

# 基于连接矩阵的潜在通路定性分析方法

黄 聪<sup>1</sup>, 梅 洪<sup>2</sup>, 张庆振<sup>1</sup>, 程 林<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

**摘要:** 对电路图中的电气元件进行定性建模, 根据建立的元件模型, 按照电流方向将电路图转化为有向图的形式, 进而构造出图的连接矩阵, 利用其代数余子式计算有向图中从电源正端到地端的所有通路路径, 并与该电路图设计的功能支路进行对比确定电路是否存在潜在通路; 相比于传统潜在通路分析的邻接矩阵法, 该方法不仅能判别电路中是否存在潜在通路, 而且能确定潜在通路的所有导通路径信息; 在此基础上, 提出了改进原始电路图以达到消除潜在通路影响的方法, 文中采用某汽车点火电路为例, 利用 Capital Harness System (CHS) 软件仿真分析, 验证该方法的正确性与可行性。

**关键词:** 连接矩阵; 开关函数; 潜在通路分析; CHS

## Sneak Circuit Qualitative Analysis Method Based on Connection Matrix

Huang Cong<sup>1</sup>, Mei Hong<sup>2</sup>, Zhang Qingzhen<sup>1</sup>, Cheng Lin<sup>1</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The electrical components were qualitative modeled in the circuit diagram. To get the connection matrix of the circuit diagram, it's necessary to transform the circuit diagram to directed graph by the current direction on the basis of the modeled components. All the paths in the directed graph from the battery positive terminal to ground could be calculated by using its algebraic cofactor, and compared the paths with the function branches that were designed for the circuit graph. Compared to the adjacency matrix method used in traditional sneak circuit analysis, this method could not only judge whether there were sneak circuits in the circuit graph, but got all the conduction paths information of the sneak circuits. On this basis, the method that was designed for wiping the effects of the sneak circuits was proposed to improve the original circuit graph. The validity and feasibility of the method has been confirmed experimentally in the car ignition circuit by using Capital Harness System (CHS).

**Keywords:** connection matrix; switch function; sneak circuit analysis; CHS

## 0 引言

潜在通路问题是与元器件失效无关、在特定条件下会导致系统期望功能被非预期地抑制或非期望功能被非预期地激发的这一类问题<sup>[1]</sup>。潜在通路问题的研究是从上世纪 60 年代美国红石火箭发射失败时开始, 原因是点火后产生意外通路导致发动机关机<sup>[1-2]</sup>。在航空航天测试中, 由于电路系统过于庞大, 电气元件种类繁多, 在不同时序的开关组合下, 可能造成某些功能元件被意外激发, 对整个电路系统的安全造成潜在隐患, 因此开展电路的潜在通路研究时很有必要的。

传统潜通路分析是通过构建电路有向图, 利用邻接矩阵求取电路通路数目, 当时序变化导致开关组合发生变化时, 邻接矩阵亦随之变化, 计算潜在通路过程复杂且只能得出支路数目, 无法得出潜在通路回路的具体路径<sup>[3]</sup>。本文中提出一种基于电路有向图的连接矩阵方法, 通过对电器元件定性建模, 通过计算连接矩阵代数余子式能直观反映出电路图中所有开关组合下的路径通路<sup>[4-6]</sup>, 并与设计的功能支路数进行对比, 从而确定是否存在潜在通路并详细指出潜在通路的路径信息<sup>[3]</sup>。

## 1 基于图论的电路有向图

对电气元件进行定性建模, 把电路图中建模后的功能元件

定性转化为图论中的边, 按照流过功能元件的电流方向定义边的方向, 那么每个功能元件对应的边是有向边, 由有向边和顶点集合所构成的图即是有向图。

### 1.1 电气元件定性建模

电气元件是指能在电路中实现某一特定功能的部件, 在实际电路系统为了简化分析过程, 先对简单电气元件如电阻、灯、开关等进行定性建模。

图 1 左边的简单电气元件中, 它们都是由端点和所在通路组成, 为了简化模型, 不论元件是否处于工作状态或者开关是否处于导通状态, 我们将除了电源以外的元件都等效成图 1 右边的模型, 其中  $A_i$  代表端点,  $e_i$  代表等效支路<sup>[7]</sup>。

