AN13571

基于LPC553x/LPC55S3x的无刷直流电机控制演示

第4版—2024年1月30日 **应用笔记**

文档信息

信息	内容
关键词	LPC553x/LPC55S3x处理器、嵌入式系统、3相无刷直流电机控制、霍尔传感器、基于Arm Cortex-M33的微控制器
摘要	本应用笔记介绍了基于恩智浦LPC553x/LPC55S3x处理器的带霍尔传感器的三相无刷直流电机控制实现方案。

1 介绍

本应用笔记介绍了基于恩智浦LPC553x/LPC55S3x处理器的带霍尔传感器的三相无刷直流电机控制实现方案。

LPC553x/LPC55S3x是一款基于Arm Cortex-M33的面向嵌入式应用的微控制器，它们包含了：

- 高达256kB的片上闪存
- 高达128kB的片上SRAM
- 1个SCTimer/PWM
- 8个灵活型串行通信外设，可配置为USART、SPI、高速SPI、I2C或I2S接口
- 2个16位采样率为每秒200万次的ADC（12位模式下的采样率为每秒330万次），能够同时进行4个转换
- 4个比较器
- 2个温度传感器
- 3个12位采样率为每秒100万次的DAC
- 3个运算放大器
- 2个FlexPWM定时器

Arm Cortex-M33提供了一个安全基础，采用TrustZone技术提供隔离，以保护宝贵的IP和数据。它通过集成的数字信号处理（DSP）指令简化了数字信号控制系统的设计和软件开发。

本应用笔记介绍了带霍尔传感器的无刷直流电机六步控制的原理、硬件和软件实现，包括详细的外设设置和驱动描述。

2 LPC553x/LPC55S3x的特性和优势

LPC553x/LPC55S3x是一款基于Arm Cortex-M33、面向嵌入式应用的微控制器。Arm Cortex-M33提供了一个安全基础，采用TrustZone技术提供隔离，以保护宝贵的IP和数据。它通过集成的数字信号处理（DSP）指令简化了数字信号控制系统的设计和软件开发。为了满足安全需求，LPC553x/LPC55S3x支持多种安全功能，如安全启动、高级加密标准（AES）、Rivest-Shamir-Adleman（RSA）、通用唯一标识符（UUID）、设备标识符组合引擎（DICE）、动态加解密、调试身份验证以及TBSA合规性。图1展示了这些特性。

