



申请代码	F020202
受理部门	
收件日期	
受理编号	6173000101



国家自然科学基金 申 请 书

(2017 版)

资助类别:	重点项目		
亚类说明:			
附注说明:	软件工程需求动态不确定性及其智能架构		
项目名称:	软件工程需求动态不确定性及其智能架构理论和方法研究		
申 请 人:	李必信	电 话:	02552090879
依托单位:	东南大学		
通讯地址:	南京市江宁区东南大学计算机科学与工程学院		
邮政编码:	211189	单位电话:	02583790506
电子邮箱:	bx.li@seu.edu.cn		
申报日期:	2017年03月08日		

国家自然科学基金委员会



基本信息

申请人信息	姓名	李必信	性别	男	出生年月	1969年08月	民族	汉族
	学位	博士	职称	教授	每年工作时间（月）		6	
	电话	02552090879		电子邮箱	bx.li@seu.edu.cn			
	传真	02552090879		国别或地区	中国			
	个人通讯地址	南京市江宁区东南大学计算机科学与工程学院						
	工作单位	东南大学/09计算机学院						
	主要研究领域	需求分析；模型转换；架构恢复、评估、重构和优化						
依托单位信息	名称	东南大学						
	联系人	程小易	电子邮箱	xycheng@seu.edu.cn				
	电话	02583790506	网站地址	http://kjc.seu.edu.cn/webapp/KJGL_app/KJC_ZY1/inde				
合作研究单位信息	单位名称							
	南京航空航天大学							
	北京科技大学							
项目基本信息	项目名称	软件工程需求动态不确定性及其智能架构理论和方法研究						
	英文名称	Research on Theories and Methods for Dynamic Uncertainty of Software Requirements and Their Intelligent Software Architectures						
	资助类别	重点项目				亚类说明		
	附注说明	软件工程需求动态不确定性及其智能架构						
	申请代码	F020202. 软件工程				F020201. 软件理论与软件方法学		
	基地类别							
	研究期限	2018年01月01日 -- 2022年12月31日				研究方向：软件演化		
	申请直接费用	306.0000万元						
中文关键词		在线演化；动态演化；演化模型；版本演化；版本管理						
英文关键词		online evolution; dynamic evolution; evolution model; version evolution; version management						



中文摘要	<p>软件需求会随时随地发生变更，而且变更的类型多种多样，变更的根源难以预测，即需求具有动态不确定性。而随着移动计算、云计算等新型计算范型的出现，软件工程面临的处理对象更加复杂、软件的形态更加多样、运行的环境更加多变，需求动态不确定性问题显得尤其突出，由此带来的风险更加难以控制。本课题拟从不确定性需求的认知与获取出发，研究如何利用智能化架构来处理不确定性需求的方法：即研究如何利用模块化技术对不确定性需求进行模块化处理、如何利用特征模型对不确定性需求建模、如何利用轨迹矩阵记录和跟踪管理不确定性需求到软件架构的映射过程、如何利用机器学习来获取多源异构软件架构知识、如何利用知识库来实现软件架构在线演化和优化、如何利用特征和MAPE-K来实现架构自适应等。本课题的预期研究成果将形成比较完整的智能化架构演化和优化理论体系，为在未来软件系统开发过程中如何降低或避免需求动态不确定性导致的项目风险提供技术指引。</p>
英文摘要	<p>Software engineering requirements will change at any time and anywhere, and there are a lot of different requirement change types, however it is very difficult to predict when requirements change will happen, and also very difficult to capture the causes why the requirement changes. With the occurrence of new computing paradigms such as mobile computing, cloud computing etc. and they are widely adapted in different application domains, software engineering needs to deal with the more and more complex objects, develop different kinds of software products, and satisfy the requirement of different running environments, which leads directly to the dynamic uncertainty of software engineering requirement becomes an obvious and serious problem, and further leads to the uncontrolled risk in existing project. In this project proposal, we try to find an intelligent architecture by deep and wide study to deal with uncertain requirement efficiently and effectively, and we promote our first task from identifying and the collecting uncertain requirements, and then use modularization techniques to isolate uncertain requirements, and then use feature models to describe uncertain requirements, and then use traceability matrix to record and manage all information and data produced during the procedures and steps for abstracting scenario from the requirement use cases or use case maps, extracting features from scenarios, mapping features to responsibilities, and mapping responsibilities to architectural elements etc., and then use machine learning to obtain all kinds of architectural knowledges for building knowledge base, and then use knowledge base to make decisions for online planning, online refactoring, online evolving and optimizing etc., and then use features and MAPE-K reference model to realize the self-adaptation of intelligent architecture. The expected research results will include patents, papers, books, software tools and other documents, which forms a set of useful methods and techniques which can be used to guide how to reduce or avoid the project risk brought by uncertain requirements in the future develop projects.</p>



项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作 时间（月）
1	黄志球	1965-05-16	男	教授	硕士	南京航空航天大学	13851678450	zqhuang@nuaa.edu.cn	320103196505162010	3
2	孙昌爱	1974-07-18	男	教授	博士	北京科技大学	13641386936	casun@ustb.edu.cn	32092319740718093X	6
3	马宗民	1965-11-09	男	教授	博士	南京航空航天大学	13776653597	zongminma@nuaa.edu.cn	210102196511095772	6
4	王森章	1986-01-23	男	讲师	博士	南京航空航天大学	13182938672	szwang@nuaa.edu.cn	370686198601237410	6
5	何啸	1983-12-24	男	讲师	博士	北京科技大学	010-66666666	hxiao@163.com	110108198312242710	8
6	王璐璐	1985-07-03	男	讲师	博士	东南大学	025-52090879	wanglulu@seu.edu.cn	320721198507030032	6
7	张祥	1979-06-21	男	讲师	博士	东南大学	025-52090861	x.zhang@seu.edu.cn	320106197906210013	6
8	李宗花	1981-07-09	女	博士后	博士	东南大学	025-52090879	leeleaf@163.com	512324198107090487	8
9	王真	1994-03-18	女	博士生	学士	北京科技大学	18600485478	18600485478@163.com	131122199403182449	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
10	4	4	0	1	1	0



国家自然科学基金项目资金预算表

项目申请号: 6173000101

项目负责人: 李必信

金额单位: 万元

序号	科目名称	金额	备注
	(1)	(2)	(3)
1	一、直接费用	306.0000	
2	1、设备费	40.0000	
3	(1)设备购置费	40.00	用于购买PC机, 投影仪和打印机
4	(2)设备试制费	0.0000	
5	(3)设备改造与租赁费	0.0000	
6	2、材料费	39.00	用于购买硒鼓、打印纸、电脑配件、网络耗材
7	3、测试化验加工费	3.00	用于支付测试机构的测试费
8	4、燃料动力费	0.00	
9	5、差旅/会议/国际合作与交流费	95.00	用于国内外差旅、举办会议等费用
10	6、出版/文献/信息传播/知识产权事务费	30.00	用于发表论文、申报专利、著作权及出版专著
11	7、劳务费	70.00	用于参加该项目的博士生和硕士生的助研费
12	8、专家咨询费	25.00	用于支付项目外专家的咨询费用、差旅费
13	9、其他支出	4.00	用于购买茶叶、文具等办公用品
14	二、自筹资金来源	0.0000	



预算说明书（定额补助）

（请按《国家自然科学基金项目资金预算表编制说明》中的要求，对各项支出的主要用途和测算理由及合作研究外拨资金、单价 ≥ 10 万元的设备费等内容进行详细说明，可根据需要另加附页。）

(1) 设备费 40 万元：主要用于购买 PC 机，投影仪和打印机。其中，

- PC 机：30 台 $\times 0.7$ 万元/台=21 万元；
- 投影仪：3 台 $\times 1$ 万元/台=3 万元；
- 笔记本电脑：10 台 $\times 1$ 万元/台=10 万元；
- 黑白打印机：15 台 $\times 0.2$ 万元/台=3 万元；
- 彩色打印机：6 台 $\times 0.5$ 万元/台=3 万元。

(2) 材料费 39 万元：主要用于购买硒鼓、打印纸、电脑配件、网络耗材等。其中，

- 彩色硒鼓：6 套/年 $\times 0.25$ 万元/套 $\times 5$ 年=7.5 万元；
- 黑白硒鼓：45 套/年 $\times 0.06$ 万元/套 $\times 5$ 年=13.5 万元；
- 电脑配件（维修）和网络耗材：3 万元/年 $\times 5$ 年=15 万元；
- 打印纸：30 箱/年 $\times 0.02$ 万元/箱 $\times 5$ 年=3 万元。

(3) 测试化验加工费：用于支付测试机构的测试费。3 万元。

(4) 燃油动力费：包含到间接费用中。

(5) 差旅/会议/国际合作与交流费 95 万元：用于参加在国内召开的学术会议、专委会、研讨班、培训班以及短期访问的费用等；用于每年在国内举办研讨会的场地费等；用于出国（境）参加国际会议的、短期学术交流的费用（例如，注册费、差旅费、住宿费等）。

- 国内差旅：40 人次/年 $\times 0.2$ 万元/人次 $\times 5$ 年=40 万元；
- 举办会议：2 万元/次 $\times 1$ 次/年 $\times 5$ 年=10 万元；
- 国际差旅：6 人次/年 $\times 1.5$ 万元/人次 $\times 5$ 年=45 万元。

(6) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费 30 万元：用于发表论文、申报专利、登记软件著作权和购买书籍、电子资料等费用。

- 6 万元/年 $\times 5$ 年=30 万元。

(7) 劳务费 70 万元：用于参加该项目的博士生和硕士生的助研费。其中，

- 博士生：0.2 万元/人月 $\times 50$ 人月/年 $\times 5$ 年=50 万元；
- 硕士生：0.1 万元/人月 $\times 40$ 人月/年 $\times 5$ 年=20 万元。

(8) 专家咨询费 25 万元：用于支付项目外专家的咨询费用（即专家的讲座费、上课费等）。其中，

- 境内专家：10 人次/年 $\times 0.2$ 万元/人次 $\times 5$ 年=10 万元；
- 境外专家：3 人次/年 $\times 1$ 万元/人次 $\times 5$ 年=15 万元。

(9) 其他支出 4 万元：用于专家来访和学位论文答辩的时候需要购买一些的办公文具、水果、茶叶等。

(10) 关于合作研究资金的说明：需要外拨总经费的 30%到南京航空航天大学，以及总经费 30%到北京科技大学。



报告正文

(一) 立项依据与研究内容 (5000-10000 字) :

1. 项目的立项依据 (研究意义、国内外研究现状及发展动态分析,需结合科学研究发展趋势来论述科学意义;或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录) ;

1.1 立项背景

1.1.1 软件工程中需求动态不确定性

虽然人们很早就意识到软件工程领域存在各种需求不确定性问题,但直到Richardson等人于1997年在国际软件工程大会(ICSE)上详细分析软件工程领域的各种不确定性问题,并强调不确定性需求的存在将使得软件开发项目存在一定的风险^[1];后来,Fehlmann等人进一步分析了产生不确定性的各种原因^[2];Garlan等人也认为软件工程面临的是一个不确定的问题空间,软件工程师要随时准备解决各种不确定性问题、满足很多不确定性需求^[3]。

对于什么是需求不确定性,人们给出了不同的理解:Giese等人认为执行一项任务需要知道的信息和已经获取的信息之间的差异^[4];Benslimane等人认为识别用户需求所需要的所有信息和开发者已经掌握信息之间的差异^[5];Ebert等人认为在软件系统的开发过程中直到被实践需要的时候才发现的需求^[7];Elbaum等人认为软件开发过程中的需求不确定性包含两种情况^[8],即已知的不确定性(known unknown)和未知的不确定性(unknown unknown):已知的不确定性是指那些在所有软件开发相关人员之间已经知道的不确定性问题,只是这些问题以及问题的解决方案存在多种情况,难以选择而已;未知的不确定性是指那些还不知道的不确定性问题。

需求不确定性在软件开发过程中并不是一成不变的,Nolan等人指出不确定性需求会随着时间的改变而改变,不仅有数量上的改变而且有形式上的改变^[6];Salay等人也指出随着软件建模过程的推进,各种模型的不确定性可能随着时间的推移、环境的改变和利益攸关者(stakeholders)的变化有可能增加或者减少。因此,需求不确定性是普遍存在的,并且动态改变的^[9]。

由此可见,理解需求动态不确定性应该至少从这几方面考虑:由于理解不充分或由于理解冲突引起的需求描述中存在的**不一致、不完整和不准确的情况**;由于内外环境的变化导致需求具有**不稳定性(或易变性)**;动态性主要体现在需求会随着**时间、空间、技术、人财物的变化而发生**变更。这里,**需求不一致**是指不同用户之间、用户和开发团队之间、开发团队内部存在的对问题空间理解的不一致、自然语言描述的不一致等;**需求不完整**是指随着计算机技术的发展,计算平台从传统的封闭、静态、易控平台到Internet为基础的开放、动态、虚拟平台,软件实体行为具备了不可预见性,软件运行环境具备了潜在不确定性、复杂性,以及用户使用方式具备了灵活性和多样性,从而导致需求获取的不完整性;**需求不准确**是指由于对系统的理解不全面以及外部环境的制约,在某些方面很难甚至是不可能提供准确定义的信息,通常会对软件需求做一些假设,从而导致需求描述的不准确性;**需求不稳定**是指用户对需求的理解是逐步完善的,用户需求在项目实施过程中经常会发生变更,在软件开发的初始阶段、结束阶段以及维护阶段软件需求有可能发生很大的不同,而且软件的不同用户定义的需求往往差别很大,从而导致需求的不稳定性。

1.1.2 需求动态不确定性导致的问题与挑战



(1) 需求动态不确定性普遍存在且难以消除：Noppen等人指出需求动态不确定性是软件开发过程中的固有属性，所有需求是固定的和确定的想法是不现实的^[10]；Ebert等人指出需求动态不确定性独立于项目的规模、作用域和运行环境存在，是随时随地可能出现的问题^[7]；Esfahani等人指出虽然获取更多项目信息可以减少一部分的不确定性问题，但人们不可能在软件开发过程中完全消除所有的不确定性问题^[11]。

(2) 需求动态不确定性对软件开发的影响：早在1921年，美国芝加哥大学的经济学家弗兰克·奈特(Frank Knight)在他写的论文《Risk, Uncertainty, and Profit》中详细说明了不确定性与风险、利益的密切关系，在此基础上建立了著名的奈特不确定性理论，该理论认为不确定性是一种不可直接度量、不能直接计算的风险，但对目标利益有很大影响；不确定性是一个棘手难题，因为“关于不确定性你是不能确定的”^[12]。Bell等人的早期所做的大规模实验表明：不确定的需求有很多，而且它们对最终软件产品质量影响很大^[13]。Boehm等人的实验更加证明了软件开发后期对软件需求的改正所付出的代价会相当高^[14]。Letier等人的研究表明软件需求的动态不确定性对软件架构的设计和演化产生巨大的负面影响，甚至直接影响最终软件产品的质量^[15]。

1.1.3 立项意义

(1) 基于确定性需求的架构理论与方法相对比较成熟，其中面向特定领域的构件构架技术得到广泛的推广运用^[16]。但是，针对不确定性需求的早期认知和获取、从不确定性需求到架构的映射、以及在架构设计和演化过程中如何处理不确定性需求等，还存在着理论方法和技术手段上的不足，带来的直接影响是：在软件开发的中后期阶段出现不确定性需求的时候，原来的设计方案可能需要进行大规模的修改，架构的整体布局和局部结构都需要进行大量的修改（重构），使得开发和维护成本大幅度提高。

本项目将针对上述不足进行系统的理论与方法研究：探讨如何尽早识别潜在的需求动态不确定性、如何模块化处理不确定性需求、如何通过各种类型的轨迹矩阵(traceability matrix)实现从不确定性需求到架构的有效映射、如何通过机器学习的方法在需求不确定性情形下进行软件架构的设计、演化与优化，以及如何增强软件架构的自适应能力等，建立一套能有效处理需求动态不确定性的智能架构理论与方法，具有重要的理论意义。

(2) 工程实践中存在的大量由于需求动态不确定性带来的问题，这些问题解决不好会带来质量、风险，甚至严重的安全问题。

例如，1996年6月4日，欧洲 Ariane 5 火箭在启动后 45 秒发生坠落，坠落的原因在于 Ariane 5 火箭的需求相比于 Ariane 4 火箭已经发生变更，工程师没有意识到需求的变更对软件的影响，并在 Ariane 5 火箭上重用了 Ariane 4 的软件程序，从而导致了这次严重的火箭坠毁事故^[16]。再如，2012 年 Google 公司根据自身的需求在其软件产品中实施了新的隐私策略，但是隐私需求是由用户、国家法律和 Google 公司三方决定，但是 Google 公司忽略了这三者对隐私需求可能产生的冲突而导致的的不确定性，擅自采用自己的策略，违反了欧盟的规定，导致在欧洲被暂停使用^[17]。还如，导致各类智能系统在使用过程中事故频发的原因，大部分都是由需求的动态不确定性引起的^[18]。这些教训告诉我们，需求动态不确定性是软件开发和版本升级过程中普遍存在，出现不确定性需求的时间和空间难以预料，导致需求动态不确定性的因素非常复杂且难以预测。

本项目将结合不同应用领域的典型案例进行大规模的实验分析和验证，争取在 2-3 个领域推广应用所获得的技术、理论和方法的成果，为解决工程实践中由于需求动态不确定性带来的架构演化和优化问题，提供理论方法指导和技术手段、工具平台支持。

1.2 现状分析

我们利用系统的文献调研手段，对主流论文数据库和借助百度、谷歌等主流搜索引擎通

过关键词搜索，共查找到相关论文2000余篇，在此基础上通过PIO（Population, Intervention和Outcome）标准筛选出190篇文献。通过对这些文献进行研读与分析，将需求动态不确定性及其智能架构方面的研究成果归纳为如下三类（如图1所示）：需求动态不确定性的研究、从需求到软件架构的转换的研究，和智能架构原理和方法的研究。

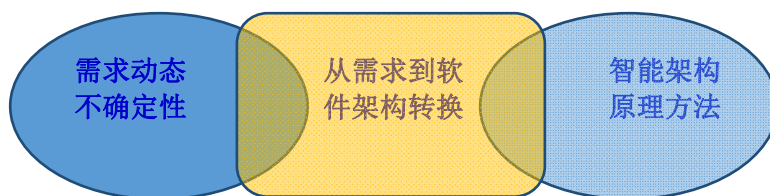


图1. 相关研究内容及其联系

1.2.1 需求动态不确定性研究现状

从软件工程需求动态不确定性根源分析、需求不确定性识别和准确的需求获取、需求不确定性的影响分析及评估、不确定性需求管理和处理策略，以及特定领域软件系统的需求不确定性问题等五个方面对软件工程需求动态不确定性研究现状分析如下。

(1) 软件工程需求动态不确定性根源分析

软件工程需求的不确定性来源非常复杂，有效的分类机制可以更好帮助研究和开发人员理解导致需求不确定性的原因，进行更加合理的架构设计和重构。Sillitti 等人认为需求不确定性主要来源于内部环境和外部环境^[20]。其中，内部环境包含项目相关人员的知识局限性、沟通的不通畅性以及对项目初始理解的不确定性等；外部环境包含技术变更、政策法规变动、市场计划改变以及金融条件变化等。Benslimane 和 Nidumolu 等人将不确定性的来源划分为如下三类^{[5][21]}：1) 需求的不稳定性：在软件开发的初始阶段、结束阶段以及维护阶段软件需求有可能发生很大的变化；2) 需求的多样性：不同用户定义的需求差别很大，不同用户之间提出需求的不一致性；3) 需求的可分析性：将用户需要转化为软件需求过程的自动化程度，如果存在一个可理解步骤转化用户需要到需求，那么软件需求可以很容易确定。Ebert 等人讨论了软件项目中四种需求不确定性，并解释了不确定性的根源^[7]。四种不确定性需求如下：1) 不完整的需求：主要原因是需求没有被充分地规约和分析，以及关键的人员没有参与需求的制定；2) 没有意识到的需求之间的依赖关系：主要原因是不知道项目依赖，关键的人员没有参与需求的制定，以及不清楚的产品视图和策略；3) 参与人员的冲突、统一的意见没有得到维护：主要原因包括关键的人员没有参与需求的制定，商业案例没有得到充分地分析；4) 每一个需求的成本效益不清楚：主要原因包括需求没有被充分地规约和分析，不清楚的产品视图和策略，以及商业案例没有得到充分地分析。Letier 等人认为需求不确定性包括^[15]：1) 利益相关者的目标和优先事项的不确定性；2) 替代方案对这些目标影响的不确定性；3) 实现替代方案的可行性、成本和持续时间的不确定性；4) 利益攸关者的目标未来变化的不确定性；5) 商业环境和技术环境的不确定性；6) 询问的是否是正确的决策问题、正确的决策问题是否涵盖了标识出的所有选择的不确定性。在决策问题中，不确定性是指缺少关于替代方案的真实结果的完整知识。此外，Horkoff 认为软件需求工程需求的获取、理解和捕捉存在不确定性、缩小需求不确定性的范围变得尤为重要^[22]。Dey 和 Lee 认为日益复杂和动态的执行环境将会导致需求不确定性的增加，因此如何设计自适应系统尤为重要^[23]。Shi 等人提出在软件的生命周期中，某些需求由于不成熟的业务流程、需求之间的多重依赖以及为了改变做出的设计等原因，在多个版本之间需要经常改变^[24]。Alrajeh 等人指出意料之外的不利条件会使软件和其所处环境表现不符合预期，造成需求不完整^[25]。这些不利条件代表可能造成严重软件失败的风险，如安全隐患、安全威胁和数据不准确等。Rashid 等人提出发现“未知的已知”的安全需求，认为目前已知的安全漏洞中存在需求工程师未知的知识，需求工程师并没有把这些未知的知识作为需求考虑^[26]。



综上所述,导致需求不确定性的因素很多,但这些因素可以分成外部因素和内部因素两类:1) 外部因素包括技术的变化、规定条例的变化、公司政策变化、市场计划改变、经济情况变化、不可预知的执行环境、问题域的不确定性、这个世界固有的随机性、限制的计算机资源、以及系统所在环境的稳定性等;2) 内部因素包括软件演化的本质特性、对应用领域知识的局限性、不完整的需求、需求中没有意识到的依赖关系、项目中交流和关系协作问题、参与人员的意见冲突、自然语言描述需求的二义性问题、用户最初对需求不准确描述、建模人员之间领域知识的鸿沟、客户对软件领域知识的缺乏、多地点共同软件开发、模糊的需求描述、以及用户随机性需求等。

(2) 需求不确定性识别和准确的需求获取

由于内部因素和外部因素的限制,准确获取需求并不是一件容易的事情。需求识别和获取的方法和手段可以分成如下两类:

1) 确定性需求识别和获取方法: 确定性需求是指那些在需求分析的时候已经比较明确的需求。这类需求对用户和开发人员来说比较容易理解和描述,在软件开发过程中相对稳定,即使需要变更,也是可以预见的^[1,8]。该类需求获取方法的研究也比较成熟,目前有不少行之有效的办法,典型的方法包括:用户访谈、用户调查、现场观摩、文档考古、建立联合分析小组、原型法、模型驱动和基于上下文的方法^[1,2,8]。

2) 不确定性需求的识别和获取方法: 不确定性需求是指那些在需求分析的时候还不明确的需求。这类需求对用户和开发人员来说难以理解、难以描述、甚至还不知道是什么,在软件开发过程中的任何时间点、任何空间点都可能出现,而且出现的形式也是未知的,难以预测、难以控制。也就是说,不确定需求的出现时间、空间和形式都是随机的^[2,8]。人们已经关注到该类需求在软件开发过程中重要性,它们往往是决定软件开发项目能否成功实施的关键因素。表1总结了该类需求识别和获取的典型方法。

表1 典型的不确定需求获取方法

方法名称	基本思想	参考文献
网格分析	用网格技术捕捉用户意向和技术的可变性,随后进行可变性分析,根据用户意向、场景等因素进行需求决策。	[23]
贝叶斯模型	将不确定性需求作为目标模型一部分,对扩展后的目标模型进行分析。	[22][27][36]
机器学习	利用智能规划与机器学习的方法,将需求域转化为部分规划域,建立了具有不确定性效果的动作模型学习算法,应用该算法可以获得完整规划域以及需求规格说明。	[28]
需求预测	用需求演化的方式进行需求预测,或者从软件演化历史信息去预测需求的变化。	[22] [24]
部分模型	通过局部模型将不确定性需求形式化表达出来,同时进行不确定需求的精化以减少不确定情况。	[9][29]
特征模型	扩展特征模型支持不确定性需求的建模与推理,根据用户意向进行特征配置的决策。	[30]
监控和反馈机制	从需求、监控范围和运行阶段监控模型的实例化三个维度,监控需求的变化并且在运行阶段追踪需求。	[31][32][34]
自然语言理解	利用各种自然语言理解技术获取不确定性需求方面的信息。	[26][34][35]

(3) 需求不确定性的影响分析及评估

不确定性需求对软件开发会产生巨大的影响,甚至带来风险,导致重大经济损失和财产损失,不可预测的不确定性需求危害更大,因此针对不确定性需求的影响分析和评估非常重要。Noppen等人指出需求不确定性可能导致软件系统的设计过程产生大量的重构甚至导致整个系统的重新设计^[10];Liu等人讨论了需求不确定性与风险分析的关系^[37],认为不确定性需求会增大系统开发的风险;Sillitti等人讨论了敏捷开发和文档驱动开发中的需求不确定性^[20]:1) 75%的敏捷开发公司和63%的文档驱动开发公司中的软件需求总是随着时间变化;2) 88%的文档驱动的软件开发公司和13%的敏捷开发公司认为需求的变化是需求获取过程中最困难的问题;3) 50%的文档驱动开发公司使用灵活的体系结构来应对可预测需求变化。Yazdanshenas等人研究了基于组件的软件产品族的细粒度变化的影响^[38],采用静态程序切片技术建立族依赖图,通过分析程序组件之间的相互关系来估计程序的变化影响。Rungra等人扩展了有向增量符号执行支持过程间分析,结合静态和动态调用上下文信息有效地产生受影响的程序行为^[39]。Bezerra等人认为特征模型直接影响软件产品质量,将质量评估度量应用于特征模型,保证特征模型建立的正确性^[40]。



(4) 不确定性需求管理、建模和处理策略

通过对不确定性需求的管理和处理,可以在很大程度上解决不确定性需求带来的问题与挑战。Ghezzi 等人研究了模型驱动的软件开发中非功能性需求的不确定性问题,提出一种称为 ADAM 的适应性模型驱动执行方法,能够支持自适应系统的有效开发和运行^[41]。Fukamachi 等人提出一种处理不确定性的模块化策略:把不确定性作为一个可插拔的接口,基于部分模型进行模块化推理,进而进行不确定性推理^[42]。Salay 等人采用部分模型管理已知的不确定需求,采用一系列的机制精化不确定性需求,有助于减少不确定情况^[9]。Famelis 等人通过使用定义良好的语义注解来处理不确定性,并将这些注解转换成部分模型,进一步完善了部分模型^[29]。Horkoff 等人将不确定性需求作为目标模型一部分,对扩展后的目标模型进行分析,减少目标模型中不确定的情况^[22]。Massacci 等人通过扩展特征模型支持不确定性需求的建模与推理,并且实现根据用户意向完成最后特征配置的决策^[26]。Alrajeh 等人提出了一种风险驱动的需求模型修正方法,通过识别和解决造成需求不完整风险条件,利用基于学习的修正方法,根据障碍和非障碍发生的典型踪迹,迭代修正目标模型中的障碍目标^[21]。Le 等人认为可以在领域专家帮助下,在实现阶段进行可变性信息抽取,逆向生成特征模型,通过与原始特征模型进行比较,验证语义一致性和语法一致性^[39]。李引等人使用信息检索技术对需求进行动态跟踪,可有效解决软件开发过程中需求和软件产品的一致性^[33]。

(5) 特定领域软件系统的需求不确定性问题

不确定性需求普遍存在于各种特定领域的软件开发中,这方面的代表性研究工作包括:1) 在自适应软件系统方面,Esfehiani 等人讨论了不确定性需求的各种形式以及应对措施^[11]。Bencomo 等人研究了如何采用贝叶斯模型建模自适应软件中的不确定性需求^[36];2) 在信息物理系统方面,Yue 等人讨论了如何对 CPS 中需求不确定性进行建模和测试^[44];3) 在社交网络领域,Horkoff 等人则以一个会议安排程序为例,讨论了在不确定性需求存在的前提下如何进行早期的决策^[22];4) 在移动计算领域,孟祥武等人研究了如何在动态环境下进行需求获取的方法,通过收集用户状态和行为、所处环境的物理信息、设备能力上下文、终端业务上下文、终端网络环境上下文等信息,采用数据挖掘的分析方法计算得到用户的需求^[27]。

1.2.2 从需求到软件架构的转换研究现状

由于问题空间中需求动态不确定性的存在,使得需要求解的问题变得更加复杂且不稳定,增加了软件设计人员寻找有效解决方案的难度。需求工程主要关注问题空间的需求动态不确定性,如何基于需求(问题空间)进行架构设计(解空间)一直是软件工程领域研究的热点和难点问题^[47]。依据需求是确定的还是不确定,相关的研究工作分成两大类,即面向确定性需求的架构设计方法和面向不确定性需求的架构设计方法。

(1) 面向确定性需求的架构设计方法

2000 年之前,需求工程和软件架构领域的大多数研究工作都是相互独立的,如何针对给定的需求设计软件架构的研究工作较少。2001 年和 2003 年分别召开的从需求到软件架构过渡的国际研讨会^[44]推进了这方面的研究工作。目前,关于需求到软件架构的过渡问题的研究工作中,部分工作采用了软件架构的概念和描述手段描述软件需求,能够在较高抽象层次刻画问题空间。例如:Mei 等人提出了一种面向架构的需求工程方法,用软件架构的基本概念来描述问题空间,用构件和连接子的概念来结构化地组织需求,最终的需求规约包括构件的需求规约、连接子的需求规约及约束需求规约等^[49]。Davor 等人提出架构层次需求规约的概念,架构层次需求规约由一组软件架构层次用例构成,每个软件架构层次用例包括相应的参与者、语义规约、质量属性规约等软件架构层次元素^[50]。更多的研究工作主要是探讨如何从需求规约自动或半自动地变换到软件架构模型。结构化软件开发方法中给出了由 DFD(Data flow diagram)到软件架构的详尽转换步骤^[51]。Kardoš 等人于 2010 年提出可以将 DFD 图转换为一系列 UML 图(如:用例图、活动图、顺序图和领域模型)来表示软件架构^[52]。面向对象的软件开发方法中,直接采用 UML 图进行需求分析和架构设计,通过词性分



