

信息·熵·经济学 人类发展之路

XINXI SHANG JINGJIXUE RENLEI FAZHAN ZHI LU

鲍际刚 夏树涛 刘鑫吉 王 朝 江敬文/著



经济科学出版社
Economic Science Press

信息·熵·经济学

——人类发展之路

鲍际刚 夏树涛 刘鑫吉 王朝 江敬文 著

经济科学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

信息·熵·经济学：人类发展之路/鲍际刚等著. —北京：
经济科学出版社，2013. 10
ISBN 978-7-5141-3760-6

I. ①信… II. ①鲍… III. ①未来学-研究 IV. ①G303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 214542 号

责任编辑：卢元孝
责任校对：郑淑艳
版式设计：代小卫
责任印制：邱 天

信息·熵·经济学

——人类发展之路

鲍际刚 夏树涛 刘鑫吉 王 朝 江敬文 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址：北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编：100142

总编部电话：010-88191217 发行部电话：010-88191522

网址：www.esp.com.cn

电子邮件：esp@esp.com.cn

天猫网店：经济科学出版社旗舰店

网址：http://jjkxcbs.tmall.com

北京万友印刷有限公司印装

710×1000 16 开 13 印张 250000 字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5141-3760-6 定价：32.00 元

(图书出现印装问题，本社负责调换。电话：010-88191502)

(版权所有 翻印必究)

目

录

自序	1
前言之预言	9
第1章 熵	19
1.1 概述	19
1.2 热力学熵——克劳修斯熵	20
1.2.1 克劳修斯熵的定义和热力学第二定律	20
1.2.2 温度	22
1.3 统计熵——玻尔兹曼熵	23
1.4 信息熵——香农熵	24
1.4.1 信息熵	24
1.4.2 联合熵、条件熵、相对熵和互信息	26
1.4.3 信息熵、联合熵、条件熵和互信息之间的关系	27
1.4.4 最大熵原理	27
1.4.5 热力学熵、统计熵和信息熵之间的关系	29
1.5 热寂论、负熵与耗散结构	31
1.5.1 热寂论与负熵	31
1.5.2 耗散结构	34
1.5.3 环境问题	36
1.6 本章小结	37
第2章 压缩感知	39
2.1 压缩感知基本理论	39
2.1.1 背景介绍	39
2.1.2 压缩感知理论框架	40



2.2 未来世界的数据处理手段——压缩感知	42
第3章 基于信息熵的人类社会和经济系统分析	44
3.1 概述	44
3.2 基本概念回顾	45
3.3 商品供需关系和社会发展历程的信息角度描述	47
3.3.1 基础知识和符号表示	47
3.3.2 人类社会发展历程的信息熵演绎	48
3.3.3 商品种类的影响	54
3.3.4 影响社会发展的因素	57
3.3.5 未来社会的发展方向 (1): 网络化的分散布局	59
3.4 商品价值	60
3.4.1 价值的细分维度	60
3.4.2 五种细分价值的对比	64
3.4.3 未来社会的发展方向 (2): 归信息化	65
3.5 商品价格	66
3.5.1 本征价格	66
3.5.2 市场价格	68
3.6 本章小结	68
第4章 分散布局	69
4.1 分散布局简介和历史	69
4.1.1 什么是分散布局	69
4.1.2 分散布局在历史上成功的例子	72
4.2 当今人类社会中的分散布局结构的例子	81
4.2.1 维基百科——Wikipedia	81
4.2.2 分布式光伏发电	84
4.2.3 分布式计算	87
4.2.4 分布式公益——众人拾柴火焰高	90
4.2.5 谷歌的分布式项目——润物细无声地改造我们的生活	91
4.2.6 分布式的分享电子档案	93
4.2.7 比特币	93
4.2.8 分布式的制造业——3D 打印	93
4.2.9 分布式舆论监督	99

