

THE BOOK OF WHY

为什么

[美] 朱迪亚·珀尔 [美] 达纳·麦肯齐 著 江生于华 译

关于因果关系的新科学

THE NEW SCIENCE
OF CAUSE AND EFFECT

中信出版集团

THE BOOK OF WHY

为什么

关于因果关系的新科学

[美] 朱迪亚·珀尔 JUDITH PEARL

[美] 达纳·麦肯齐 DANA MACKENZIE 著

江生 于华 译

THE NEW SCIENCE
OF CAUSE AND EFFECT

图书在版编目(CIP)数据

为什么/(美)朱迪亚·珀尔,(美)达纳·麦肯齐
著;江生,于华译.--北京:中信出版社,2019.7
书名原文:The Book of Why: The New Science of
Cause and Effect
ISBN 978-7-5217-0507-2

I. ①为… II. ①朱… ②达… ③江… ④于… III.
①人工智能—普及读物 IV. ① TP18-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第082844号

The Book of Why: The New Science of Cause and Effect
Copyright © 2018 by Judea Pearl and Dana Mackenzie
Simplified Chinese translation copyright © 2019 by CITIC Press Corporation
All rights reserved.

本书仅限中国大陆地区发行销售

为什么

著者:[美]朱迪亚·珀尔 [美]达纳·麦肯齐
译者:江生 于华
出版发行:中信出版集团股份有限公司
(北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编 100029)
承印者:北京楠萍印刷有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:25.5 字数:365千字
版次:2019年7月第1版 印次:2019年7月第1次印刷
京权图字:01-2019-2972 广告经营许可证:京朝工商广字第8087号
书号:ISBN 978-7-5217-0507-2
定价:69.00元

版权所有·侵权必究
如有印刷、装订问题,本公司负责调换。
服务热线:400-600-8099
投稿邮箱:author@citicpub.com

推荐序

了解因果关系科学，从珀尔的《为什么》开始

珀尔教授一生致力于因果关系科学及其在人工智能方面领域的应用，这本科普著作是他毕生思想的沉淀，其中他以平实的话语介绍了因果推断的理论建构，每段文字都浸透着他对因果关系科学的热情。珀尔教授不仅学问做得好，还执着地追求真理，深入地反省自我，勇敢地阐述思想，在这个堆积术语、追逐名利的学术大氛围里，珀尔教授孤单的身影显得尤为意味深长。

为什么要写这本书？在此之前，珀尔教授已经出版过三部因果关系科学的专著，读者群仅限于数据分析或者人工智能的研究者，影响范围很窄。这本书则是这些专著的科普版，其面向更广泛的读者群体，着重阐述思想而非拘泥于数学细节。对渴望了解因果推断的人们来说，它既是因果关系科学的入门书，又是关于这门学问从萌发到蓬勃发展的一部简史，其中不乏对当前的人工智能发展现状的反思和对未来人工智能发展方向的探索。正如作者所期待的，这场因果革命将带给人们对强人工智能更深刻的理解。

统计学的传统教育忌讳讨论因果，权威的统计学家曾言：“……从未见过一种关于因果的数学语言，也从未发现过它的好处。”对此，珀尔在本书中的讨论与评述可谓良药苦口。很惭愧，笔者在北大讲授概率统计、机器学习、贝叶斯数据分析等一些与人工智能相关的课程时，也未曾谈及因果关系科学，更从未主动地去突破这种因果禁忌。

这部关于因果关系科学的科普著作如同为我们开启了一扇窗，让我们看到了更广阔的天地。笔者甚至觉得，此书比珀尔的三部因果关系科学专著都要好，理论之争的来龙去脉，学术江湖的恩怨情仇，正道沧桑的愤世嫉俗，授业解惑的苦口婆心，黎明曙光的呼之欲出……都由作者在此书中娓娓道来。对于读者而言，阅读本书就像亲历一次冒险之旅，整个过程充满了惊奇与兴奋、怅然若失与无限憧憬。

