

# 特种设备安全事故时间序列拓扑网络特征研究

晋良海<sup>1,2,3</sup>, 夏露<sup>1</sup>, 陈述<sup>1,2\*</sup>, 邵波<sup>1,2</sup>, 刘佳<sup>1</sup>, 范玲<sup>1</sup>, 闫月蓉<sup>1</sup>

1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002

2. 三峡大学安全生产标准化评审中心, 宜昌 443002

3. 湖北安环科技有限公司, 宜昌 443002

**摘要** 为揭示特种设备安全事故时间序列的非线性动力特征, 以2005—2020年中国不同类型特种设备安全事故时间序列为对象, 采用可视图法将特种设备安全事故时间序列转化为拓扑网络图, 生成拓扑网络结构模型; 利用拓扑网络理论分析节点度、网络密度、加权聚类系数、幂律指数、介数中心性等拓扑网络特征参数, 挖掘特种设备事故发生的时间序列规律。结果表明: 各类特种设备安全事故时间序列的拓扑网络具有小世界特性和无标度特性; 拓扑网络的聚类系数均较大, 社团结构明显; 介数中心性越大的节点, 对应年份发生事故概率越大。采用的拓扑网络分析方法能更简洁、直观地展示特种设备安全事故时间序列的拓扑网络结构, 更全面地表征特种设备安全事故时间序列的非线性动力特征, 可为特种设备安全事故预测提供理论基础。

**关键词** 特种设备; 安全事故; 时间序列分析; 可视图法; 拓扑网络

特种设备是广泛使用于生产、生活领域的重要基础设施, 包括电梯、起重机械、压力容器、客运索道等, 对经济社会发展具有重要作用。特种设备常蕴含高强度热能、势能与动能, 承载大量易燃、易爆、有毒介质或人员, 容易造成群死群伤重大事故, 涉及生命财产安全, 具有较高的社会风险水平<sup>[1-2]</sup>。根据中国特种设备安全监察局统计, 2005年至

2020年间特种设备发生安全事故多达4009起, 死亡人数多达4049人, 其安全问题引起了广泛关注。特种设备安全事故属于随机事件, 事故数量随着社会、经济、政策等因素动态变化, 其时间序列呈现非线性特征和随机特性<sup>[3]</sup>, 一定程度上可表征事故变化规律与事故特征趋势。因此, 开展特种设备安全事故时间序列特征研究, 挖掘时间序列演变规律与

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179136, 72204141)

作者简介: 晋良海, 教授, 研究方向为安全工效等, 电子信箱: jinlianghai@ctgu.edu.cn; 陈述(通信作者), 教授, 研究方向为安全管理建设项目管理等, 电子信箱: chenshu@ctgu.edu.cn

引用格式: 晋良海, 夏露, 陈述, 等. 特种设备安全事故时间序列拓扑网络特征研究[J]. 科技导报, 2022, 40(24): 78-84; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.009

非线性动力特征,是实现数据驱动的特种设备智慧安全监管与风险决策的理论基础,对于政府主管部门制定监管政策具有重要现实意义。

实现特种设备安全智慧治理、完善双重预防机制建设、提高安全监管效率是当前的研究热点。为解决近年来我国特种设备监管部门压力过大的问题,部分研究人员尝试通过构建“风险管控层次分析模型(AHP)<sup>[4]</sup>”、“基于 ANP-CM 的风险预警模型”<sup>[5]</sup>和“风险预警信息挖掘模型”<sup>[6]</sup>等实现特种设备安全风险辨识,明确特种设备安全监管重点。还有研究人员将区块链技术<sup>[7]</sup>、多中心治理<sup>[8]</sup>思想引入特种设备安全监管研究中,有效提升中国特种设备安全治理水平。

