

引用格式: 缪惠全, 高思远, 刘如山, 等. 生命线工程的可靠性研究进展分析(II)——国内电力系统的抗震可靠性[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(3): 362-384.

MIAO H Q, GAO S Y, LIU R S, et al. Research progress on reliability of lifeline engineering(II)—Domestic research on seismic reliability of electricity system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(3): 362-384. (in Chinese)

生命线工程的可靠性研究进展分析(II) ——国内电力系统的抗震可靠性

缪惠全¹, 高思远¹, 刘如山², 钟紫蓝¹, 张聪聪³, 杜修力¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 3. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257091)

摘要: 为了解国内电力系统的抗震可靠性研究现状, 基于知识图谱分析软件 CiteSpace 分别对城市电力系统—城市电力系统抗震(可靠性)—城市电力系统抗震可靠性 3 个层次 4 个领域的发文量、发文作者、发文机构、期刊和关键词展开系统分析, 梳理该领域的历史发展脉络, 明确热点问题、核心团队以及研究主题。通过进一步分析研究主题, 明确其研究现状和关键科学问题。研究表明: 国内电力系统的抗震可靠性研究主要包括地震灾害、地震反应、易损性、可靠性 4 个方面; 关键科学问题包括不同电力设备与设施的震害机理与抗震措施、电力系统不同元件地震易损性分析方法、变电站和城市电网系统的韧性评估方法与提升理论、以电网为核心的耦合基础设施系统的灾害传播机理与量化模型 4 个方面。

关键词: 韧性城市; 电力系统; 电网; 变电站; 地震; 可靠性

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2024)03-0362-23

doi: 10.11936/bjtxb2023020025

Research Progress on Reliability of Lifeline Engineering (II) —Domestic Research on Seismic Reliability of Electricity System

MIAO Huiquan¹, GAO Siyuan¹, LIU Rushan², ZHONG Zilan¹, ZHANG Congcong³, DU Xiuli¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

3. Dongying Power Supply Company of State Grid Corporation of China, Dongying 257091, Shandong, China)

Abstract: To understand the domestic research progress on the seismic reliability of electricity system, based on the knowledge mapping software CiteSpace, this paper conducted a systematic analysis of the number of publications, authors, issuing institutions, journals and keywords in three levels and four areas of “urban electricity system → seismic (reliability) of urban electricity system → seismic reliability of urban electricity system”. The objective was to sort out the historical development path, and clarify the hot issues, core teams and research topics of this area. With thorough investigation of the research topics

收稿日期: 2023-02-21; 修回日期: 2023-06-24

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3003603)

作者简介: 缪惠全(1988—), 男, 助理研究员, 主要从事生命线工程与韧性城市方面的研究, E-mail: miaohq@126.com

通信作者: 钟紫蓝(1986—), 男, 副研究员, 主要从事地下基础设施抗震方面的研究, E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn

in this field, the current research status and key scientific issues were identified. Results show that the research topics of seismic reliability of domestic electricity system include seismic hazard, seismic response, vulnerability and reliability; the key scientific issues include seismic damage mechanism and anti-seismic measures of different electrical equipment and facilities, seismic vulnerability methods of different components in power supply networks, resilience assessment methods and enhancement theory for substations and urban power grids, disaster propagation mechanism and quantitative model for interdependent infrastructure systems with power supply networks as the core.

Key words: resilient city; electricity system; power grid; substation; earthquake; reliability

新中国成立以来,电力工业迅速发展,电力系统规模不断扩大,与此同时,作为重要的生命线系统之一,电力系统与其他能源系统和生命线系统之间耦合愈加显著^[1-2],特别是灾害作用下的级联破坏现象日益为人们所重视^[3-4]。以地震灾害为例,历次大地震中,电力系统的破坏均对城市人员生命财产安全和其他基础设施产生巨大影响^[5]。1976年唐山地震导致市区8个110 kV变电站全部破坏,北京、天津、滦县、秦皇岛4条输电线路均因电源点处跳闸而无法供电,损失发电量共1 100 MW,占京、津、唐电网发电总量的30%,耗时1个月才全部恢复供电^[6];2008年汶川地震造成四川电网设施直接经济损失71亿元,246座变电站和1 643条输电线路均受到不同程度的破坏,城市大面积停电,震中区历时2个多月抢修才恢复正常供电^[7-8]。此外,地震中的停电还导致供排水系统、交通信号系统瘫痪,严重影响抢险救灾速度^[9]。

当前关于电力系统文献综述主要是基于研究者经验开展的,国内代表性成果如下。

1) 在电力系统稳定运行领域:徐新智等^[10]对国内外电力系统运行模拟与容量规划的分析方法、软件进行综述,总结各类软件特点,提出对该领域未来发展的思考;Li等^[11]总结多端电压源的高压直流电网中直流线路保护方法,为制定多端电压源的高压直流电网直流线路保护策略提供依据;胡萍等^[12]综述复杂电力系统连锁故障预测研究方法,重点是模式搜索法、模型法及风险评估法,并给出未来的研究方向;张程铭等^[13]对考虑频率安全的电力系统优化方法进行总结并对未来可能的发展方向做出展望;郭创新等^[14]从二次设备、信息安全、人为风险3个方面综述二次系统的风险评估方法以及各类风险对一次系统的影响,指出二次设备的发展趋势;阮前途等^[15]总结国内外电力系统韧性相关概念,立足于我国电网发展现状,提出韧性电网的概念,阐明其与能源互联网的关系并探讨该领域的发展前景。

2) 在地震灾害领域:谢强等^[16]总结强风、冰雪、地震等自然灾害对电力系统的破坏特点;谢强^[5]总结中日美三国在电力系统抗震方面的研究进展并阐述日本东京电力公司的应急响应对策;谢强等^[17]系统地总结变电站抗震韧性的评估流程与方法,详细介绍变电站抗震韧性评估流程与难点,进而提出4点研究展望;文波等^[18]对电力系统的震害特点以及电力系统抗震可靠性研究现状做出综述;孙江玉等^[19]以韧性视角对地震灾害情形模拟、电网元件脆弱性建模、电网功能变化过程仿真、电网抗震性能评估与改进4个方面进行综述。

3) 在地震之外的自然灾害领域:Dong等^[20]梳理电力系统覆冰灾害的检测与防冰研究发展脉络,指出关键技术与应用场景的发展趋势;赵彬等^[21]总结电网覆冰舞动应对措施的优点,梳理舞动机理、人工智能等相关领域的成果,并指出应对电网舞动的研究方向;Hou等^[22]从风场产生法、电气元件故障模型、建筑停电预测模型等角度,对风灾影响下的失效分析方法进行综述,阐述风灾下电力系统的故障分析和预测发展;Yang等^[23]将风力预报技术分为物理方法、统计方法和组合法,根据多个指标从3个角度综合比较107种风力预报方法;杜诗嘉等^[24]着眼于台风灾害,从预警到恢复、韧性评估与韧性提升综述电力系统中配电网关于韧性方面的研究成果,并展望配电网韧性未来的研究方向。

本文在文献[25]的基础之上,继续采用CiteSpace软件从3个层次4个领域以量化的形式推进城市生命线系统典型代表——电力系统的抗震可靠性研究分析,沿城市电力系统(第1层)—城市电力系统抗震(可靠性)(第2层)—城市电力系统抗震可靠性(第3层)的脉络,明确领域历史发展脉络,核心研究团队,通过解析研究主题探明研究现状和发展趋势,指明领域的关键科学问题,从而为深入推进该领域研究奠定基础。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

本文所使用的软件为知识图谱分析软件 CiteSpace, 版本为 6.1R2(64 bit)。

1.2 数据来源

数据库为中国知网, 检索工作分为 3 个层次, 如图 1 所示。具体检索方式和检索结果见表 1, 检索时间为 2022 年 7 月 30 日 14 时 58 分。

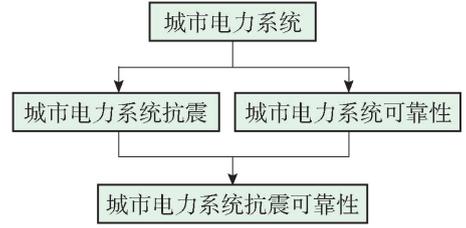


图 1 研究的 3 个层次

Fig. 1 Three levels of research

表 1 检索方式

Table 1 Retrieval method

层次	领域	主题检索	精炼方式	有效文献/篇
1	城市电力系统	(电力系统 + ^① 电气设备) * ^② (电网 + 变电站 + 电塔 + 电线)	基金文献且学科为电力工业、 自动化技术、建筑科学与工程、 水利水电工程	16 729
	2-1 城市电力系统抗震	层次 1 * (地震 + 抗震)	基金文献	92
2	2-2 城市电力系统可靠性	层次 1 * (可靠性 + 可靠度 + 易 损性 + 脆弱性 + 风险 + 韧性)	基金文献	2 116
3	城市电力系统抗震可靠性	层次 2-1 * 层次 2-2	基金文献	32

① “+”为逻辑运算符“或”。② “*”为逻辑运算符“与”。

2 城市电力系统领域

2.1 文献来源分析

检索结果中文献数量排名前 10 的期刊见表 2, 共文献 6 693 篇, 占有有效检索文献总数的 40.01%。

其中, 有 7 本期刊处于 EI 层次, 文献数量共 5 858 篇, 占 10 本期刊文献总量的 87.5%。这暗示了城市电力系统在工科领域关注度较高, 期刊的办刊质量也受到普遍认可。

表 2 城市电力系统领域文献检索数量前 10 名期刊

Table 2 Top 10 journals in urban electricity system by the number of documents retrieved

编号	期刊名称	文献 数量/篇	占有有效文献 数量比/%	期刊 层次	主管单位
1	电力系统自动化	1 720	25.70	EI ^①	国家电网有限公司
2	电网技术	1 174	17.54	EI	国家电网有限公司
3	电力系统保护与控制	1 101	16.45	EI	许昌开普电气研究院有限公司
4	中国电机工程学报	783	11.70	EI	中国科学技术协会
5	电力自动化设备	455	6.80	EI	中国华电集团有限公司
6	电工技术学报	337	5.04	EI	中国科学技术协会
7	湖南大学学报(自然科学版)	288	4.30	EI	中华人民共和国教育部
8	电网与清洁能源	283	4.23	核心期刊 ^②	西北电网有限公司
9	电力建设	279	4.17	核心期刊	国家电网有限公司
10	华北电力大学学报(自然科学版)	273	4.08	核心期刊	中华人民共和国教育部

① EI 为工程索引(美)。② 核心期刊为北京大学《中文核心期刊要目总览》来源期刊。

2.2 年度发文量分析

该领域年度发文量如图2所示,可以看出该领

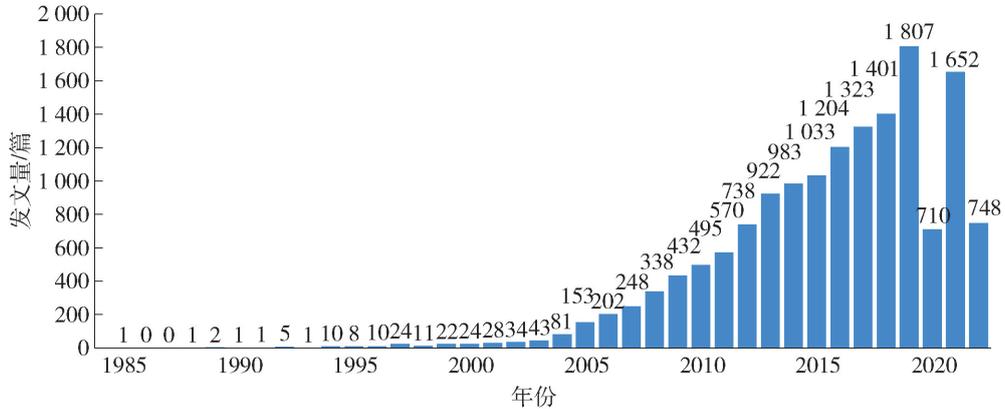


图2 城市电力系统领域年度发文量变化

Fig.2 Number of papers published each year in the area of urban electricity system

