

基于人工智能技术的台风灾害损失快速评估与 应急物资调度研究

蓝美娟¹ 冯涛³ 黄玉杰¹ 丛海勇² 曾建鹏³

1. 浙江安防职业技术学院智能建筑学院
2. 大连理工大学化工学院
3. 温州市消防救援支队

摘要: 为实现台风灾害的快速评估,提升应急物资调度效率,研究基于人工智能技术,建立了一种公路台风灾害风险评估模型,并构建台风灾害系统动力模型,在考虑政府应急能力、次生灾害频次等因素的前提下,分析应急物资调度策略。研究表明,在政府应急物资调度能力提升的情况下,可有效缓解城市应急物资调度的负荷;在次生灾害逐渐增多的情况下,政府应急物资调度能力将会有一定程度上的降低,但是只要确保调度的合理性,受到台风侵害的地区依然会恢复到稳定状态。

关键词: 人工智能; 台风灾害; 风险评估; 应急物资调度; 系统动力学

在城镇化进程不断加快的背景下,城市人口数量也呈现出一种集聚增长的趋势,城市发展过程中的复杂风险以及不确定因素也日益凸显。公路作为城市建设过程中的重要组成部分,其对城市经济的发展有着直接影响,尤其是受到台风的侵害后,将会造成严重的经济损失^[1]。因此,为有效提升公路的抗风险能力,构建有效的公路风险保障体系尤为重要。

基于此,本文基于人工智能技术构建了台

风灾害评估模型,实现台风灾害损失的快速评估。在确定台风造成的损失后,基于系统动力学,构建了台风灾害系统动力模型,实现应急物资调度策略的优化。

1 风险评估理论体系

1.1 公路灾害风险模型

为有效实现公路灾害风险的快速、准确评估,研究构建了一种基于人工智能技术的公路灾害风险评估模型,如图1所示。

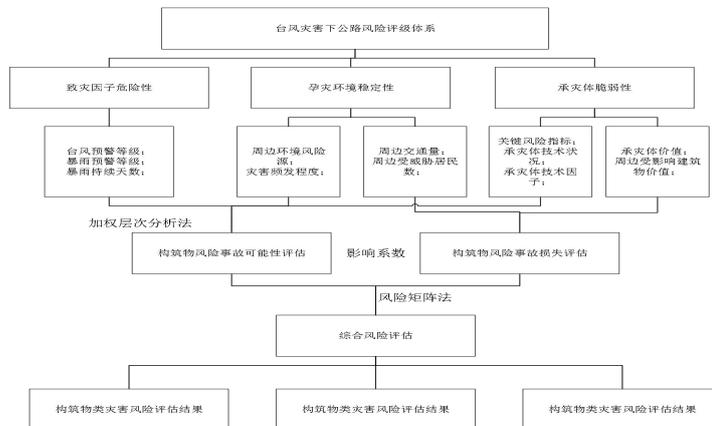


图1 公路灾害风险评估体系

在对风险进行相应的评估后，采用风险矩阵法，预测风险等级，并将其划分为四个等级，详见表 1。在本次研究过程中，为有效提升事故的预防能力，采用了公路保险机制，并采用对称风险评估矩阵，确定风险，即：

$$R_j = 0.65P_j + 0.35L_j \quad (1)$$

式 (1) 中， R_j 、 P_j 、 L_j 分别为 J 类构筑物的综合风险、事故可能性风险度、事故损失风险度。

表 1 风险度与风险等级对应关系

风险度区间	风险典型值	风险等级
(0, 0.2]	0.05	I 级
(0.2, 0.6]	0.4	II 级
(0.6, 0.8]	0.75	III 级
(0.8, 1.0]	1	IV 级

