

中文引用格式:王威,王越,侯本伟,等. 基于 T-S 故障树的通信基站系统地震易损性与重要度分析[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5):287-295.

英文引用格式:Wang Wei, Wang Yue, Hou Benwei, et al. Seismic fragility and importance analysis of communication base station systems based on a T-S fault tree[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5):287-295.

基于 T-S 故障树的通信基站系统地震易损性与重要度分析*

王威¹教授, 王越², 侯本伟²副教授, 夏陈红¹助理研究员, 郭小东^{**1}教授

(1 北京工业大学 建筑与城市规划学院, 北京 100124; 2 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

中图分类号:X915.5; P315.9 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0510

基金项目:国家自然科学基金资助(52494960, 52278472);北京市自然科学基金资助(8232004, 8254041)。

【摘要】 为解决传统故障树难以准确刻画通信基站系统组件间复杂相关性的问题,提出基于 T-S 故障树的通信基站系统地震易损性与重要度分析方法。首先,构建“供电-机房-传输”3个子系统架构,建立通信基站系统震后功能损失的 T-S 故障树模型,利用门规则表量化组件间和子系统间的功能相关性;其次,对比分析通信基站系统与机房子系统的地震易损性曲线;然后,基于 Monte Carlo 模拟计算传统故障树下的通信基站系统地震易损性,并与 T-S 故障树结果对比;最后,结合 T-S 关键重要度开展重要度分析,以识别关键影响因子,并通过组件地震易损性参数敏感性分析定位系统薄弱环节。结果表明:单独分析机房子系统会低估系统功能损失风险,需综合3个子系统分析通信基站系统地震易损性;T-S 故障树在刻画组件间模糊逻辑关系方面更具优势,分析结果较传统故障树更为可靠;轻微破坏状态下的线缆和严重破坏状态下的机房建筑为关键影响因子;变电站、输电线路和机房建筑对系统功能影响最为显著。

【关键词】 T-S 故障树; 通信基站系统; 地震易损性; 重要度分析; T-S 关键重要度

Seismic fragility and importance analysis of communication base station systems based on a T-S fault tree

Wang Wei¹, Wang Yue², Hou Benwei², Xia Chenhong¹, Guo Xiaodong¹

(1 College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2 College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the limitations of traditional fault trees in accurately capturing the complex correlations among components of communication base station systems, this study proposes a method for seismic fragility and importance analysis based on T-S fault tree. First, a three-subsystem architecture consisting of power supply, machine room, and transmission is constructed, and a T-S fault tree model for post-earthquake functional loss of communication base station systems is established. The functional correlations among components and subsystems are quantified using gate rule tables. Second, the seismic fragility models of communication base station system and the machine room subsystem are comparatively analyzed. Then, the seismic fragility of communication base station system is calculated using traditional

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0287-09; 收稿日期:2026-01-15; 修稿日期:2026-03-21

** 通信作者:郭小东(1979—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,主要从事城乡安全与防灾韧性规划方面的研究。E-mail: gxd@bjut.edu.cn。

fault trees and Monte Carlo simulation, and compared with the results from T-S fault tree. Finally, key impact factors are identified by combining the T-S critical importance analysis, and the weak links of the system are located through the sensitivity analysis of component fragility parameters. The results show that analyzing only the seismic fragility of the machine room subsystem underestimates the risk of system functional loss, and it is necessary to comprehensively analyze the seismic fragility of the communication base station system by integrating the three subsystems. The T-S fault tree method has advantages in describing the fuzzy logic relationships among components, and its results are more reliable than those from traditional fault tree. Cables under the slight damage state and machine room buildings under the severe damage state are the key impact factors. Substations, transmission lines, and machine room buildings have the most significant impact on the system function.

Keywords: Takagi-Sugeno(T-S) fault tree; communication base station system; seismic fragility; importance analysis; T-S criticality importance measure

0 引言

近年来,生命线系统地震易损性与重要度分析等相关研究受到广泛关注,涵盖水厂^[1]、管网^[2]、建(构)筑物^[3]等关键基础设施系统^[4]。通信基站作为通信网络的核心节点,承担保障通信网络正常运行的重要职能。地震的突发性与强破坏性易导致基站结构性损毁及功能中断,严重制约应急救援信息传递效率。因此,建立科学且可操作的通信基站系统地震易损性与重要度分析模型具有重要的工程价值。

当前研究主要集中于3个层面:通信设备设施、网络系统及系统抗震。在通信设备设施层面,主要针对机房、通信铁塔及内部关键设备(走线架、机柜、蓄电池等)开展了动力分析与振动台试验,提取相应的易损性参数^[5-6]。在通信网络系统层面,主要侧重于震后连通性评估、恢复过程模拟及电力-通信耦合机制^[7-9]。在通信基站系统层面,主要研究了基站失效概率计算方法,并逐步引入了电力中断与组件相关性的考量^[10-13]。然而,上述研究存在可靠性低、忽视系统内部关联性问题。

鉴于此,笔者拟引入T-S(Takagi-Sugeno)故障树方法,综合考虑通信基站系统组件的多状态特征及内部相关性,建立通信基站系统震后功能损失T-S故障树模型,底事件故障概率由模糊数描述,基本组件间的相关性通过门规则表刻画,进而构建更贴近实际的通信基站系统地震易损性与重要度分析模型,旨在克服传统可靠性分析的局限,通过深化重要度分析为基站抗震韧性提升提供精确理论支撑。

