



GMaster
XJTLU × UoL

Technical Review

(Dual-Barreled Infantry)

技术报告 (双枪管步兵)

Liverbot GMaster

at Embedded Artificial Intelligence Hardware University-Enterprises Joint Key Laboratory

Email: TeamGMaster@xjtlu.edu.cn

Address: 8, Chongwen Road, SIP, Suzhou

IR724, International Research Building, South Campus, Xi'an Jiaotong-Liverpool University

目录

1.	绪论.....	4
a)	机器人综述.....	4
b)	研发背景.....	4
2.	主要技术参数.....	6
3.	机械结构设计.....	7
a)	底盘设计.....	7
b)	云台设计.....	8
i.	发射机构选型.....	8
ii.	发射原理.....	9
iii.	发射机构.....	11
iv.	弹舱.....	12
v.	云台架.....	13
vi.	底盘配合.....	14
4.	硬件设计.....	14
a)	超级电容.....	14
i.	超级电容组.....	15
ii.	超级电容控制模块.....	16
b)	导电滑环分线板.....	18
i.	滑环分线板功能与设计思路.....	18
ii.	反思与讨论.....	19
c)	C型开发板扩展板.....	20
i.	实现与成品.....	20
ii.	结果与讨论.....	21
5.	软件设计.....	21
a)	嵌入式控制.....	21

i.	云台控制.....	21
ii.	辅助瞄准系统设计 (下位机)	24
iii.	超级电容控制.....	27
b)	视觉算法	28
i.	综述	28
ii.	视觉方面.....	29
iii.	通讯方面.....	32
c)	创新功能	34
i.	黑匣子.....	34
ii.	丢轮控制.....	34
d)	人机交互设计	35
i.	操作界面 UI	35
ii.	自动性能调节.....	36
iii.	自动切枪.....	36
6.	系统开发与调试	37
7.	参考文献	39
8.	附录.....	40
a)	超级电容模组控制部分原理图	40
b)	超级电容模组功率和电源部分原理图	41
c)	导电滑环分线板电路原理图.....	42
d)	C 型开发板扩展板电路原理图	43

1. 绪论

a) 机器人综述

西交利物浦大学&利物浦大学联队的 5 号步兵机器人 (即双枪管步兵) 是 RoboMaster2021 国际邀请赛综合表现最为亮眼的机器人之一。该步兵保留普通步兵车体结构坚固可靠、弹道稳定 Yaw 轴惯性小和 Pitch 轴响应快等优点, 同时利用独特的双枪管发射机构高效输出。在联队参与的赛事中该机器人从未阵亡, 在绝大多数对局中更是占全队一半以上伤害量, 局均对建筑伤害均超过 1000。优秀的操作手感和高效率的推塔表现使其成为国际邀请赛中步兵佼佼者。

双枪管步兵优异的表现是联队本赛季胜利的关键所在。凭借性能优良的步兵进行正面对抗是本次比赛战术核心, 而能力拔群的双枪管步兵机器人凭借正面输出优势和稳定的机械结构设计更是锦上添花。另一方面, 受英雄机器人性能表现限制, 联队主要采用阵地战和步兵推塔战略。双枪管步兵机器人较高的热量上限和弹速令其在对前哨战的抢血争夺中占据优势, 加速胜利步伐。遗憾的是, 由于悬挂和车体配重方面未合理设计导致该机器人暂时无法顺利飞坡。同时, 由于设计阶段配合不紧密, 未能合理安排机器人内部空间和线路, 造成云台供电紧张、电路复杂且不稳定、无法使用对信号稳定性要求高的工业摄像头等问题。相信在下个赛季联队能够改进设计流程, 各组别间紧密协作、设计出性能更加优异的机器人, 再创佳绩。

b) 研发背景

步兵机器人是 RoboMaster 机甲大师比赛中最古老、基础的单位。步兵移动和射击能力的优劣直接关系队伍发挥的上下限。对于团队而言, 强有力的步兵机器人是队伍复兴的关键。步兵在比赛中承担如下三个主要任务:

- 击杀敌方有生力量, 尤其是敌方地面单位;
- 辅助英雄机器人, 为英雄对建筑输出创造条件;
- 激活能量机关, 产生团队增益。

与往年规则对比, RMUC2021 的规则和实战情况有如下特征:

- 17mm 机动枪管。

机动枪管既可以赋予无人机从空中制敌的能力, 也可以让英雄也拥有 17mm 发射机构, 还可以让其中一台步兵拥有两个热量单

独计算的 17mm 发射机构。不过，无人机受赛制限制发挥空间有限，且无人机精准射击对队伍的技术水平提出了更高要求。同时英雄有着自重大不灵活、大装甲板更易被攻击等缺点，拥有额外的 17mm 发射机构并不能带来多少优势。双枪管步兵的研发调试投入相对较小，实战效果更佳。

- 发射机构类型。

本赛季规则新增了性能体系以实现不同的战术效果。在实战中，发射机构系统有三个显著特点：一是无论发射机构种类，1 级机器人的火力均受到限制，与机器人实际性能上限差距巨大；二是高等级属性远超低等级属性，尤其是 1 级与 2 级之间的差距；三是在单一枪口前提下，射击频率和弹丸飞行速度难以同时达到理想水平，冷却优先和爆发优先弹丸速度始终慢于弹速优先，而即使是高等级的弹速优先也会受限于射频较低的缺陷。选择弹速优先的双枪管步兵能够同时避免射频低和弹速慢的问题。

- 经验系统。

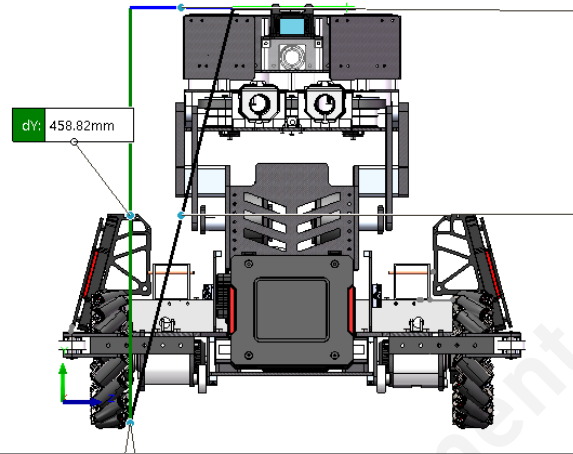
经验主要通过击杀敌方单位和非击杀状态自然增长获得。单场比赛首次击杀带来的额外经验加成能让 1 级步兵在短时间内升级为 3 级步兵。若无击杀，直至比赛三分钟后步兵会升级为 2 级步兵。这意味着 1 级步兵初始性能的强弱对于局势影响巨大。双枪管步兵由于额外机动枪管带来的火力优势有利于占据前期局势上风。

从队伍的技术实力与资源考虑，双枪管步兵是我们的不二之选。在当前的规则下，双枪管步兵有着巨大的优势，能够极大提升作战能力和胜率。但是，要在短时间内制造出先前鲜有涉猎的新机型，其设计方案的选择、各技术组间的协作以及功能测试与完善至关重要。

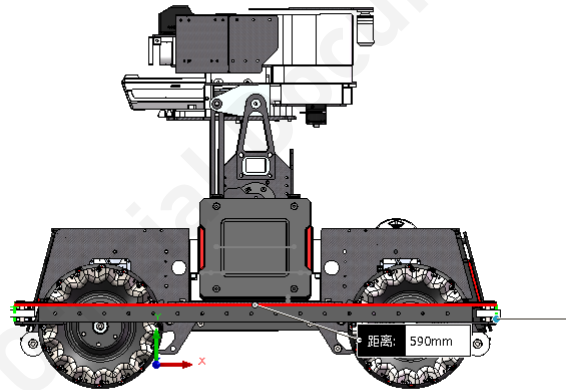
2. 主要技术参数

视图

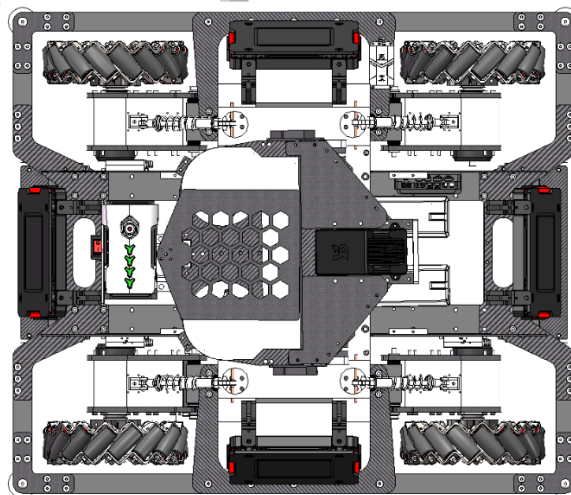
正视图



侧视图



俯视图



技术指标	
尺寸	长 590mm / 宽 505mm / 高 459mm
重量	设计要求 17kg 内 (不包含裁判系统)
	重心高度 ~210mm
移动	最大前进速度 3.9m/s
	最大爬升坡度 20°
云台	Pitch 轴俯仰角 -25°~30°
射击	最大射速 > 27m/s
	命中率 5m 处小装甲板命中率 98%
供弹	弹舱容量 275 ± 25
	射击频率 20Hz
视觉辅助	高帧率识别 / 运动预测 / 重力补偿
保护框架	能同时承受多辆步兵最大速度撞击并保证机器人完整
外壳	对整车的电路和线材进行有效保护

3. 机械结构设计

a) 底盘设计

RoboMaster 赛场中最常见的悬挂主要为横臂式和纵臂式。横臂式悬挂在机器人前后运动时受到麦克纳姆轮的分力容易出现较大的晃动，不利于行进间射击。同样的，纵臂式悬挂在机器人左右平移时也会出现较大晃动。结合 2021 赛季场地在哨兵轨道与高地之间存在大面积凹凸不平地面的情况，我们在经过多次实测后迭代出了一种结构简单，可靠性高的自适应悬挂系统。该悬挂系统有如下优势：

- 在机器人启动和小陀螺运动时均不会产生较大形变；
- 为下台阶等有较高高度差的工况提供有效避震；
- 可以过滤部分细碎震动，提高射击精度。

该自适应悬挂通过上部金属负压避震器与下部拉簧的配合实现。其中，上部避震器采用了溪地创新全金属 110mm 孔距避震器，经测量，该避震可压

缩量为 30mm ，可调节量为 20mm ，弹性系数为 3.9N/m 。经过 RMUL 比赛实测，该避震器在独立使用时可满足大部分平坦地面工况。考虑到 RMUC 场地更加复杂，在 RMUL 比赛过后我们重新设计了轮组，并在一组纵向轮组中间挂载了两组拉簧以满足需求。其中一组为单根长度 60mm ，线径 0.6mm ，弹性系数为 3.8N/mm 的 304 不锈钢拉簧，另一组为两根单根长度 20mm ，线径 0.4mm ，弹性系数为 3.8N/mm 的 304 不锈钢拉簧，如图 1 所示

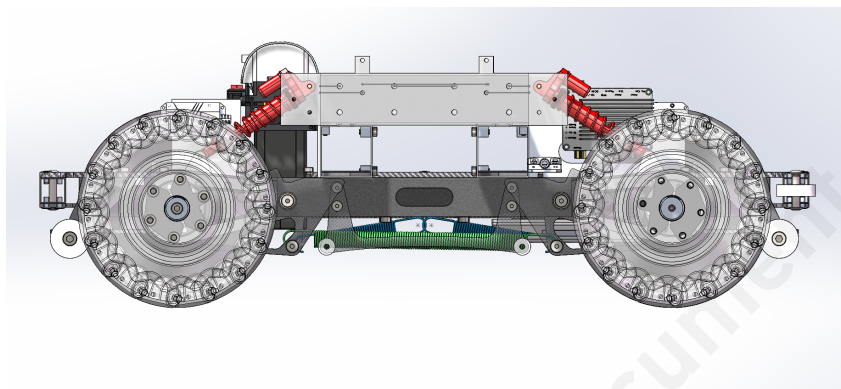


图 1 悬挂系统示意图

双根串联式拉簧主要负责在轮组发生小幅度形变提供防止轮组形变的力，而单根的高拉力拉簧主要应对轮组产生大幅度形变时的工况，可快速将轮组复位。同时，两组下拉簧共同提升了纵向轮组的系统刚性，更好地适应上下坡等工况。

b) 云台设计

i. 发射机构选型

双枪管步兵的设计核心难点之一在于如何自由使用两个枪口，因此发射机构的设计至关重要。根据开源资料与和其他队伍的交流总结，双枪管步兵云台的设计方案主要区别于摩擦轮数量的多少。较常见的方案有使用双摩擦轮、三摩擦轮和四摩擦轮三种：

- 双摩擦轮构型使用类似转盘的装置，让两个测速模块在摩擦机构前来回切换（以福建工程学院为例：旋转枪口双摩擦轮构型）；
- 三摩擦轮构型将摩擦轮水平排布，两两之间设置弹路，通过中间摩擦轮的旋转方向切换弹丸的发射弹路；
- 四摩擦轮构型则是将传统的发射机构水平或竖直叠放（以东南大学为例：纵向四摩擦轮固定双枪管构型）。

下表从多个维度对比各构型的理论属性：

方案	双摩擦轮	三摩擦轮	四摩擦轮
稳定性	较低	较高	较高
火力	中等	中等	较高
切换时长	较长	中等	无
设计难度	中等	中等	较高
云台重量	较轻	中等	较重
射击精度	中等	较高	中等
操作水平要求	较低	中等	较高

