

序

统筹发展和安全，是贯彻总体国家安全观、推进国家治理体系和治理能力现代化的核心要求。当前，我国正处在韧性城市与智慧交通建设的关键时期，各类交通基础设施的安全稳定运行，直接关系到经济社会发展大局和人民群众生命财产安全。公路隧道作为现代综合交通体系的咽喉要道，其应对火灾等突发事件的风险抵御、快速响应与高效恢复能力是交通运营安全水平的重要表征。

传统安全管理模式虽在常态风险防控与灾后应急处置中发挥着重要作用，但面对突发性、复杂性、极端性显著增强的突发事件时，其被动性和局限性日益凸显。人们必须深刻认识到，提升安全保障能力关键在于推动理念革新与范式转型——即从侧重“事后应对”的被动管理，转向着眼于“全过程韧性”的主动治理。安全体系不仅要筑牢“防”的屏障、强化“救”的能力，更要具备在扰动中保持核心功能、吸收冲击并快速恢复的韧性。开展韧性交通基础设施建设，既是落实党中央关于交通强国、韧性城市建设战略部署的具体行动，也是构建与新安全格局相适应的基础设施发展格局的必然路径。

《公路隧道火灾应急韧性理论与方法》一书立足于构建一套完整的理论体系与技术方法，系统解决公路隧道火灾应急过程中的现实难题，其价值体现在三个层面：

一是在理论建构上，将前沿的韧性理论与隧道火灾应急实践深度融合，系统地提出了应急韧性概念框架与分析流程，为理解和提升隧道系统在灾变环境下的动态行为提供了新的理论模型。

二是在实践路径上，提出了以内部机电设备功能保障为基石、外部救援力量高效协同为驱动的双重机制，明晰了隧道火灾应急韧性建设的内在支撑与外部动力，为从系统层面提升应急韧性提供了清晰的实践指引。

三是在方法创新上，创新提出了应急韧性基准值概念，构建了融合风险可接受标准与应急韧性能力目标的应急韧性概率评估模型，实现了从定性分析到定量评估的方法深化，为科学决策提供了精准的量化依据。

该书的出版，不仅是学术研究的重要成果，更是对行业重大需求的积极回应。期望该书能成为公路隧道设计者、运营管理者与安全应急科研人员的重要参考，助力推动我国基础设施安全治理模式向韧性应对转型，进而为现代化基础设施体系建设提供有力支撑。

中国工程院院士

2026年6月25日

前 言

我国是公路隧道建设运营数量最多、发展速度最快的国家，火灾是公路隧道面临的最大风险之一。尤其是特长隧道火灾应急救援存在隧道内外联络困难、救援车辆不能及时快速进入、疏散路径长人员无法快速撤离等难题。因此，特长公路隧道火灾应急管理和救援技术面临着更高的要求和挑战。目前，以风险管理为主导的模式已难以适应特长隧道火灾应急工作实际需求，隧道火灾应急领域仍缺乏一种涵盖灾前、灾中、灾后全过程的集成化分析、评估与提升方法框架。

目前，韧性理念已从学术研究领域向工程实践领域广泛渗透，正在推动安全治理范式从传统风险管理向更具系统性的韧性管理转型。世界道路协会（PIARC）在 2024 ~ 2027 年战略规划报告中明确倡议，应重点关注增强韧性的战略、战术和应用计划，以有效降低风险并应对事故灾害。同时，该报告将突发火灾事故视为对隧道系统正常运营的干扰，指出韧性理论内涵与隧道火灾应急的实际需求相契合，基于韧性的方法可从整体上提升隧道系统安全裕度并有效控制灾损规模。

本书首先系统梳理了韧性和安全韧性理论在各行业领域中的研究与应用进展，明确了应急韧性概念提出的理论基础和必要性。通过一系列概念命题推理过程，对应急韧性概念的定义与内涵进行了界定。在风险分析过程的基础上，本书进一步提出了系统应急韧性分析的标准化流程。结合隧道火灾应急过程场景特征，构建了隧道火灾应急韧性理论模型，并提出以救援单位到达时效性与预期损失可接受度为核心的应急韧性能力表征方法。从隧道系统内部和外部两个维度，明确了隧道火灾应急韧性的实现路径。

在隧道火灾应急韧性的实现路径方面，本书提出了基于机电设备应急功能的隧道火灾应急韧性内部保障机制，以及基于外部救援单位应急救援效能的外部驱动机制。前者将隧道机电设备火灾应急功能划分为火灾探测报警功能、应急疏散引导功能、通风排烟功能、应急交通组织功能、消防灭火功能五大类，基于实际故障数据提出了各项设备可靠度预测方法，并据此构建了隧道火灾机电设备应急功能保障度评估模型，为运维决策与系统可靠性提升提供了量化依据。后者在隧道火灾应急救援组织流程的基础上，定义了应急救援效能内涵，包括外部救援单位到达时效性、火灾规模控制、人员疏散安全保障、交通影响程度控制，并分别提出了其过程量化表征方法。本书以系统动力学（SD）模型为载体，构建了应急救援效能 SD 模型，为隧道火灾应急救援过程推演和救援策略制定提供决策支持。

