

王小东, 栗春晨, 宋圣楠, 冯键, 翟亮亮, 熊政辉, 马腾飞, 2021. 基于多租户的高性能地震保险损失评估 SaaS 云平台设计与实现. 震灾防御技术, 16 (2): 253—262. doi: 10.11899/zzyf20210204

基于多租户的高性能地震保险损失评估 SaaS 云平台设计与实现¹

王小东¹⁾ 栗春晨¹⁾ 宋圣楠²⁾ 冯 键²⁾ 翟亮亮¹⁾ 熊政辉³⁾ 马腾飞¹⁾

1) 中再巨灾风险管理股份有限公司, 重庆 400023

2) 中国再保险(集团)股份有限公司, 北京 100033

3) 中国再保险(集团)股份有限公司博士后工作站, 北京 100033

摘要 地震巨灾风险的特点是低频高损, 历史震害数据缺乏、风险暴露快速变迁等因素导致基于大数定理的费率厘定方法无法针对各区域不同建筑类型的风险暴露进行精细化定价。本文基于“五代图”潜在震源区模型的随机事件集解决观测数据不足的问题; 并使用“五代图”所采用的地震动参数衰减关系模型与工程易损性方法计算地震事件对风险暴露造成的损失, 从而计算费率厘定、地震风险管理需要的必备参数。本文采用云计算平台的弹性伸缩计算技术, 实现动态按需分配计算资源, 满足多用户并发使用的业务需求; 同时采用以业务数据为单元的数据隔离方案, 构建支持多租户的高性能地震保险损失评估 SaaS 云平台。

关键词: 地震保险损失 风险评估 巨灾模型 费率厘定

Design and Implementation of Multi-tenant SaaS Cloud Platform for High-Performance Seismic Insurance Loss Assessment

Wang Xiaodong¹⁾, Su Chunchen¹⁾, Song Shengnan²⁾, Feng Jian²⁾, Zhai Liangliang¹⁾,
Xiong Zhenghui³⁾ and Ma Tengfei¹⁾

1) China Re Catastrophe Risk Management Company Ltd., Chongqing 400023, China

2) China Reinsurance (Group) Corp., Beijing 100033, China

3) Postdoctoral Workstation of China Reinsurance (Group) Corp., Beijing 100033, China

Abstract Earthquake catastrophe risk is characterized by low frequency and extreme severity. Due to the lack of historical earthquake loss data and the rapid changes of exposure, it is difficult to price the various exposure in different regions precisely based on the law of large numbers. And in this paper, the problem of insufficient data is solved by the application of the random event set based on the potential seismic source zones of the Fifth Generation National Seismic Zoning Map. The losses caused by those earthquakes are calculated by utilizing the Ground Motion Prediction Equation (GMPE) adopted by the Fifth Generation National Seismic Zoning Map and classic engineering vulnerability methods. Based on the output, we calculate the necessary parameters for insurance pricing and risk managing of seismic catastrophe. To meet the concurrent use needs of a large number of users, we implement the dynamic on-demand management of computing resources by adopting the elastic scaling computing technology based on the cloud computing platform. And to ensure the separation and security of user data, we isolate and split the data by the exposures uploaded by users. By the methods above, we implement a multi-tenant high-performance seismic insurance loss assessment SaaS cloud platform.

1 基金项目 国家重点研发计划 (2018YFC1504604)

【收稿日期】 2021-04-12

【作者简介】 王小东, 男, 生于 1988 年。硕士。主要从事巨灾损失评估模型研发方面的工作。E-mail: wxd_mail@163.com

【通信作者】 冯键, 男, 生于 1972 年。博士。主要从事企业数字化转型方面的工作。E-mail: fengj@chinare.com.cn

Key words: Earthquake Insurance Loss; Risk Assessment; Catastrophe Model; Pricing

引言

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与地中海喜马拉雅山地震带交汇处，因此地震灾害频发。1990—2020年，成灾地震造成直接经济损失11210.81亿元（楼宝棠，1996；国家地震局等，1996；中国地震局监测预报司，2001；中国地震局震灾应急救援司，2010，2015），其中2020年我国大陆地区共发生5.0级以上地震20次（5.0~5.9级地震17次，6.0~6.9级地震3次），造成5人死亡，30人受伤，直接经济损失约18.47亿元（林向洋等，2020；应急管理部国家减灾中心，2021）。从国际经验来看，自然灾害的商业保险赔付金额约占直接经济损失的30%~40%，而我国商业保险赔付率尚不足1%（冯键，2019）。推动地震巨灾保险发展的技术核心在于对地震风险的量化与管理。孟生旺等（2018）使用极值理论对地震灾害事件进行了统计分析，建模并测算地震风险保费。牛方曲等（2012）基于全国县级尺度人口、房屋结构数据库、中国地震烈度区划图和地震对房屋的破坏参数，建立了区域中长期房屋震灾损失评估系统。陈洪富等（2013）基于WebGIS平台，将已有震害预测、地震应急指挥、地震现场损失评估、灾后科学考察和恢复重建等业务功能集成为有机整体，建立了综合性地震灾害损失评估系统。熊政辉（2019）结合我国地震风险特点和保险行业需求，构建了具有良好可拓展性的地震巨灾模型EQCat。

