



从“物理-组织”双重视角谈医院设施运营韧性

李灵芝 博士/副教授

南京工业大学

2022年12月17日

个人简历

教育背景

- | | | | |
|-------------|-----------|---------|-----------|
| · 2013-2017 | 东南大学 | 管理科学与工程 | 博士 |
| · 2014-2015 | 美国佐治亚理工学院 | 设施管理 | CSC公派联合培养 |
| · 2010-2012 | 东南大学 | 管理科学与工程 | 硕士 |
| · 2006-2010 | 中国海洋大学 | 工程管理 | 学士 |

工作经历

- | | | | | |
|-------------|--------|--------|----------|-----|
| · 2018.4-至今 | 南京工业大学 | 土木工程学院 | 智能建造与管理系 | 副教授 |
|-------------|--------|--------|----------|-----|

学术兼职

- 研究方向：**建筑设施智慧运维、公共服务设施运营韧性、智慧养老等**
- 科研项目：主持国家自然科学基金青年项目1项、教育部人文社科基金青年项目1项、江苏省高等自科面上项目1项等
- 科研成果：在JME、Automation in Construction、JCP、现代城市研究、复旦学报、南京日报等期刊发表论文近20余篇
- 社会兼职：中国建筑学会工程管理研究分会会员、南京市老年学学会理事、南京市职业培训“BIM建筑信息模型技术应用”讲师等；Habitat International、Environment, Development and Sustainability等SCI/SSCI审稿人

主要内容

1 研究背景

2 物理系统韧性

3 组织系统韧性

4 工作展望

1 研究背景

运营特点

大规模、开放性、大人流、空间多样、流线复杂、系统繁多、持续运营

当代高风险社会，重大传染病、极端气候灾害、设施老化、人口老龄化等急性冲击频发、慢性压力释放。医院设施在这种多发的多重扰动环境中运营，极具脆弱性。



7.20郑州特大暴雨：郑大一附院



急诊车祸群体伤



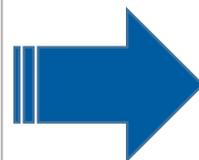
新冠肺炎爆发初期

如何有效预防、应对突发扰动，以维持医院设施的可持续运营？

提升医院设施“有效抵御扰动、吸收扰动，并能快速恢复其正常运营能力” **运营韧性**才能在动态复杂变化的内外部环境下实现可持续运营(Holling,1973; Bruneau et al. 2003)。

问题一：如何测度医院设施运营韧性？

问题二：如何提升医院设施运营韧性？



探知系统微观结构变化与宏观涌现韧性的内在关联，明晰韧性影响因素。

以“维持医院设施运营绩效”为目标，考虑“人员—空间—流程”等设施管理运营要素，将医院设施运营系统视为“物理系统”与“组织系统”的融合体。

物理系统

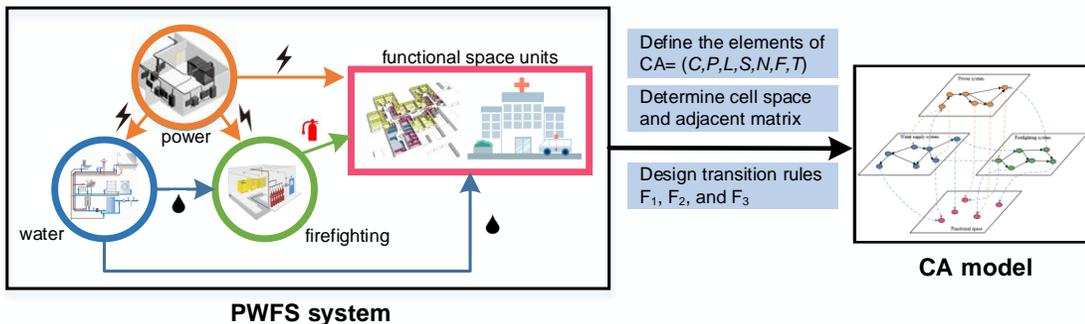
构成医院设施的建筑功能空间以及各类设备设施系统，包括功能空间系统、供电系统、照明系统、给排水系统、暖通空调、消防系统等。

医院设施运营方各部门围绕运营管理业务/应急管理任务而形成的相互关联的结构体系，如各个科室、急诊、后勤、其他临时性组织等。

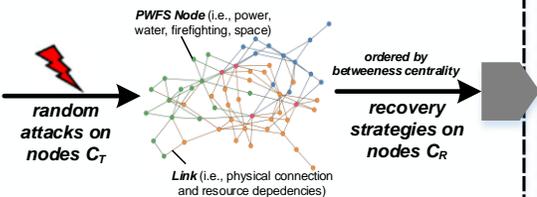
组织系统

在某特定扰动情景下，评估医院设施“物理系统”与“组织系统”的运营韧性

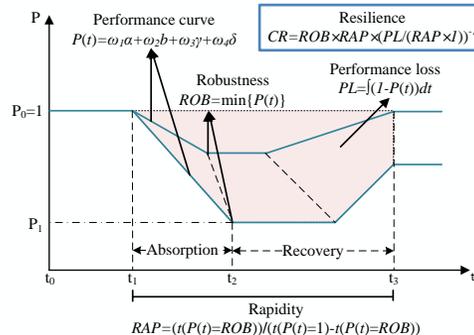
Step 1: Developing the CA model of PWFS system



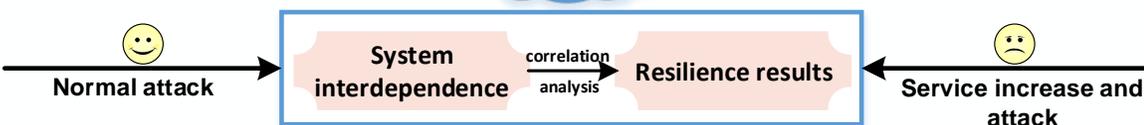
Step 2: Designing attack patterns and recovery strategies



Step 3: Simulating CA model to capture system performance and resilience measures



Case study

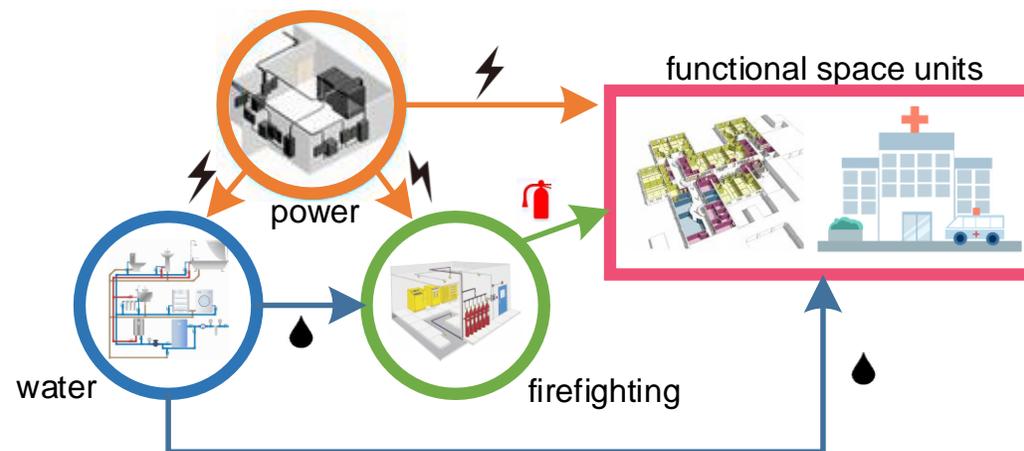
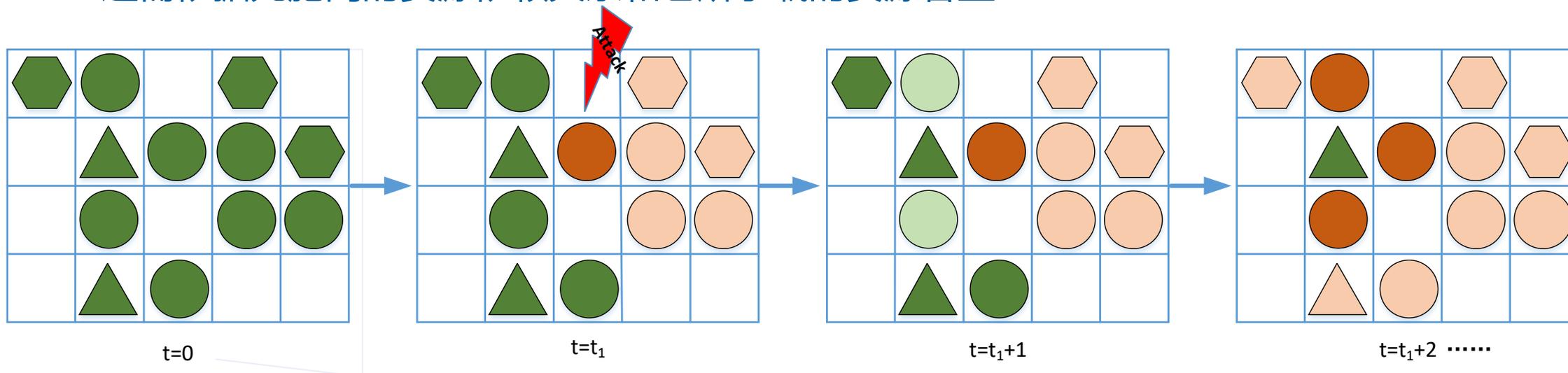


