

Application Note

步进电机无传感器失速检测



Dipankar Mitra, Mojtaba Afshar

摘要

步进电机系统本质上是一种开环位置控制系统。没有反馈可让驱动器 IC 了解电机是在运行还是失速。然而，在许多应用中，用户需要了解电机的状态：无论用于诊断目的还是位置检测。当今市场上可用的无传感器失速检测解决方案无法在电源电压、温度和微步进模式等各种运行参数下可靠地检测失速。德州仪器 (TI) 器件 (包括 [DRV8889-Q1](#)、[DRV8434A-Q1](#)、[DRV8434A](#)、[DRV8434S](#)、[DRV8452](#)、[DRV8461](#) 和 [DRV8462](#)) 通过使用 PWM 关断时间来检测反电动势，实现一种全新的步进电机无传感器失速检测方法。这种失速检测算法消除了对电源电压、线圈电阻和温度变化的一阶依赖性。本应用报告旨在重点介绍具有失速检测的德州仪器 (TI) 器件失速检测算法的优势，并提供示例来说明这些器件如何在各种终端应用中可靠地检测失速。

内容

1 简介.....	3
2 步进电机的反电动势.....	4
3 现有失速检测方案.....	5
3.1 在电流过零期间测量反电动势.....	5
3.2 固定关断时间方法.....	5
3.3 PWM 周期计数方法.....	6
4 TI 集成的失速检测算法.....	7
4.1 失速检测方案的详细信息.....	7
4.2 失速检测结构的详细信息.....	8
4.3 失速检测配置的详细信息.....	12
4.4 失速检测功能的实验结果.....	14
5 评估示例.....	30
5.1 汽车前照灯调平和旋转.....	30
5.2 汽车抬头显示 (HUD).....	33
5.3 HVAC 阀门控制.....	34
6 总结.....	35
7 参考资料.....	35
8 修订历史记录.....	36

插图清单

图 2-1. 随线圈电流的反电动势相移.....	4
图 3-1. 固定关断时间方法.....	5
图 4-1. 固定纹波电流控制方法.....	7
图 4-2. 空载电机的反电动势.....	8
图 4-3. 汽车应用中使用的 PL35L-024 步进电机.....	14
图 4-4. 电机运行时的线圈电流和扭矩计数.....	15
图 4-5. 电机失速时的线圈电流和扭矩计数.....	15
图 4-6. DRV8889 的 PL35L-024 电机扭矩计数.....	16
图 4-7. 禁用扭矩扩展时 DRV8434S 的 PL35L-024 电机扭矩计数.....	16
图 4-8. 启用扭矩扩展时 DRV8434S 的 PL35L-024 电机扭矩计数.....	17
图 4-9. 不同运动方向稳定计数随速度的变化.....	18
图 4-10. 随运动方向的失速计数变化.....	18
图 4-11. DRV8889-Q1 在 150pps 的稳定计数.....	19
图 4-12. DRV8434S 在 150pps 的稳定计数 (禁用 TRQ_SCALE 时).....	19
图 4-13. DRV8434S 在 150PPS 的稳定计数 (启用 TRQ_SCALE 时).....	20

图 4-14. DRV8889-Q1 在 100PPS 的稳定计数.....	20
图 4-15. DRV8434S 在 100PPS 的稳定计数 (禁用 TRQ_SCALE 时)	21
图 4-16. DRV8434S 在 100PPS 的稳定计数 (启用 TRQ_SCALE 时)	21
图 4-17. 200PPS 时的稳定计数.....	22
图 4-18. 700PPS 时的稳定计数.....	23
图 4-19. Q1 调节丢失时的稳定计数变化.....	24
图 4-20. 1100PPS 时的稳定计数.....	25
图 4-21. 稳定计数随电源电压的变化.....	26
图 4-22. 随微步进的稳定计数变化.....	26
图 4-23. 随输出压摆率的稳定计数变化.....	27
图 4-24. 随环境温度的稳定计数变化.....	27
图 4-25. 随满量程电流的稳定计数变化.....	28
图 4-26. 采用 80 Ω 电阻的阀门电机的线圈电流波形.....	29
图 4-27. 采用 36 Ω 电阻的阀门电机的线圈电流波形.....	29
图 4-28. 稳态扭矩计数变化.....	30
图 5-1. 各种运行条件下的稳定计数.....	31
图 5-2. 使用 DRV8889-Q1 进行前照灯模块失速检测.....	31
图 5-3. 无失速检测功能的音频噪声频谱图.....	32
图 5-4. 有 DRV8889-Q1 失速检测功能的音频噪声频谱图.....	32
图 5-5. 具有和没有失速检测功能的音频噪声 SPL 图.....	33
图 5-6. 失速检测.....	34
图 5-7. HVAC 阀门稳定计数.....	35

表格清单

表 4-1. 具有集成失速检测功能的驱动器.....	7
表 4-2. 具有失速检测的 TI 步进电机驱动器比较.....	8
表 4-3. DRV8889-Q1 寄存器映射.....	9
表 4-4. DRV8434S 寄存器映射.....	9
表 4-5. 故障条件汇总.....	10
表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 失速相关引脚.....	10
表 4-7. STL_MODE 和 TRQ_CNT/STL_TH 引脚配置汇总.....	11
表 4-8. STL_REP 引脚配置汇总.....	11
表 5-1. 前照灯步进电机的运行条件.....	30
表 5-2. HUD 模块的运行条件.....	33
表 5-3. HVAC 阀门的运行条件.....	34

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

开环步进电机系统的简单性很有吸引力；然而，即使在步进电机中，也可能需要反馈。许多应用要求系统了解电机的状态以用于诊断目的，例如能够检测电机是否被卡住或过载；还要求位置检测，以能够检测电机是否已达到线路终点或撞到物理障碍物。

应用通常会大幅过驱电机使其超出所需终点，以确保抵达终点，这会降低系统效率。编码器或霍尔传感器等用于监测转子位置的外部元件会增加系统成本。如果没有失速检测，电机驱动器将继续驱动通过障碍物，从而导致可闻噪音和机械故障。

集成的无传感器失速检测方法可以解决这些负面影响，并确保电机不会过载或受阻。此外，在不需要精确位置检测的情况下，无传感器失速检测可以取代昂贵的霍尔传感器、限位开关和编码器。与需要超时机制的位置传感器解决方案相比，集成的无传感器失速检测功能还可在发生失速时提供即时响应。

可以受益于集成无传感器失速检测算法的一些系统和应用包括：

- 汽车前照灯调平和旋转
- 汽车抬头显示 (HUD)
- 汽车和工业 HVAC 执行器控制
- 电子膨胀阀 (EEV)
- 多功能打印机
- 3-D 打印机
- 监控摄像头 (平移和倾斜运动)
- 医疗应用

2 步进电机的反电动势

对于步进电机，可以用[方程式 1](#) 表示电源电压。

$$V_M = I \times R_{\text{coil}} + \text{BEMF} + L \times \frac{di}{dt} \quad (1)$$

其中

- I 是线圈电流
- R_{coil} 是电机线圈的线圈电阻
- BEMF 是反电动势电压
- L 是线圈的电感

反电动势是电枢在定子内旋转时电机产生的电压。反电动势可以用[方程式 2](#) 表示。

$$\text{BEMF} = -p \times \psi_m \times \omega \times \sin(p\omega t) \quad (2)$$

其中

- 其中 p 是极对数
- ψ_m 是最大磁通量，对于每个电机而言是恒定的
- ω 是电机的角速度

因此，反电动势本质上为正弦波形，与电机转速 (ω) 成正比。电机在快速旋转时产生的反电动势比慢速旋转时更大。当电机失速时，不会产生反电动势。

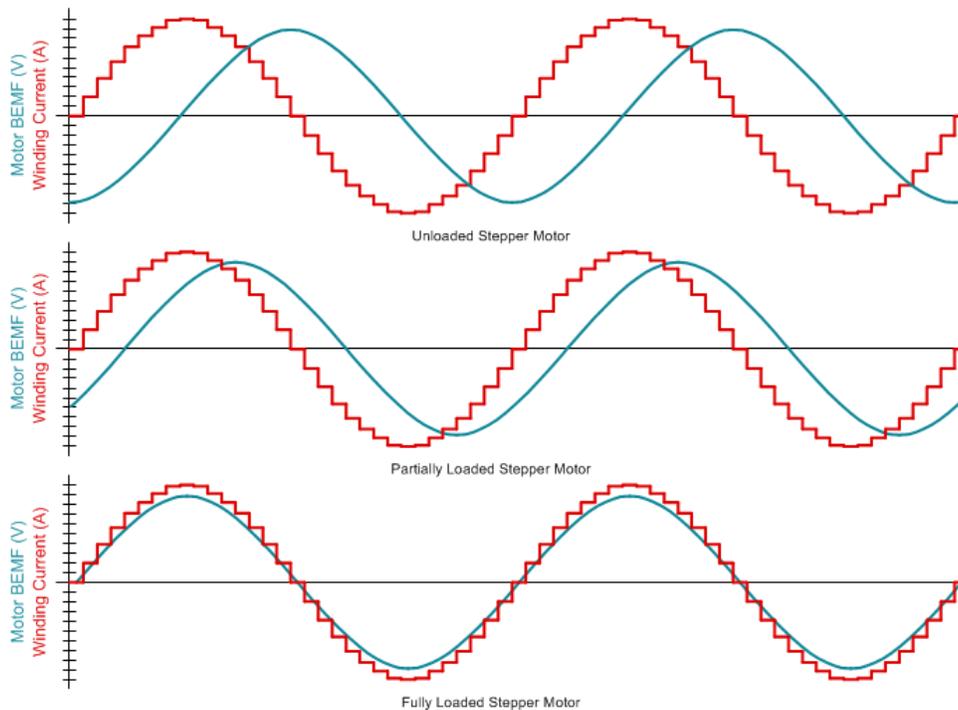


图 2-1. 随线圈电流的反电动势相移

步进电机的线圈电流、反电动势和电机的机械扭矩负载之间有着独特的关系，如[图 2-1](#) 所示。与线圈电流相比，空载电机的反电动势将相移 90° 。对于给定的线圈电流，当电机负载接近电机的扭矩能力时，反电动势与线圈电流同相。当负载扭矩增加到超过满载条件时，转子与定子磁场不同步，导致电机失速。

以给定速度运行的电机在不丢步的前提下可承受的最大负载扭矩称为失步扭矩。因此，当电机上的负载扭矩超过电机的失步扭矩时，会发生失速情况。大多数步进电机数据表都包含失步扭矩与速度曲线。失步扭矩将随着转速的增加而减小，并随着流经电机线圈的电流增加而增大。

3 现有失速检测方案

目前，不同的步进电机驱动器制造商可提供多种无传感器失速检测方案。这些方法的简要介绍如下：

3.1 在电流过零期间测量反电动势

目前大多数可用的失速检测方案都可以在正弦电流过零期间测量反电动势。当线圈电流为零时，电机线圈两端的电压等于反电动势。电机失速时，反电动势降至接近零值。因此，当反电动势减小时，其可以很好地指示电机已失速。

但是，这种方法有一些缺点，例如：

- 仅在过零期间监控反电动势。
- 测量时段需要确保线圈电流确实达到零。过零点附近线圈电压波形中的振铃可以缩短测量时段，并可能需要额外的消隐时间。
- 对于高电机转速，此方法需要复杂的电路才能进行快速测量。因此，此方法不适用于中高电机转速。
- 此方法在全步逆模式下不起作用 — 线圈电流在满量程设置的 71% 到 -71% 之间切换；因此，无法进行过零检测。有些方法即使在全步进模式下也可强制执行过零周期，但这些方法有其自身的问题。
- 当电机缓慢旋转时，很难检测到反电动势的变化。

3.2 固定关断时间方法

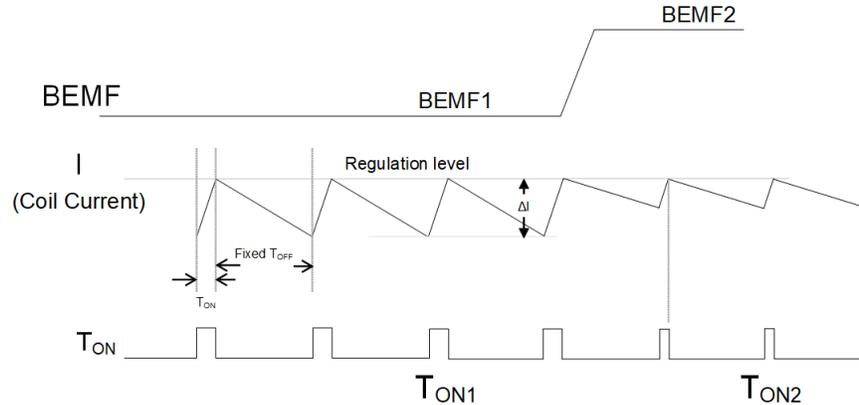


图 3-1. 固定关断时间方法

一些固定 PWM 关断时间 (T_{OFF}) 电流调节方法取决于连续周期内 PWM 导通时间 (T_{ON}) 之差，该差值可确定反电动势，从而检测失速，如 图 3-1 所示。

然而，这种方法也有自身的缺点。导通时间的公式如 方程式 3 所示：

$$T_{ON} = T_{OFF} \times \frac{((I \times R) - BEMF)}{(VM - ((I \times R) - BEMF))} \quad (3)$$

$$\Delta T_{ON} = T_{ON1} - T_{ON2} = T_{OFF} \times \frac{VM \times (BEMF2 - BEMF1)}{(VM - ((I \times R) - BEMF1)) \times (VM - ((I \times R) - BEMF2))} \quad (4)$$

如 方程式 4 所示， ΔT_{ON} 取决于电源电压、线圈电流和线圈电阻（因而也受环境温度影响）。因此，当电源电压、温度或电机电流发生变化时，此方案可能会导致失速检测出现误报或漏报。

3.3 PWM 周期计数方法

一些实现会监控 PWM 周期计数以检测反电动势变化，从而检测失速。反电动势在失速情况下会降低，从而加快电流上升时间。在固定步进频率下，失速会导致每步产生更多的 PWM 周期（因为 TOFF 固定）。该方法的缺点是：

1. 如方程 [方程式 3](#) 所示， T_{ON} 将随电源电压 (VM)、电机电流 (I) 和温度 (T) 发生变化（电机电阻 R 随 T 增加）。因此，当电源电压、温度或电机电流发生变化时，此方法可能会导致失速检测出现误报或漏报。
2. 在全步进模式下不起作用
3. 仅在步进频率相对恒定时才起作用。如果步进频率动态变化，会使 PWM 脉冲数产生不确定性。

4 TI 集成的失速检测算法

表 4-1 中列出了集成失速检测功能的 TI 步进电机驱动器。

表 4-1. 具有集成失速检测功能的驱动器

器件	市场	电压范围	最大电流	接口
DRV8889-Q1	汽车	4.5 - 45V	1.5A	SPI
DRV8434A	工业	4.5 - 48V	2.5A	GPIO
DRV8434S	工业	4.5 - 48V	2.5A	SPI
DRV8452	工业	4.5 - 55V	5A	SPI
DRV8461	工业	4.5 - 65V	3A	SPI
DRV8462	工业	4.5 - 65V	10A	SPI

DRV8889-Q1 是 TI 集成失速检测功能的首款步进电机驱动器，主要面向汽车应用。其余驱动器采用了稍作更新的方案，以便能够检测工业应用中常见的相对较高电机转速下的失速。以下各节将详细说明失速检测方案。

4.1 失速检测方案的详细信息

图 2-1 显示，对于空载电机，反电动势与电机电流之间存在 90° 相移。随着负载增加，反电动势相移减小。最后，当负载增加到负载扭矩超过失步扭矩时，电机将失速，反电动势变为零。通过检测电机电流上升和下降电流象限之间的反电动势相移，具有失速检测功能的德州仪器 (TI) 器件可检测到电机过载失速情况或行程终点。

