



社会网络分析

第3讲 SNA的基础知识

邵鹏 博士

副教授 硕士生导师

西安工程大学管理学院

shaopengde@sohu.com

inebm.cn



是什么关系？



郭德纲

4-30 18:19 来自 iPhone 12 Pro Max



让我们共同努力，与全体同仁一道大力弘扬中华优秀传统文化，积极培育新时代行业新风正气。❤️

@人民日报：【#中国曲协倡议坚决抵制恶俗粗劣相声表演#】中国曲艺家协会相声艺术委员会和中国曲艺家协会行风建设委员会发布倡议书：近期，少数民间相声表演团体在公共场合暴露出的不当行为、不良风气引起广大网民、社会公众的关注、质疑和反对。**#中国曲协倡议坚决抵制相声界封建行帮陋习#**：“三年学徒，两年效力”“以师命家法为大”“清理门户”等带有浓厚封建色彩的江湖陈规陋习已经被时代、**社会和人民所摒弃**，推崇封建礼法、渲染人身依附的旧式班主制或师徒关系绝不是真正意义上的尊师重道，而是开历史的倒车。倡议书指出，要坚决抵制恶俗粗劣表演。相声是一门雅俗共赏、深受人民喜爱的大众艺术，让人们在含着眼泪的笑声中得到教育和启迪，决不能用低俗庸俗媚俗的内容和方式取悦观众、迎合市场。“伦理哏”、脏臭荤口、谄媚取闹、恶意调侃等做法跌破道德底线，败坏社会风气，丧失了相声艺术的基本操守。

(人民日报记者王珏) [网页链接](#)





提纲

- 1 弱连接(关系)与强链接(关系)
- 2 网络中心性(三类)
- 3 网络特征在研究中的运用
- 4 经典网络结构 (小世界与无标度)



1. 弱连接与强链接



弱连接

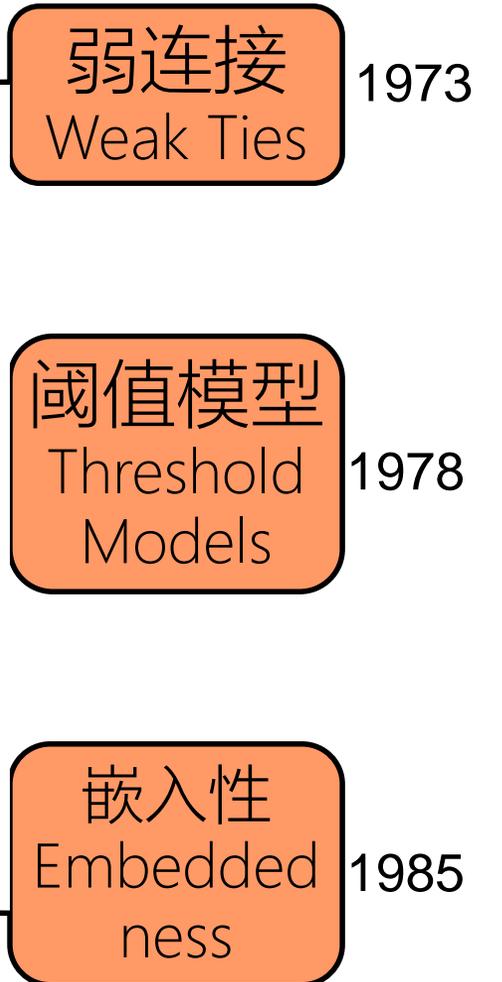
马克·格兰诺维特 (Mark Granovetter)

1943年，Granovetter出生于美国，在普林斯顿大学历史系学习期间，读到分析1789年法国大革命的著作，这对他日后进行社会网络研究产生了直接影响。

1965年，Granovetter在普林斯顿大学获得学士学位，进入哈佛大学攻读研究生学位。

1970年，Granovetter通过哈佛大学博士论文答辩，在博士论文中探讨的找工作问题，亦成为贯穿其学术生涯的研究主题。

三大贡献





马克·格兰诺维特 (Mark Granovetter)

1963年，哈里森·怀特 (Harrison C. White) 进入哈佛大学社会学系，与一大批学生 (包括格兰诺维特) 发展并完善了社会网络分析法，用于个人、组织间关系网络的定性和定量研究。

1973年，Granovetter在《美国社会学杂志》上发表The Strength of Weak Ties，奠定了其在社会网络研究领域的地位。

Granovetter将人们之间的联系分为“强连带”和“弱连带”，指出弱连带在信息传播中具有显著优势，弱连带有助于人们接受新事物、找到合适的工作，甚至能够增强社区的凝聚力，保持社区稳定。

哈里森·怀特
(Harrison C. White)

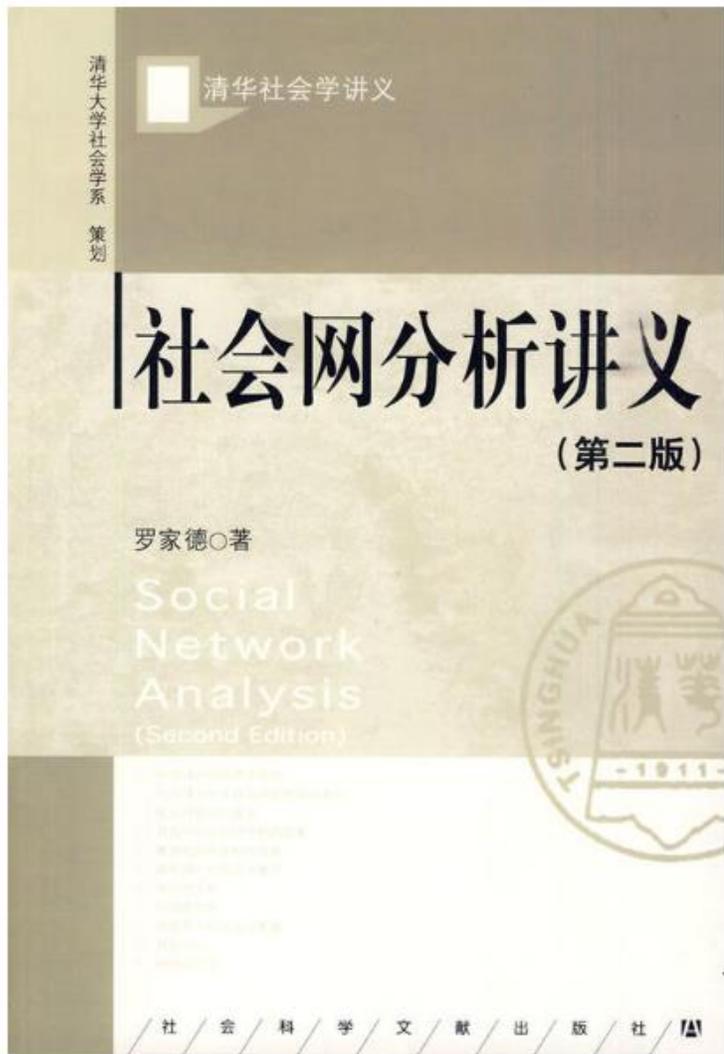
马克·格兰诺维特
(Mark Granovetter)

罗家德



罗家德著作

- 第一章 社会网分析的理论架构
- 第二章 社会网分析在社会学研究中的角色
- 第三章 社会网研究的类别
- 第四章 自我中心社会网资料的收集
- 第五章 整体社会网资料的收集
- 第六章 图形理论与社会计量学
- 第七章 中心性分析
- 第八章 小团体分析
- 第九章 社会资本的定义与衡量
- 第十章 角色分析
- 第十一章 网络动态学



1973. "The Strength of Weak Ties." *American Journal of Sociology*, 78 (May):
1360-1380.

The Strength of Weak Ties¹

Mark S. Granovetter

Johns Hopkins University

Analysis of social networks is suggested as a tool for linking micro and macro levels of sociological theory. The procedure is illustrated by elaboration of the macro implications of one aspect of small-scale interaction: the strength of dyadic ties. It is argued that the degree of overlap of two individuals' friendship networks varies directly with the strength of their tie to one another. The impact of this principle on diffusion of influence and information, mobility opportunity, and community organization is explored. Stress is laid on the cohesive power of weak ties. Most network models deal, implicitly, with strong ties, thus confining their applicability to small, well-defined groups. Emphasis on weak ties lends itself to discussion of relations *between* groups and to analysis of segments of social structure not easily defined in terms of primary groups.



“关系”（ties）是衡量人与人之间关联的一个重要指标。

不同亲密程度的人与人之间，“关系”的紧密程度也各不相同。

在分析中，可以用“认识时间的长短”、“互动的频率”、“亲密性”以及“互惠性服务的内容”等维度来对关系的强度进行衡量。



通过大量的调查，格兰诺维特发现很多人能找到工作，其实主要依赖于弱关系而非强关系。其作用机制则主要是信息传播。

- 一般来说，具有强关系的人，基本都处于同一群体，他们拥有的信息基本是同质的。
- 而那些彼此关系较弱的人，则可能分处不同的群体，因此可能会拥有差异化的信息。显然，这种差异化的信息对于人们找工作是十分重要的。

格兰诺维特将弱关系的这种作用称为弱关系的力量。

李艳,李树茁,彭邕.农村大龄未婚男性与已婚男性心理福利的比较研究[J].人口与发展,2009,15(04):2-12.

3.2.1 因变量:心理福利

通过抑郁度和生活满意度两个方面来测量,前者测量心理福利的负面情绪,后者评价个体感知判断当前生活质量状况,是对心理福利正向方面的测量 (Silverstein et al, 2006)。抑郁度的测量采用 Radloff(1977)编

3.2.2 解释变量:婚姻状况

婚姻状况是本文研究的主自变量,分为未婚和已婚两类。已婚包括初婚和再婚,未婚则是指 28岁及以上从未结过婚。

3.2.3 控制变量:包括社会支持变量和人口社会经济地位特征变量

社会支持分为现实社会支持和感知社会支持两个维度。现实的社会支持的度量基于范德普尔的社会支持标准问卷 (Van delPoel 1993),包括实际支持网、情感支持网和社会交往网三种网络。具体问题请参考《性别失衡与农村人口生活福利调查技术报告》。对被访者列举的可求助的支持者,以“(该成员)是否实际提供帮助或支持”的问题进行甄别,仅实际提供过帮助或支持的成员才纳入到现实社会支持的规模和关系构成计算,最终现实社会支持变量纳入模型的指标为三个网的“规模”以及“有无弱关系”,“有无弱关系”指实际提供过帮助的成员中是否与被访者是非亲缘关系(非亲缘关系指除配偶、伴侣、父母或配偶的父母、子女、继子女或养子女、兄弟姐妹、兄弟姐妹的孩子及其他亲戚外的关系)。

感知社会支持利用领悟社会支持量表 (Perceived Social Support Scale简称 PSSS)来测量个体感觉到的各种社会支持源(如家庭、朋友和其他人)的支持程度。该量表一共 12个条目,每个条目的回答分为五级(非常同意、同意、中立、不同意、非常不同意),因为都是正向题,在计算总分时如果被访者选项为“非常同意”则赋 5分,“同意”赋 4分,“中立”赋 3分,“不同意”赋 2分,“非常不同意”赋 1分,12个条目的总分反映个体感受到的社会支持程度。领悟社会支持量表的信度为 0.91。

刘学元,丁雯婧,赵先德.企业创新网络中关系强度、吸收能力与创新绩效的关系研究[J].南开管理评论,2016,19(01):30-42.

而影响创新网络成败的一个重要维度是网络中各成员之间关系的强弱,即创新网络中的关系强度。所谓关系强度,Granovetter^[8]在《弱关系的力量》中将其具体定义为由接触时间与频次、情感强度、相互信赖和互惠性四个维度构成的一个集合概念,并提出人与人、组织与组织之间交流联系会形成不同的关系强度,而关系的强弱会影响知识的创造、获取和传递,且网络关系可以区分为强关系与弱关系:强关系表现为经常性的互动、相互的好感以及长久合作关系,而弱关系则表现为不频繁的联系、较弱的情感和短期的合作关系。虽然企业间的合作关系已被证实对企业创新有促进作用,^[9-11]但现有研究对合作关系的强度与创新绩效的关系尚未形成一致结论,主要分为两个流派:“强关系”流派和“弱关系”流派。“强关系”派以Coleman^[12,13]为代表,强调了网络成员之间团结的重要性,认为紧密的网络关系是获得社会资本的先决条

(1) 创新网络关系强度

如前文所述,创新网络是企业与其他利益相关者建立的正式或非正式的联结关系。^[77]其中,企业与其竞争者虽然具有竞争关系,但根据Ghosh等^[78]的研究,其合作也可以为彼此降低研发成本并提高市场占有率,从而影响企业的创新绩效。但以往研究中,关系强度的测量方法主要是以社会学的个人关系研究为基础,^[25]并没有考虑到企业网络的特点。因此,本研究借鉴了潘松挺等^[79]开发的基于企业创新网络的关系强度测量量表。该量表基于中国特殊的商业文化环境而设计,相比国外学者开发的量表,更能反映在我国特殊文化和经济背景之下的网络关系强度。我们从接触时间、投入资源、合作交流范围和互惠性4个维度共10个题项来度量核心企业与科研机构、中介金融机构、供应商和客户以及竞争对手的关系强度。我们要求受访者根据企业与各利益相关者的关系对关系强度的每一个维度进行客观评判,并用7点LIKERT量表来测量,其中,1表示非常不同意,7表示非常同意。

冯娇,姚忠.基于强弱关系理论的社会化商务购买意愿影响因素研究[J].管理评论,2015,27(12):99-109.

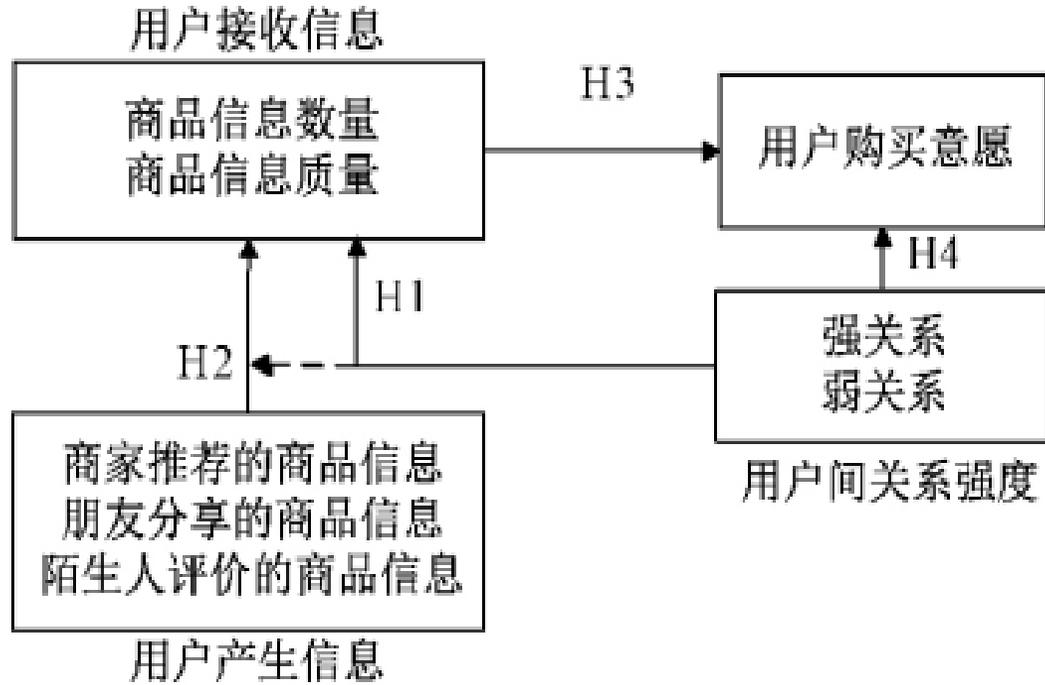


图1 研究模型

用户间关系强度(RD) Cronbach's $\alpha=0.68$ CR=0.85 AVE=0.48

RD01:我与人人网中的人(平均)认识多久?

