

物理学的新延拓——经济物理学

王劲松 黄开齐

(中国人民解放军军事经济学院 武汉 430035)

经济物理学的提出及其发展

近年来,由大量的、存在强相互作用的组分组成的、远离平衡的复杂系统研究中,发展起来的复杂性理论取得了很大进展,由于经济系统与其他复杂系统具有相同或十分相似的性质,比如,热力学系统中的分子运动和经济系统中的商品运动都具有数量极大和运动随机的特征,其运动的相似性如下表:

分子运动	分子扩散	涨落	分子密度	速率	碰撞
商品运动	商品扩散	价格波动	商品密度	流通速率	竞争

这使得人们自然想到运用处理复杂系统的熵理论和方法对经济系统进行分析。

根据热力学第二定律,一个孤立系统必定自发向熵极大的平衡态发展。由此可以定性推定,市场的某些表征量发展,也是符合热力学第二定律的。利用物理学的方法手段,提出自然系统简化模型,试图阐明导致系统具有某些特征和遵循某些法则的主要原因和机制,这本是物理学家惯用的手段,如今已在经济系统模型中得到广泛应用。例如少数获胜博弈模型、Ising 自旋模型、股市价格演化的一维水动力学模型、交易冲量和价格阻力模型、交易者群聚模型等等。再如,对大量数据进行统计分析的方法被先后用于经济数列的研究,也取得了相当的进展。主要的经济数据分析方法有统计分布模式、自关联函数和功率谱分析、重定标涨落尺度 R/S 分析和消漂涨落分析、相对差分检验、ARFIMA 最大可能性估计。物理学向经济学的大进军使得一门介于物理学与经济学之间的新学科——经济物理学诞生了。1995年,Stanley 等人比照生物物理学、地球物理学和天体物理学的提法,第一次使用经济物理学(Econophysics)一词为这一新的交叉学科命名。这样原本属于经济学中的问题,诸如如何描述经济系统的状态和变化过程、各个参数间有何依赖关系、不同系统是否具有某些普遍的和特有的性质、是否遵循某种机制或规律等等,成为一些兴趣广泛的物理学家研究的范畴。

实际上,物理学家研究经济问题的历史还可以追溯得更远,早在1900年法国Bachelier提出了第一个关于收益的随机过程的模型——由独立的、全同

的、遵从 Gauss 分布的随机变量描述的无关联随机行走模型,1936年,意大利物理学家Majorana就指出了物理学与社会科学所遵循的统计规律的类似性,但他们的观点并未引起人们的重视。

Mandelbrot 在20世纪60年代分析了股市和期货市场的价格走势,发现并不遵循 Gauss 分布,指出分布的“胖尾”现象和不同时间标度下的稳定函数形式,与 Levy 稳定分布相符。之后用统计物理学的概念和方法研究经济问题的的工作逐渐增加。但是,经济物理学形成了一门分支学科而迅速发展并取得重要进展并引起人们广泛重视,则是近10年的事,其中 Stanley、Mantegna、Arneodo、Ausloos 和张翼成等人做了开创性的工作。

近年来对经济物理学的研究,大体上可概括为3个方面:一是采用不同的手段和方法,对经济领域的各种经济数列进行分析和定量表征;经济领域的最原始数据是以价格、收益、多变性等参量随不同时间间隔变化形成的时间数列,这类数列的长度可达几千到几百万。这些表面上看似起伏无常、变化不定的数列,实际上是经济系统内部的结构、机制在一定的外部环境下产生的规律性的反映;要想逐步揭示出这些内在规律,首先必须找到适当的方法对原始经济数列进行多方面综合分析,用合适的特征参数进行定量表征。二是在数据分析的基础上,找出不同参数间的依赖关系,寻求系统的某些经验或半经验公式和唯象描述方法。三是将经济系统的已知信息与物理学和其他学科的相关系统进行类比,建立经济系统模型,以求阐明系统的微观结构、作用机制以及与宏观参数和演化动力学的关系。

