Benoit Mandelbrot 是刺猬还是狐狸?

Rosario N. Mantegna*

埃米利奥·塞格雷物理与化学系 `, 巴勒莫大学 `, 意大利巴勒莫; 奥地利维也纳复杂性科学中心（日期: 2026年2月3日）

arXiv:2602.01122v1 [physics.soc-ph] 1 Feb 2026

摘要

Benoit Mandelbrot 的科学遗产横跨众多非凡的学科——从语言学、流体湍流到宇宙学和金融学——这似乎体现了以赛亚·伯林著名的思想家二分法中“狐狸”式的思维气质。然而，本文认为，Mandelbrot 本质上是一只“刺猬”：一位由单一指导原则贯穿思想的思想家。在他多样化的研究中，标度这一概念——体现为自相似性、幂律、分形和多重分形——始终是构建其工作的核心思想。通过追溯这一标度范式在他对数学、物理学和经济学所作贡献中的延续，本文揭示了一条被表面上的博采杂收所掩盖的连贯思想轨迹。Mandelbrot 在自然与社会现象建模方面经久不衰的洞见，可以通过尺度不变性的几何学和统计学来理解。

Benoit Mandelbrot 的科学遗产横跨众多学科，范围非同寻常——从语言学、流体湍流到宇宙学和金融学——乍看之下，他似乎符合以赛亚·伯林著名思想家二分法中的“狐狸”形象。然而，本文认为，Mandelbrot 从根本上更接近“刺猬”型思想家，因为他的思想由一个统一原则所构筑。在表面上各不相同的研究中，尺度这一概念——通过自相似性、幂律、分形和多重分形等形式呈现——构成了贯穿其著作的核心理念。本文追溯这一尺度范式如何贯穿他在数学、物理学和经济学领域的贡献，揭示出一条连贯的思想轨迹，而其表面上的博杂掩盖了这一点。因此，Mandelbrot 在自然与社会现象建模方面的持久贡献，可以从尺度不变性的几何学与统计学角度加以阐释。

关键词：Benoit Mandelbrot、以赛亚·伯林、标度、自相似性、分形、多重分形、金融市场、L´evy 稳定过程。

JEL分类代码：C58、D31、G10、G12。

*电子邮件：rosario.mantegna@unipa.it

引言

Benoit Mandelbrot 是二十世纪及二十一世纪初科学界的一位重要人物。在整个职业生涯中，他都称自己是科学界的“特立独行者” [1]。科学界的特立独行者可以定义为这样一类研究人员：他们挑战既定范式，经常跨越学科边界开展工作，或游离于学术主流之外；而在取得成功时，他们会重塑科学界的主流认知。在职业生涯中，Mandelbrot 对语言学到金融等众多不同领域都作出了重大贡献。事实上，他的智识探索范围极广，且本质上具有多学科特点。

本文旨在考察 Mandelbrot 的科学遗产，探究其作品究竟更适合被诠释为通才取向的体现——其特点是追求多种科学问题——还是其建模实践背后统一概念原则的表现，即对这一原则的专才执着。本文的分析置于以赛亚·伯林的文章《刺猬与狐狸》 [2], 所提供的诠释框架之中；这一框架有助于审视 Mandelbrot 的全部作品中，思想广度与概念统一性之间的张力。

一、刺猬与狐狸

1951年，也就是 Mandelbrot 发表其首篇科学论文的同一年 [3], ，俄裔英国社会与政治理论家、哲学家和思想史学家以赛亚·伯林发表了《刺猬与狐狸》 [2]。这篇文章开篇谈到一则归于希腊诗人阿基洛科斯名下的残篇：“狐狸懂得许多事情，而刺猬只懂得一件大事。”伯林将这则格言解读为对思想家、作家乃至更广泛意义上的人类所作的深刻区分。正如他所解释的：

“不过，若从比喻意义上理解，这些词可以引申出一种含义，用来标示作家和思想家之间、也许还有人类普遍存在的最深刻差异之一。一边的人凡事都归结于一个单一的核心愿景、一套或多或少连贯或清晰的体系，并以此