随着特种设备安全问题研究的不断深入,国内外研究人员逐渐认识到安全事故预防是防止和减少事故发生的重要举措。Wang 等<sup>[9]</sup>提出故障树分析法(FTA)来评估事故发生的可能性,杨强等<sup>[10]</sup>通过推导特种设备可靠寿命的退化规律,预测特种设备发生潜在故障的工作时间。郑霞忠等<sup>[11]</sup>剖析塔机作业事故调查报告,厘清关键致因因素,预防塔机作业物体打击(SFO)事故发生。除了进行事故预防,还可依据历史数据对事故发展趋势进行预测。Ding 等<sup>[12]</sup>采用灰色马尔可夫预测模型对我国特种设备事故进行预测,崔庆玲等<sup>[13]</sup>应用灰色理论对我国“十二五”期间特种设备安全事故的绝对死亡人数和万台设备死亡人数进行了预测,谷梦瑶等<sup>[14]</sup>提出融合事故表征和 CBR 的特种设备事故预测研究,探究事故发展趋势及事故特征、事故发生部位等事故表征信息的发生概率。时间序列是典型的非线性动力学系统<sup>[15]</sup>。然而,以上研究大都依赖于线性假设,忽略了特种设备安全事故时间序列的非线性演化规律。采用拓扑网络理论,可从多维度指标定量刻画特种设备安全事故时间序列的非线性动力特性。

鉴于此,拟针对特种设备安全事故时间序列非线性动力特征,采用可视图法构建特种设备安全事故时间序列拓扑网络模型,分析节点度、网络密度、加权聚类系数、幂律指数、介数中心性等拓扑网络特征参数,揭示特种设备安全状况变化的内在规

律,以期为特种设备安全风险防控和监管政策制定提供新的理论依据。

## 1 时间序列与拓扑模型的映射关系

时间序列是以一维数据组成的纵向观测值序列,而网络拓扑是由节点和支路连接成的平面几何图。采用 Lacasa 等<sup>[16]</sup>在 2008 年提出可视图法,将特种设备安全事故时间序列映射变换为复杂网络拓扑结构,可保留原时间序列大部分内在特性<sup>[17-19]</sup>,更直观地展示时间序列的属性。

给定时间序列  $D = \{D_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ , 每个时间点  $t_i$  对应 1 个数据点  $D_i$ 。将每个数据点视为网络中的 1 个节点,若时间点  $t_a$  和  $t_b$  所对应数据点  $D_a$  和  $D_b$  之间任意节点  $D_c$  ( $D_a < D_c < D_b$ ) 满足如下公式:

$$D_c < D_b + (D_a - D_b) \frac{t_b - t_c}{t_b - t_a} \quad (1)$$

则数据点  $D_a$  和  $D_b$  可视,将两点用可视线连接,对应网络节点间存在连边;若不满足,则对应网络节点间不存在连边。原理如图 1 所示,拓扑模型节点大小代表节点度。

可视图法将分形时间序列转化成无标度拓扑网络<sup>[18]</sup>,根据网络图是否具有无标度性来判断特种设备安全事故时间序列是否具有分形特性。因此,

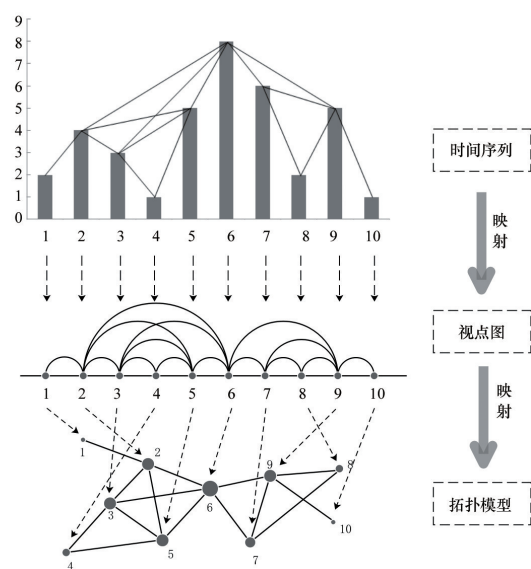


图 1 时间序列与拓扑网络的映射关系

本文借助可视图法将特种设备安全事故时间序列转化成网络图,使用复杂网络的理论方法来挖掘特种设备安全事故时间序列的内在属性。

## 2 特种设备安全事故时间序列网络拓扑特征参数

### 2.1 度与度分布

节点度  $k$  是指特种设备安全事故时间序列网络中各年份节点衔接的线路数量,所有节点的平均度值为网络平均度  $\langle k \rangle$ 。网络平均度数值越大,特种设备事故起数对应视点之间超越性越大,年份节点间连接更紧密。计算节点度  $k$  的节点数  $N_k$  在所有  $N$  个节点中所占比例:

$$p(k) = \frac{N_k}{N} \quad (2)$$

现实中网络大多具有无标度性,网络的度分布服从右偏幂律分布<sup>[15]</sup>。根据无标度网络的特性,度分布  $p(k)$  与  $k$  之间满足幂律关系:

$$p(k) \sim k^{-\gamma} \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为幂律指数。

### 2.2 网络密度与聚类系数

特种设备安全事故时间序列网络中,网络密度  $\rho$  是指实际已有边数与网络可容纳最大连边数之比。加权网络的聚类系数具有连边权重的非均匀化特性,在衡量网络相邻节点之间的聚集度时,需考虑节点之间相关强度的影响<sup>[20]</sup>。计算加权网络的节点  $i$  的加权聚类系数:

$$\rho = \frac{\langle k \rangle}{N - 1} \quad (4)$$

$$C^\omega(i) = \frac{\sum_{j,k} \omega_{ij} \omega_{jk} \omega_{ki}}{\sum_{j,k} \omega_{ij} \omega_{ki}} \quad (5)$$

式中,  $\omega_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  连边的权重。网络的加权聚类系数  $C(k)$  为各个节点的加权聚类系数均值:

$$C(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C^\omega(i) \quad (6)$$

式中,  $N$  为网络节点个数。加权聚类系数越大,网络密集性越好,网络拓扑结构越有序,社团结构越

明显。

### 2.3 介数中心性

节点的介数中心性是指网络中任意节点对之间的最短路径经过该节点的概率,反映节点在网络信息传输中的重要性。对于特种设备安全事故时间序列网络,介数中心性越高的节点重要性越大,研究此类节点可把握特种设备安全事故时间序列变化规律。 $s, t$  为一条路径中的 2 个节点,计算指定节点  $i$  的介数中心性 ( $BC_i$ ):

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{g_{st}^i}{g_{st}} \quad (7)$$

式中,  $g_{st}$  为一条路径的源节点、目标节点和节点  $s$  与节点  $t$  之间所有可能的最短路径数量<sup>[21]</sup>;  $g_{st}^i$  为节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径中经过节点  $i$  的最短路径数量。

## 3 实证研究

### 3.1 特种设备安全事故时间序列的拓扑网络结构

根据国家市场监督管理总局特种设备安全监察局全国特种设备安全情况通报 (<http://www.samr.gov.cn/tzsbj/>) 以及《特种设备典型事故案例集(2005—2013)》中的特种设备事故数据进行统计。依照《中华人民共和国特种设备安全法》《特种设备安全监察条例》规定,将特种设备划分为 8 类,分别为:锅炉、压力容器(含气瓶)、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施和场(厂)内专用机动车辆。具体分类及事故起数如表 1 所示。

以每年事故数量为节点,应用可视图法构建 2005—2020 年 8 类特种设备安全事故时间序列网络。8 类特种设备安全状况波动特征可反映其拓扑网络特征,通过分析网络拓扑参数,可以挖掘不同特种设备安全事故时间序列变化规律。2005—2020 年 8 类特种设备事故时间序列拓扑网络结构如图 2 所示。

图 2 中节点大小代表节点度大小。由图 2 可知,8 类特种设备安全事故时间序列网络拓扑结构存在一定差异,但大部分网络差异度较小。

表1 各类特种设备事故起数

代码	特种设备类型	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
SE <sub>1</sub>	锅炉	43	22	25	33	34	28	41	29
SE <sub>2</sub>	压力容器(含气瓶)	77	62	62	37	47	32	48	52
SE <sub>3</sub>	压力管道	13	9	9	5	9	5	6	8
SE <sub>4</sub>	电梯	42	39	33	38	45	44	64	42
SE <sub>5</sub>	起重机械	89	68	84	54	69	89	74	76
SE <sub>6</sub>	客运索道	0	0	0	0	0	0	1	2
SE <sub>7</sub>	大型游乐设施	5	5	4	3	7	5	7	2
SE <sub>8</sub>	场(厂)内专用机动车辆	5	13	26	15	42	34	34	17