在评估方法方面，本书通过定义救援单位介入时间与预期后果损失满足期望的可接受/可容忍概率阈值，提出了隧道火灾应急韧性适应能力、吸收能力、恢复能力基准的表征方法，同时明确了风险可接受标准与应急韧性基准的内涵关系与转化方法。以应急韧性基准值为依据，本书进一步提出了基于外部救援单位到达时效性与预期损失可接受度的应急韧性能力测度方法。基于应急韧性能力的实现路径及影响因素分析，构建了融合 FRAM 和

BN 方法的隧道火灾应急韧性概率评估模型。通过对评估方法的实例应用，从机电设备可靠度指标分配、救援单位到达时间约束等方面提出了隧道火灾应急韧性优化路径，形成了从评估到优化的完整方法论闭环。

本书是团队在公路隧道火灾安全与应急领域长期工程实践与科学研究基础上的思考和总结，在撰写过程中得到了中铁第四勘察设计院集团有限公司薛光桥、孙文昊、陈玉远等，陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司张杨等的大力支持和帮助；武汉科技大学安全与应急研究院李亚鑫、牛子铭、崔思冰等研究生也为本书的完成付出了辛勤努力。限于篇幅，未能将所有给予支持的单位与同仁一一列举，在此谨向他们致以衷心的感谢。

感谢武汉科技大学研究生质量工程项目对本书出版的资助。

期待本书能够为韧性理论在安全与应急领域的融合应用提供新的视角，为隧道火灾应急管理理论建构与应急能力提升提供方法支持。

由于作者水平所限，书中难免存在不足和纰漏之处，恳请各位读者批评指正。

著 者

2025 年 12 月

| 目 录 |

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 公路隧道建设情况	1
1.2 公路隧道火灾应急新需求	2
1.3 公路隧道系统韧性新趋势	3
1.4 韧性评估方法应用研究评述	7
1.5 本书内容框架	23
第 2 章 公路隧道火灾应急韧性理论研究	26
2.1 韧性理论基础与延伸	26
2.2 应急韧性概念框架	35
2.3 公路隧道火灾应急韧性理论模型	44
2.4 公路隧道火灾应急韧性能力实现路径与驱动保障	54
2.5 本章小结	58
第 3 章 公路隧道火灾应急韧性内部保障机制研究	59
3.1 公路隧道火灾应急韧性内部保障机制基本架构	59
3.2 基于 Weibull 分布的公路隧道火灾应急功能机电设备可靠性预测	67
3.3 公路隧道机电设备火灾应急功能保障度分析与评估	82
3.4 公路隧道火灾机电设备应急功能保障优化路径研究	90
3.5 本章小结	95
第 4 章 公路隧道火灾应急韧性外部驱动机制研究	97
4.1 公路隧道火灾应急韧性外部驱动机制基本架构	97
4.2 公路隧道火灾动态发展与灭火救援过程量化分析	104
4.3 公路隧道火灾多类别救援单位到达时效性量化表征方法	110
4.4 公路隧道火灾人流/车流疏散演变机理	117
4.5 基于动力学机制的公路隧道火灾应急救援效能评估模型及应用分析	129
4.6 本章小结	138
第 5 章 公路隧道火灾应急韧性基准研究	140
5.1 公路隧道火灾应急韧性基准内涵与构建流程	140
5.2 基于公众风险认知与事故统计的公路隧道火灾风险标准分析	146
5.3 我国公路隧道火灾风险可接受标准制定	157
5.4 公路隧道火灾应急韧性基准表征与构建	166

5.5	本章小结	171
第 6 章	公路隧道火灾应急韧性评估方法研究	172
6.1	公路隧道火灾应急韧性评估框架	172
6.2	公路隧道火灾应急韧性概率评估模型构建	177
6.3	公路隧道火灾应急韧性评估实例研究	189
6.4	公路隧道火灾应急韧性能力优化路径	197
6.5	公路隧道火灾应急韧性评估系统设计与实现	207
6.6	本章小结	214
参考文献		215

第 1 章 | 绪 论

1.1 公路隧道建设情况

中华人民共和国交通运输部《2025 年交通运输行业发展统计公报》显示，截至 2025 年年底，全国公路隧道共 30 502 处、3576.59 万延米，比上年末增加 1778 处、316.93 万延米，其中特长隧道为 2546 处、1179.66 万延米，长隧道为 8756 处、1538.94 万延米^[1]，我国早已成为世界上隧道工程建设规模最大、数量最多和技术难度最高的国家。

