

· 方法论 ·

19-24 耗散结构理论的自组织方法论研究 094

吴 彤

N94
703

内容提要 本文研究和区分了耗散结构创始人创立耗散结构的方法与研究耗散结构的方法;建立了耗散结构概念方法论的方法程序。

关键词 耗散结构, 耗散结构理论特征概念, 耗散结构概念方法论

自组织理论

普里戈金创立了耗散结构理论,今天看来,这个理论在解决什么情况或条件下可以、可能出现耗散结构的问题具有重要的方法论意义。更广泛地说,该理论在运用何种方法可以判断一个体系可以从无序的状态自发地、自主地演化成为有序结构方面,作出了重要贡献。

以往,在研究自组织方法论本来不多的国内文献中,常常把两个方面的东西混同起来。即,第一,把自组织的方法与它对唯物辩证法的意义混同起来,用对唯物辩证法的意义代替对自组织的方法的分析;第二,把自组织理论创始人建立理论的方法与理论寻找和发现自组织系统建立、发展的方法混同起来。例如有的同志在文中,仅仅讨论自组织方法论的意义与作用,而没有讨论什么是自组织方法论。似乎什么是自组织方法论已经被确切了解和掌握,不用讨论。然而他们关于自组织方法论的意义讨论却很泛泛,只是在那里谈自组织方法对唯物辩证法有何意义之纠缠。^[1]有鉴于此,本文将对耗散结构理论创始人建立耗散结构理论的方法、耗散结构理论的“发现”(其实是研究什么条件下可以出现)、“耗散结构”方法和该方法论的意义做出明确区分,并对它们做出进一步的讨论。

一 耗散结构创始人建立耗散结构理论的方法与思想

1. 从可逆到不可逆:反常问题、哲学启迪和范式影响^[2]

按照库恩的科学革命的观点,普里戈金从事科学事业的时段已经是物理学的范式从牛顿转变到了爱因斯坦以后的时代。但是,在物理化学领域这个转变却远远没有完成。其中最重要的,就是人们还习惯于把可逆问题的研究当作“库恩范式”下的常规科学问题研究,而把不可逆问题当作“干扰”和令人厌恶的有害因素对待。克劳修斯与达尔文的矛盾,对十九世纪的以平衡态热力学和生物进化论为代表的常规科学,虽然一直就是一个演化方向的矛盾,是一个库恩意义上的反常,但是由于它们是在两个不同领域出现的,因而一直被科学家们搁置起来,不予理睬。同时也存在一些基本的实验上的反常问题一直未得到很好解释,但都被看成为小问题而搁置起来,如贝纳德对流元胞,化学的B-Z振荡和化学波反应。但是它们也引起了科学家们对非平衡状态下新结构的注意。

然而,毕竟在更大的领域里,范式已经转变,强调演化的思想已经萌芽,非线性问题和观念开始受到重视。在哲学上,柏格森的《创造进化论》对生命的冲动、创造的活力和创造本身的关注,一反太阳底下无新鲜事的旧观点,^[3]普里戈金的老师也是一个预先觉悟新范式的科学工作者。再后来,这个领域的一些杰出人物也抛弃了先前的范式,如巴黎的让·佩兰讲座的继承者E·博爱尔,以及莱登的H·A·克拉麦克等,^[4]对不可逆现象关注的人越来越多,意识到它可能是新科学革命的重要突破口的人也越来越多,

而且,应用各种热力学方法力图解决不可逆问题的现象出现了,原有的范式松动了、模糊了,各种新或在旧范式领域内出现的旧范式变形体也越来越多。热力学为普里戈金和其他研究者提供的各种各样的观点和前景中,使得普里戈金感受极为强烈的,是一切都明显地表现出“时间单向性”的不可逆性。

在这种观念下,普里戈金首先建立起一种“过程观”,而不是采取传统的“静止观”来看待问题。演化过程观的建立对于提出耗散结构理论有非常重要的意义,它相当于一种可以引导研究者进入特定领域和问题的规范及形而上学规则。