4.2.10 复利——财富在时间上的分散布局的强大武器	100
4.3 展望现在到未来极有前景的分散式布局	100
4.3.1 云制造	100
4.3.2 创客们引导的生产革命	102
4.3.3 分布式金融——C2C 借贷	103
4.3.4 分布式教育	104
4.3.5 分布式工作	104
4.3.6 3D 打印人体器官	105
4.3.7 人脑功能的分布式应用——平行空间中的并行生命	107
4.4 本章小结	107
第5章 网络	110
5.1 概述	110
5.2 网络的拓扑结构	111
5.2.1 图论	111
5.2.2 几种常见的网络拓扑	114
5.3 复杂网络	114
5.3.1 网络的统计特征	115
5.3.2 小世界现象	116
5.3.3 无标度网络	118
5.3.4 网络中的其他现象	119
5.4 网络结构与网络功能	120
5.4.1 网络结构熵	121
5.4.2 网络结构决定网络功能	123
5.4.3 网络结构与创新	125
5.5 未来社会归信息化、网络化的分散布局经济	125
5.6 本章小结	128
第6章 归信息化	129
6.1 归信息化	129
6.2 归信息化的价值观	130
6.2.1 共享	130
6.2.2 边际递增	130
6.2.3 合作	131



6.2.4	开放	131
6.2.5	民主、自由和平等	132
6.2.6	全局	132
6.2.7	环保	132
6.2.8	与自然和谐	133
6.2.9	非物质幸福和非物质尊严	133
6.3	人类社会进步依赖信息化	133
6.3.1	信息传递的演进	133
6.3.2	信道	135
6.3.3	知识的传播	136
6.3.4	计算机时代电子信息加速社会发展	136
6.3.5	货币的产生就是归信息化的过程	137
6.4	归信息化的应用	141
6.4.1	政府管理归信息化	141
6.4.2	企业管理归信息化	144
6.4.3	居民生活归信息化	147
6.4.4	归信息化趋势之下的行业演进趋势	153
6.5	本章小结	156
 第7章 货币		157
7.1	货币的概念	157
7.2	货币与信道	159
7.2.1	信道和信道容量	159
7.2.2	费雪交易方程与行业间货币量分配	162
7.3	货币价格	164
7.4	未来社会的货币和商品交换	165
7.5	本章小结	167
 第8章 全书总结		168
8.1	信息论的新认识	168
8.1.1	信息论为描述复杂系统提供强大的工具	168
8.1.2	信息论的认识论和方法论	168
8.1.3	网络化的分散布局和归信息化的价值观	169
8.1.4	经济学上开创性的新结论及方法	171

8.2 中国的现实困境	174
8.2.1 资源局限	174
8.2.2 环保欠账	176
8.2.3 债务风险	177
8.2.4 经济增长局限	188
8.2.5 困境解决之路	191
参考文献	193
作者简介	197
后记之房地产危局	198

自序

人类对科学世界的认识是从确定性开始的。从文明诞生之时起，人们就通过观察自然界中各类可重复的现象进行规律的总结，是为“归纳”；而从具体的事实或抽象的假设出发，利用数理逻辑推演出确定的结果，即为“演绎”。对于较为复杂的系统，人们的研究往往遵循近代科学中的“牛顿—爱因斯坦力学体系”，从基元或局部出发，利用简单、线性、对称、连续、因果、可逆的思想构建整个体系。爱因斯坦的广义相对论是这一思想体系的巅峰之作，几个简洁漂亮的方程就揭示了宇宙的大尺度规律，他曾不止一次地说过，“上帝不掷骰子”。

进入 20 世纪以来，统计物理和量子力学的发展使人们对世界本质的认识逐渐产生了改变。面对经济、生命、人类社会、互联网、大数据等诸多复杂巨系统，传统的以确定性为基础，以局部、简单、线性、可逆等为特征的思想方法和研究体系显得力不从心。越来越多的科学家认为，世界的本质是随机的，确定性只不过是随机性的一个特例。从整体或全局出发的系统论思想正在成为科学研究的主流方向之一，复杂、非线性、突变、自组织、自相似、随机涨落、不可逆等特征在复杂巨系统中俯拾即是。与爱因斯坦不同，我们认为，“上帝是掷骰子的，复杂巨系统很难用几个简单方程描述”。

香农在 1948 年创建了信息论，在概率统计基础上提出了“熵”和“互信息”的核心概念，用来解决通信系统中的数据压缩和可靠传输等问题。香农信息熵是描述概率分布不确定性的度量，其本质与克劳修斯的热力学熵以及玻尔兹曼的统计熵是相同的，统计熵实际上是均匀分布的信息熵。热力学第二定律，即“熵增定律”是现代物理学的基石，正如爱因斯坦评价的那样，“熵理论对整个科学来说是第一法