1 T-S故障树基本理论

T-S故障树基于T-S模糊模型,以T-S门替代传

统故障树中的逻辑“与或门”描述事件间关联,并采用模糊数描述底事件故障概率及故障程度^[14]。该方法克服了传统故障树仅考虑故障和正常2种状态的局限,支持基本事件重要度分析,进而识别系统关键影响因子。T-S故障树模型如图1所示, x 为基本事件, y 为中间事件, T 为顶事件。

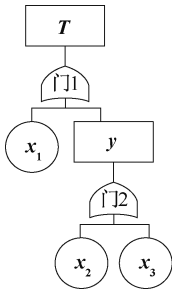


图1 T-S故障树模型

Fig.1 T-S fault tree model

1.1 模糊数及事件描述

故障程度采用区间 $[0,1]$ 上的模糊数描述^[14],各级事件的故障概率一般由梯形隶属度函数 F 表征:

$$F \equiv (F_0, s_L, m_L, s_R, m_R) \tag{1}$$

式中: F_0 为模糊数支撑集中心; s_L 和 s_R 分别为左、右支撑半径; m_L 和 m_R 为左、右模糊区域。 F 描述的模糊数称为模糊数 F_0 ,隶属度 μ_F (图2)计算如下:

$$\mu_F = \begin{cases} 0, & F \leq a \\ \frac{F - a}{m_L}, & a \leq F \leq b \\ 1, & b \leq F \leq c \\ \frac{c - F}{m_R}, & c \leq F \leq d \\ 0, & d \leq F \end{cases} \tag{2}$$

式中 a, b, c, d 为模糊数。其中, $a = F_0 - s_L - m_L, b =$

$F_0 \text{---} s_L, c = F_0 + s_R, d = F_0 + s_R + m_R \circ$

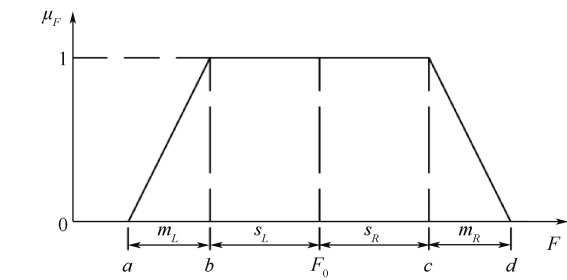


图 2 模糊数的梯形隶属函数

Fig. 2 Trapezoid membership function of fuzzy numbers

1.2 T-S 门及模糊可能性计算

T-S 门以 If-then 模糊规则组合构成万能逼近器,兼顾同一子系统下各基本事件的重要性及相关性,并以规则表描述。设各基本事件 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 处于故障程度 $D_{si} (i = 1, 2, \cdots, t)$ 的模糊可能性为 $P(x_1 = D_{si}), P(x_2 = D_{si}), \cdots, P(x_n = D_{si})$, 则规则 $l (l = 1, 2, \cdots, m)$ 执行的可能性为:

$$P_0^l = P(x_1 = D_{si}), P(x_2 = D_{si}) \cdots, P(x_n = D_{si}) \tag{3}$$

上级事件 y 的模糊可能性为:

$$\begin{cases} P(y = D_{s0}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y = D_{s0}) \\ P(y = D_{s1}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y = D_{s1}) \\ \vdots \\ P(y = D_{st}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y = D_{st}) \end{cases} \tag{4}$$

1.3 T-S 关键重要度分析

T-S 关键重要度为基本事件故障程度发生概率的变化率与由其单独引起顶事件故障程度概率的变化率之比,反映基本事件概率变化对顶事件的影响及其自身不可靠程度。基本事件 x_j 故障程度为 D_{si} 对顶事件 T 故障程度为 D_{sk} 的 T-S 关键重要度^[14]为:

$$I_{cr}^{(D_{sk})}(x_j = D_{si}) = \{ P(D_{sk}, P(x_j = D_{si}) = 1) - P(D_{sk}, P(x_j = D_{si}) = 0) \} \frac{P(x_j = D_{si})}{P(T = D_{si})} \tag{5}$$

式中: $P(D_{sk}, P(x_j = D_{si}) = 1)$ 为 $P(x_j = D_{si}) = 1$ 时顶事件 T 故障程度 D_{sk} 的概率; $P(D_{sk}, P(x_j = D_{si}) = 0)$ 为 $P(x_j = D_{si}) = 0$ 时顶事件 T 故障程度 D_{sk} 的概率; $P(x_j = D_{si})$ 为基本事件 x_j 故障程度 D_{si} 的概率; $P(T = D_{sk})$ 为顶事件 T 故障程度 D_{sk} 的概率。

基本事件 x_j 对顶事件 T 故障程度为 D_{sk} 的 T-S 关键重要度为:

$$I_{cr}^{(D_{sk})}(x_j) = \frac{\sum_1^i I_{cr}^{(D_{sk})}(x_j = D_{si})}{a - 1} \tag{6}$$

式中 $a - 1$ 为第 j 个基本事件非 0 故障程度的个数。

2 T-S 故障树及地震易损性模型

2.1 通信基站系统 T-S 故障树构建

基于四川长宁震后通信基站系统震害调查^[15]与通信基站结构特征,剔除震后次要影响设备,将基站合理简化为 3 个核心子系统:①包含市电、蓄电池与发电机组的交直流供电子系统;②聚焦塔外砌体结构及核心室内设施(空调、走线架、机柜等)的机房子系统;③由 50 m 四方铁塔和架空光缆构成的传输子系统。同时,综合考虑各组件与子系统间的功能相关性,并参照 Li Fan 等^[13]的贝叶斯网络模型,针对长宁县实际选取设备设施种类,建立通信基站系统震后功能损失 T-S 故障树模型,如图 3 所示。

