

## 希望理查森能够知道，他生前的梦想成真了

陈关荣

### 一 引子

大家都听说过“蝴蝶效应”，说的是微小的初始差异可能会导致巨大的不同结果。这一比喻源于气象学家洛伦茨（Edward N. Lorenz, 1917-2008）的“混沌”（Chaos）理论，他把长期天气预报的不可能性归咎于大气动力系统的混沌本质。

不过，这并不排除短期天气预报的可能性和准确性。事实上，现在我们经常都看天气预报，而且知道这些天气预报还是相当准确的。统计记录表明，目前 3 天之内的预报在全球范围可达到 80% 的准确度，各气象站覆盖的半径可达 25 公里，7 天之内的预报一般来说还是有效的，10 天以上便属于长期天气预报了，而两周以后的预测通常就只能理解为“可能吧”了。当然，现代科学技术的发展持续地让长期天气预报的准确性以每 10 年增加 1 天的速度不断提高。

那么，今天的气象台是怎样作出短期天气预报的呢？

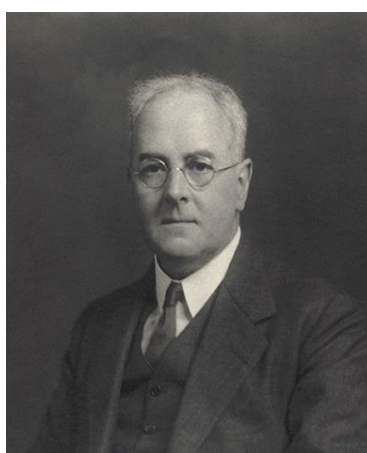
大家都知道许多民间谚语，如“天上瓦片云，地上晒死人”、“空中鱼鳞天，不雨也风颠”之类。据说这类民谣可以追溯到公元前三百多年。现代文献中记载的第一张小范围天气图出现在 1820 年。当年德国气象学家布兰德斯（Heinrich W. Brandes）根据过去的气象观测资料，将各地同一时刻的气压和风况等数据填写在地图上，从而绘制成了世界上第一张供事后作记录和研究用的天气图。

1844 年，美国的一位名画家莫尔斯（Samuel F. B. Morse）出于好奇心而发明了有线电报，为大范围气象观测数据的迅速传送和汇集提供了条件。1851 年，英国气象学家格莱舍（James W. L. Glaisher）基于电报技术和气象资料，在英国皇家博览会上展示了他绘画的全球第一张大范围接近实时的地面天气图。

气象观测数据资料包括气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数、地表温度等等，是名副其实的大数据。气象学家们是如何利用它们来做天气预报

的呢？粗略地说，他们有三种比较成熟的方法：天气学预报方法、统计学预报方法、动力学预报方法。目前这些方法都基于大数据并使用计算机，统称为数值天气预报。

基于数学理论和方法作天气预报的思想可以追溯到挪威气象学家皮叶克尼斯（Vilhelm F. K. Bjerknes, 1862-1951），他首先建议把天气预报问题描述成大气运动的数学动力方程组的初值问题，根据目前某时刻实测的气象资料，通过求解方程组来计算出将来某时刻大气的运动状态。但是人们发现，这些方程组都无法求出解析解，因而不能应用。后来，用数值方法对这些方程求解然后进行天气预报，即现代的数值天气预报技术，归功于英国气象学家路易斯·理查森（Lewis Fry Richardson, 1881年10月11日—1953年9月30日）。



路易斯·佛莱·理查森（1931）

理查森出生于英格兰 Newcastle 的一个新贵格会（Quakers）家庭，毕生是个虔诚教徒。他22岁从剑桥大学 King's College 毕业，开始在英国国家物理实验室当气象员，后来在苏格兰气象局属下的 Eskdalemuir 天文台任职台长。约40岁时起，他在 Westminster Training College 工作了九年，从物理讲师晋升到系主任，期间他47岁时从伦敦大学取得数学心理学博士学位。接下来，他在 University of the West of Scotland 的 Paisley 分校当了十一年校长直至退休。

