

李晋, 张移. 大城市建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 143–148. [LI Jin, ZHANG Yi. Seismic Performance Investigation of Buildings and Disaster Situation Construction System in Big Cities[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 143–148. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.023.]

# 大城市建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统<sup>\*</sup>

李 晋, 张 移

(广东省地震局, 广东 广州 510070)

**摘 要:** 随着经济社会的发展, 人员和财富高度聚集于大城市或城市群, 而大城市内超高层建筑、重大工程和生命线基础设施项目众多, 部分老旧民房抗震能力低下, 地震灾害风险高而应对措施不足, 一旦发生中强以上地震, 可能造成城市系统性、社会性失稳。该文以广州为例, 建设以专业数据库为基础, 实景化、立体化、现代化的地震风险评估及建筑物抗震性能普查系统, 通过系统整合建筑物、生命线工程、地震危险性场地、公共设施等基础数据, 采用模块化、插件式的开发模式集成系统, 实现构建、分析与展示地震灾害、应急对策及救援行动的一体化情景。

**关键词:** 大城市; 建筑物; 地震灾害; 抗震性能排查; 风险评估; 灾害情景构建; 广东

**中图分类号:** P315; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0143-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.023

随着我国人口、财富和产业不断向城市群聚集, 大城市内超高层建筑、高速铁路、大型桥梁等各种类型的重大生命线工程设施众多、系统繁杂, 城镇部分老旧民房抗震能力仍旧低下, 有些城市聚集区处于我国地震重点监视防御区, 存在发生破坏性地震危险或受破坏性地震影响可能造成严重灾害损失, 面对强震灾害风险挑战的应对准备措施依然不足, 公众缺乏应对大震大灾的经验<sup>[1]</sup>。党和政府高度重视防灾减灾救灾能力建设, 正在有计划推进全国地震灾害风险调查和风险评估工作。

情景构建技术在灾害治理与管理领域的应用日趋深入<sup>[2-5]</sup>, 地震灾害情景构建已被多个国家应用于防震备灾工作。在我国开展大城市地震灾害情景构建也是防震减灾工作的一项重要任务, 许多专家在各自领域, 对其理论、方法、应用有所研究<sup>[6-11]</sup>。通过情景构建技术, 人们可以对地震造成的灾害影响有更为直观的认识, 进而更轻松地掌握地震灾害可能造成的影响, 更有效启发人们如何有效应对地震灾害<sup>[12]</sup>。

因此, 收集地震灾害风险普查的海量多源数据, 采集大城市实景三维数据, 建设高精度海量基础地理数据库、大城市三维实景数据库、地震灾害风险评估专业数据库以及防震减灾信息数据库等, 打造城市三维实景化、立体化、现代化的建筑物抗震性能普查及灾害情景构建系统, 实现对风险普查的海量多源数据的管理、应用、示范, 并构建、分析与展示地震灾害及其应急对策

行动的一体化情景。

在设定地震或模拟实际地震下, 系统动态分析与展示建筑物、生命线工程的损毁及分布情况、评估次生灾害影响、人员伤亡与经济损失情况等灾害场景, 以及模拟灾害的应急救援、医疗救治等应急处置措施。依据风险评估与分析, 平时为政府与公众提供城市防震减灾基础信息、建筑物、生命线工程、次生灾害源、避难场所等基础数据查询及防震减灾科普知识宣传教育服务。震后为政府提供灾害救援辅助决策服务, 系统分析和评估建筑物和生命线工程的地震易损性, 评估次生灾害影响以及人员伤亡与经济损失的情况, 并结合断裂、滑坡、液化等不利场地, 给出城市地震灾害潜在风险源, 建筑物、生命线工程等承灾体的风险点, 服务于国土资源利用和城市建设规划以及震后应急救援与灾后重建。此外, 还可为相关行业及其它灾害防御、城市科学化管理提供基础资料信息服务。

