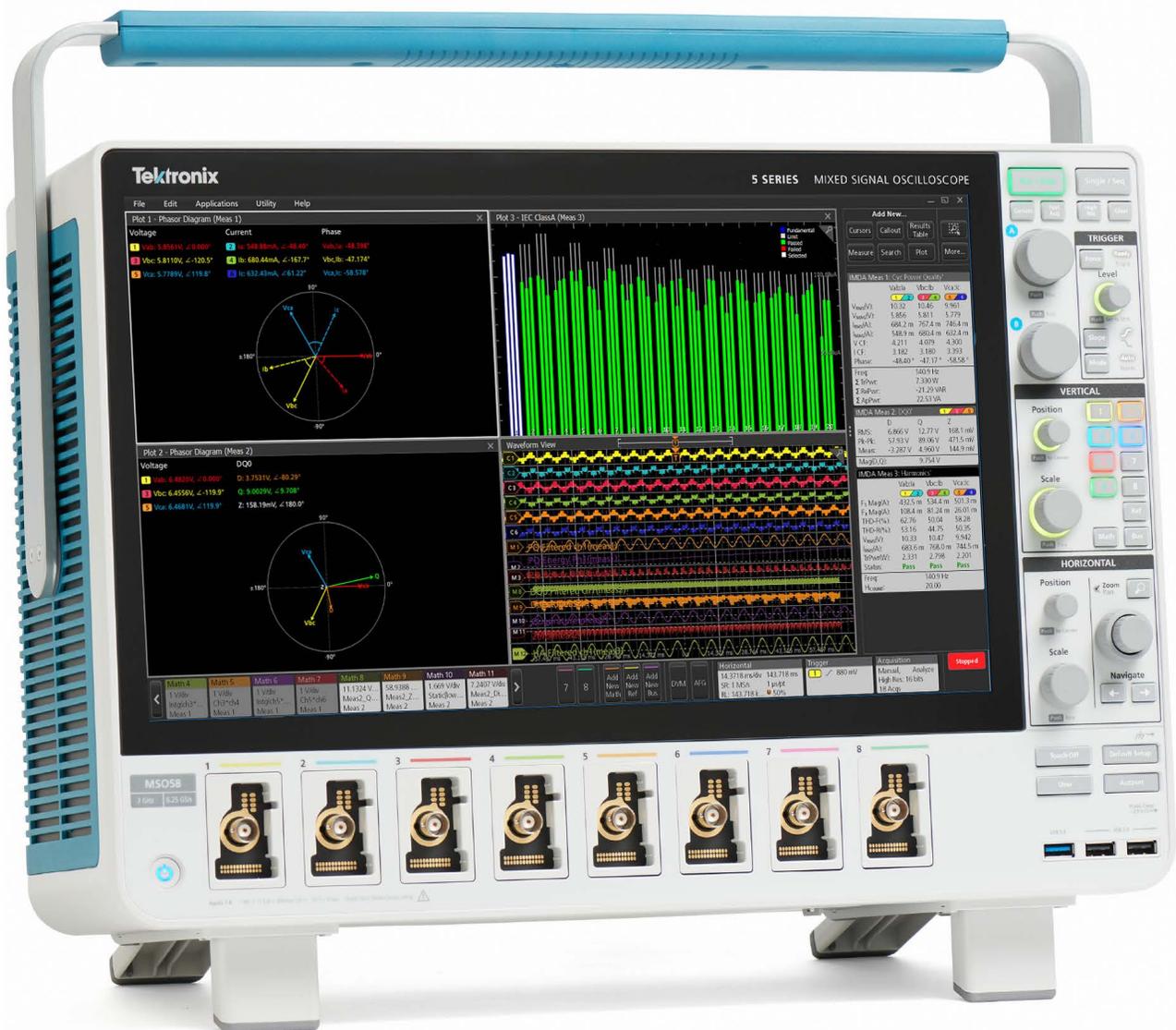


三相逆变器电机驱动器分析

5 系列/6 系列 B MSO 选项 5-IMDA/6-IMDA 应用产品技术资料

深入了解逆变器、机和系电驱动统



三相功率系统的测量和分析本质上比单相系统更复杂。尽管示波器能够以高采样率捕获电压和电流波形，但需进一步计算才能从数据中产生关键的功率测量值。基于示波器的三相解决方案允许使用高达 16 位的 HiRes 采集模式捕获具有更高采样率、更长记录长度的三相电压和电流波形，并在自动测量的支持下产生关键的功率测试结果。基于脉宽调制 (PWM) 的功率转换器（例如变频电机驱动器）会使测量复杂化，因为提取 PWM 信号的精确零交叉点非常重要，因此对于电机设计师而言，示波器成为推荐的用于验证和故障排除的测试工具。旨在用于对逆变器、电机和驱动器进行自动化功率分析的专用软件，极大地简化了对 PWM 系统的重要三相功率测量，并可以帮助工程师更快地了解他们的设计。借助泰克逆变器电机驱动器分析 (IMDA) 解决方案，设计师能够充分利用 5 系列/6 系列 B MSO 上的高级用户界面、六个或八个模拟输入通道和“高分辨率”模式（16 位），设计出更佳和更高效的三相电机驱动器系统。IMDA 解决方案能够为工业电机以及交流感应电机、永磁同步电机 (PMSM) 和无刷直流 (BLDC) 电机的驱动器系统提供快速、准确和可重复的电气测量结果。它可以配置为测量直流到三相交流转换器，例如电动汽车中使用的转换器。

