

Shivam Kumar, Venkata Naresh Kotikelapudi and Dipankar Mitra

摘要

步进电机系统是一种开环位置控制系统。系统控制器或电机驱动器 IC 并不能确定施加的负载扭矩大小或正常运行中防止失步的最佳电流。由于驱动器无法感知负载扭矩需求，因此通常会以恒定满量程电流驱动电机，从而维持最大负载扭矩。但是，在较轻的负载下无需使用大工作电流，因为这会导致不必要的 I^2R 损耗。除了降低整体系统效率之外，线圈大电流还会由于电机发热而导致热问题，从而降低电机的耐用性和寿命。

德州仪器 (TI) 最近推出的 DRV8462、DRV8452 和 DRV8461 步进电机驱动器具有自动扭矩算法等多种新功能。自动扭矩功能可根据负载扭矩自动调整步进电机线圈电流，以此提高系统效率。自动扭矩功能不需要任何外部传感器，而是凭借快速传感能力，监测提供给电机的功率，从而生成一个随负载扭矩呈线性变化的内部信号。本应用报告重点介绍自动扭矩算法的优势，以及如何对其进行优化以带来更多益处。

内容

1 步进电机驱动器的功率效率.....	3
2 自动扭矩.....	4
2.1 自动扭矩：学习原理.....	4
2.2 电流控制.....	8
2.3 PD 控制环路.....	11
2.4 自动扭矩调优参数的影响.....	12
2.5 通过自动扭矩提高效率.....	21
3 案例研究.....	22
3.1 应用 1：ATM 机.....	22
3.2 应用 2：纺织机器.....	24
3.3 应用 3：打印机.....	28
4 总结.....	28
5 参考文献.....	28

插图清单

图 1-1. 传统步进电机驱动器的功率损耗.....	3
图 2-1. 通过自动扭矩实现节能.....	4
图 2-2. (ATQ_LRN + ATQ_CNT) 与负载扭矩间的关系.....	5
图 2-3. 自动扭矩学习流程图.....	7
图 2-4. 自动扭矩学习.....	8
图 2-5. ATQ_CNT 作为负载扭矩的函数.....	9
图 2-6. 选择 ATQ_TRQ_MIN、ATQ_TRQ_MAX、ATQ_UL、ATQ_LL.....	10
图 2-7. 选择 PD 控制环路参数.....	12
图 2-8. ATQ_TRQ_MIN = 0.6A, ATQ_UL = 40.....	12
图 2-9. ATQ_TRQ_MIN = 0.74A, ATQ_UL = 45.....	12
图 2-10. ATQ_TRQ_MIN = 0.93A, ATQ_UL = 50.....	13
图 2-11. ATQ_TRQ_MIN = 1.2A, ATQ_UL = 60.....	13
图 2-12. ATQ_UL = 40, ATQ_LL = 40.....	13
图 2-13. ATQ_UL = 40, ATQ_LL = 20.....	13
图 2-14. 节能作为负载扭矩的函数.....	14
图 2-15. 选择节能曲线.....	14
图 2-16. 自适应 ATQ_UL.....	15

图 2-17. 使用非自适应 ATQ_UL 的电流波形.....	15
图 2-18. 使用自适应 ATQ_UL 的电流波形.....	15
图 2-19. KP = 1 时的负载瞬态.....	16
图 2-20. KP = 5 时的负载瞬态.....	16
图 2-21. KP = 7 时的电流波形.....	16
图 2-22. KD = 0, 负载扭矩从 0.3Nm 更改为 0.57Nm.....	17
图 2-23. KD = 5, ATQ_D_THR = 30, 负载扭矩从 0.3Nm 更改为 0.57Nm.....	17
图 2-24. KP = 1, FRZ = 1, AVG = 1.....	17
图 2-25. KP = 1, FRZ = 1, AVG = 8, 对于慢速瞬态非常稳定.....	17
图 2-26. KP = 1, FRZ = 7, AVG = 8, 响应缓慢.....	17
图 2-27. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0, 环路在快速负载瞬态期间需要很长时间才能稳定.....	18
图 2-28. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 2, 减少了振荡.....	18
图 2-29. ATQ_CNT 作为电机速度的函数.....	18
图 2-30. 3000pps 步进频率.....	19
图 2-31. 4800pps 步进频率.....	19
图 2-32. 6400pps 步进频率.....	19
图 2-33. 8000pps 步进频率.....	19
图 2-34. ATQ_CNT 作为电源电压的函数.....	19
图 2-35. ATQ_LRN 与 VM 间的关系.....	20
图 2-36. ATQ_CNT 与电机温度间的关系.....	20
图 3-1. ATM 电机的学习例程快照.....	23
图 3-2. ATM 电机加载/卸载, 不具有自动扭矩功能.....	23
图 3-3. ATM 电机加载/卸载, 不具有自动扭矩功能.....	23
图 3-4. ATM 电机加载/卸载, 具有自动扭矩功能.....	24
图 3-5. ATM 电机加载/卸载, 具有自动扭矩功能.....	24
图 3-6. 纺织电机的学习例程快照.....	25
图 3-7. 纺织电机加载/卸载, 不具有自动扭矩功能.....	26
图 3-8. 纺织电机加载/卸载, 不具有自动扭矩功能.....	26
图 3-9. 纺织电机加载/卸载, 具有自动扭矩功能.....	27
图 3-10. 纺织电机加载/卸载, 具有自动扭矩功能.....	27
图 3-11. 打印机电机加载/卸载, 不具有自动扭矩功能.....	28
图 3-12. 打印机电机加载/卸载, 具有自动扭矩功能.....	28

表格清单

表 2-1. 用于自动扭矩学习例程的寄存器.....	5
表 2-2. 用于电流控制的寄存器.....	8
表 2-3. PD 控制环路的参数.....	11
表 2-4. 负载分布 A、B 和 C 的节能.....	15
表 2-5. 通过自动扭矩提高热性能.....	21

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 步进电机驱动器的功率效率

步进电机之所以很受欢迎，是因为其可以简单地将输入端的激励变化转换为输出端的精确位置变化，而无需使用任何外部传感器来监测位置。这种电机对步进电机线圈中的电流进行调节来实现精确的位置和速度控制。

电机的扭矩公式为**方程式 1**。扭矩值取决于线圈电流和电机结构：

$$\tau_{\max} = K_T \times I \quad (1)$$

其中 τ_{\max} 是支持的最大扭矩， K_T 是电机的扭矩常数， I 是线圈电流。

方程式 1 可被解释为线圈电流 I 提供的扭矩能力。为了维持给定的负载扭矩，电机驱动器运行时的线圈电流所能提供的扭矩必须始终大于需要的扭矩。

传统电机驱动器根据峰值负载扭矩需求来配置满量程工作电流。这可确保在需要峰值负载时电机不会丢失步进。因此，无论负载扭矩如何，电流都保持恒定。因而，当负载扭矩低于峰值负载时，驱动器和电机会以电阻功率损耗的形式消耗部分输入功率，如图 1-1 所示。

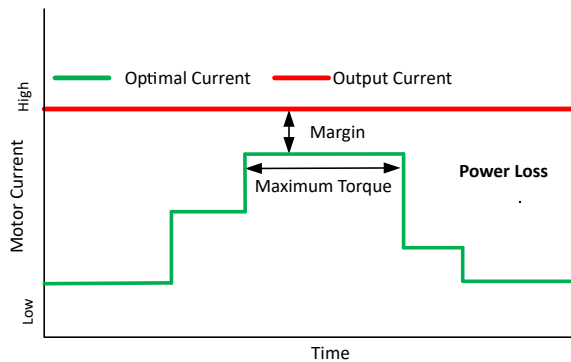


图 1-1. 传统步进电机驱动器的功率损耗

在大多数系统中，只有极少情况下才需要峰值负载扭矩。例如，在 ATM 机中，步进电机可能需要在不到其总运行时间 15% 的时间内提供峰值负载。不过，由于存在不必要的功率损耗、更大的系统尺寸和更短的组件寿命，典型的步进驱动器最终会始终向电机提供满量程电流，进而导致系统效率降低。

2 自动扭矩

DRV8462、DRV8452 和 DRV8461 电机驱动器中实现的自动扭矩算法会根据负载扭矩来动态改变输出电流，从而提高系统效率。每当负载扭矩较低时，输出电流都降低，以此减少电阻损耗；当负载扭矩增加时，输出电流会立即增加，防止电机失步。图 2-1 展示了此概念。由于自动扭矩功能提高了效率，系统会以较低的温度运行，从而延长了组件的寿命。有了自动扭矩功能后，设计中还可以使用更便宜、尺寸更小的步进电机。

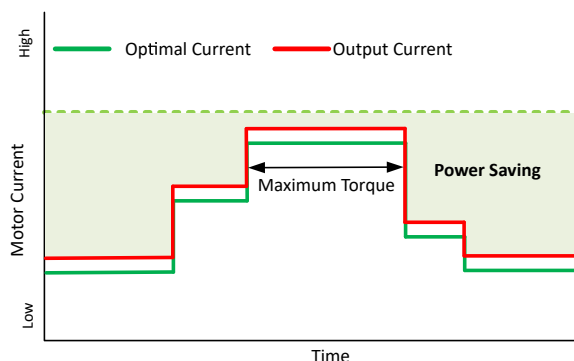


图 2-1. 通过自动扭矩实现节能

在步进电机系统中，电源提供的总功率将用于满足负载的扭矩要求，并会导致功率损耗，例如电机绕组电阻和驱动器导通电阻引起的电阻损耗。这可由方程式 2 表示：

$$\text{Power delivered by supply} = \text{Constant losses} + \tau \times \omega \quad (2)$$

其中 τ 是负载扭矩， ω 是电机转速。

根据方程式 2，可以观察到，当负载扭矩增加时，电源提供的功率也会增加。自动扭矩算法通过监控电源提供的功率来获取有关负载扭矩的信息。恒定损耗由 ATQ_LRN 参数表示，ATQ_CNT 参数表示支持负载扭矩所需的功率（如节 2.1 所述）。

2.1 自动扭矩：学习原理

本节介绍自动扭矩算法了解电机参数和电机运行条件的步骤。

如节 2 中所述，ATQ_LRN 参数取决于系统中的恒定损耗。对于任何给定电机，ATQ_LRN 与线圈电流成正比。这可通过方程式 3 表示：

$$\text{ATQ_LRN} = \frac{k \times I_M}{V_{VM}} \quad (3)$$

其中 I_M 是电机电流， V_{VM} 是驱动器的电源电压， k 是常数。方程式 3 给出了 ATQ_LRN 与电机电流之间的线性关系。自动扭矩学习例程在空载时的任意两个电流下学习 ATQ_LRN 值，然后使用此关系在任何其他电流下内插 ATQ_LRN 值。

ATQ_CNT 参数表示支持负载扭矩的已提供功率的分量。此关系可以用方程式 4 表示。

$$\text{ATQ_CNT} = \frac{k_1 \times \tau \times \omega}{I_{FS}} \quad (4)$$

其中 k_1 是给定工作条件下的常数， I_{FS} 是步进驱动器的满量程电流（正弦电流波形峰值）。

方程式 4 定义了自动扭矩算法的基本工作原理。ATQ_CNT 参数可用于根据在步进电机上施加的负载扭矩来执行电机线圈电流调节。

图 2-2 展示了 $(\text{ATQ_LRN} + \text{ATQ_CNT})$ ，对于额定电流为 2.8A 的混合双极 NEMA 24 步进电机，在 2.5A 满量程电流下作为负载扭矩的函数进行测量。ATQ_LRN 不随负载扭矩变化，而 ATQ_CNT 随负载扭矩线性变化。

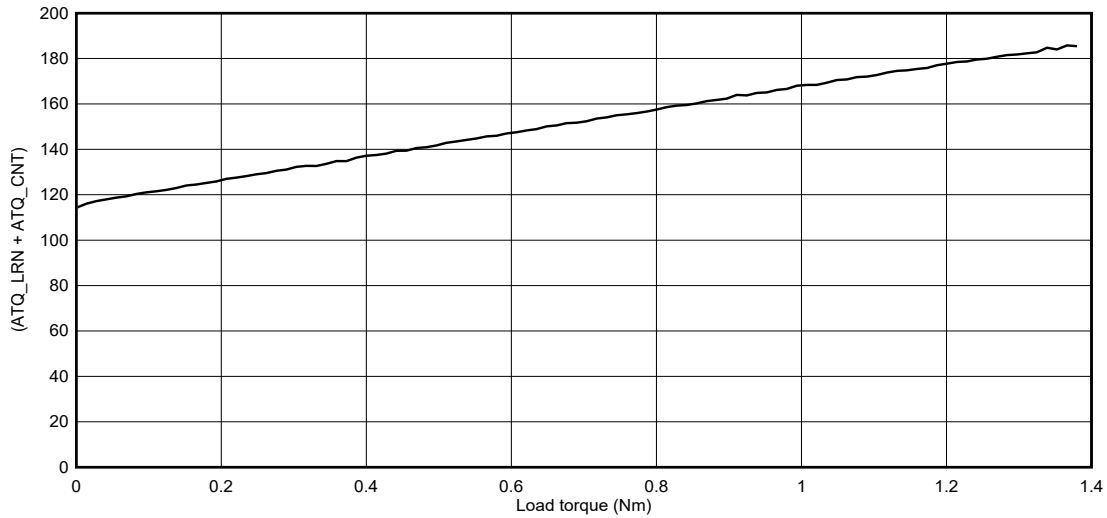


图 2-2. (ATQ_LRN + ATQ_CNT) 与负载扭矩间的关系

2.1.1 配置自动扭矩学习例程

启用自动扭矩算法后，必须运行学习例程来估计 ATQ_LRN 参数。

学习例程使用方程式 3 中所示的 ATQ_LRN 与电机电流之间的线性关系。您必须选择执行学习的两个电流值（在电机上施加空载扭矩）。这两个电流值由 ATQ_LRN_MIN_CURRENT 和 ATQ_LRN_STEP 寄存器编程。