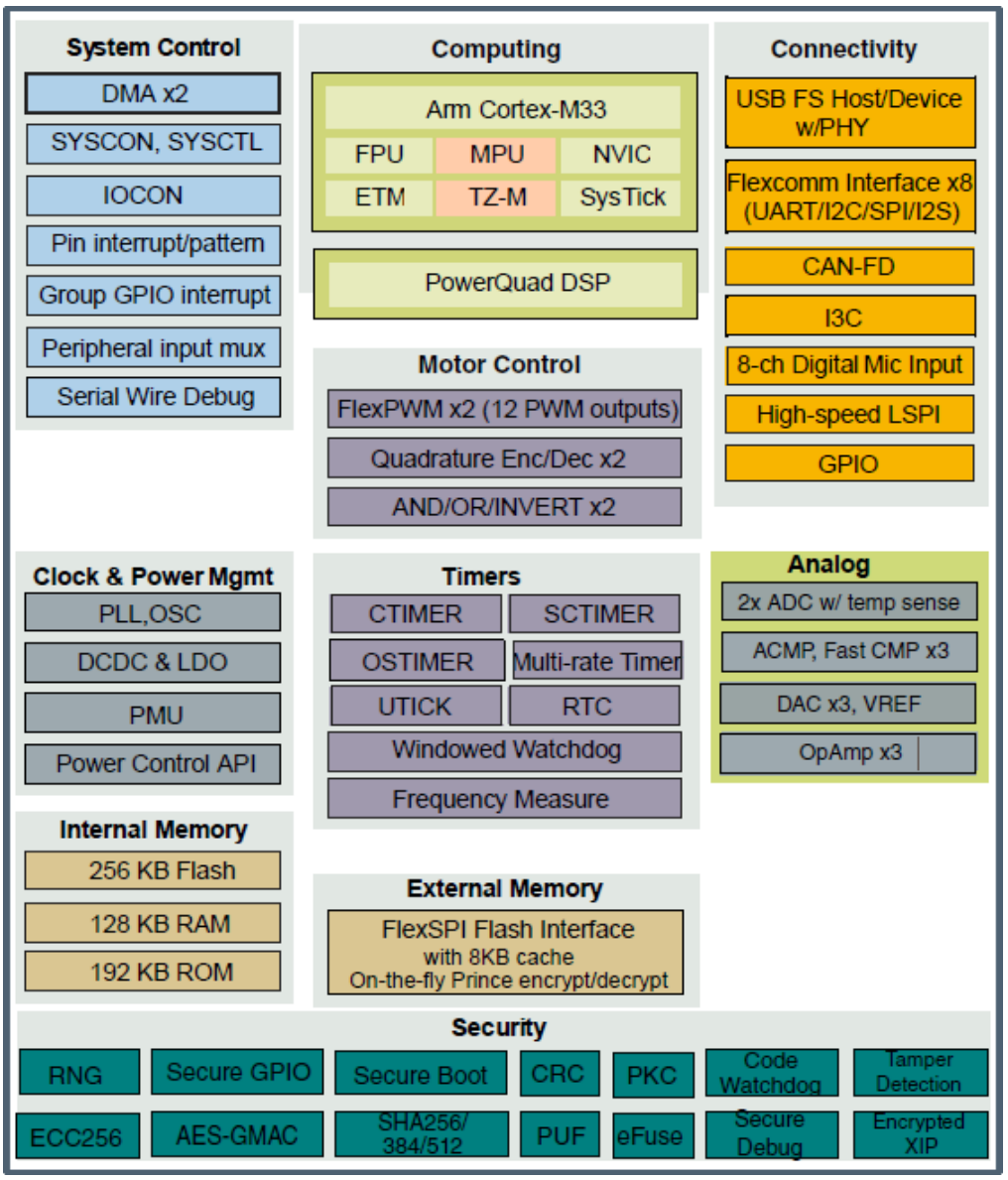

图1. LPC553x/LPC55S3x特性概述

对于无刷直流电机控制，LPC553x/LPC55S3x的优势如下：

- 多通道PWM信号输出。
- 丰富的定时器和通讯接口。
- 集成了丰富的内部模拟外设。

3 无刷直流电机控制理论

无刷直流电机是一种旋转式电动机械。它的定子与传统感应电机的三相定子类似，而转子表面贴装了永磁体。转子上没有碳刷，而是在特定的转子位置通过电子方式进行换向。图2所示为无刷直流电机的典型横截面。

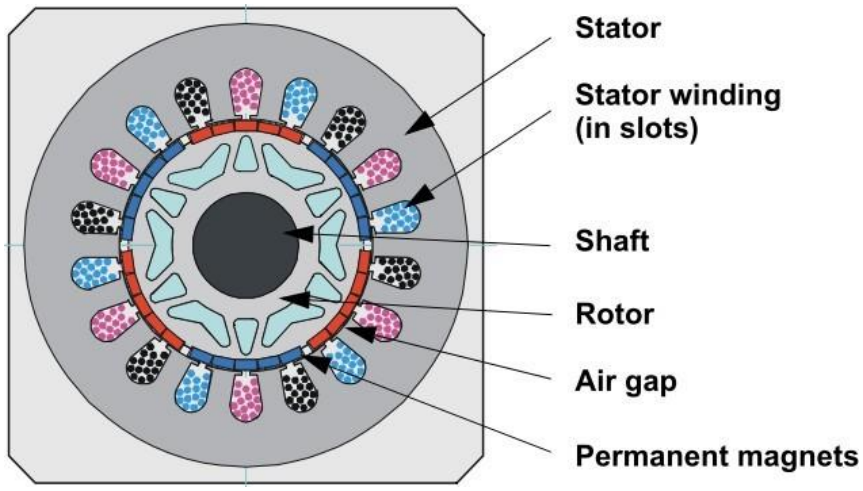

图2. BLDC电机的横截面

霍尔传感器安装在定子三相绕组的轴上，用于检测转子位置。

- 当转子磁体的直轴位置在某相位轴正方向的180°范围内时，对应相位反馈的霍尔传感器会得到高电平。
- 当转子磁体的直轴位置在预留的180°范围内时，对应相位反馈的霍尔传感器会得到低电平。

