

团体标准

T/ITS XXXX-XXXX

智能网联道路交通系统电力应急弹性资源 配置技术指南

Guidelines for Electrical Emergency Resilient Resource Allocation Technology in
Intelligent and Connected Road Traffic Systems

(征求意见稿)

本稿完成日期：2026年04月15日

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国智能交通产业联盟 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	4
4 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置流程	4
4.1 一般规定	4
4.2 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置流程要求	5
5 智能网联设备供电优先级划分方法	5
5.1 一般规定	5
5.2 智能网联道路交通系统负荷分级方法	5
5.3 其他要求	6
6 智能网联道路交通系统应急场景集构建要求	6
6.1 一般规定	6
6.2 电力应急弹性资源配置场景集构建要求	6
7 电力应急弹性资源配置要求	6
7.1 一般规定	6
7.2 电力应急弹性资源	7
7.3 电力应急弹性资源配置原则	7
7.4 最优配置方案确定	8
8 电力应急资源配置方案评估方法	8
8.1 一般规定	8
8.2 供电系统 MTBF 评估方法	9
8.3 能量路由器应急性能指标评估	11
附 录 A（资料性附录）智能网联设备供电优先级划分示例	12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智能交通产业联盟提出、归口、解释并实施。

本文件起草单位：西安交通大学、中交投资有限公司、上海同陆云交通科技有限公司、苏州同智瑞达交通科技有限公司、同济大学、中交京津冀投资发展有限公司、长安大学。

本文件主要起草人：陈晨、朱晓东、刘成龙、徐子雯、沈文韬、赖德翔、马峰、王汉卿、张子健。

中国智能交通产业联盟

引 言

本文件的编制贯彻执行国家和交通运输部有关技术政策，坚持技术创新与标准引领相结合，通过深入挖掘智能网联道路交通系统电力应急需求，规范智能网联背景下电力弹性资源配置，实现智能网联道路交通系统安全运行与绿色发展。编制过程中注重吸纳先进技术成果，保障系统运行稳定性和应急响应能力，提高系统弹性，为构建安全、可靠、环保、高效的智能网联道路交通系统提供技术支撑。

本文件在制定过程中遵循以下原则：注重条文的技术先进性、合理性和可操作性，强调对电力应急弹性资源配置流程、场景构建、配置方法和评估方法的规范化要求；借鉴国内外相关技术标准和研究成果；与相关标准、规范、规程协调配套。

中国智能交通产业联盟

智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置技术指南

1 范围

本文件规定了智能网联道路交通系统中智能网联设备供电优先级确定方法，以及电力应急弹性资源在智能网联道路交通系统中的配置原则、配置方法和评估方法。

本文件适用于接入智能网联道路交通系统的电力应急弹性资源的规划配置。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 28045-2011 道路车辆 42V 供电电压的电气和电子设备 电气负荷
- GB/T 29328-2018 重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范
- GB/T 43758.1-2024 智能网联汽车运行安全测试环境技术条件 第1部分：公共道路
- GB/T 43758.2-2024 智能网联汽车运行安全测试环境技术条件 第2部分：半开放道路
- GB/T 44373-2024 智能网联汽车 术语和定义
- GB/T 44719-2024 智能网联汽车 自动驾驶功能道路试验方法及要求
- DL/T 1499-2016 电力应急术语
- GA/T 2099-2023 城市智能交通管理系统可靠性评价指标
- QB/T 4146-2010 风光互补供电的LED道路和街路照明装置
- DB4201/T 654-2022 智能网联道路建设规范（总则）

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 44373-2024与DL/T 1499-2016界定的术语和定义以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

智能网联道路交通系统 intelligent and connected road traffic systems

整合路侧感知、智能决策、自动管控功能，能与汽车进行信息交互，实现车-路-云协同控制，保障车辆安全高效通行的道路交通系统。

3.1.2

智能网联设备 intelligent connected devices

部署在道路环境中的智能化设备，包括路侧设备、摄像头、动态交通信息屏等，能够与车辆和云端系统实时交互，支持交通流量管理、环境监测和应急服务。

3.1.3

高影响低概率事件 high impact low probability events

罕见但一旦发生可能造成重大影响的电网扰动事件，具有发生地点、发生频率和故障模式难以预测的特点。

3.1.4

弹性 resilience

系统在受到扰动、故障或灾害影响时，维持关键功能、吸收冲击并在可接受时间内恢复到正常或可接受运行状态的能力。

3.1.5

电力应急弹性资源 electrical emergency resilient resource

在高影响低概率事件中为部分对电源稳定性要求较高的设备提供不间断的电力支持的电源设备设施，为除自备电厂外的所有自备应急电源，包含发动机驱动发电机组，储能电池组，移动发电设备以及其他新型电源装置。