(0-1年,选1;1-2年,选2;2-3年,选3;3-4年,选4;4年以上,选5)

RD02:我浏览人人网的频次?

(不经常,选1;每月几次,选2;每周几次,选3;每天,选4;每天很多次,选5)

RD03:人人网中我有很多非常亲密,关系很好的朋友

RD04:我对人人网上与他(她)人的关系很满意

RD05:人人网上我的朋友对人很真诚,我相信他(她)们

RD06:人人网让我有归属感,我希望与人人网上的朋友保持长久关系

彭华涛.大学生与企业职工创业社会网络演化特征比较[J].科研管理,2013,34(02):97-104.

潜变量	可观测变量		Cronbach α	文献来源
关系强弱	GX ₁	与合作伙伴或客户的关系逐步从纯粹的经济关系开始向信任关系转变	0.612	Smith, Lohrke ^[27]
	GX ₂	一旦发现有可以赢利但需要合作完成的项目,均会想到合作伙伴或客户		DonnellA, GilmoreA ^[28]
	GX ₃	经常会组织和推动合作伙伴之间或者客户之间的相互联系和交往		Uzzi B ^[29]
结构疏密	JG ₁	合作伙伴或客户的行为表现和作用与预期差别较大	0.597	Ostgaard, Tabirleys ^[30]
	JG ₂	目前所从事的业务范围决定了熟人或朋友都是相关行业领域的		Veronique ^[31]
	JG ₃	能够发展的新合作伙伴或客户受初期合作伙伴或客户类型和数量的影响		GilsingV ^[32]
功能集成	GN ₁	通过多种方式与合作伙伴或客户进行交往以维护双方关系	0.603	Portes A ^[33]
	GN ₂	非常有必要根据业务发展的需要去寻找不同类型的合作伙伴或客户		Zahra S A, Neubaum D O ^[34]
价值多元	JZ ₁	在创业的不同阶段需要得到不同合作伙伴或客户的支持和帮助	0.580	Pekhools ^[35]
	JZ ₂	合作伙伴或客户必须不断适应外部环境和业务发展的不断需要		Podolny J M, Baron J N ^[36]
	JZ ₃	合作伙伴或客户数量越来越多,与有些合作伙伴或客户的利益无法同时兼顾		Baker W ^[37]

吴晓云,王建平.网络关系强度对技术创新绩效的影响——不同创新模式的双重中介模型[J].科学学与科学技术管理,2017,38(07):155-166.

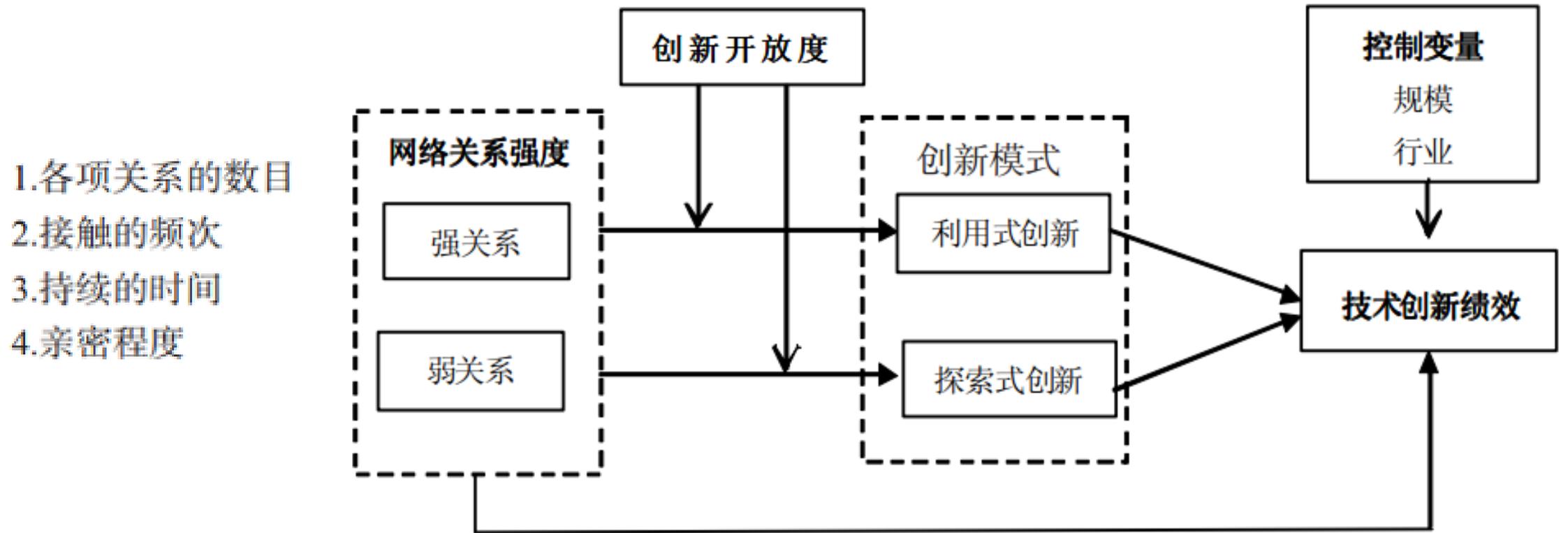


图1 研究模型

桥接型社会资本 ($\alpha = 0.892$)

1. 我感觉自己是西交大的一员。
 2. 我在西交大有归属感。
 3. 我对西交大发生的事情很感兴趣。
 4. 我乐意花时间去支持一些校园活动。
 5. 西交大是一所好的学校。
 6. 毕业后如果有能力的话我会捐钱给学校。
 7. 与西交大同学和老师的交往使我乐意尝试新的事物。
 8. 与西交大同学和老师的交往扩大了我的人际交往圈。
-

粘结点社会资本 ($\alpha = 0.856$)

9. 我有几个值得信任的人,可以帮助我解决各种问题。
10. 如果急需 500 元钱时,我知道在学校可以找哪些人借。
11. 在做重要的决定时,我在学校可以找到人咨询意见。
12. 当我感到孤寂时,在学校可以找到人倾诉。
13. 我在学校有关系很好的小圈子。

维持型社会资本 ($\alpha = 0.842$)

14. 我可以通过高中同学了解到他们所在城市发生的事情。
 15. 如果需要的话,我可以求助于高中同学。
 16. 如果我到一个城市旅行,我可以住在高中同学那里。
 17. 我能从高中同学那里获取有关工作或实习的信息。
 18. 我很容易找到高中同学并邀请他们参加同学聚会。
-

王永健,谢卫红,王田绘,成明慧.强弱关系与突破式创新关系研究——吸收能力的中介作用和环境动态性的调节效应[J].管理评论,2016,28(10):111-122.

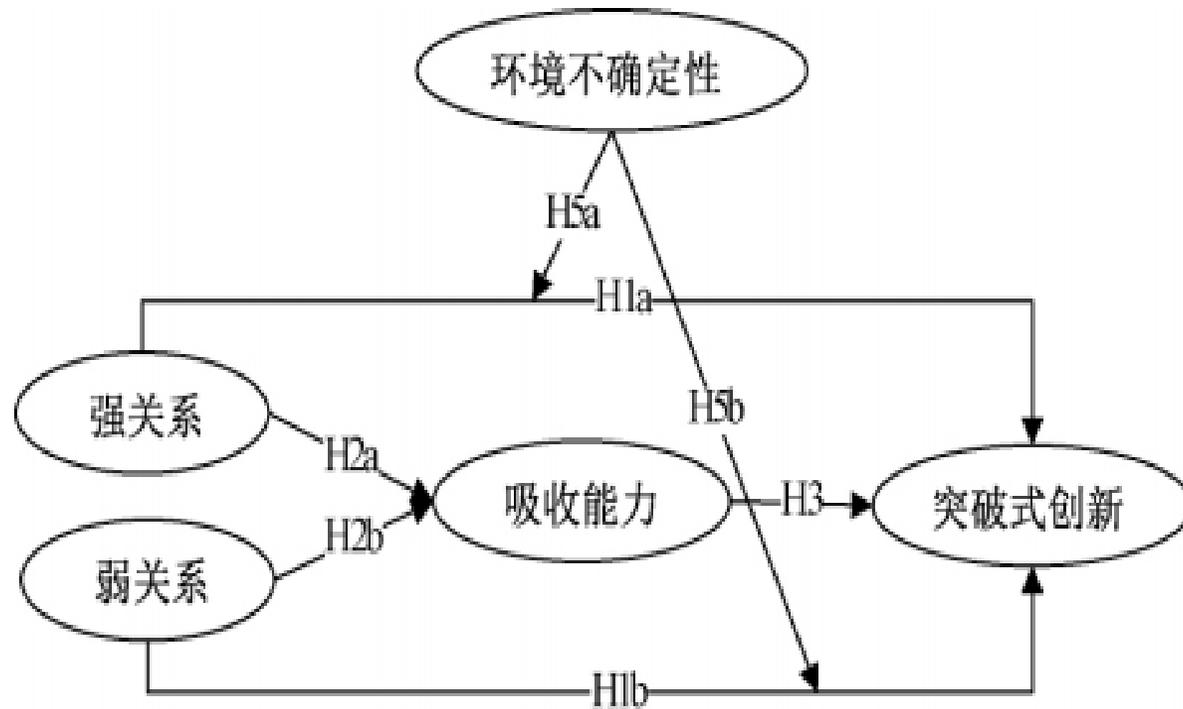


图1 理论模型图

- ◆ 问卷通过三种途径发放，一是委托广东高科技产业商会发放，二是通过在读 MBA 学员发放，调查对象主要是企业中高层管理者；三是直接发放给企业。
- ◆ 在正式发放问卷之前，抽取了 20 位 MBA 学员和 10 家企业进行了预调查，对问卷提出疑问和修改意见，针对反馈的问题进一步修改，形成正式问卷。
- ◆ 共发放了 600 份问卷，回收 259 份，去掉无效问卷 38 份，获得有效问卷 221 份。

1978. "Threshold Models of Collective Behavior." *American Journal of Sociology*, 83 (May): 1420-1443.

Threshold Models of Collective Behavior¹

Mark Granovetter

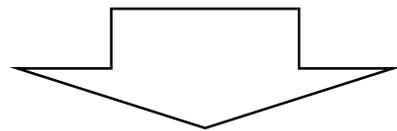
State University of New York at Stony Brook

Models of collective behavior are developed for situations where actors have two alternatives and the costs and/or benefits of each depend on how many other actors choose which alternative. The key concept is that of "threshold": the number or proportion of others who must make one decision before a given actor does so; this is the point where net benefits begin to exceed net costs for that particular actor. Beginning with a frequency distribution of thresholds, the models allow calculation of the ultimate or "equilibrium" number making each decision. The stability of equilibrium results against various possible changes in threshold distributions is considered. Stress is placed on the importance of exact distributions for outcomes. Groups with similar average preferences may generate very different results; hence it is hazardous to infer individual dispositions from aggregate outcomes or to assume that behavior was directed by ultimately agreed-upon norms. Suggested applications are to riot behavior, innovation and rumor diffusion, strikes, voting, and migration. Issues of measurement, falsification, and verification are discussed.



根据“Threshold Models”，一个集体的内部结构会对集体行为产生很大影响。

例如，如果在一个集体中，大部分人都是容易被煽动的，或者说对于从事某事件有较低的门槛，只需要有很少的人行动，他们就会行动，那么这个集体就更容易发生群体性行为。反之，如果这个集体中多数人不易煽动，那么这个集体发生群体性行为的可能也就相应较低。



In line with the threshold model, it is assumed that an individual will participate in collective action if:

$$s_{i,t-1} > \tau_i$$

where $s_{i,t-1}$ denotes the social influence that individual i receives from neighbors at time $t - 1$, and τ_i is the threshold of the individual i that is independent of time.

1985. "Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness."
American Journal of Sociology, 91(November): 481-510.

Economic Action and Social Structure: The Problem of Embeddedness¹

Mark Granovetter

State University of New York at Stony Brook

How behavior and institutions are affected by social relations is one of the classic questions of social theory. This paper concerns the extent to which economic action is embedded in structures of social relations, in modern industrial society. Although the usual neoclassical accounts provide an “undersocialized” or atomized-actor explanation of such action, reformist economists who attempt to bring social structure back in do so in the “oversocialized” way criticized by Dennis Wrong. Under- and oversocialized accounts are paradoxically similar in their neglect of ongoing structures of social relations, and a sophisticated account of economic action must consider its embeddedness in such structures. The argument is illustrated by a critique of Oliver Williamson’s “markets and hierarchies” research program.



嵌入性（ Embeddedness ）指的是个人在**社会网络中的互相嵌入关系**。

- 在传统经济学家眼中，人是“理性”的。在各类经济社会活动中，理性人主要按照权衡利益得失行事，而不受社会结构、社会关系的影响，因此社会网络是不重要的。
- 传统社会学家的观点则更强调社会对个人的影响。

格兰诺维特把这两种观点分别冠以了“低度社会化”和“过度社会化”之名。

格兰诺维特主张既要避免“低度社会化”的分析倾向，把人认为是孤立的原子，也要避免“过度社会化”的分析倾向。而应该把人看作镶嵌在真实的、正在运作的社会关系系统之中的，有目的的行动个体。