## 二 数值天气预报

理查森在天文台工作期间积累了丰富的气象学知识和预报经验并收集了大量的观测数据。由于他具备坚实的数学和物理背景，同时受到德国气象学家布兰德斯及英国气象学家格莱舍等前人研究成果的启发，理查森对用微分方程去描述天气变化的做法十分感兴趣，并萌发了通过数值方法去求解微分方程来作天气预报的思想。

1916-1919年间，理查森在法国参加了由贵格会组织的友谊救护车队（Friends' Ambulance Unit），承担应急救援的义务工作。他利用业余时间进行数值天气预报的尝试研究。他改进了挪威气象学家皮叶克尼斯的大气动力学方程组，并通过对空间作网格剖分然后应用有限差分方法去求微分方程的近似解，发展了后来被称为理查森迭代（Richardson Iteration）和理查森外推（Richardson extrapolation）等计算方法，并建立了世界上第一个数值天气预报计算框架。作为验证，他通过手算用后来记录的天气数据试图推演出1910年5月20日那一天的天气状况。他使用了当天早上7点采集的数据用来计算6个小时后的天气。结果如何呢？University College Dublin 的荣休教授、气象学家林奇（Peter Lynch）在他2006年出版的《数值天气预报的诞生》一书中说，当年理查森得到的是一个戏剧性的错误预测，他算出6小时内有高达145百帕的气压上升，而实际记录表明当时的气压基本上没有变化。不过，林奇指出理查森失败的原因只是没有对数据做平滑化处理以排除非物理因素对气压值带来的影响。林奇后来验算的结果表明，假若当年理查森对数据做平滑化处理以去掉各种噪声的话，他的预报基本上还是准确的。林奇评论说，如果你考虑到他当时正在救护车队做义工，在救护伤病员工作的间隙中用纸和笔做手算，你就会惊叹他的成绩是多么非凡。按理查森自己的回忆，他当时的工作环境的确简陋：“我的办公室只是一个放有干草的寒冷土房。”

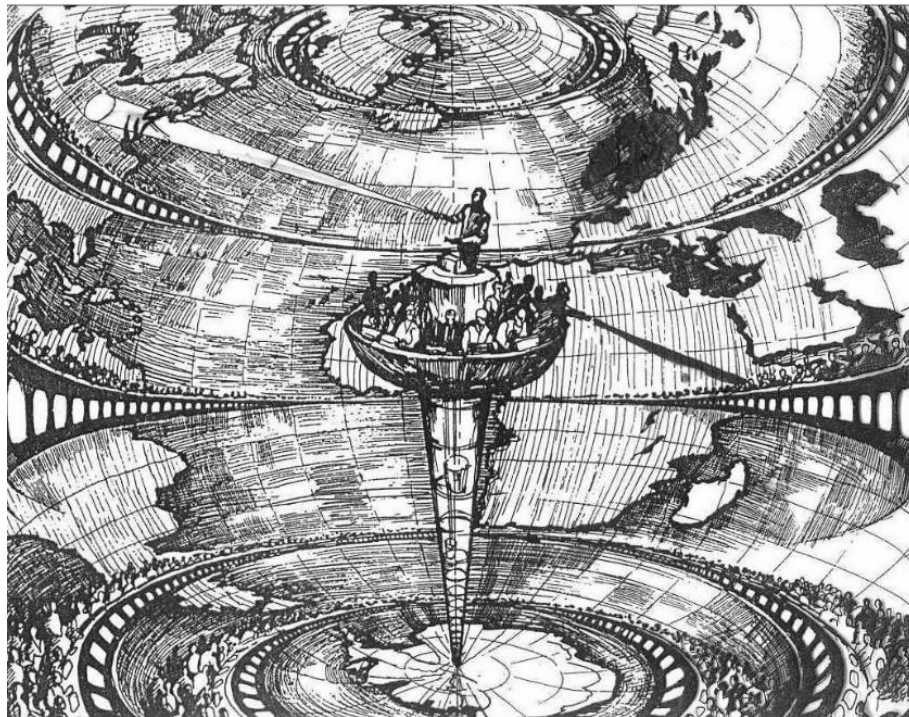


理查森的数值天气预报地图手稿

无论如何，当年理查森并没有气馁，他在坚持并不断努力。1922年，也就是他当物理系主任期间，理查森出版了一本专著《通过数值过程预测天气》，其中生动地描述了他关于一个“天气预报工场”的奇思妙想：

