

前言¹

自从 20 世纪 40 年代后期，约翰·冯·纽曼教授开始研究一套关于自动机的理论。他以数学和逻辑的形式，构想出了一套系统性理论，以便对于大自然中的系统（即生物自动机）以及模拟和数字计算机（即人造的自动机）取得实质性的理解。

在这方面，冯纽曼已经完成了五篇著作，它们分别是（按照时间顺序）：

（1）《自动机的通用逻辑理论》，在 1948 年 9 月的希克森会议（Hixon Symposium）上宣读，并于 1951 年发表，参见《冯纽曼文集 5》：288-328。

（2）《复杂自动机的理论与结构》，来自于冯纽曼 1949 年 12 月在伊利诺斯大学（University of Illinois）作的五个讲座，也即本书的第一部分。

（3）《概率逻辑：从不可靠组件合成可靠整体》，发表于 1952 年加州理工学院讲座。参见《冯纽曼文集 5》，329-378。

（4）《自动机理论：构建、复制以及同质性》冯纽曼从 1952 年秋天起开始写这篇手稿，为期一年。即本书的第二部分。

（5）《计算机与人脑》写于 1955 年至 1956 年间，发表于 1958 年。

其中第二和第四篇著作在他去世的时候仍然是初稿，还需要作较多的编辑以完善。编者将它们合编为本书的前后两部分，也概括了冯纽曼在自动机理论方面的工作。

为了更好地整理这些手稿，编者对冯纽曼在计算机方面的所有贡献，包括自动机理论作了一番研究，之后在第一部分的“导读”中我还会提到这些工作。

冯纽曼对复杂的自动装置特别感兴趣，这包括人类的神经系统以及他所预见到的，未来的大型计算机等。作为设计大规模计算机的前提条件，他构思了一套用基本逻辑单元构成复杂系统的理论。在他专注研究的自动机理论中，有两个问题与复杂性有着密切的关系：可靠性问题以及自复制问题。一方面，构件的可靠性直接限制了能够构造出的自动机的复杂程度；另一方面，为了实现类似生命的自复制，我们又需要自动机能够达到相当高的复杂度，这个矛盾构成了冯纽曼思考的焦点。

冯纽曼在《概率逻辑：从不可靠组件合成可靠整体》一书中已用相当的篇幅讨论了可靠性的问题。而他有关自复制自动机的工作则主要集中在本文集中。在占本书较大篇幅的第二部分中，自复制自动机具体的逻辑设计得到了讨论。而在较短的第一部分（即五次课程的讲义）中，冯纽曼虽然主要阐述了一般意义上的复杂自动机，但重点还是要说明自复制自动机的动力模型（第五堂课）。因此，我们以“自复制自动机理论”作为本书的总标题，以求合乎题旨。

由于冯纽曼教授不幸英年早逝²，生前未能完成自动机理论的全部工作。所以本书两部分的手稿都还没有写完，处于初稿的状态。作为某种补偿，读者可以从中一窥冯纽曼强大的思考

¹ 译者注：本书由冯纽曼弟子 ARTHUR W. BURKS 编辑，序言中“编者”“我”即指 Burks 教授。

² 译者注：冯纽曼于 1957 年死于骨癌，其主要原因就在于他早期参与曼哈顿工程研制原子弹过程中受到的核辐射。

过程。在一般情况下，具有这样水准的思想家的草稿是难得遇见的。虑及于此，编者尽力保留了冯纽曼手稿的原始风格，而仅稍许修改以便阅读。这样，读者就能直观体验到原始手稿之特色，正文部分主要包括原始手稿，编者编辑添加的内容以括弧标出。

冯纽曼原计划把五次伊利诺斯大学讲座（1949年12月讲授）整理成一本关于自动机理论的书。这些讲座当时是有录音记录的，不幸的是，录音带及打字稿的质量不如人意，缺少了很多内容，难以理解。冯纽曼还没有来得及编辑这些内容，他原打算以“自动机理论：构造、复制以及同态性”来做这本书的标题。录音现在也已经找不到了。虽然如此，伊利诺斯大学讲座的内容至关重要，应该出版。于是我们尽力把残缺的原稿加以整理后付梓，这也就是本文集的第一部分。

冯纽曼曾为发表这些讲座准备了详尽的提纲，而讲座的内容也基本与提纲相符。提纲的标题是“复杂自动机的理论与结构”，包括三个主题：

- 高速数字计算机器的逻辑结构以及它们的限制；
- 计算机器与其它自动装置（人工和生物的）的比较；
- 从生物神经系统做出的推理和启示；

以下五次讲座的题目和内容，都对应于这三个主题。每次讲座前的“摘要”部分大致包括了其意图，但由于种种原因，讲座的内容并非完全符合摘要。

因为原始手稿还比较粗糙，我们不得不做大量的编辑工作。录音打字稿中，冯纽曼在黑板前板书讲座的部分，也即课程的主要内容的记录尤其混乱。编者只能借用两本当时的听课笔记以作校订。我尽可能地按照冯纽曼教授习惯的措辞方式来写作，但也不可避免地要用到编者自己的语言。有时候，相比于尝试去重建原始文本，总结其大意要容易得多。另外，在已发表的作品中，冯纽曼曾提到过伊利诺斯大学讲座中的一些重要概念，或者这些概念是众所周知的。在这种情况下，我会对冯纽曼所说的话进行总结或者是给出他已发表工作的参考文献。

我把我自己的话放到了括号“【】”中。而把原属于冯纽曼的话放在正文中间，需要说明的是，即使是没有放到括号里面的话也是经过不少修改的。

相比之下，第二部分手稿：“自动机理论：构建、复制和同质性”的完成度要好很多。除了对于“连接循环和计时循环的内存控制器（参见第4.1节、4.2节）”这个具体的自动机流程，冯纽曼曾写过一个提纲和设计图以外，其他的文字也都是初稿，但已经达到了可以出版的状态。除以下三种类型的情况以外，我们尽量保持原文原封不动的状态，这包括：

（1）首先，手稿没有把配图公式等加以编号，导致阅读上的不便。由于图形没有标题，公式、小节以及图形都用同样数字来标记，所以如果没有明确说明，读者搞不清某一个数字究竟指的是公式、小节还是图形。手稿把小节标题列在一张单独的表中，冯纽曼还把计划用到的脚注放到了另外一张单独的表里。他仅用单个的字母来标识自动机组件。例如，他用“A”和“B”来指代我命名为“构建单元CU”和“记忆控制MC”的零件。我前后多次阅读这个手稿，每次我都惊叹冯纽曼是怎样记清如此多的零件而不弄混的。

在编辑的过程中，编者曾花了不少力气给这些零件加上注释。例如，在冯纽曼写到“CO”的时候，我通常把它改为“控制零件CO”。我给每张图加上了标题，并且写完了参考文献的脚注。冯纽曼曾在图上写下了一些解释性的注释，我把它们放到了正文中。我做了大量类似

的修改，正文中均不另加说明。

此外，我还在正文的多处添加了脚注、评论、解释，并做了一些总结；还加入第五章作为总结。所有这些添加的内容都放到了中括号“【】”里。冯纽曼原本用到的括号则改成大括号，经常使用的“[0]”和“[1]”等特殊符号则除外。除了放在中括号中的内容，我还添加了表格 I 和 V，以及不少插图。图 1-8,16,18,19,22,24,28-36,38,39 和 41 是冯纽曼本人绘制的；其他插图则是编者增添的。

(2) 其次，第二部分手稿中间有不少错误，这包括文字上的笔误（直接加以改正），考虑欠周到的情况（我在括号中加上了修改和评论），也包括较大的，需要重新设计的欠缺（在第 5.1.1 和 5.1.2 节中进行了讨论）。所有这些错误都可以通过修改得到更正，但由于一些零件的设计在早期手稿中已经固定，并被沿用到了后期，一些小问题扩散了开来，甚至被“放大”了。对于这些失误，我们应该认识到，由于还是修改中的初稿，作者一边在思考写作，一边还在调整自动机的设计与参数，存在一些差错是完全正常的。

(3) 再次，第二部分手稿并未写完。在差不多完成了纸带单元的设计之后，写作就终止了。作为弥补，在第 5 章中，我会试图说明如何完成冯纽曼自复制自动机的设计。

从技术角度说，手稿的编辑工作是相当复杂和棘手的。而上述问题则进一步加重了困难。从某种意义上说，与其对第 2 章之后的手稿进行修订，还不如按照冯纽曼的思路重新构建自动机来得简单。但是我们不能这样做，不仅因为这份手稿的历史意义，而且还因为手稿提供了一个难得的机会，让我们能体会思想在伟大的心智中形成的过程。因此，编者竭尽全力订正了手稿，添加了一些评论而保留原作的风格，只是令之更加易读而已。

