



基于目标风险的地震区划图

潘华 张萌

Risk-targeted seismic zoning maps

Pan Hua, Zhang Meng

引用本文:

潘华, 张萌. 2022. 基于目标风险的地震区划图. *地震学报*[J], 44(5): 743–751. DOI: 10.11939/jass.20220161
Pan H, Zhang M. 2022. Risk-targeted seismic zoning maps. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 743–751. DOI: 10.11939/jass.20220161

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220161>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

辽宁地区地壳垂直形变特征与地震危险性分析

Characteristics of crust vertical deformation and seismic risk analysis in Liaoning area
地震学报. 2017, 39(6): 891–898 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.007>

基于遗传算法的地震烈度衰减参数反演方法及应用

Inversion method and application of seismic intensity attenuation parameters based on genetic algorithm
地震学报. 2020, 42(4): 435–446 <https://doi.org/10.11939/jass.20190171>

基于Newmark模型的概率地震滑坡危险性分析方法研究

Probabilistic seismic slope displacement hazard analysis based on Newmark displacement model: Take the area of Tianshui, Gansu Province, China as an example
地震学报. 2019, 41(6): 795–807 <https://doi.org/10.11939/jass.20180075>

2014年新疆于田 M_S 7.3地震的发震构造及余震特征

Seismogenic fault and aftershock characteristics for the 2014 M_S 7.3 Yutian earthquake, Xinjiang
地震学报. 2021, 43(1): 48–56 <https://doi.org/10.11939/jass.20200044>

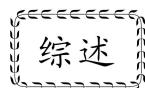
烈度仪用于地震预警的可靠性研究——以高雄 M_S 6.8地震为例

Reliability of seismic intensity instrument used in earthquake early warning: Taking the Gaoxiong M_S 6.8 earthquake as an example
地震学报. 2017, 39(6): 955–964 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.013>

利用反透射系数确定理论地震图计算过程中的积分限阈值

Determining the threshold value in upper limit of wavenumber integration by reflection-transmission coefficient in theoretical seismograms calculation
地震学报. 2018, 40(6): 719–727 <https://doi.org/10.11939/jass.20180013>

潘华, 张萌. 2022. 基于目标风险的地震区划图. 地震学报, 44(5): 743-751. doi: 10.11939/jass.20220161.
Pan H, Zhang M. 2022. Risk-targeted seismic zoning maps. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 743-751. doi: 10.11939/jass.20220161.



基于目标风险的地震区划图^{*}

潘 华[†] 张 萌

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 为保证国土范围内建筑倒塌风险的一致性, 提出了基于目标风险的地震区划图. 该图通过求取地震危险性曲线与结构易损性曲线的卷积的风险积分方法计算目标风险. 本文介绍了采用风险积分法确定基于目标风险的地震动参数的基本原理, 回顾了这项技术在国内外研究与应用的最新进展. 此外, 还讨论了基于目标风险的地震区划图未来的发展及可能面临的问题.

关键词 风险积分 目标风险 可接受风险 地震区划图 抗震设计图

doi: 10.11939/jass.20220161 **中图分类号:** P315.9 **文献标识码:** A

Risk-targeted seismic zoning maps

Pan Hua[†] Zhang Meng

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: To ensure the consistency of building collapse risk within the country, a risk-targeted seismic zoning map is proposed. The risk integral method calculates the target risk by the convolution of the seismic hazard curve and the structural vulnerability curve. Currently, the use of risk-targeted seismic zoning maps has been widely used in practice in the United States, and related studies have been conducted in France, Romania, Canada, Indonesia, Europe and China. This article introduces the basic principles of using the risk integral method to determine the risk-targeted ground motion parameters and reviews the recent progress of research and application of this technique in China and abroad. In addition, we discuss the future development of risk-targeted seismic zoning maps and some of the problems may face.

Key words: risk integral; risk-targeted; acceptable risk; seismic zoning map; seismic design map

* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(DQJB21K51)资助.
收稿日期 2022-07-30 收到初稿, 2022-08-31 决定采用修改稿.
作者简介 潘华, 博士, 研究员, 主要从事地震区划、概率地震危险性分析、地震活动性等方面的研究, e-mail: panhua.mail@163.com



引言

地震区划图是为了满足国土范围内一般建设工程抗震设计的需要而提出的,后续随着地震区划图应用范围的扩展以及地震危险性评价技术和抗震设计理念与方法的发展,地震区划图形成了双图模式,即地震危险性图(seismic hazard map)与抗震设计图(seismic design map)([张萌等, 2017](#)). 地震危险性图主要反映依据地震科学认识和基础观测资料评估得到的国土地震危险性分布,抗震设计图则继承了传统地震区划图的主要功能,反映国土范围内建筑抗震设计所需地震动参数的分布([潘华等, 2017](#)). 抗震设计图是国际上通用的中文译称,该图与建筑抗震设计规范配合使用,与我国现行地震区划图含义和用途一致,故下文不再对两者加以区分,但对于国外应用依然称为抗震设计图.