- 初始电流电平 = ATQ_LRN_MIN_CURRENT x 8
- 最终电流水平 = 初始电流水平 + ATQ_LRN_STEP

这两个电流下的 ATQ_LRN 值保存在 ATQ_LRN_CONST1 和 ATQ_LRN_CONST2 寄存器中。这两个寄存器用于为应用工作范围内的所有其他电流内插 ATQ_LRN 值。

表 2-1 列出了与自动扭矩学习例程相关的寄存器。

表 2-1. 用于自动扭矩学习例程的寄存器

寄存器名称	说明
ATQ_LRN_MIN_CURRENT[4:0]	表示自动扭矩学习例程的初始电流电平。
ATQ_LRN_STEP[1:0]	表示初始电流电平的增量。支持四个选项： <ul style="list-style-type: none"> • 00b : ATQ_LRN_STEP = 128 • 01b : ATQ_LRN_STEP = 16 • 10b : ATQ_LRN_STEP = 32 • 11b : ATQ_LRN_STEP = 64 示例：如果 ATQ_LRN_STEP = 10b 且 ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 11000b，则： <ul style="list-style-type: none"> • 初始学习电流电平 = 24*8 = 192 • 最终学习电流电平 = 192 + 32 = 224
ATQ_LRN_CYCLE_SELECT[1:0]	学习例程使电流跳转到下一个电平之后，保持一个电流电平的正弦半个周期数量。支持四个选项： <ul style="list-style-type: none"> • 00b : 8 个半个周期 • 01b : 16 个半个周期 • 10b : 24 个半个周期 • 11b : 32 个半个周期
LRN_START	向该位写入 1b 将启用自动扭矩学习例程。学习完成后，该位自动变为 0b。
LRN_DONE	学习完成后，该位变为 1b。
ATQ_LRN_CONST1[10:0]	指示初始学习电流电平时的 ATQ_LRN 参数。
ATQ_LRN_CONST2[10:0]	指示最终学习电流电平时的 ATQ_LRN 参数。

表 2-1. 用于自动扭矩学习例程的寄存器 (continued)

寄存器名称	说明
VM_SCALE	当该位为 1b 时，自动扭矩算法根据电源电压变化自动调整 ATQ_UL、ATQ_LL 和 ATQ_LRN 参数。

在设置学习例程参数时，需要考虑以下几点：

- 建议选择介于最大工作电流的 30% 至 50% 之间的初始电流电平。
- 最终电流水平不得超过 255，并且可以在最大工作电流的 80% 和 100% 之间选择。
- 电流波形失真（由于高速或低电源电压）会导致 ATQ_LRN 参数读取不正确。应从观察到波形失真的电流中选择学习电流电平。
- ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 的值较低，可加快学习速度。但是，在易受噪声影响的系统中，较高的 ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 会导致更稳定的 ATQ_LRN 参数值。
- 当电机达到稳态速度后，应进行学习。
- 如果电机发生更改或电机速度变化 $\pm 10\%$ ，则应重新学习。

简单总结，应该应用以下命令序列来启用自动学习：

1. 向 ATQ_EN 写入 1b。
 2. 空载运行电机。
 3. 对 ATQ_LRN_MIN_CURRENT 进行编程。
 4. 对 ATQ_LRN_STEP 进行编程。
 5. 对 ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 进行编程。
 6. 向 ATQ_LRN_START 写入 1b。
 7. 该算法会以初始电流电平运行电机并持续 ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 个电气半个周期。
 8. 接着，该算法会以最终电流电平运行电机并持续 ATQ_LRN_CYCLE_SELECT 个电气半个周期。
- 学习完成后：
 - ATQ_LRN_START 位会自动清零至 0b
 - ATQ_LRN_DONE 位变为 1b
 - ATQ_LRN_CONST1 和 ATQ_LRN_CONST2 会填充在各自的寄存器中
 - 电机电流达到 ATQ_TRQ_MAX

从原型设计测试了解 ATQ_LRN_CONST1 和 ATQ_LRN_CONST2 后，即可用于大规模生产，而无需再次调用学习例程。大规模生产中应使用以下命令序列：

1. VREF 设置为与原型测试学习期间相同的值
2. 对 ATQ_LRN_MIN_CURRENT 进行编程
3. 对 ATQ_LRN_STEP 进行编程
4. 对 ATQ_LRN_CONST1 进行编程
5. 对 ATQ_LRN_CONST2 进行编程
6. 向 ATQ_EN 写入 1b

图 2-3 展示了自动扭矩学习例程的综合流程图。

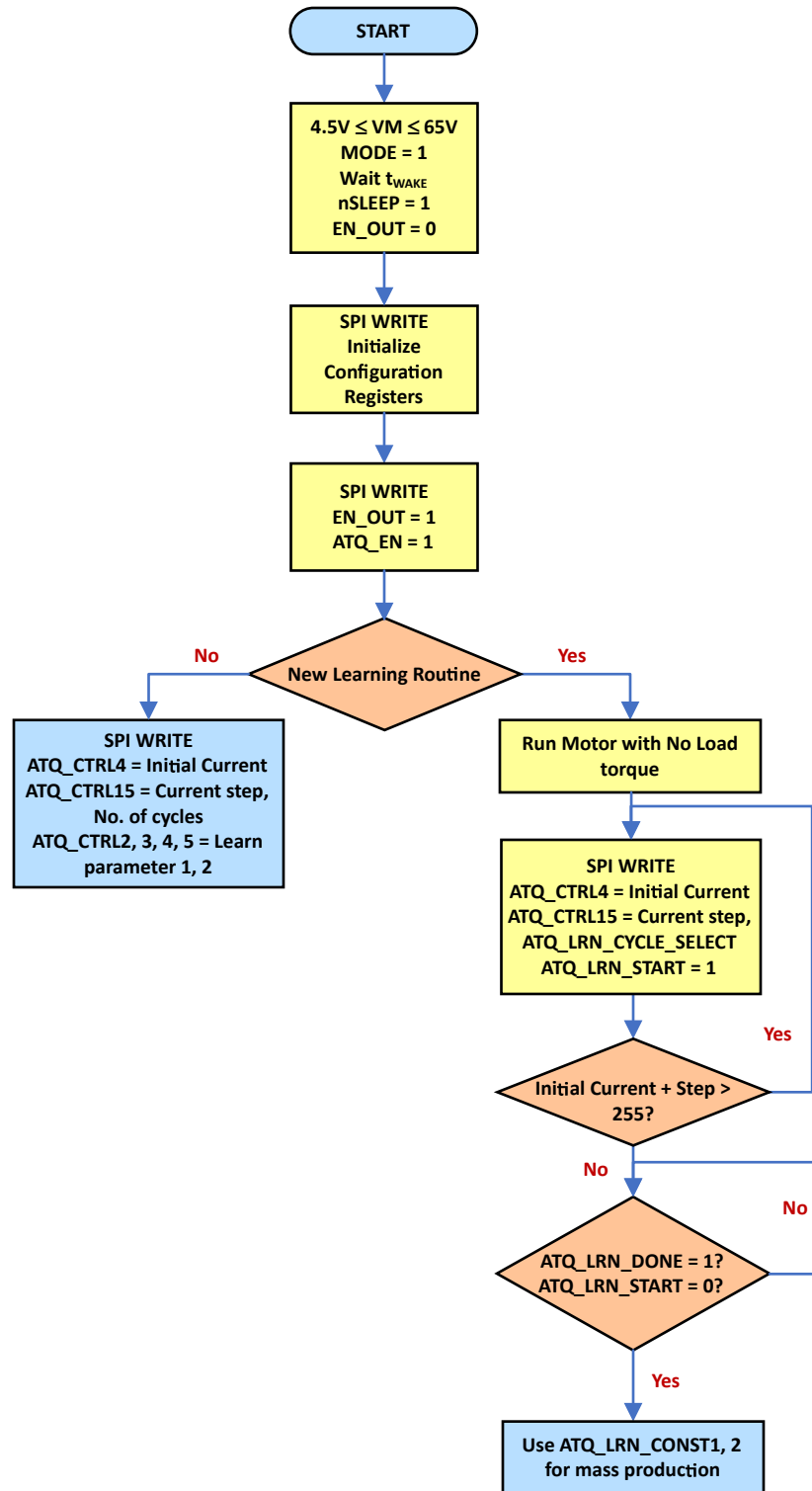


图 2-3. 自动扭矩学习流程图

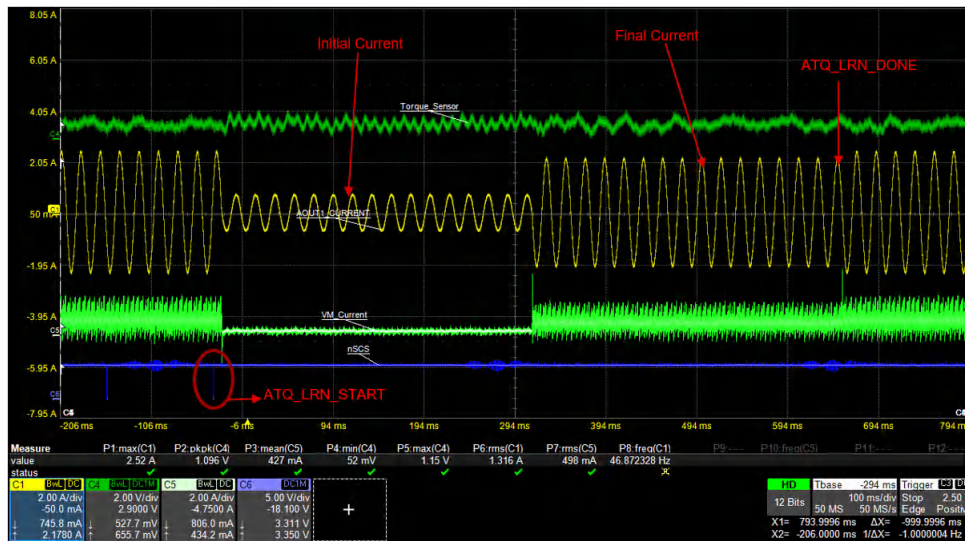


图 2-4. 自动扭矩学习

从上到下绘制的图线依次为：负载扭矩、线圈电流、电源电流、nSCS。

图 2-4 展示了初始电流 (I_{FS1}) 为 740mA 且最终电流 (I_{FS2}) 为 2.2A 时的自动学习过程。ATQ_LEARN_CYCLE_SELECT 对应于 32 个半个周期。

2.2 电流控制

本节介绍自动扭矩算法如何根据施加的负载扭矩来修改电机线圈电流，从而更大限度降低系统中的电阻损耗。

表 2-2 列出了与电流控制相关的寄存器。

表 2-2. 用于电流控制的寄存器

参数	说明
ATQ_UL[7:0] ATQ_LL[7:0]	滞环的上限和下限，其中 ATQ_CNT 通过修改电机电流来控制。
ATQ_TRQ_MIN[7:0] ATQ_TRQ_MAX[7:0]	启用自动扭矩时的可编程最小和最大电流限制。
ATQ_TRQ_DAC[7:0]	当自动扭矩被启用时，输出电机电流的值。ATQ_TRQ_DAC 可以在 ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_TRQ_MAX 之间变化。
CNT_OFLW	如果 ATQ_CNT 大于 ATQ_UL，则 CNT_OFLW 标志变为 1b。
CNT_UFLW	如果 ATQ_CNT 小于 ATQ_LL，则 CNT_UFLW 标志变为 1b。

如方程式 4 所示，ATQ_CNT 参数与负载扭矩成正比，与步进驱动器的电流设置成反比。

此关系的理想化表示如图 2-5 所示。

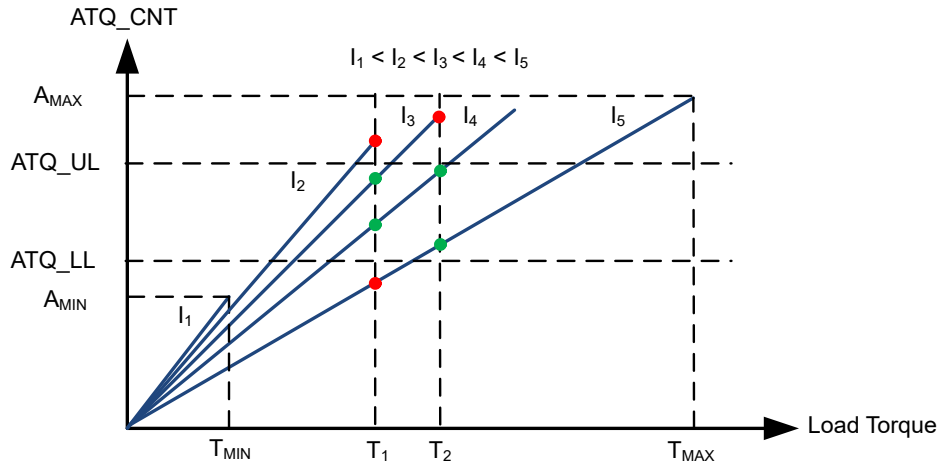


图 2-5. ATQ_CNT 作为负载扭矩的函数

自动扭矩算法通过调制电机电流将 ATQ_CNT 限制在由用户可编程的 ATQ_UL 和 ATQ_LL 参数定义的滞环范围内，如图 2-5 所示。

- 电机在没有失步或失速的情况下可支持的最大负载扭矩与电机电流成正比。
- 如果负载扭矩需求增加 (T_1 到 T_2)，ATQ_CNT 会超过 ATQ_UL 阈值，作为响应，该算法会通过增加电流 (I_3 到 I_4) 将 ATQ_CNT 带入滞环范围内。
- 当负载扭矩需求下降 (从 T_2 降至 T_1) 且 ATQ_CNT 低于 ATQ_LL 时，该算法会降低此电流，使 ATQ_CNT 处于滞环范围内 (I_5 到 I_4)。

