

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

缪惠全, 韦 杰, 钟紫蓝, 侯本伟, 韩俊艳, 杜修力
(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)

摘 要: 为了解国内供水管网抗震可靠性的研究现状, 基于 CiteSpace 软件分别对管线—供水管网—供水管网抗震或供水管网可靠性—供水管网抗震可靠性 4 个层次、涉及 5 个领域的文献逐层深入地展开量化分析, 明确该领域的历史发展脉络、核心研究团队以及研究主题和未来的发展趋势. 研究结果表明: 国内供水管网抗震可靠性的研究主题包括可靠性、地震反应、拓扑优化、水力分析、抗震性能 5 个方面. 该领域关键科学问题包含现役劣化管线的地震破坏机理、断层、液化等地震引起的场地大变形作用下管网破坏机理与抗震设计方法、不同漏损形式的地震破坏管网渗漏分析模型、震后管网水质污染机理和扩散模型、大型管网抗震韧性分析的高效通用性方法、基于既有管网的供水管网更新和优化设计方法 6 个方面.

关键词: 生命线; 地震; 供水管网; 可靠性; 韧性; 韧性城市

中图分类号: U 461; TP 381

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2022)11-1189-19

doi: 10.11936/bjtxb2022020001

Research Progress on Reliability of Lifeline Engineering (I)

—Domestic Research on Seismic Reliability of Water Supply Networks

MIAO Huiquan, WEI Jie, ZHONG Zilan, HOU Benwei, HAN Junyan, DU Xiuli
(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To understand the domestic research status of seismic reliability of water supply networks, based on the software of CiteSpace, an in-depth quantitative analysis of the documents involving five fields at four levels, i. e. “pipelines—water supply networks—seismic (reliability) of water supply networks—seismic reliability of water supply networks”, was conducted so as to clarify the historical development, key research teams and research topics. By analyzing research topics, the research status and future development trend of the seismic reliability of water supply networks were clarified. The research results show that the topics of seismic reliability of water supply networks include five aspects: reliability, seismic response, topological optimization, hydraulic analysis, and seismic performance. Also, the key scientific issues include six aspects: the seismic failure mechanism of existing degraded pipelines, the seismic failure mechanism and design methods of pipeline networks under large ground deformation caused by earthquake such as fault and liquefaction, the leakage model of the earthquake-

收稿日期: 2022-02-07; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108427);北京市自然科学基金资助项目(8222008);中国博士后科学基金资助项目(2021M690278)

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

damaged pipelines with different leakage forms, the water pollution mechanism and pollutant diffusion model of water supply networks after an earthquake, the efficient and universal methods for the seismic resilience analysis of large-scale pipeline networks, and the renewal and optimization design methods of the water supply network based on existing old water supply networks.

Key words: lifeline; earthquake; water supply networks; reliability; resilience; resilient city

改革开放 40 多年来,我国城镇化得到快速发展. 根据全国第 7 次人口普查数据,2020 年我国常住人口城镇化率达到 63.89%,城市化的过程一方面带动城市经济社会的发展,另一方面推动以供水管网为代表的城市基础设施的高速发展. 2010 年我国城市供水管线总长度为 539 778 km, 2020 年则达到 1 006 910 km,10 年的时间增长接近 1 倍^[1]. 然而,在自然灾害特别是地震作用下,供水管网所遭受的破坏和由此产生的次生灾害对人民生命财产的威胁仍非常显著. 1976 年唐山地震造成市区 140 km 供水管线完全丧失服务功能,震后供水最初完全依靠来自北京、天津等地的几十部消防车和水罐车运送,经过 2 个多月的抢修,饮用水与生产用水才基本解决^[2-3];1995 年日本阪神地震造成地震区 110 万用户断水,全部修复工作持续 2 个半月,缺水严重阻碍地震所引起的次生火灾的救援^[4-5];2008 年汶川地震受损供水管线达 47 642 km,供水受灾人口达 1 058 万人,直接经济损失约 26.78 亿元^[6-7]. 因此,研究城市供水管网的抗震可靠性,提高管网系统的抗震能力,对现代城市的发展具有重要意义.

目前针对供水管网的文献综述基本以非量化的形式展开,主要依靠研究者多年的经验,主要研究成果包括:1) 管线抗震性能研究方面,Liang 等^[8]通过管线破坏的量化分析、地震现场观测、理论分析和试验研究,总结场地条件对埋地管线抗震性能的影响. 2) 供水管网的抗灾可靠性研究方面,Shuang 等^[9]量化分析供水管网的抗灾韧性研究,解析不同的方法和概念,辨析管网韧性,研究未来所面临的挑战;Liu 等^[10]针对包含供水管网在内的 6 类基础设施的韧性概念进行梳理,指出其挑战和趋势. 3) 供水管网漏损控制方面,黄哲懿等^[11]介绍目前国内外的漏损检测技术并分析各种检测技术的适用性,通过对这些技术进行对比分析得出单独使用某一种检漏技术无法满足管网检漏低成本且无损的目标;Wu 等^[12]将基于数据驱动的爆管探测方法分为分类法、预测-分类法、统计法 3 种,通过梳理这些方法的研究进

展,展望该领域未来的研究趋势;Li 等^[13]通过对国内外常用爆管探测和定位方法的研究成果进行总结,分析各种方法的优缺点,提出未来研究趋势是发展一种混合检测的方法,即综合利用基于硬件和基于软件的爆管探测和定位方法. 4) 供水管网水质研究方面,赵欣等^[14]介绍常见的管道清洁技术的原理和优缺点,通过对这些技术进行对比分析给出各种管道清洗技术的适用范围;林晓丹等^[15]梳理余氯模型、消毒副产物模型、浊度模型、总铁模型 4 种经验统计水质模型的研究进展,在此基础上展望经验统计水质模型未来的研究趋势;Song 等^[16]以天津市为例概述城市多水源供水的发展趋势,总结供水优化分配方案的建模方法,讨论基于多水源供水的应急运行和保证用户水量与水质要求的日常运行未来所面临的挑战.

既往研究各具特色,为深入了解供水管网的可靠性提供了全景式的概念图示. 但以非量化的形式撰写综述主要的不足之处是分析的结果存在主观性,分析的内容强烈依赖于研究者的深入程度,对于领域的初入者难以提供客观量化的分析结果. 基于上述原因,为了更加客观地认识国内供水管网抗震可靠性领域研究进展,本文基于 CiteSpace 软件分别对 4 个层次、涉及 5 个领域的文献展开量化分析. 从一般管线研究领域(第 1 层),逐步深入供水管网领域(第 2 层),进而进入供水管网抗震领域(第 3 层)或供水管网可靠性领域(第 3 层),并最终详细地分析了供水管网抗震可靠性领域(第 4 层),明确该领域的历史发展脉络、核心研究团队,通过解析研究主题来探明该领域目前的研究现状以及未来的发展趋势. 本文不仅可为供水管网抗震领域研究的新生力量提供概览式量化的研究风貌,同时亦可为经验丰富的研究人员提供有效的借鉴.

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

CiteSpace 是基于 JAVA 语言开发的信息可视化软件,可以通过国家、机构和作者的合作网络分析、关键词的共现分析以及参考文献的共被引分

析等功能来绘制某一领域的知识图谱, 展现该领域的研究热点, 厘清该领域的知识脉络, 探索该领域的发展趋势^[17]. 本文使用的软件版本为 5. 8. R2 (64-bit).

1.2 数据来源

本文选用知网为数据源, 检索方式按照研究范围从宽到窄分为 4 个层次, 如图 1 所示. 为了有效剔除质量较低的文献, 需对检索的文献进行进一步凝练, 所用检索词、精练方式、检索结果如表 1 所示. 检索的时间为 2021 年 10 月 31 日 20 时 52 分.

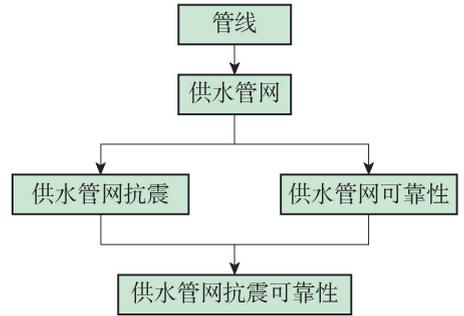


图 1 研究的 4 个层次

Fig. 1 Four levels of research

表 1 检索方式
Table 1 Retrieval method

层次	领域	检索方式	精练方式	有效文献/篇
1	管线	篇名:管道 + 管线 + 管网	基金文献且学科为石油天然气工业或建筑科学与工程	8 951
2	供水管网	层次 1 * (主题:给水 + 排水)	基金文献且学科须属于建筑科学与工程、自动化技术、计算机软件及计算机应用、自然地理学和测绘学以及电信技术	1 167
3	3-1 供水管网可靠性	层次 2 * (主题:可靠性 + 可靠度 + 易损性 + 脆弱性 + 评估 + 漏损)	基金文献	266
	3-2 供水管网抗震	层次 2 * (主题:地震 + 抗震)	基金文献	93
4	供水管网抗震可靠性	层次 3-1 * 层次 3-2	无	89

注:“+”为逻辑运算符“或”;“*”为逻辑运算符“与”.

2 管线研究领域

2.1 文献来源分析

该领域文献检索数量排名前 10 位的期刊如表

2 所示,这 10 本期刊共收录该领域 2 240 篇文献, 占所检索有效文献数量的 25%, 是管线研究领域最具代表性的期刊. 从文献类型来看,《油气运输》《天然气工业》《石油机械》《天然气与石油》《油气田地

表 2 管线领域文献检索数量前 10 名期刊

Table 2 Top 10 journals in pipeline research by the number of documents retrieved

编号	期刊名称	文献数量	占比/%	层次	主管单位
1	油气储运	738	8. 24	核心期刊	中国石油天然气集团有限公司
2	中国给水排水	236	2. 64	核心期刊	住房和城乡建设部
3	天然气工业	204	2. 28	EI	中国石油天然气集团有限公司
4	给水排水	189	2. 11	核心期刊	住房和城乡建设部
5	石油机械	183	2. 04	核心期刊	中国石油天然气集团有限公司
6	天然气与石油	168	1. 88		中国石油集团工程设计有限公司
7	中国安全生产科学技术	161	1. 80	核心期刊	应急管理部
8	油气田地面工程	152	1. 70		中国石油天然气集团有限公司
9	管道技术与设备	115	1. 28		沈阳仪表科学研究院有限公司
10	石油工程建设	94	1. 05		中国石油天然气集团有限公司

注:核心期刊为北京大学《中文核心期刊要目总览》来源期刊;EI 为工程索引(美).

