DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.01.014

地下空间支撑下的城市轨道交通和能源系统融合发展研究

秦博宇[1*]，王宏振[1]，王召健[2]，熊自明[3]，赵金龙[4]，卢浩[3]，王明洋[3]

（1. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240；
3. 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室，南京 210007；4. 军事科学院国防工程研究院，北京 100036）

摘要：城市因人口、经济活动高度集中而产生极大的能源消耗量，也是各类风险高度集聚的重点区域；能源和交通作为城市碳减排的重点领域、城市“生命线”工程的重要组成部分，进行融合发展对于城市绿色低碳、安全韧性建设具有重要价值。本文梳理了城市轨道交通与能源领域的低碳韧性发展现状，涵盖城市轨道交通低碳发展、城市轨道交通与能源系统韧性评估及提升、储能系统安全防控及风险评估三方面；提出了地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统构想，阐述了常态时期、极端条件下相应系统的运行模式；从环境、经济、社会角度分析了城市轨道交通多能源融合系统的潜在效益，展望了构想系统的未来研究方向与可能的解决思路。研究建议，完善城市轨道交通多能源融合系统政策机制，推进多部门协同治理；构建城市轨道交通多能源融合系统科技创新体系，助力实现城市轨道交通低碳、安全、高效运行；推动城市电网和轨道交通协同管理体系建设，增强城市“生命线”工程韧性治理能力。

关键词：地下空间；城市轨道交通；交通–能源融合；可再生能源；储能安全防护

中图分类号：U2　　**文献标识码：**A

Integrated Development of Urban Rail Transit and Energy Systems Supported by Underground Space

Qin Boyu[1*], Wang Hongzhen[1], Wang Zhaojian[2], Xiong Ziming[3], Zhao Jinlong[4], Lu Hao[3], Wang Mingyang[3]

(1. School of Electrical Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Nanjing 210007, China; 4. Institute of National Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100036, China)

Abstract: Cities consume a large amount of energies owing to their high population density and centralized economy, and have high concentration of various risks. Energy and transportation are key areas for carbon emission reduction in urban areas and significant components of urban lifeline engineering. Therefore, the integrated development of energy and transportation systems is crucial for the low-carbon and resilient construction of cities. This study first reviews the low-carbon and resilient development status of urban rail transit and energy systems, covering three aspects: low-carbon development of urban rail transit, resilience assessment and

收稿日期：2022-12-28；**修回日期：**2023-01-30

通讯作者：*秦博宇，西安交通大学电气工程学院副教授，研究方向为电力系统运行与控制、低碳电力系统； E-mail: qinboyu@xjtu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“面向地铁低碳运行的地下储能发展战略研究”(2022-XY-75)；国家自然科学基金项目(52177112，52278419)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

improvement, and security protection and risk assessment of energy storage systems. Moreover, the concept of an underground-space-supported multi-energy-integrated urban rail transit system is proposed, elaborating the operating modes of the system in normal times and extreme conditions. Subsequently, benefits of the proposed system are analyzed from the perspectives of environment, economy, and society, and future research directions and key problems to be solved are introduced. Furthermore, the following suggestions are proposed: (1) improving the policy mechanism for the multi-energy-integrated urban rail transit system and promoting coordinated governance by multiple departments, (2) constructing a technology innovation system for the system to realize low-carbon, safe, and efficient operation of urban rail transit, and (3) promoting the development of a coordinated management system for urban power grids and rail transit to enhance urban resilience.

Keywords: underground space; urban rail transit; integration of transit and energy; renewable energy; energy storage safety protection

一、前言

在我国，随着城市化进程的加快，城市成为人口流动、经济发展、能源消耗的中心[1~4]；城市活动产生的碳排放量约占全国总量的80%，具有显著的聚集碳排效应[5,6]，因而推动城市绿色低碳发展成为实现碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标的关键环节。同时，城市呈现立体空间多层次、分类整合多功能、人口分布高密度等特征，若遭遇自然灾害、重大生产安全事故、战争打击等极端事件，城市经济发展和居民生活将面临严重威胁。近年来，国家高度重视城市安全和风险的防范治理问题，以城市“生命线”工程等设施安全运行为重点，多措并举、多元融合，推进韧性城市建设[7,8]。《“十四五”全国城市基础设施建设规划》（2022年）[9]明确了面向绿色低碳、安全韧性的城市高质量发展方向，提出推行城市基础设施的绿色低碳发展新模式以提高安全运行及抵抗风险水平。

能源、交通是城市碳减排的重点领域，也是城市“生命线”工程的组成部分。一方面，能源、交通领域碳排放量占比高且处于持续增长阶段，如“十四五”时期城市的能源、交通运输需求将继续呈现快速增长态势[10]，而能源结构、交通发展的技术水平尚未发生根本性转变。另一方面，能源、交通系统的正常运行是保障城市韧性的关键因素[11]，如能源、交通工程受极端灾害影响可能毁伤或停摆，将引发城市功能瘫痪、居民恐慌甚至造成经济损失与人员伤亡。因此，亟需针对能源和交通领域，开展城市低碳韧性研究，支持城市低碳转型和韧性提升。

在能源领域，大规模可再生能源并网以及柔性负荷接入成为未来电力能源的基本特征，对电力系统安全稳定、灵活经济运行提出了新要求[12]。一方面，风电、光伏等新能源出力的波动性和间歇性，电动汽车的无序充放电导致城市电力系统面临的不确定性进一步增加；电力电量平衡实时调节的难度日益增大，电力系统抗干扰能力下降，安全运行风险增加[13]。另一方面，新型电力系统下的城市电网结构更加复杂，运行形态更加多变，安全威胁趋于增多；当小概率、高影响的极端事件发生时，单个系统故障可能会传导到其他系统引发连锁故障，导致电力系统韧性面临挑战[14]。储能凭借优异的双向调节、快速响应能力，成为构建新型电力系统的重要技术与装备，为提升系统运行的灵活性与经济性、保障极端事故下的快速有序恢复能力提供了支撑。《“十四五”新型储能发展实施方案》（2022年）[15]明确，针对新能源消纳和系统调峰问题，推动大容量、中长时间尺度储能技术示范。然而，以电化学储能为代表的新型储能的安全问题依然突出，如北京市大红门储能电站事故引发了广泛关注[16]。因此，亟需发展以新型储能为代表的灵活调节资源，加强以电化学储能为代表的储能安全管理，为能源低碳转型与安全供给提供保障。

在交通领域，绿色交通和韧性交通建设是加快构建低碳、可靠的现代综合交通运输体系的重要组成部分。相较于传统地表公路运输方式，以地铁为代表的城市轨道交通具有运量大、速度快、安全准时、不占用地表空间等优势，逐步成为缓解城市交通压力、增强城市运输能力的重要方式[17,18]。我国城市轨道交通运营线路规模、在建线路规模、客流规模均居世界前列[19]，但城市轨道交通呈现能耗大、整体效益不足、供电可靠性要求高、仅具备一定工程防护能力等特征[20~24]。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》（2021年）[25]提出，增强综合交通运输体系韧性，调整发展模式，将绿色发展理念、低碳发展要求贯穿发展全过程。因此，创新城市轨道交通低碳用能模式、提升城市轨道交通对城市韧性的支撑作用，是未来城市轨道交通的重

点发展方向。

综上，城市具有人口、经济活动高度集中特征，能源消耗巨大，面临的风险趋于复杂多元，其低碳发展和韧性提升需求迫切。作为城市碳排放的主要来源、城市“生命线”工程的重要组成部分，城市能源和交通系统联系紧密、相互交叉、双向影响，碳减排目标趋同，安全韧性要求一致，政策机制相关[26,27]。因此，推动城市轨道交通和能源系统深度融合、协同发展，对低碳韧性城市建设具有现实意义。本文针对城市轨道交通与能源系统融合，分析发展现状、提出系统构想，展望未来研究方向与解决思路，以期为城市绿色低碳发展、城市韧性增强研究提供基础参考。

二、城市轨道交通与能源系统融合发展现状

（一）城市轨道交通低碳用能

城市轨道交通包括地铁、轻轨、单轨、市域快线、现代有轨电车等制式，其中地铁的运营线路长度占比高达79%，是我国城市轨道交通的主要运营方式[28]。目前，我国城市轨道交通仍处于快速发展阶段，建设、运营过程中的碳排放与能耗问题较为突出。

在低碳建造方面，降碳措施体现在建筑材料、施工设备、施工方式上。约有75%的建筑材料碳排放量源自建材生产阶段，使用再生混凝土、再生钢材等绿色建筑材料可显著降低碳排放水平[29]。城市轨道交通用的工程机械设备多为燃油设备，施工机械的电动化、清洁能源化可降低城市轨道交通建造的碳排放强度[30,31]。以装配式地铁地下车站为代表的新结构形式，在高效、绿色建造层面具有突出优势[32]。

