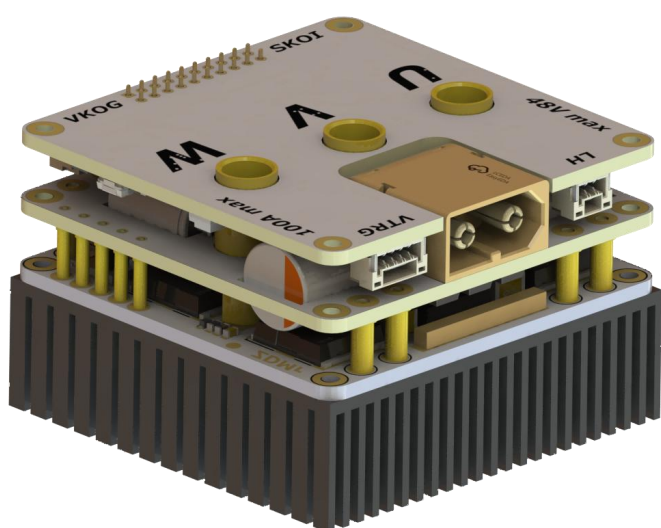




ZMDr 使用指南



武汉大学智能机器人研究室
武汉大学机器人队

概述

ZMDr (ZJZ Motor Driver) , 由作者 ZJZ 完成软硬件开发, 武汉大学机器人智能研究室 (A9307) 提供支持, 由武汉大学机器人队开展实验测试。该无刷电机驱动器开发的目的在于降低 FOC 硬件的成本, 实现国产替代, 同时, 在软件上尽量降低用户使用门槛, 推进 FOC 电机矢量控制技术的应用。

目前的 ZMDr 通用型号包含小功率 (30A) 和大功率 (100A) 版本, 适应不同场合的需求, 接受 PCB 定制。驱动器可以实现对合适功率的无刷电机电流 (扭矩)、速度、位置控制, 包含无编码器速度控制、轨迹规划算法。

ZMDr 正处于开发和更新的状态, 将会根据实验测试和用户反馈不断改进。

声明

在使用之前, 请仔细阅读本声明, 请严格遵守使用指南。驱动器为强电设备, 作者对认为过激参数不负责任。

ZMDr 开源软件原理图, 闭源 PCB、软件、上位机。 **严禁任何作者未允的商用行为**。软件仅授权于武汉大学机器人队。

致谢

ZMDr 开发从零做起, 起始于 2020 年, 开发过程极为艰难, 作者对开发过程中提供过帮助的朋友表示衷心的感谢:

FOC 启蒙参考: ODrive, VESC

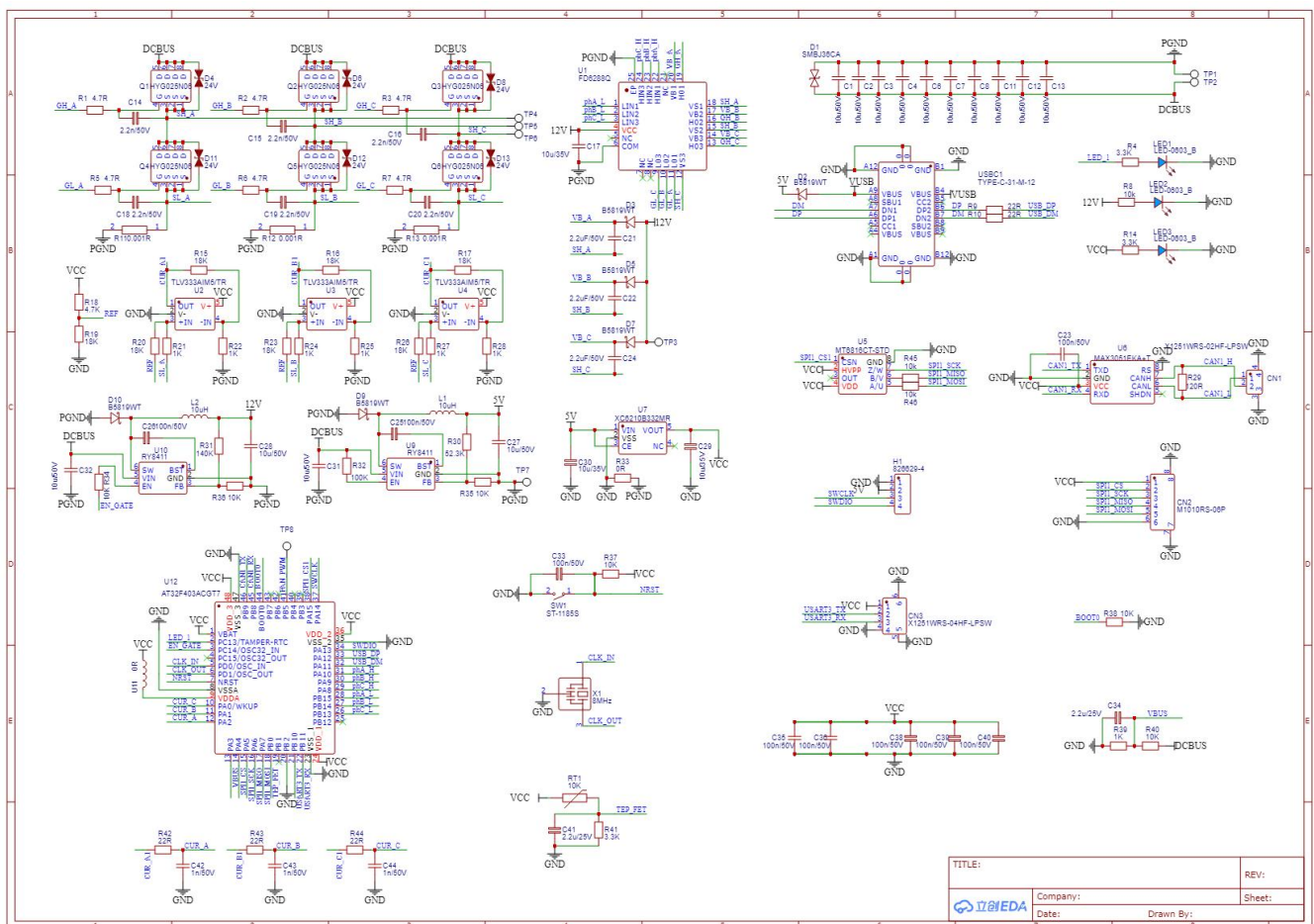
硬件开发支持: 矛盾聚合体、滚筒洗衣机

软件开发支持: Turing、AMO、Jdhfusk

1 ZMDr 硬件

1、开源原理图

原理图开源给用户参考，主控制器采用国产 AT32F403ACGT7，栅极驱动器采用 FD6288Q，TX4137 电源方案（图示为低压同步 RY 8411 的通用电路），使用低噪声运算放大器（721 系列）做电流采样，HYG025N06 高压 MOS 管。