析和一些经验规则来完成需求分析(用例图)向架构模型(包括类图等)的转换,通过表格^[53]或者用例映射^[54]来协助转换过程。

除了这两种经典方法之外,研究者们从不同角度进行了从需求规约到软件架构转换的研究,主要方法包括:1) **基于场景的架构分析方法**:美国卡内基梅隆大学软件工程研究所于1993年提出的第一个被广泛接受的软件架构分析评价方法 SAAM^[55]。SAAM 采用大脑风暴技术构建场景,软件架构的描述采用自然语言或其他形式表示,使用场景作为指定和评价质量属性的表述手段。将场景归类为直接场景和间接场景,分别支持对软件架构的静态结构分析和动态分析。主要用于分析系统可修改性、可拓展性以及功能覆盖等质量属性。Schindler 等人提出一种基于模型的方法,保证基于场景的需求规约和软件架构的一致性^[56]。Landuyt 等人提出一个支持早期架构假设的元模型,使用面向方面的需求描述语言以支持需求规约和软件架构之间的转换^[57]。Hebisch 等人采用架构追踪图辅助进行需求规约和软件架构之间的转换^[58]。2) **面向特征的模型向软件架构的转换**:Davis 等人将特征作为需求规约的一个重要机制^[59];Kang 等人提出了 FODA^[60]、FORM^[61]等面向特征的软件架构设计方法。Turner 等人提出一个特征工程框架,建议以“面向特征”的概念建立用户与开发者的交流^[62];刘冬云等人^[1]提出一种面向特征的需求规约到软件架构映射方法^[63];Zhang 等人采用特征模型描述需求,以“责任”作为从需求模型向软件架构转换的桥梁,通过“特征-责任-构件”的映射关系来维护可追踪性^[64]。3) **业务流程向软件架构的转换**:Rodríguez 等人根据 QVT 规则^[65]和精化规则等将由 BPMN 描述的安全业务过程转换为架构图^[66];Anish 等人提出一种基于知识的需求规约向软件架构的转换方法^[67]。4) **面向目标的软件架构设计方法**:Chung 等人提出了一个非功能性需求框架用以表示系统非功能目标,并对其进行分析^[68]。Brandozzi 等人定义了一种架构脚本语言 (APL) 描述软件架构,并给出了将需求规约映射到 APL 的方法和过程^[69];Lamsweerde 等人提出了面向目标的需求工程方法,将系统的目标转换为基于 UML 的架构模型^[70];Sabatucci 等人提出了一个面向目标的模式文档化方法,提出了半结构化的可视化符号进行设计模式的选择和定制^[71];Jacobson 等人提出基于用例、面向方面的软件开发方法(AOSD/UC),将用例应用于面向方面的需求工程^[72];Chitchyan 等人提出一种将面向方面的需求规约转换为面向方面的软件架构的方法^[73];Oliveira 等人提出了一个面向方面的软件架构模型,采用扩展的 SysML 语言进行多视图描述以定义面向方面的软件架构^[74]。5) **基于模式的软件架构方法**:Bosch 等人提出可以通过架构模式、设计模式等将需求转换为软件架构^[75];Rajasree 等人从软件架构设计模式出发,利用模式将需求与架构设计决策联系起来^[76];Sutcliffe 等人提出了一种通过架构模式将面向目标的需求向架构转换的过程^[77]。6) **其它方法**:Hofmeister 等人通过全局分析业务流程的影响因素(组织因素、技术因素、产品因素)来定义问题和制定策略,使用影响因素表、问题卡等来记录全局分析过程以维护需求和软件架构的一致性^[78];Medvidovic 等人通过使用软件架构层次概念(构件、连接器等)来逐步精化需求,从而得到软件架构的设计模型^[79]。

(2) 面向不确定性需求的架构设计方法

该类方法主要关注如何在需求分析阶段增加不确定性需求分析,以便在架构设计中增加处理不确定性的机会和手段。典型方法有两种:1) **在需求分析时加强对不确定性的描述和建模机制,这样再过渡到架构设计比较直接**。代表性的工作包括:Smaling 在其博士论文中提出采用模糊帕累托最优技术进行不确定性需求的描述,提出一种基于近邻的筛选技术对解空间进行处理,选择合适的软件架构^[80];Whittle 等人提出了一种需求语言 RELAX,支持自适应系统中不确定需求的描述^[82];Baresi 等人提出了一种目标模型 FLAGS,将需求作为活动的、运行中的实体进行考虑,为自适应系统添加适应性目标^[82]。2) **在软件架构设计加强对不确定性需求的处理,采用具有自适应机制的框架处理需求的动态不确定性**。例如,Elkhodary 等人提出了面向特征的自适应框架 FUSION,能够支持未能预测的情形^[83];McGhan 等人在 NASA 的空间站系统项目中提出了一个 RSE 架构,该架构能够支撑构件突然失效、未知环境、未知科学发现等情况,并进行自主决策^[84]。

1.2.3 智能架构的研究现状



Oreizy 等人于 1999 年提出的自适应软件架构中融合了决策、规划和优化思想,我们认为这是较早的智能架构研究工作^[85]。智能架构理论和方法的发展经历了两个阶段:1) **早期阶段**人们主要关注需求的动态变更问题,包括已知的确定性变更和已知的不确定性变更。这类需求问题的出现是由于软件维护引起的,即纠错型维护、完善型维护、适应型维护以及预防型维护,代表性的解决方案有软件架构持续集成和演化^[86-94]、软件架构重构和优化^[95-112]、以及动态软件架构理论和方法等^[113-117];2) **近期阶段**人们开始研究需求动态不确定性问题,主要包括已知的不确定性需求和未知的不确定性需求,这类需求问题的出现是由于问题空间的很多不确定因素引起的,出现的时间和空间都是未知的,处理起来难度很大,代表性的解决方案是**自适应架构或智能架构**^[118-189]。

(1) 软件架构持续集成和演化方法

根据 Breivold 等人的文献综述^[47],软件架构演化围绕如下几个方面开展研究工作:软件架构演化的类型、软件架构演化的理论方法和技术、软件架构演化过程的管理和一致性保障、软件架构演化效果的评估和成本估算^[86-88],等等。Madhavji 等人从软件开发环境的角度分析软件演化,认为引起软件架构演化的原因主要包括^[89]:1) 政府、法律、组织机构政策的修改;2) 利益攸关者对软件功能或其它方面做出要求;3) 资源约束及环境的改变,例如可用的通信协议的修改、可用的存储空间의 缩减等,均会导致软件演化来满足新的约束要求。Kitchenham 等人从软件架构维护的角度,将软件架构变更分为两类^[90]:1) 修正软件产品或应用的行为与观察者行为相矛盾的地方,以此来满足资源约束变更;2) 通过改变系统的行为或实现来改进和提升系统,主要包括改进已有的需求、增加新的系统需求以及改进系统的实现。Feng 等人提出了一种基于构件的软件架构设计的动态演化分析技术,采用静态构件结构和 UML 顺序图描述生成该模型的过程,通过对构件交互轨迹的切片分析来实现动态演化影响分析^[91]。Cheung 等人提出一个软件构件可靠性预测框架,利用架构模型、相关分析技术、随机建模方法以及一些在软件开发生命周期早期阶段可得到的资源来解决开发中与构件相关的不确定性,包括构件操作资料 and 系统运行失败信息的缺失^[92]。Janthong 等人讨论了如何追踪工业复杂产品的设计(再设计)所产生的变化影响,开发了一个设计变更影响的可视化分析工具,利用相干矩阵管理变更影响^[93]。Tang 等人采用架构原理和元素链模型来表示架构元素与架构决策之间的因果关系,通过贝叶斯信念网络来获取架构设计模型中架构元素和决策之间的概率关系^[94]。

(2) 基于软件架构评估和重构的优化方法

在软件开发初期通过评估发现架构设计中可能的缺陷,从而对架构设计进行改进,降低项目因架构设计导致失败的风险和开发成本。Qureshi 等人通过系统梳理 1995-2010 期间软件架构领域的文献,发现软件架构评估是软件架构领域的研究热点^[95]。高晖等人总结出基于场景、基于度量 and 预测、面向特定软件架构描述语言等软件架构评估方法,指出软件架构评估的关键研究方向^[96]。在特定领域的软件架构评估方面,Costa 等人提出了针对基于 REST 模式系统的架构评估方法、指南及工具^[97]。Knodel 等人对 50 个大型工业软件项目的架构评估案例进行综合分析,基于分析结果为大型软件架构评估给出了经验性的操作指南和建议^[98]。Brosig 等人对基于构件的架构设计给出了模型驱动方法的架构性能分析和评价方法,在定性评估的基础上提供了定量的评估结果^[99]。Kazman 等人提出了一种对系统早期架构进行评估的方法,并用智能电网软件系统对该方法进行了应用验证^[100]。

软件架构优化的目标是在满足一组系统质量需求的前提下寻找最优的架构设计方案。Aleti 等人对软件架构优化方法进行了系统文献回顾和综述,从架构优化问题、架构优化方案和优化结果验证三个维度对现有的软件架构优化方法进行了分类,提出了若干研究方向,尤其是如何对架构优化的成本和效果进行评价^[101]。Etemaadi 等人提出了质量需求驱动的软件架构优化方法,并应用于汽车制造领域的软件系统^[100]。Heesch 等人关注于软件架构决策的推理和优化过程,通过对工业界架构师的采访调研,总结出若干软件架构决策推理与优化的最佳实践^[103]。Xu 等人提出了一种合作的协同演化方法来进行面向模式的架构合成,实现了软件架构优化的自动化^[104]。崔晓峰等人提出以决策为中心的架构设计方法,实现了候选架构设计方案的自动合成与优化,以及相关设计决策知识的获取^[105]。特别地,如何在自动



化搜索过程中表示软件架构设计方案、如何在搜索过程中自动化评估不同的软件架构设计方案、如何在搜索过程中充分和有效利用软件架构决策知识，是自动化的软件架构设计优化中需要解决的重要问题。

代表性的架构重构技术主要有如下六种：1) 基于模式匹配的软件架构重构^[106]：利用各种模式匹配算法进行软件架构的识别、恢复和重构；2) 质量属性驱动的软件架构重构^[107]：利用质量评估结果来指导软件架构重构；3) 视图驱动的软件架构重构^[108]：利用各种静态视图、动态视图进行架构匹配和重构，是一种模型驱动的方法；4) 元模型驱动的软件架构重构^[109]：利用 UML 中的元模型进行架构元素的重构，以此达到对软件架构的重构；5) 桥接具体领域和逻辑领域的软件架构重构^[110]：利用逻辑领域的设计文档和具体领域的实现代码之间的映射和匹配关系来指导软件架构重构；6) 基于架构描述语言和过程的软件架构重构^[111,112]：利用架构描述语言来描述软件架构，通过对架构描述语言的重构达到对软件架构的重新构建。

(3) 动态架构理论和方法

动态软件架构是一个活跃软件架构研究方向^[113-117]，然而对于动态架构究竟是什么以及如何在真实的软件系统中使用仍然没有达成共识。Andersson 等人分析了现有的动态软件架构方法，定义了三种动态软件架构类型，即构成动态、自适应动态及智能动态^[113]。随着云计算的广泛应用，在软件运行过程中动态改变软件组件已经成为重要的研究课题。Ding 等人通过扩展双层高级 Petri 网对软件架构进行静态和动态建模，然后使用 SPIN 对所建模型进行模型检测^[114]。Smaali 等人提供一个动态软件架构元模型(DySAM)说明软件架构中构件间的互相影响及其重构^[115]。近年来，在研究软件架构构造的自适应性时人们更多地开始关注环境感知、服务质量建模、编程语言等因素。陈向东等人在研究动态自适应过程时提出一种软件架构重配置方法，通过对构件、连接子的添加、删除和替换等操作来调整软件架构^[116]。此外，少数架构描述语言能够部分支持动态软件架构的描述。例如，Cavalcante 等人提出的基于进程代数的形式化架构描述语言 π -ADL，从结构与行为两个方面支持动态软件架构的动态配置的描述^[117]。

(4) 自适应架构理论和方法

1999 年 Oreizy 等人提出的自适应系统的软件架构，为自适应系统的演化、管理和实现提供了重要的理论支持^[85]。冯珊等人基于软件集成电路的思路提出了一种软件系统构造的自组织方法，采用 H.A.Simon 的决策认知过程分析，采用基于构件组装的方式实现的信息系统能够适应不同的需求^[118]；李阳等人针对网络环境多变的情况，提出了一种动态自适应系统的理论模型，通过对自适应系统结构功能的抽象，实现了已知基于网络构件的软件自适应系统，能够适应复杂多变的网络环境^[119]；冯耀东等人提出了一种自适应软件架构方法 SASA，利用基于质量属性场景的软件架构分析方法获得适应性变化的原因和时机，利用质量属性驱动的软件架构设计方法决定适应性变化的内容，利用支持变化性描述的软件架构描述语言记录上述信息，利用基于运行时刻软件架构的中间件在运行时刻实施指定的适应性变化，以达到面向质量属性的软件自适应目标^[120]。人们在自适应架构理论和方法方面进行了广泛、深入的研究工作，解决了多重选择困难、动态需求变更、架构重配置、架构局部优化等问题。表 2 总结了代表性的自适应架构的理论与方法。

表 2 自适应架构研究现状

方法名称	基本思想	参考文献
基于智能系统原理自适应架构	借鉴典型智能系统开发的相关做法	[111-124]
基于多态的自适应架构	利用面向对象方法中多态理念对已知的不确定性（多种可选的策略）进行处理	[125]
基于 Bigraph 理论自适应架构	利用 Bigraph 理论对自适应软件架构进行形式化规约，分析和验证系统动态演化的性质	[126]
基于预测理论的自适应架构	自适应架构设计中，利用贝叶斯网预测可能发生的不确定性需求	[127]
基于反射的自适应架构	利用反射组件和动态面向方面的编程技术实现动态自适应架构，可以作为交叉适应的补充手段	[128]



基于生物学原理的自适应架构	借鉴生物学原理构建自适应软件架构	[129]
基于决策理论的自适应架构	利用决策学中不确定性处理方法解决架构设计中的不确定性问题	[130-132]
基于自控理论的自适应架构	将反馈回路和控制器思想引入软件架构的设计过程，加强自适应处理能力	[133-140]
基于机器学习的自适应架构	利用机器学习、在线规划原理实现自适应软件架构	[141-143]
基于变更配置管理自适应架构	利用传统的变更管理、配置管理机制实现自适应软件架构	[144-150]
基于参考模型的自适应架构	利用自适应系统中参考模型构建自适应软件架构	[152-153]
基于架构知识的自适应架构	通过收集各方面的架构知识，分析需求不确定性产生的根源，探索解决不确定性的有效方案	[154-157]
基于遗传算法的自适应架构	利用遗传算法自动生成配置和重配置方案实现自适应架构	[158]
基于动态决策网络	利用贝叶斯网（特别是动态决策网络）支持自适应系统的决策	[159,160]
基于特征模型的自适应架构	利用特征模型来表示可变性和自适应的组合，实现有限的自适应处理	[161]
基于拓扑感知的自适应架构	在运行时监视拓扑的更改，识别新的或变化的威胁和攻击，部署适当的安全控制	[162]
基于多目标规划的自适应架构	应用决策分析和多目标优化技术处理早期需求和架构决策问题中的不确定性问题	[163-165]
基于搜索的自适应架构	采用搜索技术处理自适应系统中多维搜索空间的复杂问题	[166-168]
基于形式化推理的自适应架构	采用适应组件和知识模型集成的形式化模型构建自适应架构模型	[169]
基于多智能体的自适应架构	借助自组织多智能体概念设计和实现自适应架构	[170,171]
基于概率模型的自适应架构	在架构设计中利用概率模型进行不确定性分析和检查	[172]
基于部分模型的自适应架构	使用自我组织和自我优化技术实现自适应性	[173]
基于 QoS 的自适应架构	通过预测 Qos 值进行转换控制的方法实现云系统的自适应架构	[174,175]
基于演化理论的自适应架构	利用动态演化理论指导自适应架构的实现	[176-179]
自适应架构相关研究	研究自适应架构的分类、建模、验证和特定领域的自适应架构等问题	[180-189]

1.3 存在问题分析

尽管从需求动态不确定性到智能架构的研究已有了 20 年左右的历史，相关研究已经取得了很多有价值的成果，但是需求动态不确定性仍然是当前软件工程实践中最棘手的问题之一。一方面，无论是学术界还是工业界，都已经注意到需求动态不确定性问题的重要性，在理论与方法研究和工程实践中投入了大量精力；另一方面，还没有很好的办法来完全解决这个问题，已发表的论文中由于前提假设太多，真正有效解决实际问题的方法并不多。我们注意到：无论针对需求动态不确定性的研究，还是智能架构的研究均存在很多明显的不足，离彻底解决实践中由于需求动态不确定性带来的软件分析和设计问题还很遥远 [5,152,163,180,183,186]。根据 Escrivá 等人的文献调查^[190]以及课题组对 190 篇主要文献的分析，目前的研究还存在如下不足之处：

(1) 现有技术对不确定性需求认知能力和模型表示能力有限：由于导致需求动态不确定性的因素很多，这些因素可能是外部的或内部的、主观的或客观的、直接的或间接的等，还有可能是多种因素的综合导致的。在软件工程学术界，研究人员通常对需求做一些假定以去除那些模糊及矛盾的需求，因而导致部分信息的丢失，得到的需求模型往往偏离用户的初衷。目前针对需求动态不确定性的表示和建模方法中，例如贝叶斯模型、部分模型和特征模型等，都存在由于假设带来的信息丢失问题。

(2) 在从不确定需求模型到架构模型的转换过程中存在不完整、不一致、不精确等诸多问题：已有的从需求模型到架构模型的转换方法和工具主要关注从确定性需求到架构转换（例如 UML 建模方法和工具，模型驱动的方法等），但很少有真正能处理不确定性需求模型到架构转换方法。有些方法尽管考虑到不确定性需求模型到架构转换问题，但仍然存着转换过程的不完整、不一致、不精确等问题：

(3) 在架构设计和演化过程中处理不确定性需求存在代价大的问题：自适应架构是目前处理不确定性需求的最有效方法（很多智能架构本质上属于自适应架构），目前的自适应架构思想来源于自适应软件的设计，其核心思想是基于知识库的决策、规划来实现架构自



适应。现有方法和工具依赖于受限的知识库，知识库的知识来源单一、知识类型有限、缺乏真正有价值的知识，因此导致知识库的作用有限。另外，由于缺少有效的在线评估和验证手段，使得架构在演化和优化过程面临反复的重构过程，增加了架构演化与自适应的成本。

(4) 目前自适应软件架构理论方法众多，研究人员之间、研究人员与工程人员之间、以及工程人员之间均没有形成统一的共识。虽然很多人认为自适应架构是解决需求动态不确定性的主要方法，并提出了多种软件自适应方法，但每种方法都存在自身的不足。例如，基于控制理论的自适应软件架构方法中，由于控制理论软件实现往往是随机的，该方法在实践中通常有效，但是难以理解和推断所得到的自适应软件及其控制器的期望属性和行为。此外，有些方法的研究不具有持续性，有些方法过度依赖于不合实际的假设（对实际不确定性问题的高度抽象），因此这些方法只具有理论上的意义，缺乏实践应用价值。

为了有效解决由于不准确、不一致、不完整、不稳定需求描述带来的需求动态不确定性问题，满足在随时随地发生的确定性需求和不确定性需求，以及由于不可预知的因素导致的不确定性需求，使得系统的行为尽量达到理想的状态，软件架构的设计和演化应该是一个在线学习、在线决策、在线重构和在线演化过程。现有的各种自适应软件架构理论很少支持架构具有这种能力、绝大部分尚不支持这种能力。

本项目将围绕“软件工程需求动态不确定性及智能架构理论与方法”开展深入系统的研究工作。通过本项目的实施，课题组力争提出适用于不确定性需求的软件工程过程新模型，在传统的管理过程模型或者敏捷过程模型加入一些新的方法和技巧处理运行数据和知识，通过引入在线学习新的需求、在线架构评估和验证、在线系统行为监控、在线软件架构演化和优化等手段提升软件架构的智能化水平，探索一系列面向需求动态不确定性的新型智能架构理论与方法。

参考文献

- [1] Ziv H, Richardson D, and Klösch R. *The uncertainty principle in software engineering*. In: Proc. of the 19th International Conference on Software Engineering (ICSE 1997), 1997, pages 33-43.
- [2] Fehlmann T, Santillo L. *Uncertainty of software requirements*. In: Proc. of the Software Measurement European Forum, 2007, pages 199-209.
- [3] Garlan D. *Software engineering in an uncertain world*. In: Proc. of the Workshop on Future of Software Engineering Research, at the 18th ACM SIG-SOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2010), Santa Fe, NM, USA, November 7-11, 2010, pages 125-128.
- [4] Giese H, Bencomo N, and Pasquale L, et al. *Living with uncertainty in the age of runtime models*. In: Proc. of the Models@run.time - Foundations, Applications, and Roadmaps, LNCS 8378, 2011, pages 47-100.
- [5] Benslimane Y, Yang Z, and Bahli B. *Requirements uncertainty and standardization in IS development projects: a survey of the IT sector in China*. In: Proc. of the Industrial Engineering and Engineering management conference, 2010, pages 1097-1101.
- [6] Nolan A J, Abrah S, and Clements P C et al. *Managing requirements uncertainty in engine control systems development*. In: Proc. of the 19th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2011), Trento, Italy, August 29 - September 2, 2011, pages 259-264.
- [7] Ebert C and Man J D. *Requirements uncertainty: influence factors and concrete improvements*. In: Proc. of the 27th International Conference on Software Engineering (ICSE 2005), 15-21 May 2005, St. Louis, Missouri, USA, 2005, pages 553-560.
- [8] Elbaum S and Rosenblum D S. *Known Unknowns: Testing in the presence of uncertainty*. In: Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2014), 2014, pages 833-836.
- [9] Salay R, Chechik M, and Horko J, et al. *Managing requirements uncertainty with partial models*. Requirements Engineering, 2013. 18(2):107-128.
- [10] Noppen J. *Imperfect information in software design processes*. Ph.D thesis, University of Twente, 2007.
- [11] Esfahani N and Malek S. *Uncertainty in self-adaptive software systems*. In: Proc. of the Software Engineering for Self-Adaptive Systems II - International Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, LNCS 7475, 2010, pages 214-238.
- [12] Knight F H. *Risk, uncertainty, and profit*. Boston: Hart, Schaffner & Marx, 1992.
- [13] Bell T E and Thayer T A. *Software requirements: are they really a problem?* In: Proc. of the 2nd International Conference on Software Engineering (ICSE 1976), San Francisco, 1976, pages 61-68.
- [14] Boehm B W. *Software engineering economics*. Prentice-Hall, 1981.
- [15] Letier E, Stefan D, and Barr E T. *Uncertainty, risk, and information value in software requirements and architecture*. In: Proc. of the 36th International Conference on Software Engineering (ICSE 2014), 2014, pages 883-894.



- [16] 孙昌爱, 金茂忠, 刘超. 软件体系结构研究综述. 软件学报, 2002, 13(7):1228-1237.
- [17] <http://www-users.math.umn.edu/~arnold/disasters/ariane5rep.html>
- [18] <http://www.patentexp.com>, Google 隐私案概述及对欧洲个人数据保护的影响.
- [19] <http://special.csdnmcms.csdn.net/security/>
- [20] Sillitti A, Ceschi M, and Russo B, et al. *Managing uncertainty in requirements: a survey in documentation-driven and agile companies*. In: Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Software Metrics, 19-22 September 2005, Como Italy, 2005, pages 10-17.
- [21] Nidumolu S R. *Standardization, requirements uncertainty and software project performance*. Information & Management, 31(3):135-150, 1996.
- [22] Horkoff J, Salay R, and Chechik M, et al. *Supporting early decision-making in the presence of uncertainty*. In: Proc. of the 22nd International Requirements Engineering Conference (ICSE 2014), 2014, pages 33-42.
- [23] Dey S and Lee S W. *From requirements elicitation to variability analysis using repertory grid: A cognitive approach*. In: Proc. of the 23rd International Requirements Engineering Conference (RE 2015), 2015, pages 46-55.
- [24] Shi L, Wang Q, and Li M. *Learning from evolution history to predict future requirement changes*. In: Proc. of the 21st International Requirements Engineering Conference (RE 2013), 2013, pages 135-144.
- [25] Alrajeh D, van Lamsweerde A, and Kramer J, et al. *Risk-driven revision of requirements models*. In: Proc. of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016), 2016, pages 855-865.
- [26] Rashid A, Naqvi S A A, and Ramdhany R, et al. *Discovering "unknown known" security requirements*. In: Proc. of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016), 2016, pages 866-876.
- [27] 孟祥武, 王凡, 史艳翠, 张玉洁. 移动用户需求获取技术及其应用. 软件学报, 2014, 25(3): 439-456.
- [28] 高洁, 卓汉魁, 李磊. 基于不确定性动作模型学习理论的软件需求获取方法. 计算机科学, 2012, 39(8): 141-146, 177.
- [29] Famelis M, Salay R, and Chechik M. *Partial models: Towards modeling and reasoning with uncertainty*. In: Proc. of the 34th International Conference on Software Engineering (ICSE 2012). IEEE, 2012, pages 573-583.
- [30] Massacci F and Tran L M S. *An approach for decision support on the uncertainty in feature model evolution*. In: Proc. of the 22nd International Requirements Engineering Conference (RE 2014), 2014, pages 93-102.
- [31] 刘春, 张伟, 赵海燕, 金芝. 基于反馈控制的软件适应性需求的识别与分析. 软件学报, 2015, 26(4): 713-729.
- [32] Vierhauser M, Rabiser R, and Grünbacher P, et al. *A requirements monitoring model for systems of systems*. In: Proc. of the 23rd International Requirements Engineering Conference (RE 2015), 2015, pages 96-105.
- [33] 李引, 李娟, 李明树. 动态需求跟踪方法及跟踪精度问题研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 177-192.
- [34] Arora C, Sabetzadeh M, and Goknil A, et al. *NARCIA: an automated tool for change impact analysis in natural language requirements*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 962-965.
- [35] Yang H, De Roeck A N, and Gervasi V, et al. *Speculative requirements: Automatic detection of uncertainty in natural language requirements*. In: Proc. of the 20th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2012), Chicago, IL, USA, September 24-28, 2012, pages 11-20.
- [36] Bencomo N, Belaggoun A, and Issarny V. *Bayesian artificial intelligence for tackling uncertainty in self-adaptive systems: the case of dynamic decision networks*. In: Proc. of the 2nd International Workshop on Realizing Artificial Intelligence Synergies in Software Engineering, San Francisco, CA, USA, May 25-26, 2013, pages 7-13.
- [37] Liu J, Wang Q, and Ma Q. *The effects of project uncertainty and risk management on IS development project performance: A vendor perspective*. International Journal of Project Management, 2011, 29(7): 923-933.
- [38] Yazdanshenas A R and Moonen L. *Fine-grained change impact analysis for component-based product families*. In: Proc. of the 28th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM 2012), Trento, Italy, 2012, pages 119-128.
- [39] Rungta N, Person S, and Branchaud J. *A change impact analysis to characterize evolving program behaviors*. In: Proc. of the 28th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM 2012), Trento, Italy, 2012, pages 109-118.
- [40] Bezerra C I M, Andrade R M C, and Monteiro J M S. *Measures for quality evaluation of feature models*. In: Proc. of the 14th International Conference on Software Reuse (ICSR 2015), 2015, pages 282-297.
- [41] Ghezzi C, Pinto L S, and Spoleini P, et al. *Managing non-functional uncertainty via model-driven adaptivity*. In: Proc. of the 2013 International Conference on Software Engineering (ICSE 2013), 2013, pages 33-42.
- [42] Fukamachi T, Ubayashi N, and Hosoi S et al. *Modularity for uncertainty*. In: Proc. of the 2015 IEEE/ACM 7th International Workshop on Modeling in Software Engineering, 2015, pages 7-12.
- [43] Le D M, Lee H, and Kang K C, et al. *Validating consistency between a feature model and its implementation*. In: Proc. of the 12th International Conference on Software Reuse (ICSR 2013), 2013, pages 1-16.
- [44] Ali S and Yue T. *U-test: evolving, modelling and testing realistic uncertain behaviors of cyber-physical systems*. In: Proc. of the Testing in Practice track of International Conference on Software Testing, 2015, pages 1-15.
- [45] 熊伟, 李兵, 陈军, 周华昱. 一种基于预测控制的SaaS系统自适应方法. 计算机学报. 2016, 39(2): 364-376.
- [46] 陈星, 张颖, 张晓东, 武义涵, 黄罡, 梅宏. 基于运行时模型的多样化云资源管理方法. 软件学报, 2014, 25(7): 1476-1491.



- [47] Breivold H P, Crnkovic I, and Larsson M. *A systematic review of software architecture evolution research*. Information and Software Technology, 2012, 54(1): 16-40.
- [48] <https://cs.uwaterloo.ca/~straw03/>
- [49] Mei H. *A complementary approach to requirements engineering—software architecture orientation*. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2000, 25(2):40-45.
- [50] Davor S. *Architecture-level requirements specification*. In: Proc. of the 2nd Int'l Software Requirements to Architectures Workshop, 2003, pages 14-19.
- [51] Garlan D and Shaw M. *An introduction to software architecture*. In: Proc. of the Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering Conference, 1993, pages 1-39.
- [52] Kardoš M and Drozdová M. *Analytical method of CIM to PIM transformation in model driven architecture*. Journal of Information And Organizational Sciences, 2010, 34(1): 89-99
- [53] 邵维忠, 杨芙清. *面向对象的系统分析(第二版)*.清华大学出版社, 2007.
- [54] Buhr R. *Use case maps as architectural entities for complex systems*. IEEE Transactions on Software Engineering, 1998, 24(12): 1131-1155.
- [55] Kazman R, Bass L, and Webb M, et al. *SAAM: A method for analyzing the properties of software architectures*. In: Proc. of the 16th international conference on Software engineering (ICSE 1994), 1994, pages 81-90.
- [56] Schindler B, Ibe M, and Vogel M, et al. *CREATE: A co-modeling approach for scenario-based requirements and component-based architectures - A detailed view*. International Journal on Advances in Software, 2014, 7(1 / 2):224-237.
- [57] Landuyt V and Joosen W. *Modularizing early architectural assumptions in scenario-based requirements*. In: Proc. of the International Conference on Fundamental Approaches to Software Engineering, LNCS 8411, 2014, pages 170-184
- [58] Erik H, Book M, and Gruhn V. *Scenario-based architecting with architecture trace diagrams*. In: Proc. of the Fifth International Workshop on Twin Peaks of Requirements and Architecture, 2015, pages 16-19.
- [59] Davis A M. *The design of a family of application-oriented requirements languages*. Computer 1982, 15(5): 21-28.
- [60] Kang K C. *Feature-oriented domain analysis (FODA)*, technical report, CMU/SEI-90-TR-21, 1990, pages 206-207.
- [61] Kang K C. *FORM: A feature-oriented reuse method with domain-specific reference architectures*. Annals of Software Engineering, 1998, 5(1):143-168.
- [62] Turner C R. *A conceptual basis for feature engineering*. Journal of Systems & Software, 1999, 49(1):3-15.
- [63] 刘冬云, 梅宏. *从需求到软件体系结构:一种面向特征的映射方法*. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(3):372-378.
- [64] Zhang W, Mei H, and Zhao H Y, et al. *Transformation from CIM to PIM: A feature-oriented component-based approach*. In: Proc. of the International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, LNCS 3713, 2005, pages 248-263
- [65] http://www.omg.org/gettingstarted/what_is_uml.htm, "QVT: Meta Object Facility (MOF) 2.0 Query/View/Transformation", OMG, 2008.
- [66] Rodríguez A, Eduardo F M, and Piattini M. *Towards CIM to PIM transformation: from Secure Business Processes defined in BPMN to Use-Cases*. In: Proc. of the Business Process Management Conference, LNCS 4714, 2007, pages 408-415.
- [67] Anish P R and Balaji B. *A knowledge-assisted framework to bridge functional and architecturally significant requirements*. In: Proc. of the 4th International Workshop on Twin Peaks of Requirements and Architecture, 2014, pages 14-17.
- [68] Chung L, Nixon B A, and Yu E, et al. *Non-functional requirements in software engineering*. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [69] Brandozzi M and Perry DE. *From goal-oriented requirements to architectural prescriptions: The prescriptor process*. In: Proc. 2nd Int'l Software Requirements to Architectures Workshop, 2003, pages 107-113.
- [70] van Lamsweerde A. *Requirements engineering: from system goals to UML models to software specifications*. Wiley Publishing, 2009.
- [71] Luca S, Cossentino M, and Susi A. *A goal-oriented approach for representing and using design patterns*. Journal of Systems and Software, 2015, 110(1): 136-154.
- [72] Jacobson I and Ng P W. *Aspect-oriented software development with use cases*. Addison Wesley, 2005.
- [73] Chitchyan R, Pinto M, and Rashid A, et al. *Compass: composition-centric mapping of aspectual requirements to architecture*. Transactions on aspect-oriented software development IV. Springer-Verlag, 2007, pages 3-53.
- [74] Oliveira D, Kenia S, and Joyce M S et al. *Extensions of SysML for modeling an aspect oriented software architecture with multiple views*. In: Proc. of the 2013 Tenth International Conference on Information Technology: New Generations, 2013, 35-43.
- [75] Bosch J and Molin P. *Software architecture design: evaluation and transformation*. In: Proc. of the IEEE Conference and Workshop on Engineering of Computer-Based Systems, 1999, pages 4-10.
- [76] Rajasree M S, Reddy P K, and Janakiram D. *Pattern oriented software development: moving seamlessly from requirements to architecture*. In: Proc. of the 2nd Int'l Software Requirements to Architectures Workshop, 2003, pages 54-60.



