基于复杂适应系统的道路网络空间韧性规划方法

代梦瑶

河北工程大学

摘要：道路网络在日常运行中需要保障通行效率，在极端扰动下还应具备维持基本服务、组织替代交通和逐步恢复的能力。本测试稿依据原稿的理论讨论，以复杂适应系统为分析基础，从结构、功能与治理三个维度整理路网空间韧性的规划思路。针对通道过度集中、道路功能衔接不足、设施与生态条件脱节以及管理协同不充分等问题，分别讨论多路径冗余、模块化组织、关键节点强化、交通动态调控及全周期协同管理。三类方法通过空间布局、运行机制和治理安排相互衔接，形成覆盖扰动前后不同阶段的规划框架。本文保留原稿的概念与论证范围，用于测试正文层级及图文排版，不新增实证研究结果。

关键词：道路网络；空间韧性；复杂适应系统；协同规划

1 研究背景与规划问题

交通基础设施的发展既涉及通达水平和网络密度，也涉及突发事件下的服务维持与恢复能力。面对外部风险，道路网络需要吸收冲击、调整运行方式，并在条件允许时恢复或改善原有功能。原稿以交通强国建设为背景，将空间韧性引入路网规划讨论，关注道路布局、设施联系与治理机制之间的关系。相较于仅考察网络拓扑或单一灾害的分析，本文沿用其综合视角，整理工程系统与空间治理相结合的规划方法。

2 路网空间韧性的概念与目标

路网空间韧性强调道路系统在空间上的抗扰、代偿和恢复能力。通过统筹道路布局、层级联系、节点组织及防护设施，使路网在常态下承担通行任务，在局部受损时保持必要连通，并为应急处置和后续修复预留条件[1-2]。这一概念覆盖事前预防、事中适应和事后恢复，不限于单项设施的安全强度。其规划重点包括结构稳定、路径冗余、尺度衔接以及恢复过程的可组织性。

3 路网规划中的主要韧性约束

3.1 通道集中与替代路径不足

当交通流量过度依赖少数中心枢纽和骨干廊道时，局部损坏容易影响较大范围的运行[3]。放射型布局有利于常态集散，却可能使替代路线不足；关键桥梁、隧道或连接通道中断后，车流难以及时转移，进而增加连锁拥堵或功能失效的风险。因此，规划既要考虑高效通行，也要检查重要节点以外是否存在可用的绕行联系，避免将系统运行过度集中于单一路径。

3.2 道路功能固化与尺度衔接不足

不同等级道路承担的交通任务有所差异，但若功能分工过于固定，次级路网便难以在主干通道受阻时发挥补偿作用。支路不足、断头路较多以及城乡或跨区域路网衔接不畅，都会削弱应急分流能力。原稿据此强调，应同时检查快速通行网络与基层微循环之间的联系，使城市内部、城乡接合和区域干线能够在扰动下相互支撑，而非分别规划、独立运行。

3.3 设施建设与生态条件衔接不足

仅以工程通行为导向的道路布局，可能忽视沿线排水、生态连通和灾害暴露条件。硬质化断面、封闭式设施和生态空间割裂，会影响路网与周边环境之间的适配关系。在强降雨或地质灾害情景中，这些问题可能增加道路受损及恢复的难度。空间韧性规划因而需要将设施选线、防护措施与生态条件共同考虑，减少工程建设和风险防控之间的脱节。

3.4 部门协同不足与动态调整滞后

道路风险识别和应急处置涉及交通、公安、应急管理、自然资源及气象等多个部门。若基础数据分散、

职责接口不清晰，风险研判和行动部署就难以衔接。另一方面，长期固定的静态规划也不易回应风险条件的变化。原稿将治理协同与动态监测纳入韧性分析，强调在设施建设之外建立信息共享、预警和反馈调整机制。

4 结构功能治理三维分析框架

4.1 复杂适应系统视角

道路网络由设施、出行者、管理机构和配套服务等不同主体共同构成，各主体之间的联系会随交通需求和外部条件变化。复杂适应系统理论关注这种非线性互动，以及系统自组织、适应和演化的过程。原稿以此作为理解路网韧性的理论基础，将物理网络的变化与运行主体的响应联系起来[4-5]。