1) 阶段1是该领域的初步发展阶段。尽管该阶段处于改革开放不断深化的大背景下,但年发文量都不超过10篇,发展较为缓慢。

2) 阶段2是该领域的高速发展阶段。为发挥市场竞争机制的积极作用,提高经济效率^[26],1997年1月,国家电力公司成立,该领域的年度发文量亦逐步提高,2002年3月,国务院批准了《电力体制改革方案》,指明电力市场的发展方向^[27],领域的年度发文量增长速度显著(其中2004、2005、2006年分别有81、153、202篇,年平均增长率达50%)。

3) 阶段3是该领域的快速发展阶段。年度发文量多在1000篇以上,文献总数占该领域文献检索数量的67%。2015年《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》揭开了新一轮电力改革的序幕,随着5G技术、智能电网、新能源等研究的深入,该领域的研究达到新高潮,2019年论文发表数量达到1807篇,迎来该领域年度发文量的一个极值点。

2.3 作者发文分析

为了解该领域主流研究者及其合作关系,对被引前2000篇文章进行分析,得到该领域研究者合作网络如图3所示,可以发现,该领域最活跃是清华大学的张伯明、孙宏斌、吴文传、梅生伟和郭庆来,他们合作紧密,影响力显著。此外还有8个核心团队,如天津大学王成山、浙江大学郭创新等。清华大学处于相对优势地位,值得特别关注与学习。

2.4 关键词共现分析

对被引次数排名前2000篇文章进行关键词共现分析,共现次数最多的前10%见表3,按照关键词反映的内容将关键词分为研究对象(类别1)、研究

域发展可分为3个阶段:1997年之前(阶段1),1997年到2015年(阶段2),2015年至今(阶段3)。

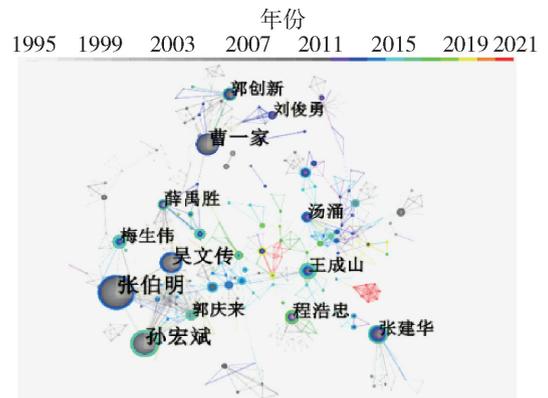


图3 城市电力系统领域作者合作网络

Fig.3 Collaborative networks of authors in the area of urban electricity system

问题(类别2)和研究方法(类别3)3类,其中,电力系统、智能电网、微电网等归属类别1的关键词有15个。风力发电、连锁故障、故障诊断等归属类别2的关键词共有36个。大数据、遗传算法、人工智能等归属类别3的关键词共11个。类别1、类别2和类别3分别出现了879、768、170次。主要结论如下:

1) 从关键词出现的频次来看,智能电网、微电网是近些年来最受关注的研究对象,而风力发电、连锁故障和故障诊断则是关注的焦点,大数据则是最受关注的方法。

2) 关键词出现时间表明以深度学习(2018年)为代表的人工智能对这一领域产生显著影响,而优化运行(2015年)和直流电网(2015年)则展现目前综合能源系统运营的复杂性,不仅涉及多源多类的能源供应,还包括复杂的应用和存储问题,揭示当前

表3 城市电力系统领域关键词共现频次统计

Table 3 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the area of urban electricity system

序号	关键词	频次	首出年份	类别	序号	关键词	频次	首出年份	类别
1	电力系统	310	1992	1	32	云计算	18	2009	3
2	智能电网	155	2009	1	33	复杂网络	18	2005	3
3	微电网	88	2009	1	34	电能质量	17	2009	2
4	风力发电	80	2007	2	35	新能源	17	2013	1
5	连锁故障	60	2005	2	36	变电站	16	2002	1
6	故障诊断	57	1992	2	37	电压稳定	16	1997	2
7	电动汽车	55	2012	1	38	配电系统	16	2009	1
8	配电网	52	2002	1	39	专家系统	15	1992	3
9	电力市场	44	2000	1	40	风电消纳	15	2011	2
10	需求响应	40	2013	2	41	一次调频	15	2007	2
11	微网	38	2009	1	42	优化调度	15	2006	2
12	继电保护	35	2005	2	43	潮流计算	14	2010	3
13	不确定性	29	1999	2	44	模型	12	2010	3
14	储能系统	28	2008	1	45	协调控制	12	1999	3
15	低频振荡	27	2004	2	46	机组组合	12	2003	2
16	经济调度	27	2011	2	47	大停电	11	2011	2
17	可靠性	26	2000	2	48	优化配置	10	2004	2
18	大数据	24	2013	3	49	暂态稳定	9	2008	2
19	电网规划	24	2001	2	50	互联电网	9	2004	1
20	储能	24	2007	2	51	发展趋势	9	2006	2
21	风电场	24	2006	1	52	优化运行	9	2015	2
22	控制策略	23	2007	2	53	深度学习	9	2018	3
23	遗传算法	23	2007	2	54	智能调度	9	2009	2
24	风电	22	2001	3	55	故障定位	8	2008	2
25	人工智能	21	2004	3	56	孤岛运行	8	2011	2
26	储能技术	20	2009	2	57	无功补偿	8	1999	2
27	IEC 61850 ^①	19	2005	2	58	智能用电	8	2014	2
28	风险评估	19	2006	2	59	直流电网	8	2015	1
29	电网	19	2009	1	60	规划	8	2000	2
30	黑启动	19	2004	2	61	仿真	8	2004	3
31	光伏发电	18	2008	2	62	信息融合	8	2008	3

① IEC 61850 为电力系统自动化领域的全球通用标准。

电力系统运营调度管理的复杂性。

3 城市电力系统抗震领域

3.1 论文发表时间分布分析

通过表1可以发现,层次2中电力系统抗震领域的文章(92篇)远少于层次1中文献数量,占比仅有0.55%,这侧面反映出电力系统抗震并非电力系统研究的主流领域。但是地震对电力系统破坏的严

峻性和广泛性,又要求研究者不得不聚焦于这一领域。该领域年度发文量如图4所示,在2009年之前,其年度发文量均不超过5篇,表明其研究内容还未受到国内研究者的重视,2008年汶川地震之后,年度发文量显著增加,2020年高达11篇,文献[28]是该领域能检索到的最早文献,文中给出了3种失效准则并给出了各个准则下高压变电站中常见的双母线系统的抗震可靠性表达形式。

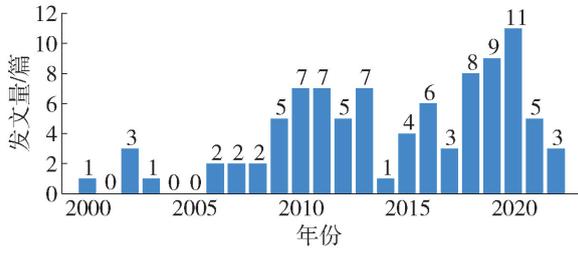


图4 城市电力系统抗震领域年度发文章量变化

Fig.4 Number of papers published each year in the seismic area of urban electricity system

3.2 论文发表作者分析

该领域作者合作网络如图5所示,可以发现主流学者已形成4个核心团队,分别为同济大学谢强团队、西安建筑科技大学文波团队、中国地震局工程力学研究所刘如山团队、中国电子科技集团公司电子科学研究院程永锋团队,其中谢强、刘如山团队较早进入这一领域并仍保持相当研究活跃。

3.3 关键词共现分析

共现次数排名前20%的关键词见表4,共34个,按照2.4节方法进行分类,归属类别1的关键词有变电站、电气设备、电力系统等15个,归属类别2

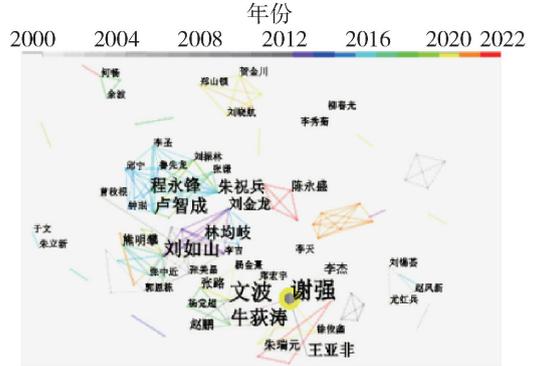


图5 城市电力系统抗震领域作者合作网络

Fig.5 Collaborative networks of authors in the seismic area of urban electricity system

的关键词有抗震性能、地震响应等13个,归属类别3的关键词有易损性、时程分析等6个。主要结论如下:

- 1) 关键词量化结果揭示整个电力系统中变电站的抗震性能得到更为普遍的关注。
- 2) 易损性和时程分析是电力系统抗震分析中最为重要的2个方法,这与经验性的认识基本一致。
- 3) 最新的关键词是2020年的放大系数^[29-30]和2018年的动力特性^[31-32],反映了对电力设施的地震反应规律和动力特性的重视。

表4 城市电力系统抗震领域关键词的共现频次统计

Table 4 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the seismic area of urban electricity system

编号	关键词	频次	首出年份	类别	编号	关键词	频次	首出年份	类别
1	变电站	20	2002	1	18	数值模拟	3	2013	3
2	电气设备	14	2002	1	19	自然灾害	3	2006	1
3	电力系统	14	2002	1	20	抗震	3	2009	2
4	抗震性能	7	2002	2	21	数字滤波	3	2006	3
5	易损性	6	2016	3	22	芦山地震	2	2013	1
6	汶川地震	6	2009	1	23	潮流分析	2	2002	3
7	地震响应	6	2009	2	24	动力特性	2	2018	2
8	地震灾害	6	2007	1	25	隔震技术	2	2010	2
9	地震	5	2008	1	26	失效概率	2	2011	2
10	抗震设计	4	2008	2	27	绝缘子	2	2016	1
11	软母线	4	2009	1	28	有限元法	2	2011	3
12	相互作用	4	2010	2	29	放大系数	2	2020	2
13	震害	4	2010	1	30	电力建筑	2	2007	1
14	时程分析	4	2010	3	31	房屋建筑	2	2016	1
15	电力设施	3	2010	1	32	松弛度	2	2011	2
16	抗震能力	3	2012	2	33	地震反应	2	2015	2
17	电网	3	2009	1	34	变电设备	2	2013	1

4 城市电力系统可靠性领域

4.1 论文发表时间分析

该领域年度发文量如图 6 所示,显然,这一主题与电网系统抗震研究不同,自 2002 年以后该领域处于持续稳定发展阶段,从 2020 年开始年发文量都不低于

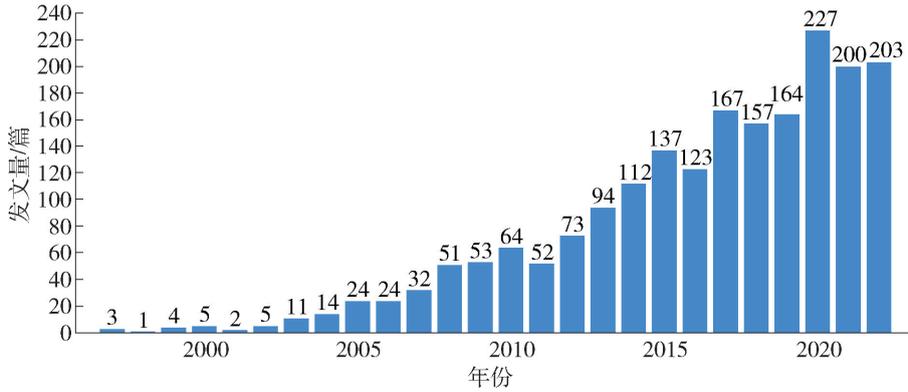


图 6 城市电力系统可靠性领域年度发文量变化

Fig. 6 Number of papers published each year in the reliability area of urban electricity system

