

产品配置的知识表示^{*}

王 涛¹ 李占山^{2,3} 孙吉贵^{2,3} 任 健^{2,3} 曹旭光²

(长春工业大学计算机科学与工程学院 长春 130012)¹

(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)²

(吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)³

摘 要 为按照用户的需要定制售卖产品的公司提供支持的基于知识的配置系统,产品配置器是人工智能技术的一个重要应用。本文首先描述了配置问题及其相关概念,然后分析了某些配置知识表示的优缺点,在此基础上提出了产品配置知识的图形表示方法,最后讨论了目前的一些热点研究问题。

关键词 大批量定制,产品配置,知识表示,广义产品结构

The Knowledge Representation of Product Configuration

WANG Tao¹ LI Zhan-Shan^{2,3} SUN Ji-Gui^{2,3} REN Jian^{2,3} CAO Xu-Guang²

(School of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012)¹

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012)²

(Key Laboratory of Symbol Computation and Knowledge Engineering for Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012)³

Abstract Knowledge-based systems for configuration tasks, product configurators, are an important application of AI techniques for companies selling products tailored to customer needs. In the paper, we first introduce configuration problems and some related notions, then we analyze the advantages and disadvantages of several knowledge representation for configuration, based on it we propose the graph-based knowledge representation of configuration, in the end, we discuss some active research problems.

Keywords Mass customization, Product configuration, Knowledge representation, General product structure

1 引言

配置问题是近年来一个十分活跃的研究领域,一方面作为 AI 技术应用领域发展的试验田,与 MC(mass customization)生产方式遥相呼应^[1];另一方面,作为 AI 理论研究的一个重要分支,受到众多研究人员的重视。于 1981 年开发的配置计算机的开创性专家系统 R1/XCON^[2],成为基于规则专家系统最经典的案例。由于其广泛的应用前景,近年来吸引了众多技术开发与理论研究人员的眼光。如美国人工智能协会组织的 AAAI'96 与 AAAI'99 秋季有关配置的专题、欧洲人工智能协会 ECAI 组织的 ECAI2000、ECAI2002 和 ECAI04 有关配置会议专题、国际人工智能协会组织的 IJCAI2001 与 IJCAI2003 有关配置研讨会吸引了众多著名学府与公司的研究与开发人员参加,并发表了大量相关论文;英国剑桥大学出版的 AI-EDAM 杂志分别与 98 与 2003 出版了关于配置问题研究与应用开发的专集;IEEE Intelligent Systems 也于 98 年出版了关于配置问题的专集;此外,像国际著名杂志人工智能、逻辑程序、约束程序等上面也经常能看到有关配置研究的论文出现。由于社会、制造企业等方方面面的大量需求,以及研究与开发人员的积极参与,产品配置问题在人工智能领域获得了空前的发展,如 Ilog、SAP、Cincom、Oracle、Trilog 等一些公司都有配置器产品可供用户选择^[3]。

任何一个配置任务的解决通常需要两个步骤:第一步需要对相关配置的领域知识进行表示;第二步是针对基于该种知识表示方法构造相应的算法,来解决问题。

目前国内外关于配置的知识表示有很多种不同的方法,各有其优缺点和应用侧重,本文对其部分配置的知识表示方法进行剖析与比较,并在此基础上提出一种基于图形的知识表示方法,能够实现配置系统与 PDM 系统的无缝集成,并且这种知识表示符合制造企业产品的 BOM(bill of material)管理方法,使用方便,具有直观明了的特点。

2 产品配置的相关概念

尽管配置问题的研究受到了广泛的关注,但对于配置的定义,大家还没有达到共识。研究者与系统开发者常常采用最适合本领域的定义,并且选择适合该领域的形式给出相应的定义。例如:Mittal 和 Frayman^[4]认为所谓配置任务就是:

给定:(A)一固定的组件集合,其中每个组件是由属性、连接该组件与其它组件的端口、描述连接到该端口组件的约束以及其它结构约束的集合所描述;(B)某预期配置的功能描述,以及;(C)最优化选择的可能标准。

构建:一个或多个配置满足所有的要求,其中配置是一个组件的集合与描述该集合中组件间连接的描述,或者检测与需求的不一致性。

^{*} 本文得到国家自然科学基金(60073039、60273080)和吉林省自然科学基金(20040526)资助。王 涛 讲师,硕士,主要研究基于模型诊断的应用。李占山 副教授,博士,主要研究领域为基于模型的诊断、配置问题及其求解。孙吉贵 教授,博士生导师,主要研究自动推理、约束推理、逻辑程序等。

