·科学技术哲学·

CMU 的科学哲学与珀尔的因果理论

——科学哲学如何影响人工智能？

The Philosophy of Science in CMU and Pearl's Theory of Causality: The Influences of Philosophy of Science on Artificial Intelligence

董焕防 /DONG Huanfang

（清华大学科学史系，北京，100084）
（Department of History of Science, Tsinghua University, Beijing, 100084）

摘　要：科学哲学之于科学的价值一直存在着争议。本文通过研究 CMU 的科学哲学对于朱迪·珀尔的因果理论的贡献来讨论科学哲学对于人工智能的影响。珀尔的因果理论是人工智能的最重要理论之一。CMU 科学哲学研究成果“将‘干预’表示为图结构上的变化”对珀尔建立其因果理论起到了非常关键的作用。由此可见，科学哲学对于人工智能具有重要影响。我们还尝试分析了 CMU 科学哲学研究对珀尔构建因果理论之所以能产生贡献的原因，以及科学哲学可以影响人工智能的原因。

关键词：朱迪·珀尔　因果理论　贝叶斯网络　因果模型　干预

Abstract: The value of philosophy of science to science has always been controversial. This paper discussed the influences of philosophy of science on artificial intelligence by studying the contribution of the philosophy of science in CMU to Judy Pearl's theory of causality, which is one of the most important theories in artificial intelligence. The philosophy of science in CMU proposed a research result that represents "intervention" as a change in the graph structure, which plays a very critical role in Pearl's establishment of his theory of causality. Therefore, it can be seen that philosophy of science has an important impact on artificial intelligence. We also tried to analyze why the research results of philosophy of science in CMU contributed to Pearl's construction of his theory, and why philosophy of science can influence artificial intelligence.

Key Words: Judea Pearl; Theory of causality; Bayesian networks; Causal nodels; Intervention

中图分类号：B025.5; N031　DOI: 10.15994/j.1000–0763.2025.01.004　CSTR: 32281.14.jdn.2025.01.004

背　景

科学哲学是研究科学的基础、方法以及影响的哲学分支，分为一般科学哲学和分支科学哲学。科学哲学之于科学的价值一直存在着争议。以物理学为例，爱因斯坦肯定了科学哲学对于物理学的价值，[1] 而费曼否定了科学哲学对于物理学的价值。美国国家科学院院刊于 2019 年发表了论文“为什么科学需要哲学”，[2] 该论文展示了哲学在生命科学的三个领域有重要价值，论证了哲学对于生命科学有重要的且富有成效的影响。较之物理学和生物学，人工智能是一门新兴的科学学科，而且哲学思考

收稿日期：2022 年 6 月 22 日；**返修日期：**2023 年 3 月 7 日
作者简介：董焕防（1979–）男，山东安丘人，清华大学科学史系博士研究生，研究方向为一般科学哲学、统计学哲学、机器学习哲学。Email: philml@qq.com

在人工智能的发展过程中始终发挥着重要的影响，比如司马贺（Herbert Simon）[3]和明斯基（Marvin Minsky）[4]的研究工作。因果理论，作为人工智能的分支之一，是在《因果性》[5]出版后在人工智能领域逐步获得广泛认可的。考虑到物理学和生物学等传统科学学科与人工智能的差异性，尤其是哲学在这些学科发展过程中发挥作用的模式不同，本文不展开讨论一般意义上科学哲学对于科学的影响，而是聚焦于讨论科学哲学对于人工智能（尤其是因果理论）的影响。

本文的目标是阐述卡耐基梅隆大学（Carnegie Mellon University，以下简称CMU）科学哲学研究对珀尔（Judea Pearl）构建其因果理论的影响，进而讨论科学哲学对于人工智能的影响，以及影响之所以产生的原因。第一部分是关于珀尔的因果理论的简要介绍。在第二部分介绍了CMU科学哲学研究。在第三部分详细阐述了CMU科学哲学研究对于珀尔的因果理论的影响。在第四部分我们尝试分析了CMU科学哲学研究对珀尔构建因果理论之所以能产生贡献的原因，以及科学哲学之所以能够影响人工智能的背后原因。

