

# 基于粒子群算法的认知无线电参数优化及敏感度分析

冯文江 李俊建 王品  
(重庆大学通信工程学院 重庆 400030)

**摘要** 认知无线电能根据环境变化和用户需求自适应调整工作参数。现有认知引擎大多采用遗传算法优化参数。但随着认知用户数的增加,遗传算法染色体增多,导致算法收敛时间过长,无法满足实时通信需求。将改进惯性因子的粒子群算法用于认知无线电工作参数的优化,并在不同通信模式下对传输参数进行敏感度分析,以便有选择性地从目标函数中剔除敏感度较低参数,降低处理复杂度。仿真结果表明,采用粒子群算法的参数优化在收敛速度、搜索效率和算法稳定性等方面均优于遗传算法,仅需较小的进化代数就能找到最优参数解,从而减小了优化时间,满足了认知无线电实时处理的要求。

**关键词** 认知无线电,参数优化,粒子群算法,敏感度分析

**中图分类号** TN929.5 **文献标识码** A

## Parameters Optimization and Sensitivity Analysis Based on Particle Swarm Optimization Algorithm in Cognitive Radios

FENG Wen-jiang LI Jun-jian WANG Pin

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract** Cognitive radio can adaptively adjust its working parameters according to users' needs and changes in the environment, most of the existing cognitive engines use genetic algorithm to optimize parameters, however with the increase in the number of cognitive users, the increased chromosomes result in long convergence time of genetic algorithm, which can't meet the needs of real-time communication. An improved inertia factor particle swarm optimization was used for parameter optimization in cognitive radio, and parameter sensitivity analysis on transmission parameters was done in different communication modes, so as to remove lower sensitivity parameters selectively from the objective function, and reduce the processing complexity. Simulation results show that parameter optimization based on particle swarm optimization has better convergence, efficiency and stability than genetic algorithm, and can successfully find optimal parameter solution at smaller evolution generation, reduce the optimization time, and meet the real-time processing requirement of cognitive radio.

**Keywords** Cognitive radio, Parameter optimization, Particle swarm optimization, Sensitivity analysis

无线频谱资源的稀缺是一种相对稀缺,即某些频谱上承载了大量业务,而另一些频谱却利用不足。美国 FCC 对无线频谱资源利用现状的调查结果表明,目前已分配频段的利用率为 15%~85%不等<sup>[1]</sup>,并且在不同时间、地区,频谱利用率也不相同。1999 年, Mitola 提出了认知无线电<sup>[2]</sup> (Cognitive Radio, CR) 的概念。作为一种智能无线通信技术,认知无线电能够感知电磁环境、无线信道特征及用户需求,并通过推理和对以往经验的学习,自适应调整内部配置和传输参数,优化系统性能,以适应环境和需求的变化。

认知无线电需要根据环境变化动态调整传输参数<sup>[3]</sup>,其实现过程是一个典型的动态多目标优化问题<sup>[4]</sup>。美国弗吉尼亚工学院研制的 CR 测试平台<sup>[5]</sup>采用遗传算法来优化认知无线电性能;文献<sup>[6]</sup>设计了单载波和多载波系统的一组适应度函数,并在多载波系统中用遗传算法实现参数优化;文献<sup>[7]</sup>

使用遗传算法来实现认知引擎的参数优化,并进行了参数敏感度分析。上述研究都局限于采用遗传算法。虽然遗传算法能满足认知引擎的处理要求,但收敛时间较长,会影响认知无线电的实时性。本文将改进惯性因子的粒子群算法用于认知无线电工作参数的优化,并通过描述在不同通信模式下的不同传输参数对认知引擎的影响程度,有选择性地从目标函数中剔除敏感度较低参数,从而降低处理复杂度,减少优化时间,满足认知无线电实时处理的要求。

## 1 粒子群算法

认知无线电作为一种智能通信系统,其智能主要体现在认知引擎上。认知引擎用来决策产生适合当前工作场景的一组工作参数。为了优化通信系统的性能,认知引擎常采用人工智能来优化工作参数。目前,认知引擎的实现方法主要有