1 将医院设施物理系统PWFS（供电、供水、消防、功能空间）构建元胞自动机模型（CA），任意元胞均含元胞属性、元胞空间、元胞状态、元胞邻居、转换规则和时间步长等属性参数；

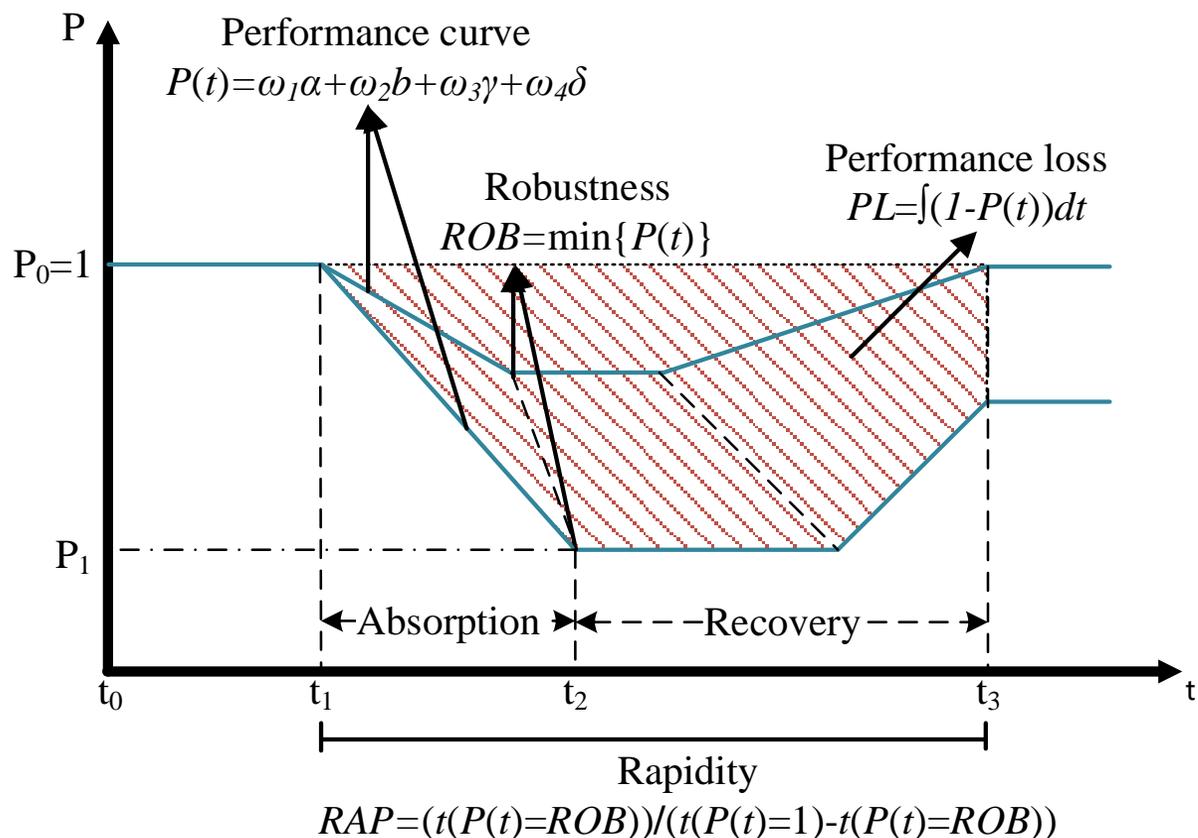
2 设定随机攻击方式、考虑中介中心性的恢复次序；

3 运行攻击下的CA模型，捕捉物理系统的功能曲线，提取韧性指标。

将CA应用于设施内部相互依赖系统建模最关键的元素为元胞邻居与元胞转换规则，
这需依据元胞间的资源依赖关系和它所承载的资源容量



输出系统功能曲线、提取混合韧性指标



功能绩效函数

元胞正常率 α 、
 连通性 β
 资源传输效率 γ
 功能空间正常率 δ

混合韧性指标

鲁棒性
 迅速性
 功能绩效损失水平

Resilience

$$CR = ROB \times RAP \times (PL / (RAP \times 1))^{-1}$$

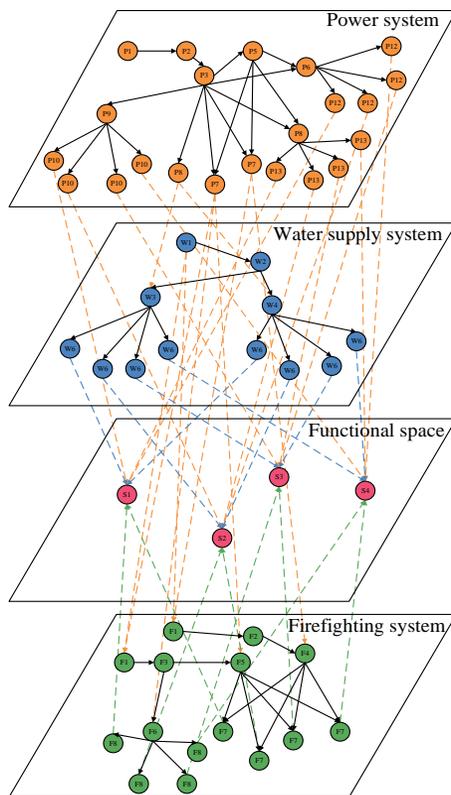
Reference: 王诗莹,李向阳,于峰.城市CIS物理关联脆弱性的动态分析方法[J].运筹与管理,2017,26(08):115-122.

Nan C, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.