珀尔的《为什么》是笔者所知道的目前已出版的唯一一部因果关系科学方面的科普著作，作者在其中深入浅出地把因果关系科学的理论框架及其发展脉络展现给了读者。值得一提的是，那些曾经令人备感困惑的悖论作为经典统计学中的未解之谜，最终也经由因果关系分析而拨云见日，笼罩在其上的迷雾也随之烟消云散了。水落石出后，因果推断显得如此自然，就仿佛一切本该如此。对于每一位想了解因果关系科学的读者来说，以《为什么》为起点就意味着你踏上了一条捷径，在理解此书的基础上阅读因果关系科学方面的专业著作，你的收获将会更大。

虽然以科普读物为定位，作者仍然雄心勃勃地将这本书的英文书名确定为“*The Book of Why*”。（大凡以“*The Book of ……*”为书名的作品大多在某一领域意义重大，例如，《易经》的英文书名为“*The Book of Change*”，《诗经》的英文译名则为“*The Book of Songs*”。）这样一本重量级的科普读物，即便是对于一位专门从事人工智能或机器学习方面的研究的学者而言，如果其以前从未接触过因果推断，那么在初次阅读时他也未必能完全掌握书中的内容，因此这本书对于没有专业背景的普通读者的阅读难度可想而知。对于没有概率统计基础的读者来说，笔者的阅读建议是略过数学细节，着重抓住内容大意；而对于有一定概率统计基础的读者来说，笔者认为在阅读时一定不能放过正文中的数学精髓，这本书中的数学公式不多不少，刚好自圆其说。

在人人接触人工智能的今天，各种学说、思潮充斥于媒体，铺天盖地的科技快餐也让人应接不暇。昨天刚得报一个突破，今天就听说一场革命，人们在良莠不齐的信息中逐渐迷失了方向。1971年图灵奖得主、“人工智能”

概念的提出者约翰·麦卡锡教授曾说过：“不符合数学的，都是胡言乱语。”按照这个标准，现今的人工智能理论又有多少是真正有价值的呢？珀尔教授在这本新书中提出的因果关系视角可谓一股清流。古人云：“博学之，审问之，慎思之，明辨之，笃行之。”此话正合此书精神，与读者共勉。

《为什么》第一译者 江生

2019年5月于美国，旧金山湾区

前言

大约 20 年前，在为我的书《因果论》(*Causality*, 2000) 作序时，我发表了一段颇为大胆的评论，以致朋友们都劝我低调行事。“因果论经历了一次重大转变，”我写道，“从一个笼罩着神秘色彩的概念转变为一个具有明确语义和逻辑基础的数学对象。悖论和争议得以解决，模棱两可的概念得以阐明，那些依赖于因果信息、长期被认为是形而上的或无法解决的实际问题，现在也可以借助初等数学加以解决了。简言之，因果论已经完成了数学化。”

如今读到这段话，我自觉当时还是有些短视了。我所描述的“转变”被证明是一场改变了诸多科学理念的“革命”，现在，很多人称之为“因果革命”，而它在学术圈激起的波澜正蔓延至教育和应用领域。我相信，眼下是向更多读者分享它的大好时机。

我在本书中力图完成一个三位一体的使命：首先，用非数学的语言阐述因果革命的知识内涵，说明它将怎样影响我们的生活和未来。其次，分享在解决重要的因果问题时，我们的科学家前辈走过的英勇征程，无论成败，这些故事都值得讲述。

最后，回溯因果革命在人工智能领域的发源地，目的是向你介绍如何开发出用我们的母语——因果语言进行交流的机器人。新一代机器人应该能够向我们解释事情为何发生，为何机器人以它们选择的某种方式做出反

应，以及大自然为何以这样而非那样的方式运作。一个更加雄心勃勃的目标是，它们也应该能够让我们进一步认识人类自身：我们的思维为什么以这样的方式运行，以及理性思考原因和结果、信任和遗憾、目的和责任究竟意味着什么。

