ANALOG DEVICES 超越一切可能™ | ADI AnalogDialogue

直流电能计量应用

Luca Martini，系统工程师

为什么直流电能计量很重要?

21世纪，世界各国政府都在制定行动计划，以应对长期复杂的减少CO_2排放的挑战。CO_2排放已证实是造成气候变化严重后果的原因，同时对新型高效能源转换技术和改进电池化学组成的需求也在迅速增长。

包括可再生和不可再生能源在内，仅去年一年，世界人口就消耗了近18万亿千瓦时，而这一需求还在继续增长；事实上，在过去的15年里，消耗了超过一半的现有能源。

为此，我们的电网和发电机还在不断地增长；如今，对更高效、更环保的能源的需求与日俱增。由于更容易使用，早期的电网开发人员使用交流电(ac)向世界供电，但在许多地区，直流电(dc)可显著提高效率。

在基于宽带隙半导体（例如GaN和SiC器件）的高效经济型功率转换技术发展的推动下，许多应用现在都看到了转换为直流电能的好处。因此，精确的直流电能计量变得越来越重要，特别是涉及到电能计费的地方。本文将讨论直流计量在电动汽车充电站、可再生能源发电、服务器场、微电网和点对点能源共享方面的发展机会，并介绍一种直流电表设计。

直流电能计量应用

电动汽车直流充电站

预计到2018年[1]，插电式电动汽车(EV)的复合年均增长率为+70%，并且预计2017至2024年将以+25%的复合年均增长率增长。[2]充电站市场从2018至2023年将以41.8%的复合年均增长率增长。[3]然而，为了加速减少私人交通造成的二氧化碳排放，电动汽车需求成为汽车市场的首选。

近年来，人们在提高电池容量和使用寿命方面做了大量工作，但同时必须提供广泛的电动汽车充电网络，这样才能无需担心行驶里程或充电时间问题，从容实现长途旅行。许多能源供应商和私营企业都在部署高达150 kW的快速充电器，并且每个充电桩功率高达500 kW的超快充电器也引发了公众的兴趣。考虑到局部充电峰值功率高达兆瓦的超快充电站和相关的快速充电能源溢价率，电动汽车充电将成为一个巨大的电能交换市场，随之需要进行准确的电能计费。

目前，标准电动汽车充电器在交流侧计量，缺点是无法测量交流-直流转换过程中损失的电能，因此，对最终客户来说，计费不准确。自2019年以来，新的欧盟法规要求能源供应商只能向客户收取传输到电动汽车的电能费用，使得电源转换和分配损失都由能源供应商来承担。

虽然先进的SiC电动汽车转换器可达到97%以上的效率，但快速和超快充电器直接连接到汽车电池时，电能以直流方式传输，在这种情况下，显然需要在直流侧实现准确计费。除了涉及电动汽车充电计量公共利益外，私人和住宅点对点电动汽车充电计划可能对于直流侧进行精确的电能计费具有更大的激励作用。

