

摘要

本文档介绍了电机驱动器中的电流再循环技术、其重要性，以及如何使用 TI 的集成电机驱动器衰减模式电路来部署这些技术。

内容

1 引言.....	2
1.1 异步衰减.....	2
1.2 同步衰减.....	3
2 电流再循环.....	4
2.1 快速衰减.....	4
2.2 慢速衰减.....	5
2.3 混合衰减.....	5
2.4 智能调优.....	6
3 参考文献.....	9
4 修订历史记录.....	9

插图清单

图 1-1. H 桥.....	2
图 1-2. 续流二极管.....	2
图 2-1. 快速衰减模式.....	4
图 2-2. 施加于电感负载的电压.....	4
图 2-3. 慢速衰减模式.....	5
图 2-4. 电流衰减.....	5
图 2-5. 混合衰减模式.....	6
图 2-6. 智能调优纹波动态衰减模式.....	7
图 2-7. 智能调优纹波控制模式.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

H 桥允许通过电感负载（如电机）控制两个方向上的电流。图 1-1 展示了如何通过选择要启用的 FET，使电流向一个方向或另一方向流动。

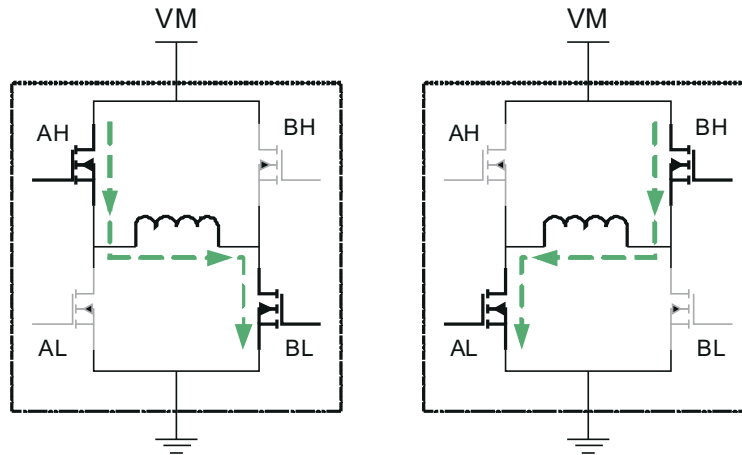


图 1-1. H 桥

由于电感负载的物理性质，当电流向一个方向流动时，必须保持该方向。当已禁用 H 桥或施加了相反电压极性时（例如切换了 **Direction** 命令时），也是如此。

如果没有为此电流提供安全的流动路径，则在电流衰减至零或切换为新方向电流时，会导致 H 桥电源开关受损。

此电流衰减的正确路径通常作为与 FET 开关并联的续流二极管提供，它将在 FET 开关禁用的同时立即开始传导。处理此电流的更高效方式是，按照承载衰减电流的顺序启用/禁用 FET 开关，但前提是在不导致击穿的情况下。

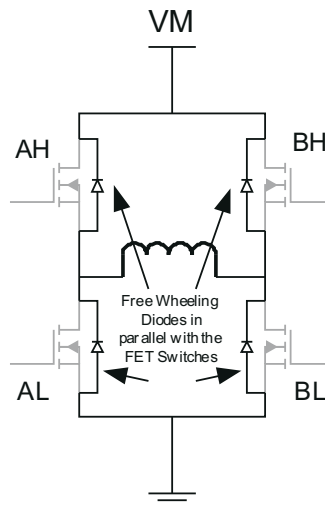


图 1-2. 续流二极管

这些在电流衰减之前控制电流的方法被称为电流再循环方法。在本应用手册中，我们将详细说明每种类型的电流再循环和衰减模式。

1.1 异步衰减

当二极管用于接受衰减电流时，这被称为异步衰减。它与打开和关闭 FET 开关的控制器异步。二极管开始传导的时间未知，但强烈建议尽可能缩短此开通时间，以避免对 FET 开关造成的可能损害。肖特基二极管通常用于该目的。

1.2 同步衰减

虽然 FET 开关通常具有关联的体二极管，但将 FET 导通电阻用作电流衰减的安全路径通常更加高效。当控制器协调 FET 开关的打开和关闭以作为在衰减期间提供电流安全路径的方式时，这被称为同步衰减。FET 上线承载电流的时间已知并且固定。

