

团 体 标 准

T/ITS XXXX—XXXX

路域能源自洽系统与机电系统融合 技术指南

Guide on the Integration of Road - domain Energy Self - sufficient System and
Mechatronic Systems

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - 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 术语和定义	2
4 基本要求	4
5 系统构成及要求	4
5.1 系统构成	4
5.2 路域能源自治系统配置要求	4
5.3 路域机电系统配置及技术要求	5
5.4 能量路由器配置及技术要求	5
5.5 通信要求	6
5.6 设备集成要求	6
5.7 安全与冗余要求	6
6 系统性能要求	7
6.1 配电设备要求	7
6.2 路域能源设备要求	7
6.3 系统安全稳定要求	7
6.4 能源管理系统要求	8
7 系统接入要求	8
7.1 电源接入	8
7.2 负荷接入	8
7.3 能源自治系统与机电系统的接入	8
7.4 接口要求	9
7.5 交互要求	9
8 路域自治能源系统与机电系统融合要求	10
8.1 能源供需预测	10
8.2 能量管理要求	11
8.3 能源管理平台架构要求	11
8.4 数据交互要求	12
9 实施与验收要求	12
9.1 设计要求	12
9.2 建设要求	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：华北电力大学、蜀道清洁能源集团、四川路桥建设集团股份有限公司、同济大学、中交投资有限公司。

本文件主要起草人：范宇轩、姜之未、胡俊杰、孙周、黄海权、刘斌、王文浩。

中国智能交通产业联盟

引 言

本规程编制的指导思想：本规程的编制以国家“双碳”目标和《交通强国建设纲要》为指导，坚持技术创新与标准引领相结合，通过推动路域能源自洽系统与机电系统的深度融合，实现公路交通领域的节能减排和绿色发展。编制过程中注重吸纳先进技术成果，强化系统安全可靠，促进资源高效整合，并依托示范应用带动行业推广，为构建绿色低碳、安全高效的现代公路交通体系提供技术支撑。

本规程的编制原则：注重条文的技术先进性、合理性和可操作性，强调对施工关键工序和关键过程的控制；借鉴国外先进技术标准和成果；与相关的标准、规范、规程协调配套。

中国智能交通产业联盟

路域能源自洽系统与机电系统融合技术指南

1 范围

本文件规定了路域能源自洽系统与机电系统相融合的技术要求。通过总结路域能源自洽系统的成功应用经验，结合公路机电系统在节能方面的发展要求和能源自洽系统的最新技术进展，确定路域能源自洽系统与机电系统融合的体系框架、技术方案选择、接口规范和关键技术指标。

本文件适用于高速公路及一般省级道路场景，通过指导路域能源自洽系统与机电系统的融合设计，以实现公路领域能源流和资源配置的综合优化，促进能源自洽系统在公路领域的推广应用，实现节能减碳、提升能源利用效率的目标。

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 9535-1998 地面用晶体硅光伏组件 设计鉴定和定型
- GB/T 10760.1-2017 小型风力发电机组用发电机 第1部分：技术条件
- GB 14050-2008 系统接地的型式及安全技术要求
- GB/T 17626 电磁兼容（EMC）试验和测量技术
- GB/T 19068.1-2017 小型风力发电机组 第1部分：技术条件
- GB/T 19964-2021 光伏发电接入配电网技术规定
- GB/T 20321-2023 离网型风能、太阳能发电系统用逆变器
- GB/T 36274 微电网能源管理系统技术规范
- GB/T 36276 电力储能用锂离子电池
- GB/T 36547-2018 微电网接入配电网技术规定
- GB 38755 电力系统安全稳定导则
- 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 44719-2024 智能网联汽车自动驾驶功能道路试验方法及要求
- GB 50057-2022 建筑物防雷设计规范
- GB/T 50065-2011 交流电气装置的接地设计规范
- GB 50217-2018 电力工程电缆设计标准
- GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
- GB 50794 光伏发电站施工规范
- YD/T 3032-2016 中国通信行业标准
- YD/T 3568 通信基站基础设施技术要求
- IEC 61850-7-420 电力自动化通信协议

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

路域能源自洽系统 Road-Domain Energy Self-Sufficient System

以公路、城市道路及沿线基础设施为载体，深度融合能源生产、存储、传输、调控与消费环节，通过“交通流—能量流—信息流”三流协同与智能优化调度，实现能源就地生产、就近消纳、多能互补与供需动态平衡的一体化新型能源系统。

路域能源自洽系统是指以道路（如高速公路、城市道路）及沿线基础设施为载体，深度融合能源生产、存储、传输与消费环节，通过“交通流—能量流—信息流”三流协同与智能调控，实现能源供需动态平衡、多能互补与自给自足的新型能源系统。

3.2

路域机电系统 Roadside Electromechanical System

部署在道路沿线及附属设施内的电气与智能化设备总称，通常包括道路照明、交通监控、通信传输、通风排烟、供配电、交通信号、收费及自动驾驶路侧感知等子系统，用于保障道路安全、高效、智能化运行。

3.3

高熵能源 High-entropy Energy

来源于交通运行与环境耦合的多形态分布式能源，主要包括隧道活塞气流能、车辆振动能量、路面温差能、沿线风光能源等，具有随机性强、波动性大、时空分布不均、非线性特征显著的特点。