Sabin 和 Weigel 也给出了配置的非形式定义^[6]：“配置是一种具有下面两个关键特征的特殊设计活动：配置的人工制品(artifact)是从充分定义的确定制件类型集合中的实例装配的，并且这些组件之间以预先确定的方式相互作用”。

Friedrich 和 Stumptner 从诊断角度出发，定义配置为：^[6]

定义 1(配置问题) 配置问题可以定义为逻辑句子集合的一个二元组(DD, SRS)，其中 DD 是领域描述， SRS 是与应用领域相关的特定(用户)需求。

实际上，配置是从给定领域中具有的各种类型组件目录中建立的，例如某公司电话交换机或计算机产品生产线都可以是我们研究的领域，它的零部件目录确定了配置的基本属性和建立不同组件间逻辑或物理连接集合(值域)。

定义 2(配置) 令(DD, SRS)是配置问题。配置可以定义为一个三元组($COMPS, CONNS, ATTRS$)，

其中： $COMPS$ 是构成某产品(变形)的组件集合。 $CONNS$ 是组件之间的连接约束基本文字集合， $conn(c1, p1, c2, p2)$ 表示组件 $c1$ 的 $p1$ 端口连接到组件 $p2$ 端口。 $ATTRS$ 是形如 $val(c1, a1, v1)$ 的基本文字集合，而 $val(c1, a1, v1)$ 表示组件 $c1$ 的属性 $a1$ 的值是 $v1$ 。其中属性可以是组件的长度、重量、颜色等。

定义 3(有效配置) 令(DD, SRS)是配置问题。配置($COMPS, CONNS, ATTRS$)是有效的当且仅当 $DD \cup SRS \cup COMPS \cup CONNS \cup ATTRS$ 可满足。

这个定义说明只有满足领域规范、用户需求与约束关系的零部件组合才是有效的。

笔者认为所谓产品配置通俗地讲就是满足领域知识与用户需求约束的零部件及相关属性值的有机组合。

3 产品配置的知识表示

在几乎所有的配置中都需要对研究对象进行知识表示，按照 Stumptner 的观点^[7]配置问题的知识表示主要分为两类，一类称为面向表示的配置，另一类为面向任务的配置。面向表示的配置观点认为配置中的关键问题是为了表达问题领域的结构与属性，要寻找合适的表示方法。如果表示是说明性的，能够选择适当的推理机制搜索配置解。表示方法的说明性有助于实现高度清晰的无冗余描述，而且可不必对领域知识进行复杂的改变就能够实现搜索的一致性。面向任务的配置观点认为配置的关键问题是正确识别要解决的子问题。问题的不同侧面实际上反映了不同的推理任务，使用全局策略决策来影响在问题的特定阶段产生哪个任务。面向任务的表示又常常规划到设计任务中去，因此本文主要描述面向表示的配置方法。

3.1 基于规则的配置

所谓基于规则的配置，其知识表示方法是基于 IF 条件 THEN 行动的产生式规则，其典型案例就是引言中提到的 R1，作为第一代专家系统的代表^[2]。优点是简单易用，效率高；缺点是知识库维护、更新困难。

3.2 基于结构的配置

基于结构的配置表示方法是由 Mittal 和 Frayman 提出的使用关键组件表示配置任务的通用模型方法^[4]，对于“结构”一词我们可以从两个方面进行理解：一个是指零部件彼此连接的不同方式(装配结构)，二是指描述要装配零部件详细属性的参数集合(个体组件结构)。参数称为属性，连接界面称为端口，整个系统的结构称为功能体系结构。笔者认为此

种表示方法优点是结构清晰、直观明了，适用于注重关键组件而可以忽略连接以外属性的产品；缺点是无法体现除连接以外属性，导致无法描述这些属性约束，如整车的价格不能超过 10 万，车体的颜色等，另外产品结构与组件的数量都受到限制。

