

地震作用下国防工程损毁风险分析系统研究*

王凤山^{a,b},戎全兵^b,张宏军^b

(1.解放军理工大学 a.野战工程学院, b. 指挥信息系统学院,南京 210007)

摘要:针对地震作用下国防工程易损特性模型计算和仿真实验的需要,设计和建立了基于模块化和风险集成管理机制的地震作用下国防工程损毁风险分析系统。以区域灾害系统理论为指导,围绕致险因素、孕险环境、风险介质、控制机制及承险体等元素的相互作用、交互、影响,辨析国防工程震害损毁机理和风险体系,提炼、概括和抽象国防工程震害损毁风险结构、功能、以及状态的演化特性和表现,建立其系统分析基本流程和集成框架,确立一致和权威的国防工程震损风险系统模型和仿真推理公共起点;着眼风险模型时序执行和软件优化需求,给出了地震作用下国防工程损毁风险分析系统的模块化逻辑结构和功能设计,研制系统软件。案例表明,系统交互性良好,为有效分析国防工程震害易损性的本质问题提供了模型服务平台和仿真实验工具。

关键词: 风险分析;国防工程;地震;损毁;综合集成

中图分类号:P642.22;TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)03-0809-07

Study on Earthquake-Damaged Risk Analysis System for Military Engineering

Wang Fengshan^{a,b}, Rong Quanbing^b, Zhang Hongjun^b

(a. College of Field Engineering, b. College of Command Information Systems, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, P.R.China)

Abstract: For the needs of model calculation and simulation experiment about earthquake-induced vulnerability of military engineering, a earthquake-damaged risk analysis system was designed and implemented on module and integrated risk management mechanism. Directed by regional disaster system theory, earthquake-induced damage mechanism and risk system were discriminated from the reciprocity, interaction, and influence among the risk factors, risk pregnant environment, risk medium, control mechanism, risk-hold body and other elements. Through refining, summarizing and abstracting such earthquake-induced damage risk evolution and performance around structure, function and status points, basic system analysis workflow and integration were put forward, which established a consistent and authoritative commonality jumping-off on earthquake-damaged risk analysis system model and simulation reasoning operations for military engineering. Focusing on timing implementation and software optimization requirement about risk models, such module logical structure and function were designed for earthquake-damaged risk analysis system for military engineering, and systematic software was developed. The case shows its good alteration, which provides the effective model service flat and simulation experiment tool for the essential earthquake-induced vulnerability of military engineering.

Keywords: risk analysis; military engineering; earthquake; damage; meta-synthesis

* 收稿日期:2016-10-20(修改稿)

作者简介:王凤山(1978-),男,江苏大丰人,博士后,副教授,主要从事防护工程系统毁伤建模与仿真分析方面的教学与科研工作。E-mail:WFS919@126.com

基金项目:国家自然科学基金(51308541);江苏省自然科学基金(BK20130066);中国博士后科学基金资助(20110491844);中国博士后科学基金特别资助(2013T60913)

0 引言

通常认为,地下工程结构的覆盖层保护作用及洞室周围土体介质的约束作用,使得地下工程结构具有较好的抗震等地质灾害性能^[1]。因而,在过去的一百多年,地震对于地下工程结构的损毁危险性及其破坏风险潜伏和衍化特性没有得到工程科学界足够的重视。然而,20世纪以来发生的美国洛杉矶地震、东日本大地震、苏联亚美尼亚地震、中国汶川地震等表明,强烈地震动效应爆发时,现有的地下工程结构存在极强的不安全性^[2-3],如数值模拟苏州地铁车站的地震反应特性^[4],发现地下车站结构受地震反应影响很大,其结构浅埋部分的地震损伤大于深埋部分。

地震极易引起国防工程口部区域的滑塌、支护结构及围岩的损伤、破坏乃至结构的坍塌,甚至坑道的堵死,且在各种诱因的作用下,极易出现次生、衍生、耦合、变异和扩大等变化,具有不确定性、续发性、动态性损毁特征,影响人员、装备的转移和机动,使国防工程丧失应有的功能,造成巨大的经济损失和社会影响^[5]。因此,地震已成为国防工程面临的典型灾害威胁。