4.2 论文发表作者分析

该领域的作者合作网络如图 7 所示,可以看出该领域形成多个相对分散的研究团队,如顾雪平团队、刘俊勇团队、郭创新团队、薛禹胜团队等,其中,薛禹胜团队较早地进入该领域并形成显著的影响力。

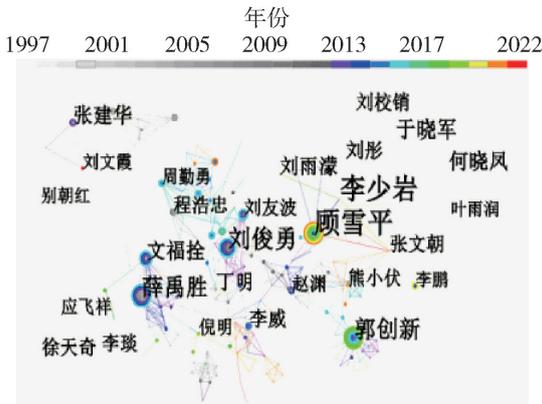


图 7 城市电力系统可靠性领域作者合作网络

Fig. 7 Collaborative networks of authors in the reliability area of urban electricity system

4.3 关键词共现分析

共现频次前 10% 的关键词见表 5,共有 58 项,各关键词根据研究对象(类别 1)、研究问题(类别 2)、研究方法(类别 3)亦做了归类分析,可以发现:

1) 该领域最关注的问题是电力系统的风险评

估问题,笔者认为,电力体制改革^[33]、微网与智能电网技术发展^[34]、能源互联网研究^[35]、大停电事件^[36]等因素都在不同程度上推进该领域的发展。特别是受 2003 年美加大停电等重大事故影响,使得可靠性准则成为电网设计与运营的强制性规定^[37],并促使制定系列国家标准和规范^[38-42]。

估问题,而最受关注的方法则是复杂网络方法。

2) 最新的关键词是 2019 年首次出现的换相失败、深度学习,侧面反映特高压直流输电系统的建设问题和人工智能领域对电力系统研究的影响。此外,2017 年的互联电网和电动汽车,则反映储能技术对电力系统可靠性问题的推动。

5 城市电力系统抗震可靠性领域

由于该领域文献相对较少,基本是城市电力系统抗震研究的子集,因此,对论文发表时间和作者不再做具体分析,直接对关键词进行分析,其聚类结果如图 8 所示。可以发现,主流关键词共有 4 个聚类,包含 53 个节点、166 条连线,各聚类信息见表 6,笔者将对每个主题的核心聚类进行详细介绍。

5.1 聚类#0

该聚类主要内容为电力系统震害特点、抗震措施和典型震害数据。此处分别按照输电塔线体系、变电站和建构物进行分析总结。

1) 输电塔线体系中电线破坏非常少见,但因为塔杆折断倾倒或房屋倒塌而间接导致电线破坏,见图 9。塔线体系破坏多数是输电塔破坏,且主要是地质灾害等原因引起的间接破坏,如输电塔周围土体发生滑坡导致输电塔基础开裂,见图 10,因地面不均匀沉降导致输电塔发生倾倒、破裂,仅有少

表5 城市电力系统可靠性领域关键词的共现频次统计

Table 5 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the reliability area of urban electricity system

编号	关键词	频次	首出年份	类别	编号	关键词	频次	首出年份	类别
1	风险评估	206	2006	2	29	优化调度	19	2007	2
2	可靠性	187	1997	2	30	运行风险	15	2009	2
3	电力系统	184	1998	1	31	电动汽车	15	2017	1
4	配电网	141	1997	1	32	机组组合	14	2005	2
5	连锁故障	140	1997	2	33	风险分析	13	2005	2
6	微电网	85	1997	1	34	储能	13	2014	2
7	电力市场	73	2000	1	35	优化配置	13	2011	2
8	鲁棒优化	65	1997	2	36	数字孪生	13	1997	3
9	智能电网	62	2009	1	37	指标体系	13	2011	2
10	脆弱性	51	2005	2	38	电能质量	12	2004	2
11	电网规划	49	1997	2	39	预防控制	12	2014	2
12	不确定性	47	2003	2	40	遗传算法	12	2009	3
13	安全性	47	1997	2	41	风险管理	12	2007	2
14	复杂网络	44	2005	3	42	灵敏度	12	2011	2
15	需求响应	37	1997	2	43	互联电网	11	2017	1
16	自然灾害	32	1997	1	44	并网策略	11	1997	2
17	新能源	31	1997	1	45	二次设备	11	2012	1
18	电网	29	1999	1	46	风险调度	11	2017	2
19	风险理论	29	1997	3	47	储能系统	11	2013	2
20	隐性故障	28	1997	2	48	状态检修	10	2016	2
21	风力发电	28	2009	2	49	核心主网	10	1997	1
22	继电保护	27	2007	2	50	方案评估	10	1997	2
23	G1法 ^①	27	1997	3	51	电磁环网	10	1997	2
24	风电	26	2012	2	52	综合评价	10	2012	2
25	经济性	25	2000	2	53	风险指标	9	2013	2
26	韧性	25	1997	2	54	换相失败	9	2019	2
27	风险	25	2006	2	55	深度学习	9	2019	3
28	变电站	20	2002	1	56	风险预警	9	2013	2

① G1法为序关系分析法。

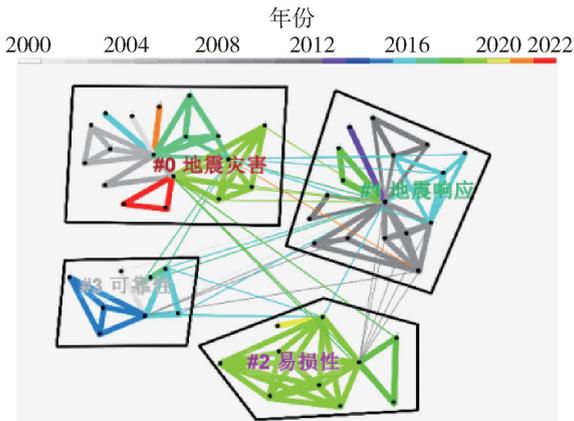


图8 关键词聚类图谱

Fig. 8 Clusters of keywords

表6 关键词聚类信息

Table 6 Clustering information of keywords

聚类	规模/个	平均轮廓值 ^①	年份 ^②	研究主题
#0	18	0.940	2013	地震灾害
#1	17	0.868	2011	地震响应
#2	10	0.909	2017	易损性
#3	8	0.764	2012	可靠性

① 平均轮廓值反映聚类质量, 当该值大于 0.5 时认为是合理的, 当该值大于 0.7 时, 认为聚类结果具有高可信度。

② 年份为该关键词平均出现的时间。

数输电塔本身发生折断倒塌破坏, 此外, 与输电线相连的输电塔发生串倒破坏也比较常见。



图9 塔杆折断致使电线破坏^[43]

Fig. 9 Power lines damaged by Tower rod break^[43]



图10 汶川地震中高压输电塔因地质灾害倒塌^[43]

Fig. 10 High voltage transmission tower collapsed due to geological disaster in Wenchuan Earthquake^[43]

2) 变电站中变压器主体、蓄电池等浮放设备的破坏形式一般为移位、倾倒、漏油、出轨。相应的配套设备如支柱绝缘子、断路器、隔离开关这类电瓷型高电压变电设备抗弯性能差,固有频率与地震波卓越频率接近,容易发生共振,此类设备在地震中损坏率最高,见图 11。瓷套管根部位移受到限制,该类设备在地震中的破坏大多发生在根部。电气主接线系统中母线分为软母线和硬母线,在地震作用下,软母线破坏一般是由于悬挂母线的绝缘子串被拉断所至,硬母线破坏则是由于支柱绝缘子在地震作用下折断所至。



图11 汶川地震中某 110 kV 变电站损坏的开关^[43]

Fig. 11 Damaged switch of a 110 kV substation in Wenchuan Earthquake^[43]

3) 与一般建筑物相比,电力系统建构物的梁

柱、楼板等构件多高大厚重,加上电气设备的自重较大,故地震作用较一般类型建筑大,因此,建构物很容易因为刚度和强度不足引起破坏和倒塌,见图 12。针对以上震害特点,一些提高电力系统抗震能力的建议得以提出^[8,44-45]:为有效防止输电塔杆倾倒,应将其建设在不易发生泥石流、滑坡等地质灾害的位置,同时设置可靠的防滑措施并加强输电线防串倒技术研究;对变电设备可采用高强硅瓷并研发新型材料,像支柱绝缘子这种长细比较大的电气设备可以通过减隔震技术减小地震反应,加强设备本体与基础连接以防止浮放设备发生滑移、倾倒;电气主接线系统连接方式有四大类,选择合理的接线方式能有效提高主接线系统抗震可靠性;减隔震技术的合理应用能够减小开关、断路器、变压器等关键设备的动力反应,进而达到提高其抗震性能的作用^[46-48]。



图12 汶川地震中绵竹某变电站主控楼坍塌现场^[43]

Fig. 12 Collapse of the main control building of a substation in Mianzhu in the Wenchuan Earthquake^[43]

与此同时,对典型地震灾害中电力系统的破坏情况,研究者进行了统计分析。刘如山等^[7]统计了汶川地震中变电站和线路破坏的总体情况,见表 7,并详细统计了变电站中各类设备破坏类型占比情况,见表 8。

表7 汶川地震四川省受损变电站和线路数^[7]

Table 7 Number of substations and lines damaged in Sichuan Province in Wenchuan Earthquake^[7]

电压等级/kV	受损变电站/个	需重建变电站数/个	受损线路数/条
500	1		4
220、330	14	3	64
110	75	5	136
35	156	7	187
10			1 252

表8 汶川地震中110 kV及以上变电站中电气设备破坏类型和比例^[7]

Table 8 Failure type and proportion of electrical equipment in 110 kV and above substations in Wenchuan Earthquake^[7]

高压电气设备	主要破坏类型所占比率/%			
	断裂、倾倒、裂缝、炸裂	漏油、漏气	变形	其他
断路器	73.6	17.6		8.8
隔离开关	83.3		13.7	3.0
电压互感器	45.8	20.8		33.4
电流互感器	26.4	28.8	6.7	38.1
避雷器	95.7			4.3

表9 芦山地震中芦山县、天全县变电站高压电气设备震害情况

Table 9 Damage of high voltage electrical equipment in Lushan County and Tianquan County in Lushan Earthquake

地区	变电站名称	电压等级/kV	地震烈度	设备震害情况
芦山县	金花变电站	110	8	变压器位移、漏油、瓷套管受损;70%隔离开关受损;并联电容器受损
	苗溪变电站	110	8	主变压器变形、瓷套管破坏漏油;开关瓷瓶错位
天全县	天全变电站	220	8	主变压器漏油,瓷瓶破裂,套管、散热器受损
	沙坪变电站	110	8	避雷器损坏,相套管位移、漏油;开关柜、隔离开关及部分隔离刀闸损坏;电容器开关受损;开关套管断裂、开关电流互感器(current transformer, CT)损坏
	始阳变电站	110	8	主变压器110 kV侧中性点间隙接地CT损坏
	仁义变电站	35	8	开关等设备受损
	思经变电站	35	8	开关柜受损