- [77] Alistair S. *Bridging users' values and requirements to architecture*. In: Proc. of the 3rd International Workshop on the Twin Peaks of Requirements and Architecture (TwinPeaks), 2013, pages 15-21.
- [78] Hofmeister C, Nord R L, and Soni D. *Global analysis: moving from software requirements specification to structural views of the software architecture*. IEE Proceedings-Software, 2005, 152(4): 187-197.
- [79] Medvidovic N, Dashofy EM, and Taylor RN. *The role of middleware in architecture-based software development*. Int'l Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2003, 13(4):367-393.
- [80] Smaling R M. *System architecture analysis and selection under uncertainty*. Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [81] Whittle J, Sawyer P, and Bencomo N et al. *Relax: Incorporating uncertainty into the specification of self-adaptive systems*. In: Proc. of the 17th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2009), 2009, pages 79-88.
- [82] Elkhodary A, Esfahani N, and Malek S. *FUSION: a framework for engineering self-tuning self-adaptive software systems*. In: Proc. of the 8th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of software engineering (FSE 2010), 2010, pages 7-16.
- [83] Baresi L, Pasquale L, and Spoletini P. *Fuzzy goals for requirements-driven adaptation*. In: Proc. of the 18th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2010), 2010, pages 125-134.
- [84] McGhan and Catharine L. *The resilient spacecraft executive: An architecture for risk-aware operations in uncertain environments*. AIAA SPACE Forum 2016-5541.
- [85] Oreizy P, Gorlick M M, and Taylor R N, et al. *An architecture-based approach to self-adaptive software*. IEEE Intelligent Systems, 1999, 14(1):54-62.
- [86] Lassing N, Rijsenbrij D, and van Vliet H. *On software architecture analysis of flexibility, complexity of changes: Size isn't everything*. In: Proc. of the 2nd Nordic Software Architecture Workshop, 1999, pages 1103-1581.
- [87] Lung C H, Bot S, and Kalaichelvan K, et al. *An approach to software architecture analysis for evolution and reusability*. In: Proc. of the 1997 Working Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research, 1997, pages 23-26.
- [88] Williams B J and Carver J C. *Examination of the software architecture change characterization scheme using three empirical studies*. Empirical Software Engineering, 2014 19(2):419-464.
- [89] Madhavji N H. *Environment evolution: The Prism model of changes*. IEEE Transactions on Software Engineering, 1992, 18(5):380-392.
- [90] Kitchenham B A, Travassos G H, and A Von Mayrhauser, et al. *Towards an ontology of software maintenance*. Journal of Software Maintenance: Research and Practice, 1999, 11(6) 365-389.
- [91] Feng T and Jonathan I M. *Applying dynamic change impact analysis in component-based architecture design*. In: Proc. of the 7th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, 2006, pages 57-63.
- [92] Cheung L, Roshandel R, and Medvidovic N, et al. *Early prediction of software component reliability*. In: Proc. of the 30th International Conference on Software Engineering (ICSE 2008), 2008, pages 111-120.
- [93] Janthong N. *A methodology for tracking the impact of changes in (re)designing of the industrial complex product*. In: Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2011, pages 1058-1062.
- [94] Tang A, Jin Y, and Han J. *A rationale-based architecture model for design traceability and reasoning*. Journal of Systems and Software, 2007, 80(6):918-934.
- [95] Qureshi N, Usman M, and Ikram N. *Evidence in software architecture: A systematic literature review*. In: Proc. of the 17th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 2013, pages 97-106.
- [96] 高晖, 张莉, 李琳. *软件体系结构层次的软件适应性预测模型*, 软件学报, 2010, 21(9):2118-2134.
- [97] Costa B, Pires P. F, and Delicato F C, et al. *Evaluating REST architectures-Approach, tooling and guidelines*. Journal of Systems and Software, 2016, 112: 156-180.
- [98] Knodel J and Naab M. *Software architecture evaluation in practice: retrospective on more than 50 architecture evaluations in industry*. In: Proc. of the 11th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2014), Sydney, Australia, 2014, pages 115-124.
- [99] Brosig F, Meier P, and Becker S, et al. *Quantitative evaluation of model-driven performance analysis and simulation of component-based architectures*. IEEE Transactions on Software Engineering, 2015, 41(2): 157-175.
- [100] Kazman R, Bass L, Ivers J, et al. *Architecture evaluation without an architecture: Experience with the smart grid*. In: Proc. of the 33rd International Conference on Software Engineering (ICSE 2011), Waikiki, Honolulu, USA, 2011, pages 663-670.
- [101] Aleti A, Buhnova B, Grunske L, et al. *Software architecture optimization methods: A systematic literature review*. IEEE Transactions on Software Engineering, 2013, 39(5): 658-683.
- [102] Etemaadi R, Lind K, and Heldal R, et al. *Quality-driven optimization of system architecture: industrial case study on an automotive sub-system*. Journal of Systems and Software, 86(10):2559-2573
- [103] van Heesch U and Avgeriou P. *Mature architecting - A survey about the reasoning process of professional architects*. In: Proc. of the 9th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2011), Boulder, Colorado, USA, 2011, pages 260-269
- [104] Xu Y and Liang P. *A Cooperative coevolution approach to automate pattern-based software architectural synthesis*. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2014, 24(10): 1387-1411.



- [105] 崔晓峰, 孙艳春, 梅宏. 以决策为中心的软件体系结构设计方法. 软件学报, 21(6):1196-1207, 2010.
- [106] Sartipi K, Kontogiannis K, and Mavadda F. *A pattern matching framework for software architecture recovery and restructuring*. In: Proc. of the International Workshop on Program Comprehension, 2000, pages 37-47.
- [107] Stoermer C, O'Brien L, and Verhoef C. *Moving towards quality attribute driven software architecture reconstruction*. In: Proc. of the 10th Working Conference on Reverse Engineering (WCRE 2003), 2003, pages 46-56.
- [108] van Deursen A, Hofmeister C, and Koschke R. *Symphony: view-driven software architecture reconstruction*. In: Proc. of the IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2004), 2004, pages 204-209.
- [109] Favre J M. *CacOphoNy: metamodel-driven software architecture reconstruction*. In: Proc. of the Working Conference on Reverse Engineering (WCRE 2004), 2004, pages 204-213.
- [110] Riva C. *Bridging the concrete and logical domains for software architecture reconstruction*. In: Proc. of the IEEE/IFIP Working Conference on Software Architecture (WICSA 2005), 2005, pages 87-96.
- [111] Pollet D, Ducasse S, and Poyet L, et al. *Towards a process-oriented software architecture reconstruction taxonomy*. In: Proc. of the 11th European Conference on Software Maintenance and Reengineering (CSMR 2007), 2007, pages 137-148.
- [112] Ducasse S and Pollet D. *Software architecture reconstruction: A process-oriented taxonomy*. IEEE Transactions on Software Engineering, 35(4):573-591, 2009.
- [113] Andersson J. *Issues in dynamic software architectures*. In: Proc. of the 4th International Software Architecture Workshop, 2000, pages 111-114.
- [114] Ding J. *An approach for modeling and analyzing dynamic software architectures*. In: Proc. of the 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2016, pages 2086-2092.
- [115] Smaali S, Choutri A, and Belala F. *K-maude definition of dynamic software architecture*. In: Proc. of the 1st International Conference on Advanced Aspects of Software Engineering, Constantine, Algeria. CEUR-WS.org, 2014, pages 92-99.
- [116] 陈向东. 动态自适应软件体系结构重配置研究. 计算机科学, 2015, 42(6): 185-188.
- [117] Cavalcante E, Batista T, and Oquendo F. *Supporting dynamic software architectures: from architectural description to implementation*. In: Proc. of the 12th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2015), 2015, pages 31-40.
- [118] 冯珊, 李尧. 基于构件建造信息系统的自适应体系结构. 系统工程与电子技术, 1999 (3):5-9.
- [119] 李阳, 吴朝晖. 一种动态自适应体系结构的研究. 浙江大学学报, 2005, 39(2): 216-220.
- [120] 冯耀东, 黄罡, 梅宏. 一种自适应软件体系结构建模及其实施方法. 北京大学学报 (自然科学版), 2008, 44(1): 67-76.
- [121] Taylor J H and Sayda A F. *An intelligent architecture for integrated control and asset management for industrial processes*. In: Proc. of the IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005, pages 1397-1404.
- [122] Georgas J C and Taylor R N. *Policy-based self-adaptive architectures: a feasibility study in the robotics domain*. In: Proc. of the International Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-managing Systems, 2008, pages 105-112.
- [123] Chiang C H and Chen L H. *A self-adaptive intelligent control system with hierarchical architecture*. Journal of Information Science and Engineering, 2015, 31(3): 1027-1049.
- [124] Niemczyk S and Geihs K. *Adaptive run-time models for groups of autonomous robots*. In: Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 127-133.
- [125] Ma X, Zhou Y, and Pan J, et al. *Constructing self-adaptive systems with polymorphic software architecture*. In: Proc. of the 9th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2007, pages 2-8.
- [126] 常志明, 毛新军, 齐治昌. *Biograph 理论在自适应软件体系结构上的应用*. 计算机学报, 2009, 32(1): 97-106.
- [127] 高晖, 张莉, 李琳. 软件体系结构层次的软件适应性预测模型. 软件学报 2010, 21(9): 2188-2134.
- [128] Wu Y, Wu Y, and Peng X, et al. *Implementing self-adaptive software architecture by reflective component model and dynamic AOP: A case study*. In: Proc. of the 10th International Conference on Quality Software, 2010, pages 288-293.
- [129] Di Marco A, Gallo F, and Inverardi P, et al. *Towards a stem architecture description language for self-adaptive systems*. In: Proc. of the Fourth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2010, pages 269-270.
- [130] Szlenk M, Zalewski A, and Kijas S. *Modelling architectural decisions under changing requirements*. In: Proc. of the Joint Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture and European Conference on Software Architecture, 2012, pages 211-214.
- [131] Mirakhorli M, Fakhry A, and Grechko A, et al. *Archie: a tool for detecting, monitoring, and preserving architecturally significant code*. In: Proc. of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2014), Hong Kong, China, 2014, pages 739-742.
- [132] Groher I and Weinreich R. *A study on architectural decision-making in context*. In: Proc. of the 12th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2015), 2015, pages 11-20.



- [133] Patikirikorala T, Colman A, and Han J, et al. *A systematic survey on the design of self-adaptive software systems using control engineering approaches*. In: Proc. of the 7th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2012, pages 33-42.
- [134] Vogel T and Giese H. *A language for feedback loops in self-adaptive systems: Executable runtime megamodels*. In: Proc. of the 7th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2012, pages 129-138.
- [135] Perrouin G, Morin B, and Chauvel F, et al. *Towards flexible evolution of dynamically adaptive systems*. In: Proc. of the 34th International Conference on Software Engineering (ICSE 2012), 2012, pages 1353-1356.
- [136] Weyns D, Iftikhar M U, and Söderlund J. *Do external feedback loops improve the design of self-adaptive systems? A controlled experiment*. In: Proc. of the 8th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2013, pages 3-12.
- [137] Bailey C, Montrieux L, and De Lemos R, et al. *Run-time generation, transformation, and verification of access control models for self-protection*. In: Proc. of the 9th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2014, pages 135-144.
- [138] Filieri A, Maggio M, and Angelopoulos K, et al. *Software engineering meets control theory*. In: Proc. of the 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 71-82.
- [139] Muccini H, Sharaf M, and Weyns D. *Self-adaptation for cyber-physical systems: a systematic literature review*. In: Proc. of the 11th International Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2016, pages 75-81.
- [140] 杨启亮, 马晓星, 邢建春, 胡昊, 王平, 韩德帅. 软件自适应: 基于控制理论的方法. 计算机学报, 2016, 39(11):2189-2215.
- [141] 周勇, 王苹. 基于SARSA在线规划的软件体系结构自适应. 计算机应用研究, 2012, 29(5):1756-1760.
- [142] 苏世雄, 齐金平. 一种自适应软件体系结构框架模型的建立. 计算机科学, 2015, 42(S2):486-489.
- [143] 苏世雄, 齐金平. 基于强化学习的自适应在线规划的应用研究. 测控技术, 2016, 35(7):124-127.
- [144] Groher I and Weinreich R. *Integrating variability management and software architecture*. In: Proc. of the Joint Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2012) and European Conference on Software Architecture (ECSA 2012), 2012, pages 262-266.
- [145] Shatnawi A, Seriai A, and Sahraoui H. *Recovering architectural variability of a family of product variants*. In: Proc. of the 14th International Conference on Software Reuse (ICSR 2015), 2015, pages 17-33.
- [146] Siegmund N, Grebhahn A, and Apel S, et al. *Performance-influence models for highly configurable systems*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 284-294.
- [147] Behrang F, Cohen M B, and Orso A. *Users beware: preference inconsistencies ahead*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 295-306.
- [148] Xu T, Jin L, and Fan X, et al. *Hey, you have given me too many knobs: understanding and dealing with over-designed configuration in system software*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 307-319.
- [149] Garba M, Noureddine A, and Bashroush R. *MUSA: A scalable multi-touch and multi-perspective variability management tool*. In: Proc. of the 13th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2016), 2016, pages 299-302.
- [150] Fredericks E M. *Automatically hardening a self-adaptive system against uncertainty*. In: Proc. of the 11th International Workshop on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2016, pages 16-27.
- [151] Tamura G, Villegas N M, and Müller H A, et al. *Improving context-awareness in self-adaptation using the DYNAMIC reference model*. In: Proc. of the 8th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, San Francisco, CA, USA, 2013, pages 153-162.
- [152] Angelopoulos K, Souza V E S, and Pimentel J. *Requirements and architectural approaches to adaptive software systems: A comparative study*. In: Proc. of the 8th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, San Francisco, CA, USA, 2013, pages 23-32.
- [153] Arcaini P, Riccobene E, and Scandurra P. *Modeling and analyzing MAPE-K feedback loops for self-adaptation*. In: Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 13-23.
- [154] Esfahani N, Malek S, and Razavi K. *GuideArch: guiding the exploration of architectural solution space under uncertainty*. In: Proc. of the 35th International Conference on Software Engineering (ICSE 2013), 2013, pages 43-52.
- [155] Anish P R, Balasubramaniam B, and Sainani A, et al. *Probing for requirements knowledge to stimulate architectural thinking*. In: Proc. of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016), 2016, pages 843-854.
- [156] Valdeyán J M C and Toro M. *Defeasible argumentation of software architectures*. In: Proc. of the 13th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2016), 2016, pages 115-121.
- [157] Robillard M P and Medvidović N. *Disseminating architectural knowledge on open-source projects: a case study of the book architecture of open-source applications*. In: Proc. of the 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016), 2016, pages 476-487.



- [158] Pascual G G, Pinto M, and Fuentes L. *Run-time adaptation of mobile applications using genetic algorithms*. In: Proc. of the 8th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2013, pages 73-82.
- [159] Bencomo N and Belaggoun A, Issarny V. *Dynamic decision networks for decision-making in self-adaptive systems: a case study*. In: Proc. of the 8th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2013, pages 113-122.
- [160] Amoud M and Roudies O. *MAPE-K-based approach for security@runtime*. In: Proc. of the IEEE International Conference on Software Science, Technology and Engineering, Beer Sheva, Israel, 2016, pages 138-140.
- [161] Cubo J, Gamez N, and Fuentes L, et al. *Composition and self-adaptation of service-based systems with feature models*. In: Proc. of the 12th International Conference on Software Reuse (ICSR 2013), 2013, pages 326-342.
- [162] Pasquale L, Ghezzi C, and Menghi C, et al. *Topology aware adaptive security*. In: Proc. of the 9th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2014, pages 43-48.
- [163] Letier E, Stefan D, and Barr E T. *Uncertainty, risk, and information value in software requirements and architecture*. In: Proc. of the 36th International Conference on Software Engineering (ICSE 2014), 2014, pages 883-894.
- [164] A. Filieri, H. Hoffmann, and M. Maggio. *Automated multi-objective control for self-adaptive software design*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 13-24.
- [165] S. Shevtsov and D. Weyns. *Keep it SIMPLEX: Satisfying multiple goals with guarantees in control-based self-adaptive systems*. In: Proc. of the 24th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2016), Seattle, WA, USA, 2016, pages 229-241.
- [166] Zoghi P, Shtern M, and Litoiu M. *Designing search based adaptive systems: a quantitative approach*. In: Proc. of the 9th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2014, pages 7-16.
- [167] Hassan S, Bencomo N, and Bahsoon R. *Minimizing nasty surprises with better informed decision-making in self-adaptive systems*. In: Proc. of the 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 134-144.
- [168] Coker Z, Garlan D, and Le Goues C. *SASS: Self-adaptation using stochastic search*. In: Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 168-174.
- [169] Iftikhar M U and Weyns D. *Activforms: Active formal models for self-adaptation*. In: Proc. of the 9th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2014, pages 125-134.
- [170] Florio L. *Decentralized self-adaptation in large-scale distributed systems*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 1022-1025.
- [171] 李青山, 王璐, 褚华, 张曼. 一种基于智能体技术的软件自适应动态演化机制. 软件学报, 2015,26(4): 760-777.
- [172] Moreno G A, Cámara J, and Garlan D, et al. *Proactive self-adaptation under uncertainty: A probabilistic model checking approach*. In: Proc. of the 23th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering (FSE 2015), Bergamo, Italy, 2015, pages 1-12.
- [173] Götz S, Gerostathopoulos I, and Krikava F, et al. *Adaptive exchange of distributed partial models@run.time for highly dynamic systems*. In: Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pages 64-70.
- [174] 熊伟, 李兵, 陈军, 周华昱. 一种基于预测控制的 Saas 系统自适应方法. 计算机学报. 2016, 39(2): 364-376.
- [175] 吕晨, 姜伟, 虎嵩林. 面向动态环境的复合服务自适应方法. 计算机学报. 2016, 39(2): 305-322.
- [176] Chen L, Huang L, Li C, et al. *Self-adaptive architecture evolution with model checking: A software cybernetics approach*. Journal of Systems and Software, 2016, 121(3): 101-116.
- [177] Lung C H, Zhang X, and Rajeswaran P. *Improving software performance and reliability in a distributed and concurrent environment with an architecture-based self-adaptive framework*. Journal of Systems and Software, 2016, 121(11): 311-328.
- [178] Cámara J, Lopes A, Garlan D, et al. *Adaptation impact and environment models for architecture-based self-adaptive systems*. Science of Computer Programming, 2016, 127(10):50-75.
- [179] 刘吉伟, 毛新军. 软件运行时可变性动态演化机制研究. 计算机学报, 2016, 39(11): 2216-2235.
- [180] Robertson P and Laddaga R. *The grava self-adaptive architecture: History; design; applications; and challenges*. In: Proc. of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2004, pages 298-303.
- [181] Denaro G, Pezzé M, and Tosi D, et al. *Towards self-adaptive service-oriented architectures*. In: Proc. of the Workshop on Testing, Analysis, and Verification of Web Services and Applications, 2006, pages 10-16.
- [182] Kramer J and Magee J. *A rigorous architectural approach to adaptive software engineering*. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(2): 183-188.



- [183] Salehie M and Tahvildari L. *Self-adaptive software: landscape and research challenges*. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2009, 4(2): 14.
- [184] 接钧靖, 史庭训, 焦文品, 孟繁晶. 自主构件自适应策略的在线定制及动态评估. 软件学报, 2012, 23(4): 802-815.
- [185] 丁博, 王怀民, 史殿习. 构造具备自适应能力的软件. 软件学报, 2013, 24(9): 1981-2000.
- [186] Faniyi F, Lewis P R, Bahsoon R, et al. *Architecting self-aware software systems*. In: Proc. of the 2014 IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA 2014), 2014, pages 91-94.
- [187] 韩德帅, 杨启亮, 邢建春. 一种软件自适应 UML 建模及其形式化验证方法. 软件学报, 2015, 26(4): 730-746.
- [188] Salama M. *Stability of self-adaptive software architectures*. In: Proc. of the 30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2015), 2015, pages 886-889.
- [189] Abbas N, Andersson J, and Ifikhar M U, et al. *Rigorous architectural reasoning for self-adaptive software systems*. In: Proc. of the 1st Workshop on Qualitative Reasoning about Software Architectures, 2016, pages 1-8.
- [190] Macías-Escrivá F D, Haber R, and del Toro R, et al. *Self-adaptive systems: A survey of current approaches, research challenges and applications*. Expert Systems with Applications, 2013, 40(18): 7267-7279.

2. 项目的研究内容、研究目标, 以及拟解决的关键科学问题(此部分为重点阐述内容);

2.1 主要研究内容

在上述立项依据的基础上, 结合项目组现有的研究基础和兴趣领域, 拟定本项目的研究内容包括如下五个方面: 需求动态不确定性分析理解和处理的研究, 如何从不确定性需求到软件架构的映射的研究, 如何进行知识库的构建以及如何构造初始架构模型的研究, 智能架构和架构自适应的研究, 以及支持平台的开发与典型案例分析和验证研究。

(1) 需求动态不确定性分析理解和处理的研究

- 研究如何利用自然语言理解技术及其辅助工具, 从现有的需求描述文档中(含自然语言文字、数据图表和模型等)获取准确需求信息的理论与方法; 研究如何通过数据分析和处理技术找出哪些是模糊数据、哪些是不一致数据, 进一步分析产生模糊数据、不一致数据的原因, 并找出有效的方法来管理数据图表; 研究如何通过各种模型分析和检查技术, 找出哪些模型是不完整的、哪些模型之间是不一致的, 进一步分析原因, 并找出有效的模型完整性和一致性保障方法。
- 研究如何利用模块化和形式化技术进行不确定性需求建模, 研究如何通过不确定性需求的模块化处理, 使得在软件开发和维护过程中, 能够有效控制不确定性需求的影响范围, 在架构设计和演化中起到减少工作量的目的。模块化技术的使用方便了项目相关人员之间的交流, 强化他们对不确定性需求的理解; 研究如何通过形式化技术来验证不确定性需求描述的正确性。
- 研究如何进行环境建模, 捕获环境带来的不确定性问题: 对于软件而言, 环境会对软件的结构和行为施加影响, 软件必须适应环境的变化, 即软件和环境之间存在着交互作用。只有在理解这种交互作用的机理的情况下, 才能建立软件架构模型, 软件也才能根据周围环境的变化不断地自适应地修改自身的结构和行为以使其性能达到最优。因此, 软件 and 环境的交互作用是拟开展项目需要解决的一个关键问题。

(2) 如何从不确定性需求到软件架构的映射的研究

- 研究如何从需求用例中抽取场景: 研究如何从需求用例和用例图中自动抽取场景的方法, 研究如何从场景中自动抽取特征的方法, 研究如何从特征映射到职责的方法, 以及研究如何从职责映射到架构元素的方法。



- 研究如何利用轨迹矩阵来记录和管理上述抽取和映射过程中产生的不同类型中间产品的方法，以及保障抽取和映射过程一致性和完整性的方法。
- 研究可插拔的不确定性接口（pluggable uncertain interface）技术，以及如何通过机器学习和在线决策和重构技术，通过对可插拔的不确定性接口的增、删、改在架构设计和演化过程中来处理不确定性需求。

(3) 如何进行知识库的构建以及如何构造初始架构模型的研究

- 研究如何从相关的历史项目中通过架构恢复和度量评估中获得架构的基本数据、度量数据、问题域的基本数据、以及成功案例（正样本）和失效案例（负样本）；研究如何从专家团队（方案专家、领域专家、架构师等）获得对不确定需求的分析处理以及相应的架构设计方面的经验数据；研究如何通过运行监控和数据分析获得系统运行过程中的动态数据。
- 研究如何在训练数据的基础上通过半监督学习获得有用的知识来构建初始架构模型。这里有两个问题：第一是在数据量不大时，常规的学习算法（数据挖掘，神经网络）不够用，很难得到理想的知识；第二是所要处理的数据过大或频率过大，通常的算法计算费用大，尽管有一些智能算法（如演化算法），可分解为一些小计算模块，但在做预测时不易迅速计算得到需要的知识。所以需要研究如何解决这两个问题。

(4) 智能架构和架构自适应的研究

- 研究如何在训练数据集的基础上，通过训练学习、归纳分类来建立知识库。研究各种知识（例如，架构模式、关联规则、推理规则、问题解决方案对、知识本体、知识图谱等），的表示方法、存取方法和管理机制。
- 研究如何进行基于知识库的在线决策和规划，研究如何借鉴模糊决策理论、多目标规划的基本原理进行决策，并制定架构重构计划。在此过程中，由于存在许多不确定因素，需要对系统的质量和行为做一些预测，包括选取合适的预测模型和合适的参数去进行观察，这些参数的选取应为下一步架构重构和演化做准备。
- 研究如何利用知识库进行评估驱动、面向模式的架构重构。在知识库的基础上，基于架构的评估结果，对达不到质量要求的架构设计需要通过重构使其达到要求；与设计模式可以改进设计质量一样，架构模式的使用可以提高架构设计质量，因此研究如何利用架构模式（但不是强制要求）来指导架构重构。
- 研究如何实施在线评估和优化：在线架构评估主要是对架构的可持续演进性和架构演进效果进行评估，其中架构可持续演进性主要关注架构的演进能力，架构的演进效果主要关注基于当前的架构模型实现的系统有没有达到预期目标。
- 研究如何进行机器学习和模型转换来实现基于特征的自适应架构：软件系统需要调整自身的行为去适应运行时出现的新的需求，或者更明确、更确定的需求。行为的调整体现在参数的选取上，哪些参数需要被优化、以及如何选择合适的参数是个优化过程，同时会涉及到许多互相制约的条件。因此，需要设计一种具有理论基础的严格机制，保证系统在自适应前后的状态一致性。

(5) 支持平台的开发与典型案例分析和验证研究

- 研制集成化的不确定性需求处理和智能架构在线演化和优化平台，包括自动模块化处理、自动抽取场景和特征、自动进行职责分配、自动映射到架构元素的工具；研制自动数据标注和数据结构化处理的工具；研制在线决策、在线规划、在线重构、在线评估和在线优化的工具等；集成一些可用的开源工具用于检查和验证的目的，保障整个处理过程的正确性和有效性。
- 从不同领域选择典型案例进行大规模实验分析和验证，完善理论与方法。



2.2 本项目的研究目标

总体目标：研究如何利用人工智能技术，通过在线学习、在线决策、在线演化和优化，使得目标系统在开发或运行维护过程的任何时段遇到不确定性需求时，可以通过尽可能少的架构重构步骤或尽可能少的重构成本就能满足新出现的不确定性需求。

为了完成总体目标，本项目需要完成以下子目标：（1）借助自然语言处理技术全面分析需求动态不确定性的根源和形成机理，探索有效的认知和获取不确定性的方法，探索如何通过模块化技术来处理不一致、不完整、不准确和不稳定的需求，探索如何保障从不确定性需求到架构的映射的有效性和正确性；（2）利用在线学习方法，通过学习历史项目中处理不确定性需求的各种方法，预测不确定性需求在架构演化中可能对应的动态演化点，寻找可能的架构模式来处理不确定性需求，并提供架构演化和优化指导建议，辅助实施自动化架构重构；（3）构建完善的架构知识库，包括如何刻画不确定性需求的起因、类型、潜在影响和解决方案之间的知识联系，建立严格有效的基于知识库的在线决策和评估机制，为智能架构的在线重构、在线演化和在线优化提供良好的理论基础；（4）开发智能化的支撑平台辅助描写正确的用户需求，对某些重要应用领域案例的在线架构评估、在线架构重构、在线架构演化和在线架构优化提供平台支持。

2.3 拟解决的关键科学问题

（1）不确定性需求的准确认知和有效预测问题：导致需求动态不确定性的因素很多（既可能是外部因素也可能内部因素、既可能是人的因素也可能是其他因素、既可能是直接因素也可能是间接因素等），甚至可能是多种因素的综合，从而导致不确定性需求的认知过程非常复杂，认知的准确性和结果的正确性难以保障。另外，不确定性需求在软件开发和运行维护过程中什么时间发生、什么地方发生都难以预测。传统意义的预测模型（例如组合预测、随机预测等）都存在由于过度假设导致的预测结果不够可靠的问题。因此，如何提高认知的准确性以及如何保证预测的有效性，是本项目拟解决关键科学问题之一。

（2）不确定性需求的动态演化及其对软件架构的影响问题：需求动态不确定性问题本质上是需求的动态演化问题，即动态不确定性体现在新的需求随时随地可能以不确定的形式出现，另一方面，需求到架构的映射过程是连接需求和架构的桥梁，桥梁不稳、风险重重。如何准确识别和分析需求的动态演化、如何预测不确定性需求的影响范围及其对软件架构的影响是本项目拟解决的另一关键科学问题。

（3）面向动态不确定性需求的智能架构演化与优化问题：智能架构演化和优化过程中，需要解决如何针对不确定性需求进行合理的架构设计和重构、如何保证架构评估的有效性、如何使得架构演化满足不确定性需求、如何保证架构在演化过程中逻辑视图、开发视图和编译构建视图之间的一致性，并且保证不同视图的同步更新和协同演化、如何保证以最小的代价进行架构的在线演化和优化、如何选择合适的粒度进行系统的切分、准确地识别出相关模块或子系统等关键问题。因此，本项目拟解决的另一关键科学问题包括架构在线决策的合理性(rationality)、在线评估的可度量性(measurability)、架构演化过程中遵从性(conformance)、一致性(consistency)、架构的可重构性(reconfigurability)和可适配性(adaptability)问题。

3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

3.1 研究方法



本项目将提出一套面向不确定性需求的智能架构设计和演化理论与方法，包括从多维度、多层次获取训练数据，尝试各种机器学习算法和预测模型，归纳智能架构与自适应架构相关的各种知识，构建完善的知识库，基于知识库进行在线决策、在线规划、在线重构、在线评估以及在线演化与优化等。这个过程随着估结果的满足与否、新需求随时随地的出现进行循环，直至获得满意的架构。

研究过程中，还有如下几个方面的考虑：

(1) 理论与方法研究和工具研制相结合：1) 系统研究需求动态不确定性的形成机理、影响分析、建模管理，以及评估预测的理论和方法；系统研究智能架构的理论和方法，包含知识库构建、各种在线学习算法、在线决策和多目标规划理论、在线重构、评估和优化的理论和方法。2) 研制开各种工具和管理平台：包括建模工具、理解和学习工具、影响分析工具、评估工具、重构和优化工具等。

(2) 离线方法和在线方法相结合：在项目实施过程中，从历史项目库获取数据、从专家分析获取经验数据、以及从早期的预测的需求模型到架构模型的转换、以及知识库的构建等采用的离线方法（静态方法）；而获取运行过程数据、在线学习、在线决策、在线重构、评估和优化等均采用在线方法（动态方法）。

(3) 定性方法和定量方法相结合：在需求分析、不确定性需求分析、建模、表示、专家经验数据的获取和均采用定性方法；但在历史项目数据挖掘、架构恢复、分层信息提取、架构度量、在线架构评估等方面采用定量方法。

3.2 技术路线

图2示意了本项目的技术路线。本项目包含三个主要过程，即基于机器学习与归纳的知识库构建（过程一）、基于知识库的智能架构设计和在线演化（过程二）、以及基于特征的架构自适应（过程三）。其中，过程二包含三个主要步骤，即目标系统需求动态不确定性获取和建模（步骤一）、不确定性需求到架构的映射（步骤二）、基于知识库的智能架构演化和优化（步骤三）。此外，本项目将结合大规模开源软件和应用软件进行典型案例分析和验证（在过程四中讨论）。