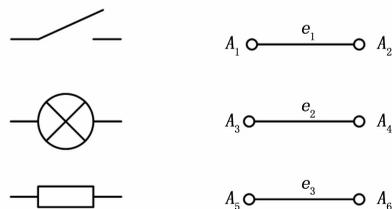


图 1 电气元件模型

充分考虑电气元件处于工作或者非工作状态, 对应的支路  $e_i$  取值为 0 或 1。当  $e_i=0$  时, 表示开关打开或者功能元件处于不使能状态, 当  $e_i=1$  时, 表示开关关闭或者功能元件处于使能状态。

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-05-24。

作者简介: 黄 聪(1992-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事制导与控制, 电气仿真方向的研究。

1.2 电路有向图

按照电源正端到地端的顺序, 对每个电气元件的端点进行编号, 分别记作  $A_1, A_2 \dots A_N$ , 从电源正端  $A_1$  为起始点, 选择一个与  $A_1$  相邻且未被访问的节点  $A_m$ , 再从  $A_m$  出发选择一个与  $A_m$  相邻且未被访问的节点  $A_n$ , 一直到访问到地端节点, 依次循环。根据电流的流向关系, 将每条功能元件的边转化为有向边, 分别记作  $e_1, e_2 \dots e_n$ 。在图 2<sup>[1]</sup>所示的某汽车点火电路图, 将电源正端编号为  $A_1$ , 闪光灯 1 端、2 端分别编号为  $A_2, A_3$ , 地端编号为  $A_4$ , 停车灯与停车开关相交节点编号为  $A_5$ , 打火开关、刹车开关与收音机相交节点编号为  $A_6$ , 并将危险开关 S1、闪光灯、刹车灯、停车灯、停车开关、刹车开关、打火开关与收音机分别编号为有向边  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8$ , 转化为有向图如图 3 所示。

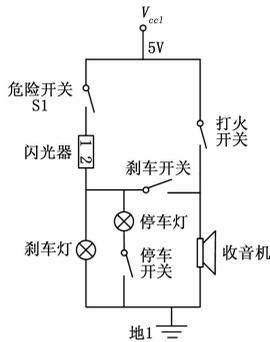


图 2 某汽车点火电路

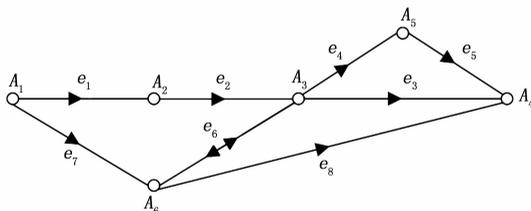


图 3 电路有向图

2 电源正端到地端通路计算

2.1 连接矩阵

由顶点集合  $V(G)$  和边集合  $E(G)$  的二元关系集合组成的有向图  $G(V, E)$  中,  $V(G)$  中元素个数称为有向图的阶, 记为  $n$ ;  $E(G)$  中的元素称为有向图的边, 用符号  $e$  表示。有向图的连接矩阵  $X$  是  $n \times n$  阶矩阵, 矩阵元素  $x_{ij}$  定义如下: 当  $i=j$  时,  $x_{ij}=1$ ; 当  $i \neq j$  且节点  $i$  和节点  $j$  之间不连通时,  $x_{ij}=0$ ; 当  $i \neq j$  且节点  $i$  和节点  $j$  之间连通时,  $x_{ij} = \sum_{k=1}^k e_x$ , 其中  $e_1, e_2 \dots e_k$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的有向边<sup>[5]</sup>。

按照连接矩阵的定义, 图 2 电路的连接矩阵表示为:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & e_7 \\ 0 & 1 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & e_3 & e_4 & e_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e_6 & e_8 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 开关函数

