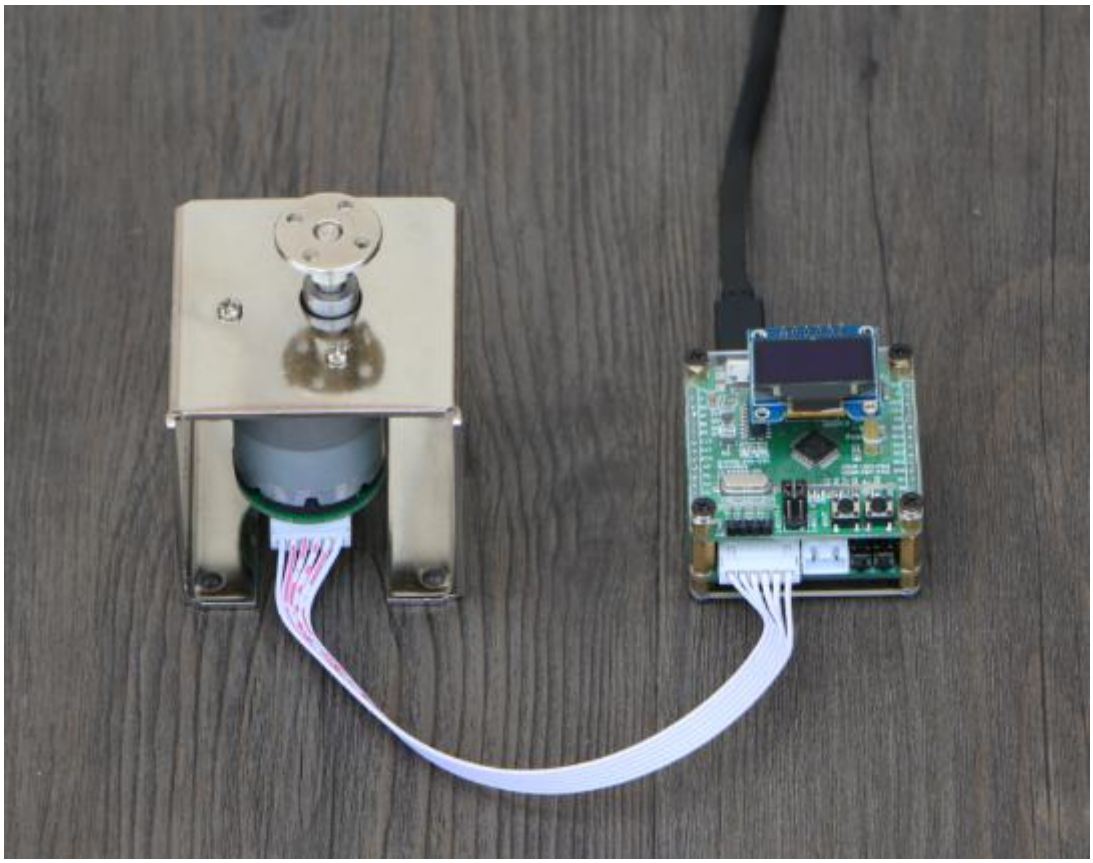
# 直流电机 PID 开发指南

（基于【平衡小车之家】直流电机 PID 学习套件 1.0）



目录

PID 调节器出现于上世纪 30 年代。所谓 PID 控制，就是对偏差进行比例、积分和微分的控制。PID 由 3 个单元组成，分别是比例（P）单元、积分（I）单元、微分（D）单位。在工程实践中，一般 P 是必须的，所以衍生出许多组合的 PID 控制器，如 PD、PI、PID 等。

在我们的微处理器里面，因为控制器是通过软件实现其控制算法的，所以必须对模拟调节器进行离散化处理，这样它只需根据采样时刻的偏差值计算控制量。因此，我们需要使用离散的差分方程代替连续的微分方程。

假定采样时间很短时（比如 10ms），可做如下处理：

1) 用一介差分代替一介微分；

2) 用累加代替积分。

# 1.位置闭环控制

位置闭环控制就是根据编码器的脉冲累加测量电机的位置信息，并与目标值进行比较，得到控制偏差，然后通过对偏差的比例、积分、微分进行控制，使偏差趋向于零的过程。

## 1.1 理论分析

根据位置式离散 PID 公式

$$Pwm=Kp*e(k)+Ki*\sum e(k)+Kd[e(k)-e(k-1)]$$

e(k)：本次偏差

e(k-1)：上一次的偏差

$\sum e(k)$：e(k)以及之前的偏差的累积和;其中 k 为 1,2,,k;

