

黄健文.基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析[J].地震工程学报,2019,41(4):1060-1065.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1060

HUANG Jianwen.A Novel Suitability Planning Model for Rural Earthquake Disaster Prevention Based on ANSYS[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(4):1060-1065.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1060

## 基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾 适宜性规划模型分析

黄健文

(广东工业大学建筑与城市规划学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**当前新型乡村抗震防灾适宜性规划分析中通常采用地质分区方法对勘测点进行分析,在分析过程中忽略了 GIS 空间的复杂性,且未对评价指标加权分析,导致抗震适宜性评价指标量化过程过于主观,存在计算结果与实际结果拟合度低的问题。据此,提出基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析。考虑到 GIS 的空间复杂性,采用 ANSYS 在 GIS 空间进行有限元结构场修正操作,结合 Logistic 非线性回归模型,对乡村土地抗震防灾适宜性规划中的二分类变量数据进行非线性回归分析。为了防止计算数值过于主观,采用组合熵系数模型对 Logistic 方程计算得来的评价指标加权,由此完成基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析。经过实例分析证明,所提方法求出的计算结果与实际结果拟合度较高,能成功完成评价指标的量化,对乡村抗震防灾适宜性规划分析更加客观。

**关键词:** ANSYS 软件; 乡村土地规划; 抗震适宜性; 模型分析

**中图分类号:** TU984.116

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2019)04-1060-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1060

## A Novel Suitability Planning Model for Rural Earthquake Disaster Prevention Based on ANSYS

HUANG Jianwen

(School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

**Abstract:** At present, the analysis of the suitability of earthquake resistance and disaster prevention in new rural areas usually adopts the geological zoning method for the survey points. The complexity of the GIS space is neglected in the analysis process, and the weighted analysis of the evaluation indicators is not carried out, resulting in the low fitting degree of the calculated and actual results. Based on this, a new rural earthquake disaster prevention suitability planning model based on ANSYS is proposed. Considering the spatial complexity of GIS, the ANSYS is used to modify the finite-element structure field in GIS space. Combined with the logistic nonlinear regression model, a nonlinear regression analysis is carried out on the binary variable data in the

**收稿日期:** 2018-11-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(51308130)

**作者简介:** 黄健文(1978—)男,广东广州人,博士,讲师,研究方向:城市设计与旧城更新。E-mail: huangjianwen@gdut.edu.cn。

earthquake disaster prevention suitability planning of rural land. To prevent the calculation value from being too subjective, the combined entropy coefficient model is used to weight the evaluation index calculated by the logistic equation, and the new rural earthquake disaster prevention suitability planning model based on ANSYS is completed. The case study proves that the calculated results obtained by the proposed method have a high degree of fitting with the actual results, can successfully complete the quantification of the evaluation indicators, and can objectively complete the rural earthquake disaster prevention suitability planning analysis.

**Keywords:** ANSYS software; rural land planning; seismic suitability; model analysis

## 0 引言

受到交通拥堵、空气污染、房价激增的影响,老城区的居住适宜性降低,人们开始向郊区和乡村迁移。在乡村抗震防灾适宜性规划中,其抗震适宜性评价是乡村土地抗震防灾工作的基础任务,国内外学者对此进行了大量的研究。文献[1]方法以江苏省兴化市为例,对其城市土地的抗震性进行了分析,采用传统方法,根据土地评价范围对土地勘测点进行地质分区,结合回归模型完成土地抗震适宜性的评价参数赋值,结合 GIS 系统对勘测地区进行勘测模拟。该方法计算所得的抗震适宜性评价指标量化过程较为主观。文献[2]方法同样采用传统方法对勘测点土地进行地质分区,根据勘测点地形地貌的数据对应引入耦合式模型中,采用多组实地勘测数据进行组合验算,结合 GIS 系统对数据进行空间栅格,校对完成城区土地抗震适宜度分析。该方法在操作中的空间栅格更适用于局部地质的分析,所需的实地勘测数据较多,导致一定的人力物力消耗。文献[3]方法通过分区法结合 GIS 对其分区范围内的地质特点进行灾害模拟,从地震工程学角度要求其建筑物具有建造适宜性,从而主要提出施工问题,并简略对土地抗震适宜性进行了传统分区评价。