面工程》《石油工程建设》《中国安全生产科学技术》《管道技术与装备》共8本期刊,其发表的文献多和油气管线有关,检索到的文献数量为1 815篇,占10本期刊收录文献数量总和的81%。《中国给水排水》《给水排水》收录的文献多和给排水管线有关,这2本期刊收录的文献数量为425篇,占10本期刊收录文献数量总和的19%。

2.2 发文作者分析

该领域发文量超过40篇的作者如表3所示,共有15人,发文量总数为752篇,占总数量的8.4%。其中有10人的工作单位是石油类高校,分别是西南石油大学的姚安林、李长俊、张鹏,中国石油大学

表3 管线领域发文量不低于40篇的作者

Table 3 Authors with at least 40 papers in pipeline research

编号	发文量/篇	作者	作者单位
1	70	姚安林	西南石油大学
2	59	宫敬	中国石油大学(北京)
3	58	李长俊	西南石油大学
4	54	李玉星	中国石油大学(华东)
5	53	张鹏	西南石油大学
6	52	帅健	中国石油大学(北京)
7	51	杨理践	沈阳工业大学
8	49	陈明国	中国石油大学(华东)
9	49	吴明	辽宁石油化工大学
10	47	张宏	中国石油大学(北京)
11	46	王树立	常州大学
12	43	何仁洋	中国特种设备检测研究院
13	41	骆正山	西安建筑科技大学
14	40	梁永国	中国石油大学(北京)
15	40	高松巍	沈阳工业大学

(北京)的宫敬、帅健、张宏、梁永国,中国石油大学(华东)的李玉星和陈明国,辽宁石油化工大学的吴明,其余5人的研究也都涉及油气管线。因此,从该领域的文献来源和发文作者分析可以看出,油气管线和给排水管线是管线研究领域的主流,而油气管线相对于给排水管线更加受到关注。

3 供水管网研究领域

3.1 论文发表时间分布分析

该领域年度发文量如图2所示,从中可以发现,国内供水管网的研究可分为3个阶段,分别是2002年以前(阶段1)、2003—2007年(阶段2)、2008年至今(阶段3)。

阶段1中所能检索到的最早的文献是1994年仲伟俊等^[18]发表的对于城市供水管网系统改造优化设计问题的研究,其次是哈尔滨工业大学的吴学伟等^[19]于1996年发表的管道工况分析中确定管径 d 、海曾-威廉斯公式系数 C 、柯尔勃洛克公式中 k 值及用管道相对负荷指数分析管道工况问题的文章。当然,供水管网的抗震问题自1976年唐山大地震之后就得到关注,但由于知网文献收录时间的原因,最早能检索到的文献只能向前追溯至1994年。这一阶段文献数量总体在个位数徘徊,显示出该领域的发展还处于较早的阶段。

阶段2的年度发文量逐年递增,年平均增长率为47%,表明在这一阶段供水管网领域的研究开始兴起。

阶段3主要是自2008年汶川大地震以后,供水管网的研究进入了高速发展阶段。地震导致的供水中断直接影响了震后的应急救援,而震后供水管网的漏损问题和水质恶化问题又影响了人们的正常生活,在灾害的影响下,供水管网的防灾减灾问题受到政府、科研机构以及广大群众的广泛重视,发文数量总体呈逐年递增的趋势,2020年发文量112篇,相

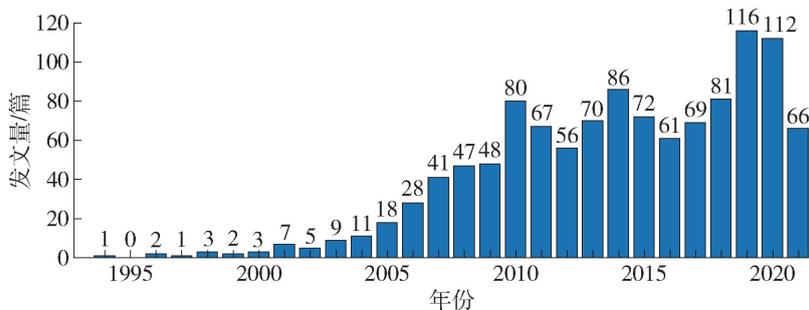


图2 供水管网领域年度发文量变化

Fig. 2 Number of papers published each year in the research area of water supply networks

比 2008 年的 47 篇,增长了 1.38 倍。

3.2 论文发表作者分析

论文发表作者是科学研究的主体,通过对发作者及其之间合作关系的分析,可以反映出该领域的核心作者群及其合作关系。该领域的作者合作网络如图 3 所示,图中每个节点代表 1 位作者,作者姓名字体的大小(节点的大小)代表了核心作者的发文数量;2 个节点之间的连线表示 2 个作者之间存在合作关系,线条的粗细表示 2 个作者的合作强度,线条的颜色代表了 2 位作者首次合作的年份,颜色变化由灰到红表示时间由远及近。

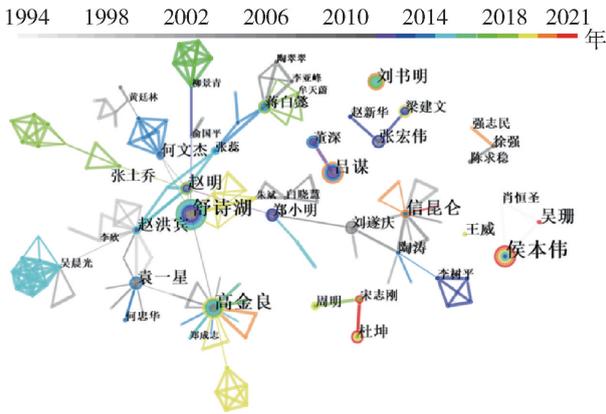


图 3 供水管网领域作者合作网络

Fig. 3 Collaborative networks of authors in the research area of water supply networks

从图 3 可以看出,国内供水管网研究已经形成 9 个核心研究团队,包括了哈尔滨工业大学(赵洪宾)、同济大学(刘遂庆)、浙江大学(张土乔)、天津大学(张宏伟)、清华大学(刘书明)、中国科学院生态环境研究中心(强志民)、东华大学(舒诗湖)、青岛理工大学(吕谋)、北京工业大学(侯本伟)。分析国内该领域的研究团队不难发现,供水管网的研究呈现小集中、大分散的特征,同一个研究团队内部合作强度较大,但各个研究团队之间的合作强度比较弱,这从侧面反映出主流研究者还需要进一步加强国内的交流和合作,共同推进我国供水管网领域研究的进展。

3.3 关键词的共现分析

关键词的共现频次反映了研究者对该关键词的关注程度,而最近几年共现频次较高的关键词则可以反映出该领域的研究热点。取共现频次排名前 10% 的关键词进行分析,共 40 项,如表 4 所示。从反映该领域所研究的问题的关键词及其共现频次来看,爆管、漏损控制、漏损、泄漏检测、泄漏定位、漏点

定位、管网漏损反映的问题主要是漏损控制,水质模型、生物膜、水质、管网水质、铁释放、水源切换、余氯衰减、余氯反映的问题主要是水质,优化调度、优化设计、优化布置、优化反映的问题主要是管网优化,水力模型反映的问题主要是水力模型的建立。因此,该领域的研究主要包括漏损控制、水质、管网优化、水力模型 4 个主题。

在该领域中,关键词“地震”的共现频次只有 7 次,而反映漏损控制主题的关键词的共现频次是 94 次,反映水质主题的关键词的共现频次是 86 次,反映管网优化主题的关键词的共现频次是 29 次,反映水力模型主题的关键词的共现频次是 42 次。可以发现,供水管网领域侧重于研究日常运维中的漏损、水质等问题,而供水管网抗震问题所受的关注度相对较低。

4 供水管网抗震研究领域

4.1 论文发表时间分布分析

该领域检索文献随时间的变化如图 4 所示,从中可以发现,2006 年以及以前年度发文量均在 3 篇以下,表明供水管网的抗震研究未引起足够的关注,研究进展缓慢。2007 年迎来了发文量峰值(7 篇),2008 年的汶川地震造成供水设施的大量破坏,其中处在地震烈度 9 度区的德阳绵竹市城区供水系统遭受严重破坏,供水管线 80% 破裂,震后开始供水时管网漏失率达 85%^[7]。总体上,2008 年以后供水管网抗震研究明显比 2007 年之前增加。

4.2 论文发表作者分析

该领域的作者合作网络如图 5 所示,从中可以发现,国内供水管网抗震研究形成了 3 个核心团队,即同济大学以李杰为核心的研究团队、北京工业大学以杜修力为核心的研究团队和中国地震局工程力学研究所所以郭恩栋为核心的研究团队。从进入该领域的时间来看,李杰团队较早进入该研究领域并形成影响力,而杜修力团队和郭恩栋团队目前仍处于非常活跃的阶段。

4.3 关键词的共现分析

取共现频次排名靠前 20% 的关键词进行分析,共 26 项,如表 5 所示。从反映该领域所研究的问题的关键词及其共现频次来看,震害预测是该领域所研究的一个主题,水力分析、渗漏模型、水力模拟、渗漏面积反映的问题是水力分析,拓扑优化、图论理论反映的问题是拓扑优化,抗震性能反映的问题是管

表4 供水管网领域关键词的共现频次统计

Table 4 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the research area of water supply networks

编号	年份	共现频次	关键词	编号	年份	共现频次	关键词
1	1994	591	供水管网	21	2013	9	铁释放
2	2003	61	供水管道	22	1999	9	供水系统
3	1996	44	给水管道	23	2014	9	管材
4	2005	42	水力模型	24	2006	8	泄漏检测
5	2007	36	遗传算法	25	2006	8	数值模拟
6	1999	31	给水管网	26	2013	8	水源切换
7	2005	26	爆管	27	2004	8	优化设计
8	2006	26	漏损控制	28	1999	8	镀锌钢管
9	2007	16	管网	29	2005	7	泄漏定位
10	2006	16	水质模型	30	2006	7	余氯衰减
11	1999	16	供水安全	31	2004	7	数据采集
12	2006	15	漏损	32	2005	7	地下管线
13	2006	14	生物膜	33	2003	7	地震
14	2004	13	GIS	34	2005	6	优化
15	1999	13	水质	35	2006	6	余氯
16	2004	13	管网水质	36	2015	6	漏点定位
17	1999	10	评价指标	37	2009	6	优化布置
18	2003	9	优化调度	38	2006	6	数学模型
19	2003	9	综合管廊	39	2010	6	管网漏损
20	2006	9	预测	40	1999	6	管段

注:年份为该关键词首次共现的时间.