在这里，我想感谢所有那些给予我帮助的人。感谢已故的克拉拉·冯纽曼-埃卡特（Klara von Neumann-Eckardt）女士给我提供她丈夫手稿的一些信息。一些与冯纽曼一起在计算机方面工作的人给了我第一手的信息，他们是：Abraham Taub, Herman Goldstine, Adele Goldstine 特别是 Julian Bigelow 和斯坦·乌拉姆(Stan Ulam)；冯纽曼经常与 Bigelow 和乌拉姆讨论有关自动机理论的工作。John Kemeny, Pierce Ketchum, E.F. Moore 以及克劳德·香农(Claude Shannon)曾经听过他的自动机方面的讲座并与冯纽曼进行过讨论。还有库特·哥德尔(Kurt Godel)，得到他的允许后，我把他给我的回信放到了第 1 部分第 2 个讲座后面一并发表了。我还要感谢我的研究生们以及研究助理们，他们给予了我技术上的帮助，特别是 Michael Faiman, John Hanne, James Thatcher, Stephen Hedetniemi, Frederick Suppe, 以及 Richard Laing, Alice Finney, Karen Brandt, Ann Jacobs 以及 Alice R. Burks 曾经帮助我进行编辑工作。M.Elizabeth Brandt 帮我画图。我的编辑工作由自然科学基金资助。所有关于编辑方面的责任都由我个人承担。

阿瑟·伯克斯
于安 阿伯，1965

导读

冯纽曼在计算机方面的工作

冯纽曼于 1903 年 12 月 28 日在匈牙利的布达佩斯出生，于 1957 年 2 月 8 日在美国华盛顿特区去世。曾在瑞士苏黎世联邦高等工业学院化学专业就学，并于布达佩斯大学获博士学位。他曾于 1927 年在德国柏林大学，1929 年在汉堡大学分别拿到过无薪讲师（Privatdozent）的职位。1930 年的时候，他以访问学者的身份来到美国的普林斯顿大学，并于次年获得全职教授职位。1933 年，他成为新成立的普林斯顿高等研究院的教授之一，全力投入理论研究，这也是他终身从事的工作。

在生命的后期，他仍旧保持了对理论的兴趣以及旺盛的创造力，并且热切投身于数学的应用中。在二战期间曾大量参与国防研究。他曾在原子弹研发中，特别在压紧起爆技术的发明上做出重大贡献。冯纽曼曾在多家政府试验室和组织机构担任顾问。并成为多家科学顾问委员会的成员。战争结束后，他仍然继续这些顾问咨询工作。概括起来，冯纽曼教授曾经在多个重要领域有所建树，这包括军事装备、潜艇作战、轰炸运筹、核武器（包括氢弹）、军事战略、天气预报、洲际弹道导弹、高速数字计算机以及计算理论等。1954 年 10 月，美国总统任命冯纽曼为美国原子能委员会委员，直到去世，他还在辛勤从事这方面的工作。冯纽曼一生曾获得多种奖项和荣誉，包括美国科学院院士，并以其在电子计算机方面的奠基工作获得原子能协会颁发的恩里科·费米奖。

作为数学家的冯纽曼

在他生命的最后几年，冯纽曼花了很多力气来建立一套有关自动机的理论。这也就是本文集的两篇未完成的手稿所涉及的主题。由于他的英年早逝，他没能将这个理论的全景展示给我们。因此，我们在这里将主要介绍这个自动机理论。由于冯纽曼的这个自动机的概念主要来源于数学和计算机，因此我们就从这些工作开始。

冯纽曼是一位非常伟大的数学家，他在多个数学领域中都有建树。据他自己认为，对数学贡献最大的是下面的三个领域：量子力学的数学基础，有关算符的理论以及遍历理论。在这些数学领域的研究为他之后发明现代计算机奠定了基础。在 20 世纪 20 年代晚期，他曾在符号逻辑、集合论、公理学以及证明论方面进行过研究。在 30 年代中期，他曾在格论、连续集合以及布尔代数方面做出过工作。此外，在 1928 年的著名论文以及 1944 年的书³中，他创立了现代的博弈数学理论。从 30 年代晚期直到二战结束为止，他在流体力学、动力学以及来自于核技术和气象学需求的连续体力学方面从事研究。在战争期间，他开始对计算科学以及计算机发生兴趣，这成为他战后的主要兴趣之一。

冯纽曼与计算科学

冯纽曼开始关注计算问题是源于他的流体力学研究。流体力学的很多现象都可以用非线性的偏微分方程建模。冯纽曼特别感兴趣流体中的湍流问题以及冲击波之间的相互作用。他很快

³ 与奥斯卡·摩根斯坦恩合著的《博弈论与经济行为》一书

发现，现有的分析方法并不适合获得有关这些非线性微分方程的定性信息。实际上，这是非线性偏微分方程的普遍特征。

冯纽曼的解决办法就是采用数值计算⁴的方法。在战争期间，他认识到计算方法是解决许多领域中的工程问题，包括核技术所不可忽缺的。因此，在战争中以及战后，当全新的高速通用计算机发明出来的时候，他很快地意识到这种新技术在于流体力学以及其它领域的巨大潜力。为此，他开发了一种具有重要意义的通用计算方法，让计算机可以用于纯数学以及应用数学的各种问题。

冯纽曼所创建的方法是利用计算机来求解一些关键情况的数值解，然后把结果作为一种启示来指导接下去的理论研究。冯纽曼相信实验和计算已经展示了在流体和其它非线性偏微分方程解集合的重要统计特征中存在着数理规律。这些规律和共性可以构成关于流体力学以及相应的非线性方程的新的理论基础。冯纽曼相信通过求解特殊的方程并把结果推广，就能够获得这些规律和共性。从这些特殊情况出发，我们就能够获得关于湍流、冲击波等现象的定性了解，由定性解逐步推广到定量解，从而最终建立满意的理论。相关内容可参见本文集前一部分的第一讲。

这种特别的使用计算机的方法极其重要，需要引起我们的重视。它的重要意义在于，我们并不是让计算机独立地寻求问题的解，而是作为一种辅助工具来发现有用概念，通用原理和一般理论。因此，也许我们应该称这种方法为启发式计算，这样会更贴切⁵。

启发式计算同传统的科学中的假设-归纳-试验的方法很像。我们可以根据可用信息做出某种假设，利用数学方法得出一些结论，并利用试验来对其进行验证，并最后形成新的假设，始终重复这几个步骤直到得到最终结果。在我们拥有计算机的情况下，我们也可以使用同样的方法，只是把上面提到的试验部分替换成计算。我们可以对探索的方程提出假设，并从中取出一些关键的特殊情况，然后使用计算机对这些特殊情况进行求解，从而比对假设与结果，然后提出新的假设，并继续这一循环。

计算当然也可以和实验数据进行比对。在这种情况下，计算机的启发式应用就变成了模拟仿真。计算本身仅能解答纯粹的数学问题，所以当我们无法得到经验结果以资参考的时候，启发式计算方法也可以用来解决纯数学的问题。例如，冯纽曼认为流体力学中的主要困难来源于我们对于非线性偏微分方程知识的缺乏，因此启发式计算或许能帮助数学家们建立一套切实可用的理论。他进一步指出，实际上我们已经在风洞实验方面取得了很大的进展，由于流体力学的基本方程是众所周知的，所以这些风洞实际上可以看成模拟计算机而非一种实验设备。

“... 很多纯数学或者应用数学的分支都急需计算设备的帮助，来打破那些在非线性问题上的纯解析方法屡屡失败的僵局... 高性能的计算设备可能在非线性偏微分方程这个领域以及其他现在认为困难甚至完全无法着手的领域为我们提供更多启发，甚至有可能会促进整个数学界的发展。”⁶

⁴ 参见乌拉姆，“约翰 冯 纽曼” pp 7-8, 28 以及波克霍夫，“流体力学” pp. 5,25

⁵ 参见乌拉姆“数学问题合集，第 8 章：“计算机作为一种启发式辅助工具”

⁶ 冯纽曼和 Goldstine，“关于大规模计算机器的原理”，冯纽曼文集 5.4。

冯纽曼认为强大的计算机会给数学家们提供“促进整个数学界发展的启发”，这一想法来源于他的强烈信念，即抽象科学来自现实问题，即使纯数学中间的问题和思辨也是源于实证科学的。“……当代数学最好的启发和动力……就是来源于自然科学。”⁷他认识到，数学并不是一种实证科学，而数学家们对数学问题进行选择以及决定成功标准，往往是一种科学上的审美。

