



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

第十七届全国复杂网络学术会议
The 17th Chinese Conference on Complex Networks

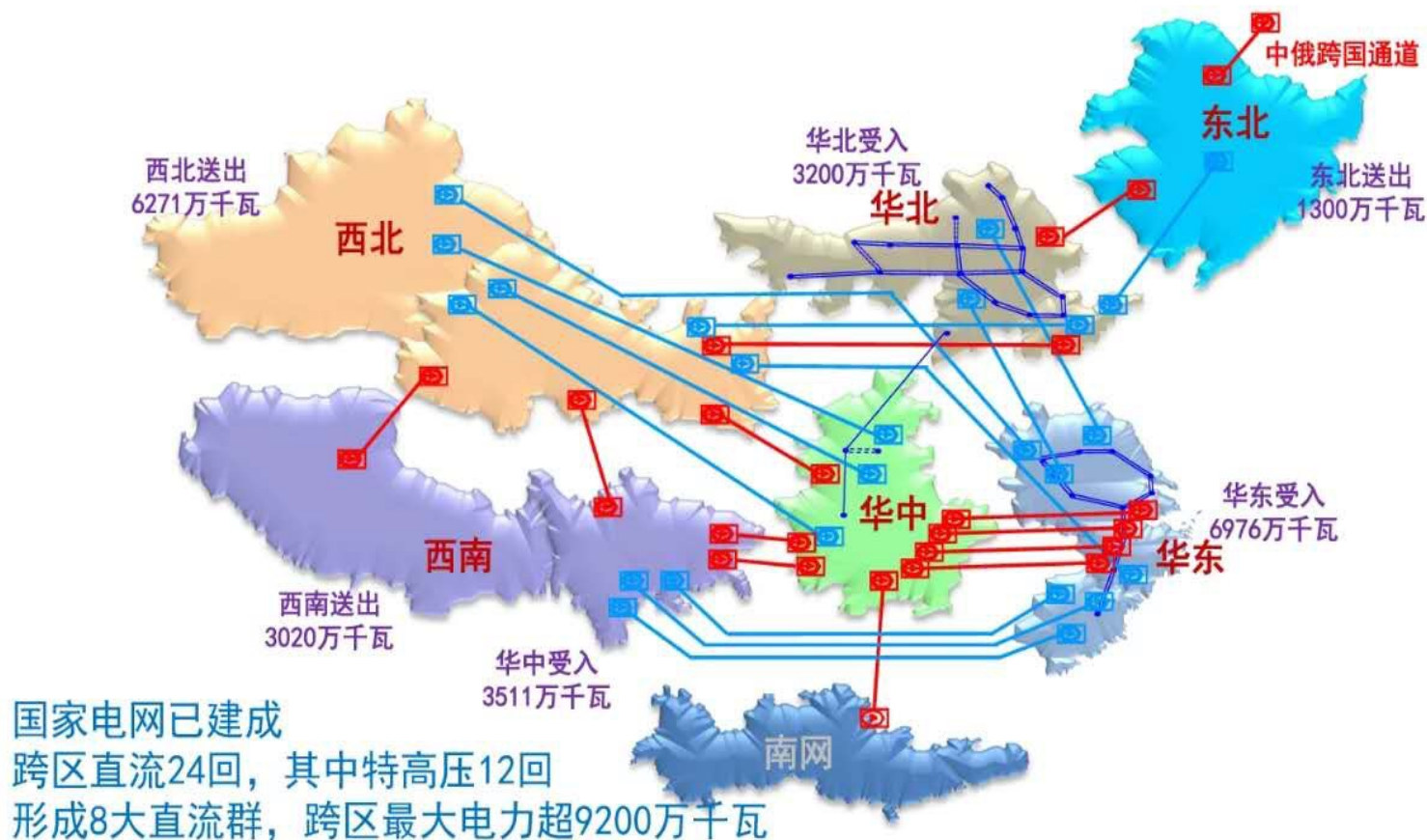
弹性电网建模、分析与智能优化

张曦，助理教授

Email: xizhang@bit.edu.cn

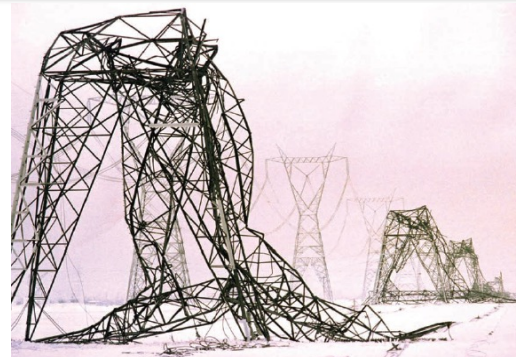
北京理工大学自动化学院

电力系统是当代社会的生命线工程。国家能源局发布的数据显示，2020年，全社会用电量75110亿千瓦时，同比增长3.1%，电能占终端能源消费比重达到27%。经过多年的快速发展，我国电网基本实现了全国互联。电网成为人造的最大复杂网络之一。



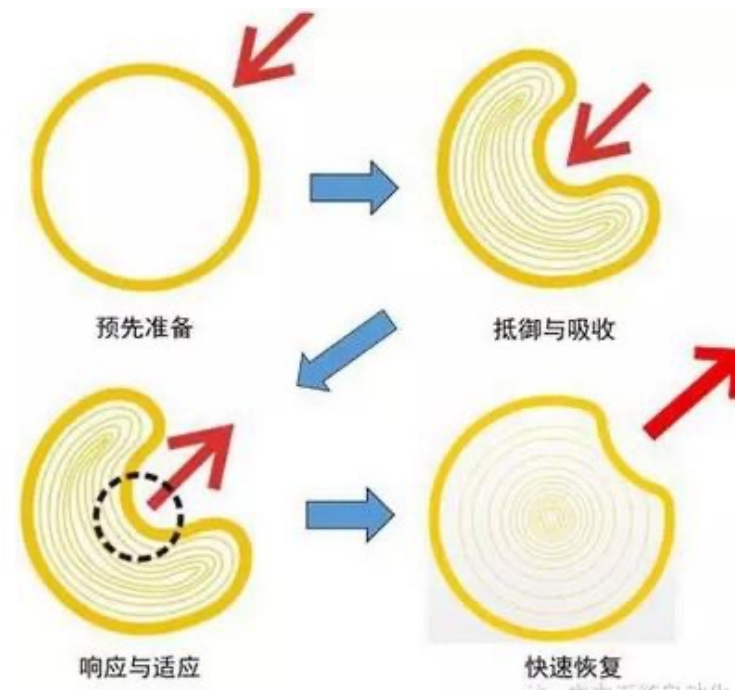
电力系统中的设备地理上广泛分布，且多暴露在野外，极易受到极端事件的影响。

- 2003年伊拉克战争，美军使用**碳纤维炸弹**瘫痪巴格达附近的电网。
- 2008年1月23日起，中国南方雪灾，连续造成 129 条线路故障，造成超一千四百万的家庭停电。
- 2011年日本东部大地震，日本电网多个电力设备受损，超过四百万家庭停电7-9天。
- 2021年2月15日起，由于遭遇寒潮遭受极寒天气，美国德州致使德州电网供电瘫痪，给当地数百万家庭和多个制造业带来恶劣影响。
- 2021年7-9月，由于煤炭供应不足、风力发电资源骤减等因素，我国多地实施轮流限电。我国部分居民生活、商业生产受到较大影响。



定义：电力系统弹性（power system resilience）指在电网面对极端天气和人为攻击时，电网受到强干扰影响，维持和恢复供电的能力。

- 2013年，**美国总统政策指令** (PPD-21) [1]指出：联邦和联邦资助的研究项目 (R&D) 应该协调起来增强电网的弹性。
- 2013年**日本提出国家弹性项目**资助关键基础设施弹性的研究[3]。
- 2015年，**英国弹性电网计划** [2] 专注于开发电力系统运行在极端天气工况下的仿真工具。
- 2019年，中国电力科学研究院成立**非常规状态研究中心**，旨在提升电网在极端环境下的应急能力。
- 美国电力研究协会（EPRI），美国科学院、工程院、医学院，以及一些电力系统领域著名学者，发表了一些列弹性电网专著。
- 我国西安交通大学邱爱慈、别朝红[4]是国内最早研究弹性电网的团队之一。



[1] Presidential Policy Directive (PPD) 21, The White House, Washington, DC, USA, 2013.