梯形反电动势的中点是转子的直轴与定子的相轴垂直的位置，在这个位置，霍尔传感器的输出信号会发生跳变，如图3所示。

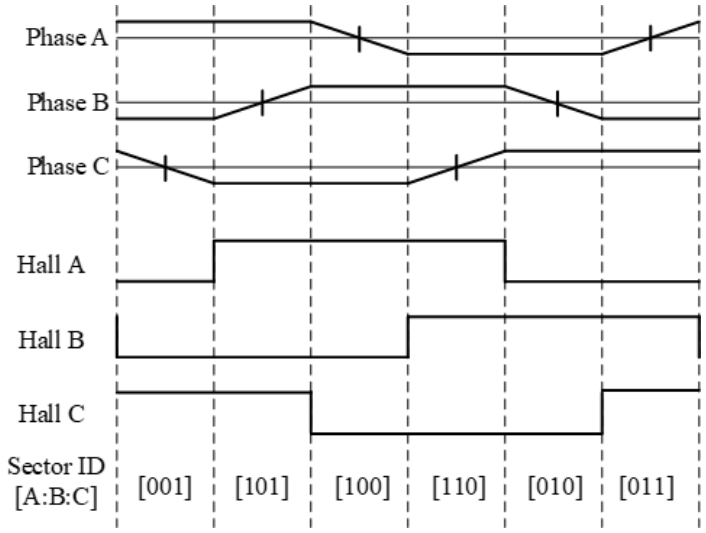

图3. 反相电路

三相霍尔传感器不会同时输出全0或全1的信号，因此转子的电角度可以划分为6个60°的扇区。在方波控制方法中，只选择三相绕组中的两个同时导通，并且产生的电压矢量与霍尔传感器划分的扇区的边界重合。扇区与电压矢量的位置关系如图4所示。

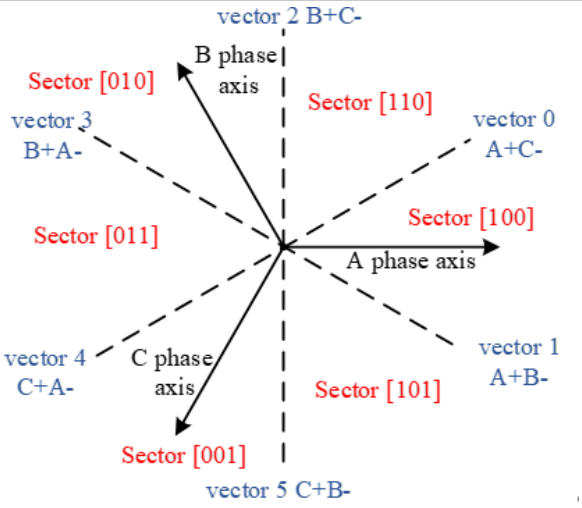

图4. BLDC电机的相位电压系统

根据扇区的位置和所需的电机旋转方向，选择适当的电压矢量和方波占空比。例如，当转子的直轴在扇区[100]时，如果电机逆时针旋转，则选择电压矢量2，如果电机顺时针旋转，那么选择电压矢量5。

根据不同的应用场景，可以使用双斩波PWM调制和单斩波调制，如`H_PWM-L_ON`、`H_ON-L_PWM`、`PWM-ON`和`ON-PWM`。

本例中使用的是双斩波PWM调制。

4 硬件和软件实现

本章介绍了硬件和软件的实现。

4.1 系统硬件设计

应用硬件包括以下部分：

- LPCXpresso55S36-EVK
  LPCXpresso55S36-EVK板设计为在独立模式下工作，或作为LPC553x/LPC55S3x的主板工作。板载接口包括RGB和其他LED接口。两个电机控制接口用于无刷直流电机控制应用。每个接口包括三相PWM输出和相应的采样信号输入接口。
- FRDM-MC-LVBLDC
  FRDM-MC-LVBLDC低压三相无刷直流电机Freedom开发板平台为您的设计应用增加了无刷直流电机控制功能，如旋转或线性运动。
  选用了LINIX 45ZVN24-40无刷直流电机。电机控制开发平台结构框图和实际演示图片如图5和图6所示。