“我大致这样认为（由于问题太复杂了，所以我只能说大概是这样）：数学的所有思想都来源于经验，虽然这些思想的形成历程很长、很模糊。但是，数学思想一旦创生了出来，它就具有了自己的生命，而且就像真正的生命一样具有创造力。这种形式的生命主要由纯粹的审美动机支配，而几乎同经验世界脱离了关系。然而，在这里，我想特别强调的一点是……如果一个数学主题已经远离了所有的实证源头，而且仅仅跟一些非常“抽象”的领域有交叉的时候，这个数学主题就会濒临衰退了……无论这一阶段何时来到，唯一补救的办法就是在它的源头处重生：重新注入或多或少的实证经验。”

这就是说，实证科学在纯数学中同样起到了一种启发性的作用：实证科学为数学提供了问题、还提示了为这些问题寻找解答的概念与原理。虽然冯纽曼从没这样说过，但是我想他会认为计算机的启发式应用可以在数学的一些领域扮演类似的角色。在第一个讲座中，他曾说纯数学中的那些最强有力的方法来自数学家对于问题的直觉经验和实践理解，这一点与人们在利用计算机对非线性偏微分方程求解的情况极其相似⁸。

值得注意的是，在启发式计算中，知识的来源还是人类做出的假设、猜想等，而并非来自机器。冯纽曼希望让机器尽可能地具备智能，但是他发现人类的直觉、空间想象力以及创新能力等是现在和可预见未来的计算机望尘莫及的。故不如说，冯纽曼更希望计算机成为一种强大的思想工具，使人类的能力、知识和创造力得以倍增。这个过程不可避免地需要人与机器进行大量交互，通过自动编译以及更先进的人体工学界面的帮助，可以让人们在未来更好地运用计算机。

在冯纽曼对于计算科学产生了兴趣之后，他为这门学科各方面，包括计算机技术在内，做出重要的贡献。现有的计算方法主要为手摇计算机以及打孔纸带设备设计的，因而不适用于新型的，快好几个数量级的电子计算机设备。因此我们需要新方法，而冯纽曼在多个不同的层面上开发了很多这样的方法。他设计算法，并编写程序，解决从基本函数的运算到非线性偏微分方程的积分甚至博弈求解等问题。

他曾设计了一种通用的技术来求解数值积分以及矩阵求逆。他在数值稳定性以及累计误差理论中也得到不少结果。他帮助发明了蒙特卡罗方法，用来求解积分微分方程、矩阵求逆，并提出用随机采样技术求解线性方程组⁹。在这个方法中，原始问题能够转化成是一个统计学的问题，然后通过大量的实例采样来用计算机求解。

冯纽曼还对计算机的设计与编程，乃至对计算理论都做出过重要的贡献。我们下面将对他在这方面的工作进行回顾。

⁷ “数学家”，冯纽曼文集 1.2，后一部分引言来源于同一篇文章，1.9

⁸ 鉴于冯纽曼特别强调数学发现中的启发性思维，一个有趣的地方是，冯纽曼自己在听觉方面的抽象能力远远高于视觉。参见乌拉姆写的“冯纽曼，1903-1957” pp.12,23 以及 38-39

⁹ 参见乌拉姆：“约翰·冯·诺依曼”第 33-34 页；冯纽曼文集 5.751-764。这种方法在 Metropolis 和乌拉姆的文章“蒙特卡罗方法”中介绍了。

计算机的逻辑设计

鉴于冯纽曼强烈爱好计算机，并且在逻辑和物理学等方面都有精深造诣，冯纽曼自然而然地投入到高性能电子数字计算机的开发过程中。世界上第一台电子计算机就是于 1943 至 1946 年在宾夕法尼亚大学（Pennsylvania university）的摩尔电子工程系设计建造的 ENIAC¹⁰。冯纽曼曾同这台机器结下了不解之缘，因此我们会详细地说一说。

这种建造一台通用目的的高速电子计算机的想法最早起源于物理学家 John Mauchly，他曾给美国陆军军械部提出有必要开发计算机器的建议，这一想法得到当时为军队工作的 H.H. Goldstine 博士的支持，在陆军的支持下，世界第一台计算机被制造了出来，当时主要设想用于弹道的计算。军方给予项目全力支持，而在机器被制造出来之后，看到机器计算火炮射表的速度，军人们感到十分震撼。ENIAC 是在 Mauchly 以及 J.P. Eckert 的带领下由多人共同设计建造的，编者本人也参加了。当我们正在制作这台机器的时候，冯纽曼正好访问了我们，他立刻对这个项目产生了兴趣。那时，ENIAC 的设计基本已经成形了，但是在机器完成后，冯纽曼告诉我们如何修改它的设计以便更容易地给它编程序。与此同时，他开发了一种革命性的计算机新式逻辑设计，我们接下来就会谈到。

ENIAC 相对于更早期的计算设备来说，当然是有翻天覆地的变化，但是更加有趣的是，ENIAC 同之后设计的计算机也有很多不同之处。主要在于两个基本方面：大量的计算单元可以半自动、半独立地同时运行，以及完全由真空管构成的高速存储器。所有这些设计都受限于当时的电子技术因素。

ENIAC 电路的工作主频是每秒钟十万次。为了获得更高的计算速度，所有 10（或者 20）位的十进制数字需要并行地处理；并且得建立大量的计算单元，每一个都需要一些局部编程，这样才能让总的主控程序单元协调很多计算来同时进行。在 ENIAC 中有 30 个基本单元：20 个加速器（每一个都可以完成 10 个数字的加法和存储运算），1 个乘法器，1 个除法器以及 1 个平方根运算器，3 个函数表单元，一个输入单元，一个输出单元，一个主控编程器，以及 2 个控制单元。所有这些单元都可以同时运行。

在当时，真空管是唯一的一种高速的可靠存储器（那时，还没有声延迟线，电子存储系统，磁芯等技术），所以我们主要使用真空管来完成高速存储以及算术和逻辑单元。这就会对计算机的高速存储带来很大的局限，因为真空管不仅造价昂贵，而且非常笨重（ENIAC 包含了 18000 个真空管，以至于很多怀疑者预言这样的一台机器永远无法正常工作）。作为机器核心的 20 位十进制数字单元的极限存储速度是由大量各种类型的低速存储设备决定的，这包括作为输入输出的电磁继电器，由手动机械开关控制的，用于表示任意数值函数以及存储编程信息的函数表电阻阵列，以及其他手动的机械开关、可插拔线路等。

通用计算机必须可以针对特定的问题编程序。在 ENIAC 中，编程序是需要手工做的：包括要设定每个计算单元的程序控制器中的机械开关，将各个程序控制器通过电线联到一起，以及设置函数表的开关。因此，这种编程的过程是非常冗长而累人的，而且也很难检验它是否正确，一旦程序被执行，计算机就不能干别的了。在 ENIAC 完成之后，冯纽曼展示了如何把它改进成集中编程的方式，这样，我们只要设置函数表上面的开关就行了。

¹⁰参见：伯克斯：“ENIAC 的电子计算电路”和“超级电子计算机，”Goldstine 及 Goldstine 的“电子数值积分以及计算机（ENIAC）”以及 Brainerd 和 Sharpless 著：“The ENIAC”

这三个函数表单元中的每一个都包含了容量为 104 个存储入口的开关存储器，每一个入口又包含 12 个十进制数值以及 2 个符号数值。然而，用来表示数字的脉冲与用来激活程序控制的脉冲具有同样的尺寸和形状。所以，函数表单元也可以用来存储程序信息。

与此同时，我们都共同关心更强大的计算机的设计。正如之前所讲，ENIAC 最大的一个弱点就是它高速存储器容量过小，这是由当时设计 ENIAC 时候的技术条件所制约的，因为当时真空管是已知的最可靠的高速存储元件了。当 J.P. Eckert 用声延迟线（acoustic delay line）作高速存储设备之后，这种限制就消除了，而且计算机工业也有了巨大的变革。声延迟线是由水银制成的，在战争期间主要用于雷达设备对脉冲进行延迟。Eckert 的想法是把一个水银延迟线的输出（通过一个放大器和脉冲滤波器）接回到它的输入端，这样就形成了一个环形的存储器，中间存有大量的波形。我们可以用水银延迟线以及一些真空管来制造一个 1000 比特的环形存储器，这与 ENIAC 所使用的双三级真空管仅能存储 1 比特形成了鲜明的对比。

