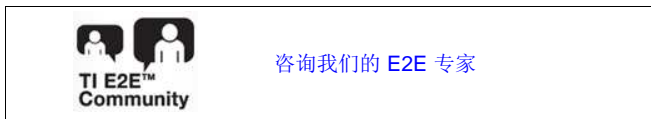


概述

ESC 模块是非军用无人机中非常重要的子系统；如果用户需要更高效的机型来实现更长的飞行时间、更好的动态行为和更加平顺、稳定的性能，那么非常适合使用此类模块。本 TI 设计采用了通常用于无人飞行器 (UAV) 或无人机的电子调速器 (ESC)。在本设计中，速度控制通过无传感器的方式完成，并使用 FOC 速度控制技术对电机进行了电气频率高达 1.2kHz（对于 6 极电机而言为 12kRPM）的测试。我们的无人机 ESC 高速无传感器 FOC 参考设计拥有一流的 FOC 算法实施，可实现更长的飞行时间、更佳的动力性能，且具有更高的集成度，因此电路板尺寸更小，BOM 组件更少。无传感器高速 FOC 控制技术使用 TI 的 FAST™ 软件观测器，利用了 InstaSPIN-Motion™ C2000™ LaunchPad™ 和 DRV8305 BoosterPack™。

资源

- TIDA-00916 设计文件夹
- DRV8305 产品文件夹
- TMS320F28069F 产品文件夹
- DRV8305N 三相电机驱动 BoosterPack 工具文件夹
- C2000 Piccolo F28069M MCU LaunchPad 工具文件夹
- TIDA-00643 设计文件夹

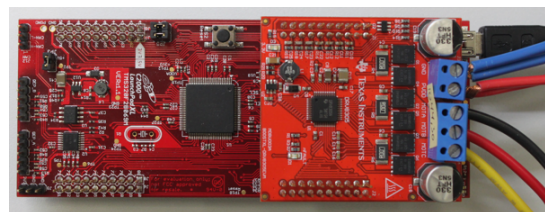
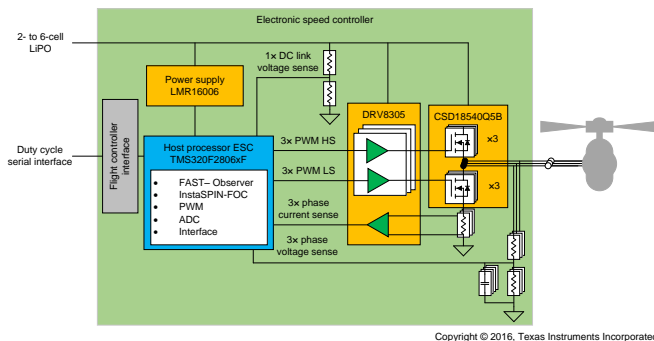


特性

- InstaSPIN-FOC™ 无传感器 FOC 可实现最高的动态性能；使用三节锂聚合物电池在高达 12,000 RPM 转速下进行了测试
- 高动态性能：在不到 0.2s 的时间内将转速从 1kRPM 提高到 10kRPM（电气频率 100Hz 至 1kHz），从而实现高性能偏转和俯仰动作
- 适于完成翻转动作的快速翻转能力
- 通过阻塞换向提高 FOC 效率，因此可实现更长的飞行时间
- 更高的 PWM 开关频率（经测试高达 60kHz），可针对低电感高速电机降低电流/扭矩纹波，并且可以避免干扰超声波传感器
- 灵活的功率级支持两节到六节锂聚合物电池
- 由于 InstaSPIN-FOC 的自动电机参数识别：自动调优无传感器 FOC 解决方案，因此可缩短产品上市时间
- 根据绕组电阻变化进行电机温度估算，从而保护电机在临时过载情况下免受损坏

应用

- 无人机和 UAV
- 高速电机
- 电池供电的电动工具



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统概述

1.1 系统说明

就无人机而言，完整无人机飞行系统包含的不同子系统通常涉及到以下模块定义。图 1 中显示了这些模块定义。

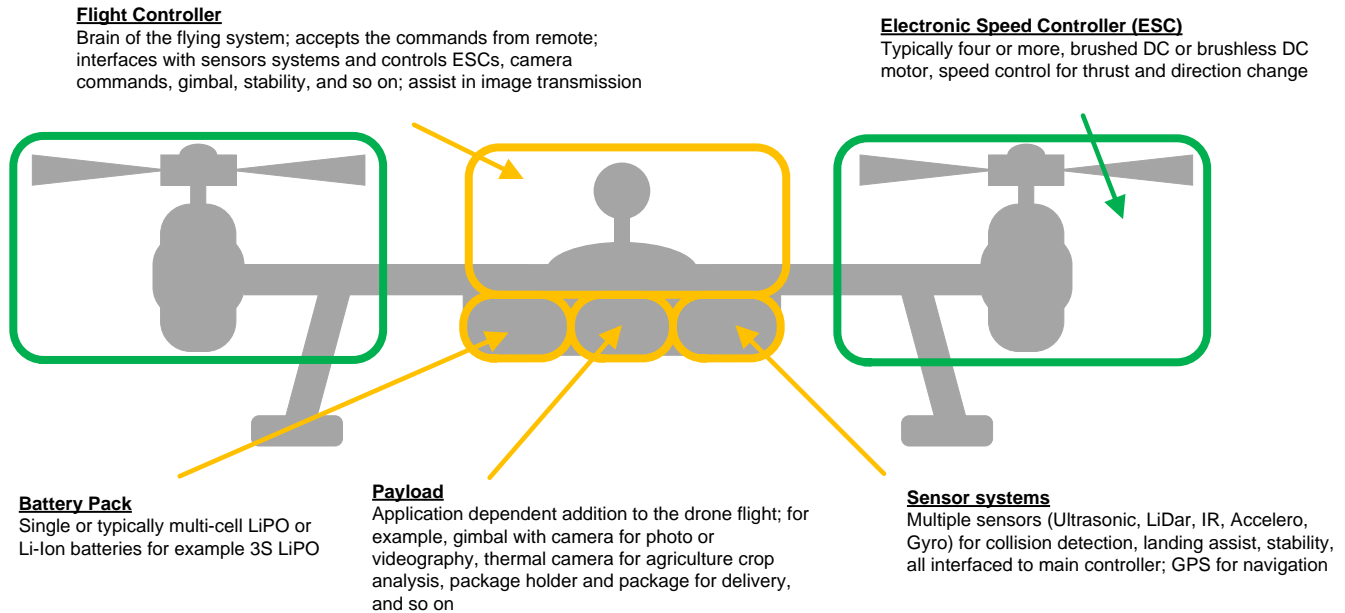


图 1. 无人机飞行系统的模块

本 TI 设计指南重点介绍电子调速器 (ESC)。

1.1.1 无人机的 ESC 功能要求

ESC 定义了无人机的动态运动性能和飞行时间。无人机必须能够完成的一些运动模式包括：

- 精确运动模式：航行、悬停
- 快速运动模式：沿 x/y/z 方向 360° 旋转、水平最高速度飞行、垂直最高速度飞行

为了提供这些功能，需要使用优秀的 ESC 来控制所用电机在所有速度下产生的升力。这样一来，基于位置传感器模块的稳定算法可以补偿影响无人机的振动和外力。能够改变的电机速度越快，稳定算法需要执行的速度变化就越少；因此，使用的能量少于无人机以高度变化的速度运行的情况下（使用动态性较差的 ESC 时便属于这种情况）所需的能量。

1.1.2 最佳系统性能

定义前面章节中所述的细节对于了解无人机所需的系统性能是非常重要的。凭借这一系统规格，我们可以定义 ESC 的性能。根据所要设计的无人机类型，可以对 ESC 的性能做出某些妥协。

在设计低端无人机时，通常使用刷式直流电机或三相梯形反电动势控制型电机，因为此类电机价格便宜并且性能在可接受范围。这些电机通常采用开环控制方式运行。角度和电流控制都是如此。

中端无人机通常使用三相梯形反电动势电机。与前者不同之处在于，这种电机在运行时将采用闭环角度估算技术，也可能是采用一种简单的电流控制算法，但通常属于开环电流控制方式。为了节省成本，这种电机使用低性能控制器。

高端无人机通常使用三相正弦反电动势电机。在某些情况下，还使用梯形反电动势电机，但会导致动态性能比正弦绕组电机的动态性能更差。

目前有一种从梯形控制技术向正弦控制技术过渡的趋势，而这种发展趋势使无传感器的控制技术变得更加重要，因为使用角度传感器会导致解决方案缺乏成本竞争力。除了成本之外，此处的第二个问题在于传感器所需的高速度。

如果想要构建 ESC 以便开发无传感器算法，从而提供足够出色的角度精度来控制电机，这当然需要付出一些努力。

1.1.2.1 正弦控制型 ESC 模块

本 TI 设计重点介绍采用正弦控制方式的 ESC。有了这种选择，请考虑以下几点：

- 以 1 到 5 度的最小精度测量转子的磁场角度，从而使用 FOC 算法确保最大扭矩，或
- 根据电机的相电压和相电流估算转子磁角（无传感器算法）

图 2 显示了三个相位的典型 PWM 高侧和低侧图形，并显示了以正弦控制方式运行电机时消除 PWM 载波后的相应理想滤波相电压。

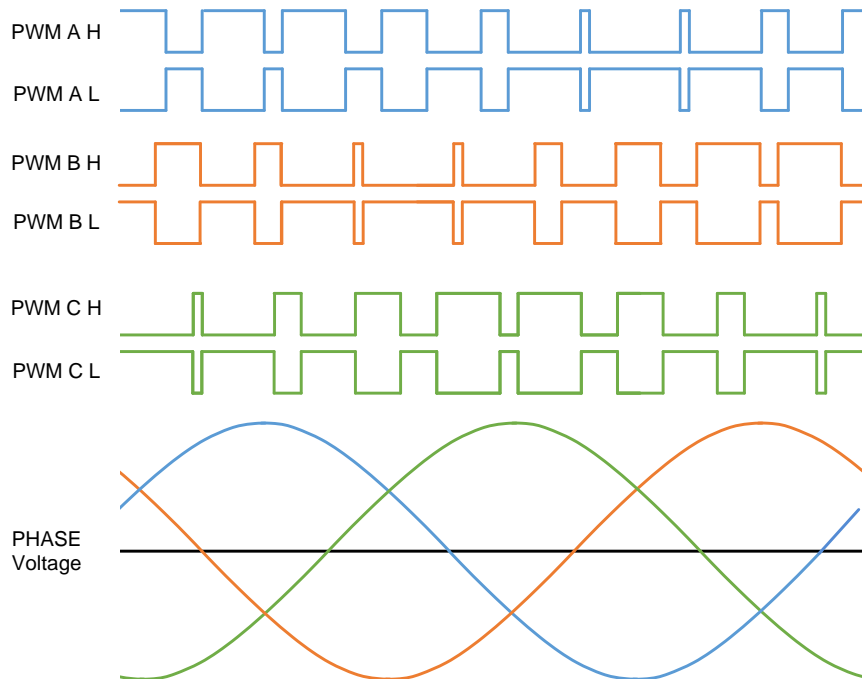


图 2. 生成理想的 PWM 到正弦相电压

由于角度变化很小，因此与梯形控制方案相比，系统的扭矩纹波保持最小状态。选择控制算法后，下一步需要决定控制方式应该是开环还是闭环。

在开环控制中，同步电机（BLDC 或 BLAC）由控制信号进行盲目驱动，并假定该电机将跟随指定的控制动作。

一个问题是假定电机跟随控制信号可能是错误的。为确保电机正确运行，需要在绕组上施加比理想电流更大的电流来强制该运动。最终，这是开环控制电机与闭环控制电机相比系统效率降低的主要原因。

在闭环控制中，电机控制系统能够测试电机是否按照预期运行。如果不能按预期运行，控制环路会自动通过减少或增加电流进行补偿。

无论是使用闭环控制还是使用无传感器算法，都必须测量电流和电压信号，以便将这些信号用作反馈信号。对于正弦控制，应测量最多三个分流电流。进行电压测量时，应选择仅测量 DC link 电压还是同时测量三相电压和 DC link 电压。图 3 显示了正弦控制的测量配置。

有关控制算法的更多详细信息，请参阅电机控制纲要[9]。

1.1.3 电子调速器 (ESC)

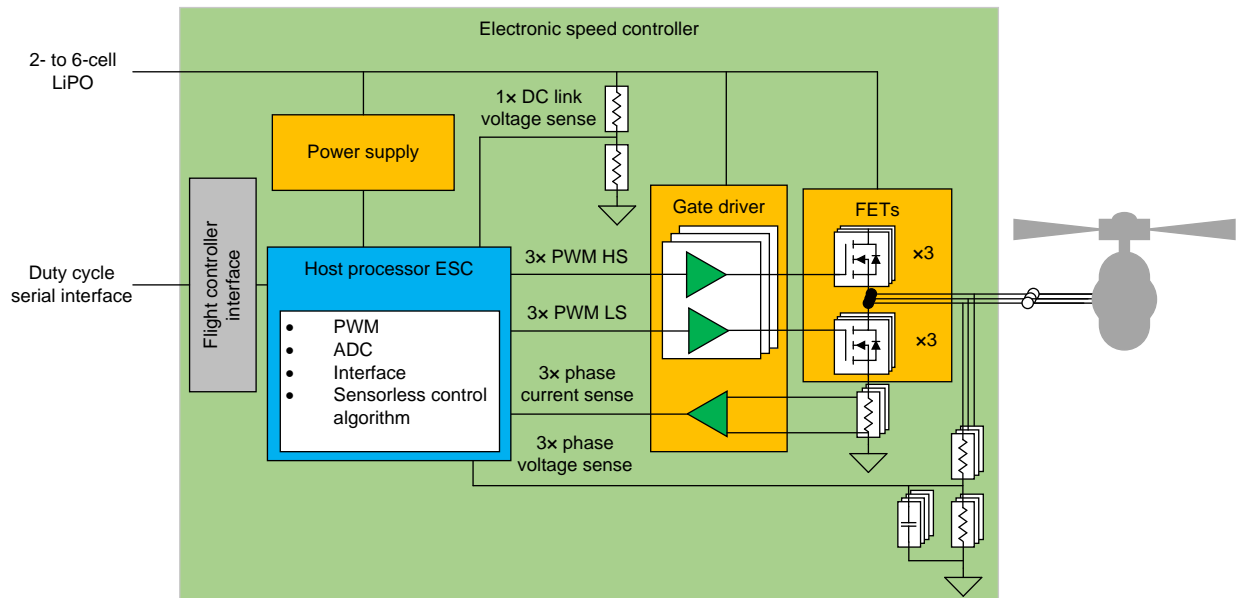
无人机的发动机运行速度必须按照无人机的重量和螺旋桨的尺寸确定，以便产生无人机飞行所需的升力。为无人机设计的典型三相无刷电机具有以下常见特性：

- 低电感
- 低电阻
- 两到八个极对
- 1000Hz 或更高的电气频率

该电机采用优化设计，可由包含两节至六节电池（即 7.4V 至 22.2V 直流电压）的锂聚合物电池供电。这些电压用于设计所选电机的最大速度。

此处的一个常见问题是以最大速度运行接近 V_{BUS} 的电机，因为此处的 FOC 算法和无传感器算法都必须足够出色才能支持此运行方式。

本报告中使用的 ESC 适用于使用无传感器算法的三相无刷电机。该 ESC 模块的组件如图 3 所示。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 3. 无人机 ESC 的框图

1.2 主要系统规格

本 TI 设计需要一个具有上述传感能力的三相半桥功率级，以便生成无传感器算法所需的反馈信号。

此功率级必须由包含两节至六节电池（即 V_{BUS} 为 7.4V 至 22.2V）的锂聚合物电池供电。

由于电机和依赖于频率的传感器具有较低的时间常数，因此 PWM 频率较高；典型的电流设计使用大约 45kHz 至 60kHz 的 PWM 频率，并有进一步增加的趋势。

其次需要一种与飞行控制器通信的方式，可使用占空比或串行通信方式完成。

表 1. 主要系统规格

参数	规范
输入电压	4.4V 至 45V，支持包含两节至六节电池甚至更多节数的锂聚合物电池
电机相位的 PWM 频率	45kHz 或更高
角度检测	在全速范围内使用 InstaSPIN-FAST 进行无传感器角度估算
无传感器角度精度	为实现高效率：角度精度在 1024 机械编码器稳定状态的 ± 1 计数范围内
电机控制算法	采用 FOC 算法进行高速电机的速度控制
电流控制	22.5kHz
电流环路带宽	2.5kHz（取决于硬件）
观测器	22.5kHz
速度范围	-12 至 12kRPM
加速度	高达 86kRPM/s
固件	InstaSPIN-FOC

1.2.1 功率级

LaunchPad 和 BoosterPack 采用单个电源供电。该电源的电压范围为 4.4V 至 45V。功率级包含用于无刷直流驱动器的三个半桥。这三个半桥必须以最大速度为电机提供功率，使电机功率可高达 500W。

1.2.2 电压和电流检测

BoosterPack 还支持无传感器算法所需的电压和电流检测。本示例中需要测量的是 V_{BUS} 、三个相电压和三个相电流。电流测量通过低侧分流器完成，所使用的三个电流检测放大器集成在 DRV8305 IC 中。

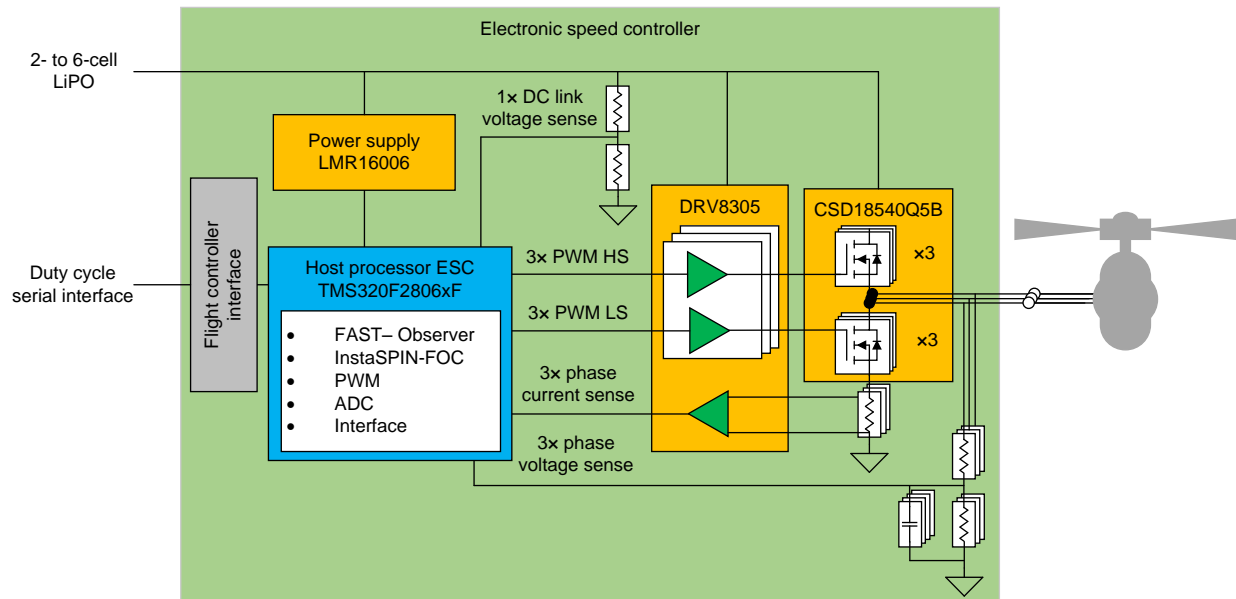
1.2.3 ESC 控制器

对于 ESC 控制器，需要使用 TMS320F28069F 来提供电机控制平台。使用此器件可以启用无传感器反电动势观测器算法 InstaSPIN-FAST。

该算法为客户提供基于反电动势的角度估算器，而目前在电机控制的设计阶段只需要考虑 FOC 算法。

InstaSPIN-FOC 算法是作为 BSD 授权的开源软件包（称为 MotorWare™）提供的；通过该软件包，客户可以开始使用 FOC 电机控制，并且可以使用客户特有的算法更新和改进该算法，从而重点关注电机的实际运动而不是角度估算，这种方式正在取代角度传感器。

1.3 方框图



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 4. 方框图

1.4 重点产品

本 TI 设计使用以下主要产品，并重点介绍它们的主要特性。

1.4.1 TMS320F2806xF

F2806xF Piccolo™ 系列微控制器 (MCU) 将 C28x 内核和控制律加速器 (CLA) 的性能与高度集成的控制外设整合到低引脚数的器件中。

一个内部稳压器实现了单电源轨运行。高分辨率脉宽调制器 (HRPWM) 模块经过强化以实现双边沿控制 (频率调制)。该器件内还新增了采用 10 位内部基准的模拟比较器，可通过与其直接相连来控制 ePWM 输出。ADC 可在 0V 至 3.3V 的固定满量程范围内实施转换，并支持比例式 V_{REFHI}/V_{REFLO} 基准。ADC 接口已针对低开销和延迟进行了优化。

该器件在专用于执行的 ROM 中包含专用的电机控制软件以实现 InstaSPIN-FOC 解决方案，并通过 MotorWare 提供系统软件支持。

InstaSPIN-FOC 特性 + FAST:

- 取代了“无传感器”场定向扭矩控制器 (FOC) 中的机械编码器和旋转变压器
 - 将 FAST™ 软件编码器用作卓越的转子磁通传感器
- 加快了控制系统设计速度
 - 内置电机参数识别
 - 自动闭环电流控制调优
 - 仅需数分钟即可完全调优观测器并稳定扭矩控制器
- ROM 中提供了完整的 InstaSPIN™-FOC 控制系统
 - 选择 Piccolo MCU 器件
 - 通过 MotorWare 软件获取软件 API 和多种示例项目

- 电压和电流滤波可确保向系统提供高质量的采样信号
 - 一次性硬件和软件校准
 - 偏移补偿
- 解决启动难题：
- 零速下的 FAST 软件编码器稳定性可实现以下特性：
 - 零速启动功能提供超过 100% 的启动扭矩以及闭环控制，同时 FAST 提供小于一个电气周期的角度
 - 从零速开始的完整闭环 - 通过额外的初始位置检测算法直接提供电气启动角度
- 电机识别
 - 无需产品说明书
 - 根据简单的电机铭牌数据（最大电压、电流）实现一次性参数识别
 - 可选的 R_s 在线功能可以跟踪电阻变化情况并在运转期间提供补偿
 - FAST 软件编码器

1.4.2 DRV8305

DRV8305 是一款适用于三相电机驱动应用的栅极驱动器 IC 而设计。该器件提供三个高精度修整和温度补偿的半桥驱动器，每个驱动器能够驱动一个高侧和低侧增强模式 N 沟道 MOSFET。DRV8305 具有三个基于电流器的电流检测放大器，可实现对电流的精确测量，支持 100% 占空比，并且具有多级保护。通过串行外设接口 (SPI) 可以对该栅极驱动器进行编程。

该器件的主要特性包括：

- 4.4V 至 45V 工作电压
- 1.25A 和 1A 峰值栅极驱动电流
- 支持 100% 占空比的电荷泵栅极驱动器
- 三个集成式分流放大器
- 高达 200kHz 的 3 PWM 或 6 PWM 输入控制
- 通过 SPI 进行器件设置和故障报告
- 保护特性：
 - 故障诊断和 MCU 看门狗
 - 可编程的死区时间控制
 - MOSFET 击穿保护
 - MOSFET V_{DS} 过流监视器
 - 栅极驱动器故障检测
 - 支持电池反向保护
 - 支持跛行回家模式
 - 过温警告和关断

1.4.3 LMR16006

该 PWM 直流/直流降压稳压器具有 4V 至 60V 的宽输入电压范围，适用于从工业到汽车的广泛应用中非稳压电源的电源调节。该稳压器在 ECO 模式下的待机电流为 28 μ A，非常适合电池供电类系统。

该器件的主要特性包括：

- 在 ECO 模式下具有 28 μ A 的超低待机电流
- 输入电压范围：4V 至 60V
- 1 μ A 关断电流
- 高达 600mA 的输出电流
- 0.7MHz 和 2.1MHz 开关频率
- 内部软启动
- 过流保护
- 过温保护

1.4.4 CSD18540Q5B

这款 60V 1.8m Ω SON 5mm \times 6mm NexFET™ 功率 MOSFET 可用于最大限度地降低电源转换应用中的损耗。

该器件的主要特性包括：

- 超低 Q_g 和 Q_{gd}
- 低热阻
- 雪崩级
- 逻辑电平
- 无铅端子镀层
- 符合 RoHS
- 无卤素

2 硬件和软件入门

2.1 硬件

本部分介绍完整设计的不同子模块，并说明组件选择和原理图设计过程中所做的各种选择。

- 电源管理
- 三相功率级
- 电压和电流检测
- ESC 主机控制器
- 飞行控制器接口

2.1.1 电源管理

为了给 F2806xP 处理器供电，LMR16006 提供 3.3V 电压，电流高达 0.6A。

2.1.2 三相功率级

该功率级为三个半桥使用 DRV8305 栅极驱动器 IC 和 6 个 CSD18540Q5B NextFET IC。所选的 NextFET 具有 $1.8\text{m}\Omega$ 的 $R_{ds(on)}$ 。本设计旨在提供高达 15A_{RMS} 或 20A_{PEAK} 的电流。有关本设计的更多详细信息，请参阅《[BOOSTXL-DRV8305EVM 用户指南](#)》(SLVUA18)，其中介绍了该 BoosterPack。

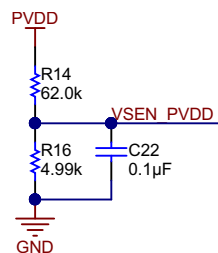
2.1.3 电压和电流检测

为了使用 InstaSPIN-FAST 观测器，需要七个检测信号：四个电压测量值（三个相电压和一个 DC link 电压）以及三个电流测量值（三个相电流）；请参阅图 4。

对 BoosterPack 感应电路所做的更改如节 2.1.3.1 所述。有关感应电路的详细信息，请参阅《[BOOSTXL-DRV8305EVM 用户指南](#)》(SLVUA18)。

2.1.3.1 电压检测

标准 BoosterPack 根据设计可在 4.4V 至 45V 的电压范围内工作。由于该电压范围远高于无人机上使用的电压，因此必须更改电压标度以提高电压信号的准确度。电阻器 R8、R9、R10 和 R14 经过更改以便调整电压标度。DRV8305 BoosterPack 的电压检测电路如图 5 所示。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 5. BoosterPack 的电压检测电路

此处，电机的电气速度还取决于由串联电阻器 R14 和 R16 与电容器 C22 组成的滤波器。

在定义此滤波器时，请考虑以下几点：

- 电机有多少个极对？
- 电机运行的最大转速是多少？

考虑这些问题后，可采用公式 1 计算电机的最大电压频率。

$$f_{\text{voltage}} = \frac{\text{MAX}_{\text{rpm}}}{\text{sec}} \times \text{pp} = \frac{12000 \text{ rpm}}{60 \text{ sec}} \times 6 = 1200 \text{ Hz} \quad (1)$$

这表明电压测量的滤波频率必须在 1200Hz 左右，以免信号衰减量超过必要限度。要计算滤波器极点，请使用公式 2:

$$f_{\text{filter_pole}} = \frac{1}{2 \times \pi \times R_{\text{parallel}} \times C} = \frac{1}{2 \times \pi \times \left(\frac{R14 \times R16}{R14 + R16} \right) \times C22} \quad (2)$$

在本示例中，选择的电阻器 R14 和 R16 为 62.0kΩ 和 4.99kΩ，且选择的 C22 为 0.033μF。因此得出 $f_{\text{filter_pole}}$ 为 1044.3Hz。

该频率稍低于电机频率，但仍然足够高了，不会导致信号衰减过多。

2.1.3.2 电流检测

该电路板的电流检测电路可以支持高达 20A 的电流，考虑到系统的功率要求，这一数值是合理的。本 TI 设计无需对电流检测硬件进行任何更改即可直接使用该电路板。

2.1.4 ESC 主机控制器

ESC 主机控制器必须能够运行 FOC 算法、无传感器角度估算算法和通信功能。在满足这一要求的同时，必须确保在预定义时间执行 FOC 算法和角度估算。PWM 频率越高，执行这两种算法的可用时间就越少。此处，可通过提高主机控制器外设的使用效率来争取执行时间。所使用的控制器属于包含角度估算器 (InstaSPIN-FAST) 的 C2000 产品系列。

本 TI 设计使用 TMS320F28069M。终端系统可以使用 TMS320F2806xF 或 TMS320F2802xF，具体取决于 ESC 主机控制器的其他软件或硬件实施要求。此处应考虑使用飞行控制器接口以确保可使用正确的外设。

2.1.5 飞行控制器接口

本设计提供两个 2x10 引脚 2.54mm 接头来连接主机处理器板。该接口适用于 LaunchPad LAUNCHXL-F28069F/M。

2.1.5.1 信号说明

该接口上的以下引脚用于提供信号以便与 C2000 处理器中的飞行控制器进行通信。

该接口与 3.3V I/O 系统兼容。表 2 列出了偶数引脚上的信号。

表 2. 连接到主机 MCU 的 TIDA-00916 接口连接器

功能	信号	I/O [3V3]	备注
飞行控制器接口 - 占空比	输入	数字输入	使用占空比 PWM 的速度命令
飞行控制器接口 - 串行接口	输入	数字输入	使用串行接口的速度命令
	输出	数字输出	使用串行接口的速度命令

有关连接器引脚分配的详细信息，请参阅第 6 部分。

2.1.5.2 飞行控制器接口的测试

在 TIDA-00643 中可以看到采用了占空比飞行控制器的接口。有关更多详细信息，请参阅 [TIDA-00643](#) 设计指南《[4.4V 至 30V、15A、高性能无刷直流螺旋桨控制器参考设计](#)》(TIDUAK1) 的第 5.3 部分。

2.1.5.3 温度和尺寸估算

对于 ESC 而言，系统尺寸和温度是需要重点关注的问题；在本设计中，由于使用的是模块，因此未讨论这些问题。

有关性能的初步估算情况，请参阅 TIDA-00643 TI 设计。在[本设计指南](#) (TIDUAK1) 中，请参阅第 7.2.4 部分了解温度测量值，并参阅第 8 部分以查找 TIDA-00643 设计文件的下载链接。

2.1.6 推荐的设计升级

使用一个 LaunchPad 和两个 BoosterPack 实现两个 ESC。

2.2 软件

使用的软件基于 [MotorWare](#)。在 MotorWare 中，首先使用 proj_lab02c 实验来识别电机，然后使用 proj_lab05h 生成针对 PID 控制器参数定义而显示的测试数据。

有关如何将 MotorWare 与 Code Composer Studio™ (CCS) 结合使用的更多信息，请阅读文档《[InstaSPIN 项目和实验用户指南](#)》(lit#)。

2.2.1 为已更改的 BoosterPack 更改 MotorWare 驱动程序

为了匹配具体电机所需的速度，BoosterPack 经过了调整，而这些硬件修改必须反映在 MotorWare 中。

2.2.1.1 电压滤波器

对电压滤波器所做的更改如[节 4.3.1](#)所述。此更改必须更新到 DRV8305 BoosterPack 的驱动程序中。为此需要在 user_j1.h 文件中用以下变量实现：

```
#define USER_VOLTAGE_FILTER_POLE_Hz (344.62) // BOOSTXL-DRV8305 = 344.62 Hz
```

此处显示的值是 DRV8305 BoosterPack 的默认值。现在应将此值更改为：

```
#define USER_VOLTAGE_FILTER_POLE_Hz (1044.30) // New voltage filter pole frequency
```

2.2.1.2 速度滤波器

由于使用了高速电机，因此也应调整软件滤波器的极点：

```
#define USER_SPEED_POLE_rps (100.0) // 100.0 Default, do not change
```

更改此过滤器可以提升高速轨迹性能。通过调整此值可以改善 ESC 系统的高速性能。将此滤波器设置得太高会给系统带来额外的噪声。

2.2.2 识别电机

如需软件源代码，请下载 **MotorWare** 并找到 `proj_lab02c`。此实验的目的是识别具有低电感的 **PMSM** 电机。此实验之后，电机参数位于配置中：**Rs**、**Lq**、**Ld** 和额定磁通。有关这些值的更多详细信息，请参阅《*InstaSPIN-FOC™* 和 *InstaSPIN-MOTION™* 用户指南》(SPRUHJ1)。

为了识别电机，使用了以下初始设置：

```
#define USER_MOTOR_TYPE           MOTOR_Type_Pm
#define USER_MOTOR_NUM_POLE_PAIRS (6)
#define USER_MOTOR_Rr             (NULL)
#define USER_MOTOR_Rs             (NULL)
#define USER_MOTOR_Ls_d           (NULL)
#define USER_MOTOR_Ls_q           (NULL)
#define USER_MOTOR_RATED_FLUX     (NULL)
#define USER_MOTOR_MAGNETIZING_CURRENT (NULL)
#define USER_MOTOR_RES_EST_CURRENT (1.0)
#define USER_MOTOR_IND_EST_CURRENT (-1.0)
#define USER_MOTOR_MAX_CURRENT    (15.0)
#define USER_MOTOR_FLUX_EST_FREQ_Hz (100.0)
```

借助 `user.h` 文件中的这一定义，识别出了电机。

2.2.3 生成阶跃响应

要生成阶跃响应，请使用 `proj_lab05h` 实验。要使用此实验，请参阅 `instaspin_labs.pdf` 文件中的实验说明。在安装 **MotorWare** 时生成的文档文件夹下可以找到该文件。

生成这些阶跃响应让用户有权选择是否测试系统的 **PI** 控制器。在生成阶跃响应时，系统所用的实际负载必须连接到电机。这样将会在运行电机时产生最准确的数据。

通过此实验，用户可以根据系统性能调整控制；请参阅4节了解有关调整电流和速度控制器以确保最佳性能的更多详细信息。

2.2.4 生成轨迹曲线

为了生成轨迹曲线，`proj_lab05h` 经过了调整以便收集更长时间的数据。使用的加速度和阶跃已更改为系统所需的最大值。

以可能的每电压速度限值运行电机时，必须使用 `proj_lab09` 或 `proj_lab10`。原因在于，当占空比较高时必须忽略分流测量值，并且这两个实验包含了必要的功能。

3 入门指南

3.1 PCB 概述

图 6 和图 7 显示了 LaunchPad 和 BoosterPack PCB 的顶部和底部图片。3.2 节将介绍其接头和默认跳线设置。

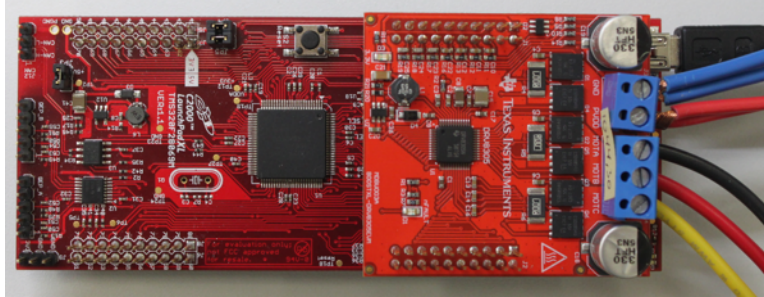


图 6. 完整系统电路板图片（顶视图）

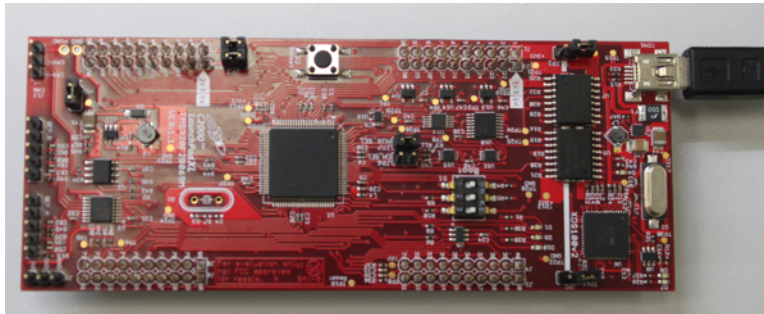


图 7. LaunchPad 电路板图片（顶视图）

3.2 连接器和跳线设置

3.2.1 LaunchPad 配置

使用 LAUNCHXL-F28069M 时，需要使用 LaunchPad 板的以下配置。表 3 列出了跳线设置。

表 3. LaunchPad 跳线

引脚	连接状态	说明
JP1	已断开连接	从 USB 启用 3.3V 电压（禁用隔离）
JP2	已断开连接	从 USB 启用 GND（禁用隔离）
JP3	已连接	启用 5V 转换器（关闭目标器件的 3.3V 电源）
JP4	已断开连接	将目标 MCU 3.3V 连接到第二套 BoosterPack 接头
JP5	已断开连接	将目标 MCU 5V 连接到第二套 BoosterPack 接头
JP6	已断开连接	Pin Mux 对于 GPIO15、GPIO28、GPIO29 和 GPIO58 的定义
JP7	已断开连接	Pin Mux 对于 GPIO15、GPIO28、GPIO29 和 GPIO58 的定义

S1 开关应设置为 ON-ON-ON 位置以允许进行 JTAG 调试连接。用于连接到 BoosterPack 的接头为 J1 至 J4。有关 LaunchPad 的更多详细信息，请参阅《LAUNCHXL-F28069M 概述用户指南》(SPRUI11) 和《使用前必读：InstaSPIN-FOC 和 InstaSPIN-MOTION LaunchPad 和 BoosterPack》。

3.2.2 BoosterPack 配置

确保已按节 2.1.3.1 所述对滤波器进行更改。

有关 BoosterPack 的更多详细信息，请参阅《[BOOSTXL-DRV8305EVM 用户指南](#)》(SLVUA18)。

3.3 设计评估

3.3.1 必要条件

要评估 TIDA-00916 TI 设计，必须具备以下硬件设备和软件。

表 4. 必要条件

设备	备注
4V 至 24V 可调节电源	最小输出电流为 20A 的电源
InstaSPIN-Motion F28069M LaunchPad	可从 TI eStore 购买
DRV8305N 三相电机驱动 BoosterPack	可从 TI eStore 购买
TIDA-00916 源代码	从 TIDA-00916 设计文件夹下载 (MotorWare 链接)
USB 电缆	用于连接到 LaunchPad
CCS 6.1.3 或更高版本	从 www.TI.com.cn 下载

3.3.2 硬件设置

确保 LaunchPad 上的跳线按照表 3 所述设置。

将 BoosterPack 接头 J1 和 J2 连接到 LaunchPad J1 至 J4 (请参阅图 6 和图 7)。

现在将电源连接到螺纹接线端子 J3，并将三相电机连接到 J4 (请参阅图 6)。

3.3.3 软件设置

运行软件时，请将标准 MotorWare 框架与 CCS 结合使用。运行这些示例时，请参阅 MotorWare 文档文件夹 (motorware_1_01_00_xx\docs\labs) 下的文档《[InstaSPIN 项目和实验用户指南](#)》。

本设计指南使用以下示例：

- Proj_lab2c
- Proj_lab5h
- Proj_lab9 或 Proj_lab10

3.3.4 用户界面

有关 CCS 用户界面的详细信息，请参阅《[InstaSPIN 项目和实验用户指南](#)》。

4 测试结果

为了解每个功能块及整个电路板的特性，我们进行了相关测试。具体来说，进行了如下测试：

- ESC 主机控制器
 - 电机识别
 - 使用的 PWM 频率
- 系统性能调优
 - 空载阶跃响应
 - 负载阶跃响应
- 系统性能测试
 - 转速到电气频率
 - 速度性能加速和减速
- 电机定子电阻可用作温度保护机制
 - 在线调整电机的 R_s 变化
- 测试总结

测试在大约 22°C 至 23°C 的室温下进行，其中 PWM 为 45kHz，且电流控制器以 22.5kHz 运行。

TIDA-00916 测试会话采用了以下设备：

表 5. TIDA-00916 性能测试的测试设备

测试设备	部件号
可调节电源	TDK Lambda GEN20-38
高速示波器（适用于模拟信号测试）	Tektronix TDS784C
单端探头	Tektronix P6139A
电流探头	Tektronix A622
ESC 电机	Turnigy Multistar 1704-1900Kv 12 极多转子外转式电机 V2
螺旋桨	5" x 4.5"

4.1 ESC 主机控制器

图 8 显示了 TIDA-00916 进行负载速度测试的图片。

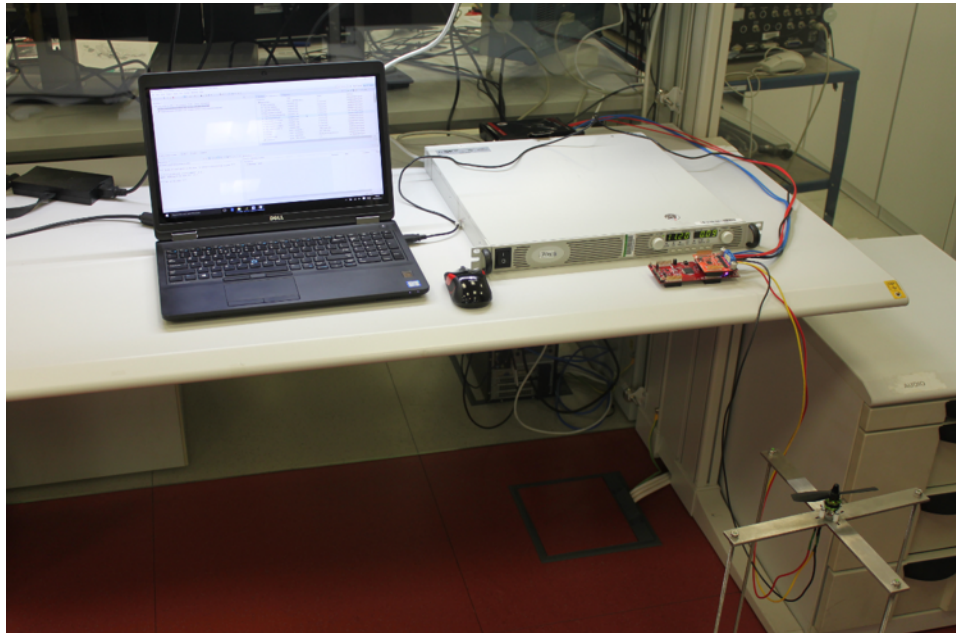


图 8. TIDA-00916 速度测试的测试设置图片

4.1.1 电机识别

识别电机参数时采用了 MotorWare 中的 proj_lab02c。识别出了以下电机参数：

```
#define USER_MOTOR_TYPE           MOTOR_Type_Pm
#define USER_MOTOR_NUM_POLE_PAIRS (6)
#define USER_MOTOR_Rs              (0.225925133)
#define USER_MOTOR_Ls_d            (1.57321483e-05)
#define USER_MOTOR_Ls_q            (1.57321483e-05)
#define USER_MOTOR_RATED_FLUX     (0.00297940802)
```

使用 MotorWare 时显示的其他电机值不用于 PMSM 电机。在 user.h 文件中定义的其余值按照节 2.2.2 中的设置进行使用。

4.1.2 使用的 PWM 频率

图 9 显示了 InstaSPIN-FOC 输出到栅极驱动器的 PWM 频率。

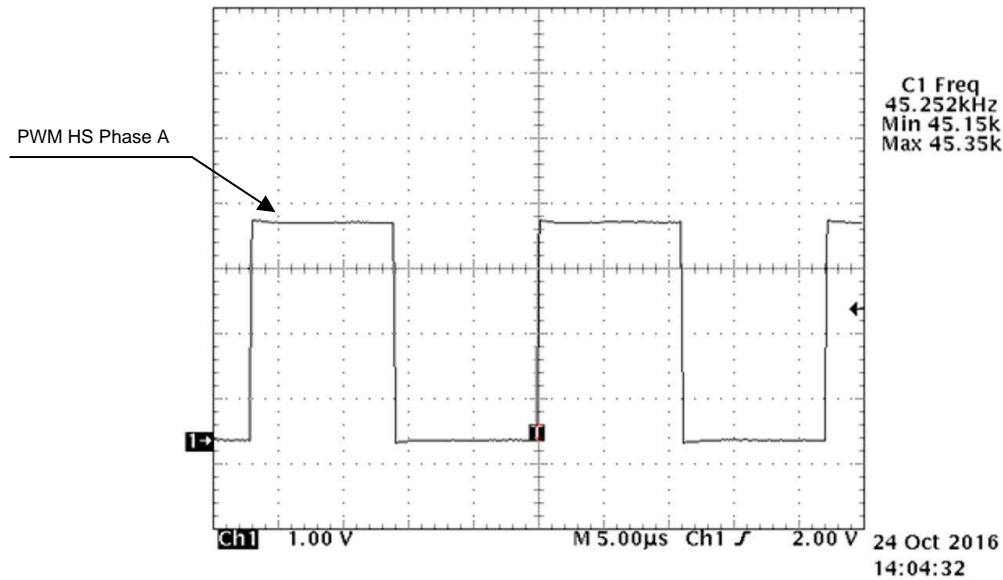


图 9. 输出到栅极驱动器的 PWM 信号

该频率大约为 45kHz，也是在软件中设置的。有关 DRV8305 栅极驱动器的更多测量值，请参阅《TIDA-00643 TI 设计指南》(TIDUAK1) 的第 7.1.2 部分。

4.2 系统性能调优

系统性能测试是分别在安装和不安装螺旋桨的情况下进行的。此处的测试显示了如何使用阶跃响应调优方法来实现稳定的高速控制。

4.2.1 空载阶跃响应

测试的电机为 Turnigy Multistar 1704-1900Kv 12 极多转子外转式电机 V2。该电机的测试是使用 MotorWare 中的 proj_lab05h 在空载且 V_{BUS} 等于 11.2V 的条件下完成的。采用这种配置获得了以下结果。

图 10 显示了 I_d 电流控制器 PI 阶跃响应。

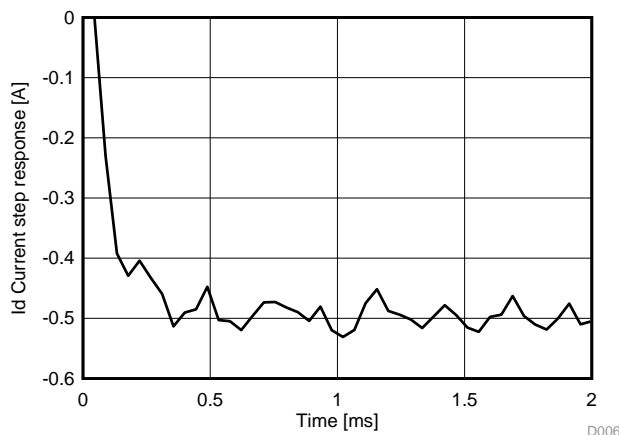


图 10. 不连接螺旋桨时的 I_d PI 电流控制器阶跃响应

图 11 显示了速度控制器 PI 阶跃响应。

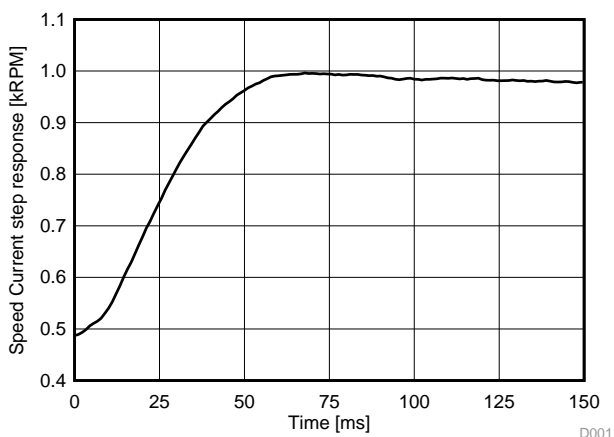


图 11. 不连接螺旋桨时的 PI 速度控制器小信号阶跃响应

所产生的阶跃响应是对电流和速度控制器使用以下 K_p 、 K_i 值实现的。

表 6. 产生空载阶跃响应的 PI 控制器参数

控制器	K_p	K_i
处于 22.5kHz 的电流控制器	0.35	0.5900
处于 1.5kHz 的速度控制器	0.27	0.0001

利用这些 PI 控制器参数在 12kRPM 时获得了如下所示的速度稳定性。

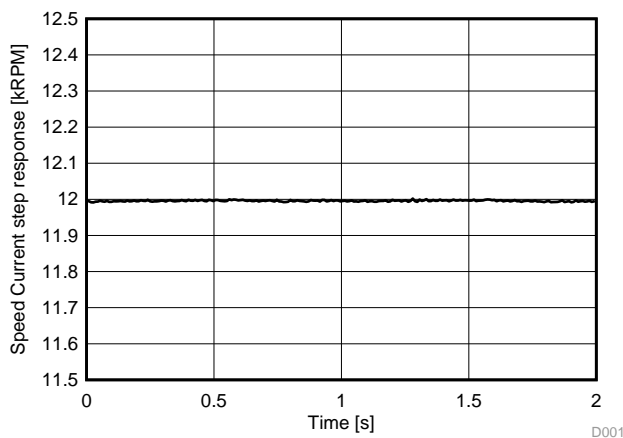


图 12. 12kRPM 速度稳定性性能（空载）

4.2.2 带有负载的阶跃响应

通过将螺旋桨连接到电机轴（如图 13 所示）为 ESC 的电机提供负载。

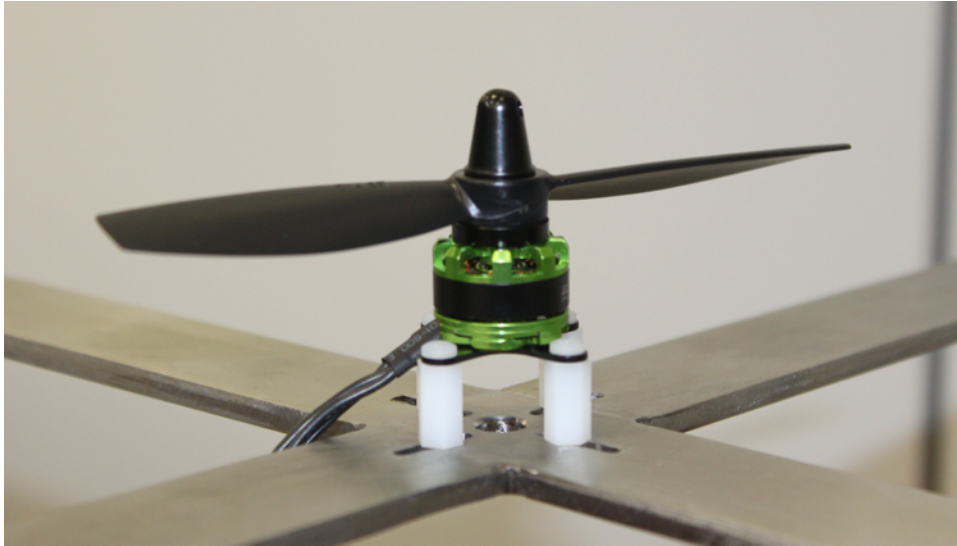


图 13. 连接了螺旋桨的电机图片

这些负载测试是在使用 5" x 4.5" 螺旋桨的条件下完成的。将此螺旋桨连接到电机上并使用等于 11.2V 的 V_{BUS} 时，获得了以下结果。

图 14 显示了电流控制器 PI 阶跃响应。

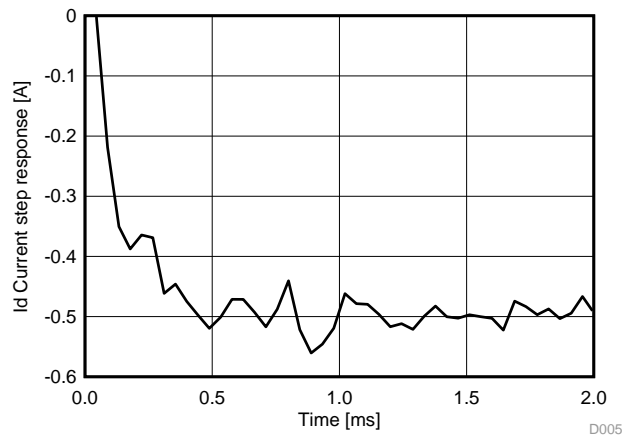


图 14. 连接螺旋桨时的 PI 电流控制器阶跃响应

图 15 显示了速度控制器 PI 阶跃响应。

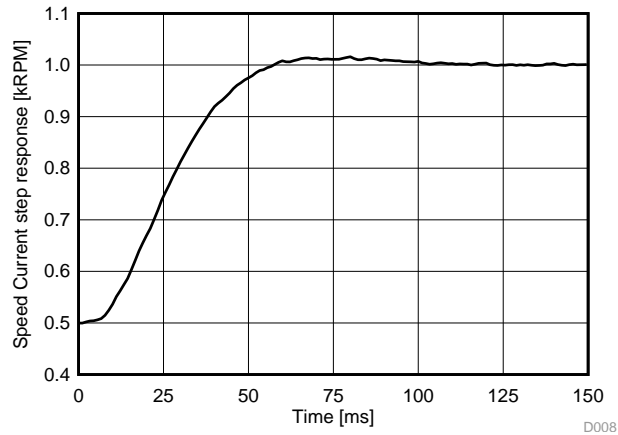


图 15. 连接螺旋桨时的 PI 速度控制器小信号阶跃响应

所产生的阶跃响应是对电流和速度控制器使用以下 K_p 、 K_i 值实现的。

表 7. 在采用螺旋桨负载时产生阶跃响应的 PI 控制器参数

控制器	K_p	K_i
处于 22.5kHz 的电流控制器	0.38	0.530
处于 1.5kHz 的速度控制器	2.50	0.002

图 16 显示了速度控制器 PI 阶跃响应。

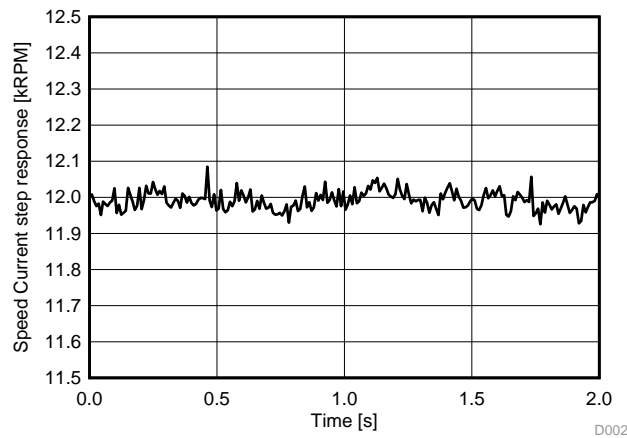


图 16. 连接螺旋桨时的 12kRPM 速度稳定性性能

4.3 系统性能测试

系统性能测试是分别在连接和不连接螺旋桨的情况下对电机进行的。此处，这些测试将显示可能的最大速度变化和最大速度稳定性。

4.3.1 转速到电气频率

为了确保从转速到电频率的转换是正确的，绘制了一张图来显示电机在 12kRPM 时的电气频率。此频率应该为 1.2kHz（请参阅公式 3）。

此频率大约为每个正弦波 1.65 个周期，这相当于：

$$f = \frac{1}{1.65 \times 500 \mu\text{s}} \approx 1.2 \text{ kHz} \quad (3)$$

所选择的电机最有可能具有梯形反电动势，这会扰乱来自完美正弦波的电流。此外，与使用正弦绕组电机运行电机相比，这也会降低系统的效率。

4.3.2 速度性能加速和减速

为了加速达到最大速度而不发生过冲，选择了以下加速度。

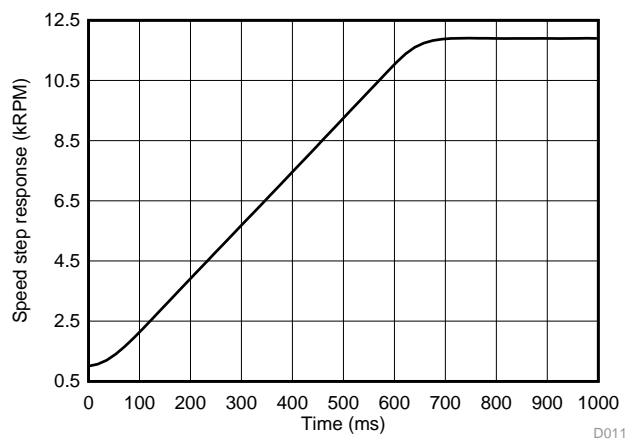


图 17. 采用 36kRPM 时速度轨迹从 1kRPM 升高到 12kRPM（不连接螺旋桨）

为了在连接螺旋桨的情况下实现所需的速度轨迹，有必要调整速度 PI 控制器。调整后的速度控制器的小信号阶跃响应如图 18 所示。

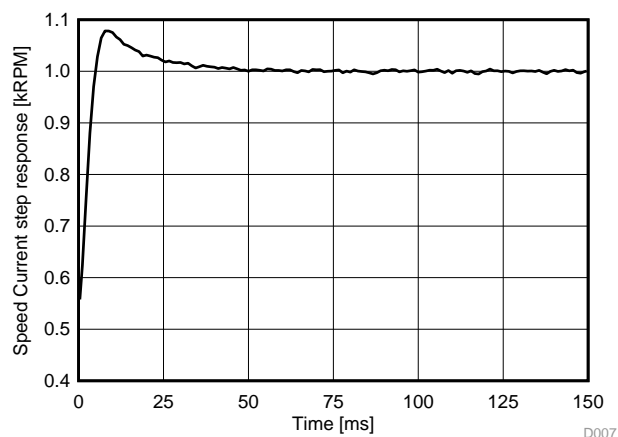


图 18. 连接螺旋桨时的 PI 速度控制器小信号阶跃响应（适用于高速度轨迹）

所产生的阶跃响应是对电流和速度控制器使用以下 K_p 、 K_i 值实现的。

表 8. 产生阶跃响应以实现优化轨迹的 PI 控制器参数

控制器	K_p	K_i
处于 22.5kHz 的电流控制器	0.38	0.5300
处于 1.5kHz 的速度控制器	2.50	0.0125

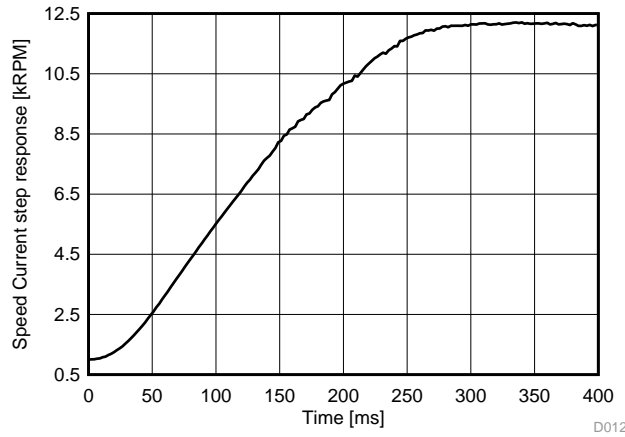


图 19. 采用 56kRPM 时速度轨迹从 1kRPM 升高到 12kRPM (连接螺旋桨)

为了测试最大速度，此测试还从 1 升高到 8k_{RPM} (采用 86k_{RPM} 轨迹)。

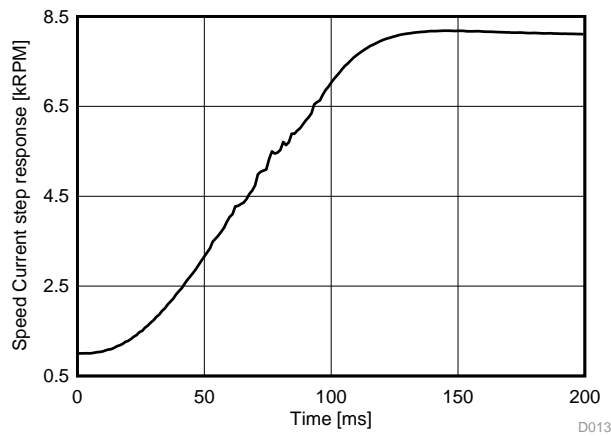


图 20. 采用 86kRPM 时速度轨迹从 1kRPM 升高到 8kRPM (连接螺旋桨)

为了测试速度反转，使用了自适应速度控制器。与电机运行速度相比，它改变了 PI 控制器参数。这样做是为了提高零速附近的性能。结果如图 21 所示。

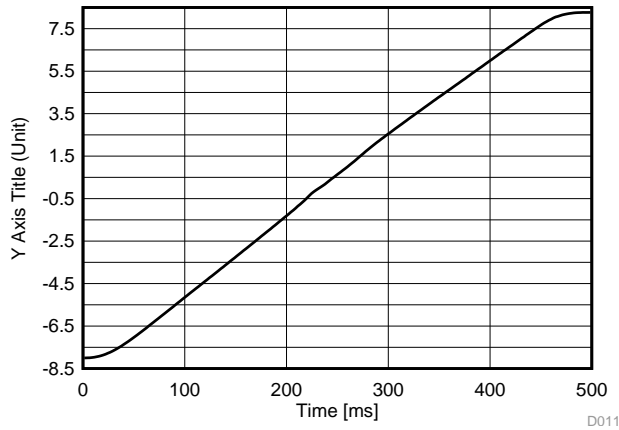


图 21. 采用 36kRPM 时速度轨迹从 -8kRPM 升高到 8kRPM（连接螺旋桨）

4.4 电机定子电阻用作温度保护机制

R_s 可以在 2kRPM 和 8kRPM 条件下改变电机。由于电机过热，因此没有在 12kRPM 条件下进行此操作。

4.4.1 在线调整电机的 R_s 变化

当电机以最大转速运转时，电机将升温。这会改变电机定子的电阻。对此变化进行补偿可以确保良好的电机控制性能。使用 InstaSPIN-FOC 可以测量和补偿电机的电阻，从而获得无传感器算法的最佳性能。

使用 MotorWare 的 proj_lab7 可以启动该功能。以下已完成的测试显示了以 2kRPM 和 8kRPM 转速运行电机时的 R_s 在线变化，旨在了解通过 R_s 在线测量方法测出的温度变化。

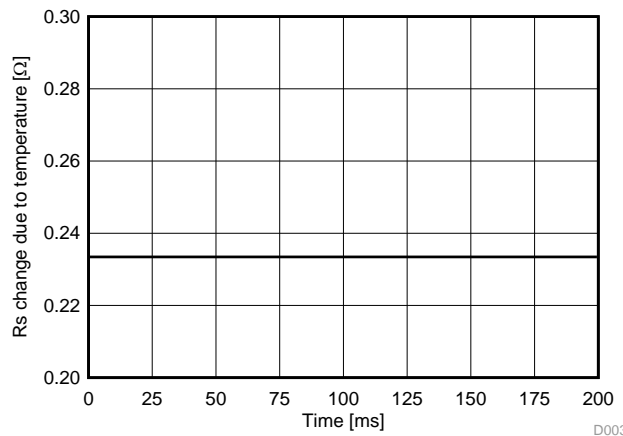


图 22. 此图显示了以 2kRPM 转速运行电机时随时间推移的 R_s 在线变化

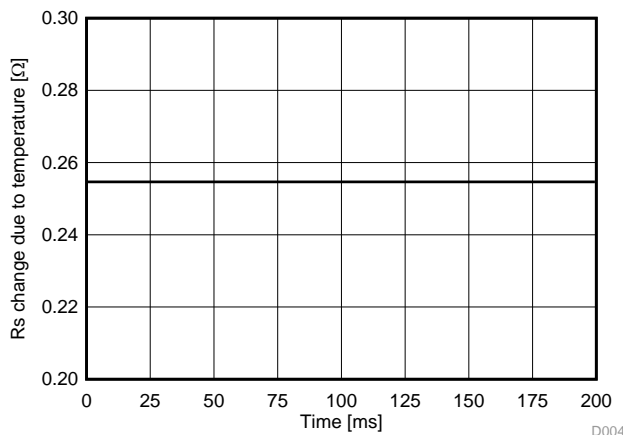


图 23. 此图显示了以 8krpm 转速运行电机时随时间推移的 Rs 在线变化

以更高的速度运转时，电机会升温。该功能可用于防止电机过热而最终导致故障。

4.5 测试总结

本 TI 设计展示了如何使用 TI 提供的软件来调整 InstaSPIN-FOC 以实现高速电机控制。为此需要使用 C2000 处理器系列的特殊功能以实现高级系统调试功能。这可以作为工程师仿真工作的补充，如此便无需为系统开发完美的仿真工具，而只需使用实际的硬件来调试控制算法问题。因此，也不需要构建复杂的仿真算法来定义具体电机或 PCB 对系统的寄生效应。

通过使用 TI 提供的软件（即 MotorWare），C2000 器件可以运行一个电气频率高达 1.2kHz 或更高频率的完整 FOC、无传感器、速度和电流闭环控制系统。

5 设计文件

5.1 电路原理图

要下载各个板的原理图，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

5.2 物料清单

要下载各个板的物料清单，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

5.3 PCB 布局图

要下载每个板的布局图，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

5.4 Altium 项目

要下载各个板的 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

5.5 光绘文件

要下载各个板的光绘文件，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

5.6 装配图

要下载各个板的装配图，请参阅 [TIDA-00916](#) 中的设计文件。

6 软件文件

如需源代码，请从 <http://www.ti.com.cn/tool/cn/motorware> 下载 MotorWare v17。

7 参考文献

1. 德州仪器 (TI), DRV8305, 具有三个集成分流放大器的三相栅极驱动器, <http://www.ti.com.cn/product/cn/drv8305>
2. 德州仪器 (TI), TMS320F28069M, 具有 InstaSPIN-MOTION 的 Piccolo 微控制器, <http://www.ti.com.cn/product/cn/tms320f28069m>
3. 德州仪器 (TI), LMR16006, 具有低 Iq 的 SIMPLE SWITCHER® 4V 至 60V、600mA 降压稳压器, <http://www.ti.com.cn/product/cn/lmr16006>
4. 德州仪器 (TI), LAUNCHXL-F28069M, C2000 Piccolo F28069M LaunchPad, <http://www.ti.com.cn/tool/cn/launchxl-f28069m>
5. 德州仪器 (TI), BOOSTXL-DRV8305EVM, DRV8305N 三相电机驱动 BoosterPack, <http://www.ti.com.cn/tool/cn/BOOSTXL-DRV8305EVM>
6. 德州仪器 (TI), TIDA-00643, 《4.4V 至 30V、15A、高性能无刷直流螺旋桨控制器参考设计》, TIDA-00643 设计指南 (TIDUAK1)
7. 德州仪器 (TI), 《InstaSPIN-FOC™ 和 InstaSPIN-MOTION™ 用户指南》(SPRUHJ1)
8. Richard Poley, 《控制理论基础》, ISBN-13: 978-1496040732
9. 德州仪器 (TI), 《电机控制纲要》, http://focus.ti.com/download/trng/docs/c2000/TI_MotorControlCompendium_2010.pdf

8 关于作者

KRISTEN MOGENSEN 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师，负责为工业驱动器开发参考设计。

8.1 鸣谢

作者希望在此感谢 **MARTIN STAEBLER** 和 **PAL BOELE** 在 TIDA-00916 设计的设计和文档编制阶段作出的出色贡献。

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能而设计。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等许可包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司