本书对截至 2026 年 6 月中国已建成运营、正在建设、规划设计的长度在 10km 以上的 74 座特长公路隧道进行了统计^[2]，这里仅对部分隧道进行了展示，见表 1-1 ~ 表 1-3。在已建成运营、正在建设及规划设计的长度在 10km 以上的特长公路隧道中，高黎贡山隧道（长度为 34 538m）是在建的世界最长的高速公路隧道，达玛拉山隧道为高海拔地区在建的世界最长的公路隧道（长度为 12 940m，洞口海拔为 4540m），正在进行工可研究的 G9912 合肥都市圈环线南环段巢湖隧道（长度为 16 160m）是世界最长的公路水下盾构隧道，正在规划设计的云南哀牢山玉临隧道（长度为 24 505m）是世界上第四条长度超过 20km 的高速公路隧道。

表 1-1 已建成运营的长度在 10km 以上的特长公路隧道

序号	隧道名称	长度/m	技术标准	所在省份	施工工法
1	秦岭终南山隧道	18 020	双向 4 车道	陕西	钻爆法
2	锦屏山隧道	17 504	双向 2 车道	四川	钻爆法
3	秦岭天台山隧道	15 560	双向 6 车道	陕西	钻爆法
4	木寨岭隧道	15 226	双向 4 车道	甘肃	钻爆法
5	米仓山隧道	13 833	双向 4 车道	四川/陕西	钻爆法
6	西山隧道	13 654	双向 4 车道	山西	钻爆法
7	二郎山隧道	13 459	双向 4 车道	四川	钻爆法
8	狮子坪隧道	13 156	双向 4 车道	四川	钻爆法
9	虹梯关隧道	13 122	双向 4 车道	山西	钻爆法
10	白马隧道	13 013	双向 4 车道	四川	钻爆法
11	天山胜利隧道	22 130	双向 4 车道	新疆	TBM+钻爆组合法
12	大凉山 1 号隧道	15 366	双向 4 车道	四川	TBM+钻爆组合法
13	大巴山隧道	13 593	双向 4 车道	重庆/陕西	钻爆法
14	圭嘎拉隧道	12 798	双向 4 车道	西藏	钻爆法

续表

序号	隧道名称	长度/m	技术标准	所在省份	施工工法
15	北天山隧道	11 896	双向 4 车道	新疆	钻爆法
16	小相岭隧道	21 775	双向 2 车道	四川	钻爆法+新奥法
17	吉雪卧塘隧道	13 566	双向 4 车道	西藏	钻爆法

表 1-2 正在建设的长度在 10km 以上的特长公路隧道

序号	隧道名称	长度/m	技术标准	所在省份	施工工法
1	胶州湾第二海底隧道	15 900	双向 6 车道	山东	盾构法+钻爆法
2	西天山隧道	15 707	双向 4 车道	新疆	TBM+钻爆组合工法
3	盐源隧道	14 150	双向 4 车道	四川	TBM+钻爆组合工法
4	太行山隧道	14 020	双向 4 车道	山西	钻爆法
5	龙骨坡隧道	12 386	双向 4 车道	重庆	钻爆法
6	勐捧隧道	12 215	双向 4 车道	云南	钻爆法
7	金塘海底隧道	16 180	双向 6 车道	浙江	盾构法
8	高黎贡山隧道	34 538	双向铁路	云南	TBM+钻爆组合工法
9	同德隧道	14 520	双向 4 车道	四川	钻爆法
10	达玛拉山隧道	12 940	双向 2 车道	西藏	钻爆法
11	峨岭特长隧道	12 200	双向 4 车道	山西	钻爆法

表 1-3 规划设计的长度在 10km 以上的特长公路隧道

序号	隧道名称	长度/m	所在省份
1	哀牢山玉临隧道	24 505	云南
2	巢湖隧道	16 160	安徽
3	五宝山隧道	12 685	云南

1.2 公路隧道火灾应急新需求

火灾是隧道安全运营的最大威胁之一。隧道内电气设备损坏或短路、交通事故、车辆自燃等均可能引发隧道火灾事故。由于公路隧道受到内部空间狭长、出入口数量少等构造特性限制，火灾产生的热量、有害气体等难以快速有效地排出洞外，不仅会造成隧道主体结构及附属设施易受损，还会使交通运输网络长时间中断，甚至严重威胁隧道内人员生命安全^[3-4]。

近年来，隧道火灾频繁发生，引发全社会对隧道火灾安全的强烈关注。例如，2022 年 12 月 29 日，韩国京畿道果川市葛岬洞第二京仁高速公路葛岬高架桥隔音隧道内，一辆行驶中的 5 吨级卡车起火，火势沿着隧道内的塑料隔音墙体蔓延，过火路段长度达 600m。

