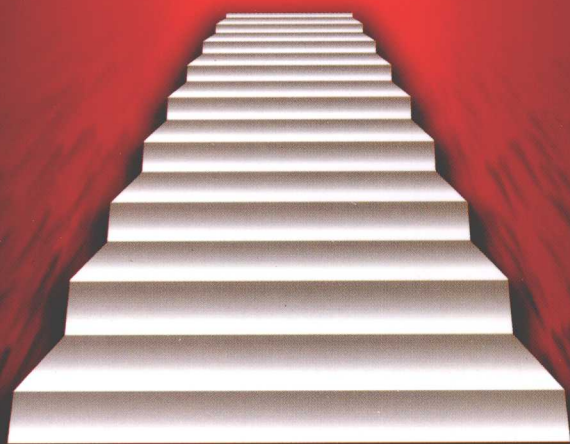


 西安交通大学学术文库

科学发现认知结构的 哲学研究

王小红 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 西安交通大学学术文库

科学发现认知结构的 哲学研究

王小红 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

科学发现认知结构的哲学研究/王小红著. —西安:西安交通大学出版社, 2010. 4
ISBN 978-7-5605-3269-1

I. 科… II. 王… III. 认知科学-研究 IV. B842.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 187246 号

书 名 科学发现认知结构的哲学研究
著 者 王小红
责任编辑 段宏亮 焦欣波

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西奇彩印务有限责任公司

开 本 720mm×1 000mm 1/B5 印张 8 字数 144 千字
版次印次 2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-3269-1/B·24
定 价 28.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82668133

读者信箱:xj_rwjg@126.com

版权所有 侵权必究

序 言

关于科学发现的过程,关于创造性思维的发生机制,关于人类的认知,是需要多个学科领域的研究者们共同关注的课题。这里既需要人工智能、神经生理学、脑科学等硬科学的研究给出实质性的操作和证据,也需要哲学、心理学、社会学、历史学的理论、思路和方法给出丰富而且更贴近人本性的解释。即将出版的这本书就是一个很好的典范。我认识小红是在5年前。那时,她还在北京大学科学与社会研究中心攻读博士学位。她的博士论文选择了一个人工智能系统 BACON,进行科学发现方法论方面的研究。小红在查阅论文资料时,看到我曾经关注过 BACON,并且还曾指导我的研究生于80年代后期进行过类似 BACON 系统的机器发现工作,所以专门找到我,向我请教关于 BACON 系统的人工智能方面的一些问题。我们愉快地谈起了 BACON,期间还谈到我熟悉的席特考(BACON 系统的开发者之一)对中国的友谊。

我非常高兴小红能从哲学方面关注并详细考察一个人工智能系统。我也十分愿意与小红讨论 BACON 系统以及其他机器发现系统的技术问题和理论问题。我参加了小红的博士论文预答辩。本来还要参加小红博士论文的正式答辩的,但遗憾的是当时我在国外参加一个学术会议未能赶回来。

从北大拿到博士学位后,小红依旧回到她原来工作的西安交通大学,临走前,小红来同我道别,送了我一本她的博士论文。应该说,小红选择了一个难度比较大的题目,但是她勤奋努力,终于如愿完成了,我由衷地为她高兴。并预祝她回到西安交大以后,继续与交大的人工智能学者合作,继续把自己的研究方向更深入地做下去。

后来,小红基于博士论文的研究项目获得了中美富布赖特基金的资助,能够有机会去美国研究访学一年。这对她的研究方向的深入和拓展是一个很好的机会。使她能有一个更广阔的视野来研究科学发现的认知建构问题。

这本书是小红在博士论文基础上,结合在美国研究一年的体会修改而成的。我期待着小红在本书中开始的结合具体 AI 系统对科学发现的认知结构进行的哲学研究,能够引起本书读者的关注,有更多的人投入到科学前沿的哲学问题的研究中来,有更多的人思考人工智能和哲学交叉领域的问题。我也期待着小红博士以此书为起点,在认知科学哲学研究方面,继续围绕新近的人工智能研究,不断有新的工作成果出现。