1.2 公路灾害风险的可能性分析

在本次研究过程中，主要基于加权层次分析法计算承灾体事故可能性大小，故将公路灾害风险指标体系进行划分，如图 2 所示。

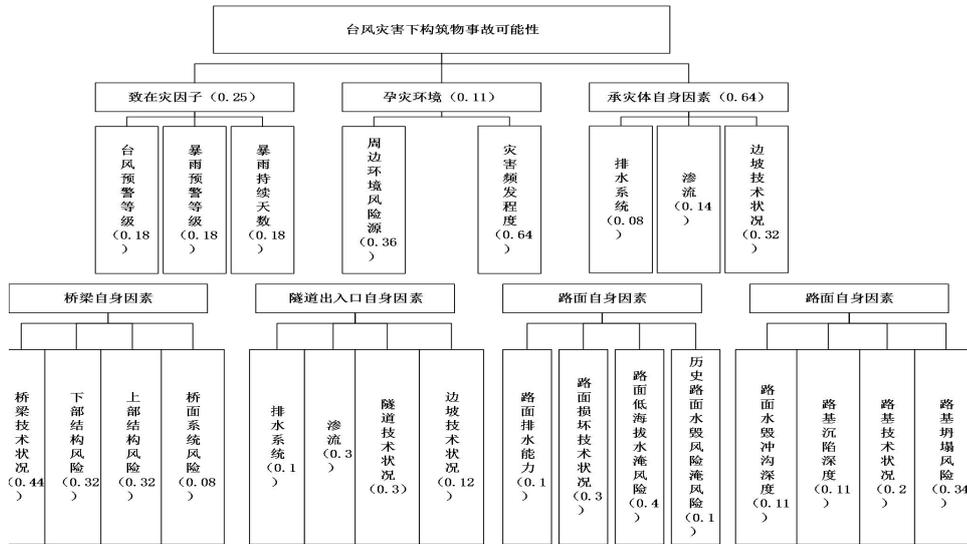


图 2 构筑物事故可能性指标体系

从图 2 中可看出，该体系主要分为三个层次。在对不同构筑物评估过程中，为实现快速评估，仅需对承灾体自身因素进行替换。公路

台风灾害风险事故可能性大小可通过下列公式进行计算，

$$P_j = \omega_{j1} \sum_{i=1}^3 \frac{X_{j1i}}{i} \omega_{j1i} + \omega_{j2} \sum_{i=1}^2 \frac{X_{j2i}}{i} \omega_{j2i} + \omega_{j3} \sum_{i=1}^m \frac{X_{j3i}}{i} \omega_{j3i} \quad (2)$$

式(2)中, $X_{j1i} - X_{j3i}$ 、 $\omega_{j1i} - \omega_{j3i}$ 分别表示 j 类构筑物在 1、2、3 属性层指标下底层指标分值与权重值; $\omega_{j1} - \omega_{j3}$ 为 j 类构筑物属性层三个指标的权重值; m 为承灾体状况下的底层指标数量。对于权重结果, 主要通过专家问卷的方式获取。

1.3 公路灾害风险损失自动化计算

因公路构筑物数量多, 台风后逐个评估会

表 2 事故损失风险类别评定标准

风险典型值	周边交通量	周边受威胁居民数/人	构筑物自身价值/万元	周边受影响建筑物价值/万元
0.05	较小	≤ 10	≤ 15	≤ 15
0.4	一般	(10, 100]	(15, 50]	(15, 50]
0.75	较大	(100, 500]	(50, 100]	(50, 100]
1	繁重	> 500	> 100	> 100

此时, 事故可能性对事故损失的折减系数 可表示为:

$$M = P_j(2 - P_j) \quad (3)$$

在获取相应的折减系数后, 在此基础上对 人员伤亡进行计算, 并获取相应的经济损失, 以此来计算事故损失风险的计算 L_j , 即:

$$\begin{cases} N_1 = J_{11} + 0.12J_{12} \\ N_2 = J_{21} + 0.12J_{22} \\ L_j = \max\{MN_1, MN_2\} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, 性 J_{11} 、 J_{12} 分别表示周边交通量与受威胁居民数; J_{13} 、 J_{14} 分别为构筑物价值与价值风险。 N_1 、 N_2 分别为人员伤亡、经济损失价值评估值。

错过最佳巡检时机且影响效率。为此, 本研究耦合事故发生可能性与损失, 提出公路风险事故损失评估方法, 实现快速准确评估, 步骤为:

- (1) 构建无灾害时人员分布与经济价值;
- (2) 加入事故发生可能性影响并赋折减系数;
- (3) 选取人员与经济损失中最不利结果作为评估值, 具体标准详见表 2。

2 应急物资调度系统动力演化模型

2.1 台风灾害下韧性城市应急物资调度回路

对于台风灾害应急物资需求而言, 其具有多样性、时效性、分布不确定性等特点。为此, 研究通过台风灾害应急物资调运系统动力模型, 进行应急物资需求的准确预测, 以此来满足灾害初期的物质需求, 如图 3 所示。

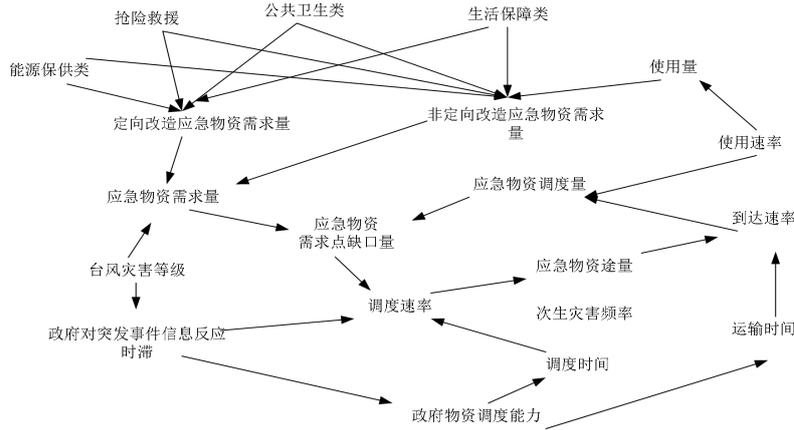


图 3 台风灾害应急物资调运系统动力模型

一般来说，基准应急需求可通过需求点的地形、人口等综合分析获取，但在台风灾害逐渐演化的背景下，传统的数学模型难以充分体现实际需求，故通过马尔可夫链实现应急物资需求的有效预测^[2]。

2.2 系统流图设计与构建

在应急物资调配过程中，需求点的物资请求往往呈现脉冲式特征，其需求到达时间与实际需求量之间存在动态差异。这种差异主要源于灾害发展的阶段性特征，随着灾情态势的演变，应急物资的需求信息呈现出明显的动态变化特性。基于此，可将周期性应急物资需求量建模为时变函数：

$$D_t = D_{t-1} - k_1 R_{t-1} + k_2 D_{t-1}^p \quad (5)$$

式(1)中， D_t 为 t 时刻物资需求量； R_{t-1} 为 $t-1$ 时刻物资库存； D_{t-1}^p 为 $t-1$ 时刻脉冲需求量。

研究基于图3中的因果回路图，通过系统动力学 Vensim 软件，构造动力学模型。在构

造的模型中，设置了相应的水位变量与速率变量。其中，水位变量主要包括 R_t 、 C 、 U_d ，分别表示应急物资在途库存、应急物资库存、物资使用量，速率变量包括 S_d 、 S_r 、 U_s 分别表示调度、到达、使用。

$$R_t = S_d - S_r \quad (6)$$

$$U_d = U_s \quad (7)$$

$$S_d = \frac{\text{应急物资缺口量}}{\text{政府突发时间反应时滞} + \text{调度时间}} \quad (8)$$

$$S_r = \frac{\text{应急物资在途库存}}{\text{运输时间}} \quad (9)$$

$$U_s = \frac{\text{应急物资库存}}{\text{使用时间} - \text{随机延时}} \quad (10)$$

3 仿真试验

以某高速公路为研究对象，基于本文提出的公路灾害风险快速评估方法，构建智能化风

险评估系统,实现风险灾害信息的管理、风险评估计算。在试验过程中,将录入系统中的数据作为基础数据,结合历史台风灾害统计数据,及时制定相应的风险等级报告。以2019

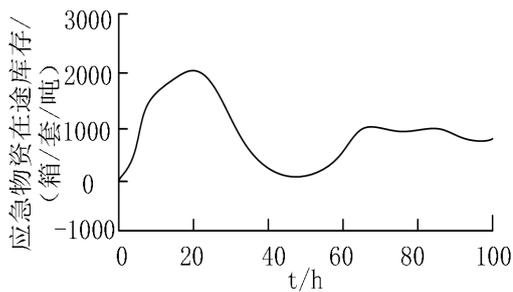
年发生的台风“利奇马”为例风险评估,在台风发生后,受灾区域总计10条公路线、涉及10县市区,总计评估构筑物为1870个,各类构筑物的风险评估结果详见表3。