## 1 系统总体设计

建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统以二/三维数据为基础, 基于三维渲染、海量数据存取、客户端缓存、GIS空间分析、面向对象、Web-Service、虚拟现实、多源空间数据集成等多种高新技术进行研究开发, 并协同基础地理数据, 建筑

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-05-06 修回日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1901602-05)

第一作者简介: 李晋(1981-), 女, 汉族, 陕西榆林人, 高级工程师, 主要从事地震工程与地震灾害风险评估相关研究工作。

E-mail: dzlijin@163.com

物、生命线工程、次生灾害、人员经济等数据,形成具有多源数据的高精度专业数据库,建设基于地震风险评估的三维灾害情景构建系统,实现灾情评估、地震应急救援、应急响应处置过程的展示,为政府提供辅助决策、为社会公众提供地震应急避难指引等服务(图1)。



图1 系统 UI 设计图

### 1.1 总体架构

基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统软件采用云技术框架,基于 B/S 架构,具有良好扩展性和灵活性。系统总体框架如图2所示。

软件总体框架由硬件环境层、数据采集层、数据存储层、系统服务层、三维实景应用层等部分组成。

数据采集层,采用多种手段、设备采集系统所需的多源数据。

数据存储层,从“地震基础数据信息资源整合与处理”开始,接入(数据交换)应急数据相关单位

或人工采集基础信息资源,整合并建立灾害情景基础数据信息资源库。

系统服务层,基于数据存储层提供的灾害情景信息资源数据库,提供各种专业服务,包括数据抽取、专题图制作、开发服务及应用拓展等。

三维实景应用层,基于系统服务层提供的专业服务,支撑系统整体的应用服务。

### 1.2 技术实现方案

系统涉及到数据工程和系统开发工程,首先对基础数据进行整理建库,再使用无人机倾斜摄影拍摄,建立实景三维模型作为系统的地图基础数据,真实的反映地物的实际情况,然后以二、三维融合一体化数据为基础搭建三维系统平台,最后在系统的支撑下,实现地震灾害三维展示,包括地震危险性分析、地震风险评估、辅助决策、协同办公等功能。

系统总体设计采用 B/S 方式设计,通过 Web-GL 技术实现前端的三维呈现。从使用逻辑来看,系统以服务器为基础,一方面为数据标准化管理提供数据存储目录;另一方面,向 WEB 端提供数据访问和展示服务。

地震灾害情景构建平台各组成系统的技术特点和职责有较大差异,但每个组成系统都要遵循 MVC 架构模式和 SOA 面向服务架构,并运用 Web Service 技术实现前后端数据的交互和展示。

