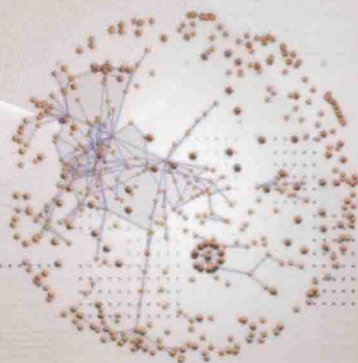
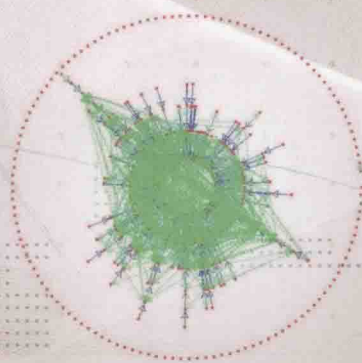
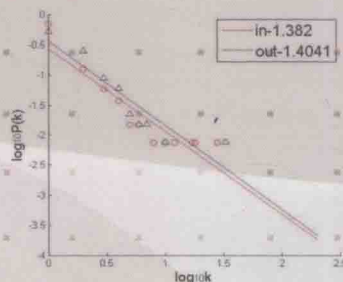
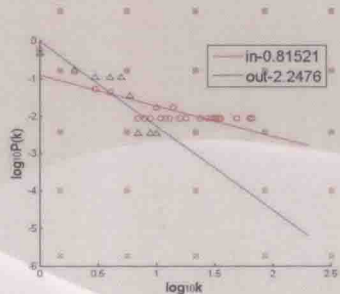


软件网络宏观拓扑特征研究 及大型软件中的检验

*Research on Macroscopic Topological Characteristics
of Software Networks and Verification in Large-scale Software*

李博
赵海
李辉
冯烟利
著

<http://www.phei.com.cn>



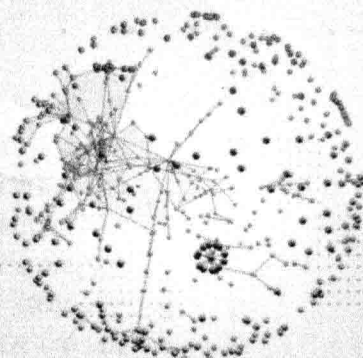
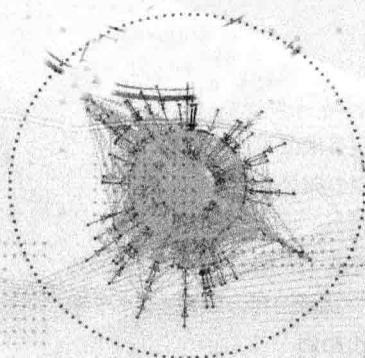
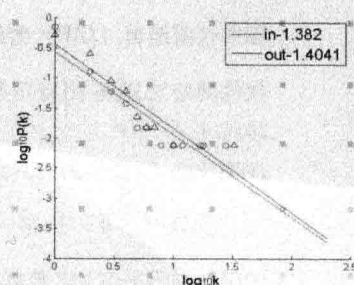
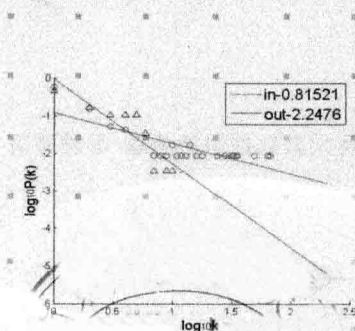
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

软件网络宏观拓扑特征研究 及大型软件中的检验

*Research on Macroscopic Topological Characteristics
of Software Networks and Verification in Large-scale Software*

李 博
赵 海
李 辉
冯烟利

著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

随着软件网络理论研究的深入进展,科学家们开始运用网络来研究自然界中的复杂系统,即复杂网络。本书系统介绍了软件网络宏观拓扑特征的研究,内容包括复杂网络 and 大型水电仿真软件,网络的多粒度度量和分析,协作性的度量和分析,缺陷和错误的度量和分析,局部发现的社团分析方法,网络度量分析平台的设计与实现。