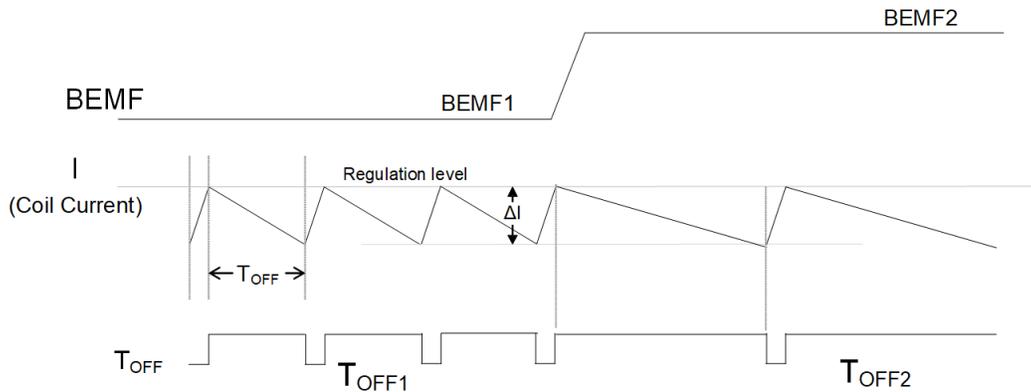


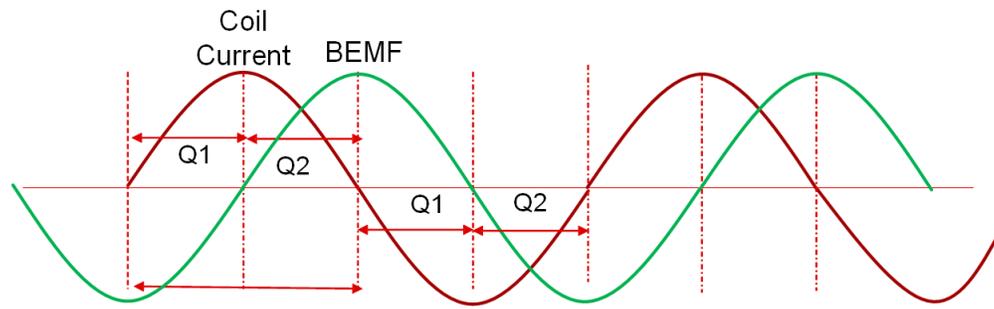
图 4-1. 固定纹波电流控制方法

$$T_{OFF} = \frac{L \times \Delta I}{(I \times R) - BEMF} \quad (5)$$

要克服与固定 T_{OFF} 电流调节方法相关的问题，TI 步进电机驱动器使用固定纹波电流调节方法（智能调优纹波控制衰减模式），如图 4-1 所示。这样 T_{OFF} 也会根据反电动势而变化——较大的反电动势会导致较高 T_{OFF} ，而较小的反电动势会导致较低的 T_{OFF} 。通过监控 T_{OFF} ，可消除对电源电压的一阶依赖，因为在 PWM 关闭期间 VM 电源与电机断开。方程式 5 表明， T_{OFF} 不依赖于 VM。

$$\frac{1}{T_{OFF1}} - \frac{1}{T_{OFF2}} = \frac{1}{L \times \Delta I} \times (BEMF2 - BEMF1) \quad (6)$$

可以使用 T_{OFF} 倒数的 Δ 代替 T_{OFF} 的 Δ ，以进一步消除对 I 和 R 项（电机电流和电阻/温度）的依赖性。如方程式 6 所示， $\Delta (1/T_{OFF})$ 不依赖于 VM、I 或 R，仅取决于反电动势变化（其他项 ΔI 和 L 是电流纹波和电机电感，其是系统的常量）。


图 4-2. 空载电机的反电动势

如 [图 4-2](#) 所示，比较正弦电流的上升 (Q1) 和下降 (Q2) 象限之间的反电动势 (通过监控 $\frac{1}{T_{OFF}}$) 可提供电机负载的良好指示。对于轻负载电机，[图 4-2](#) 中下降和上升象限之间的 Δ 反电动势将为正值。当负载增加并接近失速情况时，下降和上升电流象限之间的反电动势 Δ 将接近零，并可用于检测失速情况。

失速算法会在每个电半周期的 Q1 和 Q2 期间监控 T_{OFF} 。每个半个周期结束时， $\frac{1}{T_{OFF1}}$ (平均值) 和 $\frac{1}{T_{OFF2}}$ (平均值) 之间进行减法运算。半周期结束时计算出的 $(\frac{1}{T_{OFF1}} - \frac{1}{T_{OFF2}})$ 值与前三个半周期结束时计算出的值求平均，以得到称为扭矩计数 TRQ_COUNT 的移动平均值。对于轻负载电机，TRQ_COUNT 稳定在一个非零稳态值，称为稳定计数。当电机接近失速情况时，TRQ_COUNT 将逐渐减小，接近零并可用于检测失速情况。只要 TRQ_COUNT 降至低于预定义的阈值 (称为 STL_TH)，器件就会检测到失速。

4.1.1 TRQ_COUNT 和 STL_TH 位分辨率

[DRV8889-Q1](#) 器件配备 8 位寄存器用于 TRQ_COUNT 和 STL_TH，而 [DRV8434S](#)、[DRV8452](#)、[DRV8461](#) 和 [DRV8462](#) 器件可提供更高分辨率的 TRQ_COUNT 和 STL_TH 值，精度为 12 位。此外，[DRV8434A-Q1](#) 和 [DRV8434A](#) 为硬件器件，可为 TRQ_CNT/STL_TH 输出/输入引脚提供 12 位分辨率，进而提升失速检测精度。提高分辨率可以提升检测失速情况的精度和准确度。更高的分辨率可以更精细地区分机械负载变化，从而实现更准确的失速检测，不会出现误报或漏报失速的情况。

4.1.2 放大扭矩计数和失速阈值

在电机线圈电阻高或运行速度低的应用中，由于 BEMF 降低，TRQ_CNT 值通常较低，使失速检测在 [DRV8889-Q1](#) 中更具挑战性和不可靠。为缓解此问题，某些设备 (包括 [DRV8434A-Q1](#)、[DRV8434A](#)、[DRV8434S](#)、[DRV8452](#)、[DRV8461](#) 和 [DRV8462](#)) 提供扩展功能，可将扭矩计数和失速阈值放大 8 倍。通过放大扭矩计数，这些器件即使在低 BEMF 水平下也能实现更准确的检测，从而产生更高的 TRQ_CNT 值。下表比较了具有失速检测功能的 TI 器件。

表 4-2. 具有失速检测的 TI 步进电机驱动器比较

失速检测功能	DRV8889-Q1	DRV8434S 、 DRV8452 、 DRV8461 、 DRV8462	DRV8434A-Q1 、 DRV8434A
接口	SPI	SPI	硬件
扭矩计数分辨率	8 位	12 位	12 位
失速阈值分辨率	8 位	12 位	12 位
CTRQ_COUNT/STALL_TH 扩展	不适用	放大 8 倍	放大 8 倍

4.2 失速检测结构的详细信息

本节介绍 TI 步进电机驱动器中具有不同接口配置的失速检测配置。

4.2.1 SPI 接口器件

[DRV8889-Q1](#)、[DRV8434S](#)、[DRV8452](#)、[DRV8461](#) 和 [DRV8462](#) 通过 SPI 接口提供失速检测功能。这些器件的失速参数设置大致可分为两组。[DRV8434S](#) 与 [DRV8452](#)、[DRV8461](#) 和 [DRV8462](#) 具有相同的参数，而

DRV8889-Q1 具有不同的设置。为了提供全面的覆盖范围，本节将重点介绍 DRV8889-Q1 和 DRV8434S，分别代表这两个类别。

要详细了解这些器件评估模块 (EVM) 的硬件实现，请参阅相应的用户指南：[DRV8889-Q1 评估模块用户指南](#) 和 [DRV8434S-Q1 评估模块用户指南](#)。此外，[DRV8889-Q1 EVM GUI 用户指南](#) 和 [DRV8434S EVM GUI 用户指南](#) 提供了关于通过 EVM 使用图形用户界面 (GUI) 软件的分步说明。

表 4-3 和表 4-3 分别概述了 DRV8889-Q1 和 DRV8434S 器件的寄存器映射，详细介绍了每个器件的寄存器配置。从下面的寄存器映射中可以看出，DRV8434S (和类似器件) 有两个额外的寄存器，用于支持 STALL_TH 和 TRQ_COUNT 的位分辨率和可扩展性增加。

表 4-3. DRV8889-Q1 寄存器映射

寄存器名称	7	6	5	4	3	2	1	0	访问类型	地址
FAULT 状态	FAULT	SPI_ERROR	UVLO	CPUV	OCP	STL	TF	OL	R	0x00
DIAG 状态 1	OCP_LS2_B	OCP_HS2_B	OCP_LS1_B	OCP_HS1_B	OCP_LS2_A	OCP_HS2_A	OCP_LS1_A	OCP_HS1_A	R	0x01
DIAG 状态 2	UTW	OTW	OTS	STL_LRN_OK	STALL	RSVD	OL_B	OL_A	R	0x02
CTRL1	TRQ_DAC [3:0]			RSVD		SLEW_RATE [1:0]			RW	0x03
CTRL2	DIS_OUT	RSVD		TOFF [1:0]		DECAY [2:0]			RW	0x04
CTRL3	DIR	STEP	SPI_DIR	SPI_STEP	MICROSTEP_MODE [3:0]			RW	0x05	
CTRL4	CLR_FLT	LOCK [2:0]			EN_OL	OCP_MODE	OTSD_MOD_E	TW_REP	RW	0x06
CTRL5	RSVD		STL_LRN	EN_STL	STL_REP	RSVD			RW	0x07
CTRL6	STALL_TH [7:0]								RW	0x08
CTRL7	TRQ_COUNT [7:0]								R	0x09

表 4-4. DRV8434S 寄存器映射

寄存器名称	7	6	5	4	3	2	1	0	访问类型	地址
FAULT 状态	FAULT	SPI_ERROR	UVLO	CPUV	OCP	STL	TF	OL	R	0x00
DIAG 状态 1	OCP_LS2_B	OCP_HS2_B	OCP_LS1_B	OCP_HS1_B	OCP_LS2_A	OCP_HS2_A	OCP_LS1_A	OCP_HS1_A	R	0x01
DIAG 状态 2	UTW	OTW	OTS	STL_LRN_OK	STALL	RSVD	OL_B	OL_A	R	0x02
CTRL1	TRQ_DAC [3:0]			RSVD		SLEW_RATE [1:0]			RW	0x03
CTRL2	DIS_OUT	RSVD		TOFF [1:0]		DECAY [2:0]			RW	0x04
CTRL3	DIR	STEP	SPI_DIR	SPI_STEP	MICROSTEP_MODE [3:0]			RW	0x05	
CTRL4	CLR_FLT	LOCK [2:0]			EN_OL	OCP_MODE	OTSD_MOD_E	TW_REP	RW	0x06
CTRL5	RSVD		STL_LRN	EN_STL	STL_REP	RSVD			RW	0x07
CTRL6	STALL_TH [7:0]								RW	0x08
CTRL7	RC_RIPPLE[1:0]		EN_SSC	TRQ_SCALE	SATLL_TH [11:8]					
CTRL8	TRQ_COUNT [7:0]								R	0x09
CTRL9	REV_ID [3:0]				TRQ_COUNT [11:8]					

将器件设置为进行失速检测相当简单，只需几个位来控制与失速检测算法相关的关键参数。表 4-3 和 表 4-3 中突出显示了与失速检测相关的位。

- **EN_STL**：默认情况下，器件上电后会禁用失速检测。EN_STL 必须设置为 01b 才能启用失速检测。
- **DECAY [2:0]**：必须将衰减模式设置为智能调优纹波控制，因此必须确保将其设置为 111b。将衰减模式设置为任何其他值将禁用失速检测。

- **STL_LRN** : 该位默认为 00b。必须将其设置为 01b 才能启用自动失速学习过程。当失速学习过程完成后, 该位会自动返回到 00b。
- **STL_LRN_OK** : 在成功学习失速阈值结束时变为 01b。
- **TRQ_COUNT [7:0]** : 这 8 位保留 TRQ_CNT 的值, 以指示负载扭矩。该值与电机负载成反比, 在电机空载时最高, 在电机失速时接近零。这样可以评估电机的负载状态。此外, 具有 12 位分辨率的驱动器可提供扩展范围, 在另一个寄存器中提供额外的 TRQ_COUNT [11:8] 位, 以实现更精确的扭矩监控。
- **STALL_TH [7:0]** : 这 8 位用于在失速学习过程中手动编程或学习所需的失速阈值水平。每当扭矩计数降至低于此阈值时, 器件将检测到失速。此外, 在配备 12 位失速阈值的器件中, 另一个寄存器中还提供 4 位 (STALL_TH [11:8]), 从而提供扩展的配置选项。
- **STL_REP** : 此位控制失速检测的报告。要启用对 nFAULT 引脚的失速检测故障报告, STL_REP 位必须为 01b。如果满足此条件, 检测到失速时 nFAULT 引脚将被驱动为低电平, 从而提供明确的故障指示。
- **TRQ_SCALE** : 在配备扩展功能的器件中, 该位可以配置为“1”, 以将较低的 TRQ_COUNT 和 STALL_TH 值放大 8 倍。具体而言, 如果算法计算的初始 TRQ_COUNT 值小于 500, 建议将 TRQ_SCALE 位设置为 01b 以提高检测准确度。

当检测到失速时, STALL、STL 和 FAULT 位被锁存为高电平, 并且 nFAULT 引脚被拉至低电平 (如果 STL_REP 设置为 01b)。在这种失速状态下, 电机轴进入停止状态, 但如果电机继续接收 STEP 信号, 仍可能表现出振动。当失速情况解决后, 电机将恢复旋转。当通过设置 CLR_FLT 位或应用 nSLEEP 复位脉冲发出清除故障命令后, nFAULT 信号将被释放并且故障寄存器将被清除。有关 SPI 器件中失速检测相关故障情况的全面汇总, 请参阅表 4-5。

表 4-5. 故障条件汇总

FAULT	条件	配置	H 桥	电荷泵	分度器	逻辑	恢复
失速检测 (STALL)	电机失速/卡住	STL_REP = 00b	运行中	运行中	运行中	运行中	CLR_FLT/ nSLEEP
		STL_REP = 01b	运行中	运行中	运行中	运行中	nSLEEP

4.2.2 硬件接口器件

DRV8434A-Q1 和 DRV8434A 器件具有硬件失速检测功能。有关硬件实现的详细概述, 请参阅 [DRV8434A 评估模块用户指南](#), 该指南全面介绍了 EVM。下表总结了与具有硬件接口的器件中失速检测相关的关键引脚, 其中突出显示了失速检测功能中涉及的关键引脚和信号。

表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 失速相关引脚

引脚	类型	说明
STL_MODE	输入	引脚输入电平对失速检测模式进行编程： GND = 扭矩计数模式, 扭矩计数模拟电压在 TRQ_CNT/STL_TH 引脚上输出。 Hi-Z = 学习模式, 学习结果模拟电压在 TRQ_CNT/STL_TH 引脚上输出。 DVDD = 失速阈值模式, 失速阈值由 TRQ_CNT/STL_TH 引脚上的输入电压设置。 利用一个 330k Ω 电阻器连接至 GND = 禁用失速检测。
TRQ_CNT/STL_TH	输入/输出	扭矩计数模拟输出或失速阈值模拟输入, 具体取决于 STL_MODE 引脚输入电平。必须将 1nF 电容器从该引脚连接到 GND。 STL_MODE = GND, 表示扭矩计数电压作为输出。 STL_MODE = DVDD, 编程失速阈值电压作为输入。 STL_MODE = Hi-Z, 表示失速阈值电压作为输出。

表 4-6. DRV8434A、DRV8434A-Q1 失速相关引脚 (续)

引脚	类型	说明
STL_REP	漏极开路	失速故障报告输出。需要上拉电阻器 (建议为 $10k\Omega$)。如果此引脚已连接至 GND, 将禁用失速故障报告。
		STL_MODE = GND/DVDD STL_REP 引脚上从低电平转换到高电平表示失速
		STL_MODE = Hi-Z STL_REP 引脚上从高电平转换到低电平表示成功学习。
启用	输入	0 = 禁用器件输出
		1 = 启用器件输出
		Hi-Z = 启用器件输出和 8 倍扭矩计数扩展
nFAULT	输出	如果 STL_REP > 1.6V, nFAULT 会在检测到失速时变为低电平

DRV8434A 和 DRV8434A-Q1 器件的失速检测算法通过三个关键引脚的组合进行全面配置：两个数字 IO 引脚 (STL_MODE 和 STL_REP) 以及一个模拟 IO 引脚 TRQ_CNT/STL_TH。这些引脚用于实现对失速检测功能的精确控制和自定义。下面详细说明了这些引脚的角色、配置和应用，可让您全面了解如何在各种运行条件下优化 DRV8434A 和 DRV8434A-Q1 的性能。

4.2.2.1 STL_MODE 和 TRQ_CNT/STL_TH 引脚

STL_MODE 引脚通过其四种可配置的状态提供多功能性：低电平、高阻态、高电平以及通过 $330k\Omega$ 电阻器的接地连接。引脚的具体状态决定了失速检测条件的功能以及 TRQ_CNT/STL_TH 引脚的状态。下表详细概述了这些功能，为不同情况下 STL_MODE 引脚的功能和使用提供了清晰的指导。

表 4-7. STL_MODE 和 TRQ_CNT/STL_TH 引脚配置汇总

运行模式	STL_MODE	TRQ_CNT/STL_TH 状态
扭矩计数模式	GND	输出：指示扭矩计数电压
失速阈值模式	DVDD	输入：编程失速阈值电压
学习模式	高阻态	输出：指示失速阈值电压
禁用失速检测	通过 $330k\Omega$ 连接到 GND	不适用

4.2.2.2 STL_REP 引脚

STL_REP 引脚专门用于失速故障报告，当直接接地时，其功能被禁用。为确保正常运行，必须使用外部上拉电阻器。下表对引脚的运行条件进行了详细汇总。

表 4-8. STL_REP 引脚配置汇总

运行模式	STL_MODE	条件	STL_REP	nFAULT
扭矩计数模式 或 失速阈值模式	GND 或 DVDD	无失速报告	从外部拉至低电平	高
		无失速故障	低	高
		STALL 故障	高	低电平 (如果 STL_REP > 1.6V)
学习模式	高阻态	学习成功	低	不适用
		学习未完成	高	

表 4-8. STL_REP 引脚配置汇总 (续)

运行模式	STL_MODE	条件	STL_REP	nFAULT
禁用失速检测	通过 330kΩ 连接到 GND		低	

4.3 失速检测配置の詳細信息

失速检测算法会计算 TRQ_COUNT 值，该值用作电机负载状况的关键指示器。对于轻负载电机，TRQ_COUNT 会产生一个非零值，称为稳定计数。当电机接近失速情况时，TRQ_COUNT 会降至零，表示为失速计数，从而能够检测失速情况。当 TRQ_COUNT 降至低于预定义阈值时，将检测到失速。配置步骤针对基于 SPI 的器件和基于硬件的器件量身打造，从而确保优化的性能和检测能力。

4.3.1 SPI 接口器件

要在 DRV8889-Q1、DRV8434S、DRV8252、DRV8461 和 DRV8462 等具有 SPI 接口的器件中启用失速检测，请按照以下步骤操作：

1. **启用失速检测**：开始为您的应用以正常速度和负载电流旋转电机，并将 EN_STL 设置为 01b 可激活此功能。
2. **读取扭矩计数值**：通过在正常运行期间读取 TRQ_CNT 寄存器可获取扭矩计数信息。
3. **设置失速阈值**：有两种配置选项可供选择：
 - a. 在失速期间读取 TRQ_CNT 寄存器，并通过写入 STALL_TH 位手动设置特定的阈值。
 - b. 允许算法通过失速学习过程自动学习理想的阈值。

[如何在 SPI 器件中设置失速阈值](#)一节介绍了 SPI 器件设置失速阈值所需的步骤。

4. **监控失速报告**：通过各种渠道接收失速检测报告，包括：
 - a. DIAG 状态 2 和故障状态寄存器中的 STALL、STL 和 FAULT 位。
 - b. nFAULT 引脚 (如果 STL_REP 位已激活)。

对于配备扭矩调节功能的器件，如果初始 TRQ_COUNT 值小于 500，则启用 TRQ_SCALE 位。这使 TRQ_COUNT 可以乘以 8，从而有效地调节扭矩测量值，以提高准确度和精度。

4.3.1.1 如何在 SPI 器件中设置失速阈值

在配备失速检测功能并具有 SPI 接口的器件中，可通过以下两种方式之一设置失速阈值：手动写入 STALL_TH 位，或允许算法通过失速学习过程自动学习理想失速阈值。

4.3.1.1.1 用户定义的失速阈值

如果用户具有适用于其用例的扭矩计数信息，其可以向阈值寄存器写入一个值。在电机正常运行期间和电机失速时，它们可以通过读取 TRQ_CNT 寄存器来获取其用例的扭矩计数信息。失速阈值应设置为稳定计数和失速计数的平均值。扭矩计数的特征化应在整个运行条件 (温度、电源电压、速度等) 范围内以及运动的两个方向完成。如果运行条件变化较大，例如电机转速在上限和下限值之间变化，则可能无法设置所有条件的单个失速阈值。在这种情况下，控制器可以实现失速阈值查找表。有时，可能需要具有足够高时间常数的外部低通滤波器，以便消除扭矩计数中由于电机失速时的振动产生的纹波。

4.3.1.1.2 驱动器定义的失速阈值

系统本身可以进入失速学习模式，并计算电机的理想失速阈值。以下过程介绍失速学习模式：

- 空载运行电机
- 通过写入 STL_LRN = 1 开始学习
- 等待 32 个电气周期，让驱动器了解稳定计数。等待时间将取决于步进频率和微步进。
- 让电机失速
- 等待 16 个电气周期，让驱动器学习得到失速计数
- 读取寄存器，直至 STL_LRN = 0
- 如果 STL_LRN_OK = 1，则已计算出失速阈值。如果 STL_LRN_OK = 0，则失速学习失败。

- 失速阈值计算为稳定计数和失速计数的平均值。成功学习结束时，STALL_TH 寄存器将加载正确的失速阈值位。

在某些情况下，由于电机运行或失速期间扭矩计数的波动，失速学习过程可能无法产生准确的结果。高线圈电阻或极端转速等因素可导致扭矩计数发生显著变化，从而使稳态计数与失速计数之间的差异很小。在这类情况下，建议用户分析整个运行范围内的稳态计数和扭矩计数，并将阈值设为介于最小稳态计数和最大失速计数之间的中间值

4.3.2 硬件接口器件

要在 DRV8434A 和 DRV8434A-Q1 等具有硬件接口的器件中启用失速检测，请按照以下步骤操作。

- 启用失速检测：**开始让电机以正常速度和负载电流为您的应用旋转。STL_MODE 会对失速检测模式进行编程。将 STL_MODE 引脚设置为 GND 或 DVDD 可启用失速检测。STL_MODE Hi-Z 启用学习模式。
- 读取扭矩计数值：**将 STL_MODE 引脚连接到 GND 并测量 TRQ_CNT/STL_TH 引脚上的模拟电压。
- 设置失速阈值：**有两种配置选项可供选择：
 - 将 STL_MODE 连接到 DVDD 并将特定的阈值电压施加到 TRQ_CNT/STL_TH 引脚，该电压用作失速阈值电压，并与内部 TRQ_CNT 值进行比较。
 - 允许算法通过失速学习过程自动学习理想的阈值。

[如何在硬件器件中设置失速阈值](#)一节介绍了硬件器件设置失速阈值所需的步骤。

- 监控失速报告：**STL_REP 引脚专门用于失速故障报告，当直接接地时，其功能被禁用：
 - STL_REP 引脚处于高电平时，会报告失速故障。
 - 如果 $STL_REP > 1.6V$ ，nFAULT 会变为低电平。

TRQ_SCALE 可通过将 ENABLE 引脚悬空启用（高阻态模式）。这使 TRQ_COUNT 可以乘以 8，从而有效地调节扭矩测量值，以在初始 TRQ_COUNT 值小于 500 时提高准确度和精度。

4.3.2.1 如何在硬件器件中设置失速阈值

在具有硬件接口的器件中，可通过以下两种方式之一设置失速阈值：用户定义的失速阈值或驱动器定义的失速阈值，下面将对此进行详细说明。

4.3.2.1.1 用户定义的失速阈值

为了有效利用失速阈值，用户必须获取其用例对应的特定扭矩计数信息。这可以通过在正常和失速条件下，将 STL_MODE 连接到 GND 时测量 TRQ_CNT/STL_TH 引脚上的扭矩计数电压来实现。然后，可以使用这些测量值的平均值来确定失速阈值。

有两种方法可以根据确定的失速阈值检测失速故障：

- 向 TRQ_CNT/STL_TH 引脚施加失速阈值电压：**在此模式下，用户可以使用失速阈值信息配置失速检测。通过将 STL_MODE 连接到 DVDD，器件会进入失速阈值运行模式。然后，向 TRQ_CNT/STL_TH 引脚施加所需的失速阈值电压。该电压与内部 TRQ_CNT 值进行比较。如果内部值降至低于应用的阈值，器件会通过 STL_REP 引脚从低电平驱动为高电平来报告失速故障。应用 nSLEEP 复位脉冲以拉低 STL_REP 并再次拉高 nFAULT。
- MCU 辅助失速检测模式：**该模式涉及 MCU 将 TRQ_CNT/STL_TH 电压作为输入。其对任何二阶效应进行补偿，并将电压与自己的失速阈值进行比较以检测失速。为了实现这一点，STL_MODE 引脚应连接至 GND，TRQ_CNT/STL_TH 引脚应连接至 MCU 的 ADC 引脚。然后，MCU 将 TRQ_CNT 值与其指定的失速阈值进行比较，并在必要时报告故障。由于此模式是外部模式，因此必须通过将 STL_REP 引脚连接到 GND 来禁用器件的内部失速报告机制。此外，MCU 可以运行算法以根据扭矩计数控制 VREF，从而提高检测精度和系统性能。

4.3.2.1.2 驱动器定义的失速阈值

该系统具备自动失速学习模式，可确定电机的最优失速阈值，并将其作为模拟电压输出至 TRQ_CNT/STL_TH 引脚。该阈值还会存储在内部，供后续在扭矩计数模式下使用，使驱动器可根据学习模式计算得到的最优失速阈值检测失速故障。要启动此过程，请按照下述步骤操作。

1. 开始失速阈值学习之前，请确保电机转速已达到其目标值。请勿在电机转速加快或减慢时学习失速阈值。
2. 通过将 **STL_MODE** 引脚设为高阻态来启动学习。
3. 空载运行电机。
4. 等待 32 个电气周期，让驱动器了解稳定计数。
5. 让电机失速。
6. 等待 16 个电气周期，让驱动器了解失速计数。
7. 如果学习成功，**STL_REP** 将被拉至低电平。
8. 失速阈值计算为稳定计数和失速计数的平均值。
9. 学习成功后，**TRQ_CNT/STL_TH** 引脚会将失速阈值作为模拟电压输出，并在内部存储该值以用于扭矩计数模式。
10. 学习成功后，一旦器件通过更改 **STL_MODE** 逻辑电平进入扭矩计数模式或失速阈值模式，**STL_REP** 就会变为高电平，**nFAULT** 会被下拉并且 **TRQ_CNT/STL_TH** 引脚上的电压会复位。
11. 施加 **nSLEEP** 复位脉冲以拉低 **STL_REP**，并再次拉高 **nFAULT**。

4.4 失速检测功能的实验结果

我们使用常用于自适应前照灯应用的 **PL35L-024** 步进电机进行失速检测实验。此电机的额定最大驱动电流为 450mA，线圈电阻为 7.7Ω。如 **图 4-3** 所示，根据运动方向，电机轴在内部或外部移动。在具有 8 位 **TRQ_COUNT** 的器件（如 **DRV8889_Q1**）中，**MSP430 MCU** 使用 **MCU** 内部的 8 位 **DAC** 将 **TRQ_COUNT** 转换为模拟电压。**DAC** 的满量程是 3.3V，对应 **TRQ_COUNT** 寄存器的 256 个计数。因此，单个 **TRQ_COUNT** 位表示为 12.89mV。但是，在具有 12 位 **TRQ_COUNT** 的器件（如 **DRV8434S**）中，**MSP430 MCU** 使用 **MCU** 内部的 12 位 **DAC** 将 **TRQ_COUNT** 转换为模拟电压。**DAC** 的满量程是 3.3V，对应 **TRQ_COUNT** 寄存器的 4096 个计数。因此，单个 **TRQ_COUNT** 值表示为 0.81mV。

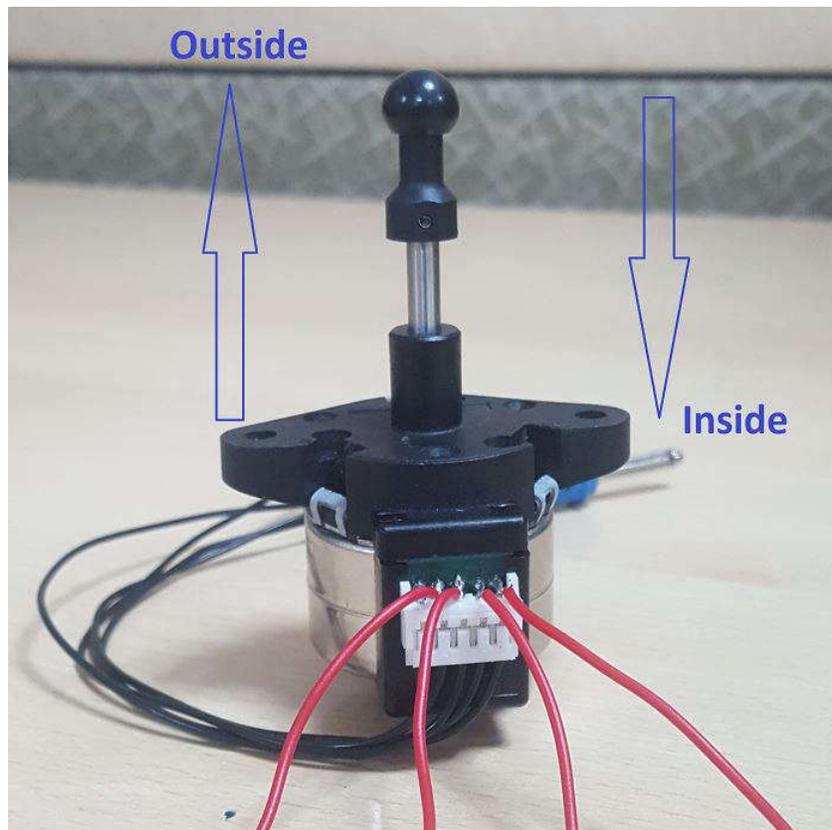


图 4-3. 汽车应用中使用的 **PL35L-024** 步进电机

4.4.1 正常和失速条件下的电机波形

图 4-4 和 图 4-5 分别展示了正常和失速条件下的电机线圈电流、TRQ_COUNT 值和步进脉冲。DRV8889-Q1 器件电源电压为 13.5V，配置为全步进模式，以 125pps 的速度运行，满量程电流为 200mA，压摆率为 105V/μs。当电机到达任一终点止动位置时，电机就会失速。从图中可以明显看出，当电机以其标称速度运行时，反电动势会使线圈电流失真，从而导致其在 T_{OFF} 相位期间上升而不是衰减。因此，DAC 输出电压约为 500mV，对应 TRQ_COUNT 为 38。相比之下，当电机失速时，没有反电动势会导致所有象限出现均匀的线圈电流，并且扭矩计数降至零。

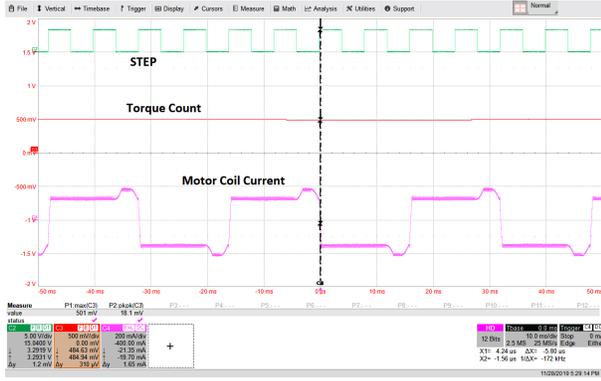


图 4-4. 电机运行时的线圈电流和扭矩计数

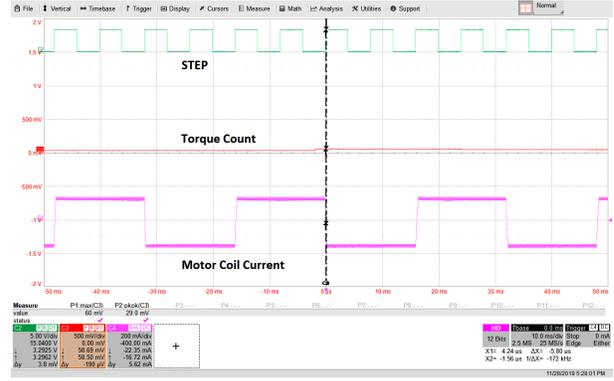


图 4-5. 电机失速时的线圈电流和扭矩计数

4.4.2 TRQ_COUNT/STALL_TH 分辨率分析

本节通过比较 DRV8889-Q1 中的 8 位实现方案与 DRV8434S 中的 12 位实现方案，评估 TRQ_COUNT 和 STALL_TH 分辨率对无传感器失速检测的影响。电机在 1/4 微步进模式下运行，步进速率为 500PPS，压摆率为 105V/μs，满量程相位电流为 200mA。电机轴在内外重复驱动，然后在每个方向上出现失速条件，以观察相应的 TRQ_COUNT 行为。如图 4-6 所示，对于实现 8 位 TRQ_COUNT 的 DRV8889-Q1，当轴在外部方向移动时，正常运行期间测得的扭矩计数约为 75 个计数 (≈970mV)，表示 8 位满量程的 30%；在内部移动期间为 58 个计数 (≈750mV)，表示 8 位满量程的 22%。由于为 8 位分辨率，扭矩计数要粗得多。相比之下，如图 4-6 所示，DRV8434S 提供 12 位 TRQ_COUNT，能够显著提高扭矩分辨率。禁用 TRQ_SCALE 后，在正常移动期间测得的 TRQ_COUNT 约为 125 个计数 (≈100mV)，仅表示 12 位满量程的 3% 左右。尽管未调节的扭矩计数仅占用可用范围的一小部分，但较高的分辨率可清楚区分正常运动和失速。如图 4-6 所示，当扭矩计数低于 500 时，建议启用 TRQ_SCALE 功能。这会将 TRQ_CNT 和 STL_TH 值扩展 8 倍，从而改善内部运动、外部运动和失速条件之间的区别，同时保留精细的分辨率。