NOTE

无法通过开/关相反 FET 来即时提供衰减电流的安全路径，因为这会导致击穿。因此，采用同步衰减机制的每个控制器都会在极短时间内，通过 FET 开关的体二极管采用异步衰减形式。

2 电流再循环

在后续定义中，“快”和“慢”通常与电流衰减降至零的速度相关。这并不是指电感负载上任何形式的驱动速度。

2.1 快速衰减

在快速衰减再循环模式期间，电流被认为会尽快衰减至零。这通过以下方法达到：禁用激励 FET 开关、然后启用相反 FET 开关（同步衰减），或者让电流通过续流二极管（异步衰减）。

因为电压的幅度更大，电流将以最快速度衰减，但相反的极性将施加到电感负载上。

在异步衰减时，达到快速衰减模式的适当技术是，在采取机制以避免击穿之前进行断路。如果在禁用激励 FET 开关的同时立即启用了相反 FET，所有四个 FET 开关将在短时间内传导。这对器件来说是极为有害的。

其解决方案是，添加一个令所有 FET 开关均处于关闭状态的时间段（被称为死区时间）。在此期间，允许激励 FET 开关切换到关闭状态，存在电感负载的电流由体二极管或外部肖特基二极管承载。

采用异步衰减的 H 桥将使二极管在电流衰减时导电。

采用同步衰减的 H 桥将启用相反 FET 开关，直至电流衰减降至零或经过一段固定时间。

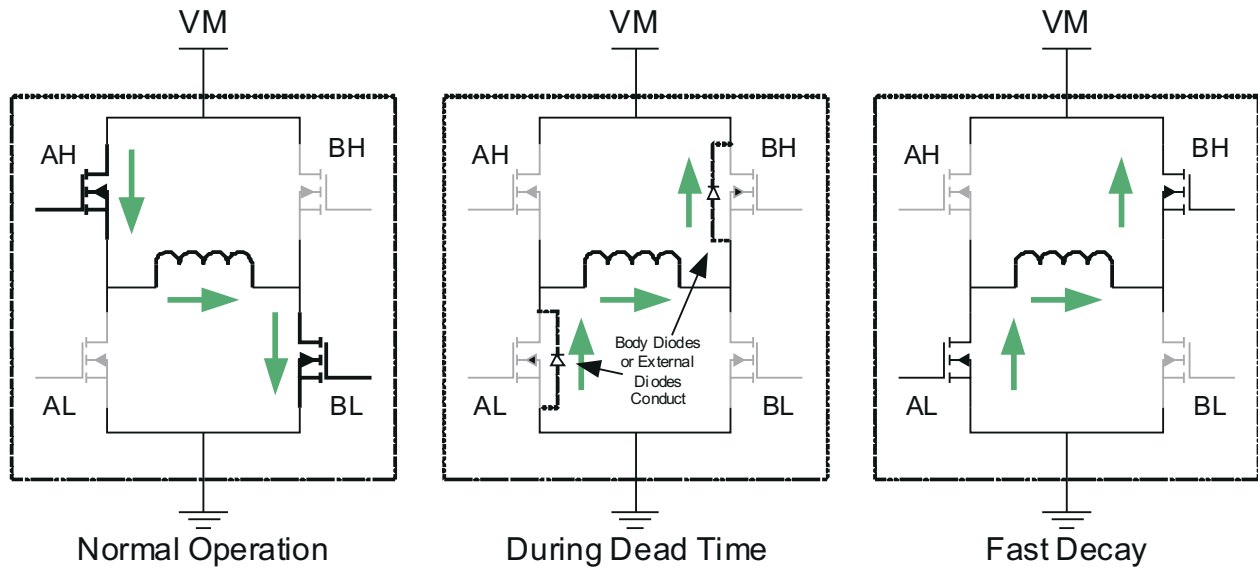


图 2-1. 快速衰减模式

请注意，施加于电感负载的电压是源加上两个二极管正向压降，或电流乘以相应开关的 R_{DSon} 。

