

# 物理经济学理论与方法研究新进展\*

蔡宏波 秦培文 仲鑫

**内容提要:**物理经济学作为物理学及经济学的交叉领域,运用物理学的思想、原理、模型等来解释和研究经济问题,已引起越来越多学者的关注,尤其是近十年来物理经济学在理论与方法上的进展颇丰。基于物理学研究基础之上的经济学研究框架现已建立,本文考察了近十年来物理经济学的最新发展,重点综述和评价了时间序列上的动态相关性、物理模型在能源市场中的动态预测、运用 Boltzmann 分布的财富分布理论以及网络科学研究等四个方面的内容。这些探索有助于为经济学开拓新的研究方向,促进物理学与经济学的进一步交融,推动更多的物理学思想融入经济学领域,使得经济学研究得以拥有更加丰富的对象、理论和方法。

**关键词:**物理经济学 时间序列 网络科学

## 一、早期研究

历史上不少经济学家都对物理与经济现象及其之间的联系有兴趣,或者接受过一定程度的物理学教育。比如,经济学家费雪(I. Fisher)在耶鲁大学求学时师从著名物理学家吉布斯(J. W. Gibbs);在经济学发展史上,早期的一些经济学家,比如瓦尔拉斯(L. Walras)、帕累托(V. Pareto)等都曾尝试将物理学的公式、概念套用在经济学领域。他们通过将经济个体比作物理学中的物质点,将效用比作物质的能量,再使用物理学方法来研究经济活动的过程,最终得到类似物理学中的均衡概念。物理和经济在某些情况下有着惊人的一致,比如 Black-Scholes 期权定价公式就是热力学方程在特殊边界条件下的一个特解。借助随机变量服从 Gauss-Brown 过程的假设,一些经济学家逐步建立起一套完备的经济学理论体系,即新古典经济学(王烜、陈收,2005)。

物理经济学这个概念提出的时间并不长,它最早于 20 世纪 70 年代出现在《物理学家眼中的股票市场和金融》(Osborne,1976)一书中。此后,金融市场数据分析成为统计物理学的研究热点,到 1994 年,华尔街已有 1/3 的金融分析师拥有物理学的专业背景。1995 年,物理学家 H. E. Stanley 借鉴天体物理学和生物物理学的命名方式,在加尔各答统计物理会议中首次提出物理经济学(Econophysics)一词。1997 年,J. Kertesz 和 I. Kondor 在布达佩斯建立了历史上第一个物理经济学研究所;1998 年,他们主办了首届物理经济学专题研讨会,参会者多为物理学家、经济学家和金融学家。值得注意的是,当时主流的经济学家们并没有参与这次会议,那时物理经济学尚未被广泛接受,不过这次专题研讨会标志着物理经济学这一新兴学科的诞生。从那至今,在 2000 年 7 月(比利时)、2001 年 12 月(英国)、2003 年 11 月(波兰)和 2004 年 9 月(英国)陆续召开了第二届至第五届世界物理经济学专题研讨会。

物理学家与经济学家在物理经济学领域的合作研究集中在两个方面:(1)实证特性分析——从实际市场数据出发,运用统计方法和计量模型,获得市场整体行为特征,如相关性、波动性等。(2)建

\* 蔡宏波、仲鑫,北京师范大学经济与工商管理学院,邮政编码:100875,电子邮箱:hongbocai@bnu.edu.cn;秦培文,北京师范大学物理系。基金项目:国家自然科学基金项目(71773007,71403024);北京市社会科学基金项目(17YJB020)。感谢匿名审稿人的修改建议,文责自负。

立微观动力学模型——运用物理学已有的动力学模型与实际市场数据,得出与实证结果基本一致的  
动力学模型,研究系统遵循的演变规律,掌握其变化发展趋势。

本文着重综述近十余年来物理经济学研究理论与方法的发展动态。具体而言,主要从时间序列  
的互相关动态性、能源市场动态预测、运用 Boltzmann 分布的财富分布理论以及网络科学研究四个  
方面对 21 世纪物理经济学研究进展进行综述和评价。

## 二、时间序列上的互相关动态性

Alessio et al(2002)对二阶移动随机时间序列的平均值与缩放问题进行研究,证实了有干扰的  
时间序列缩放属性和平均滤波技术之间的关系。同年,Kantelhardt et al(2002)使用趋势波动分析  
(DFA)研究了他们设定的非平稳时间序列,这一方法可以精确定义时间序列的多重分形缩放行为。

