

城市生命线网络防护资源优化配置研究

张宁

陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室

摘要：自然灾害与蓄意攻击作为常见的灾害背景，探究两种灾害背景下城市生命线网络防护资源的优化配置对于城市防灾规划具有重要的现实意义。自然灾害对城市生命线网络造成的风险是一种概率性风险。蓄意攻击对城市生命线网络造成的风险是一种策略性风险。明确了两种灾害风险下防护机理的巨大差异和目标防护优先级的不同，提出两种灾害风险与不确定性风险下防护资源优化配置的方法。

关键词：自然灾害；蓄意攻击；防护资源；优化配置

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2021.21.015

引言

城市生命线包括城市电力网络、城市供水网络、通信网络、交通运输网络、石油及天然气网络等，其对维持城市运转和居民正常生活至关重要，降低其在灾害下的风险是城市管理者的任务。

一、自然灾害下防护资源优化配置研究

现有自然灾害下防护资源优化配置研究方法主要为优化模型方法。随着城市生命线网络复杂程度不断提高，对其进行防护将形成数量巨大的资源配置备选方案，传统方法难以应对，因而优化模型方法逐渐发展起来。优化模型方法主要根据研究对象和目标确定优化配置的目标函数，在一定的约束条件下，以最大化或者最小化目标函数为目的，采用合适的优化算法，寻得最优的资源配置方案。具体的优化模型可分为：①确定性优化模型，包括线性规划、整数规划等。Dodo等^[1]建立线性规划模型，对区域地震防灾资源进行配置。②随机优化模型，包括两阶段随机优化模型及多阶段随机优化模型等。如Peyghaleh等^[2]采用双阶段随机优化模型，对地震灾害下供水管网等生命线体系的防护资源配置进行研究。如Xu等^[3]利用多阶段随机优化模型，对城市年度地震损失及防灾资源投入进行研究。

对于自然灾害而言，量化分析方法均较为成熟。一是各类不同烈度等级自然灾害的发生概率量化估计方法较为成熟，如地震灾害，根据研究区域的历史地震

数据和地质条件等资料，可以进行地震灾害概率分析（PSHA），得出研究区域不同地震烈度及其相关动参数的联合超越概率；二是各类城市生命线工程设施在不同烈度等级的冲击下，易损性和毁伤概率是客观的，可以根据工程试验或者历史灾害经验数据进行定量计算。概率性风险对目标的毁伤不存在主观故意性，取决于自然灾害发生概率及在特定烈度冲击时不同单元设施毁伤的可能性。对自然灾害下城市生命线网络的防护资源优化配置，可以直接根据各类生命线单元设施的重要度和易损性，结合相关决策分析和优化算法进行研究。

在概率性风险下，防护方优先防护能带来最大效益的关键单元，将防护资源投入至单元得到完全防护，然后再关注防护效益次大的单元，直到资源耗尽。对防护方而言，概率性风险下的分配标准是尽可能增加单位防护资源的防护效益，概率性风险下能产生最大防护效益的单元往往可以得到完全防护。

二、蓄意攻击下防护资源优化配置研究

2001年911事件发生后，国际上开始重视反恐防护资源的配置工作。到目前为止，学者们开展了蓄意攻击下防护资源优化配置研究，并取得了相应成果。

比例分配方法：依据各个防护目标的体量或价值，按比例进行防护资源分配。2005年美国联邦政府依据每个州的人口规模，将有限的防护资源按人口规模的比例分配至各州。基于风险的配置方法：Willis建立了恐怖袭击风险评估框架，用以指导防护资源配置。目标面临的恐怖袭击风险是攻击威胁、目标易损性和攻击后果的交集。根据目标风险评估结果，对防护资源进行分配，以求将每个目标的风险值降低至阈值以下^[4]。结合风险与策略博弈的配置方法：近年来，结合风险评估，应用博弈论进行防护资源优化配置的方法逐渐发展起来。2009年Powell^[5]改进了以往用于军事对抗的Blotto博弈模型，建立了用于国家防护资源配置的连续、非零和Blotto博弈模型。随后，庄军等学者面对恐怖袭击威胁下一般普适性目标的防护资源博弈分配问题，针对防护信息披露^[6]、攻击者属性不确定性^[7]等视角开展了丰富的研究，取得了诸多成果。

