

# 基于多点采样的电能计量系统精度优化技术

张 浩

(国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津 300171)

**摘要** 多点采样技术为电能计量系统精度优化提供了新的解决方案。通过分析传统电能计量系统的误差来源,可以发现单点采样在复杂负载条件下存在局限性。针对这一问题,一种基于多点采样的优化方法在时间和空间维度上增加了采样点,有效提高了采样的代表性和全面性。实验结果表明,该方法在各种负载条件下均能显著提升计量精度,尤其在非线性负载和谐波干扰较强的情况下表现突出。这种技术为提高电能计量系统的精度和可靠性提供了新的思路和方法。

**关键词** 电能计量系统; 多点采样; 精度优化; 非线性负载; 谐波干扰

**中图分类号**: TM93

**文献标志码**: A

**文章编号**: 2097-3365(2024)10-0010-03

智能电网的快速发展和用电负载的日益复杂化对电能计量系统的精度提出了更高要求。传统的单点采样技术在面对非线性负载、谐波干扰等复杂情况时,往往难以保证计量的准确性。因此,提高电能计量系统的精度成为当前研究的一个热点问题。多点采样技术作为一种新兴的信号处理方法,在提高采样代表性和抗干扰能力方面具有显著优势。将多点采样技术应用于电能计量系统,有望显著优化其精度表现。通过理论分析和实验验证,可以系统地阐述多点采样在电能计量精度优化中的应用方法和效果。

## 1 电能计量系统精度问题分析

### 1.1 传统电能计量系统的误差来源

电能计量系统精度问题对于电力行业至关重要。深入分析误差来源、技术局限性和复杂负载条件下的挑战,有助于改进计量系统,提高电能计量的准确性。

传统电能计量系统的误差来源多种多样。电流互感器和电压互感器是主要误差来源之一,其非线性特性和相位角误差直接影响测量结果<sup>[1]</sup>。电能表本身也存在固有误差,包括元器件精度、温度漂移和老化等因素。此外,接线误差、电磁干扰和谐波失真等外部因素也会引入计量偏差。为了更直观地展示误差来源及其影响程度,可以参考表1。

### 1.2 单点采样技术的局限性

单点采样技术在电能计量中得到广泛应用,但也存在明显的局限性。这种技术基于对电压和电流瞬时值的单次采样,难以准确捕捉快速变化的电气参数。面对非线性负载和谐波干扰,单点采样容易造成采样失真,导致计算结果偏离实际值。同时,采样频率的限制使得高

频成分难以被准确测量,影响了对谐波含量的评估。

表1 电能计量系统主要误差来源及影响分析

误差来源	典型误差范围	主要影响因素
电流互感器	$\pm 0.1\% \sim \pm 0.5\%$	负载特性、温度、磁饱和
电压互感器	$\pm 0.1\% \sim \pm 0.3\%$	二次负载、环境温度
电能表	$\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$	元器件精度、温度系数
接线误差	$\pm 0.1\% \sim \pm 1\%$	人为操作、线路阻抗
电磁干扰	$\pm 0.1\% \sim \pm 0.5\%$	电磁环境、屏蔽效果

### 1.3 复杂负载条件下的计量挑战

在复杂负载条件下,电能计量面临更多挑战。非线性负载如变频器、开关电源等设备产生的谐波和间谐波,使得传统计量方法难以应对。负载快速波动和瞬态过程也给精确计量带来困难<sup>[2]</sup>。大功率电力电子设备引起的电网畸变,进一步增加了计量系统的误差。此外,分布式能源和智能电网的普及,使得双向电能流动成为常态,对计量系统提出了新的要求。

为应对这些挑战,新型电能计量技术不断涌现。多点采样和数字信号处理技术的应用,显著提高了对复杂波形的分析能力。基于人工智能的自适应算法,能够动态调整计量参数,适应负载变化。高精度传感器和先进的校准技术的引入,也大大提升了计量系统的整体性能。

## 2 多点采样技术原理与系统设计

### 2.1 多点采样的基本概念

多点采样技术在电能计量领域实现突破,核心是在单个电气周期内多次测量电压和电流。这种方法可

大幅提升测量精度，尤其适合复杂电网环境。相比单点采样，它能全面捕获电气参数瞬时变化，通过高频密集采样描绘波形细节。该技术的优势在于精确捕捉非线性负载和电网扰动下的波形畸变，为谐波分析和功率质量评估提供可靠数据。多点采样不仅提高了常规参数测量精度，还实现了高级参数的实时监测，为电网优化奠定基础。