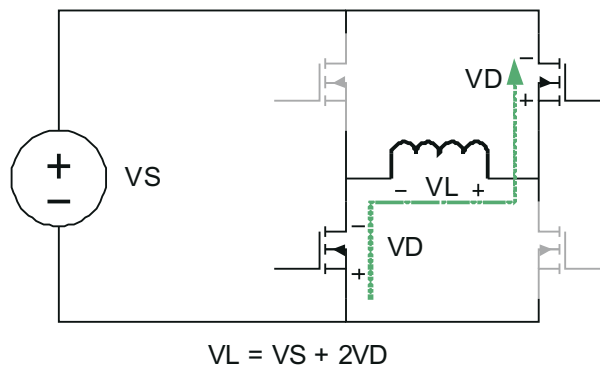


图 2-2. 施加于电感负载的电压

2.2 慢速衰减

在慢速衰减再循环模式期间，电流被认为会以慢于快速衰减的速度衰减至零。若要进入慢速衰减模式，需禁用高侧激励 FET 开关，并启用相反的低侧 FET 开关。

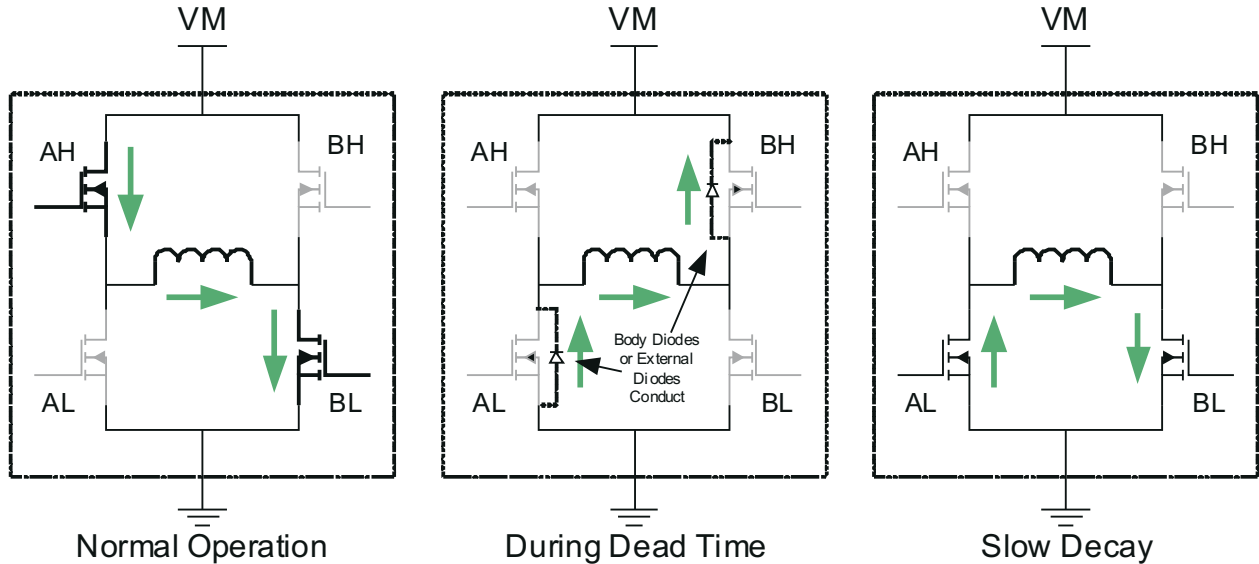


图 2-3. 慢速衰减模式

NOTE

虽然慢速衰减通常描述为两个低侧 FET 开关打开、两个高侧 FET 开关关闭，但相同现象可通过启用两个高侧 FET 开关、同时禁用两个低侧 FET 开关来实现。一些 DRV88xx 器件允许通过相应的模式输入信号来适当配置器件，以采取其中一种技术。

用户必须了解慢速衰减模式的一些特殊字符：

1. 电流的衰减将低至 LR 时间常数，其中 L 是电感负载上的电感，R 是低侧开关 R_{DSon} 的两倍。

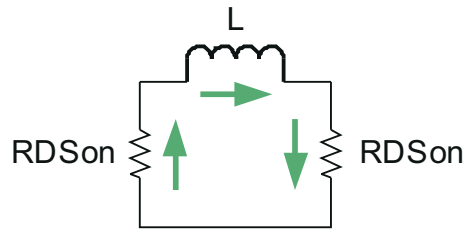


图 2-4. 电流衰减

2. 在直流电机上，反电动势在电机旋转时升高，慢速衰减模式提供绕组短路，进而形成反电动势短路（崩溃）。这将使转子极快停止旋转。

2.3 混合衰减

在混合衰减再循环模式中，电流衰减至零的速度快于慢速衰减方法，但慢于快速衰减方法。实现此技术的方法是，协调 FET 开关的开/关时间，在固定时间内处于快速衰减模式，然后在剩余时间内处于慢速衰减模式。系统保持在快速衰减模式与慢速衰减模式中的时间比例被称为混合衰减百分比。

