

第一章

启程之前



当杰克把一粒种子种到地里时，一棵美丽的蔓藤葡出现了，慢慢地它变为一棵成熟的巨大的葡萄树。在孩提时代，我们往往觉得杰克奇妙的豆苗和日常其他类似的事物，如秋天的落叶、发芽的种子都是不可思议的。长大以后，这些有关种子的奇妙现象仍然令我们着迷。一些小而结实的种子竟能够长成巨大的红杉、日常的雏菊和豆苗这样复杂和独具特色的结构！这些正是涌现现象的体现：复杂的事物是从小而简单的事物中发展而来的。现在我们已经知道，是种子中的基因使生化作用按照某种规则一步步地展开，从而决定了有机体的成长和发育。但是，对于这个复杂的过程，我们目前仅仅弄清楚了其中的一些片段。实际上，只有完全弄清楚基因是通过怎样的一系列相互作用，使得一粒种子或一个受精卵逐步发育成一个成熟的有机体，我们才能算真正了解基因和染色体。总之，我们只有弄清楚涌现现象，才会真正弄清楚生命和有机体本身。

当我们研究其他与上述生物发育似乎毫不相关的领域，例如棋类游戏时，会发现类似的涌现现象，它以另外一种形式展现在我们面前。当一系列规则确定之后，就会形成一种非常复杂的游戏。国际象棋就是由简单的二十几条规则限定的，然而，经过了几百年精心研究之后，人类至今还是能够不断地在游戏中发现新的走法。就像小小的种子成长为各式各样复杂的

生物体一样，为数不多的一组游戏规则会衍生出极其复杂的棋局。

在其他不同的领域中也有类似的情况，如牛顿万有引力定律或者麦克斯韦描述电磁现象的方程，它们与游戏的定义有着许多共同之处。牛顿定律与麦克斯韦方程相当于游戏的“规则”，由这些规则限定的“运动”能够利用数学工具推导出来。在观察这些运动的过程中，我们又能发现新的方程；利用新发现的方程，再加上各种数学方法，就能预测出事物发展变化的趋势。这就像在游戏中，我们可以揭示由创始者允许的所有可能的结果。牛顿不会想到他的定律将会导致“引力助推器”的发明，从而使人类可以借助其他行星的引力将空间探测器抛到其他外层行星的轨道上；麦克斯韦也不会预料到，他的方程会帮助人们研制出精巧的电子控制系统，而这种控制系统是制造现代电子设备绝对必要的条件。就像杰克的豆苗一样，这些方程揭示了无数的奇迹。实际上，我们对整个物质世界的理解，大部分都是从少数基本的方程出发的，而这些方程的核心则是以牛顿和麦克斯韦理论为基础。

涌现的本质就是由小生大，由简入繁。这种特征也使得涌现变成一种神秘的、似乎似是而非的现象。这种现象往往带有“暴发致富”的味道。然而，涌现确实是我们周围世界普遍存在的一种现象。日常的一些活动，如耕种，就依赖着涌现的一些基本经验——比如，必须知道影响种子发芽的各种条件。同时，人们的创造性活动，从对企业和政府进行改革到创建新的科学理论，所有这一切也都涉及到受控制的涌现现象。

在生活中的每一个地方，我们都面临着复杂适应系统中的涌现现象——蚁群、神经网络系统、人体免疫系统、因特网和全球经济系统等。在这些复杂系统中，整体的行为要比其各个

部分的行为复杂得多。在对这些复杂系统中涌现属性的理解方面，至今存在着许多深奥的待解决的问题，这些问题与人类的生存状况密切相关：整个生物系统是如何按照物理、化学的规律涌现出来的？我们是否能将人类的意识解释为某些物理系统的一种涌现属性？只有弄清楚涌现现象的普遍原理，我们才会真正弄清楚对这些问题给出的种种解答是否全面。本书的中心思想，就是要提供具有充分说服力的证据，以便证明，对于这方面进行的科学研究将大大加深我们对涌现现象的了解。

