

# 基于能量等级的分簇拓扑控制算法

李朋飞<sup>1,2</sup> 李志华<sup>1,2</sup> 尹熙<sup>1,2</sup> 孙雅<sup>1</sup> 张华伟<sup>2</sup>

(江南大学物联网工程学院轻工过程先进控制教育部重点实验室 无锡 214122)<sup>1</sup>

(江南大学物联网应用技术教育部工程研究中心 无锡 214122)<sup>2</sup>

**摘要** 针对无线传感器网络中节点能耗不均匀和节点容易过早死亡的问题,提出了基于能量等级的分簇拓扑控制算法 ELBC 和多跳 M-ELBC 算法。通过在簇头选择策略中引入能量等级的概念并考虑基站位置影响,上述算法根据网络的整体能量状况动态调节各因素在簇头选择过程中的权重,来有效地保证簇头的合理分布,均衡能量消耗;同时根据节点剩余能量对偏向参数进行优化,来提升高能量节点在簇头竞争中的竞争力,避免低能量节点过早死亡。仿真结果表明,ELBC 和 M-ELBC 算法能够有效地推迟死亡节点的出现时间,均衡节点能耗,延长网络生存时间。

**关键词** 分簇拓扑控制, EBAPC 算法, ELBC 算法, M-ELBC 算法

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Energy-level Based Clustering Network Topology Control Algorithm

LI Peng-fei<sup>1,2</sup> LI Zhi-hua<sup>1,2</sup> YIN Xi<sup>1,2</sup> SUN Ya<sup>1</sup> ZHANG Hua-wei<sup>2</sup>

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education,

School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)<sup>1</sup>

(Engineering Research Center of IoT Technology Application Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Considering the unbalanced energy consumption and the premature death of the nodes in wireless sensor network (WSN), this paper presents an energy-level based clustering algorithm (ELBC) and a multi-hop algorithm (M-ELBC). By defining the concept of the energy-level and considering the location of the sink, the algorithms dynamically adjust the proportion of factors to ensure the reasonable distribution of the clusters and balance the energy consumption. By optimizing the preference parameter based on the nodes' residual energy, the algorithms improve the high energy nodes' competitiveness to delay the appearance of the first dead node. Experimental results show that the ELBC and M-ELBC algorithms can put off the appearance of the dead nodes, balance the nodes' energy consumption and prolong the network lifetime.

**Keywords** Clustering topology control, EBAPC algorithm, ELBC algorithm, M-ELBC algorithm

## 1 引言

拓扑控制是无线传感器网络研究的核心问题之一<sup>[1]</sup>。LEACH 算法<sup>[2]</sup>是其中最具代表性的分簇拓扑控制算法之一,有优点也有其不足之处,LEACH 算法通过随机选举簇头,均衡了各节点的能量消耗,却不能保证簇头的最优分布,进而影响了网络的生存时间。文献[3]提出了 HEED 算法,算法通过主、次两个参数进行分簇,虽然解决了簇头分布不均匀的问题,但却出现了孤立节点,降低了数据融合的效率;文献[4]提出的 PEGASIS 算法,把所有节点组织成一条链路并且仅仅传输数据给最近节点,减小了节点能量消耗,但却带来了较高的传输延迟;文献[5]提出的 LEACH-C 算法,考虑了能量因素和簇头数目,能量消耗更均衡,但成簇开销过大;文

献[6-8]提出的算法在 LEACH 算法基础上考虑节点剩余能量和簇头与基站间的距离,能够有效避免节点过早死亡,降低簇头能量消耗,但是算法没有考虑簇内节点和簇头间距离,容易造成整体能耗过多,影响网络的生存时间;文献[9-11]在 LEACH 算法基础上引入多跳的思想,使数据通过簇头间形成的多跳路径到达基站,解决了簇头负载过重的问题,但簇头分布不均匀问题没有得到充分考虑;针对 LEACH 算法没有考虑节点的剩余能量、分布位置等问题,文献[12]提出了 EBAPC 算法,算法通过引进适应度因子的新定义,借鉴 AP 算法<sup>[13]</sup>中聚类中心的选择策略,并把这种策略近似成簇头选择策略,综合考虑了节点的剩余能量和节点间距离因素,与 LEACH 算法相比,簇头选择更合理,能量消耗更均衡,显著地延长了网络的生存时间,但 EBAPC 算法没有考虑网络的