经济系统研究中的物理学应用

运用物理学的概念和方法,对由大量非同质组分组成、相互间有很强作用、具有剧烈涨落、处于非平衡动力学过程中的经济系统所产生的经济数列进行分析和研究,不仅可以对系统进行唯象描述,并通过特征参量提供有价值的信息,而且还能找出不同参量间的相互依赖关系,进一步揭示某些经验和半经验法则,诸如标度律和标度不变性、年增长率与出现几率满足幂次律关系的普适性等性质。这不能不使人们联想到物理系统在临界点附近出现的普适性和标度律,虽然经济系统和物理系统差别极大,前者的组成单元是有生命、有思维的,而后者则恰恰相

反,它们遵循同一经验法则在于它们在临界点附近都存在长程关联。

经济系统中的自相似性与标度不变性

自相似性与标度不变性是物理学中分形理论的基础。分形是一个生成规则的吸引子,而信息则是随机生成的,它的较小部分与整体部分相关,在这个意义上它是自相似的。分形形状在空间上显现出自相似性,分形的时间序列在时间分布上表现出自相似性。一个时间序列,只有当它被许多等可能性事件所影响时,才是随机的。一个非随机时间序列,反映出其影响的非随机性及其内在的相关性,并且这种相关性是长期的。这就是说,非随机时间序列是分形的,它不一定遵循随机游走,其分布也不服从正态分布。Hurse 在 20 世纪 40 年代研究了有偏随机游走,提出了一种新的统计量,即 Hurst 指数 H ,并提出重标极差 R/S 分析方法。Mandelbrot 在 20 世纪 60 年代再次对非随机时间序列做了全面的研究,指出证券市场是服从一族分形分布的,稳定的分形分布在均值处有高峰,也有胖尾,倾向于有趋势的循环,对于一个分形的时间序列 $\{z_i\}$,当时间标度为 t ,方差 $Var[z_i - z_{i-1}] = E[z_i - z_{i-1}]^2 = t^{2H}$,标准差为 t^H 。分形时间序列与随机时间序列最重要的区别是 $\{z_i\}$ 不是 Markov 过程。给定一个从 $-t$ 到 0 的过去增量 $(z_i - z_{i-1})$,与未来增量 $(z_{i+1} - z_i)$ 的相关系数为

$$\begin{aligned} C(t) &= \frac{E[(z_i - z_{i-1})(z_{i+1} - z_i)]}{E(z_{i+1} - z_i)^2} \\ &= \frac{(2t)^{2H} - 2t^{2H}}{2t^{2H}} \\ &= 2^{2H-1} - 1 \end{aligned}$$

其中, H 为 Hurst 指数,当 $H = 1/2$ 时, $C(t) = 0$,即未来的增量与过去的增量不相关,时间序列是随机的。但是当 $H > 1/2$ 时, $C(t) > 0$ 且与时间 t 无关,则未来的增量与过去增量有关,时间序列是分形的。分形的时间序列是定性自相似的,即序列在不同的时间标度上有类似的统计特性,表现出长期相关性的特征。

Levy 对分形分布的性质做了研究,指出高峰、胖尾现象是分形分布的特征形状,给出随机变量 t 的概率分布特征函数的对数为

$$\lg f(t) = i t - |t| [1 + i (t/|t|) \tan(\alpha/2)]$$

其中, α 、 β 、 γ 为参数。 α 是偏度的度量,其取值空间为 $[-1, 1]$, $\alpha = 0$ 分布是对称的, $\alpha > 0$ 分布为右偏,且右偏程度随着 α 趋向于 1 而增加,当 $\alpha <$

0 情况正好相反; β 是均值的位置参数; γ 是可以调整的标度参数,如日数据于周数据之间的差别; β 是时间序列概率空间的分形维度,度量了分布的峰度合胖尾程度,其取值区间为 $0 < \beta < 2$,时间序列性质受到 β 取值的影响,显然当 $\beta = 2$, $\alpha = 0$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ 时,分布为正态分布;当 $1 < \beta < 2$ 时,方差变成无限,表现为分形的时间序列;当 $0 < \beta < 1$ 时,不存在稳定的均值。而有效市场假说要求 β 必须等于 2,但在分形的市场假说当中, β 可以在 1 和 2 之间取值。