3.3 基于约束的配置

所谓基于约束的配置是指我们把配置任务的约束形式看作约束满足问题，并且使用约束满足问题(CSP)描述特定领域的配置知识，即通过对组件附加参数变量建立产品配置约束关系。通常在此框架下又有层次值域约束满足问题^[8]、动态约束满足问题^[9]、元约束满足问题^[10]和复合约束满足问题^[11]方法表示配置问题。其中复合约束满足问题允许变量值是完整的子问题，基于聚合与分类为组织领域知识提供了良好的机制，通过使用搜索中维护约束网络局部一致性和利用问题层次与复合结构的特殊 CSP 算法提高效率。基于约束配置的优点：约束满足问题求解算法完全适用于求解配置解，能够很好地描述各种约束关系；另外，给定一个已有配置很容易通过检验 CSP 表示的配置一致性来验证它的修改，而不管这个配置是部分还是完全确定的。缺点：没有直观地体现出零部件之间结构(BOM)，与 PDM 系统集成接口会出现缝隙，用户界面不够直观明了，给熟悉 PDM 系统的领域专家建模带来不便。

3.4 基于资源的配置

基于资源的配置是以功能为线索，在资源提供的功能基础上寻找合适的组件(每个个体组件都看作系统中其他地方需要的资源提供者)^[12]，所需要的功能和零部件列表中组件提供的功能必须通过选择适当的组件集合达到彼此平衡，这样出现在配置中特定类型组件数目取决于一个配置解所需的资源量，基于资源配置产品所需的主要推理类型是资源平衡技术。优点是知识库具有积木式结构，组件间的关系不是使用端口而是根据它们的功能实现的，通过分离/拆分不同组件类型使得知识库的维护更加容易，这种知识表示适用于专业知识较少的一般用户；缺点是不能够把结构/拓扑知识和启发式知识加入进去，与基于结构方法相比回溯过多，组件类型的拆分受到限制，一般限定于几乎没有例外的清晰的设计产品上，不能够与制造部门的 BOM 结构相对应，对于专业人员使用会有诸多不便。

3.5 面向组件的配置

面向组件的配置吸取了基于结构和基于资源配置优点，组件类型是以继承层次安排的，因此与组件正确类型的选择顺序相一致，每当推导出限定可能子类的新信息时新的更加具体的子类能够从剩下的相容集合中选取。零部件之间的装配约束通过端口实现，其他约束关系通过类似于基于约束的方法实现。这种知识表示的优点是结构清晰、直观明了，通过分离/拆分不同组件类型使得知识库的维护更加容易，这种知识表示适用于专业知识较少的一般用户；缺点是不能够把结构/拓扑知识和启发式知识加入进去，不能够与制造部门的 BOM 结构相对应，对于专业人员使用会有诸多不便。面向组件配置工具的一个例子是由 Stumptner 等人开发的 COCOS 系统^[13]，其知识表示为扩充 DCSP 的广义 CSP(GCSP)。因此组件、变量、属性与约束都是根据需要动态建立的，COCOS 是为具有大量组件的配置系统设计的并且已经应用于总量达 4000 个组件的配置系统求解。

3.6 基于模型诊断框架下的配置

1999年Friedrich和Stumptner^[6]提出使用基于模型的诊断框架表示配置知识,给出了基于一致的配置知识方法。他们使用符号DD表示领域知识集合,SRS表示用户需求集合,组件、连接与属性值的三元组(COMPS, CONNS, ATTRS)代表配置,而把与DD和SRS相一致的三元组看作有效配置。此框架下的配置的优点是:能够进行知识的通用表示,使诊断领域获得的问题求解方法能够很自然地应用于配置问题之中,如配置求解方法^[6]、知识库的诊断^[19~21]等。在配置器知识库的诊断中知识库中的约束公式看作组件,而知识库的维护任务变成了搜寻那些如果删除掉会使知识库恢复一致的约束;缺点是组件之间的结构关系是通过端口实现的,使用者不能看到产品的BOM结构,求解过程计算复杂,需要采用分层或分解的方法提高效率,这是笔者目前正在进行的工作。

3.7 基于描述逻辑的配置

使用描述逻辑表示配置知识最初是由AT&T贝尔实验室研究开始的^[14],后来又有一些研究者使用这种方法处理配置问题^[15,16]。基于描述逻辑的配置采用面向对象建模以及基于框架结构方法描述配置知识,能够很好地处理层次结构与分类知识并能够较好地解释推理过程;缺点是约束关系的表示没有基于约束的方法方便灵活,并且推理求解能力较弱,往往需要借助于基于规则的系统提高推理能力。最近Junker和Mailharro使用描述逻辑与约束程序相结合的范式表示产品配置器知识^[17],这种表示方法既保留了上述两种形式的优点又克服了每种方法处理问题的缺陷,取得了很好的效果,目前已经应用到Ilog产品配置器中。