[2] The Resilience of the Electricity System, Science and Technology Committee—House of Lords, London, U.K., 2015.

[3] A. Dewit, “Japan’s ‘National Resilience’ and the legacy of 3–11,” Asia-Pacific J., vol. 14, no. 6, pp. 1–7, 2016.

[4] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.

电力系统弹性分析应从多个维度展开：多过程，多指标，多模型，多方法。

重要指标参数：

①连锁故障后供电功率损失：

$$\Delta F_1 = F(t_0) - F(t_2)$$

②紧急恢复后供电功率损失：

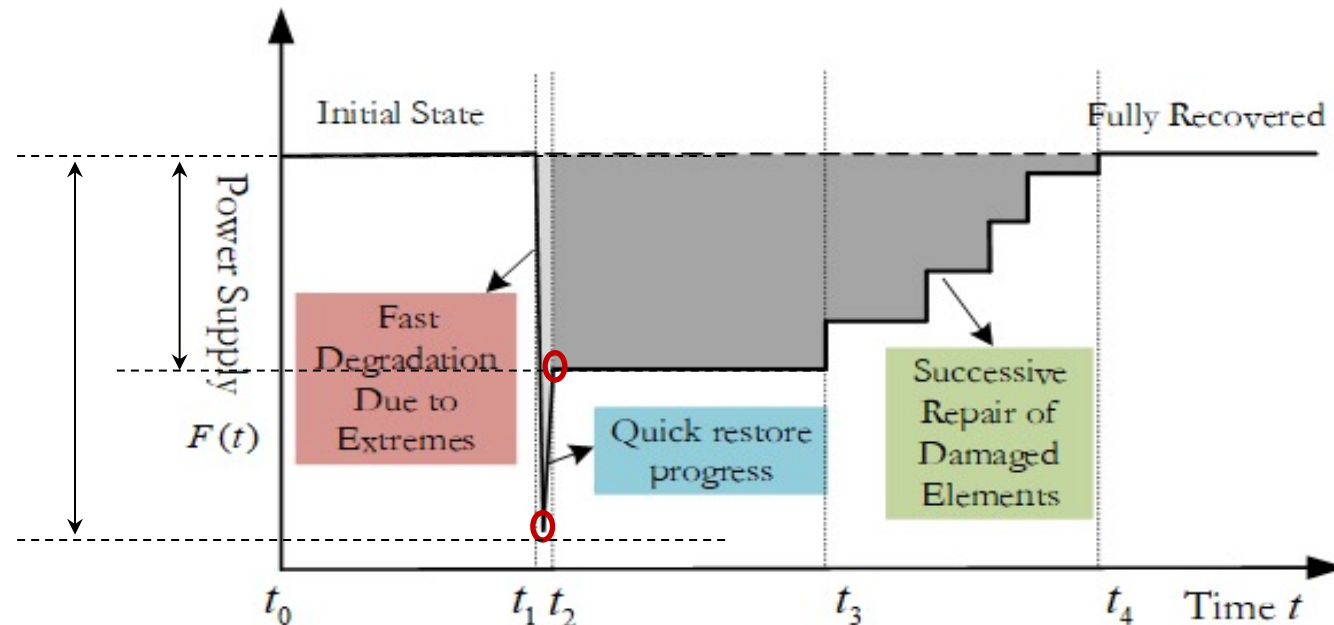
$$\Delta F_1 = F(t_0) - F(t_3)$$

③全过程中的供电量损失：

$$Q = \int_{t_1}^{t_4} F(t) dt$$

④一段运行时间内的供电量损失风险：

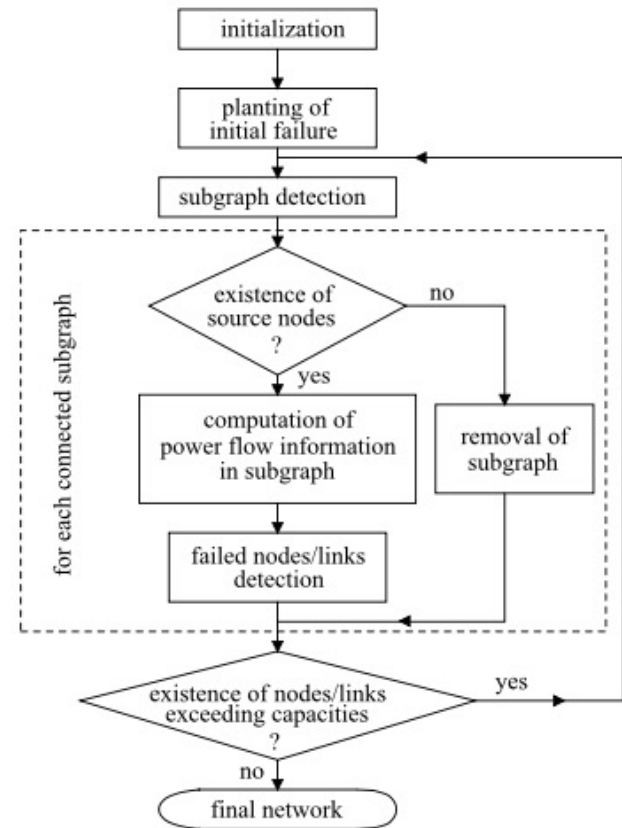
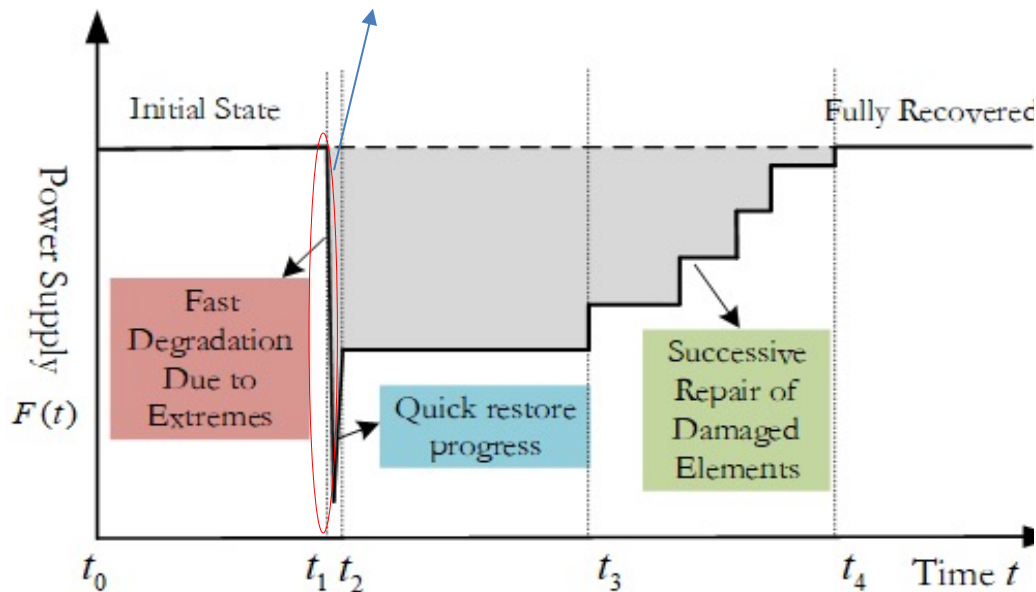
$$R = \sum_{s \in \Omega} Pr(s) Q(s)$$