### 1.3 系统功能设计

系统功能设定是以三维展示为基础,在展示的基础上,按照地震灾害风险评估的业务流程,进行业务功能的层层递进开发。功能逻辑关联如图3所示。

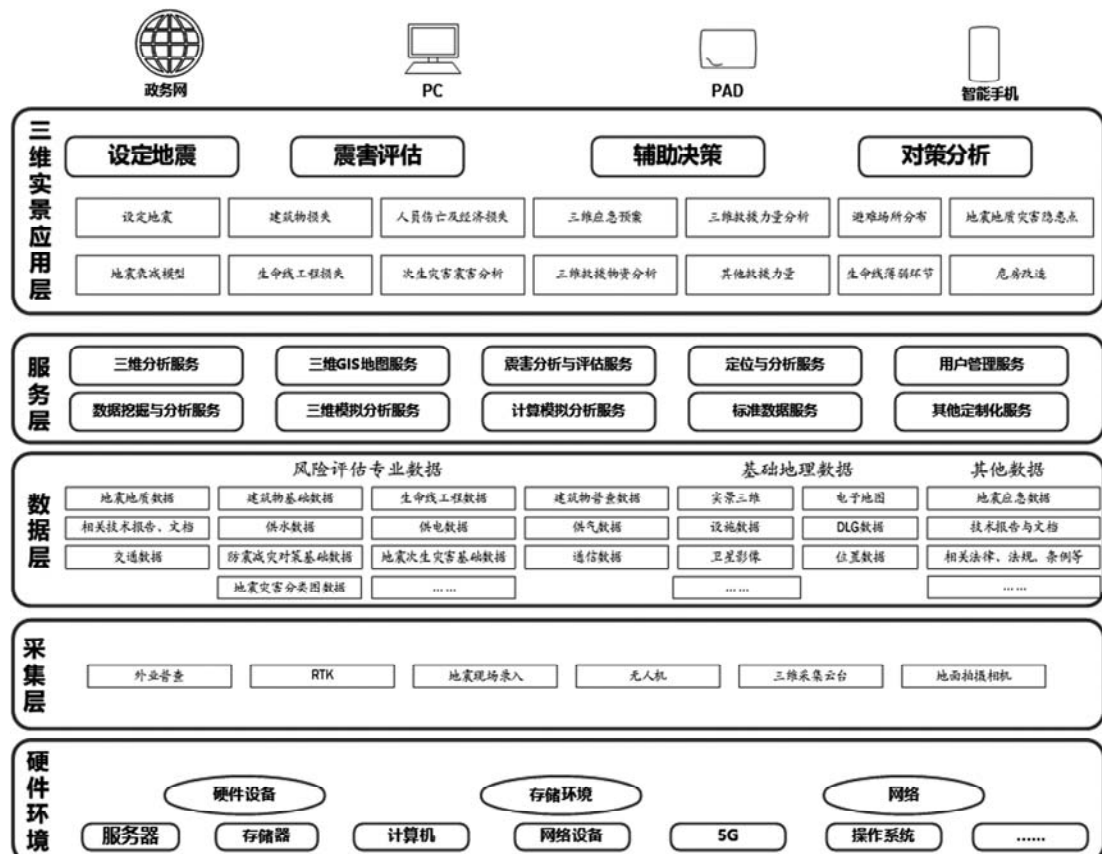


图2 系统总体架构图

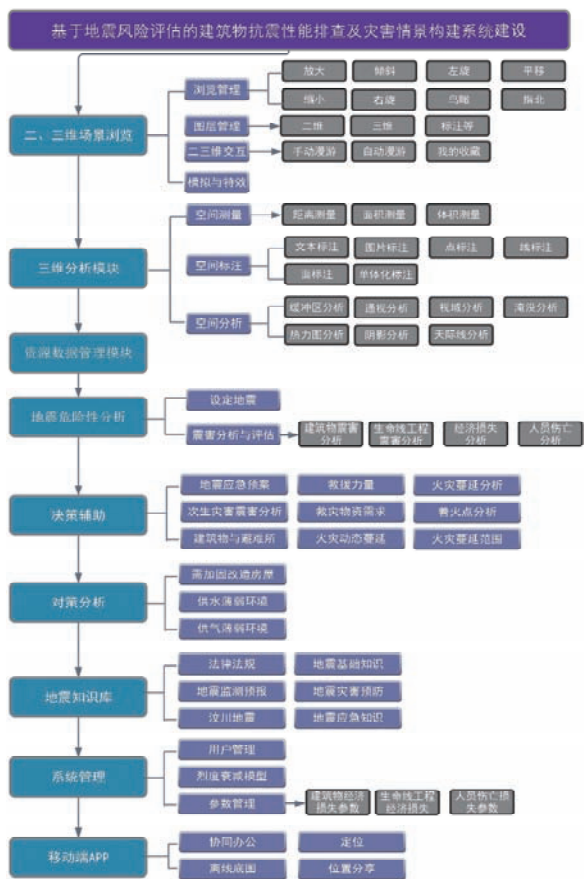


图3 系统三级功能逻辑关联图

## 2 系统关键技术

### 2.1 重点技术分析

基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统有四项重点技术。一是航空三维实景，它是系统的核心基础地图数据，也是系统的特点和亮点。航空三维实景提供真实的基于图像纹理的全区范围三维数据，内容信息丰富，包含城市鸟瞰信息和建筑物等侧面信息，真实三维是智慧城市信息化基础设施的必要组成部分，提供统一的空间信息基础；二是数据更新，数据是系统运行的血液，空间地理信息和业务数据都会发生变化，尤其是业务数据变化频率更高，因此，为了保持数据的时效性，在平台层面提供数据更新的工具，使业务部门可以自己维护本部门数据；三是地图服务，系统提供工作区统一的二维及三维地图服务，能够基于服务接口快速完成地图模块的搭建，为地震应急、决策指挥等应用系统提供统一的地图支持，引领政府各部门基于三维时空信息开展行业深度应用；四是自动上图展示，提供平台和工具给使用者调用，将各行业不断丰富数据汇聚到本系统中，提供快速上图服务，推动各部门共同建设、丰富平台能力与数据，打造协同运营、良性循环的平台生态环境。

### 2.2 难点分析

#### 2.2.1 多源数据融合展示

系统包含无人机采集的区域三维实景、地面基础二维数据、遥感影像、专业专题数据等多个图层，数据类型各有不同，空间数据与一般数据

并存，对此多结构多类型的数据进行协同显示，以及二维、三维数据同系统显示是本系统难点之一。在实施过程中，将通过空间匹配技术及三维实景数据分级分层显示的方法，解决多源数据融合展示的难点。制定多源异构数据空间匹配技术标准，进一步拓展多来源、多格式、多时空、多比例尺、多语义性的源数据融合展示，使多源数据真正形成相互关联、相互衔接、相互协同的一张图。