当前各国正式颁布的地震区划图几乎均基于“危险性一致”原则编制,即以全国一致的概率水平(或重现期)定义地震区划图的基准地震动参数,如50年超越概率2%(重现期2 475年)地震动. 基准地震动参数是规范中用来确定各级别抗震验算地震动的基准,它往往对应全国抗震设防要达到的重点目标. 建筑抗震设防通常有即刻可用(immediate occupancy, 缩写为 IO)、生命安全(life safety, 缩写为 LS)和倒塌防护(collapse prevention, 缩写为 CP)三个级别的抗震设防目标,我国将其概括为小震不坏、中震可修、大震不倒. 大多数国家以生命安全(LS)为重点防护目标,而美国等发达国家已发展到以倒塌防护(CP)为重点设防目标. 生命安全目标允许结构在遭遇设计地震动作用时发生破坏,出现可控的有限的塑性变形,但不会造成人员生命的损失;而倒塌防护强调结构在遭遇所考虑的最强地震作用时,允许发生严重的塑性变形,但是不能发生结构的倒塌,以避免大量人员因倒塌而损失生命. 因此,大多数国家的地震区划图以50年超越概率10%(重现期475年)相应的地震动参数作为基准地震动参数,我国称之为基本地震动([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](#))或设计基本地震动([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](#)). 美国最早也以50年超越概率10%地震动为基准,1997年开始以50年超越概率2%(重现期2 475年)相应的地震动参数为基准地震动参数,建筑设计规范中称其为最大考虑地震(maximum considered earthquake, 缩写为 MCE)地震动([Federal Emergency Management Agency, 1998; 潘华等, 2017](#)),2009年以来开始采用基于目标风险的最大考虑地震(risk-targeted MCE, 缩写为 MCE_R)地震动.

美国在更新2009版国家地震减灾计划(National Earthquake Hazards Reduction Program, 缩写为 NEHRP)建筑设计法规时,地震工程学家们认识到,由于地震动特征的复杂性与不确定性,以及建筑构建过程中在建设质量、建筑材料及其性质的稳定性、工程措施实施状况等方面存在的难以预知的不确定性,基于MCE地震动设计的建筑物并不能保证全美在遭遇MCE地震动作用时能够达到一致的倒塌防护水平.为此,提出了基于目标风险的最大考虑地震的概念([Luco et al, 2007](#)),采用目标风险水平为50年地震倒塌概率1%的地震动参数MCE_R为基准地震动参数编制抗震设计图,并纳入2009版NEHRP法规文件和2010版美国土木工程师协会(American Society of Civil Engineering, 缩写为 ASCE)设计规范([Federal Emergency Management Agency, 2009; American Society of Civil Engineering, 2010](#)).

对于基于目标风险的地震区划图(risk-targeted seismic design maps),目标风险(risk-targeted)是抗震设计要考虑的最大失效风险([Luco et al, 2007](#)),依据目标风险确定的地震动参

数称为目标风险地震动(risk-targeted ground motion)、目标性能地震动(target performance ground motion)、风险一致地震动(uniform risk ground motion)、失效(倒塌)概率一致地震动(uniform failure (collapse) probability ground motion)、基于性能的地震动(performance-based ground motion)等,其实质都是一样的.

