

SPECIFICATION

单路 FOC 电机驱动板 规格书 (Specification)

单路三相 FOC 无刷电机驱动 · 硬件规格书

品牌	Daliang Auto
产品名称	FOC_Single 单路 FOC 电机驱动板
产品型号	PF1-400-A
主控	STM32G473RCT6 (ARM Cortex-M4F, LQFP64)
文档版本	Rev. 2.0
适用	电动自行车 / 电动踏板车 / LEV、卡丁车线控、通用 BLDC / PMSM 有感 FOC 驱动、通用 FOC 开发

本规格书仅描述 **硬件**（电气、功率链路、接口、引脚、连接器、机械与保护）。部分电源 / 栅驱 / 功率 / 保护 / 接口器件以功能描述给出，具体料号不在本公开文档披露。文中电气参数为典型 / 推荐值，量产前请以正式测试报告为准。

1. 产品概述

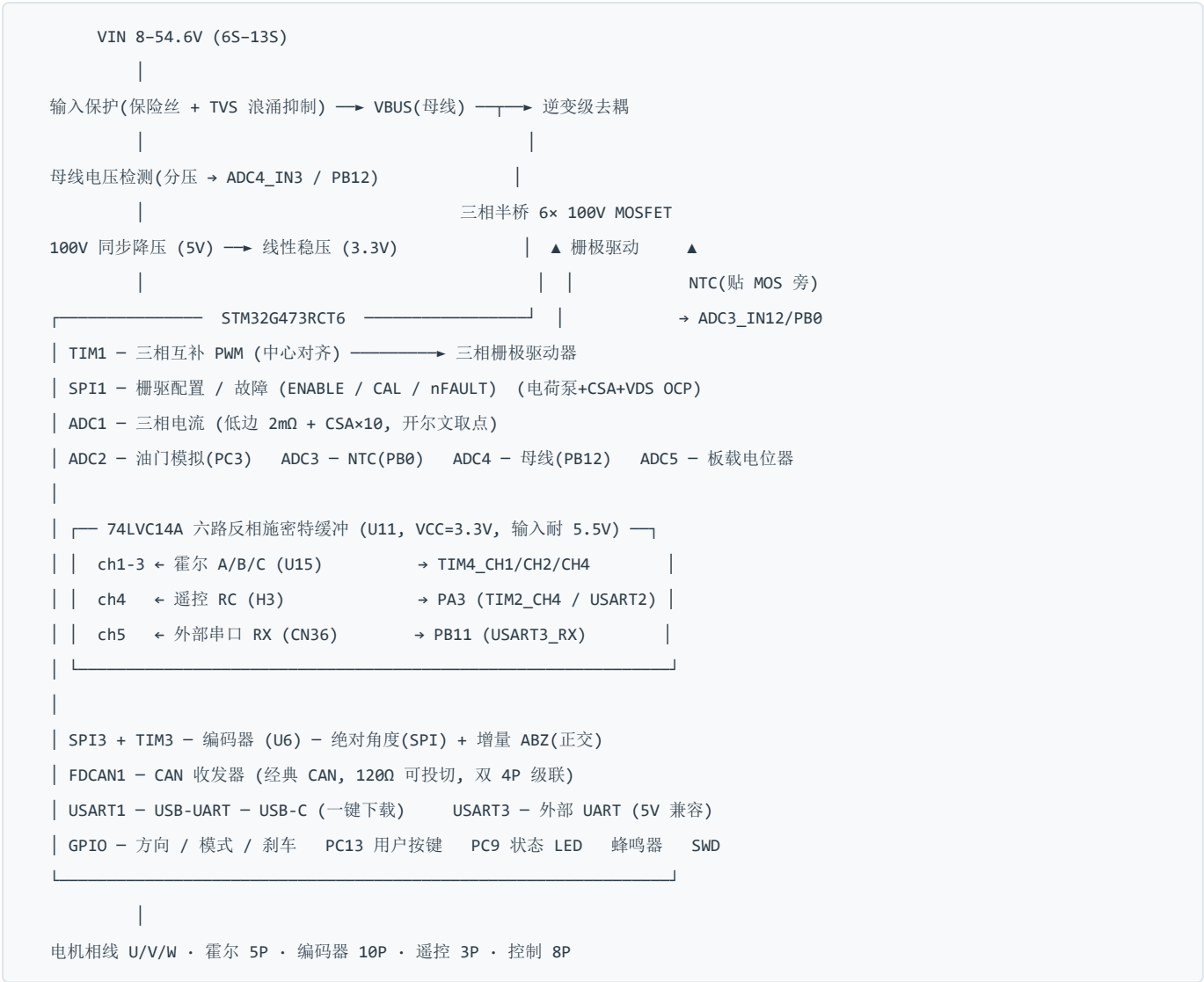
FOC_Single 是一款以 **STM32G473RCT6** 为核心的单路、三相 FOC（磁场定向控制）无刷电机驱动板。功率链路、电流采样、保护与母线采样均按 **100 V 功率体系** 设计，出厂标定为 **48 V 平台**，覆盖 6S–13S 锂电。

Rev. 2.0 相对 Rev. 1.1 的主要变化：新增编码器接口（SPI 绝对 + ABZ 增量）、新增 MOS 温度检测（NTC）、遥控输入支持 PWM/SBUS/CRSF/IBUS 四协议、外部串口升级为 5 V 兼容。 详见 §16 修订记录。