#### 2.2.2 跨平台地图应用

为了方便用户使用，提升用户使用体验，系统应用环境主要是通过互联网及移动互联网对地图进行展示及应用，终端设备包括PC机、手机、平板电脑等，操作系统包括Windows、Android、iOS等，系统需要支持用户跨终端地图应用。

#### 2.2.3 地图数据在线更新

地图数据采集与处理具有很强的专业性，为了保持数据的现势性，系统平台支持矢量数据等进行在线更新，支持用户通过多种渠道将采集生成的数据自主进行更新。在项目实施过程中，将通过网格分块、控制点匹配等技术实现更新数据与原始数据的配准与更新。

### 2.3 系统关键技术和创新点

#### 2.3.1 超大城市市场景实景三维自动化重建技术

基于武汉大学自主研发的重建超算引擎G-Engine，具备成熟稳健的空三自由网平差算法、影像自动增强、智能特征提取、匀光匀色等多步骤深度优化能力，海量数据分区块联合处理能力，使得模型生产效率更高，模型精度与质量更佳。

#### 2.3.2 海量数据轻量化加载展示调度技术

在数据生产阶段，采用内容感知重建，在不影响几何精度的情况下，提高建模效率，减少模型数据量，同时采用几何和纹理优化技术，简化模型几何结构，增强纹理显示效果。在数据转换阶段，将模型转换成适用于网络发布与快速检索的多次层次细节模型格式，提升模型数据在网络传输与检索效率。在服务发布阶段，将转换后的模型数据进行分布式存储和缓存调度，利用服务调度预加载技术，提升服务调度效率。在应用加载阶段，根据比例尺和角度选择性加载模型有效的层次和细节，采用LOD技术，根据模型的不同复杂程度和加载特点，对模型的不同区域采取不同细节的描述和绘制，实现超大面积实景三维数据秒级加载。

#### 2.3.3 多源异构数据协同展示技术

融合实景三维数据、遥感影像数据、地理基础数据、地震小区划数据、震害预测专题数据等不同来源、格式、比例尺的源数据，进行多源异构数据协同显示。

#### 2.3.4 基于真实数学预测模型的地震情景仿真构建技术

根据真实地震传播机制和区域地震构造背景确定合理地震动输入场，根据地震模拟参数引入数学评估模型，对地震灾害动态发展进行模拟，并实现三维可视化。应用优选指标体系和优化决策理论算法构建优化决策模型，对工作区内的建筑物、生命线、次生灾害源等因素进行分析，分析在不同地震影响下，建筑物、生命线的破坏情况，与工作区可能出现的人员伤亡情况和经济损失，为震前基础工程加固与震后应急指挥决策提供依据。