目前,基于目标风险的地震区划图在美国已被广泛应用,法国、罗马尼亚、加拿大、西班牙、伊朗和印度尼西亚等国家以及整个欧洲也进行了针对抗震设计规范修订的研究.例如: Douglas 等(2013)针对欧洲 Eurocode 8 规范,讨论了法国大陆地区的目标风险地震区划; Allen 等(2015)对加拿大国家建筑规范(National Building Code of Canada, 缩写为 NBCC)中的目标风险进行了讨论; Silva 等(2016)基于泛欧一致地震危险性项目的统一地震危险性图,给出了欧洲地区基于目标风险的地震动分布; Vacareanu 等(2018)采用与美国抗震设计图一致的方法在地震活动强烈的罗马尼亚编制了一致目标风险图; Iervolino 等(2017)采用同样的技术方法对整个意大利地区的地震风险进行了评估; Taherian 和 Kalantari (2021)使用中东地震模型(EMME14)中的地震危险性结果,编制了伊朗地区基于目标风险的地震区划图; 东南亚地区的印度尼西亚在 2012 年版的建筑设计规范 SNI-726-2012 中就采用了基于目标风险的最大考虑地震(MCE_R)抗震设计图,2017 年基于最新数据和认识对图件进行了更新,2019 年又在 2017 年图的基础上,经易损性分布修订等工作,推出目标风险为 50 年倒塌概率 1% 的新抗震设计图(Sengara *et al.*, 2020); Kharazian 等(2021)基于西班牙半岛新的地震危险性评价结果,研究了考虑倒塌和屈服两种不同破坏状态的目标风险抗震设计图编制,并探讨在考虑一致风险假设的情况下地震动确定方法是否会对现行设计地震动 PGA 值产生显著影响; 张萌和潘华(2022)探讨了将核电工程中广泛采用的确定基于性能的地震动参数的“设计因子法”用于确定目标风险地震动,并编制了中国大陆地区基于目标风险的地震区划图,同时对倒塌概率、失效风险概率、易损性标准差等几个关键参数的合理取值问题进行了讨论.上述工作体现了未来地震区划图发展的可能趋势.

本文拟对基于目标风险的地震区划图中地震动参数确定的原理与方法、区划图研究与编制的现状以及未来的发展方向进行综述,以资我国地震区划图相关工作参考借鉴.

1 目标风险地震动确定方法

1.1 结构失效风险 P_F

地震工程学家很早就意识到未来地震在场点产生的地震动的随机性,以及建筑材料强度的变化、工艺质量、结构地震反应模型的不精确性等因素,会导致按所考虑的最大地震动进行抗震设计的结构在遭遇不超过该最大地震动的地震动作用时也存在倒塌的可能(FEMA, 2010).

美国应用技术委员会最早在其发布的 ATC3-06 报告中提出了地震风险的概念,以及计算结构地震风险的“风险积分”方法(Applied Technology Council(缩写为 ATC), 1978).该方法的核心是引入在给定地震动下结构失效的概率评价.采用概率方法对由地震动导致结构失效的概率进行估计,这些概率估计值称为易损性函数.易损性函数假定满足对数正态分布,可以用两个参数完全定义,即在某地震动下的倒塌概率和对数正态分布的标准差.风险积分方法通过地震危险性曲线与结构易损性函数卷积来计算结构的失效风险曲线,反映结构地震风险.失效风险 P_F 定义为给定时段内结构超越某一特定性能极限状态发生失效的概

率, 也可称为“不可接受性能年均发生率”或“目标性能指标”(target performance goal) (ASCE, 2005).

对于核电等重大工程, 根据结构抗震设计分类的不同, 规定了不同的失效风险 P_F 目标, 其中最为重要的安全物项(Seismic design category-5)对应最低失效风险为每年 10^{-5} (ASCE, 2005). 美国抗震设计图采用 50 年倒塌概率 1% 为失效风险概率.

失效风险 P_F 可采用下面两个积分公式之一计算得到(ATC, 1978; McGuire, 2004), 即

$$P_F = \int_0^{+\infty} H(a) \frac{dP_{Fa}}{da} da, \quad (1)$$

$$P_F = - \int_0^{+\infty} P_{Fa} \frac{dH(a)}{da} da, \quad (2)$$

式中: $H(a)$ 为经由概率地震危险性分析得到的地震危险性曲线; P_{Fa} 为结构易损性函数, 是给定地震动下结构失效概率的对数正态分布函数, 其一阶导数为给定地震动下结构失效概率密度, 它们都代表经设计后结构的失效防护抗震性能. 式(1)与式(2)是等效的(McGuire, 2004), 但式(1)更加方便, 因是直接与地震危险性分析链接, 并利用了地震危险性曲线, 因此, 在基于地震风险的相关应用中得到普遍的使用.

1.2 目标风险地震动

能够在设计中满足结构失效风险 P_F 目标的地震动, 称为“目标风险地震动”(risk-targeted ground motion, 缩写为 RTGM), 通常基于前述的风险积分方法来确定. 在核电工程的相关文献和设计法规中常被称为“基于性能的方法”(performance-based approach)(USNRC, 2007), 这是因为目标风险关联特定结构失效性能的极限状态, 如核设施的显著非弹性形变出现状态、一般建筑结构的倒塌极限状态等.

