

支持规模化超快充电设施车网互动的智能调控终端 研究与设计

刘彤¹, 姜伟², 吴蔚¹, 谢慧勤¹, 彭伊伊¹

1. 国网武汉供电公司营销运营中心, 湖北 武汉 430000

2. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461100

DOI:10.61369/EPTSM.2026010009

摘 要 : 【目的】针对大规模超快充电设施接入配电网存在车网交互感知失真、配电网安全与电动汽车超快充电矛盾冲突、充电桩利用率提升优化以及配电网储能协同调控能力不足等问题, 提出一种实现大规模超快充电设施车网互动的智能调控终端设计方案。【方法】构建集“多源数据采集与车网状态感知—车网互动策略优化—功率动态分配—储能协同调控—实时响应与反馈—安全与协议适配”于一体的终端架构。采用端—边—云协同模式实现多源信息融合与分层决策; 基于多主体博弈与多智能体强化学习实现电网、用户与运营商多方收益协调; 通过优先级评估与比例公平算法对电网与储能系统的可用功率进行联合分配, 并在边缘侧构建快速闭环响应机制。【结果】所设计的智能调控终端在结构上实现了状态感知、策略生成与执行控制的有机协同, 满足大规模超快充电场景下对实时性、可靠性与可扩展性的工程需求。【结论】该终端设计方案在不依赖特定储能技术路线的前提下, 能够为大规模超快充电站提供可工程部署的车网互动基础设施支撑, 具有良好的推广与应用前景。

关 键 词 : 超快充电设施; V2G; 智能调控终端; 动态功率分配; 储能协同; 端—边—云架构

Research and Design of Intelligent Regulation Terminal Supporting Vehicle-to-Grid Interaction for Large-scale Ultra-fast Charging Facilities

Liu Tong¹, Jiang Wei², Wu Wei¹, Xie Huiqin¹, Peng Yiyi¹

1. Marketing and Operation Center of State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

2. Henan Xuji Instrument Co., LTD., Xuchang, Henan 461100

Abstract : Objective: Aiming at the problems existing in the connection of large-scale ultra-fast charging facilities to the distribution network, such as distorted perception of vehicle-grid interaction, conflicts between distribution network safety and ultra-fast charging of electric vehicles, optimization of the utilization rate of charging piles, and insufficient collaborative regulation capacity of energy storage in the distribution network, a design scheme of an intelligent regulation terminal for achieving vehicle-grid interaction of large-scale ultra-fast charging facilities is proposed. Method: Construct a terminal architecture that integrates "multi-source data collection and vehicle-grid status perception - vehicle-grid interaction strategy optimization - dynamic power allocation - energy storage collaborative regulation - real-time response and feedback - safety and protocol adaptation". The end-edge-cloud collaborative mode is adopted to achieve multi-source information fusion and hierarchical decision-making. The multi-party benefit coordination among the power grid, users and operators is achieved based on multi-agent game and multi-agent reinforcement learning. The available power of the power grid and energy storage systems is jointly allocated through priority assessment and proportional fairness algorithms, and a fast closed-loop response mechanism is constructed on the edge side. The designed intelligent regulation terminal has achieved an organic synergy of state perception, strategy generation and execution control in its structure, meeting the engineering requirements for real-time performance, reliability and scalability in large-scale ultra-fast charging scenarios. Conclusion: This terminal design scheme can provide engineering-deployable vehicle-grid interaction infrastructure support for large-scale ultra-fast charging stations without relying on specific energy storage technology routes, and has a good prospect for promotion and application.

Keywords : ultra-fast charging facilities; V2G; intelligent control terminal; dynamic power distribution; energy storage synergy; end-edge-cloud architecture

引言

随着电动汽车保有量的持续攀升和超快充技术的快速发展，大功率、短时、高频次的充电需求日益突出^[1]。大规模超快充设施在城市枢纽、服务区及公共充电站等场景集中接入，使配电网面临更高的功率波动和负荷峰值压力。通过车网互动（Vehicle-to-Grid, V2G），利用电动汽车和站侧储能的可调容量参与削峰填谷和辅助服务，被认为是缓解配电网压力、提升可再生能源消纳能力的重要途径^[2]。