本文在以上基础上提出了基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析,为了弥补 GIS 空间的复杂性问题,采用 ANSYS 软件对 GIS 空间进行有限元分析操作,达到修复空间结构场的理算数据目的。根据 Logistic 方程对乡村土地抗震防灾适宜性规划中的数据变量做非线性回归分析,为了防止方程计算结果存在过于主观的问题,结合了组合熵系数法对评价指标进行加权分析,并通过某乡村进行土地抗震防灾适宜性规划的实例分析。

## 1 ANSYS 软件 GIS 在空间的应用

目前,在地区抗震防灾的适宜性规划方面上,主

要采用有限元软件对其进行建模分析<sup>[4]</sup>。我国较早引入了 MSC 和 ANSYS 软件,且这两款软件的适用性研究的也较为成熟,鉴于课题涉及到 GIS 系统接口联合处理问题,故选择了建模功能较好,且分析能力较强的 ANSYS 有限元分析软件,对研究中所涉及的模型数据进行计算。

ANSYS 的基础结构即有限元分析,兼容了热场、电磁场、声学场和结构场等,被应用于物理、化学、生物、工程等领域。为了分析乡村抗震防灾适宜性规划问题,本文采用 ANSYS 软件对 GIS 空间进行结构场分析<sup>[5-6]</sup>。ANSYS 的操作中会出现 GUI(界面操作)和 APDL(参数化语言操作),为了更好地对模型中的错误数据进行更改和调整,使模型具有更好的可行性,故采用 APDL 进行软件操作。其分析操作流程如图 1 所示。

## 2 Logistic 非线性回归模型

根据上述空间数据分析流程进行预测模型优化,在基坑沉降和山体滑坡等灾害的预测中,需要采用 Logistic 模型对二分类变量进行非线性数据回归<sup>[7-8]</sup>。乡村土地的规划以其土地抗震防灾适宜性评价为依据,因此需要对乡村土地抗震适宜性进行评价。在评价中,以乡村土地是否发生地震灾害为因变量,当其判定数值为 0 时,代表不出现地震灾害,而数值为 1 时,代表出现地震灾害。其自变量为各个地区地震灾害的影响因子。根据地震灾害的非连续特征,采用非线性回归来表示自变量和因变量之间的关系。用 Logistic 方程对地震灾害进行回归分析,其公式为:

$$P(y=1|x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) = \frac{1}{1 + e^{-\epsilon_i}} \quad (1)$$

$$\epsilon_i = \alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_i$  表示用线性函数表达的地震影响因子,

$P(y = 1 | x_{ki})$  表示地震发生概率和以  $x_{ki}$  代表的自变量是预测非线性地震灾害的单调函数; $x_{ki}$  表示地震概率的影响因子,同时也是乡村抗震防灾适宜性的评价指标。伴随  $x_{ki}$  的增大  $P(y = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$  同时单调递增,反之, $x_{ki}$  减小  $P(y = 1 | x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki})$  也随之单调递减,在  $(0, 1)$  范围内进行取值,并且表现为 S 状曲线,随机变量的

累积分布曲线与这种曲线较为相似。采用 Logistic 方程计算乡村地震灾害出现概率,初始阶段各项评价指标的变化较小,表明地震灾害出现概率的变化较小,随后在中间阶段,伴随着各项评价指标之间的差异变大,表示其对应的地震灾害出现概率发生了变化波动,但随着评价指标的样本数量积到达上限,乡村地震灾害出现概率的数值将不再变化。