在可再生能源利用方面，水电、风电、光伏发电、生物质发电是当前主要的可再生能源利用类型[33]。从安全性角度看，水电对地理条件要求高，通常需拦河筑坝，影响周边环境的水土性质以及生物生长，若大坝决堤会带来更加严重的后果；风电的风机塔架属于高耸建筑，承受上部较大的水平载荷和倾覆力矩，在人口稠密的城市地区进行布设需要更高的安全性要求[34]；光伏发电的电源为静止元件，结构简单轻便，通常不存在安全性问题；生物质发电以直接燃烧发电技术为主，燃烧后的废气、残渣对空气有一定的污染[35]。从经济性角度分析，水电建设周期长，初始建设投资大；风电受风速、环境等因素影响明显，城市内的风场条件不佳导致难以稳定利用风能[36]；光伏发电间歇性强、能量密度低，但太阳能资源分布广泛，不易受资源分布地域的限制，便于就近供电；生物质发电涉及生物质能资源的收集、运输、加工、储存等环节，建设和运营成本偏高。近年来，光伏与城市轨道交通建设的结合应用成为创新发展趋势之一，在城市轨道交通沿线高架站、车辆段等建筑屋面，通过光伏发电为城市轨道交通提供清洁电能成为主流的解决方案；在上海、苏州、青岛等城市，已有与地铁、有轨电车结合的光伏发电项目投入运营[37~39]。

在节能降耗方面，牵引供电、动力照明等系统是城市轨道交通用能的主要部分，成为节能降耗的主要方向。研究材料轻量化、结构轻量化等车辆轻量化技术，据此提出节能坡设计、列车运行模式优化及灵活编组方案，有效降低了车辆牵引能耗[40]。研究永磁同步电机低速段的高效特性，在与城市轨道交通频繁启停工况契合后，相比异步牵引系统可带来单节列车节能约30%的效果[41]。再生制动能量回收是降低城市轨道交通牵引能耗的重要途径，城市轨道交通主要采用逆变回馈型、储能型两种装置：前者易对电网造成冲击，产生谐波问题[42]；后者将超级电容、飞轮、电池等储能元件与双向变流装置结合，可实现再生制动能量的回收与利用[43]。目前，储能型再生制动能量回收技术已有城市轨道交通应用，如北京、青岛等城市取得了较为显著的节能减排效果[44~46]。

现有的城市轨道交通低碳技术研究，主要从降低城市轨道交通全生命周期碳排放目标出发，探索低碳建造技术应用，提高可再生能源供能比例，降低地铁能耗。城市轨道交通开展储能系统应用，在可再生能源利用、再生制动能量回收等方面取得一定成效；但储能配置规模小，固有潜力发挥有限，不足以显著改善城市轨道交通的用能模式和运营现状；亟需配置规模化储能，提升城市轨道交通负荷的灵活调节能力、可再生能源利用水平，以用能模式优化来提升城市轨道交通综合运营效益。

可以看出，适应城市轨道交通规模化储能的储能类型，需兼顾经济性、安全性以及自身性能。按技术原理，储能类型分为机械储能、电化学储能、

电磁储能、氢储能[47]。① 在机械储能中，抽水蓄能具有容量大、技术成熟、寿命长等优点，但抽水蓄能电站对地理条件要求严格，初始投资大；压缩空气储能安全低碳、容量大、成本低，但能量密度低，对地理条件同样有一定要求[48]。② 电化学储能主要通过可充电电池实现，具有地理位置限制小、建设周期短、功率与能量配置灵活等优点；占据市场份额90%以上的锂电池，在能量密度、充放电效率、循环寿命等方面表现良好[49]，是城市轨道交通配置规模化储能较为合适的储能技术；储能电池作为含高能物质的部件，安全性有待进一步研究和提升，才能适应城市轨道交通规模化储能对安全性的要求[50]。③ 电磁储能（如超导储能、超级电容器）具有响应速度快、功率密度大的特点，但能量密度偏低，不宜用作规模化储能[51]。④ 氢储能基于电力和氢能的互变性，具有能量密度高、运行维护成本低、存储时间长等优点；因能源转化效率低、响应速度慢、投资成本高，目前不适应城市轨道交通用能场景需求[52]。

（二）城市轨道交通与能源系统韧性评估及提升

受自然灾害、社会公共安全、设备故障等突发事件的威胁，城市轨道交通和能源系统可能面临关键节点失效、网络中断或瘫痪等挑战。城市轨道交通和能源系统韧性研究成为趋势，旨在增强系统的灾害抵御能力、减小事故造成的社会经济损失，使交通和能源网络在灾后快速、高效地恢复至正常状态；现有研究集中于韧性评估方法、提升策略两方面。

在韧性评估方法方面，建立了包含灾害模型建立、故障场景生成、评价指标引入在内的韧性评估体系[53]，提出了涵盖数据获取、灾害建模、确定设备状态与系统拓扑、引入韧性指标的韧性评估体系[54]；城市轨道交通与能源系统的韧性评估指标以韧性三角形或梯形模型为基础，相关系统韧性评估过程涉及吸收率、适应率、修复速率等核心指标[55,56]；考虑台风、地震等灾害，定义了持续时间、恢复时间、灾害损失等城市能源系统韧性指标[57,58]；基于扰动事件后的路网性能损失程度，提出基于换乘和客流情况的城市轨道交通网络韧性指标[59]。

在韧性提升策略方面，城市轨道交通与能源系统的韧性规划、应急响应、调整恢复是研究热点。采取网架结构加固、快速故障隔离、微网化应急孤岛供电、协同快速抢修等应急响应方法，在提升城市能源系统韧性方面效果显著[60,61]。优化调度低碳能源发电、多类型应急供电车、可迁移负荷等低碳应急资源，支撑负荷转供并降低线路阻塞，提升了城市轨道交通和能源系统抵御极端灾害和快速恢复的能力[62~65]。论证提出了利用公交接驳车辆增强城市轨道交通防灾水平并加速灾后恢复的优化决策方法以及相关技术方案的可行性[66]。

也要注意到，城市轨道交通和能源系统韧性发展的现有研究多针对某一特定灾害场景，评估对象多为单一类型的系统，对未来城市轨道交通、能源系统融合应用的适应性不强；需统筹考虑交通、能源系统功能耦合特性，进一步提升多灾源场景下城市轨道交通和能源融合系统的韧性。

（三）储能系统安全防控及风险评估技术

随着储能系统应用规模的扩大，相关安全问题形势严峻。近10年来，世界储能电站领域发生了70余起安全事故，造成了人员伤亡和经济损失[67]。现有的储能系统安全防控技术对各种潜在风险的早期预警与及时处理的能力仍显不足；仅能短时抑制火焰，难以实现有效降温，存在复燃和爆炸风险，缺乏事故中灭火和防爆的有效措施；相关研究集中在事故前的预测预警、事故中的防护控制两方面。

在事故前的预测预警方面，主要从储能安全诱因、致灾机理分析角度着手，提出储能安全风险辨识与评估方法。基于对不同滥用条件下电池内部反应的时序规律、特征温度规律的认识，提出了正极材料的分解、与电解液的反应、内部短路放热是电池热失控主要热来源的观点[68]。分析了荷电状态、电池排列对电池热失控传播的影响，为优化电池布置、防止并控制电池热失控传播提供了良好参考[69]。辨识了预制舱式储能柜热失控早期征兆、不同类型气体探测的安全预警有效性，为磷酸铁锂储能舱热失控预警提供数据支持[70]。设计了四级警报（潜伏期、早期警报期、警报期、火焰期）的层次化热失控报警系统，提高电池系统的安全预警有效性[71]。

在事故防护控制方面，研究集中于热管理和消防灭火系统的适用性。基于液冷对锂离子电池组热失控蔓延抑制效果的研究成果，对液冷结构进行了设计优化[72]。总结了引发储能电池热失控的各类因素，对比了空气散热、液冷散热、热管散热、固体

相变材料散热等方式的优缺点[73]。电池热失控后的产气是造成火灾和爆炸的重要原因，基于储能热失控喷射气体的扩散过程设计了热失控排气策略，是电池包排气方案制定的良好参考[74]。针对消防灭火系统，分析了多种锂离子电池的燃烧特性[75]，全氟己酮、七氟丙烷、干粉、二氧化碳、水成膜泡沫以及细水雾等不同介质对锂离子电池火灾的抑制情况[76~79]；认为水喷淋系统对锂离子电池储存安全具有积极作用（但无法扑灭电池组内部的火灾[80]），多数灭火剂释放完全后储能系统仍然有复燃甚至爆炸的风险。

