

北京物资学院学术文库

大脑功能连接的 复杂网络研究

**Brain Functional Network
Research base on
Complex Network**

张方风◎著



对外经济贸易大学出版社

University of International Business and Economics Press

中国科学院研究生院
中国科学院计算技术研究所

大规模网络系统的 性能分析与研究

Large Scale Network Systems
Performance Analysis and
Research

王明

中国科学院计算技术研究所
中国科学院研究生院

北京物资学院学术文库

北京物资学院学术专著出版基金资助

大脑功能连接的 复杂网络研究

**Brain Functional Network Research base
on Complex Network**

张方风 著

对外经济贸易大学出版社

中国·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

大脑功能连接的复杂网络研究/张方风著. —北京:
对外经济贸易大学出版社, 2011. 9
(北京物资学院学术文库)
ISBN 978-7-5663-0161-1

I. ①大… II. ①张… III. ①大脑 - 机能 (生物) -
研究 IV. ①R338. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 190095 号

© 2011 年 对外经济贸易大学出版社出版发行

版权所有 翻印必究

大脑功能连接的复杂网络研究
Brain Functional Network Research base on Complex Network

张方风 著

责任编辑: 陈跃琴 王文君

对外经济贸易大学出版社

北京市朝阳区惠新东街 10 号 邮政编码: 100029

邮购电话: 010-64492338 发行部电话: 010-64492342

网址: <http://www.uibep.com> E-mail: uibep@126.com

唐山市润丰印务有限公司印装 新华书店北京发行所发行

成品尺寸: 170mm × 230mm 12 印张 222 千字

2011 年 10 月北京第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5663-0161-1

定价: 26.00 元

前 言

脑是自然界中最复杂的物质，脑的高级功能是自然界中最复杂的运动形式。作为脑的高级功能，认知是一类分布式过程。对于某个特定的认知功能，往往并不是发生在某个单一脑区内，而是不同脑区之间相互作用的结果。所以，在面对大脑这一复杂适应性系统的研究问题时，本书并没有局限于某一特定脑区的活动，而是将整个大脑看作一个系统，忽略子系统内部的动力学行为，关注子系统之间的联系，并着重分析了子系统之间联系的统计特征，从整体上分析了大脑作为一个复杂系统在认知活动中所表现出的拓扑结构特性。

复杂网络是当前重要的交叉学科研究的热点之一，是人类认识世界的新观点，目前已经发现各种自然和人工网络存在重要的普遍特征，例如小世界、无标度、健壮性等，展现在人们面前的是一个美丽、神秘而令人惊异的网络世界。深入研究复杂网络对于人们深入理解自然界至关重要。反过来，利用已经发现的网络结构规律去设计和构造具有特殊要求的人造网络，则构成有极大实用价值的“逆工程”，有可能解决计算机科学、传染病学、社会学等许多学科领域中的一些关键问题。

本书将对认知任务中的大脑机制研究，使用了不同于传统心理学和认知科学的方法——复杂网络的方法。将大脑的各个不同的脑区看成是复杂网络中的节点，各个脑区之间的相互关系与功能相关，可以看作是复杂网络上的边，将大脑按照复杂网络模型进行描述，构建在不同认知任务中的大脑功能网络。本书主要研究了大脑功能网络的拓扑结构特性。

首先，我们从最简单的认知任务——手指运动入手，分析手指运动任务下的大脑功能网络的拓扑结构特性，比较左手运动和右手运动任务下网络结构性质的异同，得到了初步的结论，也证明了复杂网络方法的有效性。

随后我们将复杂网络的方法应用到数学认知这样的高级认知的脑机制分析中。数学认知问题一直是心理学家和认知神经科学家所关心的领域，但像许多其他高级认知机制一样，对数学认知的脑机制所知甚少。本书通过对北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室的已有的关于数学认知的实验的大脑功能磁共振成像的数据的重新分析，从另外的角度，通过对大脑功能网络的分析，讨论数数字这一认知任务下大脑机制；并且通过对顺数数字、倒数数字、顺数字母、倒数字母四个不同条件的对比，探讨大脑功能网络的结构特性；最后对四个不同任务下的大脑功能网络的鲁棒性（robustness）进行分析。