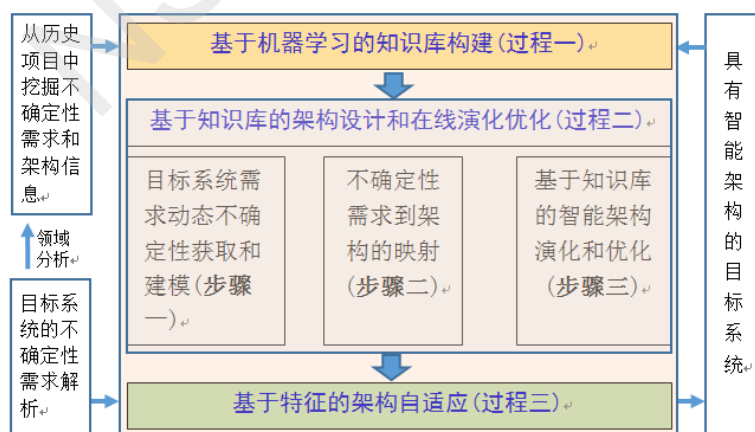


图2. 本项目总体技术路线示意图

过程一：基于机器学习与归纳的知识库构建

在本项目中，知识库是智能架构在线演化以及架构自适应的基础。为了提高基于知识库的架构演化以及自适应的效果，本项目首先采用各种数据挖掘、信息提取、半监督机器学习

以及归纳手段,提炼出与不确定性需求以及智能架构相关的各种知识,在此基础上构建比较全面的知识库。知识库中的知识主要来源包括专家知识、相关领域历史项目、和目标系统自适应过程和动态运行过程三个方面。知识库的构建过程如图3所示:从专家知识和相关领域历史项目中获取的知识将构成知识库中的初始知识集合;从目标系统自适应过程和动态运行过程中获得的数据和信息,通过训练学习和知识归纳形成的知识,对知识库中的知识起到补充和完善的作用。知识库中知识的构成主要包含如下四个方面:1) 架构设计所需的基本知识,包括架构概念、类型、语言和风格等;2) 架构模式和设计模式,这是寻找问题求解方案的最有效方式之一(例如,历史项目中对某个不确定性需求的有效解决方案是什么?);3) 典型案例知识记录了一些典型的成功解决不确定性需求的架构设计(即正样本)和失效的架构设计(即负样本);4) 关联规则的内容比较广泛,包括知识之间的关联规则、数据关联、演化关联等。

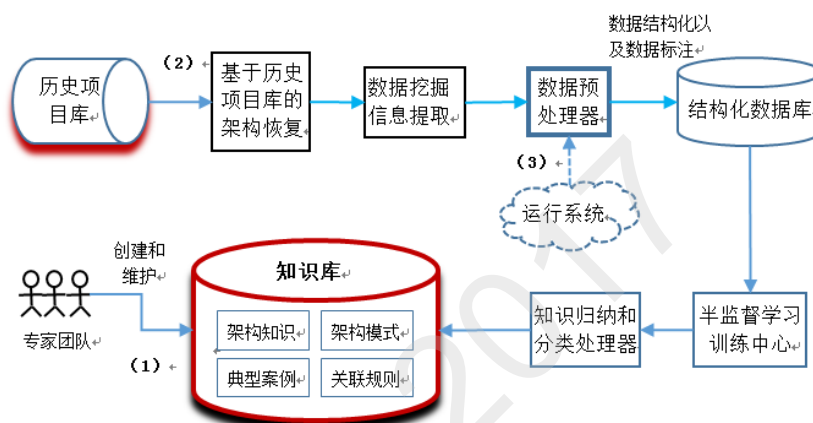


图3. 知识库的构建过程

(1) 来自于专家的知识:需求工程专家、架构专家以及领域专家等,可以通过对用户需求和问题域的分析,给出很多很有经验的知识。例如,这个领域中的某些不确定需求在架构设计中是如何解决的?专家认为可能用某种架构模式就能解决。

(2) 来自于相关领域历史项目的知识:基于历史项目库的架构恢复及分层次信息提取过程如图4所示。核心思路是:从软件系统的源代码中恢复软件架构,在恢复过程中需要结合其他信息(包括工程目录、编译/构建过程、架构师对架构的描述)进行恢复架构的完善和校验,以便获得更加精确、更接近实际的软件架构。从恢复过程的不同层次进行数据挖掘和信息提取,交给数据预处理器进行数据结构化处理和标注处理,然后由半监督学习训练中心进行学习和知识归纳分类,形成各种有用的知识。

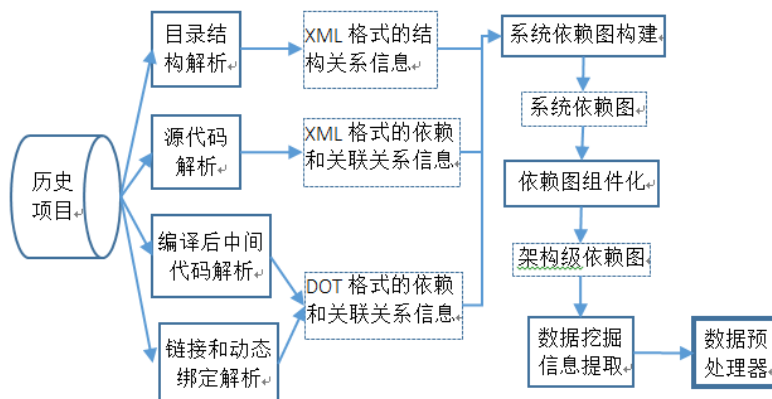


图4. 基于历史项目库的架构恢复及分层次信息提取过程



(3) 来自于目标系统自适应过程和动态运行过程中的知识：在架构自适应过程中（过程三），首先捕获目标系统动态运行过程中的自适应数据，包括行为数据、环境数据和质量相关数据；然后，对相关数据进行预处理后再将其存放到训练数据集中，为将来学习增加训练数据；同时进行度量评估和效果分析，判断在目前原型架构基础上实现的系统是否满足用户需求以及在不确定性需求的处理能力是否得到用户的认可。如果用户满意，则说明目前的架构满足要求，整个过程结束；否则，再进入过程二，进一步进行智能化架构在线演化与优化，获得更好的智能架构。这方面的工作可以使得知识库中的知识不断得到补充和完善，基于该知识库的智能架构决策更加合理、演化和优化更加有效。

过程二：基于知识库的智能架构设计与在线演化

在图 2 示意的技术路线图中，基于知识库的智能架构设计与在线演化是核心过程，主要用来进行基于知识库的架构早期设计和智能化架构演化和优化。该过程由目标系统不确定性需求分析和需求获取（步骤一）、不确定性需求到架构的映射（步骤二）以及基于知识库的智能化架构演化和优化（步骤三）三个主要步骤构成。

步骤一：目标系统不确定性需求分析和获取

研究如何对目标系统的用户需求进行解析和模块化处理，分析将来可能发生的需求变更（即需求的动态不确定性），以及当不确定性需求发生时如何处理它们。目标系统不确定性需求分析和获取过程如图 5 所示，基本思路是：（1）项目相关人员借助自然语言理解技术、图表分析技术和初始知识库对用户需求进行详细解析。首先要分析和识别出各种导致需求动态不确定性的需求描述（例如，需求描述不一致、不准确、不完整）。其次需要分析和识别出与需求动态不确定性相关的各种潜在因素（例如，内部因素和外部因素），预测这些因素可能带来的需求变更，导致需求不稳定。（2）在需求分析的基础上，进一步对不确定性需求进行分类：哪些是确定性需求？哪些是不确定性需求？还要明确哪些是已知的不确定性需求？哪些是未知的不确定性需求？针对这些需求分类，在需求建模过程中就可以做到模块化处理。模块化处理使得确定性需求在早期架构设计时就可以解决，而对不同类型的不确定性需求在架构设计时可以通过预留各种类型的演化点得以解决。

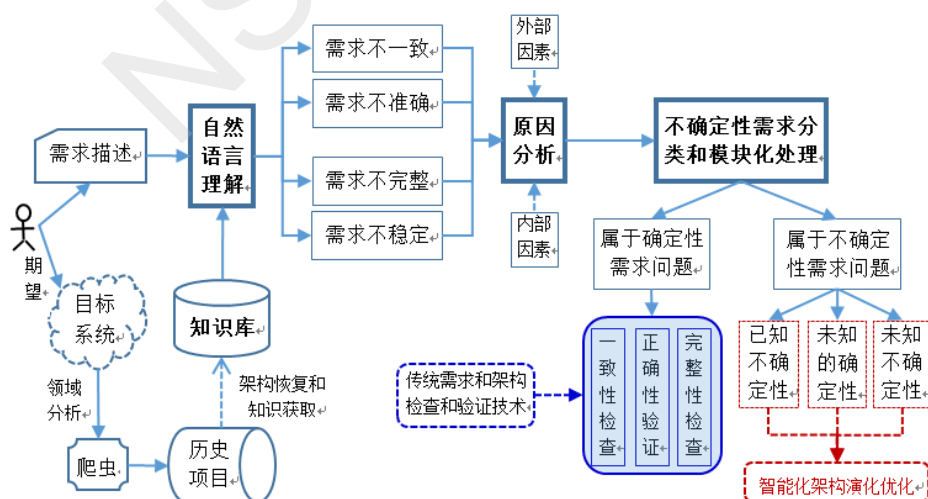


图 5. 不确定性需求分析和获取过程

步骤二：不确定性需求到架构的映射

在需求解析和不确定性需求的模块化处理之后，本项目需要进行如何从需求（特别是不确定性需求）映射到架构的技术方法研究。完整的映射过程包含两个层面：



首先从用户的功能需求描述中（假设用户采用用例和用例图来描述需求）逐步获取所需的架构元素，如图6所示。其中，虚线符号分别代表不确定性需求描述、不确定性场景、不确定性特征、不确定性职责以及不确定性的架构元素。其中架构元素是指构成所需架构的各种元素，包括构件、链接子、约束信息等。

其次从用户的非功能性需求描述中获取更多的与架构设计和演化好坏相关的约束信息和目标信息，并结合获得的架构元素，设计和选取架构风格和模式，确定架构的拓扑结构和整体配置，制定架构设计和维护计划，完成初始架构的设计和实现。

(1) 由于功能需求影响架构设计和演化过程中需要的架构元素种类和数量，本项目首先通过“用例→场景→特征→职责→架构元素”的解析和抽取过程来获取架构设计中所需的各种架构元素。解析和抽取过程比较复杂，工作量比较大，通过完善开源工具和自主开发相结合的方式获得一些辅助工具来实现。需要重点关注的技术点是：如何从场景抽取特征、如何从特征映射到职责、如何从职责映射到架构元素等。

(2) 由于非功能需求会直接影响架构的组成结构（属于架构重配置问题）和架构元素的内部结构（属于架构元素的重构问题），本项目将结合目标系统的功能需求和获取的架构元素集合，并根据非功能需求（主要是指质量需求）来进行质量-功能部署，也就是要设计或选取架构模型（包括选取什么样的架构风格、架构模式、甚至设计模式等）。架构风格确定了，架构的拓扑结构也就基本上确定下来了。架构模式和设计模式分别用来处理特定的用户需求，架构的拓扑结构、架构模式和设计模式使用的情况，是影响能否更好地完成架构设计和重构决策、能否实现用户非功能需求目标的主要因素。

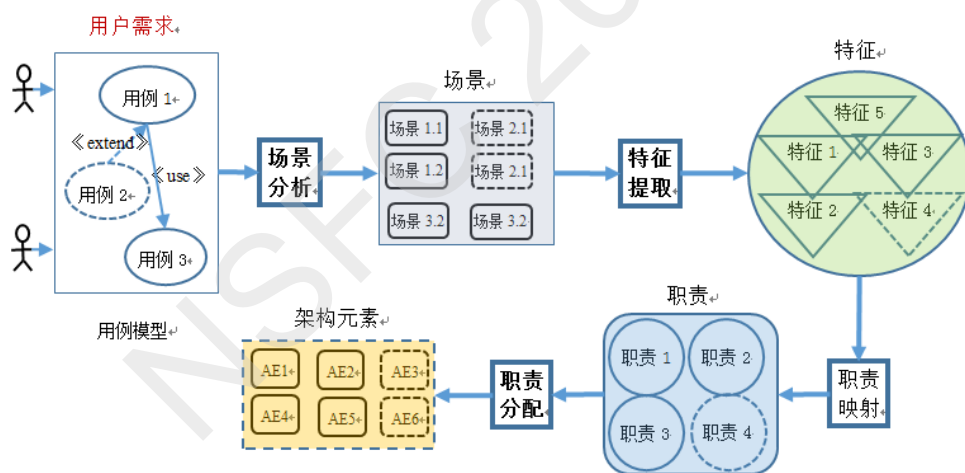


图6. 从需求描述获取架构元素过程示意图

本项目在确定性需求和已知的不确定性需求（例如，多种选择问题）的基础上，结合步骤二（1）和（2）的讨论的方法，构造满足用户需求的初始架构模型。对其他类型的不确定性需求（例如，未知的未知），通过基于知识库的智能架构演化和优化（即步骤三）来处理。

步骤三：基于知识库的智能架构演化和优化

基于知识库的智能架构演化和优化过程如图7所示。基于上述步骤中获得的初始架构模型，结合知识库进行智能化的在线决策和规划、在线重构、在线评估和在线优化过程。这一过程循环往复，直到获得满意的架构模型，再进入基于特征的架构自适应过程。通过分析和观察从自适应过程中获得的数据，判断是否满足目标系统用户的功能性和非功能性需求，以及随时出现的不确定性需求。如果满足这些需求，在线演化和优化过程停止；否则，进入下一过程（过程三）完成大循环，直至用户满意。



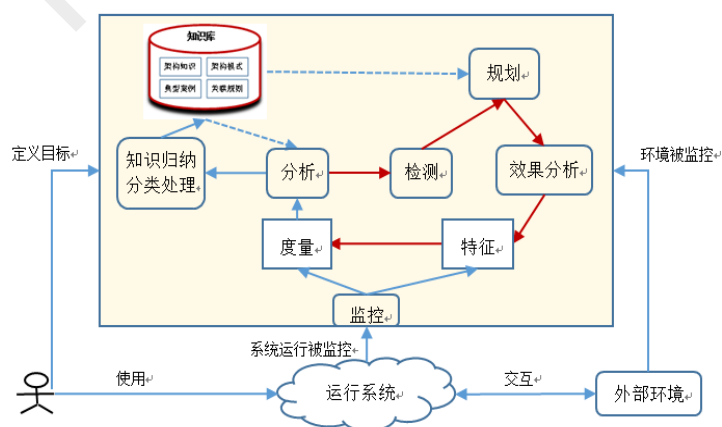
```

graph TD
    User((用户)) -- 用户需求 --> Prediction[不确定性需求预测]
    Prediction --> Model[需求模型]
    Model -- 架构映射 --> Init[初始架构模型]
    Init --> Decision[在线决策]
    KB[知识库] -- 架构知识 --> Decision
    KB -- 架构模式 --> Decision
    KB -- 典型案例 --> Decision
    KB -- 关联规则 --> Decision
    Decision -- "多目标决策<br/>模糊决策等" --> Reconstruct[在线重构]
    Reconstruct --> Eval[在线评估]
    KB -- 架构知识 --> Eval
    KB -- 架构模式 --> Eval
    KB -- 典型案例 --> Eval
    KB -- 关联规则 --> Eval
    Eval --> Optimize[优化的架构模型]
    Optimize -- 架构实现 --> Target((目标系统))
    Target -.-> Prediction

```

过程三：基于特征的架构自适应

特征是对目标系统可以提供的某个能力的一种抽象。一个特征既可能影响系统的功能性属性(例如,打印功能是否可用),也可能影响非功能性的属性(例如,某个授权协议的正确性)。采用特征作为一种抽象可以使得自适应方案独立于实现平台或者应用领域。例如,在基于规则的系统,特征对应着一组规则;在面向服务的系统中,特征对应着某个工作流中的一组服务;在自适应系统中,特征对应着一组自适应策略等。根据过程二中的步骤二,特征通过职责映射到架构元素的某个子集,最终对应实现系统的一个子集。



过程四：典型案例分析和验证

版本: 17020000000290160



多样性、灵活性)描述引起的需求不确定性;电子邮件应用系统例子可用于分析和验证由于不完整描述引起的需求不确定性,等等。总之,我们在选择典型案例进行分析的时候,是有一定针对性的,不是盲目的选择。

(2) **案例分析和验证**:通过使用项目开发的平台和各种相关工具,对选择的案例进行实验,获取中间数据和最终数据,验证原型架构或最终架构的智能化水平和自适应能力,还可以对原型架构或最终架构是否满足系统的功能需求、非功能需求,确定性需求和不确定性需求进行分析评估等。

3.3 可行性分析

首先,对在本项目中用到的关键技术进行可行性分析。由于本项目需要用到的关键技术比较多,有些关键技术的在软件工程领域中普遍运用,也得到了相关可行性验证;另一方面,由于篇幅的限制等原因,所以选择以下五种关键技术做详细分析。

(1) **架构恢复及分层次信息提取技术**:基于历史项目库的架构相关数据获取过程采用了面向架构的逆向工程技术以及分层信息提取技术,具体来讲就是如何利用代码解析、目录结构分析、编译构建过程信息挖掘等手段,尽可能多的发现各种架构元素、以及架构元素之间的各种依赖关系。此项工作的基础来源于东南大学团队与华为公司多年的合作项目。目前从代码解析、目录结构分析、编译构建过程信息挖掘进行架构恢复的工具原型已经完成,并通过开源项目验证和华为产品验证。

(2) **用于处理不确定性需求的模块化技术**:此项技术的核心思想是在对需求进行解析的基础上,根据不确定性需求的类型,把需求进行模块化处理,目的是把不确定性需求分离出来,尽可能集中到少数模块中进行描述。为了处理这些不确定性需求,在架构设计时会增加不确定性接口,将来通过对这些不确定性接口进行扩展、修改或删除来应对不确定性需求。一个简单的示意图如图9所示。

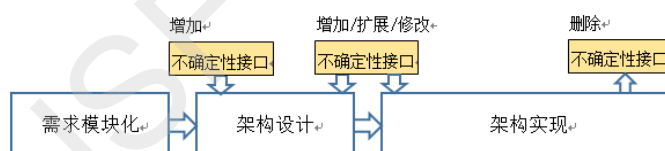


图9. 可插拔的不确定性接口

(3) **用于记录和管理从不确定性需求到智能架构变换的轨迹矩阵技术**:在对不确定性需求进行模块化处理之后,本项目首先在解析用户需求描述的用例图的基础上,抽取场景,在场景的基础上抽取特征,进一步把特征映射到职责,再把职责分配给每个架构元素,如下表3所示。但在上述过程中,抽取过程都不仅仅是一对一的,还存在一对多、多对一和多对多的抽取或映射关系,用表3很难表示这种复杂的关系。本项目引入多层次轨迹矩阵来记录和管理抽取过程、映射过程信息。

表3. 需求和架构元素之间的关系

目标系统 用户需求 (use case)	场景 (Scenario)	特征 (Features)	职责 (Responsibility)	架构元素 (Architectural elements)	不确定性需求对架构的影响
UC01	S01,S02	F01, F02, F03, F04,...	Res01, Res02, Res03, Res04,...	AE01, AE02, AE03, AE04, AE05,...	新增[AE06], 修改[AE05]
UC02	S04...				
UC03	S11,S12				
...	...				
UC0n	S20...				



轨迹矩阵能够很好地记录和管理上述过程中每个阶段产生的信息之间的复杂关系,为后续的架构设计和演化、甚至架构自身的缺陷检测和定位提供很好的支持。例如,表4表示从需求用例到场景的跟踪矩阵,其中矩阵的列表示与某个需求用例相关的场景,矩阵的行表示与场景相关的需求用例。“1”表示某个需求与某个场景有关系,“0”表示某个需求与某个场景没有关系。红色部分代表了不确定性需求用例和不确定性场景。表5表示从需求用例到架构元素的跟踪矩阵,其中矩阵的列表示与某个需求用例相关的架构元素,矩阵的行表示与架构元素相关的需求用例。其中,[AE05]、[AE06]表示可插拔的不确定接口。根据不确定性需求的具体情形,对这类不确定性接口进行扩展、修改或删除,也可以根据需要增加可插拔的不确定接口。

表4 需求用例到场景的跟踪矩阵

需求用例(UC)/场景 (S)	UC01	UC02	UC03	#UC04
S01	1	0	1	0
S02	1	1	1	0
S03	0	0	1	1
S04	1	1	0	0
[S05]	0	0	0	1
[S06]	0	0	0	1

表5.需求用例到架构元素的跟踪矩阵

需求用例(UC)/架构元素 (AE)	UC01	UC02	UC03	#UC04
AE01	1	0	1	0
AE02	1	1	1	0
AE03	0	0	1	0
AE04	1	1	0	0
[AE05]	1	0	0	1
[AE06]	0	0	0	1

(4) 基于知识库的在线决策和规划技术:在初始原型架构的基础上,利用知识库提供的架构知识、架构设计模式、正负样本和关联规则进行架构的在线决策,进一步制定架构重构规划,结合架构的在线评估,实施对架构的在线优化。在此过程中,合理的架构在线决策和规划是关键步骤。本项目将研究如何结合不确定性需求的类型,采用多种决策方法和规划模型来实现在线决策和规划。可能用到的决策方法包括多组合决策方法、目标决策方法、模糊决策方法、群体决策方法等,用到的决策模型包括动态规划网络、贝叶斯网络、决策树等。可能用到的规划模型包括线性规划、多目标规划、动态规划和随机规划模型等。这些在数学科学领域均有充分研究,项目组的核心成员(李必信、马宗民等)具有良好的统计学背景,可以保障这部分的工作顺利开展和按预期完成。

(5) 特征选择字符串技术:该技术用在过程三中,便于实现基于特征的自适应。基于特征选择字符串的思想,特征模型用来识别当前系统的配置。例如,目前可用的特征设置为“1”,不可用的特征设置为“0”。这样架构自适应就可以建模成从一个特征选择字符串到另一个的转换。例如,1101表示第三个特征在某次自适应过程中没有得到满足,可能是对某个不确定性需求的处理不到位,需要进入新的在线学习、在线决策和规划、在线重构、在线评估和优化的过程,直至出现1111。此项技术的实现比较容易,而且基于特征选择字符串进行效果分析也不难,保证相关研究和技术实现的可行性。

其次,从完成本项目的团队和实验环境进行可行性分析。本项目是基金重点项目,团队成员由来自东南大学、南京航空航天大学 and 北京科技大学的老师 and 研究生构成:项目核心团队包含4名正教授、4名讲师、2名博士后、以及近10名博士生和硕士生。核心成员具有软件工程、人工智能、决策理论、自适应系统等方面多年的研究和开发经验。项目团队有多年与华为、国家电网等大型企业进行合作开发大型软件系统的经验,以及完成国家973、863、国家自然科学基金、军工项目的经历。团队核心成员具有多年的合作经历,在学术研究、人才培养和学科建设等方面有着广泛的合作基础。其中,联合申报的项目“质量需求驱动的软件演化管理和故障探测方法”获得2014年度高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)自然



科学二等奖（李必信[排名第 1]、黄志球[排名第 2]）。获奖项目中的很多关键技术研究成果也为本项目的开展奠定基础。例如，软件演化管理技术、变更影响分析技术以及一致性检测技术等，团队成员都具有良好的前期研究基础。

另外，项目实施过程中所需的各种资源和基础条件均能得到保障，为项目的顺利实施以及任务目标的完成奠定了很好的基础：（1）有很多成功的开源代码库、bug 库（例如 **GitHub**）可以用来作为基础进行架构恢复、信息提取和知识发现；（2）有很多成熟的技术（例如，数据挖掘技术、知识本体技术、知识图谱技术等）可以用来挖掘网络上知识，用于补充和完善知识库；（3）有很多有经验的领域工程专家、需求工程专家以及架构设计专家可以请来进行专家研讨和知识论证等；（4）合作单位有稳定有成熟的实验环境和先进的实验手段。

4. 本项目的特色与创新之处：

（1）**利用模块化思想对不确定性需求进行模块化处理，达到有效控制不确定性需求的影响范围**：需求模块化虽然在传统软件开发过程中经常用来进行功能分解，但在处理不确定性需求方面是一种新的尝试，而且把不确定需求进行模块化处理之后，使得从需求到架构的映射过程中，可以按照传统的处理确定性需求的方法来处理不确定性需求（例如，把不确定性需求映射到可插拔的不确定性接口），也为未来处理随时出现的不确定性需求打下良好的基础，从而保证了映射过程的合理性和有效性。

（2）**利用轨迹矩阵来记录和管理从不确定性需求到架构的映射过程**：实现对整个抽取和映射过程的全记录、全监控；保障了不确定性需求处理过程的透明性，使得当问题出现时，可以很好地进行原因分析、定位缺陷所在的位置。

（3）**基于机器学习的多源异构架构知识发现及推理**：多源异构架构知识来源于机器学习和知识归纳和分类，而机器学习和训练的数据集包括来自历史项目的源代码、目录结构、编译构建过程、领域专家和架构专家的知识以及目标系统自适应过程中获取的数据。由于数据来源广泛、不同数据的表示结构差异很大，需要选择合适的学习算法的知识表示方法。对这些多源、异构的架构知识的发现及推理方法的研究不仅具有创新性、也具有相当的挑战性。

（4）**基于知识融合的架构演化和优化**：本项目在智能架构的演化和优化过程中，需要在各种决策方法中融合不同类型的知识（例如架构基础知识、架构模式和设计模式、正负样本和各种关联规则等），尽可能做到决策的合理性和有效性。

（5）**基于特征的架构自适应**：在 IBM 提出的 MAPE-K 参考模型基础上，进行基于特征的架构自适应，利用“特征选择串”技术进行架构自适应效果分析和评估。这种特征选择串技术不仅简单有效，而且正确可靠，基本原理具有创新性。

5. 年度研究计划及预期研究结果（包括拟组织的重要学术交流活动、国际合作与交流计划等）。

5.1 年度研究计划

（1）2018.01—2018.12：广泛跟踪以下方面最新的研究文献，确定主攻方向，制定研究计划，进行任务的合理分配和人员安排，开展初步理论分析和实验研究，提交年度进展报告：

- 需求动态不确定性和智能架构的最新研究进展：关注相关的理论方法、技术手段的研究进展，挖掘新的问题解决思路，弥补现有方案的不足；
- 熟悉各种机器学习算法和最新算法：关注机器学习中的监督学习和半监督学习算法、以及深度学习、强化学习、Q 学习的最新研究进展，找出实际可行并且效果比较好的机器学习算法，用来对项目中获得的数据进行训练学习，归纳实际可用的有价值的知识；



- 开展 2-3 次项目研讨会，项目负责人向项目组所有成员介绍项目的范围和目标、明确项目的进度和任务安排等。同时，还要结合各成员阶段性学习和研究成果，开展初步的理论方法、技术手段、以及实验方法的研讨，讨论如何搭建实验平台和需要开发哪些工具原型等。接下来就是准备年度报告，总结经验教训。

(2) 2019.01—2019.12: 根据研究计划，围绕研究内容展开广泛的理论和关键技术分析和研究，撰写早期研究方案和研究报告，申请发明专利，开发原型系统，提交年度进展报告：

- 通过与架构专家、其他软件工程专家的交流和研讨，明确构建知识库所需要技术，以及知识库中包含的知识类型、结构和表示，以及知识的存取方式等。在此基础上，研究如何构建初始的知识库以及存放何种知识等。
- 研究如何通过面向架构的逆向工程技术从历史项目恢复架构，以及研究如何利用多维度分层次的信息提取技术来挖掘与不确定性需求和智能架构相关的数据；研究如何利用机器学习算法来学习训练，以此获得想要的架构知识，丰富知识库内容。
- 研究如何结合目标系统的用户需求和领域分析方法，进行不确定性需求的类型分析、原因分析以及对不确定性需求进行模块化处理等；
- 研究如何从需求用例有效抽取场景，从场景有效抽取特征，从特征映射到职责，以及如何把职责映射到架构元素的方法，通过反复实验比较获取准确有效的架构元素集。
- 研究如何利用轨迹矩阵来记录和跟踪管理从不确定性需求用例到架构元素映射过程中的各种中间信息（包括用例、场景、特征、职责和架构元素等），以及研究如何在架构设计和演化优化中通过使用可插拔的不确定性接口来解决不确定性需求。

(3) 2020.01—2020.12: 根据研究计划，针对智能架构演化和优化的理论和关键技术进行深入研究，完善原型系统，进行实验研究，撰写研究论文，申请发明专利，提交年度进展报告：

- 针对具体的动态不确定性需求，分析影响架构设计和演化的各种可能因素，进一步分析处理这类不确定性需求所需的架构元素及架构模式或设计模式等。研究在架构演化过程中如何通过增加、修改、或删除一些可插拔的不确定性接口来处理这类不确定性需求。
- 研究如何完善知识库以及如何通过实验分析选择一些可行且有效的在线决策、在线规划、在线演化、在线评估和在线优化算法。
- 开发基于知识库的智能架构演化和优化工具平台，尽可能实现智能架构有效的在线决策、在线规划、在线演化、在线评估和在线优化。
- 研究基于特征的架构自适应技术，研究如何通过使用“特征选择串”技术来实现自适应效果的分析验证，以及如何结合 MAPE-K 参考模型获得更好的自适应效果。
- 在理论问题和关键技术进行深入研究的基础上，撰写研究论文，申报发明专利，举办国际国内研讨会，开展各种学术交流。

(4) 2021.01—2021.12: 通过大规模的开源软件进行分析和验证，发现可能存在的理论方法或技术手段方面的问题，总结研究过程中的经验和教训，完善理论和关键技术。撰写研究论文，申请发明专利，提交年度进展报告

- 进行典型案例的分析和验证，检验不确定性需求模块化技术、从需求用例到架构元素映射过程、轨迹矩阵、知识库、在线决策算法、所有在线演化和优化措施以及在线评估等的有效性和正确性。
- 通过多个典型案例的分析和验证，找出本项目建立的各种理论方法、技术手段、实验手段、工具平台方面的不足。通过技术研讨会，提出改进建议、制定改进计划、实施全方位修改和完善。



- 在实验分析和验证的基础上，通过研讨会的形式进行经验和教训总结，撰写研究论文，申报发明专利，举办国际国内研讨会，开展广泛学术交流。

(5) 2022.01—2022.12: 寻找合作单位，推广研究成果，利用合作单位的实际项目分析和验证项目中建立的理论方法、技术手段和工具平台。从实践提炼新的研究问题，提交项目结题报告。

- 结合实际的软件项目，从横向和纵向两个角度进行大规模的实验研究和数据分析，对本项目提出的各种技术方法、理论模型和算法进行实证研究，找出进行技术转化有效途径。
- 从理论和关键技术研究、实验研究和工业实践等方面完善本项目的研究成果，总结研究过程中所取得成功经验和失败教训，撰写研究报告和技术报告，并在此基础上撰写相关书籍、学术论文和申报专利、著作权等。
- 撰写项目结题报告，并开展与企业的合作（可以在目前合作的华为公司），通过推广应用本项目的研究成果，找出实际应用中存在的不足，进一步改进和完善技术成果，并凝炼新的研究问题，确定未来研究方向。

5.2 预期研究成果

- (1) 在国内外专业会议和期刊上发表学术论文 30 篇以上（其中 CCF 推荐的 B 类以上国际会议和期刊 20 篇以上），出版专著 1 部。
- (2) 智能架构演化和优化实验支撑平台及多个自动建模、验证等辅助工具。
- (3) 申报专利 20 项，软件著作权 2 项。
- (4) 培养研究生 10~15 名，其中博士生 5~10 名。
- (5) 项目研究报告 1 份。

(二) 研究基础与工作条件

1. 研究基础（与本项目相关的研究工作积累和已取得的研究工作成绩）；

东南大学课题组由 1 名教授、4 名讲师、2 名博士后和多名博士生、硕士生组成。近几年，分别在国家自然科学基金委、江苏省自然科学基金、华为技术有限公司、国家电网江苏省电力公司的资助下，主要开展了两个方面的研究：