2.2.1 设置电流控制参数

电流控制参数值的选择方法如下所述：

ATQ_TRQ_MIN 是支持施加到电机的最小负载扭矩所需的最小电机电流。

1. 要查找此参数：
 - a. 以最小负载扭矩 (T_{MIN}) 加载电机，并以满量程电流 (I_{FS}) 驱动电机。
 - b. 将 ATQ_UL 和 ATQ_LL 设为零，将 KP 设为 1。
 - c. 减小电流，直至电机失速。
 - d. 记下电机失速的电流 (I_A)。
 - e. 设置 $ATQ_TRQ_MIN = 1.1 \times I_A$ 。
2. 要查找 ATQ_TRQ_MAX：
 - a. 电机电流为 I_A 时，以最大负载扭矩 (T_{MAX}) 加载电机，然后电机将失速。
 - b. 开始增大电机电流。记下电机从失速状态重新启动的电流 (I_B)。
 - c. 设置 $ATQ_TRQ_MAX = 1.1 \times I_B$ 。记下 ATQ_CNT (A_{MAX})，其中电流为 ATQ_TRQ_MAX，负载扭矩为 T_{MAX} 。
3. 对于 ATQ_UL：
 - a. 将初始值设置为 $0.5 \times A_{MAX}$ 。
 - b. 应用特定于应用的负载分布 (峰值负载和空闲负载)。
 - i. 如果电机失速，请减小 ATQ_UL 的值，直到电机不再失速。
 - ii. 如果电机在应用负载分布后没有失速，则可以增加 ATQ_UL，直到电机失速。
 - c. ATQ_UL 的值越高，在峰值负载时可以节省更多功率，但在快速负载瞬态的情况下，电机可能会失速。
 - d. 较低的 ATQ_UL 值会降低峰值负载时的节能效果，但也会降低电机失速和失步的可能性。
4. 对于大多数应用程序，ATQ_UL 和 ATQ_LL 之间相差 2 是一个很好的起点。
5. 只有在用户设置 ATQ_UL 和 ATQ_LL 后，VM_SCALE 位才应设置为 1b。

选择 ATQ_UL、ATQ_LL、ATQ_TRQ_MAX 和 ATQ_TRQ_MIN 参数的流程图如图 2-6 所示。

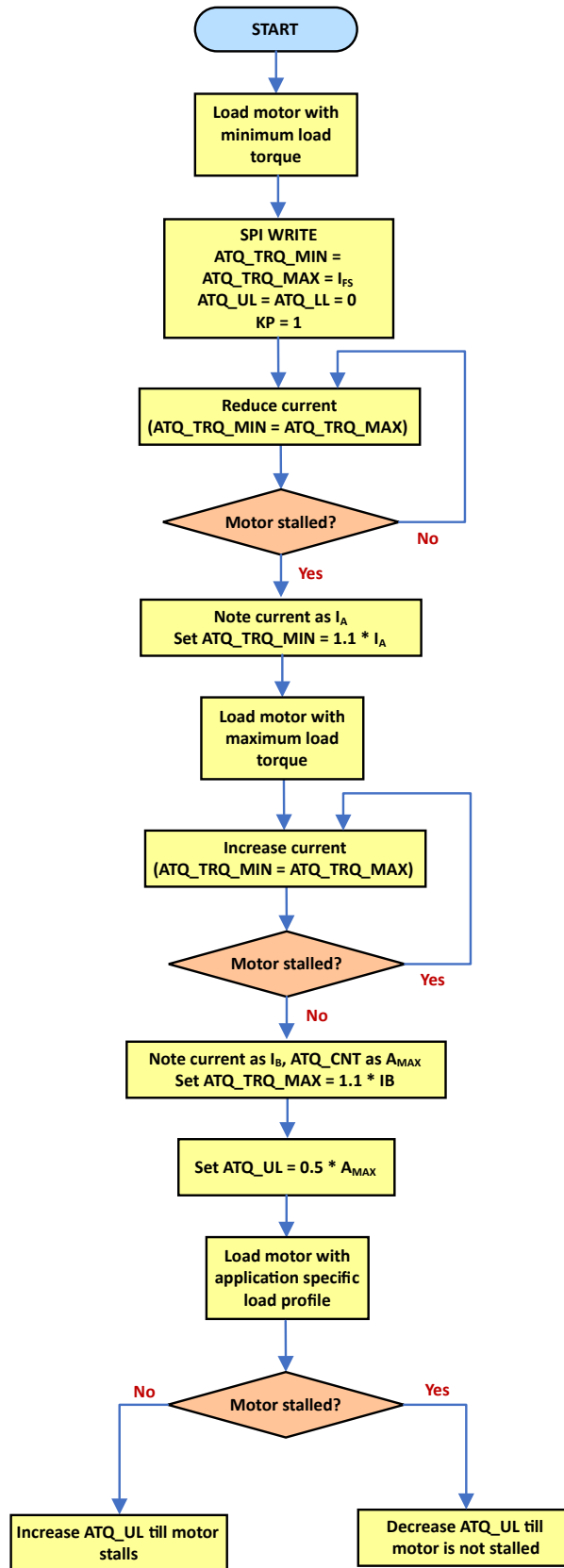


图 2-6. 选择 ATQ_TRQ_MIN、ATQ_TRQ_MAX、ATQ_UL、ATQ_LL

2.3 PD 控制环路

本节介绍内部 PD 控制环路如何平滑响应负载扭矩突变，同时更大限度减小误差。

表 2-3 描述了与 PD 控制环路相关的主要参数：

表 2-3. PD 控制环路的参数

参数	说明
KP[7:0], KD[3:0]	PD 控制环路的比例和微分增益参数。
ATQ_AVG[2:0]	ATQ_CNT 参数是 ATQ_AVG 半个周期数的移动平均值。因此，较高的 ATQ_AVG 值会减慢环路对突然出现的峰值负载需求的响应，但会确保平稳无急冲地过渡到更高的扭矩输出。较低的值会导致环路立即响应突然的负载需求。 <ul style="list-style-type: none"> 010b - 2 周期平均值 100b - 4 周期平均值 111b - 8 周期平均值 其他值：无均值计算
ATQ_FRZ[2:0]	电气半个周期中的延迟，在此之后，电流会随着 PD 环路而变化。值越小，电流就越能更快地增加，以满足峰值负载需求。此参数的范围是 1 至 7。 001b - 响应速度最快，但环路可能变得不稳定 111b - 响应速度最慢，但环路将保持稳定
ATQ_D_THR[7:0]	如果误差变化小于 ATQ_D_THR，则 KD 对校正没有影响。只有当误差变化大于 ATQ_D_THR 时，KD 才会产生影响。 例如：当 ATQ_D_THR = 10 时， 如果误差变化为 9，则 $u(t) = KP * e(t)$ 如果误差变化为 12，则 $u(t) = KP * e(t) + KD * de(t)/dt$
ATQ_ERROR_TRUNCATE[3:0]	在 PD 环路公式中使用之前从误差中截断的 LSB 位数。高值会减少电流波形中的任何振荡。

PD 控制算法表示为：

$$u(t) = KP * e(t) + KD * de(t)/dt \quad (5)$$

其中，

KP 和 KD = PD 环路常数

- $u(t)$ = 控制器的输出
- $e(t)$ = 误差信号

调整 PD 环路参数的指导原则如下：

- 设置 KP = 1，KD = 0，所有其他 PD 环路参数应为默认值
- 应用特定于应用的负载分布
- 如果电机失速，增加 KP、KD，减小 ATQ_D_THR，直到电机停止失速
- 一旦电机不再失速，请观察恒定负载扭矩下的电流波形
- 如果电流波形有振荡，请增加 ATQ_FRZ、ATQ_AVG 和 ATQ_ERROR_TRUNCATE
- 如果 ATQ_FRZ、ATQ_AVG 和 ATQ_ERROR_TRUNCATE 的值超高，则可能会使负载瞬态响应恶化，因此建议再次检查负载瞬态响应，确保 PD 控制环路稳定。

图 2-7 是选择 PD 控制环路参数的流程图。

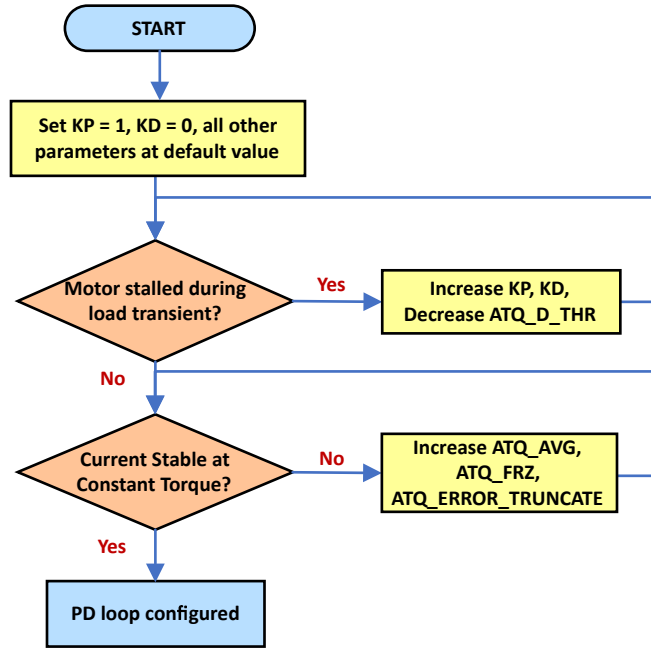


图 2-7. 选择 PD 控制环路参数

2.4 自动扭矩调优参数的影响

2.4.1 学习参数对负载瞬态响应的影响

如节 2.2.1 中所述，ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_UL 的选择会影响控制环路对负载扭矩瞬态的响应。图 2-8 和图 2-11 展示了这一情况。

以下绘制的所有图线从上到下依次为：负载扭矩、线圈电流、电源电流：

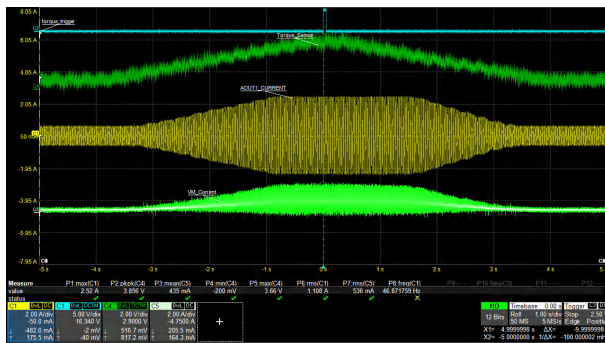


图 2-8. ATQ_TRQ_MIN = 0.6A , ATQ_UL = 40

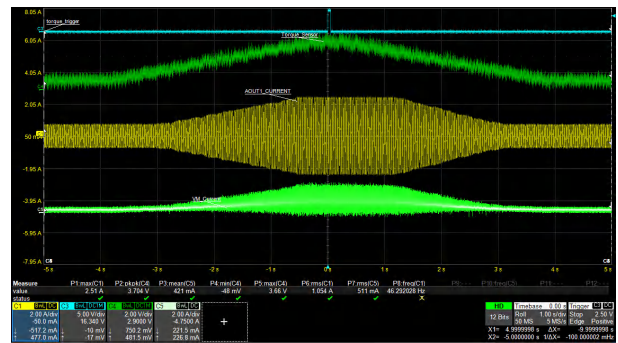


图 2-9. ATQ_TRQ_MIN = 0.74A , ATQ_UL = 45

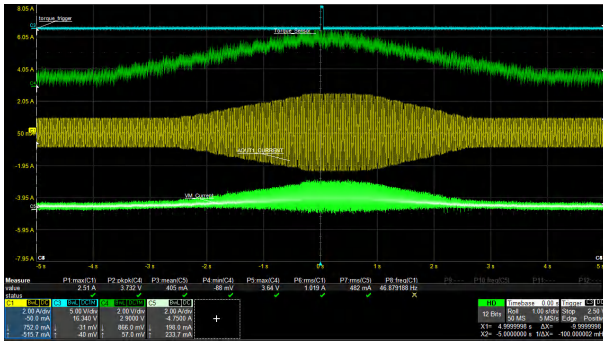


图 2-10. ATQ_TRQ_MIN = 0.93A, ATQ_UL = 50

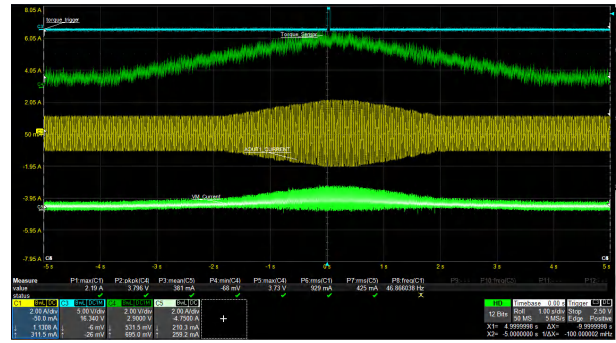


图 2-11. ATQ_TRQ_MIN = 1.2A, ATQ_UL = 60

- 在图 2-8 中，当 ATQ_UL 最小时，电机电流比其他设置更早达到 ATQ_TRQ_MAX。因此，该设置的节能最少，但它针对快速负载扭矩瞬态具有最快的响应时间。
- 在图 2-11 中，电机电流的增加需要很长时间。该设置的节能最多，但对负载扭矩瞬态的响应最慢。