到稿日期:2013-04-01 返修日期:2013-08-10 本文受江苏省产学研前瞻项目(BY2013015-23),中央高校基本科研业务费专项资金项目(JUSRP211A41)资助。

李朋飞(1988—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:wxpengfeili@yahoo.cn;李志华(1969—),男,博士,副教授,主要研究方向为网络技术、物联网技术、信息与网络安全、物联网安全技术等;尹熙 男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;孙雅 女,硕士生,主要研究方向为网络技术、数据挖掘;张华伟 男,硕士生,主要研究方向为物联网安全技术、信息与网络安全。

整体能量状况和基站的布局位置,容易造成局部节点能耗过大,部分重要节点过早死亡,最终影响网络的生存质量。

本文综合考虑上述不足因素,在 EBAPC 算法的基础上,通过进一步考虑节点与基站间的距离以及引入能量等级的概念,提出了基于能量等级的分簇拓扑控制 (Energy-Level Based Clustering Algorithm for WSN Topology Control, EL-BC) 算法,并在此基础上引入多跳的思想,从而提出了多跳 M-ELBC 算法。仿真实验的结果表明,与 EBAPC 算法相比,ELBC 算法和多跳 M-ELBC 算法能够进一步推迟死亡节点的出现时间,更加均衡网络节点能耗,从而起到从根本上保证网络生存质量的作用。

## 2 ELBC 算法的设计思想

### 2.1 能量等级定义

能耗是决定无线传感器网络生命周期最关键的因素之一。本文引进能量等级的概念,用来表征网络的整体能量状况。

定义 1 能量等级 (Energy-Level, EL) 用来度量网络中节点总能量的消耗情况。EL 的计算方法为:

$$EL = \begin{cases} 0, & 0 \leq p < \frac{1}{3} \\ 1, & \frac{1}{3} \leq p < \frac{2}{3} \\ 2, & \frac{2}{3} \leq p \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $p = E_{current} / E_{total}$ ,  $E_{current}$  表示当前网络中所有节点剩余的总能量,  $E_{total}$  表示初始网络中所有节点的总能量。在簇头选择时,应根据能量等级的变化动态调节各影响因素在选择策略中的比重,从而根据网络情况的变化作出最优的簇头选择。EL 值越高,说明当前网络中节点剩余能量越多,节点存活的可能性越高,在簇头选择时,应该提高节点剩余能量在选择策略中所占的比重,提升高能量节点成为簇头的可能性,以推迟死亡节点的出现时间;EL 值越低,说明当前网络中节点剩余能量越少,节点存活的可能性越低,此时应调整簇头的选择策略,降低节点剩余能量在选择策略中所占的比重,优化簇头位置、降低节点与簇头间的通信能耗,以达到延长网络生存时间的目的。

### 2.2 算法设计思想

本文主要对 EBAPC 算法作了以下 3 方面的改进,以使它更加满足实际应用需求。

(1) 网络整体能量状况的衡量。EBAPC 算法在选择策略中,节点剩余能量和节点间距离的比重是不变的,不能根据网络的实时能量状况作出最佳决策,为此本文引入能量等级的定义,可根据网络整体能量状况动态地调节各因素间的比重,以期作出最佳的簇头选择。

(2) 簇头位置问题。簇头所负责转发的数据量较大,簇头与基站间的距离成为影响簇头能量消耗的因素之一。在设计簇头选择策略时,应该考虑基站位置的影响。

(3) 偏向参数的优化。高能量节点在网络中应该更多地担任簇头,以均衡能量消耗,为此根据节点剩余能量重新定义偏向参数,从而使高能量节点在簇头竞争中更容易被选择。

## 3 基于能量等级的分簇拓扑控制算法

AP 算法<sup>[1]</sup>能对大数据集进行高效聚类而著称,其思想

是通过计算样本的责任性  $r(i, j)$  和可用性  $a(i, j)$  来确定聚类中心。分簇拓扑控制算法中簇头的选择策略完全可以借鉴这一思想,而责任性  $r(i, j)$  和可用性  $a(i, j)$  计算的基础取决于样本相似度矩阵。本文类比样本即传感网中的节点,则分簇拓扑控制算法中考虑能量等级和节点与基站间距离的相似度矩阵重新定义如下。