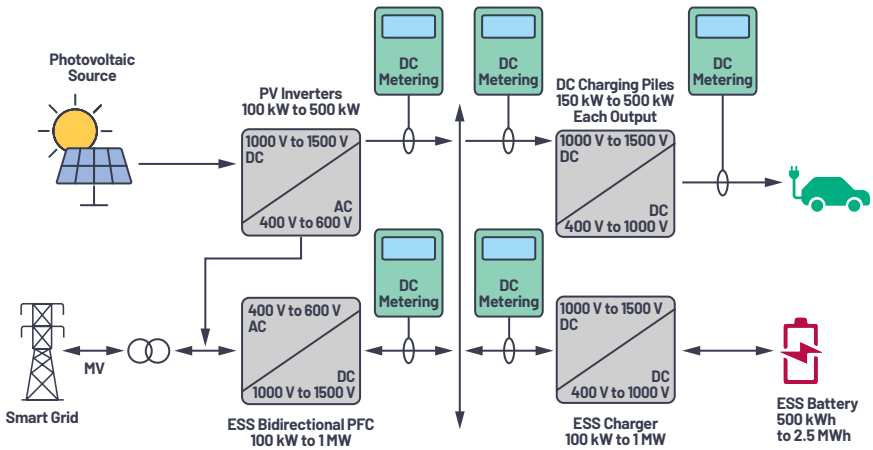

图1. 未来电动汽车充电站的直流电能计量。

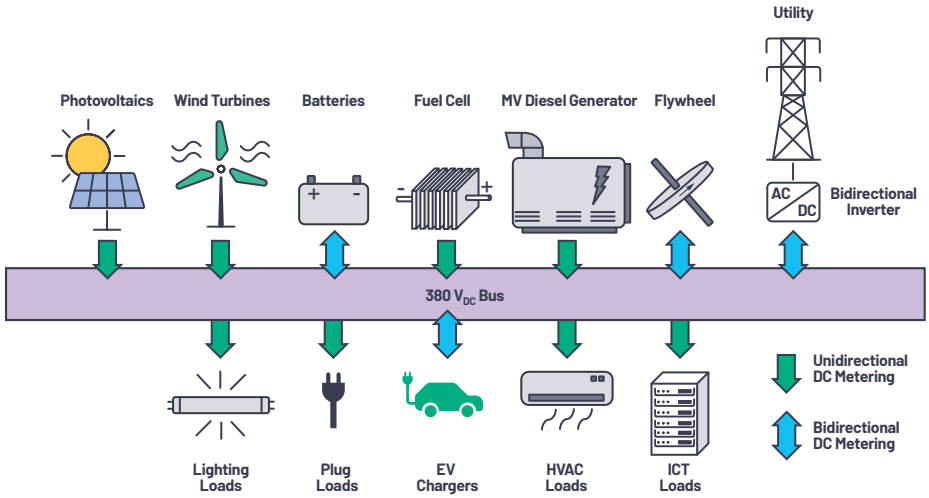

图2. 可持续微电网基础设施的直流电能计量。

直流配电—微电网

什么是微电网？从本质上讲，微电网是更小版本的公用电力系统。因此，需要安全、可靠、高效的电源。医院、军事基地都可能使用微电网，微电网甚至会作为公用系统的一部分，其中可再生能源发电、燃料发电机和储能共同作用形成一个可靠的能源分配系统。

楼宇建筑中也会使用微电网。随着可再生能源发电机的广泛使用，建筑物甚至可以自行供电，屋顶太阳能电池板和小型风力涡轮机产生的电能足够使用，独立运行但仍提供公共电网支持。

此外，建筑物多达50%的电力负载是直流电。目前，每台电子设备都必须将交流电转换为直流电，在这个过程中会损失高达20%的电能，与传统交流配电相比，估计总能耗可节省多达28%。[4]

