

科普一下虎妈她爸

吴建永

(美国乔治城大学医学院神经科学系 华盛顿特区 20007)

大家都知道虎妈¹⁾，但是知道虎妈爸爸的人就比较少了。他叫蔡绍棠(Leon O. Chua, 加州大学伯克利分校教授)。我在此科普一下他的一个主要科学贡献——能产生混沌行为的蔡氏电路(Chua's circuit)。

要科普蔡氏电路，我先要铺垫好多背景知识。“混沌”(chaos)这词大家都听说过吧？混沌不是混乱(disorder)。简单地说，混乱和混沌虽然都产生不可预测的后果，但混乱是随机的，而混沌却是一种神秘的有序状态。也就是说，看起来好像是随机的，但是后面受一种神秘规律的操控。自然界由于混沌这个神秘规律的存在，就可以把一些微小的事件极大地放大，而不是像大量随机事件叠加那样出现一种可预期的统计结果。

我们常听说所谓的“蝴蝶效应”，就是说香港一只蝴蝶翅膀的扇动，能被放大成一个小的气旋，小气旋能进而被放大成当地的一场阵雨，进而影响大气对流，进而在大西洋引起一次飓风，进而在美国南部造成一场灾难，进而影响美国总统选举，进而改写现代史的进程。

联系到时事，莫言成了得诺贝尔奖的大文学家，可和他一条炕上长大的兄弟至今还在种地。是什么造成他

俩人生轨迹的大不同？很可能是少年时期一个偶然的因素使莫言对文学感兴趣，而这兴趣的萌芽在莫言后来的经历中不断地被放大，使他们兄弟之间越来越不同。

那么自然界真的存在这么一种神秘的规律吗？最早看出端倪的是数学家庞加莱(Henri Poincare)，他在1880年代就发现三个星体之间由于互相吸引造成的运动轨道极为复杂，算不清楚。当时瑞典国王悬赏解决三体互动问题，庞加莱耍了个小聪明，假定第三体的质量极小可以忽略不计。由此他虽然得到了奖金，却深刻地认识到两个物体的互动可以用牛顿定律精确地描述，但是只要再加一个物体，成了三体互动，经典的力学就不灵了，成了至今无解的三体问题。这就是所谓的又有规律又不能根据规律来预测。

我们生活的现实世界里充满了 N 体互动，如天气是由大量气体和水分子互动产生，历史是多个由人组成的集团之间互动产生。

庞加莱之后对混沌的研究主要局限在数学领域，但却偶尔在实用科学中露一下峥嵘。1960年代气象学家洛伦茨(Edward Lorenz)想用计算机模型来预报天气。那时候还不知道大气层里住着混沌这只魔鬼。大家认为只要

把今天世界上各地的天气情况叠加起来，再加上一些随机扰动造成的混乱，就能预测未来的天气。

1960年代的计算机精度只有三位数，洛伦茨发现，如果用六位数的精度来计算，算出的结果与用三位数的粗算差别巨大，这就是说细节里有魔鬼。洛伦茨虽然端个气象学家的饭碗，可却是个全须儿全尾儿的数学家，获达特茅斯学院数学学士和哈佛大学的硕士。他以极为敏锐的数学直觉写出一组非线性微分方程，用以解释这个极小的初始条件变化造成巨大后果的所谓“蝴蝶效应”。这套洛伦茨方程描述出混沌状态的精髓(见图1左上角)。

到了二十世纪七八十年代，关于混沌的理论发展到了极致。发现这只魔鬼原来不仅仅是住在星球之间和大气层里，而是无处不在的。它参与了树叶的形状，空气中的湍流和飓风(图1)，心脏跳动的节拍，股市的涨落，甚至流行音乐的节律，是个普适的自然规律。对混沌的研究也就成了一门朦胧的现代科学，将来定然会有大发展的。

产生混沌现象至少需要三个基本条件：(1) 存在对初始状态的微小变化很敏感的过程，才能出现蝴蝶效

1) 那位以华人家长的方式严格督促子女学习的耶鲁女教授，曾写了一本叫“虎妈战歌”(Battle Hymn of the Tiger Mother)的书。她教育子女的方式深得中国家长的认同，但在欧美引起了很大争议

洛伦茨方程

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x),$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y,$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z.$$