## 2.2 时间和空间维度采样优化

多点采样技术的优化可以从时间和空间两个维度进行。在时间维度上，主要有提高采样频率和优化采样时刻分布两种方法。提高采样频率可以捕捉更多的波形细节，尤其适用于谐波丰富的工业环境<sup>[3]</sup>。优化采样时刻分布则有助于提高波形重构精度，对非正弦波形的测量尤为有效。通过合理安排采样时刻，可以在降低采样频率的同时保证测量精度，从而减少数据处理量和存储开销。

在空间维度上，多点采样优化的主要方式包括多点分布采样和关键节点重点采样。多点分布采样是在被测电路的不同位置布置采样点，以全面反映整个系统的电能状态。这种方法特别适用于大型配电系统，可以提供更详细和准确的电能分布信息。关键节点重点采样则是在电路中的关键位置设置采样点，针对性地提高特定参数的测量精度。

## 2.3 系统架构设计

多点采样系统的架构设计需全面考虑高精度、可靠性和灵活性。核心组件包括高精度 ADC、同步采样控制单元、数据存储模块和处理单元。ADC 的选型影响系统精度和动态范围。同步采样控制单元协调各采样点数据采集，确保时间一致性。数据存储模块提供足够容量和访问速度，处理单元采用高性能处理器和优化算法提高效率。

系统需具备良好的抗干扰能力和高速数据传输能力，采取屏蔽、隔离和滤波措施，采用高速数据总线 and 高效通信协议。通过 GPS 或 PTP 等技术保证多点采样的时间同步性。可扩展性和互操作性也是设计重点。模块化设计和标准化接口提高系统灵活性和兼容性，能够集成新的传感器、通信协议和数据处理算法，适应不断变化的应用需求。

## 2.4 多点采样算法与数据处理方法

多点采样技术效果取决于算法和数据处理方法选择。常用算法如插值、FFT 和小波变换，可从大量数据中提取信息，重构波形并计算电能参数<sup>[4]</sup>。处理方法需平衡实时性和准确性，通常采用分层策略：快速算法用于实时监测，复杂算法进行深度分析。实际应用

中面临数据量大、处理复杂等挑战。边缘计算、分布式处理等新技术可提升性能。人工智能和机器学习的引入为解决非线性问题开辟新途径。多点采样涉及多学科交叉，通过优化策略、改进架构和创新算法，不断提升电能计量精度和功能。

## 3 精度优化策略

电能计量的精度优化是一项复杂而关键的任务，需要从多个角度入手。采样点的选择、采样频率的自适应调整以及抗干扰措施的实施，都是提高多点采样技术精度的有效策略。

### 3.1 采样点选择优化

采样点的选择直接影响测量精度。传统的等间隔均匀采样方式简单易行，但面对复杂波形时捕捉不足。优化采样点分布可提高精度，主要有两种策略：不均匀采样和自适应采样。不均匀采样根据波形特点，在变化剧烈区间增加采样点密度，平缓区间减少采样点；自适应采样实时监测波形变化，动态调整采样点位置。不同采样策略适用不同场合，需综合考虑精度需求、计算复杂度和硬件成本。均匀采样实现简单，适合线性负载和稳定电网；不均匀采样能更好地捕捉关键特征，适用非线性负载和谐波环境；自适应采样精度高，适合复杂多变的电力系统。

### 3.2 采样频率自适应调整

采样频率的选择也是影响测量精度的重要因素。固定采样频率难以应对瞬息万变的电网环境，因此动态调整采样频率成为提升精度的另一有效手段。采样频率的自适应调整可依据多方面因素，如信号频谱、谐波分量以及负载类型等。当检测到高次谐波含量升高时，系统可自动提高采样频率，以获取更多的波形细节；当电网趋于稳定时，则可适度降低采样频率，节约系统资源。这种策略在确保精度的同时，也优化了系统性能。

### 3.3 抗干扰措施实施

电能计量系统常受电磁干扰、温漂等噪声影响。为确保测量可靠，提高抗干扰能力至关重要。在硬件方面，可用屏蔽材料、隔离设计减少电磁干扰，选用温度稳定元器件并温度补偿，降低温漂误差。在软件方面，数字滤波如中值滤波、卡尔曼滤波可抑制干扰，数据融合技术可综合多传感器信息，改善可靠性。常用抗干扰措施包括：电磁屏蔽隔离外部电磁场，光电隔离抑制共模干扰，数字滤波去除特定频段干扰，差分输入抑制共模和电源干扰。

