

# 一种新的基于 LEACH 的 WSN 分簇协议

吴 征, 朱 军, 韩永远

(安徽大学 电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

**摘 要:** LEACH 是针对无线传感器网络设计的低功耗自适应分簇聚类路由算法, 与一般的平面多跳路由算法相比, LEACH 算法可以将网络生命周期延长 15%。但是, 靠近汇聚节点的簇头节点由于转发大量数据而导致自身能量消耗过快且节点易失效, 从而造成网络分割, 形成“热区”的问题, 提出了一种新颖的基于分区能耗均衡的多跳非均匀分簇算法 (CEUC)。改进后的算法采用固定分簇的方式; 形成的簇是不均匀簇, 即靠近 Sink 节点的簇的半径较大, 而远离 Sink 节点的簇的半径较小; 簇首选择的依据是节点的剩余能量。仿真实验结果表明, 该路由协议有效地平衡了无线传感器网络的节点能耗, 延长了网络的存活时间。

**关键词:** 无线传感网络; 路由算法; 非均匀分簇; LEACH

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2010)05-0029-05

## A New LEACH - Based Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks

WU Zheng, ZHU Jun, HAN Yong-yuan

(Department of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** LEACH is a low energy adaptive clustering hierarchy algorithm for wireless sensor networks, it can prolong the lifetime of the networks by fifteen percent. But, Employing clustering techniques in routing protocols can improve the scalability of wireless sensor networks. To solve the “hotspot” problem that is caused by the cluster heads close to the sink, which are burdened with heavy relay traffic via multi-hop communication and tend to die earlier and that leads to the network being partitioned, a novel cell energy balanced uneven clustering hierarchy scheme (CEUC) is presented. The improved algorithm used the stationary cluster; the shape of the cluster was unequal, the radius of the cluster that was far away from the sink node was smaller than the radius of the cluster that was close to the sink node; the cluster-heads were selected according to the present energy of the nodes. The new algorithm can utilize the energy of the sensor nodes and prolong the lifetime of the whole network in theory. Simulation results show that the routing protocol efficiently balances the energy consumption of nodes in wireless sensor networks, and prolongs the network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks; routing algorithm; unequal clustering; LEACH

## 0 引 言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, 简称 WSN) 是计算、通信和传感器这三项技术相结合的产物, 随着微处理器和无线通信技术的发展, 其重要性越来越突出。它可应用于布线 and 电源供给困难的区域, 人员不能到达的区域 (如受到污染、环境不能被破坏或敌对区域) 和一些临时场合 (如发生自然灾害时, 固定通信网络被破坏) 等<sup>[1]</sup>。它不需要固定网络支持, 具

有快速展开, 抗毁性强等特点, 可广泛应用于军事、工业、交通、环保等领域, 被认为是 21 世纪最重要的技术之一, 它将会对人类未来的生活方式产生深远的影响。在国防军事、环境监测、灾难现场等领域都有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。由于传感器节点通常采用电池驱动, 一旦投放, 很难再补充能量。所以, 其首要设计目标就是高效使用传感器节点的能量, 延长网络的生存期。传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和通信模块。随着集成电路工艺的进步, 处理器模块和传感器模块的功耗都很低, 因此传感器节点主要的能量消耗集中在无线通信模块上。

无线传感器路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点, 它主要包括两个方面的功能: 寻找源节点和目的节点间的优化路径以及将数据分组

收稿日期: 2009-09-11; 修回日期: 2009-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60572129)

作者简介: 吴 征 (1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为通信网络与无线传感器网络; 朱 军, 副教授, 博士, 研究方向为光信号处理与光通信。

沿着优化路径正确转发。路由协议要能在局部网络信息的基础上选择合适的路径,路径上的所有节点都要消耗一定的能量通过无线通信模块来转发数据,因此路由协议是影响传感器节点能量消耗的重要因素之一。在无线传感器网络中,节点能量有限且一般没有能量补充,因此路由协议需要高效利用能量<sup>[3]</sup>。同时传感器网络节点数目往往很大,节点只能获取局部拓扑结构信息,传统的路由协议应用于无线传感器网络中将在某些方面存在一定的缺陷,因此需要针对无线传感网络设计相应的节能路由协议。

