

DOI: 10.11992/tis.201703020

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20170702.1547.028.html>

有向相依网络的可控性研究

陈世明, 程运洪, 邓兵

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对相依方式对有向相依网络可控性的影响, 研究了不同相依方式下有向相依网络的可控性。通过构建基本的有向相依网络模型, 结合严格可控性理论, 给出了可控性评判指标。同时基于经典的有向随机网络和有向无标度网络, 提出 3 种有向相依网络模型, 并研究了随机相依条件下有向相依网络的可控性。随后定义了 3 种相依方式, 并对比分析了在不同相依方式下有向相依网络的可控性。结果表明, 在同等相依比例下, 基于最低入度与最低出度节点相依的有向相依网络可控性最强, 而基于最高入度与最高出度节点相依的有向相依网络可控性最弱, 研究成果能够为实际有向相依网络的构建提供有益的参考和指导。

关键词: 有向网络; 相依网络; 相依方式; 严格可控性

中图分类号: TP273;N941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)04-0602-08

中文引用格式: 陈世明, 程运洪, 邓兵. 有向相依网络的可控性研究[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 602-609.

英文引用格式: CHEN Shiming, CHENG Yunhong, DENG Bing. Research on the controllability of directed interdependent networks[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(4): 602-609.

Research on the controllability of directed interdependent networks

CHEN Shiming, CHENG Yunhong, DENG Bing

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, we consider the influence of interdependency on the controllability of interdependent directed networks and investigate the controllability of interdependent directed networks with different types of interdependency. We build a basic interdependent directed network model and generate a controllability index by introducing the theory of exact controllability. We propose three kinds of interdependent directed network models for classical directed random networks and directed scale-free networks. In addition, we investigate the controllability of the interdependent directed networks with random interdependencies. Based on the results, we propose three kinds of interdependencies and compare and analyze the controllability of interdependent directed networks with different types of interdependency. The results show that, with the same proportion of interdependence, the best controllability of an interdependent directed network is that with an interdependency of lowest in-degree and lowest out-degree nodes, whereas the poorest controllability of an interdependent directed network is that with an interdependency of highest in-degree and highest out-degree nodes. The research results provide a useful reference and guidance for the construction of actual interdependent directed networks.

Keywords: directed network; interdependent network; interdependency; exact controllability

在过去几十年中, 复杂网络研究吸引了许多来自不同科学领域学者的关注^[1]。而以往的工作主要集中在对网络拓扑结构复杂性及其与网络动

力学行为之间关系的研究, 通过对复杂网络拓扑性质、复杂网络演化模型以及动力学行为的分析, 揭示出隐藏在复杂系统中的一系列共同规律, 对于把握复杂系统的宏观特征及调节复杂系统上的动力学行为都将具有重要意义^[2-3]。随着对复杂网络研究的进一步深入, 复杂网络可控性

收稿日期: 2017-03-15. 网络出版日期: 2017-07-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61364017).

通信作者: 陈世明. E-mail: shmchen@ecjtu.jx.cn.

的研究得到了充分的关注与重视。Lin^[4]给出了线性时不变控制系统“结构”和“结构可控性”的概念,并通过研究找到了结构可控性的充要条件;Liu等^[5]基于线性时不变控制系统的结构可控性理论,对实际复杂系统进行了研究并建立了网络结构可控性模型;Jia^[6-7]发现了两种不同的网络控制模式:集中式控制和分布式控制;同时基于控制能力和随机抽样算法对有向复杂网络的结构可控性做了进一步探索,随后一些研究者通过改变连接边的方向实现了网络可控性的优化^[8-10]。目前复杂网络可控性研究已经取得了众多的重要成果,但复杂网络控制方面的研究仍然处于起步阶段,还有很多未解决的理论问题,例如结构可控性理论无法适用于无向网络、权重网络和时变网络的可控性等问题。针对结构可控性理论仅适用于有向网络的局限性,Yuan^[11]引入了严格可控性(exact controllability)的概念,证明完全控制复杂网络所需的最少控制器数目由网络矩阵特征值的最大重数决定,并提出了利用矩阵初等变换甄别网络中需要被独立控制的节点的方法,通过对大量真实网络和模型网络的计算结果表明了严格可控性理论的有效性和实用性;Li^[12]针对实际网络的分型特征,运用严格可控性理论对分型网络的可控性进行了分析。基于单层有向网络和无可控性进行的研究已取得较大突破。但现实中的网络通常是相互依存的,例如,公交-地铁网络、电力-通信网络、电力-供水网络等,且通过研究已经发现相依网络的动态特性如级联失效^[13-17]、扩散现象^[18]、演化博弈动力学^[19]、同步性^[20]等,均明显区别于单层网络。怎样合理地控制相依网络将是面临的重要挑战。Yuan^[21]运用严格可控性理论对多重网络的可控性进行了研究,发现在多关系网中存在主导关系网,其结构和连接权重对于整个网络的严格可控性起主导作用;在多层网中,不同层间的连接方式以及疏密程度对整个网络的严格可控能力都有重要的影响,并且发现在层间加入少量连接能够大大提高整个网络的可控能力。Nie^[22]分析了多层网络中层间连边结构对网络可控性能的影响,研究发现层间连边比例较小时,网络最少驱动节点的数目随着连边度相关性的增加而减小,层间连边同配性强的网络易于控制;当层间连边比例较大时,则会出现相反的情况,层间连边异配性强的网络易于控制。然而以上研究仅分析了网络层间的连接方式及网络层间连接边的度相关性对无向相依网络可控性的影