案例研究—南京市Z医院门诊大楼



门诊楼与功能空间示意



用于CA建模的拓扑结构示意

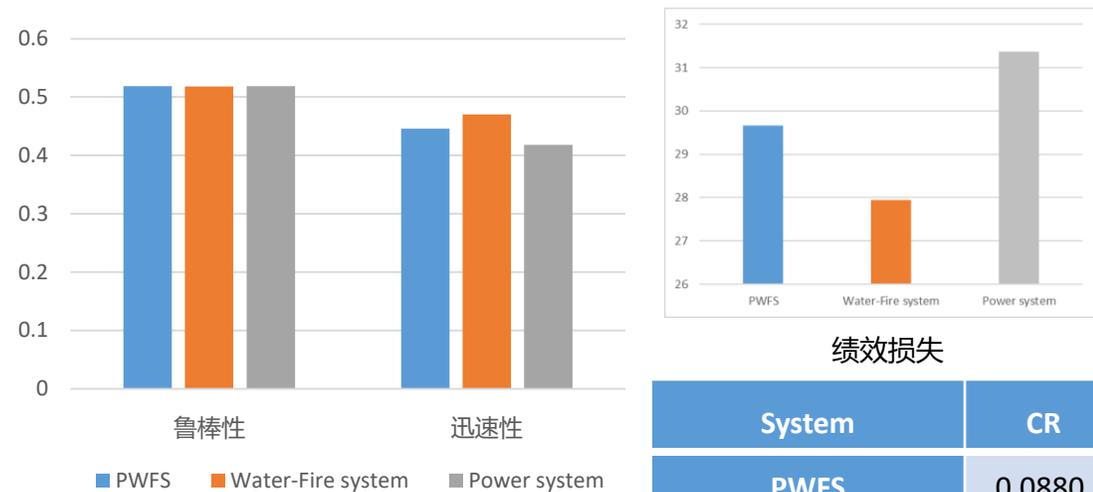
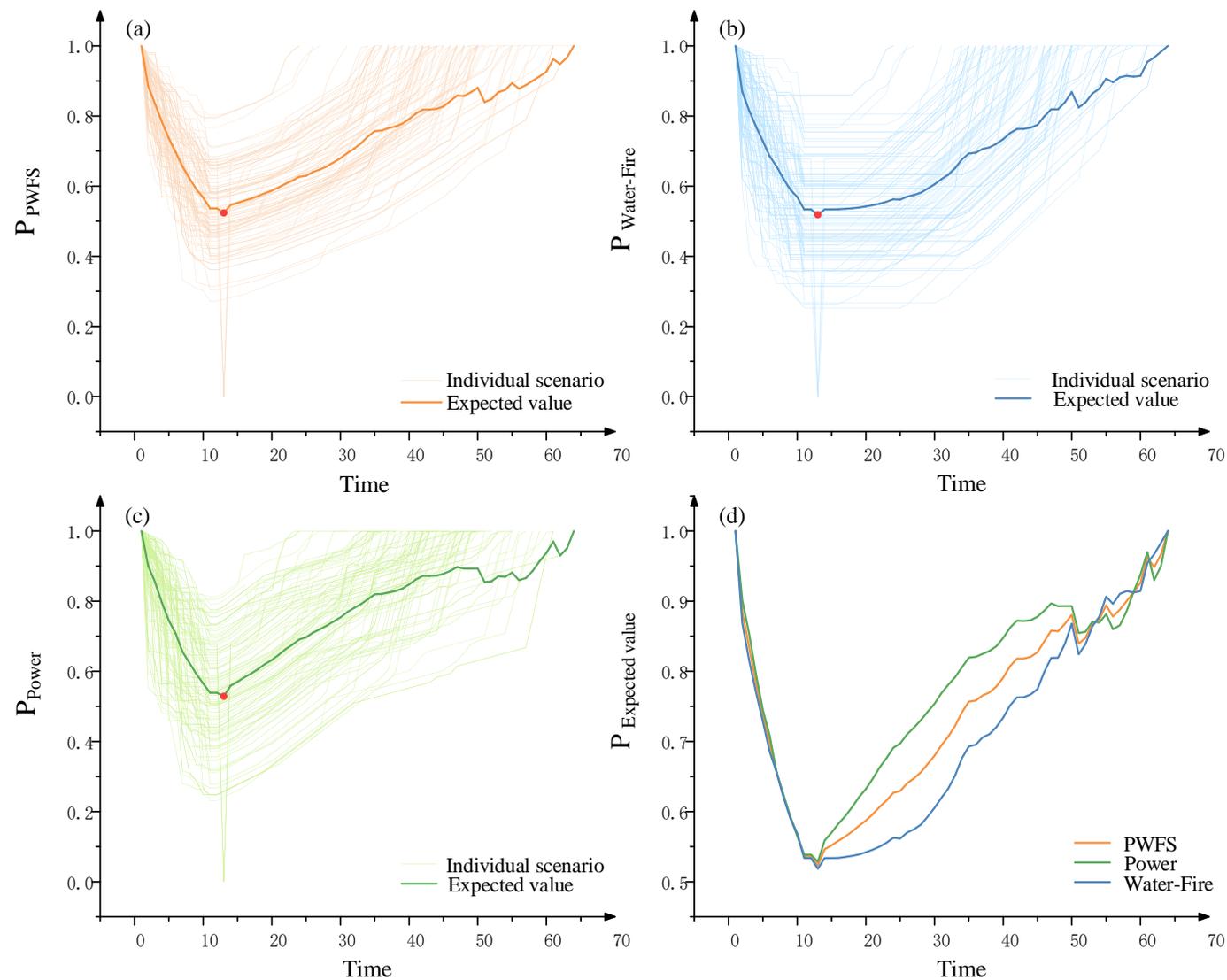
Supply facilities	Target supply	Demand facilities	Target demand	Service increase
Municipal water supply	2,472 (m ³)	domestic water	1,280 (m ³)	+12.3%
		hot water	400 (m ³)	+30%
		indoor fire hydrant	648 (m ³)	--
		fire sprinkler	144 (m ³)	--
Municipal power supply	16,960 (kWh)	general lighting	4,300 (kWh)	--
		sockets	1,200 (kWh)	+28.6
		fire detector	800 (kWh)	--
		emergency lighting	600 (kWh)	--
		air source heat pump	1,200 (kWh)	--
		chillers	5,500 (kWh)	--
		fire transfer pumps	600 (kWh)	--
		fire stabilization pumps	1,080 (kWh)	--
		fire booster pumps	1,320 (kWh)	--
		sprinkler pressurization pumps	360 (kWh)	--

用于CA建模的元胞资源供需数据

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
Number of power cells	22	Number of supply cells	2	Attack ratio	20%
Number of water supply and firefighting cells	21	Number of transfer cells	18	κ	0.5
Number of functional spaces	4	Number of demand cells	35	λ	1.3
Number of simulations	100				

仿真参数设计

案例研究—正常随机攻击

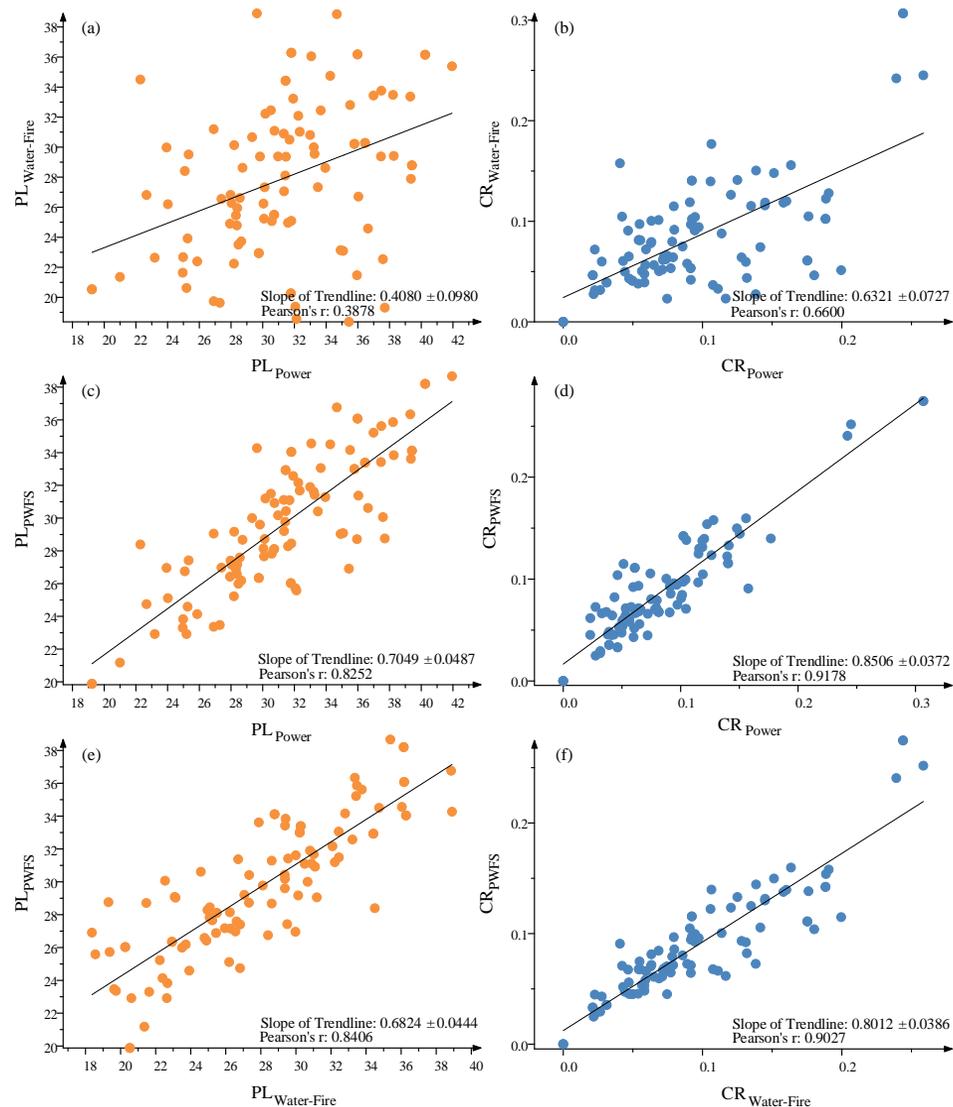


绩效损失

System	CR
PWFS	0.0880
Water-Fire system	0.0839
Power system	0.0945

- (1) 随机攻击下，PWFS耦合系统与单一系统的鲁棒性与迅速性差异不大；
- (2) 随机攻击下，各类系统绩效损失水平差异较大，尤其是单一电力系统损失最大；
- (3) 随机攻击下，单一电力系统的韧性值略高。