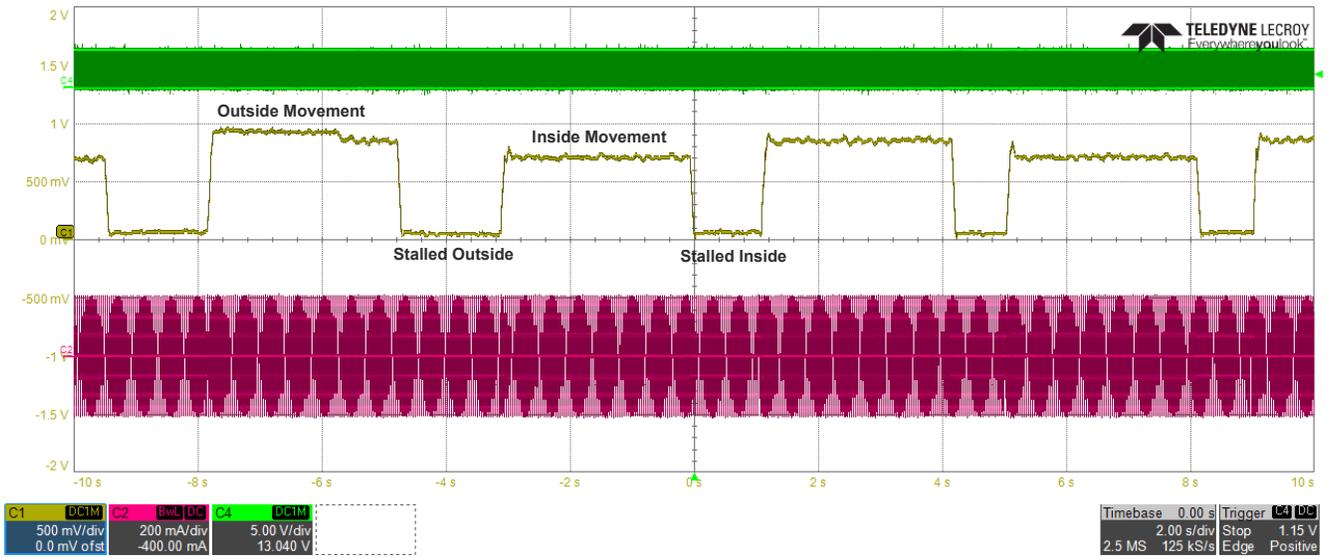


图 4-6. DRV8889 的 PL35L-024 电机扭矩计数

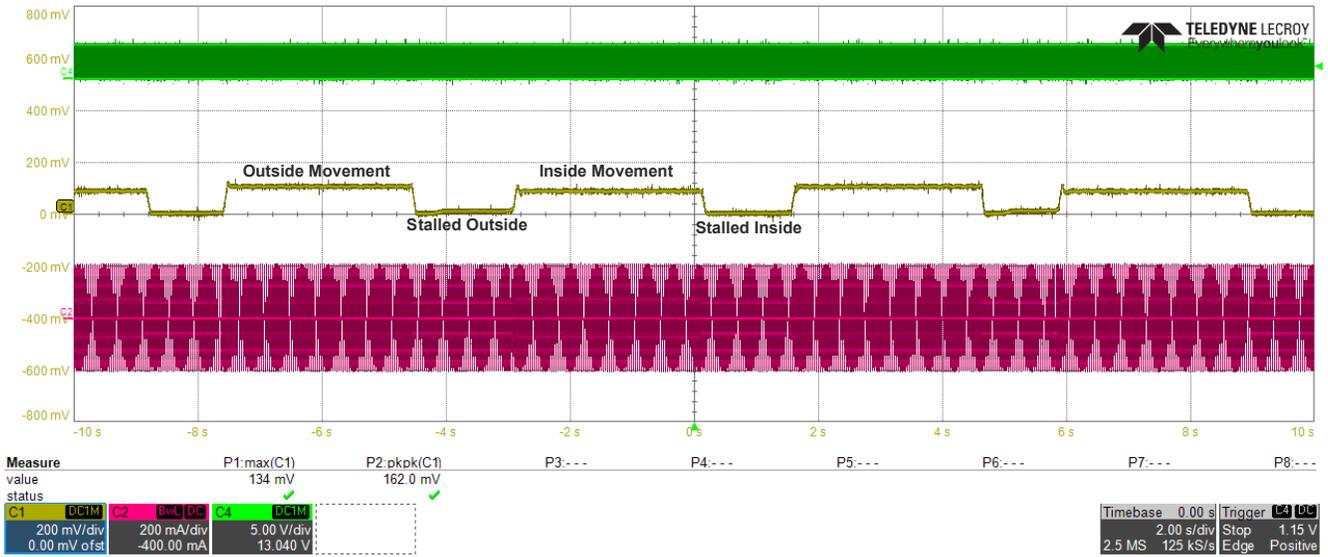


图 4-7. 禁用扭矩扩展时 DRV8434S 的 PL35L-024 电机扭矩计数

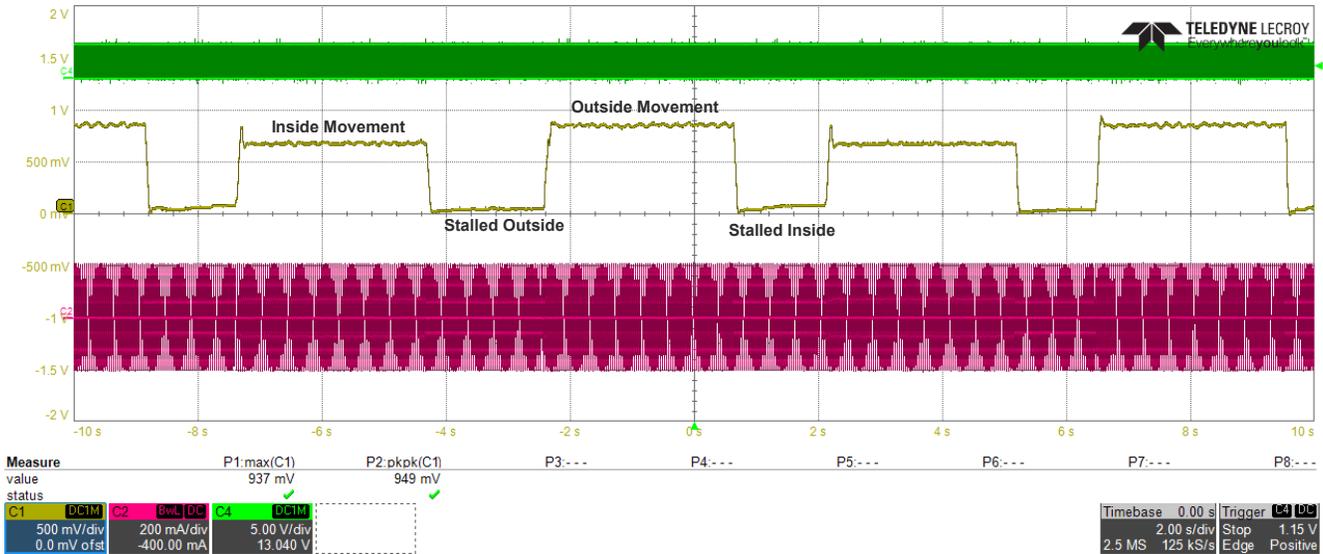


图 4-8. 启用扭矩扩展时 DRV8434S 的 PL35L-024 电机扭矩计数

4.4.3 运行条件下的扭矩计数变化

扭矩计数在电源电压、温度和其他运行条件变化时基本保持不变。但是，二阶效应将导致扭矩计数值发生微小变化，本节对此进行详细介绍。

4.4.3.1 随电机转速和运动方向的变化

扭矩计数可能随电机的运动方向而变化。电机的有效负载有时取决于运动方向。例如，重力或线圈弹簧可能会在一个方向上辅助转子运动，而在另一个方向上阻碍其运动。负载差异会导致反电动势相对于线圈电流的相位变化不同。这会产生不同的稳定计数，具体取决于运动方向。

图 4-9 显示 PL35L-024 电机的稳定计数如何根据转子轴是在内部还是外部移动而变化。电机以全步进模式运行，满量程电流设置为 200mA，压摆率为 105V/μs。电源电压为 13.5V。请注意，稳定计数几乎随电机转速线性增加。这是因为反电动势与电机转速成正比。转速越高，反电动势越大，因此导致上升和下降电流象限之间 T_{OFFs} 的差异就越大——换句话说，扭矩计数就越大。由于具有更高的分辨率，DRV8434S 显示更高的扭矩计数。

电机失速时的扭矩计数（失速计数）也可能随运动方向而变化。失速计数取决于终点止动装置的硬度。移动终点位置实际上可能不会使转子失速——在某些情况下，转子可能会由于松动、海绵状或软终点止动装置而继续旋转，从而使转子发生弹跳。通常，失速的转子在尝试移动时会发生振动；然而，任何旋转运动都会转化为反电动势。与步进角较小的电机相比，步进角较大的电机可能会显示更多振动。在这种情况下，失速计数将明显低于稳定计数，但其可能不为零。图 4-9 显示了相同运行条件下 PL35L-024 电机的失速计数。

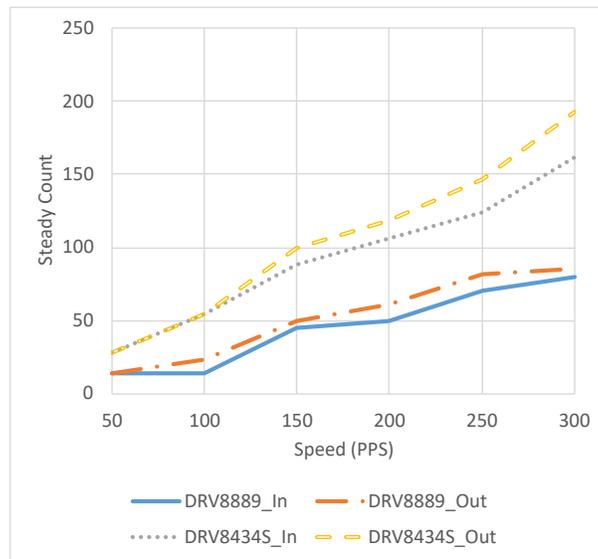


图 4-9. 不同运动方向稳定计数随速度的变化

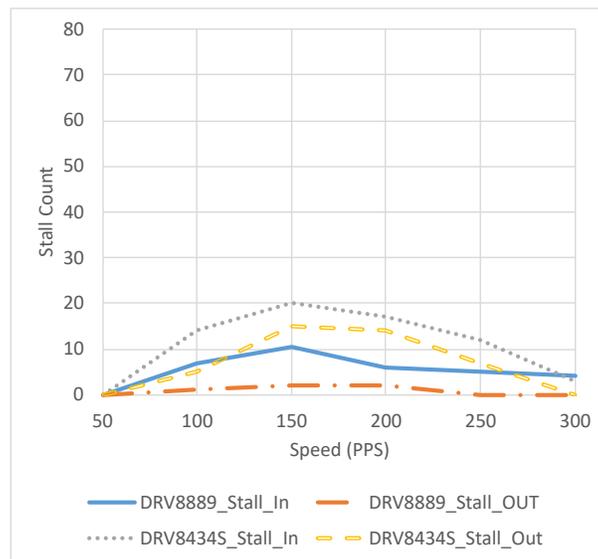


图 4-10. 随运动方向的失速计数变化

4.4.3.2 低电机转速造成的限制

由于低速运行固有的低反电动势值，因此是失速检测最具挑战性的情况。图 4-11 至 图 4-11 展示了采用 1/8 微步进、转速为 150PPS 和 100PPS 时的稳态扭矩计数测量结果，对比了 DRV8889-Q1 和 DRV8434S 在启用和禁用 TRQ_SCALE 功能下的表现。

对于 DRV8889-Q1，图 4-11 表明在 150PPS 时扭矩计数保持极低，通常低于值 10。此外，相对较粗的扭矩计数分辨率会导致较小的扭矩偏移，这些偏移仍接近本底噪声，从而难以区分正常运动和失速情况。因此，DRV8889-Q1 在低速下的可靠失速检测变得越来越困难。

相比之下，DRV8434S 即使在禁用 TRQ_SCALE 的情况下也表现出提升的低速扭矩可见性，这主要是由于其较高的有效扭矩计数分辨率。如 图 4-11 所示，与 DRV8889-Q1 相比，150PPS 时的扭矩计数波形更平滑，并且展示的粒度更高。但是，在非常低的速度下，绝对扭矩计数摆幅仍会受到可用动态范围的限制，这凸显了对扭矩扩展的需求。在 DRV8434S 上启用 TRQ_SCALE 时（图 4-11），可以看到明显的改善。扭矩扩展可增加有效扭矩计数幅度，从而使正常运动与失速事件之间的区别更明显。更高的分辨率进一步使这些运行状态之间的区别更加明显。

在 100PPS 时，DRV8889-Q1 的限制变得更加明显。如 图 4-11 所示，由于分辨率较粗，扭矩计数在运动和失速情况下都会趋近于零，导致在此速度下无法可靠地检测失速。相比之下，DRV8434S 即使在禁用 TRQ_SCALE 的情况下也能保持提升的扭矩可观性，如 图 4-11 所示。启用 TRQ_SCALE 后，DRV8434S 即使在 100PPS 下仍可能明显区分运动和失速情况，从而在超低速运行下展示稳健的扭矩计数可见性。

总体而言，这些结果表明，更高的扭矩计数分辨率与扭矩扩展相结合，可为低速运行提供基本优势。与 DRV8889-Q1 相比，DRV8434S 可提供出色的扭矩计数可见性，增加的失速检测裕度，并通过 1/8 微步进在 150PPS 和 100PPS 时增强稳健性。增加的 TRQ_SCALE 功能进一步扩大了这些优势，更大幅度地扩大了可用扭矩测量范围，使 DRV8434S 非常适合可靠失速检测至关重要的超低速和高精度运动控制应用。

