

SPECIFICATION

DlaSteer-100 电动转向执行器

齿轮齿条式线控转向执行器 · 产品规格书

品牌	Daliang Auto
产品型号	DlaSteer-100
主控	STM32G473RCT6 (ARM Cortex-M4F @170 MHz, LQFP64)
电机	100 W 无刷直流 + 行星减速 (速比 **10 / 15 / 20 三种, 按订单**)
齿条行程	±50 mm (软限位) / **±55 mm (机械止点, 实测) **
指令接口	CAN (经典帧 1 Mbps) / UART
文档版本	Rev. 1.0
适用	无人车、卡丁车、AGV、线控底盘转向

本规格书描述整机（机械、电气、接口、控制性能与安全功能）。部分电源 / 驱动 / 传感器件以功能描述给出，具体料号不公开。标注「实测」的项目为台架实测值并附测试条件，标注「计算」的为按额定参数推导，标注 **TBD** 的为尚未验证项，量产前以正式测试报告为准。

⚠️ **Rev 1.0 更正了 Rev 0.9 的十二处** (§14 有逐条清单)，全部来自 2026-09-08 的台架实测与复核。最要紧的六处是：极对数 (4 → **2**)、转轴到编码器的速比 (2:1 → **24/14**)、编码器可测范围 (± 70.7 → **± 60.6 mm**)、机械止点 ("约 ± 60 mm, TBD" → **实测 ± 55 mm**)、位置反馈 (模拟电压 → **在用的 SPI 绝对编码器**，不再是"预留可升级")、越程锁存余量 (3 mm → **1.5 mm**)。变更明细见 §14。

⚠️ 同时**作废了 Rev 0.9 里全部按电压推导的速度数字** ("24 V 受限 124 mm/s" 等)：那些换算都经过极对数，而当时极对数取的是 4。一个经由错误常数得到的测量，不会因为它被观察过就变成事实。