到稿日期:2010-11-18 返修日期:2011-04-29 本文受国家自然科学基金(60872038),重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA2064)资助。  
冯文江(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等, E-mail:fwj@ccee.cqu.edu.cn;  
李俊建(1984-),男,硕士生,主要研究方向为认知引擎;王品(1987-),男,硕士生,主要研究方向为物联网应用。

基于案例的推理、基于规则的推理、遗传算法、粒子群算法、神经网络等。在这些算法中,粒子群算法具有通用性强、并行处理、参数调整规模小等优点。

### 1.1 基本粒子群算法

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是近年来提出的一种启发式搜索算法,源于对鸟群觅食行为的模拟,通过种群粒子中个体的交互作用来寻找复杂问题的优化解。PSO算法采用速度-位置搜索模型,先在搜索空间中随机产生一个初始种群,每个粒子的位置表征优化问题的一个可行解,并由待优化目标函数确定适应值,粒子性能的优劣程度取决于该适应值<sup>[8]</sup>。每个粒子在解空间中运动,由速度向量决定其飞行方向和速率大小。粒子通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优解。在每一代中粒子将跟踪两个极值:一个是粒子迄今找到的最优解 pbest,另一个是全种群迄今找到的最优解 gbest。

基本 PSO 算法为:在一个由  $N$  个粒子构成的  $D$  维目标搜索空间中,种群中第  $i$  个粒子的位置向量为  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 、速度向量为  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ 、搜索到的最优位置为  $p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$ ,整个种群搜索到的最优位置为  $p_g = [p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}]$ ,则第  $t$  代第  $i$  个粒子的位置和速度更新公式为

$$v_i^{t+1} = v_i^t + c_1 \times \text{rand}_1() \times (p_i - x_i^t) + c_2 \times \text{rand}_2() \times (p_g - x_i^t) \quad (1)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t$$

式中,  $1 \leq i \leq N, 1 \leq t \leq T_{\max}$  ( $T_{\max}$  为最大进化代数),  $c_1$  和  $c_2$  是学习因子,  $\text{rand}_1()$  和  $\text{rand}_2()$  用于产生分布于  $[0, 1]$  间的随机数。

基本 PSO 算法流程如图 1 所示。

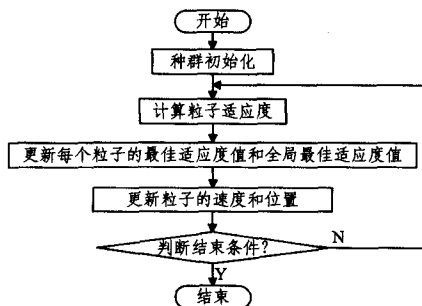


图 1 基本粒子群算法流程

### 1.2 改进惯性因子的粒子群算法

基本 PSO 算法存在一些固有缺陷,如在算法运行后期,种群多样性丧失和搜索速度迅速减小,导致算法停滞,会出现早熟收敛<sup>[8]</sup>。为了使 PSO 算法能够达到全局和局部寻优间的平衡,Shi 等人<sup>[9]</sup>在粒子位置更新公式中加入了惯性因子,提出了带惯性因子的 PSO 算法,进化方程变为:

$$v_i^{t+1} = w^t \times v_i^t + c_1 \times \text{rand}_1() \times (p_i - x_i^t) + c_2 \times \text{rand}_2() \times (p_g - x_i^t) \quad (2)$$

惯性因子  $w^t$  描述了粒子第  $t-1$  代速度对第  $t$  代粒子速度的影响,控制其取值大小可调节 PSO 算法的全局和局部寻优能力。 $w^t$  值越大,全局寻优能力强,局部寻优能力弱;反之,则全局寻优能力弱,局部寻优能力强。为提高算法优化性能,可采用惯性因子动态调节机制,如 Shi 建议的线性递减权重策略,即  $w^t = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) * t}{T_{\max}}$ ,其中,  $T_{\max}$  为最大

进化代数,  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别为最大和最小惯性因子,典型取值为  $w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.4$ 。