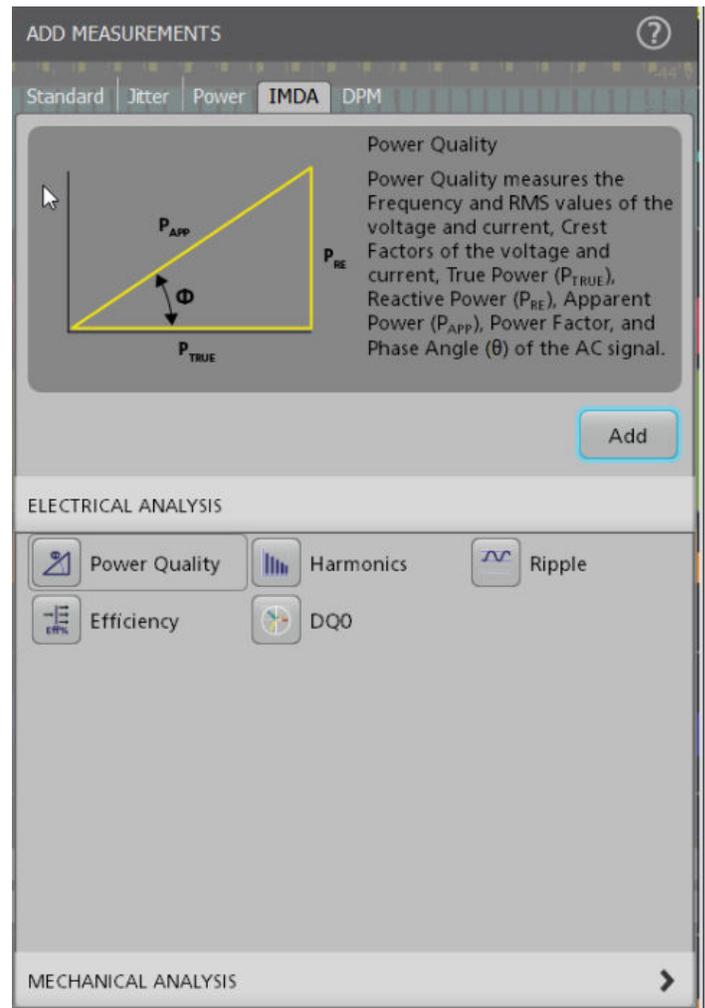
主要特点和技术规格

- 准确分析用于驱动交流感应电机、无刷直流 (BLDC) 电机和永磁同步 (PMSM) 电机的三相 PWM 信号。
- 基于示波器的独特相量图指示已配置布线对的 V_{RMS} 、 I_{RMS} 、 V_{MAG} 、 I_{MAG} 和相位关系，一目了然。
- 通过同时查看时域中的驱动器输入/输出电压和电流信号及相量图来调试电机驱动器设计。
- 三相自动设置功能配置示波器的最佳水平、垂直、触发和采集参数，以采集三相信号。
- 根据 IEC-61000-3-2、IEEE-519 或自定义限制测量三相谐波。
- 根据选定的接线配置测量系统效率。
- 通过 5 系列/6 系列 B MSO 上直观的拖放界面快速添加和配置测量。
- 分析逆变器和汽车三相设计的直流输入和交流输出接线配置。
- 在分析期间显示 PWM 过滤的边沿限定符波形。
- 在特定测量的分析过程中，显示每个记录或每个周期模式的测试结果。
- 支持特定测量的时间趋势图和采集趋势图。
- 支持特定接线的线对线到线对中性线的数学转换。
- 支持使用相量图进行 DQ0 测量。
- 支持使用霍尔传感器信号进行机械测量。

测量概述

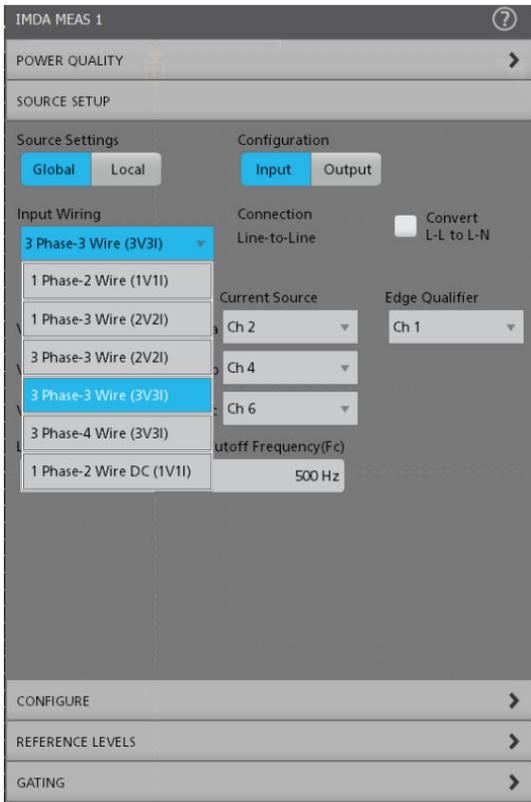
可变频率驱动器等三相功率转换器在设计过程中需要进行一系列测量。用于 5 系列/6 系列 B MSO 的逆变器、电机和驱动器

分析包自动执行分组到电气分析组中的关键电气测量。测量可配置为测量输入或输出接线配置。

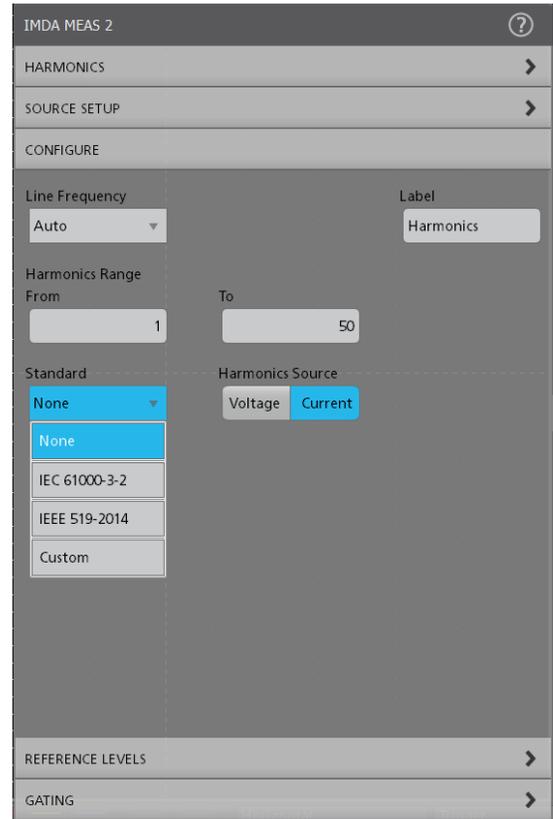


IMDA 在电气分析组下测量

测量可设置为测量 1V1I（1 相 2 线）、2V2I（1 相 3 线）、2V2I（3 相 3 线）、1V1I（1 相 2 线直流）或 3V3I（3 相 3 线）和 3P4W（3 相 4 线）以支持各种电源和电机配置。可进行线对线或线对中性线的测量，以支持 Delta 和 Wye 或 Star 配置。