遵循风险管理的客观规律和仿真设计通用化规则^[6],利用模型的运行、交互来仿真分析、试验和探究国防工程震害致险因子和承险因子之间的逻辑关联和作用机理,辨析地震动态响应规律与影响因素之间的复杂关系^[7],是传统理论、实验研究的发展和补充^[8],丰富了国防工程震损分析实验样本,解决了国防工程震害毁伤特性分析所需的全面、系统的样本数据,具有安全、经济、可控、可多次

重复、无风险、不受自然环境限制等优越性^[9]。

1 地震作用下国防工程破坏机理描述

系统科学方法指导国防工程地震灾害风险系统分析,包括对其组元、元素和因素,以及这些组元、元素和因素通过一定关联方式所构成的国防工程地震灾害特点的分析,具备广泛的非线性、高维作用机制。

地震作用下国防工程风险分析问题,本质是多参量的协调匹配过程。利用集合论的观点,地震作用下国防工程损毁评估问题可以被定义成集合结构,表示为 S :

$$S = \langle T, X, \Omega, Q, Y, \delta, \lambda \rangle \quad (1)$$

定义从集合角度概括了国防工程震害风险结构及评估系统,科学界定国防工程震害风险评估的内涵与交互。其中, T 是时间基, δ 是随时间推移的状态转移函数; X 表征地震及孕险环境作用参数、国防工程实体参数等输入集合; Ω 是其输入段集; Q 是国防工程震害风险内部状态集合,表征国防工程关键单元与整体的损毁状态; Y 是输出集,即地震作用下国防工程整体毁伤的度量值; λ 是其输出函数。

围绕国防工程震害机理及风险评估推理的输入输出结构^[10],将国防工程震害毁伤评估进程及使命空间与此相关的成分和现象抽象出来,表示为实体、行为、交互等可辨识元素,从模型、进程、评估角度表达国防工程震害风险评估系统特征,如图1所示。

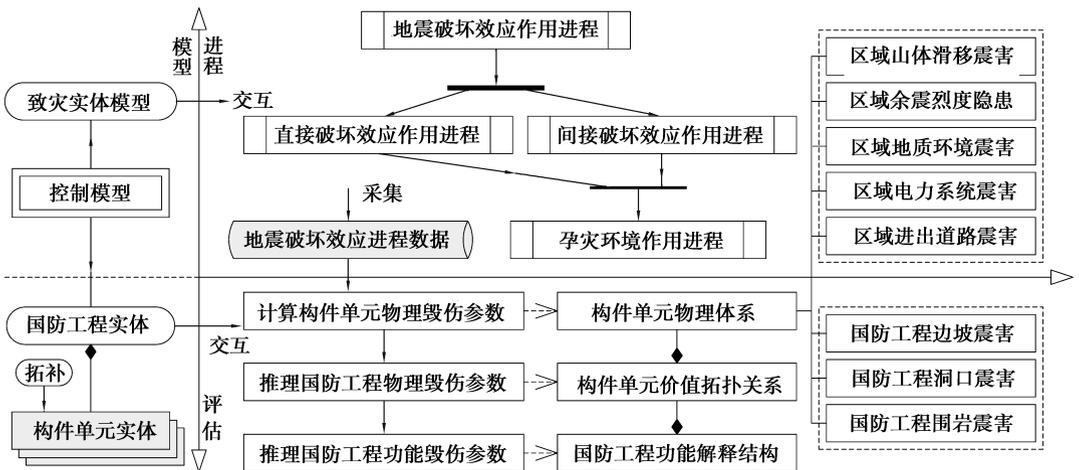


图1 国防工程地震破坏机理及评估体系叙述

Fig.1 Mechanism and evaluation system depiction on earthquake-damaged military engineering

图1本质上是对国防工程地震毁伤评估的功能性系统抽象,描述在地震直接、间接破坏效应作用进程的国防工程状态的变迁,从系统结构与地震毁伤的非线性函数、映射、约束、功能性依赖,解决构件单元物理毁伤判决、国防工程物理毁伤参数计算、国防工程系统层面功能毁伤推理计算等问题。

可见,通过对国防工程地震灾害的初步解析,地震灾害是诸多元素的系统作用和系统集成,包含区域余震烈度隐患、区域山体滑移震害、区域地质环境震害、区域电力系统震害、区域进出道路震害等孕险环境的破坏,包含国防工程边坡震害、国防工程洞口震害、国防工程坑道主体(围岩)震害等