在 ENIAC 中，只有几个正在被处理的，存储在电路中的数字可以被自动快速地修改；所有其他的数字和程序信息都在电磁继电器、开关以及连接电缆中间存在。现在则可以利用水银延迟线存储所有的信息，并及时进行访问。在 ENIAC 中，同步和异步两种工作方式并存。现在，利用水银延迟线存储脉冲信息，我们可以建造一种完全同步的，由我们称之为“时钟”的中央脉冲源控制所有电路的机器。Eckert 和 Mauchly 设计了一种电路，他们充分地考虑了水银延迟线机器的设计，可以以 1 兆的主频速度（相当于 ENIAC 的 10 倍）工作。最终，他们使用了二进制系统。由于延迟线是串行操作的，最简单地处理这些顺序到来的数据的方法就是串行。所有这都可以使我们能够构造一台比 ENIAC 小很多，却比它强大得多的机器。我们把这一机器称为 EDVAC。据估算，可以用仅仅 3000 个真空管建造出 EDVAC。

冯纽曼参与了这台计算机的详细设计工作中。所有的结果都收集在他的未发表手稿《EDVAC 初步设计》中¹¹。在这个设计中间，计算机可以用电子而非机械的方式来储存并修改计算程序，我将概述其内容。这一设计在以下方面都对我不无启发：把计算逻辑与硬件电路分离开来，与人类神经系统的比较，机器的通用架构，以及如何处理编程与控制等匠心独运之处。

冯纽曼把他的设计完全构建在开关-延迟元件的基础上，而这种思想主要来源于 McCulloch 和 Pitts¹²的神经网络：每一个模拟神经元都有一到三个输入，可以导致兴奋，也可能有一到两个抑制性的输入，一个阈值数字（1, 2, 3），以及一个延迟单元。当且仅当在 t 时刻下面两个条件被满足的时候，它才在 $t+1$ 时刻发射一个脉冲。这两个条件是：（1）没有抑制性的输入被激活，（2）被激活的兴奋输入的数量不小于阈值¹³。

这种应用理想化计算单元的设计思路有两个优点：首先，它可以让设计者把逻辑设计与计算机的电路设计分离。在设计 ENIAC 的过程中，我们开发了逻辑设计规则，但是它们不可避免地与电路设计规则混在了一起。现在用计算单元来设计，我们就能将计算机需要的纯粹逻辑（内存以及真值表）和技术要求以及计算机制造的材料和元件等问题分开了。第一步进行逻辑

¹¹ 这是“电子离散变量自动化计算机”，这个名称实际上最早来源于电子工程系的摩尔学院，尽管参与设计的人后来与摩尔学院已经没有关系了。后来在剑桥大学的 EDSAC 的逻辑设计也是基于这个报告的。Wilkes, “高速计算机设计的进展”和自动数字计算机。

¹² “神经活动思想中的逻辑运算（A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity）”

¹³ 与“概率逻辑：从不可靠组件合成可靠整体”一文中的阈值元素相似，但是与其不同的是抑制输入部分，参见冯纽曼文集 5.332。

辑设计；第二步则是电路设计。当然，做逻辑设计的时候也需要考虑到和之后的电路设计相匹配，我们不能过于理想化导致实际上无法实现。

其次，使用了理想计算单元，向建立自动机理论的方向迈进了一步。这是因为计算单元的逻辑设计可以通过严格的数理逻辑来完成，而工程设计则包括许多技术和技巧，不属于理论范畴。不但如此，这种方法还可以让我们将不同自动机元件进行对比，比如，在此设计中，我们就把计算机元件与神经元元件进行了比较。冯纽曼在《EDVAC 初步设计》中做了这样的对比，包括类似和差异两个方面。他观察到 EDVAC 中的电路是同步的（由中央时钟进行控制），而神经系统中则是异步的（由系统的组件按顺序进行反应，来实现自治性的时间控制）。他还注意到人类神经系统中的联想、感觉、行动神经元与计算机中的中心控制部分、输入设备和输出设备的相似之处。这样的一种把生物与人工自动机的比较，后来成为他的自动机理论中的重要主题。

EDVAC 的架构与 ENIAC 有本质上的不同。ENIAC 有好几个基本单元，它们都是并行操作的，所以很多计算进程可以在同一个时间进行。作为对比，EDVAC 对于每一种类型的计算只有一个基本单元，故从来不会同时进行两个以上的算术或者逻辑运算。这些基本单元包括：高速内存 M，核心算术单元 CA，外围存储介质 R，以及输入元件 I，输出元件 O，和中央控制器 CC。

存储器 M 包括了 256 个延迟线，每个能够存储 32 个字元，每个字元有 32 比特，这还包括让 M 上的不同位置和机器的其它地方连接的开关设备。内存 M 中可以存储偏微分方程中的边界条件和初始条件，任意的数值函数，计算获得的部分结果等等，以及控制计算的程序（命令序列）。外围存储介质 R 是由打孔卡、纸袋、磁线或磁带，或者照相胶片，或它们的组合构成的。这些介质可以用于输入或输出，也可能用于辅助性的低速存储。输入组件 I 可以从 R 到 M 传递信息；输入组件 O 可以从 M 到 R 传递信息。M 是二进制的，而 R 则是十进制的。

中央算术单元 CA 包含了一些辅助的寄存器来存储数字（单字元的延迟线）。中央控制器 CC 决定以下操作：加、减、乘、除、平方根以及二进制-十进制之间的转换、寄存器之间以及寄存器与内存 M 之间传递数字，根据第三个数字的符号位来从两个数字中选择其一等。最后一种操作用于控制的传递（即有条件的跳转），从程序中的一个指令跳转到另一个。在 CA 中处理数字是串行方式的，低位先进行处理，而且一次只进行一个运算。

每个字的第一个比特如果是 0 就表示这个字是一个数字，如果是 1 就表示它是一条指令。每次按照操作的要求，把 8 个字节的数据放到指定位置。如果需要对 M 进行内存读取的话，那么就把 13 个比特放到指定地址中。典型的一个操作过程如下：假设我们要执行一个位于内存中 y 位置处的加法指令，加数位于 y+1 处，结果存到 x 处，下一条指令在 y+2 处。那么在 y 处的命令首先进入 CC，在 y+1 处的加数进入 CA；加法的结果放到内存中的 x 处。然后位于 y+2 处的指令被接下来执行。

在通常情况下，所有的指令都从延迟线取出，按顺序执行，内存读取除外，当指令要求读取地址 z，那么 CC 就会转向内存地址 z，从该位置调用下一条指令。当一个数字从 CA 转移到内存地址 w 上，系统会检查 w 的内容。如果 w 包含了一个指令（也就是首字的首个比特是 1），那么在 CA 中存储的 13 个最高位的比特就被 w 位置处的 13 个比特所替换。指令的地址可能被机器自动地修改。这种允许修改程序的机制，以及跳转到内存任意位置 w 处的特殊

指令，再加上 CA 单元可以根据第三个符号位两数择一的条件机制，使得整个机器成为一台真正意义上的，可编程的自动计算机。

在同一时期，冯纽曼还设计了 EDVAC 的逻辑结构，他提出用光电映像管（iconoscope）来作为高速内存使用¹⁴，其原理是，信息通过光写入映像管的显示区域，并由电子束感应读取。冯纽曼建议信息也可以通过电子束存到映像管的内表面上。这样，就相当于把信息用静电荷的形式储存在阴极射线管的内表面上。他预期这种存储形式会优于延迟线存储器。很快，这个想法得到了验证，冯纽曼便开始思考怎样用这种内存来设计更强大的计算机。

新的计算机比设计中的所有机器都要快很多。主要有两个原因：第一，在静电存储系统中，每一个位置都是可立即访问的，而存储在延迟线上的一个比特或一个字，除非正好位于线的末端，否则就不能被访问。第二，由于新的装置可以同时处理 40 个比特，因此大大减少了计算时间。这个逻辑设计是在“电子计算设备逻辑设计的初步讨论”¹⁵中谈到的。这一台计算机是在普林斯顿高等研究院，由数名工程师在 Julian Bigelow 带领下建造的，被命名为 JONIA C¹⁶。在这台计算机还在制造的过程中，它的逻辑和电路设计就已经影响了美国其他的计算机的建造，包括伊利诺斯大学、洛斯阿拉莫斯国家实验室，Argonne 国家实验室，Oak Ridge 国家实验室的，兰德公司的，以及一些商业公司制造的计算机。另外，JONIA C 也在氢弹的开发中起到了关键作用¹⁷。

编程与流程图

冯纽曼很快意识到这些新的计算机可以如此快速地解决庞大的计算问题，以至于我们需要新的编程方法让数学家和程序员可以利用这些机器的强大性能。冯纽曼在原来的高等研究院计算机的指令代码的基础上提出了新的编程方法。这种方法发表在很有影响力的系列报告“对于电子计算设备的问题规划与编码”¹⁸中。

