

AN14258

MCXA153上的无传感器BLDC电机控制

第1.0版—2024年3月19日

应用笔记

文档信息

信息	内容
关键词	FRDM_MCXA153、BLDC、电机控制、无传感器控制、速度控制、FreeMASTER
摘要	本应用笔记演示了如何在MCXA系列MCU上实现无刷直流（BLDC）电机的六步换向控制。



1 介绍

本应用笔记介绍了如何在MCXA系列MCU上实现无刷直流（BLDC）电机的六步换向控制。恩智浦Freedom板FRDM-MC-LVBLDC用作电机控制参考解决方案的硬件平台。本应用笔记还介绍了电机控制软件中与硬件相关的部分，包括详细的外设置和驱动程序说明。本文还介绍了FreeMASTER的操作。

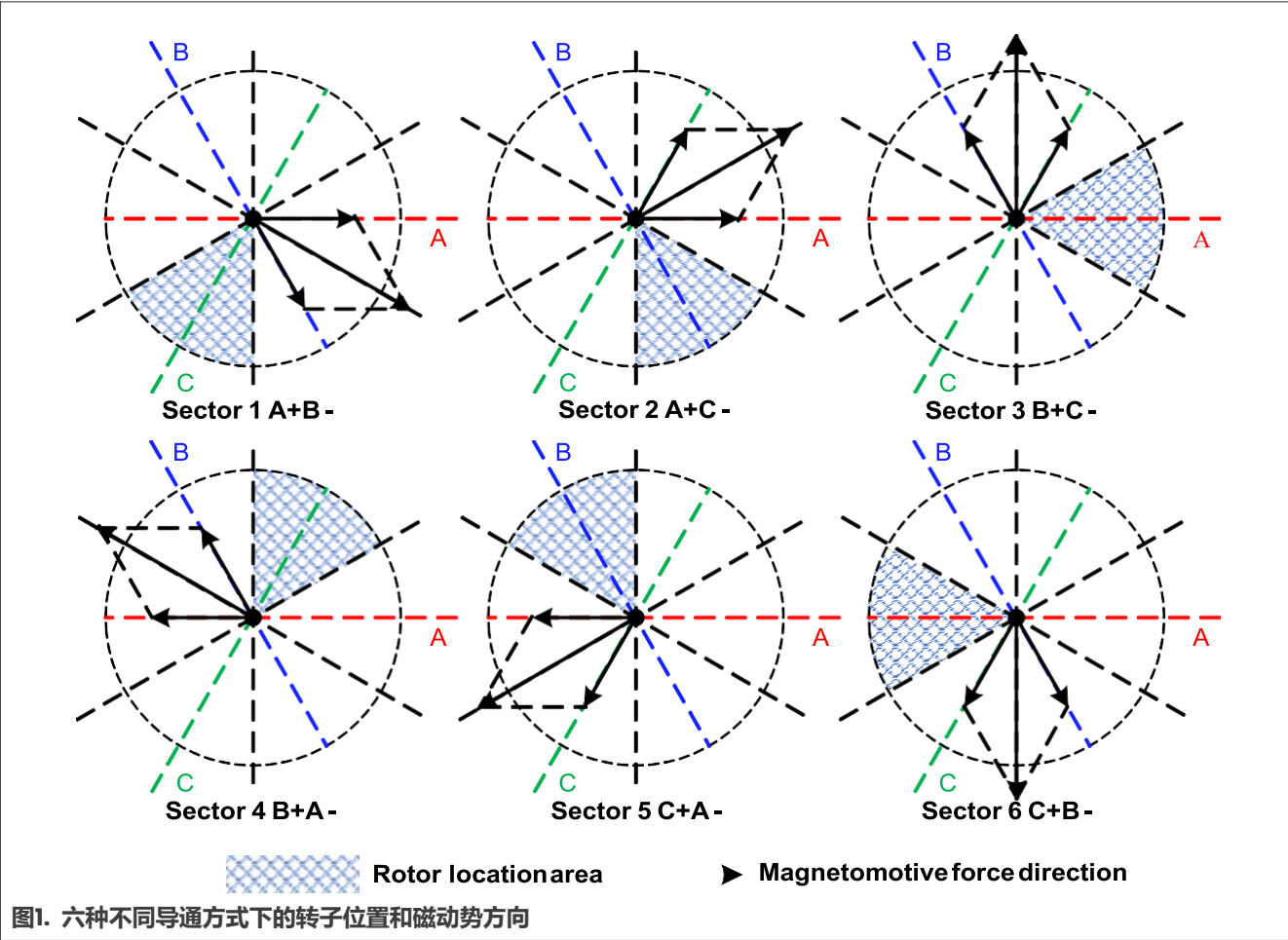
2 BLDC电机无传感器换向控制方法

本章节介绍一种BLDC电机无传感器六步换向控制的方法。

BLDC电机具有以下优点：

- 效率高
- 功率密度高
- 调速性能好
- 结构简单
- 维护方便

BLDC电机采用六步换向的控制模式。在一个电气周期的每个60度扇区中，电流从三相绕组的一相流入，从另一相流出，余者为非导通相。[图1](#)为转子绕组在六种不同位置区间的导通方式。