2.2 构建通信基站系统 T-S 门规则表

首先,定义基本组件 5 种损伤状态^[16]:基本完好 D_{s0} 、轻微破坏 D_{s1} 、中等破坏 D_{s2} 、严重破坏 D_{s3} 及毁坏 D_{s4} 。依据组件间及子系统间相关性,图 3 中的门 1、3、4、5、7 为或门,门 2、6 为与门。结合专家经验与历史数据逐条编写 T-S 门规则,门 4 规则见表 1,表 1 中规则 2 表明:当基本组件 x_{10} 为 D_{s0} 、 x_{11} 为 D_{s1} 时,中间事件 A_3 为 D_{s0} 、 D_{s1} 、 D_{s2} 、 D_{s3} 和 D_{s4} 的概率分别为 0.55、0.40、0.05、0、0,其余规则照此。

表 1 T-S 门 4 规则

Table 1 Rules of T-S gate 4							
规则	x_{10}	x_{11}	A_3				
			D_{s0}	D_{s1}	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}
1	D_{s0}	D_{s0}	1	0	0	0	0
2	D_{s0}	D_{s1}	0.55	0.40	0.05	0	0
3	D_{s0}	D_{s2}	0.50	0.15	0.30	0.05	0
4	D_{s0}	D_{s3}	0.50	0.10	0.05	0.30	0.05
5	D_{s0}	D_{s4}	0	0	0	0	1
6	D_{s1}	D_{s0}	0.60	0.30	0.10	0	0
7	D_{s1}	D_{s1}	0.15	0.70	0.15	0	0
8	D_{s1}	D_{s1}	0.10	0.50	0.35	0.05	0
9	D_{s1}	D_{s3}	0.10	0.45	0.15	0.25	0.05
10	D_{s1}	D_{s4}	0	0	0	0	1
11	D_{s2}	D_{s0}	0.25	0.15	0.50	0.10	0

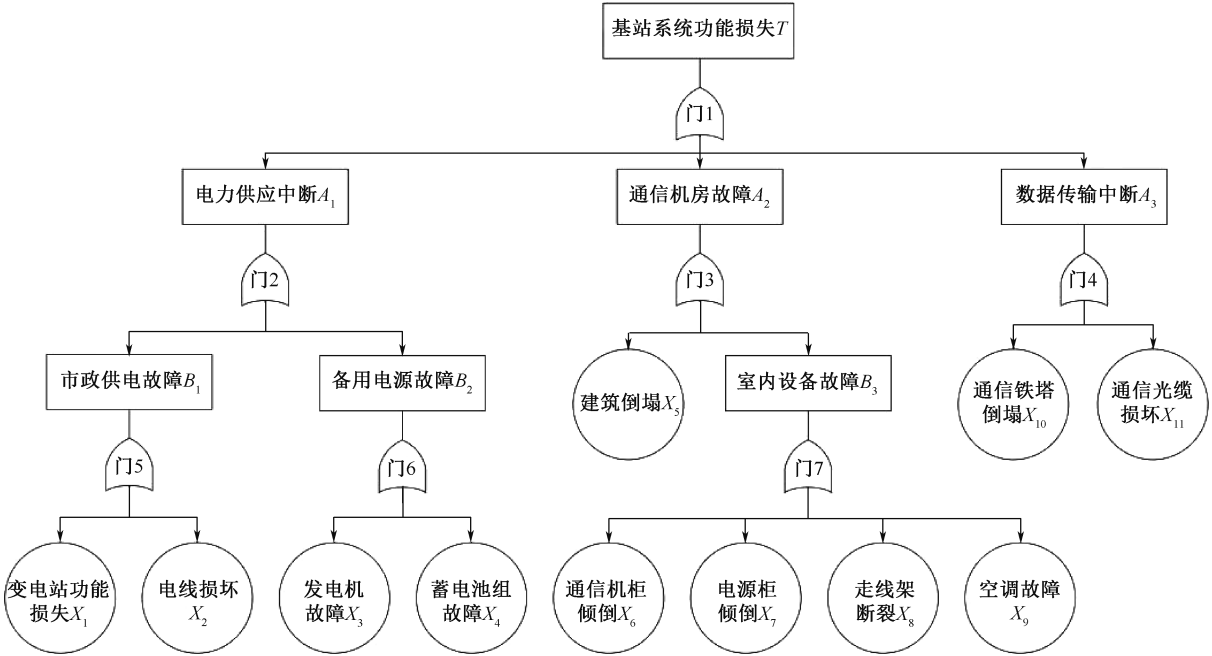


图3 通信基站系统震后功能损失 T-S 故障树模型

Fig. 3 T-S fault tree model for post earthquake functional loss of communication base station system