Podobnik & Stanley(2008)利用降趋势波动的思想分析两个同时记录的非稳定时间序列互相关  
性,提出降趋势互相关分析法(DCCA)。Conlon et al(2009)利用滑动时间窗的特征检验了金融多元  
时间序列的等时互相关动态矩阵。基于标准普尔(S&P)500 指数和道琼斯欧元区斯托克 50 指数的  
测算结果,他们发现这些时间窗内互相关矩阵的小特征值的动态性与那些较大特征值的动态性相抵  
消,进而据此提出了一个具有经验数据特征值谱主要动态性特征的基本因子模型。通过划分特征值  
时间序列,可以证明负指数收益率与最大特征值取极大值时的时间段有关,而正指数收益率与最大  
特征值取极小值时的时间段有关。相关波动性的研究为商人集体行为中的策略差异性分析提供了  
一个新的视角。他们还利用降趋势互相关分析法(DCCA)研究了贸易变化量与价格变化之间的关  
系,其中,不考虑贸易量而是考虑贸易量的增长速率,其可以通过两个连续交易量之间的对数差测  
得。Siqueira et al(2010)利用 DCCA 方法考察了巴西农产品和股票的相关性以及互相关性。此后,  
由 DCCA 方法逐步发展演化出了降趋势移动平均互相关分析方法(Detrended Moving-average  
Cross-correlation Analysis,DMCA)。

与此同时,还有学者将物理学中分形的概念和 DMCA 方法结合,探寻长时间序列的互相关性。  
Kristoufek(2011)为检验时间序列中存在的长程互相关性和交叉多重分形,提出了多重分形高度互  
相关分析法(Multifractal Height Cross-correlation Analysis,MF-HXA)。Kristoufek et al(2016)利  
用 MF-HXA 及熵的概念,研究了黄金、货币和市场效率之间的关系,发现黄金价格在主要货币市场  
中是极不活跃的,在次要货币市场中却是极度活跃的。黄金与货币市场形成了具有特定关系的独特  
配对。作者专注于黄金市场中不同货币购买黄金的有效排名,利用分形维数基础上的效率指数  
(EI)、近似熵和长期统计,对 142 种不同货币的黄金价格系列进行广泛组合,再根据他们设计的扩展  
EI 方法构建效率排名,发现了意想不到的结果:主要货币的黄金价格处于效率最低的货币行列,而  
使用较少的货币却处于极高效率的货币行列。这种结果违反了人们的直观感受,作者认为其中有两  
个方面的原因:一是在特定时期对黄金的量化计算较为宽松;二是外汇市场中可能存在一些非法操  
作。利用 Kristoufek & Vosvrda(2013,2014)定义的效率指数(EI)可以进一步描述市场效率,即

$$EI = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\hat{M}_i - M_i^*}{R_i} \right)^2}$$

其中, $\hat{M}_i$ 是第  $i$  个度量的估计, $M_i^*$ 是有效市场的第  $i$  个度量的期望值, $R_i$ 是第  $i$  个度量的范围。  
因此,EI 是与有效市场的距离。他们使用的这三个变量均与以往学者市场效率的度量方法——基  
于赫斯特指数(Hurst Exponent)的测算方法相一致。有效市场的预期值为 0.5( $M_H^* = 0.5$ ),分形维  
数  $D$  的预期值为 1.5( $M_D^* = 1.5$ ),近似熵的期望值为 1( $M_{AE}^* = 1$ )。此处可以引入长程相关性描述时  
间序列的全局特性,其可被表述为具有幂律衰减的自相关函数。重要的是,对于有效市场,存在  
 $H=0.5$ 以及指数在固定过程下是有限数的事实。在众多赫斯特指数估计中,作者选择局部 Whittle  
估计量和 GPH 估计量,因为它们适用于具有弱短期记忆可能性的短时间序列。与长程相关性对应  
全局相反,分形维数  $D$  可以解释为系列的局部记忆度量,因为它捕获系列的粗糙度。对于单变量系

列,分形维数范围在  $1 < D \leq 2$  之间,对于不相关过程,该范围由  $D=1.5$  的值分隔,这代表了有效的市场价值。低分形维数表示较低的粗糙度,相反,高分形维数表示较粗糙的系列,因此局部负相关。对于有效的市场,分形维数被很好地定义,并且其限于单变量序列,这使得它成为效率指数中的完美候选,即利用分形维数的 Hall-Wood 和 Genton 估计量验证了短时序的理想统计特性。

在引入物理统计学及分形相关理论后,从 DCCA 到 DMCA 再到 MF-HXA,物理学思想和方法逐步深入到经济研究的范畴之中。从最初的统计,到最后引入分形与熵的概念,物理和经济(金融)的关系越发紧密。

