

# 基于NSUC1610的车载步进电机控制

AN-11-0001

作者: Zhen Li, Chenwang Zhou, Huabiao Tang



# 基于NSUC1610的车载步进电机控制

## 摘要

新能源汽车热管理系统是汽车中的一个关键系统，主要负责汽车的热量管理和散热控制。在新能源车热管理系统中，往往需要使用至少两个水泵和三个阀门，同时，这些应用场景对体积要求非常严苛，因此，纳芯微推出了专用小型电机驱动芯片 NSUC1610，内部集成车载高压 LDO、LIN PHY、Gate Driver、MOSFET 以及 MCU 的完整解决方案，可以帮助客户实现安全可靠的车载电机控制，本篇应用笔记主要针对于步进电机的阀门应用进行介绍。

## 目录

1. 步进电机控制	2
1.1. 步进原理简介	2
1.2. 步进电机全步控制模式	2
1.3. 步进电机半步控制模式	3
1.4. 步进电机半步缩放控制模式	3
1.5. 步进电机微步控制模式	3
2. 步进电机电流衰减	5
2.1. 异步缓慢衰减	5
2.2. 同步快速衰减	5
2.3. 混合衰减	6
2.4. 恒流控制	6
2.5. 失步检测	7
3. 具体应用描述	7
3.1. 硬件连接	7
3.2. 软件代码	8
4. 修订历史	9

# 基于NSUC1610的车载步进电机控制

## 1. 步进电机控制

### 1.1. 步进原理简介

通常步进电机内部是由两组线圈组成,因此需要将两个 H 桥分别连接到两组线圈的端子上,从而可以形成两相四线的控制方式。在两个线圈中,我们习惯性地把他们分别称为 A 相和 B 相,而 A 相的两个端子又分别记为 A+、A-,同理 B 相的两个端子称为 B+、B-。通过给 A 相和 B 相施加一定的电流,从而可以形成一个矢量合成的磁场,由于磁场的存在,所以可以把步进电机的转子进行旋转控制。使用 NSUC1610 的桥臂输出 MOUT0 和 MOUT1 分别连接步进电机的 A+ 相、A- 相,使用桥臂输出 MOUT2 和 MOUT3 分别连接到步进电机的 B+ 相、B- 相,通过控制 A 相和 B 相的电流可以组成四个象限,具体如图 1.1 所示。

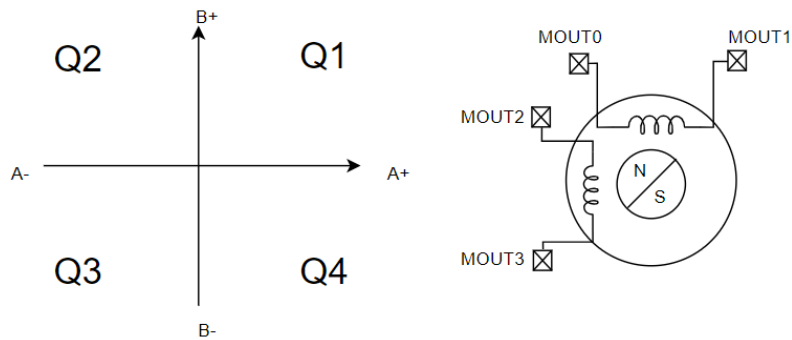


图 1.1 两相步进电机接线原理图

### 1.2. 步进电机全步控制模式

全步模式下,只需要在每一步调整一个相位的电流方向,就可以实现简单的全步控制。例如在第一象限电流方向为 A+, B+; 在第二象限为 A-, B+; 第三象限为 A-, B-; 第四象限为 A+, B-; 依次循环往复,这样每一步的电流矢量即为  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ ,具体波形如图 1.2 所示:

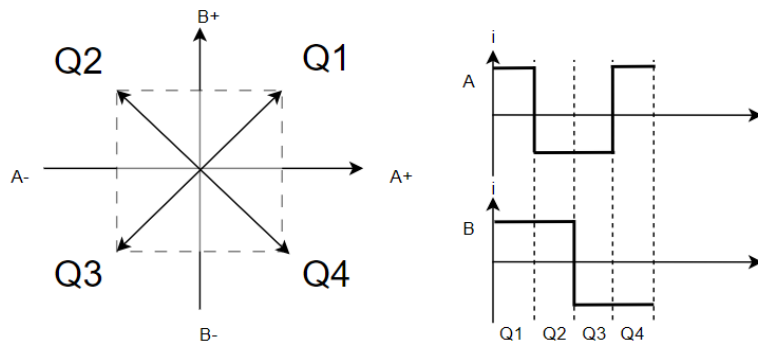


图 1.2 步进电机全步控制模式图

## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 1.3. 步进电机半步控制模式

半步模式下, 是基于全步控制中间插入一个 0 电流状态, 再配合 A+, B+, A-, B- 进行组合, 即可以得到 8 个矢量状态, 这八个状态分别是  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ , 具体波形如图 1.3 所示:

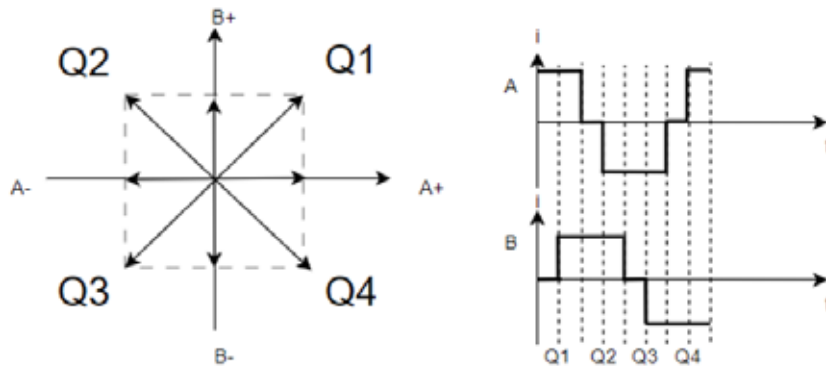


图 1.3 步进电机半步控制模式图

### 1.4. 步进电机半步缩放控制模式

缩放模式是针对半步控制进行的一种优化, 由于半步控制的矢量大小不在一个圆内, 因此会产生转矩脉动和运转不均衡的情况。为了能够减小这个脉动, 我们需要将大小不为 1 的矢量除以  $\sqrt{2}$ , 经过这个操作以后, 每一步的转矩大小就都一样从而避免了转矩突破而产生的脉动, 具体波形如图 1.4 所示:

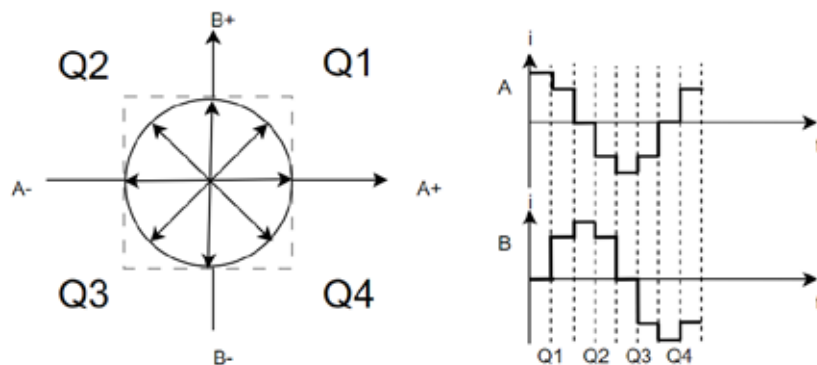


图 1.4 步进电机半步缩放控制模式图

## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 1.5. 步进电机微步控制模式

微步控制是将 A, B 两相的电流分别设置成正弦、余弦电流, 正余弦的电流分辨率直接影响步进电机控制的噪音以及旋转的丝滑程度。典型的微步控制是指在每一个象限细分的步数, NSUC1610 可支持每个象限最多 32 步细分, 在一个步进角范围内则可以实现最多到 128 细分, 具体电流控制波形如图 1.5 所示:

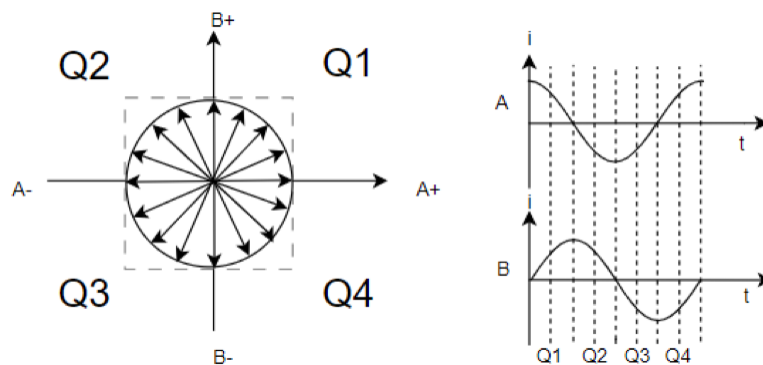


图 1.5 步进电机微步控制模式图

通常在应用软件中, 我们需要将正余弦的查找表设置成大小为“32+1”, 实际上每个象限使用 32 个值, 根据步进电机控制的旋转方向, 可以将正弦表的值从 0 增加到 31, 再从 32 减到 1, 这样操作以后可以避免所在象限边界处的最小和最大值使用两遍, 具体电流波形可以从图 1.6 看出:

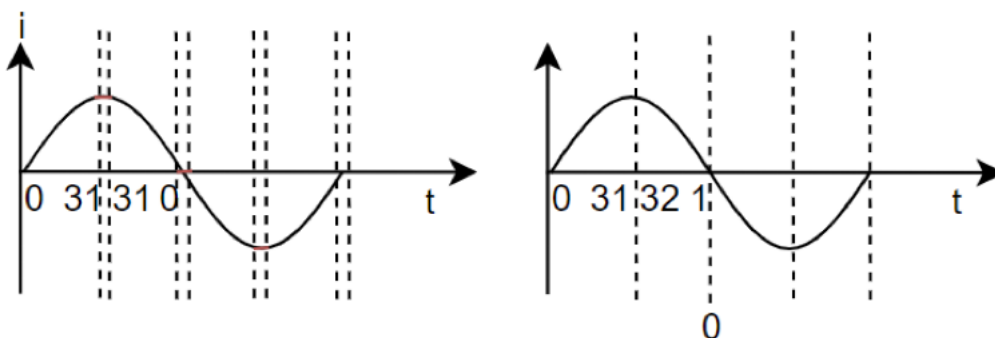


图 1.6 步进电机微步模式电流波形(左图交越区域产生畸变, 右图就是完美的正弦信号)



## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 2. 步进电机电流衰减

为了在电机的整个速度范围内实现用于微步进的正弦形电流波形，必须对电流进行衰减控制。通常只有将电流纹波控制在较低水平，才能够实现低辐射和低噪音。这就需要通过缓慢的电流衰减实现，但随着电机旋转速度的增加，在某一点上，电流衰减会太慢，电流就不再遵循正弦形状。这种情况可以通过使用快速衰减来改善。在中速范围内，缓慢衰减达到极限，但快速衰减又会引入较高的电流纹波，所以需要两者混合使用。在这种混合衰减模式中，首先应用快速衰减，然后将衰减模式切换为慢衰减，这样可以根据速度调整快衰减与慢衰减的比率，以实现适当的电流衰减和最小的电流纹波。当续流电流可能流过 H 桥开关的固有二极管，即异步衰减，或者开关主动接通以接管续流电流，即同步衰减。此外，续流电流可能仅在 H 桥的高侧或低侧循环，即为缓慢衰减，或者可能通过 H 桥的直流电源循环，即为快速衰减。