易损性函数的确定是风险积分的重要环节, 它涉及两个重要参数, 即给定地震动的倒塌概率和对数正态分布的标准差 β . 后者通常可以根据经验统计、结构动力反应分析等方法估计, 如美国抗震设计图编制中 β 取为 0.8 (Luco *et al.*, 2007). 给定地震动的倒塌概率反映抗震设计中可接受的风险程度. 在美国建筑设计相关的法规中, 均采用了“可接受的风险”(acceptable risk)的概念, 并采用以下具体限定: 在建筑法规所考虑的最强地震动作用下, 任何结构发生部分或完全倒塌的概率很小, 约为 10%; 对于居住大量人员的结构, 可接受的倒塌概率更小, 6% 左右; 对于履行应急、安全等重要功能的结构, 需要更低的倒塌概率, 接近 3% (Federal Emergency Management Agency, 2010).

当式(1)中, 失效风险 P_F , 概率地震危险性曲线 $H(a)$, 可接受失效发生概率 c (设计准则), 易损性函数的对数正态分布标准差 β 确定(经验设定), 则通过迭代的积分运算可以得到失效概率为 c 的目标风险地震动 A_c . 美国抗震设计图采用的目标风险地震动 MCE_R 对应 c 为 10%, P_F 为 50 年倒塌率 1%.

基于目标风险的地震动首先被应用于美国能源设施等重大建设工程的抗震设计中 (Kennedy, Short, 1994), 随后被吸纳入核电工程的相关技术标准, 如美国土木工程师协会标准 ASCE43-05 (ASCE, 2005)、美国核管会 NRC 监管指南 RG1.208 (USNRC, 2007). 这些标准基于目标风险地震动确定, 未采用“风险积分”方法, 而是提出了“设计因子法”. 该方法假定地震危险性曲线可以简化为幂函数, 结合对数正态分布函数, 最终建立目标风险地震动与概率一致地震动设计因子(调整系数)之间的关系式, 可用于确定基于目标风险的地震动或

基于性能的地震动，极大地方便了规范应用(Kennedy, 2011)。在吸收了核电工程的应用经验后，美国开始在建筑抗震设计中考虑基于目标风险的最大考虑地震 MCE_R (Luco *et al.*, 2007)，并以抗震设计图加以呈现。 MCE_R 的确定采用经典的“风险积分”方法。风险积分法和设计因子法各有长短，目前的应用场景差异也相对清晰，但实质上都能获得给定目标风险的地震动参数，为此，张萌和潘华(2022)探讨将“设计因子法”扩展应用于基于目标风险的地震区划图。当前“风险积分”方法依然是国际范围内基于目标风险的地震区划图编制采用的通用方法。

2 目标风险地震区划的研究与应用现状

2009年美国首先发布了基于目标风险的抗震设计图(FEMA, 2009)，并被ASCE7-10规范采纳(ASCE, 2010)，在此后的十多年中，又陆续更新了2014版、2018版美国国家地震区划图与相应的规范ASCE7-16、ASCE7-20，这使得这一新的抗震设计理念和地震区划技术得以被广泛接受。当前，国际上越来越多的国家开始探讨编制基于目标风险的地震区划图的必要性，并推广该图在建筑抗震设计规范中的应用。

在美国颁布的推荐标准FEMAP-750 (FEMA, 2009)和抗震设计准则ASCE7-10 (ASCE, 2010)中，均采用风险积分方法编制基于目标风险的抗震设计图，但图件的表征方式在ASCE7-10中更加典型(潘华等, 2017)，为 MCE_R 的等值线图(图1)，在此后更新的各版中均采用同样的方式。以风险积分法确定地震动参数时，采用 $\beta=0.8$ (或0.6)， $c=0.1$ (对应地震动水平为MCE)， P_F 为50年倒塌率1%。Liel等(2015)的研究表明，采用与规范中相同的 c 和 β 时，受俯冲带地震影响的区域50年内的倒塌概率在0.21%到0.62%之间变化，而在近断层位置风险偏高，在某些情况下可达6%，故Liel等(2015)建议在ASCE7-10中考虑俯冲带地震和近断层效应。

