

步进电机平衡小车与 LV8731V

平衡小车是学习研究控制算法的很理想的平台。很多爱好者在 DIY 贴片机或者 3D 打印机之余，希望制作一个平衡小车耍耍，正好打算利用手头上的步进电机和驱动器。但是大家做小车的时候不太好理解步进电机做平衡小车时候的 PID 结构和电机选型、细分控制等问题，下面我们将交流一下我们的项目经验。

1. 步进电机的缺点

本节开始介绍之前，先介绍一下步进电机的缺点。

- ① 低速转动时振动和噪声都比较大；
- ② 输出力矩随着转速升高而降低；
- ③ 启动频率不能太高，否则会堵转并伴随有呼啸声；
- ④ 速度突变较大时存在丢步和过冲现象；
- ⑤ 最高运动速度较低，且高速转动时输出力矩小；
- ⑥ 开环控制，不能完全保证实际运行效果与给定一致；

看到这些大家先不泄气，不是我们要打击大家的士气，因为这些问题后面我们或多或少都需要面对的，就当是增加了我们工作的挑战性吧。当然，上述部分缺点可以通过一些办法弥补的，比如使用细分驱动器改善低速性能，在一些工业场合会配备减速器，让步进电机工作在高速的同时输出低速；通过加减速曲线防止速度突变等。但是在高速运动的时候力矩小是电机的固有特性，因为步进电机的功率体积比小，所以，如果单纯的使用功率更大的步进电机，体积也相应增大，在平衡小车这种运动控制系统里面，负载也随之增大。所以需要均衡各方面的要求。

2. 步进电机在平衡小车上面的应用

下面我们将从电机选型开始，结合直流电机平衡小车做对比。首先，直流减速电机做平衡小车的时候转速一般需要 250rpm 以上(基于直径 65mm 轮胎)，电机扭矩大小一般和小车重量有关，扭矩的大小决定了平衡小车的抗干扰能力和负载

能力。步进电机的转速和频率相关，根据我们的经验，使用 42 步进电机(步距角 1.8° ,相电流 1.3-1.7A)制作平衡小车，当配备 16 细分的驱动器的时候，频率一般最多大可给到 13khz，因为步进电机的矩频特性，高速时转矩下降很大。另外，频率太大的时候，脉冲信号变化太快，步进电机由于内部的反向电动势的阻尼作用，转子与定子之间的磁反应将跟随不上电信号的变化，将导致堵转和丢步。下面给出频率计算公式：

$$\text{步进电机转速} = \text{脉冲频率} * 60 / ((360/T) * X)$$

步进电机转速单位是：rpm

脉冲频率单位是：Hz

X：步进电机驱动器的细分数。

T：步进电机固有步距角。

根据公式计算出我们以上使用的步进电机转速是 243.75rpm。基本可以满足平衡小车的要求，而且，我们可以无需使用减速器，避免了电机输出轴的回程间隙，因此，步进电机平衡小车在直立的时候性能非常好。

限制步进电机平衡小车频率最大值的不仅仅是矩频曲线，还有平衡小车的控制算法。我们知道，在贴片机、雕刻机等项目是开环系统，输出由输入决定，控制原理图如图 4 所示。



图 4

以上是雕刻机的简单控制原理图。显然，这个是一个开环系统，步进电机的运行轨迹由 CAD 过程决定。运行速度可以由控制器决定，也就是说，我们可以根据步进电机的特性设定理想的加减速曲线，如正弦曲线或者经过修调的指数曲线，避免步进电机高频无法启动等问题。