此次事故造成 45 辆车被烧毁, 5 人死亡、37 人受伤, 其中 3 人受重伤, 34 人因吸入烟雾受轻伤。当地消防部门派出 94 辆消防车辆和 219 名消防员参与灭火, 于事故发生约 1h30min 后将大火基本扑灭^[5] [图 1-1 (a)]。2019 年 8 月 27 日, G15 沈海高速猫狸岭隧道发生一起大货车自燃起火事故, 造成 5 人死亡、31 人受伤 (其中 15 人重伤), 隧道设施、途经车辆、事故货车及货物严重受损, 直接经济损失达 500 余万元。该隧道经全力抢修, 直至同年 9 月 5 日恢复通行^[6] [图 1-1 (b)]。



图 1-1 隧道火灾事故

显然, 隧道作为路网的控制性工程, 一旦发生火灾, 不仅会引发隧道内外联络困难、救援车辆不能及时进入、疏散路径长人员无法快速撤离等诸多棘手问题, 还会严重影响区域交通通行, 进而导致社会影响进一步扩大。尤其是中国长度在 10km 以上甚至 20km 以上的隧道逐渐增多, 新形势下特长公路隧道火灾应急管理和救援技术面临着更高的要求 and 更严峻的挑战。

1.3 公路隧道系统韧性新趋势

1.3.1 从风险管理到韧性隧道

隧道风险是指在隧道全生命周期内, 由不确定性因素导致的人员伤亡、财产损失、环境破坏或运营中断等潜在负面影响^[7]。传统的隧道安全管理主要依赖于风险管理方式, 其核心是通过风险识别、风险评估、风险控制与风险监控等一系列系统性活动, 降低风险事件的发生概率或减轻其可能造成的后果损失。在隧道工程领域, 风险管理已形成一套相对成熟的应用体系。例如, 在隧道设计阶段, 采用定性或定量的风险评估方法 (如事件树分析、事故树分析) 来辨识火灾、水灾等重大风险源, 并据此优化设计方案、增设安全设施; 在运营阶段, 则通过制定应急预案、定期巡检与维护来管控风险。

然而, 随着隧道工程建设规模与运营复杂性的不断提升, 传统以风险管理为主导的模式逐渐暴露出其局限性: ①静态与预设性。该模式主要基于已知或可预见的风险, 对极端罕见事件或复杂系统内生的、非线性连锁失效等“未知的未知”现象, 其预见和应对能力

有限。②目标导向聚焦避免与减损。其核心目标是使系统保持在一个预设的、可接受的安全边界内，侧重通过防御措施将风险控制在阈值之下；一旦超出此边界，系统可能迅速崩溃，缺乏在超标扰动下维持基本功能或防止事态恶化的能力。③恢复视角不足。风险管理更关注防止坏事发生和减轻既定损失，但对于事故发生后系统如何快速从坏变好，即功能的恢复速度与效率关注相对较少，缺乏对恢复能力的量化设计与主动提升。然而，基于韧性的方法被视为对传统风险管理的有效拓展与必要补充^[8-9]，将安全管理重心从单纯的灾前防御延伸至全过程应对，强调系统在不确定性环境中的自适应、自组织与持续学习能力。两者在核心理念、关注焦点等关键维度存在差异，具体如表 1-4 所示。

表 1-4 风险管理与韧性对比

对比维度	风险管理	韧性
核心理念	防控可预见风险，将损失控制在可接受水平	承受、适应、恢复各种扰动，保持并恢复核心功能
关注焦点	风险事件本身（概率与后果）	系统应对扰动的全过程能力（抵抗、吸收、恢复、学习）
时间视角	侧重灾前预防与准备	全过程（灾前、灾中、灾后），强调动态响应与恢复
目标导向	避免与减损	维持与恢复
应对不确定性	应对已知或可预见的风险	应对已知及未知、不可预见的扰动，包容不确定性
系统状态	追求静态的安全平衡点	承认动态变化，追求在扰动中保持功能连续性
恢复能力	非核心关注点，恢复策略常为事后制定	核心维度之一，恢复速度与效率是韧性的关键指标
方法特点	多为确定性、标准化的分析与控制流程	更注重适应性、灵活性、冗余性与学习进化能力

近年来，国内外政策与标准也愈发重视韧性建设。国务院印发的《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》（国发〔2021〕27号）中明确提出，要完善交通基础设施紧急疏散、救援和避难通道系统，增强交通运输网络韧性，提高自身运行安全水平和对国家战略安全的保障能力^[10]。中共中央办公厅、国务院办公厅联合印发的《关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》进一步强调，持续提升城市设施韧性、管理韧性、空间韧性，为城市与交通系统的韧性建设提供了关键指引。此外，交通运输部在《关于同济大学开展交通基础设施韧性提升关键技术等交通强国建设试点工作的意见》（交规划函〔2022〕399号）中，明确将交通基础设施韧性提升关键技术列为重点试点任务，推动实现其从理论到实践的闭环突破。PIARC 在 2024~2027 年战略规划报告中也倡议，应重点关注增强韧性的战略、战术和应用计划，以有效降低风险并应对事故灾害。公路隧道作为区域交通的控制性节点和经济发展的支撑，提升其在灾害与事故扰动下的预防、抵抗、适应与快速恢复能力，不仅是落实国家韧性城市与交通强国战略的具体行动，也是未来隧道建设与运营发展的必然方向与关键目标^[11]。