(1) **支持全生命周期的软件演化和软件协同演化研究**：主要研究内容包括软件演化对软件复杂性（例如圈复杂度、Halstead 复杂度）、软件兼容性、可维护性以及可靠性等是如何影响的，以及软件开发和演化过程中，不同软件制品之间是如何协同演化的。主要研究成果发表在 FSE 2013、ISSRE 2015、Journal of Systems and Software, Information and Software Technology 和 China Science 等 CCF 推荐 A 类和 B 类会议和期刊上。例如，发表在 FSE 2013 上的论文 An empirical analysis of the co-evolution of schema and code in database applications^[1] 重点讨论了在基于数据库的应用系统中，方案(schema)和代码(code)之间的协同演化问题。大量的实验研究表明，在数据库应用系统中，方案和代码之间的协同演化是一种普遍现象，是一个比较棘手的问题，如果协同演化问题解决不好，会导致出现大量的不一致性问题，不仅给维护带来困难，还会带来很多潜在风险，包括质量风险、成本风险、可靠性风险和安全性风险等。该项工作有助于在智能架构在线演化和优化过程中解决由于协同演化带来的问题，也可以架构自适应过程即时发现不一致性问题等。发表在 ISSRE 2015 的论文“Experience report: How do techniques, programs, and tests impact automated program repair?”^[2] 讨论了技术、程序和测试对自动程序修复是如何影响的？该项研究对智能架构的在线演化提供了很



好的理论分析基础和技术支持的指引。发表在 Journal of Systems and Software 上的论文“Understanding the syntactic rule usage in Java^[3]”和 Information and Software Technology 上的论文“Understanding the API usage in Java^[4]”分别讨论了如何理解 Java 程序中词法规则、语法规则和 API 的使用情况，包括各种规则或基本单元的使用频率和使用关联，以及在解决特定问题（属于需求问题）过程中使用到的词法规则、语法规则、语义规则和 API 的情况。在知识库的构建过程中，上述工作为从历史项目中获取架构模式、架构知识和关联规则等提供了很好的理论方法和技术手段的支持。

另外，在变更影响分析，运行时动态分析和回归测试等方面做过大量研究工作^[5-12]。这些工作在国内外具有较大影响。主要成果发表了 20 多篇高水平论文，获得 20 余项授权发明专利。此项工作的部分成果已经在华为公司的部分产品和工具中得到应用（例如，华为的软件演化和评估系统 1.0【与华为公司多年的合作项目：1 多重因素驱动的软件演化关键技术研究（编号：YB2013120195，时间：2014/04-2016/04）】，JAVA 程序切片系统 1.0）；【程序切片技术合作项目（编号：YB2015060041，时间：2015/07-2016/06）】。该类成果为需求的动态变更检测、变更影响分析以及由于需求变更带来架构调整等提供理论方法和技术手段方面的支持。

（2）软件架构建模、仿真、验证、度量和重构：此项工作主要是在华为技术有限公司的资助下完成的，与华为公司多年的合作项目有：1）架构可持续演进技术合作项目（编号：YBN2016020009，时间：2016/01-2018/12）；2）软件架构咨询项目（编号：YB2014100029，时间：2014/10-2015/10）；3）软件架构建模、仿真和验证系统研发（编号：YB2013040010，时间：2012/12-2013/12）。

该项研发工作取得的主要成果首先包括两个原型系统：1）软件架构仿真、评估和验证系统 1.0，该系统已经交付华为公司，并得到推广运用；2）架构可持续演进评估和重构系统 1.0，该系统已经通过开源软件验证和华为产品验证环节，目前正在进行第二阶段的升级开发。主要成果申报了 10 项发明专利，其中 3 项专利已经获得授权：一种基于 UML 模型的软件架构正确性验证方法（授权号：ZL 2014 1 03190169）；一种基于度量和预测技术的软件架构评估方法（授权号：ZL 2014102712636）；一种基于原型仿真的架构评价方法（授权号：ZL 2014102686928）

该项研究成果为智能架构的在线评估和正确性验证提供了很好的基础支持，同时通过该类研发工作，项目团队积累了丰富的处理架构相关的各种问题的能力。

相关论文如下：

- [1] Dong Qiu, Bixin Li, Zhendong Su. An empirical analysis of the co-evolution of schema and code in database applications. ESEC/SIGSOFT FSE 2013: 125-135
- [2] Xianglong Kong, Lingming Zhang, W. Eric Wong, Bixin Li: Experience report: How do techniques, programs, and tests impact automated program repair? ISSRE 2015: 194-204
- [3] Dong Qiu, Bixin Li, Earl T. Barr, Zhendong Su: Understanding the syntactic rule usage in Java. Journal of Systems and Software 123: 160-172 (2017)
- [4] Dong Qiu, Bixin Li, Hareton Leung: Understanding the API usage in Java. Information & Software Technology 73: 81-100 (2016)
- [5] Lulu Wang, Bixin Li, Hareton Leung: A new method to encode calling contexts with recursions. SCIENCE CHINA Information Sciences 59(5): 052104:1-052104:15 (2016)
- [6] Fei Liu, Bixin Li, Rupesh Nasre: Efficient online cycle detection technique combining with Steensgaard points-to information. Softw., Pract. Exper. 46(5): 601-623 (2016)
- [7] Bixin Li, Lulu Wang, Hareton Leung: Profiling selected paths with loops. SCIENCE CHINA Information Sciences 57(7): 1-15 (2014)
- [8] Bixin Li, Li Liao, Hareton Leung, Rui Song: PHAT: A Preference and Honesty Aware Trust Model for Web Services. IEEE Trans. Network and Service Management 11(3): 363-375 (2014)
- [9] Dong Qiu, Bixin Li, Shunhui Ji, Hareton K. N. Leung: Regression Testing of Web Service: A Systematic Mapping Study. ACM Comput. Surv. 47(2): 21:1-21:46 (2014)
- [10] Bixin Li, Xiaobing Sun, Jacky Keung: FCA-CIA: An approach of using FCA to support cross-level change impact analysis for object oriented Java programs. Information & Software Technology 55(8): 1437-1449 (2013)
- [11] Bixin Li, Xiaobing Sun, Hareton Leung, Sai Zhang: A survey of code-based change impact analysis techniques. Softw. Test., Verif. Reliab. 23(8): 613-646 (2013)



- [12] Bixin Li, Shunhui Ji, Dong Qiu, Hareton Leung, Gongyuan Zhang: Verifying the Concurrent Properties in BPEL Based Web Service Composition Process. IEEE Trans. Network and Service Management 10(4): 410-424 (2013)

相关授权专利如下:

授权专利名称	授权专利号
一种基于路径特征的程序执行轨迹状态自动获取方法	ZL 2014 1 0609913.3
一种用于父子进程间交互的路径剖析方法	ZL 2014 1 0419011.3
一种基于软件路径剖析结果的修改影响分析方法	ZL 2014 1 02815295
一种基于 UML 模型的软件架构正确性验证方法	ZL 2014 1 03190169
一种基于度量和预测技术的软件架构评估方法	ZL 2014102712636
一种基于原型仿真的架构评价方法	ZL 2014102686928
一种基于 SoaML 的云应用正确性验证方法	ZL 2013102262216
一种基于 SBG 的组合服务可靠性的动态预测方法	ZL 201210209600X
一种带环路径的编码、执行及解码方法	ZL 2012101596766
一种云计算环境下的任务调度方法	ZL 2013102760207
一种基于云的嵌入式软件交叉测试方法	ZL 2013 1 0261929.5
一种基于排斥区域的自适应随机测试的方法	ZL 2013 1 0238825.2
一种基于日志的云计算服务可信度评估方法	ZL 2013 1 0147178.4
一种基于信任的组合服务优化方法	ZL 2012 1 0209892.7
一种基于 XCFG 的组合服务可信性演化影响分析方法	ZL 2012 1 0306508.5
一种基于数据依赖的组合服务可信性计算方法	ZL 2012 1 0268698.6
一种基于修改影响分析的回归测试用例生成方法	ZL 2012 1 0270343.0
一种基于用户诚实度的动态 Web 服务信任评估方法	ZL 2012 1 0279363.4
一种基于修改影响分析的部件软件回归测试用例更新方法	ZL 2012 1 0303829.X
一种基于面向对象程序切片谱的错误定位方法	ZL 2012 1 0184233.2
基于 HybridUML 向微分代数程序转换的 CPS 建模与验证方法	ZL 2011 1 03380920
一种基于形式概念分析的软件维护方法	ZL 2011 1 03002679
一种基于微分代数时序动态逻辑的 CPS 属性验证方法	ZL 2011 1 03323078
一种基于模型转换的 CPS 建模与验证方法	ZL 2011 1 03323364
基于 HybridUML 和定理证明的 CPS 自适应性验证方法	ZL 2011 1 03380390
一种基于 BPEL 控制流图的建模方法	ZL 2010 1 0173783.5
一种基于灾变的演化测试的动态优化方法	ZL 2010 1 0198471.X
一种基于层次切片的回归测试用例选择技术	ZL 2010 1 0173787.3

南京航空航天大学课题组由 2 名正教授、2 名讲师和多名博士生和硕士构成,在需求建模、软件智能化以及模糊决策、多目标决策方面有很好的工作积累,为本项目的开展和顺利推进奠定了坚实的基础。该团队的主要工作基础及取得的成果如下:

(1) 在软件建模方面: Web 服务的建模方面,在 ICWS 2009^[1]和 ICWS2010^[2](CCF 推荐 B 类会议)会议上发表了对 Web 服务中事务的建模方法。在 Knowledge-based System (CCF 推荐 C 类期刊)上发表了对云计算中隐私策略的建模^{[3][4]}。在期刊 Journal of Web Services 上发表了对 TCCS 进行代价扩展的研究^[5],提出了一种面向代价的进程代数 PTCCS,并对 Web Service 组合中的代价进行建模与分析。嵌入式软件建模方面,在 QSIC 2010 (CCF 推荐 C 类会议)会议上提出了需求规约到软件体系结构模型的转换以及模型的可追踪性方法,提出了 MDA 框架下进程代数规约到 UML-RT 模型的转换方法,使用该方法可以提高 UML-RT 对嵌入式软件建模的精确性^[6];在软件学报上发表了对通过建立 LOTOS 规约到 UML-RT 模型的模型转换,提出一种基于形式化规约生成软件体系结构模型的方法^[7]。在 FSE2014 (CCF 推荐 A 类会议)中给出了一种建立安全需求与软件设计以及软件设计之间的可追踪信息的方法^[8]。在 International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering (CCF 推荐 C 类期刊)上发表了关于对实时系统嵌入式软件的多资源建模方法^[9]。

(2) 在软件验证和分析方面:形式化验证方面,在 Software: Practice and Experience (CCF 推荐 B 类期刊)上发表对航空器控制软件的形式化验证实例研究^[10]。在 Journal of Logic and Computation (CCF 推荐 C 类期刊)^[11]和 Internal Conference on Formal Engineering Methods (ICFEM 2016)^[12](CCF 推荐 C 类会议)提出了使用偏序约简对系统的状态空间进行约简的技



术,从而降低对系统的时序属性验证的复杂度。在 TASE 2015 会议上提出了一种运行时监控、验证、执行以及控制下形式化语义,从而保证程序的安全性^[13];在 Middleware2013 (CCF 推荐 B 类会议)中给出了关于安全需求状态事件故障树的最小割集求解方法^[14]。

软件缺陷预测方面,在 ICSE 2017 中发表了关于对软件接口 API 描述与软件实现一致性的检测方法^[17]。在 International Journal of Approximate Reasoning^[15](CCF 推荐 B 类期刊)和 Knowledge-based Systems^[16](CCF 推荐 C 类期刊)上发表了使用三支决策方法的软件缺陷预测技术。

(3) 在软件智能和大数据方面:在地理信息系统顶级会议 ACM SIGSPATIAL GIS2015 发表了基于 Twitter 数据的城市交通网中的交通拥堵情况预测^[18]。在 CCF B 类会议 ECMLPKDD'2016^[19]和 CCF C 类会议 MDM'2016^[20]上发表了融合 Twitter 数据和车载 GPS 传感器数据的城市交通拥堵程度评估。成果能够更有效准确的对城市规模的交通路网的交通拥堵情况进行评估。

在数据挖掘顶级会议 ACM KDD2014 (CCF A 类)给出了信息传播网络结构推断。研究了在社交网络中如何基于多信息传播模式的多视角信息传播网络结构推断问题^[21]。在数据库会议 DASFAA2015 (CCF B 类)发表了关于跨网络融合的基于迁移学习的信息传播网络结构推断。提出了基于迁移学习的信息传播网络推断算法^[22]。在人工智能顶级会议 AAAI2015 (CCF A 类)和 Knowledge and Information System (CCF B 类)上发表了基于异构数据、特征融合的社交网络中信息传播瀑布的爆发预测。通过研究如何预测社交网络中信息瀑布的爆发时间。提出了一种基于分类方法的信息瀑布爆发时间的预测模型^[23]。在 World Wide Web Journal (CCF B 类)发表了基于社交圈广度的社交网络用户信息传播影响力排序算法研究^[24]。在数据挖掘重要会议 SIAM SDM2014 (CCF B 类)发表了融合文本和结构信息的学术异构网络中多实体未来影响力同排序算法研究^[25]。论文的扩展发辩在数据挖掘重要期刊 ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology 录用。在 AAAI 2013 (CCF A 类)发表了关于基于社交网络中节点封锁的负面信息传播范围最小化研究^[26]。

(4) 在知识和推理方面:对模糊知识表示与推理的研究主要从三个方面展开:模糊描述逻辑,语义 Web 模糊本体以及语义 Web 模糊规则表示与互换。1) 针对模糊描述逻辑,首先,提出了多种具有不同语义表达能力和推理能力的模糊描述逻辑,特别是在国际上首次将模糊数据类型及模糊数据类型定义引入到模糊描述逻辑中,给出了模糊描述逻辑的语法、语义、知识库和推理算法,设计实现了推理机原型系统^[27-29];其次,通过将不同类型的模糊数据库模型(包括:模糊概念数据模型、模糊 XML 数据模型、模糊关系数据库及模糊面向对象数据库模型)映射成相应的模糊描述逻辑知识库模型,利用模糊描述逻辑的推理能力,实现对模糊数据库模型的自动推理,用以检验模糊数据库模型的有效性和合理性^[30-34];最后,提出具有较强语义表达能力模糊描述逻辑的合取查询方法,满足用户对模糊描述逻辑知识库的复杂推理需求^[35,36]。2) 针对语义 Web 模糊本体,首先,提出具有相应模糊描述逻辑作为逻辑基础的模糊本体模型,扩展了语义 Web 本体语言 OWL^[37];其次,提出模糊本体相似性判定方法,并以此为基础提出模糊本体的映射方法,为大规模多源模糊本体的整合提供技术支持^[38];另外,在国际上率先提出了不同类别模糊数据库模型到模糊本体的映射方法,用以实现模糊本体的自动构建;最后,在国际上率先提出了模糊本体到的模糊关系数据库和模糊面向对象数据库的映射方法,用以实现大规模模糊本体的持久化存储^[39]。3) 针对语义 Web 模糊规则表示与互换,首先,提出多种具有不同表达能力的模糊规则语言,给出了其语法、语义及其表示形式;其次,提出一种模糊规则互换格式 RIF,并以此为中心实现了多种类别模糊规则的互换^[40-42]。

相关成果如下:

- [1] Min Yuan, Zhiqiu Huang, Fangxiong Xiao: Modeling and Analysis of Flexible Transaction for Web Services. ICWS 2009: 1008-1009
- [2] Min Yuan, Zhiqiu Huang, Xiang Li, Yan Yan: Towards a Formal Verification Approach for Business Process Coordination. ICWS 2010: 361-368



- [3] Changbo Ke, Zhiqiu Huang: Self-adaptive semantic web service matching method. *Knowl.-Based Syst.* 35: 41-48 (2012)
- [4] Changbo Ke, Zhiqiu Huang, Mei Tang: Supporting negotiation mechanism privacy authority method in cloud computing. *Knowl.-Based Syst.* 51: 48-59 (2013)
- [5] Fangxiong Xiao, Zhiqiu Huang, Zining Cao, Jun Hu, LinYuan Liu, Min Yuan: Unified Modelling Functional and Non-Functional Aspects of Web Services Composition Using PTCCS 1. *Int. J. Web Service Res.* 8(4): 47-80(2011)
- [6] Yi Zhu, Zhiqiu Huang, Zining Cao, Hang Zhou, Min Yuan: An MDE Based Approach for Generating Software Architecture Models from Formal Specifications. *QSIC 2010*: 373-376
- [7] 祝义, 黄志球, 曹子宁, 周航, 刘亚萍. 一种基于形式化规约生成软件体系结构模型的方法, *软件学报*, 2010(11): 2738-2751.
- [8] Shuanglong Kan, Zhiqiu Huang, Zhe Chen: Partial Order Reduction for State/Event Systems. *ICFEM 2016*: 329-345
- [9] Yi Zhu, Zhiqiu Huang, Guangquan Zhang, Hang Zhou, Fangxiong Xiao: Multi-Resource Modeling of Real-Time Software Based on Resource Timed Process Algebra. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering* 26(7): 1099-1116 (2016)
- [10] Zhe Chen, Yi Gu, Zhiqiu Huang, Jun Zheng, Chang Liu, Ziyi Liu: Model checking aircraft controller software: a case study. *Softw., Pract. Exper.* 45(7): 989-1017 (2015)
- [11] Shuanglong Kan, Zhiqiu Huang, Zhe Chen, Weiwei Li, Yutao Huang. Partial Order Reduction for State/Event Systems. *Journal of Logic and Computation*. (Publish online).
- [12] Shuanglong Kan, Zhiqiu Huang, Zhe Chen: Partial Order Reduction for State/Event Systems. *ICFEM 2016*: 329-345
- [13] Zhe Chen, Ou Wei, Zhiqiu Huang, Hongwei Xi: Formal Semantics of Runtime Monitoring, Verification, Enforcement and Control. *TASE 2015*: 63-70
- [14] Bingfeng Xu, Zhiqiu Huang, Jun Hu, Ou Wei, Yu Zhou: Minimal cut sequence generation for state/event fault trees. *Middleware 2013*: 3:1-3:6
- [15] Weiwei Li, Zhiqiu Huang, Xiuyi Jia, Xinye Cai: Neighborhood based decision-theoretic rough set models. *Int. J. Approx. Reasoning* 69: 1-17(2016)
- [16] Weiwei Li, Zhiqiu Huang, Qing Li: Three-way decisions based software defect prediction. *Knowl.-Based Syst.* 91: 263-274 (2016)
- [17] Yu Zhou, Ruihang Gu, Taolue Chen, Zhiqiu Huang, Sebastiano Panichella, Harald Gall. Analyzing APIs Documentation and Code to Detect Directive Defects. *ICSE 2017* (Accepted).
- [18] Senzhang Wang, Lifang He, Leon Stenneth, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Citywide traffic congestion estimation with social media. *SIGSPATIAL/GIS 2015*: 34:1-34:10
- [19] Senzhang Wang, Fengxiang Li, Leon Stenneth, Philip S. Yu: Enhancing Traffic Congestion Estimation with Social Media by Coupled Hidden Markov Model. *ECML/PKDD (2) 2016*: 247-264
- [20] Senzhang Wang, Lifang He, Leon Stenneth, Philip S. Yu, Zhoujun Li, Zhiqiu Huang: Estimating Urban Traffic Congestions with Multi-sourced Data. *MDM 2016*: 82-91
- [21] Senzhang Wang, Xia Hu, Philip S. Yu, Zhoujun Li: MMRate: inferring multi-aspect diffusion networks with multi-pattern cascades. *KDD 2014*: 1246-1255
- [22] Senzhang Wang, Honghui Zhang, Jiawei Zhang, Xiaoming Zhang, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Inferring Diffusion Networks with Sparse Cascades by Structure Transfer. *DASFAA (1) 2015*: 405-421
- [23] Senzhang Wang, Zhao Yan, Xia Hu, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Burst Time Prediction in Cascades. *AAAI 2015*: 325-331
- [24] Senzhang Wang, Fang Wang, Yan Chen, Chunyang Liu, Zhoujun Li, Xiaoming Zhang: Exploiting social circle broadness for influential spreaders identification in social networks. *World Wide Web* 18(3): 681-705 (2015)
- [25] Senzhang Wang, Sihong Xie, Xiaoming Zhang, Zhoujun Li, Philip S. Yu, Xinyu Shu: Future Influence Ranking of Scientific Literature. *SDM 2014*: 749-757
- [26] Senzhang Wang, Xiaojian Zhao, Yan Chen, Zhoujun Li, Kai Zhang, Jiali Xia: Negative Influence Minimizing by Blocking Nodes in Social Networks. *AAAI (Late-Breaking Developments) 2013*
- [27] Ma, Zongmin, Zhang, Fu, Yan, Li and Cheng, Jingwei, 2013, *Fuzzy Knowledge Management for the Semantic Web*, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-39282-5, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*.
- [28] Ma, Z. M., Fu, Zhang, Wang, Hailong and Yan, Li, 2013, "An Overview of Fuzzy Description Logics for the Semantic Web", *Knowledge Engineering Review*, 28 (1): 1-34.
- [29] Zhang, Fu and Ma, Z. M., 2013, "Construction of Fuzzy Ontologies from Fuzzy UML Models", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 6 (3): 442-472.
- [30] Zhang, Fu, Yan, Li and Ma, Z. M., 2012, "Reasoning of Fuzzy Relational Databases with Fuzzy Ontologies", *International Journal of Intelligent Systems*, 27 (6): 613-634.
- [31] Ma, Z. M. and Wang, Xing, 2012, "Rule Interchange in the Semantic Web", *Journal of Information Science and Engineering*, 28 (2): 393-406.
- [32] Zhang, Fu, Ma, Z. M., Yan, Li and Wang, Yu, 2012, "A Description Logic Approach for Representing and Reasoning on Fuzzy Object-oriented Database Models", *Fuzzy Sets and Systems*, 186 (1): 1-25.
- [33] Ma, Z. M., Zhang, Fu, Yan, Li and Cheng, Jingwei, 2011, "Representing and Reasoning on Fuzzy UML Models: A Description Logic Approach", *Expert Systems with Applications*, 38 (3): 2536-2549.
- [34] Zhang, Fu, Ma, Z. M. and Yan, Li, 2011, "Construction of Ontologies from Object-oriented Database Models", *Integrated Computer-Aided Engineering*, 18 (4): 327-347.



- [35] Ma, Z. M., Zhang, Fu, Yan, Li and Cheng, Jingwei, 2011, "Extracting Knowledge from Fuzzy Relational Databases with Description Logic", *Integrated Computer-Aided Engineering*, 18 (2): 181-200.
- [36] 程经纬, 马宗民, 张富, 王星, 2012, 模糊描述逻辑知识库查询蕴涵的判定方法, *计算机学报*, 35 (4): 767-785.
- [37] 张富, 马宗民, 2012, 基于模糊描述逻辑的模糊面向对象数据模型的表示与推理, *软件学报*, 23 (3): 594-612.
- [38] 张富, 严丽, 马宗民, 王星, 2011, 基于模糊描述逻辑的模糊 XML 模型的表示与推理, *计算机学报*, 34 (8): 1437-1451.
- [39] Yan, Li, Zhang, Fu and Ma, Z. M., 2012, "f-SROIQ(G): An Expressive Fuzzy Description Logic Supporting Fuzzy Data Type Group", *Proceedings of the 2012 ACM International Symposium on Applied Computing*, March 26-30, 2012, Riva del Garda (Trento), Italy, 320-325.
- [40] Zhang, Fu, Ma, Z. M., Wang, Yu and Fan, Gaofeng, 2010, "Formal Approach and Automated Tool for Constructing Ontology from Object-Oriented Database Model", *Proceedings of the 2010 ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM 2010)*, Oct. 25-29, 2010, Toronto, Canada, 1329-1332.
- [41] Zhang, Fu, Ma, Z. M., Fan, Gaofeng and Wang, Xing, 2010, "Automatic Fuzzy Semantic Web Ontology Learning from Fuzzy Object-oriented Database Model", *Proceedings of the 2010 International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2010)*, August 30-September 3, 2010, Bilbao, Spain, 16-30.
- [42] Wang, Xing, Ma, Z. M., Zhang, Fu and Yan, Li, 2010, "RIF Centered Rule Interchange in the Semantic Web", *Proceedings of the 2010 International Conference on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2010)*, August 30-September 3, 2010, Bilbao, Spain, 478-486.

北京科技大学课题组是由 1 名教授、1 名讲师、1 名博士后和多名博士生、硕士生构成。近年来, 在国家自然科学基金、北京市自然科学基金、教育部博士点基金、航空基金以及国家科技支撑计划的资助下, 主要开展如下方面的研究工作, 取得了突出的成果:

(1) 在软件架构构造方法与描述技术方面: 课题组提出了七视图的软件架构模型^[1,2], 分别从系统的整体风格、静态结构、动态行为、数据视角、功能定义、实现过程、开发组织七个方面刻画软件系统, 由核心视图(框架视图、逻辑视图、行为视图与数据视图)与辅助视图(功能视图、集成视图与开发视图)组成; 提出了基于模式的多视图软件架构构造方法^[3,4], 将软件结构知识以软件模式的方式引入软件架构构造, 包括基于模式驱动的框架视图构造、基于场景的低层核心视图的构造; 提出一种基于扩展 UML 的多视图软件架构描述方法, 在遵循现有软件架构描述语言的框架基础上, 分别从抽象语法、良构约束、语义解释与规格说明四个方面对 UML 元模型进行扩展, 支持软件架构多视图描述^[5]; 基于逆向工程的基本原理, 提出了由目标、角色、技术、资源与工具五种要素组成的软件架构逆向构造框架, 开发了 JavaBeans 构件化程序的软件架构逆向构造支持环境^[6]。本课题将基于上述研究成果进一步研究如何将设计决策与架构知识引入软件架构构造与演化, 增强软件架构构造与演化的智能特性的关键问题。

(2) 在构件与软件架构运行时演化、适应性软件开发方法与支持工具方面: 课题组通过在构件实现中引入反射与重配置接口支持运行时变化, 提出一种增量化和实用的支持构件与软件架构运行时演化方法^[7]; 课题组近年来围绕服务组合程序的适应性开展了相关研究工作, 开发了基于可变性管理的适应性服务组合方法与支持平台, 扩展了服务组合语言 BPEL 支持在服务组合中定义多种类型的可变性, 扩展了 BPEL 引擎支持运行时服务组合中可变性的执行。相关研究成果引起国际同行的广泛关注, 发表于重要的国际期刊和国际会议^[8-13], 获得了中国计算机学会主办的全国软件原型竞赛三等奖^[14]; 课题组系统地探讨了服务组合的事务需求、以及如何在 BPEL 服务组合中集成与管理事务的问题, 提出了一种面向服务组合的增量及声明式事务集成与管理方案, 研究成果被正式接纳为欧盟框架计划项目 SeCSE 的技术报告^[15-17], 部分研究结果发表于重要的国际期刊和国际会议^[18-21], 授权中国发明专利 1 项^[22]; 此外, 课题组将模型驱动的方法与可变性建模相结合, 提出一种从软件架构到服务组合的适应性服务软件开发方法, 开发了相应的工具支持^[23, 24]。本课题将基于上述构件与软件架构运行时演化技术、服务软件的适应性开发方法方面的技术积累, 进一步探索智能软件架构动态自适应模型与策略关键问题。

相关成果如下:

- [1] 孙昌爱, 金茂忠, 刘超. 软件体系结构研究综述. *软件学报*, 2002, 13(7):1228-1237.



- [2] 孙昌爱. 软件体系结构正逆向构造与描述研究. [博士学位论文]北京: 北京航空航天大学, 2002 年 12 月.
- [3] 孙昌爱, 金茂忠, 刘超. 基于模式的体系结构构造. 第一届全国软件与应用学术会议(NASAC 2002), 北京, 2002 年 11 月 15-16, pp.51-58.
- [4] Chang-ai Sun, Maozhong Jin, Chao Liu. An Object Model for Architectural Pattern. Proceedings of International Symposium on Future Software Technology (ISFST2002), WuHan, China, Oct.23-25, 2002, pp.532-536.
- [5] Chang-ai Sun, Jiannong Cao, Maozhong Jin, Chao Liu, Michael R. LYU. Extendable and Interchangeable Architecture Description of Distributed Systems Using UML and XML, Proceedings of APPT'03, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 2834, Spring, Xiamen, China, Sept.17-19, 2003, pp536-545.
- [6] Chang-ai Sun, Jun Zhou, Jiannong Cao, Maozhong Jin, Chao Liu. ReArchJBs: a Tool for Automated Software Architecture Recovery of JavaBeans-based Applications, Proceedings of the 16th Australian Conference on Software Engineering (ASWEC), IEEE Computer Society, Brisbane, Australia, 2005, pp. 270-280.
- [7] Chang-ai Sun. An incremental and practical approach to enable the component run-time evolution. Proceedings of 12th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC2005), IEEE Computer Society, Taipei, Taiwan, Dec 15-17 2005, pp.603-610.
- [8] Chang-ai Sun, Marco Aiello. Towards variable service compositions using VxBPEL. Proceedings of the 10th International Conference on Software Reuse (ICSR 2008), LNCS 5030, Springer, 2008, pp.257-261.
- [9] Michel Koning, Chang-ai Sun, Marco Sinnema, Paris Avgeriou. VxBPEL: supporting web service variability in BPEL. Information and Software Technology, Elsevier, 2009, 51(2): 258-269.
- [10] Chang-ai Sun, Tieheng Xue, Marco Aiello. ValySeC: a variability analysis tool for adaptive service compositions using VxBPEL. Proceedings of the 5th IEEE Asia-Pacific Service Computing Conference (APSCC 2010), IEEE Computer Society, 2010, pp.307-314.
- [11] Chang-ai Sun, Rowan Rossing, Marco Sinnema, Marco Aiello. Modeling and managing variability of web service-based systems. Journal of Systems and Software, Elsevier, 2010, 83(3): 502-516.
- [12] 孙昌爱, 薛铁恒, 胡长军. VxBPELEngine:一种变化驱动的适应性服务组装引擎. 计算机学报, 2013, 36(12):2441-2454.
- [13] Chang-ai Sun, Pan Wang, Xin Zhang, Marco Aiello. VxBPEL_ODE: A Variability Enhanced Service Composition Engine. Proceedings of APWeb 2014 Workshops, LNCS 8710, Springer, 2014, pp.69-81.
- [14] 孙昌爱, 王攀, 张鑫, 王可, 薛铁恒. 基于可变性管理的适应性服务组装支持平台. 全国软件原型竞赛三等奖, 中国计算机学会主办, 2014年11月.
- [15] Chang-ai Sun, Dieter Hammer. State of the Art on Transaction Management for Service Centric Systems, Technical Report, the University of Groningen & SeCSE Project, Aug. 2006
- [16] Chang-ai Sun, Dieter Hammer. Preliminary Design of Transaction Management for SeCSE, Technical Report, The University of Groningen & SeCSE Project, Aug. 2006.
- [17] Chang-ai Sun, Marco Aiello. A Declarative Approach to Integrating Transaction Management into BPEL Processes, Technical Report IWI PP 2007-7-01, Univ. of Groningen, 2007.
- [18] Chang-ai Sun, Marco Aiello. Requirements and evaluation of protocols and tools for transaction management in service centric systems. Proceedings of the 31st Annual IEEE International Computer Software and Application Conference (COMPSAC 2007), IEEE Computer Society, 2007, pp.461-466.
- [19] Chang-ai Sun. Towards transaction-based reliable service compositions. Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Computer Software and Application Conference (COMPSAC 2009), IEEE Computer Society, 2009, pp.216-221.
- [20] Chang-ai Sun, E. Khoury, Marco Aiello. Transaction management in service-oriented systems: requirements and a proposal. IEEE Transactions on Services Computing, 2011, 4 (2):167-180.
- [21] Chang-ai Sun, Xin Zhang, Yan Shang, Marco Aiello. Integrating Transactions into BPEL Service Compositions: An Aspect-based Approach. ACM Transactions on the Web, ACM Press, 2015, 9(2):9:1-9:31.
- [22] 孙昌爱. 面向服务组装的声明式事务集成方法与系统. 中国发明专利, 专利号: ZL201110034052.7, 授权日:2013年9月25日.
- [23] Xiao He, Yanmei Fu, Chang-ai Sun, Zhiyi Ma, Weizhong Shao. Towards Model-Driven Variability-Based Flexible Service Compositions, Proceedings of 39th Annual IEEE International Computer Software and Application Conference (COMPSAC 2015), IEEE Computer Society, July 1- 5, 2015, Taichung, Taiwan. pp.298-303.
- [24] Chang-ai Sun, Yan Zhao, Lin Pan, Xiao He, Dave Towey. A Transformation-based Approach to Testing Concurrent Programs using UML Activity Diagrams. Software: Practice and Experience, 2016, 46(4):551-576.