一、朱迪·珀尔的因果理论

珀尔1936年生于以色列，1965年在美国布鲁克林理工大学（Polytechnic Institute of Brooklyn）取得博士学位，1970年加入加州大学洛杉矶分校计算机系并一直工作至今。2011年美国计算机学会将计算机领域最高荣誉图灵奖授予珀尔，表彰其发展的概率演算和因果演算对于人工智能做出的基础性贡献。珀尔发展的概率演算是以贝叶斯网络作为概率表达和推理的语言，1988年出版的专著《智能系统的概率推理》涵盖了其在概率演算上的主要研究成果，包括了珀尔提出的贝叶斯网络的理论和算法。[6]珀尔构建的因果演算是以贝叶斯网络上的干预作为研究因果关系的基本建模语言，2000年出版的专著《因果性》涵盖了其在因果演算上的主要研究成果，[5]2009年出版其第二版。[7]珀尔关于贝叶斯网络的相关研究为人工智能中的概率推理建立了基础，这是人工智能发展历史上的重要贡献，最权威的人工智能教科书《人工智能——一种现代方法》专门用一章来介绍贝叶斯网络的理论和算法。[8]可以将贝叶斯网络理论和因果理论视为珀尔对人工智能做出的两个重要贡献。

拉卡托斯奖是科学哲学领域的最高奖之一。2001年的拉卡托斯奖授予珀尔2000年出版的专著《因果性》，说明这是科学哲学视角下的重要贡献。事实上珀尔的因果理论是在科学哲学家的影响下发展起来的，我们将在第四部分来详细阐述具体的影响。通过珀尔的个人履历可以看出来，这是学术界对珀尔的因果理论的最早奖项之一。考虑到专著《因果性》的技术性比较强，珀尔与其合作者于2016年出版了面向统计学家的专著《统计中的因果推断》，[9]于2018年出版了面向大众的专著《为什么》，[10]其中文版[11]于2019年出版。

珀尔在其论文“以因果革命的七个火花来看机器学习的理论障碍”中提出了概率推理的三种层次：观察（Seeing），干预（doing，或者intervention，manipulation），想象（imaging）。[12]“观察”对应的推理任务是给定一个观察后推断其后验概率，比如：观察到某个症状后推断患者的疾病的概率。“干预”对应的推理任务是进行一个干预（比如动作、政策或者实验）后推断其效果，比如：服下阿斯匹林后头痛能不能被治愈？“想象”对应的推理任务可以视为对“观察”和“干预”两种推理任务的综合，比如：如果我当时服下的不是阿斯匹林而是感冒冲剂，我的头疼能不能被治愈？贝叶斯网络是用于描述和推理“观察”这类推理任务，贝叶斯网络上的变化（包括某些边被删除）用于描述和推理“干预”以及“想象”。对“观察”的描述和推理通常使用概率论中的条件概率进行计算，以贝叶斯规则来联系联合概率、边缘概率以及条件概率。一个概率推理问题可以表示为这三种概率上的推理。习惯上把三种概率描述的信息称之为概率分布图表。计算机科学家为了便于算法设计，通常将信息表示为

某个离散数学结构，比如序列、树、图或者网络等。珀尔为概率信息设计了一种离散数学结构，称之为贝叶斯网络。贝叶斯网络是有向无环图，可以视为概率分布图表的紧凑表示。通过贝叶斯网络，概率信息和概率推理问题就转化为有向无环图上的信息和问题。珀尔提出了一种通过检验贝叶斯网络上是否满足d-分割（d-separation）性质来判断条件独立性的算法。因为条件独立性是概率推理以及因果推理中的基本问题，d-分割是贝叶斯网络上的最重要的图结构性质之一。关于d-分割的重要性在第四部分会继续讨论。贝叶斯网络可以简单描述为：每个随机变量对应图上的一个节点，节点之间的边表示变量之间的依赖关系，依赖关系被量化地表示为条件概率。贝叶斯网络的假设条件是：联合概率表示为节点的边缘概率与条件概率的乘积（对没有父节点的节点计算其边缘概率，对有父节点的节点计算其条件概率），其中条件概率P(X|Y)中条件Y仅仅包含X的父节点。因果模型包括了图结构、每个变量的函数表示以及外生变量的随机分布。“干预”被表征为从因果模型到子因果模型的映射，可以直观地理解为所有指向被干预变量的边被截断。“想象”是反事实推理，同时包含了某些变量上的“观察”和“干预”。这些变量上的“观察”表示实际发生的信息，而这些变量上的“干预”表示不同于实际发生的信息，即反事实信息。因为“观察”可以通过条件概率进行表达，而“干预”可以表示为模型上的变化，所以“想象”对应的反事实推理就可以通过因果模型来实现。

