

复杂网络系统拓扑连接优化控制方法

周漩^{1)2)†} 杨帆³⁾ 张凤鸣¹⁾ 周卫平²⁾ 邹伟²⁾

1) (空军工程大学装备管理与安全工程学院, 西安 710051)

2) (海军装备研究院, 北京 100161)

3) (西藏大学师范学院, 拉萨 850000)

(2012年9月9日收到; 2013年4月17日收到修改稿)

为了增加实际网络系统连接增益、减少网络连接成本, 提出了一种基于网络效率和平均连接度的网络拓扑连接优化控制方法, 该方法利用网络效率来表征网络连接收益、用网络平均连接度来表征网络连接成本, 并提出了其计算优化算法, 该算法的时间复杂性为 $O(Mpn^2)$. 实验分析表明, 可以采取一定的方式对实际复杂网络拓扑连接进行优化控制, 小世界和无标度网络均存在一个最佳的网络平均度值能够使网络连接增益达到最大.

关键词: 复杂网络, 拓扑连接, 优化控制, 连接增益

PACS: 02.10.Ox

DOI: 10.7498/aps.62.150201

1 引言

复杂网络是复杂系统的抽象, 它无处不在^[1-3], 许多现实系统都可以抽象为网络模型进行研究^[4]. 复杂网络研究中的一个核心问题是复杂系统结构与功能之间的关系问题^[5], 因此优化网络结构、改善系统功能吸引了复杂网络领域许多学者的注意. 当前的复杂网络优化研究中, 不同学者针对不同网络的不同需求, 优化目标也不尽相同. 有的学者侧重于提高网络鲁棒性: 文献[6]提出了一种基于 Kleinberg 模型的无线传感器网络拓扑优化方法, 通过优化能够显著改善网络的容错性和可靠性; 文献[7]通过对现有复杂网络拓扑关键节点的发现和消除算法的分析和改进来改善 P2P 网络的连通性和鲁棒性. 有的学者侧重于改善网络的拓扑特性: 文献[8]研究了网络边重连算法, 通过边的重连来提高网络的同步性; 文献[9]提出了一种异质的连接策略来优化动态无线网络的拓扑结构, 使其具有小世界特性; 文献[10]提出了一种城市交通无线传感器网络优化方法, 通过优化使网络具有小世界特

性. 有的学者侧重于研究改善网络效率: 文献[11]研究了多智能体系统中信息共享的网络拓扑优化问题, 并运用混合整数规划方法, 得出了优化的网络模型和边权值; 文献[12]为了提高网络传输效率, 提出了一种利用均匀和非均匀网络拓扑来提高网络传输效率的方法; 文献[13]为了减少光纤网络边上交通流和网络拥堵问题、优化网络鲁棒性, 通过综合考虑网络拓扑优化和生存策略, 提出了一种 LCM-WP 方法来优化光纤网络. 从当前的研究情况看, 许多学者只注重复杂网络优化的目的, 而忽略了网络优化所需成本. 为此, 本文提出一种综合考虑网络连接增益和连接成本的复杂网络拓扑连接优化控制方法. 最小生成树和全连通网络是连通网络的两个极端, 虽然在实际网络建设中很少采用, 但两者之间却存在着巨大的网络拓扑空间. 为了实现复杂网络拓扑连接的优化控制、找出网络连接增益最大的网络拓扑, 本文通过对网络信息连接收益、连接成本以及网络增益进行定义, 利用网络效率和平均连接度来表征网络连接收益和连接成本, 提出一种复杂网络连接优化设计评估方法, 为实际复杂网络系统优化控制提供依据.

† 通讯作者. E-mail: zhouxuan_333@126.com

2 复杂网络拓扑连接优化控制

2.1 理论基础

设图 $G = (V, l)$ 是一个无自环的无向连通网络, 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是网络中所有节点的集合; $l = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 且 $l \subseteq V \times V$ 是节点间边的集合. ω_{ij} 表示连接节点 v_i 和 v_j 的边 l_{ij} 的权值.

定义1 对于图 $G = (V, l)$, 用 a_{ij} 表示 G 中节点 v_i 和 v_j 之间边的权值, 当 v_i 与 v_j 直接相邻时, $a_{ij} = \omega_{ij}$, 否则 $a_{ij} = \infty$, 则 n 阶方阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$ 称为 G 的边权矩阵.

边权矩阵 A 用来表示网络各节点一步可达的距离. 当 $\alpha_{ij} = \infty$ 时, 说明节点 v_i 与 v_j 不能一步可达, 它们不相邻. 网络中的边权用来表示节点之间信息流通的难易程度, 数值越大, 消耗的资源越多.

定义2 对于图 $G = (V, l)$, 用 a'_{ij} 表示 G 中节点 v_i 和 v_j 之间的相邻情况, 当 v_i 与 v_j 直接相邻时, $a'_{ij} = 1$, 否则 $a'_{ij} = 0$, 则 n 阶方阵 $A' = (\alpha'_{ij})_{n \times n}$ 称为 G 的邻接矩阵.

定义3 对于图 $G = (V, l)$, 用 z_{ij} 表示 G 中与节点 v_i 相连的第 j 个节点, 当 $a'_{ij} = 1 (j = 1, \dots, n)$ 时, 则 $z_{ik} = v_j, k = k + 1$; 则 $n \times p$ 阶矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times p}$ 称为 G 的相连矩阵.

定义4 节点距离是指两节点之间所有路径边权之和的最小值, 用 d 表示. 如果 v_i 和 v_j 之间不存在路径, 则 $d_{ij} \rightarrow \infty$. 网络中节点之间距离的最大值为网络的直径 R . 当网络为无权网络时, d 表示两节点之间最短路径上的边数.

$$d_{ij} = \min \left\{ \sum_{pq} \omega_{pq} \right\}, \quad v_p, v_q \in r_{ij} \in Rt, \quad (1)$$

d_{ij} 表示节点 v_i 和 v_j 之间的距离, r_{ij} 表示连接节点 v_i 和 v_j 的某一条路径, Rt 表示连接节点 v_i, v_j 的路径集合.

定义5 网络效率 E 是指任意两个节点之间最短路径倒数之和的平均值, 它用来表示网络信息流通的平均难易程度. 网络效率越高, 网络信息流通越容易,

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}, \quad (2)$$

式中, n 为网络中节点数目, d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的距离. 从网络效率 E 的定义中可以看出, 网络效率

E 表达了网络中所有节点对之间的平均接近程度. 网络中节点对之间越接近、距离越短, 网络效率值越大.

2.2 网络连接成本收益评估模型

实际网络系统组建过程中, 由于不同节点之间通信需求、地理位置和系统功能等要求的不同, 导致各节点通信线路建设成本是不同的. 本文用节点之间的路径长度来衡量链路建设的成本和信息传播的便捷程度. 节点之间路径长度越短, 链路建设成本越小、信息传播越容易.

对于实际网络而言, 较短的网络平均路径长度可以使得信息快速传播、节省网络建设所消耗的资源, 提高网络的整体效率, 因此通过增加网络连接度可以减少网络平均路径长度, 节省资源, 增加网络连接收益; 但由于网络平均连接度的增大, 又会导致节点信息超载和通信链路过度冗余, 而产生较高的信息阻塞费用和冗余费用. 如图 1 所示的简单通信网络, 相同数目节点之间可以存在多种连接方式 (网络 A, B, C 表示加权网络, 网络 D, E, F 分别表示网络 A, B, C 所对应的无权网络连接模式, 网络 G, H, I 分别表示环形网络、链状网络和星形网络 3 种特殊连接模式): 网络 A 和网络 D 通信连接非常充分, 信息可以在全部节点中快速传播, 从而获得与信息高速传播相关的高收益, 但也使得网络连接成本的增加; 网络 B, C 和网络 E, F 相比于网络 A 和网络 D 具有较小的网络连接成本, 各节点之间也能实现信息的有效传播. 因此, 对于任意规模的网络都可以采取一定的方式对其连接模式进行优化和控制, 以使网络获得较高的网络连接增益.

从图 1 可以看出, 网络连接的高增益与适当数量的信息连接有关: 随着网络平均连接度的增大, 会使得网络节点之间最短路径长度的减小而增大网络连接的增益; 同时, 过大的网络平均连接度又会产生由于过量的信息连接所带来的较高的网络连接成本费用. 因此, 本文综合考虑网络各节点之间的连接程度和最短路径长度, 对网络连接增益 I 进行定义:

$$I = f(E) \times (1 - C), \quad (3)$$

式中, $f(E)$ 为复杂网络连接的收益, C 为复杂网络连接的成本, E 为网络效率.

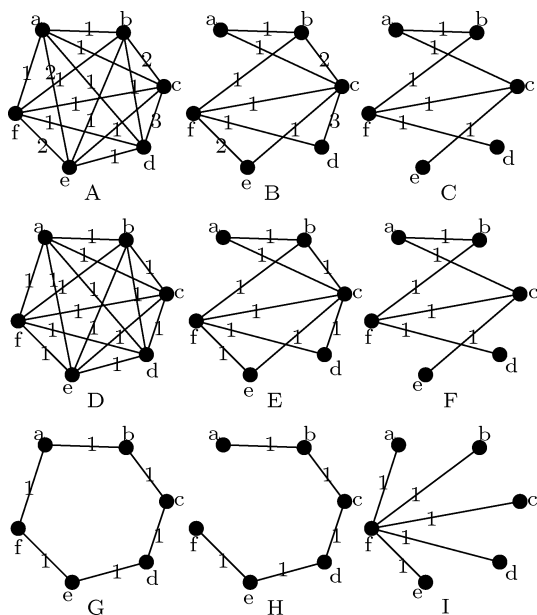


图1 简单通信网络拓扑结构图

对于网络中传输的信息而言, 如果节点对之间距离很大, 但是要保持信息传输的完整性, 那么该节点对之间信息传输所消耗的资源就很多; 反之, 节点之间信息传输就很容易. 由于网络效率表征了网络中节点的平均接近程度, 因此网络效率在一定程度上反映了整个网络的连接收益. 网络效率越高, 表明节点对之间距离越短、网络信息流通越容易、网络信息传输负载越小、收益越大. 因此, 本文将 $f(E)$ 定义如下:

$$f(E) = \frac{E}{E_{\max}}, \quad (4)$$

式中, E 和 E_{\max} 分别表示网络效率和网络效率最大值.

对于网络效率最大值 E_{\max} , 我们考虑一个理想化的例子: 全连通网络. 由于全连通网络中节点之间充分连接, 各节点之间距离都能达到最小值, 使得它们之间的信息能够以最高的效率进行传播; 当网络在全连通基础上去除一定数量边, 会导致一定数量节点之间最短距离的增大而减少网络的效率. 由此可知, 全连通网络的效率才能达到最大值, 本文所用到的 E_{\max} 是指全连通网络的效率, 例如图 1 中网络 A 和 D 的效率即为该简单加权和无权通信网络的 E_{\max} . 从 (4) 式可以看出, $f(E) \in [0, 1]$.

当我们利用网络模型来分析现实网络时, 一个重要的变量就是网络成本. 我们期望一个网络边数

增加时, 它的效率能够增加得更快; 或者网络边数固定的情况下, 通过改变网络连接情况来提高网络效率. 因此现实网络的构建往往围绕网络建设的成本和效率而展开.

对于网络节点所消耗的资源, 单纯运用图论的观点可以用节点度值、介数等等来表示, 但是许多实际的通信网络, 不同路由策略使得各节点的连接成本并不依赖于网络的度值和介数. 为了表征网络连接的成本 C , 本文用网络边连接程度来表示, 并将其定义如下:

$$C = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \alpha'_{ij} \gamma(\alpha_{ij})}{C_{\max}}, \quad (5)$$

式中, α'_{ij} 与 α_{ij} 分别表示网络邻接矩阵和边权矩阵中的元素; $\gamma(*)$ 表示网络边连接的成本因子函数, 它计算的是建立给定长度的连接所需要的成本; C_{\max} 表示网络成本最大值.

对于 $\gamma(*)$, 本文将其定义如下:

$$\gamma(\alpha_{ij}) = \begin{cases} \beta \times \alpha_{ij}, & \alpha_{ij} \leq d_{ij}, \\ \rho \times \alpha_{ij}, & d_{ij} < \alpha_{ij} < \infty, \\ 0 & \alpha_{ij} = \infty, \end{cases} \quad (6)$$

式中, d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的最短距离; β, ρ 分别表示网络建立单位长度连接所需成本的调节因子. 一般情况下, 我们认为 $\beta \leq \rho$, 使其在无权网络和加权网络都适用.

定义 (6) 式的目的是为了辨别网络中的冗余边和必需边, 并且给它们赋予不同的网络建设成本值. 当 $d_{ij} < \alpha_{ij}$ 时, 可知该边为网络的冗余边, 通过 $\beta \leq \rho$, 使得网络冗余边的建设成本高于网络必需边.

对于 C_{\max} , 由于全连通的网络各节点之间充分连接, 导致其网络连接成本达到最大值, 因此可以将 C_{\max} 定义如下:

$$C_{\max} = \sum_{i \neq j \in G} q'_{ij} \gamma(q_{ij}) = \sum_{i \neq j \in G} \gamma(q_{ij}), \quad (7)$$

式中, q'_{ij} 和 q_{ij} 分别表示全连通网络邻接矩阵和边权矩阵中的元素. 从 (5) 式可以看出, $C \in [0, 1]$.

由于 $f(E)$ 和 C 被分别定义在 $[0, 1]$ 之间, 因此我们可以运用 (3) 式对网络连接成本收益进行研究. 当网络为全连通网络时, 其网络连接收益和成本均达到最大值 1, 而它的网络连接增益却为 0, 这

也是全连通网络在现实世界中很少采用的重要原因之一,同时也说明了本文模型的合理性.

2.3 算法设计

下面我们给出评估网络连接增益的简单算法步骤:

输入: 边权矩阵 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$ 、邻接矩阵 $A' = (\alpha'_{ij})_{n \times n}$ 、相连矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times p}$, β, ρ .

输出: 网络连接增益 I .

Begin

1) 根据 $A = (\alpha_{ij})_{n \times n}$, 计算所有节点对之间的最短距离矩阵 $[d_{ij}]_{n \times n}$ /Floyd 算法;

2) 构造相同规模的全连通网络, 根据 (2) 式和 (7) 式分别计算 E_{\max} 和 C_{\max} ;

3) 根据 $[d_{ij}]_{n \times n}$, 利用 (2) 式和 (4) 式计算 $f(E)$;

4) 根据 $[d_{ij}]_{n \times n}$ 和 $A' = (\alpha'_{ij})_{n \times n}$, 利用 (5) 式计算 C ;

5) 根据 (3) 式, 输出 I .

End

从上述算法步骤可以看出, 对网络连接成本收益的评估, 关键在于网络最短距离矩阵 $[d_{ij}]_{n \times n}$ 的确定, 其算法的时间复杂度为 $O(n^3)$. 通过对 Floyd 算法的分析可知, Floyd 算法在计算最短距离矩阵 $[d_{ij}]_{n \times n}$ 过程中, 任意节点对之间最短距离的确定都需要对距离矩阵进行 n 次循环, 但是当网络中所有节点对之间的最短距离都已经找到时, 我们就会发现 $[d_{ij}]_{n \times n}$ 在后续循环过程中保持不变. 因此, 在求解 $[d_{ij}]_{n \times n}$ 过程中, 如果盲目地进行 n 次循环, 势必会造成计算资源的浪费、提高算法的时间复杂度. 基于此, 本文在运用 Floyd 算法计算 $[d_{ij}]$ 过程中, 将中间节点循环提到最内层循环, 运用网络相连矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times p}$ 对其进行优化. 优化后的复杂网络最短路径计算算法流程如图 2 所示.

通过分析可以发现, 网络相连矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times p}$ 的列数值 p 为网络中节点的最大度值; 当网络中所有节点对之间的最短距离都已经找到时, 网络节点之间的最大距离 (网络直径 R) 也已经确定. 由此, 图 2 所示算法时间复杂度为 $O(Mpn^2)$, M 表示确定网络直径 R 所需的循环次数, p 表示网络节点的最大度值. 由于现实世界大多数实际网络都是稀疏网络并具有小世界特性, 网络节点之间连接不是

很充分, 网络节点的最大度值取值较小、网络直径 $R \ll n$, 即使是无标度网络节点最大度值较大, 也只有少数节点具有较大度值, 因此本文提出的算法在计算实际网络连接增益时其时间复杂性可以达到 $O(n^2)$, 对大规模复杂网络拓扑连接优化控制可以获得理想的计算能力.

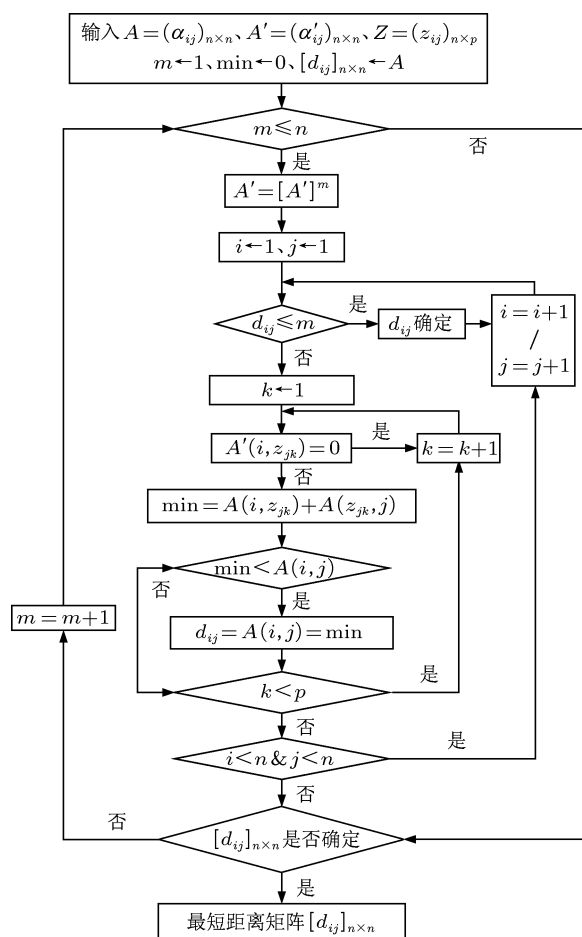


图 2 最短距离矩阵计算算法流程图

3 数值仿真与分析

3.1 模型有效性分析

为了对本文所提模型有效性进行分析, 本文以图 1 所示简单通信网络为例, 对其网络连接增益进行比较分析. 通过对图 1 进行简单分析, 可以发现加权网络 A, B, C 中: 网络 A 存在多条冗余路径, 如 $l_{fe}, l_{ae}, l_{bc}, l_{cd}$; 网络 B 也存在冗余路径; 只有网络 C 连接相对合理. 对于图 1 中的无权网络, 虽然不能直观判断网络中的冗余路径, 但是它们之间网络连

接增益是不同的. 运用本文所提模型对图 1 中网络连接增益进行计算, 结果如表 1 所示 ($\beta = 1, \rho = 4$).

通过表 1 可以看出, 网络 A 和网络 D 的充分连接, 使得它各节点之间能够以最小的路径长度进行信息交互, 使其效率达到最大值, 增大了网络连接收益, 但是网络连接程度的增大, 造成了网络连接的过度冗余和连接成本的增加, 导致网络 A 和网络 D 具有最小的网络连接增益; 网络 B 和网络 C 虽然具有相同的网络效率值, 但是网络 C 较低的网络连接程度使得它具有最高的网络连接增益; 网络 F 也具有相同的特性. 计算结果与理论分析一致, 说明

了本文方法的有效性, 它能有效权衡加权与无权网络构建过程中网络连接收益和网络连接成本.

对于图 1 中所示环形网络、链状网络、星形网络 3 种特殊网络连接模式, 星形网络具有最高的网络连接收益和最小的网络连接成本, 其连接模式最优, 究其原因是由于星形网络能够以最少的连接数使各节点之间的路径长度最小. 无权网络计算结果表明, 网络节点之间的充分连接不一定会提高网络连接增益, 适当地对复杂网络中信息连接度和连接方式进行控制, 可以获得最优的网络连接性能.

表 1 不同网络连接增益比较表

类型	网络	E_{max}	E	$f(E)$	C_{max}	C	I
加权网络	A	0.83	0.83	1	52	1	0
	B		0.67	0.80		0.69	0.25
	C		0.67	0.80		0.23	0.62
	D		1	1		1	0
无权网络	E	1	0.80	0.80	30	0.60	0.32
	F		0.67	0.67		0.40	0.40
	G		0.67	0.67		0.40	0.40
	H		0.58	0.58		0.33	0.38
	I		0.67	0.67		0.33	0.44

3.2 算法效率分析

为了对本文所提算法效率进行分析, 运用该优化算法在 Intel Core i5 3.10 GHz 微机上运行 MATLAB 程序对边权为 1 的不同规模小世界网络^[14] (每个节点与周围 80 个节点相连, 边重连的概率为 0.6) 的网络连接增益进行计算. 通过仿真, 可以得到算法执行时间随网络规模的变化趋势如图 3 所示 (多次仿真平均值).

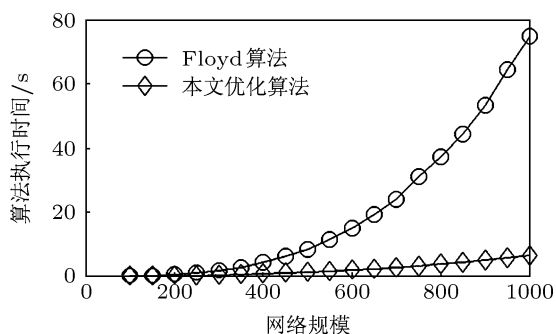


图 3 不同规模小世界网络算法执行效率图

从图 3 中可以看出, 本文优化算法相比于 Floyd 算法具有更高的计算效率, 计算节点规模为 1000 的小世界网络的连接增益不超过 10 s, 能够适用于大规模小世界网络拓扑连接优化控制方法中.

3.3 网络拓扑连接优化控制仿真分析

为了优化小世界网络的连接模式, 本文通过构造网络规模为 400, 边权为 1, 平均度值分别为 6, 12, 20, 30 的小世界网络进行分析. 通过仿真计算, 可以得到小世界网络连接增益随网络边重连概率 p 的变化趋势, 如图 4 所示 ($\beta = 1, \rho = 2$, 多次仿真平均值).

通过图 4 可以看出, 当网络平均度值一定时, 由于网络连接成本没有变化, 网络边重连概率 p 的增大, 会缩短网络节点对之间的最短路径长度, 提高网络整体效率, 增加网络连接收益. 因此, 网络连接的增益随 p 的增大而增加. 同时, 网络连接增益

也会随着平均度值的增大而增加,但是当网络平均度值达到一定数值时,网络连接增益增长变缓.为了确定小世界网络的最佳平均度值,本文取 $\beta = 1$, $\rho = 2$, 边重连概率 $p = 0.6$, 构造网络规模为 400 的小世界网络进行仿真计算, 可得小世界网络平均度值对网络连接增益的影响图, 如图 5 所示 (多次仿真平均值).

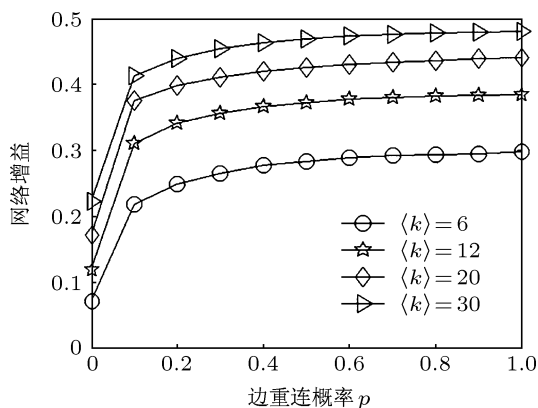


图 4 边重连概率对网络连接增益影响图

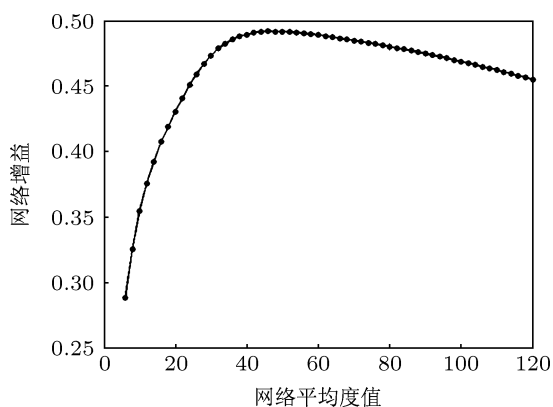


图 5 平均度值对网络连接增益影响图

通过图 5 可以看出, 当网络平均度值小于一定数值时, 由于网络连接成本小, 增大网络的平均连接度, 可以显著改善网络连接增益; 但是网络平均度值增大到一定程度时, 网络平均连接度的增加, 会使得网络连接成本大于网络平均路径长度减小所带来的网络连接收益, 导致网络连接增益的减小. 在小世界网络中, 存在一个最佳的网络平均度值, 能够使得网络的连接增益最优.

为了优化无标度网络连接模式, 本文按照文献 [15] 提供的方法, 通过构造网络规模为 400, 新增节

点与不同数目节点相连的无标度网络进行比较分析. 通过仿真计算, 可以得到无标度网络连接增益随新增节点边数目的变化趋势, 如图 6 所示 ($\beta = 1$, $\rho = 2$, 多次仿真平均值).

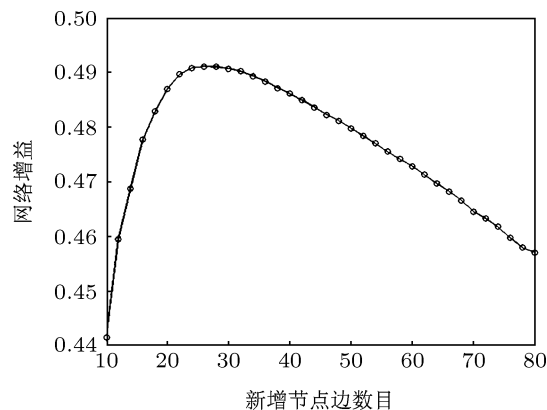


图 6 无标度网络连接增益示意图

从图 6 可以看出, 当网络规模一定时, 无标度网络新增节点边数目在很大程度上决定着网络连接增益, 并且存在一个边阈值 26, 能够使网络的连接增益达到最大.

综合图 4 至图 6 仿真结果, 说明复杂网络构建过程中, 可以采取一定方式对网络的连接模式进行优化, 小世界网络和无标度网络均存在一个最优的网络平均度值能够使网络取得最优的网络连接增益.

4 结论

为了增加实际网络连接增益、减少网络连接成本, 提出了一种基于网络效率和平均连接度的网络拓扑连接优化控制方法, 该方法利用网络效率来表征网络连接收益、用网络平均连接度表征网络连接成本, 并提出了其计算优化算法. 当网络具有小世界特性, 且 $M \ll n$ 时, 算法的时间复杂度可以达到 $O(n^2)$. 实验分析表明, 可以采取一定的方式对实际复杂网络拓扑连接进行优化控制, 网络节点之间的充分连接不一定会提高网络连接增益, 适当地对复杂网络中的信息连接度和连接方式进行控制, 可以获得最优的网络连接性能; 小世界和无标度网络均存在一个最佳的网络平均度值能够使网络取得最优的网络连接增益.

- [1] Zhao J, Li J P, Guo P, Zhang Y Z, Wang S H, Li X L 2009 *International Conference on Computing and Intelligence Analysis* Chengdu, China, October 23–25, 2009 p266
- [2] Liu Y H, Chen H C, Yang C 2008 *International Conference on Natural Computation* Jinan, China, October 18–20, 2008 p267
- [3] Li T, Pei W J, Wang S P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5903 (in Chinese) [李涛, 裴文江, 王少平 2009 物理学报 **58** 5903]
- [4] Wu J J, Gao Z Y, Sun H J 2008 *Physica A* **387** 1025
- [5] Souza F S H, Cunha A S da, Mateus G R 2009 *IEEE INFOCOM Workshops* Rio de Janeiro, Brazil, April 19–25 2009 p1
- [6] Jing W P, Liu Y Q, Zhang X 2010 *International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics* Harbin, China, June 8–10 2010 p1297
- [7] Fan W, Ye D F, Yang M X, Zhang L 2011 *Advanced Materials Research* **267** 738
- [8] Wang L F, Wang Q L, Kong Z, Jing Y W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 080207
- [9] Holme P, Kim B J, Fodor V 2010 *European Physical Journal B* **73** 597
- [10] Hu J M, Song J Y, Zhang M C, Kang X J 2008 *Tsinghua Science and Technology* **13** 229
- [11] Rafiee M, Bayen A M 2010 *IEEE Conference on Decision and Control* Atlanta, USA, December 15–17 2010 p3877
- [12] Xue Y H, Wang J, Li L, He D R, Hu B B 2010 *Phys. Rev. E* **81** 037101
- [13] Ouveysi I, Shu F, Chen W, Shen G X, Zukerman M 2010 *Optical Switching and Networking* **7** 95
- [14] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [15] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

Control method for complex network topological connection optimization

Zhou Xuan^{1)2)†} Yang Fan³⁾ Zhang Feng-Ming¹⁾ Zhou Wei-Ping²⁾ Zou Wei²⁾

1) (Material Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Navy Academy of Armament, Beijing 100161, China)

3) (Normal College, Tibet University, Lasa 850000, China)

(Received 9 September 2012; revised manuscript received 17 April 2013)

Abstract

In order to enhance complex network connection income and reduce network connection cost, a network topological connection optimization control method was proposed based on network efficiency and average connection degree, which used network efficiency and average connection degree to denote the gain and cost of network connection respectively, and an optimized arithmetic whose time complexity was $O(Mpn^2)$ was provided. Experimental analysis shows that the topological connection of complex network can be optimized by some measures, and an average degree threshold existed in small world network and scale-free network which can make the network's income reach the maximum value.

Keywords: complex network, topological connection, optimization control, connection income

PACS: 02.10.Ox

DOI: 10.7498/aps.62.150201

† Corresponding author. E-mail: zhouxuan_333@126.com