在我书写各种公式时，我很清楚我的读者是谁。但是当我为大众写作时，情况就不一样了——对我来说这是一次全新的冒险。这种新的体验很奇特，甚至可以说是我生命中令我收获最大的一场自我教育之旅。我需要用读者的语言组织思路，猜测读者的背景、可能提出的问题和给出的反应，这比我在写作此书之前对所有那些公式的探索都更能加深我对因果论的理解。

为此，我将永远感激你，我的读者。我希望你能与我一样迫不及待地寻求答案。

朱迪亚·珀尔

洛杉矶，2017年10月

导言：思维胜于数据

每一门蒸蒸日上的科学都是在其符号系统的基础上繁荣发展起来的。

——奥古斯都·德·摩根（1864）

本书将要讲述的故事会围绕一门科学展开，这门科学改变了我们区分事实与虚构的方式，但目前，它仍处于大众的视野之外。这门新科学非常重要，已经影响到了日常生活的种种重要的方面，并且还有可能进一步扩大影响范围，覆盖从新药开发到经济政策制定，从教育和机器技术到枪支管制乃至全球变暖等重大问题的探索 and 解决。值得注意的是，尽管这些问题涉猎的领域广泛多元且完全不具可比性，但这门新科学仍然成功地将它们全部纳入一个统一的框架，这在 20 年前是根本不可能实现的。

这门新科学并没有一个时髦的名字，和我的许多同事一样，我简单地称之为“因果推断”。它本身也并不是什么高科技。因果推断力图模拟的理想技术就存在于我们人类自身的意识之中。数万年前，人类开始意识到某些事会导致其他事的发生，并且改变前者就会导致后者的改变。没有其他物种领悟到了这一点，更别说达到我们所理解的这种程度。由这一发现，人类这一物种创造出了有组织的社会，继而建立了乡村和城镇，直至创建了我们今天所享有的科技文明。所有这一切都源于我们的祖先提出了这样一个简单的问题：为什么？

因果推断正是关于这个问题的严肃思考。它假设人类大脑是大自然有史以来为处理因果知识而设计出的最先进的工具。我们的大脑存储了海量的因果知识，而在数据的辅助下，我们可以利用这些知识解决当代社会所

面临的最紧迫的问题。一个更宏伟的目标是，一旦我们真正理解了因果思维背后的逻辑，我们就可以在现代计算机上模拟它，进而创造出一个“人工科学家”。这个智能机器人将会为我们发现未知的现象，解开悬而未决的科学之谜，设计新的实验，并不断从环境中提取更多的因果知识。

但在冒险推测未来发展之前，了解迄今为止因果推断或因果关系这门科学所取得的成就至关重要。我们将深入探讨它如何改变了几乎所有依赖数据信息的学科中研究者的思维模式，以及它将如何改变我们的生活。

这门新科学解决了以下这些看似简单明了的问题：

- 一种特定的疗法在预防某类疾病方面的效果如何？
- 是新税法的颁布还是层出不穷的广告推销活动导致了销售额的增长？
- 由肥胖引发的医疗保健成本增长的总体占比为何？
- 雇用记录能否证明雇主实施了涉及性别歧视的招聘政策？
- 我打算辞掉工作。我究竟该不该这么做？

这些问题的共同点在于它们都与因果关系有关，我们可以通过诸如“预防”“导致”“由……引发”“证明”“该不该”这样的词语轻易识别出它们。这些词在日常生活用语中很常见，我们的社会也一直在不断提出这样的问题并寻求答案。然而，就在不久之前，我们甚至还无法在科学的范围内找到途径明确地表述这些问题，更别说回答它们了。

到目前为止，因果推断对人类最重要的贡献就是让这个科学盲点变成了历史。这门新科学催生出了一一种简单的数学语言，用以表达我们已知和欲知的因果关系。以数学形式表达因果关系的能力让我们得以开发出许多强大的、条理化的方法，将我们的知识与数据结合起来，并最终回答出如上述那 5 个涉及因果关系的问题。

过去的 25 年里，我有幸成为参与这一科学发展进程的一员。在公众的视野之外，我曾目睹这门新科学在学生宿舍和研究实验室中崭露头角，也曾听到过在严肃的科学会议中它的突破性进展所引发的共鸣。眼下，随着

