

## Application Note

## 如何降低步进电机中的可闻噪声



Madison Eaker, Dipankar Mitra, Mojtaba Afshar

## 摘要

众所周知，步进电机在运行时会产生可闻噪音，这对许多应用来说是需要避免的。采用固定百分比混合衰减电流斩波和低微步进级别的传统步进电机驱动器是造成噪音的主要原因。但诸如智能调优技术、静音步进衰减模式和高微步进级别等功能有助于显著降低可闻噪音。本应用报告的目的是解释特定电机驱动器功能如何能够降低多种步进电机系统和应用的可闻噪音。

## 内容

1 简介.....	3
2 测试设置详细信息.....	4
3 步进电机中的噪声源.....	5
3.1 磁噪声.....	5
3.2 机械噪声.....	5
3.3 电气噪声.....	6
4 总结.....	15
5 参考资料.....	15
6 修订历史记录.....	16

## 插图清单

图 1-1. 微步进电流波形.....	3
图 1-2. 衰减模式.....	3
图 2-1. 可闻噪声测量设置.....	4
图 3-1. 分子偶极随施加的磁场而变化.....	5
图 3-2. 微步进电流与 STEP 输入 (慢速衰减).....	6
图 3-3. 微步进电流与 STEP 输入 (混合衰减).....	6
图 3-4. 在上升和下降步进中采用 30% 混合衰减.....	6
图 3-5. 在上升和下降步进中采用慢速衰减.....	6
图 3-6. 智能调优纹波控制衰减模式.....	7
图 3-7. 1/256 微步进条件下的混合衰减与智能调优纹波控制 (STRC).....	8
图 3-8. 电流纹波变化的影响.....	8
图 3-9. 静音步进方框图.....	9
图 3-10. 静音步进衰减模式下的线圈电流波形.....	9
图 3-11. 1/256 微步进条件下的静音步进 (SS) 衰减模式与智能调优纹波控制 (STRC) 衰减模式.....	10
图 3-12. PWM 处于 38% 水平, PWM 频率为 55kHz.....	11
图 3-13. PWM 处于 92% 水平 (上升), PWM 频率为 44kHz.....	11
图 3-14. PWM 处于 100% 水平, PWM 频率为 35kHz.....	11
图 3-15. PWM 处于 92% 水平 (下降), PWM 频率为 25kHz.....	11
图 3-16. 消隐时间较长导致的电流失真.....	12
图 3-17. 关断时间较长导致的电流失真.....	12
图 3-18. 1/16 微步进条件下的过零点平滑度.....	12
图 3-19. 1/64 微步进条件下的过零点平滑度.....	12
图 3-20. 1/4 微步进、混合衰减、步进频率 = 2000pps (每秒脉冲数) 时的 SPL 图.....	13
图 3-21. 不同微步进级别下的 SPL 图.....	13
图 3-22. 1/8 微步进、智能调优纹波控制模式下的电流波形.....	14
图 3-23. 1/256 微步进、智能调优纹波控制模式下的电流波形.....	14

## 表格清单

表 3-1. 采用智能调优纹波控制的步进电机驱动器.....	7
表 3-2. 采用静音步进衰减模式的步进电机驱动器.....	9

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

步进电机广泛用于打印机、投影仪、纺织机、舞台照明、工业自动化、电子销售终端、汽车前照灯和抬头显示等应用中。步进电机以离散步进方式运动，此方式由旋转过程中的步进角定义。一个步进电机具有两个电流绕组，每个绕组可通过 H 桥进行控制。如图 1-1 所示，步进电机驱动器将近似正弦波（蓝色）的电流波形施加到一个线圈中，将近似余弦波（红色）的电流波形施加到另一个线圈中。电流波形的一个象限 ( $90^\circ$ ) 对应步进电机旋转一个步进角，这在当今使用的大多数混合式步进电机中为  $1.8^\circ$ 。

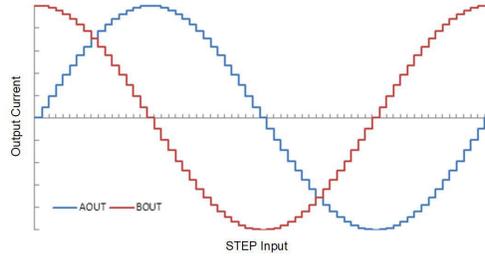


图 1-1. 微步进电流波形

大多数步进电机驱动器通过以某个频率（称为 PWM 频率）对驱动输出进行斩波来限制电流。在 PWM 电流斩波期间，将启用 H 桥以驱动电流流过电机绕组，直至达到 PWM 电流斩波阈值。图 1-2 的项目 1 展示了这种情况。

一旦达到斩波电流阈值后，H 桥可在两种不同的状态下运行：快速衰减或慢速衰减。在快速衰减模式下，一旦达到 PWM 斩波电流电平，H 桥便会进行状态逆转，使绕组电流反向流动。此时对侧的 FET 开启；当绕组电流接近零时，禁用该电桥，以防止出现反向流动的电流。图 1-2 的项目 2 展示了快速衰减模式。在慢速衰减模式下，通过启用该电桥的两个低侧 FET 来实现绕组电流的再循环。图 1-2 的项目 3 展示了这种情况。大多数的传统步进电机驱动器都采用固定百分比混合衰减方案，其中衰减模式在固定百分比的关断时间内为快速衰减，在剩余关断时间内为慢速衰减。