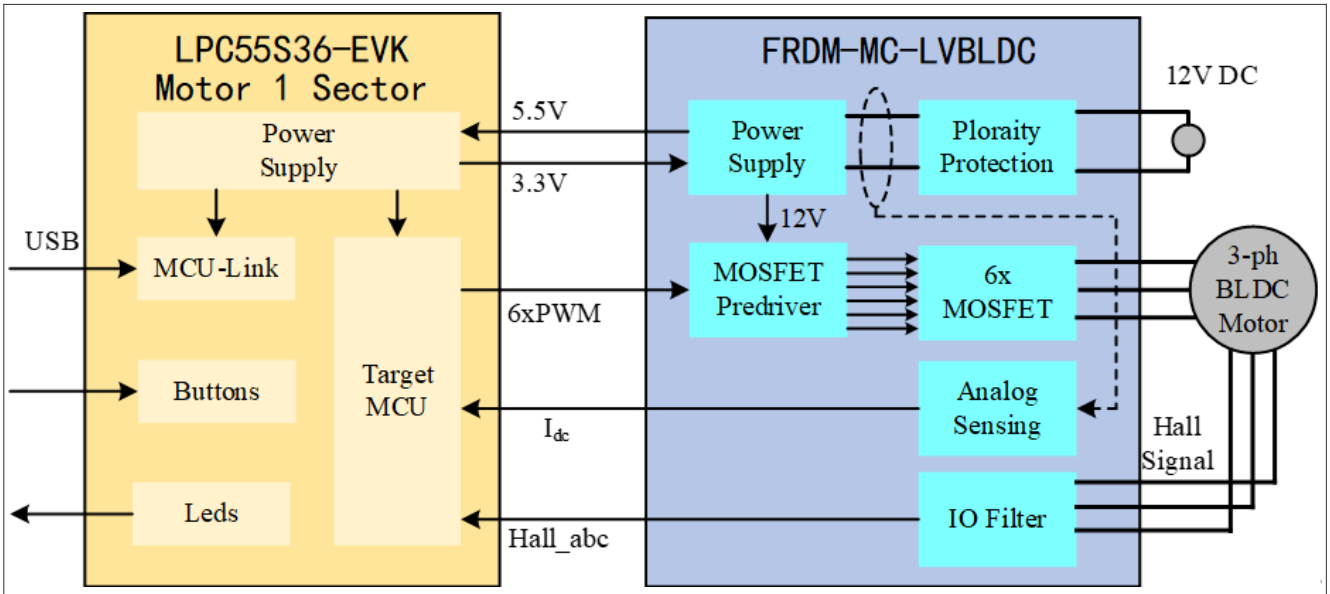

图5. 电机控制开发平台结构框图

图6. 实际演示图片

4.2 系统软件设计

软件和硬件应用可以满足以下设计要求：

- 选择LPC553x/LPC55S3x作为控制器
- 基于霍尔传感器的速度闭环控制
- 基于硬件和软件的过压、欠压和过流故障保护
- 最低转速为300转/分，最高转速为2200转/分
- 默认限制电流设置为4A
- 支持两个旋转方向
- 可以从任何电机位置启动，无需转子对准

图7所示为系统结构框图。整个控制流程包括三个部分。

- 通讯

霍尔信号的采集和换向控制是在PINT产生的通讯中断中完成的。要选择转子所在的扇区，在此中断中轮询连接到霍尔信号的GPIO值。同时，定时器存储换向时间。

- 定时控制环路
  速度PI控制器计算、应用状态机更新和软件故障保护在由PWM慢环触发的ADC ISR（1kHz）中完成。在定时控制环路中更新速度PI控制器的输出PWM占空比。读取缓存换向时间来计算速度。
- 软硬件保护
  HSCMP实现了母线电流的硬件保护。它向eFlexPWM和DAC生成故障信号，可以用来配置电流保护阈值。软件保护在控制环路中执行。