（四）基于发展现状辨识城市轨道交通和能源系统融合发展的价值

在“双碳”目标、韧性城市建设举措的驱动下，未来城市轨道交通和能源系统将呈现高效能、低碳化、高韧性的发展态势；储能凭借其快速、灵活的能量时空转移能力，可为实现城市轨道交通与能源系统的绿色低碳发展、系统韧性增强提供支持，但储能相关的安全事故制约其应用空间，需加强储能安全防护建设。

值得指出的是，地下空间具有封闭性、稳定性、防护性上的优势，可为城市轨道交通和能源系统低碳韧性发展提供良好的空间支撑[81]：将规模化储能系统放置于地下空间，可节约地表生态空间、缓解用地紧张局面，适应城市用地集约化需求；地下空间能够削弱外部自然灾害的侵袭，加之内部环境稳定，为储能系统提供适宜的运行条件，支撑储能系统安全稳定运行；地下空间被岩石或软土包围，能够隔绝储能运行时对外部的影响，降低储能故障时对周边环境的破坏效应；城市轨道交通系统具备地下空间开发的良好基础，可降低地下储能系统的建设运营成本、提高地下空间的开发利用效率。因此，立足城市轨道交通和能源系统运行特性，面向低碳韧性发展需求，采用地下空间与多类能源耦合的方式，探索城市轨道交通和能源融合系统低碳韧性发展新模式，具有现实意义和广阔前景。

三、地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统构想

以“低碳高效、安全韧性”为核心，集成规模化储能、城市轨道交通能源清洁化转型、地下空间精细化规划管理等技术，形成地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统；提供一种兼顾交通、能源、地下空间应用的低碳韧性城市发展模式，驱动城市轨道交通多元能源–空间优化配置和协同运行，提高极端条件下的城市整体韧性。在“双碳”目标、电力市场化机制引导下，利用地下空间建设规模化储能系统，发挥不同能源形式在城市轨道交通系统中的应用潜力，以城市轨道交通清洁能源、地下空间等资源的统筹开发与有效协同来提升能源综合利用与城市空间资源开发效率，降低系统能源生产与供给的碳排放强度；依托规模化储能的灵活支援能力、地下工程功能特性，提高城市轨道交通和能源协同的精细化治理及风险源防控水平，增强城市灾害抵御、应急响应、灾后恢复能力。

（一）地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统架构

地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统（见图1）包括城市轨道交通供电系统、地下储能系统、可再生能源发电系统、再生制动能量回收系统，用于实现电能、机械能、光能等多类异质能流的耦合转换与有机协调。地下空间为光伏、再生制动能量等多类能量的层次化利用提供依托，以其封闭性、稳定性、防护性的功能优势来保障规模化储能系统的安全稳定运行。电网侧市场机制以峰谷分时电价机制为基础，以需求侧响应、调峰调频等辅助服务机制为资源调控手段，为城市轨道交通多能源融合系统的低碳、经济、高效运行提供投资引导。

城市轨道交通供电系统的主体包括中压环网配电系统、牵引供电系统、低压动力照明供电系统，通常采用三级集中式供电方式。中压环网配电系统将降压变电站、牵引变电站等通过不同的断路器划分为不同的供电分区，实现分区灵活运行。牵引供电系统为直流供电，通过直流牵引网向城市轨道交通列车提供动力。低压动力照明系统为交流供电，涵盖通风制冷与给排水系统、门梯系统、城市轨道交通照明系统等。

城市轨道交通的建设规模大、辐射范围广，可在沿线高架站、车辆段等建筑屋顶安装分布式光伏发电系统，为城市轨道交通系统提供清洁绿色电

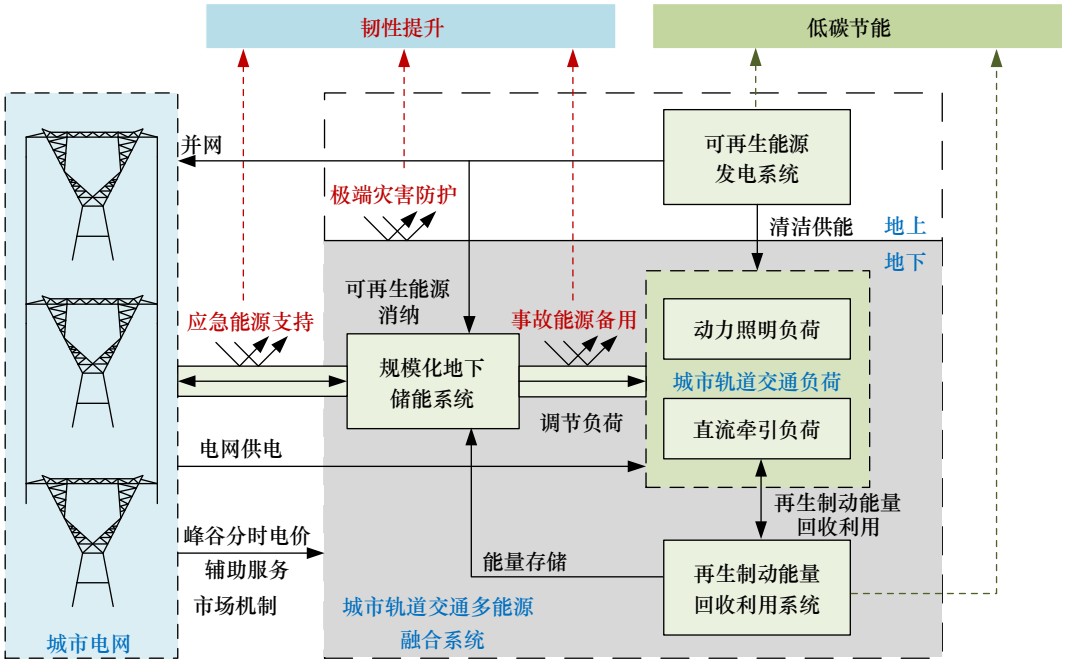

图1　城市轨道交通多能源融合系统框架

力，在减少购电的同时削减了用能碳排放。城市轨道交通分布式光伏发电建设采用光伏建筑一体化系统（BIPV），也称“构建型”“建材型”光伏建筑，其中的光伏发电装置与建筑物同步设计、施工、安装，具有美观、防水、寿命长、安全等优点。

再生制动能量回收系统通过功率型储能（如飞轮储能、超级电容储能）回收列车再生制动能量，提高城市轨道交通节能运行水平。城市轨道交通具有列车运行密度大、站间距小、启停频繁等特点，启动和制动过程带来较大的功率冲击，导致再生制动能量回收设备的功率要求较高。直接将再生制动能量回馈至交流电网将造成交流电网的谐波污染，而通过飞轮储能、超级电容储能进行回收可减少功率冲击对供电设备元器件以及车辆的影响，同时高效率地回收利用再生制动能量。

规模化地下储能系统依托地下空间功能特性，储存容量大、响应速率快、不占用地表空间，在配置容量、储能设备选址、快速响应等方面具有灵活性，受外部灾害影响小，运行环境安全稳定；凭借双向功率调节特性实现与外部电网的灵活互动，如通过峰谷电价差套利来提高城市轨道交通经济效益，参与需求侧响应、调峰调频等市场机制以为城市轨道交通带来增量经济效益，调节城市轨道交通负荷特性以提高可再生能源接入相应供电系统后的消纳水平。此外，规模化储能系统还可提供应急能源支持能力，作为城市轨道交通应急能源备用，提供地下隧道内人员掩蔽及战略转移所需能源，保障灾后城市其他工程能源恢复。

（二）地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统运行模式

地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统在常态时期挖掘不同能源形式在城市轨道交通系统中的应用潜力，在极端条件下提供应急恢复能源支持并承担人员掩蔽及战略转移作用，促进城市轨道交通–可再生能源–地下储能在协同减排、韧性支持方面的深度融合，相应的供电方式如图2所示。地下储能系统包括储能单元、由逆变器组成的功率转换子系统及滤波装置。城市轨道交通中压供电系统的电能可经整流后流向地下储能系统，地下储能系统中的电能在逆变后可反向流向中压供电系统，由此实现能量在地下储能系统、城市轨道交通供电系统之间的双向流动。光伏发电输出的直流电经直流柜汇总后，再逆变接入低压动力照明系统，采用低压侧并网方式。飞轮储能装置输出交流电能，通过变流器整流后输出直流电能，挂接于直流牵引网以进行能量双向流动。