每种导通模式都会产生一个固定磁动势，相互之间有60度的差异，这处于当前转子位置之前的60度至120度。PWM调制用于控制相绕组中的电流，以改变电磁转矩来加速。

控制BLDC电机需要一个三相逆变电路。三相桥由六个功率开关元器件（Q1至Q6）组成。六步换向控制用于驱动每个开关元器件，如图2所示。

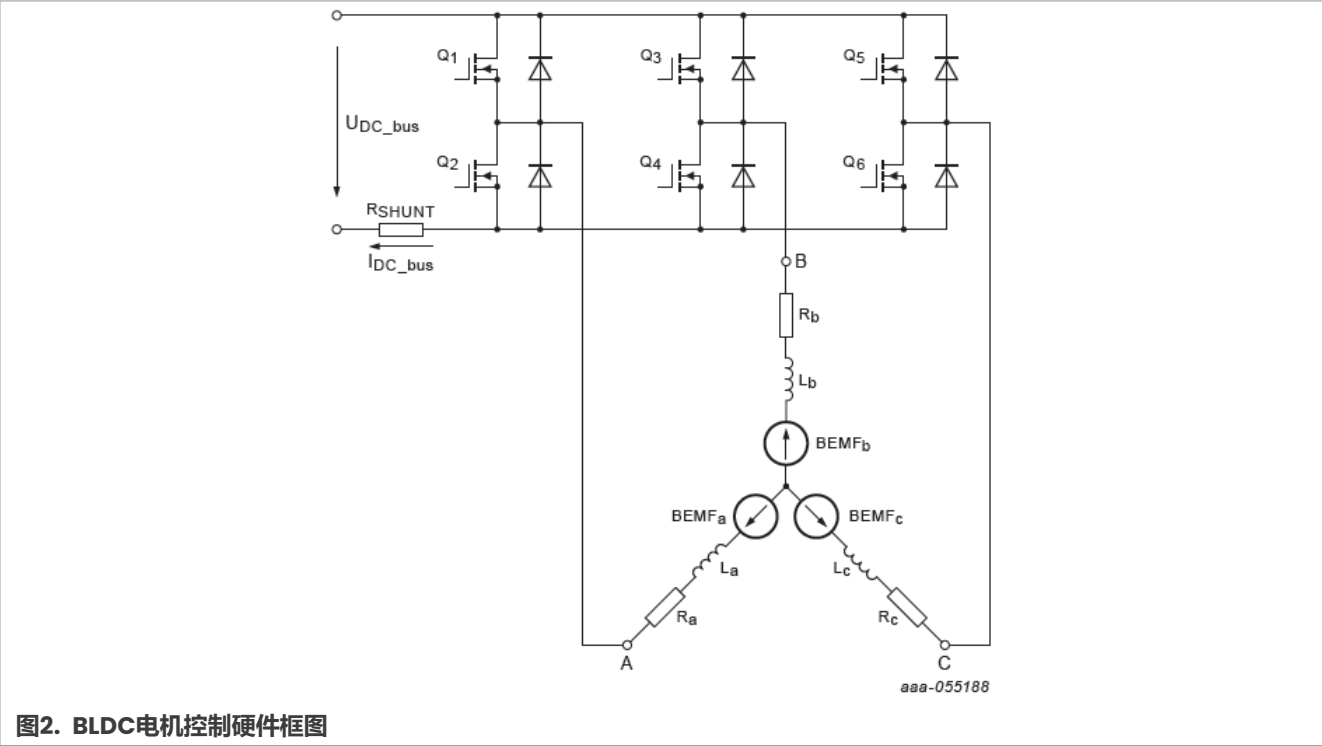


图2. BLDC电机控制硬件框图

当转子的直轴与相绕组的轴线重合时，相绕组的反电动势为零。因此，如果检测到每个相绕组的反电动势的过零点，就可以在一个电气周期内获得转子的六个关键位置。而电动势过零点延迟30度的电角度就是换向控制点。

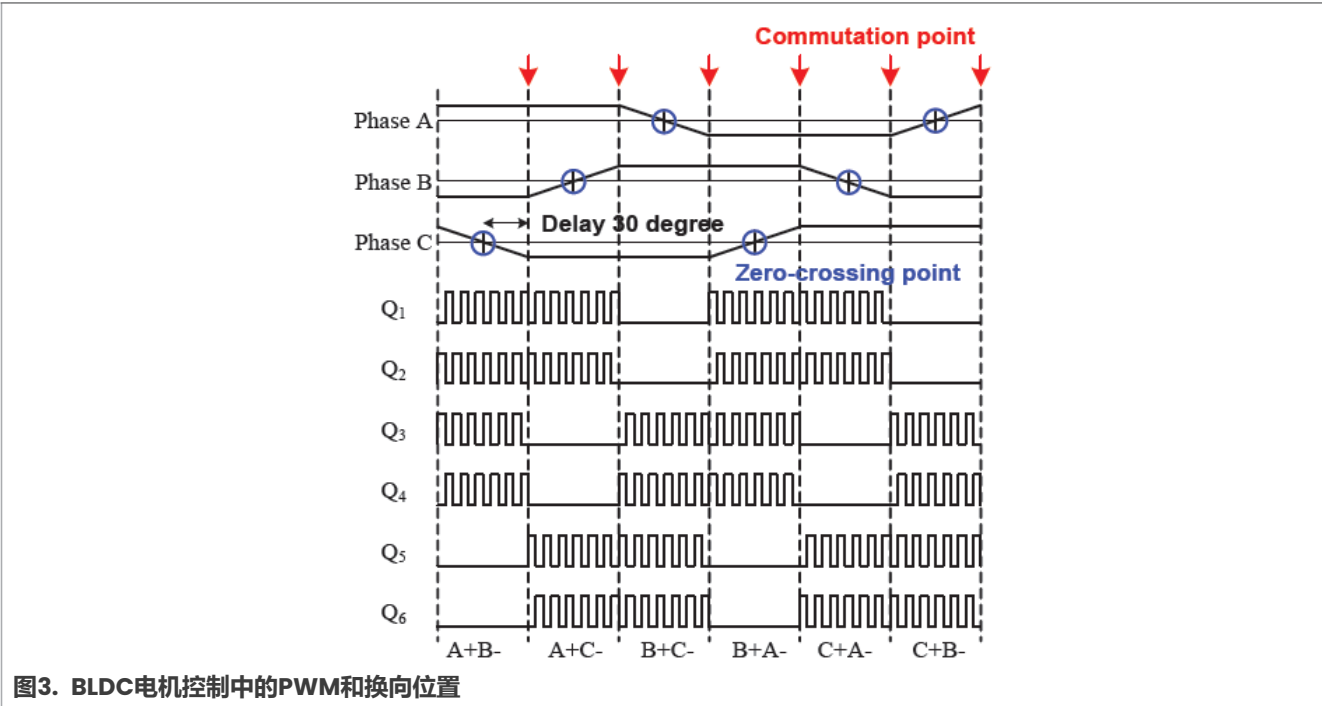


图3. BLDC电机控制中的PWM和换向位置

BLDC电机的六步无传感器换相控制算法，即通过检测BLDC相绕组反电动势（Back EMF）的过零点的方法，可称为反电动势法。反电动势检测实质上是将非导通相的端电压与BLDC（无刷直流）电机的中性点电压进行比较。通常情况下，BLDC电机的中性点是不能导电的。在某些PWM调制模式下，中性点及电机端电压会随着PWM调制规律波动，因此需要采用特殊的处理方法来准确检测反电动势的过零点。

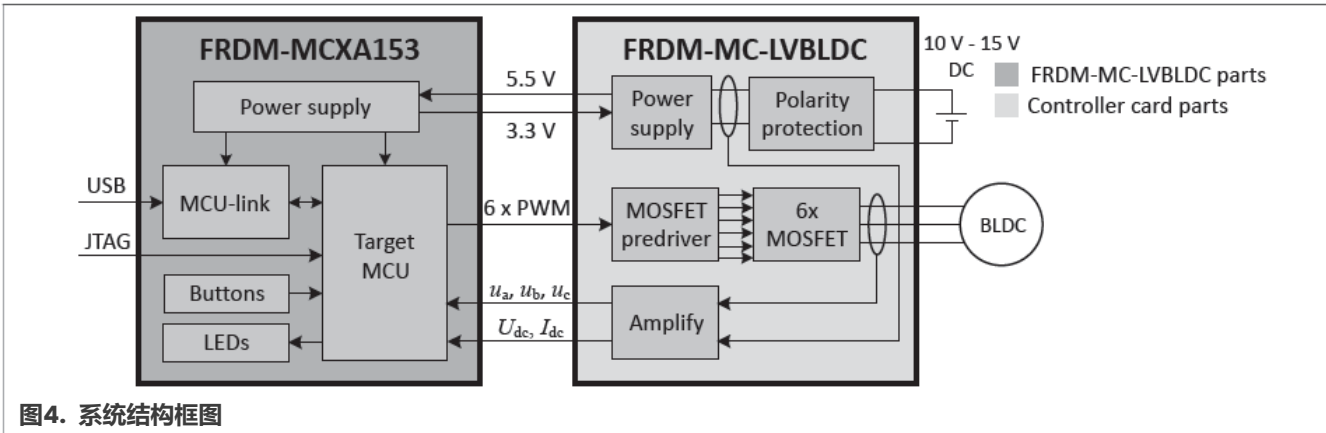
3 开发平台

本章节详细介绍演示所使用开发硬件套件的具体细节。图4展示了该演示的系统结构及连接图。

恩智浦设计的FRDM-MCXA153包含MCXA153 MCU和外设接口。eFlexPWM、ADC和CMP等片上外设，分别用于电机控制、模拟信号采集及保护功能。

MCXA153上运行的应用软件包括以下内容：

- BEMF过零检测算法
- 实时控制嵌入式软件电机控制与功率转换库（RTCESL、CM33NODSP 4.7.1 for MCUXpresso）
- SDK 2.14.2



FRDM-MC-LVBLDC低压三相BLDC Freedom开发板平台为设计应用增加了电机控制功能。FRDM-MC-LVBLDC开发平台的电源输入电压为10VDC至15VDC，并带有反极性保护电路。可产生5.5VDC辅助电源为FRDM MCU板供电。输出电流高达5A RMS。在此板上采样模拟量，例如三相反电动势电压、直流母线电压和直流母线电流。此外，还有一个速度和位置传感器（编码器、霍尔）接口。

4 MCXA153的特性和外设设置

本章节列出了MCXA153的以下特性和外设设置：

- MCXA143/153系列MCU扩展了MCX Arm Cortex-M33产品系列，提供了多种高速连接，工作频率高达96MHz（MCXA143工作频率高达48MHz），以及串行外设、定时器、模拟和低功耗功能。
- MCXA153提供三个32位标准通用异步定时器/计数器（CTIMER），一个eFlexPWM（包含三个子模块；每个子模块支持一对互补输出或两个独立输出），以及一个正交解码器（eQDC）实体。
- MCXA153有一个LPI2C、三个LPUART和两个LPSPI。
- MCXA153有一个I3C通信接口和一个USB FS设备（包含16个使用共享RAM的单向端点）。
- MCXA153有一个4Msps的12位ADC和两个模拟比较器。

4.1 硬件定时和同步

在电机控制应用中，正确且精确的定时至关重要。电机控制专用外设在硬件层处理定时和同步。定时图如图5所示：

- 顶部信号（PWM计数器）显示SM0计数器重新加载。在PWM信号的上升沿插入死区时间。
- VAL4的匹配事件用于在PWM周期开始时生成PWM0_SM0_TRIG0。VAL5的匹配事件用于在PWM周期中间生成PWM0_SM0_TRIG1。它们在PWM周期开始时触发ADC采样母线电流，并在PWM周期中间采样非导通相的反电动势电压和母线电压。
- ADC电压采样转换完成后，进入ADC ISR并计算快速环路控制功能。

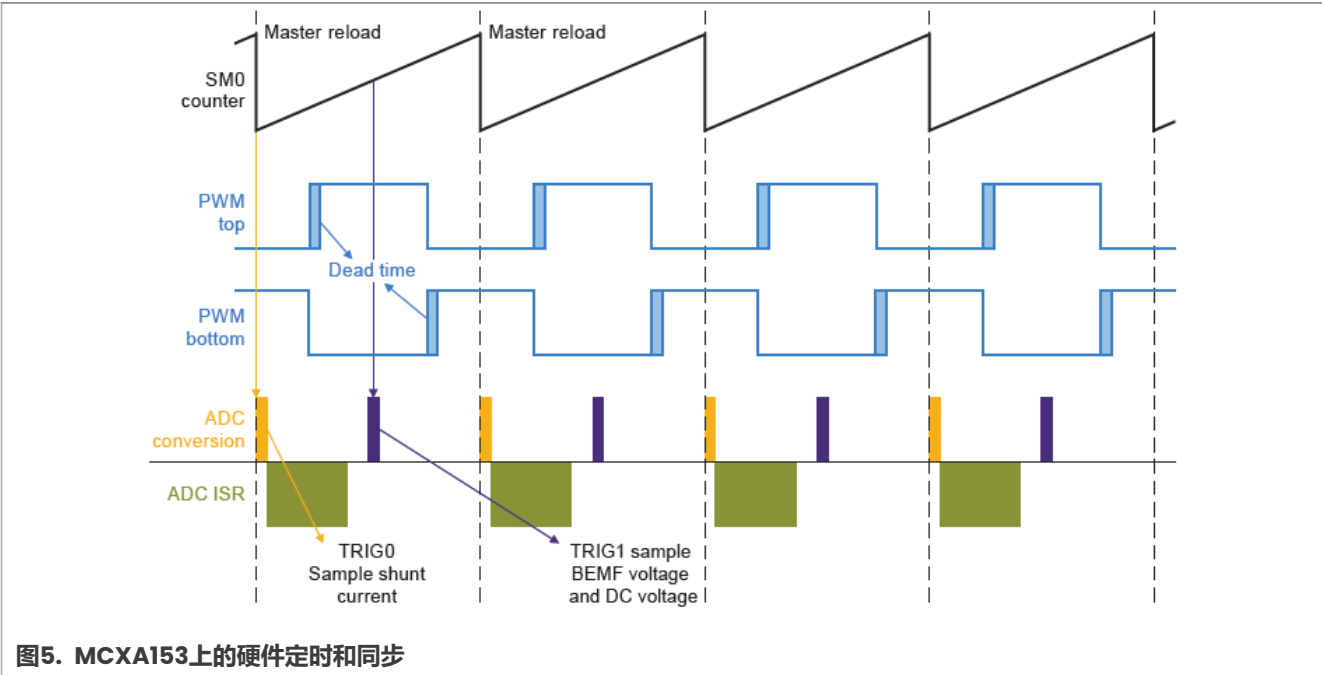


图5. MCXA153上的硬件定时和同步

4.2 外设配置

本节将介绍MCXA153上用于电机控制的外设。在MCXA153上，具有3个子模块的eFlexPWM用于生成六通道PWM，ADC用于测量反电动势电压、直流母线电流和直流母线电压。eFlexPWM通过INPUTMUX触发ADC。一个CTIMER用于生成慢环中断。

4.2.1 系统时钟生成器

系统时钟生成器（SCG）生成并控制本设计中各种模块的时钟。该模块使用可用的时钟源生成时钟根。此电机控制应用中使用的时钟源是快速内部参考时钟（FIRC），其频率最高可提升至192MHz。Arm内核的最高时钟速率为96MHz，而eFlexPWM最多能在192MHz时钟下工作。因此，首先必须将FIRC提升到相对较低的频率。然后，在设置适当的分频因子使Arm内核能正常工作后，再将其频率提升至192MHz，如图6所示。设置其他外设时钟源分频因子。

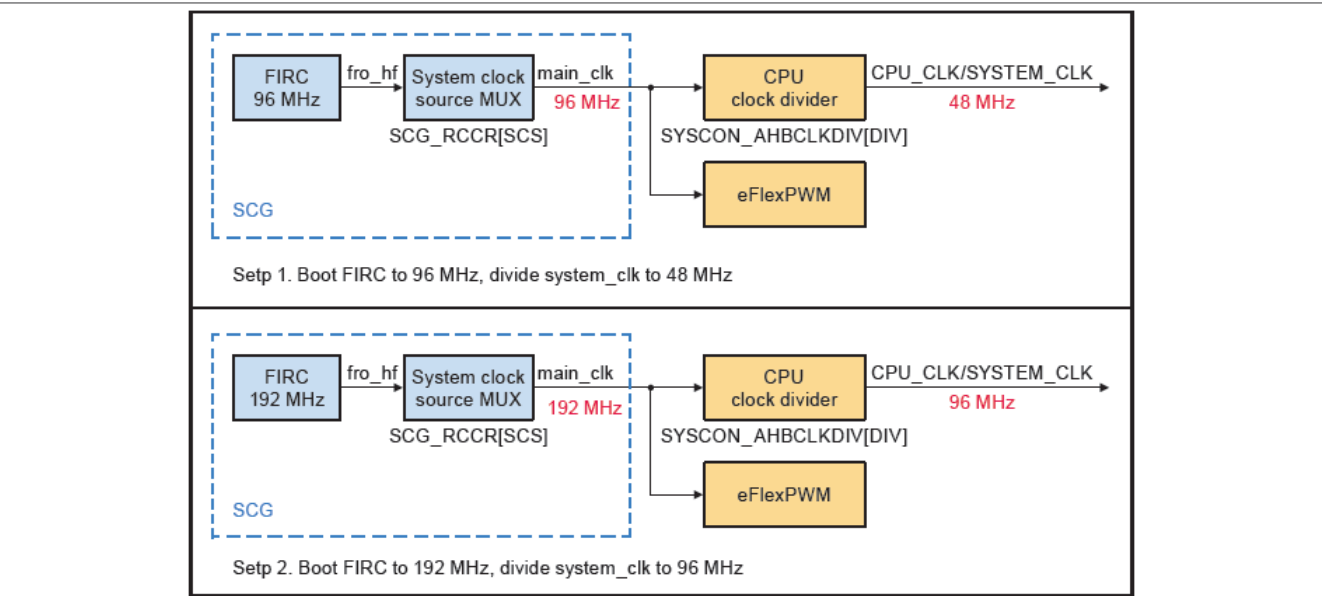


图6. MCXA153系统时钟生成器

表1列出了此电机控制所用外设的时钟源。

表1. MCXA153电机控制外设的时钟源

MCU上的模块	时钟源	分频值
Arm核	FIRC	96MHz
eFlexPWM	FIRC	192MHz
ADC	FIRC	48MHz
CTIMER	FIRC	96MHz
LPUART	SIRC	12MHz

4.2.2 PWM生成 - eFlexPWM0

eFlexPWM的时钟来自192MHz系统时钟。三个子模块的六个通道用于生成3相PWM。

- 子模块0在每个PWM周期生成主重载。
- 子模块1和2从子模块0获取时钟。
- 子模块1和2的计数器与子模块0的主重载信号同步。
- 子模块0用于在PWM周期的开始和中间触发ADC：
 - 当计数器计数到VAL4时，子模块在PWM重载后生成输出TRIG0。
 - 当计数器计数到VAL5时，子模块在PWM周期中间生成输出TRIG1。
- 子模块0、1和2的通道A和B启用故障模式，及自动清除故障功能。在故障输入返回零后的第一次PWM重新加载时，PWM输出会重新启用。
- 计数器从INIT计数到VAL1所需的时间决定了PWM周期（频率）。默认情况下，INIT = -MODULO/2 = -4800和VAL1 = MODULO/2 -1 = 4799。eFlexPWM时钟是192MHz，因此它需要0.00005秒（20kHz）。
- 启用死区时间插入。用户在MI_PWM_DEADTIME宏中定义死区时间长度。

4.2.3 外设触发控制 - INPUTMUX

INPUTMUX将PWM的触发与ADC触发输入和其他外设互连。

- PWM0_SM0_OUT_TRIG0输出触发器连接至ADC_TRIG0。
- PWM0_SM0_OUT_TRIG1输出触发器连接至ADC_TRIG1。

4.2.4 模拟感应 - ADC0

ADC0用于电机控制相采样电流和直流母线电压的模拟感应：

- ADC0的时钟频率为48MHz，它取自系统时钟的4分频。
- ADC采用单端转换和硬件触发方式，工作在12位。
- INPUTMUX通过eFlexPWM生成的触发器触发ADC。

4.2.5 慢环中断生成 - CTIMER0

CTIMER0生成慢环中断：

- CTIMER0的时钟来自系统时钟的2分频，因此CTIMER0的时钟频率为96MHz。
- 慢环比快环慢10倍。速度环频率在MI_SPEED_LOOP_FREQ宏中设置，等于1000Hz。
- 将匹配值寄存器设置为96000。当计数器值等于匹配值3时，计数器初始化为0并产生中断请求。

4.2.6 时间事件处理 - CTIMER1

CTIMER1用于产生中断，以在启动期间执行若干强制驱动、在旋转期间检测换向故障以及执行强制换向。

- CTIMER1的时钟来自系统时钟的2分频，因此CTIMER1的时钟频率为96MHz。
- CTIMER1内部预刻度（PR寄存器）设置为159。预刻度计数器（PC寄存器）使用96MHz时钟源计数，CTIMER1定时器计数器（TC寄存器）在160个预刻度周期后增加。CTIMER1以600kHz频率的自由运行模式工作。
- 在每次时间事件中断和快速控制中断时，都会读取CTIMER1的计数器值。然后根据当前电机状态计算下一个事件时间。如果计数器值达到匹配值，为了进入时间事件中断，将该事件时间存储在匹配寄存器中。

4.2.7 FreeMASTER通信 - LPUART0

MCU板与PC之间的FreeMASTER通信使用低功耗通用异步接收器/发送器（LPUART0）：

- 波特率设置为115,200bit/s。
- 接收器和发送器均已启用。
- 其他设置为默认值。

5 演示操作

本章节演示了电机控制演示程序的操作。

5.1 Linix 45ZWN24-40电机

Linix 45ZWN24-40电机是一种低压三相BLDC电机，带有霍尔传感器，用于BLDC电机控制应用。电机参数列于表2。

表2. Linix 45ZWN24-40电机参数

特性	符号	值	单元
额定电压	V_t	24	V
额定转速	-	4000	RPM
额定扭矩	T	0.0924	Nm
额定功率	P	40	W
持续电流	I_{cs}	2.34	A
极对数	pp	2	-

电机有以下两种连接器（电缆）：

- 第一根电缆有三根专为电机供电的导线。
- 第二根电缆有五根线，专用于霍尔传感器的信号感应。

注：对于无传感器BLDC应用，只需要电源输入线。

表3. Linix 45ZWN24-40

第一根电缆		第二根电缆	
颜色	定义	颜色	定义
白色 ○	A相	红色 ●	电源电压 V_c (5V)
蓝色 ●	B相	黑色 ●	电源接地
绿色 ●	C相	白色 ○	霍尔传感器A
		蓝色 ●	霍尔传感器B
		绿色 ●	霍尔传感器C