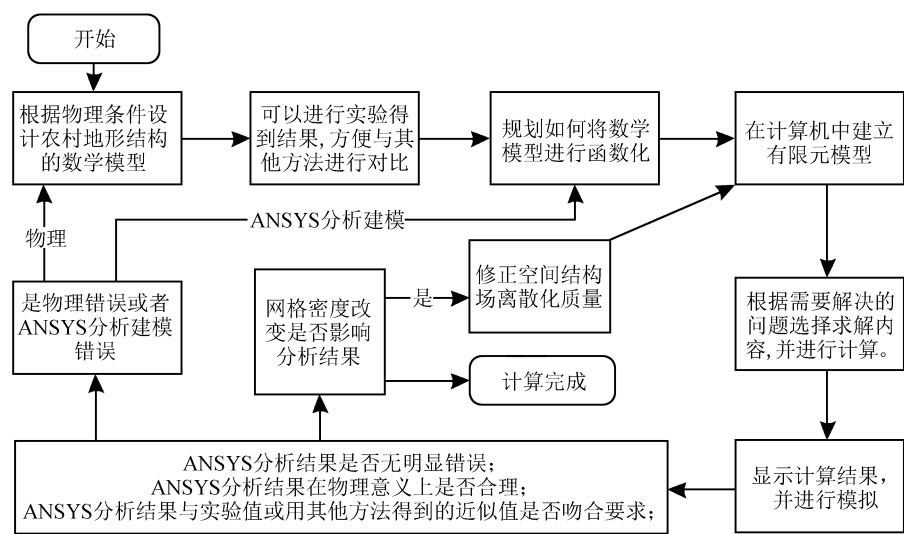


图 1 采用 ANSYS 对 GIS 空间数据分析流程  
Fig.1 Process for analyzing GIS spatial data using ANSYS

设乡村地震灾害的出现概率为  $P$ ,  $(0, 1)$  为  $P$  的取值范围。自变量  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$  为公式中的各项指标,  $P$  为因变量, 采用 Logistic 模型可以表达为:

$$P = \frac{e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k \cdot x_{ki}}}{1 + e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k \cdot x_{ki}}} \quad (3)$$

从式(3)中可以得知,在无指标干扰下,乡村地震灾害出现与未出现的概率比并非常数,其数值为  $\alpha$ ;其中回归系数采用  $\beta_k$  表示。假设  $\beta_k$  为确定值时,既可以通过  $\beta_k$  推导出某一乡村的地震灾害出现概率  $P$ ,根据  $P$  的数值大小判断乡村土地抗震适宜性的等级关系,从而达到量化乡村土地抗震适宜性的目的。因此,需要将该地区此前的历史地震情况建立地震情报库,将乡村抗震适宜性的评价指标  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$  引入 Logistic 模型中进行反向推算,求出逻辑回归系数  $\beta_k$ ,从而求出评价该地区抗震适宜性各项指标的对应数值。

### 3 组合熵系数模型分析

为了防止上述回归方程数据在计算上出现理论

误差,因此采用组合熵系数法确定回归方程中评价指标的加权向量<sup>[9-10]</sup>。

设原始化数据参数归一化后得出为  $\beta = (\beta'_{ij})_{m \times n}$ ,即存在  $n$  个指标对地震灾害出现概率的  $m$  个可能因素进行评估,求出第  $j$  个指标的熵值为:

$$H_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:  $f_{ij} = \beta'_{ij} / \sum_{i=1}^m \beta'_{ij}$ , 当  $f_{ij} = 0$  时,令  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

$H_j$  越大说明目标评价指标的数值与计算中得出的最优解的数值差异越小,即计算值最接近实际值,故此将组合熵模型公式定义为:

$$\lambda'_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (5)$$

式中:  $0 \leq \lambda'_j \leq 1; \sum_{j=1}^n \lambda'_j = 1$ 。根据指标所对应熵值确定熵权系数,求出给定灾害因子集合和灾害判定集合,并据此分析各项指标在与实际值对比的近似度,运用主观权重法将主观计算值和客观权重值进行融合,从而得到各项评价指标的权重值:

$$\lambda_j = \lambda'_j \lambda''_j / \sum_{j=1}^n (\lambda'_j \lambda''_j) \tag{6}$$