主要特性：

- **主控：** STM32G473RCT6, Cortex-M4F @ 170 MHz, 256 KB Flash / 128 KB SRAM, 硬件 FPU + CORDIC, TIM1 高级定时器、5×ADC、FDCAN。
- **三相 FOC 功率级：** 集成式三相栅极驱动器（内置电荷泵、3 路电流采样放大器、SPI 配置、VDS 硬件过流保护）+ 6× **100 V 功率 MOSFET** 三相半桥。
- **精密电流采样：** 低边 3× **2 mΩ** 分流，**开尔文（四线）取点** + 内置 CSA（增益 10 V/V），满量程 ±82.5 A。
- **位置反馈（双通道）：**
- **编码器接口（新增）** — **SPI3 绝对角度 + ABZ 增量正交**，10P 连接器（U6），3.3 V 供电。
- **霍尔接口** — 5 V 供电 + RC 滤波 + 施密特缓冲，TIM4 输入捕获。
- **MOS 温度检测（新增）：** 板载 **10 kΩ / B3950 NTC**，贴装于功率 MOSFET 旁 ≈2.6 mm，接 ADC3_IN12。取代旧版纯 I²t 软件估算。
- **遥控输入（升级）：** 单一引脚（PA3 / H3）经施密特缓冲，固件可选 **PWM / SBUS / CRSF (ExpressLRS) / IBUS** 四种协议；**3.3 V 与 5 V 接收机均可直接接入**。
- **宽压输入：** DC **8–54.6 V**（6S–13S 锂电），板载 **输入保险丝 + TVS 浪涌抑制**，母线电压经 ADC 实时检测。
- **板载电源：** **100 V 同步降压** 输出 5 V + 线性稳压 3.3 V，对外提供 5 V 取电（经自恢复保险丝）；5 V 轨亦可经**肖特基二极管**由 USB 供电。
- **通信：** 1×CAN（经典 CAN ≤1 Mbps，双 4P 接口可级联，120 Ω 终端可切换）、USB Type-C（USB-UART + 一键下载）、**5 V 兼容外部 TTL 串口（升级）**。
- **保护：** 输入保险丝、TVS 浪涌抑制、栅驱 VDS 过流、**NTC 实测 MOS 温度**、母线过压 / 欠压软件监测、5 V 取电口自恢复保险丝。
- **尺寸：** 100 × 55 mm，4 层 PCB，4 × Ø3.2 mm 安装孔（94 × 49 mm 孔距）。

2. 系统框图



3. 主控 MCU 规格

参数	规格
型号	STMicroelectronics STM32G473RCT6
内核	ARM Cortex-M4, 带 FPU (单精度)、DSP 指令、CORDIC 三角加速器
主频	最高 170 MHz (板载 8 MHz 主晶振经 PLL 倍频)
Flash / SRAM	256 KB / 128 KB
关键外设	TIM1 高级定时器 (互补 PWM + 死区 + 刹车输入)、5×12-bit ADC、FDCAN、多路 UART / SPI
封装	LQFP64 (10×10 mm, 0.5 mm 间距)
供电	3.3 V; VDDA 经 10 Ω + 1 μF + 100 nF π 型滤波独立供电, VREF+ = VDDA
时钟源	8 MHz 主晶振 (18 pF 负载电容)
工作温度	-40 °C ~ +85 °C (按 MCU 规格, 整板以实测为准)

3.1 ⚠ I/O 电平耐压（设计与接线必读）

STM32G4 的 I/O 分两类，且没有到 **VDD** 的正向注入通路（数据手册 Table 15 脚注："*Positive injection (when VIN > VDD) is not possible on these I/Os*", $I_{INJ}(PIN) = -5/0\text{ mA}$ ）。

这意味着：串联电阻不能防止过压损坏。引脚上加超过上限的电压，没有电流被钳走，栅氧直接承受全压。

I/O 结构	耐压	本板使用的引脚
FT（5 V 容忍）	5.5 V	PC6 / PC7 / PC8 / PC9 / PC10 / PC11 / PC12 / PC13 / PA15 / PB6 / PB7 / PB9
TT_a（3.6 V 上限）	3.6 V	PA0–PA8 / PB0 / PB1 / PB10 / PB11 / PB12 / PC3 / PC5

对外接口的防护策略：

接口	引脚结构	防护
霍尔	经 74LVC14A（耐 5.5 V）	✓ 缓冲器隔离
遥控 RC	经 74LVC14A（耐 5.5 V）	✓ 缓冲器隔离， 3.3 V / 5 V 接收机均安全
外部串口 RX	经 74LVC14A（耐 5.5 V）	✓ 缓冲器隔离， 5 V TTL 模块安全
方向 / 模式 / 刹车	PC6/7/8 = FT	✓ 引脚本身耐 5 V
油门模拟（PC3）	TT_a	✓ 10 k / 20 k 分压（0.667）
编码器 ABZ（PA5/6/7）	TT_a，直连无缓冲	⚠ 仅支持 3.3 V 编码器 （U6 供 3V3；开漏/NPN 编码器由 2.2 kΩ 上拉定义 3.3 V 高电平，亦安全）
外部串口 TX（PB10）	TT_a，输出	⚠ 接线务必 TX↔RX 对接，勿 TX↔TX

4. 电源系统

4.1 输入与保护

环节	实现	说明
主输入端子	U5 （5.08 mm 螺钉端子，2P）	BAT+ / GND，主电源输入
过流保护	输入保险丝（SMD 保险丝座 + 保险管）	短路 / 过流最终熔断保护，串联于输入
浪涌 / 钳位	TVS 瞬态抑制（标称 60 V 级，钳位 < 100 V）	抑制输入瞬态过压，钳位包络对齐 100 V 功率器件
防反接	无	端子防呆 + 丝印标极性， 电池务必正接，勿反接
母线电压检测	电阻分压 + RC 滤波 → ADC4_IN3（PB12）	分压比 21.0，满量程 69.3 V； 响应时间常数 ≈0.5 ms [Rev.2.0 由 ≈5 ms 提升]；软件过压 / 欠压监测
5 V 取电口保护	自恢复保险丝（PPTC）	保护 CN36 / U6 等对外 5 V / 3V3 取电口短路

