

你遇见过香农吗？

陈关荣
(香港城市大学)

美国科学家香农 (Claude Elwood Shannon, 1916 年 4 月 30 日—2001 年 2 月 26 日) 以创立信息论而著名。



Photo: © Stanley Rowin

香农出生于密歇根 (Michigan) 的湖滨小镇佩托斯基 (Petoskey)，该地名来自当地印第安人语，意为“旭日之光”。

1936 年，香农在密歇根大学获得数学与电气工程学士学位，然后进入麻省理工学院 (MIT) 读研究生。1938 年香农在 MIT 获得电气工程硕士学位，学位论文题目是“继电器与开关电路的符号分析” (A symbolic analysis of relay and switching circuits)。他把布尔代数的“真”与“假”和电路系统的“开”与“关”对应起来，分别用 1 和 0 表示。他的数学分析为数字电路打下了理论基础，把计算机科学引上了数字化的道路，为今天形形色色的数字技术铺垫了牢固的基石。1940 年，香农因这一成果获得了美国工程师学会颁发的 Alfred Noble 奖。同年，香农在 MIT 获得数学博士学位，学位论文题目是“理论遗传学的代数学” (An algebra for theoretical genetics)。在科学史上被公认为有奠基性成果的博士论文并不多见，广为人知的当然有爱因斯坦、居里夫人、德布罗意、费曼，数学方面还包括黎曼和纳什，而香农的博士论文被认为是二十世纪最优秀的一篇。

1940-41 年间，香农在普林斯顿高等研究院工作，期间开始思考信息理论和数字通信问题。1941 年，他加入 AT&T 电话电报公司的贝尔实验室 (Bell Labs) 数学部，工作至 1956 年。其后被 MIT 聘为客座教授，1958 年成为讲座教授，1978 年退休成为名誉教授。

在贝尔实验室期间，除了火炮控制系统之外，信息保密和隐藏技术是香农的主要工作内容。1945年，香农向实验室提交了一份机密文件“密码学的数学理论”（A mathematical theory of cryptography）。该研究成果在二战结束后于1949年以“保密系统的通信理论”（Communication theory of secrecy systems）为题正式发表，为现代公钥密码和分组密码设计提供了启发和指导。他随即被美国政府聘为密码事务顾问。

在贝尔实验室，信息理论和数字通信一直是香农的重点科学研究内容。1948年，香农在实验室主办的杂志《Bell System Technical Journal》上分两期发表了一篇论文“通信的数学原理”（A mathematical theory of communication），研究了如何最好地为发送信息编码，引进了量度不确定性的信息熵，还设计了稍后和范诺（Robert Fano）一起完成的“香农-范诺编码”。1949年，他又在该杂志上发表了“噪声下的通信”一文，其中建立了著名的香农采样定理（Shannon sampling theorem）。香农这期间的一系列工作，建立了现代信息论。他后来回忆道：“我的第一个想法，就是如何在噪声信道中最好地改善信息传输”。香农在文章中定义了信息的基本单位，采取了贝尔实验室同事 John Tukey 的建议，定为“比特”。当年，据说是冯·诺尔曼（John von Neumann）说服香农借用热力学的“熵”这个词。冯·诺尔曼认为，当时没有人知道这个“信息熵”是什么，这在学术界关于信息理论辩论中会给香农带来优势。此外，香农说过他的通信理论在数学和哲学原理方面颇多受益于 MIT 的同事维纳（Norbert Wiener）。维纳则强调，引入信息熵及数字技术作为该理论的基础是香农个人的功劳。