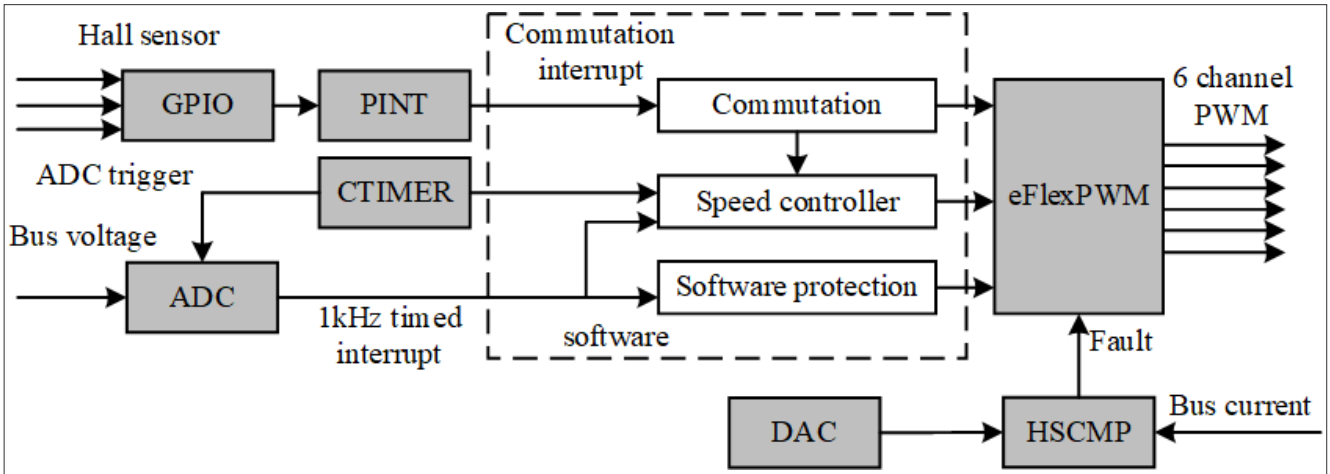

图7. 系统结构框图

5 外设配置

本节介绍LPC553x/LPC55S3x上用于电机控制的外设的配置，包括eFlexPWM、CTIMER、ADC、PINT、GINT、DAC和HSCMP。

5.1 eFlexPWM

配置eFlexPWM0生成6个PWM输出来驱动无刷直流电机，并使能子模块0的计数重置，使子模块1和2同步。

eFlexPWM0的配置包括：

- 启用IPBus时钟源150MHz。
- 全周期重新加载和全周期重新启用

子模块0

- 运行频率为20kHz，周期为5μs。
- 输出边缘对齐且高电平为真的互补PWM，死区时间为1μs。
- 从该子模块生成的PWM重新加载和初始化信号送到子模块1、2。

子模块1、子模块2

- 运行频率为20kHz，周期为5μs。
- 输出边缘对齐且高电平为真的互补PWM，死区时间为1μs。
- PWM重新加载和初始化信号来自子模块0。

5.2 ADC

ADC对直流母线电压进行采样。其采样值用于与用户给出的过压值和欠压值进行比较。ADC实现了对电机控制系统的软件保护。

ADC配置包括：

- 总线时钟源。时钟分频值为2。
- 标准分辨率。单端12位转换。
- 要对直流母线电压进行采样，请配置采样通道P0_10/ADC0_1A通道。

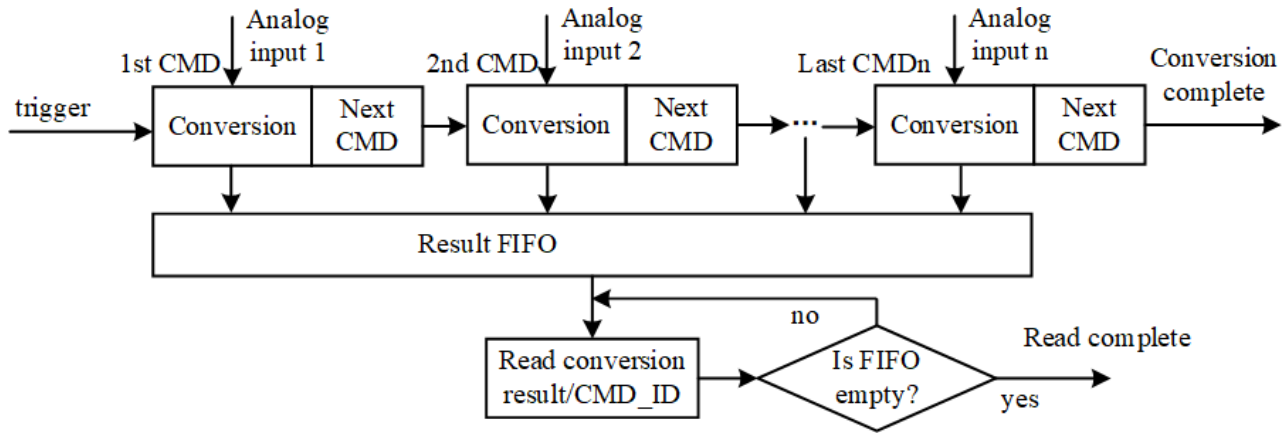

图8. ADC采样顺序和读取方法

5.3 CTIMER

CTIMER0用于：

- 生成1kHz触发器以触发ADC转换
- 进入定时控制中断以执行速度控制

CTIMER0的配置包括：

- 固定频率时钟源FRO 96MHz。
- 在定时器模式下工作，在匹配值3时复位。
- 通过INPUTMUX将MAT3连接到ADC TRIG0。

CTIMER1自由运行，记录并缓存每个扇区的换向时间点，用于速度计算。CTIMER1的配置包括：

- 固定频率时钟源FRO 96MHz。

5.4 GPIO

表1列出了EVK板上与BLDC控制有关的GPIO配置。

表1. GPIO配置

引脚号	引脚名称	引脚功能	引脚号	引脚名称	引脚功能
11	PIO1_20	PWM0_A0	70	PIO0_13	GPIO_input
91	PIO1_17	PWM0_B0	71	PIO0_14	GPIO_input
50	PIO1_6	PWM0_A1	78	PIO1_11	GPIO_input
40	PIO1_22	PWM0_B1	30	PIO1_19	ADC0_1A
36	PIO1_8	PWM0_A2	35	PIO1_5	HSCMP0_IN3