2. 从现象分析到建立抽象的耗散结构理论的特征概念

然而仅有一般的规范或哲学是不够的,必须应用科学本身来解决不可逆问题。在解决不可逆问题的过程中,化学热力学的最小熵产生原理的应用,使普里戈金发现,这个原理只适用于不可逆的线性范围,于是他们自然提出一个问题:线性范围以外,远离平衡态的稳定状态是什么样子呢?如何能够从平衡态过渡到非平衡态的非线性区呢?在进一步的研究中,他们发现线性关系不能应用于化学动力学的研究。例如适用于线性区的昂萨格倒易关系和最小熵产生原理都不再适用了,远离平衡态的非线性区究竟怎么样呢?他和他的同事们在合作中,很快发现,远离平衡态的非线性区的演化与平衡态或近平衡态区演化的最大不同就是并不存在一个适用于非线性范围内体系演化的一般准则。而其表现就是体系存在着分岔或分支点现象。换句话说,就是存在着发展演化的多种可能性,需要具体问题具体分析。

普里戈金等从基本的现象分析开始,发现了有些体系出现有序结构的特征,建立了描述体系出现有序结构的一般概念。这些现象有1900年发现的“贝纳德元胞”;1958—60年化学上的“B—Z”反应(化学波与化学钟现象);以及后来的生物学上的种群竞争现象(那时已经有了描述性的Lotka—Volterra方程),等等。普里戈金等认真地研究了这些现象,发现它们有一些共同的特征。通过艰苦的努力,这些特征被普里戈金等总结为:

①**活的有序性结构**。贝纳德元胞流体中的六角形花样,化学振荡的“B—Z”反应中的生成物浓度随时间振荡和空间周期分布以及扩散波都是有序结构。但是这种有序结构与晶体结晶过程形成的平衡结构有极大的不同。宏观不变的平衡结构是由微观粒子的规则排列构成的,所以结构是死结构;而这种结构是由微观粒子的不停运动构成的,因此结构是活的结构。第二,由微观粒子的不停运动构成的宏观稳定结构需要外界不断供给物质和(或)能量来维持和发展。后来,普里戈金把这个概念准确地称为“耗散结构”。

②**对称性破缺**。所有从无序到有序的演化,都出现了对称性破缺。这样对体系有序演化的概括和描述就有了共同的概念。也可以比较不同体系演化的有序程度了。³

③**自催化(或自组织)的非线性作用**。所有有序结构的形成,外界的物质与能量供给只是一种条件。普里戈金他们特别地发现了这种外部条件尽管是必须的,但是却不是针对体系的特定部分的。由于外部物质和能量是平均地供给到体系的,而体系却出现了各向异性的对称性破缺,这就反映了体系内部存在着的非线性相互作用是体系演化出有序结构的根本原因的特性。

④**分岔**。远离平衡态的非线性区的演化与平衡态或近平衡态区演化的最大不同就是并不存在一个适用于非线性范围内体系演化的一般准则。换句话说,就是存在着发展演化的多种可能性。而其表现就是体系存在着分岔或分支点现象。例如,存在着按原来演化方向进行的线性稳定分支,也在某一点存在向新的有序演化的非线性稳定分支,即在某点存在两个或两个以上的演化分支。这就为后来的微分方程的稳定性分析奠定了概念基础。更为有意义的是,分支把历史引入到了科学的各个学科中了,而过去“历史”这个因素似乎只是留给研究社会以及文化现象的学科的某种专利。⁶

3. 数学分析:从建立模型到理论

在建立一般性的具有普适意义的概念之后,最重要的恐怕就是建立一个具有普遍意义的模型,而一个模型能够具有普遍意义就必须是可数学化的,并且模型的数学方程也具有代表性,即能够描述多种过程和多个领域的现象。

普里戈金所领导的比利时布鲁塞尔学派经过10多年的努力终于找到了可以表达耗散结构建立的数学条件、分析方法和模型。它们是热力学稳定性分析、分支分析、突变奇点分析。而这个著名的模型就是“布鲁塞尔器”(Brusselator)。

“布鲁塞尔器”是由下列反应系统给出的模型系统:



系数归一化处理后,得到下列方程

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a - bx + x^2y - x \\ \frac{dy}{dt} = bx - x^2y \end{cases} \quad ②$$

该方程的非零定态解为

$$X_0 = a, \quad y_0 = \frac{b}{a}$$

此非零解表示该反应在近平衡区的稳定反应状态。系统能否走向有序耗散结构,决定于这些定态解能否失稳、何种条件失稳。

普里戈金等利用“布鲁塞尔器”分析了一般的耗散结构建立的失稳条件,他们发现只要控制反应物 B 与 A 的浓度,使得 $B > 1 + A^2$ 关系被满足就能够使体系出现失稳,然后向耗散结构过渡。这个模型具有典型的示范意义,它类似于库恩所说的“范式”,是从事非线性方法论研究的概念模型和解题工具。²⁾