在常态时期，城市轨道交通多能源融合系统以

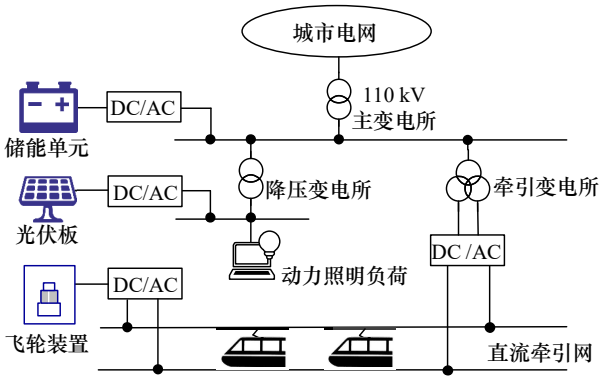

图2 城市轨道交通多能源融合系统供电方式

注：DC /AC 表示交流 / 直流。

地下储能为“枢纽”，实现多种能源形式在城市轨道交通系统中的耦合应用。规模化地下储能系统将提高可再生能源消纳比例及再生制动能量回收水平，支持城市轨道交通低碳节能运行。可再生能源发电系统与城市轨道交通供电系统及城市电网相连，就近供给城市轨道交通负荷并将多余电能输送至电网。优化调节规模化地下储能系统的充放电策略，可平滑可再生能源出力，有效应对可再生能源发电的间歇性和波动性问题，改善电能质量并提高消纳比例。飞轮、超级电容等功率型储能与城市轨道交通牵引网相连，（通过跟踪变电所电压）判断并存储未被制动列车动力设备和相邻车辆完全吸收的再生制动能量，弥补邻车吸收、逆变回馈用于再生制动能量回收利用的局限性，在更高水平上实现城市轨道交通列车再生制动能量的回收利用。此外，城市轨道交通基于储能系统跨时段的能量转移特性，参与电力市场交易以提高自身经济效益；在峰谷分时电价机制下，城市轨道交通多能源融合系统利用规模化储能对自身负荷进行时空转移，调控规模化储能系统在电价低谷期从电网购入电能，而在电价高峰期供给城市轨道交通负荷。规模化储能系统还可注册为电力辅助服务市场成员，跟踪电力调度指令提供调峰调频、需求侧响应等辅助服务。

在极端条件下，城市轨道交通多能源融合系统将有效连接城市枢纽节点，为能源系统乃至城市整体提供韧性支撑。当城市轨道交通供电因极端灾害影响而中断时，规模化地下储能系统为城市轨道交通提供持续稳定的应急能源供给，发挥城市轨道交通突发事故情况下的备用能源作用。对于遭遇极端灾害的城市能源系统，规模化地下储能系统可提供应急恢复韧性支持。此外，城市轨道交通作为地下交通主干线可作为人员掩蔽场所、战略转移通道，规模化地下储能系统为极端灾害条件下的人员及物资转移、隐蔽、运输等提供照明与动力所需的能源支持。

（三）地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统效益分析

地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统，发掘不同能源形式在城市轨道交通系统中的应用潜力，探寻用能新模式；将能源、城市轨道交通、地下空间充分耦合，在发挥各自推动社会低碳转型作用的同时，相互依托、互为补充，在更高维度上促进包括环境效益、经济效益、社会效益在内的综合效益提升；还可推动城市能源与轨道交通的低碳韧性协同发展，为低碳韧性城市建设提供路径选择。

在环境效益方面，城市轨道交通多能源融合系统通过可再生能源发电、再生制动能量回收等方式，减少化石能源消耗造成的碳排放；运用储能的充放电模式灵活特性，改善城市轨道交通的负荷特性，降低碳排放高峰期的电耗并减少碳排放；地下储能节约城市地表占用，为种植绿地植物以固定二氧化碳提供空间，兼顾绿植景观优化、生态环境质量改善。

在经济效益方面，城市轨道交通多能源融合系统明确城市轨道交通、储能、可再生能源等运行主体的功能定位，以市场交易机制引导城市轨道交通系统调整用能模式，增强参与电力削峰填谷与辅助服务交易的积极性，进而提高系统经济性。城市轨道交通具有良好的地下空间开发和利用基础，在工程建造过程中针对性应用新技术，将为地下储能空间建设提供便利。城市地表空间日趋紧张、成本高昂，而地下空间的开发潜力极大，可为规模化储能系统运行提供宽裕的空间资源，规避储能建设的土地成本问题。

在社会效益方面，规模化地下储能作为备用能源能够提升城市轨道交通供电可靠性，降低因电力问题停运的概率，提高交通出行满意度；还可为城市能源系统提供应急恢复支持，改善特殊时期的社会用能可及性。通过城市轨道交通多能源融合系统支撑下的城市能源系统应急恢复技术，统筹城市轨道交通、能源、空间的城市轨道交通平–灾转换机

制及临灾综合利用技术，贯通能源、交通、空间等多类型“生命线”工程，将实质性提升城市应对和处置极端突发事件的应对处置能力以及城市整体韧性。

四、地下空间支撑下的城市轨道交通和能源融合发展的关键问题与解决思路

（一）城市轨道交通多能源融合系统协同规划及智慧调度

地下空间地质结构中的岩土介质、结构面等要素，面临应力场、应变场、渗流场耦合作用的环境，相关要素之间的作用过程与机理有待挖掘。地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合系统，在建造和运行阶段对地质结构会产生不同程度的扰动，相应动态互馈机制复杂。新能源发电、城市轨道交通负荷、地下储能等系统之间的能量、时空交互频繁，具有动态强耦合特征，构成地下储能规划调度方面的挑战。

揭示地下交通和能源系统的空间与能量复杂耦合机理，提出面向综合效益优化的城市轨道交通多能源融合系统规划和运行调度优化方法，是解决相关问题的优先事项（见图3）。① 分析城市轨道交通沿线地质条件、气候特点等数据的自相关性和互相关性，分析数据样本的短期波动特征、长期依赖关系，提取城市轨道交通沿线的可再生能源分布特征。② 综合考虑运行负荷、可再生能源出力、天气状况等因素，定量评估牵引网–能源网不确定性因素对两网联合的影响。③ 分析城市轨道交通多能源融合系统的空间形态与能源布局耦合机理，量化能量与空间作用关系，提出储能全寿命周期综合效益优化目标，制定储能选址及定容优化规划方案，追求系统综合效益优化。④ 构建城市轨道交通多能源系统调度模型，涵盖可再生能源时变出力、城市轨道交通动态负荷、实时再生制动能量等要素，提出储能充放电调度优化策略。⑤ 分析城市轨道交通多能源融合系统内的储能调控与源荷不确定性交互影响，构建各储能单元相互支撑及协作的运行模式，提出分布式储能系统协同控制策略。

（二）面向储能安全运行的地下空间防御力评估理论及提升技术

特定环境下多种因素耦合引发的地下储能灾害事件具有突发性、随机性，灾害演化过程中与工程

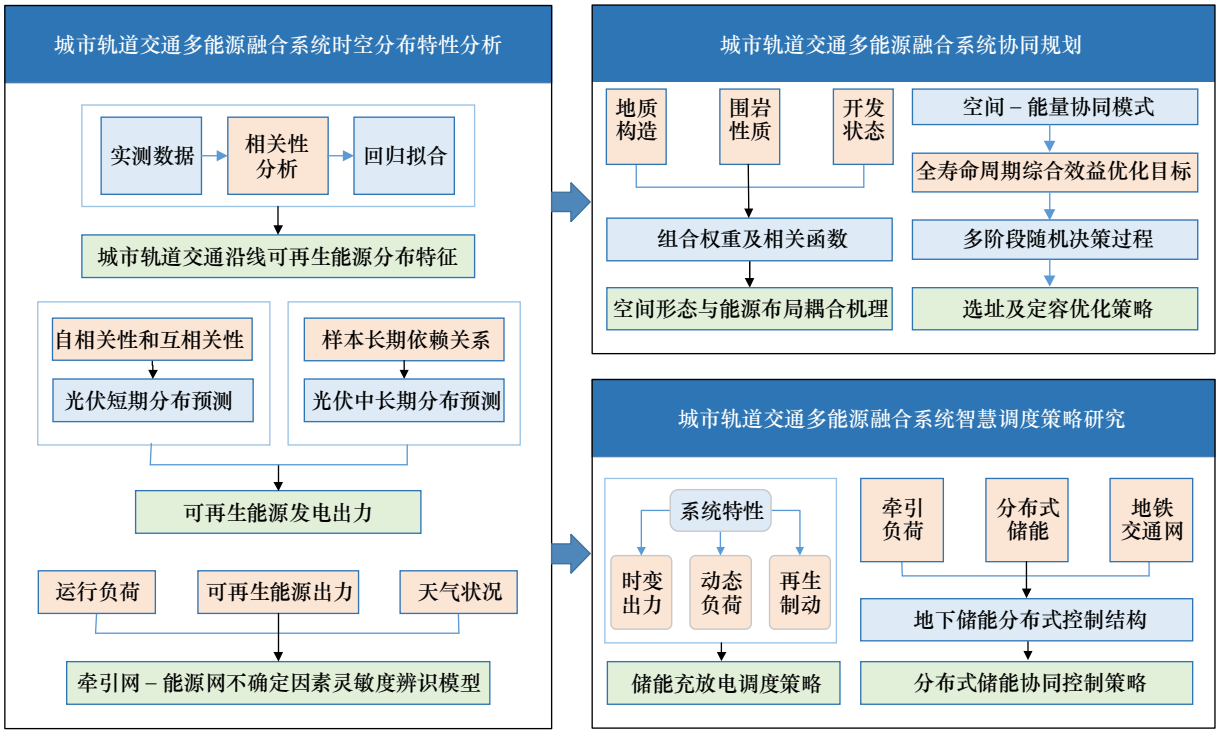

图3　城市轨道交通多能源融合系统协同规划及智慧调度研究

结构相互作用行为呈现非线性，相应的随机非线性动力灾变机制复杂。作为随机量的灾害强度特征值难以确定，事故时出现结构体系破坏概率、建筑物结构潜在破坏点不明，灾害危险性预测、结构响应及易损性分析、结构功能性态评估、抗爆韧性优化等技术有待发展。结构损伤指数与功能损失、恢复时间、抗爆等级之间的对应关系复杂，而现有的功能损失计算、功能恢复时间计算等方法，不足以保障地下储能系统设施周围的生命财产安全。