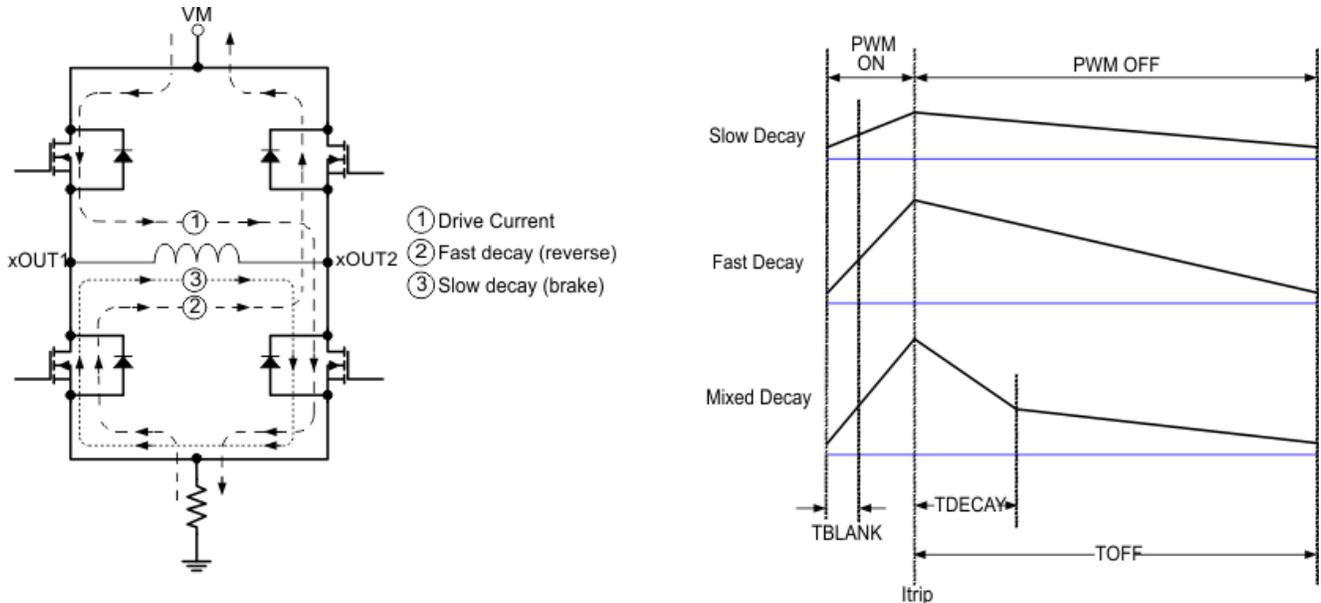


图 1-2. 衰减模式

在传统的慢速、快速和混合衰减模式下，步进电机在运行时可能会发出嗡嗡声和呜呜声。在大多数应用中，可闻噪声可能会干扰用户，并且可能需要采用昂贵的噪声抑制方法，例如橡胶隔离器，但这些方法却无法完全消除噪声。例如，家用或办公打印机以及 3D 打印机都有多个步进电机，并且电机发出的噪声可能会导致用户分心。步进电机驱动器如果质量更高，能够降低电机噪声，则将大大提高用户的满意度。另一个示例是电动汽车。它们由于不使用内燃机而通常较为安静，而降低前照灯调平系统中所用步进电机的噪声水平有助于在车内实现整体安静。

在以下各节中，本文档将讨论步进电机中的各种噪声源，以及不同的步进电机驱动器功能如何降低大部分噪声。

## 2 测试设置详细信息

在本应用报告中，我们进行了多次测量，以演示步进电机驱动器中不同设置在降低电机噪声方面的有效性。采用声压级 (SPL) 作为测量方法。SPL 测量声波引起的局部压力与环境压力的偏差。SPL 通过图形表示为以分贝 (dB) 为单位的声压与频率之间的关系。为了获取本应用报告中所示的 SPL 图，在消音室内放置了一个麦克风和一台由 DRV8424 和 DR8462 驱动器驱动的步进电机，并录制了步进电机在不同工作条件下产生的可闻噪声，以绘制 SPL 图。图 2-1 所示为消音室内麦克风的图片。详细设置如下：

- 电机牢固安装在橡胶上，以最大程度减少额外振动。
- 步进电机的额定电流为 2.3A，并具有 1.8° 的步进角、1.9mH 的电感和 0.93 Ω 的电阻。
- 使用校准后的 USB 麦克风录制噪声。
- 首先，录制几秒钟（大约五秒钟）的环境噪声作为参考。
- 然后，在电机转动时录制几秒钟（大约 5-10 秒钟）的音频。
- 将音频录制文件导入软件，以绘制 SPL 图。



图 2-1. 可闻噪声测量设置

### 3 步进电机中的噪声源

步进电机产生的可闻噪声量取决于电机类型和工作条件。步进电机噪声被描述为高频呜呜声、嘶嘶声甚至是轮胎放气声。人类可闻频率范围通常为 20Hz 至 20kHz，但人耳对 2kHz 至 15kHz 之间的频率最为敏感。永磁和混合式步进电机通常噪声更低，而可变磁阻步进电机的噪声最大。

步进电机的噪声源可分为三大类：磁噪声、机械噪声和电气噪声。

#### 3.1 磁噪声

铁磁性材料具有磁致伸缩的特性，即该材料会在磁场作用下伸长或缩短。分子偶极和磁场边界在磁场的作用下发生偏移，导致材料长度在所施加磁场方向上略有变化，如图 3-1 所示。在步进电机中，磁致伸缩会导致铁磁体发生形变，并使转子和定子齿在空气间隙中相互吸引，从而产生可闻噪声。

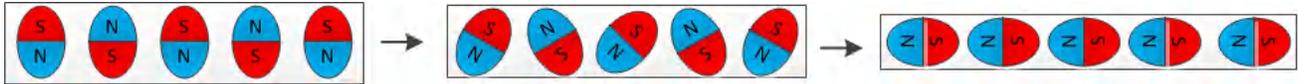


图 3-1. 分子偶极随施加的磁场而变化

对于步进电机，磁致伸缩的可闻声音表现为强烈的低频嗡嗡声。在低速运行的步进电机上，磁致伸缩产生的影响最为严重。因此，磁致伸缩在激光打印机和复印机所用电机中产生的噪声影响最为严重，原因就在于这些电机运行速度通常较低。

磁致伸缩产生的噪声无法完全消除，但众所周知，某些类型的金属比其他金属更容易发生磁致伸缩。一些特殊材料可在磁致伸缩和磁芯损耗之间取得平衡，以在给定应用中实现最佳性能。

#### 3.2 机械噪声

机械噪声由步进电机结构中的物理元件导致。导致噪声的常见原因包括安装结构不牢固、轴弯曲以及轴承松动或缺失。所有这些原因都会导致不必要的振动和谐振频率。其他机械噪声因素包括电机外壳、转子平衡和轴承选择。

电机外壳结构对高速电机应用有极大影响。如果转子不平衡，则会出现与电机转速直接相关的频率尖峰。电机使用多种类型的轴承：滑动套筒轴承或滚动轴承。套筒轴承通常被视为静音轴承。正确润滑的套筒轴承仅会因轴承和轴的表面光洁度而产生非常高的噪声频率。滚动轴承通常噪声较大，并且许多因素都可能导致产生噪声。

通过强化安装结构并选择降噪材料（例如将电机安装在橡胶等消音材料中、平衡转子以及使用正确维护的轴承），可以最大限度地降低大多数机械噪声。

### 3.3 电气噪声

步进电机存在各种可产生可闻噪声的电气源，后续各节将对此进行详细介绍。与磁噪声和机械噪声不同，电气噪声可以通过正确选择步进电机驱动器来降低。

#### 3.3.1 电流纹波和衰减模式的影响

德州仪器 (TI) 步进电机驱动器中的电流调节功能可以在多种衰减模式之间配置，具体取决于驱动器特性。衰减模式可以选择为慢速衰减、混合衰减、智能调优衰减和静音步进衰减等模式。当对绕组施加正弦电流波形时，步进电机将以最平稳、最安静的状态运行。电流波形中的任何纹波都是与所需形状的偏差，可导致电机扭矩不均匀，在运行期间则表现为振动和噪声。为了减少纹波并降低因此产生的可闻噪声，建议尽可能让步进电机采用慢速衰减模式运行，而非采用快速或混合衰减模式。

