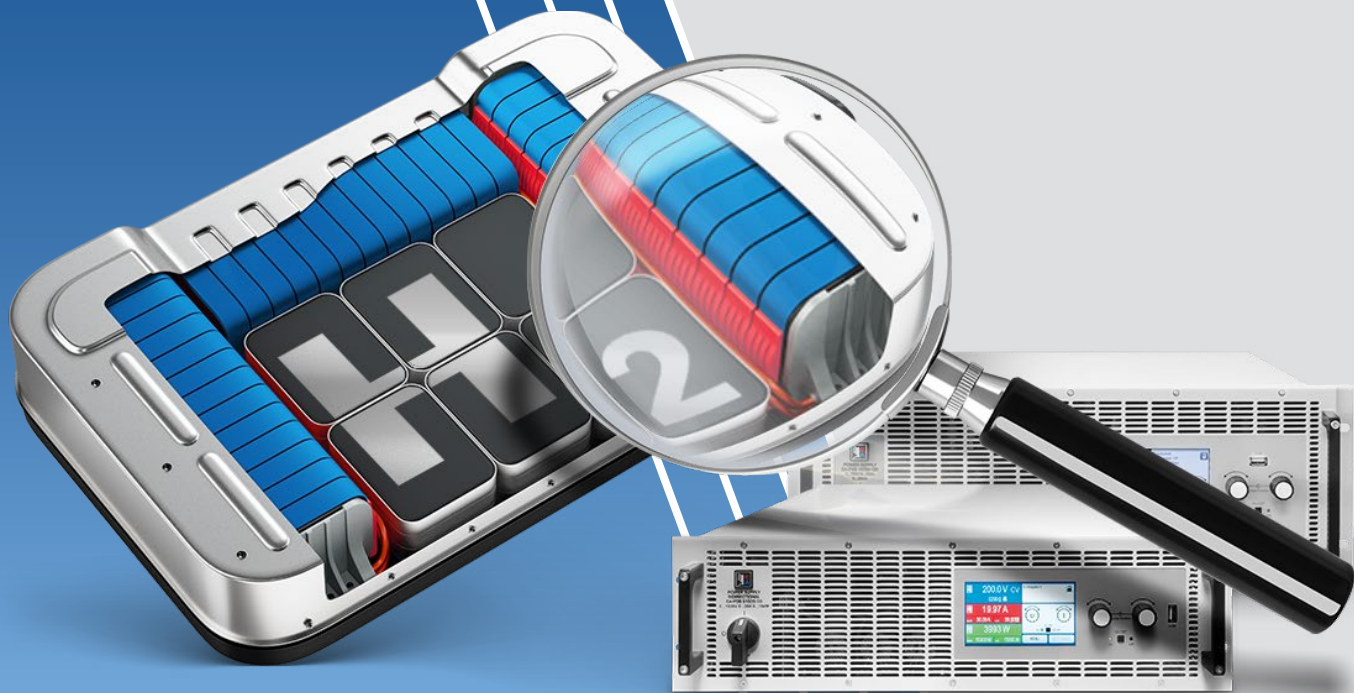




Elektro-Automatik



# 高效轻松的燃料电池测试

支持气候中立能源的发展



简单



性价比高



可持续

# 测试燃料电池堆

燃料电池使用氢作为燃料，与氧结合产生电力。产电过程的副产品是热和水。温室气体二氧化碳的排放量为零，使用燃料电池电源有助于减少环境中的二氧化碳。图 1 显示了燃料电池的工作原理。氢和氧通过阳极氧化和阴极还原形成离子。电子可以通过外部负载从阳极流到阴极，质子可以通过电解质从阳极流到阴极，使化学反应能量转化成电能。最终产物是水和热，不是二氧化碳。图示燃料电池是质子交换膜 (PEM) 燃料电池。