混合衰减对于步进电机驱动很有意义，但最重要的是，它对微步进驱动极有意义。在微步进时，将保持一定波形以获得出色的运动质量。例如，通常会通过正弦波（电流曲线）来驱动步进电机绕组。也可以在相同范围内使用三角形和菱形。

命令步进电机运动的越快，遵循所需波形就越难。这是由于电机电感会限制绕组输出的速度。因此，必须在快速衰减模式与慢速衰减模式之间，找到能够适应目标波形的不同部分的电流再循环速率。

当电流增加时，在发出微步进后，首选再循环模式为慢速衰减。慢速衰减模式之所以是理想模式，实际上是因为在再循环期间 EMI 降低、效率增加。在叠加波形（第一个 90 度电角度）上的电极增加期间，慢速衰减足以处理在新的微步进发出时的电流值变化（如图 2-5 所示）。

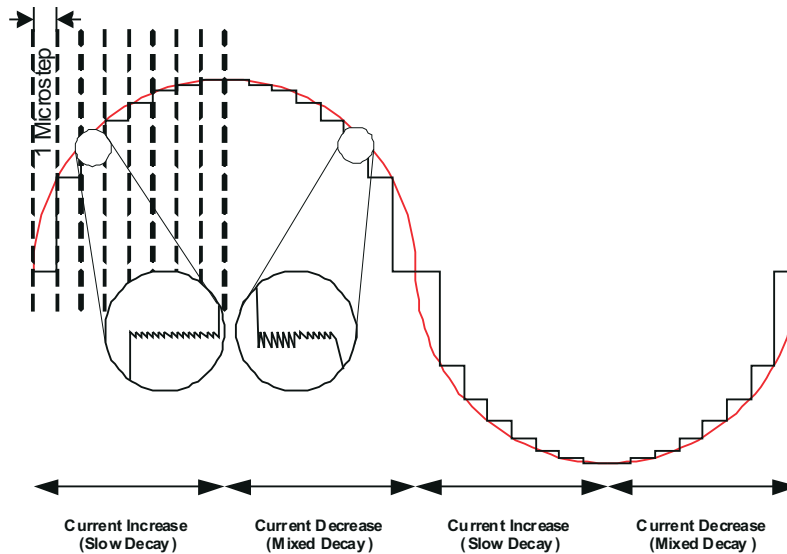


图 2-5. 混合衰减模式

不过，慢速衰减模式不够快，无法以跳转到下一微步进所需的速度在电感器上输出电流，当电流减少时，仍遵循波形。快速衰减的速度过快，会导致波形扭曲。通过选择合理的混合衰减率，可以找到一个安全点。

2.3.1 混合衰减模式

可通过两种方式处理步进电机驱动器中的混合衰减模式：固定和可调。

固定混合衰减模式：固定混合衰减模式会通过时分多路复用，将快速与慢速衰减的比率设置为预设到驱动器内核的百分比。例如，30% 的快速衰减时间和剩余 70% 的慢速衰减周期时间。

可调或可编程混合衰减模式：对于 DRV88xx 等器件系列，将提供模拟输入以使输入上的模拟电压对混合衰减比率进行编码。而 DRV84xx 系列具有数字输入引脚或寄存器设置，可选择混合衰减比率。特定器件数据表提供了设置混合衰减比率的具体详细信息。

所需的混合衰减比率由应用用例确定。步进率、电机电源电压、相电流设置、绕组电阻和电感等因素将确定达到需要的电流纹波目标所需的混合衰减比率。此过程被称为调优。调优特定于应用用例。

2.4 智能调优

手动可调混合衰减方案不适于具有可变步进率或可变负载的应用。需使用可变混合衰减调优比率来适应这些不同情况。TI 对此问题的解决方案是智能调优技术，这是一种集成的闭环自动衰减调优系统。智能调优可以通过电机运行参数（例如速度、负载、电压和温度以及老化效应）自动补偿任何变化。