本文基于前人研究成果，结合地震巨灾保险定价与风险管理需求，构建多租户的高性能地震保险损失评估SaaS（Software as a Service, 软件即服务）云平台。该平台通过集成风险暴露模块、致灾因子模块、工程易损性模块、金融模块，实现了地震保险损失评估功能；通过采用快速随机事件筛选方法、针对地震事件影响场特征设计的数据结构与检索方法等实现了高性能的计算引擎；采用基于数据隔离方案的多租户模式，保证用户数据安全；设计基于业务单元的资源弹性伸缩方法，以满足保险业业务集中需求，且可针对用户不同需要进行配置，提供个性化使用需求。

1 云平台技术架构

传统的地震风险评估软件或巨灾模型常以软件授权的方式交付用户。基于软件授权的单机模式在软件使用率低时无法及时释放计算资源，且业务集中，需大量使用时无法动态增加计算资源，从而导致计算资源的浪费，同时又无法满足地震风险快速评估的商业化需求。而云计算技术可通过虚拟化技术合理管理计算资源，打破传统单机模式的局限性。本文在综合分析国内外地震巨灾风险评估的需求后，基于云计算技术，以每次上传的风险暴露为单元进行数据隔离、计算引擎隔离，实现了多租户的地震风险评估SaaS云平台。根据用户提交的任务优先级、数量，动态增加或销毁计算节点，满足用户不同的算力需求。地震风险评估SaaS云平台系统架构如图1所示。

1.1 展现层

根据多租户、多用户弹性计算的业务需求，采用B/S架构构建地震风险评估系统。采用前后端分离的架构思想，使用基于HTTP协议的API（Application Programming Interface, 应用程序接口）将展现层、服务层分离。展现层基于SPA（Single Page Web Application, 单页面应用）架构，使用主流的H5+JavaScript技术、WebGL等GIS可视化技术构建交互友好的用户界面。展现层为用户提供高效的风险暴露上传接口、风险暴露数据可视化展示界面、地震保险损失评估模式选择界面、地震保险损失评估参数设置界面、地震保险损失评估结果展示界面、风险累积和保险方案设计界面。

1.2 服务层

服务层即后端服务器层，根据展现层的请求，与数据层、算力层交互并为展现层提供API接口。展现层与服务层采用易于扩展的微服务架构，可通过容器技术或者虚拟化技术实现资源弹性伸缩与负载均衡。

1.3 数据层

根据高性能计算及多租户的需求，在深入分析业务特点的基础上，系统按照用户上传的业务数据（即风险暴露数据）进行分库、按“分析”（即地震保险损失评估计算）将不同分析结果存放在不同数据库表中，达到数据隔离与数据库横向扩展的目的。