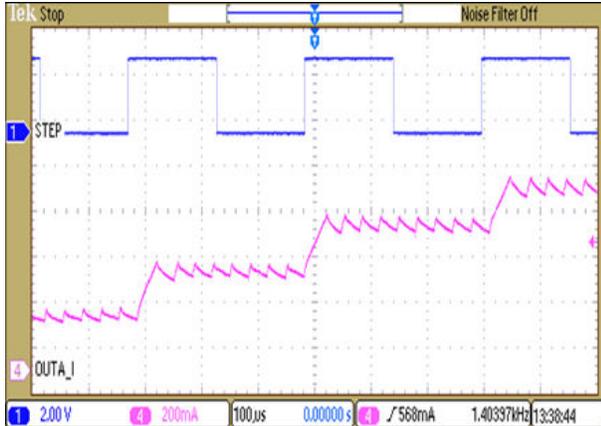


图 3-2. 微步进电流与 STEP 输入 (慢速衰减)

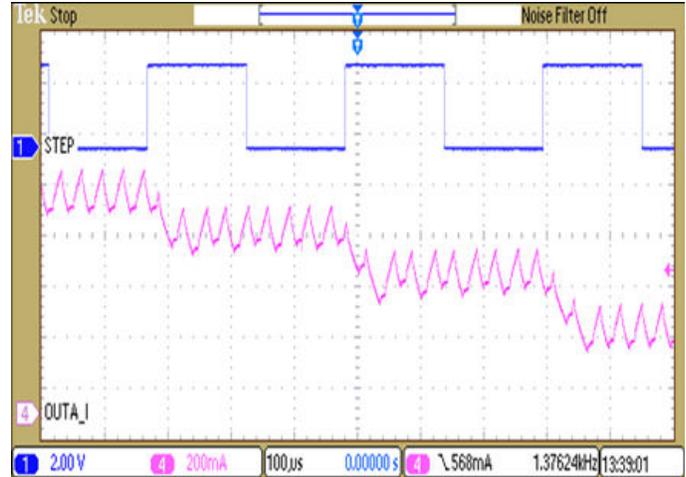


图 3-3. 微步进电流与 STEP 输入 (混合衰减)

图 3-2 和图 3-3 分别显示了工作条件相同时慢速衰减模式和固定百分比混合衰减模式中的电流纹波。在慢速衰减模式中，电流纹波大致为 50mA。但是，当衰减模式更改为 30% 快速衰减的传统混合衰减模式时，电流纹波接近 200mA。

然而，如图 3-4 (混合衰减) 和图 3-5 (慢速衰减) 所示，与慢速衰减相比，由于反电动势的存在，混合衰减模式在跟随理想正弦电流波形方面的表现更佳，尤其是在高速和下降步进中。因此，在所有条件下都可以跟随理想波形的慢速衰减模式是降低步进电机可闻噪声的理想选择。

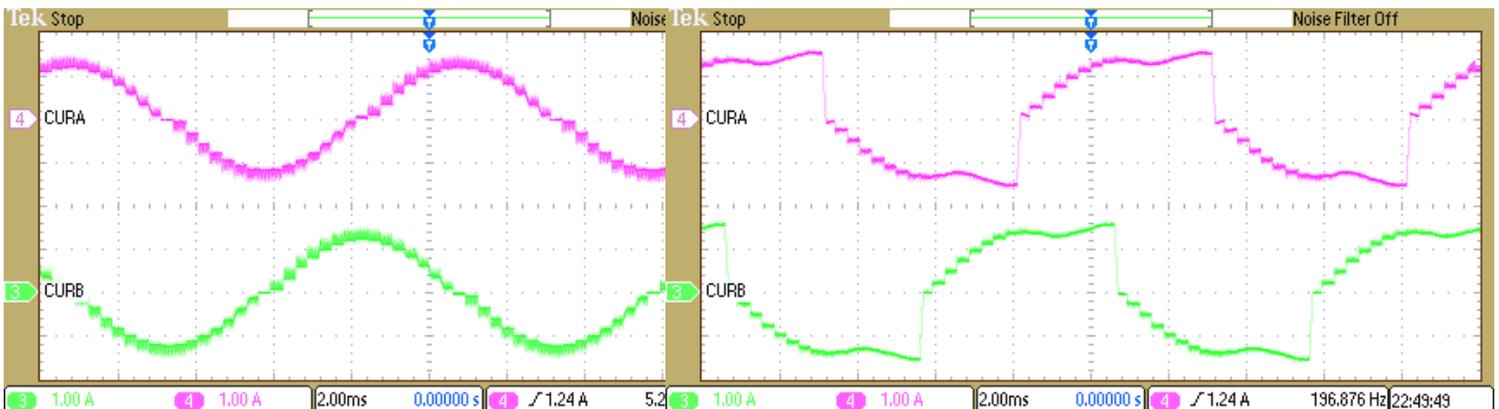


图 3-4. 在上升和下降步进中采用 30% 混合衰减

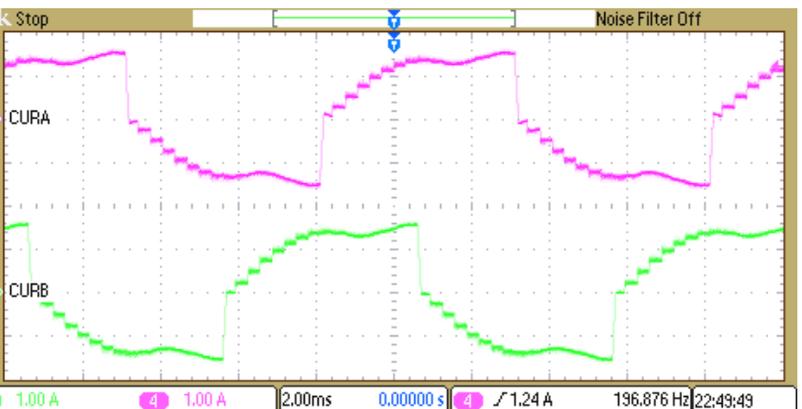


图 3-5. 在上升和下降步进中采用慢速衰减

德州仪器 (TI) 多款步进电机驱动器中采用的智能调优纹波控制 (STRC) 模式就是此类慢速衰减方案之一。如图 3-6 所示, 智能调优纹波控制通过设置  $I_{VALLEY}$  电平及  $I_{TRIP}$  电平来进行操作。当电流电平达到  $I_{TRIP}$  时, 驱动器不是进入慢速衰减直到  $t_{OFF}$  时间结束, 而是进入慢速衰减直到达到  $I_{VALLEY}$ 。

因此, 与传统的混合衰减方案相比, 该模式可以更严格地调节纹波电流。在此模式下,  $t_{OFF}$  根据电流电平和运行条件而变化。在步进下降时, 智能调优纹波控制会自动切换到快速衰减, 以快速进入下一个步进, 从而能够在所有速度下都跟随理想的正弦电流波形。