承载客体的破坏。因此,需秉持综合集成的视角,运用综合集成的技术方法,探求国防工程地震灾害风险的本质规律。

2 国防工程地震损毁风险体系

2.1 国防工程地震损毁风险体系

围绕国防工程地震损毁风险分析任务与功能约束,将国防工程地震损毁风险分析使命空间内与此相关的成分和现象抽象出来,表示为若干可辨识元素,从地震危险性、国防工程区域、承险性质角度,描述国防工程地震损毁风险体系(如图2),揭示孕险环境、承险体、风险因素、风险事故、风险损失等属性及作用机理。

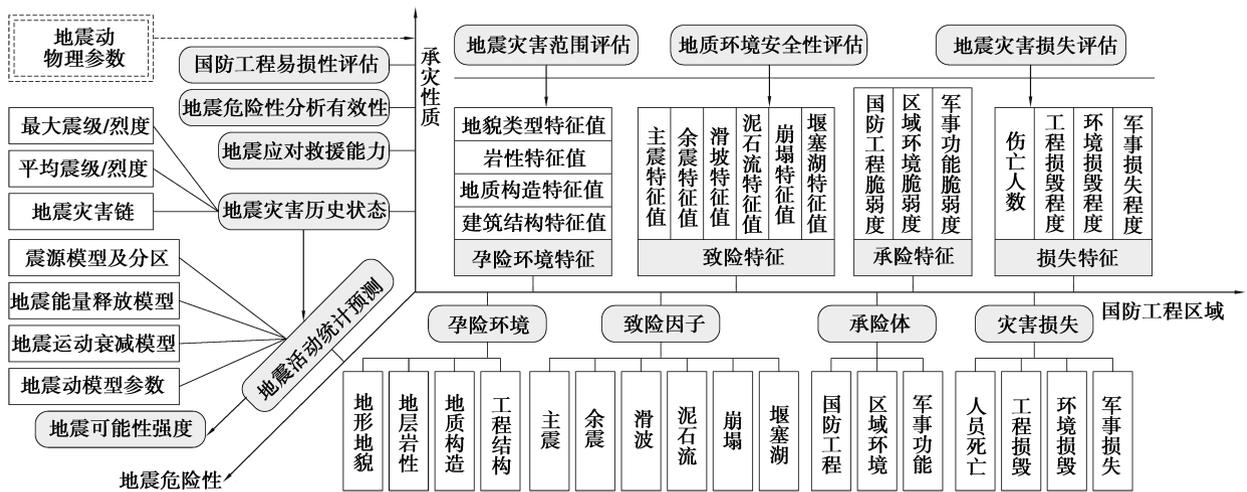


图2 国防工程地震损毁风险三维体系

Fig.2 Three-dimensional risk system on earthquake-damaged military engineering

国防工程地震损毁风险体系,遵循灾害系统理论,由孕险环境、致险因子、承险体和灾害损失共同组成的地球表层特定异变系统^[11],客观上集成国防工程区域地震灾害孕险环境的一致性和差异性,集成国防工程区域地震灾害致险因子组合类型、时空聚散、强度和频度分布的一致性和差异性,集国防工程区域地震灾害承险体类型、承险能力和抗灾能力的一致性和差异性,集成国防工程区域地震灾害损失类型、损失程度的一致性和差异性,形成和完善国防工程区域灾害风险综合分析主导因素相结合体系。

因此,国防工程地震损毁风险过程呈链式反应,决定着国防工程地震损毁风险研究工作的综合性和复杂性,不断建立地震灾害系统影响条件下的国防工程损毁风险的横向结合和纵向加深的综合,使国防工程地震灾害综合风险理论研究更好地指导减灾实践。

2.2 国防工程地震损毁风险系统分析流程

地震作用下国防工程损毁风险系统属于典型的复杂巨系统,其系统分析是认识系统、模拟系统、评估系统的前提,也是国防工程抗震风险管理的基础,属于典型应用技术层次的系统科学问题^[12]。如何将地震作用下国防工程损毁风险定性、感性、不全面的认识,转化为理性、客观、全面的规律性认识,即按照一定目的和限定条件,将国防工程震损风险系统的属性或功能上关联的不同部分组织协调成为宏观有序、运行协调、功效最优的有机整体,从而实现国防工程震损风险系统的结构优化和问题解决^[13]。

遵照认识和实践不断循环的方式,提炼、概括和抽象地震作用下国防工程损毁风险结构、功能、以及状态的演化特性和表现,运用系统集成研讨厅专家体系、机器体系、知识体系合作的研究方式与工作方式^[14],建立地震作用下国防工程风险系统分析基本流程,如图3所示。