我们进入强人工智能时代，越来越多的人开始鼓吹大数据和深度学习^①的无尽可能性，这使我越发感觉到，向读者展示这门新科学正在进行的大胆探索，及其对于数据科学以及人类在 21 世纪的生活可能造成的诸多影响，是恰逢其时且激动人心的。

我知道，当听到我把这些成就描述为一门“新科学”时，你可能会心存疑虑。你甚至可能会问，为什么科学家没有在更早的时间就开始这样做？比如在古罗马诗人维吉尔首次宣称“幸运儿乃是能理解众事原委之人”（公元前 29 年）的时候，或者，在现代统计学的奠基人弗朗西斯·高尔顿和卡尔·皮尔逊首次发现人口统计数据可以揭示一些科学问题的答案的时候。在这些关键性的时间节点上，他们很遗憾地与因果关系失之交臂，这背后的曲折故事我将在本书有关因果推断的历史渊源的章节中一一道来。在我看来，阻碍因果推断这一科学诞生的最大障碍，是我们用以提出因果问题的词汇和我们用以交流科学理论的传统词汇之间的鸿沟。

为了说明这一鸿沟的深度，不妨设想一下科学家在尝试表达一些明显的因果关系时所面临的困难——举个例子，气压计读数 B 可以用来表示实际的大气压 P 。我们可以轻而易举地用方程式来表示这种关系， $B = kP$ ，其中 k 是某个比例常数。如今，代数规则允许我们以多种形式书写这个方程，例如， $P = B/k$ ， $k = B/P$ ，或者 $B - kP = 0$ 。它们意义相同，即如果知道方程中的三个量中的任意两个，那么第三个量就是确定的。字母 k 、 B 或 P 三者中的任意一个在数学上都没有凌驾于其他两个之上的特权。那么，我们怎样才能表达这个确凿无疑的事实，即是大气压导致了气压计读数的变化，而不是反过来？倘若连这一事实都无法表达，我们又怎能奢望去表达其他许多无法用数学公式来表达的因果推断，例如公鸡打鸣不会导致太阳升起？

我的大学教授们就没能做到这件事，也从没有为此抱怨过。我敢打赌，你们的大学教授中也没人研究过这个问题。现在，我们已经明白原因

① 2019 年图灵奖颁给了杰弗里·辛顿、扬·勒昆和约舒亚·本吉奥三人，以表彰他们在深度学习（deep learning）上的杰出贡献。——译者注

为何了：他们从未见识过一种关于因果的数学语言，也从未发现到它的好处。这种语言的发展被好几代科学家漠视，其实质是一种科学的衰败。众所周知，按动开关按钮会导致一盏灯的打开或关闭，夏日午后的闷热空气会促使当地冰激凌店的销售额增加。那么，为什么科学家们没有像用公式表达光学、力学或几何学的基本法则那样，用公式去捕捉这些显而易见的事实？为什么他们容忍这些事实在原始的直觉中凝滞，而不去运用那些促使其他科学分支走向繁荣和成熟的数学工具呢？

答案部分在于，科学工具的开发是为了满足科学需要。正因为开关、冰激凌和气压计这类问题我们处理起来驾轻就熟，所以用特殊的数学工具来解决它们的意愿始终不够强烈。但随着人类求知欲的不断增强，以及社会现实开始要求人们讨论在复杂的法律、商业、医疗等领域的决策情境中出现的因果问题，我们终于发现我们缺少一门成熟的科学所应提供的用于回答这些问题的工具和原理。

这种迟来的觉醒在科学中并不少见。例如，直到大约 400 年前，人们还满足于以本能来应对日常生活中的不确定性，从过马路到冒险打一架都包括在内。后来，赌徒们发明了复杂的赌博游戏，他们得以通过精心的设计来欺骗我们做出糟糕的选择。直到这时，布莱斯·帕斯卡（1654）、皮埃尔·德·费马（1654）和克里斯蒂安·惠更斯（1657）这样的数学家才发现有必要建立一门今天我们称之为概率论的数学科学分支。同样，只有当保险机构开始要求准确估算人寿年金保险的时候，爱德蒙·哈雷（1693）和亚伯拉罕·棣莫弗（1725）这样的数学家才开始关注死亡率统计数据，并据此计算出了人的预期寿命。与此相似，正是天文学家对天体运动精确预测的要求促使雅格布·伯努利、皮埃尔-西蒙·拉普拉斯和卡尔·弗里德里希·高斯建立了误差理论，让我们得以从噪声中提取信号。这些方法和理论都是今天统计学得以建立的基础。

