

IEEE802.15.4 动态自适应 CSMA/CA 算法设计与仿真

蒋子峰, 陆建德

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215008)

摘 要:在无线传感器网络中,节点的业务负载是随网络节点的位置和网络运行的时间不断变化的,又由于每一个节点能量有限,功耗是无线传感器网络性能的重要参数之一。针对无线传感器网络的这些特点,对 IEEE802.15.4MAC 层协议的关键技术进行了阐述,讨论了 CSMA/CA 信道访问机制在动态自适应方面的不足,进而设计提出了一种基于动态自适应的低功耗退避算法-DA-CSMA/CA 算法,最后对该算法进行了仿真分析。仿真结果表明,该算法在网络拓扑相对固定的环境中能在低功耗的前提下很好地适应网络流量的变化。

关键词:IEEE802.15.4;MAC 层协议;DA-CSMA/CA;低功耗

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)09-0069-05

IEEE802.15.4 Dynamic Adaptive CSMA/CA Algorithm Design and Simulation

JIANG Zi-feng, LU Jian-de

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215008, China)

Abstract: In wireless sensor networks, service load of the network node was changing all the time with the node location and the time for network operations. Besides, because of low power capacity of each sensor node in wireless sensor networks, energy consumption was one of the important performance parameters in wireless sensor networks. In view of these characteristic of wireless sensor networks, carried on the detailed elaboration to the key technologies of MAC protocol of IEEE802.15.4, discussed the shortcomings of the CSMA/CA channel access mechanism in dynamic adaption. Then designed the low-power backoff algorithm based on dynamic adaption which called DA-CSMA/CA. The result of the final simulation of the algorithm shows that the algorithm can be well under the premise of low-power adaptive network flow rate changes in the certain network topology.

Key words: IEEE802.15.4; MAC protocol; DA-CSMA/CA; low-power consumption

0 引 言

无线传感器网络^[1]节点通常采用电池供电^[2],节点的能量非常有限,并且电池在使用过程中不能随时充电,节点的使用寿命直接影响到整个网络的寿命,为了延长网络的寿命,能量有效性成为无线传感器网络应用中首要的一个设计指标^[3];另外,传感器节点在网络拓扑中所处的空间和时间不同,节点的业务流量也会不同。所以,如何通过适当的方法在不影响网络正常工作的情况下,减小节点的功耗并且使其适应网络负载的变化,对于无线传感器网络具有重要的意义。

文中在无线传感器网络低功耗特点的基础上,针对 IEEE802.15.4CSMA/CA 算法不能很好地适应节点业务流量的变化这方面的不足,提出了一种根据感知节点业务流量动态调整退避指数和重传自增值的动态自适应退避算法-DA-CSMA/CA 算法。文章首先回顾了 IEEE802.15.4MAC 标准^[4],然后分析了原退避算法在动态自适应方面的不足,最后对原方案进行了改进并提出了新算法。仿真实验表明,新算法能够在感知节点业务流量的情况下通过调整退避指数寻找到最优的退避周期,从而减小业务数据包的冲突,在吞吐量和能耗两方面都较原算法有很大的改进。

收稿日期:2010-01-24;修回日期:2010-04-06

作者简介:蒋子峰(1984-),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为无线网络;陆建德,教授,硕士研究生导师,研究方向为计算机网络、无线网络。

1 IEEE802.15.4 MAC 回顾

IEEE802.15.4 标准是 IEEE802.15 工作组为低速率无线个人区域网络(wireless personal area network,

WPAN)的应用而设计的一种无线组网技术,该标准把低能量消耗、低传输速率、低成本作为重点目标,旨在为个人或者家庭范围内不同设备之间的低速互连提供统一标准^[5]。网络节点的能量控制由物理层控制实现,而 MAC 层起到主导和指挥的作用。

1.1 超帧

在 IEEE 802.15.4 标准中,采用以超帧为运行周期来组织网络节点进行通信^[6]。如图 1 所示,每个超帧通常由两部分组成:活动部分和非活动部分^[7]。超帧的活动期负责网络设备之间的相互通信,通常分成三个阶段:信标帧发送时段、竞争访问时段(contention access period, CAP)和非竞争访问时段(contention-free period, CFP)^[8]。信标处于每个超帧的起始部分,每个信标都是由网络协调器发出的,其中含有超帧持续时间以及每个时间段的分配信息,信标的主要作用是维持各个节点之间的同步。超帧在信标后的部分为网络通信时段:在 CAP 周期内,网络中的设备采用载波监听多路访问/冲突避免的访问控制机制来争用信道;在 CFP 周期内,所有设备的传输都由预先设定好的时隙决定。在非活动期间,设备关闭收发器,不会与网络中的其他设备进行通信,从而可以进入休眠状态来节省能量。