X. Zhang, J., Guo, T. Wang, S. Ma and S. Zeng, Identifying Critical Elements to Enhance the Power Grid Resilience, *IEEE ISCAS*, 2020. 产权：中国电力科学研究院

在电力系统遭受干扰后，易引发连锁故障。工程上建立了三道防线紧急控制措施，有效抑制系统中连锁故障的传播。

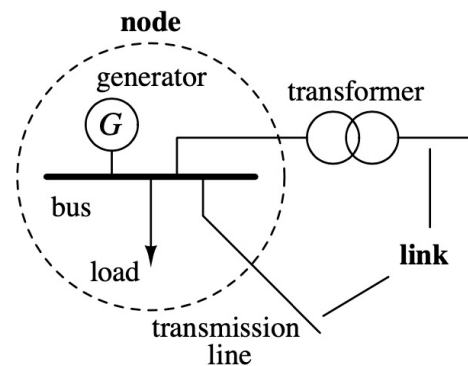
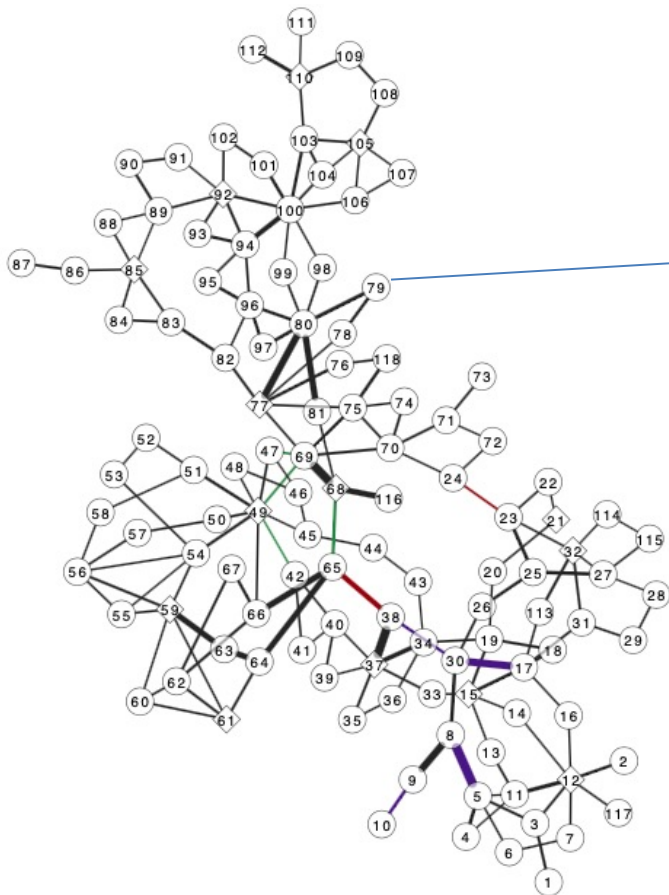
建模：电力系统连锁故障模型



X. Zhang and C. K. Tse, **Assessment of robustness of power systems from a network perspective**, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 456 – 464, September 2015. [This paper has been spotlighted by the IEEE Xplore.](#) 产权：香港理工大学

电力网络动力学建模：节点动力学+节点间相互作用

电力节点建模：



电力节点间相互作用：

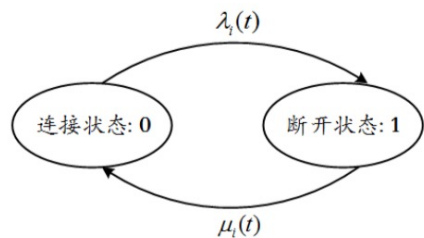
KCL KVL

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \cdots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \cdots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

X. Zhang and C. K. Tse, *Assessment of robustness of power systems from a network perspective*, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 456 – 464, September 2015. [This paper has been spotlighted by the IEEE Xplore.](#) 产权：香港理工大学

建模：基于马尔可夫链和主化学方程式建立了连锁故障模型

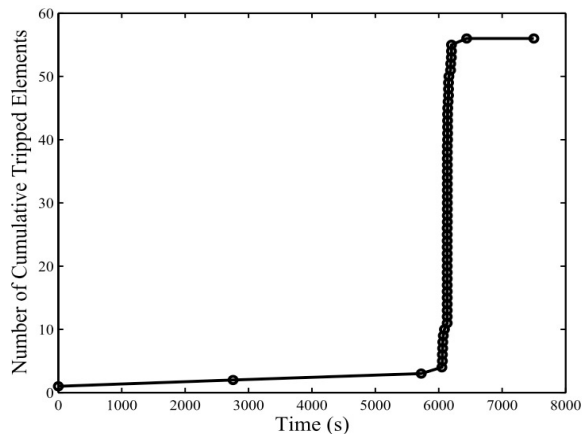
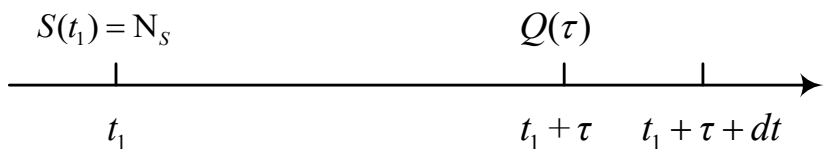
单一元素故障模型：



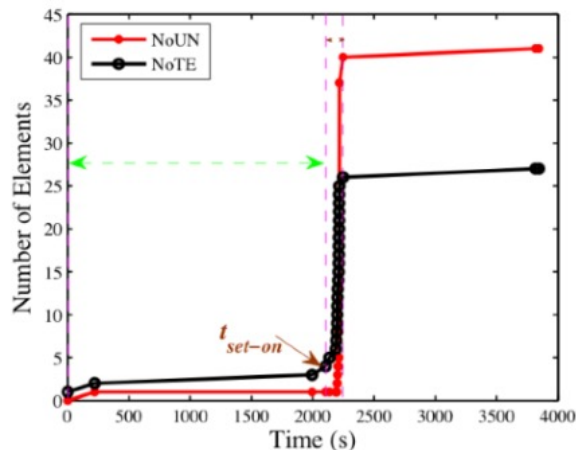
$$\lambda_i(t) = \begin{cases} a_i * \frac{L_i(t) - C_i}{C_i}, & \text{if } L_i(t) > C_i \\ 0, & \text{if } L_i(t) \leq C_i \end{cases}$$

系统状态转换：

$$F(\tau) = 1 - Q(\tau) = 1 - e^{-\lambda * \tau}$$



1996年8月美国大停电事故传播过程记录。



基于所提出模型的仿真结果。

X. Zhang, C. Zhan and C. K. Tse, Modeling the dynamics of cascading failures in power systems, IEEE JETCAS, vol. 7, no. 2, pp. 192-204, June 2017. 知识产权：香港理工大学

在电力系统遭受极端事件损害发生连锁故障后，如何根据现有的、可以实现快速恢复措施使系统快速恢复，如黑启动、电力调度。

可用措施求解灾后：如何快速安排出最优运行方式，包括**黑启动，调节发电机负荷功率，调节网络拓扑。**

目标：

$$F_{\max}(S_i) = - \min \sum_{i \in N_d} P_i$$

模型：

$$P_i = V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}),$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}),$$

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij},$$

$$Q_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + V_i^2 B_{ij},$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max},$$