不难发现，尽管双摩擦轮构型对操作水平的要求较低，同时机械结构相对简单，云台尺寸和重量较常规构型并未增加许多。但是，该构型有着枪管切换耗时长、不能同时发射等问题。同时，该构型对枪管装配精度要求较高，否则容易出现弹丸撞击枪口的情况；四摩擦轮构型有着高稳定、高火力输出的特点，但是过重的云台和复杂的结构无疑增加机械设计和嵌入式控制难度。三摩擦轮构型很好的平衡了其余两种构型的优缺点。通过切换摩擦轮转向而切换发射弹路的设计较为稳定、切换时间短。由于少用一个摩擦轮，云台体积和重量均优于四摩擦轮构型。因此，我们最终采用三摩擦轮构型。

ii. 发射原理

双枪管步兵的发射机构如图 2 所示。

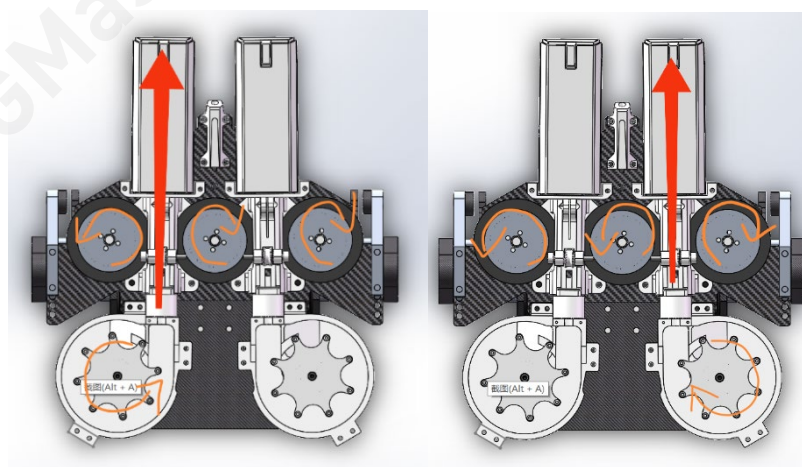


图 2 三摩擦轮构型发射机构剖面图

以左侧枪管先发射为例：左、中摩擦轮和左拨弹轮启动，左枪管进入发射状态；当枪管热量达到上限或操作手主动切换时，左摩擦轮和拨弹轮停止，中摩擦轮换向，右摩擦轮和右拨弹轮启动，发射枪管切换为右枪管。

根据测试，拆除减速箱并且携带包胶轮的 3508 电机由 $+3800\text{ rpm}$ （弹丸初速 15m/s ）的转速反转至 -3800 rpm 的时间小于 300 ms ，由 $+9400\text{ rpm}$ （弹丸初速 27m/s ）反转至 -9400 rpm 的时间小于 600 ms 。这意味着此种发射机构能够在极短时间内完成枪口切换，在比赛中不会因为切换枪口的延迟而影响操作。

由于发射机构由并排的三个摩擦轮组成，且摩擦轮电机选用的是拆除减速箱的 3508 电机，导致两个枪口间间距较大。根据测量，这个间距约为 74 mm ，而小装甲板的宽度是 135 mm ，如图 3 所示。因此，若两个枪管平行放置，切换枪口将导致弹丸落点变化大，从而降低命中率，也不利于辅助瞄准的部署。

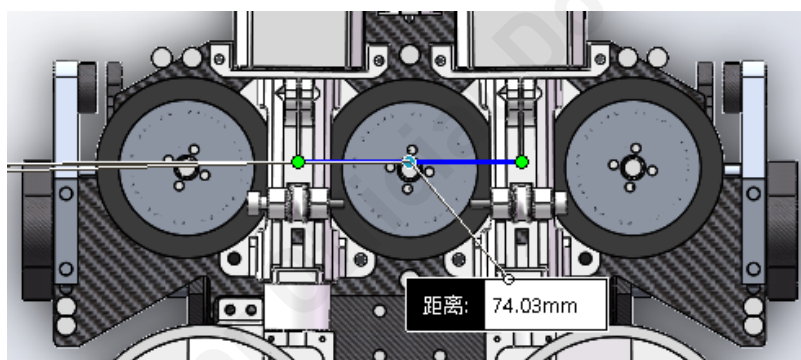


图 3 发射机构摩擦轮示意图

因此，两个枪管呈一定夹角放置。通过对往期比赛情况的分析，步兵的有效交战距离在 3 m 左右。因此，我们将两个枪管的延长线交点设置于 4.5 m 处，与云台中线的夹角约为 1° ，如图 4 所示。

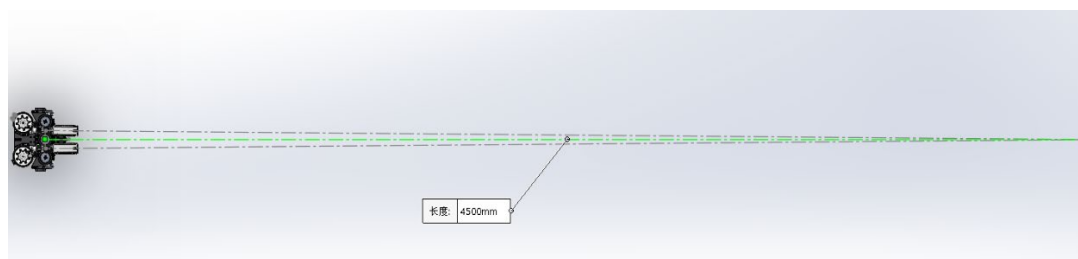


图 4 发射机构枪管角度示意图

此时弹丸落点与普通步兵类似，可以直接依照云台中线瞄准，无需复杂的补偿计算，便于辅助瞄准算法设计并提高命中率。

iii. 发射机构

步兵发射机构借鉴 [北京理工大学 2019 小弹丸发射机构^{\[1\]}](#) 开源设计，在此基础上进行改进优化。实践证明，该发射机构稳定性高，性能优异，强烈推荐其他队伍参考学习。该机构结构如图 5 所示。通过两个弧形轴承控制弹丸接触摩擦轮的位置，令每发弹丸在接触摩擦轮时位置相同。同时，配合 3508 电机的闭环控制和无炮管设计的改进，10 m 远处小装甲板命中率接近 100%。

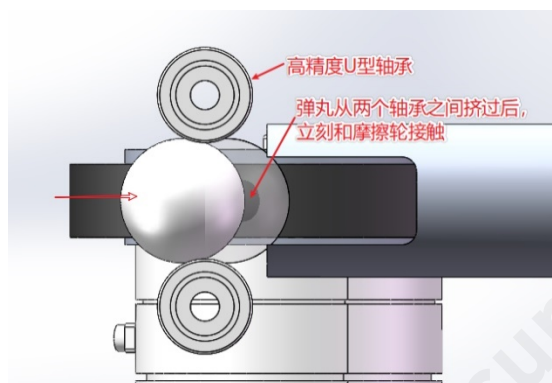


图 5 北京理工大学发射机构开源方案原理示意图

尽管该设计可以大幅度提高射击精度，但是仍有改进之处。可能是与开源方案中下供弹设计不同的缘故，双枪管步兵的上供弹设计在配合该发射机构时出现严重的溜弹问题。机器人加速运动或者上下坡时的震动易使弹丸因惯性被挤出轴承，导致弹丸在不应该发射的时候接触摩擦轮而射出。初步尝试固死弧形轴承以增加阻力的效果并不明显。因此，我们修改了该发射机构，在弧形轴承后部额外增加单发限位片，防止其作用是防止弹路中的弹丸将前面的弹丸挤出轴承。改进后结构如图 6 所示，其中限位片材料既可以使用弹性 TPU，也可以使用剪裁塑料瓶获取，制作简易且造价低廉。修改后的发射机构既保持原方案的射击精度和稳定性，同时也解决了溜弹问题。

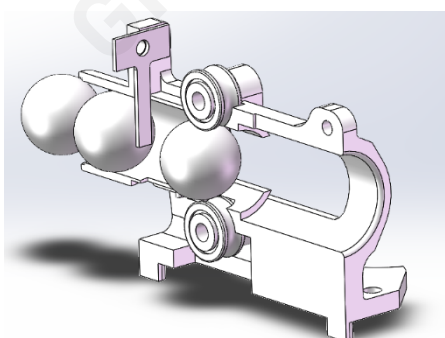


图 6.1 添加限位片的改进版本发射机构

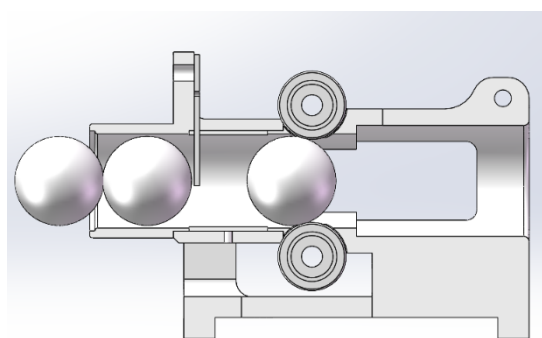


图 6.2 添加限位片的改进版本发射机构

双枪管步兵的拨弹轮在一对镜像的 2020 年官方开源步兵拨弹轮^[2] 基础上进行修改，较为稳定，在中高射频时从未卡弹。缺点在于若拨弹轮反转力度过大可能会破坏弹舱 3D 打印件，调试时需留意。拨弹轮结构如图 7 所示。

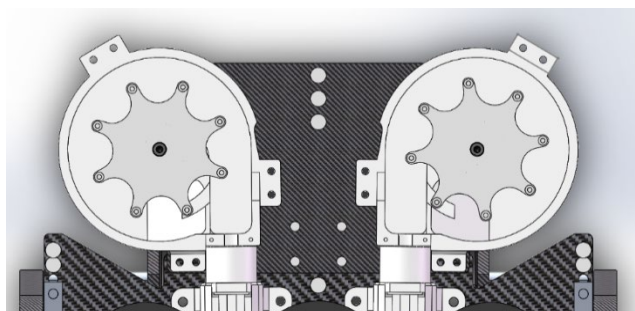


图 7 双枪管步兵拨弹机构示意图

iv. 弹舱

在测试时发现通过下落补给的弹丸会在弹舱中反弹掉出，造成浪费。因此，我们临时在弹舱中心添加了如图 8 所示的坡面结构。加装该结构后，垂直掉落的弹丸将反弹至弹舱内部而不是外部，避免浪费。弹舱总容量为 275 ± 25 发，可以满足比赛需求。

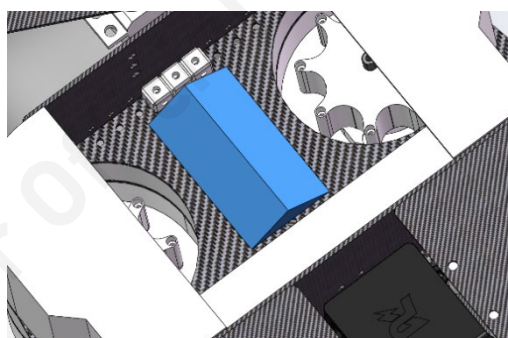


图 8 加装坡面结构的弹舱内部

弹舱盖使用舵机进行驱动。如图 9 所示，舵机通过的多功能舵机支架与弹舱进行连接。板材使用 M3 六面螺丝孔固定块进行垂直连接。标准件的使用大大简化了设计与装配。



图 9 舵机辅助安装件

v. 云台架

此次双枪管步兵的 Pitch 轴采用了平行双曲柄连杆机构，结构如图 10 所示。其中，将构件 1 和构件 3 作为摇杆，将构件 2 作为连杆，实现云台在 pitch 轴上的俯仰角运动。此设计参考上海交通大学蛟龙战队在 2019 的步兵开源^[3]，通过对构件 1 和 3 的尺寸进行重新修改来解决对单枪口转为双枪口后云台体积过大以及零件干涉的问题。

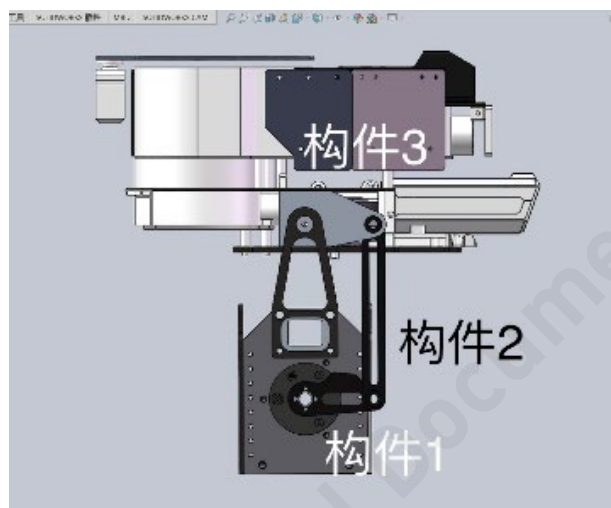


图 10 云台架机械结构示意图

为了避免云台重量增加导致的 Pitch 轴电机响应慢以及过热问题，设计之初我们使用双 Pitch 轴电机方案。在测试中，仅使用单个电机、弹舱满弹且仅在仰角达到最大时，通过 6020 电机的最大电流为 17000。因此，实装时双枪管步兵仅使用单 Pitch 轴电机。

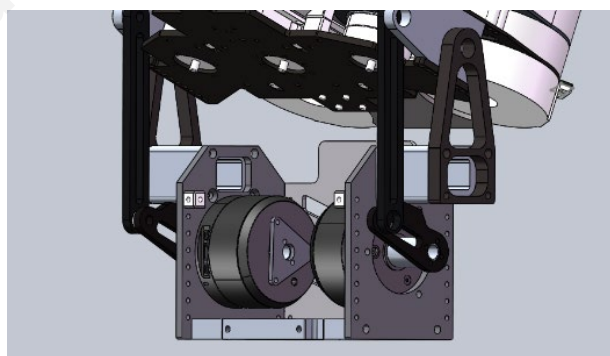


图 11 云台驱动电机设计方案

vi. 底盘配合

本赛季步兵底盘框架在 上海交通大学开源步兵 的基础上改进优化。双枪管步兵经过设计依旧适配上交底盘框架。如图 12 所示，云台架和底盘可通过 Yaw 轴基座直接连接。

