FIRMWARE MANUAL

单路 FOC 驱动板 出厂固件说明书

FOC_Single · 出厂固件 · 使用说明书

副标题	FOC_Single · 出厂固件 · 使用说明书
品牌	Daliang Auto
产品名称	FOC_Single 单路 FOC 电机驱动板
固件名称	FOC_single
固件版本	0.6.4（构建标识见随包 `MANIFEST.txt`）
适用硬件	硬件 2.0（型号 PF1-400-A）、硬件 3.0（型号 S1055-800-B），两版各用对应镜像
文档版本	Rev. 1.13
发布日期	2026-11-11
控制台	USB Type-C 虚拟串口，115200 8N1，无流控
对外接口	控制台命令行 · `=tlm` 遥测 · 整车 CAN · 遥控接收机

> **本书与规格书的分工**
>
> - 《FOC_Single 产品规格书》描述硬件：电压平台、功率、电流、接口、引脚、 连接器、保护器件、机械尺寸。规格书仅随硬件改版更新。
> - 本书描述出厂固件：命令、标定流程、控制逻辑、保护动作、通信协议、升级。 固件每发布一个版本，本书相应更新一版，与规格书相互独立。
> - 两本书中均出现的量（母线电压范围、电流量程）以规格书为准。 本书仅说明固件如何使用这些量。
>
> 板上运行的固件版本以 `ver` 命令的输出为准，不以出厂日期推断。 `ver` 报告的 `cmdhash` 须与随包 `COMMANDS.json` 中的值相等，方可确认该发布包与板上固件对应。 仅版本号相同不足以确认。
>
> 注意：本板与 DlaSteer-100 转向执行器使用同一块 PCB。 两种固件烧录后均可运行、均能通过校验、均会在串口响应。 识别固件仅以发布包 `MANIFEST.txt` 中的 `name: FOC_single` 为准， 不以目录名或版本新旧判断。

---

1. 固件概述

出厂固件使本板成为可直接使用的单路无刷电机驱动器。 接上电机、霍尔（或编码器）和电池，通过 USB 线完成一次标定后， 即可由油门、电位器、遥控器或整车 CAN 驱动，无需编写代码。

1.1 功能概览

类别	固件功能
电机控制	三相 FOC：电流（转矩）、速度、开环电压、I-f 起动四种模式
自学习标定	一条命令测出电机的接线、相电阻电感、霍尔换相表与电流环增益，保存在板载 Flash 中
位置反馈	霍尔（标配）+ 编码器（Rev 2.0 起，SPI 绝对 / ABZ 增量）。编码器不可用时自动退回霍尔
指令来源	油门、电位器、遥控接收机（SBUS / CRSF / IBUS，可自动识别）、整车 CAN、控制台
保护	过压、欠压、过流、栅极驱动器故障、过温、NTC 失效、编码器失步、遥控失联、电流采样不可信，共九个故障位；切桥故障均锁存
停机方式	自由滑行或主动短路（高速时按反电动势自动选择）
看门狗	独立看门狗 + 五个 CPU 故障向量，任一触发时先关栅极，记录后复位（0.1.0 起）
对外接口	供操作者使用的命令行、供程序读取的 `=tlm` 快照、供整车使用的 CAN

1.2 三条对外通路

通路	对端	物理层	本书章节
控制台命令行	操作者，或上位机软件	USB Type-C（USART1），115200 8N1	§2 – §6
`=tlm` 快照	程序：上位机、测试脚本	同上，与命令行共用一条串口	§8.1
整车 CAN	上位控制板	经典 CAN，1 Mbps	§7

---

2. 连接控制台

2.1 接线与串口参数

项	值
物理口	USB Type-C（板载 USB-UART 桥，接 USART1）
波特率	115200，8 数据位，无校验，1 停止位，无流控

项	值
换行	本板发送 `CR LF`；接收 `CR` 或 `LF` 均可识别

输入 `help` 列出全部 77 条命令。

2.2 命令危险等级

随包 `COMMANDS.json` 为每条命令标注 `danger` 等级：

标记	含义	示例
`none`	只读，仅查询	`ver` `tlm` `prot` `hall` `enc` `drv`
`gates`	修改状态或设置，不会使任何部件转动	`save` `clear` `stop` `pi` `ibus`
`motion`	**可能使电机转动**	`drive` `cl` `spd` `learn` `iqmax`

注：命令按其最危险的使用形式分类。

2.3 随时可用的停机命令

```
stop
```

`stop` 立即关闭栅极总使能，并将栅极驱动器置于安全状态。

注意：执行 `stop` 后电机处于自由滑行状态，转动中的车轮可能持续滑行较长时间。

2.4 首先执行的三条命令

```
ver         固件版本、板卡标识、cmdhash
tlm         当前完整状态，一屏（供程序读取）
prot        保护状态和门限
```

`ver` 的输出中有一行供程序读取：

```
=tlm 1 build debug=0 stamped=1 crc=1 major=0 minor=6 patch=4 board=foc_single scm=<构建标识> hw=3.0 hw_detected=3.0
cmdhash=<数>
```

警告：`debug=1` 表示 Debug 构建，不得用于驱动实际负载。

---

3. 标定

3.1 架空车轮

警告：标定时电机会转动并滑行。这是全部命令中唯一在操作结束后仍会继续运动的动作。标定前须将车轮架空。

3.2 标定命令

```
learn
```

`learn` 按顺序执行以下四项：

1. **电流零点**：桥臂关闭，测量三相电流采样的零位
2. **霍尔映射**：电机转动一圈，记录六个霍尔状态各自对应的电角度
3. **相电阻 / 电感**：开环定电压激励，测量 R 和 L

4. **电流环增益**：根据 R、L 和母线电压自动整定

注：0.3.0 起第 3 步的测量方法有变化，所测 R 比 0.2.x 高约两成，属正常结果。 由 0.3.0 以前固件标定的板子升级后须重新执行 `learn`。 不重新执行不会导致故障，但电流环带宽达不到设计值。