3.9 基于加权约束规则的配置

Soininen等人提出的使用加权约束规则表示配置知识^[18],使用稳定模型作为语义基础。在此知识表示下把知识分为配置模型知识、用户需求知识和配置解知识三类,使用规则集表示的配置模型知识确定出现在配置中的实体和这些实体如何组合的规则,被表示为另一类不同于配置模型知识状态的规则集用户需求知识,需要被配置所满足并且不需要为任何需求要素提供理由;被定义为配置模型中的规则集稳定模型的配置解知识确定一个配置。这种知识表示方法优点是配置的表示具有紧凑、简单与积木式,知识库的维护方便,推理能力强;缺点是计算复杂,没有受过专门训练的人员不易掌握。

3.9 基于案例的配置

基于案例的推理方法完全不同于前面描述的假配置知识的方法,该方法实际上属于面向任务的配置,由于具有更加通用的目标常被划分为设计系统一类中。这种配置方法从以前领域中已有配置解知识库出发,从中搜寻与当前未解决的案例最匹配的那些案例,并试图使用相应的解按照需求的不同做必要的改进以获得满足当前需要的配置^[7]。优点是不需要对整个领域的通用知识进行形式化,效率较高;缺点是如果选取了不适当的案例会影响该方法的效率,并且该方法需要一个充足的案例库存在,不能够保证找到有效解。后来Geneste和Ruet^[19]提出把基于案例的推理与约束满足问题相结合的办法,以此来处理信息的复杂性与不完全性,能够部分地弥补上述缺陷。

4 产品配置知识的图形知识表示

上一节我们剖析了当前主要使用的几种产品配置知识表示方法,并对各自的优缺点进行了分析,在此基础上我们结合

目前众多制造企业产品管理的实际情况(主要采用PDM系统),我们提出使用广义产品结构树进行配置知识的表示,下面扼要介绍其主要思想。

对企业产品配置管理情况有所了解的人能够知道,在企业中产品及其零部件结构一般是通过BOM(俗称为物料清单)实现的,它反映了一个产品与其零部件之间的结构与数量关系,根据它企业就可以组织设计、制造与装配活动。但是对于一个产品的BOM来说是确定的,它不能反映该产品所属产品系列的领域知识情况,因此不能满足第2节中提到的按用户要求灵活定制产品的需要。但是这种结构是企业产品管理情况的真实反映,并且体现了产品零部件之间的结构约束关系,具有直观明了的特点,符合企业产品管理的习惯。为此我们对这种产品知识管理方式进行扩充,利用扩充的有向树——广义产品结构树来表示企业中的产品系列。我们用有向树的根节点代表产品系列的名称;叶节点表示不可拆分的零件;中间的节点代表可拆分组件;树中的每一条弧都是虚拟的;对每一个结构没有确定的节点都附带有参数文件夹,文件夹中的参数供领域专家建立零部件之间的约束关系和用户选装使用^[20,21]。

与上述方法相比,这种知识表示的好处是零部件之间的连接关系直接通过树的数据结构实现;容易实现与PDM系统的无缝集成;具有直观明了,使用方便;可以直接使用已有的众多图形搜索算法;并且能够灵活建立零部件极其属性间约束关系。缺点是当问题规模较大时会出现运行效率问题,但这一问题可以通过分层抽象和模型分解的办法加以解决。

结论与展望 从上个世纪末期开始,人们的需求正逐渐从购买制造商提供的产品向制造商提供按照客户需求定制的产品方向上发展,进入新世纪以来,人们更加注重商品的个性化,越来越多的制造商为了满足客户的需求而提供了产品定制服务业务。为了满足社会的需求,作为大批量定制生产方式基石的产品配置器研究受到了研究与开发人员广泛的重视^[22,23]。虽然象Ilog、SAP、Cincom、Oracle、Trilog等一些公司都有配置器产品可供用户选择^[3],但由于产品复杂程度的日益提高以及应用领域的不断扩大,向研究与开发人员不断提出了新的挑战。本文在剖析已有知识表示方法基础上提出产品配置知识的图形表示方法,能够较好地反映企业产品配置管理方式,同时能够灵活建立产品约束关系。