在研究问题的时候，我们通常从问题的数学表述开始分析，然后决定使用什么样的数学方法。这些方法通常是归纳性质的，涉及了递归的层层嵌套。在这时候，我们通常用自然语言或者数学符号来表示出我们想要的计算是什么样的。而下面的任务就是要从这种描述转换为机器语言表述的程序。这一点并不简单，原因可能是描述过于一般化，也可能是因为递归过程本身就是难以直接表述的。

要理解递归过程，特别是那些复杂的递归，最好的方法是从动态（也就是每一步的效果）的角度而不是静态的（静态的符号序列）角度去看待。从机器语言的角度来说，就是要考虑到一个命令是强烈依赖于它正在控制的计算过程的：是否要使用一个指令，以多大的频率使用它，这个指令指向内存的什么位置。所有这些都是有关整个程序以及正在处理的数字的函数。因此，一个程序虽然是一个静态的符号序列，但是我们最好是从它的动态效果来理解，也就是说看它实际上是如何控制计算过程的。

¹⁴ 参见“EDVAC 的第一份手稿”，第 12.8 节

¹⁵ 这本书是由笔者和 H.H. Goldstine 合作的。冯纽曼希望这篇报告中的专利保护部分公开化，并且我们都签过名了，这是典型的冯纽曼式作风。

¹⁶ Estrin 称之为“高等研究院的电子计算机”，最原始的计划是使用 Rsjchman 描述的内存：“选择电荷——一种选择性的静电存储管”，但是实际制造的存储器包含了阴极射线管，参见 Williams 的“阴极射线管数字存储”。

¹⁷ 参见“纽约时代杂志”1957 年 2 月 9 日，第 19 页。

¹⁸ 与 H.H. Goldstine 合著

为了在日常语言的数学计算描述和对应机器语言的程序之间架起桥梁，冯纽曼发明了流程图。一个流程图是一个带着各种符号标记的图，它由很多图框以及连线组成。图框有几种类型：操作框（规定了计算的非递归部分），选择框（对应于控制指令的有条件的跳转，并用跳转条件来标注），替换与声明框（表示了递归的索引值），存储框（给出了内存关键部分在某一个计算阶段的内容），并且用圆圈来标注程序的开始和结束以及相互联系。在执行与流程图相应的程序的时候，计算机相当于是是在流程图上行走，从开始圆圈出发，按照操作框中的指令序列进行执行，根据选择框中的跳转标准进行循环或者到流程图其它部分的分支。有向直线代表了图上流动的方向，最后在图上的某点汇合，无向的直线用来连接存储框与图上的对应于存储内容作为计算对象的某个点。

当程序员解决一个复杂问题的时候，很有必要事先编好整个流程图。任何一个比较复杂的问题都会由很多子问题构成，我们可以事先为这些子问题编好流程图和子程序。事先要准备一些子程序来处理求解问题过程中所用到的大量的基本算法：例如十进制到二进制的相互转换，双精度运算，各种积分和插值方法，网格和排序算法，等等。这些子程序可以存放在一个磁带库中以备调用。为了解决一个具体问题，程序员只需要写下一个“母程序”，告诉计算机如何从纸带上调用正确的程序，并且为了特定的问题如何修改这些子程序。

使用子程序的组合以及子程序库是让计算机协助编写程序的第一步。在这样的系统中，所有的东西都需要由程序员用笨拙的“机器语言”书写。更好的办法是构建一套“程序员的编程语言”，程序员可以用这种编程语言来写程序，然后使用机器语言编写一个编译程序，使得机器可以自动把编程语言写的程序翻译成用机器语言所写的相应程序。这种编程语言将更接近数学家、科学家以及工程师所熟悉的日常的或者数学的语言，而且也更容易被使用。这种方法现在称为自动编译。冯纽曼使用“短代码”（编程语言）和“完全代码”（机器语言）来表示它们¹⁹。

冯纽曼认识到，自动编译的概念可以看成由图灵证明的通用图灵机的一个实例。图灵机是一个有限自动机加上无限长度的记录纸带。任意通用目的的计算机，加上一个能够无限修改纸带存储的读写装置，都可以看作是图灵机。而通用图灵机 U 拥有以下属性：对于任意的图灵机 M ，都存在一个有限的程序 P 使得机器 U 在 P 的指导下可以计算与 M 相同的结果。也就是 U 和 P 可以模拟 M 。

自动编译当然也涉及到了模拟。设 U_e 为一个使用机器语言，程序员不方便使用的机器。程序员使用编程语言会更方便。从理论上可以证明，我们可以构建一台机器来直接理解编程语言；我们把这个假想的计算机叫做 M_p 。 P_t 可以把编程语言翻译成 U_e 的机器语言的程序（用机器 U_e 的语言写成）。那么 U_e 将会在 P_t 的指挥下计算出与 M_p 完全一样的结果。也就是说 U_e 加上 P_t 模拟了 M_p ，这就是图灵机 U 与 P 能够模拟 M 的特殊情况。

注意，在 U_e 中有两种语言：一种是计算机直接使用的机器语言，另一种是通过编译程序 P_t 间接使用的程序员语言。冯纽曼把这些称为机器的“初级”和“高级”语言。初级语言主要用于机器中的通讯与控制，而高级语言是我们人类与机器通信的语言。冯纽曼由此假设，也许在人类的神经系统中也存在这样的初级与高级语言，而且这两种语言非常的不同。

“因此，神经系统也可能使用着与我们所熟悉的一般算术和数学非常不同的概念体系……”

¹⁹ 计算机与人脑， pp.70-73

... 无论中枢神经系统使用什么语言,有可能它们的逻辑与代数的深度都比我们通常使用的要浅。

因此,当我们把中枢神经系统中的逻辑与数学看作一种语言的时候,它们必然会与我们通常经验的语言在结构上本质的不同。

... 当我们讨论到数学的时候,我们可能谈论的是一种高级语言,但是它是在初级语言这种中枢神经网络主要使用的语言之上构建的²⁰。”

他认为神经系统的初级语言从本质上具有统计特征。因此,他关于概率逻辑的工作就是与这种语言有关的。参见本文集的第一部分的第三和第四个讲座以及“概率逻辑以及用不可靠元件合成可靠有机体”,其中有他关于概率逻辑以及可靠性的讨论。

计算机电路

从一开始,冯纽曼就对电路和计算机的电子元件产生了兴趣。他为了提高计算机元件的性能,分析了它们的物理和化学属性²¹。在他关于自动机理论的讲座中,他比较了计算系统中的生物与人工元件在速度、尺度、可靠性和能量消耗以及二值决策所需要消耗的最小热能等特性。(参见本文集第一部分的第四个讲座)正是由于这些物理学方面的工作,他才能够发明出新的计算元件。

这种新的元件是一个以频率 $nf(n=2,3,4,\dots)$ 激活并能以频率 f 的谐波震荡的谐波发生器²²。谐波发生器电路包括一个电感和电容,以产生频率 f 的波形。其中电容与电感都是非线性的,而且其值会在激发信号(频率为 nf) 呈现周期性变化。以频率为 f 的震荡可以在 n 个独立相位进行。每个震荡相位在刚建立的时候都是高度稳定的,但是,当震荡开始以后,相位会很容易地被频率为 f 的输入信号所影响,以得到所需相位。通过调节(开关)发生器(频率为 nf) 以及一个交替于主动和被动工作状态下的低频方波(时钟信号)产生器,就可以在激发信号出现的时候,从频率为 f 的 n 种不同的震荡相位的波形中间选择所需要的。

为了让一个谐波发生器(发射器)的相位转变为另一个发生器(接收器),发射器和接收器通过一个变压器相互耦合在一起。发射器和接收器的方波调谐达到了相同频率,但是相位不同,这样,发射器可能已经开启了,但是接收器还是处于即将开启的状态。所以,接收器开始以发射器相同的频率 f 震荡。接收器接下来就从之前的状态调谐到另一个谐波发生器状态,以此类推。我们可以使用三个时钟信号,通过使用恰当的时钟信号激活相互连接在一起的发生器,使得所有的信号都具有相同的频率但是有三个不同的相位。每一个这样的发生器都有一个输入和一个输出,并且频率都是 f ,而输入的激活频率是 nf ;两个不同发生器的时

²⁰ 计算机与人脑, pp.79-82

²¹ 他在这个领域的主要思想仅仅是与别人的口头交流,没有正式发表。一个主要的参考文献是“电子计算设备的逻辑设计的初步讨论”,冯纽曼文集 5.39。Booth,“自动数字计算机的未来”,p.341 中也谈到了与冯纽曼在 1947 年讨论的超导存储单元。冯纽曼海在 MASER 上作过一些早期的工作。参见文集 5.420,科学美国人(1963 年 2 月)第 12 页,和科学美国人(1963 年 4 月)第 14-15 页。