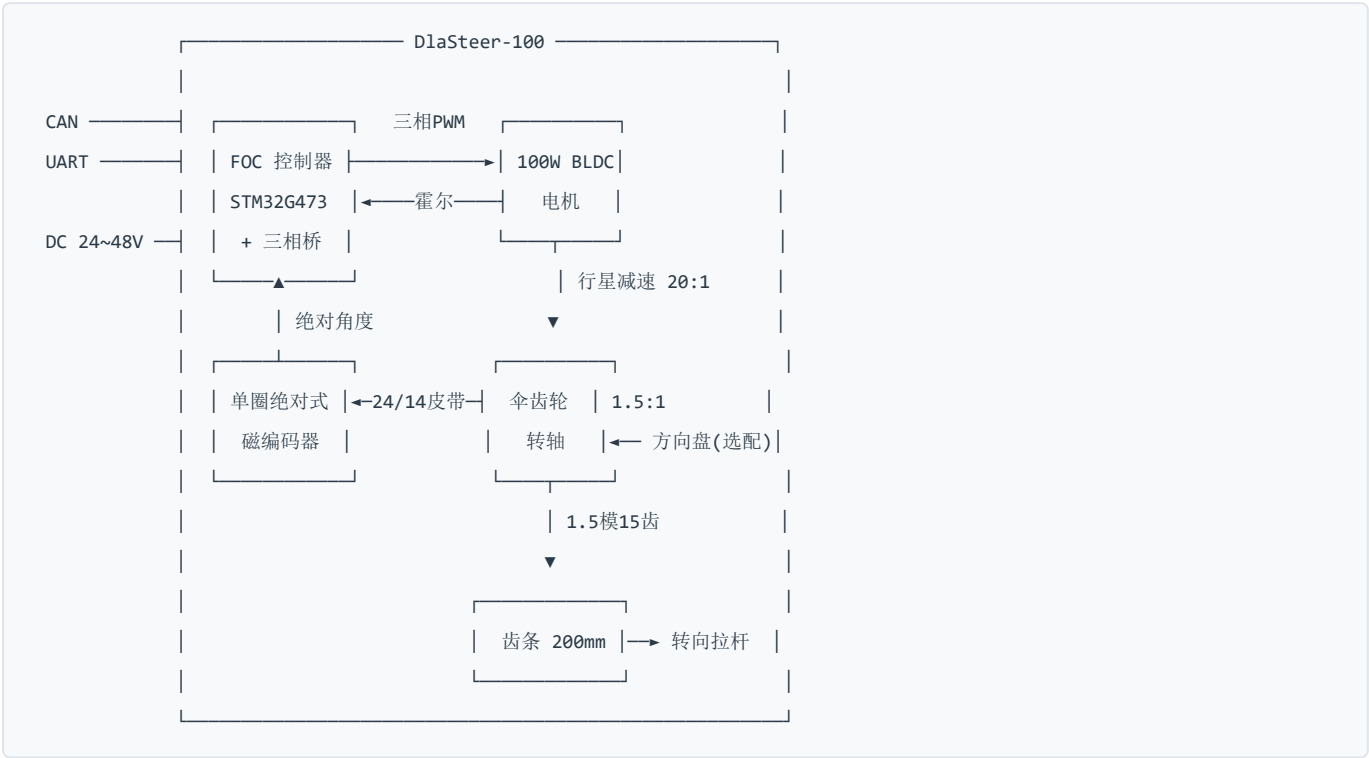
1. 产品概述

DlaSteer-100 是一款**集成式电动转向执行器**，把无刷电机、两级减速、齿轮齿条机构、绝对位置反馈与 FOC 驱动控制器整合为一个可直接安装于底盘的转向总成。上位机只需通过 CAN 或串口下发目标转向位置，执行器内部闭环完成定位，并自主承担全部限位与故障保护。

主要特性

- **闭环位置伺服**：位置环 (200 Hz) → 速度环 (1 kHz) → 电流环 (20 kHz FOC) 三级级联，齿条位置直接寻址，无需上位机做位置闭环。
- **绝对位置反馈**：单圈绝对式磁编码器经 **24/14 同步带**接转轴，**测量范围严格大于机械行程**，上电即知位置，无需回零。
- **纯软件限位**：无机械限位开关，由软限位、减速带、越程锁存、回绕检测、传感器故障检测多层保护共同保证齿条不撞机械止点。
- **停止包络**：接近限位与目标时按 $v = \sqrt{2 \cdot a \cdot d}$ 限速，保证在剩余距离内一定停得住——不依赖摩擦。
- **越程可恢复**：越程锁存后可经受限通道（限速、仅朝中位）自行退回，不需人工干预。
- **整车集成**：CAN 支持独立转向指令帧与整车广播帧两种模式，失联自动保持位置。
- **自标定**：电机换相参数（霍尔映射、相电阻 / 电感、电流环增益）一键自学习；位置标定单基准（齿条中位）一条命令完成。

2. 系统组成



3. 机械规格

3.1 传动链

环节	速比	说明
电机 → 减速机输出	行星减速 10 / 15 / 20	★ 按订单，整条链上唯一按批次不同的环节。同一台电机本体，输出额定 400 / 266 / 200 rpm
减速机输出 → 转轴	伞齿轮 1.5:1	换向 90°
转轴 → 齿条	齿轮齿条 模数 1.5 / 15 齿	分度圆 Ø22.5 mm，周长 70.686 mm/转
转轴 → 编码器	同步带 24/14 = 1.7143	皮带轮 24 齿 / 14 齿。★ 这一级是 安全要求 ，不是分辨率选择，见 §3.2
电机 → 转轴 总减速比 (速比 20 时)	30:1	10 / 15 时分别是 15:1 / 22.5:1

★ **交叉校验**：三种速比的「减速机输出额定转速 × 速比」都约等于 4000 rpm，因为它们是一台电机本体。

换算系数（与速比无关，只由齿轮齿条几何决定）

量	值
齿条位移 / 转轴转角	0.19635 mm/° (5.093 °/mm)
齿条位移 / 转轴整转	70.686 mm
齿条位移 / 电机整转 (速比 20)	2.356 mm
软限位 ±50 mm 对应转轴转角	±254.6° (全程 509.3°)
机械止点 ±55 mm 对应转轴转角	±280.1° (全程 560.2°)

