



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112104474 B

(45) 授权公告日 2021.06.01

(21) 申请号 201911296306.5

(56) 对比文件

(22) 申请日 2019.12.16

CN 108880872 A, 2018.11.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 108900320 A, 2018.11.27

申请公布号 CN 112104474 A

CN 107395440 A, 2017.11.24

CN 103605852 A, 2014.02.26

(43) 申请公布日 2020.12.18

审查员 邹婷

(73) 专利权人 佛山科学技术学院

地址 528000 广东省佛山市禅城区江湾一路18号

(72) 发明人 焦波 张文生 戎海武 何敏藩 石建迈 邢立宁

(74) 专利代理机构 广州嘉权专利商标事务有限公司 44205

代理人 蔡伟杰

(51) Int. Cl.

H04L 12/24 (2006.01)

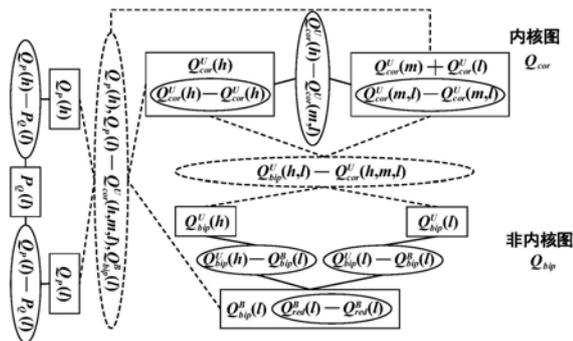
权利要求书7页 说明书18页 附图2页

(54) 发明名称

基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法及系统

(57) 摘要

本发明公开了基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法及系统,将AS级网络拓扑细化分解为十六个不同的实连接和虚连接组件,并以互联网历史演化进程上连续探测的不同时刻拓扑图序列为输入,提取这十六个组件的稳定特征参数,从而引导拓扑仿真子系统的拓扑参数配置,得到能够精确仿真生成过去、当前和未来任意时刻网络拓扑结构的结果通过AS级网络拓扑结构十六个实/虚组件的细粒度分解,能够捕获网络的稳定特征参数,从而为各种网络拓扑在过去、当前和未来状态的精确仿真提供更精细的特征参数配置功能。



1. 基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

S100:输入网络拓扑数据;

S200:通过静态拓扑分解方法将网络拓扑数据依次分解为十六个实虚组件;

S300:通过特征参数抽取方法将十六个实虚组件中相应的组件,在特征参数抽取方法中采用线性拟合方法对真实拓扑图序列对应的组件序列进行数据拟合,生成特征参数拟合数据;

S400:将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件输出。

在S200中,静态拓扑分解方法包括以下步骤:

输入:网络拓扑 $G=(V,E)$ ,其中节点集 $V$ 为特定时刻探测获得真实互联网中自治系统AS域的集合,边集 $E$ 为该互联网中不同AS域之间通信链路的集合;度阈值 $d_{low}^{tra}=10$ ;度阈值 $d_{high}^{cor}=100$ ;度阈值 $d_{low}^{S-Q}=30$ ;

输出:八个实组件,分别为内核组件 $Q_{cor}$ 和外围组件 $Q_{bip}$ 、P-Q、I-Q、J~Q、K-Q、K~S和S-Q;八个虚组件,分别为 $Q_{bip}^U(h,l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_P(h),Q_P(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_I(h),Q_I(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_J(h),Q_J(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_K(h),Q_K(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $K_Q(1)-K_S(1)$ 、 $S_Q(h),S_Q(1)-S_K(h),S_K(1)$ 和 $Q_S(h),Q_S(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ ;

S201:计算节点集

$$P=\{v \in V \mid d_G(v)=1\}$$

$$Q=\{v \in V \mid \exists w, (v,w) \in E, w \in P\}$$

$$K=\{v \in V_I \mid d_{G_I}(v)=1 \wedge \forall (v,w) \in E_I, d_{G_I}(w) > 1\}$$

$$S=\{v \in V_I \mid \exists w, (v,w) \in E_I, w \in K\}$$

$$I=\{v \in V_I \mid d_{G_I}(v)=0\}$$

$$J=\{v \in V_I \mid d_{G_I}(v)=1 \wedge \forall (v,w) \in E_I, d_{G_I}(w)=1\}$$

其中 $d_G(v)$ 和 $d_{G_I}(v)$ 分别为网络拓扑图 $G$ 及其子图 $G_I$ 中节点 $v$ 的度,且 $G_I=(V_I, E_I)$ 是由图 $G$ 中节点集 $V/(P \cup Q)$ 和这些节点之间的边构成的子图, $V_I$ 和 $E_I$ 分别是节点集和边集;

S202:计算节点集

$$Q_{bip}^B(l)=\{v \mid v \in Q \wedge d_Q(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \quad Q_{bip}^U=Q/Q_{bip}^B(l)$$

$$Q_{red}^B(l)=\{v \mid v \in Q_{bip}^B(l) \wedge \exists w \in Q_{bip}^B(l), (v,w) \in E\}$$

其中 $d_Q(v)$ 为由图 $G$ 中节点集 $Q$ 和这些节点之间的边构成的子图中节点 $v$ 的度;

S203:生成子图 $Q_{bip}$ ,其是图 $G$ 中两个边集

$$Q_{bip}^B(l)-Q_{bip}^U=\{(v,w) \mid (v,w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U\}$$

$$Q_{red}^B(l)-Q_{red}^B(l)=\{(v,w) \mid (v,w) \in E \wedge v, w \in Q_{red}^B(l)\}$$

以及这些边连接的节点构成的子图 $Q_{bip}$ ;

S204:计算节点集

$$Q_{bip}^U(l) = \{v \mid v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{bip}}(v) \leq d_{low}^{tra}\},$$

$$Q_{bip}^U(h) = Q_{bip}^U / Q_{bip}^U(l)$$

其中  $d_{Q_{bip}}(v)$  为子图  $Q_{bip}$  中节点  $v$  的度; 将子图  $Q_{bip}$  中的边集划分为三类, 即  $Q_{red}^B(l) - Q_{red}^B(l)$  和

$$Q_{bip}^U(h) - Q_{bip}^B(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U(h)\}$$

$$Q_{bip}^U(l) - Q_{bip}^B(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U(l)\};$$

S205: 生成子图  $Q_{cor}$ , 其是图  $G$  中节点集  $Q_{bip}^U$  和这些节点之间的边构成的子图  $Q_{cor}$ ; 计算节点集

$$Q_{cor}^U(l) = \{v \mid v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \leq d_{low}^{tra}\}$$

$$Q_{cor}^U(h) = \{v \mid v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \geq d_{high}^{cor}\}$$

$$Q_{cor}^U(m) = Q_{bip}^U / (Q_{cor}^U(l) \cup Q_{cor}^U(h)),$$

$$Q_{cor}^U(m, l) = Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$$

$$Q_{cor}^U(h, m, l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$$

其中  $d_{Q_{cor}}(v)$  为子图  $Q_{cor}$  中节点  $v$  的度; 将子图  $Q_{cor}$  中的边集划分为三类, 即

$$Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(h) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(h)\}$$

$$Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(m, l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_{cor}^U(h) \wedge w \in Q_{cor}^U(m, l)\};$$

$$Q_{cor}^U(m, l) - Q_{cor}^U(m, l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(m, l)\}$$

S206: 采用  $X-Y$  表示五个子图  $P-Q$ 、 $I-Q$ 、 $J-Q$ 、 $K-Q$  和  $K-S$ , 其中  $X \in \{P, I, J, K\}$  且  $Y \in \{S, Q\}$ ; 这五个子图的生成方法相同, 即子图  $X-Y$  的生成: 子图  $X-Y$  是图  $G$  中边集

$$Y_X - X_Y(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Y_X \wedge w \in X_Y(l)\}$$

以及这些边连接的节点构成的子图; 其中节点集

$$Y_X = \{v \mid v \in Y \wedge \exists w \in X, (v, w) \in E\}, \quad X_Y(l) = X;$$

计算节点集

$$Y_X(l) = \{v \mid v \in Y_X \wedge d_{X-Y}(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \quad Y_X(h) = Y_X / Y_X(l),$$

其中  $d_{X-Y}(v)$  为子图  $X-Y$  中节点  $v$  的度; 将子图  $X-Y$  中的边集划分为两类, 即

$$Y_X(h) - X_Y(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(h) \wedge w \in X_Y(l)\}$$

$$Y_X(l) - X_Y(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(l) \wedge w \in X_Y(l)\};$$

计算边集和节点集

$$J_J(l) - J_J(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in J\}$$

$$S_S = \{v \mid v \in S \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad S_S(h) = S_S \cap S_K(h), \quad S_S(l) = S_S \cap S_K(l)$$

$$S_S(h) - S_S(h) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(h)\};$$

$$S_S(h) - S_S(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in S_S(h) \wedge w \in S_S(l)\}$$

$$S_S(l) - S_S(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(l)\}$$

生成子图  $J \sim Q$ , 其为边集  $J_J(l) - J_J(l)$  和子图  $J-Q$  的并集;

生成子图  $K \sim S$ , 其为边集  $S_S(h) - S_S(h)$ ,  $S_S(h) - S_S(l)$ ,  $S_S(l) - S_S(l)$  和子图  $K-S$  的并集;

P-Q、I-Q、J~Q、K-Q和K~S是五个输出的外围组件；

S207:生成子图S-Q,其是图G中边集 $\{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in S \wedge w \in Q\}$ 以及这些边连接的节点构成的子图S-Q;计算节点集和边集

$$Q_S = \{v \mid v \in Q \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad Q_S(l) = \{v \mid v \in Q_S \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad Q_S(h) = Q_S / Q_S(l)$$

$$S_Q = \{v \mid v \in S \wedge \exists w \in Q, (v, w) \in E\}, \quad S_Q(l) = \{v \mid v \in S_Q \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad S_Q(h) = S_Q / S_Q(l)$$

$$Q_S(h) - S_Q(h) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(h) - S_Q(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(l)\}$$

$$Q_S(l) - S_Q(h) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(l) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(l) - S_Q(l) = \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(l) \wedge w \in S_Q(l)\};$$

将子图S-Q中的边集划分为四类,即 $Q_S(h) - S_Q(h)$ ,  $Q_S(h) - S_Q(l)$ ,  $Q_S(l) - S_Q(h)$ 和 $Q_S(l) - S_Q(l)$ ;

S208:设 $A = Q_{bip}^U(h, l) = Q_{bip}^U(h) \cup Q_{bip}^U(l)$ 且 $B = Q_{cor}^U(h, m, l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$ ;其中,A是拓扑图中实组件 $Q_{bip}$ 的节点集且B是拓扑图中实组件 $Q_{cor}$ 的节点集;为了精确地建立 $Q_{bip}$ 与 $Q_{cor}$ 之间的关联性,按照以下方式生成虚组件 $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ :生成二分图 $G_{A-B} = (A, B, E_{A-B})$ ,其中 $E_{A-B} = \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B \wedge a$ 和 $b$ 是网络拓扑图G中的同一个节点};

采用相同的方法生成拓扑图中其它七个虚组件 $K_Q(1) - K_S(1)$ 、 $Q_P(h), Q_P(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_I(h), Q_I(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_J(h), Q_J(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_K(h), Q_K(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), S_Q(h), S_Q(l) - S_K(h), S_K(1)$ 和 $Q_S(h), Q_S(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ ;其中

$$Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l) \cup Q_{bip}^B(l)$$

$$Q_X(h), Q_X(l) = Q_X(h) \cup Q_X(l), \quad X \in \{P, I, J, K\} \quad \circ$$

$$S_Y(h), S_Y(l) = S_Y(h) \cup S_Y(l), \quad Y \in \{Q, K\}$$

在S300中,特征参数抽取方法包括以下步骤:

输入:拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ ,其中 $G_t$ 表示从起始时间开始第t个时间段探测得到的拓扑图,  $1 \leq t \leq T$ ;

输出:演化拓扑图序列的稳定特征参数;

S301:调用静态拓扑分解方法依次将演化拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ 分解为八个实组件和八个虚组件,其中每个组件可被进一步分解为若干节点集和边集,具体分解方法详见拓扑结构分解方法;

S302:对于实组件 $Q_{cor}$ ,其包含三个节点集 $Q_{cor}^U(h), Q_{cor}^U(m), Q_{cor}^U(l)$ 和三个边集 $Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(h), Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(m, l), Q_{cor}^U(m, l) - Q_{cor}^U(m, l)$ ;依据拓扑图序列 $G_t$ ,计算 $Q_{cor}^U(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{cor-n_h}(t)$ ,  $Q_{cor}^U(m)$ 节点数的二次线性拟合函数 $Q_{cor-n_m}(t)$ 和 $Q_{cor}^U(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{cor-n_l}(t)$ ;对于 $Q_{cor}^U(h)$ 节点按度从大到小顺序排列的序号 $i = 1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ ,计算密度曲线拟合函数 $Q_{cor-density}(i)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中前i个度最大的 $Q_{cor}^U(h)$ 节点之间的边数与最大可能边数 $i(i-1)/2$ 的比率;对于 $Q_{cor}^U(m, l) = Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{hig}^{cor} - 1, \dots, d_{hig}^{cor} - 1 = 99$ ,计算度偏好连接拟合函数 $Q_{cor-p_c}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的

实组件 $Q_{cor}$ 中一条 $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(m,l)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_{cor}^U(m,l)$ 节点的概率;对于 $Q_{cor}^U(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ , 计算度分布拟合函数 $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中一个 $Q_{cor}^U(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $Q_{cor}^U(m)$ 中节点的度 $d = d_{low}^{tra}+1, d_{low}^{tra}+2, \dots, d_{high}^{cor}-1, d_{low}^{tra}+1=11$ , 计算度分布拟合函数 $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中一个 $Q_{cor}^U(m)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Q_{cor}^U(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设 $n_i$ 为其中的第 $i$ 个节点, 计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中节点 $n_i$ 的度, 然后对于 $Q_{cor}^U(h)$ 中节点排列的序号 $i = 1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ , 计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $Q_{cor-m}(i)$ , 其表示 $Q_{cor}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $Q_{cor-b}(i)$ , 其表示 $Q_{cor}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距;