## 2 参数敏感度分析

参数敏感度分析用于分析系统中特定输入参数对输出的敏感程度,以此确定不同输入参数对输出的影响因子,为判断各输入参数的重要性提供依据。

敏感度定义为性能目标函数对输入参数的一阶导数,如  $S_x = \partial C / \partial x$ ,式中  $x$  为欲分析的输入参数,  $S_x$  为输入参数  $x$  的敏感度,  $C$  为输出目标函数。也可将敏感度简单定义为某输入参数变化所造成的目标函数值改变的百分比,即  $S_x = (\Delta C_x / C) \times 100\%$ 。

在进行参数敏感度分析时,首先必须确定系统性能指标与影响这些指标的主要参数以及取值范围,然后将这些主要参数在取值区间内做一定的变动,再代入模型中进行计算,以观察参数变动对总的性能或计算结果的影响程度。

本文在对认知无线电进行参数敏感度分析时,采用单因素分析法,具体步骤如下:

Step1 用 PSO 算法求出所有工作参数都自适应取值时的最大适应度值;

Step2 将欲进行敏感度分析的参数固定取值,其他参数都随机取值,用 PSO 计算此时的适应度值;

Step3 按照 Step2,变动欲进行敏感度分析的参数取值,计算目标函数适应度达到稳定时的最小值;

Step4 比较 Step1 和 Step3 得到的最大和最小适应度值,利用敏感度定义计算出该参数对认知无线电系统影响的敏感度。

## 3 基于改进 PSO 算法的认知引擎

参数自适应调整是认知无线电应具有的基本功能<sup>[5]</sup>之一。参数调整需要根据当前信道条件、用户需求等信息,优化设定的多个性能目标,并给出一种对多个目标折衷的最佳参数解决方案,从而使系统性能达到最优。

在基于改进 PSO 算法的认知无线电认知引擎参数优化中,需要调整的认知无线电传输参数包括发射功率  $P$ 、带宽  $B$ 、帧长度  $L$ 、符号速率  $R_s$ 、调整指数  $m$  等。PSO 算法将归一化目标函数作为衡量粒子性能的适应度函数,本文依据的优化目标有最小化误码率  $f_{\min\_ber}$ 、最大化吞吐量  $f_{\max\_tp}$ 、最小化功耗  $f_{\min\_power}$ 、最小化频谱干扰  $f_{\min\_spec\_int}$ 、最大化频带利用率  $f_{\max\_spec\_eff}$  等 5 种,以文献<sup>[10]</sup>的优化目标适应度函数为基础,并进行适当调整,得到上述优化目标的归一化表达式分别为:

$$f_{\min\_ber} = 1 - \frac{\log_{10}(0.5)}{\log_{10}(P_{be})} \quad (3)$$

$$f_{\max\_tp} = \frac{L}{L+H} * (1 - P_{be})^{L+H} \quad (4)$$

$$f_{\min\_power} = 1 - \frac{P}{P_{\max}} \quad (5)$$

$$f_{\min\_spec\_int} = 1 - \frac{P * B}{P_{\max} * B_{\max}} \quad (6)$$

$$f_{\max\_spec\_eff} = \frac{m * R_s * B_{\min}}{B * m_{\max} * R_{s\max}} \quad (7)$$

式中,  $P$  为传输功率,  $R_s$  为符号率,  $m$  为调制指数,其最大取值分别为  $P_{\max}, R_{s\max}, m_{\max}$ ;  $B$  为带宽,其最小取值为  $B_{\min}; L$

为帧长;  $P_{be}$  为误码率, 不同调制方式下  $P_{be}$  不同, 定义 0.5 为最差误码率取值;  $H$  为帧头开销, 取值 40 字节。

采用加权求和将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 总适应度函数  $F$  为:

$$F = w_1 f_{\min\_ber}(\bar{x}) + w_2 f_{\max\_tp}(\bar{x}) + w_3 f_{\min\_power}(\bar{x}) + w_4 f_{\min\_spec\_int}(\bar{x}) + w_5 f_{\max\_spec\_eff}(\bar{x}) \quad (8)$$