二、CMU的科学哲学

CMU哲学系始创于1985年。三位创始哲学家分别是科学哲学家卡拉克·格里默（Clark Glymour），统计学哲学家泰迪·赛登菲尔德（Teddy Seidenfeld），以及数理逻辑学家威尔弗里德·西格（Wilfried Sieg）。格里默创立了以其学生[①]为主的研究组（以下称之为“CMU科学哲学研究组”），主要包括彼特·斯伯茨（Peter Spirtes）、理查德·谢恩斯（Richard Scheines）以及凯文·凯利（Kevin Kelly），研究领域主要是科学哲学，具体包括因果理论以及形式学习理论等。本文中“CMU科学哲学”是指CMU科学哲学研究组在科学哲学领域的研究。CMU哲学系 的显著特色是其交叉性和严谨性，主要研究领域是科学、计算、数学、伦理、价值理论的基础，力求提升这些学科的基础、方法以及概念。这些研究领域分为三个方向：科学哲学、逻辑与数学哲学、伦理与价值理论。以科学哲学为例，哲学系与统计学系、机器学习系、经济学系等进行交叉性研究。交叉性也表现在研究生项目上，比如CMU非常著名的交叉型博士生项目“逻辑、计算、方法论及哲学”是由哲学系、计算机系以及数学系共建。

CMU科学哲学的主要研究成果是1993年出版的专著《因果性，预测与搜索》，[13]并于2000年出版了第二版。[14]正如这本书的前言所陈述，CMU科学哲学组关于因果性的研究主要建立在以下三个研究之上：（1）格里默出版于1980年的专著《理论与证据》的第七章（提出了因果图、因果模型两个概念）；[15]（2）格里默及其学生出版于1987年的专著《发现因果结构》；[16]（3）格里默及其学生发表于1990年的论文《来自于概率的因果》，[17]，[18]之后扩展为1991年的论文“从概率到因果”。[19]简单地说，以上研究成果中直接影响了珀尔构建其因果理论的是：将经济学家习惯使用的结构方程（形如：Y=a*X+U表示变量Y依赖于变量X以及U，U通常表示不可观察的随机变量，也称之为外生变量）表示为图，即X、Y、U三个变量表示为节点，而且从X到Y存在有箭头的连线，从U到Y也存在带箭头的连线。进而结构方程组上的变化被表示为图上的变化。如此，经济学家“将‘干预’建模为结构方程组上的变化”这一重要思想就被CMU科学哲学组转化为“将‘干预’建模为结构方程组上的变化”，在接下来的第四部分我们会详细阐述这一思想

①格里默与学生的学术谱系关系来自www.academictree.org以及匹兹堡大学图书馆。

对珀尔构建其因果理论的影响。为了与一般意义上的“图”区分开，本文中的图特指“图模型”，包括贝叶斯网络以及马尔可夫网络等。

为什么将结构方程组替换为图模型如此重要？以条件独立性问题为例子，当概率信息以结构方程组的形式表达时，没有有效的推理方法来解决条件独立性问题。但当概率信息以图模型的形式表达时，基于珀尔提出的d-分割可以有效地解决条件独立性问题。条件独立性问题是因果推理中的基本问题。做为珀尔的因果理论中的重要组成部分，论文“实证研究的因果图式”提出的干预演算（do-calculus）所推断的因果问题正是建立在条件独立性判断这个基本问题之上。[20]事实上CMU科学哲学研究组在其研究因果性的早期就采用了d-分割来判定条件独立性问题。这对应着图1中所示的从珀尔关于贝叶斯网络的专著《智能系统中的概率推理》[6]到斯伯茨在乌普萨拉所演讲的论文“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”[21]之间的文献依赖关系。

