

# 冯·诺依曼的计算机科学哲学思想

任晓明 潘 沁

(南开大学 哲学院 天津 300071)

**摘要:** 冯·诺依曼是计算机科学哲学理论的主要奠基人之一。他的计算机科学哲学思想主要体现在他的自动机理论中。冯·诺依曼为自动机理论奠定了逻辑基础。他认为最高层次的抽象应当借助严密的数理逻辑方法去完成。在他看来,只有抽象的形式结构可以了解整个世界;只有严密的逻辑体系才可能包含普遍真理,计算机的设计必须追求逻辑简洁性。在他看来,借助数量极少的术语和规则可以在计算机上作出极其复杂的计算或推理。不断追求逻辑的简洁性和形式美,是计算机科学研究的永恒目标。逻辑简洁性、数学和谐性和形式美的理念在他的自动机理论中表现得淋漓尽致。冯·诺依曼的自动机理论源于毕达哥拉斯主义,是毕达哥拉斯主义数学自然观的产物。

**关键词:** 冯·诺依曼;自动机理论;计算机科学哲学;毕达哥拉斯主义

中图分类号:N02

文献标识码:A

文章编号:1674-7062(2011)04-0018-05

冯·诺依曼(John Von Neumann)的计算机科学哲学思想主要体现在计算机逻辑理论和自动机理论中。他的自动机理论研究始于他对电子计算机逻辑理论的研究。早期的计算机的逻辑设计是他提出自动机理论的第一步,随后他又进一步提出了自动机理论的总体构想与模型。冯·诺依曼的自动机理论是高度数学化、形式化的,他常常把他的自动机理论说成是“自动机的逻辑理论”,而不只是谈“自动机理论”。追溯冯·诺依曼计算机和自动机理论的历史渊源,考察他的计算机科学方法论,我们会发现,冯·诺依曼的计算机科学哲学的基本理念源于古希腊毕达哥拉斯主义,他的计算机科学哲学思想是毕达哥拉斯数学自然观的产物。

## 一 逻辑简洁性和数学和谐性: 建构“冯·诺依曼机”的方法论原则

冯·诺依曼是第一台电子计算机的研制者,他在其中的主要贡献是创立了计算机的逻辑理论。他

的计算机逻辑结构的设计奠定了后来的计算机逻辑理论的基础。下面我们来看看“冯·诺依曼机”的逻辑设计是如何体现数学和谐性和逻辑简洁性原则的。

20世纪30年代,电子学的发展以及研制穿孔卡片式统计分析机的经验,为创立电子计算机提供了主要的技术前提。当时,负责研制第一台计算机即ENIAC机的成员主要是一些物理学家和工程师,例如,负责电子计算机总设计方案的是物理学家莫齐利(John W. Mauchly),芬兰人艾克特(J. Presper Eckert)担任总工程师,他负责解决制造中的工程技术问题,而戈德斯汀(Godesting)负责科研管理。虽然ENIAC机的制造采用了当时最先进的电子技术,但由于存储容量太小、程序不能存储其中等缺陷,极大地限制了机器的运算速度,它的先天不足预示着计算机需要更合理的结构设计。尽管从当时的技术条件看已具备制造通用电子计算机的条件,但在计算机的结构设计上还缺乏原理指导。正在这一关键

【收稿日期】 2011-04-24

【基金项目】 国家社科基金后期资助项目(07FZX003)

【作者简介】 任晓明(1953-),男,四川泸州人,南开大学教授、博士生导师,研究方向为逻辑学和科技哲学;

潘 沁(1974-),女,湖北荆州人,南开大学博士研究生,桂林电子科技大学副教授,研究方向为科技哲学。

时刻,冯·诺依曼适逢其时地出现了。

冯·诺依曼来到摩尔学院,参观了正在建造的ENIAC电子计算机。在研制现场,他提出的第一个问题就是:计算机的逻辑结构是什么?这就让那些原来对他心存疑虑的人们不由得暗暗佩服:不愧是一位天才的科学家,一下子就点到问题的要害。从那以后,冯·诺依曼实际上成为摩尔学院有关计算机逻辑结构设计的顾问。一来到摩尔学院,冯·诺依曼就开始研究新机器的逻辑结构。在他出场之前,摩尔学院的研究小组主要关注的是技术问题,自从他来了之后,他就成了逻辑问题的引导者。1945年6月,在ENIAC的基础上,冯·诺依曼提出了一个新的改进方案,一是用二进制代替十进制,进一步提高电子元件的运算速度;二是把存储程序放在计算机内部的存储器中。按这一结构建造的计算机称为存储程序计算机,又称为“冯·诺依曼机”。他提出的EDVAC方案是计算机发展史上的一个划时代的文献。这个方案确定了电子计算机由以下几部分构成:运算器、控制器、存储器、输入、输出,这也被称为“冯·诺依曼结构”。冯·诺依曼的逻辑设计具有以下特点:

(1) 把电路设计与逻辑设计分开,为建立理想化的自动机奠定了基础。

(2) 研究了计算机的一般组织结构、程序编制和控制问题,为具体实现通用电子计算机铺平了道路。

(3) 把人的神经系统与人工机器加以比较,开创了生物自动机研究的新方向。

在这里我们不禁要问一个问题。冯·诺依曼本是一个数学家,此前他对计算机的研究,特别是技术方面知之甚少,他何以能一下子看出计算机设计的关键在于其逻辑结构呢?他的第一个问题何以就是“计算机的逻辑结构是什么”?

这与冯·诺依曼把数学和谐性、逻辑简洁性看做一种重要的启发性原则是分不开的。在20世纪30和40年代,申农(Shannon)的信息工程、图灵(Turing)的理想计算机理论、匈牙利物理学家奥特维(Rudolf Ortway)对人脑的研究引发了冯·诺依曼对信息处理理论的兴趣,而关于计算机的逻辑设计的思想则深受麦卡洛克(McCulloch)和皮茨(Pitts)关于人工神经网络研究成果的启发。

在《神经活动中思想内在性的逻辑演算》(1943)一文中,麦卡洛克和皮茨把简单的数学规则应用于复杂的大脑信息处理过程的研究成果给冯·

诺依曼留下深刻的印象。皮茨用一种简单的逻辑演算方法表征了极其复杂的人脑神经网络。他们的工作使冯·诺依曼看到了将人脑信息过程数学定律化的潜在可能。“当麦卡洛克和皮茨继续发展他们的思想时,冯·诺依曼开始沿着自己的方向独立研究,使他们的思想成为其自动机逻辑理论的基础。”<sup>[1]</sup>冯·诺依曼研究了麦卡洛克和皮茨的工作以及图灵在通用计算机上的工作,认为这些想象的机器都是与数理逻辑共存的。在他看来,自动机所能做的都可以用逻辑语言来描述,反之,所有能用逻辑语言严格描述的也可以由自动机来做。他认为麦卡洛克-皮茨理论的优点在于,用一种简单的数理逻辑模型来刻画人脑的复杂神经系统,而不局限于神经元真实的生物和化学性质的复杂性;相反,神经元被当做一个“黑箱”,只研究它们输入和输出信号的数学规则以及神经网络的结合方式。冯·诺依曼认为麦卡洛克和皮茨运用了数学中的公理化方法,是对理想细胞而不是真实的细胞做出研究,理想细胞具有真实细胞的最本质特征,前者比后者更简洁。显然,这里需要的是数学上的和谐且逻辑上的简洁。

在有关EDVAC机的设计方案(1945)中,冯·诺依曼所描述的存储程序计算机便是由麦卡洛克和皮茨设想的“神经元”(neurons)所构成的自动机而不是由真空管、继电器或机械开关等常规元件构成的机器。在EDVAC报告发表的那一年,冯·诺依曼已经清楚地指明了电子计算机的设计背后的逻辑基础。他在一篇文章的引言中指出“在本文中,我们将尝试不仅从数学的观点,而且从工程师和逻辑学家(即真正适合设计科学工具的人)的观点来探讨(大规模计算)机器。”<sup>[2]32</sup>受麦卡洛克和皮茨的理想化神经元的逻辑设计的启发,冯·诺依曼设计了一种理想化的开关延迟元件。这种理想化计算元件的使用有以下两个优点:

(1) 它能使设计者把计算机的逻辑设计与电路设计分开。在ENIAC的设计中,设计者们也提出过逻辑设计的规则,但是这些规则与电路设计规则相互联系、相互纠结。有了这种理想化的计算元件,设计者就能把计算机的纯逻辑要求(如存储和真值函数的要求)与技术状况(材料和元件的物理局限等)所提出的要求区分开来考虑。