### 三、能源市场的动态预测

原油在世界经济中扮演着重要角色,石油价格波动是影响未来经济稳定和增长的关键因素之一。由于石油市场包含大量的数据,很多学者开始借助统计物理学和混沌的相关思想研究石油市场。能源期货市场价格波动的时间序列数据经常被一些物理经济学家拿来测算。Panas & Ninni (2000)首先利用混沌和非线性过程测算了鹿特丹和地中海原油市场的关联、熵和 Lyapunov 指数,他们借助 Brock 理论和 Eckman-Ruelle 条件,考察了大量用于检验时间序列的恒定量,以此研究原油价格序列。不久,Adrangi et al(2001)通过分析原油、取暖油和无铅汽油期货价格的低维混沌结构,发现了石油产品在价格上存在非线性现象的证据。Alvarez-Ramirez et al(2002)使用多重分形研究国际原油市场的日价格,认为原油价格是随机游走这一假设仅在几天到几周的时间尺度内成立,一个合理的原油价格形成机制是由不同的时间尺度共同决定的,需要用重标极差赫斯特指数对原油市场的情况进行长期分析。他们在使用高相关性和基于平均移动筛选的两个特征时间尺度分析时还发现,原油市场具有分形结构。Tabak & Cajueiro(2007)利用时间序列上的分形结构分析了原油市场,并运用移动窗格和重标极差赫斯特指数检验长时间差异。研究发现,原油市场随着时间的推移已越来越高效,同时通过绝对收益代理的原油价格的波动具有很高的持久性。这意味着,GARCH 或者 EGARCH 波动模型不能用来估计和预测原油价格,并且,Black-Scholes 期权定价模型不能用于原油价格的预测。Alvarez-Ramirez et al(2008)使用多重分形去趋势波动分析法(Multifractal Detrended Fluctuation Analysis, MF-DFA)估计了赫斯特指数动态回报,并在此基础之上考察了国际原油价格的自相关性。他们在降低非平稳市场走势影响以及关注自相关收益的基础之上,观测了市场结构在不同时间跨度上的波动。研究发现,原油市场在短期时间变化中呈现低效的状态,但在长期却更为高效。Zunino et al(2008)提出了一个检验市场发展阶段与复杂程度之间关系的模型,通过检验不同国家之间 32 个股权指数收益的复杂程度发现,股市低效率可能与复杂程度负相关,即更高的复杂性与较不发达的市场(或新兴市场)相关联。新兴市场具有比发达市场更大的相关性,这意味着具有更大的可预测性。因此,新兴经济体似乎比发达经济体效率低。Martina et al(2011)、Barkoulas et al(2012)和 Ortiz-Cruz et al(2012)等也曾基于熵研究原油市场的效率。

上述研究从不同角度考察国际原油市场的复杂特征,并将其与效率之间建立简单的线性回归,这有助于加深对国际原油市场价格走势复杂性的理解。然而,Gu & Zhang(2016)分析了动态市场定价系统的复杂特征和市场效率之间的关系。他们通过引入效率指数和市场的复杂程度,运用滚动窗口的方法,从线性和非线性视角系统地研究了国际原油市场的无效性与多重程度之间的关系。之前并没有学者做过这方面的探索,这是首篇揭示国际原油市场无效性和复杂性之间关系的论文,提供了对原油市场内部机制的一种深刻理解。利用多重分形分析这一有力工具,我们可以研究包含原油市场在内的许多种类的市场动态。Gu & Zhang(2016)还使用来自美国能源部能源信息管理局(EIA)西德克萨斯中级原油(WTI)从 1986 年 1 月 2 日至 2012 年 9 月 28 日共 6846 个每日收盘现货价格数据(以每桶美元计算),研究能源市场价格。令  $p_t$  为第  $t$  天的原油价格,每日价格回报为相邻两天原油价格对数差,即  $r_t = \log(p_t/p_{t-1})$ 。为了刻画 WTI 原油市场的无效率和复杂性的动态,作者共计算了 4 年(1008 次观测)时间窗和 1 年(250 次观测)时间窗,并将衰减阶数  $q$  设置为从 -10 到

10. 统计结果显示,4年时间窗的每日价格回报 $r_t$ 的平均水平大于1年时间窗口的平均水平,但1年时间窗的每日价格回报 $r_t$ 的标准偏差大于4年时间窗口的标准偏差。所有指数序列的偏度大于0.2,1年时间窗口的偏度大于4年时间窗口的偏度,表明所有系列都是左偏差,1年时间窗口的偏差更大。每个指数系列的J-B统计检验显示所有指数系列不遵循正态分布。为了研究WTI原油回报的效率指数和复杂程度的稳定性,在这些时间序列中使用单位根检验(如ADF检验和PP检验),ADF检验的滞后长度是基于SIC标准,PP检验的标准是基于Newey & West方法确定的。

学者们将物理学中一些分形、熵的概念和原油市场的时间维度或者其他维度相结合,最终可以初步预测原油期货市场未来数值,这是探索物理经济学领域原油市场动态的第一步。有效地预测期货市场的未来发展,可以有效地避免类似1986年和1991年石油危机的发生。