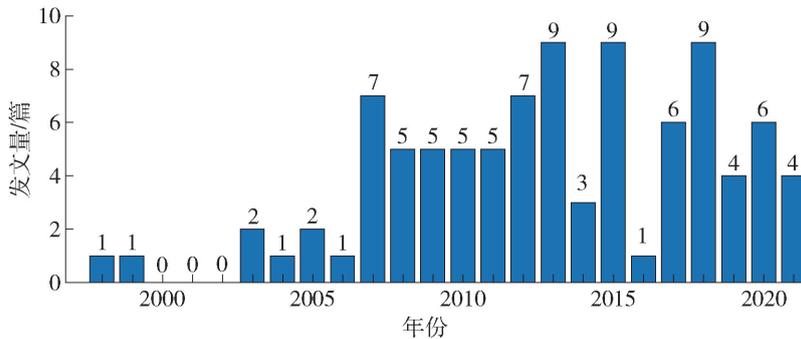


图4 供水管网抗震领域年度发文量变化

Fig. 4 Number of papers published each year in the seismic research area of water supply networks

线的抗震性能,可靠性、随机模拟反映的问题是供水管网的抗震可靠性.因此,该领域主要包括震害预测、水力分析、拓扑优化、管线抗震性能、供水管网抗震可靠性5个研究主题.

5 供水管网可靠性研究领域

5.1 论文发表时间分布分析

从图6中论文发表的数量情况来看,在2005年及以前,年度发文量均不超过2篇,该领域的研究处

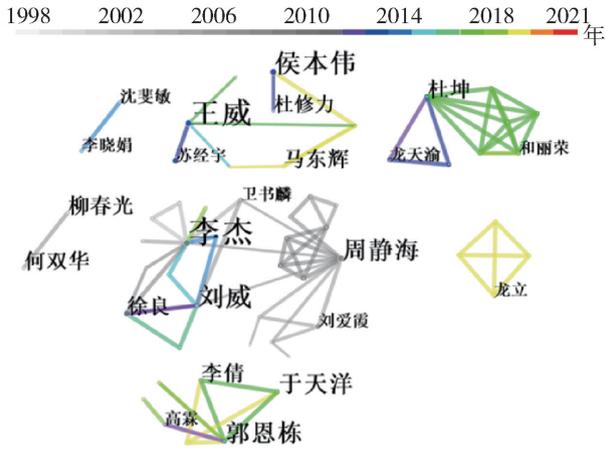


图 5 供水管网抗震领域作者合作网络

Fig. 5 Collaborative networks of authors in the seismic research area of water supply networks

于起步阶段. 2006 年以后年度发文量均不少于 5 篇,且发文量有逐年递增的趋势,尤其是近 3 年的发文量显著增长,呈现出该领域的研究蓬勃发展、方兴未艾之势.

5.2 论文发表作者分析

该领域的作者合作网络如图 7 所示,从中可以发现,国内供水管网可靠性研究已经形成了一些相对稳定的科研合作群体,如李杰团队、赵洪宾团队、张宏伟团队、刘遂庆团队,其中李杰团队主要研究供水管网在灾害下的可靠性,其他 3 个团队的研究主要涉及供水管网在日常运维下的可靠性. 从作者的合作时间可以看出,李杰团队、刘遂庆团队、赵洪宾团队进入该领域的时间较早,并且已经形成重要的影响力,而郭恩栋团队、强志民团队进入该领域的时间相对较晚,目前正处于快速发展阶段.

5.3 关键词的共现分析

取共现频次排名靠前 10% 的关键词进行分析,共 39 项,如表 6 所示. 从反映该领域所研究的问题的关键词及其共现频次来看,漏损控制、漏损、漏损

表 5 供水管网抗震领域关键词的共现频次统计
Table 5 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the seismic research area of water supply networks

编号	年份	共现频次	关键词
1	2003	49	供水管网
2	2003	11	地震
3	2005	8	渗漏模型
4	2005	7	供水管道
5	1998	7	震害预测
6	2004	6	水力分析
7	2008	4	抗震性能
8	2008	4	柔性接口
9	2006	4	拓扑优化
10	2013	3	可靠性
11	2014	3	水力模拟
12	2003	3	渗漏面积
13	2011	3	图论理论
14	2008	2	防震减灾
15	2007	2	震害
16	2004	2	抗震
17	2007	2	地下管线
18	2007	2	轴向力
19	2011	2	地下管道
20	2011	2	力学性能
21	1998	2	供水管线
22	2009	2	信息系统
23	2007	2	抗震设计
24	2010	2	拓扑结构
25	2012	2	遗传算法
26	2018	2	随机模拟

注:年份为该关键词首次共现的时间.

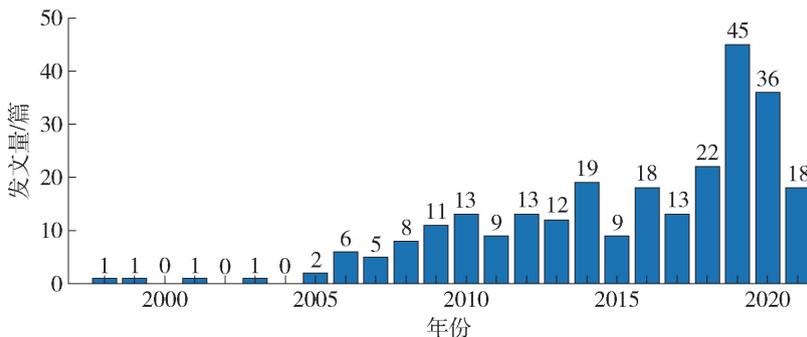


图 6 供水管网可靠性领域年度发文量变化

Fig. 6 Number of papers published each year in the reliability research area of water supply networks

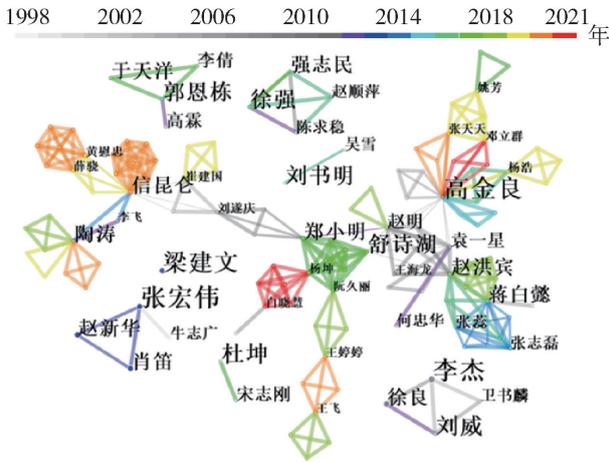


图7 供水管网可靠性领域作者合作网络

Fig. 7 Collaborative networks of authors in the reliability research area of water supply networks

定位、爆管、管网漏损、漏损评估、水力模型、局部漏损、漏损率、漏损检测反映的问题主要是漏损控制, 优化设计、优化布置、拓扑优化反映的问题主要是管网优化, 渗流模型、震害预测、水力模拟反映的问题主要是供水管网的抗震可靠性。因此, 该领域所研究的主题主要可以分为三大类, 即漏损控制问题、管网优化问题和供水管网抗震可靠性问题。

在上述3个研究主题中, 反映漏损控制主题的关键词的共现频次为89次, 反映管网优化主题的关键词的共现频次是11次, 反映供水管网抗震可靠性主题的关键词的共现频次是10次。由于漏损控制问题属于供水管网日常运维中的问题, 因此, 在供水管网可靠性研究领域中, 日常运维下的可靠性比抗震可靠性所受的关注度更高。

6 供水管网抗震可靠性研究领域

6.1 论文发表时间分布分析

该领域论文发表数量随时间的变化如图8所示, 从中可以看出, 供水管网抗震可靠性的研究可以分为3个阶段, 第1个阶段为1997年之前, 第2个阶段是1998—2007年, 第3个阶段为2008年至今。

第1个阶段仅能检索到第1篇发表于1992年的有关震害预测的文献^[20], 限于当时的科学技术和经济发展水平, 国内供水管网抗震可靠性的研究仅停留在震害预测方面。

第2个阶段对供水管网进行系统的抗震可靠性研究开始起步。在1998—2007年10年中, 文献的数量逐年变化不大, 多则3篇, 少则空白。

表6 供水管网可靠性领域关键词的共现频次统计
Table 6 Co-occurrence frequency statistics of keywords in the reliability research area of water supply networks

编号	年份	共现频次	关键词
1	1998	107	供水管网
2	2006	26	漏损控制
3	2001	22	给水管道
4	2005	19	供水管道
5	2006	16	漏损
6	2014	11	水力模型
7	2009	9	遗传算法
8	2011	8	漏损定位
9	2009	7	可靠性
10	2018	6	风险评估
11	2010	6	健康监测
12	2008	6	地震
13	2007	6	供水管网
14	2007	6	爆管
15	2016	5	管网漏损
16	2012	5	漏损评估
17	2010	5	局部漏损
18	2016	4	分区计量
19	2014	4	漏损率
20	2011	4	神经网络
21	2009	4	随机模拟
22	2009	4	优化布置
23	2009	4	声波检测
24	2006	4	拓扑优化
25	2005	4	渗流模型
26	2019	3	漏损检测
27	2019	3	物联网
28	2019	3	智慧水务
29	2016	3	探地雷达
30	2014	3	水力模拟
31	2012	3	震害预测
32	2012	3	分区
33	2011	3	数学模型
34	2011	3	图论理论
35	2009	3	优化设计
36	2008	3	可靠度
37	2008	3	模型校核
38	2007	3	地下管线
39	2006	3	预测模型