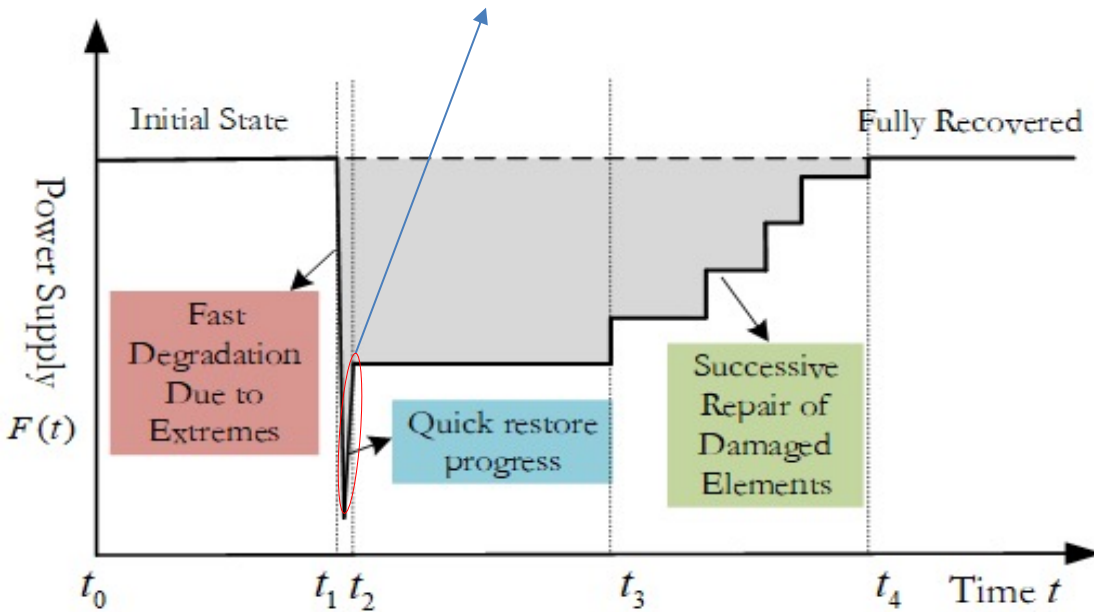
$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max},$$

$$Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max},$$

$$P_{ij \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij \max}.$$

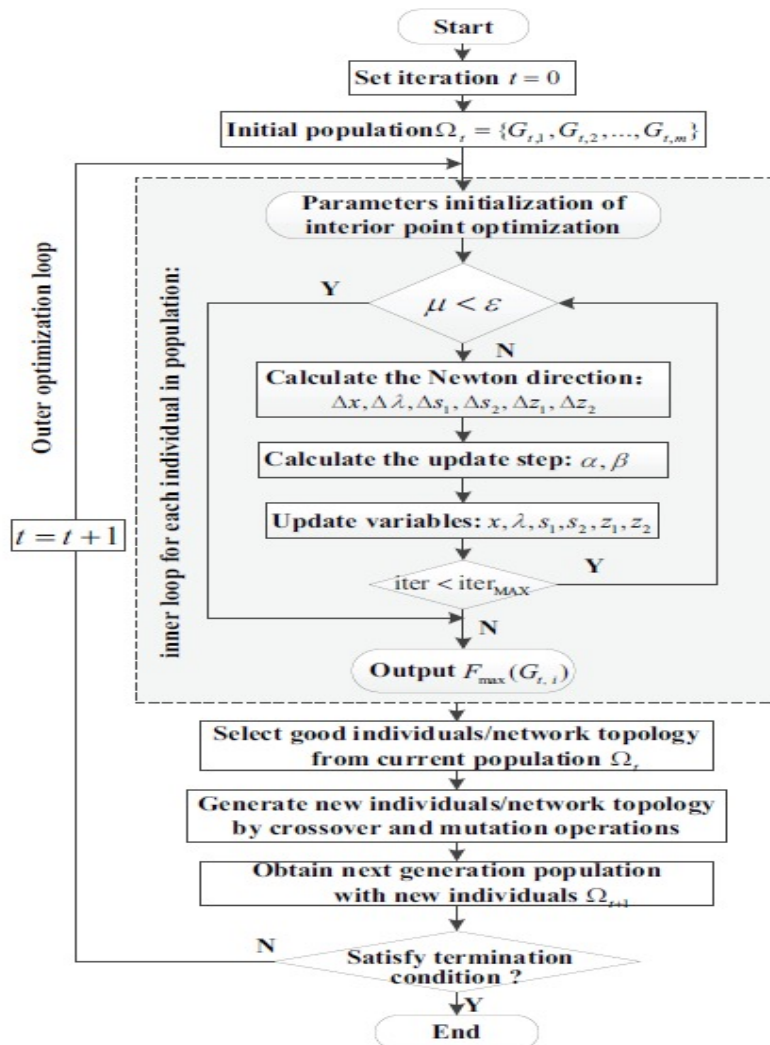
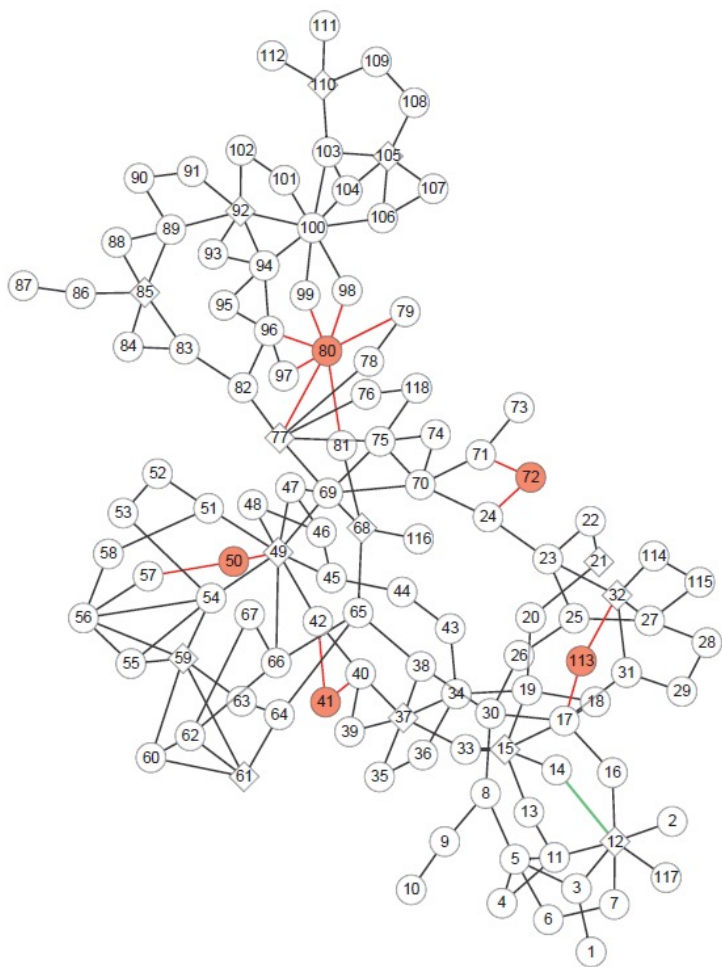
方法：

内点法求最优潮流
遗传算法优化拓扑



X. Zhang, H. Tu, J. B. Guo, et al. Braess Paradox and Double-Loop Optimization Method to Enhance Power Grid Resilience, Reliability Engineering & System Safety, vol. 125, pp. 1077913-1-15, November 2021. (IF = 6.18).

产权：北京理工大学，杭州电子科技大学，中国电科院。



X. Zhang, H. Tu, J. B. Guo, et al. Braess Paradox and Double-Loop Optimization Method to Enhance Power Grid Resilience, Reliability Engineering & System Safety, vol. 125, pp. 1077913-1-15, November 2021. (IF = 6.18).