3.2 行程

项	值	说明
软限位 (固件)	±50.0 mm	正常工作范围, 可经指令配置
减速带起点	±42.0 mm	进入后按停止包络限速
越程故障阈值	±51.5 mm	软限位 + 1.5 mm 硬余量。锁存故障, 需显式恢复
机械止点	±55 mm (实测)	2026-09-08 台架, 两端手推、读已标定的编码器: -54.95 / +54.50 mm, 全程 109.45 mm。两侧统一取 55.0
编码器可测范围	±60.6 mm	严格大于机械止点, 全程位置唯一

✔ **关键安全设计:** 编码器可测范围 (±60.6 mm) 严格大于机械止点 (±55 mm)。这保证任何物理上到得了的位置都对应唯一读数, 不存在断电被外力推到量程外、上电后误判位置的可能。

⚠️⚠️ **这条设计防的是这套系统唯一一条三道检查都不响的失效。** 编码器一旦回绕, 一个物理位置会读出另一个位置的合法数值: 上电时没有前一个样本 (跳变检测不响)、数值在标定带内 (开路检测不响)、也在软限位内 (越程保护不响) —— 三道保护同时保持沉默, 而执行器会朝着它已经顶住的止点继续推。软件修不了它: 信息在传感器那里就已经丢了。所以修法是机械的。

⚠️ 历史上装过 20/15 皮带轮的一版 (速比 1.3333), 回绕点落在 ±47.1 mm —— 在机械行程以内。这是 24/14 这一级存在的全部理由。

余量预算 (由几何决定, 改不了)

项	值
编码器可测范围 - 机械止点, 两侧合计	11.7 mm
完美皮带相位时, 每侧	5.9 mm
皮带相位每偏 1 mm	一侧的余量整个搬到另一侧

⚠️ 所以出厂标定里有一道**皮带相位门**和一道**回绕余量门**, 也因此标定时齿条必须卡住: 皮带一松齿条就是自由的, 台架实测两次读数之间 它自己滑了 4.9 mm, 而滑掉的每一毫米一比一地吃掉余量。

❌ **出厂固件当前的回绕余量判据偏乐观:** 它按「软限位 50 + 硬余量 1.5 = 51.5 mm」当止点算, 而实测止点是 55 mm。⇒ 本版不把“回绕余量充足”作为结论对外声明。

3.3 转向力与速度

★ 下面这些数一律不经过极对数, 只用减速电机铭牌和齿轮几何 —— Rev 0.9 里那几个“电压受限极速”经过极对数, 而极对数当时取错了, 所以全部作废。

按速比 (额定工况, 理想传动)

速比	齿条速度 (额定)	齿条速度 (空载)	齿条推力 (理想)	齿条推力 @85% 效率
10	314 mm/s	393 mm/s	318 N	271 N
15	209 mm/s	262 mm/s	478 N	406 N
20 (标准配置)	157 mm/s	196 mm/s	637 N	541 N (55 kgf)

推力 = 额定功率 ÷ 齿条速度, 与「电机额定扭矩 × 总减速比 ÷ 小齿轮分度圆半径」两条路算出同一个数。速比 20 时: 4.78 N·m (减速机输出) × 1.5 = 7.16 N·m (转轴) ÷ 11.25 mm = 637 N。

⚠️ 推力仍是计算值, TBD 待实测。

固件的出厂限值

项	值	说明
推荐工作速度上限	90 mm/s	出厂固件的默认速度上限
全程（100 mm）耗时 @90 mm/s	约 1.1 s	计算

⚠⚠ **真正约束推力和速度的是控制器的电流上限，不是机械。** 上表那几个机械数是这台机器**能不能**做到的上界；实际做得到多少，取决于出厂固件的转矩电流上限、连续电流限和母线电流折返限三个值，它们按电机铭牌设定，出厂验收里有一道门检查它们是不是量产值。