代码	特种设备类型	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
SE <sub>1</sub>	锅炉	26	22	18	17	11	8	11	4
SE <sub>2</sub>	压力容器(含气瓶)	34	47	56	27	18	15	8	10
SE <sub>3</sub>	压力管道	9	12	3	2	4	1	1	4
SE <sub>4</sub>	电梯	70	95	58	48	56	31	33	25
SE <sub>5</sub>	起重机械	61	62	79	94	93	100	26	27
SE <sub>6</sub>	客运索道	0	1	2	0	1	0	0	1
SE <sub>7</sub>	大型游乐设施	9	6	9	6	3	5	6	3
SE <sub>8</sub>	场(厂)内专用机动车辆	18	38	32	39	52	59	45	33

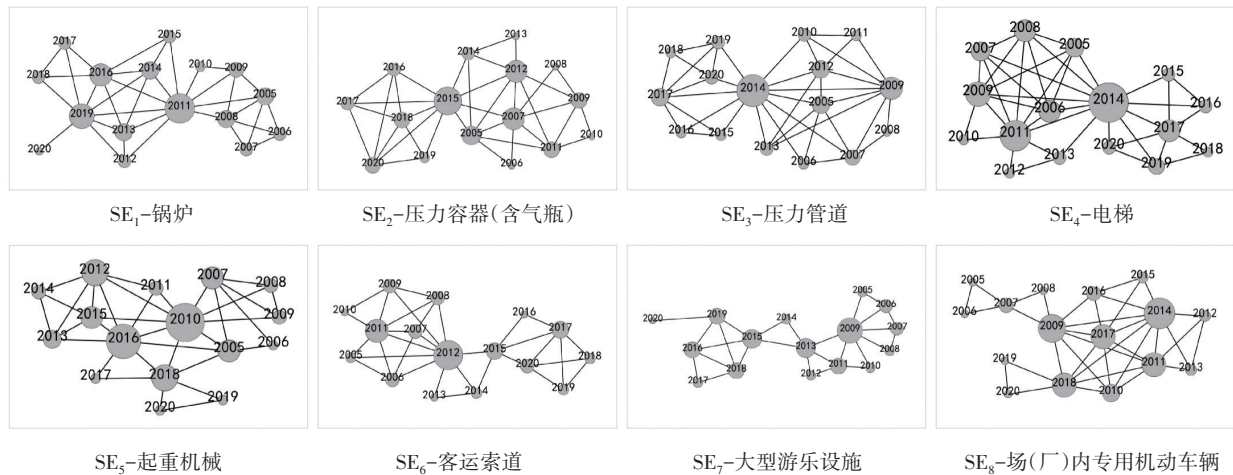


图2 各类特种设备安全事故时间序列拓扑网络结构图

### 3.2 特种设备安全事故时间序列的拓扑网络特征

#### 3.2.1 节点度及分布特征

Lacasa 等<sup>[16]</sup>发现,对于分形时间序列,例如分数布朗运动,对应可视图的度分布服从幂律分布。 $\gamma$ 与Hurst指数之间具有明确对应关系 $\gamma=3-2H^{[22]}$ ,分形时间序列的Hurst指数 $H \leq 0.5$ 时,网络不具有小世界特性,而当 $H > 0.5$ 时,网络具有明显的小世界特性,且明显度与 $H$ 的值呈正相关。计算8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络的节点度

和度分布,并对其进行拟合,得到幂律指数及Hurst指数,8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络指数如表2所示,双对数坐标下度分布如图3所示。

由表2可知, $\gamma$ 均为正值,证明8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络的度分布服从幂律分布,转化后网络为无标度网络。Hurst指数均大于0.5,表明8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络具有明显的小世界特性。