#### 四、财富分布理论

在物理学中,能量被认定为一个守恒量,系统内每个粒子带有的能量总和是固定的,而每个粒子所携带的能量大小决定了该粒子的能级状态,因此系统内粒子的状态可以用固定公式来描述。L. Boltzmann和J. W. Gibbs借此提出了Boltzmann分布(或Gibbs分布),这是一种概率分布,这种分布能在确定系统能量和温度分布的情况下计算出粒子处在某特定能级的概率,表达式为:

$$p_i = \frac{e^{-\epsilon_i/kT}}{\sum_{j=1}^M e^{-\epsilon_j/kT}}$$

其中, $p_i$ 为粒子处在能级 $i$ 的概率, $\epsilon_i$ 为能级 $i$ 的能量, $k$ 为Boltzmann常数, $T$ 是系统温度, $M$ 是系统可达到的能级,上述方程右侧分母部分一般称为规范分布函数,用 $Q$ 表示,即:

$$Q = \sum_{i=1}^M e^{-\epsilon_i/kT}$$

因此

$$p_i = \frac{1}{Q} e^{-\epsilon_i/kT}$$

这里可以简单地理解为,在一个固定的容器中,有很多粒子在系统内不停地随机运动,在容器某个固定方向比如竖直方向,每个粒子所受的力是固定的。Drăgulescu & Yakovenko(2000)认为金钱也是一种类似能量的守恒量,并将经济体系与热力学系统相类比。他们将Boltzmann分布 $p_i = \frac{1}{Q} e^{-\epsilon_i/kT}$ 简化为

$$P(m) = C e^{-m/T}$$

其中, $m$ 表示货币, $T$ 是每一个经济人的平均有效温度。与Boltzmann假设的模型类比,他们认为在封闭的经济系统内含有大量的货币,货币在平衡状态下的概率分布 $P(m)$ 服从Boltzmann分布。货币守恒定律的基本原理是,货币特别是纸币与物质财富不同,纸币无法由经济人制造,只能在经济人之间转移。也有学者在时间反演不变性系统中做过类似讨论,在这个系统中Boltzmann分布通常不成立。他们巧妙地将财富分为货币与物质财富,二者的本质区别在于物质财富可以被制造、销毁、消耗等,更重要的是,材料产品的货币价值(价格)并非恒定,而货币价值恒定并且遵守货币守恒定律。因此,Drăgulescu & Yakovenko(2000)仅讨论货币这单一量在经济系统中的分布。他们在货币交换的过程中增加了一些随机假设,在较为传统的经济研究中,自然人之间交换货币遵循固有策略,并不是随机的,如最大化效用。这项研究中的平衡概念类似于物理学中的系统平衡,通过能量最小化或最大化来实现均衡。然而对于较大的集合,统计均衡是一个相对的概念。当众多自然人之间进行交换时,货币交换是有效且随机的。对于实体经济,系统在外界条件不变的情况下会逐渐趋于平

衡态,然而由于外界因素在不断改变,实体经济的变动方向也在不断改变。尽管如此,统计中的平衡概念对于研究非平衡现象是一个十分有用的参考。

Drăgulescu & Yakovenko(2000)运用不同的货币转移规则  $\Delta m$  进行了几个模型的模拟。只要货币转移的规则满足时间反演对称性,那么不论初始条件和转移规则的细节如何,静态分布总是服从  $P(m) = Ce^{-m/T}$  规则,然而传递的乘法规则违反了这种对称性,例如比例规则  $\Delta m = \gamma m_i$  (Ispolatov et al,1998)、节省倾向(Chakraborti & Chakrabarti,2000)、可转让价格(Molico,2006)。这些模型产生的概率分布为类伽马分布(Chatterjee & Chakrabarti,2007)。尽管在数学上有一些差异,但所有的模型都证明,由于代理商之间的随机资金转移,货币的高度不等概率分布具有自发发展现象(Chakraborti et al,2011)。Wright(2005,2009)设计了更多涉及代理的模拟,并证明在最初的平等代理人中,会出现一个两级社会。

Foley(1994,1996)运用 Boltzmann-Gibbs 方程研究了商品的流动以及工资分布,而 Drăgulescu & Yakovenko(2000)考察发现商品库存及货币平衡的分配趋于指数分布。这些方法之间没有矛盾,因为商品流动和货币流动可能同时具有指数分布的特性。Foley(1994,1996)的研究是由一个长期存在的问题激发的,即市场如何以分散的方式确定不同商品之间的价格。Drăgulescu & Yakovenko(2000)对如何解释在不同的初始禀赋基础上平等的代理人之间不平等自发发展很感兴趣。在传统经济学中具有相同初始禀赋的平等代理人应永远保持平等,但这与现实经验矛盾。统计方法认为,平等状态从根本上是不稳定的,因为它具有非常低的熵。由概率定律(Farjoun & Maverver,1983)衍生出的指数分布是高度不等的,不过却是稳定的,因为它使熵最大化。经济学文献将价格和货币余额的分布模拟在一个共同的统计框架之内加以分析(Molico,2006)。