香农在1948年的论文中还引进的通信信道的香农极限（Shannon limit），也称为香农容量（Shannon capacity），就是针对特定噪声水平的信道的最大理论信息传输速率。后来著名的香农定理（噪声信道编码定理）指出： $C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$ ，其中 C 是信息传输速率即信道容量， B 是带宽， S 是平均信号功率， N 是平均噪声功率， S/N 为信噪比。香农极限就是 C 的最大值。香农在该论文中解释了如何计算这个极限，但他当时并不知道如何逼近它。多年以后，香农和其他科学家不断地挑战这个重要而棘手的技术问题。现代通信系统从1G、2G、3G、4G到5G的整个发展过程中，全世界的科学家、通信运营商和生厂商们一直在追逐着逼近香农极限。2018年初，NOKIA 在新闻发布会上宣称，他们的第三代光子业务引擎 PSE-3 芯片达到了目前逼近香农极限的最佳值。

1951年，香农发表了“书面英语的预测和熵”（Prediction and entropy of printed English）一文，说明信息论不但可以应用于计算机语言，而且可以应用于自然语言，他还计算了英语的熵，主张从数理统计的角度去分析人类语言。

香农是一个典型的兴趣驱动型的科学家，他并不考虑自己的研究成果有无商业价值，甚至不关心最后成果是否有用。他说：“我在完全无用的事情上花了大量的时间”。事实上，香农对各种创新尝试的喜好甚至让他迷恋上智能游戏机。1949年，他发表了论文“为下棋计算机编程”（Programming a computer for playing chess），勾画了关于人工智能的一项开创性工作。次年，他亲手制造了一只名为“忒修斯”（Theseus）的机器老鼠，让机械鼠通过反复试探后自己找到迷宫的出路。忒修斯是希腊神话中的英雄，他为了解救希腊的童男童女，自告奋勇到克里特岛除掉了人头牛身的恶怪“弥诺陶洛斯”（Minotaur），并在可怕的迷宫里成功地找到了出口。

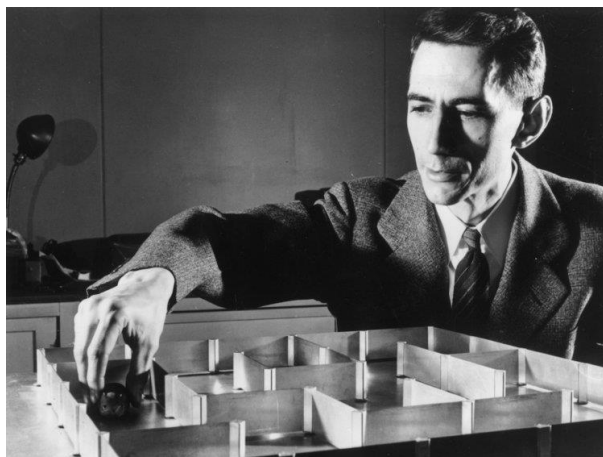


Photo from <http://history-computer.com>

1951 年，香农发表了论文“介绍一个走迷宫的机器”（Presentation of a maze solving machine），解释了这一任务是通过密集继电器系列的运作完成的，取材于贝尔电话系统的交换机元件。那个巧妙的机电设计被视为现代计算机芯片的雏型。1953 年，他又设计了一个“心灵阅读”（mind reading）机器，它通过观察和分析弈棋对手过去所做各种选择的样本，能够相当准确地猜测到对手下一步棋的走法。那个成功的逻辑设计被视为现代机器学习和人工智能发展的前奏。香农当年说过：“我认为，几十年后机器智能超越人类是完全可以预期的”。

1960 年代，年方半百的香农逐渐消失在公众的视野中。他甚至不再出席由他创办的信息领域专业会议。香农曾经说过：“许多伟大数学家在年轻的时候就已经完成了生命中最重要研究”。也许是他自认为江郎才尽了？旁人和后人都不得而知。只是到了 1985 年，有一次他出乎意料地出现在英国布莱顿举行的国际信息论研讨会上，当时很多与会者甚至不知道他仍然在世。事实上到了 1980 年代，香农的记忆力开始严重衰退，后来患上了老年痴呆症。香农在与疾病抗争了很长一段时间后于 2001 年 2 月 24 日辞世，享年 84 岁。