此外,刘如山等^[49]统计了芦山地震中芦山县、天全县变电站电气设备破坏情况,见表9,可以看出隔离开关破坏和变压器位移、漏油破坏最容易发生。

5.2 聚类#1

该聚类为各类电气设施地震反应分析方法,主要包括数值模拟法和试验实测法,接下来分别对输电塔线体系、变电站、建构物进行介绍。

1) 输电塔线体系

在数值模拟方面:早期研究忽略了导线作用,谢丽宇等^[50]用ANSYS建立模型,得到高压输电塔的地震反应。张晓志等^[51]对比ANSYS中的Newmark平均常加速度法和希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)方法,结果显示,HHT方法计算精度更好。黄帅等^[52]用ABAQUS建立模型得到输电

塔动力反应。由于文献[51-52]未考虑导线影响与体系拓扑结构,与实际结果相比可能会有较大误差。田利等^[53]用SAP2000建立输电塔线体系有限元模型,发现行波效应能够放大或缩小输电塔的动力反应,且行波效应的影响与波速有很大关系。孙建梅等^[54]基于ANSYS验证了文献[53]中的结论并找到输电塔薄弱处。岳茂光等^[55]建立输电塔线体系有限元模型,对比行波输入和一致地震动输入下输电塔的动力反应,发现行波输入增加导线轴力反应,对导线纵向和竖向位移有放大作用。全伟等^[56]提出一种多点地震动模拟算法,以此输入模型并得到地震反应,发现行波效应能减小塔身受力但会增大导线轴力,而部分相干效应和局部场地土效应对塔身和导线都起不利作用;文献[56]中的结论对折线形输电塔线体系同样适用,且相同条件下折线形输电

塔地震反应更大^[57]。田利等^[58-59]在文献[57]中所述条件下考虑地形变化、地震动空间变化的影响,结果表明,这些因素的影响同样不可忽视。田利等^[60]、盖震等^[61]、袁光英等^[62]分别讨论了桩-土-结构相互作用、地震动持续时间、不同地震输入方向对输电塔线体系地震反应的影响,为工程设计提供依据。

在试验模拟方面:白杰等^[63-64]为研究双回路输电塔线耦联体系和格构式输电塔线体系地震反应,提出试验设计理论与方法并验证可行性;李宏男等^[65]使用缩尺模型,展开多维多点振动台试验研究,并通过与数值模拟对比验证结果的可靠性;田利等^[66]在设计模型时引入导线比例修正系数,并通过振动台试验验证方法的合理性^[67],同时研究地震波入射方向的影响,确定地震波最不利入射角^[68]。

2) 变电站

在关键设备方面:谢强等^[69]进行足尺寸原型振动台试验,结果显示 220 kV 断路器薄弱部位在瓷套管根部;王喆等^[70]有限元模拟的结果显示 110 kV 隔离开关的薄弱部位也在根部,这与震害资料反映的规律一致。

在支架对电气设备反应的影响方面:程永锋等^[71]通过振动台试验探究 880 kV 复合绝缘子动力反应特性,发现支架对设备加速度反应影响最大,但放大系数小于 1.3;郑山锁等^[72]用有限元模拟得到不同支架形式对 110 kV 隔离开关动力反应影响;姜斌等^[73]考虑柔性连接件刚度和支架影响,结合理论分析与试验模拟,得出支架-设备最优刚度比与设备绕法兰的最优转动刚度。

此外,一些学者在研究电气设备地震反应规律时采用多种方法以确保结果的可靠性。Ma 等^[74-75]建立 550 kV 电力变压器有限元模型,获得电力变压器的地震反应,发现该类设备在结构设计中没有充分考虑地震效应;进而对 1 100 kV 变压器套管进行物理和数值模拟,2 种模拟方法所得结果具有较好的一致性。He 等^[76-77]提出一种快速估计变压器套管地震反应的方法,并通过有限元与振动台试验结果的对比验证方法的合理性。进而,根据振动台试验对 2 种特高压气体绝缘开关设备 (gas-insulated switchgear, GIS) 套管的抗震性能进行分析,结果表明 2 种 GIS 套管均符合抗震要求^[78]。何紫薇等^[79]建立有限元模型并与文献^[78]中的试验结果对比验证其可靠性,通过分析发现复合材料对 GIS 套管的影响要比陶瓷材料大,但复合套管材料自身的力学特点使其安全性要好于瓷套管。

在软母线耦联设备体系方面:谢强等^[80]用 ABAQUS 软件建模发现母线对设备的牵引作用很大程度上促进设备的破坏,并讨论软母线水平张力和水平张力刚度受松弛度的影响规律、母线冗余度对设备反应的影响^[81],随后,通过振动台试验进一步得到松弛度对设备地震反应的影响——松弛度较小时地震作用大的情况下导线起不利作用,地震作用小的情况下导线起有利作用,松弛度大的导线对设备几乎没有影响^[82];魏森森等^[83]根据有限元模拟,发现在软母线耦联体系中母线会分别增大和减小高低频设备的动力反应,与近场非脉冲地震相比,近场脉冲地震对设备的破坏性更强;朱祝兵等^[84]发现 880 kV 换流站中互连设备地震反应差别与导线刚度成正相关关系;He 等^[85]在对分裂导线互联电气

设备的地震反应研究中发现,互连电气设备抗震性能评价不仅要考虑终端力,还要考虑终端弯矩;张雪松^[86]提出考虑刚度条件的软母线位移形函数、最大弧垂计算公式,并通过振动台试验和有限元验证公式的正确性,结果表示软母线刚度越大,设备的地震反应也越大;郑山锁等^[87]建立软母线耦联设备的地震位移反应比公式并进行验证,为软母线耦联体系地震反应量化分析提供参考。

在硬母线耦联电气设备体系方面:程永锋等^[88]通过振动台试验研究 110 kV 硬母线对设备影响,发现耦联设备地震反应略有降低,双向激励比单向激励地震反应更大,此外通过在单体设备顶部设置配重能模拟耦联设备的地震反应,随后将对象换为 550 kV 避雷器和互感器耦联体系进行试验,影响规律类似^[89];Yang 等^[90]以缩尺模型试验得到在考虑平面外运动和扭转运动条件下管母线连接设备体系的动力反应,结果表明,按设备频率参数选择设备和相邻柱绝缘子之间的连接类型能够有效提高电气主接线系统的抗震能力;孟宪政等^[91]对复合外套避雷器和互感器经硬母线连接的耦联体系展开振动台试验,建议在考虑经济和安全的条件下将支架对设备的动力放大系数取为 1.4。

在减隔震技术方面:程永锋等^[92]提出一种隔震试验模型设计方案并通过振动台试验和数值仿真验证其合理性和隔震设计的有效性;刘振林等^[93]为了解金属耗能减震器应用在 800 kV 复合材料支柱绝缘子的效果开展振动台试验,测试了设备的动力反应,结果表明在不同地震波输入条件下减震率都在 50% 以上,且峰值地面加速度 (peak ground acceleration, PGA) 越大,减震器效率越高;王喆等^[70]通过有限元模拟表明设置钢丝绳阻尼器能有效降低开关的地震反应,且中间层减震效果优于底部减震;苏小超等^[94]针对特高压瓷套避雷器提出一种低自由度力学模型建立方法,并以实际算例验证其可行性,提高减震装置的研究效率。

3) 建构筑物

蒋凤梅等^[95]采用 SAP2000 建立变电站厂房框架的有限元模型,发现电气设备与主体结构之间的相互作用条件会对厂房地震反应产生较大影响。张睿明^[96]使用 ABAQUS 软件验证这一结论。

5.3 聚类#2

该聚类内容有电力系统各类结构的地震反应风险评估,主要从不确定性角度对电力系统的地震反应规律分析,基本方法包括经验统计法、理论分析法

和数值模拟法3类,此外,部分学者还将上述工作进一步拓展至经济损失的评估之中。此处按照电力系统不同结构对象进行分析。

1) 输电塔线体系

谢丽宇等^[50]通过基于性能分析获得输电塔的抗震能力曲线,选取100条地震记录,利用AYSYS获得输电塔顶点最大位移角与PGA之间的关系,最终建立跨越式输电塔的地震易损性曲线。张伟等^[97]通过数值模拟获得输电塔动力反应,以塔顶最大位移为参数,结合增量动力分析(increment dynamic analysis, IDA)和概率分析建立直线酒杯型输电塔易损性分析曲线。Zheng等^[98]用显示动力分析方法对高层输电塔进行倒塌分析并与汶川地震中实例进行对比验证,又基于概率估计方法对高层输电塔进行倒塌易损性评估。Liu等^[99]考虑主余震对高层输电塔的损伤影响,并以易损性曲线量化不同损伤状态的概率。Tian等^[100]建立输电塔概率地震需求模型(probabilistic seismic demand model, PSDM),通过IDA方法获取PSDM数据并量化悬挂式输电塔的地震易损性。Pan等^[101]建立PSDM,采用IDA方法,在考虑土-结构相互作用、距地表不同深度地震动强度变化和结构参数不确定性条件下进行1000 kV双回路钢管输电塔的易损性评估。

2) 变电站

在经验统计法方面:贺海磊等^[102]根据震害统计分析方法得到变电站中主要设备的地震易损性曲线;Liu等^[103-104]基于汶川地震的资料根据正态分布函数及其累积函数、克里金插值法与高斯分布的累积函数2种不同的方法分别拟合出断路器、隔离开关等6类电气设备的破坏率与地震烈度关系曲线;李吉超等^[105]总结部分电气设备易损性分析成果,并通过双对数正态分布模型确定各类设备的抗震能力中值与对数标准差。文献[103-105]进一步验证隔离开关是地震中破坏最普遍的电气设备之一。

在数值模拟方面:李晓璇等^[106]建立精细化有限元模型,获得 ± 800 kV换流变压器的易损性曲线;罗金盛等^[107]用有限元模拟获得变压器、断路器、隔离开关的位移反应,以此为参数,拟合出设备破坏率与地震烈度关系曲线,结果显示3者易损性由高到低为变压器、断路器、隔离开关;田松丰等^[108]建立800 kV直流场极母线回路有限元模型,拟合出回路和关键设备的易损性曲线;李强等^[109]通过有限元模拟对交流滤波器进行易损性分析,当PGA高于0.4 g时,设备失效概率达40%以上,母线

耦联体系中质量较小的设备应力反应会高于相应的单体设备,在设计过程中需要注意;刘任鹏等^[110]通过有限元模型,在考虑材料自身不确定性下,对特高压GIS瓷套管进行易损性分析;何畅等^[111]提出考虑多种不确定性条件下变电站电气设备地震易损性和地震失效风险的理论分析方法以及相应的评估流程,然后通过有限元模拟量化地震动、结构参数、性能指标与有限元模型质量不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险分析的影响^[112];梁黄斌等^[113]将换流站划分为7个子系统,通过有限元模拟分别指出其薄弱位置,并给出各子系统的地震易损性评估流程与易损性曲线。还有学者通过有限元模拟获得数据,进行概率地震易损性分析(probabilistic seismic demand analysis, PSDA)。柏文等^[114]建立有限元模型,采用PSDA方法进行瓷柱形电气设备在考虑地震动和材料强度不确定性下的易损性分析;李圣等^[115-116]同样结合有限元模型与PSDA分析理论,得到典型支柱绝缘子互连体系在不同强度和不同输入方向下的地震损伤概率,并通过对复合材料绝缘子的易损性分析提出一个提高绝缘子抗震能力的方向。

对比220 kV与 ± 800 kV变压器易损性曲线,如图13所示,可以发现, ± 800 kV特高压变压器发生破坏的阈值比低等级变压器高,在PGA达到0.2 g之前失效概率几乎为0,但当PGA达到破坏的阈值后,相同的PGA增幅下,特高压变压器失效概率上升较220 kV变压器显著。