则”。作为热力学熵和统计熵的推广，信息熵的适用范围更广，早已从通信系统延伸到生命科学、信息科学、经济学和社会学等领域。在香农信息论中，均匀分布具有最大的不确定性（即最大熵），信息使得概率分布偏离均匀分布，从而减少了不确定性、增加了有序度，这个思想进一步推广到两个一般概率分布情形，就是互信息的概念。我们认为：从局部意义上说，信息即熵减即有序即价值；从整体意义上说，世界是由物质、能量和信息构成的，自然是物质和能量在时间和空间中的分布，该分布相对于均匀分布的偏离即为信息，人类的总价值即为人与自然之间的互信息。因此，受热力学第二定律的启发，我们在复杂系统中定义分布及其信息熵，利用信息熵增的思想研究复杂系统的演进，利用信息论中的模型和算法研究复杂系统的表达，有理由相信，信息熵和信息论的思想可以用来描述和刻画整个世界的发展和演化，也许对整个世界来说是第一法则，本书是在这方面的一个起步和探索。

对于复杂巨系统，信息论不仅提供了形而上的、独特的研究视角，还能给出许多科学的研究工具以解决具体问题。通信系统中的香农信息论主要包含理论极限和编码方法两大部分，例如，熵是数据压缩的比特下限，LZW 是逼近理论极限的一种压缩编码算法；互信息是可靠传输的速率上限，LDPC 码是逼近香农限的一种信道编码方法；等等。在将信息论思想和方法应用于经济、社会、生命等复杂巨系统时，我们将看到信息论独特的研究视角（对应理论极限部分）以及众多的科学工具（对应编码方法部分）的重要性，下面我们给出几个例子：

1. 整体与局部或者宏观与微观的关系一直是科学研究的重点和难点。传统科学方法通常从局部出发，往往通过一个或几个方程对简单系统进行刻画，但对复杂系统的整体性质和演化机理缺乏认识；系统论方法通常从整体出发，注重系统的类别、层次、结构，但经常只能定性而不是定量地解决问题，缺乏实用性。这在某些领域中，通常会产生宏观研究与微观研究的割裂问题，目前的经济学就是一个典型的例子，物理学中的广义相对论与量子力学也是如此。分类和分层在复杂系统中很常见，微积分等传统数学工具处理起来非常困难，不同类别的东西（例如水果和汽车的产量）一般无法直接处理，但它们的联

合熵在信息论中是有意义的；对于分层问题，信息熵在层次间具有“可加性”，可以很自然地应用于从局部到分层到整体的复杂系统。因此，信息论为解决上述宏微观割裂问题提供了一种新的视角和可能。

2. 对于一个复杂系统，人们对局部或整体的认识都是不完备的，如何利用所有的已知认识对系统进行推断？信息论给出的答案是在所有满足已知条件的概率分布中选择熵最大的那个，这就是著名的“最大熵原理”。可以证明：系统的最大熵解是存在并且唯一的，一般情况下也是最稳定的，从“熵增定律”角度看它是系统自然演化的必然结果。信息论及相关领域的学者对于最大熵模型及其求解算法做了大量研究和改进，极大地降低了求解算法的复杂度，目前从语音识别到网络搜索甚至股票投资等，最大熵算法的表现几乎都是最好的，应用十分广泛，例如，美国文艺复兴技术公司的西蒙斯是一个数学家，他率领一个做语音识别技术的团队利用最大熵原理等信息论方法在量化投资领域创造了一个传奇，其旗下的大奖章基金从1988年成立至今，净回报率平均每年高达34%，换句话说，1988年投入1美元2008年的回报已经超过200美元，远远超过巴菲特的伯克希尔哈撒韦公司，在2008年股市暴跌中，文艺复兴公司的回报高达80%！20世纪初期的著名股市作手利维摩尔说过“价格总是沿着阻力最小的路径运行”，我们认为阻力最小即能量消耗最少，其本质是向着最大熵的方向运动。