⚠ **90 mm/s 不是“机械做不到 157”，**是往那个方向走需要**重做停止包络的验证**——软限位到机械止点之间只有 4.9 mm，速度直接从这个停车预算里花掉。而 Rev 0.9 那次验证是在极对数取 4 的条件下做的，**已经作废**。

4. 电机与驱动

4.1 电机

参数	值
类型	三相无刷直流（BLDC），霍尔有感
额定功率	100 W
极对数	2
本体额定转速	4000 rpm
额定转速（减速机输出）	400 / 266 / 200 rpm（对应速比 10 / 15 / 20）
相电阻（典型，实测）	约 313 ~ 365 mΩ
相电感（典型，实测）	约 485 ~ 493 μH
位置传感	霍尔 ×3，实测扇区间隔 55~64°（理想 60°）
额定母线电流 @24 V	约 4.2 A
额定母线电流 @32 V	约 3.1 A

⚠⚠ **极对数是 2，不是 4。** 厂家规格书那一行写的是 Poles 4，而 **4 极 = 2 对极**。Rev 0.9 把那一行直接抄了过来。台架三次双向实测反推 2.13 / 2.03 / 2.06。⇒ 这个数**不只用于速度换算**：标定工具经它从霍尔边沿推算转轴转数，取 4 的时候工具会给出一句自信的、关于硬件的错话（“编码器在行程内会回绕”），而不回绕正是 §3.2 那套皮带轮存在的全部理由。

⚠ **相电阻 / 电感是逐台学出来的，不是产品参数。** 上表给的是量级；每台执行器出厂时由自标定测得并存进控制器，控制器的电流环增益按它整定。

电压说明：减速机铭牌上的额定转速本身就是 24 V 下的数 ⇒ 速比 20 的 157 mm/s **不需要任何电压降额**。🚫 Rev 0.9 的“24 V 供电时最高约 3164 rpm（齿条 124 mm/s）”是经极对数换算得到的，**已作废**。

4.2 驱动控制器

项	规格
主控	STM32G473RCT6, Cortex-M4F @170 MHz, 256 KB Flash / 128 KB SRAM
功率级	三相 MOSFET 半桥 ×3 + 专用三相栅极驱动器（含电荷泵、电流采样放大、VDS 过流保护）
换相方式	磁场定向控制（FOC），霍尔角度观测器
电流环	20 kHz, Id / Iq PI（圆形限幅 + 抗饱和），SVPWM
相电流采样	低边分流 + 放大, 0.0403 A/count , 量程 ±82.5 A
母线电压采样	电阻分压比 21.0, 满量程 69.3 V

项	规格
电流环增益	上电按实测 R / L 与母线电压自整定

5. 位置反馈

项	规格
类型	单圈绝对式磁编码器（非接触，无磨损）
安装	经 24/14 同步带连接转轴
输出方式	数字 SPI，14 位绝对角度
满量程计数	16384 counts / 360°
齿条分辨率	约 0.0074 mm/count（135.2 counts/mm）
可测范围	±60.6 mm（见 §3.2）
位置噪声	TBD 待实测
采样率	200 Hz
帧校验	每帧带状态位与偶校验；连续坏帧计入出厂验收的编码器一项

⚠⚠ Rev 0.9 把这一节写成了“模拟电压输出 + SPI 硬件已预留、可升级”。那是上一代。现在 SPI 绝对编码器就是在用的主传感器，不是选配、也不是待升级项：位置读数、标定、限位、回绕判据全部走它。

⚠ 位置噪声一栏是 TBD，不是“和上一代一样”：Rev 0.9 那个 0.47 mm 是模拟通道上量的，换成 14 位数字口之后没有在这台机器上重新量过。一个换过传感器还留着旧噪声数的规格书，读起来和量过一样。

⚠ 到位死区出厂默认 0.5 mm。收紧它之前先量噪声。

6. 电源

参数	最小	典型	最大	单位	备注
母线输入电压	18	24 / 32	48	V	直流；实测试验证 24 V 与 32 V
母线电流（额定负载）	—	3.1~4.2	—	A	随母线电压
母线电流软折返阈值	—	可配	—	A	默认按台架电源能力设定
逻辑电源	—	板载	—	—	母线经降压 + 线性稳压
欠压 / 过压保护	自动	—	自动	—	上电自动识别电池节数并设定门限

