

面向宽量程直流计量的智能电表可靠性提升与在线校准技术

赵洛阳

浙江瑞银电子有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：本研究分析了分流器阻值漂移、信号调理链路温漂与时漂累积、ADC 非理想特性及 PCB 绝缘下降等影响长期稳定的关键因素。在此基础上，提出了硬件与算法协同的解决方案：硬件层面采用低漂移零漂移放大器、高稳定外部基准源及高温老化筛选工艺，并结合三防涂覆与密封灌胶增强环境适应性；算法层面构建了基于电流空闲时段的被动式零点校准与基于误差累积模型的自适应主动校准机制，辅以滑动滤波、异常剔除及动态周期管理策略。该软硬件结合方案可在无需拆表的前提下，有效补偿器件老化与环境引起的测量偏差，提升智能电表在宽量程下的长期运行可靠性与计量准确性，为分布式直流计量设备的在线监管提供了可行技术路径。

【关键词】：宽量程直流计量；智能电表；可靠性；在线校准

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.082

直流电能计量已由传统轨道交通、电解电镀等领域向更多民商应用扩展。随着电动汽车直流充电桩大量应用，用户侧直流计量需求快速增长；随着用户侧储能在各领域的应用，要求电表准确计量充放电双向直流电能；随着数据中心、5G 基站、智慧建筑等广泛采用直流供电系统，同时对直流电源进行精细管控的要求。以上应用场景有一个共同的特点：电流动态很大——待机状态下的电流只有几十毫安，但快充或者满功率下却有几百甚至上千安，量程比一般都超过 10000:1。宽量程直流计量给智能电表带来的技术难度远远大于以往交流电表。小电流端容易受噪声影响，零点漂移会引起无法容忍的相对误差；在大电流端由于分流器自身的发热导致阻值漂移，在长期使用中元器件的老化也使得出厂校准参数不再准确。传统定期拆表送检的计量监管模式，在直流充电桩等分散部署场景下成本高、实施难。因此，研究面向宽量程直流计量的智能电表可靠性提升技术，并探索无需拆表的在线校准方法，具有重要的理论价值与工程紧迫性。

1 宽量程直流计量场景下智能电表可靠性的核心内涵与挑战

对于宽量程直流计量应用中的智能电表来说，其可靠性有着不同于以往交流计量的独特含义。一是量程范围可靠。即不仅要求在额定电流附近准确度高，在接近起始启动电流（一般为额定电流的 0.1%~0.5%）和极限过载电流（一般为额定电流的 120%~200%）的情况下也要运行可靠。这也就意味着要求信号链路具有从微伏级至百毫伏级跨越数量级的线性响应能力。

直流充电桩用智能电表的设计使用寿命一般为 8~10 年，不能经常进行校准。分流器阻值缓慢漂移、放大器失调电压老

化、基准源长期漂移等都会对精度产生持续的损耗。高可靠性的要求是上述漂移在寿命周期内累计不超过允许的误差，或能通过自身的在线校准功能加以补偿。直流充电桩多采用室外或者半室内的安装方式，智能电表需适应-25℃~+70℃的环境温度范围以及凝露、盐雾、振动等严苛的工作条件。

宽量程测量对温度梯度尤其敏感——大电流自热与环境温度变化相互叠加，使分流器的热状态极为复杂。

宽量程与高可靠性是相互矛盾的。为了实现宽量程，信号链路需高增益来放大微弱的小信号，而高增益也放大了噪声及偏移；为了承受大电流，分流器需要较大的散热体积，但是大的体积带来更大的热容和热阻的变化使得温度补偿更加困难。如何解决上述矛盾，需要在误差机理分析的基础上，在硬件上提高其可靠性的同时进行智能校准算法的设计。



作者简介：赵洛阳（1981-），男，汉族，浙江绍兴人，本科，中级工程师，研究方向：新能源交直流计量产品。

2 影响宽量程直流计量可靠性的主要因素分析

2.1 分流器长期老化与阻值漂移特性

分流器作为直流智能电能表中的关键传感器件，它的阻值稳定与否直接影响着电能表的准确度；锰铜材料虽然有着较小的温度系数，但长时间在流过较大电流后会存在缓慢的阻值漂移现象。造成这种现象的主要原因是锰铜在老化的初期由于内部晶格中储存的能量被释放导致电阻率发生变化而产生一定的内阻，还有就是连接端子处的接触电阻也会随着时间增加发生一定的增大，最后就是铜引线与锰铜片之间会出现一定的热传导而导致阻值的变化。相关研究证明，未经特殊处理过的锰铜分流器经 1000h 额定电流老化后，其阻值漂移为 0.1%~0.3%，对 0.5 级电能表来说是无法接受的。