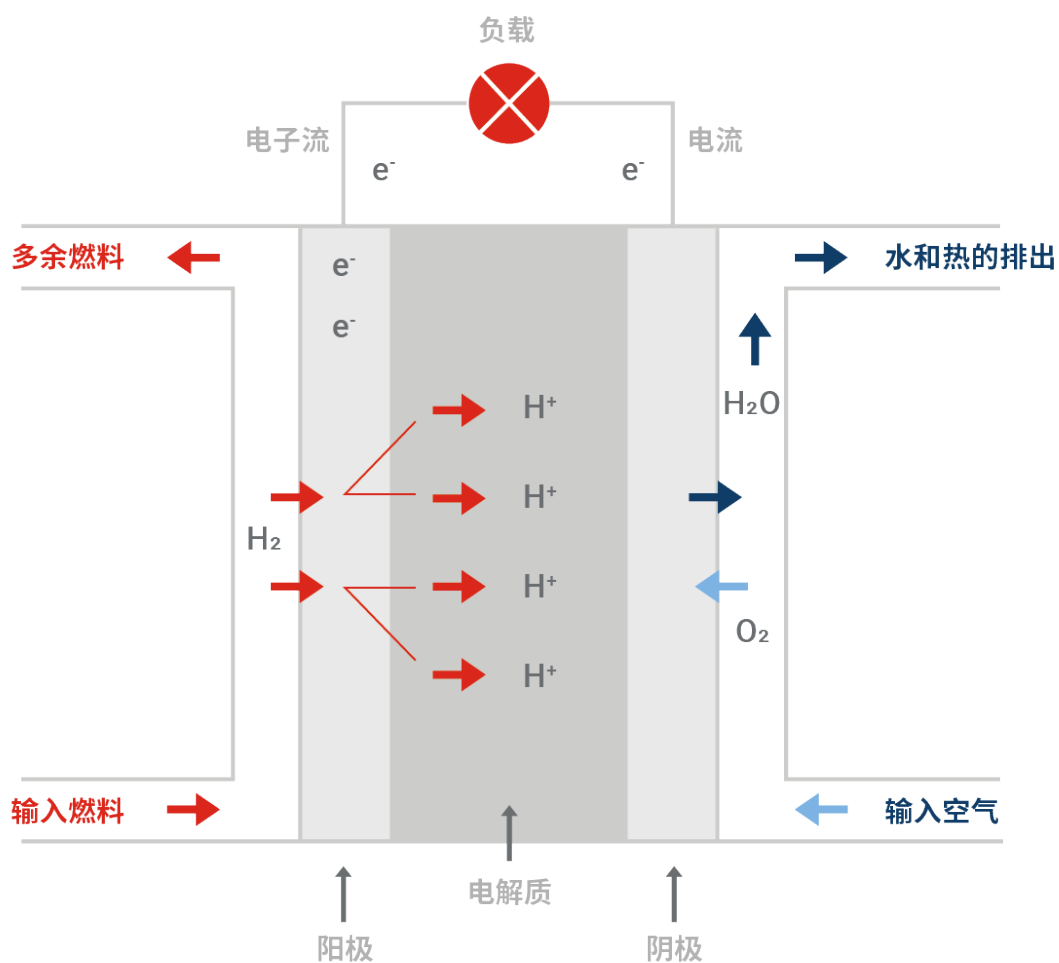


图 1  
质子交换膜燃料电池的基本功能原理图

燃料电池\*应用于物料搬运车辆、运输车辆和长途车辆，以及用作备用电源。政府计划、经济激励和新应用使市场增长率超过 30%。

单个燃料电池的输出电压为 2 V，因此，实际燃料电池是由多个电池组成的电池组或电池堆。车辆燃料电池的输出功率可达 125 kW；用作备用电源的最大燃料电池可具有 1.5 MW 的容量和 900 V 的输出电压。随着燃料电池技术的改进，制造商将设计功率更高和额定电压更高的燃料电池堆。

在如此高的功率容量下，必须测试燃料电池堆，确保它们安全，具有最低的指定效率和所需的使用寿命。EA Elektro-Automatik 电子负载和双向电源具有非常高的输入和输出容量，能够测试燃料电池堆。电子负载可提供具有 30 kW 容量和 2000 V 输出电压的型号。电流容量可达 1000 A。可并联多达 64 个负载来测试功率级高达 1.92 MW 的燃料电池。无论是源电源还是吸收电源，双向电源都具有相同的功率处理和并联仪表容量。

## 使用 AC 扰动技术测量燃料电池电阻

图 2 显示了燃料电池的简化电路模型。燃料电池最重要的参数是它的电阻分量。电解质电阻占燃料电池总电阻的主要部分。极化电阻模拟了反应等效电阻，双层电容模拟了阳极-电解质-阳极界面。燃料电池的总电阻越低，功率损失越低，效率越高。当发电为 kW 到 MW 时，过高的总电阻会妨碍燃料电池堆输出其最大额定功率。

测量燃料电池电阻的难点在于，电池电压源不能像电路模型所建议的那样与电阻分量隔离。不采用传统直流电阻测量，测量燃料电池电阻需要 AC 测量或伪 AC 测量。在这两种测量中，负载形成的扰动  $\Delta I$  在燃料电池中产生  $\Delta V$  ( $\Delta U$ )；燃料电池电阻  $R = \Delta V (\Delta U) / \Delta I$ 。