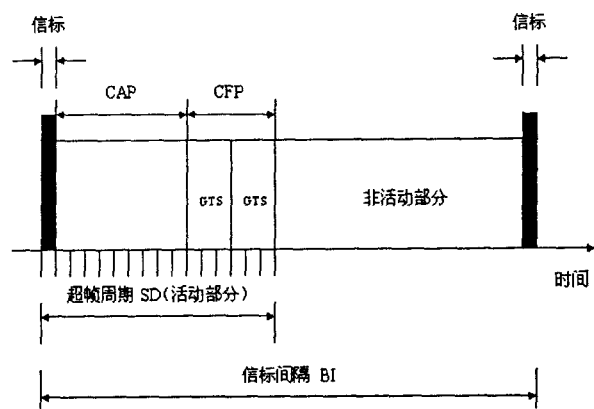


图 1 超帧结构图

超帧通信时间和休眠时间的比例是由 MAC 层 PIB 属性 macBeaconOrder 和 macSuperframeOrder 的值来描述的^[9]。MacBeaconOrder 描述了协调器发送信标帧的间隔,简称为 BO,它与图 1 中的信标间隔 BI 的关系为:当 $0 \leq BO \leq 14$ 时, $BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}$,如果 $BO = 15$,表示网络不使用信标;macSuperframeOrder 描述了超帧激活期的长度,简称为 SO,信标帧包含在激活期部分,它与图 1 中的超帧持续时间 SD 的关系为:当 $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ 时, $SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}$,如果 $SO = 15$,超帧在信标帧后,将不保持激活状态。

1.2 CSMA/CA 信道访问机制

CSMA/CA 算法是 ZigBee 技术的关键之一^[10]。在 IEEE802.15.4 标准中,CSMA/CA 算法是各网络设备在超帧竞争访问时段争用信道所采用的一种机制。CSMA/CA 是指载波侦听、多路访问、冲突避免^[1]。在 ZigBee 网络中,根据网络中是否使用信标,分别采用带时隙和不带时隙的 CSMA/CA 算法来争用信道的使用权。文中讨论信标使能的 ZigBee 网络,使用带时隙的 CSMA/CA 算法,原始算法的执行流程如图 2 所示。

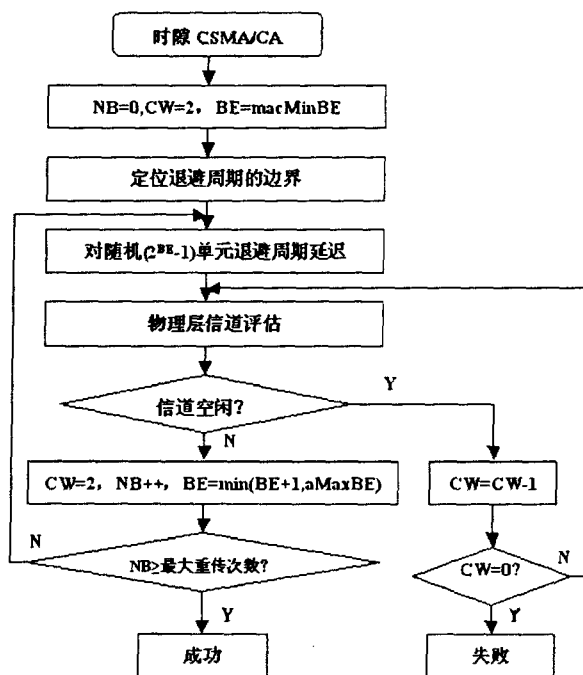


图 2 时隙 CSMA/CA 算法流程

从图 2 中可知,IEEE802.15.4 标准中的带时隙的 CSMA/CA 算法中主要维护三个变量:NB, CW 和 BE, NB (Number of Backoff) 是指在争用传输之前,算法需要退避的次数,初始化为 0;CW (Contention Window) 是指竞争窗口的大小,只适用在时隙 CSMA/CA 算法中,初始化为 2;BE (Backoff Exponential) 是指退避指数,它的值决定了一个设备接入信道前需要等待的退避周期,初始化为 MAC 层 PIB 属性 macMinBE 的值。整个算法执行流程如下所示^[11]:

- 1) 根据 MAC 层 PIB 的值初始化 NB、CW 和 BE 三个变量,定位下一个退避周期的边界。
- 2) 根据设定的 BE 的值,在 $[0, 2^{BE} - 1]$ 之间取一个随机数,并且延迟这个随机数个完整的退避周期。
- 3) 在退避周期边界处请求物理层信道评估。
- 4) 信道空闲的情况。继续检测是否有其他设备同时争用信道,即竞争窗口 CW 是否为 0。若 CW 等于 0,则争用信道成功,设备在下一个退避周期边界处开始占用信道;若 CW 不等于 0,则将 CW 减 1,算法返

回步骤3,并在退避周期的边界处重新执行物理信道评估。

5)信道忙的情况。NB和BE的值都加1,并将CW的值设为2。首先判断BE的值是否大于PIB设定的最大BE值 $aMaxBE$,若BE大于 $aMaxBE$,则重新设定BE为 $aMaxBE$ 。接着再判断NB的值是否小于或者等于PIB设定的信道访问失败最大退避次数 $macMaxCSMABackoff$ 。若NB的值小于或者等于 $macMaxCSMABackoff$,则网络设备进行重传,算法返回步骤2;若NB的值大于 $macMaxCSMABackoff$,则争用信道失败。

2 DA-CSMA/CA 算法设计仿真

2.1 原始算法的不足

在IEEE802.15.4标准中,CSMA/CA算法是通过调节退避指数BE来解决网络碰撞的问题^[10]。当竞争信道发生碰撞冲突后,退避指数BE的值增加1,整个退避窗口的大小扩大一倍。当数据传输成功后,退避指数BE的值重新设为最小值,同时退避窗口大小也变为最小;同时,算法在设备竞争信道失败时线性增加重传计时器NB,通过检测NB的值是否大于门限值来决定争用信道是否成功。在网络业务流量较低时,该算法执行效率良好。但当网络业务流量提高时,网络中需要传输数据的节点增多,一方面,节点在成功传输完数据后均将退避窗口减小到最小,而此时网络中发生碰撞的概率依然很高;另一方面,业务流量的提高将引起重传次数的增加,在较高负载的网络中不断地重传必然会引起网络的恶性循环,导致网络拥塞。

IEEE802.15.4标准MAC层协议采用CSMA/CA算法来竞争信道访问权。在业务负载不断变化的网络环境中存在一定的不足之处,具体表现为以下几点:

1)初始BE的设定:初始BE取值的大小决定了节点第一次执行CSMA/CA算法所要退避的次数的多少,原始算法把初始BE值固定设为 $macMinBE$ (默认值为3)。当处于负载不断变化的网络中时,当负载很轻时,没有大量的节点竞争信道,可能引起不必要的指数退避;对于负载较重时,初始BE设定过小,可能引起节点在经过较短退避后总是得不到空闲信道,从而引起重传。

2)重传次数NB的增加:从图2中可知,在每次退避过后节点发现信道忙时,会使得重传次数NB加1,当NB加到 $macMaxCSMABackoffs$ 时,表示此次CSMA失败,丢失该帧。在网络负载较轻时,在加大退避指数的前提下,重传能够解决网络中偶尔的碰撞;在网络负载较重时,很可能存在大量节点同时竞争信道,NB的

线性增长可能引起节点的不断重传,而结果还是将使NB超过门限值,导致传输失败。

2.2 DA-CSMA/CA 算法设计

针对IEEE802.15.4CSMA/CA算法在传输速率变化环境下的不足,提出一种基于动态自适应的退避算法-DA-CSMA/CA算法。

●算法的设计思想如下:

1)对于初始BE的设定:根据网络的负载轻重,动态地调整初始BE的大小。使得在网络负载较轻时,初始化较小的BE,减少不必要的退避次数;在网络负载加大后,初始化较大的BE,扩大退避范围,减小重传概率。