设想有一个类似剧院的球形大厅，中央有舞台和乐池，周边有许多座位。64000个计算员在各自的座位上，对着球形墙壁挂起的世界地图，分别去计算自己座位所处地图对应位置的天气状态。其中每个计算员只负责一个方程或者方程的一部分，但有一名管理员负责协调一个较大区域的计算过程和结果。球形墙壁上有许多袖珍屏幕，各自显示即时的计算结果，供附近的计算员读取使用。在大厅中心竖立有一根柱子，顶起一个平台，让总指挥和他的几名助理坐在那里工作。总指挥的职责是保证全球各地区的计算员保持同步计算。助理们则以最快的速度汇集计算结果作为未来天气预测的数据，并将它们发送到大厅旁边的隔音室。在那里，天气预报结果被编码然后发送到各个无线电收发站，再分别向全世界各地进行广播。

要知道那个时候世界上还没有计算机，甚至没有大规模快速计算的概念，更没有大范围联手合作进行全局天气预测的先例。理查森当时的思想，是超时代的。



理查森的“天气预报工场”设想（1922）

在《通过数值过程预测天气》这本书中，理查森主要研究了大气层里的气流过程，包括大气湍流方面的一些理论分析和实验结果。书中还建立了一种“现象学”模型，描述多种混合流体（如气体和液体）在多孔介质系统中的流动过程，并讨论了如何把该



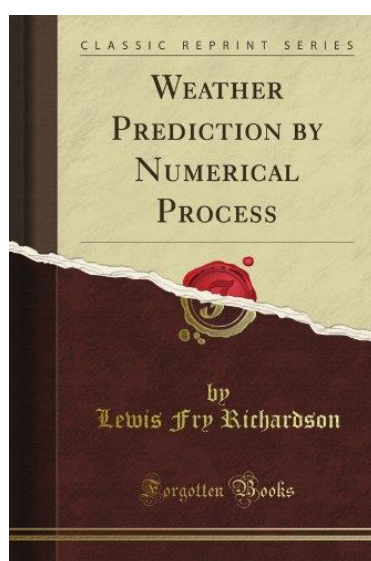
模型用于天气预报。后来，科学家们继续在理查森模型的基础上进行扩展，并将其基本原理以及各种改进模型应用于石油工程、环境工程、水文学和土壤学等多个领域。

毋庸置疑，直到电子计算机出现之前，理查森的数值天气预报设想是不现实的。当年，他自己也曾估计，用手算去预测未来6个小时后的天气，其数值方法至少需要6个星期的运算才可望完成。

多年以后，到了1946年，世界上第一台可编程通用电子计算机 ENIAC 在美国宾夕法尼亚大学（UPenn）诞生。1950年，普林斯顿高等研究院的数学家冯·诺依曼（John von Neumann）和气象学家查尼（Jule Charney）及菲尔托夫（Agnar Fjörtoff）用 ENIAC 来完成了数值天气预报的可行性实验。他们在《Tellus》杂志上发表了题为“正压涡度方程的数值积分”一文，报告了他们用这台计算机花费了约24小时便完成了提前24小时的天气预报计算。当理查森从查尼那里收到这篇论文的影印本时，十分兴奋地回了祝贺信，称赞他们用计算机作天气预报的成功是一个“巨大的科学进步”。1952年，冯·诺依曼和查尼等人说服了美国空军和海军两个气象研究部门，联手在马里兰州建立了一个数值天气预报机构。

1954年，英国BBC电台向全世界广播了历史上的第一次数值天气预报。1955年，冯·诺依曼和查尼领导下的数值天气预报机构推动了美国多个电台在广播中使用数值天气预报。从此，理查森的数值天气预报技术在全球正式启航。后来，加上超级计算机和卫星数据的配合，使预报准确度和实时性不断获得改进，该技术一直被沿用至今。