#### 2.1. 异步缓慢衰减

如果 H 桥的高边 PWM 开关关闭，续流电流将流过低边 MOSFET 的本征二极管，电流将进行缓慢衰减，直到再次打开驱动开关，或直到电流衰减到零。这是低速低电流水平下，上升电流或下降电流的首选衰减模式。具体波形如图 2.1 所示：

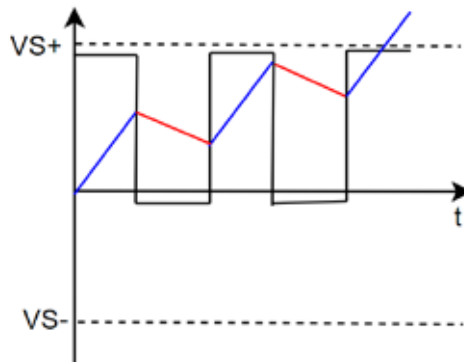


图 2.1 异步缓慢衰减电流电压波形图

#### 2.2. 同步快速衰减

如果半桥的高边使用 PWM 开关控制，低边使用互补的  $\overline{\text{PWM}}$  控制关闭，另外一路半桥高边使用互补  $\overline{\text{PWM}}$  控制，低边使用 PWM 控制，续流电流将流过高边 MOSFET 的 DS 端到电源，电流将进行快速衰减，具体波形如图 2.2 所示：

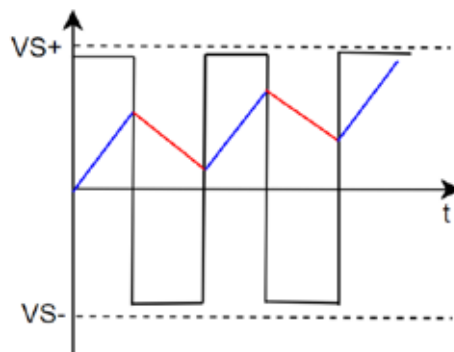


图 2.2 同步快速衰减电流电压波形图

## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 2.3. 混合衰减

混合衰减是快速衰减和慢衰变的结合。在一个 PWM 周期内，两种衰减模式均按顺序执行。通常先应用快速同步衰减，然后再用异步缓慢衰减。快衰减与慢衰减的比率也可以根据实际电流水平和电机速度进行调整。这是衰减模式是在中高速和高电流到低电流水平下，降低电流的首选衰减模式。在应用软件中，实现了快衰变和慢衰变之间的固定比率。为了避免在低电流水平衰减时反向驱动电机，软件中增加了额外的电流阈值，混合衰减仅在高于此阈值时应用。如果设置的电流水平低于此阈值，则应用缓慢衰减。具体波形如图 2.3 所示：

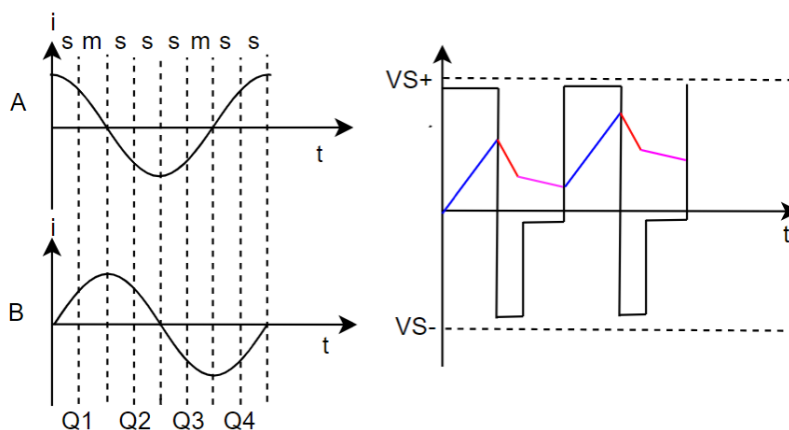


图 2.3 混合衰减电流电压波形图

### 2.4. 恒流控制

NSUC1610 集成了闭环电流控制外设，其中包括 DAC (数模转换器)、MOUT 桥臂低边电流检测、BEMFC 从三个中选择两个作为普通比较器，通过比较 DAC 的值和桥臂电流值输出限流信号，以及四路 EPWM。EPWM 使用的是上管 100% 占空比控制，当电流达到限流点时候，EPWM 会自动关断，当到达下一个限流点时，PWM 会再次开启，具体控制电流波形如下图所示：

