

产品概述



电动滑板车牵引电机控制参考设计是一款功率板与控制板相互独立的多功能双电路板设计。本参考设计旨在驱动各种低电压三相电机，其中包括无刷直流电机（Brushless DC, BLDC）、永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）、内置永磁同步电机（Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM）和交流感应电机（AC Induction Motor, ACIM），并且支持基于传感器的操作和无传感器操作。这种多功能性使得本参考设计能够适配于两轮和三轮电动车的牵引控制。

功率板

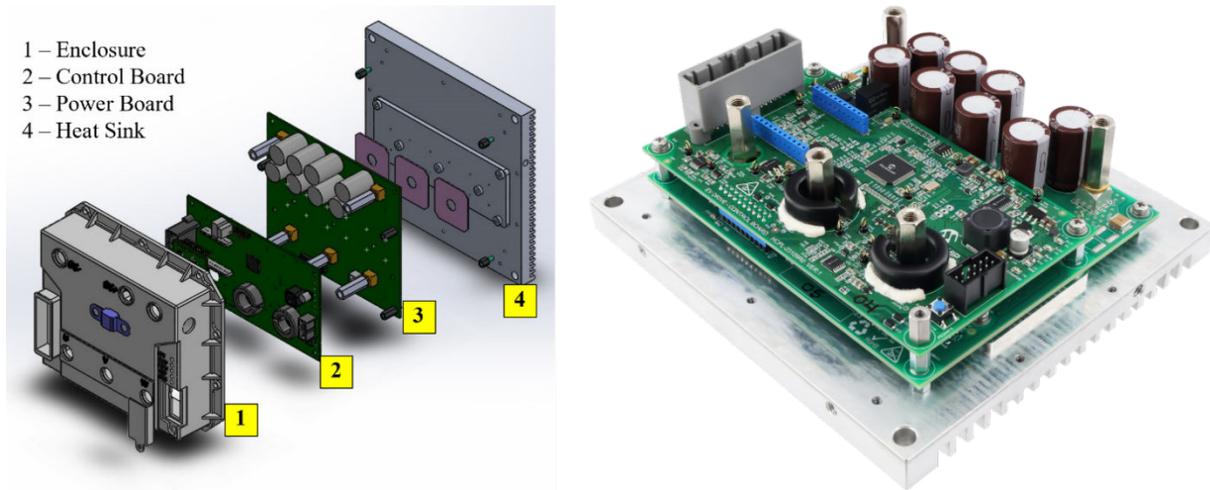
功率板集成了三相逆变器电路（由 MOSFET、栅极驱动器、直流链路电容和保护电路组成），以及稳健的功率级（由 80V/100V 顶部冷却 MOSFET 组成）。选择这种设计可以采用 FR-4 PCB（取代传统的金属包覆 PCB），从而降低制造成本。MOSFET 由三个峰值电流能力达 3A 的 MIC4104 100V 半桥栅极驱动器驱动。直流链路的两端并联 8 个 470 μF 的电容（总电容为 3.76 mF），以确保实现稳定的功率转换。此外，功率板还配有电流检测电阻和运算放大器，用于为 MOSFET 提供直通保护。

控制板

控制板搭载 dsPIC33CK256MP508 数字信号控制器（Digital Signal Controller, DSC），并集成了直流/直流转换器、电流传感器、信号调理电路、转子位置反馈接口、编程接口和通信接口。

48V 至 12V 同步降压转换器、中间的 12V-5V 降压转换器和 3.3V LDO 共同负责生成所需的电压输出，从而为本参考设计中的栅极驱动器、信号调理电路、各种接口和 dsPIC DSC 供电。相电流反馈（对于磁场定向控制至关重要）从非接触式电流传感器获得，以确保反馈准确可靠。操作本参考设计所需的外部接口可通过控制板上提供的用户接口连接器进行连接。所有外部信号均经过信号调理电路连接到 dsPIC DSC 输入引脚，以确保信号完整性。