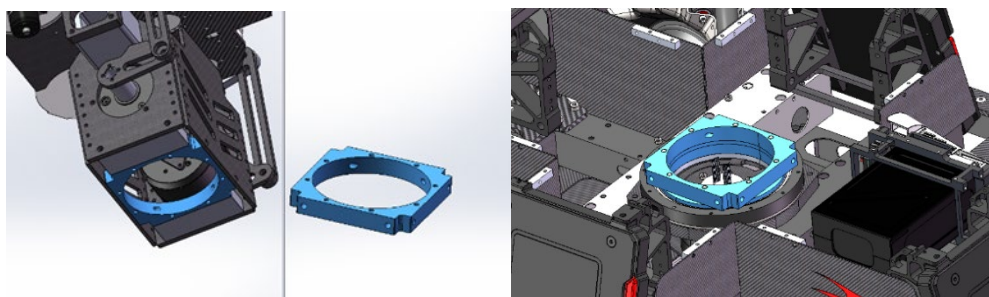


图 12 云台底盘对接示意图

4. 硬件设计

a) 超级电容

由于规则限制了底盘的输入功率（30W – 100W 多个等级），而功率限额远小于底盘电机的功率需求（峰值可达 400W），由此造成的功率缺口需要通过预先储能的超级电容进行填补。电容控制板的接线图如图 13 所示

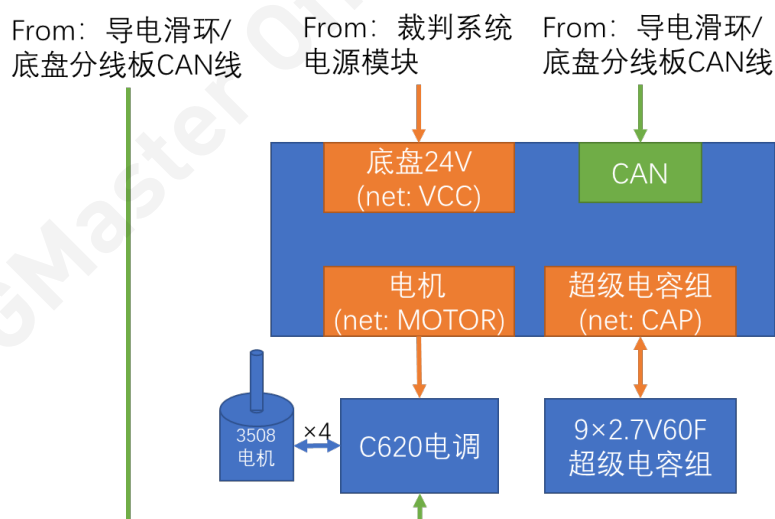


图 13 机器人部分线路拓扑

i. 超级电容组

根据 C620 电调的技术规格和实测经验值，其输入电压典型值为 24V，最高可达 27V，为留出少量余量防止损坏电调，故选取 2.7V 电容器用于电容组，每组由 9 个电容单体串联，则电容组总电压计算为

$$V_{CAP} = 9 \times 2.7V = 24.3V$$

根据规则，超级电容组总能量不能超过 2000J，由电容能量公式：

$$E_{CAP} = \frac{1}{2}CV^2 \leq 2000J$$

代入 $V = V_{CAP} = 24.3V$ ，可得 $C \leq 6.77F$ ，再由串联电容组公式：

$$C_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}}$$

其中 C_S 为电容总容量， $C_S \leq 6.77F$ ，那么就可以计算出单体电容容量不大于 60.97F，所以最终选取了 2.7V 60F 的电容器组装超级电容组。

为保护超级电容，每个电容均需要有过充过放保护电路，电容组需要有均压功能，为此选取了 BW6101 芯片实现上述功能，电容组原理图如下所示。图中展示了单个电容和 BW6101 的外围电路，复制 9 套即为整个电路的原理图。

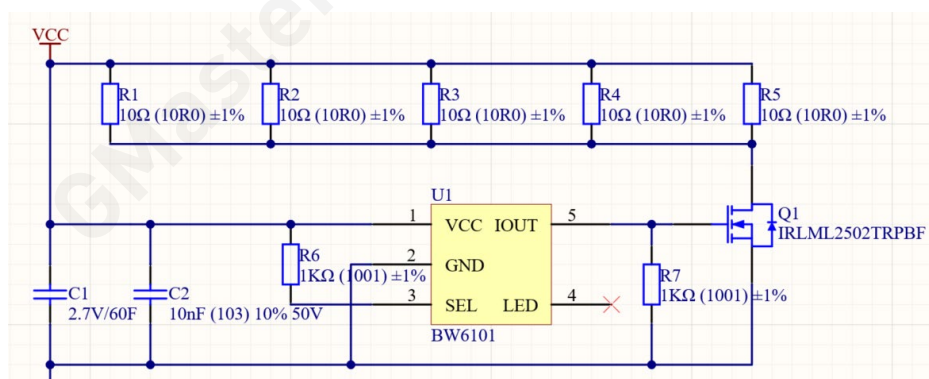


图 14 单电容保护电路原理图

其中，Q1 为过充、均压泄放开关，作为 BW6101 的扩展管，BW6101 内部设有 2.7V 超级电容专用的保护逻辑，在过充和需要均压的情况下，多余的电流会通过 Q1 和 R1~R5 以热的形式泄放，从而实现防过充和单元均压。

超级电容 PCB 的 3D 示意图如下所示:

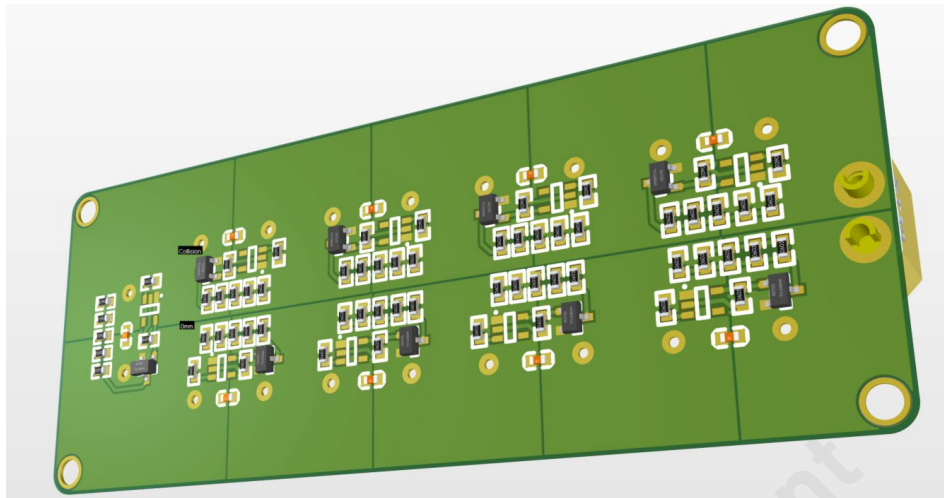


图 15 超级电容组模块 PCB 3D 视图

为了提升过电流能力并兼顾绝缘性能和美观，利用铺铜作为电容单体之间的连接。

ii. 超级电容控制模块

对于电容器，在初始状态下电压为 0，内阻也几乎为 0，等效于短路状态，为了防止在电容组电压为 0 时接入电路带来的电流浪涌以及超功率问题，需要通过功率控制电路来控制底盘的输入功率以及超级电容组的工作状态。其中，电路框图如下：

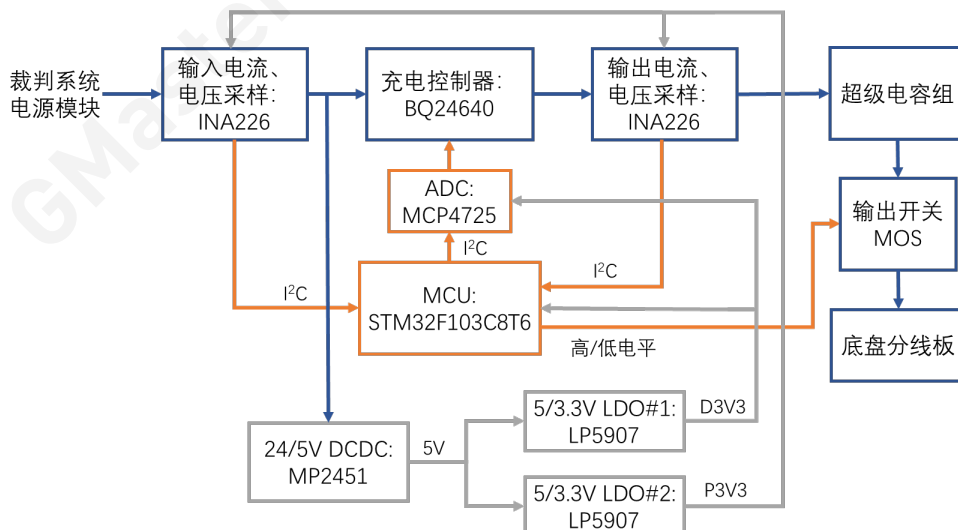


图 16 超级电容控制模块逻辑示意图

由裁判系统电源管理模块提供的 24V 母线电源首先经过输入电流采样部分，随后分别输入母线电源降压电路和充电控制器，总输入由一片 INA226 采集电压、电流和功率数据，通过 I2C 总线发送至作为主控的 STM32F103C8T6（以下简称“MCU”）。电源随后经过充电控制器送往输出电流采样，并由第二片 INA226 通过 I2C 总线返回电压、电流、功率数据至 MCU，然后送入超级电容组储能。考虑到 C620 电调具有动能回收功能，因此将超级电容直接与底盘电机并联，以期利用超级电容回收机器人的制动能量。超级电容与输出之间通过一 PMOS 实现开关，开关电路由 MCU 输出高或低电平控制通断。母线电压经过由 MP2451 组成的 DC/DC 电路降压至 5V，随后分别由 2 片 LP5907 线性稳压器 (LDO) 转换出 2 路 3.3V，分别供给 MCU、ADC 和 2 片 INA226。出于信号稳定性和数字电路的安全考虑，直接干涉功率路径的 INA226 采用独立一路 3.3V 供电，MCU 和 ADC 采用另一路 3.3V 供电，PCB 上将功率部分和数字部分分别独立铺地，并通过 LC 网络分割。

其中选定了 Texas Instruments 的 BQ24640 芯片作为充电控制器，BQ24640 自带恒功率充电功能，通过采样电阻设定充电电压为 24.3V，然后通过芯片的 Iset 引脚上施加 0 – 2V 之间的电压，即可设定充电电流。由于 BQ24640 自带电压和电流闭环，以及 INA226 能够直接返回电压、电流和功率数据，为 MCU 节省许多运算量，也方便代码控制。遗憾的是最终未能实装。电容控制板 3D 视图下 PCB 文件如图 17 所示。控制部分和功率部分原理图请查阅附录 (a)。

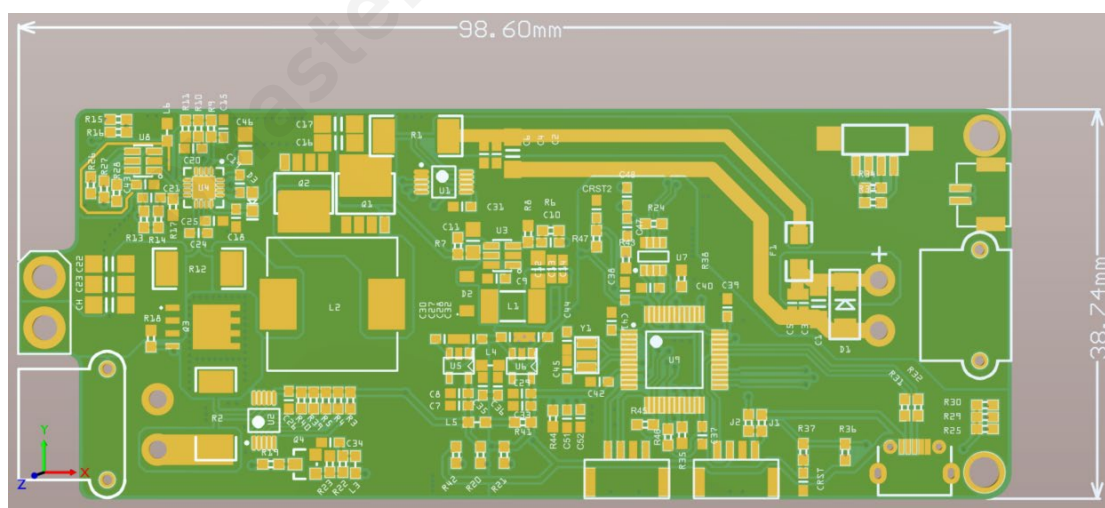


图 17.1 超级电容控制模块 PCB 3D 视图

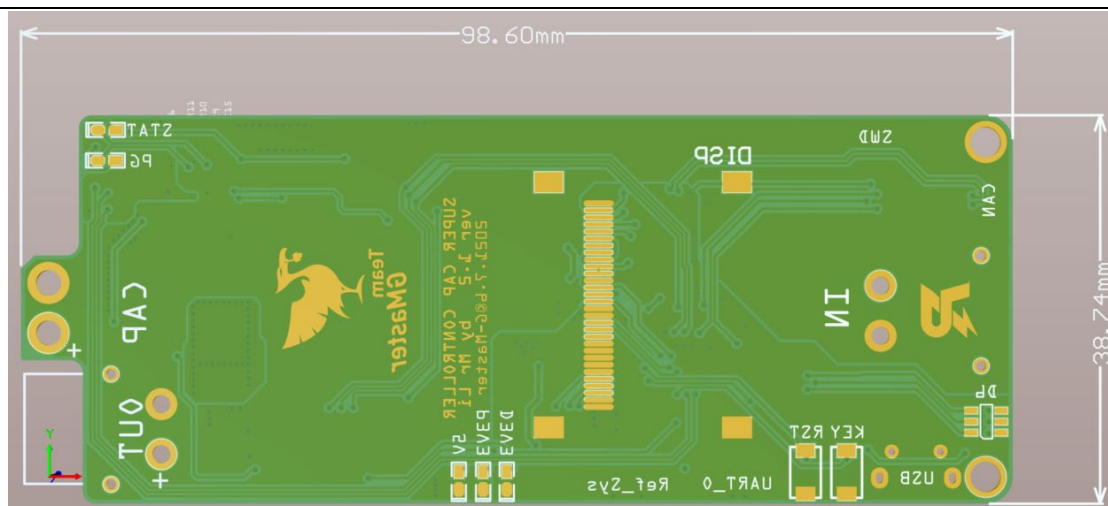


图 17.2 超级电容控制模块 PCB 3D 视图

b) 导电滑环分线板

为了实现步兵小陀螺，需要在云台关节处加装导电滑环以实现电源和信号走线能够 360° 旋转传输。在机械设计过程中，mini PC 被放置在步兵的底盘上，且全车只由位于云台上的一块 C 型开发板控制，因此，导电滑环所承载的除了云台的供电，还有 USB 摄像头信号、上下之间串口和 CAN 信号的传输。