史忠植

2009年11月30日

于中国科学院计算技术研究所

目 录

第 1 章 研究科学发现的一种新途径·····	(1)
第 1 节 机器发现与 BACON 系统 ·····	(1)
第 2 节 BACON 系统的启发式及其运行特点 ·····	(7)
第 3 节 机器发现系统的研究价值 ·····	(14)
第 2 章 机器发现系统所依据的科学发现观 ·····	(20)
第 1 节 “启发式搜索解题”发现观及其机器实现 ·····	(20)
第 2 节 西蒙的科学发现观引发的对 AI 发现系统的批评 ·····	(31)
第 3 节 对西蒙科学发现观的批评的实质 ·····	(38)
第 4 节 认知研究面临整合难题 ·····	(43)
第 3 章 机器发现与科学发现的逻辑 ·····	(44)
第 1 节 计算机模拟发现的工作是不是重新“发现” ·····	(44)
第 2 节 机器发现与“发现的哲学”的复活 ·····	(50)
第 3 节 机器发现与科学家发现的不同 ·····	(69)
第 4 章 是培根的归纳还是波普尔的猜想-反驳·····	(71)
第 1 节 BACON 方法对归纳思想的意义 ·····	(71)
第 2 节 能否从波普尔思想中找寻发现的逻辑 ·····	(77)
第 3 节 BACON 是产生可能性假说的逻辑 ·····	(87)
第 5 章 对 SSK 强纲领的经验拒斥 ·····	(90)
第 1 节 拒斥强纲领的“图灵检验” ·····	(91)
第 2 节 “纯粹的”或“无社会污染的”吗 ·····	(94)
第 3 节 争论、融合与意义 ·····	(107)
结 语 未尽的问题·····	(110)

第 1 章 研究科学发现的一种新途径

科学发现的认知建构,或者说创造性思维的实践研究大致有四个方面:计算机建模、神经网络建模、认知实验以及历史案例研究。我们的哲学考察选择计算机建模作为切入点,这是因为人工智能领域对科学发现的计算机建模密切结合了其他三个方面的成果。比如对发现程序的设计,需要以科学史考察得到的真实实验数据及科学家做出科学发现的真实过程作为设计的基础;而经过发现程序运行得出的科学发现思维的假设,还要经受以人为受试对象的认知实验的检验,根据检验结果调整发现策略的设计;同时,发现程序的开发和设计也运用了神经网络研究中的最新成果。本书的考察为避免泛泛而谈,选择了具体的发现程序 BACON 进行剖析,并且对其他主要发现程序 KEKADA、PAULI、MECHEM 等也进行了讨论。具体研究背景是这样的:

二十世纪最后二十年里,人工智能(AI)界出现了一个不同于历史、哲学、心理学的研究科学发现的新领域,即机器发现。这种机器发现工作已经远远超出了其本身所具有的人工智能价值,而对科学哲学、科学史乃至认知科学研究都产生了广泛影响。在众多机器发现程序中,BACON 程序具有一定的典型意义:它重新发现的科学定律最多,是最重要的经验定律发现程序;它还是版本最多的机器发现系统;更重要的,BACON 是西蒙(Herbert A. Simon, 1916~2001)人工智能思想的成功范例。西蒙是人工智能的创始人之一,又是认知心理学的创始人之一,他在机器发现领域的探索活动同样是最早的。因此,从 BACON 这个西蒙传统典型机器发现程序入手,进行深入地案例研究,对考察科学发现的认知结构具有重要的方法论意义。

第 1 节 机器发现与 BACON 系统

1. 机器发现:研究科学发现的新途径

科学发现是极富创造性的工作。人们相信,解读创造性之谜能帮助科学家更有效地做出科学发现。科学史家仔细分析一些著名科学家的手稿、信件以及实验

室原始记录,试图“挖掘”出科学家做出科学发现的真实过程。心理学家从认知风格、创造人格及创造技法等独特角度研究科学发现。此外,还有做出科学发现的科学家本人对他的发现过程的回忆性描述。在种种研究科学发现的途径中哲学家的探讨是最早的。

对科学发现逻辑的探讨始自亚里士多德(Aristotle,公元前 384~322)。自从亚里士多德的《后分析篇(Posterior Analytics)》以来,研究科学发现和形成概念的逻辑就是认识论的中心任务^[1]。随着近代自然科学的诞生和发展,17、18 世纪这项事业非常兴盛,科学发现的逻辑成为了许多大科学家和方法论家致力于解决的科学方法论的核心问题。其中代表人物有培根、笛卡儿、波义耳(Robert Boyle, 1627~1691)、洛克、莱布尼兹和牛顿等。

但是,研究科学发现逻辑的事业在 19 世纪下半叶出现衰落。一方面,科学它的衰落与认识论上可错论(fallibilism)对不可错论正统地位的取代息息相关。另一方面,科学发现逻辑的研究被冷落一百多年,也与整个科学方法论研究的逐步势衰有关。从培根以降的方法论研究中形成的种种研究程序:归纳主义程序、猜想-反驳程序、常规科学(范式)→科学革命→新的常规科学(范式)的历史主义程序,以及科学研究纲领,由于都不具有普适性,费耶阿本德(Paul Feyerabend, 1924~1994)就主张方法论的多元主义,反对有任何一种科学研究的普遍程序,从而使科学哲学中科学方法论的探讨陷入沉寂。在这种大背景下,科学发现方法论的研究就更加不是科学哲学家的兴趣所在了。