推荐工作输入：DC 8–54.6 V（6S–13S 锂电），出厂标定 48 V 平台。输入下限受降压 UVLO 限制。

功率输出参考（额定工况，母线连续电流）：

工况 (母线电压 / 功率)	母线连续电流
24 V / 200 W	≈ 8.3 A
36 V / 350 W	≈ 9.7 A
48 V / 400 W	≈ 8.3 A

功率级采用 **100 V 功率 MOSFET** (100 V / 100 A 级, 三相半桥), 器件能力远高于上述使用电流; 连续能力主要由分流电阻降额与散热决定, 见 §5、§14。

4.2 电源轨

电源轨	规格	对外接口
+5 V	100 V 同步降压 DC-DC , 约 5.1 V; 亦可经 肖特基二极管 由 USB 5V (VBUS) 并入	H2 排针、霍尔 U15、控制 U2、遥控 H3、外部串口 CN36 (经 PPTC)
+3.3 V	线性稳压, ≤600 mA (供 MCU / 逻辑 / 通信)	编码器 U6 、H2 排针
母线去耦	入口 470 μF/100 V + 1 μF + 100 nF; 逆变级 220 μF/100 V + 薄膜 + 每相 100 nF (全 ≥100 V)	—

接入 USB 时, 5 V 轨可由 USB (VBUS, 经肖特基) 供电, **不接主电池即可运行 MCU / 逻辑** (便于烧录 / 调试 / 参数配置); 功率级驱动电机仍需主电池母线。

5. FOC 功率级

5.1 三相半桥与功率链路

- 三相半桥**: 6× **100 V 功率 MOSFET** (100 V / 100 A 级), VBUS 顶层连续铺铜喂上管漏极, 相节点经多过孔下内层走宽铜到电机端子。
- 栅极驱动**: 集成式 **三相栅极驱动器**, 内置电荷泵、3 路电流采样放大器 (CSA)、SPI 配置与 **VDS 过流保护** (阈值经 SPI 可配, 触发 nFAULT)。每管 10 Ω 栅极串阻 (贴栅极) + 10 kΩ 栅源电阻。
- PWM**: TIM1 中心对齐互补输出 (CH1/2/3 + CH1N/2N/3N), 死区由 TIM1 死区发生器产生; 典型载波 16–40 kHz (固件设定, 出厂 20 kHz)。栅驱故障 nFAULT 可接 TIM1_BKIN 硬件关断 PWM。

5.2 电流采样

项目	实现
分流电阻	低边 3× 2 mΩ , 开尔文 (四线) 取点 (大电流走焊盘外端, 采样对从电阻内侧专线并走、远离开关节点)
采样放大	栅驱内置 CSA, 增益 10 V/V , 零电流偏置 1.65 V (约 2048 count)
抗混叠	SOx 输出经 33 Ω + 1 nF RC (贴 ADC 脚) 后入 MCU
ADC 通道	ADC1_IN1 / IN2 / IN3 (PA0 / PA1 / PA2, SOA / SOB / SOC) 注入组, TIM1_CH4 触发
电流标度	约 0.0403 A / count , 满量程 ±82.5 A
连续上限	受 2 mΩ 分流降额约束, 约 30 A RMS 连续; 更高连续电流需重选分流并加宽相铜

6. 位置反馈

本板提供 **两套独立的位置反馈通道**, 可单独使用或组合 (编码器为主 + 霍尔备份 / 启动定位)。

6.1 编码器接口 (Rev. 2.0 新增)

连接器 U6 (ZX-PHB2.0-2-5PZZ, 2.0 mm 双排 10P) :

脚	信号	脚	信号
1	+3.3 V	2	GND
3	EN_SCK	4	EN_MISO
5	EN_MOSI	6	EN_CS
7	A	8	GND
9	B	10	Z

SPI3 绝对角度通道:

项目	实现
引脚	SCK=PC10 / MISO=PC11 / MOSI=PC12 / CS=PA15 (软件片选)
调理	四线各串 100 Ω; CS 经 10 kΩ 上拉至 3V3 (MCU 侧, 复位期间定电平); MISO 经 2.2 kΩ 上拉至 3V3 (连接器侧, 防线缆缺失悬空)
独立性	SPI3 与栅驱的 SPI1 (PB3/4/5) 完全独立, 无总线争用
供电去耦	U6 pin1 旁 100 nF (≤3.3 mm)

ABZ 增量正交通道:

项目	实现
引脚	A=PA6 (TIM3_CH1) / B=PA7 (TIM3_CH2) / Z=PA5 (EXTI)
解码	TIM3 编码器模式 (4 倍频), Z 走 EXTI 上升沿
调理 (每路)	100 Ω 串阻 (贴 U6, 入口限流 / 阻尼) + 470 pF 对地 (贴 MCU, 接收端滤波) + 2.2 kΩ 上拉至 3V3
极性	不经缓冲器, 不反相 (区别于霍尔 / 遥控 / 串口 RX)
边沿 (推挽编码器)	≈103 ns (100 Ω × 470 pF), 可用至 ≈2.4 MHz
边沿 (开漏编码器)	≈2.3 μs (2.2 kΩ × 470 pF), 可用至 ≈110 kHz (覆盖 1000 线 @ 6000 rpm)

⚠ 编码器电平限制: 仅支持 3.3 V 编码器。PA5/PA6/PA7 为 TT_a (3.6 V 上限) 且无钳位二极管, ABZ 未经缓冲器。U6 只提供 3.3 V 供电, 与此限制自治。开漏 / NPN 输出的编码器 (5 V / 12 V / 24 V 外部供电) 亦可安全接入 —— 它只拉低, 高电平由板上 2.2 kΩ 上拉定义为 3.3 V, 天然完成电平转换 (速度上限见上表)。