表2 特种设备安全事故时间序列拓扑网络指数

	特种设备							
	SE <sub>1</sub>	SE <sub>2</sub>	SE <sub>3</sub>	SE <sub>4</sub>	SE <sub>5</sub>	SE <sub>6</sub>	SE <sub>7</sub>	SE <sub>8</sub>
$\langle k \rangle$	4.375	4.500	4.750	4.875	4.250	4.000	3.250	4.375
$\gamma$	0.052	0.580	0.396	0.706	0.918	0.983	0.034	0.910
$H$	1.474	1.210	1.302	1.147	1.041	1.009	1.483	1.045

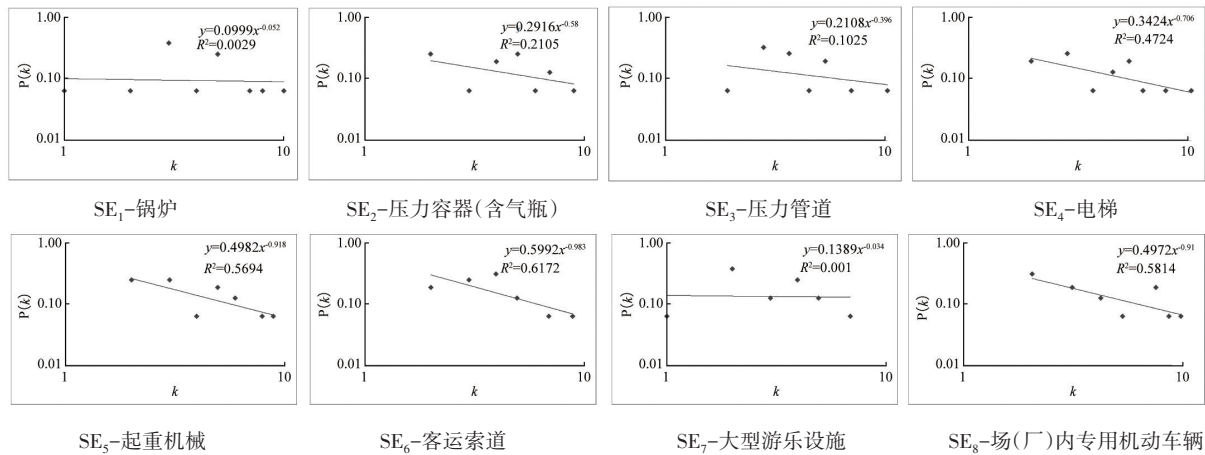


图3 各类特种设备安全事故时间序列拓扑网络度分布(双对数坐标)

### 3.2.2 聚集性特征

节点的加权聚类系数随着节点度的增加而降低, Yang 等<sup>[23]</sup>研究发现加权聚类系数与度之间的关系表现为幂律性, 即  $C(k) \sim k^{-\gamma}$ , 聚集指数  $\gamma$  被广泛

用于检测网络的聚集性。对网络加权聚类系数  $C(k)$  与其对应的节点度  $k$  依照幂律关系进行拟合, 得到聚集指数  $\gamma'$ , 特种设备安全事故时间序列拓扑网络聚集性参数如表3所示。

表3 特种设备安全事故时间序列拓扑网络聚集性参数

	特种设备							
	SE <sub>1</sub>	SE <sub>2</sub>	SE <sub>3</sub>	SE <sub>4</sub>	SE <sub>5</sub>	SE <sub>6</sub>	SE <sub>7</sub>	SE <sub>8</sub>
$\rho$	0.292	0.300	0.317	0.325	0.283	0.267	0.217	0.292
$C(k)$	0.731	0.760	0.794	0.823	0.762	0.755	0.663	0.807
$\gamma'$	0.740	0.739	0.743	0.561	0.806	0.808	1.151	0.519

由表3可知, 节点数相同的网络, 平均度值越大, 网络整体结构更紧密, 相应的网络密度越大。8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络的节点加权聚类系数最大值均为1, 网络中存在局部聚类现象。网络加权聚类系数范围为0.663~0.823, 均处于较高水平, 说明特种设备安全事故时间序列拓扑网络密集性良好, 节点间存在短程相关性。8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络的  $C(k) \sim k$  拟合曲线均符合幂律分布, 即随着节点度增大, 聚类系数均以幂律形式衰减。特种设备的聚集指数  $\gamma'$  均