但是用 Levy 分布虽然可以很好的描述市场收益率,却碰到了胖尾的现象,于是提出截尾的 Levy 分布,即其中间部分用 Levy 分布来刻画,而尾部则用指数分布来刻画,这样能够较好地描述市场收益率。分形时间序列可以有分形维数,在时间上有足够的自相似性,这会改变原有的经济时间序列的许多特性,表现出局部的随机性与整体的相似性。即使是做了时间标度的调整,序列的分布仍然保持同样的形状,这种关于不同时间标度的相似性称为标度不变性。近年来,肯尼斯·法尔科内、芒德布罗等人通过使用 DNA 法对股市价格波动进行分析发现,股市价格的波动与 DNA 技术中所发现的某些特性极为相似。两者同时呈现一种长程的、幂指数分布,具有分形结构的特征,并据此提出了非趋势波动分析的 DFA 方法。不过,对于不同的经济系统,标度律还有哪些表现形式、如何实现自组织临界性、系统内部结构和外部环境对系统演化有何影响、缓变与突变如何交替、各参数间有何关联等都还需要做进一步研究。

混沌分形与经济系统的演化

混沌理论是物理学中的一个重要理论,系统混沌的特征包括随机性、分形的性质、标度不变性和对初始条件的敏感依赖性。而通过对经济系统进行判定后发现经济系统的李亚普诺夫指数为正,豪斯道夫维数为分数,拓扑熵或测度熵为正且功率谱是连续的,因此可以推定,经济系统是混沌的,可以用物理学中的混沌理论进行解释。

混沌理论研究表明一个经济系统所处的不同状态取决于系统的参数,当参数在一定范围内连续变化时,系统从稳定状态经过倍周期分岔,演化到 2 周期态、4 周期态、8 周期态……最后进入混沌状态。初始条件的微小改变或运行状态的微小扰动,将有可能引起经济系统的蝴蝶效应,例如东南亚金融危机。经济系统是一个开放的系统,许多经济过程都

是不可逆的熵增加过程,这两个基本特征决定了经济系统本质上是一个高度复杂的非线性系统。非线性系统的一般特性在经济系统的运动中都有突出表现,如失灵性(如少量的资金投入对起经济是不可能的)、非单值性、饱和特征(如对劳动力需求的饱和限制)以及继电特性——突变性等等。一些研究已同样证明,经济系统中存在非平衡相变(自组织)的基本特征——非对称性,并发现了经济系统运行中的对称破缺现象。因此要客观地分析经济运行规律,就必须正确研究经济系统中的非线性。长期以来,经济学家承认经济运行的复杂性,但在经济规律的研究和经济运行的调控上,却总回避这种复杂性。一般认为,由于不稳定运行结果只会在量上略有差异,不会出现质变。然而,往往发生危机或经济过热现象;发生因确定性运行的失稳,从量变(类似倍周期分岔)到质变(混沌)的不确定性运行。而物理学中的混沌理论正好在这方面为研究经济运行的复杂变化提供了理论和方法。在更深层次的意义上,物理学中的混沌理论在经济研究中的运用扭转了传统的外界环境随机性的旧观念,将它以内在的非线性特征揭示出来。经济活动者一方面应承认经济混沌的存在,另一方面应研究它、分解它,利用运动方式的可选择性,将其引向最佳状态。

混沌物理学中的分形分维理论对于经济系统还具有重要的方法论意义。奇怪吸引子是一种经典的分形,是混沌运动的伴生物,其特征值就是分数维,它可以反映经济的自由度,如果系统是低维的,虽不能确切列出其动力学方程,也不能进行长期预测,但可以对系统进行比较精确的短期预测。该方法最早是由 N. packard, J. P. Crutchfield, J. D. Farmer 和 R. Shaw (1980) 以及 F. Takens (1981) 提出的,其数学根据是 H. Whitney 提出的拓扑嵌入定理。Grassberger 和 Procaccia (1983) 进一步完善了该方法,更适用于实验资料序列,计算经济奇怪吸引子的维数,并以此来判断经济系统是否为确定性系统,也就变得可行了。