三、CMU科学哲学研究对于朱迪·珀尔的因果理论的影响

珀尔的因果理论主要在《因果性》中进行了陈述。[5]他在本书的前言中提到了在其构建和发展其因果理论的过程中得益于与统计学、经济学、流行病学、哲学以及人工智能等领域的专家进行的交流与合作。尤其提到了与詹姆斯·伍德沃德（James Woodward）、南希·卡特赖特（Nancy Cartwright）、布莱恩·斯科姆斯（Brian Skyrms）、格里默以及斯伯茨之间的哲学讨论。正如在第三部分所述，格里默以及斯伯茨是CMU科学哲学研究组的主要成员，接下来我们阐述CMU科学哲学研究组在珀尔构建其因果理论的过程中所发挥的具体影响。

作为珀尔对于其因果理论的面向大众的诠释性著作，《为什么》这本书在第218页提到“卡耐基梅隆大学的哲学教授斯伯茨是在我之前就开始使用网络模型研究因果关系的前辈，他的观点对我后续的研究有着非常关键的影响。在听到他在瑞典乌普萨拉发表的一次演讲后，我意识到，执行干预可以被看作从因果图中删除箭头。在那之前，与历代统计学家一样，我一直戴着枷锁思考，试图只借助静态的概率分布图表来思考因果论”。[11]这段陈述为研究“CMU科学哲学研究到底是在什么具体细节上对珀尔构建因果理论产生了影响”这一问题提供了重要的线索。

根据以上陈述，我确定了珀尔在乌普萨拉参加的会议是1991年第9届逻辑、方法论与科学哲学国际大会。在这次大会上斯伯茨做了题目为“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”的报告，[21]斯伯茨在这个报告中宣讲了CMU科学哲学研究成果，即将“干预”建模为图模型上的变化。在这个大会上，珀尔与他的学生沃玛做了题为“一个关于推断出的因果的理论”的报告。[22]巧合的是，珀尔和斯伯茨的报告被安排同一个会议议题“社会科学的基础”，这使得他们有机会相互交流彼此的研究。关于斯伯茨及沃玛与珀尔在1991年的讨论，我在2022年5月与凯利的线上讨论中进行了确认。凯利是CMU科学哲学研究组的主要成员，参与编写了CMU科学哲学研究组关于因果推断的第一本专著《发现因果结构》。[16]

较之珀尔在《因果性》致谢的五位哲学家，[7]他在《为什么》第345页的致谢部分只提到了CMU科学哲学研究组的三位哲学家：斯伯茨、格里默以及谢恩斯，并声称“他们把我从概率的悬崖边推向了因果关系的惊涛骇浪”。[11]这足以可以说明CMU科学哲学研究组对珀尔构建其因果理论所发挥的重要影响。我们接下来诠释“从概率的悬崖边推向了因果关系的惊涛骇浪”背后更深层的含义。珀尔在《因果性》的前言提到，他于1988年出版了专著《智能系统中的概率推理》，[6]珀尔坦陈他当时的观点是“概率构成了人类知识的基础，而因果性仅仅提供了对概率关系上的复杂模式进行简化和组织的方式”。珀尔后来在认识上发生了很大变化，把因果关系视为人类知识的基本构件，而概率则是因果机制的表层现象。我们可以从“他们把我从概率的悬崖边推向了因果关

系的惊涛骇浪”这句话，来理解CMU科学哲学研究组对于珀尔从概率为中心到以因果为中心的认知转变中起到的关键作用。与珀尔长期以概率为中心的认知观点相对，CMU科学哲学组则长期以因果为中心，在第五部分我们会分析这一对比的背后原因。虽然1991年乌普萨拉会议上斯伯茨宣讲的论文第一次使得珀尔意识到对“干预”的正确建模应该是图上的变化而不是静态的图，CMU科学哲学组基于动态结构来研究因果的方法已经发表在更早的文献中，比如:格里默及其学生发表于1990年的论文“来自于概率的因果”，[17]，[18]之后扩展为1991年的论文“从概率到因果”，[19]这些论文都强调了因果性的核心地位。