配置输入接线配置的测量

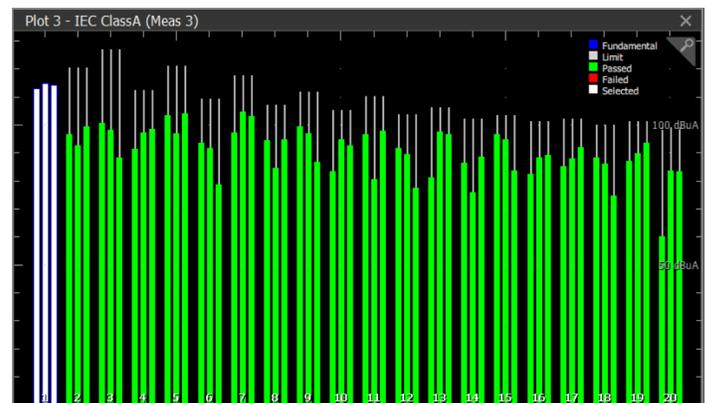


将谐波测量与行业标准或自定义限制进行比较

谐波

功率波形很少为教科书式的正弦曲线。谐波测量将非正弦电压或电流波形分解为其正弦分量，指示各分量的频率和幅度。

谐波分析最多可执行 200 次谐波。可以根据您的需求，在测量配置中指定范围设置最大谐波次数。测量各相位的 THD-F、THD-R 和基波值。可以根据 IEEE-519 或 IEC 61000-3-2 标准或自定义限制对测量进行评估。可以将测试结果记录在详细的报告中，并指示状态（通过/失败）。



示例谐波图表示通过谐波测试结果。每组条形图均包含相位 A、B 和 C 的结果，便于相互关联。

谐波图显示的是所有三相的测试汇总结果，因此用户可以关联各相之间的测试结果。该图还直观地显示测试结果。在通过条件下，谐波条以绿色突出显示，并在超过测试限制时以红色突出显示。这便于在调试谐波设计时快速了解情况。