数据层包括元数据库与业务数据库。元数据库用于存储业务数据的数据库地址、配置信息等，不包括风

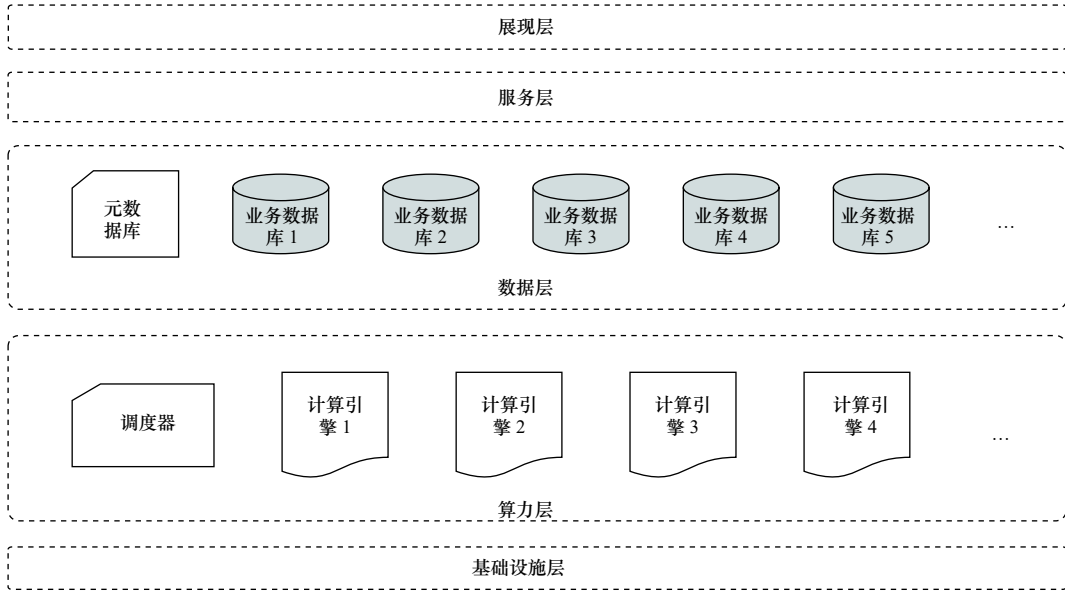


图 1 地震保险损失评估 SaaS 云平台技术架构

Fig. 1 Technical architecture

险暴露数据与计算结果数据，同时采用一主一备的高可用架构。业务数据库中有若干实例，实例间交互隔离，当用户上传风险暴露数据时，系统会根据元数据库的配置信息，在指定的服务器节点上创建数据库实例作为业务数据库，用于存储风险暴露数据。系统根据多个数据库服务器节点的负载与存储情况，可调整业务数据库的创建策略，实现数据库的负载均衡，从而避免访问集中于单个服务器节点造成的卡顿与其他服务器节点的资源浪费。

1.4 算力层

算力层为系统提供地震保险损失评估分析的算力，包括调度器与计算引擎。云计算技术（包括虚拟化、容器化技术等）的弹性伸缩通常是基于 CPU 或者内存的使用率调整服务器资源，如 CPU 在指定时间间隔内使用率超过设定的阈值会增加新的服务器节点。但地震保险损失评估计算涉及大量科学计算，属于 CPU 密集型计算场景。一旦开始计算，必须极大程度地利用 CPU 与内存资源，这与传统的 SaaS 应用场景不同。同时基于多租户的地震保险损失评估系统，要求用户间对计算资源的使用不能相互影响，用户须有独享的使用体验。因此需要有针对性地设计调度器的资源分配逻辑。

调度器将不同用户提交的任务赋予不同优先级，并提交到任务队列，分别分配计算引擎。调度器维护 1 套可配置的计算引擎调度策略，并根据该策略利用虚拟化技术或容器技术增加或销毁计算引擎节点。调度器可根据配置的调度策略，维护多个不同的任务队列，实现不同性能的计算资源的调配，满足客户对算力的个性化需求，如图 2 所示。

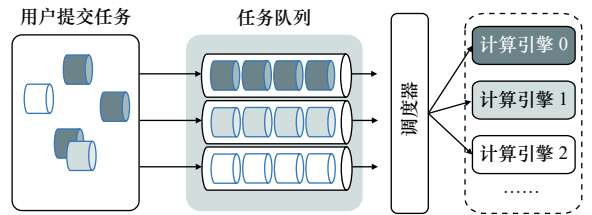


图 2 任务队列的计算引擎调度策略

Fig. 2 Engine scheduling strategy based on task queue

计算引擎实现了地震保险损失评估系统的核心算法，集成了风险暴露数据计算、地震危险性计算、工程易损性计算、费率厘定及风险累积计算等算法，并将计算结果保存到风险暴露数据对应的业务数据库中。

1.5 基础设施层

基础设施层使用云计算技术，为展现层、服务层、数据层、计算层提供稳定的运行环境，并通过虚拟化技术、容器化技术为用户提供动态分配、销毁、管理计算资源的服务。

2 云平台功能架构

为满足地震巨灾保险费率厘定的需求，地震保险损失评估 SaaS 平台提供了风险暴露处理模块、地震保险损失评估模块、损失结果汇总模块、费率厘定模块及系统管理模块，云平台功能架构如图 3 所示。