此外，分流器的老化速率并非线性，初期老化较快，后期趋于平缓，这要求出厂前必须进行充分的预老化筛选。

2.2 信号调理链路的温漂与时漂累积效应

从分流器出来的毫伏级电压至模数转换器所能接受的信号一般都需要经过仪表放大器或者可编程增益放大器进行调理，这些有源器件的输入失调电压、失调电流以及增益都会随着温度和时间的变化而变化。例如典型的仪表放大器的输入失调电压温漂可以达到 $0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \sim 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，这样对于一个 $100 \mu\Omega$ 的分流器来说就是 $5\text{mA} \sim 50\text{mA}/^\circ\text{C}$ 的电流漂移了。对于小电流来说，这个漂移足够淹没实际信号了。更为糟糕的是，温漂与时漂都是累积性的——多级串联使用的器件的误差是累加起来的，并且它们的符号有可能相同，总漂比单体的漂大得多。

2.3 模数转换器的非理想特性与参考源劣化

ADC 的 DNL 和 INL 引入量化误差，对于大动态范围的应用，小信号段有效位数不足；同时 ADC 内部参考电压源决定了测量的绝对精度，带隙参考源的长期漂移典型值在 $50\text{ppm} \sim 100\text{ppm}/1000\text{h}$ ，早期老化快。当电能表使用的是模数转换器内部参考时，参考老化就变成增益误差，并不能用一个零点来修正。

2.4 印制电路板绝缘阻抗下降与漏电流干扰

由于印制电路板在潮湿或污染条件下，其表面的绝缘阻抗会由正常情况下的百兆欧左右降低到兆欧甚至千欧级别，在这种情况下，分流器输出的毫伏量级的小信号受到邻近网络上的漏电流影响较大；尤其对高阻抗输入而言，微安级的漏电流会引起毫伏级的电压误差。另外，焊锡残渣、松香助焊剂中有效物质以及涂层老化变质也会形成漏电流的路径。

3 面向可靠性提升的硬件设计与工艺优化

3.1 分流器材料优选与高温老化筛选工艺

为了提高分流器寿命，在制造过程中首先应该选材合理，

并严格进行质量控制。分流器材料锰铜的铜、锰、镍成分影响分流器的电阻温度系数及使用寿命，建议采用长期使用证明性能优良的牌号（例如 6J12 或者 6J13），另外分流器采用电子束或者激光焊接优于传统的锡焊工艺。另外，在分流器筛选过程中，应该加入高温快速老化的环节：对装好后的分流器在 $120^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 下加电老化 $48\text{h} \sim 72\text{h}$ ，让分流器经历早期快速老化过程，阻值基本不变后做出厂定值。这样处理过的分流器之后长时间漂移可以降到 0.05% 以下。

3.2 低漂移、低噪声信号调理电路设计

调理电路中应采用零漂移型的仪表放大器或者可变量程放大器。零漂移放大器利用自动归零或者斩波稳零的方式，使得输入失调电压温度系数能够控制到 $\text{nV}/^\circ\text{C}$ 的量级，一般达到 $0.05 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 以下；同时其等效输入电流噪声也要比普通放大器低很多，这对于获取分流器上极小的电流信号十分有益。硬件层面应使用差分方式采集，并且从分流器两端直接引入凯尔文线接入运放同名端，以保证大电流回路不经过信号通道；在运放前端加入低漏流 EMI 滤波器件，实现高共模抑制比的同时降低漏流影响。

3.3 高稳定基准源与模数转换器选型要点

ADC 应选择具有较高输入阻抗、较低噪声的 Δ - Σ 型 ADC，它本身具有的过采样及噪声整形特性可以有效地增加小信号区有效位数。基准源尽可能使用外部基准而不是 ADC 内置基准。外部基准应为金属封或者陶瓷封埋入式齐纳基准，其长稳达 $10\text{ppm} \sim 20\text{ppm}/1000\text{h}$ ，比一般带隙基准提高了一个数量级；基准源输出端加装低通滤波器，进一步滤除宽带噪声；如考虑成本因素，也可以使用选型的高品带隙基准，但需要进行整机老化之后统调。

3.4 抗潮湿、抗污染的防护涂覆与密封技术

PCB 的保护是保证其长期绝缘性的重要因素。所有的装好后 PCB 需要清洗掉焊接残渣及离子污染，并喷涂三防漆或真空浸涂。三防漆宜采用丙烯酸、聚氨酯或聚对二甲苯，后者气相沉积形成的涂层没有针孔并且非常均匀，防尘防水等级最高但是价格也最高，在户外使用场合还要考虑到把计量模块全部封装在灌胶盒里，灌胶材料可以选择低应力高强度绝缘的环氧树脂或者有机硅凝胶。密封设计需兼顾散热与应力释放，避免温度循环导致内部器件损坏。