分析大脑在认知活动中的机制时，注重的是分析大脑作为一个系统在整体上所表现的统计特征，并对不同任务条件下的大脑功能网络的拓扑结构进行了分析，对大脑功能网络做了横向的比较。不论是在简单的手指运动任务还是复杂的数学认知任务下，大脑功能网络在拓扑结构上都表现出了一致性：大脑功能网络在拓扑结构上具有较大的集聚系数和较小的平均最短路径的特点，即大脑功能网络具有小世界的特性。同时我们还发现，大脑功能网络是一个无标度网络，说明大脑各部分脑区在认知活动中的地位和作用不尽相同，存在着重要的核心节点，能够通过连接与更多的脑区相互作用，在大脑功能网络中起着重要作用，预示我们对大脑功能脑区的分析应该集中在对核心节点的分析上。

在对大脑功能网络分析时，发现在不同的认知任务下，大脑功能网络的结构也有差异。简单来说，在较为困难的任务下，大脑功能网络的结构更加紧凑，连接更加紧密，网络的连接具有更高的冗余度，对环境的干扰表现出更好的鲁棒性。

在本书中，我们首次将大脑功能网络的复杂网络研究结果与心理学结论进行结合比较，通过对核心节点对应的脑区位置的分析，发现在手指运动的大脑功能网络中，核心节点包含了任务相关的脑区，与已有心理学结论有了很好的验证。大脑功能网络构建的网络节点是在某一认知任务中，功能相关的所有脑区的集合，表现的是完成认知任务的所有关联脑区；而这些功能相关的脑区中功能相近的连接更加紧密，以功能聚集成集团，这为我们对大脑功能的研究提供了另一个突破口。

对大脑功能网络的分析发现，现有的网络演化模型不能很好地体现大脑网络的特点。于是在本书的最后部分，我们根据在实际大脑功能网络中的发

现，构建了大脑网络的演化模型。在模型构建中，首先考虑了在三维空间上建立网络的演化；并且根据实际大脑功能网络中所表现出来的特点，建立两节点之间连边的机制。在考虑两个节点之间连边的可能性与两点间的空间距离为高斯函数的形式时，在不同机制条件下，得到了大脑网络的部分特征。

人们预言 21 世纪是复杂性的世纪，复杂性研究将在本世纪取得重大的突破，并将展示美好的应用前景。而复杂网络的研究涉及到广泛的交叉学科，也是复杂性理论研究的重要组成部分，它必将成为新世纪科学技术前沿的战略性课题之一。本书的研究工作是一个交叉研究的工作，希望对复杂性研究、复杂网络研究和脑科学、认知神经科学研究的学者有所启示和借鉴。

本书的工作开始于笔者在博士期间的研究，此项研究最终能够付梓，离不开我的博士导师姜璐，首先要感谢姜老师对我的栽培、关心、鞭策和支持。还要感谢我在北京师范大学读博士期间的各位老师和同学的帮助。在北京物资学院工作的这几年里，我将原来的研究不断地丰富和完善，最终形成了这本专著所展示的结果。这期间我的领导给予了我很多关怀和必要的指导，同事们也给予了很多的无私帮助，在这里一起表示感谢！

由于学识和理论水平有限，书中难免有不足和错误，请各位专家学者指正。

张方风

2011 年 9 月于北京物资学院

TITLE
Brain Functional Network Research base
on Complex Network

PREFACE

Brain is the most complex matter in nature, and the advanced function of brain is the most complex activity in nature. Cognition as the advanced function of brain is a distributed process, which doesn't occur in single brain area, while is the result of interactions between different brain areas. Facing with brain, a complex adapt system, we took the whole brain as one system and focused on the relationship between subsystems rather than fixed on one special brain area, and then we analyzed the feature of relationships between subsystems from the statistical view and the feature of brain as a whole in topological structure.

In this book we used a new method in researching the brain mechanism in cognitive process rather than the traditional way in psychology and cognition science, which is called as complex network. We took different brain areas as nodes of the complex network, the interactions between brain areas as links, thus we constructed the brain functional network. We mainly studied the feature of brain functional network in topological structure in this thesis.