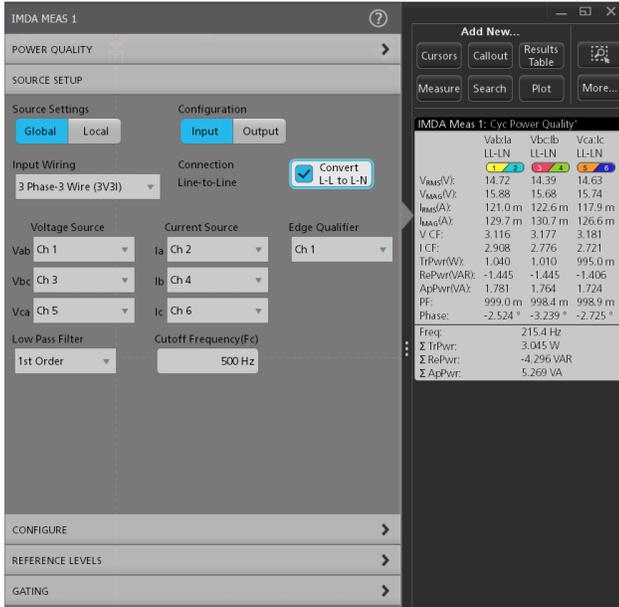
电源质量

该测量提供关键的三相功率子测量，包括：电压和电流的频率和 RMS 幅度、电压和电流的波峰因数、PWM 频率以及各

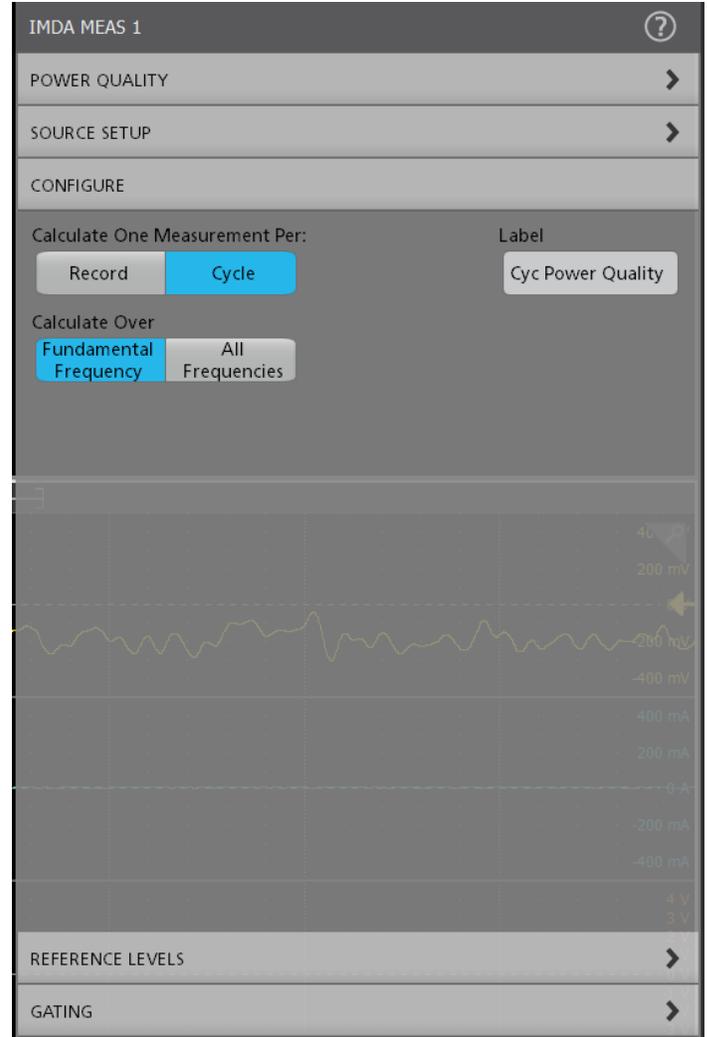
相的相角。它还显示有功功率总和、无功功率总和、视在功率分量总和。

此外，在线对中性线配置中，此测量显示所有三相的有功功率、无功功率和视在功率分量。

电压和电流矢量可以显示在相量图上，因此您可以快速判断各相的相移和相间的平衡。每个向量由一个 RMS 值表示，相位通过使用离散傅立叶变换 (DFT) 方法计算。

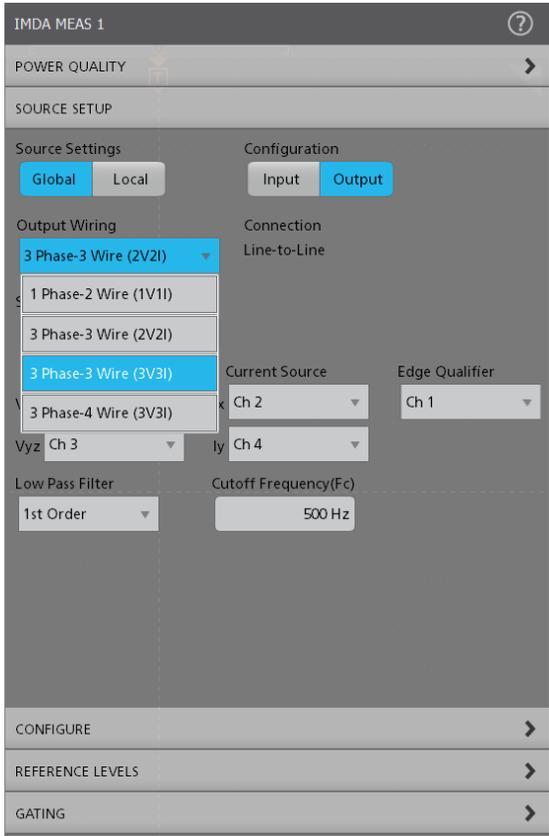


轻松配置设置以深入了解电源质量

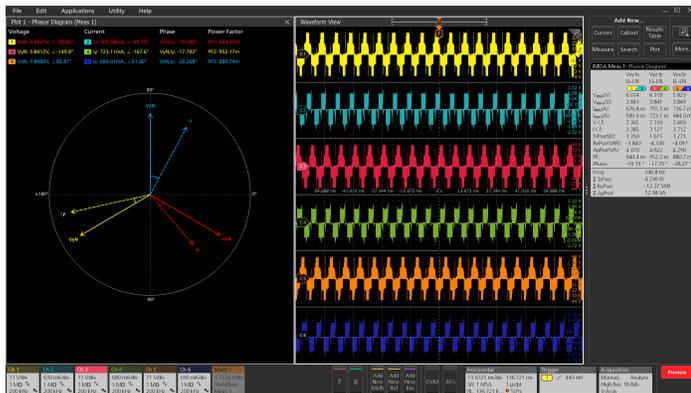


电源质量计算方法

功率质量测量可配置为在输出侧提供关键三相功率测量，包括：电压和电流的频率和 RMS 幅度、电压和电流的波峰因数、PWM 频率、有功功率、无功功率、视在功率、每相的功率因数和相角。



轻松配置功率质量测量上的电压和电流输入以显示相量图



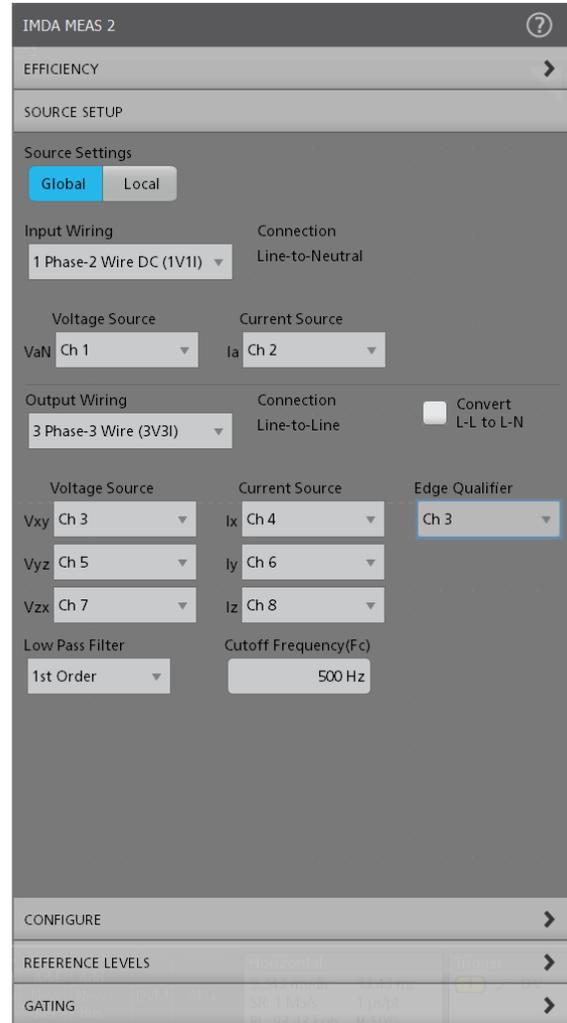
独特的基于示波器的相量图功能提供电压和电流矢量之间的关系

效率

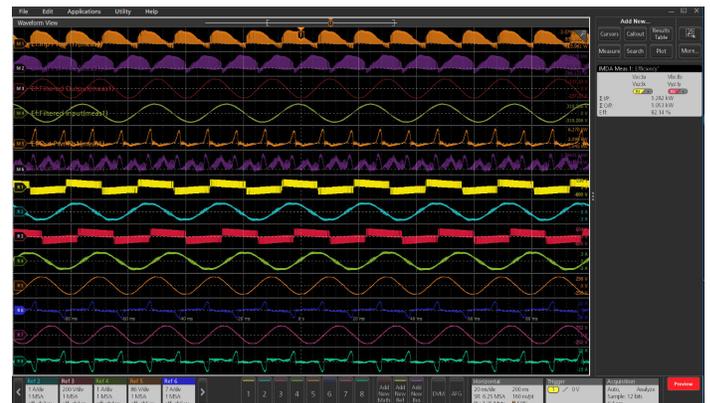
效率测量输出功率与输入功率的比率。IMDA 解决方案支持三相交流和逆变器配置的效率。通过使用 2V2I 方法，可以使用 8 个示波器通道（输入侧有 2 个电压源和 2 个电流源，输出侧有 2 个电压源和 2 个电流源）测量三相效率。该解决方案根据不同的输入和输出接线组合计算各相位的效率（对于 3V3I 配置）和系统的总（平均）效率。