6.2 霍尔接口

项目	实现	说明
连接器	U15 (2.0 mm, 5P: 5V / GND / HA / HB / HC)	5 V 供电, 霍尔有感
前端调理	330 Ω 串 + 4.7 kΩ 上拉 + 10 nF RC + 74LVC14A 施密特缓冲	干净边沿, 抗抖动; 信号反相
捕获通道	TIM4_CH1 / CH2 / CH4 (PB6 / PB7 / PB9, 独立输入捕获)	—

⚠ 不能使用 TIM 的硬件霍尔接口 (XOR / TIMx_CR2.TI1S) 模式。该模式要求三路霍尔落在同一定时器的 CH1/CH2/CH3, 而 TIM4_CH3 = PB8 已被 BOOT0 占用, 霍尔 C 只能退到 CH4。请使用 TIM4_CH1/CH2/CH4 三路独立输入捕获 (硬件时间戳, 测速精度不打折), 或 EXTI + 自由运行计数器。硬件 XOR 与自动换相 (TIM1 COM) 是为六步梯形波设计的, FOC 用不到。

7. 温度检测 (Rev. 2.0 新增)

项目	实现
传感器	NTC 10 kΩ / B3950 (0603, 贴装于功率 MOSFET 旁 ≈2.6 mm)
电路	+3V3 → 4.7 kΩ → 节点 (100 nF 对地) → NTC → GND
ADC 通道	ADC3_IN12 (PB0)
布局	NTC 接地脚落在 GND 铜皮 (不在开关节点铜皮上) ; 分压上端电阻与滤波电容置于 MCU 侧
源阻抗	4.7 k ∥ 10 k ≈ 3.2 kΩ → ADC 必须设长采样时间 (≥247.5 cycles)

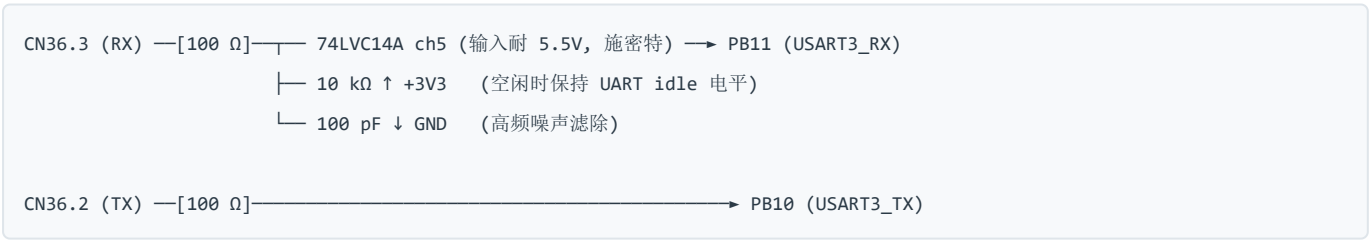
取代 Rev. 1.x 的"无 NTC / 纯 I²t 软件估算"。建议固件仍并行运行 I²t 模型, 取两者中更保守的一个 —— NTC 开路 / 脱焊时读数会假性偏"冷"。

8. 通信接口

接口	引脚	连接器	说明
CAN	FDCAN1_TX=PA12 / RX=PA11	CN5 / CN40 (2.0 mm, 4P, CANH / CANL)	3.3 V CAN 收发; 经典 CAN ≤1 Mbps; 120 Ω 终端经拨动开关可投切; 双接口便于级联
USB (下载 / 调试)	USART1_TX=PA9 / RX=PA10	USB1 Type-C	USB-UART 桥接; 含双三极管一键下载 (自动控制 NRST + BOOT0)
外部 UART (升级)	USART3_TX=PB10 / RX=PB11	CN36 (2.5 mm, 4P: GND / TX / RX / +5V)	5 V 兼容 TTL 串口, 见下

8.1 外部串口的 5 V 兼容 (Rev. 2.0 升级)

CN36 的电源脚输出 +5 V (经 PPTC 自恢复保险丝), 因此外接模块 (GPS / 蓝牙 / 激光雷达 / MAX485 / USB-TTL 等) 会以 5 V 工作。为此:



项	说明
RX 方向	经缓冲器, 3.3 V 与 5 V 模块均安全; PB11 本身是 TT_a (3.6 V), 无缓冲器会被 5 V 打穿
RX 极性	缓冲器为反相型 → 固件必须设 USART3_CR2.RXINV = 1
TX 方向	MCU 直出 3.3 V。绝大多数串口模块 RX 为 TTL 门限 (VIH = 2.0 V), 3.3 V 可靠驱动; 不设 TXINV
附带能力	反相缓冲器正好把 SBUS (反相 UART) 还原为正常 UART → CN36 亦可作第二个遥控输入口 (RXINV=0)

9. 控制 I/O 资源

功能	MCU 引脚	连接器	说明
遥控 / PWM 输入	PA3 (TIM2_CH4 / USART2_RX)	H3 (2.54 mm, 3P)	经施密特缓冲, 四协议可选, 见 §9.1

功能	MCU 引脚	连接器	说明
油门（模拟）	ADC2_IN9 (PC3)	U2 (脚 3 = THR_ADC)	分压 10 kΩ / 20 kΩ (比 0.667, 满量程 4.95 V) + 100 nF 滤波
方向输入	IN_DIR (PC6, FT)	U2 (脚 2 = DIR)	100 Ω 串 + 10 nF + 10 kΩ 上拉
模式输入	IN_MODE (PC7, FT)	U2 (脚 4 = MODE)	同上
刹车输入	IN_BRAKE (PC8, FT)	U2 (脚 5 = BRAKE)	同上
板载电位器	ADC5_IN1 (PA8)	—	板载 10 kΩ 微调电位器（不对外）