续表 1

规则	x_{10}	x_{11}	A_3				
			D_{s0}	D_{s1}	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}
12	D_{s2}	D_{s1}	0.05	0.35	0.50	0.10	0
13	D_{s2}	D_{s1}	0	0.15	0.70	0.15	0
14	D_{s2}	D_{s3}	0	0.10	0.50	0.35	0.05
15	D_{s2}	D_{s4}	0	0	0	0	1
16	D_{s2}	D_{s0}	0.25	0.05	0.10	0.50	0.10
17	D_{s2}	D_{s1}	0.05	0.25	0.15	0.45	0.10
18	D_{s2}	D_{s1}	0	0.05	0.35	0.50	0.10
19	D_{s2}	D_{s3}	0	0	0.15	0.70	0.15
20	D_{s2}	D_{s4}	0	0	0	0	1
21	D_{s4}	D_{s0}	0	0	0	0	1
22	D_{s4}	D_{s1}	0	0	0	0	1
23	D_{s4}	D_{s1}	0	0	0	0	1
24	D_{s4}	D_{s3}	0	0	0	0	1
25	D_{s4}	D_{s4}	0	0	0	0	1

2.3 通信基站系统地震易损性模型确定

T-S 故障树中各事件故障概率表征为组件处于各损伤状态的概率(破坏概率)。基于地震易损性理论^[17],将通信基站系统地震易损性定义为给定的地震动水平下,通信基站系统超过某种损伤状态的条件概率,同时,假设其服从对数正态分布,参数选取峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA),则超越概率 $F_R(x)$ 计算如下:

$$F_{R_i}(x) = P(D_{sk} \geq D_{si} | PGA) = \Phi \left[\frac{\ln(e_i)}{\beta_i} \right] \quad (7)$$

式中: $\Phi[\cdot]$ 为标准对数正态分布函数; e_i 为损伤状

态 D_{si} 对应的地震易损性曲线中位值, $g;\beta_i$ 为损伤状态 D_{si} 对应的地震易损性曲线对数标准差。

超越概率与破坏概率转化公式为:

$$P(D_{si}) = \begin{cases} 1 - F_{R_0}(x) \\ F_{R_{i-1}}(x) - F_{R_i}(x), & i = 1, 2, \dots, n \\ F_{R_r}(x) \end{cases} \quad (8)$$

依据实际震害、科学试验及数值模拟研究成果,获取通信基站系统基本组件易损性函数参数(表 2)。

表 2 基本组件易损性函数参数

Table 2 Fragility parameters of essential component

代号	基本组件	需求参数/ g	损伤状态	地震易损性函数参数	
				e_i/g	β_i
x_1	变电站 ^[18]	PGA	D_{s1}	0.152 3	0.473 8
			D_{s2}	0.268 2	0.606 8
			D_{s3}	0.470 2	0.442 8
			D_{s4}	0.729 4	0.497 7
x_2	输电线 ^[16]	PGA	D_{s1}	0.280 0	0.300 0
			D_{s2}	0.400 0	0.200 0
			D_{s3}	0.720 0	0.150 0
			D_{s4}	1.100 0	0.150 0
x_3	柴油发电机 ^[19]	PGA	D_{s4}	0.900 0	0.400 0
x_4	蓄电池 ^[6]	PGA	D_{s1}	0.397 0	0.843 0
			D_{s3}	0.883 0	0.959 0

续表 2

代号	基本组件	需求参数/ g	损伤状态	地震易损性函数参数	
				m_i/g	β_i
x_5	通信机房 ^[8]	PGA	D_{s1}	0. 121 0	0. 713 0
			D_{s2}	0. 235 1	0. 642 5
			D_{s3}	0. 434 1	0. 605 9
			D_{s4}	0. 688 9	0. 587 6
x_6	通信机柜 ^[5]	PGA	D_{s1}	0. 300 1	0. 301 2
			D_{s2}	0. 593 3	0. 298 3
			D_{s4}	1. 258 3	0. 307 2
x_7	电源柜 ^[16]	PGA	D_{s1}	0. 150 0	0. 750 0
			D_{s2}	0. 320 0	0. 600 0
			D_{s3}	0. 600 0	0. 620 0
			D_{s4}	1. 250 0	0. 650 0
x_8	走线架 ^[5]	PGA	D_{s1}	0. 439 2	0. 413 3
			D_{s2}	0. 894 7	0. 343 2
			D_{s4}	1. 228 8	0. 467 4
x_9	空调 ^[16]	PGA	D_{s1}	0. 130 0	0. 550 0
			D_{s2}	0. 260 0	0. 500 0
			D_{s3}	0. 460 0	0. 620 0
			D_{s4}	1. 030 0	0. 620 0
x_{10}	50m 四方塔 ^[5]	PGA	D_{s1}	0. 519 4	0. 361 1
			D_{s3}	1. 067 9	0. 345 3
			D_{s4}	1. 320 5	0. 320 1
x_{11}	通信光缆 ^[8]	PGA	D_{s1}	0. 240 0	0. 250 0
			D_{s2}	0. 330 0	0. 200 0
			D_{s3}	0. 580 0	0. 150 0
			D_{s4}	0. 890 0	0. 150 0

表 3 基本组件破坏概率及模糊数 (PGA=0. 4g)

Table 3 Damage probability and fuzzy numbers of essential components (PGA=0. 4g)

基本组件	损伤状态	破坏概率 $P(D_{si})$	模糊数			
			a	b	c	d
x_{10}	D_{s0}	0. 765 3	0. 719 4	0. 727 0	0. 803 6	0. 811 2
	D_{s1}	0. 232 5	0. 218 6	0. 220 9	0. 244 1	0. 246 5
	D_{s2}	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0
	D_{s3}	0. 002 1	0. 002 0	0. 002 0	0. 002 2	0. 002 2
	D_{s4}	0. 000 1	0. 000 1	0. 000 1	0. 000 1	0. 000 1
x_{11}	D_{s0}	0. 020 5	0. 019 3	0. 019 5	0. 021 5	0. 021 7
	D_{s1}	0. 147 5	0. 138 7	0. 140 1	0. 154 9	0. 156 4
	D_{s2}	0. 825 4	0. 775 9	0. 784 1	0. 866 7	0. 874 9
	D_{s3}	0. 006 6	0. 006 2	0. 006 3	0. 006 9	0. 007 0
	D_{s4}	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 0