2. 工作条件（包括已具备的实验条件，尚缺少的实验条件和拟解决的途径，包括利用国家实验室、国家重点实验室和部门重点实验室等研究基地的计划与落实情况）；



东南大学计算机科学与工程学院拥有“计算机科学与技术”、“软件工程”和“网络空间安全”3个一级学科博士点和博士后流动站。学院建有计算机网络和信息集成教育部重点实验室、江苏省计算机网络技术重点实验室、江苏省网络与信息安全重点实验室、未来网络研究中心、以及云计算和大数据处理中心等交叉学科研究机构。在学校 985 和 211 学科建设中，课题组实验环境得到了进一步改善，已于 2010 年搭建基于 IBM X3850 的虚拟化研究平台，平台可以模拟目前主流操作系统环境开展科学研究工作；数据存储方面，平台具有 2TB 存储容量，能够满足目前课题组对复杂结构大规模数据的存储和管理需要。这些为课题组科学研究工作提供了基本保障。

南京航空航天大学计算机科学与技术学院现有“计算机科学与技术”、“软件工程”、“网络空间安全”3个一级学科博士点，在计算机科学与技术 and 软件工程两个学科均设有博士后流动站。学院设有高安全系统的软件开发与验证技术工信部重点实验室（科研用房 4350 平方米，固定资产 4200 余万元）和安全关键软件国际研究中心。模型驱动开发工具 IBM Rational Rhapsody 平台；运行时检测工具 Parasoft Insure++等。测试工具 IBM Rational Test Realtime、IBM RATIONAL PERFORMANCE TEST、TestComplete Enterprise、Parasoft C++Test、Parasoft Jtest 等。学校图书馆拥有丰富的包括 Elsevier、Kluwer、Springer、IEEE 和 ACM 等国际期刊的电子刊物，为及时了解国内外同行的研究进展提供了便利。

北京科技大学计算机与通信工程学院拥有“计算机科学与技术”、“通信工程”两个一级学科博士学位授予权，拥有“计算机科学与技术”、“软件工程”博士后流动站。在“211 工程”和北京市重点学科等项目的支持下，购置了大批先进的仪器设备，现有设备原值近 4000 万元，实验、研究室使用总面积达到近 4000 平方米，软硬件环境达到国际先进水平。此外，北京科技大学已经购买了国际上主流计算机科学与技术、软件工程方面的电子数据库，订购了国内计算机领域主要的学术刊物，为本项目研究提供了便利的信息检索平台。除了计算机和网络升级与维护外，本课题所需实验条件已经基本就绪。

目前，用于本课题研究的实验环境良好，通过租赁或免费开放的形式，相关重点实验室和数据处理中心可以提供可靠的实验分析和验证，以及数据处理方面的支持。尚缺少的实验条件包括：需要添置 30 台 PC 机、3 台投影仪、10 台笔记本电脑以及 20 台左右的彩色和黑白打印机等；必要时需要购买部分工具软件。拟解决的途径是：购买。

3. 正在承担的与本项目相关的科研项目情况（申请人和项目组主要参与者正在承担的与本项目相关的科研项目情况，包括国家自然科学基金的项目和国家其他科技计划项目，要注明项目的名称和编号、经费来源、起止年月、与本项目的关系及负责的内容等）；

项目申请人李必信教授目前正在承担一项国家自然科学基金面上项目（面向全生命周期的软件协同演化关键技术研究，61572126，2016/1-2019/12，77.6万）。该项目主要围绕这类软件全生命周期中各种软件制品之间的协同演化（co-evolution）问题展开系统深入的研究，主要内容包括：（1）利用数据挖掘方法从软件修改历史库挖掘各种修改关联，并结合类型关联选择和过滤当前软件中存在的各种软件制品关联；（2）利用机器学习方法训练出预测模型，并结合新的修改请求预估当前软件的协同演化范围和成本；（3）利用演化关联矩阵和演化关联图进行一致性检查和保障，并结合开源软件和传统软件评估协同演化效果。上述项目的部分研究成果可以直接在本项目中用来进行数据挖掘、信息提取和知识发现；其他成果可以用来在智能架构演化和优化过程中进行一致性检测和在线评估。在本项目中，李必信教授是本项目的申请人，在本项目中主要负责项目的总体规划、知识库的构建、智能架构的在线演化、在线评估和在线优化等方面的工作。

主要参与者黄志球教授目前正在参与一项国家科技部 863 课题（内存计算系统软件研究与开发，2015AA015303，2015/1-2018/12，76 万元）。该项目主要研究如何使得 CPU 直接从内存而非硬盘上读取数据，并对数据进行计算、分析。此项技术是对传统数据处理方式的



一种加速,是实现商务智能中海量数据分析和实施数据分析的关键应用技术。该项研究与本项目没有直接的关系,但研究过程中一些智能化软件开发理念以及数据挖掘和处理的方式方法有借鉴意义。在本项目中,黄志球教授将主要负责不确定性需求模型的动态构建以及形式化验证,不确定性需求的模块化处理等方面的研究工作。

主要参与者孙昌爱教授目前正在承担一项国家自然科学基金面上项目(面向 SOA 软件的蜕变测试技术研究、61370061、2014/1-2017/12、75 万元),2017 年 12 月结题。该项目旨在研究面向 SOA 软件的蜕变测试技术与支持工具,侧重研究在测试预期不存在情形下如何对 Web 服务及其组合进行有效地测试问题。上述研究的相关成果可以用来解决本项目在开发工具平台和部署过程出现的问题,满足一些特定的测试需求;同时基于 SOA 的应用也将成为本项目在案例分析和验证过程中用到的主要案例。在本项目中,孙昌爱教授主要负责研究在出现需求动态不确定性的情况下,软件架构的动态自适应问题,侧重研究服务软件的智能架构构造与演化问题。

主要参与者王森章博士(讲师)目前正在承担一项国家自然科学基金青年基金项目(基于多源异构在线社交网络平台的信息传播模型研究与传播趋势预测,61602237,2017.1-2019.12,26 万)。该项目主要围绕多源异构在线社交网络平台上信息传播机制分析、轨迹获取以及信息传播趋势分析等展开研究,在此基础上建立信息传播模型和预测模型,达到准确有效预测不确定性信息的目的。上述项目的研究内容与本项目有良好的互补性,研究思路和一些关键技术思想对本项目的研究也有很好的启发作用。王森章博士在本项目中主要负责数据预处理技术、机器学习算法、以及预测技术等方面的研究工作。

主要参与者王璐璐博士(讲师)目前正在承担一项国家自然科学基金青年基金项目(并发程序路径剖析技术研究、61402103、2015/01-2017/12、26 万元),2017 年 12 月结题。该项目主要研究并发程序中各种路径剖析技术,通过路径剖析可以知晓并发程序在动态运行过程中每条路径被执行的频次,这样可以识别关键路径、甚至关键模块,为编译优化、故障检测和定位提供良好的技术支撑。相关研究成果可以用来捕获基于用户需求的目标系统运行和自适应过程中动态信息的作用。在本项目中,王璐璐博士主要负责运行监控、动态数据和信息获取、在线评估等方面的研究。

主要参与者马宗民教授目前没有在研的国家自然科学基金项目和其他国家项目。在本项目中,马宗民教授主要负责知识发现、知识表示、知识归纳和推理、以及基于知识库的在线决策方面的研究。

主要参与者何啸博士(讲师)目前没有在研的国家自然科学基金项目和其他国家项目。在本项目中,何啸博士主要负责架构自适应机理分析和自适应过程监控、数据分析以及在线评估方面的研究。

主要参与者张祥博士(讲师)目前没有在研的国家自然科学基金项目和其他国家项目。在本项目中,张祥博士主要负责知识发现、知识表示和推理方面的研究。

主要参与者李宗花博士后目前没有在研的国家自然科学基金项目和其他国家项目。在本项目中,李宗花博士主要负责需求模型到架构模型转换方面的工作。特别地,不确定性需求到智能架构的转换理论与方法研究是其博士后期间的主要课题。

主要参与者王真博士生目前没有在研的国家自然科学基金项目和其他国家项目。在本项目中,王真主要负责智能架构自适应方面的研究。

其他参与者:廖力博士(讲师)、周颖博士(讲师)以及博士生阚双龙、刘辉辉、孔祥龙、熊壬浩、王桐和邱建鹏等主要参与工具平台的开发和大规模实验分析和验证。

4. 完成国家自然科学基金项目情况(对申请人负责的前一个已结题科学基金项目(项目名称及批准号)完成情况、后续研究进展及



与本申请项目的关系加以详细说明。另附该已结题项目研究工作总结摘要（限 500 字）和相关成果的详细目录）。

申请人李必信教授前一个完成的国家自然科学基金项目（面上项目）：Web 服务组合建模与验证技术研究（批准号：60973149）。

工作总结摘要

本项目在充分理解WEB服务组合行为机理的基础上，研究了如何利用相关的形式化机制刻画组合服务的交互行为，研究了如何从用户端对WEB服务进行集成测试和回归测试，研究如何对WEB服务的各种场景进行建模，研究了如何描述服务组合过程中的各种属性描述机制，研究了如何对动态服务组合进行监控和属性验证等，并建立了一套比较完整的面向WEB服务测试、监控和验证的理论框架和试验支撑平台。通过三年的研究和探索，本项目在理论和实验方面取得了如下主要成果：（1）提出一种扩展的层次的有色Petri网（称为EH-CPN）对组合服务的行为进行建模，并在此基础上生成用于集成测试的测试用例；（2）提出了一种BPEL控制流图（称为XBFG），针对WEB服务的各种演化情况，实现了对组合服务回归测试的测试用例选择和生成；（3）提出了属性序列图（PSC）的理论和方法，针对各种属性（包括安全性、行为一致性、时态属性、实时属性和概率属性等）进行监控和验证，取得良好的效果；（4）提出了一种全路径剖析方法，使得对WEB服务的执行路径的分析和控制得到有效管理；（5）提出了基于形式概念格的修改影响分析方法和基于切片谱的故障定位方法，使得在WEB动态演化过程中修改传播和故障定位更加有效。（6）开发了一个面向WEB服务测试、监控和验证的理论框架和试验支撑平台。主要成果统计（1）出版专著1部；（2）录用和发表论文60篇，其中SCI国际期刊论文8篇（SCI已检索6篇），EI期刊和国际会议论文43篇（EI已检索40篇），ISTP检索6篇；（3）申报发明专利18项（其中17项已经获得授权）；（4）软件著作权登记11项；（5）培养博士生12名（其中2名已经获得博士学位），培养硕士生25名（其中10人已获得硕士学位），指导本科毕业设计10人；（6）6名青年教师在本项目中获得锻炼和提高。

相关成果的详细目录

（1）出版专著

1李必信、张鹏程，组合服务建模、测试与验证，中国科学出版社，2012。

（2）发表论文

- [1] Bixin Li, Xiaobing Sun, and Hareton Lueng. Combining concept lattice with call graph for impact analysis, *Advances in Engineering Software*, 53(1), pp 1-13, 2012.
- [2] Bixin Li, Lulu Wang, Hareton Leung, and Fei Liu. Profiling all paths: A new profiling technique for both cyclic and acyclic paths. *Journal of Systems and Software*, 85(7), pp 1558-1576, 2012.
- [3] Bixin Li, Dong Qiu, Leung, Hareton, Wang, Di, Automatic test case selection for regression testing of composite service based on extensible BPEL flow graph. *Journal of Systems and Software*, 85(6), pp 1300-1324, 2012.
- [4] Bixin Li, Xiaobing Sun, Hareton Lueng, and Sai Zhang. A survey of code-based change impact analysis techniques. *Software Testing, Verification and Reliability*, 53(5), pp 1-34, 2012.
- [5] Chunli Xie, Bixin Li, Li Liao, and Xifeng Wang. Combining control structure and composition condition for web services reliability prediction. *Chinese Journal of Electronics*, 21(3), pp 425-429, 2012.
- [6] 朱敏, 李必信, 陈乔乔, 吉顺慧, 李加凯. 基于微分动态逻辑的CPS建模与属性验证, *电子学报*, 06期, pp1126-1132, 2012.
- [7] 王璐璐, 李必信, 周晓宇. 全路径剖析方法, *软件学报*, 06期, pp 1413-1428, 2012.
- [8] 孙小兵, 李必信, 陶传奇. 基于LoCMD的软件修改分析技术, *软件学报*, 06期, pp 1368-1381, 2012.
- [9] 刘翠翠, 李必信, 齐姗姗, 吴晓娜, 宋锐. BPEL 组合服务可信性评估方法研究, *计算机科学与探索*, 11(12), pp1-11, 2012/11/12.
- [10] 谢春丽, 李必信, 王喜凤, 廖力. Web服务可靠性的阶段模型, *东南大学学报(自然科学版)*, 01期, pp 40-44, 2012.
- [11] 刘翠翠, 邱栋, 李必信. WS-CDL测试路径的生成与排序, *东南大学学报(自然科学版)*, 03期, pp 428-434, 2012.
- [12] Xiaona Wu, Bixin Li, Rui Song, Cuicui Liu, and Shanshan Qi. Trust-based Service Composition and Optimization, *APSEC 2012*, 2012.



- [13] Rui Song, Bixin Li, Xiaona Wu, Cuicui Liu, and Shanshan Qi. A Preference and Honesty Aware Trust Model for Web Services, APSEC 2012, 2012.
- [14] Shanshan Qi, Bixin Li, Cuicui Liu, Xiaona Wu, and Rui Song. A Trust Impact Analysis Model for Composite Service Evolution, APSEC 2012, 2012.
- [15] Cuicui Liu, Bixin Li, Shanshan Qi, Xiaona Wu, and Rui Song. Data Dependency Based Trust Evaluation for BPEL Processes, APSEC 2012, 2012/12.
- [16] Qiangdong Zhang, Bixin Li, and Xiaobing Sun. Mining Call Graph for Change Impact Analysis, SEKE 2012, 2012/6.
- [17] Xiaobing Sun, Bixin Li, and Qiangdong Zhang. A Change Proposal Driven Approach for Changeability Assessment Using Formal Concept Analysis, COMPSAC 2012, 2012.
- [18] Xiaoxiang Zhai, Qiaoqiao Chen, Shunhui Ji, and Bixin Li. A Unified Framework for Modeling and Verifying Cyber Physical Systems, QSIC 2012, 2012.
- [19] Xiaobing Sun, Bixin Li, Chuanqi Tao, and Sai Zhang. HSM-based Change Impact Analysis of Object-Oriented Java Programs. Chinese Journal of Electronics, 20(2), pp 247-251, 2011/4.
- [20] 吉顺慧, 李必信, 周宇. 基于UML的Web组合服务建模与验证, 东南大学学报(自然科学版), 41(2), pp 305-311, 2011.
- [21] 蒋玉婷, 李必信. Novel Technique for Cost Reduction in Mutation Testing. Journal of Southeast University (English Edition), 27(1), pp 17-21, 2011.
- [22] Xifeng Wang, Bixin Li, Li Liao, and Chunli Xie. 基于优化逆问题的Web服务选择, 东南大学学报(自然科学版), 41(3), pp 438-442, 2011.
- [23] 吉顺慧, 李必信, 周宇. 基于顺序图的Web组合服务属性验证. 东南大学学报(自然科学版), 02期, pp 305-311, 2011.
- [24] Chuanqi Tao, Bixin Li, and Jerry Gao. Regression Testing of Component-based Software - A Systematic Practise Based on State Testing , 13th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering, HASE 2011, 2011/11/10-2011/11/12, pp 29-32, Boca Raton, FL, United states, 2011/11/10.
- [25] Xiaobing Sun, Bixin Li. Using formal concept analysis to support change analysis, 2011 26th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2011, 2011/11/6-2011/11/10, pp641-645, Lawrence, KS, United states, 2011/11/6.
- [26] Xifeng Wang, Bixin Li, Li Liao, and Chunli Xie. Ontology-based Reliability Evaluation for Web Service. 35th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2011, 2011/7/18-2011/7/21, pp 348-349, Munich, 2011/7/18.
- [27] Chunli Xie, Bixin Li, and Xifeng Wang. A Staged Model for Web Service Reliability. 35th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2011, 2011/7/18-2011/7/21, pp 564-565, Munich, Germany, 2011/7/18.
- [28] Lulu Wang, Bixin Li. A Technique of Profiling Selective Paths. 35th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2011, 2011/7/18-2011/7/21, pp 588-589, Munich, Germany, 2011/7/18.
- [29] Zhengshan Wang, Bixin Li, Lulu Wang, and Qiao Li. An Effective Approach for Automatic Generation of Class Integration Test Order. 35th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2011, 2011/7/18-2011/7/21, pp 680-681, Munich, 2011/7/18.
- [30] Lulu Wang, Bixin Li. A Technology of Profiling Inter-proccdural Paths. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp31-36, Miami, FL, United states, 2011/7/7.
- [31] Wanzhi Wen, Bixin Li, Xiaobing Sun, and Jiakai Li. Program Slicing Spectrum-based Software Fault Localization. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp 213-218, Miami, FL, United states, 2011/7/7.
- [32] Chuanqi Tao, Bixin Li, and Jerry Gao, A Model-based Approach to Regression Testing of Component-based Software. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp 230-237, Miami, FL, United states, 2011/7/7.
- [33] Chunli Xie, Bixin Li, and Xifeng Wang. A Web Service Reliability Model Based on Birth-death Process. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp 625-628, Miami, FL, United states, 2011/7/7.
- [34] Zhengshan Wang, Bixin Li, Lulu Wang, and Qiao Li. A Brief Survey on Automatic Integration Test Order Generation. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp 254-257, Miami, FL, 2011/7/7.
- [35] Fei Liu and Bixin Li. Multithreaded Pointer Analysis Based on Petri Net. SEKE 2011 - Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering, 2011/7/7-2011/7/9, pp127-130, Miami, FL, United states, 2011/7/7.
- [36] Xiaobing Sun, Bixin Li, Sai Zhang, Chuanqi Tao , Using Lattice of Class and Method Dependence for Change Impact Analysis of Object Oriented Programs , 26th Annual ACM Symposium on Applied Computing, SAC 2011, 2011/3/21-2011/3/24, pp 1439-1444, TaiChung, 2011/3/21.
- [37] Bixin Li, Shunhui Ji, Dong Qiu and Ju Cai. Generating Test Cases of Composite Services Based on OWL-S and EH-CPNs. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 20(7), pp921-941, 2010/11.
- [38] Bixin Li, Xiaocong Fan, Ying Zhou, and Zhiyong Su. Evaluating the Reliability of Web Services Based on



- BPEL Code Structure Analysis and Run-time Information Capture. 17th Asia Pacific Software Engineering Conference: Software for Improving Quality of Life, APSEC 2010, 2010/11/30-2010/12/3, pp 206-215, Sydney, NSW., 2010/11/30.
- [39] Bixin Li, Dong Qiu, Shunhui Ji, and Di Wang. Automatic Test Case Selection and Generation for Regression Testing of Composite Service Based on Extensible BPEL Flow Graph. 2010 IEEE International Conference on Software Maintenance, ICSM 2010, 2010/9/12-2010/9/18, Timisoara, 2010/9/12.
- [40] Chuanqi Tao, Bixin Li, and Xiaobing Sun. An Approach to Regression Test Selection Based on Hierarchical Slicing Technique. 34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference Workshops, COMPSACW 2010, 2010/7/19-2010/7/23, pp 347-352, Seoul, Republic of Korea, 2010/7/19.
- [41] Meng Wang, Bixin Li, Zhenshan Wang, and Xiaoyuan Xie. An Optimization Strategy for Evolutionary Testing Based on Cataclysm. 34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference Workshops, COMPSACW 2010, 2010/7/19-2010/7/23, pp 359-364, Seoul, 2010/7/19.
- [42] Zhengshan Wang, Bixin Li, Lulu Wang, and Meng Wang. Using Coupling Measure Technique and Random Iterative Algorithm for Inter-class Integration Test Order Problem, 34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference Workshops, COMPSACW 2010, 2010/7/19-2010/7/23, pp 329-334, Seoul, 2010/7/19.
- [43] Xiaobing Sun, Bixin Li, Chuanqi Tao, and Wanzhi Wen. Change Impact Analysis Based on a Taxonomy of Change Types. 34th Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 2010, 2010/7/19-2010/7/23, pp 373-382, Seoul, 2010/7/19.

(3) 获得授权专利

- [1] 邱栋,李必信,周颖,王迪. 一种基于BPEL的控制信息流图的建模方法, 中国, ZL 201010173783.5.
- [2] 王猛,李必信,王正山,蒋玉亭,张功源,邱栋,吉顺慧. 一种基于灾变的演化测试的动态优化方法, 中国, ZL 2010 1 0198471.X.
- [3] 陶传奇,李必信,周颖,孙小兵,文万志. 一种基于层次切片的回归测试用例选择技术, 中国, ZL 2010 1 0173787.3.
- [4] 李必信,李加凯,朱敏,吉顺慧,齐珊珊,吴晓娜,刘翠翠. 基于HybridUML和定理证明的CPS自适应性验证方法, 中国, ZL 201110338039.0.
- [5] 李必信,陈乔乔,翟小祥,宋锐,张前东. 基于 HybridUML 向微分代数程序转换的 CPS 建模与验证方法, 中国, ZL 201110338092.0.
- [6] 李必信,朱敏,李加凯,陈乔乔,翟小祥. 一种基于模型转换的CPS建模与验证方法, 中国, ZL 201110332336.4.
- [7] 李必信,翟小祥,李加凯,朱敏,陈乔乔. 一种基于微分代数时态逻辑的CPS属性验证方法, 中国, ZL 201110332307.8.
- [8] 李必信,孙小兵. 一种基于形式概念分析的软件维护方法,中国, ZL 201110300267.9.
- [9] 李必信,张前东,孙小兵,陶传奇,耿国清,兰阳阳. 一种基于修改影响分析的回归测试用例生成方法,中国, ZL 201210270343.0.
- [10] 李必信,齐姗姗. 一种基于XCFG的组合服务可信性演化影响分析方法,中国, ZL 201210306508.5.
- [11] 李必信,陶传奇,孙小兵. 一种基于修改影响分析的部件软件回归测试用例更新方法,中国, ZL 201210303829.X.
- [12] 李必信,宋锐. 一种基于用户诚实度的动态web服务信任评估方法, 中国, ZL 201210279363.4
- [13] 李必信,刘翠翠. 一种基于数据依赖的组合服务可信性计算方法, 中国, ZL 201210268698.6.
- [14] 李必信,吴晓娜,刘翠翠,宋锐,齐姗姗,李超. 一种基于信任的组合服务优化方法, 中国, ZL201210209892.7.
- [15] 李必信,谢春丽. 一种基于SBG的组合服务可靠性的动态预测方法, 中国, ZL 201210209600.X.
- [16] 李必信,王璐璐. 一种带环路径的编码、执行及解码方法, 中国, ZL 201210159676.6.
- [17] 李必信,文万志. 一种基于面向对象程序切片谱的错误定位方法, 中国, ZL 201210184233.2.

(三) 其他需要说明的问题

1. 申请人同年申请不同类型的国家自然科学基金项目情况（列明同年申请的其他项目的项目类型、项目名称信息，并说明与本项目之间的区别与联系）。

无



2. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在同年申请或者参与申请国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，申请或参与申请的其他项目的项目类型、项目名称、单位名称、上述人员在该项目中是申请人还是参与者，并说明单位不一致原因。

无

3. 具有高级专业技术职务（职称）的申请人或者主要参与者是否存在与正在承担的国家自然科学基金项目的单位不一致的情况；如存在上述情况，列明所涉及人员的姓名，正在承担项目的批准号、项目类型、项目名称、单位名称、起止年月，并说明单位不一致原因。

无

4. 其他。

无



李必信 简历

东南大学，09计算机学院，教授

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

1. 1998/2 - 2000/12, 南京大学, 计算机软件, 博士, 导师: 郑国梁
2. 1991/9 - 1994/7, 安徽大学, 基础数学, 硕士, 导师: 张康培
3. 1987/9 - 1991/7, 安徽大学, 数理统计, 学士, 导师:

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

1. 2004/2-至今, 东南大学, 计算机学院, 教授
2. 1994/9-1998/1, 合肥经济技术学院, 基础部, 讲师
3. 2001/4-2003/12, TUCS, NTNU, CWI, 博士后, 合作导师: Ralph Johan Back

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）：

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况：

1. 国家自然科学基金面上项目, 61572126, 面向全生命周期的软件协同演化关键技术研究, 2016/01-2019/12, 77.6万元, 在研, 主持
2. 华为技术有限公司合作项目, YBN2016020009, 架构可持续演进技术合作项目, 2016/04-2018/12, 在研, 主持

代表性研究成果和学术奖励情况

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文

1. 第一作者论文

(1) **Bixin Li**^(#), Xiaobing Sun, Jacky Keung, FCA - CIA: An approach of using FCA to support cross-level change impact analysis for object oriented Java programs, Information and Software Technology, 2013.8.01, 55 (8) : 1437~1449

(2) **Bixin Li**^(*), Qiandong Zhang, Xiaobing Sun, Hareton Leung, Using Water Wave Propagation Phenomenon to Study Software Change Impact Analysis, Advances in Engineering Software, 2013.2.10, 54 (4) : 45~53



(3) **Bixin Li**^(*), Lulu Wang, Hareton Leung, Profiling Selected Paths with Loops, Science China: Information Sciences, 2014.7.1, 57 (7) : 072105:1~072105:15

(4) **Bixin Li**^(*), Lulu Wang, Hareton Leung, Fei Liu, Profiling All Paths: A New Profiling Technique for Both Cyclic and Acyclic Paths, Journal of Systems and Software, 2012.7.01, 85 (7) : 1558~1576

(5) **Bixin Li**^(*), Li Liao, Hareton Leung, Rui Song, PHAT: A Preference and Honesty Awarded Trust Model for Web Services, IEEE Transactions on Network and Service Management, 2014.9.1, 11 (3) : 363~375

(6) **Bixin Li**^(*), Dong Qiu, Hareton Leung, Di Wang, Automatic Test Case Selection for Regression Testing of Composite Service Based on Extensible BPEL Flow Graph, Journal of Systems and Software, 2012.6.01, 85 (6) : 1300~1324

(7) **Bixin Li**^(*), Xiaobing Sun, Hareton Lueng, Combining Concept Lattice with Call Graph for Impact Analysis, Advances in Engineering Software, 2012.11.1, 53 (1) : 1~13

(8) **Bixin Li**^(*), Shunhui Ji, Dong Qiu, Hareton Leung, Gongyuan Zhang, Verifying the Concurrent Properties in BPEL Based Web Service Composition Process, IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013.12.1, 10 (4) : 410~424

(9) **Bixin Li**^(*), Xiaobing Sun, Hareton Lueng, Sai Zhang, A Survey of Code-based Change Impact Analysis Techniques, Software Testing, Verification and Reliability, 2013.5.1, 23 (5) : 613~646

(10) **Bixin Li**^(*), Shunhui Ji, Dong Qiu, Ju Cai, Generating Test Cases of Composite Services Based on OWL-S and EH-CPNs, International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2010.11.01, 20 (7) : 921~941

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）

(1) Dong Qiu, **Bixin Li**^(*), Earl T. Barr, Zhendong Su, Understanding the syntactic rule usage in Java, Journal of Systems and Software, 2017.1.1, 123 (1) : 160~172

(2) Wang, Lulu, **Li, Bixin**^(*), Leung, Hareton, A new method to encode calling contexts with recursions, Science China Information Sciences, 2016.5.01, 59 (5)

(3) Zecheng Li^(#), Li Liao, Hareton Leung, **Bixin Li**, Chao Li, Evaluating the credibility of cloud services, Computers & Electrical Engineering, 2016.6.6



- (4) Dong Qiu^(#), **Bixin Li**, Hareton Leung, Understanding the API usage in Java, Information and Software Technology, 2016.5.01, 73: 81~100
- (5) Xie Chunli, **Li Bixin**^(*), Liao Li, Wang Xifeng, Combining Control Structure and Composition Condition for Web Services Reliability Prediction, Chinese Journal of Electronics, 2012.7.01, 21 (3) : 425~429
- (6) Dong Qiu, **Bixin Li**^(*), Shunhui Ji, Hareton Leung, Regression Testing of Web Service: A Systematic Mapping Study, ACM Computing Surveys, 2014.8.1, 47 (2) : 21:1~21:46
- (7) Pengcheng Zhang, **Bixin Li**^(*), Lars Grunske, Timed Property Sequence Chart, Journal of Systems and Software, 2010.3.01, 83 (3) : 371~390
- (8) Xiaobing Sun, **Bixin Li**^(*), Chuanqi Tao, Sai Zhang, HSM-based Change Impact Analysis of Object-Oriented Java Programs, Chinese Journal of Electronics, 2011.4.01, 20 (2) : 247~251
- (9) 张鹏程, **李必信**^(*), 李雯睿, 时间属性序列图的语法和语义, 软件学报, 2010.01.01, 21 (11) : 2752~2767
- (10) 朱敏, **李必信**, 陈乔乔, 吉顺慧, 李加凯, 基于微分动态逻辑的CPS建模与属性验证, 电子学报, 2012.01.01, (06) : 1126~1132
- (11) 孙小兵, **李必信**^(*), 陶传奇, 基于LoCMD的软件修改分析技术, 软件学报, 2012.01.01, (06) : 1368~1381
- (12) 王璐璐, **李必信**^(*), 周晓宇, 全路径剖析方法, 软件学报, 2012.01.01, (06) : 1413~1428
- (13) 陶传奇^(#), **李必信**, Jerry Gao, 孙小兵, 基于模型的构件软件修改影响分析, 软件学报, 2013.5.15, (05) : 942~960
- (14) 王璐璐^(#), **李必信**, 过程间循环路径剖析方法, 计算机学报, 2013.11.15, (11) : 2224~2235
- (15) 文万志, **李必信**^(*), 孙小兵, 齐姗姗, 基于条件执行切片谱的多错误定位, 计算机研究与发展, 2013.5.1, 50 (5) : 1030~1043
- (16) 陶传奇, **李必信**^(*), Jerry Gao, 基于模型的系统化部件软件修改影响分析, 软件学报, 2013.5.1, 24 (5) : 942~960
- (17) 吉顺慧, **李必信**^(*), 邱栋, 基于XCFG的BPEL数据流属性分析与验证, 电子学报, 2013.7.1, 41 (7) : 1365~1370



(18) 文万志, **李必信**^(*), 一种基于层次切片谱的软件错误定位技术, 软件学报, 2013.5.1, 24 (5): 977~992

(19) 王璐璐^(#), **李必信**, 一种面向有环兴趣路径的过程内剖析方法, 计算机学报, 2014.12.15, (12): 2464~2481

3. 既非第一作者又非通讯作者论文

(1) Sun, Xiaobing^(*), Peng, Xin, Li, Bin, **Li, Bixin**, Wen, Wanzhi, IPSETFUL: an iterative process of selecting test cases for effective fault localization by exploring concept lattice of program spectra, Frontiers of Computer Science, 2016.10.01, 10 (5): 812~831

(2) Xiaobing Sun^(#), **Bixin Li**, Hareton Leung, Bin Li, Junwu Zhu, Static change impact analysis techniques: A comparative study, Journal of Systems and Software, 2015.11.01, 109: 137~149

(3) Xiaobing Sun^(#), **Bixin Li**, Hareton Leung, Bin Li, Yun Li, MSR4SM: Using topic models to effectively mining software repositories for software maintenance tasks, Information and Software Technology, 2015.10.01, 66: 1~12

(4) Xiaobing Sun^(#), Hareton Leung, Bin Li, **Bixin Li**, Change impact analysis and changeability assessment for a change proposal: An empirical study ☆☆, Journal of Systems and Software, 2014.10.01, 96: 51~60

(5) Pengcheng Zhang^(*), Henry Muccini, **Bixin Li**, A Classification and Comparison of Model Checking Software Architecture Techniques, Journal of Systems and Software, 2010.5.01, 83 (5): 723~744

(6) 孙小兵^(#), 李斌, 陈颖, **李必信**, 文万志, 软件修改影响分析研究与进展, 电子学报, 2014.12.15, (12): 2467~2476