此时, 认知无线电参数优化就转化为调整各个传输参数以实现式(8)适应度函数的单目标优化问题。式中,  $w_i$  为各目标函数的权重, 且  $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ ,  $w_i$  反映了不同通信场景下目标函数  $f_i(\bar{x})$  的重要程度。对于不同的通信模式, 权值组合不同, 目标函数对应的权重设置也不同。

#### 4 仿真及结果分析

为了验证基于改进 PSO 算法的认知无线电参数优化性能, 选择表 1 所列的可调传输参数, 并依据表 2 所列的权重设置进行实验。表 2 中模式 1 适用于低功耗情况; 模式 2 适用于对可靠性要求较高的应用, 如保密通信; 模式 3 适用于对频谱干扰要求较高的通信; 模式 4 适用于高吞吐量应用, 如视频通信。

表 1 可调传输参数及其取值

参数名	取值
传输功率 P	-8; 2; 22dBm
带宽 B	2; 2; 32MHz
帧长度 L	100; 100; 1500Byte
符号率 Rs	125000; 125000; 1000000Sym/s
调制指数 m	[2 4 16 64 256]

表 2 不同通信模式下的权重

模式	$w = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5]$
模式 1	[0.05, 0.15, 0.60, 0.15, 0.05]
模式 2	[0.60, 0.05, 0.05, 0.15, 0.15]
模式 3	[0.05, 0.15, 0.15, 0.60, 0.05]
模式 4	[0.15, 0.60, 0.05, 0.05, 0.15]

PSO 算法的参数设置为: 种群中粒子数  $N=30$ , 学习因子  $c_1=c_2=2$ , 最大进化代数  $T_{\max}=80$ , 惯性因子  $w_{\max}=0.9$ ,  $w_{\min}=0.4$ 。参数敏感度采用简单定义法, 用 Low, Middle, High 3 种级别来描述该参数对认知无线电系统的影响程度。将导致适应度变动小于 10% 的参数定义为 Low, 变动在 10%~25% 之间的参数定义为 Middle, 变动大于 25% 的参数定义为 High。

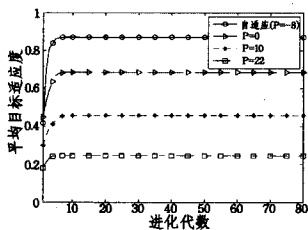


图 2 模式 1 下不同传输功率时适应度变化曲线

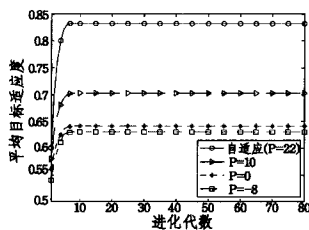


图 3 模式 2 下不同传输功率时适应度变化曲线

分别对模式 1 和模式 2 下传输功率  $P$  对适应度的敏感度进行分析, 得到每代所有粒子目标函数平均适应度值随进化代数变化的曲线, 如图 2 和图 3 所示。在模式 1 下, 适应度最大值  $F_{\max}=0.87$ , 最小值  $F_{\min}=0.25$ , 适应度变动范围  $S_{P1} =$

$\frac{F_{\max}-F_{\min}}{F_{\max}} \times 100\% = 71.2\%$ 。可见, 传输功率  $P$  在模式 1 下

对认知无线电系统影响的敏感度为 High; 同样可以分析, 在模式 2 下适应度变动范围为 24.3%, 故其敏感度为 Middle。就收敛时间而言, 由图可知, 大约经过 10 代迭代就能得出最佳优化适应度值, 相比于遗传算法需要 1000 代才能优化出最佳适应度值<sup>[6]</sup>, PSO 算法能更好地满足认知引擎的实时性要求。

类似地, 对所有参数在不同通信模式下分别进行参数敏感度分析, 其结果如表 3 所列。

表 3 认知无线电参数敏感度仿真结果

参数	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
P	High	Middle	Middle	High
L	Low	Low	Low	High
B	Low	Middle	Middle	High
Rs	Low	Low	Low	Low
m	Middle	Middle	Low	Low