### 3 系统集成

基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统的部署是基于 B/S 模式,在不同的部署模式下,其应用系统集成时也会有所不同。

系统采用分层架构集成基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统,包括数据支撑层、应用服务层、Web 应用层和用户层。数据层以实景三维模型、基础地理底图为基础底座,搭载灾情构建的建筑物、生命线工程数据,形成专题数据库;服务层基于数据层的灾害情景信息数据库提供对外服务,包括数据访问、专题图制作、应用扩展接口以及开发服务等。在 web 应用层集成各类地图服务与功能构件进行地震模拟、震害评估、辅助决策等业务场景归类和整合,满足在政务网、web 浏览器、移动端等多终端用户的快速登录、访问、浏览与交互(图 4)。

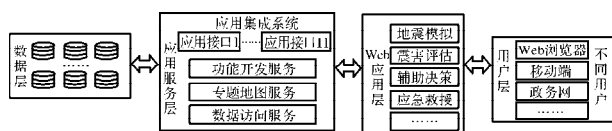


图 4 基于 B/S 模式集成方式图

#### 3.1 集成要求

为了对各应用开发子系统的功能、用户权限和模型库统一管理,各子系统需要进行有效集成,统一用户界面将是不可或缺的要求,系统集成时在系统框架、具体的用户界面等方面都要求界面统一,样式一致。在对基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统的各综合应用子系统进行集成时,必须将各子系统的需求和功能进行规整,并对各子系统的功能构件进行归类,以便系统集成管理。集成的各综合应用子系统与系统的关系既相互独立,又相互衔接。

基于地震风险评估的建筑物抗震性能排查及灾害情景构建系统支持动态扩展功能,即当各综合应用子系统的功能模块发生变化时,相应功能随各子系统的功能模块变化而变化。各综合应用子系统在集成时充分考虑各子系统在运行时的计算时间、对数据 I/O 量等性能要求,对各子系统各项参数进行合理配置,使整个 GIS 综合管理信息平台的效率达到最优。

#### 3.2 集成内容

系统功能集成主要是为实现地震灾害风险评估以及建筑物抗震性能排查的各专业子系统功能的扩展、共享、开发、集成与管理。形成标准的对外数据信息服务以及与其他业务系统互通的接口,为扩展应用系统提供基础保障。

系统模型库集成主要是为实现各应用模块的规范管理与共享。本系统的风险评估模型库的集成,主要是通过模型库管理器提供的功能来实现,以此达到对模型的入库、集成、查询、修改、获取等功能的集成管理。

### 4 系统平台的实现

采用地震灾害风险评估技术,开展建筑物和

生命线工程地震灾害过程模拟,给出设定地震下建筑物及生命线工程易损性结果,评估地震次生灾害、人员伤亡、经济损失,建立不同烈度地震下的大城市三维震害情景,在此基础上制定针对不同等级地震的应急处置措施和具体方案,给出救援物资需求、分析医疗救护力量、分析灾民安置与避险避难方案等具体行动处置措施,并将成果集成到地震灾害情景构建云平台。实现在不同地震作用下的地震灾害情景、灾害处置对策以及救援力量物资的分析与展示功能,同时通过多种媒介和手段进行宣传和推广。

#### 4.1 三维综合展示

三维综合展示系统基于基础二、三维数据,提供相关工具在三维实景地图的基础上对地图化的业务数据进行地图查看、属性查看、空间分析等工作。实景地图以共享数据为基础,提供内容管理、视图管理、浏览管理、统计分析、测量工具、标注工具、分析工具、演示工具等(图 5)。