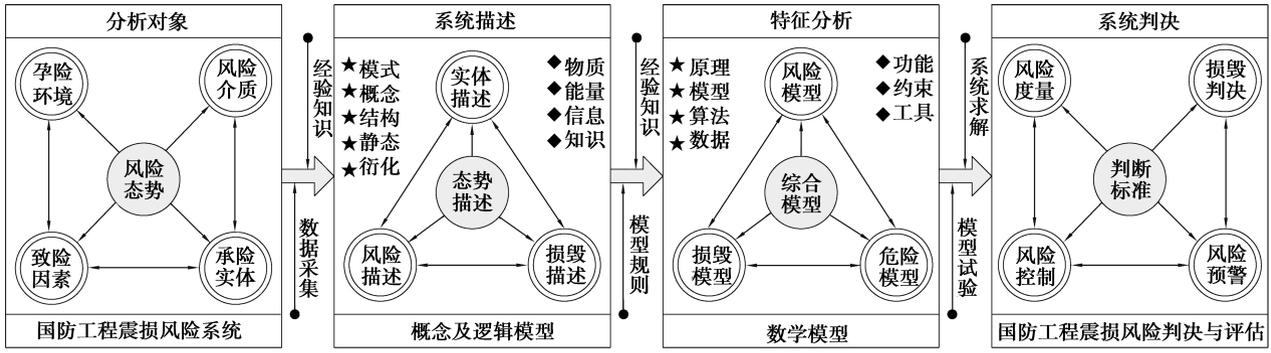


图3 国防工程地震损毁风险系统分析流程

Fig.3 Risk system analysis workflow on earthquake-damaged military engineering

地震作用下国防工程风险分析的基本过程为分析对象、系统描述、特征分析、系统判决。其中，分析对象是遵循地震作用下国防工程风险系统概念约束和风险发生机理的规律性要求，对国防工程震损风险系统的实践和认识，需要专家群的智慧与经验知识，包含地震作用下国防工程风险客观世界中诸如孕险环境、风险介质、风险态势等各类实体、过程或现象、事物等的机器体系数据采集，包含感情的、理性的、经验的、科学的、定性的和定量的国防工程震损风险知识综合集成。其本质是从需求知识层面对国防工程风险信息、数据、知识、模型、智慧等广义知识体系的综合集成。

遵循地震作用下国防工程风险系统物质、能量、信息和知识平衡，适应量化评估和计算机仿真推理的需要，从规范化角度建立国防工程震损风险分析模式、概念、结构、静态及其衍化的系统描述，实现了国防工程震损风险问题域概念及逻辑模型的一致性语义表达，确立一致和权威的国防工程震损风险系统模型和仿真推理的公共起点。

特征分析，即论证地震作用下国防工程风险问题框架和模型体系同构同态的结构性质，实现感性到理性、定性到定量的功能转变，从数量关系或指标体系描述和表征国防工程震损风险系统的各种关联及系统要素的相互作用，支持地震作用下国防工程风险系统决策科学化、智能化提供模型支持与 服务，包含定量模型、定性模型、推理模型、分析模型、评估模型等，实践国防工程震损风险判决与评估任务，最终利于判决标准框架下的地震作用下国防工程风险度量、损毁判决、风险预警、风险控制等问题的解决。

2.3 地震作用下国防工程风险集成管理系统框架

地震作用下国防工程损毁风险分析系统的设

计，需具备较强的问题求解和决策支持性能，具备风险分析进程的数据支持和交互协调性能，具备较强的地理空间模型和风险分析模型耦合性能。

应以提高系统预警能力为出发点，围绕风险管理基本原理，遵循国防工程地震损毁风险系统本质思想和关键概念的顶层约束，按照国防工程地震灾害风险全过程评估与管理为指导，系描述地震作用下国防工程损毁风险分析系统的数据、结构、功能，建立地震作用下国防工程损毁风险分析系统集成框架(如图4)。

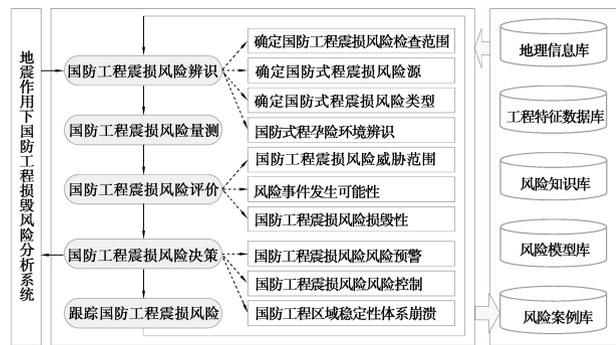


图4 地震作用下国防工程损毁风险分析系统集成框架
Fig.4 Risk analysis integration frame on earthquake-damaged military engineering