Photo: © Stanley Rowin

回顾香农辉煌的一生，他年轻时开始已经在世界上被逐渐公认推崇，获得过 10 个荣誉博士学位（先后依次为密歇根大学、普林斯顿大学、爱丁堡大学、匹兹堡大学、美国西北大学、牛津大学、东英格伦大学、卡内基梅隆大学、塔夫斯大学和宾夕法尼亚大学），成为美国科学院和工程院院士以及英国皇家学会院士。他获得的主要奖项包括 1985 年的日本京都奖（Kyoto Prize）、1966 年的 IEEE 荣誉奖章（IEEE Medal of Honor）、1972 年 IEEE 第一届香农奖（Shannon Award）和 1996 年的美国国家科学奖（National Medal of Science）。遗憾的是，香农研究工作的领域和本质决定了他无缘于诺贝尔奖。

在香农的生前身后，许多科学家和数学家都遇见过他（“Meets Shannon”）。除了与他同时代或稍后的知名数学家和科学家卡诺（Carnot, 1796–1832）、菲克（Fick, 1829–1901）、李雅普诺夫（Lyapunov, 1857–1918）、马可尼（Marconi, 1874–1937）、奈奎斯特（Nyquist, 1889–1976）、维纳（Wiener, 1894–1964）、冯·诺尔曼（von Neumann, 1903–1957）、波德（Bode, 1905–1982）、列昂季耶夫（Leontief, 1906–1999）、图灵（Turing, 1912–1954）、布莱克韦（Blackwell, 1919–2010）、贝尔曼（Bellman, 1920–1984）、纳什（Nash, 1928–2015）、列康（LeCam, 1924–2000）、摩尔（Moore, 1929–）、卡尔曼（Kalman, 1930–2016）、斯特朗（Strang, 1934–）、索兹（Shortz, 1952–）之外，还有他的前辈傅里叶（Fourier, 1768–1830）、麦克斯韦（Maxwell, 1831–1879）、瓦尔拉斯（Walras, 1834–1890）、特斯拉（Tesla, 1856–1943），他们都遇见过香农（见[附录]）。香农如此敬业乐群，你也遇见过他么？

[附录] Who meets Shannon or Shannon meets whom?

- [1] **Carnot:** O Shental and I Kanter, [Shannon meets Carnot: Generalized second thermo-dynamic law](#), Europhysics Letters, 85(1): 10006, 2009.
- [2] **Carnot:** H Li, [Information efficiency of communications for networked control in cyber physical systems: When Carnot meets Shannon](#), 55th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 12–14, 2016, Las Vegas, NV, USA
- [3] **Fick:** AO Bicen, JJ Lehtomäki, and IF Akyildiz, [Shannon meets Fick on the microfluidic channel: Diffusion limit to sum broadcast capacity for molecular communication](#), IEEE Transactions on NanoBioscience, 17(1): 88–94, 2018.
- [4] **Lyapunov:** T Holliday, P Glynn and A Goldsmith, [Shannon meets Lyapunov: Connections between information theory and dynamical systems](#), 44th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 12–16, 2005, Seville, Spain, 2005.
- [5] **Marconi:** D Tse, [Modern wireless communication: When Shannon meets Marconi](#), 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, May 14–19, 2006, Toulouse, France, 2006.
- [6] **Nyquist:** YX Chen, AJ Goldsmith and YC Eldar, [Shannon meets Nyquist: The interplay between capacity and sampling](#), 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Sept. 28–30, Monticello, IL, USA, 2011.
- [7] **Nyquist:** YX Chen, YC Eldar, and AJ Goldsmith, [Shannon meets Nyquist: Capacity of sampled Gaussian channels](#), IEEE Transactions on Information Theory, 39(8): 4889–4914, 2013.
- [8] **Wiener:** GD Forney, [On the role of MMSE estimation in approaching the information-theoretic limits of linear Gaussian channels: Shannon meets Wiener](#), 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Oct. 1–3, 2003, Monticello, IL, USA, 2003; and [Shannon meets Wiener II: On MMSE estimation in successive decoding schemes](#), 2004.