式中: $\lambda''_j$  ( $0 \leq \lambda''_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \lambda''_j = 1$ )。以此作为各项评价指标的权重值。由此完成基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析。

4 乡村抗震防灾适宜性规划实例分析

应用第 3 节的防震防灾规划模型来对实际乡村进行分析。某乡村规划占地为 430 km<sup>2</sup>,位于某河流下游,为低山丘陵地貌。整个乡村土地的 60%为低山岗,其中地形坡度较大的地区约占 20%,存在不同程度的滑坡灾害和坍塌灾害的可能。该乡村断裂构造较为复杂,处于 5 条断裂带余脉上。此外,河流两岸容易发生流水侵蚀,可能出现崩滑灾害,并且易受地震影响从而出现大面积沉陷<sup>[11-12]</sup>。经过乡村的河流在历史上发生过多次改道,河流古道上存在较多的砂土层,受地震影响容易发生砂土液化<sup>[13]</sup>。除了自然因素外,人为因素造成的地下水抽取过量

形成地下漏斗,都可能威胁该乡村的土地结构的稳定性<sup>[14-15]</sup>。故而对乡村抗震适宜性建立了评价指标,指标体系如图 2 所示。

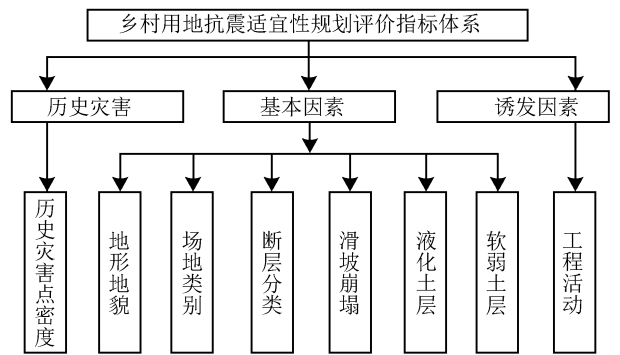


图 2 乡村抗震适宜性规划评价指标  
Fig.2 Evaluation index of rural seismic suitability planning

由图 2 可知,引发乡村地震灾害的主要原因可分为三类:历史灾害、基本因素以及诱发因素。结合空间插值法,在 ANSYS 仿真平台上对 GIS 空间内的评价指标进行赋值。其赋值结果如表 1 所列。

表 1 各项评价指标赋值结果

| Table 1 Assignment results of various evaluation indicators |                   |              |               |                  |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|------------------|
| 评价指标赋值                                                      | 0.5~1(0.67)       | 0            | 1             | 0~0.5(0.33)      |
| 地形地貌                                                        | 河漫滩区              | 平坦地区         | 陡峭山地          | 丘陵地区             |
| 液化土层                                                        | $5 < I_{IE} < 15$ | $I_{IE} = 0$ | $I_{IE} > 15$ | $0 < I_{IE} < 5$ |
| 软弱土层                                                        | $5 < S_T < 15$    | $S_T = 0$    | $S_T > 15$    | $0 < S_T < 5$    |
| 滑坡崩塌                                                        | 有条件稳定             | 稳定           | 不稳定           | 较稳定              |
| 断层分布                                                        | 活动性中              | 无活动性         | 活动性强          | 活动性弱             |
| 场地类别                                                        | 类场地               | 类场地          | 类场地           | 类场地              |
| 灾害点密度                                                       | 较密                | 无            | 密集            | 稀疏               |
| 人类工程活动                                                      | 保护区边缘区            | 各类保护区、禁区     | 非保护区、禁区       | 二级保护区            |

由表 1 可知在 (0,1) 区间内对各项评价指标采用分级赋值。根据对乡村地震灾害的出现概率属性可以知道,灾害密度越大的土地规划范围越容易出现灾害,所以赋值为 0~1 由小渐大。其中液化指数为  $I_{IE}$ ,软土塌陷指数为  $S_T$ ,其指标数值