We started with a simple cognitive process, finger moving process. We analyzed the network features of brain functional network in this process and contrasted the network features between in left finger process and in right finger process. We got some conclusions and proved the validity of complex network method in brain science.

Then we used the complex network method in advanced cognitive process like numerical cognition. We studied the most basic numerical processing—number sequence recitation in this part, then contrasted the feature and the robustness of brain functional network in numbers' forward recitation process, in numbers' backward recitation process, in letters' forward recitation process and in letters' backward recitation process.

Results showed that, there were some identical features in different cognitive processes: the distribution of functional connections is scale-free. The characteristic path length is relatively small and comparable to those calculated for equivalent random networks. The clustering coefficient is orders of magnitude larger than those of equivalent random networks. All these properties, typical of scale-free small world networks, reflect important functional information about brain states. Furthermore the location of voxels with high degree in finger moving process agrees with that of the active sites in former research. The method of complex network gives new hints and brings elicitation to the cognitive neuroscience research.

There is also some different in the pattern of organization in different cognitive process. Simply speaking, the structure of brain functional network is tighter, the links are more redundancy and the network represents better robustness in the more difficult task.

Through the empirical research of brain functional network, we know that the existing generation model of network can't represent the properties of brain networks well. So we discussed the mechanism of the generation of brain functional network. By introducing the rule of making link according to the distance between two nodes, we build our generation model in three-dimensional space. When the possibility of making link is the Gauss function of the distance of the two nodes, we recurred the real brain functional network of model organisms.

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 复杂性科学	(4)
1.1.1 从简单性到复杂性	(5)
1.1.2 复杂适应性系统	(8)
1.2 脑科学研究	(11)
1.2.1 脑科学理论	(11)
1.2.2 大脑功能结构与分区	(14)
1.2.3 脑科学方法	(17)
1.3 本书研究内容及章节安排	(21)
第 2 章 复杂网络简介	(23)
2.1 定义和描述符号	(28)
2.2 复杂网络统计量	(31)
2.2.1 度、度分布和度的相关性	(32)
2.2.2 最短路径、直径	(34)
2.2.3 集聚系数	(36)
2.2.4 边介数与点介数	(37)
2.2.5 最大连通子图	(38)
2.2.6 集团结构	(38)
2.2.7 模体	(38)
2.3 几类重要网络类型的拓扑性质	(39)
2.3.1 随机网络	(39)
2.3.2 规则网络	(42)
2.3.3 小世界网络	(43)
2.3.4 无标度网络	(44)

2.4	复杂网络结构与功能的关系	(47)
2.5	复杂网络方法在脑科学上的应用	(48)
2.5.1	大脑结构网络研究	(51)
2.5.2	大脑功能网络研究	(58)
2.6	小结	(63)
第3章	手指运动任务下大脑功能网络分析	(67)
3.1	功能磁共振成像原理及应用	(69)
3.1.1	功能磁共振成像原理	(69)
3.1.2	实验设计	(71)
3.1.3	fMRI 实验数据处理	(73)
3.2	实验和方法	(76)
3.2.1	实验设计和数据获取	(76)
3.2.2	数据预处理	(77)
3.2.3	大脑功能网络的构建	(78)
3.3	结果和分析	(82)
3.3.1	左手运动任务下的大脑功能网络	(83)
3.3.2	左手运动大脑功能网络核心节点分析	(88)
3.3.3	右手运动任务下的大脑功能网络	(90)
3.3.4	右手运动大脑功能网络核心节点分析	(95)
3.3.5	左手运动和右手运动任务下大脑功能网络比较	(95)
3.4	小结	(98)
第4章	数学认知任务下大脑功能网络分析	(101)
4.1	顺数数字大脑功能网络分析	(103)
4.1.1	顺数数字大脑功能网络构建	(104)
4.1.2	顺数数字大脑功能网络拓扑性质分析	(104)
4.2	不同认知任务下大脑功能网络比较	(108)
4.2.1	不同阈值情况下大脑功能网络比较	(108)
4.2.2	四种任务下大脑功能网络基本情况比较	(110)
4.2.3	4个任务下大脑功能网络最大连通集团拓扑性质比较	(111)
4.3	核心节点对应脑区位置分析	(120)