因此，推动隧道安全范式从风险管理向韧性隧道演进，不仅是理论发展的必然趋势，更是应对复杂灾害场景、保障城市交通生命线安全稳定的迫切需求。韧性隧道不仅关注是否安全，更追求如何在扰动中保持并恢复安全，代表着未来隧道工程安全建设与运营管理的先进方向。

1.3.2 隧道系统韧性研究现状

近年来,韧性理论逐渐在公路隧道领域得到应用,并成为公路隧道领域的热点研究主题。PIARC^[12]从公路隧道安全性与可用性角度对韧性作出如下定义:及时有效地准备、计划、抵抗、吸收、恢复和更成功地适应影响公路隧道可用性的事件或发展的实际或潜在负面影响的能力。在这种情况下,可接受的安全水平是公路隧道可用性的强制性约束。

基于此定义,PIARC 提出公路隧道系统韧性具体表现为预防性韧性、缓解性韧性、适应性韧性三个维度。

(1) 预防性韧性(静态)。完全抵抗、吸收或限制某一事件负面影响的能力,从而防止或限制可用性损失。同时,保持可接受的安全水平作为强制性约束。

(2) 缓解性韧性(静态和动态)。通过限制可用性损失的程度或持续时间,从特定事件的负面影响中恢复的能力。同时,保持可接受的安全水平作为强制性约束。

(3) 适应性韧性。在相同反复出现的情况下,提高隧道可用性性能的能力;在不断变化的情况下,保持或提高可用性性能(适应长期发展)的能力。同时,保持可接受的安全水平作为强制性约束。

1.3.2.1 隧道系统韧性理论

在隧道系统韧性理论方面,PIARC 给出了较为系统化的公路隧道系统韧性概念框架。在此基础上,丁浩等^[13]将公路隧道运营韧性定义为:对影响公路隧道正常运营通行的实际或潜在负面效应,进行预防、抵抗、适应、恢复的能力。公路隧道运营韧性不仅包括事前及时预防,还包括事中快速响应和事后高效恢复,具有全阶段性、动态演进性和量化客观性。除此之外,Xu 等^[14]建立了公路隧道韧性理论分析模型;在此基础上,提出了公路隧道系统韧性的五个基本属性用于表征系统韧性水平,即抗扰性、适应性、响应性、可恢复性及鲁棒性。Dinh 等^[9]将隧道系统应急韧性定义为:在紧急状况下,系统能够迅速表现出控制系统功能、调节系统状态、保障人民生命安全的能力,具有安全系数高、预案智能化、性能动态化、传输通道多、交互容错强等特征。

在韧性理论应用于隧道系统的具体研究中,一般需要结合具体的扰动或灾害场景对隧道系统进行韧性分析、评估及提升。目前,相关研究多集中在隧道结构韧性、施工安全韧性、抗震韧性及火灾韧性等方面。

1.3.2.2 隧道结构韧性

在隧道结构韧性方面,林星涛等^[15]针对多次扰动下盾构隧道结构韧性评估开展了研究。通过构建多阶段隧道结构韧性分析模型,该研究确定了隧道结构韧性指标计算方法,定义了隧道结构韧性等级划分标准,并在此基础上进一步分析了隧道结构性能恢复程度和加固决策时间对结构韧性程度的影响。朱旻等^[16]针对地面堆卸载作用,对不同埋深盾构隧道结构响应特征和韧性演化规律进行了研究。该研究将隧道结构韧性分为四个等级,并指出当结构进入极低韧性阶段时,应采取更加高效快速的综合修复方案,同时避免对结构

造成二次损伤。Zhang 等^[17]基于多级隧道结构韧性分析模型，确定了隧道结构性能指标，并据此对隧道韧性等级进行了划分。以实际隧道工程为例，通过分析隧道结构在重型车辆碰撞和火灾双重作用下的韧性，为隧道初步设计以及灾后性能恢复和加固措施的制定提供了依据与建议。

1.3.2.3 隧道施工安全韧性

在隧道施工安全韧性方面，翁源等^[18]提出了决策试验与评估实验室（DEMATEL）和 BN 方法的隧道工程系统韧性评价模型（DEMATEL-BN），通过 DEMATEL 剔除关联度较小的影响因素并构建 BN 拓扑图，结合 BN 正向推理，计算系统韧性值。赵映璿等^[19]从应急系统应对风险事故的承受能力、吸收能力、恢复能力、优化能力四个方面，确定了隧道施工应急系统韧性评价指标体系，并基于可拓云模型提出了应急系统韧性评价方法。王德凯和郝伟^[20]基于压力-状态-响应（PSR）模型从压力、状态、响应三个方面建立了公路隧道洞口施工安全系统韧性评价指标，并基于 BN 提出了韧性水平计算方法。郑刚等^[21]认为隧道及地下空间工程韧性提升的目的在于保障工程的高可靠性、低灾害后果性和灾后快速恢复性，并将保障工程系统韧性的现有设计方法分为四个层次，即单一安全系数设计、可靠度设计、鲁棒性设计和可恢复性设计。