较大, 证明特种设备安全事故时间序列网络的拓扑结构较为有序, 社团结构明显。表3中, 场(厂)内专用机动车辆的聚集指数最小, 场(厂)内专用机动车辆事故时间序列网络的拓扑结构更为无序, 社团结构不明显, 发生风险的可能性较大。对照统计的各年份特种设备安全事故数量发现, 场(厂)内专用机动车辆近几年事故发生频率仍较高, 需加强风险管控。

### 3.2.3 重要性特征

分析特种设备安全事故时间序列转化得到的

可视图,计算8类特种设备安全事故时间序列拓扑网络节点的介数中心性及Pagerank值。每类特种设备安全事故时间序列网络均包含16个节点,表4

给出8类特种设备安全事故时间序列网络介数中心性最大的节点的重要性评估结果。

表4 特种设备安全事故时间序列拓扑网络节点重要性评估结果

代码	特种设备类型	最大介数中心性	最大Pagerank值	节点度	对应年份
SE <sub>1</sub>	锅炉	58.667	0.131	10	2011年
SE <sub>2</sub>	压力容器(含气瓶)	51.250	0.114	9	2015年
SE <sub>3</sub>	压力管道	60.667	0.146	12	2014年
SE <sub>4</sub>	电梯	58.700	0.143	12	2014年
SE <sub>5</sub>	起重机械	38.755	0.121	9	2010年
SE <sub>6</sub>	客运索道	61.500	0.127	9	2012年
SE <sub>7</sub>	大型游乐设施	58.500	0.090	5	2013年
SE <sub>8</sub>	场(厂)内专用机动车辆	45.667	0.106	8	2009年

分析表4可得:除大型游乐设施和场(厂)内专用机动车辆外,其他特种设备安全事故时间序列拓扑网络介数中心性最大的节点,其Pagerank值与节点度值也最大,这些节点对应年份的特种设备事故起数均为特种设备安全事故时间序列局部极值点或全局极值点。因此,介数中心性越大的节点,发生安全事故的概率越大,该年份节点对应的特种设备为安全监管重点,需要及时采取相应的干预措施。因此,在特种设备安全事故处理过程中,需要在不同时期针对不同重点采取相应的管理策略,达到“对症下药”的效果。

备安全事故月数据,进行长时间序列及纵向的深入分析,为今后进一步将拓扑网络理论的其他研究成果应用于特种设备宏观安全态势研究奠定基础。

## 4 结论

1) 应用可视图法,构建特种设备安全事故时间序列拓扑网络模型。将特种设备安全事故时间序列映射变换为拓扑网络,极大程度上保留了原始时间序列信息,可从多维度指标定量刻画特种设备安全事故时间序列的非线性动力特性。

2) 2005—2020年中国特种设备安全事故时间序列分析结果表明:特种设备安全事故时间序列拓扑网络拓扑结构较为有序,社团结构明显,具有小世界特性和无标度网络特性。网络聚类系数较大,节点间存在短程相关性,可为特种设备安全事故的短期预测提供理论参考。

3) 基于拓扑网络理论的特种设备安全事故时间序列分析方法,从全新的视角审视了特种设备安全事故变化规律。后续研究还将继续收集特种设

## 参考文献(References)

- [1] 董颖, 罗云, 许铭, 等. 8类特种设备危险点(源)风险强度定量分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 218-221.
- [2] 曾珠, 罗云, 杨燕鹏, 等. 特种设备社会风险水平定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8): 119-124.
- [3] 孙轶轩, 邵春福, 计寻, 等. 基于ARIMA与信息粒化SVR组合模型的交通事事故时序预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(3): 348-353.
- [4] 曾珠, 罗云, 杨燕鹏, 等. 适于监管的特种设备使用过程关键风险因素辨识分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(2): 157-163.
- [5] 张倩倩, 张亦冰, 丁日佳. 基于监管视角的区域特种设备宏观安全风险预警[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 397-405.
- [6] 王新浩, 罗云, 李桐, 等. 基于大数据的特种设备宏观安全风险预警方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(4): 160-166.
- [7] Liang Z, Zhou K, Gao R, et al. Special equipment safety supervision system architecture based on blockchain technology[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(20): 601-625.
- [8] 郝素利. 特种设备安全监管新模式: 多中心治理[J]. 中国科技论坛, 2018(7): 9-17.
- [9] Wang F, Zhang J, Liang X, et al. Elevator safety risk and countermeasures based on FTA-TFN[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2014, 8(4): 1741-1748.
- [10] 杨强, 孙志礼, 赵鑫, 等. 可测量潜在故障模式的特种设备可靠寿命预测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 88-92.