图 1. 双电路板设计——分解视图



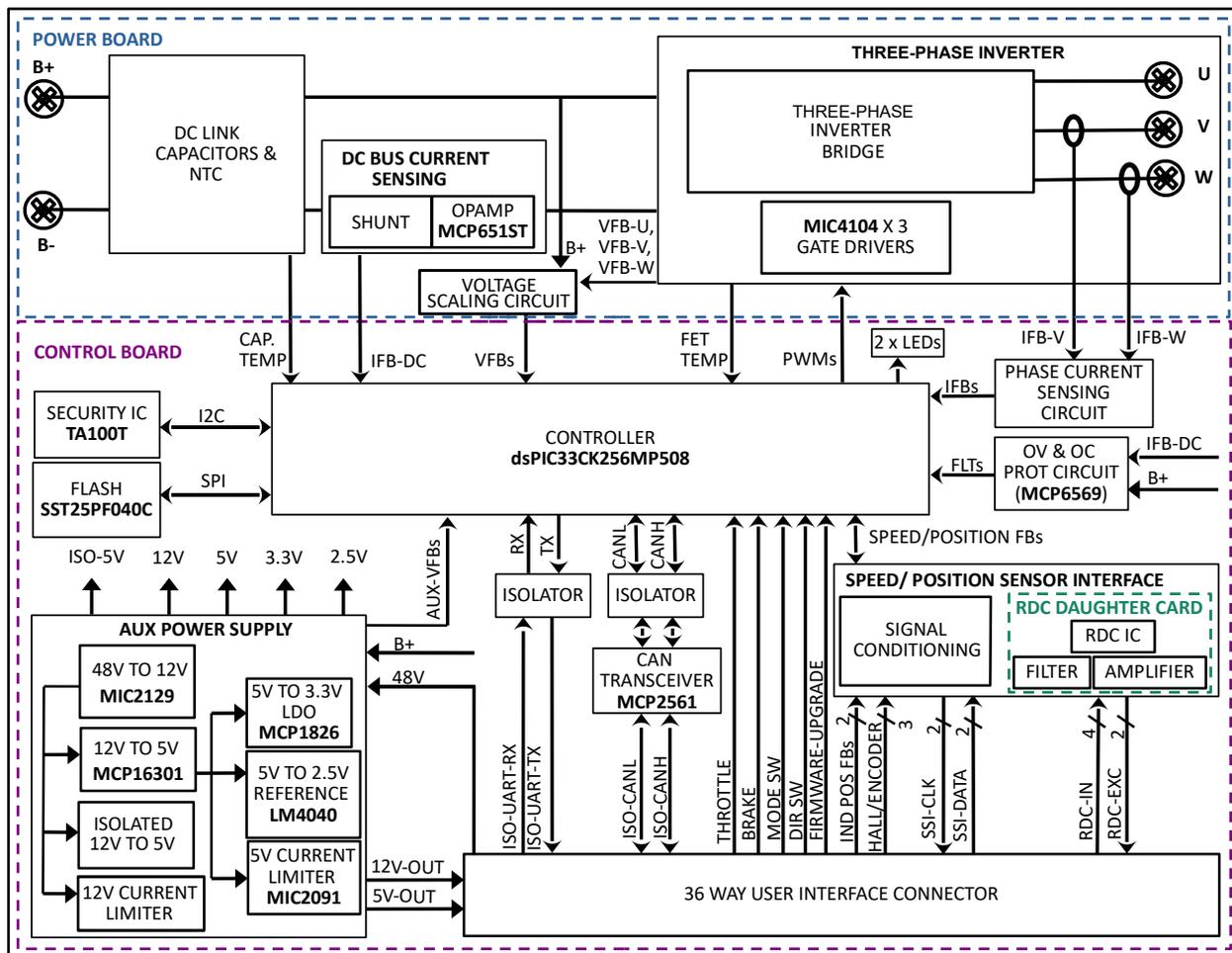
特性

表 1. 硬件、固件和软件特性

特性	说明
数字信号控制器	dsPIC33CK256MP508-E/PT
固件特性	<ul style="list-style-type: none"> • PMSM、IPMSM 或 ACIM 的正弦磁场定向控制（Field Oriented Control, FOC） • 弱磁控制 • 最大转矩/电流（Maximum Torque Per Ampere, MTPA）算法 • 再生制动功能，可在惯性滑行时为电池充电 • 电机的四象限操作 • 故障期间的跛行回家模式 • 控制模式：转矩控制和巡航控制 • 可配置电机参数
可通过更改配置电阻来选择转子位置传感器接口	<ul style="list-style-type: none"> • 霍尔传感器 • 磁性编码器（AM4096） • 旋转变压器（子卡作为接插板） • 电感式位置传感器 • 正交编码器
驾驶模式	<ul style="list-style-type: none"> • 节能模式（Eco） • 运动模式（Sports）
通信	<ul style="list-style-type: none"> • 隔离 CAN 接口 • 隔离 UART 接口
编程/调试	可选在线串行编程（In-Circuit Serial Programming™, ICSP™）接口插座
信号监视和调试接口	通过隔离 UART 接口
自举程序	基于 UART 的自举程序——使用隔离 UART 接口。
板上存储器	板上闪存。该外部闪存芯片仅用于数据记录，与包含程序代码的 dsPIC 内部闪存有所不同。
保护特性	<ul style="list-style-type: none"> • 过压保护 • 欠压保护 • 12V 和 5V 电源过载保护 • 相过流保护 • 过热保护——直流链路电容和 MOSFET • 过热保护——电机 • 基于约束的动态转矩限制 • 失速保护 • 油门开路保护和高开度保护 • 缺相检测 • 位置传感器的故障检测

图 2 给出了电动滑板车牵引电机控制参考设计的框图。

图 2. 电动滑板车牵引控制参考设计框图



系统规范

表 2. 系统规范

参数	规范
电气规范	
额定功率	3 kW (连续, 持续 15 分钟) 6 kW (峰值, 持续 60 秒) (60 秒后降额至 4.5 kW)
电压 (直流)	48V (标称值)
最大直流电流	65A (连续); 125A (峰值, 持续 60 秒)
最大相电流 (直流)	65 A-rms (连续); 125 A-rms (峰值, 持续 60 秒)
开关频率	10 kHz-20 kHz (最大值)
机械规范	
尺寸	155 mm (宽) * 165 mm (长) * 60 mm (高)
冷却	对流 ⁽¹⁾
IP 防护等级	IP65 设计
PCB 材料	控制板——FR4 材料; 功率板——FR4 材料
注:	
1. 采用外部冷却机制可以提升连续额定功率 (最高提升至 150%)。	

目录

产品概述.....	1
功率板.....	2
控制板.....	2
特性.....	3
系统规范.....	5
1. 整体系统解决方案——Microchip 器件.....	7
2. 硬件部分和接口.....	9
2.1. 硬件部分.....	9
2.2. 控制板接口.....	11
2.3. 功率板连接器.....	13
2.4. 连接图.....	14
2.5. 转子位置传感器接口.....	16
2.6. 油门接口和模拟制动接口.....	18
2.7. 数字接口.....	18
2.8. 通信接口.....	18
2.9. 固件升级使能跳线.....	19
2.10. 电流传感器增益.....	19
2.11. 运行和故障 LED 指示.....	19
3. 热运行测试结果.....	21
Microchip 信息.....	22
商标.....	22
法律声明.....	22
Microchip 器件代码保护功能.....	22

1. 整体系统解决方案——Microchip 器件

本参考设计的各项特性通过多款 Microchip 产品实现，其中包括栅极驱动器、降压转换器、比较器、闪存、降压稳压器、LDO、CAN 收发器、信任锚和运算放大器。