3.4

多微网集群 Multi-Microgrid System

由多个“风光储充”等独立微网单元，通过能量路由器、互联联络线及通信网络构成的集群系统，可实现微网间能量互济、功率互援与故障冗余，提升整体供电可靠性与能源利用率。

3.5

能量路由器 Energy Router

具备多电压等级接入、多方向能量管控的电力电子装置，集成AC/DC、DC/DC变流、功率调度、故障隔离与即插即用等功能，是实现多微网互联与能源协同调度的核心设备。

3.6

能源流优化 Energy Flow Optimization

基于源—网—荷—储运行状态，通过智能算法动态匹配能源供给与机电负荷需求，实现能源利用效率最大化、碳排放强度最小化及运行成本最优的调度控制过程。

3.7

静态稳定储备标准 Static stability reserve standard

电力系统在正常运行及常见扰动下，维持节点电压、系统频率稳定且不发生失步的最小安全裕度，其计算与考核应符合GB38755的相关规定。

3.8

动态无功调节设备 Dynamic reactive power adjustment equipment

能够快速响应系统电压波动，实时补偿无功功率的电力装置（如STATCOM、SVG等），用于平抑波动、维持电压稳定、提升系统抗扰动能力。

3.9

柔性直流配电 Flexible DC Distribution

采用模块化多电平换流器（MMC）等电力电子技术构建的直流配电系统，具备电压灵活调节、谐波抑制、双向功率控制及故障快速限流等特点，适用于路域分布式能源高密度接入场景。

3.10

能源管理系统 Energy management system

集成软硬件平台与智能应用的综合管控系统，实现对路域能源自洽系统的发电、储能、配电、用电及机电负荷的统一监测、优化调度、安全保护与经济运行管理。

[来源：GB/T36274-2018，3.2，有修改]

3.11

故障扰动耐受能力 Fault disturbance tolerance

系统或机电设备在遭遇短路故障、电压骤升/骤降、频率异常等电网扰动时，仍能维持连续运行或安全停机、不发生失控损坏的能力。

3.12

I/II/III类机电负荷 Class I/II/III Electromechanical Load

按照供电可靠性、中断允许程度及功能重要性划分的路域机电负荷。I类负荷为不可中断关键负荷；II类负荷为允许短时中断的重要负荷；III类负荷为可柔性调节的非关键负荷。

3.13

云—边—端协同架构 Cloud-Edge-Terminal Collaborative Architecture

由云端平台、边缘计算节点、现场终端设备构成的分层架构，实现数据采集、边缘预处理、远程优化决策与闭环控制，支撑能源与机电系统融合运行。

3.14

源网荷储协同 Source-Grid-Load-Storage Coordination

对分布式电源、配电网络、机电负荷及储能系统进行统一调度，实现功率实时平衡、负荷按需调控、储能充放优化的综合控制方式。

3.15

即插即用 Plug and Play (PnP)

分布式能源、储能、负荷等设备通过标准化接口与协议接入系统后，无需额外配置即可被平台自动识别、建模并参与协同调控的技术特性。

3.16

数据可追溯性 Data Traceability

系统运行、能源调度、设备状态及故障事件等数据在全生命周期内可查询、可核验、可溯源的特性，满足监管、运维与事故分析要求。

3.17

并网无缝切换 Seamless Grid-Connected/Islanding Switching

系统在并网运行与离网运行之间切换时，关键负荷供电不中断、电压与频率无剧烈波动，实现平滑过渡的控制能力。

4 基本要求

- 4.1 路域能源自洽系统应当依据公路沿线的能源资源、结合沿线用电负荷，科学规划自洽系统的各部分系统参数、配置、容量及选型。
- 4.2 路域能源自洽系统应提高调节能力，必要时应配置储能电站等灵活调节资源及调相机、静止同步补偿器、静止无功补偿器等动态无功调节设备。
- 4.3 路域能源自洽系统应具有与沿线机电系统各层级设备进行信息交互的功能，并宜具有与消防系统、通风等设备进行信息交互的功能。
- 4.4 路域能源自洽系统应接入机电系统的防雷系统，防雷装置应符合 GB 50057 的有关规定。
- 4.5 路域自洽系统接入机电系统后宜采用全路域直流供电，直流供电系统宜采用直流熔断器或直流断路器，其额定工作电压应与系统输出直流电压相适应。
- 4.6 全路域直流供电系统输出端到用电设备的受电端之间的配电环节不宜超过 3 级。

5 系统构成及要求

5.1 系统构成

- 5.1.1 路域能源自洽系统宜由分布式能源系统、储能系统、配电系统、公路场景用电负荷及能源管理系统等组成。
- 5.1.2 分布式能源系统由光伏发电组件、风力发电组件、逆变器和汇流箱等组成。
- 5.1.3 储能系统由蓄电池单元和并网配电单元组成。
- 5.1.4 公路场景用电负荷由服务设施和管理设施组成，服务设施包括服务区、停车区、客运汽车停靠站等，管理设施包括收费设施、监控设施、通信设施、照明设施、路域智能网联设备、隧道机电设备和办公生活设施等用电设备。
- 5.1.5 路域机电系统是由监控系统、收费系统、通信系统、供配电照明系统及隧道机电系统五大子系统构成的有机整体。

