

JIYU Agent DE  
FUZA XITONG JIANMO YU FANGZHEN

# 基于Agent的 复杂系统建模与仿真

张俊瑞 编著



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

# 基于 Agent 的复杂系统建模与仿真

张俊瑞 编著

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书简单介绍了复杂系统的相关理论及其仿真平台,着重介绍了利用基于 Agent 的建模与仿真方法对复杂系统进行仿真时需要考虑的相关问题,并在本书的最后给出了具体的模型实例——井下避灾模型。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于 Agent 的复杂系统建模与仿真/张俊瑞编著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2018.5  
ISBN 978-7-5635-5442-3

I. ①基… II. ①张… III. ①软件工具—应用—系统建模—研究②软件工具—应用—系统仿真—研究 IV. ①N945.12-39②N945.13-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088120 号

---

书 名 基于 Agent 的复杂系统建模与仿真  
编 著 者 张俊瑞  
责任编辑 付小霞  
出版发行 北京邮电大学出版社  
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)  
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)  
网 址 www.buptpress3.com  
电子信箱 ctrd@buptpress.com  
经 销 各地新华书店  
印 刷 北京九州迅驰传媒文化有限公司  
开 本 787 mm×960 mm 1/16  
印 张 9.5  
字 数 186 千字  
版 次 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-5442-3

定价:48.00 元

如有质量问题请与发行部联系  
版权所有 侵权必究

# 前 言

基于 Agent 的建模与仿真是研究复杂系统最有效的途径之一,是当前最具有活力的仿真方法学,它克服了传统建模技术存在的不足,为研究复杂系统提供了新的思路。基于 Agent 的建模与仿真方法采用自底向上的建模方式,将复杂系统中的元素用 Agent 表示,通过对 Agent 的行为及其之间的交互关系和社会性进行刻画来描述复杂系统。目前,基于 Agent 的建模与仿真方法在很多领域得到了应用,如社会、经济、人工生命、地理与生态、工业过程和军事领域等。

本书对复杂系统的相关理论及其仿真平台进行了简单介绍,着重介绍了利用基于 Agent 的建模与仿真方法对复杂系统进行仿真时需要考虑的相关问题,并在本书的最后给出了具体的模型实例。

本书共分为 7 章。第 1 章是绪论,对本书的研究和应用背景及相关的研究领域进行了简单介绍;第 2 章介绍了复杂性、复杂系统与复杂性科学的相关内容;第 3 章介绍了基于 Agent 的建模与仿真方法以及仿真平台;第 4 章利用形式化描述语言 Z 对 Agent 及 Agent 系统进行了形式化描述;第 5 章从 6 个方面对 Agent 的行为进行了详细介绍;第 6 章介绍了两种 Agent 通信语言——KQML 和 FIPA ACL,并简单介绍了基于 XML 的 Agent 通信;第 7 章是模型实例。

本书是作者多年来的科研成果的积累,旨在与广大读者进行交流,也希望读者通过本书对基于 Agent 的复杂系统建模与仿真有一定的了解,并在今后对这个研究方向持续关注。

感谢在本书筹划、编写过程中给予我帮助的每一个人,特别要感谢山西省计算机学会秘书长、太原科技大学陈立潮教授,太原科技大学软件工程研究所所长潘理虎副教授,晋中学院的秦振吉教授、常文萃教授、芦彩林教授、罗永莲副教授和赵丽副教授的指导和帮助,他们对本书的编写和修改工作提出了许多宝贵的意见和建议。此外,本书还得到了晋中学院“1331 工程”创客团队建设计划资助,在此对相关领导和同事表示衷心的感谢。

本书在编写过程中直接或间接地引用了许多行业内专家和学者的文献和著作,在此也向他们表示感谢!

