



# 城市生命线系统应急能力：一个基于韧性理论的分析框架

■ 黄永 余廉

**摘要：**城市生命线系统是维系城市正常运转、统筹城市发展和安全的关键基础设施，但在日益频发的城市突发事件应对中面临越来越多的挑战。现有研究主要关注城市生命线系统自身安全及其维护城市日常功能方面的内容，对于其在城市公共管理中的应急功能和能力的研究不足。本文基于韧性城市理论视角，从城市生命线系统设施本身属性出发，梳理了城市生命线系统的“线网”空间特征及其承担的城市发展和安全功能，提出了城市生命线系统应急能力框架，并进而细分为五个具体评价维度。结合实践观察与文献研究对城市生命线系统应急能力的现状进行分析，有针对性地提出城市生命线系统应急能力优化对策，以期为城市基础设施安全保障和城市韧性的提升提供参考。

**关键词：**城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

**【中图分类号】**X9 doi:10.3969/j.issn.1674-7178.2023.05.012



开放科学(资源服务)标识码(OSID)

2022年4月26日，习近平总书记在中央财经委员会第十一次会议上指出：“基础设施是经济社会发展的重要支撑，要统筹发展和安全，优化基础设施布局、结构、功能和发展模式，构建现代化基础设施体系”。会议强调要加强水利设施、内河航道、油气管网、分布式智能电网、城市综合交通网等网络型基础设施，强化面向防洪排涝、污水治理等城市公共安全需求的防灾减灾基础设施建设和公共卫生应急基础设施建设，“加强国家安全基础设施建设，加快提升应对极端情况的能力”<sup>[1]</sup>。这为当前和今后我国传统和新型基础设施建

**【基金项目】**国家社科基金重点项目“加强国家城市地下空间应急管理体系和能力建设研究”(22AZD086)成果。



## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

设提供了根本指导，同时也间接反映出我国基础设施存在较大的改善空间，离“统筹发展和安全”还有一定的差距。在各类基础设施中，有一类最为关键，它们通常都是维持城市正常运转和公众日常生活必不可少的系统工程，事关“城市生命”，因此被形象地称为城市生命线系统。按照其承担的主要功能，可划分为：公路、铁路、航道等交通运输系统；广播设施、网络设施和邮政线路及设施等传播和通信系统；电力、煤气、天然气、供热设施等动力能源系统；生活用水的供应、污水处理、雨水排放、洪水管理等给排水系统；还包括生活供应系统和灾害、医疗等应急保障系统。这些设施均与城市生产生活密切相关，是城市居民日常生活、生产过程中的基本要素和重要安全保障，具有庞大而复杂的系统结构，在城市功能体系中十分重要。然而，由于中国仅用几十年时间走完了西方几百年的城市化历程，在快速发展中也存在各类安全隐患，城市生命线系统问题尤其显著，统筹其发展和安全迫在眉睫。

### 一、问题的提出

随着城市规模的逐步扩大，城市承载和流通的资源量也越来越多，巨大需求促进了城市生命线系统的快速发展，与此同时，逐步完善的立体交通网络等城市生命线系统也加速了城市面积扩张和人口积聚。大中城市尤其是“北上广深”等超大、特大城市日益成为复杂巨系统，带来的是对城市生命线系统的深度依赖，使得城市生命线系统的安全不仅关系到系统本身的稳定运营，更直接影响城市系统的公共安全。并且，由于水、电等资源和设施对于城市防灾减灾救灾的重要作用，使得城市生命线系统亦关系到整个城市的应急能力。例如，在河南郑州“7·20”特大暴雨灾害中，地下排水管网爆裂、电力中断和通信瘫痪等使城市救灾工作陷入极大困境，城市生命线系统面对自然灾害或其他突发事件冲击时存在较大的脆弱性并由此影响其在城市突发事件应对中的应急能力<sup>[2]</sup>。因此，提高城市生命线系统的应急能力对于整个城市有效预防和抵御自然灾害、事故灾难等各类突发事件具有积极作用，能够更好地维护社会、经济的安全和稳定。