Pwm 代表输出

## 1.2 控制原理图

图 1 为位置控制原理图。其中需要说明的是，我们这边是通过微机实现 PID 控制的，所以下面的【位置 PID 控制器】是一个软件实现的过程，比如在我们的代码里面就是一个我们定义的函数。

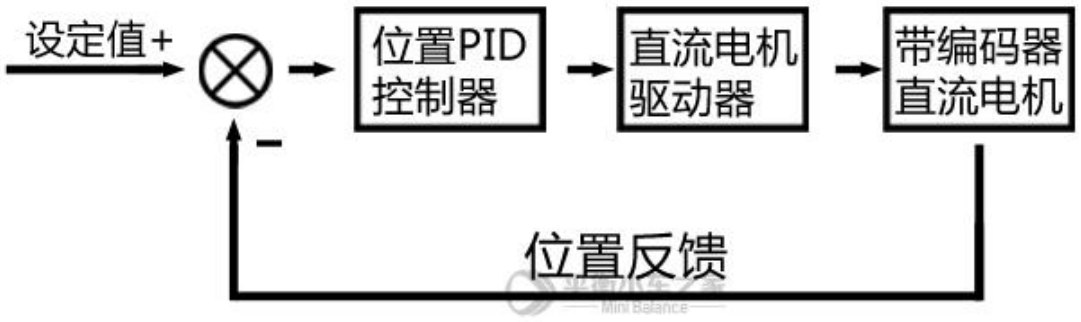



图 1

## 1.3 C 语言实现

如何把我们以上的理论分析和控制原理图使用 C 语言写出来呢，这是一个有趣且实用的过程。位置式 PID 具体通过 C 语言实现的代码如下：

```
int Position_PID (int Encoder,int Target)
{
static float Bias,Pwm,Integral_bias,Last_Bias;
Bias=Encoder-Target;                                  //计算偏差
Integral_bias+=Bias;                                  //求出偏差的积分
Pwm=Position_KP*Bias+Position_KI*Integral_bias+Position_KD*(Bias-Last_Bias);
Last_Bias=Bias;                                       //保存上一次偏差
return Pwm;                                           //输出
}
```

入口参数为编码器的位置测量值和位置控制的目标值，返回值为电机控制 PWM(现在再看一下上面的控制原理图是不是更加容易明白了)。

第一行是相关内部变量的定义。

第二行是求出速度偏差，由测量值减去目标值。

第三行通过累加求出偏差的积分。

第四行使用位置式 PID 控制器求出电机 PWM。

第五行保存上一次偏差，便于下次调用。

最后一行是返回。

然后，在定时中断服务函数里面调用该函数实现我们的控制目标：

```
Moto=Position_PID(Encoder,Target_Position);
```

```
Set_Pwm(Moto);          //===赋值给 PWM 寄存器
```

## 1.4 参数整定

首先我们需要明确我们的控制目标，也就是满足控制系统的 3 个要求：

① 稳定性

② 快速性

③ 准确性

具体的评估指标有最大超调量、上升时间、静差等。

最大超调量是响应曲线的最大峰值与稳态值的差，是评估系统稳定性的一个重要指标；上升时间是指响应曲线从原始工作状态出发，第一次到达输出稳态值所需的时间，是评估系统快速性的一个重要指标；静差是被控量的稳定值与给定值之差，一般用于衡量系统的准确性，具体可以参考图 2 的解析。