在部署直流电的建筑物中，可以通过将交流电一次转换为直流电，并将直流电直接馈入所需设备（如LED灯和电脑）来降低能耗。

随着大家对直流微电网日益关注，对标准化的需求也在增加。

IEC 62053-41是一个即将推出的标准，将规定住宅直流系统和封闭式电表（类似于直流电能计量的等效交流计量）的要求和标称水平。

截止2017年[5]，直流微电网领域价值约为70亿美元，并且随着新兴直流配电的发展趋势将会进一步增长。

直流供电数据中心

数据中心运营商正在积极考虑使用不同的技术和解决方案来提高设施的电力效率，因为电力是其最大的成本之一。

数据中心运营商看到了直流配电的相关好处，不仅可减少交流和直流之间需要进行的最少转换次数，而且与可再生能源的整合也更轻松、更高效。转换级数的减少按下式估计：

- 节能5%至25%：提高传输和转换效率，并减少热量产生
- 双倍可靠性和可用性
- 占地面积减少33%

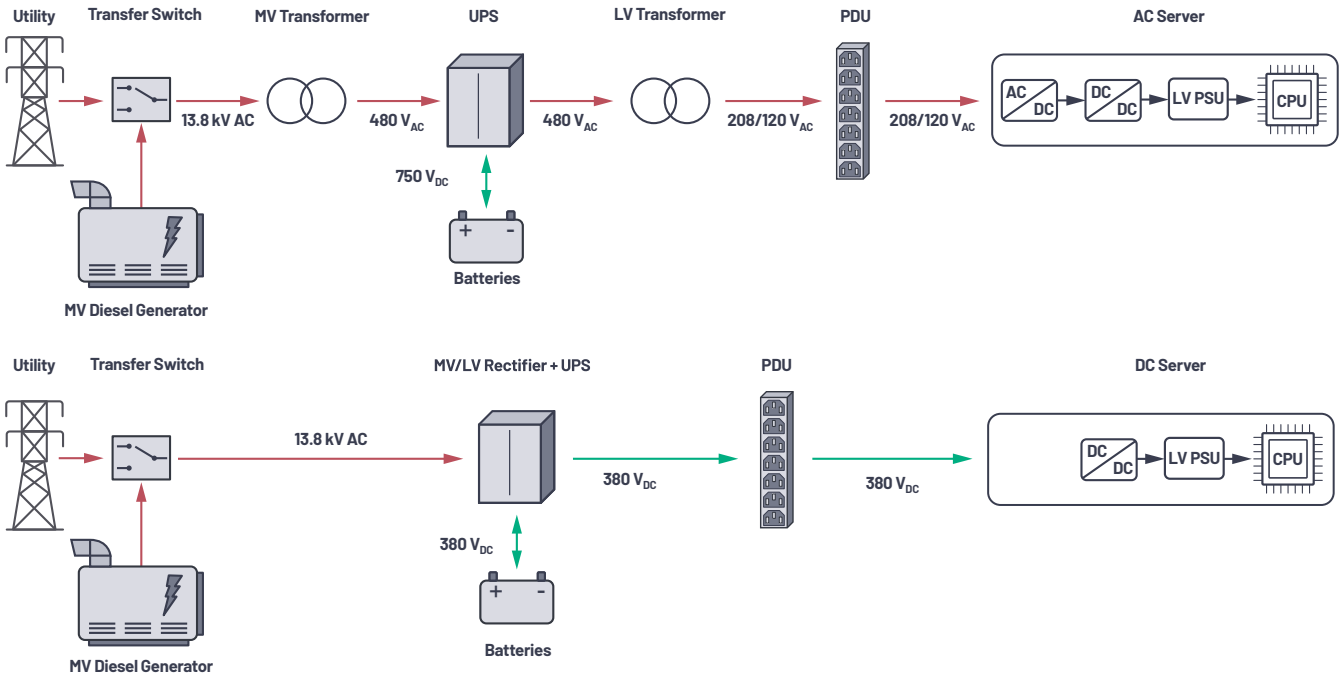

图3. 与传统交流配电相比，数据中心直流供电需要的组件更少，损耗也更低。

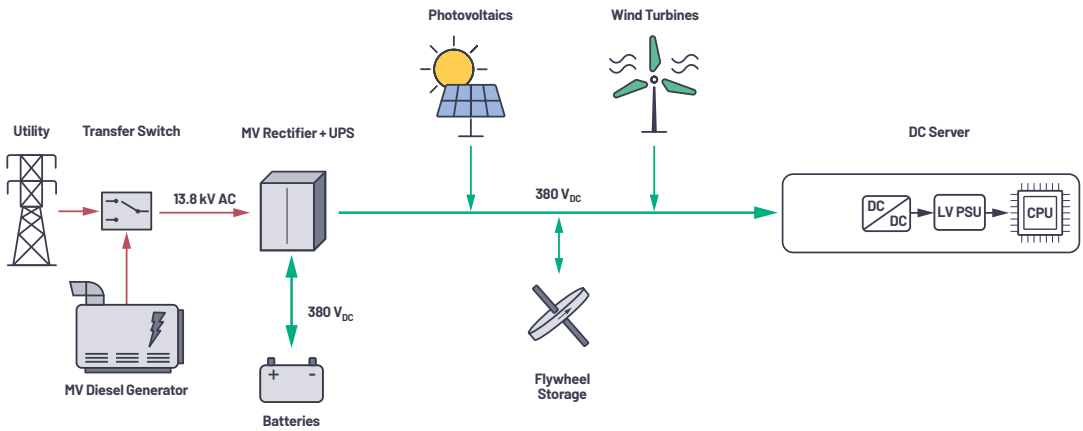

图4. 直流供电数据中心的可再生能源整合。

配电总线电压范围高达380 V_{DC}左右，由于许多运营商开始采用按用电量向托管客户收费的测量方法，因此精确的直流电能计量越来越倍受关注。

向托管客户收取电费的两种常用方式：

- 每次（每个出口固定费用）
- 消耗的电能（计量出口—对所消耗的每千瓦时收取电费）

为了鼓励提高电源效率，计量输出方法越来越受欢迎，客户定价涉及以下几部分：

经常性费用 = 空间费用 + （IT设备抄表 × PUE）

- 空间费用：固定，包括安全保障和所有建筑物运营成本
- IT设备抄表：IT设备消耗的千瓦时数乘以电能成本
- 电源使用效率(PUE)：考虑IT背后基础设施的效率，例如散热冷却

一个典型的现代机架会消耗高达40 kW的直流电。因此，需要使用计费级直流电表来监测高达100 A的电流。