1.3.2.4 灾害扰动下的隧道系统韧性

在隧道系统面对灾害扰动的韧性能力方面，现有研究主要聚焦灾害扰动类型，包括地震、火灾及交通事故。Meng 等^[22]基于间接边界元法（IBEM）和有限元法（FEM），提出了考虑地形放大效应和隧道-土动力相互作用的山区隧道抗震韧性快速评价框架。Sun 等^[23]基于系统韧性理论，采用 BN 和多目标优化相结合的方法，提出了适用于城市道路的隧道系统火灾韧性评估框架；同时，在考虑运维成本和韧性水平情况下，分析了以火灾韧性提升为目标的投资最优策略。Zhu 等^[24]提出了一种量化圆形隧道钢筋混凝土衬砌在密闭车辆火灾条件下的韧性框架；该框架通过评估火灾造成的功能损失，能够根据具体隧道条件对各种防火方法的效率进行决策评估。Caliendo 等^[25]通过建立宏观交通仿真模型，以平均出行速度及其空间剖面作为韧性度量，评估了双洞高速公路隧道中单洞发生交通事故情况下的韧性能力，并据此提出了交通组织和恢复的建议策略。

1.3.3 隧道火灾应急韧性研究必要性

相比于其他研究领域，公路隧道领域的韧性理论及应用研究仍较为薄弱。目前，相关研究多集中在隧道结构安全韧性领域，而对隧道系统在面临灾害或事故扰动时的安全韧性关注不足，且尚未形成系统化的理论体系与应用方法。特别是在公路隧道火灾领域，韧性理论尚未在传统风险管理模式上实现补充和扩展，没有同隧道火灾预防与应急实际工作内容及需求建立有效的联系，使得韧性理论的丰富内涵难以为隧道消防安全与应急工作提供有效的理论指导和实践方法支撑。

近年来, 尽管韧性理论在安全科学领域逐渐得到广泛关注, 但在实际应用中仍存在一定不足, 特别是在公路隧道消防安全领域, 相关研究仍较为匮乏。已有研究存在的局限性主要体现在以下几个方面:

(1) 现有韧性研究尚未形成可直接指导实际的理论方法和框架, 部分研究侧重韧性实际应用, 而忽视了对韧性理论内涵的挖掘, 导致韧性理论和实际应用之间缺乏有效的衔接和整合。

(2) 系统破坏性事件发生后的应急响应与救援处置过程, 目前尚未有效融入韧性概念框架内。韧性理论尚未在传统风险管理模式的基础上实现补充和扩展, 其在隧道工程领域的应用也未能与预防及应急工作实际内容、需求建立有效联系。

(3) 在公路隧道领域, 韧性理论目前多用于解决隧道结构与抗震等方面的问题, 其应用场景多集中在设计与施工建设阶段。然而, 在隧道火灾应急这一复杂场景中, 韧性理论尚未得到有效应用, 仍缺乏一种有效的概念和理论方法, 以支持其在火灾应急中的应用和改进。

综上所述, 韧性具有相当丰富的理论内涵, 若将火灾紧急情况视为对隧道系统正常运营的干扰, 韧性理论内涵与隧道系统消防与应急实际需求相契合, 能够为隧道火灾应急管理 with 应急救援能力的持续提升提供支持和指导。建设具有良好应急韧性水平的隧道工程, 对最大限度降低隧道火灾事故发生概率、降低隧道火灾事故损失、最短时间完成灾后恢复具有重要的实际意义。

1.4 韧性评估方法应用研究评述

韧性评估作为韧性研究的核心组成部分, 对于理解和提升系统或组织在面临扰动与灾害时的适应能力、吸收能力、恢复能力具有重要作用。该过程不仅涉及系统抗扰动能力, 更强调其在遭受冲击后的适应机制与恢复路径。通过科学有效的韧性评估, 决策者能够识别系统脆弱性、厘清恢复瓶颈, 并为制定有针对性的韧性提升策略提供理论依据。

鉴于韧性概念的多维性及评估对象的复杂性, 韧性评估方法需兼顾不同系统特征、扰动类型与应用情境的需求。当前, 韧性评估主要包括基于韧性曲线的韧性评估方法、基于指标体系的韧性评估方法及基于概率的韧性评估方法。这些方法分别从系统性能、多维度指标集成和随机过程建模等角度出发, 构建了韧性量化与分析的评估框架。本节将系统阐述常用韧性评估方法的基本原理、评估步骤、方法优势和方法局限性等, 以期在不同领域下的韧性评估实践提供理论参考与方法支持。