虽然作者试图通过多次核对参考文献的内容来减少书中可能会出现错误或作者自己理解、描述不准确的地方,但由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请广大专家和读者批评指正。

张俊瑞  
2017年12月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究及应用背景 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 应用背景 .....	1
1.2 相关研究领域介绍 .....	3
1.2.1 复杂系统 .....	3
1.2.2 Agent 技术 .....	3
1.2.3 基于 Agent 的建模与仿真 .....	3
第 2 章 复杂性、复杂系统与复杂性科学 .....	5
2.1 什么是复杂性 .....	5
2.2 复杂系统 .....	8
2.3 复杂适应系统 .....	11
2.4 复杂性科学 .....	13
本章小结 .....	15
第 3 章 基于 Agent 的建模与仿真 .....	16
3.1 Agent 技术 .....	16
3.1.1 Agent 的定义 .....	16
3.1.2 Agent 的结构 .....	17
3.1.3 Agent 的学习机制 .....	20
3.2 基于 Agent 的建模与仿真方法 .....	21
3.2.1 基于 Agent 的建模 .....	23
3.2.2 基于 Agent 的仿真 .....	24

3.3 基于 Agent 的建模与仿真平台 .....	25
3.3.1 Swarm .....	25
3.3.2 Repast .....	33
本章小结 .....	41
<b>第 4 章 Agent 的形式化描述</b> .....	<b>42</b>
4.1 形式化描述语言 Z .....	43
4.2 Agent 的形式化描述 .....	44
4.2.1 Agent 的结构 .....	44
4.2.2 定义集合的数据类型 .....	45
4.2.3 Agent 的环境和任务的定义 .....	46
4.3 Agent 系统的形式化描述 .....	49
本章小结 .....	51
<b>第 5 章 Agent 的行为</b> .....	<b>52</b>
5.1 Agent 间的关系 .....	52
5.2 Agent 社会的结构形态 .....	53
5.3 Agent 的行为分类 .....	55
5.3.1 Agent 行为的分类标准 .....	55
5.3.2 Agent 行为的特征 .....	56
5.3.3 Agent 行为的分类 .....	56
5.4 Agent 的行为模型 .....	57
5.5 Agent 的内部结构 .....	59
5.6 Agent 的交互机制 .....	61
5.6.1 协作机制 .....	62
5.6.2 通信机制 .....	63
5.6.3 协商机制 .....	65
5.7 Agent 的行为规范 .....	66
本章小结 .....	67
<b>第 6 章 Agent 的通信</b> .....	<b>68</b>
6.1 Agent 通信语言 .....	68
6.1.1 ACL .....	68

6.1.2	KQML .....	71
6.1.3	FIPA ACL .....	74
6.1.4	KQML 与 FIPA ACL 的区别 .....	77
6.2	Agent 间的通信 .....	77
6.2.1	Agent 间的通信问题 .....	78
6.2.2	Agent 间通信的连接方式 .....	78
6.3	基于 XML 的 Agent 通信 .....	80
6.3.1	XML 简介 .....	80
6.3.2	基于 XML 的 ACL .....	83
	本章小结 .....	86
<b>第 7 章</b>	<b>基于 Agent 的井下避灾模型 .....</b>	<b>87</b>
7.1	研究背景及现状 .....	87
7.2	模型的形式化描述 .....	89
7.3	模型的总体架构 .....	92
7.4	模型中的类及时序 .....	93
7.4.1	模型中的主要类 .....	94
7.4.2	模型的 UML 类图 .....	95
7.4.3	模型的时序图 .....	96
7.5	井下火灾避灾模型 .....	98
7.5.1	Agent 的空间活动环境 .....	98
7.5.2	Agent 的种类和属性 .....	101
7.5.3	Agent 的决策 .....	102
7.5.4	Agent 的学习机制 .....	104
7.5.5	模型的数据统计 .....	104
7.5.6	模型的主要参数 .....	105
7.5.7	仿真结果分析 .....	106
7.6	井下透水事故避灾模型 .....	110
7.6.1	Agent 的空间活动环境 .....	110
7.6.2	Agent 的种类和属性 .....	110
7.6.3	模型的运行规则 .....	111
7.6.4	模型的主要参数 .....	112
7.6.5	结果分析 .....	113



7.7 井下避灾路线的生成 .....	114
7.7.1 算法思想 .....	114
7.7.2 算法流程 .....	118
7.7.3 算法实现 .....	119
7.7.4 结果分析 .....	124
本章小结 .....	125
附录 1 巷道网格地图(井下火灾避灾模型) .....	126
附录 2 巷道网格地图(井下透水事故避灾模型) .....	127
附录 3 井下火灾避灾模型巷道网格地图的程序文件 .....	128
附录 4 井下透水事故避灾模型巷道网格地图的程序文件 .....	135
参考文献 .....	142

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究及应用背景

### 1.1.1 研究背景

为什么会有 20 世纪 30 年代的经济大萧条? 为什么纽约股票交易所 1987 年 10 月 19 日会出现股价暴跌? 为什么亚洲金融风暴最后会波及全球?