表1. GPIO配置（续）

引脚号	引脚名称	引脚功能	引脚号	引脚名称	引脚功能
75	PIO1_4	PWM0_B2			

GPIO配置可以通过MCUXpresso IDE的配置工具来实现，如图9所示。

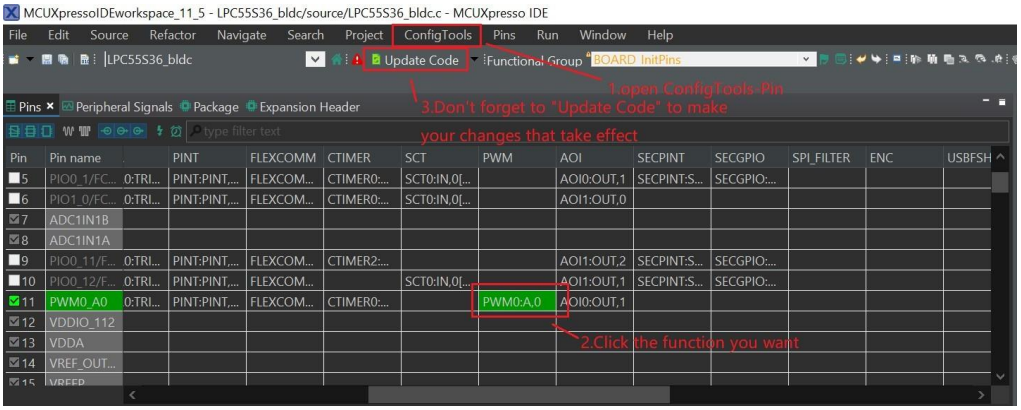

图9. ADC采样顺序和读取方法

5.5 GINT

GINT0用于生成通用中断，以检测SW3开关状态，由用户实现控制功能。GINT0的配置包括：

- 启用AHB时钟。
- 电平触发和低电平有效。
- 启用PIO1_17参与分组中断。

5.6 PINT

PIN_INT_IRQ 0-2用于分别检测霍尔信号A、B和C的边沿，以产生中断并完成通讯。PINT0的配置包括：

- 分别选择PIO0_13、PIO0_14和PIO1_11作为PIN_INT_IRQ 0-2的中断源。
- 电平触发，上升和下降沿均处于活动状态。

5.7 DAC

DAC用于配置母线电流阈值和HSCMP的负输入。DAC0的配置包括：

- 启用时钟源的主时钟150MHz，除以6，得到25MHz时钟。
- 选择VREFH1作为参考电压。
- 使用OPAMP作为DAC模拟缓冲器。
- DAC转换值为DATA×3.3V/4096。