但是，理查森在1953年便去世了，他生前没有来得及看到这一天。当年，他曾说：“也许在不远的将来，由于信息的获取，在人类可以承受的代价下，计算的速度能够超过天气变化的速度。但目前这只是个梦想。”今天，我们希望理查森能够知道，他的梦想成真了。



理查森名著《通过数值过程预测天气》（1922）

### 三 和平主义活动与战争数学模型

除了数值天气预报，理查森在流体力学和物理科学中也有不少重要贡献，其中有著名的 Richardson's  $t^3$ -law 和  $4/3$ -law。湍流理论中有以他命名的 Richardson-Richards 方程以及一个重要的无量纲常数 Richardson Number。此外，还有一项成果值得提及。1912年4月15日泰坦尼克号巨型游轮沉没后不久，他就注册了使用空气中传递的声波进行回声定位以探测海浮冰山的专利。一个月后，他又注册了在水中进行回声定位的另一个专利。后来把这一思想变成实用的是1915年法国物理学家朗之万（Paul Langevin）和俄国电气工程师奇洛夫斯基（Constantin Chilowski）合作发明的声纳，在当时第一次世界大战中用来探测军事潜艇。

1926年，45岁的理查森因为“把数学应用于气象学和物理学的杰出贡献”被遴选为英国皇家学会院士。

可是，这一年政府出于战备考虑把气象台全部划归空军管辖。理查森还发现他关于流体力学和天气预测的一些研究成果被利用于战备和军事目的，感到十分失望。由于宗教信仰的背景和生活环境的影响，理查森毕生是个和平主义者。于是他决定退出流体物理和天气预报的研究，甚至自行销毁了一些有可能被战争利用的研究成果和数据。自此之后，他把余生的工作、科研和社会活动转到了教育。

有人说，数学家能够把数学用到所有你能想得出来甚至想不出来的地方去。理查森是个应用物理和计算数学家，还是个数学心理学博士，他就是这样的一个例子。他在后半生把数学知识和技能应用于心理学的研究，特别是用于践行自己心中的和平主义原则，用来理解和描述战争与冲突，并试图找出避免和结束战争的各种条件和可能方法。在心理学方面，他研究了人类智能及心理活动，包括痛苦、理解、憎恨等情感方面，并发展了一套量化方法。他的文章主要发表在1904年创刊的心理学旗舰杂志 *British Journal of Psychology*。在战争与和平研究领域里，他和莱特（Quincy Wright）、索罗金（Pitirim Sorokin）、伯丁（Kenneth Boulding）、拉帕波特（Anatol Rapoport）、科尔（Adam Curle）等人一起被认为是国际军事冲突和军备竞赛的科学分析理论的开创者。这是一个用定性定量和数理社会学方法来系统地研究战争的起因与和平的条件理论研究方向。

从1926年起，理查森开始了这个战争和冲突分析课题的研究。和他对天气问题的研究一样，理查森主要使用微分方程和概率论等传统的数学工具。他提出了一个理想化的微分方程组，就是后来著名的“理查森军备竞赛模型”（Richardson arms-race model），用来描述两个国家的战争冲突和军备竞赛。在模型中，他假定一个国家的武器生产速率与其对手拥有的武器数量成正比，与其对于对手的敌意成正比，而与自己目前拥有的武器数量成反比。该微分方程组有助于人们对两国之间多种可能的存在状态的本质以及这些状态的稳定性获得准确的认识。

1935年，理查森在《Nature》上发表文章，用他的军备竞赛模型说明其数学结果与第一次世界大战的历史数据一致，并指出模型预测第二次世界大战前夕局势的不稳定性和后来的实际结果一致，还建议了如何通过调整对外政策让对抗系统稳定下来。