学术界对城市生命线系统安全管理进行了多学科、多层次的探索，取得了较多的研究成果，但也存在一些不足。从研究维度看，主要聚焦于城市生命线系统自身安全，以及围绕安全保障而展开的城市生命线系统的监测、预警、防灾减灾等相关研究。童林旭<sup>[3]</sup>较早从防灾减灾的角度对城市生命线安全展开研究，主要是基于对日本阪神地震的总结和反思，侧重经验借鉴。李若飞<sup>[4]</sup>从“维系和保障城市经济和社会功能”的角度定义和分析城市生命线系统，认为城市生命线系统随着不同时代经济社会对于基础设施的依赖侧重点不同而具有不同的内涵和外延，主要从灾害损失来评估城市生命线系统的脆弱性。王灵志等人<sup>[5]</sup>以武汉高温天气为例，提出了城市生命线系统如何提高气候适应性的策略。陈潭等人<sup>[6]</sup>则进一步从城市生命线系统的脆弱性、复杂性、公共性等社会属性的相对关系论述，从运营人工智能、物联网、大数据等技术角度提出了城市生命线系统的实践路径，主要



是从安全角度强化城市生命线系统的管理。付明等人<sup>[7]</sup>基于我国城市生命线工程运行监测实践的现状,从提高工程运行安全水平的角度提出了由五个子体系构成的监测标准体系,服务于预警管理;陈醉等人<sup>[8]</sup>侧重从城市生命线复杂风险预测预警智能化的进程中研究大数据的应用意义及优化对策。从研究视角看,赵景伟<sup>[9]</sup>从线性空间视角对城市生命线的开发利用进行了研究,主要是侧重从地下空间开发利用来分析城市生命线,对城市地下生命线的选线、防灾和设计施工要求进行了初步阐述。李舒等人<sup>[10]</sup>则从城市公共安全的研究视角提出城市生命线系统应该采用新技术加强监测预警和精细管理。

综上,已有文献的研究对象主要是城市生命线系统自身安全,主要侧重城市生命线系统的管理手段、管理模式、管理技术、管理标准、管理机制等方面,本质上还是围绕城市生命线系统的“发展”功能,较少关注城市生命线系统在城市防灾减灾救灾体系中的关键作用等维度。尽管也有学者以“健康码”为例说明了大数据在城市公共卫生应急管理中的工具性,以及技术嵌入对于应急管理政策创新的影响,实际上从一个侧面阐释了应急管理中的信息传输与使用<sup>[11]</sup>,涉及城市生命线系统在应急管理中的作用,但总体上看,从城市公共安全的角度审视城市生命线系统的相关文献发现,现有研究维度和理论视角还存在一些不足,譬如从总体服务城市应急管理、提升城市公共安全水平的视角来优化生命线系统设施的方向视角有待拓展。

## 二、理论基础与分析框架

著名的城市问题学者雅各布斯曾经提出:“哪一种思维方式会有用,或者会有助于产生正确答案,这不取决于我们如何考虑这个问题,而取决于这个问题的固有本质。”<sup>[12]</sup>科学认知城市生命线系统等城市基础设施的运营和管理,需要一种与城市生命线系统本身属性契合的研究框架。

### (一) 韧性城市:城市生命线系统应急能力研究的科学视角

城市生命线系统是一个复杂而有序的有机体,需要系统地看待其设施与城市社会的互动,尤其是其设施的物理属性与其承担的城市安全应急功能之间的关系<sup>[13]</sup>。城市韧性理论以其城市公共安全和可持续发展的宏观视野而与城市生命线系统问题研究具有较高的契合度,基础设施韧性研究更成为城市韧性研究的热点主题。

“韧性”概念最初由加拿大学者霍林<sup>[14]</sup>引入生态学领域,对生态系统研究产生了持续的影响。随后,这一概念被应用到生态学、社会学、心理学、管理学等学科,并在适应各学科的发展过程中得到不同维度的拓展。进入21世纪后,韧性理论被广泛运用于城市研究和实践,Godschalk<sup>[15]</sup>较早将韧性城市的概念与城市灾害管理相结合,并对传统防灾减灾手段与韧性城市理念下的减灾手段进行了比较。国内外不少学者陆续从不同场景、不同维度对韧性城市展开研究,初步形成了广泛认可的、比较完整的概念体系,比较有代表性的如:“抵御、吸收和恢复”是韧性的三个主要特征<sup>[16]</sup>,这也是韧性能力的三个核心要素。



## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

城市生命线系统是最重要的城市基础设施，既是事关民生的发展工程，又是防范化解城市风险的安全工程，对城市公共安全具有关键性、全局性影响，而城市生命线系统的规划、设计、建设成本高，后期运营及维护成本也较高，如在前期未能合理地针对城市需求进行规划，会导致一连串的资源浪费并降低运行效率，甚至形成严重的安全隐患。因此，从韧性城市视角开展对城市生命线应急能力的研究具有坚实的理论依据和重要的实践价值。

维护城市公共安全，要着力提高城市生命线系统设施的韧性，城市生命线系统的建设、运营和管理理念更要实现从“灾后处理”向“灾前预备”转变，聚焦应急能力的构建。实际上，国家政策层面已经对公共基础设施的应急能力提出了明确的要求。2023年4月召开的中共中央政治局会议中提出，要在超大特大城市积极稳步推进城中村改造和“平急两用”公共基础设施建设；2023年7月召开的国务院常务会议则进一步审议通过了《关于积极稳步推进超大特大城市“平急两用”公共基础设施建设的指导意见》，为在“北上广深”等一线城市探索推进“平急两用”公共基础设施建设提供了行动指南，是“统筹发展和安全、推动城市高质量发展的重要举措”<sup>[17]</sup>。然而，哪些公共基础设施应该纳入“平急两用”，如何实现“平急两用”，仍处于探索阶段。城市生命线系统作为关键的公共基础设施，具备“平急两用”的天然基础和必然需求。

国家提出“平急两用”公共基础设施建设既有经济发展的意图，也有公共安全的考量。首先是发展意图，从“平急两用”公共基础设施的实现路径来看，主要包括两种模式，一种是新建“平急两用”公共基础设施，一种是对现有的城市基础设施进行“平急两用”化改造，这两种方式都能够有效地带动投资，促进经济的发展。其次是安全考量，“平急两用”公共基础设施强调“急时”状态下的应急功能，发挥其在自然灾害、安全生产事故、突发公共卫生事件等突发事件中的避难、隔离等功能。本文认为，“平急两用”公共基础设施理念是新时期对“平战结合”理念的继承和发展，韧性城市理论则为“平急两用”公共基础设施的实践提供理论支撑。具体到城市生命线系统，除了维系城市居民日常的生活生产，它既满足城市“平时”的“发展”需要，同时也是城市抵御灾害和应对突发事件的能力保障，满足城市“急时”的“安全”需求，是保障城市正常运转和居民生命财产安全的关键基础设施。一旦城市生命线系统遭受破坏，城市就会陷入局部甚至整体瘫痪。因此，城市生命线应急能力的构建至关重要。

在韧性城市理论视角下，城市生命线系统的应急能力是指城市生命线系统应对、吸收、适应外部冲击并恢复自身功能的能力，在外延上至少有两层范围：当城市遭受外部冲击，处于安全威胁等突发状态时，城市生命线系统能够提供有效支撑，实现城市应急管理的功能；当城市生命线系统的某一个或多个子系统遭到外部冲击时，其他子系统能够提供有效应急响应和救援，并尽快恢复受冲击子系统功能的运行。

### （二）线网特征与韧性需求：分析框架的提出

城市生命线系统在外部形态上常呈现“线网”特征，在内在功能上是支撑城市发展与维护城市公共安全的关键基础设施，其外部形态和内在功能共同决定了城市生命线系统



的应急能力要素。

线网是城市生命线系统固有的城市空间形态。从城市生命线系统的具体空间形式来看,它们大多是以“管、线、带”的外在物理形式存在,在城市整体基础设施的复杂系统中对其观察,其物理形式可以总结或抽象为“线网”空间特征。首先,城市生命线系统如铁路线、航线、公路线、输变电线、供水排水管线和通信线路,它们以各种“管、线、带”的形态出现,在城市基础设施布局中以抽象的“线网”空间组成复杂的城市生命线系统网络。其次,城市生命线系统的功能是传输城市各类物质、能量和信息等内容<sup>[18]</sup>,因此,不论其传输内容和传输方式,实现物质、能量和信息从起点到终点的“线”状连续传输是对城市生命线系统的基本要求,进而实现对城市区域点、线、面的全覆盖。因此,“线网”空间特征是城市生命线系统最重要的特征,有助于理解其作为应急管理基础设施在维护城市公共安全中的作用和规律。