配置接线和滤波器以执行工业电机的效率测量



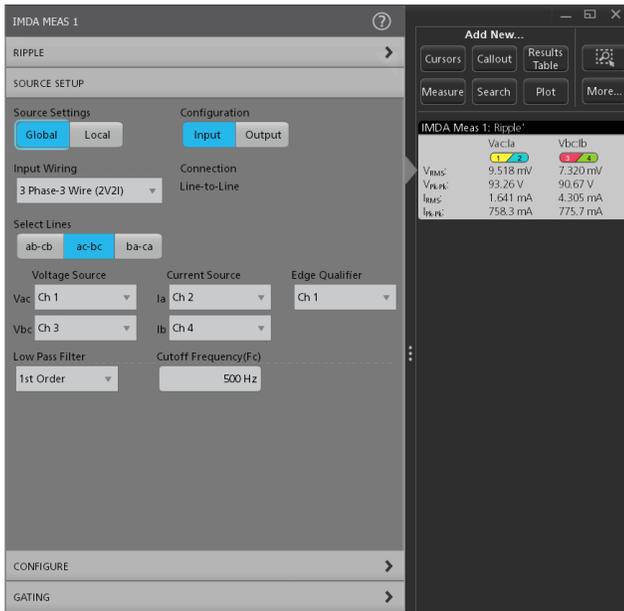
配置接线和滤波器以对最适合逆变器测试的DC-AC 拓扑执行效率测量



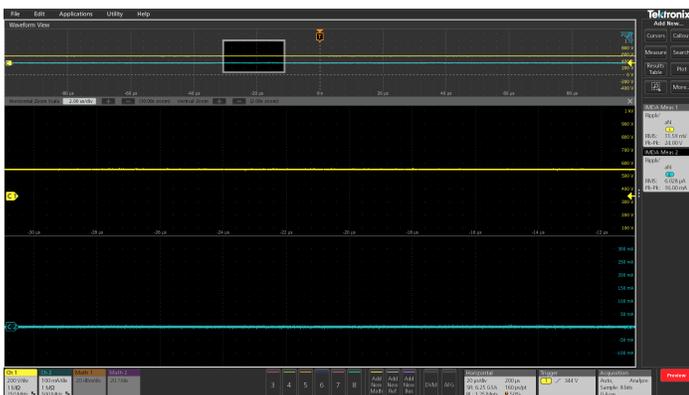
全面了解整个系统效率

纹波分析

纹波被定义为恒定直流分量上的残余或多余交流电压。通常在直流总线上测量纹波。此测量有助于了解信号在输入端从 AC 转换为 DC 的效率，以及多余分量对输出端的 PWM 信号的影响。



可以设置纹波分析配置以查看工频和开关纹波



测试逆变器时对直流输入信号进行纹波测量

直接正交零 (DQ0) 分析

三相交流电机的行为可通过如下旋转电压和电流方程进行描述。

$$V_A = V_g \times \cos(w(t))$$

$$V_B = V_g \times \cos\left(\frac{w(t)-2\pi}{3}\right)$$

$$V_C = V_g \times \cos\left(\frac{w(t)-4\pi}{3}\right)$$

其中：

A、B、C 是三相交流信号。

“Vg”是相应的增益。

“w(t)”是 $2\pi \times f \times t$ 。

AC 接口处的电压 (V) 和电流 (I) 通常分开，一般相差 120 度。这些 V 和 I 分量是时变的，这意味着没有稳态工作点的表示。

通常，交流信号是真实世界的信号，但将它们转换为直流信号有助于获得直接正交变换的抽象表示。DQ0 有助于模拟控制器。这些信息有助于更多地了解控制器正在做什么，并允许调整控制器设计。

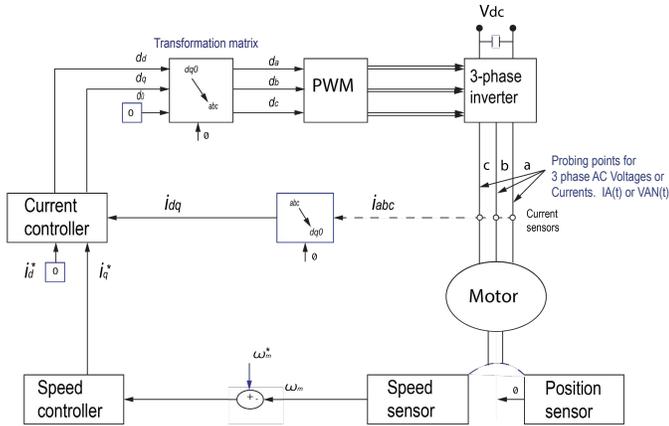
DQ0 变换通常会旋转 AC 波形的参考系，以将其转换为 DC 信号。这样便可在执行逆变换以恢复实际三相交流结果之前对直流信号进行简化计算。

为测量和监控控制系统的输出，设计人员依靠 FPGA 和基于 ASIC 的硬件处理传感器数据以获取 DQ0 信息，然后通过多次迭代检查控制信息。该解决方案涉及复杂且耗时的过程。

测量或探测 D-Q-0 信号实际上具有挑战性。典型的解决方案为控制器提供外部激励，以将控制器输入信号和模数控制器 (ADC) 输出复制为 DQ0 信号。

为应对这一挑战，用户依靠软件应用程序 DQ0 解决方案了解电源控制系统中的复杂动态现象。

IMDA 解决方案采用 DQ0 变换，旋转三相波形的参考系，使其成为直流信号。这些直流量的计算可以简化，然后将其逆变，得到实际的三相交流结果。基本控制方案如下图所示。



A basic control scheme for a permanent magnet synchronous motor

进行 DQ0 测量的典型连接设置和探测点

泰克在电气分析测量类别下提供一种名为 DQ0 的专利示波器测量，作为使用 Clarke 和 Park 变换矩阵的附加选项。DQ0 功能在 5 系列和 6 系列 MSO 上作为选项 5-IMDA-DQ0/6-IMDA-DQ0 提供。

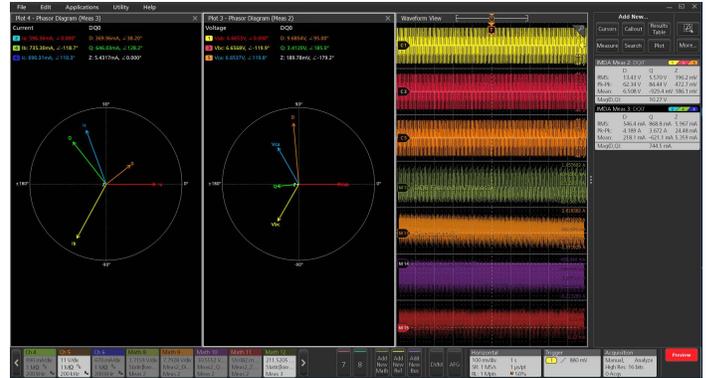
DQ0 方法将角度 (θ) 计算为 $2\pi i^* t$ ，并根据我们预期时变信号所在位置推断参考系。DQ0 帧（相量图）以正确的速度和频率旋转，不一定与转子同相，这有助于理解电机的瞬时状态。

3V3I 配置支持此测量，将来自电机的三相电压或电流信号作为输入，并将其转换为 D-Q-0 系数，作为电机设计人员调整其 PWM 控制器电路设计的强大调试工具。

该测量通过转换三相驱动器输出电压或电流波形计算实时 DQ0 转换。变换矩阵将时变交流信号转换为非时变直流分量。这有助于重现控制系统对瞬时电机扭矩和速度的理解。通过使用 DQ0 变换，电机设计人员能够将三相电源部分的性能与控制系统的硬件算法和设计相关联。重叠的 DQ0 和三相 ABC 矢量作为一项很好的调试特征，设计人员可以在同一绘图上同时观察两个向量轴。

