

Origin of process engineering and study on the irreversible circular processes

Zuohu LI*

Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: In the year 1996, we found that, if the closed recycling reaction between acid–alkali–salt should be completed, we can be able to zero discharge in the clean production of chemical technology process. At the beginning of the year we study the acid–alkali united production from metallic salts by hydrolytic action as a new unit operation of chemical engineering. In the year 2012, we get up the theory of dynamic closed system with multy-phase and chemical kinetics, and find the third group from entropy to order structure in the nonequilibrium thermodynamics. If the new theory expanded to the solar system, we discover the closed circular flow of entropy and universal eternal self-motive machine, so we give the new definition of the times.

Key words: chemical technology process; circular economics; complex closed system;
universal eternal self-motive machine

收稿: 2019-05-01, 修回: 2019-06-03, 网络发表: 2019-06-04, **Received:** 2019-05-01, **Revised:** 2019-06-03, **Published online:** 2019-06-04
作者简介: 李佐虎(1940-), 男, 湖北省武汉市人, 1967 年研究生毕业, 研究员, 博导, 化学工程专业, Tel: 010-82661863, E-mail: zhli@ipe.ac.cn.

引用格式: 李佐虎. “过程工程学”的由来及对“不可逆循环过程”的研究. 过程工程学报, 2019, 19(增刊 1): 3–9.

Li Z H. Origin of process engineering and study on the irreversible circular processes (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(S1): 3–9,
DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219214.

(此文献给张懿院士。贺八十大寿！祝身体安康！)

“过程工程学”的由来及对“不可逆循环过程”的研究

李佐虎*

中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

摘 要: 1996 年我们发现, 如果能实现酸-碱-盐闭路化学循环, 则化工清洁生产就能达到零排放。从此开始了盐水解法酸碱联产新化工单元的研究。2012 年提出了“动态多相动力学封闭系统”理论, 发现这是非平衡热力学中的第三类“熵致有序”结构。将这一理论推广至太阳系, 发现了“熵循环流”与“宇宙永动机”, 还给出了时间新定义。

关键词: 化工过程; 循环经济; 复杂封闭系统; 宇宙永动机

中图分类号: TQ02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)S1-0003-07

1 “过程工程学”的由来及其扩展性内涵与外延

2001 年中国科学院化工冶金研究所正式更名为过程工程研究所。很多人在问: “过程工程”(Process

Engineering)与“化学工程”(Chemical Engineering)有何本质差别? 应该说这是自 20 世纪 80 年代初就一直在探讨的研究所学科发展方向问题。90 年代末, 郭慕孙与陈家镛两位创所元老将问题归纳为下式^[1,2]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{冶金工业, 石化工业} \\ \text{化学工业, 核能工业} \\ \text{建材工业, 生化工业} \\ \text{医药工业, } \dots \end{array} \right\} = \text{过程工业} = \text{“三传一反”} + X = \text{过程工程学}$$

“三传一反”是“化学工程学”的理论基础, 属于非平衡热力学中的“唯象理论”, 其技术对象是“化工单元”操作(Unit Operation); 多个化工单元相互衔接, 构成化学加工产品的生产“流程”(Process)。显然“Process”是比“Unit Operation”高一层级的复杂组合系统。所以 $X \neq 0$ 。至于 X 具体内容是什么? 则众说纷纭。

既然将“过程工程学”定位在“过程工业”上, 就得问, 当今“过程工业”的时代新需求是什么? 答案是显而易见的, 即资源节约与环境友好^[1-6], 是“循环经济”的主体内容。“循环经济”是“物质闭环流动型经济”的简称^[5]。在我国已推行近 20 年, 然而“物质人工闭路化学循环”在化学热力学上是一个未被证明的“科学命题”^[6]。致使我国学界与政界都不敢用“物质闭环流”来定义“循环经济”, 而是舍近求远地借用美国杜邦公司 20

世纪 80 年代提出的环保“3R 制造原则”做定义^[5], 还用 Frosch 1989 年提出的“生态工业园”概念作为实现形式。在国内强力推行十多年, 结果无功而返。提出并推行这一浪潮的诸多高端人士失去信心, 有的甚至转向认为这是一种“乌托邦”。

我们是从化工清洁生产“源头治理”与“末端治理”的共性技术中寻求 X 解的^[3,4]。“污染是放错了地方的资源”, 通常被看成是一句黑色幽默式的调侃语。我们却认定, 这是将“污染”与“资源”一体化的精辟定义^[7]。20 世纪 90 年代初, 我们就发现“源头治理”与“末端治理”合二为一的“必要”与“充分”条件是“酸碱联产与再生循环”, 称其为“酸碱联产”新“化工单元”^[4]。由此就可构建出“物质人工闭路化学循环”新过程。故有 X 解:

X = “物质人工闭路化学循环”新过程的技术与理论

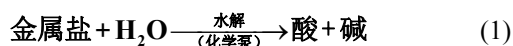
这一问题的本质是如何构建“化工酸碱盐闭路循环”新流程。按“循环经济”理念要求, 在应用上构建出了“生态循环工程学”; 在理论上推演出“动态多相动力学封闭系统”, 及其“物质不可逆循环过程”新概念。

将此“过程工程学”方法进一步推广至太阳引力大时空系统, 发现存在有“能量不可逆循环过程”与“熵不可逆循环过程”, 形成“不可逆循环过程”研究新领域。

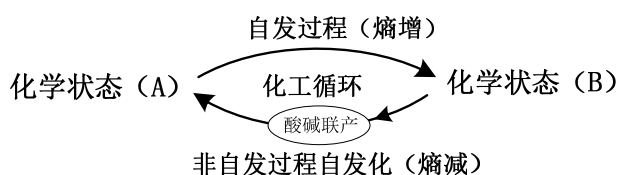
2 从“酸碱联产”到“物质人工闭路化学循环”新过程

化学工业起始于酸碱制造，至今“四酸三碱”仍是化学工业基础的基础。然而由于原料与工艺流程几乎完全不同，致使“制酸工业”与“制碱工业”成为两个完全分离的独立行业，且鸡犬之声相闻，老死不相往来，是当今工业化学污染与资源浪费的总根源。

“酸碱联产”是一个新概念，包含酸-碱-盐三者的“再生循环”，无废酸、废碱与废盐排放。条件是就地生产，就地使用；能与产品工艺有效融合，不再外购酸与碱。显然不能简单地采用现行工业酸碱生产流程，必须另觅新原理与新途径。我们的重大发现与技术突破就是：



是酸碱中和反应的逆反应，构成酸-碱-盐“再生闭路循环”新过程。



我们研究化学工程学“三传一反”理论与非平衡热力学的关系多年，知道化学工程学本质上就是实施化学热力学上的不可逆过程。上述新发现只是证明了“酸碱联产与再生循环”是使非自发过程自发化的充分必要条件，构建出“化工循环”新过程，是 Process 高于 Unit Operation 的实质内容。换言之，“化工过程”本质上就是研究“物质人工闭路化学循环”的，只因缺少“酸碱联产”这一新化工单元，致使这一循环“断链”，故全称为“化工酸碱盐闭路循环”新过程。

3 “循环经济”理论与“生态循环工程学”

“循环经济”概念源自“生物地球化学循环”^[8],

由于金属盐种类繁多，水解温度、动力学途径、反应速度、物料性能等各不相同，构成一片未开垦的化工研究新领域。早期受传统游离酸碱概念的束缚，致力于游离酸碱联产，难以突破技术经济关。2007 年在众多应用中发现，当与产品工艺融合时，绝大多数“耦合反应”只需“隐形酸”或“隐形碱”就足够了。总体工艺流程大为缩短，能耗大幅降低，设备腐蚀小，工程难度与经济效益焕然一新，称为“广义酸碱联产”，是理念上的一次关键性质变。

“酸碱联产”反应器研制是其产业化的关键，要求反应温度 200~500℃，反应介质为低温亚熔盐，当与被加工物料混合时往往呈膏状，常规搅拌与间壁传热方式都很困难。属于“冶金反应工程”与“化学反应工程”之间的空白地带，称“亚熔盐反应工程”。所谓“亚熔盐”是指含有少量水分的低温熔盐液体，有中性亚熔盐、酸性亚熔盐和碱性亚熔盐三类。亚熔盐三相反应器是一类全新的化工单元。

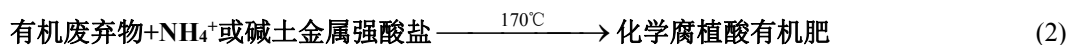
有了酸-碱-盐闭路循环新化工单元，就可构建出一般性化合物人工“单向闭路化学循环”，即“化工循环”：

新时代要求人类的一切物质生产活动能像“自然生态循环”那样“无废排放”，是对社会生产方式再造的新“理念”。但至今人们仍局限在工业环保范围内，还未回归到“生态意识”原义上来，全名应称“生态循环经济”。

3.1 人工生态循环的两个新技术范式

“物质人工闭路化学循环”在理论上可以做到“无废排放”，但在实际工程实践中会碰到经济问题，或地域性物料不平衡问题。因此很难在“生态工业园区”内完全实现无废排放，称之为“生态工业园区规划怪圈”。例如我国西北地区盐湖开发氯离子的出口问题，几乎是一个“死结”，有待技术理论新突破。

2008 年初，我们在“隐形酸”概念的指引下，偶然发现了“化学腐殖酸”的一般合成方法：



自然界的腐殖酸均为动植物死亡后的残体，是在微生物降解时合成的大分子中间体，也是煤形成的中间过程，称“生物腐殖酸”或“生化腐殖酸”，是“植物营养循环”的必要条件。当今的有机肥仍然在采用这种微生物发酵法，称堆肥与沤肥，转化时间长，转化率低，有

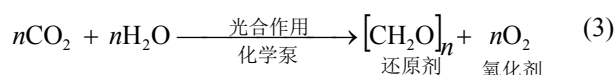
严重二次污染。式(2)所示的化学腐殖酸反应速度快，一般只需 2~4 h，转化率高，无二次污染，类似于超高温灭菌操作，生产过程简单，是工业无用废弃物的最安全出口，构成工农业联合“物质人工闭路化学循环”零排放的完备技术体系。称式(1)与(2)为两个新技术范式：一

个是化学推动力,另一个是工农业生态衔接纽带与通道,称之为“人工生态循环”。盐湖 Cl^- 离子通过化学腐植酸有机肥途径无害回归大海。

3.2 人工生态循环与自然生态循环的协同作用

人是自然的一部分,“人工生态循环”只能从属于自然生态循环之中。人又是智慧生物,有创造性,故人工生态循环又高于自然生态循环。两者互补,构成生态循环工程学,是人类走向生态文明的必由之路。

自然生态循环的推动力是光合作用:



比较式(1)与(3),都是水合反应,前者是离子键拆分,后者是共价键重组,可称之为两个最基础的“化学泵”。产出四种最基本的化工原料:酸、碱、还原剂、氧化剂。再配上高温能源,就可以对一切化合物进行拆分与重组。这就从理论上再次证明“物质人工闭路化学循环”是完全成立的。“循环经济”理念不是乌托邦,确有着完备的技术与理论基础。

人工生态循环离不开自然生态循环的供给,如能源工业与冶金工业中所用碳质原料、大气中的氧,均来自自然生态循环。

人工生态循环不仅要求“工农业生态一体化”,实现“无废排放”,还要对大气、水体及土壤的“生态修复”,植树造林,开辟新人工湿地等等。这种人工生态循环与自然生态循环的协同作用,称之为“生态循环工程学”,是“生态循环经济”的技术与理念基础。

3.3 生态循环工程学与生态文明新时代

我国在世界上首先倡导了“生态文明”新理念,并成为中国特色社会主义理论的核心内容之一,是不可持续“工业文明”走向可持续“生态文明”的历史必然过程,是人类命运共同体的理论依据。

“生态循环工程学”指的是生态文明中的“物质文明”部分,首先指人类社会的生产方式与生活方式及其观念的转换,树立“生态意识”。“生态”与“环保”是两个不完全相同的概念。“环保意识”指“少排与达标排放”,“生态意识”指“无废排放”。长期以来人们都认为“无废排放”是乌托邦,这就是观念转换问题。

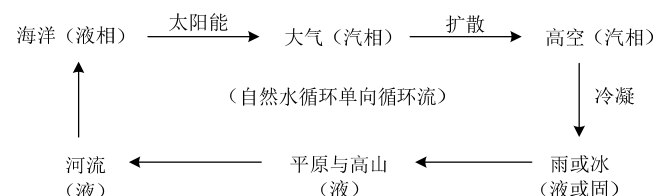
从20世纪70年代起,“后工业时代”研究就成为西方“未来学”的研究对象。其中有一派研究的是“生态马克思主义”。90年代我国“生态工程”与“环保工程”学者掀起的一场“生态文明”大讨论,在我国正式确立了“生态文明”新理念,使中国特色社会主义理论自成体系,站在了世界政治道德文明的制高点,率先跨

入生态文明新时代。

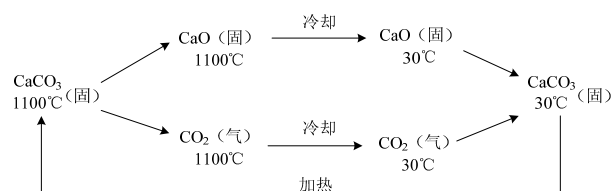
4 “动态多相动力学封闭系统”新理论

如果将“物质人工闭路化学循环”新原理推广,就得到一般性“动态多相动力学封闭系统”理论,简称“动态复杂封闭系统”。它是由多个“开放子系统”组合成的复杂封闭系统,系统内存在多种物质宏观“单向循环流”,与外界没有质量交换,但有能量交换,以驱动内在宏观物流。这一动态循环系统与卡诺循环有诸多相似之处,在瓦特蒸汽机内也有宏观水循环流与气液相变,是最早研究、也最简单的“动态简单封闭系统”。

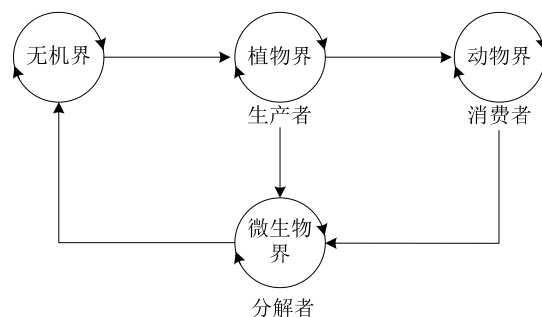
地球就是一个最大的“动态复杂封闭系统”,包含物理循环,化学循环,生命循环。最易理解的是地球上的水循环:水有气-液-固三相;地球上有大气,海洋,高山,平原,河流,称之为“库”。“库”与“流”相连,就构成“循环流图”。



化工循环流图随处可见,最简单的如 CaCO_3 热分解循环流图:



最复杂的是生物地球化学循环:



包含着物理循环、化学循环、生命循环,大循环中套着无数小循环。艾根的“超循环理论”以自催化反应为出发点,探讨生命的本质。普里高京用非线性化学动力学理论探讨生命“进化”过程中的“耗散结构”。

“动态复杂封闭系统”中的“物质单向循环流”也是一种时空有序结构，有多重相变。这与孤立系统中的玻尔兹曼相变、开放系统中的普里高京“耗散结构”不同，是封闭系统内的宏观单向循环流结构，故称第三类“熵致有序”结构^[12]，类似于现代高速公路网中的汽车流。

“熵致有序”是指从“无序”到“有序”的过程，按热力学熵增原理，这是一个非自发过程，然而可由两个“化学泵”使“熵”减少。因此有结论：平衡热力学研究的是“库”，从“有序”到“无序”的过程；非平衡热力学研究的是“流”，从“无序”到“有序”的过程，两者衔接，构成“物质不可逆循环流”。非平衡热力学可等价于化工宏观动力学，这就在平衡热力学与化工动力学之间长期存在的鸿沟^[15]上架起了一座新的“时间”之桥。前者不随时间而变，后者随时间而变。

5 太阳系中的“熵循环流”与“宇宙永动机”

这是两个别开生面的新概念。热力学的灵魂是“熵增原理”。然而如果宇宙中的一切自发过程都是“熵增过程”，那么“低熵”来自何处？至今没有人能回答。所以克劳修斯“热寂说”至今并未被真正破解，也是非平衡热力学理论至今还很不完备的原因。

在波尔兹曼的墓碑上没有碑文，只刻有一个公式： $S = k \log W$ ， S 是“熵”， W 是微观状态数， k 是波尔兹曼常数，其简洁性可与爱因斯坦质能公式： $E = mc^2$ 媲美，两者都代表着自然界最本质的规律。

前已指出地球就是一个典型的“动态多相动力学封

闭系统”，与卡诺循环的唯一差别是，不是对外作“功”，而是对内在“宏观循环流”做功。所以地球也是一部最大的热机。高温热源是太阳的高温热辐射，低温冷源是太空低温(2.7 K)。高频光子具有低熵值，地球向太空发出的低温热辐射具有高熵值。一个高频光子经质能相变可转化成多个低频光子，两者能量相等，但熵增加了，符合玻尔兹曼公式。

现在的问题是，地球发出的低频光子到哪里去了？太阳发出的高频光子又是如何产生的？应该说，现代物理学已经给出了完美答案。

光子被电子或其它基本粒子吸收是一种质能转化“相变”过程，动质量转变成了静质量，遵从质能公式 $E = mc^2$ 。在克劳修斯时代，不知有此公式。按波尔兹曼公式，两个微观粒子结合成一个新微观粒子，即两个质点合并成一个质点，应属“熵减”，反之“熵增”。同理，两个原子或离子(高温等离子态)结合成一个分子也应是“熵减”^[10]。这就是“微观熵”新概念，普利高京已经注意到这种“微观熵”及微观不可逆过程^[14]。另一种“自发熵减过程”是万有引力系统，是一个“反热力学过程”，其热容为负值^[9]。这就是自然界自发性负熵的两个来源。

太空中的暗物质与暗能量是当今物理学的前沿领域。可初步认定是众多基本粒子与光子的脱耦态。当在太空低温条件下结合成氢或氦原子(熵减)后，就被恒星引力自发聚集成高温聚变核燃料，热核反应将之转变为高频光子与基本粒子返回太空脱耦，是基本粒子的“单向循环流”。恒星发出的一部分高频光子被行星吸收，就成为地球热机的负熵来源，构成一部庞大的“宇宙永动机”，如图1所示。

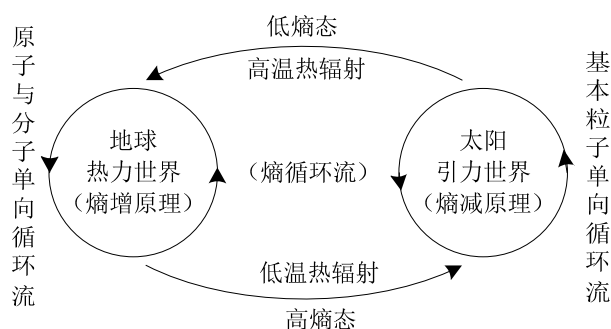


图1 宇宙永动机运行图

太阳系的半径约一光年，是最小的宇宙单元，可以近似认为是一个与外界既无质量交换、也无热量交换的“动态复杂孤立系统”。在太阳系内存在着质量、能量、熵三类“单向循环流”，相互耦合，互为推动力，构成一

部“宇宙永动机”。三个单向循环流的旋转方向是一致的，如同一部前后轮都是主动轮的坦克车，履带则是热辐射与“熵循环流”。

许多学者早已知道，“熵增原理”只适用于地球，不

适用于宇宙^[1]，也知道引力系统是反热力学的。但未能将两者有效统一，原因是没有“过程”概念与其方法的指引。“相变”可以使两个“相反过程”衔接与转换。

其实热力学与万有引力理论都是自然规律的近似描述。热力学强调的是“对流”与“传导”两种传热方式，忽略了热辐射效应。地球上也有万有引力，所以才有大气层的不均匀分布，甚至出现在毫米尺寸上的“贝纳德花纹”。引力理论忽略了短距离内多聚体的“负热容效应”，致使两者完全隔离开来。但“过程”概念又使两者衔接起来了，证明太阳系是一个统一的“动态复杂孤立系统”。质量、能量、熵三类“动态不可逆循环系统”耦合组成“宇宙永动机”，不可能进入“热寂态”，如同一个轮子，只能前行，不能后退，也不能静止。这与当今热力学中的“静态简单孤立系统”概念有着本质差别。

特别值得注意的是，驱动“宇宙永动机”前行的履带为“光子不可逆循环流”，既是“能量”载体，又是“熵”载体。这就指明两者必有某种不可分割的依存关系。联想到薛定谔的“负熵”概念，发现可以用玻尔兹曼 H 定律定义单个光子的“负熵”：

$$S(\text{光子}) = k\nu \log(1/\nu) = -k\nu \log \nu$$

式中， ν 为光波的频率， k 为玻尔兹曼常数。

不难证明，一个高频光子转化成 n 个能量相等的低频光子，“熵增”值为 $\Delta S = k\nu \log n$ ，也可称之为“微观熵”，“光子”就是“微观负熵”。光子的“吸收”与“发射”是两个独立的“微观不可逆过程”。

“熵减原理”指的是“负熵”自发产生过程。太阳系空间因引力自发形成三个区块：太阳、行星与太空。太阳中超高温度核反应产生的基本粒子射向超低温太空脱耦，并重新合成为氢氦等轻元素；引力使氢等返回太阳，形成“基本粒子不可逆循环流”，这是“能量不可逆循环过程”，包括“光子不可逆循环流”。一部分高频光子射向地球，就成为地球“负熵”的来源，并使地球温度高于太空。“光”与“热”密切相关，是动能的两个极端形态，“不可逆过程”的总根源。

以上研究让我们得出一个大胆的结论：自然界的一切物质形态与能量形态都处在不停地“演化”与“回归循环”过程中，分“可逆循环”与“不可逆循环”两大类。可逆循环由两个相变点构成，不产生“熵”；不可逆循环由三个以上相变点构成，产生不可逆“熵”。其中“物质不可逆循环”要有能量耗散，产生热力学“正熵”；“能量不可逆循环”要有质量亏损，产生动力学“负熵（光子）”。两者耦合，构成“熵不可逆循环流”。“正熵”与“负熵”经过“质能相变”，相互抵消，分别称之为

“质量守恒定律”，“能量守恒定律”与“质能守恒定律”。

6 “时间”与“过程”两个元概念的相互依存关系

“时间的性质”是当今理论物理研究的前沿。自1988年霍金出版了著名的《时间简史》以来，全世界都在寻找时间不可逆性、流逝性、相对性、客观性、多样性、均匀性等特征的由来。“时间机器”与“星际旅行”是其争论的焦点。当我们发现“宇宙永动机”之后，就对“时间定义”问题产生了质疑^[16-23]。

“过程”与“流程”是两个不完全相同的概念，“过程”的含义要宽泛得多。凡与时间有关的一切变化量都称“过程”，可用函数 $f(t)$ 表示。最基础的过程函数是速度 $v(t)$ ：

$$v(t) = \Delta x / \Delta t$$

其中， Δx 为空间位移， Δt 为所需时间间隔。

在牛顿力学中，空间-时间-质量是三个完全独立的基本物理量，称绝对空间与绝对时间。爱因斯坦相对论颠覆了这一观念，三者都与速度有关， $v(t) \leq c$ (光速)，即说，速度才是真正的物理自变量，时间、空间、质量等都是速度的函数。故应有物理逻辑关系式：

$$\overline{\Delta t}(\nu) \triangleq \frac{\Delta x}{\nu}$$

应该用速度 $\bar{\nu}$ 来定义时间的方向与速度。宇宙永动机中的三种“不可逆循环流”的循环方向是一致的。可以用这三种“不可逆循环流”的速度、周期与方向来统一定义时间。故有三种时间：(1) 热力学时间，即物质不可逆循环流时间；(2) 宇宙时间，即能量不可逆循环流时间；(3) 虚时间，即熵不可逆循环流时间，与闵可夫斯基四维时空中时间空间化坐标(ict)有关。这就是用不可逆循环流定义的时间多样性、客观性、不可逆性、相对性与均匀性的来源。

这四种“不可逆循环流”都必须三个相变点以上构成的复杂过程。当循环只有两个相变点时，就只能构成“可逆循环”，性质不同于“不可逆循环”。这是保守质点动力学中的“时间反演不变性”问题，也是平衡热力学中的内部时间问题。

由于时间不可逆循环流中有多重相变，不是一个均匀光滑的圆环，不同于哥德尔宇宙中的“时间环”概念。不存在孙子回到祖母时代杀死祖母的逻辑悖论。相变使他不可能活着回到祖母生他父亲之前的时代。

所谓“时间反演不变性”是对质点力学方程而言，当进行 $t \rightarrow -t$ 变换时，方程性质不变，由此推断可以有

(-t)方向存在,即时间“倒流”。这一误解与时间如何定义有关,如果定义时间有起点与终点,是一个没有相变的光滑的无限长直线,全同空间坐标,就会有坐标原点引起的对正负方向的误解。对于只有机械动能与势能两个相变点的无耗散“能量循环流”,改变方向的不是“时间”方向,而是空间方向,两次空间方向的转向是不同时的,分前后。这种“时间段”的前后秩序与衔接才是时间,机械钟就是这样建造的。时间是“流逝量”,过去与未来是不对称的。过去是确定性的,未来是不确定性的,是混沌动力学中的“极限环”或“混沌吸引子”。“不动点”指的也是“可逆平衡态”。“过去”也是多择性的,不同人会有不同的“过去”或“历史”。所以才有量子电动力学中的“费曼历史求和”方法,也可能存在众多不同历史的小宇宙,太阳系只是其中一种。

凡点粒子运动就有时间。热力学平衡态中有许多微观可逆循环运动,故也应有时间,普里高京称“内部时间”。即平衡态外部时间 $1/\Delta t=0$ 时,内部时间 $\Delta t' \neq 0$ 。内部时间可以外在化,原子钟就是典型事例。有关系式 $1/\Delta t' > 1/\Delta t$ 。

关于“时间”起点与终点的概念:可以用“局部时间”解释,两个相变点之间的“时间段”就是人的感知时间。人们用“光阴似箭”来形容时间,光的“发射点”与“吸收点”是两个相变点。二者之间的局部时间就是人们日常的时间概念。然而光的“吸收点”也就是新的“发射点”,但光频会改变。故时间起点与终点“同源”。总之“时间”的完整结构是含三个以上相变点的复杂“不可逆循环流”,可以比较全面地说明时间的各种特性。

“时间”寄存于“过程”之中,是因果单向有序的终极表象,是自然界“自组织”过程的总根源^[13],是当今“复杂性科学”中的两个关键词。

参考文献

- [1] 陈家镛. 过程工业与过程工程学 [J]. 过程工程学报, 2001, 1(1): 8-9.
- [2] 郭慕孙. 过程工程 [J]. 过程工程学报, 2001, 1(1): 2-7.
- [3] 李佐虎. 从“酸碱联产”到“化学工程学”理论基础的重新定位——生态循环工程学的由来 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(3): 427-432.
- [4] 李佐虎. 生态化工新过程将撑开另一片蓝天——记中国科学院过程工程研究所李佐虎教授 [J]. 科学中国人, 2009, (2): 10-15.
- [5] 冯之浚. 中国循环经济高端论坛 [M]. 北京: 人民出版社, 2005.
- [6] 金涌, 陈定江. 过程工业与循环经济——在过程工业中推进循环经济发展[M]/李洪钟. 过程工程—物质, 能源, 智慧. 北京: 科学出版社, 2010: 388-398.
- [7] 宋瑞祥. 零排放——后工业社会的梦想与现实 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [8] 赵洗尘. 循环经济文献综述 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
- [9] 赵凯华, 罗蔚茵. 力学, 第 2 版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [10] 赵凯华, 罗蔚茵. 热学, 第 2 版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [11] 冯端, 冯少彤. 溯源探幽——熵的世界 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [13] 尼科利斯, 普里戈京. 非平衡系统的自组织 [M]. 徐锡申, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [14] 伊·普里戈金, 伊·斯唐热. 从混沌到有序 [M]. 曾庆宏, 沈小峰, 译. 上海: 上海译文出版社, 1987.
- [15] 郑重知. 不可逆热力学及现代反应动力学导论(上) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [16] 史蒂芬·霍金. 时间简史 [M]. 吴忠超, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1995.
- [17] 刘辽, 赵峥. 黑洞与时间的性质 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [18] 李·斯莫林. 时间重生 [M]. 钟益鸣, 译. 杭州: 浙江人民出版社, 2017.
- [19] 亚当·弗兰克. 关于时间大爆炸暮光中的宇宙学和文化 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [20] 都筑卓司. 时间的奥秘 [M]. 王旭, 译. 北京: 科学出版社, 1997.
- [21] 伊戈尔·诺维科夫. 时间之河 [M]. 吴王杰, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [22] 郭树源. 时间与物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [23] 彼得·柯文尼, 罗杰·海菲尔德. 时间之箭 [M]. 江涛, 向守平, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1995.