然而，在大规模超快充场景下，现有车网互动系统仍存在显著瓶颈：（1）传统的模型驱动而非量测驱动导致电网方、电动汽车用户及运营商在安全裕度、有序充电、充电时长与经济收益方面目标不一致，单目标或加权和优化策略难以兼顾多方诉求；（2）多源数据存在量纲差异、噪声干扰和时滞，SOC等关键状态估计偏差较大，难以为精细化调控提供高可信输入；（3）在变压器容量和配电设备约束下，传统静态限流策略难以充分挖掘同时满功率充电能力，无法平衡优化变压器容量，充放电收益、用户体验以及配电网安全；（4）站侧储能与车载电池潜力尚未充分发挥，缺乏与负荷预测、电价信号、电网约束相协同的统一调度机制；（5）云端集中调控方式响应时延较大，难以满足多元负荷快速控制需求，同时多方系统互联将带来的数据安全与协议兼容问题尚未系统解决。

已有研究在超快充站群优化调度、多主体博弈、电动汽车聚合负荷建模等方面取得一定进展，但多数工作聚焦于算法层或单一环节，缺乏从“端-边-云一体化终端”的工程视角，将状态感知、策略生成、功率分配、储能协同与实时响应有机融合的系统化方案。特别是在大规模超快充实际工程场景中，如何在变压器不增容的条件下同时提升网侧安全性、用户体验和运营收益，仍存在明显研究空白。

针对上述问题，本文提出一种面向大规模超快充设施车网互动的自适应调控终端。终端以“多源数据采集与车网状态感知-车网互动策略优化-功率动态分配-储能协同调控-实时响应与反馈-安全与协议适配”为主线，构建可工程部署的一体化体系结构。

一、智能调控终端总体架构

（一）终端总体框架

面向大规模超快充设施车网互动的自适应调控终端主要由六大功能模块构成：

1. 多源数据采集与车网状态感知模块（101）；
2. 车网互动策略优化模块（102）；
3. 功率动态分配模块（103）；
4. 储能协同调控模块（104）；
5. 实时响应与反馈模块（105）；
6. 安全与协议适配模块（106）。

多源数据采集与状态感知模块构建端-边-云采集通道，实时采集并融合充电桩、电动汽车、电网及用户侧数据，生成统一车网状态向量；车网互动策略优化模块基于状态向量与负荷预测结果，利用多主体博弈和多智能体强化学习生成调控策略；功率动态分配模块依据策略与实时约束进行优先级计算与功率池分配；储能协同调控模块制定并执行储能充放电计划，为充电桩群及电网提供双向支撑；实时响应与反馈模块在边缘侧解析电网调控指令并进行快速响应，同时计算执行偏差并反馈至上层策略；安全与协议适配模块贯穿全流程，为多方系统互联与数据交互提供安全和协议保障。

（二）端-边-云协同架构

为兼顾策略复杂度和现场实时性，智能调控终端采用“端设备-边缘节点-云平台”三级协同架构：

1. 端设备侧：部署于充电桩控制板、车辆通信单元、配电网

监测设备及储能变流器等处，负责就地物理量采集、基础滤波与状态上报。

2. 边缘节点侧：部署于站级控制柜或就近配电房，实现多源数据融合、策略执行、功率分配与快速闭环响应，是车网互动的关键控制层。

3. 云平台侧：用于复杂模型训练、长期参数整定和跨站点策略协调，向边缘节点下发策略模板、参数配置与软件更新，提供历史数据分析和运维管理等服务。

在信息流上，端侧向边缘节点实时上送采集数据；边缘节点根据自身算法与云下发策略生成控制指令下发至各端设备；云平台则周期性收集边缘节点汇总的信息进行长期分析与优化。在设计上，边缘节点应具备一定的独立运行能力，当云平台不可用或通信异常时，可通过本地策略保障基本车网互动功能不间断。

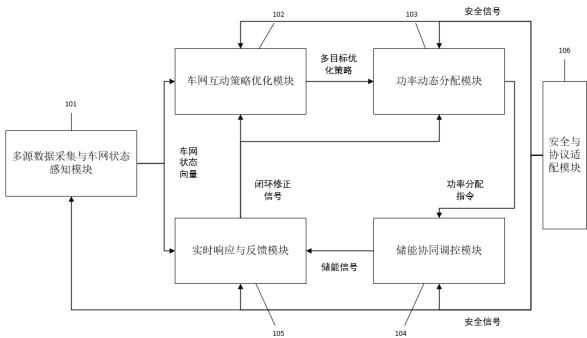


图1 智能调控终端总体架构

二、智能调控终端模块设计

（一）多源数据采集与车网状态感知模块设计

多源数据采集与车网状态感知模块包括多源异构数据采集子模块与车网状态融合感知子模块。

1. 多源异构数据采集

多源异构数据采集子模块主要采集如下信息：

（1）充电桩直流侧电参数：通过霍尔传感器获取实时充电功率、电压、电流等信息，用于估算桩侧功率及检测异常。

（2）车辆电池状态：通过 OBD-II 接口与电动汽车 BMS 系统通信，获取电池 SOC、SOH、实时温度及充放电截止电压，用于判断电池健康与安全边界。

（3）配电网运行参数：通过配电网 FTU 采集配电变压器及关键节点电压、电流、功率因数及频率，用于感知电网负荷率、安全裕度与调频需求。

（4）用户充电需求数据：通过手机 APP、小程序或车机服务接口获取用户预约时间、目标 SOC、期望离站时间及付费模式等偏好信息。

在通信层面，模块支持 CAN 总线、5G、LoRa 等多种协议并行传输，以适配不同厂商与不同物理链路条件。

2. 加权贝叶斯融合状态估计

针对多源数据存在的量纲差异、时滞差异与噪声干扰问题，车网状态融合感知子模块采用加权贝叶斯融合算法^[3]生成统一车网状态向量 $\mathbf{S}$ 。首先对各类数据进行滤波、对齐和标准化处理，然后按如下公式进行融合：

$$\mathbf{S} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \mathbf{s}_i \cdot \exp(-a \cdot |s_i - \bar{s}_i|) \quad (1)$$

其中， ω_i 为第 i 类数据源的可信度权重， $\mathbf{s}_i$ 为当前时刻的原始数据值， $\bar{s}_i$ 为该类数据的历史滑动均值， $a=3$ 为动态修正系数。通过指数惩罚项，当某一数据源与其历史平均偏差过大时，自动降低其在融合结果中的影响权重，从而抑制异常值和突发噪声的干扰。

融合后的状态向量 $\mathbf{S}$ 主要包括电网安全裕度、充电需求强度、设备健康度，为后续调控提供精准状态输入。

（二）车网互动策略优化模块设计

车网互动策略优化模块包括多主体博弈优化子模块和智能充放电预测子模块，目标是在电网安全约束下实现电网方、用户方与运营方三者收益的综合最优。

1. 多主体非合作博弈模型^[4]

（1）电网方收益函数

电网方关心的核心目标是网损最小化与频率稳定，电网方收益函数可表示为：

$$U_{\text{grid}} = \gamma_1 \cdot (P_{\text{load,ref}} - P_{\text{load,real}}) - \gamma_2 \cdot \text{Loss}(P_{V2G}) \quad (2)$$

其中， $P_{\text{load,ref}}$ 为目标负荷， $P_{\text{load,real}}$ 为实际负荷， $\text{Loss}(P_{V2G})$ 为 V2G 放电功率导致的线路损耗， $\gamma_1=0.6$ 为调频权重， $\gamma_2=0.4$ 为网损权重。该函数鼓励通过车网互动削峰填谷，同时抑制过度 V2G

放电引起的额外网损。

（2）用户方收益函数

用户主要关心充电时长、电池寿命与综合成本，用户方收益函数可表示为：

$$U_{\text{user}} = \gamma_3 \left(1 - \frac{\text{SoC}_t}{\text{SoC}_{\text{target}}} \right) - \gamma_4 t_{\text{charge}} - \gamma_5 \text{SOH}_{\text{loss}} \quad (3)$$

其中， SoC_t 为当前 SOC， $\text{SoC}_{\text{target}}$ 为目标 SOC， t_{charge} 为当前累计充电时间， SOH_{loss} 为电池 SOH 损耗量， $\gamma_3=0.5$ 为 SOC 目标达成度权重， $\gamma_4=0.3$ 为时间权重， $\gamma_5=0.2$ 为电池损耗权重。该函数鼓励在满足目标 SOC 的前提下缩短充电时间并减缓电池老化。

（3）运营方收益函数

运营方收益由电能销售差价和 V2G 补贴组成，运营方收益函数为：

$$U_{\text{op}} = \gamma_6 (P_{\text{charge}} c_{\text{sell}} - P_{\text{buy}} c_{\text{buy}}) + \gamma_7 P_{V2G} c_{\text{subsidy}} \quad (4)$$

其中， P_{charge} 为充电功率， c_{sell} 为对应充电电价， P_{buy} 、 c_{buy} 分别为从电网购电功率与电价， P_{V2G} 、 c_{subsidy} 为 V2G 放电功率和补贴标准， $\gamma_6=0.7$ 、 $\gamma_7=0.3$ 分别为电力销售收益与 V2G 补贴收益权重。

（4）纳什均衡与策略求解

在给定电网运行约束、用户需求与运营政策的条件下，通过构建三方非合作博弈模型，求解纳什均衡点，使得任一主体在其他主体策略给定时无法通过单边调整收益函数进一步改善，即：

$$\frac{\partial U_{\text{grid}}}{\partial P_{V2G}} = 0, \quad \frac{\partial U_{\text{user}}}{\partial t_{\text{charge}}} = 0, \quad \frac{\partial U_{\text{op}}}{\partial P_{\text{charge}}} = 0 \quad (5)$$

在工程实现中，终端通过多智能体强化学习（Multi-Agent RL）迭代逼近该均衡点：每个主体视为一个智能体，通过与环境（电网 - 车 - 桩 - 储能系统）交互收集奖励，更新策略网络，最终收敛至近似纳什均衡。

2. 智能充放电预测

为提高策略前瞻性与鲁棒性，智能充放电预测子模块采用 LSTM 模型^[5]预测未来充电负荷与 V2G 可调容量。模型输入包括历史充放电功率曲线、用户出行与充电行为特征、气象数据、日期类型。预测精度通过相对误差均值衡量，其准确度定义为：

$$\text{Accuracy} = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{\hat{P}_t - P_t}{P_t} \right| \quad (6)$$

其中， T 为预测时段数， P_t 和 $\hat{P}_t$ 分别为 t 时刻的实际功率与预测功率。预测结果为后续储能调度、功率分配和博弈优化提供重要先验信息。

（三）功率动态分配模块设计

功率动态分配模块包括优先级评估子模块和动态功率分配子模块，旨在在变压器容量与储能约束下实现功率池共享与精准调配。

1. 三维优先级评估模型

优先级评估子模块构建“用户充电紧急度 - 电池健康状态 -

电网负荷率”三维评价体系。设，优先级评价函数为：

$$P_{\text{rior}} = \tau \cdot \exp(-\beta \cdot (1 - \text{SOH})) + (1 - \tau) \cdot (1 - \theta) \quad (7)$$

其中， τ 为用户紧急度、 θ 为电网负荷率， β 为调节 SOH 敏感度的系数。预约 10 分钟内需启动充电的用户取 $\tau = 0.9$ ，1h 后充电的用户取 $\tau = 0.3$ ；当 $\text{SOH} \leq 80\%$ 时，自动降低优先级，以减缓衰减加快电池的循环损耗；当电网负荷率 $\theta > 0.8$ 时，适度提升电网友好型（可响应削峰或接受 V2G 控制）用户的优先级。

2. 比例公平功率分配与削减机制

动态功率分配子模块以电网可承载功率与储能可释放功率之和构建共享功率池 P_{pool} ，采用比例公平策略进行分配：

（1）根据各充电桩对应用户的优先级 $P_{\text{rior},i}$ 计算占比：

$$\alpha_i = \frac{P_{\text{rior},i}}{\sum_j P_{\text{rior},j}} \quad (8)$$

（2）分配功率为：

$$P_i = \min(\alpha_i \cdot P_{\text{pool}}, P_{i,\text{demand}}) \quad (9)$$

其中 $P_{i,\text{demand}}$ 为第 i 桩当前需求功率，保证分配功率不超过需求。

（3）当监测到电网负荷率超出安全阈值，如 $\theta > 1$ 或电流超过额定 105% 时，立即触发功率削减机制，优先对低优先级桩进行削减，其削减量与超载程度成比例。

（四）储能协同调控模块设计

1. 储能状态监测

储能状态监测子模块实时采集锂电池 SOC、充放电功率、循环次数、温度等；超级电容电压、瞬时功率、健康状态指标等。储能可用容量按下公式估计：

$$E_{\text{avail}} = E_{\text{rated}} \cdot \frac{\text{SOC} - \text{SOC}_{\min}}{1 - \text{SOC}_{\min}} \quad (10)$$

其中 $\text{SOC}_{\min} = 20\%$ 为保护阈值，保证充放电深度不超过 80%，以延长寿命。 E_{avail} 指储能系统当前可实际利用的容量， E_{rated} 指储能系统的额定容量。

2. MPC 驱动的储充协同优化

储能与储充协同优化子模块采用模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）在滚动时域内联合优化储能充放电功率轨迹^[6]。其优化目标包括：

（1）使电网交互功率尽量接近平抑目标曲线 $P_{\text{grid,ref}}(t)$ ，削弱充电负荷波动对配电网的影响；

（2）平滑储能功率变化率，约束 $|\Delta P_{\text{ess}}(t)|$ 尽可能小，减少储能频繁大幅度充放电造成的损耗。

优化问题可表述为：

$$\min_{P_{\text{in}}(t), P_{\text{sc}}(t)} \sum_{k=1}^H [\lambda_1 (P_{\text{grid}}(t+k) - P_{\text{grid,ref}}(t+k))^2 + \lambda_2 (\Delta P_{\text{ess}}(t+k))^2] \quad (11)$$

在约束条件中考虑储能 SOC 上下限、功率限额以及充放电效率等。通过滚动优化与在线反馈，系统在高峰时段优先释放储能支持超充，减少配电网扩容需求；在低谷时段利用谷电补能，降

低运营购电成本；在突发大功率接入 / 退出时，由超级电容快速吸收 / 释放能量，抑制电网电压与频率波动。

（五）实时响应与反馈

实时响应与反馈模块包括电网指令解析子模块和闭环修正子模块。

电网指令解析子模块通过与配电网调度系统的接口，接收调频指令、无功补偿需求和紧急减载命令等，将调频信号转换为有功功率调节量：

$$\Delta P_{\text{adj}} = K_f \cdot \Delta f \quad (12)$$

其中， $K_f = 100 \text{ kW/Hz}$ 为频率响应系数， Δf 为频率偏差信号。边缘节点据此在本地快速调整充电桩群与储能的功率输出，实现一次调频需求。

闭环修正子模块则将实际响应功率与电网目标进行对比，评估执行偏差，分析可能成因（如通信延迟、设备限额、模型误差等），并在后续控制周期中对优先级、策略参数和储能出力边界进行在线修正，逐步提高响应精度。

边缘驱动的闭环响应模式相较于纯云端控制显著缩短了响应时间，能够满足一次调频和部分二次调频场景下的时间要求。

（六）安全与协议适配

安全与协议适配模块从数据、通信和设备三个层面构建安全防护体系：

1. 数据安全：对车 - 桩 - 网 - 云之间的关键数据进行加密存储与传输，采用访问控制与匿名化处理保护用户隐私；

2. 通信安全：采用 VPN、TLS 等安全通信机制防止中间人攻击与非法窃听；

3. 设备安全：通过设备指纹认证与固件签名校验防止非法设备接入与恶意固件篡改。

在协议适配方面，终端内置多协议转换接口，支持与各级电网平台、车企后台系统及政府监管平台实现数据与控制指令的双向对接，满足跨主体协同和政策合规要求。

三、结论

本文围绕大规模超快充设施接入配电网所带来的安全与调控挑战，提出并设计了一种面向车网互动场景的智能调控终端整体方案。主要结论如下：

（1）基于端 - 边 - 云架构与加权贝叶斯融合算法的多源数据采与车网状态感知机制，有效降低了 SOC 测量误差和状态估计时滞，为车网互动提供了高保真数据基础，解决了传统方案中车网状态评估易失真的问题。

（2）通过构建电网、用户、运营商三方非合作博弈模型，并结合多智能体强化学习搜索纳什均衡点，实现了调峰、用户充电效率和运营收益的多目标协调优化，显著改善多主体利益冲突。

（3）依托三维优先级评价与比例公平功率分配策略，构建共

享变压器与储能的功率池，支持多桩同时满功率运行，在变压器容量约束下显著提升充电桩利用率，消除用户长时间等待问题。

（4）配电台区光储充协同优化调控，将在新能源消纳，有序充电，削峰填谷、抑制大功率冲击和降低购电成本方面取得良好效果。

（5）采用边缘计算驱动的电网指令快速响应与闭环修正机

制，并配合三层安全防护与协议适配，实现了跨平台、跨主体环境下的安全高效车网互动。

整体而言，该自适应调控终端为大规模超快充场站与配电网之间的协同提供了一套可工程落地的系统解决方案。

参考文献

- [1] 电动汽车充电设施布局规划与调控运营专栏导语 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(04): 2.
- [2] 谢娜, 徐泉, 柳邵辉, 等. 面向车网互动的电动汽车标准体系研究与思考 [J]. 中国汽车 (中英文对照), 2025, 35(11): 643-647+664.
- [3] 王睿, 梅文明, 刘新, 等. 基于贝叶斯序网络和自适应阈值的信令风暴预测算法 [J]. 计算机应用, 2025, 45(S1): 202-205.
- [4] 周步祥, 曾扬俊, 邱一苇, 等. 基于非合作博弈的可再生能源制氢合成氨系统多主体运行模式分析 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 197-205.
- [5] 杜银昌, 袁杰. 基于 LSTM 方法的海上油气平台中短时电力负荷预测研究 [J]. 船电技术, 2025, 45(11): 56-59.
- [6] 高瑞. 基于 MPC 算法的煤矿电力系统负荷暂态频率稳定智能化控制 [J]. 能源与环保, 2025, 47(10): 177-183.