

◎ CHANPIN SHUZHUA SHEJI LILUN YU FANGFA ◎

产品数字化设计 理论与方法

刘夫云 著



清华大学出版社



产品数字化设计理论与方法

刘夫云 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

满足客户个性化需求的定制生产方式已在制造业得到越来越广泛的应用。产品数字化设计是提高产品设计效率和设计质量的关键,是实现定制生产的前提。本书主要就基于复杂网络理论与算法的产品族零部件管理、零件变型设计、装配件变型设计以及产品配置设计中的一些关键技术问题进行探讨。

本书面向的读者为企业工程师、从事产品数字化设计工作的研究人员和研究生。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

产品数字化设计理论与方法/刘夫云著. —北京:清华大学出版社, 2016

ISBN 978-7-302-43299-9

I. ①产… II. ①刘… III. ①产品设计—数字化 IV. ①TB472-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 051650 号

责任编辑:桑任松 郑期彤

封面设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:15.5 字 数:373 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版

印 次:2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

产品编号:065967-01

前 言

随着人们生活水平的日益提高,人们对产品的个性化需求越来越强烈,制造业生产方式正逐步从传统的大批量生产向个性化定制生产转变。如何低成本且快速地响应市场需求,成为实现定制生产的关键。西方发达国家先后提出了精益生产和敏捷制造等,这些新的生产方式分别从不同角度、不同侧面剖析了传统批量生产方式所面临的困境,提出了各自的解决方法。祁国宁教授及其研究团队在其专著《大批量定制技术及其应用》中对大批量定制的基本原理、面向大批量定制的开发设计技术、管理技术以及制造技术进行了较系统的阐述。

面向定制生产的数字化快速设计技术是实现低成本快速响应市场个性化需求的关键,是实现个性化定制生产的前提条件。近年来,计算机技术、信息技术的快速发展使得实现产品数字化快速设计成为可能。本书主要对作者及其研究团队十余年来在数字化快速设计理论与方法研究中的一些研究工作进行总结和归纳。书中将讨论产品族零部件分析与管理、零件变型设计、装配件变型设计、产品配置设计中的一些关键技术,并通过一些实际案例对上述关键技术进行应用验证。

本书由桂林电子科技大学刘夫云著。在本书的统稿和出版过程中,杨运泽老师、李雪梅教授做了大量工作,在此表示由衷的感谢。

感谢研究团队黄美发教授、钟艳如教授、孙永厚教授、匡兵副教授以及邓小林、肖礼志、汪沙娜、杨孟杰等研究生对本书的出版所做出的贡献。

本书的研究得到国家 863 计划(课题编号:2006AA004Z116)、国家自然科学基金(课题编号:50865002、51265006)的资助,在此表示感谢。

感谢清华大学出版社在本书的出版过程中所付出的艰辛和努力。

因本书涉及的范围较宽,在一些新技术的研究和新问题的分析方面肯定还存在不足甚至谬误,恳请专家和同行批评指正。

作者于桂林电子科技大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大批量定制生产方式及其面临的挑战	1
1.1.1 技术革命与生产方式的变迁	1
1.1.2 大批量定制面临的挑战	2
1.2 面向大批量定制的开发设计技术	2
1.2.1 传统开发设计技术存在的不足	2
1.2.2 面向大批量定制的产品开发设计技术	3
1.3 本书探讨的几个问题及其意义	3
1.3.1 复杂网络理论与算法	3
1.3.2 产品族结构的管理与优化	5
1.3.3 产品变型设计关键技术	6
1.3.4 产品配置设计关键技术	6
1.3.5 产品模块化设计关键技术	7
1.3.6 产品数字化快速设计系统的开发与应用	7
第 2 章 基于复杂网络的产品族结构管理与优化技术	8
2.1 复杂网络理论与算法简介	8
2.1.1 复杂网络理论简介	8
2.1.2 机械产品网络理论与方法体系结构	16
2.1.3 简单路径搜索算法	19
2.2 产品族结构网络及其特性	24
2.2.1 产品族结构网络构建方法	24
2.2.2 产品族结构网络统计参数计算	29
2.3 产品族结构网络的应用	34