\* “燃料电池”和“燃料电池堆”将在应用说明中互换使用。

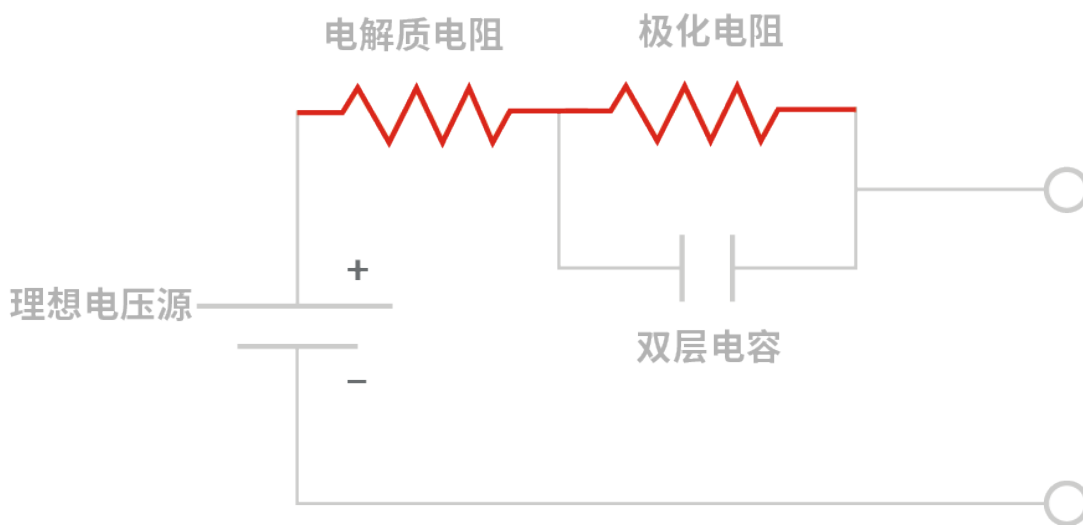
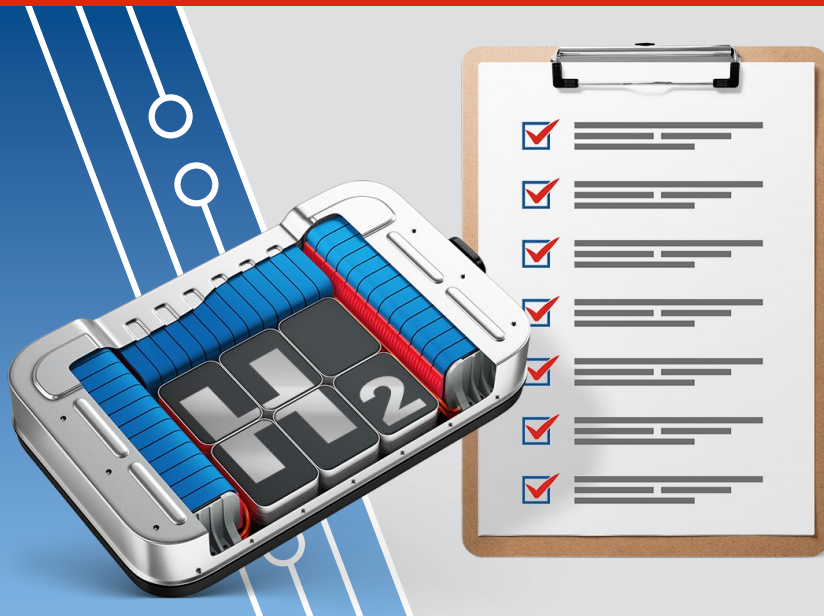


图 2  
燃料电池的简化模型



伪 AC 测量称为电流中断法。顾名思义，此方法将负载电流从稳态值瞬间切换为 0 A，形成  $\Delta I$ 。燃料电池电压从因负载电流和燃料电池电阻的乘积而降低的电压，上升到开路电压。图 3 显示了电流瞬间关闭形成的电压脉冲。虽然此方法只需要一个电子负载，但缺点是对电池造成很大扰动。图 3 显示了理想电压，这仅用于说明。但是当电流转换时，电缆电感  $L \cdot di/dt$  在

电压脉冲的边缘产生振铃。这将难以获取电压峰值的准确读数。尽量缩短负载和被测燃料电池之间的测试电缆可以降低振铃效应。图 4 显示了电流中断测试的测试设置。此方法的第二个缺点是将燃料电池电阻高估了 10 - 20%。