注: 年份为该关键词首次共现的时间。

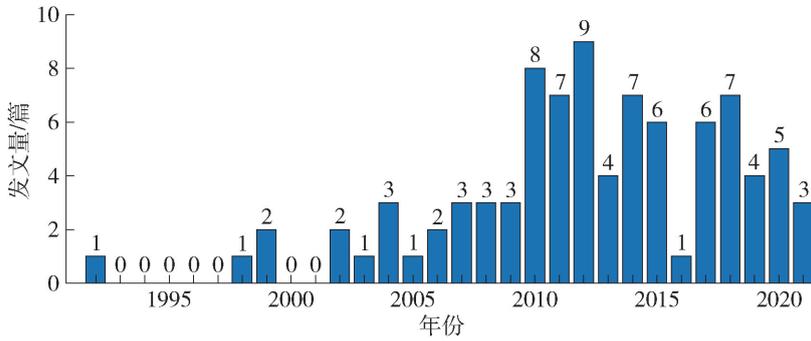


图 8 供水管网抗震可靠性领域年度发文量变化

Fig. 8 Number of papers published each year in the seismic reliability research area of water supply networks

第 3 个阶段则是 2008 年以后, 由于汶川地震所导致的严重后果, 供水管网抗震可靠性的研究兴起, 一个关注焦点则是基于抗震可靠度的性能优化设计问题. 2010 年的玉树地震和 2013 年的芦山地震进一步推动了供水管网抗震可靠性的研究, 使得该领域的文章数量出现明显的增加.

6.2 论文发表作者分析

该领域的作者合作网络如图 9 所示, 从中可以发现, 国内供水管网抗震可靠性研究形成了 3 个核心团队, 即李杰团队、杜修力团队、郭恩栋团队. 与第 3 个层次中供水管网可靠性研究人员的分析相对比可以发现, 侧重于管网运维的团队并不包含于此, 而针对供水管网进行抗震研究的主流团队, 则均涉及供水管网系统层次的可靠性研究.

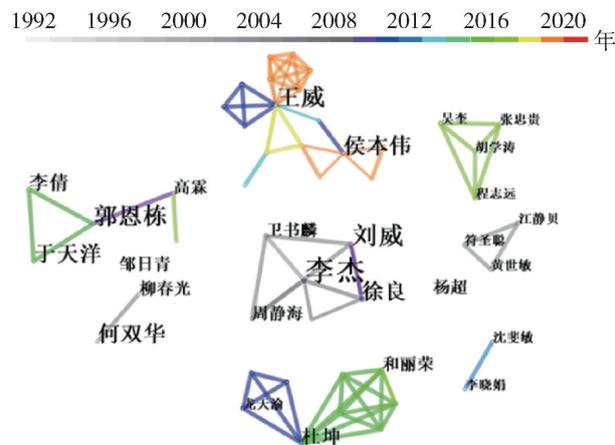


图 9 供水管网抗震可靠性领域作者合作网络

Fig. 9 Collaborative networks of authors in the seismic reliability research area of water supply networks

6.3 关键词的聚类分析

关键词的聚类是指把含义相同或相近的关键词聚为一类, 而表达含义不同的关键词则被分到不同的聚类中, 每个聚类代表相应领域的 1 个研究主题.

第 2、3 层次通过对关键词的定性分析实现对相应领域研究主题的归类, 在这一层次通过对关键词进行聚类实现了对关键词的定量分析, 更加准确地反映出供水管网抗震可靠性领域的研究主题.

关键词的共现聚类如图 10 所示, 共有 5 个聚类, 包含 134 个节点、276 条连线. #0、#1……代表聚类的编号, 编号的数字越大表示聚类中所包含的节点数量越少. 表 7 给出了各个聚类的具体信息, 其中规模为聚类中关键词的数量; 平均轮廓值反映聚类质量, 当该值大于 0.7 时, 认为聚类结果具有高可

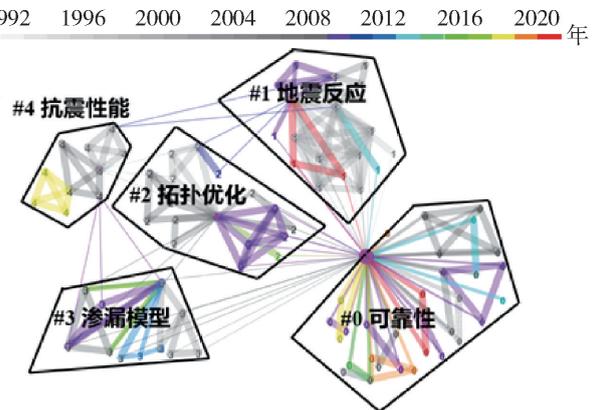


图 10 关键词聚类图谱

Fig. 10 Clusters of keywords

表 7 关键词聚类信息

Table 7 Clustering information of keywords

编号	规模/个	平均轮廓值	年份	研究主题
#0	32	0.995	2012	可靠性
#1	19	0.854	2006	震害预测
#2	17	0.953	2009	拓扑优化
#3	12	0.862	2009	水力模拟
#4	8	0.887	2010	抗震性能

注: 年份为该关键词平均出现的时间.

信度;研究主题由各个聚类中的关键词凝练总结得出,所有的研究主题构成该领域的知识体系.通过对各个聚类的文献进行分析,每个主题的核心研究问题如下.

6.3.1 聚类#0

该聚类集中于供水管网抗震可靠性分析方法的研究,主要包含两大类:管网连通可靠性分析与管网功能可靠性分析.连通可靠性侧重于分析管网的网络连通性能,而功能可靠性侧重于分析震后管网的实际供水量保有能力.

供水管网的连通可靠性分析方法主要有精确解法、界限值近似法和随机模拟法.

1) 精确解法主要包括经典的最小路算法^[21-22]和经典的最小割算法^[23]等.随着管网系统规模的扩大,管网系统中的最小路数目和最小割数目会呈现非多项式增长,由此导致网络连通可靠性计算时间和空间分解的非多项式增长.当求解大型网络系统连通可靠性时,会产生巨大的工作量,其计算往往会非常耗时,从而限制了这类方法的应用与发展.

2) 界限值近似法是通过求解管网系统可靠性的上、下限值,并通过指定上、下限差值来获得管网系统可靠性的近似解. Li 等^[24]提出 M-Dotson 法(最小路递推分解算法)以及李杰等^[25]提出最小割递推分解算法有效缓解了求解大型复杂网络工程系统时网络连通可靠度分析的非多项式增长难题,可计算中小型网络失效概率的精确值及大型复杂网络系统失效概率的高精度值.在此基础上,刘威等^[26-27]提出改进的最小路递推分解算法和改进的最小割递推分解算法,能更高效地计算网络系统的连通可靠度.刘威等^[28]通过实例对比分析改进的最小路递推分解算法和改进的最小割递推分解算法,分析结果表明最小路类递推分解算法对网络单元可靠度较高的情况收敛性较好,而最小割类递推分解算法对网络单元可靠度较低的情况收敛性较好.侯本伟^[29]针对网络两端连通可靠性问题,采用直接不交算法进行求解,可在有限计算时间内求出小型网络系统可靠性的精确解或大型网络系统可靠性的近似解,相比最小路递推分解算法,此算法可更快地求解单元处于低可靠度状态时的网络连通可靠性;相比最小割递推分解算法,此算法可获得较优的不交解集.界限值近似法的研究重点在于寻找高效的上、下限求解方法.

3) 随机模拟法原理是概率论中的大数定律和伯努利试验原理,认为当试验次数足够大时,事件出

现的频数等于其发生的概率.由于随机模拟法避免了网络连通可靠性分析中出现的非多项式增长难题且无须考虑网络拓扑结构的复杂性,因而在求解大型管网系统的连通可靠性时有极大的优势.随机模拟法的模拟误差与抽样方差成正比,与模拟抽样次数的平方成反比. Shinozuka 等^[30]较早将 Monte Carlo 模拟法运用到供水管网系统抗震连通可靠性分析中,采用网络邻接矩阵的 N 次幂方法对每次模拟所得的管网系统进行抗震连通可靠性分析,并以洛杉矶供水管网为例验证了该方法的可靠性.何双华等^[31-32]基于 Monte Carlo 模拟法模拟供水管网中各管段的运行状态及破坏状态,结合模糊数学理论给出供水管网的连通可靠性.由于采用模糊数学理论判断大型管网系统连通能力会出现计算效率低下的缺点,韩阳^[33]基于 Monte Carlo 模拟法,采用宽度优先搜索技术判断管网系统的连通能力.韩阳和何双华在进行网络连通可靠性分析时,假设节点完全可靠,仅考虑边的失效概率.针对同时考虑节点和边单元失效的一般赋权网络,侯本伟等^[29,34]提出一种考虑节点失效网络连通可靠性计算的基于重要度抽样的 Monte Carlo 模拟法,此方法可以增加对失效概率贡献大的抽样点出现概率,并且在相同模拟次数下,重要度抽样模拟的效率及精度高于普通随机模拟,但对于单次模拟,此方法并不能提高随机模拟法的精度.龙立等^[35-36]采用基于 Sobol 序列的 Quasi-Monte Carlo 模拟法对供水管网系统单元的破坏概率进行抽样,结合宽度优先搜索技术进行管网连通性判别,通过算例分析表明该方法比普通随机模拟具有更高的计算效率及精度.

供水管网抗震功能可靠性分析方法主要可以分为一次二阶矩法、随机模拟法、概率密度演化方法.