保护门限随上电检测的平台自动缩放（例：24 V 识别为 6S，欠压 18.0 V / 过压 26.1 V；32 V 识别为 9S，欠压 27.0 V / 过压 39.2 V）。

7. 控制性能

测试条件：母线 32 V，齿条空载连接转向机构，`vmax = 90 mm/s`，位置容差 0.5 mm，测试日期 2026-07-26。

⊖ ⊖ 这一整张表待复测，两条独立的理由，任何一条都足以作废它：

- 它是在 **±40 mm 临时行程配置**（编码器速比 1.3333、模拟输出）下取得的，而量产配置是 ±50 mm、24/14、数字 SPI —— 传感器和传动都换过了。
- 当时**极对数取的是 4**，而正确值是 2 ⇒ 一切经速度换算的量（包括 "阶跃 @90 mm/s"里的那个 90）都不是它写的那个数。

⇒ 表中数据保留在这里，是为了说明测过什么、在什么条件下测的，不作为本版的性能承诺。量产前重测并出正式报告。

项目	实测值	条件
定位精度	-0.4 ~ +0.3 mm	8 个目标位置 (±35 / 25 / 15 / 5 mm)，每点从中位出发
重复定位精度	-0.6 ~ +0.2 mm	0→+30→-30 mm 往返 5 次
小步进精度	-0.2 ~ +0.3 mm	2 / 4 / 6 / 8 / 10 mm 台阶
限位超调	≤0.9 mm	指令超出软限位，速度 30 / 60 / 90 mm/s
稳定时间	558 ms	25 mm 阶跃 @90 mm/s，落定后完全静止
阶跃超调	0.9 mm	同上
制动减速度	🚫 见下	Rev 0.9 写的是「实测约 94 mm/s ² ，停止包络按 70 mm/s ² 设定」

⚠ **减速度这一行已经不成立。** 出厂固件现在的停止包络按 **250 mm/s²** 设定，依据是台架上量到的**纯滑行**（不加制动力矩）约 260 mm/s² —— 转向模式下会开 主动制动，所以实际能力高于滑行值。⚠ 开主动制动之后到底能到多少，**没有量过**，而停止包络用的正是这个数。⇒ 它必须实测，而且要**填得比实测能力低**：填高了算出来的允许速度停不住，而这件事只在真正冲到限位那一次才表现出来。

控制结构

环路	频率	说明
位置环	200 Hz	PD，输出齿条速度指令
停止包络	200 Hz	$v \leq \sqrt{2 \cdot a \cdot d}$ ，同时作用于目标距离与限位距离
速度环	1 kHz	PI，输出 Iq 参考
电流环	20 kHz	Id / Iq PI + SVPWM

8. 通信接口

8.1 CAN（经典帧，1 Mbps）

转向指令帧 0x230（上位 / 控制板 → 执行器）

字节	内容
0:1	目标位置 int16 LE: ‰ (-1000~+1000)，或 mm×10（当 bit1 置位）
2	标志: bit0 使能 / bit1 单位=mm / bit2 回中 / bit3 清故障
3	速度限制: 0..255 映射为已配置上限的 0..100% (0 = 用默认)
4	序号（在状态帧里回显）
5	指令超时 ×10 ms (0 = 用默认)

⚠ 第 3、5 字节的覆盖值**只作用于本帧**，不写入持久化配置 —— 否则一帧走偏的报文能把齿条速度永久压低，而随后一次存盘会把它固化。

⚠⚠ **清故障按 bit3 自身的上升沿触发，而且带清故障位的那一帧不会使能。** 控制器要恢复必须先放掉 bit3、再发使能，两帧。一直举着 bit3 的控制器，轴就是不上电 —— 做错了它自己会说话。