产权：北京理工大学，杭州电子科技大学，中国电科院。

仿真结果:

布雷斯悖论：在网络中多加链路可能会降低系统整体性能！

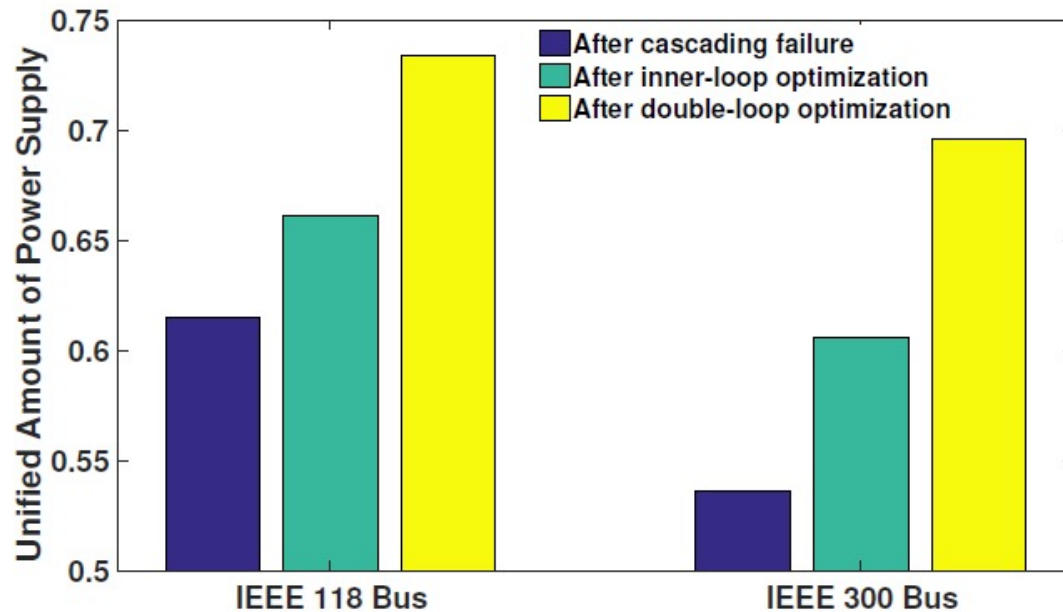


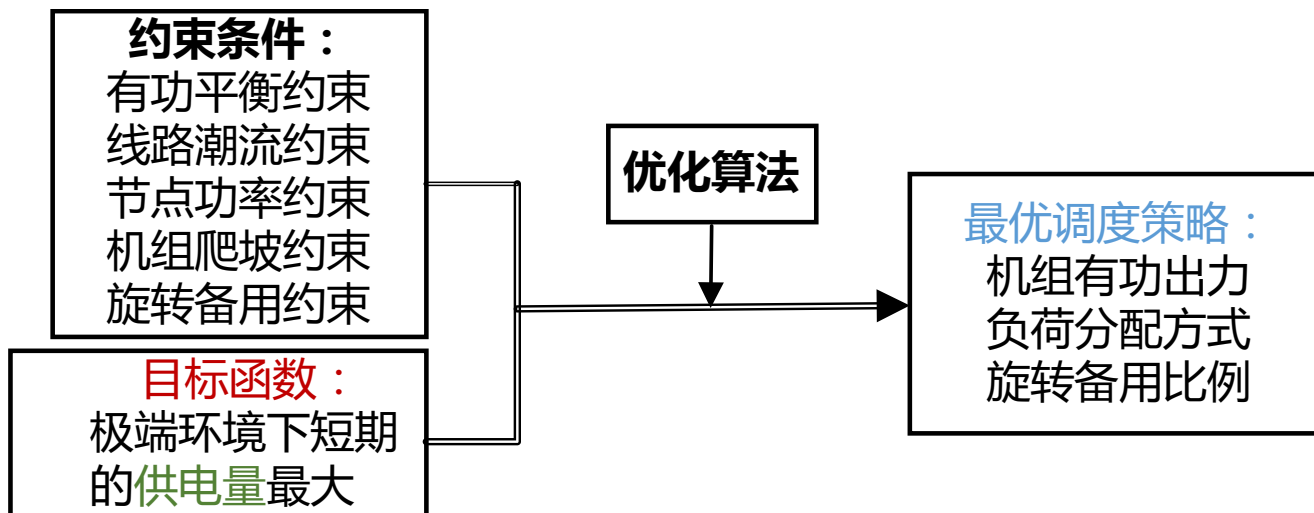
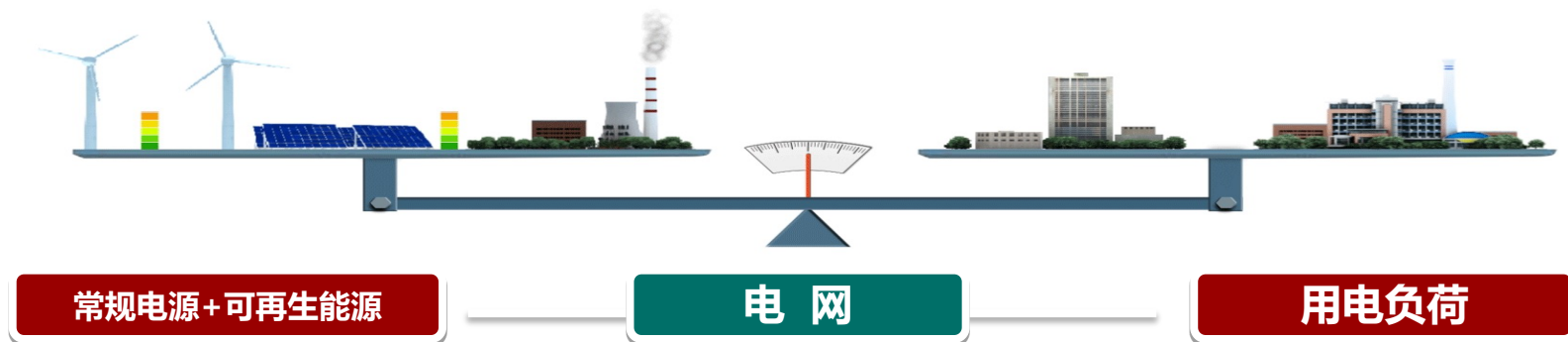
Fig. 7. The comparison of unified amount of power supply maintained after cascading failure processes, optimized by the inner-loop optimization and the double-loop optimization.

X. Zhang, H. Tu, J. B. Guo, et al. Braess Paradox and Double-Loop Optimization Method to Enhance Power Grid Resilience, Reliability Engineering & System Safety, vol. 125, pp. 1077913-1-15, November 2021. (IF = 6.18).