图4提供了地震作用下国防工程损毁风险分析系统框架，按照风险管理活动的时序，将地震作用下国防工程损毁风险复杂体系自上而下分解成规范化递解结构，为地震作用下国防工程损毁风险分析工作提供了规范化的风险分析流程，揭示了地震作用下国防工程风险管理执行的操作流。

可见，地震作用下国防工程损毁风险分析系统属于典型区域性的专题地理信息系统，以震区地理空间数据为基础，以国防工程和孕险环境为监测对象，以风险辨识为其输入指令、风险决策为其输出报

告。其中,地理信息库、工程特征数据库、风险知识库、风险模型库、风险案例库为外部支持系统,具有开放性。

3 地震作用下国防工程损毁风险分析系统设计

3.1 国防工程损毁风险分析系统结构设计

面对构建标准化、规范化、通用化、系列化的地震作用下国防工程风险分析系统要求,将地震作用下国防工程综合风险分析系统这一复杂工程优化分解为合理层次的用户模型、业务流程、数据流、活动模型、序列机制、对象模型、实体模型、数据交互、架构设计等单元模块,并将单元模块组合成更多更新的具有通用功能和结构的架构设计、数据设计、静态模型、动态模型、功能模型等模块^[15]。

根据系统工程的原理,设计多层次递阶结构的地震作用下国防工程风险分析模块体系如图5所示。

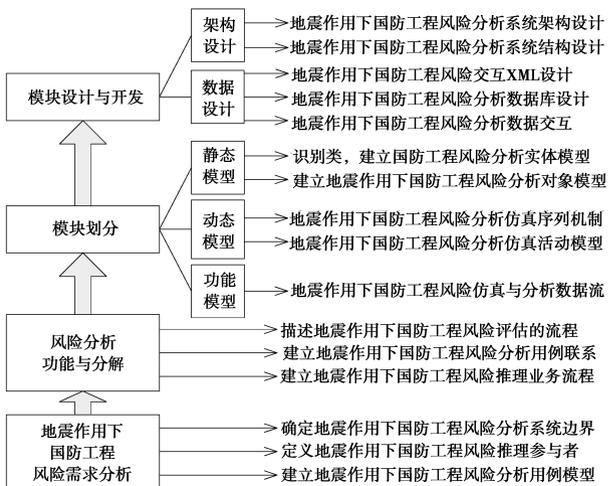


图5 国防工程损毁风险分析系统结构逻辑设计

Fig.5 Structural logical design of risk analysis system on earthquake-damaged military engineering

执行模块化分解、组合、订制、设计的基本原则和软件规则,按照需求分析、风险分析功能与分解、模块划分、模块设计与开发等工作流程,建立地震作用下国防工程综合风险分析体系逻辑设计机制。其中,“模块划分”是地震作用下国防工程综合风险分析系统模块化设计的核心和重要步骤,主要包括静态模型、动态模型、功能模型,其任务包括:设计地震作用下国防工程综合风险分析的实体模型,建立地震作用下国防工程综合风险分析的对象模型,建立地震作用下国防工程综合风险分析仿真序列机制,建立地震作用下国防工程综合风险分析仿真活动模型,构建地震作用下国防工程综合风险分析与仿真的数据流等。

地震作用下国防工程综合风险分析体系的模块化逻辑设计,使得地震作用下国防工程综合风险分析体系结构内要素拥有独立的形态、结构、接口、数据支持、边界、特性、行为、功能,按其内在的规律性活动相互支持和排斥,表现出风险评估特定的问题结构、约束环境、整体功能和外部特征,是具备系统特性的现象和软件设计、开发问题^[9]。

3.2 国防工程损毁风险分析系统设计

地震作用下国防工程风险分析系统是对国防工程实体模型、地震效应及衍化模型、风险辨识及评估模型、试验控制模型等体系的综合集成,结合防护、军事、仿真、运筹、模型专家知识及作战实验工具,集实体组件、数据库组件、仿真控件、信息交互组件、决策智能体、研讨平台、效能评估、反馈机制等为一体,执行国防工程震害风险分析、风险演化、风险评估概念、理论、模型和方法的论证、训练、研讨、创新和发展^[16]。