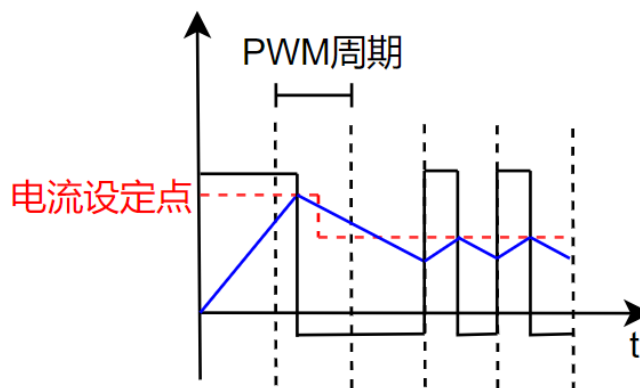


图 2.4 闭环电流控制示意图

## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 2.5. 堵转检测

NSUC1610 是通过反电动势的大小来进行堵转检测，在马达相位未通电期间，可以检测到 BEMF 电压。但这不包括全步进模式，因为两个相位始终通电。以下假设在微步进模式下检测失速，BEMF 电压与电机转速成正比，这样可以判断电机是否运行。由于只有在一相未通电的情况下才能进行测量，因此对 BEMF 电压的观察非常有限。对于理想的电机，在没有任何负载和损耗的情况下，转子将随着定子磁场持续旋转，并且在相电流为零时，可以看到 BEMF 电压的峰值。对于实际电机和外加负载，转子将始终滞后于定子磁场。此负载相关相位滞后将导致固定测量点处 BEMF 电压的负载相关变化。在零相位滞后的情况下，可以测量 BEMF 电压峰值，并且只能看到反电势与速度的相关性。在与负载变化的情况下，反电势会产生相位滞后，BEMF 电压将从峰值将出现偏移，当这个电压大于或者小于一个阈值时，这就标志着检测到失步点，电机运动将停止。BEMF 电压测量仅在零电流阶跃期间启用。在零电流阶跃结束时，采样和测量最后一次 BEMF 电压值。这可确保线圈电流达到零，且 BEMF 电压实际可见。根据电机参数、速度和阶跃模式，零阶跃可能会变短，并且无法获得明显的 BEMF 电压。此时则无法检测失速。失速检测仅在匀速运动期间进行，在加速或减速期间，BEMF 电压可能非常低，则不会启用失速检测。具体电流波形如图 2.5 所示：

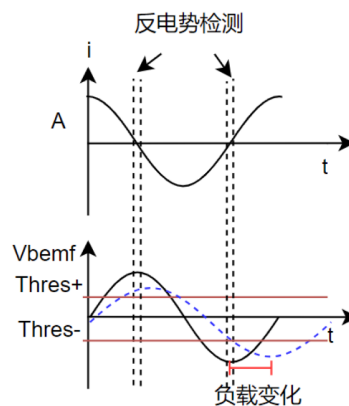


图 2.5 步进电机失步检测示意图

## 3. 具体应用描述

### 3.1. 硬件连接

NSUC1610 集成了 4 个半桥，通过两两组合形成两个 H 桥连接，具体连接如图 3.1 所示：

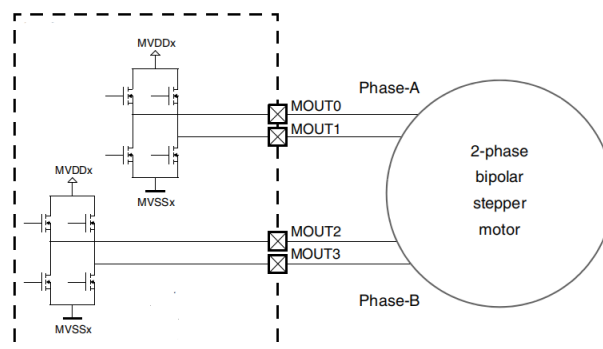


图 3.1 步进电机与 NSUC1610 系统连接图



## 基于NSUC1610的车载步进电机控制

### 3.2. 软件代码

软件文件：

ADC.h/.c -- ADC measurement of VBEMF, Tj, and VBVD.