2.4.2 ATQ_UL、ATQ_LL 迟滞的影响

如果通过增大差值来加宽 ATQ_UL 和 ATQ_LL 之间的滞环，则会提高算法对系统噪声的抗扰度。

- 如图 2-12 所示，较小的迟滞意味着对负载增加或减少的响应是类似的。
- 图 2-13 显示，当负载减小时，较大的迟滞会使电流需要更长的时间才能降低，从而导致对负载降低的响应速度变慢，并且效率略微下降。但在负载具有高噪声瞬态的情况下，会有所帮助。

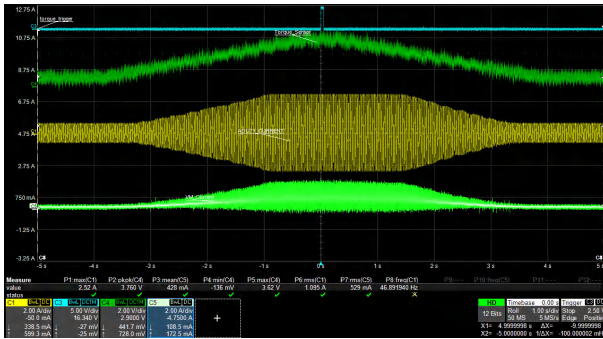


图 2-12. ATQ_UL = 40, ATQ_LL = 40

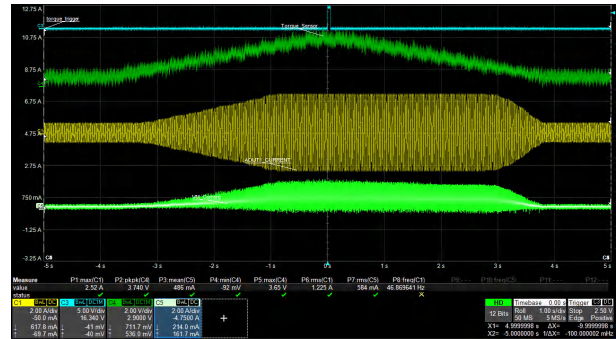


图 2-13. ATQ_UL = 40, ATQ_LL = 20

2.4.3 负载分布对节能的影响

本节说明负载扭矩分布性质对节能的影响，如图 2-14 所示。

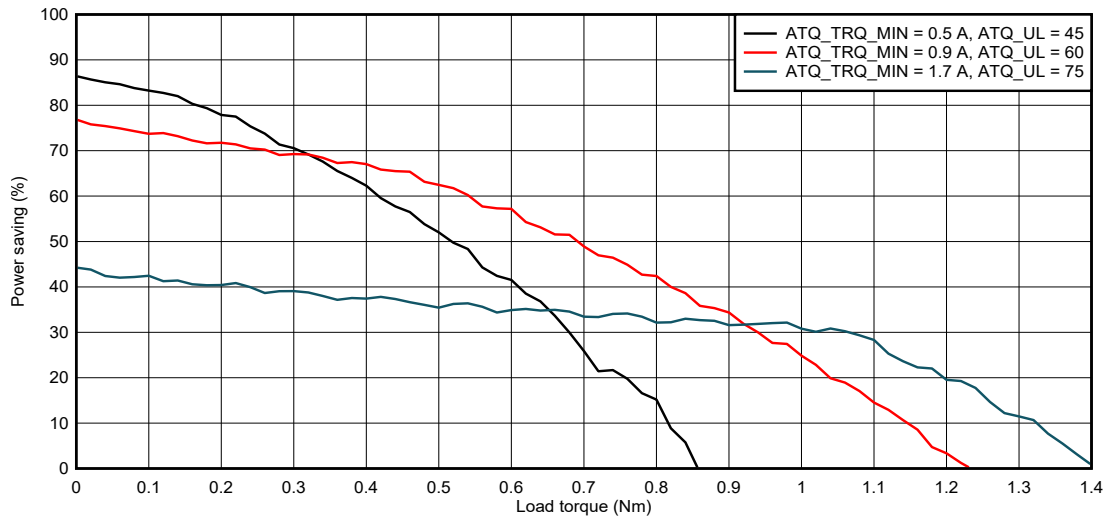


图 2-14. 节能作为负载扭矩的函数

- 对于较低的 ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_UL，轻载时的节能更多，但节能曲线在较低负载扭矩下便会下降至零。
- 较高的 ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_UL 值在轻载时只能实现适度的节能，但在较高的负载扭矩下才会下降至零。

节能曲线的选择取决于峰值负载的频率和占空比，如图 2-15 中的三种假设负载扭矩分布和两条节能曲线所示。

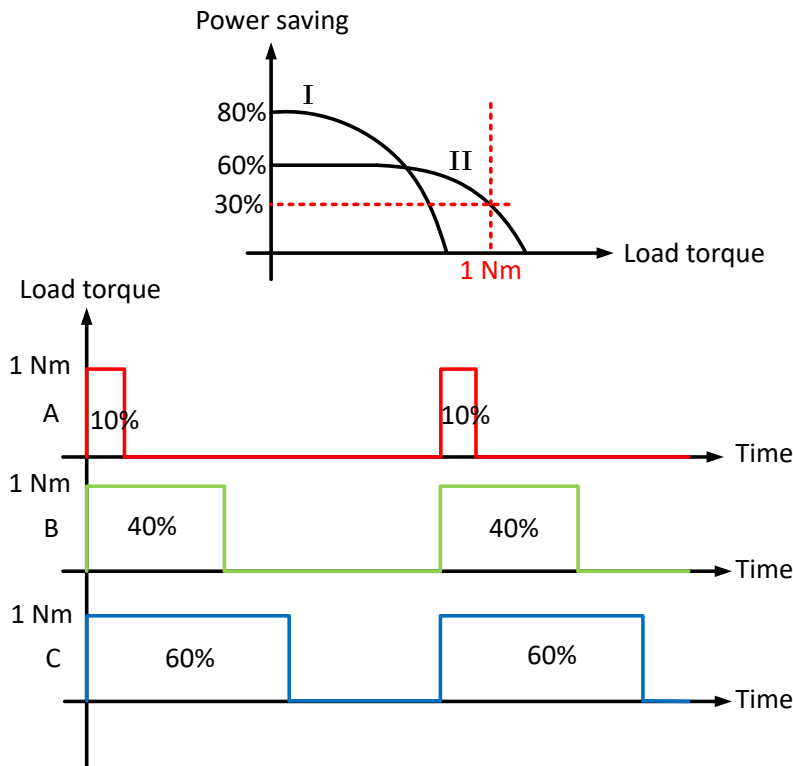


图 2-15. 选择节能曲线

表 2-4. 负载分布 A、B 和 C 的节能

负载分布	峰值负载占空比	曲线 I 的节能	曲线 II 的节能
A	10%	72%	57%
B	40%	48%	48%
C	60%	32%	42%

- 如表 2-4 所示，对于负载分布 A，节能曲线 I 可实现最多节能。
- 对于负载分布 B，两条节能曲线可实现相同大小的节能。
- 对于负载分布 C，节能曲线 II 可实现最多节能。
- 因此，如果负载分布使得峰值负载占空比很低，则应选择较低的 ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_UL 值。
- 如果峰值负载占空比很高，请选择较高的 ATQ_TRQ_MIN 和 ATQ_UL 值。

2.4.4 自适应 ATQ_UL、ATQ_LL

如果 ATQ_UL 在每个电流电平下均可适应最大 ATQ_CNT，则可以进一步提高节能效果。如图 2-16 中的包络图所示，通过持续更新 ATQ_UL (作为电机电流的函数) 的值，可以在固件中实现该自适应 ATQ_UL。

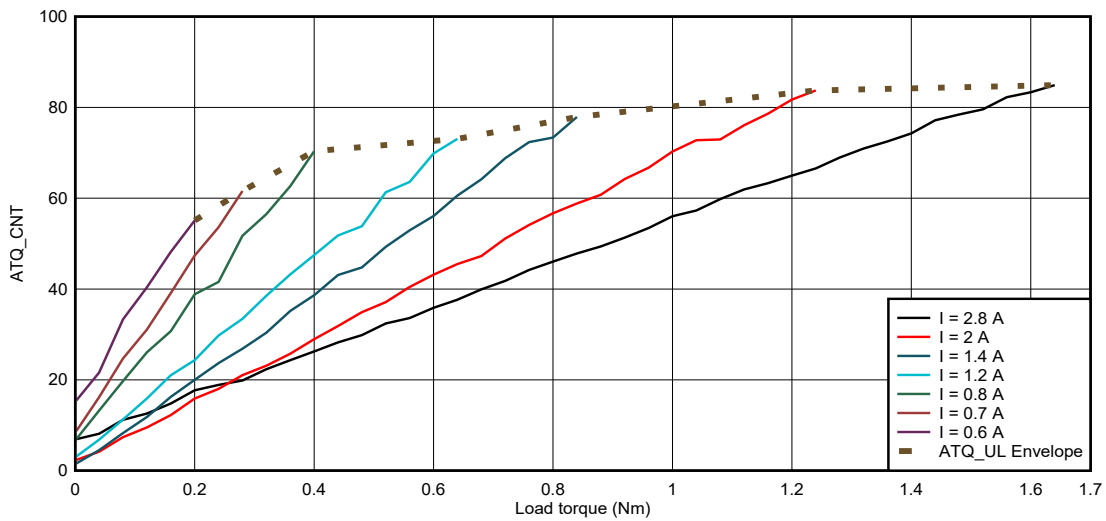


图 2-16. 自适应 ATQ_UL

通过使用自适应 ATQ_UL，图 2-18 中的电流波形比图 2-17 中所示的非自适应情况具有更好的节能效果。

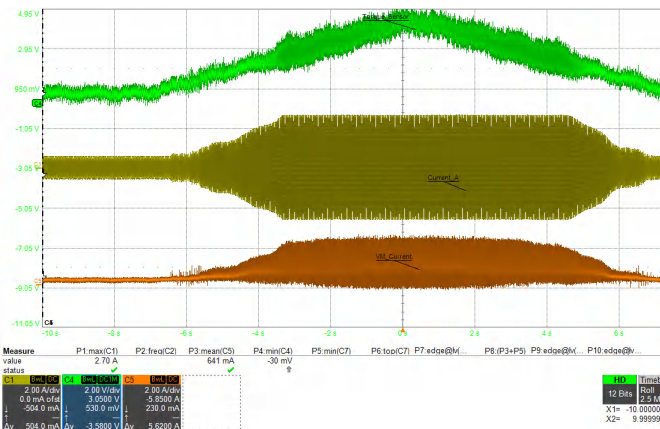


图 2-17. 使用非自适应 ATQ_UL 的电流波形

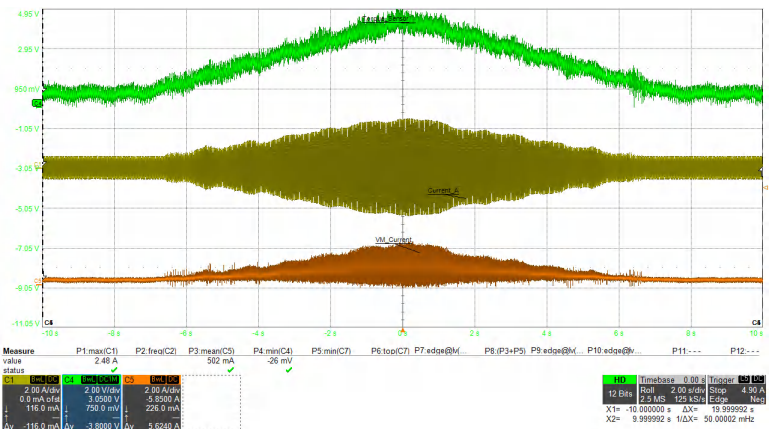


图 2-18. 使用自适应 ATQ_UL 的电流波形

2.4.5 PD 参数依赖曲线

本节介绍负载瞬态响应如何依赖于 PD 控制环路参数。

2.4.5.1 对 KP 的依赖

- 一般来说，增大 KP 会提高控制系统的响应速度，如图 2-19 和图 2-20 所示。
- 但是，如果 KP 过大，电流波形将开始振荡。
- 如果 KP 进一步增大，振荡将增大。系统会变得不稳定，甚至可能失控振荡，如图 2-21 所示。