强连接

南开大学哲学学士、法学硕士（社会学专业）、美国纽约州立大学社会学博士。

美国明尼苏达大学社会学系终身教授，西安交通大学人文社会科学学院院长（2009.6-2017.6）、实证社会科学研究所以所长。

北美华裔社会学家协会主席、美国社会学学会亚洲分会主席、社会网络分析国际学会理事

2014年-2016年Elsevier 期刊源论文全球高被引学者。

看我一生，虽然发表了130多篇文章，十几本书，有过一些头衔，做了一堆事，但是最后发现，自己的学术成果就四个。

第一，在中国社会分层机制问题上提出了权力继续论；

第二，在网络研究上提出了强关系假设；

第三，在社会学和社会科学的方法论上提出了理论导向的实证研究；

第四，就是基于中国的文化现实，提出了关系社会学的研究方向。

对话 | 边燕杰：让国际学界聆听中国声音

<http://wemedia.ifeng.com/23218549/wemedia.shtml>



强连接

学术历程从1981年读社会学时开始，而后留在南开读了硕士并留校工作

1985年，到美国纽约州立大学读博士，毕业后去杜克大学博士后，然后就到了明尼苏达大学当正式的教员

1997年到2006年离开了明大到香港科技大学任教

2009年6月，边燕杰教授受聘为西安交通大学人文学院院长

费孝通

1981年南开社会学专业班

国内外师资

54名学员

林南等

边燕杰

James G. March

詹姆斯·马奇

周雪光

著名社会学家边燕杰教授访谈

http://www.cssn.cn/shx/shx_bjtj/201401/t20140127_955067_1.shtml

社会学学科：同行三十年老树绿枝鲜

<http://news.nankai.edu.cn/xs/system/2013/10/20/000147359.shtml>

周雪光著作

第一讲 导论：组织现象和组织社会学

第二讲 组织与市场：一个交易成本经济学的研究角度

第三讲 组织与制度：一个制度学派的理论框架

第四讲 组织与社会关系网络

第五讲 有限理性与组织研究

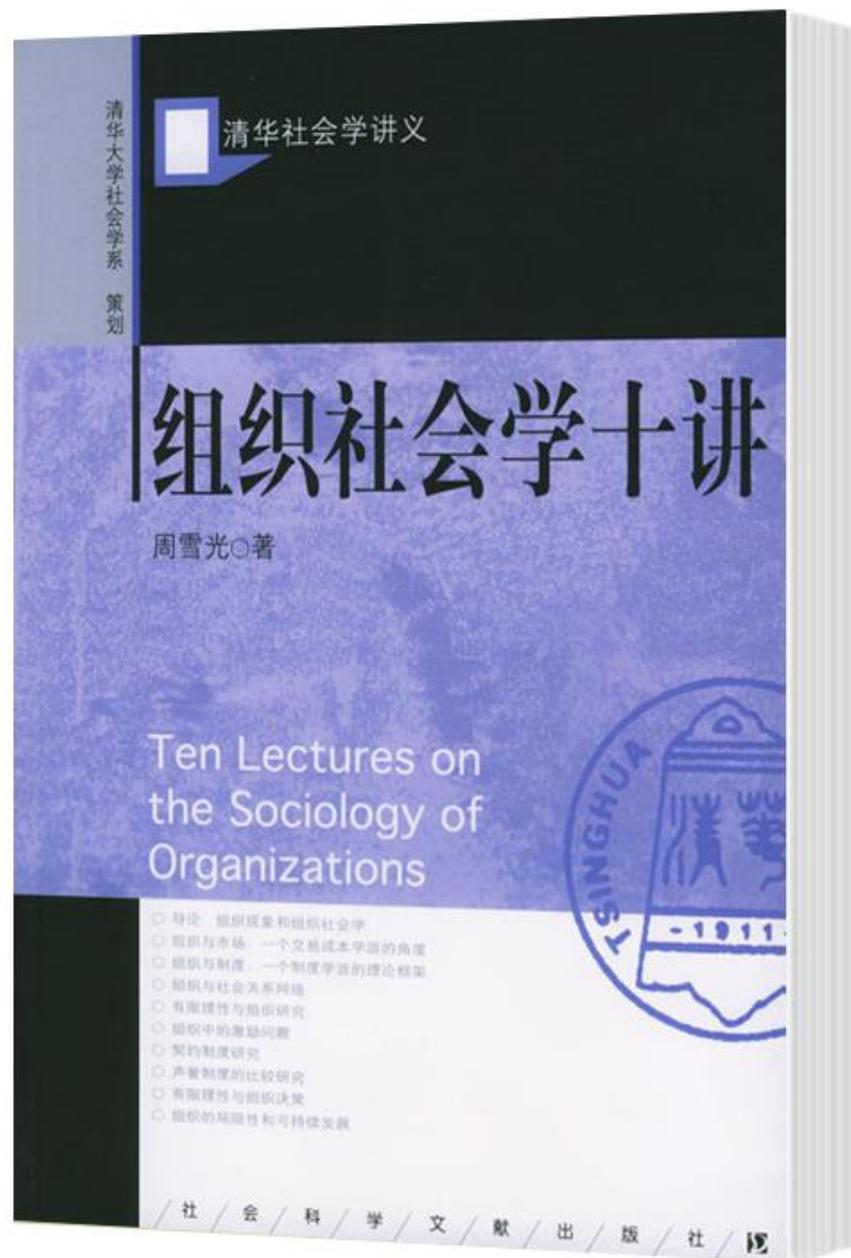
第六讲 组织中的激励问题

第七讲 契约制度研究

第八讲 声誉制度的比较研究

第九讲 有限理性与组织决策

第十讲 组织的局限性和可持续发展



1997, Bringing Strong Ties Back in: Indirect Ties, Network Bridges, and Job Searches in China

BRINGING STRONG TIES BACK IN: INDIRECT TIES, NETWORK BRIDGES, AND JOB SEARCHES IN CHINA*

Yanjie Bian

University of Minnesota

Granovetter's (1973, 1974) "strength-of-weak-ties" argument has led to fruitful research on how individuals are matched to jobs in market economies. In analyzing the institution for assigning jobs in China, I make distinctions (1) between information and influence that flow through networks during job searches and (2) between direct ties and indirect ties used by job-seekers. I find that in China personal networks are used to influence authorities who in turn assign jobs as favors to their contacts, which is a type of unauthorized activity facilitated by strong ties characterized by trust and obligation. In a 1988 survey in Tianjin, I find that (1) jobs are acquired through strong ties more frequently than through weak ties, (2) both direct and indirect ties are used to obtain help from job-assigning authorities, (3) job-seekers and their ultimate helpers are indirectly connected through intermediaries to whom both are strongly tied, and (4) job-seekers using indirect ties are more likely to obtain better jobs than those using direct ties.



假说 1: 求职渠道是通过个人网、更多地是通过强关系而非弱关系建立的。

假说 2: 求职者寻求帮助的控制代理人所属的组织级别愈高，他愈可能被较高级别的工作单位录用。

假说 3: 求职者更可能通过间接而非直接的关系与较高级别的控制代理人交往。

假说 2 假定，较高级别的控制代理人能提供较好的工作，假说 3 暗含着

假说 4: 如果求职者使用间接而非直接的关系，那么他们就可能找到较好的工作。

注意：因为间接关系被用来接近较高级别的控制代理人，当考虑到控制代理人的级别时，间接关系并不对已获得的工作产生独立的影响。

假说 5: 年长的或具有较高社会经济背景的求职者比那些年轻者或较低地位的求职者更可能运用间接关系。

假说 6: 当求职者与控制代理人没有关系时，或当他们仅仅有表面的交往时，在找工作过程中，他们倾向于通过一个与双方关系都密切的中介人联系起来。

2015, Beyond the Strength of Social Ties: Job Search Networks and Entry-Level Wage in Urban China

Beyond the Strength of Social Ties: Job Search Networks and Entry-Level Wage in Urban China

Yanjie Bian^{1,2} and Xianbi Huang³

Abstract

This article provides an assessment of the effect of job-search networks on entry-level wage in urban China. The analysis of a 2009 large-scale survey shows that (a) users of social contacts have a significantly higher wage at job entry than nonusers; (b) both strong ties and weak ties increase entry-level wage; (c) network-mobilized information and favoritism increase entry-level wage; and (d) these network effects are stronger in sectors of less institutionalization and for jobs of lower skill specificity, but do not vary significantly from the prereform to the postreform period.

American Behavioral Scientist
2015, Vol. 59(8) 961–976

© 2015 SAGE Publications

Reprints and permissions:

sagepub.com/journalsPermissions.nav

DOI: 10.1177/0002764215580608

abs.sagepub.com





Hypothesis 1a: Weak ties and informational ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such an effect is greater in less institutionalized sectors than in more institutionalized sectors.

Hypothesis 1b: Weak ties and informational ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such an effect is greater for jobs with lower skill specificity than for jobs with higher skill specificity.

Hypothesis 1c: Weak ties and informational ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such an effect is greater in later periods than in earlier periods of the reform era.



Hypothesis 2a: Strong ties and favor-exchange ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such effect is greater in less institutionalized sectors than in more institutionalized sectors.

Hypothesis 2b: Strong ties and favor-exchange ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such effect is greater for jobs of lower skill specificity than for jobs of higher skill specificity.

Hypothesis 2c: Strong ties and favor-exchange ties to social contacts during job searches will increase one's entry-level wage, and such effect is greater in earlier periods than in later periods of the reform era.



2. 网络中心性



中心性的概念

中心性指标衡量一个人在网络结构中的重要性，地位的优越性或特权性，以及社会声望等。

度中心
性

接近中
心性

中介中
心性



度中心性(Degree Centrality)

绝对度中心性：一个人的关系数量的总和，即节点的度。

$$C_D(n_i) = d(n_i) = \sum_j x_{ij} = \sum_j x_{ji}$$

相对度中心性：除以某一点在社会网络中最大可能的关系数， $g-1$ 条边。

$$C'_D = \frac{d(n_i)}{g-1}$$



度中心性(Degree Centrality)

群体度中心性(group degree centrality)

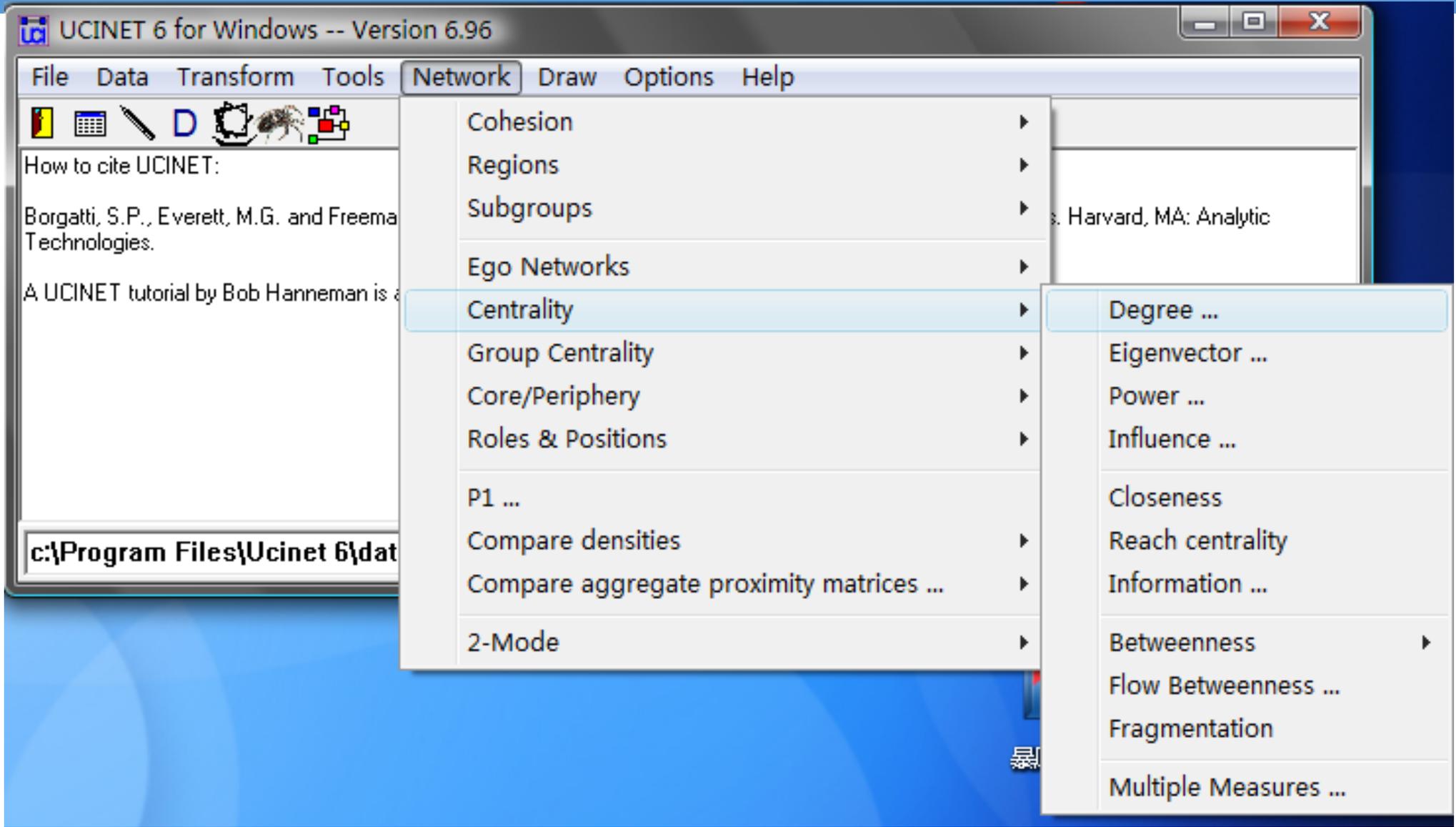
- 网络的整体结构指标，其含义是：一个图形中，度中心性最高的那个人，其度中心性与其他人度中心性的差距。差距越大，则群体度中心性数值越高，表明该团体的权利过分集中，有一个人特别重要。
- 群体度中心性最高的图形就是星状图形。

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^g [C_D(n^*) - C_D(n_i)]}{\max \sum_{i=1}^g [C_D(n^*) - C_D(n_i)]}$$

$C_D(n^*)$ 是节点最大的度中心性

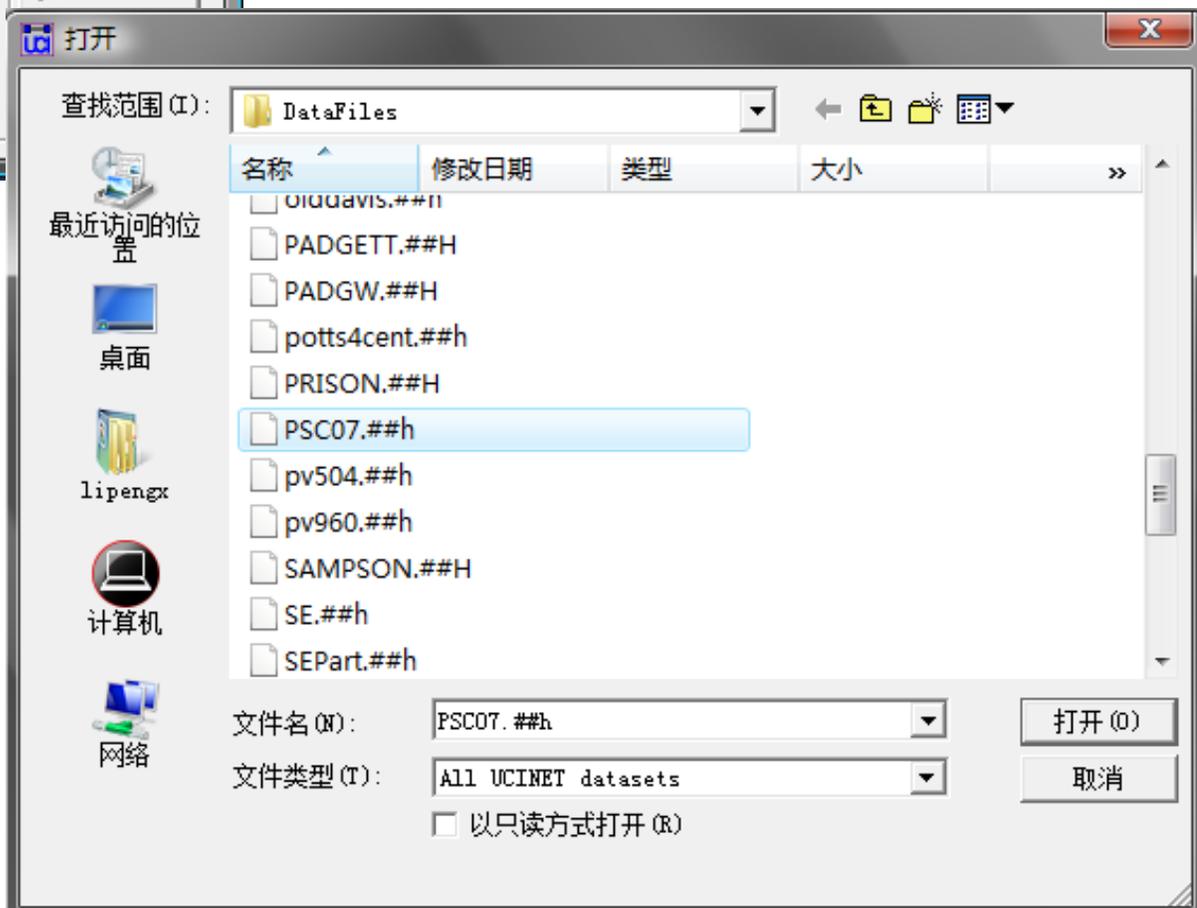


度中心性(Degree Centrality)





度中心性(Degree Centrality)





度中心性(Degree Centrality)