此测量具有不同的输出，例如具有 D 和 Q 幅度的标量值、具有统计数据的 RMS 值、导出的数学波形和相量图。数学波形提供直流变换后的波形。这在单个视图中提供控制系统的不同视图。

通过观察 DQ0 结果，可以得出一些重要的推论，如表示 RMS 纹波、峰峰值和高次谐波的变化。这些参数与理解控制系统中算法的操作直接相关。若无这些信息，则难以理解电机控制系统的性能。



在 5 系列 MSO 上运行的 DQ0 测量。它们在相量图上表示为 VQ（绿色）、VD（橙色）和 VZ（白色）向量，并在右侧的结果标记中提供其标量值。DQ0 波形显示为数学 M12 滤波波形（绿色）、M13-直接（橙色）、M14-正交（紫色）和 M15-零（红色）。

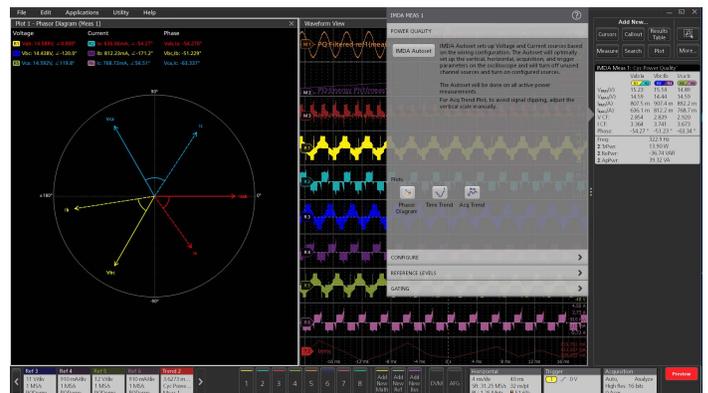
使用趋势分析进行动态测量

电机驱动器分析的一项常见要求是，能够在更长的测试时间、记录和大量集中查看电机响应，以监控不同负载条件下的 DUT 行为。这种动态测量有助于了解最佳设计和电压、电流、功率、频率等不同参数间的相互依赖性及其基于负载条件的变化。您可以手动缩放并获取感兴趣的特定区域，以查看波形特定区域的测试结果。

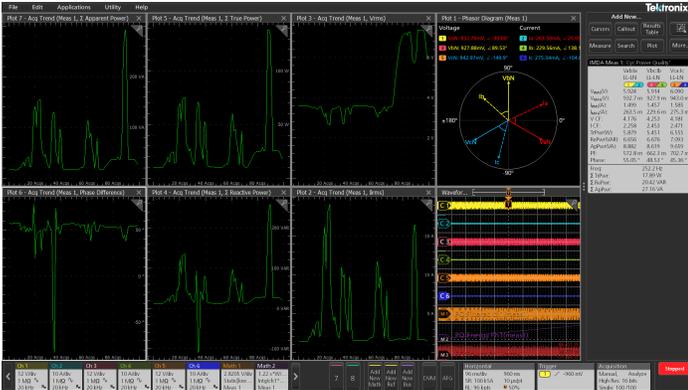
IMDA 解决方案提供两种独特的电能质量测量趋势图，以支持此类要求：

- 时间趋势图
- 采集趋势图

每幅绘图都有其优点，可用于绘制电能质量测量下支持的子测量。时间趋势图显示的是各周期或采集波形（记录）的测量值，而采集趋势图显示的是每次集中中各记录的测量值平均值。可在测试配置期间设置采集计数。这使您能够捕获长数据记录以执行深入的记录分析并了解运动响应的动态行为。绘图可另存为 CSV 文件以进行后处理。



通过时间趋势图，您能够在一次采集记录中以图形方式分析功率测量。采集趋势图可以绘制多次采集的功率测量结果，以进行长期测试。



此示例显示 100 次采集的平均功率测量的采集趋势图，包括 -Vrms、Irms、相位差、有功功率之和、视在功率和无功功率。

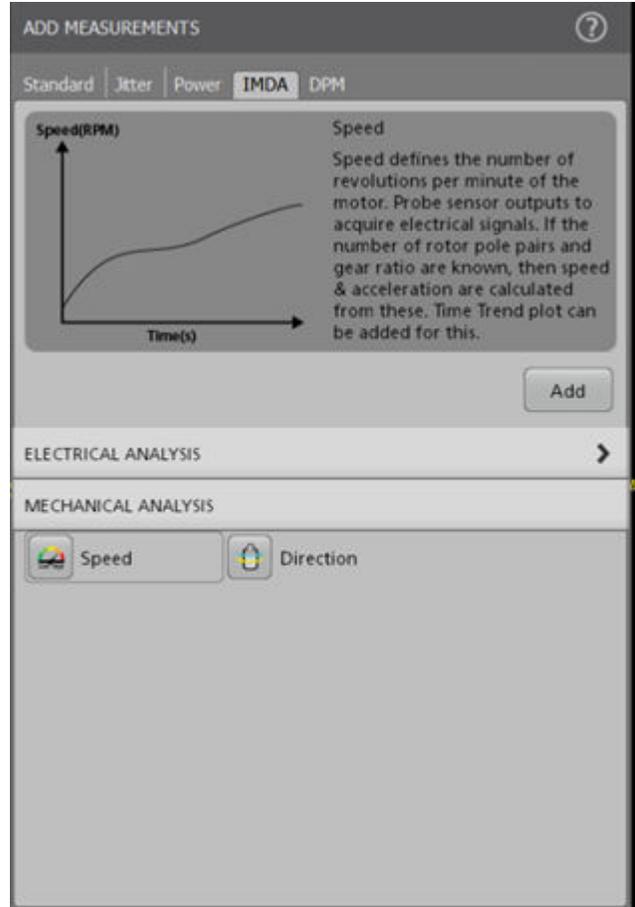


添加并配置功率质量测量不同子测量的时间趋势图。该图显示的是监控 Vrms 和频率参数的两个时间趋势图。

机械分析

IMDA 机械分析组（选件 IMDA-MECH）支持霍尔传感器输出信号来计算速度、加速度和方向信息。加速度结果报告为速度测量的一部分。测量需要极对数和相应的齿轮比测量关键的电机参数。方向测量需要在操作前配置一系列霍尔传感器上升边沿，并在操作期间对其进行验证。