`learn` 完成后自动保存，无需再执行 `save`。输出的最后一行为：

```
LEARN OK, save OK
```

`save` 用于保存其他手动设置的参数，例如 `thrmin` / `thrmax`、 `potmin` / `potmax`、 `side`、 `iqmax`。这些参数修改后须执行 `save`。

3.3 须手动设置的参数

参数	说明
极对数 `pp`	电机规格书中的 `Poles` 为**总极数**，极对数 = Poles ÷ 2
车轮/负载相关的限值	`iqmax`（转矩上限）、 `ibus`（母线电流折返限）按电机铭牌和电池能力设置。 `iqmax` 不设时由本板按电机计算（0.6.2 起，见下文）； `ibus_limit_ma` 0.6.2 起保存到 flash
安装侧 `side`	同时决定同一条指令下车轮的转动方向，以及本板在 CAN 上使用的 ID 组。两块板组成两驱时，一块设 `left`，一块设 `right`，设置后执行 `save`。可在 `learn` 之前设置并保存（0.1.2 起），此时本板仍报告未标定
方向反转 `motor_invert`	0.6.1 起。装车后某一侧车轮在 D 挡反转时， `param set motor_invert 1` 后 `param save`，只翻转该轮方向，不改变 `side` 决定的 CAN ID。须在电机停止、桥臂关断时设置
编码器型号与线数	仅接编码器时需要设置（ `encchip` / `enccpr` ），然后执行 `enccal`

`iqmax` **未设置时的自动值（0.6.2 起）**：本板按额定功率 `drive_watts` 和 `learn` 测得的相电阻 R 计算电机的额定电流 （额定 = 0.46 × √(W ÷ 1.5R)，最高 15 A），静止起步时允许到额定 × 1.3（最高 19.5 A）。 未测过 R 的板子仍为 5 A。用户用 `iqmax <mA>` 设过的值始终优先， `iqmax auto` 回到自动值， `iqmax` 不带参数时显示当前值及其来源。

注意：自动值通常远大于 0.6.0 及以前的默认 5 A（例如 15 极对、R = 0.207 Ω 的轮毂电机为约 18.6 A）， 起步明显更有力。用限流较小的台架电源调试时，电源可能在起步瞬间被拉到限流，母线电压随之下跌； 本板会按欠压门限自动减小驱动转矩（§6.1.2），但起步会变软。必要时临时设一个较小的 `iqmax`。

堵转退让（0.6.2 起，仅对自动值）：电流高于额定且 3 秒没有霍尔沿时，上限降到额定 × 0.98， 等计时回零后恢复。用户设过的 `iqmax` 不退让。

极对数核对方法：输入 `iq`，输出行中的 `flux=<n> uWb` 为在线磁链估计值。 将其与由电机铭牌电压常数换算得到的值比较。该比较不依赖极对数设置。 两者相差一倍时，极对数设置错误一倍。

3.4 未标定时拒绝闭环驱动

未标定时本板没有换相表，闭环命令被拒绝执行。

查看方法： `tlm` 的 `cal` 组中 `hall=1` 表示已标定；或输入 `mode`， 查看 `calibrated=`。

`calibrated=0` 有以下两种原因：

原因	处理
板上没有标定记录（新板，或更换固件版本后无法读取旧记录）	执行 `learn`
存在记录，但该记录不是由 `learn` 生成。例如先执行 `side right` 再执行 `save`，该记录中的换相表为空	执行 `learn`。本板可区分这两种记录（0.1.2 起），不会报告已标定

3.5 装车参数（0.5.0 起）

速度档（`spd 1` ~ `spd 5`、遥控油门、CAN 的速度指令）均按满速的百分比下发。 本板须知道整车满速对应的转速，才能将百分比换算为转速。

该转速不由用户直接填写，也不固化在固件中。用户填写以下四个可从规格书查得的参数， 由本板计算：

参数	含义	来源
`pole_pairs`	电机极对数	从电机规格书原文或铭牌照片读取。规格书中的 `Poles` 为**总极数**，极对数 = Poles ÷ 2。手动转动一圈计数的方法仅在规格书缺失时使用
`wheel_mm`	车轮直径，毫米	实测，或查轮胎规格
`speed_max_kph`	整车设计满速，km/h	整车设计值。该值定义 100% 速度档对应的车速，不起限速作用
`gear_ratio_x1000`	车轮转一圈时电机转过的圈数（减速比 × 1000）	减速箱/链轮规格。直驱填 `1000`；1:10 减速箱填 `10000`

```
param set pole_pairs 15
param set wheel_mm 400
param set speed_max_kph 25
param set gear_ratio_x1000 1000
param save
```

填写完成后输入 `param get speed_max_rpm` 查看计算结果。该参数为只读， 其值由上述四个参数计算得出：

```
400 mm 轮 · 25 km/h · 直驱  ->  speed_max_rpm = 332
```

注意：`wheel_mm` 或 `speed_max_kph` 为 0 时， `speed_max_rpm` 为 0，速度档不生效。 此时本板如实报告 0。新板出厂时为默认值，须按实际车辆填写。

注：这四个参数不影响保护和转矩上限，仅决定 100% 速度档对应的转速。 转矩和电流上限由 `iqmax` / `ibus` / `drive_watts` 分别设定。

---

4. 使用方法

本节说明从拆封到电机运转的完整步骤。按使用场景选择对应章节：

使用场景	章节
本板装在车上，另有一块**整车控制板**（踏板、档杆、遥控均接在整车控制板上）	§4.1
仅使用本板，**不接控制板**，由油门 / 遥控 / 旋钮直接驱动	§4.2

两种用法的前四步相同，从第 5 步起分开。

4.0 共同步骤（两种用法均须执行）

第 1 步 · 接线，暂不上电

连接对象	接口	说明
电机三相	U / V / W	相序任意，标定时自动识别
霍尔	霍尔端子	五根线（5 V、地、三路信号），线序任意
电池	电源端子	正负极不得接反。板上防反接电路仅用于故障保护，不得用于接线测试