后来,Chen & Yakovenko(2007)将货币随时间的概率分布  $P(m,t)$  用计算机动画演示,在短暂的时期后,货币分布呈现固定的收敛模式,正如最开始预期的那样,该分布与指数函数吻合得很好。在如上 Drăgulescu & Yakovenko(2000)考虑的最简单模型中,转移量  $\Delta m = \$1$  是常数。Chen & Yakovenko(2007)通过计算机动画表明,货币的初始分布首先扩展为对称的高斯曲线,这是典型的反差过程。然后,由于施加条件  $m \geq 0$  作为边界,分布开始堆积在  $m=0$  状态的周围。结果, $P(m)$  图像变得歪斜(不对称),最终达到固定指数形状。 $m=0$  的边界类似于物理学中的基态能量,即物理系统的最低可能能量。没有这一边界条件,货币的概率分布不会稳定于一个固定形状。计算机动画也显示了定义为  $S/N = -\sum_k P(m_k) \ln P(m_k)$  的货币分布的熵如何演化到统计均衡的最大值。

Boltzmann-Gibbs 分布还适用于债务模型,从个人经济主体的视角来看,债务可被视为负数。当代理人从银行贷款时,代理人的现金余额(正数货币)增加,同时获得平等债务负债(负数),其总余额(净值)保持不变。所以,货币借款的行为仍然服从总货币(净值)的广义守恒,其现在定义为正(现金 M)和负(债务 D)贡献的代数和: $M - D = M_b$ ,其中  $M_b$  是系统中货币的原始金额——货币基数(McConnell & Brue,1996)。当代理人需要以超过其货币余额  $m_i$  的价格  $\Delta m$  购买产品时,允许代理人从银行借入。在交易之后,代理人的新余额变为负数: $m'_i = m_i - \Delta m$ ,仍然服从局部守恒定律  $m_i - m_j = m'_i + m'_j$ ,不过现在它涉及  $m$  的负值。因此,债务的后果不是违反守恒定律,而是呈现了负平衡  $m_i < 0$  的状态, $m=0$  不再是基态。例如先前 Chen & Yakovenko(2007)通过计算机模拟  $\Delta m = \$1$  对代理的债务没有任何限制,货币  $P(m,t)$  的概率分布不会稳定,并且系统从未达到稳定状态。随着时间的推移, $P(m,t)$  继续以高斯函数扩展到  $m = +\infty$  和  $m = -\infty$ 。根据广义守恒定律,代数定义货币  $m$  的第一状态保持恒定  $\langle m \rangle = M_b/N$ ,它意味着一些代理人有正余额  $m > 0$ ,变得更富有,后果是其他代理人进一步背负债务,负余额  $m < 0$ 。当执行债务并且不受任何约束的限制时,分区函数中  $m_k$  的正值和负值之和发散。

近年来,世界各国的许多经济学家都曾尝试将财富收入类比为粒子系统,运用热力统计学的思想寻求普遍结论。其实,热力统计学在金融领域的应用颇为广泛,两个学科的融合在逐步扩大。

### 五、在网络科学研究中的应用

自 Mantegna(1999)引入基于邻近度的网络概念以来,通过开发网络科学的新概念和工具,并将

其应用于金融和众多经济问题,统计物理学对网络科学研究的多个领域的发展做出了贡献。

这里有必要澄清物理经济学研究领域中关系网络、邻近网络和关联网络的异同。关系网络是当两个节点之间存在给定关系时,系统的节点通过链路连接的网络。例如,银行间交易构建的网络,如果在给定时间段它们之间存在至少一个信用关系,则两个银行被链接,可以认为它们之间存在关系网络。邻近网络是指当在两个节点之间存在某种程度的相似性时,即使两个节点之间可能没有直接关系,也认为两家银行间存在邻近度。例如,两家银行可能与另一家没有直接关系,但他们可能具有相同类型的资产组合。在这种情况下,两个组在邻近的网络中彼此链接。基于邻近度的网络早期示例可以在 Onnela et al(2003)和 Tumminello et al(2005)的研究中找到。关联网络则需要通过对所有节点执行交互影响的统计检验加以构建。Billio et al(2012)和 Yang et al(2014)通过在所有经济参与者之间执行统计检验获得了关联网络的因果关系或协整一致来构建关联网络。