U2 (8P) 引脚顺序: 1 = +5V, 2 = DIR, 3 = THR_ADC, 4 = MODE, 5 = BRAKE, 6 / 7 / 8 = GND。

9.1 遥控输入 H3 (Rev. 2.0 升级)

H3 (2.54 mm, 3P) 引脚顺序: 1 = GND / 2 = +5V / 3 = SIG —— 符合航模标准（电源在中间），可直接插标准 3 线接收机线。

H3.3 (SIG) —[100 Ω]— 74LVC14A ch4 (输入耐 5.5V, 施密特) → PA3

└ 100 pF ↓ GND

└ 10 kΩ ↓ GND (未插接收机时钳定低电平, 防幻影脉冲)

同一引脚，固件切换四种协议：

模式	PA3 外设置	说明
PWM 遥控	TIM2_CH4 输入捕获, 捕获极性取反	传统单通道 PWM (1–2 ms / 50 Hz)
SBUS (Futaba / FrSky)	USART2_RX, 100000, 8E2, RXINV = 0	SBUS 本身是反相 UART, 缓冲器正好将其还原
CRSF (ExpressLRS / Crossfire)	USART2_RX, 420000, 8N1, RXINV = 1	现代主流, 双向遥测、低延迟
IBUS (FlySky)	USART2_RX, 115200, 8N1, RXINV = 1	—

✅ 3.3 V 与 5 V 接收机均可直接接入（缓冲器输入耐 5.5 V, 且不衰减）。✅ 未插接收机时 PA3 呈高电平 = UART idle 电平, SBUS 模式下不产生 break / 帧错误。

10. 施密特缓冲器与极性约定 (Rev. 2.0 关键)

板上一颗 74LVC14APW (U11, 六路反相施密特触发器, VCC = 3.3 V, 输入耐 5.5 V) 承担全部外部数字输入的电平隔离与整形：

通道	输入	输出	用途
ch1	1A	1Y	霍尔 A
ch2	2A	2Y	霍尔 B
ch3	3A	3Y	霍尔 C
ch4	4A	4Y	遥控 RC → PA3
ch5	5A	5Y	外部串口 RX → PB11
ch6	6A (接地)	6Y (悬空)	空闲

VCC 旁 100 nF 去耦（距 VCC 脚 ≤2.3 mm）。

⚠ 全板极性表（固件必读）

链路	经 74LVC14A	极性	固件处理
霍尔 A/B/C	✓	反相	霍尔状态表按反相编写
遥控 PA3	✓	反相	TIM2_CH4 捕获极性取反；SBUS→RXINV=0，CRSF/IBUS→RXINV=1
外部串口 RX（PB11）	✓	反相	USART3 RXINV = 1
编码器 ABZ（PA5/6/7）	✗ 直连	不反相	TIM3 正常；Z 用 EXTI 上升沿

编码器 ABZ 是全板唯一不经缓冲器的外部数字输入，极性与其余三条链路相反。

11. 指示与人机

器件	连接	说明
有源蜂鸣器	OUT_BUZZER（PA4）经 N-MOS 驱动（栅极串 100 Ω + 下拉）	高电平 = 鸣响；上电默认静音
状态 LED	PC9（经 1 kΩ 限流，低电平点亮）	用户可控状态指示（白色）
电源 LED	+3.3 V 上电点亮	电源指示
用户按键	PC13（外部 10 kΩ 上拉 + 100 nF 消抖）	通用输入 / 进入标定模式
复位按键	NRST	—

12. 编程、调试与扩展排针

方式	接口	说明
SWD（推荐）	H1 排针（2.54 mm，5P）：3V3 / SWDIO(PA13) / SWCLK(PA14) / GND / NRST	支持 ST-LINK / J-Link 在线调试与烧录
USB ISP（一键下载）	USB1 Type-C	双三极管电路自动控制 BOOT0 + NRST，免按键 USART1 串口烧录
电源输出排针	H2（2.54 mm，3P）：GND / 3V3 / 5V	对外取电

BOOT0（PB8）出厂 10 kΩ 下拉。**一键下载注意：**若串口工具在复位瞬间同时拉低 DTR + RTS，BOOT0 可能被采样为高而进入 DFU —— 此为该电路固有特性；ST-LINK 烧录 / 复位时请勿开占用串口的工具。

13. 完整引脚分配表（STM32G473RCT6 / LQFP64）

引脚	I/O 结构	功能	用途
PC0	FT	TIM1_CH1	三相 PWM — 相 A
PC1	FT	TIM1_CH2	三相 PWM — 相 B
PC2	FT	TIM1_CH3	三相 PWM — 相 C
PB13	FT	TIM1_CH1N	互补 PWM — 相 A
PB14	FT	TIM1_CH2N	互补 PWM — 相 B
PB15	FT	TIM1_CH3N	互补 PWM — 相 C

引脚	I/O 结构	功能	用途
PA0	TT_a	ADC1_IN1	相电流采样 SOA
PA1	TT_a	ADC1_IN2	相电流采样 SOB
PA2	FT_a	ADC1_IN3	相电流采样 SOC
PB12	TT_a	ADC4_IN3	母线电压检测 (分压比 21.0)
PC3	TT_a	ADC2_IN9	油门模拟输入 (分压 0.667) [Rev.2.0 由 PA6 迁入]
PB0	TT_a	ADC3_IN12	NTC — MOS 温度 [Rev.2.0 新增]
PA8	FT_a	ADC5_IN1	板载电位器 (不对外)
PA3	TT_a	TIM2_CH4 / USART2_RX	遥控输入 (H3, 经 U11 ch4, 反相)
PA5	TT_a	GPIO / EXTI	编码器 Z [Rev.2.0 新增, 直连不反相]
PA6	TT_a	TIM3_CH1	编码器 A [Rev.2.0 新增, 直连不反相]
PA7	TT_a	TIM3_CH2	编码器 B [Rev.2.0 新增, 直连不反相]
PC10	FT	SPI3_SCK	编码器 SPI [Rev.2.0 新增]
PC11	FT_f	SPI3_MISO	编码器 SPI [Rev.2.0 新增]
PC12	FT	SPI3_MOSI	编码器 SPI [Rev.2.0 新增]
PA15	FT_f	SPI3_CS (软件)	编码器 SPI [Rev.2.0 新增]
PB3	FT	SPI1_SCK	栅驱配置时钟
PB4	FT	SPI1_MISO	栅驱数据
PB5	FT	SPI1_MOSI	栅驱数据
PD2	FT	SPI1_CS (软件)	栅驱片选
PC4	FT_fa	ENABLE	栅驱使能
PC5	TT_a	CAL	栅驱 CSA 校准
PB1	TT_a	nFAULT	栅驱故障 (低有效)
PB6	FT_c	TIM4_CH1	霍尔 A 输入捕获 (经 U11 ch1, 反相)
PB7	FT_f	TIM4_CH2	霍尔 B 输入捕获 (经 U11 ch2, 反相)
PB9	FT_f	TIM4_CH4	霍尔 C 输入捕获 (经 U11 ch3, 反相)
PA12	FT	FDCAN1_TX	CAN
PA11	FT	FDCAN1_RX	CAN
PA9	FT	USART1_TX	USB 下载 TX
PA10	FT	USART1_RX	USB 下载 RX
PB10	TT_a	USART3_TX	外部串口 (CN36) [Rev.2.0 由 PC10 迁入]
PB11	TT_a	USART3_RX	外部串口 (CN36, 经 U11 ch5, 反相 → RXINV=1) [Rev.2.0 由 PC11 迁入]
PC13	FT	用户按键	外部上拉 [Rev.2.0 由 PC12 迁入]
PC9	FT_f	OUT_LED_STATUS	状态 LED [Rev.2.0 新增位置]
PA4	TT_a	OUT_BUZZER	蜂鸣器驱动

引脚	I/O 结构	功能	用途
PA13	FT	SWDIO	调试
PA14	FT	SWCLK	调试
PB8	—	BOOT0	启动配置（10 kΩ 下拉）； 占用 TIM4_CH3
PC6	FT_f	IN_DIR	方向输入（5 V 耐压）
PC7	FT_f	IN_MODE	模式输入（5 V 耐压）
PC8	FT_f	IN_BRAKE	刹车输入（5 V 耐压）
PF0 / PF1	—	OSC_IN / OSC_OUT	8 MHz 主晶振
PB2	TT_a	—	未使用（固件建议配为模拟模式）

外设占用汇总： TIM1（三相 PWM）· TIM2（遥控 PWM 捕获）· TIM3（编码器 ABZ）· TIM4（霍尔捕获）· ADC1/2/3/4/5 · SPI1（栅驱）· SPI3（编码器）· USART1（USB）· USART2（遥控串行协议，与 TIM2 复用 PA3）· USART3（外部串口）· FDCAN1

14. 连接器一览表

位号	间距 / 形式	功能
U5	5.08 mm 螺钉端子 2P	主电源输入 BAT+ / GND
P4	5.08 mm 螺钉端子 3P	电机相线 U / V / W
U15	2.0 mm 线对板 5P	霍尔 5V / GND / HA / HB / HC
U6	2.0 mm 双排 10P	编码器（新增） 1=+3V3 / 2=GND / 3=SCK / 4=MISO / 5=MOSI / 6=CS / 7=A / 8=GND / 9=B / 10=Z
CN5 / CN40	2.0 mm 线对板 4P	CAN ×2 （CANH / CANL），拨动开关投切 120 Ω 终端
U2	2.0 mm 双排 8P	控制 / 油门 （1=+5V / 2=DIR / 3=THR_ADC / 4=MODE / 5=BRAKE / 6–8=GND）
H3	2.54 mm 排针 3P	遥控输入（1=GND / 2=+5V / 3=SIG ，航模标准）〔Rev.2.0 引脚序修正〕
CN36	2.5 mm 线对板 4P	外部 UART （1=GND / 2=TX / 3=RX / 4=+5V）， 5 V 兼容
H1	2.54 mm 排针 5P	SWD 调试 （3V3 / SWDIO / SWCLK / GND / NRST）
H2	2.54 mm 排针 3P	电源输出 （GND / 3V3 / 5V）
USB1	USB Type-C	USB 下载 / 调试 （USART1 一键 ISP）；可 USB 5V 供电（经肖特基）

14.1 连接器配线选型

用途	板端连接器	间距	对插件 / 配线
主电源输入（U5） / 电机相线（P4）	5.08 mm 插拔 / 螺钉端子	5.08 mm	5.08 mm 端子 插头 ，螺钉压线（相线建议 ≥14 AWG）
霍尔（U15）	PH2.0 系列（5P）	2.0 mm	PH2.0 母壳 + 压接端子（JST-PH 兼容）
编码器（U6）	PHB2.0 系列（双排 10P）	2.0 mm	PHB2.0 母壳 + 压接端子（JST-PHB 兼容）

用途	板端连接器	间距	对插件 / 配线
控制 / 油门 (U2)	PHB2.0 系列 (双排 8P)	2.0 mm	PHB2.0 母壳 + 压接端子
CAN (CN5 / CN40)	PHB2.0 系列 (4P)	2.0 mm	PHB2.0 母壳 + 压接端子
外部 UART (CN36)	XH 系列 (4P)	2.5 mm	XH 2.5 mm 4P 母壳 + 端子 (JST-XH 兼容)
SWD (H1) / 电源输出 (H2)	2.54 mm 排针	2.54 mm	2.54 mm 杜邦母头线 / IDC 排线
遥控 (H3)	2.54 mm 排针 3P	2.54 mm	可直插标准 3 线遥控接收机线 (GND / +5V / SIG)
USB1	USB Type-C	—	USB-C 数据线

15. 电气特性 (典型, Ta = 25 °C)

参数	最小	典型	最大	单位	备注
主电源输入 VIN	8	24–48	54.6	V	6S–13S 锂电; 下限受降压 UVLO 限制
+5 V 轨输出	—	5.1	—	V	板载 100 V 同步降压
+3.3 V 轨输出	—	3.3	—	V	≤600 mA
连续相电流 (RMS)	—	8–15	≈30	A	上限受 2 mΩ 分流降额与散热限定
峰值相电流 (RMS)	—	—	35–40	A	加速 / 起步短时 (秒级)
PWM 载波频率	16	20	40	kHz	固件设定
相电流采样量程	—	—	±82.5	A	2 mΩ + CSA 增益 10 V/V
母线电压采样量程	—	—	69.3	V	分压比 21.0
油门模拟输入量程	0	—	4.95	V	分压 0.667; 典型霍尔油门 0.8–4.2 V
编码器供电 (U6)	—	3.3	—	V	仅支持 3.3 V 编码器
遥控接收机信号电平 (H3)	—	3.3 / 5	5.5	V	经施密特缓冲, 两者均可
外部串口信号电平 (CN36)	—	3.3 / 5	5.5	V	RX 经缓冲器; TX 为 3.3 V 输出
工作温度	-20	—	+85	°C	受 MCU 限制, 整板以实测为准

⚠ 重要: 1. **G4 的 I/O 无正向注入通路 (无 VDD 钳位二极管)**, 串联电阻不能防止过压损坏。见 §3.1 的耐压表。2. **编码器接口 (U6) 仅支持 3.3 V**。ABZ (PA5/6/7) 为 TT_a 且未经缓冲器; 接 5 V 推挽输出的编码器会永久损坏 MCU。开漏 / NPN 编码器安全 (见 §6.1)。3. **无反接保护**, 电池务必正接, 按端子防呆 + 丝印接线。4. **保险管需单独配**: 输入为保险丝座, 需另配 15 A / ≥58 V / 高分断 的对应尺寸保险管 (不含在贴片 BOM 内)。5. **连续相电流上限约 30 A RMS** (受 2 mΩ 分流降额限定)。

16. 机械尺寸

项目	规格
板尺寸	100 × 55 mm
安装孔	4 × Ø3.2 mm 完全贯穿, 孔位间距 94 × 49 mm
整体高度 (含元件)	26.59 mm
层数	4 层 (L1 器件 + 功率铜 + 信号 / L2 完整 GND 平面 / L3 VBUS + 相 功率分配 / L4 功率铜)

