

Каскадные сбои в системах городской инфраструктуры на пути к устойчивости: обзор и перспективы

ZHANG Changchun, HE Lei, FAN Tingjun

Аннотация: Растущая частота экстремальных бедствий, вызванных глобальным изменением климата, подчеркивает риски каскадного сбоя, вызванные сложной взаимозависимостью между системами городской инфраструктуры, что делает их ключевой проблемой для устойчивого к стихийным бедствиям городского планирования. Существующие исследования ограничены тремя ограничениями. Идентификация взаимозависимостей инфраструктуры ограничена наличием данных и методологических средств, что создает узкий набор признанных категорий. Утонченная идентификация критически важных объектов часто игнорирует социальные системы и поведение жителей, что приводит к неполным симуляционным структурам. Стратегии повышения устойчивости по-прежнему сосредоточены главным образом на односистемных мерах реагирования и чрезвычайных контрмерах, в то время как совместное многосистемное планирование остается недостаточно развитым. На фоне быстрого прогресса в области искусственного интеллекта в этой статье предлагаются направления исследований и технические пути: использование многоисточниковых гетерогенных данных и моделей большого языка для улучшения детализации и точности идентификации взаимозависимости; разработка моделей киберфизического моделирования, связанных с объектом-обществом-населением, для характеристики городской пространственной уязвимости; и формулирование интеллектуальных, многосистемных совместных стратегий восстановления для ускорения восстановления потенциала городских услуг. Исследование обеспечивает теоретическое руководство и возможные технические подходы для ключевых вопросов в планировании устойчивости к стихийным бедствиям.

Ключевые слова: городская инфраструктура; каскадные сбои; устойчивое к стихийным бедствиям планирование; искусственный интеллект; обзор литературы

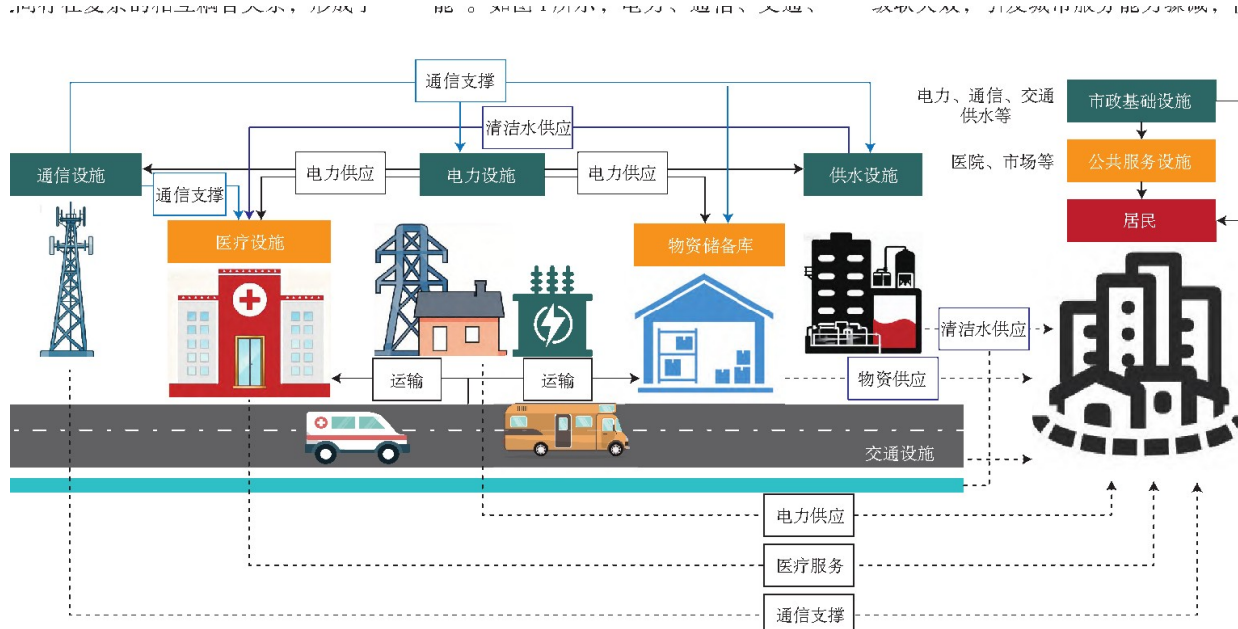
Глобальное изменение климата увеличило частоту и интенсивность экстремальных метеорологических катастроф, подвергая сильно застроенные китайские мегаполисы серьезным заболачиванием и наводнениям. Недавние сильные ливни в Чжэнчжоу, Пекине и Шэньчжэне привели к значительным потерям и социальным последствиям и выявили уязвимость городских систем. Необычный ливень в Чжэнчжоу 20 июля является типичным случаем: каскадные сбои, вызванные отказом одного объекта инфраструктуры, вызвали крупномасштабный функциональный паралич, а восстановление государственных услуг заметно отставало [1].

В ответ Китай придает все большее значение устойчивости к стихийным бедствиям и обновлению инфраструктуры. За последние пять лет был выпущен ряд документов по национальной политике, в том числе «Мнения по содействию строительству новой городской инфраструктуры и строительству устойчивых городов», выпущенные в декабре 2024 года. Эти документы требуют от местных органов власти повышения устойчивости к экстремальным стихийным бедствиям и улучшения всеобъемлющего потенциала по предотвращению городских бедствий. На практике Пекинское территориально-пространственное планирование, Шанхайское комплексное планирование предотвращения и уменьшения опасности стихийных бедствий и национальные технические процедуры территориально-пространственного комплексного планирования предотвращения стихийных бедствий имеют все определенные рамки, процессы и основное содержание. Однако научное понимание многосистемных взаимодействий и точных методов регулирования остается недостаточным.