2)对于重传次数NB的增加:同样根据网络负载的轻重,动态调整NB的增长幅度。使得网络负载较轻时,NB保持原有的线性加1增长;当网络负载加大后,冲突必将增多,重传发生的概率将增大,由于事先根据网络流量已经设定了最优的初始BE值,故重传将不能更有效地增大退避窗口,于是,适当加大NB的增大幅度,减少不必要的重传。

●算法设计的具体方案如下:

1)感知网络负载的大小。

用节点单位时间内发送的分组个数表示该节点的平均业务流量G。根据节点的拓扑环境以及整个传感器网络的整体性能,设置一个节点平均业务流量下限 $Gmin$ 和一个节点平均业务流量上限 $Gmax$ 。

2)根据网络负载大小调整初始BE。

根据MAC PIB属性值,调整 $macMinBE$ 为最小值0,调整 $macMaxBE$ 为最大值8。则初始BE的取值范围为0~8,根据节点的平均业务流量G,若 $G < Gmin$,则BE值自减,若 $G > Gmax$,则BE值自增,若G在 $Gmin$ 和 $Gmax$ 之间,则BE值保持不变。通过NS2网络仿真软件模拟网络环境,选择一定数量的节点组成固定的拓扑,给予每个节点固定的初始能量,取一定量的节点业务流量G,模拟网络运行,计算出在不同流量区间的最佳初始化 BE_G 值。

3)根据网络负载大小调整NB的增加。

把每次NB自增值设为 I_G ,首先把MAC PIB属性值中 $macMaxCSMABackoffs$ 设为最大值5,根据初始化BE的值的大小动态调整NB的增加幅度,当初始化BE为0、1、2时, $I_G = 1$;初始化BE为3、4、5时, $I_G = 2$;初始化BE为6、7、8时, $I_G = 3$ 。

DA-CSMA/CA算法的执行流程如图3所示。

2.3 NS2 仿真过程

使用NS2仿真软件^[12]对新提出的退避算法进行仿真分析,通过对节点的吞吐量和能耗的对比,验证在

流量变化环境下新算法的优越性。仿真参数如表 1。

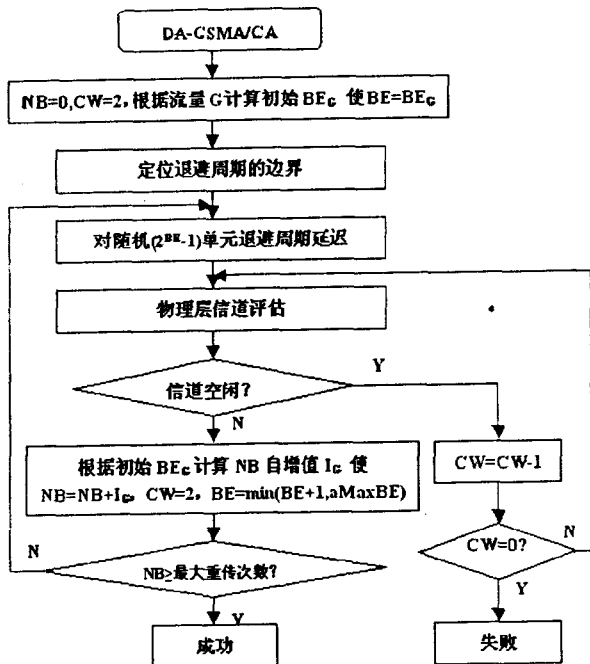


图 3 DA-CSMA/CA 算法流程

表 1 仿真参数

参数	值
网络大小	50m * 50m
仿真时间	200s
节点个数	6 个节点, 一个网络协调器
拓扑结构	星型
业务类型	CBR
分组间隔	0.1s/packet ~ 1.0s/packet
CBR 大小	32Byte
路由协议	DSDV
能量模型	Energy Model
初始能量	100J
接收功率	35mW
发送功率	31mW
空闲功率	712μW
睡眠功率	1114nW

在文中的仿真模型中,网络范围为 50m * 50m, 包含一个网络协调器和 6 个网络节点,采用 DSDV 路由协议,并且应用了能量模型来计算网络能量的消耗,能量模型的参数依照 CC2420 传感器节点参数规格设定。利用发送数据包的时间间隔来表示节点的业务流量, Gmin 和 Gmax 的设定分别为 1/(0.4s/packet) 和 1/(0.6s/packet)。