信基站系统完全损毁可能性较大,此时需重新规划通信线缆并入其他基站或新建基站。

3.2 通信基站系统与机房子系统对比分析

同理,计算不同 PGA 下机房子系统和通信基站系统的破坏概率,通过 Matlab 拟合地震易损性曲线并采用最大似然估计法求解参数,机房子系统和通

3 通信基站系统地震易损性分析

3.1 破坏概率计算及模糊化

取 PGA 为 0. 4 g ,模糊化参数 $s_L=s_R=0. 05F_0$, $m_L=m_R=0. 01F_0$ 。依据表 3 中易损性函数参数,计算各基本组件破坏概率并模糊化,基本组件 x_{10} 和 x_{11} 的破坏概率及模糊数见表 3。

中间事件 A_3 处于 D_{s0} 的破坏概率为:

$$P(A_3 = D_{s0}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(A_3 = D_{s0}) = 0. 423 5$$

其模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 374 2, 0. 382 2, 0. 466 9, 0. 475 9)$ 。依据 T-S 故障树模型自下而上逐层计算,顶事件 T 的破坏概率及模糊数分别为: $P(T=D_{s0})=0. 105 6$,模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 053 6, 0. 060 1, 0. 150 2, 0. 160 4)$; $P(T=D_{s1})=0. 172 3$,模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 087 5, 0. 098 3, 0. 245 8, 0. 262 7)$; $P(T=D_{s2})=0. 239 1$,模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 119 3, 0. 134 0, 0. 335 5, 0. 358 4)$; $P(T=D_{s3})=0. 167 7$,模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 083 7, 0. 094 0, 0. 235 2, 0. 251 4)$; $P(T=D_{s4})=0. 315 3$,模糊数 (a,b,c,d) 为 $(0. 181 7, 0. 204 4, 0. 511 6, 0. 547 0)$ 。计算结果表明:PGA 为 0. 4 g 时,通信基站系统达中等破坏及以上的概率较大。Ⅷ度的地震事件中,系统功能将受显著影响,需维修后方可运行;同时,通

信基站系统不同损伤状态下的地震易损性函数参数和地震易损性曲线见表 4 和图 4。

对比表 4 中 2 个系统易损性函数参数,通信基站系统中位值小于机房子系统,原因在于供电子系统和传输子系统较机房子系统更易受损,而机房建筑抗震性能良好。因此,仅以机房及内部设备设施

表 4 机房子系统及通信基站系统不同损伤状态下的地震易损性函数参数

Table 4 Seismic fragility parameters of machine room system and communication base station system under different damage states

损伤状态	机房子系统		通信基站系统	
	e_i/g	β_i	e_i/g	β_i
D_{s1}	0. 174 2	0. 621 9	0. 158 6	0. 741 7
D_{s2}	0. 362 6	0. 537 3	0. 259 6	0. 669 9
D_{s3}	0. 554 3	0. 393 4	0. 400 0	0. 519 4
D_{s4}	0. 693 0	0. 342 6	0. 495 6	0. 439 6

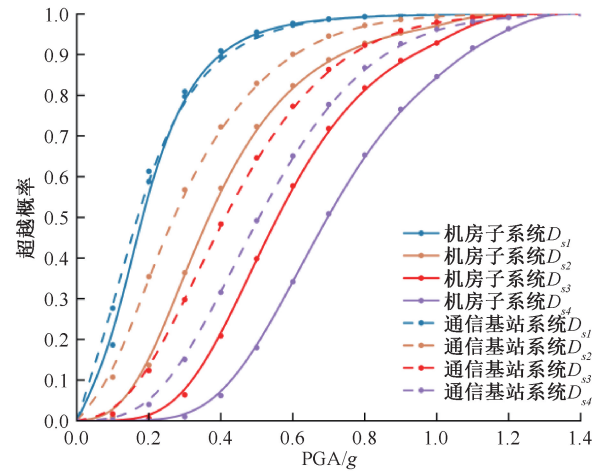


图 4 机房子系统和通信基站系统不同损伤状态下的地震易损性曲线

Fig. 4 Seismic fragility curves of machine room system and communication base station system under different damage states

损坏状态判别通信基站系统损伤状态偏理想,实际通信基站系统功能损失大于机房子系统。

3.3 传统故障树与 T-S 故障树对比分析

将图 3 中的 T-S 门替换为“与或门”,基于表 3 参数,利用 Monte Carlo 随机数模拟生成基本组件破坏概率。各基本组件随机数生成区间依据其破坏概率模糊数上下界确定,Matlab 计算通信基站系统各损伤状态概率后归一化处理。基于传统和 T-S 故障树计算的地震易损性函数参数及易损性曲线见表 5 和图 5。

表 5 基于传统和 T-S 故障树计算的地震易损性函数参数
Table 5 Seismic fragility parameters calculated based on traditional and T-S fault tree

损伤状态	传统故障树		T-S 故障树	
	e_i/g	β_i	e_i/g	β_i
D_{s1}	0. 079 8	0. 408 2	0. 158 6	0. 741 7
D_{s2}	0. 161 7	0. 424 3	0. 259 6	0. 669 9
D_{s3}	0. 288 5	0. 427 1	0. 400 0	0. 519 4
D_{s4}	0. 517 8	0. 378 7	0. 495 6	0. 439 6