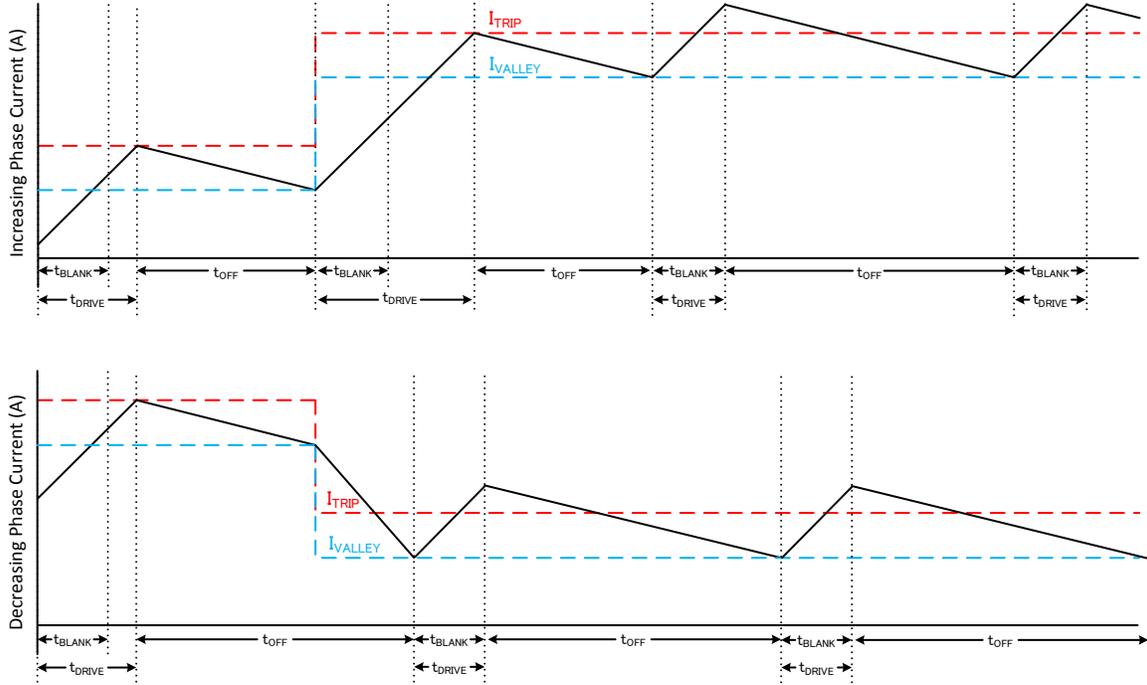


图 3-6. 智能调优纹波控制衰减模式

表 3-1 中列出了采用智能调优纹波控制衰减模式的各种步进电机驱动器。

表 3-1. 采用智能调优纹波控制的步进电机驱动器

器件	满量程电流	工作电源电压范围	$R_{DS(ON)}$ (HS + LS)	微步进
DRV8428	1A	4.2-33V	1500m $\Omega$	1/256
DRV8899-Q1	1A	4.5-45V	1200m $\Omega$	1/256
DRV8849	1.5A	4.5-40V	900m $\Omega$	1/256
DRV8426	1.5A	4.5-33V	900m $\Omega$	1/256
DRV8436	1.5A	4.5-48V	900m $\Omega$	1/256
DRV8889-Q1	1.5A	4.5-45V	900m $\Omega$	1/256
DRV8425	2A	4.5-33V	550m $\Omega$	1/256
DRV8434A-Q1	2.5A	4.5-48V	330m $\Omega$	1/256
DRV8434S/A	2.5A	4.5-48V	330m $\Omega$	1/256
DRV8424	2.5A	4.5-33V	330m $\Omega$	1/256
DRV8461	3A	4.5-70V	300m $\Omega$	1/256
DRV8452	5A	4.5-60V	100m $\Omega$	1/256
DRV8462	10A	4.5-65V	100m $\Omega$	1/256

由于能够严格地控制纹波电流，因此智能调优纹波控制比混合衰减方案提供更好的音频性能。图 3-7 中比较了 1/256 微步进条件下 DRV8424 采用智能调优纹波控制和混合衰减时的 SPL 图。由此可见，智能调优纹波控制（绿色）在 4kHz 以上时的噪声比混合衰减（紫色）低出高达 10dB。智能调优纹波控制仅会产生几乎不可闻的嘶嘶声，而电机在以混合衰减模式运行时会产生呜呜声。众所周知，分贝水平每降低 3dB，声能就会减半；分贝水平每降低 10dB，声能就会降低 10 倍。因此，在特定频率下，智能调优纹波控制产生的声能仅为混合衰减模式的 10%。

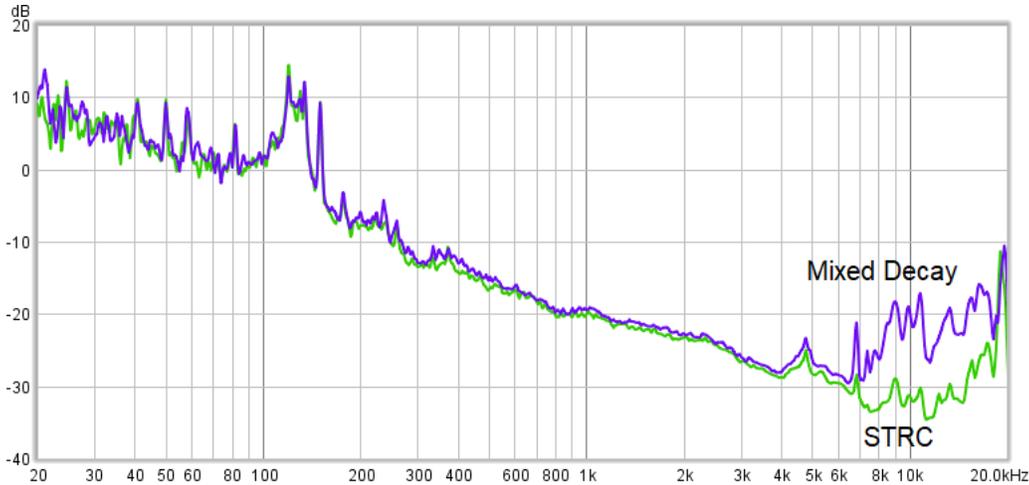


图 3-7. 1/256 微步进条件下的混合衰减与智能调优纹波控制 (STRC)

纹波电流降低时的影响将通过图 3-8 进一步说明。对于 DRV8424、DRV8425 和 DRV8426 器件，可通过 TOFF 引脚来调节智能调优纹波控制模式下的纹波电流电平。图 3-8 中的 SPL 图比较了不同纹波电流设置下的可闻噪声。由于比较器偏移等原因，1% 和 2% 纹波电流设置产生大致相同的纹波电流，约等于正弦波峰处的 50mA。根据该图，1%（绿色）和 2%（蓝色）纹波设置表现出最优的音频性能，6%（橙色）纹波在整个频谱范围内的音频性能最差。