无线传感器网络中的路由协议根据节点在路由过程中是否有层次结构、作用是否有差异,可分为平面路由协议和层次路由协议。层次路由协议是现有无线传感器网络路由协议研究的重点,其中 LEACH 协议是最典型的层次路由协议。LEACH 协议通过把网络的负载均匀地分布在整个网络上,大大节约了通信过程中的能量损耗。在不同的轮中,由不同的节点充当簇首节点,把远距离通信的负载轮流分配给网络节点,因此,LEACH 协议在性能上要大大优于一般的平面多跳路由协议。但是 LEACH 协议采用随机轮换簇首的方法,将簇首的能量消耗平均分担给所有节点。由于簇的大小是固定的,各簇首在簇内通信上所使用的能量相差不大。而在采用多跳通信的情况下,靠近基站的簇首还要承担转发来自其它簇首数据的任务,从而过早消耗完自身能量,导致网络死亡。

针对 LEACH 协议及其改进协议不足,文中提出一种新的非均匀分簇协议,通过改变靠近基站的簇的大小,来平衡网络内区域间的能量消耗。

## 1 LEACH 协议介绍

### 1.1 协议概述

LEACH<sup>[4]</sup>(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议由 MIT 的 Heinzelman 等人提出,它是第一个在无线传感器网络中提出的分簇式路由协议,在无线传感器网络路由协议中占有重要地位,其它基于分簇的路由协议如 TEEN, APTEEN, PEGASIS 等大都由 LEACH 协议发展而来。LEACH 协议的运行是周期的,分成若干轮(Round),每一轮又包括:簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段。

簇的建立阶段是簇首的形成阶段。每个节点决定在当前“轮”中是否成为簇首的概率是一个建议的固定值,需要根据网络中节点的数目而定。在簇的建立阶段,每个节点选取一个介于 0 和 1 之间的随机数,如果这个数小于这一“轮”所设定的门限值,那么这个节点就成为簇首。在随机产生出簇首后,成为簇首的节点

再向网络广播分簇信息,告知其他节点产生了一个新的簇首。其他节点接收到分簇消息后,根据信号强度来选择它要加入的簇群,并通知相应的簇首。这样在簇的建立阶段,就构成了以多个簇首为核心的簇群。各簇群中的节点通过 TDMA 方式与簇首进行通信。

在稳定的数据通信阶段,在每个簇内,每个簇头节点接收各成员节点采集、传输的数据,接着簇头进行必要的数据融合;各簇头节点采用 CSMA 协议通信竞争通道,获得通道的簇头节点将数据发送给 Sink 节点。每隔一定时间,整个网络重新回到簇形成阶段,开始新一轮的选择簇头的阶段。每个簇使用不同的 CDMA 码进行通信,减少属于其他簇的节点对本簇节点的干扰。

人们围绕着节能的目标,在 LEACH 协议的基础上又提出了一些改进协议。Lindsey 等人提出了 PEGASIS<sup>[5]</sup>协议,PEGASIS 协议通过贪婪算法,把网络中所有节点组织成一条链,链上的节点只与最近的邻居节点进行数据的发送、接收,以节省能量。数据发送过程中,通过贪婪算法选择向基站发送数据的链首,负责把收集到的数据以点对点的方式传递、融合,最终发送到基站。为平衡链首的通信开销,链中的每个节点会轮流成为链首向基站发送数据。当所有节点都与基站通信一遍后,再进行新一回合的选举,这种轮流通信机制使能耗统一分布到每个节点上;Heinzelman 等人提出了集中式的簇构造协议 LEACH-C<sup>[6]</sup>,LEACH-C 协议根据全局信息挑选簇首,每个节点把自身地理位置和当前能量报告给基站。基站根据所有节点的报告计算平均能量,当前能量低于平均能量的节点不能成为候选簇首。从剩余候选节点中选出合适数量和最优地理位置的簇首集合是一个 NP 问题。基站根据所有成员节点到簇首的距离平方和最小的原则,采用模拟退火算法解决该 NP 问题。最后,基站把簇首集合和簇的结构广播出去。