越大,出现灾害的可能性越高。在 ANSYS 软件将评价区域采用网格功能进行划分,得到 40 300 个网格,并利用 ANSYS 软件将数值输入到非线性回归模型之中,利用模型进行运算,其运算结果如表 2 所列。

表 2 评价指标回归运算结果

| Table 2 Regression results of evaluation indexes |        |       |        |       |       |                 |      |
|--------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-----------------|------|
| 评价指标                                             | 发生比率   | 显著水平  | 卡方值    | 回归系数  | 标准误差  | Exp(B)的置信区间 95% |      |
|                                                  | /OR    | /P    | /Wald  | /βk   | /S.E  | 上限              | 下限   |
| 地形地貌                                             | 0.423  | 0.012 | 5.336  | 0.469 | 0.203 | 0.68            | 0.02 |
| 断层分布                                             | 2.126  | 0.002 | 1.239  | 0.638 | 0.573 | 3.72            | 0.90 |
| 场地类别                                             | 0.926  | 0.031 | 9.345  | 0.749 | 0.245 | 2.63            | 0.18 |
| 滑坡崩塌                                             | 2.693  | 0.021 | 4.145  | 1.083 | 0.532 | 5.31            | 1.38 |
| 软弱土层                                             | 0.163  | 0.018 | 22.83  | 1.362 | 0.285 | 0.21            | 0.03 |
| 液化土层                                             | 2.692  | 0.009 | 11.22  | 1.159 | 0.346 | 3.91            | 0.83 |
| 灾害点密度                                            | 1.724  | 0.002 | 11.83  | 0.581 | 0.169 | 2.95            | 1.27 |
| 人类工程活动                                           | 0.726  | 0.039 | 2.126  | 1.347 | 0.924 | 1.19            | 0.21 |
| Constant                                         | 11.470 | 0.134 | 68.087 | 7.388 | 3.277 |                 |      |

根据表 2 中可以知道  $P$  是显著水平,表示统计量在检验过程中拒绝方向的几率,通过  $P$  可以求得自变量取得定值时,其对应的因变量的预测几率数值关系为  $P < \alpha$ ,那么 0 假设被拒绝,即每组数值的划分都与实际的因变量数值有关,说明模型计算数

$$P = \frac{e^{7.388+0.469x_1+0.638x_2+0.749x_3+1.083x_4+1.362x_5+1.159x_6+0.782x_7+1.347x_8}}{1+e^{7.388+0.469x_1+0.638x_2+0.749x_3+1.083x_4+1.362x_5+1.159x_6+0.782x_7+1.347x_8}}$$

(7)

根据式(7)中的非线性回归方程能够得出  $\beta_k$  均为正数,说明因变量和自变量呈现非线性增长的相关趋势,当  $\beta_k$  数值越高,说明其对相对应的因变量影响越大。通过模型可以知道,滑坡崩塌、液化土层、软土指标以及人类活动对该乡村抗震适宜性评价的影响较高,因此以上各项指标不容忽视。因此根据各项权重值较与逻辑系数的比值关系,结合组合熵可以求出,各项指标的权重值:

表 3 各项指标的权重值

| Table 3 Weight values of various indicators |       |       |       |       |       |       |        |       |
|---------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 指标名称                                        | 场地类别  | 地形地貌  | 滑坡崩塌  | 断层分布  | 液化土层  | 软弱土层  | 人类工程活动 | 灾害点密度 |
| 指标权重                                        | 0.101 | 0.063 | 0.147 | 0.086 | 0.158 | 0.184 | 0.182  | 0.079 |
| 逻辑回归系数                                      | 0.749 | 0.469 | 1.083 | 0.638 | 1.159 | 1.362 | 1.347  | 0.581 |