图1 由于混沌这种自然规律的存在，对空气分子的扰动会产生远大于分子尺度的宏观结构。图为飞机降落时翼尖造成的气旋，是一种常见的宏观动态结构

应；(2) 过程重复的“神似”。神似在数学上有严格的定义，叫拓扑可传递性(topologically transitive)。举例而言，“历史总是出现惊人的重复”就是过程重复的神似。中国历史上的改朝换代，每次都有大革命破坏前朝、修养生息达到繁荣、繁荣产生腐败和腐败导致革命等几个阶段。虽然每次改朝换代的时间、地点和人物都不一样，可过程的重复却是神似的；(3) 循环过程要充分细化，以便让神似的关键点能不断重复出现，又让能引起歧点的细节不被忽略。

问题出来了：如果混沌这个魔鬼混在多体互动之中，躲在小数点后无限位之下，我们怎么来研究它？数学公式虽然简单精确，可是太抽象了，像你我这样没有俄国血统的一般人还真不容易看懂。能不能造一个放在桌子上的小机器，让混沌这只魔鬼在里面淋漓尽致地表演？虎妈她爸的发明，蔡氏电路，就是一个简单而且精彩的混沌机器。

蔡绍棠是菲律宾华裔，1959年获玛普尔技术学院电子工程学士，1961年获麻省理工学院硕士，1964年获伊

利诺伊大学厄巴纳-香槟分校博士。携20世纪50年代以来半导体集成电路发展的大潮，他在非线性电路领域做出多个杰出贡献。

蔡氏混沌电路的发明是在1983年10月，当蔡绍棠到日本早稻田大学松本实验室做访问学者的时候。在洛伦茨方程组发表后，早稻田大学的松本孝(Matsumoto Takashi)小组就致力于用电子线路模拟洛伦茨方程，搭建出一个能表演混沌现象的“洛伦茨”电路。我们知道，电路是可以

式也可以用电路来模拟。松本的办法是用电阻、电容、放大器等电子元件模拟洛伦茨公式的每一项，希望由此能出现洛伦茨公式的非线性动态行为和混沌。可奇怪的是，几年来他们不断改进这个电路，使其包含了几十个集成电路和大量元件，外加许多可调节参数，可是这么个复杂的电路虽然不断地逼近洛伦茨方程，却完全没有产生混沌行为。

蔡来到松本实验室的第一天，他们向他演示了这个洛伦茨电路。这个超级复杂电路搭在桌子这么大的线路板上，密如蛛网的电线和一排排的电子元件给蔡留下了深刻的印象。当晚回到招待所，蔡依然在思考这个混沌电路的问题。

也许人类思维也受混沌规律的支配，把同样一个问题放在两个人的面前，求解的思路也会相差万里。松本的想法是“形似”，认为既然洛伦茨方程只有这么几项，我用多个元件去逼近每一项，最后总能达到足够近似，从而产生相应的行为。而蔡的想法则是“神似”，他觉得既然洛伦茨方程和勒斯勒尔(Rossler)方程都含有至少两个不稳定点，如果一个振荡电路也有这样两个不稳定点，也许就能产生混沌。这个新思路使蔡豁然开朗。那天他刚到招待所，连张纸都找不到，于是他在一个旧信封和几张餐巾纸上画来画去。作为一个电路专家，简化电路是他的拿手好戏。如此他先画出一些含有两个稳定点的振荡电路，然后根据直觉和经验把那些不必要的元件去掉，不到一个小时，他就得到了一个简单的电路，只含有一个电阻、两个电容、一个线圈和一个臆想出来的“蔡氏二极管”(图2)。

第二天早上，蔡把这个电路的构想告诉松本。松本马上用他的计算机模拟了这个电路，并且立刻看到了盼

望已久的混沌行为！这个故事立刻成为武林中“温酒斩华雄”的经典，经典中的经典。云游的布袋僧看一眼就破了你苦心经营几年的阵。对蔡来说，一个人的事业再得意也不过如此，可对松本呢？一个人的事业再倒霉也不过如此了。

我查了一下，业内关于蔡氏电路的文章有近千篇，仅在1993年就有两本杂志出了专辑。为什么这么火？早期的时候，大家对其原版电路进行改型，使它的性能不断优化，达到了线路最简单而行为最复杂的经典蔡氏电路。后来呢，许多人致力于使整个电路集成化，做在一个晶片上。为什么要把这个线路极度小型化呢？因为许多人，包括蔡本人都都在极力推崇一种新的想法，就是用多个蔡氏电路连成的阵列，来产生像人的思维一样的极为复杂的过程。

