

CPS 拓扑结构节点重要性排序方法

杨志才 裴杭萍 权冀川 雷智朋

(解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)

摘要 信息物理融合系统(Cyber-physical Systems, CPS)拓扑结构中节点重要性排序是 CPS 拓扑分析的重要方面。针对 CPS 内在结构特征,构建一种 CPS 拓扑结构模型——交互网络模型。然后结合 CPS 信息交互特点定义节点交互介数作为衡量具体节点重要性度量,阐明该测度能够反映节点的相对重要度,并给出了时间复杂度为多项式阶的节点重要性排序有效算法。最后构建 CPS 拓扑实例进行分析,并与节点介数进行对比,说明节点重要性排序能够为 CPS 的运行和防护提供重要参考。

关键词 信息物理融合系统(CPS),交互网络模型,节点交互介数,重要性排序

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.027

Node Importance Ordering for Topology Structure of Cyber-physical Systems

YANG Zhi-cai QIU Hang-ping QUAN Ji-chuan LEI Zhi-peng

(College of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract The node importance ordering for topology structure of cyber-physical systems(CPS) is an critical aspect of topological analysis. A topology model for CPS named interactive network model was established according to the intrinsic structural features. Then the node interactive betweenness was defined considering the information interacting characteristics of CPS, which can reflect relative importance of each node. The effective node importance ordering algorithm was presented, of which the time complexity is polynomial. Finally, a topology instance for CPS was analyzed, and the result was compared with node betweenness, suggesting that node importance ordering can provide valuable reference for the running and protection of CPS.

Keywords Cyber-physical systems(CPS), Interactive network model, Node interactive betweenness, Importance ordering

1 引言

目前,信息物理融合系统作为物联网的演进迅速发展^[1-3],它是集计算、通信和物理过程为一体的混成系统。CPS 涉及网络通信、计算科学、控制理论等多个学科,广泛应用于多种实际系统,包括道路交通、远程医疗、航空航天、能源自动化、国家电网等大型基础设施系统^[4-6]。CPS 的深入研究和研究成果的应用将极大地改变信息世界和物理世界的交互方式,影响未来物理系统的构建方式。

CPS 是复杂异质系统的集成,系统分析 CPS 的组成结构是深入研究 CPS 的一个关键问题^[7]。目前对 CPS 系统分析主要是从体系结构的角度^[8-10]进行,而对 CPS 具体分析比较少。CPS 拓扑结构分析是 CPS 具体分析的基础研究,节点重要性排序是拓扑研究的一个重要方面。Yagan 等^[11]从 CPS 网络结构中节点关联引发级联失效的角度分析系统的鲁棒性和节点重要性;陈丽娜等^[12]根据 CPS 物理层不同节点划分单元(CPSU)以及 CPSU 能够嵌套构建来分析不同单元的性能并以此作为重要性的度量,但侧重于 CPS

体系结构的分析,而且划分单元不易区分具体节点的重要性。

本文分析 CPS 内在结构组成特征,从拓扑角度建立 CPS 交互网络模型,根据节点在网络结构中的功能特性构建衡量节点重要性的测度,给出整个拓扑结构节点重要性排序的有效算法;并在实例计算中与节点介数进行对比分析,以说明该测度更能反映 CPS 结构特征。最后阐明节点重要性排序的重要实用意义。

2 CPS 拓扑结构模型

CPS 是计算和物理的整合^[13],是信息网络和物理网络构成的整体系统,系统功能的实现需要两个系统之间的交互^[14]。物理网络中的节点包括 CPS 中各种物理设备,如传感器、执行器等,信息网络中的节点主要有信息处理中心、决策中心等,它们之间通过有线或无线链路进行信息的传输。CPS 中节点连接关系具有复杂网络的特征^[15],本文将 CPS 信息网络与物理网络抽象成两个复杂网络,构建交互网络模型,如图 1 所示。

到稿日期:2014-09-03 返修日期:2015-02-02 本文受国家自然科学基金(61103225),江苏省自然科学基金(BK20140070)资助。

杨志才(1990—),男,硕士生,主要研究方向为物联网、信息物理融合系统,E-mail:ygdc888@126.com;裴杭萍(1965—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为系统仿真与评估;权冀川(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向为综合效能评估;雷智朋(1989—),男,博士生,主要研究方向为信息管理。

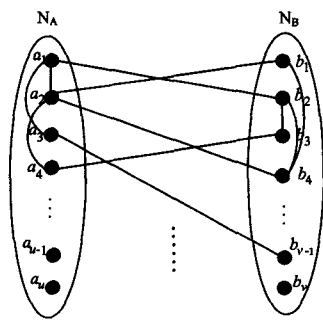


图1 交互网络模型

根据交互网络模型特点，将CPS拓扑结构中的边区分为内部边和交互边。内部边表示信息网络(网络A)或物理网络(网络B)中内部节点相互连接的边，如图1中边 a_1a_2, b_1b_4 等。交互边表示端点分别在两个网络中的边，如边 a_1b_2, a_2b_1 等。节点的度分为内部度和交互度，内部度指节点连接内部边的条数，交互度指节点连接交互边的条数，例如节点 a_1 的内部度为2，交互度为1。在交互网络模型中，将端点分别在两个网络中的路径称为交互路径，如路径 $P_1 = a_1a_3b_{v-1}$ 。由于必须经过交互边才能够跨越两个网络，因此交互路径必然包含交互边，如路径 P_1 中包含交互边 a_3b_{v-1} 。实际中，两个网络的信息交互总是沿着交互路径实现的。

假设网络A和网络B中节点数量分别为 u 和 v ，则两个网络的节点集合可表示为 $N_A = \{a_1, a_2, \dots, a_u\}$ ， $N_B = \{b_1, b_2, \dots, b_v\}$ 。

定义1 内部邻接矩阵表示网络A或网络B内部边的连接情况。

设网络A与网络B的内部邻接矩阵分别用 M_A 和 M_B 表示，有 $M_A = (m_{ij})_{u \times u}$ ， $M_B = (m_{ij})_{v \times v}$ 。

定义2 交互邻接矩阵表示两个网络之间交互边的连接关系。

设 M_I 为两个网络之间的交互矩阵，则 $M_I = (m_{ij})_{u \times v}$ ，交互矩阵中元素 $m_{ij} = 1$ (或 $m_{ij} = 0$)表示节点 a_i 和 b_j 存在(或不存在)交互边。由于CPS的功能特性，信息需要在两个网络之间交互才能够实现系统功能，因此交互边集合不能为空，即有 $M_I \neq O_{u \times v}$ 。

根据以上定义，可构建五元组 $\{N_A, N_B, M_A, M_B, M_I\}$ 用于表示CPS拓扑结构。考虑CPS属性特点，本文在研究CPS拓扑结构中，侧重分析CPS的静态结构，做出以下约定：

约定1 不考虑CPS拓扑结构的动态变化。

约定2 不考虑同时属于信息网络和物理网络的特殊节点。

3 节点重要性度量

节点重要性排序是拓扑结构分析的关键内容之一，首先需要定量度量节点重要性。CPS系统功能实现的关键在于信息网络与物理网络之间的交互，因此CPS拓扑结构中交互路径对于系统信息的流动具有重要意义。针对CPS拓扑结构特点，本文定义交互介数作为衡量拓扑结构的重要性测度，据此确定节点重要性排序。

定义3 节点 $k(k \in N_A \cup N_B)$ 的交互介数 $W(k)$ 为CPS拓扑结构中节点 k 在所有最短交互路径中出现的频数与全部最短交互路径数之比，即：

$$W(k) = \frac{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}(k)}{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} f(P_{ij})} \quad (1)$$

式中， $f(P_{ij}) = 1$ (或0)表示节点 i, j 之间存在(或不存在)最短交互路径。两个节点之间最短交互路径可能不唯一，例如图1中节点 a_1 和 b_4 之间存在两条最短交互路径 $S_{a_1, b_4}^{(1)} = a_1a_2b_4$ ， $S_{a_1, b_4}^{(2)} = a_1b_2b_4$ 。若节点 i, j 之间存在 N_{ij} 条最短交互路径 $S_{ij}^{(1)}, S_{ij}^{(2)}, \dots, S_{ij}^{(N_{ij})}$ ，则 P_{ij} 表示这 N_{ij} 条路径，并且每条路径表示 $1/N_{ij}$ 条最短交互路径，即 $f(S_{ij}^{(r)}) = 1/N_{ij}$ ($r = 1, 2, \dots, N_{ij}$)。设 $|P_{ij}|$ 表示最短路径的长度(指节点数)，由于路径的最短性，显然有各最短路径的长度相等，即 $|S_{ij}^{(1)}| = |S_{ij}^{(2)}| = \dots = |S_{ij}^{(N_{ij})}| = |P_{ij}|$ 。

$\sum_{i \in N_A, j \in N_B} f(P_{ij})$ 表示CPS拓扑结构中最短交互路径的数量。节点 i, j 之间是否需要计算最短交互路径，可根据实际需要确定。若不考虑其他因素，由于整个CPS拓扑结构为一个连通分支，此时有 $\sum_{i \in N_A, j \in N_B} f(P_{ij}) = |N_A| |N_B|$ 。

$P_{ij}(k)$ 表示节点 k 在节点 i, j 之间所有最短交互路径(设为 N_{ij} 条)中出现的频数，其值为：

$$P_{ij}(k) = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{r=1}^{N_{ij}} S_{ij}^{(r)}(k) \quad (2)$$

式中， $S_{ij}^{(r)}(k)$ 表示节点 k 是否在节点 i, j 之间的第 r 条最短路径中，取值为：

$$S_{ij}^{(r)}(k) = \begin{cases} 1, & \text{最短路径包含节点 } k \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

交互路径包含了拓扑结构中的内部边和交互边，并且节点交互介数越大，表明经过该节点的最短交互路径越多，其更容易成为CPS中的瓶颈节点，因此交互介数能够综合反映出节点在拓扑结构中的重要性。

在CPS交互网络模型中节点交互介数具有如下两个性质。

性质1 增加交互边，所有节点的交互介数之和减少(或不变)。即任意增加交互边 $E_{st}(s \in N_A, t \in N_B)$ ，有

$$\sum_{k \in N_A \cup N_B} W'(k) \leq \sum_{k \in N_A \cup N_B} W(k) \quad (4)$$

证明：CPS网络中全部最短交互路径数根据实际确定，在计算中取值 N_p ，显然有 $N_p \leq |N_A| |N_B|$ ，从而：

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in N_A \cup N_B} W'(k) \\ &= \sum_{k \in N_A \cup N_B} \frac{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}'(k)}{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} f(P_{ij}')} \\ &= \sum_{k \in N_A \cup N_B} \frac{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}'(k)}{N_p} \\ &= \frac{1}{N_p} \sum_{k \in N_A \cup N_B} \sum_{i \in N_A, j \in N_B} \left[\frac{1}{N_{ij}} \sum_{r=1}^{N_{ij}} S_{ij}^{(r)}(k) \right] \\ &= \frac{1}{N_p} \sum_{i \in N_A, j \in N_B} \left[\frac{1}{N_{ij}} \sum_{k \in N_A \cup N_B} \sum_{r=1}^{N_{ij}} S_{ij}^{(r)}(k) \right] \\ &= \frac{1}{N_p} \sum_{i \in N_A, j \in N_B} \left[\frac{1}{N_{ij}} (N_{ij} \cdot |S_{ij}'|) \right] \\ &= \frac{1}{N_p} \sum_{i \in N_A, j \in N_B} |P_{ij}'| \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\sum_{i \in N_A, j \in N_B} |P_{ij}'|$ 即所有最短交互路径长度之和。事实上，增加交互边 E_{st} ，由于 P_{ij} 的最短性， $|P_{ij}|$ 不可能增大，即有 $|P_{ij}'| \leq |P_{ij}|$ ，因此

$$\sum_{k \in N_A \cup N_B} W'(k) \leq \frac{1}{N_p} \sum_{i \in N_A, j \in N_A} |P_{ij}| = \sum_{k \in N_A \cup N_B} W(k) \quad (6)$$

性质 2 当网络 A 中每个节点均与网络 B 中所有节点直连时, CPS 中所有节点的交互介数达到最小。在计算拓扑结构中所有最短交互路径时, 网络 A 中节点的交互介数均为 $1/|N_A|$, 网络 B 中节点的交互介数均为 $1/|N_B|$ 。

证明: 拓扑结构中, 网络 A 中任一节点 a_i 与网络 B 中所有节点之间至少存在一条最短交互路径, 当然 a_i 与网络 B 中部分节点之间的最短交互路径可能根据实际不计入。设 a_i 与网络 B 中 h_{a_i} 个节点计入最短交互路径, 从而 a_i 至少作为端点出现在与这 h_{a_i} 个节点的所有最短交互路径中, 即有 $\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}(a_i) \geq h_{a_i}$, 从而

$$W(a_i) = \frac{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}(a_i)}{N_p} \geq \frac{h_{a_i}}{N_p} \quad (7)$$

当网络 A 中每个节点均与网络 B 中所有节点直连时, 所有最短交互路径均直接为交互边, 不经过其他节点, 此时有

$$\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}(N_{a_i}) = h_{a_i} \quad (8)$$

从而式(7)取等号。由于 a_i 的任意性, 网络 A 中所有节点交互介数均取最小值; 同样可证, 该结论对网络 B 中所有节点也成立。

计算拓扑结构中所有最短交互路径时, $N_p = |N_A| |N_B|$, 并且对于任意 a_i , $h_{a_i} = |N_B|$, 从而

$$W(a_i) = \frac{\sum_{i \in N_A, j \in N_B} P_{ij}(a_i)}{|N_A| |N_B|} = \frac{|N_B|}{|N_A| |N_B|} = \frac{1}{|N_A|} \quad (9)$$

即任意网络 A 中节点的交互介数为 $1/|N_A|$, 同样可得出网络 B 中节点的交互介数均为 $1/|N_B|$ 。因此性质 2 成立。

由性质 1 和性质 2 可知, 增加交互边可能导致部分节点交互介数减少, 其他节点交互介数增加, 但实际上该节点原有边的连接情况并未改变, 即该节点相对于其他节点的重要性降低了。因此交互介数反映的是节点在 CPS 拓扑结构中相对于其他节点的重要度。根据节点交互介数即可对 CPS 拓扑结构中所有节点进行重要性排序。

4 节点重要性排序算法

实现 CPS 拓扑结构中所有节点的重要性排序, 需要对整个网络的所有最短路径进行搜索和计算。本文计算所有节点的交互介数, 实现节点重要性排序的算法如下:

- 1) 根据 M_A, M_B, M_I 构建 CPS 拓扑结构的邻接矩阵 $M_{CPS} = (m_{ij})_{u+v, u+v}$ 。
- 2) 应用广度优先搜索算法计算出每对节点间的最短路径长度, 用距离矩阵 $D_{CPS} = (d_{ij})_{u+v, u+v}$ 记录。
- 3) 对于任意节点对 $i \in N_A, j \in N_B$, 从节点 j 开始回溯, 逐步搜索满足 $d_k = d_{ij} - m_{jk}$ 的节点 k ($k \in N_A \cup N_B$), 回溯到节点 i 结束, 得到 i, j 之间的最短交互路径。搜索完所有节点时, 即可得出 i, j 之间的所有最短路径。
- 4) 对每对 $i \in N_A, j \in N_B$ 反复执行步骤 3), 得到所有最短交互路径。
- 5) 根据所有最短交互路径, 统计每个节点的频数, 根据式(1)计算节点交互介数。
- 6) 对网络 A 与网络 B 中所有节点的交互介数分别进行

排序, 得出节点重要性排序结果。

因为交互网络模型为无权图, 步骤 2) 中应用广度优先搜索算法逐步记录节点即能求出所有节点对之间的路径长度, 算法复杂度为 $O((u+v)L)$ 。步骤 3) 中搜索回溯过程比较次数不会超过所有边的总数(设为 L), 而步骤 4) 共需执行 uv 次步骤 3), 因此执行完步骤 4) 的时间复杂度为 $O(uvL)$ 。步骤 5) 为步骤 4) 结果的逐一比较, 时间复杂度同步步骤 4)。步骤 6) 中排序的时间复杂度为 $O(u \log u + v \log v)$ 。从而可得 CPS 拓扑结构节点重要性排序算法的时间复杂度为 $O((u+v)L) + O(uvL) + O(u \log u + v \log v)$ 。

5 实例分析与对比

CPS 拓扑结构具有复杂网络特征, 因此本文从复杂网络理论出发, 分别应用 BA 网络模型^[16]和 ER 网络模型^[17]作为网络 A 和网络 B 的分析实例(也可以反过来), 构建 CPS 拓扑结构实例进行分析。实例中网络 A 和网络 B 均取 60 个节点, 内部度均值取 3, 交互边采用随机部署的方式部署, 所有节点的交互度均值设为 2。

根据节点重要性排序算法可得出 CPS 拓扑实例中所有节点的交互介数, 结果如图 2 所示。采用 Brandes 算法^[18]计算所有节点介数来作为节点重要性, 结果如图 3 所示。

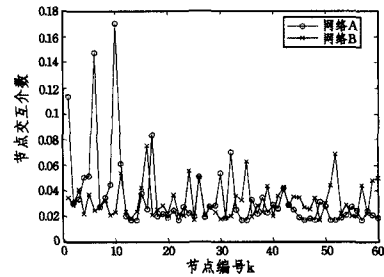


图 2 节点交互介数分布

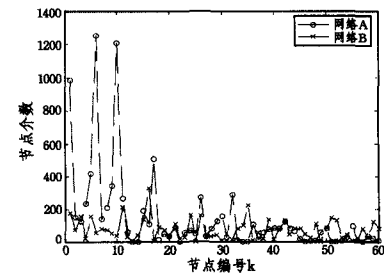


图 3 节点介数分布

由节点交互介数的计算结果可得出网络 A 中节点重要性排序为 $a_{10}, a_6, a_1, \dots, a_{51}, a_{52}, a_{57}$, 网络 B 中节点重要性排序为 $b_{16}, b_{52}, b_{35}, \dots, b_{30}, b_{25}, b_{49}$ 。网络 A 和网络 B 节点介数(重要性)排序分别为 $a_6, a_{10}, a_1, \dots, a_{51}, a_{52}, a_{57}$ 和 $b_{16}, b_{35}, b_{11}, \dots, b_{17}, b_{25}, b_{49}$ 。

分别选取网络 A 中两种节点重要性排序方法中最重要节点 a_{10} 和 a_6 进行比较。节点 a_{10} 连接 3 条交互边, 节点度数为 28(包括交互边); 节点 a_6 连接 2 条交互边, 节点度数为 30。这是由于节点介数不区分链路类型, 节点度数越大, 链路经过的可能性越大; 而节点交互介数侧重反映节点在网络交互链路中的重要性, 更加符合 CPS 拓扑结构特征。

从图 2 中可看出, 两个网络中前几个节点交互介数明显高于其他节点, 根据实际需要可进行重点防护。

计算 CPS 中节点交互介数,确定节点重要性排序,一方面可用于分析 CPS 中重要节点所在,做好提前防护或重点备份,确保系统正常运用;另一方面,在有多个节点失效时可迅速确定维修顺序,尽快恢复系统性能,提高系统抗毁性。这对于 CPS 的部署、运行和维护具有重要指导意义。

结束语 本文针对信息物理融合系统的内在结构特点,构建交互网络模型,并提出一种有效的节点重要性排序方法,可为 CPS 的实际应用提供重要参考。CPS 具有广阔的应用前景,CPS 拓扑结构研究对 CPS 的深入研究具有重要的指导意义,有待于进一步展开。

参考文献

- [1] Guinard D, Trifa V. Towards the web of things; Web mashups for embedded devices[C]//Proceedings of WWW(International World Wide Web Conferences) Workshop on Mashups, Enterprise Mashups and Lightweight Composition on the Web(MEM 2009). Madrid, Spain; Springer-Verlag, 2009;15-22
- [2] 王中杰,谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011,37(10):1157-1166
Wang Zhong-jie, Xie Lu-lu. Cyber-physical systems; a survey [J]. Acta Automatica Sinica, 2011,37(10):1157-1166
- [3] 李仁发,谢勇,李蕊,等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展, 2012,49(6):1149-1161
Li Ren-fa, Xie Yong, Li Rui, et al. Survey of Cyber-Physical Systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(6):1149-1161
- [4] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems[M]//The Impact of Control Technology. Washington DC, USA: IEEE, 2011; 161-166
- [5] 林峰,舒少龙. 赛博物理系统发展综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010,38(8):1243-1249
Lin Feng, Shu Shao-long. A review on Cyber-Physical Systems [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38 (8):1243-1249
- [6] Wan Jia-fu, Yan He-hua, Suo Hui, et al. Advances in Cyber-Physical Systems Research[J]. KSII Transactions on Internet & Information Systems, 2011,5(11):1891-1908
- [7] Rajkumar R R, Lee I, Sha L, et al. Cyber-physical systems; the next computing revolution[C]//Proceedings of the 47th Design

- Automation Conference. New York: ACM, 2010;731-736
- [8] 何明,梁文辉,陈希亮,等. CPS 系统体系结构顶层设计研究[J]. 计算机科学, 2013,40(11):18-22
He Ming, Liang Wen-hui, Chen Xi-liang, et al. Research on top-level design of architecture for Cyber-physical Systems[J]. Computer Science, 2013,40(11):18-22
- [9] Zhu Quan-yan, Rieger C, Basar T. A hierarchical security architecture for cyber-physical systems[C]//2011 4th International Symposium on Resilient Control Systems (ISRCs). Boise ID, USA: IEEE, 2011;15-20
- [10] Dillon T S, Zhuge Hai, Wu Chen, et al. Web-of-things framework for cyber-physical systems[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2011,23(9):905-923
- [11] Yagan O, Qian Da-jun, Zhang Jun-shan, et al. Optimal allocation of interconnecting links in cyber-physical systems; Interdependence, cascading failures, and robustness[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012,23(9):1708-1720
- [12] 陈丽娜,王小乐,邓苏. CPS 体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011,38(5):295-300
Chen Li-na, Wang Xiao-le, Deng Su. Cyber-physical System architecture design[J]. Computer Science, 2011,38(5):295-300
- [13] Lee E A, Seshia S A. Introduction to embedded systems; A cyber-physical systems approach[M]. Berkeley: Lee & Seshia, 2011;1-15
- [14] Yagan O, Qian Da-jun, Zhang Jun-shan, et al. On allocating interconnecting links against cascading failures in cyber-physical networks[C]//2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Shanghai, China: IEEE, 2011;930-935
- [15] Uliuru M. Design for resilience of networked critical infrastructures [C] // Digital EcoSystems and Technologies Conference (DEST'07). Inaugural IEEE-IES. Cairns, Australia: IEEE, 2007;540-545
- [16] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks; Structure and dynamics[J]. Physics reports, 2006,424(4):175-308
- [17] Shao Jia, Buldyrev S V, Braunstein L A, et al. Structure of shells in complex networks[J]. Physical Review E, 2009,80(3):36-67
- [18] Brandes U. A Faster Algorithm for betweenness Centrality[J]. Journal of Mathematical Sociology, 2001,25(1):163-177

(上接第 100 页)

- [11] Siddavaatam R, Anpalagan A, Woungang I, et al. Ant Colony Optimization Based Sub-channel Allocation Algorithm for Small Cell HetNets[J]. Wireless Personal Communications, 2014,77 (1):411-432
- [12] Marshoud H, Otrouk H, Barada H, et al. Resource allocation in macrocell-femtocell network using genetic algorithm[C]//Proceedings of IEEE WiMob. 2012;474-479
- [13] La Q, Chew Y, Soong B. Performance Analysis of Downlink Multi-Cell OFDMA Systems Based on Potential Game[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012,11(9):3358-3367
- [14] Bochrini S, Bouras C. Efficient MCS selection mechanisms for

multicasting over LTE networks [C] // Proceedings of IEEE WMNC. 2013;1-8

- [15] Lee C, Huang J-H. Distributed channel selection principles for femtocells with two-tier interference[C]//Proceedings of IEEE VTC. 2010;1-5
- [16] Ahmadi H, Chew Y H, Chai C C. Multicell multiuser OFDMA dynamic resource allocation using ant colony optimization[C]//Proceedings of IEEE VTC Spring. 2011;1-5
- [17] Dorigo M, Birattari M, Stützle T. Ant colony optimization[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006(1):28-39
- [18] Srinivas M, Patnaik L. Genetic algorithms; a survey[J]. IEEE Computer, 1994,27(6):17-26