2.3.1 零部件通用性分析	34
2.3.2 零部件用量预测	38
第 3 章 零件变型设计技术	52
3.1 基于参数化技术的零件变型设计方法	52
3.1.1 引言	52
3.1.2 零件尺寸参数分析	53
3.1.3 基于参数化技术的零件变型设计方法和过程	55
3.1.4 应用举例	56
3.2 基于行为建模技术的零件变型设计方法	57
3.2.1 基于参数化技术的变型设计中存在的问题	57
3.2.2 基于行为建模技术的变型设计方法和过程	58
3.2.3 应用举例	60
3.3 零件精度变型设计技术	64
3.3.1 零件精度变型设计关键技术	64
3.3.2 零件尺寸与精度集成的变型设计系统开发	81
3.4 满足工程约束条件的零件变型设计技术	85
3.4.1 引言	85
3.4.2 基于参数化的 CAE 技术研究	85
3.4.3 参数化 CAD/CAE 集成技术	94
3.4.4 基于 CAD/CAE 集成的满足工程约束条件的变型设计方法	96
3.4.5 原型系统开发与实现	108
第 4 章 装配件变型设计技术	118
4.1 引言	118
4.2 基于参数化技术的装配件变型设计方法	118
4.2.1 基于参数化技术的装配件变型设计原理	118
4.2.2 产品零部件尺寸参数分析	120

4.2.3	装配件变型设计方法和过程	122
4.2.4	应用举例	123
4.3	基于装配语义的装配件变型设计方法	125
4.3.1	基于装配语义的变型设计原理	125
4.3.2	基于相似理论的语义映射过程	128
4.3.3	约束的规范处理和方程式的解算	143
4.3.4	装配件变型设计方法及系统的实现	157
4.4	基于复杂网络的装配件变型设计方法	165
4.4.1	尺寸参数传递结构	165
4.4.2	尺寸约束关系网络	166
4.4.3	网络统计参数的意义及尺寸参数传递计算方法	170
4.4.4	基于复杂网络的装配件变型设计方法与步骤	171
4.4.5	应用举例	172
第 5 章	产品配置设计关键技术	174
5.1	引言	174
5.2	配置模块选择辅助决策依据	174
5.2.1	扩展的产品主结构	175
5.2.2	关联系数计算	179
5.2.3	基于关联系数的配置模块选择方法	185
5.3	配置模块选择辅助决策系统	186
5.3.1	CMSAD 系统需求分析	187
5.3.2	系统的体系结构	187
5.3.3	系统开发与实现	188
第 6 章	产品模块化设计关键技术	192
6.1	引言	192
6.2	产品模块化程度比较方法	193

6.2.1	无标度模型及其限制条件.....	193
6.2.2	度分布规律与产品模块化程度之间的关系.....	197
6.2.3	应用举例.....	200
6.3	产品模块化程度定量评价方法.....	202
6.3.1	模块分解与尺寸编码方法.....	203
6.3.2	尺寸约束关系网络.....	208
6.3.3	模块化程度定量评价方法.....	208
6.3.4	应用举例.....	214
第 7 章	产品数字化快速设计系统开发.....	216
7.1	引言.....	216
7.2	产品数字化快速设计系统开发的基本方法.....	216
7.2.1	产品数字化快速设计相关技术简介.....	216
7.2.2	基于 SolidWorks 平台的数字化快速设计系统开发方法.....	219
7.3	产品数字化快速设计系统开发实例.....	223
7.3.1	龙门铣床快速设计系统开发.....	223
7.3.2	钢板弹簧快速设计系统开发.....	226
	参考文献.....	231

第 1 章 绪 论

1.1 大批量定制生产方式及其面临的挑战

1.1.1 技术革命与生产方式的变迁^[1,2]

第一次工业革命之前,制造业的主要形式是家庭作坊和手工工场,大多数属于手工无图生产方式,没有严格的产品设计^[3]。

18 世纪 60 年代起,以蒸汽机的发明为主要标志的第一次工业革命,使机械化生产方式成为可能,制造业的生产方式发生了根本的变化,手工工场开始向工厂转变,生产方式主要是以机器为主的小批量生产。与手工生产相比,工厂生产使劳动生产率得到大幅度提高,产品数量得到显著增加,产品质量也得到明显改善^[3]。

19 世纪 60 年代,以电力、电机和内燃机的发明为标志的第二次工业革命,为制造业提供了更加强大便利的动力来源,机械化生产逐步成熟和完善,生产效率进一步提高,生产规模进一步扩大,制造业对机器和技术的依赖程度进一步加强^[3]。