来理解、思考和感受——也就是说，他们有一条普遍而统摄一切的原则，唯有借助这条原则，他们的一切所思所言才有意义；另一边的人则追求众多目标，这些目标往往彼此无关，甚至相互矛盾；即使彼此有所关联，也只是以某种事实上存在的方式，出于某种心理或生理原因，而与任何道德或审美原则都无关。后者过着离心而非向心的生活，做出离心而非向心的举动，怀有离心而非向心的观念；他们的思想纷散或弥散，游移于不同层面，捕捉形形色色的经验与事物本身的 *essence*，却无论有意还是无意，都不试图将它们纳入或排除于任何一种恒定不变、包罗万象、有时自相矛盾且并不完整、偶尔还带有狂热色彩的单一内在愿景。第一类知识与艺术人格属于刺猬，第二类则属于狐狸；……” [2]。

因此，Berlin 勾勒出智识参与的两种原型模式：刺猬透过单一而统摄一切的愿景来诠释现实；狐狸则从多元的经验与视角中汲取洞见。这种概念二分为评估Mandelbrot科学事业的性质，以及其作品在多大程度上体现了这两种原型之一的特征，提供了一个有用的框架。

对大多数作家和思想家而言，沿着刺猬—狐狸谱系（或其中某个中间位置）进行分类相对容易。然而，有些情况下，这种二元分类并不适用。其中一个例子是托尔斯泰，Berlin 本人曾对此详加讨论。用 Berlin 的话来说：

”但当我们谈到列夫·尼古拉耶维奇·托尔斯泰伯爵，并向他提出这个问题——问他属于第一类还是第二类，是一元论者还是多元论者，他的视野关乎一者还是多者，他是由单一物质构成，还是由异质元素组成——我们便无法得到明确或直接的答案” [2]。

类似地，在批判性审视 Benoit B. Mandelbrot 的作品时，也会遇到相似的诠释难题。他的智识遗产难以被简单归类：他的全部作品展现出狐狸特有的广博与多样，同时也体现出他对统一概念愿景——即标度概念所发挥的统摄作用——深刻而持久的坚持，这使他与刺猬相契合。

事实上，Mandelbrot 的研究贡献横跨极其广泛的学科领域。他在信息论 [3, 4]，语言学 [5]，水文学[6]，随机过程 [7, 9, 10]等领域发表了重要成果，尤其关注长期记忆现象——

以及具有非整数维度的几何结构 [11], 湍流 [12], 地球物理学[13], 天体物理学 [14], 多重分形 [12], 金融学 [15, 16], 和经济学 [17]。这套广泛而多样的研究成果——这里只列举了其中最为重要的领域——很容易让人将 Mandelbrot 描绘成典型的“狐狸”型科学家；正如 Berlin 所说，他“所从事的行为和所提出的思想具有离心性，而非向心性” [2]。

然而，尽管他的科学成果显然具有跨学科（甚至多学科）的性质，Mandelbrot 的学术生涯中仍呈现出一条连贯而持久的主线。他几乎所有的研究都探讨由某种标度行为支配的体系、过程和现象 [18, 19]。这一围绕标度的统一关注——体现在对自相似性、分形几何、幂律分布乃至多重分形等更复杂概念的探索中——表明，在表面上纷繁多样的主题之下，Mandelbrot 的学术追求始终由一个统一的构想驱动：寻找证据，彰显标度在自然与社会中普遍发挥的作用。

II. MANDELBROT 作品中的标度

标度这一概念具有多重含义 [18]。从最根本的意义上说，它指的是尺度不变性的理念。当尺度不变性存在时，在不同尺度下观察某个体系或现象，会发现相似的模式。尺度不变性最引人注目的表现形式是自相似性——也就是说，某些几何结构或随机结构会在多个尺度上反复出现。

标度的典型例子出现在由幂律（或双曲型）概率密度函数支配的随机过程中。对于这类分布，重标度变量并不会改变密度函数的形式（除乘法因子外），这意味着幂律分布本质上具有尺度不变性 [20]。

Mandelbrot 最早的研究之一考察了齐夫定律——这一经验关系描述了文学文本中词语出现的频率，并且与幂律分布一致 [5, 21]。

他后来发现，在竞争性市场上交易的商品，其对数价格变动遵循的概率分布具有显著的非高斯尾部 [15] ——再次呈现出幂律行为——这促使他“扩展标度的概念，以处理若干

噪声现象。”