### 1.2 协议不足

LEACH 协议在每轮固定簇首之后再建立簇类,簇首开销较大。由于簇首是随机产生的,所以经常会出现簇首位置分布不均、各簇节点数量差别较大的情况,甚至在某一轮中还会出现质量很差的簇。簇内节点数量多的簇首,会消耗更多的能量,且远离簇首的节点也会因通信距离相对较大而消耗更多的能量,造成节点能耗分布的不均;再者,这种各节点等概率地担当簇首的机制,没有考虑节点的剩余能量,也没有考虑节点的地理位置。在每个循环中,无论剩余能量多少,所有节点都必须担当一次簇首,会使剩余能量较小、距离基站较远的节点很快失效;另外在建立阶段,节点同时在

其他节点的通信范围内且频率相同。系统短消息间的发送冲突会频繁发生,这极有可能使一些重要的短消息未被预期的节点接收到,导致一些节点不能及时加入到簇中,在一段时间内与网络失去联系。

PEGASIS 避免了 LEACH 重构簇的能耗开销,通过数据融合减少了数据的收发次数,降低了网络能耗。仿真结果表明,与 LEACH 相比,PEGASIS 能将网络的生存周期提高近 2 倍<sup>[7]</sup>。但是 PEGASIS 协议也存在一些不足。第一,协议的运行是以每个节点都能直接与基站通信为前提的。而在实际网络中,传感器节点一般需要采用多跳路由的方式才能到达基站;第二,尽管协议避免了重构簇的能耗开销,但由于节点需要知道邻居的能量水平以便能发送数据,所以仍需要动态调整拓扑结构。对那些利用率高的网络而言,拓扑的调整会带来更大的开销;第三,链上距离较远的节点会引起较长的时延,且链首的唯一性会使其成为系统的瓶颈;LEACH-C 算法充分利用了基站的中心算法构建簇,构建的簇的性能要优于 LEACH,但基站需要知道每个节点的位置和能量信息,同时节点要通过基站广播获取分簇信息。这样的网络就不完全是自组织网络,其使用范围也受到了一定限制。

## 2 非均匀节能分簇(CEUC) 协议

### 2.1 系统模型

考虑一个由  $N$  个随机部署的传感器节点形成的网络,用  $S_k$  表示第  $k$  个节点,相应的节点集合为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 。假设所要研究的无线传感器网络的应用场景具有以下特征:

- 传感器节点位于一个圆形区域内,在给定区域中随机、均匀地分布,并足够密集,节点在部署后就不再移动;
- 传感器节点同构,并在网络中的地位、作用相同,具有相同的初始能量,并且都有一个 ID 号;
- 节点的能量有限,并且不能补充;
- 网络为静态网络,只存在一个 Sink 节点,且放置在圆心处;
- 簇内通信采用单跳模式,簇头节点与汇聚节点通信采用多跳模式;
- 根据接收者的距离远近,节点可以自由调节其发送功率以节约能量消耗。

无线传感器网络的大部分能耗来自于通信,通信所消耗的能量比感知和计算所消耗的能量要大得多,因此,文中对节点在进行运算、存储和睡眠时所消耗的能量忽略不计。根据无线通信模型,假设网络中的一个节点在单位时间内产生的数据量为  $h$ ,又设簇间传送

和簇内传送都采用自由空间模型,则发送数据和接收数据的无线通信模型分别为

$$E_{\text{tr}}(h, d) = h e_1 + h e_2 d^2 \quad (1)$$

$$E_{\text{r}}(h, d) = h e_1 \quad (2)$$

式中:  $e_1$  为无线收发电路能耗;  $e_2$  为自由空间模型放大器的能耗;  $d$  为数据传送的距离;  $h$  为要发送或接收的单位数据位数<sup>[8]</sup>。

### 2.2 协议模型

考虑一个包含  $N$  个随机部署节点的传感器网络,节点的集合为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ,节点的最大传输半径设为  $2R$ 。在网络部署阶段, sink 节点需要用一个给定的发送功率向网络内广播一个信号,每个传感器节点在接收到此信号后,根据接收信号的强度计算它到 sink 节点的近似距离<sup>[9]</sup>。获得这个距离不仅有助于传感器节点向汇聚点传输数据时选择合适的发送功率以节约能量消耗,而且它还是协议构造大小非均匀的簇的必需信息之一。