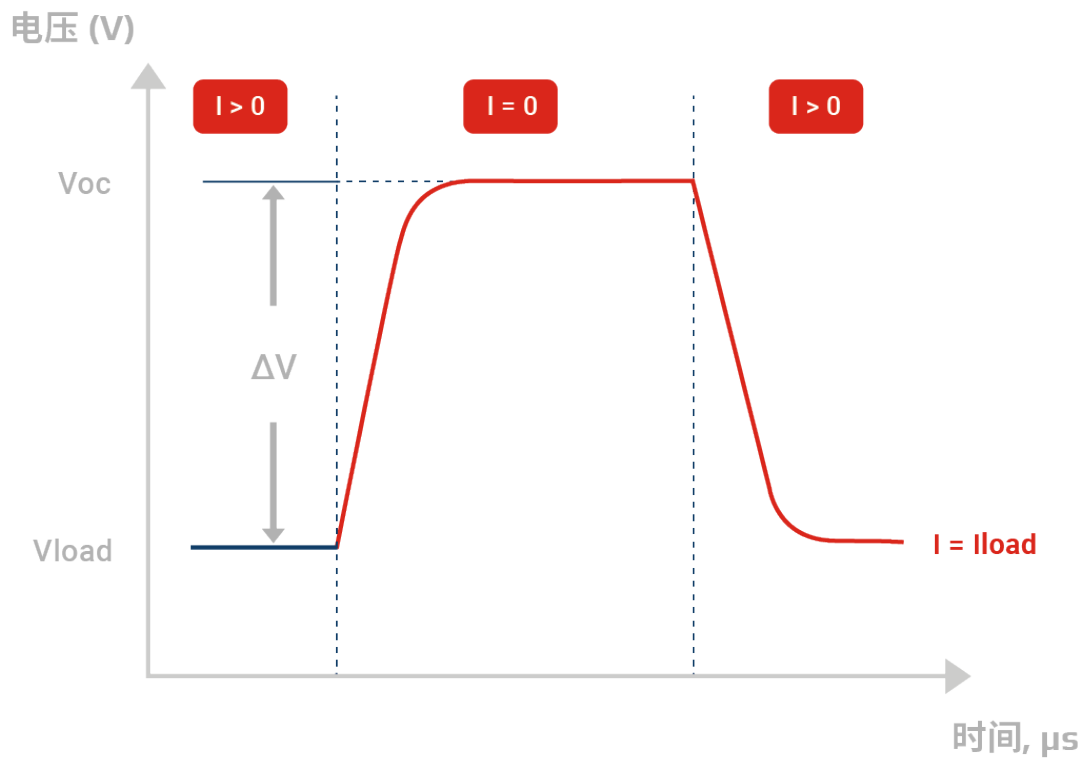


图 3 对负载电流中断的理想燃料电池响应。由于电缆电感，实际输出会在电压脉冲的上升边缘和下降边缘产生振荡（振铃）。这一转换是 AC 效应，所以在负载转换期间，电缆像 R-L-C 传输线路一样反应。

**说明  
1**

使用 4 芯遥感 (开尔文接线) 更准确地测量燃料电池输出电压, 不需要测量由于电源线路中的电流造成的电压降。2 芯系统可用于测量较低电压。

**说明  
2**

将遥感引线扭在一起, 与电源引线分开, 减少感应线路中的感应耦合噪声。

**说明  
3**

尽可能缩短测试引线, 减少步进负载发生变化时的传输线路振铃效应。



图 4  
使用电流中断法测量燃料电池电阻的测试设置

EA Elektro-Automatik Power Control 软件可控制 EA 电源和电子负载，简化了在直流负载电平上创建正弦波的工作。图 5 的屏幕截图显示了创建一个振幅为  $5 V_{RMS}$  的  $1 \text{ kHz}$  正弦波。Power Control 软件不需要编码。如果电子负载需要集成到其他控制软件中，此负载的 SCPI 仪器命令库可提供仪器通信和控制。表 1 列出了会生成正弦波的命令。SCPI 命令可以用 C 和 Python 等编程语言编写为读写命令。