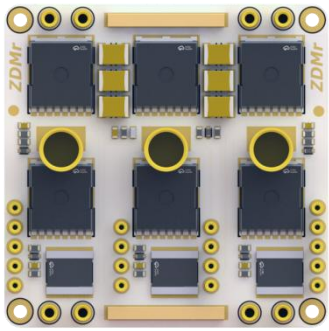
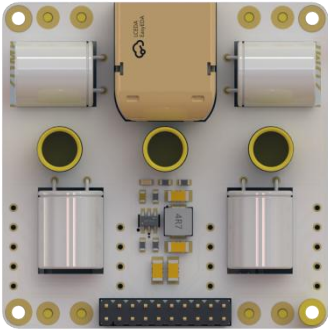
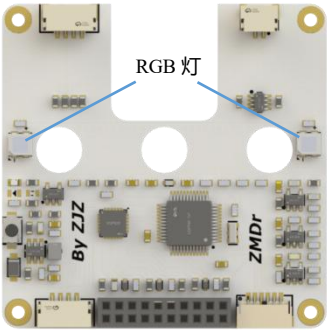
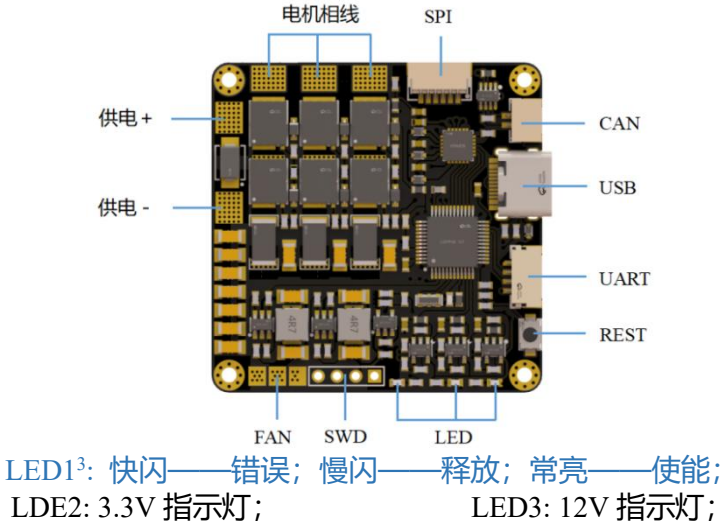


2、硬件接口电路

ZMDr 通信接口包含 USB 虚拟串口、CAN、串口、SPI 编码器接口。虚拟串口需要用于与上位机通信，进行调试和校准。CAN 通信为嵌入式运用的主要通信方式¹，另外提供 UART 接口²，SPI 连接磁

¹ ZMDr CAN 通信具备最高的优先级，若运用于轨迹跟踪等通信准确性要求较高的场合，请采用 CAN 通信。

编码器，ZMDr 可以板载 MT6816 磁编码器。



接口定义

名称	线序名称
UART VTRG	VCC TX RX GND
UART(_P) ⁴ VTRG	VCC TX(DP) ⁵ RX(DM) GND
SPI VSKOIG	VCC CS SCK MISO MOSI GND
SPI(_P) SKOI	(VCC) CS SCK MISO MOSI (GND)
SWD G5KO	GND 5V SWK SWDIO
SWD(_P) VKOG	VCC SWK SWDIO GND
FAN 风扇 ⁶	GNC 12V FAN_PWM

2 当前 UART 通信未启用，用户不能使用。
3 高功率版本无 LED1，有 RGB，呼吸表示正常，停止呼吸表示错误。
4 _P 表示高功率版本对应的接口。
5 高功率版本 USB 和串口通过跳线电阻复用。
6 高功率版本无风扇接口。

2 ZMDr 软件

1、软件接口参数

ZMDr 接口参数包含了电机的**用户参数**、**校准参数**、**状态参数**。

用户参数需要用户给定，包含电机的特性，校准的阈值、控制的 PID、控制阈值等。状态参数是驱动器通过自生校准获取的参数，不需要给定。状态参数反映电机的运行参数，方便用户调试，其不会被保存到 FLASH，包含用户设置的目标、实际运行的值等。

参数定义⁷⁸

	名称	解释	范围	UART ID	CAN ID
用户参数	pol	电机极对数	[2, 42]	pol	0x01
	ses_en	无感标志位	[0, 1](int)	ses	0x03
	enl_en	编码器标志位	[0, 2](int)	enl	0x05
	can_id	CAN id	[0, 7](int)	cid	0x07
	can_bit	CAN 心跳信息	73 77 79 85 87	cbt	0x 5F
	start_en	上电进入状态	[0, 3](int)	ste	0x09
	i_cl	电机校准电流	[5, i_limit]	icl	0x0B
	a_cl	KV 校准加速度	[0.1, 2]	acl	0x0D
	i_ses	无感强托电流	[0.1, 0.5*i_limit]	ies	0x0F
	p_p	位置环 P	[0.01, 10]	p_p	0x11
	p_i	位置环 I	[0, 10]	p_i	0x13
	v_p	速度环 P	[0.1, 10]	v_p	0x15
	v_i	速度环 I	[0, 10]	v_i	0x17
	i_limit	最大电流限制	[0, 40 120] ⁹	ili	0x19
	v_limit	最大的转速限制	[0, 10 ⁶]	vli	0x1B
	a_trp_up	运行加速度	[0, 1000]	acu	0x1D