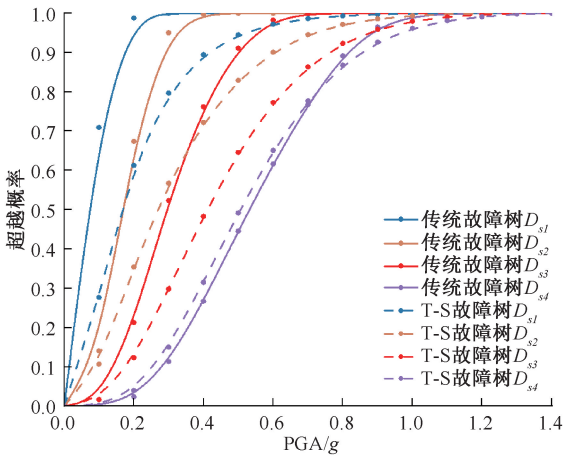


图 5 基于传统和 T-S 故障树的地震易损性曲线

Fig. 5 Seismic fragility curves obtained from traditional and T-S fault tree

在不同 PGA 区间内,2 种方法的预测差异显著,当 $PGA \leq 0.2 g$ 时,传统故障树敏感性更强,预测的损伤状态偏高; PGA 为 $0.3 \sim 0.6 g$ 时,其 D_{s3} 概率远超 T-S 故障树,对严重破坏的预测更为激进; $PGA \geq 0.7 g$ 时,两者均预测通信基站系统主要处于 D_{s4} 状态,但传统故障树概率增速更快。总体上,传统故障树对 D_{s4} 状态预测更激进,对其他状态偏保守,表现为相同损伤状态(除 D_{s4} 外)下,地震易损性曲线位于 T-S 故障树上方且中位值更小。由于传统故障树未考虑组件间相关性,忽略子系统间相互作用,而 T-S 故障树通过门规则表量化供电子系统、机房子系统和传输子系统间的相关性及组件相互作用,如机房建筑倒塌对电源柜等核心设备的破坏在传统故障树中未予考虑。

据四川长宁震后通信系统震害调查结果^[15],长宁县所在市域的 3 大通信运营商中断通信基站 385 个,1 周内通信全部恢复,即大部分通信基站损伤状态为中等破坏及以下。利用 T-S 故障树和传统故障树计算 $PGA=0.4 g$ 时系统处于中等破坏及以下的概率:传统故障树 0.237 9,T-S 故障树 0.517 0,后者与长宁地震震害调查结果更为吻合。误差源于统计范围为宜宾市域,而震中位于长宁县,基本完好样本数量大导致结果偏大。

4 基本组件关键重要度分析

开展基本组件关键重要度分析,进一步提升通信基站系统的抗震加固性能与韧性,基于计算 T-S 关键重要度,识别在不同损伤状态下制约系统功能的关键影响因子,为后续的资源优化配置提供数据支撑。

4.1 基本组件 T-S 关键重要度计算

取 PGA 为 0.4 g ,按式(5)和式(6)计算通信基站系统各基本组件 T-S 关键重要度(表 6)。

由表 6 可知:不同功能状态下各基本组件重要度排序不同。轻微破坏状态下,通信光缆与输电线为关键影响因子,线缆受损易导致通信基站系统轻微破坏;中等破坏下,机房内通信设备为关键影响因子,机房建筑未倒塌但设备易倾倒;严重破坏及毁坏状态下,机房建筑为关键影响因子,建筑倒塌砸损设备导致通信基站系统功能中断。

表 6 各基本组件 T-S 关键重要度

Table 6 T-S criticality importance measure of each essential component				
基本组件	T-S 关键重要度 $I_{cr}^{(DSi)}$			
	$I_{cr}^{(Ds1)}$	$I_{cr}^{(Ds2)}$	$I_{cr}^{(Ds3)}$	$I_{cr}^{(Ds4)}$
x_1	0. 209 0	0. 226 1	0. 206 3	0. 229 3
x_2	0. 237 5	0. 167 9	0. 186 0	0. 207 9
x_3	0. 179 4	0. 186 8	0. 208 0	0. 246 4
x_4	0. 225 4	0. 241 8	0. 226 5	0. 335 2
x_5	0. 179 7	0. 209 0	0. 244 8	0. 371 9
x_6	0. 161 6	0. 186 4	0. 244 7	0. 371 8
x_7	0. 091 9	0. 096 1	0. 106 4	0. 191 7
x_8	0. 008 2	0. 013 4	0. 005 0	0. 009 1
x_9	0. 003 4	0. 004 5	0. 002 3	0. 002 3
x_{10}	0. 046 8	0. 048 7	0. 050 3	0. 089 2
x_{11}	0. 244 5	0. 244 7	0. 206 9	0. 244 6

4.2 关键影响因子识别

通信基站系统地震易损性与组件地震易损性密切相关。依据重要度分析的计算结果,考虑输电线路与通信光缆易损性参数相同,仅选取输电线路分析,最终选取重要度较大的 6 个组件: x_2 、 x_4 、 x_1 、 x_5 、 x_3 和 x_6 。按修复难易程度分为 2 组;第 1 组为修复难度大的组件(x_1 、 x_2 和 x_5),第 2 组为设备类组件(x_3 、 x_4 和 x_6)。依次将每组组件易损性中位值提升 5%、10%和 15%,标准差保持不变,观察其对整个系统地震易损性的影响。绘制各方案通信基站系统易损性曲线,如图 6 所示,各方案易损性中位值见表 7。