蔡氏电路是怎样产生电子流动的混沌行为呢？我们知道，线圈和电容可以产生振荡，就是不断往复循环的电子流。这种不断的循环往复的电子流就是产生混沌的条件之一，具有拓扑可传递性的重复。而蔡氏二极管是

一个非线性的“负电阻”，用来创造不稳定的歧点，引发蝴蝶效应。负电阻的行为和我们零件柜里的普通电阻的行为相反。普通电阻是其两端电压与流过电阻的电流成正比，而负电阻则正好相反，流过电阻的电流越大，两端电压越低。另外，普通电阻是线性的，而蔡氏二极管是非线性的，在两端电压接近零的时候负电阻值会突然变得更大一些。这样在负电阻变化的拐点就会产生不稳定，由于微小的电流变化产生突然的电流逆转。

蔡氏二极管本来是没有的，是为了造蔡氏电路臆想出来的。我们会奇怪为什么一个电路专家会用世界上不存在的元件建造线路呢？这就是大师和俗人的区别了。俗人工程师只会根据已知的条件和元件实现一项任务。而大师要做的却是艺术创作，创作就可以浪漫地使用世间没有的元件。有电路基础的同学一定看到了，图2(b)中的蔡氏二极管是由电池和一些集成电路搭建出来的。由于这个原因，蔡氏电路是先在松本的计算机里实现了混沌行为，两年后才由他的中国学生在电路板上实现。

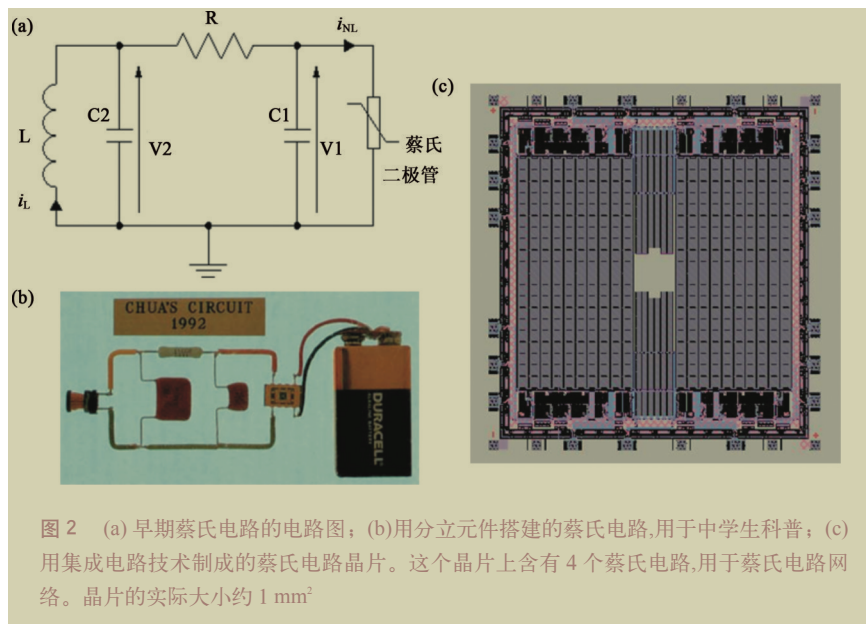


图2 (a) 早期蔡氏电路的电路图；(b) 用分立元件搭建的蔡氏电路，用于中学生科普；(c) 用集成电路技术制成的蔡氏电路晶片。这个晶片上含有4个蔡氏电路，用于蔡氏电路网络。晶片的实际大小约1mm²