- [11] 郑霞忠, 周佳丽, 邵波, 等. 基于D-I的塔机作业物体打击事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 83-89.
- [12] Ding K, Tao G, Zhang L. Accident prediction of special equipment in china based on grey markov Model[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(3): 32007.
- [13] 崔庆玲, 罗云, 崔刚, 等. 基于灰色理论的特种设备安全事故预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(5): 141-144.
- [14] 谷梦瑶, 李光海, 戴之希. 融合事故表征和CBR的特种设备事故预测研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(1): 255-267.
- [15] Wenjun X, Yanxia L, Guanrong C. Characterizing vertex-degree sequences in scale-free networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, doi: 10.1016/j.physa.2014.02.036.
- [16] Lacasa L, Luque B, Ballesteros F, et al. From time series to complex networks: The visibility graph[J]. PNAS, 2008, 105(13): 4972-4975.
- [17] Pierini J O, Lovallo M, Telesca L. Visibility graph analysis of wind speed records measured in central Argentina [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(20): 5041-5048.
- [18] 王超, 朱明. 基于复杂网络表征ATF时间序列动力学特性[J]. 计算机仿真, 2018, 35(6): 81-85.
- [19] 邢雪, 于德新, 田秀娟, 等. 结合可视图的多状态交流流时间序列特性分析[J]. 物理学报, 2017, 66(23): 57-65.
- [20] 曾明, 王二红, 赵明愿, 等. 基于时间序列符号化模式表征的有向加权复杂网络[J]. 物理学报, 2017, 66(21): 292-302.
- [21] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. Sociometry, 1977, 40(1): 35-41.
- [22] 邹勇, Donner Reik V, Marwan Norbert, 等. 非线性时间序列的复杂网络分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(1): 133-147.
- [23] Yang Y, Wang J, Yang H, et al. Visibility graph approach to exchange rate series[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388(20): 4431-4437.

## Research on topological characteristics of special equipment safety accidents time series

JIN Lianghai<sup>1,2,3</sup>, XIA Lu<sup>1</sup>, CHEN Shu<sup>1,2\*</sup>, SHAO Bo<sup>1,2</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, FAN Ling<sup>1</sup>, YAN Yuerong<sup>1</sup>

1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China
2. Safety Production Standardization Review Center of China Three Gorges University, Yichang 443002, China
3. Hubei Anhuan Technology Co., Ltd., Yichang 443002, China

**Abstract** In order to reveal the nonlinear dynamic characteristics of the time series of special equipment safety accidents, taking the time series of different types of special equipment safety accidents in China from 2005 to 2020 as the research object, the visualization method was used to convert the time series of special equipment safety accidents into a topology network diagram to generate a topology network structural model; using topological network theory to analyze topological network characteristic parameters such as node degree, network density, weighted clustering coefficient, power law index, betweenness centrality, etc., the time series law of special equipment accidents was mined. The results show that: The topological networks of various special equipment safety accident time series have small-world characteristics and scale-free characteristics; the clustering coefficients of the topological networks are all large, and the community structure is obvious; the node with greater betweenness centrality corresponds to the corresponding year, the greater the probability of an accident. The topology network analysis method used in this paper can more concisely and intuitively display the topology network structure of the time series of special equipment safety accidents, and more comprehensively characterize the nonlinear dynamic characteristics of the time series of special equipment safety accidents, which can provide a theoretical basis for the prediction of special equipment safety accidents.

**Keywords** special equipment; safety accidents; time series analysis; visualization method; topological characteristics ●



(责任编辑 卫夏雯)