1940年，59岁的理查森校长任期结束，他同时接到了一个新的教授职位邀请。几经思考之后，他做出了一个艰难的谢绝决定，并从工作岗位退休，以便全力以赴去推进他关于战争与和平的科学研究。从此之后，他的余生都是一个独立的业余科研人员。

1941年，理查森在《Nature》上发表了一篇关于人类群体迁移数学模型的短文。但在这个研究方向似乎没有太多的后续工作。

1949年，理查森出版了一本专著《军备与动荡》并留下一本手稿《致命冲突的统计》（1960年由他的儿子 Stephen 整理出版）。在这两本著作中，他尝试用数理统计学的方法去分析战争发生的原因。1940年代中期，冯·诺依曼的数学博弈论初露头角，理查森应该还没注意到。那时他的研究基于统计数据，考虑的因素主要包括经济、宗教和语言的差异。在《致命冲突的统计》的前言中，他写道：“现今在世界上有大量精彩和充满睿智的政治讨论，但都未能得出明确的结论。我有个不同的目标，就是用定量的方法去检验几种表述，以期得到可靠的答案。”因为采用统计学方法，理查森整理了从1815年到1945年几乎所有战争的数据。通过对这些数据的分析，他观察到了武装冲突的伤亡服从幂律，即伤亡人数不多的战役数目远远大于伤亡人数众多的战役数目。他指出即使在较小的尺度上，例如1935年的多次满洲里土匪袭击和芝加哥帮派冲突，其发生次数和伤亡人数之间的关系也符合这个幂律。他还论证了，尽管我们事前不能预测军事冲突的规模，也就是说不能给出伤亡人数的上限，但是战役中的伤亡人数本身符合泊松分布。

1951年，理查森在《Nature》上发表了一篇著名文章“Could an arms-race end without fighting?”，以他的数学模型为基础讨论了军备竞赛是否一定会导致战争和如何可以不通过战争而消除对抗这样一些重要的社会科学问题。

