

# 电动汽车充电过程电学计量误差分析研究

连明明<sup>1</sup> 陈光明<sup>1</sup> 孙斌<sup>2</sup>

1 临沂市计量检定所, 山东省临沂市, 276000;

2 临沂市人防工程建设服务中心, 山东省临沂市, 276000;

**摘要:** 随着电动汽车产业的快速发展, 充电设施的电学计量准确性成为保障用户权益、规范市场秩序的关键环节。本文围绕电动汽车充电过程中的电学计量误差展开深入研究, 从计量系统的硬件构成、充电环境条件、充电运行模式三个维度, 剖析误差产生的核心来源与作用机制。通过分析电压采样偏差、电流互感器特性漂移、环境温湿度干扰及充电模式切换对计量精度的影响, 提出基于硬件校准优化、环境自适应补偿及动态计量算法改进的误差控制策略, 为提升充电计量准确性、推动充电基础设施标准化建设提供理论参考。

**关键词:** 电动汽车; 充电过程; 电学计量误差; 计量校准; 误差控制

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.02.041

## 引言

在“双碳”目标推动下, 电动汽车已成为交通领域绿色转型的核心载体, 而充电基础设施作为电动汽车运行的重要支撑, 其计量准确性直接关系到用户充电成本核算与充电服务市场的公平性。当前, 部分用户反映充电计量结果与车辆电池实际充入电量存在偏差, 这一问题不仅引发用户对计量公正性的质疑, 也对充电设施的标准化发展提出挑战。电学计量误差的产生并非单一因素导致, 而是涉及充电设备硬件性能、外部环境干扰及充电运行参数变化等多方面的复杂作用<sup>[1]</sup>。因此, 分析充电过程中电学计量误差的来源与影响规律, 建立科学的误差控制体系, 对于提高充电计量精度, 保障充电市场健康发展具有重要的现实意义。本文从硬件, 环境, 运行模式三个层面分析充电计量的核心环节, 提出相应的误差控制策略, 为充电计量技术的优化提供思路。

## 1 电动汽车充电过程电学计量误差的核心来源

### 1.1 计量硬件系统的性能偏差

充电过程的电学计量是由电压采样模块, 电流采样模块及数据处理单元构成的硬件系统, 其性能偏差是导致计量误差的第一大因素。在电压采样环节, 采样电阻的温度系数将直接影响采样精度, 当充电设备长时间运行造成温度升高时, 采样电阻阻值发生漂移, 导致实际采样电压与真实电压相差很大。同时, 电压采样回路中的导线阻抗得不到补偿, 在大电流充电场合会产生分压效应, 进一步放大电压采样误差。电流采样环节电流互

感器的励磁特性, 对计量精度影响很大。传统的电流互感器在低负荷电流下, 容易出现励磁电流过大, 导致二次侧输出电流与一次侧实际电流线性度较差, 产生非线性误差; 在高负荷电流下, 互感器铁芯容易进入饱和区, 使得二次侧电流不能很好的跟随一次侧电流的变化, 造成严重的计量偏差。此外, 霍尔电流传感器虽在线性度上优于传统互感器, 但传感器的零点漂移现象, 受温度变化与长期使用老化影响, 输出信号出现零位偏移, 仍会导致电流采样结果偏离真实值, 进而影响电能计量的准确性<sup>[2]</sup>。数据处理单元作为计量数据的核心计算环节, 其模数转换(ADC)芯片的分辨率与转换速率也会引发误差。若ADC芯片的分辨率不足, 无法对采样得到的模拟信号进行高精度量化, 会导致数字信号与模拟信号之间存在量化误差; 而转换速率过低时, 在充电电流或电压快速变化的场景(如快充启动阶段), 无法及时捕捉信号变化, 造成采样数据的时间滞后, 进一步影响电能计算结果的准确性。

### 1.2 外部充电环境的干扰作用

外部充电环境的温湿度、电磁干扰及电网波动等因素, 会通过影响计量硬件性能或直接干扰采样信号, 间接导致计量误差。温度对计量系统的影响具有多维度性: 一方面, 如前文所述, 温度升高会导致采样电阻、电流互感器等元件的性能参数漂移; 另一方面, 高温环境会降低ADC芯片的工作稳定性, 使其量化误差增大, 同时加速电子元件的老化进程, 缩短硬件系统的精度保持周期。而低温环境则会导致电池充电接受能力下降, 充电电流出现波动, 计量系统如果未针对电流波动场景进

行适应性优化，易出现采样数据与实际充电电流的不匹配，进而产生计量偏差<sup>[3]</sup>。在较高湿度的情况下，充电设备内部的印制电路板 PCB 易受潮，导致电路绝缘性下降，产生漏电流。漏电流会分流部分充电电流，使电流采样模块采集的电流值小于实际充电电流，致使电能计量结果偏小；同时，漏电流还可能干扰数据处理单元的正常工作，导致数据计算出现错误。另外，潮湿环境还会加快金属元件的腐蚀，破坏电流互感器的铁芯磁性，使计量硬件的性能更差。

### 1.3 电磁干扰

另外，充电设施周边的高压电力线路，其他充电设备的运行，也会产生强电磁辐射，形成复杂的电磁环境。这些电磁干扰将通过空间耦合或传导途径进入计量系统的采样回路，对电压、电流采样信号产生干扰，使采样信号产生噪声叠加。如果数据处理单元没有配备有效的滤波算法，不能抑制干扰信号，采样数据会产生失真，影响电能计量的准确性。另外，电网电压的变动与谐波污染也会加剧计量误差，电网电压瞬时骤升或骤降会使电压采样值偏离额定范围，电网中的谐波成分（特别是三次、五次谐波）会使电压与电流的相位差发生变化，若计量芯片仍采用基于正弦波假设的计量算法，将使有功功率计算出现偏差，最终导致电能计量误差。

### 1.4 充电运行模式的动态影响

因为充电运行模式的改变会导致充电电流、电压的动态变化，如果计量系统对不同的运行模式不能做适应性设计，将产生动态计量误差。在常规充电模式下，充电电流相对稳定，计量系统可保持较高的计量精度；但在快速充电模式下，充电电流通常处于大电流，宽范围波动状态，如直流快充的电流可从几十安培快速提升至几百安培，此时电流采样模块的响应速度若无法匹配电流变化速率，会出现采样滞后，导致采样电流与实际电流存在时间差，进而使电能计算结果出现偏差。在充电过程中的模式切换如恒流充电模式切换至恒压充电模式也会引起计量误差<sup>[4]</sup>。在模式切换瞬间，充电电流或电压发生突变，若计量系统采样频率不够，对突变瞬间的信号变化没有抓取，则该时段的采样数据缺失或不准确，从而影响整体电能计量结果。此外，部分充电设备为实现充电效率优化，会采用脉冲充电或交流充电等特殊模式，这些模式下的电流信号具有非正弦、高频波动的特点，若计量系统的滤波算法与信号处理逻辑仍基于传统正弦波信号设计，会无法准确提取有效信号成分，

导致计量误差增大。

## 2 电动汽车充电过程电学计量误差的控制策略

### 2.1 硬件系统的校准与优化

针对计量硬件系统性能偏差引发的误差，需通过硬件校准与优化实现精度提升。一是应建立完善的硬件元件选型标准，优先选用低温度系数、高稳定性的采样电阻，如金属膜电阻或合金电阻，其温度系数可控制在±10ppm/°C 以内，有效降低温度变化对采样精度的影响；对于电流采样环节，可采用宽量程、低励磁电流的高精度电流互感器，或选用具有自动零点校准功能的霍尔电流传感器，通过传感器自身的补偿机制抵消零点漂移带来的误差<sup>[5]</sup>。二是需强化硬件系统的出厂校准与定期校准机制。在出厂前，应对每台充电设备的电压、电流采样模块进行逐点校准，通过标准信号源输入已知的电压、电流信号，对比计量系统的输出结果与标准值，建立误差补偿模型，将补偿参数写入数据处理单元的存储器，实现硬件层面的误差修正；在设备运行过程中，应根据使用频率与环境条件制定定期校准计划，如每半年或一年进行一次现场校准，利用便携式标准电能表对充电设备的计量精度进行检测，及时发现并修正硬件性能漂移外，也可以从硬件电路设计优化的角度降低误差<sup>[5]</sup>。例如，在电压采样回路中，采用差分采样，减少由于导线阻抗而带来的分压的影响；在电流采样回路中，增加铁芯去磁电路，避免电流互感器由于长期使用造成铁芯磁化；在数据处理单元中，选择 16 位及以上高分辨率，转换速率高的 ADC 芯片，并具有独立的电源模块，减少电源噪声对 ADC 芯片工作稳定性的影响，从电路设计层面上提升计量硬件的抗干扰

### 2.2 环境干扰的自适应补偿

针对外部环境干扰造成的计量误差，应建立环境自适应补偿机制，通过对环境参数的实时监测，调节计量系统参数来补偿环境因素的影响。在温湿度补偿方面，在充电设备内部设置温湿度传感器，实时采集环境温湿度数据，并将数据传输到数据处理单元。在预设的温湿度-误差补偿模型的基础上，当温度或湿度超过预设的阈值时，自动调整电压、电流采样模块的补偿参数，根据温度的变化修正采样电阻的阻值偏差，根据湿度的变化修正漏电流带来的采样误差。例如，当温度升高到 35°C 以上时，由软件算法将电压采样值乘以温度补偿系数，来补偿采样电阻温度漂移带来的误差；当湿度超过 80% 时，启动漏电流检测电路，实时计算漏电流大小，