对于一个经济时间序列 x_1, x_2, \dots, x_N , 相空间重构技术主要包括以下几个步骤:

(1) 选择嵌入空间维数 m , 然后将序列 $\{x_i\}_{i=1}^N$ 嵌入其中, 具体嵌入方法是将 $\{x_i\}_{i=1}^N$ 转化为 m 维空间的一个点序列 $\{x_i\}_{i=1}^{N-m+1}$, 其中 $x_i = [x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}]^T$, 这样就可以得到一个与 $\{x_i\}_{i=1}^N$ 相对应的 m 维空间的一个点序列 $\{x_i\}_{i=1}^{N-m+1}$ 。

(2) 依次取若干个不同的个值, 分别计算序列 $\{x_i\}_{i=1}^{N-m+1}$ 所对应点集的相关维数 $D(\cdot, m) = \frac{\ln C(\cdot, m)}{\ln \frac{1}{N^2}} = \frac{\ln C(\cdot, m)}{\ln \frac{1}{N^2}} = \frac{\ln C(\cdot, m)}{\ln \frac{1}{N^2}}$ 。其中 $C(\cdot, m) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N (x_i - x_j)^2$ 是 $x_i - x_j < \epsilon$ 的点对所占的比例, ϵ 是 Heaviside 函数, 当 $Z < 0$ 时, $H(Z) = 0$; $Z > 0$ 时, $H(Z) = 1$; ϵ 是选取的一个较小的正数。—根据所取的 ϵ 值与其对应的 $D(\cdot, m)$ 值, 作出 $\ln C(\cdot, m) - \ln \epsilon$ 曲线, 而其直线部分的斜率是 $D(\cdot, m)$ 。

(3) 不断提高嵌入维数 m , 重复 (2), 直到 m 达到某一值 m_c 时, 相应的 $D(\cdot, m)$ 不再随 m 的增大而发生有意义的变化为止。这在 $\ln C(\cdot, m) - \ln \epsilon$ 图中表现为一些曲线的线部分的斜率不再随 m 的变化而变化, 此时, $D = D(m_c)$ 就是所求的吸引子的关联维。

Takens 证明, 只有当选择的嵌入空间的维数 m 足够大时, 重构的动力系统与原经济系统才是几何等价的, 因而可以通过重构运动系统的一些几何性质来达到研究原经济系统的目的。一般地说, 如果 $m \geq 2d + 1$ (其中, d 表示原来动力系统相空间的维数), 那么得到的 $x(t)$ 就是原来动力系统相应的一条轨道到 R^m 中的嵌入。

此外, Mandelbrot 通过对棉花价格的研究得出了分维为 1.7 的重要数值; 陈平确定了维数为 1.5 左右的货币奇怪吸引子; Benhabib 和 Day 在 1981 年从消费者选择行为中发现了收入较高阶层消费者的消费行为存在的周期波动或混沌现象等等。

布朗运动与金融经济学

众所周知, 布朗运动是属于典型物理运动, 由英国植物学家布朗在 1827 年首先发现的。1905 年, 爱因斯坦发表了关于布朗运动的数学描述, 根据他的假设, 得到了结果为 $\langle x^2 \rangle = kTt/3$ t 爱因斯坦公式。1908 年, 朗之万在研究布朗运动的涨落现象时, 给出了物理学中第一个随机微分方程:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{dx}{dt} + \xi(t)$$

而早在 1900 年, 法国数学家巴施利叶就已经在其研究股市的博士论文《投机理论》中给出了布朗运动的数学描述。1997 年度的诺贝尔经济学奖颁给了哈佛大学的莫顿教授和斯坦福大学的斯科尔斯教授, 布莱克则因去世而未能获奖。瑞典皇家学院这样评价: 他们研究出衍生性金融商品的评估方法和风险