我们在实际调试和操作过程中发现，由于路数和单路过电流能力的限制，导电滑环能提供给云台的电力并不富裕，直接导致双枪管步兵的发射机构无法获得足够的电力供应。然而导电滑环是一个脆弱的元件，会因路数过多结构复杂、电流冲击过大烧毁、应力过大出现机械损坏以及我们不知道的玄学问题等种种原因损坏，且步兵图纸中导电滑环的两头分别直接连接到云台和底盘上相应的用电器的设计导致涉及滑环的维修非常困难且耗时。由于已没有充足的时间去修改甚至重做步兵的机械结构，我们设计并制作了导电滑环分线板以期降低维修难度和缩短维修时间。

i. 滑环分线板功能与设计思路

这一模块将来自滑环的 Yaw 轴电机、发射机构供电的两个供电口扩展为四个，同时还传输裁判系统，CAN 总线，串口的信号，且集成了 USB2.0 HUB 功能。

对于供电部分，我们将 24p 滑环线中的 10p 用于供电（传输裁判系统电源管理模块云的台机电源，裁判系统电源管理模块下称“电源模块”），为了保证足够的过电流能力，我们将 Yaw 轴电机、C 板、发射机构并联为一路供电，其中发射机构电机通过一个 24V 大容量继电器控制开关，继电器的线圈电

源来自电源模块的发射机构输出，使用 1p 导电滑环线传送。如此设计便保证了云台与发射机构的供电需求。

对于信号部分，我们分配了 14p 的导电滑环线，其中裁判系统 4p，运算平台的 USB 总线 4p，两对串口共 4p，CAN 总线 2，其中串口与电源共地。我们使用了 RJ45 接口作为这 14p 信号线的连接器以实现快速拆装，同时滑环分线板向云台零件的出线同样使用可插拔连接器，以期提高模块化程度并降低维修难度。滑环分线板 PCB 的 2D 和 3D 视图如下所示。滑环分线板的原理图详阅附录 (c)。

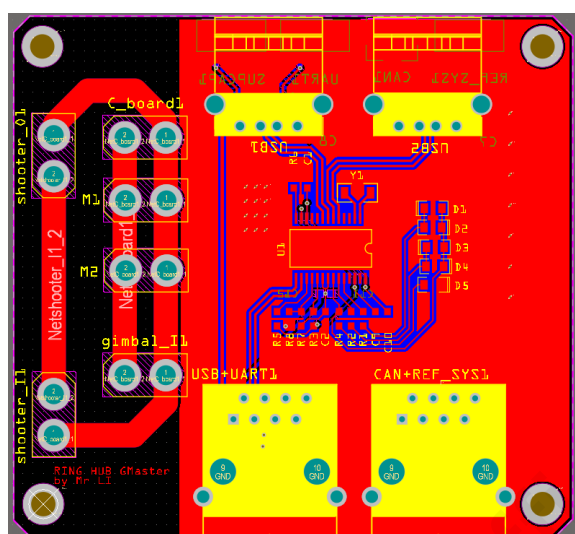


图 18.1 滑环分线板 PCB 2D 视图

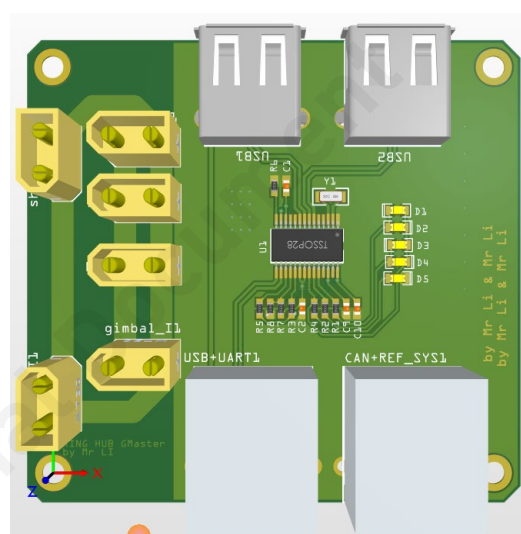


图 18.2 滑环分线板 PCB 3D 视图

最终的成品为一块 $5.50 \times 6.50 \text{ cm}$ 的 PCB，安装于步兵云台脖子处。

ii. 反思与讨论

通过滑环分线板，我们实现了导电滑环的模块化，这意味着当我们面临电路损坏和导电滑环老化时可以做到只更换导电滑环而不需要将整体的电路全部拆除，这将为我们的机器人检修与维护提供巨大的便利。其次，我们将所有供电并联为一输出并由继电器单独控制发射机构确实是一个很好的方式，这样不但增强了导电滑环和整体电路的鲁棒性，也成功解决了双枪管步兵发射机构供电不足的问题。

然而，经过上车实测和比赛，我们发现在导电滑环中设置如此多信号线并不是一个明智的设计思路，因为滑环厂商无法提供线序与颜色的对应关系，我们无法保证电源线和信号线在滑环内部能够完全分开，此外电机作为感性负载会在电源线内部产生 EMI，容易耦合到信号线上产生干扰。缺少屏蔽、无法保证 D+、D- 间距最小的导电滑环对于 USB 这种高速差分信号来说是噩梦般的

存在，这也直接导致了我们的步兵的自瞄并不稳定、机器会因信号紊乱而出现的响应缓慢问题。解决这个问题最好的办法是尽量减少高速信号线的长度，也就是尝试将 mini PC 放置于云台，此外，可以尝试一台步兵用两块开发板，底盘开发板作为裁判系统信号-CAN 收发器并承载其他附加功能，云台与底盘之间只通过高速且抗干扰能力强的 CAN 总线通信，导电滑环剩余线路全部用来传输电源。

c) C 型开发板扩展板

C 板扩展板是我们根据实际的接线需求为 C 板定制的一块扩展板，设计思路脱胎于官方 C 板电源分线板，它可以像官方分线板一样与 C 板孔位完美贴合，通过铜柱连接后，可以牢固的固定在 C 板上方。在这块小小的双面分线板上我们塞下了电源 1 分 4 扩展、CAN 总线 1 分 4 扩展、DAP-link 烧录器以及相应的 USB、SWD、虚拟串口。

i. 实现与成品

DAP-link 部分参考了 GitHub 上的开源项目 (nanoDAP^[4])。扩展板 3D 视图下 PCB 文件如图 19 所示。电路原理图详见附录 (d)。

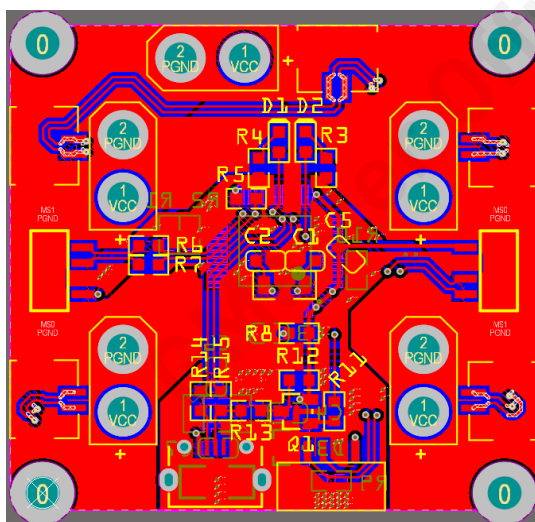


图 19.1 扩展板 PCB 2D 视图

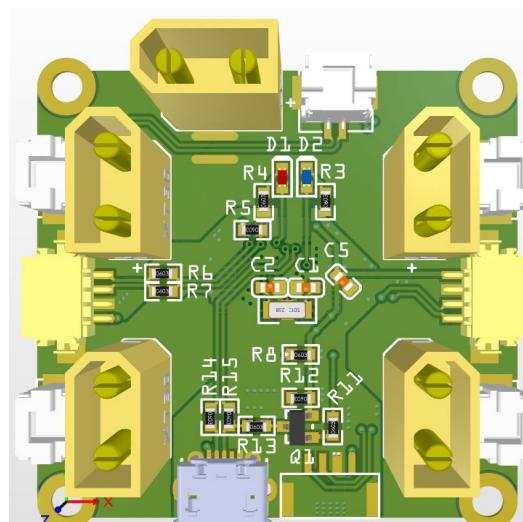


图 19.2 扩展板 PCB 3D 视图

ii. 结果与讨论

上车测试证明 DAP 下载器能够为 C 板成功烧录程序，DAP-link、CAN 总线和电源走线在步兵调试阶段和比赛全程中均未出现过问题，说明我们的设计是成功的。小体积、高度集成化的设计符合步兵的整体设计要求，同时我们为 SWD、虚拟串口都加入了供电功能，即使机器人未安装电池或者电源断开的情况下依然能够调试 C 板。这块分线板的存在简化了布线、检修和烧录代码的步骤，大大提高了备赛时的效率和容错率。

5. 软件设计

a) 嵌入式控制

步兵采用单 C 型开发板控制的架构，节约成本的同时便于代码维护调试。在保证正常工作的前提下增加了黑匣子、丢轮控制等新功能。整体架构如图。

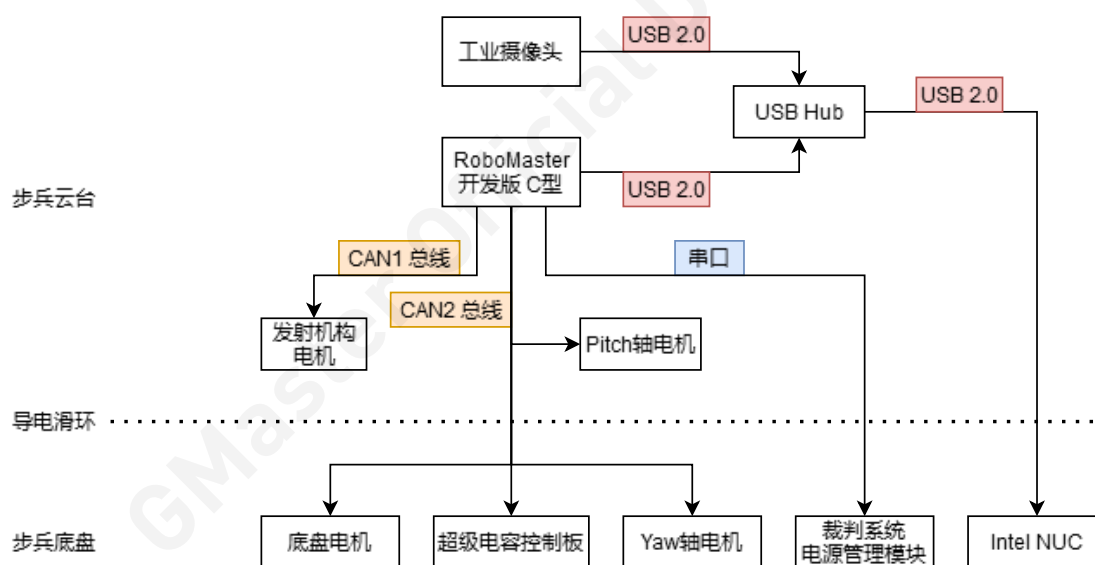


图 20 嵌入式控制架构

i. 云台控制

步兵云台控制基于经典控制理论设计，从定性角度出发，结合 6020 响应特性及编码器、陀螺仪传感器噪音特性，设计角度-速度 PID 双环控制。

- 背景

控制器设计者接手步兵云台时其 Pitch、Yaw 均表现出明显超调震荡，不利于操作手使用。考虑到备赛时间成本，设计者基于原有的角度-角速度环双环 PID 进行了调整。

- 模型分析

视 6020 电机为一般直流无刷电机，则转矩电流与输出力矩成比例关系。向 6020 电机发送阶跃、正弦电压输入信号，收集输出转矩电流返回值。利用经验及 MATLAB 系统辨识工具箱初步判断驱动器 CAN 电压-电机转矩电流系统为具有一定滞后的一阶系统。云台的角度、角速度为简单的牛顿第二定律模型，故对云台 Pitch、Yaw 角速度、角度设计双环 PID 控制器。

- 角速度环 (输入角速度, 输出 6020 驱动器 CAN 电压)

考虑到电机的滞后，角速度环不仅用 PI 控制，同时使用 D 微分项减少相位滞后。角速度环反馈信号为 BMI088 陀螺仪角速度数据，其具有一定的噪音，且微分项放大噪音。该噪音频率与目标信号频率（角速度信号）不重合，故而使用一阶低通滤波器初步过滤噪音数据即可，减少噪音对电机带来的负担与可能的系统失稳，增加使用高增益提高系统响应与抗扰性的可能性。

- 角度环 (输入角度, 输出角速度)