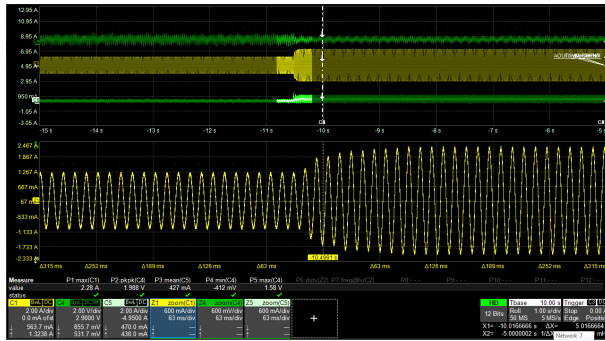


图 2-19. KP = 1 时的负载瞬态

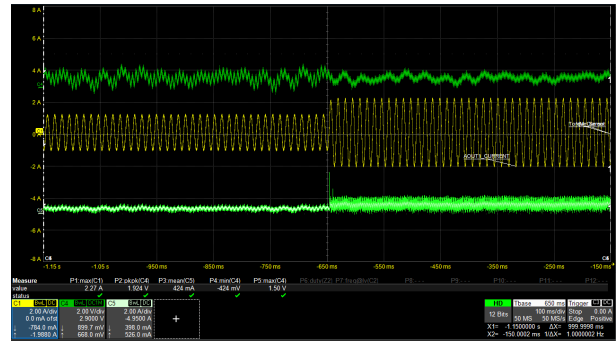


图 2-20. KP = 5 时的负载瞬态

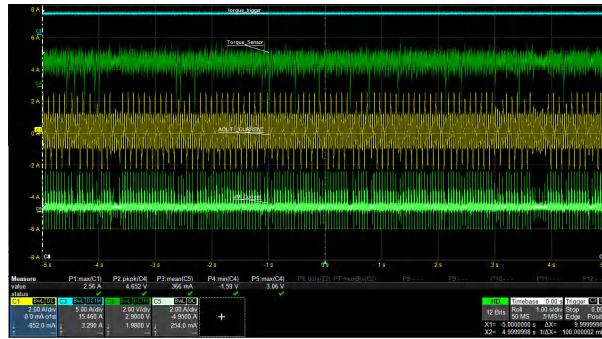


图 2-21. KP = 7 时的电流波形

2.4.5.2 对 KD 和 ATQ_D_THR 的依赖

- 增大 KD 的值将使控制系统对误差项的变化做出更强烈的反应，并将提高控制系统的总体响应速度，如图 2-22 和图 2-23 所示。
- 建议使用较小的 KD 值，因为微分响应对噪声非常敏感。
- 当选择非零 KD 值时，为了提高系统的抗噪性能，应使用较高的 ATQ_D_THR 值。

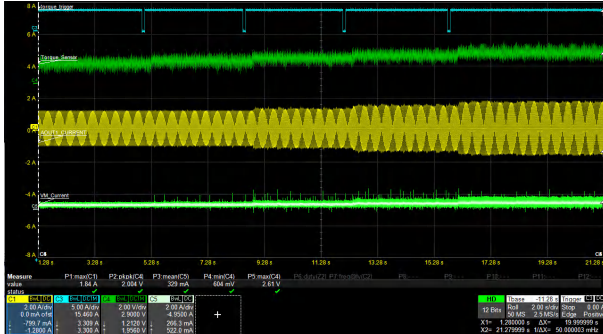


图 2-22. KD = 0，负载扭矩从 0.3Nm 更改为 0.57Nm

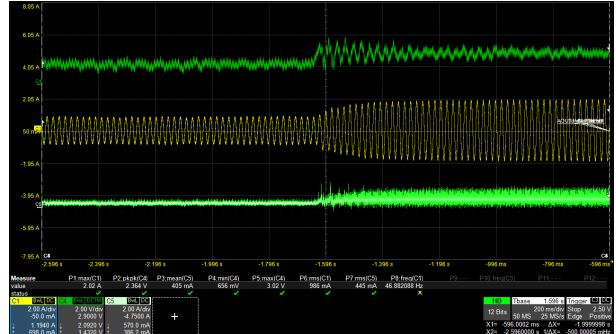


图 2-23. KD = 5，ATQ_D_THR = 30，负载扭矩从 0.3Nm 更改为 0.57Nm

2.4.5.3 对 ATQ_FRZ 和 ATQ_AVG 的依赖

- 较高的 ATQ_AVG 值会减慢环路对突然出现的峰值负载需求的响应，但会确保平稳无急冲地过渡到更高的扭矩输出。
- 较低的 ATQ_AVG 值意味着环路会立即响应突然的负载需求。
- ATQ_FRZ 的值越小，电流就越能更快地增加，以满足峰值负载需求。

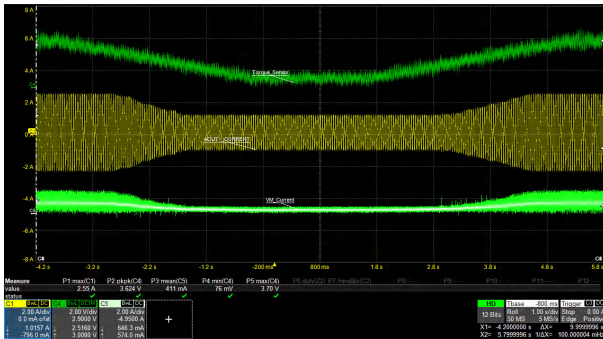


图 2-24. KP = 1，FRZ = 1，AVG = 1

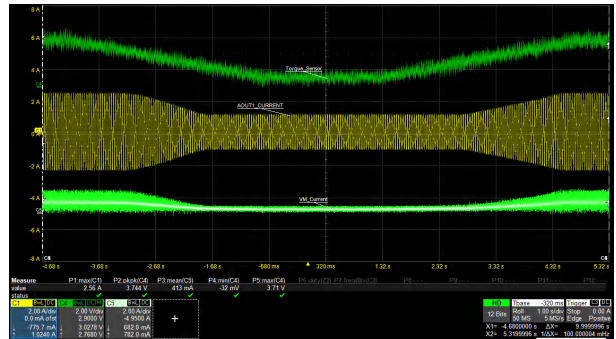


图 2-25. KP = 1，FRZ = 1，AVG = 8，对于慢速瞬态非常稳定

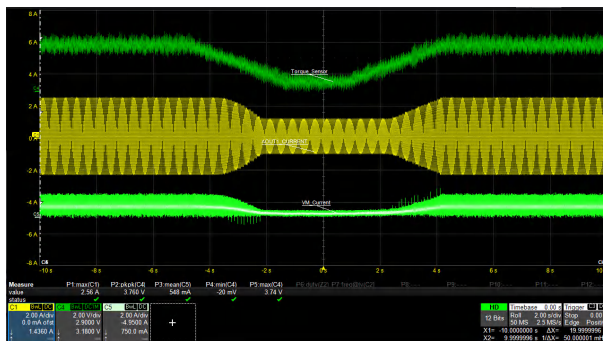


图 2-26. KP = 1，FRZ = 7，AVG = 8，响应缓慢

2.4.5.4 对 ATQ_ERROR_TRUNCATE 的依赖

增加 ATQ_ERROR_TRUNCATE 的值会减少电流波形中的振荡。

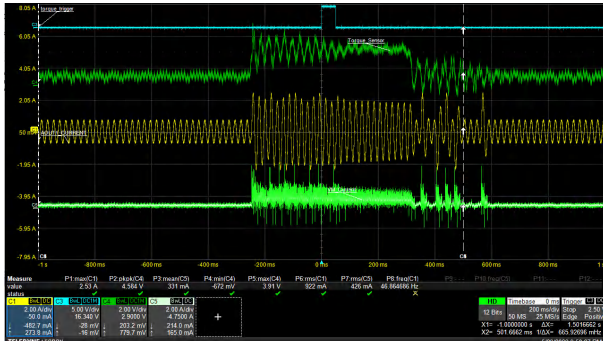


图 2-27. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0，环路在快速负载瞬态期间需要很长时间才能稳定

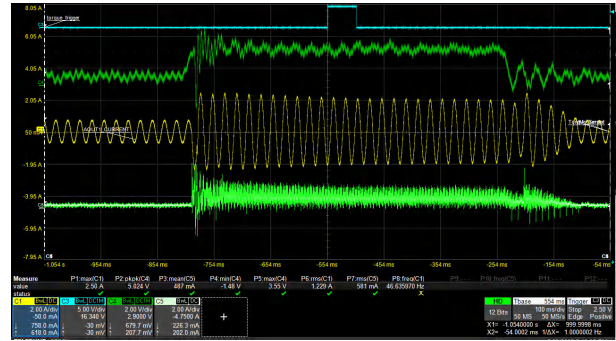


图 2-28. ATQ_ERROR_TRUNCATE = 2，减少了振荡

2.4.6 不同电机速度下的 ATQ_CNT

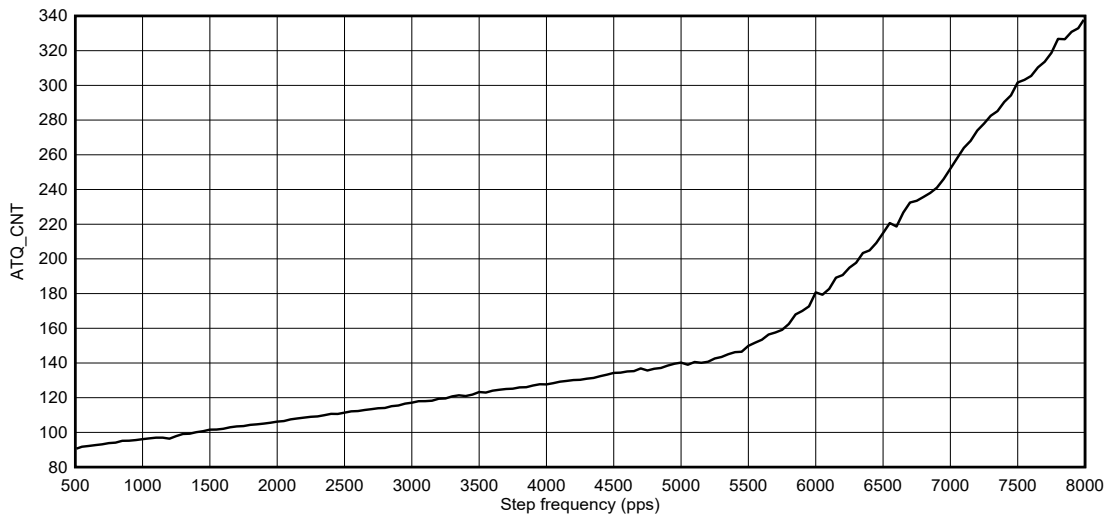


图 2-29. ATQ_CNT 作为电机速度的函数

图 2-29 展示了 ATQ_CNT 在所有其他运行条件保持不变的情况下如何随电机速度变化。很明显，在 ATQ_CNT 与速度的关系图中有两个具有不同斜率的不同线段。

- 斜率较小的线段对应于如图 2-30 和图 2-31 所示的正弦电流波形。
- 在较高速度下，当电流波形开始变为三角形（如图 2-31 和图 2-33 所示）时，ATQ_CNT 与速度的关系图具有更陡的斜率。
- 在给定的电机速度范围内，固件可以根据类似图 2-29 的曲线调整 ATQ_LRN 参数 ATQ_UL 和 ATQ_LL。
 - 首先，用户可以改变电机速度并在最大电流下绘制此曲线。
 - 在正常运行期间的任何速度下，用户都可以从曲线中找到校正因数，并将其应用于 ATQ_LRN 参数 ATQ_UL 和 ATQ_LL。

