

# 云台控制 -- Pitch轴重力补偿与前馈设计

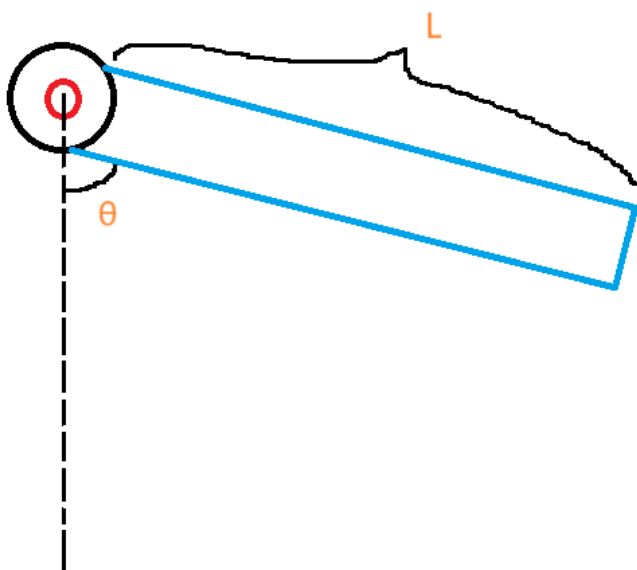
## 1.前言

在Yaw轴控制篇中，我们从Yaw轴速度环的微分方程入手，设计了前馈控制器。在本篇中，我们将介绍更优的前馈环路及Pitch轴的前馈设计方法。

本篇内容涉及：重力补偿、Pitch轴扫频及系统辨识、前馈设计。

## 2.物理模型

对于如图单摆结构的Pitch轴，可给出以下的微分方程：



$$J * \ddot{\theta} + b * \dot{\theta} + \int_0^L (\rho(l) * l * g * \sin \theta) dl = T$$

由于积分结果为一个常数，令其为M，故可写成下式：

$$J * \ddot{\theta} + b * \dot{\theta} + M * g * \sin \theta = T$$

其与Yaw轴微分方程不同的地方在于，Pitch轴会多出一个重力项。

(公式物理量说明：J--转动惯量、b--阻尼系数、 $\theta$ --与重力方向夹角、g--重力加速度、L--杆长、 $\rho(l)$ --线密度)

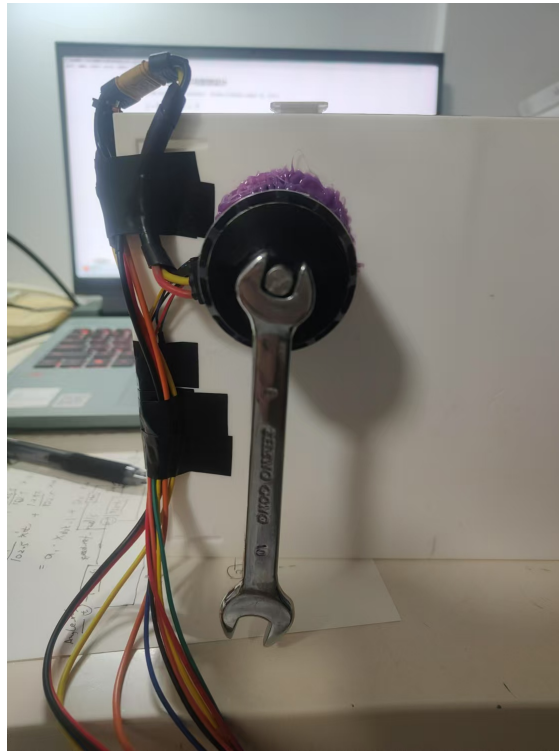
其中，**重力项  $Mg\sin\theta$  为非线性项**，由于我们的前馈控制与PID控制都是针对于线性系统的，于是我们有必要对Pitch轴进行**重力补偿以抵消该非线性项**。