二 从稳定性到非稳定性的耗散结构分析方法

由于非稳定性的分析比较困难,科学家们常常通过稳定性分析找出体系可能失稳的点或区域,然后判断体系从无序进入有序的情况。这个方法是一个非常实用的方法。如果体系的演化可以运用数学表达,那么在数学上则可以很好的处理。

让我们从普里戈金的热力学稳定性与非稳定性分析入手。

热力学是研究物质运动现象中热性质、热现象和规律的学科。在热力学的演化过程中,发展出两个分支,即平衡态热力学和非平衡态热力学。

平衡态热力学理论是建立在四个热力学基本定律的基础上的。它们分别被称为,热力学第零定律、第一、第二和第三定律。在平衡态热力学的发展中,著名的德国物理学家玻尔兹曼导出了一个关于“熵”的统计性公式,即

$$S = K_B \ln \Omega \quad ③$$

其中 Ω 即热力学几率, $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度。很明显,体系内部各个组分及其运动分布越均匀,几率越大,因而越无序,熵越大。分布达到完全均匀,几率最大,体系最无序。所以,熵是体系走向混乱程度的度量。这里顺便要纠正一个误读,即认为存在负熵。³⁾实际上,按照热力学定律,和所谓信息熵的提法,不可能存在负熵,而只能有负熵流,即熵的流动的方向性可以有负号的方向性。

非平衡态热力学是从平衡态热力学发展而来的,它又包括两个部分:线性非平衡态热力学(又称为不可逆热力学)和非线性非平衡态热力学(简称非线性热力学)。在非平衡态情况下,能否直接推广在平衡态下得到的一些热力学结论?科学家在常规科学研究中自然会问这样的问题,由此而来科学家也力图通过平衡态热力学使用的方法,推广平衡态热力学的结果。科学家们假定在非平衡态条件下,一个热力学体系存在着局域平衡。所谓局域平衡假定,就是体系内部从宏观上看足够小小到内部非平衡差异元可以看成不存在的一个平衡整体,而从微观上看,它又充分大,如下图所示

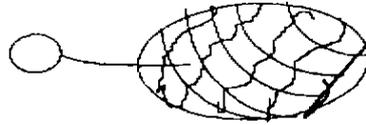


图1 局域平衡假定
每一个部分都是一个从宏观看充分小的局域,局域内部平衡

一个非平衡态的无序的热力学系统能否转变为一个非平衡的有序结构,在什么条件下转变?这是耗散结构理论方法中最为重要的关键分析。热力学理论和后来发展起来的耗散结构理论都证明,一个稳定态的热力学系统当它可以用数学加以描述时,也可以通过某种数学函数表达它的稳定性。而稳定性则可以分为以下几种:

1. 方程稳定性分析

假定体系的演化情况可以用如下方程组加以描述:³

$$\frac{dx_i}{dt} = G_i(X_1, X_2, \dots, X_n, t) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad ④$$

这里 X_1, X_2, \dots, X_n 是 n 个说明体系状态的变量。
在无序的稳定热力学分支上,它们均为零,即

$$\frac{dx_i}{dt} = 0 = G_i(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0) \quad ⑤$$

在物理上,有三种稳定性,即状态稳定性、轨道稳定性和结构稳定性。其中状态稳定性和轨道稳定性都是对体系的运动状态和过程而言的,是系统的一种局域性质。而结构稳定性是涉及系统演化整体的,从数学上看,结构稳定性是系统对参数变动而言的,一般认为,参数变动时解的结构要发生变动,解的个数,解的特点全都会发生变动。数学上方程解随参数变化反映系统状态随参数的变化,也反映系统向有序方向演化的特点。而结构稳定性的研究就必须通过状态稳定性进行分析,例如,通过对某参数下系统的状态稳定性分析与改变参数下的状态稳定性分析有无变化,就可以知道方程解对此参数变化是否是结构稳定的。⁹

2. 线性稳定性到非稳定性分析

许多非线性的方程很难找到理论上精确的解。但是可以通过定态解的线性稳定性分析的方法,从而找到从稳定到不稳定的可能的分支点。普里戈金就是这样做的。

分析的基本思想是:假定方程具有定态解 $\{X_0\}$, 与定态解有微小偏离的解 $\{X_i\}$ 可以写成线性形式,即

$$X_i = X_0 + U_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

对方程进行泰勒级数展开并只取线性项:

$$\frac{dX_i}{dt} = G_i(\{X_i\}) = G_i(\{X_0 + u_i\}) = G_i(\{x_i\}) + \sum \frac{\partial G_i}{\partial X_j} X_j = \lambda_{ij} u_i \quad ⑥$$