7 单位：电阻 (mR)，电感 (uH)，电流 (A)，速度 (转/s)，位置 (圈)。

8 读写：蓝色参数仅读取，禁止写入，黑色参数可读可写。

9 标准版为 40A，高功率版为 120A，此值为峰值电流，最大持续电流依散热条件而定。

	a_trp_down	运行减速度	[0, 1000]	acd	0x1F
	p_vel_end	PVT 模式末速度	[0, v_limit]	pvd	0x21
	vel_f	速度滤波系数	[0.001, 1]	vef	0x23
	filter_v	滤波截速	[0, v_limit]	fvk	0x25
	flk_k	磁链增益	[0.1, 10]	flk	0x27
校准参数	rsi	电机电阻	[10, 20000]	rsi	0x29
	ind	电机电感	[10, 3000]	ind	0x2B
	kv	电机 KV	[10, 10 ⁴]	k_v	0x2D
	enc_dir	编码器方向	1, -1	dir	0x2F
	enc_of	编码器偏移量	[-2*PI, -2*PI]	eof	0x31
	cal_ok	校准状态	[0, 4](int)	cla	0x33
状态参数	i_set	设置电流 (扭矩)	[-i_limit, i_limit]	iin	0x35
	v_in	设定速度	[-v_limit, v_limit]	vin	0x37
	p_in	设定位置	[-∞, +∞]	pin	0x39
	ia	A 相电流	[-i_lim, i_lim]	i_a	0x3B
	ib	B 相电流	[-i_lim, i_lim]	i_b	0x3D
	ic	C 相电流	[-i_lim, i_lim]	i_c	0x3F
	id	直轴电流	[-0, +0]	i_d	0x41
	iq	交轴电流	[0, i_limit]	i_q	0x43
	vd	角度超前量	[0, 0.5*PI]	v_d	0x45
	vq	输出占空比	[0, 4096](int)	v_q	0x47
	i_max	当前 id+iq	[0, i_limit]	i_m	0x49
	enc_raw	编码器值	[0, CPR](int) ¹⁰	ecr	0x4B
	vel_usr	当前速度	[0, v_limit]	vel	0x4D
	p_usr	当前位置	[-∞, +∞]	pos	0x4F
	flk_est	估计磁链	[0.5*flk, 1.5*flk] ¹¹	flk	0x51
	vbus	供电电压	[0, 25.2]	vbs	0x53
	mode	当前模式	[0, 12](int)	mod	0x55
	err	当前错误	[0, 13](int)	err	0x57

参数说明:

¹⁰ CPR 为编码器的分辨率, 例如 14 位编码器位 16384。

¹¹ flk 为根据 KV 计算的大致内部参数。

pol: 电机的极对数，为电机的磁铁个数除以 2，填写错误编码器校准无法通过。

ses_en、enl_en: 无感、编码器标志位，两个标志位相互配合实现不同的控制模式，无感相较于有感可以得到更加平滑的速度控制。

ses \ enl	0	1	2
0	非法模式	纯有感模式	有感编码器补偿模式
1	纯无感模式	有感启动无感模式	有感补偿启动无感模式

start_en: 启动自动进入的模式，如需要上电自动进入位置模式，则令 start_en=3.设置该参数**务必完成校准**，更换驱动电机时务必重置此值。否则可能引起参数不正确导致电机跑飞。

i_cl: 电机电阻、电感校准时的电流、尽量取额定电流的 50%。

a_cl: KV 校准为电机加速旋转的过程，该值越大加速越快相应校准的精度会有所降低，校准时间缩短。

i_ses: 无感启动时的电流，启动过程为强制拖动电机达到一定速度后进入无感观测器，该值过小会导致无法启动，过大会导致目标转速过大而失速。

p_p, p_i, v_p, v_i: 速度环、位置环的 PI 参数，电流环参数通过校准获得，无需用户给定，参照表格范围给定。其中位置环 I 应较小，用于消除位置锁定的误差，在点对点运行时较大的 I 会导致严重的过冲，轨迹跟踪下不会。