连接对象	接口	说明
USB	Type-C	连接电脑。标定和状态查询均通过此连接

警告：须将车轮架空。下一步电机会转动。

第 2 步 · 上电并确认本板工作正常

上电后，在电脑上打开上位机（或任意串口终端，115200 8N1）。输入 `ver`，应显示五行， 其中以下两行为本板标识：

```
firmware : 0.5.0 <构建号>, crc ok
uid      : <24 位十六进制>
```

- `crc ok` 表示固件完整。显示 `crc bad` 时应停止后续操作，重新烧录固件。
- 识别板卡以 `uid` 行为准。外观相同的两块板 `uid` 不同。

第 3 步 · 标定（一条命令，约 14 秒）

```
learn
```

警告：标定时电机会转动并滑行。这是全部命令中唯一在操作结束后仍会继续运动的动作。 执行前须再次确认车轮已架空。

完成后最后一行显示 `LEARN OK, save OK`。标定结果已自动保存，无需再执行 `save`。

标定内容为：电流采样零点、霍尔与电角度的对应关系、电机电阻电感， 以及根据测量值计算的电流环增益。更换电机后须重新标定，更换电池无需重新标定。

标定未成功时参见 §3.4 和 §6，不得跳过此步骤继续操作。 未标定的板子拒绝闭环驱动，因为此时没有换相表。

第 4 步 · 设置安装侧（仅使用一块板时跳过）

两块板驱动两个车轮时，一块设为 `left`，另一块设为 `right`：

```
side left        （或 side right）
save
```

注意：`side` 同时决定两项：本板在 CAN 上使用的 ID 组， 以及同一条前进指令下本侧车轮的转动方向（两侧车轮镜像安装，其中一侧须反向）。 设置错误时，车辆可以行驶，但两侧车轮反向出力。

4.1 用法一：装车，接整车控制板

完成 §4.0 的四步后，接入 CAN 即可，无需其他设置。

第 5 步 · 接入 CAN，装车

将本板的 CAN 接入整车总线（与控制板、其他驱动板位于同一总线）。

第 6 步 · 上电，自动进入整车模式

控制板上电后即开始广播行驶指令。本板收到后自动切换到整车模式，无需输入命令。 输入 `mode` 应显示：

```
mode=can  drive=on  calibrated=1
```

控制板自动识别总线上的两块单路板，无需配置。

第 7 步 · 通过整车操作机构驾驶

踏板、档杆、遥控均接在控制板上，本板仅执行控制板的指令。

注意：整车模式下，板上的油门口、旋钮、遥控口均不起作用，整车只接受一个指令来源。 如需使用这些输入，须断开 CAN（见 §4.2）。

第 8 步 · 填写装车参数（装车时执行一次）

屏上的速度档（低速 / 高速）生效的前提是本板已知 100% 档对应的转速。 该转速取决于车轮和整车参数，须由用户设置。

按 §3.5 填写四个参数（极对数、轮径、设计满速 km/h、减速比）， 然后执行 `param save`。本板自动计算满速转速，可通过 `param get speed_max_rpm` 查看。

注：0.5.0 起 `speed_max_rpm` 为只读参数，直接写入会被拒绝。

注意：四个参数未填齐时速度档完全不起作用，车辆在任何档位下均以同一最高速度行驶。 本板收到档位时输出以下提示：

```
drive: speed band 60% ignored - wheel_mm=0 speed_max_kph=0 (both needed; a band is a speed range, not less torque)
```

参数填齐后，速度档限制的是最高车速，不限制转矩。低速档起步转矩不变， 车速达到该档上限后不再上升。

车辆不行驶时，按以下顺序排查：

检查项	方法	说明
是否未标定	输入 `mode`，查看 `calibrated=`	为 0 时返回 §4.0 第 3 步
控制板是否禁止行驶	在**控制板**上检查	整车使能开关、档位等均由控制板管理
本板是否报告故障	输入 `prot` 和 `fault`	见 §6
总线是否连通	输入 `can`，查看 `rx=` 是否增加	不增加表示未收到控制板的帧，检查接线和终端电阻

4.2 用法二：单板使用，不接控制板

此用法由用户选择指令来源。完成 §4.0 前三步（第 4 步不需要）后，执行以下步骤：

第 5 步 · 选择指令来源并接线

指令来源	接口	选择命令
模拟油门（霍尔油门、电位器踏板）	`PC3`	`mode analog`
PWM 油门 / 航模舵机信号	`PA3`	`mode pwm`
遥控接收机（SBUS / CRSF / IBUS）	`PA3`	`mode rc`
板载旋钮	无需接线	`mode pot`

注：PWM 油门与遥控接收机共用 `PA3`，同一时间只能接其中一个，上电时本板自动识别有信号的一路。 注：板载旋钮仅供调试使用，不作为成品输入口。

第 6 步 · 标定输入行程（旋钮和遥控可跳过）

须标定油门完全松开和踩到底时的输入值：

```
thrmin          油门完全松开时输入
thrmax          油门踩到底时输入
save
```

未执行此步骤时油门行程不准确，可能踩下一半即达到最大，或踩到底仍未达到最大。

第 7 步 · 使能桥臂

```
drive on
```

第 8 步 · 给油

警告：首次给油前，须先将油门（或旋钮）回到零位。 进入运行模式后指令强制为 0，直到指令首次回到 5% 以下才解除。

正确操作为：先将油门松到底（或将旋钮拧到底），再逐渐加油。 上电时油门若停在半程，电机不会转动。此为上述保护的正常动作，并非故障，松开油门即可解除。

停止：

```
stop            关闭桥臂，电机滑行
```

板上另有 `BRAKE` 干接点，接通时执行能耗制动（三相短路，动能转化为绕组发热）。 该输入优先于所有指令来源，接通期间任何油门指令均不起作用。

4.3 两种用法的共同事项

1. **断电重新上电后，标定保留，运行模式不保留。** 本板每次上电均从 `idle` 启动， 不驱动电机。整车用法下，本板收到控制板的帧后自动切换；单板用法下须重新输入 `mode <...>` 和 `drive on`。
2. **升级方式决定标定是否保留。** 经 SWD 仅写应用区时，标定页不被改写；经上位机或串口 ISP 升级时整片擦除，标定随之清除。 标定记录格式改变的版本（例如 0.5.0）无论采用哪种方式均须重新标定，见 §10.2。升级后 `mode` 显示 `calibrated=0` 时，按 §10.2 重新设置。
3. `stop` **始终有效**，适用于任何模式、任何时刻。