本书可作为从事软件网络研究与学习、应用的科技人员的参考用书,也可作为高等学校研究生学习模式识别的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

软件网络宏观拓扑特征研究及大型软件中的检验/李博等著. —北京:电子工业出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-121-22153-8

I. ① 软… II. ① 李… III. ① 网络拓扑结构—研究 IV. ① TP393.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 301662 号

责任编辑:张 剑 (zhang@phei.com.cn)

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

装 订:北京京华虎彩印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:720×1000 1/16 印张:10 字数:154 千字

印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价:58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言



软件系统在我们的生活中发挥着越来越大的作用，软件的规模和复杂程度随着其功能的日益强大而剧增。随着软件规模的增大，软件复杂性的不断提高，软件各组成部分之间的相互作用使得软件系统产生了作为整体而具备的新特点，这些特点就蕴藏在软件的结构之中。在软件体系结构方面，软件的结构已经出现了多种层次、不同粒度、多种集成方式的组织方法。在各种各样的系统之中，度量活动始终处于一个核心的地位。度量有助于了解系统的面貌，以便做出有助于提高系统性能的分析和改进。随着软件开发技术的发展和实际需求的变化，对于度量和分析方法也提出了新的要求，传统的度量方法已无法更有效地对大规模软件结构进行度量。如何从多角度更好地理解 and 量化软件日益增长的复杂性，保证软件正确可靠地运行，不仅是软件工程领域的热点问题之一，也是它面临的一个严峻挑战。

随着网络理论研究的深入进展，科学家们开始运用网络来研究自然界中的复杂系统，即复杂网络。复杂网络是指由大量具有紧密联系和彼此间相互作用的单元所组成的网络。由于软件拥有不同的粒度（如函数、类、源代码文件、程序库、组件等），这些部分的关联和交互可以被用于定义一种网络拓扑，进而作为一种软件结构特性的模型来进行研究。近年来，有人提出将研究复杂网络拓扑结构的思想应用到软件度量中，并进行了一些相关的研究，因此产生了软件网络的概念。这有助于从全局的角度了解软件结构的基本性质和规律，进而反映出结构特征对系统质量的影响。关于宏观拓扑特征方面的研究正在

不断完善该理论。

本书共分8章。第1章为绪论；第2章介绍复杂网络和大型水电仿真软件；第3章提出了软件网络的多粒度度量和分析；第4章介绍版本演化及协作性结构度量与分析；第5章提出了基于波浪效应的错误倾向和缺陷分析；第6章提出了局部社团发现算法；第7章阐述了软件网络宏观拓扑特征度量和分析平台；第8章进行了总结与展望。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目（61070175 和 60973022）、山东省自然科学基金（ZR2013FL017 和 ZR2013FL018）、烟台市科技发展计划项目（2013ZH347 和 2013ZH091）、山东省高校科技计划项目（J12LJ03）和高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目（708026）等的资助，并得到了东北大学嵌入式技术重点实验室博士生导师赵海教授的指导。参加研究工作的还有徐久强教授、张君副教授、刘铮博士、毕远国副教授、朱剑博士、蔡巍博士、李鹏博士、李辉博士、王家亮博士、艾均博士等，在此一并表示感谢！

本书可作为从事软件网络研究与学习、应用的科技人员的参考用书，也可作为高等学校研究生学习模式识别的教学用书。

由于撰写时间和水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

著 者

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 软件网络研究背景和现状	2
1.2 本书的研究意义和主要研究内容	5
1.3 本书的组织结构	9
第 2 章 复杂网络和大型水电仿真软件	12
2.1 复杂网络在软件结构研究中的应用	14
2.2 大型水电仿真软件	18
2.3 软件样本选取原则	23
2.4 本章小结	24
第 3 章 软件网络的多粒度度量和分析	25
3.1 多粒度软件网络	25
3.1.1 方法粒度软件网络	26
3.1.2 类粒度软件网络	27
3.1.3 包粒度软件网络	29
3.1.4 Wemux 多粒度软件网络	29
3.2 多粒度度量的特征值	31
3.2.1 软件网络拓扑通用定义	31
3.2.2 度和度分布	31
3.2.3 聚集系数	32
3.2.4 介数	33