无向图中星型网络的群体中心性是：

$$(g-1)(g-2)$$

无向图的群体度中心性公式简化为：

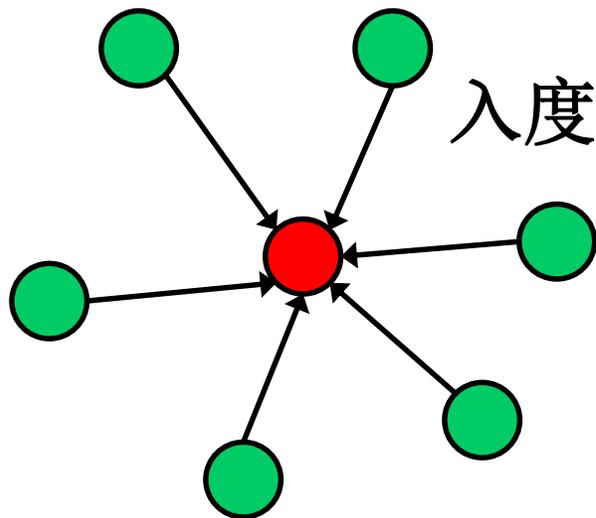
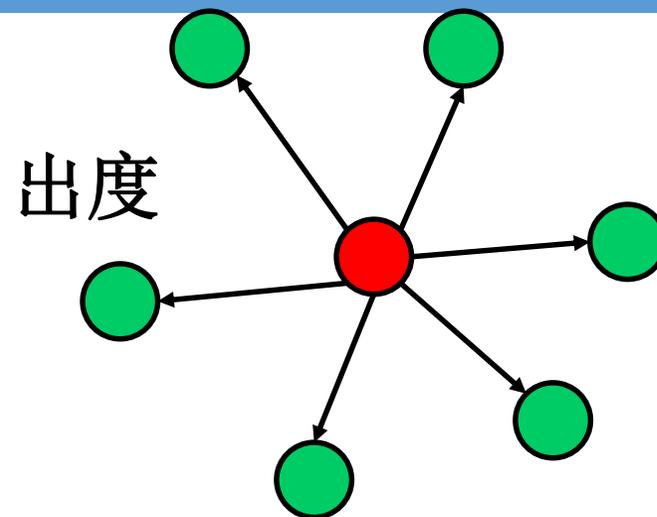
$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^g [C_D(n^*) - C_D(n_i)]}{(g-1)(g-2)}$$

度中心性(Degree Centrality)

出度中心性(out-degree centrality)：一个节点承认对外关系数量的总和。

$$C_{Do}(n_i) = d_o(n_i) = \sum x_{ij}$$

$$C'_{Do} = \frac{d_o(n_i)}{g-1}$$



入度中心性(in-degree centrality)：其他节点承认对某一节点有关系的数量总和。

$$C_{DI}(n_i) = d_I(n_i) = \sum x_{ij}$$

$$C'_{DI} = \frac{d_I(n_i)}{g-1}$$

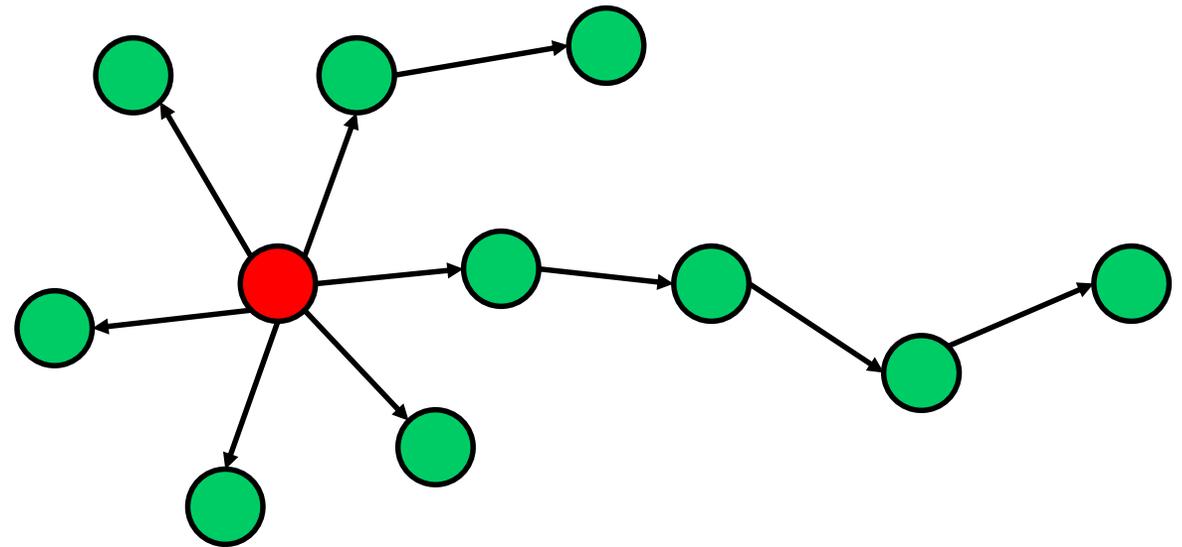


接近中心性(Closeness Centrality)

用距离来衡量一个节点的中心程度，与其他节点距离越近则中心性越高，距离越远者则中心性越低。

某节点到其他各节点距离之和的倒数。

$$C_C(n_i) = \left[\sum_{j=1}^g d(n_i, n_j) \right]^{-1}$$





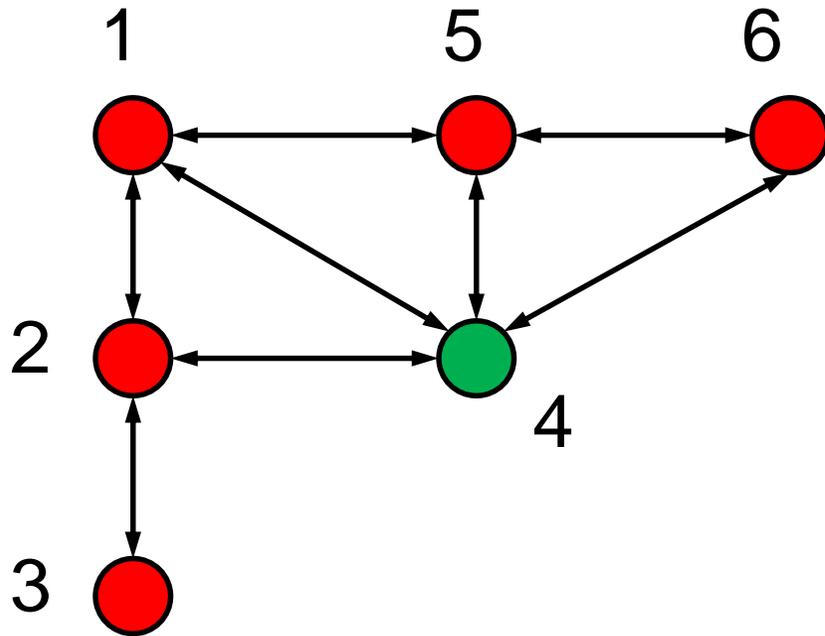
接近中心性(Closeness Centrality)

- 接近中心性值越小，就表示节点 i 与其他各点的距离越大。一个人越是在边缘，也就越不重要。
- 接近中心性指标的计算对图的连通性要求很高——完全连通图。否则，距离无法计算。对于有向图，要求整个图形内所有节点两两强相连才能计算。
- 接近中心性指标与度中心性高度相关，通常很少用。



中介中心性(Betweenness Centrality)

- 中介性指标衡量一个人作为其他人联系桥梁的中介能力。如果别人之间的联系都需要经过他才能进行，就表明他有很高的中介性。
- 中介性高的人容易得到信息和商业机会，从中搭桥以获得中介利益。



就点对 jk 而言 $b_{jk}(i) = g_{jk}(i) / g_{jk}$

就网络中所有点对而言

$$C_B(i) = \sum_j \sum_k b_{jk}(i)$$

$$(j \neq k \neq i, j < k)$$



中介中心性(Betweenness Centrality)

为消除网络规模的影响，进行标准化：

无向图

$$C'_B(i) = \frac{\sum_j \sum_k b_{jk}(i)}{\frac{1}{2}(g-1)(g-2)}$$

$(j \neq k \neq i, j < k)$

有向图

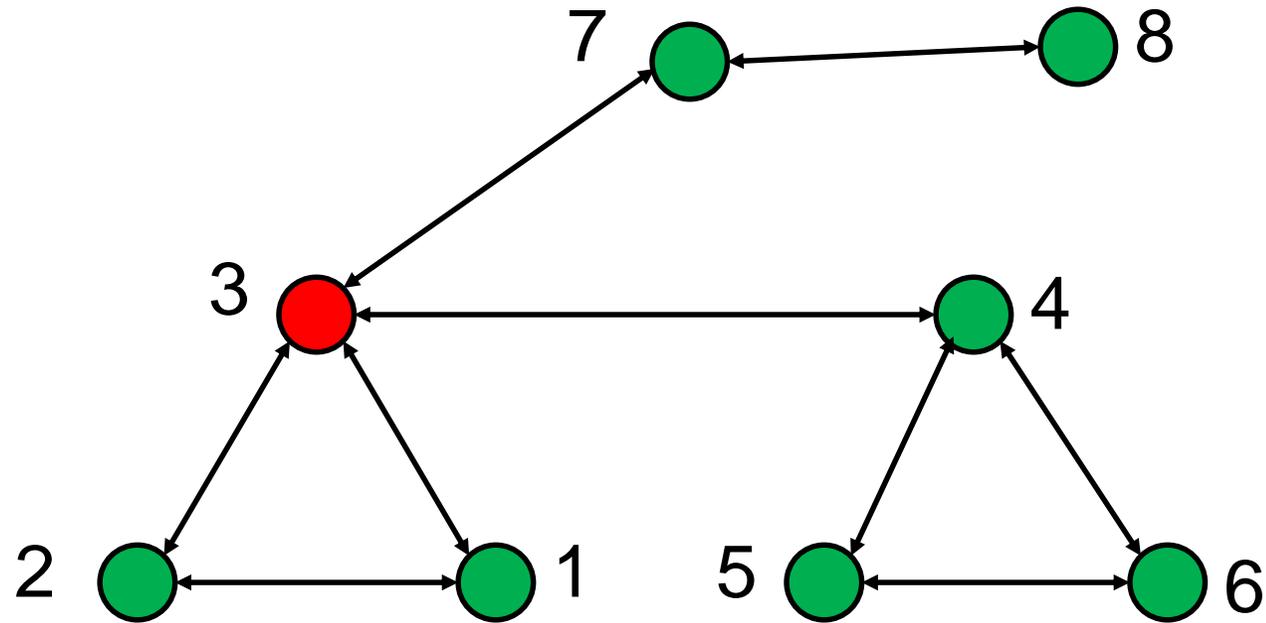
$$C'_B(i) = \frac{\sum_j \sum_k b_{jk}(i)}{(g-1)(g-2)}$$

$(j \neq k \neq i, j < k)$



中介中心性(Betweenness Centrality)

切开点(Cutpoint)：有最多捷径经过该点，占据“桥”的位置，中介性最高。一旦删除，网络就无法连通。





中介中心性(Betweenness Centrality)

群体中介性公式：

$$C_B = \frac{2 \sum_{i=1}^g [C_B(n^*) - C_B(n_i)]}{[(g-1)^2(g-2)]}$$

- 网络的整体结构指标，其含义是：一个图形中，中介性最高的人，其中介性与其他人中介性的差距。差距越大，则群体中介性的数值越高。表明该团体分成数个小团体而过分依靠某个人来中间传话，这个中间人特别重要。
- 该指标越高，表明组织中的信息被少数人垄断的可能性越高。
- Ucinet_Network_Centrality_Betweenness_Nodes

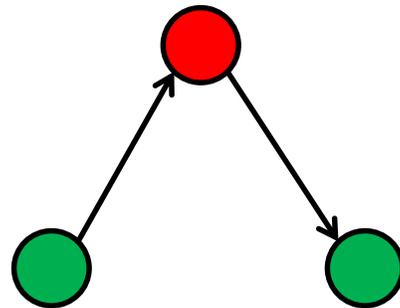


中介中心性(Betweenness Centrality)

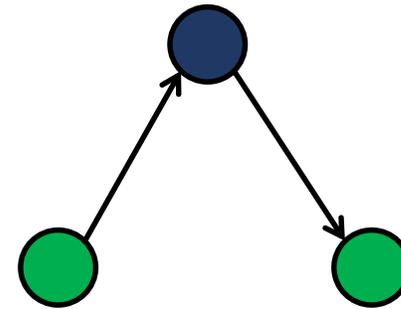
一些“桥”的位置

协调者(Coordinator)：在一个团体中，协调者中介性较高，可以获得信息流通和操控双方的利益，但协调者会受到该团体规范的约束。

协调者



中介者



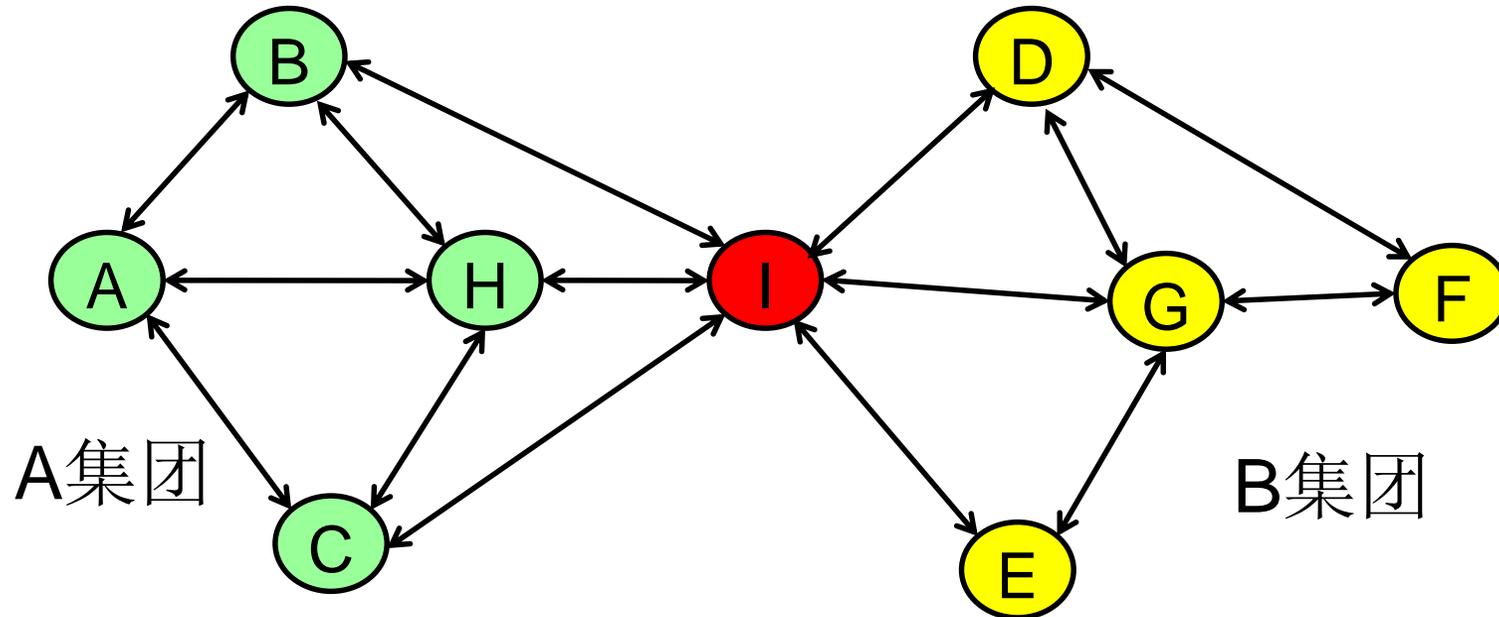
中介者(Broker)：团体外部的中介者，协调团体内部双方。比协调者有更大的自由度，不受团体规范约束。



中介中心性(Betweenness Centrality)

一些“桥”的位置

齐美尔连带：指被两个网络（或集团）都认作自己人，要求其代表团体的利益，遵守团体的规范。俗称“陷入两难境地的人”，两面讨好，没有任何自由度。



例：结构因素与社会资本的衡量

1 个体层次社会资本

- 个体社会资本有两个来源：关系以及因关系而可达的资源；个人的社会结构位置。

友谊网络（信任网络）+ 咨询网络 + 情报网络

- 友谊网络：中心位置可以产生社会资本。往往拥有非正式权力，有号召力，人缘好。
- 咨询网络：中心位置可以产生社会资本。一般情况下，会拥有正式权力，也可以拥有非正式权力。因为很多人都会向同一个人寻求咨询或者建议。

2 能创造个体社会资本的结构位置

- 个体占据两种位置比较有利：
- 中心位置：越是处于网络的中心位置，就越可能提供与群体中其他成员较好的联系。中心位置所传递的要么是正式权力，要么是非正式的社会影响。由中心位置带来的资源都会创造出更好地控制外部环境并降低不确定性的机会。
- 居间位置：如果在咨询网络中处于居间位置，就能及时获得重要的信息或知识——有价值的资源。在一个弱社会中，居间位置对于控制信息流动是至关重要的。

3 集体层次社会资本

- 关于集体层次社会资本的定義尚未达成共识。当前对集体社会资本的测量主要集中在：信任、公共参与、社会结构、社会网络、社会规范等方面。
- 一个组织或社会中的信任程度越高、社会成员参与公共活动的比率越高、社会网络联系越紧密，则该社会的社会资本积累越高。
- 组织社会资本有三个测量维度：信任+集体内的连接+集体网络结构形态。



3. 网络特征在研究中的运用



网络特征为关键词检索文献

输入检索条件:

(主题 词频 并含 词频 精确)

并且 (篇名 网络特征 词频 并含 词频 精确)

作者 中文名/英文名/拼音 精确 作者单位: 全称/简称/曾用名 模糊

从 不限 年到 不限 年 指定期: 更新时间: 不限

来源期刊: 期刊名称/ISSN/CN 模糊 ...