走向何方

尽管涌现是普遍存在的现象，而且相当重要，但它至今仍是一个奇妙的令人难以理解的问题，人们对它更多的还是感到好奇，而没有进行过细致的分析。我们目前所了解的关于涌现的知识，主要是通过一些例子得来的。在许多领域我们常常只是凭借以往的经验行事。例如，为了使种子发芽就要将它放入潮湿的土壤里。当然，我们今天对涌现的理解，要比孩子们利用霜精去理解秋天神奇的色彩要好一些。孩子们的解释激发了我们的想象，但其结果从根本上说往往是不能令人信服的。当然，我们的本能是寻找一种更深层的解释，这种解释可能会深入到复杂的生物分子的相互作用中去，这种相互作用将能够引起秋天所发生的种种变化，这也正是分子生物学家深思的问题。这种更深层次的解释，一旦被人们掌握，无疑会不可避免地大大推动人们的想象。但是，问题在于，需要研究的仅仅就是解释这些问题的具体机制吗？

像涌现这么复杂的问题，不可能只是服从一种简单的定义，我也无法提供这样的定义。但是，为研究这一问题，我可以提供一些标识，用来划出特定领域，以便进行相应的研究。

首先，我将把我们的研究领域限制在那些在规则和规律方面富有启发的系统。这方面主要的例子包括游戏、人们已充分理解其组成的物质系统（如由原子组成的分子）和用科学理论（如牛顿万有引力定律）定义的概念系统。当然，涌现现象也会在那些至今几乎还没有什么规律可循的领域中发生，如道德伦理系统、民族进化、思维中的概念扩展。我们在书中讨论的大部分观点都是与这样的系统相关联的，但精确地把这些观点应用于这些系统，则还需要对存在于这些系统中控制涌现发展的规律作进一步的研究。

当然，“涌现”这个概念还可能科学有效地应用于其他方面。但是在上述这一由规则制约的领域中，它就已经复杂得足以花费我们几乎全部的时间去研究了。本书将一遍又一遍地反复证明，少数规则和规律就能产生令人惊讶的、错综复杂的系统。这种复杂性不仅来源于系统随机模式本身，而且也与从局部到整体的过渡密切相关。就像在一幅点彩派画家的作品里那样，除了这些点本身之外，还可以从中看出特定的模式，它们确实是存在的。此外，这些系统是变化的，即动态的。它们隔一段时间就会改变，尽管规律本身不会改变，然而规律所决定的事物却会变化。在棋类游戏中不断变化的每一个棋局，或者在牛顿万有引力定律支配下不断变化其运行轨迹的棒球、行星和银河系，都说明了这一点。处处都显示着：少数规则和规律生成了复杂的系统，而且以不断变化的形式引起永恒的新奇和新的涌现现象。实际上，只有我们弄清楚了系统中涌现现象的规律，才会真正了解这些复杂系统。

在研究涌现现象的过程中，可识别的特征和模式是关键的部分。除非一种现象是可以识别的并且重复发生，否则我是不会称这种现象为涌现现象的；在这种情况下，我通常说这种现

象是有规律的。一种现象是有规律的，并不意味着它容易认识和解释。即使某种现象的基础规律及其动态变化都弄得很清楚了，认识和解释这种现象还可能会是很困难的。在国际象棋中，人们为了了解对弈中的某些定势整整研究了好几个世纪。例如，如何有效地排列“兵”。一旦找到了某些定势，这些定势就会帮助对弈者大大提高获胜的可能性。类似的，为了获取由牛顿万有引力定律发展出来的动态变化模式，我们已经花费了几个世纪的时间去研究，如在探索行星时使用的引力助推器，直到现在我们仍然还在研究。

弄清楚控制系统的演化规律及它们之间的相互关系，将使我们更有希望理解复杂系统中的涌现现象。其中关键的一步就是要从偶发的、不相干的细节中找出基本规律。例如，我们可以通过桌球碰撞的理想化形式，来洞察大气中分子碰撞的运动规律。通过这些相互碰撞的分子，得出一些可测量的变化规律，如大气的温度和压力等（关于这方面的问题还将在第九章中详细介绍）或者我们也可以用一种数学方法描述博弈以研究政治谈判中存在的复杂性。我们称这个过程为建模。