定义 2  $S(i, j)$  表示节点  $j$  在多大程度上适合做节点  $i$  的簇头。相似度矩阵  $S$  的计算公式为:

$$S(i, j) = \begin{cases} -\frac{(d(i, j) + \lambda d(j, B))^{3-EL}}{E_j}, & i \neq j \\ P(j), & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $d(i, j)$  为节点  $i$  到节点  $j$  的距离,  $d(j, B)$  为节点  $j$  到基站的距离,  $E_j$  为节点  $j$  当前的剩余能量; EL 为当前网络的能量等级,可以通过式(1)计算得到;  $\lambda$  为节点到基站距离的权值,通过调节  $\lambda$  可以调整节点到基站距离在选择策略中所占的比重,  $\lambda$  值越大,簇头越偏向离基站近的节点;  $P$  为偏向参数,即相似度矩阵  $S$  对角线上的值。重新定义的偏向参数  $P$  按照式(3)计算。

$$P(i) = \bar{S} * \frac{E_{i0}}{E_i} \quad (3)$$

式中,  $\bar{S}$  为相似度矩阵  $S$  的平均值,  $E_{i0}$  为节点  $i$  的初始能量,  $E_i$  为节点  $i$  的当前能量。从式(3)可以看出,由于相似度矩阵取负值,节点剩余能量越多,偏向参数  $P$  的取值就越大,节点就越可能成为簇头。

节点的责任性  $r(i, j)$  和可用性  $a(i, j)$  按照式(4)~式(6)计算,其中  $r(i, j)$  表示节点  $j$  作为节点  $i$  簇头的合适程度,  $a(i, j)$  表示节点  $i$  选择节点  $j$  作为其簇头的合适程度。

$$r(i, j) = S(i, j) - \max_{j's, t, j' \neq j} \{a(i, j') + S(i, j')\} \quad (4)$$

$$a(i, j) = \min\{0, r(j, j) + \sum_{i's, t, i' \in (i, j)} \max\{0, r(i', j)\}\} \quad (5)$$

$$a(j, j) = \sum_{i's, t, i' \neq j} \max\{0, r(i', j)\} \quad (6)$$

责任性和可用性的迭代过程如式(7)、式(8)所示:

$$R_i = (1 - \gamma)R_i + \gamma R_{i-1} \quad (7)$$

$$A_i = (1 - \gamma)A_i + \gamma A_{i-1} \quad (8)$$

其中,  $R_i$  表示第  $i$  轮时的责任性矩阵;  $A_i$  表示第  $i$  轮时的可用性矩阵;  $\gamma$  为迭代过程的阻尼因子,通过调整  $\gamma$  可以改变算法的收敛速度。

责任性和可用性不断迭代更新,直到达到规定的迭代次数或者算法收敛为止。更新结束后,对于任意节点  $i$ ,选择使  $r(i, j) + a(i, j)$  值最大的  $j$ ,如果  $i = j$ ,则说明节点  $i$  为簇头;如果  $i \neq j$ ,则说明节点  $j$  是节点  $i$  的簇头。综上所述,ELBC 算法概括如下:

ELBC 算法

步骤 1 产生一个节点随机分布的无线传感器网络,每个节点拥有唯一的 ID 标识和位置信息,节点传输数据时附上当前剩余能量信息,基站保存有节点的 ID、位置信息和当前剩余能量信息。

步骤 2 基站根据节点剩余能量信息,根据式(1)计算网络能量等级 EL,根据式(2)、式(3)计算节点相似度矩阵和偏向参数。根据式(4)~式(8),对责任性和可用性进行迭代更新,直到达到最大迭代次数 IterMax 或者收敛,得到成簇信息。