量子理论在自然科学中的扩展 和对社会科学的影响

杨兆华

(山东泰山学院物理系 泰安 271000)



刚刚过去的 20 世纪可以说是物理学中量子理论对人类文化及人类社会产生空前影响的世纪。具体表现是,量子力学首先在物理学的其他领域产生革命性影响,又扩展到了化学、生物学等领域,进而又影响了哲学社会科学,影响人们的思想和认知观念。

量子观念刚刚诞生就对黑体辐射、光电效应、氢原子光谱等问题的解决显示出了独特能力。1928 年,那时奇妙的微观世界才刚刚展示它的底蕴,人们只知道两个粒子(质子和电子),但量子理论却非常成功地解答了一连串的物理之谜,使人们终于正确地掌握了氢原子和氢分子的形成,隧道效应也开始帮助人们了解放射性核的衰变。不久,量子场论初步建立之后,又成功揭示了各种粒子相互作用和相互作用转化的规律。

20 世纪 40 年代,发展了重整化方法,部分地克服了发散困难。50 年代以后,又发展起来一种非线性场论——规范场理论。按照量子场论的方法,研究带电粒子与电磁场之间相互作用的量子电动力学由于重整化技术的发展,已成为最精密理论之一。

60 年代,科学家提出统一描绘电磁相互作用和弱相互作用的规范理论,称为电弱相互作用统一理论。这一理论预言了中间玻色子的存在和它们的质量。于 1983 年实验证实了中间玻色子 W^+ 、 W^- 和 Z^0 的存在,测出了它们的质量,在实验误差范围内跟理论预言符合得相当好。

70 年代,建立了描述强相互作用的理论,即量子色动力学。这一理论认为,将层子、反层子结合成强子的强相互作用是由胶子所带色荷产生的,由对应于 8 种胶子场的 8 种胶子所传递。量子色动力学成功地反映了强相互作用的重要特性,但对于研究

强子的内部结构等问题还有困难,很难给出可以和实验相比较的、准确的结果。量子色动力

学是否是正确的关于强相互作用的基本理论,还有待于今后长期、艰巨的研究。现在把电弱统一理论和量子色动力学统称为标准模型理论。直到今天,实验上还没有发现与标准模型理论有矛盾之处,因此可以说,标准模型理论是十分成功的。

北京大学教授曾谨言先生指出,没有量子理论的建立,就没有人类的近代文明(洪德[Friedrich Hund]著《量子理论的发展》中译本序言)。曾先生的上述论断非常正确。量子理论一个世纪以来不但为物理学的发展做出巨大贡献,还被广泛用于化学、生物学领域以及哲学、社会科学领域。

量子理论不断地向自然科学的各个领域进行广泛的渗透,形成了许多交叉学科,诸如量子化学、量子生物学等。在量子力学出现之前,物理学和化学是截然分开的两门科学。只有在量子力学建立后,两者才找到了统一的理论基础——例如元素的物理和化学性质的周期性和化学键的本质等。

量子化学是应用量子力学的规律和方法来处理和研究化学问题的一门学科。主要内容有化学键理论、分子间作用力、分子结构与性能关系的理论阐明等。

量子生物学是量子力学作为工具在生物学问题上的应用,是从电子水平研究生物现象的一门新型学科,从研究方法上来看,量子生物学运用了几乎所有的量子物理方法。1945 年,法国的帕尔玛(Pull-

管理,是过去 25 年来对经济学的最大贡献之一。而布莱克原是哈佛大学物理系毕业生,莫顿原是加利福尼亚工学院电机系毕业生。

关于物理学理论的可延拓性,过去大多强调的

是其思维模式、方法论和工作语言等,而且主要针对工程科学而言。其实,物理学理论一些具体内容对社会科学尤其是经济学的辐射作用,也同样值得高度重视。