综合运用精度优化策略和抗干扰措施，可显著提升多点采样技术在电能计量中的应用效果。实际工程

需根据具体环境选择合适的优化手段组合，以达到最佳测量精度和可靠性。未来将涌现更多创新精度优化方法，推动电能计量技术发展。

## 4 实验验证与性能评估

### 4.1 实验设置与方法

实验在标准的电能计量测试平台上进行，采用高精度的功率标准源和参考电能表作为基准，同时使用各种类型的负载和干扰源模拟实际电网环境<sup>[5]</sup>。测试对象为采用不同精度优化策略的多点采样电能表，包括优化采样点分布、自适应采样频率调整以及各种抗干扰措施等。实验数据通过高速数据采集系统记录，并进行离线分析处理。

### 4.2 线性负载与非线性负载下的精度对比

实验首先考察了优化前后电能表在线性负载和非线性负载下的测量精度。线性负载采用标准阻性负载，非线性负载采用单相可控硅调压负载，分别代表了两种典型的用电环境。在线性负载条件下，优化后电能表的误差从0.5%降低到0.2%，精度提升了60%；在非线性负载条件下，误差从1.2%降低到0.6%，精度提升了50%。优化策略对非线性负载的改善效果尤为明显。

### 4.3 谐波环境下的性能分析

非线性负载的广泛应用导致电网中谐波含量日益升高，给电能计量带来严峻挑战。为评估优化方法在谐波环境下的适应性，实验模拟了不同总谐波失真率（THD）下的测量场景。（见表2）

表2 不同谐波含量下的测量误差对比

总谐波失真率 (THD)	优化前误差	优化后误差	精度提升
5%	0.8%	0.4%	50%
10%	1.5%	0.7%	53%
20%	2.3%	1.1%	52%

实验结果显示，随着THD的升高，优化前电能表的测量误差明显增大。当THD为5%时，优化前误差为0.8%，优化后降低到0.4%，精度提升50%；当THD为10%时，优化前误差为1.5%，优化后降低到0.7%，精度提升53%；当THD达到20%的恶劣环境下，优化前误差高达2.3%，优化后控制在1.1%，精度提升效果稳定在52%以上。实验表明，所采用的优化措施能够有效适应谐波干扰，保证测量精度。

### 4.4 与其他精度优化方法的比较

为全面评价所提出优化方案的性能，实验还将其与其他常见的精度优化方法进行了对比，包括传统的

模拟滤波、Sigma-Delta调制等。（见表3）

表3 不同精度优化方法的性能比较

优化方法	线性负载 误差降低	非线性负载 误差降低	谐波适 应性
本文提出的方案	60%	50%	强
模拟滤波	30%	20%	弱
Sigma-Delta调制	45%	40%	中

对比结果表明，本文提出的优化方案在线性负载下的误差降低效果达60%，显著优于模拟滤波的30%和Sigma-Delta调制的45%；在非线性负载下，本方案的误差降低效果达50%，同样优于模拟滤波的20%和Sigma-Delta调制的40%。此外，本方案在谐波适应性方面表现出强大的优势，远超其他两种方法。

综合实验结果可以看出，通过采样点优化、自适应频率调整以及抗干扰措施的有机结合，多点采样技术的测量精度和可靠性得到大幅提升，为电能计量领域的技术进步提供了新的思路和方案。本文提出的优化方法在各种负载类型和干扰环境下都表现出色，具有广阔的应用前景。

## 5 结束语

基于多点采样的电能计量系统精度优化技术有效解决了传统单点采样在复杂负载条件下的精度问题。通过理论分析和实验验证，证明了该方法在提高计量精度、增强抗干扰能力方面的显著效果。这一研究不仅为电能计量系统的精度优化提供了新的技术路径，也为智能电网中的高精度能源管理奠定了基础。未来研究方向将聚焦于进一步优化采样策略，探索在更广泛的应用场景中的实施方案，以及与人工智能技术的结合，以实现更智能、更精确的电能计量系统。

## 参考文献：

- [1] 王炬广. 用电信息采集系统中的计量数据异常原因分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(05): 156-157.
- [2] 赵小凡, 杜舒明, 刘超. 基于大数据挖掘的电能计量互感器误差自动化控制系统[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(03): 151-154, 164.
- [3] 王元鸿, 姚文熙. 基于多点采样的交流伺服驱动器电流重构方法[J]. 电工技术, 2023(23): 24-28, 33.
- [4] 程晶晶, 周明龙. 分布式多点采样短期电力负荷预测系统的设计[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2018, 36(02): 216-218.
- [5] 邱燕雷. 电能计量装置在线监测系统研究[J]. 光源与照明, 2024(01): 146-148.