然而,大约在 20 世纪 70 年代前后,科学哲学界出现了一股复兴“发现的哲学”的潮流。这种复兴的“潜流”始自 20 世纪 50 年代汉森(Norwood Russell Hanson, 1924~1967)对科学发现模式的研究,后来在 20 世纪 70 年代又有多位方法论研究者的努力,尤其必须提到的是以西蒙为代表的人工智能研究者对发现方法论的贡献。在对他们的工作进行剖析之前,必须先对西蒙学派研究工作中一个核心词语——启发式(Heuristics),稍作介绍。

“Heuristics”在计算机科学中译为启发式,也有其他领域学者译为“助发现法”、“启发力”。该词出自希腊语 heuriskein,意思是“发现(to find)”。家喻户晓的阿基米德(Archimedes,约公元前 287~212)发现浮力定律的故事中,那声著名的欢呼“尤里卡(eureka)!”即是该词的一种形式。为了纪念这一事件,当今世界最著名的发明博览会还以“尤里卡”命名。关于 heuristics 的研究有时也用单数形式 heuristic,但 heuristics 更常用,在这个意思上,该词与 physics、mathematics 一样都作为单数使用。启发式这一概念,在 20 世纪中期,由于数学家波利亚(George Polya, 1887~1985)的名著《怎样解题(How to Solve It)》而深入人心,在计算机科学、心理学、哲学以及法学等领域中都有运用。

根据维基百科(Wikipedia)的解释,启发式就是指人们在进行学习、发现或解

题的过程中,能指挥人的注意力的一类重复有效的方法或途径。而在计算机科学中,启发式是指,为了简化难题使之容易解答而设计出的一类技术(technique)和经验规则(rules of thumb),虽然它们不保证最终解题方案的成功,但通常都会产生好的解题方案,或者可以解决一个涉及更复杂问题求解的相对简单的问题,但潜在地会损失精确性或精密度。

人工智能自诞生起就一直存在着以西蒙为代表的符号主义学派利用启发式搜索(heuristics search)技术探索人类思维过程的研究途径。他们使用计算机模拟手段探索人类解决问题的方法。尤其是20世纪70年代中叶以来,西蒙小组开辟了机器发现(Machine Discovery,简称MD)这个将AI技术结合科学史、科学哲学进行科学发现研究的新领域。该领域现在已做的工作主要是再发现,即开发计算机程序模拟科学史上重要科学发现的过程。

这种新的研究科学发现的途径为传统“发现的哲学”研究注入了活力。它不仅开拓了已有的科学发现研究的资源。机器发现还为我们提出了新的哲学问题并提供了新的研究手段。而且,面对众说纷纭的科学发现理论以及科学哲学理论,机器发现尝试使某些理论成为可检验的,这对科学哲学研究具有前所未有的意义。同时,这种新的研究途径能在多大程度上帮助人类揭开“创造性思维”之谜?它能否使科学史家、科学哲学家、认知科学家、创造心理学家甚至科学家本人对历史上科学家做出科学发现的过程有更多、更清晰的了解?这也是我们力图探讨的问题。



图1-1 1978年诺贝尔经济学奖获得者西蒙
(照片来源:nobelprize.org [2008-03-12])

2. BACON 系统的六个版本及其成就

以英国哲学家弗兰西斯·培根(Francis Bacon, 1561~1626)命名的计算机程序系列BACON,是众多MD程序中最重要经验定律发现程序。从1978年到1983年,先后发表了六种版本(BACON.1~BACON.6)。BACON的最早和最主要的开发者为P. 兰利(Patrick W. Langley)。兰利1979年在卡内基-梅隆大学(Carnegie-Mellon)师从西蒙获得认知心理学博士学位。从BACON.4以后的版本是兰利与布拉德肖(Gary L. Bradshaw)、西蒙、席特考(Jan M. Zytkow, 1944~2001)等人的合作研究成果。

在这个研究团队中的布拉德肖，当时也在西蒙门下攻读心理学博士，他本科和硕士阶段都是心理学背景，现在是密西西比州立大学（Mississippi State University）心理学系教授。