- [9] **von Neumann:** ST Jose and AA Kulkarni, [Shannon meets von Neumann: A minimax theorem for channel coding in the presence of a jammer](#), arXiv:1811.07358, 2018.
- [10] **Bode:** N Elia, [When Bode meets Shannon: Control-oriented feedback communication schemes](#), IEEE Transactions on Automatic Control, 49(9): 1477-1488, 2004.
- [11] **Leontief:** D Zachariah and P Cockshott, [Leontief meets Shannon - Measuring the complexity of the economic system](#), arXiv:1705.02154, 2017.
- [12] **Turing:** JP Giannini and T Bowen, [Life in code and digits: When Shannon met Turing](#), Electronic Visualisation and the Arts, July 11-13, 2017, London, UK, 2017.
- [13] **Turing:** W Szpankowski and A Grama, [Frontiers of science of information: Shannon meets Turing](#), Computer, 51(1): 28-38, 2018.
- [14] **Blackwell-Le Cam:** M Raginsky, [Shannon meets Blackwell and LeCam: Channels, codes, and statistical experiments](#), IEEE International Symposium on Information Theory, July 31 - Aug. 5, 2011, St. Petersburg, Russia, 2011.
- [15] **Bellman:** S Meyn and G Mathew, [Shannon meets Bellman: Feature based Markovian models for detection and optimization](#), 47th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 9-11, 2008, Cancun, Mexico, 2008.
- [16] **Nash:** RA Berry and DNC Tse, [Shannon meets Nash on the interference channel](#), IEEE Transactions on Information Theory, 57(5): 2821-2836, 2011.
- [17] **Moore:** L Harrison, [Moore's law meets Shannon's law: The evolution of the communication's industry](#), IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers and Processors, Sept. 23-26, 2001, Austin, TX, USA, 2001.
- [18] **Moore:** S Scholl, S Weithoffer and N When, [Advanced iterative channel coding schemes: When Shannon meets Moore](#), 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information, Sept. 5-9, 2016, Brest, France, 2016.
- [19] **Kalman:** A Gattami, [Kalman meets Shannon](#), arXiv:1404.4350, 2014.
- [20] **Strang-Fix:** PL Dragotti, M Vetterli, and T Blu, [Sampling moments and reconstructing signals of finite rate of innovation: Shannon meets Strang-Fix](#), IEEE Transactions on Signal Processing, 55(5): 1741-1757, 2007.
- [21] **Shortz:** M Efron, [Shannon meets Shortz: A probabilistic model of crossword puzzle difficulty](#), Journal of the American Society for Information Science and Technology, 59(6): 875-886, 2008.
- [22] **Fourier:** ZD Wang and GB Giannakis, [Wireless multicarrier communications: Where Fourier meets Shannon](#), IEEE Signal Processing Magazine, 17(3): 29-48, 2000.
- [23] **Maxwell:** K Chakraborty and M Franceschetti, [Maxwell meets Shannon: Space-time duality in multiple antenna channels](#), 44th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Sept. 27-29, 2006, Monticello, IL, USA, 2006.
- [24] **Maxwell:** SH Lee and SY Chung, [Capacity scaling of wireless ad hoc networks: Shannon meets Maxwell](#), IEEE Transactions on Information Theory, 58(3): 1702-1715, 2012.
- [25] **Walras:** E Jorswieck and R Mochaourab, [Shannon meets Walras on interference networks](#), International Workshop on Information Theory and Applications, Feb. 10-15, 2013, San Diego, CA, USA, 2013.
- [26] **Tesla:** P Grover and A Sahai, [Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer](#), International Symposium on Information Theory, June 13-18 2010, Austin, TX, USA, 2010.

(收录于 2019 年春)