²² “感应开关的非线性电容、放大器和存储设备。”Wigington 也描述了与冯纽曼类似的想法,“计算中的新概念。”

由 E.Goto 独立发明的变感元件(parametron)其实也已经包含了相同的思想,但是它们在执行速度上却有显著的不同。参见 Goto 的“变感元件,一种可以利用参数震荡实现的数字计算机。”Goto 所报告的最高频率可以达到 5×10^6 周期每秒的激活频率($2f$),以及 108 转的时钟频率。根据 uWigington,冯纽曼估计了稳定的激活频率($2f$)为 5×10^{10} 以及时钟频率 109

钟的相位决定了哪一个发生器是接收器哪一个是发射器。输出信号（频率 f ）要比输入信号（频率 f ）拥有更大的功率，这样才能控制住震荡的频率，因此谐波发生器是一个对频率 f 的放大器，功率的放大是通过频率 nf 的激发信号而来的。

由于谐波发生器的震荡是稳定的，所以谐波会一直持续，并在各个发生器之间传递，因此这个设备具有明显的存储能力。通过谐波发生器还可以按照下面的方法实现开关转换。设 $n=2$ ，也就是说我们有两个相同频率 f 不同相位的谐波发生器，因此系统是二进制的。通过把三个生成器的输出连接到第一个发射器上，我们可以把它们的输出电压进行叠加；把一个接收端发生器连接到第二个转换器上，这样第二个转换器的电压就会与发射器具有相同的相位，那么接收器也就会以这样的相位震荡了。这样一种安排可以实现所谓“多数决定元件 (majority element)”，也就是一个有三个输入端一个延迟输出端的开关，当且仅当输入端中的两个或者更多的输入为状态“1”的时候，输出才为“1”²³。我们也可以把一个发生器的输出与另一个的输入连接起来，并且让转换反向，从而实现取反的元件。通过组合两个相同频率 (f) 多个不同相位的信号源可以实现常数“0”和“1”。使用多数元件、取反元件以及常数源元件“0”和“1”可以组合出各种计算，因此我们就可以用这些谐波发生器构建出计算机的中心部分²⁴。

冯纽曼的自动机理论

介绍

只要你对冯纽曼所取得的研究成果稍加浏览，你一定立即被其研究之深度和广度所震撼。尤其显得与众不同，冯纽曼的成就涵盖了从理论到实践的广阔的领域。而且他还可以很好地将理论和实际结合起来，他是第一个认识到计算机技术可能引发技术革命，也会对人类生存的环境（例如天气）进行预测与干预的人。

之所以冯纽曼可以在很多不同的领域做出突出贡献，主要原因是他可以根据自己的兴趣把很多完全不同的能力综合起来。他的超强理解和记忆能力可以很快地吸收、组织、保留和使用大量的信息。而广泛的兴趣又使他能够接触到很多领域的工作。他是一个解决各种困难问题的高手 (virtuoso)，并且可以用他自己的方法深入分析，直到触及各种问题的本质。

广泛的兴趣是冯纽曼作为一位伟大的数学家的最出众之处，这还使他成为了一位最卓越的应用数学家。他一方面对各种自然科学问题和工程实践问题非常熟悉，另一方面也非常擅长抽象的纯数学方法。他的这种与科学家和工程师们沟通的能力在数学家中是很罕见的。他曾虚心学习历史以及科学研究方法，并探讨它们与纯数学的关系²⁵。

由于这样的一种背景和性格，冯纽曼能够开创关于计算机的一般理论就是非常自然的事情了。冯纽曼观察到计算机和自然界中的生命之间存在着重要的相似性，把这样两个不同的但是却密切相关的系统做比较，可以带来很多的启发。所以他开始寻找一套可以概括这两种系统的理论，并将自己的这个系统理论称为“自动机理论”。自动机理论包含了人工与生物系统的结构与组织，在这些系统中语言与信息的作用，以及对这类系统的编程与控制等内容。

²³ “概率逻辑以及从不可靠元件合成可靠有机体”，冯纽曼文集 5.339。

²⁴ 很多计算机都是通过类似的方法构建的。参见 Goto, op .cit

²⁵ 参见“博弈与经济行为”的第一章；以及“数学家”冯纽曼文集 1.1-9；以及“物理学方法”冯纽曼文集 6.491-498

在本文集中的第一部分和第二部分的第一章和第二章中，有多处讨论了自动机理论的内容。

冯纽曼早期在计算机设计和编程方面的研究工作使得他认识到，数理逻辑会在新的自动机理论中起到重要作用。但是，由于其他的一些原因（我们在后面会提到），他认为现有的数理逻辑虽然在自动机理论不无用处，但是还不足以成为他的这种特别的自动机的核心逻辑。取而代之，他相信自动机的新逻辑将更类似于概率论、热力学和信息论。因此冯纽曼的自动机理论从一开始就具有明显的跨学科特征。

不幸的是，由于冯纽曼过早去世，他并没有完成他的自动机理论。在他关于这个主题的最后工作中，他提到“如果我们能够谈论这样的一套自动机理论就好了，然而，令人遗憾的是，直到现在……这套理论也仅仅是对‘经验的总结’。”²⁶尽管如此，在这个领域，冯纽曼的研究还是当之无愧的开山鼻祖。他概述了自动机理论的轮廓：它的结构、内容以及相关的问题、应用以及数学形式；他比较了人工自动机与生物自动机；最后，他形式化地给出了两个自动机理论的基本问题并初步进行了解答，这就是：一个可靠的系统是如何利用不可靠的元件构造的？什么是一个自复制自动机的基本逻辑构成？第一个问题在他的文章“概率逻辑以及如何由不可靠元件合成可靠的有机体”中，第二个问题则在本文集的第一部分的第五个讲座以及第二部分进行了讨论。

我不知道冯纽曼是怎样想到这两个问题的，但是从他的兴趣和文章来看，它们主要来源于冯纽曼早年在计算机领域的实际工作。新的电子计算机具有革命性的意义，因为与早期的计算系统（人工的、机械的以及电力的机器，或者是它们的混合）比较起来，新计算机可以做更大量的自动而快速的计算。ENIAC、EDVAC 以及高等研究院的计算机都朝着更强大的计算迈进了一大步。在求解一般的非线性偏微分方程的兴趣，特别是利用方程来预测天气，使得他自然会去寻找更强大的机器，并试图突破高性能机器计算的瓶颈。作为政府和产业界的资深顾问，冯纽曼教授大大促进了大规模计算机的设计和构建事业。

冯纽曼通过比较当时最好的计算机与自然界中最智慧的生命得出结论：至少有三个因素可能制约了工程师们建造更加强大的计算机的能力：可用元件的尺寸，这些元件的可靠性，以及对计算元件如何组成复杂的逻辑结构的理论缺乏了解。冯纽曼关于元件部分的工作是对第一个困境的解决，而他关于可靠性和自复制自动机方面的工作分别是对第二个和第三个局限的挑战。在他的《概率逻辑：从不可靠组件合成可靠整体》的文章中，给出了两种克服元件不可靠性的方法：不是将这些元件变得更可靠，而是通过变换组合它们的方式使得计算机整体变得更加可靠。他把他这部分的工作视作是一种概率逻辑，这也是沿着自动机逻辑方向迈出的第一步。他关于自复制的工作也属于复杂自动机理论。他认为那些具有很大复杂性的系统中存在着定性的新规律，而这种新规律可以通过对强烈依赖于复杂性的自复制现象的研究而获得。而且，我们知道自复制和自修复的联系非常紧密，因此对自复制现象的研究将有助于我们解决可靠性的问题。

这就解释了为什么冯纽曼会对复杂自动机非常感兴趣，他希望得到一个关于由计算元件构成的复杂系统的，关于其逻辑结构的理论。他认为可靠性和自复制的问题与复杂自动机密切相关。

另外，还有两个相关的因素。首先，冯纽曼相信我们应该从那些可以被清晰描述的问题，甚

²⁶ 计算机与人脑，p.2

至是我们熟悉的日常现象入手开始建立一门新科学,这些经验的积累可以进一步发展出一套严格的理论去解释这些现象²⁷。他关于可靠性和自复制的问题就属于这一类。第二,冯纽曼相信复杂自动机的恰当理论将有助于解决计算机能力瓶颈的问题。他明确地指出,除非我们有了一个关于自动机的足够深刻的理论,否则计算机的复杂度和能力就有一个极限,而我们很难突破这个极限。²⁸