来自波兰的访问学者席特考，既是 AI 专家，又具有深厚的科学哲学背景，曾获得华沙大学（The University of Warsaw）科学哲学博士学位。由于这种科学哲学背景，席特考成为了西蒙机器发现思想最热情和最坚定的实行者之一。他先后开发了 FAHRENHEIT, 49er, GALILEO, GELLMANN, STAHL, MENDEL 等多个机器发现程序。他 1982 年开始加入西蒙的科学发现研究团队，跟随西蒙进行机器发现研究。20 世纪 90 年代曾访问中国，中科院计算所的史忠植先生曾与他有过愉快的学术交流。但不幸的是，正当科学研究生涯的盛年，这位优秀的科学家却因病早逝，令人痛惜不已。在美国北卡罗来那大学（University of North Carolina at Charlotte）网站上，至今仍保留着席特考的纪念主页。

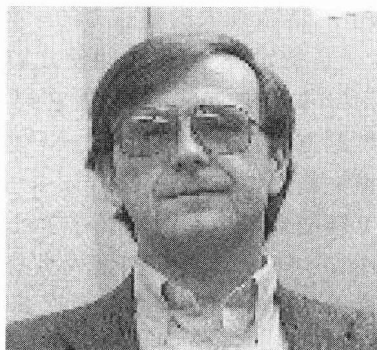


图 1-2 BACON 程序的主要设计者兰利
(照片来源: www.isle.org/langley/discovery.html [2002-04-23])

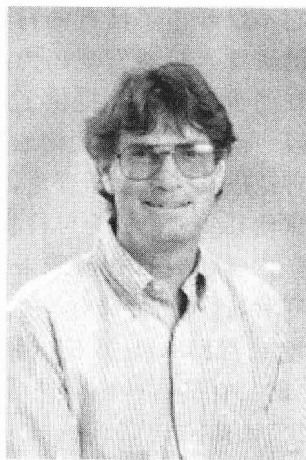


图 1-3 布拉德肖

(照片来源: <http://www2.msstate.edu/~glb2> [2008-03-12])

BACON. 1: 科学再发现的初步实现

最早的系统 BACON. 1^[2]能够解决序列外推任务，学习合取、析取概念，及发现简单形式的物理定律：如波义耳定律 $pV = c$ （一定量的气体，温度一定，其压强 p 与其体积 V 的乘积等于一个常数 c ）；开普勒（Johann Kepler, 1571 ~ 1630）行星运动第三定律 $D^3/P^2 = c$ （一个行星距太阳距离 D 的立方与该行星的运行周期 P 的平方之比为一常数）。BACON. 1 是兰利博士论文的研究成果，它对通常发现系统的启发式进行创新，初步实现了“一个一般性发现系统”的设计初衷，可看作西蒙等人 1974 年提出的通用规则归结器的实现，但该系统只限于发现简单的幂函数。次年，兰利推出了第二个版本 BACON. 2。



图 1-4 席特考纪念主页上的照片

(照片来源:席特考纪念主页 coitweb. uncc. edu/~ras/Zytkow [2007-05-08])

BACON. 2:从简单到复杂

BACON. 2 将 BACON. 1 的产生式加以扩展,增加了两种操作:一种用于在序列外推任务中发现递归模块,另一种用于产生多项式定律^[3]。该程序通过检查数据的差异发现了复杂的多项式函数,例如,天文学中有名的经验定律,波得定律(Bode's Law),该定律表明各行星环绕太阳的椭圆轨道的平均半径的数值之间是一种简单的数学级数关系。尽管 BACON. 2 发现定律的复杂程度有明显提高,但根据该版本的启发式,系统不能被拓展发现更多的经验定律,而此技术问题在兰利接下来开发的 BACON. 3 中有了很大的改观。

BACON. 3:打破“观察”和“理论”的分界

BACON. 3^[4]是最成熟、最具逻辑一致性的版本,它成功地重新发现了理想气体定律、库仑定律、开普勒行星运动第三定律、欧姆定律和伽利略的单摆和匀加速定律。其成功的关键是取消了数据和假定的规律之间的界限:从低级描述层次中的数据概括出简单规律之后,就将此简单规律作为较高描述层次中的“数据”,由此“数据”再概括出更复杂的规律,这样逐级上升,启发式规则递归地运用于新的“数据”上,最后就可得出普遍性的经验定律。在这个过程中,系统描述层次逐级增加,更高的层次描述更复杂的定律,也说明了更多的原始数据,因此大大扩充了系统的表达能力。BACON. 3 的成功给了科学哲学研究一个启示,BACON. 1 和 BACON. 2 严格区分实验测得的数据与程序得出的假设,却拓展能力不强,而 BACON. 3 取消了数据和假设之间的严格区别,却发现了更多的经验定律。由此,我们熟悉的观察和理论的区别的争论在这里得到了一次生动的检验。