人类社会是如何组织的? 鸟群是怎样聚集的? 蚂蚁群是如何形成的? 人体中的细胞是怎样组织的? 大脑是什么? 动物的免疫系统是如何形成的?

这些问题没有人可以回答,至少目前科学也无法解释。虽然这些问题涉及的系统看似毫无关联,但是它们都属于同一种系统——复杂系统。

复杂系统的规模一般都较大,系统结构很复杂,系统各部分之间存在大量的交互,因此很难用数学分析或者其他形式化的方法来研究,目前最有效的研究途径之一是系统建模与仿真。

使用系统建模与仿真的方法来研究复杂系统时,最主要的问题是如何对目标系统建立仿真模型。国内外的研究表明,已有的建模方法并不能很好地刻画复杂系统,而采用基于 Agent 的建模与仿真(agent-based modeling and simulation, ABMS)方法,通过对复杂系统中的基本元素及元素之间交互的建模与仿真,可以将复杂系统的微观行为和宏观“涌现”现象有机地结合到一起,是一种自底向上的、有效的建模仿真方式。

### 1.1.2 应用背景

我国是一个产煤大国,煤炭开采在我国有 1 800 多年的历史。长久以来,煤炭

一直是我国的主要能源,煤炭消费占我国一次性能源消费的比例始终维持在 70% 以上。因此,煤炭开采也就成为我国就业人数众多的一个行业。从世界范围来看,我国煤炭产量占全世界煤炭总产量的 37% 左右,但事故死亡人数却占全世界煤矿死亡总人数的 70% 左右。

据国家煤矿安全监察局的年度报告,2010 年煤矿事故起数和死亡人数分别同比减少 213 起、198 人,分别下降了 13.2% 和 7.5%。全国煤矿瓦斯事故起数和死亡人数分别同比下降了 7.6% 和 17.5%,其中,特别重大瓦斯事故起数和死亡人数分别同比下降 50% 和 70.9%。全国小煤矿发生事故 970 起、死亡 1 700 人,分别同比下降 14.1% 和 3.2%;小煤矿百万吨死亡率为 1.417,同比下降 6%。由此可见,在 2010 年,总体安全形势有所好转。但是还应看到,仍然发生了重大的煤矿安全事故,如山西临汾王家岭煤矿透水事故、河南平顶山凤凰岭煤矿瓦斯爆炸事故、河南平煤集团平禹四矿瓦斯突出事故等,均造成了重大人员伤亡。从国家煤矿安全监察局的通报中还可以看到,中小煤矿发生的事故还很多,问题还很严重。

我国煤矿事故频发的原因在于发生煤矿安全事故的主客观条件仍然存在。首先,我国煤层自然赋存条件复杂多变,影响煤矿安全生产的因素多,是造成事故的客观因素。我国煤矿开采的煤层大多属于石炭二叠纪的煤层,其中瓦斯含量大、煤层透气性低,地质构造复杂。高瓦斯矿井和煤与瓦斯突出矿井占 48%,突出灾害的发生次数每年达数百次。其次,国家对煤矿企业的技术定位不够准确是主观因素。煤矿在人们的心目中是技术水平不高、要求比较低的劳动密集型产业,忽视了煤矿技术投入和产业技术人才的培训。第三,大多数煤矿从业人员素质低,工程技术人员缺口多,难以适应高危环境的要求。最后,煤矿安全基础工作薄弱,安全技术装备不足,抗灾能力差。在短期内无法改变这些主客观条件的情况下,制定科学的安全生产、事故预防及应急处理方案,成为煤矿安全生产与管理的核心问题。

综合全国煤矿死亡人数和百万吨死亡率来看,我国煤矿行业整体安全状况不断趋于好转。但是,由于许多方面的问题还未得到很好解决,煤矿事故多、伤亡大、职业病严重的状况尚未得到根本好转,我国煤矿的百万吨死亡率仍远远高于一些发达国家,虽然近几年百万吨死亡率已经呈下降趋势,但绝对死亡人数仍然很多。当前,我国经济的快速增长对煤炭行业发展提出了更高的要求,即要求煤炭工业持续、稳定、健康地发展。

百万吨死亡率是衡量一个国家煤炭安全的重要指标,我国煤矿百万吨死亡率一直居高不下,与先进采煤国家相比,差距很大。2000—2004 年,我国煤矿的百万吨死亡率为 6~3,2005 年的为 2.83,2006 年的为 2.04,2007 年的为 1.485,2010 年的为 0.783,呈下降趋势,而美国、澳大利亚等发达国家的煤矿百万吨死亡率是 0.03~0.05,我国煤矿百万吨死亡率是美国等先进国家的 30~50 倍。

现在,降低百万吨死亡率、减少矿难发生时的死亡人数是我国煤矿实现安全生

产亟待解决的一个问题。因此,如果能提出一种更好的方法来实现井下避灾,将具有重要的理论意义和实践意义。

## 1.2 相关研究领域介绍

### 1.2.1 复杂系统

在近几十年中,各个不同研究领域中的科学家,从不同的角度突破了近代科学的、以还原论为主要特征的思维框架,形成了现代系统思想与系统方法的思想体系和框架,复杂系统与复杂性科学的研究日益得到人们的重视。

什么是复杂系统?复杂系统是复杂的系统吗?如何理解复杂系统中的“复杂”?复杂系统中的“复杂”是相对的还是绝对的?复杂系统和简单系统是如何划分的?复杂系统与简单系统是相对的吗?世界是复杂的吗?复杂性是世界的根本属性吗?我们又该如何处理复杂性?这些问题需要现代科学解答。因此,对复杂系统进行研究具有重要的现实意义。

### 1.2.2 Agent 技术

1977年,Carl Hewitt提出了“并发演员模型”(concurrent actor model)。在这个模型中,他提出了“一个具有自兼容性、交互性和并发处理机制”的对象,并称之为“actor”,这是第一个 Agent 系统。Hewitt 认为 Agent 是一种处于一定环境下的、包装的计算机系统,该系统能在特定的环境下灵活、自主地活动。

1995年,Wooldridge 给出了 Agent 的两种定义:弱定义和强定义。弱定义中,Agent 是具有自治性、社会性、反映性和能动性的硬件系统或基于软件的计算机系统;强定义中,Agent 除了具备弱定义中的所有特性外,还应具备一些人类才具有的特性,如知识、信念、义务、意图等。其中,关于 Agent 的弱定义得到了大多数研究者的认可。

### 1.2.3 基于 Agent 的建模与仿真

对自然现象、工程、生物、人工生命、经济、管理、军事、政治和社会等领域复杂系统和复杂性研究的需求,对传统的建模与仿真方法提出了挑战,因而需要新的建

模与仿真方法的出现。

复杂系统拥有大量交互的个体,因此,个体间的交互和个体的行为影响了系统的复杂性。基于 Agent 的建模与仿真,将复杂系统中的各个实体用 Agent 来描述,通过对 Agent 的行为及 Agent 间的交互关系对复杂系统进行刻画和描述。

基于 Agent 的建模与仿真是国内外学者热门研究的一个方向。ABMS 是复杂适应系统理论与分布式人工智能技术相融合的结果。自从 20 世纪 70 年代末提出该方法以来,它发展非常迅速,目前已经成为一种对复杂系统进行分析与模拟的思想方法与工具。现在,基于 Agent 的建模仿真方法是普遍关注的一个发展方向,人们更侧重于研究多个 Agent 之间的相互作用,它为描述和研究复杂系统提供了更加符合现实和更加有效的建模框架。

## 第 2 章

# 复杂性、复杂系统与复杂性科学

### 2.1 什么是复杂性

“复杂性”这个词并非古已有之,而是有一个演变的过程。它是由“复杂”这个日常用语演变而来的,逐渐演变成了“复杂性”这个名词,因而在现代汉语词典中能找到“复杂”这个词,但找不到“复杂性”这个词。百度百科对“复杂”的解释是:事物的种类、头绪等多而杂,如我们会经常说的“人际关系很复杂”“局势比较复杂”“心情较复杂”等。

复杂性研究是与以往完全不同的一个研究趋势及方向,经历了漫长的萌芽和发展的过程,并逐步走向成熟和完善。复杂性研究至少可以追溯到 20 世纪之初。1928 年,奥地利生物学家贝塔朗菲(Bertalanffy)在他的论文《生物有机体》中首次提出了“复杂性”的概念,“复杂性”科学的研究由此开始。1948 年,魏沃尔(Warren Weaver)发表《科学与复杂性》一文,将复杂性作为科学研究的对象,并给出了复杂性研究的第一个规划,这也被看作科学界向复杂性进军的宣言书。20 世纪 50 年代到 70 年代,耗散结构论、突变论、协同论、混沌论、超循环论、分形理论等新科学理论相继诞生,不同领域、不同层次、不同类型的复杂性获得全面的研究,对自然史的探索得到空前发展。20 世纪 80 年代,复杂性研究开始得到科学共同体的承认,并形成了不同的研究学派,复杂性研究开始走向繁荣。随后,出现了独立的复杂性科学研究组织[如美国的圣塔菲研究所(Santa Fe Institute, SFI)等],形成了统一的复杂性科学研究团体,开始出现专门研究复杂性的刊物,如《复杂性》《涌现》等。此后,复杂性研究进入了相对成熟的发展阶段。

什么是复杂性?目前并没有统一的定义,学科背景和研究对象不同,复杂性的定义就有差别。美国记者约翰·霍根(John Horgan)在他所著的《科学的终结》一书中记述:麻省理工学院的物理学家塞思·劳埃德(Seth Leoyd)曾经通过电子邮件向他提供了一份关于复杂性定义的清单,分别为:

- (1) 信息 (information) (Shannon);
- (2) 熵 (entropy) (Gibbs, Boltzmann);
- (3) 算法复杂性 (algorithmic complexity);
- (4) 算法信息量 (algorithmic information content) (Chaitin, Solomonoff, Kolmogorov);
- (5) 费希尔信息 (Fisher information);
- (6) Renyi 熵 (Renyi entropy);
- (7) 自描述代码长度 (self-delimiting code length) (Huffman Shannon-Fanna);
- (8) 纠错代码长度 (error-correcting code length) (Hamming);
- (9) 切尔诺夫信息 (Chernoff information);
- (10) 最小描述长度 (minimum description length);
- (11) 参量个数或自由度或维数 (number of parameters, degrees of freedom, dimensions);
- (12) Lempel-Ziv 复杂性 (Lempel-Ziv complexity);
- (13) 共有信息或通道容量 (mutual information, channel capacity);
- (14) 演算共有信息 (algorithmic mutual information);
- (15) 相关性 (correlation);
- (16) 储存信息 (stored information) (Shaw);
- (17) 条件信息 (conditional information);
- (18) 条件演算信息含量 (conditional algorithmic information content);
- (19) 计量熵 (metric entropy);
- (20) 分形维数 (fractal dimension);
- (21) 自相似 (self-similarity);
- (22) 随机复杂性 (stochastic complexity) (Rissanen);
- (23) 混合 (sophistication) (Koppel, Atlan);
- (24) 拓扑机器容量 (topological machine capacity) (Crutchfield);
- (25) 有效或理想的复杂性 (effective or ideal complexity) (Gell-Mann);
- (26) 分层复杂性 (hierarchical complexity) (Simon);
- (27) 树形多样性 (tree sub-graph diversity) (Huberman, Hogg);
- (28) 同源复杂性 (homologous complexity) (Teich, Mahler);
- (29) 时间计算复杂性 (time computations complexity);
- (30) 空间计算复杂性 (spatial computation complexity);
- (31) 基于信息的复杂性 (information-based complexity) (Traub);
- (32) 逻辑深度 (logical depth) (Bennett);

- (33)热力学深度(thermodynamic depth)(Lloyd, Pagels);
- (34)语法复杂性(grammatical complexity)(position in chomsky hierarchy);
- (35)Kullback-Liebler 信息(Kullback-Liebler information);
- (36)区别性(distinguishability)(Wooters, Caves, Fisher);
- (37)费希尔距离(Fisher distance);
- (38)分辨力(discriminability)(Zee);
- (39)信息距离(information distance)(Shannon);
- (40)演算信息距离(algorithmic information distance)(Zurek);
- (41)Hamming 距离(Hamming distance);
- (42)长幅序(long-range order);
- (43)自组织(self-organization);
- (44)复杂适应系统(complex adaptive systems);
- (45)混沌边缘(edge of chaos)。①

事实上,关于复杂性的定义不止上述 45 种,还有比较常见的如描述复杂性、原始复杂性、内禀复杂性和潜在复杂性等。此外还有:德国的 Friedrich Cramer 提出的根本复杂性、临界复杂性和亚临界复杂性,美国的 Warren Weaver 提出的组织复杂性和非组织复杂性,我国清华大学吴彤教授提出的结构复杂性、边界复杂性、运动复杂性、客观复杂性、认识复杂性和文本意义复杂性,钱学森先生等提出的关于复杂性的定义。

复杂性定义如此之多,是不是意味着人们非常清楚“什么是复杂性”“什么不是复杂性”呢?事实刚好相反。这是因为,这些复杂性定义涉及的内容及领域非常广泛,定义的方式及标准也各不相同,有用计算机语言的,有用自然科学知识的,有用日常描述语言的,还有用哲学思辨方法的。这些定义方式并没有对复杂性进行统一和明确的界定,它们之间可能没什么联系,也可能相互矛盾。例如,存在这种情况:某个对象根据某一复杂性的定义是复杂的,但根据别的定义这个对象却不复杂。

中国人民大学哲学系苗东升教授认为:“复杂性是现代科学中最复杂的概念之一,至今无法给出统一的定义是正常的,也许根本就不存在统一的复杂性定义。”被誉为“现代电子计算机之父”的美籍匈牙利数学家冯·诺依曼(Von Neumann)也曾指出“阐明复杂性和复杂化概念应当是 20 世纪科学的任务,就像 19 世纪的熵和能量概念一样。”显然,冯·诺伊曼提出的科学任务在 20 世纪并未完成。

实际上,我们不必追求复杂性的统一定义,至少目前不必追求,应当认识到不

① 以上定义的提出者各不相同,塞思·劳埃德只是进行了收集和整理,第二个括号里为定义的提出者。



同学科中对复杂性的定义是有区别的。多样性和差异性 is 复杂性固有的内涵,如果只接受一种意义下的复杂性,就否定了复杂性本身。

## 2.2 复杂系统

目前,关于复杂系统的定义还很不统一,至少有 30 多种,具有代表性的主要有:

- (1)复杂系统就是混沌系统(混沌学派);
- (2)具有自适应能力的演化系统(Santa Fe);
- (3)包含多个行为主体(Agent)具有层次结构的系统;
- (4)包含反馈环的系统(Stacey);
- (5)任何人不能用传统理论与方法解释其行为的系统(John Warfield);
- (6)动态非线性系统。

虽然对于复杂系统尚未有统一的认识与定义,但是一般都认为复杂系统应该具有以下基本特征。

### 1. 非线性(不可叠加性)

相互作用是事物发展变化的终极原因。相互作用分为线性和非线性两种。线性相互作用产生简单性,无法造就复杂性。非线性意味着无穷的多样性、差异性、可变性、非均匀性和创新性。元素之间、子系统之间的非线性相互作用是系统产生复杂性的必要条件,没有非线性就没有复杂性。因此,复杂系统都是非线性的动态系统。

### 2. 动态性

动态性是复杂系统显现出复杂化的重要原因。复杂系统随着时间的演变,经过系统内部和系统与环境的相互作用,不断适应、调节,经过不同阶段和不同的过程,向更高级的有序化发展,涌现出独特的整体行为与特征。

### 3. 非周期性

复杂系统的行为(或表现)一般是没有周期的。非周期性表明了复杂系统演化的不规则性和无序性,系统的演化不具有明显的规律。复杂系统在演变过程中不会重复原来的轨迹,总是在一个有界的区域内展示出一种极其“无序”的振荡行为。

### 4. 开放性

复杂系统与外部环境相互关联、相互作用,与外部环境相统一,是开放的系统。任何一种复杂系统都是在开放的环境下形成的,也只有在开放的环境下才能维持