学者们针对特定的生命线网络,采用网络规划等方法进行防护资源优化配置研究。如Qiao等^[8]建立网络最大最小线性规划模型,对供水网络安全防护资源配置进行优化。此外,部分学者将策略博弈和网络规划方法相结合,进行防护资源配置研究。如金建钢等^[9]人针对城市轨道交通网,结合轨道交通网络流理论,基于策略博弈开发了防御—攻击—用户三级博弈模型进行防护资源优化配置。

蓄意攻击属于策略性风险,对城市生命线网络的破坏存在着很大的主观故意性和动态博弈性。在各类城市生命线网络中,不同单元设施遭受攻击的受袭概率完全不同,这与单元重要度,攻击方理性程度、决策偏好等多种因素相关。同时,防护方防护资源的投入情况,会极大地影响攻击方的攻击策略,而攻击方的策略,又会反过来影响防护方防护资源的防护策略。所以蓄意攻击下城市生命线网络的防护资源配置,是攻防双方动态博弈的结果。博弈论作为策略互动的有效工具,可以有效的反映攻防双方的策略互动,与单元风险大小或网络规划理论相结合,可以更好地帮助防护方优化防护资源配置。策略性风险下防护资源分配倾向于最易受攻击的单元。首先分配防护资源于最脆弱的单元,并持续到其潜在损害水平与第二脆弱的单元相等。此时,必须在两个单元(不同比例)中平行分配防护资源,保持攻击方袭击任一单元的收益都不大于另一个,直到达到第三位脆弱的单元的潜在损害水平,并以这种方式继续直到防护资源耗尽。

三、结论

对于防护方而言,城市生命线网络面临的风险是一种不确定性风险。这种不确定风险包括概率性风险和策略性风险。概率性风险与策略性风险发生机理存在着巨大差异,两种灾害类型下防护资源分配标准的优先级是不同的,针对灾害类型优化防护资源配置可以提高资源利用效率。在下一步的研究中,基于“韧性”的概念,在韧性评估框架下,灾前防护资源与灾后恢复资源在统一模型框架内进行协调优化配置,使生命线网络更快恢复至灾前水平。

参考文献

[1] Dodo A., Xu N. X., Davidson R. A. Optimizing regional earthquake mitigation investment

strategies[J]. Earthquake Spectra, 2005, 21 (2): 350-327.

[2] Peyghaleh E., Alkhrdaji T. Resource allocation model toward seismic water pipeline risk mitigation measures[A]. Paolacci F., Furuya O., Matsuoka T. Proceedings of the Asme Pressure Vessels and Piping Conference[C]. New York: Amer Soc Mechanical Engineers, 2019, 8:1-12.

[3] Xu N. X., Davidson R. A., Nozick L. K., et al. The risk-return tradeoff in optimizing regional earthquake mitigation investment[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2007, 3 (2):133-146.

[4] Willis H. H. Guiding resource allocations based on terrorism risk[J]. Risk Analysis, 2007, 27 (3):597-606.

[5] Powell. Sequential, nonzero-sum “Blotto”: Allocating defensive resources prior to attack[J]. Games and Economic Behavior, 2009, 67 (2): 611-615.

[6] Zhang J., Zhuang J., Jose V. R. R. The role of risk preferences in a multi-target defender-attacker resource allocation game[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 169:95-104.

[7] Nikoofal M. E., Zhuang J. Robust allocation of a defensive budget considering an attacker's private information[J]. Risk Analysis, 2012, 32 (5): 930-943.

[8] Qiao J. H., Jeong D., Lawley M. Allocating security resources to a water supply network[J]. Iie Transactions, 2007, 39 (1):95-109.

[9] Jin J. G., Lu L. J., Sun L. J. Optimal allocation of protective resources in urban rail transit networks against intentional attacks[J]. Transportation Research Part E—Logistics and Transportation Review, 2015, 84:73-87.

基金项目:国家自然科学基金(51708554),江苏省自然科学基金(BK20181336),国家重点研发计划(2020FYB2103300-4)