接下来我们将在更具体的文献依赖关系层面上，来阐述CMU科学哲学研究组对珀尔建立其因果理论的影响。图1是为了分析上述影响而画的文献依赖关系图，它并不完全等同与文献引用关系图。文献依赖强调的是思想上的传承关系的严谨性。因为某些原因，有些思想传承关系与文献引用关系并不一致，比如在1991年的乌普萨拉会议上珀尔受到斯伯茨演讲的影响，但是实际上珀尔在表达其借鉴CMU科学哲学组“基于动态结构来研究因果的方法”这一思想时使用的引用文献不是斯伯茨的论文“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”[21]却是斯伯茨等人1993年出版的专著《因果，预测与搜索》，[13]尽管后者是在前者基础上进一步发展形成的。

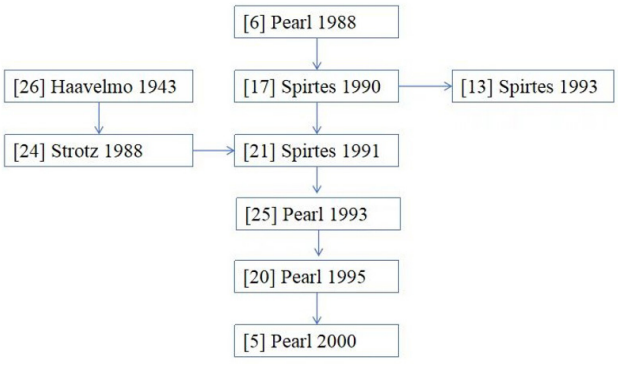

图1 文献依赖关系图

珀尔在1995年发表于著名统计学期刊*Biometrika*上的论文“实证研究的因果图式”[20]标志着珀尔的因果理论的正式建立。这篇期刊论文的一个简短版本是作为会议论文“关于行动的一个概率演算”[23]在1994年发表于人工智能的顶级会议“人工智能中的不确定性”。论文“实证研究的因果图式”[20]提到由来自瑞典的两位经济学家罗伯特·斯特罗兹（Robert Strotz）和赫尔曼·沃尔德（Herman Wold）发表于1960年的论文“递归系统与非递归系统”，[24]该论文率先提出“将干预表示为从模型中去掉一些方程”这一思想。当时经济学家还以结构方程作为主要的模型语言，尚未使用图作为模型语言。论文“递归系统与非递归系统”[24]也是斯伯茨在乌普萨拉会议上的论文“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”[21]的思想源头，斯伯茨对论文“递归系统与非递归系统”[24]中使用的结构方程替换为图，从而实现了基于图语言对干预的表达。斯伯茨这篇论文促成了珀尔使用“将干预建模为图上的变化”这一思想的第一篇论文“评论：图模型、因果性与干预”。[25]论文“实证研究的因果图式”[20]在致谢部分用了非常强调的陈述“很多的研究是受到斯伯茨等人的专著《因果、预测与搜索》[13]的启发，该专著率先提出了基于图语言来刻画操纵（manipulation①，等同于intervention）”。正如前面所述，专著《因果、预测与搜索》[13]是在论文“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”[21]之上进一步发展并整合其他论文后形成的专著。此外，珀尔在论文“实证研究的因果图式”[20]以及其专著《为什么》[10]都分别陈述了“基于模型②改变来表示干预”的概念源头是来自于特里夫·哈维默（Trygve Haavelmo）的论文“联立方程组的统计蕴含”，[26]但是珀尔关于这个概念源头的追溯是在1991年从斯伯茨获知“基于图模型改变来表示干预”这个思想之后进行的。珀尔在2015年发表了一