来源类别: 全部期刊 SCI来源期刊 EI来源期刊 核心期刊 CSSCI CSCD

支持基金: 模糊 ...

包含资讯 网络首发 增强出版 数据论文 中英文扩展 同义词扩展

分组浏览: **主题** 发表年度 研究层次 作者 机构 基金

网络特征 (94) [社会网络分析 \(22\)](#) [中心度 \(16\)](#) [社会网络 \(13\)](#) [企业管理 \(12\)](#) [特征分析 \(8\)](#) [城市网络 \(8\)](#) [实证研究 \(8\)](#) [创新绩效 \(6\)](#)
[网络结构 \(6\)](#) [合作网络 \(5\)](#) [中心性 \(5\)](#) [结构洞 \(5\)](#) [网络密度 \(5\)](#) [中华人民共和国 \(5\)](#) >>

[1]赵天骄,肖翔,张冰石.利益相关者网络特征与民营企业社会责任绩效[J].管理学报,2019,16(03):397-407.

- 使用**董事在上市公司间的兼任关系**作为利益相关者网络联结的基础数据。
- 如果同一年度**企业A与企业B有共同的董事任职**,则认为企业A与企业B具有信息与社会资本相互输送的可能性,在利益相关者网络中构成了联结关系。

- 构建的利益相关者网络为无向网络,但考虑联结的关系强度。**成对的企业之间同一年份共同董事数量越多,则关联强度越大。**

解释
变量 企业的网络中心度综合指标

C_E 同一年度民营企业的网络程度中心度、中介中心度、接近中心度、特征向量中心度4个指标的中位数、最大值、平均数和最小值,分别用 M_E 、 M_A 、 A_V 和 M_I 表示

其他企业平均网络中心度指标

A_C 分年度计算与民营企业相联结的所有其他企业的平均网络中心度,并取上述4个平均指标的中位数、最大值、平均数和最小值,分别用 A_E 、 A_A 、 A_R 和 A_I 表示①

[2]孙爱军.G20国家间贸易网络特征研究[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2019,21(01):42-50+106.

- 以国家作为研究节点, 作为一个区域性组织, 欧盟不纳入研究范围。各国进出口贸易总量来源于2000—2016年[国际贸易数据库](#), [世界银行官方网站](#)提供的年度商品贸易数据涵盖全球99%的国家之间的实际发生的贸易数额。
- 用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率对G20国家贸易整体网络特征来进行衡量。
- 用点度中心度、中介中心度和接近中心度等网络中心性指标对各国进出口贸易的网络结构特征进行衡量。

[21]朱孟珏,庄大昌.2001—2015年全球健康产业贸易网络特征研究[J].人文地理,2018,33(02):76-83.

- 以全球195个国家 (包括193个联合国成员国和2个观察员国) 为研究样本, 获取健康产业的进 (出) 口额及国家间贸易额。健康产业相关数据来源于 **International Trade Centre (ITC) statistics**。

网络密度	$D = \frac{m}{g(g-1)}$	m 为网络实际关系数, g 为网络节点个数, $g(g-1)$ 为最大理论关系数。	整体网络分析指标。衡量健康产业网络中国家间的紧密联系程度。
关联度	$C = 1 - \frac{v}{g(g-1)/2}$	v 为网络中不可达的点对数量, g 是网络节点个数。	整体网络分析指标。衡量健康产业网络节点的连通程度(可达性)。
中心势	$C_{AD} = \frac{\sum_{i=1}^g (C_{ADmax} - C_{ADi})}{\max[\sum_{i=1}^g (C_{ADmax} - C_{ADi})]}$	C_{ADmax} 表示网络中最大的程度中心度, 程度中心度计算见后面公式。	整体网络分析指标。衡量多大程度上表现出向核心节点集中的趋势。
程度中心性	$C_{in}(n_i) = \sum_{j=1}^g r_{j,n_i}, C_{out}(n_i) = \sum_{j=1}^g r_{i,j}$ $C(n_i) = C_{in}(n_i) + C_{out}(n_i)$	$C_{in}(n_i)$ 内向中心性; $C_{out}(n_i)$ 外向中心性; $C(n_i)$ 总中心性; g 是节点个数; r_{j,n_i} 表示从 j 出发到 i 的有向关系数; $r_{i,j}$ 表示从国家 i 出发到国家 j 存在的有向关系数。	节点分析指标。衡量节点在网络中的地位和作用, 中心性越高说明该国家相对居于“核心”地位, 具有控制和影响流向的作用。
接近中心性	$C_{AP}^{-1} = \sum_{j=1}^g D_{ij}$	D_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的路径距离(即捷径中包含的关系线数)。	节点分析指标。衡量某国与其他国家在贸易网络的通达性与便捷度。
中间中心性	$C_{ABi} = \sum_j \sum_k b_{jk}(i), b_{jk}(i) = \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$ $j \neq k \neq i, \text{且 } j < k$	g_{jk} 是节点 j 和 k 之间路径条数, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 和 k 之间的经过节点 i 的路径条数, $b_{jk}(i)$ 表示 i 控制 j 、 k 交往的能力。	节点分析指标。衡量在网络中, 某节点对网络贸易的控制程度。

[29]唐青青,谢恩,梁杰.知识深度、网络特征与知识创新:基于吸收能力的视角[J].科学学与科学技术管理,2018,39(01):55-64.

- 根据教育部2012年公布的国内115所高校工商管理学科评估结果筛选出排名前25%的28所高校,获得各高校工商管理学科学者名单。统计各位学者2007—2016年的SSCI论文发表信息。
- 统计了202位学者2007—2016年发表的SSCI期刊论文,共计1706条论文数据,形成202位学者中心网络的7年面板数据。
- 网络规模,以学者具有的直接合作者数量来度量其网络规模。
- 关系嵌入强度,使用学者与各合作者的联系频次之和除以合作者数量后的值表示关系嵌入强度。

$$\text{关系嵌入强度} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

[32]朱孟珏,李芳.1985-2015年中国省际人口迁移网络特征[J].地理科学进展,2017,36(11):1368-1379.

- 以全国31个省、自治区、直辖市为研究单元,并获取1985-1990、1990-1995、1995-2000、2000-2005、2005-2010、2010-2015年6个时间断面内的省际人口迁移数据。

(1) 整体网络分析。采用网络密度和外(内)向中心势指标进行分析。网络密度反映人口迁移网络中节点间的联系紧密状况,用于评估网络对节点区域活动的影响力;外(内)向中心势反映人口迁出(入)地的集中程度,用于衡量人口迁移网络整体向少数核心节点集中的趋势。网络密度、外(内)向中心势公式如下:

$$D = \frac{m}{k(k-1)} \quad (1)$$

式中:D为网络密度;m为人口迁移网络中实际联系数;k为网络节点数, $k(k-1)$ 为最大理论联系数。

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^k (C_{w_{max}} - C_{w_i})}{k-2} ; C_N = \frac{\sum_{i=1}^k (C_{N_{max}} - C_{N_i})}{k-2} \quad (2)$$

式中: C_{w_i} 、 C_{N_i} 分别为节点i的外向和内向中心性; $C_{w_{max}}$ 、 $C_{N_{max}}$ 分别为网络外向中心度和内向中心度的最大值;k是网络节点数。

[37]生帆,葛宝山.TMT网络特征、知识创造与双元创新关系研究[J].南方经济,2017(08):122-140.

采用Burt (1992) 与董保宝 (2010) 的量表测量TMT网络特征, 共8个测量题项, 包括中心性与稀疏性各4个题项。

	题项 (KMO =0.831)
中心性	NC1 团队成员在网络联系中较对手更易获取某些资源
	NC2 团队成员在网络中的地位促使其他企业加强与其合作
	NC3 团队成员在网络中的地位加强了其他企业对其的信任
	NC4 团队成员的网络中心地位为企业带来了正面效应
稀疏性	NS1 团队成员与企业建立了紧密联系
	NS2 团队成员与消费者建立了紧密联系
	NS3 团队成员与大学科研机构建立了紧密联系
	NS4 团队成员与政府机构建立了紧密联系

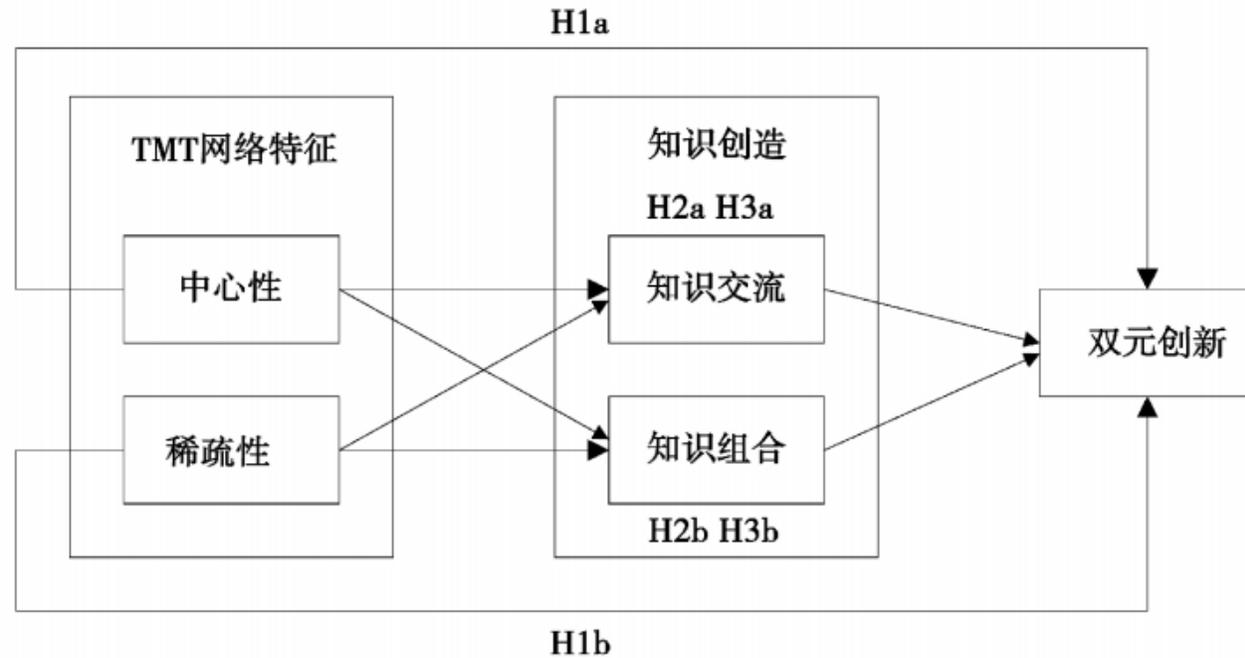


图1 概念模型

[60]张艺,陈凯华,朱桂龙.中国科学院产学研合作网络特征与影响[J].科学学研究,2016,34(03):404-417.

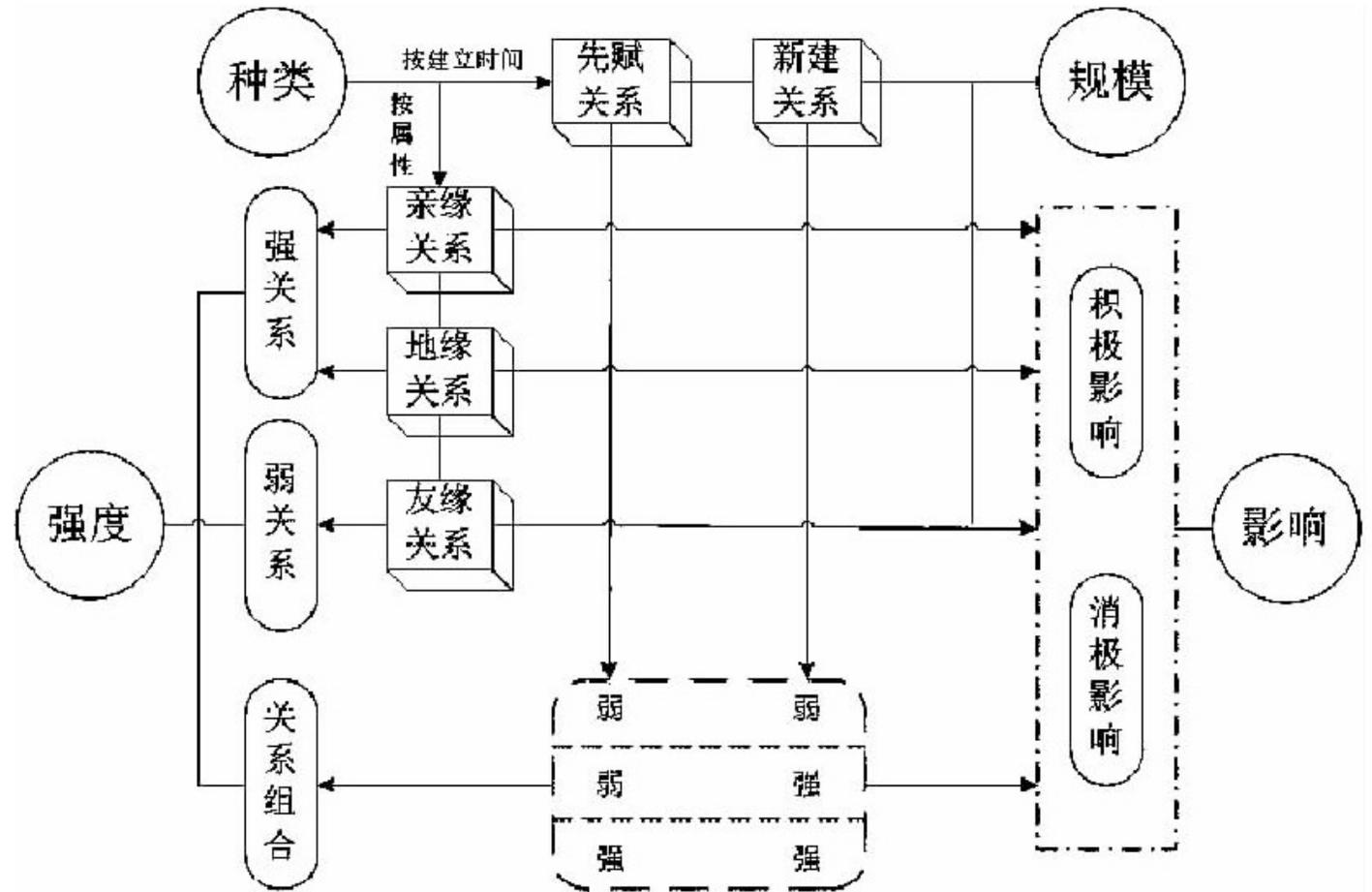
所需的数据来源于WOS核心合集数据库,检索中国科学院在2015年之前参与发表(含与企业、大学双方或三方参与发表)的全部SCI论文。