### 3.重力补偿

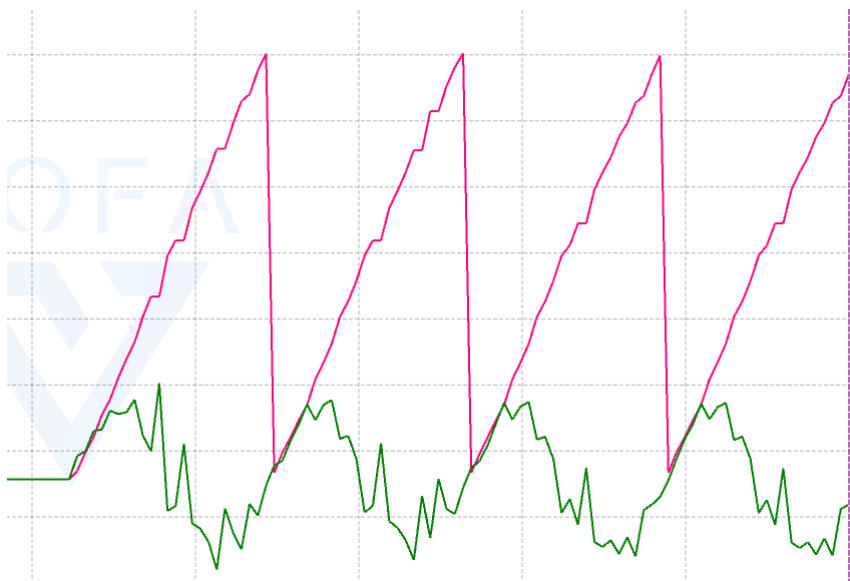
重力补偿分为机械层面的重力补偿与电控层面的重力补偿，本篇介绍的是如何通过电控的方式实现重力补偿。

由上述的物理模型可知，对于单摆结构的Pitch轴而言，其重力项是一个随 $\theta$ 变化的正弦函数，故我们可以粗略地先用PID对Pitch轴进行角度闭环，待角度值稳定不变后，获取其当前角度值与力矩电流值，并将这个过程重复多次，获取不同的力矩电流-角度值。

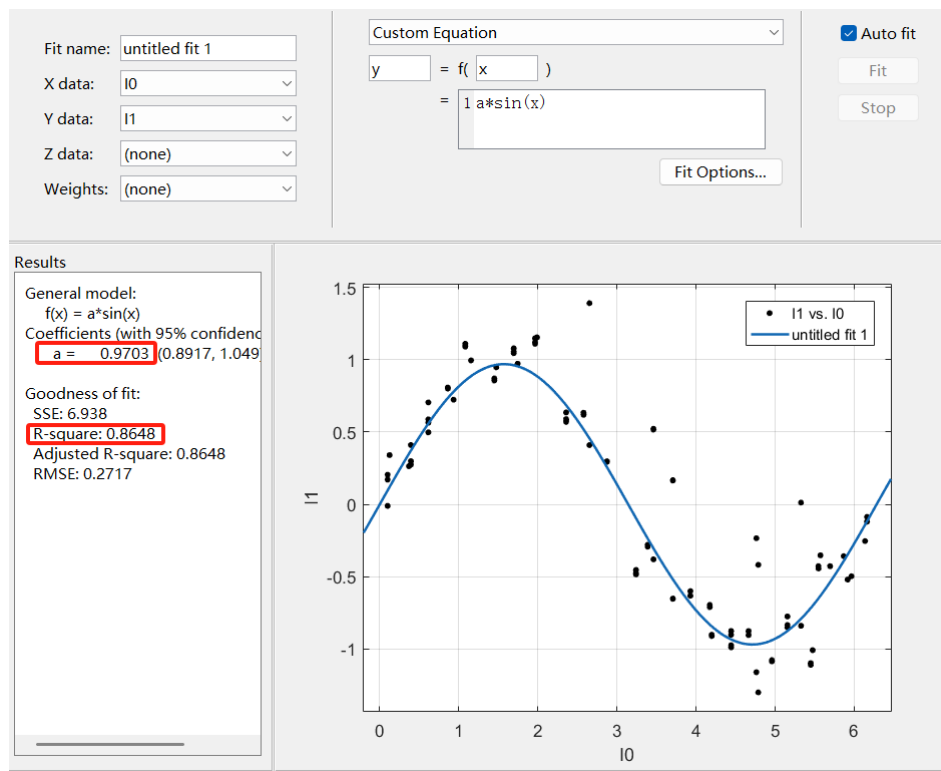
我们对如下机械结构的Pitch轴进行重补数据的采集，可以得到以下的数据图像



(注：红色为角度值，绿色为力矩电流值)



将该数据导入到matlab中，通过cftool工具箱对重力项的系数进行拟合



以上结果显示，其确定系数R-square达到0.86，证明有较好的拟合效果

编写C代码，将重力补偿函数的返回值叠加到内环的输出值（力矩电流值）上，即可实现重力补偿。

若此时断开内环的输出，让力矩电流值直接等于重力补偿函数返回值，可以轻松地将Pitch轴转到任意角度并停住。

```
float Gravity_compensation(float angle)
{
    float Iq_Gravity = 0.9703f*sinf(angle);
    return Iq_Gravity;
}
```