①CMU科学哲学研究组使用manipulation来表达干预，而珀尔使用intervention来表达干预。
②此处的“模型”的具体含义是结构方程。

篇综述性论文“特里夫·哈维默与因果演算的出现”[27]来纪念哈维默在思想源头上对其因果理论的贡献。综上所述，珀尔因果理论中“基于图概念来刻画干预”这一思想的依赖路径为论文“联立方程组的统计蕴含”[26]“递归系统与非递归系统”[24]“从含有隐变量的统计数据中构建因果图”[21]“评论：图模型、因果性与干预”[25]“实证研究的因果图式”，[20]图1描述了更为详细的依赖关系。珀尔在与其合作者的专著《统计学中的因果推断》[9]详细阐述了这一思想路径。

这样我们就在文献依赖关系这一具体层面上论述了CMU科学哲学研究组对于珀尔构建其因果理论做的贡献。事实上他们之间的交互是双向的。CMU科学哲学研究组在其专著《因果、预测与搜索》，[13]，[14]谢恩斯在其论文“因果推断介绍”，[28]以及斯伯茨在其论文“因果推断介绍”[29]中都强调了他们基于图模型来研究因果性理论是建立珀尔在贝叶斯网络上的研究成果尤其是d-分割（d-separation）理论之上的。所以，我们看到一个有趣的两步影响关系：首先是珀尔构建的贝叶斯网络理论为CMU科学哲学研究组提供了研究因果性的图模型，CMU科学哲学研究组“基于图模型上的变化来刻画干预”这一思想反过来又影响了珀尔建立其因果理论。

四、科学哲学为什么可以影响人工智能？

在第四部分，我们通过阐述文献依赖关系论述了CMU科学哲学对于珀尔建立其因果理论有重要贡献。在事实之外，进一步追问事实背后隐藏的规律是有价值的，因为这些规律可以使得我们更好地认知科学哲学对科学施加影响的模式。所以我们接下来尝试对“为什么CMU科学哲学研究组会对珀尔建立其因果理论有重要贡献？”进行探究。

因果性是科学哲学的最重要研究对象之一。亚里士多德以及休谟都对因果性做出过重要的研究成果。从上世纪50年代开始，关于概率因果性的研究取得很多突破，代表著作包括汉斯·赖欣巴哈（Hans Reichenbach）1956年在专著《时间的方向》[30]提出的共同原因原则，帕特里克·苏佩斯（Patrick Suppes)的专著《一个概率因果理论》，[31]斯科姆斯的专著《因果必然性》，[32]卡特赖特的专著《寻找并使用原因》，[33]以及卫斯理·萨尔蒙（Wesley Salmon）的专著《科学解释与世界的因果结构》。[34]CMU科学哲学研究组从上世纪八十年代就开始专注研究动作、实验以及政策的效果评估问题，这是广泛存在于统计学、经济学、医学、流行病学以及其他社会科学中的共性的因果推理问题。CMU科学哲学研究组意识到珀尔提出的贝叶斯网络的对于研究因果性的重要性，将贝叶斯网络作为他们研究因果推断的语言，尤其是他们将计算因果的“干预”表示为贝叶斯网络上的改变。正是这个思想对珀尔建立其因果理论产生重要影响。

每个学科约定了该学科的研究者要研究的的基本对象。正如上述的由科学哲学家做出的关于因果性的一系列研究成果，科学哲学家会自然地把因果性作为自己的研究对象。而作为计算机科学家的珀尔把不确定性推理①作为自己的研究对象也是自然的，因为不确定性推理是人工智能中的重要研究问题。不确定性推理的本质是概率计算。贝叶斯网络的提出正是出于为不确定性推理提供算法框架这样的目标。贝叶斯网络在直观上讲就是概率分布图标的图表示，但基于图表示可以更好的对概率推理进行算法设计。可见，珀尔提出贝叶斯网络是因为对概率推理进行算法化的目标（计算机科学家把算法设计视为基本的研究目标）。正因为如此，珀尔在很长一段时间内都将概率作为核心，而把因果性作为表面。这导致珀尔在很长一段时间内都是基于静态的概率分布图标来研究因果性，那个阶段珀尔没有在因果性研究上取得突破，正如珀尔自己所言“带着精神枷锁”