В своей основе построенная среда содержит сложные связи между несколькими элементами. Эти отношения создают условия и пути для распространения неудач, позволяя вторичным бедствиям, вызванным первичными опасностями, распространяться и расширяться в построенной среде [2-3]. Городское и сельское планирование является основным средством координации многосистемных пространственных схем и последовательностей строительства в построенной среде, но отсутствие систематических исследований и точного регулирования для многоопасных и многосистемных взаимодействий ограничивает эффект планирования предотвращения стихийных бедствий [4-8]. Поэтому в этом документе рассматриваются текущие ограничения в планировании предотвращения стихийных бедствий, обобщаются исследования каскадного отказа взаимосвязанной инфраструктуры от идентификации взаимозависимости, моделирования отказов и стратегии восстановления устойчивости и предлагаются перспективы и инновационные пути на основе новых технологий.

1 Соединение рисков в системах городской инфраструктуры

Город представляет собой динамичную систему, которая во время работы сильно зависит от инфраструктурных функций. По-видимому, независимые системы образуют взаимосвязанную функциональную сеть передачи, которая поддерживает повседневную жизнь и городские функции [9]. Как показано на фиг.1, энергоснабжение, связь, транспорт, водоснабжение и другие спасательные системы имеют тесные внутренние связи между снабжением и поддержкой. Они также обеспечивают основные гарантии для объектов государственной службы, таких как больницы и материальные резервы. Эти объекты через инфраструктурные сети и системы автомобильного транспорта удовлетворяют повседневные потребности жителей и стабилизируют городскую работу.



1 Взаимозависимость между подсистемами городской инфраструктуры.

Эта ассоциация является результатом планирования и проектирования. Форма и организация построенной среды определяются решениями по планированию, а отношения взаимозависимости, пространственные схемы и функциональные связи между системами инфраструктуры предназначены для повышения общей эффективности работы. По мере увеличения плотности соединений и связей повышается эффективность обслуживания, но растет и системная уязвимость [10-11]. Когда критический узел или подсистема нарушены, эффект может быстро распространяться через цепи зависимостей и

вызвать многосистемный паралич. Отключение электроэнергии в Северной Америке в 2003 году вызвало сбои в водоснабжении, транспортировке и связи; в 2021 году в Чжэнчжоу 20 июля ливень, повреждения энергетических объектов вызвали трудности в водоснабжении и связи [1].

Взаимосвязи между инфраструктурными системами означают, что повреждение одного объекта может вызвать каскадные сбои, ослабить возможности городского обслуживания и нанести ущерб повседневной жизни жителей и городской экономике. В рамках интенсивных усилий Китая по строительству устойчивых к стихийным бедствиям городов, снижению каскадных воздействий, эффективному вмешательству в ограниченные объекты, посылки и системы, а также улучшению возможностей городского обслуживания являются ключевыми задачами для устойчивого городского строительства.

2 Прогресс в области исследований в области планирования предотвращения стихийных бедствий в городской инфраструктуре

Традиционное планирование предотвращения стихийных бедствий вокруг городской инфраструктуры развивалось в основном в двух направлениях. Во-первых, это оптимизация односистемного объекта.

Существующие исследования сосредоточены на оптимизированном проектировании отдельных объектов, таких как дорожная инфраструктура, резервуары для содержания дождевой воды, трубопроводы водоснабжения, зеленая инфраструктура и насосные станции, часто с использованием физических или численных моделей для минимизации потерь после стихийных бедствий и повышения эффективности планов действий в чрезвычайных ситуациях [12-15]. Эта линия работы полезна для локальной инженерной оптимизации, но обычно ограничивается одним объектом и не учитывает обратную связь между несколькими системами или пространственной связью.

Второе направление – это системная защита и планирование. С точки зрения системы исследования выявляют устойчивость инфраструктуры и предлагают стратегии в таких областях, как комплексное управление, усовершенствованный полный контроль процессов и регулярное техническое обслуживание [16-17]. Недавние работы по повышению устойчивости городов все чаще признают, что взаимозависимость между инфраструктурами определяет уязвимость городов и скорость восстановления после стихийных бедствий. Ученые предложили руководство по планированию, основанное на сочетании муниципальной инфраструктуры и систем предотвращения стихийных бедствий [18], призвали включить анализ воздействия, уязвимости и опасности в систему оценки планирования предотвращения стихийных бедствий [20] и утверждали, что устойчивое планирование должно координировать надежность одной системы с предотвращением каскадных сбоев в нескольких системах [19-21].

В целом, ориентированное на устойчивость планирование предотвращения стихийных бедствий должно перейти от инженерного опыта на уровне объекта к межсистемной координации. Его задача заключается в выявлении уязвимых звеньев в сложных сетях, понимании механизмов каскадного отказа и эффектов усиления и переводе их в оперативные средства управления планированием. Процесс может быть организован вокруг трех основных звеньев: идентификации взаимозависимости, моделирования отказов и стратегии восстановления (рисунок 3).