5.2 路域能源自洽系统配置及技术要求

- 5.2.1 光伏组件、风力发电机等分布式能源设备的安装应符合以下要求：
 - a) 光伏组件倾角设计需避免对驾驶员造成眩光（参考 GB 50794）。
 - b) 风力发电机距公路路肩水平距离 $\geq 20\text{m}$ ，垂直高度 $\geq 6\text{m}$ 。
- 5.2.2 逆变器的安装应符合以下要求：
 - a) 逆变器的额定功率、电压和频率需符合 GB/T 20321-2023 规定，输出频率偏差应控制在 $\pm 1\%$ 以内，稳态电压波动不超过 $\pm 3\%$ ，动态波动不超过 $\pm 8\%$ 。
 - b) 具备过压、欠压、过流、短路保护功能，防雷等级符合 GB/T 20321-2023 要求。
 - c) 外壳防护等级不低于 IP65，适应户外恶劣环境。
- 5.2.3 汇流箱的安装应符合以下要求：
 - a) 箱体需防水、防尘、防腐蚀，防护等级 $\geq \text{IP65}$ ；材质需耐候性强，表面无锈蚀或裂痕。
 - b) 支路熔断器耐压 $\geq \text{DC}1000\text{V}$ ，断路器需灵活可靠，投退操作顺序严格（如先合支路后合总输出）。
 - c) 工作温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ，湿热环境（95%湿度）下 48 小时无故障。

5.2.4 蓄电池单元应符合以下要求：

a) 中大型储能电站优先选用磷酸铁锂电池、液流电池等技术成熟且安全性高的电池类型，审慎选用梯次利用动力电池；若选用梯次电池，需进行全生命周期一致性筛选和安全评估，并符合 GB/T 36276 的有关要求。

b) 蓄电池设备间需配置可燃气体探测装置（如 H_2 、CO 浓度监测）、防爆通风系统及自动灭火装置（如七氟丙烷或全氟己酮），灭火系统需通过实体火灾模拟试验验证。

c) 根据负荷需求和无电网保障时间来确定电池容量。

5.2.5 并网配电单元应符合以下要求：

a) 储能项目需纳入省级能源发展规划或年度实施方案，并取得地方能源主管部门备案；未完成配储或租赁储能容量的新能源项目禁止并网。

b) 配电设备应通过 GB/T 17626 等系列标准的电磁兼容性测试，减少对电网的干扰。

c) 直流回路配置开断设备，电池模块端子需防反接；并网系统需设置防雷击、漏电保护装置，接地电阻 $\leq 0.02 \Omega$ 。

5.2.6 能源管理系统需支持“源-网-荷-储”一体化协同，实现风能、光伏、储能、备用电源等多能源互补运行，并通过分层控制策略（如集中式与分布式结合）优化能源调度，需适配离网型、并网型及混合型系统架构，灵活应对电网强弱或无电网场景。

5.3 路域机电系统配置及技术要求

5.3.1 路域能源机电系统的大负荷设备需满足：支持双路供电与智能调控（动态响应时间 $\leq 50ms$ ）；具备过载保护（短时 $\geq 120\%$ 额定功率）及温度实时监测；符合能效标准（转换效率 $\geq 95\%$ ）并预留容量冗余；采用模块化设计便于维护，同时满足防尘防水（IP54 以上）与阻燃防护要求。

5.3.2 配电装置中采用的熔断器、断路器额定电压应与直流系统标称电压相适应。

5.3.3 单极性直流系统中，直流断路器应同时切断回路正负极。

5.3.4 对于熔断器与非选择型之路断路器构成上、下级过负荷保护时，熔断器宜装在非选择型直流断路器的上一级，熔断器额定电流应不小于直流断路器长延时脱钩器的整定电流值的 1.3 倍。

5.3.5 对于直流配电系统中，直流母线排、电缆、电线正极宜采用棕色，负极宜采用蓝色。

5.3.6 线缆最大电压降宜为系统标称电压的 10%，允许最大电压降宜为标称电压的 20%。

5.3.7 公路服务区、监控大厅等场所宜选用无卤电缆或电线。

5.3.8 配电线路过电流保护应确保正、负极线路均设置保护器，上下级保护电器动作协调且分级配置（上级采用熔断器或直流断路器，末级必须采用直流断路器），以实现故障精准隔离和系统可靠运行。