精密直流电能计量挑战

20世纪初，传统交流电表完全是机电式。使用电压和电流线圈的组合在旋转铝盘中感应涡流。铝盘上产生的转矩与电压和电流线圈产生的磁通量的乘积成正比。最后，在铝盘上添加一个破碎磁铁，使转速与负载消耗的实际功率成正比。此时，只需计算一段时间内的旋转次数即可计量耗电量。

现代交流电表则更复杂，也更准确，并可防止窃电。现在，先进的智能电表甚至可以监测其绝对精度，并且安装在现场时可全天候检测是否存在窃电迹象。ADI公司的ADE9153B计量IC就具有此功能，它采用*m*Sure®技术。

无论是现代电表、传统电表、交流电表还是直流电表，都是根据其每千瓦时脉冲常数和百分比等级精度进行分类的。每千瓦时脉冲数表示电能更新率，即分辨率。等级精度表示电能的最大计量误差。

与老式机械电表类似，给定时间间隔内的电能也是通过计算这些脉冲数进行计量；脉冲频率越高，瞬时功率也越高，反之亦然。

直流电表架构

直流电表的基本架构如图5所示。要测量负载所消耗的功率($P = V \times I$)，至少需要一个电流传感器和一个电压传感器。当低电压侧为地电位时，流过电表的电流通常在高电压侧测量，以便尽量减少未计量漏电的风险，但电流也可在低电压侧测量，如果设计架构需要，也可以在两侧测量。通常使用测量和比较负载两侧电流的技术，使电表具有故障和窃电检测能力。但是，在测量两侧的电流时，至少需要隔离一个电流传感器，以便处理导体间的高电位。

电压测量

电压通常用电阻分压器来测量，其中使用阶梯电阻将电位以一定比例降低到与系统ADC输入兼容的电平。

由于输入信号的幅度很大，使用标准组件可轻松实现精确的电压测量。但是，必须注意所选组件的温度系数和电压系数，以确保在整个温度范围内具有所需的精度。

如前所述，用于电动汽车充电站等应用的直流电表有时需要专门对传输到车辆的电能计费。为了满足测量要求，电动汽车充电器的直流电表可能需要有多个电压通道，使电表也能在车辆的入口点检测电压（4线测量）。采用4线配置的直流电能计量方式，就可以将充电桩和电缆的所有电阻损耗从总电能账单中扣除。

