

基于拓扑发现的校园网终端定位系统设计

于博, 胡东辉, 汤临春

(合肥工业大学信息化建设与发展中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 当前校园网管理中缺少一种定位网络终端的有效方法。提出了一种能够准确发现校园网内二三层网络设备及其互连关系的拓扑发现算法。在此基础上, 利用 SNMP 和数据库等工具, 给出一种快速定位校园网终端的方法并完成程序设计。理论分析和实际应用的结果表明, 拓扑发现算法简便高效, 终端定位系统快速准确。

关键词: 校园网; 网络管理; 拓扑发现; 终端定位; 管理信息库

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024226

Design of campus network terminal positioning system based on topology discovery

YU Bo, HU Donghui, TANG Linchun

Information Construction and Development Center, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: At present, there was not an effective approach to position network terminal in the campus network management. An algorithm of network topology discovery was proposed, which could discover all the layer-2 and layer-3 network devices and their connections. Based on the proposed algorithm, the approach was proposed and carried out with program design, which could position campus network terminal fast, using the SNMP protocol and database. Theoretical analysis and practical application indicate that the algorithm of topology discovery is simple and efficient, and the terminal positioning system is fast and accuracy.

Keywords: campus network, network management, topology discovery, terminal positioning, MIB

0 引言

随着网络应用与需求的快速发展, 各高校的校园网规模不断扩大、结构日益复杂, 各型网络设备的数量也不断增加。与此相伴, 在数以万计的校园网用户中难免存在着病毒扩散、黑客攻击、不良言论发布等不安全因素。如何在纷繁的网络环境中方便快捷地呈现网络拓扑、迅速定位终端用户, 是每一个校园网管理者必须面对的巨大挑战。

网络终端定位, 是指根据终端用户的 IP 地址确定终端用户的接入网络设备和接入端口, 并准确描述接入设备到核心设备间的连接关系。大多数高校校园网有着相似的网络拓扑结构, 即校园网主干

由核心交换机(或路由器)和三层汇聚交换机组成, 楼宇内部署二层接入交换机, 设备之间通过光纤链路连接。核心设备和汇聚交换机承担路由和三层交换任务, 二层接入交换机仅承担终端用户接入和二层转发任务。近年来, 随着简单网络管理协议(SNMP)在拓扑发现领域和网络路径追踪^[1]方面的应用与发展, 以及新型网络设备对管理信息库(MIB)的支持日趋完善, 快速厘清校园网拓扑, 进而准确定位网络终端成为可能。

在二层网络拓扑发现方面, 贝尔实验室的 Britbart 等^[2]提出了基于交换机介质访问控制(MAC)地址转发表的物理网络拓扑发现方法, 前提是交换机 MAC 地址转发表完整。但实际环境中, 交换机

的 MAC 地址转发表难以保证完整。Breitbart 等^[3]改进了 ping 指令, 在其中加入源交换机的 MAC 地址, 强制目的交换机回应指定的源交换机, 以保证地址转发表的完整性。但这种机制在大型校园网中会导致 ping 包泛滥, 消耗大量的硬件资源。郑海等^[4]、Gobjuka 等^[5]分别给出了不依赖转发表完整性, 由上下行端口和部分完整的 MAC 地址表共同判断交换机连接关系的判定定理。三层网络拓扑发现方面, 杨安义等^[6]提出了基于 SNMP 的网络拓扑发现算法, 实现了对网络主干路由节点的发现。Zhou 等^[7]提出了基于 SNMP、链路层发现协议 (LLDP) 的多协议网络拓扑发现算法, 具体方法是当发现无 SNMP 服务设备时, 通过 LLDP MIB 获取各个端口互连的 IP 地址以及各设备的连接关系。潘爽^[8]提出了多协议融合网络拓扑发现技术的设备发现方法对逻辑拓扑发现和物理拓扑发现算法进行优化。上述成果均局限于单独二层或三层网络的拓扑发现, 未针对校园网二层、三层网络兼有且设备连接繁杂的实际情况, 提出切实可行的解决方案。

本文借鉴前人的研究成果, 结合高校校园网的特点, 提出了一种适用于校园网环境, 二层、三层兼备的网络拓扑发现算法。依据该算法获取设备拓扑连接, 再利用 SNMP 获取相关设备的网管信息并加以处理, 最终实现对校园网终端用户的准确定位。

1 网络拓扑的发现

1.1 三层设备的拓扑发现

校园网环境中, 通常重要的三层网络设备数量有限, 本文利用 SNMP, 遍历所有三层设备 MIB-II 库^[9]中的 ipRouteType、ipRouteNextHop、ipRouteIfIndex 信息, 从而获取邻居路由器的连接信息。ipRouteType 记录的是邻居设备的类别, ipRouteType 为 3, 表示互连的是二层交换机; ipRouteType 为 4, 表示互连的是路由器或三层交换机。ipRouteNextHop 表示路由下一跳地址, 也就是邻居三层设备的 IP 地址。ipRouteIfIndex 表示邻居设备和本设备互连的接口索引号。

三层设备拓扑发现算法的流程如下。

1) SNMP 查询三层设备的 ipRouteType 信息, 保存 ipRouteType=4 的 IP 子网。

2) 逐一 SNMP 查询由 1) 得到的 IP 子网的 ipRouteNextHop 地址, 得到邻居三层设备的 IP 地址。如果一个邻居设备上有多个 IP 子网, 则这些子网的下一跳地址是相同的。算法将删除那些重复的下一跳地址, 确保邻居设备不被重复保存。

3) SNMP 查询 ipRouteIfIndex, 得到邻居设备与本设备互连的接口索引号。

4) 对每个邻居设备, 逐一重复 1)~3) 的操作, 直到遍历网内所有三层设备。

在实际网络环境中, 由于三层网络设备数量少, 互连链路极少变动。因此, 三层设备的拓扑发现完毕后直接保存在数据库中, 在需要对网络终端进行定位时直接调用。当三层网络设备及链路出现调整时, 网络管理员可以重新执行三层拓扑发现进程, 更新数据库即可。

在算法实际应用中, 通常选择校园网的核心三层设备作为拓扑发现的起点耗时最少、效率最高。一台三层设备可能会配置多个接口 IP 地址。为避免重复遍历这样的设备, 应当把当前设备的邻居和其他已完成发现设备的邻居进行对比。如果两台设备的邻居相同, 表明是同一台设备, 即当前设备已完成拓扑发现, 可以跳出当前设备的发现进程, 转而完成其他设备的拓扑发现。

1.2 二层设备拓扑发现算法

校园网中, 二层接入设备数量众多且连接复杂。本文基于图与树的相关知识, 在校园网已知二层设备管理 IP 地址的情况下, 提出了新的设备拓扑发现算法。

连通且不含回路的无向图 $G=(V, E)$ 称为树。与节点相连的边的个数称为节点的度。度为 1 的节点称为树叶节点, 度大于或等于 2 的节点称为分支节点。

本文提出如图 1 所示的树的演化过程。已知无向图 G_1 为树, 依次删除 G_1 中所有的树叶节点及与其相连的边, 得到无向图 G_2 , 则有以下结论。

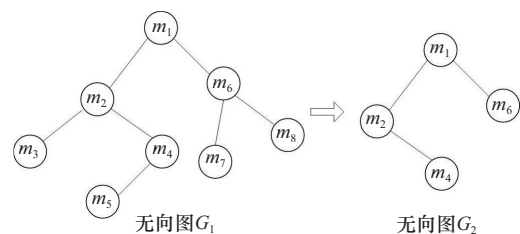


图 1 树的演化过程

1) 删除树叶节点, 得到的子图仍然是树。

证明 ①连通性。假设删除树叶节点 m_i 及与其相连的边后, 子图变成非连通的, 则 m_i 必定与 2 个以上的节点相连。这与 m_i 是树叶节点, 只有一条边与其他节点相连矛盾。因此, 删除树叶节点后得到的子图是连通的。②无回路。因为删除树叶节点及其相连的边不会增加其他节点的边, 所以不会在图中新增回路。

因此, 删除树叶节点后生成的子图是不含回路的连通图, 仍然是一棵树。证毕。

2) 树必有树叶节点。

证明 假设生成树中没有树叶节点, 即每个节点都有至少两条边与其他节点相连, 则此无向图必然是有回路的, 这与树的定义相矛盾。所以树必然存在树叶节点。证毕。

根据以上结论进行如下操作: 1) 删除树叶节点及其相连的边, 得到子树; 2) 循环递归 1) 操作。这样可以不重复地遍历原图中所有的节点与边。所谓描绘网络的拓扑, 就是记录网络中所有的节点以及它们的互连关系。因此, 上述算法可以作为描绘网络拓扑的有效途径。

1.3 二层拓扑发现算法的实现

校园网内二层网络设备通常部署在各个楼宇, 数量多, 连接复杂, 更换调整频繁。因此, 楼宇二层网络拓扑机构采取随用随查的方式, 需要进行网络终端定位时, 调用二层拓扑发现进程, 查找相关楼宇当前的二层设备拓扑结构。

以图 2 所示的交换机拓扑连接为例, 5 台交换机 $S_1 \sim S_5$, MAC 地址为 $M_1 \sim M_5$, 定义 P_{ij} 为交换机 S_i 第 j 口的 MAC 地址集合。二层设备拓扑发现算法流程如下。

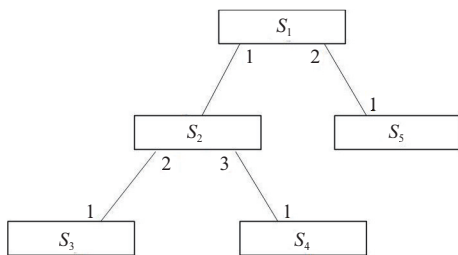


图2 交换机拓扑连接

1) 对 5 台交换机进行 ping 操作, 保证交换机 MAC 地址转发表完整。

2) SNMP 查询上连三层设备 MIB-II 库中的

ipNetToMediaPhysAddress 信息, 得到 5 台交换机的 MAC 地址 $M_1 \sim M_5$ 。

3) SNMP 查询 5 台交换机的地址转发表, 只保留有关 $M_1 \sim M_5$ 的信息, 得到 MAC 地址集合: $P_{11}\{M_2, M_3, M_4\}, P_{12}\{M_5\}, P_{22}\{M_3\}, P_{23}\{M_4\}, P_{3j}\{\phi\}, P_{4j}\{\phi\}, P_{5j}\{\phi\}$ 。

4) 根据算法, 得到: S_3 上连 S_2 的端口 2; S_4 上连 S_2 的端口 3; S_5 上连 S_1 的端口 2。

5) 在 MAC 地址集合中删除 $S_3 \sim S_5$ 的所有地址和端口信息, 得到: $P_{11}\{M_2\}, P_{2j}\{\phi\}$ 。依据算法, 易得: S_2 上连 S_1 的端口 1, 以及如图 3 所示的拓扑连接, 且 S_1 是与三层设备互连的头交换机。

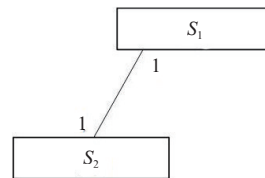


图3 演化后的拓扑连接

至此, 二层交换机的拓扑发现完成。

2 网络终端的定位

校园网内终端用户定位的基本思路如下: 首先, 遍历三层设备, 确定终端 IP 地址所在的三层设备; 其次, SNMP 查询三层汇聚设备得到终端 MAC 地址和二三层设备互连端口; 最后, 根据二层拓扑, SNMP 查询二层交换机的 MAC 地址转发表, 确定终端 MAC 地址所在的接入交换机和接入端口。

2.1 三层设备上的定位

本文已讨论了三层网络设备拓扑发现的算法和流程。已知三层设备拓扑, 确定终端 IP 地址所在的三层设备, 只需要遍历所有三层网络设备的地址解析协议 (ARP) 缓存表即可。获取 ARP 表的方法是 SNMP 查询三层交换机 MIB-II 库中的 ipNetToMediaPhysAddress 信息。命令为: snmpwalk -v 1 -c public <设备 IP>.ipNetToMediaPhysAddress。

由终端 MAC 地址确定接入端口的索引号, 同样使用 SNMP 查询 MIB 库。但是不同品牌设备查询方式略有不同。本文研究的校园网环境是思科三层交换机, 查询命令为: snmpwalk-v1-c public@vid <设备 IP>.1.3.6.1.2.1.17.4.3.1.2。其中, public 表示设备 SNMP 配置中的 community ID, vid

表示终端 IP 地址所属的虚拟局域网 (VLAN) 号^[10]。如果设备上存在多个 VLAN, 需要设计一个循环子程序, 遍历所有 VLAN 以获取完整的 MAC 地址表。对网络终端进行定位, 其基本流程如下。1) 确定终端 IP 地址接入的三层网络设备。2) 确定网络终端的 MAC 地址。3) 确定终端 IP 地址在三层网络设备上的接入端口。

在 Linux Shell 脚本环境下程序的主要代码如下。

```
//查找 client_ip 的 ARP 信息
$cmdline101="sudo /usr/local/bin/snmpwalk -v 1
-c public $HuiJu_IP.ipNetToMediaPhysAddress.$cli-
ent_ip";
EscapeShellCmd($cmdline101);
//提取 ARP 信息里的 MAC 地址的字段
$cmdline102="sudo /bin/cut -d' ' -f4 /usr/local/
apache/htdocs/snmp_port_ip/Mac/ip_mac_snmp";
EscapeShellCmd($cmdline102);
//查找 MAC 地址在三层汇聚上的端口,遍历所有 VLAN
get_vlan($vid);
do{
$cmdline103="sudo /usr/local/bin/snmpwalk -v 1
-c public@$vid HuiJu_IP.1.1.3.6.1.2.1.17.4.3.1.2.
$mac";
EscapeShellCmd($cmdline103);
get_vlan($vid);
}while($vid!=null);
```

2.2 二层设备上的定位

二层设备上的终端定位, 首先需根据拓扑结构对交换机进行标记。如果交换机下连其他设备, 则定义为级联交换机, 在数据库中标记为 *J*; 如果没有下连设备, 则定义为边缘交换机, 标记为 *B*。表 1 所示为某楼宇二层交换机的拓扑信息存储在数据库中的情况, 其中, *switch_ip* 为交换机的管理地址, *role* 为交换机标记, *up_ip* 为上连设备的地址, *up_port* 为上连设备的端口索引号。

图 4 所示为二层设备的终端查询程序流程, 其主要方法如下。

- 1) 查找顺序。从楼宇内上连三层设备的头交换机开始, 自上而下逐层查找。
- 2) 标记判断。标记为 *J*, 进行接口判断; 标记

为 *B*, 即得到终端接入设备和接口。

3) 接口判断。终端 MAC 地址所在端口是否为级联交换机的下连端口。如果是, 继续查询下连交换机; 否则得到终端所在的接入设备和接入端口。

switch_ip	role	up_ip	up_port
192.168.101.16	<i>J</i>	192.168.101.1	10
192.168.101.51	<i>B</i>	192.168.101.16	3
192.168.101.52	<i>B</i>	192.168.101.16	2
192.168.101.53	<i>B</i>	192.168.101.16	4
192.168.101.54	<i>B</i>	192.168.101.16	1
192.168.101.55	<i>B</i>	192.168.101.16	5

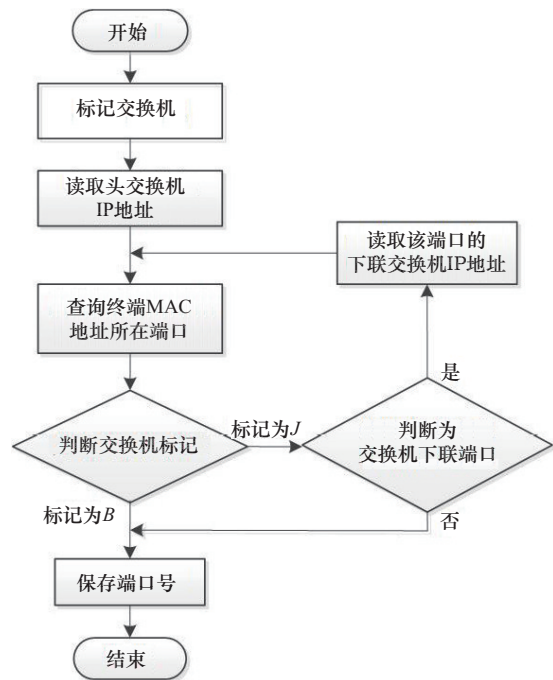


图 4 终端查询程序流程

3 程序实现与实验结果

在实际校园网环境中, 三层网络设备数量小, 链路变动少。因此, 三层拓扑发现完成后数据保存在数据库中, 进行终端定位时可直接调用。如果三层网络设备或链路出现调整, 网络管理员重新执行三层拓扑发现进程, 更新数据库即可。二层网络设备一般分散在各个楼宇, 数量大, 连接复杂, 调整频繁。因此, 在进行终端定位时必须实时查询楼宇的网络拓扑信息, 从而获取最新的二层设备拓扑信息。

根据前述的拓扑发现算法和终端定位方法, 本

文设计了一套校园网拓扑发现与终端定位系统，终端定位系统程序框架如图 5 所示。

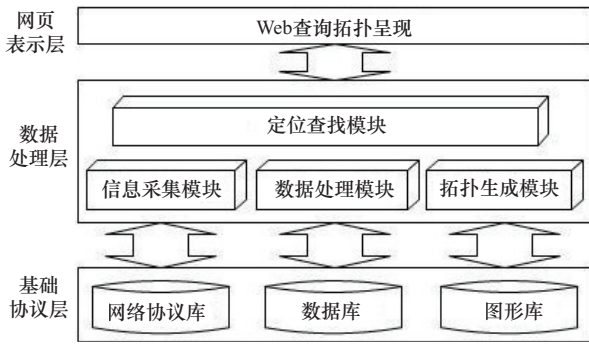


图 5 终端定位系统程序框架

整个程序框架由三层组成：基础协议层、数据处理层和网页表示层。基础协议层包含互联网控制报文协议 (ICMP)、SNMP、MySQL、图形绘制工具等组件，它为数据处理层提供底层支持。数据处理层是整个程序的核心，它由信息采集模块、数据处理模块、拓扑生成模块和定位查找模块组成。各模块之间协同处理，实现拓扑发现和终端定位功能。网络拓扑结构和用户终端定位结果最终通过网页表示层以 Web 浏览方式呈现给网络管理者。

该系统在实际某高校校园网环境中完成了部署应用。以下是对学校科技楼某网络终端进行定位。首先，可得到图 6 所示的校园网三层网络设备及科技楼二层网络设备连接情况的拓扑发现图。深灰色为校园网三层设备，白色为科技楼二层设备。

其次，基于网络拓扑结果对网络终端 IP 地址的网络接口进行定位，可以得到图 7 所示的网络终端接入信息。



图 7 网络终端接入信息

实际测试得到，校园网二三层网络拓扑发现及页面生成时间小于 3 s，网络终端定位及页面生成时间小于 1 s。

4 结束语

准确描述校园网的拓扑结构，精确定位网络中的接入终端，是科学管理校园网、优化网络性能、研究网络行为的前提。本文提出的校园网拓扑发现算法，对原有二层和三层网络拓扑发现方法进行了改进、整合与优化。在校园网规模下，该算法逻辑条理清晰、程序开发简单、时间开销小，能够较好

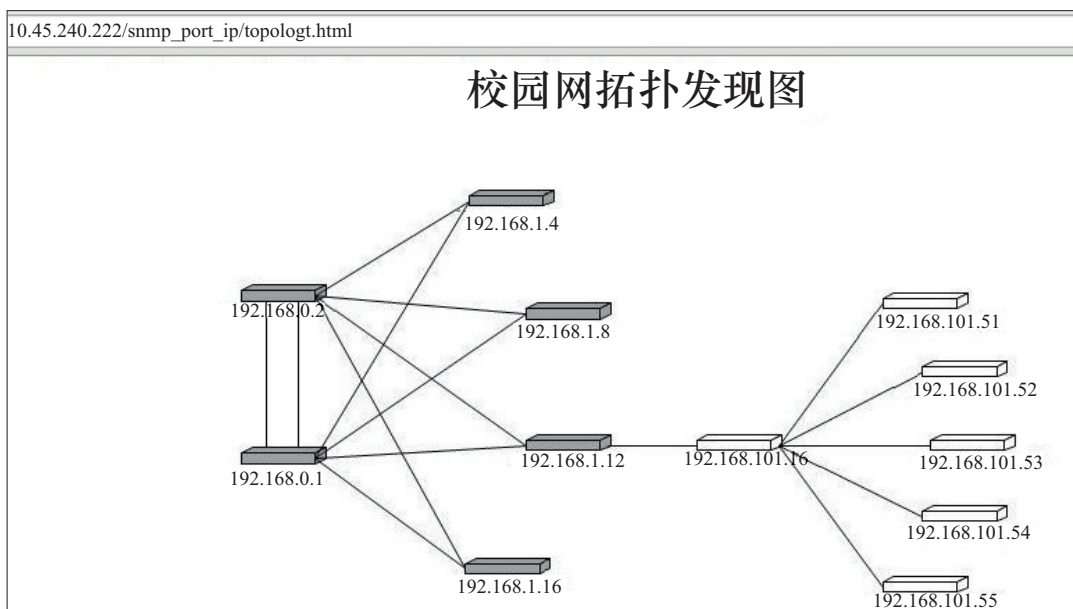


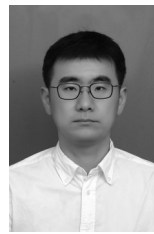
图 6 校园网拓扑发现图

地满足校园网管理者的需要。在此基础上, 本文进一步给出了网络终端的定位方法和程序实现, 该方法和结论已在高校校园网环境中进行实际应用。实验证明, 本文提出的拓扑发现算法简便高效、适用性好, 网络终端定位快捷准确。

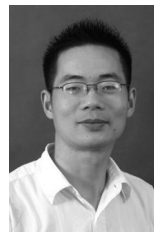
参考文献:

- [1] XIAO Y. Physical path tracing for IP traffic using SNMP-a comprehensive solution for end-to-end and multicast streams monitoring[C]//Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer. Piscataway: IEEE Press, 2010: V5-310-V5-317.
- [2] BREITBART Y, GAROFALAKIS M, MARTIN C, et al. Topology discovery in heterogeneous IP networks[C]//Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 2000: 265-274.
- [3] BREITBART Y, GAROFALAKIS M, JAI B, et al. Topology discovery in heterogeneous IP networks: the NetInventory system[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 401-414.
- [4] 郑海, 张国清. 物理网络拓扑发现算法的研究[J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(3): 264-268.
ZHENG H, ZHANG G Q. An algorithm for physical network topology discovery[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(3): 264-268.
- [5] GOBJUKA H, BREITBART Y J. Ethernet topology discovery for networks with incomplete information[C]//Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1220-1233.
- [6] 杨安义, 朱华清, 王继龙. 一种改进的基于SNMP的网络拓扑发现算法及实现[J]. 计算机应用, 2007, 27(10): 2412-2413, 2419.
YANG A Y, ZHU H Q, WANG J L. Improved SNMP-based network topology discovery algorithm and its implementation[J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(10): 2412-2413, 2419.
- [7] ZHOU S P, CUI L G, FANG C, et al. Research on network topology discovery algorithm for Internet of Things based on multi-protocol[C]//Proceedings of the 2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [8] 潘爽, 苏亚维. 多协议融合的网络拓扑发现技术研究[J]. 物联网技术, 2021, 11(9): 14-17.
PAN S, SU Y W. Research on network topology discovery technology based on multi-protocol fusion[J]. Internet of Things Technologies, 2021, 11(9): 14-17.
- [9] MCCLOGHRIE K, ROSE M. Management information base for network management of TCP/IP-based Internets: MIB-II, IETF network working group[S]. 1991.
- [10] Cisco Systems. Cisco 7600 series router MIB specifications guide[EB/OL]. (2012)[2024-08-22].

[作者简介]



于博 (1981-), 男, 山东兖州人, 合肥工业大学工程师, 主要研究方向为计算机网络应用、网络安全、人工智能。



胡东辉 (1973-), 男, 安徽望江人, 博士, 合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息安全、人工智能、智慧教学。



汤临春 (1980-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学助理研究员, 主要研究方向为网络安全、人工智能。