城市生命线系统的“线网”空间特征决定其安全韧性需求。城市生命线系统的“线网”结构极大地提高了城市应对外部冲击和扰动时的防灾减灾和救灾能力,但另一方面,城市生命线系统之间的高度关联性也强化了其自身的脆弱性,容易引起多个系统的灾害级连锁反应,即城市生命线系统的各子系统之间具有的较强关联性使得其某一子系统受损的时候会连带影响到其他子系统,甚至导致其他系统罢工,以致出现“以点带面”的辐射状损毁<sup>[19]</sup>。例如,发生地震时,燃气管道、供水管道、供电线路也都会遭到破坏,燃气泄漏容易引发火灾,但是灭火所需的水源由于供水管道的损坏而得不到供应,而供水系统的应急可靠性则不仅依赖自身系统的恢复,也很大程度取决于电力的可靠程度<sup>[20]</sup>。这样的灾害链式影响往往使得城市生命线系统受灾后果极有可能进一步扩大。因此,城市生命线系统设施的应急能力与城市安全密切相关,可以据此衡量城市生命线系统在受到灾害和突发事件影响时抵抗损害的能力,进而折射出城市在发展过程中抵御内外部因素干扰和破坏的能力<sup>[21-22]</sup>。

在韧性城市理论视角下,提高城市生命线系统应急能力要优化行政管理体制,加强城市生命线系统不同管理单位和使用单位的综合协调,避免由于“条块分割”造成的系统内各子系统之间的冲突和相互干扰。提高城市生命线系统应急能力要强化风险管理,在平时加强对设施布局交叉、管线老化、超负荷运行、设施各类信息登记缺失等安全隐患进行排查<sup>[23]</sup>,建立城市总体的风险地图,有针对性地优化城市生命线系统的布局,确保城市在进入应急阶段时各生命线系统设施处于良好状态。提高城市生命线系统应急能力要强化应急演练,通过情景构建和模拟的方式检验城市生命线系统设施的可靠性,并通过演练情况总结对相关设施的韧性能做出评估,及时发现不足并补齐短板。总体上看,城市生命线系统的应急能力一方面取决于设施本身的物理属性,另一方面则与其管理系统相关。

基于对城市生命线系统工程的线网特征与韧性需求分析,本文尝试提出我国城市生命线系统在发挥突发事件应对功能时关键取决于其线网抗击力、传输量、传输率、覆盖率和连续性这五个维度的应急能力,针对各个维度将从基础设施本身的“线网”物理属性和



## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

“安全”管理功能两个方面展开分析。

### (三)城市生命线系统应急能力要素：分析框架的内容

#### 1. 维度一：线网抗击力

城市生命线的抗冲击力维度刻画主要是城市生命线系统抵御外部冲击和扰动的能力。从“线网”的物理形态看，城市生命线系统传输的是物质、能量或信息，容易因为过载而导致管线本体受损，或是受到外界的冲击和扰动而直接造成设施的损毁，或是由于外界的致灾因子诱发城市生命线系统设施内传输物质或能量的释放。从“安全”的城市功能看，城市生命线的强度表现为管理和运营者感知、理解和应对风险的能力，包括面临中低风险的临危不乱和应对中高风险的科学高效，以维持城市生命线功能的灾时连续性。

#### 2. 维度二：线网传输量

城市生命线的线网传输量维度刻画主要是城市生命线系统在每一个时间节点传输内容的绝对数量。从“线网”的物理形态看，造成这一问题的主要原因是政府公共支出预算等管理原因或设计规格等技术原因导致的城市生命线系统管线设施过细，仅能满足当前城市日常运营所需的容量，却不能满足城市应急状态下对于物资供应、防洪排水、能源供给、应急通信和医疗救助等的峰值需求。从“安全”的城市功能看，当前我国城市生命线系统工程大多建设于20世纪末期，甚至部分可以追溯至中华人民共和国成立后和改革开放前，当时的公共管理对市政管线等城市生命线系统设施赋予的功能主要是满足日常生活的基本需求，较少考虑“安全”功能所需的冗余容量。

#### 3. 维度三：线网传输率

城市生命线的传输率维度刻画主要是城市生命线系统在单位时间内传输各类物质、能量和信息数量的相对效率，与其顺畅程度有关。血栓堵塞人体血管，导致血液流动不畅进而危及人体健康，城市生命线系统在使用过程中也常发生堵塞，造成物质、能量和信息传输的阻滞，进而影响城市应急响应与救援，危及城市公共安全。从线网的物理形态看，一方面可能存在设计能力低于城市发展速度，缺少对城市发展所需城市生命线系统承载能力的预判；另一方面，城市生命线系统设施在使用过程中可能发生性能劣化，造成传输能力的下降。从“安全”的城市功能看，主要是衡量公共服务的质量，尤其是部门条块分割所造成的掣肘程度。