表3 风险评估结果

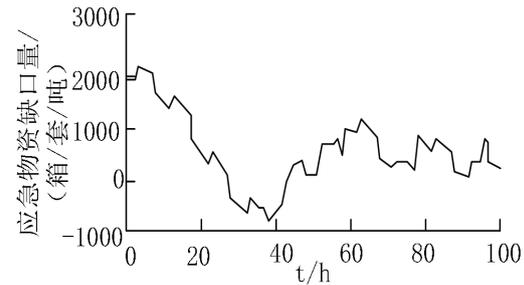
等级	边坡	桥梁	隧道	路面	路基
IV	22	1	0	3	0
III	52	0	1	16	11
II	139	16	0	801	805
I	3	0	0	2	0

通过分析得知,边坡风险等级为III的数量相对较多,路面、路基数量相对较少。在台风过后,边坡出现不同程度的损失,造成严重经济损失。

在确定相应的损失后,及时启动应急供给,并对物资调运进行动态模拟,以此来获取应急物资调度趋势,如图4所示。



(a) 应急物资在途库存趋势图



(b) 应急物资缺口量趋势图

图4 应急物资调度趋势

从图4中(a)可明确看出,在应急物资运输过程中,存在较大的波动,在短时间内难以将大量的物资运往灾区,但是随着时间的推移,应急物资调度逐渐恢复平缓。从图4(b)中可明确看出,物资调度初期系统能有效弥补供给缺口,但随着时间推移呈现动态变化特征:在持续补给作用下,物资缺口呈现单调递减趋势,最终实现供需平衡(缺口量 $\rightarrow 0$)并

形成物资储备。当在途库存降至安全阈值时,缺口量出现非线性反弹现象,其增长速率呈现指数特征,可在 Δt 时间内恢复至灾前水平。这一动态过程验证了模型对台风“利奇马”灾害演变的实时仿真能力。

为进一步量化评估政府应急响应效能,本研究构建了多因素耦合分析模型(图5)。

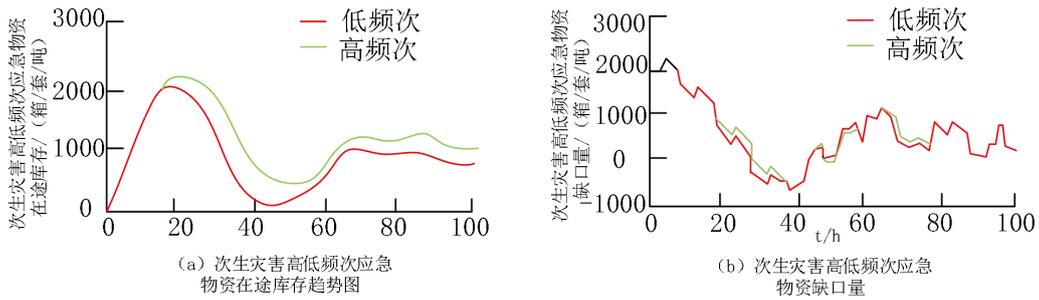


图5 不同频次次生灾害下政府应急物资调度能力

从图5(a)中可明确看出,在灾害初期,随着次生灾害频次的增加,应急物资在途库存并未发生显著变化,并在仿真过程中始终保持在较高的水平,可保障应急物资缺口在可控范围内^[3-4]。

从图5(b)中可明确看出,当次生灾害

为高频次时,应急物资缺口量仍在可控范围内,并且与低频次状态下的波动趋势大致相同。由此得知,在次生灾害频次不断增加的情况下,为缓解灾情的蔓延,应急物资调运将逐渐增加,不会导致物资缺失的情况产生。