20 世纪初,福特和斯隆创立了大批量生产方式^[4],这是制造业的又一次根本变革。大批量生产是在市场环境相对稳定的情况下,企业根据对市场的预测所进行的、以批量产品生产为特征的生产活动^[3]。大批量生产的主要特点是采用标准的制造过程和通用的零部件,进行高效率的自动化作业,通过规模经济效应,降低生产成本,提高产品质量^[3-5]。

随着新技术特别是电子技术、自动化技术的飞速发展,制造业主动加强与新技术的融合,使得制造业的生产逐步向自动化的大批量生产方向发展。随着大批量生产的应用和普及,生产效率极大提高,生产数量急剧增长,在某些领域,产品开始出现供大于求的过剩现象,供过于求的买方市场逐渐形成,产品在市场中的竞争日益激烈^[3,4]。

随着技术的发展和人们生活水平的不断提升,客户对产品的个性化需求逐步增加,为客户定制生产已经成为厂家相互争夺市场份额的重要且有效的手段。随着先进制造技术、计算机技术以及网络技术的发展,按照客户的需求进行个性化定制生产从理想

逐步转变为现实。企业通过产品设计、制造和销售资源的共享和重用来降低产品成本,以尽可能接近大批量生产的价格和交货期为客户提供定制化的个性产品,这就是大批量定制生产方式^[3]。近年来,大批量定制生产方式得到迅速发展,正成为 21 世纪制造业的主流生产方式。

1.1.2 大批量定制面临的挑战

大批量定制需要以尽可能接近大批量生产的成本和交货期向客户提供个性化的定制产品,无论是采用传统的大批量生产方式还是传统的定制生产方式都无法满足低成本、短交货期、高质量地向客户提供个性化定制产品的需求^[3,5]。要实现大批量定制,企业需要全新的面向大批量定制的开发设计技术、制造技术和管理技术的支持^[3]。大批量定制生产企业在产品开发设计技术、制造技术、管理技术等方面面临一系列挑战。本书主要针对大批量定制生产方式在产品开发设计技术方面面临的挑战进行阐述。

1.2 面向大批量定制的开发设计技术^[1,2]

1.2.1 传统开发设计技术存在的不足

传统开发设计方法和技术存在以下不足。

1. 缺乏设计方法学的支持

目前,许多制造企业通常仅仅将 CAD(Computer Aided Design, 计算机辅助设计)系统作为替代图板的绘图工具,而不是设计工具,停留在低水平的应用阶段,没有将 CAD 系统与设计方法学有效地结合起来,因此,远远没有充分利用 CAD 系统所提供的各种功能^[6]。

从技术层面来看,目前利用 CAD 系统进行的主要是面向图纸的设计而不是面向模型的设计^[6]。所谓面向图纸的设计,是指当设计一个新的零部件时,设计人员主要参考已有的零部件图纸,通过对这些图纸进行修改,形成新的零部件图纸。

2. 没有充分利用已有的零部件资源

由于缺乏标准化、规范化、模块化等技术支持,企业不能充分利用已有的零部件资源,导致定制型生产企业的零部件数量无限增长,最终导致企业的设计成本、生产成本和管理成本过高,企业的市场竞争力下降,难以实现大批量定制生产。

3. 缺乏有效的数据管理和过程管理

由于 CAD、CAM(Computer Aided Manufacturing, 计算机辅助制造)等 CAx(Computer Aided x)工具的广泛使用,企业在产品设计、制造过程中会产生大量的电子信息数据,如材料数据、设备数据、工具数据、制造规范、产品结构、成本数据、CAD/CAM 文件、NC(Numerical Control, 数字控制)程序和检验计划等。目前,由于缺乏有效的数据管理和过程管理,企业员工和部门之间的信息交流存在诸多不便,从而导致工作效率降低、成本增加等一系列问题发生。

1.2.2 面向大批量定制的产品开发设计技术

由前可知,传统的产品开发设计方法和技术存在不足,设计速度、设计质量、设计成本都无法满足大批量定制生产方式对产品开发设计技术的需求。大批量定制生产方式需要全新的开发设计方法和技术的支持^[3]。本书后续章节主要针对面向大批量定制的开发设计技术进行阐述。