补充：若Pitch轴机械结构不是单摆结构，其重力项就不一定是一个正弦函数了。如果此时无法得知其重力矩与角度的函数关系，可在cftool工具箱中可通过多项式拟合的方式来得到补偿系数。

## 4.Pitch轴系统辨识与前馈设计

由于重力项已经通过重力补偿抵消了，故其微分方程就变得跟Yaw轴的一致：

$$J * \ddot{\theta} + b * \dot{\theta} = T$$

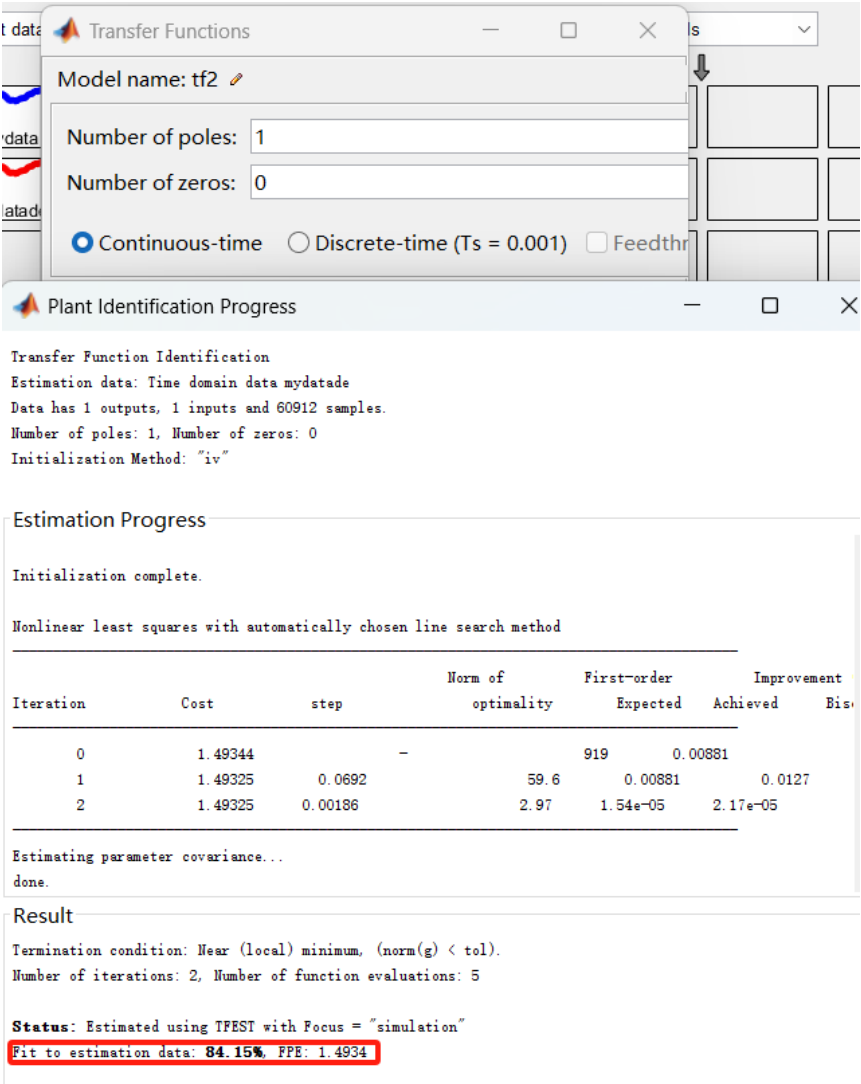
此时就可以通过Yaw轴控制篇所描述的方法来进行系统辨识与控制器的设计。但考虑到实车的结构限制，其操作的实现难度较高，故本篇介绍另一种扫频辨识的方法与前馈设计方法，这种方法设计出来的前馈的控制性能与环路的稳定性都要优于Yaw轴篇中所描述的方法。



可以看到，这次我们的前馈的输入不再是期望角度而是期望转速，这样避免了求2阶导的操作。同时，此时的前馈也只与机械结构有关而与速度环无关，意味着我们不需要像Yaw轴篇一样为了前馈设计的简洁性而让速度闭环只有Kp控制。现在的速度环可以使用PI控制并加入滤波器，进而提高了控制环路的稳定性。