并计入电流采样结果中，确保采样电流与实际充电电流一致。针对电磁干扰，要从硬件屏蔽与软件滤波两方面着手<sup>[6]</sup>。在硬件层面对计量系统的采样回路与数据处理单元进行电磁屏蔽设计，关键电路采用金属屏蔽罩进行包裹，减少外界电磁辐射的干扰；采样导线采用带屏蔽层的双绞线，减少电磁干扰的传导耦合。在软件层面，将自适应滤波算法，如卡尔曼滤波算法，植入数据处理单元中，实时分析采样信号的频率特性，识别并滤除电磁干扰产生的噪声信号，保留真实的电压、电流信号成分。同时，对电网谐波干扰，采用基于FFT的谐波分析算法，计算准确电网中的谐波含量，根据谐波成分对有功功率计算结果做出修正，避免谐波引起的计量偏差。对于电网波动，可在充电设备中增加电网电压监测模块，实时监测电网电压的变化情况。当电网电压出现骤升或骤降时，自动调整电压采样的量程范围，确保采样模块始终工作在最佳精度区间；同时，通过软件算法对电网电压波动时段的采样数据进行平滑处理，减少电压波动对电能计算结果的影响。此外，还可采用电压暂降补偿技术，在电网电压短暂下降时，通过储能元件维持充电电压稳定，间接降低电网波动对计量精度的干扰。

### 2.3 动态计量算法的改进

针对充电运行模式动态变化引发的误差，需通过改进动态计量算法，提升计量系统对不同充电模式的适应性。第一，针对快速充电模式下电流快速波动的特点，可采用变采样频率算法，根据充电电流的变化速率自动调整采样频率。当充电电流处于稳定状态时，采用较低的采样频率以降低系统功耗；当充电电流出现快速变化时，自动提高采样频率，如从1kHz提升至10kHz，确保能够及时捕捉电流变化信号，减少采样滞后带来的误差。第二，针对充电模式切换引发的误差，可设计模式切换预判与数据补全算法。通过对充电过程中电压、电流变化趋势的分析，提前预判模式切换的时间节点，并在切换前提升采样频率；在切换瞬间，若出现采样数据缺失，利用切换前的采样数据与切换后的初始采样数据，通过线性插值或三次样条插值算法，补全缺失数据，确保整个充电过程的采样数据连续、完整，避免因数据缺失引起的计量误差。对脉冲充电、变流充电等特殊充电模式，必须开发基于非正弦信号的电能计量算法。传统的电能计量算法是基于正弦电压、电流信号假设，计算电压、电流有效值以及相位差求出有功功率；在非正弦

信号的场合，必须采用基于瞬时功率理论的计量算法，通过实时采集电压、电流的瞬时值，计算瞬时功率并对瞬时功率进行积分，得到一段时间的总电能。这种算法能有效地避免非正弦信号带来的谐波误差，保证了在特殊充电模式下计量精度。同时，可引入自适应信号处理技术，通过实时分析电压、电流信号的波形特征，自动选择合适的计量算法，实现不同充电模式下的精准计量。

### 4 结论

本文深入分析电动汽车充电过程电学计量误差，明确计量硬件性能偏差，外部环境干扰与充电运行模式动态变化是误差核心来源，并针对性提出硬件校准优化、环境自适应补偿及动态计量算法改进的控制策略。研究证实，通过多维度、系统性误差控制措施，可有效提升充电电学计量精度，为保障用户权益、规范充电市场秩序提供技术支撑。未来，随着充电设施向更高功率、更智能方向发展，需进一步研发宽量程高精度计量硬件，如基于MEMS技术的微型低功耗采样传感器；结合人工智能构建大数据计量误差预测与自校准系统，实现误差预判与自动校准；同时推动充电计量技术标准化，统一误差评价指标与测试方法，为充电设施研发运维提供规范，助力充电产业高质量发展。

### 参考文献

- [1] 孙海丽.电动汽车充电桩计量系统的精度评估与误差分析[J].汽车知识, 2025, 25, (09): 248-250.
- [2] 戴煊丁, 何雨辰, 钱丽娟, 张煌辉, 邵海明, 刘国强, 林强.基于时空网络的电动汽车充电桩电能表误差估计方法研究[J].计量学报, 2025, 46, (01): 126-132.
- [3] 张继红, 叶福钰.电学计量检定和测量系统误差因素研究[J].中国质量监管, 2024, (06): 82-83.
- [4] 李全明.考虑充电行为的电动汽车充电站充电负荷分类预测研究[D].上海电机学院, 2024.
- [5] 汪冬冬.基于电动汽车充电负荷预测的充电站选址定容研究[D].安徽工程大学, 2023.
- [6] 王刚.面向CPSS的电动汽车充电站负荷预测方法研究[D].兰州理工大学, 2022.

作者简介：连明明（1990.04-），男，汉族，江苏宿迁，硕士研究生，中级，电学计量。