4.4 运行模式与指令来源

```
mode              查询
mode idle         空转，不驱动
drive on|off      总使能
```

指令来源：

来源	输入方式	命令
控制台	命令输入	`cl <mA>` 转矩 / `spd <eHz>` 转速
油门	模拟口	先执行 `thrmin` / `thrmax` 标定
电位器	模拟口	先执行 `potmin` / `potmax` 标定
遥控接收机	串行协议	`rc` 查看状态， `rcch` 选择通道
整车 CAN	`0x210` 广播帧	见 §7

切换模式时，电流调节器复位，两个参考值清零，切换本身不产生转矩， 须由其他来源随后写入非零参考值。 执行 `drive on` 时，桥臂按当前已有的参考值输出，该值可能是上一条命令留下的。 因此 `drive on` 是风险最高的操作。

4.5 转矩模式与转速模式

```
srcmap torque    指令 = 转矩（出厂）
srcmap speed     指令 = 转速目标
```

注意：设为转速模式后，松开指令时车辆会主动减速至零，不再滑行。 两种模式的驾驶特性完全不同。

4.6 行驶中换向（0.6.4 起）

车轮仍在向前转时收到后退指令（遥控摇杆推前后在车轮停下前拉回、CAN 挡位由 F 变 R 等）， 本板直接施加反向转矩，由电流环控制大小：反向转矩先把车轮制动到零，再反向驱动。 制动的能量回馈到电池，回馈转矩按电池过压门限自动折返（§6.1.2），母线不会被推到过压。

- 0.6.0 及以前：换向时立即以满反向转矩驱动，回馈无门限折返，用台架电源或满电电池时会锁过压故障。
- 制动力度取决于电池能吸收多少回馈：台架电源不能吸收回馈，换向较慢（实测 660 rpm 约 2 s）； 接电池时快得多（实测 34 V 电池、545 rpm 约 0.6 s）。
- `=tlm 1 mot` 的 `revhold=` 计数换向时车轮仍在反向转动的控制周期数，仅供诊断。

---

5. 停机方式

本板根据反电动势自动选择以下两种停机方式：

方式	条件	动作
自由滑行	转速低、反电动势小	桥臂全部断开，电机自由转动至停止
主动短路（ASC）	反电动势达到母线电压的一定比例	三相低边全部导通，电机受电磁力矩制动

注：高速滑行时电机处于发电状态，反电动势会抬高母线电压。主动短路将能量消耗在电机自身的电阻上。

警告：ASC 的两个门限（`ascpu`）设置错误时，可能在高速时短接三相。 该命令不直接驱动电机，但决定电机的停机方式，因此在命令表中归为 `motion` 等级。

注意：BRAKE 输入和整车 CAN 的刹车位（`0x210` 字节 4 bit1，控制板在遥控急停、刹车踏板、遥控失联时发出） 使用三相低边短路制动，高速时制动瞬间电流冲击大，电机会有明显的撞击声。 短路电流在约 95 eHz（`brake_max_ehz`）以上时由固件改为先滑行、降速后再短路。 实测 15 极对轮毂电机在约 95 eHz 合闸时相电流峰值约 43 A（过流门限约 55 A）。 正常换向不经过此路径（§4.6）。

---

6. 保护与故障

6.1 九个故障位（`prot` / `tlm` 的 `fault=`）

位	名字	含义
0	`OV`	过压
1	`UV`	欠压
2	`OC`	软件过流（在 20 kHz 中断中判断）
3	`NFAULT`	栅极驱动器报告故障（经中断立即切桥）
4	`OT`	功率管过温（NTC）
5	`NTC`	NTC 开路或短路，温度读数不可信
6	`ENC`	编码器失步或无响应
7	`RC`	遥控链路失联（失效保护）

位	名字	含义
8	`IMEAS`	三相电流残差不合理，电流采样链异常。0.6.3 及以前在高转速（调制接近上限）时可能误报，0.6.4 已修正（§6.1.3）

- 过压/欠压门限按电压档案 `vpack_s`（电池串数，0.6.0 起）计算，并设有绝对上下限：
- 硬件 2.0：`vpack_s` 为 0（默认）时沿用上电时检测电池节数的旧方法；设了串数则按串数计算。
- 硬件 3.0：默认按 13S（48 V）计算，不再自动检测。接 24 V / 36 V 电池时必须设置 `vpack_s`，否则欠压门限会一直拦着启动。
- `vpack_s` 是保存型参数：`param save` 时写入 flash，标定（`learn`）结束时的自动保存也会把当时的值一并写入。 改换电池电压平台时须重新设置并保存。档案低于实际电池电压时（例如保存的是 10S、实际接 13S）， 开机即报过压故障、功率级不打开，`prot` 可看到当前门限；按实际电池设置 `vpack_s`、执行 `clear` 和 `param save` 即可。
- 切桥故障均锁存，须执行 `clear` 解除。故障原因仍存在时无法清除。

6.1.1 硬件 3.0 的母线过压分级（0.6.0 起）

硬件 3.0 增加了由 MCU 控制的母线泄放电路，固件在 20 kHz 中断中按母线电压分三级动作：

母线电压	动作
55 → 57 V	回馈（制动）电流逐步折返，减少灌回母线的能量
56 → 58 V	泄放电路按比例导通，把多余能量消耗掉
60 V（连续两个采样）	紧急：三相低边同时导通（ASC），并报过压故障