[来源：GB/T 29328-2018，有修改]

3.1.6

能量路由器 energy router

适配智能网联道路交通系统能源需求的可选能量集成与调控装置，可对路域内高熵能源捕获装置、光伏、储能等分布式能源的输出电能进行变换、分配、调度，连接源、网、荷、储并灵活对接设备负载与外部电网。具备识别故障与响应能力，能通过快速切换运行模式、隔离故障能源端口、重构微网拓扑，实现应急场景下能源资源的弹性调配与供电网络的连通，具备高效灵活的供能保障能力。

3.1.7

应急电力需求 emergency electrical demand

智能网联道路交通系统在灾害或突发事件中，确保关键负荷正常运行所需要的最小电力供应量。

3.1.8

平均无故障时间 mean time between failures

衡量系统可靠性的指标，指智能网联道路交通系统相邻两次无法维持基本工作状态之间的平均工作时间。

3.1.9

路侧单元 roadside units

部署在道路沿线的通信和计算设施，为智能网联交通系统的重要组成部分，通过与车辆、交通信号灯、监控摄像头等设备进行信息交互，实现交通数据的采集、处理和分发功能。

3.1.10

动态交通信息屏 dynamic traffic information display board

用于显示动态道路交通信息的电子设备，包括限速指令、道路拥堵状态、应急信息等，能为驾驶员提供实时指引。

3.1.11

交通信号控制系统 traffic signal control system

调节路口交通流量的智能化设备，通过调整信号灯周期和配时方案，优化车辆通行效率，减少拥堵和冲突。

3.1.12

边缘计算设备 edge computing device

在靠近数据源的地方进行实时数据处理和分析的计算设备，用于减少延迟、提升系统响应速度，支持高频率交通数据的快速处理和应用。

3.1.13

5G基站 5G base station

提供第五代移动通信服务的基础设施，为车辆与基础设施之间的数据交换提供高速率和低延时支持，是车联网通信的重要保障。

3.1.14

RTK基站 real-time kinematic base station

提供高精度定位服务的基站设备，通过差分技术实现厘米级定位精度，支持自动驾驶和导航应用。

3.1.15

激光雷达 light detection and ranging

通过激光发射和回波接收生成高精度的三维点云数据，用于环境感知、障碍物检测和车辆导航。

3.1.16

毫米波雷达 millimeter-wave radar

使用毫米波信号检测物体位置、速度和距离，适用于全天候的环境感知，是智能网联系统的关键传感设备之一。

3.1.17

气象站 weather station

用于实时监测道路环境的气象条件（如风速、湿度、降雨量），为驾驶决策和交通管理提供必要的气象数据支持。

3.1.18

路侧广播 roadside broadcasting system

提供语音信息播报的系统，用于紧急情况下向驾驶员发布警示和引导信息。

3.1.19

车辆充电桩 vehicle charging pile

为电动汽车提供充电服务的设备。

3.1.20

车路协同 vehicle to infrastructure

车辆与路侧基础设施（如路侧单元、交通信号灯）的信息交互方式，支持实时交通数据共享和协调，增强驾驶安全和交通管理效率。

3.1.21

储能电池组 battery energy storage system

能量存储装置，能够在短时间内为设备提供应急供电。包含不间断电源（uninterruptible power supply）、应急电源（emergency power supply）、蓄电池以及超级电容。

3.1.22

移动发电车 mobile power generator vehicle

安装了发电设备的移动车辆，用于大范围或特殊场景下的电力应急支持，机动性强，适合系统级故障中的临时部署。

3.1.23

移动储能 mobile energy storage system

一种可移动的储能装置，集成了高效储能电池、能量管理系统和便携式连接接口，可在多种应急场景中提供灵活的电力支持。

3.1.24

分布式能源 distributed energy resources

部署于道路周边的分散式电力生产和存储设备，如太阳能板、风力发电机和储能装置，用于增强电力供应的灵活性和可靠性。

3.1.25

能量源故障识别响应准确率 accuracy of energy source fault identification and response

配备能量路由器的智能网联道路供电系统中，在出现典型故障或异常工况类型后，能量路由器能够检测并做出正确响应动作的比率。

3.1.26

能量源恢复接入时间 energy source recovery and connection time

配备能量路由器的智能网联道路供电系统中，能量路由器从收到恢复接入控制指令开始，到能量源重新接入网络并开始注入功率为止的时间。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

MTBF: 平均无故障时间 (Mean Time Between Failures)

RSU: 路侧单元 (Roadside Unit)

RTK: 实时动态测量 (Real-Time Kinematic)