据此，可从三个方面分析路网韧性。结构层面关注拓扑联系、通道冗余和关键节点稳定，为抵御外部冲击提供空间基础；功能层面关注车流转移和道路用途调整，体现运行过程的适应能力；治理层面关注风险识别、指挥决策和协同执行，为前两者提供持续管理条件。三者相互影响，共同决定道路系统在扰动前后的表现。

4.2 三类维度的协同关系

图 1 保留原稿提出的结构、功能和治理三维框架。结构设计通过布局优化与节点强化提高物理网络的稳定性；功能组织通过调控规则和用途切换维持必要服务；治理安排通过跨部门合作和全周期管理推动方案实施。该框架将道路空间、交通运行和制度协调放在同一分析体系中，用于检查规划措施是否相互支持。

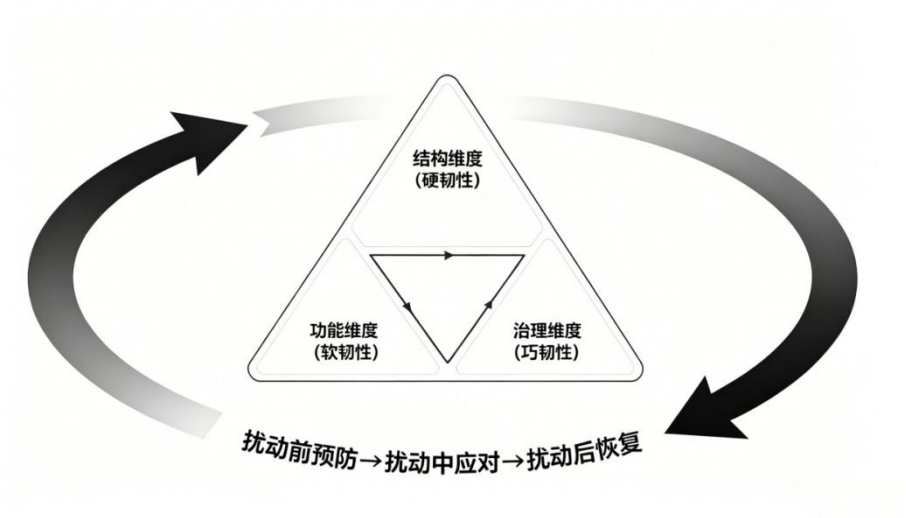


图 1 原稿所示路网空间韧性三维框架

三类维度贯穿风险预防、扰动应对与恢复调整各阶段。结构改造需要与实际运行规则衔接，功能转换需要具备可执行的协同程序，而治理决策也需要以设施状态和交通信息为依据。通过这一联系，可避免规划仅停留在单项工程或孤立的管理措施上。

5 韧性规划的实施方法

5.1 冗余通道与模块化空间组织

首先，在区域、城际及城市尺度安排相互补充的通道体系，使主要运输走廊、分担通道和应急备用路线形成联系。日常运行依靠骨干网络组织交通，在高峰或突发事件中则通过其他通道分流。原稿建议使用复杂网络分析中的连通性和冗余指标识别薄弱环节，并结合新增联络线或道路改造补充替代路径[6]。

其次，将路网组织为具有一定独立运行能力的空间模块，在保持必要对外联系的同时，降低单个局部故障向全网扩散的可能[7]。模块之间保留可调度的连接通道，以支持受扰后的车流转接。在城市片区层面，可结合生活圈与街区单元完善微循环网络，使局部出行不完全依赖跨区域主干道路。模块化的重点是平衡内部服务能力、外部联系和风险传播控制。

再次，对桥梁、隧道、互通立交和枢纽连接点等关键设施开展针对性强化。措施包括根据风险条件完善防护设计，为抢修、物资周转和临时集散预留空间，

并结合可修复构件与监测终端改善维护条件。关键节点的规划不应只关注结构本身，还需考虑受损后能否进入现场、组织抢修并维持周边基本通行。

5.2 动态运行调控与功能切换

在运行调控方面，利用交通监测和车路协同信息分析突发事件下的流量变化，形成绕行及分流方案[8]。区域信号控制根据车流分布调整配时，以缓解局部瓶颈并支持应急疏散[9]。规划阶段则应同步考虑感知设备位置、安装空间与数据接口，使后续动态调控具备必要的设施条件。