5.2 演示设置

图8展示了此演示的电路板连接。

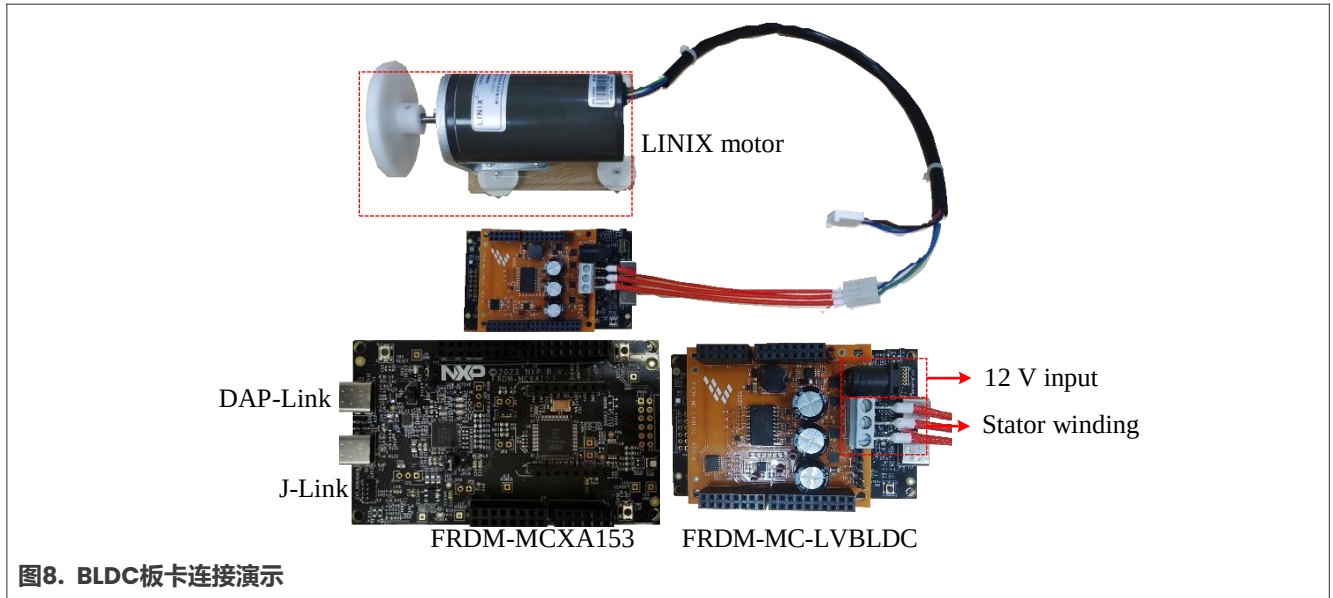


图8. BLDC板卡连接演示

硬件要求如下：

- FRDM-MCXA153板
- FRDM-MC-LVBLDC板
- LINIX电机
- USB Type-C电缆

要设置演示，请执行以下步骤：

1. 将FRDM-MC-LVBLDC shield扩展板连接到FRDM-MCXA153板顶部，如图8所示。确保扩展板上的定子绕组和12V输入连接器与MCXA板的Type-C连接器方向一致。
2. 将3相电机线连接到Freedom BLDC功率级的螺丝端子（J7）。
3. 将12V DC电源（超过40W）插入Freedom BLDC功率级的DC电源连接器。
4. 将USB电缆从USB主机插入FRDM板上的调试USB连接器J15。
5. 从<https://github.com/nxp-appcodehub/an-mc-bldc-mcxa153>克隆演示代码或在[Application Code Hub](#)上搜索“an-mc-bldc-mcxa153”。
6. 打开版本不低于11.9的MCUXpresso IDE，选择**File > import**，如图9所示。
7. 选择**General > Existing Projects into Workspace**，如图9所示。

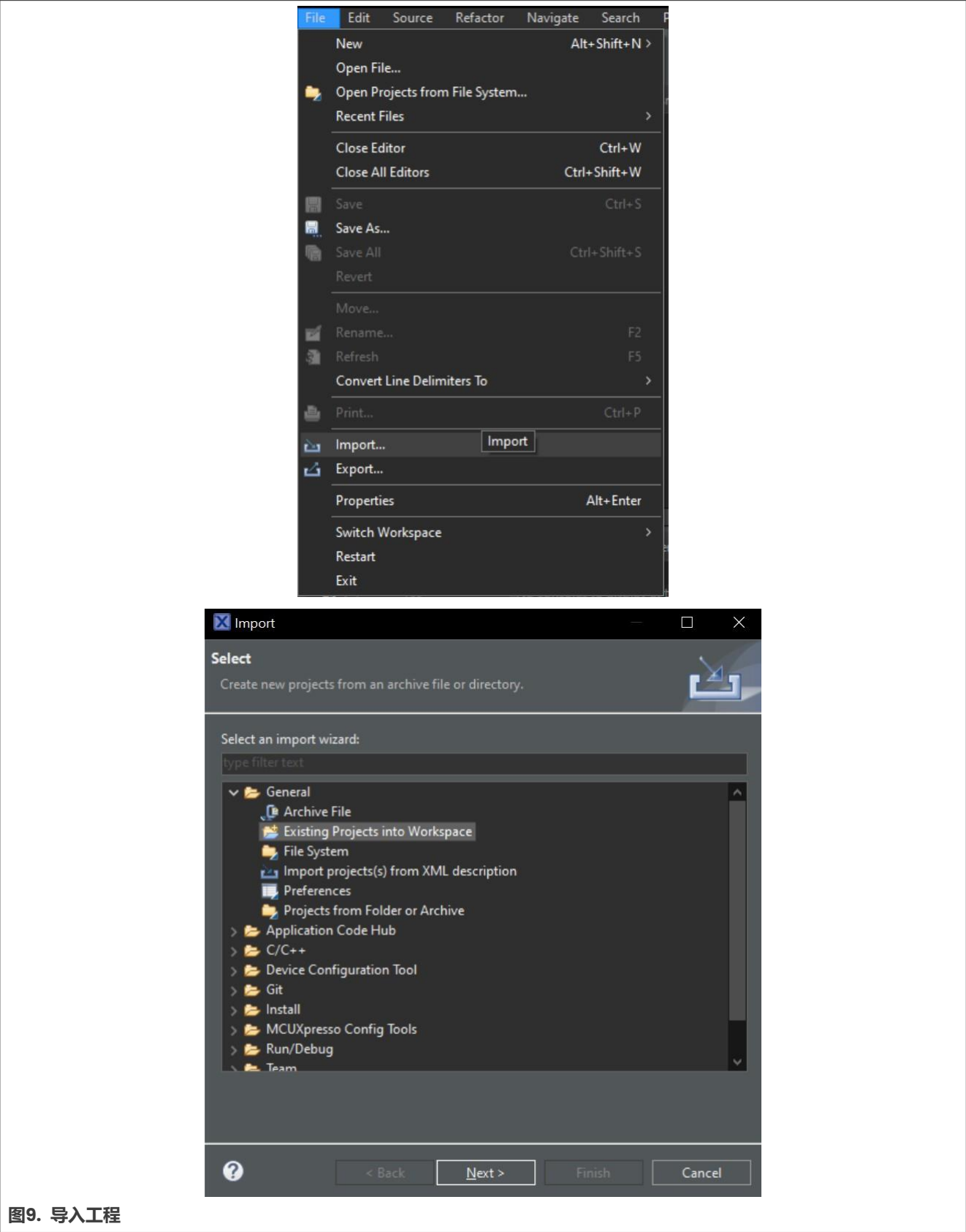


图9. 导入工程

8. 点击**Browse...**选择已下载软件压缩包的本地路径，如图10所示。

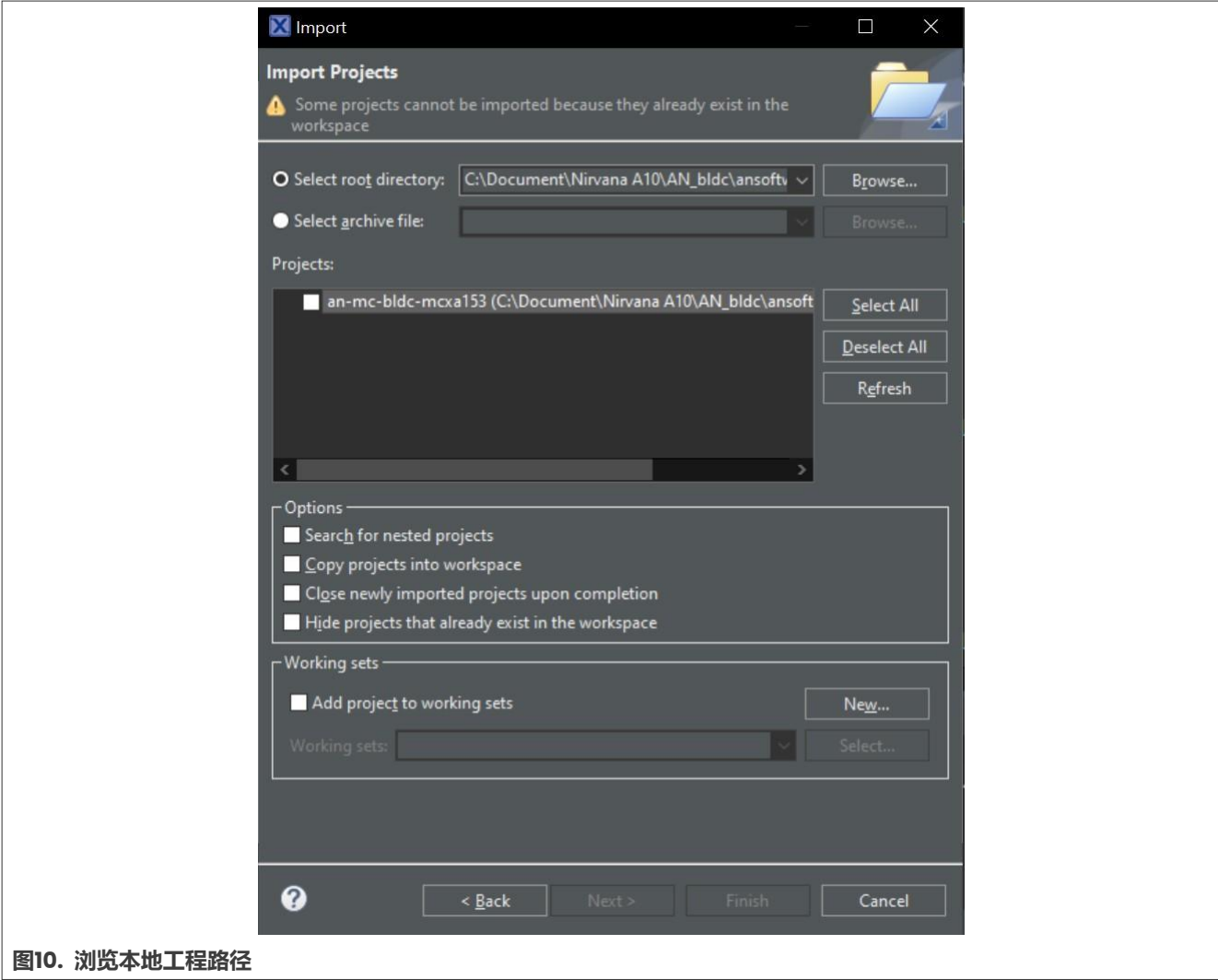


图10. 浏览本地工程路径

9. 编译工程，如图11所示。

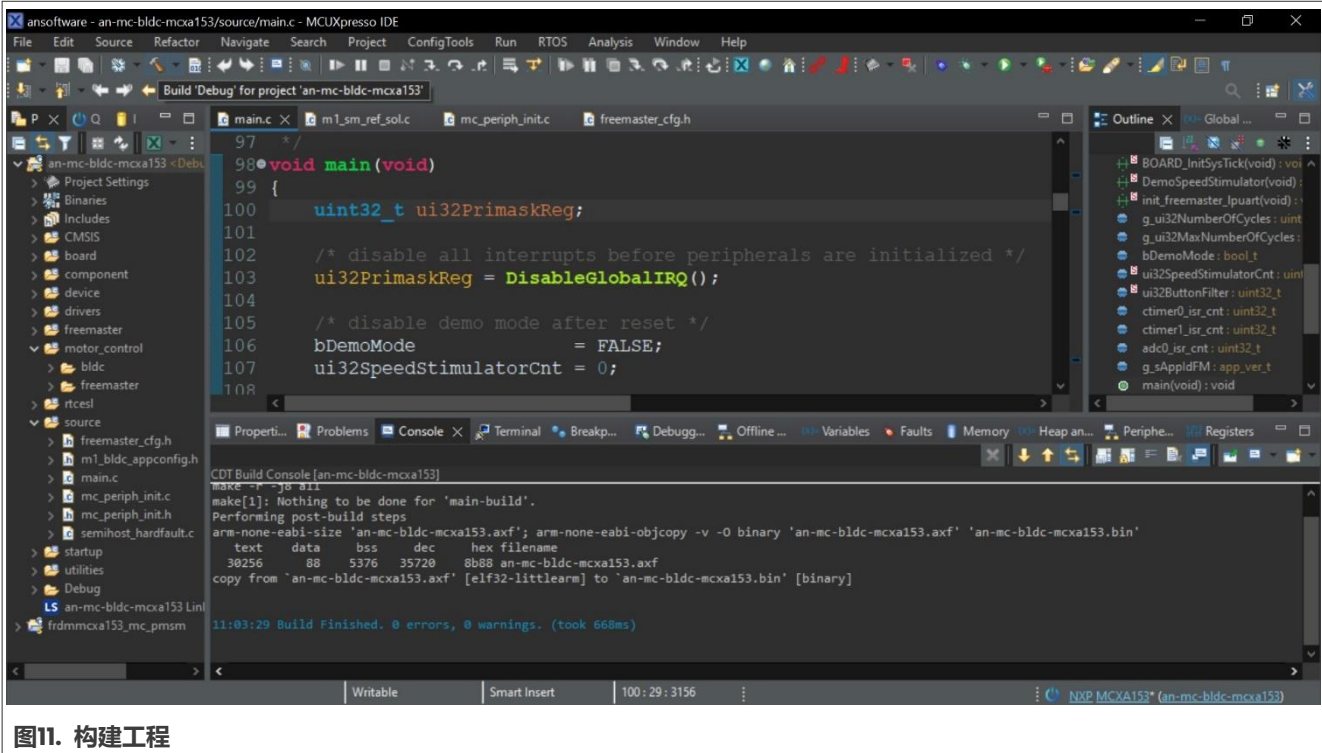


图11. 构建工程

10. 将程序下载到MCU，如图12所示。

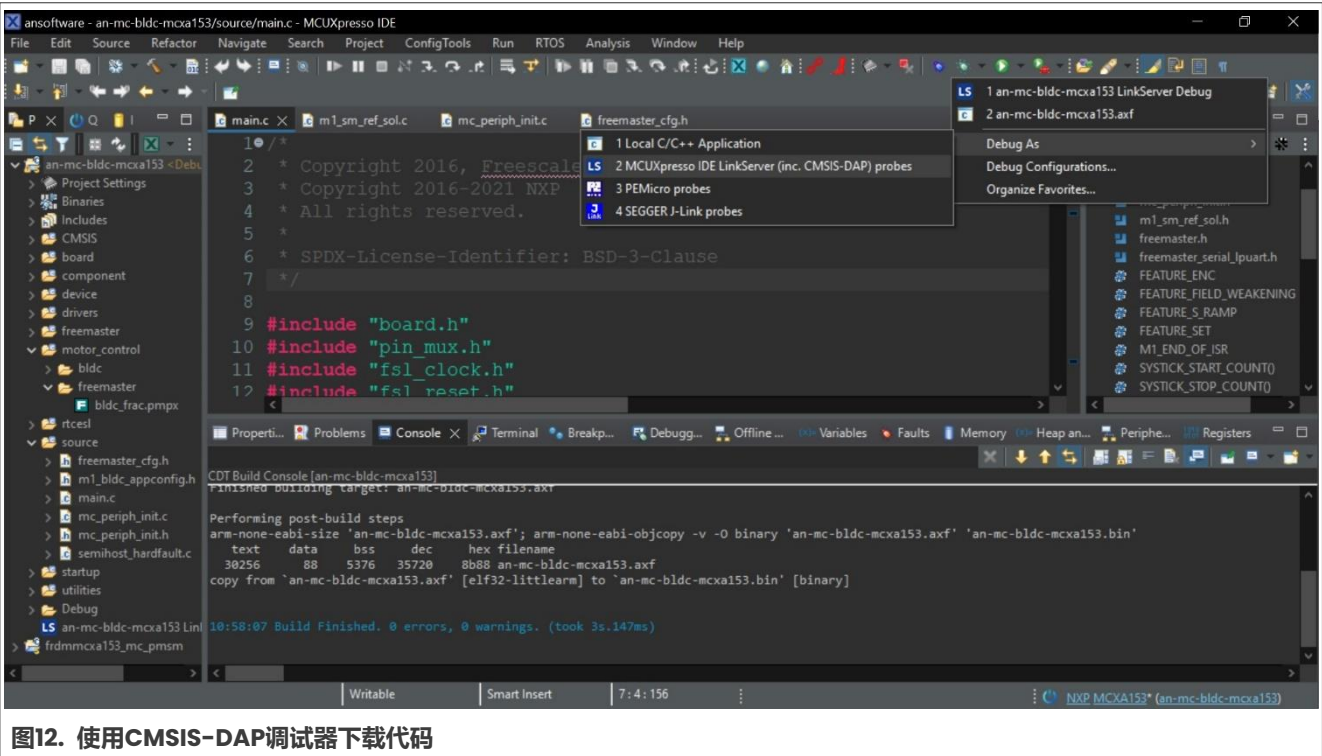


图12. 使用CMSIS-DAP调试器下载代码

11. 要控制电机运行或停止、改变转子速度、查看速度或其他值，可按下FRDM板上的SW2或使用代码包中的FreeMASTER工程bldc_frac.pmpx。

5.3 FreeMASTER操作

FreeMASTER可以控制电机控制应用。本章节介绍FreeMASTER中演示控制的以下操作：

- 1. 要配置通信端口和速度，选择**Project > Options...**。

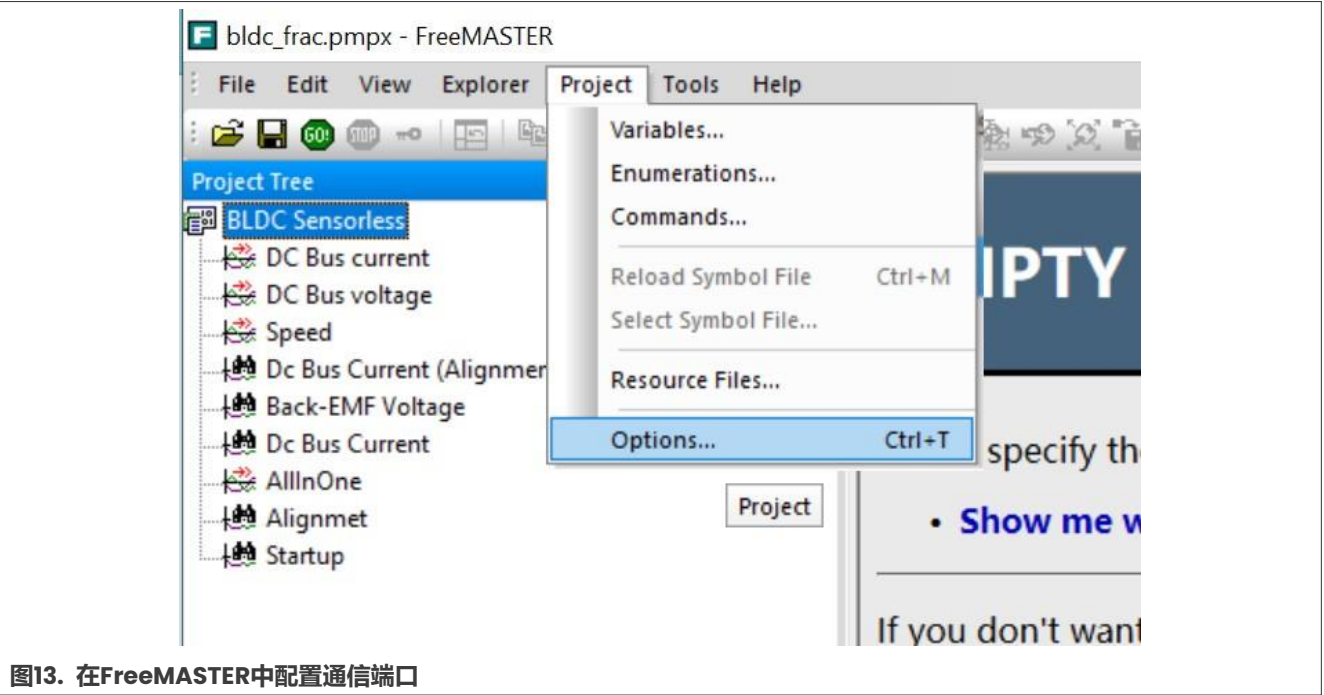


图13. 在FreeMASTER中配置通信端口

- 2. 在**Options**窗口，选择 “Comm” 选项卡，并选择以下属性：
 - 将**Port**设置为相应的 “COM”
 - 将**Speed**设置为 “115200”

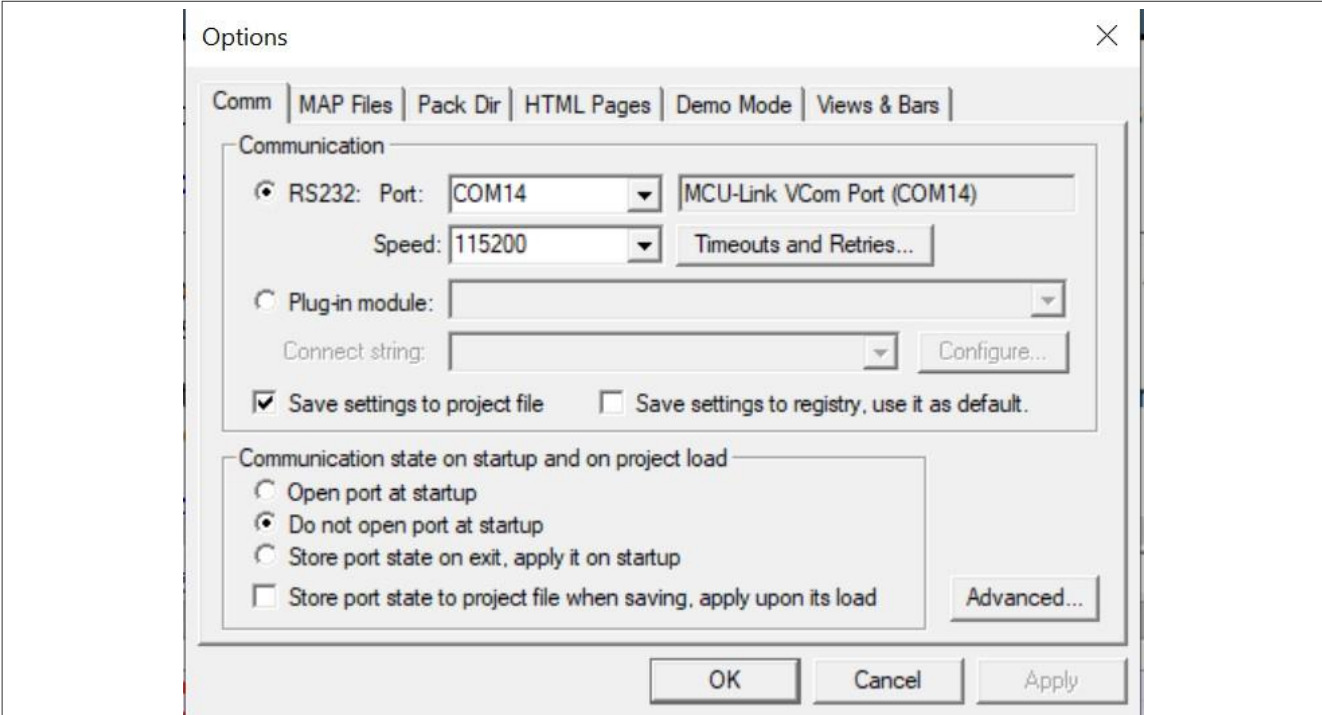


图14. 选择属性

3. 要开始通信，请单击 .

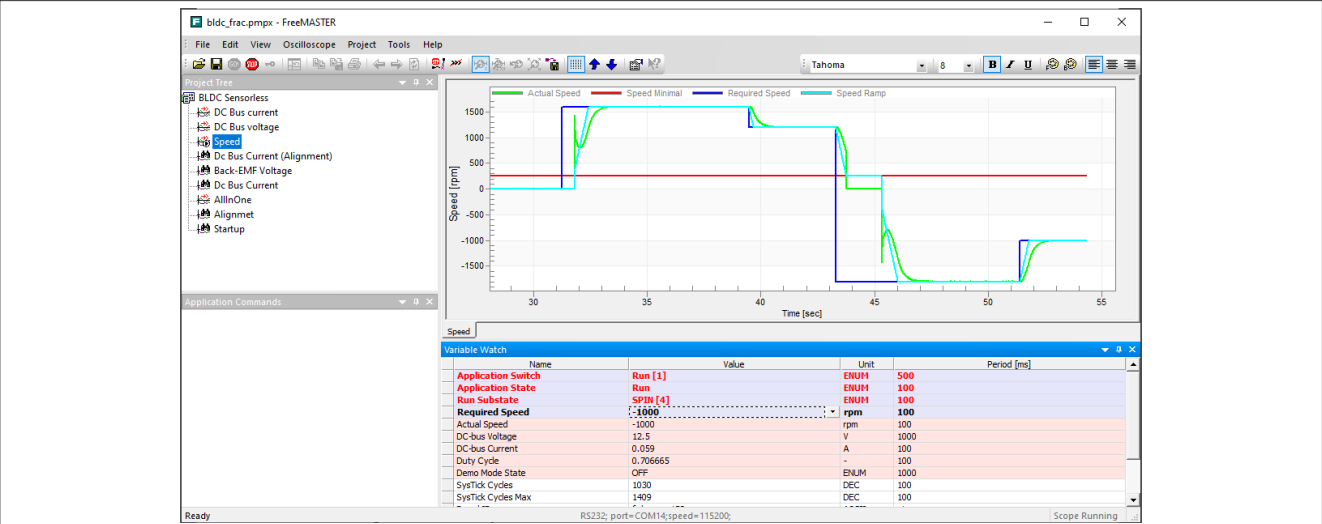


图15. 在FreeMASTER中操作

5.4 CPU负载和内存使用情况

以下信息适用于使用MCUXpresso IDE 11.9构建的演示应用，优化级别设置为“最优化（-O3）”。

[表4](#)和[表5](#)显示内存使用情况和CPU负载。CPU负载是通过SysTick定时器测量的。

表4. 系统内存

内存区域	使用大小	区域大小	使用百分比
板FLASH	30,256字节	128kb	23.6%
板SARM	5464字节	24kb	22.8%

表5. CPU负载

CPU负载	已用大小	总数	负载百分比
快速回路	949	4800	19.8%

6 参考资料

本文档有以下补充参考资料：

- MCX A153、A152、A143、A142参考手册 ([MCXAP64M96FS3RM文档](#))
- MCUXpresso SDK Builder (板: SDK_2.14.2_FRDM-MCXA153) : [MCUXpresso SDK Builder](#)
- MCUXpresso SDK 3相PMSM和BLDC电机的磁场定向控制 (FOC) ([PMSMFRDMMCXA153文档](#))

7 关于本文中源代码的说明

本文中所示的示例代码具有以下版权和BSD-3-Clause许可：

2024年恩智浦版权所有；在满足以下条件的情况下，可以源代码和二进制文件的形式重新分发和使用本源代码（无论是否经过修改）：

- 重新分发源代码必须保留上述版权声明、这些条件和以下免责声明。
- 以二进制文件形式重新分发时，必须在文档和/或随分发提供的其他材料中复制上述版权声明、这些条件和以下免责声明。
- 未经事先书面许可，不得使用版权所有者的姓名或参与者的姓名为本软件的衍生产品进行背书或推广。

本软件由版权所有者和参与者“按原样”提供，不承担任何明示或暗示的担保责任，包括但不限于对适销性和特定用途适用性的暗示保证。在任何情况下，无论因何种原因或根据何种法律条例，版权所有或参与者均不对因使用本软件而导致的任何直接、间接、偶然、特殊、惩戒性或后果性损害（包括但不限于采购替代商品或服务；使用损失、数据损失或利润损失或业务中断）承担责任，无论是因合同、严格责任还是侵权行为（包括疏忽或其他原因）造成的，即使事先被告知有此类损害的可能性也不例外。

8 修订历史

[表6](#)总结了本文档的修订情况。

表6. 修订历史

文档ID	发布日期	说明
AN14258 v.1.0	2024年3月19日	首次公开发布

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.

AMBA, Arm, Arm7, Arm7TDMI, Arm9, Arm11, Artisan, big.LITTLE, Cordio, CoreLink, CoreSight, Cortex, DesignStart, DynamIQ, Jazelle, Keil, Mali, Mbed, Mbed Enabled, NEON, POP, RealView, SecurCore, Socrates, Thumb, TrustZone, ULINK, ULINK2, ULINK-ME, ULINK-PLUS, ULINKpro, μ Vision, Versatile — are trademarks and/or registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries or affiliates) in the US and/or elsewhere. The related technology may be protected by any or all of patents, copyrights, designs and trade secrets. All rights reserved.

MCX — is a trademark of NXP B.V.

目录

1 介绍..... 2

2 BLDC电机无传感器换向控制方法..... 2

3 开发平台..... 4

4 MCXA153的特性和外设设置..... 5

4.1 硬件定时和同步 5

4.2 外设配置..... 6

4.2.1 系统时钟生成器 6

4.2.2 PWM生成 - eFlexPWM0 7

4.2.3 外设触发控制 - INPUTMUX 8

4.2.4 模拟感应 - ADC0 8

4.2.5 慢环中断生成 - CTIMER0 8

4.2.6 时间事件处理 - CTIMER1 8

4.2.7 FreeMASTER通信 - LPUART0 8

5 演示操作..... 8

5.1 Linux 45ZWN24-40电机 9

5.2 演示设置..... 10

5.3 FreeMASTER操作..... 14

5.4 CPU负载和内存使用情况..... 15

6 参考资料..... 16

7 关于本文中源代码的说明..... 16

8 修订历史..... 16

法律声明..... 18

Please be aware that important notices concerning this document and the product(s) described herein, have been included in section 'Legal information'.

© 2024 NXP B.V. All rights reserved.

For more information, please visit: <https://www.nxp.com.cn>
Date of release: 19 March 2024
Document identifier: AN14258