Douglas等(2013)以法国现行的抗震设计规范Eurocode 8为基础，给出了中国大陆地区的以年 10^{-5} (对应地震动水平为50年超越概率10%)为目标倒塌概率的PGA抗震设计图(图2)。该研究发现，与基于目标风险的方法在美国城市的应用相比，目标风险地震动不会导致法国当前的地震危险性区划图有较大改变，也不会导致不同城市之间设计地震动相对大小的变化。

Allen等(2015)讨论了加拿大国家建筑规范(National Building Code of Canada)中所代表的地震风险。为了便于比较，对Luco等(2007)基于目标风险的地震动确定方法得出的地震动值与2015年NBCC提出的地震动值进行划分(50年超越概率2%)。对比结果显示，在加拿大西南

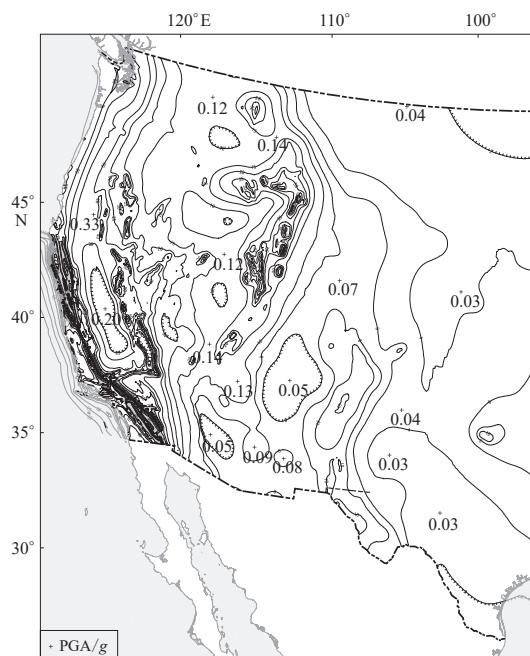


图1 美国西部基于目标风险的1 s 谱加速度抗震设计图(引自 ASCE, 2010)

Fig. 1 Risk-targeted seismic design map of 1 s spectrum acceleration in the western United States (after ASCE, 2010)

部, 1.0 s 反应谱周期加速度的目标风险地震动与一致危险性地震动的比值介于 0.84 到 1.0 之间.

Silva 等(2016)采用适用于欧洲地区建筑结构的数百个结构易损性模型和 SHARE 项目的地震危险性结果, 计算了欧洲地区的一般建筑结构的地震风险. 假设在重现期为 2 475 年的地震动下结构倒塌概率为 10%, 对于两个 β 值(0.6 和 0.8), 他们发现在重现期为 475 年的设计地震动加速度下结构倒塌概率为 10^{-3} — 10^{-2} , 并且基于损失估计, 选择 $c=10^{-3}$, $P_F=5.0 \times 10^{-5}$, 最终给出了欧洲地区新的基于风险的抗震设计地震动图(图 3).

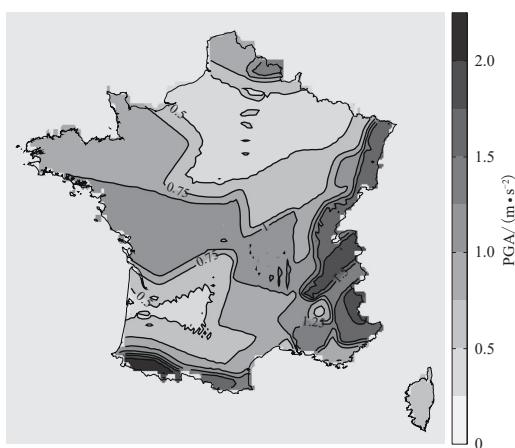


图 2 法国大陆基于目标风险的 PGA 抗震设计图(引自 Douglas *et al*, 2013)

Fig. 2 Seismic design map of risk-targeted PGA in France (after Douglas *et al*, 2013)

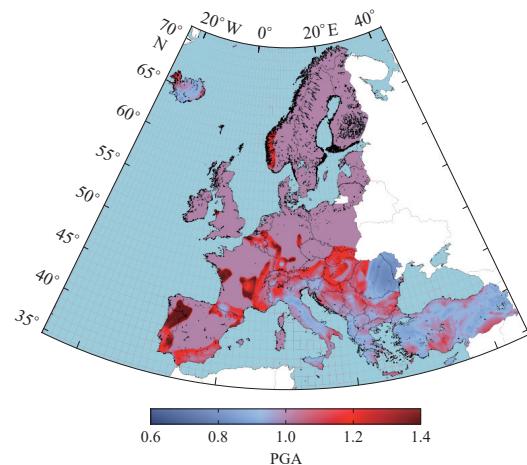


图 3 欧洲大陆基于目标风险的 PGA 风险系数图(引自 Silva *et al*, 2016)