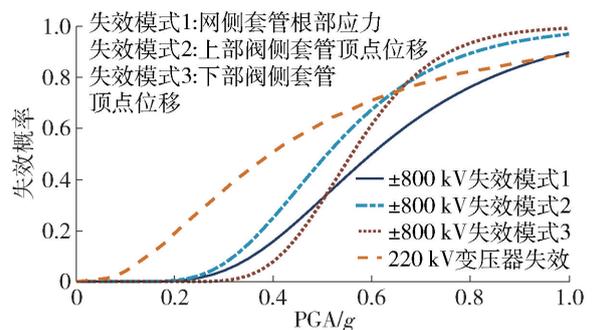


图13 220 kV和 ± 800 kV变压器易损性曲线^[102,106]

Fig. 13 Vulnerability curve of 220 kV and ± 800 kV transformer^[102,106]

在经济损失评估方面:张睿明^[96]根据汶川地震的资料,利用课题组开发的中国地震灾害损失评估系统,开发变电站地震灾害经济损失评估模块,实现评估功能地理信息化;张中近等^[117]将变电站资产分为室外高压电气设备、室内设备和房屋建筑

3类,根据汶川地震的震害资料计算出各类电气设备在地震中的经济损失占比,以此为依据给出快速评估震后变电站经济损失的方法;刘如山等^[118]在文献^[117]的基础上考虑变电站中不同设备抗震能力差异的影响,对文献^[117]的方法进行改进。

3) 建构物

蒋凤梅等^[95]通过建立有限元模型考虑电气设备与厂房之间的相互作用,以层间位移角为参数对变电站主厂房进行易损性评估。文波等^[119]选取100条地震记录进行模拟,实现不同工况下大型变电站主厂房地震易损性分析,并对文献^[95]提出的公式进行修正。张睿明^[96]使用ABAQUS软件建立分析模型验证进行变电站易损性分析时不可以忽略设备与结构之间相互作用的结论。

5.4 聚类#3

该聚类内容主要以系统视角对不同尺度电力系统进行抗震可靠性评估,主要对象包括变电站系统和城市电力网络系统,研究方法包括解析法、随机模拟法、概率图方法等。常用的解析法有最小路算法和最小割算法,解析法能够得到网络系统可靠度的精确解,但是解析法的计算量随节点增加呈非多项式增长(non-deterministic polynomial complete, NP问题),所以很难应用于大型复杂网络的可靠性分析。蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)模拟法是最常用的模拟法,其原理是以一定概率模型为基础,根据各节点的破坏概率产生随机数来模拟各单元在地震中的破坏状态,当试验次数足够大的时候认为所得结果等于实际概率,在精度达到工程要求的同时避开了网络的NP问题,更适合用于大型网络系统抗震可靠性分析^[120]。根据不同系统,对其代表性研究进行综述。

1) 变电站系统

在解析法方面:李天等^[28]基于电气主接线系统的3个破坏准则,应用最小路法分别对双母线、双母线带旁路母线^[121]和 $1\frac{1}{2}$ 接线系统^[122]的抗震可靠性展开分析并给出表达式;李黎等^[123]同样通过最小路法验证双母线接线系统在不同准则下的抗震可靠性表达式。在随机模拟法方面:郑山锁等^[124]将变电站系统转化为边权网络模型,用改进的Warshall算法求解传递闭包,进而结合MC法进行变电站主接线系统的抗震可靠性评估;贺金川等^[125]在文献^[124]研究的基础上,以确定性的低偏差点列代替均匀分布的伪随机数序列进行抽样,建

立拟蒙特卡洛模拟法(quasi Monte Carlo, QMC),通过提高抽样的收敛速度加快计算效率。

2) 城市电力网络

考虑到解析法的NP问题限制其在大型网络上的应用,李杰等^[126]以最小路实时不交化为切入点,基于结构函数递推分解的思想提出递推分解算法,提高大型点权网络系统可靠度的计算速度,并通过分析证明在计算电力网络系统可靠性时地震危险性分析的必要性,给出在设定地震条件基础下区域电力网络抗震可靠性分析步骤。文献^[127-129]进一步改进这一递推分解算法,充分利用分解过程中的信息对节点进行处理,提高计算效率。但解析法将电力网络系统简化为点权模型则默认线路不发生破坏,这与实际情况存在差异。

MC模拟法在电力网络抗震可靠性分析中更受青睐,其关键步骤为连通性分析。林均岐等将电力网络系统简化为一般赋权有向网络模型并用邻接表存储法表示,用深度优先搜索算法进行电力系统震后连通性分析^[130],随后又结合MC法进行电力系统震后可靠性分析^[131],应用深度优先搜索法计算传递闭包占用内存少,但计算速度慢的问题没有得到明显改善。

杜景林等^[132]用模糊关系矩阵通过对布尔矩阵的运算进行供电网络系统连通性分析,然后结合MC法计算网络系统的抗震可靠度,并引入功能失效系数来考虑系统中的薄弱环节。应用模糊矩阵需要对节点进行改造,增加矩阵的阶数,需要更多的储存空间,因此增加了运算量。柳春光等^[120]提出用Warshall算法计算二元关系传递闭包,不仅节省储存空间还提高了计算速度。贺金川等^[125]针对Warshall算法在计算传递闭包的过程中未考虑到对角线元素的处理问题,提出一种考虑对角线元素的三角形算法,减少了计算量,提高了传递闭包求解速度。Liu等^[133]分别以图论法、模糊数学法、三角形算法3种算法求解节点抗震可靠性指标,对比MC法和QMC法在3种计算方法下相同抽样次数所需要的时间,结果表明三角形算法与QMC法结合能够在保证精度的同时加快计算速度。

6 关键科学问题

1) 不同电力设备与设施的震害机理与抗震措施。一方面,电力系统各类设施与设备复杂多样,且通过不同的连接形式,如软硬母线、导线、电缆、套管等传力单元^[134],构成更为复杂的受力系统。另一

方面,地震灾害类型多样,如地震波动、场地液化、滑坡等,均会对电力设备与设施产生破坏。因此,科学辨析各类电力设备与设施的震害机理并研发相应的抗震工程措施,是提升电力系统抗震可靠性的根本性科学问题。

2) 电力系统不同元件地震易损性分析方法。不同国家和地区电压等级、设备生产和安装标准等差异性导致电力系统不同元件的地震易损性模型具有显著的差异性;与此同时,随着电气化、清洁能源化、智能化等为主要特点的电力系统发展,各类新型电力设备不断涌现,如智能电表、智能变压器、海上巨型风机等。因此,建立符合地域特征与地域地震危险性特征的不同元件地震易损性分析方法,是实现电力系统整体抗震可靠性分析的基础性科学问题。

3) 变电站和城市电网系统的韧性评估方法与提升理论。近些年来,基于系统视角对变电站系统乃至对区域电网进行韧性分析与提升已成为学界和工业界的焦点。韧性不仅聚焦于灾害来临时系统功能的损失,还关注灾前和灾后系统的预备和恢复,即不仅关注系统的直接损失,还关注系统的间接损失。因此,不仅涉及对系统自身物理力学特征的考察,更涉及系统的功能分析,并进而上升至维修资源、恢复策略,乃至评估框架、系统分析方法等诸多层次^[135]。此外,合理的韧性目标是实现系统韧性首要且最重要的一环。以韧性理论为指导,结合大数据、人工智能等新技术,实现变电站和城市电网系统的评估与提升是电力系统可靠性研究的前沿性科学问题。

4) 以电网为核心的耦合基础设施系统灾害传播机理与量化模型。电网作为城市和区域间能源传输关键基础设施系统,同天然气系统等构成更为复杂的综合能源系统;此外,与水网、路网等构成耦合的城市生命线系统^[136-138]。因此,某一系统的破坏不仅影响系统自身的功能,还会导致灾害在系统间的传播与扩散。此外,以地震灾害为代表并耦合海啸、滑坡、暴雨等多灾害情景,进一步加剧这一问题研究的复杂性。美国土木工程师协会生命线地震工程委员会(technical council on lifeline earthquake engineering, TCLEE)在2009年新增关于耦合生命线系统的技术分会,而美国国家地震工程研究中心则在2013年将灾害研究拓展至包括人致威胁的多灾害情景^[139],从侧面表明了这一问题的重要性。

7 结论

1) 城市电力系统研究领域自1997年以后迎来快速发展时期,量化结果表明主流研究人员形成了以清华大学为代表的多个研究团队;关键词不仅揭示了近些年来以大数据、人工智能等新方法对电力系统研究的影响,而且展现了综合能源系统运营管理的复杂性。

2) 城市电力系统抗震领域形成了以同济大学和中国地震局工程力学研究所为代表性的研究团队,领域关注的焦点是变电站的抗震性能研究,易损性与时程分析是两类最常用的方法。与抗震相比,电力系统可靠性研究更受电气工程领域关注,其关注焦点仍主要集中在运营调度领域而对灾害领域关注较少,特高压直流输电系统以及储能技术对电力系统可靠性影响是当前关注的热点。

3) 城市电力系统抗震可靠性研究是整个电力系统抗震研究的一部分,不仅涉及电力系统震害特点的考察与典型震害数据的总结,更为重要的是,在输电塔线体系、变电站、建构筑物等三大主要方面,进行震害机理分析,提出包括经验统计法、理论分析法、数值模拟法和试验模拟法为代表的方法。

4) 基于系统视角对变电站系统和城市电力网络进行可靠性评估是电力系统抗震可靠性研究的核心问题,包括以图论为基础的解析法和以MC模拟法为代表的方法。考虑到随着系统复杂性的增加和模拟精度的提高,特别是随着韧性城市研究和建设的兴起,该领域依然值得不断深入探索。

5) 该领域的关键科学问题主要包括不同电力设备与设施的震害机理与抗震措施、电力系统不同元件地震易损性分析方法、变电站和城市电网系统的韧性评估方法与提升理论、以电网为核心的耦合基础设施系统的灾害传播机理与量化模型。

参考文献:

- [1] DI GIORGIO A, LIBERATI F. A bayesian network-based approach to the critical infrastructure interdependencies analysis [J]. IEEE System Journal, 2012, 6(3): 510-519.
- [2] ZHANG P C, PEETA S. A generalized modeling framework to analyze interdependencies among infrastructure systems [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45: 553-579.
- [3] DI MURO M A, LA ROCCA C E, STANLEY H E. Recovery of interdependent networks [J/OL]. Scientific

- Reports, 2016, 6: 22834 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000371605600001>.
- [4] HONG S, LV C, ZHAO T D, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network[J/OL]. Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical, 2016, 49(19): 195101 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000374218900007>.
- [5] 谢强. 电力系统的地震灾害研究现状与应急响应[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 1-6.
XIE Q. State-of-the-art of seismic disaster research and emergency response of electric power system[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 1-6. (in Chinese)
- [6] 杨文忠. 在唐山地震中生命线系统的破坏及其恢复[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 184-185.
YANG W Z. Destruction to lifeline system in Tangshan Earthquake and its recovery[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 184-185. (in Chinese)
- [7] 刘如山, 张美晶, 邬玉斌, 等. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(增刊1): 200-211.
LIU R S, ZHANG M J, WU Y B, et al. Damage and failure study of Sichuan electric power grid in Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(Suppl 1): 200-211. (in Chinese)
- [8] 于永清, 李光范, 李鹏, 等. 四川电网汶川地震电力设施受灾调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 5-10.
YU Y Q, LI G F, LI P, et al. Investigation and analysis of electric equipment damage in Sichuan power grid caused by Wenchuan Earthquake[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 5-10. (in Chinese)
- [9] 薄涛, 李明政, 孙有为. 我国西部中小型城镇的电力系统抗震能力分析——以四川省盐源县为例[J]. 防灾科技学院学报, 2017, 19(1): 26-33.
BO T, LI M Z, SUN Y W. Seismic capacity analysis of power system in middle and small-sized cities of Western China—a case study of Yanyuan county, Sichuan province[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2017, 19(1): 26-33. (in Chinese)
- [10] 徐新智, 杜尔顺, 高艺, 等. 电力系统运行模拟与容量规划工具研究与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 188-199.
XU X Z, DU E S, GAO Y, et al. Overview on research and application of power system operation simulation and capacity planning tools[J]. Automation of Electric Systems, 2022, 46(2): 188-199. (in Chinese)
- [11] LI B, HE J W, LI Y, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J/OL]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1):21 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000538758800001>.
- [12] 胡萍, 梅挺, 范文礼. 复杂电网连锁故障预测研究综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(4): 355-363.
HU P, MEI T, FAN W L Cascading failure forecast of complex power grids: a review[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(4): 355-363. (in Chinese)
- [13] 张程铭, 柳璐, 程浩忠, 等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-265.
ZHANG C M, LIU L, CHENG H Z, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-265. (in Chinese)
- [14] 郭创新, 陆海波, 俞斌, 等. 电力二次系统安全风险评估研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 112-118.
GUO C X, LU H B, YU B, et al. A survey of research on security risk assessment of secondary system[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 112-118. (in Chinese)
- [15] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
RUAN Q T, XIE W, XU Y, et al. Concept and key features of resilient power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784. (in Chinese)
- [16] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.
XIE Q, LI J. Current situation of natural disasters in electric power system and counter measures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131. (in Chinese)
- [17] 谢强, 梁黄彬, 刘潇, 等. 变电站系统抗震韧性研究现状与展望[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 1-14.
XIE Q, LIANG H B, LIU X, et al. Research status and prospect of seismic resilience of substation system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 1-14. (in Chinese)
- [18] 文波, 牛荻涛, 赵鹏. 电力系统抗震可靠性研究与分析综述[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 86-90, 108.
WEN B, NIU D T, ZHAO P. A review on a seismic reliability research in electric power systems[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(4): 86-90, 108. (in Chinese)
- [19] 孙江玉, 刘创, 欧阳敏, 等. 地震灾害下电网性能研