①不确定性推理对应uncertain reasoning或者uncertainty in artificial intelligence。

做因果性的研究。

可见一个研究者的学科角色会限制其认知，贝叶斯网络是珀尔提出来的，但是其对于研究因果性的重要价值却是CMU科学哲学研究组率先看到并使用的，即使用贝叶斯网络上的动态变化来刻画因果性。巧合的是1991年召开的逻辑、方法论与科学哲学国际大会给了珀尔与科学哲学家们交流的机会，珀尔在交流中得知CMU科学哲学研究，从而彻底改变了其之前对于贝叶斯网络的受限认知，完成了从概率到因果的认知转变。鉴于学科角色会限制研究者的认知视角，发展交叉型研究项目、举办交叉型学术会议、设立交叉型教育项目是有助于推进科学研究的。

以上阐述对于发展科学哲学与人工智能哲学之间的交叉研究是具有推广价值的。人工智能简单说是研究可靠自动推理的基础，其需要从已有的科学发展中吸纳方法论思想，而科学哲学恰好以澄清归纳存在于科学分支中的基本概念、基本方法以及基本思想为目标，对存在于科学理论以及实践中的具有哲学意义的模式进行显式地提取和阐释，这就使得人工智能与科学哲学之间的交叉部分越来越多越来越深刻。举个例子，曲线拟合问题是人工智能（尤其是机器学习）、统计学等科学分支中的最重要的基本问题之一，与科学哲学中关于实在论与反实在论以及统计解释等领域存在紧密的联系。基于这个联系，科学哲学有希望对机器学习的研究做出重大贡献。关于这个方向上的研究的基本结果可以参考《统计学哲学手册》。[35]

通过分析国际科学哲学杂志《英国科学哲学杂志》（*British Journal of Philosophy of Science*）以及《科学哲学》（*Philosophy of Science*）上最近几年发表的论文，我们可以看到这样一种趋势：科学哲学家越来越深入地研究科学分支中的基本问题。这使得科学哲学对于科学的直接影响变得越来越深远。一般科学哲学的核心研究对象包括归纳、解释、确认、因果性等，它们正在与人工智能（尤其是机器学习以及因果推断）产生越来越多的交叉，这在本质上决定了科学哲学研究对人工智能研究产生的影响会越来越多。另外一个趋势是人工智能对很多科学分支正在产生深刻影响，比如基于人工智能的数学定理证明，基于机器学习的蛋白质结构解析等。基于这样的联系，科学哲学对于人工智能的影响也正在间接转化为对科学的影响。通过直接影响和间接影响，科学哲学研究对于科学的影响正变得越来越多。回顾CMU哲学系的特色，即建立交叉性研究生项目以及鼓励交叉型研究，或许这是国内哲学系值得学习的模式。

作为本文的结尾，我们进一步讨论“CMU科学哲学研究组对珀尔建立其因果理论有重要贡献”所包含的价值形式。论文《为什么科学需要哲学》总结了哲学对科学产生价值的四种形式：（1）澄清科学概念；（2）对科学假设以及科学方法进行严格评估；（3）制定新概念和新理论；（4）促进不同科学之间的交互。[8] CMU科学哲学研究组对珀尔建立其因果理论产生的价值包含了以上哪些形式呢？ CMU科学研究组对珀尔将因果性定义在干预之上是有影响的，所以形式（1）是包含的。正是对因果概念做到了澄清，使得珀尔进一步建立了干预理论，这是珀尔因果理论的主要部分，所以形式（3）也是包含的。将因果定义在干预之上，使得人工智能、经济学、流行病学等学科关于因果的研究实现了进一步的交互，所以形式（4）也是包含的。

［参 考 文 献］

[1] Howard, D. 'Albert Einstein as a Philosopher of Science'[J]. *Physics Today*, 2005, 58(12): 34–40.

[2] Laplane, L., Mantovani, P., Adolphs, R., et al. 'Why Science Needs Philosophy'[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(10): 3948–3952.

[3] Newell, A., Simon, H. *Human Problem Solving*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972.

[4] Minsky, M. *The Society of Mind*[M]. New York: Simon & Schuster, 1988.

[5] Pearl, J. *Causality*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[6] Pearl, J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*[M]. San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1988.

