

文章编号: 1001-0920(2009)09-1436-05

无线传感器网络中一种能量高效的分布式分簇算法

于振华^{1,2}, 刘 宇¹, 纪 明¹, 蔡远利²

(1. 西安应用光学研究所, 西安 710065; 2. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

摘 要: 提出了一种适用于无线传感器网络的能量高效的分布式分簇算法 (EEDC), 该算法使具有较高剩余能量及距离基站较近的节点有更大的机会成为簇头. 理论分析表明该算法通信开销较小, 而且有效地均衡了节点的能量消耗. 为了确保 EEDC 的正确性、完整性和可靠性, 利用形式化方法——着色网对其关键属性进行建模和分析. 仿真结果表明, EEDC 有效地延长了网络生命周期, 提高了网络的能耗效率.

关键词: 无线传感器网络; 分簇; 着色网; 能量均衡

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

An energy-efficient distributed clustering algorithm for wireless sensor net works

YU Zhen-hua^{1,2}, LIU Yu¹, JI Ming¹, CAI Yuan-li²

(1. Xi 'an Institute of Applied Optics, Xi 'an 710065, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China. Correspondent: YU Zhen-hua, E-mail: zhenhua_yu@163.com)

Abstract: An energy-efficient distributed clustering algorithm (EEDC) for wireless sensor networks (WSN) is presented. A node with higher residual energy and closer to the base station is more likely to be elected as a cluster head. EEDC minimizes energy consumption for communications and balances the energy load among all nodes. To ensure its correctness, completeness and reliability, colored Petri nets (CPN) are employed to model EEDC. Moreover, the key characteristics of EEDC are analyzed and verified by the supporting tools of CPN. Simulation results demonstrate that EEDC effectively prolongs the network lifetime, and improves the energy consumption efficiency.

Key words: Wireless sensor networks; Collaboration; Contract net; Petri nets

1 引 言

无线传感器网络 (WSN) 是由大量具有感知、计算和无线通信能力的传感器节点通过自组织方式构成的网络^[1,2], 它能够根据环境自主完成监测、目标发现、识别与跟踪等任务. 由于 WSN 具有随机布设、自组织和隐蔽性强等特点, 在军事、工业和商业等领域有着广阔的应用前景和较高的应用价值^[3].

传感器节点的感知、计算和通信能力有限, 而且节点通常采用电池供电, 能量有限而且不可再生, 存在严重的能量约束问题. 因此, 要设计一种能量高效的 WSN 路由算法, 延长网络的生命周期. 分簇路由算法可以将网络感知的数据进行融合后再进行传输, 从而减少冗余数据传输产生的能量开销及增强网络的可扩展性, 近年来已成为 WSN 中研究的热点.

目前已提出了多种不同的分簇路由算法^[4-9]. LEACH^[4] (Low energy adaptive clustering hierarchy) 在每一轮中随机选择若干传感器节点作为簇头, 当簇生成后, 簇头将簇内成员采集的数据进行融合后再将结果发给基站. 由于减少了与基站直接通信的节点数量及通信量, LEACH 可以有效地延长网络生命周期. 但 LEACH 中簇头是随机产生的, 导致网络中簇头分布不均匀, 且每一轮中产生的簇头数目不一定等于预先设定的最优值, 使得某些节点附近没有簇头, 从而与远方的基站直接通信, 导致这些节点过早地死亡. PEGASIS^[7] (Power-efficient gathering in sensor information systems) 利用贪婪算法将传感器节点构成一条链, 然后在链上选择一个头节点与基站直接通信, 链两端数据沿

收稿日期: 2008-11-10; 修回日期: 2009-01-22.

基金项目: 博士后科学基金项目 (20070421121).

作者简介: 于振华 (1977 →), 男, 山东乳山人, 博士, 从事无线传感器网络、多 Agent 系统理论的研究; 刘宇 (1965 →), 男, 江苏人, 研究员, 从事光电系统及侦察感知等研究.