应当认识到,在基于邻近度的网络和关联网络中,对相似性或影响的估计需要与统计检验相关联。此外,为了构建网络,需要对所有节点执行统计检验。这意味着需要对基于邻近度的网络和关联网络进行多次检验。由于复杂系统通常用大量的节点表征事实,统计检验的数量依据节点数量呈现二次增长。当必须执行大量检验以获得网络时,势必进行多个假设检验校正以避免潜在的假显著性结果。在某些情况下,比如使用相关性测量基于邻近度的网络,统计上不等于零的相关值可能性非常大。当相关性被明确定义时,例如在给定的股票市场中股票交易回报的时间序列,它就可以看作几个基于邻近度的网络。另外,在基于邻近度的网络中,链接的过滤有助于分析的可视化,能够阐明系统中存在的最相关的邻近关系。在过去几年中,学者们提出了邻近度的网络中信息过滤非常有效的方法,例如基于最小生成树的信息过滤程序。

2008 年全球金融危机改变了不少经济学家的思维方式,特别体现在近几年来网络概念的流行和方法的大量应用。经济学研究对网络的关注由来已久,但直到最近才真正使用网络科学的方法考察经济和金融问题。系统性金融风险是少数经济学家的研究领域,他们很少通过经济行为者之间网络关系的视角对此考察。事实上,关系网络或邻近网络在金融领域的第一次实证研究是由包括经济学家与物理学家在内的跨学科团队进行的。如今,没有网络科学的视角和方法,就无法解决任一学科在系统风险研究方面的关键问题。

物理学家、计算机科学家、数学家和经济学家之间的交流在经济和金融领域日趋频繁,这是最有前景的学科交叉问题之一。有理由相信,不同专业背景的学者之间的有效互动可以在未来几年将取得丰硕成果。此外,当这些互动变得频繁和富有成果时,在一个共同的研究框架之下,不同学科之间的障碍已经荡然无存。

## 六、总结

基于物理学研究基础之上的经济学研究框架已经建立起来,诸多方向的探索有助于为经济学开拓新的研究方向。不论是分形的时间序列研究还是套用物理学模型寻找均衡,都能够有助于预测未来的经济发展趋势,这些都是物理学对经济学的贡献。毋庸置疑,物理学与经济学进一步交融,更多的物理学思想融入经济学领域,将使得经济学研究得以拥有更加丰富的对象、理论和方法。

### 参考文献:

- 王烜 陈收, 2005:《物理经济学前沿综述》,《经济学动态》第 4 期。
- Adrangi, B. et al(2001), "Chaos in oil prices? Evidence from futures markets", *Energy Economics* 23(4):405-425.
- Alvarez-Ramirez, J. et al(2002), "Multifractal Hurst analysis of crude oil prices", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 313(3):651-670.
- Alvarez-Ramirez, J. et al(2008), "Short-term predictability of crude oil markets: A detrended fluctuation analysis approach", *Energy Economics* 30(5):2645-2656.
- Aste, T. et al(2005), "Complex networks on hyperbolic surfaces", *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 346(1):20-26.