Fig. 3 Risk coefficients map of risk-targeted PGA in Europe (after Silva *et al*, 2016)

Vacareanu 等(2018)对 Luco 等(2007)和 Silva 等(2016)提出的基于风险的参数取值在罗马尼亚进行了检验. 与之前的一致危险性地震区划图相比, 基于目标风险计算得到的 PGA 发生了显著变化. Vacareanu 等(2018)计算了 $\beta=0.8$, $c=0.1$ 和 0.001 条件下 475 年平均重现期的设计 PGA 与 $P_F=2 \times 10^{-4}$ 的风险目标 PGA 之间的比值. 对于较低的 c , 比值低于 0.6, 而对于较高的 c , 比值大于 1.0. 最后, 考虑到 475 年和 2 475 年这两个重现期, 使用 $c=0.1$ 和 $c=0.001$ 分别给出了新的基于目标风险的设计地震动图. 根据全国范围内的风险分布, 他们认为, 正如 Silva 等(2016)所建议的, 使用 $c=0.001$ 会导致 P_F 的分布不太现实.

Iervolino 等(2017)对整个意大利地区的地震风险进行了评估, 其结果表明: 整个领土内符合意大利抗震设计规范要求的钢筋混凝土结构的年倒塌风险介于 10^{-5} — 2.02×10^{-4} 之间; 对于单层钢筋混凝土结构, 其年倒塌风险介于 10^{-5} — 6.35×10^{-3} .

Taherian 和 Kalantari (2019)根据伊朗抗震设计规范采用的 $c=0.01$ 和 $\beta=0.8$ 的倒塌易损性曲线, 给出了伊朗地区基于目标风险的抗震设计图. Taherian 和 Kalantari (2021)又以 50 年内倒塌率为 1% 作为目标风险 P_F , 给出了两种不同结构($\beta=0.6$ 和 $\beta=0.8$)的地震风险图, 最后得出结论, 即基于 50 年超越概率 2% 的地震动水平进行抗震设计会导致全国范围内更均匀的倒塌风险.

Kharazian 等(2021)采用不同的 β 和 c 对西班牙进行地震风险分析, 以评估不同参数取值

对风险分析结果的影响. 最终认为当 $\beta=0.7$, $c=3\times10^{-4}$ 时得到的一般建筑结构的目标风险地震动与当前的设计地震动较为一致.

借鉴美国的做法, 印度尼西亚抗震建筑规范 SNI1726—2012 也吸收了基于风险的理念 (Sengara *et al*, 2016). 通过设定 50 年结构倒塌概率 1% 和 $c=0.1$, 该规范给出了 0.2 s 和 1.0 s 反应谱周期的地震动加速度值. 考虑到代表印度尼西亚更广泛地区的材料特性和其它相关因素, 该规范采用的 β 值约为 0.7.

近年来, 已有部分学者开展了针对我国一般建筑结构的地震风险评价与基于目标风险的设计地震动确定的相关研究. 例如: 王丛和吕大刚(2020)基于《建筑抗震设计规范》和第五代《中国地震动参数区划图》给出的地震动强度, 对我国一般建筑结构风险导向地震动决策参数进行了相关分析; 张萌和潘华(2022)探讨了将“设计因子法”应用于确定目标风险地震动, 提出了反应谱设计因子与地震动形状参数的拟合式, 并计算编制出中国大陆地区基于目标风险的地震区划图, 同时也针对适合我国国情的倒塌概率、失效风险水平、易损性标准差等几个关键参数的合理取值进行了研究.

3 基于目标风险的地震区划的发展

根据前文对基于目标风险的地震区划图编制原理、方法及国内外应用状况的分析与综述, 作者对基于目标风险的地震区划图未来的发展趋势及存在的问题提出了以下相应的见解与建议:

1) 采用基于目标风险的地震动进行结构设计, 可以预先了解结构达到特定性能水平(如不倒塌)的概率, 使得在国土范围内达到地震风险一致的抗震设防目标. 因此, 这一抗震设计理念会被更广泛地接受与应用, 基于目标风险的地震区划图也会成为世界范围内越来越多的国家建筑抗震设计规范的选择. 未来我国地震区划图也必然会采用地震危险性图与抗震设计图(或地震区划图)分开、并行发展的模式, 在更科学、更细致、更全面地呈现国家地震危险性的同时, 也能实现对国土抗震设防要求的区划. 同时, 国际上兴起的基于性能的设计, 以及更加关注倒塌风险控制的基于目标风险地震动的设计理念, 也将影响我国未来抗震设计规范的发展. 为此, 应尽快将基于目标风险的地震区划图的编制纳入我国地震区划业务, 完善抗震设防要求体系, 服务基于风险控制的抗震设计需求.