(7) 孙小兵^(#), 李云, **李必信**, 文万志, 形式概念分析在软件维护中的应用综述, 电子学报, 2015.7.15, (07): 1399~1406

(8) 陶传奇^(#), **李必信**, Jerry Gao, 构件软件的回归测试复杂性度量, 软件学报, 2015.12.15, (12): 3043~3061

二、会议论文

1. 通讯作者论文(勿与第一作者论文重复)

(1) Dong Qiu, **Bixin Li**^(*), Zhendong Su, An Empirical Analysis of the Co-Evolution of Schema and Code in Database Applications, ESEC/FSE 2013, Russian Federation, 2013.8.21-2013.8.27

三、专著



(1) **李必信**^(*)，周颖，信息物理融合系统导论，科学出版社，30000，2013. 5. 1

(2) **李必信**^{(#) (*)}，张鹏程，组合服务建模、测试与验证，中国科学出版社，460000，2012. 11. 1

四、授权发明专利

(1) **李必信**^(#)，苗意盎，王璐璐，姜雨晴，陈艺，一种用于父子进程间交互信息的路径剖析方法，2017. 03. 01，中国，CN201410419011. 3

(2) 王璐璐^(#)，**李必信**，廖力，周颖，基于路径特征的程序执行轨迹状态自动获取方法，2017. 03. 01，其他国家，CN201410609913. 3

(3) **李必信**^(*)，谢春丽，一种基于SBG的组合服务可靠性的动态预测方法，2016. 05. 04，中国，201210209600. X

(4) **李必信**^(*)，王璐璐，一种带环路径的编码、执行及解码方法，2016. 04. 06，中国，201210159676. 6

(5) **李必信**^(#)，李伟，陶传奇，刘力，喻析蒙，一种云计算环境下的任务调度方法，2016. 01. 13，其他国家，CN201310276020. 7

(6) **李必信**^(#)，耿国清，王璐璐，陶传奇，兰阳阳，司静文，一种基于SoaML的云应用正确性验证方法，2016. 05. 25，其他国家，CN201310226221. 6

(7) **李必信**^(#)，司静文，俞析蒙，孔祥龙，姜雨晴，一种基于度量和预测技术的软件架构评估方法，2016. 06. 29，中国，CN201410271263. 6

(8) **李必信**^(#)，陈艺，司静文，孔祥龙，苗意盎，一种基于原型仿真的架构评价方法，2016. 06. 08，其他国家，CN201410268692. 8

(9) **李必信**^(#)，俞析蒙，陈艺，孔祥龙，王璐璐，一种基于UML模型的软件架构正确性验证方法，2016. 08. 03，中国，CN201410319016. 9

(10) 王璐璐^(#)，**李必信**，廖力，周颖，一种基于软件路径剖析结果的修改影响分析方法，2016. 08. 01，中国，CN201410281529. 5

(11) **李必信**^(*)，陶传奇，孙小兵，一种基于修改影响分析的部件软件回归测试用例更新方法，2015. 07. 08，中国，201210303829. X

(12) **李必信**^(*)，吴晓娜，刘翠翠，宋锐，齐姗姗，李超，一种基于信任的组合服务优化方法，2015. 02. 15，中国，201210209892. 7

(13) **李必信**^(*)，张前东，孙小兵，陶传奇，耿国清，兰阳阳，一种基于修改影响分析的回归测试用例生成方法，2015. 04. 18，中国，201210270343. 0



(14) **李必信**^(*)，文万志，一种基于面向对象程序切片谱的错误定位方法，2015.07.29，中国，201210184233.2

(15) **李必信**^(*)，宋锐，一种基于用户诚实度的动态web服务信任评估方法，2015.04.08，中国，201210279363.4

(16) **李必信**^(*)，齐姗姗，一种基于XCFG的组合服务可信性演化影响分析方法，2015.09.30，中国，201210306508.5

(17) **李必信**^(*)，刘翠翠，一种基于数据依赖的组合服务可信性计算方法，2015.09.30，中国，201210268698.6

(18) **李必信**^(#)，兰阳阳，王璐璐，陶传奇，刘力，陈艺，一种基于排斥区域的自适应随机测试的方法，2015.09.09，中国，CN201310238825.2

(19) **李必信**^(#)，刘力，王璐璐，陶传奇，李超，俞析蒙，一种基于云的嵌入式软件交叉测试方法，2015.11.01，中国，CN201310261929.5

(20) **李必信**^(#)，李超，廖力，孔祥龙，陶传奇，耿国清，一种基于日志的云计算服务可信度评估方法，2015.07.01，中国，CN201310147178.4

(21) **李必信**^(*)，孙小兵，一种基于形式概念分析的软件维护方法，2014.08.13，中国，201110300267.9

(22) **李必信**^(*)，翟小祥，李加凯，朱敏，陈乔乔，一种基于微分代数时态逻辑的CPS属性验证方法，2014.08.06，中国，201110332307.8

(23) **李必信**^(*)，朱敏，李加凯，陈乔乔，翟小祥，一种基于模型转换的CPS建模与验证方法，2014.05.07，中国，201110332336.4

(24) **李必信**^(*)，陈乔乔，翟小祥，宋锐，张前东，基于HybridUML向微分代数程序转换的CPS建模与验证方法，2014.12.10，中国，201110338092.0

(25) **李必信**^(*)，李加凯，朱敏，吉顺慧，齐珊珊，吴晓娜，刘翠翠，基于HybridUML和定理证明的CPS自适应性验证方法，2014.04.16，中国，201110338039.0

(26) 邱栋，**李必信**^(*)，周颖，王迪，一种基于BPEL的控制信息流图的建模方法，2013.02.27，中国，CN201010173783.5

(27) 陶传奇，**李必信**，周颖，孙小兵，文万志，一种基于层次切片的回归测试用例选择方法，2012.02.22，中国，ZL 2010 1 0173787.3

(28) 王猛，**李必信**^(*)，王正山，蒋玉亭，张功源，邱栋，吉顺慧，一种基于灾变的演化测试的动态优化方法，2012.10.24，中国，ZL 2010 1 0198471.X

五、获得学术奖励



- (1) **李必信**^{(#)(*)} (1/7), 质量需求驱动的软件演化管理和故障侦探方法, 教育部, 2014年度高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术), 自然科学奖2等, 2015.2.1
- (**李必信**^{(#)(*)}, 黄志球, 聂长海, 梁金能, 姜炜, 孙小兵, 柯昌博)

NSFC 2017



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 黄志球简历

黄志球 南京航空航天大学，计算机科学与技术学院，教授，副校长

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- (1) 1995/9-1999/6, 南京航空航天大学, 机电工程系, 博士, 导师: 王珉
- (2) 1987/9-1990/6, 国防科技大学, 计算机系, 硕士, 导师: 胡守仁
- (3) 1983/9-1987/6, 国防科技大学, 计算机系, 学士, 导师: 张晨曦

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

- (1) 2003/9-至今, 南京航空航天大学, 计算机科学与技术学院, 教授
- (2) 2002/9-2003/8, 南京航空航天大学, 计算所, 研究员
- (3) 1995/9-2002/8, 南京航空航天大学, 计算所, 副研究员

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 国家科技部“863”课题, 2015AA015303, 内存计算系统软件研究与开发, 2015/1-2018/12, 76 万元, 在研, 参与。
- (2) 国家自然科学基金面上项目, 61272083, 云计算演化环境中的隐私建模与检测方法研究, 2013/1-2016/12, 80 万元, 已结题, 主持。
- (3) 国防技术基础子课题, 基于失效数据的航空装备软件需求安全性验证技术研究, 2014/01-2015/12, 40 万元, 已结题, 主持。
- (4) 航空预研项目, 面向适航审定的软件验证方法研究, 2010/4-2012/4, 35 万元, 已结题, 主持。
- (5) 陆航预研子课题, XX 总体设计技术, 2013/01-2015/12, 60 万元, 已结题, 主持。

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）



一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) Yi Zhu, **Zhiqiu Huang**, Guangquan Zhang, Hang Zhou, Fangxiong Xiao. Multi-Resource Modeling of Real-Time Software Based on Resource Timed Process Algebra. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering* 26(7): 1099-1116 (2016)
- (2) Weiwei Li, **Zhiqiu Huang**, Xiuyi Jia, Xinye Cai. Neighborhood based decision-theoretic rough set models. *Int. J. Approx. Reasoning* 69: 1-17 (2016).
- (3) Weiwei Li, **Zhiqiu Huang**, Qing Li. Three-way decisions based software defect prediction. *Knowl.-Based Syst.* 91: 263-274 (2016).
- (4) Changbo Ke, Ruchuan Wang, Fu Xiao, **Zhiqiu Huang**. Requirement-Oriented Privacy Protection Analysis Architecture in Cloud Computing. *JCM* 10(1): 55-63 (2015).
- (5) Yu Zhou, Yankai Huang, Ou Wei, **Zhiqiu Huang**. Verifying specifications with associated attributes in graph transformation systems. *Frontiers of Computer Science* 9(3): 364-374 (2015).
- (6) Zhe Chen, Yi Gu, **Zhiqiu Huang**, Jun Zheng, Chang Liu, Ziyi Liu. Model checking aircraft controller software: a case study. *Softw., Pract. Exper.* 45(7): 989-1017 (2015).
- (7) Youwen Zhu, **Zhiqiu Huang**, Liusheng Huang, Tsuyoshi Takagi. On the Security of A Privacy-Preserving Product Calculation Scheme. *IEEE Trans. Dependable Sec. Comput.* 12(3): 373-374 (2015).
- (8) 阚双龙, **黄志球**, 陈哲, 徐丙凤, 使用事件自动机规约的 C 语言有界模型检测, 软件学报, 2014, 25 (11): 2452-2472。
- (9) **黄志球**, 徐丙凤, 阚双龙, 胡军, 陈哲, 嵌入式机载软件安全性分析标准、方法及工具研究综述, 软件学报, 2014, (02): 200-218。
- (10) Changbo Ke, **Zhiqiu Huang**, Supporting negotiation mechanism privacy authority method in cloud computing, *Knowledge-Based Systems*, 2013, 51: 48-59.
- (11) Changbo Ke, **Zhiqiu Huang**. Self-adaptive semantic web service matching method. *Knowl.-Based Syst.* 35: 41-48 (2012).
- (12) 柯昌博, **黄志球**, 刘林源, 曹子宁, 面向约束的 Web 服务发现方法研究, 软件学报, 2012, (10): 2665-2678。

二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

- (1) Yu Zhou, Ruihang Gu, Taolue Chen, **Zhiqiu Huang**, Sebastiano Panichella. Harald Gall. Analyzing APIs Documentation and Code to Detect Directive Defects. *ICSE 2017*. (Accepted).
- (2) Shuanglong Kan, **Zhiqiu Huang**, Zhe Chen. Partial Order Reduction for State/Event Systems. *ICFEM 2016*: 329-345.
- (3) Zhe Chen, Ou Wei, Zhiqiu Huang, Hongwei Xi. Formal Semantics of Runtime Monitoring, Verification, Enforcement and Control. *TASE 2015*: 63-70.
- (4) Yu Zhou, Xuefeng Yan, **Zhiqiu Huang**. A Graph Transformation Based Approach for Modeling Component-Level Migration in Mobile Environments. *COMPSAC Workshops 2012*: 152-157.
- (5) Min Yuan, **Zhiqiu Huang**, Xiang Li, Yan Yan. Towards a Formal Verification Approach for Business Process Coordination. *ICWS 2010*: 361-368.
- (6) Min Yuan, **Zhiqiu Huang**, Jun Hu, Xiang Li, Yi Zhu. Ensuring Coordination of Multi-business Interactions. *IEEE SCC 2009*: 356-363.



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 孙昌爱简历

孙昌爱 北京科技大学，计算机与通信工程学院，教授/博导/所长/院长助理

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

1997/9 - 2012/12，北京航空航天大学，计算机软件，博士，导师：金茂忠

1993/9 - 1997/7，北京科技大学，计算机应用，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2014/7 - 至今，北京科技大学，计算机与通信工程学院，教授

2013/3 - 2014/3，美国普渡大学，计算机系，访问学者

2009/5 - 2014/6，北京科技大学，计算机与通信工程学院，副教授

2007/9 - 2009/4，北京交通大学，计算机与信息技术学院，讲师

2006/5 - 2007/5，荷兰格罗宁根大学，数学与自然科学学院，博士后

2004/3 - 2006/5，澳大利亚斯文本大学，信息与通信技术学院，博士后

2003/3 - 2003/7，香港理工大学，计算机系，助理研究员

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

主持或参加科研项目及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

- (1) 北京市自然科学基金项目、4162040、模型驱动的SOA软件测试与监控技术研究、2016/1-2018/12、18万元、在研、主持。
- (2) 航空科学基金项目、2016ZD74004、面向航空嵌入式软件的变异测试框架与优化技术研究、2016/10-2018/9，18万元、在研、主持。
- (3) 国家自然科学基金面上项目、61370061、面向SOA 软件的蜕变测试技术研究、2014/1-2017/12、75万元、在研、主持。
- (4) 横向项目、2014-457、云计算基础架构技术研究、2014/7-2015/1、5万元、已结题、主持。
- (5) 北京市优秀人才培养资助项目、2012D009006000002、高效新型的SOA 软件测试技术与工具研究、2013/1-2014/12、4万元、已结题、主持。
- (6) 中央高校基本科研业务费资助项目学科发展科研基金、FRF-SD-12-015A、面向SOA的新型软件测试技术与工具、2012/1-2014/12、40万元、已结题、主持。
- (7) 十二五国家科技支撑计划、2011BAK08B04、面向群体的网络热点传播分析与监测技术研究、2010/1-2013/12，180万元、已结题、参加。



- (8) 北京市自然科学基金面上项目、4112037、2011/1-2013/12、蜕变测试应用于服务组装的若干关键问题研究、11万元、已结题、主持。
- (9) 国家自然科学基金青年基金项目、60903003、基于可变性管理的适应性Web服务组装方法研究、2010/1-2012/12、19万元、已结题、主持。

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Chang-ai Sun**, Yan Zhao, Lin Pan, Huai Liu, T.Y. Chen. Automated Testing of WS-BPEL Service Compositions: A Scenario-Oriented Approach. *IEEE Transactions on Services Computing* (刊出中, DOI:10.1109/TSC.2015.2466572).
- (2) **Chang-ai Sun**, Lin Pan, Qiaoling Wang, Huai Liu, Xiangyu Zhang. An Empirical Study on Mutation Testing of WS-BPEL Programs. *The Computer Journal*, (刊出中, DOI:10.1093/comjnl/bxw076), 2017.
- (3) **Chang-ai Sun**, Yan Zhao, Lin Pan, Xiao He, Dave Towey. A Transformation-based Approach to Testing Concurrent Programs using UML Activity Diagrams. *Software: Practice and Experience*, 2016, 46(4):551-576.
- (4) **Chang-ai Sun**, Feifei Xue, Huai Liu, Xiangyu Zhang. A Path-aware Approach to Mutant Reduction in Mutation Testing. *Information and Software Technology*, 2017, 81(1):65-81.
- (5) **Chang-ai Sun**, Guan Wang, Qin Wen, Dave Towey, T.Y. Chen. MT4WS: An Automated Metamorphic Testing System for Web Services. *International Journal of High Performance Computing and Networking*, 2016, 9(1):104-115.
- (6) **Chang-ai Sun**, Yimeng Zhai, Huai Liu. Evaluating and Comparing Fault-based Testing Strategies for General Boolean Specifications: A Series of Experiments. *The Computer Journal*, 2015, 58(5):1199-1213.
- (7) **Chang-ai Sun**, Xin Zhang, Yan Shang, Marco Aiello. Integrating Transactions into BPEL Service Compositions: An Aspect-based Approach, *ACM Transactions on the Web*, 2015, 9(2):1-31.
- (8) **Chang-ai Sun**, Zuoyi Wang, Guan Wang. A Property-based Testing Framework for Encryption Programs. *Frontiers of Computer Science*, 2014, 8(3):478-489.
- (9) **Chang-ai Sun**, Yimeng Zhai, Yan Shang, Zhenyu Zhang. BPELDebugger: An effective BPEL-specific fault localization framework. *Information and Software Technology*, 2013, 55(12):2140-2153.
- (10) **孙昌爱**, 薛铁恒, 胡长军. VxBPELEngine:一种变化驱动的适应性服务组装引擎. 计算机



学报, 2013, 36(12):2441-2454.

- (11) **Chang-ai Sun**, Guan Wang, Baohong Mu, Huai Liu, Zhaoshun Wang, Tsong Yueh Chen. A Metamorphic Relation-Based Approach to Testing Web Services Without Oracles. *International Journal on Web Service Research*, 2012, 9(1):51-73.
- (12) **孙昌爱**. 基于约束的软件失效域识别与特征分析. *软件学报*, 2012, 23(7):1688-1701.
- (13) **Chang-ai Sun**, Elie el Khoury, Marco Aiello. Transaction Management in Service-Oriented Systems: Requirements and a Proposal. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2011, 4(2) :167-180.
- (14) **Chang-ai Sun**, Rowan Rossing, Marco Sinnema, Pavel Bulanov, Marco Aiello. Modeling and managing variability of Web service-based systems. *Journal of Systems and Software*, 2010, 83(3):502-516.

二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Chang-ai Sun**, Yiqiang Liu, Zuoyi Wang, W.K. Chan. μ MT: A Data Mutation Directed Metamorphic Relation Acquisition Methodology. *Proceeding of the First Workshop on Metamorphic Testing (MET 2016)*, collocated with 38th International Conference on Software Engineering (ICSE 2016), IEEE Computer Society, Austin, USA, May 14-22, 2016, pp.12-18.
- (2) **Chang-ai Sun**, Pan Wang, Xin Zhang, Marco Aiello. VxBPEL_ODE: A Variability Enhanced Service Composition Engine, *Proceedings of the 16th Asia-Pacific Web Conference (APWeb 2014)*, Springer, Changsha, China, 2014, pp.69-81.
- (3) **Chang-ai Sun**, Yan Shang, Yan Zhao, Tsong Yueh Chen. Scenario-Oriented Testing for BPEL Service Compositions, *Proceedings of 12th International Conference on Quality Software (QSIC 2012)*, IEEE Computer Society, Xi'an, China, August 2012, pp.171-174.
- (4) **Chang-ai Sun**, Yi Meng Zhai, Yan Shang, Zhenyu Zhang. Toward Effectively Locating Integration-Level Faults in BPEL programs. *Proceedings of 12th International Conference on Quality Software (QSIC2012)*, IEEE Computer Society, Xi'an, China, August 2012, pp.17-20.
- (5) **Chang-ai Sun**, Guan Wang, Kai-Yuan Cai, Tsong Yueh Chen. Distribution-aware Mutation Analysis. *Proceedings of 9th IEEE International Workshop on Software Cybernetics (IWSC 2012)*, IEEE Computer Society, Izmir, Turkey, July 2012, pp.170-175.
- (6) **Chang-ai Sun**, Guan Wang, Kai-Yuan Cai, Tsong Yueh Chen. Towards Dynamic Random Testing for Web Services. *Proceedings of 36th Annual IEEE International Computer Software and Application Conference (COMPSAC 2012)*, Izmir, Turkey, IEEE Computer Society, July 16-20, 2012, Izmir, Turkey. pp.164-169.
- (7) **Chang-ai Sun**, Guan Wang, Baohong Mu, Huai Liu, Zhaoshun Wang, Tsong Yueh Chen. Metamorphic Testing for Web Services: Framework and a Case Study. *Proceedings of 9th IEEE International Conference on Web Services (IEEE ICWS 2011)*, IEEE Computer Society, July 4-9, 2011, pp.283-290.

三、专著（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

四、授权发明专利（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

- (1) **孙昌爱**,尚岩. 基于方面的可靠WEB服务组装方法与系统, 中国发明专利, 专利号: ZL201210428162.6, 授权日:2016.2.3.



- (2) 孙昌爱.一种无需预期的Web服务测试方法,中国发明专利,专利号: ZL201110109427.1, 授权日: 2014.10.29.
- (3) 孙昌爱. 面向服务组装的声明式事务集成方法与系统, 中国发明专利, 专利号:ZL201110034052.7, 授权日:2013.9.25.

五、会议特邀学术报告（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

六、其他成果（请按发表或发布时的格式列出）（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

七、获得学术奖励（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 马宗民简历

马宗民 南京航空航天大学，计算机科学与技术学院，教授、博士生导师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

1997/04-2001/04，香港城市大学，博士

1990/09-1993/07，东北重型机械学院（现在的燕山大学），硕士

1984/09-1988/07，东北重型机械学院（现在的燕山大学），学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2015/4-现在，南京航空航天大学，计算机科学与技术学院，教授、博士生导师

2013/11-2014/04，加拿大西安大略大学，计算机工程系，高级研究学者

2011/11-2012/03，日本名古屋大学，客座教授

2004/11-2015/03，东北大学，信息科学与工程学院，教授、博士生导师

2003/09-2004/08，加拿大Université de Sherbrooke，计算机科学系，博士后

2003/06- 2003/08，美国Wayne State University，计算机科学系，博士后

2002/01- 2003/05，美国 Oakland University，计算机科学与工程系， 博士后

2001/01- 2002/12，加拿大University of Saskatchewan，博士后

1993/08- 1997/03，中国科学院沈阳自动化研究所，助理研究员

1988/08- 1990/08，东北重型机械学院（现在的燕山大学），助教

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 国家自然科学基金面上项目，61572118、大规模模糊RDF数据管理关键技术研究、2016/01-2016/12、16万、已结题、主持。
- (2) 国家自然科学基金面上项目，61073139、数据库支持的语义Web模糊本体管理关键技术研究、2011/01-2013/12、33万、已结题、主持。
- (3) 国家自然科学基金面上项目，60873010、模糊XML数据管理若干关键技术的研究、2009/01-2011/12、31万、已结题、主持。
- (4) 教育部高等学校博士学科点专项科研基金，20050145024、基于含不精确和不确定信息数据库的智能数据处理的研究、2006/01-2008/12、6.5万、已结题、主持。
- (5) 教育部新世纪优秀人才支持计划，NCET-05-0288、2006.1-2008.12、50万、已结题、主持



代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Ma, Zongmin**^{(#)(*)} and Zhao, Zhen, 2017, A methodology for measuring structure similarity of fuzzy XML documents, Computing (accepted).
- (2) **Ma, Zongmin**^{(#)(*)}, Capretz, Miriam A. M. and Yan, Li, 2016, Storing massive RDF data: A survey, The Knowledge Engineering Review, 31 (4): 391-413.
- (3) **Ma, Zongmin**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2016, Modeling fuzzy data with XML: A survey, Fuzzy Sets and Systems, 301: 146-159.
- (4) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Fu, Zhang, Wang, Hailong and Yan, Li, 2013, An overview of fuzzy description logics for the Semantic Web, The Knowledge Engineering Review, 28 (1): 1-34.
- (5) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Wang, Xing, 2012, Rule interchange in the Semantic Web, Journal of Information Science and Engineering, 28 (2): 393-406.
- (6) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Yan, Li and Zhang, Fu, 2012, Modeling fuzzy information in UML class diagrams and object-oriented database models, Fuzzy Sets and Systems, 186 (1): 26-46.
- (7) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, Fu and Yan, Li, 2011, Fuzzy information modeling in UML class diagram and relational database models, Applied Soft Computing, 11 (6): 4236-4245.
- (8) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, Fu, Yan, Li and Cheng, Jingwei, 2011, Extracting knowledge from fuzzy relational databases with description logic, Integrated Computer-Aided Engineering, 18 (2): 181-200.
- (9) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, Fu, Yan, Li and Cheng, Jingwei, 2011, Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach, Expert Systems with Applications, 38 (3): 2536-2549.
- (10) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Liu, Jian and Yan, Li, 2011, Matching twigs in fuzzy XML, Information Sciences, 181 (1): 184-200.
- (11) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Liu, Jian and Yan, Li, 2010, Fuzzy data modeling and algebraic operations in XML, International Journal of Intelligent Systems, 25 (9): 925-947.
- (12) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2010, A literature overview of fuzzy conceptual data modeling, Journal of Information Science and Engineering, 26 (2): 427-441.
- (13) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2010, Conflicts and their resolutions in fuzzy relational multidatabases, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 18 (2): 169-195.



- (14) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, Fu, Yan, Li and Lv, Yanhui, 2010, Formal semantics-preserving translation from fuzzy ER model to fuzzy OWL DL ontology, *Web Intelligence and Agent Systems*, 8 (4): 397-412.
- (15) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Lv, Yanhui and Yan, Li, 2008, A fuzzy ontology generation framework from fuzzy relational database, *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 4 (3): 1-15.
- (16) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2008, A literature overview of fuzzy database models, *Journal of Information Science and Engineering*, 24 (1): 189-202.
- (17) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2007, Fuzzy XML data modeling with the UML and relational data models, *Data & Knowledge Engineering*, 63 (3): 970-994.
- (18) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2007, Updating extended possibility-based fuzzy relational databases, *International Journal of Intelligent Systems*, 22 (3): 237-258.
- (19) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Yan, Li, 2007, Generalization of strategies for fuzzy query translation in classical relational databases, *Information and Software Technology*, 49 (2): 172-180.
- (20) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Shen, Derong, 2006, Modeling fuzzy information in the IF2O and object-oriented data models, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 17 (6): 597-612.
- (21) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Wang, Huaiqing, 2006, STEP implementation of imperfect EXPRESS model in fuzzy object-oriented databases, *Fuzzy Sets and Systems*, 157 (12): 1597-1621.
- (22) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, 2006, Extending EXPRESS for imprecise and uncertain engineering information modeling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17 (1): 63-92.
- (23) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, 2005, Engineering information modeling in databases: Needs and constructions, *Industrial Management & Data Systems*, 105 (7): 900-918.
- (24) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, 2005, A conceptual design methodology for fuzzy relational databases, *Journal of Database Management*, 16 (2): 66-83.
- (25) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J. and Ma, W. Y., 2004, Extending object-oriented databases for fuzzy information modeling", *Information Systems*, 29 (5): 421-435.
- (26) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Mili, F., 2003, Knowledge comparison in design repositories, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16 (3): 203-211.
- (27) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)} and Mili, F., 2002, Handling fuzzy information in extended possibility-based fuzzy relational databases, *International Journal of Intelligent Systems*, 17 (10): 925-942.
- (28) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J. and Mili, F., 2002, Fuzzy data compression based on data dependencies, *International Journal of Intelligent Systems*, 17 (4): 409-426.
- (29) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J., Ma, W. Y. and Mili, F., 2002, Data dependencies in extended possibility-based fuzzy relational databases, *International Journal of Intelligent Systems*, 17 (3): 321-332.
- (30) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J. and Ma, W. Y., 2002, Extending IDEF1X to model fuzzy data, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13 (4): 295-307.
- (31) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J., Ma, W. Y. and Chen, G. Q., 2001, Conceptual design of fuzzy object-oriented databases using extended entity-relationship model, *International Journal of Intelligent Systems*, 16 (6): 697-711.
- (32) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J. and Ma, W. Y., 2000, Semantic measure of fuzzy data in extended possibility-based fuzzy relational databases, *International Journal of Intelligent Systems*, 15 (8): 705-716.
- (33) **Ma, Z. M.**^{(#)(*)}, Zhang, W. J. and Ma, W. Y., 1999, Assessment of data redundancy in fuzzy relational database based on semantic inclusion degree, *Information Processing Letters*, 72 (1-2): 25-29.



2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Li, Guanfeng and **Ma, Zongmin**, 2017, An efficient matching algorithm for fuzzy RDF graph, Journal of Information Science and Engineering (accepted).
- (2) Zhao, Zhen and **Ma, Zongmin**, 2017, Similarity measure of fuzzy XML DTDs with extreme learning machine, Journal of Information Science and Engineering (accepted).
- (3) Cheng, Haitao and **Ma, Zongmin**, 2016, A literature overview of knowledge sharing between Petri nets and ontologies, The Knowledge Engineering Review, 31 (3): 239-260.
- (4) Yan, Li and **Ma, Zongmin**, 2015, A Probabilistic object-oriented database model with fuzzy measures and its algebraic operations, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 28 (5): 1969-1984.
- (5) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.** and Li, Weijun, 2015, Storing OWL ontologies in object-oriented databases, Knowledge-Based Systems, 76: 240-255.
- (6) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.** and Chen, Xu, 2015, Formalizing fuzzy object-oriented database models using fuzzy ontologies, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 29 (4): 1407-1420.
- (7) Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2014, Modeling fuzzy information in fuzzy extended entity-relationship model and fuzzy relational databases, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 27 (4): 1881-1896.
- (8) Yan, Li, Wang, Hailong and **Ma, Z. M.**, 2014, A fuzzy description logic F-SHIQ (G), Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 26 (6): 2609-2626.
- (9) Yan, Li, **Ma, Z. M.** and Zhang, Fu, 2014, Algebraic operations in fuzzy object-oriented databases, Information Systems Frontiers, 16 (4): 543-556.
- (10) Zhang, Fu and **Ma, Z. M.**, 2014, Representing and reasoning about XML with ontologies, Applied Intelligence, 40 (1): 74-106.
- (11) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.** and Yan, Li, 2014, Representation and reasoning of fuzzy ER models with description logic DLR, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 26 (2): 611-623.
- (12) Bai, Luyi, Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2013, Determining topological relationship of fuzzy spatiotemporal data integrated with XML twig pattern, Applied Intelligence, 39 (1): 75-100.
- (13) Liu, Jian, **Ma, Z. M.** and Yan, Li, 2013, Querying and ranking incomplete twigs in probabilistic XML, World Wide Web, 16 (3): 325-353.
- (14) Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2013, A fuzzy probabilistic relational database model and algebra, International Journal of Fuzzy Systems, 15 (2): 244-253.
- (15) Zhang, Fu and **Ma, Z. M.**, 2013, Construction of fuzzy OWL ontologies from fuzzy EER models: A semantics preserving approach, Fuzzy Sets and Systems, 229: 1-32.
- (16) Zhang, Fu and **Ma, Z. M.**, 2013, Construction of fuzzy ontologies from fuzzy UML models, International Journal of Computational Intelligence Systems, 6 (3): 442-472.
- (17) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.** and Yan, Li, 2013, Construction of fuzzy ontologies from fuzzy XML models, Knowledge-Based Systems, 42 (1): 20-39.
- (18) Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2012, Incorporating fuzzy information into the formal mapping from Web data model to extended entity-relationship model, Integrated Computer-Aided Engineering, 19 (4): 313-330.
- (19) Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2012, Comparison of entity with fuzzy data types in fuzzy



object-oriented databases, Integrated Computer-Aided Engineering, 19 (2): 199-212.

- (20) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.**, Yan, Li and Wang, Yu, 2012, A description logic approach for representing and reasoning on fuzzy object-oriented database models, Fuzzy Sets and Systems, 186 (1): 1-25.
- (21) Zhang, Fu, Yan, Li and **Ma, Z. M.**, 2012, Reasoning of fuzzy relational databases with fuzzy ontologies, International Journal of Intelligent Systems, 27 (6): 613-634.
- (22) Zhang, Fu, **Ma, Z. M.** and Yan, Li, 2011, Construction of ontologies from object-oriented database models, Integrated Computer-Aided Engineering, 18 (4): 327-347.

3. 既非第一作者又非通讯作者论文（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Zhang, Fu, **Ma Z. M.** and Cheng, Jingwei, 2016, Enhanced entity-relationship modeling with description logic, Knowledge-Based Systems, 93: 12-32.
- (2) Liu Jian, **Ma Z. M.** and Feng, Xue, 2015, Answering ordered tree pattern queries over fuzzy XML data, Knowledge and Information Systems, 43 (2): 473-495.
- (3) Yan Li and **Ma Z. M.**, 2014, Formal translation from fuzzy EER model to fuzzy XML model, Expert Systems with Applications, 41(8): 3615-3627.
- (4) Liu Jian, **Ma Z. M.** and Qv, Qiulong, 2014, Dynamically querying possibilistic XML data, Information Sciences, 261: 70-88.
- (5) Wang Xing, **Ma Z. M.**, Chen, Ji and Meng, Xiangfu, 2014, f-RIF metamodel-centered fuzzy rule interchange in the Semantic Web, Knowledge-Based Systems, 70: 137-153.
- (6) Liu Jian, **Ma Z. M.** and Yan, Li, 2013, Efficient labeling scheme for dynamic XML trees, Information Sciences, 221 (1): 338-354.
- (7) Liu Jian, **Ma Z. M.** and Ma, Ruizhe, 2013, Efficient processing of twig query with compound predicates in fuzzy XML, Fuzzy Sets and Systems, 229: 33-53.