案例研究—正常随机攻击

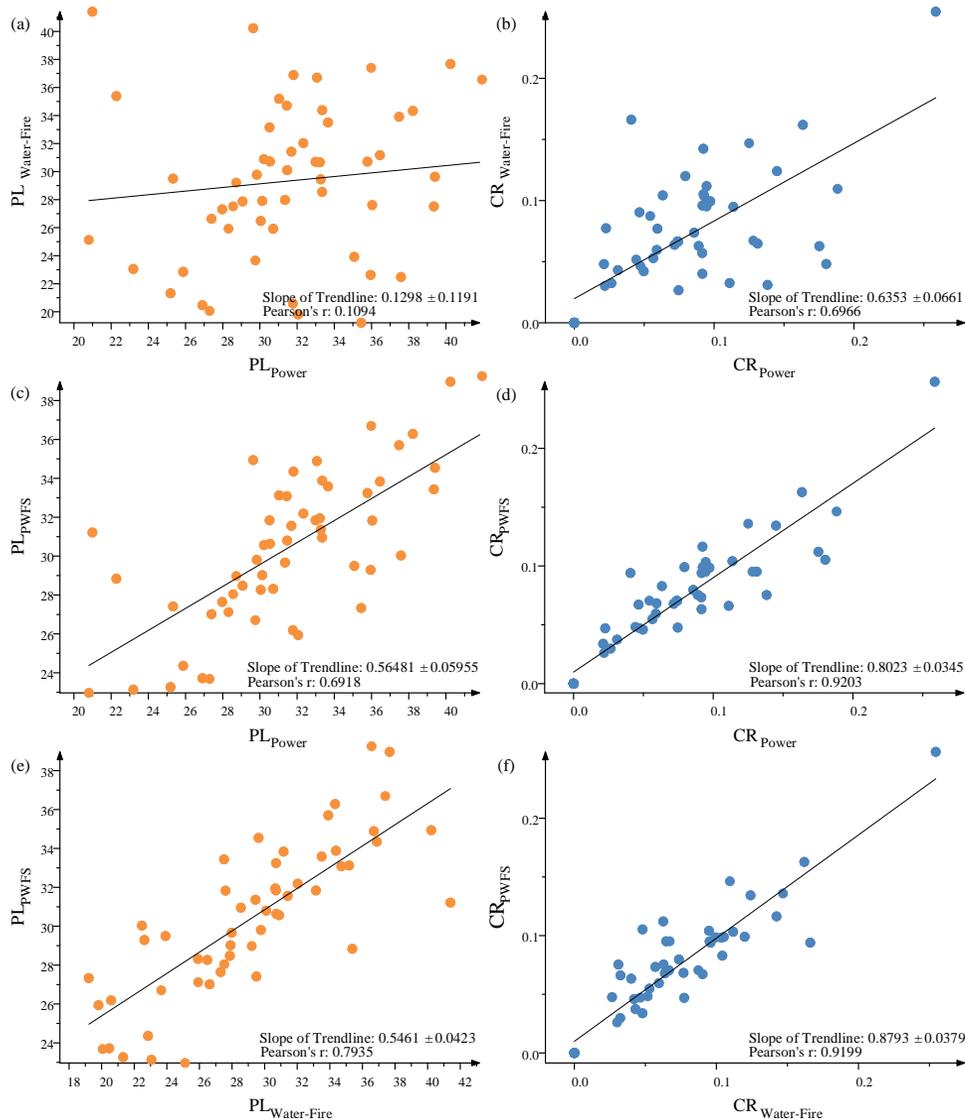


(1) 单一电力系统与供水-消防系统的绩效损失水平呈弱相关关系(a)，而其韧性水平的相关性略强 (b) ；

(2) 在绩效损失水平 (c) 和韧性水平(d)上，单一电力系统与PWFS系统呈较强相关性；

(3) 供水-消防系统与PWFS系统在绩效损失水平上具有较强相关性(e)，在韧性水平上也呈较强相关性，但略逊于电力与PWFS的相关性。

案例研究—需求急增+随机攻击



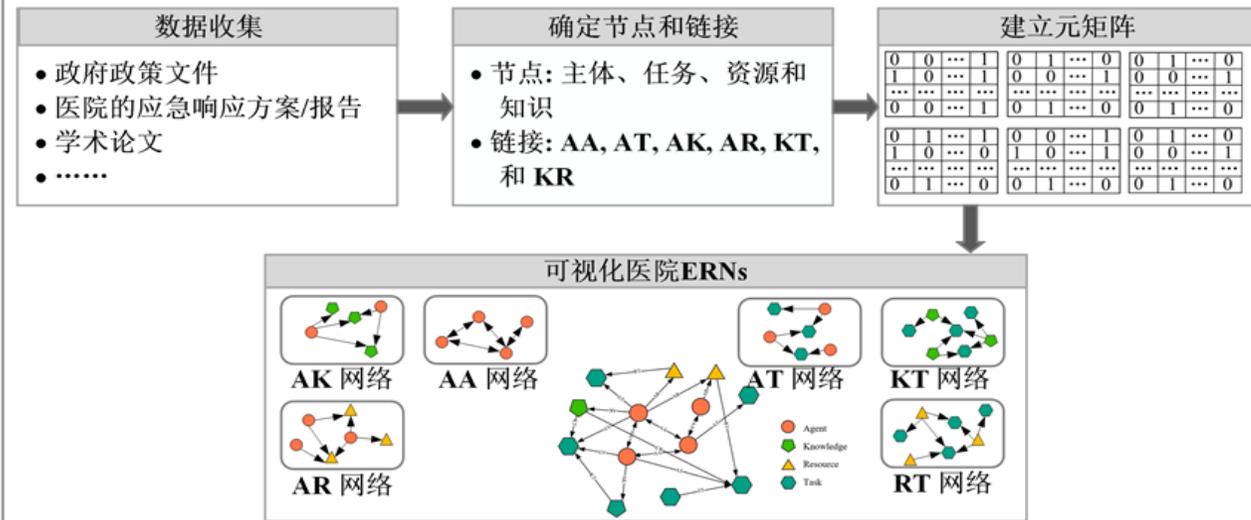
System	Simulation results			
	ROB	RAP	PL	CR
PWFS	0.4203	0.4522	30.4890	0.0674
Water-Fire system	0.4252	0.4711	29.3391	0.0653
Power system	0.4153	0.4279	31.6295	0.0717

- (1) 单一电力系统与供水-消防系统的绩效损失水平呈极弱相关性(a)，而其韧性水平的相关性略强 (b)；
- (2) 单一电力系统与PWFS系统在绩效损失水平 (c) 上呈较强相关性，在韧性水平(d)上呈极强相关性；
- (3) 供水-消防系统与PWFS系统在绩效损失水平上具有较强相关性(e)，且略高于电力对PWFS的相关性，在韧性水平(f)上也呈较强相关性。