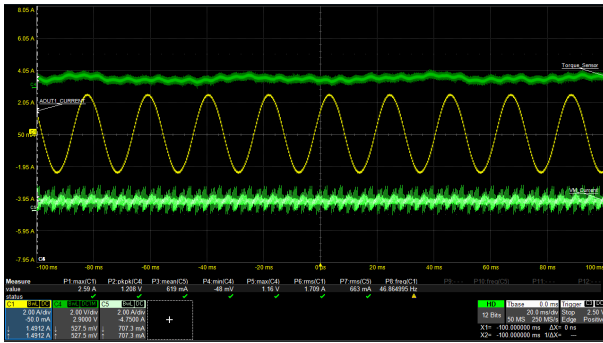


图 2-30. 3000pps 步进频率

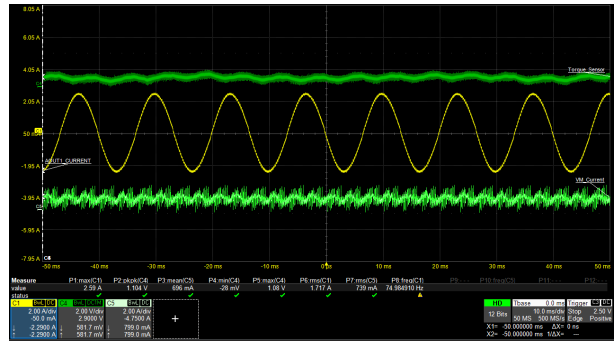


图 2-31. 4800pps 步进频率

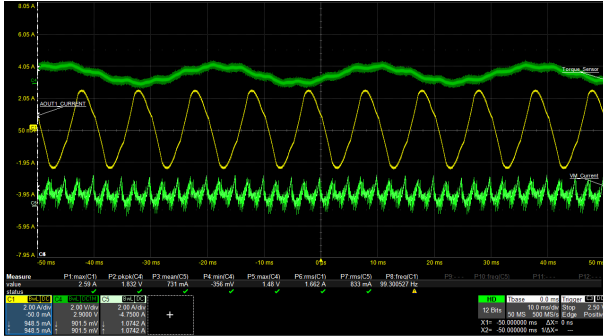


图 2-32. 6400pps 步进频率

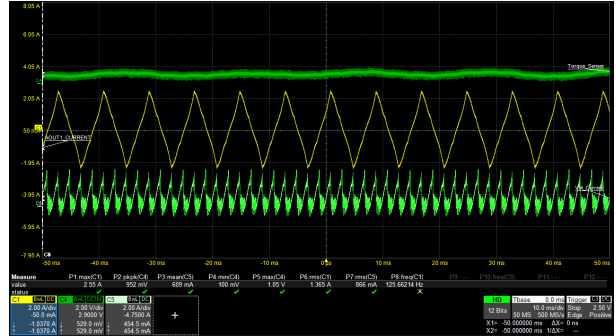


图 2-33. 8000pps 步进频率

2.4.7 不同电源电压下的 ATQ_CNT

图 2-34 所示为 ATQ_CNT (作为电机电源电压的函数) 的变化, 所有其他运行条件保持不变。

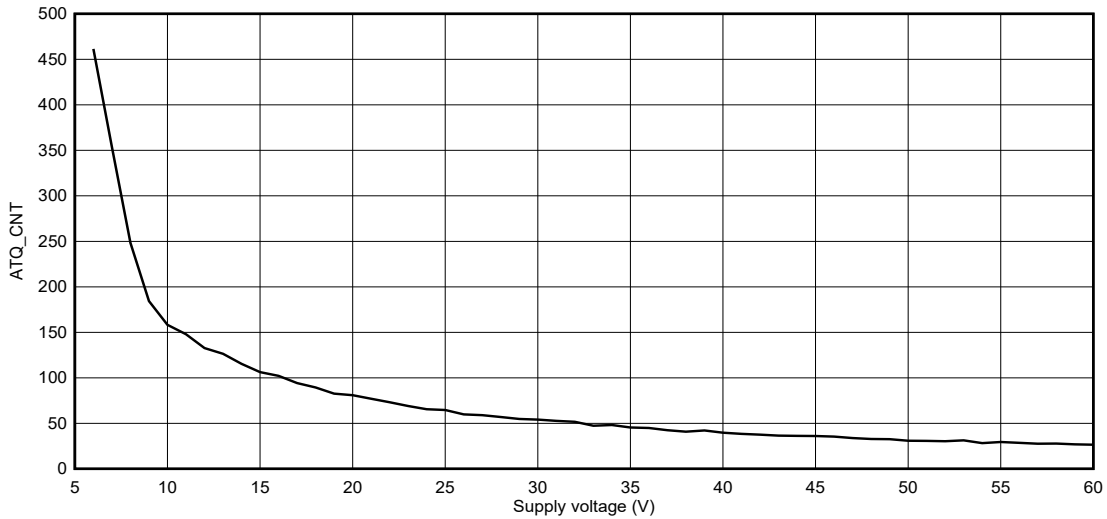


图 2-34. ATQ_CNT 作为电源电压的函数

当 VM_SCALE 位配置为 1b 时, 自动扭矩算法根据电源电压自动调整 ATQ_UL、ATQ_LL 和 ATQ_LRN 参数。

图 2-35 展示了当 VM_SCALE 位设置为 1b 时 ATQ_LRN 参数如何随电源电压自动变化。

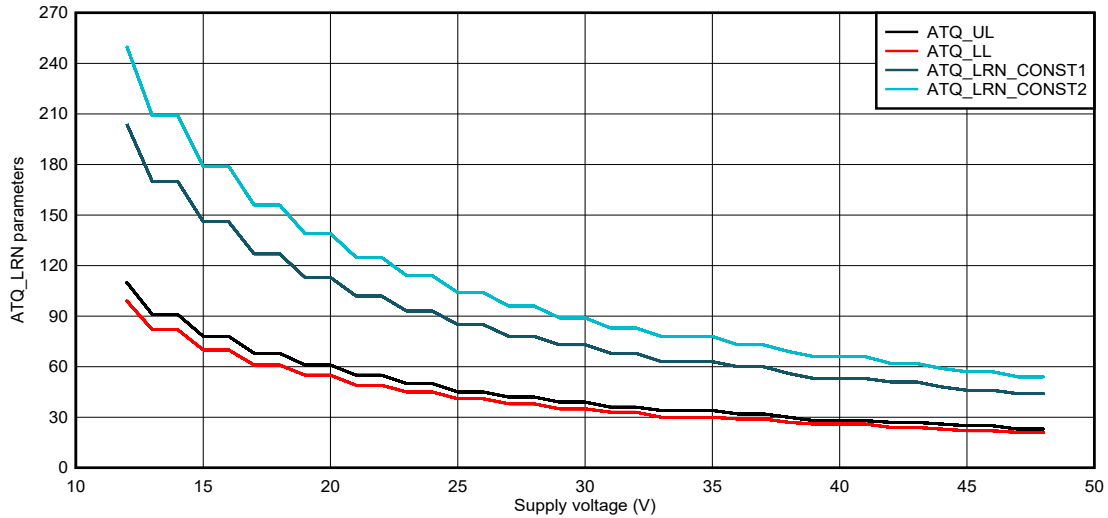


图 2-35. ATQ_LRN 与 VM 间的关系

2.4.8 电机温度估算

在所有其他运行条件保持不变的情况下，ATQ_CNT 值的变化可能与电机外壳温度变化相关，如以下具有 25 Ω 线圈电阻的步进电机的关系图所示。此属性可在应用中用于监测 PCB 和电机的温度。通过监测电机温度随时间的变化，可以提高系统稳健性并执行电机预测性维护。

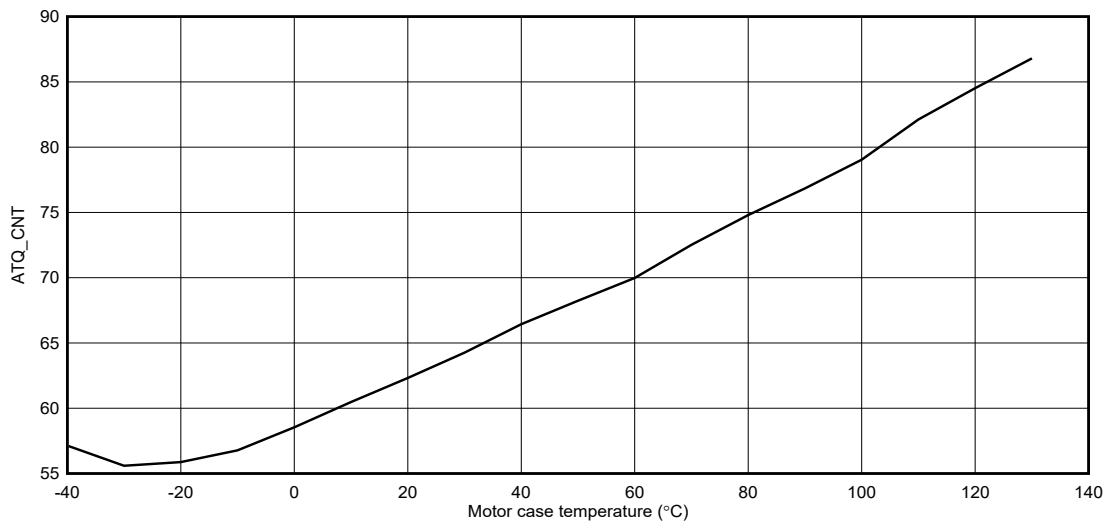


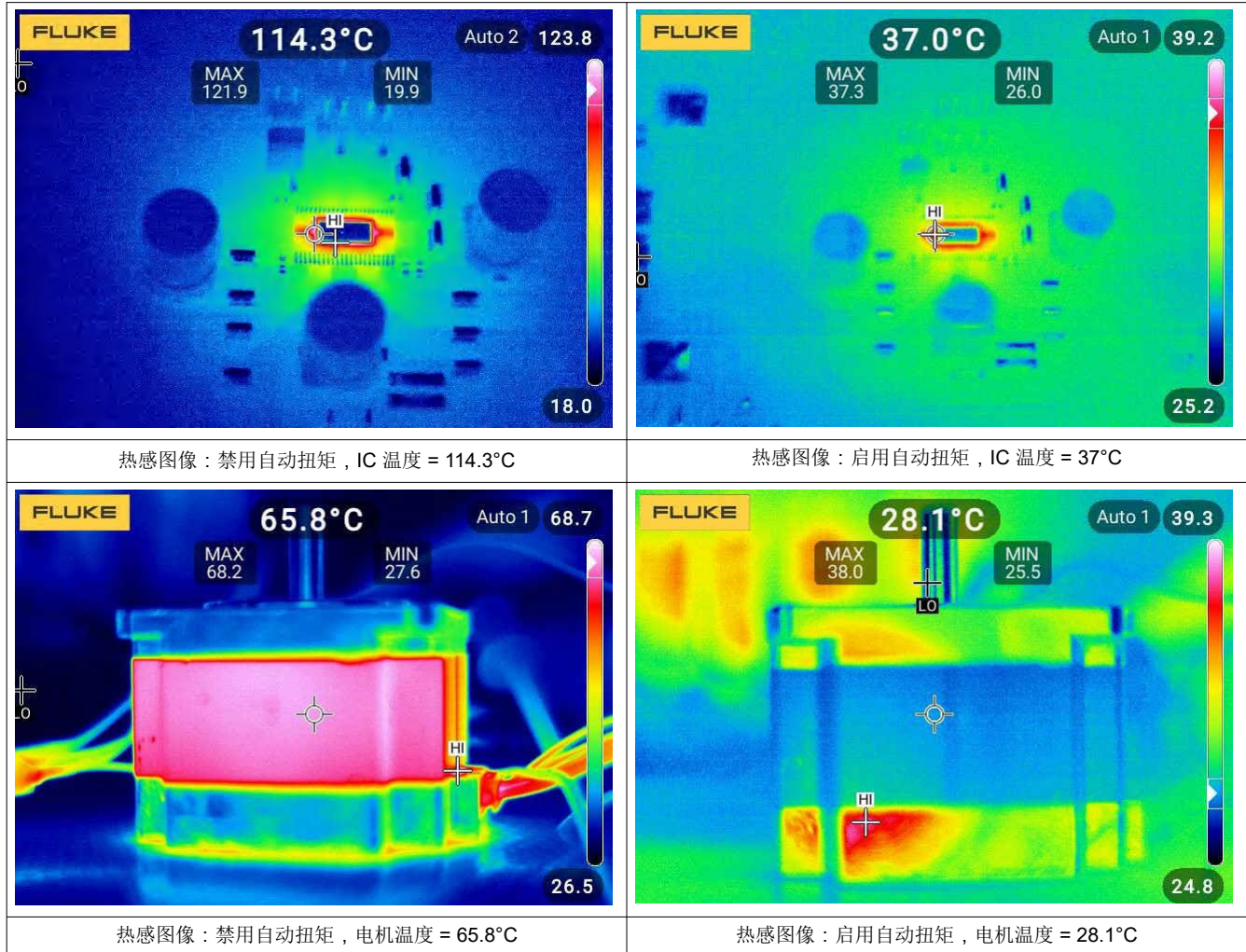
图 2-36. ATQ_CNT 与电机温度间的关系

2.5 通过自动扭矩提高效率

表 2-5 展示了自动扭矩带来的热性能改进。热图像是在以下条件下捕捉的：

VM = 24V，1/16 微步进，4A 满量程电流，3000pps 速度，空载，室温环境

表 2-5. 通过自动扭矩提高热性能



自动扭矩带来的 IC 和电机温度降低可提高步进电机系统的长期可靠性。

3 案例研究

本节介绍自动扭矩实现显著节能的具体用例。

3.1 应用 1 : ATM 机

步进电机在 ATM 机内部用于各种子系统，例如现金发放机、账单提取机和现金传送带。单个 ATM 机有时可能包含 15 个以上的步进电机。

“自动扭矩”是 ATM 系统中的一项理想功能，可以在负载扭矩小于峰值负载时（例如在未发放现金时）降低功率损耗。平均而言，ATM 机在一小时内的使用时间可能只有 10-15%；因此，自动扭矩可以显著降低 ATM 机的功耗。整个行业范围内的一个趋势是采用节能的“绿色”ATM 机来降低电费，从而为使用者节省成本。自动扭矩可帮助制造商实现这些节能目标。

3.1.1 ATM 电机运行条件

本节介绍 ATM 中使用的典型步进电机的运行条件。

参数	值
电机电流额定值	2.8A
20°C 时的电机线圈电阻	1.5Ω
电机线圈电感	6.8 mH
保持扭矩	3.1Nm
电机机座尺寸	NEMA 24
电机电源电压	24V
微步进	16
步进频率	3kHz

3.1.2 具有自动扭矩功能的 ATM 电机

根据测量数据，现金传送带中使用的典型步进电机将以大约 300mNm/40ms 的速率发生负载扭矩变化。

在实验室中，一台这样的步进电机以 300mNm/40ms 的速率承受 176mNm 至 1.46Nm 范围内的负载扭矩瞬态。峰值负载的导通时间为 500ms，而峰值负载事件之间的持续时间为 4.5s（对应于峰值负载的 10% 占空比）。

对于该电机，自动扭矩学习例程在空载时根据以下参数值运行：

- ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 00110b
- ATQ_LRN_STEP = 11b
- ATQ_LRN_CYCLE_SELECT = 11b