1.4.1 基于韧性曲线的韧性评估方法

基于韧性曲线的韧性评估方法是一种从系统性能角度出发, 量化分析系统在遭受灾害或干扰时的性能下降程度以及恢复能力, 进而评估系统韧性水平的方法^[26-27]。它关注系统在灾害发生前后的性能变化, 通过评估系统性能损失的时间历程和程度来衡量系统的韧性水平。该方法的核心思想在于将系统的韧性与系统性能损失紧密联系起来, 认为系统的韧

性体现在其有效抵抗灾害导致的性能损失、加速性能恢复以及最大限度地减少性能损失带来的影响。

1.4.1.1 评估步骤

其评估方法框架如图 1-2 所示。

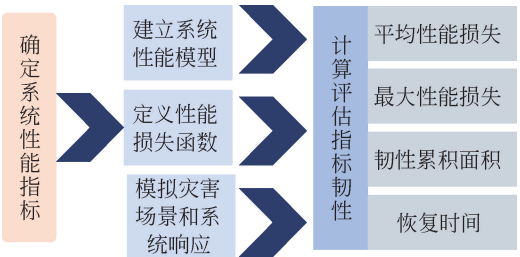


图 1-2 基于韧性曲线的韧性评估方法框架

(1) 确定系统性能指标。根据研究对象和评估目的，选取能够准确反映系统功能和状态的性能指标。这些指标应具有可测量性。例如，隧道火灾应急系统性能指标包括人员疏散时间、火灾扑灭时间、交通中断时间等。

(2) 建立系统性能模型。构建能够描述系统在正常运行状态下性能表现的数学模型。该模型应基于系统的实际运行数据和相关理论，模拟系统在无灾害情况下的性能变化规律。同时，还需建立灾害发生时系统响应模型，以分析灾害对系统性能的影响机制。这些模型可以采用物理模型、统计模型或基于仿真的模型进行构建。

(3) 定义性能损失函数。基于系统性能指标和性能模型，明确性能损失的定义和计算方法。性能损失函数可以表示为系统实际性能与期望性能之间的差异关系，通常是一个随时间变化的函数。例如，性能损失函数可以定义为实际性能指标值与正常性能指标值的比值或者两者的差值等。通过该函数可以定量地描述系统在灾害发生后的性能损失程度。

(4) 模拟灾害场景和系统响应。利用数值模拟、仿真技术等方法，模拟不同灾害场景下系统的行为和响应过程。通过考虑灾害的强度、持续时间、发生位置等因素对系统性能的影响，预测系统在灾害发生后的性能损失情况。

(5) 计算评估指标韧性。根据性能损失函数和模拟结果，计算基于系统性能损失的韧性评估指标。常见的韧性评估指标包括：①平均性能损失。在灾害持续期间系统性能损失的平均值，用于评估系统在灾害期间的整体性能下降程度。②最大性能损失。系统在灾害过程中经历的最大性能下降幅度，用于衡量系统在极端情况下的抗灾能力。③韧性累积面积。性能损失-时间曲线下方面积与总评估时间段的比值，反映了系统在整个灾害事件期间的韧性表现。韧性面积越大，表明系统的性能损失越小，韧性水平越高。④恢复时间。系统从灾害发生到恢复到一定性能水平所需的时间，体现了系统的恢复速度和效率。

1.4.1.2 韧性曲线

韧性曲线本质上是系统性能随时间变化的轨迹，其核心在于刻画系统在干扰前的正常

状态、干扰后性能下降-恢复至稳定状态的全过程。曲线的关键要素包括干扰发生时间、性能下降幅度、恢复速度、恢复后的稳定性能水平等,通过这些要素的量化(如面积、斜率、差值)可对系统韧性进行定量评估。韧性曲线的形状由恢复函数决定,如图1-3所示,常见的有三种类型^[28]:

(1) 线性恢复函数。系统性能水平随时间变化呈直线上升态势,适用于缺乏响应资源或数据的场景。

(2) 三角函数恢复函数。初期系统性能水平恢复速度缓慢(资源不足或组织混乱),后期系统性能水平恢复速度加快(资源到位、协调改善),曲线呈S形。

(3) 指数恢复函数。初期系统性能水平恢复速度快(大量资源涌入),后期系统性能水平恢复速度放缓(资源耗尽或修复难度增加),曲线呈递减斜率的凸形。

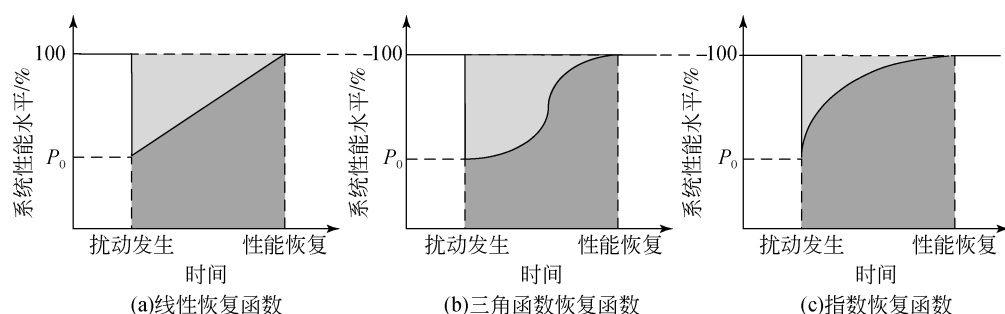


图 1-3 恢复函数曲线

1.4.1.3 性能指标与性能损失

在韧性评估中,需要明确系统的性能指标,这些指标应能准确反映系统在正常运行状态下的功能和效率。例如,对于交通隧道系统,性能指标可以包括交通流量、车辆通行速度、事故率等;对于电力系统,性能指标可以是供电稳定性、电力负荷满足程度等。通过将系统性能转化为具体的量化指标,可以更直观地观察系统在灾害发生前后的性能变化。

系统性能损失是刻画扰动对系统功能破坏程度的核心变量,基于系统性能损失的韧性评估可以理解为系统在遭受灾害或干扰后,其实际性能与理想性能或正常性能之间的差距^[29-30],这一差距可以通过数学模型进行量化。例如,采用性能损失率、性能下降幅度等指标来度量。性能损失的大小反映了系统受灾害影响的程度,是韧性评估的关键因素之一。其界定需建立在基准性能与实际性能之上,在时间上具有动态演变的特点,时间维度的引入能够全面地刻画系统在灾害全过程中的韧性表现。灾害发生后,系统的性能可能在短时间内急剧下降;之后,随着恢复措施的实施,其性能将随时间的推移逐渐回升至某一水平。因此,在评估韧性时,需要考虑性能损失在不同时间阶段的变化情况,包括灾害发生初期的性能下降速度、中间阶段的维持能力以及恢复阶段的恢复速率等。

1.4.1.4 韧性的量化

Bruneau 等^[31]将韧性三角形模型用于社区或基础设施在地震等灾害中的韧性评估,是

最经典的韧性曲线模型之一，如图 1-4 所示。该曲线模型以系统性能水平为纵轴，时间为横轴。韧性量化曲线模型较好地表达了整个韧性周期的过程，曲线起点为干扰发生前的正常性能（100%），干扰发生后性能下降至最低水平，随后逐渐恢复，直至 t_1 回到正常水平（100%）。曲线与正常性能水平线之间的阴影区域为韧性损失。如式（1-1）所示，韧性损失通过积分计算，韧性损失值越大，韧性水平越低；反之，则韧性水平越高。

$$RL = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1-1)$$

式中，RL 为韧性损失； t 为时间，其中 t_0 为干扰发生时间， t_1 为系统性能水平回到正常水平时间； $Q(t)$ 为系统性能水平。

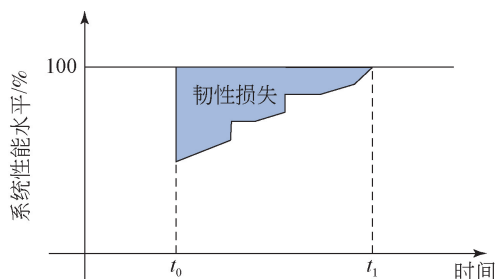


图 1-4 韧性三角形模型量化韧性损失

Zobel^[32]将韧性曲线描述为纵轴表示功能完备度，横轴表示时间，三角形面积代表单次干扰的总功能损失（图 1-5）。该曲线突出功能损失幅度与恢复时间的联动关系，强调功能损失与恢复时间的权衡。然而，该理论假设恢复是线性的，可能与实际非线性恢复过程存在偏差，如式（1-2）所示。

$$R(X, T) = 1 - \frac{XT}{2T^*} \quad (1-2)$$

式中， T^* 为设定的时间区间； X 为功能损失百分比； T 为恢复所需时间； $(XT/2)$ 为三角形面积。

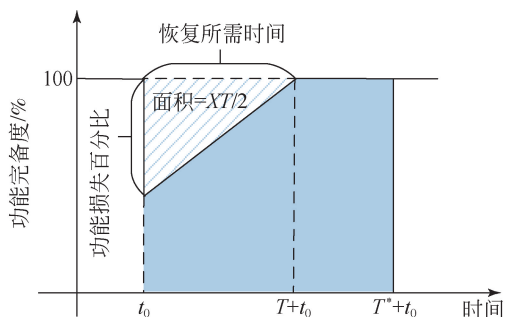


图 1-5 韧性三角形模型量化韧性损失的另一种表征

Rose^[33]将经济韧性定义为：当发生破坏时，实体或系统维持系统功能的能力，分为静态（抗干扰能力）和动态（恢复速度）韧性。静态韧性曲线纵轴表示系统产出水平，