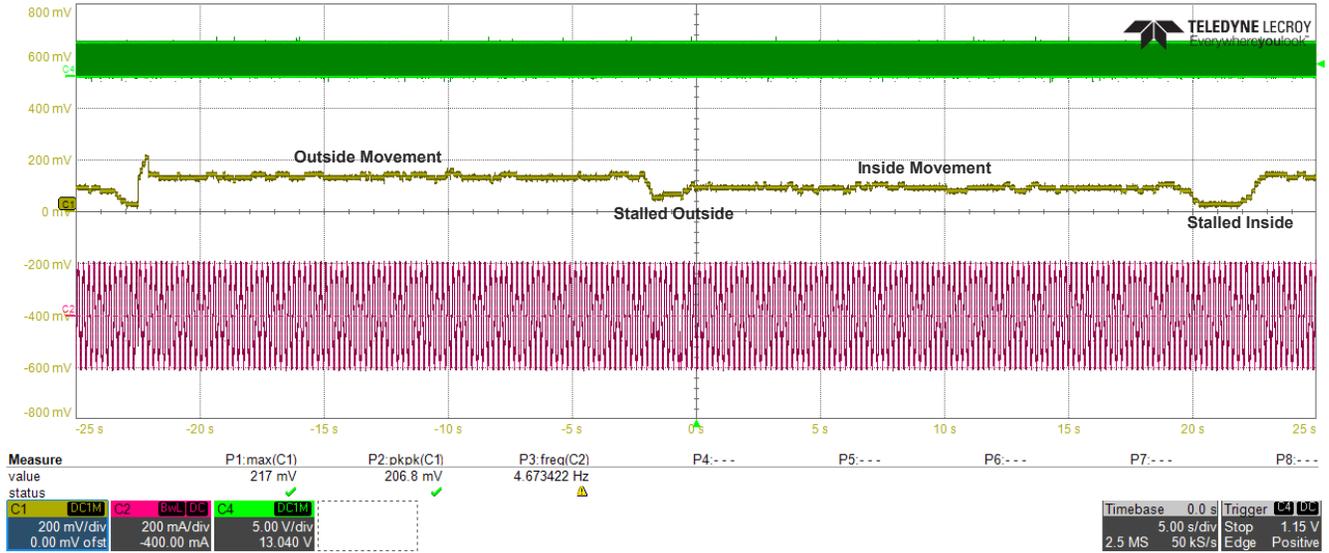


图 4-11. DRV8889-Q1 在 150pps 的稳定计数

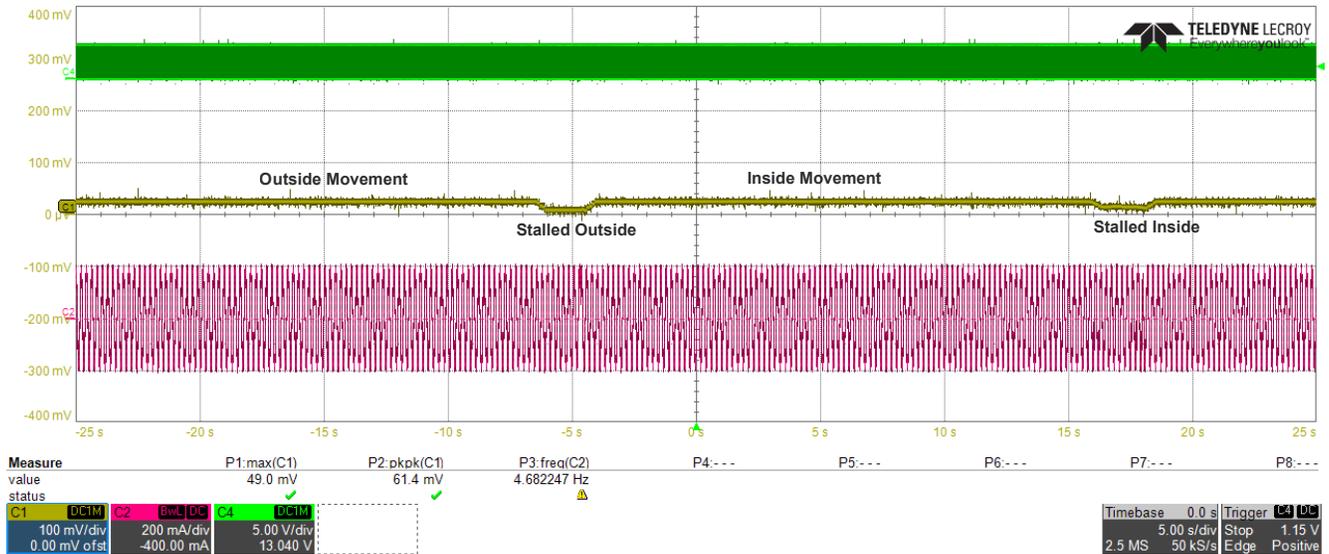


图 4-12. DRV8434S 在 150pps 的稳定计数 (禁用 TRQ_SCALE 时)

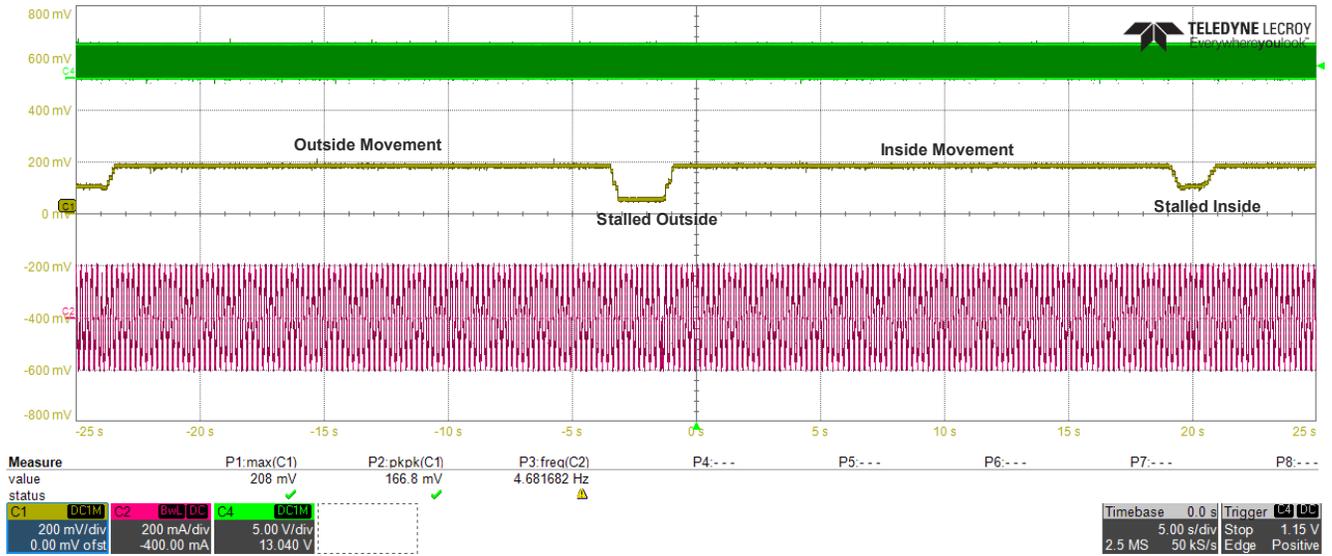


图 4-13. DRV8434S 在 150PPS 的稳定计数 (启用 TRQ_SCALE 时)

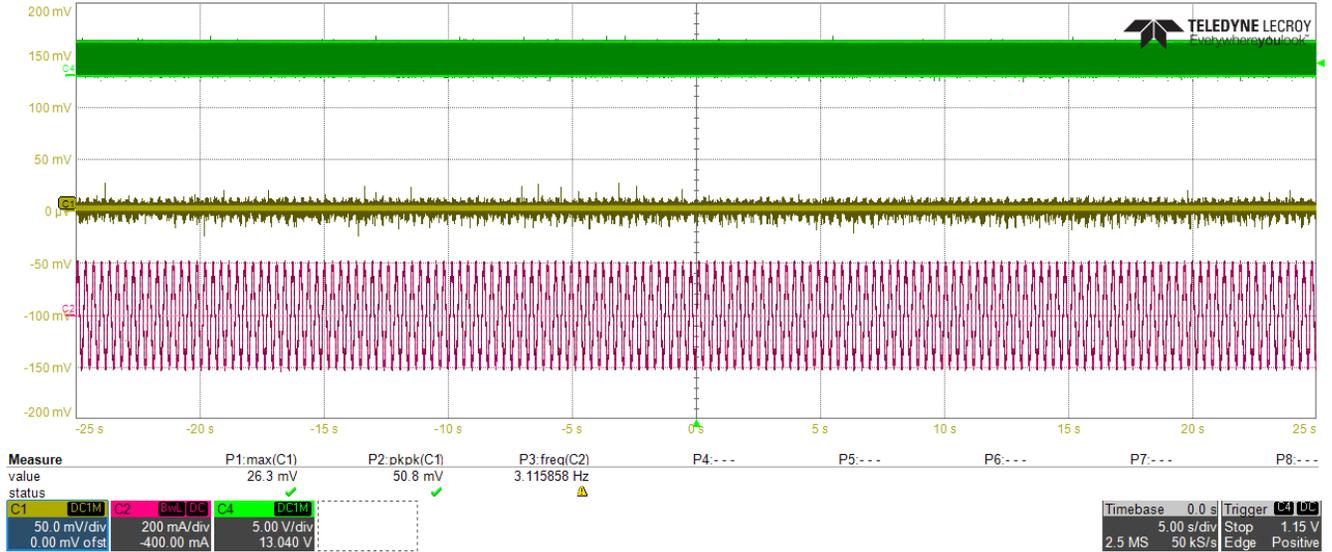


图 4-14. DRV8889-Q1 在 100PPS 的稳定计数

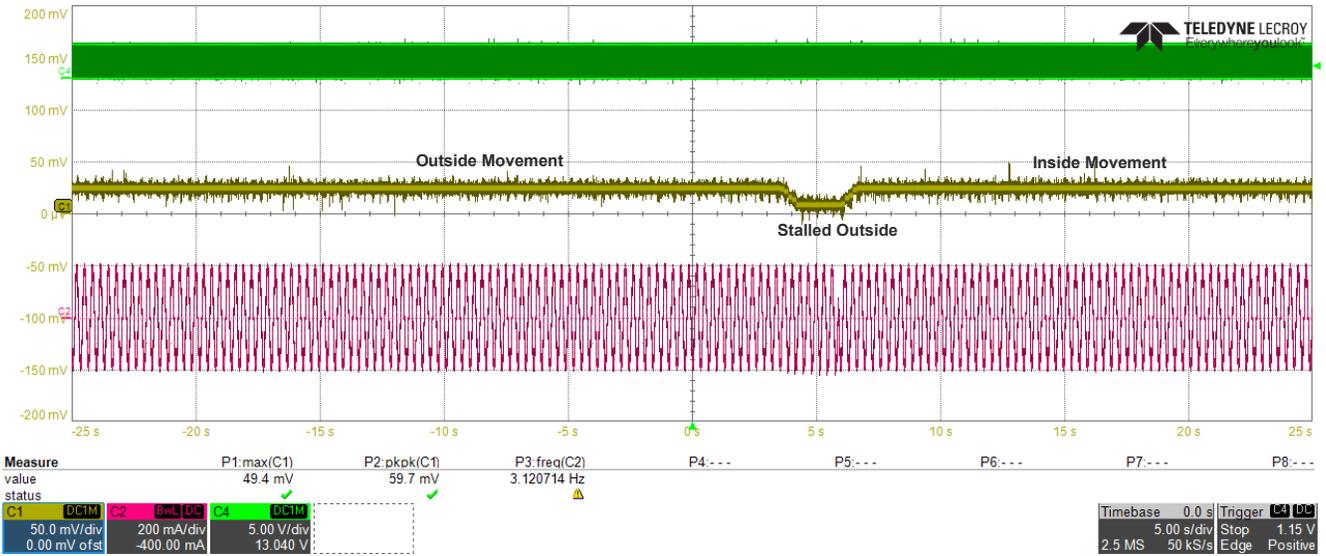


图 4-15. DRV8434S 在 100PPS 的稳定计数 (禁用 TRQ_SCALE 时)

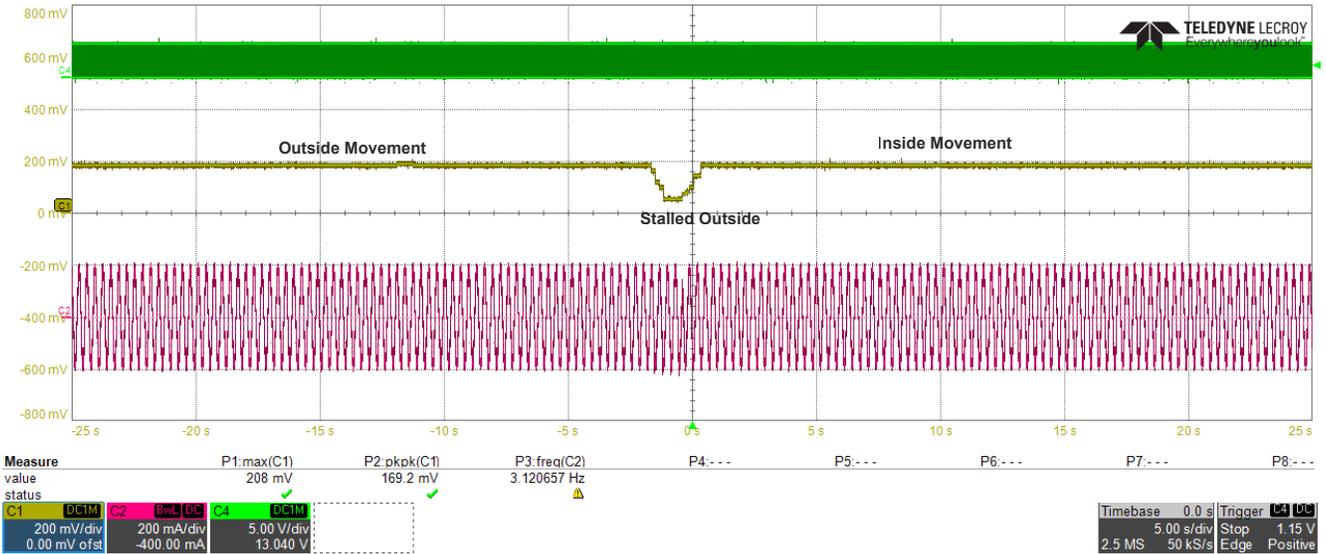


图 4-16. DRV8434S 在 100PPS 的稳定计数 (启用 TRQ_SCALE 时)

4.4.3.3 高电机转速造成的限制

高速和较大的反电动势会使线圈电流失真，并且失速检测在电机转速非常高时可能不可靠。以下四个示波器快照显示 17PM- F438B 电机在 13.5V 电源电压和 500mA 满量程电流下运行时全步进模式的线圈电流。