尽管角速度环使用微分补偿相位，其追踪仍具有一定滞后。滞后在角度环带来了超调，引起了操作手画面震荡，故在角度环依然引入微分项补偿相位。为了防止自动瞄准控制输入的近似阶跃信号带来的微分突变，在角度环上使用微分先行控制，即不对输入参考信号微分，而是直接将角速度反馈信号作为微分项。这一举措在 Pitch 轴上实现了震荡的有效抑制。然而对于 Yaw 轴，实测俯仰角的变化会对 Yaw 轴转动惯量引起较大的变化进而影响控制性能，故对于 Yaw 轴的微分系数 K_d 进行粗略的 Gain-Schedule 来改变阻尼，如下公式所示：

$$K_d = K_d^{base} + \frac{\theta_{current}^2}{\theta_{boundary}} K_d^{inc}$$

其中 K_d^{base} 为惯量最大，即近似中立位（取决于质量分布）俯仰角下符合性能指标的微分项增益系数； $K_d^{inc} + K_d^{base}$ 为惯量最小，即最大/最小机械限位俯仰角下符合性能指标的微分项增益系数。 θ 为由编码器位置反馈信号转换的角

度, 当前角度与限位角度的平方比用来近似惯量随俯仰角的变化。经检验这一简单的 Gain-Schedule 可以使 Yaw 轴角度环追踪性能在不同俯仰角以及弹量负载下达到优秀并近似一致的水准。

- 优点总结

利用微分先行、Gain-Schedule 等行之有效的策略, 搭配简单的一阶低通滤波器和通俗的频域分析, 双环 PID 有着更小的参数量, 可以以很快的速度进行整定并以高增益换取抗扰性能和追踪性能而无需复杂建模, 且具有一定的鲁棒性。

- 反思

尽管最终云台响应水准在 RMUL 基础上得到了提高, 并到达了实战水准, 且在多个兵种平台上表现出了普适性, 其追踪性能仍表现出一定的滞后 ($\approx 50ms$, 近似于一阶系统 $\frac{1}{as+1}$ 中 α 较大而表现出的相位滞后, 测试输入频率约为 $3\pi rad/s$), 这一滞后可能是由于所设计 PID 控制器性能不足, 抑或是所应用的低通滤波带来的滞后过大。限于备赛时间, 控制器设计者仅对朴素的双环 PID 进行了参数调整和局部更改, 而未利用前馈、超前滞后矫正等手段优化性能。

值得一提的是, 设计者曾试图使用基于名义模型的干扰观测器 (Nominal Disturbance Observer) 提高系统的抗干扰性, 并利用 Nominal Performance Recovery 简化调参过程, 然而由于建模误差以及 Q 滤波器带来的滞后, 设计者最终抛弃 Nominal DOB 而转向高增益抗扰。

设计者认为对于步兵的云台控制器设计, 相比于 MPC、鲁棒控制、ADRC 或是自适应律, 简单而有效的经典控制理论频域分析以及恰当的参数变化策略足以换来优异的控制性能。在接下来的赛季, 设计者将着手通过前馈、相位矫正、电流闭环等方法将追踪延迟进一步缩小。另一方面, 设计者将通过灰箱辨识等手段建立更加精确的模型, 便利基于模型设计控制器, 并尝试应用进阶控制方法 (如基于 H_∞ 方法设计) 提高控制器的鲁棒性。

ii. 辅助瞄准系统设计 (下位机)

由于本赛季未准备大风车视觉辅助，下位机自瞄算法主要针对装甲板射击与预测。

• 算法设计

参考系选择以 $Yaw=0$ 为 x 轴正方向， $Yaw=90^\circ$ 为 y 轴正方向，竖直向上为 z 轴正方向的云台中心参考系。在本算法中，三个以匀变速模型为系统状态方程的卡尔曼滤波器（即下图中提到的观测器）被用来估计当前目标的位置，速度，加速度。如图 21 所示为对新数据的处理（当前帧时间为图像实际对应的的时间）

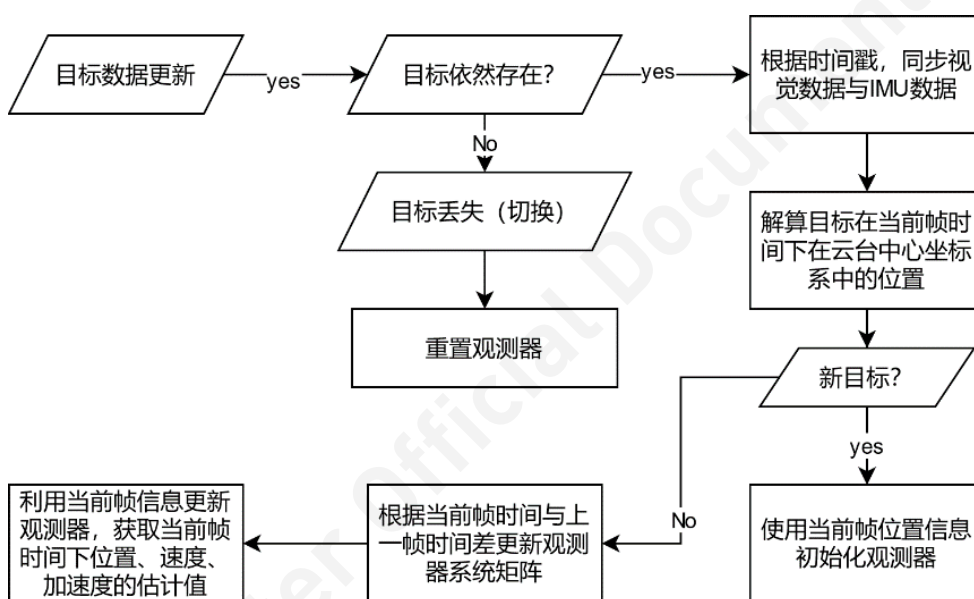


图 21 下位机目标解算流程示意

每个运算周期 (1 ms) 内算法会进行如图 22 所示的操作

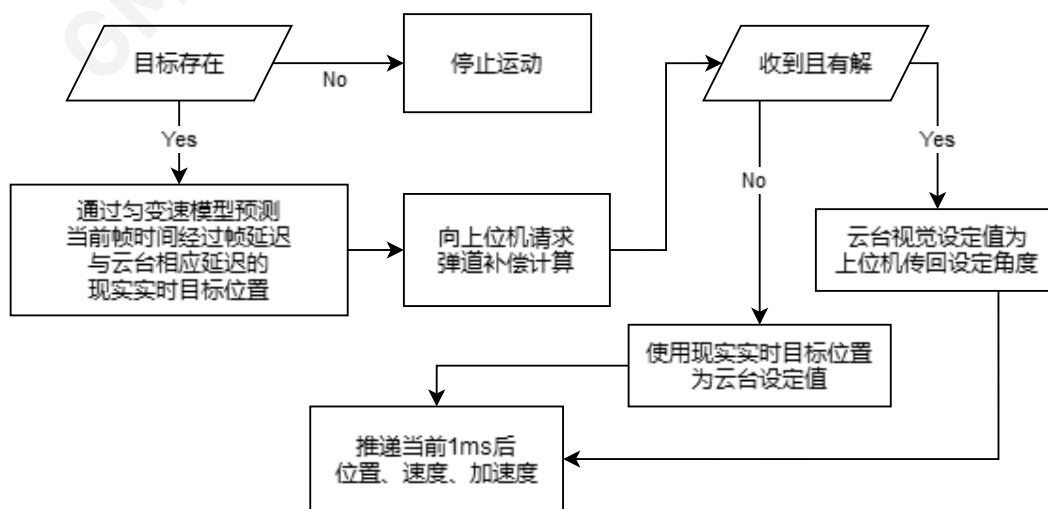


图 22 计算请求流程示意

其中，停止运动指不再改变云台视觉设定值，此情况下操作手可以关闭视觉自瞄，自行寻找目标。

- 时序关系

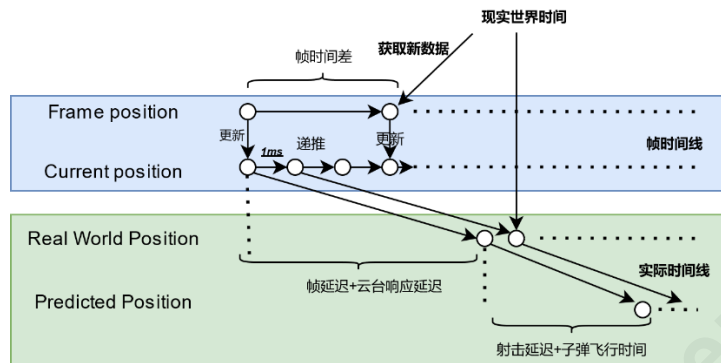


图 23 时序图

由上图可知，卡尔曼滤波仅维护帧时间线下每一帧中位置、速度、加速度的变化，故此可以解耦估计、补偿延迟、预测时间线，使逻辑清晰，代码实现高效简洁。

- 弹道补偿

弹道模型同时考虑弹丸射出方向的水平与竖直空气阻力。假设速度方向上空气阻力与速度方向相反，且大小为 $f = kv^2$ 。设初速度为 v_0 ，水平距离为 x_0 ，与水平方向夹角为 θ 。

水平方向弹丸飞行时间为

$$T = \frac{e^{kx_0} - 1}{kv_0 \cos\theta}$$

竖直方向需分向下和向上两种情况。当弹丸向下射出时，在 T 秒时射中高度为

$$y = -\frac{1}{2k} \log\left(1 - v_0^2 \sin^2 \theta \frac{k}{g}\right) - \frac{\log\left(\cosh\left(\sqrt{gk} t - \operatorname{atanh}\left(v_0 \sin\theta \sqrt{\frac{k}{g}}\right)\right)\right)}{k}$$

当弹丸向上射出时，分为以下两种情况：

- 情况 1：弹丸在到达最大高度前击中目标；
- 情况 2：弹丸在到达最大高度后击中目标

计算可得到达最大高度的时间为

$$C = \frac{\operatorname{atan}\left(v_0 \sin\theta \sqrt{\frac{k}{g}}\right)}{\sqrt{\frac{g}{k}}}$$

可知当 $T < C$ ，对应情况 1；当 $T > C$ ，对应情况 2。情况 1 下，弹丸的最终落点为

$$y = \frac{1}{k} \log\left(\frac{\cos(\sqrt{kg}(C - T))}{\cos(\sqrt{kg}C)}\right)$$

情况 2 下，弹丸的最终落点为

$$y = \frac{\log\left(\frac{kv_0^2 \sin^2\theta}{g} + 1\right)}{2k} - \frac{\log\left(\cosh(\sqrt{kg}(C - T))\right)}{k}$$

利用以上弹道模型，以 $\frac{\text{目标距离}}{\text{子弹在当前仰角下的水平飞行速度}}$ 为预测时间

estimated_horizon，通过匀变速模型预测目标在 *estimated_horizon* 时刻的位置，通过打靶法迭代求解目标角度，当最终落点与目标高度差值小于容忍限度时的角度即为经过弹道补偿的俯仰角。

- 软件设计

由于弹道迭代解算补偿俯仰角的计算在下位机无法在一个计算周期 (1ms) 内完成，该迭代解算过程移动到上位机进行计算。经过统计，上位机进行 100 次迭代约消耗 80μs，并且下位机可以在一个计算周期收到回复数据。另一方面，下位机视觉任务等待过程中将通过 *NotifyTake* 挂起，等待 USB 中断唤醒，将资源交给其他任务。

下位机接受上位机数据后，在 USB 中断中调用相对应的函数将 USB 缓冲区数据复制到指定结构体中。并通过 *FreeRTOSNotification* 机制唤醒任务。

○ 线程安全

下位机视觉数据接受结构体为双缓冲区结构，当视觉任务 *VisionTask* 运行时，接收到上位机新数据，解包任务 *VisionUnpackTask* 将新数据读入非活跃缓冲区，并在等待 *Mutex* 释放后获取 *Mutex*，在将活跃缓冲区切换到新数据所在非活跃缓冲区后释放 *Mutex*。 *VisionTask* 在每次运行时，会等待 *Mutex* 释放后获取 *Mutex*，以指针标记当前所使用的缓冲区为活跃缓冲区，然后释放 *Mutex*。考虑到上位机数据更新速度 ($\approx 15ms$) 远大于 *VisionTask* 执行速度 ($\approx 80\mu s$)，该机制可简单有效避免 *VisionTask* 执行过程中发生数据错乱。

○ USB 中断

考虑到任务优先级，*NotifyTake* 阻塞时间等原因，为保障 USB 接收重新使能，新接收到的数据将在 USB 中断中根据数据头直接复制到指定结构体实例中，在重新使能 USB 接收后再 *yield* 到具体任务中。

iii. 超级电容控制

超级电容控制分为输入端控制和输出端控制，如图所示：

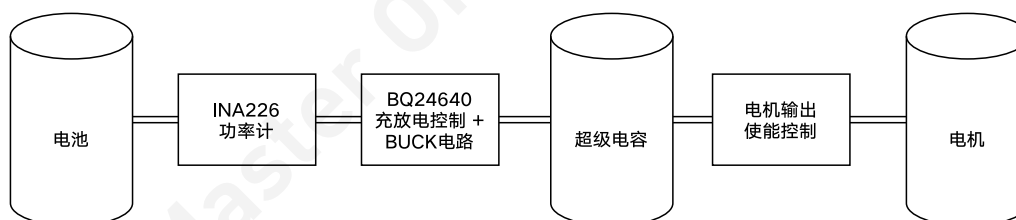


图 24 超级电容模块控制流程图

输入端通过 INA226 功率测量芯片获得反馈，STM32 控制板给 BQ24640 发送合适的控制指令使电池的放电功率不超过设定的值，如 80W。输出端控制使用和 A 型开发板相同的电路，实现电机输出端的通断控制。