尽管人们常常认为建立模型在创立科学理论中的地位并不是决定性的，然而我的观点恰恰相反。每当一位科学家建立一整套描述世界的方程时，如牛顿和麦克斯韦方程，总是要构建一个模型。每个模型都会集中描述世界的某一个被限定的方面，而将其他方面看成是偶然发生的。如果设想的模型很恰当，它将对可能出现的情况作出预报或设计相应的对策，并且揭示新的可能性。正因为在对复杂系统的研究中建模起到了非常重要的作用，在下一部分我们将讲述有关建模的知识。在第二章中，我们将通过仔细研究那些历史上由我们祖先构建的游戏和地图模型，更加详细地讨论科学的建模方法。在第三章中，

我们将通过更加仔细地观察可由计算机实现的游戏和复杂系统的模型，进一步对动态过程进行研究。读者将会看到，在阅读本书的过程中，建模将是一再出现的主题。

虽然组成系统的元素及其属性往往是简单的，但是由于它们具备适应和学习的能力，由它们引起的各种各样涌现现象却是综合的，从而使组合变得十分复杂。在第四章中，我们将研究一个具有自学习功能的西洋跳棋程序。尽管从涌现问题成为热点以来又有许多关于这方面的工作，但这个程序是如此的引人入胜，它一直使许多后来的工作相形见绌。这个程序通过学习居然战胜了它的设计者！很显然这是一个产出大于投入的案例。它通过自身组成元素所发生的一些小的由经验积累而引起的变化来实现这一功能，而且它最终会将其能力扩展到一场锦标赛级别的水平。这个程序完全可以还原成决定它的规则（指令）本身，因此它没有什么需要隐藏的；然而这个程序产生的行为并不是简单地通过观察那些规则就可以预测到的。

无法预料、出其不意，这是涌现的一个重要方面，这看来是很具诱惑力的。意外通常是与一个基于规则的系统所显示出的一些异常行为相联系的，它常常起到一种心理上的引导作用，将人们的注意力引到涌现现象上去。然而，我并不认为出其不意是支撑这一领域研究的一个重要因素。总之，我认为涌现不是一种类似“旁观者的眼睛”的现象，人们一经弄清那种现象就会走开。

如果把涌现行为的产生者看成是主体的话，我们就能够更好地理解是什么超越了旁观者的眼睛而存在着。对于基于主体的涌现的经典描述是1979年霍夫施塔特（Douglas Hofstadter）提出的，他将蚁群作为这种涌现的隐喻。不管这些独立的主体——蚂蚁的能力多么有限，整个蚁群在探索和开拓其周围环境

的过程中展现了非凡的灵活性。不知什么缘故，这些主体的简单规律产生了一种远远超过个体能力的涌现行为。值得注意的是，涌现行为是在没有一个中心执行者进行控制的情况下发生的。以第五章的神经网络为例，这些网络是由大量模拟神经元构建的模型，这些神经元相互关联，构成整个交流的网络。它们显示出较为清晰的涌现现象，这与前面提到的西洋跳棋程序形成了一个有趣的对比。

从西洋跳棋和神经网络中我们看到了组合的巨大作用，而它又使得我们的思想看起来似乎是模仿古希腊人的想法。古希腊人认为所有的机器都能由六大基本的机械构件组合而成，这些构件分别是杠杆、螺钉、斜面、楔子、轮子和滑轮。在 30 年前，即 1969 年，西蒙（Herbert Simon）提出了一种对我们的客观世界有重要意义的思想。他的钟表匠的故事证明了这种想法的优势，即制造一块手表时首先制造组成手表的各个基础构件，然后再将这些构件组合成一个更大的装置，依次用来生产手表。我们能够更容易地理解和控制这种背景下的复杂系统。