生物与人工自动机

通过考察两种主要类型的自动机:人工的和生物自动机,我们就可以明白冯纽曼的自动机理论的范围以及它的跨学科的特性。模拟与数字计算机是最重要的一类人工自动机,但通讯或信息处理目的而造的其他的人造系统也包括在其中,如电话和收音机广播系统等。生物自动机则包括了神经系统、自复制和自修复系统,以及生命的进化与适应等特性。

自动机理论明显一方面与通讯与控制工程相交叉,另一方面也与生物学交叉。事实上,生物与人工自动机的范围是非常广的,我们自然想知道为什么自动机理论会与这些学科不同。冯纽曼从来没有讨论过,但是他曾涉及到自动机理论的边界问题。自动机理论与以数理逻辑以及数字计算机等学科为主导的领域非常不同。虽然该理论会在工程实践中有大量的应用,但是,它本身还是一个理论定律而不是实践法则。最后,自动机理论又与生物学不同,因为它更加集中在诸如组织、结构、语言、信息以及控制等问题上。

自动机理论寻找有关组织、结构、语言、信息以及控制的一般性原理。很多这样的原理都可以应用到生物与人工系统中,因此把这两类自动机(生物与人工)作比较是一个很好的出发点,我们将找到并解释这两类不同系统的共同与相似之处,开发能够描述这两类自动机的数学原理。例如,真值逻辑与延迟逻辑适用于计算机元件,同样也适用于神经元,而冯纽曼提出的概率逻辑也应该可以横跨这两个领域(参见本文集的第二、三堂课)。以相似的方式,冯纽曼提出自复制元胞自动机,其设计将生物机体和数字计算机联系起来。在这一点上,自动机理论与博弈论有着非常惊人的相似之处。经济系统可以类比为生物界,而游戏则是人类行为,博弈论包含了对于经济系统和游戏的数学原理²⁹,因而把两者联系在一起。这一点正像自动机理论包含了人工与生物自动机的共同的数学原理一样。

冯纽曼花费了很大的精力来比较生物与人工自动机的同异³⁰。近些年来,人们对于自然界和生物学的科学知识积累非常快速,因此,现在如果再将它们进行对比就会比当年冯纽曼有更多的细节基础,但是,无疑冯纽曼得到了一些非常有趣的一般性的方法和结论。我们可以将这些结论概括成如下几个方面:(1)模拟与数字的不同;(2)基本元件所用到的物理和生物的材料;(3)复杂性;(4)逻辑组织;(5)可靠性。

(1)在冯纽曼的著作中,相当的篇幅被用于讨论模拟与数字的区别,并发现这种区别在研究自然自动机的过程中起到了重要的向导作用。参见第一部分的第一个和第四个讲座。他得到的最一般的结论就是自然生命体是一种混合体,同时包含了模拟与数字过程。有很多实例可以说明这一点,这里仅举两例:神经元是“有或无”的,因此数字真值函数逻辑是神经行为的一种初级近似,但是神经元的激活有有赖于空间上的刺激加总,并有疲劳不应现象,这

²⁷ 博弈论与经济行为,第1.3和1.4节

²⁸ “关于自动机的一般的和逻辑的理论,”冯纽曼文集5.302-306

²⁹ 博弈论与经济行为,第1.1.2和4.1.3节

³⁰ Norbert 维纳耶在他的《控制论》一书中用一种不同的方法比较了自然与人工系统。维纳和冯纽曼都了解彼此的工作——参见《控制论》(特别是“介绍”的部分)以及冯纽曼对该书的评价。

些都是连续而非离散的过程。在复杂的有机体中，数字运算通常与模拟过程交替进行。例如，基因是数字的，而酶是通过一种模拟的方式对功能进行控制的。冯纽曼在他关于自然自动机的知识的影响下提出了一种模拟与数字混合的计算模式³¹。这是一个将生物系统的研究成果用于人工系统设计的很好的实例。

(2) 冯纽曼通过将现存的自然与人工元件对比，包括它们在尺寸、速度、能量需求以及可靠性等方面的区别，并且将这些区别、材料的可靠性以及自动机的组织结构联系起来。计算机的基本元件要比神经元大得多，而且需要更多的能量，但是它们的速度要快很多。这些区别会影响到系统的组织构成：生物自动机是通过一种更加并行的方式工作的，而数字计算机则是串行结构。真空管和神经元尺寸的不同是由于它们所用材料的机械稳定性不同而引起的。真空管要更容易被损坏却不好修复。而当神经元膜受到破坏以后，会很容易地被修复。冯纽曼计算了计算元件需要花费的最小能量，从理论上说，计算机元件的最高效率可以达到生物神经元的 10^{10} 倍。（参见第一部分的第四个讲座）他所做的生物与人工元件的比较研究无疑对他的计算机设计产生了影响。

(3) 人，也包括天地万物，是一种比他们能够构建的人工自动机更复杂得多的生物自动机。正是由于这种复杂性，人类对于它自己的逻辑设计的细节理解要远远比不上对他所构建的最大型计算机的理解。冯纽曼认为自动机理论的核心概念就在于复杂性。而复杂性需要严格的定义。自动机理论将会把复杂自动机的逻辑构成与它的行为联系起来。这一理论将允许我们开发出人工自动机的逻辑设计。这些人工自动机将能够像人类一样执行非常困难的任务以及非常高级的功能，甚至可以在求解非线性偏微分方程等大规模问题方面远胜于人类。在复杂系统中，可靠性问题异常关键。冯纽曼怀疑超复杂的系统会涌现出新的原理。例如，他认为在一定的阈值以下，复杂度是降级的，自复制是不可能的。他设想，通常来说对于简单自动机，对它行为的描述要比这个自动机自己更加简单，但是如果自动机非常复杂的时候，自动机本身就会比对它的描述更加简单了。参见第一部分的第二个讲座。

(4) 在讨论到生物与人工元件的相对速度的时候，我们注意到生物自动机在操作方式上更多地采用并行处理，而人工自动机则更倾向于串行处理的方式。当我们设计一个自动机或者规划一个计算任务的时候，我们可以在一定程度上规划出串行和并行的部分，但是这一程度是极其有限的。比如串行计算后面的运算步骤会强烈依赖于前面运算的输出结果，因此从原则上讲不能让这些计算并行同时执行。此外，这种效应也会影响到机器的其他方面，特别是内存的需求。后面的运算只有在它即将被执行的时候，才能把它所需要的数据存到内存中。人工自动机的内存管理通常是分层次的。不同的层级以不同的速度操作。在一个特定的计算机中，有高速的电子寄存器，有低速的磁芯，以及更慢的磁带单元。再说，机器内部的硬件连线也影响了整个系统的组织方式。冯纽曼讨论了机器存储的层级结构，并希望在生物自动机中寻找出相似的层级性。神经环路中的脉冲、神经阈值的改变、神经系统的组织以及基因中的编码就构成了这样的层级实例。

计算机的结构与计算机中的一个具体计算过程的结构是不同的。当我们同时考虑这两个因素的时候，生物与人工自动机在串行与并行方面的区别就更显得重要了。冯纽曼将这种联系称为计算的“逻辑深度”³²。一个计算过程包含了大量的基本逻辑步骤（例如转换或者延迟），

³¹ “概率逻辑以及如何由不可靠元件合成可靠有机体”，冯纽曼文集 5.372-377。

³² 《计算机与人脑》，第 27, 29 页。他也把这称为语言的逻辑深度。参见 *ibid.*，第 81-82 页，以及《计算机与人脑》第 15 页上面有关神经系统的基本语言的讨论

每一个基本步骤都依赖于之前的步骤。我们将这样的每步都依赖于之前的步骤序列称为一个“计算链”。计算的逻辑深度就是最长计算链的逻辑步数。由于数字计算的高速度，它使用了超长逻辑深度的计算。因此，为了得到最后有用的答案，机器犯错误的概率就得非常小，而且计算结果对每一个逻辑步骤的依赖性都很强。从这里，我们可以引入冯纽曼关于生物与人工自动机对比的第五点。