表 4 抗震适宜性评价与灾害出现概率的关联性结果

| Table 4 Correlation results between seismic suitability evaluation and disaster occurrence probability |           |           |           |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 适宜性评价                                                                                                  | 不适宜       | 有条件适宜     | 较适宜       | 适宜        |
| 地震灾害出现概率                                                                                               | 0.60~1.00 | 0.40~0.60 | 0.20~0.40 | 0.00~0.20 |

由表 4 可以得到地震灾害发生的概率与乡村土地抗震适宜性的关系,可看出适宜性乡村土地发生地震灾害的概率明显小于不适宜土地区域。结合表 1~表 3 的结果,可为乡村抗震研究中土地的适宜性规划提供一定的参考,但由于本文考察的灾害因素相对较少,仍需在将来投入大量的工作,以开展更为详尽深入的研究。

5 结论

为了满足乡村土地规划的适宜性,本文根据某乡村的实际情况,建立了乡村土地抗震适宜性的指标,并根据 Logistic 模型对数据指标进行回归分析,配合组合熵理论求出评价指标的权重值,利用 ANSYS 软件完成乡村土地数据的结构性分析,由此完成基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析。根据实际案例分析证明,基于 ANSYS 的新型乡村抗震防灾适宜性规划模型分析,能够直观地展示出乡村土地抗震适宜性的量化评价结果。由

值和实际数值相比拟合度较高,相反较低。在很多领域 0.05 的  $P$  数值一般被默认为边界范围。表格中的各项系数在  $P < 0.05$  范围内说明模型拟合度良好,具有一定的统计意义,能够预测灾害发生的几率。其所构建的回归方程为:

$$\lambda_j = \lambda'_j \lambda''_j / \sum_{j=1}^n (\lambda'_j \lambda''_j)$$

(8)

式中: $\lambda''_j$  ( $0 \leq \lambda''_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \lambda''_j = 1$ ) 为各项指标的权重值。将各项指标加权计算后所得结果如表 3 所列。将灾害可能出现的概率计算公式引入软件中,得出所测试乡村的抗震适宜性评价的数值结果,如表 4 所列。

于本文资料的局限性,仅能对乡村中 8 个灾害影响因素进行分析,如何让乡村抗震防灾适宜性规划研究更加客观,还需进行进一步研究。作者水平有限,文中遗漏之处及错误难免,望请读者给予批评指正。

参考文献(References)

[1] 袁媛.江苏兴化城市土地抗震适宜性评价方法研究[J].山西建筑,2016,42(2):42-44.  
YUAN Yuan.Research on Evaluation Method of Urban Land Seismic Suitability in Xinghua City of Jiangsu Province[J]. Shanxi Architecture,2016,42(2):42-44.  
[2] 李波,马东辉,苏经宇,等.土地防灾适宜性评价的变权集对分析-Vague 集耦合模型[J].建筑科学,2017,33(3):19-24.  
LI Bo,MA Donghui,SU Jingyu,et al.Coupling Model Based on Variable Weight Set Pair Analysis and Vague Set for Aseismic Suitability of Urban Construction Land[J].Building Science, 2017,33(3):19-24.  
[3] 周俊.贵州金阳移动建设场地工程地质条件适宜性浅析[J].世