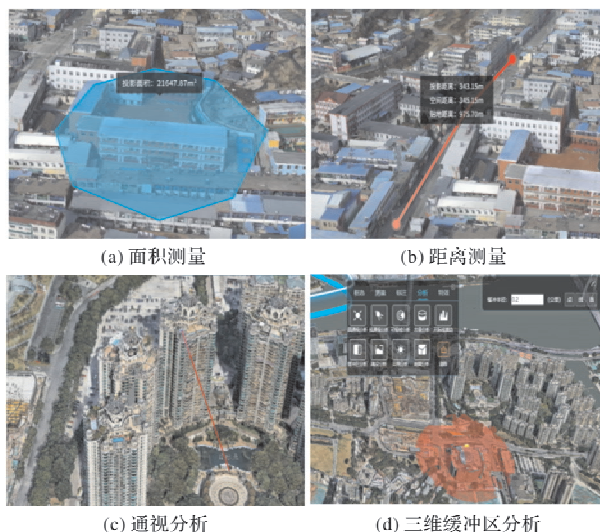


图 5 三维综合展示功能

#### 4.2 灾害情景构建

地震灾害情景构建以三维数据为基础,通过模拟计算震后的建筑物、生命线工程的破坏情景,推演次生灾害影响等,动态模拟大城市在地震发生后的受灾情况,系统可全局、立体、直观的展示出城市受灾情景,为震后应急救援提供有效地帮助。

(1)数据概览。数据概览支持全研究区域、多种交互方式的单体建筑物数据、生命线工程、次生灾害、经济人口、对策分析等基础数据查询及展示,其中建筑基本信息包括建筑年代、地理位置、结构类型、高度、层数、设防等数据以 3D 方式直观展示(图 6)。

(2)地震危险性分析。查看分析测区相关的三维地震地质构造,包括地貌、工程地震场地条件、地震小区划、砂土液化预测、工程地质分布和岩土分布等,点击可以查看对应的专题图信息。

(3)震害分析评估。在设定地震参数或选择典型地震案例后,基于所给参数和地震烈度模型,基于三维空间数据,模拟地震烈度图,以此完成对建筑物、生命线工程、次生灾害源的震害分析,并对人员伤亡、经济损失、高危害区域做出评估,为救援力量、救援物资需求提出辅助参考(图 7)。