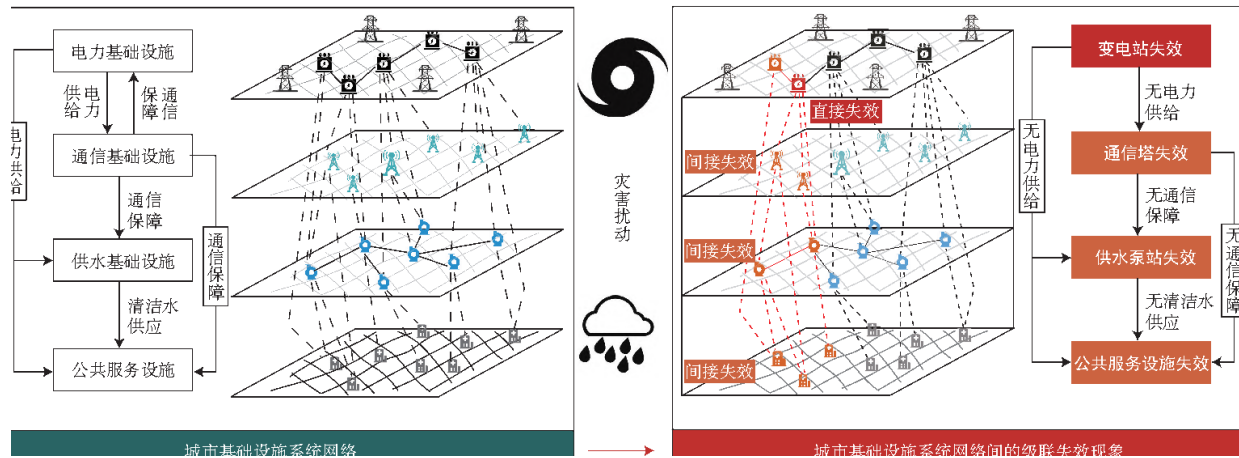
3 Прогресс в области исследований ключевых технологий каскадных отказов в взаимосвязанной городской инфраструктуре

近年来，随着对城市韧性问题的关注，学者们逐渐认识到，基础设施间的关联性是决定城市脆弱性与灾后恢复速

城市关联基础设施各子系统通过物质、能量与信息交互形成有机整体，极

支持。

为此，后续研究转向基于数据的依赖性关系识别。目前依赖性识别方法主要



2 Каскадные сбои систем городской инфраструктуры.

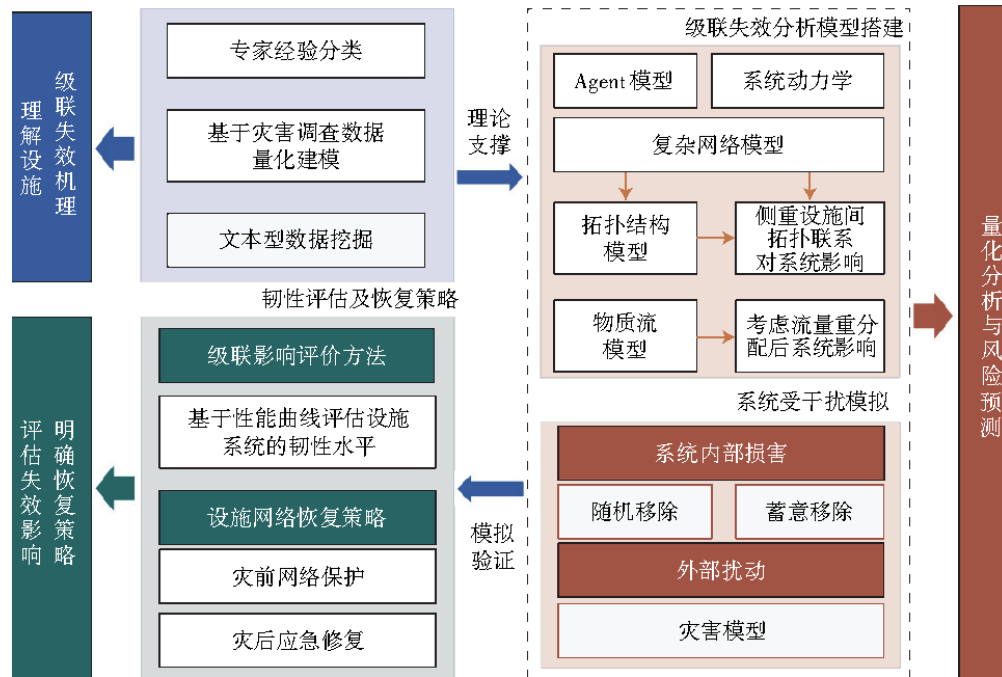


图3 城市基础设施级联失效关键技术研究概况

3 Обзор литературы по ключевым технологиям смягчения каскадных сбоев в городской инфраструктуре.

Подсистемы городской инфраструктуры формируют органические объекты посредством обмена веществ, энергии и информации. При экстремальных нарушениях локальные сбои могут распространяться по цепочкам зависимости и перерастать в каскадные сбои, угрожая городской эксплуатации и безопасности жителей. Анализ этой проблемы должен следовать системной логике анализа механизмов, вычета риска, активного вмешательства и оценки устойчивости. Следующий обзор фокусируется на идентификации взаимозависимости, модели сбоев и контрмерах устойчивости.