上述 $Q_{cor-n_h}(t)$ 、 $Q_{cor-n_m}(t)$ 、 $Q_{cor-n_l}(t)$ 、 $Q_{cor-density}(i)$ 、 $Q_{cor-p_c}(d)$ 、 $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ 、 $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ 、 $Q_{cor-m}(i)$ 和 $Q_{cor-b}(i)$ 为提取的拓扑图序列 $G_t$ 中实组件 $Q_{cor}$ 的稳定特征参数;

S303: 对于实组件 $Q_{bip}$ , 其包含三个节点集 $Q_{bip}^U(h)$ 、 $Q_{bip}^U(l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 和三个边集 $Q_{bip}^U(h)-Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_{bip}^U(l)-Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_{red}^B(l)-Q_{red}^B(l)$ ;依据拓扑图序列 $G_t$ , 计算 $Q_{bip}^U(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{uh}}(t)$ 、 $Q_{bip}^U(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{ul}}(t)$ 和 $Q_{bip}^B(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{bl}}(t)$ ;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度偏好连接拟合函数 $Q_{bip-p_c}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{bip}^U(h)-Q_{bip}^B(l)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d_2 = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度偏好连接拟合函数 $Q_{bip-p_s}(d_2)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{bip}^U(l)-Q_{bip}^B(l)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率;对于 $Q_{bip}^U(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度分布拟合函数 $Q_{bip-p_{du}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一个 $Q_{bip}^U(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度分布拟合函数 $Q_{bip-p_{db}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一个 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Q_{bip}^U(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设 $n_i$ 为其中第 $i$ 个节点, 计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中节点 $n_i$ 的度, 然后对于 $Q_{bip}^U(h)$ 中节点排列的序号 $i = 1, 2, \dots, Q_{bip-n_{uh}}(t)$ , 计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $Q_{bip-m}(i)$ , 其表示 $Q_{bip}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $Q_{bip-b}(i)$ , 其表示 $Q_{bip}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距;调用度对排序方法将由 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度构成的所有度对进行排序得到度对排序列表DPL, 对于DPL中度对 $(d_1, d_2)$ 的排列序号 $r$ , 计算度对分布拟合函数 $Q_{bip-p_{dpl}}(r)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{red}^B(l)-Q_{red}^B(l)$ 边连接两个度分别为 $d_1$ 和 $d_2$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率;

上述 $Q_{bip-n_{uh}}(t)$ 、 $Q_{bip-n_{ul}}(t)$ 、 $Q_{bip-n_{bl}}(t)$ 、 $Q_{bip-p_c}(d)$ 、 $Q_{bip-p_s}(d_2)$ 、 $Q_{bip-p_{du}}(d)$ 、 $Q_{bip-p_{db}}(d)$ 、 $Q_{bip-m}(i)$ 、 $Q_{bip-b}(i)$ 和 $Q_{bip-p_{dpl}}(r)$ 为提取的实组件 $Q_{bip}$ 的稳定特征参数;

S304: 采用X-Y表示五个子图P-Q、I-Q、J-Q、K-Q和K-S, 其中 $X \in \{P, I, J, K\}$ 且 $Y \in \{S, Q\}$ ;

这五个子图的稳定特征参数提取方法相同,即子图X-Y的提取方法:

子图X-Y包含三个节点集 $Y_X(h)$ ,  $Y_X(1)$ ,  $X_Y(1)$ 和两个边集 $Y_X(h) - X_Y(1)$ ,  $Y_X(1) - X_Y(1)$ ;依据拓扑图序列 $G_t$ ,计算 $Y_X(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{n_{yh}}(t)$ ,  $Y_X(1)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{n_{y1}}(t)$ 和 $X_Y(1)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{n_{x1}}(t)$ ;对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, 30$ ,其中30为 $G_t$ 中所有 $X_Y(1)$ 节点的度的上界,计算度偏好连接拟合函数 $XY_{p_c}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一条 $Y_X(h) - X_Y(1)$ 边连接度为 $d$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率;对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d_2=1, 2, \dots, 30$ ,计算度偏好连接拟合函数 $XY_{p_s}(d_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一条 $Y_X(1) - X_Y(1)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率;对于 $Y_X(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ ,计算度分布拟合函数 $XY_{p_{dy}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一个 $Y_X(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, 30$ ,计算度分布拟合函数 $XY_{p_{dx}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一个 $X_Y(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Y_X(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_i$ 为其中第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ ,其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中节点 $n_i$ 的度,然后对于 $Y_X(h)$ 中节点排列的序号 $i=1, 2, \dots$ ,  $XY_{n_{yh}}(t)$ ,计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $XY_m(i)$ ,其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $XY_b(i)$ ,其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距;

上述 $XY_{n_{yh}}(t)$ 、 $XY_{n_{y1}}(t)$ 、 $XY_{n_{x1}}(t)$ 、 $XY_{p_c}(d)$ 、 $XY_{p_s}(d_2)$ 、 $XY_{p_{dy}}(d)$ 、 $XY_{p_{dx}}(d)$ 、 $XY_m(i)$ 和 $XY_b(i)$ 为提取的演化拓扑图序列 $G_t$ 中子图X-Y的稳定特征参数;其中P-Q、I-Q和K-Q为网络拓扑结构的三个实组件;

S305:对于实组件 $J \sim Q$ ,其包含子图J-Q和边集 $J_J(1) - J_J(1)$ 两部分;设 $d_{J-Q}(v)$ 为节点 $v$ 在子图J-Q的度,调用度对排序方法将满足 $v_1, v_2 \in J$ 且 $d_{J-Q}(v_1) \leq d_{J-Q}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 进行排序得到度对排序列表DPL,依据拓扑图序列 $G_t$ ,对于DPL中度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 的排列序号 $r$ ,计算度对分布拟合函数 $JQ_{p_{dpl}}(r)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $J_J(1) - J_J(1)$ 边连接子图J-Q中两个度分别为 $d_{J-Q}(v_1)$ 和 $d_{J-Q}(v_2)$ 的属于集合J的节点的概率;

上述 $JQ_{p_{dpl}}(r)$ 和子图J-Q的特征参数共同构成了实组件 $J \sim Q$ 的稳定特征参数;

S306:对于实组件 $K \sim S$ ,其包含子图K-S和三个边集 $S_S(h) - S_S(h)$ ,  $S_S(h) - S_S(1)$ ,  $S_S(1) - S_S(1)$ ;设 $d_{K-S}(v)$ 为节点 $v$ 在子图K-S的度,调用度对排序方法将满足 $v_1, v_2 \in S$ 且 $d_{K-S}(v_1) \leq d_{K-S}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 进行排序得到度对列表DPL,依据拓扑图序列 $G_t$ ,对于DPL中度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 的排列序号 $r$ ,计算度对分布拟合函数 $KS_{p_{dpl}}(r)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(1) - S_S(1)$ 边连接子图K-S中两个度分别为 $d_{K-S}(v_1)$ 和 $d_{K-S}(v_2)$ 的属于集合 $S_K(1)$ 的节点的概率,其中 $S_K(1)$ 为子图K-S的一个节点集;依据拓扑图序列 $G_t$ ,对于 $S_K(1)$ 中节点在子图K-S中的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ ,计算度偏好连接拟合函数 $KS_{p_{c1}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(h) - S_S(1)$ 边连接子图K-S中度为 $d$ 的 $S_K(1)$ 节点的概率;

上述 $KS_{p_{dpl}}(r)$ 、 $KS_{p_{c1}}(d)$ 和子图K-S的特征参数共同构成了实组件 $K \sim S$ 的稳定特征参数;

S307:对于实组件 $S \sim Q$ ,其包含四个节点集 $Q_S(h)$ ,  $Q_S(1)$ ,  $S_Q(h)$ ,  $S_Q(1)$ 和四个边集 $Q_S(h) - S_Q(h)$ ,  $Q_S(h) - S_Q(1)$ ,  $Q_S(1) - S_Q(h)$ ,  $Q_S(1) - S_Q(1)$ ;依据拓扑图序列 $G_t$ ,分别计算 $Q_S(h)$ ,  $Q_S(1)$ ,  $S_Q(h)$ ,  $S_Q(1)$ 四个集合包含节点数的一次线性拟合函数 $SQ_{n_{qh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{q1}}(t)$ 、 $SQ_{n_{sh}}(t)$ 和 $SQ_{n_{s1}}(t)$ ;

$n_{s1}(t)$ ; 对于  $S_Q(1)$  中节点的度  $d=1,2,\dots, d_{low}^{S-Q}, d_{low}^{S-Q}=30$ , 计算度偏好连接拟合函数  $SQ_{p_{cs}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一条  $Q_s(h) - S_Q(1)$  边连接度为  $d$  的  $S_Q(1)$  节点的概率; 对于  $Q_s(1)$  中节点的度  $d=1,2,\dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度偏好连接拟合函数  $SQ_{p_{cq}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一条  $Q_s(1) - S_Q(h)$  边连接度为  $d$  的  $Q_s(1)$  节点的概率; 对于  $S_Q(1)$  中节点的度  $d_2=1,2,\dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度偏好连接拟合函数  $SQ_{p_s}(d_2)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一条  $Q_s(1) - S_Q(1)$  边连接度为  $d_2$  的  $S_Q(1)$  节点的概率; 调用节点分类与排序方法将  $Q_s(h)$  中全部节点分类至  $c=10$  个相互交集为空且有序排列的节点集  $L_{q1}, L_{q2}, \dots, L_{qc}$ , 并将  $S_Q(h)$  中全部节点分类至  $c=10$  个相互交集为空且有序排列的节点集  $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{sc}$ , 对于任意序号对  $(r_1, r_2)$ , 其中  $1 \leq r_1, r_2 \leq c$ , 计算序号对分布拟合函数  $SQ_{p_{rd}}(r_1, r_2)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一条  $Q_s(h) - S_Q(h)$  边的两个端点属于节点集  $L_{qr_1}$  和节点集  $L_{sr_2}$  的概率; 对于  $Q_s(1)$  中节点的度  $d=1,2,\dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度分布拟合函数  $SQ_{p_{dq}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一个  $Q_s(1)$  节点的度为  $d$  的概率; 对于  $S_Q(1)$  中节点的度  $d=1,2,\dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度分布拟合函数  $SQ_{p_{ds}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中一个  $S_Q(1)$  节点的度为  $d$  的概率; 将  $Q_s(h)$  中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设  $n_{qi}$  为其中第  $i$  个节点, 计算一次线性拟合函数  $f_{qi}(t) = m_{qi} \cdot t + b_{qi}$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中节点  $n_{qi}$  的度, 然后对于  $Q_s(h)$  中节点排列的序号  $i=1,2,\dots, SQ_{n_{qh}}(t)$ , 计算参数  $m_{qi}$  的拟合函数  $SQ_{m_q}(i)$ , 其表示  $Q_s(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_{qi}(t)$  的斜率, 并计算参数  $b_{qi}$  的拟合函数  $SQ_{b_q}(i)$ , 其表示  $Q_s(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_{qi}(t)$  的截距; 将  $S_Q(h)$  中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设  $n_{si}$  为其中第  $i$  个节点, 计算一次线性拟合函数  $f_{si}(t) = m_{si} \cdot t + b_{si}$ , 其表示图  $G_t$  的实组件 S-Q 中节点  $n_{si}$  的度, 然后对于  $S_Q(h)$  中节点排列的序号  $i=1,2,\dots, SQ_{n_{sh}}(t)$ , 计算参数  $m_{si}$  的拟合函数  $SQ_{m_s}(i)$ , 其表示  $S_Q(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_{si}(t)$  的斜率, 并计算参数  $b_{si}$  的拟合函数  $SQ_{b_s}(i)$ , 其表示  $S_Q(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_{si}(t)$  的截距;

上述  $SQ_{n_{qh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{ql}}(t)$ 、 $SQ_{n_{sh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{s1}}(t)$ 、 $SQ_{p_{cs}}(d)$ 、 $SQ_{p_{cq}}(d)$ 、 $SQ_{p_s}(d_2)$ 、 $SQ_{p_{rd}}(r_1, r_2)$ 、 $SQ_{p_{dq}}(d)$ 、 $SQ_{p_{ds}}(d)$ 、 $SQ_{m_q}(i)$ 、 $SQ_{b_q}(i)$ 、 $SQ_{m_s}(i)$  和  $SQ_{b_s}(i)$  为提取的拓扑图序列  $G_t (t=1, 2, \dots, T)$  中实组件 S-Q 的稳定特征参数;

S308: 对于任意一个虚组件, 由静态拓扑分解方法知, 其可以表示为二分图  $G_{A-B} = (A, B, E_{A-B})$ , 其中  $E_{A-B} = \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B \wedge a$  和  $b$  是网络拓扑图  $G$  中的同一个节点  $\}$ ; 调用混合节点分类与排序方法将  $A$  中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集  $L_1^a, L_2^a, \dots, L_{c+d}^a$ , 其中, 输入参数  $c=10, d=10$ , 并将  $B$  中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集  $L_1^b, L_2^b, \dots, L_{c+d}^b$ , 然后依据拓扑图序列  $G_t$ , 对于任意序号对  $(r_1, r_2)$ , 其中  $1 \leq r_1, r_2 \leq c+d$ , 计算序号对分布拟合函数  $AB_{p_{rd}}(r_1, r_2)$ , 其表示图  $G_t$  的虚组件二分图  $G_{A-B}$  中一条边的两个端点属于节点集  $L_{a,r_1}$  和节点集  $L_{b,r_2}$  的概率;

上述  $AB_{p_{rd}}(r_1, r_2)$  为提取的拓扑图序列  $G_t$  中虚组件 A-B 的稳定特征参数; 其中虚组件 A-B 的八个实例为  $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ 、 $Q_P(h), Q_P(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $K_Q(1) - K_S(1)$ 、 $Q_l(h), Q_l(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_j(h), Q_j(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_k(h), Q_k(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $S_Q(h), S_Q$

(1)  $-S_K(h)$ ,  $S_K(l)$  和  $Q_S(h), Q_S(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 。

其中,度对排序方法包括以下步骤:

输入:节点度的上界(最大值) $U_b$ ;

输出:按照特定顺序排列的节点度对列表DPL;

ZS101:初始化 $len \leftarrow 2$ 和 $DPL \leftarrow \Phi$ ;其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

ZS102:如果 $len \leq 2 \cdot U_b$ ,则初始化 $k_1 \leftarrow 1$ 且 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转ZS103;否则,终止运算;