而在平衡小车里，我们可以看作是一个双输入量、单控制量的闭环系统。其控制原理图如图 5。

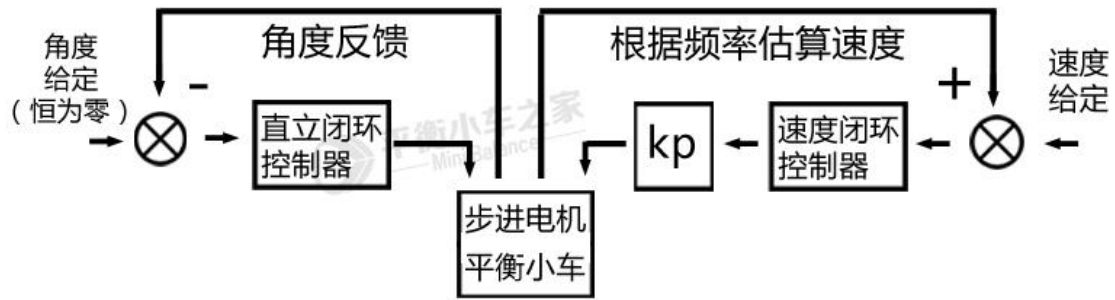


图 5

可以看到,因为步进电机的速度是由上一个控制周期输出频率估算的,所以,这不是一个理想的闭环的系统,但是在平衡小车上应用,已经可以满足要求。根据系统原理图,我们得知,步进电机的输出速度并不完全是我们预设的,还取决于外部传感器的输入,甚至会有外部干扰。理想情况下,在采样时间足够短的前提下,传感器的角速度输入是连续的,输出也是连续的。但是在受到较大干扰的情况下,角度值会发生突变,此时步进电机突然进入高频区,缺少加速过程,容易发生堵转并伴随有呼啸声。所以,步进电机平衡小车的抗干扰能力较直流电机而言,是比较弱的。

3. 步进电机与直流电机平衡小车控制差异

在控制方面,直流电机和步进电机平衡小车的 PID 结构基本一样的。下面说一下一些细节的不同点。

① 定时器配置

直流有刷电机驱动器一般根据占空比大小控制速度,频率是固定的;步进电机驱动器根据频率大小控制速度,占空比是固定的。使用 STM32 的时候,一般我们会把定时器设置为 PWM 模式控制直流电机,这样一个定时器可以输出多组 PWM。但是 PWM 模式同一个定时器输出的 PWM 频率是固定的,如果使用 PWM 模式改变频率控制步进电机平衡小车,需要至少 2 个定时器,在一些定时器资源捉襟见肘的系统里面是不可取的。所以,一般我们使用定时器的输出比较模式,这样一个定时器可以输出多组不同频率的 PWM,在一些其他项目,如 delta 机器人,机械手等使用了多个步进电机的项目中这个技巧就很实用。

② 直立控制

根据制作直流电机平衡小车的经验,我们知道,直立控制使用 PD 控制器。

而步进电机因为自身不带减速器且一般负载很小，所以，转动惯量较低，可以使微分参数很小甚至为 0。一般我们设定为 0，因为微分参数会放大系统的噪声，减小步进电机平衡小车的抗干扰能力。下面是控制代码：

```
int balance(float Angle ,float Gyro)
{
    float Bias,kp=350,kd=0.000;    //这里 D 为零
    int balance;
    Bias=Angle-ZHONGZHI;          //===求出平衡的角度中值 和机械相关
    balance=kp*Bias+kd*Gyro;       //===计算平衡控制的电机 PWM
    return balance;
}
```

③ 速度反馈与控制

和直流电机平衡小车一样，步进电机平衡小车也使用 PI 控制器对速度进行调节。而且控制器也基本一样，不同之处在于，直流电机速度反馈是使用编码器，而步进电机是使用上一个控制周期计算的频率值代替编码器反馈。可以根据下面的代码理解一下，代码是在一个周期为 100HZ 的定时中断服务函数里面循环执行。

```
Balance_Pwm =balance(Angle_Balance,Gyro_Balance);
Velocity_Pwm=velocity(Moto1,Moto2);
Turn_Pwm     =turn(Moto1,Moto2);
Moto1=Balance_Pwm+Velocity_Pwm-Turn_Pwm;
Moto2=Balance_Pwm+Velocity_Pwm+Turn_Pwm;
Set_Pwm(Moto1,Moto2);
```

可以看到，在一个新的控制周期到来之后，系统读取上一个控制周期计算出来的控制量 Moto1、Moto2 作为速度反馈。需要说明的是，Moto1、Moto2 并不是最终输出频率，而是和输出频率之间存在一个系数关系。另外，为了减小数据的噪声，进行了滑动平均滤波和低通滤波，具体可以看完整的代码。

4. 步进电机控制与 LV8731V

很多同学第一次体验步进电机控制是在 51 开发板上。使用达林顿管配合单片机延时去控制步进电机，通过 Delay 函数进行延时来改变脉冲频率进行调速。这种方法不仅浪费单片机的资源，也没法对步距角进行更大的细分，单双拍混合工作时，可以理解为工作在 2 细分状态，无法满足平衡小车在低速控制时对稳定性的需求。所以，我们这里是使用专用细分驱动芯片去控制。