定理 1: 电路有向图端点  $A_i$  和  $A_j$  的开关函数  $F_{ij}$  等于真

值  $Per X_{ij}$  ( $i \neq j$ ), 其中,  $X_{ij}$  表示连接矩阵  $X$  除第  $i$  行与第  $j$  列的子矩阵,  $Per X_{ij}$  表示对矩阵  $X_{ij}$  取行列式并将所有子项的符号位取绝对值, 开关函数是指在开关电路中两个端点之间所有路径的乘积和<sup>[8-9]</sup>。

证明: 在原图  $G$  中增加一条边  $e_0$ , 规定该边从  $A_i$  出发, 指向  $A_j$ , 得到新图  $G_0$ 。

显然, 图  $G_0$  从  $A_i$  到  $A_j$  的全部有向路径可以按照是否含有单通边  $e_0$  分为两大类, 一类有向路径中不含单通边  $e_0$ , 记为  $D_k$ , 另一类有向路径中含有  $e_0$ , 记为  $e_0 P_k$ , 可得:

$$Per X_0 = \sum D_k + e_0 \sum P_k \quad (2)$$

去掉边  $e_0$  后  $G$  与  $G_0$  完全相同, 因此有:

$$Per X = \sum D_k \quad (3)$$

由于  $e_0$  定义为从  $A_i$  到  $A_j$  的单通边,  $P_k$  可以看作由  $A_j$  到  $A_i$  有向边的积,  $\sum P_k$  为  $A_j$  到  $A_i$  的全部有向路径, 因此有:

$$\sum P_k = F_{ij} = Per X_{ij} \quad (4)$$

证毕:

由定理 1 知, 开关函数  $F_{ij}$  是关于支路  $e_i$  的多项式的和, 在实际电路中, 由于电流不能从同一功能元件流通两次, 即有向回路中支路  $e_i$  不能同时出现两次<sup>[10-11]</sup>, 因而开关函数中  $F_{ij}$  中所有含有  $e_i^k$  ( $k \geq 2$ ) 的项都应被剔除。

在图 2 电路中, 电源正端对应图 3 有向图中节点  $A_1$ , 地端对应图 3 有向图中节点  $A_4$ , 除掉第 4 行第 1 列的子矩阵行列式表示为:

$$|X_{14}| = \begin{vmatrix} e_1 & 0 & 0 & 0 & e_7 \\ 1 & e_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & e_3 & e_4 & e_6 \\ 0 & 0 & e_5 & 1 & 0 \\ 0 & e_6 & e_8 & 0 & 1 \end{vmatrix} = e_1 e_2 e_3 - e_7 e_8 - e_1 e_2 e_4 e_5 - e_1 e_2 e_6 e_8 + e_3 e_6 e_7 - e_4 e_5 e_6 e_7 \quad (5)$$

将  $|X_{14}|$  中每条通路前的系数求取绝对值并去掉开关函数中的平方项, 得到从电源正端到地端的开关函数为:

$$F_{14} = e_1 e_2 e_3 + e_1 e_4 e_5 + e_1 e_2 e_6 e_8 + e_3 e_6 e_7 + e_7 e_8 + e_4 e_5 e_6 e_7 \quad (6)$$

3 潜在通路判定

根据潜在通路的定义, 在电路分析中, 只需要关注关键元件, 分析从电源正端到地端节点的开关函数中含有该元件有向边的实际功能支路数, 将此数目与电路设计中该元件正常工作的路径数相比较, 即可获取电路中是否存在潜在通路<sup>[3]</sup>。

3.1 连接矩阵

潜在通路的判定算法具体步骤如下:

- 1) 找出需要分析是否存在潜在通路的功能元件及其转化为有向图中的有向边  $e_i$ ;
- 2) 在一定的开关组合下, 使该功能元件使能的路径数目  $p$ ;
- 3) 按照定理 1 中的准则求取开关函数  $F_{ij}$ ;
- 4) 将开关函数  $F_{ij}$  中不包含  $e_i$  的子项去掉, 多项式中剩余子项的个数记为  $q$ ;
- 5) 比较  $p$  与  $q$  的大小; 若  $p > q$ , 则存在设计的功能支路被抑制, 若  $p < q$ , 则存

在非期望功能被激发的潜在通路, 只有当  $p=q$  时, 该电气元件设计的功能支路数等于其处于使能状态的路径数目, 此时不存在潜在通路<sup>[12]</sup>。

图 2 中的某汽车点火电路是存在潜在通路的典型例子, 在该电路中, 要求在打火开关断开时, 收音机不能被触发开启, 危险开关和闪光器为旁通设计, 刹车开关与刹车灯、停车灯与停车开关构成相应功能支路。

在此电路中, 主要是判断收音机的工作是否存在潜在导通情况, 由于它只受打火开关的控制, 故  $p=1$ , 将开关函数  $F'_{41}$  中不含  $e_8$  的项剔除, 得到关于  $e_8$  的导通路径函数为  $\Delta F=e_7e_8+e_1e_2e_6e_8$ , 故  $q=2$ , 满足  $p<q$ , 因此电路中存在非期望功能被激发的潜在通路。

### 3.2 潜在通路的开关组合

将处理后的开关函数与设计功能数对比, 找出开关函数中功能元件被非期望激发的所有子项, 将每个子项中的所有开关元件对应的有向边  $e_i$  设定为闭合状态, 电路中的其他所有开关元件都设定为打开状态, 这些开关元件所组成的集合即为对应潜在路径下的开关组合。

分析图 2 中的电路可知, 其存在潜在路径  $\Delta F'=e_1e_2e_6e_8$ , 该多项式中含有开关元件  $e_1$  与  $e_6$ , 不含开关  $e_5$  与  $e_7$ , 因此对应的开关组合为  $[e_1, e_5, e_6, e_7] = [1, 0, 1, 0]$ , 其中 1 代表开关闭合, 0 代表开关断开。

### 3.3 潜在通路的改进

在开关电路中, 当功能元件被非期望激发时, 通过开关函数的子项找出所有潜在路径, 在每条导通路径中, 从该功能元件开始, 沿着电流的反方向找到与该功能元件最近的电气元件, 在两个元件之间添加二极管<sup>[13]</sup>, 按照二极管正向导通反向截止的电气特性, 添加二极管元件后的电路能够抑制该潜在通路并且不会对电路的其他功能造成影响。

利用该方法, 对图 2 中的电路进行改进, 得到改进后的电路如图 4 所示。

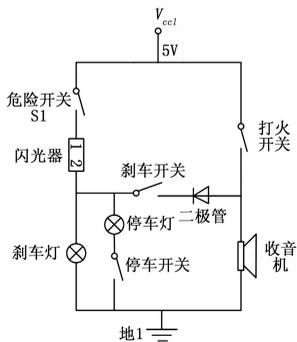


图 4 改进后的汽车点火电路

规定图 4 中二极管的功能边为  $e_9$ , 左端点为节点 G, 则改进后的电路连接矩阵为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & e_1 & 0 & 0 & 0 & e_7 & 0 \\ 0 & 1 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & e_3 & e_4 & 0 & e_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_8 & 0 & 1 & e_9 \\ 0 & 0 & e_6 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将除去第 4 行第 1 列的子矩阵取行列式并将平方项省略, 得到改进后电路的开关函数为:

$$F_{41} = e_1e_2e_3 + e_1e_2e_4e_5 + e_3e_6e_7e_9 + e_4e_5e_6e_7e_9 + e_7e_8 \quad (8)$$

关于  $e_8$  的导通路径函数为  $\Delta F=e_7e_8$ , 满足  $p=q=1$ , 因此改进后的电路不存在潜在通路。

## 4 CHS 仿真实验

利用 MentorGraphics 公司设计研制的电气线束设计软件 Capital Harness System 对图 2 中的点火电路进行潜在通路分析验证, 转化成的电路图如图 5 所示。

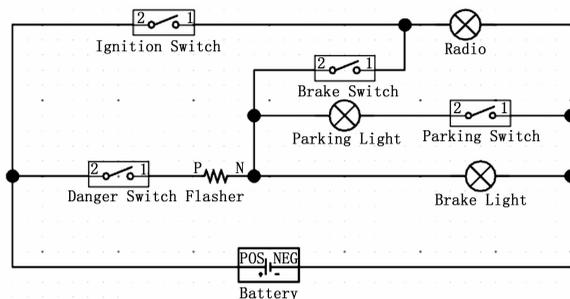


图 5 基于 CHS 的某汽车点火电路图

利用 CHS 中 Capital SimProve 功能模块对图 5 中的电路图进行定性仿真, 电路中存在的潜在通路函数以及对应的开关状态如图 6 所示, 可以看出该电路存在一条潜在通路。

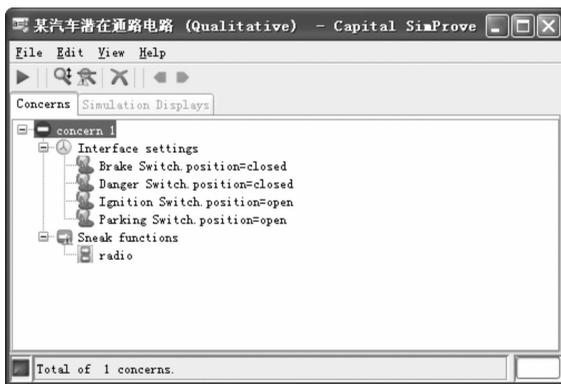


图 6 某汽车点火电路潜在通路 CHS 仿真结果

图 7 表示用 CHS 画出的改进后汽车点火电路图, 在刹车开关与收音机之间增加一个反向二极管, 利用 Capital SimProve 进行仿真, 仿真结果显示改进后的电路不存在潜在通路, 验证了潜在通路改进方法的正确性。

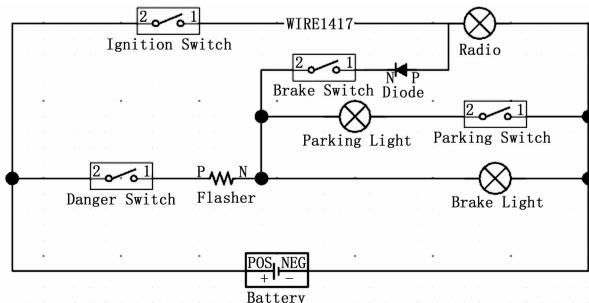


图 7 改进后某汽车点火电路图

## 5 结论

本文针对传统潜在通路分析的邻接矩阵法不能准确得到潜在通路的具体路径的缺点, 提出基于有向图的连接矩阵方法对电路进行潜在通路分析, 定性求解出功能元件所有潜在通路的路径信息, 在此基础上对潜在路径进行抑制与消除, 能从根源上避免潜在路径的形成, 在实际工程应用中具有很大的实用价值。

### 参考文献:

- [1] 胡昌华, 陈斌文, 刘丙杰. 复杂系统潜在问题分析理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 卢佩英, 沈士团, 孙宝江. 潜在通路分析在自动测试系统中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (7): 847-866.
- [3] 徐 萍, 马齐爽, 邹 涛. 开关电路潜通路分析的一种方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (3): 360-363.
- [4] 黎剑源, 丘东元, 张 波.  $n$ 阶谐振开关电容变换器潜电路图论分析法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (3): 53-59.

(上接第 239 页)

看文献会看到有很多关于改善系统性能的文章, 可以去分析讨论相关的技术, 本文也不例外, 在面對竞报价系统的缺陷, 利用所学知识, 得出一个系统而有效的科学方法来提高系统的性能。

本次系统在运行过程中我们发现, 并发量不高, 响应时间迟缓的关键, 是系统中没有很好的对服务器那一块做负载均衡处理。负载均衡技术又有很多种, 本次文章大胆假设利用多衡量指标的方法来提高服务器的负载能力, 就其中服务器处理静态数据的能力和动态数据的能力加入考虑, 现在随着硬件技术的飞速成长, 制约一个系统性能的瓶颈越来越推向软件方向, 所以本次的重点就是从负载决策上找到一个更合理的方法, 结合国外教授的先进理论我们得出服务器基于多衡量指标的算法, 从而优化系统的性能。

### 参考文献:

- [1] 桂勇哲, 张进宇. 基于覆盖网络多路径与并行 TCP 的传输技术 [J]. 计算机应用, 2010, 30 (5): 1171-1175.
- [2] 杜文峰, 吴 真, 赖力潜. 传输延迟感知的多路径并发差异化路径数据分配算法 [J]. 通信学报, 2013, 34 (4): 149-157.
- [3] 赵先明, 朱伏生, 唐 宏, 等. TD-LTE 系统动态资源分配算法研究 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2013, 25 (2): 226-230.
- [4] 杨际祥, 谭国真, 王荣生. 并行与分布式计算动态负载均衡策略综述 [J]. 电子学报, 2010, 38 (5): 1122-1130.
- [5] 王荣生, 杨际祥, 王 凡. 负载均衡策略研究综述 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31 (8): 1681-1686.
- [6] 王春娟, 董丽丽, 贾 丽. Web 集群系统的负载均衡算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (2): 102-104.
- [7] 张玉芳, 魏钦磊, 赵 膺. 基于负载权值的负载均衡算法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (12): 4711-4713.
- [8] 李 新, 黎文伟. 一种改进的动态告警负载均衡算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34 (7): 1585-1589.
- [9] 许少华, 夏智伟. 基于轮转周期的动态反馈负载均衡算法 [J]. 计算机技术与发展 (ISTIC), 2013, 23 (6): 63-66.

- [5] 郑 丹. 流体网络中单向回路问题的研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [6] 刘 剑, 贾进章, 于 斌. 通风网络含有单向回路时的通路算法 [J]. 辽宁大学工程技术大学学报, 2003, 22 (6): 721-724.
- [7] 刘丙杰, 刘勇志, 卫 翔. 图论与定性仿真相结合的潜在通路分析 [J]. 四川兵工学报, 2009, 30 (7): 17-19.
- [8] 兰家隆, 刘 军. 应用图论及算法 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995.
- [9] 王桂平, 王 衍, 任嘉辰. 图论算法理论、实现及应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [10] 梅 义, 丘东元, 张 波. 基于深度优先搜索的潜在电路计算机辅助分析法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (24): 75-80.
- [11] 丘东元, 张 波. 谐振开关电容变换器中潜电路现象的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21): 34-40.
- [12] 刘丙杰, 贾兴亮, 赵永刚. 潜在通路存在的判定方法研究 [J]. 航天控制, 2009, 27 (2): 88-90.
- [13] 邹 涛, 马齐爽. 基于网络流仿真的潜通路分析方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38 (4): 546-550.
- [10] 孙峻文, 周 良, 丁秋林. 基于退火算法的动态负载均衡研究 [J]. 计算机科学, 2013, 40 (5): 89-92.
- [11] 杨 锦, 李肯立, 吴 帆. 异构分布式系统的负载均衡调度算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (2): 166-168.
- [12] 张聪萍, 尹建伟. 分布式文件系统的动态负载均衡算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32 (7): 1424-1426.
- [13] Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8 (3).
- [14] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Y B, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18 (3).
- [15] Peng M G, Liang D, Wei Y, et al. Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51 (5).
- [16] Andrews J, Singh S, Ye QY, et al. An overview of load balancing in HetNets: old myths and open problems [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21 (2).
- [17] Androne C, Palade T, Puschita E, et al. Study of co-channel cross-layer interference for the downlink communication in femto-cell networks [A]. Proceedings of ISSCS [C]. Lasi, 2011.
- [18] Li Z H, Wang H, Pan Z W, et al. Joint optimization on load balancing and network load in 3GPP LTE multi-cell networks [A]. Proceedings of 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP) [C]. Nanjing, China, 2011.
- [19] Sheng J, Yang Z, Tang L R. A novel load balancing algorithm based on utility functions and fuzzy logic in heterogeneous wireless networks [A]. Proceedings of FSKD [C]. Sichuan, China, 2012.
- [20] Muoz P, Barco R, Ruiz-Avilé J M, et al. Fuzzy rule-based reinforcement learning for load balancing techniques in enterprise LTE femtocells [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (5).
- [21] Kyuho Son, Song C. Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8 (7).