1.3 本书探讨的几个问题及其意义

1.3.1 复杂网络理论与算法

网络是节点与边的集合^[7]。网络的数学基础是图论。近年来,人们对复杂网络的研究表现出了极大的兴趣,并取得了一些重要的研究成果^[5]。在 R. Albert 和 A.-L. Barabási 等人于 1999 年发表了关于发现无标度网络(Scale-Free Network)研究成果之后的十几年时间中,无论在实证研究方面,还是在复杂网络建模与理论分析方面,无标度网络模型的研究都取得了令人瞩目的成果,相继在《科学》《自然》《物理评论快

讯》《欧洲物理》等权威期刊上发表了多篇有影响力的文章，引起了国际科学界的重视。无标度网络的发现，不但开创了复杂网络研究的新局面，对于系统科学、制造科学以及其他科学的研究也都有着非常重要的意义^[8]。

无标度模型(Scale-Free Model, 也称 BA 模型)是在研究大型复杂的网络结构时提出的一种新模型,其显著特征是度(节点的度是指与节点相连的边的条数)分布服从幂律分布。其表现出的特性是:大多数的节点只与少数节点相连接,但有少数节点却被大量地连接,即非同质性(inhomogenous)。无标度模型一般可以用来分析网络的动态特性,揭示大型复杂网络的拓扑结构。无标度模型目前的应用主要集中在万维网、基因网络和社会网络等方面。如通过研究万维网的无标度特性,可以揭示计算机病毒传播的规律;通过研究人类接触网络,可以揭示传染性疾病的传播规律,等等。

目前,从事复杂网络研究的学者主要来自数学、物理学、计算机科学、生物学、社会学以及经济学等领域。有关复杂网络的研究主要集中在以下几个方面:①复杂网络拓扑结构的静态统计分析,主要包括给定度分布基础之上的匹配模式、各种相关关系、加权网络的统计性质和描述方式、网络的聚类等。②复杂网络的演化和机制模型,实证上,主要研究实际网络演化的统计规律,检验无标度模型的偏好连接假设;理论上,主要发展完善的具有形成特定几何性质的网络机制模型。③复杂网络上的动力学研究,主要研究网络的容错性和网络攻击鲁棒性,以及网络上的传播、同步与共振等各种动力学过程^[9]。

任何理论研究的终极目标都是要为实际应用服务,复杂网络理论也不例外。目前,复杂网络理论特别是无标度模型迫切需要寻求新的应用领域,以推动复杂网络研究进一步向前发展。因此,进行复杂网络的应用研究就显得十分重要和迫切^[2]。

无论在大批量定制领域还是机械制造业领域,许多问题都可以采用网络形式来描述,如产品族零部件关系网络、供应链网络、生产计划网络等。这些网络形式中的许多网络在定性分析上具有无标度特性。制造领域特别是大批量定制领域的零部件分析、产品变型设计和配置设计中的一些关键技术问题,采用传统的方法难以取得令人满意的结果,需要寻求新的理论和解决方法。无标度模型的提出为研究制造领域特别是大批量定制领域的某些技术问题提供了新方法和新工具,有望取得重要的理论成果并解决实际工作中的一些技术难题。上述这些为复杂网络在大批量定制领域的应用提供了

理论上的可能性^[2]。

算法研究是复杂网络应用研究的基础与前提,没有相应的算法,复杂网络的许多应用研究将无法进行。在复杂网络特别是制造领域的复杂网络形式中,简单路径搜索算法是进行许多统计参数计算的前提,因此,对复杂网络简单路径搜索算法进行研究就具有十分重要的意义^[2]。我们(笔者及其研究团队)近年来对复杂网络在制造领域的应用研究进行了探索,在复杂网络简单路径搜索算法及基于复杂网络的产品族结构管理与优化、产品尺寸参数传递与修改以及变型设计方面取得了积极的进展。

1.3.2 产品族结构的管理与优化

1. 产品族零部件通用性分析方法

在大批量定制生产中,要从总体上提高定制生产效率和降低成本,就需要对产品族中的零部件进行通用性分析,挑选出常用的零部件,并有针对性地对这些通用零部件加以改进,这样在进行定制产品设计时就可以优先选择这些通用零部件。对于定制产品而言,专用零部件对其成本和生产周期都有比较重要的影响,是制订粗生产计划和定制产品快捷报价的重要依据,因此,也需要将这些专用零部件挑选出来^[5]。此外,零部件通用程度的高低对定制企业合理安排零部件库存也具有重要的指导意义。因此,迫切需要科学合理地对产品族中的零部件进行通用性分析。以往主要通过经验来确定零部件的通用程度,最多也只是做一下数量上的统计和分布计算。我们将复杂网络理论和算法应用于大批量定制的零部件通用性分析领域,提出了一种更加科学合理的基于复杂网络理论与算法的零部件通用性分析方法以及零部件通用程度计算方法,可以为定制企业进行零部件分析和分类提供理论依据与计算方法^[2]。

2. 零部件用量预测方法

在大批量定制生产中,准确预测各个零部件的用量,既是合理安排零部件库存和生产计划的重要依据,同时也是有效缩短定制产品交货期的重要途径。因此,对零部件用量预测方法进行研究就具有十分重要的意义。目前,企业通常采用零部件ABC分析等方法来进行零部件分析以及零部件库存管理,有关零部件用量预测方法研究的文献则非常少见。我们将复杂网络理论和算法应用于大批量定制领域,提出了一种基于

复杂网络理论与算法的零部件用量预测方法，可以为定制产品生产企业比较准确地预测零部件用量提供理论依据与计算方法^[2]。

1.3.3 产品变型设计关键技术

产品变型设计是实现产品数字化快速设计的有效途径，目前，产品变型设计中的一些关键技术问题还没有得到有效解决。我们近年来对零件变型设计技术、装配件变型设计技术中的一些关键技术问题进行了深入研究，在基于参数化技术的零件变型设计、基于行为建模技术的零件变型设计、零件精度变型设计、满足工程约束条件的零件变型设计、装配约束识别与提取、装配件尺寸参数传递与修改、装配语义推理等关键技术上取得了突破和积极进展，为实现产品数字化快速设计提供了关键技术支撑^[2]。

1.3.4 产品配置设计关键技术

1. 配置模块关联系数计算方法

产品配置设计是定制产品的一种重要的设计方法，在产品配置设计中，如何选择配置模块一直是困扰产品配置设计效率和准确性的难题。目前，业界主要采用基于规则、基于约束满足等办法来进行配置模块的选择。至于产品族的各个模块之间是否存在内在的联系，即选择了某一模块之后，哪些模块将被同时选择、优先选择或肯定不被选择，相关的文献比较少见。如果可以得到产品族中各个模块之间的关联程度，即选择了某个模块之后，可以得到其他模块被同时选中的概率，将有助于选择配置产品的配置模块，从而大大提高产品配置设计的准确性与效率。因此，进行配置模块关联程度的研究就具有十分重要的意义。我们将复杂网络理论和算法应用于配置模块选择领域，提出了一种基于复杂网络的配置模块关联系数计算方法，为配置模块的选择提供了定量的辅助决策依据^[2]。

2. 配置产品尺寸参数传递方法

在产品配置设计中，除了配置模块选择外，配置模块修改也是一个非常重要的问题。在产品配置设计中，有时会遇到现有的配置模块无法配置出满足客户个性化需求

的新产品的情况；另外，随着技术的更新，有时需要进行产品的再配置。在上述情况下，经常需要对配置产品的部分模块进行变型设计或修改。当配置产品中某个模块的某些尺寸改变以后，其他模块如何做出相应的改变是配置设计中一个非常重要而一直没有得到有效解决的问题。因此，进行配置模块尺寸参数修改方法的研究就具有十分重要的意义。目前，单个零件的变型设计主要采用关联图法等方法，而有关配置产品的尺寸参数修改方面的研究则比较少见。我们将复杂网络理论和算法应用于配置产品尺寸参数修改领域，提出了一种基于复杂网络理论和算法的配置产品尺寸参数传递方法，为产品变型设计和配置产品尺寸参数修改提供了理论依据与方法^[2]。

1.3.5 产品模块化设计关键技术

对大批量定制而言，产品的模块化具有特别重要的意义，产品模块化是实现产品零部件重用的基础，也是实现产品配置设计和变型设计的关键^[6]。目前，有关产品模块化技术的研究主要集中在模块化原理、模块化设计以及应用等方面，而有关模块划分、模块化程度的评价方法等方面的研究则比较少见。我们将复杂网络理论和算法应用于大批量定制的产品模块化设计领域，提出了基于复杂网络理论与算法的产品模块划分和模块化程度评价与比较方法，为实现产品模块化设计提供了关键的技术支撑^[2]。

1.3.6 产品数字化快速设计系统的开发与应用

产品数字化快速设计是实现产品定制生产的关键支撑技术，其应用对于企业缩短产品开发周期、缩短交货期、降低产品成本、增强产品的市场竞争力起着至关重要的作用。本书对我们为企业开发的数字化快速设计系统实例进行了简要介绍，展示了产品数字化快速设计方法与快速设计系统在实际生产中的应用价值，为产品数字化快速设计在相关领域的推广应用提供了样例。

第2章 基于复杂网络的产品族结构管理与优化技术

2.1 复杂网络理论与算法简介

2.1.1 复杂网络理论简介

网络是节点与边的集合。复杂网络是指具有复杂拓扑结构和动力行为的大规模网络，它是由大量节点通过边的相互连接而构成的网络。现实生活中，网络形式的系统随处可见，如因特网、万维网、引文网、航空网、电力网、企业合作网、供应链网、产品结构网等。各种各样的网络与人们的生产和生活密切相关，因此，需要深入研究和理解这些网络的拓扑结构、运行机制、动力行为、抗干扰能力等。另外，还需要深入研究有关网络的各种算法，如复杂网络简单路径搜索算法等。近年来，复杂网络研究引起了许多相关领域研究人员的兴趣与关注，取得了一些研究成果，发表了一系列研究论文^[7,10-27]。但由于大规模复杂网络的复杂性，目前有关复杂网络的研究还只是涉及其皮毛，许多深层次的问题还有待广大学者进行进一步的深入研究。根据网络的拓扑结构，可以将复杂网络分为规则网络^[7]、随机网络^[28]、小世界网络^[15]、无标度网络^[12]、演化网络等^[7]。根据网络的边的方向属性，可以将复杂网络分为有向网络和无向网络。根据网络的边是否有权重，可以将复杂网络分为加权网络与无权网络^[2]。

1. 复杂网络统计参数

1) 平均路径长度

在网络中，最短路径定义为两指定节点间所有路径中路径长度最短的那条路径。如果是无权网络，最短路径是指两指定节点间经过的节点和边最少的那条路径；如果是加权网络，最短路径是指经过的边的权重之和最少的那条路径。在复杂网络应用研究中，特别是在网络寻优中，经常需要计算两节点间的最短路径。在网络中，最短距离是指两节点间的最短路径的距离值。在无权网络中，最短距离就等于最短路径所经

过的边的条数之和；在加权网络中，最短距离是指最短路径所经历的边的权重之和。网络直径是指网络中所有节点两两之间的最短路径中路径长度的最大值。平均最短距离是指网络中所有节点两两之间的最短路径的平均值^[2]。在网络中，通常也可以将平均最短距离称为平均路径长度。

2) 集聚系数

在复杂网络中，节点的集聚系数(clustering coefficient)是指邻居的邻居仍然是邻居的概率，或朋友的朋友仍然是朋友的概率。其具体的计算表达式为

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2-1)$$

式中： C_i ——节点 i 的集聚系数；

E_i ——节点 i 的 k_i 个邻居节点中彼此直接相连的边的条数；

k_i ——与节点 i 有边直接相连的邻近节点数，也称为节点 i 的度。

3) 节点的度

在复杂网络中，节点的度定义为与该节点直接相连的边的条数。在有向网络中，节点的度又可进一步分为节点的入度和节点的出度。节点的入度定义为指向该节点的边的条数，节点的出度定义为从该节点出发的边的条数^[2]。

4) 介数

在复杂网络中，介数(betweenness)定义为经过指定节点或指定边的最短路径的条数，可以进一步分为点介数和边介数。点介数是指经过某指定节点的最短路径的条数，边介数是指经过某指定边的最短路径的条数^[2]。

2. 网络演化模型

1) 规则网络

规则网络定义为具有规则拓扑结构的网络，如完全连接图、星形网络、邻近节点连接图等。规则网络是最简单的一种网络，关于规则网络的研究，已经建立了比较完善的理论体系^[18]。规则网络的集聚系数与网络大小无关；规则网络的平均路径长度也与网络大小无关，其值是一个常数；在规则网络中，所有节点的度相等。

2) 小世界网络

1998年，Watts 和 Strogatz 提出了一种单参数的小世界网络。这种单参数的小世界