产权：北京理工大学，杭州电子科技大学，中国电科院。

新能源电源特点：

新能源电站出力具有随机性、波动性，为电力系统电力电量平衡带来挑战



考虑分时段新能源备用比例的弹性优化模型

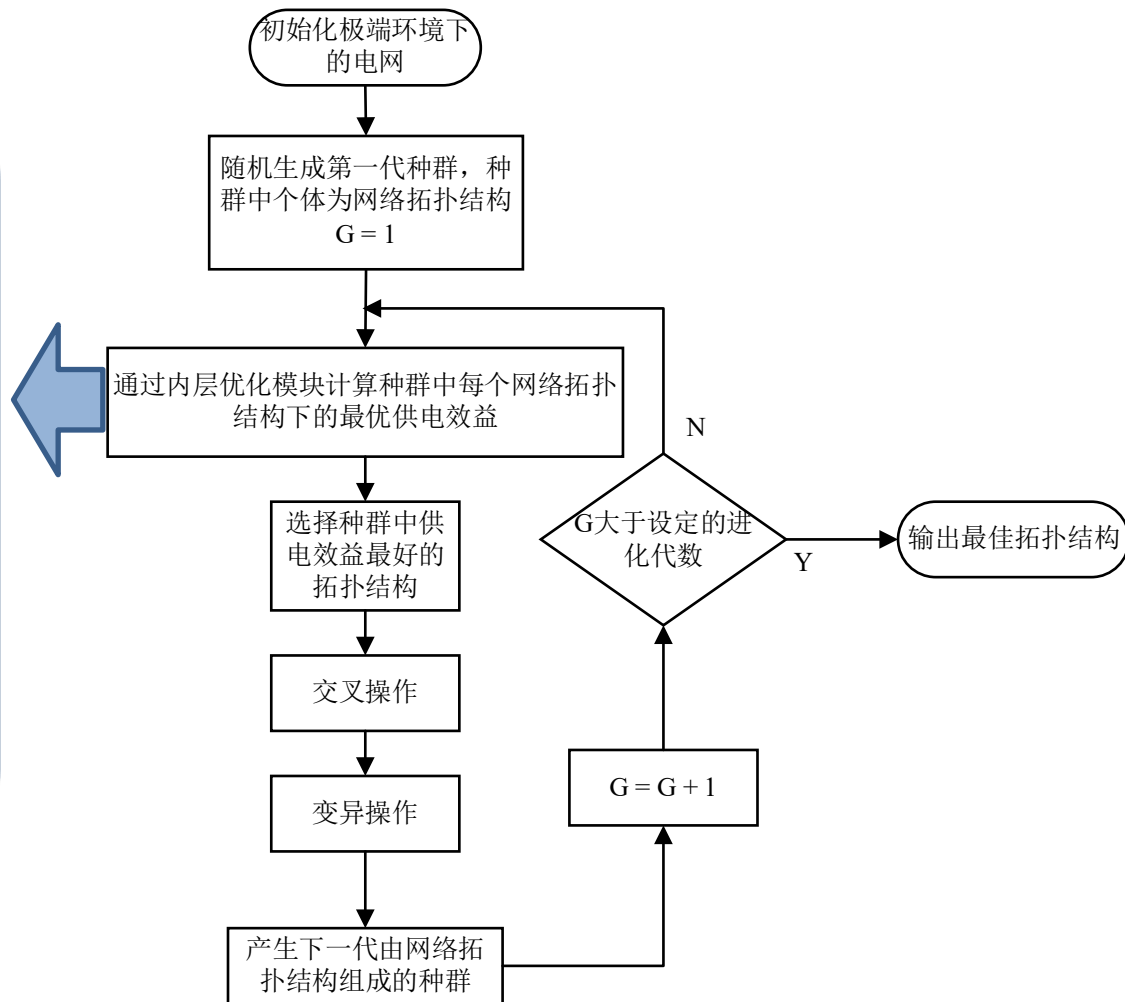
内层优化模型

目标函数：（适应度函数）

$$\max F = \sum_{t=1}^m \left(\sum_{l=1}^L w_l \cdot P_l(t) \right) \cdot \Delta t$$

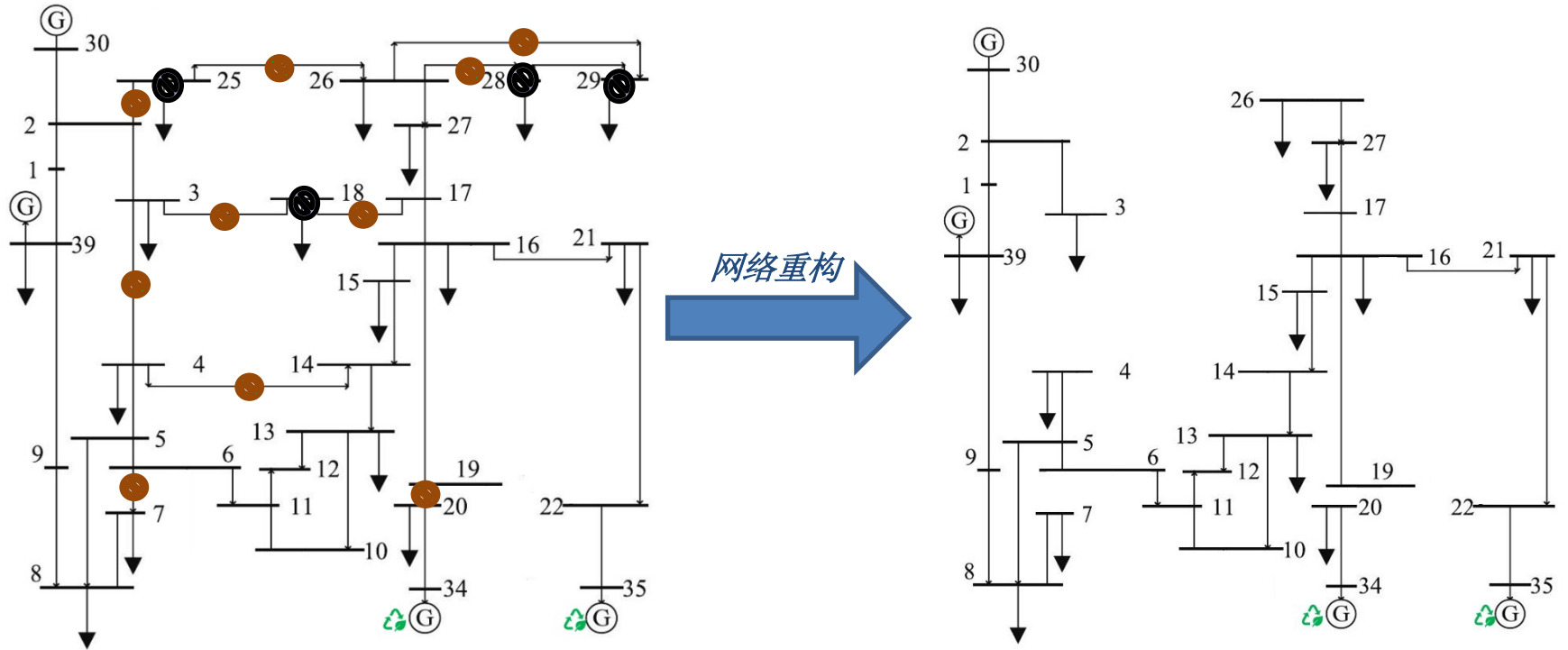
约束条件：

有功平衡约束；
线路潮流约束；
节点功率约束；
（无旋转备用约束）



B. Mu, X. Zhang, X. Mao, et al. An Optimization Method to Boost the Resilience of Power Networks with High Penetration of Renewable Energies, *NCAA 2021*, pp. 3-16. 产权：北京理工大学

仿真结果：



网络重构前后系统的总供电效益

网络重构前系统的最大供电效益 (MWh)	网络重构后系统的最大供电效益 (MWh)	网络重构对供电效益的提升百分比
6579.759	7319.769	11.2%

B. Mu, X. Zhang, X. Mao, et al. An Optimization Method to Boost the Resilience of Power Networks with High Penetration of Renewable Energies, *NCAA 2021*, pp. 3-16. 产权：北京理工大学