4 准时机优化与校准数据处理策略

4.1 基于电流空闲时段的被动式校准触发

在线校准最大的难题就是不能影响到正常的计量工作，在线校准的最佳时刻就是在电流空闲的时候进行校准——没有负载连接、被测电流近似为零的时间窗口。对于电动汽车充电桩来说，两次充电任务之间往往有时间窗口可以执行一次完整的零点校准过程。智能电表应该实时监控当前的电流采样值，若

在一定时间内（例如：30s）流经该传感器的电流小于某个预设值（例如：额定电流的0.1%）则认为处于空载运行模式并进行一次零漂补偿。

其中，零点偏移自动校正方法具体如下所示：首先将输入端子接到内短路或者保持外开路状态，依次进行N次ADC值读取后求出其均值即为当前零点偏移量，并将旧的零点偏移设置成新旧二者之和。这是一种非主动触发模式，不需人工干涉，在空余时间自动运行。

4.2 基于误差累积模型的自适应主动校准

被动式校准等待自然闲置的机会，但是在一些利用率很高的场合，负载会持续运行而没有校准的机会。这时就需要建立误差累积模型进行自适应的主动校准机制。误差累积模型考虑分流器老化程度以及以往温度漂移情况，还有上次校准以来累计运行的时间来估计目前的最大测量误差值。

如果估计出的误差接近一定范围（比如精度指标的70%），则即便没有检测到空闲条件，也可以由电表主动发起一次短时间的中止操作（比如延后下一次开始），为校准留出1~2分钟的时间窗。自适应主动式校准的关键变量有：分流器老化系数、信号链温度系数、累计电流值。将时间改为累计流过的总电流值，则更能体现分流器发热程度及寿命变化情况。

4.3 校准数据的滑动滤波与异常值剔除

实际得到的校验数值中存在一定的噪声及随机性的扰动，若将其作为新的校验系数可能会带来更大的误差。所以对得到的新校验数值应该进行合理的处理。最简单的做法是使用滑动滤波的方法，在获取N次校验数值之后去掉其中最大的一个数值和最小的一个数值并计算它们的平均值以消除尖峰噪声的影响；为了更好地避免这种情况发生，还可以采用基于中位数的滤波或者基于拉依达准则的异常值判断——如果一个读数比平均值大3个标准差，则将其排除，并重测一次。

此外，还需要将本次校准的结果同历史结果做对比，如果出现

参考文献：

- [1] 秦德金,秦莫凡.基于数智化的低压供电可靠性与采购成本效益关联研究[J].中国招标,2025,(S2):18-20.
- [2] 工业和信息化部电子第五研究所——致力可靠性检验检测技术开发助力电力行业自主可控高质量发展[J].中国质量监管,2022,(01):60-61.
- [3] 邝梓佳.基于多部门联动的F市10kV配网供电可靠性提升研究[D].暨南大学,2019.

过大的偏差（例如：零漂出现突然变化 $10\mu\text{V}$ 以上的情况），则不应立即更新，并进入故障分析程序检查是否发生了硬件异常或者受到外界较强的干扰。

4.4 校准周期动态调整与历史记录管理

固定周期校验不能满足所有场合下可靠性的要求，采用智能变周期校验方法能根据误差增长情况动态地调节校验时间，在计量器具刚投入运行的一段时间里，其元件老化程度比较快，应该采取比较小的时间间隔进行定期检定（如7d），随着时间推移，老化速度减慢，则可以逐渐增加校验间隔为1个月或者几个星期。如果发现某只电能表经常受到较大的负载电流冲击或是温升变化很大，应当临时缩短其校准间隔，并将所有的校准操作和结果予以记录并存入非易失存储器内，保存完整的校准历史记录。这些记录可以用来观察电能表稳定特性变化规律，判断下一次检定时间，也可以作为故障排查的数据支撑。如果出现多期检定数据发生正负偏差持续增大等情况，则可以进行异常报警，提醒相关人员注意此只电能表是否正常。

5 结论

针对宽量程直流计量智能电表的可靠性提高和在线校准方法研究，是支撑未来直流充电桩、储能等领域新型应用公平计量的重要保障。文章结合宽量程直流计量可靠性的含义，对分流器老化、信号链路漂移、模数转换器老化以及绝缘能力降低等方面的影响进行了讨论。从硬件方面提出分流器用材优选及高温老化筛选、低漂移信号调理电路设计、高稳定性基准源选型以及防护涂覆密封等提高可靠性的方法。从校准方法角度出发，提出基于电流空闲时间间隔的被动式校准和基于误差累积模型的自适应主动校准相结合的在线校准方案，给出滑动滤波、异常剔除以及周期动态调整的数据处理和管理策略。软硬件结合的方式使得在不拆除电表送检的情况下，持续稳定地实现宽量程直流计量。下一步的研究工作主要有：基于人工智能的误差趋势预测、多电表协同校准及高电压等级直流计量的隔离和校准方法。