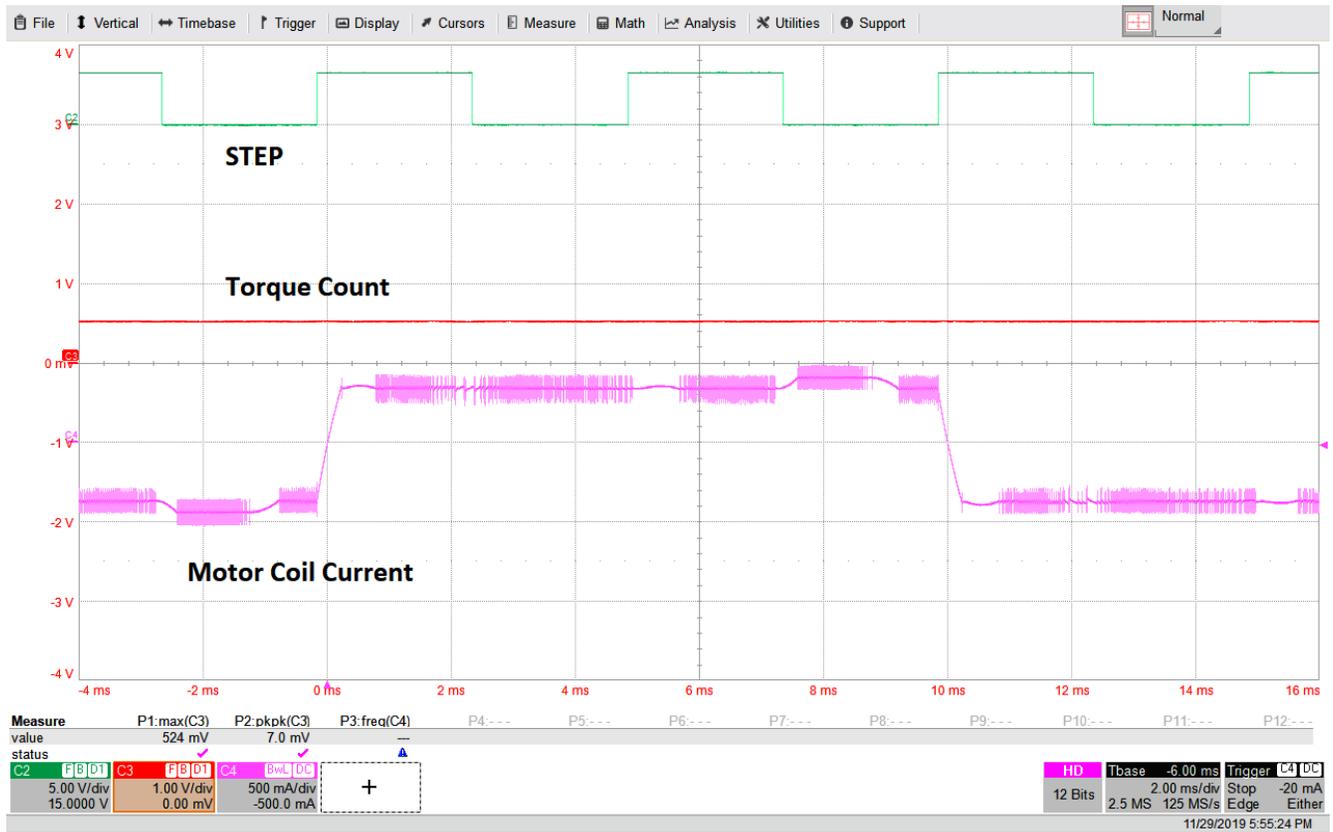


图 4-17. 200PPS 时的稳定计数

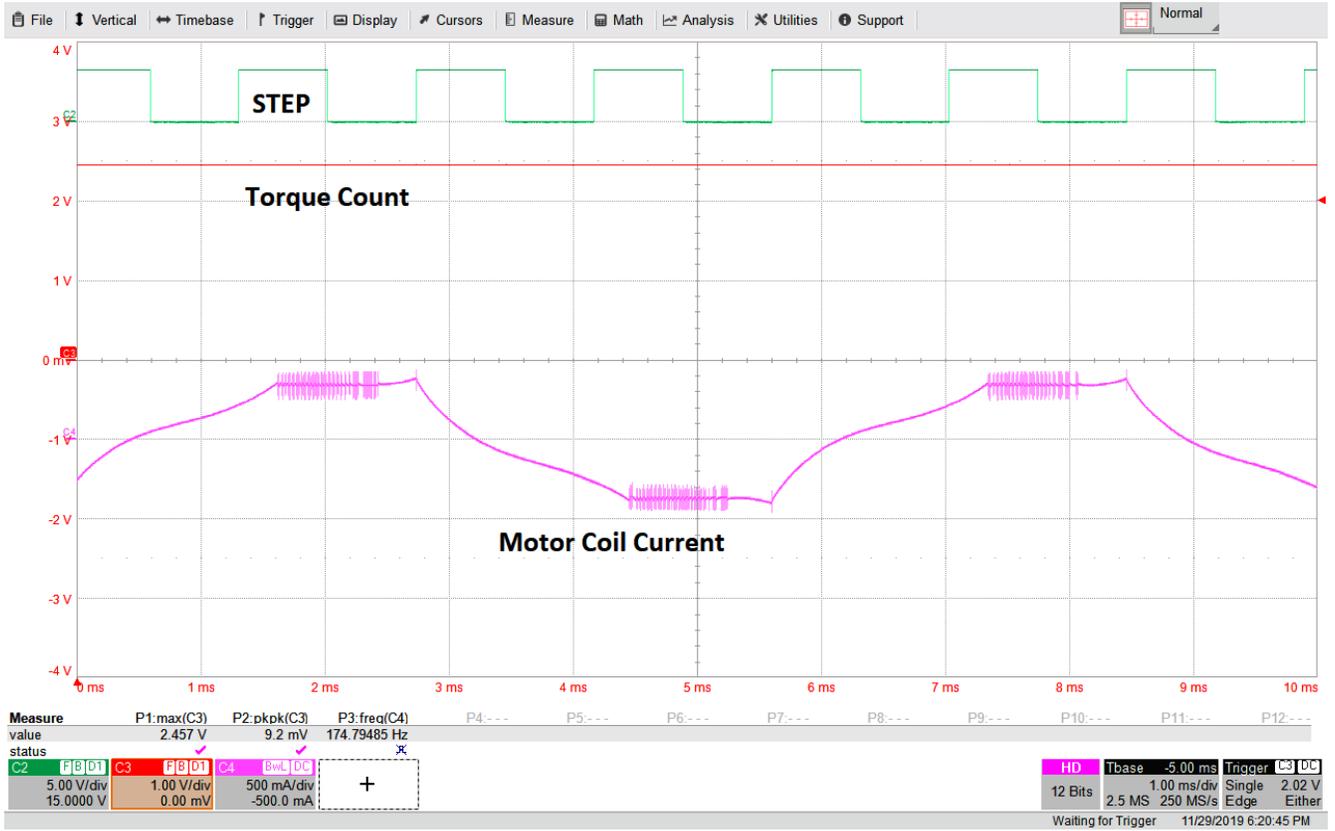


图 4-18. 700PPS 时的稳定计数



图 4-19. Q1 调节丢失时的稳定计数变化

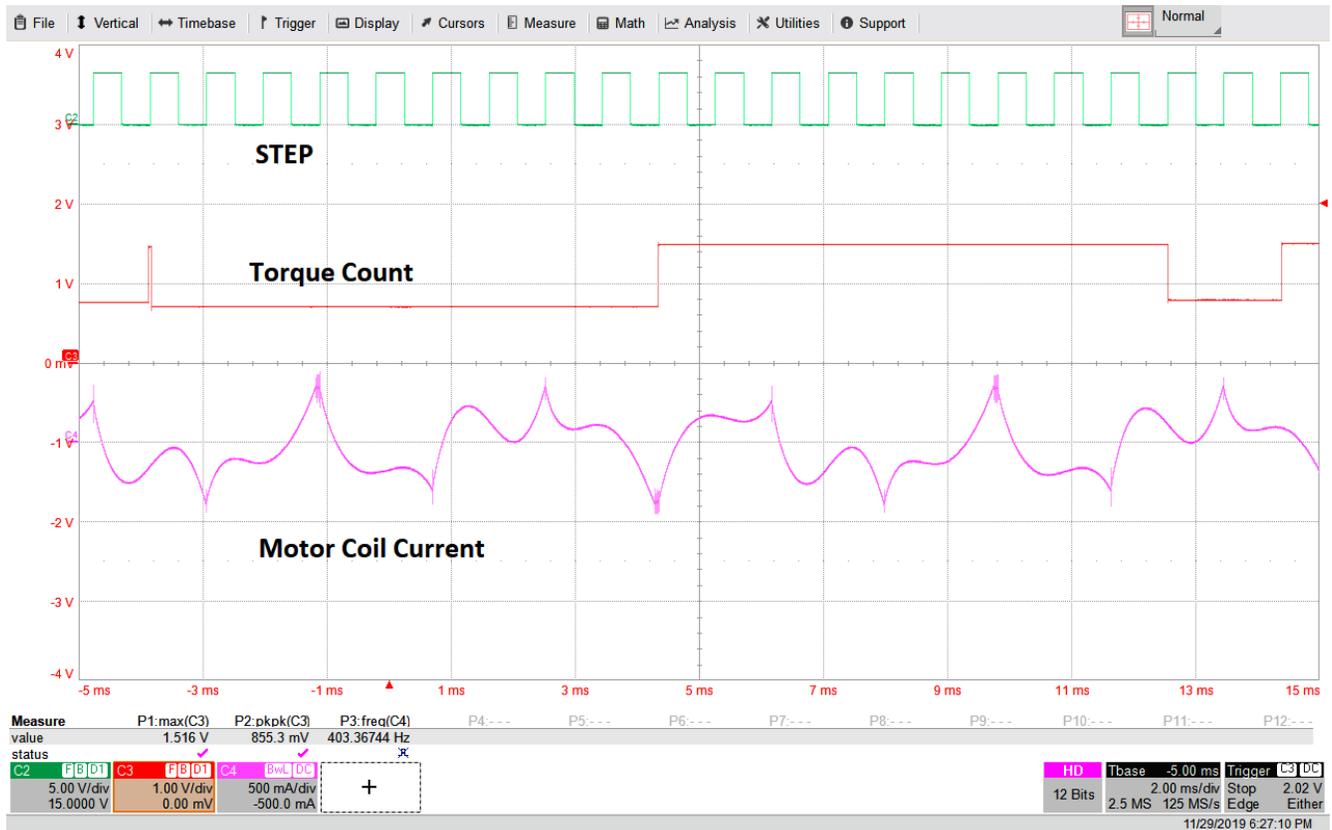


图 4-20. 1100PPS 时的稳定计数

如 图 4-17 所示，当电机转速使电流在 Q1 和 Q2 象限中均可调节时，该算法使用来自两个象限的 T_{OFF} 并得出扭矩计数。

图 4-17 显示，在较高速度下，电流的上升时间可能非常长，以至于 Q1 中的电流调节丢失，但 Q2 中的电流仍将进行调节。即使在这种情况下，仍然能可靠地检测到失速。当 Q1 中的电流调节丢失时，会导致扭矩计数值突然跳变，如 图 4-17 所示。

在更高的速度 (图 4-17) 下，电流波形可能会严重失真，从而导致 Q1 和 Q2 象限中的调节均丢失。在这种情况下，算法无法再检测失速，并且扭矩计数值将不稳定和不可靠。

根据公开的 $V = L \times di/dt$ 公式，图 4-17 所示的电流上升时间取决于电源电压、线圈电感和线圈电流水平。上升时间越短，就能在更高的转速下实现电流调节。因此，通过 (1) 降低电机电感、(2) 降低电流水平以及 (3) 提高电源电压，可以获得更宽的运行速度范围。

4.4.3.4 随电源电压的变化

公式 方程式 5 表明 T_{OFF} 参数与电源电压 (VM) 无关。因此，比较一个象限的 T_{OFF} 平均值与下一个象限的 T_{OFF} 平均值时，结果应与电源电压无关。不过，图 4-21 表明，稳定计数随电源电压的变化很小。此数据适用于 PL35L-024 电机，采用 1/8 微步进，速度为 1000PPS、压摆率为 105V/ μ s 且满量程电流设置为 200mA。

此变化可通过查看各种电源电压下的电流纹波来说明。在较高电压下，纹波略有增加，从而导致 T_{OFF} 值略微增加。但是，Q2 象限的 T_{OFF} 变化将略大于 Q1 中的 T_{OFF} 变化，因为反电动势幅度在较高电压下保持恒定。其影响是稳定计数随电源电压略有增加。

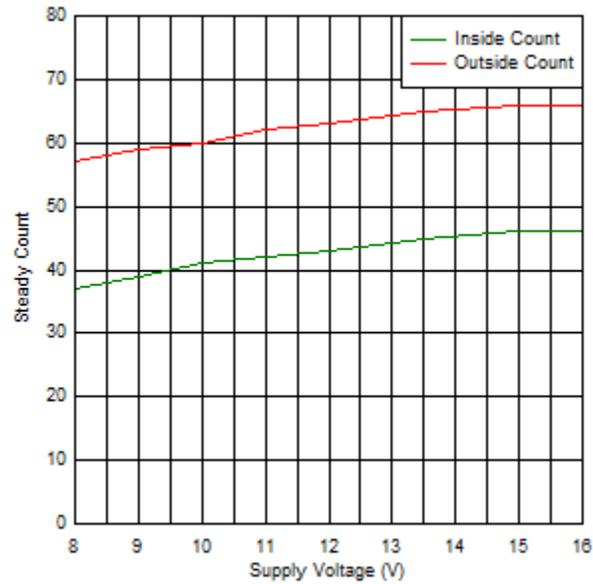


图 4-21. 稳定计数随电源电压的变化

4.4.3.5 随微步进设置的变化

更高阶的微步进通常会带来更高的扭矩计数。图 4-22 显示 PL35L-024 电机随微步进设置的稳定计数变化。每个微步进设置下的电机转速 (PPS) 进行了调节，可达到每秒 125 个全步进的相同速率。

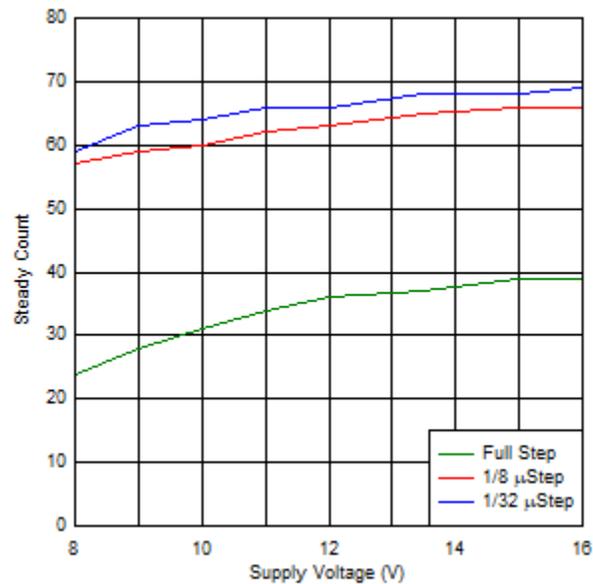


图 4-22. 随微步进的稳定计数变化

4.4.3.6 随输出压摆率的变化

较慢的输出压摆率会导致扭矩计数降低。由于输出下降时间较慢， T_{OFF} 在较低压摆率下减小，从而导致扭矩计数降低。

较高的压摆率也有助于将驱动器的开关损耗保持在尽可能低的水平 — 这样驱动器就可以在给定的环境温度下支持更高的电流。相反，较低的压摆率可带来更好的 EMC 性能。需要进行仔细的权衡分析，才能为应用选择合适的压摆率。

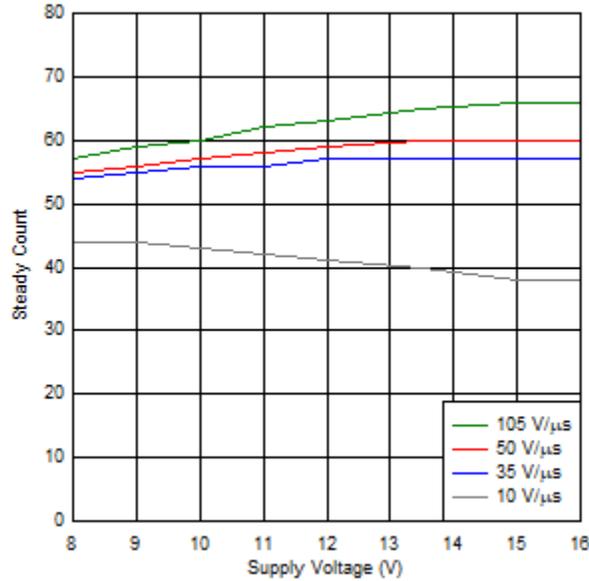


图 4-23. 随输出压摆率的稳定计数变化

4.4.3.7 随环境温度的变化

图 4-24 显示 HVAC 燃气阀中使用的步进电机内部和外部计数如何随环境温度而变化。该电机以 300PPS 的转速在全步进模式下运行。从图中可以明显看出，扭矩计数几乎不受环境温度的影响。

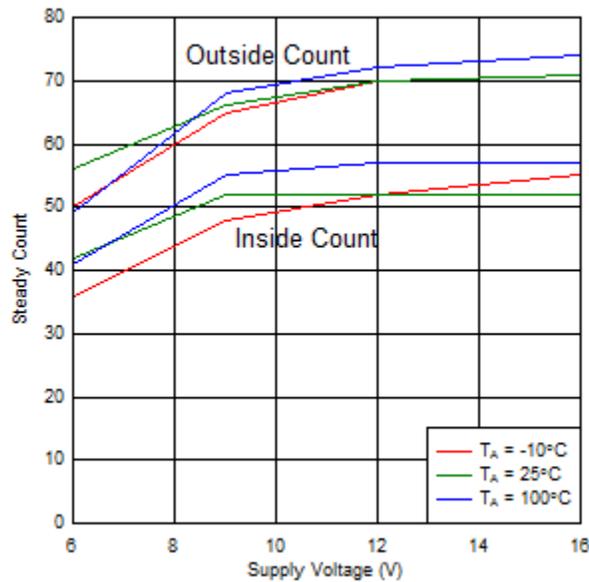


图 4-24. 随环境温度的稳定计数变化

4.4.3.8 随满量程电流设置的变化

在恒定电源电压下，稳定计数在满量程电流较高时会下降。电机线圈上的高 $I \times R_{coil}$ 压降会导致反电动势过小；因此， T_{OFF} 不会受到影响，从而导致计数降低。

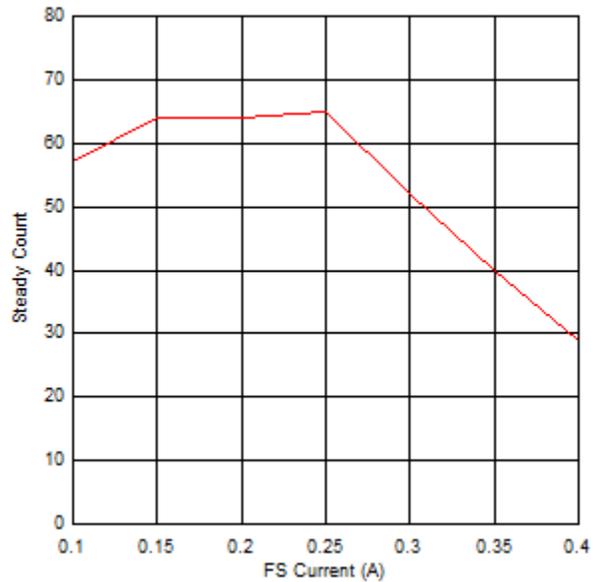


图 4-25. 随满量程电流的稳定计数变化

4.4.3.8.1 高线圈电阻导致的限制

如果线圈电阻过高，则线圈电流波形会失真，并且反电动势无法影响 T_{OFF} ，从而导致扭矩计数和失速检测不可靠。

图 4-26 展示了采用 $80\ \Omega$ 电阻的 HVAC 阀门电机的线圈电流波形。电源电压为 12V，满量程电流为 200mA。很明显，扭矩计数波形本质上是不稳定的，无法可靠地检测到失速。图 4-26 展示在相同运行条件下采用 $36\ \Omega$ 线圈电阻的另一个 HVAC 电机的扭矩计数。当电机在一个终点失速时，会周期性振动，从而导致失速计数出现峰值。尽管稳定计数和失速计数之间存在一些重叠，但使用具有足够高时间常数的外部低通滤波器可消除失速计数峰值，以实现可靠的失速检测。