遵循作战实验的基本原理和方法^[17],设计地震作用下国防工程风险分析系统的功能结构体系,如图6所示。



图6 地震作用下国防工程损毁风险分析系统功能模块

Fig.6 Function modules of risk analysis system on earthquake-damaged military engineering

图6中可见地震作用下国防工程风险分析系统主要包括服务平台、基本想定、系统控制平台、风险要素分析、孕险环境危险性、工程风险、数据库管理等功能需求、目标设计和知识服务,其核心功能和目标是对风险评估与预测的相关问题、理论、模型和方法进行分析、训练、论证、应用。

3.3 国防工程损毁风险分析系统软件架构设计

基于模块化和风险管理 workflow 机制,以通用仿真引擎为运行环境^[18],在 Visual C# 和 .NET 语言环境下,设计地震作用下国防工程损毁风险分析系统,如图7所示。

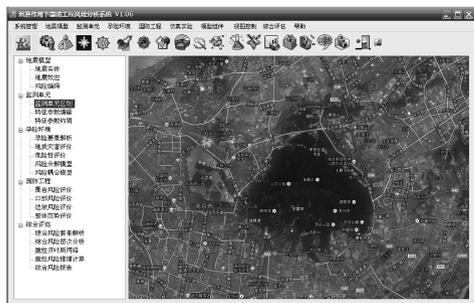


图7 地震作用下国防工程损毁风险分析系统主体设计

Fig.7 Main body design of risk analysis system on earthquake-damaged military engineering

图7中地震作用下国防工程风险分析系统架构以 Windows 方式设计窗口界面线程作为联邦成员客户端,可视用户界面通过操作面板控制地震作用下国防工程风险的数据管理、系统分析与仿真推理,其推理任务和仿真实验进程由总控模型根据时间和步长系统控制

以【围岩风险评估】组件为例,既可独立于系统运行,实施围岩结构风险仿真实验、学习训练和系统分析,又可支持作为联邦成员支持地震作用下国防工程风险分析的模型计算和仿真检验^[19],如图8。

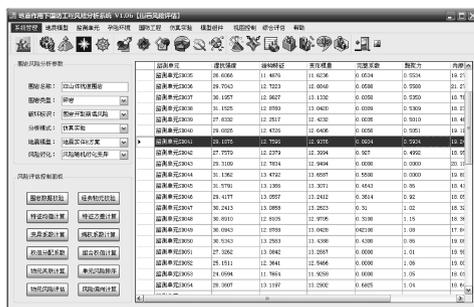


图8 地震作用下国防工程损毁风险分析系统演示

Fig.8 Demonstration of risk analysis system on earthquake-damaged military engineering

可见,模型系统可作为单独的进程运行,各模型受控制模型控制信息交互和协作。基于模块化设计的地震作用下国防工程损毁风险分析系统有效支持了国防工程围岩结构风险与稳定性的仿真实验和模型训练;同时,仿真模型依托联邦控制系统提供模型服务。

4 结语

利用军事仿真、作战实验手段检验地震作用下国防工程区域损毁风险空间及易损性向量的本质思想和关键概念,尝试解决地震作用下国防工程易损性精确评估和风险计算的难点。其模型试验不受自然条件限制和约束,可以反复执行和推演计算,具有重要积极的军事价值和社会效益,为得到较为理想的国防工程震害风险及其演化规律提供了工具和手段。

为进一步推进地震作用下国防工程风险分析系统的理论研究和实践应用的深度及广度,需要进一步探索风险仿真及分析实验的模型、规则、原理、工作流、机制、方法,充实国防工程震害计算机实验的理论基础;注重顶层设计,着眼国防工程震害风险实验需求,突出平时防灾战时抗毁的横向协同实验环境建设;强化风险管理需求牵引,探索孕险、致险、防险、控险集成化的仿真实验,促进模型实验和相关分析成果转化为国防工程抗震防灾能力。

参考文献 (References)