状态帧 0x231（执行器 → 上位，周期 20 ms）

字节	内容
0:1	当前位置 % int16 LE
2:3	当前位置 mm×10 int16 LE
4	状态位，见下表
5	转向故障码
6	电机电流 I _q (A×10，有符号)，供上位机估算路面负载
7	序号回显

状态位（字节 4）

位	含义
0	已标定
1	已使能
2	到位
3	在负向（左）软限位
4	在正向（右）软限位
5	转向故障 （详见字节 5）
6	助力模式（当前固件未启用）
7	驱动侧已锁存故障 ：过流 / 栅极驱动器故障 / 欠压过压 / 电流采样不可信

⚠⚠ **位 5 和位 7 是两种不同的失效，处置也不同**：位 5 = 轴不相信自己的位置；位 7 = 桥关了，齿条根本不会动。没有位 7 的话，一次锁存的过流会让整帧看起来完全健康——故障位 0、故障码 0、位置照报（传感器是好的，关掉的是电机）。

❌ **本执行器不接收整车行驶广播帧，也不发送牵引状态帧。** Rev 0.9 的「亦可从整车驱动广播帧中提取转向字段」是错的：那些 ID 属于牵引驱动板，本节点发它们会在整车总线上和左牵引板撞车。⇒ 它只认一条指令帧：0x230。

⚠ 这条设计有代价：执行器**拿不到任何整车层面的信息**，「整车已经撤防」只能通过 0x230 字节 2 的 bit0 传进来。⇒ **整车撤防时，控制板必须把那一位放掉。**

8.2 UART

项	规格
速率	115200 8N1
用途	标定、整定、诊断、状态监视
功能	位置指令、三点 / 单基准标定、限位与增益配置、几何参数配置、原始读数诊断、故障查询与清除

9. 保护与安全功能

本执行器**无机械限位开关**，全部限位保证由以下多层机制共同承担：

层级	机制	动作
1	停止包络	接近限位 / 目标时按可停距离限速，保证停得住
2	减速带	距软限位 8 mm 内按距离限速
3	软限位	到限位仅允许朝中位运动，禁止继续外冲

层级	机制	动作
4	越程锁存	超出软限位 1.5 mm 锁存故障并停机；可经受限恢复通道（限速 10 mm/s、仅朝中位、有时限）退回
5	回绕 / 跳变检测	单周期位移超出物理可能值即判故障（用未滤波原始值，另设绝对上限）。△ 见 §3.2：上电那一刻它拦不住回绕，那一条靠机械余量
6	传感器故障检测	读数超出标定跨度带（去抖 3 次）判开路 / 短路
7	方向自检	指令下误差持续发散判为反馈或电机极性反接
8	标定几何校验	标定跨度与机械几何不符（>±35%）即判无效，可检出皮带打滑或标定不全

电机侧保护

保护	说明
快速过流	电流环内检测，消隐 + 去抖，即时封锁栅极
欠压 / 过压	去抖判定，门限随平台自动缩放
I²t 热折返	连续电流积分模型
母线电流软折返	超限时按比例压缩转矩而非跳闸
栅极驱动器故障	硬件故障信号即时封锁
转动看门狗	指令超时未刷新自动停机
失联保护	指令超时保持当前位置（不自动回中）
上电保护	上电不自动运动；未标定拒绝驱动；故障清除不等于重新使能
独立看门狗	MCU 挂死时由片内 IWDG 复位，复位原因可查询
最后一道关栅极	不经过应用层：直接写定时器的总使能位并把栅极驱动器的 ENABLE 拉低，两条互相独立的通路

⚠⚠ **这台执行器没有抱闸，也没有自锁机构。** 停机和断电之后齿条是自由的，拉杆上有力它会被推着走。整车若需要"断电保持转向角"，那是机械件的事。

10. 电气特性（典型，Ta = 25 °C）

参数	最小	典型	最大	单位	备注
母线输入电压	18	24 / 32	48	V	—
待机电流	—	TBD	—	mA	待测
额定负载母线电流	—	3.1~4.2	—	A	随母线电压
相电流采样量程	—	—	±82.5	A	0.0403 A/count
母线电压采样量程	—	—	69.3	V	分压比 21.0
PWM 载波频率	—	20	—	kHz	—
位置采样率	—	200	—	Hz	—
CAN 速率	—	1	1	Mbps	经典帧
工作温度	-20	—	+85	°C	受 MCU 限制，整机以实测为准
防护等级	—	TBD	—	—	取决于最终外壳方案

⚠ **注意事项** 1. 控制器数字 I/O 为 3.3 V，**非 5 V 容忍**；对外 5 V 信号须经分压或电平转换。2. 母线**无防反接保护**，接线务必确认极性。3. **首次装配或更换传动件后必须重新标定位置**，并复核软限位实际物理位置。4. 更换母线电压后**必须重跑电机自标定**——电流环增益随母线电压整定。

11. 机械尺寸与安装

11.1 壳体

壳体为**铝合金 6061 加工件，表面阳极氧化**，由本体、顶盖、底板、电机法兰板、封板组成。

 壳体本体尺寸图

壳体本体 (FXJ-HOUSING-BODY-001)

项	尺寸
型材	80 × 80 × 6 mm 铝方管
外形	80 × 80 × 72 mm (宽 × 深 × 高)
上下端面安装螺纹	4 × M3 深 10 ，孔距 72 × 72 mm (上下对称)
齿条通孔	Ø20.5 贯穿
转轴 / 轴承孔	Ø28
侧面固定螺纹	2 × M6 (孔距 20 mm) 、 2 × M4 贯穿
单件重量	约 94 g

 底板尺寸图

底板 (FXJ-HOUSING-BASE-001)

项	尺寸
外形	80 × 80 × 4 mm
固定孔	4 × Ø3.4 贯穿 (Ø6.6 × 90° 沉头) ，孔距 76 × 76 mm
中间螺纹	2 × M4 贯穿，孔距 35 mm
单件重量	约 25 g

其它壳体件：顶盖（含 M 版，区别为是否带 Ø10 通孔）、电机法兰板、封板，材料与表面处理同上。

项	值
齿条长度	200 mm
整机外形尺寸 (含电机与减速机)	TBD
整机重量	TBD

11.2 安装要点

- 壳体上下端面各有 4×M3 (孔距 72×72) ，可按安装朝向选择固定面；侧面 M6 供整机与底盘框架固定。
- 齿条两端经球头拉杆 (杆端关节轴承) 连接转向节；**装配后齿条中位应对应车轮回正位**。
- 若装车后方向盘或车轮不正，**应调整拉杆长度，不得修改位置标定**——改标定会使两侧行程不对称。
- 转轴顶端可选配方向盘 (人工接管用途，见 §12) 。

12. 预留与可选项

项	状态	说明
SPI 绝对角度接口	✅ 已启用，是在用的主传感器	⚠ Rev 0.9 把它写成"硬件已预留、可升级"，那是上一代的状态。见 §5
ABZ 增量接口	硬件已预留	可与 SPI 绝对角度融合，做高带宽角度 + 周期真值校验
温度检测	硬件已预留	控制器带 NTC 采样通道； 当前固件未启用 ，过温依赖 I ² t 模型
方向盘接管	机械已预留	转轴可接方向盘。 如需助力功能建议加装扭矩传感器 ——无扭矩传感器时只能由位置偏差反推驾驶员意图，无法与路面负载区分，故当前固件未启用助力
外壳与防护	TBD	当前为开放式框架

13. 标定与调试流程

出厂标定与验收由控制器内的一条命令完成：它跑十道门，每一道不合格的都会 输出**下一步该做什么**。上位机 (DlaAiStudio) 把这些原样显示出来。

步骤	内容	谁做
1	烧录固件	产线
2	⚠ 完整断电重启 (断开电源，确认掉电后再上电)	产线
3	填 减速比 (10 / 15 / 20，从减速箱铭牌读)；确认极对数为 2	★ 只能人填
4	齿条摆到机械中位并 卡住 → 转编码器皮带轮到量程中点 → 张紧同步带 → 跑位置标定	产线 + 控制器
5	此时转向机可完整装配 (装电机)	产线
6	电机自标定 (轴自由)：电流零点、霍尔映射、R / L、电流环增益	控制器
7	存盘	控制器
8	复核十道门	控制器
9	全部通过即放行	产线

