

Application Note

如何使用 MCF831x 来解决散热和快速启动挑战



Jenson Fang

摘要

MCF831x 是一款集成的无代码无传感器 FOC 器件，可广泛用于住宅风扇、吊扇、空气净化器、冲洗泵和扫地机器人中的吸风电机等电器系统。由于 MCF831x 无代码，具有高集成度和缩短的开发时间，为客户带来了很大的便利，但也为客户带来了一些挑战。本应用手册分析了散热设计挑战和快速启动设计挑战，并提出了解决这些挑战的方法。

内容

1 引言.....	2
2 第 1 项设计挑战：散热挑战.....	3
2.1 引发散热问题的原因.....	3
2.2 如何解决热问题.....	3
3 第 2 项设计挑战：快速启动.....	9
3.1 引发快速启动问题的原因.....	9
3.2 如何解决快速启动问题.....	9
4 总结.....	12
4.1 致谢.....	12
5 参考资料.....	12
6 修订历史记录.....	12

插图清单

图 1-1. MCF831X 方框图.....	2
图 2-1. MCF831X 电流检测电路.....	3
图 2-2. MCF831X 电源序列.....	4
图 2-3. 测试 1 配置下的 MCF8315 电流波形.....	4
图 2-4. 测试 1 配置下的 MCF8315 热像图.....	4
图 2-5. 测试 2 配置下的 MCF8315 电流波形.....	5
图 2-6. 测试 2 配置下的 MCF8315 热像图.....	5
图 2-7. 测试 1 配置下的 MCF8316 电流波形.....	5
图 2-8. 测试 1 配置下的 MCF8316 热像图.....	5
图 2-9. 测试 2 配置下的 MCF8316 电流波形.....	6
图 2-10. 测试 2 配置下的 MCF8316 热像图.....	6
图 2-11. 只有很少过孔的 MCF831X PCB.....	7
图 2-12. 有更多过孔的 MCF831X PCB.....	7
图 2-13. MCF831X 散热路径（底层）.....	7
图 2-14. MCF831X 散热路径（顶层）.....	7
图 2-15. MCX831X 布局的热仿真.....	8
图 3-1. MCF831X 启动过程.....	9
图 3-2. 示例 1 电流波形.....	10
图 3-3. 示例 2 电流波形.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

MCF831x 是一款无代码和无传感器磁场定向控制 (FOC) 电机驱动器。MCF831x 具有高度集成的架构, 包含三个 1/2H 桥, 具有 40V 的绝对最大电压和 $95\text{m}\Omega$ 的超低 $R_{\text{ds(ON)}}$ (高侧和低侧相结合), 可提供大功率驱动能力。使用集成电流检测电路来检测电流, 无需外部电流检测电阻器。可调降压稳压器和 LDO 为器件生成必要的电压轨, 可用于为外部电路供电。MCF831x 器件具有高度集成度, 因此仅使用一个芯片即可驱动电机, 从而满足客户的需求。内部的 EEPROM 可以通过下电上电独立运行。

许多客户认为, 无代码系统的灵活性还不够, 而且无法像微控制器单元 (MCU) 那样对其进行编程以实现各种期望的功能。然而, MCF831x 器件具有许多可以调优的配置寄存器, 可满足大多数客户的需求。例如, 如本文开头所述, 客户认为高度集成会引发对热性能的担忧, 或者他们希望实现一些特定功能 (如快速启动、快速制动、精确控制速度) 来满足系统级要求。这些挑战可以通过 SCH、PCB 布局或 EEPROM 配置来控制。

下一步是考虑散热和快速启动挑战, 并讨论如何解决和优化这些挑战。

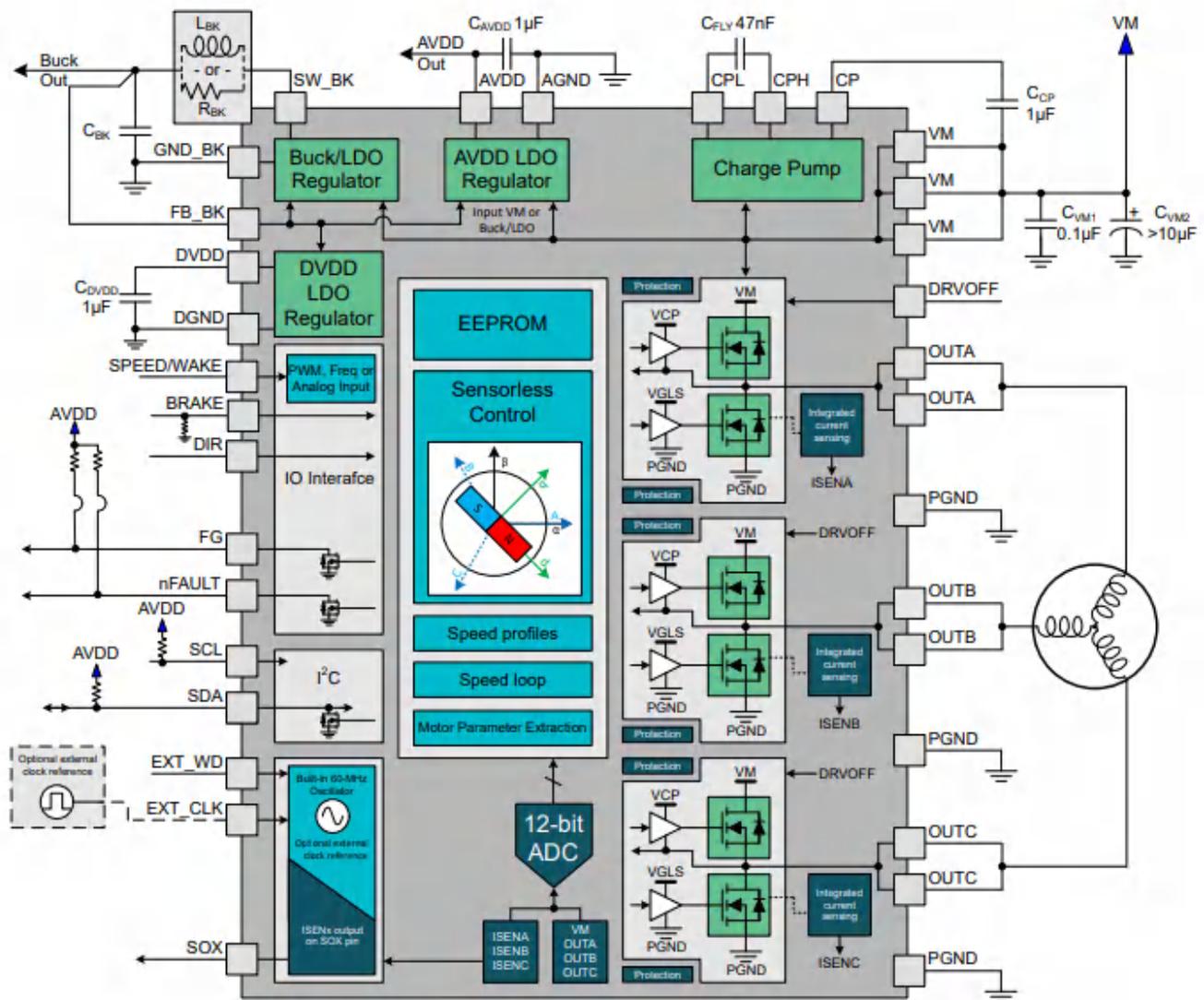


图 1-1. MCF831x 方框图

2 第 1 项设计挑战：散热挑战

对于单芯片集成设计，尤其是具有集成 FET 的设计，客户会担心器件的热性能。如果客户的应用相对封闭，且没有良好的散热，他们会更加关注器件的热性能。例如，对于吊扇和水泵应用，PCB 放置在电机中并处于封闭的环境。因此，热设计对 MCF831x 来说是一项挑战，以下是对此项挑战的分析。

2.1 引发散热问题的原因

第一步是分析哪些因素会使 MCF831x 面临散热挑战，首先分别从硬件、布局和算法开始：

1. 硬件

从硬件的角度来看，MCF831x 的热源主要分为以下几点。

- 内部 MOSFET 的导通和开关损耗
- 采样电阻上的损耗
- 内部 LDO/BUCK 产生的损耗。

2. 算法

由于 MCF831x 使用特定的 FOC 控制方法，效率相对较高，但 PWM 频率、电流采样的精度和观测器观测角的准确度也会影响效率。适当的配置有助于实现更好的热性能。

3. PCB 布局

这是 PCB 设计中容易忽略的因素。事实上，在测试过程中，良好布局与不良布局之间的温差可能会高达 10°C！

2.2 如何解决热问题

2.2.1 通过硬件解决散热问题

由于 MCF831x 器件是集成式 FET 器件，因此 MOSFET 的导通损耗和关断损耗不可避免地会影响热性能。对于大多数对数集成式 FET 电机控制器件，HS+LS 的 $R_{ds(ON)}$ 为 200m Ω 至 300m Ω ，但对于 MCF831x， $R_{ds(ON)}$ (Hs+LS) 为 95m Ω ，可以大幅降低导通损耗。而对于 MCF831x，MOSFET 下桥的 $R_{ds(ON)}$ 用作采样电阻器，以便进一步降低传统驱动器中采样电阻器导致的损耗。

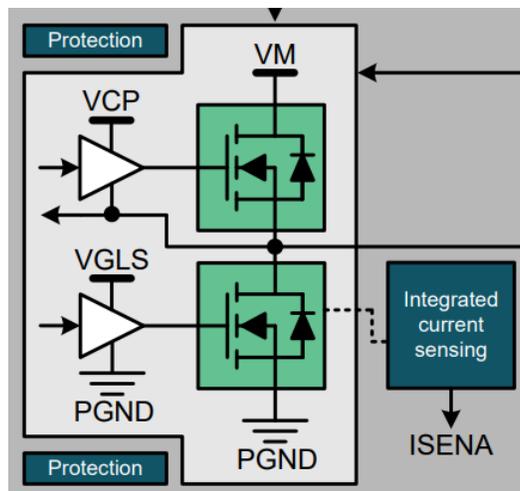


图 2-1. MCF831X 电流检测电路

对于内部 LDO 和降压引起的损耗，请查看图 2-2 中 MCF831x 内部的电源轨路径。

从效率的角度来看，妥善做法是启用内部降压或 LDO，并将降压输出设置为 3.3V，使 LDO 引起的损耗达到最小值。

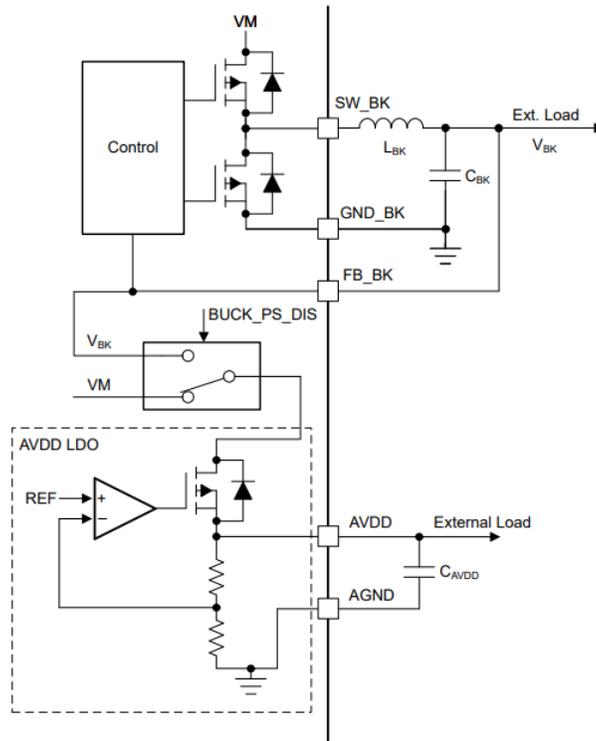


图 2-2. MCF831X 电源序列

2.2.2 通过算法解决散热问题

尽管 FOC 是一种高效的电机驱动方法，但使用这些设置可进一步优化热性能：

1. 降低 PWM 频率
2. 增加 CSA 增益
3. 开启死区时间补偿
4. 将 PWM 调制方案配置为“不连续空间矢量 PWM 调制”。

通过前面的配置，可以从算法的角度提高热性能。

一般来说，通过启用降压稳压器电源时序、提高 MOSFET 开关的压摆率、降低 PWM 输出频率并将 PWM 调制方案配置为不连续空间矢量 PWM 调制，可以尽可能降低 MCF831xA 的功率损耗。

以下是测试数据，展示了改善散热的不同算法技术：

2.2.2.1 MCF8315 测试 1

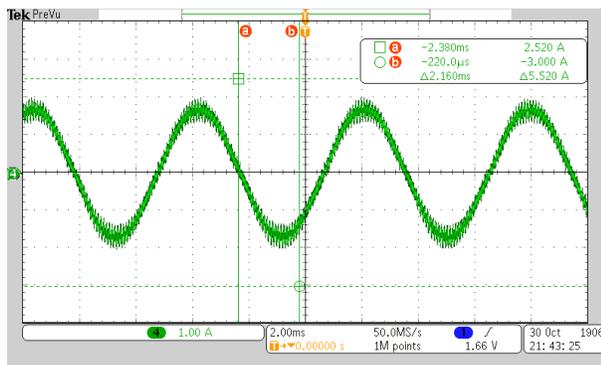


图 2-3. 测试 1 配置下的 MCF8315 电流波形

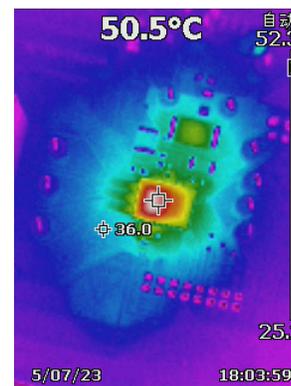


图 2-4. 测试 1 配置下的 MCF8315 热像图

- 压摆率 [SLEW_RATE] = 200V/us
- PWM 输出频率 [PWM_FREQ_OUT] = 15KHz
- PWM 调制方案 [PWM_MODE] = 不连续空间矢量调制
- 动态电压调整 [DYNAMIC_VOLTAGE_GAIN_EN] = 启用
- 动态 CSA 增益调整 [DYNAMIC_CSA_GAIN_EN] = 启用
- 死区时间补偿 [DEADTIME_COMP_EN] = 启用

2.2.2.2 MCF8315 测试 2

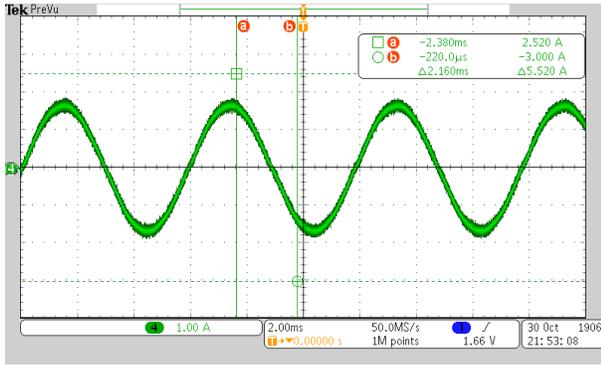


图 2-5. 测试 2 配置下的 MCF8315 电流波形

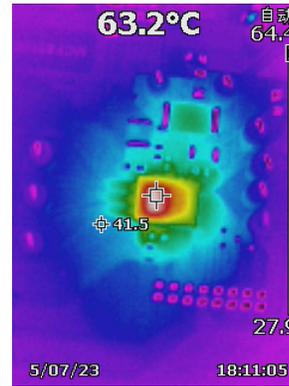


图 2-6. 测试 2 配置下的 MCF8315 热像图

- 压摆率 [SLEW_RATE] = 25V/us
- PWM 输出频率 [PWM_FREQ_OUT] = 30KHz
- PWM 调制方案 [PWM_MODE] = 连续空间矢量调制
- 动态电压调整 [DYNAMIC_VOLTAGE_GAIN_EN] = 禁用
- 动态 CSA 增益调整 [DYNAMIC_CSA_GAIN_EN] = 禁用
- 死区时间补偿 [DEADTIME_COMP_EN] = 禁用

2.2.2.3 MCF8316 测试 1

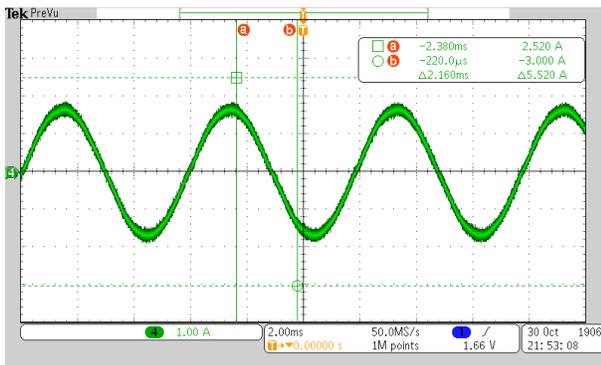


图 2-7. 测试 1 配置下的 MCF8316 电流波形

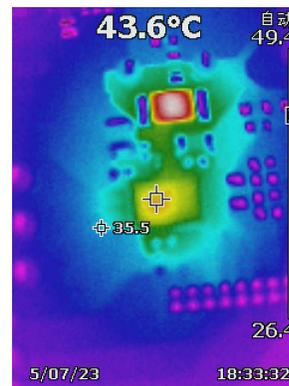


图 2-8. 测试 1 配置下的 MCF8316 热像图

- 压摆率 [SLEW_RATE] = 200V/us
- PWM 输出频率 [PWM_FREQ_OUT] = 15KHz
- PWM 调制方案 [PWM_MODE] = 不连续空间矢量调制
- 动态电压调整 [DYNAMIC_VOLTAGE_GAIN_EN] = 启用
- 动态 CSA 增益调整 [DYNAMIC_CSA_GAIN_EN] = 启用
- 死区时间补偿 [DEADTIME_COMP_EN] = 启用

2.2.2.4 MCF8316 测试 2

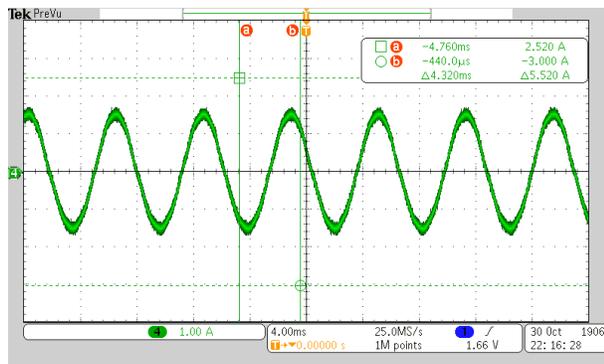


图 2-9. 测试 2 配置下的 MCF8316 电流波形

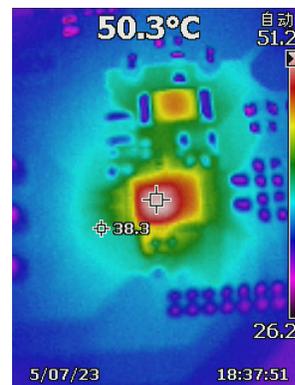


图 2-10. 测试 2 配置下的 MCF8316 热像图

- 压摆率 [SLEW_RATE] = 25V/us
- PWM 输出频率 [PWM_FREQ_OUT] = 30KHz
- PWM 调制方案 [PWM_MODE] = 连续空间矢量调制
- 动态电压调整 [DYNAMIC_VOLTAGE_GAIN_EN] = 禁用
- 动态 CSA 增益调整 [DYNAMIC_CSA_GAIN_EN] = 禁用
- 死区时间补偿 [DEADTIME_COMP_EN] = 禁用

2.2.3 通过 PCB 布局解决散热挑战

PCB 布局对热性能也有很大影响。以下示例显示，良好布局与不良布局之间的温差可以达到 15°C。

1. 对于没有散热器的系统，覆铜量越大，芯片上的散热就越好。尽可能选择 2 盎司或更大的覆铜厚度，这非常有助于散热。但是，覆铜量越大，也意味着成本越高，因此在选择覆铜厚度时需要考虑系统要求。
2. MCF831x 具有散热焊盘，我们需要尽可能使用 MCF831x，以便通过共通路径来散发热量。请注意，务必通过尽可能多的过孔将热量传递到其他 PCB 层。（如图 2-11 所示，右侧的 PCB 更好。）在过孔中打开阻焊层，这有助于将 MCF831x 的热量通过散热焊盘传递到 PCB 上的覆铜。并尽可能使用多层电路板，以便提供更大的散热面积。

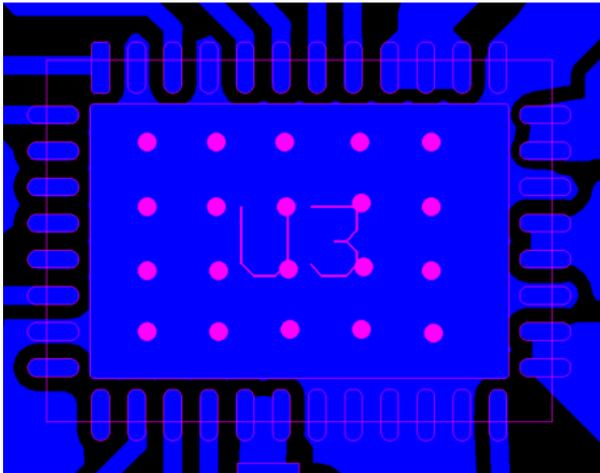


图 2-11. 只有很少过孔的 MCF831X PCB

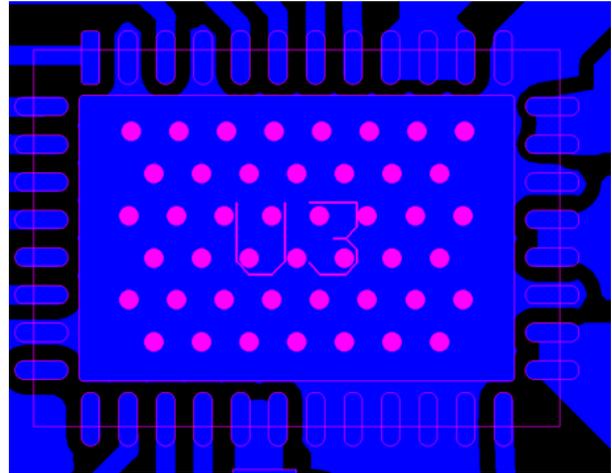


图 2-12. 有更多过孔的 MCF831X PCB

在顶层，尽可能将引脚与散热焊盘连接，以便通过散热焊盘将热量传递出去。

将散热焊盘连接到实心铜平面是创建散热路径的一项重要要求。为了使热量从器件中散出，铜平面必须是连续的。将散热焊盘连接到电路板上的其他区域。妥善做法是在覆铜区中添加较宽的排出路径。在驱动器下方创建大表面积的宽阔平面。如果这些平面被中断，散热路径会缩小，从而增加热阻。热阻的增加会在散热焊盘与同一平面上较宽的表面区域之间产生更大温差。

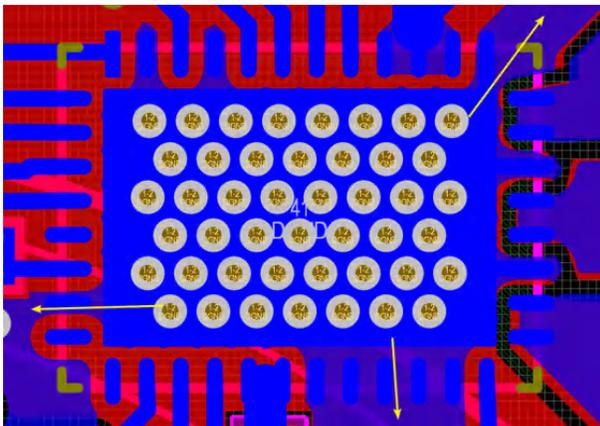


图 2-13. MCF831X 散热路径（底层）

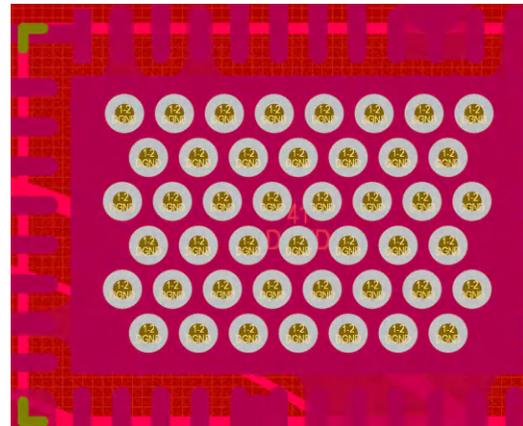


图 2-14. MCF831X 散热路径（顶层）

图 2-15 展示了热仿真；优化 PCB 布局可将总体温升降低 15°C。

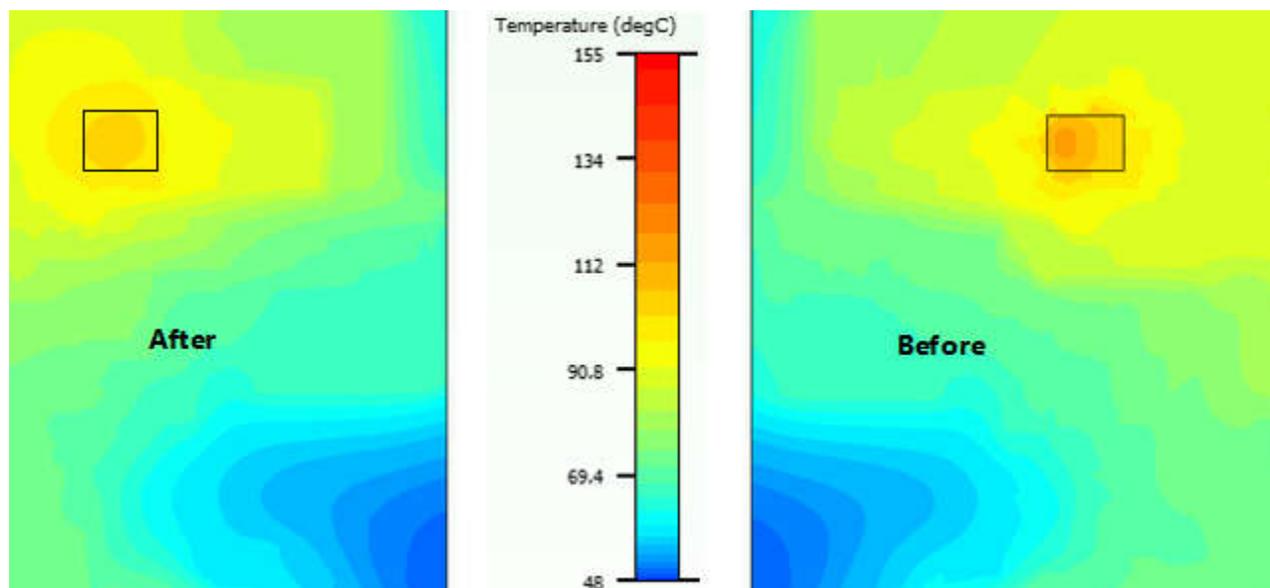


图 2-15. MCX831X 布局的热仿真

3 第 2 项设计挑战：快速启动

对于单芯片集成解决方案，尤其是无代码设计，客户可能会担心是否能够满足系统特定的要求，例如快速启动要求。在风扇等一些应用中，客户需要在 1 秒内达到 2000RPM，这样才能为客户提供更好的体验。对于水泵，客户需要能够在没有水的情况下快速启动。对于这项挑战，通过可在 MCF831x 器件中配置的许多寄存器来满足客户的要求。

3.1 引发快速启动问题的原因

对于无传感器 FOC，由于 MCF831x 没有用于提供位置信息的传感器，因此启动分为以下几步：电机启动、开环、切换和闭环。分开启动的原因是启动过程很复杂，但要确保每个启动链路都正确运行，因此启动速度不如刷子电机那么快。但是，我们可以在算法级别花时间优化每个步骤，并尽可能缩短启动时间。

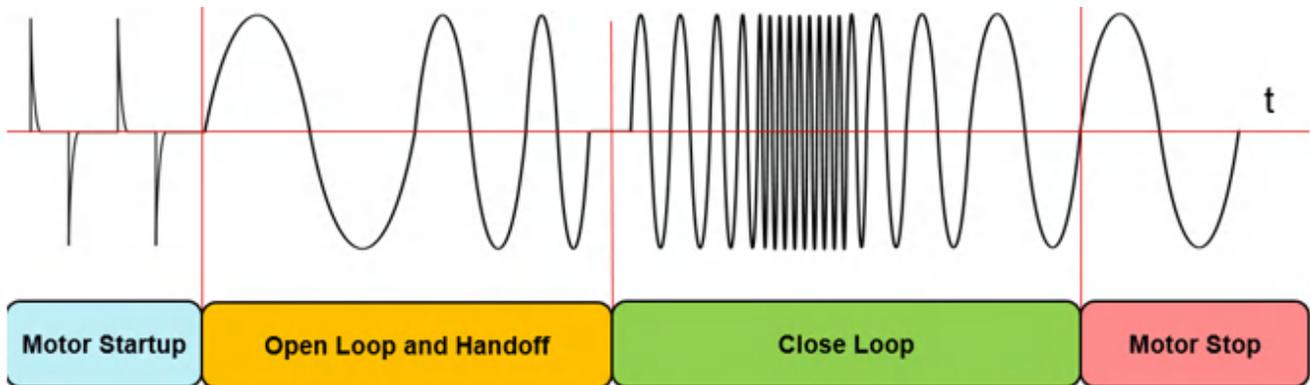


图 3-1. MCF831X 启动过程

3.2 如何解决快速启动问题

我们需要将每一步的速度分别调整为设计值，以便获得最快的启动速度，同时确保启动成功。

1. 电机启动

电机启动速度最快的选择是 IPD，但 IPD 也会引入其他潜在问题，例如可闻噪声。我们需要小心地将 IPD 电流阈值 [IPD_CURR_THR] 增大至电机的额定电流。有关启动的更多介绍，请参阅：[MCF8316A - 设计挑战和解决方案](#) 应用手册。

2. 开环和切换

影响此阶段启动的参数是开环加速系数 A1 [OL_ACC_A1] 和开环加速系数 A2 [OL_ACC_A2]。我们可以尽可能地提高加速度，因为我们知道会触发一些保护，例如“锁定 - 限制”。

在切换阶段，我们可以使用自动转换，为“用于切换的最小 BEMF [AUTO_HANDOFF_MIN_BEMF]”选择为 0mV，开启自动切换或手动切换，以及选择可确保切换到闭环且能快速切换到闭环的位置。

3. 闭环

关键参数是估算器尚未完全对齐时的闭环加速和闭环加速率 [CL_ACC]。我们需要在不失去同步和触发过流的情况下尽可能提高这些参数。

在进行前面提到的参数调整时，需要小心谨慎地进行，以确保电机不会失去同步或触发保护机制。请记住，只有启动成功时，快速启动才有意义。

下面是一个示例配置和结果：

示例 1：

电机参数：

电机相电阻 [Motor_RES]：1.15Ω

电机相电感 [Motor_IND]：0.96Ω

电机 BMEF 常数 [MOTOR_BEMF_CONST]：23mv/Hz

电机启动选项 [MTR_STARTUP]：对齐

对齐或慢速首循环电流限制 [ALIGN_OR_SLOW_CURRENT_ILIMIT]：0.15625A

对齐或慢速首循环斜升速率 [ALIGN_SLOW_RAMP_RATE]：1A/s

对齐时间 [ALIGN_TIME]：50ms

开环电流限制 [OL_ILIMIT_CONFIG]：0.3125A

开环加速系数 A1[OL_ACC_A1]：2.5Hz/s

开环加速系数 A2 [OL_ACC_A2]：2.5Hz/s²

开环到闭环阈值 [OPN_CL_HANDOFF_THR]：8%

估算器尚未完全对齐时的闭环加速 [CL_SLOW_ACC]：10Hz/s

闭环加速率 [CL_ACC]：40Hz/s

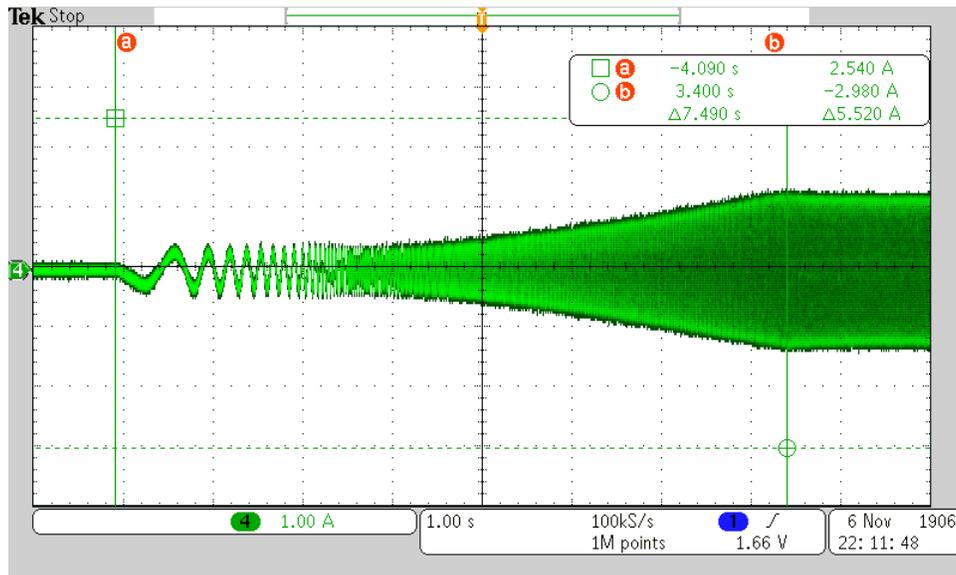


图 3-2. 示例 1 电流波形

示例 2：

电机启动选项 [MTR_STARTUP]：IPD

IPD 电流限制 [IPD_CURR_THR]：0.3125A

IPD 时钟值 [IPD_CLK_FREQ]：1000Hz

IPD 重复时间 [IPD_REPEAT]：1 次

启用 IPD 高分辨率 [IPD_HIGH_RESOLUTION_EN]：启用

开环电流限制 [OL_ILIMIT_CONFIG]：0.3125A

开环加速系数 A1 [OL_ACC_A1]：10Hz/s

开环加速系数 A2 [OL_ACC_A2]：80Hz/s²

从开环到闭环的自动切换 [AUTO_HANDOFF_EN]：启用

估算器尚未完全对齐时的闭环加速 [CL_SLOW_ACC]：100Hz/s

闭环加速率 [CL_ACC]：300Hz/s

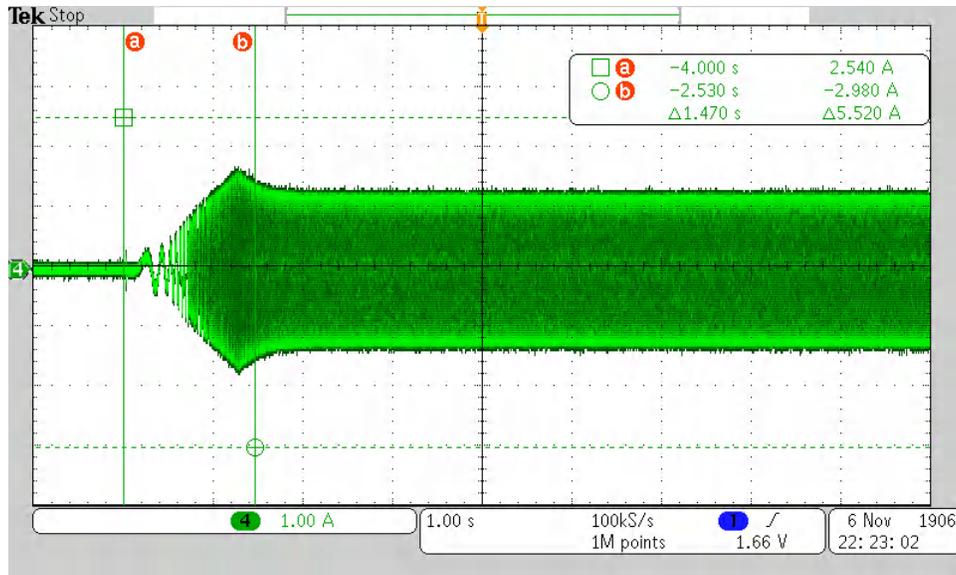


图 3-3. 示例 2 电流波形

图 3-3 显示在参数优化后，我们可在 1.5 秒内以 3000RPM 的转速运行电机。

4 总结

本应用手册详细分析了 MCF831X 应用中的散热挑战和快速启动挑战，并提供了应对散热挑战和快速启动挑战的设计。

本应用手册从硬件、算法和布局方面分析了散热挑战的解决方案，提出了具体的优化设计，并分析了热仿真结果。对于“快速启动”挑战，详细分析了启动步骤、提出了优化设计并提供了测试结果。

4.1 致谢

感谢 Jayden Li 为本应用手册提供了一些数据。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [用 TI 的霍尔效应和线性 3D 霍尔效应传感器替代簧片开关](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [MCF8316A 无传感器磁场定向控制 \(FOC\) 集成式 FET BLDC 驱动器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [MCF8316A 调优指南](#) 用户指南。
- 德州仪器 (TI), [如何设计高效散热型集成式 BLDC 电机驱动 PCB](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [MCF8316A - 设计挑战与解决方案](#) 应用手册。

6 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2023) to Revision A (October 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了住宅风扇、吊扇、空气净化器、冲洗泵和扫地机器人中的吸风电机	1

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司