

I Robot 能量机关击打技术报告

作者：杨绪康

1. 能量机关任务背景

能量机关分为大小能量机关，小能量机关可激活时间为比赛开始一分钟后至第三分钟（即倒计时 5:59-4:00），大能量机关可激活时间为比赛开始四分钟后（即倒计时 2:59）。小能量机关激活buff为1.5倍攻击力，大能量机关为2倍攻击力和50%防御。

能量机关示意图：



小能量机关以10 RPM转速匀速旋转，大能量机关转速为三角函数形式：

$$spd = a * \sin(w * t) + b$$

其中 `spd` 的单位为 `rad/s`，`t` 的单位为 `s`。`a`、`w` 的取值随机，取值范围见超级对抗赛规则手册。能量机关任务中的难点和关键点在于大能量机关的运动估计。能完成大能量机关，那么小能量机关也不成问题。

同时需要注意一点，我们击打能量机关的距离相对来说较为固定，一般在测试时，在6.5m~7.5m内测试通过即可。

2. 能量机关的视觉识别

能量机关的识别是基础，虽然其难度并不像运动预测一样大，但是一个好的识别和一个不稳定的识别之间的差距是很大的，尤其是像在争夺能量机关的环节上，你肯定不想瞄着瞄着突然飞了（本人赛场真实情况）。

能量机关的识别中主要包含四个部件：装甲板、待激活扇叶、已激活扇叶、中心R标。待激活扇叶是我们的击打目标，需要和已激活扇叶区分开来。中心R标是为了辅助我们确认能量机关运动的圆心，以进行运动的估计预测。

本赛季方案中对于能量机关的识别会先从能量机关扇叶内外轮廓关系出发，以确认能量机关目标。在 `cv::findContours()` 函数中需要使用 `RETR_TREE` 参数，将得到的 `contours` 建立父子关系，即内外关系。

```
cv::findContours(bin, contours, hierarchy, RETR_TREE, CHAIN_APPROX_SIMPLE);
```

对于目标的识别和筛选，主要根据以下几个方面的特征：

1. 轮廓像素面积
2. 轮廓内外面积比
3. 轮廓角点数

我采用了 `cv::approxPolyDP()` 函数获取轮廓大致的角点数，用于作为一个区分装甲板、待激活扇叶和已激活扇叶的依据。函数具体作用可自查资料得知。

```
cv::approxPolyDP(contours[i], hull, param.approx_epsilon, true);
```

在对能量机关的视觉识别中我们不仅需要将其其他干扰项和能量机关目标区分开来，还需要将待激活目标和已激活目标区分开来。二者的特征如下：

待激活目标：装甲板与扇叶轮廓面积比大，扇叶呈 T 字型，扇叶下方有凹凸不平的流动灯条

已激活目标：装甲板与扇叶轮廓面积比大，扇叶整体轮廓较平直，扇叶外轮廓有三个内轮廓。

如果能将 `param.approx_epsilon` 设置在一个较合适的范围内的话，由于待激活目标流动灯条的凹凸不平，其得到 `hull.size()` 将远大于已激活目标扇叶轮廓，从而顺利将二者区分。除此之外也可以考虑根据扇叶内轮廓数量的特征进行筛选，不过在本赛季方案中并未正式加入。

3. 大能量机关运动预测

3.1 总体方案

大能量机关的运动预测是该任务中的难点、重点，主要需要对其运动函数的振幅、角频率、相位进行估计。我在尝试了多种方案后，最终参考了2021年深圳大学RobotPilots战队在青年工程师大会上提到的方案，由于深圳大学并没有正式开源能量机关的具体方案，我只能根据自己对其答辩内容的理解对其实现，并在此基础上加入了线性插值的方法进行改进，以具有更好的适用性。

进行改进后的方案其优点如下：

1. 无需采用硬触发的方式定时采集相机数据
2. 相位拟合基本重合，激活大能量机关的成功率较高
3. 算法耗时少

3.2 相位拟合算法理论

首先我们需要了解三角函数的一个简单的性质，而这条简单的性质也是该算法的核心之一：

$$F(m, n, t_1, t_2) = \int_0^{2\pi} \sin[m(x + t_1)] * \sin[n(x + t_2)] dx \quad 0 \leq t_1, t_2 \leq 2\pi$$

对于上述函数公式，`F` 在 `m=n`, `t1=t2` 时取得最大值。

我们将采集的目标角速度信号称为 `f(k)`，序列长度为 `N`，假设我们已经求得（或初始化得到的）待估计参数 `a`，`w`，即振幅和周期，我们将原始信号 `f(k)` 中的直流信号分量去除，我们令：

$$g(k) = \frac{f(k) - b}{a}$$

而待估计函数为：

$$T(k, t_0) = \sin[w(k + t_0)]$$

t_0 即为我们待估计的相位。我们可以在 $[0, 2\pi]$ 的范围内等分取离散值，并将 $T(k, t_0)$ 与 $g(k)$ 的每一项相乘并累加（离散求积分）：

$$\sum_{k=0}^{N-1} g(k)T(k, t_0)$$

上述式子在 t_0 与 $f(k)$ 的相位相等时取得最大值，即当 t_0 为目标运动函数的相位相等时取得最大值。但由于我们的 t_0 是在 $[0, 2\pi]$ 的范围内等分取的离散值，所以最大值时是相近，并不完全相等，我们可以通过提高划分的精度以提高结果精度。