- [1] 刘晶波,王文晖,赵冬冬,等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(8): 1618-1624. (Liu Jingbo, Wang Wenhui, Zhao Dongdong, et al. Integral response deformation method for seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1618-1624. (in Chinese))
- [2] Omer A, Yoshimi O, Melih G, et al. Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010,43(6):857-875.
- [3] Wang Z Z, Gao B, Jiang Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake [J]. Science China Technological Sciences, 2009,52(2): 546-558.
- [4] 陈磊,王涛,孙晓锋. 苏州地区地铁地下车站结构的地震反应分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(增1): 1590-1595. (Chen Lei, Wang Tao, Sun Xiaofeng. Earthquake response analysis in subway

- station structure of Suzhou Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,10(Supp.1): 1590-1595. (in Chinese))
- [5] 王凤山,戎全兵,郭杰,等. 基于系统概念的国防工程地震破坏机理研究[J]. 防护工程, 2014,36(5):60-65. (Wang Fengshan, Rong Quanbing, Guo Jie, et al. Study on failure mechanism of national defence engineering under earthquakes based on system concept [J]. Protective Engineering, 2014,36(5):60-65. (in Chinese))
- [6] Choun Y S, Elnashai A S. A simplified framework for probabilistic earthquake loss estimation [J]. Probabilistic Engineering Mechanics 2010, 25(4): 355-364.
- [7] 贾超,王志鹏,朱维申. 地下洞室地震动态响应规律的影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(4): 808-812. (Jia Chao, Wang Zhipeng, Zhu Weishen. Study on influencing factors of dynamic response of underground cavern under earthquake [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(4):808-812. (in Chinese))
- [8] Yang Y S, Hsieh S H, Tsai K C, et al. ISEE: Internet-based simulation for earthquake engineering - Part I: Database approach [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2007,36(15):2291-2306.
- [9] 袁辉,王凤山. 坑道工程动荷载抗精确打击毁伤分析系统[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2667-2671. (Yuan Hui, Wang Fengshan. Precise damage analysis on active load section of protective engineering [J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9): 2667-2671. (in Chinese))
- [10] 王凤山,张宏军. 军事工程毁伤与防护仿真概念模型研究[J]. 山东大学学报(工学版),2011,41(增1): 113-117. (Wang Fengshan, Zhang Hongjun. Conceptual model study on military engineering damage and protection simulation [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2011, 41(Supp.1): 113-117. (in Chinese))
- [11] Mckenna F. OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation [J]. Computing in Science and Engineering, 2011, 13(4):58-66.
- [12] 徐玖平,卢毅. 地震灾害与评估的综合集成模式[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(11):1-18. (Xu Jiu Ping, Lu Yi. Meta-synthesis pattern of analysis and assessment of earthquake disaster system [J]. Systems Engineering-Theory & Praetice, 2009, 29(11):1-18. (in Chinese))
- [13] 朱诗兵,李长青,谢科范. 武器装备综合集成评估指标的建立方法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2):106-110. (Zhu Shibing, Li Changqing, Xie Kefan. Establishment of Assessment Factors for the Meta-synthesis of Weapon Systems [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(2):106-110.(in Chinese))
- [14] Yan J J, Bracewell D B, Ren F J, et al. An integrated system for semantic analysis of Chinese [J]. Wseas Transactions on Computers,2006,5(9):1886-1891.
- [15] 秦胜君,陈燕,杨明. 基于信息流结构分析的系统建模[J]. 大连海事大学学报,2011,37(2):97-100. (Qin Shengjun, Chen Yan, Yang Ming. System modeling based on information flow structure analysis [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(2):97-100. (in Chinese))
- [16] Du S, Lü J, Xi L. An integrated system for on-line intelligent monitoring and identifying process variability and its application [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2010, 23(6): 529-542.
- [17] 戎全兵,张宏军. 基于作战实验的国防工程震害风险分析仿真研究[J]. 军事运筹学系统工程,2014,28(2):61-64. (Rong Quanbing, Zhang Hongjun. Study on earthquake-damaged risk analysis and simulation for military engineering based on operational experiments [J]. Military Operations Research and Systems Engineering,2014,28(2):61-64. (in Chinese))
- [18] 王凤山,吴华杰. 基于作战实验的震后应急处置风险控制仿真训练研究[J]. 计算机工程与设计,2011,32(8):2796-2800. (Wang Fengshan, Wu Huajie. Research on risk control simulation in earthquake emergency response based on operational experiments [J]. Computer Engineering and Design,2011,32(8):2796-2800. (in Chinese))
- [19] Zhao X, Chen G, Gao L. System design of the equipment support efficiency evaluation simulation system based on HLA [J]. Advanced Materials Research, 2013, 765-767: 1291-1294.