#### 4. 维度四：线网覆盖率

城市生命线的线网覆盖率维度刻画主要是城市生命线系统在城市空间区域布局的覆盖程度，一般表现为长度。从线网的物理形态看，典型表现为城市轨道交通、排水管线、供暖系统的长度伸展等未能匹配城市和经济社会的发展。从“安全”的城市功能看，线网覆盖率实际上是城市基本公共服务供给仍未实现均等化的表现，并且在城市的不同区域，城市生命线系统设施的布局和效率也存在差异。

#### 5. 维度五：线网连续性

城市生命线的连续性维度刻画主要是城市生命线系统功能和业务是否可以不因外



界的冲击而失去连续性。从线网的物理形态看,正是由于城市生命线系统以“线”的形式存在,意味着“线”的全程连贯性是其发挥功能的前提,一旦某个点断开,物质、能量和信息的传输将中止,在应急救援和处置过程中,将导致急需的应急物资不能及时到位。从“安全”的城市功能看,现代城市日益成为一个复杂的巨系统,所依靠的不仅包括市政管线在内的基础设施网络,更多的是城市功能体系的复杂网络,城市生命线系统中各子系统的业务衔接与连贯是其“安全”功能得以发挥的重要衡量维度。

### 三、城市生命线系统应急能力现状与优化策略

#### (一) 城市生命线系统应急能力现状分析

在一些经济社会发展水平相对落后、城市功能不够完善的城市中,生命线系统的规划建设进度和水平未能与城市的快速发展有效匹配,或实际建设规格质量未达设计标准,导致诸如路网构建不合理、分布不均匀和可达性不足的状况,由此产生停水停电频繁、交通线路堵塞甚至安全事故频发等问题,对城市居民生活和安全保障产生不利影响。通过对城市生命线系统在发挥城市应急管理功能过程中暴露出的各类问题进行梳理,依据城市生命线系统“线网”空间的五个维度,笔者发现城市生命线系统普遍存在抗冲击力、冗余度、传输效率、覆盖率和连续性不足等问题,这些问题不但反映出城市生命线系统在城市发展情境下的适应性不足,更反映出灾时应急能力不足,暴露出城市生命线系统的韧性不足。

##### 1. 抗冲击力不足

输水管线爆裂是典型的城市生命线系统过载而产生的强度问题,通常是由于供水输水管线水压过高造成的。一些城市的输水管线使用年限较为久远,材料质量发生了劣化,在缺少维护的情况下容易爆裂,造成城市供水中断。此外,暴风或冰雪灾害中的输电线断裂问题也比较常见。一方面是各种原因导致的电缆直接断裂,另外一种情形是由于架空电缆的电缆塔或电线杆被风暴席卷倒塌间接引起线路扯断。两种情形都是因为输电线路或其配套辅助设施的强度不足以抵御自然灾害的冲击。许多城市电网设施老旧、布局杂乱,安全隐患突出,在遭遇风暴雨雪等极端自然灾害时极为脆弱,容易损毁。

此外,需要特别注意的是地震等急性冲击或地层运动等慢性地质灾害和压力这些外部因素对城市生命线系统设施各类管线造成的撕扯、扭断等,可能造成整个城市生命线系统的瘫痪,从而导致城市应急响应、应急救援等功能无法运转,造成严重的城市危机。

##### 2. 冗余度不足

城市生命线系统的粗度对城市应急能力的影响在城市供水排水系统表现较为明显。以应急排水问题为例,通过海绵城市、流域治理等,许多城市在雨洪内涝管理方面取得了一定进展,但对于排水管廊的研究和建设仍亟待完善。我国城市的排水系统目前普遍是依赖铺设地下管网的模式,排水管多为在近地表位置埋藏管径1~3米的主管道和0.1~1米



## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

的支管道。此类排水管瞬时承载能力有限，在发生特大暴雨或洪水时便捉襟见肘，导致城市发生内涝，对特大降水量乃至洪水等情况的应对能力不足。一些城市的排水系统依然采用雨污合流的方式，但其设计排水能力往往仅考虑所在城市区域的日常生活污水的排放，一旦发生较大降雨，这些排水管线就不能满足瞬时排洪需求，甚至造成地下污水返流至地面，造成城市环境的严重污染。郑州“7·20”特大暴雨灾害集中体现了城市生命线系统的防洪排水问题。

### 3. 传输效率不足

城市生命线系统的传输效率不但与容量直接相关，也受管线传输顺畅程度影响。供水排水等城市输水管线、城市供暖管道长时间使用后可能由于水质的原因而缓慢结垢或管道内外壁被腐蚀，影响通畅程度。此外，部分桥梁经过长时间服役后强度降低，通行桥梁的运输工具不得不降低载重，从而降低了单位时间内的运载和传输能力。部分航道由于上游水土流失或两岸泥石流等因素造成河道淤塞，长年未得到清理疏浚，导致水道变浅，影响大型船舶通行和航道安全，或尽管能通行，但是需要减速慢行小心避让可能存在障碍物，极大影响了传输效率。

### 4. 覆盖率不足

从城市总体应急能力的角度来看，城市生命线系统在城市区域的布局不完备、不均等将系统地降低城市韧性。污水排水管线是城市的“里子”，但是部分城市更注重面子，将排污管线出口架设到附近偏僻低洼区域或明渠河道，而未延伸至城市郊外指定排污区域或城市污水处理厂，相当于没有将城市污水这种物质内容传输到位，将问题从城市内部一个区域转移到另外一个区域，造成二次污染，未能完成城市生命线系统本应完成的污水处置功能，造成环境安全和公共卫生隐患。此外，特大城市通常在郊区建设了大量卫星城，由于房价较低等各种因素吸引了大批年轻人入住，但是城市的轨道交通等基础设施未能配套延伸至这些区域，从而导致地面公路交通过载，尤其是在早晚高峰期交通堵塞严重，给市民生活带来极大不便，同时也加重了空气污染和安全隐患。

### 5. 连续性不足

应急物流系统的连贯性问题在新冠疫情期间表现得较为明显，关系到一座城市应对突发公共卫生事件的能力，影响救援速度甚至会给社会稳定带来风险。应急物资调配和运送的物流系统由于部分枢纽城市的隔离政策造成中断，主要是交通枢纽无法发挥交通线的中转节点作用，突发的疫情则可能导致车辆和人员被就地隔离，多种因素导致交通无法完全畅通，人民群众的生活物资的调度受到一定影响，这也体现了城市生命线系统之间复杂的关联性。

洪水、地震、台风等极端自然灾害或其他巨灾情况下，由于高压电缆、信号塔等供电及通信设施通常都暴露在露天无保护的环境下，因此地表城市供电及通信系统往往首先受损。灾害发生时，稳定的通信是调动物资和紧急救援人员的有效保障，而电力供应则是维修、救援、疏通等工作中设备机器运转的基础。我国供电及通信线网在许多不发达地区或



线路末端缺乏保护措施,在发生灾害时往往不能有效运转,需要紧急维修和重建,极大影响应急响应和救援效率,危及人民群众的生命财产安全。

## (二)城市生命线系统应急能力优化策略

### 1. 缓冲耐灾:化解冲击和扰动

城市生命线系统提升“线”的强度,建立具备抵御外部冲击和扰动的耐灾缓冲能力,一方面要加强采用新材料、新工艺和新设计,提高城市生命线系统的工程设施本身的强度;另一方面更要着力加强城市生命线系统设施的防灾保护措施,阻隔、缓冲外部冲击对城市生命线系统的直接冲击力度和影响,主要策略有通过设施地下化来减少城市生命线系统设施在灾害中的暴露程度,从而降低其脆弱性。

城市生命线系统设施由于其线、网状特征,单位占地面积小,但是纵横交错,对地面建筑布局、城市安全和市容有较大影响,天然具备地下化优势<sup>[24]</sup>。电缆、燃气管道等设施地下化可以避免地面暴雨风雪或人为破坏等冲击带来的安全隐患。但由于地下工程的不可逆性,传统的直埋方式存在地下线路出现老化、故障等问题后维护难度较大的弊端,而综合管廊有利于克服这种弊端,是城市生命线系统适应现代城市安全需要及地下集约化发展趋势下的产物。在大城市新区先行试点基础上,还需要结合全国各地实际,在城市建成区更大范围推行综合管廊建设。对于油、电、气、水的管网管廊设计,需要根据当地的气候、水文、地质等信息有针对性和预防性地进行规划和设计,综合分析管网铺设的安全性和灾害发生后损毁预评估,为灾害和突发事件预留弹性空间<sup>[25]</sup>。

### 2. 适度冗余:平衡常态与应急

城市生命线系统不论传输的内容是物质、能力或信息,其负荷和传输能力与设施本身容量密切相关,而容量通常又由“线”的粗细直接决定,尤其是在突发事件应对或危机处置中,峰值能力取决于“线”的粗壮程度。如排水泄洪管道的粗细直接影响单位时间内的最大排水量;在抢险救灾中的应急通信设施较为紧缺,在通信网络带宽有限的情况下,现场众多的通信设备挤占有限的带宽资源将导致通信质量下降,影响影像图片等资料的传输。

城市生命线系统设施除了要满足日常城市运营所需的物质、能量和信息的传输,还要适度预留城市生命线系统负荷能力的冗余度,充分考虑所在城市的各类极端自然灾害和突发事件中的应急管理需要,合理设置城市生命线系统工程的规格。容量冗余既可以通過增加单线的规格实现,也可以针对特定关键设施设置复线。

### 3. 顺畅高效:提升传输效率

城市生命线系统提升应急能力需要梳理和维护其传输物质、能量和信息时的顺畅程度,常用的措施有:基础环境稳定、材料更新、内部疏浚、裁弯取直。

对于城市轨道交通而言,钢轨的平顺程度对于列车运行速度、稳定性和安全性有关键性影响,因此需要致力于提升城市轨道交通的基础稳定性、轨面平滑性和材料结构性,严格控制“投影变形”;对于输变电线路等,需要更新现有老旧设施,采用更加高效的新型输



## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

变电材料和技术；对于公路桥梁航道，需要清理道路内各种堵塞物，对于暖气管道、供水排水管道要及时清理水垢等日积月累可能形成的堵塞物，提高既有设施的内在通行量；对于有些可以更改布局的城市生命线系统设施，如交通流量较大的城市主干道、泄洪排涝的干渠，要适当裁弯取直，尽量把曲线变成直线，提高既有线路的点到点的通行速度，降低传输时间，提升传输效率。

### 4. 有效连接：覆盖城市全域

由于当代城市圈状辐射式和地上地下立体式的多形态发展，城市生命线系统需要同步更新和扩展，并要求各类城市生命线系统设施在城市各个区域都全面覆盖，形成合理布局。具体而言，城市生命线系统的建设、完善和更新需要与城市发展阶段、规模和现代化程度相匹配，当城市工业生产、商业贸易等各类经济社会活动扩展了城市边界时，城市公路或轨道交通、通信、垃圾清运和水电暖气等基础设施应提前布局，同步发挥城市功能。从实践层面看，主要需要强化道路网络、电力传输线路、供水管网和通信基础设施等相关城市生命线系统的规划、设计、投资和建设相关单位之间的良好协作，确保城市生命线系统的合理布局和分布。而对于城市老城区，城市生命线系统应该成为城市更新工程体系中的重中之重。

### 5. 多路并联：契合城市网络

借鉴物理学里电路串联和并联的特征和不同作用，在城市生命线系统的网络布局方面，在投资预算和技术可行的情况下要合理采用并联结构，以防城市生命线系统某个节点发生断点情况时，备用路径能保障物质、能量和信息传输的连续性。

首先，合理设置单一系统的内部网络结构，针对不同功能的城市生命线系统设施，适应其功能特点、防灾脆弱性和救灾关键性等的程度而采用串联或并联布置，增强城市生命线系统应对灾害、事故等突发事件的防灾韧性，在传输能力不足时优先保障重点用户的资源，确保在灾害发生时能够维持城市最低限度的基础功能运行。如区分关键基础生产区和商业办公区用水用电需求、区分消防用水管线和居民用水管线的布置。其次，要弥补单一系统不足，综合考虑各类基础设施之间的联系和转化能力，以便在城市生命线系统某些子系统遭受到破坏的时候，能够实现不同系统功能的快速转换，增强城市生命线系统整体稳定性、安全性尤其是业务连续性，从城市总体安全层面不断强化城市生命线系统韧性。

### 参考文献：

- [1]《全面加强基础设施建设构建现代化基础设施体系 为全面建设社会主义现代化国家打下坚实基础》[N],《人民日报》2022年4月27日第1版。
- [2]黄永、余廉、赖文波:《城市地下空间洪涝水灾应急响应:问题、成因与对策——基于郑州“7·20”特大暴雨国务院灾害调查报告的启示》[J],《中国应急救援》2022年第5期。
- [3]童林旭:《城市生命线系统的防灾减灾问题——日本阪神大地震生命线震害的启示》[J],《城市发展研



究》2000年第3期,第8—12、78页。

[4] 李若飞:《灾害损失视角下城市生命线系统脆弱性评估研究》[D],博士学位论文,大连理工大学管理科学与工程专业,2017年。

[5] 王灵志、吴培肇、李薇:《极端高温天气下城市生命线系统适应性研究——以武汉市为例》[J],《科技通报》2018年第3期,第228—233页。

[6] 陈潭、严艳:《城市生命线管理的理论命题与实践范式》[J],《浙江学刊》2020年第2期,第88—96页。

[7] 付明、谭琼、袁宏永、梁光华、陈涛、凌俊杰:《城市生命线工程运行监测标准体系构建》[J],《中国安全科学学报》2021年第1期,第153—158页。

[8] 陈醉、原珂:《基于大数据应用的城市生命线复杂风险智能预测预警》[J],《社会主义研究》2020年第3期,第93—100页。

[9] 赵景伟:《城市生命线——城市线性地下空间的开发与利用》[J],《四川建筑科学研究》2011年第4期,第249—252页。

[10] 李舒、付明:《城市生命线安全防范新思路和新技术》[J],《现代职业安全》2020年第2期,第30—31页。

[11] 邹伟、李婷:《技术嵌入与危机学习:大数据技术如何推进城市应急管理创新?——基于健康码扩散的实证分析》[J],《城市发展研究》2021年第2期,第90—96页。

[12] 雅各布斯:《美国大城市的死与生》[M],金衡山译,译林出版社,2006年。

[13] 陈忠:《城市社会的生命自觉与风险治理——一种城市哲学与文明批评史的视角》[J],《武汉大学学报(哲学社会科学版)》2018年第2期,第48—56页。

[14] C. S. Holling, “Resilience and Stability of Ecological Systems” [J], *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1—23.

[15] David R. Godschalk, “Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities” [J], *Natural Hazards Review*, 2003 (3): 136—143.

[16] Royal Francis and Behailu Bekera, “A Metric and Frameworks for Resilience Analysis of Engineered and Infrastructure Systems” [J], *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121 (1): 90—103.

[17]《极端天气影响之下“平急两用”公共基础设施建设更显紧迫性》[N],《第一财经日报》2023年8月2日第A02版。

[18] 范维澄、闪淳昌等:《公共安全与应急管理》[M],科学出版社,2017年,第50页。

[19] 陈潭、李义科:《面向大数据驱动的城市生命线系统管理》[J],《河海大学学报(哲学社会科学版)》2020年第5期,第22—31页。

[20] 刘晓航、贺金川、郑山锁、陈点新、吴星霞:《生命线:电力系统对供水系统抗震可靠性影响模型》[J],《天津大学学报(自然科学与工程技术版)》2021年第5期,第468—478页。

[21] 李彤玥:《基于“暴露—敏感—适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例》[J],《经济地理》2017年第3期,第86—95页。

[22] 方创琳、王岩:《中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征》[J],《地理学报》2015年第2期,第234—247页。

[23] 郭远红、魏淑艳:《基于危机生命周期理论的城市地下管线事故应急问题研究》[J],《辽宁大学学报(哲学社会科学版)》2017年第4期,第18—23页。

[24] 黄永、余廉:《城市韧性需求下的地下空间开发》[J],《中国应急管理》2021年第8期,第58—61页。

## 城市治理

城市生命线系统；韧性城市；应急能力；“线网”空间；公共安全

[25] 李雄飞、田甜、程香菊、尹小玲、宋琢：《综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析》[J],《水资源保护》2021年第6期,第1-11页。

**作者简介：**黄永，中共中央党校(国家行政学院)应急管理教研部(中欧应急管理学院)博士研究生。余廉(通讯作者)，中国矿业大学特聘教授。

**责任编辑：**陈丁力