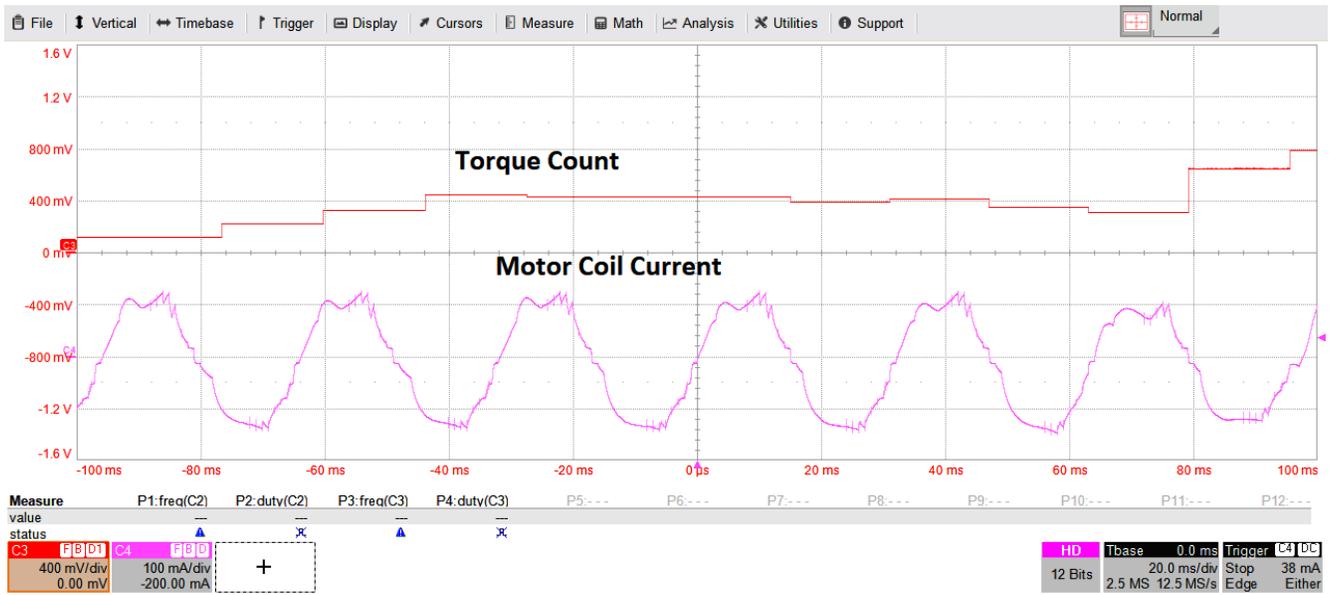


图 4-26. 采用 80 Ω 电阻的阀门电机的线圈电流波形

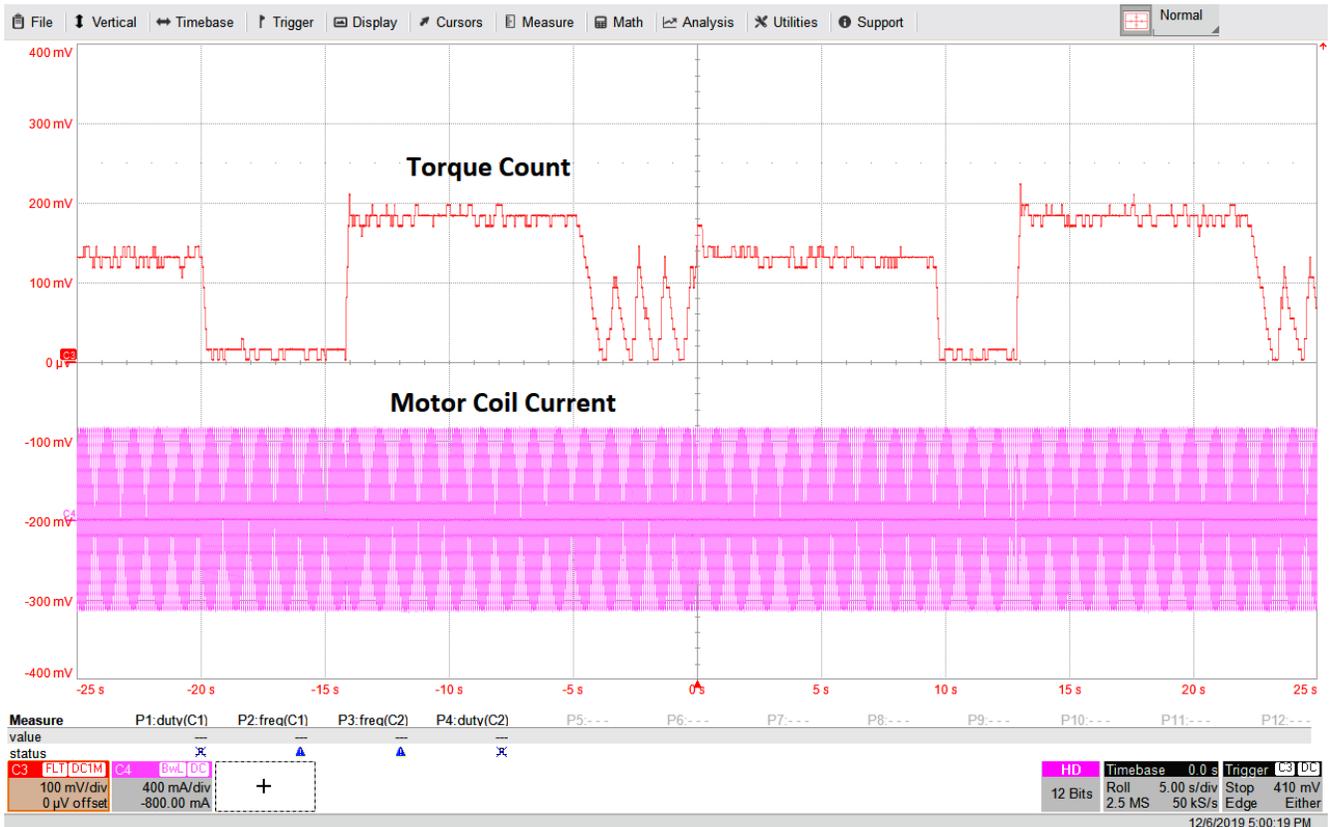


图 4-27. 采用 36 Ω 电阻的阀门电机的线圈电流波形

4.4.3.9 固定运行条件下的稳态计数变化

图 4-28 显示以 1/8 微步进和 1000PPS 速度运行的 PL35L-024 电机的稳定计数。该波形的峰峰值纹波为 42mV，对应计数变化 3。换句话说，稳定计数在 63 到 66 之间变化。这可通过 T_{OFF} 中的微小随机变化来说明。变化可归因于多种因素：例如反电动势电压的性质以及电机结构中的微小不对称。

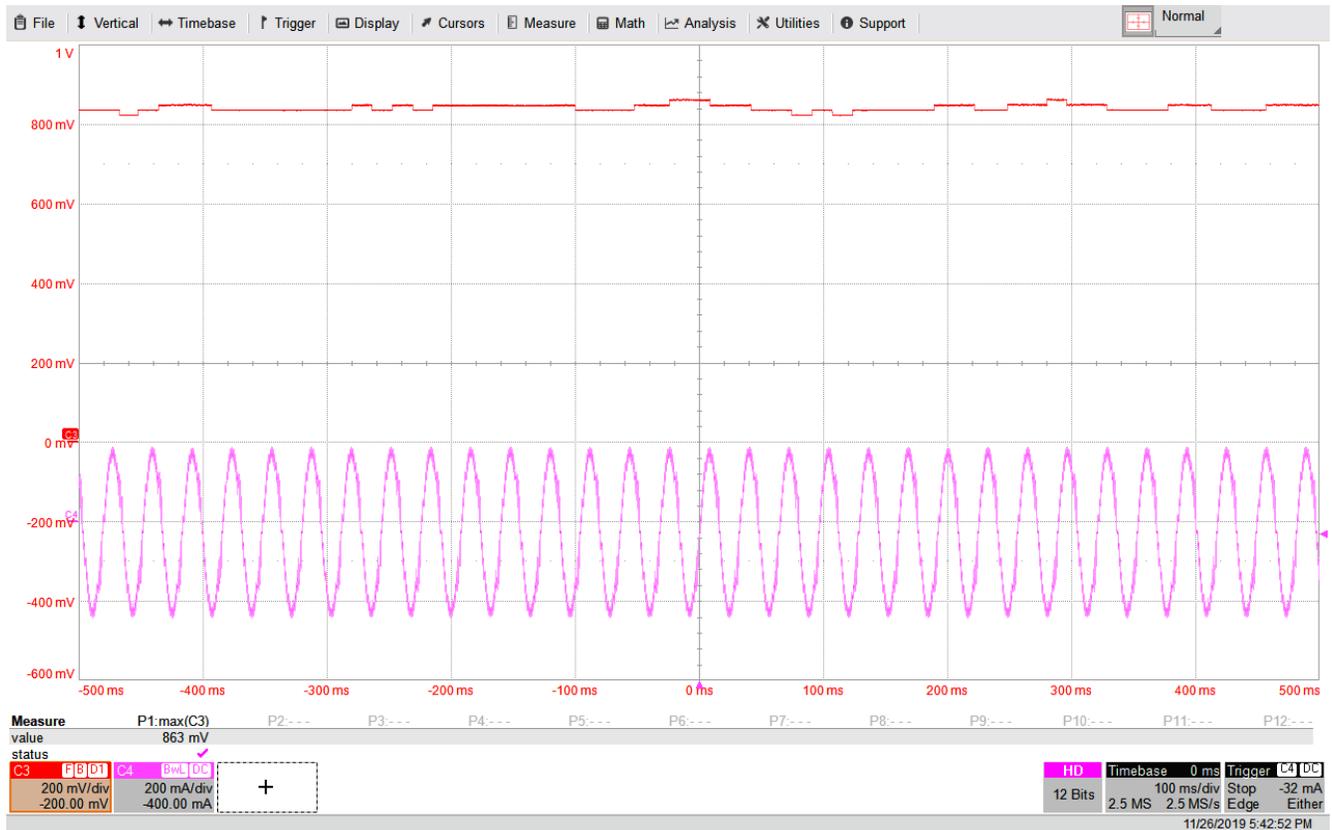


图 4-28. 稳态扭矩计数变化

5 评估示例

5.1 汽车前照灯调平和旋转

世界各地的汽车制造商广泛使用自适应前照灯 (AFS) 系统。这些系统通过对前照灯的光束进行轻微的垂直调整，补偿车辆相对于路面倾角的变化。它们还会使前照灯旋转，以应对车辆转向时的变化。步进电机通常用于前照灯调节应用，因为步进电机成本低、坚固耐用，并且可提供相对于尺寸较高的扭矩。

大多数汽车前照灯系统都需要失速检测，以防止电机在初始位置校准或正常运行期间撞击终点止挡件。如果没有失速检测，为确保达到终点止动位置，步进电机会在估算的终点止动位置之外驱动多个步进。这会导致电机阻塞，并产生相关的可闻噪声和机械磨损。可闻噪声对电动汽车尤为敏感。如果没有集成的失速检测功能，一些系统将被迫使用昂贵的位置传感器来接收有关电机角度位置的反馈。

以下示例显示 DRV8889-Q1 如何检测汽车前照灯模块的失速。在运行时，转子轴在内部或外部移动，可能在两端终点失速。表 5-1 中列出了这一典型自适应前照灯应用的运行条件。

表 5-1. 前照灯步进电机的运行条件

参数	值
电源电压范围	9V 至 16V
满量程电流	500mA
目标转速	122.5 个全步进/秒
微步进	1/8 或 1/32
温度范围	-40°C 至 105°C
电机线圈电阻	7.7 Ω
电机步进角	15°

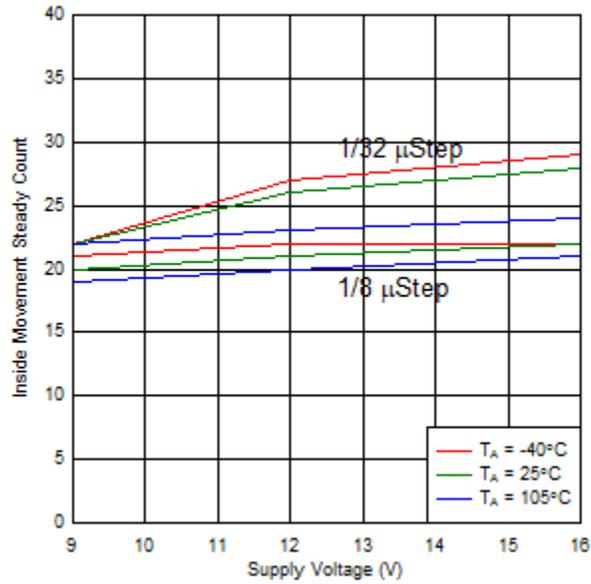


图 5-1. 各种运行条件下的稳定计数

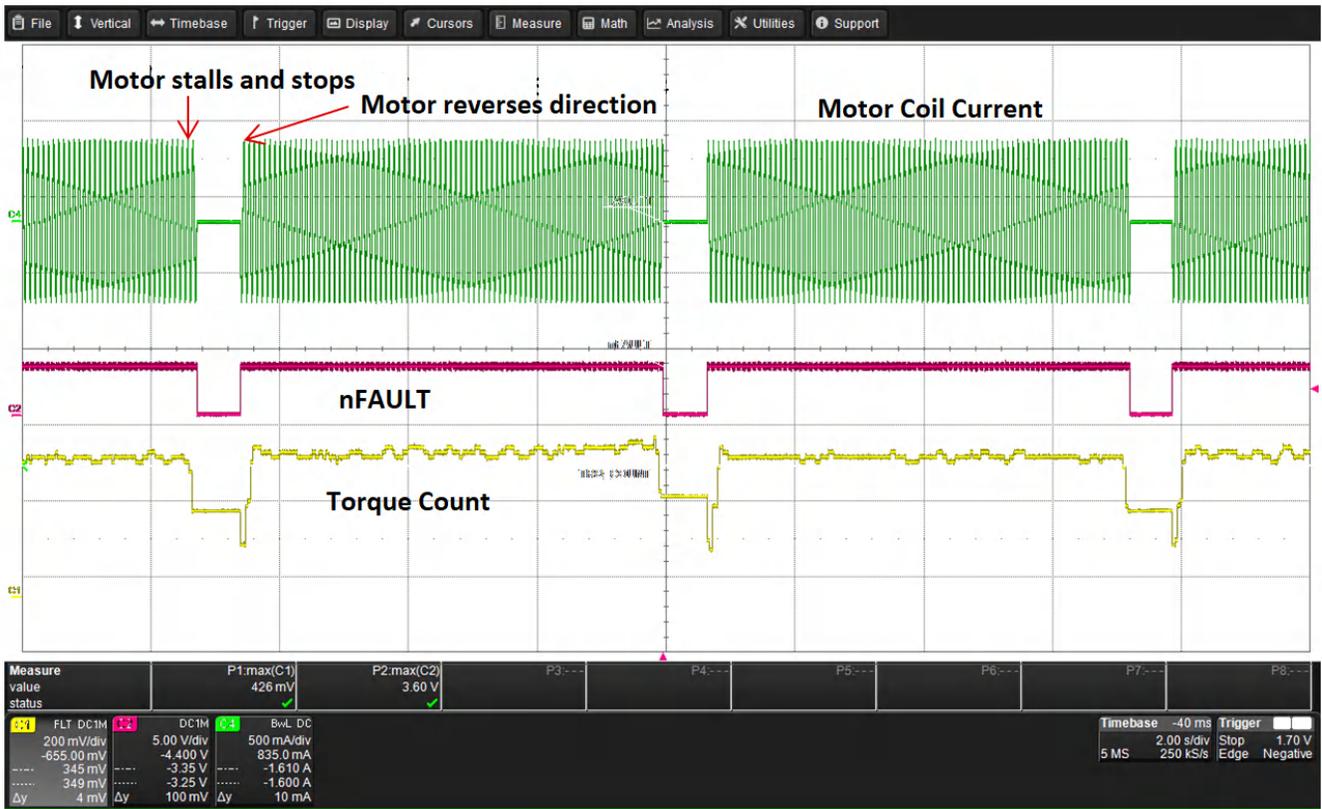


图 5-2. 使用 DRV8889-Q1 进行前照灯模块失速检测

图 5-1 绘制了内部运动的稳定计数与前照灯模块运行参数的函数关系。内部方向计数低于外部方向计数。根据最小内部计数，选择的失速阈值为 12。通过此失速阈值，DRV8889-Q1 可以在各种运行条件下可靠地检测两端终点的失速，如 图 5-2 所示。只要扭矩计数低于失速阈值，nFAULT 输出就会变为低电平，向系统指示已检测到失速。