5.8 HSCMP

HSCMP用于比较母线电流采样信号与用户配置的DAC阈值，以执行硬件保护。HSCMP0的配置包括：

- 输入“-” = 外部DAC，输入“+” = 模拟多路复用器的第三输入，高功率/高速模式。
- 将比较输出连接到eFlexPWM的故障。

6 软件实现

本节介绍无刷直流电机应用的软件设计。

6.1 状态机

在ADC中断中实现了一个状态机控制，用于控制电机的运行状态，如图10所示。

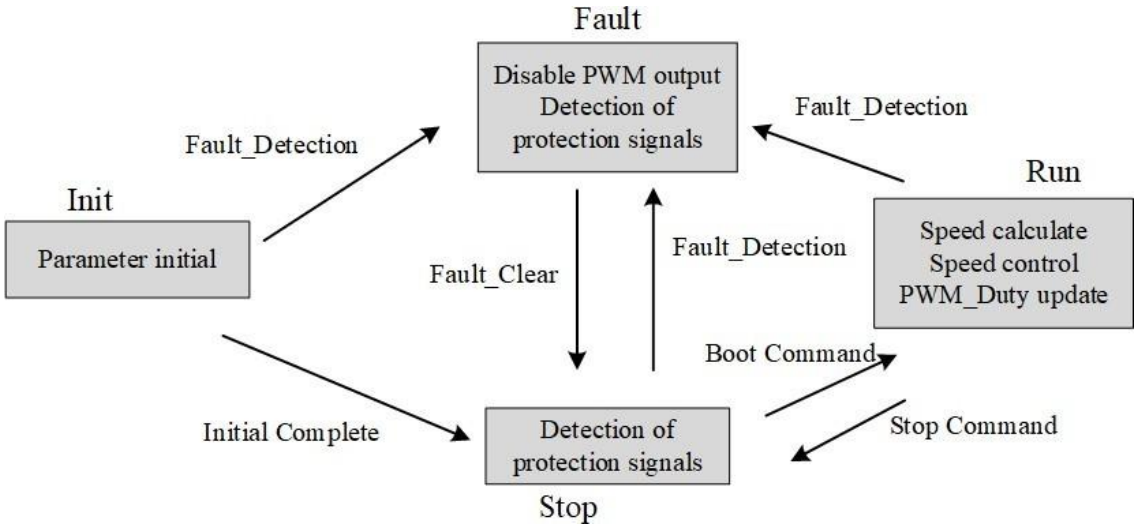

图10. 状态机流程图

6.2 转速计算

CTIMER1记录每个扇区的持续时间。电机转速（RPM）可以根据前6个扇区的时间来计算。

$$Speed\_Fed = \frac{60}{Cnt_{SixSector} * Period * Polepair} \quad (1)$$

7 演示的操作

本章介绍该演示的操作。

7.1 电机参数

表2提供了电机规格。

表2. 电机规格

制造商名称	Linix	定子电阻/Ohm	1
型号	45ZWN24-40	定子绕组电感d轴/μH	426
额定转速/rpm	4000	定子绕组电感q轴/μH	460
额定线路电压/V	24	极对数	2
额定功率/W	40	反电动势常数/V.s.rad-1	0.01456

在设置电机的应用参数（如速度PI控制器和启动电流值）时，需要考虑到轴上安装了塑料环（作为套件的一部分）。如果没有考虑这个因素，电机的转速可能会出现波动。

7.2 演示的实验性能

如图11所示，当电机以1000rpm的速度运行时，

- 霍尔传感器的信号交替变化。
- 电机绕组端子的电压根据霍尔信号的输出被切割。
- 相反电位为零交叉波形，无导通。

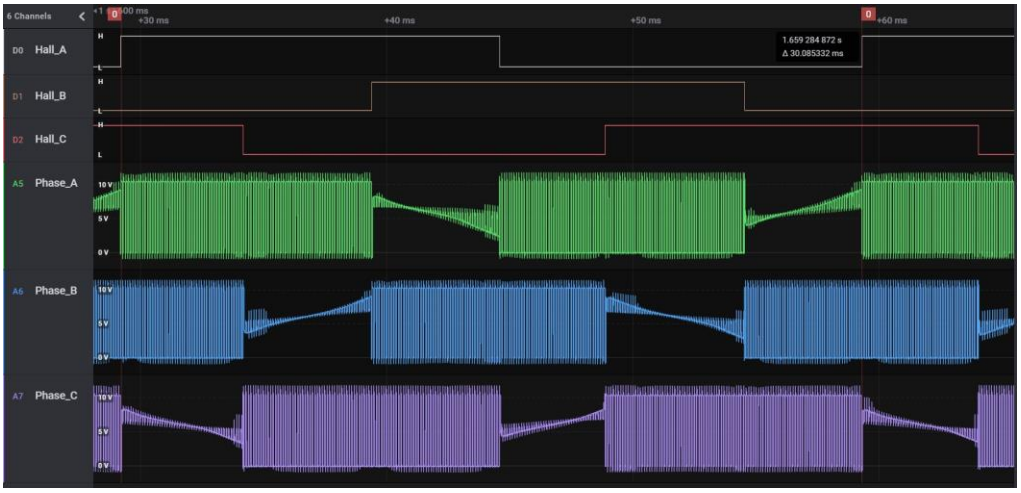

图11. 1000 rpm时的霍尔信号与电机绕组端子

7.3 CPU负载和内存使用情况

表3所示为演示程序的空间使用情况和内核负载。使用SYSTick定时器测量CPU负载。

表3. LPC553x/LPC55S3x无刷直流电机控制演示CPU负载和内存使用

代码存储器[字节]	20132
数据存储器[字节]	8720
CPU周期	257
CPU负载	1.71%

8 参考资料

这些参考资料可在www.nxp.com.cn上获得：

- 《LPC553x参考手册》（文档LPC553xRM）
- 《MCUXpresso SDK三相永磁同步电机控制（LPC）》（文档3PPMSMCLPCUG）

9 修订历史

表4汇总了对本文档的修订。

表4. 修订历史

版本号	发布日期	说明
4	2024年1月30日	更正了第6节中的一个拼写错误。
3	2023年12月7日	根据SDK、IDE和EVK板的更新进行了更新
2	2023年7月17日	• 更新了第4.1节 • 更新了第5.1节 • 更新了第5.3节 • 更新了第7.3节
1	2022年5月25日	将LPC55S3x替换为LPC553x/LPC55S3x
0	2022年3月25日	初版发布

Legal information

Definitions

Draft — A draft status on a document indicates that the content is still under internal review and subject to formal approval, which may result in modifications or additions. NXP Semiconductors does not give any representations or warranties as to the accuracy or completeness of information included in a draft version of a document and shall have no liability for the consequences of use of such information.