4 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置流程

4.1 一般规定

4.1.1 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置是为了在发生电力中断或供电系统故障时，通过科学、高效的资源配置，最大限度保障智能网联道路交通系统的稳定运行和关键负荷的持续供电。

4.1.2 电力应急弹性资源配置方案应能够在不同应急场景下确保智能网联道路交通系统电力应急响应及时、有效。

4.1.3 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置应兼顾智能网联道路交通系统应急弹性需求和应急场景，统筹各类型电力应急弹性资源，结合智能网联道路交通系统建设条件和建设周期等因素确定。

4.1.4 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置实施与预期有较大差异或智能网联道路交通系统规划有重大调整时，应进行配置评估和滚动调整。

4.1.5 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置实施流程见图 1。

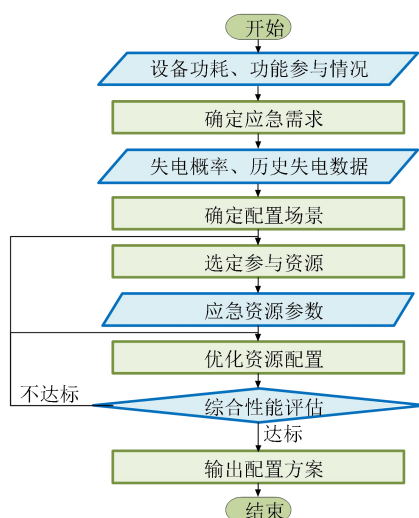


图 1 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置实施流程

4.2 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置流程要求

4.2.1 确定应急需求：对智能网联道路交通系统中设备供电优先级进行分级，根据优先级对智能网联设备负荷进行加权，确定智能网联道路交通系统的应急弹性电力需求。

4.2.2 确定配置场景：确定智能网联道路交通系统应急弹性电力需求后，应根据区域内智能网联道路交通系统用能负荷水平、供电系统结构、分布式电源、电力故障情况等综合因素，确定待配置区域的电力应急弹性资源配置场景集。

4.2.3 选定参与资源：应依据电力应急弹性资源配置场景集，为待配置智能网联道路交通系统选择合适的电力应急弹性资源组合。

4.2.4 优化资源配置：选定参与电力应急弹性资源的组合后，应结合对应资源的数学模型及相应的约束条件，根据电力应急弹性资源配置的需要选择优化目标，建立随机优化模型，求解得到最优电力应急弹性资源配置方案。

4.2.5 综合性能评估：应针对得到的电力应急弹性资源配置方案进行综合评估，从各方面评价系统性能，验证配置结果是否符合实际需求，若不符合需求应重新调整配置方案。若供电系统中配备能量路由器，还需对能量路由器应急性能进行评估。

5 智能网联设备供电优先级划分方法

5.1 一般规定

5.1.1 智能网联设备部署应根据道路场景确定。参考 GB/T 44719-2024 中的道路类型划分，I型道路环境为高速公路以及快速路路况下的道路环境，II型道路环境为城市主干路、城市次干路以及城市支路路况下的道路环境，III型道路环境为除I型道路环境以及II型道路环境外的其他路况下道路环境。

5.1.2 智能网联设备的供电优先级应基于对应道路场景下设备的重要性指数和功能参与度确定，综合考虑设备对行车安全、行车效率及行车体验的影响，优先保障重要度较高的智能网联功能。

5.2 智能网联道路交通系统负荷分级方法

5.2.1 智能网联设备应分为四个等级，分别为关键设备、重要设备、次要设备和普通设备：

a) 对交通安全及智能网联道路交通系统核心功能具有直接和重要影响的设备应为关键设备，这类设备与交通安全关系密切，且广泛参与智能网联道路交通系统关键功能，在应急情况下需优先保障其供电需求。

b) 重要设备应为对智能网联道路交通系统运行效率和用户服务体验有重要支撑作用的设备，其供电优先级次于关键设备。

c) 对系统运行有辅助作用，但在应急场景中优先级较低的设备为次要设备。

d) 关键设备、重要设备、次要设备之外为普通设备。

5.2.2 对某一智能网联道路交通系统中智能网联设备负荷进行分级时，应遵循如下一般流程：

a) 分析设备所实现的功能（如合流区碰撞预警、匝道车辆汇入引导等，I型道路环境推荐功能分类见附录 A.1）。

b) 对智能网联道路各项功能在行车安全、行车效率、行车体验三个指标上的表现进行打分（I型道路环境推荐功能评级见附录 A.2）。为进行加权计算，可将“优秀、良好、中等、一般、较差”分别赋值为 5、4、3、2、1。各指标定义如下：