解释变量	含义	计算公式	说明
度数中心度	又称为“局部中心性”,用其他节点与该节点的直接连线数量来度量。	$D(i) = \sum_j X_{ij}$	X_{ij} 是布尔型量。
中间中心度	用于测量一个节点在多大程度上位于网络中其他节点间最短路径上 ^[11] 。其值大小反映该节点对其它节点间信息资源流动的控制能力强弱。	$B(i) = \frac{2 \sum_j \sum_k b_{jk}(i) \quad j \neq k \neq i \quad j < k}{n^2 - 3n + 2}$	$b_{jk}(i)$ 代表节点 <i>j</i> 和 <i>k</i> 经过节点 <i>i</i> 的捷径(最短路径)数量, <i>n</i> 是网络节点数量。
接近中心度	用某节点与网络中其它连通节点的距离之和来衡量,其值的大小反映该节点在网络中位置的“中心”程度。	$C(i) = \sum_{j=1}^n d_{ij}$	d_{ij} 是由节点 <i>i</i> 与节点 <i>j</i> 之间最短距离的线数, <i>n</i> 是网络节点数量。
结构洞	网络节点之间的非冗余关系,是节点之间的一种结构性间隔。	$S(i) = \frac{\sum_j (1 - \sum_q p_{iq} m_{jq})}{C_i}$	p_{iq} 是节点 <i>i</i> 在连接节点 <i>q</i> 的投入比重, m_{jq} 是节点 <i>j</i> 与 <i>q</i> 之间的边缘强度, C_i 是节点 <i>i</i> 与其它节点所有的连接数量。
控制变量	含义	计算公式	说明
平均路径长度	平均路径长度指网络中所有最短路径的算术平均值。(注:最短路径是指网络某一个节点至少要经过多少中间环节才能达到另一个节点)	$PL = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$	d_{ij} 是节点 <i>i</i> 到 <i>j</i> 之间的最短距离, <i>n</i> 是网络节点数量。
聚类系数	衡量连接在一起的网络组分各自的近邻之中有多少是共同近邻的程度 ^[24] 。	$CC = 3 \times \frac{\sum_{k>j} a_{ij} a_{jk} a_{ik}}{\sum_{k>j} a_{ij} a_{ik}}$	分子是网络中包含节点 <i>i</i> 的封闭三方组的数量,分母是包含节点 <i>i</i> 的三方组(缺少一边的三角形)数量。
网络密度	网络节点之间实际直接联系数量占所有节点间可能存在直接联系数量的比例。	$DE = \frac{2l}{n(n-1)}$	<i>l</i> 代表网络实际的直接联系数量, <i>n</i> 是网络节点的数量。
知识储备量	将考查期前5年所发表的文献的数量用于衡量一个组织过去知识储备量的多少 ^{[25][26]} 。	$PR_t = \sum_{i=1}^5 SCI_{t-i}$	SCI_{t-i} 表示 <i>t-i</i> 年发表的论文数。

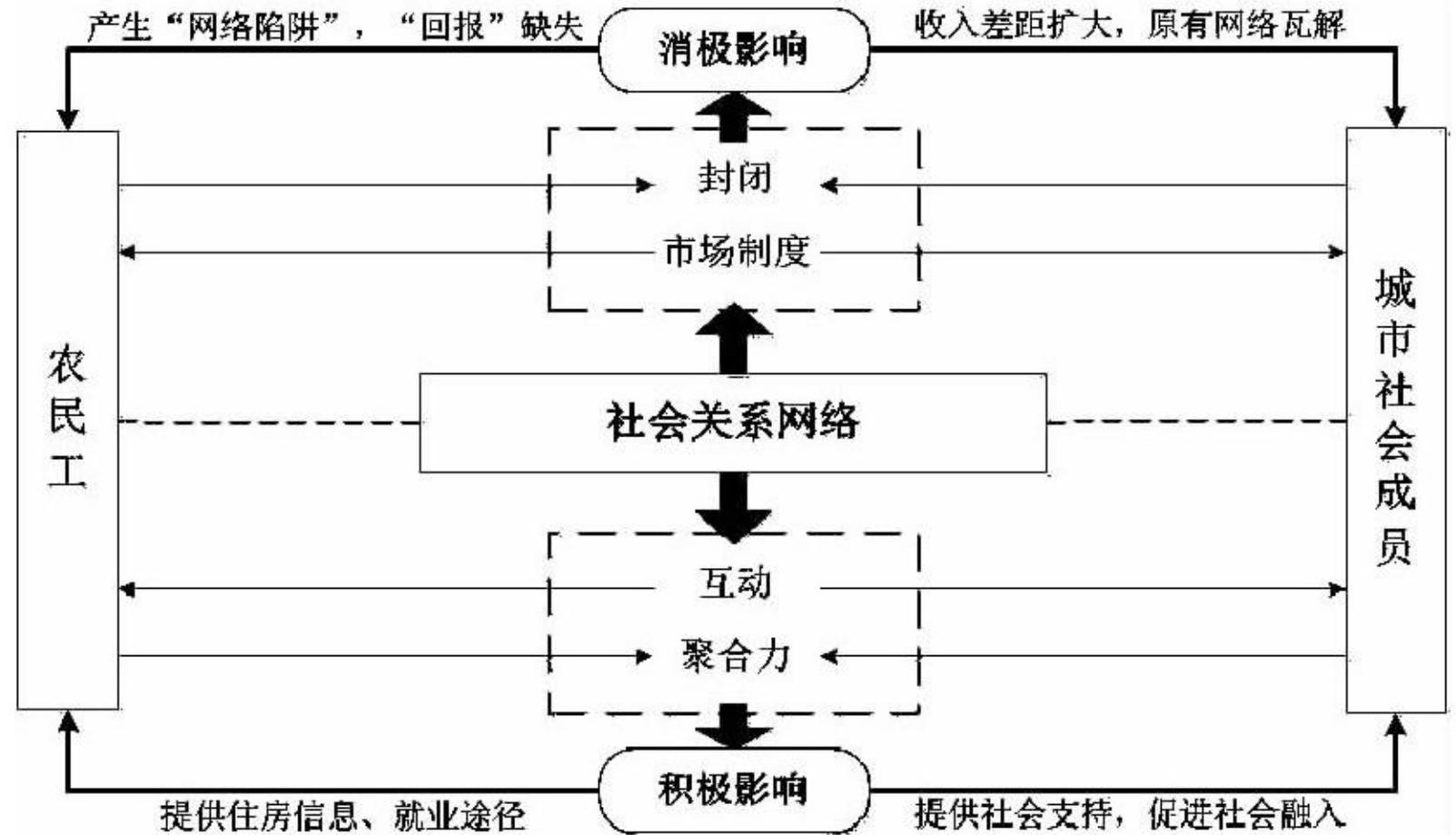
[65]张一凡,冯长春.进城农民工社会关系网络特征及其影响分析——以北京市海淀区建筑工人为例[J].城市发展研究,2015,22(12):111-120.

- 以北京市海淀区建筑工人为研究对象,研究了农民工的社会关系网络情况。
- 从网络规模、种类、强度影响等方面对500余位进城农民工发放问卷进行调查。
- 发现农民工来京后社会关系网络的规模均有扩大;不同种类的网络对农民工的帮助程度不同。



[65]张一凡,冯长春.进城农民工社会关系网络特征及其影响分析——以北京市海淀区建筑工人为例[J].城市发展研究,2015,22(12):111-120.

- 社会关系网络与农民工的居住、就业及在城市中的归属感有紧密联系;良好的城市社会互动是社会关系网络对农民工产生积极影响的前提。
- 社会关系网络对农民工也有负面、消极的影响。



[71]漆文璐,蒋军锋.企业位构与创新类型:网络特征调节下的分析[J].科学与科学技术管理,2015,36(05):115-125.

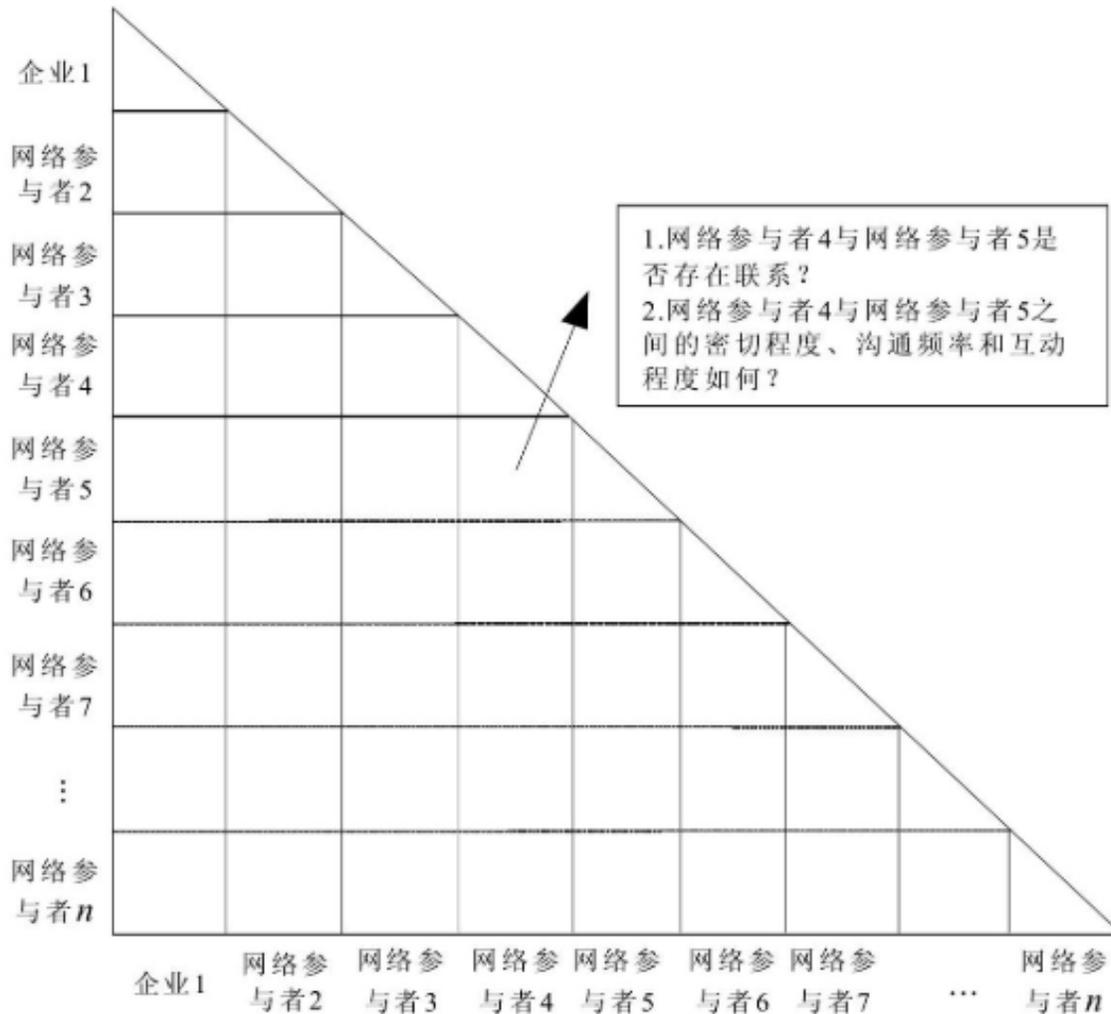
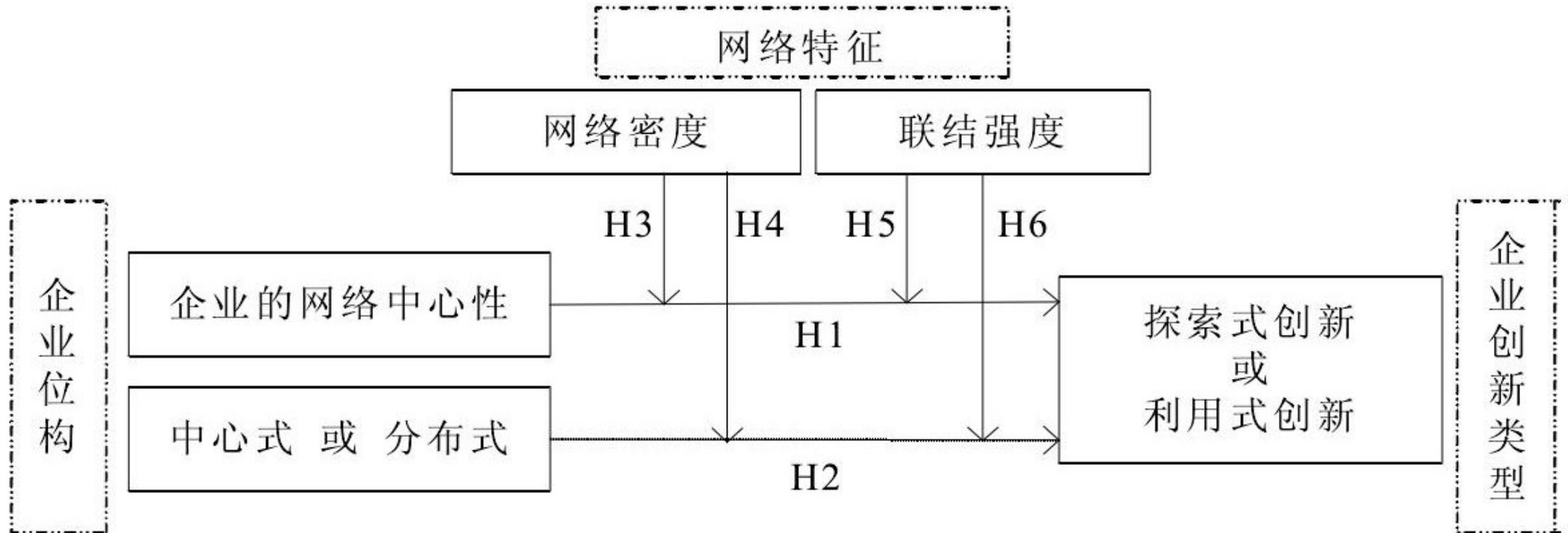


图2 同一产品网络内企业间联结情况图 [下载原图](#)

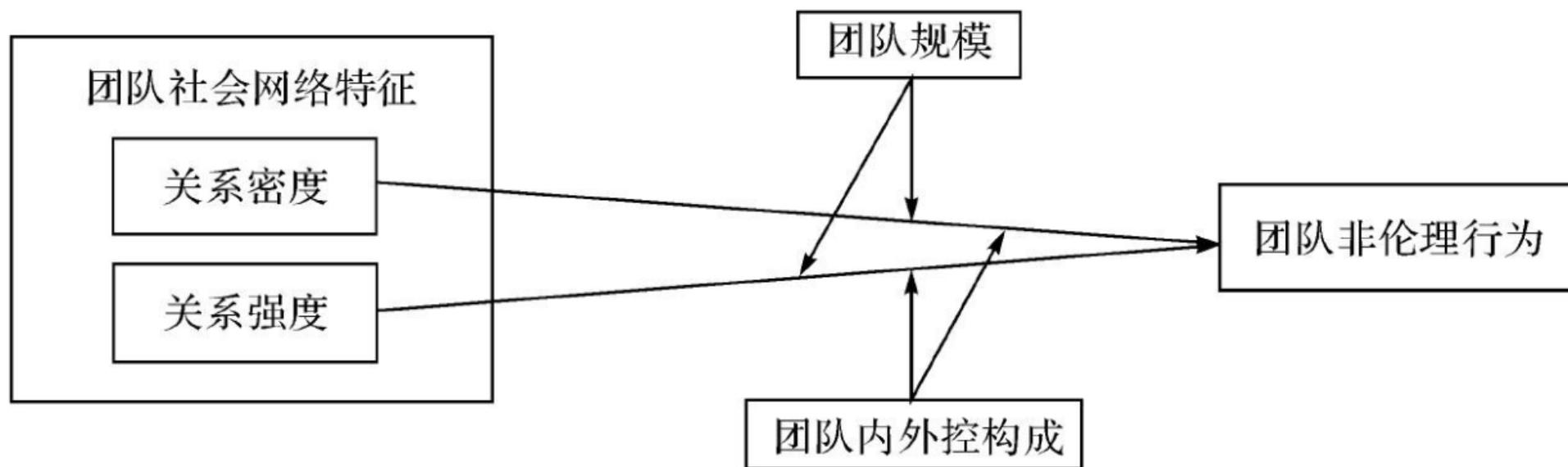
- 采用下三角阵形式来描绘某一产品网络内企业间的联结情况
- 填报企业作为该产品网络企业间联结情况的提供者,将其直接定义为企业1,网络中的其余企业为网络参与者2或参与者3,以此类推,直到网络参与者n,填报企业可根据自身实际合作企业数目进行填写。
- 通过实地访问、邮件及问卷等形式向不同类型企业发放调查问卷。

[71]漆文璐,蒋军锋.企业位构与创新类型:网络特征调节下的分析[J].科学学与科学技术管理,2015,36(05):115-125.