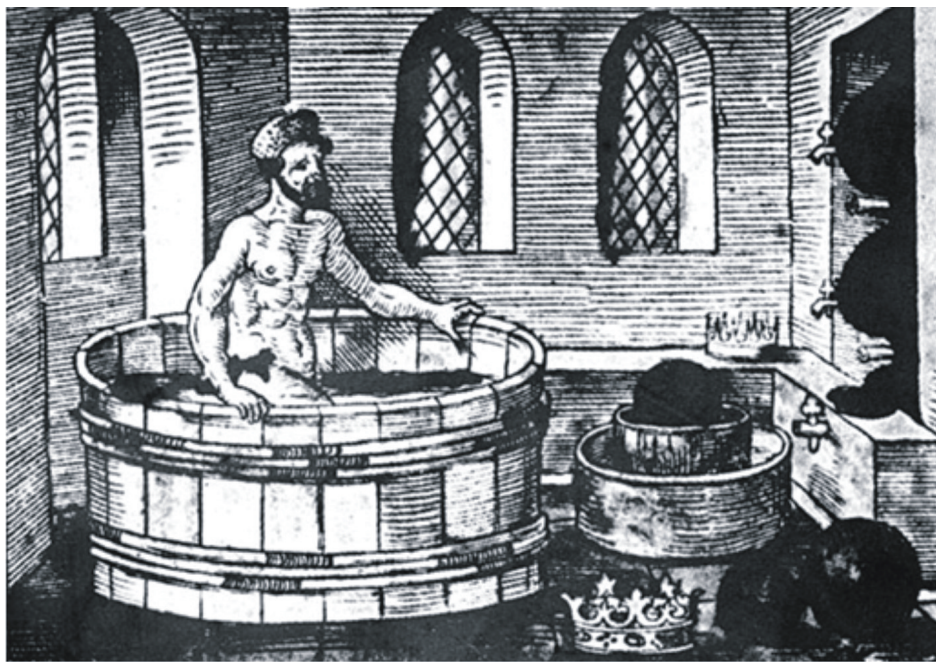


图3 这是一幅中世纪的木刻，描绘阿基米德在浴盆里发现浮力定律的“Eureka moment”。旁边放着国王的王冠。本文中已经两次提到国王悬赏了。那年头没有基金评审，国王悬赏就算最公平、最文明的资助方式了

用不存在的元件建造线路，我不知道怎样用蔡先生的菲律宾家乡话来描述这种创造性艺术。用中国的俗话说就是“人有多大胆，地有多高产”。这，这话不已经被批判过了，儿童不宜的吗？确实，这属于武林中的暗器。暗器都是危险的，很能伤人也很能伤己。但是，不会用暗器

是成不了大师的。用英语来描述，这个创新思想的暗器叫“think outside the box”。

说来有趣，创新思想的过程也受混沌规律的支配。一个伟大的发现或创新的产生过程多半要经过反反复复的思考，而同一个人多次思考同一个问题的结果多半是在一个套路上兜圈

子。可是，由于许多不起眼的因素，每次思考的起始条件也许有极小量的不同，由于混沌的规律存在，思路可能会在某处突然跳出圈子，使结果产生巨大的不同，这就是蝴蝶效应。

再举个国王悬赏的实例：当年阿基米德测算皇冠的质量，由于皇冠的外形极为复杂，几何方法是不可能的。阿基米德连日反复多次地想这个问题，直到有一天在浴盆里突然发现了答案(图3)，忘乎所以地大叫 Eureka! (啊! 我知道了!)。

至今，在反复思考中突然产生全新想法的现象依然叫做“Eureka! effect”(啊哈! 效应)。据很多创新者的回忆，新想法的产生完全是突然的，下意识的，犹如一道闪电照亮脑海。这种思维闪电的出现也叫“Eureka moment”。译成中文，也许可以借用禅宗的“顿悟”一词，来描述这种可遇不可求的时刻吧。

既然 Eureka! 现象可能与混沌规律有关，那么混沌的公式里能出现

蔡氏电路和混沌计算机

每当我们点一下鼠标，计算机就会执行一系列指令。这些指令是被程序固定死的，同样的程序执行多少次都是同样的路径和同样的结果。这样的计算机是不会跳出盒子，不会产生 Eureka! 现象的。许多人在想，是否可以用能产生混沌行为的蔡氏电路连成网络，由于在每个结点上都可能产生混沌行为，整个网络的状态和行为就会变得极为复杂而不可预测。这样的网络可以用来实现现代计算机不可能实现的任务，比如作曲、写诗和学习人类的自然语言。本世纪的前十年这种想法很普遍，但至今还没有一个令人满意的突破。可能是因为混沌太玄妙，不易掌控吧。也许在我们的有生之年这种计算机会出现一个突破，实现比人还聪明的人工智能。