5.3.9 供电系统裸母线应进行封闭处理，裸露的直流正负极带电金属部分应增加物理隔离措施或防潮防水措施。

5.3.10 对于中间接头的处理，应尽量避免，无法避免应尽量选择安装在室内容易检修的地方；室外设置中间街头时宜设置人孔井或手孔井，做好绝缘与防水防潮处理。

5.3.11 在公路上敷设线路时，应在科学经济比选后选择架空、直埋和穿管敷设方式。

5.4 能量路由器配置及技术要求

5.4.1 互济功能技术要求

a) 多能互补能力：支持风/光/储/网/荷五端能量交互，转换效率 $\geq 95\%$ （额定功率下）；

b) 动态功率分配：具备 $\pm 10\%$ 额定功率范围内的自适应调节能力，响应时间 $\leq 50ms$ ；

c) 孤岛互济模式：主网故障时，可切换至离网运行，实现本地能源与负荷的秒级自平衡。

5.4.2 协同控制要求

a) 通信协议：支持 Modbus TCP/IP、IEC 61850 等通用协议，确保与上级能源管理平台的数据互通；

b) 接口兼容性：直流侧电压范围兼容 400V~1500V，交流侧支持 380V/50Hz 及 480V/60Hz 双制式。

5.4.3 可靠性要求

a) 过载保护：短时过载能力 $\geq 120\%$ 额定功率（持续 10s），故障隔离时间 $\leq 100\text{ms}$ 。

b) 环境适应性：运行温度 $-25^{\circ}\text{C}+60^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\leq 95\%\text{RH}$ （无凝露）。

5.4.4 评价指标：能量路由器互济性能评价表基于功能（效率 $\geq 95\%$ ）、动态响应（时间 $\leq 50\text{ms}$ ）、安全隔离（故障处理 $\leq 100\text{ms}$ ）等核心指标划分等级（I 级、II 级），通过权重分配（功能 30%、动态 25%）量化设备综合能效与可靠性。

5.4.5 测试方法

a) 多能互补能力：通过仿真平台模拟光伏波动、负荷突变场景，记录能量路由器各端口功率实时分配数据

b) 动态响应时间：使用阶跃负载装置触发功率变化，采用示波器捕捉电压/电流波形。

5.5 通信要求

5.5.1 路域能源自洽系统应具有与沿线机电系统各层级设备进行信息交互的功能，并宜具有与消防系统、通风等设备进行信息交互的功能。

5.5.2 路域能源自洽系统与沿线机电系统可采用以太网通信接口,支持 Modbus，并符合 DL/T 634.5104、DL/T 860（所有部分）的有关规定，宜采用双网冗余通信。

5.5.3 路域能源自洽系统与消防、通风等设备可采用 RS-485、以太网等通信接口,支持 Modbus 通信协议。

5.6 设备集成要求

5.6.1 兼容性设计

能源自洽系统设备（如逆变器、储能单元）的输入/输出参数应与机电系统兼容，包括但不限于：

a) 电压等级偏差 $\leq \pm 10\%$ ；

b) 频率偏差 $\leq \pm 0.5\text{Hz}$ （交流系统）；

c) 通信协议支持 Modbus、MQTT，并符合 DL/T 860 的有关规定。

5.6.2 光伏组件、风力发电机等分布式能源设备的安装应符合以下要求：

a) 光伏组件倾角设计需避免对驾驶员造成眩光（参考 GB 50794）；

b) 风力发电机距公路路肩水平距离 $\geq 20\text{m}$ ，垂直高度 $\geq 6\text{m}$ ；

c) 储能电池舱与机电设备的安全间距 $\geq 1.5\text{m}$ ，并配置防火隔离措施。

5.6.3 电磁兼容性

设备需满足 GB/T 17626 系列标准要求，包括：

a) 射频电磁场抗扰度 $\geq 3\text{V/m}$ ；

b) 静电放电抗扰度 $\geq 4\text{kV}$ （接触放电）；

c) 快速瞬变脉冲群抗扰度 $\geq 2\text{kV}$ （电源端口）。

5.7 安全与冗余要求

5.7.1 安全要求

系统应具备以下防护能力：

a) 防雷接地电阻 应 $\leq 4\Omega$ ；

b) 电池舱配置可燃气体监测与自动灭火装置；

c) 网络安全三级等保要求应满足 GB/T 22239 的有关规定。

5.7.2 冗余设计

核心设备（能源管理系统、通信网关等）应满足：

- a) 采用双电源供电，主备电源切换时间 $\leq 20\text{ms}$ ；
- b) 控制指令通道冗余（如双网口、4G/光纤双链路）；
- c) 数据存储采用 RAID 1 或更高等级冗余架构。

6 系统性能要求

6.1 配电设备要求

6.1.1 配电装置是直流配电设备中的重要组成部分，其中安全保护装置尤为重要：

- a) 配电装置中采用的熔断器、断路器额定电压应与直流系统标称电压相适应；
- b) 单极性直流系统中，直流断路器应同时切断回路正负极；
- c) 对于熔断器与非选择型之路断路器构成上、下级过负荷保护时，熔断器宜装在非选择型直流断路器的上一级，熔断器额定电流应不小于直流断路器长延时脱钩器的整定电流值的1.3倍；
- d) 对于直流配电系统中，直流母线排、电缆、电线正极宜采用棕色，负极宜采用蓝色。

6.1.2 配电线路电缆设计应符合 GB 50217 的有关规定

- a) 线缆最大电压降宜为系统标称电压的 10%，允许最大电压降宜为标称电压的 20%；
- b) 公路服务区、监控大厅等场所宜选用无卤电缆或电线；
- c) 配电线路过电流保护应确保正、负极线路均设置保护器，上下级保护电器动作协调且分级配置（上级采用熔断器或直流断路器，末级必须采用直流断路器），以实现故障精准隔离和系统可靠运行；
- d) 供电系统裸母线应进行封闭处理，裸露的直流正负极带电金属部分应增加物理隔离措施或防潮防水措施；
- e) 对于中间接头的处理，应尽量避免，无法避免应尽量选择在室内容易检修的地方；室外设置中间街头时宜设置人孔井或手孔井，做好绝缘与防水防潮处理。

6.1.3 在公路上敷设线路时，应在科学经济比选后选择架空、直埋和穿管敷设方式。

6.2 路域能源设备要求

6.2.1 分布式能源设备

6.2.1.1 太阳能光伏组件：

- a) 光伏组件应符合 GB/T 9535 的有关要求
- b) 光电转换效率应不小于 14%；
- c) 应有旁路二极管。

6.2.1.2 风力发电机组：

- a) 发电机组应符合 GB/T 19068.1 的有关要求；
- b) 宜选用永磁式发电机，应符合 GB/T 10760.1 的有关要求；
- c) 额定风速：8m/s，也可根据当地风资源实测选取；
- d) 应有刹车保护系统。

6.2.1.3 蓄电池组件：

- a) 蓄电池组件的电性能、环境适应性、耐久性能、安全性能应满足 GB/T 36276 的有关规定；
- b) 蓄电池组件的系统防雷与接地应符合 GB 14050、GB 50057、GB/T 50065 的有关规定；

6.3 系统安全稳定要求

- 6.3.1 系统的静态稳定储备标准应满足 GB 38755 的有关规定。
- 6.3.2 系统承受大扰动能力的安全稳定标准应满足 GB 38755 的有关规定。
- 6.3.3 系统第三级安全稳定标准应满足 GB 38755 的有关规定。

6.4 能源管理系统要求

- 6.4.1 路域能源自洽系统的能源管理系统应按照发电类型、容量和运行特性制定发电管理方案,满足清洁、可靠、经济运行需求。
- 6.4.2 路域能源自洽系统内部存在多个可作为主电源运行的发电单元时,能源管理系统应根据电源状况和 经济性目标对各备用主电源运行模式进行设置。
- 6.4.3 能源管理系统应按照负荷等级和负荷类型制定负荷管理方案,满足相应等级负荷用电需求。
- 6.4.4 能源管理系统应根据微电网内功率预测数据、实时运行数据、电源与负荷特性及运行约束条件制定负荷用电计划,负荷用电计划宜包括日前用电计划和日内用电计划,可采用人工输入和自动生成两种方式制定。
- 6.4.5 日前用电计划宜制定次日零时起 24h~168h 的用电功率计划,时间间隔不大于 15min;日内用电计划宜滚动制定当前时刻至未来 4h 的用电功率计划,每 15min 滚动一次,时间间隔不大于 15min。
- 6.4.6 能源管理系统负荷管理性能指标应符合 GB/T 36274 的有关规定。
- 6.4.7 能源管理系统应具备电能量统计功能,宜具备各类型发电、负荷、储能运行数据统计功能及电能质量统计功能。
- 6.4.8 能源管理系统宜具备供电可靠性分析等功能。

7 系统接入要求

7.1 电源接入

- 7.1.1 根据路域自洽能源在沿线机电系统中的地位和作用,不同规模的自洽能源应分别接入相应的电压等级网络;在经济合理与建设条件可行的前提下,宜在受端系统内建设一定具有支撑和调节能力的主力电源。
- 7.1.2 路域自洽能源需经相对独立的送电回路接入受端系统,避免电源或送端系统之间的直接联络以及送电回路落点和配电线路过于集中。当电源或送端系统需要直接联络时,应进行必要的技术经济比较。每一组送电回路的最大输送功率所占受端系统总负荷的比例不应过大,具体比例应结合受端系统的具体条件来决定。

7.2 负荷接入

- 7.2.1 沿线负荷的谐波、冲击等特性对所接入电力系统电能质量和安全稳定的影响不应超过该系统的承受能力。
- 7.2.2 沿线负荷应具备一定的故障扰动耐受能力,在确保用电设备安全的前提下,应设置合理的负荷保护定值,在系统电压、频率波动时避免不必要的负荷损失和故障范围的扩大。
- 7.2.3 沿线可中断负荷及提供频率响应的负荷,宜优先列入保障电力系统安全稳定运行的负荷侧技术措施。沿线重要负荷(如隧道风机、服务区等)应优先确保其供电可靠性。

7.3 能源自洽系统与机电系统的接入

- 7.3.1 能源自洽系统与机电系统的接入应进行技术经济比较后选择采用交流或直流方式互联。
- 7.3.2 交流联络线的电压等级应与主网最高一级电压等级相一致。

- 7.3.3 在任一侧失去大电源或发生严重单一故障时，联络线应保持稳定运行，并不应超过事故过负荷能力。
- 7.3.4 在联络线因故障断开后，应保持各自系统的安全稳定运行。
- 7.3.5 系统间的交流联络线不应构成弱联系的大环网，应考虑其中一回断开时，其余联络线应保持稳定运行，并可转送规定的最大电力。
- 7.3.6 对交流弱联网方案，应详细研究对电力系统安全稳定的影响，经技术经济论证合理后方可采用。
- 7.3.7 采用直流输电时，直流输电的容量应与送受端系统的容量匹配，直流短路比（含多馈入直流短路比）应满足要求，并联交流通道应能够承担直流闭锁后的转移功率。

7.4 接口要求

7.4.1 物理接口

7.4.1.1 路域能源自洽系统与机电系统的电气连接接口应符合以下要求：

- a) 直流系统接口标称电压等级宜为 400V/750V/1500V，允许偏差±10%；
- b) 交流系统接口标称电压等级宜为 220V/380V，频率 50Hz，允许偏差±2%；
- c) 接口端子应具备防误插设计，连接器类型推荐采用工业级插接件。

7.4.1.2 机械接口：

- a) 设备安装接口尺寸及固定方式应符合 GB 50217 中电缆桥架与设备连接要求；
- b) 光伏支架与公路结构（如护栏、声屏障）的机械连接抗风压、抗震设计应满足 GB 50794 的有关规定。

7.4.1.3 防护等级要求：

- a) 室外设备接口防护等级不低于 IP65；
- b) 隧道、地下通道等潮湿环境接口防护等级不低于 IP67。

7.4.2 数据接口

7.4.2.1 通信协议：

能源自洽系统与机电系统间的数据交互应采用以下协议：

- a) 控制指令传输：DL/T 860（IEC 61850）或 Modbus-TCP；
- b) 实时监测数据传输：MQTT 或 DL/T 634.5104（IEC 60870-5-104）；
- c) 历史数据存储：支持 OPC UA 或 HTTP/JSON 格式。

7.4.2.2 接口安全：

- a) 数据接口应支持 TLS 1.2 及以上加密传输；
- b) 访问权限控制需符合 RBAC（基于角色的访问控制）模型。

7.5 交互要求

7.5.1 硬件设备交互

7.5.1.1 控制信号交互

机电系统可向能源自洽系统发送以下指令：

- a) 储能充/放电模式切换（如峰谷电价时段调度）；
- b) 紧急功率限制（如电网故障时降载运行）；
- c) 设备启停控制（如远程关闭非必要负荷）。

7.5.1.2 状态反馈

能源自洽系统需实时向机电系统反馈以下状态：

- a) 发电设备运行状态（在线/离线/故障）；
- b) 储能系统充放电功率及剩余容量；

c) 关键节点温度监测数据（如逆变器散热器温度）。

7.5.2 管理系统交互

7.5.2.1 能源管理系统与机电监控系统交互

数据同步：

- a) EMS 每 15 分钟向机电监控系统推送能源供需预测数据；
- b) 机电监控系统实时上传负荷需求数据至 EMS。

协同控制：

- c) 在电网调度模式下，EMS 接受上级电网指令并协调本地发电/储能设备；
- d) 在离网模式下，EMS 自主控制能源分配，优先保障关键负荷（如隧道照明）。

7.5.2.2 故障联动处理

当检测到系统异常（如储能过温、通信中断）时，EMS 应自动触发以下动作：

- a) 向机电系统发送告警信息（SNMP Trap 或 Syslog）；
- b) 启动备用通信链路（如 4G/5G 冗余通道）；
- c) 隔离故障设备并切换至备用电源（切换时间 $\leq 200\text{ms}$ ）。

8 路域自治能源系统与机电系统融合技术要求

8.1 能源供需预测

8.1.1 一般要求

a) 应基于公路机电系统用能特性与运行规律，构建能源供给—波动扰动—负荷需求耦合分析模型，实现三级预测调度：实时调控级（15min 级）支撑能源与负荷动态匹配；计划调度级（日级）支撑日内运行策略优化；规划设计级（年度级）支撑系统容量配置与路网能源布局。

b) 预测模型与误差控制应满足：短期预测（15min~24h）采用 LSTM 神经网络模型，预测误差 $\leq 15\%$ ；中期预测（1~7 天）采用 ARIMA 模型，预测误差 $\leq 12\%$ ；长期预测（月度/年度）：采用回归分析模型，预测误差 $\leq 10\%$ 。

c) 基础数据采集精度与频率应满足：电压、电流测量精度 $\leq 0.5\%$ ；光照强度、风速等气象数据更新频率 ≥ 1 次/分钟；交通流量分车型统计精度 $\geq 90\%$ 。

8.1.2 高熵能源评估

a) 按设备级—集群级—微网级开展三级高熵能源可用性评估：设备级评估单台风光发电单元出力可靠性与运行稳定性；集群级评估同类发电设备阵列协同出力特性；微网级评估“风光储充”一体化单元全局供电可用度。评估结果通过标准化接口上传至路域能源管理平台，实现全网共享与统一调度。

b) 高熵能源运行数据采用时序数据库存储，支持 1Hz~10Hz 高频写入，历史数据存储时长 ≥ 1 年，数据可追溯性符合 GB/T36547 相关要求。

8.1.3 风光出力预测

a) 光伏出力预测应融合气象数据、光伏阵列倾角与安装参数，模型兼容数值天气预报（NWP）接口，支持逐小时出力曲线预测，误差率 $\leq 15\%$ 。

b) 风力及隧道气流能预测：常规路段采用时序预测模型，输入历史风速序列；隧道场景需计入行车活塞效应，气流参数测量精度 $\geq 95\%$ 。

8.1.4 负荷预测

按供电重要性将路域机电负荷分为三级，并明确供电保障与融合调控要求：

a) I类负荷（关键负荷）：包括路侧智能控制单元、5G通信基站、自动驾驶路侧感知设备等。供电连续性 $\geq 99.99\%$ ，不允许中断；应急供电满足设备最小运行功率，符合 GB/T43758.1-2024 公共道路测试环境要求。多微网协同场景下优先保障供电，能源调度接口具备最高优先级权限。

