现树之间相互交流的根菌网络的存在。有了根菌网络，我们研究一个树木的生长、砍伐、病虫、生态地位等问题的时候，就需要考虑跟它相连的其他树对这棵树的影响以及这棵树对其他树

的影响,更进一步还需要考虑周围的树及其邻居之间的相互影响。于是,一个目标对象的问题转化成了一个需要从整体的角度来考虑的问题。甚至,Simard 就在研究中明确地提出来了这里面有例如间接影响、社团结构、层次结构等复杂系统的一般性问题^[5-7]。

于是,森林科学家有可能需要突破传统的森林科学的分析计算方法来研究这个问题,而且在这个突破中,我们同样很容易看到上一个问题中强调出来的几点:个体之间的相互影响,以及网络的描述方式,还有网络上具有整体性的具有间接效益的分析方法。

类似地,Google 的 PageRank 算法^[8]对网页的排名实际上也考虑了类似的因素:一个网页被很多网页引用就说明这个网页重要,并且如果引用它的网页自己也很重要,那么这个网页就会更重要。另外一个例子是我们后面会详细介绍的汉字之间的结构与读音含义上的联系,以及基于这个联系对汉字学习顺序和检测顺序的讨论^[9]。在那里,我们首先建立汉字之间相互联系的网络^①,然后从整体的角度对优化学习顺序和检测算法做了讨论。在这个问题中,我们同样也注意到以下几点:大量的个体、个体之间的相互作用的描述和具有整体性和间接效益的分析方法,以及没有特定领域限制的研究对象。

因此,系统科学不仅仅是交叉科学,而且是具有某种特定的共性的交叉科学:没有特定领域限制的研究对象,包含大量个体的系统,个体之间存在相互作用,所讨论的问题需要考虑这些相互作用,讨论这些问题的方法也有可能具有一些共性——例如整体性、间接联系、网络的描述方法。将来我们还会看到,不仅分析方法,分析的结果或者系统的行为、系统的组织方式演化方式都可能有共性。

系统科学的基本研究目标有两个层面。第一,如何处理在各种各样的系统之中的多个个体之间的相互作用,讨论其对系统的性质和功能的影响;第二,如何把对一种系统的研究方法抽象出来应用于更多的系统。两者都是方法论层次的目标,前者比后者稍微具体一些。如果我们把相互作用局限在四种基本相互作用(引力、电磁、强、弱)的框架内,那么我们讨论的就是统计物理学与场论的基本对象和目标。系统科学可以包含更广义的相互作用,如人群之间的意见形成与传播,其相互作用形式就不能直接还原成为四种基本相互作用。沿着这个思路。在每一个层次,

^① 实际上,这样来理解汉字的方式被称为系联法。首先被陈洋提出来^[10],后来经过章太炎^[11]发扬光大,并成为章黄学派汉字研究和教学的核心思想^[12]。