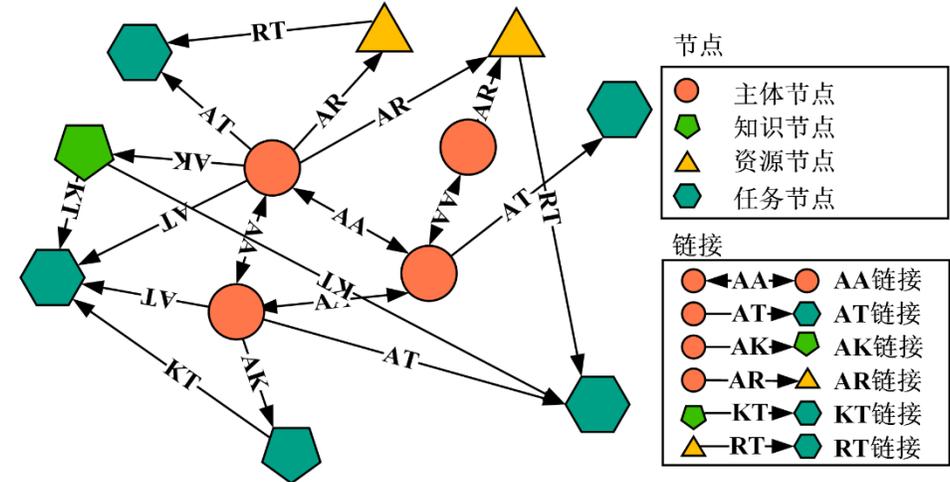
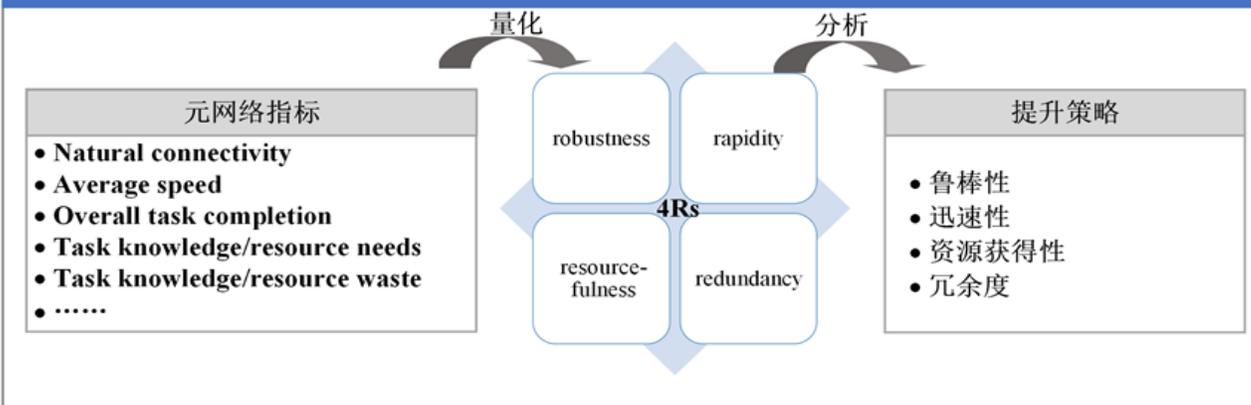
研究内容二：基于MNA的医院运营组织系统的韧性评估

基于元网络分析（meta-network analysis）原理，将突发事件下医院设施响应系统运行过程中涉及的“主体-资源-知识-任务”构建为应急响应元网络（ERN）

步骤一、建立医院应急响应元网络（ERN）



步骤二、量化分析医院 ERN 4Rs 韧性能力



链接	关系
AA	主体之间的交互关系（什么主体与什么主体有交互关系）
AT	主体负责的任务（什么主体执行什么任务）
AR	主体拥有的资源（什么主体对什么资源直接拥有）
AK	主体拥有的知识（什么主体对什么知识/信息直接拥有）
RT	完成任务需要的资源（完成什么任务需要什么资源）
KT	完成任务需要的知识/信息（完成什么任务需要什么信息）

元网络建模示意

基于MNA的4Rs (Bruneau et al. 2003) 韧性指标

◆ 鲁棒性 (Robustness)

是系统承受给定水平的干扰而不会遭受功能损失的能力，即组织可靠性。针对AA网络，通过测量“替代路由的冗余”来表示组织系统鲁棒性，即自然连通度。

$$Robustness = R_{Rob}(G_{AA}) = \ln\left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m e^{\lambda_j}\right)$$

◆ 迅速性 (Rapidity)

是系统迅速响应、恢复中断的能力。针对AA网络，通过测量“主体间互动的平均通信速度”来表示组织系统的迅速性，即平均速度。

$$Rapidity = R_{Rap}(G_{AA}) = \sum_{i=1}^n \frac{(n-1)}{nd_i}$$

$$d_i = \sum_{u=1, u \neq i, D(i,u) > 0}^n \frac{1}{D(i,u)}$$

◆ 资源获得性 (Resourcefulness)

是系统面临扰动时能够调集资源、确立优先事项、以完成响应任务的能力。针对ERN网络，测量“主体利用可获得的资源和知识来完成任务的百分比”表示组织的资源可获得性，即总体任务完成度。

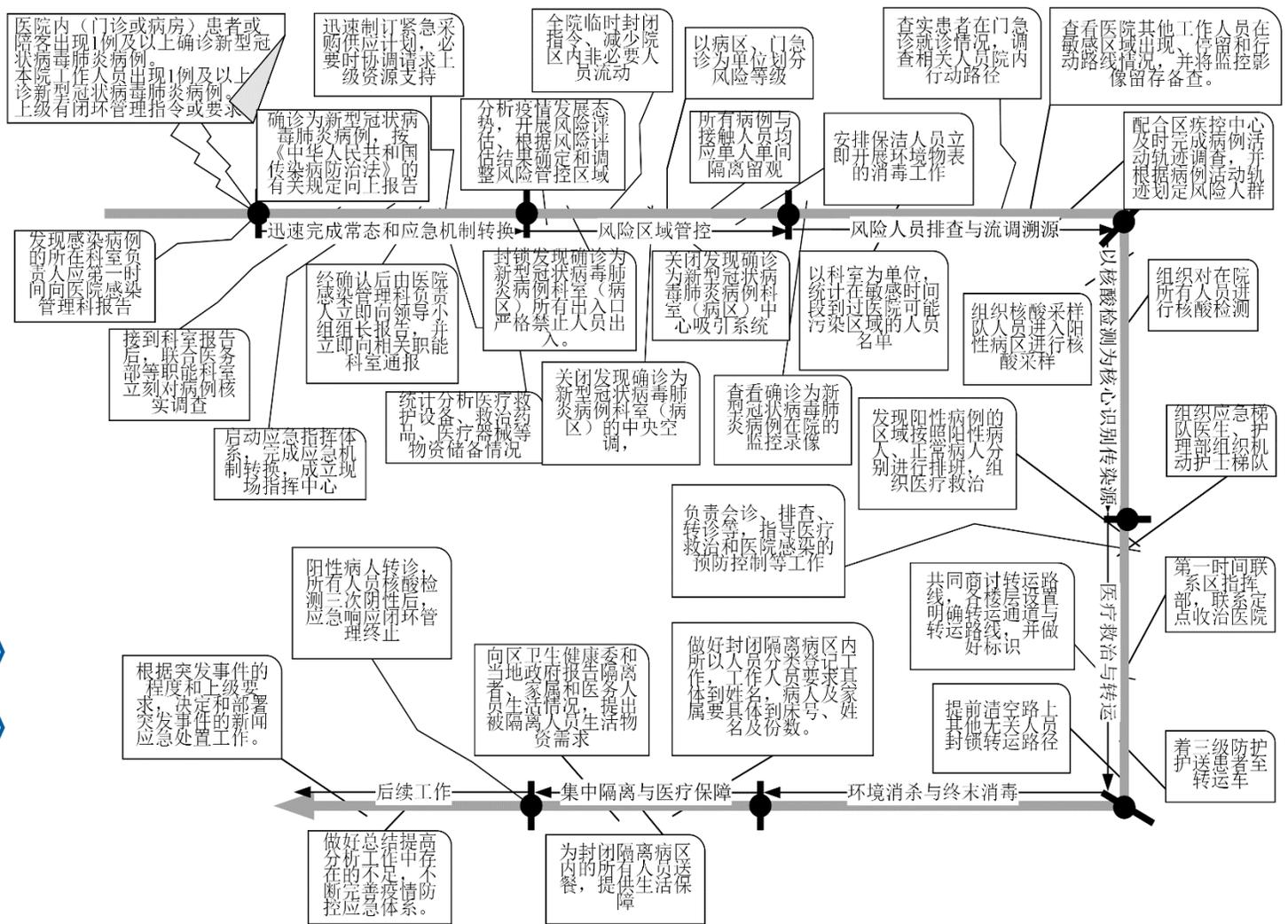
$$Resourcefulness = R_{Res} = \frac{|T| - |S_{RK}|}{|T|}$$