由于产品配置问题涉及到配置的知识表示(建模)、知识相容性检测、知识的编译、配置求解、冲突解释以及与PDM、CAD和电子商务的集成等诸多问题,笔者认为下列问题是目前的研究热点:如何提高产品复杂或零部件数以千万记时配置求解效率是一个重点与难点;研究新的配置分解技术控制配置问题复杂性,使用冲突剪枝技术提高算法搜索效率,以及其他领域成功应用的技术提供配置效率,这也是我们目前正在进行的工作;由于产品零部件标准化,使一种产品的许多零部件供应商可能处于不同的地区,随着网络技术的提高为我们交互分布式配置产品提供了技术条件,因此开发新的适应这种分布式配置需求的配置器成为一个研究热点;与电子商务技术的结合能够使产品配置器获得广泛的应用空间,因此如何与电子商务技术有机集合也是一个值得研究的问题。

参 考 文 献

- 1 Pine II B J. Mass customization-the new frontier in business competition[M]. McGraw-Hill, 1993
- 2 McDermott J. R1: A rule-based configurator of computer sys-

- tems. Artificial Intelligence, 1982, 19(1): 39~88
- 3 <http://www.sics.se/isl/configuration/configurators.html>
- 4 Mittal S, Frayman F. Towards a generic model of configuration tasks. In: Sridharan N S, ed. Proc. of the 10th intl. joint conf. on artificial intelligence, San Mateo Morgan Kaufmann publishers, 1989. 1395~1401
- 5 Sabin D, Weigel R. Product configuration frameworks-A survey. IEEE Intelligent Systems, 1998, 14(3): 42~49
- 6 Friedrich G, Stumptner M. Consistency-based configuration. www.ifi.uni.klu.ac.at/IWAS/staff/Gerhard.Friedrich
- 7 Stumptner M. An overview of knowledge-based configuration. AI Communications, 1997, 10(2): 1~16
- 8 Kokeny T. A new arc-consistency algorithm for csps with hierarchical domains. In: workshop Notes of the ECAI'94
- 9 Mittal S, Falkenhainer B. dynamic constraint satisfaction problems. In: proc. of the 8th national conf. on artificial intelligence, AAAI Press, 1990. 25~32
- 10 Freuder E. Constraint solving techniques. Constraint Programming, 1992, 131: 51~74
- 11 Sabin D, Freuder E. Configuration as composite constraint satisfaction. In: Faltings B, freuder E, eds. Configuration-Papers from the 1996 Fall Symposium, AAAI Press, 1996. 28~36
- 12 Heinrich M, Jüngst E. A resource-based paradigm for the conf. of technical systems form modular components. In: Proc. of the 7th IEEE Conf. on AI Applications(CAIA), 1991. 257~264
- 13 Stumptner M, Haselböck, Friedrich G. COCOS-a tool for constraint-based, dynamic configuration. In: Proc. of 10 th IEEE Conf. on AI Applications(CAIA), San Antonio, 1994. 373~380
- 14 McGuinness D L, Wright R. An industrial-strength description logic-based configurator platform. IEEE Intelligent Systems & Their Applications, 1998, 13(4): 69~77
- 15 Wache H, Kamp G. Using description logic for configuration problems. <http://www.informatik.uni-bremen.de/~wache/publications.html>
- 16 McGuinness D. Configuration. In: Baader F, McGuinness B, narli D, eds. The Description Logic Handbook: Theory Implementation, and Application, Cambridge university Press, 2002. 397~414
- 17 Junker U, Mailharro D. The logic of ILOG(J) Configurator: combining constraint programming with a description logic, IJCAI on configuration, 2003
- 18 Soininen T, Niemela I, et al. Representing configuration knowledge with weight constraint rules.
- 19 Geneste L, Ruet M. Fuzzy case based configuration. In: Stumptner M, ed. Papers from the workshop at ECAI 2000 on Configuration, Berlin, Germany, 2000. 71~76
- 20 李占山, 王涛, 孙吉贵, 张朝辉. 产品配置器的工作机理研究. 计算机应用研究, 2004, 21(10)
- 21 李占山, 寇飞红, 孙吉贵, 王崧, 任键. 一种产品配置知识的图形表示与配置求解
- 22 Stumptner M, ed. Papers from the workshop at ECAI 2000 on Configuration, Berlin, Germany, 2000
- 23 Aldanodo M, ed. Papers from the workshop at ECAI 2002 on Configuration, Lyon, France, 2002

