

# 第1章 智能决策与复杂系统

周炜星 谢文杰

华东理工大学金融学系

2023年秋

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题

# 智能决策简介

- 智能决策一直是人类关心的问题。
- 运筹帷幄之中，决胜千里之外。
- 何为智能？
- 为什么需要智能？
- 在一个极其简单的环境下，个体能否展现出智能？
- 如何在复杂环境中进行智能策略的学习，特别是在模拟的复杂环境下，如何训练智能体获得智能决策能力，是深度强化学习主要面对和需要解决的问题。

# 智能决策简介

智能决策的主体包括居民、社区、政府、经济体以及联合国等国际组织，在不同的时间和空间尺度上都面对着大量的决策问题。

- 对学生而言，选择不同食堂是一个决策问题；
- 对旅行者而言，规划旅游路线是一个决策问题；
- 对政府而言，疫情防控措施是一个决策问题；
- 对经济体而言，选择贸易合作伙伴是一个决策问题；
- 对国际组织而言，协调国际关系、化解国际冲突是决策问题。

作为人类命运共同体的组成部分，主体在不同尺度上、不同空间上、不同时间上的每一次决策，都会影响人类命运共同体的未来发展。

# 复杂金融系统中的智能决策

- 在复杂金融系统中，个人投资者、机构投资者和监管部门共同构成了一个动态演化的复杂巨系统。
- 美国次贷危机引发的全球金融海啸促使科学家重新审视主流经济金融理论，提出了当前金融理论所面临的挑战。
- 由于金融系统具有非线性、动态性、随机性等复杂特征，如何有效识别、度量、预警和防范风险，会直接影响全球金融经济系统的稳定和健康发展。
- 基于智能算法对复杂社会经济系统进行极端风险和系统性风险的预警和防控，具有重要现实意义和科学价值。
- 如何对动态演化的市场环境进行实时监控，对市场环境状态进行建模分析，对系统性风险及其传染进行识别、度量、预警和防控，是深度强化学习能够有所作为的领域。

# 金融市场是典型的复杂系统

- 复杂金融系统是一个由庞大数量、相互关联、互相影响的个体共同组成的系统。
- 投资者行为能够决定宏观市场行为，从微观行为到宏观行为的跨越，是复杂系统研究人员希望理解和分析的关键问题。
- 金融系统中每天产生海量信息，包括投资者情绪、市场行情、交易行为和其他另类数据（Alternative Data）。
- 复杂金融系统中海量、异构、多源的数据都是投资者的决策信息，金融系统的复杂关联也导致了系统的脆弱性。

## 金融市场是典型的复杂系统

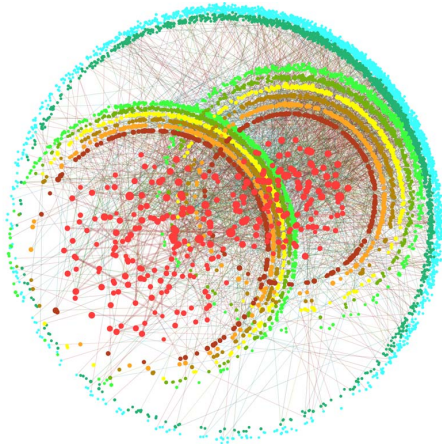


图 1: 金融交易网络



# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统**
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题

# 复杂性科学

## 复杂性科学定义

复杂性科学是指以复杂系统为研究对象，以超越还原论为方法论特征，以揭示和解释复杂系统运行规律为主要任务，以提高人们认识世界、探究世界和改造世界的能力为主要目的的一门“交叉学科”。复杂性科学主要包括早期研究阶段的一般系统论、控制论、信息论、人工智能，以及后期研究阶段的耗散结构理论、协同学、突变论、超循环理论、混沌、分形、自组织临界理论和元胞自动机等。

复杂性科学的关键不在于学科本身，而在于不同学科之间的交叉融合，在于学科之间的协同创新，共同解决科学问题和实践难题。

# 复杂系统定义

诺贝尔物理学奖得主**帕里西**在论文《复杂系统：一个物理学家的观点》里写道：“**复杂系统有许多可能的定义。我将复杂系统定义为：如果一个系统的行为在很大程度上取决于系统的细节，那么该系统就是复杂的，且这种依赖性往往是非常难以理解的。**”  
复杂系统的定义非常之多，也各不相同。例如，复杂系统的另一个定义为“**复杂系统是具有涌现和自组织行为的系统**”。