3.1 Выявление взаимозависимостей между взаимосвязанной инфраструктурой

Ринальди и другие классифицировали взаимозависимости между инфраструктурой в физические, кибер, географические и логические категории, уделяя особое внимание энергетике, водоснабжению, коммуникациям, энергетике и транспортным системам [9]. Более поздние исследования расширили эту классификацию с разных точек зрения, добавив политическую зависимость, социальную зависимость и экономическую зависимость [22]. Ранняя работа часто основывалась на экспертных суждениях и была сосредоточена на нескольких секторах, таких как электроснабжение и водоснабжение, с ограниченной поддержкой эмпирических данных.

Последующие исследования перешли к идентификации зависимостей, основанной на данных. Методы, основанные на отчетах о расследовании стихийных бедствий, количественно определяют взаимозависимость от данных после событий. Мендонка и Уоллес определили корреляции в восстановлении инфраструктуры после стихийных бедствий после атаки Всемирного торгового центра в 2001 году [24]. Monsalve и de la Llera оценили коэффициенты взаимозависимости и сильные стороны от установки коэффициента восстановления [25]. Зорн и Шамсельдин получили направление и интенсивность зависимости, используя отношения помощи и восстановления [26]. Добыча отчетов и новостей также использовалась для извлечения событий зависимости из публичных записей и средств массовой информации, создавая более разнообразные текстовые доказательства для признания взаимозависимости [27-29].

Исследования, основанные на данных, остаются исследовательскими. Многие исследования опираются на одномодальный анализ текста, отсутствие перекрестной валидации данных из нескольких источников и обычно выявляют типы взаимозависимости, такие как географическая смежность или поддержка административных решений. Они по-прежнему недостаточны для выявления сложных механизмов зависимости между соответствующей инфраструктурой.

3.2 Моделирование каскадных сбоев во взаимосвязанной инфраструктуре

Каскадные сбои в инфраструктуре происходят из-за сложной взаимозависимости и функциональной зависимости. Поэтому реалистичное моделирование имеет важное значение для понимания механизмов отказа и выявления ключевых объектов. Существующие исследования в основном касаются методов моделирования, форм возмущений и динамической дедукции при неисправностях.

3.2.1 Методы моделирования взаимосвязанных инфраструктурных сетей

Из-за различий в перспективах исследований и доступности данных широко используются три типа методов моделирования. Агентное моделирование рассматривает компоненты инфраструктуры как объекты с атрибутами принятия решений и поведения и имитирует взаимодействие между системами [31-32]. Системно-динамические методы исследуют обратную связь между возмущением и сетевым откликом, анализируя долгосрочные последствия отказов [33-34]. Методы сетевого анализа используют абстрактные компоненты в качестве узлов, физические или зависимые соединения в качестве краев и направленные отношения в качестве весов, тем самым идентифицируя надежность и передачу потока услуг в системах [35-36].

3.2.2 Формы сбоев в работе инфраструктурных сетей

Инфраструктурные сети подвержены внутренним и внешним возмущениям. Внутренние нарушения включают случайное удаление и вредоносные атаки на узлы или компоненты, которые используются для имитации прерываний, вызванных устаревающим оборудованием, эксплуатационным сбоем или целевым повреждением [45-47]. Внешние нарушения включают природные опасности, несчастные случаи

и вредоносные атаки. Они имеют значительную пространственно-временную неоднородность и географические корреляции, и исследования часто объединяют модели процессов опасности с моделями инфраструктуры-сети для имитации отказа компонентов в рамках действий в случае стихийных бедствий [48-51]. Однако существующие модели возмущений по-прежнему обладают ограниченной способностью фиксировать динамическую пространственную эволюцию и процессы межсистемного реагирования в условиях сложных бедствий.

3.3 Стратегии обеспечения устойчивости инфраструктуры в условиях каскадного сбоя

На основе механизмов каскадного отказа проведена оценка стратегий устойчивости инфраструктуры и восстановления для обеспечения стабильности обслуживания в экстремальных погодных условиях. Оценка устойчивости обычно использует кривые производительности для количественной оценки состояния системы до, во время и после отказа [51]. Исследования по восстановлению сосредоточены на защите сети до катастрофы и распределении ресурсов после катастрофы, включая идентификацию ключевых компонентов, оптимизацию режимов работы сети, распределение ресурсов и меры защиты [52-54]. Исследования аварийного восстановления изучают последовательность задач и распределение ресурсов в условиях ограниченных ресурсов на ремонт и ограничений поведения [55-56]. Существующие стратегические исследования позволили добиться прогресса в выявлении ключевых компонентов, улучшении защиты сетей и оптимизации распределения ресурсов для ремонта, но они по-прежнему сосредоточены в основном на самих инфраструктурных сетях. Влияние доступности услуг резидентов, поведения социальных операций и пространственной координации на устойчивость часто не полностью учитывается.

3.4 Обзор прогресса в исследованиях

3.4.1 Объекты исследования: недостаточная многосистемная интеграция

Текущие исследования в основном сосредоточены на отдельных инфраструктурных системах или внутренних каскадных сбоях среди небольшого числа систем. Они еще не сформировали структуру, которая начинается с общего города, объединяет несколько типов инфраструктуры и оценивает их влияние на возможности обслуживания жителей. В содержании исследований по-прежнему преобладают транспортные и дренажные сооружения, в то время как неадекватное внимание уделяется функциональным последствиям сбоев социальной инфраструктуры, такой как больницы, материальные резервы и объекты экстренной помощи. Поскольку отказ этих объектов может прямо или косвенно повлиять на восстановление после стихийных бедствий, объектную систему исследований необходимо расширить.