4.4	大脑功能网络鲁棒性分析	(121)
4.5	小结	(127)
第5章	大脑功能网络演化模型	(129)
5.1	复杂网络演化模型的研究	(132)
5.1.1	WS 模型	(132)
5.1.2	BA 模型及其扩展	(134)
5.1.3	其他网络模型	(139)
5.2	具有空间结构的演化模型	(142)
5.3	大脑网络演化模型	(144)
5.3.1	已有结果在三维空间上的演化结果	(144)
5.3.2	与实证结合的距离函数的演化模型	(146)
5.4	小结	(150)
第6章	总结与展望	(153)
6.1	总结	(155)
6.2	展望	(156)
参考文献	(159)

第 1 章

绪 论

人是万物之灵，人脑是宇宙中最复杂的物质，20世纪90年代被命名为“脑的十年”^[1]，21世纪被称为脑科学的世纪，探索和揭示脑的奥秘是当代自然科学家面临的最重大的挑战之一。人脑大约有1 000亿（ 10^{11} ）神经元，每个神经元又有 10^4 的机会与其他神经元联系^[2]；人脑的发展经过了长时间的进化，可以在特殊的生态体系中保护个体，保证基因组的繁殖；人脑能够穿过聒噪、不稳定和不可预知的环境，在众多不同的形态中提取相对应的模式（pattern）；构成人脑的神经系统是非线性的动力系统，而且是非静态的；神经元具有适应性和多稳态动力学的特性；可以说人脑或者神经系统是一个复杂适应性系统（CAS）^[3]。

长期以来，人们一直在作种种努力，希望能揭开大脑功能之迷，但直至今天这一研究仍在继续，特别是近几年，随着脑功能成像技术、认知神经科学、计算神经科学等的飞速发展，在国内外形成了脑认知功能研究的新热潮。

人脑的研究是具有重大的科学意义和哲学意义的战略性科学领域。人脑的研究包括认识脑、保健脑、开发脑和仿造脑等多个方面：认识脑是为了阐明脑功能的本质；保健脑是为了预防和治疗脑疾病；开发脑是为了开发人脑的潜在能力；仿造脑是为了制造具备人脑特点的高度智能化的应用设备；专家们预测本世纪的脑科学在这些方面都将会取得进展。本书的研究属于认识脑的范畴，尤其是认识人脑的功能。

毋庸置疑，大脑在其演化历史、结构、功能和脑神经元的编码方式上都具有相当的复杂性，首先体现在各神经子系统自身的高度非线性、不稳定性和适应性，其次体现在各神经子系统之间连接的非均匀性及大规模并行的特点。现阶段，人们对于少数几个神经元的动力学特征已经有了一定的了解，在脑神经元放电的时间编码方式及其相互之间的响应机制等方面的研究也已获得初步的进展。然而，大脑包含了诸多动态和静态的因素，具有非常丰富的信息含量，所以它作为一个独特的复杂适应性系统仍旧是难以分析的。但是，通过复杂性科学的研究，借助于自组织理论和一些相关概念，我们至少可以认识到大脑中复杂性的部分特点，并对于脑的记忆和学习、创造性思维的出现、意识流的形成等问题，实现了数理上的、具备一定科学性的探索。本书正是基于这样的观点，以系统科学的专业视角，从复杂性研究的角度，对大脑这一复杂适应性系统进行研究，具体来讲是应用复杂网络方法研究大脑的整体特性，主要是研究大脑的功能连接的性质。