- 1) 行车安全：功能对交通安全的直接影响程度（如减少事故风险、提高驾驶安全性）；
- 2) 行车效率：功能对道路通行能力和交通流畅性的支持作用（如优化车辆速度、缓解拥堵）；
- 3) 行车体验：功能对驾驶员舒适性和信息获取便利性的提升程度。

- c) 对各功能评分按权重加权计算得到综合评分。对于I型道路，建议以行车安全 50%、行车效率 30%、行车体验 20%为基准设置权重，可根据具体道路场景对上述权重进行适当修正；将归一化后的综合评分作为该功能的重要性指数。
- d) 统计待分级设备在各项功能中的参与情况，将该设备参与功能的重要性指数求和，得到设备总重要性。对总重要性进行归一化处理，得到设备重要性指数。
- e) 根据各智能网联设备的重要性指数，可采用凝聚层次聚类等方法进行聚类分析，划分智能网联设备等级（I型道路环境建议智能网联设备等级划分情况见附录 A.3）。所采用方法应满足分类结果稳定、类别数量可解释，并应输出设备等级划分依据。

5.3 其他要求

5.3.1 智能网联道路交通系统中关键设备应包含 GB/T 44719-2024 中每种类型的道路环境中规定的设备，即应包含维持智能网联道路交通系统基本功能的设备。

5.3.2 智能网联道路交通系统中的关键设备、重要设备应满足 GB/T 43758.1-2024、GB/T 43758.2-2024、DB4201/T 654-2022 的相关设备要求。

6 智能网联道路交通系统应急场景集构建要求

6.1 一般规定

6.1.1 应建立待配置智能网联道路交通系统的电力应急弹性资源配置场景集，以反映待配置区域内可能发生的典型电力故障，为电力应急弹性资源的配置提供基础。

6.1.2 本文件考虑的场景，仅包括因供电中断导致智能网联道路交通系统功能失效、且在恢复供电后系统功能可恢复的情形，不包括因智能网联设备自身故障导致的系统运行异常。

6.2 电力应急弹性资源配置场景集构建要求

6.2.1 待配置智能网联道路交通系统的电力应急弹性资源配置场景集应满足如下原则：

- a) 一个电力应急弹性资源配置场景集应由多个电力应急弹性资源配置场景组成。
- b) 电力应急弹性资源配置场景反映智能网联道路交通系统可能出现的某一电力故障情况。
- c) 电力应急弹性资源配置场景集应包含待配置区域的所有典型电力故障情况，确保待配置智能网联道路交通系统在不同的电力故障下，电力应急资源配置均有效可行，能够保障系统稳定运行。
- d) 在保证典型故障覆盖性和场景代表性的前提下，宜尽量减少场景数量，以降低计算量。

6.2.2 电力应急弹性资源配置场景集应按照以下方式确定：

- a) 场景集中的应急场景宜基于待配置智能网联道路交通系统所在区域智能网联设备的历史失电情况确定，也可通过蒙特卡洛法等模拟方法对智能网联设备进行极端场景运行模拟获得。
- b) 应对待配置区域的所有应急场景进行分析，通过场景聚类与削减，得到具有代表性的应急场景作为典型场景，加入电力应急弹性资源配置场景集。

7 电力应急弹性资源配置要求

7.1 一般规定

7.1.1 智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置时，应根据应急场景选择合适的电力应急弹性资源，以保证智能网联道路交通系统的应急弹性。若供电系统中配有能量路由器，需考虑其对分布式电源的接入容量、控制响应速度及协同调控能力。

7.1.2 弹性资源容量、位置等具体配置方案应根据应急场景集中的各应急场景及其权重建立优化模型求解确定，使最终配置方案达到优化目标的期望最优。

7.2 电力应急弹性资源

7.2.1 电力应急弹性资源应包括 GB/T 29328-2018 规定的除自备电厂外的自备应急电源。

7.2.2 电力应急弹性资源应分为固定资源和移动资源。宜使用固定资源进行长期部署，并结合移动资源动态调配。若供电系统配置能量路由器，可将两类资源统一接入能量路由器实现集中管控。

7.2.3 固定资源应依据长期智能网联道路交通系统电力应急弹性需求进行规划，确保在不同高影响低概率事件中具备充足应急电源储备，应部署在智能网联道路交通系统中关键位置，在高影响低概率事件发生时接入，为系统提供有效电力支撑。可按照以下方式部署：

- a) 不间断电源宜作为短时供电，部署至路侧设备等关键设备处，支持局部设备运行。
- b) 储能电池组应作为中短期电力支持，部署至 5G 基站等关键且功率较大的智能网联设备处，用于高负荷智能网联设备的连续供电。
- c) 分布式能源（光伏、风能）宜作为长期备用供电，并在智能网联道路交通系统所在区域内组网形成局部微电网，在电网供电较弱或电网供电失效时为智能网联道路交通系统供电。若供电系统配有能量路由器，可通过能量路由器实现多能源的协同调控。
- d) 宜使用备用柴油发电机等大型发电机进行大功率长期供电，并部署于重要交通枢纽等连接智能网联设备较多的电力节点。