2) 基于目标风险的地震区划图, 针对的是设计规范中结构失效防护所考虑的最强地震动作用, 因此, 以最强地震动为抗震设计中各级地震作用确定的基准, 是设计规范应发展的方向, 体现的是随着社会经济的发展而提升国家重点保障的抗震设防目标(如由生命安全提升为倒塌防护). 我国目前地震区划图以 50 年 10% 超越概率下的地震动参数为基准地震动参数, 与现行的《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, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)相配套, 未来可以考虑过渡到基于目标风险的地震区划图, 适应设计规范可能的发展.

3) 合理确定结构“可接受风险”, 也即规范中考虑的最强地震动的倒塌概率, 对易损性函数的确定比较重要, 也直接影响基于风险的地震动的合理确定. 我国当前建筑的抗震设计尚未提出明确的“可接受风险”目标, 在大多数结构的设计中只依靠来自于震例经验的构造措施实现抗倒塌性能, 难以给出明确的可接受的倒塌概率. 未来随着我国社会经济的发展, 以及国家以人为本的安全发展趋势, 应及时发展基于最强地震动作用下可接受失效风险的

抗震设计方法，并与各类结构的“可接受风险”目标达成共识。在编制基于目标风险的地震区划图时，应该对地震区划图适用的建筑或结构“可接受”的倒塌风险进行充分的论证。

4) 地震风险对易损性函数标准差 β 的变化比较敏感。当前国际上采用的标准差 β 值的范围为 0.5—0.8，各国都有所不同。在美国抗震设计图编制中采用 β 为 0.8 或 0.6，在欧洲这一数值偏高，这是由于不同地区建筑结构模型、设计标准、服役情况等不同，建筑结构易损性标准差的评估会存在一定差异，这会直接影响到各地区结构地震风险水平的评价。未来各国编制基于目标风险的地震区划图时，会针对本国建筑结构的基本国情，采用各自国家适用的结构易损性模型及标准差值。我国尚未提出能被广泛接受的结构倒塌易损性标准差值，也较缺乏针对我国国情开展的易损性标准差确定的研究。我国地域广大，各地地震危险性水平、社会经济发生状况、建筑结构特点、建设工艺水平、建筑材料性质等差异较大，必然导致易损性标准差的较大变化，因此，一方面要对我国全国和各地区适用的易损性标准差开展深入研究，另一方面也需要发展能够采用不同易损性标准差来编制基于目标风险的地震区划图的技术(张萌, 2021)。

参 考 文 献

- 潘华, 张萌, 李金臣. 2017. 美国地震区划图的发展: 地震危险性图与抗震设计图[J]. 震灾防御技术, 12(3): 511–522.
 Pan H, Zhang M, Li J C. 2017. Review of seismic zonation in United States, seismic hazard maps and seismic design maps[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(3): 511–522 (in Chinese).
- 王丛, 吕大刚. 2020. 基于抗震规范和地震动区划图的风险导向地震动决策参数分析[J]. 建筑结构学报, 41(8): 19–28.
 Wang C, Lü D G. 2020. Analysis of risk-targeted decision parameters of seismic ground motions based on seismic design code and ground motion zonation map of China[J]. *Journal of Building Structures*, 41(8): 19–28 (in Chinese).
- 张萌. 2021. 基于风险的地震动确定[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 45–48.
 Zhang M. 2021. *Risk-Targeted Ground Motion and Its Application*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 45–48 (in Chinese).
- 张萌, 潘华. 2022. 中国大陆地区建筑结构一致倒塌风险的设计地震动研究[J/OL]. 建筑结构学报. doi: [10.14006/j.jzjgxb.2021.0317](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0317).
- Zhang M, Pan H. 2022. Study on design ground motion for uniform collapse risk of building structures in mainland China[J/OL]. *Journal of Building Structures*. doi: [10.14006/j.jzjgxb.2021.0317](https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0317) (in Chinese).
- 张萌, 潘华, 李金臣. 2017. 美国建筑抗震设计的法规体系与设计地震动的确定[J]. 震灾防御技术, 12(2): 306–318.
 Zhang M, Pan H, Li J C. 2017. Building anti-seismic design regulations in the United States and its approach to ground motion design[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(2): 306–318 (in Chinese).
- 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 [S]. 北京: 中国标准出版社: 4.
- 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*[S]. Beijing: Standards Press of China: 4 (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 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 18–20.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 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*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 18–20 (in Chinese).
- Allen T I, Adams J, Halchuk S. 2015. The seismic hazard model for Canada: Past, present and future[C]//*Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building: An Earthquake-Resilient Pacific*. Sydney, Australia: Seismo-