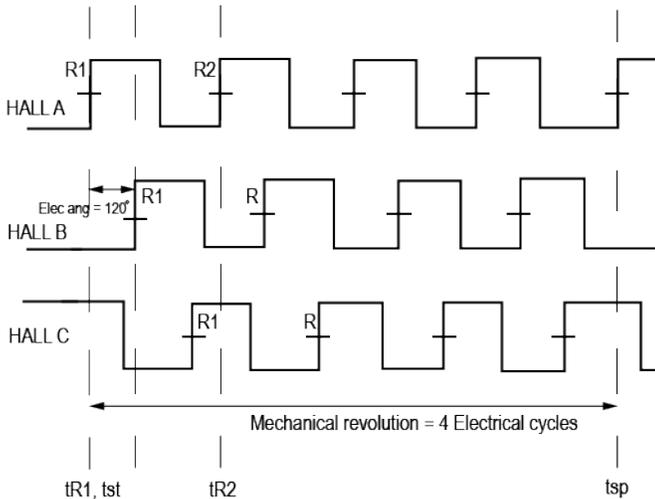
TPP1000 无源探头或高压差分 THDP0200/100 探头可用于根据电机输出功率和噪声水平捕获传感器输出。建议使用带有 TLP 逻辑探头的数字通道代替模拟通道，因为噪声较小，有助于为其他测试操作保留模拟通道，并使用单个灵活通道进行测量。



IMDA 机械分析支持速度（与加速度）和方向测量

速度测量

霍尔传感器信号转换如下图所示。



使用三个霍尔传感器转换进行速度测量计算

速度由以下等式定义，

$$Speed\ in\ RPM = \left(\left(\frac{1}{T_{SP} - T_{ST}} \right) * 60 \right) * G$$

其中：

T_{SP} 和 T_{ST} 间的差异由极对数定义。

T_{ST} 是电脉冲的开始

T_{SP} 是电脉冲的结束

60 是 RPM（每分钟转数）

G 是齿轮比。

加速度

加速度是单位时间内速度的变化率。定义为

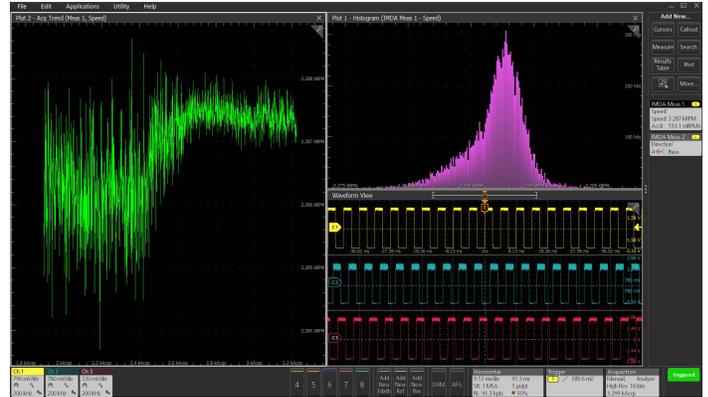
$$Acclr = \frac{Speed(t_{n+1}) - Speed(t_n)}{((t_{n+1}) - t_n)}$$

速度和方向支持以下各图：

- 直方图
- 时间趋势图
- 采集趋势图

速度采集趋势图的重要性

采集趋势图和直方图显示电机速度的抖动，否则需要使用颤振仪等专用仪器进行测量。该抖动信息（边缘时序的变化）测量电机速度的一致性。



ACQ 趋势图显示电机速度的抖动（左）以及指示速度分布的直方图（右）

电机启动配置文件

电机设计人员有兴趣在设计阶段研究电机启动配置文件。时间趋势给出电机的瞬时速度信息，否则很难测量。

下面是电机图像启动顺序的**时间趋势图**，其中电机从 OFF（关闭）状态到 ON（开启）状态所需的启动时间为 2.3s。同样，可以执行 ON（开启）到 OFF（关闭）状态并深入了解减速过程，如图**显示电机减速进入停止状态图像的时间趋势图**所示。



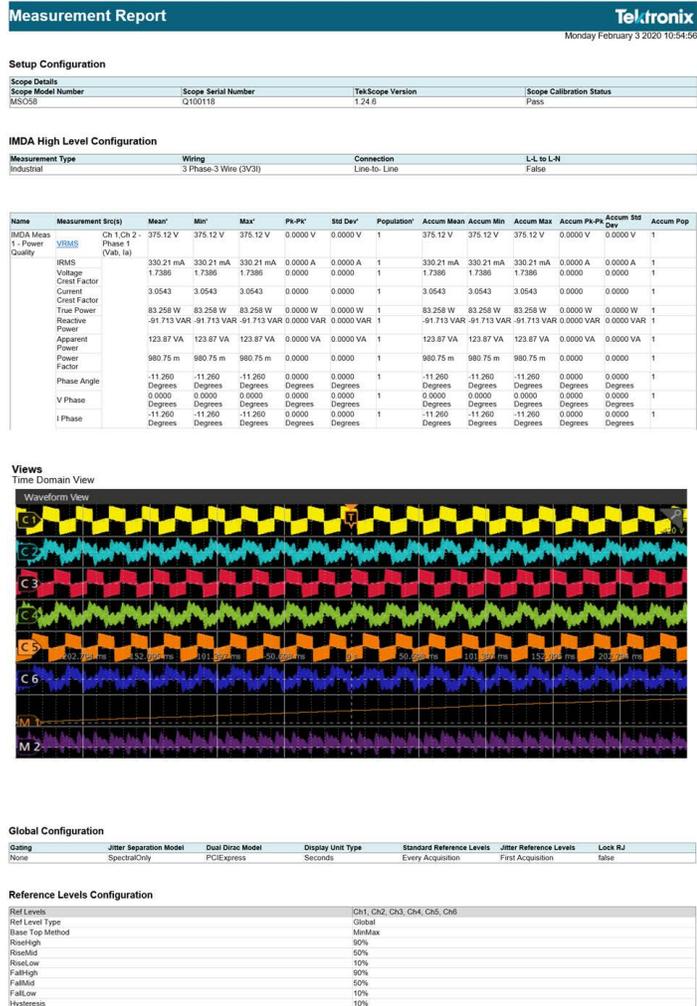
显示电机启动顺序的时间趋势图



显示电机减速进入停止状态的时间趋势图

报告生成

IMDA 软件简化了设计和开发过程的数据收集、归档和文档编制。它支持生成 MHT 或 PDF 格式的报告，并带有通过/失败结果，以便于分析。



包含摘要、详细信息和相应图像的示例IMDA 测试报告文件

技术规格

接线配置	1V1I (1相2线), 2V2I (1相3线), 2V2I (3相3线), 2V2I (直流输入交流输出), 3V3I (直流输入交流输出) 或 3V3I (3相3线) 和 3P4W (3相4线)
L-L (线对线) 到 L-N (线对中性线) 转换	适用于 3 相 3 线 (3V3I) ¹
电气分析	功率质量、谐波 ² 、纹波、DQ0 ³ 、效率 ⁴
机械分析	速度、加速度和方向
三相自动设置	适用于所有测量
绘图	时间趋势图、采集趋势图、相量图、谐波条形图 ⁵ 、DQ0 图和直方图 (速度分布)
报告	MHT 和 PDF 格式, 数据导出到 CSV 格式
消磁/时延校正 (静态)	自动检测探头, 自动调零。用户可以对电压和电流探头进行相位校正, 从每个通道的菜单中对电流探头进行消磁
源支持	实时模拟信号, 基准波形, 数学波形