响,却未考虑到实际网络中存在有向网络相互依存的情况,例如在交通网络与供电网络中,某一时间内列车的运行方向是定向的,同时供电系统按照列车运行的线路提供电力支持保证其正常运行。在供电网络中某一处发生故障会通过网络之间的相依关系,将其传递到交通网络中从而导致经过这条线路的列车都无法运行,反之亦然。这样在某个网络中产生的故障会因为彼此间的相依关系,使得故障在两个网络之间相互蔓延,从而对网络造成更大的破坏,由此表明有向相依网络间的相依关系对整个有向相依网络有重要影响。为了探究有向网络间相依关系对网络的影响,本文首先构建了基本的有向相依网络模型,并结合严格可控性理论,给出了基于最少控制输入的可控性评判指标;其次,针对相依方式对有向相依网络可控性产生的影响,基于经典的有向随机网络(DER)和有向无标度网络(DSF),构建了DER-DER、DER-DSF、DSF-DSF 3类有向相依网络模型,并研究了随机相依方式下3类网络的可控性能;最后,基于随机相依方式下对网络可控性的分析,提出了3种有向网络的相依方式:最高入度与最高出度节点相依(HI-HO)、最高入度与最低出度节点相依(HI-LO)、最低入度与最低出度节点相依(LI-LO),且在既定的3种相依方式下对网络的可控性进行了仿真分析。

1 有向相依网络可控性

1.1 有向相依网络

有向相依网络由两个有向子网络(子网络 A 和子网络 B)通过双向连接线连接而成, $\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 表示子网络 A 中的节点,节点数为 N_A ; $\{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ 表示子网络 B 中的节点,节点数为 N_B ,子网络之间的双向连接线为网络相依边,其余单向连线为内部边。 F 表示节点相依比例。 F 包括 F_A 和 F_B ,其中 F_A 表示子网络 A 的相依节点数 N'_A 占子网络 A 总节点数 N_A 的比例值, F_B 表示子网络 B 的相依节点数 N'_B 占子网络 B 总节点数 N_B 的比例值,即

$$\begin{aligned} F_A &= N'_A / N_A \\ F_B &= N'_B / N_B \end{aligned} \quad (1)$$

本文仅考虑相依子网络节点数相同的情况,即 $N_A = N_B$,且网络为单相依,则有 $N'_A = N'_B$,即 $F_A = F_B = F$ 。

如图1所示,定义了简单的有向相依网络模型, $N_A = N_B = 5$, $N'_A = N'_B = 4$, $F_A = F_B = 0.8$,单向箭头实线表示子网络内部连接边,黑色双箭头虚线表示子网络间的连接线,即网络相依边。

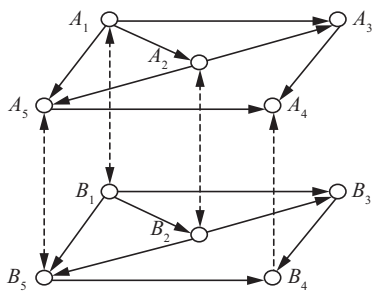


图1 有向相依网络

Fig. 1 The interdependent directed network

1.2 严格可控性

在现代控制理论中, 如果通过一些控制变量的输入能使一个系统从任意初始状态达到理想状态, 我们称这个系统是可控的。这里只考虑线性时不变系统并且假设系统内部未发生动态变化。有向相依网络状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} A_1 & A_{12} \\ A_{21} & A_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2)$$

向量 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_N(t) \ x'_1(t) \ x'_2(t) \ \cdots \ x'_N(t)]^T$ 是系统的 $2N$ 个节点在 t 时刻的状态; 邻接矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{2N \times 2N}$ 称为系统矩阵, A_1 、 A_2 分别表示组成有向相依网络的两个有向子网络内部节点间的相互作用关系, A_{12} 、 A_{21} 表示两子网络节点之间的相互作用关系, $\mathbf{B} = (b_{ij})_{2N \times M}$ 称为输入矩阵 ($M \leq 2N$), 它表示输入信号与网络的连接方式, $\mathbf{u}(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \cdots \ u_M(t)]^T$ 为输入向量。

定理 1 对于一个可控系统来说, 最少控制输入个数是系统矩阵特征值中具有最大代数重数的特征值所对应的几何重数。

为了有效地衡量有向相依网络的可控性, 本文采用 n_D 作为网络可控性能指标, 表示为

$$n_D = \frac{N_D}{2N} \quad (3)$$

式中: N_D 和 $2N$ 分别为控制有向相依网络所需的最少控制输入个数和网络节点总数。 n_D 越小, 表示有向相依网络的可控性越强。

1.3 理论分析

对于满足状态方程 (2) 的系统来说, 其节点总数是不变的且为 $N_0 = 2N$, 若使得系统满足其可控性, 需通过外部控制输入作用于系统节点。假设得到外部控制输入作用的节点个数为 N_1 , 未作用的节点个数为 N_2 , 则

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (4)$$

对于可控系统来说, 必然存在一个得到外部控制输入作用节点的最小个数, 记为 $\min(N_1)$, 使得系统达到可控要求, 并且未作用的节点个数达到最大, 记为 $\max(N_2)$, 得

$$N_0 = \min(N_1) + \max(N_2) \quad (5)$$

从而可得

$$\frac{\min(N_1)}{N_0} = 1 - \frac{\max(N_2)}{N_0} \quad (6)$$

在此定义最小控制比例 n_D 为得到外部控制输入作用节点的最小个数占节点总数的比例, 记

$$n_D = \frac{\min(N_1)}{N_0} \quad (7)$$

由式 (7) 可知: 若 n_D 越小, 系统的可控性就越好。

然而需要确定能够达到控制效果所需的最少控制输入个数。在这里将最小控制输入个数 N_D 定义为达到系统可控性要求时, 输入矩阵 \mathbf{B} 秩的最小值, 即

$$N_D = \min\{\text{rank}(\mathbf{B})\} \quad (8)$$

若满足状态方程 (2) 的系统是可控的, 那么由 PHB 判定定理可知, 对矩阵 \mathbf{A} 的任意特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, 2N)$, 下式恒成立:

$$2N = \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}, \mathbf{B}] \quad (9)$$

式中 \mathbf{I} 为单位矩阵。

根据矩阵不等式关系得:

$$2N = \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}, \mathbf{B}] \leq \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}] + \text{rank}[\mathbf{B}] \quad (10)$$

进一步得

$$\text{rank}[\mathbf{B}] \geq 2N - \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}] \quad (11)$$

上式满足恒成立关系, 则:

$$\text{rank}[\mathbf{B}] \geq \max\{2N - \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}]\} = \max_i \{\mu(\lambda_i)\} = \mu(\lambda^M) \quad (12)$$

进一步可得

$$\min(\text{rank}[\mathbf{B}]) \geq \max\{N - \text{rank}[\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}]\} = \max_i \{\mu(\lambda_i)\} = \mu(\lambda^M) \quad (13)$$

再由 N_D 和特征值几何重数定义可知:

$$N_D = \mu(\lambda^M) \quad (14)$$

式中: $\mu(\lambda_i)$ 为特征值 λ_i 对应的几何重数, $\mu(\lambda^M)$ 为特征值 λ^M 对应的几何重数, λ^M 是系统矩阵最大代数重数所对应的特征值。

由 N_D 的定义可得:

$$N_D = \min(N_1) \quad (15)$$

最后可得:

$$n_D = \frac{N_D}{2N} \quad (16)$$

由此可知, 当 N_D 越小时, n_D 越小, 即有向相依网络的可控性就越好。

如图 2 表示一个有向相依网络, 其中子网络节点数 $N_A = N_B = 5$, 相依节点比例 $F = 2/5 = 0.4$, 黑色带箭头线表示子网络内部的有向边, 黑色双向箭头虚线表示相依边, u_1 、 u_2 、 u_3 为控制输入, 其数量为最小控制输入个数 N_D 。由图 2 的连接关系可得系统矩阵 \mathbf{A} 以及特征值 λ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\lambda = [1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (18)$$

通过观察特征值 λ 可知,系统矩阵最大代数重数对应的特征值 $\lambda^M = 0$,那么最小控制输入个数: $N_D = \mu(\lambda^M) = 10 - \text{rank}(\lambda^M \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 3$ 。

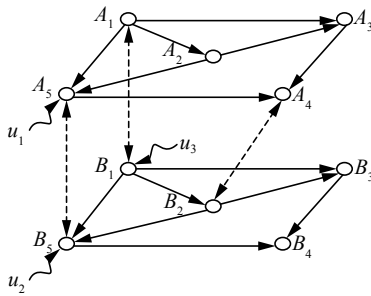


图2 有向相依网络可控性

Fig. 2 Controllability of the interdependent directed network

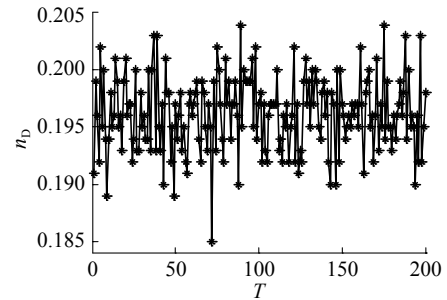
2 随机相依方式下网络可控性的仿真与分析

本文基于经典的有向随机网络(DER)和有向无标度网络(DER),构建了DER-DER、DER-DSF、DSF-DSF 3类有向相依网络模型。同时在随机相依方式下,对不同相依比例的DER-DER网络可控性进行了独立仿真实验。

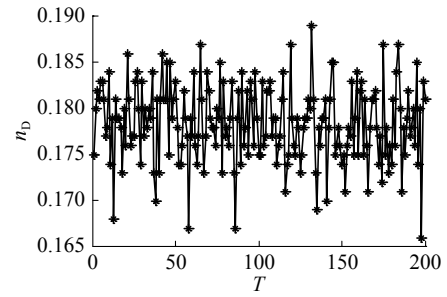
在随机相依方式下,通过对4组不同相依比例的DER-DER网络可控性进行多次仿真,其中网络规模 $2N = 1000$, T 为实验次数, $T_{\max} = 200$;相依比例为 F 。从图3(a)中可以发现在相依比例 $F = 0.1$ 时, n_D 在区间 $[0.184, 0.204]$ 内出现明显的波动,即网络可控性在这一范围内出现很大的随机性;同时结合图3(b)、3(c)、3(d)可知,在相依比例 $F = 0.2, 0.4, 0.8$ 时, n_D 同样在一定范围内出现较大的波动。这表明,在同一相依比例下,随机的相依方式使得网络可控性表现出明显的差异性,即有向网络的相依方式直接影响着网络的可控性。

通过对比以上4组不同相依比例下的网络可控性发现,随着相依比例 F 的逐渐增加, n_D 逐渐减小,即随着相依比例的增加,网络可控性逐渐增强。为了充分证明相依方式直接影响着有向相依网络

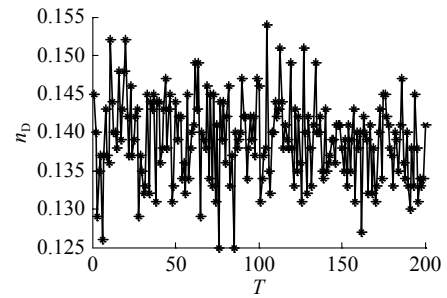
可控性,我们在随机相依方式下对连续相依比例的3类有向相依网络的可控性进行了仿真分析。



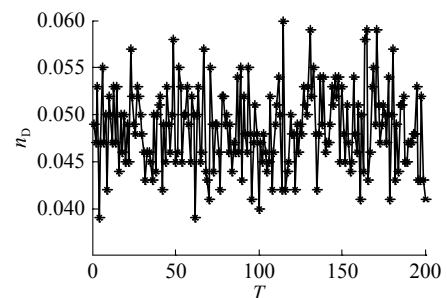
(a) $F=0.1$



(b) $F=0.2$



(c) $F=0.4$



(d) $F=0.8$

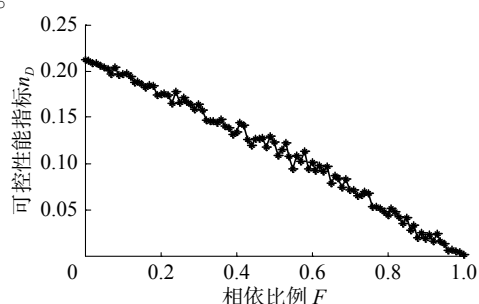
图3 单一相依比例下DER-DER网络的可控性

Fig. 3 Controllability of DER-DER network with a single dependency ratio

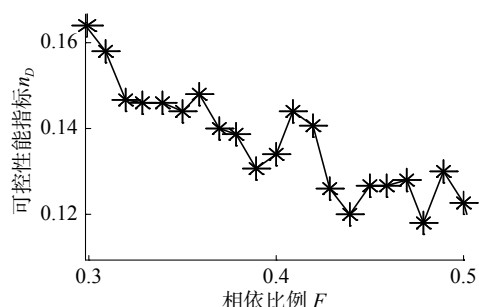
在随机相依方式下,通过对连续相依比例的DER-DER、DER-DSF、DSF-DSF这3类有向相依网络的可控性进行仿真,如图4(a)所示,就DER-DER有向相依网络而言,随着相依比例 F 的逐渐增加, n_D 总体呈现逐渐减小的趋势,但由于相依方式的随机性,DER-DER有向相依网络中存在 $F_2 > F_1$, $n_D^{(2)} > n_D^{(1)}$ 的情况,同时在图4(b)所示的DER-

DSF 有向相依网络与图 4(c) 所示的 DSF-DSF 有向相依网络中均呈现与图 4(a) 相同的变化规律, 即网络可控性在随着相依比例增加而增强的过程中会出现一定程度的波动, 从而表明有向相依网络的可控性不仅与相依比例有着紧密相关, 更与有向网络的相依方式有着密不可分的关系, 上述分析为有向相依网络可控性的研究提供了充分条件。

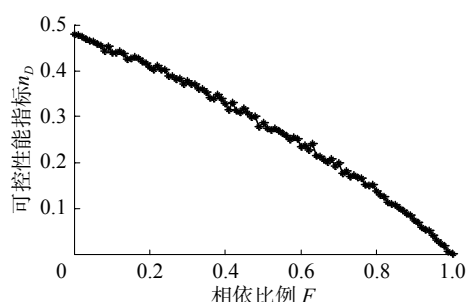
图 4 中, 网络规模 $2N=1\ 000$, 其中 DER 网络, $\langle K \rangle=2$; DSF 网络, $\gamma_{in}=\gamma_{out}=3$, $\langle K \rangle=2$; 嵌入图为在相依比例 $F \in [0.3, 0.5]$ 内随机相依方式下的网络可控性。



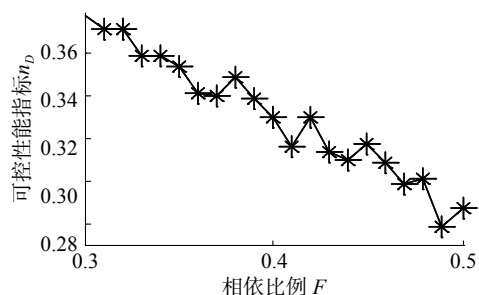
(a) DER-DER网络的可控性



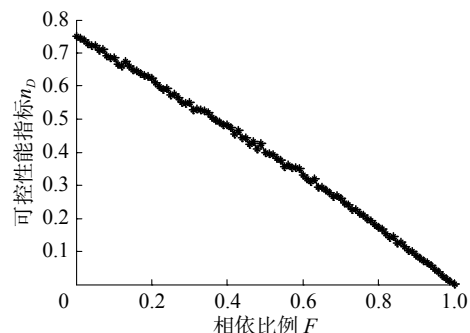
(b) DER-DER网络的可控性细节图



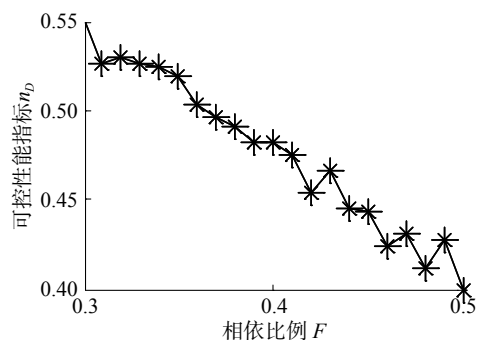
(c) DER-DSF网络的可控性



(d) DER-DSF网络的可控性细节图



(e) DSF-DSF网络的可控性



(f) DSF-DSF网络的可控性细节图

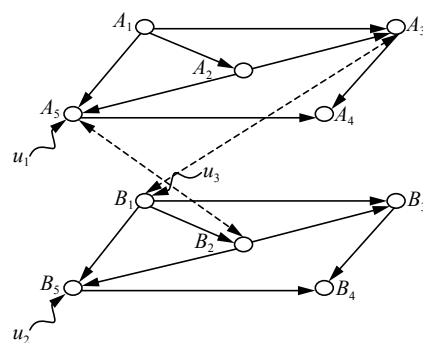
图 4 连续相依比例下网络的可控性

Fig. 4 Controllability of the network under continuous dependency ratio

3 有向相依网络的相依方式及其可控性对比分析

基于随机相依方式下对有向相依网络可控性的分析, 本文提出了有向网络之间的 3 种相依方式: 最高入度与最高出度节点相依 (HI-HO)、最高入度与最低出度节点相依 (HI-LO)、最低入度与最低出度节点相依 (LI-LO), 同时针对 3 种相依方式构建了如图 5 所示的简单有向相依网络模型并分析了其可控性。

图 5 中, 网络节点总数 $2N=10$, $F=0.4$ 。图 5(a) 中最高入度与最高出度节点相依 (HI-HO), $N_D=3$, u_1, u_2, u_3 为控制输入; 图 5(b) 中最高入度与最低出度节点相依 (HI-LO), $N_D=2$, u_1, u_2 为控制输入; (c) 最低入度与最低出度节点相依 (LI-LO), $N_D=1$, u_1 为控制输入。



(a) 最高入度与最高出度节点相依(HI-HO)

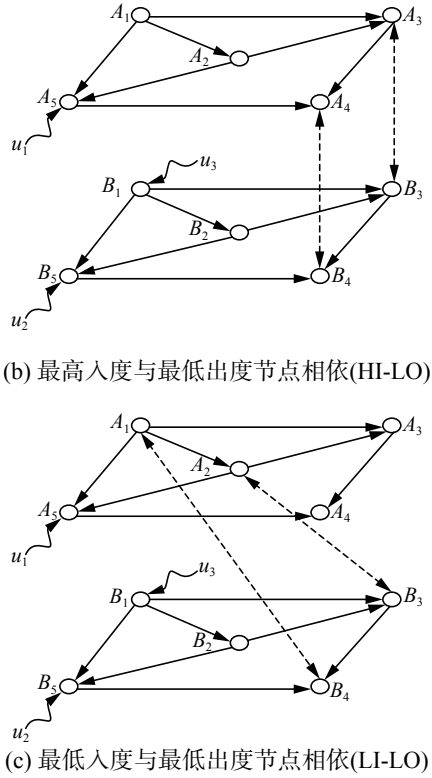
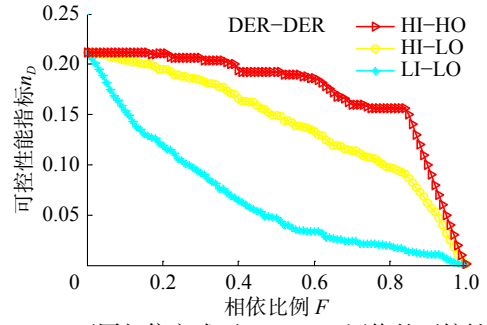


图5 有向相依网络的相依方式

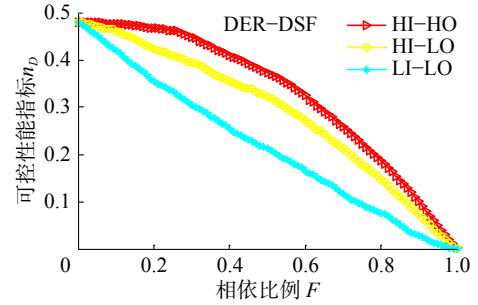
Fig. 5 Dependent way of the interdependent directed network

针对提出的3种有向网络相依方式,在DER-DER、DER-DSF、DSF-DSF 3类有向相依网络中对网络可控性进行了仿真对比。如图6(a)所示,在DER-DER有向相依网络中对3种既定相依方式而言, n_D 均呈现随着相依比例 F 增大而减小的趋势,同时在图6(b)所示的DER-DSF有向相依网络与图6(c)所示的DSF-DSF有向相依网络中, n_D 的变化趋势与图6(a)相同,即在同一有向相依网络中对任一既定相依方式来说,网络可控性会随着相依比例的增加而逐渐增强。在图6(a)所示的DER-DER有向相依网络中,针对相同相依比例 F ,对3种既定相依方式下的网络可控性进行对比发现 $n_D(\text{LI-LO}) < n_D(\text{HI-LO}) < n_D(\text{HI-HO})$,同时在图6(b)所示的DER-DSF有向相依网络与图6(c)所示的DSF-DSF有向相依网络中,在同等相依比例 F 下有 $n_D(\text{LI-LO}) < n_D(\text{HI-LO}) < n_D(\text{HI-HO})$,即在同一网络中相同相依比例下,基于最小入度与最小出度节点相依的有向相依网络可控性最强,而基于最大入度与最大出度节点相依的有向相依网络可控性最弱。

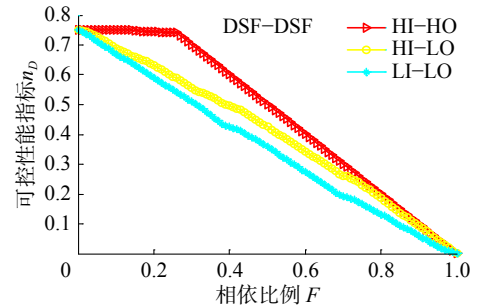
图6中,网络规模 $2N=1\,000$,其中DER网络, $\langle K \rangle=2$;DSF网络, $\gamma_{\text{in}}=\gamma_{\text{out}}=3$, $\langle K \rangle=2$ 。每组数据为50次独立实验的平均值。



(a) 不同相依方式下DER-DER网络的可控性



(b) 不同相依方式下DER-DSF网络的可控性



(c) 不同相依方式下DSF-DSF网络的可控性

图6 不同相依方式下有向相依网络可控性

Fig. 6 Controllability of the interdependent directed network under different dependent way

4 结束语

相互依存的复杂网络广泛存在于实际复杂系统中,且往往存在有向网络之间的相依,本文首先构建了基本的有向相依网络模型,并结合严格可控性理论,给出了基于最少控制输入的可控性评判指标;考虑相依方式对有向相依网络可控性产生的影响,本文基于经典的有向随机网络(DER)和有向无标度网络(DSF),构建了DER-DER、DER-DSF、DSF-DSF三类有向相依网络模型,并在4组不同相依比例下,研究了随机相依方式下的DER-DER网络的可控性能,研究发现,随着相依比例的增加,网络可控性逐渐增强。但每组相依比例下的网络可控性均会在一定范围内出现大幅的波动。为了进一步证实相依方式影响着网络的可控性,通过在随机相依方式下对连续相依比例下的3类有向相依网络可控性进行了仿真,我

们发现随着相依比例的逐渐增加,网络可控性总体均呈现逐渐增强的趋势,但由于相依方式的随机性,网络可控性在增强过程中会出现明显的波动情况,即有向网络的相依方式对网络可控性产生着重要影响。

基于分析本文提出了3种有向网络的相依方式:最高入度与最高出度节点相依(HI-HO)、最高入度与最低出度节点相依(HI-LO)、最低入度与最低出度节点相依(LI-LO),同时就提出的3种相依方式在3类有向相依网络中对网络可控性进行了仿真对比,且通过对比发现,在同一网络中同等相依比例下,基于最低入度与最低出度节点相依的有向相依网络可控性最强,而基于最高入度与最高出度节点相依的有向相依网络可控性最弱。研究证实了有向网络相依方式密切影响着网络的可控性,且得到3种相依方式下有向相依网络可控性的强弱关系,这为构建强可控性能的实际有向相依网络提供了参考依据。

参考文献:

- [1] MORENO Y, NEKOVEE M, PACHECO A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks[J]. *Physical review E*, 2004, 69(6): 066130.
- [2] NEWMAN M E, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. *Physical review E*, 2004, 69(2): 026113.
- [3] SHEN J, ZHENG B. Cross-correlation in financial dynamics[J]. *Europhysics letters*, 2009, 86(4): 48005.
- [4] LIN Chingtai. Structural controllability[J]. *IEEE transactions on automatic control*, 1974, 19(3): 201–208.
- [5] LIU Yangyu, SLOTINE J J, BARABÁSI A L. Controllability of complex networks[J]. *Nature*, 2011, 473(7346): 167–173.
- [6] JIA Tao, LIU Yangyu, CSÓKA E, et al. Emergence of bimodality in controlling complex networks[J]. *Nature communications*, 2013, 4: 2002.
- [7] JIA Tao, BARABÁSI A L. Control capacity and a random sampling method in exploring controllability of complex networks[J]. *Scientific reports*, 2013, 3: 2354.
- [8] WANG Wenxu, NI Xuan, LAI Yingcheng, et al. Optimizing controllability of complex networks by minimum structural perturbations[J]. *Physical review E*, 2012, 85(2): 026115.
- [9] XU Jiuqiang, WANG Jinfang, ZHAO Hai, et al. Improving controllability of complex networks by rewiring links regularly[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference. Changsha, China: IEEE, 2014: 642–645.
- [10] HOU Lvlin, LAO Songyang, SMALL M, et al. Enhancing complex network controllability by minimum link direction reversal[J]. *Physics letters A*, 2015, 379(20/21): 1321–1325.
- [11] YUAN Zhengzhong, ZHAO Chen, DI Zengru, et al. Exact controllability of complex networks[J]. *Nature communications*, 2013, 4: 2447.
- [12] LI Jingwen, YUAN Zhengzhong, FAN Ying, et al. Controllability of fractal networks: an analytical approach[J]. *Europhysics letters*, 2014, 105(5): 58001.
- [13] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1025–1028.
- [14] WANG Jianwei, LI Yun, ZHENG Qiaofang. Cascading load model in interdependent networks with coupled strength[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2015, 430: 242–253.
- [15] WANG Jianwei, JIANG Chen, QIAN Jianfei. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2014, 393: 535–541.
- [16] CHENG Zunshui, CAO Jinde. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2015, 430: 193–200.
- [17] 陈世明, 吕辉, 徐青刚, 等. 基于度的正/负相关相依网络模型及其鲁棒性研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(4): 048902.
- CHEN Shiming, LÜ Hui, XU Qinggang, et al. The model of interdependent network based on positive/negative correlation of the degree and its robustness study[J]. *Acta physica sinica*, 2015, 64(4): 048902.
- [18] GÓMEZ S, DÍAZ-GUILERA A, GÓMEZ-GARDEÑES J, et al. Diffusion dynamics on multiplex networks[J]. *Physical review letters*, 2013, 110(2): 028701.
- [19] OHTSUKI H, NOWAK M A, PACHECO J M. Breaking the symmetry between interaction and replacement in evolutionary dynamics on graphs[J]. *Physical review letters*, 2007, 98(10): 108106.
- [20] BARRETO E, HUNT B, OTT E, et al. Synchronization in networks of networks: the onset of coherent collective behavior in systems of interacting populations of heterogeneous oscillators[J]. *Physical review E*, 2007, 77(3): 036107.
- [21] YUAN Zhengzhong, ZHAO Chen, WANG Wenxu, et al. Exact controllability of multiplex networks[J]. *New journal*

al of physics, 2014, 16(10): 103036.

- [22] NIE Sen, WANG Xuwen, WANG Binghong. Effect of degree correlation on exact controllability of multiplex networks[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2015, 436: 98–102.

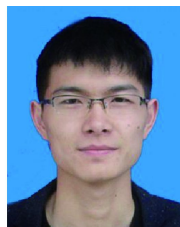
作者简介:



陈世明, 男, 1977 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为群体动力学与协调控制、复杂网络理论及应用、多机器人系统、粒子群优化算法。先后主持国家自然科学基金项目 3 项、其他省部级项目 10 余项, 发表学术论文 70 余篇, 其中 SCI/EI 检索近 50 篇。



程运洪, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为相依网络的鲁棒性优化研究。



邓兵, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 主要研究方向相依网络级联失效的可控性研究。

2018 IEEE/CSAA 制导、导航与控制学术会议 2018 IEEE/CSAA Guidance, Navigation and Control Conference

IEEE/CSAA 制导、导航与控制学术会议 (GNCC) 是目前最大的航空、航天、航海、陆地等运动体制导、导航与控制 (GNC) 领域的国际学术会议, 每两年举办一次, 已经成功举办 7 届。IEEE/CSAA GNCC2018 将集聚国内外高等院校、科研院所和工业部门的专家学者, 探讨和交流 GNC 领域相关的学术和技术问题, 并将邀请 GNC 领域的国际知名学者做大会特邀报告, 会议还包括会前报告、小组讨论、邀请组、口头报告和张贴报告等。

IEEE/CSAA GNCC2018 会议将于 2018 年 8 月 10 日~12 日在厦门召开。本届会议由中国航空学会 (CSAA) 制导、导航与控制分会 (TCGNC)、飞行器控制一体化技术重点实验室、IEEE 控制系统协会 (CSS) 南京分会共同主办, 中国自动化学会控制理论专业委员会 (TCCT) 技术协办, 厦门大学承办。

根据 IEEE 最新规定, 只有英文论文进入在线的 IEEE Xplore, 并根据质量被 EI Compendex 收录, 其中部分优秀的英文论文将被推荐到《Chinese Journal of Aeronautics》(SCI-E index), 《Science China Information Sciences》(SCI-E index) 等国际期刊发表。

欢迎为本届会议组织 Special Session (每个 Session 包括 6 篇稿件), 热忱欢迎国内外相关研究领域同行踊跃投稿并参会!

主办单位:

中国航空学会 (CSAA) 制导、导航与控制分会 (TCGNC)

飞行器控制一体化技术重点实验室

IEEE 控制系统协会 (CSS) 南京分会

技术协办单位:

中国自动化学会 (CAA) 控制理论专业委员会 (TCCT)

承办单位:

厦门大学

联系信息

程序委员会秘书处:

唐仁林 北京市海淀区学院路 37 号, 北京航空航天大学, 自动化科学与电气工程学院, 100083

电话: 010-82317318

手机: 13621186338

邮箱: trl@buaa.edu.cn

会议时间 2018-08-10 至 2018-08-12

会议地点 厦门

官方网址 <http://gncc.buaa.edu.cn>