- logy Research Center: 5.
- ASCE. 2005. *ASCE/SEI 43-05 Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components In Nuclear Facilities*[S]. Reston, Virginia: ASCE: 109–117.
- ASCE. 2010. *ASCE 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers: 207–211.
- ATC. 1978. *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, Report ATC 3-06*[R]. Washington D C: Applied Technology Council, National Bureau of Standards, U.S. Government Printing Office: 296–312.
- Douglas J, Ulrich T, Negulescu C. 2013. Risk-targeted seismic design maps for mainland France[J]. *Nat Hazards*, **65**(3): 1999–2013.
- Federal Emergency Management Agency, 1998. *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions*[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council: 10–18.
- Federal Emergency Management Agency. 2009. *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures: FEMAP-750*[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency: 21–28.
- Federal Emergency Management Agency. 2010. *Earthquake-Resistant Design Concepts: An Introduction to the NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures: FEMAP-749*[R]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency: 13–20.
- Iervolino I, Spillatura A, Bazzurro P. 2017. RINTC project: Assessing the (implicit) seismic risk of code-conforming structures in Italy[C]//6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Rhodes, Greece: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), Greece: 1545–1557.
- Kennedy R P, Short S A. 1994. *Basis for Seismic Provisions of DOE-STD-1020*[R]. Washington D C: USDOE: 1–4.
- Kennedy R P. 2011. Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants[J]. *Nucl Eng Des*, **241**(3): 648–656.
- Kharazian A, Molina S, Galiana-Merino J J, Agea-Medina N. 2021. Risk-targeted hazard maps for Spain[J]. *Bull Earthq Eng*, **19**(13): 5369–5389.
- Liel A B, Luco N, Raghunandan M, Champion C P. 2015. Modifications to risk-targeted seismic design maps for subduction and near-fault hazards[C]//12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. Vancouver, Canada: Civil Engineering Risk and Reliability Association: 1–8.
- Luco N, Ellingwood B R, Hamburger R O, Hooper J D, Kimball J K, Kircher C A. 2007. Risk-targeted *versus* current seismic design maps for the conterminous United States[C]//SEAOC 2007 Convention Proceedings. California: Structural Engineers Association of California: 1–7.
- McGuire R K. 2004. *Seismic Hazard and Risk Analysis*[M]. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute: 143–153.
- Sengara I W, Sidi I D, Mulia A, Asurifak M, Hutabarat D. 2016. Development of risk coefficient for input to new Indonesian seismic building codes[J]. *J Eng Technol Sci*, **48**(1): 49–65.
- Sengara I W, Irsyam M, Sidi I D, Mulia A, Asurifak M, Hutabarat D, Partono W. 2020. New 2019 risk-targeted ground motions for spectral design criteria in Indonesian seismic building code[C/OL]. *E3S Web Conf*, **156**(1): 03010.
- Silva V, Crowley H, Bazzurro P. 2016. Exploring risk-targeted hazard maps for Europe[J]. *Earthq Spectra*, **32**(2): 1165–1186.
- Taherian A R, Kalantari A. 2019. Risk-targeted seismic design maps for Iran[J]. *J Seismol*, **23**: 1299.
- Taherian A R, Kalantari A. 2021. Analysis of the risk-targeting approach to defining ground motion for seismic design: A case study of Iran[J]. *Bull Earthq Eng*, **19**(3): 1289–1309.
- USNRC. 2007. *A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion*[S]. Washington D C: USNRC: 17–18.
- Vacareanu R, Pavel F, Craciun I, Coliba V, Arion C, Aldea A, Neagu C. 2018. Risk-targeted maps for Romania[J]. *J Seismol*, **22**(2): 407–417.