具有讽刺意味的是，对因果关系理论的需求正是在统计学产生的那一刻浮出水面的。事实上，现代统计学的创立正源自因果问题——高尔顿和皮尔逊提出了一个关于遗传的因果问题，并独具匠心地去尝试用跨代数据

来解答它。遗憾的是，这一努力失败了，他们没有停下来问为什么，反而声称这些问题是禁区，转而去发展另一项刚刚兴起、不涉及因果关系的事业——统计学。

这是科学史上的一个关键时刻。给因果问题配备一套专属语言的机会眼看就要被成功捕捉并转化为现实，却被白白浪费掉了。在接下来的几年里，这些问题被宣布为“非科学”，被迫转入地下。尽管遗传学家休厄尔·赖特（1889—1988）为此做出了艰苦卓绝的努力，但因果词汇仍然被科学界禁用了半个多世纪。我们知道，禁止言论就意味着禁止了思想，同时也扼杀了与此相关的原则、方法和工具。

哪怕不从事科学研究，你也能见证这一禁律的存在。在统计学基础课程中，每个学生都会很快学会念叨“相关关系不等于因果关系”这句话。此话的确颇有道理！公鸡打鸣与日出高度相关，但它显然不是日出的原因。

遗憾的是，统计学盲目迷恋这种常识性的观察结论。它告诉我们，相关关系不等于因果关系，但并没有告诉我们因果关系是什么。在统计学教科书的索引里查找“因果”这个词是徒劳的。统计学不允许学生们说 X 是 Y 的原因^①，只允许他们说 X 与 Y “相关”或“存在关联”。

这一禁律也潜移默化地让人们认同了处理因果问题的数学工具毫无用武之地这一结论，与此同时，统计学唯一关注的就是如何总结数据，而不关注如何解释数据。一个了不起的例外是 20 世纪 20 年代由遗传学家休厄尔·赖特发明的路径分析（path analysis），它是本书所集中讨论和使用的一种关键方法的直接原型。然而，统计学及其相关学科严重低估了路径分析，使其在萌芽状态历经了数十年的压制。直至 20 世纪 80 年代，这迈向因果关系科学的第一步仍然是科学界唯一的一步。统计学的其他分支，以及那些依赖统计学工具的学科仍然停留在禁令时代，错误地相信所有科学问题的答案都藏于数据之中，有待巧妙的数据挖掘手段将其揭示出来。

今天，这种以数据为中心的观念仍然阴魂不散。我们生活在一个相信

① 可能存在一个例外情况，就是我们进行了随机对照试验，具体可参见第四章的内容。

大数据能够解决所有问题的时代。大学中“数据科学”方面的课程激增，在涉足“数字经济”的公司中，“数据科学家”享有极高的工作待遇。然而，我希望本书最终能说服你相信这一点：数据远非万能。数据可以告诉你服药的病人比不服药的病人康复得更快，却不能告诉你原因何在。也许，那些服药的人选择吃这种药只是因为他们支付得起，即使不服用这种药，他们照样能恢复得这么快。

在科学和商业领域，仅凭数据不足以解决问题的情况一再发生。尽管或多或少地意识到了其局限所在，但多数热衷于大数据的人仍然选择盲目地继续追捧以数据为中心的问题解决方式，仿佛我们仍活在因果禁令时代。

正如我刚才所说的，在过去的30年里，情况发生了戏剧性的变化。如今，感谢那些设计精巧的因果模型，当代科学家得以着手解决那些一度被认为是不可解决的甚至是超出了科学探索范围的问题。例如，仅在100年前，人们还认为“吸烟是否危害健康”这一问题是非科学的。仅仅是在研究论文中提及“因”或“果”这样的词都会在任何稍有名气的统计期刊上引发强烈的批判。