构建面向储能安全运行的地下空间防御力评估理论，是解决相关问题的关键内容（见图 4）。① 分析储能电池热失控造成的火焰传播过程，揭示多组分燃气耦合爆炸荷载的形成机理和变化规律。② 结合爆炸荷载对储能结构的破坏毁伤效应，分析地下储能结构的弹塑性变形和失稳模式，构建多组分燃气爆炸荷载作用下的结构破坏模型。③ 结合可燃气体爆炸对外部空间产生的冲击波、高温辐射变化规律、飞石运动轨迹预测数据，建立储能结构－周边设施安全距离判据。④ 建立燃气随机分布下的爆炸荷载模型、结构破坏随机模型，辨识地下空间结构影响的敏感性因素，形成针对储能安全运行的地下空间防御力评估体系。⑤ 结合典型灾害的灾变前兆特征、关键参数演化规律，建立灾情智能预警系统、灾情态势推演模型；基于分区、主动防护理念，优化泄爆抑爆措施，建立地下储能防灾减灾快速响应体系。

（三）城市轨道交通多能源融合系统支撑下的城市韧性提升技术

城市面临多方面的极端威胁和致灾风险，而当前的“生命线”工程灾害防护理念未能统筹考虑多种致灾因子，难以应对一种类型极端灾害导致的“多灾并发”复杂局面。城市“生命线”工程综合防护理念、政策体系等尚未建立，多方管理体制割裂，有关极端灾害冲击下的韧性优化研究缺乏系统性，难以形成防护合力。

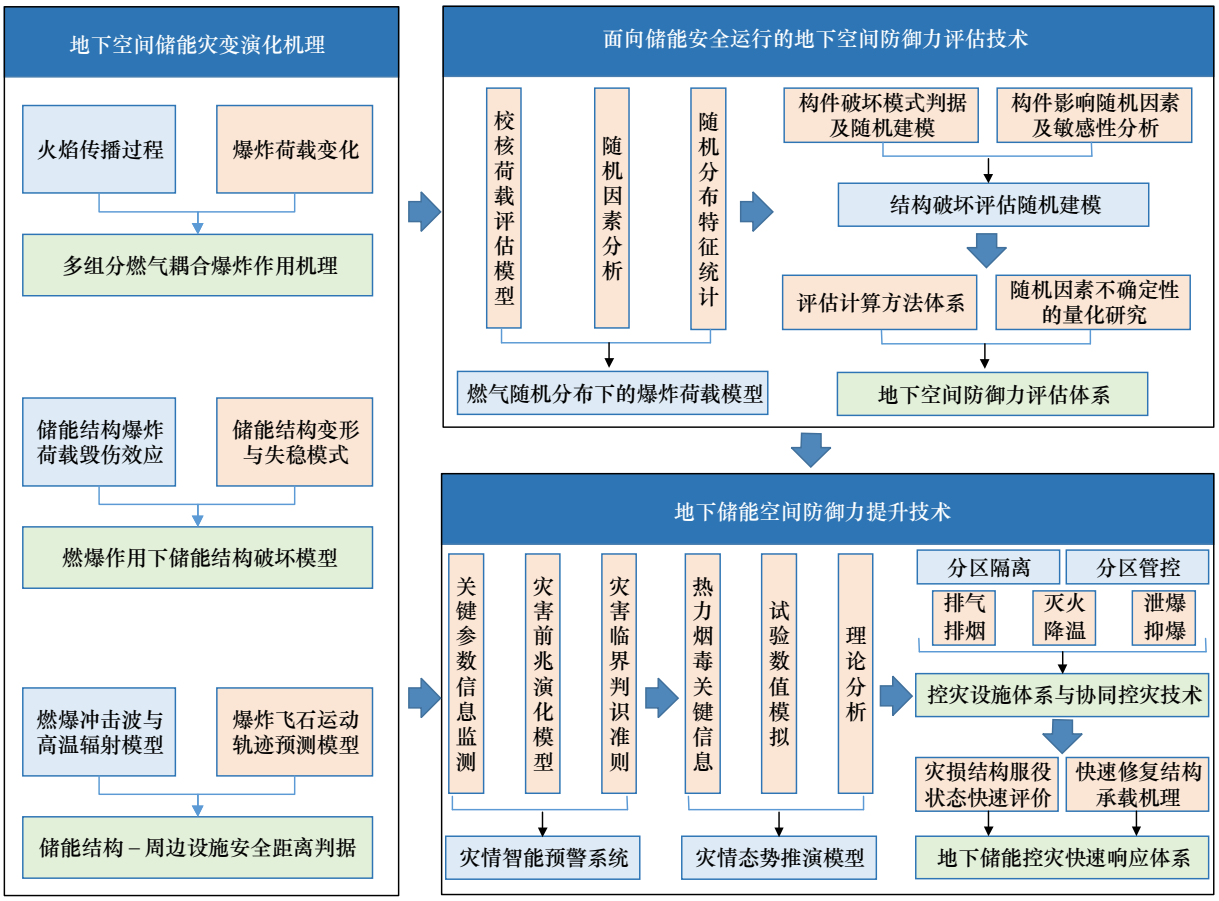

图 4　面向储能安全运行的地下空间防御力评估理论及提升技术

构建多方协同、统筹协调的灾害防护管理和协调机制，提高系统对于极端事件的应对处置能力，是解决相关问题的必要保障（见图5）。① 考虑实际自然灾害的影响范围、城市空间的分布特点，梳理城市面临的多种极端灾害风险类型，建立城市极端灾害典型场景集。② 建立表征城市各类“生命线”工程关联关系的网络模型，明确和量化城市轨道交通多能源融合系统对城市的支撑作用。③ 辨识城市轨道交通多能源融合系统对城市韧性支撑能力的关键影响因素，分析城市“生命线”工程特性和灾害应急调控成本，建立城市韧性量化评估体系。④ 结合城市能源系统各关键负荷灾后故障规模、负荷损失、故障恢复时间等数据，构建城市轨道交通多能源融合系统支撑下的城市能源系统应急恢复优化决策模型，制定相应的应急恢复路径及决策方案。⑤ 结合城市轨道交通网络、能源、空间等分布特点，提出极端灾害条件下城市轨道交通网络利用模式，形成极端灾害时城市轨道交通平－灾转换机制、城市轨道交通和能源协同的城市整体韧性提升策略。

五、城市轨道交通与能源融合发展建议

（一）完善城市轨道交通多能源融合系统政策机制，推进多部门协同治理

建议发展和改革、交通运输、国土资源等管理部门联合成立“城市轨道交通－地下储能规划建设委员会”，明确地下储能支撑下城市轨道交通低碳、经济发展的目标与任务，推动城市轨道交通企业与城市空间规划部门、各省份电力公司、储能企业的深入合作。① 研究制定城市轨道交通多能源融合系统的发展脉络，保障管理职能的覆盖面，顾及从前

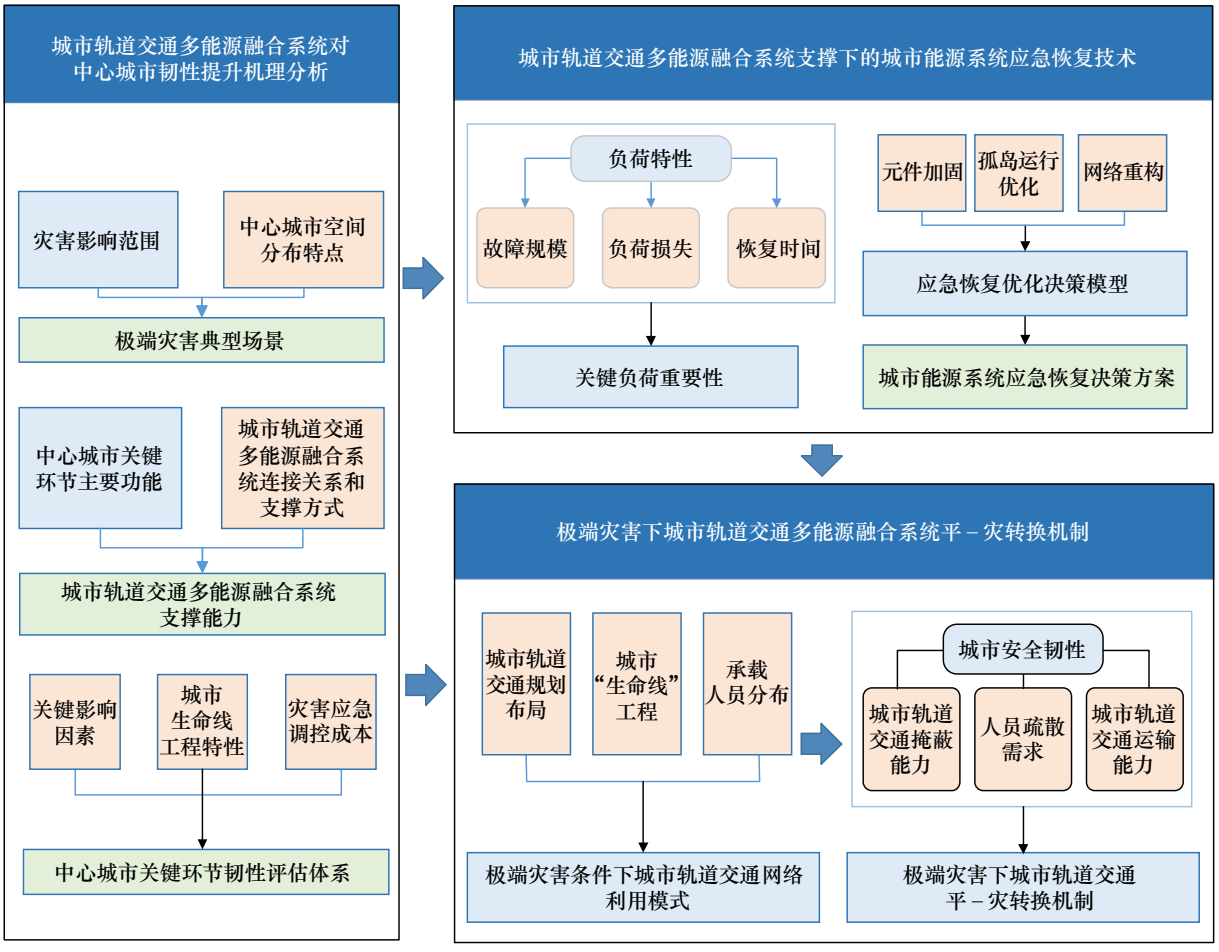

图5　城市轨道交通多能源融合系统支撑下的城市韧性提升技术

期规划到后期经营的产业布局全流程；厘清管理职责边界，完善跨部门协调模式，发布审批核准、建设运营、安全监管等行业政策，组织利益相关方形成协同治理制度及规则，引导城市轨道交通、地下空间、储能等行业的域内顶层设计。② 建立城市轨道交通、地下空间、储能统筹规划与协调建设机制，明确城市轨道交通线路及相邻区域地下空间资源的确权出让政策，鼓励城市轨道交通与地下储能建设用地的一体化设计和统一供应，推动城市轨道交通多能源融合系统的开发和利用。③ 合理优化面向城市轨道交通多能源融合开发的投融资、税收等政策，推动形成城市轨道交通由电力电量消费者向调节支撑功能提供者转变的市场交易机制，择机实施有关扶持地下储能技术的补贴政策，适度超前构建成本疏导机制，为城市轨道交通多能源融合系统发展创造条件。

（二）构建城市轨道交通多能源融合系统科技创新体系，提高城市轨道交通低碳、安全、高效运行水平

城市轨道交通多能源融合系统预期效益的发挥，受到规划建设、运行控制、安全防控等制约。构建“政产学研用”协同联动的城市轨道交通多能源融合科技创新体系，开展重大科学问题研究和创新技术研发。① 注重城市轨道交通多能源融合系统架构、空间–能量协同规划、地下空间灾变演化等基础理论研究，发展地下空间支撑下的城市轨道交通多能源融合运行模式和市场机制，引导地下空间多元能源、物质融合系统的低碳协同规划，揭示地下空间致灾因子及多灾源作用下的灾害传播规律。② 攻关城市轨道交通多能源融合系统智慧运行、安全防护关键技术，明确“源荷储”不确定性的交互影响；布局城市轨道交通多能源融合系统的智慧调度技术研发，提高系统动态感知、决策智能化的水平；在多场景、高效能的储能事故应急响应机制方面实施重点突破，发展针对性强、可靠性高的地下储能空间防爆技术，支撑构建全方位、多层次的地下储能纵深防御体系。③ 推动城市轨道交通多能源融合系统示范工程建设，地下储能装置研发、城市地下空间综合利用、城市轨道交通低碳转型的资源共享和运管融合，形成储能、城市轨道交通、地下空间等领域协同创新的新发展格局。

（三）推动城市电网和城市轨道交通协同管理体系建设，增强城市“生命线”工程韧性治理能力

建议从政策引领、机制创新、分级管控等方面着手，积极提升城市应对极端威胁的综合能力。① 开展城市轨道交通多能源融合系统支撑下的城市韧性相关政策体系建设，明确管理部门在韧性协调治理方面的职责范围，建立和健全各类型城市“生命线”工程韧性治理的相关标准体系；适时发布针对能源、轨道交通、地下空间协同治理的城市韧性发展扶持政策，引导社会力量和优势资源支持城市风险管理与应急恢复建设，提高城市韧性治理体系的制度化、规范化、标准化水平。② 重视城市电力能源系统、轨道交通之间的关联关系，深化极端条件下多类型城市战略应急资源的互联互通和优化利用；发挥地下储能安全灵活、城市轨道交通网络点多面广的特性，构建多方协同、统筹协调的灾害应急管理机制，保障城市韧性恢复基础设施的“提档升级”。③ 开展城市“生命线”工程韧性治理分级管控，依据分类、分区城市“生命线”工程韧性提升要求，形成覆盖城市运行关键环节的韧性多级管控体系；考虑自然灾害、重大安全事故等多类型极端威胁和致灾风险因素，建立多元技术互补、多维数据融合的城市“生命线”工程风险量化与灾后恢复技术平台，切实保障城市的极端事件处置能力及效率。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 28, 2022; **Revised date:** January 30, 2023

Corresponding author: Qin Boyu is a associate professor from the School of Electrical Engineering of Xi’an Jiaotong University. His major research fields include power system operation and control, low-carbon power system. E-mail: qinboyu@xjtu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Underground Energy Storage for Low-Carbon Operation of Subway” (2022-XY-75); National Natural Science Fund project (52177112，52278419)

参考文献

[1] 别朝红, 任彦哲, 李更丰, 等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 3–15.
Bie Z H, Ren Y Z, Li G F, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Sys-

tems, 2022, 46(17): 3–15.

[2] Shen L Y, Wu Y, Shuai C Y, et al. Analysis on the evolution of low carbon city from process characteristic perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187: 348–360.

[3] 徐智邦, 焦利民, 王玉. 1988—2018年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比 [J]. 地理学报, 2022, 77(10): 2514–2528.
Xu Z B, Jiao L M, Wang Y. Comparison of urban land expansion between urban physical and administrative areas in China from 1988 to 2018 [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(10): 2514–2528.

[4] 陈乐, 李郇, 姚尧, 等. 人口集聚对中国城市经济增长的影响分析 [J]. 地理学报, 2018, 73(6): 1107–1120.
Chen L, Li X, Yao Y, et al. Effects of population agglomeration on urban economic growth in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(6): 1107–1120.

[5] 中国投资协会创新投融资专业委员会,《环球》, 中国人民大学生态金融研究中心, 等. 2020中国绿色城市指数Top50报告 [R]. 北京: 中国投资协会创新投融资专业委员会,《环球》, 中国人民大学生态金融研究中心, 等, 2021.
China Investment Association Innovation Investment and Financing Specialized Committee, Global, Ecological Finance Research Center of Renmin University of China, et al. 2020 China green city index Top50 report [R]. Beijing: China Investment Association Innovation Investment and Financing Specialized Committee, Global, Ecological Finance Research Center of Renmin University of China, et al, 2021.

[6] 张保留, 白梓函, 阳平坚, 等. 城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 [EB/OL]. (2022-10-25) [2022-12-15]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202208091.
Zhang B L, Bai Z H, Yang P J, et al. Evaluation method and application for urban carbon peaking & neutrality performance [EB/OL]. (2022-10-25) [2022-12-15]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202208091.

[7] 时珊珊, 崔正达, 陈颖, 等. 电气化交通和城市电网协同韧性提升方法综述 [J]. 电工电能新技术, 2022, 41(3): 43–54.
Shi S S, Cui Z D, Chen Y, et al. Review of resilience enhancement methods with coordination of electrified transportation system and urban power grid [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(3): 43–54.

[8] 许慧, 李杨, 邓宁辉, 等. 城市复杂公共空间系统韧性建模研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(7): 1964–1978.
Xu H, Li Y, Deng N H, et al. Resilience modeling of complex urban public space system [J]. Systems Engineering–Theory & Practice, 2022, 42(7): 1964–1978.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”全国城市基础设施建设规划 [EB/OL]. (2022-07-29) [2022-11-12]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhcxjsbwj/202207/20220729_767388.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China, National Development and Reform Commission. The 14th Five-Year Plan for national urban infrastructure construction [EB/OL]. (2022-07-29) [2022-11-12]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhcxjsbwj/202207/20220729_767388.html.

[10] 张儒峰, 李雪, 姜涛, 等. 城市综合能源系统韧性评估与提升综述 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 122–132.
Zhang R F, Li X, Jiang T, et al. Review on resilience assessment and enhancement of urban integrated energy system [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 122–132.

[11] 刘爱华, 吴超, 徐文彬. 基于脆性熵的城市生命线灾损敏感性评估 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2793–2801.
Liu A H, Wu C, Xu W B. Damage sensitivity evaluation of urban lifeline based on brittleness entropy [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(8): 2793–2801.

[12] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术 [J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036–3046.
Han X Q, Li T J, Zhang D X, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036–3046.

[13] 贾宏杰, 穆云飞, 侯恺, 等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 49–62.
Jia H J, Mu Y F, Hou K, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 49–62.

[14] Yodo N, Arfin T. A resilience assessment of an interdependent multi-energy system with microgrids [J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2021, 6(1–2): 42–55.

[15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知 [EB/OL]. (2022-03-21) [2022-11-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220321_1319773.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of *The 14th Five-Year Plan for the development of new energy storage* [EB/OL]. (2022-03-21) [2022-11-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220321_1319773.html.

[16] 王久平. 及时应对储能安全风险挑战——从“4·16”北京丰台供电公司火灾事件说起 [J]. 中国应急管理, 2021 (5): 10–13.
Wang J P. Timely response to energy storage security risk challenges-from the “4·16” Beijing Fengtai power supply company fire incident [J]. China Emergency Management, 2021 (5): 10–13.

[17] Qiao Y K, Peng F L, Sabri S, et al. Low carbon effects of urban underground space [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 45: 451–459.

[18] Cui J Q, Broere W, Lin D. Underground space utilisation for urban renewal [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103726.

[19] 韩宝明, 李亚为, 鲁放, 等. 2021年世界城市轨道交通运营统计与分析综述 [J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 5–11.
Han B M, Li Y W, Lu F, et al. Statistical analysis of urban rail transit operations in the world in 2021: A review [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(1): 5–11.

[20] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略 [J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 1–4.
Shi Z H, Ding S K. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022,

35(1): 1–4.

[21] Anupriya, Graham D J, Carbo J M, et al. Understanding the costs of urban rail transport operations [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 138: 292–316.

[22] 赵旭东, 陈志龙, 许继恒, 等. 地震灾害下城市双层关联生命线网络易损性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 767–777.
Zhao X D, Chen Z L, Xu J H, et al. Seismic vulnerability of urban double-layer interdependent lifeline network [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2020, 54(4): 767–777.

[23] Zhang D M, Du F, Huang H W, et al. Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example [J]. Safety Science, 2018, 106: 230–243.

[24] 成都市人防建筑设计研究院有限公司. 俄乌战争对地铁和地下综合管廊人民防空防护体系建设的思考 [EB/OL]. (2022-04-15)[2022-11-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/LKo1h8YZBkNI46CK4tzHWg.
Chengdu Civil Air Defense Academy Co., Ltd. Reflections on the construction of civil air defense protection system in subway and underground integrated pipeline gallery during the Russo-Ukrainian war [EB/OL]. (2022-04-15)[2022-11-29]. https://mp.weixin.qq.com/s/LKo1h8YZBkNI46CK4tzHWg.

[25] 中华人民共和国交通运输部. “十四五”现代综合交通运输体系发展规划 [EB/OL]. (2022-01-19)[2022-11-19]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.
Ministry of Transport of the People’s Republic of China. The 14th Five-Year Plan for the development of modern comprehensive transport system [EB/OL]. (2022-01-19) [2022-11-19]. https://xxgk.mot.g ov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.

[26] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1285–1301.
Jiang L Z, Bie Z H, Long T, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285–1301.

[27] 贾利民, 程鹏, 张蜇, 等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 173–183.
Jia L M, Cheng P, Zhang Z, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: Development paths and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 173–183.

[28] 李佩娟. 2022 年中国地铁行业全景图谱 [R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2022.
Li P J. Panorama of China’s subway industry in 2022 [R]. Shenzhen: Forward Industry Research Institute, 2022.

[29] 粟月欢, 张宇, 段华波, 等. 地铁建设环境影响评估及减排效益研究: 以深圳市为例 [J]. 环境工程, 2022, 40(5): 184–192.
Su Y H, Zhang Y, Duan H B, et al. Research on environmental impact assessment and emission reduction potential of metro construction: A case study in Shenzhen, China [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(5): 184–192.

[30] 林元正, 林添良, 陈其怀, 等. 电动工程机械关键技术研究进展 [J]. 液压与气动, 2021, 45(12): 1–12.
Lin Y Z, Lin T L, Chen Q H, et al. Research progress on key technologies of electric construction machinery [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(12): 1–12.

[31] 张成玉, 王馨宇. 欧洲工程机械电动化趋势及中国制造商进入欧洲市场面临的挑战 [J]. 工程机械, 2021, 52(12): 97–100.
Zhang C Y, Wang X Y. Electrification trend of European construction machinery and challenges faced by Chinese manufacturers entering the European market [J]. Construction Machinery and Equipment, 2021, 52(12): 97–100.

[32] 朱旻, 孙晓辉, 陈湘生, 等. 地铁地下车站绿色高效智能建造的思考 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2037–2047.
Zhu M, Sun X H, Chen X S, et al. Green, efficient, and intelligent construction of underground metro station [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(12): 2037–2047.

[33] 丁怡婷. 我国可再生能源发电量稳步增长 [N]. 人民日报, 2022-01-29(06).
Ding Y T. Renewable energy generation is growing steadily [N]. People’s Daily, 2022-01-29(06).

[34] 朱峰林. 某陆上风电场风机基础选型及结构安全性分析 [J]. 水电与新能源, 2018, 32(10): 72–75.
Zhu F L. Selection and structural safety analysis of the wind turbine foundation for a land wind farm [J]. Hydropower and New Energy, 2018, 32(10): 72–75.

[35] 马隆龙, 唐志华, 汪丛伟, 等. 生物质能研究现状及未来发展策略 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 434–442.
Ma L L, Tang Z H, Wang C W, et al. Research status and future development strategy of biomass energy [J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2019, 34(4): 434–442.

[36] 戴靠山, 唐精, 何任飞, 等. 城市风能利用在绿色建筑中的运用综述 [J]. 绿色建筑, 2017, 9(3): 44–48.
Dai K S, Tang J, He R F, et al. Introduction on application of city wind energy in green building [J]. Green Building, 2017, 9(3): 44–48.

[37] 吕欣乐. 促进城市轨道交通减少碳排放的策略与思考 [J]. 城市轨道交通, 2022 (9): 28–29.
Lyu X L. Strategies and considerations on promoting urban rail transit to reduce carbon emissions [J]. China Metros, 2022 (9): 28–29 .

[38] 苏州市人民政府国有资产监督管理委员会. 高新区国企屋顶光伏电站项目成功并网发电 [EB/OL]. (2019-07-10)[2023-01-15]. http://guozw.suzhou.gov.cn/gzw/szgz/201907/AD6AAUZH5ELZJ7V50R6PW41ZEJ2Y6VZL.shtml.
Assets Supervision and Administration Commission of Suzhou Municipal People’s Government. High-tech zone state enterprise roof photovoltaic power station project successfully connected to the grid for power generation [EB/OL]. (2019-02-10)[2023-07-15]. http://guozw.suzhou.gov.cn/gzw/szgz/201907/AD6AAUZH5ELZJ7V50R6PW41ZEJ2Y6VZL.shtml.