三、专著（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

- (1) **Zongmin Ma.** Fuzzy Knowledge Management for the Semantic Web, Springer, 2013



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 王森章简历

王森章 南京航空航天大学，计算机科学与技术学院，讲师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2013/09–2015/09，美国伊利诺伊大学芝加哥分校，联合培养博士生，导师：Philip S. Yu

2011/09–2015/12，北京航空航天大学，计算机，博士，导师：李舟军

2009/09–2011/06，北京航空航天大学，计算机，硕士在读（转博），导师：曹庆华

2005/06–2009/09，东南大学，工业工程，学士，导师：黄卫

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2016/05–至今，南京航空航天大学，计算机科学与技术学院，讲师

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 国家自然科学基金青年基金项目，61602237，基于多源异构在线社交网络平台的信息传播模型研究与传播趋势预测 2016.12-2019.12，在研，主持
- (2) 国家自然科学基金面上项目，61370126，社交网络中热点话题检测与传播分析研究 2014.01-2017.12，78万元，在研，参与
- (3) 软件开发环境国家重点实验室开放课题，SKLSDE-2013ZX-19，面向微博的社会网络舆情分析技术研究，2014.01-2014.12，30万，结题，参与
- (4) 北京航空航天大学博士研究生创新基金，YWF-14-YJSY-021，社交网络中的人物影响力分析及信息传播机理研究，2014.01-2015.01，3万，结题，主持

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）



一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Senzhang Wang**, Xiaoming Zhang, Jianping Cao, Lifang He, Leon Stenneth, Philip S. Yu, Zhoujun Li, Zhiqiu Huang: Computing Urban Traffic Congestions by Incorporating Sparse GPS Probe Data and Social Media Data. 被ACM Transactions on Information Systems录用 (CCF A类期刊).
- (2) **Senzhang Wang**, Zhao Yan, Xia Hu, Philip S. Yu, Zhoujun Li, Biao Wang: CPB: a classification-based approach for burst time prediction in cascades. Knowledge and Information System, 49 (1), 243-271. (CCF B类期刊)
- (3) **Senzhang Wang**, Sihong Xie, Xiaoming Zhang, Zhoujun Li, Philip S. Yu, Yueying He: Coranking the Future Influence of Multiobjects in Bibliographic Network Through Mutual Reinforcement. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology 7(4): 64 (2016)
- (4) **Senzhang Wang**, Fang Wang, Yan Chen, Chunyang Liu, Zhoujun Li, Xiaoming Zhang: Exploiting social circle broadness for influential spreaders identification in social networks. World Wide Web Journal, 2015(18):681-705. (CCF B类期刊)
- (5) **Senzhang Wang**, Zhoujun Li, Chunyang Liu, Xiaoming Zhang, Haijun Zhang: Training data reduction to speed up SVM training. Appl. Intell. 41(2): 405-420 (2014) (CCF C类期刊)

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Haijun Zhang, Xia Hu, Zhoujun Li, **Senzhang Wang**, Zhenping Li, Jianshe Zhou: Exploit Latent Dirichlet Allocation for Collaborative Filtering. 被Frontier of Computer Science期刊录用(FCS, CCF C类期刊)
- (2) Xiaoming Zhang, Xia Hu, **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Yang Yang, Zhoujun Li, Jianshe Zhou: Learning Geographical Hierarchy Features via a Compositional Model. IEEE Trans. Multimedia 18(9): 1855-1868 (2016)(CCF B类期刊)
- (3) Jianping Cao, **Senzhang Wang**, Hui Wang. Detecting Communities on Topic of Transportation with Sparse Crowd Annotations. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Volume: PP(99), 1-6 (CCF B类期刊)
- (4) Xiaoming Zhang, Shufan Ji, **Senzhang Wang**, Zhoujun Li, Xueqiang Lv: Geographical Topics Learning of Geo-Tagged Social Images. IEEE Trans. Cybernetics 46(3): 744-755 (2016) (CCF B类期刊)
- (5) Xin Wang, Ji Wu, Chao Liu, **Senzhang Wang**: A hybrid model based on singular spectrum analysis and support vector regression machines for failure time series prediction. Quality and Reliability Engineering International 32 (8), 2717-2738.
- (6) Qingbo Hu, Sihong Xie, Shuyang Lin, **Senzhang Wang**, Philip S. Yu: Clustering Embedded Approaches for Efficient Information Network Inference. Data Science and Engineering 1(1): 29-40 (2016)
- (7) Xiaoming Zhang, Xiaoming Chen, Yan Chen, **Senzhang Wang**, Zhoujun Li, Jiali Xia: Event detection and popularity prediction in microblogging. Neurocomputing, 149: 1469-1480 (2015) (CCF C类期刊)
- (8) Yang Yang, Zhoujun Li, Yan Chen, Xiaoming Zhang, **Senzhang Wang**: Improving the Robustness of Complex Networks with Preserving Community Structure. PLoS One. 2015 Feb 12; 10(2): e0116551.



二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Xia Hu, Philip S. Yu and Zhoujun Li: MMrate: Inferring Multi-aspect Diffusion Networks with Multi-pattern Cascades. ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'2014, CCF A类会议)
- (2) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Zhao Yan, Xia Hu, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Burst Time Prediction in Cascades. 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'2015, CCF A类会议)
- (3) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Xiaojian Zhao, Yan Chen, Zhoujun Li, Kai Zhang, Jiali Xia: Negative Influence Minimizing by Blocking Nodes in Social Networks. 27th AAAI Conference on Artificial Intelligence (Late-Breaking Developments) 2013. (AAAI'2013, CCF A类会议)
- (4) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Fengxiang Li, Xiaoming Zhang, Leon Stenneth, Philip S. Yu: Enhancing Traffic Congestion Estimation with Social Media by Coupled Hidden Markov Model. The European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery (ECMLPKDD'2016, CCF B类会议)
- (5) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Lifang He, Leon Stenneth, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Citywide Traffic Congestion Estimation with Social Media. 23rd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM SIGSPATIAL GIS'2015).
- (6) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Sihong Xie, Zhoujun Li and Philip S Yu: Future Influence Ranking of Scientific Literature. The 15th SIAM International Conference on Data Mining (SDM'2014, CCF B类会议)
- (7) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Honghui Zhang, Jiawei Zhang, Xiaoming Zhang, Philip S. Yu, Zhoujun Li: Inferring Diffusion Networks with Sparse Cascades by Structure Transfer. The 20th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA'2015, CCF B类会议).
- (8) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Lifang He, Leon Stenneth, Philip S. Yu, Zhoujun Li, Zhiqiu Huang: Estimating Urban Traffic Congestions with Multi-Sourced Data. 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM'2016, CCF C类会议)
- (9) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Zhoujun Li, Wen-Han Chao, Qinghua Cao: Applying adaptive over-sampling technique based on data density and cost-sensitive SVM to imbalanced learning. International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2012, CCF C类会议)
- (10) **Senzhang Wang**^{(#)(*)}, Zhoujun Li, Xiaoming Zhang: Bootstrap Sampling Based Data Cleaning and Maximum Entropy SVMs for Large Datasets. The 24th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI'2012, CCF C类会议)

2. 既非第一作者又非通讯作者论文（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Chaozhuo Li, Zhoujun Li, **Senzhang Wang**, Yang yang, Xiaoming Zhang, Jianshe Zhou: Semi-Supervised Network Embedding. 被The 22nd International Conference on Database Systems for Advanced Applications会议录用 (DASFAA'2017, CCF B类会议).
- (2) Chaozhuo Li, **Senzhang Wang**, Dejian Yang, Zhoujun Li, Yang yang, Xiaoming Zhang, Jianshe Zhou: Semi-Supervised Network Embedding. 被The 2nd International Conference on Database Systems for Advanced Applications会议录用 (DASFAA'2017, CCF B类会议).



- (3) Tianhang Song, Zhaohui Peng, **Senzhang Wang**, Wenjing Fu, Xiaoguang Hong, Philip S. Yu. Review-Based Cross-Domain Recommendation through Joint Tensor Factorization. 被 The 22nd International Conference on Database Systems for Advanced Applications会议录用(DASFAA'2017, CCF B类会议).
- (4) Hao Zheng, Zhoujun Li, **Senzhang Wang**, Zhao Yan, Jianshe Zhou: Aggregating Inter-sentence Information to Enhance Relation Extraction. 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'2016, CCF A类会议)
- (5) Dandan Li, **Senzhang Wang**, Shuzhen Yao, Yu-Hang Liu, Yuanqi Cheng, Xian-He Sun: Efficient Design Space Exploration by Knowledge Transfer. 2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS'2016, CCF B类会议)
- (6) Dandan Li, Shuzhen Yao, **Senzhang Wang**, Yu-Hang Liu, Xian-He Sun: Efficient Design Space Exploration via Statistical Sampling and AdaBoost Learning. Design Automation Conference (DAC'2016, CCF B类会议)
- (7) Xiaoming Zhang, Zhoujun Li, **Senzhang Wang** Yang Yang, and Xueqiang Lv: Location Prediction of Social Images via Generative Model. The Annual ACM International Conference on Multimedia Retrieval (ICMR'2015, CCF B类会议)
- (8) Haijun Zhang, Zhoujun Li, Yan Chen, Xiaoming Zhang, **Senzhang Wang**: Exploit Latent Dirichlet Allocation for One-Class Collaborative Filtering. 23rd ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'2014, Poster, CCF B类会议)
- (9) Jianping Cao, **Senzhang Wang**, Hui Wang, Feiyue Wang, Philip Yu: Clustering Large Attributed Graphs with Multiple Sparse Annotations. The 20th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'2016, CCF C类会议)
- (10) Qianyi Zhan, Jiawei Zhang, **Senzhang Wang**, Philip S. Yu, Junyuan Xie: Influence Maximization across Partially Aligned Heterogeneous Social Networks. The 19th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'2015, CCF C类会议)
- (11) Qingbo Hu, Sihong Xie, Shuyang Lin, **Senzhang Wang**, Philip S. Yu: CENI: a Hybrid Framework for Efficiently Inferring Information Networks. The 9th International AAAI Conference on Web and Social Media (ICWSM'2015).
- (12) Qian Wang, Zhaohui Peng, **Senzhang Wang**, Philip S. Yu, Qiangzhong Li: cluTM: Content and Link Integrated Topic Model on Heterogeneous Information Networks. The 16th International Conference on Web-Age Information Management (WAIM'2015, CCF C类会议)
- (13) Min Zhu, Tianchen Zhu, Zhaohui Peng, Guang Yang, Yang Xu, **Senzhang Wang**, Xiangwei Wang: Relevance Search on Signed Heterogeneous Information Network Based on Meta-path Factorization. The 16th International Conference on Web-Age Information Management (WAIM'2015, CCF C类会议)
- (14) Jiawei Zhang, Weixiang Shao, **Senzhang Wang**, Xiangnan Kong, Philip S. Yu: PNA: Partial Network Alignment with Generic Stable Matching. The 16th IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IEEE IRI'15).
- (15) Fang Wang, Zhongyuan Wang, **Senzhang Wang**¹, Zhoujun Li: Exploiting Description Knowledge for Keyphrase Extraction. The 14th Pacific Rim Conference on Artificial Intelligence (PRICAI'2014, CCF C类会议)



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 何啸简历

何啸 北京科技大学，计算机与通信工程学院，讲师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2006/09-2012/06，北京大学，信息科学技术学院，博士，导师：邵维忠 教授

2002/09-2006/06，北京大学，信息科学技术学院，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2012/07-至今，北京科技大学，计算机与通信工程学院，讲师

2015/08-2016/08，荷兰格罗宁根大学，数学与计算机科学系，访问学者

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 北京市自然科学基金项目、4162040、模型驱动的SOA软件测试与监控技术研究、2016/1-2018/12、18万元、在研、参加。
- (2) 航空科学基金项目、2016ZD74004、面向航空嵌入式软件的变异测试框架与优化技术研究、2016/10-2018/9，12万元、在研、参加。
- (3) “863”计划项目、2015AA01A303、核反应堆关键材料性能优化高性能数值模拟软件研发，2015/01-2016/12、93.5万、结题、参加。
- (4) 国家自然科学基金青年基金项目、61300009、模型转换静态验证方法研究、2014/01-2016/12、22万、结题、主持。
- (5) 中国博士后科研基金项目、2013M540050、基于不变式的模型转换静态验证技术研究、2013/09-2015/09、8万、结题、主持。

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，



唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

请按如下顺序列出：

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Xiao He**, Tian Zhang, Changjun Hu, Zhiyi Ma, Weizhong Shao. An MDE Performance Testing Framework Based on Random Model Generation. Journal of Systems and Software, 2016, 121(11):247-264.
- (2) 何啸, 麻志毅, 邵维忠, 胡长军. 一种针对模型转换的图形化建模语言. 计算机研究与发展, 2015, 52(9):2145-2162.
- (3) **Xiao He**, Changjun Hu, Zhiyi Ma, Weizhong Shao. A bidirectional- transformation-based framework for software visualization and visual editing. Science China: Information Sciences, 2014, 57(5): 052109:1-052109:23.
- (4) 何啸, 麻志毅, 王瑞超, 邵维忠. 语义可配置的模型转换. 软件学报, 2013, 24(7): 1436-1454.
- (5) 何啸, 麻志毅, 冯超, 邵维忠. 一种支持多种模型转换技术的组合方法. 软件学报, 2012, 23(4): 816-830.

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Chang-ai Sun, Yan Zhao, Lin Pan, **Xiao He**, Dave Towey. A Transformation-based Approach to Testing Concurrent Programs using UML Activity Diagrams. Software: Practice and Experience, 2016, 46(4):551-576.
- (2) 孙昌爱, 赵敏, 何啸. 一种面向Web服务的综合可信性度量模型. 北京科技大学学报, 2014, 36(4):543-550.
- (3) Ma Zhiyi, **He Xiao**, Liu Chao. Assessing the quality of metamodels. Frontiers of Computer Science, 2013, 7(4):558-570.

二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

请按如下顺序列出：

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Xiao He**, Paris Avgeriou, Peng Liang, Zengyang Li. Technical Debt in MDE: A Case Study on GMF/EMF-Based Projects. Proceedings of 19th ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MoDELS 2016), ACM Press, Saint-Malo, France, 2016, pp.162-172.
- (2) **Xiao He**, Tian Zhang, Zhiyi Ma, Weizhong Shao. Randomized model generation for performance testing of model transformations. Proceedings of 38th Annual International Computers, Software & Applications Conference (COMPSAC 2014), IEEE Computer Society, Västerås, Sweden, 2014, pp.11-20.
- (3) **Xiao He**, Wenfeng Li, Tian Zhang, Yi Liu. Towards Parallel Model Generation for Random Performance Testing of Model-Oriented Operations. Proceedings of the 10th International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering (TASE 2016), IEEE Computer Society, Shanghai, China, 2016, pp. 57-64.



- (4) **Xiao He**, Yanmei Fu, Chang-ai Sun, Zhiyi Ma, Weizhong Shao. Towards model-driven variability-based flexible service compositions. Proceedings of 39th Annual International Computers Software & Applications Conference (COMPSAC 2015), IEEE Computer Society, Taichung, Taiwan, 2015, pp.298-303.
- (5) **Xiao He**, Zhiyi Ma, Yi Liu, Hongjie Chen, Weizhong Shao. VisTML: a visual modeling language for model transformation. Proceeding of the 18th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2011), IEEE Computer Society, Ho Chi Minh city, Vietnam, 2011, pp.130-137.

NSFC 2017



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 王璐璐简历

王璐璐，东南大学，计算机科学与工程学院，讲师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2006/09 – 2012/07，东南大学，计算机科学与工程学院，博士，导师：李必信

2002/09 – 2006/06，东南大学，计算机科学与工程学院，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2012/08–至今，东南大学，计算机科学与工程学院，讲师

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 国家自然科学基金青年基金项目，61402103、并发程序路径剖析技术研究、2015/01-2017/12、26 万元、在研、主持。
- (2) 江苏省自然科学基金青年基金项目，BK20130633，剖析复杂路径的关键技术研究、2013/07-2016/06、20 万元、已结题、主持。

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称(或会议论文集名称及起止页码)、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Wang Lulu**, Li Bixin, Leung Hareton. A new method to encode calling contexts with recursions. Science China Information Sciences, 59(5):1-15. 2016
- (2) **王璐璐**,李必信.一种面向有环兴趣路径的过程内剖析方法. 计算机学报, 37(12): 2464-2481, 2014



- (3) 王璐璐,李必信,周晓宇. 一种有效的全路径剖析方法. 软件学报, 23(6): 1413-1428, 2012

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Bixin Li, **Lulu Wang**, Hareton Leung. Profiling selected paths with loops. Science China Information Sciences, 57(7):1-15. 2014
- (2) Bixin Li, **Lulu Wang**, Hareton Leung. Profiling of All Paths: A New Profiling Technique for Both Cyclic and Acyclic Paths. The Journal of Systems and Software, Elsevier, 85(7):1558-1576, 2012

二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Lulu Wang**, Bixin Li. A Technique of Profiling Selective Paths. In Proc. of IEEE 24th International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2011), July 18-22, Munich Germany.2011
- (2) **Lulu Wang**, Bixin Li. A Technology of Profiling Inter-procedural Paths. In Proc. of the 23rd International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2011), July 7-9, Eden Roc Renaissance Hotel Miami Beach, USA. 2011

三、专著（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

四、授权发明专利（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

- (1) 王璐璐, 李必信, 廖力, 周颖. 一种基于软件路径剖析结果的修改影响分析方法. 授权发明专利(授权号: ZL201410281529.5)
- (2) 王璐璐, 李必信. 一种基于路径特征的程序执行轨迹状态自动获取方法. 授权发明专利(授权号: ZL201410609913.5)

五、会议特邀学术报告（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

六、其他成果（请按发表或发布时的格式列出）（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

七、获得学术奖励（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 张祥简历

张祥，东南大学，计算机科学与工程学院，讲师

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

2002/09 - 2009/01 东南大学计算机科学与工程学院，计算机软件与理论，博士，瞿裕忠

1997/09 - 2001/06 南京航空航天大学计算机科学与技术系，计算机科学与技术，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

2009/01-至今，东南大学，计算机科学与工程学院，讲师

2013/08-2014/08，Bucknell University，计算机科学系，访问学者，导师：Xiannong Meng

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目(课题)及人才计划项目情况(按时间倒序排序)：

- (1) 国家自然科学基金青年基金，61502095，基于关键词的大规模链接数据搜索技术研究，2016/01-2018/12，24万元，在研，参与
- (2) 国家863项目，2015AA015406，开放域知识集成、推理与检索关键技术及系统，2015/01-2017/12，353万元，在研，参与
- (3) 江苏省数据工程与知识服务重点实验室开放课题，DEKS2014KT002，基于多维度语境的文本检索模型与方法，2014/12-2017/12，3万元，在研，主持
- (4) 国家自然科学基金，61472077，本体匹配中的参数和策略调谐问题研究，2014/09-2018/12，80万元，在研，参与
- (5) 江苏省自然科学基金，BK20140643，面向大规模链接数据的关键词搜索技术研究，2014/07-2017/06，20万元，在研，参与
- (6) 国家自然科学基金，61272378，描述逻辑中的本体融合方法研究，2013/01-2016/12，81万元，在研，参与
- (7) 国家自然科学基金，61170165，OWL DL 公理的统计关系学习方法，2012/01-2015/12，55万元，已结题，参与
- (8) 江苏省自然科学基金，BK2011335，基于多用户分集优势的多业务无线Mesh网关键技术研究，2011/07-2014/07，10万元，已结题，参与
- (9) 国家自然科学基金青年基金，61003055，海量语义关联检索的关键问题研究，2011/01-2013/12，19万元，已结题，主持
- (10) 国家自然科学基金青年基金，61003157，基于描述逻辑的本体调试关键技术的研究，2011/01-2013/12，20万元，已结题，参与
- (11) 江苏省自然科学基金，BK2010412，大规模OWL本体调试技术研究，2010/07-2013/07，



10万元，已结题，参与

- (12) 江苏省自然科学基金，BK2009136，语义关联发现方法的研究，2009/09-2012/09，20万元，已结题，主持

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

请按如下顺序列出：

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) **Xiang Zhang***, Wenyao Cheng. Pattern Mining in Linked Data by Edge-labeling. Journal of Tsinghua Science and Technology. 2016, 21(2):168-175
- (2) 张祥*, 李星, 温韵清, 沈凯, 郝敬坤. 语义网虚拟本体构建. 东南大学学报(自然科学版). 2015, 45(4):652-656
- (3) **Xiang Zhang***, Gong Cheng, Weiyi Ge, Yuzhong Qu. Summarizing Vocabularies in the Global Semantic Web. Journal of Computer Science and Technology(JCST), 2009, 24(1):165-174
- (4) 张祥*, 葛唯益, 瞿裕忠. 语义网站点的发现与排序. 软件学报, 2009, 20(10):2834-2843
- (5) 张祥*, 瞿裕忠. 语义网中的排序问题. 计算机科学, 2008, 35(2):196-200

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Wenbo Zhang, **Xiang Zhang***, Yuming Qian, Chao Xing, Peng Wang. Access Control Models for Information Retrieval in Social Network. Journal of Computational Information Systems. 2013, 9(16):6511-6518
- (2) 邢超, 张文博, 张祥*, 瞿裕忠. 一个社交网络数据搜索引擎. 中国科技论文在线, 2012.（在线发表）
- (3) 于斌, 张祥*, 胡伟, 瞿裕忠. 一个基于本体的语义Blog原型系统的设计与实现. 计算机应用与软件, 2005, 22(12):26-27,77

二、会议论文（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

请按如下顺序列出：

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）



- (1) **Xiang Zhang***, Yulian Lv. Towards Multi-Target Search of Semantic Association. In Proceedings of the 6th Joint International Semantic Technology Conference (JIST2016). 236-244, 2016.
- (2) **Xiang Zhang***, Yulian Lv, Erjing Lin. Object Clustering in Linked Data using Centrality. In Proceedings of China Conference on Knowledge Graph and Semantic Computing (CCKS2016). 1-12, 2016.
- (3) **Xiang Zhang***, Cuifang Zhao, Peng Wang, Fengbo Zhou. Mining Link Patterns in Linked Data. In Proceedings of the 13th International Conference on Web-Age Information Management (WAIM2012). 83-94, Harbin, China, 2012. 564-576.
- (4) **Xiang Zhang***, Cuifang Zhao. ONTRUSE: Searching Ontological Structures. In Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Service System (CSSS2012). 361-364, Nanjing, China, 2012.
- (5) **Xiang Zhang***, Cuifang Zhao, Sanfeng Zhang, Peng Wang. A Partition-Based Approach to Mining Link Patterns. In Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Service System (CSSS2012). 2165-2168, Nanjing, China, 2012.
- (6) **Xiang Zhang***, Rui Hu, Sanfeng Zhang. A Survey on Access Control in Online Social Networks. In Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Service System (CSSS2012). 2865-2868, Nanjing, China, 2012.
- (7) **Xiang Zhang***, Huaping Chen. Indexing Ontological Structure based on Neighbor Tree. In Proceedings of the 2010 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI2010). 263-269, Hsinchu, Taiwan, 2010.
- (8) **Xiang Zhang***, Gong Cheng, Yuzhong Qu. Ontology Summarization Based on RDF Sentence Graph. In Proceedings of the 16th International World Wide Web Conference (WWW2007). 707-716, Banff, Canada, 2007.
- (9) **Xiang Zhang***, Huiying Li, Yuzhong Qu. Finding Important Vocabulary within Ontology. In Proceedings of the 1st Asian Semantic Web Conference (ASWC2006). 106-112, Beijing, China, 2006.
- (10) **Xiang Zhang***, Wennan Shen, Yuzhong Qu. WonderDesk - A Semantic Desktop for Resource Sharing and Management. In Proceedings of ISWC2005 Workshop on Semantic Desktop. 281-285, Galway, Ireland, 2005.

2. 通讯作者论文（勿与第一作者论文重复）（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Yunqing Wen, **Xiang Zhang***, Kai Shen, Peng Wang. Towards Building Virtual Vocabularies in the Semantic Web. In Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Data Mining and Applications (ADMA2013). 2013, Hangzhou, China, 193-204.
- (2) Xiaowei Jiang, **Xiang Zhang***, Feifei Gao, Chunan Pu, Peng Wang. Graph Compression Strategies for Instance-focused Semantic Mining. In Proceedings of the 7th China Semantic Web Symposium & 2nd Web Science Conference (CSWS2013). 2013, Shanghai, China, 50-61.
- (3) Chen Wang, **Xiang Zhang***, Yongtao Lv, Li Ji, Peng Wan. Searching Semantic Associations Based on Virtual Document. In Proceedings of the 7th China Semantic Web Symposium & 2nd Web Science Conference (CSWS2013). 2013, Shanghai, China, 62-75.
- (4) Xiaowei Jiang, **Xiang Zhang***, Wei Gui, Feifei Gao, Peng Wang, Fengbo Zhou. Summarizing Semantic Associations Based on Focused Association Graph. In Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Data Mining and Applications (ADMA2012). 564-576, Nanjing, China, 2012.
- (5) Cuifang Zhao, **Xiang Zhang***, Peng Wang. A Label-based Partitioning Strategy for Mining Link Patterns. In Proceedings of 7th International Conference on Knowledge, Information



and Creativity Support Systems (KICSS2012). 203-206, Melbourne, Australia, 2012.

- (6) Huansong Wang, **Xiang Zhang***. MaVis: Feature-based Defects Visualization in Software Testing. In Proceedings of the 2012 Spring World Congress on Engineering and Technology(SCET2012). 1-4, Xi'an, China, 2012.
- (7) Rui Hu, **Xiang Zhang***. Classification and Evaluation of Online Indexing Strategies. In Proceedings of the 2011 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI2011). 233-238, Chung-Li, Taiwan, 2011.

3. 既非第一作者又非通讯作者论文（仅不列此项时可删除该标题，序号按实际情况编排）

- (1) Peng Wang*, **Xiang Zhang**, Yue You. Discovering Scholar Knowledge from Conference Web Pages. In Proceedings of the 2011 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI2011). 173-178, Chuang-Li, Taiwan, 2011.
- (2) Huiying Li*, **Xiang Zhang**, Honghan Wu, Yuzhong Qu. Design and Application of Rule Based Access Control Policies. In Proceedings of ISWC2005 Workshop on Semantic Web and Policy. 34-41, Galway, Ireland, 2005.
- (3) Jian Guan*, **Xiang Zhang**, Jianming Deng, Yuzhong Qu. An Ontology-driven Information Retrieval Mechanism for Semantic Information Portals. In Proceedings of the 1st International Conference on Semantics, Knowledge and Grid (SKG2005). 614-620, Beijing, China, 2005.
- (4) Yuzhong Qu*, **Xiang Zhang**, Huiying Li. OREL: An Ontology-based Rights Expression Language. In Proceedings of the 13th international World Wide Web Conference (WWW2004), Poster Session. 324-325, New York, USA, 2004.

三、专著（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

四、授权发明专利（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

发明专利：一种新型语义关联挖掘方法（专利号：ZL 2012 1 0399288.5，已授权）

五、会议特邀学术报告（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

六、其他成果（请按发表或发布时的格式列出）（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无

七、获得学术奖励（仅不列此项时可删除该标题，标题序号按实际情况编排）

无



除非特殊说明，请勿删除或改动简历模板中蓝色字体的标题及相应说明文字

参与者 李宗花简历

李宗花 东南大学，计算机科学与工程学院，博士后

教育经历（从大学本科开始，按时间倒序排序；请列出攻读研究生学位阶段导师姓名）：

- (1) 2012/09–2016/06 河海大学，计算机与信息学院，博士 导师：周晓峰
- (2) 2003/09–2005/12 北京航空航天大学，软件学院，硕士 导师：林广艳
- (3) 1997/09–2001/07 西南大学，计算机与信息学院，学士

科研与学术工作经历（按时间倒序排序；如为在站博士后研究人员或曾进入博士后流动站（或工作站）从事研究，请列出合作导师姓名）：

- (1) 2006/01–至今，淮阴师范学院，计算机科学与技术学院，讲师
- (2) 2016/12–至今，东南大学，计算机科学与工程学院，博士后，合作导师：李必信

曾使用其他证件信息（申请人应使用唯一身份证件申请项目，曾经使用其他身份证件作为申请人或主要参与者获得过项目资助的，应当在此列明）

无

主持或参加科研项目（课题）及人才计划项目情况（按时间倒序排序）：

无

代表性研究成果和学术奖励情况（每项均按时间倒序排序）

（请注意：①投稿阶段的论文不要列出；②对期刊论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、期刊名称、发表年代、卷（期）及起止页码（摘要论文请加以说明）；③对会议论文：应按照论文发表时作者顺序列出全部作者姓名、论文题目、会议名称（或会议论文集名称及起止页码）、会议地址、会议时间；④应在论文作者姓名后注明第一/通讯作者情况：所有共同第一作者均加注上标“#”字样，通讯作者及共同通讯作者均加注上标“*”字样，唯一第一作者且非通讯作者无需加注；⑤所有代表性研究成果和学术奖励中本人姓名加粗显示。）

一、期刊论文（仅不列此项时可删除该标题）

1. 第一作者论文（仅不列此项时可删除该标题）

- (1) 李宗花*, 周晓峰, 吴克力, 陈伏兵, 基于扩展 Petri 网模型的 BPMN 形式化. 计算机科学, 43(11):40-48,2016
- (2) Zonghua Li*, Xiaofeng Zhou, Aihua Gu, Qinfeng Li, A complete approach for CIM modelling and model formalising. Information and Software Technology, 65, 39–55,2015
- (3) 李宗花*, 周晓峰, 顾爱华, 李勤丰, CIM 建模及模型形式化方法研究综述. 计算机应用研究. 31(10):2896-2901,2014



附件信息

序号	附件名称	备注	附件类型
1	李必信获得教育部奖励	教育部高等学校科学技术奖自然科学二等奖，排名第一	科技奖励
2	黄志球获得教育部奖励	教育部高等学校科学技术奖自然科学二等奖，排名第二	科技奖励
3	代表论文之一		代表性论著
4	代表论文之二		代表性论著
5	代表论文之三		代表性论著
6	代表论文之四		代表性论著
7	代表论文之五		代表性论著
8	与华为的合作项目		其他
9	专利01		专利
10	专利02		专利
11	专利03		专利
12	专利04		专利
13	专利05		专利
14	专利06		专利
15	专利07		专利
16	专利08		专利
17	专利09		专利
18	专利10		专利
19	专利11		专利
20	专利12		专利

**签字和盖章页(此页自动生成, 打印后签字盖章)**

申请人: 李必信

依托单位: 东南大学

项目名称: 软件工程需求动态不确定性及其智能架构理论和方法研究

资助类别: 重点项目

亚类说明:

附注说明: 软件工程需求动态不确定性及其智能架构

申请人承诺:

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助, 我将履行项目负责人职责, 严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 认真开展工作, 按时报送有关材料。若填报失实和违反规定, 本人将承担全部责任。

签字:

项目组主要成员承诺:

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助, 我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定, 切实保证研究工作时间, 加强合作、信息资源共享, 认真开展工作, 及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定, 本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称	证件号码	每年工作时间(月)	签字
1	黄志球	南京航空航天大学	320103196505162010	3	
2	孙昌爱	北京科技大学	32092319740718093X	6	
3	马宗民	南京航空航天大学	210102196511095772	6	
4	王森章	南京航空航天大学	370686198601237410	6	
5	何啸	北京科技大学	110108198312242710	8	
6	王璐璐	东南大学	320721198507030032	6	
7	张祥	东南大学	320106197906210013	6	
8	李宗花	东南大学	512324198107090487	8	
9	王真	北京科技大学	131122199403182449	10	

依托单位及合作研究单位承诺:

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助, 我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障, 严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定, 督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章

日期:

合作研究单位公章1

日期:

合作研究单位公章2

日期: