第59卷第3期
2019年5月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol. 59, No. 3
May 2019

文章编号: 1000-8608(2019)03-0310-06

新型建筑智能化平台节点拓扑匹配算法研究

杨亚龙*[1,2,3], 洪德健[1,2], 张 睿[1,2], 刘 为[1,2,3]

(1.安徽建筑大学 智能建筑与建筑节能安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022;
2.安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230061;
3.中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对新型建筑智能化平台中空间拓扑与节点拓扑一致性问题,提出了一种拓扑匹配算法.在拓扑匹配过程中,通过提取AutoCAD建筑平面图的B-rep信息,将其表示为以空间单元为节点的属性邻接图.建筑平面图空间拓扑被表示为大图,平台中智能节点交互形成的拓扑被表示为小图,一致性问题被转化为大图中查询同构小图问题.该算法与传统的子图同构算法相比,首先利用顶点度优化匹配顺序,其次增加顶点的邻域信息作为剪枝条件,对候选集匹配项进行筛选,最后采用非递归-回溯思想对数据节点进行验证,并在真实的数据集上验证了算法的适用性与高效性.

关键词: 新型建筑智能化平台;AutoCAD;子图同构;非递归

中图分类号: TP399　　**文献标识码:** A　　**doi:** 10.7511/dllgxb201903013

0 引 言

近年来,随着物联网、虚拟现实、人工智能等新兴技术的突飞猛进,云计算、大数据基础设施的不断完善,智能建筑得到快速发展,楼宇自控系统也随之发展.然而,该系统在实际运行中智能化效果并不理想,存在配置工作繁重,需多学科协作,灵活性缺乏等问题.究其原因是楼宇自控系统集中式分层系统架构阻碍了自身的发展.近年来,为突破这种禁锢的架构,以清华大学为代表的研发机构开展了一系列探索,提出了扁平化、无中心新型建筑智能化平台.该平台基于空间划分原则,将整栋建筑划分为多个建筑空间单元,每一个建筑空间单元都对应一个智能节点,又称为CPN (computing process node)[1].

CPN网络可以抽象为二维无向连通图,这意味着图的同构算法适用于网络拓扑匹配,能够识别图中节点对之间的结构关系,可以用于精确匹配,既而适用于网络拓扑的全结构匹配.同时子图同构算法用于寻找匹配的子图,可以用于网络拓扑子结构匹配.子图同构是一个NP完全(NP-complete)问题[2].判断两个图是否子图同构,本质上是从大图中找到与小图同构的所有节点匹配集[3].目前不建立特征索引单机版子图同构算法主要有Nauty、Ullmann、SD、VF、VF2算法[4-8].

本文以济南华润万象城为例,商业一期面积超过2×10^5 m^2,地下2层,地面5层,规划店铺近500家.若构建新型建筑智能化平台,按照空间划分原则,每个空间单元布置一个节点,包括走廊、电梯等,拓扑规模节点将近1 000个.针对智能化平台中拓扑节点众多、即插即用、无固定编号等特点,需要对其拓扑匹配算法的适用性以及高效性有所保证.传统的子图同构算法由于较好的通用性,在精确子图匹配问题中执行效率有所欠缺,适用的子图规模较小[9].同时没有定义相关的匹配顺序,仅按照给定的顺序对匹配项进行验证,因此会产生大量重复无用节点匹配项,在匹配验证阶段消耗大量时间,并且都采用递归思想对其拓扑匹配加以验证,必定存在深度递归使其执行效率降低的问题[10-11].综上所述,传统的子图同构算法不适用于新型建筑智能化平台CPN网络拓扑匹配.

收稿日期: 2018-10-12; **修回日期:** 2019-01-28.
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0704100).
作者简介: 杨亚龙*(1980-),男,博士,教授,硕士生导师,E-mail:yangyalong@ipp.ac.cn;洪德健(1993-),男,硕士生,E-mail:hong_de_jian@163.com.

针对上述问题，为保证拓扑匹配算法的适用性以及高效性，需要设计相应的查询匹配优化技术. 因此本文提出 TMANBIP(topology matching algorithm of new building intelligent platform)，通过建筑空间单元的特征，对其节点的匹配顺序进行优化；在动态搜索过程中，增加顶点的邻域信息作为剪枝条件；同时采用非递归-回溯思想对数据节点进行验证.

1　节点拓扑匹配总体思路

在新型建筑智能化平台的实际运行中，主要依赖于 CPN 网络，如图 1 所示. 然而施工过程中有可能导致漏接、错接，不满足 CPN 布设规则. 尤其是关键位置的 CPN 如果未连通，会出现信息孤岛，无法完成各类智能处置，因此必须保证 CPN 网络拓扑与建筑平面图空间拓扑相一致. 若空间拓扑与节点拓扑不一致，CPN 的连接有可能违背空间划分的基本原则，引发后期建筑事故. 以某宾馆客房区走廊为例，走廊十分狭长，连接几十个客房、楼梯间，根据消防系统设计，应该存在多个防火区，对应多个安全通道，如果 CPN 连接不满足布设规则，当出现火灾时可能出现信息孤岛，既而不能合理地规划逃生路线. 因此，一致性问题成为该平台架构中的一个技术难题，目前还没有很好的解决方法，只能通过人工核查. 相反，在 CPN 接线过程中，施工人员易出错，并且出错后线路排查工作更加耗时耗力.

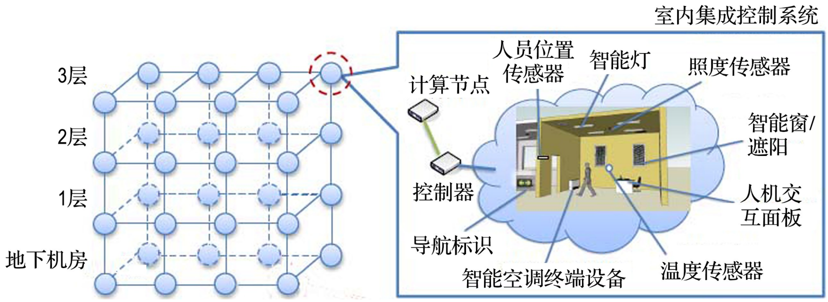


图 1　新型建筑智能化平台

Fig. 1　New building intelligent platform

为解决这一问题，本文提出了 TMANBIP. 通过提取 AutoCAD 建筑平面图中 B-rep 信息，将建筑平面图的一个空间单元等价转化成一个属性邻接图，多个空间单元组建成一个大的属性邻接图，即作为大图；平台中相邻 CPN 交互形成的局部拓扑结构，即作为小图. 空间拓扑与 CPN 拓扑一致性问题转换为在大图中寻找同构小图问题. 拓扑匹配总体思路如图 2 所示.

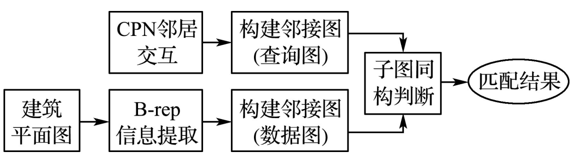


图 2　节点拓扑匹配总体思路

Fig. 2　General idea of node topology matching

2　节点拓扑匹配算法

2.1　图同构概述

通过属性邻接图表示方法，空间拓扑与 CPN 拓扑不一致问题转化为子图同构问题解决，下面给出图同构与子图同构的定义.

定义 1(图同构)　给定一个查询图 $q=(V,E)$ 和一个数据图 $g=(V',E')$，如果存在映射函数 M，使得 $V\rightarrow V'$，并且 $\forall(u_i,u_j)\in E$，$(M(u_i),M(u_j))\in E'$，同时存在映射函数 M，使得 $V'\rightarrow V$，并且 $\forall(u_i,u_j)\in E'$，$(M(u_i),M(u_j))\in E$，那么 q 与 g 是同构的.

定义 2(子图同构)　给定一个查询图 $q=(V,E)$ 和一个数据图 $g=(V',E')$，如果存在映射函数 M，使得 $V\rightarrow V'$，并且 $\forall(u_i,u_j)\in E$，$(M(u_i),M(u_j))\in E'$，那么 q 与 g 的一个子图是同构的，记为 $q\subseteq g$.

2.2　构建属性邻接图

新型建筑智能化平台由大量 CPN 构成，每一个 CPN 对应一个建筑空间单元. 空间单元必须连续、不重合、不遗漏、不跨越实墙、不跨越防火分区，而 AutoCAD 建筑平面图可以通过 B-rep 信息精确描述每个空间单元. 通过提取 AutoCAD 建

筑平面图中 B-rep 信息，可将空间单元转化为一种属性邻接图. 每一个图的顶点对应建筑平面图中的一个空间单元，顶点与顶点之间的关系对应建筑平面图中空间单元之间的关系，若空间单元有公共边则表明相应的顶点相邻. 构建属性邻接图的步骤如下：

步骤 1 遍历 AutoCAD 建筑平面图中每一个空间单元，对应创建一个属性邻接图的顶点.

步骤 2 对每两个空间单元识别两者之间的关系，作为对应的属性邻接图顶点之间的关系.

图 3 所示为局部 AutoCAD 建筑平面图对应的属性邻接图.

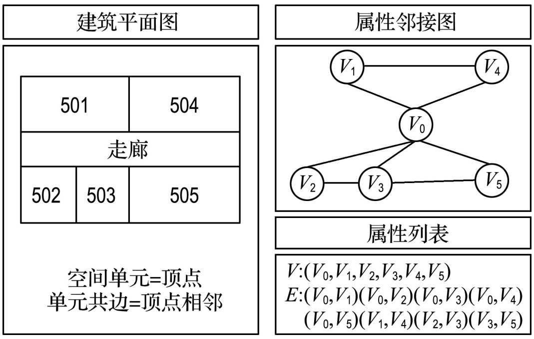
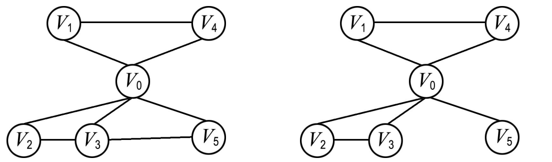


图 3 属性邻接图

Fig. 3 Attribute adjacency graph

2.3 TMANBIP

2.3.1 节点度优化匹配顺序 对于子图匹配算法，减少冗余节点的枚举对于提高算法效率至关重要. 在减少枚举问题上，最易想到的是选择一个合适的匹配序列. 如图 4 所示，给定大图 T 与小图 Q，若 T 中各个顶点遍历顺序为$(V_1,V_4,V_0,V_2,V_3,V_5)$时，选取小图 Q 中 V_5 和 V_0 分别作为同构匹配的起点进行比较. 当选取 V_5 时，候选集 $P(s)$为$\{(V_1,V_5),(V_4,V_5),(V_0,V_5),(V_2,V_5),(V_3,V_5),(V_5,V_5)\}$，将 $P(s)$中匹配项记为(V_T,V_Q). 对于(V_1,V_5)使用可行性规则判断时，V_Q 的顶点度小于等于 V_T 的顶点度，继续下一步，直到不满足可行性规则. 选择顶点度最大 V_0作为匹配起点，候选集 $P(s)$为$\{(V_1,V_0),(V_4,V_0),(V_0,V_0),(V_2,V_0),(V_3,V_0),(V_5,V_0)\}$，易知只有 $P(s)$中(V_0,V_0)满足 V_Q 的顶点度小于等于 V_T 的顶点度，使得该算法能够尽早排除 V_Q 的顶点度大于 V_T 顶点度的匹配项，例如 $P(s)$中的(V_1,V_0)，(V_4,V_0).



(a) 大图 T (b) 小图 Q

图 4 顶点度大的点作为同构匹配的起点

Fig. 4 The point with larger vertex size as the starting point of isomorphic matching

因此，针对新型建筑智能化平台的特点，本文算法对小图中顶点度按照从大到小的顺序排序，优先选择查询图中顶点度大的节点作为匹配的起点，尽早排除不可能的匹配项，从而提高算法匹配效率. 算法 1 如下：

算法 1

GetStart(Q)

Input：Small graph Q；

Output：start node V_{start}；

BEGIN

1. initialize matrix $\boldsymbol{M}_{[N][N]}$，degree←0，Max_degree←0，V_{start}←q_0；
2. get the adjacency matrix $\boldsymbol{M}_{[N][N]}$ of Q；
3. for each i in N do
4.   for each j in N do
5.   if ($M_{[i][j]}==1$) then
6.   degree＋＋；
7.   end if
8.   end for
9.   if (degree＞Max_degree) then
10.   Max_degree←degree；
11.   degree←0；
12. V_{start}←q_i；
13.   end if
14. end for

END

算法 1 给出了选择匹配起点算法的伪代码. 算法第 1 行对其参数初始化；第 2 行获取小图 Q 的邻接矩阵$\boldsymbol{M}_{[N][N]}$；第 3～14 行遍历 $\boldsymbol{M}_{[N][N]}$ 每一个元素，并将每行等于 1 的元素进行统计，最终得出元素 1 个数最多的行数，即作为小图匹配的起点.

2.3.2 邻居信息筛选策略 在面向单个大图的子图搜索问题中，一个有效的筛选策略是利用顶点的邻居信息. 该策略在生成候选集匹配项验证之前，根据邻居信息对其进行筛选.

定义 3(邻域树) 顶点 v 为根，以 v 所有的邻居为叶子的树称为 v 的邻域树 $NT(v)$.

定义 4(候选集匹配项) 给定小图 Q 和目标

图 T,Q 中的一个顶点 V_Q 与 T 中的一个顶点 V_T 组成的(V_T,V_Q)称为候选集匹配项.

定义 5(邻域筛选)　给定小图 Q 和目标图 T,Q 中的一个顶点 V_Q 与 T 中的一个顶点 V_T,V_Q 的邻域树 $NT(V_Q)$与 V_T 的邻域树 $NT(V_T)$,如果候选集匹配项(V_T,V_Q)匹配成功,那么对于(V_T,V_Q)所在的候选集 $P(s)$中任意一个匹配项(V'_T,V'_Q),若满足 $V'_Q \in NT(V_Q)$且 $V'_T \in NT(V_T)$或者 $V'_Q \notin NT(V_Q)$且 $V'_T \notin NT(V_T)$两个条件中的一个,称 V'_Q 和 V'_T 满足邻域筛选条件,记为 $NF(V'_T,V'_Q)=1$.

如图 4 中,若候选集匹配项(V_1,V_1)匹配成功,候选集 $P(s)$为{(V_0,V_0),(V_0,V_2),(V_0,V_3),(V_0,V_4),(V_0,V_5)}.已知邻域树 $NT(V_0)$的节点集合为{V_0,V_4},故候选集匹配项 $NF(V_0,V_0)=1$,$NF(V_0,V_4)=1$.由此可以看出,(V_0,V_2),(V_0,V_3),(V_0,V_5)匹配项被提前筛选去除.合理利用候选集节点的邻居关系对候选集匹配项进行筛选,可以尽早排除不可能的匹配项,减小待匹配数据的规模,在验证匹配阶段有效地减少验证函数的调用次数.

算法 2 给出了邻居信息筛选策略的算法伪代码.

算法 2

GetSelectNeighbor (V_T, V_Q, $P(s)$)
Input:vertex V_T, V_Q, $P(s)$;
Output:candidate set $P_{\rm sim}(s)$;
BEGIN
1. get the $NT(V_T)$ of V_T, get the $NT(V_Q)$ of V_Q;
2. for each (V'_T, V'_Q) in $P(s)$ do
3. 　if ($V'_Q \in NT(V_Q) \cap V'_T \in NT(V_T) \parallel V'_Q \notin {\rm NT}(V_Q) \cap V'_T \notin {\rm NT}(V_T)$) then
4. 　　$NF(V'_T, V'_Q)=1$;
5. 　　$P_{\rm sim}(s) \leftarrow (V'_T, V'_Q)$;
6. 　end if
7. end for
END

2.3.3　非递归思想验证　现有子图同构算法主要采用递归思想,虽然递归算法有其固有优点,如可以简单、直观的代码实现淹没分析的计算过程,易理解.但是当递归深度太深时,往往导致栈溢出,同时也会浪费搜索时间.本文算法采用非递归-回溯思想对数据节点进行验证,不仅避免了传统递归算法所造成的栈溢出问题,同时也降低了验证阶段消耗的时间.

2.3.4　TMANBIP 的实现　如算法 3 所示,首先通过节点度优化匹配顺序,其次利用候选集节点的邻居信息筛选出精炼的候选集匹配项,最后采用非递归-回溯思想与传统的子图同构算法对其候选集匹配项进行验证,得到匹配结果.由于小图存在对称性结构,导致大图与小图重复匹配,通过对其子图去重得到无重复的目标子图集.对于新型建筑智能化平台,仍然依靠人工根据 CPN 节点的相对方位信息进行去重.一般而言,对于复杂的建筑不存在完全对称拓扑结构.

算法 3

主程序:Match(T,Q)
Input: Big graph T, Small graph Q, Matching state $M(s)$;
Output:all embedding of Q in T;
BEGIN
1. $M(s) \leftarrow \varnothing$;// $M(s)$为初始状态空集
2. $V_Q \leftarrow$ GetStart(Q);
3. get the candidate set $P(s)$:(V_{T0},V_Q),(V_{T1},V_Q),…,(V_{Tn},V_Q)
4. for each (V_T,V_Q) in $P(s)$ do
5. 　if $F(V_T,V_Q,M(s))$ then
6. 　　$M(s) \leftarrow (V_T,V_Q)$; //更新中间状态
7. 　　SonMatch(T,Q,$M(s)$)
8. 　else
9. 　　Different structures of subgraphs
10. 　end if
11. end for
子程序:SonMatch(T,Q,$M(s)$)
1. initialize Matching the number of successful nodes depth
2. depth$\leftarrow M(s)$
3. for each depth<the size of Q do //循环终止条件
4. 　depth$\leftarrow M(s)$,$P(s) \leftarrow M(s)$,$V_T \leftarrow M(s)$,$V_Q \leftarrow M(s)$;
5. 　$P_{\rm sim}(s)$=GetSelectNeighbor(V_T,V_Q,$P(s)$);//邻域筛选
6. 　for each (V'_T, V'_Q)$\in P_{\rm sim}(s)$ do
7. 　if $F(V'_T,V'_Q,M(s))$ then
8. 　　$M(s) \leftarrow (V'_T,V'_Q)$;//更新中间状态(保存有可能回溯的节点,未匹配的节点)
9. 　　break;//跳出 for 循环,继续深度遍历
10. 　else
11. 　　$M(s-1) \leftarrow M(s)$;//回溯到上一个状态
12. 　end if
13. end for
14. all embedding of Q in T
END

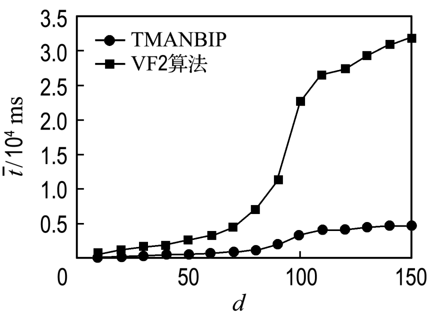
文献[12]中表明:对二维网状的规则图,VF2 算法与其他传统的子图同构算法相比,在平均查

找时间、迭代调用次数与扩展性能方面都比其他传统的子图同构算法高效，所以本文选用效率较高的VF2算法与TMANBIP进行对比.实验使用相同的平台实现VF2算法和TMANBIP，分别对平均匹配时间与匹配次数进行对比.

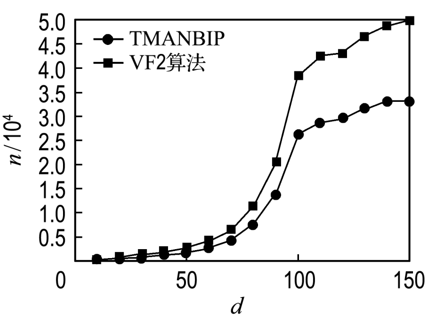
实验的硬件条件如下：Intel(R) Core(TM) i5-3337U CPU @ 1.80 GHz，8 GB内存，操作系统采用64位Windows 7，程序实现语言是Java.

实验中考虑新型建筑智能化平台的特定需求，选取了示范工程不同规模楼层的AutoCAD建筑平面图.提取B-rep信息生成的拓扑结构作为大图，且为连通图，用数据集T表示，分别对应15组数据：T_{10}，T_{20}，T_{30}，T_{40}，T_{50}，T_{60}，T_{70}，T_{80}，T_{90}，T_{100}，T_{110}，T_{120}，T_{130}，T_{140}，T_{150}，节点数依次从10个节点递增到150个节点；小图用数据集Q表示，共15组数据：Q_{10}，Q_{20}，Q_{30}，Q_{40}，Q_{50}，Q_{60}，Q_{70}，Q_{80}，Q_{90}，Q_{100}，Q_{110}，Q_{120}，Q_{130}，Q_{140}，Q_{150}.但每组数据中包含3个小图，用s表示，由数据集T中随机去除相应的边或节点构成(表示实际工程拓扑少线、少节点情况)，去除边或点时保证图的连通性，即保证s是T的子图.

图5(a)为15组数据多次实验所得的平均验证时间$\bar{t}$与查询图节点个数d的关系图.实验结果表明：当增加查询图节点个数时，平均验证时间增加，因为查询图节点个数越多，需要探测候选的节点和调用匹配函数的次数就越多.本文算法比VF2算法整体平均验证时间少，可见非递归匹配搜索方式效率更高.图5(b)为15组数据多次实验所得的验证次数n与查询图节点个数d的关系图.当查询图节点个数增加时，调用匹配函数的次数也增加.本文算法调用匹配函数的次数即验证次数比VF2算法少，可见图顶点度优化与候选集策略可以尽早减少很多不合格的候选节点.



(a) 平均验证时间



(b) 验证次数

图5　算法结果对比

Fig.5　Comparison of algorithm results

3　结　语

本文给出TMANBIP，首先将AutoCAD建筑平面图转化为一种属性邻接图，然后将拓扑匹配问题转化为子图同构问题来解决.在设计拓扑匹配算法时，通过提取建筑空间单元的特征，基于顶点度来优化节点匹配顺序，减小了待匹配数据的规模；在动态搜索过程中，增加了顶点的邻域信息作为剪枝条件，对候选集匹配项进行筛选，在一定程度上避免了查询节点和数据节点之间的无用枚举.最后采用非递归-回溯思想对数据节点进行验证，减少了验证阶段消耗的时间，从而使匹配算法效率更高.实验结果表明，该算法能够实现新型建筑智能化平台节点拓扑匹配，能够达到实际应用要求，并且与VF2算法相比，效率更优.未来可以从实际工程多节点、多边以及去重方面继续研究算法或者设计更高效的剪枝策略以提高查询效率.

参考文献：

[1]　沈　启. 智能建筑无中心平台架构研究[D]. 北京：清华大学，2015.
SHEN Qi. Studies on architecture of decentralized system in intelligent building [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)

[2]　LEWIS H R. Reviewed work: Computers and Intractability. A guide to the theory of NP-completeness by Michael R. Garey, David S. Johnson[J]. **Journal of Symbolic Logic**, 1983, **48**(2):498-500.

[3]　DOLEV D, GALIL Z, RODEH M. **ISTCS′92 Proceedings of the Israel Symposium on Theory of Computing and Systems** [M]. London: Springer-Verlag, 1992.

[4]　MCKAY B D, PIPERNO A. Practical graph isomorphism, Ⅱ [J]. **Journal of Symbolic Computation**, 2014, **60**:94-112.

[5] ULLMANN J R. An algorithm for subgraph isomorphism [J]. **Journal of the Association for Computing Machinery**, 1976, **23**(1):31-42.

[6] SCHMIDT D C, DRUFFEL L E. Fast backtracking algorithm to test directed graphs for isomorphism using distance matrices [J]. **Journal of the Association for Computing Machinery**, 1976, **23**(3):433-445.

[7] CORDELLA L P, FOGGIA P, SANSON E C, *et al*. A (sub) graph isomorphism algorithm for matching large graphs [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2004, **26**(10):1367-1372.

[8] CORDELLA L P, FOGGIA P, SANSONE C, *et al*. Performance evaluation of the VF graph matching algorithm [C] // **Proceedings — International Conference on Image Analysis and Processing, ICIAP 1999**. Venice: IEEE Computer Society, 1999:1172-1177.

[9] 李长青,张富斌,彭思龙. 基于子图同构的子电路提取算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, **42**(34):185-187.
LI Changqing, ZHANG Fubin, PENG Silong. Subcircuit extraction algorithm based on subgraph isomorphism [J]. **Computer Engineering and Applications**, 2006, **42**(34):185-187. (in Chinese)

[10] 孙召伟,赵建利,朱东生. 数据结构中递归转非递归算法分析及模型设计研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, **32**(1):43-46.
SUN Zhaowei, ZHAO Jianli, ZHU Dongsheng. Analysis and model design of conversion algorithm from recursion to non-recursion in data structure [J]. **Journal of Hebei University of Science and Technology**, 2011, **32**(1):43-46. (in Chinese)

[11] 廖慧芬,马书月. 算法设计中递归转为非递归探讨[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2005(4):14-16.
LIAO Huifen, MA Shuyue. An elementary view on recurrence transforming into non-recurrence in project of algorithm [J]. **Journal of Jiujiang University (Natural Science Edition)**, 2005(4):14-16. (in Chinese)

[12] 李 欣,宋婷婷,何险峰. 基于VF2算法的分子二维子结构检索[J]. 计算机与应用化学, 2007, **24**(11):1551-1554.
LI Xin, SONG Tingting, HE Xianfeng. VF2 algorithm based 2D molecular substructure search [J]. **Computers and Applied Chemistry**, 2007, **24**(11):1551-1554. (in Chinese)

Research on node topology matching algorithm of new building intelligent platform

YANG Yalong*[1,2,3], HONG Dejian[1,2], ZHANG Rui[1,2], LIU Wei[1,2,3]

(1. Anhui Province Key Laboratory of Intelligent Building and Building Energy Saving, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230061, China;
3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A topology matching algorithm is proposed to solve the consistency problem between spatial topology and node topology based on new building intelligent platform. In the process of topology matching, the B-rep information of AutoCAD building plans is extracted and represented as an attribute adjacent graph with spatial units as nodes. The spatial topology of the building plan is represented as a big graph, and the topology formed by the interaction of intelligent nodes in the platform is represented as a small graph, and the consistency problem is translated into querying isomorphic small graph in the big graph. Compared with the traditional subgraph isomorphism algorithm, firstly, node degree is used to optimize the matching order. Secondly, the neighborhood information of vertices is added as pruning condition to filter the matching items of candidate sets. Finally, non-recursive backtracking is used to verify the data nodes, and the applicability and efficiency of the algorithm are verified on the real data sets.

Key words: new building intelligent platform; AutoCAD; subgraph isomorphism; non-recursive