BACON. 4:形成概念

从 BACON. 1 到 BACON. 3, 系统已经能够比较令人满意地完成科学发现过程的一个重要环节, 即对数据进行分析, 从数据中找出规律性的一个模式。但是, BACON 系统能不能进行科学发现的另一个重要环节, 形成概念呢? 兰利同他的合作者对此进行尝试, 结果在 BACON. 4 中实现了这个功能。BACON. 4^[5] 的改进之处在于增加了新的启发式, 使系统能够规定出内在属性(如, 导电性、比热等), 从而使定律推导步骤简化为只需 2 个描述层次。而 BACON. 3 在重新发现欧姆定律时, 用了 3 个以上描述层次, 而且为了描述电阻概念和电压概念, 它将第三层次描述分成两个独立的描述簇(descriptive cluster), 一个描述内部电阻概念, 另一个对应于电压概念。这里的一个描述簇是关于相关变量值对(pairs)的一种猜测, 如本章第二节中表 1.1、表 1.2 中每行数据就对应一单独的描述簇。其中, 为描述电压概念甚至用到第四层描述。稍后要谈及, 比较发现过程的复杂程度时, 所用描述层次数目也是一个评价指标。

BACON. 4 重新发现了阿基米德浮力定律、斯涅耳折射定律、动量守恒原理、万有引力定律、布莱克比热定律。但是我们应当清醒地看到, BACON 只是发现了概念的数学表述形式。它根据启发式推理出这个数学表达式是有用的, 而它实际上不可能知道该表达式具有什么样的理论意义。最终形成概念、赋予概念以理论意义都是人来完成的。可见, BACON 发现经验定律的过程, 是一个人机互动的过程。在这个人机交互过程中, 人和机器各自发挥自己的所长, 或者说, 机器充当好助手与人一道更有效地做出科学发现。

后来兰利等人对 BACON. 4 和 BACON. 5 进行改进。因为在一些化学定量定律的发现中都有一个现象, 一组值往往可以表达成其最小值的整数倍。于是, 兰利等人引入一条新的寻找公因子的启发式(和已有的启发式合取), 能够重新发现 18 世纪末至 19 世纪初的许多化学定量定律, 如普劳特原子结构假说、道尔顿倍比定律、盖伊-吕萨克气体反应定律、杜隆-柏蒂原子热定律以及阿伏加德罗和康尼查罗原子量测定方法。

但是, 兰利他们也清醒地认识到, BACON. 4 仅仅完成了对数据规律的描述, 对所发现的公因子的解释还是由人完成的。因此他们寄希望于将来的 BACON 程序版本能从描述性定律的发现进入解释性定律的发现。

BACON. 5:计算模拟优势凸显

在 BACON. 4 和 BACON. 5 重新发现布莱克比热定律时, 还引入了一条对称性启发式, 对称性规律在大多数场合是一个基本原理, 这条启发式能省去大量搜索。但是这样一来, BACON 就不是完全数据驱动而是具有理论驱动的性质了。为什么要这样做呢? 因为科学史和科学哲学的考察已经表明, 实际的科学发现过

程既不完全是数据驱动也不完全是理论驱动,而是二者都起作用。兰利他们这样做具有多方面的意义。

第一,通过计算机模型的模拟恰好说明,数据驱动和理论驱动兼备的科学发现途径正是最有效的发现途径。

第二,BACON 可以成为这样一种更普遍的科学发现模型,实验已经表明,如果数据驱动的发现系统 BACON 具备一种理论,就能使 BACON 的搜索空间减小,更有效地发现规律。

第三,BACON 开创了一种研究科学发现的新途径,这种新途径具有传统研究途径无法比拟的优势。不论历史的、哲学的还是心理学的研究途径都不可能考察纯粹数据驱动或纯粹理论驱动的科学发现,因为这样的发现在历史上是不存在的。而通过计算机模拟,可以将启发式设计成完全数据性的或完全理论性的,从而分别考察数据驱动的发现模式或理论驱动的发现模式,利用新的研究手段就得出了新的研究结论,使我们对科学发现的本性有更多的了解。

第四,BACON 以不同于人类的发现模式做出了相同的发现,BACON 的实验表明,对于一个数据驱动的发现系统,非数据性质的启发式尽管很有用,却不是本质性的。因为 BACON 别的版本在没有该启发式的完全数据驱动下,通过更加冗繁的工作也发现了同样的定律。