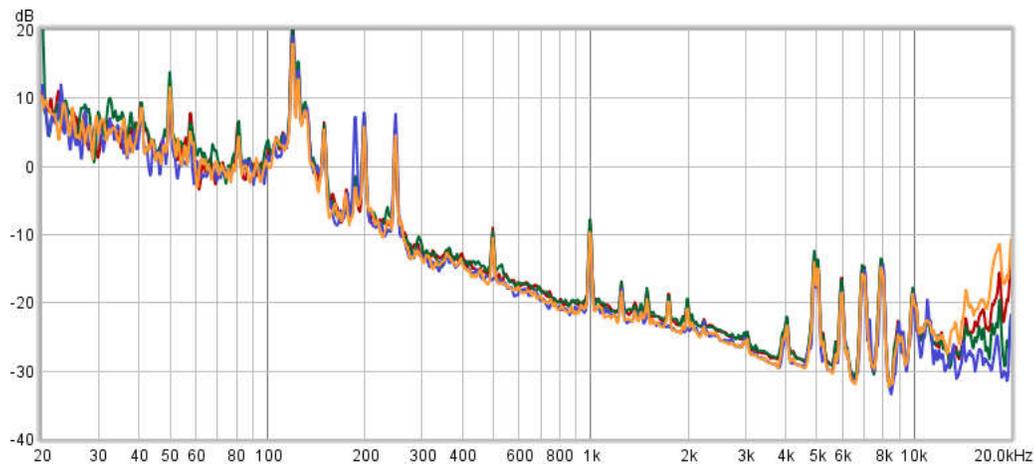


图 3-8. 电流纹波变化的影响

除了智能调优衰减模式外，DRV8461、DRV8462 和 DRV8452 还具有静音步进衰减模式，可在静止和低转速时实现超低噪声运行。传统的峰值电流模式控制通过检测 MOSFET 中的瞬时电流来确定驱动和衰减持续时间。因此，电机驱动器会对系统中的瞬时误差做出反应。这些突然的电流变化会导致电机发出可闻噪声。静音步进是一种电压模式 PWM 调节方案，用于消除因 PWM 在静止和低速时切换而产生的噪声，以确保步进电机无噪声运行。因此，采用静音步进模式的步进电机应用非常适合 3D 打印机、医疗设备和工厂自动化等低噪声运行至关重要的应用。图 3-8 展示了静音步进衰减模式实施的方框图。

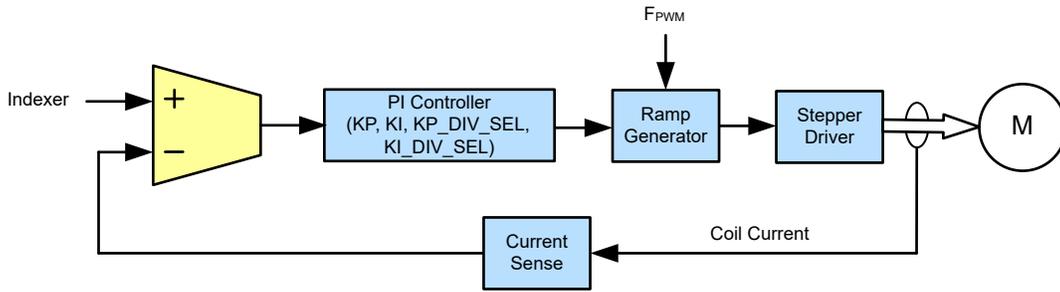


图 3-9. 静音步进方框图

图 3-8 展示了电机在静音步进衰减模式下运行时的平滑正弦线圈电流波形。

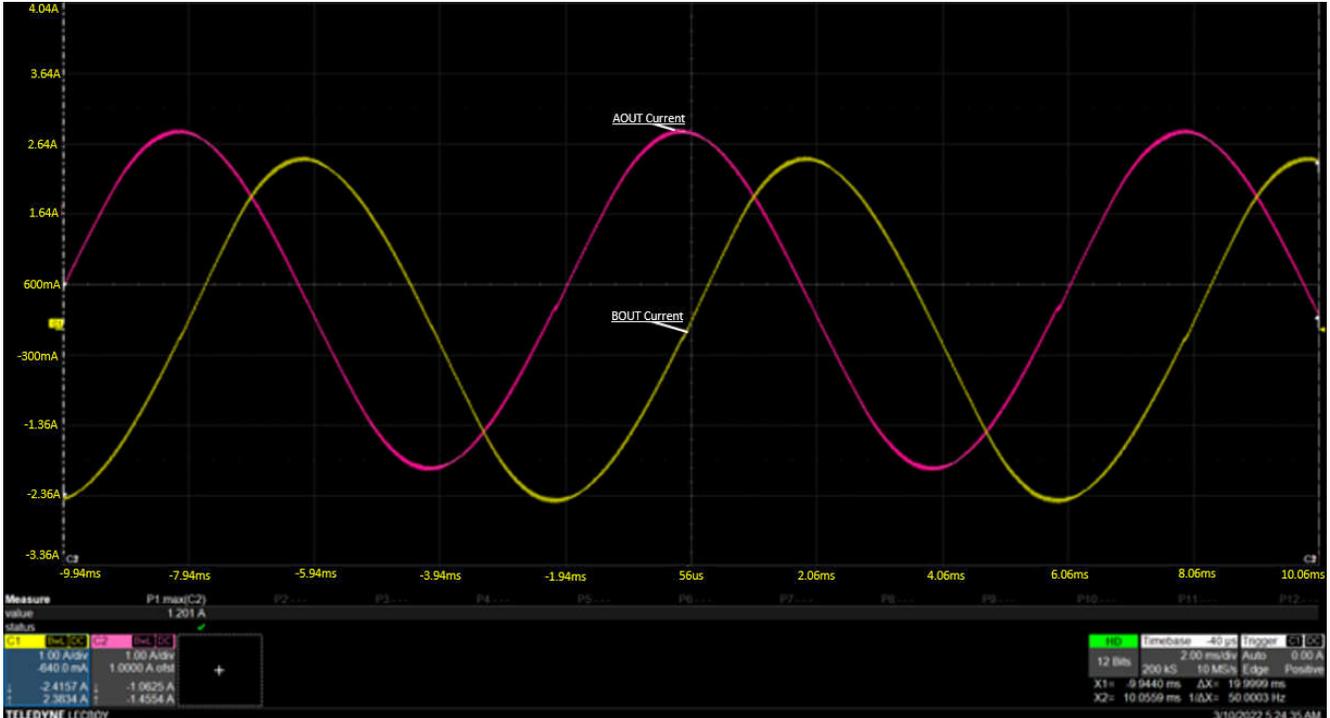


图 3-10. 静音步进衰减模式下的线圈电流波形

表 3-1 中列出了采用静音步进衰减模式的各种步进电机驱动器。

表 3-2. 采用静音步进衰减模式的步进电机驱动器

DRV8461	3A	4.5-70V	300mΩ	1/256
DRV8452	5A	4.5-60V	100mΩ	1/256
DRV8462	10A	4.5-65V	100mΩ	1/256

图 3-11 比较了 1/256 微步进条件下 DRV8462 采用静音步进衰减模式 (绿色) 和智能调优纹波控制衰减模式 (蓝色) 时的 SPL 图。由此可见, 与智能调优纹波控制衰减模式 (STRC) 相比, 静音步进衰减模式在 10kHz 至 20kHz 范围内可将可闻噪声显著降低 10dB 至 20dB。噪声每降低 10dB, 声能就降低 10 倍; 因此, 在某些频率上, 静音步进衰减模式所产生的声能仅为智能调优纹波控制衰减模式的 5%。