甚至就在20年前，询问一个统计学家诸如“是阿司匹林治愈了我的头痛吗”这样的问题还会被视为在问他是否相信巫术。引用我的一位备受尊敬的同事的话，讨论这种问题“与其说是科学探索，不如说是鸡尾酒会上的八卦闲谈”。但今天，流行病学家、社会学家、计算机科学家以及一些开明的经济学家和统计学家开始频繁地提出这样的问题，并能够借助具有高度精确性的数学工具作答。对我来说，这种改变就是一场革命。我斗胆称之为“因果革命”，是因为这场科学剧变真正接纳了我们人类理解因果知识的认知天赋，而不再拒之于科学大门之外。

因果革命不是在真空中产生的；它背后有数学工具上的发展作为支撑，这种数学工具最恰当的名称应该是“因果关系演算法”。借助这种工具，我们得以解答一些有关因果关系的最棘手的问题。能向公众展示这一演算法实在令我兴奋不已，这不仅是因为它拥有跌宕起伏的发展史，更是因为我真心期待未来某天它能在某些人那里发挥出超出我的想象的潜力……也许

就出自本书读者之手。

因果关系演算法由两种语言组成：其一为因果图（causal diagrams），用以表达我们已知的事物，其二为类似代数的符号语言，用以表达我们想知道的事物。因果图是由简单的点和箭头组成的图，它们能被用于概括现有的某些科学知识。点代表了目标量，我们称之为“变量”，箭头代表这些变量之间已知或疑似存在的因果关系，即哪个变量“听从于”哪个变量。这些因果图非常容易绘制、理解和使用，读者将在书中看到许多此类因果图的示例。这么说吧，如果你会使用基于单向街道地图的导航系统，你就一定可以理解因果图，继而就可以独自解决本书导言中提出的那些关于因果关系的问题。

虽然因果图是本书选择使用的主要工具，也是我过去 35 年的研究主题，但它并不是唯一可用的因果模型。有些科学家（比如计量经济学家）喜欢使用数学方程；另一些研究者（比如纯统计学家）则更倾向于借助一组假设来描述问题，这些假设表象化地概括了因果图的关系结构。但不管使用哪种语言，因果模型都应该描述，哪怕是定性地描述数据的生成过程，换句话说，就是那些在环境中控制并塑造数据生成的因果力量。

与图表式的“知识语言”并存的还有一种符号式的“问题语言”，它被用于表述我们想要回答的问题。例如，如果我们感兴趣的是药物（ D ）对病人生存期（ L ）的影响，那么我们的问题可以用符号写成： $P(L | do(D))$ 。换句话说，如果一个身体状况具有足够代表性的病人服用了这种药，那么他在 L 年内存活的概率（ P ）是多少？这句话所描述的就是被流行病学家称为干预（intervention）或处理（treatment）的概念，其对应于我们在临床试验中所测量的内容。在许多情况下，我们可能还希望对 $P(L | do(D))$ 和 $P(L | do(not-D))$ 进行比较，后者描述的是拒绝接受相应处理（服药）的病人，也称“对照组”病人的情况。其中， do 算子表明了我们正在进行主动干预而非被动观察，这一概念是经典统计学不可能涉及的。

在这里，我们必须调用一个干预算子 $do(D)$ 来确保观察到的病人存活期 L 的变化能完全归因于药物本身，而没有混杂其他影响寿命长短的因

素。如果我们不进行干预，而是让病人自己决定是否服用该药物，那么其他因素就可能会影响病人的决定，而服药和未服药的两组病人的存活期差异也将无法再被仅仅归因于药物。例如，假设只有疾病发展到末期的病人服用了这种药，那么这些人的情况就显然不同于那些不服药的病人，两组的比较结果实际上反映的是其病情的严重程度，而非药物的影响。相比之下，随机地指示一些病人服用药物或不服用药物，而不考虑先决条件如何，则可以去除两组病人之间原有的差异，提供有效的比较结果。