步进电机的细分技术实质上是一种电子阻尼技术，其主要目的是减弱或消除步进电机的低频振动，提高电机的运转精度是细分技术的一个附带功能。两相步进电机的基本步距角是 1.8° ，即一个脉冲走 1.8° ，如果没有细分，则是 200 个脉冲走一圈 360° ，细分是通过驱动器靠精确控制电机的相电流所产生的，与电机无关，如果是 16 细分，则发一个脉冲电机走 0.1125° ，即 3200 个脉冲走一圈 360° ，电机的精度能否达到或接近 0.1125° ，还取决于细分驱动器的细分电流控制精度等其它因素。不同厂家的细分驱动器精度可能差别很大；细分数越大精度越难控制。在电机实际使用时，如果对转速要求较高，且对精度和平稳性要求不高的场合，不必选高细分。在实际使用时，如果转速很低情况下，应该选大细分，确保平滑，减少振动和噪音。细分越大，相同的转速下，控制器需要输出的信号频率越高，而高频信号容易受干扰。在我们的平衡小车上，使用了 16 细分。

LV8731 芯片是三洋半导体 2010 年最新推出的两相步进电机驱动器芯片，用于驱动 57 及以下的步进电机，此芯片为最新工艺，超低的 0.45 欧导通电阻，体积更小，发热更低，加入了跨时代的短路保护功能，并且芯片本身带有 5V 电源输出，无需配合稳压芯片使用，特别适合在平衡小车上使用。

下面是部分参数：

电压：9-32V

最大工作电流：2.5A

可选细分：1、2、4、16

图 6 是应用在我们的平衡小车上面的原理图。

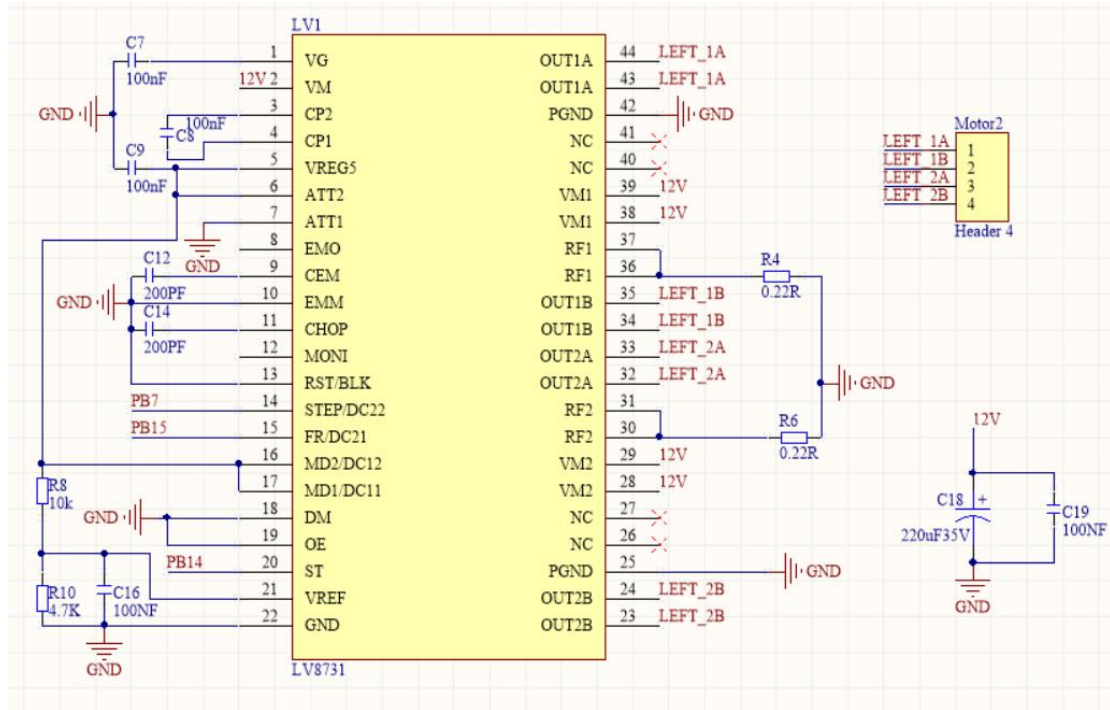


图 6

看一遍手册，然后根据手册提供的典型应用电路图设计即可。下面讲解一下重点，R4 和 R6 的选用，用于确定输出电流，可以由公式计算得到。

$$I_{OUT} = (VREF/5) / RF$$

在我们的原理图中，VREF 是由电阻分压得到，最后计算得到的电流是

$$I_{OUT} = (5V * 4.7 / 14.7 / 5) / 0.22\Omega \approx 1.45A$$

另外，在控制方面也是非常简单的。我们接入合适的 2 相 4 线步进电机之后，通过 FR 引脚的高低电平控制电机正反转，STEP 引脚的脉冲频率控制电机的运行速度，ST 引脚低电平或者悬空，芯片进入“待机模式”；高电平进入“工作模式”，所以工作的时候需要置高。