(2) 理想化计算元件的使用也为自动机理论的建立奠定了基础。理想化元件的逻辑设计可以借助数理逻辑的严密手段来实现,能够抽象化、理想化;而工程设计则是一种技巧,不能做这样的处理。另

外,理想化计算元件的使用,能使我们把人脑与计算机、神经元与计算元件相互对照、相互比较。<sup>[3]9</sup>

可见,在冯·诺依曼看来,计算机的本质是逻辑的抽象。正如戈德斯汀所说“就我所知,冯·诺依曼是第一个把计算机的本质理解为行使逻辑功能而电路只是辅助设施的人。他不仅是这样理解的,而且详细地研究了这两个方面的作用以及相互的影响。现在看来,这似乎非常陈腐不值一提,但在1944年,这是思想上的伟大进步。在给冯·诺依曼的信中,我这样写道,‘带着强烈的兴趣我仔细阅读了你的报告,我认为它具有非常重要的价值,因为它给出了机器的完整逻辑结构。’”<sup>[4]</sup>

我们知道,柏拉图说过,“自然界爱好简单性和统一,自然之中没有无用和多余的东西存在”,<sup>[5]</sup>这一思想对冯·诺依曼影响极大。冯·诺依曼在晚年,当他的学生问起他做事的秘诀时,他只是说了“简单”这两个字。实际上,他一生的研究都遵从数学和谐性和逻辑简洁性原则。在《计算机的一般逻辑理论》的演讲中,冯·诺依曼曾多次使用了为使问题更简单的划分与剔除方法。例如,在探讨生物自动机和人工自动机的数字特征与模拟特征时,他曾这样说道“生物有机体是部分数字化部分模拟的机制。计算机器——我这里所讨论的计算机器的最近的模式——都是纯数字化的,于是我必须要求你们接受这种系统的简单化。虽然我深知否认生物有机体中模拟成分的重要性是荒谬的,但为了讨论的简单,忽略这一部分,我将把生物有机体作为纯数字化自动机来考虑。”<sup>[2]297</sup>在探讨人类中枢神经系统与人工自动机的相应系统时,他也对所探讨的问题做了划分,对两类自动机的元素合成进行了公理化的讨论,“在比较生物有机体,特别是复杂的有机体——人类中枢神经系统与人工自动机——的时候,下列局限性必须被考虑。自然系统非常复杂,需要把系统中表现的问题分成几个部分。划分的方法在现在的背景下具有非常重要的意义:有机体可以被看成是由几个部分的元素构成的,这些元素在一定程度上是独立的、基本的单位。问题的第二部分是了解这些元素如何构成一个整体,整体的功能如何由这些元素来表现。问题的第一部分现在在生理学中占支配地位,它与有机化学和物理化学联系紧密。量子机制可能对它的发展也非常有帮助,我没有资格谈论这个问题,这也不是我在这里所要关注的。另一方面,问题的第二部分,可能更吸引我们这些具有数学或逻辑背景口味的人。带着这种态度,

我们将倾向于在公理化的过程中,移除问题的第一部分,而集中于第二部分。”<sup>[2]289</sup>

冯·诺依曼认为,强有力的计算机可为数学家提供启发性提示,这一观点与他坚信纯数学在观念和问题上强烈依赖于实验科学有关。他认为数学家对问题的选择标准的成功主要源于审美。<sup>[3]2-4</sup>在他看来,数学和谐体现在形式美和对称中,计算机科学追求的目标之一是数学和谐性。另一方面,冯·诺依曼特别强调逻辑简洁性在计算机科学研究中的重要作用。所谓逻辑简洁性方法是指对认识对象进行最大程度的抽象和简化处理后体现出其性质和规律。按照毕达哥拉斯主义精神,科学研究中不论多么复杂的现象,都服从几条简单的规律,可以作量化处理,可以用符号语言描述。冯·诺依曼的上述研究恰恰体现了这一原则。冯·诺依曼的计算机科学研究始终贯彻和执行了毕达哥拉斯主义的数学和谐性和逻辑简洁性原则。