i_limit, v_limit: 电机的电流、速度限制，电流限制最好不超过电机的额定电流，短时工况可以适当提高，速度限制最好不超过电

机所能达到的最大转速。

a_trp_up, a_trp_down, p_vel_end: 梯形轨迹下电机运行的加速度和减速度，位置模式默认走梯形轨迹。值得注意的是，较大的减速度会回收能量，如何电源不具备充电能力（开关电源）容易导致供电电压急剧升高，**损坏电源或者驱动器**。可以通过 a_trp_up=0 开启 PVT 轨迹，此时 a_trp_down 表示时间间隔，配合 p_vel_end（到达目标点的速度）实现 PVT 规划。

vel_f: 速度滤波系数，速度为编码器的值微分，其含有较大的噪声，降低滤波系数可以获得更平滑的速度，同时更容易产生控制上的震荡。

filter_v: 滤波截速，位置和电流的滤波强度和速度呈线性关系，最小为 0.1，最大为 1，当速度达到 filter_v 时候，则不进行滤波。同时该值在有感、**无感混合模式下作为切换转速**，当速度低于 filter_v 时为有感，当速度大于 filter_v 的两倍时切换到无感。

flk_k: 磁链观测器的参数，其越大观测其收敛越快同时越容易产生观测震荡，加减速较大时，适当增大该值。

rsi, ind, kv, enc_dir, enc_of, cal_ok: 校准参数，包括电流环参数、编码器对齐和磁链观测参数，这些参数直接决定电机的控制效果。其中 cal_ok 表示当前的校准状态，对应模式 1 到 3 的不同合法性。

cal_ok 值	含义
0	未进行任何校准，进入 1 到 3 模式非法

1	仅校准编码器偏移，仅能在 ses=0 和 enl=1 的条件下进入模式 1 到 3
2	仅校准 KV，仅能在 ses=1 和 enl=0 的条件下进入模式 2（无感速度模式）
3	已校准编码器偏移和补偿值，能在 ses=0 的条件下进入模式 1 到 3
4	校准了编码器偏移和 KV，enl=2 非法，其余状态合法
5	完成所有校准，所有状态合法

i_set, v_in, p_in：电流环、速度环、位置环的输入，分别在电流模式、速度模式、位置模式下有效。

ia, ib, ic, id, iq, i_max：ia, ib, ic 为电机三相的实时电流，id 为直轴电流，应该接近于 0，iq 为交轴电流，反映了电机输出力的大小。i_max 为 id 和 iq 的矢量合成。

vd, vq：vd 为角度超前量速度越快其越大，但是维持在一个较小值，**vq 反映了当前输出电压的大小**，当 vq 等于 4096 时，输出的相间最大电压约等于供电电压，达到满功率运行状态。

enc_raw：对于绝对编码器，其值是 0 到编码器分辨率的整数，为编码器的原始数据。

vel_usr, p_usr：电机运行的实际转速和位置，其中 **p_usr 可以用户修改**，即设定当前位置为用户所需位置，达到修改位置 0 点的目的，上电时刻，其为 0。

flk_est：磁链的估计值，启用无感后有效。当无感观测器收敛时，磁链估计会收敛到某一值。

vbus：供电电压，标准版允许 16V 到 30V 的供电范围，大功率

版本允许 16V 到 50V 的供电范围，超出范围将报错。

mode, err: 当前模式和错误，具体如下表所示。**模式 4 为强行拖动模式，用户尽量不调用。**模式 6、7、8 为驱动器根据编码器标志位和无感标志位自动选择，用户只需要进入模式 5 即可完成一键校准。模式 9 将参数保存到 FLASH，模式 10 将参数恢复默认值，模式 12 在位置模式下有效，可以迅速锁定当前位置，防止机器人撞击。