1) 一次二阶矩法的基本思想是在基本变量的概率分布不清楚时,采用变量的均值(一阶原点矩)和标准差(二阶中心矩)的数学模型求解结构可靠度的方法.陈伶俐等^[37]首次将供水管网日常运维可靠度分析的一次二阶矩法运用到管网震后的功能可靠度分析中去,以渗漏面积作为供水管网震害量化参数,运用点式渗漏模型对震后管网进行水力分析,结合一次二阶矩法,给出供水管网的抗震功能可靠度.柳春光等^[38]通过考虑震后节点配水量随节点压力的动态变化,求解管网节点实际的流量和水压,在此基础上,结合管网水力分析和一次二阶矩法得到震后低压供水管网系统的功能可靠度.一次二阶矩法具有计算量小、概念明确的优点,但是缺点

是: ① 只能反映管网功能特性的二阶统计特征, 不能全面反映概率统计信息; ② 选择不同的极限状态方程后可能得到不同的可靠度指标, 计算结果粗糙, 适用于对可靠度要求不高的情况。

2) 在管网功能可靠性分析的随机模拟法方面, 李小军等^[39]利用虚设渗漏节点模拟震时管网的漏水状态, 引入 Monte Carlo 模拟法分析各节点的水压及满足供水需求的可靠性。李昕^[40]基于管线两态破坏模型, 结合 Monte Carlo 模拟法对震后管网破坏进行随机模拟, 删除网络中完全破坏的管线和孤立的节点, 对新的管网进行水力分析, 分别以节点水压和流量的均值作为评价指标评估管网的功能可靠性。和丽荣等^[41]基于 Monte Carlo 模拟法生成震后管线状态, 分析不同烈度下管网的抗震水力功能可靠性, 但其分析过程中一定程度上简化了管道爆管及渗漏模型, 分析结果的精度有待进一步提高。随机模拟法具有原理简单, 不受网络拓扑结构复杂程度影响的优点, 但是也存在缺点, 主要是: ① 存在计算结果收敛的问题; ② 计算十分不经济。

3) 概率密度演化方法是由李杰和陈建兵提出并发展的一类针对随机动力系统的分析方法, Miao 等^[42-44]基于这一方法, 建立随机地震动场中供水管网的物理运动控制方程, 并结合瞬变流理论, 成功实现工程场地随机地震动场模拟—管网系统随机地震反应分析—渗漏供水管网动态水力分析—供水管网随机功能反应分析—供水管网抗震功能可靠度评估这一完整的分析路径, 实现基于物理机制的城市水管网动态抗震功能分析和动态功能可靠度分析。该方法不仅具有清晰的物理机制和详细的概率演化信息, 而且具有较高的计算效率。

6.3.2 聚类#1

该聚类集中于供水管网的反应研究, 包括经验统计法和理论分析法 2 类方法。

1) 经验统计法是以地面运动峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA)、地面运动峰值速度 (peak ground velocity, PGV) 等来描述场地特征, 以破坏率 D 来反映管线的地震反应, 通过对历史震害数据的统计分析得出管线破坏率与场地特征的关系。国外在这一方面的研究起步较早, Toki 等^[45]根据 Kubo 等统计的关中地震中供水系统的管线破坏分布和地震烈度分布的记录, 将东京市网格化, 逐个统计分析, 结果发现 D 与 PGV 之间有比较好的相关性, 即

$$D = 0.86 V_p^{0.62} \quad (1)$$

式中: V_p 表示 PGV, cm/s; D 约为每 30 800 人口所占

管线的破坏率。

Katayama 等^[46]根据旧金山地震统计和铸铁管的平均震害率, 将管线的破坏率按照场地、管材、埋深不同的影响因子予以修正来预测任一位置处的管线破坏率, 则

$$D_l = 1.698 \times 10^{-16} C_g C_p C_d a_p^{6.06} \quad (2)$$

式中: D_l 是预测位置 l 处的管线破坏率, 处/km; C_g 、 C_p 、 C_d 分别为场地、管材、埋深的影响因子; a_p 是场地运动峰值加速度, cm/s²。

我国在这方面的研究起步相对较晚, 通过对海城地震所造成的地下管线的震害情况进行统计分析, 得到海城等地的地下供水管线的震害率 λ ^[47-48], 如表 8 所示。

表 8 海城地震中管线的震害率 (λ)

Table 8 Seismic damage rate (λ) of pipelines in Haicheng Earthquake 处/(10 km)

地区	管线类别		
	钢管	铸铁管	石棉水泥管
盘山镇(7度)	70	16.0	13
营口市(8度)	114	10.6	20
营口市(9度)	21	12.3	70
海城市(10度)	157	212.0	90

王东炜^[49]通过对中国、日本、美国、墨西哥等国的地下管线震害资料进行统计分析得到了可以考虑管线锈蚀程度及接头类型等因素的 λ , 如表 9 所示。

表 9 地下管线平均震害率 (λ)

Table 9 Average seismic damage rate (λ) of buried pipelines 处/(10 km)

场地	管径/mm	烈度				
		6	7	8	9	10
II类	>500	0.001	0.01	0.1	1	5
	200~500	0.01	0.1	1	7	16
III类(液化概率很小的地区)	75~150	0.03	0.2	2	15	30
	>500	0.05	0.5	2	6	8
	200~500	0.1	1.5	8	18	30
	75~150	0.2	3	16	30	50

注: 对于严重锈蚀的管线, λ 的取值要加一级 (取表中的相应 λ 的右侧数据); 延性接头的管线, λ 的取值要减一级 (取相应 λ 的左侧数据)。

郭恩栋等^[50]通过对汶川地震中地下管线的地震破坏资料进行统计分析, 得到钢管、灰口铸铁管等管材的管线在烈度分别为 6、7、8 度情况下的 λ , 如

表 10 所示。

表 10 管线的震害率(λ)

Table 10 Seismic damage rate (λ) of pipelines
处/(10 km)

烈度	管线类别						
	灰口铸铁管	水泥管	钢管	球墨铸铁管	PVC管	PE管	PPR管
6	1.5	0	0	0	0	0	0
7	12.9	8.3	0.6	0.4	6.2	3.0	0
8	40.0	20.4	22.3	1.2	25.0	8.0	0

注:表中在对灰口铸铁管、钢管及球墨铸铁管的震害率统计时,其管径都是在 300 mm 以上的主干管线,水泥管是管径在 500 mm 以上的主干管线,而 PE 管、PVC 管、PPR 管都是管径在 400 mm 以下的管线。

2) 理论分析法主要是基于地下管线的物理模型建立地下管线或者管网的易损性模型^[51]。代表性的工作如刘智等^[52]采用有限元分析方法,通过数值模拟手段分析不同地震烈度下供热管线的地震反应,基于三态破坏准则对供热管线的易损性进行研究,得到单位长度供热管线的震害率。王书锐^[53]针对垫衬法加固前后球墨铸铁地下供水管线数值模型,进行非线性动力时程分析,得到非均匀场地下基于场地运动峰值速度的管线接口易损性曲线。丽娃^[54]基于 ABAQUS 有限元分析软件采用简化的管土相互作用三维模型从静力和动力 2 个方面研究天然气管线在地震作用下的反应,进一步运用地震易损性理论,给出天然气管网的地震易损性曲线。

6.3.3 聚类#2

该聚类集中于供水管网的抗震设计,其核心是拓扑优化。由于供水管网在空间尺度内是具有拓扑结构的几何模型,如何设计合理的拓扑结构,尽可能提高管网整体的抗震性能就成为关键科学问题之一。管网拓扑优化的基本思路是首先建立供水管网抗震拓扑优化模型,再利用某种算法对该模型进行求解给出优化的管网结构。李杰^[55]首先提出利用现代组合优化理论、结合网络抗震可靠度分析进行工程网络抗震优化设计的思想。在此基础上,Chen 等^[56]首次以管网建设造价为优化目标,利用遗传算法并结合启发式管径优化算法进行了基于功能可靠度的供水管网抗震拓扑优化和管径优化研究,这一工作首次实现了从系统的角度来进行管网的抗震拓扑优化。李杰等^[57]以管网造价为优化目标、管网拓

扑结构为优化参数、管网节点最低可靠度为约束条件建立优化模型,基于模拟退火算法提出供水管网的抗震拓扑优化方法。徐良等^[58]以管网年费用折算值为优化目标、管网拓扑结构与管径为优化参数、管网节点最低可靠度为约束条件建立优化模型,基于微粒群算法给出拓扑优化方法。刘威等^[59]以管网建设费用和建成后的运维费用为优化目标,管网拓扑结构和管径为优化参数,管网节点最低可靠度为约束条件,同时考虑管线投资重要度,利用不同的组合优化算法进行供水管网抗震拓扑优化设计,结果表明遗传-模拟退火算法表现最好,遗传算法和微粒群算法次之,而蚁群算法的搜索性能较差。李杰等^[60]首先提出基于自动生成策略的供水管网抗震优化设计方法,该方法只需要管网用户节点信息就可以生成满足抗震要求的供水管网,但该方法在生成管网时不考虑实际工程背景,而是直接认为管线是连接管网节点的直线,与实际工程尚有差距。在此基础上,刘威等^[61]以管网年费用折算值为优化目标、管网拓扑结构与管径为优化参数、管网节点最低可靠度为约束条件建立优化模型,将管网所在区域的道路信息引入管网优化设计中,基于自动生成策略,结合环形网络判断方法,利用遗传算法、遗传-模拟退火算法、微粒群算法进行了供水管网抗震拓扑优化分析。上述优化模型均未对用户节点进行重要度评价,对所有节点采用相同的抗震可靠性评价指标,不能体现重点保障和分级设防的抗震理念,同时优化参数也未考虑管段的抗震能力差异性。基于此,侯本伟等^[62]以不同用户的抗震保障能力需求为优化目标,以管网拓扑结构和管段抗震能力为优化参数,提出了一种可考虑管网拓扑冗余度的抗震优化设计模型,利用遗传-退火混合算法进行优化求解。

6.3.4 聚类#3

水力分析主题集中于点式渗漏模型的建立。常用的供水管网渗漏模型有点式渗漏模型和一致渗漏模型 2 类。点式渗漏模型反映渗漏点流量与渗漏面积、渗漏点水压的水力关系,属于理论模型;一致渗漏模型反映渗漏流量与管网的整体渗漏水平间的水力关系,属于经验模型。

最早的点式渗漏模型是 Eguchi 于 1983 年提出的,但是 Eguchi 点式渗漏模型只适用于管线发生一分为二的严重破坏的情况。随后,中国城镇供水排水协会(CUWA)^[63]、刘威等^[64]、美国供水协会(AWWA)^[65]、Hwang 等^[66]、Shi^[67]、Tabesh 等^[68]学