13S 档案的每串过压门限落在泄放区间内时，过压故障移到 60 V，让泄放先工作。 24 V / 36 V 等较低的档案按每串门限报过压，母线达不到上述分级。 `prot` 命令输出 `bus guard:` 一行，显示当前母线电压、折返和泄放的比例。

6.1.2 按电池门限的转矩折返（0.6.4 起）

上述分级用绝对电压（55 V 起），10S 等较低电压的电池达不到。0.6.4 起另按本板当前的过压/欠压门限折返转矩：

条件	动作
回馈（制动）时母线升到过压警告值以上	回馈转矩逐步减小，到过压故障值 − 0.3 V 时为零。10S：42.5 V → 43.2 V
驱动时母线降到欠压警告值以下	驱动转矩逐步减小，到欠压故障值时为零。10S：33 V → 30 V

硬件 3.0 按 20 kHz 母线采样执行；硬件 2.0 按约 5 ms 一次的母线采样执行，反应较慢。 接电池正常行驶时母线很少到达这些区间，折返不起作用；用台架电源或电池电量很低时会感觉到起步或制动变软，这是保护动作，不是故障。

6.1.3 高转速时的电流采样（0.6.4 起）

本板用三相低边分流电阻采样电流，只有在该相下管导通足够长时读数才准确。 转速接近上限时，占空比最高的一相下管导通时间太短，读数偏差，电机噪声增大，严重时触发 `IMEAS` 故障。 0.6.4 起，电流环工作时固件把三相占空比整体下移，并在必要时把电压矢量缩短最多 3%（只在少数角度）， 保证至多一相读数不可用，再用另外两相（三相电流之和为零）重建这一相。 实测：转速上限附近的电流读数偏差由平均 1.7 A 降到 0.07 A。 `=tlm 1 mot` 的 `phdrop=`（重建的采样数）和 `svmshort=`（缩短矢量的次数）仅供诊断。

6.2 温度读数与 NTC 状态

警告：NTC 开路时温度读数偏低。温度读数看似合理但 `ntc_ok=0` 时，该读数不可用。 `tlm` 的 `prot` 组将温度与 `ntc_ok` 并列输出，读取时须同时检查两者。

6.3 更换电池或主电源断开后执行 `clear`

栅极驱动器由主电源供电。主电源断开而逻辑电源仍在时（例如仅接 USB 供电，或更换电池）， 栅极驱动器复位为出厂寄存器值，电流采样增益由 10 V/V 变为 20 V/V，而固件按 10 V/V 计算。

此时所有电流读数为实际值的两倍，且无任何报错：电流环输出不足、过流保护在实际电流为设定值一半时动作、`learn` 保存错误的 R/L。`drv` 打印的七个寄存器在此状态下显示正常。

固件对此的处理：

- `drv` 命令在输出末尾给出判断结果，说明当前寄存器是否为固件写入的配置
- 执行 `clear` 时以及每次使能之前，固件检查并重写该配置

注意：更换电池或主电源断开后，须执行一次 `clear`。

6.4 看门狗（0.1.0 起）

- **独立看门狗**，由主循环喂狗。停止喂狗即复位。
- **五个 CPU 故障向量**（HardFault / NMI / MemManage / BusFault / UsageFault） 触发后先关闭栅极，然后将故障现场记录到后备寄存器，再复位。
- 下次开机时，控制台输出上一次异常停止的原因：

```
!! the previous run stopped feeding the watchdog
!! previous run died in a CPU fault: id=1 pc=... lr=... cfsr=... hfsr=... at ... ms
```

注：该记录仅输出一次，读取后即清除，出现时须及时记录。

6.5 开机识别硬件版本（0.6.0 起）

本板开机时自动识别电路板是硬件 2.0 还是 3.0，`ver` 和 `=tlm 1 build` 中的 `hw_detected=` 为识别结果，`hw=` 为镜像编译所针对的版本。 镜像与电路板不符时，固件拒绝打开功率级，控制台输出 `power refused: this firmware is built for hw …`：

镜像	识别为 2.0	识别为 3.0	无法识别
hw2.0 镜像	正常	拒绝	正常
hw3.0 镜像	拒绝	正常	拒绝（每次使能前重新识别）

注意：通过上位机烧录时按出厂登记和识别结果选择镜像，不应手动混用两种镜像。

6.6 硬件关断

警告：板上没有绕过 CPU 的硬件关断通路，所有保护均经过 MCU。 载人或高风险场合必须另配独立于本板的物理断路器。

---

7. 整车 CAN

经典帧，1 Mbps。本板在整车中为执行端：控制板广播行驶请求，本板执行。

7.1 行驶请求 `0x210`（控制板 → 本板，广播给两块单路板）

字节	内容
0:1	油门千分比 u16 LE，0..1000
2:3	转向（本板忽略）
4	标志：bit0 允许驱动 / bit1 刹车
5	bit0-6 挡位：0=N 1=F 2=R；bit7 清故障请求（0.6.3 起，由 0 变 1 的那一帧清除本板锁存的故障，等同控制台 `clear`；故障原因仍在时不清除；标定进行中忽略）
6	序号

字节	内容
7	指令超时 ×10 ms（0 = 用默认）

注意：该帧持续发送，不停发，安全状态由帧内容表示。 本板收不到帧时，须等待自身指令超时后才停止。 发送内容为停止的帧，比停止发送少等待一个超时窗口。

7.2 状态与遥测（本板 → 控制板）

两组 ID，由 `side` 参数选择：**左轮** `0x211` **/** `0x212`**，右轮** `0x213` **/** `0x214`。

状态帧：

字节	内容
0	健康位（本侧的：运行中 / 霍尔边沿正常 / 栅极驱动无故障 / 指令新鲜）
1	序号
2:3	左轮转速 s16 LE
4:5	右轮转速 s16 LE
6	回显收到的指令标志字节
7	bit7 = 本板认为指令有效；bit0-3 = 解出的挡位