图 4 显示了在不同的负载情况下, DA-CSMA/CA 算法和原始算法在网络吞吐量方面的对比,从图中可知,在分组间隔为 0.4, 0.5 和 0.6 的时候,原始算法的初始 BE 值为最优,此时,改进算法和原始算法的吞吐量曲线重合;而在其他负载情况下,改进算法通过感知当前网络的流量,动态调整了退避指数和重传自增

值,在负载较重时,加大了退避指数和重传自增值,从而减少了冲突的发生几率,在负载较小时,减小退避窗口,加大响应时间。在整体上使网络性能达到最优,加大了网络的吞吐量。

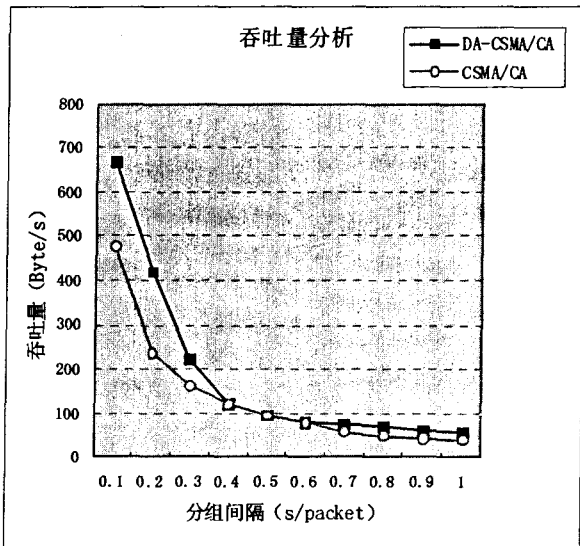


图 4 吞吐量分析

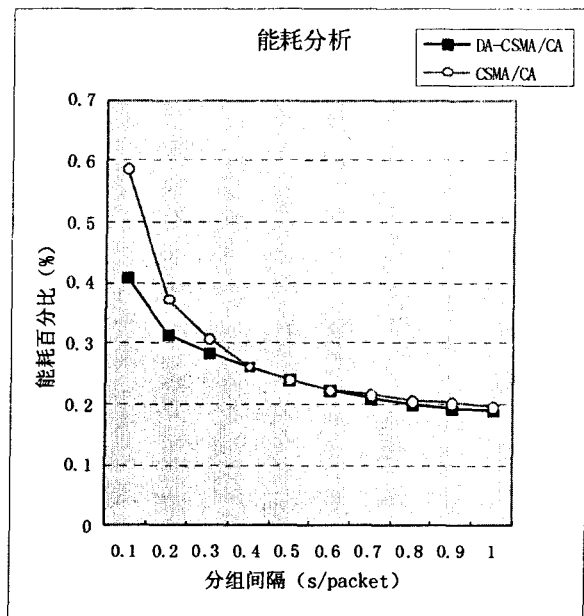


图 5 能耗分析

图 5 显示了在不同负载情况下,两种算法在能耗方面的对比,随着发送分组间隔的加大,数据传输速率在减小,节点能耗也在降低。原始算法采用固定初始退避指数和重传自增值,能耗不能在整体上达到最优; DA-CSMA/CA 算法通过感知当前网络流量,自适应地调整相应参数,使得网络在较高负载情况下能通过减少数据冲突和重传次数达到减小能耗的目的,在负载较小时,初始化较小的退避指数,能耗和原方案相当。改进后的方案能从整体上减少了节点的能耗。

仿真实验结果表明:通过感知当前网络流量,动态调整初始退避指数值 BE 和重传次数自增值 I 的 DA-CSMA/CA 算法,在动态变化网络负载的情况下,能显著地加大网络的吞吐量并且降低功率消耗。

3 结束语

文中首先阐述了 IEEE802.15.4 MAC 层协议的主要方面,并对 CSMA/CA 信道访问机制做了进一步的说明;针对 CSMA/CA 算法在动态自适应方面的不足,提出了一种低功耗的退避算法 - DA-CSMA/CA 算法,并对算法的设计思想和实现进行了相应的说明;最后通过仿真实验,证明了该算法在变化环境中能够显著地减少数据包的冲突,进而节省节点的能量。然而,该算法在拓扑频繁变化的环境中需要经常更新不同流量区间的最佳 BE_G 值,这将是额外的能量开销。无线传感器网络依赖于实际应用,协议中的大量的保留参数是为不同变化的环境专门预留的,因此,这一领域还有待进一步开放与研究。

参考文献:

- [1] Erosy D I, Alagoz F C. A Survey of MAC protocols for wireless sensor networks[J]. Communications Magazine, 2006, 44

(4):115-121.