¹ 对于 3 相 4 线 (3V3I), 连接始终为线对中性线, 而对于 3 相 3 线 (2V2I), 则为线对线。

² 支持自定义限制。

³ 仅适用于 3V3I 接线。

⁴ 仅适用于 2V2I 接线。

⁵ 范围滤波器作为测量配置的一部分。

订货信息

型号

产品	选项	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	5-IMDA	5 系列 MSO (MSO56, MSO58)	<ul style="list-style-type: none"> • 350 MHz • 500 MHz • 1 GHz • 2 GHz
产品升级选项	SUP5-IMDA		
浮动许可证	SUP5-IMDA-FL		

产品	条件 ⁶	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	5-IMDA-DQ0	5 系列 MSO (MSO56, MSO58)	<ul style="list-style-type: none"> • 350 MHz • 500 MHz • 1 GHz • 2 GHz
产品升级选项	SUP5-IMDA-DQ0		
浮动许可证	SUP5-IMDA-DQ0-FL		

产品	选项 ⁶	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	5-IMDA-MECH	5 系列 MSO (MSO56, MSO58)	<ul style="list-style-type: none"> • 350 MHz • 500 MHz • 1 GHz • 2 GHz
产品升级选项	SUP5-IMDA-MECH		
浮动许可证	SUP5-IMDA-MECH-FL		

产品	选项	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	6-IMDA	6 系列 B MSO (MSO66B, MSO68B)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 GHz • 2.5 GHz • 4 GHz • 6 GHz • 8 GHz • 10 GHz
产品升级选项	SUP6B-IMDA		
浮动许可证	SUP6B-IMDA-FL		

⁶ 选项 IMDA-DQ0 和 IMDA-MECH 需要选项 IMDA 作为先决条件

产品	选项 ⁶	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	6-IMDA-DQ0	6 系列 B MSO (MSO66B, MSO68B)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 GHz • 2.5 GHz • 4 GHz • 6 GHz • 8 GHz • 10 GHz
产品升级选项	SUP6B-IMDA-DQ0		
浮动许可证	SUP6B-IMDA-DQ0-FL		

产品	选项 ⁶	支持的仪器	可用带宽
新仪器订购选项	6-IMDA-MECH	6 系列 B MSO (MSO66B, MSO68B)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 GHz • 2.5 GHz • 4 GHz • 6 GHz • 8 GHz • 10 GHz
产品升级选项	SUP6B-IMDA-MECH		
浮动许可证	SUP6B-IMDA-MECH-FL		

软件捆绑套件

支持的仪器	捆绑选项	说明
5 系列 MSO	5-PRO-POWER-1Y	5 系列 MSO 专业版电源捆绑套件 1 年期许可证
	5-ULTIMATE-1Y	5 系列 MSO 专业版电源捆绑套件永久许可证
	5-ULTIMATE-1Y	5 系列 MSO 旗舰版捆绑套件 1 年期许可证
	5-ULTIMATE-PER	5 系列 MSO 旗舰版捆绑套件永久许可证
6 系列 MSO	6-PRO-POWER-1Y	6 系列 MSO 专业版电源捆绑套件 1 年期许可证
	6-PRO-POWER-PER	6 系列 MSO 专业版电源捆绑套件永久许可证
	6-ULTIMATE-1Y	6 系列 MSO 旗舰版捆绑套件 1 年期许可证
	6-ULTIMATE-PER	6 系列 MSO 旗舰版捆绑套件永久许可证

推荐探头

探头型号	说明	数量
TCP0030A	电流探头	3 用于 3V3I 接线 ⁷
THDP0200 或 TMDP0200	高压差分探头	3 用于 3V3I 接线 ⁷

⁷ 为执行效率测量，需要四个量。



泰克经过 SRI 质量体系认证机构进行的 ISO 9001 和 ISO 14001 质量认证。



产品符合 IEEE 标配 488.1-1987、RS-232-C 及泰克标配规定和规格。



评估的产品领域：电子测试测量仪器的规划、设计/开发和制造。

东盟/澳大拉西亚 (65) 6356 3900

比利时 00800 2255 4835*
 中东欧和波罗的海 +41 52 675 3777
 芬兰 +41 52 675 3777
 香港 400 820 5835
 日本 81 (120) 441 046
 中东、亚洲和北非 +41 52 675 3777
 中华人民共和国 400 820 5835
 韩国 +822 6917 5084, 822 6917 5080
 西班牙 00800 2255 4835*
 台湾 886 (2) 2656 6688

澳大利亚 00800 2255 4835*

巴西 +55 (11) 3759 7627
 中欧和希腊 +41 52 675 3777
 法国 00800 2255 4835*
 印度 000 800 650 1835
 卢森堡 +41 52 675 3777
 荷兰 00800 2255 4835*
 波兰 +41 52 675 3777
 俄罗斯和独联体 +7 (495) 6647564
 瑞典 00800 2255 4835*
 英国和爱尔兰 00800 2255 4835*

巴尔干、以色列、南非和其他国际电化学学会成员国 +41 52 675 3777

加拿大 1 800 833 9200
 丹麦 +45 80 88 1401
 德国 00800 2255 4835*
 意大利 00800 2255 4835*
 墨西哥、中南美洲和加勒比海 52 (55) 56 04 50 90
 挪威 800 16098
 葡萄牙 80 08 12370
 南非 +41 52 675 3777
 瑞士 00800 2255 4835*
 美国 1 800 833 9200

* 欧洲免费电话号码。如果无法接通，请拨打：+41 52 675 3777

了解详细信息。泰克拥有并维护着一个由大量的应用说明、技术简介和其他资源构成的知识库，同时会不断向知识库添加新的内容，帮助工程师解决各种尖端的技术难题。敬请访问 www.tek.com。

版权所有 © Tektronix, Inc. 保留所有权利。泰克产品受美国和外国专利权（包括已取得的和正在申请的专利权）的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品规格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。所有提及的其他商标是其各自公司的服务标志、商标或注册商标。