图 3-11. 1/256 微步进条件下的静音步进 (SS) 衰减模式与智能调优纹波控制 (STRC) 衰减模式

### 3.3.2 PWM 斩波器频率的影响

如果 PWM 频率在可闻频段内，步进电机就会发出呜呜声。即使电机停止并保持位置，也能听到与 PWM 频率相关的噪声。如果斩波频率是超声波，则可以听到嘶嘶声。

传统的步进电机驱动器通常具有一个引脚，使用两个电阻-电容无源元件来控制 PWM 的关断时间。设计常见关断时间为 50μs。当导通时间与关断时间相加时，产生的 PWM 频率会低于 20kHz，从而产生可闻噪声。因此，可以得出结论：可以通过提高 PWM 频率来降低噪声。但 PWM 频率过高也会导致开关损耗增加，因此将频率提高到远超可闻范围可能并非理想之举。合适的 PWM 频率值范围为 30kHz 到 50kHz。

方程式 1 显示了智能调优纹波控制衰减模式下 PWM 频率与电流纹波之间的近似关系。V<sub>M</sub> 表示电源电压，V<sub>BEMF</sub> 表示反电动势电压，L 表示电机线圈的电感，ΔI 表示纹波电流。显而易见，当纹波电流较低时，PWM 频率将很高。

$$f_{\text{PWM}} = \frac{V_{\text{BEMF}} \times (V_{\text{M}} - V_{\text{BEMF}})}{V_{\text{M}} \times L \times \Delta I} \quad (1)$$

图 3-12 至图 3-15 展示了 DRV8424 在智能调优纹波控制和 1/4 微步进时不同电流电平下的 PWM 频率。PWM 频率范围为 25kHz 到 55kHz，远远超出了可闻范围。通常，最低电流纹波会导致 PWM 频率超过 20kHz，因此不会影响步进电机的可闻噪声水平。

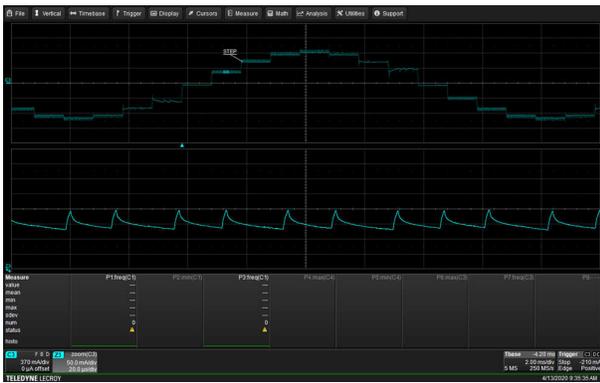


图 3-12. PWM 处于 38% 水平，PWM 频率为 55kHz

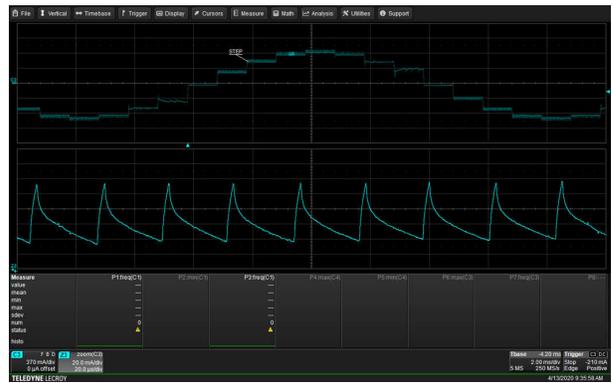


图 3-13. PWM 处于 92% 水平 (上升)，PWM 频率为 44kHz

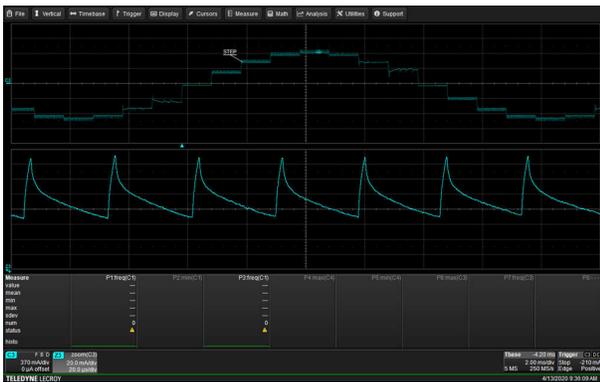


图 3-14. PWM 处于 100% 水平，PWM 频率为 35kHz

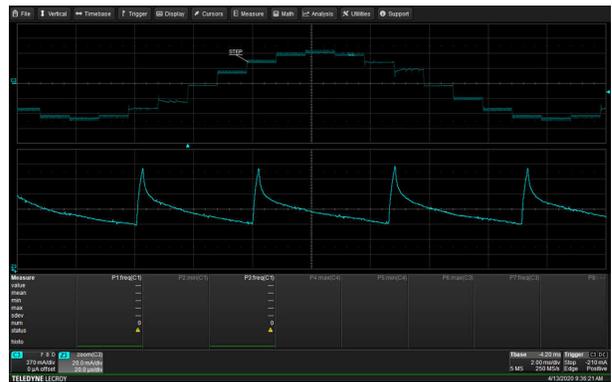


图 3-15. PWM 处于 92% 水平 (下降)，PWM 频率为 25kHz

### 3.3.3 电流过零误差的影响

导致可闻噪声的另一个潜在原因可能是电流过零点附近的平滑度。当电流相位发生改变时，大多数的传统步进电机驱动器会在电流过零点附近使电流波形失真，如图 3-16 所示。这种失真背后的原因是电流检测消隐时间较长，例如达到至少  $2\mu\text{s}$ ，这会导致步进的平均电流明显高于预期值。过零点附近失真的另一个原因是关断时间过长，这会导致平均电流明显低于预期值，如图 3-17 所示。此类失真的影响是产生不平滑的电流波形，从而导致摆动、振动和可闻噪声。