在空间利用方面，考虑道路在不同情景下切换功能的可能[10]。通过断面组织和附属设施的模块化设计，使部分道路空间兼顾日常交通与应急任务。例如，公交廊道可在规定条件下承担救援通行，滨河慢行空间的设计则需兼顾日常使用和疏散避险要求。具体切换方式应与设施条件及管理规则相匹配。

供需协调同样是运行韧性的一部分。错峰引导、弹性工作安排和公交调度可用于分散集中出行压力；道路通行权限、开放范围和组织模式，则根据预警等级及事件影响进行分级调整。两类措施相互配合，使交通供给能够随需求和风险条件变化，减少仅依赖扩大设施容量的局限。

5.3 协同管理与全周期反馈

跨部门管理需要统一基础数据和协作流程。原稿建议汇集道路空间、灾害隐患、运行监测及设施属性等信息，为交通、应急、公安、气象和自然资源部门提供共同依据。在规划论证阶段，结合极端天气、地质灾害及重大事故等情景开展压力分析，检查关键联系、应急通道和恢复安排，尽早识别方案中的系统性薄弱环节。

片区层面则通过街巷和支路建设改善微循环，并明确基层日常管护与突发事件响应的联系。社区参与、设施巡查和自救互救安排，有助于及时发现局部问题并支持应急行动。原稿将这一尺度的治理作为全域路网管理的补充，强调局部连通与基层组织能力共同作用。

规划还需要形成持续反馈机制。借助数字孪生等技术表达设施状态、交通运行与风险信息，可为定期评估和方案修订提供依据。将监测、评价、纠错与调整连接起来，有助于识别新出现的薄弱节点，安排项目建设时序并修订管控策略。其目标是让规划随实际条件更新，而不是在实施后长期保持不变。

6 总结与后续研究方向

原稿以复杂适应系统为基础，将路网空间韧性归纳为结构、功能和治理三个相互联系的方面，并据此讨论通道冗余、模块化布局、运行调控及协同管理等方法。这一框架强调日常效率与风险应对共同进入规划过程。后续研究可进一步结合不同地区的风险特征开展指标量化和方案比较，检验各项措施的实际适用条件。本测试稿仅对原有论述进行重组，不新增案例、实测数据或政策依据，也不作为独立研究成果发表。

参考文献

[1]黄建中,胡刚钰,石佳宁,等.城市交通系统的韧性研究:概念、特征与议题[J].城市规划,2025,49(2):119-130.

[2]嵇涛,姚炎宏,黄鲜,等.城市交通韧性研究进展及未来发展趋势[J].地理科学进展,2023,42(5):1012-1024.

[3]刘洁,张丽佳,石振武,等.交通运输系统韧性研究综述[J].科技和产业,2020,20(2):47-52.

[4]王益翀,鲍懿喜.基于复杂适应系统的城市交通管理平台交互设计研究[J].设计,2026,39(7):128-132.

[5]仇保兴.基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J].城市发展研究,2018,25(10):1-3.

[6]马书红,武亚俊,陈西芳.城市群多模式交通网络结构韧性分析——以关中平原城市群为例[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(7):1228-1235.

[7]彭翀,陈思宇,王宝强.中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例[J].经济地理,2019,39(8):68-76.

[8]李萌,丁川,李昀轩.道路交通系统韧性提升技术展望[J].前瞻科技,2023,2(3):34-44.

[9]王淑良,陈辰,张建华,等.基于复杂网络的关联公共交通系统韧性分析[J].复杂系统与复杂性科学,2022,19(4):47-54.

[10]马壮林,程会媛,邵逸恒,等.大客流干扰下多层公交-地铁网络的韧性评估[J].中国公路学报,2024,37(6):267-278.