智能调优衰减技术有两种实施方式。智能调优动态衰减和智能调优纹波控制。

智能调优动态衰减：在绕组电流的电气周期内（即在正象限和负象限中增加和减少电流步进），智能调优动态衰减将在慢速、混合和快速衰减模式中自动做出选择（如图 2-6 所示）。在选择混合衰减后，智能调优将动态地调整总混合衰减时间中快速衰减的百分比，因此不需要手动混合衰减调优。混合衰减百分比在绕组电流调节的每个 PWM 周期内进行评估和优化，通过基于固定关断时间 t_{OFF} 的调节方案实现可达到的更低电流纹波。智能调优动态衰减设计为在大部分时间内以慢速衰减运行，并根据保持电流调节的需求，尽可能少地使用快速衰减周期。

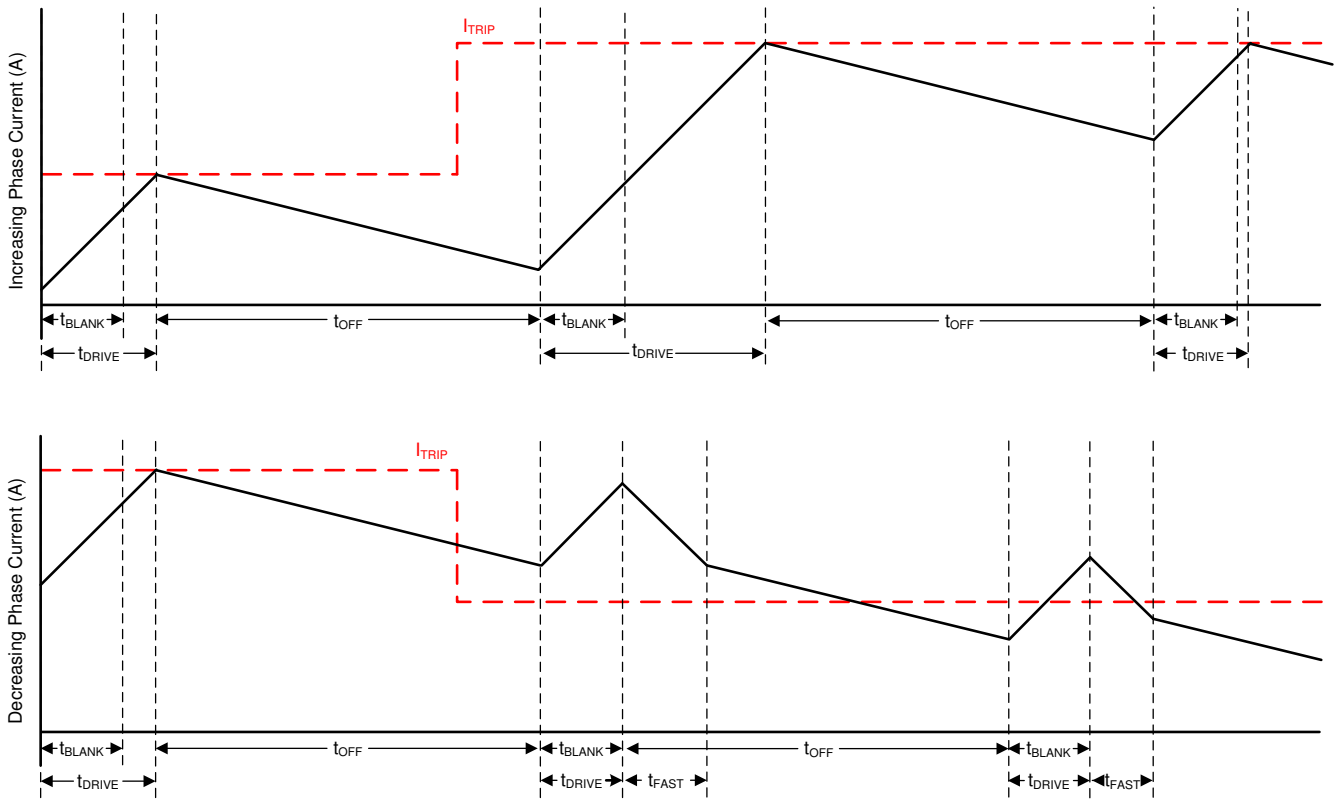


图 2-6. 智能调优纹波动态衰减模式

智能调优纹波控制：此方法通过基于可变关断时间 t_{OFF} 的调节方案，使用预设的电流纹波值来调节绕组电流。电流纹波值通过设置 I_{VALLEY} 值和 I_{TRIP} 目标电流来定义。当电流电平达到 I_{TRIP} 时，将启动慢速衰减，直至达到 I_{VALLEY} （如图 2-7 所示）。在此模式下， t_{OFF} 根据系统运行参数而变化。智能调优纹波控制可达到较低的电流纹波，进而最大限度地减少电机的可闻噪声。