MOT.h/.c --Low level motor control functions.

MSM.h/.c --Motor state machine, high level motor control.

main.h/.c --Task scheduling.

config.h --Global configuration of HW and SW parameters.

Config 头文件定义如表 3.2 所示。

变量名	默认值	描述
MOT_EPWM_PERIOD	1599	EPWM 的开关频率=32MHz/(value+1)
MOT_EPWM_FSON	0	MOUT导通输出斜率 0: 最慢 1: 正常 2: 快 3: 非常快
MOT_EPWM_FSON	0	MOUT关断输出斜率 0: 最慢 1: 正常 2: 快 3: 非常快
MOT_EPWM_OCFT	0	MOUT过流滤波时间 0: 2.4us 1: 4.8us 2: 9.6us 3: 19.2us
MOT_DECAY	0	MOUT续流方式 0: 异步慢速续流 1: 混合续流方式1 2: 混合续流方式2
MOT_EPWM_MINON	5	EPWM的最小输出占空比%
MOT_FAST_DECAY_THRS_MA	50	MOUT快速续流阈值mA
MOT_MIXED_DECAY_FAST_RATIO	50	MOUT快速续流时间占比%
MOT_ININTIAL_IRUN	200	步进电机初始运行电流 200/255 * 电流挡位 mA
MOT_ININTIAL_HOLD	80	步进电机保持电流 80/255 * 电流挡位 mA
MOT_ININTIAL_STABLE_TIME	80	步进电机稳定时间ms
MOT_ININTIAL_VMAX	500	步进电机最快运行速度pps
MOT_ININTIAL_VMIN	100	步进电机最慢运行速度pps
MOT_ININTIAL_ACC	2000	步进电机初始加速度pps2
MOT_ININTIAL_STEP_MODE	4	步进电机工作模式 0: 全步 1: 半步 2: 4分之一微步 3: 8分之一微步 4: 16分之一微步 5: 32分之一微步
MOT_ININTIAL_STALL_THRS_MV	1000	步进电机堵转检测电压阈值mV

图 3.2 步进电机应用参数说明

# 基于NSUC1610的车载步进电机控制

## 4. 修订历史

版本	描述	作者	日期
1.0	创建应用笔记	Zhen Li, Chenwang Zhou, Huabiao Tang	2023/02/20

销售联系方式: [sales@novosns.com](mailto:sales@novosns.com); 获取更多信息: [www.novosns.com](http://www.novosns.com)

### 重要声明

本文件中提供的信息不作为任何明示或暗示的担保或授权,包括但不限于对信息准确性、完整性,产品适销性、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陈述或保证。

客户应对其使用纳芯微的产品和应用自行负责,并确保应用的安全性。客户认可并同意: 尽管任何应用的相关信息或支持仍可能由纳芯微提供,但将在产品及其产品应用中遵守纳芯微产品相关的所有法律、法规和相关要求。

本文件中提供的资源仅供经过技术培训的开发人员使用。纳芯微保留对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其他更改的权利。纳芯微仅授权客户将此资源用于开发所设计的整合了纳芯微产品的相关应用,严禁为任何其他用途使用此资源,或对此资源进行未经授权的复制或展示。如因使用此资源而产生任何索赔、损害、成本、损失和债务等,纳芯微对此不承担任何责任。

有关应用、产品、技术的进一步信息,请与纳芯微电子联系([www.novosns.com](http://www.novosns.com))。

苏州纳芯微电子股份有限公司版权所有