3.3 振幅、角频率拟合算法理论

在振幅和周期的拟合上，我采用了深圳大学所提到的离散傅里叶变换(DFT)做法，但其实经过模拟数据测试以及实际测试发现其正确率并不是很高，也可能是我自己没有理解到位。故在此只作为一个参考。

我们先对经过处理的角速度信号 $g(k)$ 作离散傅里叶变换：

$$F(n) = DFT[f(k)] = \sum_{k=0}^{N-1} g(k)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{k=0}^{N-1} g(k)[\cos(\frac{2\pi}{N}kn) - j * \sin(\frac{2\pi}{N}kn)] \quad (0 \leq n \leq N - 1)$$

我们认为当 $F(n)$ 的模 $|F(n)|$ 最大时， $2n\pi/N$ 即为目标信号 $g(k)$ 的各频率分量中所占比重最大的分量，即为 $f(k)$ 的角频率。而由于角频率 ω 的是在一定的范围内的，故我们可以缩小 n 的取值范围。需要注意的是，我们信号的采样数（并不是采样频率） N 也会影响最终所估计的角频率的精度。

振幅的估计相对来说比较的粗略，是一种根据经验的求解方法，没有经过理论推导：

$$a = \frac{|F(n)_{max}|^2}{2N}$$

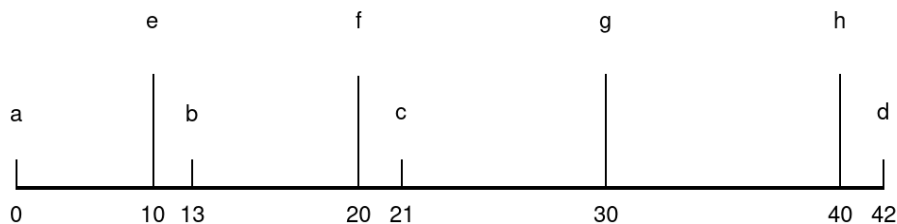
并且约束估计结果在规则中的取值范围内。

3.4 信号采样插值

上述所有的估计方法，都是基于一个前提：采样的信号是需要定频的。深圳大学通过硬触发的方式令相机定频采样，而我们综合考虑了各种因素，决定使用线性插值的方法来完成定频采样的工作。具体算法流程如下：

例如，我们采集数据的时间间隔要求为10 ms——这个时间间隔稍大于实际采样时间——我们将采集一系列角速度值，每个角速度值都附带一个时间戳，以第一帧数据为原点，选取下一帧与其间隔大于等于10 ms的数据，进行线性插值，并再以插值数据为原点进行下一轮插值。

如下图，横坐标是时间轴，abcd为实际采集计算得到的速度数据，efg为线性插值速度数据，将aefg作为拟合数据。



$$e = \frac{10}{13}b + \frac{3}{13}a$$
$$f = \frac{10}{11}c + \frac{1}{11}e$$
$$g = \frac{12}{22}f + \frac{10}{22}d$$
$$h = \frac{2}{22}f + \frac{20}{22}d$$

由于我们采样频率足够高，故使用线性插值的方式并不会造成过大的失真，当然也可以采用一些其他更好的插值方案。

信号插值的方法不仅能解决定频采样的问题，也能一定程度上解决采样时掉帧的问题，当然，掉帧时间过长我们也应当舍去。

3.5 关于算法中的参数

在进行模拟数据测试的过程中，综合考虑算法时间开销、拟合结果正确率，最终选定序列长度 $N=400$ ，采样频率 $f=100$ Hz。

关于预测量时间 t ，由于我们是位于一个相对固定的距离进行的击打，且击打目标面积较大，所以使用了一个固定的预测时间。但弹道补偿的时间依然是由弹道补偿模型计算得出。

3.6 方案缺陷

1. 振幅和角频率的拟合效果较差
2. 采样数据噪声过大，可考虑逐差法求角速度
3. 初始化数据时间较长， $N * (1/f) = 4s$

本方案是本赛季中期才提出的，中间也花费了较多的求证过程，存在着许多可优化的地方，在赛场也可以看出本方案并非效果最佳的方案，故只在此提出作为一个能量机关任务方案的参考，旨在为其他队伍提供更多的思路。

4. 致谢

在刚开始思考能量机关任务时，基本一片茫然，不知道从何下手，试过一些比较其他的不成熟方案但也存在着很多问题，感谢深圳大学RobotPilots战队所提供的思路，以及哈尔滨工程大学王洪玺同学在我优化该方案时作出的重要指导。