3.4.2 Исследование механизмов: точность идентификации остается ограниченной

Исследования механизмов отказа часто основаны на качественном суждении или анализе структурированных данных. Идентификация зависимостей и обнаружение законов передачи данных остаются слабыми. Многие исследования основаны на авторитетных документах или извлечении единой информации, не имеют перекрестной валидации и комплексного анализа разнородных данных из нескольких источников и обеспечивают недостаточную характеристику сложных зависимостей между взаимосвязанной инфраструктурой.

3.4.3 Моделирование: недостаточное описание физических механизмов и социальных эффектов

Существующие имитационные модели могут в некоторой степени описывать процессы физического сбоя объекта, но они, как правило, сосредоточены на повреждениях на уровне объекта. Они часто не имеют

всестороннего анализа доступности услуг для жителей и последствий социальной деятельности. Поскольку основная цель устойчивости городов заключается в обеспечении ежедневных потребностей жителей и непрерывности обслуживания, модели должны предусматривать такие аспекты, как доступность для жителей и предоставление услуг, для осуществления перехода от функционального прерывания к оценке социального воздействия.

3.4.4 Уровень стратегии: регулирование по-прежнему сосредоточено на инженерном ремонте

Текущие стратегии восстановления сосредоточены на инженерном ремонте и защитном подкреплении и еще не сформировали систематическую структуру восстановления, которая объединяет пространственную и временную координацию. Инженерные меры могут смягчить сбои в местной инфраструктуре, но они недостаточны для устранения каскадных воздействий в нескольких системах. Будущее планирование должно строить комплексные механизмы оптимизации пространственной планировки, резервирования объектов и координации управления, поддерживая скоординированное восстановление и быстрое восстановление потенциала обслуживания резидентов.

4 Перспективы исследований каскадных отказов в новых технологиях

Учитывая проблемы неполной идентификации взаимозависимости, недостаточного усовершенствованного моделирования критических объектов и слабых стратегий совместного планирования, искусственный интеллект предлагает новые исследовательские пути. В данной работе предлагаются три направления: повышение точности идентификации зависимости от инфраструктуры с помощью больших языковых моделей, построение киберфизических моделей многосистемной зависимости для моделирования сценариев и оценки рисков и реализация интеллектуального планирования, устойчивого к стихийным бедствиям, в рамках нескольких целей.

4.1 Использование больших языковых моделей для улучшения идентификации взаимозависимости инфраструктуры

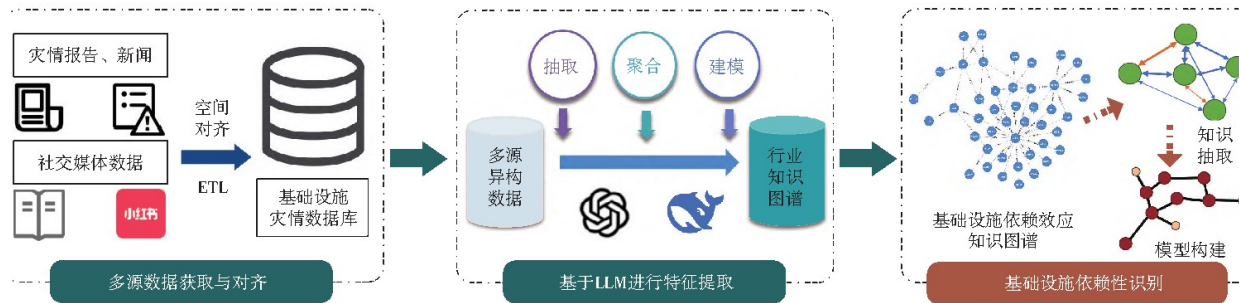
Текущий анализ взаимозависимости фокусируется главным образом на физических связях, и исследование скрытых зависимостей между системами, такими как связь, транспорт и социальная инфраструктура, остается недостаточным. Большие языковые модели могут быть использованы для добычи мультиисточников данных, включая исторические отчеты о стихийных бедствиях, новости, экспертные знания, изображения дистанционного зондирования, мониторинг датчиков и информацию в социальных сетях. Текстовые данные помогают выявить зависимости инфраструктуры при нормальной работе и необычных условиях бедствия, захватывать данные датчиков трафика и состояния работы объекта, а дистанционное зондирование интерпретирует пространственное распределение и физические связи.

На этой основе большие языковые модели могут проводить семантический анализ, извлечение знаний и построение графа знаний, создавая карту знаний взаимозависимости и делая структуры зависимостей запоминаемыми и визуализируемыми. Благодаря структурированному хранению и визуальному представлению модель может поддерживать идентификацию скрытых и неинтуитивных зависимостей и обеспечивать более прочную доказательную базу для принятия решений по планированию (рисунок 4).

机内部的级联失效现象，同时形成从城市整体视角出发、整合多类型基础设施及其对居民服务能力影响的研究框架。

空间协同优化，以能力承载力与信任协同机制的综合防灾调控体系，实现多系统协同恢复与居民服务能力的快速重建。

源数据进一步清洗、融合与知识抽取，构建基础设施依赖效应知识图谱，实现依赖关系的结构化存储与可视化呈现。



4 Улучшение идентификации взаимозависимости инфраструктуры посредством многоисточниковых данных и больших языковых моделей.