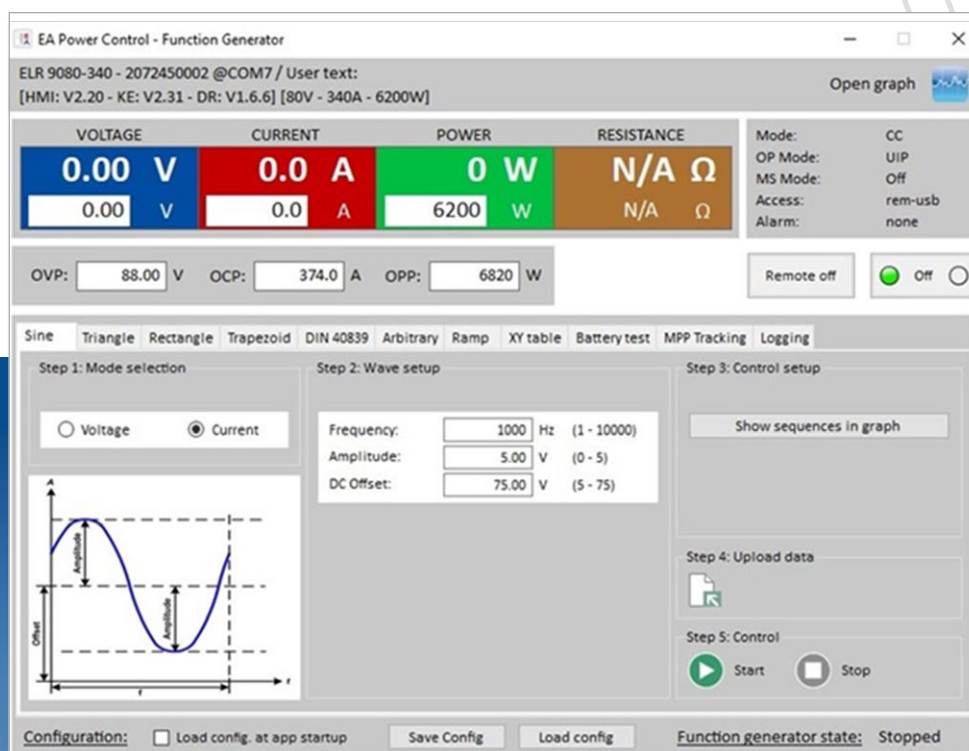


图 5  
屏幕截图显示 Power Control 软件在  $75 A_{DC}$  负载电平上创建频率为  $1 \text{ kHz}$  的  $5 V_{RMS}$  正弦波。

如果设备已处于远程控制中, 直流输入或 直流输出关闭, 则需要下列命令序列:

```
FUNC:GEN:SEL CURR ;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT.
FUNC:GEN:WAVE:LEV 1 ;SELECTS STEP 1
FUNC:GEN:WAVE:IND 5 ;SELECTS BEGINNING AC OFFSET CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 75 ;SETS AC OFFSET CURRENT START VALUE OF 75A
FUNC:GEN:WAVE:IND 6 ;SELECTS ENDING AC OFFSET CURRENT VALUE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 75 ;SETS ENDING AC OFFSET CURRENT VALUE OF 75A
FUNC:GEN:WAVE:IND 2 ;SELECTS BEGINNING AC FREQUENCY
FUNC:GEN:WAVE:DATA 1000 ;SETS BEGINNING AC FREQUENCY OF 1KHZ
FUNC:GEN:WAVE:IND 3 ;SELECTS ENDING AC FREQUENCY
FUNC:GEN:WAVE:DATA 1000 ;SET ENDING AC FREQUENCY TO 1KHZ
FUNC:GEN:WAVE:IND 0 ;SELECTS BEGINNING AC AMPLITUDE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 5 ;SETS BEGINNING AC AMPLITUDE OF 5A
FUNC:GEN:WAVE:IND 1 ;SELECTS ENDING AC AMPLITUDE
FUNC:GEN:WAVE:DATA 5 ;SET ENDING AC AMPLITUDE OF 5A
FUNC:GEN:WAVE:IND 7 ;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:DATA 10 ;SETS DURATION OF STEP TO BE 10 SECONDS
FUNC:GEN:WAVE:END 1 ;SET START SEQUENCE STEP TO 1
FUNC:GEN:WAVE:START 10 ;SET END SEQUENCE STEP TO 10
```

表 1  
在  $75 A_{DC}$  负载偏置上  
创建频率为 1 kHz 的 5  
 $V_{RMS}$  正弦波的 SCPI 代码

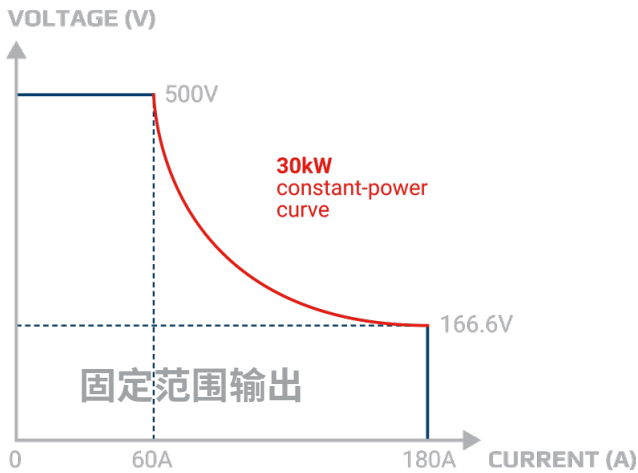


图 6  
自调整输入与固定范围负载比较。注意自调整负载在更高电流设置下提供了更高的电压输入和更高的功率容量。

测试输出功率可达 MW 级的燃料电池需要高功率测试仪器。ELR 负载型号的功率可达 30 kW，电压可达 2000 V，电流可达 1000 A。负载由于图 6 所示的自调整输入而具有此能力。自调整使负载能够吸收更大范围的全功率，而不是固定范围负载，不需要使用更高功率的负载来吸收更高的电压或更高的电流。自调整负载的电压和电流工作范围更广，还可以灵活测试更多类型的燃料电池。