者或研究机构先后提出了不同的点式渗漏模型, 侯本伟等^[69]将这些点式渗漏模型与基于孔口出流的管线渗漏模型^[70]进行对比, 如表 11 所示, 指出模型

间的差异主要来自于公式系数取值的不同, 通过对比分析各模型的应用结果, 表明孔口出流模型更符合管道漏水的实际情况。

表 11 点式渗漏模型公式对比表

Table 11 Comparison among outflow models of the leak

参考文献	渗漏公式	μ	限定管道破坏模式
[70]	$Q_L = 4.427\mu A_L \sqrt{H_L}$	0.62 ~ 0.90	
[63]	$Q_L = 0.421A_L \sqrt{H_L}$		
[64]	$Q_L = 4.427\alpha\mu A_L \sqrt{H_L}$	0.6	承插式接口拉脱
[65]	$Q_L = 2.658A_L \sqrt{H_L}$		裂缝或接口破坏
	$Q_L = 3.544A_L \sqrt{H_L}$		规则圆孔
[66]	$Q_L = 4.427\mu A_L \sqrt{H_L}$	0.64	
[67]	$Q_L = 4.427\mu A_L \sqrt{H_L}$	1.0	
[68]	$Q_L = 4.357\mu A_L \sqrt{H_L}$	0.6 或 0.8	裂缝或孔口破坏
	$Q_L = 2.615A_L \sqrt{H_L}$		环向破裂

注: Q_L 为渗漏点流量, m^3/s ; A_L 为渗流面积, m^2 ; H_L 为渗漏管段内的压力水头, m 。文献[64]中 $A_L = \alpha\pi d(R - R_1)$, α 为渗漏系数; d 为管线外径, m ; R 为单根管线接头的变形, m ; R_1 为单根管线接头的容许变形, m ; $R < R_1$ 时, $A_L = 0$ 。文献[68]中计算环向破裂管线渗漏量时 $A_L = b\pi d$, b 为环向破裂的宽度, m 。

点式渗漏模型的渗漏点流量与渗漏点水压和渗漏面积密切相关。渗漏点水压可以通过最终的水力计算迭代得到, 而渗漏面积需要提前确定。渗漏面积与管网的破坏状态密切相关, Ballantyne 等^[71]最先开始研究管线渗漏面积与其破坏状态之间的关系, 定义管线处于轻微破坏时渗漏面积为 0, 处于中等破坏时渗漏面积取为管线截面面积的 30%, 处于严重破坏时的渗漏面积取为管线截面面积, 则管线的渗漏面积计算公式为

$$A_L = 0P_1A_D + 0.3P_2A_D + P_3A_D \quad (3)$$

式中: P_1 、 P_2 、 P_3 分别为管道处于轻微破坏、中等破坏和严重破坏的概率; A_D 为管线截面面积, m^2 。由于震害状态是一个比较模糊的概念, 不同的震害调查者对于同一根管线的破坏状态界定不同, 因此这种分析比较粗疏。

陈伶俐等^[72]在管线震害分析和理论计算的基础上给出了震后管线渗漏面积的量化模型为

$$A_L = \begin{cases} 0, & R < R_1 \\ \alpha\pi d(R - R_1), & R_1 \leq R < R_2 \\ A_D, & R \geq R_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_2 为单根管线的渗漏极限位移, m , $R_2 = R_1 + A_D/(\alpha\pi d)$; A_D 为管线截面面积, m^2 。

刘威等^[73]指出了陈伶俐模型^[72]中存在的 2 点

不足: 1) 渗漏模型中渗漏面积的物理意义不够明确; 2) 对接头完全破坏的位移上限估算过大。并在此基础上重新给出了渗漏模型的量化表达式

$$A_L = \begin{cases} 0, & R < R_1 \\ \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \pi d \delta, & R_1 \leq R < R_2 \\ \pi d \delta, & R_2 \leq R \leq R_L \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ 为接头渗漏缝的最大宽度, m , 对于柔性接头, 指的是橡胶圈与插口外壁之间(平均意义上)的缝隙宽度; R_L 为接头插口插入承口的深度, m , 当 $R > R_L$ 时, 接头被完全拔出。

6.3.5 聚类#4

该聚类的文献集中于对管线本身抗震性能的研究, 主要依赖于试验手段对管线或者管线接头的力学性能的测试和分析, 包括静力加载管线接口试验、动力加载振动台试验和动力加载现场激振试验。

1) 静力加载管线接口试验的典型代表如周静海^[74]对埋地的聚氯乙烯管和球磨铸铁管在注水和不注水条件下进行了静力轴向拉伸试验, 对 2 种管材的接口力学性能进行分析。刘威等^[64]对球磨铸铁管柔性接口在填土和不填土 2 种情况下的渗漏情况进行了轴向静力拉拔试验, 研究了不同管线接口在不同接口变形条件下渗漏量和时间之间的关系。

钟紫蓝等^[75]通过对球墨铸铁承插式接口输水管线在外部无覆土、加压注水条件下进行拟静力拉拔试验,表明加载方式以及管线内部水压等对接口的轴向抗拉力学性能和破坏方式的影响不大. 钟紫蓝等^[76]采用垫衬法对 DN400 球墨铸铁供水管线的承插式接口进行修复,对修复后的管线接口进行拟静力拉拔与弯曲试验,结果表明与修复前相比该方法能显著提高管线接口的抗拉、抗弯承载力. 李晓晓等^[77]对管内注水的 DN400 型球墨铸铁管承插式接口分别进行单调和往复的轴向拉拔和横向弯曲的拟静力加载试验,分析得出:2种加载方式对接口在轴向和横向受力下发生初始漏水和严重漏水时对应的接口变形量影响不大;接口等效抗拉刚度随接口张开量的增加呈指数型下降,而等效抗弯刚度随接口弯曲转角增加而呈近似线性递减. 但是应该认识到:①由于试验条件和现场施工条件存在的差异,使得管线接口的试验性能和实际性能存在差异;②在地震作用下管线承受的是一种动力作用,这也会导致通过静力加载获得的管线性能与实际性能存在差异.

2) 动力加载振动台试验的基本思想是利用振动台对室内的模型管线或者真实管线进行动力加载试验,以研究管线在地震动作用下的反应. 韩俊艳等^[78-79]通过均匀和非均匀场地中埋地管线的多点非一致激励振动台模型试验研究埋地管线的抗震性能,试验结果表明:在纵向非一致激励和非均匀场地的共同作用下,最大峰值应变可能出现在场地变化的过渡区或土体介质较软的场地中;在横向非一致激励较高加载等级下,均匀土中管线的应变响应比一致激励作用下增大2倍左右,非均匀土中管道的应变响应变化不明显. 相比于动力加载现场激振试验,动力加载振动台试验操作相对简单,试验的效率比较高,但是该试验存在以下缺点:①不能完全消除模型箱所导致的土体的边界效应;②模型箱中的土是扰动土,这与自然状态下管道周围埋土的状态并不相同;③受振动台性能的限制,对复杂管网的试验研究很难开展.

3) 动力加载现场激振试验的基本思想是通过现场制造爆炸、打桩等人工震源,然后观测埋地管道在人工地震动下的反应. Wang 等^[80]和 Miao 等^[81]以爆炸模拟地震动,对带有弯管等复杂连接件的地下管网进行了现场动力反应试验,首次将真实地下管线的动力测试推进到网络性和系统性的层次. 动力加载现场激振试验具有可以控制人造地震动的强

度且不受地震动随机因素的控制的优点,但是该方法也存在以下不足之处:①人工地震动和天然地震动的差异可能会导致管道反应的差异;②相对室内试验,该试验操作比较复杂,人工地震动施加难度较大,试验成本高.

7 关键科学问题

通过本文的系列分析不难发现,本领域的关键科学问题主要有:

1) 现役劣化管线的地震破坏机理. 实际地下管网由于长时间的服役,存在不同程度的老化腐蚀现象,在地震这一因素的作用下,将会出现屈曲、断裂、破裂等多种形式的破坏. 因此,准确地解析老旧管线的地震破坏机理,科学地反映劣化管线的结构破坏,是进行管网系统层次分析的基础.

2) 断层、液化等地震引起的场地大变形作用下管网破坏机理与抗震设计方法. 事实上,由于地震动场的空间变异性,管线跨越断层、液化等场地大变形区面临着巨大的地震风险,深入科学地揭示断层、液化等场地大变形作用下管网破坏机理,并发展简洁有效的设计方法,是提升整个管网系统抗震可靠性的重要支撑.

3) 不同漏损形式的地震破坏管网渗漏分析模型. 地下管网的管材、接头、阀门、水表等结构形式多样,由此导致的管线管身、接头、连接件等处的渗漏形式复杂,不仅包括各类爆管、明漏等,还包括各类暗漏等,特别是地震破坏导致的管网破损各有特点,建立恰当的地震破坏管网渗漏分析模型,是进行管网抗震功能分析的基础.

4) 震后管网水质污染机理和扩散模型. 地震会导致水源地以及多种地下水源的污染,同时管网爆管等负水压会进入破损管网导致污染物的进一步扩散. 因此,科学合理地辨析地震破坏管网水质污染物扩散机理,建立管网内污染物分析模型,是实现供水管网抗震功能可靠性分析的重要内容.

5) 大型管网抗震韧性分析的高效计算方法. 随着城市规模的扩大和日趋复杂,建立更加精细的管网模型并进行分析,是提升管网抗灾韧性的基础. 充分考虑管网节点和管线物理特征、管网场地特征、失效相关特征的精细化分析模型,并以此为基础建立高效的求解分析方法,是实现管网智慧管理和建立孪生模型的基本途径之一.