## 二 数理逻辑与自动机:冯·诺依曼发展自动机逻辑理论的构想

冯·诺依曼早期在计算机逻辑和程序设计上的工作,使他认识到数理逻辑将在自动机理论中起着非常重要的作用。他在研究自动机理论时,注意到了数理逻辑与自动机之间的联系。实际上,哥德尔在当时已经阐明了数理逻辑与自动机的关系。哥德尔认为,逻辑本质上是递归的,他认为可以把数理逻辑还原为计算理论,认为递归函数是能在图灵机上进行计算的函数。所以,可以从自动机的角度来看待数理逻辑;反过来,数理逻辑亦可用于自动机的分析和综合。自动机的逻辑结构能用理想的开关—延迟元件来表示,然后翻译成数理逻辑符号。而冯·诺依曼却进一步认识到,自动机的数学和逻辑在形式特点上与数理逻辑是有所不同的。他认为当时的数理逻辑虽然有用,但对于自动机理论来说是不够的。他相信一种新的自动机逻辑理论即将兴起,它与概率理论、热力学和信息理论非常类似并有着紧密的联系。

冯·诺依曼认为,要真正掌握自动机理论,就需要恰当的数学和逻辑理论,他把自动机数学与当时的逻辑学作了比较,并指出了自动机数学理论的特点,并指出缺乏恰当的数学和逻辑理论所造出的后果。在他看来:

(1) 自动机数学中使用分析的数学方法,而数理逻辑是组合的。

自动机数学中使用分析的数学方法有方法论上的优点,而数理逻辑是组合的。“搞形式逻辑的人谁都会承认,从技术上讲,形式逻辑是数学上最难驾驭的部分之一。其原因在于,它处理严格的全有或全无概念,它与实数或复数的连续性概念没有什么联系,即与数学分析没有什么联系。而从技术上讲,分析是数学最成功、最精致的部分。因此,形式逻辑由于它的研究方法、与数学的最成功部分的方法不同,因而只能成为数学领域的最难的部分,只能是组合的”。<sup>[2]303</sup>

冯·诺依曼指出,比起过去和现在的形式逻辑(指数理逻辑)来,自动机数学的全有或全无性质很弱。它的组合性极少,分析性却较多。事实上,有大量迹象可使我们相信,这种新的逻辑系统接近于别的学科,这个学科过去与逻辑少有联系。也就是说,具有玻尔兹曼所提出的那种形式的热力学的特征,<sup>[6]</sup>它在某些方面非常接近于控制和测试信息的理论物理学部分。它多半是分析的,而不是组合的。

(2) 自动机的理论是概率的,而数理逻辑是确定性的。

冯·诺依曼认为,在自动机理论中,有一个必须解决的主要问题,那就是如何处理自动机出现故障的概率的问题,该问题是不能用通常的逻辑方法解决的,因为数理逻辑只能进行理想化的开关—延迟元件的确定性运算,而不包括处理自动机故障的概率的逻辑。因此,在对自动机进行逻辑设计时,仅用数理逻辑是不够的,还必须使用概率逻辑,把概率逻辑作为自动机运算的重要部分。冯·诺依曼还认为,在研究自动机的功能时,必须注意到已有数理逻辑的不足。既然自动机逻辑中包含故障出现的概率,那么我们就应该考虑运算量的大小。数理逻辑通常考虑的是,能不能借助自动机在有穷步骤内完成运算,而不考虑运算量有多大。但是,从自动机出现故障的实际情况来看,运算步骤越多,出故障(或错误)的概率就越大。因此,在计算机的实际应用中,我们必须关注计算量的大小。总之,冯·诺依曼认为“就整个现代逻辑而言,唯一重要的是一个结果是否在有限几个基本步骤内得到。”<sup>[7]</sup>

在冯·诺依曼看来,我们需要一个高度数学化的、更简洁的自动机与信息理论。缺乏恰当的自动机逻辑理论是限制计算机科学发展的一大障碍。如果我们没有精确而简洁的自动机与信息理论,我们就不可能建造出具有更高复杂性的机器,也就不太可能产生更具精确性的自动机。注重数学和谐性、

对称性和简洁性是冯·诺依曼计算机逻辑研究的方法论原则。

### 三 简要的评论

冯·诺依曼是计算机科学哲学理论的主要奠基人之一。为了实现莱布尼茨把人的理性还原为计算的梦想,冯·诺依曼基于图灵通用计算机的数学模型,提出了一种理论计算机模型,即以生物系统为参照系的自动机理论。冯·诺依曼计算机科学哲学思想主要表现在以下几个方面:

第一,冯·诺依曼用数学和逻辑的形式化方法揭示了计算机最本质的方面,为计算机科学尤其是自动机理论奠定了逻辑基础。

冯·诺依曼对自动机数学的分析开始于数理逻辑,并逐步转向分析数学,转向概率论,最后讨论热力学。通过这种分析而建立的自动机理论,能使我们把握极其复杂的自动机,尤其是人的神经系统。在他看来,数学推理是由人的神经系统实现的,而数学推理借以进行的“初始”语言类似于自动机的初始语言。因此,自动机理论将影响逻辑和数学的基本概念,这是很有可能的。他指出“我希望,对神经系统所作的更深入的数学研讨……将会影响我们对数学自身各个方面的理解。事实上,它将会改变我们对数学和逻辑学的固有的看法。”<sup>[8]</sup>由此可见,冯·诺依曼自动机理论实际上是毕达哥拉斯数学自然观的产物。

第二,冯·诺依曼关于计算机逻辑结构的考虑、对自动机理论的不断探讨,都是寻求自动机理论背后的数学和逻辑基础的顽强努力。

冯·诺依曼的计算机逻辑和方法论所强调的是,用数量极少的术语和规则就可以在计算机上作出极其复杂的计算或推理。不断追求数学的简洁性、对称性和形式美,是计算机科学研究的主要目标。这恰恰体现了数学理性和逻辑理性的精髓。毕达哥拉斯主义的数学和谐性、逻辑简洁性和形式美的理念在这里表现得淋漓尽致。换言之,他的逻辑方法论中充分体现了数学和谐性原则和逻辑简洁性原则。

第三,追求数学的和谐性、对称性和形式美在其计算机科学哲学观念中占主导地位。冯·诺依曼认为逻辑体系具有普遍性,而形式化的逻辑结构在某种程度上刻画了事物的抽象本质。他对寻找逻辑体系的局限性不感兴趣,但当某种局限性被他发现后,他便开始考虑如何利用更加形式化的手段去克服它

(体现在他对哥德尔不完全性定理的态度上)。对他来说最高层次的抽象——如逻辑和数学基础——应当通过严密的数理逻辑手段去完成。在接触到实际问题时,冯·诺依曼也总能迅速地给出适当的数学形式化表述并进行纯形式的推理,不仅如此,将数理逻辑和数学付诸最大限度应用,是他终生为之努力奋斗的目标。在他看来,利用抽象的形式结构可以了解整个世界——包括社会生活和精神意识,这在他对数学基础、量子理论和计算机组织的形式化工作中都有所反映。可以说,冯·诺依曼坚持着这样一种观念:只有严密的逻辑体系才可能包含永恒的普遍真理,追求数学的和谐性、对称性和形式美是计算机科学研究的永恒目标,这一切都与毕达哥拉斯主义是一脉相承的,毕达哥拉斯主义是冯·诺依曼计算机科学哲学的核心理念。

#### 【参 考 文 献】

[1] Aspray W. John von Neumann and the Origins of Modern

Computing. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1990: 181.

[2] Taub A H, Von Neumann. Collected Works [C]. New York: Pergamon Press, 1963(5).

[3] John Von Neumann, Arthur W. Burks. Theory of Self-reproduction Automata [M]. Urbana and London: University of Illinois Press, 1966.

[4] Gddststine H H. The Computer from Pascal to von Neumann [M]. Princeton: Princeton University Press, 1973: 192.

[5] 桂起权. 科学思想的源流 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1994: 103.

[6] 任晓明, 桂起权. 计算机科学哲学研究 [M]. 北京: 人民出版社, 2010: 122.

[7] Aspray W, Burks A. Papers of John von Neumann on Computing and Computer Theory [M]. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1987: 402.

[8] 冯·诺依曼. 计算机与人脑 [M]. 甘子玉, 译. 北京: 商务印书馆, 2002: 2.

## On Von Neumann's Philosophy of Computer Science

REN Xiao-ming, PAN Qin

( Faculty of Philosophy, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The philosophy of computer science, as an individual discipline, is vaguely based upon and still influenced by the ideas of von Neumann and his logical conceptualization of Automata. Von Neumann sees abstract structure as the best approach we have to deal with reality and truth inhabits only in mathematical rigor. He believes that even the most complicated reasoning and calculation can be reduced into limited simple rules and assumptions; therefore the only thing worthy is to try to achieve the logical simplicity, harmony and formal beauty of mathematical proof. Von Neumann's theory of automata originated from the Pythagorasism, and is a product of the Pythagorean's view of nature of mathematics.

**Key words:** Von Neumann; theory of automata; philosophy of computer science; Pythagorasism

(责任编辑 殷杰)