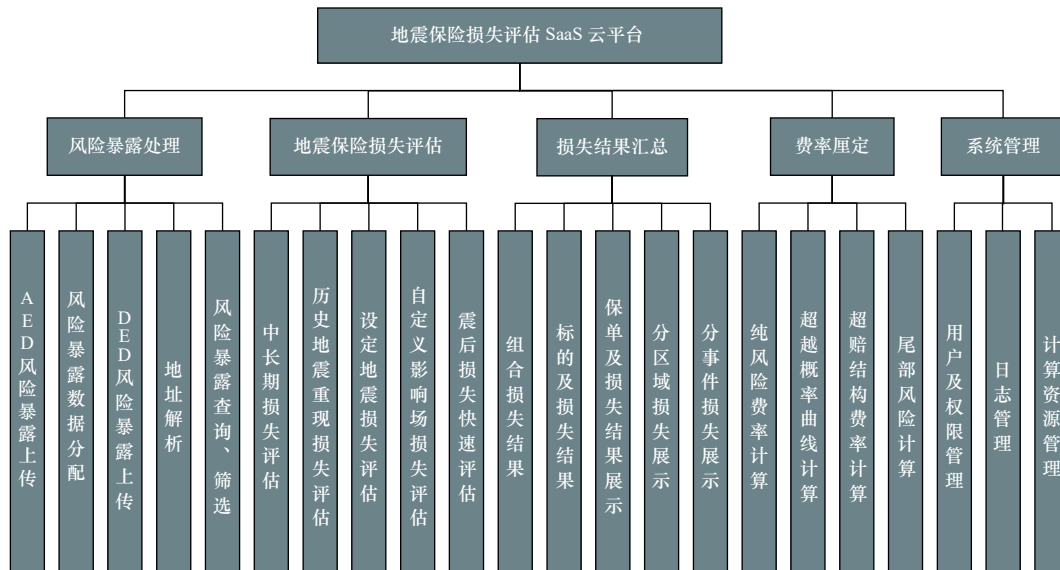


图3 地震保险损失评估 SaaS 云平台功能架构

Fig. 3 Functional architecture

风险暴露处理模块包括可视化的交互界面与 API 接口，可为用户提供风险暴露上传接口。用户通过该接口将待评估的风险暴露上传到平台，同时平台可对风险暴露数据进行地址解析、汇总风险暴露数据（Aggregate Exposure Data, AED）的拆分。

地震保险损失评估模块包括中长期损失评估、历史地震重现损失评估、设定地震损失评估、自定义影响场损失评估等，可为用户提供多种损失评估模式，如图 4 所示。



图4 多种损失评估模式

Fig. 4 Multiple options for loss assessment

损失结果汇总模块将地震保险损失评估模块计算结果按照保单、区域、事件等多维度进行汇总计算，用户可从多维度进行结果分析。此模块采用 WebGL 等 GIS 可视化渲染技术进行展示，如图 5 所示。

费率厘定模块在损失结果汇总模块的基础上用于纯风险费率、超越概率曲线、超赔合约费率的计算，以列表和图形展示不同形式的超越概率曲线，用户可对损失结果进行深入分析。费率厘定模块如图 6 所示。

系统管理模块包括用户及权限管理功能、日志管理功能、计算资源管理功能，保证系统稳定运行，合理分配、实时监控计算资源的使用情况。

3 云平台业务架构

本文采用蒙特卡洛方法产生大量地震随机事件（徐伟进等，2020）。针对各地震事件，使用地震动参数衰减关系模型计算在风险暴露位置产生的地震动强度；然后根据工程易损性计算损失；最后依据风险暴露的



图 5 损失汇总及展示

Fig. 5 Loss aggregate and display



图 6 费率厘定模块

Fig. 6 Module of rate making

保险条款计算保险损失，各地震事件保险损失计算方法为：

$$\text{保险损失} = \text{风险暴露} \times \text{地震动强度} \times \text{工程易损性} \times \text{保险条款} \quad (1)$$

由式 (1) 可知地震保险损失评估平台包括：风险暴露模块、致灾因子模块、工程易损性模块和金融模块，如图 7 所示。风险暴露模块用于解析、存储用户上传的风险暴露数据；致灾因子模块用于计算风险暴露