4.2 Создание моделей киберфизической городской многосистемной зависимости для моделирования сценариев и оценки рисков

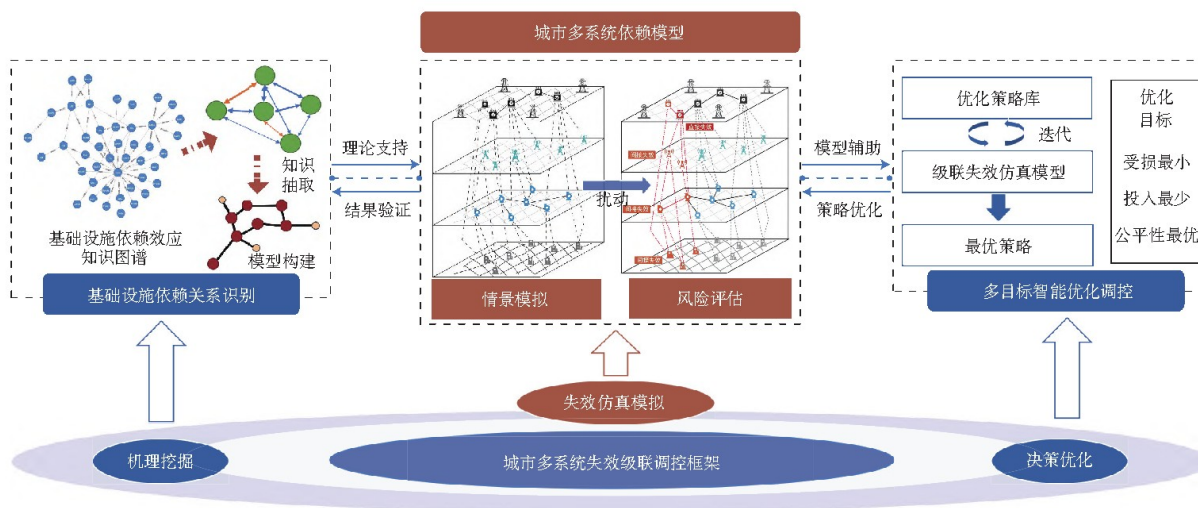
Для планирования, устойчивого к стихийным бедствиям, моделирование каскадных сбоев в нескольких системах является центральной проблемой. Чисто цифровые модели могут эффективно определять реакции макроскопической системы, но они испытывают трудности с воспроизведением мелкозернистых механизмов, а упрощение допущений модели может привести к искажению пороговых значений отказов и путей передачи. Физические модели могут восстанавливать реальные процессы, но их охват крупномасштабными сложными сценариями ограничен. Модель киберфизической зависимости может сочетать в себе преимущества того и другого.

Модель состоит из многосистемного моделирования зависимостей и физических экспериментальных модулей. Модуль моделирования берет за основу однослойные инфраструктурные сети и завершает конструкцию связи в соответствии с правилами зависимости, включая упрощенную топологию и моделирование основных сетей, таких как питание, водоснабжение и транспорт, а также определение законов потока, типов зависимости, ключевых атрибутов и основных параметров. Физический экспериментальный модуль проверяет результаты цифровой симуляции в контролируемых средах. Измерения из ветровых туннелей, резервуаров и другие эксперименты могут исправить отношения спроса и предложения, механические параметры и параметры уязвимости при экстремальных нагрузках, улучшая точность микроскопических механизмов отказа и предоставляя доказательства для многомасштабной калибровки модели.

4.3 Реализация интеллектуального планирования, устойчивого к стихийным бедствиям, в рамках нескольких целей

Существующее планирование в значительной степени опирается на основанный на опыте вывод и модельный анализ. При экстремальных бедствиях городские многосистемные каскадные сбои требуют структуры планирования, которая объединяет интеллектуальные алгоритмы и многообъективное принятие решений, переходя от пассивного реагирования к активному предотвращению. Как показано на фиг.5, ядром является построение интегрированного цикла майнинга механизмов, моделирования и оптимизации принятия решений. В майнинге механизмов определены зависимости от инфраструктуры, функциональные ассоциации и пути соединения. В моделировании многосистемные модели используются для теоретического построения, эмпирической проверки, моделирования сценариев и

оценки рисков. При оптимизации решений многообъективные алгоритмы генерируют оптимальные последовательности вмешательства в соответствии с такими целями, как минимальное нарушение, наименьшие инвестиции и оптимальная справедливость.



5 Планирование и нормативные подходы для городских многосистемных каскадных отказов.

Эта структура помогает решить две основные проблемы в текущем планировании предотвращения стихийных бедствий: отсутствие достаточных многосистемных механизмов взаимодействия и отсутствие количественного, точного и гибкого контроля. Он может поддерживать идентификацию рисков, функциональное восстановление и пространственное вмешательство и способствовать планированию, устойчивому к стихийным бедствиям, в направлении разведки и усовершенствованной модернизации.

5 Заключение

В этом документе рассматривается прогресс исследований по каскадным сбоям в инфраструктурных системах для устойчивого к стихийным бедствиям городского планирования. В нем систематически обобщаются три основных звена, а именно идентификация взаимозависимости, моделирование моделей сбоев и формулирование стратегии восстановления, а также анализируются каскадные механизмы и пути предотвращения для инфраструктуры в условиях стихийных бедствий. Точная идентификация многомерных зависимостей является основой для понимания механизмов каскадного отказа; системы моделирования сценариев и оценки являются научной основой для разработки целевых стратегий восстановления и повышения общей устойчивости системы.