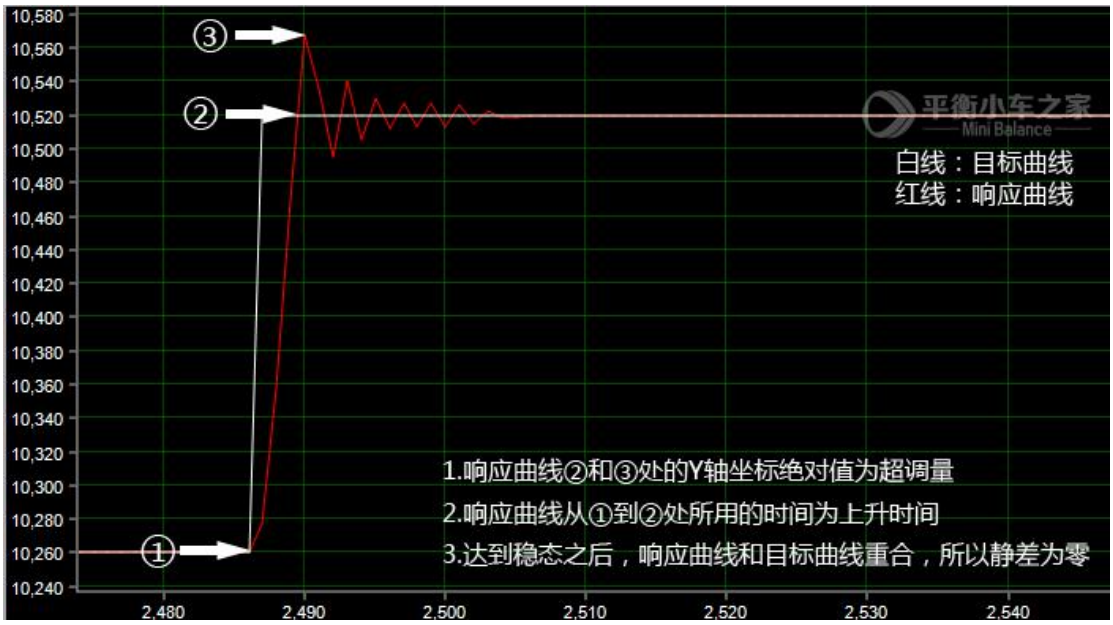



图 2

下面我们使用【平衡小车之家】直流电机 PID 学习套件 1.0 进行 PID 参数整定实验，使用套件的控制板上面的按键调节 PID 参数，然后通过观察上位机响应曲线，并评估控制效果,给出 PID 调节的心得。关于 P、I、D 三个参数的主要作用，可以大致又不完全地概况为：P 用于提高响应速度、I 用于减小静差、D 用于抑制震荡。

下面我们把控制目标从 10000 上升至 10260 时，观察响应曲线的变化。一般我们进行 PID 参数整定的时候，首先设 I 和 D 值为零，然后把 P 值从 0 逐渐增大，

直到系统震荡。

① KP=500,KI=0,KD=0.响应曲线如图 3：

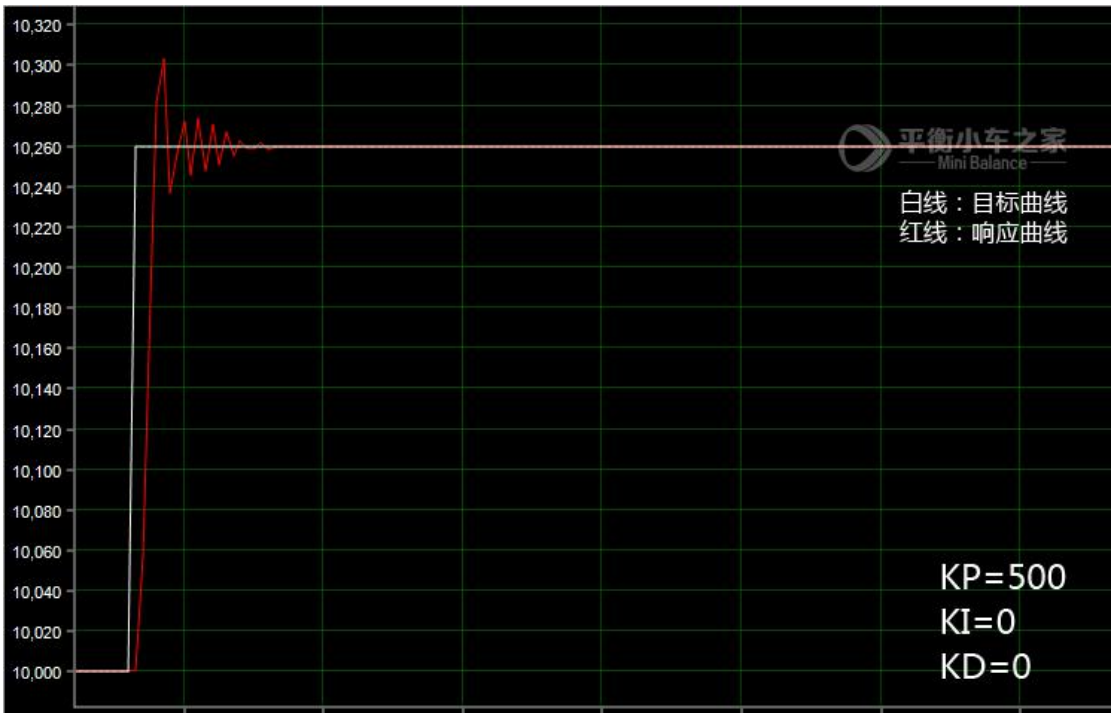



图 3

这个时候因为 P 值比较大，出现了震荡。可能大家会疑惑，为什么 I 值为零，但是没有静差呢？因为这个时候的 P 值已经很大了，静差一般是在 P 值较小而 I 值为零的时候出现的。为了验证我们的想法，我们对 PID 参数进行调整。

② KP=50，KI=0，KD=0.响应曲线如图 4：

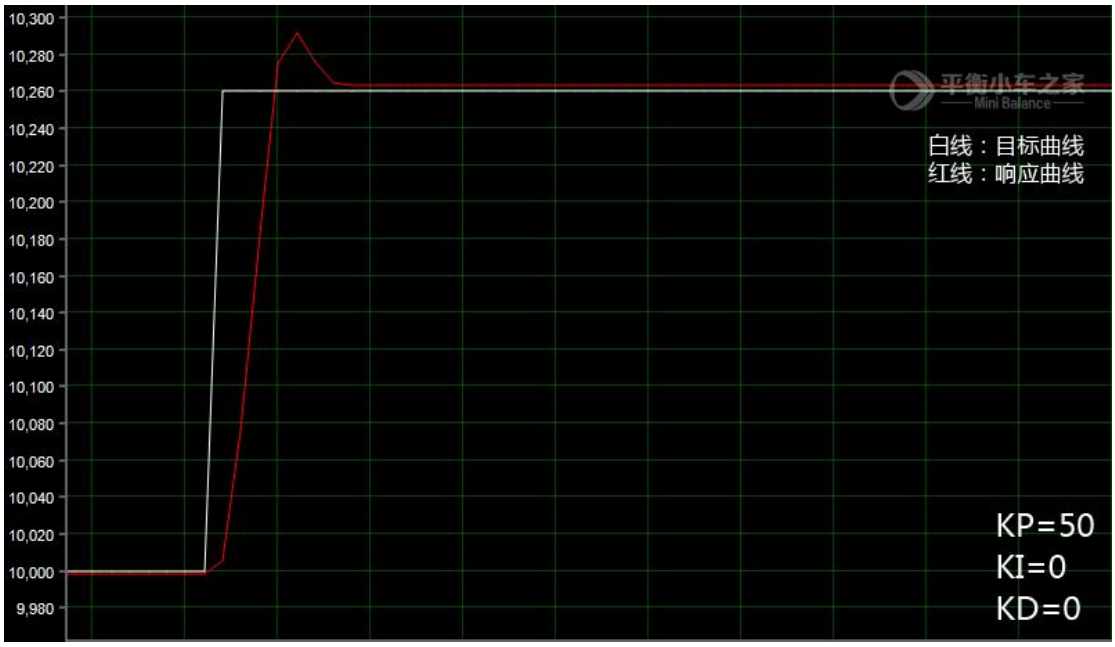



图 4

据图分析，如我们所设想的，在 P 值较小的时候出现了静差，响应速度也明显降低。所以增大 P 值可以一定程度上消除静差，提高响应速度，但是会导致系统震荡，而加入微分控制可以有效抑制震荡。下面我们尝试一组新的 PID 参数。

③ KP=500，KI=0，KD=400.响应曲线如图 5：


图 5

据图分析，加入微分控制之后，图 5 与图 3 相比，系统的震荡得到了抑制，震荡次数减少。事物都有两面性，微分控制也是弊端的。可以看到，系统的响应明显变慢了，因为引入微分控制相当于增大了系统的阻尼。这个时候我们需要结合 P 值和 I 值进行进一步的优化。

在实践生产工程中，不同的控制系统对控制器效果的要求不一样。比如平衡车、倒立摆对系统的快速性要求很高，响应太慢会导致系统失控。智能家居里面的门窗自动开合系统，对快速性要求就不高，但是对稳定性和准确性的要求就很高，所以需要严格控制系统的超调量和静差。所以 PID 参数在不同的控制系统中是不一样的。只要我们理解了每个 PID 参数的作用，我们就可以应对工程中的各种项目的 PID 参数整定了。