十道门：固件与限值、母线电压、栅极驱动器配置、编码器帧质量、霍尔、电机自标定、**皮带相位**、齿条标定、**回绕余量**、方向自检。

⚠ **第 4 步先记中位、第 6 步再做电机自标定，顺序不能反。** 位置标定存的是「编码器计数 ↔ 毫米」这个映射，电机自标定之后齿条被挪到哪里都不改变这个映射；反过来做的话，电机会把齿条从机械中位挪走，而标定记下的是当时的位置 —— **标出来的中位不是机械中位，而它看起来完全正常。**

⚠ 第 4 步电机还没装、霍尔线没接，所以那一轮的总判定一定不是通过，这是正常的：**那一步只看齿条标定和回绕余量两项。**

⚠ **第 3 步的减速比只能靠人填：**三种速比用的是完全相同的电机本体，控制器没有任何办法测出来。填错了不影响定位，影响的是速度。

⚠ **第 2 步不是客套：**烧完固件不完整断电，编码器那一道门不作数。

⚠ **更换传动件、更换母线电压、或升级固件之后，重跑一遍本流程。**

全部标定参数 (位置标定、机械几何、控制增益、限位配置) 存于控制器 Flash，带 CRC 校验与版本管理，掉电保持。

14. 版本信息

版本	日期	说明
Rev. 1.0	2026-09-08	按 2026-09-08 的台架实测与复核订正，见下表。本版新增文档版本号：Rev 0.9 之前正文里没有版本号，说不清“客户手上那份是哪一版”。
Rev. 0.9	2026-07-26	工程样机首版。机械传动链、位置反馈、控制性能、保护功能与接口定义完成；控制性能经台架实测（条件见 §7）。齿条推力、整机尺寸重量、防护等级、待机电流待实测。

Rev 1.0 改了什么

#	章节	Rev 0.9 写的	现在	出处
1	§4.1	极对数 4	2	厂家规格书那行是 Poles 4，4 极 = 2 对极；台架三次双向实测反推 2.13 / 2.03 / 2.06
2	§3.1	转轴 → 编码器 同步带 2:1	24/14 = 1.7143	皮带轮换过（24 齿 / 14 齿）
3	§3.2	编码器可测范围 ±70.7 mm	±60.6 mm	跟着第 2 条变
4	§3.2、封面	机械行程 约 ±60 mm (TBD)	±55 mm (实测)	2026-09-08 台架，两端手推读已标定的编码器：-54.95 / +54.50 mm
5	§5、§12	SPI 接口“硬件已预留...可升级”	已启用，是在用的主传感器	2026-08 的传感器改版
6	§9	越程锁存 = 软限位 + 3 mm	+1.5 mm	固件常量
7	§3.3、§4.1	按电压推导的速度（124 / 166 mm/s）	全部作废	那些换算都经过极对数，而极对数当时取的是 4
8	§3.3	单一速比 20	10 / 15 / 20 三种，按订单	同一台电机本体配三种减速箱
9	§7	制动减速度 94 mm/s²，包络 70 mm/s²	包络 250 mm/s²，滑行实测约 260	固件默认值 + 台架实测
10	§8.1	“亦可从整车驱动广播帧提取转向字段”	删除：本执行器不收整车广播帧	那些 ID 属于牵引板，本节点发它们会撞车
11	§8.1	状态位 6 项	补齐 8 位，含驱动侧故障位	没有它，一次锁存的过流会让整帧看起来完全健康
12	§13	8 步人工流程	9 步，围绕控制器内的十道出厂门组织	出厂固件 0.1.0

⚠ 仍然 TBD 的：齿条推力（实测）、位置噪声（换成数字口之后没重新量）、主动制动下的减速度、整机尺寸与重量、防护等级、待机电流、§7 整张控制性能表。