b) II类负荷（重要负荷）：包括 LED 智慧路灯、隧道通风系统、环境监测传感器等。供电连续性 $\geq 95\%$ ，允许短时中断（ $\leq 30\text{min}$ ），满足 DB 4201/T654-2022 中非关键功能暂停时长要求。支持子系统级调控接口，可参与局部能源协同优化。

c) III类负荷（非关键负荷）：包括辅助照明、临时充电设施、信息发布屏等。供电连续性 $\geq 90\%$ ，具备柔性调节能力（响应时间 $\leq 10\text{min}$ ），可参与电网峰谷互动与“风光储充”系统调节。

8.2 能量管理要求

8.2.1 一般要求

a) 遵循分级控制、多网协同、供需互动原则，构建“设备—子系统—系统”三级控制体系，实现微网集群互联与源网荷储协同互动，目标能源综合利用效率 $\geq 85\%$ ，碳排放强度 $\leq 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 。

b) 建立运行策略库，包含三种模式及切换规则：经济运行模式是以用电成本最优为目标，优先使用低谷市电，限制高成本储能放电；低碳运行模式是以碳排放最小为目标，优先就地消纳风光高熵能源，减少市电购入；应急保障模式是以 I 类负荷不间断供电为目标，优先调用储能及备用电源，备用电源启动时间 $\leq 10\text{s}$ ，符合 GB/T43758.1-2024 要求。

c) 运行模式切换响应时间 $\leq 5\text{min}$ ，模式指令通过统一接口下发执行。

8.2.2 多能级能量调控

a) 设备级控制：光伏逆变器具备 MPPT 最大功率点跟踪功能，转换效率 $\geq 98\%$ ，符合 GB/T19964 要求；储能变流器支持双向变流，响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ，支持并离网无缝切换，符合 GB/T36547 要求；I 类负荷配置 UPS，电池容量满足 ≥ 1 小时满负荷供电，供电切换时间 $\leq 10\text{ms}$ ，符合 GB/T43758.1 应急供电要求。所有设备具备标准化控制接口与状态上传接口，支持远程点对点调控。

b) 子系统级协同：单站微网支持分布式能源即插即用，统一采用 IEC61850 标准物理接口与数据模型。结合电网峰谷电价执行协同调控：峰时段（8:00 - 22:00）：优先释放储能电量，限制 II、III 类负荷非必要运行；谷时段（22:00 - 次日 8:00）：储能满充，富余能源可通过并网接口反向上网。

c) 系统级优化：日前调度计划综合能源成本、碳排因子、设备约束形成全局最优策略，运行约束满足：节点电压偏差 $\leq \pm 5\%$ ；系统频率偏差 $\leq \pm 0.2\text{Hz}$ ；储能 SOC 运行区间为 20%~90%。

8.2.3 多微网协同管理

a) 采用路由内—路由间—路由组间三层互联拓扑，支持微网间 P2P 能量交易与互济运行。能量路由器满足 5kWDC/DC 端口规范，通信遵循 IEC61850-7-420 标准，采用 OPCUA1.04 协议，保障微网间数据交互实时、可靠、可互操作。

b) 联合调度需适配风光高熵能源随机性（光伏出力波动 $\pm 20\%$ 、风机间歇性停运），优化目标为：系统网损率 $\leq 5\%$ ；综合碳排放强度 $\leq 0.4\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ；微网间联络线功率调控范围 $\leq \pm 10\text{kW}$ ，联络线接口具备功率闭锁与安全保护机制。

8.3 能源管理平台架构要求

8.3.1 总体架构

平台采用云—边—端分层架构，实现机电系统与能源系统深度融合，统一完成数据采集、状态监测、优化控制、故障诊断、协同调度功能，支持 7×24h 连续稳定运行。

8.3.2 兼容性与互操作要求

平台支持 OPC UA、MQTT、Modbus TCP 等主流工业通信协议，具备协议转换与统一数据映射能力，可兼容 3 家及以上主流厂商机电设备与能源设备，实现跨厂家、跨系统互操作。

8.3.3 平台功能模块

数据采集与监控（SCADA）：实时采集融合系统全维度运行数据，采集频率 ≥ 1 次/秒：

- a) 电力参数：三相电压、三相电流、频率、功率因数、有功功率、无功功率、视在功率；
- b) 储能参数：SOC（荷电状态）、SOH（健康状态）、电池温度、充放电电流、电池组电压；
- c) 设备状态：设备在线率、设备温度、风扇转速、通信状态、开关位置；
- d) 环境参数：光照强度、风速、风向、环境温度、湿度、气压；
- e) 系统参数：节点电压偏差、频率偏差、联络线功率、电网电价。

系统越限报警响应时间 $\leq 3s$ ，故障录波存储 ≥ 7 天，工业网络安全符合 ISO/IEC62443 要求。

8.3.4 能源预测与调度

集成短/中/长期预测模型，支持调度指令闭环执行，指令执行误差 $\leq 2\%$ ；可视化界面实时展示能源流向、负荷时序曲线、高熵能源可用度，为融合调控提供决策支撑。

8.3.5 安全与评估

数据加密传输采用 AES-256 算法，访问控制采用 RBAC 角色权限管理，通过 AI 模型实现异常访问入侵检测；系统自动生成日/月度能耗报表、碳足迹统计报表，支持 Excel/CSV 格式导出。

8.4 数据交互要求

8.4.1 边缘预处理与本地融合

边缘层设备（智能电表、变流器、能量路由器、路侧控制器）具备本地数据预处理能力，完成异常值剔除、数据归一化、时序对齐等处理，实现端侧初步融合，降低云端计算与传输压力。

8.4.2 分层通信时延与接口性能

为保障能源与机电系统实时协同，各层级通信接口时延要求：边缘层与平台层（MQTT 协议）通信时延 $\leq 500ms$ ；平台层与设备层（ModbusTCP）通信时延 $\leq 1s$ ，满足实时调控需求。

8.4.3 标准化接口与互操作规则

a) 物理接口：分布式电源、储能、负荷、能量路由器统一采用 IEC61850 系列标准接口，支持热插拔与即插即用。

b) 数据接口：遵循 GB/T36547 规范定义统一数据模型，实现机电系统（监控、照明、通信、隧道机电）与能源系统（发储充控）的数据互通、模型互认、指令互操作。

c) 外部协同接口：平台预留标准数据交互接口，可与上级电网调度系统、公路机电管控平台对接，实现跨系统数据共享与联合调控，完成路域自洽能源系统与公用电网、智慧交通管控体系的深度融合。

9 实施与验收要求

9.1 设计要求

9.1.1 公路机电系统总体规划设计阶段，应统筹考虑路域自洽能源系统接入、并网及扩容需求，线路与配电方案宜优先采用柔性直流配电技术。

9.1.2 路域自洽能源系统的规划布局、系统架构与设备选型，应充分论证并满足安全运行、供电可靠性及运维便利性要求。

9.1.3 路域自洽能源系统接入公路机电系统前，应结合沿线用电负荷特性、技术指标、经济合理性开展整体技术经济论证，接入方案与供配电设计应符合 GB 50052 的相关规定。

9.1.4 独立运行的路域自洽能源系统，接入机电系统后应实现电能就地消纳；并网运行的路域自洽能源系统，应遵循“优先就地消纳、富余电量上网”原则运行。

9.2 建设要求

- 9.2.1 工程开工前，应完成施工许可办理、施工单位资质审查、施工图纸审核、施工组织设计审批、安全技术交底及现场施工条件核查等前期工作，确认满足开工条件后方可实施。
- 9.2.2 工程涉及土方工程、支架基础、场地整治、地下管线及建（构）筑物等施工内容，施工质量与过程管理应符合 GB 50300 的相关规定。
- 9.2.3 光伏支架、光伏组件、汇流箱、逆变器、储能系统、能源管理系统等设备的安装、接线与调试，应符合 GB 50794 及相关产品技术规范要求。

9.3 设备与材料要求

- 9.3.1 系统所用光伏、储能、变配电、能量管理、测控保护等主要设备及原材料，应具备合格证明、型式试验报告及出厂检验报告，关键设备应通过国家授权机构检测认证。
- 9.3.2 设备性能指标、接口协议、防护等级应满足公路户外运行环境要求，与机电系统的兼容性、互操作性应在进场前完成核验。
- 9.3.3 设备与材料的运输、存储、开箱检验应符合规范，严禁使用不合格、过期或受损产品。

9.4 调试与试运行要求

- 9.4.1 系统安装完成后，应按分项、分部、系统三级开展调试，包括单体设备调试、子系统联调、源网荷储整体联调及多微网协同调试。
- 9.4.2 调试应覆盖能量调控、负荷分级保障、模式切换、故障响应、数据采集与上传、报警联动等功能，各项指标满足本文件要求后方可进入试运行。
- 9.4.3 系统应连续稳定试运行不少于 30 天，试运行期间应完整记录运行数据、负荷特性、能源消耗比例、设备可用率及故障情况，形成试运行报告。

9.5 验收要求

- 9.5.1 路域自洽能源系统与机电系统融合工程验收，应分为工程质量验收、技术性能验收和资料验收，验收程序与组织形式应符合公路工程及电力工程相关管理规定。
- 9.5.2 验收应核查以下内容：
- 设计文件、图纸会审、设计变更、隐蔽工程记录等完整齐全；
 - 设备合格证、检测报告、安装调试记录、试运行报告等技术资料规范；
 - 能源供需预测、能量管理、多网协同、数据交互等功能满足本文件技术要求；
 - 供电可靠性、能源利用效率、碳排放指标、接口与通信性能达标；
 - 安全防护、接地保护、消防设施等符合相关安全规范。
- 9.5.3 验收合格后出具验收合格文件，方可正式投入运行；验收不合格的应限期整改，整改完成后重新组织验收。

工程验收后，应完成技术资料移交，建立设备台账与运行维护档案，明确运维责任与周期检修要求。

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

路域能源自治系统与机电系统融合技术指南

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