由图 6 和表 7 可知:提升第 1 组地震易损性中位值对通信基站系统抗震性能改善更显著。从图 6 中可以看出,随着第 1 组中位值的提升,系统易损性曲线呈明显下降趋势(如表 7 中提升 15%的方案 6 效果显著优于提升 5%的方案 1),而第 2 组对应的曲线则与对照组基本重合。该差异主要源于:①第 2 组组件的初始易损性中位值较高,进一步提升对系统整体抗震性能的边际效益递减,而第 1 组组件是制约系统性能的关键因素;②第 1 组组件具备完整的 4 个损伤状态参数,而第 2 组部分设备损伤状态划分较简化(如仅含部分易损性参数),导致其对系统整体的地震易损性模型敏感度相对较低。

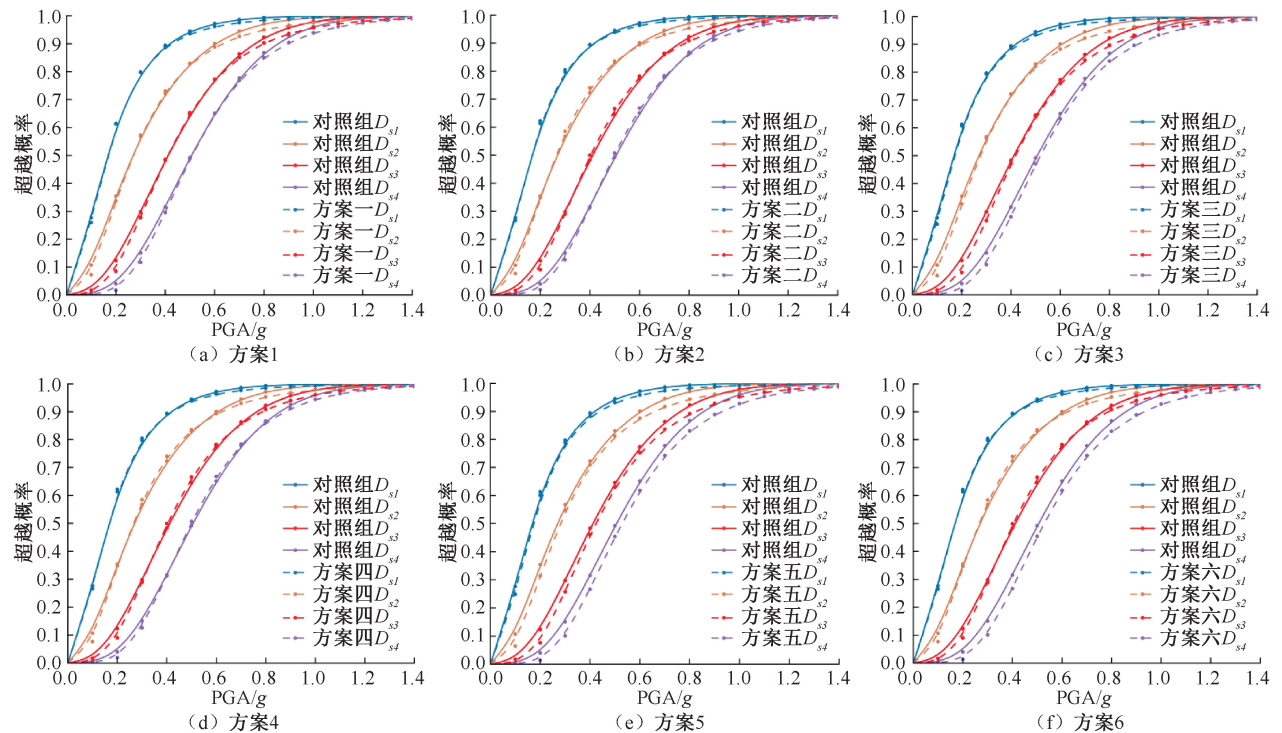


图 6 各方案通信基站系统地震易损性曲线

Fig. 6 Seismic fragility curves of communication base station system for each scheme

表 7 各方案通信基站系统地震易损性中位值
Table 7 Median value of seismic fragility of communication
base station system for each scheme

损伤状态	D_{s1}	D_{s2}	D_{s3}	D_{s4}
对照组	0. 158 6	0. 259 6	0. 400 0	0. 495 6
方案 1	0. 161 4	0. 265 2	0. 407 6	0. 506 8
方案 2	0. 158 8	0. 259 7	0. 400 1	0. 495 8
方案 3	0. 163 6	0. 270 2	0. 414 7	0. 516 8
方案 4	0. 159 0	0. 260 0	0. 400 4	0. 496 1
方案 5	0. 165 6	0. 276 8	0. 420 9	0. 526 1
方案 6	0. 159 4	0. 260 4	0. 400 9	0. 496 7

5 结 论

1) 在方法论层面,T-S 故障树引入模糊数和门规则表,可有效量化组件多状态损伤及复杂功能相关性,其计算结果与实际震害数据吻合度更高,可靠

性优于传统故障树。
2) 在地震易损性分析层面,仅考虑机房子系统会严重低估通信基站系统整体功能损失风险,将供电子系统和传输子系统纳入地震易损性分析模型具有必要性。
3) 在 T-S 关键重要度分析层面,重要度分析计算结果表明:不同功能状态下关键影响因子存在差异;基于关键重要度的敏感性分析定位系统薄弱环节为变电站、输电线路和机房建筑等基础性设施,而非内部设备。
4) T-S 门规则表构建存在主观性,部分组件易损性参数缺失。后续拟引入机器学习算法结合历史震害数据,客观标定规则概率分布以提升模型保真度,并针对参数不完整组件开展易损性研究,拓展大震及以上情景的适用性。