Eureka! effect 吗? 能啊。图4是用洛伦茨方程画出的曲线。我们先看左边那些一圈圈的曲线, 描述了在一个范围内不断往复循环的过程。可是, 当曲线行走走到某一些点的时候, 它可以遵循老的轨迹, 向左上方跑, 也可以突然偏移, 跑到右上方那片全新的空间。如果把左边那些圈圈比作对一个问题的反复思路, 那么左上方就是循规蹈矩的结果。而向右上方跑的轨迹可以比作一个新想法。在两组圈圈的交叠处有很多既能向左又可以向右的歧点。当循规蹈矩的圈圈接近歧点时, 突然就会跑到另一个空间去。Eureka! Effect就发生了。这些歧点在混沌理论中叫做 bifurcation, 中文译作“混沌分形”。当洛伦茨公式的几个参数合适时, 很多地方都会出现歧点。分形被认为是跳出盒子的原动力。

这篇文章把虎妈她爸和虎妈扯到一起, 是想说明虎妈式教育与 Eureka! moment 之间的天壤之别。Eureka! moment 对于成人是稀少的, 可遇不可求的。但对于孩子却是相对频繁的。无论是第一次穿鞋、系纽扣, 还是写字、画画都是一个 Eureka! Moment。被国人广泛效仿的虎妈式教

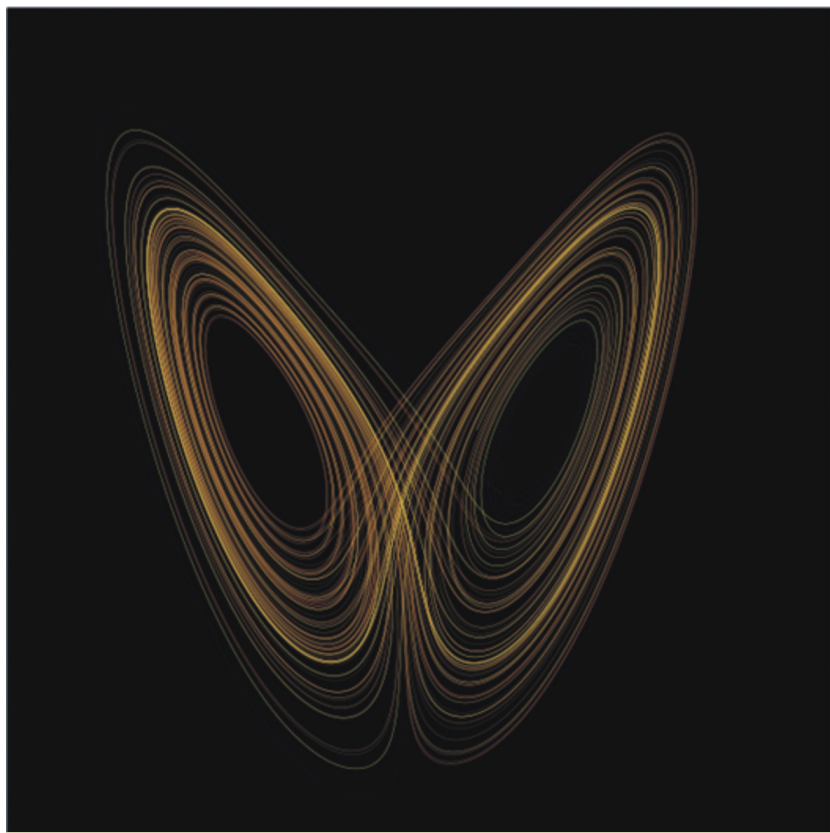


图4 根据洛伦茨公式画出的曲线。也许你是深夜在图书馆读到这篇文章。这时后面有个做清洁的阿姨, 不经意地瞟了一眼你的杂志, 然后停下手中的拖把轻声提醒到: “看, 这曲线多么像只蝴蝶! 这就是传说中的‘奇异吸引子’。业内高手所说的蝴蝶效应实际上指的是这个。”

育, 让孩子没完没了地练习英语、弹琴和做高考习题, 对孩子的灵感和创造性是有极大摧残的。所以我希望国

人不仅要学虎妈, 也要学学虎妈她爸, 多给孩子们提供一些产生 Eureka moment 的环境。

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——〈物理〉四十年集萃》

阅读《物理》, 您将了解物理界大事, 博学多闻, 轻松掌握当代物理学发展脉动。

2012年《物理》创刊40周年, 为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅两年(2013—2014年)《物理》杂志的订户, 将免费获得《岁月留痕——〈物理〉四

读者和编者

十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章, 476页精美印刷, 定价68元, 值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址: 100190, 北京603信箱《物理》编辑部收

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行

户名: 中国科学院物理研究所

帐号: 250101040005699

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话: (010)82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