预先设定阈值  $T(n)$ ,每个传感器节点随机选择 0 到 1 之间的一个值,如果选定的值小于某一个阈值  $T(n)$ ,那么这个节点成为候选簇首节点<sup>[10]</sup>。节点首先查看其剩余能量级,如果能量充足,则减小随机数,提高其成为簇首的概率。如果能量较低,则增大随机数,避免其参与簇首的选择。一旦节点  $S_i$  通过计算成为候选簇首节点,则根据网络部署阶段计算出的与基站的距离信息计算它的竞争区域,区域的半径记作  $R_c$ 。算法需要控制竞争半径的取值范围,且随着候选簇首到汇聚点距离的增大,其竞争半径应随之减小。候选簇首  $S_i$  确定竞争半径  $R_c$  的计算公式如下:

$$R_c = \left(1 - c \frac{d_{\max} - d}{d_{\max} - d_{\min}}\right) R_o \quad (3)$$

其中,  $c$  是控制取值范围的参数,在 0 到 1 之间取值,  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$  分别为网络中节点到基站距离的最大和最小值,  $R_o$  为簇的最大范围。当节点距离基站最远时,  $d = d_{\max}$ ,则  $R_c = R_o$ ,即簇覆盖范围最大。随着节点与基站距离的减小,簇的覆盖范围也变小,当节点距离基站最近时,  $d = d_{\min}$ ,则  $R_c = (1 - c) R_o$ ,簇覆盖范围最小。

$R_c$  选定之后,各候选簇首节点向  $R_c$  范围内的节点广播竞争簇首消息,该消息包括节点 ID, 剩余能量  $EN$  和  $R_c$ ,如果  $R_c$  范围内没有其它候选簇首节点,即该节点没有收到来自其它节点的竞争簇首消息,则该节点宣布成为簇首,并向  $R_c$  范围内广播竞争获胜消息。如果  $R_c$  范围内有其它候选簇首节点,则比较节点的剩余能量,如果节点收到的竞争簇首消息中包含的剩余能量  $EN$  大于自身的剩余能量,则节点退出竞争。

反之,如果节点收到的竞争簇首消息中包含的  $EN$  均小于自身,则向  $R_C$  范围内宣布竞争获胜。如果节点接收到与自身  $EN$  相等的竞争簇首消息,则比较两者  $ID$  的大小,由  $ID$  小者胜出。如果节点在约定的时间内没有接收到任何宣布竞选获胜的消息,那么该节点自动宣布成为候选簇首节点,计算  $R_C$ ,并向  $R_C$  范围广播与之前的竞争簇首消息不同的竞争消息,只有与该节点相同的没有接收到任何竞选获胜消息的节点才需要对这条消息进行响应,通过与前面类似的竞争方法选出剩余的簇首。

最终簇首产生后,原来未参与竞选的节点从睡眠状态唤醒,接着最终簇首以同样的功率向全网广播其竞选获胜的消息。普通节点按照簇内通信代价最小的原则(也就是选择接收信号强度最大的簇首节点),发送加入信息以通知该簇首加入该簇。

当簇首节点收到了来自成员节点的加入消息后,新的簇首节点将根据簇内的节点数目,为簇内的每一个节点分配一个通信时隙。簇首节点向簇内所有节点广播这个基于时分复用方式的时隙,告知节点何时可以传送数据。簇和路由树形成之后,节点就可以开始传送数据了。簇内节点持续采集周围的信息,并在自己的通信时隙内以单跳通信的方式将数据传送给相应的簇首节点。非簇首节点的发送器在不属于该节点通信时隙的时候可以关闭,从而减少节点的能量消耗。簇首节点必须保持自己的接收器处于开启状态,以便接手簇内节点所发送的所有数据。簇首节点接收到簇内所有节点的数据后,将对数据进行必要的数据融合处理。根据不同的应用,可以采用不同的数据融合技术。在接收到来自其它簇首节点的数据后,簇首节点将自己的数据和来自其它簇首节点的数据传送到自己的下一跳节点,如此将数据传送到基站。

簇形成以后便固定不变,当簇首节点低于某一个门限值时,在簇内重新选择簇首节点,以簇内剩余能量最多的节点为簇首节点。

### 2.3 仿真结果分析

通过仿真实验比较 CEUC 协议、LEACH 协议和 LEACH-C 协议。使用 MATLAB 分别对节点存活率和基站接收到的数据量做了仿真实验。实验中,每个数据包的长度  $len$  为 1024 bit,各传感器节点的初始能量为 2 J。图 1 显示了网络中节点存活率随生命周期数的变化情况。从图中结果可以看出,CEUC 在延长网络生存时间方面性能突出。此外,从第一个节点开始死亡的时间点来看,CEUC 也具有明显的优势。结果还显示,CEUC 的节点陆续死亡过程集中在一个很小的时间区域中,这表明 CEUC 使整个网络的能耗分

布趋于平均,使各节点的能量几乎同时耗尽,避免了某些节点被过度使用。这也是 CEUC 能够有效延长网络生存时间的关键所在。需要说明的是,仿真采用了网络各层完全仿真的模式,没有对无线链路进行简化,因此无线链路的噪声、冲突和信令传递所消耗的能量等也被考虑在仿真结果中了。如果采用忽略这些情况的理想环境,CEUC 的性能还会提高。

基站接收到的数据量随时间变化图,如图 2 所示。可以看出基站接收到的数据随时间的变化而增加,采用 CEUC 协议的网络中的基站接收到的数据量远远大于采用 LEACH 协议和 LEACH-C 协议网络中的基站接收到的数据量。这是因为改进后的 CEUC 协议采用了数据融合的数据处理方式,大大节省了 LEACH 协议中重复传送数据所带来的开销,有效地节省了能耗,使更多的能量被用来传递数据。

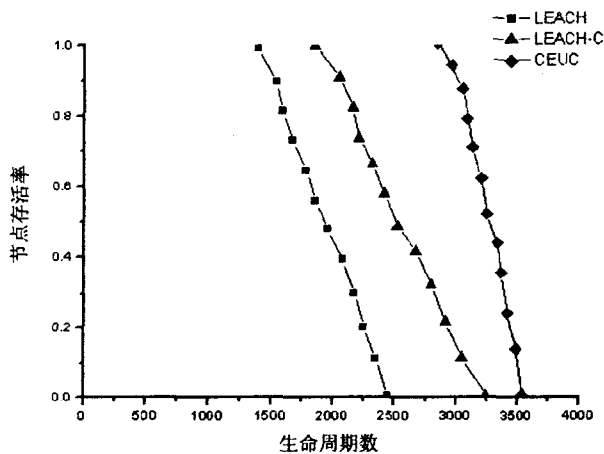


图1 网络生存时间对比

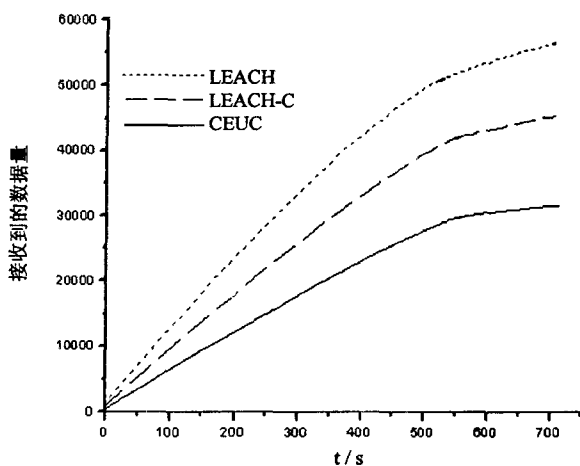


图2 基站接收到的数据量

### 3 结束语

文中通过对 LEACH 协议的分析,并借鉴前人的某些思想,在多跳分簇结构的基础上,提出了一种新的

非均匀分簇协议。CEUC 协议根据每个节点到 Sink 点的跳数,把所有节点分到半径不同的簇中,并由根据距离和剩余能量选举出的簇头收集和汇聚簇内数据,然后通过邻居簇头向 Sink 点转发。CEUC 的非均匀模型,把靠近 Sink 点的簇划分得较小,使簇头能够把更多的能量用于数据转发;把远离 Sink 点的簇划分得较大,使簇头用更多的能量完成簇内节点的信息收集与聚合。根据到 Sink 点的距离和剩余能量,所有节点轮流成为簇头,进一步达到均匀能耗的目的。仿真结果显示,改进后的 CEUC 协议能更好地平衡网络负载、节约能量消耗且具有更高的能量使用效率,从多个方面实现了优化。

#### 参考文献:

- [1] 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,2005:3-4.
  - [2] 马祖长,孙怡宁,梅涛.无线传感器网络综述[J].通信学报,2004,25(4):114-124.
  - [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] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy - Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]//Proc. of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. San Francisco: IEEE Computer Society, 2000: 3005 - 3014.
  - [5] Indseys, Raghavendra C S. PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems[C]//Proc. of the IEEE Aerospace Conf. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002:1-6.
  - [6] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670.
  - [7] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power - Efficient gathering in sensor information system[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA: [s. n.], 2002:1-6.
  - [8] Intanagonwiwat C, Govindon R, Eshin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Trans on, network, 2003,11(1):2-16.
  - [9] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation - based Protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002(8):169-185.
  - [10] Manjeshwar A, Agrawal D P. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001:2009-2015.
- 
- (上接第28页)
- [14] Tracey N, Clark J, Mander K, et al. An Automated Framework for Structural Test - Data Generation[C]//In Proceedings of the International Conference on Automated Software Engineering. [s. l.]: IEEE, 1998.
  - [15] Li Bin, Li Zhishu, Chen Yanhong. Automatic Test Data Generation Tool Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm[C]//International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops. [s. l.]: IEEE, 2007: 183 - 186.
  - [16] 马敏,陈光,陈东义.基于 Petri 网和模拟退火遗传算法的并行测试研究[J].仪器仪表学报,2007(2):331-336.
  - [17] 傅博.基于模拟退火遗传算法的软件测试数据自动生成[J].计算机工程与应用 2005(12):82-84.
  - [18] 陈路远.基于蚂蚁算法的路径测试数据自动生成方法研究[D].天津:河北工业大学,2007.
  - [19] 胡先智.基于遗传蚂蚁融合算法的测试用例生成研究[D].西安:西安理工大学,2008.
  - [20] 傅博.基于蚁群算法的软件测试数据自动生成[J].计算机工程与应用,2007(12):97-100.
  - [21] 陈明师,刘晓杰,李涛.基于多态蚁群的测试用例自动生成[J].计算机应用研究,2009,26(6):2347-2348.
  - [22] Díaz E, Tuyaa J, Blanco R, et al. A tabu search algorithm for structural software testing[J]. Computers & Operations Research, 2008,35:3052-3072.
  - [23] Hwang Guojen, Yin Pengyong, Ye Shuheng. A Tabu Search Approach to Generating Test Sheets for Multiple Assessment Criteria[J]. IEEE Transactions on Education, 2006(49):88-97.
  - [24] 李桂福.基于禁忌遗传算法的测试用例自动生成研究[D].北京:北京交通大学,2006.
  - [25] 詹泽梅.基于人工免疫算法的测试用例自动生成方法研究[D].武汉:华中师范大学,2008.
  - [26] 张国平,李国升.基于粒子群算法的改进 SCOTEM 模型测试数据生成方法[J].计算机工程与设计,2009,30(2):411-413.
  - [27] 李小青.基于遗传 - 粒子群混合算法的测试用例生成研究[J].计算机系统应用,2009(3):70-72.
  - [28] 周树德,孙增折.分布估计算法综述[J].自动化学报,2007,33(2):113-124.
  - [29] Sagrama R, Lozano J. Scatter Search in software testing, comparison and collaboration with Estimation of Distribution Algorithms[J]. European Journal of Operational Research 2006 (169):392-412.