- 界有色金属,2017(6):157,159.
- ZHOU Jun.Suitability Analysis of Engineering Geological Conditions of Jinyang Guizhou Mobile Construction Site[J].World Nonferrous Metals,2017(6):157,159.
- [4] 辛峻峰,韩兆林,焦煜,等.海洋平台地基抗震适宜性诊断方法[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2017,38(6):93-97.
- XIN Junfeng, HAN Zhaolin, JIAO Yu, et al. Ocean Platform Foundation Aseismic Suitability Diagnostic Method[J].Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition),2017,38(6):93-97.
- [5] 史晓瑞,商彦蕊,胡佳,等.石家庄市应急避难场所适宜性评价[J].震灾防御技术,2016,11(3):656-666.
- SHI Xiaorui, SHANG Yanrui, HU Jia, et al. Emergency Shelter Suitability Evaluation of Shijiazhuang City[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2016,11(3):656-666.
- [6] 周子云,赵海龙,王铁成.型钢混凝土T形柱抗震性能试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(24):257-262.
- ZHOU Ziyun, ZHAO Hailong, WANG Tiecheng. Experimental Research on Seismic Behavior of Steel Reinforced Concrete T-shaped Column[J].Science Technology and Engineering,2017,17(24):257-262.
- [7] 黄骁,陈刚,刘新义.大兴规划新城地下空间开发地质环境质量研究[J].城市地质,2016,11(1):36-41.
- HUANG Xiao, CHEN Gang, LIU Xinyi. Study on the Geological Environment of Underground Space Development in Daxing Planning New Town[J].City Geology,2016,11(1):36-41.
- [8] 于富文,魏继东,冯玉苹.检波器-大地耦合响应对地震数据的影响[J].地球物理学进展,2017,32(1):339-343.
- YU Fuwen, WEI Jidong, FENG Yuping. How the Ground-Geophone Coupling Affects the Seismic Data[J].Progress in Geophysics,2017,32(1):339-343.
- [9] 简明,曾勇.基于ANSYS的抗震机柜有限元分析[J].机械工程师,2017(3):123-125.
- JIAN Ming, ZENG Yong, JIAN Ming, et al. Finite Element Analysis of Aseismic Cabinet Based on ANSYS[J].Mechanical Engineer,2017(3):123-125.
- [10] 王少华,孙红燕.基于ANSYS模型的2000kV直流电压发生器抗震性能评估[J].广东水利电力职业技术学院学报,2016,14(3):22-27,43.
- WANG Shaohua, SUN Hongyan. Seismic Performance Assessment of 2000 kV DC Voltage Generator Based on ANSYS Model[J].Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering,2016,14(3):22-27,43.
- [11] 李笑然,胡晓,邱庆霜,等.ANSYS黏弹性边界在拱坝抗震分析中的应用[J].人民黄河,2016,38(3):84-88.
- LI Xiaoran, HU Xiao, DI Qingshuang, et al. Application of Viscoelastic Boundary in Seismic Response Analysis of Arch Dam with ANSYS[J].Yellow River,2016,38(3):84-88.
- [12] 李春光,刘振中,张志军,等.基于ANSYS WORKBENCH的纳米二氧化硅混杂纤维混凝土地下结构抗震性能研究[J].混凝土与水泥制品,2016(11):54-57.
- LI Chunguang, LIU Zhenzhong, ZHANG Zhijun, et al. Research on Seismic Performance of Hybrid Fiber Concrete Underground Structure with Nano-SiO<sub>2</sub> Based on ANSYS WORKBENCH[J].China Concrete and Cement Products,2016(11):54-57.
- [13] 王少华,孙红燕.基于ANSYS模型的2000kV直流电压发生器抗震性能评估[J].广东水利电力职业技术学院学报,2016,14(3):22-27,43.
- WANG Shaohua, SUN Hongyan. Seismic Performance Assessment of 2000 kV DC Voltage Generator Based on ANSYS Model[J].Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering,2016,14(3):22-27,43.
- [14] 朱雅婷,唐浩,周旻,等.基于ANSYS有限元仿真的再生混凝土砌块砌体墙抗震性能研究[J].天津城建大学学报,2016,22(5):325-328.
- ZHU Yating, TANG Hao, ZHOU Yang, et al. Research of Seismic Performance of Recycled Concrete Block Masonry Wall Based on ANSYS Finite Element Simulation[J].Journal of Tianjin Chengjian University,2016,22(5):325-328.
- [15] 钟珉,程永锋,代泽兵,等.变电站电气设备分级抗震设防原则研究[J].地震工程学报,2015,37(2):571-576.
- ZHONG Min, CHENG Yongfeng, DAI Zebing, et al. Study on Grading Seismic Fortification Standards of Electrical Equipment at Transformer Substation[J].Northwestern Seismological Journal,2015,37(2):571-576.