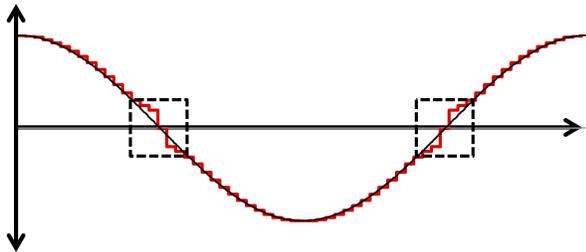


图 3-16. 消隐时间较长导致的电流失真

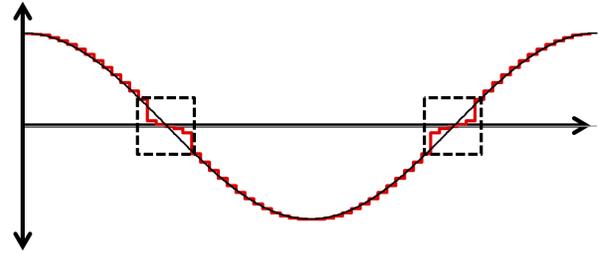


图 3-17. 关断时间较长导致的电流失真

表 3-1 中列出的驱动器消隐时间仅为  $1\mu\text{s}$ ，因此线圈电流过零区域附近没有失真。这可以减少电流和扭矩纹波，并接近真正的正弦波形，从而使电机运行更加平稳。图 3-18 和图 3-19 分别显示了 DRV8424 在 1/16 和 1/64 微步进条件下的电流过零情况，显示了过零点附近的平滑度。

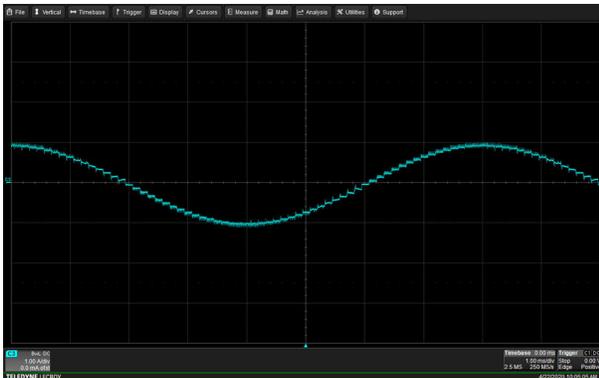


图 3-18. 1/16 微步进条件下的过零点平滑度

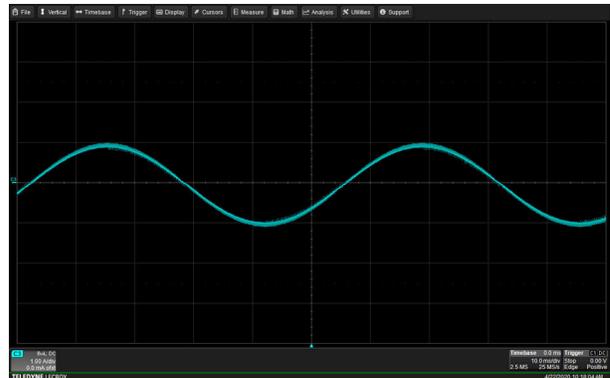


图 3-19. 1/64 微步进条件下的过零点平滑度

### 3.3.4 步进分辨率和步进频率的影响

低分辨率步进模式（如全步进或半步进）会产生大量振动，这些振动会传播到步进电机的整个结构中，尤其是在低速运行时。当驱动器发出新步进命令时，与脉冲响应类似，转子会过冲并在下一个位置附近发生振荡，从而产生机械振动和噪声。

为了减少这些振荡，现代步进电机驱动器采用微步进技术，将一个全步进分成多个较小的微步进。这会将转子置于两个连续全步进之间的中间位置。因此，转子现在以更小的角度或更短的距离完成步进。切换至新位置时，过冲和下冲会显著降低。

步进频率在步进电机的 SPL 图中表现为一个较大的尖峰。此外，步进频率的谐波在整个频谱范围内持续出现。如果步进频率介于  $20\text{Hz}$  和  $20\text{kHz}$  之间，则步进频率和所有高次谐波都会出现在可闻范围内，如图 3-20 所示（在  $2\text{kHz}$  步进频率和 1/4 微步进的混合衰减模式下）。

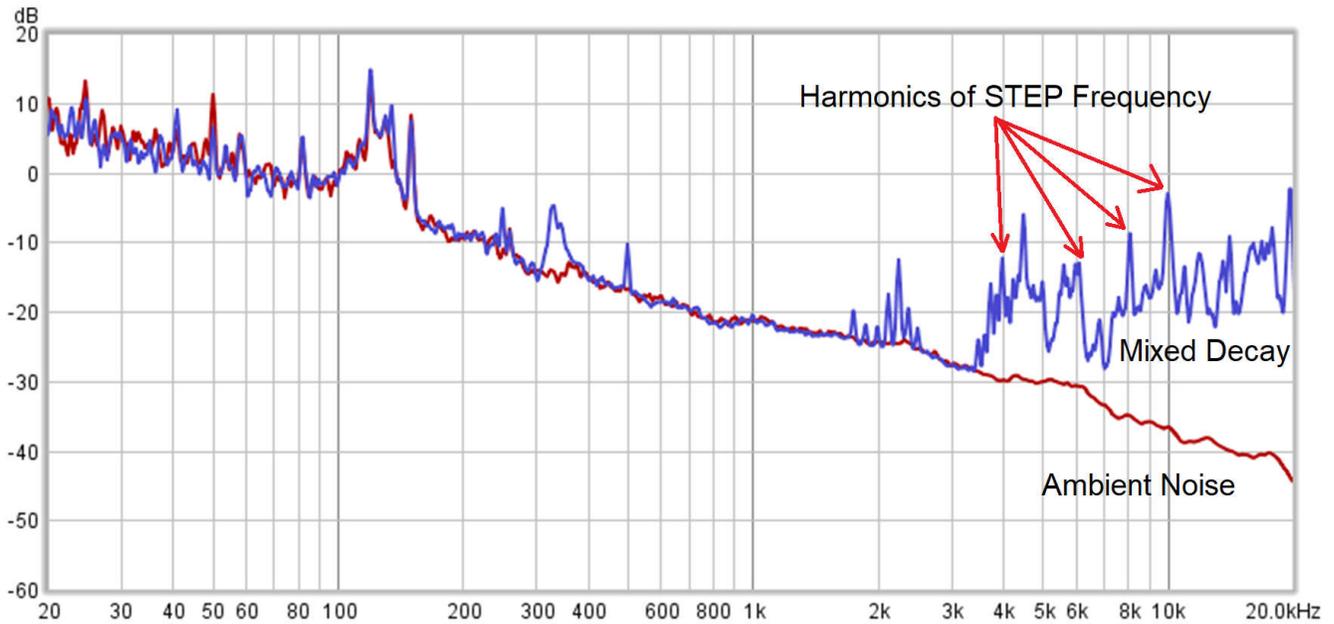


图 3-20. 1/4 微步进、混合衰减、步进频率 = 2000pps (每秒脉冲数) 时的 SPL 图

降低可闻噪声的一个技巧是同时增加微步进级别和步进频率，而保持电机转速不变。通过选择将步进频率置于可闻频段之外的微步进级别，可以实现安静的电机运行。表 3-1 中列出的大多数驱动器都允许将微步进级别增加到 1/256，这比传统步进电机驱动器高得多。