[39] 陈凌馨. 青岛城市轨道交通驶入绿色快车道 [N]. 中国经济时报, 2022-04-15(03).
Chen L X. Qingdao urban rail transit enters the green express lane [N]. China Economic Times, 2022-04-15(03).

[40] Khodaparastan M, Mohamed A A, Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 2831–2847.

[41] 吴彩秀, 李红佗, 庄舜雄. 地铁列车节能技术应用研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022 (8): 33–37.
Wu C X, Li H T, Zhuang S X. Research on the application of

energy-conservation technology for metro trains [J]. Modern Urban Transit, 2022 (8): 33–37.

[42] Vasisht M S, Vashista G A, Srinivasan J, et al. Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study [J]. Energy, 2017, 118: 684–691.

[43] Wang H, Yang X, Wu J J, et al. Metro timetable optimisation for minimising carbon emission and passenger time: A bi-objective integer programming approach [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12: 673–681.

[44] 白宣. 北京地铁再生制动能量吸收装置节能效果对比分析 [J]. 铁道技术监督, 2021, 49(5): 43–46.
Bai X. Comparative analysis of energy saving effect of regenerative braking energy absorption device in Beijing subway [J]. Railway Quality Control, 2021, 49(5): 43–46.

[45] 李明, 张骄, 崔霆锐, 等. 北京地铁绿色低碳技术创新研究与应用 [J]. 机车电传动, 2022, 286(3): 29–36.
Li M, Zhang J, Cui T R, et al. Research and application of green and low-carbon innovation in Beijing subway [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022, 286(3): 29–36.

[46] 俞慧友, 姜波. 地铁用上兆瓦级飞轮储能装置有望年节电50万度 [N]. 科技日报, 2022-04-20(05).
Yu H Y, Jiang B. Upper MW flywheel energy storage device for subway is expected to save 5×10^5 degrees of power annually [N]. Science and Technology Daily, 2022-04-20(05).

[47] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052–1076.
Chen H S, Li H, Ma W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3):1052–1076.

[48] 王一飞, 杨飞, 徐川. 电网规模化储能应用研究综述 [J]. 湖北电力, 2020, 44(3): 23–30.
Wang Y F, Yang, F, Xu C. Research overview of large-scale energy storage application of power grid [J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(3): 23–30.

[49] Sridhar S, Salkuti S R. Development and future scope of renewable energy and energy storage systems [J]. Smart Cities, 2022, 5(2): 668–699.

[50] 李建林, 谭宇良, 赵锦, 等. 电网侧储能发展态势及技术走向 [J]. 电器与能效管理技术, 2020 (5): 1–6.
Li J L, Tan Y L, Zhao J, et al. Development situation and technology trend of grid-side energy storage [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020 (5): 1–6.

[51] Koohi-Fayegh S, Rosen M A. A review of energy storage types, applications and recent developments [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101047.

[52] 刘金朋, 侯焘. 氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望 [J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 230–233.
Liu J P, Hou T. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry [J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230–233.

[53] 颜文婷, 杨隆, 李长城, 等. 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估及提升策略 [EB/OL]. (2023-01-12)[2023-01-18]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.152.
Yan W T, Yang L, Li C C, et al. Resilience evaluation and enhancement strategy of distribution network considering the impact of seismic attack on transportation networks [EB/OL]. (2023-01-12) [2023-01-18]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.152.

[54] Sabouhi H, Doroudi A, Fotuhi-Firuzabad M, et al. Electrical power system resilience assessment: A comprehensive approach [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 2643–2652.

[55] 陶希东. 韧性体系建设: 全球大城市风险化趋势下的应对策略 [J]. 南京社会科学, 2022 (10): 46–53.
Tao X D. Building resilience system: Coping strategies under the trend of global megacities risking [J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2022 (10): 46–53.

[56] 张亚超, 丁志龙, 谢仕炜, 等. 面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望 [EB/OL]. (2022-11-10)[2023-01-11]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1695.
Zhang Y C, Ding Z L, Xie S W, et al. Review and prospect of research on power distribution network resilience enhancement for energy Internet [EB/OL]. (2022-11-10)[2023-01-11]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1695.

[57] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5476–5493.
Li X, Sun T K, Hou K, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476–5493.

[58] 黄文鑫, 吴军, 郭子辉, 等. 极端台风灾害下电网韧性评估及差异化规划 [EB/OL]. (2022-11-25) [2023-01-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221124.1110.002.html.
Huang W X, Wu J, Guo Z H, et al. Grid resilience assessment and differentiated planning against extreme typhoon disasters [EB/OL]. (2022-11-25) [2023-01-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221124.1110.002.html.

[59] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 198–205.
Lyu B, Guan X Y, Gao Z Q. Evaluation and optimal recovery strategy of metro network service resilience [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 198–205.

[60] Kammouh O, Noori A, Cimellaro G, et al. Resilience assessment of urban communities [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2019, 5(1): 4019002.

[61] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范 [J]. 工程力学, 2020, 37(10): 28–44.
Fang D P, Li Q W, Li N, et al. An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 28–44.

[62] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系 [J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 10–27.
Miu H Q, Wang N Y, Wang Y J, et al. An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 10–27.

[63] 张家玉, 杨晓冬. 三度空间理念下城市韧性评价与提升策略研究 [J]. 工程管理学报, 2021, 35(6): 55–60.
Zhang J Y, Yang X D. Urban resilience evaluation and promotion strategy: A perspective of trio spaces [J]. Journal of Engineering

Management, 2021, 35(6): 55–60.

[64] Ma S S, Chen B K, Wang Z Y. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442–1451.

[65] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2819–2829.
Ruan Q T, Mei S W, Huang X D, et al. Challenges and research prospects of resilience enhancement of low-carbon power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2819–2829.

[66] Jin J G, Tang L C, Sun L J, et al. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 63: 17–30.

[67] 唐亮, 尹小波, 吴候福, 等. 电化学储能产业发展对安全标准的需求 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2645–2652.
Tang L, Yin X B, Wu H F, et al. Demand for safety standards in the development of the electrochemical energy storage industry [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2645–2652.

[68] 喻航, 张英, 徐超航, 等. 锂电储能系统热失控防控技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2653–2663.
Yu H, Zhang Y, Xu C H, et al. Research progress of thermal runaway prevention and control technology for lithium battery energy storage systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2653–2663.

[69] Zhang L L, Long R Y, Chen H. Carbon emission reduction potential of urban rail transit in China based on electricity consumption structure resources [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 113–121.

[70] Li Y, He Q, Luo X, et al. Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: A case study of Shanghai metro resources [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 128: 451–457.

[71] Yin C F, Ji F, Weng X L, et al. The optimal plan selection framework of rail transit photovoltaic power station under probabilistic linguistic environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: 129560.

[72] 肖勇, 徐俊. 基于组合赋权与TOPSIS的储能电站电池安全运行风险评价 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2574–2584.
Xiao Y, Xu J. Risk assessment of battery safe operation in energy storage power station based on combination weighting and TOPSIS [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2574–2584.

[73] 周喜超, 王楠, 徐街明, 等. 磷酸铁锂电池管理技术及安全防护技术研究现状 [J]. 热力发电, 2021, 50(6): 9–17.
Zhou X C, Wang N, Xu J M, et al. Research status of management technology and safety protection technology of lithium iron phosphate battery [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 9–17.

[74] 曹文炅, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539–1547.
Cao W J, Lei B, Shi Y J, et al. Ponderation over the recent safety accidents of lithium-ion battery energy storage stations in South Korea [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539–1547.

[75] Ditch B, Vries J D. Flammability characterization of lithium-ion batteries in bulk storage [EB/OL]. (2014-05-22)[2022-12-15]. https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Proceedings/High-Challenge-Storage-Protection/Ditch.ashx.

[76] Wang Q S, Li K, Wang Y, et al. The efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing the lithium-ion battery fire [J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2018, 15(4): 4039418.

[77] Wang Q S, Shao G Z, Duan Q L, et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppressing the lithium titanate battery fire [J]. Fire Technology, 2016, 52: 387–396.

[78] Meng X D, Yang K, Zhang M J, et al. Experimental study on combustion behavior and fire extinguishing of lithium iron phosphate battery [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30(8): 101532.

[79] Xu J J, Guo P Y, Duan Q L, et al. Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115076.

[80] Petra M A, Evegren F, Jandali M, et al. Max rosengren lion fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea [J]. Safety and Transport Safety, 2018 (6): 88–91.

[81] 秦博宇, 李恒毅, 张哲, 等. 地下空间支撑下的电力能源系统: 构想、挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1321–1332.
Qin B Y, Li H Y, Zhang Z, et al. Underground space supported electric energy systems: Conceptions, challenges, and prospects [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1321–1332.