6) 基于既有管网的供水管网更新和优化设计方法. 随着城市更新和老旧小区的改造,在既有管

网的基础上,在灾前即建立合适的管网更新优化设计方法,是降低总体震损的重要基础,从而实现“设计→更新→再设计”管网螺旋式的发展。

8 结论

为了对供水管网抗震可靠性领域的研究现状进行分析,本文基于 CiteSpace 软件分别对管线—供水管网—供水管网抗震或供水管网可靠性—供水管网抗震可靠性 4 个层次涉及 5 个领域的文献逐层深入地展开了量化分析,得出以下结论:

1) 在管线领域中,油气管线和给排水管线是研究的主流,相比于给排水管线,油气管线所受的关注度更高。

2) 供水管网领域的发展历程可以分为 3 个阶段,年度发文量受灾害的影响比较大;该领域已形成 9 个核心研究团队,各团队内部合作强度大,而团队之间的合作强度较弱;研究主题主要是漏损控制、水力模型、管网优化和水质问题;该领域侧重于研究日常运维中的漏损、水质等问题,而供水管网抗震问题所受的关注度相对较低。

3) 供水管网抗震领域的研究从 2008 年以后开始兴起;该领域已形成 3 个核心研究团队,他们所属的单位分别是北京工业大学、同济大学和中國地震局工程力学研究所;该领域主要包括震害预测、水力分析、拓扑优化、管线抗震性能、供水管网抗震可靠性 5 个研究主题。

4) 供水管网可靠性领域总体上稳步发展,尤其是近 3 年的研究热度比较高;该领域已形成一些相对稳定的科研群体,他们的研究方向可以分为供水管网在日常运维下的可靠性和抗震可靠性 2 种;研究的主流主题可以归为 3 类:漏损控制、管网优化、供水管网抗震可靠性;在该领域的研究中,日常运维下的可靠性比抗震可靠性所受的关注度更高。

5) 供水管网抗震可靠性领域研究主题包括可靠性、地震反应、拓扑优化、水力分析和抗震性能。可靠性主题集中于供水管网抗震可靠性分析方法的研究,包括抗震连通可靠性和抗震功能可靠性 2 种;地震反应主题侧重于研究管线在地震作用下的反应,主要有经验统计法和理论分析法 2 类;拓扑优化主题集中于供水管网的抗震设计,其核心是管网拓扑优化的研究;水力分析主题集中于点式渗漏模型的建立;抗震性能主题聚焦于对管线本身抗震性能的研究,主要依赖于试验手段对管体或者管线接头的力学性能的测试和分析。

6) 该领域的关键科学问题主要包括现役劣化管线的地震破坏机理,断层、液化等地震引起的场地大变形作用下管网破坏机理与抗震设计方法,不同漏损形式的地震破坏管网渗漏分析模型,震后管网水质污染机理和扩散模型,大型管网抗震韧性分析的高效通用性方法,基于既有管网的供水管网更新和优化设计方法 6 个方面。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] 侯忠良. 地下管线抗震[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990: 25-30.
- [3] 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(3): 184-185.
YANG W Z. Destruction to lifeline system in Tangshan Earthquake and its recovery[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006(3): 184-185. (in Chinese)
- [4] 孙绍平. 阪神地震中给水管道震害及其分析[J]. 特种结构, 1997(2): 51-55.
SUN S P. Seismic damage of water supply pipelines in Hanshin Earthquake and its analysis[J]. Special Structures, 1997(2): 51-55. (in Chinese)
- [5] 李杰. 生命线工程抗震——基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 8-13.
- [6] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 10-19.
LI H N, XIAO S Y, HUO L S. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008(4): 10-19. (in Chinese)
- [7] 舒亚俐. 既有给排水管线的震害及管道抗震能力关键问题综合分析[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3): 111-114.
SHU Y L. Comprehensive analysis of seismic hazard to existing water and wastewater pipelines and key issues of seismic capacity of pipelines[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(3): 111-114. (in Chinese)
- [8] LIANG J W, SUN S P. Site effects on seismic behavior of pipelines: a review [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME, 2000, 122(4): 469-475.
- [9] SHUANG Q, LIU H J, PORSE E. Review of the quantitative resilience methods in water distribution networks[J/OL]. Water, 2019, 11(6): 1189[2022-02-05]. <https://sci-hub.se/10.3390/w11061189>. DOI:10.3390/w11061189.
- [10] LIU W, SONG Z. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks[J/OL]. Reliability

- Engineering and System Safety, 2020, 193: 106617 [2022-02-05]. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106617>. DOI:10.1016/j.res.2019.106617.
- [11] 黄哲聰, 李康均, 苏键, 等. 供水管网漏损现状及漏损检测方法研究综述[J]. 科技通报, 2020, 36(4): 10-16, 27.
HUANG Z C, LI K J, SU J, et al. A review of research on leak and leakage detection methods [J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36(4): 10-16, 27. (in Chinese)
- [12] WU Y P, LIU S M. A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems [J]. Urban Water Journal, 2017, 14(9): 972-983.
- [13] LI R, HUANG H D, XIN K L, et al. A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2015, 15(3): 429-441.
- [14] 赵欣, 严棋, 陈卫星, 等. 供水管道清洁技术的研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(增刊2): 78-82.
ZHAO X, YAN Q, CHEN W X, et al. Progress of pipe cleaning technologies in water supply pipeline[J]. Water Purification Technology, 2019, 38 (Suppl 2): 78-82. (in Chinese)
- [15] 林晓丹, 陈方亮, 强志民, 等. 供水管网水质模型的研究进展: 经验统计模型[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 1-7.
LIN X D, CHEN F L, QIANG Z M, et al. Research progress on water quality models of drinking water distribution systems: empirical statistic models [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 1-7. (in Chinese)
- [16] SONG P, WANG C, ZHANG W, et al. Urban multi-source water supply in China: variation tendency, modeling methods and challenges[J/OL]. Water, 2020, 12(4): 1199 [2022-02-05]. <https://sci-hub.se/10.3390/W12041199>. DOI:10.3390/W12041199.
- [17] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2015: 68-75.
- [18] 仲伟俊, 徐南荣, 沈厚才. 管网系统改造优化设计问题的模型及分层分解算法[J]. 系统工程学报, 1994(2): 11-19.
ZHONG W J, XU N R, SHEN H C. Model and two-level optimization algorithm for design problem of network system improvement[J]. Journal of Systems Engineering, 1994(2): 11-19. (in Chinese)
- [19] 吴学伟, 赵洪宾. 管网工况分析中 d 、 C 及 k 值的确定——用管道相对负荷指数分析管道工况[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996(3): 69-72.
WU X W, ZHAO H B. Determination of d , C and k in working-state analysis in pipe networks--analyzing pipe working-state with pipe relative load index[J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1996(3): 69-72. (in Chinese)
- [20] 马尔曼. 城市供水管网震害概率预测[J]. 内陆地震, 1992(1): 63-70.
MA E M. Seismic damage probability prediction of urban water supply networks [J]. Inland Earthquake, 1992(1): 63-70. (in Chinese)
- [21] FRATTA L, MONTANARI U G. A recursive method based on case analysis for computing network terminal reliability [J]. IEEE Transactions Communications, 1978, 26: 1166-1177.
- [22] AGGARWAL K K, MISRA K B, GUPTA J S. A fast algorithm for reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975(1): 83-85.
- [23] YE H F M, LU S K, KUO S Y. OBDD-based evaluation of k -terminal network reliability [J]. IEEE Trans Reliability, 2002, 51(4): 443-451.
- [24] LI J, HE J. A recursive decomposition algorithm for network reliability evaluation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(8): 1525-1539.
- [25] 李杰, 刘威, 钱摇琨. 网络可靠度分析的最小割递推分解算法[J]. 地震工程与工程振动, 2007(5): 33-39.
LI J, LIU W, QIAN Y K. Minimal cut-based recursive decomposition algorithm for network reliability analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007(5): 33-39. (in Chinese)
- [26] 刘威. 大型管网系统考虑腐蚀影响的抗震可靠性分析与优化[D]. 上海: 同济大学, 2007: 131-139.
LIU W. Seismic reliability analysis and optimization of large-scale pipeline systems considering corrosion effect [D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 131-139. (in Chinese)
- [27] 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(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 Edition), 2008(4): 427-431. (in Chinese)
- [28] 刘威, 李杰. 网络可靠度分析的最小路算法和最小割算法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008(3): 33-38.
LIU W, LI J. Comparison between path-based and cut-based algorithms for reliability analysis of networks [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008(3): 33-38. (in Chinese)
- [29] 侯本伟. 城市供水管网抗震能力分析 & 性能化设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 85-92.

- HOU B W. Seismic performance assessment and performance-based design of water distribution system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 85-92. (in Chinese)
- [30] SHINOZUKA M, TAN R Y, KOIBE T. Serviceability of water transmission systems under seismic risk [C] // Proceedings of the 2nd TCLEE Specialty Conference. The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering. Reston, Virginia, United States: ASCE, 1981: 97-110.
- [31] 何双华, 赵洋, 宋灿. 城市供水管网在震时的连通可靠性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(5): 585-589.
- HE S H, ZHAO Y, SONG C. Seismic connectivity reliability analysis of urban water supply network [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 585-589. (in Chinese)
- [32] 何双华. 供水管网系统抗震可靠性分析及加固优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 63-71.
- HE S H. Research on seismic reliability and optimum retrofit of water supply network system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 63-71. (in Chinese)
- [33] 韩阳. 城市地下管网系统的地震可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002: 102-107.
- HAN Y. Study on seismic reliability of urban buried pipeline network systems [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002: 102-107. (in Chinese)
- [34] 侯本伟, 杜修力. 考虑节点失效网络可靠性计算的重要度抽样随机模拟[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 2144-2151.
- HOU B W, DU X L. Reliability stochastic evaluation for networks with imperfect vertices using importance sampling [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(8): 2144-2151. (in Chinese)
- [35] 龙立, 郑山锁, 周炎, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的供水管网抗震可靠性分析并行化研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(2): 241-247.
- LONG L, ZHENG S S, ZHOU Y, et al. Parallel study of seismic reliability analysis of water supply pipe network based on quasi-Monte Carlo method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(2): 241-247. (in Chinese)
- [36] 龙立. 城市供水管网抗震可靠性分析及系统开发研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021: 82-89.
- LONG L. Research on the seismic reliability analysis method of urban water supply network and system development [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2021: 82-89. (in Chinese)
- [37] 陈玲俐, 李杰. 城市供水管网系统抗震功能可靠度分析[J]. 工程力学, 2004(4): 45-50.
- CHEN L L, LI J. Aseismatic serviceability analysis of water supply network [J]. Engineering Mechanics, 2004(4): 45-50. (in Chinese)
- [38] 柳春光, 何双华. 基于震后低压变化的供水管网功能可靠度分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(5): 502-506.
- LIU C G, HE S H. Serviceability analysis of water supply networks based on varied pressure deficient conditions after earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(5): 502-506. (in Chinese)
- [39] 李小军, 赵凤新, 胡丰贤. 埋设管网系统地震危险性分析方法[J]. 自然灾害学报, 1995(增刊1): 39-48.
- LI X J, ZHAO F X, HU Y X. Method of seismic hazard analysis for buried pipeline network system [J]. Journal of Natural Disasters, 1995 (Suppl 1): 39-48. (in Chinese)
- [40] 李昕. 供水系统地震可靠性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2000: 112-117.
- LI X. Seismic reliability analysis on water supply network system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000: 112-117. (in Chinese)
- [41] 和丽荣, 杜坤, 宋志刚, 等. 城市供水管网抗震可靠性评估的随机模拟方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 62-69.
- HE L R, DU K, SONG Z G, et al. Stochastic simulation method for seismic reliability assessment of urban water distribution system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(2): 62-69. (in Chinese)
- [42] MIAO H Q, LI J. Serviceability evaluation of water supply networks under seismic loads utilizing their operational physical mechanism [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(1): 283-296.
- [43] MIAO H, LIU W, LI J. Seismic reliability analysis of water distribution networks on the basis of the probability density evolution method [J/OL]. Structural Safety, 2020, 86: 101960 [2022-02-05]. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.101960>. DOI: 10.1016/j.strusafe.2020.101960.
- [44] 缪惠全, 李杰. 基于物理机制的供水管网抗震功能实时动态分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 20-29.
- MIAO H Q, LI J. Seismic design of underground pipe networks on the basis of system reliability [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(3): 20-29. (in Chinese)
- [45] TOKI K, SATO T. Estimation of damage of water

- distribution systems by earthquakes [C] // Proceedings of the Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan. San Francisco, California, United States; ASME, 1980; 89-96.
- [46] KATAYAMA T, ISOYAMA R. Damage to buried distribution pipelines during the Miyagiken-Oki Earthquake [C] // Proceedings of the Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan. San Francisco, California, United States; ASME, 1980; 97-104.
- [47] 城市公用设施抗震设计规范编制组. 辽宁海城、营口地震城市公用设施震害调查报告 [R]. 哈尔滨: 中国科学院工程力学研究所, 1975: 21-27.
- [48] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害 [M]. 北京: 地震出版社, 1979: 21-27.
- [49] 王东炜. 地下管线震害预测初探 [J]. 郑州工学院学报, 1991(1): 65-68.
WANG D W. Preliminary research on seismic damage prediction of buried pipeline [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 1991(1): 65-68. (in Chinese)
- [50] 郭恩栋, 杨丹, 高霖, 等. 地下管线震害预测实用方法研究 [J]. 世界地震工程, 2012, 28(2): 8-13.
GUO E D, YANG D, GAO L, et al. Study on practical method for earthquake damage prediction of buried pipeline [J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(2): 8-13. (in Chinese)
- [51] O'ROURKE M, WHITMAN R V, HOLMES W, et al. HAZUS-MH 2.1 earthquake model technical manual [M]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2013: 101-107.
- [52] 刘智, 郭恩栋, 胡少卿, 等. 供热管道地震易损性分析 [J]. 工程力学, 2013, 30(7): 187-192.
LIU Z, GUO E D, HU S Q, et al. Seismic vulnerability analysis of heat supply pipeline [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 187-192. (in Chinese)
- [53] 王书锐. 垫衬法加固前后地下供水管道抗震易损性分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019: 55-60.
WANG S R. Seismic fragility analysis of buried water supply pipeline before and after retrofited by corrosion protection lining [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019: 55-60. (in Chinese)
- [54] 丽娃. 埋地天然气管线的地震损伤与易损性评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 71-77.
INDIRA Y. Seismic damage and fragility assessment of buried gas pipelines [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 71-77. (in Chinese)
- [55] 李杰. 工程系统的内涵、抗震设计与设防原则 [J]. 自然灾害学报, 2001(1): 24-29.
LI J. Engineering systems: its connotation, seismic design and prevention principle [J]. Journal of Natural Disasters, 2001(1): 24-29. (in Chinese)
- [56] CHEN L L, LI J, XU C C. Seismic reliability-based optimization for water supply network [C] // Proceedings of the 9th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Los Angeles, California; ASCE, 2002; 793-798.
- [57] 李杰, 卫书麟, 刘威. 基于模拟退火算法的供水管网抗震优化设计 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 108-114.
LI J, WEI S L, LIU W. Seismic reliability optimization of water distribution networks with simulated annealing algorithms [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 108-114. (in Chinese)
- [58] 徐良, 刘威, 李杰. 基于微粒群算法的供水管网抗震优化设计 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 269-273.
XU L, LIU W, LI J. Seismic reliability optimization of water distribution network with particle swarm algorithm [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3): 269-273. (in Chinese)
- [59] 刘威, 徐良, 李杰. 供水管网抗震拓扑优化算法研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(11): 1351-1360.
LIU W, XU L, LI J. Algorithms for seismic topology optimization of water distribution network [J]. Scientia Sinica Technologica, 2012, 42(11): 1351-1360. (in Chinese)
- [60] 李杰, 邢燕. 基于可靠度的生命线工程网络抗震设计 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 783-786, 804.
LI J, XING Y. Reliability-based seismic design of lifeline networks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 783-786, 804. (in Chinese)
- [61] 刘威, 元宏伟, 徐良. 基于自动生成策略的供水管网抗震优化算法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 861-869.
LIU W, YUAN H W, XU L. Seismic topology optimization algorithms for water distribution networks based on automatic generation strategy [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 861-869. (in Chinese)
- [62] 侯本伟, 杜修力, 王威. 基于用户综合重要度的城市供水管网抗震性能化设计 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(5): 11-22.
HOU B W, DU X L, WANG W. Seismic performance-based design of water distribution system considering comprehensive importance of users [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(5): 11-22. (in Chinese)
- [63] 宋仁元. 怎样防止给水系统的漏损 [M]. 北京: 中国

- 建筑工业出版社, 1988: 138-145.
- [64] 刘威, 黄鹭娜, 李杰. 供水管线渗漏试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(4): 167-173.
LIU W, HUANG L N, LI J. Experiment on leakage of water pipelines [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(4): 167-173. (in Chinese)
- [65] AWWA. Water Audit and Leak Control Programs[M]. 4th Edition. Washington, D. C.: American Water Works Association, 1999.
- [66] HWANG H, LIN H, SHINOZUKA M. Seismic performance assessment of water delivery systems[J]. Journal of Infrastructure Systems, 1998, 4(3): 118-125.
- [67] SHI P. Seismic response modeling of water supply systems[D]. Ithaca: Cornell University, 2006.
- [68] TABESH M, YEKTA A H A, BURROWS R. An integrated model to evaluate losses in water distribution systems[J]. Water Resource Management, 2009, 23(3): 477-492.
- [69] 侯本伟, 杜修力. 地震破坏管线漏损分析模型对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 67-75.
HOU B W, DU X L. Comparative study on hydraulic simulation of earthquake-damaged water supply pipelines [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 67-75. (in Chinese)
- [70] 刘鹤年. 流体力学[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 118-122.
- [71] BALLANTYNE D B, TAYLOR C. Earthquake loss estimation modeling of the Seattle water system using a deterministic approach [C] // Proceedings of the 3rd United States Conference on Lifeline Earthquake Engineering. Los Angeles, California: ASCE, 1991: 747-760.
- [72] 陈玲俐, 李杰. 供水管线震害量化参数——渗漏面积的估算方法[J]. 自然灾害学报, 2003(1): 69-72.
CHEN L L, LI J. Leakage area calculation method—the quantitative description of seismic damage to buried pipeline[J]. Journal of Natural Disasters, 2003(1): 69-72. (in Chinese)
- [73] 刘威, 李斌, 李杰. 供水管网渗漏模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 180-186.
LIU W, LI B, LI J. Leakage model of water distribution network [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 180-186. (in Chinese)
- [74] 周静海. 地下供水管线破坏试验及抗震分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 84-89.
ZHOU J H. Destructive test study and aseismic analysis of water supply pipeline [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 84-89. (in Chinese)
- [75] 钟紫蓝, 王书锐, 杜修力, 等. 管道承插式接口轴向力学性能试验研究与数值模拟[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 224-230, 239.
ZHONG Z L, WANG S R, DU X L, et al. Experimental and numerical study on axial mechanical properties of pipeline under pseudo-static loading [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 224-230, 239. (in Chinese)
- [76] 钟紫蓝, 王书锐, 甄立斌, 等. 经垫衬法修复后铸铁管道接口力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 141-147.
ZHONG Z L, WANG S R, ZHEN L B, et al. Experimental study on mechanical properties of ductile iron pipeline rehabilitated by corrosion protection lining [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 141-147. (in Chinese)
- [77] 李晓晓, 钟紫蓝, 侯本伟, 等. 大型球墨铸铁管承插式接口力学性能研究[J]. 特种结构, 2020, 37(4): 47-55.
LI X X, ZHONG Z L, HOU B W, et al. Study on mechanical behaviors of push-on joints of large-diameter ductile iron pipelines [J]. Special Structures, 2020, 37(4): 47-55. (in Chinese)
- [78] 韩俊艳, 郭之科, 李满君, 等. 纵向非一致激励下非均匀场地中埋地管道的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1147-1156.
HAN J Y, GUO Z K, LI M J, et al. Shaking table tests on buried pipelines in inhomogeneous soil under longitudinal non-uniform seismic excitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1147-1156. (in Chinese)
- [79] 韩俊艳, 郭之科, 李立云, 等. 横向非一致激励下非均匀场地中埋地管道的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2020-2028.
HAN J Y, GUO Z K, LI L Y, et al. Shaking table tests on buried pipelines in inhomogeneous soil under transverse non-uniform excitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2020-2028. (in Chinese)
- [80] WANG C, LIU W, LI J. Artificial earthquake test of buried water distribution network [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 171-185.
- [81] MIAO H Q, LIU W, WANG C, et al. Artificial earthquake test of gas supply networks [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 510-520.
(责任编辑 郑筱梅)