(上接第 48 页)

历了两个连续视图中的成员能够提交相同的介于这两个视图之间的消息集,使成员状态在视图发生变化时得到同步。成员的失效和脱离由基于流言的成员失效检测协议来完成。新成员的加入与网络融合以一个统一的对称方式处理,均可看成原本未连接的部分融合成为一个更大部分。这种处理方式也解决了系统启动时的问题:每个成员启动时其视图只含有其本身,所有启动的成员相互融合成为一个集合视图。视图的变化通过一系列的多播通信操作完成。

视图一致化协议包括 3 个阶段:

(1)变化发起:成员通过发送视图变化消息来发起一个视图变化过程。

(2)达成一致:所有的成员动态地对下一个要进行的视图变化达成一致。而且,所有的成员还必须对在下一个视图变化前需要提交的消息集合达成一致。这个消息集合包括在视图变化消息之前或同时发送的消息。这样做是为了满足前面提到的虚同步的性质。

(3)新视图提交:当在上一阶段达成一致的集合中的所有消息被提交之后,所有成员通过提交达成一致的视图变化消息来安装新的视图。

为了防止协议无法达成一致而无限地运行下去,协议的“变化发起”阶段和“达成一致”阶段均设置制定定时器来控制时间,它们开始执行后会在一个有限时间内终止。为了满足虚同步的性质,“新视图提交”阶段有可能包括上一视图的消息提交过程。这种情况发生在一个待提交的消息等待一个失效的成员 q 来发送 ACK 确认收到这条消息。当新视图提交把失效的成员从新视图中剔除出去后这个消息便可以顺利地提交。

大多数的传统组通信系统为了满足虚同步的性质在从得知视图开始发生变化直到新视图被提交的时间段内不允许成员发送应用消息,这样会浪费掉宝贵的运算时间和网络资源。为了满足虚同步的性质并且无需在视图变化期间阻止成员发送应用消息,我们采用了乐观虚同步机制^[7]。在乐观虚同步中,每个新视图安装之前都会有一个乐观视图,乐观视图是对下一可能视图的估计。当成员接收到乐观视图便进入乐观模

式。在这种模式下,成员接收上一视图的消息,也可以乐观地发送消息,以便在下一个视图中传递。在乐观模式发送的消息叫乐观消息。当成员安装新视图后回复到正常模式并检查是否可以在新视图里提交乐观消息。一条乐观消息发送时所在的乐观视图如果是新视图的子集,这条乐观消息便可以提交;否则将被回滚(rollback)。

结束语 SGCS 组通信系统采用了基于流言的协议与确定性协议组合的设计方法。可靠消息传输服务中的基于随机流言的多播协议与组成员管理服务中的基于流言的成员失效检测协议使系统负加在每个在成员上与网络上的负载随系统规模增长以对数的关系($\log N$)缓慢增长,及具有良好的可伸缩性,而消息恢复协议、流量控制协议与视图一致化协议保证了系统确定的可靠性。另外,多种消息提交次序的支持与乐观虚同步机制的应用时系统具有了良好的灵活性。综上所述,SGCS 系统为大规模协同应用提供了高性能的可靠可伸缩群组通信服务。

参考文献

- 1 Birman K P, Hayden M, Ozgur Ozkasap, Zhen Xiao, Mihai Budiu, Yaron Minsky. Bimodal Multicast. ACM Transactions on Computer Systems, 1999, 17(2): 41~88
- 2 范晓鹏. 基于随机闲聊的可靠多播的可靠性研究: [硕士论文]. 西安电子科技大学, 2004. 1
- 3 王伟波. 可伸缩随机成员管理策略的研究: [硕士论文]. 西安电子科技大学, 2004. 1
- 4 Birman K P, Gupta I. Building Scalable Solutions to Distributed Computing Problems using Probabilistic Components: [Cornell Technical Report]. 2004
- 5 Renesse V, Minsky RR, Hayden M. A Gossip-Style Failure Detection Service. In: Proc. of the IFIP Intl. Conf. on Distributed Systems Platforms and Open Distributed Processing Middleware ' 1998
- 6 Birman K, Joseph T. Exploiting Virtual Synchrony in Distributed Systems. In: 11th ACM Symposium on Operating Systems Principles, 1987
- 7 Sussman J, Keidar I, Marzullo K. Optimistic virtual synchrony. In: 19th IEEE Intl. Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS), 2000, 10: 42~51