本参考设计中使用的 Microchip 产品如图 1-1 所示，并在图 1-2 和图 1-3 中以黄色标出。

图 1-1. Microchip 器件框图

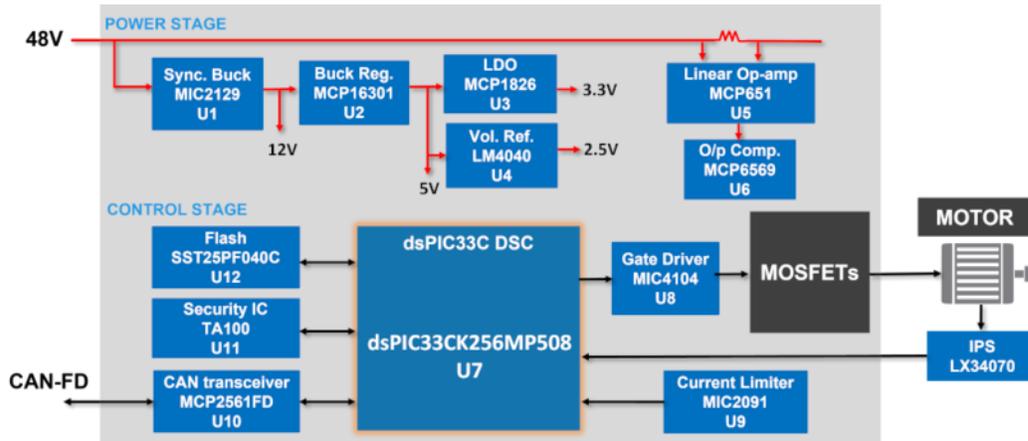


图 1-2. 控制板——Microchip 器件

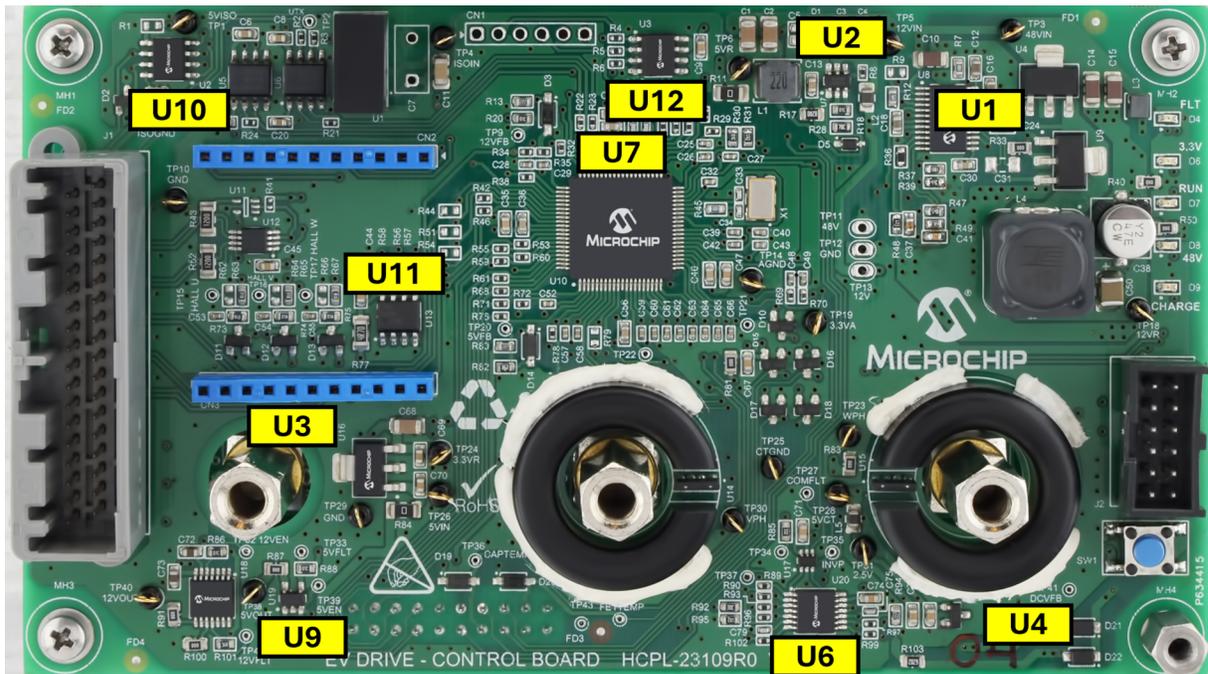
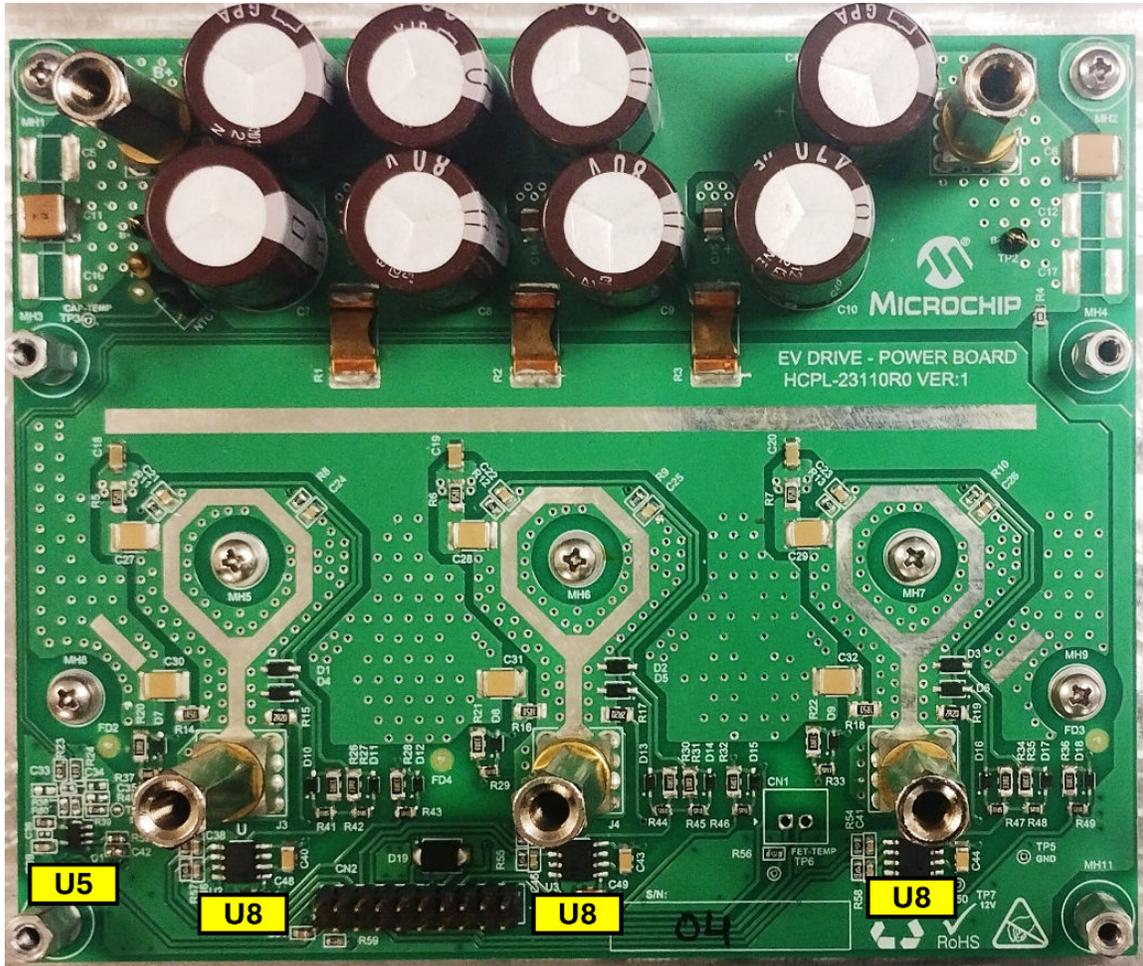


图 1-3. 功率板——Microchip 器件



2. 硬件部分和接口

2.1. 硬件部分

本章介绍了本参考设计的硬件部分。图 2-1 和表 2-1 介绍了控制板的硬件部分。

图 2-2 和表 2-2 介绍了功率板的硬件部分。

图 2-1. 硬件部分——控制板

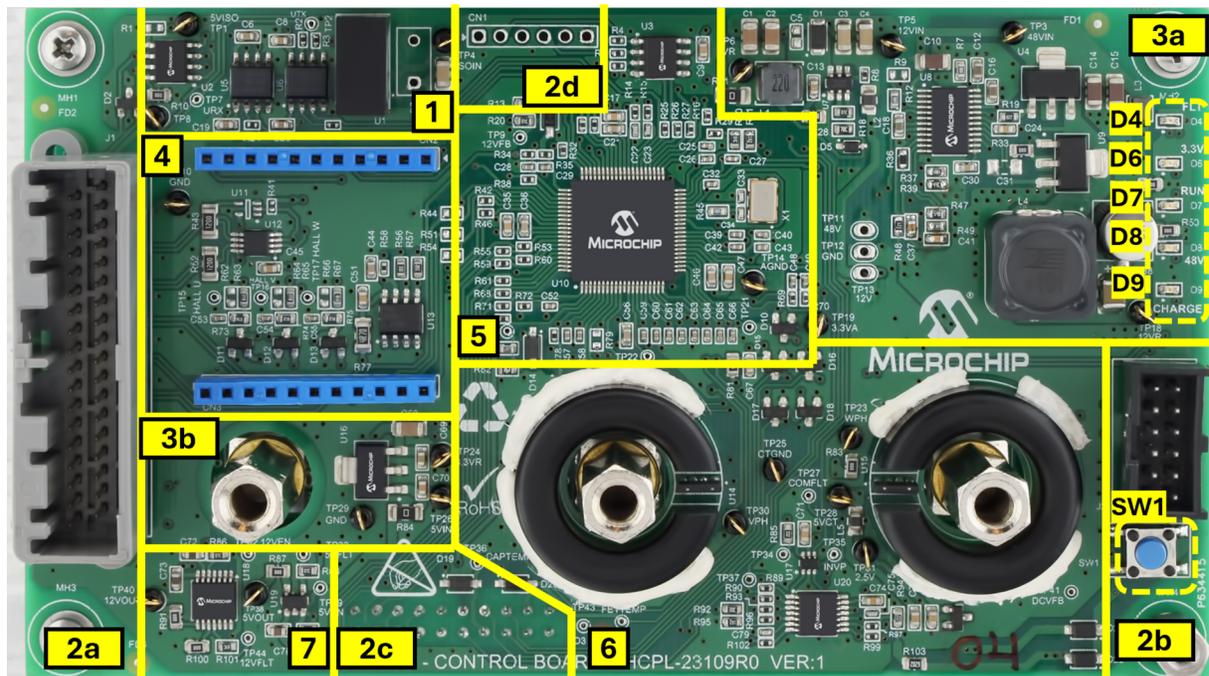


表 2-1. 硬件部分——控制板

部分编号	硬件部分
1	隔离的 5V，隔离的 UART 和 CAN
2a	用户接口连接器
2b	调试和编程器连接器
2c	控制/电源接口连接器
2d	板上闪存的编程接口连接器
3a	辅助电源（48V 转 12V，12V 转 5V）
3b	辅助电源（5V 转 3.3V）
4	旋变数字转换器——子卡
5	dsPIC DSC
6	V 相和 W 相电流检测
7	12V 和 5V 限流器