[73]王端旭,皮鑫,潘宇浩.团队网络特征对团队内非伦理行为扩散的影响: 社会网络视角研究[J].浙江大学学报(人文社会科学版),2015,45(01):70-80.

- 运用计算机仿真模拟现实中的社会网络结构及关系演变,并据此探究网络特征对非伦理行为扩散的影响机制。
- 采用初始化网络中网络密度的大小来反映关系密度的大小;采用网络中成员联结分布的均匀情况来反映关系强度。



[79]陈璠,谢义忠.就业能力感知、社会网络特征对大学毕业生就业质量的影响[J].高教探索,2014(04):140-149.

- 假设2: 社会网络规模对大学毕业生就业质量(起点薪酬、 工作满意度)存在显著正向影响。
- 假设3: 社会联系强度对大学毕业生就业质量存在显著正向影响。
- 假设4: 社会联系人地位对大学毕业生就业质量存在显著正向影响。
- 假设5: 社会网络规模显著调节大学毕业生就业能力和就业质量的关系。
- 假设6: 社会联系强度显著调节大学毕业生就业能力和就业质量的关系。
- 假设7: 社会联系人地位显著调节大学毕业生就业能力和就业质量的关系。

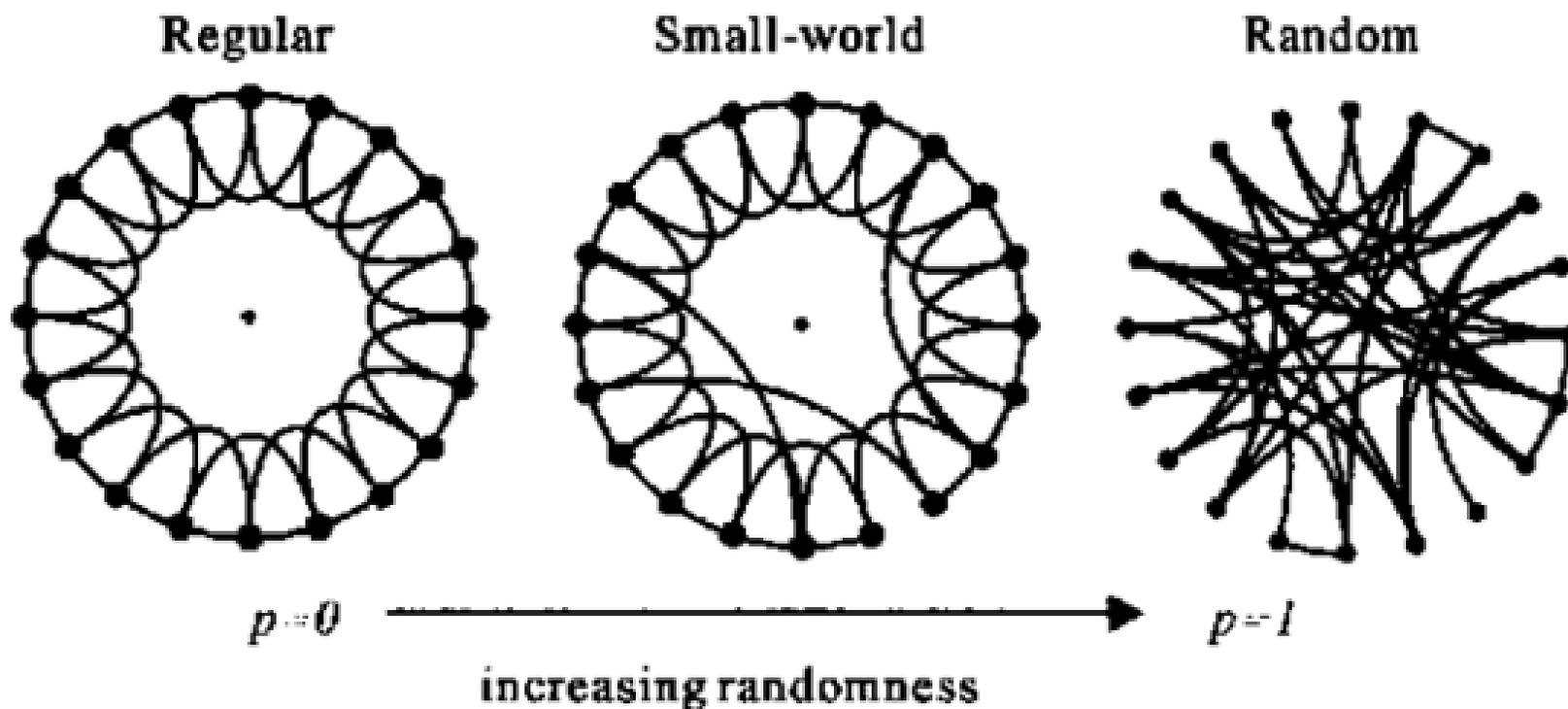


4. 经典网络结构



随机与规则网

- 在规则的网络结构中，节点与其他节点的连结数量是固定的。
- 在随机的网络结构中，节点与其他节点的连结的数量呈正态分布。
- 随机网与规则网络中节点与其他节点的连结的数量分布都有规则可循，因此是有尺度的网络。





小世界网络

- 小世界网络(Small World Network)以及无标度网络(Scale-free Network)是社会物理学中使用最为普遍的网络模型。
- 小世界WS网络模型算法：N个节点的网络中每个节点有k条边，随机破坏已有连接，并新建连接。
- 小世界NW网络模型算法：N个节点的网络中每个节点有k条边，随机选择一对不相连的节点建立连接。



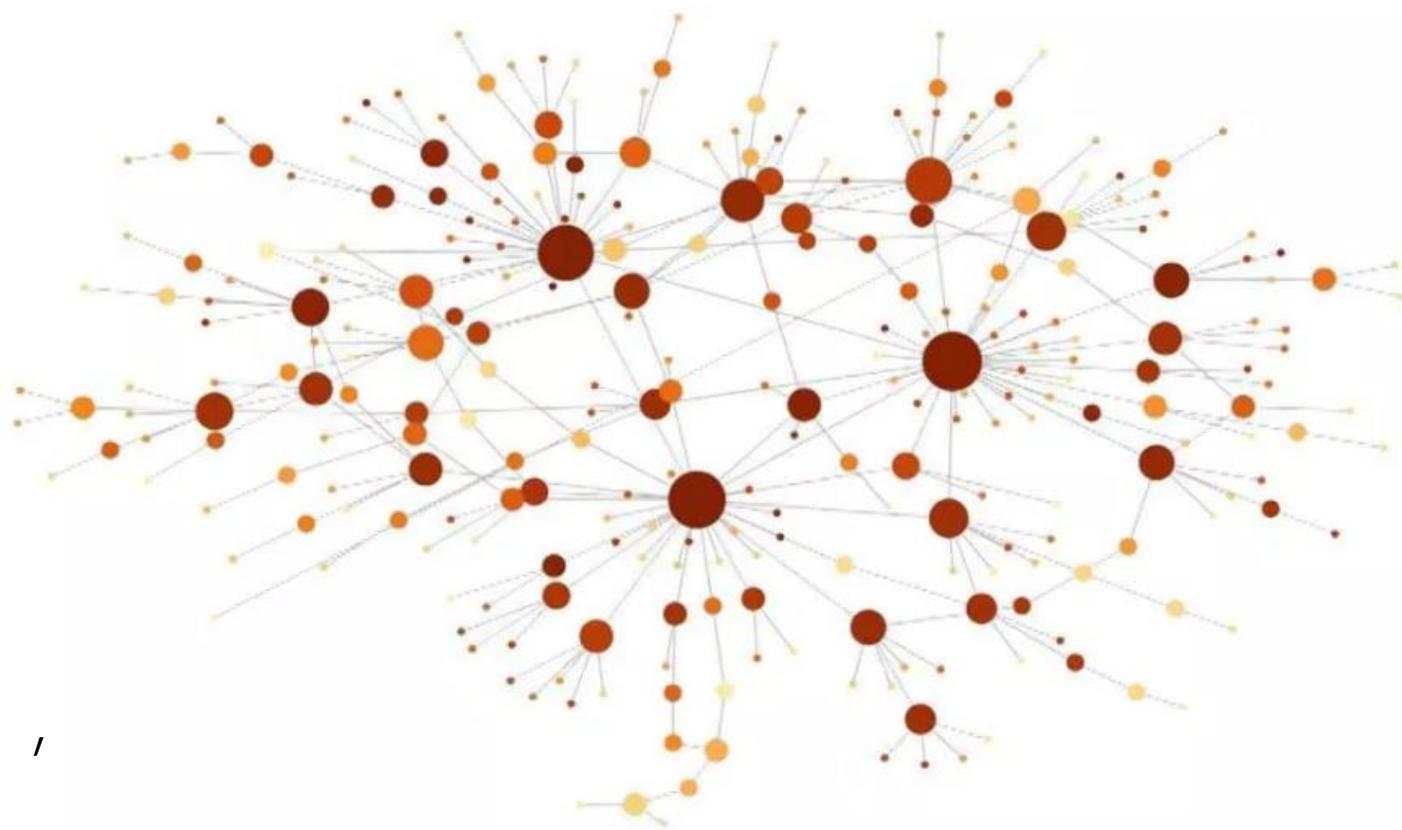
无标度网络

- 对于一些事物，个体与个体之间的差异不大。比如人的身高，中国成年男子的身高绝大多数在平均值1.70米左右。正态分布描述类似这样群体特性大致相同的情况。
- 对于另一些事物，**个体与个体之间的差异明显**。比如个人收入，大多数人月收入不到一万，而少数人月收入高达百万。幂律分布描述类似这样多数个体量级很小，少数个体量级很大的情况。



无标度网络

- 幂律分布广泛存在于物理学、生物学、社会学、经济学等众多领域中，也同样存在于复杂网络中。
- 大多数“普通”节点拥有很少的连接，而少数“热门”节点拥有极其多的连接。这样的网络称作无标度网络（Scale-free Network），网络中的“热门”节点称作枢纽节点（Hub）。





无标度网络

- 无标度网络的概念始于1999年Science杂志刊登的 Albert-László Barabási 和 Réka Albert 的文章。
- 通过研究万维网的拓扑结构发现其节点度分布服从幂律分布，随即提出了构造无标度网络的一种经典模型（B-A模型）。

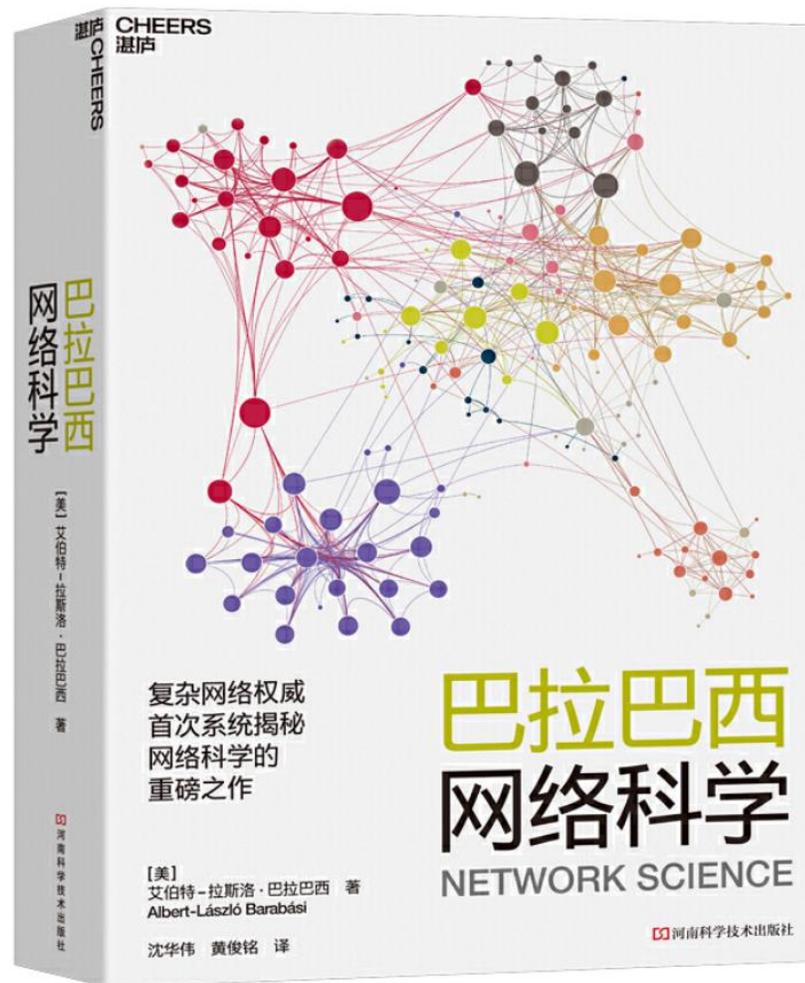
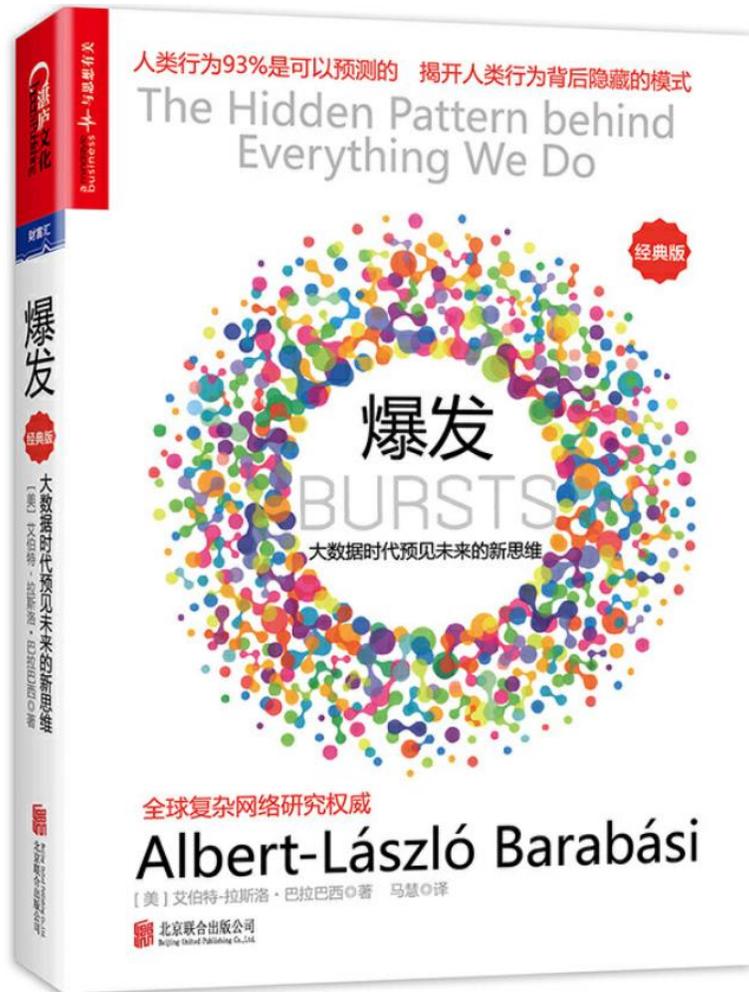
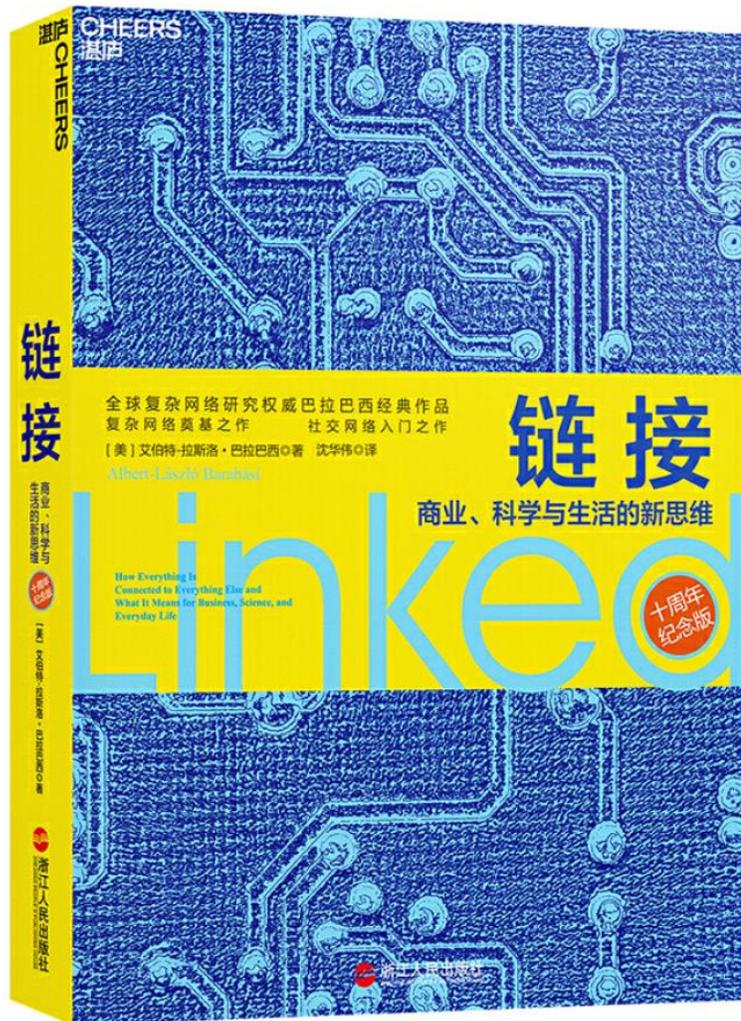