这里运用观察可以形成这样一套看待问题的方法，即我们将复杂系统和涌现看作一个由机械构件和一系列程序组合而成的事物（第七章）。为了达到这一点，必须使我们关于机械构件的想法不要过于局限和呆板。因此，我们的想法要更接近于物理学家对于基本粒子的看法。就像光子激发电子使它从原子周围的轨道跃迁那样，这样定义的构件提供了一种精确描述的方法，用以构成复杂系统的基本元素（主体）、规则及元素之间的相互作用，由此得出的整套观点，使我们能够认识和描绘种种不同的、展现涌现现象的、受一定规则支配的复杂系统。

这种方法直接的好处，就是使我们能在存在很大区别的、具有涌现现象的不同系统和模型之间进行比较，我们希望能找

到相似的东西和普遍的规则或规律。加上勤奋和好运，我们应该还可能得到更多有关涌现的规律。第八章就是通过描述西洋跳棋模型、中枢神经系统模型和“复制猫”（一个具有洞察力的计算机类比模型）而开始这一探索的。尽管这些系统在细节上有很大区别，显然它们都具有共同的机制。特别的，我们发现由那些基础“积木块”（回忆一下西蒙的构件）重新组合而成的机制在这三个复杂系统中都起了关键作用。我们进一步发现：1)这些组成机制的相互作用不受某个中央力量的控制；2)随着机制之间相互作用的增强，灵活性不断提高，涌现现象出现的可能性也不断增大。

这些观察将注意力集中在基于主体的模型上，在这种模型中，动态的“机制”（主体）相互影响、相互适应。第九章在第七章的基础上将方法作了修正，允许机制本身通过相互适应来修正其相互作用的模式。这种对系统扩展了的设定，包含了一系列涌现现象的新例子：从被称为元胞自动机的微型宇宙到前面提到的桌球模型。通过分析这些在扩展了的设定下的新例子，我们更深刻地认识到系统的各个组成部分在孕育涌现现象过程中所起的重要作用。

这些新例子也说明涌现通常涉及一些组成成分相互作用的模式，尽管这些模式中的组成成分不断变换，这些模式还是持续存在的。不妨举一个简单的例子。一条干净的流动着的小河里，水流在一块石头前激起浪花，形成所谓驻波。组成这个驻波的水分子不断变化，然而只要石头立在那里，并且水在不断流动这个驻波就会持续地存在。蚁群、城市和人体（不超过两年，它们的组分就会全部更换）提供了更复杂的例子。这些涌现的宏观模式，依赖于不断变化的微观模式，也就使得涌现更具有吸引力，也更难以研究。

在一定的观察水平下，可持续存在的模式能够成为构成更复杂水平下的可持续存在模式的积木块。在西蒙的例子中，以手表的构件为例，很好地解释了静态基准体系下的一些观点：希腊人知道的基础机械构件——杠杆、轮子等是构成手表主发条组件的积木块，而这个组件又是由其他形式相似的小组件组合成的，就像手表指针的传动装置进一步形成复杂的手表系统一样。

在每一个观察层次上，可持续的由前一层次组合而成的模式束缚着后一层次上的涌现模式。这种前后相互牵制的层次关系是有助于我们进行科学研究的一种核心特征（参见表 1.1）。这一特征可以指导我们进行一种还原工作，即我们能够把对整个系统的解释还原为对组成系统的各个简单部分间相互作用的解释。由于我们正在处理的是出现在由规则控制的系统中的涌现现象，对问题的这种还原对我们的探索和研究将有很大帮助。还原方法被哲学家们反复进行研究，有时也成为其他人文学科的研究对象，但是人们却很少注意观察还原方法与受一定规则支配的涌现现象之间的联系。在这方面曾有一些重要观点，如丹内特的《达尔文的危险理论》（*Darwin's Dangerous Idea*）第十章研究了还原方法应用到涌现问题研究中所体现出的创造性的一个方面。在这里我们发现，存在于受一定规则支配的复杂系统中的涌现现象，是合理运用还原论的一个有力佐证。

还有一点与还原方法的创造性密切联系。自古希腊人以来，我们就已经很熟悉构成手表的基础构件了，但是手表的发明距今还不到两个世纪。为什么手表的基础构件早就为人类所熟知而手表却又出现得这么晚呢？这里我们遇到了一个关于建模、创新和涌现研究的中心问题：建立一个模型或发展一个科