步骤 3 基站广播成簇信息,各节点根据成簇信息,加入所属簇头,完成簇的组建阶段。

- 步骤4 所有簇组建完后,簇头向成员节点发送 TDMA 消息。
- 步骤5 网络进入稳定的数据通信阶段,成员节点依照分配的时间片向簇头传输数据,簇头接收成员节点数据,并把融合后的数据发送给基站,完成一个周期。
- 步骤6 算法周期性地执行,直到节点全部死亡。

ELBC 算法虽然增加了偏向参数和相似度矩阵的计算时间,但与 EBAPC 算法相比,时间复杂度并没改变,都是  $O(n^2)$ 。ELBC 算法虽然存储空间有所增加,但空间复杂度没有改变,与 EBAPC 算法相当,都是  $O(n^2)$ 。

#### 4 基于能量等级的多跳分簇拓扑控制算法

LEACH 算法和 EBAPC 算法都是单跳拓扑控制算法,簇头和基站之间采用直接通信,距离基站较远的簇头将会消耗大量能量,导致簇头过早死亡<sup>[14,15]</sup>。为此,提出基于能量等级的多跳分簇拓扑控制算法 M-ELBC,其主要思想是:以 ELBC 算法产生的簇头为基础,考虑簇头的能量消耗情况,为每个簇头找到一条整体能量消耗较小的最佳路径,即多跳路径,从而达到以较小的能量消耗将数据发送给基站的目的。

##### 4.1 多跳路径的生成

最佳多跳路径生成方法如下:

- (1)根据各个簇头和基站的位置,依照能耗模型,计算簇头  $i$  直接发送 1bit 数据到基站消耗的能量  $ET(i)$ ,则簇头  $i$  发送数据到基站的代价  $EC(i) = ET(i) * \frac{E_{avg}}{E_i}$ ,其中,  $E_i$  表示簇头  $i$  的当前能量,  $E_{avg}$  表示簇头的平均能量。集合  $C$  表示所有簇头的集合,  $G$  表示找到最小能耗多跳路径的簇头集合,  $Q$  为  $C$  和  $G$  的差集,初始时  $G$  为空集。设置所有簇头下一跳为基站,即令  $next(i) = 0$ 。
- (2)若集合  $Q$  为空,结束;否则,在集合  $Q$  中,选择  $EC(i)$  值最小的簇头  $i$ ,将该簇头  $i$  加入  $G$  中,并从  $Q$  中移除。
- (3)对于  $Q$  中的任一簇头  $i$ ,计算簇头  $i$  到集合  $G$  中任一簇头  $j$  的能耗  $EC(i, j)$ ,更新簇头  $i$  的  $EC(i) = \min\{EC(j) + EC(i, j)\}$ ,并令  $EC(i)$  取最小值的簇头  $j$  作为簇头  $i$  的下一跳,即  $next(i) = j$ 。
- (4)重复(2)、(3),直到结束,即可得到所有簇头到基站的多跳路径。

##### 4.2 M-ELBC 算法描述

综上所述,多跳 M-ELBC 算法概括如下:

M-ELBC 算法

- 步骤1 定义 ELBC 算法相似度,令节点到基站距离的权值  $\lambda = 0$ ,即 在多跳通信中不考虑基站位置因素,使用 ELBC 算法产生簇头;
- 步骤2 簇头产生后,基站按照 4.1 节多跳路径的生成方法,建立簇头间的多跳路径,各簇头(包含基站)广播成簇信息并向其子簇头发送 TDMA 消息;
- 步骤3 簇头将簇内数据和接收到的其他簇头数据进行融合后,在分配的时间片内,按照产生的多跳路径,把数据传送给下一跳簇头;
- 步骤4 所有簇头将数据发往基站后,进入下一周期。

在 M-ELBC 算法中,簇头产生的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,多跳路径生成的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,因而 M-ELBC 算法时间复杂度为  $O(n^2)$ ,与 ELBC 算法和 EBAPC 算法相当。M-ELBC 算法的空间复杂度为  $O(n^2)$ ,也与 ELBC 算法和 EBAPC