Обзор также находит четкие ограничения в текущих исследованиях. Они недостаточно разбираются в многосистемных механизмах коллективного отказа, недопредставляют социальные функции и сервисные воздействия и уделяют ограниченное внимание пространственной координации при инженерном ремонте. Для преодоления этих проблем будущие исследования должны использовать многоисточниковые гетерогенные данные и большие языковые модели для построения графиков знаний о зависимости от инфраструктуры; создавать платформы киберфизического моделирования, которые интегрируют цифровое моделирование и физические эксперименты; и разрабатывать многообъективные модели принятия решений для распределения ресурсов и устойчивого вмешательства. По мере совершенствования среды данных и более глубокой интеграции интеллектуальных методов исследования устойчивости инфраструктуры будут играть все более важную роль в управлении безопасностью городов и устойчивом развитии.

Список литературы

- [1] State Council Disaster Investigation Team. Investigation report on the Henan Zhengzhou July 20 extraordinary rainstorm disaster [R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, 2022.
- [2] He Lei, Xie Ziang, Li Jie. Disaster-resilient cities: essential connotation, fractal structure and characteristic vectors [J]. City Planning Review, 2024, 48(7): 28-35.
- [3] Peng Chong, Zuo Peiwen, Li Yuewen, et al. Multi-risk coupling in urban space and resilient planning response [J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.
- [4] Zhai Guofang. Resilient responses to urban rainstorm-flood disasters from a planning perspective under climate change: key concepts, basic ideas and a general framework [J]. Urban Planning Forum, 2024(1): 29-37.
- [5] Dai Shenzhi, Liu Tingting, Gao Xiaoyu, et al. Compilation system and implementation mechanism of territorial spatial disaster prevention and reduction planning [J]. Urban Planning Forum, 2023(1): 48-53.
- [6] Yan Wentao, Ren Jie, Zhang Shangwu, et al. Shanghai resilient city planning: key issues, overall framework and planning strategies [J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 19-28.
- [7] Yan Wentao, Li Zihao. Resilience mechanism of urban spatial structure from the perspective of risk disturbance: theoretical framework and empirical methods [J]. Urban Planning International, 2023, 38(4): 1-10.
- [8] He Lei, Xie Ziang. Towards resilience: review and prospect of urban comprehensive disaster-prevention planning [J]. Urban and Rural Planning, 2021(3): 43-54.
- [9] Rinaldi S M, Peerenboom J P, Kelly T. Identifying, understanding and analyzing critical infrastructure interdependencies [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(6): 11-25.
- [10] Xie Lei, Zhou Pengfei, Yang Hongyi, et al. Exploring a resilience paradigm for lifeline engineering in coastal areas under climate-change impacts: the case of Ningbo [J]. Urban Planning Forum, 2022(8): 81-88.
- [11] Sun H J, Zhao H, Wu J J. A robust matching model of capacity to defense cascading failure on complex networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(25): 6431-6435.
- [12] Yang Xiao. Optimization scheme for urban road design based on reducing waterlogging [J]. Scientific and Technological Innovation, 2025(5): 150-153.
- [13] Li Wenyu, Hou Jingming, Li Xuan, et al. Optimal operation of urban rainwater detention tanks based on a stormwater numerical model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(5): 82-89.
- [14] Guo Li, Hu Jianing, Gu Qinghua, et al. Optimized deployment of green infrastructure for urban waterlogging response [J]. City and Disaster Reduction, 2024(6): 27-32.
- [15] Li Kailin. Design essentials and rectification-measure optimization for drainage pumping stations in old urban districts [J]. Fujian Construction Science and Technology, 2024(6): 140-142, 154.
- [16] Kong Yun, Cui Limin, Li Wei, et al. Key issues in municipal infrastructure planning from the perspective of public safety [C]//Urban Planning Society of China. People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2023 Annual National Planning Conference, 2023: 18.
- [17] Gong Qilong, Wang Xiaobin, Yin Haoqi, et al. Research on resilient municipal infrastructure from the perspective of territorial spatial planning [C]//Urban Planning Society of China. People's City, Planning Empowerment: Proceedings of the 2022 Annual National Planning Conference, 2023: 10.
- [18] Guo Dongjun, Wu Yanhua, Zhao Hongxu, et al. International experience and implications for critical infrastructure protection planning [J]. Urban Planning Forum, 2025(1): 111-119.
- [19] Dai Shenzhi, Feng Hao, He Lei, et al. Compilation mode of disaster-prevention planning in master-plan revisions of large Chinese cities: the case of Wuhan [J]. Urban Planning Forum, 2019(1): 91-98.
- [20] Chen Zhiqian. Preliminary exploration of municipal infrastructure planning strategies under the resilient-city concept [J]. City and Disaster Reduction, 2021(6): 36-42.