在电力系统遭受极端事件损害后，如何合理安排人力和物力资源，有序修复损坏电力设备，使系统逐步恢复电力供应。

在人力和物力资源有限的前提下，对被损毁设备制定最优修复顺序。

目标:

$$Re = \max \int_{t_2}^{t_4} F(t) dt$$

模型:

$$R = \sum_{i=1}^n \gamma^{t-1} r(s_t, a_t)$$

$$r(s_t, a_t) = F_{\max}(t_k) \times \Delta t_k$$

$$F_{\max}(t) = \max \sum_{i \in N_g} P_i$$

$$A\theta = P$$

$$p_{ij} = a_{ij}(\theta_i - \theta_j)$$

$$-C_{ij} \leq p_{ij} \leq C_{ij}$$

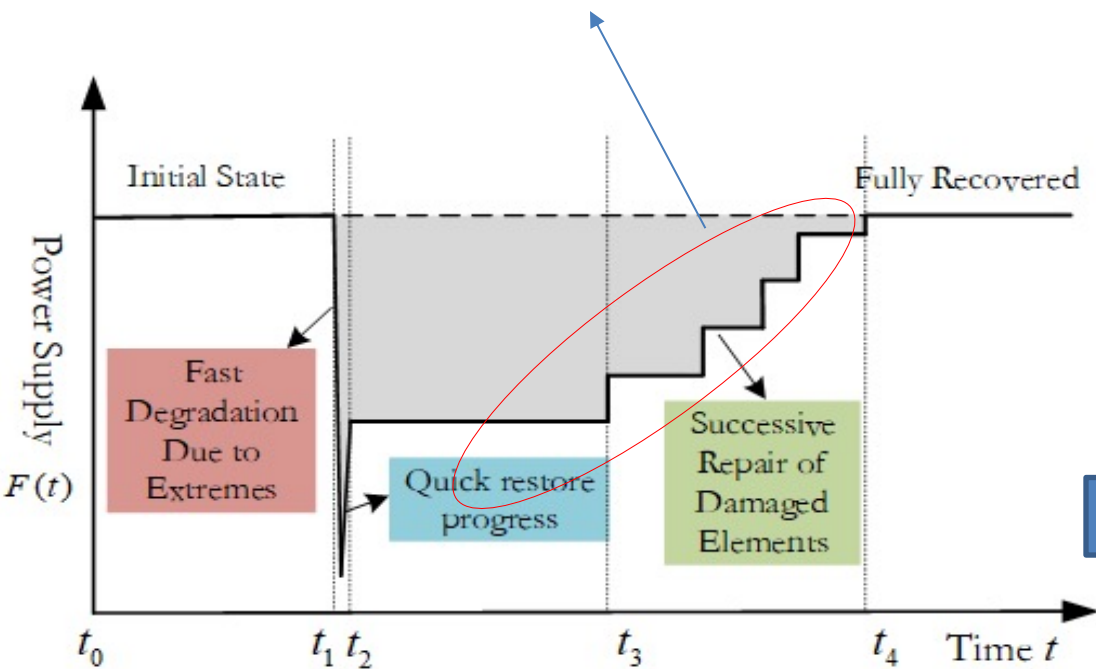
$$-C_i \leq p_i \leq 0, i \in N_d$$

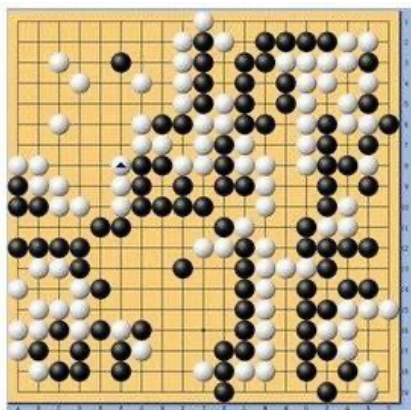
$$0 \leq p_i \leq C_i, i \in N_g$$

方法:

线性规划求最优潮流

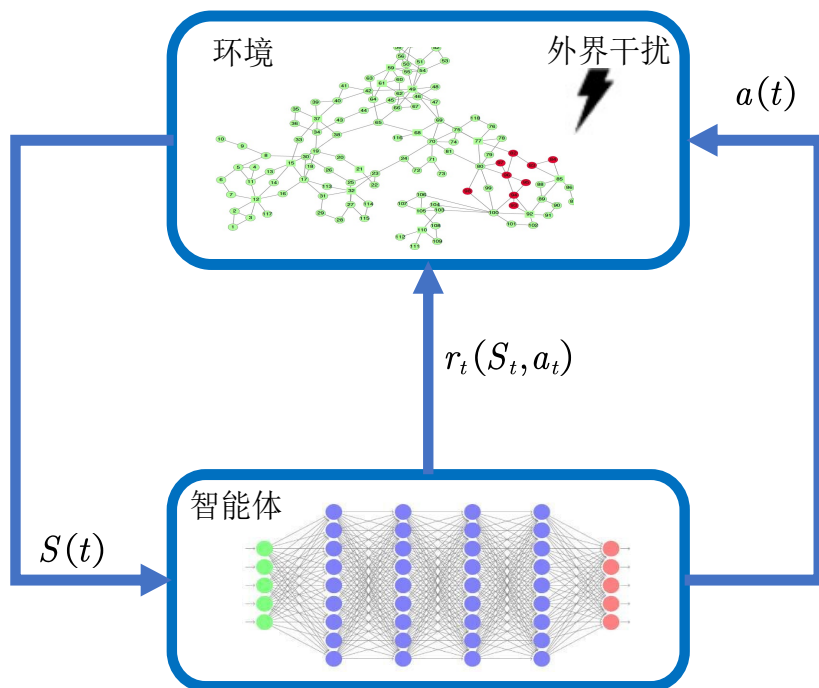
Q learning 求修复顺序





名称	时间	战绩	特点
AlphaGo	2015年10月	5: 0击败樊麾	基于大量数据 双深度神经网络
AlphaGo Lee	2016年3月	4: 1击败李世石	基于大量数据 监督学习
AlphaGo Master	2017年5月	3: 0击败柯洁	基于大量数据 单卷积神经网络
AlphaGo Zero	2017年10月	它经过3天的训练便以100: 0的战绩击败了AlphaGo Lee, 经过40天的训练便击败了AlphaGo Master。击败围棋、国际象棋、为棋中最强AI。	0数据学习 单卷积神经网络

NeurIPS智能电网调度大赛



电网模型:

电力系统仿真模型:

潮流、暂态、一次调频等

观测状态:

节点功率、电压，线路潮流（离散）

网络拓扑（连续）

动作空间:

改变网络单元的连接状态（离散）

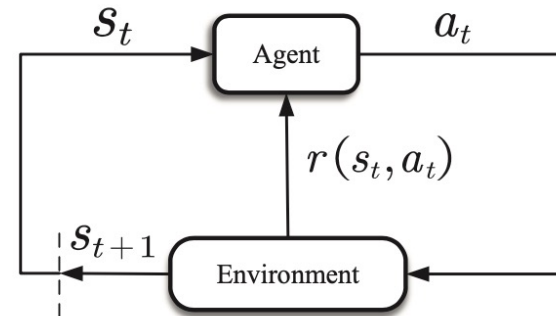
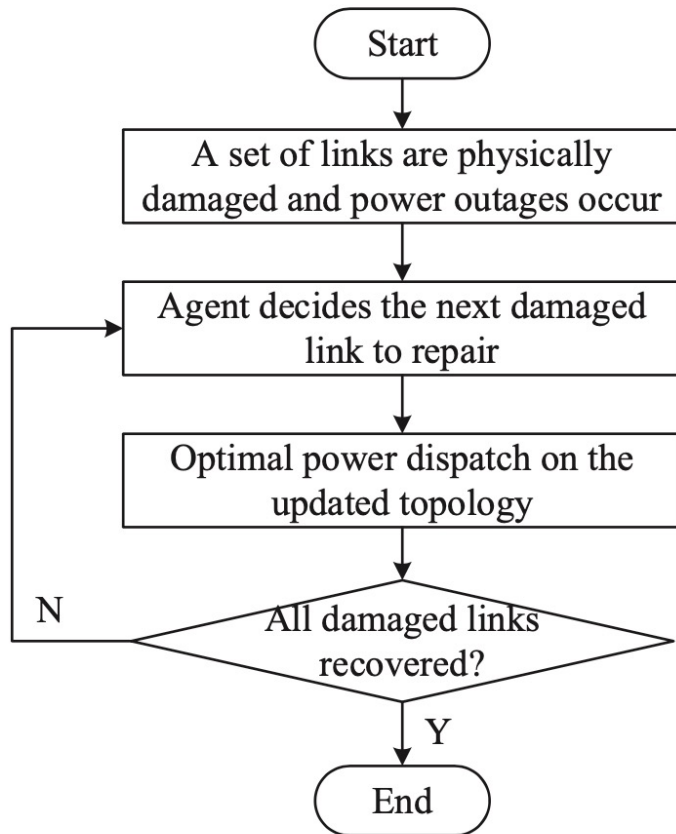
改变发电机的输出功率（连续）