对于备用发电使用的大型燃料电池合二为一，可并联多达 64 个 ELR 负载可吸收高达 64 kA 的电流。ELR 负载组件可测试任何燃料电池堆。

## 燃料电池性能测试

确定燃料电池堆的参数后，工程师可以量化燃料电池的输出性能。为确保数据的可重复性，燃料电池应处于受控环境中，即燃料电池温度、压力、湿度和燃料流速保持恒定。电压输出是负载电流的函数。负载电流开始时无负载，方便测量开路电压。以固定步进值增加负载，直到燃料电池的输出电压为开路电压的大约 20%。每次负载电流变化都需要燃料电池重新建立平衡条件；所以，在获取每个新负载电平的数据之前，需要进行延迟。图 7 显示了极化曲线示例。

- 第 1 部分** 随着负载电流增加，非线性电效应引起非线性电压降。
- 第 2 部分** 燃料电池的欧姆电阻为燃料电池的主导参数，产生一个线性段。
- 第 3 部分** 由于能量消耗速度比氢和氧化学反应提供新能量的速度快，所以电压呈指数级下降。

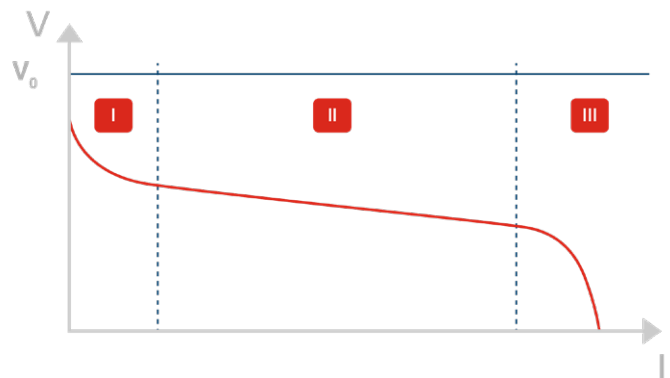


图 7  
燃料电池电压-电流输出曲线



**使用 Power Control 软件或 SCPI 命令, ELR 负载可轻松创建负载电流步进序列。**

图 8 显示了使用 Power Control 软件创建以 10 A 步进将负载电流从 0 A 增加到 100 A 的设置。此图显示了将负载电流从 10 A 增加到 20 A 的序列第二步。

表 2 显示了执行相同步进负载测试的 SCPI 命令。

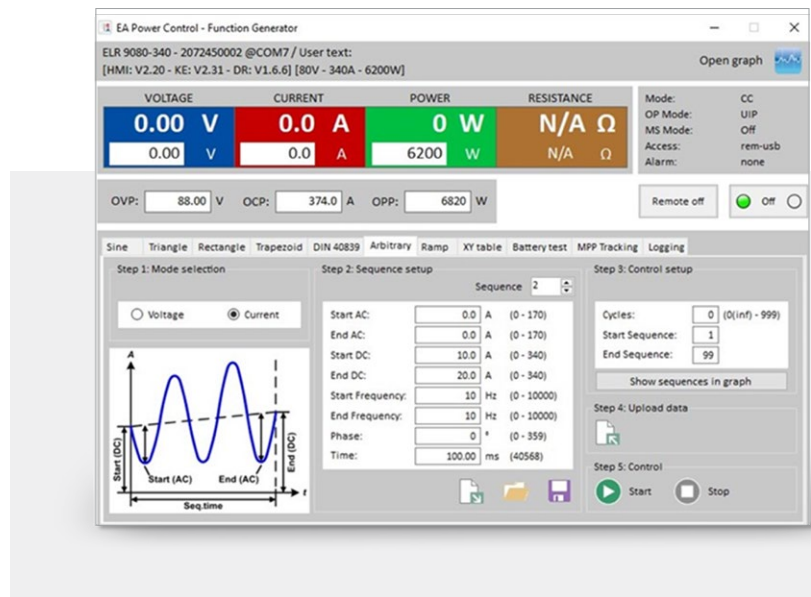


图 8  
使用 Power Control 软件创建从 0 A 增加到 100 A 的电流步进序列。

<b>FUNC:GEN:SEL CURR</b>	<b>;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT</b>
.	<b>;STEP ONE SKIPPED TO SHOW STEP 2 ONLY</b>
.	
.	
<b>FUNC:GEN:WAVE:LEV 2</b>	<b>;SELECTS STEP 2</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 5</b>	<b>;SELECTS BEGINNING DC CURRENT VALUE</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 10</b>	<b>;SETS DC CURRENT START VALUE OF 10A</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 6</b>	<b>;SELECTS ENDING DC CURRENT VALUE</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 20</b>	<b>;SETS ENDING DC CURRENT VALUE OF 20A</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 7</b>	<b>;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 10</b>	<b>;SETS DURATION OF STEP TO BE 10 SECONDS</b>
.	<b>;SKIP STEPS 3-10 WHICH INCREMENT UP 10A EACH</b>
.	
.	
<b>FUNC:GEN:WAVE:END 1</b>	<b>;SET START SEQUENCE STEP TO 1</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:START 10</b>	<b>;SET END SEQUENCE STEP TO 10</b>