在数学上，我们把自愿服药的病人的生存期 L 的观测频率记作 $P(L|D)$ ，这就是统计学教科书中常用的条件概率。这个公式表示生存期 L 的概率 (P) 是以观察到病人服用药物 D 为条件的。注意 $P(L|D)$ 与 $P(L|do(D))$ 完全不同。观察到 (seeing) 和进行干预 (doing) 有本质的区别，它解释了我们不认为气压计读数下降是风暴来临的原因。观察到气压计读数下降意味着风暴来临的概率增加了，但人为迫使气压计读数下降对风暴来临的概率并不会产生影响。

对观察和干预的混淆成为悖论之源，对此本书将展开详细的讨论。缺少 $P(L|do(D))$ ，而完全由 $P(L|D)$ 统治的世界将是十分荒诞的。在这个世界中，病人不去就诊就能减少人们患重病的概率，城市解雇消防员就能减少火灾的发生，医生会向男性患者和女性患者推荐药物，但不向性别保密的患者推荐药物，诸如此类的例子还有很多。而令人难以置信的是，就在不到 30 年前，科学正是在这样一个不存在 do 算子的世界里运行的。

因果革命最重要的成果之一就是解释了如何在不实际实施干预的情况下预测干预的效果。如果我们没有首先定义 do 算子以便提出正确的问题，其次设计出一种在不需要真正实施干预行动的条件下模拟干预行动的方法，那么我们就永远不可能取得这一成就。

当我们感兴趣的科学问题涉及反思性的思考时，我们通常会诉诸另一种类型的表达形式，这种表达形式是因果推断科学独有的，我们称之为“反事实” (counterfactual)。例如，假设乔在服用了药物 D 一个月后死亡，那么我们现在关注的问题就是这种药物是否导致了他的死亡。为了回答这

个问题，我们需要想象这样一种情况：假如乔在即将服药时改变了主意，他现在会活着吗？

再强调一遍，经典统计学只关注总结数据，因此它甚至无法提供一种语言让我们提出上面那个问题。因果推断则不仅提供了一种表达符号，更重要的是，它还提供了一种解决方案。这使得我们在预测干预效果时，在多数情况下能够借助一种算法来模拟人类的反思性思考，通过将我们对观测世界的了解输入算法系统，其将输出有关反事实世界的答案。可以说，这种“反事实的算法化”正是因果革命另一项宝贵的成果。

反事实推理涉及假设分析（what-ifs），这可能会使一些读者质疑其科学性。事实上，经验观察永远无法证实或反驳这些问题的答案。然而，人类一直在对哪些事可能发生或哪些事可能已经发生做出极可靠的、可重复的判断。例如，我们都明白，即使某天早晨公鸡没有打鸣，太阳也会照常升起。这一共识源于这样一种事实：反事实并非异想天开之物，而是反映了现实世界运行模式的特有结构。共享同一因果模型的两个人也将共享所有的反事实判断。

反事实是道德行为和科学思想的基石。回溯自己过去的行为以及设想其他可能情景的能力是自由意志和社会责任的基础。反事实的算法化使“思维机器”（thinking machine）习得这种人类特有的能力，并掌握这种目前仍为人类所独有的思考世界的方式成为可能。

在上段提到“思维机器”这个词是我有意而为的。我是以一名浸淫人工智能领域多年的计算机科学家的身份涉足这门新科学的，我的研究背景使我在进行因果推断方面的研究时能够使用一种该领域的大多数研究者并不具备的视角。首先，在人工智能的世界里，只有当你能够教会机器人理解某个课题时，你才算真正理解了它。这就是为何你会在本书看到我反复强调符号、语言、词汇和语法。我痴迷于这样的思考：是否可以用一种业已存在的语言来表达某个论断，以及我们如何判断一个论断是否与其他一些论断相一致。我们可以看到，仅仅是遵循科学语言的语法进行话语实践就能让我们掌握大量的知识，这实在令人惊喜。我对语言的强调也源于—