Disclaimers

Limited warranty and liability — Information in this document is believed to be accurate and reliable. However, NXP Semiconductors does not give any representations or warranties, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of such information and shall have no liability for the consequences of use of such information. NXP Semiconductors takes no responsibility for the content in this document if provided by an information source outside of NXP Semiconductors.

In no event shall NXP Semiconductors be liable for any indirect, incidental, punitive, special or consequential damages (including - without limitation - lost profits, lost savings, business interruption, costs related to the removal or replacement of any products or rework charges) whether or not such damages are based on tort (including negligence), warranty, breach of contract or any other legal theory.

Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever, NXP Semiconductors' aggregate and cumulative liability towards customer for the products described herein shall be limited in accordance with the Terms and conditions of commercial sale of NXP Semiconductors.

Right to make changes — NXP Semiconductors reserves the right to make changes to information published in this document, including without limitation specifications and product descriptions, at any time and without notice. This document supersedes and replaces all information supplied prior to the publication hereof.

Suitability for use — NXP Semiconductors products are not designed, authorized or warranted to be suitable for use in life support, life-critical or safety-critical systems or equipment, nor in applications where failure or malfunction of an NXP Semiconductors product can reasonably be expected to result in personal injury, death or severe property or environmental damage. NXP Semiconductors and its suppliers accept no liability for inclusion and/or use of NXP Semiconductors products in such equipment or applications and therefore such inclusion and/or use is at the customer's own risk.

Applications — Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. NXP Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification.

Customers are responsible for the design and operation of their applications and products using NXP Semiconductors products, and NXP Semiconductors accepts no liability for any assistance with applications or customer product design. It is customer's sole responsibility to determine whether the NXP Semiconductors product is suitable and fit for the customer's applications and products planned, as well as for the planned application and use of customer's third party customer(s). Customers should provide appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products.

NXP Semiconductors does not accept any liability related to any default, damage, costs or problem which is based on any weakness or default in the customer's applications or products, or the application or use by customer's third party customer(s). Customer is responsible for doing all necessary testing for the customer's applications and products using NXP Semiconductors products in order to avoid a default of the applications and the products or of the application or use by customer's third party customer(s). NXP does not accept any liability in this respect.

Terms and conditions of commercial sale — NXP Semiconductors products are sold subject to the general terms and conditions of commercial sale, as published at https://www.nxp.com.cn/profile/terms, unless otherwise agreed in a valid written individual agreement. In case an individual agreement is concluded only the terms and conditions of the respective agreement shall apply. NXP Semiconductors hereby expressly objects to applying the customer's general terms and conditions with regard to the purchase of NXP Semiconductors products by customer.

Export control — This document as well as the item(s) described herein may be subject to export control regulations. Export might require a prior authorization from competent authorities.

Suitability for use in non-automotive qualified products — Unless this document expressly states that this specific NXP Semiconductors product is automotive qualified, the product is not suitable for automotive use. It is neither qualified nor tested in accordance with automotive testing or application requirements. NXP Semiconductors accepts no liability for inclusion and/or use of non-automotive qualified products in automotive equipment or applications.

In the event that customer uses the product for design-in and use in automotive applications to automotive specifications and standards, customer (a) shall use the product without NXP Semiconductors' warranty of the product for such automotive applications, use and specifications, and (b) whenever customer uses the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' specifications such use shall be solely at customer's own risk, and (c) customer fully indemnifies NXP Semiconductors for any liability, damages or failed product claims resulting from customer design and use of the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' standard warranty and NXP Semiconductors' product specifications.

Translations — A non-English (translated) version of a document, including the legal information in that document, is for reference only. The English version shall prevail in case of any discrepancy between the translated and English versions.

Security — Customer understands that all NXP products may be subject to unidentified vulnerabilities or may support established security standards or specifications with known limitations. Customer is responsible for the design and operation of its applications and products throughout their lifecycles to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products. Customer's responsibility also extends to other open and/or proprietary technologies supported by NXP products for use in customer's applications. NXP accepts no liability for any vulnerability. Customer should regularly check security updates from NXP and follow up appropriately.

Customer shall select products with security features that best meet rules, regulations, and standards of the intended application and make the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP.

NXP has a Product Security Incident Response Team (PSIRT) (reachable at PSIRT@nxp.com) that manages the investigation, reporting, and solution release to security vulnerabilities of NXP products.

NXP B.V. — NXP B.V. is not an operating company and it does not distribute or sell products.

Trademarks

Notice: All referenced brands, product names, service names, and trademarks are the property of their respective owners.

NXP — wordmark and logo are trademarks of NXP B.V.

目录

For more information, please visit: https://www.nxp.com.cn

Date of release: 30 January 2024
Document identifier: AN13571