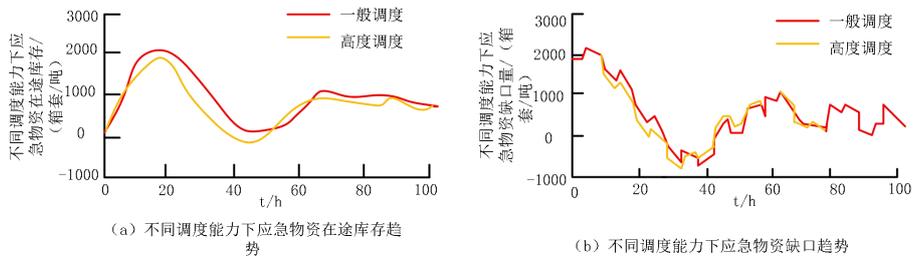


图6 不同调度能力下应急物资在途库存与缺口量趋势

从图6(a)中可明确看出,高调度模式下的物资在途库存逐渐上升,但是上升幅度较小。在达到相应的峰值后,高调度曲线呈现出一种逐渐下降的趋势,由此得知,当应急物资能力增加后,物资在库存在灾后短期内相对较低,在一定程度上缓解了物资的调度压力。从图6(b)中可明确看出,在处于高调度时,应急物资缺口量并未发生明显变化,说明物资缺乏的问题并未得到有效改善,由此得知,在应急物资调度能力提升的情况下,虽然在短时间难以恢复,但是在持续调度后,仍可恢复稳定^[5]。

4 思考与建议

通过上述分析得知,提升应急物资调度效能可有效缓解调度负荷、规避资源浪费,但次生灾害的持续发生将削弱调度系统效能,而通

过持续性的调度实践可促使系统恢复稳定状态。针对此,本研究提出以下优化建议:

(1) 通过科学选址与标准化设计完善储备体系,形成多级响应的物资缓冲机制,为政府应急决策提供战略纵深空间。

(2) 建立智能化风险识别模型提升评估精度,配套制定分级响应预案,创新设计应急物资调运时空叠合框架,实现调度能力与任务分配的实时动态优化。

(3) 提升公众减灾意识,普及台风等气象灾害风险,推动承灾体向抗灾体转变,降低应急物资需求,减少次生灾害后对应急物资调运的依赖。

结语

为实现台风灾害损失的快速评价,本文构建了一种基于智能技术的台风灾害评估体系,

并构建台风灾害系统动力模型,在考虑政府应急能力、次生灾害频次等因素的前提下,分析应急物资调度策略。仿真结果显示,构建的台

风灾害评估体系可准确识别台风灾害风险,并且可计算相应的损失,同时,构建的台风灾害系统动力模型可实现台风灾害的模拟。

参考文献

- [1]王伊,沈钰博,陆一宾,等.基于时变需求的台风灾害应急物资调度模型研究[J].物流科技,2023,46(20):22-28.
- [2]陈滢,林勇.大数据背景下台风灾害应急物流车辆调度优化仿真[J].灾害学,2019,34(01):194-197.
- [3]马仲能,袁太平,林铭潮.电网企业应急物资库存模式研究[J].低碳世界,2019,9(1):38-40.
- [4]丛雯婧,俞武扬.考虑台风情景的区域应急物资储备库选址模型与算法[J].工业工程与管理,2020,25(5):68-74.
- [5]李绍攀,赵飞,周义棋,等.基于微博数据的台风灾害舆情分析与灾害损失估计[J].清华大学学报:自然科学版,2022,62(1):43-51.
- [6]张广平,谢忠,罗显刚,等.基于WebGIS的海南省台风灾害管理决策辅助系统[J].热带海洋学报,2014(6):80-87.

作者简介:蓝美娟(1988-),女,浙江衢州人,副教授,研究方向:城市公共安全、建筑消防安全。

基金项目:本文系温州市未来城市研究院开放基金资助(基于LightGBM和GIS的温州台风再请动态预测及应急优化研究 编号:WL2023009)