- 究综述——以弹性视角为主[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 14-23.
- SUN J Y, LIU C, OUYANG M, et al. Review of performance studies on electric power grids under seismic hazards—with a focus on resilience perspective [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 14-23. (in Chinese)
- [20] DONG B B, JIANG X L, YIN F H. Development and prospect of monitoring and prevention methods of icing disaster in China power grid [J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2022, 16(22): 4480-4493.
- [21] 赵彬, 刘彬, 朱宽军. 电网舞动灾害应对技术体系研究综述[J]. 四川电力技术, 2022, 45(6): 22-30.
- ZHAO B, LIU B, ZHU K J. A research review on technical response system to galloping of power grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(6): 22-30. (in Chinese)
- [22] HOU H, ZHANG Z W, WEI R Z, et al. Review of failure risk and outage prediction in power system under wind hazards[J/OL]. Electric Power System Research, 2022, 210: 108098 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000808539800003>.
- [23] YANG B, ZHONG L N, WANG J B, et al. State-of-the-art one-stop handbook on wind forecasting technologies: an overview of classifications, methodologies, and analysis[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124628[2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000608914800008>.
- [24] 杜诗嘉, 郭创新, 俞啸玲, 等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- DU S J, GUO C X, YU X L, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186, 209. (in Chinese)
- [25] 缪惠全, 韦杰, 钟紫蓝, 等. 生命线工程的可靠性研究进展分析(I)——国内供水管网的抗震可靠性研究[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(11): 1189-1207.
- MIAO H Q, WEI J, ZHONG Z L, et al. Research progress on reliability of lifeline engineering (I)—domestic research on seismic reliability of water supply networks [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(11): 1189-1207. (in Chinese)
- [26] 王俊豪. 论自然垄断产业的有效竞争[J]. 经济研究, 1998(8): 42-46.
- WANG J H. On the effective competition of natural monopoly industry[J]. Economic Research Journal, 1998(8): 42-46. (in Chinese)
- [27] 兆文军, 原毅军. 中国电力行业体制改革与电力企业的购并趋势[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2003, 24(3): 1-8.
- ZHAO W J, YUAN Y J. Reform of China's electricity industry's system and M&A trend of power enterprises [J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences), 2003, 24(3): 1-8. (in Chinese)
- [28] 李天, 李杰, 沈祖炎. 高压变电站抗震可靠性分析(一)[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 43-49.
- LI T, LI J, SHEN Z Y. Seismic reliability analysis of high voltage substation (Part 1) [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(3): 43-49. (in Chinese)
- [29] 樊庆玲, 陈晨, 宋景博, 等. 户内变电站楼面 GIS 电气设备地震响应分析[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 240-245, 252.
- FAN Q L, CHEN C, SONG J B, et al. Seismic response analysis of floor GIS electrical equipment of indoor substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 240-245, 252. (in Chinese)
- [30] 谢强, 边晓旭, 徐俊鑫. 全户内变电站楼面电气设备抗震设计方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2155-2163.
- XIE Q, BIAN X X, XU J X. Anti-seismic design method for floor electrical equipment in whole-indoor substation [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2155-2163. (in Chinese)
- [31] 孙宇晗, 程永锋, 卢智成, 等. 170 kV 中性点电抗器地震模拟振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 229-234.
- SUN Y H, CHENG Y F, LU Z C, et al. Earthquake simulation shaking table tests for a 170 kV neutral reactor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 229-234. (in Chinese)
- [32] 文波, 杨金熹, 张路. 城市地下变电站非线性地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 33-42.
- WEN B, YANG J X, ZHANG L. Nonlinear seismic response analysis of urban underground substation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(2): 33-42. (in Chinese)
- [33] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 1-7.
- BAI Y, XIE L, XIA Q, et al. System design and suggestion for promoting marketization of electricity selling

- side in China[J]. *Automation of Electric Systems*, 2015, 39(14): 1-7. (in Chinese)
- [34] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG C S, LI P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. *Automation of Electric Systems*, 2010, 34(2): 10-14, 23. (in Chinese)
- [35] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 1-8.
SUN H B, GUO Q L, PAN Z G. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. *Automation of Electric Systems*, 2015, 39(19): 1-8. (in Chinese)
- [36] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. *电网技术*, 2003, 27(10): 8-11, 16.
YIN Y H, GUO J B, ZHAO J J, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn [J]. *Power System Technology*, 2003, 27(10): 8-11, 16. (in Chinese)
- [37] 张红云, 翟晓凡, 吴晓蓉, 等. 中压配电网可靠性理论计算及分析[J]. *中国电力*, 2005, 38(6): 32-36.
ZHANG H Y, ZHAI X F, WU X R, et al. Theoretical calculation and analysis of medium voltage distribution network reliability[J]. *Electric Power*, 2005, 38(6): 32-36. (in Chinese)
- [38] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. 供电系统用户供电可靠性评价规程: DL/T836—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [39] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. 输变电设施可靠性评价规程: DL/T837—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [40] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心, 南方电网有限责任公司超高压输电公司. 直流输电系统可靠性评价规程: DL/T 989—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [41] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心, 中国南方电网公司超高压输电公司. 串联补偿系统可靠性统计评价规程: DL/T 1090—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [42] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. 中压配电网可靠性评估导则: DL/T1563—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [43] 《汶川特大地震电力行业抗震救灾志》编纂委员会. 汶川特大地震电力行业救灾图志[M]. 北京: 方志出版社, 2013: 56-82.
- [44] 李天, 李杰, 沈祖炎. 电力系统地震灾害分析[J]. *世界地震工程*, 2000, 16(4): 19-24.
LI T, LI J, SHEN Z Y. Seismic hazard analysis of power system [J]. *World Earthquake Engineering*, 2000, 16(4): 19-24. (in Chinese)
- [45] 张大长, 赵文伯, 刘明源. 5·12汶川地震中电力设施震害情况及其成因分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(1): 44-48.
ZHANG D C, ZHAO W B, LIU M Y. Analysis on seismic disaster damage and their cause of electric power equipment in 5·12 Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 31(1): 44-48. (in Chinese)
- [46] YANG Z Y, XIE Q, HE C, et al. Isolation design for slender ultra-high-voltage composite equipment using modal parameters considering multiple responses[J/OL]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109709 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000501388500056>.
- [47] YANG Z Y, XIE Q, HE C, et al. Numerical investigation of the seismic response of a UHV composite bypass switch retrofitted with wire rope isolators [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2021, 20(1): 275-290.
- [48] WEN J Y, LI X X, XIE Q. Cost-effectiveness of base isolation for large transformers in areas of high seismic intensity[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(6): 745-759.
- [49] 刘如山, 刘金龙, 颜冬启, 等. 芦山 7.0 级地震电力设施震害调查分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(5): 83-90.
LIU R S, LIU J L, YAN D Q, et al. Seismic damage investigation and analysis of electric power system in Lushan M_s 7.0 earthquake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(5): 83-90. (in Chinese)
- [50] 谢丽宇, 唐珏, 谢强, 等. 基于性能的输电塔地震易损性分析[J]. *特种结构*, 2014, 31(1): 104-108, 68.
XIE L Y, TANG Y, XIE Q, et al. Seismic vulnerability analysis of transmission tower based on performance[J]. *Special Structures*, 2014, 31(1): 104-108, 68. (in Chinese)
- [51] 张晓志, 曹玲, 刘龙江, 等. 基于输电塔地震响应的数值方法精度可靠性研究[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(7): 200-202.
ZHANG X Z, CAO L, LIU L J, et al. Study on reliability of accuracy numerical method based on seismic response of transmission tower[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(7): 200-202. (in Chinese)
- [52] 黄帅, 汪俊龙, 王舟. 输电塔随机地震反应分析及可靠度计算[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2014,

- 36(5): 84-87.
- HUANG S, WANG J L, WANG Z. Random seismic response analysis and reliability calculation of transmission tower [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2014, 36(5): 84-87. (in Chinese)
- [53] 田利, 李宏男. 地震动差动下高压输电塔-线体系的纵向反应[J]. *地震工程与工程振动*, 2008, 28(1): 117-122.
- TIAN L, LI H N. Longitudinal response of the power transmission tower-line system considering seismic differential motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 28(1): 117-122. (in Chinese)
- [54] 孙建梅, 张健, 崔浩. 多点输入下大跨输电塔线体系抗震稳定性分析[J]. *世界地震工程*, 2015, 31(4): 58-65.
- SUN J M, ZHANG J, CUI H. Research on seismic stability analysis of long-span transmission tower-line system under multiple support excitation [J]. *World Earthquake Engineering*, 2015, 31(4): 58-65. (in Chinese)
- [55] 岳茂光, 李宏男, 王东升, 等. 行波激励下输电塔-线体系纵向地震反应分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 145-150.
- YUE M G, LI H N, WANG D S, et al. Longitudinal response of the power transmission tower-cable system under traveling seismic wave excitation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(23): 145-150. (in Chinese)
- [56] 全伟, 李宏男, 岳茂光. 多点激励下输电塔-导线体系纵向地震反应分析 [J]. *振动与冲击*, 2008(10): 75-80, 193.
- QUAN W, LI H N, YUE M G. Longitudinal response of a power transmission tower-cable system under multi-support excitations [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008(10): 75-80, 193.
- [57] 田利, 李宏男. 多维多点地震动激励下折线型输电塔线体系反应分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(增刊1): 131-135.
- TIAN L, LI H N. Seismic response of fold linear type transmission tower-line system under multi-component multi-support excitations [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2012, 45(Suppl 1): 131-135. (in Chinese)
- [58] 田利, 李宏男, 李术才. 多点地震激励下考虑地形变化输电塔线体系的响应分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(2): 257-266.
- TIAN L, LI H N, LI S C. Seismic response of transmission tower-line system considering topographic variation under multiple-support ground motion excitations [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(2): 257-266. (in Chinese)
- [59] 田利, 李宏男, 王文明. 地震动空间变化对高压输电塔线体系地震反应的影响[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(8): 79-87.
- TIAN L, LI H N, WANG W M. Effects of ground motion spatial variation on seismic response of a power transmission tower-line system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(8): 79-87. (in Chinese)
- [60] 田利, 李兴建, 易思银, 等. 地震下考虑桩-土-结构相互作用的输电塔-线体系响应分析[J]. *世界地震工程*, 2018, 34(3): 1-11.
- TIAN L, LI X J, YI S Y, et al. Response analysis of transmission tower-line system considering pile-soil-structure interaction under earthquake loading [J]. *World Earthquake Engineering*, 2018, 34(3): 1-11. (in Chinese)
- [61] 盖霞, 田利, 马瑞升, 等. 考虑地震动持时效应的输电塔-线体系响应研究 [J]. *世界地震工程*, 2019, 35(4): 229-237.
- GAI X, TIAN L, MA R S, et al. Response analysis of transmission tower-line system considering seismic duration effects [J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(4): 229-237. (in Chinese)
- [62] 袁光英, 潘海洋, 马瑞升, 等. 考虑不同地震输入方向的输电塔-线体系连续性倒塌研究 [J]. *地震工程学报*, 2020, 42(4): 840-846.
- YUAN G Y, PAN H Y, MA R S, et al. Study of progressive collapse of transmission tower-line system considering different incident angles of earthquake waves [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, 42(4): 840-846. (in Chinese)
- [63] 白杰, 谢强, 薛松涛. 特高压双回路输电线塔线耦联体系振动台试验模型设计理论与方法 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(22): 47-52.
- BAI J, XIE Q, XUE S T. Design theory and method of shaking table test model for UHV double circuit transmission tower-line coupled system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(22): 47-52. (in Chinese)
- [64] 白杰, 谢强, 薛松涛, 等. 特高压格构式输电塔线体系振动台试验设计 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(4): 20-25.
- BAI J, XIE Q, XUE S T, et al. Shaking table test model design of UHV latticed transmission tower-line coupling system [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(4): 20-25. (in Chinese)
- [65] 李宏男, 田利, 张鹏. 高压输电塔-线体系多维多点振动台试验模型研究 [C] // 第八届全国地震工程学术会