表 2  
创建从 0 A 增加到 100 A 步进序列的一部分 SCPI 代码。描述了 10 步中的第 2 步。

# 燃料电池耐久性测试

测试燃料电池最重要的一步是确保电池的安全性和稳定性。对于汽车应用，燃料电池堆必须具有5,000小时的使用寿命。备用电源必须具有 10,000 小时的使用寿命。可行测试需要加速应力测试，即燃料电池堆经受超过 100 小时的步进负载变化或负载电流斜坡循环。

负载电流变化应使燃料电池电压改变大约 50%。方波步进变化和斜坡循环的周期应为大约 50 秒。

如图 9 所示，使用内置波形发生器，ELR 负载 Power Control 软件可以创建斜坡周期为 50 秒的斜坡测试。表 3 显示了等效 SCPI 代码。

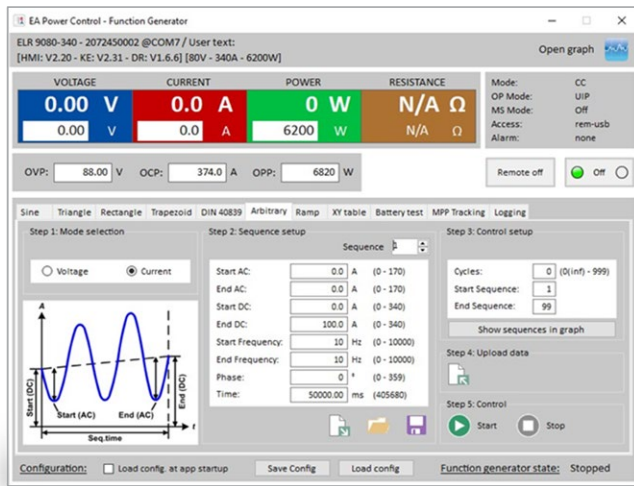


图 9 Power Control 软件屏幕截图显示了创建周期为 50 秒，从 0 A 增加到 100 A 的负载电流斜坡。

表 3 创建与图 9 定义斜坡等效的斜坡的 SCPI 代码。

<b>FUNC:GEN:SEL CURR</b>	<b>;SELECTS ARBITRARY GENERATOR FOR CURRENT</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:LEV 1</b>	<b>;SELECTS STEP 1</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 0</b>	<b>;SELECTS BEGINNING DC CURRENT VALUE</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 0</b>	<b>;SETS DC CURRENT START VALUE OF 0A</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 6</b>	<b>;SELECTS ENDING DC CURRENT VALUE</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 100</b>	<b>;SETS ENDING DC CURRENT VALUE OF 100A</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:IND 7</b>	<b>;SELECTS DURATION OF STEP IN SECONDS</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:DATA 50</b>	<b>;SETS DURATION OF STEP TO BE 50 SECONDS</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:END 1</b>	<b>;SET START SEQUENCE STEP TO 1</b>
<b>FUNC:GEN:WAVE:START 1</b>	<b>;SET END SEQUENCE STEP TO 1</b>

在高功率燃料电池堆上执行 100 小时测试会消耗许多能量。ELR 负载可以在加速应力测试中节约大量能量。这些负载具备可再生能量回收功能，可以吸收功率，再将功率返回给电网，效率高达 96%。ELR 负载不必消耗所有消耗的能量，与传统电子负载相比，散发热量更低。因此，这些负载可以降低冷却基础设施投资。使用 ELR 负载可显著降低电力成本，带来投资回报。