比赛时，若始终限制功率为裁判系统要求限制的功率，那么机器人爬坡时就只能利用超级电容中储存的能量，而无法利用裁判系统软件提供的缓冲能量。因此我们通过下述公式优先利用裁判系统提供的软件缓冲能量，待缓冲能量快耗尽时再通过超级电容控制板进行硬件层面的功率限制：

$$\text{硬件功率限制} = \text{裁判系统要求的功率限制} \times \left(0.9 + \frac{\text{裁判系统剩余缓冲区能量}}{100} \right)$$

经过测试，该控制策略在前期可以通过较宽松的硬件功率限制消耗裁判系统的缓冲能量，之后通过硬件限制以确保功率不超过上限。

b) 视觉算法

i. 综述

从视觉算法在 RoboMaster 2016 赛季中出现至今，许多战队都已经拥有了自己的一套成熟的视觉算法并随着比赛规则的变化不断进行迭代更新。边缘计算、神经网络等配套新型概念、算法和硬件的出现，也使各种运算的时间和空间开销相比以往降低了许多。虽然如此，许多学校机器人上所搭载的运算平台在用途上依然仅仅保持在“受限于视觉识别”这一阶段。

本战队在进行可行性讨论后，决定充分利用上位机算力充足的优势，突破传统上位机只负责进行视觉算法的认知，扩充其作为上位机的使用目的，包括但不限于：

- 视觉方面
 - 视觉识别（基础功能）
 - 数据集抓取与存储
- 通讯方面
 - 视觉坐标解算（基础功能）
 - 下位机运算压力分流
 - 自动机器人 ID 选择
 - 机器人黑匣子
- 日志方面
 - 异步程序日志记录服务
 - 异步黑匣子数据保存服务

以下是本赛季中步兵机器人上位机软件工作概览：

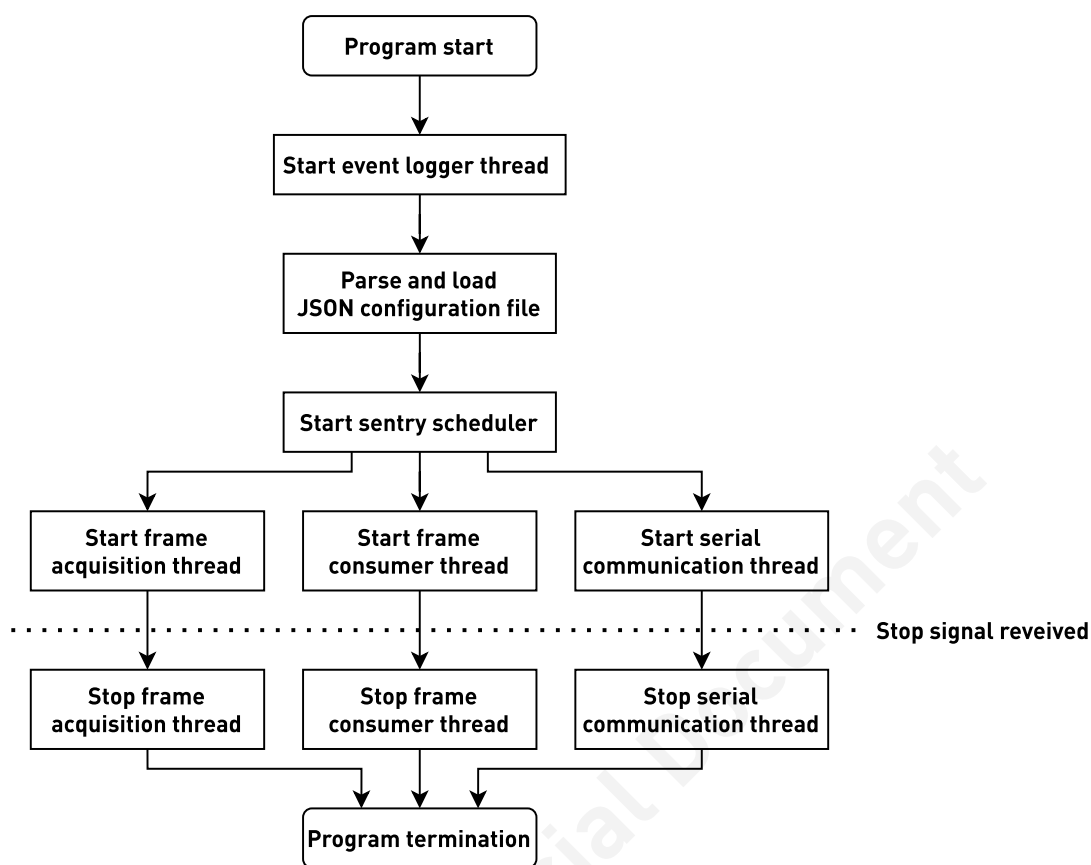


图 25 上位机软件工作概览

下文将对本赛季视觉识别部分以及上位机特色部分分别进行介绍。

ii. 视觉方面

- 视觉构架总览

在上位机的主要功能——视觉方面，主要分为两个部分：帧提供线程与帧消耗线程。以下分别是帧提供和帧消耗线程的运作构架。

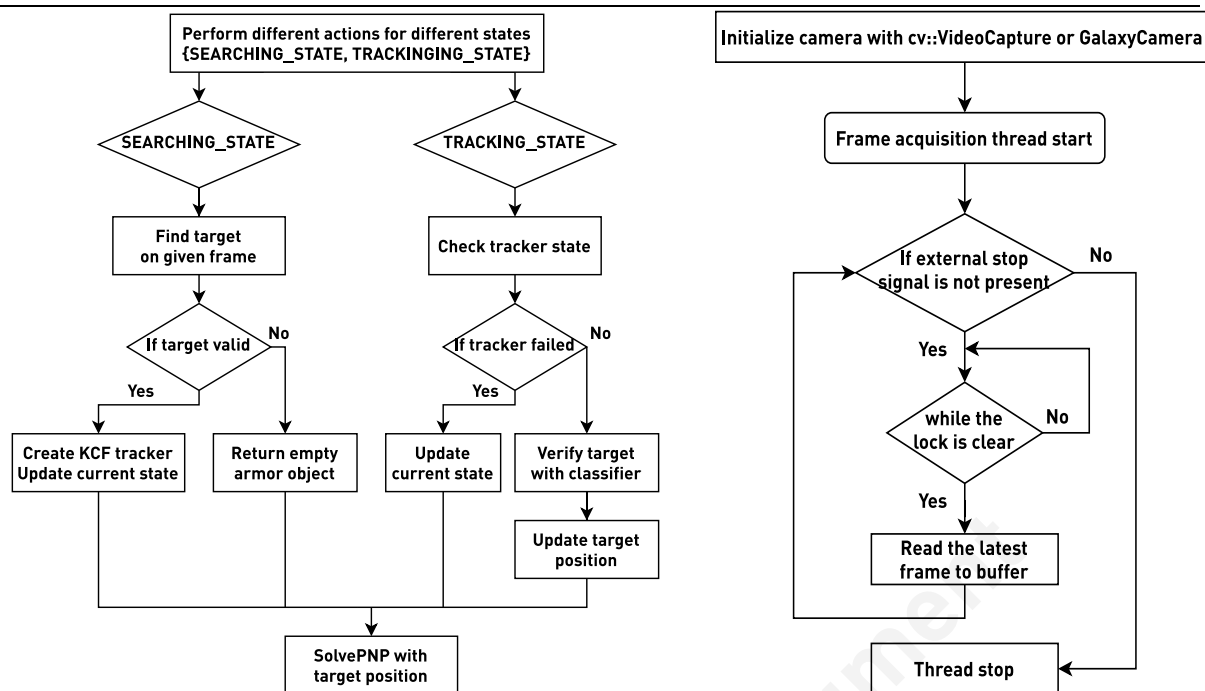


图 26 帧提供与帧消耗线程运作构架

- 帧处理算法

本赛季所运用的帧处理算法大致方向为传统图像处理方法配合分类器。

传统图像处理方面主要运用为进行图像的 RGB 通道分离、二值化、开闭运算、逻辑判断和图像缩放等。

分类器方面主要运用为将传统图像处理以及逻辑判断后的可能的装甲板区域进行装甲板分类（区分内容包括颜色、装甲板数字、非装甲板目标）。分类器的实现方式为：前期使用 TensorFlow 预训练卷积神经网络；Runtime 使用 Eigen 3 导入权重进行推理。

此外，本赛季将上位机原本的“发送目标偏离画面中心像素数”的方法更新为了“发送上位机 SolvePNP 位姿解算的平移向量”。通过使用检测出的装甲板的灯条四个角点（见图表 27）进行 SolvePNP 位姿解算，可以得到相机坐标系中的 x, y, z 三个轴上的平移向量。



图 27 所取用角点示意图

选用此方法存在以下优点：

- 将三个轴上的平移向量发送到下位机后，方便下位机配合 IMU 实时数据实现坐标系转换（即将相机坐标系转换为世界坐标系），从而实现目标位移数据滤波和目标移动的预测。

同时，存在以下缺点：

- 能进行 SolvePNP 得出相对可靠的数据的前提是摄像头已经进行了较为精细的校准。目前我们使用的校准方式是传统的棋盘格照片结合 MATLAB 内置的相机校准应用进行校准。我们得到的最优结果为重投影误差 0.08 px。
- 根据多次实验结合 SolvePNP 本身求解原理，我们发现 SolvePNP 结果对于像素变化非常敏感，即进行 SolvePNP 解算前的输入图像分辨率越高，最终解算得出的结果会更加可靠和稳定。然而受限于算法优化能力和上位机本身算力，目前可以接受的最大分辨率（能保持稳定性能的分辨率）为 640×480 。这个限制条件间接导致了解算结果的不稳定性。
- 由上一点可知，解算对于像素变化较为敏感。为了降低输出结果的噪音，我们选择对相机进行低曝光处理。这带来的好处是更加稳定的数据，但是也对人工调教和场地灯光提出了更高的要求。在深圳的实际场地中，我们发现赛场上光照不充足和不稳定性对于最终的解算结果影响较大。这也是新赛季中视觉算法部分需要着重改进的地方。

- *性能测试结果*

经过实验，此方法在性能上的表现良好。

详细 Benchmark 结果为：光线复杂场景下（即疑似目标较多的情况下）对于 640×480 尺寸的输入图像处理总时长为 7~10 毫秒，最坏情况不超过 15 毫秒，满足下位机控制循环的实时性要求。

在光线充足的情况下，使用此方法配合下位机算法（移动预测与弹道补偿）可以使反小陀螺命中率达到 70% 左右（来自实验室数据）。

iii. 通讯方面

本赛季我们引入高鲁棒异步 USB 虚拟串口通讯机制进行上下位机通讯。同时，凭借上位机的强大算例，为下位机运算压力分流。除此之外，我们还实现了黑匣子和自动裁判系统 ID 选择等功能。

- *高鲁棒异步 USB 虚拟串口通讯*

在单片机控制程序研发过程中，我们发现 STM32 微控制器自身提供的 USB Device 特性可以被配置为 Virtual ComPort，即 USB 虚拟串口。在经过资料查找和自身反复实验后发现，使用 USB 虚拟串口通讯相较于一般外置独立 USB-TTL 设备具有以下优点：

- USB 虚拟串口通讯可以提供更高的 Full Duplex 传输带宽（根据 ST 官方文档，带宽大约是 12Mbps）。在下文的黑匣子特性中，此优势可以在下文得到体现。
- USB 虚拟串口通讯可以提供更高的 Full Duplex 传输带宽（根据 ST 官方文档，带宽大约是 12Mbps）。在下文的黑匣子特性中，此优势可以在下文得到体现。
- 将下位机配置为 USB 虚拟串口后，可以直接在上位机中被枚举为串口设备（以 Linux 为例，会被内核识别为“/dev/ttyACMX”，其中 X 为设备数）。因此不需要实现额外的驱动即可实现串口通讯。

在高鲁棒性部分，我们通过结合上位机的串口库，实现了上位机程序运行中下位机热插拔功能。其主要目的是为了防止由

上位机或下位机意外断电或者接口松动而导致的信号不稳定、程序终止或崩溃问题。

在通讯协议方面，我们也实现了类似 TCP 的握手/重传以及包头区分等增强功能性和鲁棒性的特性。

以下是高鲁棒异步串口的工作流程。

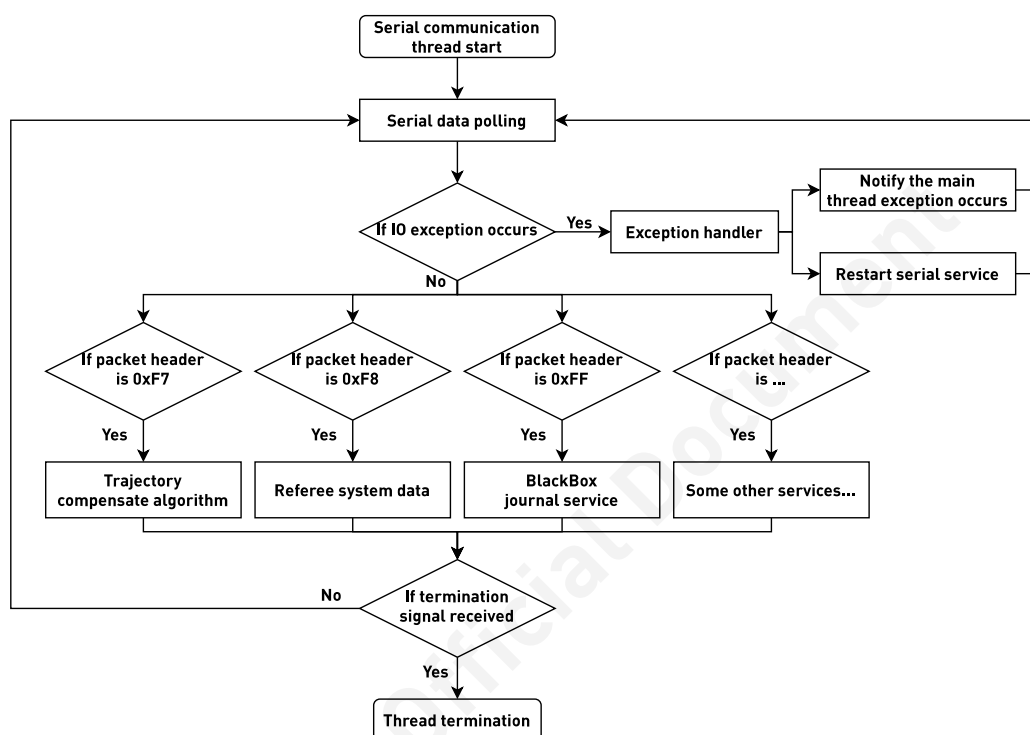


图 1 高鲁棒异步串口工作流程图

○ 下位机运算压力分流

选择 SolvePNP 后为我们提供了很多的其他可能性，其中之一就是弹道补偿运算。目前我们选用的算法是迭代求解，然而经过测试后我们发现将这部分运算放在算力受限的下位机上是不合适的，因此我们选择了通过 USB 虚拟串口将数据传输到上位机上进行运算的方法。

由于此算法需要结合 IMU 数据，运算的结果又被下位机的控制循环所需，因此对于实时性要求较高。我们在进行实际测试后发现，使用 GCC 编译器 O3 优化下的迭代算法可以较为稳定的在 500 微秒以内算出弹道补偿结果，并通过串口将结果传输至下位机，总消耗时长可以控制在 1000 微秒（1 毫秒）内。

这是我们对于上下位机运算压力分流的第一次尝试，也为今后更多功能的开发积累了经验。

- **黑匣子**

由于使用了 USB 虚拟串口，我们利用其高速与无需进行数据校验的优势实现了“黑匣子”的功能。其本质是下位机通过串口将各个电机、IMU 等的实时数据传输至上位机，并由上位机进行反序列化和序列化后保存至上位机存储。

黑匣子如其名，保存了机器人在运作过程中的各项数据，方便后期在开发调试过程中进行读取和分析以及赛后复盘。

- **自动裁判系统 ID 选择**

本功能基于裁判系统读取机器人 ID 数据。下位机读取数据后将本机 ID 发送至上位机，然后上位机通过 ID 信息选择敌方颜色以及开启或关闭某些兵种特有的特性。

c) 创新功能

- i. **黑匣子**

机器人异常状况往往难以复现。假如机器人在赛场上出现故障，更是难以当场排查故障。出于方便地复现故障这一目的，我们为机器人增加了虚拟黑匣子以记录工作数据。在机器人工作时，黑匣子会将电机数据、遥控器发送数据和陀螺仪数据等共 162 字节的数据以 100 Hz 的频率发送至上位机储存，便于事后复现。为保证通信速度和稳定性，上下位机之间的通讯并未使用 USB 转串口模块，而是使用传输速度更快、更加稳定的虚拟 USB 串口。这些数据记录在加速排障的同时，也有助于未来嵌入式程序开发和构建基于 ROS 的控制算法。

- ii. **丢轮控制**

单个麦克纳姆轮可以同时提供纵向和横向两个方向的力。机器人底盘通过控制不同轮组的转动方向和速度以在任何目标方向上产生矢量合力移动。因此，当任一轮组失控离线的环境下，若仍依照正常情况时麦克纳姆轮的速度解算公式，总存在一个方向的力无法被抵消，导致机器人运动异常。为提高机器人代码鲁棒性，我们改进了轮组离线时底盘的控制逻辑，当某一轮组电机离线时，通过主动停用产生无用方向力的轮组，允许机器人在该异常工况下依然能够完成基本移动。

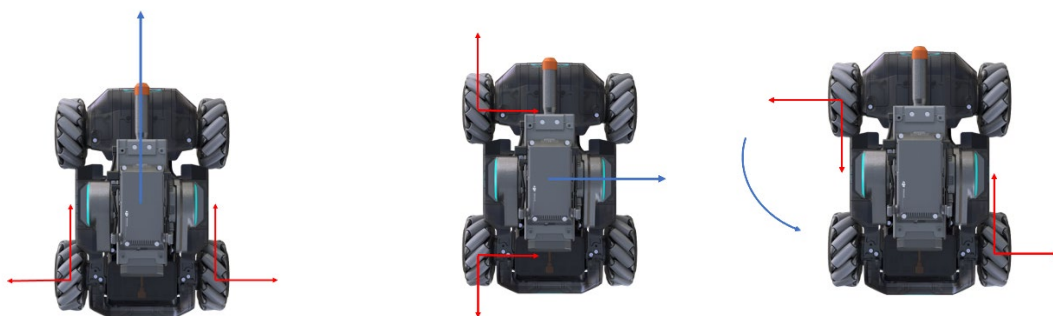


图 29 麦克纳姆轮运动分解示意图

如图 29 所示，底盘右前方电机离线。机器人直行时，停用故障轮组横向对应的电机，仅使用后轮驱动以完成动作；平移时，停用故障轮组纵向对应的电机，仅使用另一侧轮组驱动；旋转时，停用故障轮组对角线上对应电机，使用剩余轮组驱动。如此，我们实现在任一轮组离线的工况下完成基本移动，极大提高了机器人运动的鲁棒性。

值得一提的是，该方案仅能在底盘电机离线时生效。若有轮组卡死，则无能为力。

d) 人机交互设计

i. 操作界面 UI



图 30 操作手操纵界面 UI 示意

通过 UI 辅助，操作手可以更好地感知机器人状态，从而更好地操纵。操作界面如上图所示。

- 左上角标识分别为摩擦轮开/关、拨弹轮开/关/离线、视觉识别模式 离线/装甲板识别/能量机关识别和 小陀螺 关闭/开启;
- 右侧实视显示 Pitch 轴 俯仰角 数据, 方便远程吊射
- 中间红色横线 分别对应 0m / 1m / 3m 远处弹丸下落位置, 且该指示线能根据最大射速限制 自动调整。操作手可自行根据目标选择。
- 下方能量条直观展示 超级电容剩余容量

ii. 自动性能调节

通过读取裁判系统信息, 机器人可以自动选择摩擦轮转速, 保持弹丸发射初速正好略小于上限速度。为了最大化利用枪管冷却机制, 尽可能提升射击频率, 经过大量测试, 得出如下公式控制拨弹轮转速

$$\text{拨弹轮转速} = \frac{\text{枪管最大冷却量} + \text{枪管每秒冷却} * 3}{37} \text{ rpm}$$

为防止在某些特殊情况下发射过快, 设置拨弹轮转速上限为 15 rpm。经过测试, 该公式在不同发射机构类型、等级和增益下表现良好。

类似的, 为了最大化利用底盘功率, 经过大量测试, 得出如下公式控制小陀螺运动转速

$$\text{小陀螺运动转速} = \frac{\text{底盘最大功率}}{3} \text{ rpm}$$

通过自动性能调节, 机器人可以在不同的等级和增益下充分利用性能。遗憾的是, 由于裁判系统不时回传异常数据导致性能调节出现异常, 该功能实现仍有改进空间。

iii. 自动切枪

由于三摩擦轮构型切换枪管时需反转中间的摩擦轮, 在双枪管交替射击时, 反转摩擦轮产生的转动力矩对云台有轻微干扰, 降低射击精度。因此, 双枪管步兵采用如下所示的切枪逻辑, 最大限度利用枪管热量限制, 降低操纵难度。

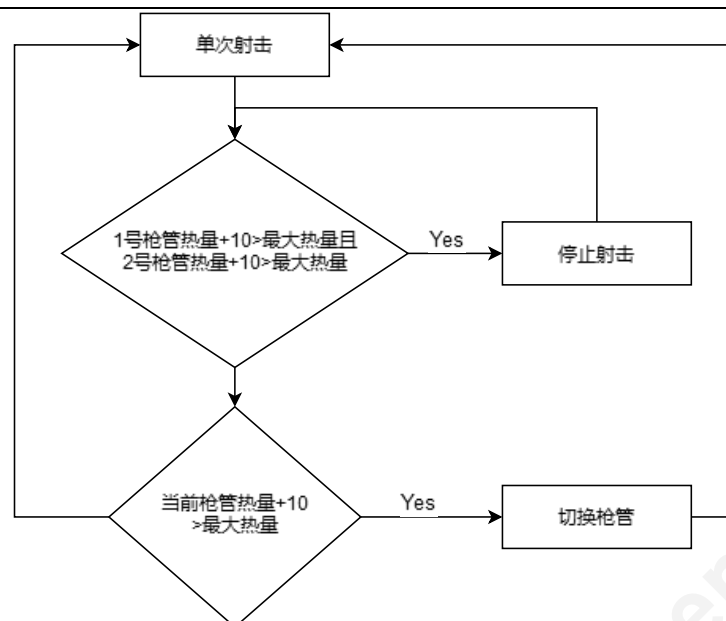


图 31 双枪管自动切换逻辑示意

6. 系统开发与调试

- 载弹量测试

以 50 发为单位，250 发 17mm 弹丸为合理最大值，300 发 17mm 弹丸会导致弹仓过满，存在洒出浪费的风险。

- 底盘功率

以在无超级电容辅助爬 15° 坡为例：以 80w 为分界线性能区别大。< 80w 爬坡时需在坡道上进行二次加速才能在不超功率扣血爬坡；≥ 80w 爬坡时无需二次加速，且爬坡速度与功率大小成正相关。与普通步兵相比，双枪管步兵临界功率高约 20w。

- 射击测试

4m 左右两枪口射击位置完全一致，其余情况两个枪口射出的子弹轨迹略有差异。不过在操纵时，差异符合预期不影响操作体验。对于同枪口的每一发弹丸的轨迹对比，当弹速为热量或冷却优先时（15m/s 或 18m/s），每一发都能够接近最大值且差异较小；当弹速为弹速优先时（30m/s），存在少数与目标弹速差别较大的弹丸，但整体性能符合预期，适合于选择两个弹速优先的发射机构。

- 射击判定

规则设定 17mm 弹丸需在与装甲板垂直面大于 12m/s 才能触发装甲板判定。在正面击打的情况下，15m/s 的弹速能够几乎在场地任何位置进行成

功击打，但是在角度倾斜时效果较差。18m/s 情况类似。30m/s 的弹速不仅正面击打效果良好，倾斜击打的效果较低弹速更加突出，非大倾斜角度均能够触发装甲板判定。

- *弹舱缓冲*

双枪管步兵的弹仓材质较普通步兵略有差异，弹丸更易弹出弹舱。在加装了坡面结构后在高度较低的补弹区防反弹效果良好；但是，在高度较高的补弹区补弹时大约十分之一的弹丸无法落入弹舱中，造成浪费。因此操作手应尽量避免双枪管步兵在高的补弹区进行补弹。

- *射频调整*

双枪管步兵的热量上限和冷却回复可以视为普通机构的两倍。此时双枪管步兵的属性与冷却优先加成后属性接近。因此，在计算过后，设置三个等级的射击频率分别为 5Hz, 8Hz 和 11Hz。若获得场地增益效果，则随之提升射击频率。考虑到经济限制，设置最高射击频率为 20 Hz。

7. 参考文献

[1] 北京理工大学-追梦战队-小发射机构机械开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=9228>

[2] RoboMaster 竞赛机器人 2020 零件套装三维图纸开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=9407>