参 考 文 献

[1] 侯本伟,元明豪,吴珊,等. 基于状态树模型的给水处理厂体系震后功能评估[J/OL]. 工程力学: 1-11. [2025-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240305.0843.002.html>.
Hou Benwei, Yuan Minghao, Wu Shan, et al. Post-earthquake functionality assessment of water treatment plant system based on state tree model[J/OL]. Engineering Mechanics: 1-11. [2025-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240305.0843.002.html>.

[2] 王威,宋卓,侯本伟,等. 震后供水管网剩余能量熵的蒙特卡罗模拟分析[J]. 中国安全科学学报,2020,30(9): 188-194.
Wang Wei, Song Zhuo, Hou Benwei, et al. Monte Carlo simulation analysis on surplus power entropy of water supply network after earthquake[J]. China Safety Science Journal,2020,30(9): 188-194.

[3] 王威,龚玉涿,朱峻佚,等. 城市建筑群抗震韧性集成评估方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(4): 219-226.
Wang Wei, Gong Yuzhuo, Zhu Junyi, et al. Integrated evaluation methods of seismic resilience of urban group buildings[J]. China Safety Science Journal,2025,35(4): 219-226.

[4] 武佳佳,王威,朱强强,等. 基于 QRNN 模型的生命年损失概率密度预测[J]. 中国安全科学学报,2019,29(5): 37-43.
Wu Jiajia, Wang Wei, Zhu Qiangqiang, et al. Lifeyears loss probability density prediction based on QRNN model[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(5): 37-43.

[5] 李诗尧. 落地通信基站地震易损性及功能失效概率评估[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2017.
Li Shiyao. Seismic vulnerability and functional failure probability assessment of landing communication station[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017.

[6] 毛晨曦,冯利飞. 基于振动台试验的移动通信节点机房蓄电池组地震易损性分析[J]. 世界地震工程,2019,35(3): 10-20.
Mao Chenxi, Feng Lifei. Seismic fragility analysis of storage batteries in mobile communication node room based on shaking table test[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 10-20.

[7] 李帆. 通信系统抗震韧性评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2022.
Li Fan. Assessment method of seismic resilience of communication system[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022.

[8] 穆志炜. 通信系统震后连通性分析及恢复过程模拟研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2023.

Mu Zhiwei. Connectivity analysis and recovery process simulation of communication system after earthquake[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2023.

[9] Cardoni A, Borlera S L, Malandrino F, et al. Seismic vulnerability and resilience assessment of urban telecommunication networks[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 77: DOI:10. 1016/j. scs. 2 021. 103540.

[10] 白鹏飞,段倩倩,张小咏. 地震灾害下通信基础设施损毁的故障树模型研究[J]. 数学的实践与认识,2017,47(21): 1-7.

Bai Pengfei, Duan Qianqian, Zhang Xiaoyong. Research on fault tree model of communication infrastructure damage under earthquake disaster[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(21):1-7.

[11] Ke S S, Wu B R, Hsu C H. Damage assessment of mobile communication facilities subjected to major earthquakes[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2022, 45(6): 501-512.

[12] Li Xueming, Wei Yao, Ming Zheng, et al. Reliability prediction and evaluation of communication base stations in earthquake prone areas[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): DOI:10. 1038/s41598-023-35841-x.

[13] Li Fan, Zhai Changhai, Qin Hao. Post-earthquake functional state assessment of communication base station using Bayesian network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 252: DOI:10. 1016/j. ress. 2 024. 110482.

[14] 姚成玉,陈东宁. T-S 故障树理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社,2020:13-80.

Yao Chengyu, Chen Dongning. T-S fault tree theory and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020:13-80.

[15] 李波,郭恩栋,毛晨曦. 四川长宁县 6.0 级地震通信系统结构震害调查与分析[J]. 世界地震工程,2020,36(2): 172-179.

Li Bo,Guo Endong, Mao Chenxi. Seismic damage survey and analysis of communication system in Changning Ms6.0 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2):172-179.

[16] RISN—TG041—2022 城市工程系统抗震韧性评价导则[S].

RISN-TG041-2022 Guideline for evaluation of seismic resilience assessment of urban engineering systems[S].

[17] Barbat A H, Moya F Y, Canas J A. Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones[J]. Earthquake Spectra, 1996, 12(3): 371-394.

[18] 刘如山,闫路鹏,姜立新,等. 110 kV 及以上变电站地震易损性研究[J]. 中国地震,2023,39(2):290-298.

Liu Rushan, Yan Lupeng, Jiang Lixin, et al. Seismic vulnerability study of 110 kV and above substations[J]. China Earthquake, 2023, 39(2): 290-298.

[19] GB/T 38591—2020 建筑抗震韧性评价标准[S].

GB/T 38591-2020 Standard for seismic resilience assessment of buildings[S].

作者简介: 王威 (1981—),男,河南沈丘人,博士,教授,博士生导师,主要从事城镇安全与韧性城市、生命线工程系统方面的研究。E-mail: ieeww@ bjut. edu. cn。