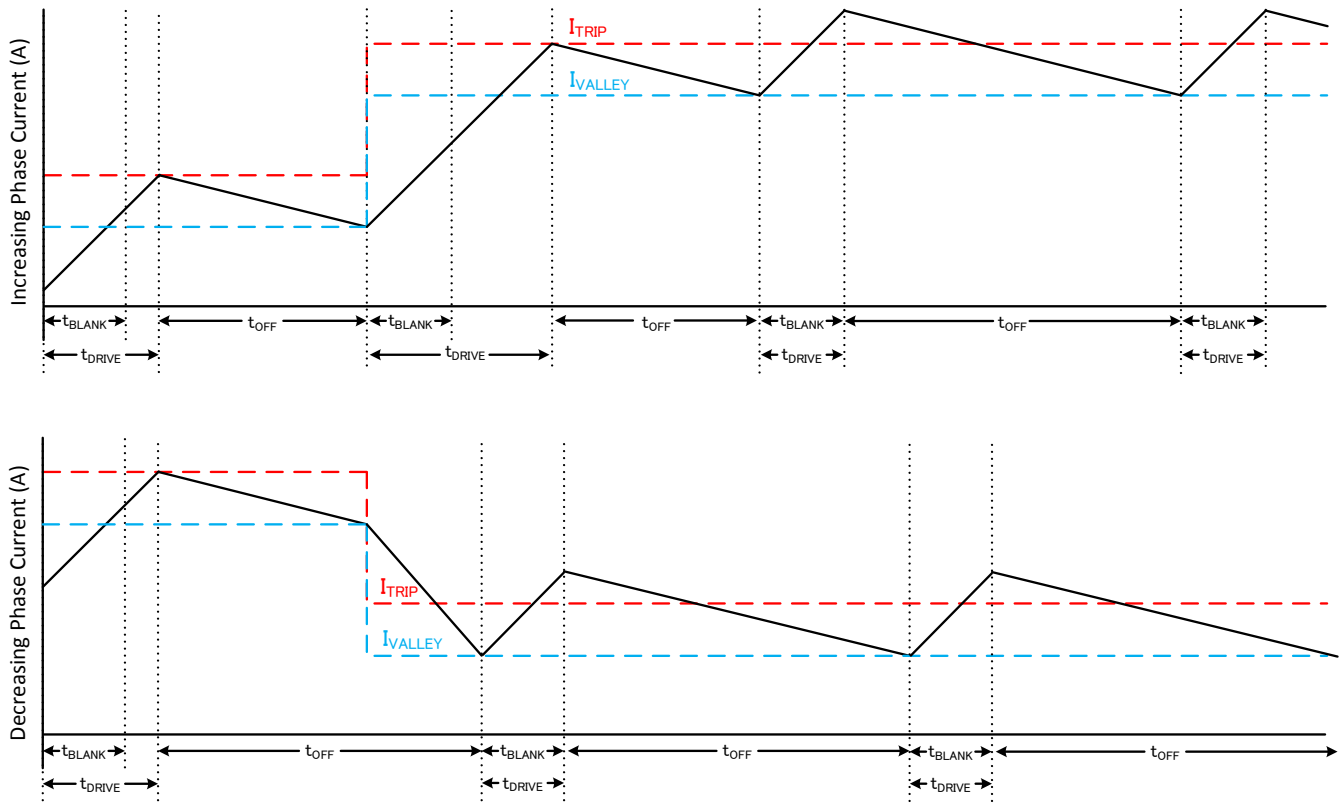


图 2-7. 智能调优纹波控制模式

3 参考文献

- [电机驱动器产品树](#)。
- 《智能调优如何调节步进电机中的电流》白皮书。
- 《智能调优，实现步进电机的安静和高效运行》应用简介。
- 《通过智能调优轻松实现步进电机》技术白皮书。
- 《如何提高步进电机的运动平滑度和精度》应用报告。
- 《如何降低步进电机中的可闻噪声》应用报告。

4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (August 2011) to Revision A (April 2021)	Page
• 增加了智能调优.....	6
• 增加了参考文献.....	9

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

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

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司