[7]Pearl, J. *Causality*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[8]Russell, S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*[M]. Third Edition, London: Pearson, 2014.

[9]Pearl, J., Glymour, M., Jewell, N. *Causal Inference in Statistics: A Primer*[M]. New York: Wiley, 2016.

[10]Pearl, J., Mackenzie, D. *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*[M]. New York: Basic Books, 2018.

[11]朱迪·珀尔、达纳·麦肯齐. 为什么–关于因果关系的新科学[M]. 江生、于华 译, 北京: 中信出版社, 2019.

[12]Pearl, J. 'Theoretical Impediments to Machine Learning with Seven Sparks from the Causal Revolution'[EB/OL]. https://arxiv.org/abs/1801.04016, 2018. 2022–06–20.

[13]Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. *Causation, Prediction, and Search*[M]. New York: Springer-Verlag, 1993.

[14]Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. *Causation, Prediction, and Search*[M]. Cambridge: MIT Press, 2000.

[15]Glymour, C. *Theory and Evidence*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1980.

[16]Glymour, C., Scheines, R., Spirtes, P. *Discovering Causal Structure: Artificial Intelligence, Philosophy of Science, and Statistical Modeling*[M]. San Diego: Academic Press, 1987.

[17]Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. 'Causality from Probability'[A], Tiles, J., Dean, G., McKee, G. (Eds.) *Evolving Knowledge in Natural Science and Artificial Intelligence*[C], London: Pitman, 1990, 181–199.

[18]Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. 'Causality from Probability'[R]. Carnegie Mellon University, Department of Philosophy, Technical Report (CMU-PHIL-12), 1990.

[19]Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. 'From Probability to Causality'[J]. *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition*, 1991, 64(1): 1–36.

[20]Pearl, J. 'Causal Diagrams for Empirical Research'[J]. *Biometrika*, 1995, 82(4): 669–710.

[21]Spirtes, P. 'Building Causal Graphs from Statistical Data in the Presence of Latent Variables'[A], Skyrms, B. (Ed.) *Proceedings of the IX International Congress on Logic, Methodology, and the Philosophy of Science*[C], Uppsala, Sweden, 1991, 813–829.

[22]Pearl, J., Verma, T. S. 'A Theory of Inferred Causation'[A], Skyrms, B. (Ed.) *Proceedings of the IX International Congress on Logic, Methodology, and the Philosophy of Science*[C], Uppsala, Sweden, 1991, 789–811.

[23]Pearl, J. 'A Probabilistic Calculus of Actions'[A], de Mantaras, R., Poole, D. (Eds.) *Uncertainty in Artificial Intelligence*[C], San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1994, 454–462.

[24]Strotz, R., Wold, H. 'Recursive vs. Nonrecursive Systems: An Attempt at Synthesis'[J]. *Econometrica*, 1960, 28: 417–427.

[25]Pearl, J. 'Comment: Graphical Models, Causality, and Intervention'[J]. *Statistical Science*, 1993, 8(3): 266–269.

[26]Haavelmo, T. 'The Statistical Implications of a System of Simultaneous Equations'[J]. *Econometrica*, 1943, 11: 1–12.

[27]Pearl, J. 'Trygve Haavelmo and the Emergence of Causal Calculus'[J]. *Econometric Theory*, 2015, 31: 152–179.

[28]Scheines, R. 'An Introduction to Causal Inference'[A], McKim, V., Turner, S. (Eds.) *Causality in Crisis?*[C], Indiana: University of Notre Dame Press, 1997, 185–200.

[29]Spirtes, P. 'Introduction to Causal Inference'[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2010, 11(5): 1643–1662.

[30]Reichenbach, H. *The Direction of Time*[M]. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1956.

[31]Suppes, P. *A Probabilistic Theory of Causality*[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970.

[32]Skyrms, B. *Causal Necessity*[M]. New Haven and London: Yale University Press, 1980.

[33]Cartwright, N. *Hunting Causes and Using Them*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[34]Salmon, W. *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1984.

[35]Bandyopadhyay, P. S., Forster, M. *Handbook of the Philosophy of Science vol. 7: Philosophy of Statistics*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.

[责任编辑 王巍 谭笑]