BACON. 6:发现复杂的多项式

BACON. 6^[6]是主要针对发现前述 18 世纪末至 19 世纪初的许多化学定量定律而改进的。它有能力处理大量的干扰,利用差分技术寻找相关的两变量之间最好的多项式函数,它能够发现像 $y^3 = ax^2 + bx + c$ 及 $\sin(y) = a \log(x) + b$ 这样的关系。需要说明的是,BACON. 6 虽然是 BACON 系列中最后一个版本,但不能说只有它是最成熟的版本,无论 BACON 的设计者还是评论者,都一致认为 BACON. 3 是 BACON 系列中最成熟、最具逻辑一致性的版本,人们也都以它为例来评价 BACON。

第 2 节 BACON 系统的启发式及其运行特点

BACON 系统作为一个成功的经验定律发现程序,它的启发式和运行特点很值得研究。

1. 数据驱动及独特的启发式

1.1 数据驱动而非理论驱动

目前开发的机器发现系统大致有两类,理论驱动 MD 系统和数据驱动 MD 系统。理论驱动 MD 系统是指,将已知的抽象理论形式化后输入计算机,作为计算机已经知道的知识,设计启发式规则指导它的推理过程。这种理论驱动的 MD 系统适合在比较成熟、已经公理化的学科领域做出新的发现。比如,纯粹理论驱动的 MD 系统 AM^[7],从约 100 个基本概念和约 250 个启发式开始,重新发现了数论中的概念并提出数学猜想。但是在自然科学中,即使像量子物理学这样抽象性、理论性程度颇高的领域,科学发现也不可能是完全理论驱动的。因此,BR-3^[8]、BR-4^[9]、GELL-MANN^[10]、PAULI^[11]等 MD 系统均是采取了理论驱动结合数据驱动,模拟量子物理学中的一些理论发现的。

数据驱动是给计算机输入经验性的知识,即纯粹定量的数据或者对观察实验的描述,并对探测数据规则的启发式进行利用。比如 BACON,在给它输入历史上科学家做出真实发现的原始数据,以及探测数据规则的启发式之后,它就对数据进行分析,找出它们之间的相互关系,从中发现一种模式,这种模式表示了一系列数据的规律^[12]。在它的发现过程中可以完全不需要任何专业理论知识背景。科学史上,尤其是在科学发展的早期,绝大多数科学发现都主要为数据驱动的过程,人们常常是先提出许多奇妙的纯粹经验性的定律、规则,而后若干年才能解释这些经验定律的理论意义。比如前面提到的波得定律、欧姆定律、孟德尔遗传定律等等。

属于数据驱动的经验发现系统还有函数归纳模型(Model of Function Induction),FAHRENHEIT,IDS^[13],GLAUBER、STAHL、DALTON^[14]等。不同的是,最后三个系统所输入的数据是对观察结果的描述,而不是纯粹的定量数据。确切地说,DALTON 还是一个数据驱动和理论驱动结合的系统。正如系统的命名所意味的,从 GLAUBER、STAHL 到 DALTON,这三个系统分别模拟了在以经验性、直观性为主的近代化学发展史中的系列重要发现,如格劳伯(Johann Rudolph Glauber,1604~1670)对酸碱盐物质分类的贡献,斯塔耳(Georg Ernst Stahl,1660~1734)燃素说到拉瓦锡(Antoine-Laurent Lavoisier,1743~1794)氧化说的历史进程,以及道尔顿(John Dalton,1766~1844)推断物质的分子组成并得出原子量的过程。

1.2 启发式的特点

前面我们对启发式概念的含义作了初步介绍,通过考察西蒙学派的工作,我们还可以给出一个更简单明了的含义,启发式就是提高搜索效率的规则。BACON 系统的启发式用 OPS(Official Production System,通用产生式系统)写成。兰利

认为该语言“为模拟人类行为提供了坚实的基础^[4]。”这是一种著名的知识表示系统,它依据人类大脑记忆模式中各种知识块之间普遍存在的因果联系或“条件-行动”式,用“IF THEN”型的产生式规则来表示知识,以此可以方便、灵活地建立人类问题求解的认知模型。

兰利为 BACON 设计了丰富的启发式。以 BACON. 3 为例,其启发式由 86 条 OPS2 语言写成的产生式规则组成,这些产生式又被分成 7 个启发式组,分别完成不同的功能:第一组,收集数据;第二组,发现规律;第三组,计算理论项的值;第四组,注意冗余理论项;第五组,忽略差异;第六组,归并描述簇;第七组,处理无关变量。

因为 BACON 的数据驱动性质,它所运用的丰富启发式中,最基本的是三个探测数据规律的启发式:A. 递增:如果 X 值随 Y 值的增加而增加,就定义比值 X/Y ,并考察这个值。B. 递减:如果 X 值随 Y 值的增加而减少,就定义乘积 XY ,并考察这个值。C. 常量:如果 X 的许多值几乎都是一个常量,就假设 X 总是取这个值。在启发式规则指导下,BACON 的运行过程大致是这样的:

以一种系统方式收集数据,一次改变一个术语值并观察它的影响。如果一个变量值的改变没有产生任何影响,这个变量就是无关的而将它剔除。如果一个变量真的对另一个变量有影响,就定义一个新理论词项,该术语由自变量和因变量组合而成。如果以前没有考虑过这个术语的影响,就计算它的值并对其进行检验。如果这个术语的许多值都恒定,BACON. 3 就创建一个新的、更高层次的描述簇,并将这个描述簇视作该层次的数据。如果这个新的簇有完全相同的条件,这个簇可以与其他簇合并。若这个新术语的值不是常量,就再定义一个更复杂的术语,并重复上述过程。此外,对有用的理论词项和不变性的搜索在每层描述中重新进行一次。总之,这些启发式使得 BACON. 3 成为一个强有力的而且一般性的发现系统^[4]。

根据这三个基本启发式以及其他的丰富启发式的指引,西蒙评价说该程序的出色处就在于,通过这些步骤发现上述种种定律并不需大量搜索。很少需要考察原变量的 12 个以上的函数,就能找到一个不变量^[15]。

1.3 BACON 的发现过程

它的发现过程是这样的,程序先收集数据,然后根据数据表现出的趋向性和不变性定义理论词项。这些理论词项是对数据规律的简化描述,而且每个术语与一个特定描述层次相联系。BACON. 3 将数据和假说的区别模糊化,用了不同层次的描述。在 BACON. 3 中,一个层次中的多个描述簇表现出的规律性能导致较高一层次的一个描述簇。进而这个较高层次的描述簇和它同层次的描述簇,又能导致更高一层次的描述簇。就通过这样的逐级概括,最终总结出能描述所有相关变

量的相互关系和规律性的科学定律。

以 BACON. 3 重新发现开普勒行星运动第三定律为例,分析具体发现步骤及启发式的运用。该定律表示一个行星距太阳的距离与行星运行周期之间的关系。其表达式为: $D^3/P^2 = c$ 。BACON 是这样运行的,使 BACON. 3 控制三个可观察变量(用到第一组启发式),分别是:原点对象、向量对象以及这两个对象被观察的时间。两个因变量是(用第一组启发式):原点对象与向量对象之间的距离和行星的视差角度。

BACON. 3 开始收集数据(用第一组启发式),后两个变量随太阳系中不同的对象而不同。表 1-1 就是用上述方式收集的数据。

表 1-1 关于太阳系的第一层次数据^[4]

原点	向量	时间 T	距离 D	角度 A	斜率 $S_{A,T}$
太阳	水星	50	0.38719	52.909	4.09090
太阳	水星	60	0.38719	93.818	4.09090
太阳	水星	70	0.38719	134.730	4.09090
太阳	金星	50	0.72398	49.000	1.60000
太阳	金星	60	0.72398	65.000	1.60000
太阳	金星	70	0.72398	81.000	1.60000
太阳	地球	50	1.00000	185.860	0.98563
太阳	地球	60	1.00000	195.710	0.98563
太阳	地球	70	1.00000	205.570	0.98563

程序很快发现(用第二组启发式),在某些情况下,确定的距离值会重复出现。而出现这一结果的条件(用第二组启发式的发现条件规则)是以太阳为原点,太阳系中一个行星为向量。创建(用第二组启发式)第二层次的一组描述簇,用以描述这些规律。

相应地,BACON. 3 还注意到(用第二组启发式),随着时间的增加,角度似乎也在增大。在每个选定向量的情况下,角度的斜率不随时间变化,是个常数。由此,定义(用第二组启发式)关于斜率和截距的线性关系理论词项,并分别用第三组、第四组启发式计算该理论词项值并考察它的唯一性。还需说明,定义的斜率和截距两个理论词项与为描述不同直线而创立的概念略有不同。结果描述簇表示在表 1.2 中。

表 1-2 关于太阳系的第二层次描述^[4]

原点	向量	距离 D	斜率 $S_{A,T}$	DS	D^2S	D^3S^2
太阳	水星	0.38719	4.090900	1.58400	0.61330	0.97146
太阳	金星	0.72398	1.60000	1.15840	0.83864	0.97146
太阳	地球	1.00000	0.985630	0.98563	0.98563	0.97146
太阳	火星	1.52370	0.524020	0.79847	1.21670	0.97146
太阳	木星	5.19910	0.083141	0.43226	2.24740	0.97146
太阳	土星	9.53850	0.033457	0.31913	3.04410	0.97146