位置控制的调节经验可以总结为：先只使用 P 控制，增大 P 系数至系统震荡之后加入微分控制以增大阻尼，消除震荡之后再根据系统对响应和静差等的具体要求，调节 P 和 I 参数。

一般而言，一个控制系统的控制难度，一般取决于系统的转动惯量和对响应

速度的要求等。转动惯量越小、对响应速度要求越低，PID 参数就越不敏感。

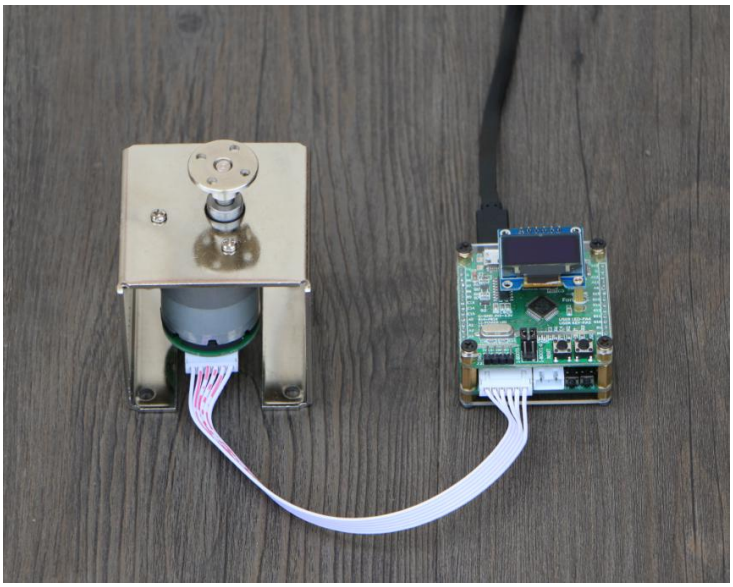


图 6

比如现在我们接到一个任务，使用如图 6 所示的【平衡小车之家】直流电机 PID 学习套件控制电机转 90°，需要严格控制超调量、和静差。但是对响应速度无要求。

因为电机处于轻载的情况下，转动惯量很小，这是一个很容易完成的工作。根据上面的理论分析和实践，因为响应速度无要求，一般 P 应该给小一点，然后加大系统的阻尼防止超调，也就是 D 参数尽量大，另外因为 P 值较小，应该加入 I 控制减小静差。根据我们的经验和简单的参数整定，最终得到一组 PID 参数 KP=120，KI=0.1，KD=500;响应曲线如图 7 所示。

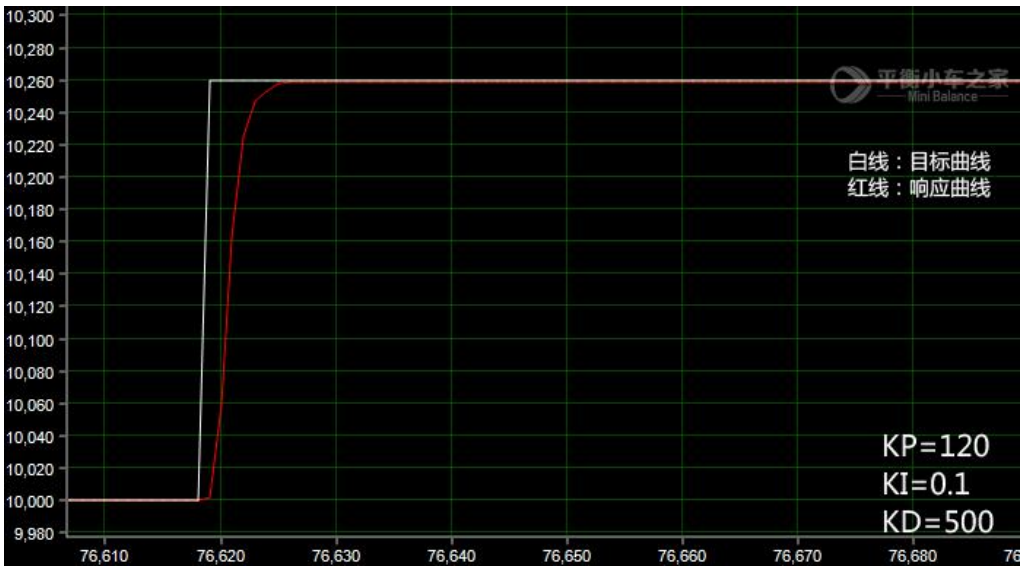



图 7

# 2.速度闭环控制

速度闭环控制就是根据单位时间获取的脉冲数（这里使用了 M 法测速）测量电机的速度信息，并与目标值进行比较，得到控制偏差，然后通过对偏差的比例、积分、微分进行控制，使偏差趋向于零的过程。