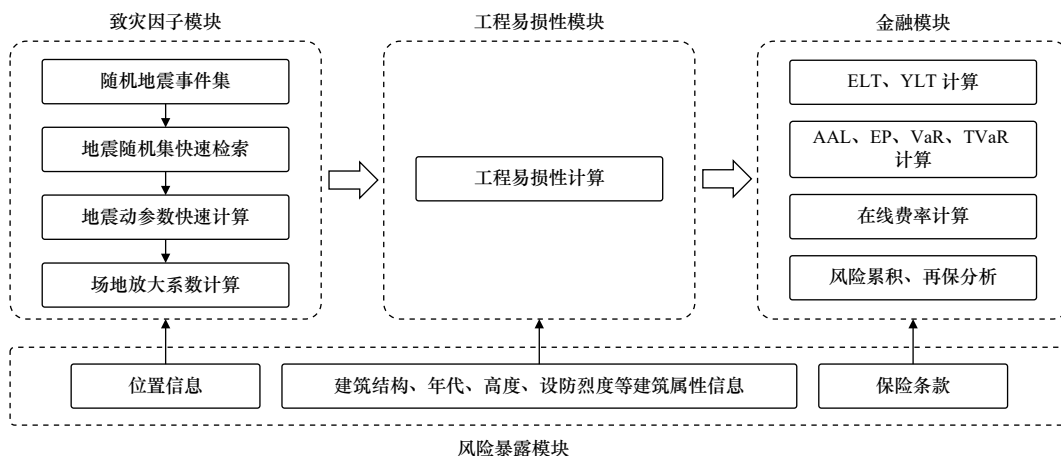


图 7 地震保险损失评估 SaaS 云平台业务架构示意图

Fig. 7 Business architecture

所在位置的地震动强度；工程易损性模块用于计算风险暴露在特定强度地震动影响下的损坏情况；金融模块用于在风险暴露损坏的情况下计算保险损失。

3.1 风险暴露模块

风险暴露模块包含 3 类风险暴露数据：

(1) 用户上传的需进行地震风险评估的详细风险暴露数据 (Detailed Exposure Data, DED)，包括保单、标的、保险责任等信息。

(2) 用户上传的需进行地震风险评估的汇总风险暴露数据 (Aggregate Exposure Data, AED)，包括风险暴露所在区域、标的数量、保额、限额、免赔额及各种建筑属性标的占比。

(3) 系统内置的全行业不同用途、不同结构的行业风险暴露的价值及地理位置数据，包括位置信息、功能用途信息 (住宅、商业、工业等)、建筑重置价值等。系统内置的行业风险暴露数据主要用于：①评估行业范围内的经济、保险损失；②当用户仅能提供汇总风险暴露数据时，用于分析汇总风险暴露数据各标的位置、建筑属性、保险额度等信息，从而评估地震风险。系统内置的行业风险暴露数据示例数据如表 1 所示。

表 1 系统内置的行业风险暴露数据示例数据
Table 1 Sample data for built-in industrial exposure

编号	经度/°E	纬度/°N	行政区划代码	省	市	区/县	住宅建筑价值/元	商业建筑价值/元	工业建筑价值/元
1	101.35	21.825	532823	云南省	西双版纳傣族自治州	勐腊县	3000	0	0
2	107.5	21.825	451422	广西壮族自治区	崇左市	宁明县	1600	0	0
3	109.275	21.825	450521	广西壮族自治区	北海市	合浦县	35000	0	0
4	110.8	21.825	440981	广东省	茂名市	高州市	500000	1600000	5000000
5	100.025	21.85	532822	云南省	西双版纳傣族自治州	勐海县	4000	0	0
6	100.225	21.85	532822	云南省	西双版纳傣族自治州	勐海县	13000	0	0
7	101.05	21.85	532801	云南省	西双版纳傣族自治州	景洪市	5000	0	0
8	101.275	21.85	532823	云南省	西双版纳傣族自治州	勐腊县	9000	0	0
9	107.1	21.85	451422	广西壮族自治区	崇左市	宁明县	1000	0	0
...

3.2 致灾因子模块

致灾因子模块为地震危险性分析模块，包括地震随机事件集和场地类型数据、地震随机事件集快速检索算法、地震动参数衰减关系算法和场地放大系数算法。致灾因子模块根据用户上传的风险暴露位置信息，使用地震随机事件集检索算法，从随机地震事件集数据中筛选出对风险暴露有潜在影响的地震随机事件数据，通过地震动参数衰减关系算法分别计算地震事件在风险暴露所在位置造成的地震动强度 (本文采用地震动参数峰值加速度 PGA)，从而通过场地放大系数算法计算地表地震动参数。

3.2.1 地震随机事件集

本文采用的地震随机事件集是基于我国最新版的潜在震源区模型及地震活动性参数，采用蒙特卡洛方法生成的符合我国地震时空分布特征的模拟地震事件集 (徐伟进等, 2020)，共模拟了中国及周缘地区面波震级 5.0 级以上 500 万年的地震事件集，生成的事件集示例数据如表 2 所示。

3.2.2 地震随机事件集快速检索算法

本文针对地震衰减关系特征，设计了从随机事件集中快速检索地震事件的方法，该方法能快速检索出可能造成损失的地震事件，步骤如下：

(1) 预处理：①将随机事件集按震中位置划分至不同的等经纬度网格中；②将归属同一网格的地震事件作为一页进行连续存储。根据空间局部性原理，每个网格中的数据往往需要同时使用或者都不使用，将空间相邻的数据存储到一起，避免频繁读取文件；③将每页数据按其网格中心点经纬度坐标创建空间索引。