辨识结果

由微分方程可知，辨识的系统为1极点、0零点的一阶系统，得到的辨识结果如下图所示



tf1 =

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{102.5}{s + 1.255}$$

前馈代码

```
float Iq_FFC_OUT(float x_n)
{
    static float ts = 0.001;
    static float x_n_1 = 0.0f;
    static float a1 = 1/102.5f;
    static float a0 = 1.255f/102.5f;
    float x_dot_1 = 0.0f;
    float y_n;

    x_n = 0.02f*x_n + 0.98f*x_n_1;//对输入信号进行一阶低通滤波

    x_dot_1 = (x_n - x_n_1)/ts;

    y_n = a1*x_dot_1 + a0*x_n;

    x_n_1 = x_n;
    return y_n;
}
```

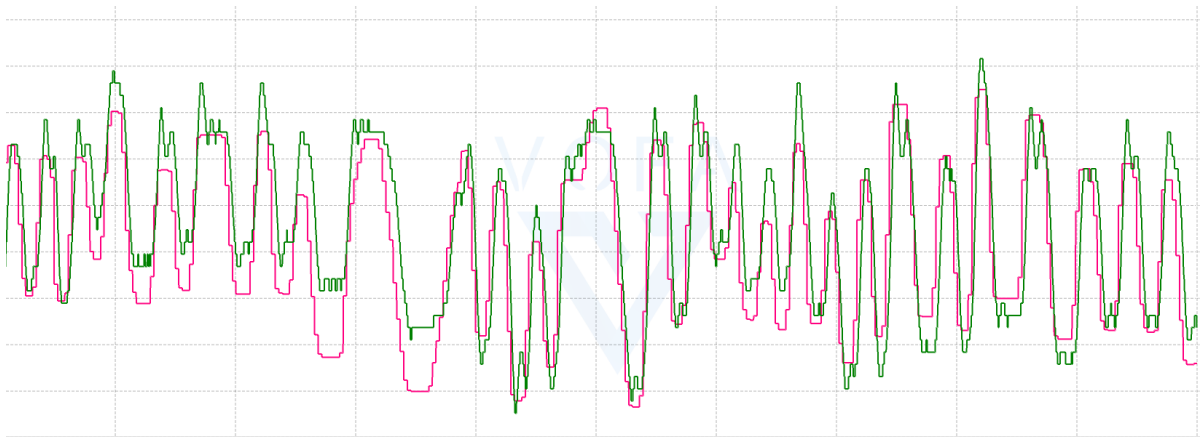
为了防止对阶跃的输入求微分，我们加了一个一阶低通滤波器，以使输入信号变得平滑。

### 效果验证

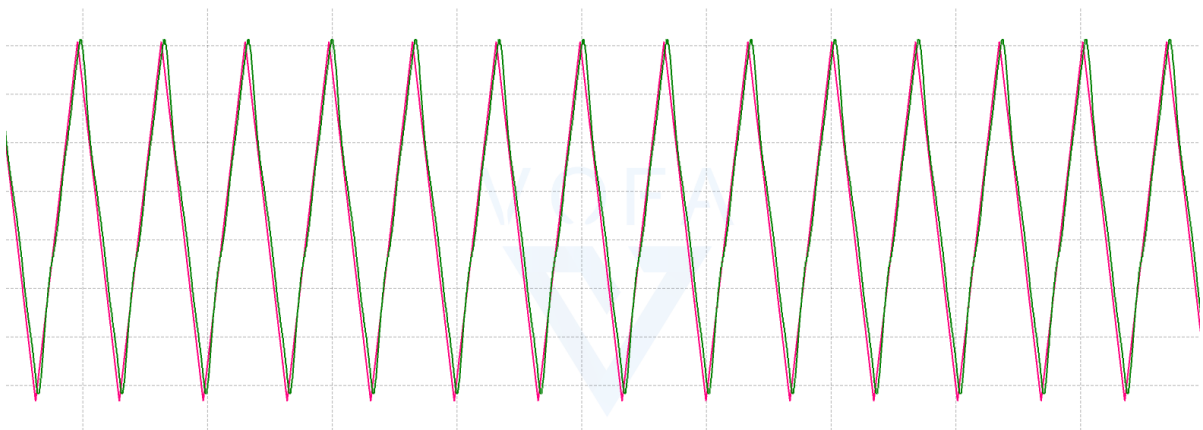
此时我们断开内环PID，在仅使用外环与前馈的情况下验证其控制效果

(注：红色为期望角度，绿色为反馈角度)

输入随机信号



输入三角波



## 4.结语

---

本章介绍了Pitch轴物理模型与重力补偿的方法，并给出了更易于操作的扫频方法与更优的前馈控制环路。至此，云台控制篇就完结了。抛砖引玉，笔者希望能够通过这两篇文档激发大家对电控工作的思考，希望大家能够做到学有所用，不断地将自身所学的知识结合到电控工作中，让队内的电控组焕发生机。