◆ 冗余度 (Redundancy)

是系统的可替代性，或所输入资源的储存量与可替代性。针对ERN网络，测量“任务在被行使可通过主体来获取资源/知识的冗余路径数”表示组织的冗余度。

$$Redundancy = R_{Red} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Rd_{RK}(i,j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [RT \ KT]^T(i,j)}$$

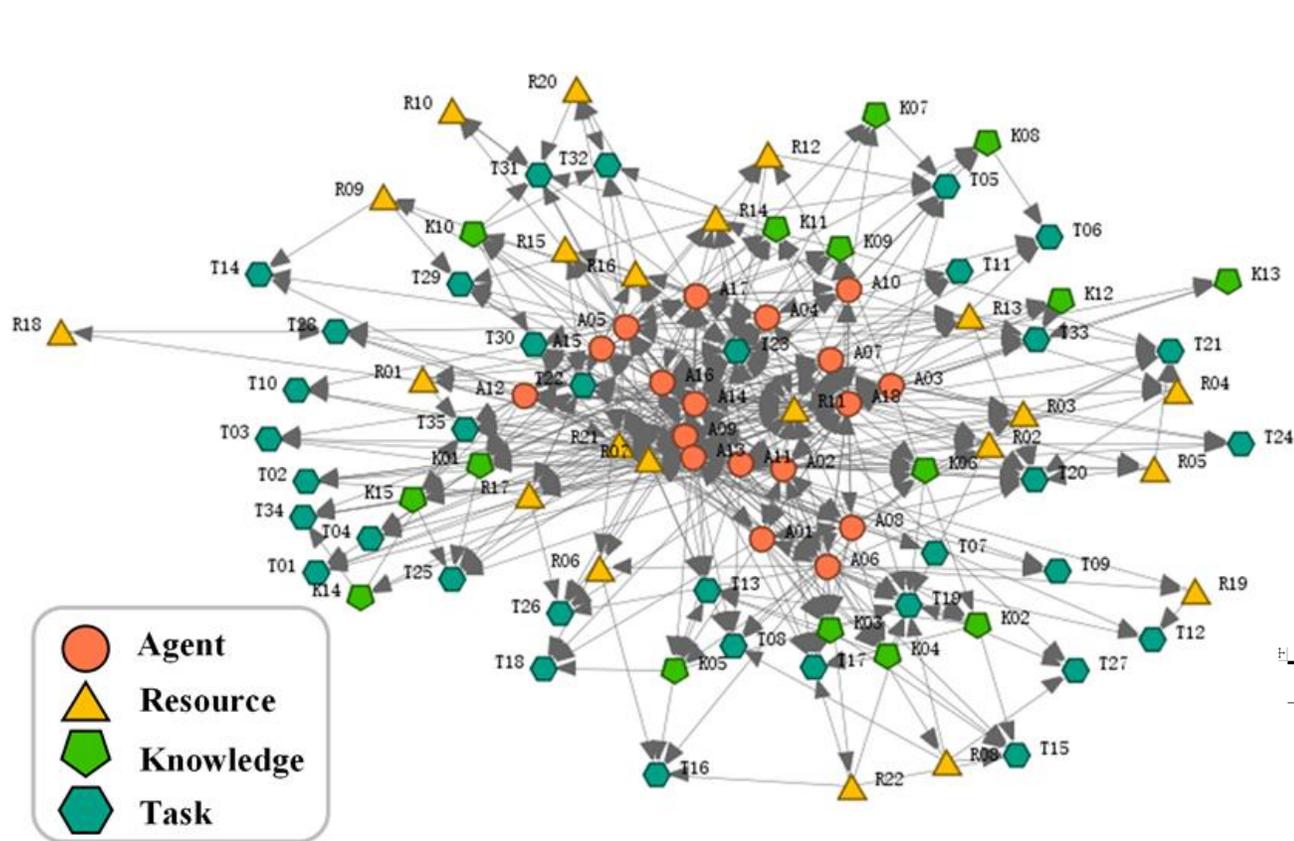
案例研究—以江苏省W市X医院新冠疫情应急响应为例



《新冠肺炎疫情医院感染防控工作方案》
《医院实行新冠疫情闭环管理应急预案》

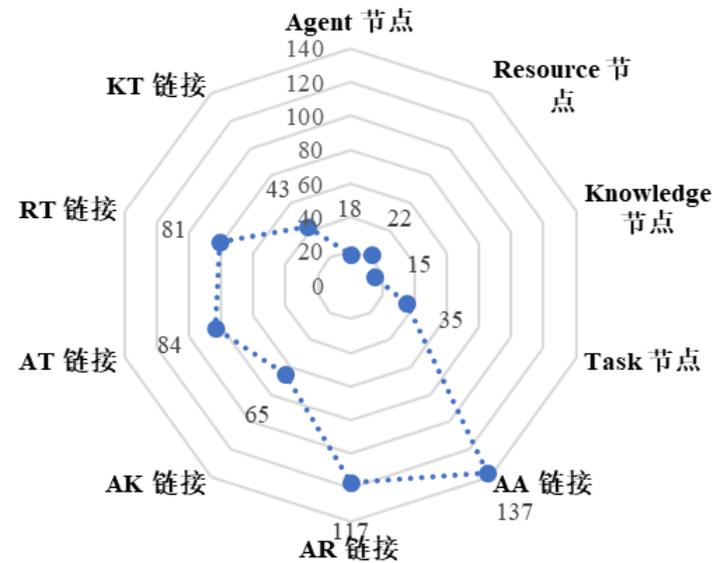
以核酸检测为核心识别传染源
医疗救治与转运

案例研究—以江苏省W市X医院新冠疫情应急响应为例



医院闭环管理ERN模型

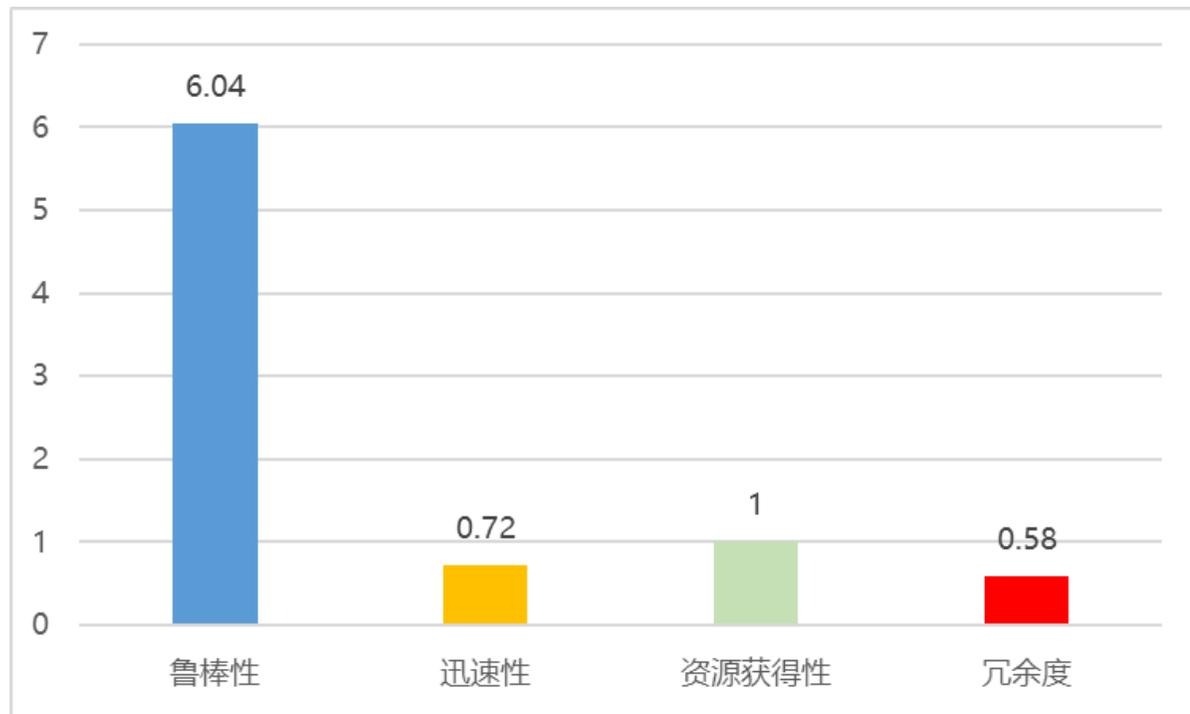
网络密度 (AA) = 0.45



医院闭环管理ERN节点和链接数量

节点代码	主体	节点代码	主体
A01	人事科	A10	药剂科
A02	医务部	A11	临床医技科室
A03	护理部	A12	120急救分站
A04	设备科	A13	闭环管理应急工作领导小组
A05	后勤保障科	A14	闭环管理应急工作专班
A06	安全保卫科	A15	闭环管理应急工作医疗救治专家组
A07	公共卫生科	A16	闭环管理应急工作信息报送组
A08	门诊部	A17	闭环管理应急工作物资保障组
A09	医院感染科	A18	闭环管理应急工作核酸采样队