(2) 检索地震事件：①计算风险暴露附近网格中心点经纬度及经纬度对应索引的 key 值；②查询空间索引中 key 值对应的数据页地址，并将该页数据 (即对风险暴露有潜在风险的地震事件) 全量加载到内存中。

表 2 随机地震事件集示例数据

Table 2 Sample data for random earthquake event set

事件编号	年	日	经度/°E	纬度/°N	深度/km	走向/°	面波震级	衰减分区
100 000 000 401	1	36	121.975	23.458	56	70	5.96	0
100 000 000 405	1	40	100.158	22.167	17	120	6.22	1
100 000 000 496	1	131	83.618	43.670	18	150	6.59	2
100 000 000 531	1	166	89.597	46.134	5	125	6.07	2
100 000 000 564	1	199	122.674	23.533	18	70	6.05	0
100 000 000 581	1	216	79.013	30.368	12	154	6.1	1
100 000 000 649	1	284	121.814	23.905	3	160	6.23	0
100 000 000 707	1	342	79.605	30.388	30	135	6.41	1
100 000 000 756	2	26	120.934	24.669	13	20	6.14	0
100 000 000 768	2	38	79.201	37.062	28	170	5.98	1
100 000 000 854	2	124	78.154	35.726	8	101	6.5	1
100 000 000 860	2	130	105.807	38.450	8	160	6.42	3
...

3.2.3 地震动参数衰减关系计算方法

参考《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2016) 和俞言祥 (2016) 的相关研究成果, 同一个地震衰减分区中, 断层走向相同、震级相同的地震事件服从参数相同的衰减关系, 而断层走向不同的地震事件衰减关系都可以断层走向为 0° 的衰减关系旋转得到。因此, 本文根据地震动参数衰减关系理论将不同地震衰减分区、不同震级地震的影响场提前计算并存储。当实时进行地震风险评估时, 仅需根据震中位置所在的衰减分区、震级查询其影响场即可。

传统的等经纬度或等距离的栅格空间数据结构需要占用巨大的存储空间, 以模拟一百万年为例, 需要占用 TB 级的空间。且地震动参数呈指数型衰减, 栅格数据在距震中较近的区域参数误差较大, 而距震中较远的区域参数非常接近, 造成存储空间浪费。本文根据地震动参数衰减关系模型特征, 采用环形空间网格的数据结构, 同时以该结构进行存储数据, 既可以提高数据精度, 又能大幅度节约存储空间。

(1) 基于环形空间网格数据结构的地震动影响场计算

根据地震动衰减椭圆模型 (俞言祥, 2016), 对于已知分区和震级的地震, 长轴、短轴上地震动参数与距离的关系为:

$$\lg Y = A + BM + C \lg(R + De^{EM}) \quad (2)$$

式中: Y 为地震动参数, R 为震中距, M 为震级。对于已知震级与地震所在分区, 长轴和短轴对应 A 、 B 、 C 、 D 、 E 为已知的回归系数。因此可得知推导出:

$$R = Y^{\frac{1}{C}} \times 10^{-\frac{A+BM}{C}} - De^{EM} \quad (3)$$

可根据式 (3) 计算出所有 (离散化的) 地震动参数对应的长轴 R_a 和短轴 R_b , 即组成了该地震的环形网格。

(2) 基于环形空间网格数据结构的地震动参数检索

当已知风险暴露的位置时, 根据地震断层走向角度与震中距 R 计算出风险暴露坐标 x 、 y ; 然后再由地震分区与地震震级, 利用地震动参数衰减关系模型公式计算长轴 Y_l 与短轴 Y_s 。最后根据 Y_l 与 Y_s 确定数据范围, 由椭圆公式检索出对应的地震动参数。

3.2.4 场地类型数据与场地放大系数模型

Li 等 (2019) 首先使用坡度法, 按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) (中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2010) 中场地类型的分类体系, 计算得到全国范围场地分类图。本文将该场地类型数据预处理为 1 km 精度的栅格数据, 由风险暴露位置查询场地类型。并按照《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2016) 中场地类型对应的地震动峰值加速

度调整系数对地震动进行调整, 最终得到考虑场地条件的地表地震动参数。

3.3 工程易损性模块

工程易损性模块用于确定风险暴露在灾害(地震)中遭受的平均损失率, 主要由风险暴露易损性曲线、易损性曲线检索器组成。易损性曲线指不同建筑属性的风险暴露在不同地震动强度下的平均损失率(Mean Damage Ratio, MDR)及其不确定性(Uncertainty)(熊政辉, 2019)。先使用熊政辉(2019)按照建筑结构类型、功能用途、建造年代、建筑高度和设防烈度等属性信息构建的风险暴露建筑分类体系及采用震害统计方法和数值分析方法研发的一系列易损性曲线集; 然后利用易损性检索器, 根据风险暴露的各建筑属性取值, 匹配和检索对应曲线, 以便后续进行损失计算。

3.4 金融模块

金融模块根据工程易损性模块输出的损失率及风险暴露的(再)保险条款, 计算风险暴露(承保标的)的损失。主要包括地震造成的实际经济损失, 又称为总损失(Ground Up Loss, GULoss), 以及考虑保险条款限制(如免赔额和限额)的保险损失, 又称为毛损失(Gross Loss, GRLoss)。

$$\text{GULoss} = \text{TIV} \cdot \text{MDR} \quad (4)$$

$$\text{GRLoss} = \begin{cases} \text{Lim}, & \text{Lim} + \text{Ded} < \text{GULoss} \\ \text{GULoss} - \text{Ded}, & \text{Lim} + \text{Ded} \geq \text{GULoss} > \text{Ded} \\ 0, & \text{GULoss} \leq \text{Ded} \end{cases} \quad (5)$$

式中: TIV (Total Insured Value) 为风险暴露的总价值, MDR 为地震对风险暴露造成的平均损失率。Ded (Deductible) 为免赔额, Lim (Limit) 为限额。

地震随机事件集中每个事件均可能对风险暴露造成损失(包含经济损失和保险损失), 表3所示为事件损失表(Event Loss Table, ELT)。

将事件损失表中同一年的损失进行汇总, 得到年累积损失表(Year Loss Table, YLT), 如表4所示。

事件损失表和年累积损失表是地震风险评估 SaaS 云平台的基本输出结果, 通过事件损失表可以计算年期望损失(Annual Average Loss, AAL)、损失标准差(Standard Deviation, SD)、在线费率(Rate On Line, ROL)、超越概率曲线(Exceedance Probability Curve, EP Curve)、各回归周期在险价值(Value at Risk, VaR)、各分位数的尾部在险价值(Tail Value at Risk, TVaR)等。

$$\text{AAL} = \frac{\sum_{i=1}^M \text{Loss}_i}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N \text{ALoss}_j}{N} \quad (6)$$

式中: N 为地震随机事件集模拟年数, Loss_i 为第 i 个地震事件造成的损失, ALoss_j 为第 j 年所有地震事件造成的损失之和, 共 M 个地震事件对风险暴露造成损失, 当 Loss_i 为总损失时, AAL 为年期望总损失, 当 Loss_i

表3 事件损失表示例数据

Table 3 Sample data for ELT

随机事件集编号	年	总损失/元	毛损失/元
100 000 299 223	35	350 829 985.24	280 663 988.19
100 000 303 197	35	358 336 146 996.12	286 668 917 596.90
100 000 553 049	64	2 642 638 483.25	2 114 110 786.60
100 000 582 342	67	1 774 458.68	1 419 566.94
100 000 724 753	83	425 193.08	340 154.46
100 000 895 924	103	141 852 462 611.31	113 481 970 089.05
100 001 000 898	115	462 850 303.77	370 280 243.02
100 001 284 622	147	265 095 628.27	212 076 502.62
100 001 469 992	168	29 291 919.44	23 433 535.55
.....

表 4 年累积损失表示例数据

Table 4 Sample data for YLT

年	总损失/元	毛损失/元
35	358 686 976 981.36	286 949 581 585.09
64	2 642 638 483.25	2 114 110 786.60
67	1 774 458.68	1 419 566.94
83	425 193.08	340 154.46
103	141 852 462 611.31	113 481 970 089.05
115	462 850 303.77	370 280 243.02
147	265 095 628.27	212 076 502.62
168	29 291 919.44	23 433 535.55
.....

为毛损失时，AAL 为年均期望毛损失。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (ALoss_j - AAL)^2}{N}} \quad (7)$$

式中： N 为地震随机事件集的模拟年数， $ALoss_j$ 为第 j 年所有地震事件造成的损失之和。根据年均期望毛损失与风险暴露的限额可计算出在线费率：

$$ROL = \frac{AAL}{Lim} \quad (8)$$

将年累积损失表按损失降序排序，则序号为 n 的损失超越概率为 p ，其中：

$$n = N \cdot p \quad (9)$$

根据式 (9) 可计算出不同超越概率损失的序号 n 。若 n 不为整数，损失取序号为 $\lfloor n \rfloor$ (即取 $\geq n$ 的最大整数) 与 $\lceil n \rceil$ (即取大于或等于 n 的最小整数) 对应的损失的插值。按此方法以保险损失为横坐标、超越概率为纵坐标可绘制年累积超越概率曲线 (Annual Aggregate Exceedance Probability Curve, AEP Curve)。超越概率 p 对应的损失为分位数为 $1-p$ 的在险价值，即 VaR_{1-p} 。尾部险位价值 $TVaR_{1-p}$ 为所有超越概率 $\leq p$ 所对应的损失 (VaR_{1-p}) 的平均值。