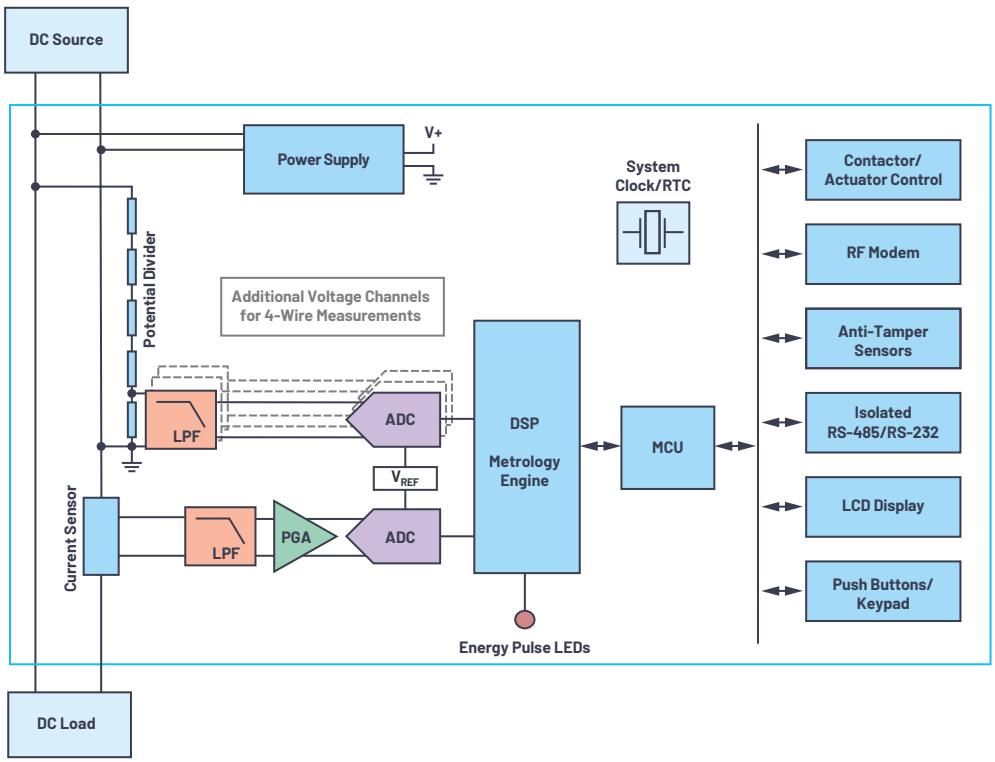

图5. 直流电表系统架构。

直流电能计量的电流测量

电流可通过直接连接测量，也可通过感应电荷载体流动所产生的磁场来间接测量。下一节将讨论最常用的直流电流测量传感器。

分流电阻

直接连接电流检测是一种成熟可靠的交流和直流电流测量方法。电流流过一个已知阻值的分流电阻。根据欧姆定律(V = R × I)，分流电阻两端的压降与流经电阻的电流成正比，将压降放大和进行数字化处理，就可以精确地得出电路中的电流。

分流电阻检测是适合测量mA至kA电流的准确高效的低成本方法，理论上具有无限的带宽。但是，这种方法有一些缺点。

当电流流过电阻时，产生的焦耳热与电流的平方成比例。这不仅会造成效率损失，而且自热效应还会影响分流电阻值，从而导致精度下降。为了限制自热效应，可使用低值电阻。但是，使用小电阻时，通过传感元件的电压也很小，有时会与系统的直流偏移相当。在这些情况下，要在动态范围的低端实现所需精度并不容易。可使用具有超低直流偏移和超低温漂的先进模拟前端，来克服低值分流电阻的限制。但是，由于运算放大器具有恒定增益-带宽乘积，高增益将会限制可用带宽。

低值电流检测分流器通常由特定的金属合金制成，如锰铜或镍铬，这些金属合金可以抵消其各成分的反向温度漂移，从而导致总漂移约为数十ppm/°C。

直接连接直流测量中的另一个误差因素是热电动势(EMF)现象，也称为塞贝克效应。在塞贝克效应这种现象中，在形成结的至少两个不同电导体或半导体之间的温差会在两者之间产生电位差。塞贝克效应是一种众所周知的现象，广泛用于检测热电偶的温度。

在4线连接的分流器中，焦耳热会在电阻合金元件的中心形成，与铜传感导线一起传播，铜传感导线可能连接到PCB（或其他介质），也可能有不同的温度。

传感电路将形成不同材料的对称分布；因此，将大致抵消正负极传感导线上的结电势。但是，热容量的任何差异，如连接到更大铜块（接地层）的负极传感导线，会导致温度分布不匹配，从而产生由热电动势效应引起的测量误差。