(5) 第一台数字计算机几乎没有自动检测错误的功能。人们通过极其细心的设计和构建，特别是通过选择高可靠性的元件的方法避免错误的出现。同样计算机程序也是通过细致的编写与检测完成的。诊断程序用来检测机器的错误，各种过程（例如差分）用于检测计算的结果。因此，设计、建造、使用这些机器的时候，人们希望，任何一个故障会在下一个故障出现之前被发现。这样，当机器遇到错误的时候就会被一个分析进程终止，并将出错部分隔离出来。正如冯纽曼在第一部分第四个讲座中指出的，这种处理错误的方法显然不能适用于极其复杂的自动机。因为复杂的自动机的设计和构建方法就决定了它必然充满了大量的错误。进一步，大量的元件就会使得错误间的平均间隔很短，从而使得对问题的定位极其困难。生物自动机在这方面显然要胜过人工自动机，就是因为它们有着强大的自检验自修复的功能。例如，人脑在经受很强的机械损伤或者疾病损伤之后仍旧能够继续很好地工作。因此，从这一点上来看，人工与生物自动机采用了完全不同的方法来对待错误。冯纽曼在可靠性方面的工作试图把这两种自动机由此联系起来。

自动机理论的数学原理

冯纽曼设想自动机的理论应该是高度数学和逻辑化的。对生物与人工自动机、以及它们的运算交互的大量研究为自动机理论提供过了丰富的实际经验。这与冯纽曼所坚信的数学需要从实证经验中获得灵感的想法是一致的。

当冯纽曼构建自动机理论的时候，他熟知数理逻辑与自动机的紧密联系。库特·哥德尔曾经展示了逻辑的基本概念（例如良构公式、定理、推理规则、证明）本质上讲是递归（有效的）的，从而将数理逻辑归结为计算理论³³。递归函数是那些可以被图灵机计算的函数，因此我们可以从自动机的观点看待数理逻辑³⁴。相反，数理逻辑也可以用于分析自动机的合成。自动机的逻辑组织可以被表示为理想的开关-延迟元件，因此可以被翻译为逻辑符号。参见第一部分的第二个讲座。

正是由于逻辑与自动机的天然联系，逻辑将作为自动机数学理论的核心部分。事实上，冯纽曼总是称该理论为“自动机的逻辑理论”而不是“自动机的理论”。然而，他认为自动机的数学理论必然会与经典的逻辑有着本质的不同。简单说，数学可以分成离散的和连续的。逻辑是属于离散的数学分支，而且是高度组合性的。冯纽曼认为自动机的数学应该更接近于连续的部分而且主要方法应该是分析性的而不是组合性的。

关于自动机理论相比较传统的逻辑更应该是分析性的观点是一个重要的课题。自动机理论必须要考虑元件失效的概率。数理逻辑仅仅考虑了开关-延迟组件的完美的确定性的特征；它从理论上就没有考虑错误。因此，在实际使用数理逻辑设计的过程中，我们必须额外地考虑这门学科之外的知识。冯纽曼希望概率逻辑能够处理元件失效的情况，并且把它作为自动机

³³ 参见哥德尔的“Uber formal unentcheidbare Satze der Principia Mathematics und verwandter System I”。定理性这一概念不总是递归的，但是形式语言的定理总是递归可枚举的。

³⁴ 参见图灵的“论可计算数：以及在判定问题中的应用”以及“可计算性与 lambda 可定义性。”

运算的一个关键步骤。而概率论具有很强的组合性的特征，也具有很强的分析特征。

当我们把失效的概率同自动机的逻辑结合考虑的时候，我们就不得不考虑计算的尺度了。在通常的数理逻辑方法中，人们总是要考虑自动机在有限步骤内是否能够完成某种功能，而不管需要多少步。但是在考虑到自动机元件会实现的实际情况下，计算的步骤越多，机器出错的可能性也就会越大，因此最终的计算结果也越有可能是错的。这样一种对计算尺度的考量同样也来源于实际自动机的构建过程。计算机被建造的目的就是要在有限的时间中计算出我们想要的结果。由于我们想让计算机做的很多事情现在还不得不由人类做，在这一点我们须留意人类是一个有限的自动机，而不是图灵机。虽然冯纽曼并没有告诉我们应该如何构建一个有关计算尺度的理论。但是这一理论一定会基于“计算量”——需要同时考虑计算的长度（也就是上面提到的“逻辑长度”）以及宽度（并行处理的数量）——这样一个定量概念的。

因此，这样一种有关计算量的理论以及它出错的可能性必须同时包括离散数学和连续数学。

“所有这些将会导致一个不同于形式逻辑的新理论的诞生，它将超越非此即彼的判断。这种新逻辑将具有更多的分析特征以及更少的组合特征。事实上，有多种迹象表明，这个新的形式逻辑理论将会与另外一个与逻辑相距甚远的学科靠得更近。这就是热力学，它的主要形式是由玻尔兹曼建立的，是理论物理的一部分，它主要讨论信息的操纵与测量的方方面面。它的技术是分析性的而不是组合性的，我再一次重申了我在上面已经表达的观点。³⁵”

冯纽曼进一步指出了将分析性数学与自动机理论相结合的方法论上的优势。

“每个曾经接触过形式逻辑的人都知道，它是数学中最难掌握的一部分。原因是，这门学科处理的是严格的，非此即彼的概念，很少涉及实数与复数的连续型概念，也就是数学分析的知识。而分析是整个数学中最成功的一种技术。因此，从方法论上说，数理逻辑就把数学最擅长的部分砍掉了，而深入到了数学疆域中最困难的部分：组合学。”

这个评论非常重要，因为冯纽曼曾在离散数学方面做出过重要的贡献。在他的“博弈论与经济行为”一书中，他曾谈到，对于社会学理论来说，组合数学以及集合论会比微分方程更有用³⁶。

在他自己的自动机理论中，冯纽曼从离散数学走到了连续数学。他的概率逻辑就是一例。在这种逻辑之后，他还提出了一种模拟-数字混合的计算系统，这个计算系统就与这种逻辑更接近³⁷。他第一个自复制模型是离散的，但是他希望将来能够开发一个连续性的模型。参见本文集第二部分的 1.1.2.3 小节。

我们注意到，冯纽曼在称呼他自己的自动机理论的时候，叫做“自动机的逻辑理论”，也叫“自动机和信息的理论”，有时候也称呼为“信息理论”，这表明信息在其中起到了关键的作用。他把控制和信息理论分成了两部分：严格的部分和概率的部分。严格部分包含了数理逻辑，这涵盖了有限自动机、图灵机等部分。概率与统计部分则包含了香农的信息论³⁸以及冯

³⁵ “自动机的一般逻辑理论”，冯纽曼文集 5.304。下一个引用来源于同一篇文章 5.308

³⁶ 第 4.8.3 节

³⁷ “概率逻辑以及如何用不可靠元件合成可靠有机体”的第 12 节，冯纽曼文集 5.372-377。

³⁸ “通讯的数学理论”

纽曼的概率逻辑。冯纽曼把他的概率逻辑看作是对严格逻辑的一种延展。

信息论与热力学之间存在着密切的联系。两个学科都用类似的方法使用概率这一概念。参见第一部分的第三个讲座，特别是引用了冯纽曼对维纳的控制论的评述这一部分。

冯纽曼曾经谈到了热力学与自动机理论的两个联系。首先，他发现热力学中的衰退现象可以类比到自复制自动机理论中：当复杂度和组织程度小于一定阈值的时候，它们就会衰退，但是高于这个阈值的时候，复杂度和组织程度就会升级。其次，他讨论了计算机设计中的平衡概念的热力学因素。计算机的效率依赖于它不同组成部分在速度和尺度上的恰当平衡。例如，在内存等级中，不同类型的内存（例如晶体管，磁芯、磁带）应该在尺寸和速度方面相互匹配。如果一台计算机的算术单元比内存快很多，或者是内存太小，就好比是一台无效率的热机，它两部分的温度差过大了。计算机的效率必须相对于它的环境来定义（也就是它要解决的问题），这就像一台热机的效率依赖于它的环境一样。工程师们在实践中摸索出了如何去平衡匹配不同元件的经验。而冯纽曼希望给出一套类似于热力学的，关于这些平衡的定量的理论。

总之，冯纽曼认为自动机的数学理论应该起始于数理逻辑，而朝向分析、概率以及热力学靠近。当这个理论建立起来了，它将能够让我们更好地理解具有异常复杂性的自动机，特别是人类的神经系统。人类神经系统能够做数学推理，并且它的“初级”语言与计算机的初级语言类似（参见上面的讨论）。因此，很有可能自动机理论将会对逻辑学以及数学产生长远的影响。

“我怀疑对于神经系统的深入的数学研究……将影响我们对于数学本身的理解。事实上，它可能会改变我们正确看待数学和逻辑学的方式。”³⁹

现在，逻辑是整个数学的基础；因此，如果冯纽曼的建议是对的，那么自动机理论将会构成一个圈：开始于数学的基础，并在此结束。

阿瑟 W. 伯克斯

³⁹ 《计算机与人脑》第 2 页，比较 70-82 页，参见乌拉姆的“约翰冯纽曼，1903-1957，”第 12 页。