Mandelbrot 职业生涯中的另一个里程碑，是他对英国海岸几何性质的研究；通过这项研究，他引入了分形对象和分形维数的概念 [11]。几何分形和随机分形都是遵循标度关系的自相似结构。

Mandelbrot 通过引导人们关注魏尔斯特拉斯曲线、科赫曲线和康托尔尘埃等数学集合与函数，阐释了几何分形。对于随机分形，他则着重研究随机过程 [22]。具体而言，他强调，布朗运动的扩散特性意味着一种时间标度形式。在 Mandelbrot 看来，布朗随机游走是一种具有明确分形维数的过程。

他进一步证明，高斯随机游走的分形特性并非独有。事实上，他沿着两个关键方向拓展了随机分形的范畴。其一是引入分数布朗运动，这是一种相对于标准扩散既可表现为超扩散、也可表现为亚扩散的随机过程，并且具有非整数分形维数 [9]。

第二项成就是认识到并普及服从广义版本中心极限定理的稳定非高斯随机过程。Mandelbrot 是最早提出真实世界现象往往可以用稳定非高斯过程更准确地描述的学者之一 [23]，也就是说，这类随机过程由中心极限定理的广义形式支配。保罗·列维、鲍里斯·弗拉基米罗维奇·格涅坚科和安德烈·尼古拉耶维奇·柯尔莫哥洛夫证明了这类广义形式的存在 [24]。值得一提的是，Mandelbrot 在巴黎综合理工学院求学期间曾旁听列维的讲座，这段经历对他后来的研究产生了深远影响 [22]。

Mandelbrot 提议用稳定非高斯过程来模拟真实世界现象，这需要一次真正的范式转变。事实上，所有稳定非高斯随机变量都具有无限方差，这意味着传统统计量可能变得定义不清，甚至毫无意义。尽管这使得量化这类过程的许多方面变得困难，甚至看似不可能，Mandelbrot 仍未退缩。他从标度的视角对这些过程进行了理论和实证分析，证明即使无法使用传统统计量，它们的标度性质仍然定义明确。

Mandelbrot 强调，即使在看似缺乏自相似性的过

程中，也存在一种更复杂的标度形式，即多重分形过程 [12, 25–27]。在多重分形过程中，标度结构的复杂性通过连续的指数谱表现出来，其中每个指数都与特定的分形维数相关联。Mandelbrot 指出，从分形集推广到多重分形测度，“意味着从主要由一个数——即分形维数——表征的几何对象，转向主要由一个函数表征的几何对象。 [28]”尽管发生了这种转变，分形和多重分形仍保留着某种形式的自相似性。在分形中，自相似性体现在几何集合本身；而在多重分形中，它则适用于表征所研究体系的测度（数学意义上的测度）。Mandelbrot 在研究充分发展湍流时，提出了第一个多重分形实例；这种现象无法用单一的自相似确定性过程或随机过程来描述 [12]。后来，他将多重分形框架扩展到竞争性市场中的金融资产收益率建模 [16]。

关于对此类市场收益率动态的建模，值得注意的是，Mandelbrot 的观点随着时间推移而演变——从他 1963 年基于稳定非高斯分布的模型 [15] ，到他 1997 年采用多重分形过程的模型 [16]。这两种方法的关键区别在于，它们如何处理收益概率密度函数的二阶矩。在稳定非高斯模型中，方差是无限的；而在多重分形模型中，只有方差有限时，模型与经验数据的吻合度才最高。因此，Mandelbrot 修正了自己对资产收益率波动率是否有限的看法，但仍然坚信存在一种内在的自相似规律。在稳定非高斯模型中，自相似性体现在资产收益率本身的动态之中；而在多重分形模型中，自相似性则支配着不同时间尺度上的标度行为，使其逐步趋近于高斯过程。

Mandelbrot 本人曾在书籍（例如，参见参考文献 [29]）和论文中总结了自己多年来提出的不同收益率动态模型（在我们看来，最能代表这一方面的参考文献是 [30]）。

在参考文献 [30] 中，Mandelbrot 在一个框架内提出了他的模型：价格变化是一种自仿射随机过程，其事件发生的时刻由一个多重分形过程描述。他将这一类随机过程称为布朗运动多重分形时间（BMMT）。具体而言，论文介绍了简化的递归构造——称为卡通布朗运动——旨在分离并直观呈现

金融数据中观察到的基本标度性质。

论文再次强调，经典布朗运动在经验层面并不充分，因为它假设收益率服从高斯分布、波动率恒定且彼此独立。论文讨论了 Mandelbrot 早先提出的模型，即 L´évy 稳定过程（捕捉厚尾） [15] 和分数布朗运动（捕捉长程依赖） [8, 9], ，并承认这些早期模型只能解释资产收益率风格化事实所呈现的经验特征中的一部分。该论文的一个关键特点是，将以往所有模型纳入一个统一框架，突出事件的时间多重分形性。

具体而言，他介绍了若干随机生成过程：这些过程通过在日益细化的时间网格上进行递归插值构造而成，采用固定的三间隔生成器，并对时间和价格进行非对称重标度。尽管这些构造受网格限制且较为人为，却具有自仿射特性，并会因生成器参数不同而呈现出广泛的行为模式。Mandelbrot 提出了一种总结方式（他称之为“相图”），将这些行为与不同的随机过程联系起来。他借助一种相当个人化的术语，讨论了所谓的菲克型（布朗）、单重分形（分数布朗）、中尺度分形（不连续、类似 L´évy）以及多重分形随机过程 [30]。在他看来，所有这些模型都是随机过程，可以视为他以一般方式定义的 BMMT 的特例。在讨论一般模型的不同设定时，他承认，要描述经验观察到的资产价格变化状态，最合适的模型需要再现金融市场的典型特征，即波动率聚集、间歇性和剧烈价格尖峰。

总之，Mandelbrot 曾几次修正自己对描述资产收益率的最佳模型的看法，但他提出的所有模型都包含某种形式的标度。标度始终是他所提出模型的关键要素 [29]。

III. 结论

Mandelbrot 是刺猬还是狐狸？Mandelbrot 本人对此问题的回答是，他是一只刺猬。在其代表作《自然界的分形几何》[22],的序言中，他写道：

“我的第一篇科学论文于1951年4月30日发表。多年来，许多人似乎都认为，我的每项研究都指向不同的方向。但这种表面上的

杂乱无章具有迷惑性：它掩盖了一个明确而统一的目标，而本文与前两篇文章一样，正是要揭示这一点。”

Mandelbrot 所指的那个发现，涉及标度在数学和现实世界的系统与过程中所发挥的作用。标度是他所察觉到的主旋律，贯穿于各种自然结构和人工结构之中——事实上，它如此根本，以至于他将其视为自然本身的基础原则之一，正如他的书名所暗示的那样。

在整个职业生涯中，Mandelbrot 不断开展研究、建立模型，挑战科学界的主流观点——这种观点认为，标度和自相似性不过是罕见的奇特现象，正如他所说，应当把它们局限在“数学艺术博物馆”里，或者更糟，局限在“怪物画廊 [22]”里。他的立场恰恰相反：在他看来，标度和自相似性是理解数学对象与现实世界系统的基本结构和行为不可或缺的概念。

Mandelbrot 将标度和自相似性视为自然不可或缺的原则，体现了刺猬式的专注——他跨越多个科学学科，寻求经验证据和理论模型，以证明许多系统（事实上，在他看来，大多数重要系统）最好通过尺度不变框架来描述，而非采用忽视过程与结构内在自相似性的简单还原论方法。

Mandelbrot凭借持续而权威的贡献，毕生致力于阐明标度与自相似性的重要性及其本质，这一努力深刻影响了现代科学。如今，跨学科对尺度不变过程的研究，无不留下他思想的鲜明印记。

---

[1] Mandelbrot, B.B., 2014.《分形主义者：一位科学特立独行者的回忆录》。Vintage出版社。[2] Berlin, I., 2013.《刺猬与狐狸：论托尔斯泰的历史观》。普林斯顿大学出版社。[3] Mandelbrot B.B., 1951年。《传输线上的消息适配》。i & ii, 《科学院院报》（巴黎）232, 1638[4] Mandelbrot, B.B., 1965a.利奥·西拉德与唯一可译性（通信）。IEEE Transac-

论信息论，11(3)，第455-456页。[5] Mandelbrot，B.B.，1961a。论词频理论及相关的话语的马尔可夫模型。《语言结构及其数学方面》，12，第190-219页。[6] Mandelbrot，B.B.和Wallis，J.R.，1968。诺亚、约瑟夫与业务水文学。水资源研究，4(5)，第909-918页。[7] Mandelbrot，B.B.，1961b。稳定帕累托随机函数与收入的乘法变异。《计量经济学：计量经济学会杂志》，第517-543页。[8]Mandelbrot，B.B.，1965b。一类自相似随机过程——在赫斯特气候定律中的应用。《法国科学院周报》，260(12)，第3274[9] Mandelbrot，B.B.和Van Ness，J.W.，1968。分数布朗运动、分数噪声及其应用。《SIAM评论》，10(4)，第422-437页。[10] Mandelbrot，B.B.，2003。若干具有1/f频谱的噪声：连接直流电与白噪声的桥梁。《IEEE信息论汇刊》，13(2)，第289-298页。[11] Mandelbrot，B.B.，1967。英国海岸有多长？统计自相似性与分数维。《科学》，156(3775)，第636-638页。[12] Mandelbrot，B.B.，1974。自相似级联中的间歇性湍流：高阶矩的发散与载体的维数。《流体力学杂志》，62(2)，第331-358页。[13] Mandelbrot，B.B.和Wallis，J.R.，1969。地球物理记录的一些长期特性。水资源研究，5(2)，第321-340页。[14] Mandelbrot，B.B.，1975。关于一种可分解的层级宇宙模型：推导天球上的星系相关性。《巴黎科学院院报·数学科学辑》，280(22)，第1551-1554页。[15] Mandelbrot，B.B.，1963。某些投机价格的变动。《商业杂志》，36(4)，第394页。[16] Mandelbrot，B.B.、Fisher，A.和Calvet，L.，1997。资产收益的多重分形模型，技术报告1412（考尔斯基金会讨论论文）。[17] Mandelbrot，B.B.，1960。帕累托–列维定律与收入分布。《国际经济评论》，1(2)，第79-106页。[18] Kadanoff，L.P.，1990。统计物理学中的标度与普适性。《物理学A辑：统计力学及其应用》，163(1)，第1-14页。

[19] Stanley, H.E., 1999. 标度、普适性与重整化：现代临界现象的三大支柱。《现代物理评论》，71(2)，第S358页。[20] Newman, M.E., 2005. 幂律、帕累托分布与齐夫定律。《当代物理》，46(5)，第323–351页。[21] Mandelbrot, B.B., 1954. 文本与传播的形式结构：两项 ′研究。《Word》，10(1)，第1–27页。[22] Mandelbrot, B.B., 1983. 自然界的分形几何。W.H.Freeman and Company，纽约。[23] Samorodnitsky, G. and Taqqu, M.S., 1994. 稳定非高斯随机过程：无限方差随机模型（第1卷）。CRC出版社。[24] Gnedenko, B.V. and Kolmogorov, A.N., 1954. 独立随机变量之和的极限分布。Addison-Wesley。[25] Parisi, G., and Frisch, U., 1985. 论充分发展湍流的奇异性结构，载于《地球物理流体动力学与气候动力学中的湍流与可预测性》。国际物理学校会议录，瓦雷纳，意大利，第84–87页。[26] Benzi, R., Paladin, G., Parisi, G. and Vulpiani, A., 1984. 论充分发展湍流与混沌系统的多重分形特性。《物理学杂志A：数学与一般》，17(18)，第3521页。[27] Halsey, T.C., Jensen, M.H., Kadanoff, L.P., Procaccia, I. and Shraiman, B.I., 1986. 分形测度及其奇异性：奇异集的刻画。《物理评论A》，33(2)，第1141页。[28] Mandelbrot, B.B., 1989. 多重分形测度，尤其面向地球物理学家。《纯粹与应用地球物理学》，131(1)，第5–42页。[29] Mandelbrot, B.B., 1997. 分形与金融学中的标度：不连续性、集中、风险。《精选集》E卷。施普林格。[30] Mandelbrot, B.B., 2001. 金融价格中的标度：III. 多重分形时间中的卡通布朗运动。《定量金融》，1(4)，第427页。