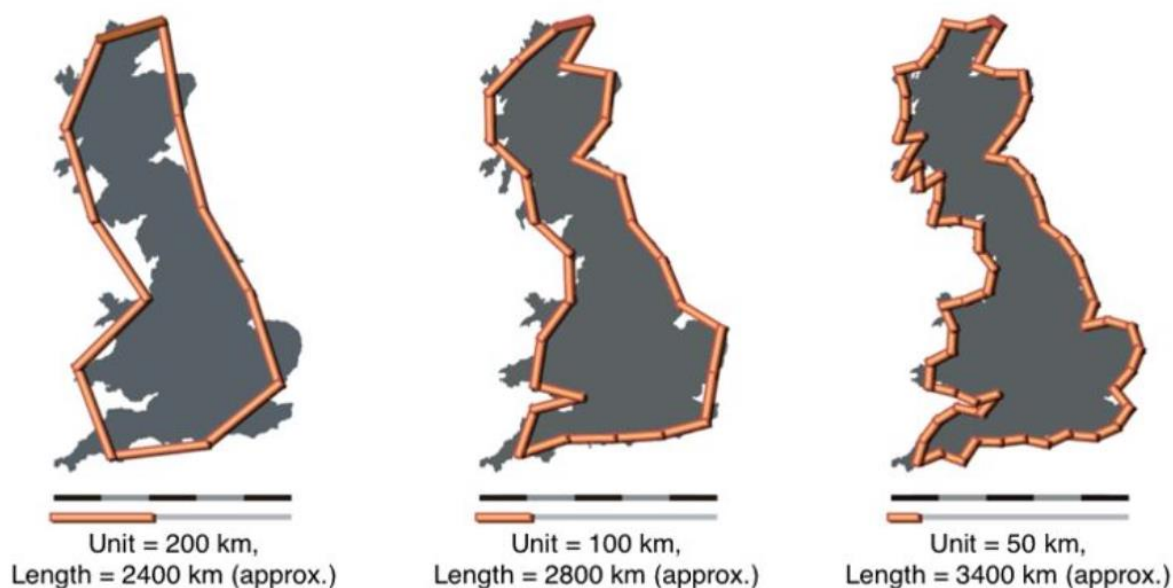
## 四分形数学思想的萌芽

科学家和数学家们的思想常常超乎常理，让人意外甚至惊奇。

在上述战争理论的研究中，理查森破天荒地认为两国之间的战争倾向是双方共同国境界线长度的函数。他试图去寻找两国开战的概率与该两国共同国境界线长度的关系。让他诧异的是，他发现不同时间和不同场合公开发表的同一国境界线长度的数据存在相当大的差别。例如，他看到西班牙和葡萄牙之间的国境界线长度有987公里的，也有1214公里的记录；荷兰和比利时之间的国境界线长度有380公里的，也有449公里的记录。是测量误差吗？理查森调查后发现：不是。

那么，是什么原因呢？这里，让我们用英格兰海岸线长度的量度为例，来解释理查森的发现。

如果我们用单位为200公里的尺子去量度，我们会得到海岸线的总长度为2400公里；用单位为100公里的尺子去量度，会得到总长度为2800公里；用单位为50公里的尺子去量度，会得到总长度为3400公里；等等。也就是说，不同单位长度的尺子量出来的结果是不同的，而且尺子越短结果越精确。



英格兰海岸线长度的不同量度

理查森的这个发现是常人不难理解并且是容易接受的。但普通人会认为，英格兰海岸线是一个固定的实体，它的总长度不管你怎么去丈量都必须是一个定数；尺子做得越来越精细，量出来的总长度就会越来越接近这个定数。对吧？

但是数学家理查森说，并非如此。他发现：使用越来越小单位的尺子，量得的海岸线总长度会变得越来越长！也就是说，随着尺子的长度趋于零，海岸线的总长度会趋于无穷大。这个不可思议的数学极限现象今天被称为“理查森效应”。

当年，科学界并没有注意到理查森这个其实是非常惊人的发现。今天，它被认为是数学分形（Fractals）理论研究的开端。“分形之父”数学家曼德博（Benoît B. Mandelbrot, 1924-2010）在他1967年的奠基性论文“英国的海岸线有多长？统计自相似和分数维度”中把分形理论的起始归功于理查森的上述发现。说起来，曼德博知道理查森的发现纯属偶然，是他在清理旧文献时往一本1961年《General Systems Year Book》的附录瞟了一眼时突然见到的。当年理查森已经知道了，有一个介于1和2之间的分数值，它可以用来描述海岸线随着测量变精细所表现出的复杂度的增加。这个分数值在今天的数学文献中被称为“分形维数”。



## 五 学术遗产和后话

理查森并非师出名门。此外，他是一个典型的“独行侠”式的科学家，极少合作伙伴，从来没有助理，绝大部分文章自己一个人完成和发表。无论如何，他的科学贡献卓著，广泛分布在计算数学、数值气象学、流体物理学、社会和平科学和计量心理学等交叉研究领域。

理查森去世后，1959年英国 Lancaster University 建立了理查森研究院（Richardson Institute），开展和平与冲突的社会科学研究。1960年，英国气象学会设立了年度颁发的理查森青年最佳论文奖。1972年，英国国家气象局把总部大楼一翼命名为理查森楼翼（Richardson Wing）。1998年，欧洲地理科学联盟（European Geosciences Union）设立了年度颁发的“路易斯·理查森奖章”（Lewis Fry Richardson Medal），表彰地球物理非线性科学研究有突出贡献的科学家，其中分形之父曼德博荣获2000年度的奖章。2001年，欧洲政治研究联盟（European Consortium for Political Research）设立了“路易斯·理查森终生成就奖”（Lewis Fry Richardson Lifetime Award）。2015年起，位于理查森读中学的 York 镇的 University of York 的数学系设立了理查森学术讲座系列。



理查森（站立者）在学术会议上发言（1949）

1953年9月30日，理查森在苏格兰 Kilmun 村的家里睡眠中平静去逝，享年72岁。夫人 Dorothy 回忆说，理查森留给她终生难忘的一句话是：

“我们人生的责任是要为后人留下更美好的事物。此后我们自己如何，则不是要去关心的。”