图 2-2. 硬件部分——功率板

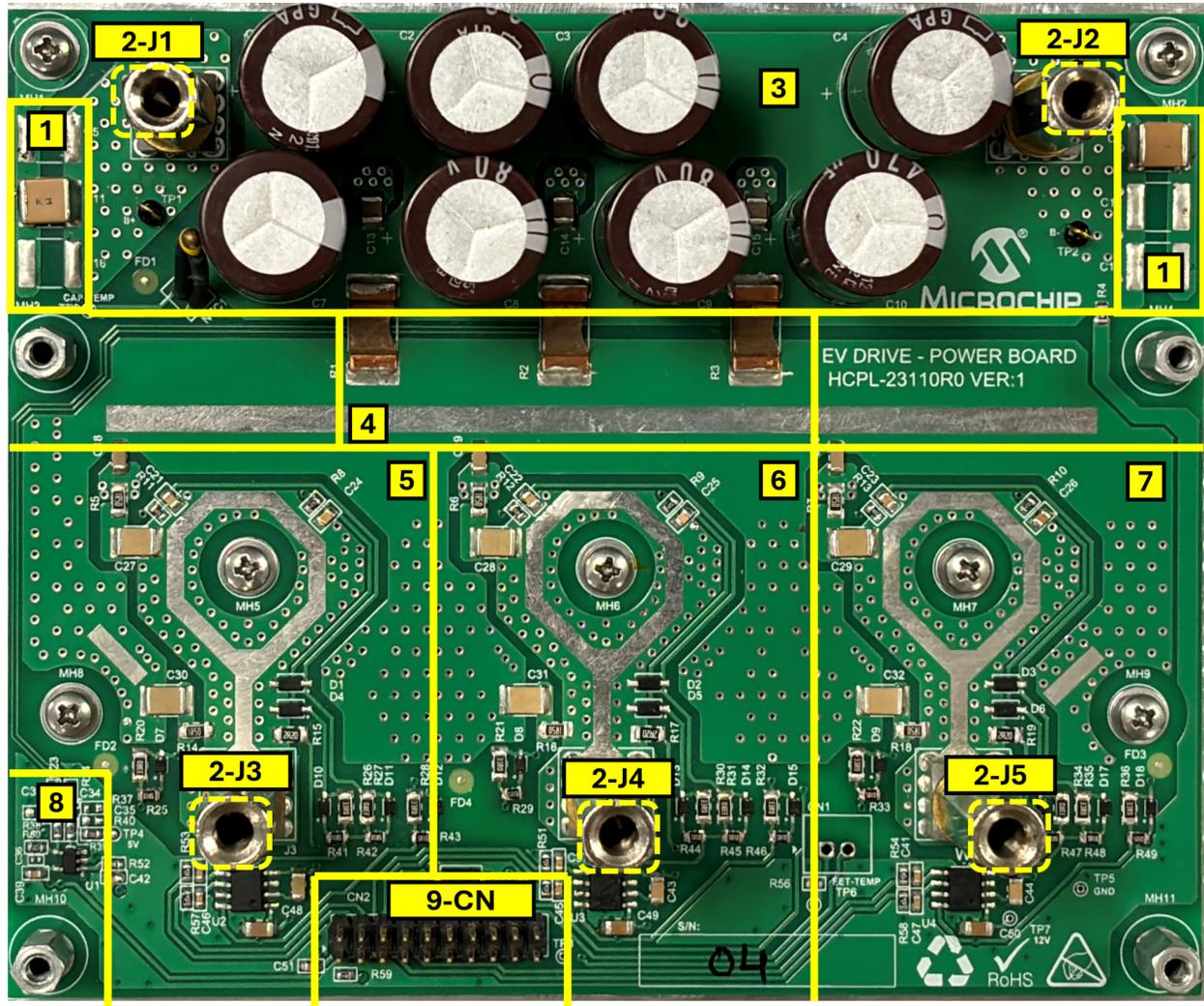


表 2-2. 硬件部分——功率板

部分编号	硬件部分
1	EMI 滤波电容
2	电源和电机连接器 (J1-J5)
3	直流母线电容
4	直流母线电流检测电阻
5	逆变器的 U 相部分——MOSFET 和栅极驱动器
6	逆变器的 V 相部分——MOSFET 和栅极驱动器
7	逆变器的 W 相部分——MOSFET 和栅极驱动器
8	直流母线电流检测运放
9	控制/电源接口连接器 (CN)

2.2. 控制板接口

本节汇总了本参考设计的控制板上的连接器、LED 和按钮。表 2-3 至表 2-9 提供了这些连接器、LED 和按钮的详细信息。

表 2-3. 控制板连接器

连接器标识	引脚数	状态	说明
J1	36	已安装	用户接口连接器
J2	12	已安装	编程/调试连接器
CN1	6	未安装	闪存编程连接器
CN4	20	已安装	控制/功率板接口连接器

表 2-4. 用户接口连接器 (J1)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	CANL	CAN 低电平电压 I/O
2	CANH	CAN 高电平电压 I/O
3	COS-IND	电感式位置传感器余弦输出
4	SIN-IND	电感式位置传感器正弦输出
5	+5V-OUT	5V 限流器 IC U19 的 5V 输出
6	GND	地
7	+12V-OUT	12V 限流器 IC U18 的 12V 输出
8	GND	地
9	THROTTLE	电动滑板车的油门输入 (0 至 5V)
10	BRK-ANA	电动滑板车的模拟制动输入 (0 至 5V)
11	GND	地
12	+5V-OUT	5V 限流器 IC U19 的 5V 输出
13	TEMP-MOT	电机温度输入
14	HALL-U	电机的霍尔传感器 U 相反馈
15	HALL-V	电机的霍尔传感器 V 相反馈
16	DIG-BRK	电动滑板车的数字制动输入信号; 默认为高电平
17	NC	无连接
18	+48V	控制板的+48V 输入
19	ISO-GND	隔离地
20	UART-TXB	隔离 UART 发送
21	UART-RXB-R	隔离 UART 接收
22	SSI-CLK_P	磁性编码器 SSI 时钟正输出
23	SSI-CLK_N	磁性编码器 SSI 时钟负输出
24	SSI-DATA_N	磁性编码器 SSI 数据负输入
25	SSI-DATA_P	磁性编码器 SSI 数据正输入
26	EXC_N	旋转变压器激励负输入/RDC 激励负输出
27	EXC_P	旋转变压器激励正输入/RDC 激励正输出
28	COS-IN_P	旋转变压器余弦正输出/RDC 余弦正输入
29	COS-IN_N	旋转变压器余弦负输出/RDC 余弦负输入

表 2-4. 用户接口连接器 (J1) (续)

引脚编号	信号名称	引脚说明
30	SIN-IN_P	旋转变压器正弦正输出/RDC 正弦正输入
31	SIN-IN_N	旋转变压器正弦负输出/RDC 正弦负输入
32	+5V-OUT	5V 限流器 IC U19 的 5V 输出
33	HALL-W	电机的霍尔传感器 W 相反馈
34	FW-UPGRD	用于固件升级的用户输入；默认为高电平
35	MODE-SW	用于速度模式选择的用户输入；默认为高电平
36	DIR-SW	用于电机方向选择的用户输入；默认为高电平

表 2-5. 编程/调试连接器 (J2)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	DBG-RX	dsPIC DSC 的调试 UART 接收引脚
2	RESET	dsPIC DSC 的主复位 ($\overline{\text{MCLR}}$)
3	DBG-TX	dsPIC DSC 的调试 UART 发送引脚
4	+3.3V	+3.3V 电源
5	GND	地
6	GND	地
7	+3.3V	+3.3V 电源
8	PGD	dsPIC DSC 编程数据线 (PGD)
9	DIO1	用户可配置的数字 IO；默认为高电平
10	PGC	dsPIC DSC 编程时钟线 (PGC)
11	DIO2	用户可配置的数字 IO；默认为高电平
12	NC	无连接

表 2-6. 板上闪存编程连接器 (CN1)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	+3.3V	+3.3V 电源
2	FLASH-CS	闪存的片选引脚
3	FLASH-SCK	闪存的时钟引脚
4	FLASH-DO	闪存的数据输出引脚
5	FLASH-DI	闪存的数据输入引脚
6	GND	地

表 2-7. 控制/电源接口连接器 (CN2)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	+5V	+5V 电源
2	GND	地
3	UTOP	U 相上桥臂开关栅极 PWM 输出
4	UBOT	U 相下桥臂开关栅极 PWM 输出
5	VTOP	V 相上桥臂开关栅极 PWM 输出
6	VBOT	V 相下桥臂开关栅极 PWM 输出

表 2-7. 控制/电源接口连接器 (CN2) (续)

引脚编号	信号名称	引脚说明
7	WTOP	W 相上桥臂开关栅极 PWM 输出
8	WBOT	W 相下桥臂开关栅极 PWM 输出
9	GND	地
10	+12V	+12V 电源
11	DC-I-FB	直流母线电流检测反馈输入
12	GND	地
13	CAP-TEMP	直流链路电容温度反馈输入
14	VPH-V-FB	V 相电压反馈输入
15	UPH-V-FB	U 相电压反馈输入
16	WPH-V-FB	W 相电压反馈输入
17	NC	无连接
18	FET-TEMP	PCB 温度反馈输入
19	DC-BUS-P	直流母线正极线路
20	NC	无连接

表 2-8. 控制板 LED

LED 标识	LED 颜色	LED 指示
D4	红色	故障指示 LED——用户可配置
D6	绿色	3.3V 状态 LED
D7	绿色	电机运行状态 LED——用户可配置
D8	蓝色	48V 钥匙状态 LED (关于钥匙开关, 请参见图 2-3)
D9	红色	直流母线上电状态 LED

表 2-9. 控制板按钮

按钮标识	说明
SW1	该按钮与 dsPIC33CK256MP508 DSC 的 $\overline{\text{MCLR}}$ 引脚相连。 按下该按钮将复位 dsPIC® DSC。

2.3. 功率板连接器

本节汇总了本参考设计的功率板上的连接器。这些连接器如图 2-2 所示, 其详细信息如表 2-10 和表 2-12 所述。

表 2-10. 功率板连接器

连接器标识	状态	说明
J1	已安装	直流母线输入正极端子
J2	已安装	直流母线输入负极端子
J3	已安装	逆变器的 U 相输出端子
J4	已安装	逆变器的 V 相输出端子
J5	已安装	逆变器的 W 相输出端子
CN1	未安装	用于外部 NTC 连接 (2 引脚)
CN2	已安装	20 引脚控制/功率板接口连接器

表 2-11. 外部 NTC 连接器详细信息 (CN1)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	FET-TEMP	PCB 温度反馈
2	+5V	NTC 的+5V 电源

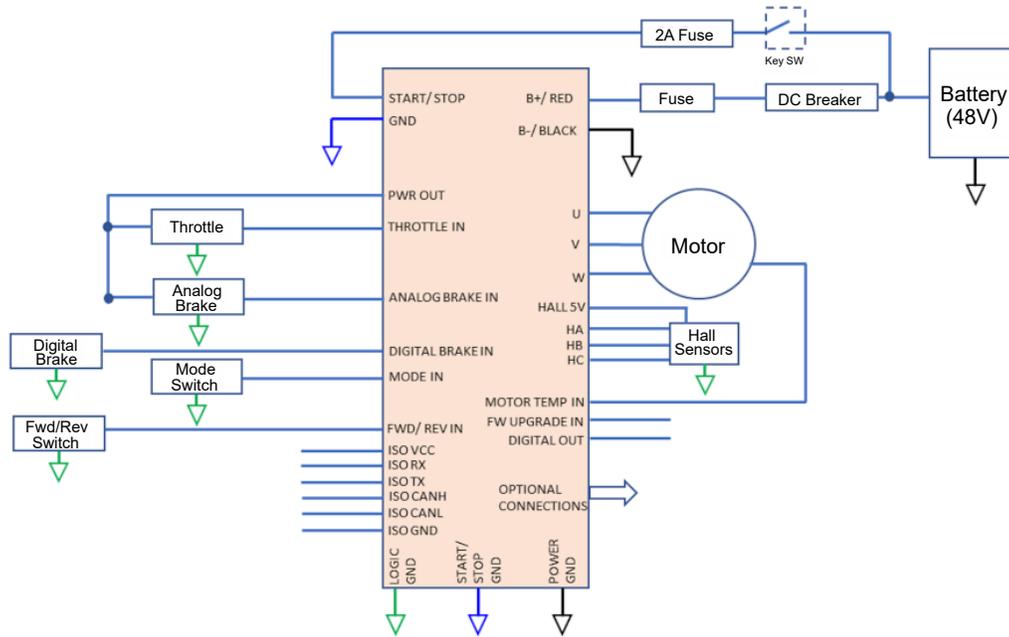
表 2-12. 控制板接口连接器详细信息 (CN2)

引脚编号	信号名称	引脚说明
1	+5V	+5V 电源
2	GND	地
3	UTOP	U 相上桥臂开关栅极 PWM 输入
4	UBOT	U 相下桥臂开关栅极 PWM 输入
5	VTOP	V 相上桥臂开关栅极 PWM 输入
6	VBOT	V 相下桥臂开关栅极 PWM 输入
7	WTOP	W 相上桥臂开关栅极 PWM 输入
8	WBOT	W 相下桥臂开关栅极 PWM 输入
9	GND	地
10	+12V	+12V 电源
11	DC-I-FB	直流母线电流检测反馈输出
12	GND	地
13	CAP-TEMP	直流链路电容温度反馈输出
14	VPH-V-FB	V 相电压反馈输出
15	UPH-V-FB	U 相电压反馈输出
16	WPH-V-FB	W 相电压反馈输出
17	NC	无连接
18	FET-TEMP	PCB 温度反馈输出
19	DC-BUS-P	直流母线正极线路
20	TP	无连接

2.4. 连接图

图 2-3 给出了本参考设计使用霍尔效应传感器作为转子位置反馈时的基本连接图。图中显示了电源端子 (+48V 和 GND)、电机 (UVW) 相、电池端子 (B+和 B-)、电机温度传感器、位置传感器反馈、油门和制动接口, 以及用于控制的外部开关。钥匙开关 (Key SW) 应与+48V 电池电源的正极端子 (引脚 18) 串联。

图 2-3. 连接图



注:

1. 为避免出现浪涌电流，应将电池正极端子通过预充电电路连接到 B+ 端子。

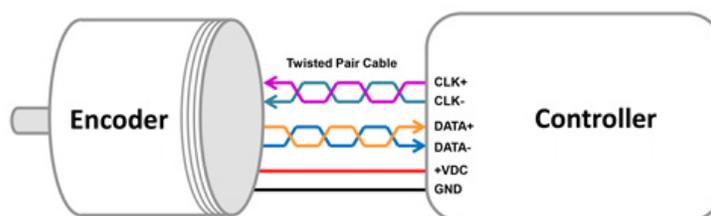
2.5. 转子位置传感器接口

牵引电机控制器需使用转子位置反馈来实现磁场定向控制。牵引逆变器支持多个传感器，具体如以下各节所述。

2.5.1. 磁性位置传感器 AM4096

AM4096 传感器通过用户接口连接器（J1）的差分 SSI 引脚进行连接。专用引脚包括 SSI-CLK-P（引脚 22）、SSI-CLK-N（引脚 23）、SSI-DATA-N（引脚 24）和 SSI-DATA-P（引脚 25）。通用传感器接口如图 2-4 所示。连接 SSI-DATA-P 和 SSI-DATA-N 时应确保当电机顺时针旋转（从轴的驱动端看）时，传感器输出（转子位置）递增。如果转子位置输出递减，则必须交换 SSI-DATA-P 和 SSI-DATA-N。

图 2-4. AM4096 传感器接口——差分 SSI

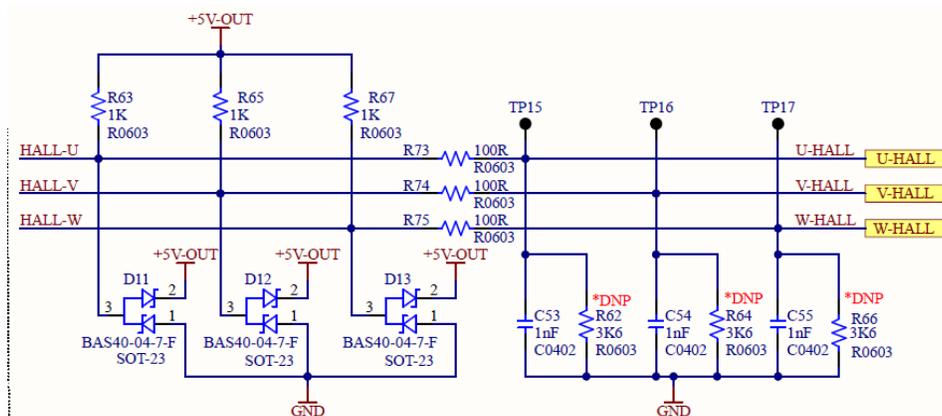


AM4096 传感器为绝对编码器，必须进行一次性转子磁极位置校准以确定转子 N 极与传感器过零点之间的偏移角。校准方法为注入正向 d 轴电流和零 q 轴电流，待转子锁定后确定转子位置。

2.5.2. 120° 霍尔效应传感器

电机的 120° 霍尔效应传感器反馈信号必须连接到控制板上的用户接口连接器 J1 的 Hall-U（引脚 14）、Hall-V（引脚 15）和 Hall-W（引脚 33）。+5V 电源通过接口连接器端子为霍尔传感器供电，本参考设计中的该接口仅兼容+5V 电源传感器。霍尔传感器接口电路既支持集电极开路传感器，也支持推挽式输出传感器。霍尔传感器接口电路如图 2-5 所示。

图 2-5. 霍尔传感器接口电路



分压器可将传感器信号从+5V 降至+3.3V。在本参考设计中，通过跳线电阻将霍尔信号和旋转变压器信号连接到数字信号控制器的相同引脚。霍尔信号默认连接到控制器（见图 2-7）。

2.5.3. 旋转变压器接口

旋转变压器可通过旋变数字转换器（Resolver to Digital Converter, RDC）子卡与本参考设计进行连接，该子卡插入本参考设计的控制板。图 2-6 给出了 RDC 子卡的框图。

图 2-6. RDC 子卡电路和接口

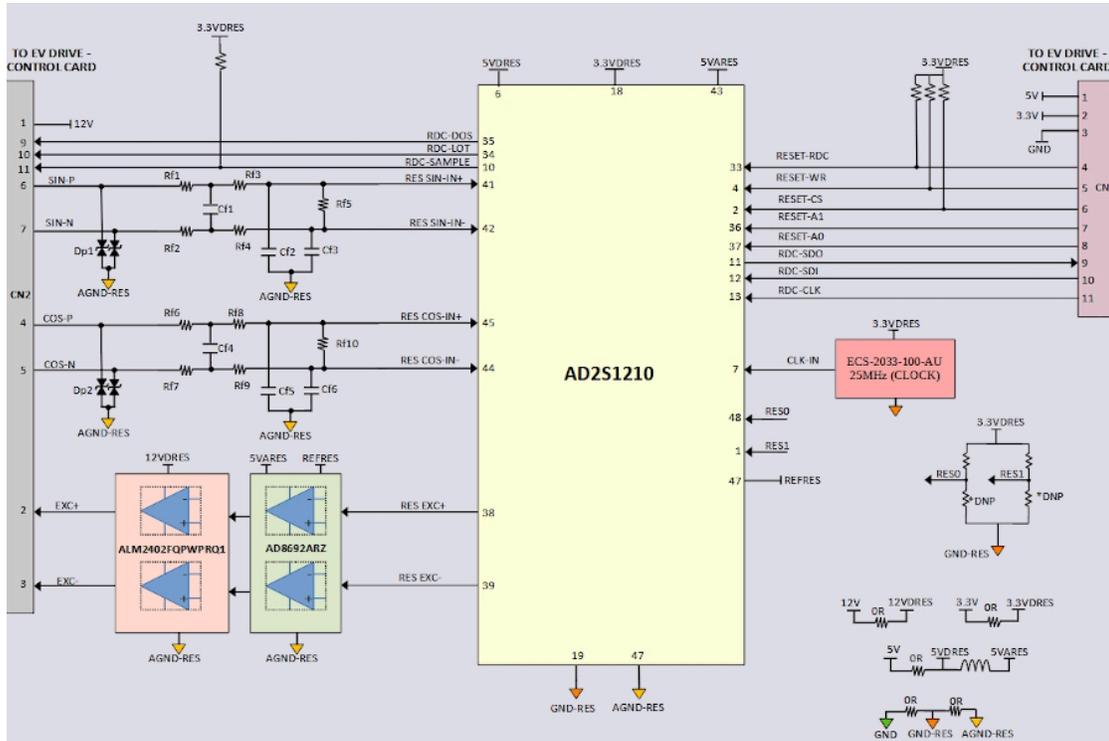


表 2-13 提供了 RDC 子卡的详细信息。

表 2-13. AD2S1210 IC 规范

参数	值
电源电压 (AVDD 和 DVDD)	5 VDC
旋转变压器输入电压范围	2.3V - 4V (Vp-p) 差分 SIN 和 COS 波形
激励电源电压范围	3.2V - 4V (Vp-p) 差分 SIN 波形 (频率范围为 2 kHz 至 10 kHz)
可编程分辨率	10 位、12 位、14 位和 16 位
模式	正常模式——位置输出

旋转变压器信号可连接到用户接口连接器 J1 (表 2-14 列出了相关引脚)。

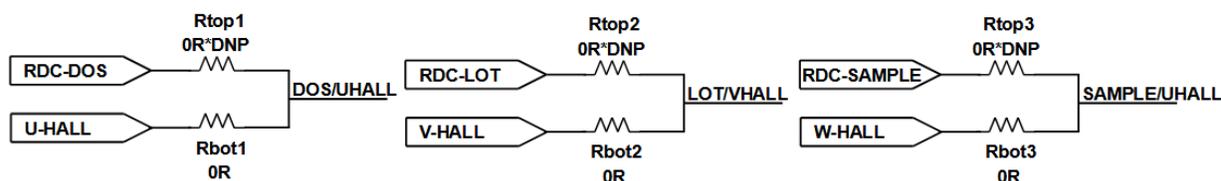
表 2-14. 引脚说明 J1——旋转变压器接口

引脚编号	信号名称	说明
26	EXC_N	旋转变压器激励负输入/RDC 激励负输出
27	EXC_P	旋转变压器激励正输入/RDC 激励正输出
28	COS-IN_P	旋转变压器余弦正输出/RDC 余弦正输入
29	COS-IN_N	旋转变压器余弦负输出/RDC 余弦负输入
30	SIN-IN_P	旋转变压器正弦正输出/RDC 正弦正输入
31	SIN-IN_N	旋转变压器正弦负输出/RDC 正弦负输入

RDC IC 将模拟信号转换为数字信号，并通过串行通信将转子位置数据发送到控制器。在本参考设计中，霍尔信号和旋转变压器信号通过跳线电阻连接到数字信号控制器的相同端口引脚。将旋转变压器信号连接到

单片机的输入时，用户必须安装适当的电阻（见图 2-7）。默认电阻跳线配置对应霍尔传感器接口。RDC 子卡不随硬件一起提供。如果需要该子卡，请联系 Microchip 现场应用工程师或销售工程师。

图 2-7. 用于选择霍尔或 RDC 接口的电阻设置



2.5.4. 正交编码器接口

增量电机轴正交编码器信号（A、B 和 Z）可通过本参考设计的电路板用户接口连接器的霍尔 UVW 信号进行连接。固件使用 dsPIC DSC 的可重映射功能来配置和使用正交编码器接口（Quadrature Encoder Interface, QEI）外设，从而连接来自电机的正交编码器反馈。表 2-15 提供了用于连接正交编码器信号的用户接口连接器的引脚映射。

表 2-15. 引脚说明 J1——霍尔/正交编码器接口

引脚编号	霍尔信号	编码器信号
14	HALL-U	编码器的 Z 索引信号
15	HALL-V	编码器的 A 信号
33	HALL-W	编码器的 B 信号

必须进行转子磁极位置校准，以确定转子 N 极与传感器 Z（索引）信号之间的偏移角。校准方法为注入正向 d 轴电流和零 q 轴电流，待转子锁定后确定转子位置。由于正交编码器为相对位置传感器，因此每次控制器上电都必须进行转子磁极校准，这一点与绝对编码器有所不同。

2.5.5. 电感式位置传感器接口

电感式位置传感器的正弦模拟信号和余弦模拟信号通过本参考设计的用户接口连接器 J1（引脚 3 和引脚 4）连接到控制板。+5V 电源通过接口连接器端子为传感器供电。每个信号输入端都连接了电容（用于降低噪声）和 ESD 保护二极管。电感式位置传感器为绝对传感器。因此，一次性校准方法为注入正向 d 轴电流和零 q 轴电流，待转子锁定后确定转子位置。

2.6. 油门接口和模拟制动接口

油门接口和模拟制动接口（如图 2-3 所示）利用 12V 外部接口电源供电。若要使用 5V 接口，需从用户接口连接器的 +12V-OUT（引脚 7）更改为 +5V-OUT（引脚 12）。

12V 和 5V 外部接口电源的输出受限流器保护，两者的输出电流限值分别为 250 mA 和 200 mA。将油门和制动等外部电路元件与本参考设计进行连接时，应确保从 +12V 和 +5V 电源汲取的输出电流不超过上述限值。

2.7. 数字接口

数字制动（DIG-BRK）、方向开关（DIR-SW）和模式开关（MODE-SW）这三个数字输入均为低电平有效输入。数字信号通过 4.7 kΩ 电阻从内部上拉至 +5V。默认电机方向为正向（即，从电机轴的驱动端看为顺时针旋转），默认模式为 ECO 模式。

2.8. 通信接口

本参考设计配有隔离 CAN 和 UART 通信端口，用于外部接口和调试。通信接口的电气隔离设计有助于将电池地与外部用户接口地噪声隔离。内部采用隔离的 5V 转换器为收发器供电，并采用数字隔离器实现信号隔离。

2.8.1. 隔离 CAN 接口

可通过用户接口连接器的引脚 1 和引脚 2 构建 CAN 接口。CAN 收发器支持 1 Mbps 的传输速率。隔离 CAN 接口可用于：

- 与电池监视系统（Battery Monitoring System, BMS）通信。
- 监视电机驱动器的性能，包括任何故障。
- 配置电机驱动器的参数。

2.8.2. 隔离 UART 接口

可通过用户接口连接器的引脚 20 和引脚 21 构建 UART 接口。隔离 UART 最高支持 115200 bps 的波特率。UART 接口可用于：

- 调试。
- 配置电机驱动器的参数。
- 固件更新。

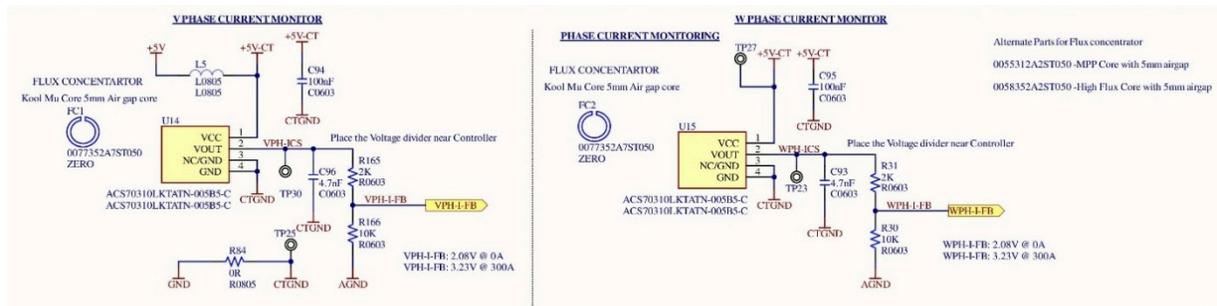
2.9. 固件升级使能跳线

可通过本参考设计的隔离 UART 接口进行固件升级。必须将用户接口连接器 J1 的 FW-UPRD 引脚（引脚 34）下拉至地才能使能固件升级。

2.10. 电流传感器增益

电流传感器增益默认设置为可检测 320A 峰值。该默认值基于逆变器的峰值额定值 125 A-rms（176A 峰值）确定。为了充分利用 ADC 的最大分辨率，需将电流增益设置为逆变器板的峰值电流额定值的两倍左右。但是，在电机峰值电流额定值小于 125 A-rms 的特殊情况下，建议将电流增益调整为电机峰值电流额定值的两倍。可通过更改 V 相电流传感器的电阻 R165 和 R166 以及 W 相电流传感器的电阻 R30 和 R31 来调整电流增益。调整电流增益时，应确保 VPH-I-FB 和 WPH-I-FB 处的输出电压在所需峰值电流下为 3.3V。

图 2-8. 电流监视电路



2.11. 运行和故障 LED 指示

外壳上的运行和故障状态指示 LED 用于指示驱动器的状态。此外，运行 LED 还可用作心跳 LED，以指示控制器的运行状况。在正常情况下，当钥匙开关关闭时，运行 LED 以较慢的速率闪烁，表示控制器运行良好；当钥匙开关打开时，运行 LED 以恒定速率闪烁。发生故障时，运行和故障 LED 会按照固件中定义的模式闪烁。这些模式可用于识别故障源。有关故障与闪烁模式的对应关系，请参见表 2-16。

表 2-16. 故障与闪烁模式的对应关系

闪烁模式	故障说明
2	振荡器故障
3	地址错误

表 2-16. 故障与闪烁模式的对应关系（续）

闪烁模式	故障说明
4	硬陷阱
1 2	堆栈指针错误
2 2	算术错误
3 2	陷阱 5 的代码（未使用）
4 2	硬陷阱
1 3	保留陷阱 7
3 1 2	硬件故障
4 1 2	直流链路过压
1 2 2	直流链路欠压
2 2 2	电机过热
3 2 2	FET 过热
4 2 2	电容过热
1 3 2	控制器过压
2 3 2	控制器欠压
3 3 2	12V 辅助电源故障
4 3 2	5V 辅助电源故障
1 4 2	2.5V 辅助电源故障
2 4 2	油门/制动/霍尔信号接口故障
3 4 2	12V 限流器故障
4 4 2	5V 限流器故障
1 1 3	陷阱冲突
2 1 3	IOPUWR 非法操作码/未初始化的 W 寄存器
3 1 3	配置不匹配
4 1 3	看门狗超时, ISR
1 2 3	看门狗超时, 主循环
2 2 3	电路板配置失败
3 2 3	检测到电路板故障

例如，在直流链路过压故障期间，故障 LED 和运行 LED 一起闪烁，闪烁模式为闪烁四次 - 短延时 - 闪烁一次 - 短延时 - 闪烁两次 - 长延时 - 闪烁四次，以此循环。

3. 热运行测试结果

在标称值和峰值额定值条件下进行驱动器热运行测试期间，持续监测各种元件以及散热器不同位置的温升数据。进行热运行测试时，将 RL 负载连接到牵引电机控制参考设计的三相输出，以将相电流设置为 65A（标称值条件下）和 125A（峰值额定值条件下）。温升测试结果如图 3-1 和图 3-2 所示。

图 3-1. 3 kW 条件下 15 分钟后的温升数据

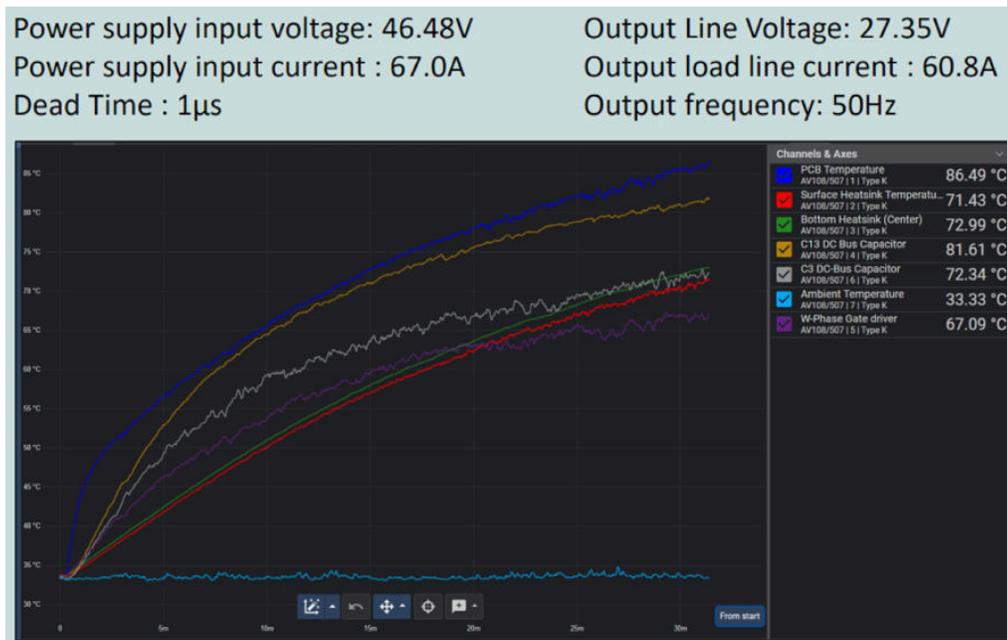
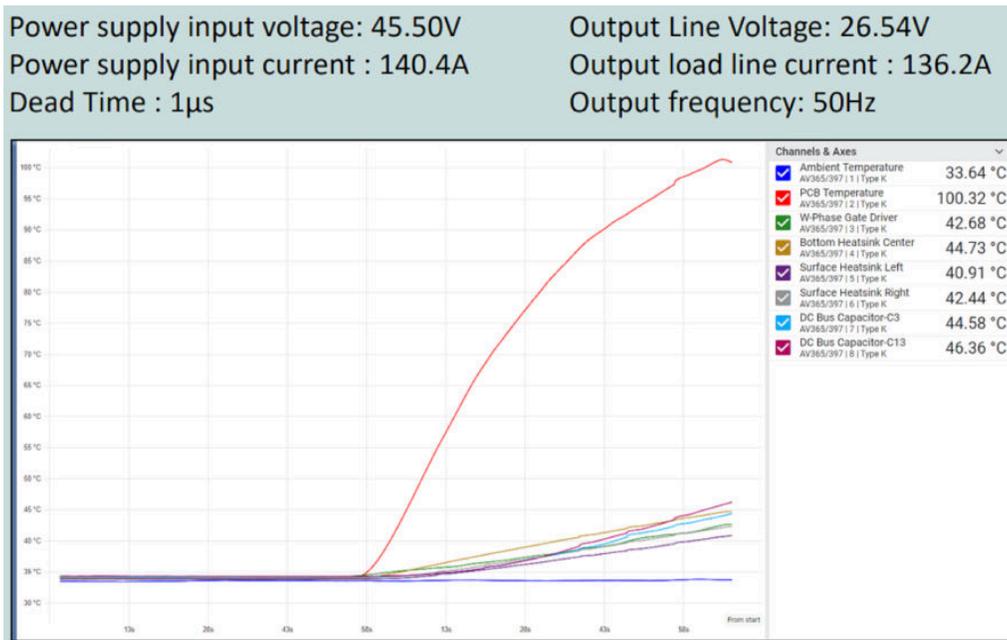


图 3-2. 6 kW 条件下 1 分钟后的温升数据



Microchip 信息

商标

“Microchip”的名称和徽标组合、“M”徽标及其他名称、徽标和品牌均为 Microchip Technology Incorporated 或其关联公司和/或子公司在美国和/或其他国家或地区的注册商标或商标（“Microchip 商标”）。有关 Microchip 商标的信息，可访问 <https://www.microchip.com/en-us/about/legal-information/microchip-trademarks>。

ISBN: 979-8-3371-1486-6

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。您须自行确保应用符合您的规范。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或附带的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》（Digital Millennium Copyright Act）。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。