模式		错误	
0	失能	0	无错误
1	电流模式	1	低电压
2	速度模式	2	过电压
3	位置模式	3	电流不稳
4	测试模式	4	过电流
5	电阻电感校准	5	超速
6	编码器线性补偿	6	电阻过大
7	编码器偏移校准	7	电感过大
8	VK 校准	8	编码器错误
9	保存配置	9	极对数不匹配
10	擦除配置	10	KV 校准失败
11	清除错误	11	模式不合法
12	刹车	12	参数保存错误
		13	高温

2、USB 协议

USB 协议采用 ASCII 通信，格式为

读写段+ID 段+数据段+结束符

读写段含读和写两种字符指令，分别为 “r_” (read) 和 “w_” (write) ；

ID 段为对应读写参数的 UART ID；

数据段为对应读写参数的值，前加 “=” ，读指令无数据段；

结束符为 “\r\n” 。

例如写极对数为 14, 则发送 “w_pol=14\r\n” , 驱动器反馈 “pol=14” ,

读当前电压，则发送 “r_vbs\r\n” , 驱动器反馈 “24.33621” 。

所有数据应遵循参数表格所给出的参数范围，禁止写入的数据吸入指令无效。如果参数超过范围或者指令格式不正确，将会收到错误指令的反馈，Not read or write! Err command! Err parameter! 等错误提示。

3、CAN 协议

CAN 协议采用指令 ID 与节点 ID 复合模式，格式为

帧 ID: ID 节点 ID<<8 || 指令 ID 帧数据: 32 位 float

节点 ID 可取 0 到 7, 指令 ID 为奇数，对应写指令，相应的 ID 减 1 (偶数) 则对应读指令，读指令不需要跟数据段 (数据段无效) 。
协议数据段均为 float 格式。

数据同样要满足 usb 协议的数据合法性要求，否则，驱动器将反馈指令 id 为 0x00，数据为-1 的错误提示。

例如，驱动器的节点 id 为 4, 写极对数 14, 则 can 发送如下

CAN ID 段: 0x401 CAN 数据段: 1(float)

读当前电压，则 can 发送如下：

CAN ID 段：0x452

CAN 数据段：0 (无)

此时可以得到驱动器反馈：

CAN ID 段：0x452

CAN 数据段：24.33621(float)

3 ZMDr 上位机

上位机为用户调试电机提供跟简单的交互方式, 可以方便完成对驱动器的参数给定, 校准, 状态参数的监测。上位机浮点协议兼容 Vofa, 其具备更强大的数据存储功能。如果需要长时间高速数据监测, 可以采用 vofa, [ZMDr 上位机的数据存储深度有限](#)。

驱动器可以同时以约 20khz 的速度打印三个数据, 控制可是为

`"w_ (通道) = (CAN ID) \r\n"`

例如, 通道 a 打印速度,

`"w_pwa=77\r\n"`

三个通道分别为 pwa、pwb、pwc, 77 为 0x4D (vel_usr) 的十进制格式。值得注意的是, 在开启高速打印的条件下, 读取其他数据无效, 关闭通道的方式为令通道 can id 为 0。

上位机界面如下图所示:



1 区：下拉选择启动器设备，设备连接后会有匹配检测，连接到错误设备将会自动断开。连接成功后会自动更新当前的模式和错误新信息。

2 区：用户参数区，所有用户需要给定的参数，用户根据自己需求调节，可以通过三角按钮单独发送该数据。

3 区：功能区，可以设置当前模式，批量操作用户参数。右侧显示当前的模式和错误，可以查询无需示波的状态参数。在连接设备后，强烈建议一键读取参数后操作，防止尚未机默认参数把驱动器参数覆盖。

4 区：绘图区，包含三个通道，可以下拉选择对应示波的参数，单击三角按钮开始示波，再次单击停止。同时可以控制示波频率，100Hz 可以实时更新模式和错误，高于 100Hz 时不允许请求数据，从而无法及时更新当前状态。频率越高数据储存的时间越短，越能翻译细微的参数变化。

5 区：动作区，在进入闭环控制后，可以拖动滑条设置目标参数，也可以直接在输入框输入后单击按钮发送。滑条的最大最小值可以用户更改。