## 复杂系统的通俗定义

复杂系统由大量相互作用的成分组成，不存在中央控制，通过简单运作的规则产生出复杂的集体行为和复杂的信息处理，并通过学习和进化产生适应性。

复杂系统存在的三个共性：

- 复杂的集体行为：个体简单，规则也简单，不存在中央控制或领导者，但集体却产生出了复杂的行为模式。
- 信号和信息处理：信息、信号的传递和利用。
- 适应性：所有的系统都通过学习和进化进行适应，即改变自身的行为以增加生存或成功的机会。

# 复杂系统类型

个体之间通过物质、能量和信息的交换而产生相互作用，并通过与环境交互以适应环境变化，改变自身特征属性与交互行为，如此形成的系统称作适应系统。

- 生物网络
- 社会网络
- 金融经济网络

在物理系统中，个体之间也会存在关联关系和相互作用，一些作用关系可以通过较为严格的函数或方程来表示和刻画，如行星之间的引力关系等。

- 恒星、星系、行星。
- 沙堆模型。

# 复杂系统研究

复杂系统建模是智能体学习和优化智能策略的基础和关键。如何高效、高质量地建模复杂系统呢？复杂网络方法和思想是研究复杂系统与复杂社会现象的重要工具。

- 复杂社会系统研究：自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件等“黑天鹅”事件。
- 虚拟社会系统研究：人类行为的海量日志数据。
- 复杂经济系统研究：面对近年来的经济危机、欧债危机、粮食危机、金融危机、全球新冠疫情、俄乌冲突等极端事件，人类亟需反思，突发事件和复杂现象背后的形成机制和原因是什么？
- 复杂金融系统研究：面对复杂金融系统，人们如何在维持金融系统稳定性与稳健的同时，有效配置资源，为社会经济系统高效运行提供动力，是一个亟需解决的问题。

# 复杂环境特征

我们将从不同角度刻画和分析复杂环境特征：

- 完全可观察的和部分可观察的环境
- 单智能体和多智能体
- 确定的和随机的环境
- 片段式和延续式环境
- 静态和动态环境
- 离散和连续环境
- 已知和未知环境

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模**
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题

# 智能体与环境的交互示意图

复杂环境建模是智能体学习和优化智能策略的基础，环境模型的好坏决定了智能体决策行为的优劣，因此需要深入分析复杂系统的特征规律和环境状态表示。

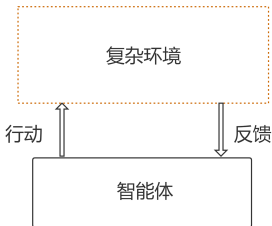


图 2: 智能体与环境的交互示意图

图2中给出了一个简单的智能体与复杂环境进行交互的框架，智能体在复杂环境中学习和优化智能策略。



# 复杂环境状态变量类型

复杂环境的状态特征、智能体行为动作以及反馈信息等都需要进行变量表示。图3给出了四种简单类型的数据结构示意图。

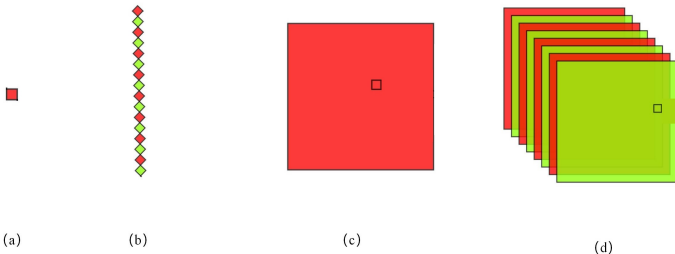


图 3: 常用数据类型

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模**
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题

# 典型决策系统模型框架

智能体作为智能决策的主体，如何处理复杂环境的**不可观察性**、**随机性**、**连续**、**不可知**等特征性质，是智能系统建模的关键。智能体模型的主要功能是信息处理和智能决策。

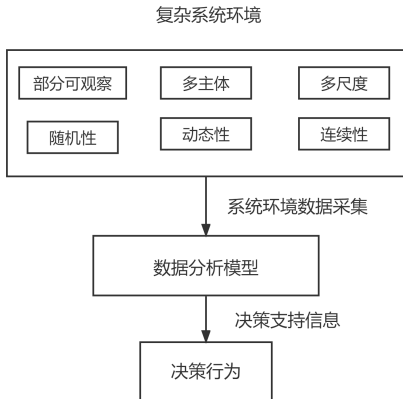


图 4: 典型决策系统建模框架



# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模**
- 6 应用实践
- 7 课后习题

智能决策系统建模框架由环境和智能体组成，融合深度强化学习的智能决策系统将更加复杂。深度强化学习的训练过程就是智能体和环境的交互过程。

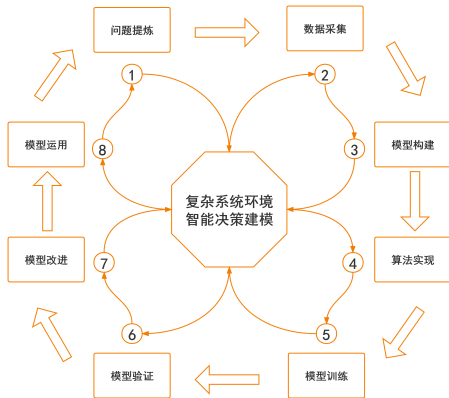


图 6: 智能决策系统建模流程框架示意图

# 问题提炼

智能决策系统建模的首要任务是明确所要解决的问题，界定问题所涉及的概念，并对问题进行抽象和提炼。

- 一般来说，单目标决策问题要易于多目标决策问题。
- 抓住主要矛盾，忽略次要矛盾，通过合理抽象。
- 问题提炼要求对复杂环境进行简化建模。
- 对问题进行抽象。
- 对特征变量进行表示。

对于问题的提炼切忌太理想化，设计一些不可能实现的目标。如解决准确预测金融危机这一问题，问题虽然很重要，但实现难度之大会让人觉得不切实际。

# 数据采集

在数据采集过程中，样本数据需要与智能体拟解决的问题相契合。

- 数据采集是模型训练的基础。
- 问题提炼过程中所涉及的环境特征等变量都需要进行数据采集。
- 采集数据的质量会影响智能体训练效率和模型最终绩效。
- 数据的规模越大，所包含的噪声也越多，需要进行数据清洗。
- 对所提炼的问题进行审视。
- 一般而言，在实践应用过程中，开发者大部分时间和精力都在进行数据采集和数据预处理。



# 模型构建

模型构建包括环境模型构建和智能体模型构建。

- 在模型的设计过程中，开发者可以先从简单模型入手，然后通过模型升级和迭代，逐步完善，提高模型性能和质量。
- 从简单模型入手，在训练过程中发现问题、解决问题，设计新模块或者子模型，进行模型升级与迭代更新，不断循环改进。
- 例如：时间序列预测问题，我们可以尝试一些经典的循环神经网络模型（RNN），完成模型训练后，对模型性能进行测试，如果模型性能不理想，可以进一步考虑更高级更复杂的LSTM模型和GRU模型等。

# 算法实现

TensorFlow和Pytorch等深度学习框架为算法实现提供了数量众多的可复用代码模块。

优点：

- 针对模型进行程序设计和代码实现，面对复杂问题和复杂模型，TensorFlow和Pytorch都提供了很好的支持和实现方法。
- 熟练地利用现有的成熟计算框架和预训练模型，能够提高模型开发效率。
- 增强决策系统的稳定性和可靠性。

缺点：

- 灵活性不足
- 适配性不足
- 可扩展性不足

# 模型训练

人工智能和深度学习时代，模型训练是需要重点关注和用心投入的环节。高质量的样本数据和优秀的智能模型，是智能决策系统成功实现的基础。高质量的样本数据可以训练优秀的智能模型，能够充分运用硬件资源，高效地完成模型训练。

- 深度学习模型的训练对硬件的要求较高。
- 模型训练之初可以先设计一些简单数据集，如对完整数据集的随机抽样来构建子数据集。
- 流行的计算平台TensorFlow和Pytorch框架都对分布式、GPU等高性能计算模式进行了很好的集成。
- 在模型训练和超参数调优过程中，深刻理解模型和算法原理是有效调参和高效训练模型的关键，我们不能因为开源代码的易获得性而忽略了对算法原理的理解和学习。

# 模型验证

模型训练后，我们需要对训练好的模型进行验证或测试，考察模型实际运用的效果，并重点关注模型的泛化性能。

- 模型训练数据收集后，我们将采集到的数据分成训练集、验证集和测试集。
- 智能模型在训练数据集上进行训练。
- 在验证集上进行可信、可靠的模型验证。
- 交叉验证方法简单且易于理解，是机器学习中估计模型性能的常用验证方法。
- 例如， $K$ 折（ $K$ -Fold）交叉验证方法将数据集均匀拆分为 $K$ 个子集，每次使用 $K - 1$ 个数据子集作为训练集来模型训练，剩下的一个子集当做验证集进行模型验证，因此 $K$ 折交叉验证方法需要进行 $K$ 次模型训练。

# 模型改进

如果验证模型后发现决策效果没有达到预期，我们就需要对问题提炼、数据采集、模型构建和模型训练过程进行分析和排查，找出数据采集、系统建模、模型训练过程中存在的错误之处或者数据错误之处，重新进行数据采集、建模和训练，改进模型结果。

- 问题提炼是否符合实际？
- 数据采集是否准确？是否引入数据偏差？
- 数据颗粒度是否合理？
- 数据时效是否达到要求？
- 模型设计是否可以改进？
- 算法实现过程是否存在逻辑问题？
- 模型超参数设定是否合理？
- 训练过程是否充分？有无过拟合或欠拟合情况？

诸多问题需要在模型改进的反复优化和迭代更新过程中进行深入全面的思考。

# 模型运用

经过验证和改进的模型可以应用和部署到现实复杂环境之中，对模型的实际运用效果进行考察。

- 随着环境变化与时间推移，复杂问题背景也会发生变化，我们需要时刻监控模型运行效果。
- 智能系统的构建和迭代更新过程本身就是一个复杂系统演化过程。
- 智能决策系统的设计过程本身就是一个复杂工程，各个环节和各个子模型构成了一个复杂工程系统，环环相扣，耦合关联，相互影响。

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践**
- 7 课后习题

# 金融市场时间序列

在复杂系统研究中，时间序列数据非常常见，时间序列在金融市场中更是十分普遍，如图7展示了2017年至2021年香港恒生指数的日度价格时间序列。

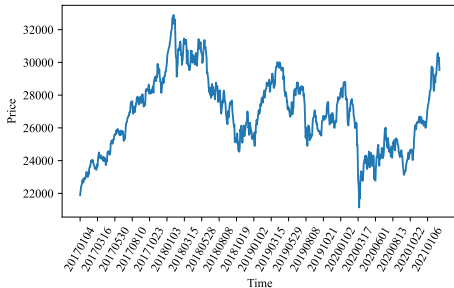


图 7: 恒生指数时间序列示意图



# 可视图算法

时间序列用  $\{x_i\}_{i=1,\dots,L}$  表示，在可视图算法中，每个时间点数据对应可视图网络节点，网络节点  $i$  和网络节点  $j$  之间的连边关系存在，必须满足以下条件：

$$\frac{x_j - x_k}{j - k} > \frac{x_j - x_i}{j - i}, \quad (1)$$

其中  $i < k < j$ 。可视图网络表示成  $G = \langle V, E \rangle$ ，其中，集合  $V = \{v_i\}$  表示可视图网络的节点集合，对应时间序列中数据点  $x_i$ ，连边集合表示为  $E = \{e_{ij}\}$ ，其元素  $e_{ij} = 1$  表示节点  $v_i$  和节点  $v_j$  相连，说明原始时间序列中数据点  $x_i$  和数据点  $x_j$  满足公式 (1)。将图7中恒生指数时间序列转化成可视图网络，如图8所示，我们可以在图8的基础上通过网络分析方法挖掘蕴含于可视图结构之中的金融市场信息。

# 可视图算法



图 8: 恒生指数时间序列转化成可视图网络示例

# 纲要

- 1 智能决策
- 2 复杂系统
- 3 复杂环境建模
- 4 智能体建模
- 5 智能决策系统建模
- 6 应用实践
- 7 课后习题**

## 课后习题

- 1 什么是智能决策？请列举现实生活的例子。
- 2 什么是复杂系统？请列举一例。
- 3 复杂环境有哪些特征？
- 4 什么是金融复杂性？如何刻画金融复杂性？
- 5 金融复杂性的来源？
- 6 什么是计算实验金融？
- 7 复杂环境状态变量有哪些类型？
- 8 智能决策系统建模包括哪些环节？