

# 使用莱迪思 Automate 解决方案集合实现具有预测性维护功能的电机控制

## 引言

工业设备市场的许多企业都希望采用人工智能和机器学习技术帮助他们最大程度减少意外的服务中断，防止其产品、产线和服务受到影响。这种想法的缘由显而易见：减少意外停机时间能够提升运营效率，实现效益最大化。市场分析公司 Aberdeen 在 2016 年发布的一份研究报告表明，企业停摆一小时的平均成本高达 26 万美元<sup>1</sup>。OEM 可以通过为工业系统增加测量和分析性能数据的智能功能，帮助客户实施预测性维护（PDM）系统，从而识别和更换故障的系统组件（例如工业机器人中使用的电机），以免它们出现故障而中断生产。

为了帮助工业设备 OEM 厂商在其产品中实现 PDM 功能，莱迪思半导体开发了用于工业自动化系统的莱迪思 Automate™ 解决方案集合。莱迪思提供各类低功耗 FPGA，作为一种可重新编程的芯片，它可执行数据处理或协处理功能，构建用于 PDM 应用的 AI/ML 推理模型。为简化和加快基于莱迪思 FPGA 的 PDM 系统的开发，Automate 包括了软件工具、工业 IP 核、模块化硬件开发板、软件可编程的参考设计和演示，轻松设计具有 PDM 功能、可扩展的多通道电机控制应用。图 1 展示了基于莱迪思 Automate 解决方案集合设计的具有预测性维护功能的电机控制系统。

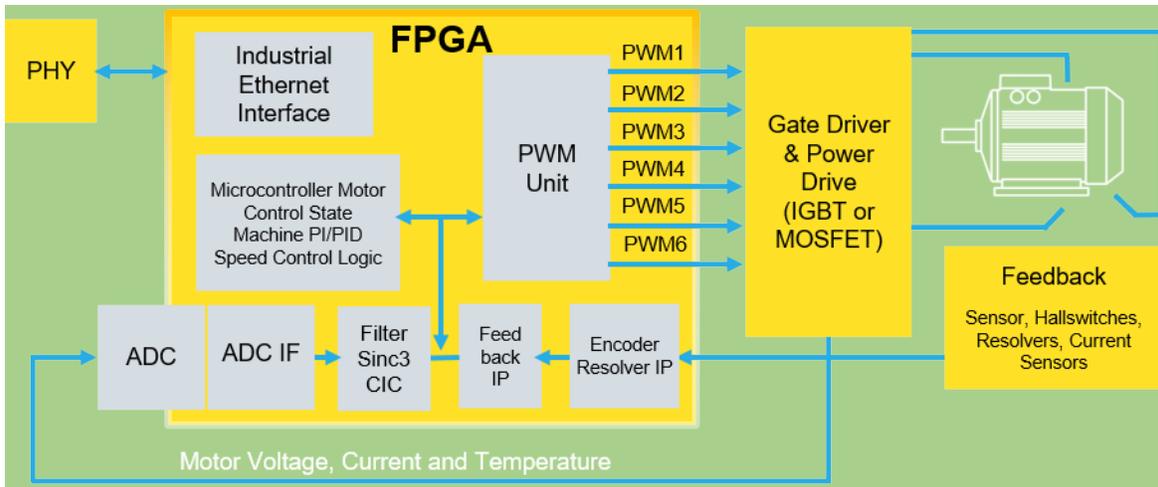


图 1. 基于莱迪思 Automate 解决方案集合设计的具有预测性维护功能的电机控制系统，可用于工业自动化应用

Automate 包括了一个 PDM 多通道电机控制参考设计，采用了业界常见的电机电流信号分析（MCSA）技术。在莱迪思的解决方案中，克拉克变换将来自三相电机的电流转换为两个信号。转换后的电流变成  $\alpha$  电流和  $\beta$  电流。对于正常运行的健康电机来说， $\alpha$  电流和  $\beta$  电流相隔 90 度。在  $x$ - $y$  坐标系平面中，点的轨迹构成一个圆。在下文中，我们将展示电流或负载不平衡引起的各种轨迹圆的变形。

本文使用了在 FPGA 的 RTL 中实现的无传感器空间矢量脉宽调制（SV\_PWM）技术来驱动一个三相无刷直流（BLDC）电机。SV\_PWM 控制信号驱动 Trenz TEP0002 电机驱动板，该开发板实现了霍尔电流传感器，并连接电机以检测电机绕组电流。板载 ADC 将霍尔电流传感器的输出

数字化，因此该参考设计可以读取和控制用于电机控制和 PDM 的 ADC。电流以每秒 0.8 MS/s 的速率进行采样。

使用克拉克变换（方程 1）将三相（A、B 和 C）电流（图 2）转化为  $\alpha$  电流和  $\beta$  电流，如图 3 所示。

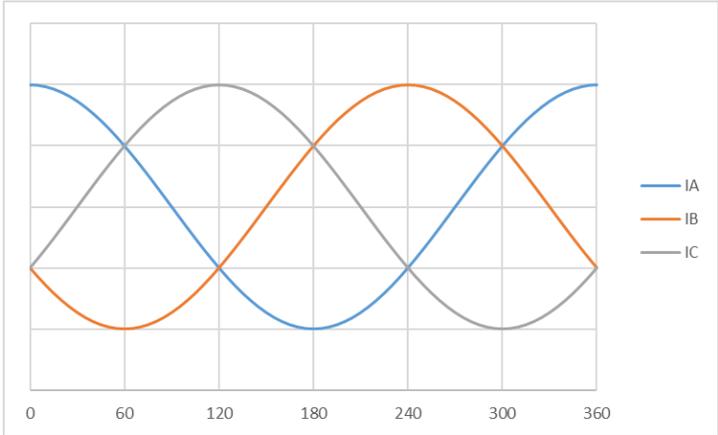


图 2. 三相电机电流 ( $I_A$ 、 $I_B$  和  $I_C$ )

$$I_\alpha = \frac{3}{2}I_A \tag{方程 1.a}$$

$$I_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}I_B - \frac{\sqrt{3}}{2}I_C \tag{方程 1.b}$$

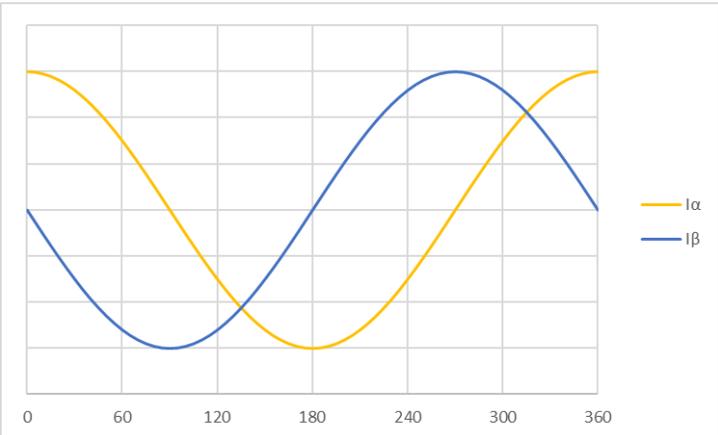


图 3. 克拉克变换的输出  $I_\alpha$  and  $I_\beta$

观察  $I_\alpha$  和  $I_\beta$  可以发现它们类似于  $\cos$  和  $\sin$  函数。事实上，当它们在 x-y 坐标平面上绘制函数图像时，结果就是一个圆（图 4）。

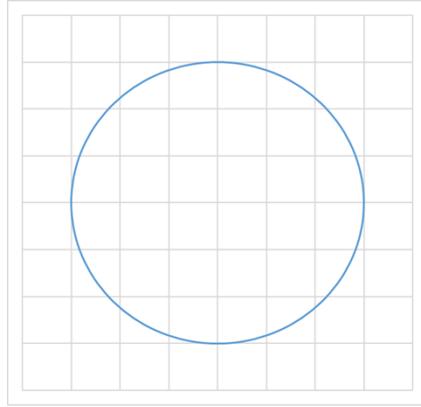


图4.  $I_q$  和  $I_\beta$  的 X-Y 平面图像

该参考设计可以对固定的轴旋转次数采集电机绕组电流快照（默认为 50 转的快照）或用户选择更长时间段内的绕组电流快照。在应用克拉克变换之前，电机电流的信号处理包括峰值检测和归一化以及移动平均滤波器。这种自适应的功能适用于各类电机和各种功耗级别的 PDM。

莱迪思 Automate 解决方案集合的 PDM 解决方案包括了一种专有算法，该算法将圆的数（如图 6 所示）折叠为一个具有更高特征集中度的较小的数据集，之后才使用 PDM AI 引擎对其进行处理。PDM AI 引擎已经使用包括正常的和不正常的电机数据在内的 10000 多个模型进行了训练。

### 不正常的电机数据类型 1——绕组电流较高

该类数据集代表了由于电机绕组过热或烧毁造成的早期电机故障。通常情况下，由于制造公差或电机驱动器故障，一个绕组会先于其他两个绕组发生故障。将电阻分别与两个“正常的”绕组串联，可以很好地模拟这种故障模式。图 5 显示了模拟绕组 A 中“短路”的情况。图 6 展示了这种情况下产生的折叠图像和原始图像。该圆已变形为长轴在 x 轴上的椭圆。表 1 总结了三个电机绕组高电流导致的变形。

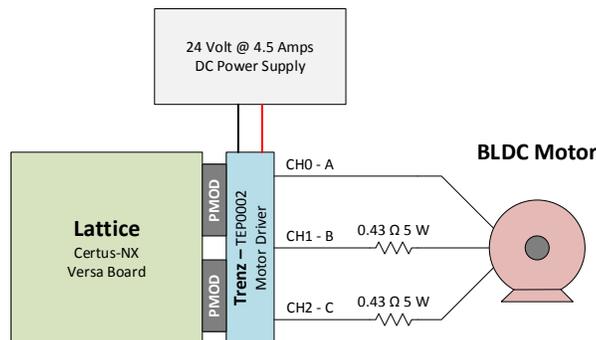


图5. 电机绕组 A 的高电流

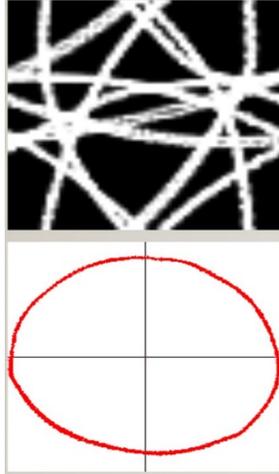


图6. 绕组 A 电流较高情况下电机的 PDM 图像 (Bad\_Robot\_D.jpg)

出现高电流的绕组	相应的 $I_\alpha - I_\beta$ 坐标图
A	长轴在 X 轴上的椭圆
B	长轴在 $45^\circ$ 的椭圆
C	长轴在 $135^\circ$ 的椭圆

表 1. 电机绕组短路时的 PDM 图像总结

## 不正常的电机数据类型 2——绕组电流较低

有几种情况会导致单个绕组电流过低。例如，大功率电机中的连接部分可能会被腐蚀或有松动，从而导致在电流到达电机绕组之前  $I-R$  电压下降。此外，其中两个绕组可能会先于第三个绕组出现故障，或者电机驱动在其中一相变弱。同样，我们可以将一个电阻与“不正常的”电机绕组串联来模拟这种故障，如图 7 所示。图 8 表明圆发生变形，变为长轴在  $135^\circ$  度的椭圆。表 2 总结了三个电机绕组低电流导致的变形。

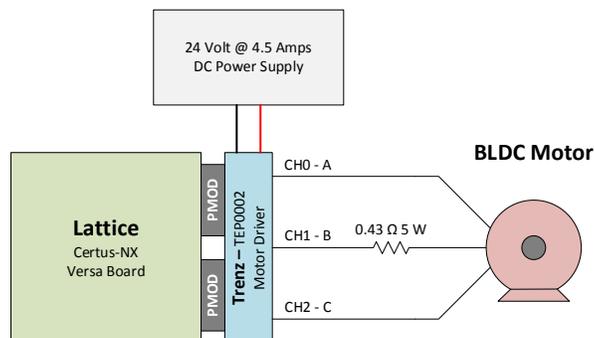


图7. 电机绕组 B 阻抗增大

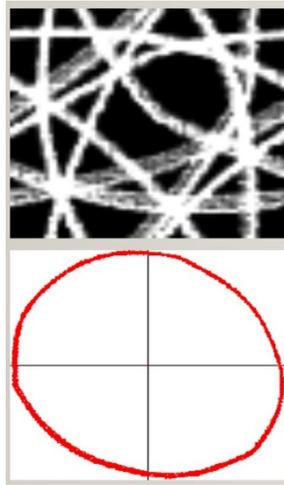


图8. 绕组B 电流较低情况下电机的PDM 图像 (Bad\_Robot\_B.jpg)

出现低电流的绕组	相应的 $I_\alpha - I_\beta$ 坐标图
A	长轴在 $90^\circ$ 的椭圆
B	长轴在 $135^\circ$ 的椭圆
C	长轴在 $45^\circ$ 的椭圆

表2. 电机绕组低电流下的PDM 图像总结

### 不正常的电机数据类型 3——负载不平衡

第三类故障同样使用 MCSA 来检测电机上机械负载的不平衡。出现负载不平衡时，转动惯量不均匀并围绕转子轴摆动（类似于陀螺在倒地前的摆动）。当转动惯量绕电机轴摆动时，绕组或多或少地会消耗更多与摆动同步而非与电机转速同步的电流。为了模拟这种情况，可以将一个不平衡的惯性轮固定在电机轴上，并在电机达到运行速度后采集数据。图 9 显示了负载不平衡的电机的 PDM 图像。电源管理有问题也可能导致相同类型的图像。

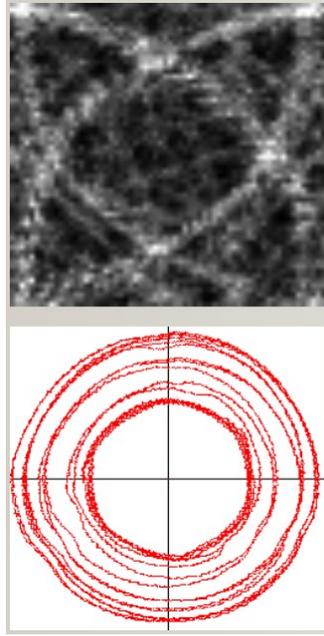


图9. 安装了不平衡的惯性轮的电机 PDM 图像

### 正常的电机数据——负载平衡电流平衡

那么正常电机的运行特征是如何呢？图 10 展示了未连接任何电阻而是一个平衡的惯性轮的电机的 PDM 图像。在  $60^\circ$ 、 $170^\circ$  和  $290^\circ$ （大约相隔  $120^\circ$ ）方向与完美的圆有一些细微的偏差。这是 SV\_PWM 从一相转换到下一相重叠的结果。

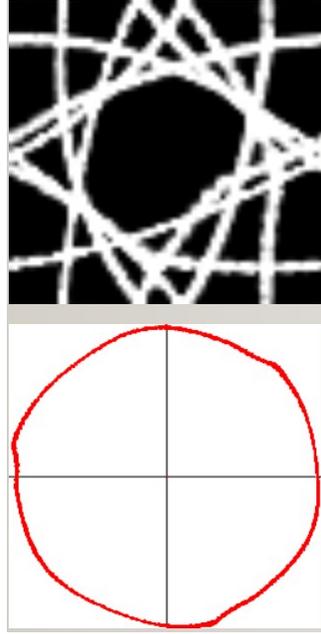


图 10. 电流和负载都平衡时的电机 PDM 图像

## 结论

用于工业电机控制系统的预测性维护功能通过最大程度减少意外故障导致的系统停摆，极大降低了运营成本。莱迪思 Automate 解决方案集合拥有快速轻松实现 PDM 所需的硬件和软件工具，并使用行业标准的 MCSA 解决方案，为许多工业应用（包括机器人）中常用的 BLDC 电机保驾护航。