项目	规格
PCB 板厚	1.6 mm (典型)
散热	MOSFET / 栅驱 / 降压 裸焊盘下密布过孔到内 / 底层

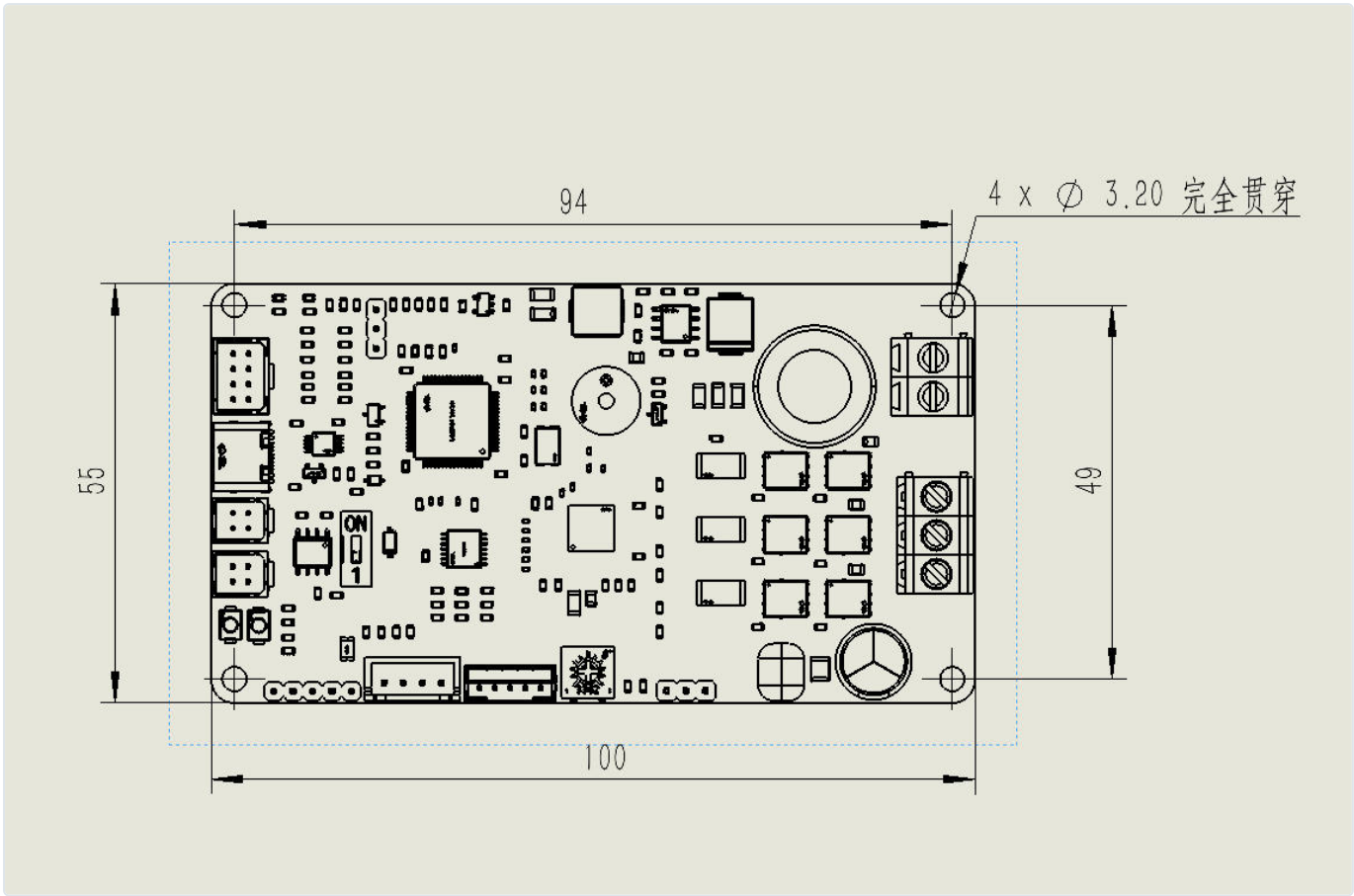


图 1. 平面尺寸与安装孔 (单位 mm)

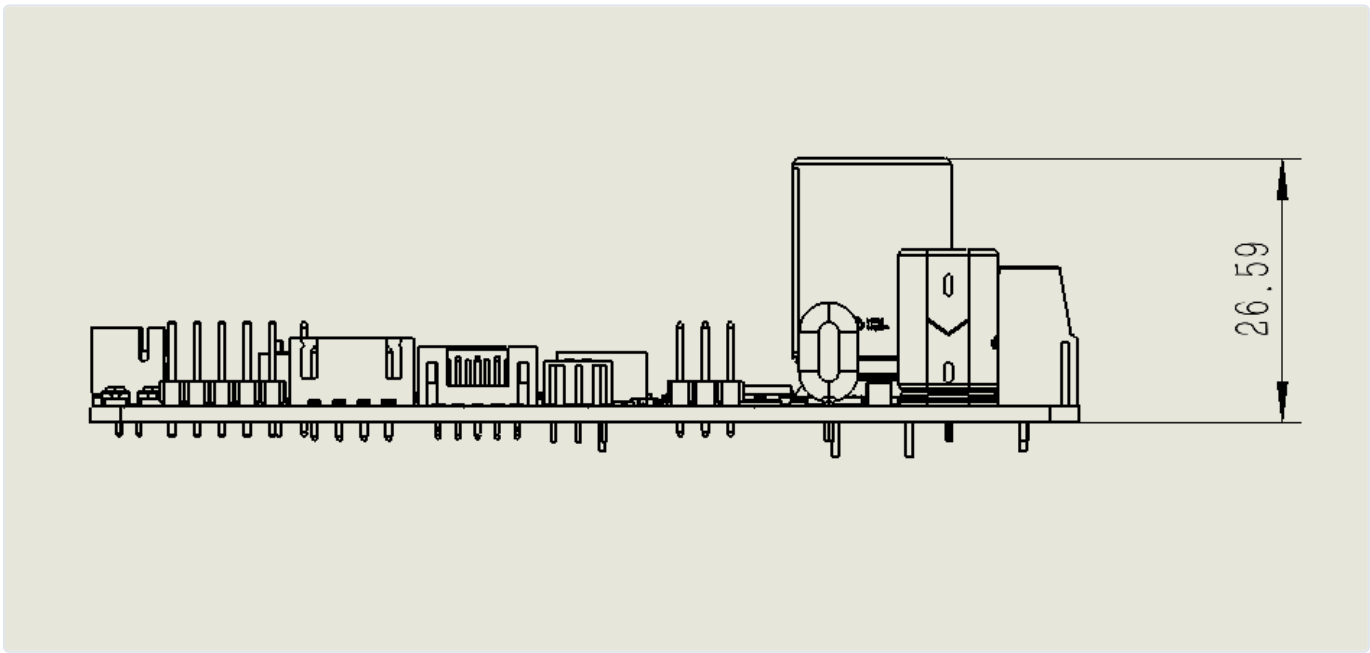


图 2. 侧视整体高度 (单位 mm)

17. 版本信息

项目	内容
品牌	Daliang Auto
产品名称	FOC_Single 单路 FOC 电机驱动板
产品型号	PF1-400-A
文档版本	Rev. 2.0
主控料号	STM32G473RCT6

修订记录:

版本	日期	说明
Rev. 2.0	2026-07-14	① 新增编码器接口 U6 (SPI3 绝对角度 PC10/PC11/PC12/PA15 + ABZ 增量 PA6/PA7/PA5, 3.3 V) 。 ② 新增 NTC MOS 温度检测 (PB0 / ADC3_IN12) , 取代纯 I ² t 估算。③ H3 引脚序修正为航模标准 GND/+5V/SIG。④ 遥控输入 PA3 经 74LVC14A 缓冲, 支持 PWM/SBUS/CRSF/IBUS 四协议, 3.3 V 与 5 V 接收机通用。⑤ 外部串口 USART3 迁至 PB10/PB11, RX 经 74LVC14A 缓冲 → 5 V 兼容 (固件须设 RXINV=1) 。⑥ 油门模拟由 PA6 迁至 PC3 (ADC2_IN9) , 分压比确认为 0.667。⑦ 用户按键 PC12→PC13, 状态 LED→PC9。⑧ 新增 §3.1 I/O 耐压表与 §10 极性约定表。
Rev. 1.1	2026-07-08	安装孔改 Ø3.2 完全贯穿; 新增 H3 (PWM / 遥控接收机输入) ; U2 引脚重排; USB 支持 5V 供电 (经肖特基) ; PC12 增为用户按键。
Rev. 1.0	2026-06-13	首版发布。

本规格书依据 FOC_Single 硬件 (原理图 Schematic1_2026-07-14 / Gerber FOC_Single_M_2) 整理。如与最新硬件 / 装配文件冲突, 以后者为准。