4 总结与展望

地震巨灾保险损失评估技术是推广地震巨灾保险，分散地震巨灾风险的技术基础。本文基于“五代图”最新数据，集成了基于潜在震源区模型的地震随机事件集与地震动参数衰减关系模型，用于计算地震事件在风险暴露位置的地震动强度。根据风险暴露的建筑属性检索对应的工程易损性曲线，计算其在特定地震动强度下的损失，汇总成事件损失表。在事件损失表的基础上计算风险暴露年期望损失、标准差、超越概率曲线。但本文未考虑余震和相关次生灾害对风险暴露造成的损失，相应的功能模块有待完善。本文对地震保险损失评估 SaaS 云平台的多租户及高性能技术架构进行了论述，并进行了部署投产。100 万风险暴露的地震保险损失可在 1 h 以内完成，且可供多用户同时使用。随着处理器技术的发展，基于 GPU 的云计算平台广泛应用于科学计算领域。为进一步提高快速损失评估性能，计划研发基于 GPU 的地震保险损失评估 SaaS 云平台。

参考文献

- 陈洪富, 孙柏涛, 陈相兆等, 2013. HAZ-China 地震灾害损失评估系统研究. 土木工程学报, 46 (S2): 294—300.
 Chen H. F., Sun B. T., Chen X. Z., et al., 2013. HAZ-China earthquake disaster loss estimation system. China Civil Engineering Journal, 46(S2): 294—300. (in Chinese)

- 冯键, 2019. 巨灾数字化平台服务国家现代风险治理体系建设. 金融电子化, (5): 32—34.
- 国家地震局, 国家统计局. 1996. 中国大陆地震灾害损失评估汇编: 1990~1995. 北京: 地震出版社.
- 林向洋, 文鑫涛, 李华玥等, 2020. 2019年中国大陆地震灾害损失述评. 震灾防御技术, 15(3): 473—483.
- Lin X. Y., Wen X. T., Li H. Y., et al., 2020. Review of earthquake damage losses in mainland of China in 2019. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 15(3): 473—483. (in Chinese)
- 楼宝棠, 1996. 中国古今地震灾情总汇. 北京: 地震出版社.
- Lou B. T., 1996. A comprehensive compilation of historic and recent earthquakes disaster status in China. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 孟生旺, 李政宵, 2018. 地震死亡人数预测与巨灾保险基金测算. 统计研究, 35(10): 89—102.
- Meng S. W., Li Z. X., 2018. Modeling earthquake deaths and calculating catastrophe insurance fund. *Statistical Research*, 35(10): 89—102. (in Chinese)
- 牛方曲, 高晓路, 季珏, 2012. 区域中长期房屋震灾损失评估系统. 资源科学, 34(2): 359—366.
- Niu F. Q., Gao X. L., Ji Y., 2012. A house damage evaluation system of regional long-term seism in China. *Resources Science*, 34(2): 359—366. (in Chinese)
- 熊政辉, 2019. 面向地震保险的巨灾模型研究与应用. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Xiong Z. H., 2019. The study and application of catastrophe model for earthquake insurance. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 徐伟进, 高孟潭, 左惠强, 2020. 地震巨灾模型中的随机地震事件集模拟. 地震工程学报, 42(4): 1024—1034.
- Xu W. J., Gao M. T., Zuo H. Q., 2020. Simulation of stochastic seismic event set using the earthquake catastrophe model. *China Earthquake Engineering Journal*, 42(4): 1024—1034. (in Chinese)
- 应急管理部国家减灾中心, 2021. 2020年全国自然灾害基本情况. 北京: 应急管理部.
- 俞言祥, 2016. 新一代地震区划图地震动参数衰减关系的建立与特点分析. 城市与减灾, (3): 34—38.
- 中国地震局监测预报司, 2001. 中国大陆地震灾害损失评估汇编: 1996~2000. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司, 2010. 2001~2005年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司, 2015. 2006~2010年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2016. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图. 北京: 中国标准出版社.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2016. GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2010. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- Li X. J., Jing B. B., Liu C., et al., 2019. Site classification method based on geomorphological and geological characteristics and its application in China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(5): 1843—1854.