- 议论文集(II). 重庆: 中国建筑学会, 2010: 343-345
- LI H N, TIAN L, ZHANG P. Research on multi-dimensional multi-point shaking table test model of high-voltage transmission tower-line system [C] // Proceedings of the 8th National Conference on Earthquake Engineering (II). Chongqing: Architectural Society of China, 2010: 343-345 (in Chinese)
- [66] 田利, 李宏男, 黄连壮. 高压输电塔-线体系振动台模型非等比例问题研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(6): 114-118, 125.
- TIAN L, LI H N, HUANG L S. Non-proportional problem in shaking table model of a power transmission tower-line system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 114-118, 125. (in Chinese)
- [67] 田利, 牛延宏, 马瑞升, 等. 大跨越输电塔-线耦联体系振动台试验模型设计研究 [J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 42-50.
- TIAN L, NIU Y H, MA R S, et al. Design study on shaking table test model of a long span transmission tower-line coupling system [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 42-50. (in Chinese)
- [68] 田利, 刘俊才, 潘海洋, 等. 近断层地震下输电塔-线体系振动台试验研究 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(增刊1): 127-132.
- TIAN L, LIU J C, PAN H Y, et al. Research on shaking table test of transmission tower-line system under near-fault earthquake [J]. Journal of Civil engineering, 2018, 51(Suppl 1): 127-132. (in Chinese)
- [69] 谢强, 王健生, 杨雯, 等. 220 kV 断路器抗震性能地震模拟振动台试验 [J]. 电力建设, 2011, 32(10): 10-14.
- XIE Q, WANG J S, YANG W, et al. Shake table test on seismic performance of 220 kV circuit breaker [J] Electric Power Construction, 2011, 32(10): 10-14. (in Chinese)
- [70] 王喆, 朱鹏, 石高扬. 110 kV 隔离开关地震响应及减震控制仿真分析 [J]. 高压电器, 2022, 58(8): 196-203.
- WANG Z, ZHU P, SHI G Y. Simulation analysis on seismic responses and vibration control of 110 kV disconnecter [J] High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 196-203. (in Chinese)
- [71] 程永锋, 刘振林, 卢智成, 等. ± 800 kV 支柱复合绝缘子抗震试验研究 [J]. 中国电力, 2017, 50(10): 89-96.
- CHENG Y F, LIU Z L, LU Z C, et al. Experimental study on seismic performance and structural characteristics of ± 800 kV composite post insulators [J]. Electric Power, 2017, 50(10): 89-96. (in Chinese)
- [72] 郑山锁, 吴星霞, 刘晓航, 等. 考虑不同支架形式放大效应隔离开关地震响应分析 [J]. 防灾减灾学报, 2021, 37(1): 1-11.
- ZHENG S S, WU X X, LIU X H, et al. Investigation on vulnerability analysis and seismic performance of disconnect switch considering different support forms [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2021, 37(1): 1-11. (in Chinese)
- [73] 姜斌, 郝群岩, 谢强, 等. 变电站设备-支架耦合体系的地震响应建模与参数分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2506-2514.
- JIANG B, HAO Q Y, XIE Q, et al. Theoretical modelling and parameter analysis on seismic responses of electrical equipment-support structural system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2506-2514. (in Chinese)
- [74] MA G L, XIE Q. Seismic analysis of a 500-kV power transformer of the type damaged in the 2008 Wenchuan Earthquake [J/OL]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(2): 04018007 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000425619400013>.
- [75] MA G L, XIE Q, WHITTAKER A S. Physical and numerical simulations of the seismic response of a 1 100 kV power transformer bushing [J]. Earthquake Spectra, 2018, 34(3): 1515-1541.
- [76] HE C, XIE Q, YANG Z Y, et al. Influence of supporting frame on seismic performance of 1 100 kV UHV-GIS bushing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 161: 114-127.
- [77] HE C, XIE Q, ZHOU Y. Influence of flange on seismic performance of 1 100 kV ultra-High voltage transformer bushing [J]. Earthquake Spectra, 2019, 35(1): 447-469.
- [78] HE C, HE Z W, XIE Q. Experimental evaluations on seismic performances of porcelain and GFRP composite UHV GIS bushings [J/OL]. Materials, 2022, 15(11): 4035 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000808699400001>.
- [79] 何紫薇, 朱阳, 何畅. 不同材料对特高压 GIS 套管抗震性能的影响研究 [J]. 高压电器, 2022, 58(8): 15-22.
- HE Z W, ZHU Y, HE C. Study on influence of different materials on seismic performances of UHV GIS bushing [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 15-22. (in Chinese)
- [80] 谢强, 王亚非, 魏思航. 软母线连接的变电站开关设备地震破坏原因分析 [J]. 电力建设, 2009, 30(4): 10-14.
- XIE Q, WANG Y F, WEI S H. Cause analysis of

- damage of flexible-busbar-connected switchgears under earthquake [J]. *Electric Power Construction*, 2009, 30(4): 10-14. (in Chinese)
- [81] 谢强,王亚非. 软母线连接变电站电气设备的地震响应分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(34): 86-92.
XIE Q, WANG Y F. Seismic response analysis of substation equipment interconnected by flexible bus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(34): 86-92. (in Chinese)
- [82] 谢强,王亚非,朱瑞元. 不同垂度导线连接变电站实体耦联设备振动台试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(1): 67-73.
XIQ Q, WANG Y F, ZHU R Y. Shaking table test on real substation equipment connected by conductors with different sag [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(1): 67-73. (in Chinese)
- [83] 魏森森,何畅,谢强. 近远场地震下软导线耦联电气设备体系地震响应分析[J]. *高压电器*, 2022, 58(8): 23-32, 49.
WEI M M, HE C, XIE Q. Seismic responses of flexible conductor interconnected electrical equipment in near and far field earthquakes[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(8): 23-32, 49. (in Chinese)
- [84] 朱祝兵,张令心,程永锋,等. ± 800 kV 换流站复合绝缘子互连回路地震响应分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(6): 23-30.
ZHU Z B, ZHANG L X, CHENG Y F, et al. Seismic response analysis on connected circuit of the composite insulator of ± 800 kV converter station [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(6): 23-30. (in Chinese)
- [85] HE C, WEI M M, XIE Q, et al. Seismic responses of bundled conductor interconnected electrical equipment [J]. *Structures*, 2021, 33: 3107-3121.
- [86] 张雪松. 软母线刚度对特高压电气设备地震响应影响分析[J]. *重庆大学学报*, 2016, 39(3): 147-153.
ZHANG X S. Effect of the stiffness of flexible bus on the seismic response of UHV electrical equipment [J]. *Journal of Chongqing University*, 2016, 39(3): 147-153. (in Chinese)
- [87] 郑山锁,汪靖,贺金川,等. 软母线连接电气设备地震响应定量分析[J]. *世界地震工程*, 2021, 37(1): 144-151.
ZHENG S S, WANG J, HE J C, et al. Quantitative analysis of seismic response of electrical equipment connected by flexiblebus [J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(1): 144-151. (in Chinese)
- [88] 程永锋,邱宁,卢智成,等. 硬管母线连接的1000 kV 避雷器和电容电压式互感器抗震性能振动台试验[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3882-3887.
CHENG Y F, QIU N, LU Z C, et al. Shake table test on seismic performance of 1000 kV arrester and capacitor voltage transformer interconnected by tube bus[J]. *High-Voltage Technology*, 2014, 40(12): 3882-3887. (in Chinese)
- [89] 程永锋,朱祝兵,卢智成,等. 硬管母联接的500 kV 避雷器和互感器耦联体系地震模拟振动台试验研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3945-3950.
CHENG Y F, ZHU Z B, LU Z C, et al. Earthquake simulation shaking table test on coupling system of 500 kV surge arrester and instrument transformer interconnected with rigid tube bus[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3945-3950. (in Chinese)
- [90] YANG Z Y, XIE Q, HE C. Dynamic behavior of multilayer suspension equipment and adjacent post insulators with elastic-viscous connections [J/OL]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2021, 28(2): e2662 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000589749700001>.
- [91] 孟宪政,卢智成,刘振林,等. 硬管母线连接的1000 kV 复合外套避雷器和互感器地震模拟振动台试验研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(2): 33-41.
MENG X Z, LU Z C, LIU Z L, et al. Study on test of seismic simulation vibration stand for 1000 kV polymeric housed arrester and instrument transformer with rigid tube bus connection [J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(2): 33-41. (in Chinese)
- [92] 程永锋,孟宪政,卢智成,等. 特高压变电站电抗器隔震试验[J]. *高电压技术*, 2017, 43(3): 814-821.
CHENG Y F, MENG X Z, LU Z C, et al. Isolation test in reactor of UHV substation [J]. *High-Voltage Technology*, 2017, 43(3): 814-821. (in Chinese)
- [93] 刘振林,程永锋,卢智成,等. 加装减震装置的特高压复合材料支柱绝缘子振动台试验研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(2): 171-178.
LIU Z L, CHENG Y F, LU Z C, et al. Experimental study on shaking table test of the UHV composite material post insulator with damper device[J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(2): 171-178. (in Chinese)
- [94] 苏小超,侯磊,朱祝兵,等. 瓷套管避雷器的多体动力学模型与地震响应分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(12): 10-16.
SU X C, HOU L, ZHU Z B, et al. Multibody dynamics model and seismic response analysis for porcelain-housed arrester[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(12): 10-16. (in Chinese)