[3] 上海交通大学-交龙战队-步兵机器人机械技术开源

<https://bbs.robomaster.com/forum.php?mod=viewthread&tid=11054>

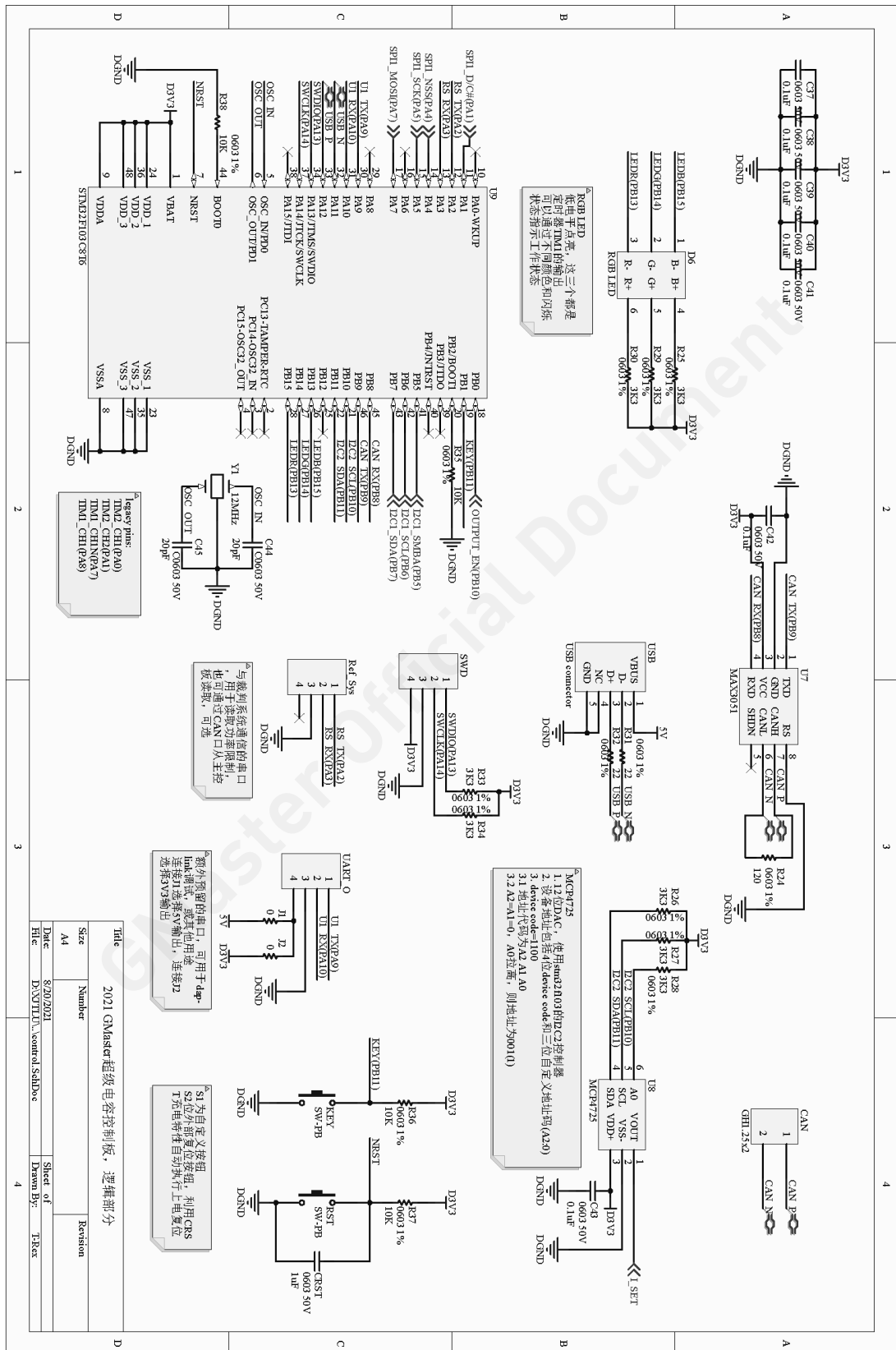
[4] nanoDAP

<https://github.com/wuxx/nanoDAP>

GMaster Official Document

8. 附录

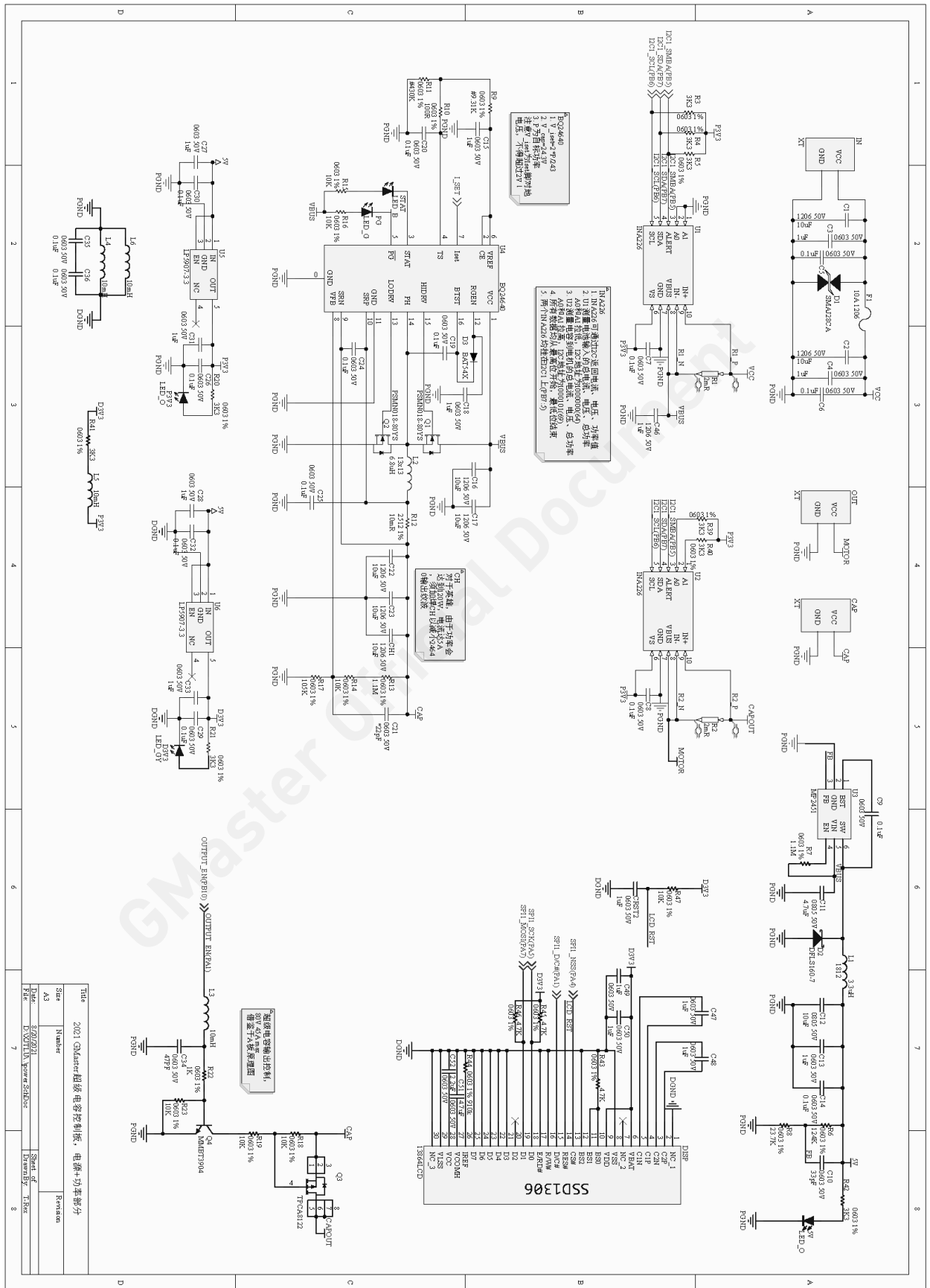
a) 超级电容模组控制部分原理图



Title	Size	Number	Revision
2021 GMaster超级电容控制板，逻辑部分	A4		

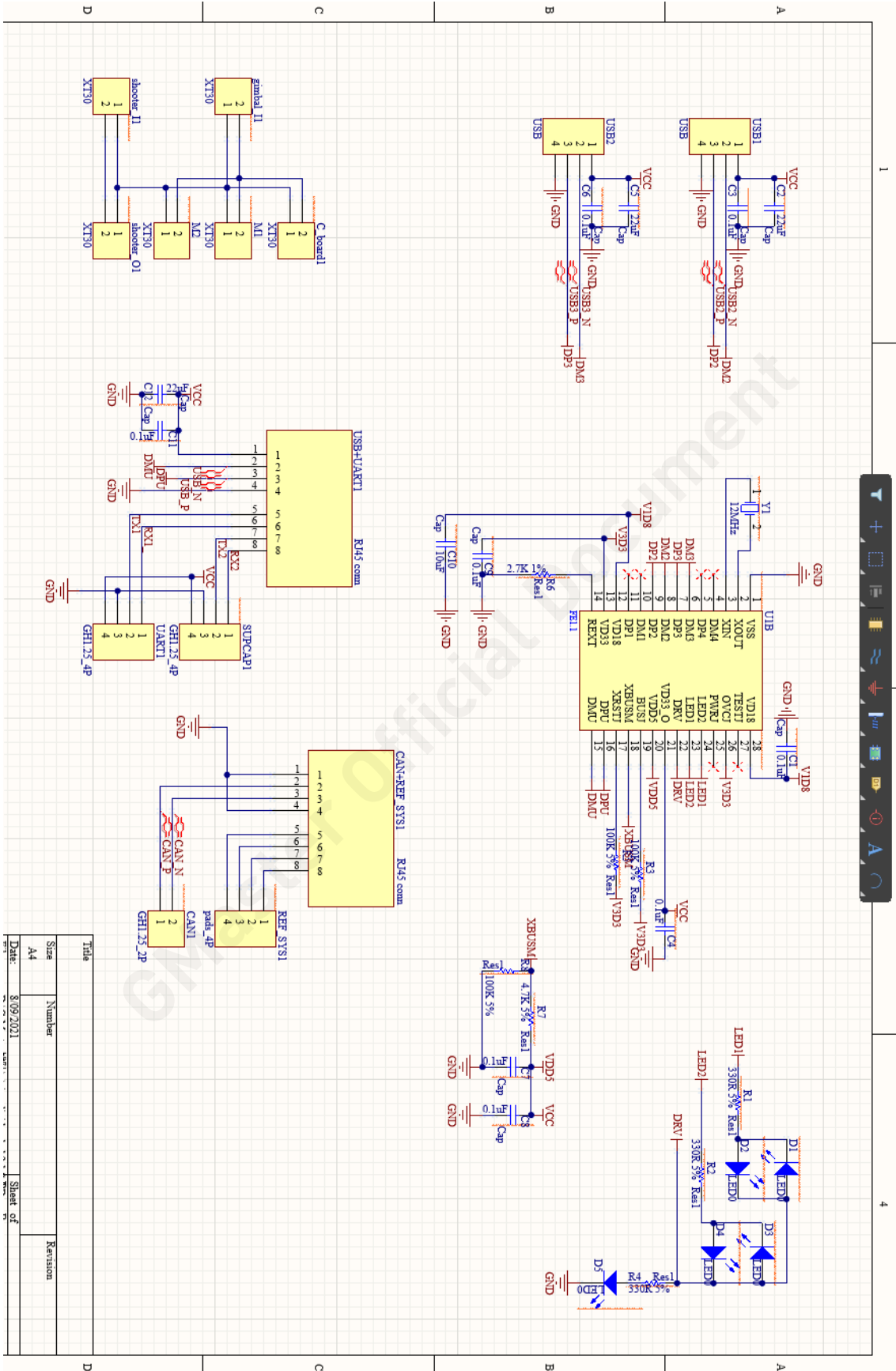
Date: 8/20/2021
 File: D:\NTT\LV...control_SchDoc
 Sheet of 4
 Drawn By: TR-xx

b) 超级电容模组功率和电源部分原理图



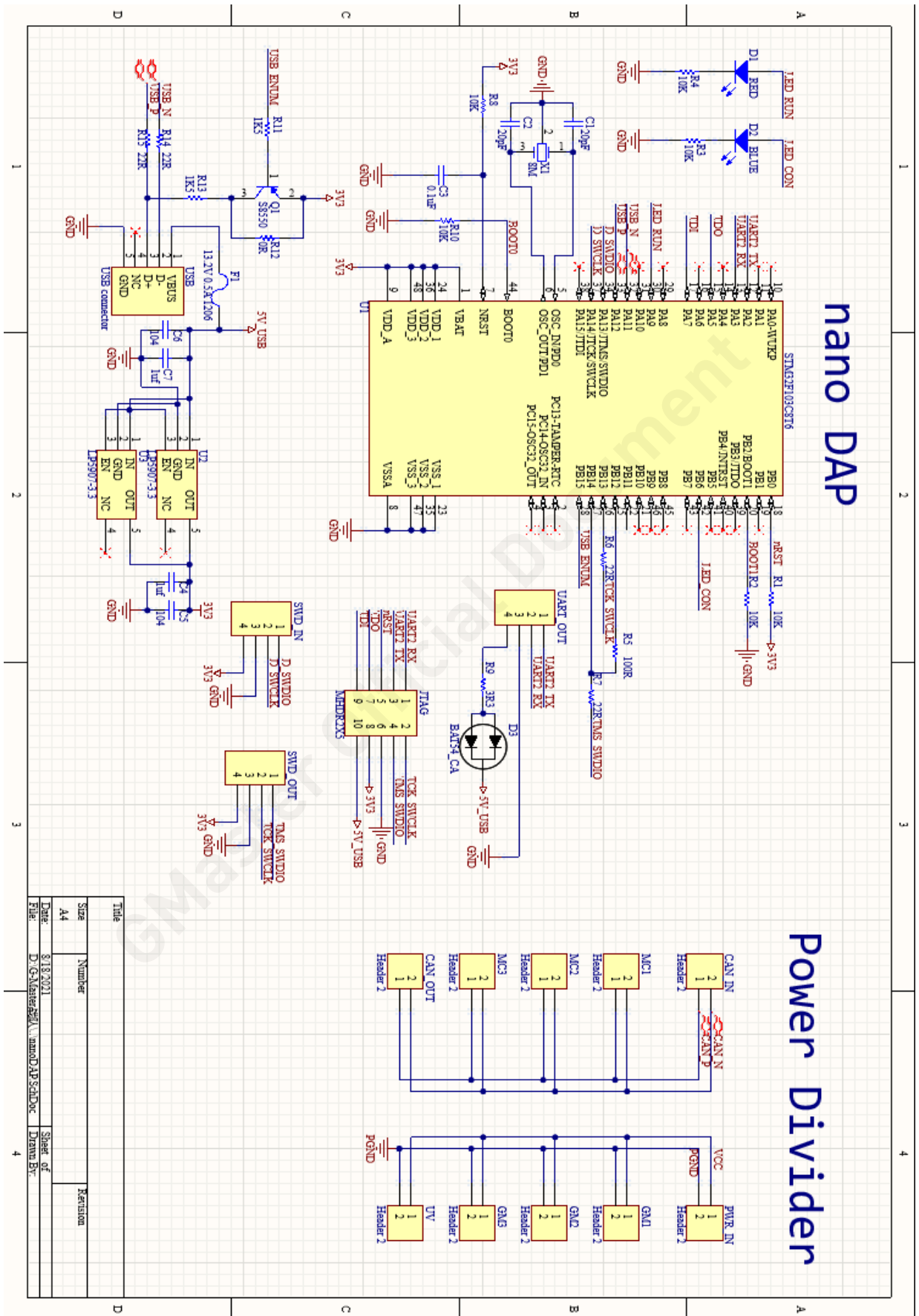
Title	2021 GMaster超级电容模组控制板 - 电源+功率部分
Star	Number
A3	
Date	1/20/2021
Drawn by	D:\VOT\IN\power+power
Sheet of	
Drawn by	T. Fax
Revision	

c) 导电滑环分线板电路原理图



Title	Number	Revision
Size	A4	
Date	3/09/2021	Sheet of

d) C 型开发板扩展板电路原理图



Title	Number	Revision
A4		
Date:	8/18/2021	Sheet of
File:	D:\G-Master\GMA\NanoDAP_SchDoc	Drawn By: