



第八届“控制科学与工程前沿论坛”天津 2016-05-06
—围绕“**互联网+**”这一热点话题，探讨现有控制理论方法和技术面临的**挑战**，探索
新思路、新方向以及新方法

复杂智能网络中的控制问题

关 治 洪

华中科技大学 自动化学院
Email: zhguan@mail.hust.edu.cn

1



报告提纲

- 一. 引言
- 二. 多自主体网络中的控制问题
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

2

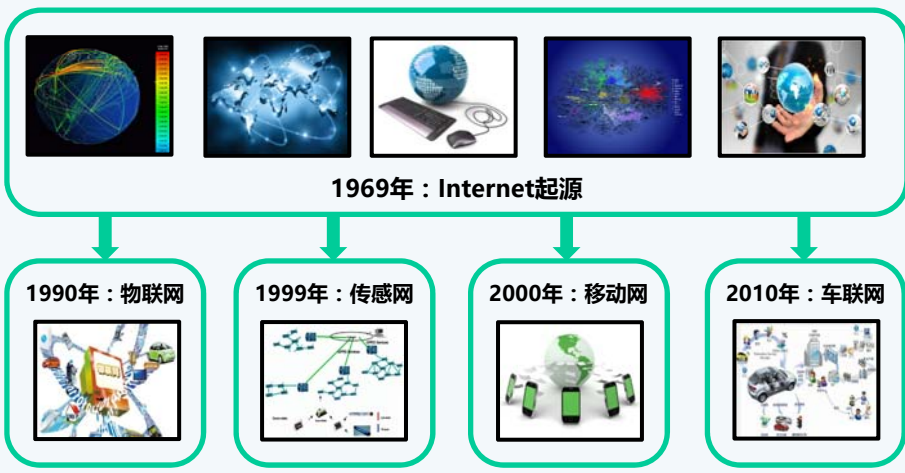
✧ 报告提纲

- 一. 引言
- 二. 多自主体网络中的控制问题
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

3

✧ 引言

■ 日新月异，飞速发展



1969年：Internet起源

1990年：物联网

1999年：传感网

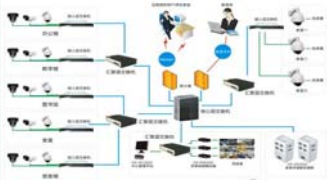
2000年：移动网

2010年：车联网

4

引言

■ 网络无处不在



校园监测网络



视频监测网络



传感监测网络



光纤监测网络

5

引言

■ 挑战问题



网络拥塞 (更快捷)



西欧大停电 (更可靠)



信息传输 (更安全)



多机器人协作 (更智慧)

6

引言

■ 网络系统中存在的挑战问题

- 如何使拥塞的网络**速度更快**（**更快捷**）？
- 如何使网络具有更强的**抗干扰能力**（**更可靠**）？
- 如何保护网络系统中的**传输数据**（**更安全**）？
- 如何使网络**作业能力更强、功能更多**（**更智慧**）？
-



7

报告提纲

- 一. 引言
- 二. **多主体网络中的控制问题**
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

8

多自主体网络中的控制问题

■ 多自主体网络



鱼群的围捕与逃逸



鸟群迁徙



蚂蚁搬家



奔腾的马群

9

多自主体网络中的控制问题

■ 挑战问题

- 如何描述具有多约束的多自主体网络**模型**？
- 如何设计满足一定性能指标的多自主体网络**优化算法**？
- 如何实现多自主体网络的**多协同**？
- 如何实现多自主体网络的**智能化**？
- **实际多自主体网络**（例如：机器人网络）如何协调？
-



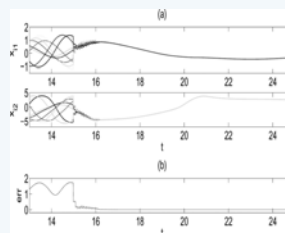
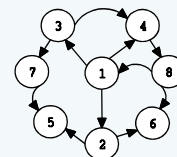
10

多自主体网络中的控制问题

多约束多自主体网络协同

具有时变时滞的多自主体网络动力学行为

$$\dot{x}_i(t) = \underbrace{Ax_i(t)}_{\text{不具有时变时滞的节点}} + \underbrace{g(t, x_i(t), x_i(t-\tau(t)))}_{\text{具有时变时滞的耦合}} + \underbrace{c \sum_{j=1}^N b_{ij} \Gamma x_j(t)}_{\text{不具有时变时滞的节点}} + \underbrace{\sum_{l=1}^m c^{\tau_l} \sum_{j=1}^N b_{ij}^{\tau_l} \Gamma^{\tau_l} x_j(t-\tau_l(t))}_{\text{具有时变时滞的耦合}} + u_i(t)$$



提出控制拓扑的思想和分布式脉冲控制算法

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \left[x_i(t) - \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} x_j(t) \right] \delta(t - t_k)$$

解决了具有多种约束的多自主体网络同步控制问题

11

多自主体网络中的控制问题

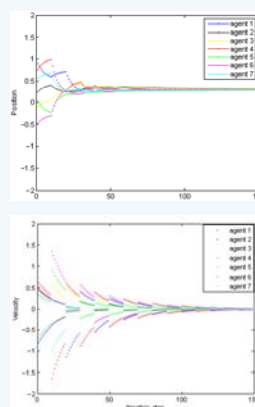
多自主体网络优化

提出多自主体网络的分布式混杂优化控制算法

$$\dot{x}_i(t) = v_i(t), \quad \dot{v}_i(t) = \underbrace{u_i^{\text{con}}(t)}_{\text{常规控制}} + \underbrace{u_i^{\text{opt}}(t)}_{\text{优化控制}}, \quad J = \sum_{i=1}^M J_i = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} e_x^T(s) P e_x(s) ds.$$

$$u_i^{\text{con}}(t) = -\alpha \left(\sum_{j=1}^M l_{ij} x_j(t) + \sum_{j=1}^M l_{ij} v_j(t) \right) \delta(t - t_k), \quad t_k \in \mu,$$

$$u_i^{\text{opt}}(t) = -\beta v_i(t)$$



解决了多自主体网络的优化一致性问题

12

多自主体网络中的控制问题

■ 多自主体网络多协同

➢ 提出一类多自主体网络的多协同算法

$\dot{x}_i(t) = v_i(t),$
 $\dot{v}_i(t) = u_i(t).$

→

$\dot{x}(t) = v(t),$
 $\dot{v}(t) = u(t).$

$$u(t) = -\sum_{l=0}^{\infty} \left\{ \alpha P x(t_{l+1}) + \beta Q [x(t_{l+1}) - x(t_l)] \right\} \delta(t - t_{l+1})$$

A. Stationary Multiconsensus $P = \bar{L}, Q = I_n$

B. First Dynamic Multiconsensus $P = Q = \bar{L}$

C. Second Dynamic Multiconsensus $P = I_n, Q = \bar{L}$

与Laplacian矩阵有关的耦合矩阵

➢ 解决了多自主体网络的分布式多协同问题

静态多一致

一阶动态多一致

二阶动态多一致

13

多自主体网络中的控制问题

■ 具有混杂智能的多自主体网络多协同

➢ 提出具有混杂智能的多自主体网络的异步多协同算法

$f(i) \in \{\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_m\}$

智能体 i 的智能度

$$u_i = -\alpha_1 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \frac{f(i)}{f(j)} l_{ij} x_j(t) \delta(t - t_{2l-1}) - \beta_1 \sum_{l=1}^{\infty} v_i(t) \delta(t - t_{2l})$$

$$u_i = -\alpha_2 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \frac{f(i)}{f(j)} l_{ij} x_j(t) \delta(t - t_{2l-1}) - \beta_2 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \frac{f(i)}{f(j)} l_{ij} v_j(t) \delta(t - t_{2l})$$

$$u_i = -\alpha_3 \sum_{l=1}^{\infty} x_i(t) \delta(t - t_{2l-1}) - \beta_3 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \frac{f(i)}{f(j)} l_{ij} v_j(t) \delta(t - t_{2l})$$

位置控制的脉冲时刻

速度控制的脉冲时刻

➢ 解决了具有混杂智能的多自主体网络的分布式多协同问题

14

多自主体网络中的控制问题

■ 机器人网络的协同跟踪控制

- 提出具有输入扰动的机器人网络协调跟踪控制算法

$$H_i(q_i)\ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)\dot{q}_i + g_i(q_i) = \tau_i + \tau_{id},$$

一阶算法

二阶算法

$$\tau_i = K_{ip}(\varepsilon_i - q_i) + K_{id}(\nu_i - \dot{q}_i), \quad \tau_i = K_{ip}(\varepsilon_i - q_i) + K_{id}(\nu_i - \dot{q}_i), \quad \text{局部控制}$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \nu_i, \quad \dot{\nu}_i = 0, \quad (t_{k-1}, t_k], \quad \dot{\varepsilon}_i = \nu_i, \quad \dot{\nu}_i = 0, \quad (t_{k-1}, t_k],$$

$$\Delta \varepsilon_i = \alpha \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{w_{ij}}{\varpi_i} (\varepsilon_j - \varepsilon_i), \quad t = t_k, \quad \Delta \nu_i = \alpha \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{w_{ij}}{\varpi_i} (\varepsilon_j - \varepsilon_i)$$

分布式估计

$$\Delta \nu_i = \beta \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{w_{ij}}{\varpi_i} (\nu_j - \nu_i), \quad t = t_k, \quad + \beta \sum_{j \in \mathcal{J}} \frac{w_{ij}}{\varpi_i} (\nu_j - \nu_i), \quad t = t_k,$$

- 解决了具有输入扰动的机器人网络的协调跟踪问题

15

多自主体网络中的控制问题

■ 机器人网络的协同跟踪控制

- 得到了很接近于充要条件的理论结果 $0 < \alpha < 1.1716, \quad 0 < \beta < 1.1716$

$$\alpha = 0.9$$

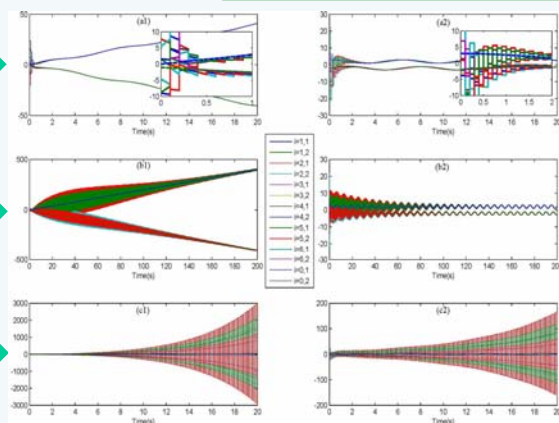
$$\beta = 1.1$$

$$\alpha = 1.17$$

$$\beta = 1.17$$

$$\alpha = 1.18$$

$$\beta = 1.18$$

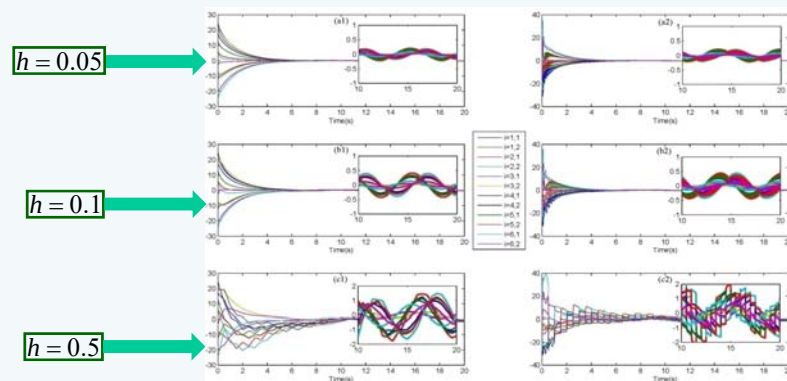


16

多自主体网络中的控制问题

■ 机器人网络的协同跟踪控制

- 收敛半径与采样周期大小成正相关 $\alpha = 0.9, \beta = 1.1$



- 建立了收敛半径与采样周期的定量关系

17

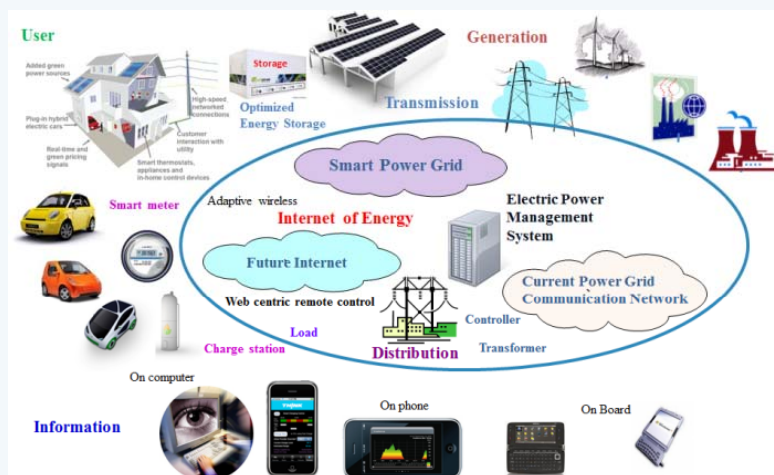
报告提纲

- 一. 引言
- 二. 多自主体网络中的控制问题
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

18

复杂能源网络中的控制问题

■ 能源互联网=互联网+智能电力系统



19

复杂能源网络中的控制问题

■ 能源互联网特性



混杂性



智能性



便捷性



安全性

20

复杂能源网络中的控制问题

■ 能源互联网中存在的挑战问题

- 能源互联网的**供需平衡风险调度问题**
- 能源互联网的**基于工程博弈的动态电价设计问题**
- 能源互联网的**有功功率与无功功率混合优化问题**
- 能源互联网的**依存网络级联故障与鲁棒性脆弱性分析问题**
-

21

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测—背景



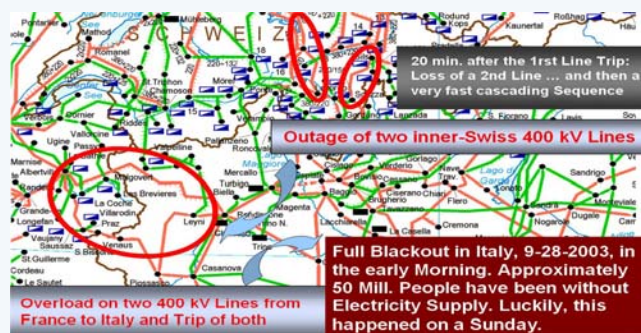
2012.10.30 美国曼哈顿大停电



2003.09.28 意大利大停电卫星图

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测—背景



- 意大利大停电的起因是从意大利到瑞士的一条输电线路被风刮断，导致从法国到意大利的两条线路负载激增，随之引起级联故障，使得从意大利起经法国到瑞士之间的线路在4秒内接连失效。三国电网瘫痪近十小时。

23

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测—背景

- 电力线路断线故障是引起大停电的主要原因之一
- 迅速检测出断线故障是保证电网安全稳定的关键
- 已有工作-采用优化模型建模（最大匹配思想）
 - 单故障线路诊断-爬山算法（启发式算法）

J. E. Tate, T. J. Overbye, Line outage detection using phasor angle measurements, *IEEE Trans. on Power Systems*, 23(4): 1644-1652, 2008.

- 单故障线路诊断-加入了潮流做约束

M. J. Smith, K. Wedeward, Event detection and location in electric power systems using constrained optimization, *Proc. of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2009.

- 双故障快速诊断-最速变化检测法

Y. C. Chen, T. Banerjee, A. D. Dominguez-Garcia, et al. Quickest line outage detection and identification, *IEEE Trans. on Power Systems*, doi:10.1109/TPWRS.2015.2394246.

- 多线路故障诊断-贪婪正交匹配跟踪算法

H. Zhu, G. B. Giannakis, Sparse overcomplete representations for efficient identification of power line outages, *IEEE Trans. on Power Systems*, 27(4): 2215-2224, 2012.

24

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测中存在的问题

- 假设电网稳定，而实际当发生断线故障的时候系统往往会发生震荡
- 假设电网中不存在孤岛，即整个电网仍旧是连通的，而实际上断线很容易导致孤岛电网的产生
- 多线路识别是NP-hard问题(最小二乘法等优化)，也就是说没有多项式时间精确算法可以求解该问题

■ 提出适用于更一般情况的新的多线路故障检测方法？

25

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测-建模

■ 电网中的发电节点

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i \\ \dot{\omega}_i = \frac{P_{m,i} - V_i^2 G_{ii}}{M_i} - \frac{D_i \dot{\theta}_i}{M_i} - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^N V_i V_j G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^N V_i V_j B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j), i \in \mathcal{V}_g \end{cases}$$

■ 电网中的频率敏感负载

$$\dot{\theta}_i = -\frac{1}{q_i} \sum_{j=1}^N V_i V_j G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - \frac{1}{q_i} \sum_{j=1}^N V_i V_j B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i^2 G_{ii}, \quad i \in \mathcal{V}_l$$

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测-建模

异构的**复杂多智能体网络**(一阶系统和二阶系统混合)

■ 电网中的发电节点

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \omega_i \\ \dot{\omega}_i = \lambda_i - \frac{D_i}{M_i} \omega_i - \sum_{j=1}^N \epsilon_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - \sum_{j=1}^N \mu_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \end{cases}, i \in \mathcal{V}_g$$

■ 电网中的频率敏感负载

$$\dot{\theta}_i = - \sum_{j=1}^N \kappa_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - \sum_{j=1}^N \nu_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - V_i^2 G_{ii}, \quad i \in \mathcal{V}_l$$

其中 $\kappa_{ij} := \frac{1}{q_i} V_i V_j G_{ij}, \quad \nu_{ij} := \frac{1}{q_i} V_i V_j B_{ij},$

$$\lambda_i = \frac{P_{m,i} - V_i^2 G_{ii}}{M_i} - \frac{D_i \dot{\theta}_i}{M_i}$$

$$\epsilon_{ij} := \frac{1}{M_i} V_i V_j G_{ij}, \quad \mu_{ij} := \frac{1}{M_i} V_i V_j B_{ij},$$

27

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测-建模

- 当出现断线故障时，联络线完全切断，其**电导电纳都变为零**，即在异构复杂多智能体网络模型中，下列参数为零

$$\epsilon_{ij} = 0, \mu_{ij} = 0, \kappa_{ij} = 0, \nu_{ij} = 0$$

- 如能识别出某些参数**从非零变为零**，则其对应的线路发生**断线故障**
- 实现多线路断线故障检测的**关键**是能够**在线辨识出相应的联络线参数**

28

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测-建模

■ 电网中的发电节点的检测算法

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_i = \hat{\omega}_i, \\ \dot{\hat{\omega}}_i = \lambda_i - \frac{D_i}{M_i} \hat{\omega}_i + \sum_{j \in N_i} \hat{\epsilon}_{ij}(t) \cos(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j) + \sum_{j \in N_i} \hat{\mu}_{ij}(t) \sin(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j) \\ - k(t) \left[(\hat{\omega}_i - \omega_i) + \frac{(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2}{\hat{\omega}_i - \omega_i} \right], \end{cases} \quad i \in \mathcal{V}_g$$

自适应控制反馈

■ 电网中的频率敏感负载

$$\dot{\hat{\theta}}_i = \frac{1}{q_i} (-V_i^2 g_{ii}) + \sum_{j=1}^N \hat{\kappa}_{ij}(t) \sin(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j) + \sum_{j=1}^N \hat{\nu}_{ij}(t) \cos(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j) - k'_i(t) (\hat{\theta}_i - \theta_i), i \in \mathcal{V}_l$$

其中 $\hat{\kappa}_{ij}(t), \hat{\nu}_{ij}(t), \hat{\epsilon}_{ij}(t), \hat{\mu}_{ij}(t)$ 为自适应参数用来识别 $\kappa_{ij}, \nu_{ij}, \epsilon_{ij}, \mu_{ij}$

29

复杂能源网络中的控制问题

■ 多线路故障检测-检测算法

■ 相应自适应参数设计如下

$$\dot{\hat{\epsilon}}_{ij} = -\alpha(\hat{\omega}_i - \omega_i) \cdot \cos(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j),$$

$$\dot{\hat{\mu}}_{ij} = -\alpha(\hat{\omega}_i - \omega_i) \cdot \sin(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j),$$

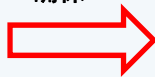
$$\dot{\hat{\kappa}}_{ij} = -\alpha(\hat{\theta}_i - \theta_i) \cdot \sin(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j),$$

$$\dot{\hat{\nu}}_{ij} = -\alpha(\hat{\theta}_i - \theta_i) \cdot \cos(\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j),$$

$$\dot{k}_i = \beta[(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2 + (\hat{\omega}_i - \omega_i)^2],$$

$$\dot{k}'_i = \beta(\hat{\theta}_i - \theta_i)^2,$$

确保



$$\|\hat{\epsilon}_{ij} - \epsilon_{ij}\| \rightarrow 0$$

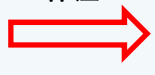
$$\|\hat{\mu}_{ij} - \mu_{ij}\| \rightarrow 0$$

$$\|\hat{\kappa}_{ij} - \kappa_{ij}\| \rightarrow 0$$

$$\|\hat{\nu}_{ij} - \nu_{ij}\| \rightarrow 0$$

$$t \rightarrow \infty$$

保证



$$\|\hat{\theta}_i - \theta_i\| \rightarrow 0$$

$$\|\hat{\omega}_i - \omega_i\| \rightarrow 0$$

$$t \rightarrow \infty$$

我们严格证明了其收敛性

Chao Yang, Zhi-Hong Guan, Zhi-Wei Liu, Jie Chen, Ming Chi, Gui-Lin Zheng. Wide-area multiple line-outages detection in power complex networks. *Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 79(2016): 132–141.

30

复杂能源网络中的控制问题

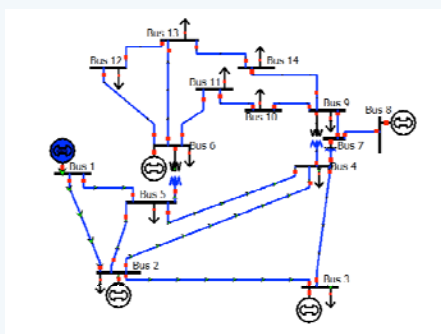
■ 多线路故障检测-检测算法优势

- 可以实现**多线路**断线故障检测算法
- 不需要假设系统稳定
- 基于本地测量和局部通信，是一种**分布式算法**
- 准许出现孤岛

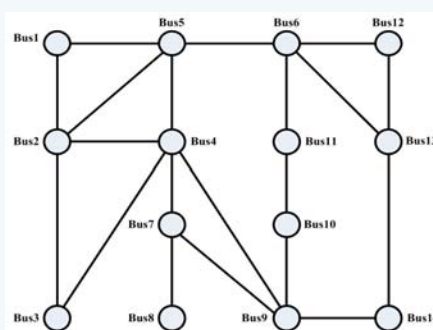
31

复杂能源网络中的控制问题

■ 例子-IEEE 14BUS测试系统



电气结构



拓扑结构

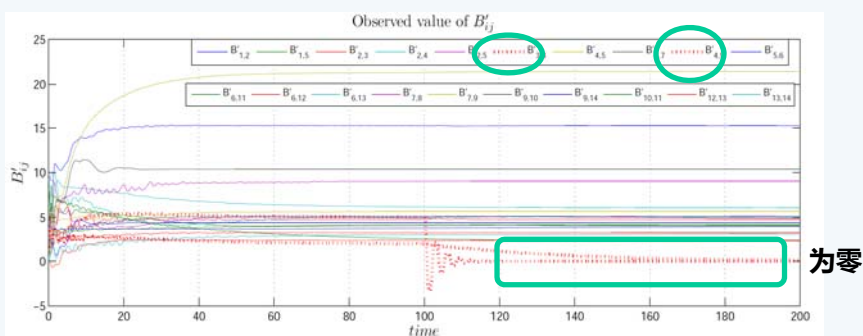
<http://icseg.iti.illinois.edu/ieee-14-bus-system/>

32

复杂能源网络中的控制问题

■ 例子-IEEE 14BUS测试系统

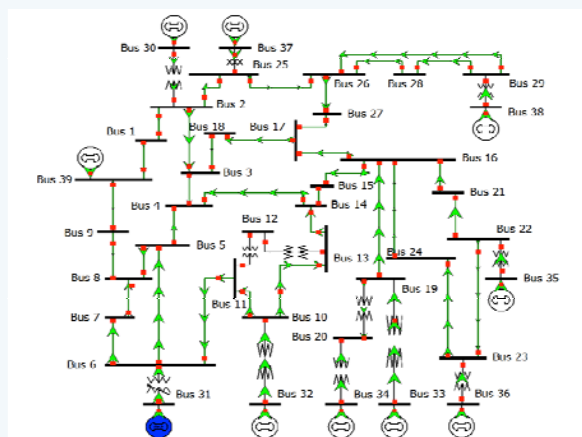
在100s之前电网保持正常工作，在100秒之后断开线路@{3, 4}与{4, 9}



当线路发生故障的时候，观测器发生波动逐渐收敛到零
当观测器的观测值发生波动时，实际已经可以初步判断出现故障

复杂能源网络中的控制问题

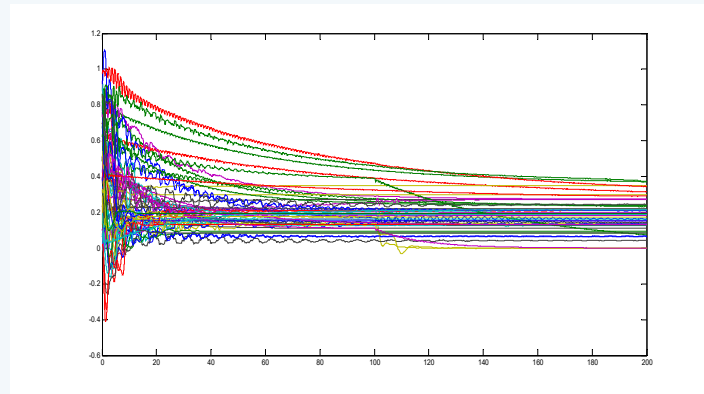
■ IEEE New England 39 bus system



<http://sys.elec.kitami-it.ac.jp/ueda/demo/WebPF/39-New-England.pdf>

复杂能源网络中的控制问题

- 在100s之前电网保持正常工作，在100秒之后断开线路{3, 4}, {6, 14}, {10, 32}, {22, 23}, {26, 29}



报告提纲

- 一. 引言
- 二. 多主体网络中的控制问题
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

复杂生物网络中的控制问题

生物系统的多样性



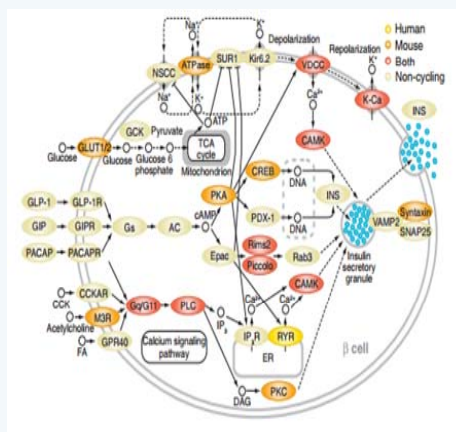
37

复杂生物网络中的控制问题

生物网络的复杂性



生物种群网络



基因调控网络

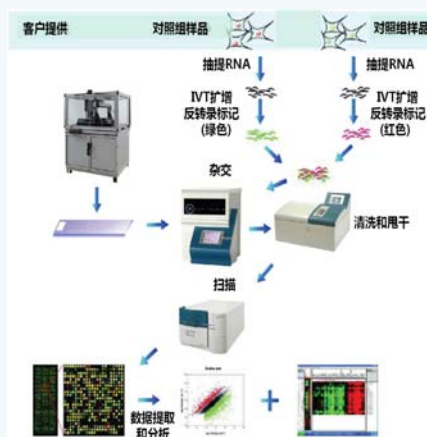
38

复杂生物网络中的控制问题

■ 生物网络的监测与控制



水质微生物监测



基因芯片检测

39

复杂生物网络中的控制问题

■ 生物网络的监测与控制



土壤植被监测



网络健康云

40

复杂生物网络中的控制问题

挑战问题

- 复杂生物网络的构建
- 复杂生物网络的模块划分与相互关系
- 复杂生物网络的功能、结构与动态演化的鲁棒性
- 复杂生物网络的多样性动态演化建模与分析
- 复杂生物网络的监测与控制设计
-

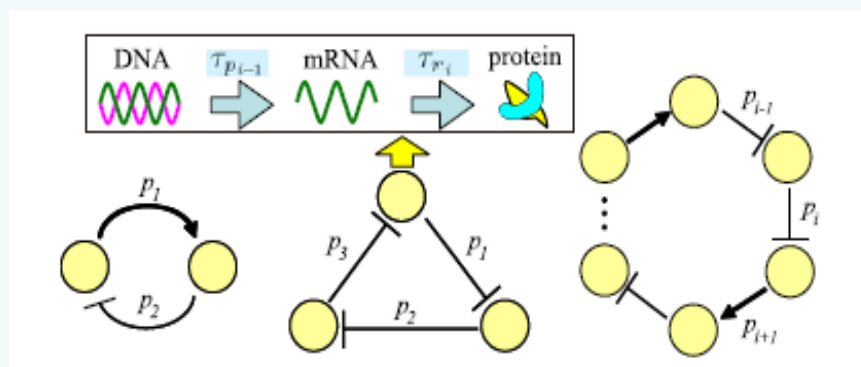


41

复杂生物网络中的控制问题

分布时滞下环形基因调控网络的多稳定性和状态切换研究

- 对具有混合时滞的正、负环状基因调控网络，建立局部稳定性与分岔分析的统一理论框架

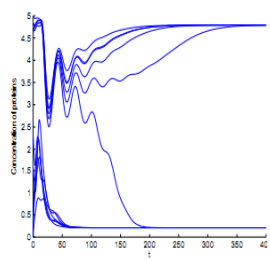


42

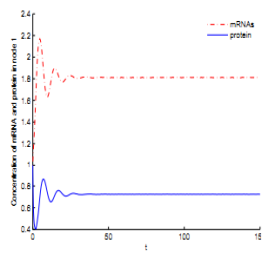
复杂生物网络中的控制问题

分布时滞下环形基因调控网络的多稳定性和状态切换研究

- 揭示了有关结构参数与环状基因调控网络动力学演化过程的关系，离散时滞与分布时滞对环状基因调控网络稳定性的不同作用。

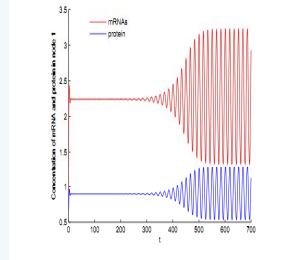


正增益网络的双稳定



负增益网络的稳定

$$\gamma < 1$$



负增益网络的周期震荡

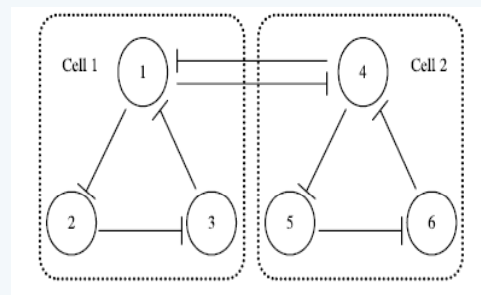
$$\gamma > 1, \varsigma > \varsigma_0$$

43

复杂生物网络中的控制问题

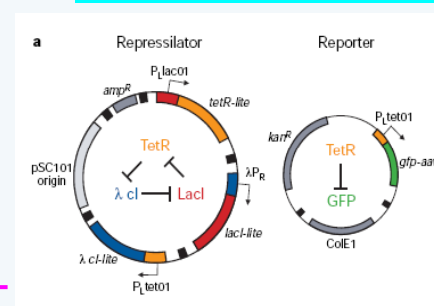
耦合时滞基因调控网络的Hopf分岔序列

- 研究了直接作用通信机制下耦合遏振荡子网络结构的稳定性和Hopf分岔动力学行为



遏振荡子结构

直接作用通信机制

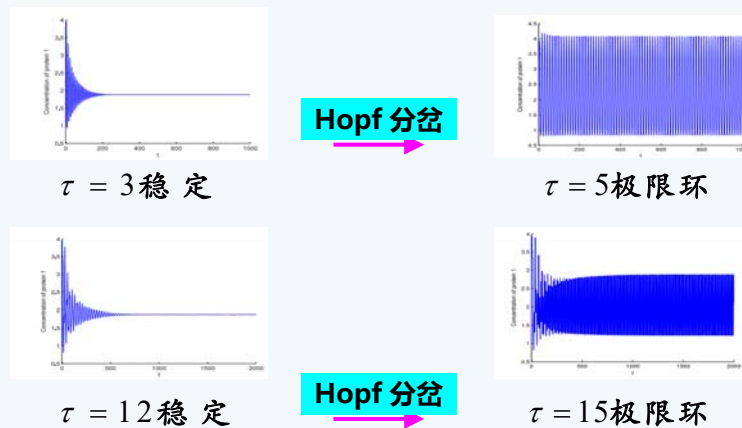


44

复杂生物网络中的控制问题

■ 耦合时滞基因调控网络的Hopf分岔序列

- 揭示了耦合网络随耦合时滞变化发生的Hopf分岔序列现象

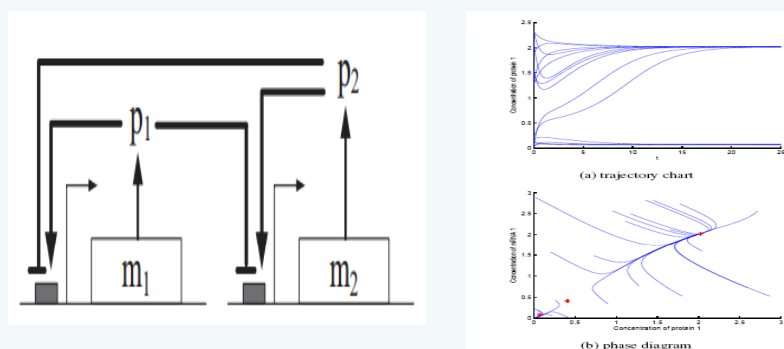


45

复杂生物网络中的控制问题

■ 正自驱动双负反馈环的双稳定

- 研究了正自驱动双负反馈环的稳定性和Hopf分岔行为



- 揭示了正自驱动双负反馈环在不同参数下的不同稳定性行为

46

部分成果列表

- Liu, Z.W., Yu, X.H., Guan, Z. H., Hu, B., & Li, C.J. (2016) Pulse-modulated intermittent control in consensus of multi-agent systems. **IEEE on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2524063.
- Ge M. F., Guan Z. H., Hu B., He D. X., & Liao R. Q. (2016) Distributed controller-estimator for target tracking of networked robotic systems under sampled interaction. **Automatica**, 69: 410-417.
- Yang C., Guan Z. H., Liu Z. W., Chen J., Chi M., Zheng G. L. (2016) Wide-area multiple line-outages detection in power complex networks. **Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 79: 132-141.
- Ling G., Guan Z. H., Liao R. Q., Cheng X. M. (2015) stability and bifurcation analysis of cyclic genetic regulatory networks with mixed time delays. **SIAM Journal on Applied Dynamical Systems**, 14(1): 202-220.
- Ling G., Guan Z. H., He D. X., Liao R. Q., Zhang X. H. (2014) Stability and bifurcation analysis of new coupled repressilators in genetic regulatory networks with delays. **Neural Networks**, 60: 222-231.
- Guan, Z. H., Han, G.S., Li, J., He, D.X., & Feng, G. (2015). Impulsive multiconsensus of second-order multiagent networks using sampled position data. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, 26 (11), 2678-2688.
- Guan, Z. H., Hu, B., Chi, M., He, D.X., & Cheng, X.M. (2014). Guaranteed performance consensus in second-order multi-agent systems with hybrid impulsive control. **Automatica**, 50 (9), 2415-2418.
- Guan, Z. H., Liu, Z.W., Feng, G., & Jian, M. (2012). Impulsive consensus algorithms for second-order multi-agent networks with sampled information. **Automatica**, 48 (7), 1397-1404.
- Liu, Z. W., Guan, Z. H., Shen, X., & Feng, G. (2012). Consensus of multi-agent networks with aperiodic sampled communication via impulsive algorithms using position-only measurements. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 57 (10), 2639-2643.
- Guan, Z. H., Liu, Z. W., Feng, G., & Wang, Y. W. (2010). Synchronization of complex dynamical networks with time-varying delays via impulsive distributed control. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I**, 57 (8), 2182-2195.

47

报告提纲

- 一. 引言
- 二. 多主体网络中的控制问题
- 三. 复杂能源网络中的控制问题
- 四. 复杂生物网络中的控制问题
- 五. 总结与展望

48