- [2] 李晓维,徐勇军,任丰原.无线传感器网络技术[M].北京:北京理工大学出版社,2007.
- [3] 任丰原,黄海宁,林 闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [4] Estrin D. Sensor Network Protocols[R]. [s. l.]: [s. n.], 2002.
- [5] 孙利民,李建中,陈 渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [6] 赵 铮. IEEE802.15.4 MAC 协议研究[D]. 郑州:中国人民解放军信息工程大学,2007.
- [7] 吉 诚,徐友云,郑宝玉.基于 802.15.4 退避算法的改进机制[J].信息技术,2008(8):8-12.
- [8] IEEE Standard for Part 802.15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks[S]. 2003.
- [9] 蒋 挺,赵成林.紫蜂技术及其应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2007.
- [10] 王月平,耿晓菊,刘春涛. IEEE802.15.4 MAC 协议低功耗研究[J].计算机技术与发展,2009,19(12):139-142.
- [11] 金 纯,罗祖秋,罗 凤,等. ZigBee 技术基础及案例分析[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [12] 徐雷鸣,庞 博,赵 耀. NS 与网络模拟[M].北京:人民邮电出版社,2003.

(上接第 68 页)

分析得出的词语相关性融合,提出了基于语义相似度与词语相关性融合的扩展查询算法 RSIQE,不仅考虑了查询的意义相近而且也考虑了查询相关性。实验结果表明改进的算法 RSIQE 在局部共现的查询扩展算法的基础上能进一步提高扩展词项的检索精度。通过实验可以看出相关词的概率统计查询扩展和相关词的语义查询扩展在一定意义上是互补的。

参考文献:

- [1] 董振东,董 强,郝长伶.知网的理论发现[J].中文信息学报,2007,21(4):3-9.
- [2] Lei Zhang. Knowledge Graph Theory and Structural Parsing [M]. The Netherlands: Enschede, Twente University Press, 2002.
- [3] Hoede C, Zhang I. Word Graphs: The Third Set[C]//II H. S. Delugach, G. Stumme. Conceptual Structures: Broadening the Base, Proceedings of 9th International Conference on Conceptual Structures. CA, USA: [s. n.], 2001:15-27.
- [4] Li Sujian, Zhang Jian, Huang Xiong, et al. Semantic Computation in Chinese Question-Answering System[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(6):993-999.
- [5] 吴 健,吴朝晖,李 莹.基于本体论的词汇语义相似度的

web 服务发现[J].计算机学报,2005,28(4):595-602.

- [6] Aky W, Ray P, Waran N P. Ontology Mapping for the Interoperability Problem in Network Management[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2005, 23(10):2058-2068.
- [7] Doan A H, Madhavan J, Domingos P. Learning to Map between Ontologies on the Semantic Web[C]//Proceedings of WWW. New York, USA: ACM Press, 2002:662-673.
- [8] 夏 天.汉语词语语义相似度计算研究[J].计算机工程, 2007, 33(6):191-194.
- [9] 陈汉华,金 海,宁小敏,等. SemreX:一种基于语义相似度的 P2P 覆盖网络.软件学报,2006,17(5):1170-1181.
- [10] 刘 群,李素建.基于<知网>的词汇语义相似度计算[J].Computational Linguistics and Chinese Language Processing, 2002, 7(2):59-76.
- [11] Cimiano P, Pivk A, Schmidt Thieme L, et al. Learning taxonomic relations from heterogeneous evidence[C]//Proceedings of the ECAI-2004 Workshop on Ontology Learning and Population. Valencia, Spain: [s. n.], 2004:1-6.
- [12] Amruta P, Ted P. Sense Clusters - Finding clusters that represent word senses[C]//Proceedings of the 19 National Conference on Artificial Intelligence (AAAI04). California, USA: [s. n.], 2004:1030-1031.