智能体算法:

深度神经网络

$$Q(S, a) = R(S, a) + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(S', a', \omega)$$

考虑分时段新能源备用比例的弹性优化模型

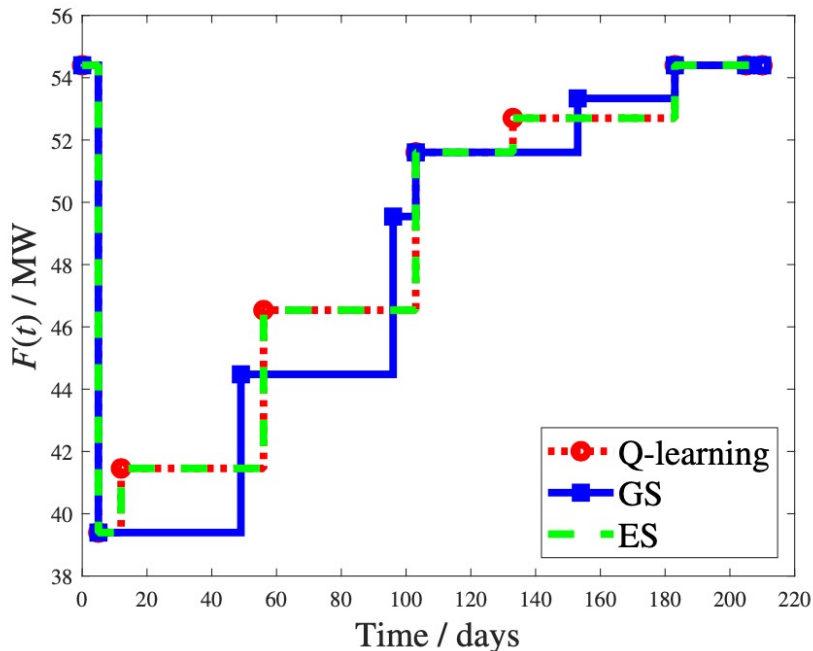


Algorithm 1 Q-Learning Algorithm

- 1: Initialize $Q(s_t, a_t)$ arbitrarily
- 2: **for** each episode **do**
- 3: Initialize s_t
- 4: **repeat**
- 5: Choose a_t from s_t using policy derived from Q (e.g. ϵ -greedy)
- 6: Take action a_t , observe $r(s_t, a_t)$, s_{t+1}
- 7: $Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha [r(s_t, a_t) + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)]$
- 8: $s_t = s_{t+1}$
- 9: **until** s_t is terminal
- 10: **end for**

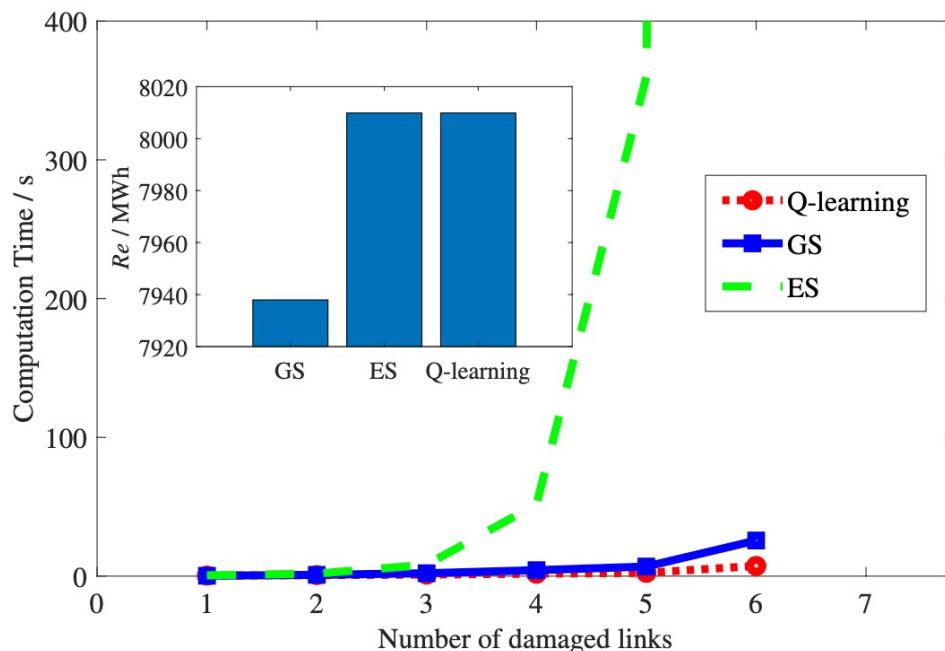
Q. Li, X. Zhang, J. B. Guo, et al. Integrating Reinforcement Learning and Optimal Power Dispatch to Enhance the Resilience of Power Grids, *IEEE TCAS-II, minor revision*. 产权: 北京理工大学

仿真结果:



不同修复策略下, IEEE 39 Bus 恢复阶段曲线。损毁单元: (4,14) (16,17) (16,24) (23,36) (26,28) (28,29)。

Q. Li, X. Zhang, J. B. Guo, et al. Integrating Reinforcement Learning and Optimal Power Dispatch to Enhance the Resilience of Power Grids, *IEEE TCAS-II, minor revision*. 产权: 北京理工大学



不同恢复策略的计算时间和恢复供电量。

- 将弹性电网分析与优化分解为**多维度子问题**，梳理了每个维度下的评估指标、适用模型、工程措施和优化方法。
- 建立了**电力网络连锁故障模型**，成功复现了历史大停电事故所表现出来的动态故障传播特征。
- 提出了应用于**灾后快速恢复供电的紧急调度模型**，发现了布雷斯悖论现象，提出了双环优化策略。
- 提出了应用于**灾后慢速恢复供电的序列决策模型**，提出了基于强化学习的受损设备顺序修复策略。



IEEE ISCAS is the flagship conference of IEEE Circuits and Systems Society. Our special session proposal has been strongly recommended to be part of the **ISCAS 2022** technical program as a Focus Session. The topic of the session is **“Intelligent analysis and decision-making of large-scale nonlinear complex systems”**. Submissions are warmly welcome for related research. Please submit the paper at <https://epapers.org/iscas2022/ESR/login.php> under track 16.7. Focus Session Papers submission deadline is November 22, 2021.

10/21/2021

Prof. Zhang Xi
Beijing Institute of Technology,
PR China

Dear Prof. Xi:

Many thanks for submitting your proposal for the Special Session of ISCAS-2022. The Special Sessions as well as the Focus Sessions highlight emerging research topics or innovative applications of established approaches of supreme relevance to ISCAS community that otherwise may not be fully cover in the regular sessions. On behalf of the ISCAS-22 Organizing Committee it is my pleasure to inform you that **your proposal entitled “Intelligent analysis and decision-making of large-scale nonlinear complex systems” has been strongly recommended to be part of the ISCAS 2022 technical program as a Focus Sessions**; congratulations.

Please contact your potential speakers and encourage them to submit their papers at <https://epapers.org/iscas2022/ESR/login.php> under track 14. Focus Session Papers submission deadline is November 22, 2021. Paper template that can help authors while preparing the manuscript can be found in the same website.

For any doubt please do not hesitate contacting me. Looking forward for the contributions of your invited speakers,

Best regards,

Jose Silva-Martinez, PhD, IEEE Fellow
Texas Instruments Professor in Analog Engineering
Technical Program Co-Chair, ISCAS-2022
Department of ECE
Texas A&M University



谢谢!