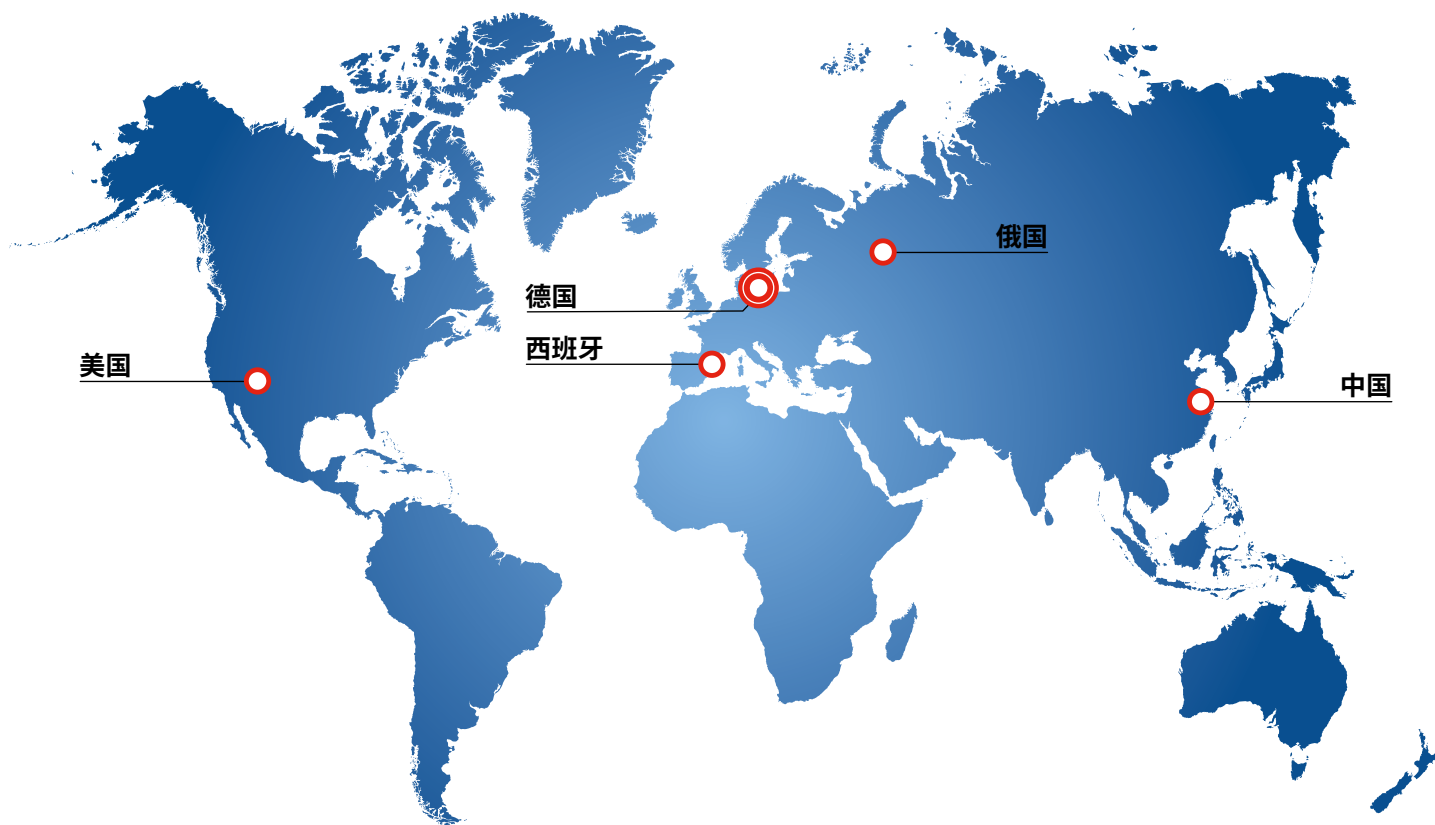
# 简单高效的燃料电池测试

ELR 负载为燃料电池测试提供下列优势：

- **内置波形发生器**不需要在高功率电路中连接低功率波形发生器，简化了燃料电池的设置和测试。通过波形发生器，ELR 负载可在直流负载电流上轻松计划正弦变化，创建测量燃料电池电阻的扰动。波形发生器还可以为性能和耐久性测试创建方波和斜坡。
- **自调整**功能帮助降低所需负载的成本，因为更宽的电压和电流范围可以根据燃料电池容量优化功率容量。达到更高的电压或电流容量通常不需要更高的功率负载。
- **可再生能源回收**的效率高达 96%，显著节约与高功率燃料电池超长加速寿命测试相关的电力成本。成本节约可最大程度提高投资回报。此外，负载散热更低，减少对其电子组件的应力。
- **Power Control 软件**可以轻松、快捷地设置测试，不需要写任何代码。

虽然本应用说明将 ELR 负载用作主要测试仪器，但是 PSB 系列双向电源可提供相同的吸收容量。与 ELR 负载一样，PSB 系列电源也有内置波形发生器、自调整输入与输出和可再生能源回收。如果测试燃料电池负载，以及需要燃料电池，PSB 电源也可以模拟燃料电池堆。有关使用 PSB 双向电源模拟燃料电池的详细信息，请参阅应用说明 AN024。无论选择哪种仪器，都能进行简单、高效的燃料电池测试。





## 提供全球服务。

公司总部位于德国北莱茵威斯特伐利亚的工业中心，占地18000平方米，拥有 200 多名合格员工，从事实验室电源、高功率电源适配器和电子负载（有或无功率反馈）的研发和生产。销售网络包括中国和美国的办事处、俄罗斯和西班牙的销售办事处，以及广泛的合作伙伴关系网。