- [95] 蒋凤梅,文波. 变电站地震易损性分析[J]. 四川建材, 2011, 37(3): 47-49.
JIANG F M, WEN B. Seismic vulnerability analysis of substation [J]. Sichuan Building Materials, 2011, 37(3): 47-49. (in Chinese)
- [96] 张睿明. 变电站地震易损性分析及经济损失评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学学报, 2019: 31-46.
ZHANG R M. Seismic vulnerability analysis and economic loss assessment of substation [D]. Xi'an: Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2019: 31-46. (in Chinese)
- [97] 张伟,周强,唐可人. 基于位移的输电塔地震易损性分析[J]. 钢结构, 2016, 31(12): 47-52.
ZHANG W, ZHOU Q, TANG K R. Seismic vulnerability analysis of transmission tower based on displacement[J]. Steel Construction, 2016, 31(12): 47-52. (in Chinese)
- [98] ZHENG H D, FAN J, LONG X H. Analysis of the seismic collapse of a high-rise power transmission tower structure[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 134: 180-193.
- [99] LIU J C, TIAN L, MENG X R, et al. Seismic fragility assessment of a transmission tower considering mainshock-aftershock sequences [J/OL]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 194: 107344 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000810179000006>.
- [100] TIAN L, PAN H Y, MA R S. Probabilistic seismic demand model and fragility analysis of transmission tower subjected to near-field ground motions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 156: 266-275.
- [101] PAN H Y, LI C, TIAN L. Seismic fragility analysis of transmission towers considering effects of soil-structure interaction and depth-varying ground motion inputs [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(11): 4311-4337.
- [102] 贺海磊,郭剑波,谢强. 电气设备的地震灾害易损性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 25-28.
HE H L, GUO J B, XIE Q. Vulnerability analysis of power equipment caused by earthquake disaster [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 25-28. (in Chinese)
- [103] LIU R S, XIONG M P, TIAN D Y. Relationship between damage rate of high-voltage electrical equipment and instrumental seismic intensity [J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021:5104214[2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000611575900001>.
- [104] LIU R, XIONG M P, SHU R. Study on damage probability of high voltage electrical equipment under different seismic intensity [C]//Proceedings of the 2016 International conference on Architectural Engineering and Civil Engineering. France: Atlantis Press, 2017: 652-656.
- [105] 李吉超,尚庆学,罗清宇,等. 基于双对数正态分布的瓷套型电气设备地震易损性研究[J/OL]. 工程力学, 2022, 39: 1-12 [2023-02-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221024.1452.158.html>.
- LI J C, SHANG Q X, LUO Q Y, et al. Double logarithmic distribution based seismic fragility analysis of porcelain electrical equipment [J/OL]. Engineering Mechanics, 2022, 39: 1-12 [2023-02-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221024.1452.158.html>. (in Chinese)
- [106] 李晓璇,谢强. ± 800 kV 换流变压器地震易损性分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 244-251.
LI X X, XIE Q. Seismic vulnerability analysis of ± 800 kV converter transformer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(15): 244-251. (in Chinese)
- [107] 罗金盛,张振. 地震灾害中的高压电气设备响应与易损性分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 47-50.
LUO J S, ZHANG Z. Response and vulnerability analysis of high voltage electrical equipment in earthquake disasters [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 47-50. (in Chinese)
- [108] 田松丰,李强,张世洪,等. 800 kV 直流场极母线回路的地震易损性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 117-126.
TIAN S F, LI Q, ZHANG S H, et al. Seismic vulnerability analysis of 800 kV DC field pole bus circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 117-126. (in Chinese)
- [109] 李强,田松丰,张世洪. 特高压交流滤波器回路地震响应及易损性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 107-116.
LI Q, TIAN S F, ZHANG S H. Analysis on seismic response and vulnerability of alternating current filter circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 107-116. (in Chinese)
- [110] 刘任鹏,朱阳,何畅. 考虑材料不确定性的特高压 GIS 瓷套管地震易损性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 91-98, 126.
LIU R P, ZHU Y, HE C. Study on seismic vulnerability of porcelain bushing for ultra-high-voltage GIS considering material uncertainty [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 91-98, 126. (in Chinese)
- [111] 何畅,王社良,江力强. 多重不确定性下的电气设备地震失效风险评估[J]. 振动与冲击, 2022,

- 41(12): 84-94.
- HE C, WANG S L, JIANG L Q. Seismic failure risk assessment of electrical equipment considering different sorts of uncertainty[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(12): 84-94. (in Chinese)
- [112] 何畅,何紫薇,江力强,等.多重不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险的影响[J].*中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5763-5775.
- HE C, HE Z W, JIANG L Q, et al. Effects of different sorts of uncertainties on seismic failure risk of ultra-high-voltage porcelain transformer bushing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5763-5775. (in Chinese)
- [113] 梁黄彬,谢强.特高压换流站系统的地震易损性分析[J].*电网技术*, 2022, 46(2): 551-557.
- LIANG H B, XIE Q. Seismic vulnerability analysis of UHV converter station system [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 551-557. (in Chinese)
- [114] 柏文,唐柏赞,戴君武,等.考虑地震和材料强度不确定性的瓷柱型电气设备易损性分析[J].*中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2594-2605.
- BAI W, TANG B Z, DAI J W, et al. Fragility analysis of porcelain cylindrical electrical equipment considering material strength and seismic uncertainties [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2594-2605. (in Chinese)
- [115] 李圣,程永锋,卢智成,等.支柱绝缘子互连体系地震易损性分析[J].*中国电力*, 2016, 49(4): 61-66.
- LI S, CHENG Y F, LU Z C, et al. Seismic fragility analysis of connected post insulators [J]. *Electric Power*, 2016, 49(4): 61-66. (in Chinese)
- [116] 李圣,卢智成,朱祝兵,等.变电站复合材料绝缘子的动力特性与地震易损性研究[J].*工程力学*, 2016, 33(4): 91-97.
- LI S, LU Z C, ZHU Z B, et al. Dynamic properties and seismic fragility of substation composite insulators [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(4): 91-97. (in Chinese)
- [117] 张中近,刘如山,姜立新.基于损失统计的变电站地震经济损失评估方法[J].*自然灾害学报*, 2016, 25(4): 93-100.
- ZHANG Z J, LIU R S, JIANG L X. Assessment method of seismic economic loss in substation based on loss statistics [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(4): 93-100. (in Chinese)
- [118] 刘如山,张中近,熊明攀,等.基于设施易损性的变电站地震经济损失快速评估[J].*应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(3): 604-614.
- LIU R S, ZHANG Z J, XIONG M P, et al. Rapid assessment of substation earthquake economic loss based on facility vulnerability [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(3): 604-614. (in Chinese)
- [119] 文波,牛获涛.大型变电站主厂房地震易损性研究[J].*土木工程学报*, 2013, 46(2): 19-23.
- WEN B, NIU D T. Seismic vulnerability analysis for the main building of the large substation [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2013, 46(2): 19-23. (in Chinese)
- [120] 柳春光,王茜.基于Warshall算法的供电系统抗震可靠性分析[J].*世界地震工程*, 2013, 29(2): 10-16.
- LIU C G, WANG Q. Seismic reliability analysis of power-supply system based on Warshall algorithm [J]. *World Earthquake Engineering*, 2013, 29(2): 10-16. (in Chinese)
- [121] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站抗震可靠性分析(二)[J].*地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 37-43.
- LI T, LI J, SHEN Z Y. Seismic reliability analysis of high voltage substation (2) [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 37-43. (in Chinese)
- [122] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站1(1/2)主接线系统抗震可靠性分析[J].*世界地震工程*, 2000, 16(3): 58-62.
- LI T, LI J, SHEN Z Y. Seismic reliability analysis of breaker-and-a-half configuration of high voltage substations [J]. *World Earthquake Engineering*, 2000, 16(3): 58-62. (in Chinese)
- [123] 李黎,程志远,吴奎,等.高压变电站系统抗震可靠性分析[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(10): 108-112.
- LI L, CHENG Z Y, WU K, et al. Seismic reliability analysis of the high-voltage substation system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(10): 108-112. (in Chinese)
- [124] 郑山锁,汪靖,贺金川,等.变电站主接线系统地震易损性分析[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 98-103.
- ZHENG S S, WANG J, HE J C, et al. Seismic vulnerability analysis of substation system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(3): 98-103. (in Chinese)
- [125] 贺金川,刘晓航,郑山锁,等.基于三角形算法的电力系统连通可靠性分析[J].*防灾减灾工程学报*, 2020, 40(5): 764-770.
- HE J C, LIU X H, ZHENG S S, et al. Connectivity reliability analysis of power system based on triangle

- algorithm [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(5): 764-770. (in Chinese)
- [126] 李杰, 何军, 李天. 大型电力网络系统抗震可靠度分析[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 2002, 35(1): 7-11.
LI J, HE J, LI T. Seismic reliability analysis of large electric power system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 35(1): 7-11. (in Chinese)
- [127] LIU W, LI J. An improved cut-based recursive decomposition algorithm for reliability analysis of networks[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 11(1): 1-10.
- [128] 刘威, 李杰. 网络可靠度分析的改进最小割递推分解算法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(4): 427-431.
LIU W, LI J. A modified minimal cut-based recursive decomposition algorithm for networks reliability evaluation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(4): 427-431. (in Chinese)
- [129] 刘威, 李杰. 生命线网络可靠度分析的改进最小路递推分解算法[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(5): 66-72.
LIU W, LI J. A modified minimal path-based recursive decomposition algorithm for seismic reliability evaluation of lifeline networks [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(5): 66-72. (in Chinese)
- [130] 林均岐, 陈永盛, 刘金龙. 电力系统震后网络连通性研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(6): 181-185.
LIN J Q, CHEN Y S, LIU J L. Study on post-earthquake connectivity of electric power systems [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(6): 181-185. (in Chinese)
- [131] 林均岐, 陈永盛, 刘金龙. 电力系统震后网络可靠性研究[J]. *世界地震工程*, 2012, 28(2): 35-40.
LIN J Q, CHEN Y S, LIU J L. Study on post-earthquake network reliability of electric power system [J]. *World Earthquake Engineering*, 2012, 28(2): 35-40. (in Chinese)
- [132] 杜景林, 杨亚弟. 供电网络系统的可靠性分析[J]. *世界地震工程*, 2005, 21(4): 133-138.
DU J L, YANG Y D. Reliability analysis of the power supply network system [J]. *World Earthquake Engineering*, 2005, 21(4): 133-138. (in Chinese)
- [133] LIU X, ZHENG S, WU X, et al. Research on a seismic connectivity reliability model of power systems based on the quasi-Monte Carlo method [J/OL]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: 107888 [2023-02-22]. <https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:000690283800074>.
- [134] 陈星, 卿东生, 谢强, 等. 导电杆预拉力对换流变套管抗震性能的影响[J]. *高压电器*, 2022, 58(1): 104-110.
CHEN X, QING D S, XIE Q, et al. Effects of conductor pre-tension on seismic performance of converter transformer bushing [J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(1): 104-110. (in Chinese)
- [135] Applied Technology Council. Critical assessment of lifeline system performance: understanding societal needs in disaster recovery [R]. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2016: 73-94.
- [136] 缪惠全, 钟紫蓝, 侯本伟, 等. 基于系统动力学的城市供水管网动态抗震韧性评估方法[J/OL]. *工程力学*, 2023, 39: 1-15 [2023-02-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221024.1610.290.html>.
- MIAO H Q, ZHONG Z L, HOU B W, et al. Dynamic seismic resilience assessment method for water distribution networks based on system dynamics[J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39: 1-15 [2023-02-22]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221024.1610.290.html>. (in Chinese)
- [137] 缪惠全, 钟紫蓝, 杜修力. 基于 CiteSpace 的韧性城市视角下耦合基础设施文献的量化分析[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(5): 12-27.
MIAO H Q, ZHONG Z L, DU X L. Literature review on interdependent infrastructures based on CiteSpace from the perspective of resilient cities[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 12-27. (in Chinese)
- [138] 缪惠全, 韦杰, 李宗财, 等. 功能耦合的城市水电网网络抗震韧性分析方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*. 2023, 55(2): 36-44.
MIAO H Q, WEI J, LI Z C, et al. Seismic resilience analysis of urban water and power networks with functional coupling characteristics[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2023, 55(2): 36-44. (in Chinese)
- [139] NEHRP Consultants Joint Venture. Earthquake-resilient lifelines: NEHRP research, development and implementation roadmap[R]. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2014: 131-135.