- [21] Han Yu, Huang Xiao, Ye Xinyue, et al. Enhancing urban resilience under climate change through adaptive disaster-prevention and mitigation planning for interconnected infrastructure systems [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(6): 78-87.
- [22] Dudenhoeffer D D, Permann M R, Manic M. CIMS: a framework for infrastructure interdependency modeling and analysis [C]//*Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. Monterey: IEEE, 2006: 478-485.
- [23] Friesz T L, Mookherjee R, Peeta S. Modeling large scale and complex infrastructure systems as computable games [M]//Friesz T L. *Network science, nonlinear science and infrastructure systems*. New York: Springer, 2007: 53-75.
- [24] Mendonca D, Wallace W A. Impacts of the 2001 World Trade Center attack on New York city critical infrastructures [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12(4): 260-270.
- [25] Monsalve M, de la Llera J C. Data-driven estimation of interdependencies and restoration of infrastructure systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 181: 167-180.
- [26] Zorn C R, Shamseldin A Y. Quantifying directional dependencies from infrastructure restoration data [J]. *Earthquake Spectra*, 2016, 32(3): 1363-1381.
- [27] Reed D A, Kapur K C, Christie R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure [J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174-180.
- [28] McDaniels T, Chang S, Peterson K, et al. Empirical framework for characterizing infrastructure failure interdependencies [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, 13(3): 175-184.
- [29] Zhou S, Ng S T, Yang Y, et al. Delineating infrastructure failure interdependencies and associated stakeholders through news mining: the case of Hong Kong's water pipe bursts [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(5): 04020060.
- [30] Gursan C, de Gooyert V, de Bruijne M, et al. Socio-technical infrastructure interdependencies and their implications for urban sustainability: recent insights from the Netherlands [J]. *Cities*, 2023, 140: 104397.
- [31] Basu N, Pryor R, Quint T. ASPEN: a micro-simulation model of the economy [J]. *Computational Economics*, 1998, 12: 223-241.
- [32] Dudenhoeffer D D, Permann M R, Manic M. Interdependency modeling and emergency response [C]//*Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*. San Diego: Society for Modeling and Simulation International, 2007: 1230-1237.
- [33] Bush B B, Dauelsberg L R, LeClaire R J, et al. Critical infrastructure protection decision support system (CIP/DSS) project overview [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [34] Conrad S H, LeClaire R J, O'Reilly G P, et al. Critical national infrastructure reliability modeling and analysis [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2006, 11(3): 57-71.
- [35] Poljansek K, Bono F, Gutierrez E. Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: the case of European gas and electricity networks [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(1): 61-79.
- [36] Duenas-Osorio L, Craig J I, Goodno B J, et al. Interdependent response of networked systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2007, 13(3): 185-194.
- [37] Ouyang M. Critical location identification and vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under spatially localized attacks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 154: 106-116.
- [38] Muhlhofer E, Koks E E, Kropf C M, et al. A generalized natural hazard risk modelling framework for infrastructure failure cascades [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 234: 109194.
- [39] Atat R, Ismail M, Serpedin E. Joint cascade vulnerability assessment of interdependent power-water infrastructures [J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5156-5167.

- [40] Rueda D F, Olivares D E, Oliveira L F M. Using interdependency matrices to mitigate targeted attacks on interdependent networks: a case study involving a power grid and backbone telecommunications networks [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 16: 3-12.
- [41] Ouyang M, Wang Z. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: with a focus on joint restoration modeling and analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 141: 74-82.
- [42] Wang S, Hong L, Ouyang M, et al. Vulnerability analysis of interdependent spatially embedded infrastructure networks under localized attack [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2017, 28(8): 1750089.
- [43] Wang N, Wu M, Yuen K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 239: 109478.
- [44] UNDRR. Addressing the infrastructure failure data gap: a governance challenge [R]. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2021.
- [45] Ouyang M, Hong L, Mao Z J, et al. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17(5): 817-828.
- [46] Beyza J, Ruiz-Paredes H F, Garcia-Paricio E, et al. Assessing the criticality of interdependent power and gas systems using complex networks and load flow techniques [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 540: 123169.
- [47] Wang N, Wu M, Yuen K F. A novel method to assess urban multimodal transportation system resilience considering passenger demand and infrastructure supply [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109478.
- [48] Loggins R A, Wallace W A. Rapid assessment of hurricane damage and disruption to interdependent civil infrastructure systems [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015, 21(4): 04015005.
- [49] Lee S, Choi M, Lee H S, et al. Bayesian network-based seismic damage estimation for power and potable water supply systems [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 197: 106796.
- [50] Kays H M I, Sadri A M, Muraleetharan K K M, et al. Modeling flood propagation and cascading failures in interdependent transportation and stormwater networks [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2025, 48: 100741.
- [51] Zhang W, Han Q, Shang W L, et al. Seismic resilience assessment of interdependent urban transportation-electric power system under uncertainty [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 183: 104078.
- [52] Fang Y P, Zio E. An adaptive robust framework for the optimization of the resilience of interdependent infrastructures under natural hazards [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(3): 1119-1136.
- [53] Wang K, Xu Z, Liu Y, et al. Resilience enhancement for multistate interdependent infrastructure networks: from a preparedness perspective [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2023, 72(1): 190-203.
- [54] Li Y, Lin J, Zhang C, et al. Joint optimization of structure and protection of interdependent infrastructure networks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 218: 108163.
- [55] Zhang C, Liu X, Jiang Y P, et al. A two-stage resource allocation model for lifeline systems quick response with vulnerability analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(3): 855-864.
- [56] Zhang C, Kong J, Simonovic S P. Restoration resource allocation model for enhancing resilience of interdependent infrastructure systems [J]. *Safety Science*, 2018, 102: 169-177.