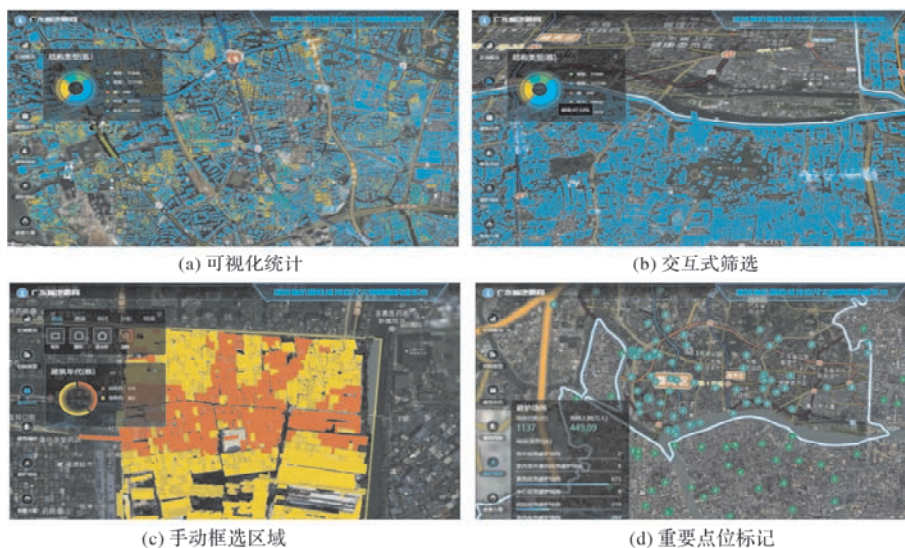


图6 数据概览功能

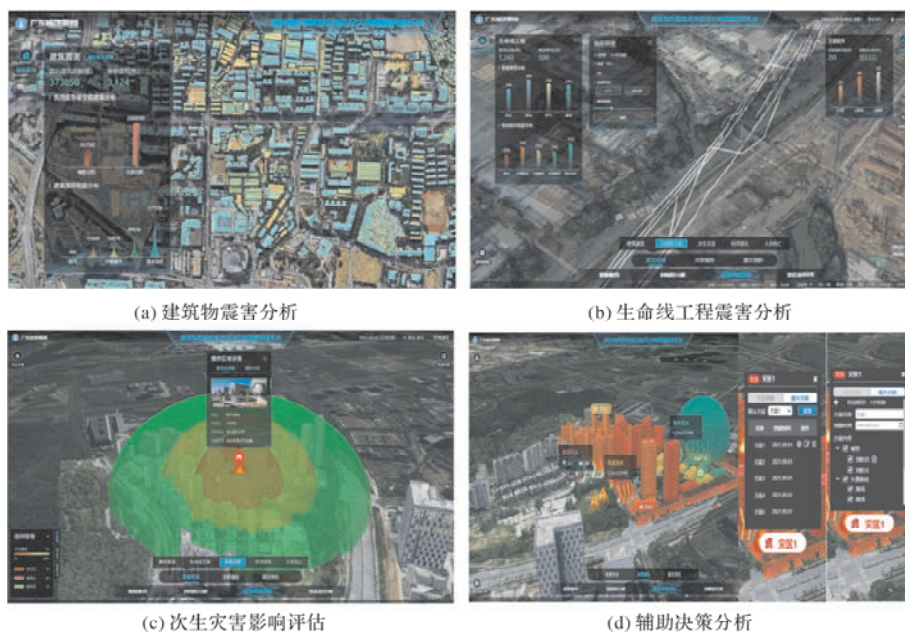


图7 系统部分功能

**建筑物震害模拟。**基于数据模型, 提供多种统计方式, 包括所有建筑数量、重要建筑数量, 以及分析各烈度范围内建筑物的受损数量、建筑破坏程度分布情况。在输入地震信息后, 可对地震区域范围内受灾建筑楼宇群进行地震晃动模拟, 以三维可视化方式对建筑受力状态进行仿真, 可为人员疏散、建筑结构稳定性提供高效直观评估。

**生命线工程震害模拟。**对生命线工程进行震害预测, 包括地下系统: 供水、供气、电力、通讯, 以及交通设施: 主干道、桥梁、隧道。

**次生灾害震害评估。**主要评估危险化学品、易燃易爆品、油库、加油站等容易造成二次灾害的地物, 在地震中可能遭受的损失, 及其对周边的影响。

**经济损失与人员伤亡评估。**依据建筑物和生

命线工程的风险评估结果, 对地震造成的经济财产损失与人员伤亡进行评估, 并按照行政区、街道和烈度范围进行分别统计。

(4) **辅助决策。**开展地震灾害救援力量需求评估、救援物资需求以及次生灾害震害等应急预案的调用和分析, 提供地震灾害应急辅助决策功能。根据地震结果识别重点灾区, 统计灾区受灾情况, 并支持设定相应的救灾方案和地图标绘。

(5) **震灾预防。**运用三维数据可视化显示地震数据三维空间信息及时空变化关系的状况。根据建筑物、生命线工程震害情况, 提供建筑处理建议和管线薄弱环境, 支持根据街道和处理方案进行分类统计。

(6) **地震知识库。**汇聚历史地震目录、地震法律法规, 借助多媒体形式, 为公众提供地震基础知识、防震应急救护、灾害预防等科普信息,



从政府到人民,从科研到公众的全方位地震教育覆盖。支持资料查询、传播、下载、打印、输出等功能,传播形式包括文本、图片、视频等。

#### 4.3 系统管理

系统管理员可对系统的资源和运行进行配置、控制和管理,包括用户身份管理、系统资源配置、系统运行的异常处理,支持管理本地和(或)异地灾难备份与复盘等。同时具备用户管理、组织机构管理、角色管理、权限管理、审批管理、日志管理、模型参数管理以及元数据管理等功能。