接下来, BACON. 3 注意到(用第六组启发式)它有许多具有相同条件组的第二层次描述簇, 但这些描述簇却得出了不同的概括。因此, 它就废除(用第六组启发式)这些描述簇, 而把斜率、截距和距离放在一起。接下来一步是将距离与角度对时间的斜率相联系。然而, 每个斜率是一个不同的理论词项, 在这种形式中, 它们不能与距离作比较, 于是转而进行下面步骤:

第一, BACON. 3 会认识到, 这些概念定义仅仅区别在一个数值特征上, 而既然它已经上升了一个描述层次, 它也许可以忽略(用第五组启发式)这些差异而视这些术语相同。因为斜率值已经被计算出来, 这个特征值就不再需要, 因此, 这个程序创立(用第五组启发式)一个新的, 更抽象的角度对时间的斜率变量, 并用这个新术语代替旧的术语。

第二, BACON. 3 有了它能检查的第二层数据, 并且, 它立即发现(用第二组启发式)在距离 d 和斜率 s 之间的单调递减关系。于是, 一个新变量, ds 被定义(用第二组启发式), 并考虑它的值; 现在, 该系统注意到(用第二组启发式) ds 和距离之间的一种递减关系, 另外一个术语被创立(用第二组启发式), d^2s , 并再考虑它的值。然后另外一个关系被发现, 术语 d^2s 与 ds 也似乎是反比关系, 于是定义它们的乘积 d^3s^2 为一个新的变量。BACON. 3 发现该术语有一个定值, 于是创建第三层次的一个描述簇(用第二组启发式); 在考虑每一个向量对象时, 都将太阳是原点对象作为关于这个规律的附加条件(用第二组启发式)。

第三, 当 BACON. 3 考虑不同的另一组对象, 如木星和它的卫星时, 这些对象很稳定地呈现这个规律。不用再重复过程, 它只要计算(用第三组启发式)已有概念的值。再一次, 理论词项 d^3s^2 被发现(用第二组启发式)是常数, 但这一次它有不同的值。这些簇的共同特征是以木星为原点对象, 这一点被加到一个新的第三层次描述簇中, 作为条件(用第二组启发式)。注意 s 的值与行星运动周期 p 成反比, 因此, $d^3s^2 = 0.97146$ 是开普勒第三定律 $D^3/P^2 = c$ 的另一种表示形式。

2. BACON 系统的一般性特征

BACON 系统已经重新发现了物理学、化学中的多个重要经验定律,作为 AI 中的一个计算发现系统,它的一般性程度如何是人们最关心的问题。程序的开发者和评论者曾部分讨论了 BACON 的一般性问题。尤其是兰利本人对 BACON. 3 的工作做了定量评价。这些工作可以作为我们下面较为全面地讨论 BACON 系统一般性特征的基础。

2.1 所发现定律的表达形式具有多样性

BACON. 3 发现了 5 个经验定律,它们的表达式如表 1-3 所示。

表 1-3 BACON. 3 发现的方程^[4]

经验定律	方 程
理想气体定律	$pV/nT=K_1$
开普勒第三定律	$d^3 \left[\frac{(a-K_2)}{t} \right]^2 = K_3$
库仑定律	$\frac{Fd^2}{q_1 q_2} = K_4$
伽利略定律	$\frac{dp^2}{Lt^2} = K_5$
欧姆定律	$\frac{D^2 T}{(LI + K_6 D^2 I)} = K_7$

在理想气体方程中, n 是气体的量(摩尔数), p 是气体被施加的压强, V 是气体体积, T 是气体温度(开尔文温度), K_1 是一个常数。

在开普勒第三定律方程中,括号内部分是角度 a 与时间 t 组成的线性方程的斜率,是周期的倒数, d 是行星(或卫星)距太阳(或中心体)的距离, K_3 是一个常数(0.97146,如前所述)。

在库仑定律方程中, F 是两个小球(在扭秤中的)间的电引力, d 是两小球间的初始距离, q_1 和 q_2 为小球所带电荷, K_4 是一个常数(8.99×10^9 牛顿米²/库仑²)。

在伽利略定律(单摆运动定律和匀加速定律)方程中, P 是单摆周期; L 是支撑物长度; d 是一个物体被释放后所经过的距离; t 是物体被释放所流逝的时间; K_5 是一个常数。

在欧姆定律方程中, T 是被一根铜线轻轻触及的一根金属棒两端的温度, L 是铜线长度, D 是铜线直径, I 是经过铜线的电流, K_6 和 K_7 是常数。

BACON. 3 发现的这几个经验定律首先表现出在描述对象方面的多样性^{[16]42}:从关于太阳系的定律,到对运动、气体、电等物理现象的描述。同时,还表