图 3-1 所示为该电机的学习例程的快照。

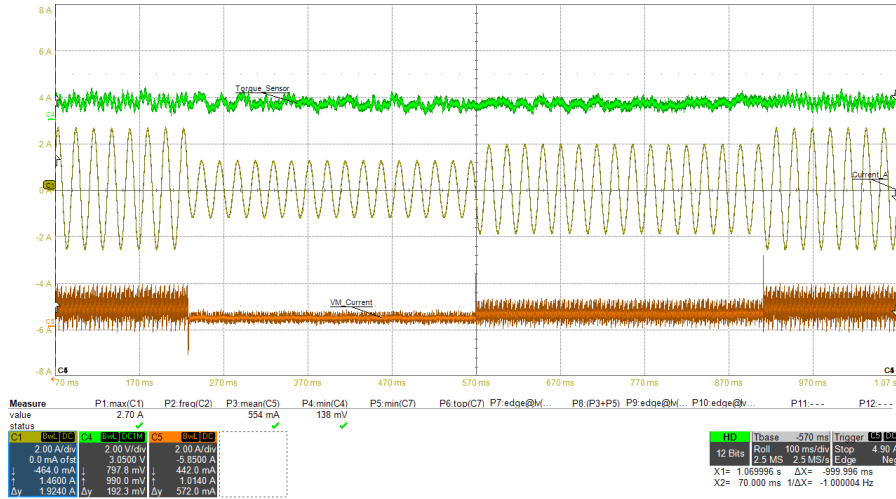


图 3-1. ATM 电机的学习例程快照

ATQ_LRN 参数的结果值为：

- ATQ_LRN_CONST1 = 83
- ATQ_LRN_CONST2 = 120

电流控制和 PD 环路控制的参数选择如下：

- ATQ_TRQ_MAX = 120
- ATQ_TRQ_MIN = 35，对应于在不传送现金时为支持电机而需要的电流
- ATQ_UL = 45
- ATQ_LL = 43
- ATQ_LL = 43
- ATQ_FRZ = 1
- ATQ_AVG = 0

图 3-2 至图 3-5 展示了具有和不具有自动扭矩功能的情况下负载扭矩变化时的输出电流波形和电源电流波形。

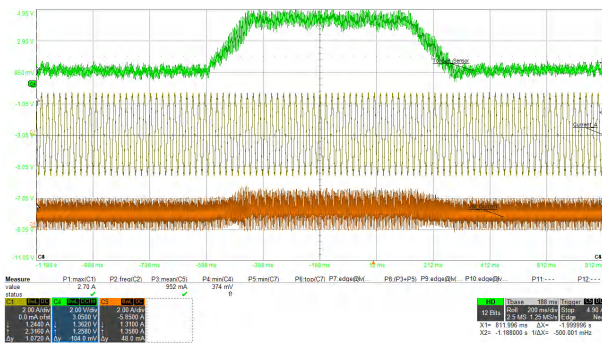


图 3-2. ATM 电机加载/卸载，不具有自动扭矩功能

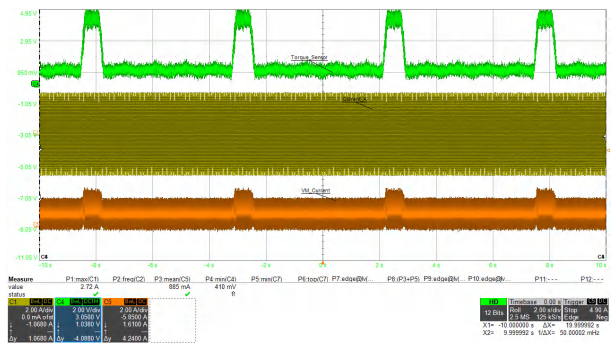


图 3-3. ATM 电机加载/卸载，不具有自动扭矩功能

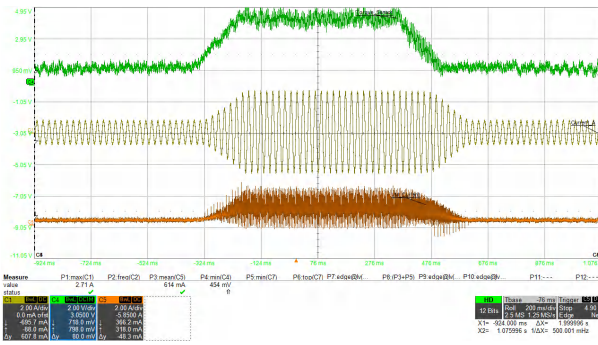


图 3-4. ATM 电机加载/卸载，具有自动扭矩功能

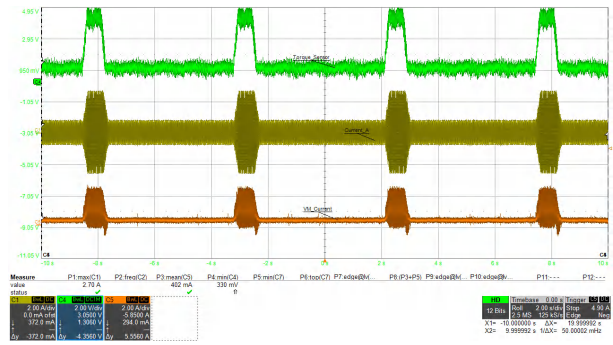


图 3-5. ATM 电机加载/卸载，具有自动扭矩功能

从示波器截图中可以看出，使用自动扭矩的情况下，电源电流消耗显著降低。基于实验室测量数据：

- 无自动扭矩时的功耗 = $24V \times 885mA = 21.24W$
- 有自动扭矩时的功耗 = $24V \times 402mA = 9.65W$
- 这意味着该电机在指定的负载分布情况下可节省 55% 的功耗。

至于电机中的功率耗散：

- 无自动扭矩时的电机功率损耗 = $(2.8A \times 2.8A \times 1.5 \Omega) = 11.76W$
- 有自动扭矩时的电机功率损耗 = $(0.1 \times 2.8A \times 2.8A + 0.9 \times 0.85A \times 0.85A) \times 1.5 \Omega = 2.15W$
- 这相当于电机线圈中的热量减少 82%，从而延长使用寿命并提高长期可靠性。

3.2 应用 2：纺织机器

全球所有主要纺织机制造商都在市场上推出了节能型纺织机。自动扭矩等新兴技术有助于进一步降低纺织机的能源成本。

在纺织针织机中，滚筒电机通常是大功率步进电机。在绕线机中，吸风电机为大功率步进电机。热管理是所有纺织机中的一个主要问题，自动扭矩可通过在纺织机的整个生命周期中调节温度来提高元件的寿命和长期可靠性。

3.2.1 纺织电机运行条件

本节介绍纺织机中使用的步进电机的运行条件。

参数	值
电机电流额定值	9 A
20°C 时的电机线圈电阻	0.15Ω
电机线圈电感	0.6 mH
保持扭矩	3Nm
电机机座尺寸	NEMA 24
电机电源电压	24V
微步进	16
步进频率	3kHz

3.2.2 具有自动扭矩功能的纺织电机

在此应用中，步进电机以 1.5Nm/15ms 的快速速率承受 50mNm 至 1.5Nm 范围内的负载扭矩瞬态。峰值负载的导通时间约为 1s，而峰值负载事件之间的持续时间为 4s（对应于峰值负载的 20% 占空比）。

图 3-6 所示为该电机的学习例程的快照。

自动扭矩学习例程在空载时根据以下参数值运行：

- ATQ_LRN_MIN_CURRENT = 1011000b
- ATQ_LRN_STEP = 00b

ATQ_LRN 参数的值为：

- ATQ_LRN_CONST1 = 43
- ATQ_LRN_CONST2 = 99

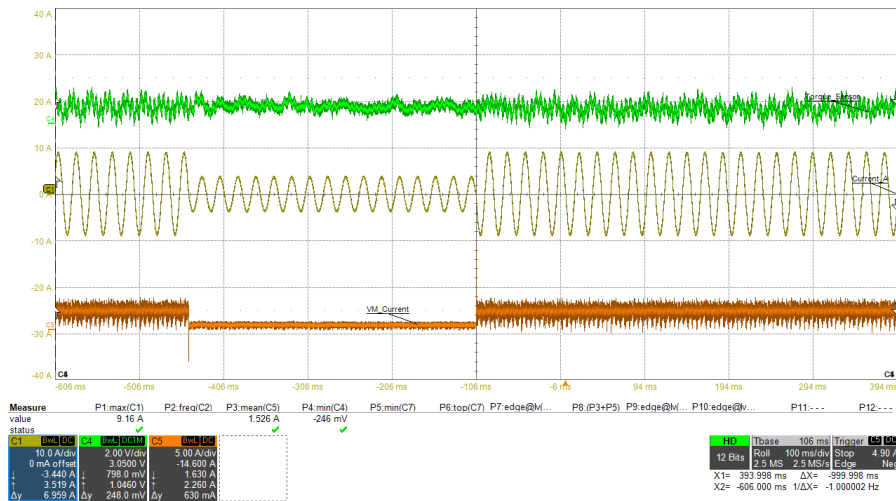


图 3-6. 纺织电机的学习例程快照

电流控制和 PD 环路控制的参数选择如下：

- ATQ_TRQ_MAX = 216
- ATQ_TRQ_MIN = 80
- ATQ_UL = 13
- ATQ_LL = 12
- KP = 1
- KD = 15
- ATQ_D_THR = 7
- ATQ_ERROR_TRUNCATE = 0
- ATQ_FRZ = 1
- ATQ_AVG = 0

图 3-7 至图 3-10 展示了具有和不具有自动扭矩功能的情况下负载扭矩变化时的输出电流波形和电源电流波形。正如预期的那样，使用自动扭矩的情况下，电源电流消耗显著降低。

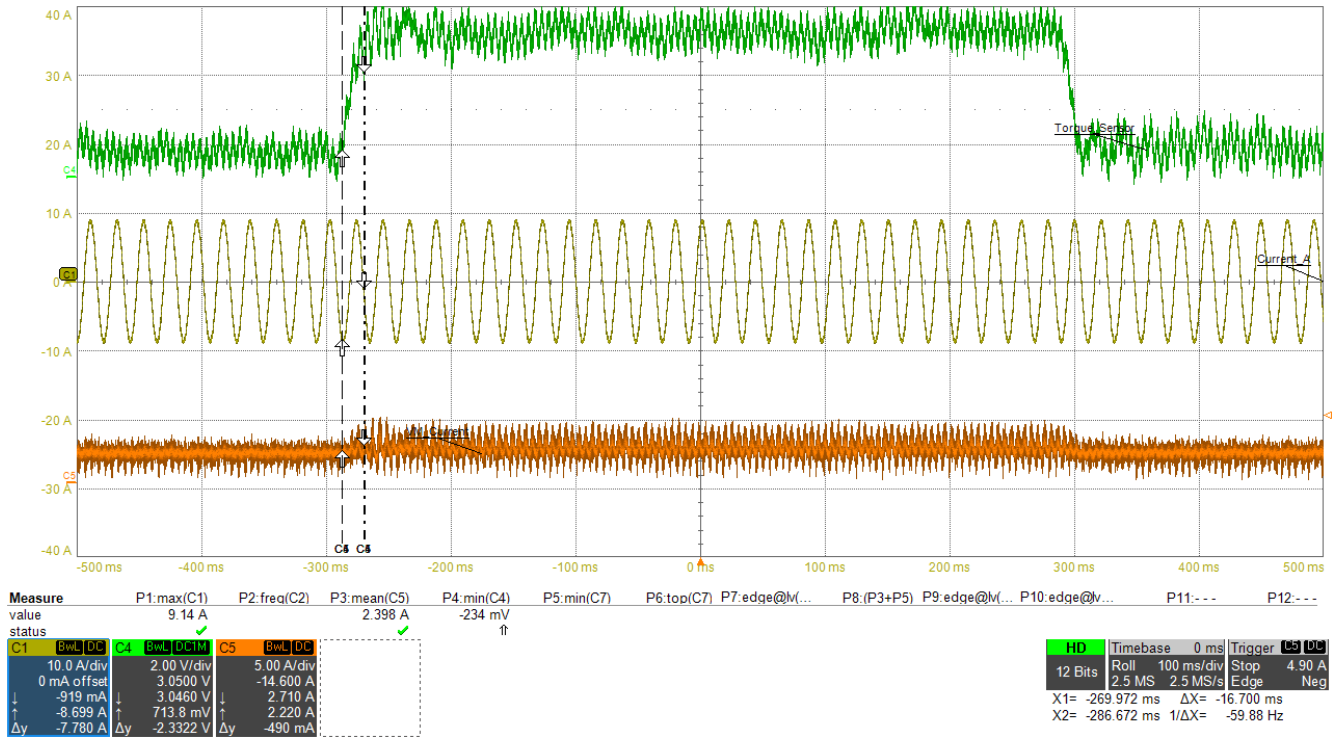


图 3-7. 纺织电机加载/卸载，不具有自动扭矩功能

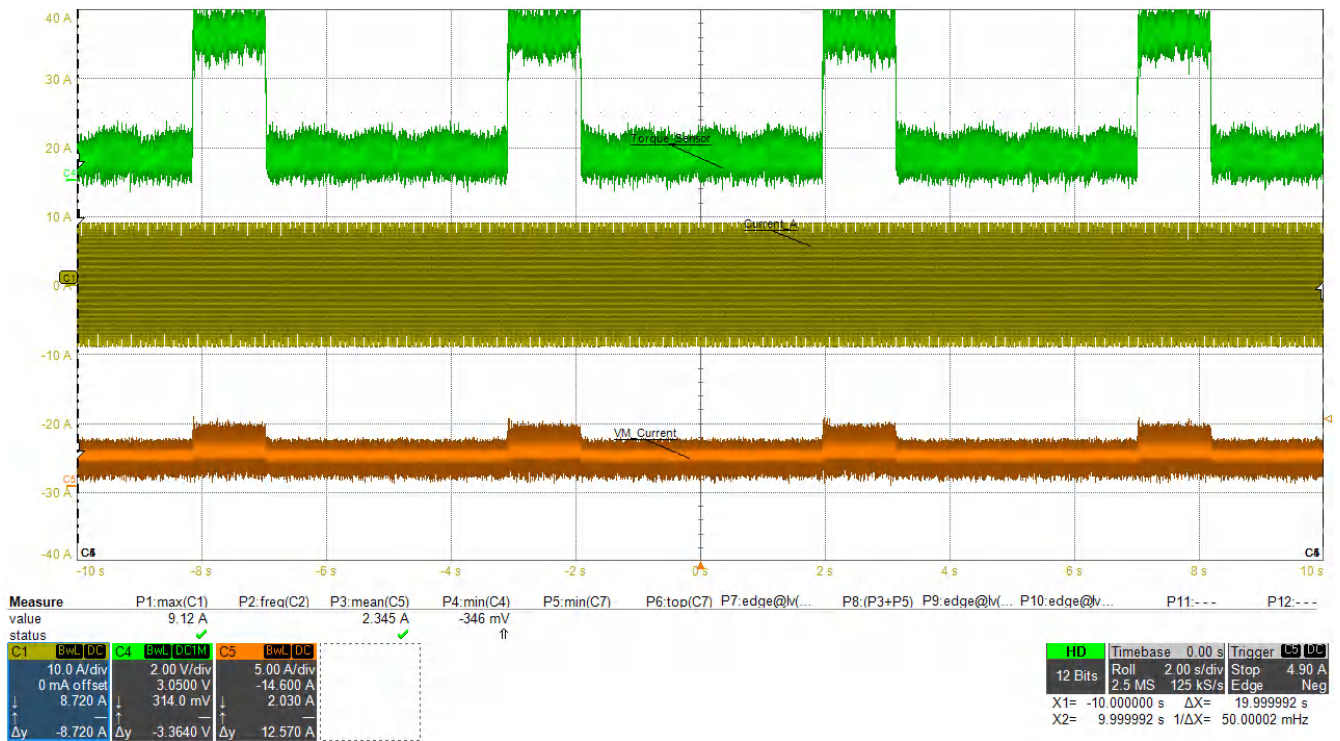


图 3-8. 纺织电机加载/卸载，不具有自动扭矩功能

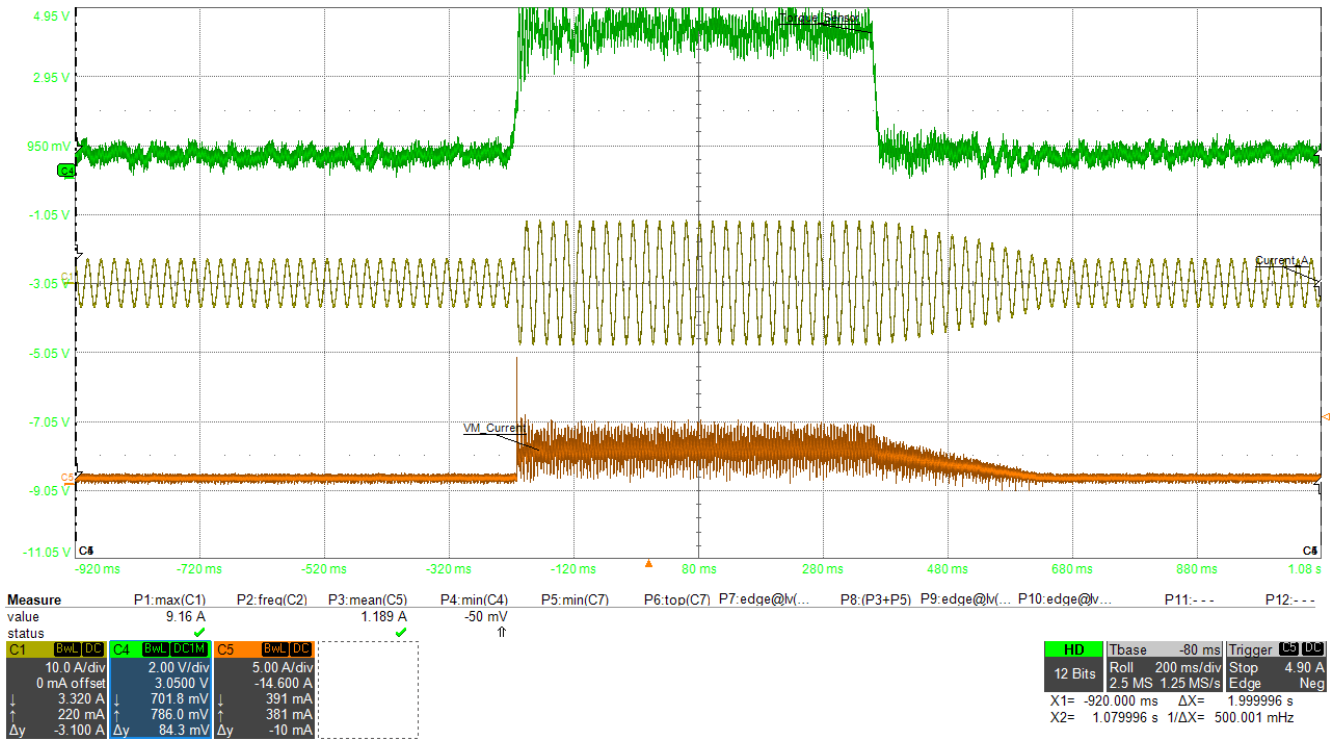


图 3-9. 纺织电机加载/卸载，具有自动扭矩功能

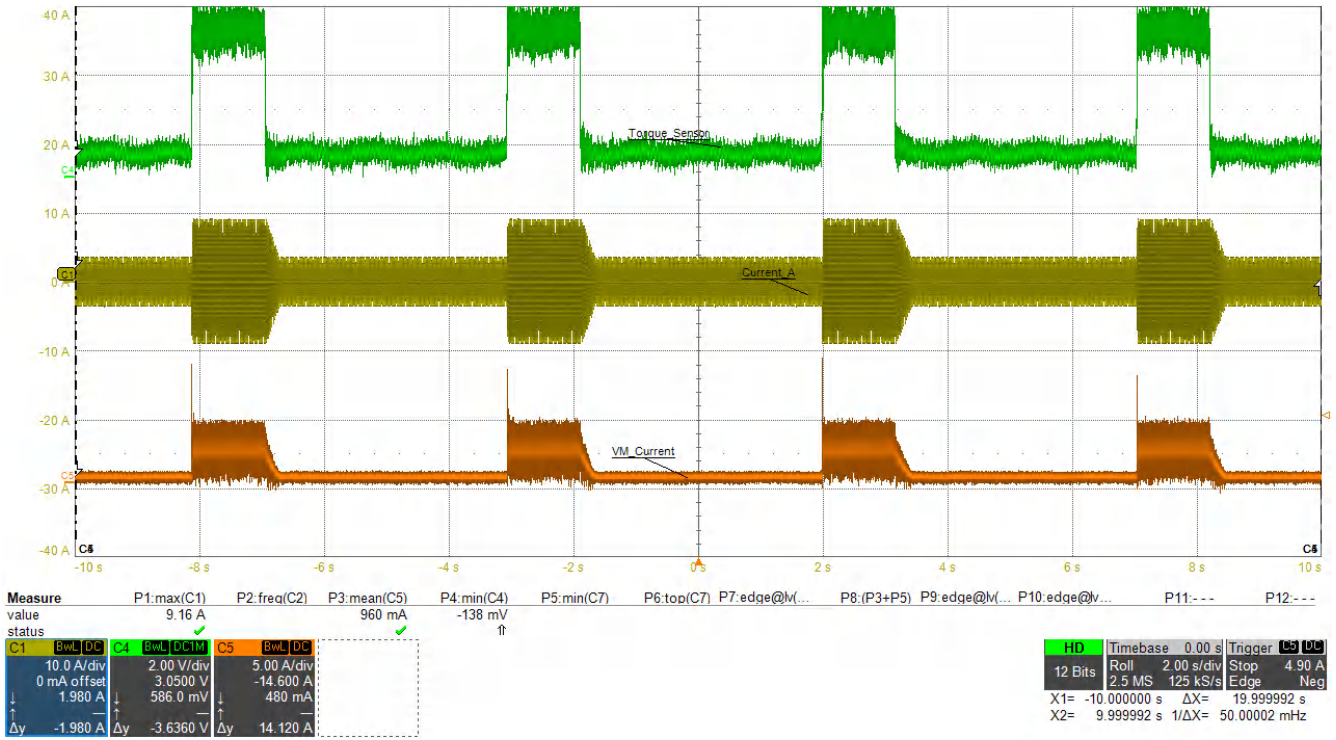


图 3-10. 纺织电机加载/卸载，具有自动扭矩功能

基于实验室测量数据：

- 无自动扭矩时的功耗 = $24V * 2.345A = 56.28W$
- 有自动扭矩时的功耗 = $24V * 960mA = 23.04W$
- 这意味着可节省 **59%** 的功耗。
- 无自动扭矩时的电机功率损耗 = $(9A * 9A * 0.15 \Omega) = 12.15W$
- 有自动扭矩时的电机功率损耗 = $(0.2 * 9A * 9A + 0.8 * 3.6A * 3.6A) * 0.15 \Omega = 4W$
- 这相当于电机线圈中的热量减少 **67%**。

3.3 应用 3：打印机

典型的家用喷墨打印机在待机模式下的功耗约为 **4W**，而在打印时的功耗约为 **40W**。与家用喷墨打印机相比，大型办公打印机的功耗几乎是其 **10 倍**。大约 **50%** 的功率损耗可归因于电子元件。根据型号的复杂程度，打印机可能包含 **2 到 15 个** 步进电机。当打印机处于非待机状态但不打印纸张时，自动扭矩可以减小线圈电流来显著降低功率损耗和能耗。

所有主要成像设备制造商的产品都遵循能源之星 (Energy Star) 标准。支持可持续发展理念的绿色打印机正日益成为市场上的常态产品。在某些情况下，尽管市场上有更便宜的选择，但耗电量比公司其他型号低 **60%** 的打印机仍会成为更畅销的产品。

3.3.1 具有自动扭矩功能的打印机电机

在此应用中，打印机内部使用的额定电流为 **1.5A** 的步进电机受到负载扭矩瞬态的影响，同时改变电机速度以模拟典型打印机的运行条件。

图 3-11 和图 3-12 展示了具有和不具有自动扭矩功能的输出电流和电源电流波形。

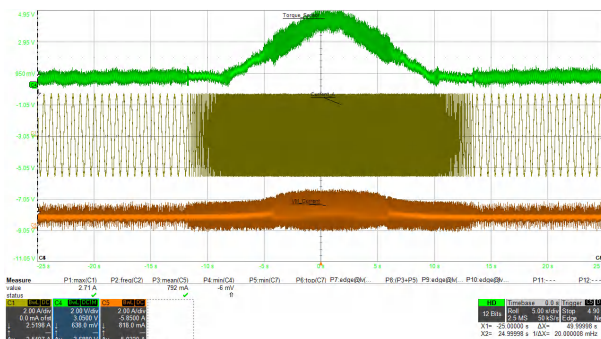


图 3-11. 打印机电机加载/卸载，不具有自动扭矩功能

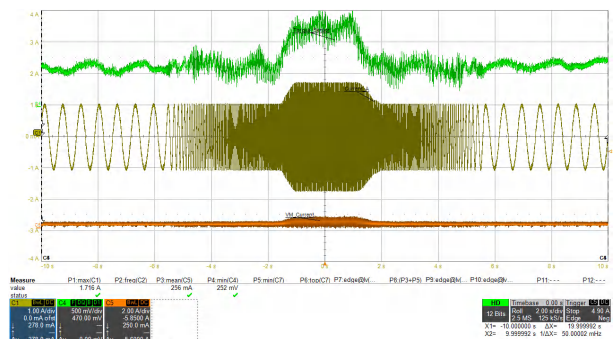


图 3-12. 打印机电机加载/卸载，具有自动扭矩功能

4 总结

德州仪器 (TI) 的 **DRV8462**、**DRV8452** 和 **DRV8461** 电机驱动器中的先进自动扭矩算法可显著降低步进电机系统中的功率损耗，同时确保电机不会出现失步。该算法可根据特定应用的需求进行高度配置。通过降低步进电机和电机驱动器的功率损耗，自动扭矩可帮助设备制造商实现其功率损耗预算和能源之星认证。

5 参考文献

- 德州仪器 (TI)：[DRV8462：可实现高效率和无噪声运行的 65V、5-10A 步进电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI)：[DRV8452：可实现高效率和无噪声运行的 50V、5A 步进电机驱动器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI)：[DRV8461：可实现高效率和无噪声运行的 65V、3A 步进电机驱动器](#) 数据表

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司