由表 3 可以看出, 模式 1 下的帧长、带宽、符号率, 模式 2 下的帧长、符号率, 模式 3 下的帧长、符号率、调制指数, 模式 4 下的符号率、调制指数等参数在对应通信模式下的敏感度较低。在优化认知无线电参数时, 可调整的参数越多, 越利于系统达到更好的自适应状态, 但认知引擎实现的复杂度和系统处理时延会同时增加。为了降低系统复杂度和减小处理时延, 在参数优化时, 有选择地将敏感度较低参数从优化目标适应度函数中剔除, 用固定取值取代, 有利于在实现复杂度和处理时延之间寻求折中。

**结束语** 本文利用改进惯性因子的粒子群算法来实现认知无线电的参数优化, 并在不同通信模式下对传输参数进行了敏感度分析。结果表明, 采用 PSO 的认知引擎参数优化在收敛时间、搜索效率和算法稳定性等方面的性能均优于遗传算法, 能在较少进化代数中找到最优参数解, 减少了优化时间, 满足了认知引擎实时处理要求。另外对传输参数进行了敏感度分析, 在参数优化时可以选择性地从目标函数中剔除某些敏感度较低参数, 以降低系统复杂度。

#### 参考文献

- [1] FCC. Spectrum Policy Task Force Report[R]. ET Docket, No. 02-155. Nov. 2002
- [2] Mitola J. Cognitive Radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18
- [3] Jiang H, Liu Y, Zhang X Q, et al. Design of Cognitive Radio Node Engine Based on Genetic Algorithm[C]// WASE International Conference Information Engineering (ICIE '09). July 2009, 2: 22-25
- [4] Ma J H, Jiang H, Hu Y C, et al. Optimal Design of Cognitive Radio Wireless Parameters based on Non-dominated Neighbor Distribution Genetic Algorithm[C]// Eighth IEEE/ACIS International Conference Computer and Information Science (ICIS 2009). June 2009: 97-101
- [5] Rieser C J. Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking[D]. Virginia Poly-

[6] Newman T R, Barker B A, Wyglinski A M, et al. Cognitive Engine Implementation for Wireless Multicarrier Transceivers[J]. Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, 7 (9): 1129-1142

[7] Newman T R, Evans J B. Parameter Sensitivity in Cognitive Radio Adaptation Engines[C] // 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN

[8] 刘晶晶. 粒子群优化算法的改进与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007

[9] Shi Y, Eberhart R C. A Modified Particle Swarm Optimizer[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1998; 69-73

[10] Newman T R. Multiple Objective Fitness Functions for Cognitive Radio Adaptation[D]. University of Kansas, 2008

(上接第 67 页)

图 6 对比了两种情况下 STR 随时间的变化规律。从图可以看出两者都可以对 SMS 类恶意节点进行有效的识别, 但识别的效果却有差别。FCTrust 在 400ms 时, 就可以完全区分出网络中的正常节点与 SMS 节点, 使 STR 达到稳定; 而集成了 SPRI 协议的 FCTrust 则要花更长的时间(大约 500ms) 才能达到同样的效果。这是因为部署了 SPRI 的信任管理系统在运行过程中, 需要不断地对有信任交互的节点进行身份验证, 并对信任信息在 P2P 网络的传输做完整性鉴别, 这些安全操作都需要花费时间, 图 6 的实验结果验证了在第 4 节中对 PDSI 协议的时间性能的分析结论。从图可知, 两者花的时间相差约 100ms, 这个差距在实际的工程应用中是一个相当小的差距, 进一步说明我们所提出的 SPRI 协议的运行成本较低, 性能优越, 具备一定的工程可行性。

## 6 相关工作

文献[6]提出了一种改进的安全传输协议, 该协议使用随机数抵御重放攻击, 使用数字签名保证信誉值的一致性和完整性, 其公钥依旧在不安全的信道上传输, 而且选举回应包的传输是按选举包消息传输的路径逆序回传, 该路径的任一节点都转化该消息包, 依旧无法阻止中间人攻击。