由于 X_0 是定态解故有

$$\frac{d_i X_0}{dt} = 0 \quad G_i(\{X_0\}) = 0$$

$$\therefore \frac{du_i}{dt} = \sum_j \frac{\partial G_i}{\partial X_j} \Big|_{X_j = X_0} u_j \quad (7)$$

该方程是线性微分方程组,其特解为 e^{at} , a_i 是方程对应特征方程(矩阵 $A = \{A_{ij}\}$ 的本征值),若特征方程的根 a_i 皆为负,定态解 $\{X_0\}$ 是稳定的。若 a_i 中有一个为正,在 $t \rightarrow \infty$ 时,解 u_i 发散,原定态解 $\{X_0\}$ 是不稳定的。事实上,判断方程定态解的稳定性,并不一定求出特征根的具体解,只要知道它们的正负就可以了。

如果我们体会上述方法,实际上,这个数学方法告诉我们,一个系统当它从稳定性的线性区域向非线性区域过渡时,如果能够判断系统的一些“稳定点”或稳定性区域有失稳的可能性,那么与这个失稳有关的条件就是可能出现耗散结构的重要条件。而系统的线性稳定性是比较好找的,我们甚至可以在完全的线性稳定性方向上不断把系统推向极端,就有可能找到系统的失稳点(或分支点)。

如果我们微扰一个系统,那么,可以从反映系统的有序或无序的序参量或“熵”等这样的参量上反映系统的稳定性,一般而言,体系的参量的一阶变化率如果与该体系参量的二阶变化率同号,那么体系是稳定的,如果反号,那么,体系可能失稳,在数学上,就可由李雅普诺夫函数来判定。

三 耗散结构概念方法论应用

我们知道,耗散结构理论的创始人普里戈金等运用稳定性的数学分析方法解决了许多体系的有序演化问题。后来在物理化学、生物学系统、人口系统、城市系统、经济系统、教育系统的分析方面也有效地应用了耗散结构理论。^[4]

但是,能够应用耗散结构的数学分析方法的体系毕竟是少数,在社会文化领域更是如此。那么,如何才能正确运用耗散结构理论解决我们面临的各种问题而少用或不用数学分析的方法呢?我认为,我们应该按照耗散结构理论的基本思想建立起运用耗散结构概念的方法程序。我想这正是我们所需要解决的基本问题,正是耗散结构方法论的本质所在。我们把这样的方法程序称为“耗散结构概念方法论”。

我认为,耗散结构概念的方法论就是分析我们所要研究的对象是否满足出现耗散结构的那些基本条件。这些基本条件以及如何满足这些条件的判据是:

- 体系开放。体系将来要建立一个活的有序结构,因此必须与外界有不断的物质、能量和信息的交换。而判断体系的开放性比较容易,因为只要知道体系有无输入和输出即可。
- 体系开放的外界输入达到一定阈值。体系出现耗散结构的条件当然不是有外界输入输出即可,当这种输入达到一定阈值,体系才可能向耗散结构转化,但是这个阈值是可以通过试探性尝试找到的。因此具有操作性。另外不同体系这个阈值的量和性都是不同的,应该具体问题具体分析,这也表现了各种耗散结构的所谓“个性”。
- 体系外界输入的平权化,体系的外部输入不能针对体系的特定部分。这是个判断体系是否自组织地达到耗散结构的条件。^[5]判断这个条件是否被满足的办法,是针对输入做必要的分析,例如体系的各个部分是否平均地得到输入的能量和物质,等等。
- 体系应该远离平衡态。判断这个条件是否满足的方法是研究体系的各个组成部分是否均衡一致,体系的各个部分之间的差异越大,体系离开平衡态就越远。
- 体系是一个非线性体系。如果体系是一个线性体系,那它根本被排除了出现耗散结构的可能性。只有非线性体系才能演化成为有序的耗散结构系统,判断一个体系是否非线性,也与上述条件类似,就是要研究体系的组成部分构成是要素还是元素,即组成部分不仅在数量上而且在性质上要相互独立且有相当的差异。^[6]另外组成体系的独立要素数量必须大于等于三。例如,老子就很早领悟到这种数量达到三的威力。他说:道生一,一生二,二生三,三生万物。^[7]
- 涨落。在这里只有涨落是无法分析的。涨落是耗散结构出现的触发器,内在涨落是必然的,但是何时

出现涨落以及涨落大小却是不可预测的。我们只能大致地对涨落出现的阶段及其意义做一描述。涨落如果出现在体系刚刚偏离平衡态的近平衡态区,那么对体系演化成为耗散结构是无建设性意义的,只有涨落出现在体系远离平衡态的区域时,才能够起到建立耗散结构触发器的作用。

- 非稳定性。涨落表现了体系的非稳定性的一个因素,逐渐地远离平衡也表现了体系的非稳定性的一个方面,非线性反映了体系内部的非稳定性。外界输入的渐增激励着非稳定性,当这种输入达到一定阈值时,意味着体系的非稳定性已经达到临界状态,再稍稍越过一点点儿,体系立刻就会跃迁到新的有序状态。另外,如果体系存在着广义的“流”和“力”,那么体系必定存在着一定程度的非稳定性。只是不好定量地判断是多少和多大。所以,我们完全可以按照控制论的“黑箱”方法,而无须判断和分析体系的非稳定性。只要控制外部控制能量的阈值即可。当然,体系可以建立数学模型进行描述和解析的,应该运用数学的稳定性分析方法去加以解决。

以上我们根据普里戈金的耗散结构建立了一种可以从七个方面实际操作的方法判断体系,其中有一个方面的判据无法判断(涨落)何时何地出现,可以认为这个判断无效。另一个可以利用“黑箱”方法避开内部结构的解剖,因此实际可用的判据有六个。我把它们称为可以分析并判断体系自组织地从无序走向有序的耗散结构的“耗散结构概念方法论”,相信这个方法具有理念理性和实践理性,可以指导我们研究和判断我们研究对象的自组织走向耗散结构的条件是否具备。而耗散结构理论上也就是这样一门学说,它仅仅解决了可以出现耗散结构的条件以及相伴而来的出现耗散结构的必然性。

我们无法创造耗散结构,耗散结构的出现完全是无预定的、自组织的。但是我们可以创造出现耗散结构的条件。而一旦出现了那些必要条件,耗散结构的出现则也是必然的了。

注释及参考文献

- ① 见艾众:“自组织理论方法论”,《天府新论》,1991年第6期。
- ② 见普里戈金的自传“我的科学生活”,《普利高津与耗散结构理论》,陕西科学技术出版社,1982年版。
- ③ 柏格森说:我们越是深入分析时间的自然性质,我们就会越加懂得时间的连续就意味着发明,就意味着新形式的创造,就意味着一切新鲜事物连续不断地产生。见《普利高津与耗散结构理论》,陕西科学技术出版社,1982年,第2页。
- ④ 见《普利高津与耗散结构理论》,第3页。
- ⑤ 这时普里戈金还没有象哈肯那样找到“序参量”这个更为准确和科学的概念。
- ⑥ 见普里戈金:《从存在到演化》,上海科学技术出版社,1986年,第97页。
- ⑦ 参见库恩:《科学革命的结构》,上海科学技术出版社,1980年。
- ⑧ 负熵的提法,首先出自德国物理学家薛定谔。
- ⑨ I. Prigogine and P. M. Allen, *The Challenge of Complexity, Self—Organization and Dissipative Structures*, edited by W. C. Schieve and P. M. Allen, University of Texas Press, Austin, 1982, P.9.
- ⑩ 参见魏宏森、宋永华等编著:《开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览》,四川教育出版社,1991,第234—235页。
- ⑪ 参见 W. C. Schieve and Peter M. Allen edit, *Self—Organization and Dissipative Structures——Applications in the Physical and Social Sciences*, (University of Texas Press, 1982) 内的各篇应用耗散结构解决各个领域问题的论文。
- ⑫ 见姜锡等关于应用自组织理论特别是耗散结构理论对经济、教育系统的演化研究。如《开创复杂性研究的新学科》、《耗散结构论》、《耗散结构新论》等著作。
- ⑬ 体系也可以通过被组织的方式达到有序结构,但那是被动的、因而与普里戈金的耗散结构概念以及所有自组织理论概念背道而驰。
- ⑭ 笔者认为,组成系统的要素是指构成系统的各个相互性质独立的那些单元;而元素是组成系统的所有数量上的单元。两者具有本质上的区别。
- ⑮ 见老子《道德经》。

作者简介:吴彤,男,1954年出生,北京师范大学科学哲学硕士,现任内蒙古大学人文学院副院长,哲学系主任,教授。

责任编辑:成素梅