因此，必须注意分流器的连接和所产生热量的分布情况。

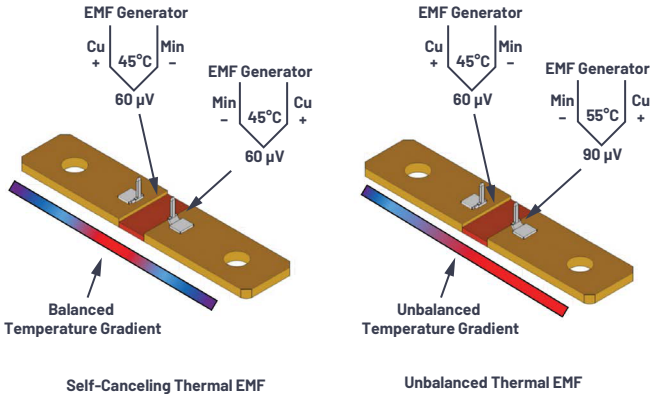

图6. 由温度梯度引起的分流器中的热电动势。

磁场感应—间接电流测量

开环霍尔效应

传感器由一个高磁导率环构成，感应电流导线通过该环。这会将被测导体周围的磁力线集中到一个霍尔效应传感器上，该传感器插在磁芯的横截面内。该传感器的输出经过预先处理，通常有不同的配置可供选择。最常见的有：0 V至5 V、4 mA至20 mA或数字接口。以相对低成本提供隔离和高电流范围的同时，绝对精度通常不低于1%。

闭环霍尔效应

由电流放大器驱动的磁通磁芯上的多匝次级绕组提供负反馈，以实现总磁通量为零的情况。通过测量补偿电流，线性度得到了提高，不存在磁芯磁滞，总体上具有出色的温漂，并且精度比开环解决方案更高。典型误差范围下降到0.5%，但是额外的补偿电路使传感器成本更高，有时带宽也受到限制。

磁通门

是一个复杂的开环或闭环系统，通过监测有意饱和磁芯的磁通量变化来测量电流。线圈绕在高磁导率铁磁芯上，磁芯由对称方波电压驱动的二次线圈有意饱和。每当磁芯接近正负饱和时，线圈的电感就会崩溃，其电流变化率也会增加。线圈的电流波形保持对称，除非外加一个外部磁场，这样波形就会变得不对称。通过测量这种不对称性的大小，就可以估算出外部磁场的强度，以及由此产生的电流。它可以提供良好的温度稳定性和0.1%的精度。但是，传感器中复杂的电子器件使其成为一种昂贵的解决方案，其价格比其他隔离式解决方案高10倍。

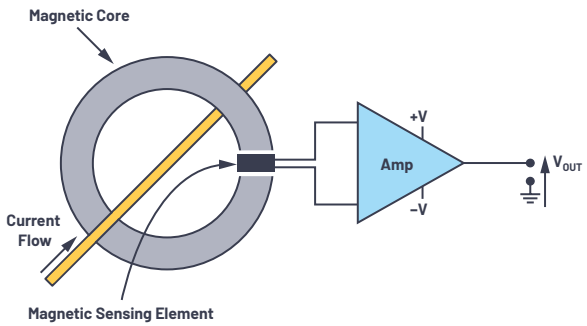

图7. 基于通量集中器和磁性传感器的开环电流传感器。

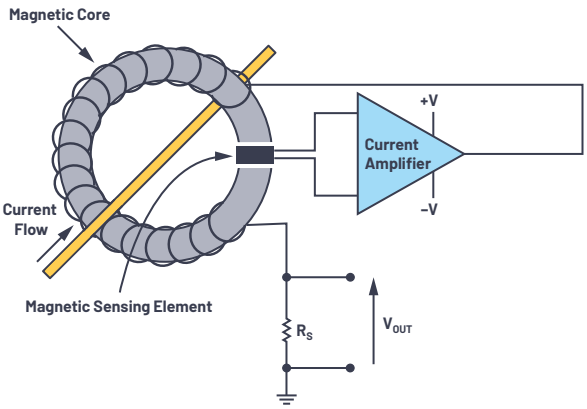

图8. 闭环电流传感器的工作原理示例。

直流电能计量：要求和标准化

虽然与现有交流计量标准生态系统相比，直流电能计量的标准化似乎不难实现，但行业利益相关者仍在讨论不同应用的要求，这就需要更多的时间来敲定直流计量的具体细节。

IEC正在制定IEC 62053-41，以定义精度等级为0.5%和1%的有功电能直流静电电表的具体要求。

该标准提出了一个标称电压和电流的范围，并对电表的电压和电流通道的最大功耗进行了限制。此外，与交流计量要求一样，定义了动态范围内的具体精度，以及空载条件下的电流阈值。