- Barabási, A. -L. (2016), *Network Science*, Cambridge University Press.
- Barkoulas, J. T. et al(2012), “A metric and topological analysis of determinism in the crude oil spot market”, *Energy Economics* 34(2):584—591.
- Barunik, J. & L. Kristoufek(2010), “On Hurst exponent estimation under heavy-tailed distributions”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 389(18):3844—3855.
- Benjamini, Y. & Y. Hochberg(1995), “Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing”, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B(Methodological)* 57(1):289—300.
- Beran, J. (1994), *Statistics for Long-Memory Processes*, CRC press.
- Billio, M. et al(2012), “Econometric measures of connectedness and systemic risk in the finance and insurance sectors”, *Journal of Financial Economics* 104(3):535—559.
- Black, F. & M. Scholes(1973), “The pricing of options and corporate liabilities”, *Journal of Political Economy* 81(3):637—654.
- Bonanno, G. et al(2001), “High-frequency cross-correlation in a set of stocks”, *Quantitative Finance* 1(1):96—104.
- Bonanno, G. et al(2003), “Topology of correlation-based minimal spanning trees in real and model markets”, *Physical Review E* 68(4):No. 46130.
- Boss, M. et al(2004), “Network topology of the interbank market”, *Quantitative Finance* 4(6):677—684.
- Cajueiro, D. O. & B. M. Tabak(2004), “Ranking efficiency for emerging markets”, *Chaos, Solitons & Fractals* 22(2):349—352.
- Cajueiro, D. O. & B. M. Tabak(2005), “Ranking efficiency for emerging equity markets II”, *Chaos, Solitons & Fractals* 23(2):671—675.
- Chakraborti, A. & B. K. Chakrabarti(2000), “Statistical mechanics of money: How saving propensity affects its distribution”, *European Physical Journal B* 17(1):167—170.
- Chakraborti, A. et al(2011a), “Econophysics review: I. Empirical facts”, *Quantitative Finance* 11(7):991—1012.
- Chakraborti, A. et al(2011b), “Econophysics review: II. Agent-based models”, *Quantitative Finance* 11(7):1013—1041.
- Chatterjee, A. & B. K. Chakrabarti(2007), “Kinetic exchange models for income and wealth distributions”, *European Physical Journal B* 60(2):135—149.
- Chen, J. & V. M. Yakovenko(2007), “Computer animation videos of money-transfer models”, <http://physics.umd.edu/~yakovenk/econophysics/animation.html>.
- Conlon, T. et al(2009), “Cross-correlation dynamics in financial time series”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 388(5):705—714.
- Cottrell, A. F. et al(2009), *Classical Econophysics*, Routledge.
- DeMasi, G. et al(2006), “Fitness model for the Italian interbank money market”, *Physical Review E* 74(6):No. 66112.
- DeGroot, M. H. (1974), “Reaching a consensus”, *Journal of the American Statistical Association* 69(345):118—121.
- Di Matteo, T. (2007), “Multi-scaling in finance”, *Quantitative Finance* 7(1):21—36.
- Di Matteo, T. et al(2003), “Scaling behaviors in differently developed markets”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 324(1):183—188.
- Di Matteo, T. et al(2005), “Long-term memories of developed and emerging markets: Using the scaling analysis to characterize their stage of development”, *Journal of Banking & Finance* 29(4):827—851.
- Drăgulescu, A. & V. M. Yakovenko(2000), “Statistical mechanics of money”, *European Physical Journal B* 17(4):723—729.
- Easley, D. & J. Kleinberg(2010), *Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about A Highly Connected World*, Cambridge University Press.
- Farjoun, E. & M. Machover(1983), *Laws of Chaos: A Probabilistic Approach to Political Economy*, Verso.
- Foley, D. K. (1994), “A statistical equilibrium theory of markets”, *Journal of Economic Theory* 62(2):321—345.
- Foley, D. K. (1996), “Statistical equilibrium in a simple labor market”, *Metroeconomica* 47(2):125—147.
- Geweke, J. & S. Porter-Hudak(1983), “The estimation and application of long memory time series models”, *Journal*

- of *Time Series Analysis* 4(4):221–238.
- Gneiting, T. & M. Schlather(2004), “Stochastic models that separate fractal dimension and the Hurst effect”, *SIAM Review* 46(2):269–282.
- Gneiting, T. et al(2012), “Estimators of fractal dimension: Assessing the roughness of time series and spatial data”, *Statistical Science* 27(2):247–277.
- Goyal, S. (2012), *Connections: An Introduction to The Economics of Networks*, Princeton University Press.
- Gu, R. & B. Zhang(2014), “Is efficiency of crude oil market affected by multifractality? Evidence from the WTI crude oil market”, *Energy Economics* 53(C):151–158.
- DiIasio, G. et al(2015), “Special Issue on ‘Interlinkages and Systemic Risk’”, *Quantitative Finance* 15(4):587–588.
- Ispolatov, S. et al(1998), “Wealth distributions in asset exchange models”, *European Physical Journal B* 2(2):267–276.
- Jackson, M. O. (2010), “An overview of social networks and economic applications”, in: J. Benhabib et al(eds), *Handbook of Social Economics*, vol. 1, North Holland.
- Jiang, Z.-Q. et al(2014), “Testing the weak-form efficiency of the WTI crude oil futures market”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 405(1):235–244.
- Kristoufek, L. (2011), “Multifractal height cross-correlation analysis: A new method for analyzing long-range cross-correlations”, *EPL (Europhysics Letters)* 95(6):No. 68001.
- Kristoufek, L. & M. Vosvrda(2013), “Measuring capital market efficiency: Global and local correlations structure”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 392(1):184–193.
- Kristoufek, L. & M. Vosvrda(2014a), “Commodity futures and market efficiency”, *Energy Economics* 42(3):50–57.
- Kristoufek, L. & M. Vosvrda(2014b), “Measuring capital market efficiency: Long-term memory, fractal dimension and approximate entropy”, *European Physical Journal B* 87(7):1–9.
- Kristoufek, L. & M. Vosvrda(2016), “Gold, currencies and market efficiency”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 449(1):27–34.
- Mantegna, R. N. (1999), “Hierarchical structure in financial markets”, *European Physical Journal B* 11(1):193–197.
- Martina, E. et al(2011), “Multiscale entropy analysis of crude oil price dynamics”, *Energy Economics* 33(5):936–947.
- Miller, R. G. (1981), *Simultaneous Statistical Inference*, Springer-Verlag.
- Molico, M. (2006), “The distribution of money and prices in search equilibrium”, *International Economic Review* 47(3):701–722.
- Newman, M. (2010), *Networks: An Introduction*, Oxford University Press.
- Onnela, J.-P. et al(2003), “Dynamics of market correlations: Taxonomy and portfolio analysis”, *Physical Review E* 68(5):No. 56110.
- Ortiz-Cruz, A. et al(2012), “Efficiency of crude oil markets: Evidences from informational entropy analysis”, *Energy Policy* 41(2):365–373.
- Osborne, M. F. (1976), *The Stock Market and Finance From a Physicist’s Viewpoint*, Crossgar Pr.
- Panas, E. & V. Ninni(2000), “Are oil markets chaotic? A non-linear dynamic analysis”, *Energy Economics* 22(5):549–568.
- Pareto, V. (1906), *Manual of Political Economy*, Società Editrice Libreria Press.
- Patriarca, M. et al(2005), “Kinetic theory models for the distribution of wealth: Power law from overlap of exponentials”, in: A. Chatterjee(eds), *Econophysics of Wealth Distributions*, Springer.
- Phillips, P. C. et al(2004), “Local Whittle estimation in nonstationary and unit root cases”, *Annals of Statistics* 32(2):656–692.
- Pincus, S. M. (1991), “Approximate entropy as a measure of system complexity”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 88(6):2297–2301.
- Pincus, S. M. & R. E. Kalman(2004), “Irregularity, volatility, risk, and financial market time series”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101(38):13709–13714.
- Podobnik, B. et al(2009), “Cross-correlations between volume change and price change”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(52):22079–22084.
- Podobnik, B. & H. E. Stanley(2008), “Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two non-