本书的研究对象是大脑，无疑我们的工作属于复杂性科学的范畴，而且我们的研究也是基于复杂性研究的视角进行的，所以本书就先从复杂性研究谈起。

1.1 复杂性科学

科学进展到今天，我们清楚地认识到，自然界并非如牛顿所说的喜欢简单化，相反，现实世界中的多数系统具有复杂的相互关系和作用机制。

简化论（reductionism）科学无疑是成功的，它试图精确描述一切实体，物理学中很多时候人们可以从系统构件的性质去预测总体的行为。于是知道磁场生成于成千上万的磁极子的群体行为，而量子粒子导致 Bose-Einstein 凝聚和超流动。但是精确的建模需要进行大量的简化而消除模糊性，实际的各种系统中有时节点的作用本身就是模糊的，而且超过三个节点的运动系统整体上的精确解析难以获得。大体而言，简化论的科学通过揭示自然界的不变规律的隐藏的简单性来消解现实世界的表面复杂性，然而这种消解却让科学逐渐远离真实世界。因而，一门新的科学呼之欲出了，这就是桑塔费研究所（The Santa Fe Institute）倡导的关于复杂的科学，这种全新的、整合为一体的科学将是一门严谨的科学，就像一直以来物理学那样“坚实”，是完全建立在自然法则之上的。但是这门科学将不是对一个最基本的粒子的探索，而是对关于流通、变迁，以及模型的形成和解体的探索。这门科学将会对事物的个性和历史偶然性有所探究，而不再对整体之外的和不可预测的事物忽略不见。这不是关于简单性的科学，而是关于复杂性的科学。这门复杂科学要完成的是跨越科学不同学科的大整合，就像达尔文进化论所完成的大整合一样。它认为，在所有的学科领域之下有一个统一性规律，这一统一性规律最终不仅囊括物理、化学，也囊括生物学、信息处理、经济学、政治科学，以及人类生活的每一个方面。

自 20 世纪 80 年代开始，复杂性科学便以一种非常惊人的速度发展至今。由于复杂性科学研究的前驱，如普里高津、巴克、哈肯等多是长期从事统计物理方面工作的，因此复杂性科学在很长时间内一直被看作是统计物理

学的一个分支。但是，现在情况已经发生了很大的变化，随着各个领域一流科学家的加入和复杂性科学越来越广泛的应用，其交叉性和重要性日益突显，它已经被认为是一个独立的研究领域。

1.1.1 从简单性到复杂性

牛顿的名言：“自然界喜欢简单化，而不爱用什么多余的原因来夸耀自己。”爱因斯坦说：“自然规律的简单性也是一种客观事实。”这两句话反映了近代科学传统的一个基本观点。在经典科学的世界中，各种复杂的现象都是由一些简单的规律加以解释的。简单性、简明性成为近代科学理论追求的目标和特色之一。过去使用理想化的模型是基于历史时期和客观条件的限制，不考虑多方面的复杂要素符合当时的实际情况。事实也证明，西方近代科学对于简单性的追求曾经给科学技术带来过巨大推动。但是，时代的进步和科学的发展使得我们不能再停留在原来简单化的思维之中，这样的现状必须有所突破。同时，规则的简单更不能代表研究方向和研究过程的简单，所谓的简单是指追求一种明晰的、有效率的普适结论，而不是放弃对于复杂问题和复杂性本身的探索。

人们对于大自然的了解本身就是一个由简入繁的过程。在人类历史早期，简单性的原则和理想化的方法主导着科学研究的方向是很正常的，也是认识真理的必经阶段。然而，上个世纪科学技术的迅猛发展，使得人们对于周围客观世界的认识大大深化了，人们的思维方式开始向着多重性的方向转变，复杂性也随之作为一个重要的概念出现于现代科学的辞典中。何谓复杂性，至今莫衷一是，没有统一的说法。按照普利高津在其专著《探索复杂性》一书中的解释，复杂性能够实现不同动态之间的转变，这是复杂过程的本质特征之一。而圣塔菲研究所的科学家们认为，复杂性主要是指复杂适应性系统的演化特征，它一般处于混沌的边缘。钱学森则指出，复杂性问题实际上是开放的复杂巨系统的动力学特征问题。在自然界，真正普适的、起作用的是开放的复杂巨系统。

当一个系统由大量互相作用的部件构成而产生平衡的时候，可能形成一种内聚的结构，其整体的行为超过了对其构成部件之行为的简单叠加。如此系统可称为复杂系统（complex system）。这里要强调构件之间的相互作用，所以复杂性产生于多个（3个就开始了）部件的“连接”。部件之间的交互