7.2.4 移动资源应根据智能网联道路交通系统所在区域、供电恢复需求及设备供电优先级进行规划，应优先部署在交通枢纽处，确保能够在高影响低概率事件发生时能快速抵达电力故障位置，为智能网联设备提供电力支撑。若系统中配有能量路由器，则一并接入能量路由器进行协同调控。可按照以下方式部署：

- a) 移动发电车应部署于高速公路服务区、城市道路交通枢纽等交通网核心位置，提供高功率机动供电，在出现区域性大规模断电时为智能网联道路交通系统大面积持续供电。
- b) 移动储能系统应部署于智能网联道路交通系统重要路段，在高影响低概率事件发生时为路段提供短期灵活供电，局部恢复智能网联设备，维持智能网联道路交通系统运行。
- c) 面向单点关键负荷的小型移动式发电机可就近部署。

7.3 电力应急弹性资源配置原则

7.3.1 电力应急弹性资源的配置应依据应急弹性需求与应急场景，综合考虑各类电力应急弹性资源在启动时间、切换方式、容量大小、持续供电时间、电能质量、节能环保、适用场所等方面的技术性能，合理选取电力应急弹性资源。若供电系统中配有能量路由器，还需同步考虑其作为核心协同调度元件的接入能力限制。

7.3.2 应综合利用多种能源，确保资源分配灵活，适应性强，能够保障关键负荷设备连续运行，同时覆盖重要和普通设备的逐步恢复需求。要求如下：

- a) 对于关键设备，应提供优先保障。所有关键设备（如路侧单元、RTK 基站）均应接入不间断电源，并配置小型储能电池组，为关键设备提供过渡性电力支持。若条件允许，可配置便携式发电机作为补充。
- b) 应在智能网联道路交通系统中智能网联设备集中位置（如道路交汇路口、隧道口等）部署柴油发电机，当用电需求较高且 a) 中所述资源无法满足供电需求时，启动柴油发电机进行电力支撑。
- c) 应在智能网联道路交通系统中配备移动电力应急弹性资源，当电力故障持续时间较长时，调度移动发电车、移动储能为设备提供持续供电。
- d) 可在智能网联道路交通系统中部署风力、光伏、储能等分布式能源系统，在高影响低概率事件中实现路段智能网联设备能源自给，并可通过能量路由器实现分布式能源的高效协同与调度。

7.3.3 在单车道、桥梁隧道等道路条件较差的智能网联道路交通系统所在路段，应以固定电力应急弹性资源为主进行部署。在道路条件较好的路段，宜适当增加移动资源部署，降低电力应急弹性资源部署成本。

7.3.4 电力应急弹性资源选型应符合 QB/T 4146-2010、GB/T 28045-2011、GB/T 29328-2018 的相关规定。

7.3.5 智能网联道路交通系统中配置的固定资源需满足绝大多数应急场景中智能网联设备的弹性需求。固定资源配置容量应按照如下方法确定：

a) 根据待配置智能网联道路交通系统路段的历史用电数据，包括每日、月或每年的负荷曲线，以及峰值负荷数据，确定待配置路段应急弹性需求与应急场景集。

b) 根据路段应急场景确定电力应急弹性资源类型及选址。

c) 根据应急弹性需求、智能网联设备运行特性、电力应急弹性资源容量限制、运行特性、电力传输特性、供电系统结构等因素确定固定资源容量。

d) 配置的固定资源容量应确保在应急场景集范围内，以电力供应期望中断时长最短为目标，并以投资和运营成本不超过项目设定限值或相关标准规定限值为约束。

7.3.6 应综合道路连续性、设备分布密度、供电边界及交通可达性等因素，将系统划分为多个路段，根据路段内总应急需求为路段配置移动资源。移动资源部署时需满足以下要求：

a) 除面向单点关键负荷的小型移动式发电机外，移动资源宜优先部署在交通枢纽处，确保其能够根据场景中突发事件的发生位置、严重程度以及所需负荷实现快速调配。

b) 应考虑应急弹性需求、智能网联设备运行特性、移动资源容量限制、调度时间限制等因素部署移动资源。

c) 部署的移动资源应能够确保在发生高影响低概率事件时，关键设备的供电不被中断；能够尽快恢复电力供应，减少系统停运时间；同时尽量降低调度和运输成本。

7.4 最优配置方案确定

7.4.1 最优配置方案应根据 7.3 中电力应急弹性资源选择结果与应急场景集，结合电力应急弹性资源运行模型与智能网联道路交通系统供电模型确定；若供电系统配有能量路由器，需同步考虑其协同调控能力约束。