案例研究—以江苏省W市X医院新冠疫情应急响应为例



医院闭环管理ERN韧性值

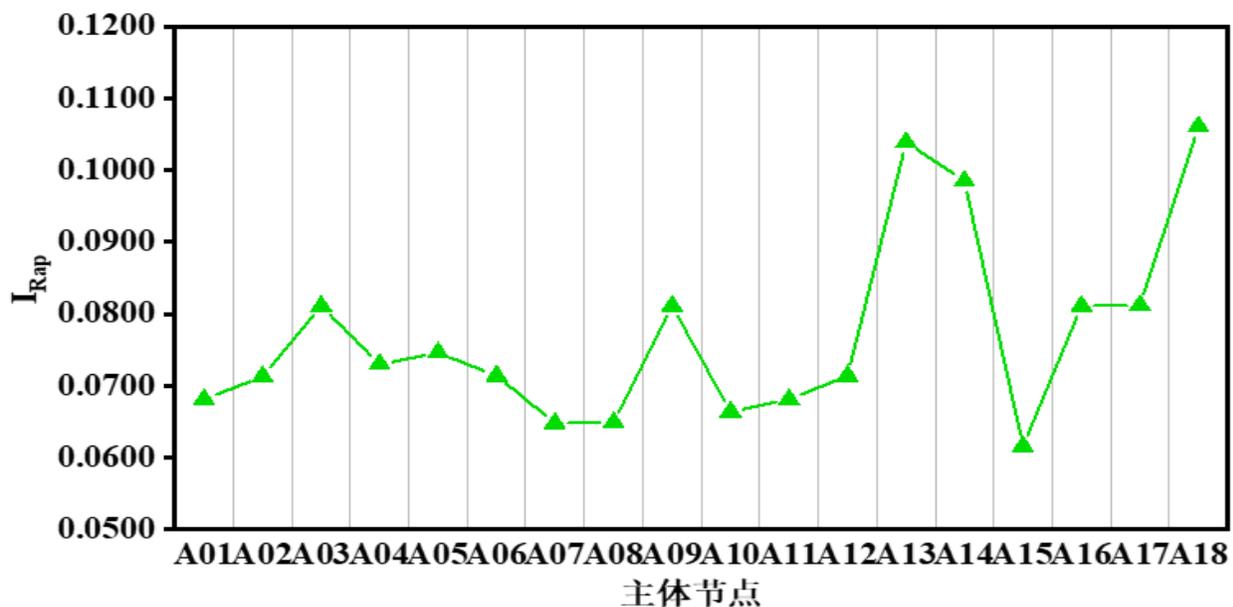
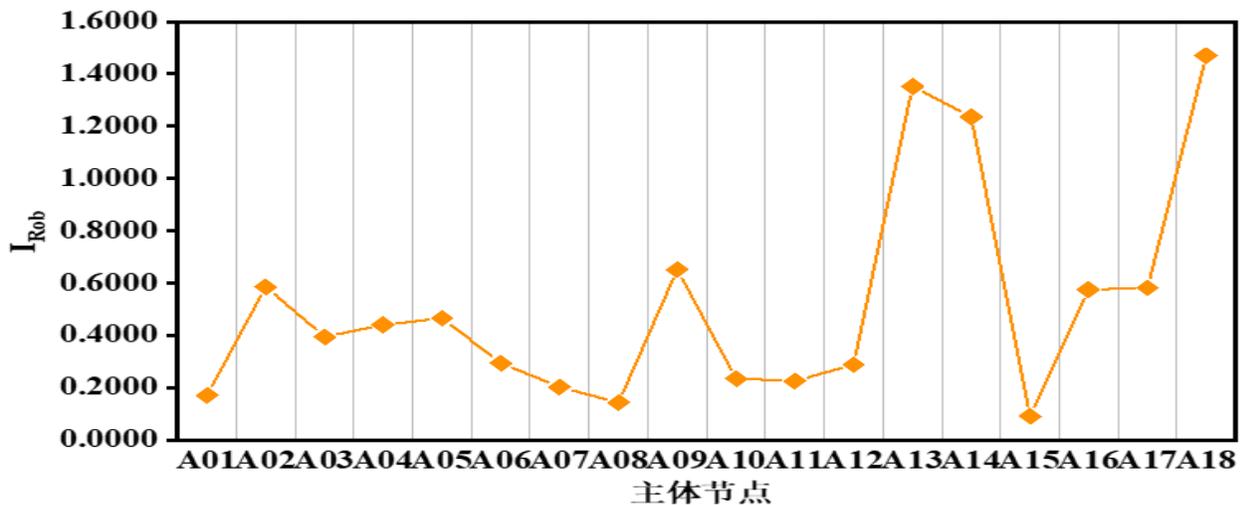
(1) 鲁棒性水平较低，主体的责任分工虽已明确，但任意两个主体直接的沟通、合作失效时，存在的其他替代沟通路径较少；