- stationary time series”, *Physical Review Letters* 100(8):No. 84102.
- Rios, M. C. et al(2013), *Economics: Principles, Problems, and Policies*, McGraw-Hill Press.
- Robinson, P. M. (1995), “Gaussian semiparametric estimation of long range dependence”, *Annals of Statistics* 23 (5):1630—1661.
- Siqueira, E. L. et al(2010), “Correlations and cross-correlations in the Brazilian agrarian commodities and stocks”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 389(14):2739—2743.
- Song, W.-M. et al(2012), “Hierarchical information clustering by means of topologically embedded graphs”, *PLoS One* 7(3):e31929.
- Soramäki, K. et al(2007), “The topology of interbank payment flows”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 379(1):317—333.
- Tabak, B. M. & D. O. Cajueiro(2007), “Are the crude oil markets becoming weakly efficient over time? A test for time-varying long-range dependence in prices and volatility”, *Energy Economics* 29(1):28—36.
- Taqqu, M. S. et al(1995), “Estimators for long-range dependence: An empirical study”, *Fractals* 3(4):785—798.
- Taqqu, M. S. & V. Teverovsky(1996), “On estimating the intensity of long-range dependence in finite and infinite variance time series”, in: R. Adler et al(eds), *A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications*, Birkhäuser Basel.
- Teverovsky, V. et al(1999), “A critical look at Lo’s modified R/S statistic”, *Journal of Statistical Planning and Inference* 80(1):211—227.
- Tumminello, M. et al(2005), “A tool for filtering information in complex systems”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102(30):10421—10426.
- Tumminello, M. et al(2010), “Correlation, hierarchies, and networks in financial markets”, *Journal of Economic Behavior & Organization* 75(1):40—58.
- Vega-Redondo, F. (2007), *Complex Social Networks*, Cambridge University Press.
- Wright, I. (2005), “The social architecture of capitalism”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 346(3):589—620.
- Wright, I. P. (2009), “Implicit microfoundations for macroeconomics”, *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* 3(19):7462—7491.
- Yakovenko, V. M. (2012), “Novel method for photovoltaic energy conversion using surface acoustic waves in piezoelectric semiconductors”, *Physica B: Condensed Matter* 407(11):1969—1972.
- Yakovenko, V. M. (2013), “Applications of statistical mechanics to economics: Entropic origin of the probability distributions of money, income, and energy consumption”, in: L. Taylor et al(eds), *Social Fairness and Economics: Economic Essays in the Spirit of Duncan Foley*, Routledge.
- Yang, C. et al(2014), “Cointegration analysis and influence rank: A network approach to global stock markets”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 400(15): 168—185.
- Zunino, L. et al(2008), “A multifractal approach for stock market inefficiency”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 387(26):6558—6566.
- Zunino, L. et al(2010), “Complexity-entropy causality plane: A useful approach to quantify the stock market inefficiency”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 389(9):1891—1901.
- Zunino, L. et al(2011), “Commodity predictability analysis with a permutation information theory approach”, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 390(5):876—890.

(责任编辑:李仁贵)

(校对:刘洪愧)