7.4.2 最优配置方案应使系统经济性指标或可靠性指标在应急场景集上达到期望最优值。

8 电力应急资源配置方案评估方法

8.1 一般规定

8.1.1 电力应急资源配置评估应衡量电力资源分配的科学性、合理性和执行效果，提高电力应急资源的利用效率。供电系统平均无故障时间（MTBF）用于衡量智能网联道路交通系统在电力应急弹性资源配置条件下的运行可靠性。

8.1.2 电力应急资源配置评估目的为验证电力应急资源配置方案的可靠性，通过时序蒙特卡洛仿真法模拟电力故障发生、资源调度的全流程，以系统首次关键设备失电时间作为系统无故障运行时间指标，进而统计 MTBF 及其置信区间。

8.1.3 电力应急资源配置评估中仅考虑由于关键设备失电造成的系统失效，包含市电中断导致的失电以及自然灾害导致的多电力线路、电力节点同时故障，不考虑智能网联设备本身故障。智能网联道路交通系统设备级可靠性评估可参考 GA/T 2099-2023。

8.1.4 电力应急资源配置评估流程分为建模→参数化→仿真运行→结果分析→优化迭代五个阶段，其

中仿真运行阶段需嵌入应急资源调度策略模型求解过程。若配有能量路由器，还需嵌入能量路由器动作执行逻辑。

8.1.5 若 MTBF 未达到目标值，应复核场景集代表性及资源配置方案，并对资源配置方案进行优化调整；必要时修正场景权重的确定依据。

8.2 供电系统 MTBF 评估方法

8.2.1 系统建模与参数定义

a) 建立智能网联道路交通系统电力供电拓扑模型，应包括市电接入点、分布式电源、储能装置、移动电源及关键负荷节点。设系统包含 M 个电力元件，其故障行为服从给定概率分布函数。

b) 参数输入包含：

- 1) 应急资源参数：包含燃料储备量、电池容量、储能电池容量衰减率等；
- 2) 环境风险参数：包含元件电力故障概率、市电中断概率等，应根据灾害场景经验故障率分布函数与概率密度确定。

c) 对于配有能量路由器的供电系统，还需输入能量路由器应急性能参数，其中，故障识别响应准确率 A 按 8.3.2 测试值输入；能量源恢复接入时间 t_A 的统计参数 μ_A 和 σ_A 按 8.3.3 的多次测试结果统计得到。

8.2.2 对系统中每个电力元件 i ，根据输入的元件可靠性数据及分布生成各元件正常运行时间，生成方法如下：

a) 生成均匀分布随机数： $U_i \sim \text{Uniform}(0,1)$ ；

b) 通过逆累积分布函数 $F_i^{-1}(U_i)$ 得到故障时间 $t_i = F_i^{-1}(U_i)$ ，其中 F_i^{-1} 为元件 i 的故障概率累积分布函数 F_i 的逆函数；

c) 若首次故障非电力故障（如智能网联设备硬件故障），则本次实验无效，应重新生成场景。

8.2.3 应以应急资源（例如移动发电车、储能等）的调度路径与投入时序等为决策变量，根据应急资源运行模型与应急资源配置结果建立智能网联道路交通系统应急资源调度策略模型：

a) 目标函数可为以下或其组合：

- 1) 最小化关键设备失电时间；
- 2) 最小化应急资源调度成本。

b) 约束条件包括：

- 1) 储能容量约束；
- 2) 移动资源调度时间约束；
- 3) 负荷供电约束；
- 4) 网络拓扑约束。

c) 若系统配置能量路由器，则需考虑其如下行为：

- 1) 能量路由器故障识别响应；
- 2) 能量源切换动作；
- 3) 微网拓扑重构；
- 4) 能量路由器端口功率限制。

d) 恢复完成后，系统进入正常运行或局部恢复状态。

8.2.4 若配有能量路由器，则按照如下方法嵌入能量路由器动作逻辑：

a) 出现电力故障后，对每个元件相连的能量路由器模拟故障识别响应。生成均匀随机数 $U_A \sim \text{Uniform}(0,1)$ ，若 $U_A \leq A/100$ ，判定识别响应成功；若 $U_A > A/100$ ，判定能量路由器未能正确识别响应故障，电力故障无法正常切除，与该能量路由器相连的设备立即失电。

b) 求解电力应急资源调度策略模型，输出能量路由器动作方案后，模拟能量路由器恢复接入。按照正态分布生成能量源恢复接入时间 $t_A \sim N(\mu_A, \sigma_A^2)$ ，其中 μ_A 为实测平均恢复时间， σ_A 为实测标准差。恢复接入时间应取非负值。设能量源允许接入时限为 $T_{A,lim}$ 。当 $t_A \leq T_{A,lim}$ 时，判定能量路由器完成能量源恢复接入，设备复电。当 $t_A > T_{A,lim}$ 时，判定能量路由器未能及时恢复能量源接入，与能量路由器相连的智能网联设备保持失电。