草案中对系统带宽没有具体要求，但要求成功完成快速负载变化测试，并对系统最小带宽定义了隐含要求。

电动汽车充电应用中的直流计量有时符合德国标准VDE-AR-E 2418或旧铁路标准EN 50463-2。根据EN 50463-2，对每个传感器都指定了精度，组合电能误差是电压、电流和计算误差的正交和：

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_V^2 + \epsilon_I^2 + \epsilon_{calc}^2} \quad (1)$$

表1. 根据EN 50463-2标准确定的最大电流误差百分比

电流范围	0.2R级	0.5R级	1R级
1%至5% I_N	1%	2.5%	5%
5%至10% I_N	0.4%	1%	1.5%
10%至120% I_N	0.2%	0.5%	1%

表2. 根据EN 50463-2标准确定的最大电压误差百分比

电压范围	0.2R级	0.5R级	1R级
<66% V_N	0.4%	1%	2%
66%至130% V_N	0.2%	0.5%	1%

结语：符合概念验证标准的直流电表

ADI公司是精密传感技术的行业领导者，为精密电流和电压测量提供完整信号链，以满足严格的标准要求。下一节将介绍符合即将推出的专用标准IEC 62053-41要求的直流电表的概念验证。

考虑到微电网和数据中心计费级直流电能计量的空间，我们可以假设表3中所示的需求。

表3. 直流电表规格—概念验证

额定值		标称值	动态范围	测量（最大范围）
电压		±400 V_{DC}	100:1	±600 V
电流		±80 A	100:1	±240 A
精度	1%至5% I_{NOM}	1%		
	5%至120% I_{NOM}	0.5%		
温度		-25°C至+55°C		-40°C至+70°C储存
电表常数		1000 imp/kWh		
电压和电流带宽		2.5 kHz		