算法相当。

## 5 仿真实验及分析

为了验证 ELBC 算法和 M-ELBC 算法的有效性,本节从网络总能量的消耗情况、节点存活情况、节点平均能耗情况和变换基站位置的影响情况对 ELBC 算法和 M-ELBC 算法进行评价,并与 EBAPC 算法进行比较。

本文采用与文献[12]一样的通信模型和网络模型。使用 matlabR2009 对算法进行仿真,实验参数设置如表 1 所列。

表 1 实验参数设置

参数类型	参数值
节点分布区域	随机部署 100m x 100m
基站位置	(150, 50)
节点总数	100
传感器节点的初始能量 $E_0$	0.3J
电子发射消耗能量 $E_{TX}$	50nJ/bit
电子接收消耗能量 $E_{RX}$	50nJ/bit
数据包长度	2000bit
控制包长度	32bit
信号放大器能耗 $\epsilon_{fs}$	100pJ/bit/m <sup>2</sup>
信号放大器能耗 $\epsilon_{amp}$	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>
数据融合能量消耗	5nJ/bit/signal
数据融合率	0.6
与基站距离权值 $\lambda$	0.5
最大迭代次数 $I_{terMax}$	100
总轮数	300
阻尼系数 $\gamma$	0.9

实验 1 主要评价算法对网络中节点存活情况的影响。通常死亡节点越少,说明网络的覆盖率越高、网络空洞越少、能耗越均匀。仿真结果如图 1 所示,EBAPC 算法在第 110 轮时出现了死亡节点,到第 212 轮时节点全部死亡;在 ELBC 算法中,从第 157 轮开始出现死亡节点,直到第 222 轮节点全部死亡;而多跳 M-ELBC 算法更是在 192 轮才出现死亡节点,直到 288 轮节点全部死亡。可以看出,ELBC 算法与 EBAPC 算法相比,由于重设偏向参数并引入能量等级的定义,使高能量节点在簇头竞争中占据优势,从而推迟了死亡节点出现的时间,避免了网络空洞过早产生。多跳算法 M-ELBC 由于采用多跳的理念,减小了簇头特别是远端簇头的通信距离,从而避免了簇头能量过多损失,有效地推迟了死亡节点出现的时间,延长了网络的生存时间。

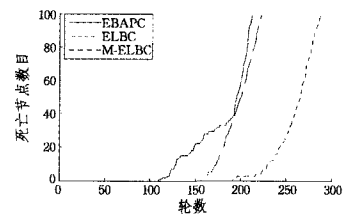


图 1 节点存活情况

实验 2 主要评价算法对网络总能量消耗的影响。从图 2 可以看出,ELBC 算法的总体能量消耗略优于 EBAPC 算法,这是由于 ELBC 算法添加了节点与基站间距离因素,簇头趋向距基站近的节点,降低了簇头向基站传输数据时的能量消耗;而多跳算法 M-ELBC 能耗情况明显优于 ELBC 算法和 EBAPC 算法,这是由于簇头传送数据时采用多跳方式,减小了传输距离,降低了簇头的能量消耗。

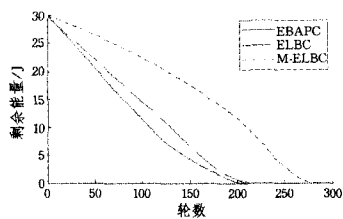


图2 网络剩余能量情况

实验3主要评价算法对节点平均能耗的影响。从图3可以看出,ELBC算法节点平均能耗优于EBAPC算法,且分布更均匀;而M-ELBC算法节点平均能耗明显低于ELBC算法和EBAPC算法,说明M-ELBC算法节点能量利用更加合理、高效,ELBC算法次之。