(2) 迅速性呈中等偏上水平，组织主体间沟通效率较快，临时性组织发挥了重要作用；

(3) 资源获得性达到最大值，预案设计合理，主体均能调动所需资源/知识去完成负责的响应任务；

(4) 冗余度呈中等水平，部分业务流程的开展设置了备选方案。

案例研究—以江苏省W市X医院新冠疫情应急响应为例

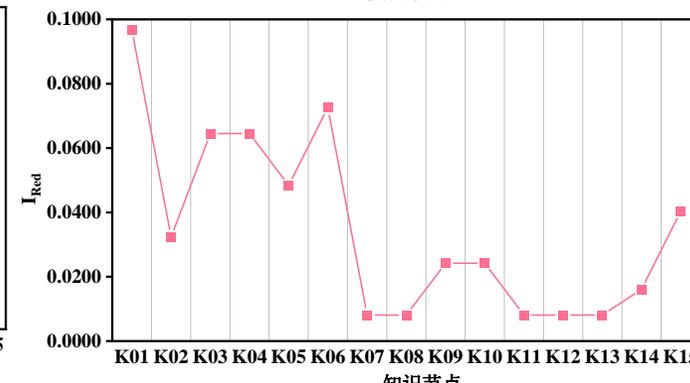
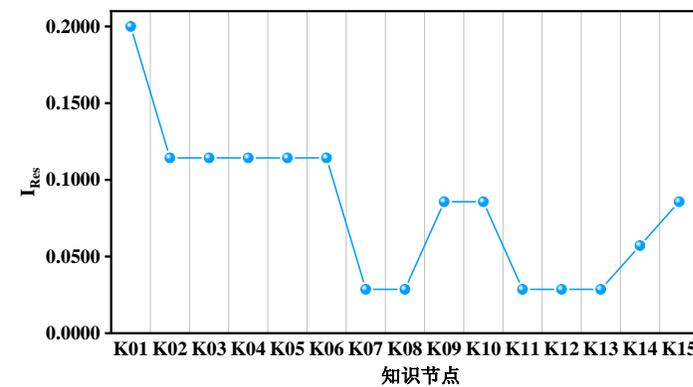
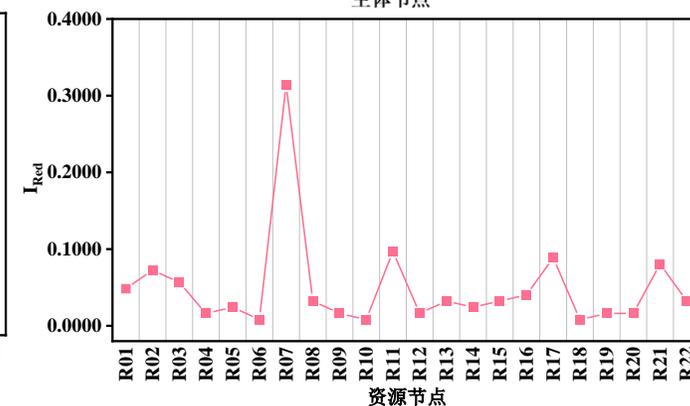
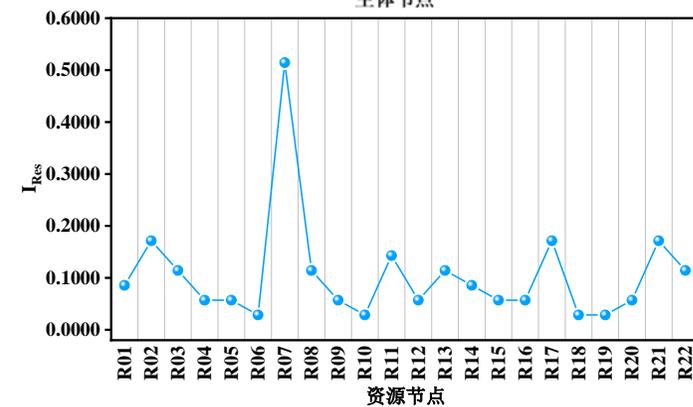
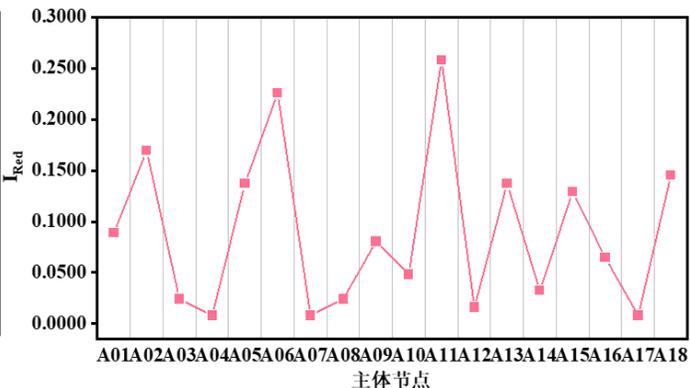
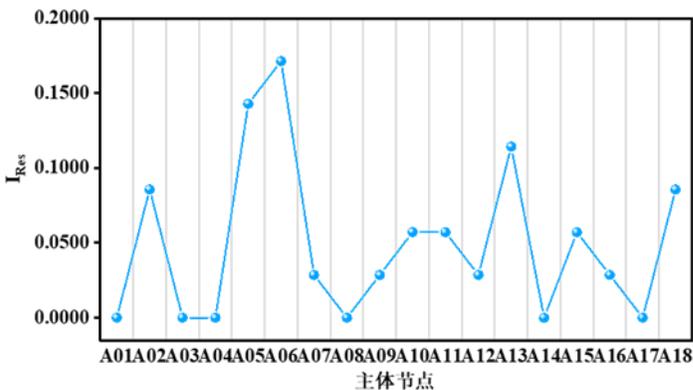


影响医院ERN鲁棒性与迅速性的关键主体

(1) 影响鲁棒性的最关键的三个主体是A13（闭环管理应急工作领导小组），A14（闭环管理应急工作专班）和A18（闭环管理应急工作核酸采样队）。

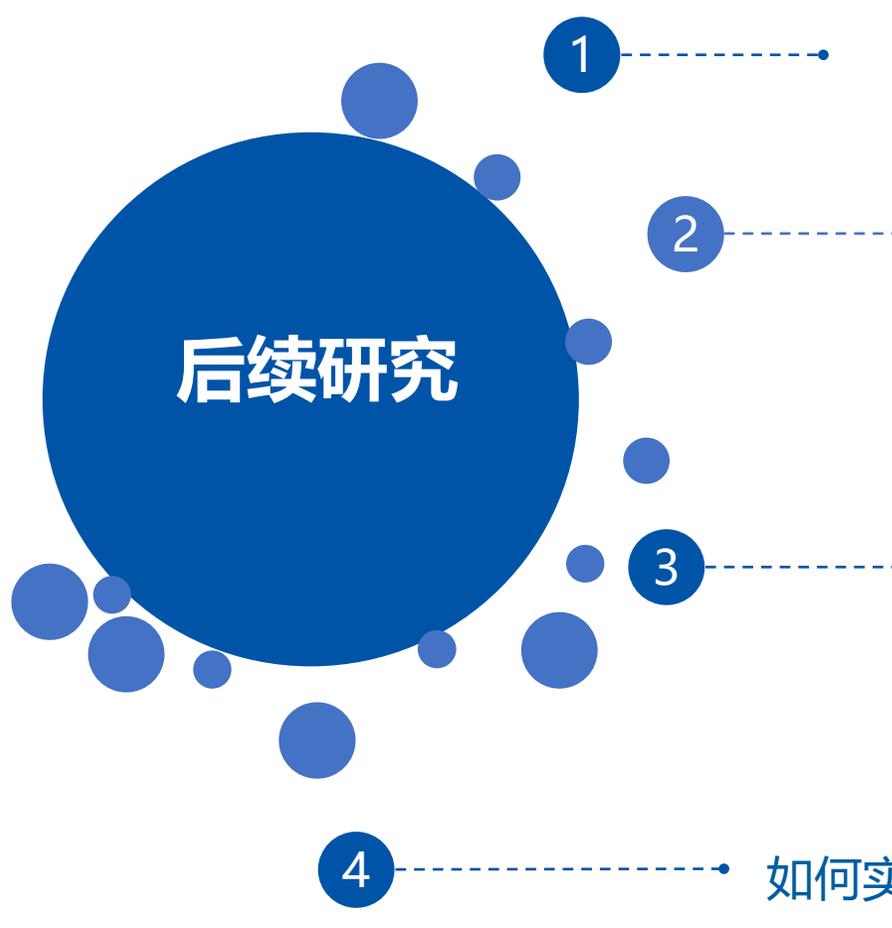
(2) 影响迅速性的最关键主体是A13（闭环管理应急工作领导小组，A14（闭环管理应急工作专班和A18（闭环管理应急工作核酸采样队），这三个主体在ERN中作为沟通桥梁的作用非常重要，决定了沟通速度。

案例研究—以江苏省W市X医院新冠疫情应急响应为例



影响医院ERN资源获得性与冗余度的关键节点

- (1) 影响资源获得性关键主体为A06(安全保卫科)、A05(后勤保障处)、A13(闭环管理应急工作领导小组)。
- (2) 影响冗余度的关键主体为A11(临床医技科室)和A06(安全保卫科)，A11是对阳性病例响应、就诊、转运的直接主体，具有不可替代性。
- (3) 影响资源获得性和冗余度的资源节点分布相似，最关键为R07(管理人员)，他们是各主体间能够上传下达，及时响应调配资源进行知识共享的纽带，也是主体内部重要领导核心。
- (4) 影响资源获得性和冗余度的知识节点分布相似，其中K01(确诊新型冠状病毒肺炎病例个人、流行病学史、临床症状等)最为关键，大多数响应工作的开展都需要该信息的支持。



后续研究

1

物理设施系统在多重扰动环境中更具脆弱性，比如新冠+日常扰动，那如何动态仿真多重扰动环境？

2

将仿真物理设施耦合系统的复杂网络建模/元胞建模涌现的网络绩效如何与现实系统中物理设施耦合系统的服务功能匹配、拟合？来进一步修正贴近现实的建模方法。组织/流程建模亦是如此。

3

物理系统与组织系统的韧性都高度相关于系统内容组件/主体的相互依赖关系，而过分依赖会产生范围较大的级联失效。如何在相互依赖的系统中设计相对独立的功能模块？既保持必要连通，又要避免系统整体级联失效以及运转低效。

4

如何实现物理系统+组织系统的复杂系统混合建模？



南京工業大學
NANJING TECH
UNIVERSITY

感谢各位聆听!
敬请批评指正!