3.2.5	平均最短路径长度	34
3.2.6	紧密度	35
3.3	多粒度度量和分析	36
3.3.1	无向度分布和有向出度—入度分布分析	37
3.3.2	出度—入度相关性分析	42
3.3.3	聚集系数和度相关性分析	44
3.3.4	介数分析	46
3.3.5	紧密度和度相关性分析	51
3.3.6	总体特征分析	54
3.4	本章小结	55
第4章	版本演化及协作性结构度量与分析	57
4.1	层次和群落	57
4.2	同配和异配	68
4.3	改进结构洞	76
4.4	本章小结	81
第5章	基于波浪效应的错误倾向和缺陷分析	83
5.1	节点负载分析	83
5.1.1	节点负载和波浪效应度	83
5.1.2	节点负载的分析	86
5.2	节点负载的分形特征	89
5.3	基于多重使用的缺陷检测	95
5.3.1	多重使用关系及结构缺陷	95
5.3.2	水电仿真软件多重使用缺陷检测分析	98
5.4	基于多重依靠的缺陷检测	99
5.4.1	多重依靠关系及结构缺陷	99
5.4.2	水电仿真软件多重依靠缺陷检测分析	102
5.5	本章小结	104



第 6 章 局部社团发现算法	107
6.1 复杂网络中的社团发现算法	107
6.1.1 GN 算法	107
6.1.2 Radicchi 算法	109
6.2 软件网络中的局部社团发现算法	110
6.2.1 算法设计与实现	110
6.2.2 算法实证分析	113
6.3 本章小结	115
第 7 章 软件网络宏观拓扑特征度量和分析平台	116
7.1 功能需求描述	116
7.2 平台总体设计	118
7.2.1 总体架构设计	118
7.2.2 数据库设计	120
7.3 系统实现与测试	122
7.4 本章小结	127
第 8 章 总结与展望	129
8.1 工作总结	129
8.2 主要贡献	131
8.3 今后的工作	133
参考文献	135

第 1 章



绪 论

在软件工程领域，经过多年的实践，人们已经认识到软件工程在软件开发中是至关重要的，软件结构的重要性与软件开发成本和外部质量特性密切相关。长期以来，由于缺乏相应的研究方法，研究人员很少从整体上来审视软件的结构及其演化规律。人们对软件质量的要求越来越高，软件的开发风险也在不断增加，而软件质量却很难得到有效的控制。自从软件工程思想和方法得到广泛应用后，一些针对软件质量保障的软件度量方法应运而生。近年来，很多研究人员发现，大型软件系统的结构呈现出与 Internet、人际网络、电力网络等复杂系统相似的网络化组织结构，是一种典型的复杂系统。复杂网络与软件工程的结合，被认为是度量软件结构和演化规律的新的有效方法。软件的网络化给我们提供了一个新的视角，即可以忽略实际细节，转而利用网络模型去发现大规模复杂软件系统中隐藏的普遍规律，并借此去理解、度量和评价软件系统，将传统的“经验型”软件工程转变为“计算型”软件工程。现代大型软件系统的庞大规模和高复杂度决定了对软件结构和演化的研究应从多个层面入手，这样可以避免过早地纠缠于琐碎的细节。对软件结构和演化规律的研究一直是软件工程领域的重要研究课题。本书将新的宏观拓扑特征度量方法引入软件网络，在多粒度层面、版本演化和模块协作性，以及错误倾向和结构缺陷等多层次、多方面对软件网络进行度量。



1.1 软件网络研究背景和现状

随着计算机应用技术和软件开发技术的发展, 软件系统规模的不断扩大, 复杂性也急剧增长, 这也使得软件中的各种问题远远超出了软件开发人员所能控制的范围。尽管计算机硬件成本呈逐年下降的趋势, 但却因为软件功能日益强大, 软件规模不断扩大, 使得软件开发成本逐年增加。人们通过研究和借鉴工程学的某些原理和方法, 形成了软件工程学, 试图通过提供规范的分析、设计方法及工具软件来避免或减少软件错误的发生^[1-2]。软件生产是逻辑性很强的智力活动, 但其产品质量尚无严格的标准可依, 因而难以得到有效的控制和保障。开发具有正确性、可用性及开销适宜的高质量软件产品是软件开发人员和研究人员的共同目标^[3]。目前, 软件系统中大量堆积的底层元素及其之间错综复杂的关系已逐渐超出了开发人员的理解能力, 致使系统难以理解和维护, 软件开发经常处于失控状态, 若软件系统中存在一个极小的错误都有可能导致开发的失败和巨大的利益损失, 因此对软件系统复杂性的控制也是十分必要的^[4-6]。据 2004 年《PC World》杂志的调查显示, 美国 30% 的软件项目被取消, 50% 的项目超预算, 发起单位认为 60% 的项目是失败的, 有 90% 的项目不能按时完成。以全世界最著名的软件制造商微软公司为例, 在时隔仅 1 年多的时间里, 先后推出了两个用户和专家们评价起来完全位于两个极端的操作系统产品, 即 Windows Vista 和 Windows 7。耗资数百亿美元, 历时 5 年多开发, 并在开发过程中先后经历 3 次重编的 Windows Vista 操作系统, 在推向市场后, 就因为功能和性能上的问题饱受批评。在一片质疑声中, 微软突然开始新的操作系统产品 Windows 7 的全球测试。在其提供更多功能、更漂亮界面的前提下, Windows 7 反而要占用更小的空间, 变得更快速、更高效。



尽管软件工程在历经了面向过程、面向对象、面向构件等阶段后，已在很多软件开发项目中得到了成功应用，但人们对软件工程的期望与软件自身的发展仍然难以吻合。软件系统的规模和复杂性所带来的质量控制问题依然困扰着研发人员，软件的质量也并不是花大量时间和金钱就可以得到控制的。

在这种情况下，以传统度量学为基础的软件度量学应运而生。软件度量提供了一种量化的方法，以此来控制软件的开发过程和提高软件产品的质量^[7]，对软件开发的各个阶段进行评估和控制，帮助开发人员客观地分析、评估软件设计和生产，并能够预测其发展趋势，这对于改善并提高软件质量、提升软件工程能力具有非常重要的意义。一些新的度量方法被不断提出，如 Briand 等人提出的基于特性的（Property - Based）软件度量方法^[8]、Furey 提出的功能点（Function Point）方法^[9]、Arnold 和 Pedross 提出的软件的规模和生产率（Productivity）度量方法^[10]，以及 Bauer 提出的使用度量组合的方法^[11]来分析软件系统等。Fenton 等人对 20 世纪 90 年代后期所提出的度量方法做了回顾和总结，认为这些方法在一定程度上丰富了面向对象软件度量学的内容，但在预测软件质量方面还存在一些局限性^[12]，主要是对软件复杂性的认识还不够全面^[13]。进入 21 世纪后，虽然仍有一些好的度量方法和模型被提出，但大多数研究人员更关注于软件过程度量和相关标准的制订，软件复杂性度量研究相对停滞，致使有的学者认为与十年前相比，现有方法在技术层面并没有本质的突破^[14]。

一些研究学者对大量面向对象软件系统的类图进行研究和分析，发现软件系统的结构并不是随机和无序的，大多数都展现出了复杂网络的特性^[15]。作为一门新兴的学科，复杂网络以数学中的图论作为研究的理论基础，大量应用统计物理学的方法，对整个网络的几何性质、演化规律、结构稳定性等方面进行大量的研究^[16]。软件系统是复杂系统其中的一种，不断有文献提及软件系统中的复杂网络特

征^[17-19]，一些特定的软件系统被看做是复杂网络而得到了分析研究。从复杂网络和复杂系统的角度重新审视软件，将软件系统抽象为复杂网络进行研究，从整体和全局的角度来探索和发现复杂软件系统的结构特性与演化规律，这有助于科学、全面地认识和理解软件的本质特征。目前，复杂网络研究的成果为研究者探索大规模软件系统的结构和行为特征提供了有力支持，用网络的观点来审视软件系统（即软件网络）得到了越来越多的研究者认同。由于复杂网络理论更能体现软件系统的整体结构特征，一些新的软件度量方法相继被提出。

复杂网络与软件工程的结合，被认为是度量软件的一个重要创新性研究方法。2002 年，Valverde 等^[20]首先将复杂网络方法引入到软件系统拓扑结构分析中，将类图作为研究对象，用无向网络表示软件系统的结构，发现软件系统中显示出“小世界”和“无标度”特性，从而开创了用复杂网络方法研究软件网络的先河。2003 年，Myers、Valverde 和 Moura 等进一步使用有向网络来表示软件系统的结构，发现了同样的现象^[21-23]。Vasa 等人根据软件网络的节点数和边数之间的关系研究软件结构的变化，预测软件系统的规模及构造该系统所需的代价^[24]。随后，他们又提出了一套度量指标来检测开发过程中面向对象软件结构稳定性的变化，并发现类的规模和复杂性的分布随时间推移变化不大，而那些有较大入度的类倾向于被修改，这对程序员进行实际的系统开发具有很好的指导意义^[25]。Girolamo 等人以面向对象软件系统作为研究对象，根据介数等指标定义了一套度量方法，在不同层次识别和检测软件结构的缺陷及有问题的类，从而对软件的设计质量进行评价^[26]。刘婧和马于涛等人将传统的 CK 度量方法和 MOOD 度量方法引入基于复杂网络理论的度量方法中，提出了一套面向软件网络的度量方法，进一步揭示了软件的结构与功能的联系，并在此基础上在代码级（使用如 McCabe 圈度量方法）、类级（使用如 CK 和 MOOD 方法）和系统级（使用复杂网络基本参数）分析软件系统的

(结构) 复杂性^[27-30]。Jenkins 等人基于“无尺度”与二级相变提出了 lcc 度量方法, 评价软件系统稳定性和可维护性演化^[31]。刘婧等人提出了平均繁殖率 (Average Propagation Ratio) 度量, 以此来评价软件网络的适应性和可维护性^[32]。Concas 等人通过对 9 个面向对象软件系统结构的研究, 发现软件结构具有自相似性, 并计算了软件系统在生长过程中分形维数变化^[33]。张浩华等人引入核数及其相关指标, 研究了软件网络的层次性及其分形特征^[34]。蔡巍等人根据节点度值的分布引入结构熵, 以标准结构熵度量软件网络的有序性^[35]。王微等人则在软件网络中研究 23 种设计模式的特征和规律, 并统计了在 134 个不同规模的软件中设计模式的应用次数, 研究设计模式的应用与软件规模之间的关系^[36-38]。而近几年发表的 IEEE 学术文献也证明了软件网络的相关研究已经逐渐成为软件工程领域的一个重要研究方向, 并使软件开发逐渐趋向专业化、标准化和科学化^[39-59]。

1.2 本书的研究意义和主要研究内容

传统的软件度量方法已经无法满足软件度量和分析的要求。在复杂网络的研究中已有多粒度研究和分层次分析方法的出现。例如, 互联网 (Internet) 是个十分典型的复杂网络, 人们已将对互联网拓扑的研究分成路由器层面和自治域层面两种粒度。在路由器层面, 网络节点为路由器, 网络边为路由器之间的物理连接。在自治域层面粒度中, 同样有层次性和多粒度的体现, 互联网由大量相互连接的自治域系统组成, 其中的每个自治域层面系统又可以看做 Stub 域或 Transit 域。互联网上每个自治域层面可以被看做属于特定的层次, 最高层内的自治域层面属于 Transit 域, 较低层 Transit 域或 Stub 域依赖于其上层的 Transit 节点与网络内的其他域进行通信。自治域层面是由单一行政部门管理的子网络, 它可由多达数以百计的路由器组成。对于不同层次的网络, 其组成元素不同, 呈现出的网络特性也



就不同。在复杂网络研究自相似特征时，将网络分层次是非常重要的研究手段。在复杂网络的研究中，从多个层次利用复杂网络的宏观拓扑性来进行研究不仅变得十分必要，而且已经日趋成熟。

同样道理，复杂软件系统已经可以看做是一种复杂网络。软件的规模在不断增大，软件复杂度也在不断提高，从软件中的变量、方法、类乃至包、子系统来看，软件的结构已经出现了多层次、多粒度、多集成方式的组织方法，现有软件网络的相关研究大多是针对单一层次软件网络的，缺乏创新性，没有从多层次来研究软件的宏观拓扑结构特性，以及蕴含在其中的规律和特点，因此需要采用新的方法对软件网络来进行研究。网络的组成元素包括类中的方法和变量，以及包和子系统。面向对象的软件系统往往会在不同层次上呈现新的特性，这种特性在单一层次上是很难观察到的，因此对于面向对象的软件系统来说，如何有效度量其不同层次组成元素的属性就变得越来越重要了。面向对象的软件的设计思想主要体现在类和模块划分，类层次的复杂性分解，以及相互关系的有效组织，而对方法层次的设计指导较少。因此在面向对象的软件中，应从多层面上研究软件网络的宏观结构特征、蕴含的规律及相互之间的关联。

在面向对象的软件系统中，可以将其静态结构图中的各层次的程序单元均看做是组成网络的个体，将这些程序单元之间的调用、协作关系看做是这些个体在网络中的关系，因此可以对面向对象的软件的静态结构进行度量和研究。各个层次的网络包含了软件不同层次的组成单元，不同粒度的网络能够呈现出不同的特性，可以从中探索软件设计与软件结构的特征。通过对面向对象的软件的网络宏观特征进行分析，可以更加完整、深入地分析软件不同层次的结构特性，这在软件的复杂性控制、研究软件设计思想对软件结构的影响等方面具有很大的现实意义。

本书提出了新的软件网络宏观拓扑特征度量和分析的方法体系。首先，本书设计并实现了大规模软件宏观拓扑特征建模和分析工具软

件,将大规模软件源代码分粒度和层次抽象成网络。例如,将方法抽象成点,方法间的关系抽象成边,这样就构成了一个方法粒度的软件网络。依此类推,类粒度、包粒度同样可以抽象成相应的软件网络。现有的软件网络工具软件很少涉及类粒度问题,因此设计和实现软件网络宏观拓扑特征度量分析工具是十分必要的。该软件将软件源代码作为输入文件,将其自动抽象成软件网络,为研究人员采用宏观特征度量方法度量软件网络提供了方便而有效的工具。

其次,本书使用度与度分布、聚集系数、介数、平均最短路径长度、紧密度等度量方法和度量特征值对软件网络进行多粒度度量和分析。在方法、类、包等 3 个粒度上对软件网络进行度量,根据度量结果分析多粒度软件网络中存在的宏观特征和规律。度量考虑到了多粒度软件网络模型的所有粒度。度量结果发现,Wemux 和其他软件系统的 3 种粒度软件网络节点的度分布在双对数坐标轴中均明显呈现幂率分布形式,这说明面向对象的软件系统的 3 种粒度软件网络均具有复杂网络的无尺度特性。在 3 种粒度软件网络中,大多数节点度值较小,只有少数节点度值较高。若将软件网络视为有向网络,则拓扑中的每个节点都存在一个入度和一个出度。它存在一个入度,表明该节点被另一个节点所依赖,入度越高,则被依赖程度越强,同时也表明复用度高;而它拥有一个出度,表明该节点依赖于一个其他的节点,一个节点的出度越高,说明该节点依赖于更多的其他节点,其行为就越复杂。

本书创新性地引入了层次群落、改进结构洞、节点负载等度量方法和特征值对类层次软件网络的版本演化和协作模块性进行度量。这些方法和特征值对研究包括水电仿真软件在内的大规模软件的结构特征,以及指导软件设计和开发,具有很强的现实意义。以层次和群落为例,本书首先给出了节点到达代价和首领节点的概念,然后在此基础上给出了交连度、层次和群落的概念。由于在软件网络中,根据类间关系(继承、依赖、关联、聚合、组合等),一个首领节点和其所



在群落的所有节点一般意义上为系统中的协作模块，共同完成一个或多个任务，而交连度则反映了模块之间的耦合性，层次和群落等概念反映了软件系统中的模块协作性。本书还给出了 abiword2.2.7 的层次和群落变化图，通过对 Wemux 和其他开源软件进行实验，发现以 0 - 层中最大群落数的首领节点为首领的各层群落中的节点个数随着层数的增长符合对数函数趋势，软件的规模与模块之间耦合度的强弱没有必然联系。

本书定义了软件网络中的波浪效应。利用软件网络中的波浪效应，引入节点负载的概念，并发现其中蕴含的分形特征。仍然以 Wemux 为试验样本，实验结果同样证明了综合考虑计算时间和计算准确率，节点负载比其他方法能更好地预测模块错误倾向。在此基础上，选取了 150 种软件进行试验，发现不同类型软件节点负载分布图的分形盒维数位于特定区间，表明大规模软件节点负载的分形特征与软件类型存在相关性，软件类型的不同会影响到软件结构，进而影响到节点负载的分布。利用软件网络中的波浪效应，本书还定义了类的多重使用性和多重依靠性，以此来反映类（或模块）的构造复杂度及其结构缺陷。针对多重实用性和多重依靠性，本书还以水电仿真软件为实证，采用多重实用性和多重依靠性进行了度量和分析，对软件系统进行了缺陷检测。分析的结果也验证了本书提出的方法对指导软件设计和开发的有效性。

最后，本书提出了局部发现的社团划分算法，研究结果证明了提出的社团划分方法的有效性。

对软件网络的宏观拓扑进行多层次度量和分析，不仅能从多方面反映软件结构中蕴含的特征和规律，拓展了研究方法，而且也对大型水电仿真软件 Wemux 等软件系统的设计和开发具有很强的指导意义。



1.3 本书的组织结构

本书利用复杂网络理论对软件系统的宏观拓扑特征进行研究，将软件网络模型抽象成多粒度，引入创新性度量方法和度量特征值，从多方面研究了大规模软件网络的宏观拓扑特征。本书具体内容如下所述。

第1章较详细地阐述了国内外软件网络的研究背景和研究现状，由此引出了本书的主要研究内容和研究意义，并介绍了本书的组织结构。

第2章从复杂网络的概念入手，介绍了复杂网络理论在软件度量中的应用，简要介绍了大型水电仿真软件和其他软件样本的选取原则。

第3章提出了软件网络的多粒度，即方法、类、包3种软件网络的粒度，并以图示和说明的形式给出了软件网络多粒度的构建过程和表示形式。提出了多粒度软件网络度量和分析的方法，即在方法、类、包3个粒度上对包括 Wemux 在内的软件网络进行度量，并分析软件网络中存在的特征和规律。在给出通用软件网络拓扑的定义和度与度分布、聚集系数、介数、平均最短路径长度和紧密度等概念的基础上对软件网络进行度量。结果表明，Wemux 等软件网络的无向图的度和有向图的出度—入度的度分布均存在幂律特性，在 Wemux 类和包层次上软件模块化的设计思想得到了很好的贯彻；度值较低的节点拥有的聚集系数较高，有更高的聚集效应，更倾向于与其他节点聚集在一起。无论哪种粒度的软件网络都拥有较高的群聚性。介数大的节点往往度值较小，Wemux 软件设计和开发者充分考虑到了控制关键模块的复杂性。对于提出的介数求解算法，实验结果表明在包和类粒度网络上，计算时间是可以接受的。对紧密度的分析也说明了中心节点的度值往往较低，节点的紧密度并未随着度值的增加而明显增加等。以东北大