ZS103:如果 $k_1 \leq k_2 \wedge k_1 \leq U_b \wedge k_2 \leq U_b$ ,则将度对 $(k_1, k_2)$ 添加到度对列表DPL的尾部,并更新 $k_1 \leftarrow k_1 + 1$ 和 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转ZS103;否则,转ZS104;

ZS104:更新 $len \leftarrow len + 1$ ,并转ZS102。

其中,节点分类与排序方法包括以下步骤:

输入:节点序列 $1, 2, \dots, n$ 和它们的度 $d_1, d_2, \dots, d_n$ ,分类数 $c$ ;

输出:按照特定顺序排列的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ ;

ZS201:对任意 $j = 1, 2, \dots, c$ ,初始化 $L_j \leftarrow \Phi$ ,并将节点 $1, 2, \dots, n$ 按照度从大到小的顺序排列;不失一般性,假设 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n$ ,转ZS202,其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

ZS202:如果 $n < c$ ,则对任意 $j = 1, 2, \dots, n$ ,更新 $L_j \leftarrow \{j\}$ ;否则,计算 $r = n/c$ ,初始化分类 $L_1 \leftarrow \{1, 2, \dots, \text{round}(r)\}$ ,并对任意 $j = 2, 3, \dots, c$ ,更新 $L_j \leftarrow \{\max(L_{j-1}) + 1, \max(L_{j-1}) + 2, \dots, \text{round}(j \times r)\}$ ,其中 $\max$ 表示取集合中最大值。

其中,混合节点分类与排序方法为:

输入:节点集 $X$ ,节点集 $X$ 所在的实组件 $G(X)$ ,任意节点 $x \in X$ 在实组件 $G(X)$ 的度 $d_{G(X)}(x)$ ,度阈值 $d$ ,分类数 $c$ ;

输出:按照特定顺序排列的节点分类列表 $L$ ;

ZS301.将 $X$ 分解为两个子集 $X_H = \{x | x \in X \wedge d_{G(X)}(x) \geq d\}$ 和 $X_N = \{x | x \in X \wedge d_{G(X)}(x) < d\}$ ;

ZS302.调用节点分类与排序方法生成节点集 $X_H$ 的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ ;

ZS303.初始化 $k \leftarrow d$ 和 $i \leftarrow 1$ ,并转ZS304;

ZS304.如果 $k \geq 1$ ,则计算节点集 $S = \{x | x \in X_N \wedge d_{G(X)}(x) = k\}$ ,并将 $S$ 赋值给第 $c+i$ 个节点分类 $L_{c+i}$ ,同时更新 $k \leftarrow k - 1$ 和 $i \leftarrow i + 1$ 后转ZS304;否则,转ZS305;

ZS305.更新 $L \leftarrow L_1, L_2, \dots, L_c, L_{c+1}, \dots, L_{c+d}$ 。

2.基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统,其特征在于,所述系统包括:存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求1所述的方法。

## 基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法及系统

### 技术领域

[0001] 本公开涉及网络拓扑、网络仿真技术领域,具体涉及基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法及系统,适用于依据特征提取参数配置互联网、物联网等拓扑系统。

### 背景技术

[0002] 互联网拓扑通常划分为三个层次,即IP层、路由层和自治系统(Autonomous System,AS)层。其中,IP层以计算机终端IP地址为节点,路由层以数据通信路由设备为节点,AS层以自治系统域为节点。一个AS节点对应于从属于同一管理域的路由节点集,一个路由节点由一系列IP地址组成。因此,AS层描述了互联网拓扑的宏观特征。

[0003] 网络规模的指数级增长趋势,给互联网的路由规划、资源定位与分配等网络管理策略的制定带来了严峻的挑战。同时,为了避免不恰当管理策略带来的灾难性后果,相关策略的开发、测试与评估难以在真实互联网上开展。因此,互联网仿真系统已成为网络管理策略制定的重要辅助手段。拓扑表征网络节点及相互连接关系,是网络设备、流量等资源的底层载体。因此,拓扑仿真子系统是互联网仿真系统的一项重要组成部分。拓扑仿真子系统必须以真实互联网演化历程的稳定拓扑特征为输入,并依据这些特征参数实现互联网拓扑仿真生成。本公开关注于真实互联网数十年演化历程中拓扑特征参数的提取方法及相关装置,为拓扑仿真子系统的参数配置提供必要的技术保障。

[0004] 在现有互联网拓扑结构建模技术中,中国专利申请号CN201810564523.7公开的互联网测试床拓扑结构分解方法,采用简单无向图 $G=(V,E)$ 建模AS级互联网络拓扑,将图G分解为七个二分图、一个匹配图和一个内核图,并给出这些子图之间的相互关联性。该互联网拓扑的分解结构模型(包含九个分解子图)已被应用于中国专利申请号CN201810565884.3公开的互联网测试床拓扑结构大比例规模缩减方法。

[0005] 该分解结构模型(中国专利申请号CN201810564523.7)仅给出AS级互联网拓扑在特定时刻的静态结构,即无法表征互联网在数十年演化历程中的稳定性。该分解结构模型的提出,主要面向拓扑结构的大比例规模缩减方法(中国专利申请号CN201810565884.3)。该规模缩减方法以一幅特定时刻探测获得的互联网络拓扑图为输入,将输入的静态拓扑图分解为七个二分图、一个匹配图和一个内核图,通过采样规则分别从这九个分解图中抽取部分节点和边,构成相应的小规模图,并依据这九个分解图节点之间的包含关系合并这些小规模图,从而实现单一静态拓扑图的大比例规模缩减。综上所述,该分解结构模型仅能够适用于过去和当前特定时刻的单一静态拓扑图,无法适用于互联网未来状态的拓扑仿真。

[0006] 规模缩减方法以一副完整的拓扑图为输入,该输入拓扑图中包含了复杂的网络结构特征,其为规模缩减图与原始输入拓扑图之间的结构相似性提供了保证。然而,互联网未来状态的拓扑预测与仿真,依赖于互联网数十年演化历程中连续探测的多幅拓扑图表现出的稳定特征。中国专利申请号CN201810564523.7公开的拓扑分解结构的缺陷体现在,其无法从连续探测的一系列不同时刻拓扑图中提取能够反映未来趋势的特征参数;此外,其对网络拓扑图的分解粒度低,且对分解图之间关联性的描述十分粗糙。

## 发明内容

[0007] 本公开的目的是解决上述现有技术的不足,将AS级网络拓扑细化分解为十六个不同的实连接和虚连接组件,并以连续探测的不同时刻拓扑图序列为输入,提取这十六个组件的稳定特征参数,从而引导拓扑仿真子系统的拓扑参数配置,得到能够精确仿真生成过去、当前和未来任意时刻网络拓扑结构的结果。

[0008] 本公开的目的是针对上述问题,提供基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法及系统,具体包括以下步骤:

[0009] S100:输入网络拓扑数据;

[0010] S200:通过静态拓扑分解方法将网络拓扑数据依次分解为十六个实虚组件;

[0011] S300:通过特征参数抽取方法将十六个实虚组件中相应的组件,在特征参数抽取方法中采用线性拟合方法对真实拓扑图序列对应的组件序列进行数据拟合,生成特征参数拟合数据;

[0012] S400:将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件输出。

[0013] 进一步地,在S200中,静态拓扑分解方法包括以下步骤:

[0014] 输入:网络拓扑 $G=(V,E)$ ,其中节点集 $V$ 为特定时刻探测获得真实互联网中自治系统AS域的集合,边集 $E$ 为该互联网中不同AS域之间通信链路的集合;度阈值 $d_{low}^{tra}=10$ ;度阈值 $d_{high}^{cor}=100$ ;度阈值 $d_{low}^{s-Q}=30$ ;

[0015] 输出:八个实组件(内核组件 $Q_{cor}$ 和外围组件 $Q_{bip}$ 、 $P-Q$ 、 $I-Q$ 、 $J\sim Q$ 、 $K-Q$ 、 $K\sim S$ 和 $S-Q$ );八个虚组件( $Q_{bip}^U(h,l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_P(h)$ 、 $Q_P(l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_I(h)$ 、 $Q_I(l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_J(h)$ 、 $Q_J(l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_K(h)$ 、 $Q_K(l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 、 $K_Q(1)-K_S(1)$ 、 $S_Q(h)$ 、 $S_Q(1)-S_K(h)$ 、 $S_K(1)$ 和 $Q_S(h)$ 、 $Q_S(l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ );

[0016] S201:计算节点集

$$P=\{v\in V\mid d_G(v)=1\}$$

$$Q=\{v\in V\mid \exists w,(v,w)\in E,w\in P\}$$

$$K=\{v\in V_I\mid d_{G_I}(v)=1\wedge \forall (v,w)\in E_I,d_{G_I}(w)>1\}$$

[0017]  $S=\{v\in V_I\mid \exists w,(v,w)\in E_I,w\in K\}$ ,

$$I=\{v\in V_I\mid d_{G_I}(v)=0\}$$

$$J=\{v\in V_I\mid d_{G_I}(v)=1\wedge \forall (v,w)\in E_I,d_{G_I}(w)=1\}$$

[0018] 其中 $d_G(v)$ 和 $d_{G_I}(v)$ 分别为网络拓扑图 $G$ 及其子图 $G_I$ 中节点 $v$ 的度,且 $G_I=(V_I,E_I)$ 是由图 $G$ 中节点集 $V/(P\cup Q)$ 和这些节点之间的边构成的子图, $V_I$ 和 $E_I$ 分别是节点集和边集;

[0019] S202:计算节点集

$$Q_{bip}^B(l)=\{v\mid v\in Q\wedge d_Q(v)\leq d_{low}^{tra}\}, Q_{bip}^U=Q/Q_{bip}^B(l)$$

[0020]  $Q_{red}^B(l)=\{v\mid v\in Q_{bip}^B(l)\wedge \exists w\in Q_{bip}^B(l),(v,w)\in E\}$ ,

[0021] 其中 $d_Q(v)$ 为由图 $G$ 中节点集 $Q$ 和这些节点之间的边构成的子图中节点 $v$ 的度。

[0022] S203:生成子图 $Q_{bip}$ ,其是图 $G$ 中两个边集

$$[0023] \quad Q_{bip}^B(I) - Q_{bip}^U = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(I) \wedge w \in Q_{bip}^U\}$$

$$[0024] \quad Q_{red}^B(I) - Q_{red}^B(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{red}^B(I)\}$$

[0025] 以及这些边连接的节点构成的子图 ( $Q_{bip}$  是一个输出的外围组件) ;

[0026] S204: 计算节点集

$$[0027] \quad Q_{bip}^U(I) = \{v | v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{bip}}(v) \leq d_{low}^{tra}\},$$

$$Q_{bip}^U(h) = Q_{bip}^U / Q_{bip}^U(I)$$

[0028] 其中  $d_{Q_{bip}}(v)$  为子图  $Q_{bip}$  中节点  $v$  的度。将子图  $Q_{bip}$  中的边集划分为三类, 即  $Q_{red}^B(I) - Q_{red}^B(I)$  和

$$[0029] \quad Q_{bip}^U(h) - Q_{bip}^B(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(I) \wedge w \in Q_{bip}^U(h)\}$$

$$Q_{bip}^U(I) - Q_{bip}^B(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(I) \wedge w \in Q_{bip}^U(I)\};$$

[0030] S205: 生成子图  $Q_{cor}$ , 其是图  $G$  中节点集  $Q_{bip}^U$  和这些节点之间的边构成的子图 ( $Q_{cor}$  是一个输出的内核组件)。计算节点集

$$Q_{cor}^U(I) = \{v | v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \leq d_{low}^{tra}\}$$

$$Q_{cor}^U(h) = \{v | v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \geq d_{high}^{cor}\}$$

$$[0031] \quad Q_{cor}^U(m) = Q_{bip}^U / (Q_{cor}^U(I) \cup Q_{cor}^U(h)),$$

$$Q_{cor}^U(m, l) = Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$$

$$Q_{cor}^U(h, m, l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$$

[0032] 其中  $d_{Q_{cor}}(v)$  为子图  $Q_{cor}$  中节点  $v$  的度,  $h, m, l$  均为与上下表等价的标记。将子图  $Q_{cor}$  中的边集划分为三类, 即

$$Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(h)\}$$

$$[0033] \quad Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(m, l) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{cor}^U(h) \wedge w \in Q_{cor}^U(m, l)\};$$

$$Q_{cor}^U(m, l) - Q_{cor}^U(m, l) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(m, l)\}$$

[0034] S206: 采用  $X-Y$  (其中  $X \in \{P, I, J, K\}$  且  $Y \in \{S, Q\}$ ) 表示五个子图  $P-Q, I-Q, J-Q, K-Q$  和  $K-S$ 。这五个子图的生成方法相同, 即子图  $X-Y$  的生成: 子图  $X-Y$  是图  $G$  中边集

$$[0035] \quad Y_X - X_Y(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X \wedge w \in X_Y(I)\}$$

[0036] 以及这些边连接的节点构成的子图。其中节点集

$$[0037] \quad Y_X = \{v | v \in Y \wedge \exists w \in X, (v, w) \in E\}, \quad X_Y(I) = X;$$

[0038] 计算节点集

$$[0039] \quad Y_X(I) = \{v | v \in Y_X \wedge d_{X-Y}(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \quad Y_X(h) = Y_X / Y_X(I),$$

[0040] 其中  $d_{X-Y}(v)$  为子图  $X-Y$  中节点  $v$  的度。将子图  $X-Y$  中的边集划分为两类, 即

$$[0041] \quad Y_X(h) - X_Y(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(h) \wedge w \in X_Y(I)\}$$

$$Y_X(I) - X_Y(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(I) \wedge w \in X_Y(I)\};$$

[0042] 计算边集和节点集

$$\begin{aligned}
& J_J(I) - J_J(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in J\} \\
& S_S = \{v | v \in S \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad S_S(h) = S_S \cap S_K(h), \quad S_S(I) = S_S \cap S_K(I) \\
[0043] \quad & S_S(h) - S_S(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(h)\} \quad ; \\
& S_S(h) - S_S(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in S_S(h) \wedge w \in S_S(I)\} \\
& S_S(I) - S_S(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(I)\}
\end{aligned}$$

[0044] 生成子图 $J \sim Q$ , 其为边集 $J_J(1) - J_J(1)$ 和子图 $J-Q$ 的并集;

[0045] 生成子图 $K \sim S$ , 其为边集 $S_S(h) - S_S(h)$ ,  $S_S(h) - S_S(1)$ ,  $S_S(1) - S_S(1)$ 和子图 $K-S$ 的并集。

[0046]  $P-Q$ ,  $I-Q$ ,  $J \sim Q$ ,  $K-Q$ 和 $K \sim S$ 是五个输出的外围组件;

[0047] S207: 生成子图 $S-Q$ , 其是图 $G$ 中边集 $\{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in S \wedge w \in Q\}$ 以及这些边连接的节点构成的子图( $S-Q$ 是一个输出的外围组件)。计算节点集和边集

$$\begin{aligned}
[0048] \quad & Q_S = \{v | v \in Q \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad Q_S(I) = \{v | v \in Q_S \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad Q_S(h) = Q_S / Q_S(I) \\
& S_Q = \{v | v \in S \wedge \exists w \in Q, (v, w) \in E\}, \quad S_Q(I) = \{v | v \in S_Q \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad S_Q(h) = S_Q / S_Q(I)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Q_S(h) - S_Q(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(h) - S_Q(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(I)\} \\
& Q_S(I) - S_Q(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(I) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(I) - S_Q(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(I) \wedge w \in S_Q(I)\}
\end{aligned}$$

[0049] 将子图 $S-Q$ 中的边集划分为四类, 即 $Q_S(h) - S_Q(h)$ ,  $Q_S(h) - S_Q(1)$ ,  $Q_S(1) - S_Q(h)$ 和 $Q_S(1) - S_Q(1)$ ;

[0050] S208: 设 $A = Q_{bip}^U(h, l) = Q_{bip}^U(h) \cup Q_{bip}^U(l)$ 且 $B = Q_{cor}^U(h, m, l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$ ; 其中,  $A$ 是拓扑图中实组件 $Q_{bip}$ 的节点集且 $B$ 是拓扑图中实组件 $Q_{cor}$ 的节点集。为了精确地建立 $Q_{bip}$ 与 $Q_{cor}$ 之间的关联性, 按照以下方式生成虚组件 $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ : 生成二分图 $G_{A-B} = (A, B, E_{A-B})$ , 其中 $E_{A-B} = \{(a, b) | a \in A \wedge b \in B \wedge a$ 和 $b$ 是网络拓扑图 $G$ 中的同一个节点};

[0051] 采用相同的方法生成拓扑图中其它七个虚组件 $K_Q(1) - K_S(1)$ 、

$$Q_P(h), Q_P(I) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I),$$

$$Q_I(h), Q_I(I) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I), Q_J(h), Q_J(I) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I), Q_K(h), Q_K(I) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I), S_Q(h), S_Q$$

$$(I) - S_K(h), S_K(I) \text{ 和 } Q_S(h), Q_S(I) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I)。 \text{ 其中}$$

$$Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(I) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l) \cup Q_{bip}^B(I)$$

$$[0052] \quad Q_X(h), Q_X(I) = Q_X(h) \cup Q_X(I), \quad X \in \{P, I, J, K\} \quad 。$$

$$S_Y(h), S_Y(I) = S_Y(h) \cup S_Y(I), \quad Y \in \{Q, K\}$$

[0053] 进一步地, 在S300中, 特征参数抽取方法包括以下步骤:

[0054] 输入: 拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ , 其中 $G_t (1 \leq t \leq T)$ 表示从起始时间开始第 $t$ 个时间段探测得到的拓扑图,  $t$ 为时间段;

[0055] 输出: 演化拓扑图序列的稳定特征参数;

[0056] S301: 调用拓扑结构分解方法依次将演化拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ 分解为八个实组件和八个虚组件, 其中每个组件可被进一步分解为若干节点集和边集, 具体分解方法详见拓扑结构分解方法;

[0057] S302: 对于实组件  $Q_{cor}$ , 其包含三个节点集  $Q_{cor}^U(h)$ ,  $Q_{cor}^U(m)$ ,  $Q_{cor}^U(l)$  和三个边集  $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(h)$ ,  $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(m,l)$ ,  $Q_{cor}^U(m,l)-Q_{cor}^U(m,l)$ ; 依据拓扑图序列  $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ), 计算  $Q_{cor}^U(h)$  节点数的一次线性拟合函数  $Q_{cor-n_h}(t)$ ,  $Q_{cor}^U(m)$  节点数的二次线性拟合函数  $Q_{cor-n_m}(t)$  和  $Q_{cor}^U(l)$  节点数的一次线性拟合函数  $Q_{cor-n_l}(t)$ ; 对于  $Q_{cor}^U(h)$  节点按度从大到小顺序排列的序号  $i=1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ , 计算密度曲线拟合函数  $Q_{cor-density}(i)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{cor}$  中前  $i$  个度最大的  $Q_{cor}^U(h)$  节点之间的边数与最大可能边数  $i(i-1)/2$  的比率; 对于  $Q_{cor}^U(m,l)=Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$  中节点的度  $d=1, 2, \dots, d_{high}^{cor}-1$  ( $=99$ ), 计算度偏好连接拟合函数  $Q_{cor-p_c}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{cor}$  中一条  $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(m,l)$  边连接度为  $d$  的  $Q_{cor}^U(m,l)$  节点的概率; 对于  $Q_{cor}^U(l)$  中节点的度  $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ , 计算度分布拟合函数  $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{cor}$  中一个  $Q_{cor}^U(l)$  节点的度为  $d$  的概率; 对于  $Q_{cor}^U(m)$  中节点的度  $d=d_{low}^{tra}+1(=11), d_{low}^{tra}+2, \dots, d_{high}^{cor}-1(=99)$ , 计算度分布拟合函数  $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{cor}$  中一个  $Q_{cor}^U(m)$  节点的度为  $d$  的概率; 将  $Q_{cor}^U(h)$  中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设  $n_i$  为其中的第  $i$  个节点, 计算一次线性拟合函数  $f_i(t)=m_i \cdot t+b_i$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{cor}$  中节点  $n_i$  的度, 然后对于  $Q_{cor}^U(h)$  中节点排列的序号  $i=1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ , 计算参数  $m_i$  的拟合函数  $Q_{cor-m}(i)$ , 其表示  $Q_{cor}^U(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_i(t)$  的斜率, 并计算参数  $b_i$  的拟合函数  $Q_{cor-b}(i)$ , 其表示  $Q_{cor}^U(h)$  中排列位置为  $i$  的节点的度的一次线性拟合函数  $f_i(t)$  的截距;

[0058] 上述  $Q_{cor-n_h}(t)$ ,  $Q_{cor-n_m}(t)$ ,  $Q_{cor-n_l}(t)$ ,  $Q_{cor-density}(i)$ ,  $Q_{cor-p_c}(d)$ ,  $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ ,  $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ ,  $Q_{cor-m}(i)$  和  $Q_{cor-b}(i)$  为提取的拓扑图序列  $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ) 中实组件  $Q_{cor}$  的稳定特征参数;

[0059] S303: 对于实组件  $Q_{bip}$ , 其包含三个节点集  $Q_{bip}^U(h)$ ,  $Q_{bip}^U(l)$ ,  $Q_{bip}^B(l)$  和三个边集  $Q_{bip}^U(h)-Q_{bip}^B(l)$ ,  $Q_{bip}^U(l)-Q_{bip}^B(l)$ ,  $Q_{bip}^B(l)-Q_{bip}^B(l)$ ; 依据拓扑图序列  $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ), 计算  $Q_{bip}^U(h)$  节点数的一次线性拟合函数  $Q_{bip-n_{uh}}(t)$ ,  $Q_{bip}^U(l)$  节点数的一次线性拟合函数  $Q_{bip-n_{ul}}(t)$  和  $Q_{bip}^B(l)$  节点数的一次线性拟合函数  $Q_{bip-n_{bl}}(t)$ ; 对于  $Q_{bip}^B(l)$  中节点的度  $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ , 计算度偏好连接拟合函数  $Q_{bip-p_c}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{bip}$  中一条  $Q_{bip}^U(h)-Q_{bip}^B(l)$  边连接度为  $d$  的  $Q_{bip}^B(l)$  节点的概率; 对于  $Q_{bip}^B(l)$  中节点的度  $d_2=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ , 计算度偏好连接拟合函数  $Q_{bip-p_s}(d_2)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{bip}$  中一条  $Q_{bip}^U(l)-Q_{bip}^B(l)$  边连接度为  $d_2$  的  $Q_{bip}^B(l)$  节点的概率; 对于  $Q_{bip}^U(l)$  中节点的度  $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度分布拟合函数  $Q_{bip-p_{du}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{bip}$  中一个  $Q_{bip}^U(l)$  节点的度为  $d$  的概率; 对于  $Q_{bip}^B(l)$  中节点的度  $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ , 计算度分布拟合函数  $Q_{bip-p_{db}}(d)$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{bip}$  中一个  $Q_{bip}^B(l)$  节点的度为  $d$  的概率; 将  $Q_{bip}^U(h)$  中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设  $n_i$  为其中第  $i$  个节点, 计算一次线性拟合函数  $f_i(t)=m_i \cdot t+b_i$ , 其表示图  $G_t$  的实组件  $Q_{bip}$  中节点  $n_i$  的度, 然后对于  $Q_{bip}^U(h)$  中节点排列的序号  $i=$

$1, 2, \dots, Q_{\text{bip-n}_{\text{uh}}}(t)$ , 计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $Q_{\text{bip-m}}(i)$ , 其表示 $Q_{\text{bip}}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $Q_{\text{bip-b}}(i)$ , 其表示 $Q_{\text{bip}}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距; 调用度对排序方法将由 $Q_{\text{bip}}^B(l)$ 中节点的度构成的所有度对进行排序得到度对排序列表DPL, 对于DPL中度对 $(d_1, d_2)$ 的排列序号 $r$ , 计算度对分布拟合函数 $Q_{\text{bip-p}_{\text{dpl}}}(r)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{\text{bip}}$ 中一条 $Q_{\text{red}}^B(l) - Q_{\text{red}}^B(l)$ 边连接两个度分别为 $d_1$ 和 $d_2$ 的 $Q_{\text{bip}}^B(l)$ 节点的概率;

[0060] 上述 $Q_{\text{bip-n}_{\text{uh}}}(t)$ 、 $Q_{\text{bip-n}_{\text{ul}}}(t)$ 、 $Q_{\text{bip-n}_{\text{bl}}}(t)$ 、 $Q_{\text{bip-p}_c}(d)$ 、 $Q_{\text{bip-p}_s}(d_2)$ 、 $Q_{\text{bip-p}_{\text{du}}}(d)$ 、 $Q_{\text{bip-p}_{\text{db}}}(d)$ 、 $Q_{\text{bip-m}}(i)$ 、 $Q_{\text{bip-b}}(i)$ 和 $Q_{\text{bip-p}_{\text{dpl}}}(r)$ 为提取的实组件 $Q_{\text{bip}}$ 的稳定特征参数;

[0061] S304: 采用X-Y(其中 $X \in \{P, I, J, K\}$ 且 $Y \in \{S, Q\}$ )表示五个子图P-Q、I-Q、J-Q、K-Q和K-S; 这五个子图的稳定特征参数提取方法相同, 即子图X-Y的提取方法:

[0062] 子图X-Y包含三个节点集 $Y_X(h)$ ,  $Y_X(1)$ ,  $X_Y(1)$ 和两个边集 $Y_X(h) - X_Y(1)$ ,  $Y_X(1) - X_Y(1)$ ; 依据拓扑图序列 $G_t(t=1, 2, \dots, T)$ , 计算 $Y_X(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{\text{n}_{\text{yh}}}(t)$ ,  $Y_X(1)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{\text{n}_{\text{y1}}}(t)$ 和 $X_Y(1)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY_{\text{n}_{\text{x1}}}(t)$ ; 对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, 30$ , 其中30为 $G_t(t=1, 2, \dots, T)$ 中所有 $X_Y(1)$ 节点的度的上界, 计算度偏好连接拟合函数 $XY_{\text{p}_c}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一条 $Y_X(h) - X_Y(1)$ 边连接度为 $d$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率; 对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d_2=1, 2, \dots, 30$ , 计算度偏好连接拟合函数 $XY_{\text{p}_s}(d_2)$ , 其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一条 $Y_X(1) - X_Y(1)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率; 对于 $Y_X(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{\text{low}}^{\text{ma}} (=10)$ , 计算度分布拟合函数 $XY_{\text{p}_{\text{dy}}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一个 $Y_X(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率; 对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, 30$ , 计算度分布拟合函数 $XY_{\text{p}_{\text{dx}}}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中一个 $X_Y(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率; 将 $Y_X(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设 $n_i$ 为其中第 $i$ 个节点, 计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ , 其表示图 $G_t$ 的子图X-Y中节点 $n_i$ 的度, 然后对于 $Y_X(h)$ 中节点排列的序号 $i=1, 2, \dots$ ,  $XY_{\text{n}_{\text{yh}}}(t)$ , 计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $XY_m(i)$ , 其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $XY_b(i)$ , 其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距; 即 $m_i$ 是线性拟合函数的斜率,  $b_i$ 是线性拟合函数的截距。

[0063] 上述 $XY_{\text{n}_{\text{yh}}}(t)$ 、 $XY_{\text{n}_{\text{y1}}}(t)$ 、 $XY_{\text{n}_{\text{x1}}}(t)$ 、 $XY_{\text{p}_c}(d)$ 、 $XY_{\text{p}_s}(d_2)$ 、 $XY_{\text{p}_{\text{dy}}}(d)$ 、 $XY_{\text{p}_{\text{dx}}}(d)$ 、 $XY_m(i)$ 和 $XY_b(i)$ 为提取的演化拓扑图序列 $G_t(t=1, 2, \dots, T)$ 中子图X-Y的稳定特征参数; 其中P-Q、I-Q和K-Q为网络拓扑结构的三个实组件;

[0064] S305: 对于实组件 $J \sim Q$ , 其包含子图J-Q和边集 $J_J(1) - J_J(1)$ 两部分; 设 $d_{J-Q}(v)$ 为节点 $v$ 在子图J-Q的度, 调用度对排序方法将满足 $v_1, v_2 \in J$ 且 $d_{J-Q}(v_1) \leq d_{J-Q}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 进行排序得到度对排序列表DPL, 依据拓扑图序列 $G_t(t=1, 2, \dots, T)$ , 对于DPL中度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 的排列序号 $r$ , 计算度对分布拟合函数 $JQ_{\text{p}_{\text{dpl}}}(r)$ , 其表示图 $G_t$ 中一条 $J_J(1) - J_J(1)$ 边连接子图J-Q中两个度分别为 $d_{J-Q}(v_1)$ 和 $d_{J-Q}(v_2)$ 的属于集合J的节点的概率;

[0065] 上述 $JQ_{\text{p}_{\text{dpl}}}(r)$ 和子图J-Q的特征参数共同构成了实组件 $J \sim Q$ 的稳定特征参数;

[0066] S306: 对于实组件 $K \sim S$ , 其包含子图K-S和三个边集 $S_S(h) - S_S(h)$ ,  $S_S(h) - S_S(1)$ ,  $S_S$

(1) - $S_S(1)$ ; 设 $d_{K-S}(v)$ 为节点 $v$ 在子图 $K-S$ 的度, 调用度对排序方法将满足 $v_1, v_2 \in S$ 且 $d_{K-S}(v_1) \leq d_{K-S}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 进行排序得到度对列表DPL, 依据拓扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ), 对于DPL中度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 的排列序号 $r$ , 计算度对分布拟合函数 $KS\_p_{dpl}(r)$ , 其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(1) - S_S(1)$ 边连接子图 $K-S$ 中两个度分别为 $d_{K-S}(v_1)$ 和 $d_{K-S}(v_2)$ 的属于集合 $S_K(1)$ 的节点的概率(其中 $S_K(1)$ 为子图 $K-S$ 的一个节点集); 依据拓扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ), 对于 $S_K(1)$ 中节点在子图 $K-S$ 中的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^m (=10)$ , 计算度偏好连接拟合函数 $KS\_p_{c1}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(h) - S_S(1)$ 边连接子图 $K-S$ 中度为 $d$ 的 $S_K(1)$ 节点的概率;

[0067] 上述 $KS\_p_{dpl}(r)$ 、 $KS\_p_{c1}(d)$ 和子图 $K-S$ 的特征参数共同构成了实组件 $K \sim S$ 的稳定特征参数;

[0068] S307: 对于实组件 $S-Q$ , 其包含四个节点集 $Q_S(h), Q_S(1), S_Q(h), S_Q(1)$ 和四个边集 $Q_S(h) - S_Q(h), Q_S(h) - S_Q(1), Q_S(1) - S_Q(h), Q_S(1) - S_Q(1)$ ; 依据拓扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ), 分别计算 $Q_S(h), Q_S(1), S_Q(h), S_Q(1)$ 四个集合包含节点数的一次线性拟合函数 $SQ\_n_{qh}(t), SQ\_n_{q1}(t), SQ\_n_{sh}(t)$ 和 $SQ\_n_{s1}(t)$ ; 对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{S-Q} (=30)$ , 计算度偏好连接拟合函数 $SQ\_p_{cs}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一条 $Q_S(h) - S_Q(1)$ 边连接度为 $d$ 的 $S_Q(1)$ 节点的概率; 对于 $Q_S(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度偏好连接拟合函数 $SQ\_p_{cq}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一条 $Q_S(1) - S_Q(h)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_S(1)$ 节点的概率; 对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d_2=1, 2, \dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度偏好连接拟合函数 $SQ\_p_s(d_2)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一条 $Q_S(1) - S_Q(1)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $S_Q(1)$ 节点的概率; 调用节点分类与排序方法将 $Q_S(h)$ 中全部节点分类至 $c=10$ 个相互交集为空且有序排列的节点集 $L_{q1}, L_{q2}, \dots, L_{qc}$ , 并将 $S_Q(h)$ 中全部节点分类至 $c=10$ 个相互交集为空且有序排列的节点集 $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{sc}$ , 对于任意序号对 $(r_1, r_2)$ , 其中 $1 \leq r_1, r_2 \leq c$ , 计算序号对分布拟合函数 $SQ\_p_{rd}(r_1, r_2)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一条 $Q_S(h) - S_Q(h)$ 边的两个端点属于节点集 $L_{qr_1}$ 和节点集 $L_{sr_2}$ 的概率; 对于 $Q_S(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度分布拟合函数 $SQ\_p_{dq}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一个 $Q_S(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率; 对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{S-Q}$ , 计算度分布拟合函数 $SQ\_p_{ds}(d)$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一个 $S_Q(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率; 将 $Q_S(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设 $n_{qi}$ 为其中第 $i$ 个节点, 计算一次线性拟合函数 $f_{qi}(t) = m_{qi} \cdot t + b_{qi}$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中节点 $n_{qi}$ 的度, 然后对于 $Q_S(h)$ 中节点排列的序号 $i=1, 2, \dots, SQ\_n_{qh}(t)$ , 计算参数 $m_{qi}$ 的拟合函数 $SQ\_m_q(i)$ , 其表示 $Q_S(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{qi}(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_{qi}$ 的拟合函数 $SQ\_b_q(i)$ , 其表示 $Q_S(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{qi}(t)$ 的截距; 将 $S_Q(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列, 设 $n_{si}$ 为其中第 $i$ 个节点, 计算一次线性拟合函数 $f_{si}(t) = m_{si} \cdot t + b_{si}$ , 其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中节点 $n_{si}$ 的度, 然后对于 $S_Q(h)$ 中节点排列的序号 $i=1, 2, \dots, SQ\_n_{sh}(t)$ , 计算参数 $m_{si}$ 的拟合函数 $SQ\_m_s(i)$ , 其表示 $S_Q(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{si}(t)$ 的斜率, 并计算参数 $b_{si}$ 的拟合函数 $SQ\_b_s(i)$ , 其表示 $S_Q(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{si}(t)$ 的截距;

[0069] 上述 $SQ\_n_{qh}(t), SQ\_n_{q1}(t), SQ\_n_{sh}(t), SQ\_n_{s1}(t), SQ\_p_{cs}(d), SQ\_p_{cq}(d), SQ\_p_s(d_2), SQ\_p_{rd}(r_1, r_2), SQ\_p_{dq}(d), SQ\_p_{ds}(d), SQ\_m_q(i), SQ\_b_q(i), SQ\_m_s(i)$ 和 $SQ\_b_s(i)$ 为提取的拓

扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ) 中实组件S-Q的稳定特征参数;

[0070] S308:对于任意一个虚组件,由拓扑结构分解方法知,其可以表示为二分图 $G_{A-B} = (A, B, E_{A-B})$ ,其中 $E_{A-B} = \{(a, b) \mid a \in A \wedge b \in B \wedge a \text{和} b \text{是网络拓扑图} G \text{中的同一个节点}\}$ ;调用混合节点分类与排序方法(输入参数 $c=10, d=10$ )将A中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集 $L_1^a, L_2^a, \dots, L_{c+d}^a$ ,并将B中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集 $L_1^b, L_2^b, \dots, L_{c+d}^b$ ,然后依据拓扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ ),对于任意序号对 $(r_1, r_2)$ ,其中 $1 \leq r_1, r_2 \leq c+d$ ,计算序号对分布拟合函数 $AB\_p_{rd}(r_1, r_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的虚组件二分图 $G_{A-B}$ 中一条边的两个端点属于节点集 $L_{a,r_1}$ 和节点集 $L_{b,r_2}$ 的概率;

[0071] 上述 $AB\_p_{rd}(r_1, r_2)$ 为提取的拓扑图序列 $G_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ )中虚组件A-B的稳定特征参数;其中虚组件A-B的八个实例为 $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ 、 $Q_p(h), Q_p(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $K_Q(1) - K_S(1)$ 、 $Q_i(h), Q_i(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_j(h), Q_j(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_k(h), Q_k(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $S_Q(h), S_Q(1) - S_K(h), S_K(1)$ 和 $Q_s(h), Q_s(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 。

[0072] 进一步地,度对排序方法包括以下步骤:

[0073] 输入:节点度的上界(最大值) $U_b$ ;

[0074] 输出:按照特定顺序排列的节点度对列表DPL;

[0075] ZS101:初始化 $len \leftarrow 2$ 和 $DPL \leftarrow \Phi$ ;其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

[0076] ZS102:如果 $len \leq 2 \cdot U_b$ ,则初始化 $k_1 \leftarrow 1$ 且 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转ZS103;否则,终止运算;

[0077] ZS103:如果 $k_1 \leq k_2 \wedge k_1 \leq U_b \wedge k_2 \leq U_b$ ,则将度对 $(k_1, k_2)$ 添加到度对列表DPL的尾部,并更新 $k_1 \leftarrow k_1 + 1$ 和 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转ZS103;否则,转ZS104;

[0078] ZS104:更新 $len \leftarrow len + 1$ ,并转ZS102。

[0079] 进一步地,节点分类与排序方法包括以下步骤:

[0080] 输入:节点序列 $1, 2, \dots, n$ 和它们的度 $d_1, d_2, \dots, d_n$ ,分类数 $c, n$ 为节点数量;

[0081] 输出:按照特定顺序排列的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ ;

[0082] ZS201:对任意 $j=1, 2, \dots, c$ 初始化 $L_j \leftarrow \Phi$ ,并将节点 $1, 2, \dots, n$ 按照度从大到小的顺序排列;不失一般性,假设 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n$ ,转ZS202,其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

[0083] ZS202:如果 $n < c$ ,则对任意 $j=1, 2, \dots, n$ 更新 $L_j \leftarrow \{j\}$ ;否则,计算 $r = n/c$ ,初始化分类 $L_1 \leftarrow \{1, 2, \dots, \text{round}(r)\}$ ,并对任意 $j=2, 3, \dots, c$ 更新 $L_j \leftarrow \{\max(L_{j-1}) + 1, \max(L_{j-1}) + 2, \dots, \text{round}(j \times r)\}$ ,其中 $\max$ 表示取集合中最大值。

[0084] 进一步地,混合节点分类与排序方法为:

[0085] 输入:节点集X,节点集X所在的实组件 $G(X)$ ,任意节点 $x \in X$ 在实组件 $G(X)$ 的度 $d_{G(X)}(x)$ ,度阈值 $d$ ,分类数 $c$ ;

[0086] 输出:按照特定顺序排列的节点分类列表L;

[0087] ZS301.将X分解为两个子集 $X_H = \{x \mid x \in X \wedge d_{G(X)}(x) \geq d\}$ 和 $X_N = \{x \mid x \in X \wedge d_{G(X)}(x) < d\}$ ;

[0088] ZS302.调用节点分类与排序方法生成节点集 $X_H$ 的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ ;

[0089] ZS303. 初始化 $k \leftarrow d$ 和 $i \leftarrow 1$ , 并转ZS304;

[0090] ZS304. 如果 $k \geq 1$ , 则计算节点集 $S = \{x \mid x \in X_N \wedge d_{G(x)}(x) = k\}$ , 并将S赋值给第 $c+i$ 个节点分类 $L_{c+i}$ , 同时更新 $k \leftarrow k-1$ 和 $i \leftarrow i+1$ 后转ZS304; 否则, 转ZS305;

[0091] ZS305. 更新 $L \leftarrow L_1, L_2, \dots, L_c, L_{c+1}, \dots, L_{c+d}$ 。

[0092] 优选地, 将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件应用于路由器、交换机、物联网节点的路由表。

[0093] 本发明还提供了基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统, 所述系统包括: 存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序, 所述处理器执行所述计算机程序运行在以下系统的单元中:

[0094] 拓扑数据输入单元, 用于输入网络拓扑数据;

[0095] 网络拓扑分解单元, 用于通过静态拓扑分解方法将网络拓扑数据依次分解为十六个实虚组件;

[0096] 特征参数抽取单元, 用于通过特征参数抽取方法将十六个实虚组件中相应的组件, 在特征参数抽取方法中采用线性拟合方法对真实拓扑图序列对应的组件序列进行数据拟合, 生成特征参数拟合数据;

[0097] 组件特征参数输出单元, 用于将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件输出。

[0098] 本公开的有益效果为: 通过AS级互联网拓扑结构十六个实/虚组件的细粒度分解, 能够捕获互联网数十年发展历程的稳定特征参数, 从而为互联网拓扑在过去、当前和未来状态的精确仿真提供更精细的特征参数配置功能。

## 附图说明

[0099] 通过对结合附图所示出的实施方式进行详细说明, 本公开的上述以及其他特征将更加明显, 本公开附图中相同的参考标号表示相同或相似的元素, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本公开的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图, 在附图中:

[0100] 图1所示为AS级互联网拓扑静态分解结构图;

[0101] 图2所示为AS级互联网拓扑静态分解结构扩展图;

[0102] 图3所示为本公开实施方式的基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统结构图。

## 具体实施方式

[0103] 以下将结合实施例和附图对本公开的构思、具体结构及产生的技术效果进行清楚、完整的描述, 以充分地理解本公开的目的、方案和效果。需要说明的是, 在不冲突的情况下, 本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0104] 图1和图2的组合为本公开的技术方案“1. AS级网络拓扑结构分解方法”涉及的AS级互联网拓扑静态分解结构。其中, 图1包含三个实组件 $Q_{cor}$ 、 $Q_{bip}$ 、P-Q和两个虚组件 $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ 、 $Q_P(h), Q_P(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ ; 图2包含五个实组件I-Q、J~Q、K-Q、K~S、S-Q和六个虚组件 $S_Q(h), S_Q(l) - S_K(h), S_K(l)$ 、

$Q_I(h), Q_I(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_J(h), Q_J(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_K(h), Q_K(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), K_Q$   
 (1) - $K_S(1), Q_S(h), Q_S(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 。

[0105] 本公开提出基于结构模型的互联网拓扑特征提取方法,具体包括以下步骤:

[0106] 1. AS级网络拓扑结构分解方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0107] 输入:互联网的网络静态拓扑 $G = (V, E)$ ,其中节点集 $V$ 为特定时刻探测获得真实互联网中自治系统AS域的集合,边集 $E$ 为该互联网中不同AS域之间通信链路的集合;度阈值 $d_{low}^{tra} = 10$ ;度阈值 $d_{high}^{cor} = 100$ ;度阈值 $d_{low}^{s-Q} = 30$ 。

[0108] 输出:八个实组件(内核组件 $Q_{cor}$ 和外围组件 $Q_{bip}, P-Q, I-Q, J \sim Q, K-Q, K \sim S$ 和 $S-Q$ );八个虚组件( $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_P(h), Q_P(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_I(h), Q_I(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_J(h), Q_J(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), Q_K(h), Q_K(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l), K_Q(1) - K_S(1), S_Q(h), S_Q(1) - S_K(h), S_K(1)$ 和 $Q_S(h), Q_S(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ )。

[0109] 步骤1. 计算节点集

$$\begin{aligned}
 P &= \{v \in V \mid d_G(v) = 1\} \\
 Q &= \{v \in V \mid \exists w, (v, w) \in E, w \in P\} \\
 K &= \{v \in V_I \mid d_{G_I}(v) = 1 \wedge \forall (v, w) \in E_I, d_{G_I}(w) > 1\} \\
 S &= \{v \in V_I \mid \exists w, (v, w) \in E_I, w \in K\} \\
 I &= \{v \in V_I \mid d_{G_I}(v) = 0\} \\
 J &= \{v \in V_I \mid d_{G_I}(v) = 1 \wedge \forall (v, w) \in E_I, d_{G_I}(w) = 1\}
 \end{aligned}$$

[0111] 其中 $d_G(v)$ 和 $d_{G_I}(v)$ 分别为网络拓扑图 $G$ 及其子图 $G_I$ 中节点 $v$ 的度,且 $G_I = (V_I, E_I)$ 是由图 $G$ 中节点集 $V \setminus (P \cup Q)$ 和这些节点之间的边构成的子图, $V_I$ 和 $E_I$ 分别是节点集和边集。

[0112] 步骤2. 计算节点集

$$\begin{aligned}
 Q_{bip}^B(l) &= \{v \mid v \in Q \wedge d_Q(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \quad Q_{bip}^U = Q / Q_{bip}^B(l) \\
 Q_{red}^B(l) &= \{v \mid v \in Q_{bip}^B(l) \wedge \exists w \in Q_{bip}^B(l), (v, w) \in E\}
 \end{aligned}$$

[0114] 其中 $d_Q(v)$ 为由图 $G$ 中节点集 $Q$ 和这些节点之间的边构成的子图中节点 $v$ 的度。

[0115] 步骤3. 生成子图 $Q_{bip}$ ,其是图 $G$ 中两个边集

$$\begin{aligned}
 Q_{bip}^B(l) - Q_{bip}^U &= \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U\} \\
 Q_{red}^B(l) - Q_{red}^B(l) &= \{(v, w) \mid (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{red}^B(l)\}
 \end{aligned}$$

[0117] 以及这些边连接的节点构成的子图( $Q_{bip}$ 是一个输出的外围组件)。

[0118] 步骤4. 计算节点集

$$\begin{aligned}
 Q_{bip}^U(l) &= \{v \mid v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{bip}}(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \\
 Q_{bip}^U(h) &= Q_{bip}^U / Q_{bip}^U(l)
 \end{aligned}$$

[0120] 其中 $d_{Q_{bip}}(v)$ 为子图 $Q_{bip}$ 中节点 $v$ 的度。将子图 $Q_{bip}$ 中的边集划分为三类,即 $Q_{red}^B(l) - Q_{red}^B(l)$ 和

$$[0121] \quad \begin{aligned} Q_{bip}^U(h) - Q_{bip}^B(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U(h)\} \\ Q_{bip}^U(l) - Q_{bip}^B(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{bip}^B(l) \wedge w \in Q_{bip}^U(l)\} \circ \end{aligned}$$

[0122] 步骤5.生成子图 $Q_{cor}$ ,其是图G中节点集 $Q_{bip}^U$ 和这些节点之间的边构成的子图( $Q_{cor}$ 是一个输出的内核组件)。计算节点集

$$[0123] \quad \begin{aligned} Q_{cor}^U(l) &= \{v | v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \leq d_{low}^{tra}\} \\ Q_{cor}^U(h) &= \{v | v \in Q_{bip}^U \wedge d_{Q_{cor}}(v) \geq d_{high}^{cor}\} \\ Q_{cor}^U(m) &= Q_{bip}^U / (Q_{cor}^U(l) \cup Q_{cor}^U(h)) \quad , \\ Q_{cor}^U(m, l) &= Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l) \\ Q_{cor}^U(h, m, l) &= Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l) \end{aligned}$$

[0124] 其中 $d_{Q_{cor}}(v)$ 为子图 $Q_{cor}$ 中节点v的度,h、m、l均为与上下表等同的标记,即节点标记。将子图 $Q_{cor}$ 中的边集划分为三类,即

$$[0125] \quad \begin{aligned} Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(h) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(h)\} \\ Q_{cor}^U(h) - Q_{cor}^U(m, l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_{cor}^U(h) \wedge w \in Q_{cor}^U(m, l)\} \circ \\ Q_{cor}^U(m, l) - Q_{cor}^U(m, l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in Q_{cor}^U(m, l)\} \end{aligned}$$

[0126] 步骤6.采用X-Y(其中 $X \in \{P, I, J, K\}$ 且 $Y \in \{S, Q\}$ )表示五个子图P-Q、I-Q、J-Q、K-Q和K-S。这五个子图的生成方法相同,即子图X-Y的生成:子图X-Y是图G中边集

$$[0127] \quad Y_X - X_Y(l) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X \wedge w \in X_Y(l)\}$$

[0128] 以及这些边连接的节点构成的子图。其中节点集

$$[0129] \quad Y_X = \{v | v \in Y \wedge \exists w \in X, (v, w) \in E\}, \quad X_Y(l) = X \circ$$

[0130] 计算节点集

$$[0131] \quad Y_X(l) = \{v | v \in Y_X \wedge d_{X-Y}(v) \leq d_{low}^{tra}\}, \quad Y_X(h) = Y_X / Y_X(l),$$

[0132] 其中 $d_{X-Y}(v)$ 为子图X-Y中节点v的度。将子图X-Y中的边集划分为两类,即

$$[0133] \quad \begin{aligned} Y_X(h) - X_Y(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(h) \wedge w \in X_Y(l)\} \\ Y_X(l) - X_Y(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Y_X(l) \wedge w \in X_Y(l)\} \circ \end{aligned}$$

[0134] 计算边集和节点集

$$[0135] \quad \begin{aligned} J_J(l) - J_J(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in J\} \\ S_S &= \{v | v \in S \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad S_S(h) = S_S \cap S_K(h), \quad S_S(l) = S_S \cap S_K(l) \\ S_S(h) - S_S(h) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(h)\} \quad \circ \\ S_S(h) - S_S(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in S_S(h) \wedge w \in S_S(l)\} \\ S_S(l) - S_S(l) &= \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v, w \in S_S(l)\} \end{aligned}$$

[0136] 生成子图 $J \sim Q$ ,其为边集 $J_J(l) - J_J(l)$ 和子图J-Q的并集。

[0137] 生成子图 $K \sim S$ ,其为边集 $S_S(h) - S_S(h)$ ,  $S_S(h) - S_S(l)$ ,  $S_S(l) - S_S(l)$ 和子图K-S的并集。

[0138] P-Q、I-Q、J $\sim$ Q、K-Q和K $\sim$ S是五个输出的外围组件。

[0139] 步骤7.生成子图S-Q,其是图G中边集 $\{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in S \wedge w \in Q\}$ 以及这些边

连接的节点构成的子图(S-Q是一个输出的外围组件)。计算节点集和边集

$$[0140] \quad Q_S = \{v | v \in Q \wedge \exists w \in S, (v, w) \in E\}, \quad Q_S(I) = \{v | v \in Q_S \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad Q_S(h) = Q_S / Q_S(I)$$

$$S_Q = \{v | v \in S \wedge \exists w \in Q, (v, w) \in E\}, \quad S_Q(I) = \{v | v \in S_Q \wedge d_{S-Q}(v) \leq d_{low}^{S-Q}\}, \quad S_Q(h) = S_Q / S_Q(I)$$

$$[0141] \quad Q_S(h) - S_Q(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(h) - S_Q(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(h) \wedge w \in S_Q(I)\}$$

$$Q_S(I) - S_Q(h) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(I) \wedge w \in S_Q(h)\}, \quad Q_S(I) - S_Q(I) = \{(v, w) | (v, w) \in E \wedge v \in Q_S(I) \wedge w \in S_Q(I)\}$$

[0142] 将子图S-Q中的边集划分为四类,即 $Q_S(h) - S_Q(h)$ ,  $Q_S(h) - S_Q(I)$ ,  $Q_S(I) - S_Q(h)$ 和 $Q_S(I) - S_Q(I)$ 。

[0143] 步骤8. 设 $A = Q_{bip}^U(h, l) = Q_{bip}^U(h) \cup Q_{bip}^U(l)$ 且 $B = Q_{cor}^U(h, m, l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$ ;其中,A是图1中实组件 $Q_{bip}$ 的节点集且B是图1中实组件 $Q_{cor}$ 的节点集。为了精确地建立 $Q_{bip}$ 与 $Q_{cor}$ 之间的关联性,按照以下方式生成虚组件 $Q_{bip}^U(h, l) - Q_{cor}^U(h, m, l)$ :生成二分图 $G_{A-B} = (A, B, E_{A-B})$ ,其中 $E_{A-B} = \{(a, b) | a \in A \wedge b \in B \wedge a$ 和 $b$ 是网络拓扑图G中的同一个节点}。

[0144] 采用相同的方法生成图1和2中其它七个虚组件 $K_Q(1) - K_S(1)$ 、 $Q_P(h), Q_P(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、

$Q_I(h), Q_I(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_J(h), Q_J(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_K(h), Q_K(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 、 $S_Q(h), S_Q(1) - S_K(h), S_K(1)$ 和 $Q_S(h), Q_S(l) - Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l)$ 。其中

$$Q_{cor}^U(h, m, l), Q_{bip}^B(l) = Q_{cor}^U(h) \cup Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l) \cup Q_{bip}^B(l)$$

$$[0145] \quad Q_X(h), Q_X(l) = Q_X(h) \cup Q_X(l), \quad X \in \{P, I, J, K\}$$

$$S_Y(h), S_Y(l) = S_Y(h) \cup S_Y(l), \quad Y \in \{Q, K\}$$

[0146] 附图1和2给出了本公开输出的网络拓扑八个实组件和八个虚组件的结构图。

[0147] 2. 度对排序方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0148] 输入:节点度的上界(最大值) $U_b$ 。

[0149] 输出:按照特定顺序排列的节点度对列表DPL。

[0150] 步骤1. 初始化 $len \leftarrow 2$ 和 $DPL \leftarrow \Phi$ ,  $\Phi$ 为空集。其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

[0151] 步骤2. 如果 $len \leq 2 \cdot U_b$ ,则初始化 $k_1 \leftarrow 1$ 且 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转步骤3;否则,终止运算。

[0152] 步骤3. 如果 $k_1 \leq k_2 \wedge k_1 \leq U_b \wedge k_2 \leq U_b$ ,则将度对 $(k_1, k_2)$ 添加到度对列表DPL的尾部,并更新 $k_1 \leftarrow k_1 + 1$ 和 $k_2 \leftarrow len - k_1$ ,转步骤3;否则,转步骤4。

[0153] 步骤4. 更新 $len \leftarrow len + 1$ ,并转步骤2。

[0154] 度对排序方法将被“5. AS级互联网演化拓扑图序列稳定特征提取方法”调用。

[0155] 3. 节点分类与排序方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0156] 输入:节点序列 $1, 2, \dots, n$ 和它们的度 $d_1, d_2, \dots, d_n$ ,分类数 $c$ 。

[0157] 输出:按照特定顺序排列的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ 。

[0158] 步骤1. 对任意 $j = 1, 2, \dots, c$ 初始化 $L_j \leftarrow \Phi$ ,并将节点 $1, 2, \dots, n$ 按照度从大到小的顺序排列, $\Phi$ 为空集。不失一般性,假设 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n$ 。转步骤2。其中, $\Phi$ 表示空集; $\leftarrow$ 表示将右边的值赋值给左边的变量;

[0159] 步骤2. 如果 $n < c$ ,则对任意 $j = 1, 2, \dots, n$ 更新 $L_j \leftarrow \{j\}$ ;否则,计算 $r = n / c$ ,初始化分

类 $L_1 \leftarrow \{1, 2, \dots, \text{round}(r)\}$ , 其中 $\text{round}(r)$ 表示对 $r$ 四舍五入取整数, 并对任意 $j=2, 3, \dots, c$ 更新 $L_j \leftarrow \{\max(L_{j-1})+1, \max(L_{j-1})+2, \dots, \text{round}(j \times r)\}$ , 其中 $\max$ 表示取集合中最大值。

[0160] 节点分类与排序方法将被“4.混合节点分类与排序方法”和“5.AS级互联网演化拓扑图序列稳定特征提取方法”调用。

[0161] 4.混合节点分类与排序方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0162] 输入:节点集 $X$ ,节点集 $X$ 所在的实组件 $G(X)$ ,任意节点 $x \in X$ 在实组件 $G(X)$ 的度 $d_{G(X)}(x)$ ,度阈值 $d$ ,分类数 $c$ 。

[0163] 输出:按照特定顺序排列的节点分类列表 $L$ 。

[0164] 步骤1.将 $X$ 分解为两个子集 $X_H = \{x | x \in X \wedge d_{G(X)}(x) \geq d\}$ 和 $X_N = \{x | x \in X \wedge d_{G(X)}(x) < d\}$ 。

[0165] 步骤2.调用“3.节点分类与排序方法”生成节点集 $X_H$ 的节点分类序列 $L_1, L_2, \dots, L_c$ 。

[0166] 步骤3.初始化 $k \leftarrow d$ 和 $i \leftarrow 1$ ,并转步骤4。

[0167] 步骤4.如果 $k \geq 1$ ,则计算节点集 $S = \{x | x \in X_N \wedge d_{G(X)}(x) = k\}$ ,并将 $S$ 赋值给第 $c+i$ 个节点分类 $L_{c+i}$ ,同时更新 $k \leftarrow k-1$ 和 $i \leftarrow i+1$ 后转步骤4;否则,转步骤5。

[0168] 步骤5.更新 $L \leftarrow L_1, L_2, \dots, L_c, L_{c+1}, \dots, L_{c+d}$ 。

[0169] 混合节点分类与排序方法将被“5.AS级互联网演化拓扑图序列稳定特征提取方法”调用。

[0170] 5.AS级互联网演化拓扑图序列稳定特征提取方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

[0171] 输入:互联网演化拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ ,其中 $G_t (1 \leq t \leq T)$ 表示从起始月开始(例如2001年1月)第 $t$ 个月探测得到的拓扑图。

[0172] 输出:演化拓扑图序列的稳定特征参数。

[0173] 步骤1.调用“1.AS级网络拓扑结构分解方法”依次将演化拓扑图序列 $G_1, G_2, \dots, G_T$ 分解为八个实组件和八个虚组件,其中每个组件可被进一步分解为若干节点集和边集,具体分解方法详见附图1,2和“1.AS级网络拓扑结构分解方法”。

[0174] 步骤2.对于实组件 $Q_{cor}$ ,其包含三个节点集 $Q_{cor}^U(h), Q_{cor}^U(m), Q_{cor}^U(l)$ 和三个边集 $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(h), Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(m,l), Q_{cor}^U(m,l)-Q_{cor}^U(m,l)$ 。依据拓扑图序列 $G_t (t=1, 2, \dots, T)$ ,计算 $Q_{cor}^U(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{cor-n_h}(t)$ , $Q_{cor}^U(m)$ 节点数的二次线性拟合函数 $Q_{cor-n_m}(t)$ 和 $Q_{cor}^U(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{cor-n_l}(t)$ ;对于 $Q_{cor}^U(h)$ 节点按度从大到小顺序排列的序号 $i=1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ ,计算密度曲线拟合函数 $Q_{cor-density}(i)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中前 $i$ 个度最大的 $Q_{cor}^U(h)$ 节点之间的边数与最大可能边数 $i(i-1)/2$ 的比率;对于 $Q_{cor}^U(m,l)=Q_{cor}^U(m) \cup Q_{cor}^U(l)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{high}^{cor}-1 (=99)$ ,计算度偏好连接拟合函数 $Q_{cor-p_c}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中一条 $Q_{cor}^U(h)-Q_{cor}^U(m,l)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_{cor}^U(m,l)$ 节点的概率;对于 $Q_{cor}^U(l)$ 中节点的度 $d=1, 2, \dots, d_{low}^{tra} (=10)$ ,计算度分布拟合函数 $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中一个 $Q_{cor}^U(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $Q_{cor}^U(m)$ 中节点的度 $d=d_{low}^{tra}+1 (=11), d_{low}^{tra}+2, \dots, d_{high}^{cor}-1 (=99)$ ,计算度分布拟合函数 $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组

件 $Q_{cor}$ 中一个 $Q_{cor}^U(m)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Q_{cor}^U(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_i$ 为其中的第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{cor}$ 中节点 $n_i$ 的度,然后对于 $Q_{cor}^U(h)$ 中节点排列的序号 $i = 1, 2, \dots, Q_{cor-n_h}(t)$ ,计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $Q_{cor-m}(i)$ ,其表示 $Q_{cor}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $Q_{cor-b}(i)$ ,其表示 $Q_{cor}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距。

[0175] 上述 $Q_{cor-n_h}(t)$ 、 $Q_{cor-n_m}(t)$ 、 $Q_{cor-n_l}(t)$ 、 $Q_{cor-density}(i)$ 、 $Q_{cor-p_c}(d)$ 、 $Q_{cor-p_{dl}}(d)$ 、 $Q_{cor-p_{dm}}(d)$ 、 $Q_{cor-m}(i)$ 和 $Q_{cor-b}(i)$ 为提取的拓扑图序列 $G_t(t = 1, 2, \dots, T)$ 中实组件 $Q_{cor}$ 的稳定特征参数。

[0176] 步骤3.对于实组件 $Q_{bip}$ ,其包含三个节点集 $Q_{bip}^U(h)$ 、 $Q_{bip}^U(l)$ 、 $Q_{bip}^B(l)$ 和三个边集 $Q_{bip}^U(h) - Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_{bip}^U(l) - Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_{red}^B(l) - Q_{red}^B(l)$ 。依据拓扑图序列 $G_t(t = 1, 2, \dots, T)$ ,计算 $Q_{bip}^U(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{uh}}(t)$ 、 $Q_{bip}^U(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{ul}}(t)$ 和 $Q_{bip}^B(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $Q_{bip-n_{bl}}(t)$ ;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ ,计算度偏好连接拟合函数 $Q_{bip-p_c}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{bip}^U(h) - Q_{bip}^B(l)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d_2 = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}(=10)$ ,计算度偏好连接拟合函数 $Q_{bip-p_s}(d_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{bip}^U(l) - Q_{bip}^B(l)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率;对于 $Q_{bip}^U(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ ,计算度分布拟合函数 $Q_{bip-p_{du}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一个 $Q_{bip}^U(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度 $d = 1, 2, \dots, d_{low}^{tra}$ ,计算度分布拟合函数 $Q_{bip-p_{db}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一个 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Q_{bip}^U(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_i$ 为其中第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_i(t) = m_i \cdot t + b_i$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中节点 $n_i$ 的度,然后对于 $Q_{bip}^U(h)$ 中节点排列的序号 $i = 1, 2, \dots, Q_{bip-n_{uh}}(t)$ ,计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $Q_{bip-m}(i)$ ,其表示 $Q_{bip}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $Q_{bip-b}(i)$ ,其表示 $Q_{bip}^U(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距;调用“2.度对排序方法”将由 $Q_{bip}^B(l)$ 中节点的度构成的所有度对进行排序得到度对排序列表DPL,对于DPL中度对 $(d_1, d_2)$ 的排列序号 $r$ ,计算度对分布拟合函数 $Q_{bip-p_{dpl}}(r)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $Q_{bip}$ 中一条 $Q_{red}^B(l) - Q_{red}^B(l)$ 边连接两个度分别为 $d_1$ 和 $d_2$ 的 $Q_{bip}^B(l)$ 节点的概率。

[0177] 上述 $Q_{bip-n_{uh}}(t)$ 、 $Q_{bip-n_{ul}}(t)$ 、 $Q_{bip-n_{bl}}(t)$ 、 $Q_{bip-p_c}(d)$ 、 $Q_{bip-p_s}(d_2)$ 、 $Q_{bip-p_{du}}(d)$ 、 $Q_{bip-p_{db}}(d)$ 、 $Q_{bip-m}(i)$ 、 $Q_{bip-b}(i)$ 和 $Q_{bip-p_{dpl}}(r)$ 为提取的实组件 $Q_{bip}$ 的稳定特征参数。

[0178] 步骤4.采用X-Y(其中 $X \in \{P, I, J, K\}$ 且 $Y \in \{S, Q\}$ )表示五个子图P-Q、I-Q、J-Q、K-Q和K-S。这五个子图的稳定特征参数提取方法相同,即子图X-Y的提取方法:

[0179] 子图X-Y包含三个节点集 $Y_X(h)$ 、 $Y_X(l)$ 、 $X_Y(l)$ 和两个边集 $Y_X(h) - X_Y(l)$ 、 $Y_X(l) - X_Y(l)$ 。依据拓扑图序列 $G_t(t = 1, 2, \dots, T)$ ,计算 $Y_X(h)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY-n_{yh}(t)$ 、 $Y_X(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY-n_{yl}(t)$ 和 $X_Y(l)$ 节点数的一次线性拟合函数 $XY-n_{xl}(t)$ ;对

于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,30$ ,其中30为 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ 中所有 $X_Y(1)$ 节点的度的上界,计算度偏好连接拟合函数 $XY_{p_c}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图 $X-Y$ 中一条 $Y_X(h)-X_Y(1)$ 边连接度为 $d$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率;对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d_2=1,2,\dots,30$ ,计算度偏好连接拟合函数 $XY_{p_s}(d_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图 $X-Y$ 中一条 $Y_X(1)-X_Y(1)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $X_Y(1)$ 节点的概率;对于 $Y_X(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{tra}(=10)$ ,计算度分布拟合函数 $XY_{p_{dy}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图 $X-Y$ 中一个 $Y_X(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $X_Y(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,30$ ,计算度分布拟合函数 $XY_{p_{dx}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的子图 $X-Y$ 中一个 $X_Y(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Y_X(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_i$ 为其中第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_i(t)=m_i \cdot t+b_i$ ,其表示图 $G_t$ 的子图 $X-Y$ 中节点 $n_i$ 的度,然后对于 $Y_X(h)$ 中节点排列的序号 $i=1,2,\dots$ , $XY_{n_{yh}}(t)$ ,计算参数 $m_i$ 的拟合函数 $XY_m(i)$ ,其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_i$ 的拟合函数 $XY_b(i)$ ,其表示 $Y_X(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_i(t)$ 的截距。

[0180] 上述 $XY_{n_{yh}}(t)$ 、 $XY_{n_{yl}}(t)$ 、 $XY_{n_{xl}}(t)$ 、 $XY_{p_c}(d)$ 、 $XY_{p_s}(d_2)$ 、 $XY_{p_{dy}}(d)$ 、 $XY_{p_{dx}}(d)$ 、 $XY_m(i)$ 和 $XY_b(i)$ 为提取的演化拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ 中子图 $X-Y$ 的稳定特征参数。其中P-Q、I-Q和K-Q为互联网拓扑结构的三个实组件。

[0181] 步骤5.对于实组件 $J\sim Q$ ,其包含子图 $J-Q$ 和边集 $J_J(1)-J_J(1)$ 两部分。设 $d_{J-Q}(v)$ 为节点 $v$ 在子图 $J-Q$ 的度,调用“2.度对排序方法”将满足 $v_1, v_2 \in J$ 且 $d_{J-Q}(v_1) \leq d_{J-Q}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 进行排序得到度对排序列表DPL,依据拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ ,对于DPL中度对 $(d_{J-Q}(v_1), d_{J-Q}(v_2))$ 的排列序号 $r$ ,计算度对分布拟合函数 $JQ_{p_{dpl}}(r)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $J_J(1)-J_J(1)$ 边连接子图 $J-Q$ 中两个度分别为 $d_{J-Q}(v_1)$ 和 $d_{J-Q}(v_2)$ 的属于集合 $J$ 的节点的概率。

[0182] 上述 $JQ_{p_{dpl}}(r)$ 和子图 $J-Q$ 的特征参数共同构成了实组件 $J\sim Q$ 的稳定特征参数。

[0183] 步骤6.对于实组件 $K\sim S$ ,其包含子图 $K-S$ 和三个边集 $S_S(h)-S_S(h)$ 、 $S_S(h)-S_S(1)$ 、 $S_S(1)-S_S(1)$ 。设 $d_{K-S}(v)$ 为节点 $v$ 在子图 $K-S$ 的度,调用“2.度对排序方法”将满足 $v_1, v_2 \in S$ 且 $d_{K-S}(v_1) \leq d_{K-S}(v_2)$ 的所有度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 进行排序得到度对列表DPL,依据拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ ,对于DPL中度对 $(d_{K-S}(v_1), d_{K-S}(v_2))$ 的排列序号 $r$ ,计算度对分布拟合函数 $KS_{p_{dpl}}(r)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(1)-S_S(1)$ 边连接子图 $K-S$ 中两个度分别为 $d_{K-S}(v_1)$ 和 $d_{K-S}(v_2)$ 的属于集合 $S_K(1)$ 的节点的概率(其中 $S_K(1)$ 为子图 $K-S$ 的一个节点集);依据拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ ,对于 $S_K(1)$ 中节点在子图 $K-S$ 中的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{tra}(=10)$ ,计算度偏好连接拟合函数 $KS_{p_{cl}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 中一条 $S_S(h)-S_S(1)$ 边连接子图 $K-S$ 中度为 $d$ 的 $S_K(1)$ 节点的概率。

[0184] 上述 $KS_{p_{dpl}}(r)$ 、 $KS_{p_{cl}}(d)$ 和子图 $K-S$ 的特征参数共同构成了实组件 $K\sim S$ 的稳定特征参数。

[0185] 步骤7.对于实组件 $S-Q$ ,其包含四个节点集 $Q_S(h)$ 、 $Q_S(1)$ 、 $S_Q(h)$ 、 $S_Q(1)$ 和四个边集 $Q_S(h)-S_Q(h)$ 、 $Q_S(h)-S_Q(1)$ 、 $Q_S(1)-S_Q(h)$ 、 $Q_S(1)-S_Q(1)$ 。依据拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ ,分别计算 $Q_S(h)$ 、 $Q_S(1)$ 、 $S_Q(h)$ 、 $S_Q(1)$ 四个集合包含节点数的一次线性拟合函数 $SQ_{n_{qh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{q1}}(t)$ 、 $SQ_{n_{sh}}(t)$ 和 $SQ_{n_{s1}}(t)$ ;对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{S-Q}(=30)$ ,计算度偏好连接拟合函数 $SQ_{p_{cs}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件 $S-Q$ 中一条 $Q_S(h)-S_Q(1)$ 边连接度为 $d$ 的 $S_Q(1)$ 节点的

概率;对于 $Q_S(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{S-Q}$ ,计算度偏好连接拟合函数 $SQ_{p_{c_q}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中一条 $Q_S(1)-S_Q(h)$ 边连接度为 $d$ 的 $Q_S(1)$ 节点的概率;对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d_2=1,2,\dots,d_{low}^{S-Q}$ ,计算度偏好连接拟合函数 $SQ_{p_s}(d_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中一条 $Q_S(1)-S_Q(1)$ 边连接度为 $d_2$ 的 $S_Q(1)$ 节点的概率;调用“3.节点分类与排序方法”将 $Q_S(h)$ 中全部节点分类至 $c=10$ 个相互交集为空且有序排列的节点集 $L_{q_1},L_{q_2},\dots,L_{q_c}$ ,并将 $S_Q(h)$ 中全部节点分类至 $c=10$ 个相互交集为空且有序排列的节点集 $L_{s_1},L_{s_2},\dots,L_{s_c}$ ,对于任意序号对 $(r_1,r_2)$ ,其中 $1\leq r_1,r_2\leq c$ ,计算序号对分布拟合函数 $SQ_{p_{rd}}(r_1,r_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中一条 $Q_S(h)-S_Q(h)$ 边的两个端点属于节点集 $L_{q_{r_1}}$ 和节点集 $L_{s_{r_2}}$ 的概率;对于 $Q_S(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{S-Q}$ ,计算度分布拟合函数 $SQ_{p_{dq}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中一个 $Q_S(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;对于 $S_Q(1)$ 中节点的度 $d=1,2,\dots,d_{low}^{S-Q}$ ,计算度分布拟合函数 $SQ_{p_{ds}}(d)$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中一个 $S_Q(1)$ 节点的度为 $d$ 的概率;将 $Q_S(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_{qi}$ 为其中第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_{qi}(t)=m_{qi}\cdot t+b_{qi}$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中节点 $n_{qi}$ 的度,然后对于 $Q_S(h)$ 中节点排列的序号 $i=1,2,\dots,SQ_{n_{qh}}(t)$ ,计算参数 $m_{qi}$ 的拟合函数 $SQ_{m_q}(i)$ ,其表示 $Q_S(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{qi}(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_{qi}$ 的拟合函数 $SQ_{b_q}(i)$ ,其表示 $Q_S(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{qi}(t)$ 的截距;将 $S_Q(h)$ 中节点按照它们的度从大到小的顺序排列,设 $n_{si}$ 为其中第 $i$ 个节点,计算一次线性拟合函数 $f_{si}(t)=m_{si}\cdot t+b_{si}$ ,其表示图 $G_t$ 的实组件S-Q中节点 $n_{si}$ 的度,然后对于 $S_Q(h)$ 中节点排列的序号 $i=1,2,\dots,SQ_{n_{sh}}(t)$ ,计算参数 $m_{si}$ 的拟合函数 $SQ_{m_s}(i)$ ,其表示 $S_Q(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{si}(t)$ 的斜率,并计算参数 $b_{si}$ 的拟合函数 $SQ_{b_s}(i)$ ,其表示 $S_Q(h)$ 中排列位置为 $i$ 的节点的度的一次线性拟合函数 $f_{si}(t)$ 的截距。

[0186] 上述 $SQ_{n_{qh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{q1}}(t)$ 、 $SQ_{n_{sh}}(t)$ 、 $SQ_{n_{s1}}(t)$ 、 $SQ_{p_{cs}}(d)$ 、 $SQ_{p_{c_q}}(d)$ 、 $SQ_{p_s}(d_2)$ 、 $SQ_{p_{rd}}(r_1,r_2)$ 、 $SQ_{p_{dq}}(d)$ 、 $SQ_{p_{ds}}(d)$ 、 $SQ_{m_q}(i)$ 、 $SQ_{b_q}(i)$ 、 $SQ_{m_s}(i)$ 和 $SQ_{b_s}(i)$ 为提取的拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ 中实组件S-Q的稳定特征参数。

[0187] 步骤8.对于任意一个虚组件,由“1.AS级网络拓扑结构分解方法”知,其可以表示为二分图 $G_{A-B}=(A,B,E_{A-B})$ ,其中 $E_{A-B}=\{(a,b)|a\in A\wedge b\in B\wedge a$ 和 $b$ 是网络拓扑图 $G$ 中的同一个节点 $\}$ 。调用“4.混合节点分类与排序方法”(输入参数 $c=10,d=10$ )将 $A$ 中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集 $L_1^a,L_2^a,\dots,L_{c+d}^a$ ,并将 $B$ 中全部节点分类至相互交集为空且有序排列的节点集 $L_1^b,L_2^b,\dots,L_{c+d}^b$ ,然后依据拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ ,对于任意序号对 $(r_1,r_2)$ ,其中 $1\leq r_1,r_2\leq c+d$ ,计算序号对分布拟合函数 $AB_{p_{rd}}(r_1,r_2)$ ,其表示图 $G_t$ 的虚组件二分图 $G_{A-B}$ 中一条边的两个端点属于节点集 $L_{a,r_1}$ 和节点集 $L_{b,r_2}$ 的概率。

[0188] 上述 $AB_{p_{rd}}(r_1,r_2)$ 为提取的拓扑图序列 $G_t(t=1,2,\dots,T)$ 中虚组件A-B的稳定特征参数。其中虚组件A-B的八个实例为 $Q_{bip}^U(h,l)-Q_{cor}^U(h,m,l)$ 、 $Q_P(h),Q_P(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $K_Q(1)-K_S(1)$ 、 $Q_i(h),Q_i(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_j(h),Q_j(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $Q_k(h),Q_k(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 、 $S_Q(h),S_Q(1)-S_K(h),S_K(1)$ 和 $Q_S(h),Q_S(l)-Q_{cor}^U(h,m,l),Q_{bip}^B(l)$ 。

[0189] 优选地,将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件应用于路由器、交换机、物

联网节点的路由表。

[0190] 在一个实施例中,仿真生成从10,000到50,000不等节点数量的AS级互联网拓扑结构,通过真实网络与仿真拓扑的对比,本公开方法能够比传统仿真工具Inet-3.0、ORBIS和S-BITE等在全局统计属性(度分布、直径、聚类)和局部结构属性(十六个组件分解)上更精确地表征真实互联网拓扑结构。Inet-3.0、ORBIS和S-BITE仿真工具文献为:

[0191] [1]Winick J,Jamin S.Inet-3.0:Internet topology generator.Technical Report,University of Michigan,2002.

[0192] [2]Mahadevan P,Hubble C,Krioukov D,et al.Orbis:rescaling degree correlations to generate annotated internet topologies.ACM SIGCOMM Computer Communication Review.ACM,2007,37(4):325-336.

[0193] [3]Accongiagioco G,Gregori E,Lenzini L.S-BITE:AStructure-Based Internet Topology generator.Computer Networks,2015,77:73-89.

[0194] 本公开的实施例提供的基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统,如图3所示为本公开的基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统结构图,该实施例的基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统包括:处理器、存储器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现上述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统实施例中的步骤。

[0195] 所述系统包括:存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序运行在以下系统的单元中:

[0196] 拓扑数据输入单元,用于输入网络拓扑数据;

[0197] 网络拓扑分解单元,用于通过静态拓扑分解方法将网络拓扑数据依次分解为十六个实虚组件;

[0198] 特征参数抽取单元,用于通过特征参数抽取方法将十六个实虚组件中相应的组件,在特征参数抽取方法中采用线性拟合方法对真实拓扑图序列对应的组件序列进行数据拟合,生成特征参数拟合数据;

[0199] 组件特征参数输出单元,用于将各个组件的特征参数拟合数据作为配置文件输出。

[0200] 所述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统可以运行于桌上型计算机、笔记本、掌上电脑及云端服务器等计算设备中。所述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统可运行的系统可包括,但不仅限于,处理器、存储器。本领域技术人员可以理解,所述例子仅仅是基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统的示例,并不构成对基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统的限定,可以包括比例子更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者不同的部件,例如所述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统还可以包括输入输出设备、网络接入设备、总线等。所称处理器可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等,所述处理器是所述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统运行系统的控制中

心,利用各种接口和线路连接整个基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统可运行系统的各个部分。

[0201] 所述存储器可用于存储所述计算机程序和/或模块,所述处理器通过运行或执行存储在所述存储器内的计算机程序和/或模块,以及调用存储在存储器内的数据,实现所述基于结构模型的互联网拓扑特征提取系统的各种功能。所述存储器可主要包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需的应用程序(比如声音播放功能、图像播放功能等)等;存储数据区可存储根据手机的使用所创建的数据(比如音频数据、电话本等)等。此外,存储器可以包括高速随机存取存储器,还可以包括非易失性存储器,例如硬盘、内存、插接式硬盘,智能存储卡(Smart Media Card,SMC),安全数字(Secure Digital,SD)卡,闪存卡(Flash Card)、至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他易失性固态存储器件。

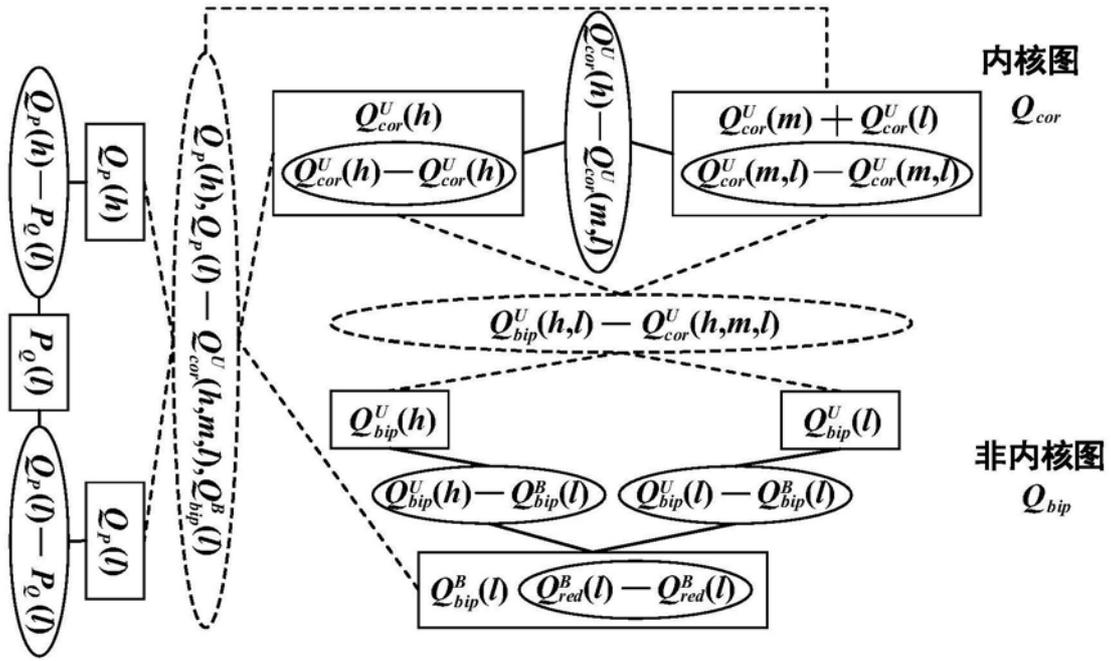


图1

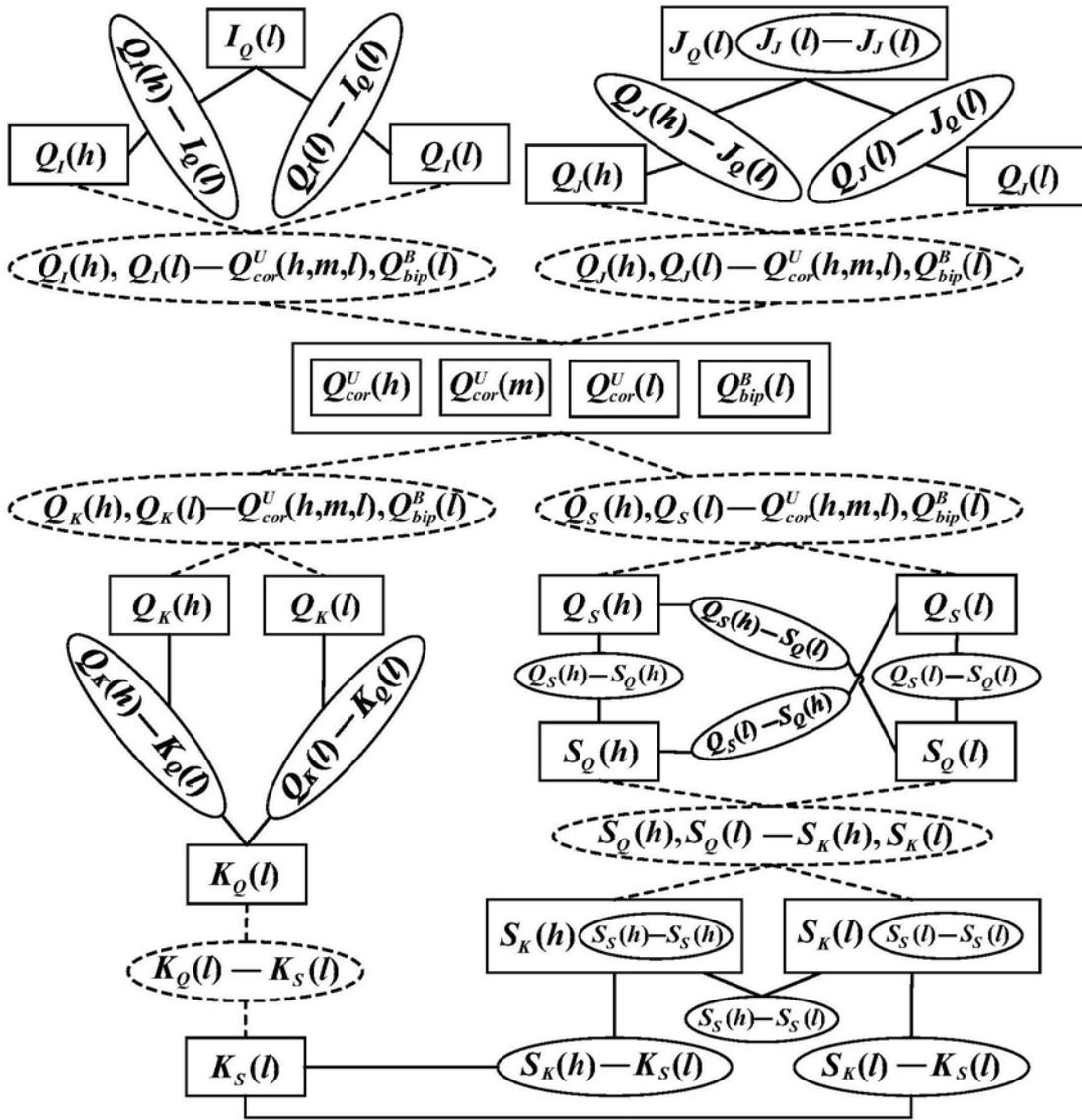


图2

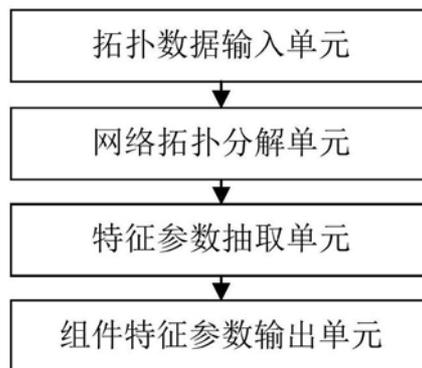


图3