8.2.5 初始化故障次数 $K=0$ ，第 k 次仿真流程见图 2，展开如下：

- a) 初始化系统状态，令 $t_k = 0$ 。
- b) 生成各元件正常运行时间 t_i ，确定首次故障元件集及首次故障时间 $t_k = t_k + \min(t_i)$ 。
- c) 判断是否影响关键设备供电：
 - 1) 若否，继续仿真，执行 b)；
 - 2) 若是，进入应急调度，执行 d)。
- d) 结合能量路由器（若有）求解应急资源调度模型，执行恢复过程。
- e) 检验失电设备中是否存在关键设备：
 - 1) 若无，继续仿真，执行 b)；
 - 2) 若有，令故障次数 $K = K + 1$ ，记录当前时间 t_k 为第 k 次仿真中系统首次关键设备失电时间，即本轮实验无故障时长 $t_k^f = t_k$ ，结束本次仿真。
- f) 判断当前时间 t_k 是否达到设定最大时间（可设为 10000h），如果达到，则结束本次仿真，该次仿真记为无故障。

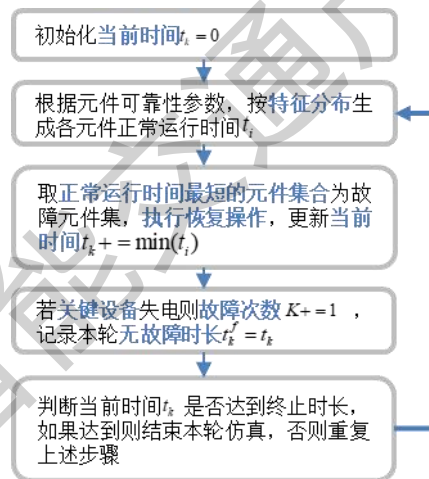


图 2 智能网联道路交通系统单次电力故障与恢复模拟流程

8.2.6 按照 8.2.5 进行多次实验，统计每次实验中无故障运行间隔时长 t_k^f （即第 k 次仿真中系统首次关键设备失电时间）。仅对发生关键设备失电的有效仿真样本统计 MTBF、样本标准差及置信区间。平均无故障时间 MTBF、样本标准差 S 及其 95%置信区间 CI 按式(1)-(3)计算：

$$MTBF = \bar{t}^f = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K t_k^f \dots\dots\dots (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (t_k^f - \bar{t}^f)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$CI = [\bar{t}^f - t_{0.025, K-1} \frac{S}{\sqrt{K}}, \bar{t}^f + t_{0.025, K-1} \frac{S}{\sqrt{K}}] \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- \bar{t}^f ——无故障时间样本均值；
- K ——蒙特卡洛仿真中出现故障（关键设备失电）的总次数；
- t_k^f ——第 k 次仿真中系统首次关键设备失电时间；
- S ——无故障时间样本标准差；
- CI ——MTBF 的 95%置信区间；
- $t_{0.025, K-1}$ ——自由度为 $K-1$ 的 t 分布双侧 95%置信区间临界值（查表确定）。

8.3 能量路由器应急性能指标评估

8.3.1 对于配置能量路由器的智能网联道路交通系统，还应评估能量源故障识别响应准确率与能量源恢复接入时间这两个关键指标。

8.3.2 能量源故障识别响应准确率是能量路由器在检测到智能网联供电系统典型故障或异常工况后，正确识别并做出正确响应动作的比率。测试方法如下：

a) 测试准备：

- 1) 模拟智能网联供电系统中能量源的典型故障/异常工况（如单相短路、断线、过压/过流、负荷冲击等），构建不少于 N 个测试场景（ $N \geq 30$ ）；
- 2) 预先制定每类故障场景对应的“标准响应动作库”，作为判断响应动作是否正确的基准。

b) 测试过程：

- 1) 通过试验平台向能量路由器输入故障/异常工况信号，记录能量路由器的故障识别结果及响应动作；
- 2) 对比“能量路由器识别结果+响应动作”与“标准响应动作库”，若故障类型识别结果与实际故障一致、响应动作符合标准库要求、且响应动作执行后，系统未出现次生故障，则判定为正确响应。

c) 计算方式：统计做出正确响应动作的场景数 k ，故障识别响应准确率 A 按式(4)计算：

$$A = \frac{k}{N} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- A ——能量路由器能量源故障识别响应准确率；
- k ——做出正确响应动作的场景数；
- N ——总测试场景数。

8.3.3 能量源恢复接入时间为能量路由器从收到恢复接入控制指令到能量源重新接入网络并开始注入功率的时间。能量源恢复接入时间测试方法如下：

a) 测试准备：搭建包含能量路由器、光伏、微网以及负载的试验系统，预先触发目标能量源故障（如断开光伏与能量路由器的连接），待系统稳定处于“故障隔离状态”后，再启动恢复接入测试。

b) 测试过程：记录能量路由器收到恢复接入控制指令的时间 t_1 ，以及能量源接入供电网络并开始输出功率的时间 t_2 ，时间记录精度需 $\leq 1\text{ms}$ 。按式(5)计算恢复接入时间 t_A 。

$$t_A = t_2 - t_1 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- t_A ——能量路由器能量源恢复接入时间；
- t_1 ——能量路由器收到恢复接入控制指令的时间；
- t_2 ——能量源接入供电网络并开始输出功率的时间。

c) 计算要求：宜进行不少于 30 次测试，并统计恢复接入时间的平均值 μ_A 和标准差 σ_A ，作为 8.2 评估输入参数。

附录 A

(资料性附录)

智能网联设备供电优先级划分示例

A.1 智能网联道路各功能所需设备表格

表 1 智能网联道路各功能所需设备

功能	功能分析	
	功能分类	使用设备
合流区碰撞预警	安全类	感知模块（毫米波雷达、摄像头）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（边缘计算设备、可变信息标志）
匝道车辆汇入引导		感知模块（毫米波雷达、摄像头）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（边缘计算设备）
前方交通事件预警		感知模块（摄像头）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变信息标志）
交通事件分级诱导		定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（边缘计算设备、可变信息标志）
路面状态预警		感知模块（摄像头、激光雷达）、定位模块（RTK基站）、引导模块（可变信息标志）、通信模块（路侧RSU、5G基站）
不良视距预警		感知模块（摄像头、激光雷达、毫米波雷达、气象站）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（边缘计算设备）
危险车辆预警		感知模块（激光雷达、毫米波雷达）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变信息标志、边缘计算设备）
拥堵提醒	效率类	感知模块（摄像头）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变信息标志）
主线动态限速		定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变限速标志）
柔性专用车道管控		定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变信息标志）
协作式车队管理		定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（边缘计算设备）
信息服务公告	信息服务类	通信模块（路侧RSU、5G基站）
停车区车位信息		通信模块（路侧RSU、5G基站）
气象信息服务		感知模块（气象站）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）
危险路段提示		感知模块（摄像头）、定位模块（RTK基站）、通信模块（路侧RSU、5G基站）、引导模块（可变信息标志、路侧广播）

A.2 智能网联道路功能建议评级表

表2 智能网联道路功能建议评级表

功能	指标评分		
	行车安全	行车效率	行车体验
合流区碰撞预警	优秀	良好	一般
匝道车辆汇入引导	良好	优秀	一般
前方交通事件预警	优秀	良好	中等
交通事件分级诱导	良好	中等	一般
路面状态预警	优秀	一般	良好
不良视距预警	优秀	一般	良好
危险车辆预警	优秀	一般	中等
拥堵提醒	一般	优秀	良好
主线动态限速	中等	良好	一般
柔性专用车道管控	一般	良好	良好
协作式车队管理	一般	优秀	良好
信息服务公告	中等	一般	良好
停车区车位信息	较差	中等	良好
气象信息服务	良好	一般	良好
危险路段提示	良好	一般	中等

A.3 智能网联设备供电优先级建议划分示例

表3 部分智能网联设备供电优先级建议划分

设备名称	所属模块	设备等级
路侧 RSU	通信模块	关键设备
5G 基站	通信模块	
RTK 基站	定位模块	
可变信息标志	引导模块	重要设备
摄像头	感知模块	

表 3 部分智能网联设备供电优先级建议划分（续）

设备名称	所属模块	设备等级
边缘计算设备	引导模块	次要设备
毫米波雷达	感知模块	
激光雷达	感知模块	
路侧广播	引导模块	普通设备
气象站	感知模块	

中国智能交通产业联盟

T/ITS XXXX-XXXX

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟

标准

智能网联道路交通系统电力应急弹性资源配置技术指南

T/ITS XXXX-XXXX

北京市海淀区西土城路 8 号 (100088)

中国智能交通产业联盟印刷

网址: <http://www.c-its.org.cn>

XXXX 年 XX 月第一版 XXXX 年 XX 月第一次印刷