3. 系统的整体规律体现在概率分布相对于均匀分布的偏离，往往表现出某种“稀疏”特性，利用这种稀疏性我们可以对系统进行简单表达，人们感兴趣的系统通常都是稀疏或近似稀疏的。某些简单系统，例如机械系统，往往只用一个或几个微分方程即可表达，这代表着系统稀疏性的极端情况，某些貌似复杂实则简单的混沌系统或分形系统也是这样。一方面，一般的复杂巨系统无法稀疏到只用几个微分方程即可描述的程度，即使是随机微分方程也不行；另一方面，个体要服从整体规律，它是整体在局部上的投影，“压缩感知”理论指出，对于稀疏系统，只要少量（数目与稀疏度正相关）的针对个体的均匀随机采样即可通过快速算法精确重建或近似重建整个系统，其思想符合我国传统的“天人合一”哲学理念，不同之处在于提供了解决问题的整套科学工具，压缩感知是目前信息论领域的研究热点之一，刚一出

现就被评为 2007 年美国十大科技进展,近年来广泛应用于医疗、图像处理、模式识别、军事等领域。

信息论在解决实际问题时表现出了卓越的能力和惊人的效果,吴军博士在《数学之美》中给出了大量的例证,这些在通信和互联网中的重要应用,包括语音识别、机器翻译、检索、分类、拼音输入法、线上广告等,背后都体现了信息论模型和算法的巨大能量。本书的主要目的之一是要拓展信息论的应用领域,试图证明同样的思想和方法在研究经济、社会和生命等复杂巨系统也是可行的,希望在这些领域以全新的视角得到与众不同的研究结果。

我们在本书的第 1 章、第 2 章介绍了熵、互信息、耗散结构和压缩感知等信息论和复杂系统中的基本概念和思想,从第 3 章开始应用这些基本理论研究人类社会系统和经济系统。我们从需求和供给开始构建理论模型,定义了需求分布和总需求熵,以及供给分布和总供给熵。不同于通常的“总需求 $\leq$ 总供给”,我们以

$$\text{总需求熵} \leq \text{总供给熵}$$

为起点对人类社会的发展和演进做了演绎分析,从原始社会开始“总需求熵=总供给熵”,演进到奴隶社会、封建社会至今,在演进过程中总供给熵与总需求熵之间的差值做周期性变化,导致了战争的出现和必然结果,从而推动社会的周期性变化,我们推测人类社会的未来演进方向还会指向到“总需求熵=总供给熵”的终极状态。在求解“总需求熵=总供给熵”的过程中,在最大熵原理的指导下很容易地得到了四组可行解——原始社会的人人平等经济、中国封建社会的自给自足小农经济、佛教理论中的最小消耗经济以及未来社会的归信息化网络化分散布局经济。这四组解具有以下共同特征:①分散布局;②近似人人平等;③几乎不需要货币。这些特征与经济学中著名的“阿罗—德布鲁一般均衡存在性定理”几乎完全吻合,但我们的推导过程要简单得多。这仅仅是巧合吗?随着科技的飞速发展,3D 打印、分布式光伏发电、互联网、云计算、维基百科、大型开放式网络课程(MOOC)等是物质、能量、时间、空间、信息等方面分散布局的典型例子,这些内容在第 4 章有详细阐述。很显然,“未来社会的归信息化网络化分散布局经济”是我们的理想目标,这里有两个关键问题:

①它与其他三组解有什么本质不同？②它的实现有可能吗？关于第一个问题我们的回答是“网络化”（第5章），关于第二个问题我们的回答是“归信息化”（第6章）。

（1）网络化：系统中局部之间的联系可以用网络来刻画，局部相当于网络节点，复杂系统和复杂网络的本质是相同的。节点之间的边是构建网络的成本，依赖于系统外负熵的持续流入，是有边界的。网络中的正反馈回路意味着涌现或创新，正反馈的过程一般是非线性的，是一种自组织行为。网络结构决定网络功能，可以利用信息熵来刻画，好的网络结构需要具有以下三个特征：①节点数目多，且几乎没有孤立的节点；②边的数目随节点数目 n 的增加而以近似 $n \log n$ 的速度增加；③建立新边的成本低廉，建立新边的规则具有一定的随机性。这样的网络具有良好的连通性（往往还有“小世界”和“无标度”等特点），容易形成回路，如果回路形成了正反馈，则会产生涌现或形成创新，否则会在自然熵增时逐渐消亡。在边的数目固定的条件下（成本固定），连通性刻画了网络效率和稳定性。显然星型网络效率最高、稳定性最差，一个高效鲁棒的网络必然会用一个中心致密子网代替星型网络的中心节点以提高稳定性，这将导致网络的分层。上述复杂网络的演进行为一般不是均匀随机演进的，其相对于均匀分布的偏离会表现出某种稀疏性，由于最公平/稳定的网络效率不高，最高效的网络公平/稳定性差，故演进过程往往体现出公平与效率的折中，这又启发我们用压缩感知来对这类稀疏系统进行简单表达，并寻求边界限制条件下的公平与效率的最优折中方案。因此，分散布局中的节点是否形成一个好的网络结构决定了整个系统效率的高低，即网络中是否能够产生涌现或创新、这些创新是否能够借助连通性使得整个网络受益，在上述四组解中，显然前三组基本没有形成网络化，而第四组就完全不同，这就是它们之间的本质区别。

（2）归信息化：在物质/能量等负熵稀缺的限制条件下，做到近似人人平等/自由有希望吗？换句话说，在负熵稀缺的约束下，如何实现更节约能源、更节约物质、更节约和保护空间、更高效率的理想生产组织方式？答案必然指向“归信息化”。我们认为商品价值可以划分为物质价值、能量价值、时间价值、空间价值和信息价值五个部分，

只有信息价值占比高也就是说商品的价值归信息化时,上述理想才能实现,这是因为信息区别于物质、能量、时间和空间的本质特征为可光速传输、可复制、可共享、可编码,前三个特征保证了人们能以极低的成本极快地得到信息,第四个特征可使得信息存储/发送/传输/接收的效率更高。我们目前正走在归信息化的路上,例如,QQ/微信、谷歌搜索/地图等商品对物质、能量、时间、空间等资源消耗极少,信息价值占比极高,已经实现了人人免费使用的理想结果。因此,当绝大部分商品归信息化时,我们就接近实现了在物质/能量等负熵稀缺约束下人人平等/自由的终极理想。

(3) 网络化与归信息化的结合:我们将整个社会系统和经济系统看作一个网络,网络节点边的数目分布称为网络的度分布,在输入负熵的总量稀缺的条件下,也就是说网络中边的总数受限,有两种基本的网络优化路径:

- 在度分布的算术平均固定的条件下,网络的最大熵解恰为节点平等的均匀分散布局网络,这通常代表着公平;
- 在度分布的几何平均固定的条件下,网络的最大熵解恰为服从幂律分布的无标度分散布局网络,这通常代表着效率。

从公平的起点出发,实际网络在演化过程中一般既要注重公平又要体现效率,每一个中间阶段我们追求的都是混合不同比例公平和效率的最大熵解,而终极指向还将是公平。在整个网络的输入负熵总量增加时,增加的部分在偏向于公平时不应使效率降低、在偏向于效率时不应使公平减少,这就是所谓的“帕累托最优”,也是我们混合模型中的最大熵解。正如前文所述,信息区别于物质/能量的本质特性使得归信息化成为负熵总量增加的最高效路径,而如何选择公平与效率的混合比例以及实现其最大熵解则取决于社会制度与经济制度的选择和变革。

在以上论述中,我们从经济学的某些概念(如需求/供给、公平/效率)出发,利用信息论的视角和方法讨论分析了人类社会系统的演化发展问题,并给出了终极指向——归信息化、网络化的分散布局经济。