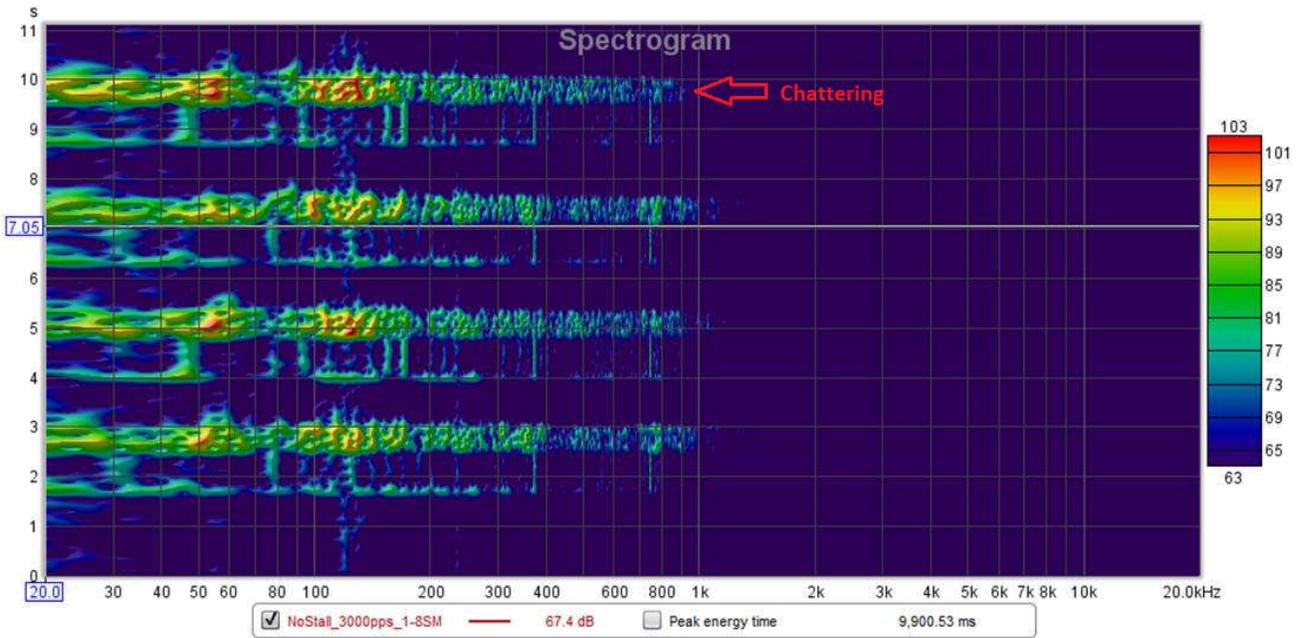


图 5-3. 无失速检测功能的音频噪声频谱图

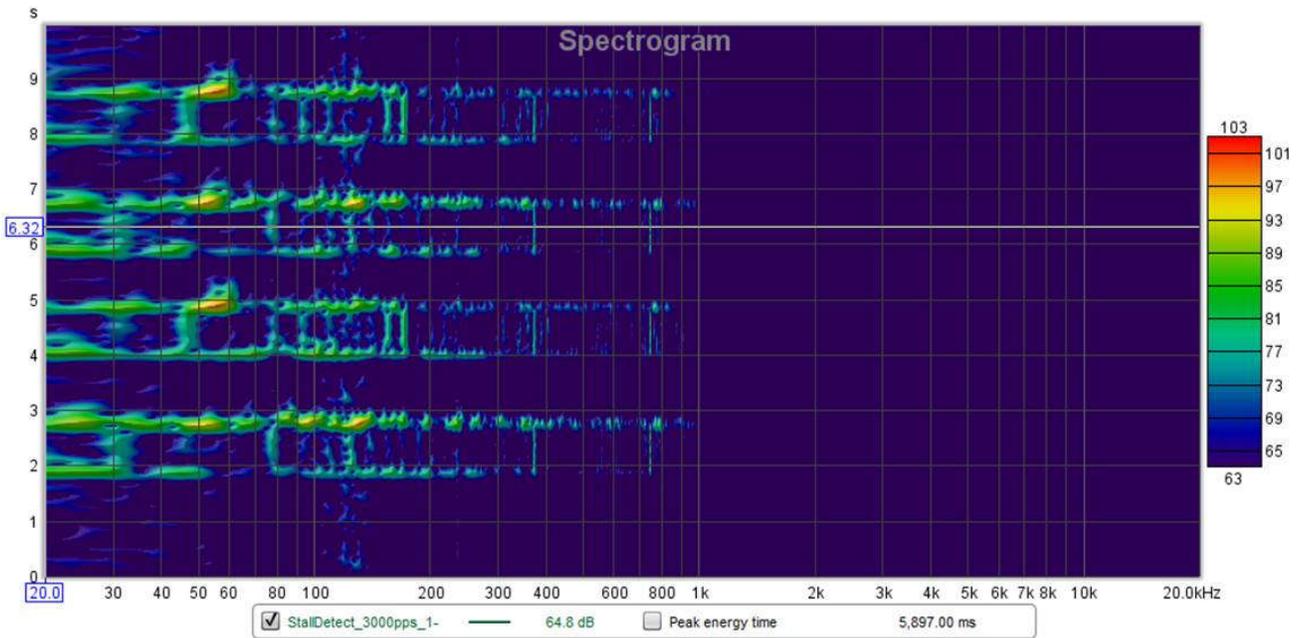


图 5-4. 有 DRV8889-Q1 失速检测功能的音频噪声频谱图

图 5-3 和 图 5-3 展示了两种情况的音频噪声频谱图：一种是前照灯模块运行时没有失速检测功能，另一种是该模块使用 DRV8889-Q1 器件在两端终点检测失速。图 5-3 清晰地展示了在约 55Hz 以及 100Hz 到 200Hz 之间产生较大音频噪声的证据。该频谱图还展示了步进电机到达行程终点时的颤振情况——这是为确保电机确实抵达终点而执行过驱动所产生的效应。相反，图 5-3 显示大体上没有音频噪声：在 100Hz 至 200Hz 之间尤其如此，并且也不存在抖动。

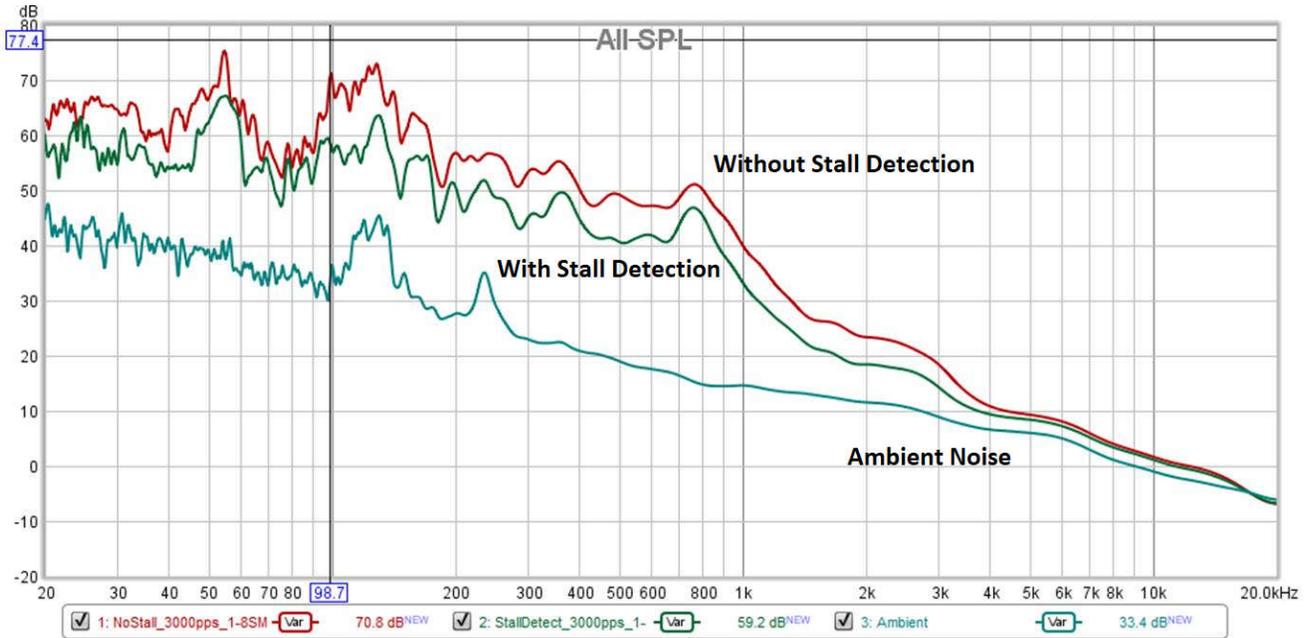


图 5-5. 具有和没有失速检测功能的音频噪声 SPL 图

图 5-3 显示有失速检测功能时可闻噪声的降低。显然，通过失速检测功能，某些频率下的噪声水平改善超过 10dB。

5.2 汽车抬头显示 (HUD)

汽车抬头显示 (HUD) 旨在通过将速度、导航数据、RPM、警报和增强现实覆盖层等重要行程信息投影到挡风玻璃内表面或称为“组合器”的透明塑料片来为驾驶员提供帮助。该系统需要多个透镜和反射镜将信息投射到挡风玻璃或组合器上，并且反射镜必须精确旋转以实现精确定位。因此，许多 HUD 单元使用步进电机，并且通常需要无传感器失速检测来确保反射镜到达其终点止动位置，而不会导致过多的音频噪声或机械磨损。

以下示例显示 DRV8889-Q1 器件如何检测汽车 HUD 模块的失速。该组合器 HUD 模块使用定制的双极步进电机，可上下移动反射镜。HUD 应用的运行条件和步进电机详细信息如表 5-2 所示。

表 5-2. HUD 模块的运行条件

参数	值
工作电压范围	8V 至 16V
满量程电流	180mA
目标转速	2550 PPS
微步进	1/32
温度范围	-40°C 至 +85°C
电机线圈电阻	20 Ω ±7%
步进角度	0.514°/步进

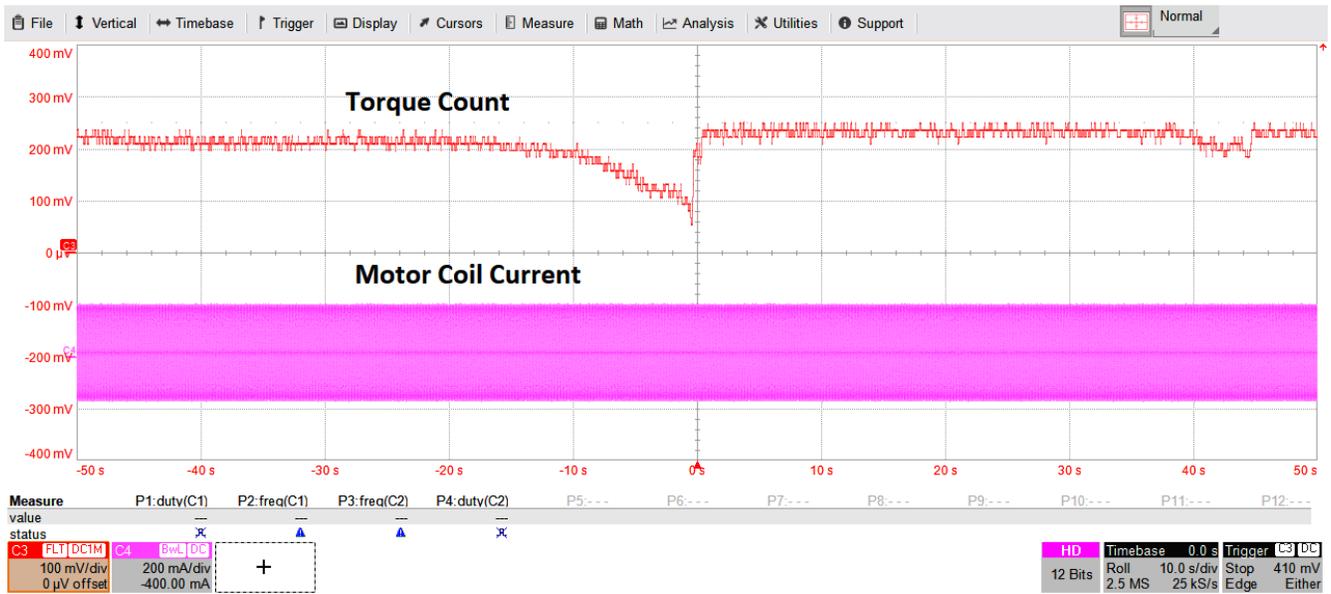


图 5-6. 失速检测

展示了电机失速期间扭矩计数如何下降。120mV 的失速阈值 (对应 TRQ_COUNT = 10) 可在该应用的全转角范围内可靠检测失速。

5.3 HVAC 阀门控制

HVAC 阀门控制执行器也需要失速检测。具有集成无传感器失速算法的步进电机驱动器可以精确检测 HVAC 系统中翼板或阀尖的终点止动，而无需过驱动步进电机。以下示例展示 DRV8889-Q1 如何检测 HVAC 阀门的失速。此 HVAC 应用的运行条件如 表 5-2 所示。

表 5-3. HVAC 阀门的运行条件

参数	值
工作电压范围	6V 至 16V
满量程电流	300mA
目标转速	300 步/秒
微步进	全步进
温度范围	-30°C 至 +100°C

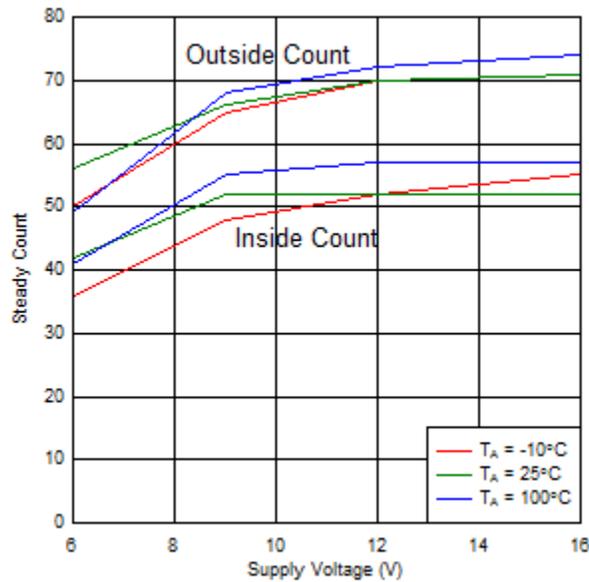


图 5-7. HVAC 阀门稳定计数

阀门电机在移动的两端终点都可能失速。图 5-7 展示了两个方向的稳定计数与电源电压之间的函数关系。失速阈值为 30，非常适合可靠地检测阀尖移动两端终点的失速情况。

6 总结

不同的制造商可提供多种无传感器失速检测方案。德州仪器 (TI) 步进电机驱动器中实施的全新失速检测方案能够在宽电源电压、速度和其他运行参数范围内可靠地检测各种应用的失速。该算法稳健性强且易用，使这些步进电机驱动器成为理想选择，可在各类终端应用中替代用于发送位置反馈的昂贵位置传感器。

7 参考资料

- Acarnley, Paul P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. 第 4 版, Institution of Engineering and Technology, 2007 年。
- [Methods and apparatus for robust and efficient stepper motor BEMF measurement](#), 作者 Sooping Saw、Rakesh Raja、Anuj Jain 和 Matthew Hein; 美国专利 US10063170B2
- [Stall detection in stepper motors using differential back-emf between rising and falling commutation phase of motor current](#), 作者 Sooping Saw、Rakesh Raja、Wen Pin Lin 和 Sudhir Nagaraj; 美国专利 US20190109551A1
- 德州仪器 (TI), [具有集成电流检测、1/256 微步进和失速检测功能的 DRV8889-Q1 汽车步进驱动器](#), 数据表
- 德州仪器 (TI), [具有集成电流检测、1/256 微步进、智能调优和失速检测功能并采用 GPIO 引脚的 DRV8434A 步进电机驱动器](#), 数据表
- 德州仪器 (TI), [具有集成电流检测、1/256 微步进、SPI 接口、智能调优技术和失速检测功能的 DRV8434S 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
- 德州仪器 (TI), [DRV8452: 可实现高效率和无噪声运行的 55V、5A 步进电机驱动器](#), 数据表
- 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

8 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2020) to Revision A (February 2026)	Page
• 更新了具有失速检测功能的 TI 器件.....	1

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月