链进行融合并传输到头节点. 但 PEGASIS 需要知道每个节点的位置信息, 而且远距离节点会引起较大的数据延迟. EADEEG^[9] (An energy-aware data gathering protocol for wireless sensor networks) 根据节点剩余能量与其邻居节点平均能量选择簇头, 并利用簇内节点调度算法关闭冗余节点, 进一步延长网络寿命. 文献[3, 10]从不同的角度对分簇路由算法进行了详细的分析和比较.

本文设计、分析并验证了一种新的能量高效的分布式分簇算法 (EEDC). EEDC 按轮运行, 根据网络局部信息及节点与基站的距离选择簇头. 利用一种高级 Petri 网——着色网 (CPN)^[11] 对 EEDC 进行分析和验证, 确保算法的完整性和正确性, 提高了数据传输的可靠性和实时性. 仿真结果表明, EEDC 达到了均衡节点能量消耗的目的, 从而延长了网络的生存周期.

2 EEDC 算法设计与分析

2.1 网络模型

本文假设 N 个传感器节点随机均匀分布在一个 $M \times M$ 的区域 A 内, 用于周期性数据采集. 假设该网络具有如下性质:

- 1) 在传感器网络中, 节点部署后不再移动;
- 2) 所有节点都是同构的, 而且节点都有一个唯一的标识符 ID;
- 3) 所有节点都保持时间同步;
- 4) 节点可以根据接收者的距离来调整其发射功率以节约能量;
- 5) 通信链路是对称的, 节点可以根据接收信号的强度 RSSI 计算出发送者到自己的近似距离.

采用与文献[5]相同的无线通信能量消耗模型. 节点发射 l (bit) 的数据到距离为 d 的位置, 消耗的能量由发射电路消耗和功率放大消耗两部分组成, 即

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l_{fs}d^2, & d < d_0; \\ lE_{elec} + l_{mp}d^4, & d \geq d_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中 E_{elec} 表示发射电路消耗的能量. 若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大消耗采用自由空间模型, 否则采用多路径衰减模型. l_{fs} 和 l_{mp} 分别为这两种模型中功率放大所需的能量. 节点接收数据 l 消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = lE_{elec}. \quad (2)$$

在 WSN 中, 簇头需要将簇内成员节点采集的数据进行融合, 然后发送到基站. 数据融合也消耗一定的能量, E_{DF} 表示融合单位比特数据需消耗的能量.

2.2 EEDC 算法设计

为了均衡节点的能量负载并保持算法的分布性, EEDC 按轮运行. 在每一轮初始时重新构造簇, 并根据节点剩余能量与邻居节点平均剩余能量的比值选择簇头, 然后簇头融合簇内数据并传递到基站.

在 EEDC 中, 每个传感器节点都保存一张邻居节点表, 储存其邻居节点的 ID 及剩余能量. 每轮开始时, 每个节点首先以半径 r 广播消息 ADV_E, ADV_E 包括节点 ID 和剩余能量. 每个节点根据所有邻居节点发送来的 ADV_E 更新其邻居表.

更新邻居表后, 每个节点求出其所有邻居节点的平均剩余能量. 节点 i 所有邻居节点的平均剩余能量为

$$E_{ai} = \left(\sum_{j=1}^m E_{ij} \right) / m. \quad (3)$$

其中: m 为节点 i 邻居节点的数量, E_{ij} 为节点 j 的剩余能量.

求得节点 i 的剩余能量后, 利用式(4) 得到节点 i 发送簇头申明消息 ADV_Head 的时间间隔 t_i ^[9], 并设置其定时器 $t_{timeri} = t_{current} + t_i$, $t_{current}$ 为当前时钟. 即

$$t_i = p \times T \times E_{ari} / E_{ni}. \quad (4)$$

其中: p 是一个随机均匀分布在 $[0, 0.9, 1]$ 之间的实数值, 为了避免剩余能量相同的节点同时发出竞争簇

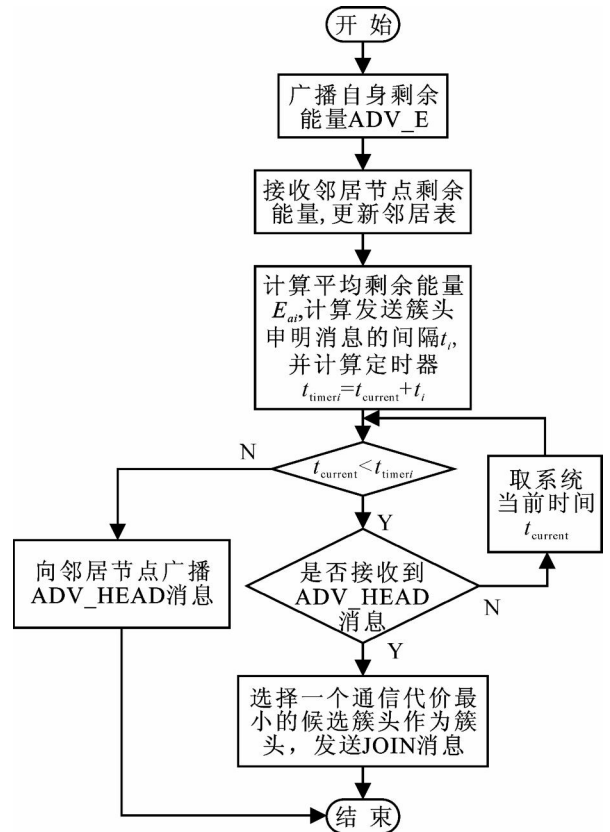


图 1 EEDC 算法流程图

头的消息, T 是预先设置的最长的簇头选择时间.

若某个节点 i 在定时器 t_{timer_i} 到达之前没有收到任何 ADV_HEAD 消息, 则向邻居节点广播簇头申明消息 ADV_HEAD. 如果节点 j 在定时器 t_{timer_j} 到达之前接收到多个节点发送的 ADV_HEAD 消息, 则该节点放弃簇头竞争, 并在其内部构成一个候选簇头表, 进而根据如下的通信代价公式, 选择最小通信代价 $cost(j, i)$ 的簇头 i 加入, 然后广播 JOIN. 有

$$cost(j, i) = \phi \times d(j, CH_\alpha) + (1 - \phi) \times d(CH_\alpha, BS). \quad (5)$$

其中: $cost(j, i)$ 是节点 j 加入簇头 i 的代价; $d(j, CH_\alpha)$ 是节点 j 到候选簇头 CH_α 的距离; $d(CH_\alpha, BS)$ 是候选簇头 CH_α 到基站的距离; ϕ 是一个调节参数, 调节 $d(j, CH_\alpha)$ 与 $d(CH_\alpha, BS)$ 之间的权重. 算法流程如图 1 所示.

2.3 EEDC 算法分析

EEDC 算法是分布式的竞争算法, 节点只需根据局部邻居节点的信息决定是否成为簇头, 不需要掌握全局信息, 而且簇的形成所需时间最多为 T .

命题 1 EEDC 算法的消息复杂度为 $O(N)$, N 为网络中节点数量.

证明 在 EEDC 算法中, 当每一轮开始时, 每一个节点首先要广播自身剩余能量, 共广播 N 条 ADV_E 消息. 然后节点根据簇头申明消息的时刻, 发送 JOIN 或 ADV_HEAD 消息. 假设最终选出 k 个簇头, 则它们广播 k 条 ADV_HEAD 消息, 而 $N - k$ 个成员节点广播 $N - k$ 条 JOIN 消息. 因此, 网络中

总的消息开销为 $N + k + N - k = 2N$, 算法的消息复杂度为 $O(N)$.

命题 2 EEDC 算法能够获得更好的负载平衡.

在 WSN 中, 由于簇头节点要担负簇内数据融合及远距离通信等任务, 需要消耗更多的能量, 而且距离基站远的簇头耗能更高, 应选择具有较多剩余能量的节点作为簇头. EEDC 首先使剩余能量较多的节点优先广播簇头申明消息 ADV_Head. 对于收到多个候选簇头消息的节点, 进一步根据节点与候选簇头的距离及候选簇头与基站的距离信息, 选择代价最小的候选簇头作为簇头. 因此, EEDC 使得拥有较多剩余能量而且距离基站较近的节点优先成为簇头, 从而实现整个系统的负载平衡.

3 EEDC 算法形式化建模与分析

考虑到 WSN 的特点, 设计路由算法时必须满足能量高效、可扩展性、鲁棒性、实时性、快速收敛性等要求, 确保数据传输的可靠性和实时性. 在路由算法的设计过程中, 可能会引入一些错误, 利用传统的仿真方法不能确保算法的正确性^[12]. 形式化方法可以对算法进行精确的描述、分析和验证, 消除设计过程中引入的人为错误, 确保算法的完整性、正确性和可靠性^[13]. 本文将利用着色网 CPN 对 EEDC 算法进行建模和分析.

为了简化模型, 不失一般性, 在一个簇中只考虑 3 个节点. 首先对 EEDC 算法进行建模, 描述一轮中簇头的选择过程; 然后利用 CPN 分析工具 INA^[14]

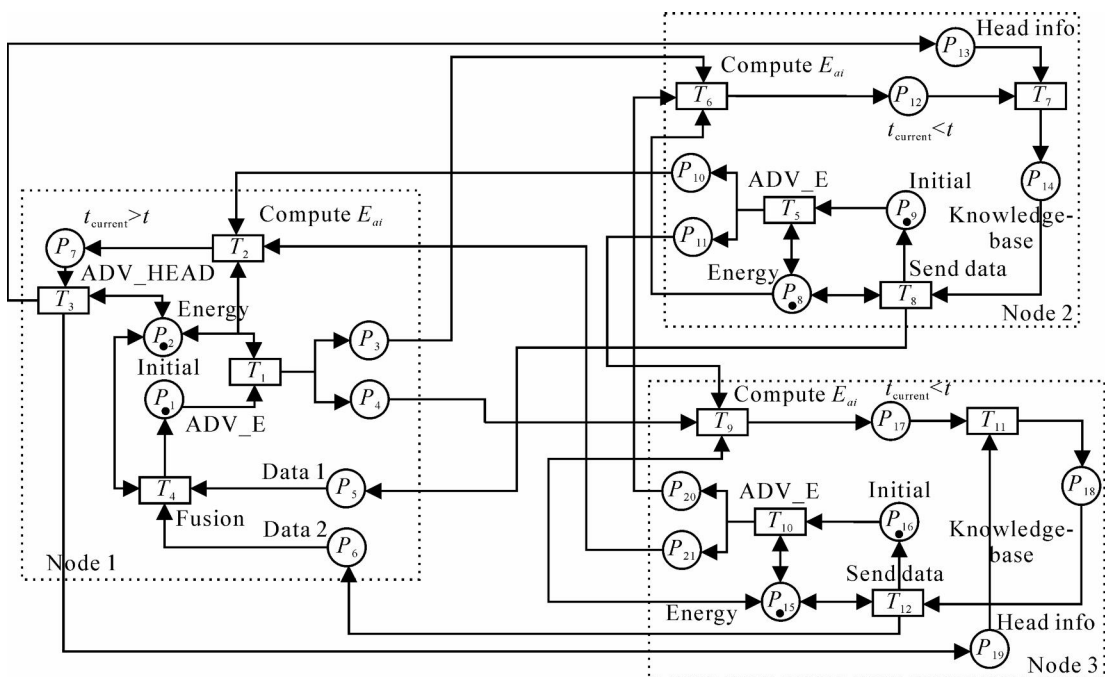


图 2 EEDC 算法的 CPN 模型

对模型的正确性进行分析. EEDC 算法的 CPN 模型如图 2 所示.

为了模型简洁,省略了模型中的颜色集、变量及弧表达式等. 库所 P_2 (Energy) 表示节点的当前能量,节点在发送和接收信息时都需要先检查是否有足够的能量进行信息传输. 算法开始时,节点首先通过变迁 T_1, T_5, T_{10} 广播剩余能量,节点 1 收到其他两个节点的剩余能量后,计算平均剩余能量并设定竞争簇头的时间. 若节点 1 在定时到达时仍未收到 ADV_HEAD 消息,则通过 T_3 向其他两个节点广播 ADV_HEAD 消息,成为簇头. 节点 2 和节点 3 收到 ADV_HEAD 消息后,存储在知识库所 P_{14} 和 P_{18} 中,然后通过 T_8, T_{12} 向簇头节点发送数据. 簇头节点接收其他两个节点的数据并通过 T_4 进行融合处理.

建立了 EEDC 的 CPN 模型后,利用工具 INA 对模型进行分析. 根据 INA 的分析结果,在图 2 所示的模型中,模型是有界的,可达状态有 46 个,而且模型是活的,不存在死锁,可以确保算法的完整性和正确性.

4 仿真实验与分析

通过 CPN 对 EEDC 的建模与分析,可以确保算法的完整性、正确性和可靠性,下面通过仿真来评价算法的性能. 实验模型由 100 个传感器节点组成,它们随机均匀分布在 $100m \times 100m$ 的感知区域内. 不失一般性,假定基站位于感知区域的中心,网络采用理想的 MAC 协议,忽略无线链路中可能发生的包冲突及丢包等错误. 为了证明本文提出的分簇算法的能量高效性,将 EEDC 与 LEACH, DCHS^[6] 和 PEGASIS 三种算法进行比较. 实验中所用的参数如表 1 所示,仿真结果取 50 次实验的平均值.

表 1 实验参数

参 数	取 值
传感器节点初始能量	0.5 J
E_{elec}	50 nJ/ bit
f_s	10 pJ/ (bit · m ²)
m_p	0.0013 pJ/ (bit · m ⁴)
d_0	87/ m
E_{DF}	5 nJ/ (bit · signal)
数据包大小	4000/ bits

图 3 为 4 种算法的存活节点数随时间(轮数)变化的情况. 从图 3 可以看出, EEDC 算法中节点的死亡时间比较接近,这是因为根据节点剩余能量和与基站的距离选择簇头,可以将能量消耗较均匀地分担到每个节点,有效地延长了网络生命周期,性能优

于其他 3 种算法. 由于 LEACH 以随机的方式选择簇头,簇头分布不均匀,导致一些节点与基站直接通信,节点很快死亡. DCHS 在 LEACH 的基础上考虑了节点的能量因素,可以有效提高网络生命周期. 但当网络运行了一段时间之后,由于节点当前能量很小,节点成为簇头的概率降低,每轮当选的簇头数量减少,导致网络能量耗费不均衡,缩短了网络生命周期. PEGASIS 算法中节点传输数据所需的距离小于 LEACH 簇内节点到簇头的距离,而且头节点至多接收两个节点传输的信息,因此性能优于 LEACH 算法.

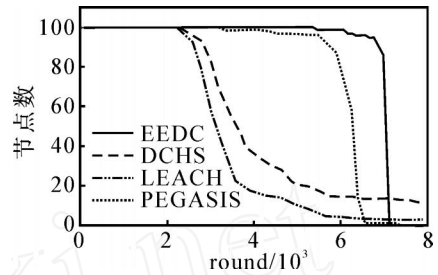


图 3 网络中存活节点数随时间的变化

图 4 显示了在系统生命周期内基站收到的有效数据,图 5 显示了节点平均剩余能量随时间变化的情况. EEDC 与 LEACH 相比,系统会多传递近 1 倍的有效数据分组,而且节点平均剩余能量要明显高于 LEACH. 这是由于 LEACH 会导致簇头分布不均匀,使节点将能量消耗在与基站的长距离通信上. 对于 PEGASIS 而言,要获得节点的全局信息,系统的控制开销较大.

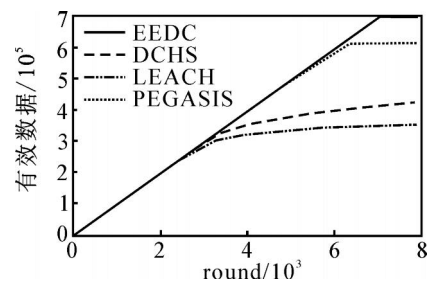


图 4 基站收到的有效数据

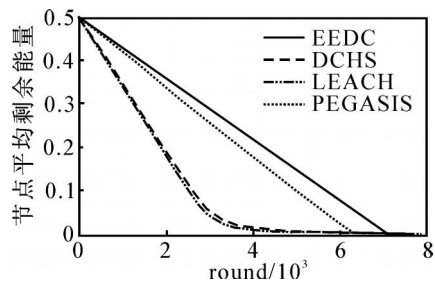


图 5 节点平均剩余能量随时间的变化

5 结 论

无线传感器网络路由算法是影响网络寿命的关

键因素.为了延长网络寿命,本文提出了一种能量高效的簇路由算法 EEDC,其核心思想是根据局部信息使剩余能量较高并距基站距离较近的节点成为簇头,从而延长网络寿命.为了确保路由算法的完整性、正确性和可靠性,利用着色网对算法进行建模,并利用 CPN 的支持工具 INA 对算法的可达性、有界性和活性进行了分析和验证.仿真实验表明, EEDC 较好地均衡了系统的通信开销,与已有的几个簇路由算法相比,该算法显著地延长了网络的存活时间.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz L F, Su W J, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Akyildiz I F, Su W J, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102 - 114.
- [3] Abbasi A A, Younis M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2007, 30(14/ 15): 2826-2841.
- [4] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]. Proc of the 33rd Annual Hawaii Int Conf on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000: 3005-3014.
- [5] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]. Proc of the 4th IEEE Conf on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002: 368-372.
- [7] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems [C]. Proc of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002: 1125-1130.
- [8] Qing L, Zhu Q, Wang M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2006, 29(12): 2230-2237.
- [9] 刘明, 曹建农, 陈贵海, 等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1092-1109.
(Liu M, Cao J N, Chen G H, et al. EADEEG: An energy-aware data gathering protocol for wireless sensor networks[J]. J of Software, 2007, 18(5): 1092-1109.)
- [10] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600.
(Shen B, Zhang S Y, Zhong Y P. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. J of Software, 2006, 17(7): 1588-1600.)
- [11] Jensen K. An introduction to the theoretical aspects of coloured Petri nets [J]. Lecture Notes in Computer Science, 1994, 803: 230-272.
- [12] Xiong C, Murata T, Tsai J. Modeling and simulation of routing protocol for mobile Ad Hoc networks using colored Petri nets [C]. Research and Practice in Information Technology. Australis: Australian Computer Society, 2002, 12: 145-153.
- [13] Haines R J, Clemo G R, Munro A T D. Petri-nets for formal verification of MAC protocols [J]. IET Software, 2007, 1(2): 39-47.
- [14] Roch S, Starke P H. INA: Integrated net analyzer, Version 2.2[EB/OL]. www2.informatik.huberlin.de/~starke/ina.html, 2008.

第8届智能控制与自动化世界大会征文通知

第8届智能控制与自动化世界大会(WCICA2010),将于2010年7月7日—9日在中国济南举行.欢迎广大同行积极投稿并参加会议.所有WCICA2010录用的论文都将由IEEE出版, EI检索.会议详细信息请浏览会议网站: <http://www.wcica.info>.

截稿日期: 2009年11月30日 录用通知: 2010年2月28日 终稿提交: 2010年3月31日
大会会务组联系人: 刘剑 薛艺诗
电邮: info@wcica.info 电话: 86-531-88392225 手机: 86-15098895860