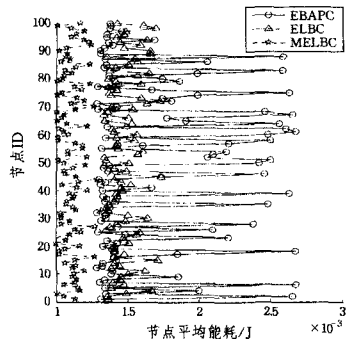


图3 节点平均能耗

实验4主要评价基站位置对算法的影响。从图4可以看出,随着基站从(120,50)移向(180,50),基站距离节点区域越来越远,网络死亡节点出现的时间越来越早,网络死亡时间也越来越早。可以看出,ELBC算法和EBAPC算法在维持网络生存时间方面比较相近,而ELBC算法相较于EBAPC算法,能够有效地延缓死亡节点的出现时间;同时,可以看出M-ELBC算法在维持网络生存时间和延缓死亡节点的出现方面都明显优于ELBC算法和EBAPC算法。

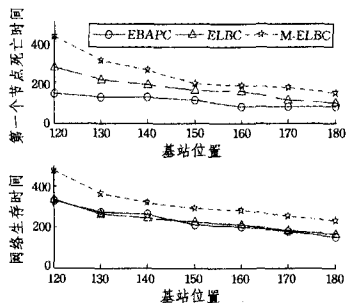


图4 基站位置对算法的影响

**结束语** 通过分析网络整体能量状况和基站位置对选择策略的影响,并结合偏向参数的优化,提出了基于能量等级的ELBC分簇算法和多跳M-ELBC分簇算法。仿真实验表明,

ELBC算法在均衡能量消耗和避免死亡节点过早出现方面有很大的改进;多跳M-ELBC算法中节点能量消耗更均衡,有效地推迟了死亡节点的出现,能量利用更高效,延长了网络的生存时间。但是ELBC算法和M-ELBC算法在选择簇头时需要进行多次迭代,占用较多的存储空间和算法执行时间,这是下一步需要解决的问题。

## 参考文献

- [1] 张少军. 无线传感器网络技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C] // Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, 2000; 3005-3014
- [3] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [4] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C] // Proc. of IEEE Aerospace Conference, 2002(3): 1125-1130
- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [6] Zytoune O, Fakhri Y, Aboutajdine D. A balanced cost cluster-heads selection algorithm for wireless sensor networks [J]. International Journal of Computer Science, 2009, 4(1): 21-24
- [7] Wang Ning-bo, Zhu Hao. An energy efficient algorithm based on LEACH protocol [C] // 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012: 339-342
- [8] 冯江, 吴春春. 基于能耗均衡的WSN多跳分簇路由算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(16): 104-107
- [9] 李岩, 张曦煌, 李彦中. LEACH-EE—基于LEACH协议的高效聚类路由算法 [J]. 计算机应用, 2007, 27(5): 1103-1105
- [10] 陈培培, 张华忠. MHST-LEACH—基于LEACH-EE高效聚类路由算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(1): 120-122
- [11] 胡艳华, 张建军. LEACH协议的簇头多跳(LEACH-M)改进算法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(34): 107-109
- [12] 崔可想, 李志华. 基于能量的EBAPC分簇网络拓扑控制算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(23): 104-108
- [13] Frey B J, Dueck D. Clustering by passing messages between data points [J]. Science, 2007, 315(5814): 972-976
- [14] Li Zhi-hua, Li Peng-fei, Yin Xi, et al. Clustering network topology control method based on responsibility transmission [J]. International Journal of Intelligence Science, 2012, 2(4): 128-134
- [15] 邹瑜, 彭舰, 黎红友. 一种基于分层无线传感器网络的路由算法 [J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 65-68

(上接第95页)

- [24] Ikuta C, Uwate Y, Nishio Y. Chaos Glial Network Connected to Multi-Layer Perceptron for Solving Two-Spiral Problem [C] // Proc. ISCAS'10, May 2010
- [25] Clark D, Schreter Z, Adams A. A quantitative comparison of distal and back propagation [C] // Proc. Austr. Conf. Neural Netw (ACNN), 1996
- [26] Truemper K. Improved comprehensibility and reliability of ex-

- planations via restricted half space discretization [C] // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Data Mining (MLDM 2009), 2009
- [27] Sevilla Villanueva B, Sánchez Marrè M. Providing intelligent decision support systems with flexible data-intensive case-based reasoning [C] // International Congress on Environmental Modelling and Software, 2012