文献[7]中每个节点只存储自身的历史交互活动信息供其他节点直接查询。同时, 为确保护这些信在传输过程不被故意更改, 对该值采用加密和数字证书的安全手段构成一个不可删除和修改的信息链, 链头由目标节点自己提供。K. A. Burton 等<sup>[8]</sup>则在基于信任网络(Web of Trust)的分布式信誉系统 OpenPrivacy 也提出相应的安全消息传输协议。

文献[9]基于对现有信任管理机制的分析, 认为在信任管理中, 为了确保档案点的安全, 即不受到恶意节点的攻击, 匿名性是一种必要属性。基于这一思想, 同时基于公钥机制提出了一种支持匿名的信誉管理机制 TrustMe, 其基本设计思想是: 通过引入一个引导服务器(Bootstrapping Server, BS), 基于节点自身的安全设施实现对信誉信息访问的匿名性以及信誉信息管理的保障性。

在 TrustMe 的基础上, 文献[10]提出了一种基于 DHT 的分布式信任管理机制 RepMan, 通过在信任管理中加入一定的安全机制, 在确保信任分布管理高效的同时提供了安全和可靠的保障。但存在如下不足:

(1) 同 TrustMe 一样, RepMan 也引入了一个 BS 作为系统的基本安全设施, 这相当于一个与认证中心(CA)类似的中心节点, 但依然存在可扩展性差、单点失效的风险。

(2) 密钥体制与认证过程过于复杂, 实践起来比较困难, 而且加重了信任管理系统本身的运行成本与负担, 其理论价

值大于其工程应用价值。

**结束语** 信任信息的真实可信是确保信任管理机制发挥作用的基础。在分析现有的信任管理机制存在的安全隐患的基础上, 提出了一种面向 P2P 网络环境的信任管理系统安全防护协议 SPRI, 用于解决信任管理中的冒名及信任信息传输中被截获篡改的问题。通过对 SPRI 的安全性分析及实验分析表明, SPRI 协议可以有效地应付针对信任管理的多种与安全性相关的攻击, 运行成本较低, 性能良好, 具备一定的工程可行性。而且, 该协议可广泛地应用于各种信任管理系统, 具有普适性。

## 参考文献

[1] Aberer K, Despotovic Z. Managing trust in a Peer-to-Peer information system[C] // Proceedings of the 10th International Conference on Information and Knowledge Management (ACM CIKM). New York, USA, 2005; 310-317

[2] Wang Yao, Vassileva J. Trust and Reputation Model in Peer-to-Peer Networks[C] // Third International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P03). Linköping, Sweden, September 2006

[3] 窦文, 王怀民, 贾焰, 等. 构造基于推荐的 Peer-to-Peer 环境下的 Trust 模型 [J]. 软件学报, 2004, 15(4): 571-583

[4] 胡建理, 吴泉源, 周斌, 等. 一种基于反馈可信度的分布式 P2P 信任模型[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2885-2898

[5] Kamwar S D, Schlosser M T, Hector G-M. The eigentrust algorithm for reputation management in P2P networks[C] // Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web. Budapest, Hungary, 2004; 640-651

[6] Siekab, Yaniad K, Singhal M. On the security of polling protocols in Peer-to-Peer systems[C] // Proceedings of the Fourth International Conference on Peer2to2Peer Computing (P2P04). Washington; IEEE Computer Society, 2009; 241-249

[7] Dewan P, Dasgupta P. Securing reputation data in peer-to-peer networks[C] // International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, PDCS. 2008

[8] Xiong L, Liu L. PeerTrust: Supporting reputation-based trust in peer-to-peer communities[J]. IEEE Transactions on Data and Knowledge Engineering, Special Is-sue on Peer-to-Peer Based Data Management, 2004, 16(7): 843-857

[9] Singh A, Liu L. TrustMe: Anonymous Management of Trust Relationships in Decentralized P2P Systems[C] // Proceedings of the third IEEE International Conference on P2P Computing. Linköping, Sweden, Sept. 2008; 142-149

[10] 唐扬斌, 王怀民, 常俊胜. 自组织虚拟计算环境中的组信誉机制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(8): 1968-1986