一些 PID 的要点在位置控制中已经有讲解，这里不再赘叙。

需要说明的是，这里速度控制 20ms 一次，一般建议 10ms 或者 5ms，因为在这里电机是使用 USB 供电，速度比较慢，20ms 可以延长获取速度的单位时间，提高编码器的采值。

## 2.1 理论分析

根据增量式离散 PID 公式

$$Pwm+=Kp[e(k)-e(k-1)]+Ki*e(k)+Kd[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]$$

e(k)：本次偏差

e(k-1)：上一次的偏差

e(k-2)：上上次的偏差

Pwm 代表增量输出

在我们的速度控制闭环系统里面只使用 PI 控制，因此对 PID 控制器可简化为以下公式：

$$Pwm+=Kp[e(k)-e(k-1)]+Ki*e(k)$$

## 2.2 控制原理图

图 8 为速度控制原理图。其中需要说明的是，我们这边是通过微机实现 PID 控制的，所以下面的【速度 PI 控制器】是一个软件实现的过程，比如在我们的代码里面就是一个我们定义的函数。

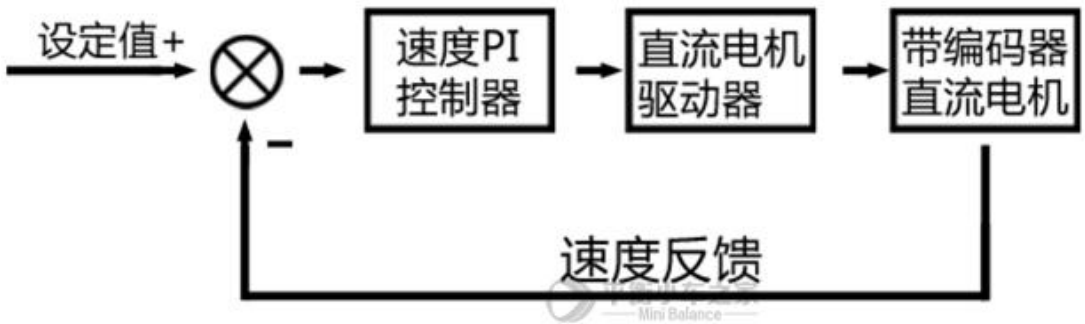



图 8

## 2.3 C 语言实现

增量式 PI 控制器具体通过 C 语言实现的代码如下：

```
int Incremental_PI (int Encoder,int Target)
{
  static float Bias,Pwm,Last_bias;
  Bias=Encoder-Target;                                  //计算偏差
  Pwm+=Velocity_KP*(Bias-Last_bias)+Velocity_KI*Bias;   //增量式 PI 控制器
  Last_bias=Bias;                                       //保存上一次偏差
  return Pwm;                                           //增量输出
}
```

入口参数为编码器的速度测量值和速度控制的目标值，返回值为电机控制 PWM。

第一行是相关内部变量的定义。

第二行是求出速度偏差，由测量值减去目标值。

第三行使用增量 PI 控制器求出电机 PWM。

第四行保存上一次偏差，便于下次调用。

最后一行是返回。

然后，在定时中断服务函数里面调用该函数实现我们的控制目标：

```
Moto=Incremental_PI(Encoder,Target_Velocity);
Set_Pwm(Moto);          //===赋值给对应 MCU 的 PWM 寄存器
```

这里我们的参数 Velocity_KP=20,Velocity_KI=30，PI 参数在不同的系统中不一样，我们的代码中的 PID 参数，仅针对【平衡小车之家】直流电机 PID 学习套件 1.0 调试得到，大家可以使用控制板的按键调节 PI 参数，然后通过观察上位机波形评估控制效果。

以上的知识请结合完整代码理解，我们的代码基于 STM32F103C8 控制器，但是把基于 C 语言的 PID 控制器部分剥离，并放在 control.c 里面，故对 STM32 不熟悉的同学依然可以使用记事本打开这个文件查看。



直流电机 PID 学习套件详情地址：

https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.1-c.w4004-9258381245.11.xfmqC1&id=532496279494