学理论结构并不是演绎的过程，科学理论结构所推导出的标准结论，往往掩盖了导出这些理论结构的早期的隐喻模型所包含的许多性质。

表 1.1 科学描述中的层次关系

系统(科学)	典型构件
原子核(物理学)	夸克、胶子
原子(物理学)	质子、中子、电子
气体、液体(物理学)	
受限的(如蒸锅中的沸腾)	PVT : 气压·容积/温度)
自由的(如气候)	环流、大气湍流
分子(化学)	键、活化位置、集体行为
细胞器(微生物学)	酶、膜、运输
细胞(生物学)	有丝分裂、减数分裂、 基因的行为
组织(生物学)	器官形成(形态发育)
生态系统(生态学)	共生现象、捕食、拟态

*科学描述中一个典型的前后相互牵制的层次关系，每一层次上的行为和结构都依赖于在它之前的那一层次上的行为和结构。

** 较低层次的行为和结构可以限定较高层次的行为和结构，并可以帮助我们认识较高层次的行为和结构。需要说明的是，任一层次的行为和结构要与所有层次的观察结果保持一致。

前面我提到了桌球碰撞模型用来隐喻气体中碰撞的分子。第十一章的开头将提到麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 如何使用机械的隐喻模型，来加深他对电磁领域的理解。在涌现的研究过程中，建模和使用隐喻的问题与另一个问题比起来还可以算作次要的，这个问题就是：科学家究竟怎样才能找出规律和机制，来有效地揭示宇宙中隐藏的秩序？除了著名的麦克斯韦，很少有其他的科学家讨论他们工作中有关这方面的问题。第十一章提出了隐喻结构和模型结构之间的密切关系。第十章

和第十一章一起把关于建模和涌现的早期讨论置于更大的富于创造性和创新性的领域。

通过对各章的简要浏览，我们可以很明显地看到关于涌现现象的研究是呈螺旋形向前发展的。此外，下列一些术语可以作为对涌现现象进行研究的方向和路标。

机制 积木块、生成器、主体 和永恒的新奇 大量不断生成的结构)

动态性和规律性 (在生成结构中持续的重复发生的结构或模式)

具有层次的组织 (在生成器结构的基础上，生成更高组织层次的生成器)

建模则是再下一步的主题，它支持着这种有风险的研究。

在本书的最后一章，我们将再次回顾已取得的成果，并进一步说明我们的研究方向和核心理念。从这本书的中间部分我们还将知道，在普适理论下是如何解释一些与复杂系统中涌现现象相关联的神秘事物的。此外，我们还考察了仍然存在的神秘现象，以及在普适理论下解决这些奥秘的方向和方法。

模型

很早开始，人类就一直在努力寻找开拓这个混乱世界的方法。最初，人类认为世界上的一切都是由神控制的，是神的牺牲品——我们用人性以及为了赎罪而献身的牺牲的方法来构建起这种模型。后来 我们发明了机械装置 (门、泵和轮子) 和使用它们部分控制世界的方法。我们开始用机械装置代替人性来构建整个模型。最后，我们发明了由计算机控制的复杂装置和模型，及那些运用抽象机制的科学模型。尽管如此广泛深入地使用模型，我们对于建模技巧本身却一直是不熟悉的，即便是

那些富有实践经验的科学家也不经常讨论它。本书中，我们会多次回到建模这个话题，并随着内容的展开，对它有一个更加深入的了解。

在地球上所有的生物中，建立起一定的实体或脚本，用以构建模型，这是人类独一无二的行为。模型可能会很小，如古埃及人建立的精美的动物和船的缩微模型；它们也可能很大，像古代独石柱巨大的固定排列那样，能够作为时间流逝的模型。显然，模型并不只是日常某种普遍行为的一部分，它主要来自于某项工作的应用。事实上，我们对于一段路的重要标记和拐角，都形成了一种内在的地图，若不是由于建筑结构或交通路线的变化而不得不找出一条其他路线的话，我们显然是意识不到这个地图的存在的。在我们找出另一条路线的过程中，并不需要验证这条变化后路线的可行性，而是为了要进行真正的实践，即走那条路。模型的重要价值，就在于我们可以不必进行费时费力，而且可能有危险的公开实践，就可以预测到结果。即使是那些比例模型（轮船模型、飞机模型、铁路模型等），也将会使我们得到一些定量的数据，否则要得到真正物体相应的度量值将是十分困难的。我们可以利用轮船模型的比例去决定在真正的轮船上从桅杆顶到第一斜桅顶的距离，可以利用在风洞中飞行的飞机模型得到一些飞行的特征属性。实际上，就像我们在后文中将要看到的，模型在精细实验中是必不可少的。

“模型”这个词的涵义，不仅仅指地图和比例模型，它在某些情况下是这样使用的：

当我们打算建房的时候，首先要调查这一小块土地，其次要构造模型。

——莎士比亚 (Shakespeare)

〔模型是〕一个试验性的理想化的结构，被用来作为测试的设备。

—— 《美国传统词典》(*American Heritage Dictionary*)

模型的广泛使用在涌现的研究中发挥了关键作用。建立一个模型需要将要建模的物体和那些与它有着不太明显的相似性的事物联系起来：牛顿方程只不过是写在纸上的一些符号，看起来一点也不像围绕太阳转动的行星轨道。然而，它们作为一种模型所描述的现实的物质空间，是那些太阳系的比例模型所不能描述的。现在我们更进了一步，通过编制计算机程序，我们可以为现实或想象的情况构建模型。这样的例子遍布从视频游戏到高度细节化的飞行模拟器的许多领域。我们很快将会看到这一切是如何发生的，但现在只是简单地强调一下：最重要的是，模型使预测和预报成为可能。

我们中的大部分人在很小的时候就会构建模型了。在孩提时期，我们用积木块去具体实现自己的想象——城堡和空间站。熟练地用那些标准物体来重新组合成新的东西，这种技能往往一直延续到我们后来所从事的职业。钟表匠使用熟悉的机械构件，传动轮、弹簧、小齿轮等，去制造能够记录时间的奇妙事物——钟表；科学家则是在一个更抽象的层次上做同样的事情，用简单的事物生成更复杂的事物，如由简单的原子合成分子。通过选择积木块和重组这些积木块的不同方法，我们建立起一些规则，用来创建易于理解的受某些规则支配的系统模型。构思很好的模型，将会展现出被模仿系统中的复杂性及涌现现象，但是删减了大量的细节部分。这本书的中间部分，从第六章到第九章，主要就是讲述这种模型的。

从某种意义上来说，所有的科学都是以模型为基础的。牛

顿和麦克斯韦方程模拟了整个物理世界，我们可以利用这个模型推断出事物发展的结果，并且做出预测。从模型中可以推断出许多连模型的创建者都没有预料到的性质，有些甚至验证了创始者天才的直觉。为了了解涌现现象，我们必须了解模型是以怎样的一种方式超出它构建时原本含有的知识，而得出新知识的。

模型，尤其是计算机模型，可以提供许多涌现方面的例子，这大大加深了我们对涌现现象的理解。而且，这样的模型可以随时运行、停止、接受检查，并可以在新的条件下重新开始运行，这些都是在大多数现实的动态系统中无法实现的（如生态系统或经济系统）。我们建立计算机模型时，可以圆满地将描述模型的程序装入计算机，而它足以使其设计者为之惊讶。我们关于涌现的第一个比较详细的例子是一个具有自学习功能的西洋跳棋程序（第四章），在这个例子中，机器棋手将慢慢学习，直到成为比它的设计者还厉害的西洋跳棋选手。我们可以仔细研究这段程序，直到把它的每一条指令都弄懂。应当承认，它是研究涌现现象的一个无可挑剔的案例。

研究道路上的困难

在我们对涌现问题不断深入了解时，比较奇怪的是对涌现问题中的诱因和可能性的有效解释还很少。许多哲学家和一些科学家认为，涌现问题不可能用科学术语简单地加以解释。他们坚持认为，对涌现的研究成果不可能还原到有明确定义的机制及其相互作用的研究上。持有这种观点的学者坚信，机器不可能具备自我扩展和自身提高的能力，即机器不可能产生出比人们在制造它时所给予的更多的功能。

这种观点与一种直到 20 世纪中叶还在广泛流行的观点比

较类似，即机器不可能再生。原因在于机器要复制自身，就需要描述自身，然而这种描述又必须包含关于机器如何描述其自身的一种描述，如此等等，以至无限。所以，机器再生“显然”是不可能的，在整个过程中也没有产生更多的功能。因为有生命的有机体显然都可以再生它们自身，所以这种“不可再生性”是表明机器与有生命的有机体之间相互区别的一个主要特征。在 20 世纪 50 年代，这种以自身的再生为基础的观点站不住脚了，因为根据乌拉姆 (Stanislaw Ulam) 提出的思想，冯·诺伊曼 (John von Neumann) 提供了一种能复制自身的机器的描述 (1966)。正像对于秋天的种种变化给出具有科学性的解释之后，人们对这一过程的疑惑并没有减少一样，人们并没研究新的领域，而是提出了新的怀疑和问题。

我认为给自身的提高和涌现现象一个近似机械解释的最大困难，不在于选择一个什么样的原则。在我看来，困难更多地来自涌现现象令人眼花缭乱的多样性。就像意识、生命或者能量，在这些方面涌现都曾经出现过，但是它的形式却是反复无常的。这种困难也部分来自于涌现现象与偶然发现的新奇事物的相似性。上下起伏的晃动着的灯将会发出不断变化的闪烁光线，然而在一个由规则支配的系统中，却很少发现我们所期望的产生涌现现象的结构。在涌现现象大量不同的例子中，隐藏其间的那些意外出现的新奇事物的虚假轨迹，给我们分离涌现现象的基本要素造成了许多困难。

取得的进展

涌现现象的研究进程依赖于对涌现现象的还原能力。复杂系统可用较简单系统之间的相互作用来描述 (参见表 1.1 人们熟悉的科学上的还原例子)。因为现在对还原存在一个常见的

错误观念，所以我特别强调“相互作用”。这种错误观念认为，要了解整体，必须深入分析到最基本的原子部分，并且要将这些部分隔离分别进行研究。这种分析只有在整体能被看成各个部分的总和时，才是有效的，但即使各部分间只存在极少量的简单的相互作用，这种分析方法也不会得到有效的结果。例如，我们可以分析一下复杂的声波，譬如在一个交响乐中瞬间出现的声波，我们研究它的各组成部分的频率，然后再将这些组成部分加起来重新构成整体。利用各种数字记录的持续作用能力，可将各组成部分的频率重新合成持续不变的整体。然而，当各个部分以较复杂的形式相互作用时（就像蚁群中的蚂蚁彼此相遇一样），知道孤立的个体行为并不能了解整个系统（蚁群）的情况。简单地运用还原的观念——只是孤立地研究部分——在这样的情况下很难有效地研究整体性质。因此，我们必须既研究各个部分，又研究各部分之间的相互作用。

涌现，就这种意义来说，仅仅发生在整体行为不等于各个部分行为的简单加总的情况下。就涌现而论，整体行为确实远比各部分行为的总和更复杂。为了说明这一点，让我们再次以国际象棋为例。仅仅依靠累加棋盘上各个棋子的价值，是不可能为一个正在进行的棋类游戏提供一个有代表性的现实描述的。各个棋子之间彼此相互作用，以达到相互支持和控制棋盘上各个部分形势的效果。如果很好地思考并利用这种相互牵制的结构，就能很容易地战胜对手。尽管对手有许多更有价值的棋子，但却没有合理地安排它们以达到最好的整体效果。要有效地分析整个棋局状况，就一定要找出能够直接描述棋子间这些相互作用、相互影响的方法。在研究涌现现象的更为复杂的形式时也是如此。

因为涌现现象是通过许多不同的学科显现出来，所以我们