遥测帧：

字节	内容
0:1	母线电压 mV u16 LE
2:3	母线电流 cA s16 LE（10 mA/LSB）
4	序号

注意：健康字节中每一位均为「1 = 正常」，硬件上低有效的信号也统一归一为 1 = 正常， 不按引脚电平直接映射。

注意：两块单路板用于同一辆车时， `side` 设置错误会导致两块板占用同一组 ID， 或一侧车轮反转，而两块板均显示工作正常。

---

8. 程序接口

8.1 `tlm` 机器可读状态快照

```
tlm
```

返回一帧多行记录，以 `=tlm end` 结束：

```
=tlm 1 sys   ms=... vbus_mv=... cells=... fault=... warn=... state=... moe=... wdog=... cpufault=...
=tlm 1 prot  uv_mv=... ov_mv=... oc_cnt=... iqmax_ma=... iqcont_ma=... iqlim_ma=... therm_m=... temp_mc=... ntc_ok=...
ntc_raw=...
=tlm 1 mot   mode=... op=... drive=... side=... hall=... edges=... dir=... omega_m=... iq_ma=... iqref_ma=... ibus_ma=...
resid_ma=... r_mohm=... l_uh=... lim_pm=... limby=... band=... revhold=... canclr=... phdrop=... svmshort=...
=tlm 1 enc   chip=... cpr=... pp=... dir=... src=... ok=... pos=... spi_raw=... omega_m=... slips=... spi_err=...
=tlm 1 cal   hall=... rl=... enc=... saved=... busy=... next=... step=... err=...
=tlm 1 can   tx=... rx=... err=...
=tlm 1 build debug=... stamped=... crc=... major=... minor=... patch=... board=foc_single scm=... hw=... cmdhash=...
=tlm end
```

格式约定：

- **仅含整数，单位体现在字段名中**（`*_ma` 毫安、`*_mc` 毫摄氏度、`*_m` 千分之一）
- `=tlm end` 标志记录结束。读取方须以收到 `=tlm end` 判断记录完整； 未收到时应视为记录被截断。截断的记录中，已收到的每一行格式仍然完整
- 快照中没有任何字段由其他两个字段计算得出。快照不是原子的 （20 kHz 中断可能在两行之间执行），不同行的字段属于不同时刻。 读取方不得将不同行的字段相乘（例如电压乘电流）

注： `mon` 输出的是面向人工查看的 4 Hz 文本流，不供程序解析。

8.2 `angle_src` 与 `angle_active` 的区别

- `angle_src` 为**配置值**：指定使用编码器或霍尔
- `angle_active` 为**当前状态**：此刻实际使用的角度来源

编码器不可用时本板自动退回霍尔， `angle_src` 保持不变。 此时实际使用的角度来源与整定时不同。读取时须同时检查这两个字段。

8.3 `param` 参数表

```
param list                  整张表：id / 名字 / 单位 / 范围 / 默认 / 权限 / 当前值
param get <名字>
param set <名字> <值>
param save
```

注：参数的范围和默认值随固件版本变化，以本板 `param list` 的输出为准，不应引用其他文档中的副本。

注意： `param list` 的回复包含 `begin` / `count=` / `end` 。读取方统计的行数与 `count` 不一致时， 须丢弃整份结果。被中断的参数表中，已收到的每一行格式仍然完整。

8.4 命令表 `COMMANDS.json`

发布包内附带该文件，列出每条命令的名字、参数形式、前置条件和危险等级。

注意：使用前须核对 `cmdhash` ：本板 `ver` 报告的值须与文件中的值相等。 不相等时不得使用该文件。

---

9. 参数

9.1 参数表以本板为准

共 74 行（0.6.4）。每一行的默认值均由固件中实际执行的常量生成。

9.2 使用规则

1. **电机使能期间不可写入。** 标定和几何类参数在电机使能时拒绝写入。

2. `param set` **返回写入后本板实际持有的值。**
3. **修改后须保存**：执行 `save`。0.6.2 起所有可写参数均保存到 flash（此前 `ibus_limit_ma` 不保存）。

9.3 特殊的参数行

类别	示例	说明
只读的测量结果	编码器偏置、编码器方向	由测量得出，只能通过重新测量更新，不可手动填写
自动值	`iq_max_ma`	`default` 栏为 5000，但未被用户设置过时，本板实际使用按电机计算的值（§3.3）；`value` 栏为实际值，`iqmax` 命令显示来源
最小值	`ibus_limit_ma`	0.6.2 起保存到 flash，最小 1000 mA（设为 0 会把转矩压到零）
运行值与默认值不同	`ov_fault_mv`	开机时取绝对上限，随后按检测到的电池节数换算。`default` 栏为检测前的初始值，不是本板正在使用的值

9.4 设置错误时无报错的参数

`param list` 在以下参数行上标注 `silent=1`：相电阻电感、换相角偏置、极对数、 死区与延迟补偿、霍尔观测器的三项、编码器线数，以及**输入标定的四行**。

警告：输入标定范围标反或标定不完整时，松开的踏板会被读成踩满， 且本板不会报告任何异常。

---

10. 固件升级

10.1 升级方式

方式	说明
串口 ISP	USB Type-C，芯片内置的系统 Bootloader。板上有一键下载电路，无需按键
SWD	ST-Link，用于生产和研发

注意：使用 ST-Link 烧录或复位时，须关闭占用同一串口的工具。

10.2 升级后检查标定

0.1.0 起标定页位于 `0x0801F800`（此前为 `0x0803F800`）。 0.1.0 以前的固件写入的标定不保证能被新固件正确读出。

升级后首先执行 `tlm` 查看 `cal` 组的 `hall=`（或输入 `mode` 查看 `calibrated=`），必要时重新执行 `learn`。

10.2.1 升级到 0.5.0：须重新标定

警告：从 0.4.x 升级到 0.5.0 后，板上原有的标定记录无法读取，将被丢弃。 0.5.0 的标定记录新增十一项设置，记录长度和校验均已改变。

升级后首次开机时，控制台输出须重新设置的项目。提示的第一句取决于升级方式：

升级方式	提示的第一句
上位机 / 串口 ISP（常用方式）：整片擦除，旧记录在擦除时已被清除	`no valid calibration in flash.`
SWD 仅写应用区，未擦除标定页	`calibration in flash is an OLDER FORMAT and was discarded.`

两种情况下，第一句之后输出的清单相同，须执行的操作也相同。清单中列出 `side`。 `side` 设置错误时不会报错，车辆照常行驶，但本板在 CAN 上与另一侧车轮占用同一组 ID。

注意：通过上位机升级的板子显示 `no valid calibration in flash.`，与全新板子的提示相同。 此时标定页已被擦除，原有标定已不存在，须全部重新设置。

升级后须重新设置以下全部项目：

项目	命令
换相表、R/L、电流环	`learn`
安装侧	`side left` 或 `side right`
油门行程	`thrmin` / `thrmax`（接遥控时还有 `pwmmin` / `pwmmax`）
装车的四个参数（见 §3.5）	`pole_pairs` / `wheel_mm` / `speed_max_kph` / `gear_ratio_x1000`
手动设置的限值	此前修改过的 `iqmax` / `ibus` / `drive_watts` 等

最后执行 `param save`。建议升级前先执行 `param list` 记录当前参数值， 升级后按记录重新设置。

10.2.2 升级到 0.6.0

0.6.0 的标定记录格式与 0.5.0 相同。仅写应用区（SWD）升级时，标定保留； 通过上位机或串口 ISP 升级时整片擦除，标定须按 §10.2.1 的清单重新设置（与 0.5.0 相同）。

硬件 3.0 的板子首次运行单路固件即从 0.6.0 开始，按 §4.0 完成标定，并按电池设置 `vpack_s`。

10.2.3 升级到 0.6.4（含 0.6.1 – 0.6.3）

标定记录长度和版本不变。仅写应用区（SWD）升级时标定保留；通过上位机或串口 ISP 升级时整片擦除， 须按 §10.2.1 的清单重新设置，并按电池重新设置 `vpack_s`。

升级后注意：

1. **转矩上限可能变大**：此前没有设过 `iqmax` 的板子（默认 5 A），升级后按电机自动计算（§3.3）， 起步明显更有力。需要保持原来的力度时执行 `iqmax 5000` 后 `param save`。
2. `ibus_limit_ma` **现在保存**：此前每次上电恢复 12 A，升级后保存的值长期有效。
3. **整车用法须同时升级控制板**：配合 DlaBoard_B 0.1.17 或更新版本。DlaBoard_B 0.1.16 换向时会发刹车位， 使本板短路制动，产生撞击声（§5）。
4. 控制板可经 CAN 清除本板故障（§7.1），控制板控制台 `clear` 同时清除两块单路板。

10.3 默认构建

发布包中为 Release 构建。构建类型以本板 `ver` 报告的 `debug=` 位为准，不以文件名判断。

---

11. 版本历史

11.1 固件

版本	日期	变化
0.6.4	2026-11-11	高转速时的电流采样修正：占空比整体下移、必要时矢量缩短最多 3%，至多一相读数不可用并由另外两相重建，消除转速上限附近的噪声和 `IMEAS` 误报（§6.1.3）；行驶中换向改为电流环控制的反向转矩，不再短路制动（§4.6）；按电池过压门限折返回馈转矩、按欠压门限折返驱动转矩，硬件 3.0 用 20 kHz 母线采样（§6.1.2）；`=tlm 1 mot` 新增 `phdrop=` / `svmshort=`。
0.6.3	2026-11-11	仅台架使用，未公开发布。换向先短路制动（0.6.4 已撤销）；整车 CAN `0x210` 字节 5 bit7 清故障（§7.1）；`=tlm 1 mot` 新增 `revhold=` / `canclr=`。
0.6.2	2026-11-03	未公开发布，内容并入 0.6.4。`iq_max_ma` 未设置时按电机计算（§3.3），`iqmax auto`；堵转 3 秒退让；`ibus_limit_ma` 保存到 flash，最小值 1000 mA。
0.6.1	2026-10-30	未公开发布，内容并入 0.6.4。新增参数 `motor_invert`（§3.3），单独翻转车轮方向，不改变 CAN ID。

版本	日期	变化
0.6.0	2026-10-18	首个支持硬件 3.0（S1055-800-B）的版本：同一源码出 hw2.0 / hw3.0 两份镜像，开机识别硬件版本，镜像与电路板不符时拒绝打开功率级（§6.5）；新增电压档案参数 `vpack_s`（§6.1）；硬件 3.0 支持 DRV8353 栅极驱动器、母线过压分级与泄放（§6.1.1）；修正栅极驱动器故障解除后再次使能时功率级未真正打开的问题；电流环增益 `i_ki_u` / `i_kp_u` 上限放宽，自标定得到的较大值可以原样写回；标定记录格式不变（§10.2.2）。
0.5.0	2026-09-16	标定记录格式变更，升级后原记录作废，须重新标定（见 §10.2.1）；满速转速改由 `pole_pairs`、`wheel_mm`、`speed_max_kph`、`gear_ratio_x1000` 计算，`speed_max_rpm` 改为只读（见 §3.5）；`iq_slew_up_a_s` / `iq_slew_dn_a_s` / `ov_fault_mv` / `asc_engage_mpu` / `asc_release_mpu` / `dt_comp_u` / `delay_comp_m` / `hall_corr_m` / `hall_accel_ff_m` / `hall_navg` / `brake_max_ehz` 共十一个参数改为保存到标定记录中（0.4.x 及以前版本中，这些参数复位后恢复出厂值）。
0.4.1	2026-09-14	修正总线上有控制板时，新板或擦除过的板子首次执行 `learn` 可能在电阻电感测量步骤失败（输出 `RL: points too close ... dI=0 mA`）的问题，标定进行期间不再切换运行模式。
0.4.0	2026-09-14	整车驱动增加电压、转速、功率三道上限（`drive_watts` 默认 300 W），`iq_max_ma` 改为静止时的电流上限并将默认值由 25 A 改为 5 A、斜率由 30 A/s 改为 25 A/s，读取控制板下发的速度档并作为转速上限，`=tlm 1 mot` 新增 `lim_pm=`（当前允许值）、`limby=`（起作用的上限：0 无 / 1 电压 / 2 转速 / 3 功率）、`band=`（收到的速度档）。
0.3.3	2026-09-14	`learn` 带参数被拒绝时，控制台提示中的标定时长由约 12 秒改为约 14 秒。
0.3.2	2026-09-14	`learn` 电阻测量改为先粗测再定位电流台阶，重复性由约 ±10% 提高到约 ±1%（电感约 ±5%），标定时长由约 12 秒增至约 14 秒。
0.3.1	2026-09-13	标定失败时输出失败步骤和当时的数值；电阻电感测量的电流台阶在最高级未达到目标时按实测斜率重新计算并重测。
0.3.0	2026-09-12	`learn` 在开环电压模式下不再施加死区补偿，R 改为两点求斜率（`V = V0 + R·I`），截距 `V0` 在 `learn` 输出和参数 128 `v0_mv` 中报告；0.2.x 所测 R、L 偏低约 27%，升级后须重新执行 `learn`。
0.2.1	2026-09-12	`learn` 带参数（例如 `learn 1 hall`）时拒绝执行，并提示该命令不带参数。
0.2.0	2026-09-12	`tlm` 的 `cal` 组新增 `step=` 和 `err=`，报告标定的当前步骤和上次停止原因。
0.1.2	2026-09-12	标定记录增加换相表来源标记，在 `learn` 之前执行 `save` 不再使本板报告已标定。
0.1.1	2026-09-10	`param set` 接受整行输入；统一参数清单头格式。
0.1.0	2026-09-09	新增独立看门狗、五个 CPU 故障向量处理、`tlm` 机器可读快照和栅极驱动器配置检查与重写（使能前、`clear` 时、`drv` 给出判断），参数表默认值改为由固件常量生成，标定页移至芯片声明的 flash 范围内。

11.2 本书

版本	日期	变化
Rev. 1.13	2026-11-11	随固件 0.6.4 更新（含 0.6.1 – 0.6.3）：修订 §3.3（`iqmax` 自动值、堵转退让、`motor_invert`）、§5（短路制动的冲击）、§6.1、§7.1、§8.1、§9.1 – §9.3；新增 §4.6、§6.1.2、§6.1.3、§10.2.3。
Rev. 1.12	2026-10-18	随固件 0.6.0 更新，增列适用硬件 3.0（S1055-800-B）：修订 §6.1（含 `vpack_s` 保存说明），新增 §6.1.1 母线过压分级、§6.5 开机识别硬件版本、§10.2.2，原 §6.5 改为 §6.6。
Rev. 1.11	2026-09-17	文字修订，内容不变。
Rev. 1.10	2026-09-16	修订 §10.2.1 升级后开机提示的说明。

版本	日期	变化
Rev. 1.9	2026-09-16	随固件 0.5.0 更新，新增 §3.5 和 §10.2.1，修订 §4.1 第 8 步。
Rev. 1.8	2026-09-14	随固件 0.4.1 更新版本历史。
Rev. 1.7	2026-09-14	随固件 0.4.0 更新，§4.1 新增第 8 步。
Rev. 1.6	2026-09-14	随固件 0.3.3 更新版本历史。
Rev. 1.5	2026-09-14	随固件 0.3.2 更新，修订 §4.0 第 3 步的标定时长。
Rev. 1.4	2026-09-13	随固件 0.3.1 更新版本历史。
Rev. 1.3	2026-09-12	随固件 0.3.0 更新，修订 §3.2 和 §4.0 第 2 步。
Rev. 1.2	2026-09-12	新增 §4 使用步骤，原 §4 改为 §4.4，原 §4.1 改为 §4.5，并随固件 0.2.1 更新。
Rev. 1.1	2026-09-12	随固件 0.1.1 – 0.2.0 更新，修订 §3.2、§3.3、§3.4、§10.2 和 §8 记录清单。
Rev. 1.0	2026-09-09	首版。

12. 已知限制（固件侧）

#	限制	影响
1	**看门狗和 CPU 故障处理未经实机验证**	待验证项为：标定完成后不发生复位；人为触发 CPU 故障后，下次开机输出故障记录
2	**没有硬件关断通路**	所有保护均经过 CPU，见 §6.6
3	**不提供完整的结构化标定向导**	0.2.0 起 `tlm` 的 `cal` 组报告 `step=`（当前步骤）和 `err=`（上次停止原因），可用于显示进度；不提供每一步的判据和重试建议
4	**Debug 构建的 CPU 占用率未在本板上测量**	不适用其他驱动板的测量值
5	**对外型号**	硬件 2.0 型号为 `PF1-400-A`，硬件 3.0 型号为 `S1055-800-B`；`ver` 中的 `hw_detected=` 为板子识别出的硬件版本

13. 附录：常用命令

命令	功能
`ver`	查询固件版本、板卡标识、`cmdhash`
`tlm`	当前完整状态，一屏（供程序读取）
`prot`	保护状态和门限
`drv`	栅极驱动器寄存器及配置校验结果

命令	功能
`learn`	电机自标定（执行前须架空车轮）
`save`	将标定保存到 flash
`pp <n>`	设置极对数（注意：填极对数，不填总极数）
`side left|right`	安装侧（同时决定转动方向和 CAN ID）
`clear`	清除锁存的故障，并重写栅极驱动器配置
`stop`	立即关闭栅极

Daliang Auto · FOC_Single 出厂固件说明书 Rev. 1.13 · 2026-11-11