图 3-21 中比较了 1/8 (蓝色)、1/64 (橙色) 和 1/256 (绿色) 微步进的 SPL 图。步进频率分别为 600pps、4800pps 和 19200pps。1/256 微步进 (绿色) 具有最佳音频性能，1/8 微步进 (蓝色) 的音频性能最差。在采用 1/8 步进时，会听到清晰的呜呜声。当微步进增加到 1/64 时，声音会变得柔和，但仍然可以听到。当微步进增加到 1/256 时，声音消失，只剩下白噪声。通过将微步进频率提高至超出可闻范围，可降低音频噪声，同时可实现整体更平滑的旋转。

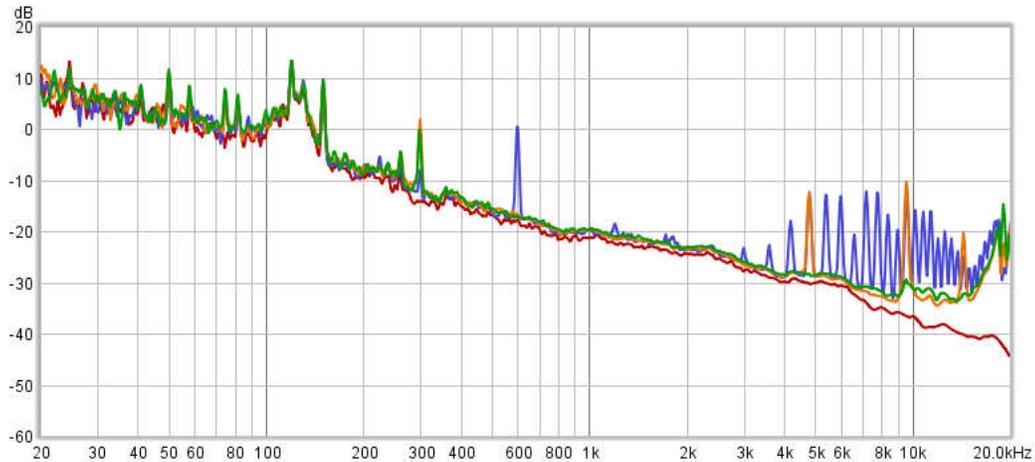


图 3-21. 不同微步进级别下的 SPL 图

图 3-22 所示为 1/8 微步进时的电流波形，图 3-23 所示为 1/256 微步进时的电流波形。它们展示了电流波形如何随着微步进级别的增加而变得更加理想。

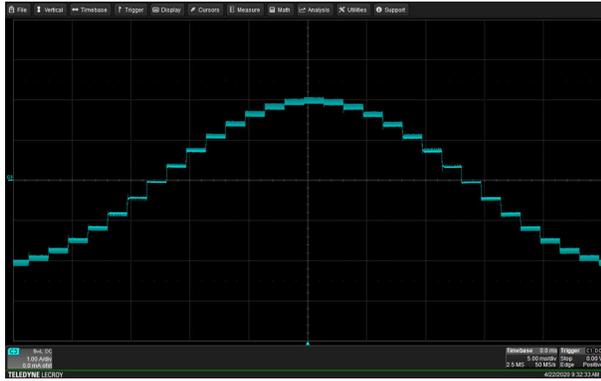


图 3-22. 1/8 微步进、智能调优纹波控制模式下的电流波形

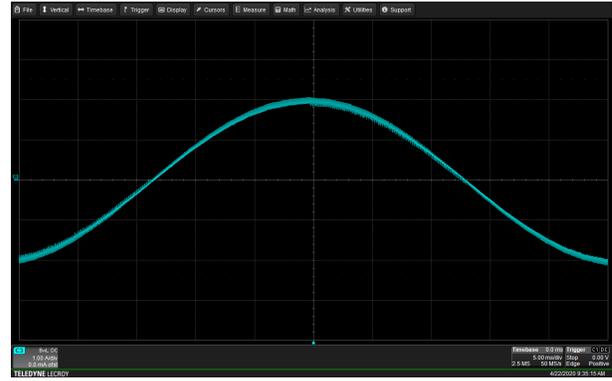


图 3-23. 1/256 微步进、智能调优纹波控制模式下的电流波形

步进电机应用中使用的典型微控制器可轻松支持 20,000pps 的步进频率。然而，高步进频率也意味着驱动器需要更多的微控制器资源来驱动电机。因此，没有必要在每项应用中都将微步进级别增加到 1/256。微步进级别只需差不多使步进频率高于 15kHz，即可在大多数实际应用中实现足够安静的运行。如果应用需要在宽速度范围内工作，则根据速度改变微步进级别有助于在整个范围内实现无噪声运行。

但需要注意的是：虽然更高的微步进级别可以提高分辨率和降低可闻噪声，但这并不会提高精度。这是因为微步进大幅限制了电机的增量扭矩，这意味着微步进扭矩可能不足以使轴发生实际转动，而在高扭矩情况下，电机最终可能会跳过部分微步进。

### 3.3.5 谐振频率的影响

每个步进电机都具有谐振频率。因此，步进电机在执行一次步进后不会立即停止，而是继续略微前后移动。电机振荡的时间量称为稳定时间。振荡速率与谐振频率相匹配。结果是电机产生振动、抖动和噪声。如果系统阻尼较低，谐振可能会压制定子和转子之间的磁场，导致丢步和可闻噪声。

同样，因为通过提高微步进级别可以使步进频率高于谐振频率，所以微步进提供了一种简单而安全的方法来消除谐振。减振器还用于降低谐振和可闻噪声。它通过吸收冲击来减少脉冲，并耗散谐振中的动能。这样可以消除噪声、增强系统瞬态响应并缩短稳定时间。

## 4 总结

步进电机产生的噪声是一个大问题，也是设计人员需要克服的一个挑战。但是，选择合适的电机驱动器后，通过使用多种不同的功能，可以显著降低电气可闻噪声。除了提高步进频率外，德州仪器 (TI) 的电机驱动器还提供采用智能调优技术的自动衰减模式控制、高达 1/256 的微步进以及可编程的纹波电流幅度目标，以确保在可闻范围之外的频率下平稳运动。其降噪效果令人惊叹，降幅可高达 10dB。有关 TI 步进电机产品的更多信息，请访问 [ti.com.cn](http://ti.com.cn)。

## 5 参考资料

- James R. Hendershot, Jr. *Causes and Sources of Audible Noise in Electric Motors*
- [Online Article on Magnetostriction](#)
- Gibbs, M. R. J. *Modern Trends in Magnetostriction Study and Application* Springer Science+Business Media, B.V. 2000. Print.
- 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 汽车级步进电机驱动器](#) 数据表。

## 6 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (January 2020) to Revision A (February 2026)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 更新了“ <a href="#">电流纹波和衰减模式的影响</a> ”中的静音步进衰减模式结果.....	6

## 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