只要涉足经济系统和经济学的研究,商品的价值和价格就是无法

回避的核心问题，这也是我们在论述归信息化指向的基本工具。为进一步深入研究经济系统，我们在第3章和第7章利用信息论的视角和方法建立了一套商品价值价格的理论框架，拓展和深化的工作希冀于我们未来的努力以及更多学者的投入。我们认为商品价值可细分为物质、能量、时间、空间和信息五个维度，其中信息是王者，物质承载信息，能量推动信息流动，时间、空间是信息的标度，对人类来说，没有信息一切都将没有意义。价值是对上述蕴藏在商品中的细分价值属性的压缩表达，其中对前四种细分价值的计算体现了商品价值的客观性部分，而对信息价值的计算以及对价值的压缩计算更体现了人们的偏好和群体意志的主观性。我们将商品价格划分为本征价格和市场价值两种，其中前者排除了货币数量的影响，仅依赖于商品价值和稀缺程度，而后者还受到货币数量多寡的进一步影响。我们用上述五个细分维度刻画商品价值，用总需求熵和总供给熵来刻画稀缺程度，给出如下表达式：

$$\frac{\text{价值}}{\text{总需求熵}} \geq \text{本征价格} = \frac{\text{价值}}{\text{稀缺}} \geq \frac{\text{价值}}{\text{总供给熵}}$$

本征价格的出现使得具有不同价值和稀缺性的商品有了可比性，是价值和稀缺的一维表达。商品的本征价格类似于热力学系统中的温度，是一个强度量，热量从高温物体传向低温物体，代表了整个系统向着熵增的方向发展；类似地，当低价同质商品出现时，原有高价商品的销量会向低价商品转移，并拉低其价格，此过程使得总需求熵和总供给熵增加。货币的本质作用是为了降低商品交换的复杂度，由于货币中介的出现， n 种商品两两比较的复杂度从 $O(n^2)$ 降为 $O(n)$ 。在讨论有货币参与的商品市场价格问题时，我们将经济系统看作信息论中的一个通信系统（信源通过信道发送信息给信宿），其中生产者、消费者类似于信源和信宿，商品类似于信息，而货币则为信道。信道一般是有噪声的，信道容量为信道中信息的传输速率上限，为保证整个经济系统的正常运行，必须保证货币量足够大（即信道容量足够大），否则必然会降低商品的交换速率，从而抑制经济的发展；而货币量太大会引起通胀等问题，也会影响商品交换的可靠性和效率，因此类似于信息论中信道容量的定义，最优货币投放量应为可靠商品交换的速率上限。进一步地，货币在不同行业之间的投放可看作并联信道的功



率分配问题，这样我们就可以利用信息论中信道容量的“注水求解法”来计算货币在不同行业之间的最优投放数量，正如噪声的大小影响并联信道中成员子信道的功率分配一样，国家的行业税收/行业准入等宏观调控政策决定着货币在该行业中的流通数量。

利用信息论研究人类社会和经济等复杂巨系统是一项巨大工程，鲍际刚先生和我经过多年探讨，在2012年底才有了一点思路，至今也谈不上初窥门径。如果本书的一些探索和尝试能有幸提供一些新的视角和思路，让更多的学者及有识之士参与这方面的研究，我们就很满意了。

夏树涛

2013年7月于南国清华园

前言之预言

一路向“南”

我出生在哈尔滨，大多数时间居住在距离哈工大很近的南岗区，大学就读于南开大学数学系，毕业后辗转到了海南省建设银行工作，以后又就职于南方证券，在深圳的绝大部分时间里都居住在南山区。在我过去的工作、生活、学习经历中，始终没有离开这个“南”字，人生的下一个“南”字在哪里还不知道，在如此随机的世界里我们没有选择权。

0511

女儿“蜡笔”出生的日子是0511，后来，我辞职的日子也选在0511，巧合的是创立的公司“悟空投资”工商执照上的成立时间刚好是0511。最惊悚的是2008年5月11日，晚上做梦，两个女人面目模糊，一高一矮，过来接我，说：你咋还没走，就等你了。感觉是要到哪儿去旅游。我说：等一下，我还有个东西没准备好。就去一个像收发室的地方取照片，路过一扇门，门大开着，里面一片灰色的瓦砾，场面肃杀。到了收发室，反复查找，也没找到我的照片，转身去跟两个人说：没有我。梦到这里就醒了。一辈子能够记住的梦很少，但这个梦我始终不会忘记。

第二天，2008年5月12日下午，汶川大地震！

随 机

从宇宙诞生出发，历经百亿年，宇宙膨胀，生命诞生，我们这种生命个体此时此刻在此地的概率几乎等于0，在如此随机的世界里，人类总是渴望预言未来，这种颠倒“因果”的渴望，与人类对永生的渴望，同等重要，挥之不去。上