使用低值和低电动势分流器可以实现准确的低成本电流检测（<1 μV_{EMF}/°C）。采用低值分流电阻对于减少自热效应并使功率电平低于标准要求的限值至关重要。

商用75 μΩ分流器将会使功耗保持在0.5 W以下。

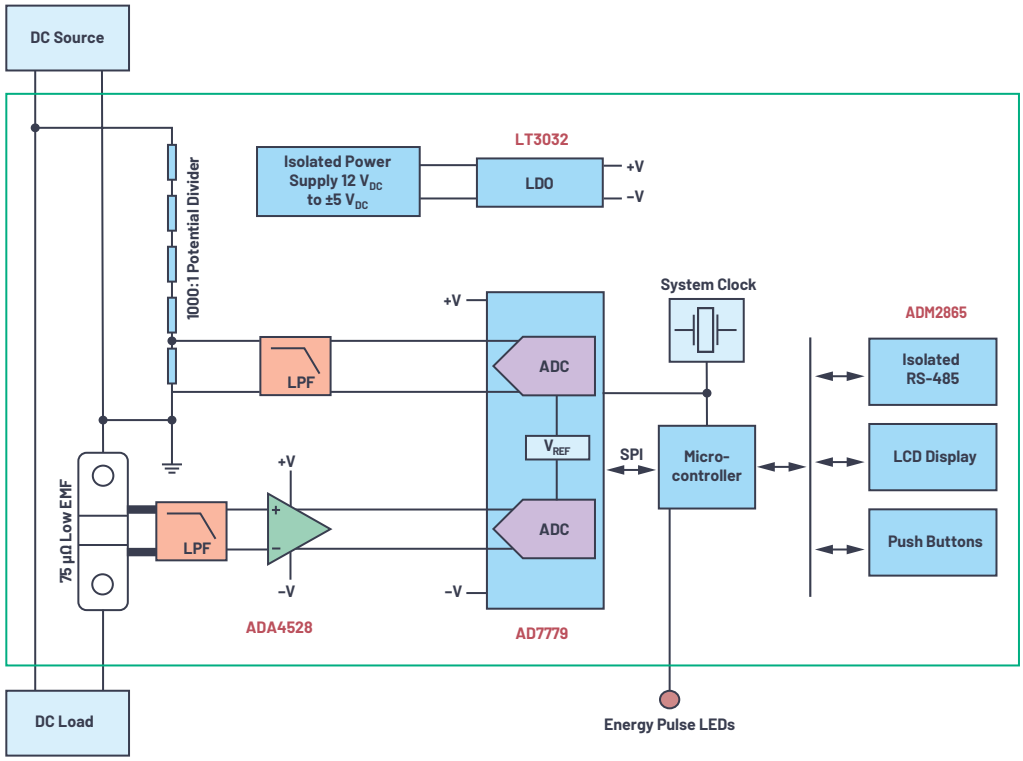

图9. 直流电表系统架构。

但是，在75 µΩ分流器上，80 A标称电流的1%会产生60 µV的小信号，需要使用在亚微伏的失调漂移性能范围内的信号链。

ADA4528的最大失调电压为2.5 µV，最大失调电压漂移为0.015 µV/°C，非常适合为小分流信号提供超低漂移、100 V/V放大。因此，同步采样、24位ADC AD7779可直接连接到放大级，具有5 nV/°C输入参考失调漂移量。

图10. 概念验证—原型制作。

通过直接与AD7779 ADC输入端相连的1000:1比率的电阻电位分压器，可以精确测量高直流电压。

最后，利用微控制器实现简单的逐样本、中断驱动计量功能，其中对于每个ADC样本，中断例程为：

- 读取电压和电流样本
- 计算瞬时功率($P = I \times V$)
- 在电能累加器中累加瞬时功率
- 检查电能累加器是否超过电能阈值以产生电能脉冲，并清除电能累加寄存器

此外，除了计量功能，微控制器还支持系统级接口，如RS-485、LCD显示和按钮。

参考资料

[1] Tom Turrentine、Scott Hardman和Dahlia Garas。“引导电动汽车向可持续发展过渡。”国家可持续交通中心，加州大学戴维斯分校，2018年7月。

[2] “按类型（纯电动汽车、混合动力电动汽车、插电式混合动力电动汽车）、车辆类型（两轮车、客车、商务车）和地区划分的全球电动汽车市场报告—行业趋势、规模、份额、增长、估计和预测，2017-2024。”Value Market Research。

[3] *按充电站（交流充电站、直流充电站）、安装类型（住宅、商业）和地区（北美、欧洲、亚太地区和世界其它地区）划分的电动汽车充电站市场—到2023年的全球预测*。Research and Markets，2018年4月。

[4] Venkata Anand Prabhala、Bhanu Prashant Baddipadiga、Poria Fajri和Mehdi Ferdowsi。“直流配电系统架构及优势概述。”MDPI，2018年9月。

[5] “按类型（交流微电网、直流微电网、混合）、连接（并网、远程/孤岛）、产品（硬件、服务、软件）、电源（天然气、太阳能、燃料电池、热电联产、柴油等）、应用（医疗健康、工业、军事、公用电力事业和教育机构）、地区（北美、欧洲、亚太地区、南美以及中东和非洲地区）划分的全球微电网市场、全球行业分析、市场规模、份额、增长、趋势和预测，2018-2025。”Researchstore.biz。

作者简介

Luca Martini于2016年获得意大利博洛尼亚大学能源电子及通信工程硕士学位。在攻读硕士学位期间，他在德国纽伦堡弗劳恩霍夫集成电路研究所(Fraunhofer IIS)工作了7个月，开发了用于表征压电能量收集器的精密实时控制系统。从2006至2016年，Luca从事生物医学领域的系统和硬件开发工作。2016年，Luca加入英国爱丁堡ADI公司的能源和工业系统事业部。联系方式：luca.martini@analog.com。

ANALOG DEVICES
超越一切可能™

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。请访问ez.analog.com/cn。

©2021 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

请访问analog.com/cn