www.barabasilab.com



<http://www.ralbert.me/>

无标度网络





无标度网络

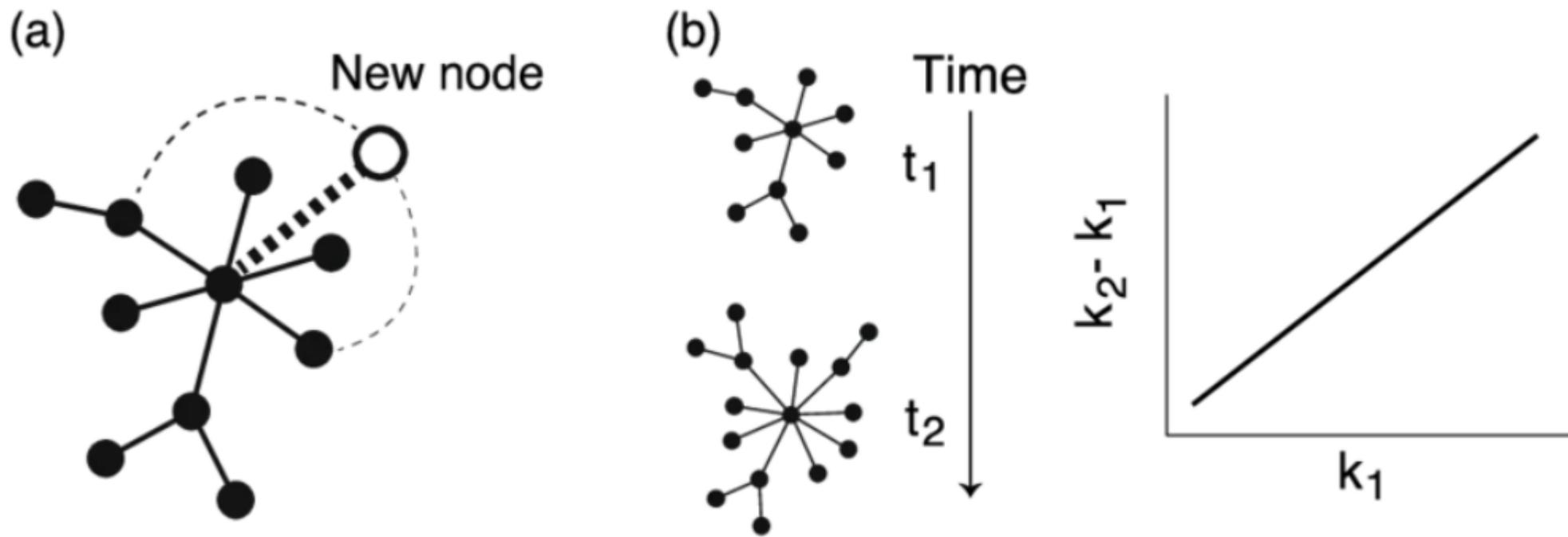
Albert-László Barabási 和 Réka Albert 提出了一种简洁的无标度网络构建模型，即B-A模型。具体来说，在构建B-A模型时，首先随机构造一个很小的网络。然后遵循以下两个机制：

- 1. 增长：每次加入一个新的节点。这模拟现实中的网络不断增长变大，例如互联网中新网页的创建，航空网络中新机场的建造等。
- 2. 优先连接：在新节点加入时，优先选择与高度数的节点连接。这模拟现实中新网页一般会连接到知名的网络站点，新机场会优先考虑建立与大机场之间的航线等。对于某个原有节点 i ，新节点与之连接的概率由下面公式给出。

重复1、2步骤，达到预先设定的节点数和边数后，网络构建完成。

无标度网络

- 无标度网络BA模型。BA模型提出了持续增长和择优连接两大机制，是经典无标度网络模型。算法如下：初始状态有 m 个孤立节点；每一时间步增加一个新节点，且该节点具有 n 条边（ $n < m$ ）；新节点在网络中基于择优连接算法选择节点建立连接关系。





无标度网络

无标度网络的生成模型

<https://blog.csdn.net/itnerd/article/details/82965555>

重访经典：无标度网络

<https://campus.swarma.org/course/1110>

从无标度网络研究历史看想法传播

<https://campus.swarma.org/course/661>

根据中国知网的数据库，列出了以“复杂网络”为关键词查询后的中文相关研究论文中引用最靠前的10篇论文。

周涛科学网博客

<http://blog.sciencenet.cn/blog-3075-256465.html>

	题名	作者	文献来源	发表时间	来源库	被引频次↓	下载次数
<input type="checkbox"/> 1	从统计物理学看复杂网络研究	吴金闪; 狄增如	物理学进展	2004-01-30	期刊	186	913
<input type="checkbox"/> 2	复杂网络研究概述	周涛; 柏文洁; 汪秉宏; 刘之景; 严钢	物理	2005-01-12	期刊	88	1452
<input type="checkbox"/> 3	复杂电网连锁故障模型评述	孙可; 韩祯祥; 曹一家	电网技术	2005-07-15	期刊	69	476
<input type="checkbox"/> 4	略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究	方锦清; 汪小帆; 刘曾荣	科技导报	2004-02-18	期刊	65	663
<input type="checkbox"/> 5	电网复杂性及大停电事故的可靠性研究	鲁宗相	电力系统自动化	2005-06-30	期刊	64	543
<input type="checkbox"/> 6	不确定性人工智能	李德毅; 刘常昱; 杜蕊; 韩旭	软件学报	2004-11-30	期刊	60	812
<input type="checkbox"/> 7	复杂网络理论及其应用研究概述	刘涛; 陈忠; 陈晓荣	系统工程	2005-06-30	期刊	56	1757
<input type="checkbox"/> 8	复杂网络研究及其意义	吴彤	哲学研究	2004-08-25	期刊	48	1142
<input type="checkbox"/> 9	复杂动力网络的数学模型与同步准则	吕金虎	系统工程理论与实践	2004-04-25	期刊	47	621
<input type="checkbox"/> 10	复杂网络上传播动力学研究综述	周涛; 傅忠谦; 牛永伟; 王达; 曾燕; 汪秉宏; 周佩玲	自然科学进展	2005-05-25	期刊	43	1020

吴金闪^{1,2},狄增如¹

(1. 北京师范大学管理学院系统科学系,北京 100875

2. 北京师范大学物理系,北京 100875)

摘要: 从统计物理学来看,网络是一个包含了大量个体及个体之间相互作用的系统。本文从统计物理学的角度整理与总结了复杂网络目前的主要研究结果,并对将来的研究工作做了一个展望。文章把网络分为三个层次——无向网络、有向网络与加权网络,对不同网络的静态几何量研究的现状分别做了综述,并结合网络机制模型设计与评价的需要,提出了新的有待研究的静态几何量;对网络机制模型做了总结与分析,提出了有待解决的关于双向幂律网络的机制模型的问题;部分地概括了网络演化性质,网络的结构稳定性以及网络上的动力学模型的研究。然后,以我们目前正在进行的两个方面的工作——科学家网络和产品生产关系网络——为例,粗略地介绍了网络研究在一些实际问题中的应用。最后,作为一个简单的补充和索引,我们整理了复杂网络研究中部分常用的解析与数值计算的方法。

关键词: 统计物理学; 复杂网络; 综述; 随机图; 幂律; 无标度网络

1.1 无向网络

目前已得到研究的典型无向网络包括:Internet网络, 电影演员合作网络, 科学家合作网络, 人类性关系网络, 蛋白质互作用网络, 语言学网络, 蛋白质折叠关系网络。

无向网络的基本几何量^[1,2]有:度及其分布特征, 度的相关性, 集聚程度及其分布特征, 最短距离及其分布特征, 介数 (Betweenness) 及其分布特征, 连通集团的规模分布。

1.2 有向网络

目前已得到研究的典型有向网络包括:WWW网络, 细胞内化学反应网络, 食物链网络, 引文网络, 电力网络, 神经网络。

当我们忽略边的方向的时候, 或者反过来看认为任何一条边都是双向的时候, 有向网络就成为无向网络。因此, 关于无向网络的所有几何量都可以在有向网络中研究。有向网络的特殊静态几何量包括:In度和Out度的分布特征, 基于顶点的In_Out度关联性, 基于边的 (In_Out, In_In, Out_In, Out_Out) 度关联性, 双向比, In集团和Out集团的集聚程度。

1.3 加权网络

目前, 关于加权网络的实证研究不多, 只有在Newman的工作^[66]中提到了一点关于科学家加权合作网络的研究。

2.1 规则网络与随机网络

网络
机制
模型

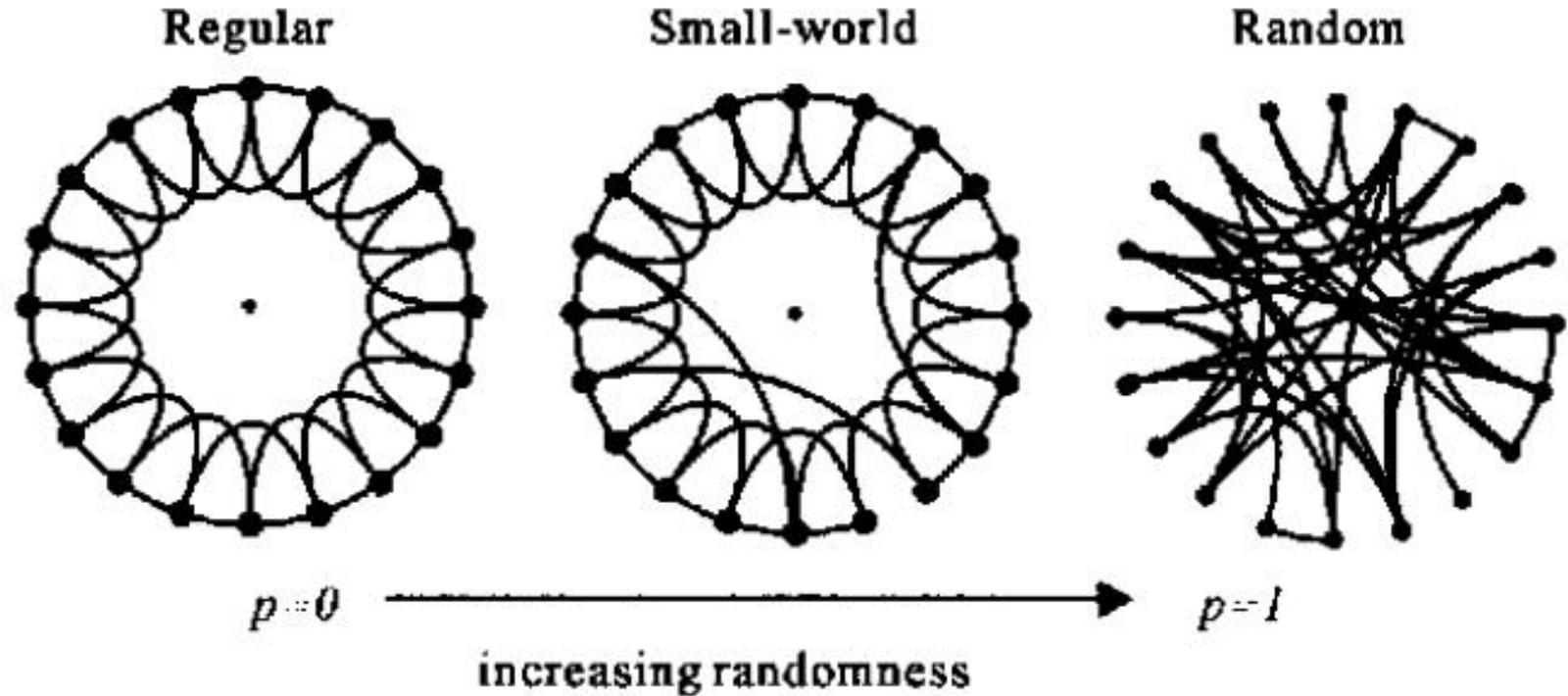


图 1 Small World 网络模型。图中所示的 Small World 网络是在左图的规则网络基础上通过边的重连得到的。当 $p = 0$ 时, 成为规则网络, $p = 1.0$ 时成为随机网络。本图取自文献[7]

2.2 Small World 网络

Watt 和 Strogatz 发现,只需要在规则网络上稍作随机改动就可以同时具备以上两个性质。改动的方法是,对于规则网络的每一个顶点的所有边,以概率 p 断开一个端点,并重新连接,连接的新的端点从网络中的其他顶点里随机选择,如果所选的顶点已经与此顶点相连,则再随机选择别的顶点来重连。当 $p=0$ 时就是规则网络, $p=1$ 则为随机网络,对于 $0 < p < 1$ 的情况,存在一个很大的 p 的区域,同时拥有较大的集聚程度和较小的最小距离。一个典型的 Small World 网络见图 1 中间的示意图,其几何性质如图 2 所示。

2.3 Scale Free 网络

在 Small World 网络的研究兴起之后,越来越多的科学家投入到复杂网络的研究中去。大家发现其实更多的其他几何量的特征也具有很大程度上的普适性和特定的结构功能关系。Scale Free 网络就是其中的一个重要方面。Scale Free 网络指的是网络的度分布符合幂律分布,由于其缺乏一个描述问题的特征尺度而被称为无标度网络。

现在我们来看看 Scale Free 网络的形成机制。目前对于无向 Scale Free 网络,普遍认为偏好依附 (Preferential Attachment)^[17] 是一个很好地形成 Scale Free 网络的机制。具体模型如下。取初始 m_0 个顶点任意连接或完全连接。每一步在原网络 $G(t-1)$ 的基础上加上一个新的顶点,同时加上从此顶点出发的 m 条边,形成新的网络 $G(t)$ 。其中新加边的另一个端点按照正比于顶点度数的分布

$$\pi_u = \frac{d_u}{\sum_{v \in V} d_v} \quad (13)$$

随机选取。重复以上新加点的过程足够多步所形成的网络的各顶点的度满足幂律分布 $p(k) \sim k^{-\gamma}$, 见图 3。而且,指数 $\gamma=3$ 与模型的参数 m_0, m 无关。进一步的数值模拟表明,当 m 取某一范围内的随机数时,指数也不变。



谢谢