### 5 结束语

基于地震风险评估的大城市建筑抗震性能排查与情景构建系统在集成基础电子地图、遥感影像图、高精度实景三维数据、建筑物基本信息、生命线系统数据、次生灾害数据等多源数据的基础上,开展地震灾害风险评估模型分析计算,推演评估地震灾害情景,并构建超大城市实景三维孪生底座,实现对城市地震灾害情景进行三维仿真模拟,可服务于震灾防御和城市规划建设,促进城市治理体系和治理能力现代化。应用优选指标体系和优化决策理论算法构建优化决策模型,评估城市地震灾害风险薄弱环节,可服务于决策者指挥地震灾害救援,有效提高救援能力和救援效率。

### 参考文献:

- [1] 高孟潭. 国家防震减灾能力提升与挑战[J]. 城市与减灾, 2017(2): 1-7.
- [2] 王海鹰. 基于情景构建的市县级地震应急工作程序探讨[J]. 城市与减灾, 2017(2): 58-62.
- [3] 罗炼, 沈建林, 张石林. 应急演练突发事件的情景构建研究和应用[J]. 安全, 2020, 41(1): 9-16.
- [4] 朱伟, 王晶晶, 杨玲. 城市重要基础设施灾害情景构建方法与应急能力评价研究[J]. 管理评论, 2016, 28(8): 59-65.
- [5] 张超, 王皖, 徐凤娇, 等. 城市公共安全风险评估情景构建标准研究[J]. 标准科学, 2020(6): 25-30.
- [6] 中国地震局. 关于2016年度《大中城市地震灾害情景构建》重点专项项目申报的通知[EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/465/539/20160426145013284155723/index.html>.
- [7] 王东明, 陈敬一, 高杰. 基于地震巨灾情景构建的应急救援演练虚拟仿真系统架构与设计[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 18-34.
- [8] 陈波, 王芳, 肖本夫. “情景-应对”型理论体系的发展及其在地震灾害应急管理中的应用探讨[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(4): 605-616.
- [9] 张文静, 宋思然, 王丽莉. 地震重大事件情景构建探讨研究[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 298-301.
- [10] 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆, 等. HAZ-China地震灾害损失评估系统研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S2): 294-300.
- [11] 熊琛, 许镇, 陆新征, 等. 城市区域建筑群地震灾害场景仿真的高真实感可视化方法研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(11): 45-51, 90.
- [12] 苏桂武, JANISE Rodgers, 田青, 等. 参与式渭南地震情景构建: 中国地震风险对策的行动研究示范[J]. 地震地质, 2020, 42(6): 1446-1473.

## Seismic Performance Investigation of Buildings and Disaster Situation Construction System in Big Cities

LI Jin, ZHANG Yi

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** With the development of economic society, people and wealth are highly clustered in big cities or urban agglomerations. However, there are many extra-high buildings, major projects and lifeline infrastructure projects in big cities, the anti-seismic capacity of some old houses is low, earthquakes risk is high while response measures are insufficient. Once a moderate-strong earthquake occurs, it will cause systematic and social instability. Taking Guangzhou as an example, a realistic, three-dimensional, and modern seismic risk assessment and seismic performance census system is built based on a professional database of seismic assessment risks, and integrates basic data such as buildings (structures), lifeline engineering, earthquake hazard sites, and public facilities through the system. The modular, plug-in development model is used to integrate the system to build, analyze and display the integrated scenario of earthquake disasters, emergency responses and rescue operations.

**Keywords:** big cities; buildings; earthquake disasters; seismic performance investigation; risk assessment; disaster situation construction; Guangdong