

直立车控制，我之初见

海南大学 越努力越幸运

前言

首先我想说仅凭华南赛区一等奖的成绩是完全不应该大言不惭的写这些东西，但是又想和大家分享我做直立车一年的经验，其一算是自己对直立车看法的一些总结，再者也是希望能给以后入门车友们一些建议，让他们尽量少走弯路，所以还是决定写点东西。

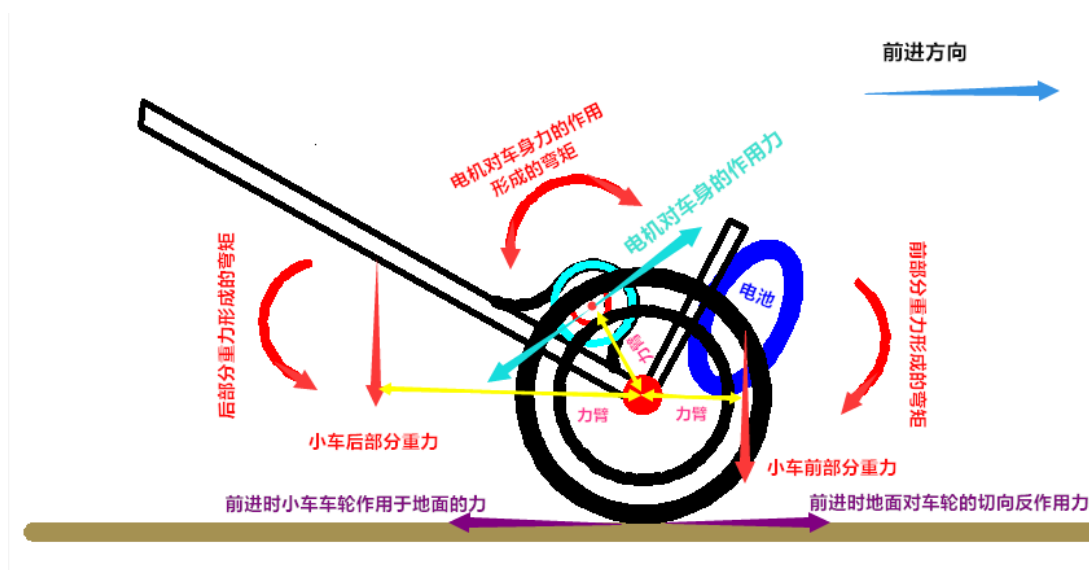
然而，从执笔到停笔，不经意洋洋洒洒写了一万多字，庆幸的是整篇文章并不是我一人的片面之言，而是综合了颇多获得国特、国一和其他有想法有见解的车友的对直立车的认识与看法，忽略我，此文可谓集大家之成，由此我认为这篇文章是具有一定的参考意义的。所以希望有心之人能认真阅读。

自认为这是应该算是一篇直立车的入门教程，但由于本人的水平有限，所以肯定有不当之处，因此还请大家海涵，也期待你们能指正并不吝赐教。同时衷心希望借此机会与大家互相学习、共同进步！

最后，十分感谢一路走来车友们对我的帮助与支持以及他们与我真诚地交流，谢谢！

换一种思维理解直立车

在阅读我后面逐个讲解直立、速度、转向及机械这一大堆废话之前，我想首先用最通俗的言语和你们讨论直立车到底是如何实现直立、跑动以及转向的。



上图是以我的理解画的简化后的直立小车受力分析图，主要由电池、底盘、车轮以及电

机组成。假如我们已经组装了一辆具有机械零位的小车，平衡位置上图所示，也就是这个位置是它能够站起来的状态，如果受外力前倾或者后仰，小车就会倒下。前倾和后仰都是绕车轴旋转，为什么会旋转？其实就是小车合力矩越过了过车轴并垂直地面的支点线。简单的理解可以认为前部分弯矩大于后部分弯矩就往前趴；后部分弯矩大于前部分弯矩就向后仰。

我们仔细分析这张图来理解小车是如何稳定的立起来的，这里我就不采用经典的单摆模型去解释了，而是根据上图由系统受力平衡去分析。我们知道弯矩是力矩的一种，即是力和力臂的乘积，小车有机械零位也就是存在除车轮以外无其他部位接触地面时的平衡位置。立起来的小车在外界干扰下偏离此位置时，前后力矩由于力臂长度的改变从而不再相等即打破平衡状态，因此若不引入电机的干扰小车就会倒下。而电机的输出其实是转矩，转矩是什么呢？其实也是一种力矩。转矩除以旋转半径就是力了，也就是我图中电机处浅蓝色的箭头所代表的力，这个力的方向和与电机齿轮啮合的传动齿轮啮合处的切线平行，如果是啮合的很好的齿轮的话那就是分度圆的切线。它的正负方向因电机旋转的方向而改变。**因此我们就明白了，小车直立的时候，若是往前倾，电机这个作用于车身上的力就往后拉，若是小车后仰，电机转矩就产生往前拉的力来使小车回到平衡位置而立住。**

那么小车是如何向前跑的呢？理解了直立，再来理解速度其实就不难了。如果利用直立环的控制将小车立在其机械零位，小车是不会跑的。**因为电机的作用就是为了让小车回到这个平衡位置，这个位置的系统受力是平衡的，因此，这个位置只要电机转动就会产生力的作用，从而产生力矩，破坏系统的平衡状态。**那么怎样的位置电机转动往前跑小车还能不倒？这个位置就是小车在非机械零位处站住的位置。这是什么意思？我们可以这样理解，比如说我们想要小车立在前倾某个角度的位置，这个时候，我们通过受力分析可以知道，小车前部分的弯矩必将大于后部分的弯矩，直立环要使小车不向前旋转倾倒，电机就得对底盘有力的作用也就是有转矩的输出转化为能够平衡小车向前的合力矩的力矩，于是小车就跑起来了。

而关于小车是如何转向的。这就十分简单了，小车两个轮子的转速不同就转向了。这就叫两轮差速转向。

值得一提的是，两轮车的转向半径的极限不同于四轮车。四轮车最小转向半径由转向舵机、转向传动安装方法及前轮安装方式有关一般不能太小，最大转向半径理论也是无穷大。两轮车的最小转向半径就是轮距的一半，最大转向半径理论上也是无穷大的。说到这我们其实可以通过限制两轮的转速差对直立车的最小转弯半径做一个限幅，避免转向环节出现极端情况。

说到这也许有人会觉得直立车小车两个轮子负责了直立、速度和转向会有点应付不过来，其实只要控制得好是没有问题的。话又说回来，这三个任务其实可以看成两个任务，即把直立和速度看成同一个任务，这点希望你们能慢慢理解。

好啦，简单的解释就这么多了，对着受力图理解应该不难，**当然在这里还得强调下，并不是电机转起来就能对车身有力的作用，如果电机空转肯定是对小车没有力的作用的，之所以会有力是因为电机转动带动车轮，而车轮和地面接触，在地面上会形成一个切向力，作用力与反作用力，这样才能使电机对车身有拉或者推的力。**因此，若是车轮接触的是完全光滑的平面，这样的情况下小车是不可能立起来的，当然如果车轮的质量很大，惯性很大，就另当别论了。好了，接下来我就单独分析每个环的实现，从理论到方法上去解释每个环节以及实现每个环节。

直立车控制之直立环

直立车要想**不跑动**的站立起来，首先得具有机械零位，什么是机械零位呢？就是小车在不借助外力和系统内力的前提下，自己能够站起来，这个时候小车姿态相对于空间的位置状态就是它的零位。平衡车只有两个车轮，一般说来车模的倒下是指车身绕车轴旋转，即前倾（趴下）和后仰（躺下）。规定了车子的前进方向之后，我们就相应的规定车模绕车轴偏离零位的旋转是前倾还是后仰。这个时候其实我们可以将车模在这个方向的自由度简化为一根一维坐标轴，坐标轴的零点即车模的机械零位，坐标轴的正方向即车模前倾（或后仰）的方向，坐标轴的负方向即车模后仰（或前倾）的方向。车模前倾和后仰对应的是正是负完全可以按你的喜好去规定，只要在后续环的控制中能保持方向一致，其对车模的控制并不会造成任何影响。

确定车模的零位和车模绕车轴旋转的正负方向之后我们就可以进行车模的直立控制了。上文有提到，车模要想直立，首先得有机械零位，即不依赖外力和系统内力就能站住。那么首先我们就需要给系统一个机械零位，那么这个零位如何获得呢？就 E、D 车模本身，我认为是不具有我们定义的机械零位的，也就是不管怎么摆放，不管车模底盘相对于水平地面的夹角为多大，都不能让其不借助支撑站立在那里——因为其质量比较分散，重心较高，很容易越过支点线，所以很难摆稳。但是没关系，我们本身就不可能用一辆空车模去比赛，一辆平衡车要想跑好，必不可少的需要：电路单元、传感器单元、动力单元以及能量单元。车上

所有的电路板我就笼统的概括成电路单元了，一般包括单片机电路、传感器电路、驱动电路、电源管理电路等。传感器单元主要就是指不同类型的路径传感器、姿态传感器和车轮转速传感器了，当然其他还有很多，在这里我就不做过多讨论。动力单元主要就是电机；能量单元就是电池了。一辆平衡车要想易于被控制和控制的效果尽可能好，良好的机械是必须的。什么是良好的机械呢？在我看来无非就是：质量集中、重心低、质量轻。短短十个字，要想实现却不容易。往往我们在设计机械时顾此失彼，保证了前者顾不上后者。所以，在机械的设计组装时我们一定要舍得花心思，动脑筋。磨刀不误砍柴工，平台搭好了，算法自然轻松在其之上翩翩起舞。

另外在此我要特别强调一下配重，就我的观点而言，不到万不得已，不要加配重，有人认为配重可以防止小车飞坡，在我看来是这种观点应该是有失偏驳的，坡道会不会飞出去只和速度有关，与质量是没有关系的。如果一个坡道 $1Kg$ 的小车 $3m/s$ 的速度能飞，那 $10Kg$ 的小车这个速度也能飞，我想这个道理很简单，我就不用再过多的去解释。当然确实也有车友会发现加了配重之后车子确实不容易飞坡，这个是因为车子比较重，上坡时重力的分力比较大导致上坡阶段减速较多而已，虽然具有一定的效果但我总认为这不是一个理想的控制。还有车友认为可以利用增加配重去增加摩擦力，这个没错： $F_f = G \cdot f$ 。增大了 G ， F_f 自然增大，但是也正是由于增大了质量，导致车模难以被控制，因为质量越大，惯性越大，也就是越难改变其运动状态，包括加速性能和方向控制等，因为其转动惯量也增大。（一般说来，一辆平衡车理想的车重是 $800 - 900g$ 之间，是比较轻的。）所以，不到万不得已请不要给小车配重，这里说的万不得已的情况不是指飞坡和抓地力偏弱，而是你实在是找不到机械零位了，只能通过配重来平衡车模。不过，话又说回来，机械零位并不是非有不可，因为比赛是比速度，不是比站立。没有机械零位的车其实也是能跑的只是站着不动就比较难了，听说今年武汉大学的车就没有机械零位，但是他们也跑得比较好，但确实不太稳定。所以有零位能站好，没零位也能跑好。但我还是建议大家能做有零位的车，一个是好控制，二个万一明年平衡车需要站着发车呢？

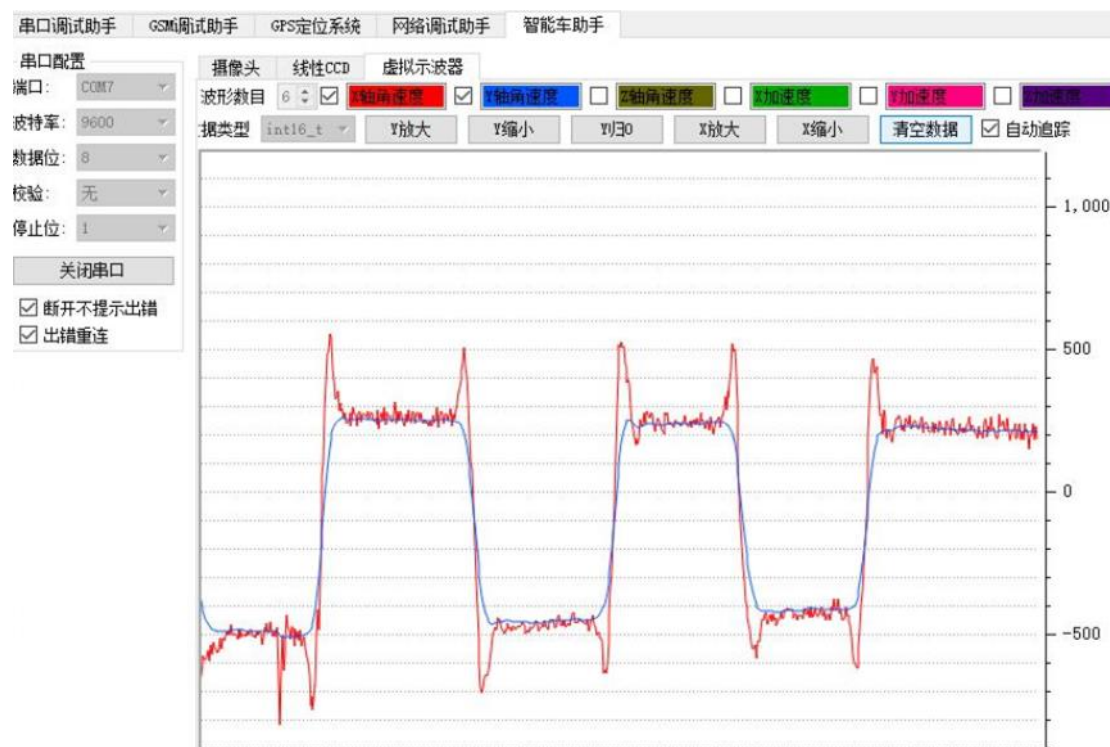
好了，关于零位我就说这么多，似乎说得有点多了，但其实要说还有很多可以说的我就不一一道来了，还是希望你们自己去发现问题思考问题解决问题。

平衡车有了机械零位之后就要控制它稳稳地站立了，只有零位也能站，只是站不稳，外界稍加干扰，这个系统的平衡就会被破坏。这是不行的，一个自动控制的系统是要有足够的的能力抵抗外界的干扰。接下来我们就是要赋予小车在站立时抵御外界干扰的能力。这个能力是什么呢？其实就是小车在偏离机械零位（平衡位置）时系统本身使其恢复到平衡位置而产

生一个回复力。这里我们可以引入另一个经典的模型去解释，也就是单摆模型，我们知道，单摆垂直于地面的位置即其平衡位置，当外界对其施加干扰使其偏离平衡位置时我们发现单摆左右摆动最后又能恢复到平衡位置。重力的分力就是使单摆恢复到平衡位置的回复力。小车回复力的最初来源是电机的转矩，电机的转矩通过齿轮传动到车轮，车轮与地面接触，车轮旋转时必将与地面有力的产生，作用力与反作用力，地面对车轮的摩擦力即是小车平衡系统回复力的来源，但并不等于其回复力，小车回复力的直接来源还是电机对车身的作用力，车轮与地面最大静摩擦力的大小只是限制了系统最大回复力的大小。这方面我们不必深究，有兴趣的可以自行分析。而我们要做的就是让电机在小车往前或往后偏离平衡位置时做出相应也就是正确的响应，其实也就是电机转动并且旋转方向不能错。

我们知道要让普通的直流电机转起来并不困难，在其两极施加一定的电压即可。旋转方向的改变也只需改变电机两电极压差的正负。那么，怎样才能让平衡车上的电机做出正确的响应呢？自然，直立的时候，小车处在零位的时候电机不转，偏离零位电机才转。那么小车是如何判断自己是否在机械零位和是否偏离机械零位的，此时我们需要借助姿态传感器了，简单的说姿态传感器就是陀螺仪和加速度计。一般说来，姿态传感器有两种，即数字式和模拟式。数字式一般利用 IIC 通信，读取寄存器的值；模拟式直接用 AD 采集。数字式不受温度等影响，但耗时较长，模拟式读取速度快，但容易受温度影响，也就是常说的温飘。至于这两种模块的内部原理，在此我不再赘述，但我们要知道，旋转陀螺仪时，则返回相应轴的角速度参考量，角速度积分就能知道旋转了多少角度。摆动加速度计时，对应轴的加速度值即改变，利用反三角函数即可求出模块在空间姿态（角度）的变化。将两者得出的角度进行滤波融合就能得到比较可靠的角度或角度参考量。融合滤波的方法比较常用的有：互补滤波、清华滤波方案、卡尔曼滤波。个人认为对于数字式传感器利用互补滤波就有比较好的效果。模拟式的可采用清华滤波或者卡尔曼滤波方案。对于滤波方案的选择我的建议是不要盲目追求那些听起来高大上的，就我了解的几所强校中也有用互补的，从他们的成绩告诉我，互补完全可以胜任平衡小车的控制。

什么是融合好的波形，可以参考下图，图中我们可以看到两条波形，红色波形是利用加



图一 融合好波形

速度计某一轴或两轴的加速度值通过反三角函数计算所得，蓝色波形则是陀螺仪一轴（即平行于小车车轴的轴）积分所得角度与红色波形互补所得。加速度波形毛刺较多是由加速度计本身特点决定。加速度计所计算出来的波形是能比较准确反应角度变化的，传感器在固定位置时所计算出来的角度值基本一致，但是由于其波形具有较多的毛刺因此是不可以直接利用的。陀螺仪角速度积分所得的角度毛刺较少，比较平滑，但由于积分存在累计误差因此单凭陀螺仪积分出来的角度长时间过后就会出现较大偏差，最直观的表现就是同一位置积分出来的角度会慢慢的变得不同，因此，只有综合这两个模块的优点才能获得较为准确的角度变化的反馈量，如何综合也就是前文所说的滤波方法。

要想观察自己的参数是否满足一个好的滤波需要，我们一般是将波形摆动成图一所示，这种类似矩形波的波形既有突变也有稳定的部分，只有这样才能考究融合之后的波形是否能快速跟踪加速度计的波形且不过冲，不滞后。那么如何摆车呢？这需要一定的技巧和多加练习，要求是摆动小车时速度要快，并在到达前倾和后仰的极限位置迅速停止。也许你们会有疑问途中红色加速度计算出来的波形尖峰部分蓝色的融合波形为何没有跟踪，因为这是快速摆车然后停止那一刹那小车本身的加速度对加速度计的影响，这个角度不是小车在空间变化的实际角度，因此不能跟踪。因此如果融合出来的波形在运动状态突变的位置有比较大的尖峰波动，这就并不是一个融合得理想的波形，要尽量平滑。

加速度计角度计算参考代码：

```

void ACC_Ang_Caculate()
{
    /*****获得加速度计的值*****/
    ACC_MMA8451_Y = MMA8451_GetResult(MMA8451_OUT_Y_MSB);
    ACC_MMA8451_Z = MMA8451_GetResult(MMA8451_OUT_Z_MSB);
    /*****角度计算方法一：两轴加速度计值反正切所得角度*****/
    Ang_ACC=(180.0/Pi*(float)(atan2(ACC_MMA8451_Z,ACC_MMA8451_Y)));
    /*反正切需要利用两个轴的加速度，180/Pi这个系数就是将计算出来的弧度值转化为角度值*/
    /*****角度计算方法一：一轴加速度计值反正弦所得角度*****/
    Ang_ACC=(180.0/Pi*(float)(asin(ACC_MMA8451_Z/8000)));
    /*反正弦需要利用两个轴的加速度，180/Pi这个系数就是将计算出来的弧度值转化为角度值，8000为z轴最大值也就是z轴正反向指向地面时的值这个值因姿态传感器不同以及读取位数的不同而异*/

    /*注意两种方法中，计算所用的轴并不一定是z轴或y轴，这个要根据模块安装方法而确定，至于选取什么轴用来计算，这个稍作分析就能知道。*/

    /*****角度限幅*****/
    if(Ang_ACC>90) Ang_ACC=90;
    if(Ang_ACC<-90) Ang_ACC=-90;
}

```

陀螺仪角度计算参考代码：

```

int16 Gyro_FXAS21002_X_Zero=28;
/*陀螺仪静止时x轴角速度值陀螺仪静止时测得，建议多次测取平均值*/

float Gyro_Speed_X_Ratio=0.00029386;
/*Gyro_Speed_X_Ratio为陀螺仪积分系数，通过调整该系数使得陀螺仪积分角度与加速度计算的角度接近*/
void Gyro_Ang_Caculate()
{
    /*****获得与车轮轴平行的x轴（因安装方法而异）陀螺仪的值*****/
    Gyro_FXAS21002_X = FXAS21002_GetResult(FXAS21002_OUT_X_MSB);

    /*****x轴陀螺仪速度，减去静态时固定偏差*****/
    Car_Gyro_X=(float)(Gyro_FXAS21002_X*1.0-Gyro_FXAS21002_X_Zero);

    /*****x轴角速度乘以积分系数得到用于积分的陀螺仪速度*****/
    Gyro_Speed_X=(float)((Gyro_FXAS21002_X*1.0-Gyro_FXAS21002_X_Zero)*Gyro_Speed_X_Ratio);

    /*****陀螺仪积分所得角度*****/
    Ang_Gyro=(float)(Ang_Gyro+(float)(Gyro_Speed_X));
}

```

滤波融合参考代码（互补滤波）：

```

/*****互补滤波*****/
Ang_Gyro=Ang_Gyro+(Ang_ACC-Ang_Gyro)*0.00425;
/*0.00425则为需要根据波形调整的互补系数*/

```


波形融合好之后我们就可以利用了，有同学纠结姿态传感器计算出来的角度值是否要是真正的角度，这个其实并没有强制要求，当然一般说来我们是转化为实际角度的，以保证我们对小车控制时有一个统一的标准。融合所得的角度如何利用？其实很简单，之前有说直立车的直立控制模型其实就是单摆模型，单摆只有再偏离平衡位置时才有回复力——类比到小车系统就是只有在小车偏离平衡位置时才给让电机转也就是赋予电机控制通道的占空比。如何判断小车是否偏离平衡位置就是要利用我们刚刚融合之后的角度了，融合好的角度能够很好的反映车身偏离平衡位置的偏差。我们将偏离的角度也就是某一位置计算出来的角度的相对于机械零位角度的偏差（有正有负）乘以一个系数 P 。再将这个值作为控制量赋给控制电机的占空比让电机转动，只要电机旋转的方向没有问题，电机就能做出正确的反应使小车回到平衡位置。但是我们知道，只有 P 的话好比单摆在真空中运动只有回复力，它会一直摆动下去，虽然每次都会经过平衡位置但并不能稳定在平衡位置，而空气中的单摆可以最后停留在平衡位置是因为空气阻力，也就是阻尼。因此，要想小车稳定在平衡位置本身说来只有 P 也是可以的，因为小车这个控制系统在电机传动过程中就有阻尼，而且在空气中也有空气阻尼，但这点阻尼是不够的，我们还需要更多的阻尼去让它尽快平衡在平衡位置，也就是很快的稳稳立住，这就需要我们引入超前控制系数 D 了。直立控制也可看成 PID 控制，只不过我们一般只用 P 、 D ， P 很好理解，其可以理解为直立环节中的动力，这个系数就是控制小车回复力的大小的，而 D 其实就可以理解为阻尼，就是为了让小车很快的稳定在平衡位置。这个怎么理解呢？你看，真空中的单摆是没有 D 的所以一直摆，空气中的单摆有小 D ，所以慢慢回到平衡位置，如果把单摆放在水中，这就是大 D 这样就会很快在平衡位置静止下来。但是 D 也不能太大，好比放在豆腐中的单摆，阻尼太大，大过了回复力，自然没法摆回平衡位置了。所以我们通过调整一组合适的 P 、 D 参数就能把直立调好，直立不能太软也不能太硬。软了小车抵抗外界影响的能力差，加入速度控制或转向控制后将会使小车出现较大摆动，太硬了也不行，会影响其他环的控制，所以其实说来直立车的控制就在于三个控制环的互相制约与平衡，此消彼长。

直立控制参考代码：

```
Ang_Deviation=Ang_Gyro-Ang_Zero;
/* Ang_Deviation为小车偏离平衡位置的角度，如果姿态传感器在小车平衡位置时绝对的垂直地面。那么互补滤波后的角度Ang_Gyro在小车平衡位置时的值也应该是0，但是由于安装误差，这个垂直是不好保证的，因此需要一个变量去修正，也就是上式的Ang_Zero，当小车处在平衡位置时，调整该值，使得Ang_Deviation在平衡位置时为0，这样才能保证这时候不会让电机做出响应。*/
Up_PWM=(int16)(P_Up*(Ang_Deviation)+Car_Gyro_X*D_Up);
/*此句则为控制小车直立的代码，Up_PWM即为直立环赋给电机占空比的值，两个电机均赋予这个值，并使其旋转方向相同请仔细理解该句代码，各变量的含义以及P、D系数变量的符号的关系*/
```


如何赋值：（需保证电机正确的旋转方向）

```
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH0,(uint32)(Up_PWM));  
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH1,0); //左（右）电机控制通道  
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH2,(uint32)(Up_PWM));  
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH3,0); //右（左）电机控制通道
```

好了，直立部分就讲到这里，这里顺便说一下姿态传感器的安装，一般说来为了减小噪声和不必要的误差我们一般将传感器安装的比较低，如很多都是安装在底盘左右车轴连线的的位置，这个位置也是最能反映小车前后摆动的。当然也有安装在其他位置的，如今年（第十一届）的全国冠军中南大学安装在两电机的中间位置，当然与他们交流时对于为什么选择这个位置他们是这么说的：本来想尽量靠近车轴安装的，但是一开始装不下，就放弃了，后来想下移到车轴位置时车出问题了，就没弄了。所以还是建立尽量装在车轴位置，这是比较理想的姿态传感器安装位置。至于安装角度的确定，一般是令其在小车平衡位置时模块尽量垂直与地面，这样小车前后摆动时计算角度的对称性更好，特别是对于陀螺仪来说。当然也有其他安装方法的，中南今年的安装就独辟蹊径——让模块在小车正常跑动的时候垂直于地面。这样的安装方法和其独特的速度控制有关，我认为可以尝试但不要盲目效仿，毕竟他们也认为自己的速度控制是存在问题的。

平衡车控制之速度环

说实话，平衡车的速度控制说难也难，说容易也容易。难是因为要想将速度控制在比较小的误差范围内（如 5%以内）对于两轮车来说是比较有难度的，直立车的速度控制一般采用 PI 控制，I 也就是积分项，速度控制中，I 是用来消除稳态误差的，什么是稳态误差，也就是调节量在一个达不到目标值的值附近波动。比如你设定的目标速度脉冲是 800，实际速度脉冲值在 700 附近波动，这样就存在一个稳态误差。理论说来，理想的速度控制是希望实际速度能够达到目标速度当然允许在小范围类波动的。但是从我们的实际经验看来这种速度控制并不容易实现。在我与其他学校的车友交流中他们也普遍存在这个问题。

第十一届“恩智浦”全国大学生智能车大赛平衡组全国第三湖北工程的车友这样认为：速度控制单 P 会有稳态误差，加 I 虽然可以去掉稳态误差，但是 I 不是个好东西，大了引起震荡，小了加速反应慢，而且用 I 就容易引起超调。于是我用纯 P 控制，软件上把直立零点前移以消除稳态误差，再用动态的期望速度。到后期我就不是把软件上的零点移动，而是通过改配重机械上重心移动来改变速度档了，并没有做到匀速。

而作为全国第一的中南大学的车友的看法和湖北工程的差不多，他们也认为：**速度控制本来效果就不大，加 I 也许能消除稳态误差，但是没稳态误差效果也不大，速度跟随没那么快，所以后面我们几乎没进行速度控制。**

因此，他们对于平衡车速度的控制是只用了纯 P 控制的。速度的纯 P 控制的效果肯定是一般的，中南车友也和我说过他们到不了匀速，而且偏差较大，那么他们又是如何将小车控制得十分理想的呢？**核心在于他们的转向控制——几乎是任何速度都能满足良好的转向要求。**就如全国第一的中南车友和我说的“假如说从长直道入 U 型弯，如果小车四米每秒的速度能过，一米的速度也能过，这样的话速度控制对于我们来说意义就不大了。”

那么速度控制的目的到底是什么呢？在我看来有这两个目的，第一，也是最基本的目的是车子小车能前进跑，并且跑动过程中不抖动，不突然加速减速，满足这个要求的话其实一个 P 就能解决。第二个目的是为了消除电池电压对转向的影响，电池电压为什么对小车的转向有影响呢？就传统的转向而言，转向 P、D 并没有和速度关联起来，是一组固定的 P、D。这样的话，两米速度的环 P、D 参数在一米速度的时候就会跑得很糟糕。因此，如果速度闭环不好，电池电压的高低对实际速度的影响很大，导致你调好的一组转向参数，换了电池就跑的很差甚至不能跑了。甚至还有“隔夜车”的说法，晚上调的一组参数，好好的，电池放一晚，第二天起来车子跑得就惨不忍睹。导致这个的原因有两个，一个是速度环太差，二个是转向环太差。但其实话又说回来，速度环不是那么重要的，最重要的还是转向环，**从中南车友霸气的言语中也可以看出，转向环才是王道。**

我们今年的速度环是薄弱环节，虽然和小车的实际速度做了简单的关联，但是并不是理想的转向控制，我认为今年直立车转向控制最好的就是中南大学了，他们的转向环及几乎可以使小车在低于 3.6m/s 的任何速度下完美过弯。这也就是他们车从分赛区赛到国赛都不仅速度快还十分稳定的原因之一。

当然，也有将速度环控制的比较理想的，基本能保证小车达到目标速度且误差比较小，第十一届全国第八的东北电力大学的车友就将 P、I 全用上了，不过他们并不是简单的 P、I 控制，而是在积分环节做了特殊的处理，用了积分分离的方法——将积分环节单独提出，然后将积分系数 I 与速度关联起来，实现变速积分的目的，这样能满足加速迅速和避免超调。

在我看来两种速度的控制方法都有可取之处，都可以尝试，然而因为电磁直立车和摄像头光电直立车的机械存在较大差异，因此对于摄像头和光电结传感器结构形式的小车建议是将速度环控制的稍好一点，这也是中南车友给我的建议。这是因为，一个好的电磁直立机械结构多少会牺牲减速的能力，而速度闭环，必将有速度的加减速，因此对于牺牲了减

速能力的电磁机械来说，速度控制就不会那么理想，但是光电和摄像头的机械是能够保证减速角的。然而速度环并不是直立车控制中最关键的部分，甚至可以说速度环其实就是直立环的一部分，这也是速度、直立两个环能串级控制的理论基础。最关键的还是转向控制。

速度控制参考代码：

```
Up_PWM=(int16) (P_Up*(Ang_Deviation + Speed_PWM )+Car_Gyro_X*D_Up);

/*
Speed_PWM即为速度的控制变量，首先要注意他的正负号与Ang_Deviation
是相反的，即如果小车往前倾Ang_Deviation为正，那么要想小车往前跑，
Speed_PWM就应该为负值，如果Speed_PWM为正值的话，我们将“+”改成“-”
就行。Speed_PWM其实可以看成是一个角度，小车为什么会跑，就是因为小车
如Speed_PWM不为零，那么即使小车在机械零位，即Ang_Deviation=0，但
Speed_PWM不为零，小车就以为自己不在平衡位置，于是电机做出反应，开
始加速跑，直到系统受力平衡，小车达到最高速度，不再加速。如果想要
小车尽快跑起来Speed_PWM给一个固定的值就行，比如说给个5，那么小车
就会就会加速到角度为5度时的最大速度，这种情况其实就类似于直立环节
中机械零位对应的偏差没有调好，也就是非0，直立时小车会跑一样。需要
强调的是如果速度闭环控制那么Speed_PWM是经过计算得来的，最简单的就
是Speed_PWM=P_Speed*Speed_Delta，Speed_Delta就是目标速度与实际速度
的差值。这也就是纯P的速度控制
*/
```

值得一提的是本文所讲速度环的控制与卓晴老师的方案是不同的，因此还请大家对比分析。

如果有兴趣，我现在和你们分析下小车的加速度和速度是怎么获得的，小车要想获得加速度，就必须有力的存在并且合力要和前进方向相同，且大于0。用汽车理论的知识说也就是牵引力大于阻力。平衡车的牵引力的直接来源是什么？有人认为牵引力来自于小车前倾于机械零位时重力在前进方向的分力，其实是不对的。用专业点的知识来说，小车的牵引力其实是：与小车驱动轮接触的地面对车轮的切向反作用力。这个力怎么来呢？就是电机提供的。电机既然发力，就必须受力——你用拳头打空气自身几乎是不受力的，打沙袋就不一样了，站不稳能把自己打到。电机受力的支撑部位就是车身，于是就有力把加速跑动或者匀速跑动而偏离平衡位置向前倾的小车平衡住。其实说到这里，理解得更深的车友可能会想到了那么不同的匀速速度应该是对应的不同前倾角，对的，因为，汽车理论的知识告诉我们，不同速度下的匀速状态，牵引力的大小是不同的。

直立车控制之转向环

我认为转向环的控制是智能车控制的核心，前文也有提到，直立环和速度环其实可以并作为一个环的控制而且控制的方法基本就是P、D或者速度环里面多一个积分系数I的调节。

控制框架也相对统一，难点或核心在于角度波形的滤波融合，这一点注意好了，小车站稳和跑起来就不难了。

转向控制的前提是偏差的获得，对于偏差的获取也是有讲究的，就今年的电磁直立车而言，其传感器为电感，很多人都在纠结电感个数，有用四个、五个、六个甚至七八个的，其实我认为对于没有直角元素的赛道，两个或三个电感就以足够。这一点也在实际操作中得到了验证，比如这一届全国第三的湖北工程用的就是两个电感，全国第八的东北电力大学和全国第一的中南大学用的是三个电感。**因此不要盲目追求电感的个数，不仅算法累赘还会造成机械上的负担。**

在我和车友交流的过程中，关于对小车的转向控制我认为有些人是走进误区了——从四轮到两轮，总有车友希望借助传感器的输入量解算出小车此时在赛道中的位置，然后再对小车进行转向控制；还有车友将赛道各个元素的传感器信息记录下来，分段对赛道元素进行处理，最后拟合成一个完整的赛道。其实我认为这些是没必要的，这也是我和其他很多车友交流的结果。因为位置解算的难度比较大，往往结算效果很不理想而造成误判，当然，并不是说这个方法一定就不可行，中南大学的车友就觉得这是个好方法，他认为就算解算存在误差，但只要趋势是对的就没多大问题，因此这种方法也是可以尝试的，但实际效果怎么样还是需要自己的尝试和验证。而对于赛道元素的拟合的方法我认为其适应性太差，赛道元素变化或者信号源的变化都将使其控制效果变得十分不理想。在我看来**只要你的偏差输入是可靠的，就能作为可靠的转向控制的输入量。**

获得可靠的偏差后，实现转向控制的方法就相对说来灵活多变了。从最基本的 P、D 调节到和速度相关的动态 P、D 控制或者分段 P、D 控制或更高级的模糊控制。最基本也是最简单的转向控制就是在某一特定速度下调得一组 P、D 参数，使其能够满足转向要求，但是其缺点就是适应性较差，也就是鲁棒性不好，表现为速度快了转向打角不及时，速度慢了打角过早容易内切，甚至不能完成基本的转向要求。和速度相关的动态 P、D 控制就是利用函数关系式将转向参数与速度关联起来，这样就能有较好的控制效果，但也不是最理想的。而分段 P、D 控制就是通过判断速度在什么样的速度区间，然后给定特定的 P、D 参数，如今年的全国第三湖北工程采用的就是这种控制思想。而模糊控制，或与模糊控制相近的专家控制方法一般说来是比较理想的控制方法了，这种控制方法鲁棒性强，具有很好的控制效果。如去年（第十届）的第一重庆大学不慢队用的就是模糊的转向控制方法。今年中南用的也是类似的方法。

今年我们组的转向控制室利用了一个简单的数学关系式即将转向参数与速度作了简单

的关联，虽然有一定的效果，但并不理想，因为小车的实际速度变化较大时，转向控制就会不稳定。对于转向控制的建议，中南车友给我的建议是如果想往更高的水平冲击，可以尝试利用模糊控制去实现对小车转向的控制。这个更高的水平就今年（第十一届）的电磁直立小车而言保守估计是 2.6+m/s 的速度吧。就 2.6 以下的速度说来，只要机械不拖后腿，转向控制与速度稍作关联应该是能满足的。因为湖北工程利用分段 P、D 控制在决赛跑出了 2.68m/s 的好成绩。当然这也和他们合理的机械分不开，这也是他们组车友经常和我强调的。

转向控制参考代码（双电感差比和）：

```
LAD=adc_once(ADC0_SE10, ADC_12bit);
RAD=adc_once(ADC0_SE11, ADC_12bit);
/*
获取左右电感的AD值，这里是直接读数
当然也可以进行算法滤波处理，方法有很多，如冒泡排序去中间值，平滑滤波，平均值滤波等，这些方法的算法实现都不难
在此我就不一一示例了。
*/
Turn_Offset=(float) (LAD-RAD)/(float) (LAD+RAD)*100;
/*
计算转向原始偏差，这就是经典的差比和，常数100是为了将偏差归一到0-100便于后面的计算
*/
Turn_Offset=Turn_Offset*(Turn_Offset*Turn_Offset/1250.0+2)/10;
/*
将原始偏差坐了一个一元三次函数的处理，保留三次项和一次项，这样处理有利于方向控制的平滑，且对于原始偏差的小偏差和大偏差响应有所区别
*/
Gyro_Ratio1=Car_Gyro_Y*Car_Gyro_Y/4000000+5.0;
/*
转向D的动态系数，速度越快，转向瞬间陀螺仪的值Car_Gyro_Y越大。后面的常数是为了消除直道抖动。
*/
Gyro_Ratio1=0.7*Gyro_Ratio1+Gyro_Ratio2*0.3;
/*
低通滤波，即新的值为本次的0.7个权重加上上次0.3的权重
*/
DireControlOutNew=(Car_Speed*Car_Speed/(Aim_Speed*Aim_Speed)+1)*\
(P_Turn)*Turn_Offset+Gyro_Ratio1*D_Turn*Car_Gyro_Y;
/*
如果不做平滑处理，DireControlOutNew值即可赋给电机两轮的控制通道，但是建议输出做平滑处理，以消除都动。至于如何平滑此处不做讲解，请仔细研读官方方案此部分内容。
*/
```


而对于三个电感的算法（双电感差比和的改良版），只需做稍微的改动即可：

```
LAD=adc_once(ADC0_SE10, ADC_12bit);
MAD=adc_once(ADC0_SE11, ADC_12bit);
RAD=adc_once(ADC0_SE12, ADC_12bit);
/*
获取左中右电感的AD值，这里是直接读数
当然也可以进行算法滤波处理，方法有很多，如冒泡排序去中间值，平滑滤波，平均值滤波等，这些方法的算法实现都不难
在此我就不一一示例了。
*/
Turn_Offset=(float)(LAD-RAD)/(float)(LAD+RAD+MAD)*100;
/*
计算转向原始偏差，这就是经典的差比和，常数100是为了将
偏差归一到0-100便于后面的计算，后面的处理与双电感无异。
*/
```

转向变量的赋值：

```
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH0,(uint32)(Up_PWM+DireControlOutNew));
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH1,0);//左（右）电机控制通道
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH2,(uint32)(Up_PWM-DireControlOutNew));
ftm_pwm_duty(FTM3,FTM_CH3,0);//右（左）电机控制通道
/*
这样小车就能实现跑动和转向了，转向变量的赋值应该是一“+”一“-”
才能实现差速，若转向方向错误即改变“+”“-”即可，另外注意占空比赋予
的量即Up_PWM±DireControlOutNew不能小于0，也不能大于初始化PWM的控制
精度（一般为100、1000或10000由初始化决定），否则会出现断言失败
而死机的情况。
*/
```

转向控制的基本思想说到这差不多就结束了，不过值得注意的是，转向环的控制中速度快了也许会出现“跳轮”的情况，也就是一侧轮胎抬起，导致这个的原因有多种，如小车重心过高，转向控制本身不平滑等，如果出现“跳轮”，跳起一侧的轮胎会因为悬空而失速疯转，这样的话对于小车的控制是极其不利的，因为如果不做处理，编码器采集到疯转的小轮脉冲后对小车实际速度失去了判断，因此我们需要对“跳轮”的现象做出处理，使小车测的速度与实际速度尽量吻合，以降低系统的不稳定性。

如何处理“跳轮”呢？一般方法有如下几种：

- 1、对脉冲最高输入做出限制，如一旦编码器测得超过 3m/s 或以上的脉冲即限制它为某一最大的数值。
- 2、对脉冲的变化率做出限制，其实通过对小车加速度的大致计算我们可以推出每个测速周期内脉冲的最大变化范围，一旦超过这个范围我们即可做出限制。
- 3、通过未抬起车轮计算抬起车轮的实际速度，如何计算呢？正如中南大学的设计报告里提到的，通过同心圆的原理即可算得，具体理论不再多说，请自行推导。

也许到这里有人还会惦记着电磁传感器的安装也就是电感的安装，在我看来，同时也结合很多优秀队伍的经验来说，**对于没有直角元素的赛道，电感水平或者小斜度（小于 10° ）安装即可，对于有直角的赛道，可以尝试使用斜电感，斜度为 20° 左右。**不过，对于大斜度的电感安装，差比和的方法会出现十字较大的抖动现象，这个时候要想控制的好的话上就需要尝试其他的算法了，一般说来有直角的赛道推荐至少使用三个电感，并利用中间电感获得原始偏差，实验证明能取得不错的效果。不过此算法更适合四轮车，因为其传感器高度相对固定。

再说说运放的选择，其实说实话，就电磁车的控制来说，LM386 或者 LMV358 基本都能满足要求，只是其带宽较小，单级放大倍数也许不能满足需要，所以一般采用双级放大设计。第十届的电磁双车全国第五的广技师车队采用的就是 LMV358。当然，要想获得更高的单级放大倍数，就可以选择其他系列的运放，如 TLV2462、OPA2350 等。至于这些电路的设计就不用多说了，论坛或者设计报告里原理图还是很多的。

最后再给点电磁传感器的安装建议，首先，6.8nf校正电容应焊接在最靠近电感的位置，一充分发挥其作用。第二，传感器的连线线型选择大家一直也比较关心，我认为**漆包线就能有很好的效果**，今年中南也是采用漆包线(0.4mm 左右直径的线应该会比较合适的，我们的是 0.3、中南的 0.5)做的连接，漆包线最好先对绞（两根线拧麻花一样）再使用。当然也有网线，网线当然效果不错，不过我认为网线太重，对直立车的机械来说影响较大所以不推荐。

转向环基本上就讲到这里了，最后再和大家说说机械吧。

直立车控制之机械

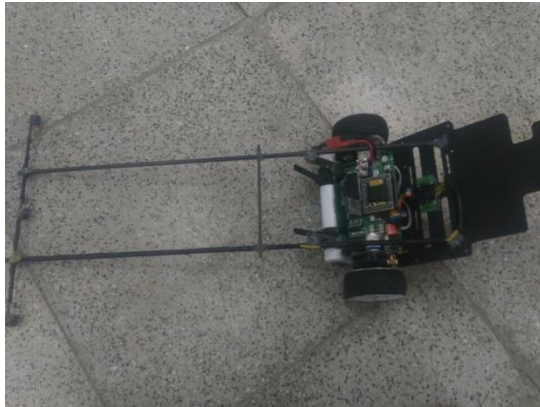
机械到底有多重要呢？回答是很重要！我那些国特、国一的朋友的共识是**认为算法和机械至少“三七分”。七分机械，三分算法。**在最开始的直立环控制中，我就说过，好的机械在我看来无非就是：质量集中、重心低、质量轻。质量集中为了减少转动惯量，这里的控制电池是关键，即电池尽量离车轴近；重心低为了防止过弯侧滑，抬轮等，能够使过弯更平滑顺畅；质量轻是便于控制，减少整车惯性。不到万不得已不要加配重。当然，我们可以看到不少跑得好的车子都加了配重的，他们是为了控制角度或速度，而不是想要车子变得更“稳重”。抓住这九个字的，如何将传感器、电池、主板组装好就看你自己了。这个真的不好具体再说，最后我会放几张比较好的机械布局的图，你们可以参考下。

我在这里重点要讲的就是 E 车模电机与车轴齿轮间的配合。很多人认为 E 车那个黑色的塑料齿轮有点偏心，所以导致和电机的金属齿轮配合不好。就我而言我不这么认为。E 车模底盘塑料质量比较差，偏软，而且，电机仅靠前端两个螺丝固定后端悬空，因此，电机固定时，若电机固定螺丝拧紧则支撑电机的支架就因为应力而变形，但是松了又不能固定住电机，往往有车友将螺丝固定紧之后发现齿轮啮合的声音非常刺耳。原因在于电机轴与车轮轴不平行，导致啮合齿轮受力不均匀，从而发出刺耳的声音。如何检验是否是这一原因引起的呢？用手轻轻转动车轮，感受至少一周的转动里是否出项有些地方啮合较松有些地方啮合较紧的情况，如果有这种感觉那几本可以判断是电机安装不当造成致两轴不平行而产生嘈杂的生音。那么如何解决这个问题？其实很简单，首先我们将固定电机的两个螺丝拧松，然后调整电机齿轮与车轴齿轮的间隙，不要太大也不要太小，什么是太大？什么是太小？啮合间隙太大则会出现打齿现象，太小则传动阻力较大，传动困难。齿轮的理想啮合是分度圆相切，然而分度圆并不是那么好找的，因此我们凭感觉控制这个间隙就好，手转动车轮，给它一个初速度，估计下其大概能够持续转动四五圈或者以上并且没有杂音，这基本上就是个良好的啮合了。这个时候，千万不要拧紧螺丝，而是用热熔胶枪将电机下侧与车身的空隙处打满热熔胶，待其冷却固化之后，再拧紧螺丝（一定要注意顺序）。注意不用拧的太紧，容易造成支架的变形。再一次对齿轮啮合造成不利影响。这样就基本把齿轮啮合的问题解决了。

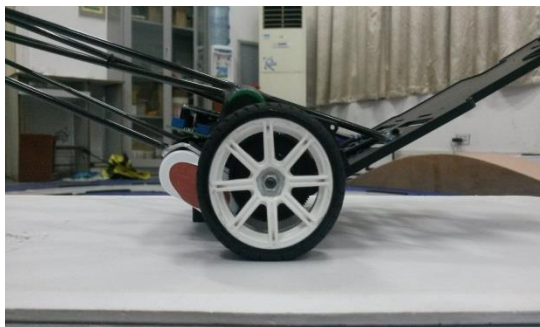
啮合好的齿轮不仅能使小车运行更流畅，齿轮更耐用，还能很大程度减小姿态传感器的输入噪声，因此是十分必要的。

机械之中，除了质量、重心、齿轮啮合等需要特别注意之外，轮胎的摩擦力千万不可小觑，因为其直接关乎你的转向极限从而限制你整车的速度极限。因此，东北电力车友说七分机械里几乎一半的重要性被轮胎占据，这不是没有道理的，我想轮胎的处理一直也是我们很头疼的事，特别是对于后期想提速的车友，往往因为小车轮胎状态的不理想而限制了自己的速度极限。对于小车而言怎样的轮胎才是好的轮胎呢？简单说来就是软且与地面接触面积大，仔细观察可以发现中部略为凸起。这样的轮胎摩擦力一般来说是比较大的，当然轮胎摩擦力也不可太大，我们知道比赛前都要通过轮胎黏性检查不说，从专业的理论知识角度去分析过大的摩擦力也是不利与整车性能的，因此对于轮胎处理我的建议是像中南车友那样，前期稍微涂点软化剂，后面注意保养，尽量不与其粘灰，勤跑，勤擦，这样轮胎的性能就会越来越好。

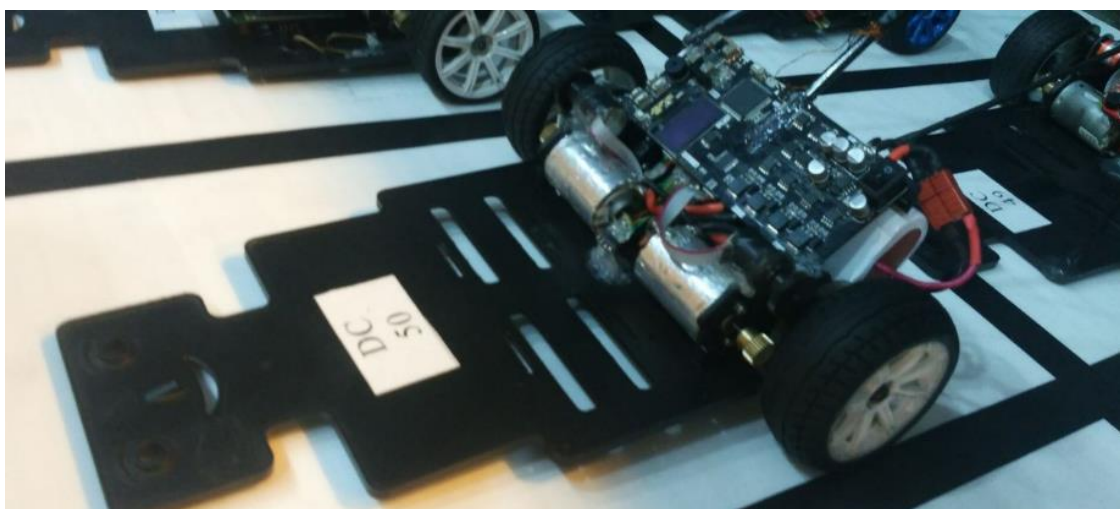
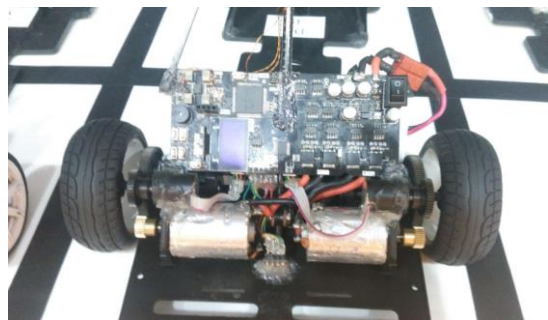
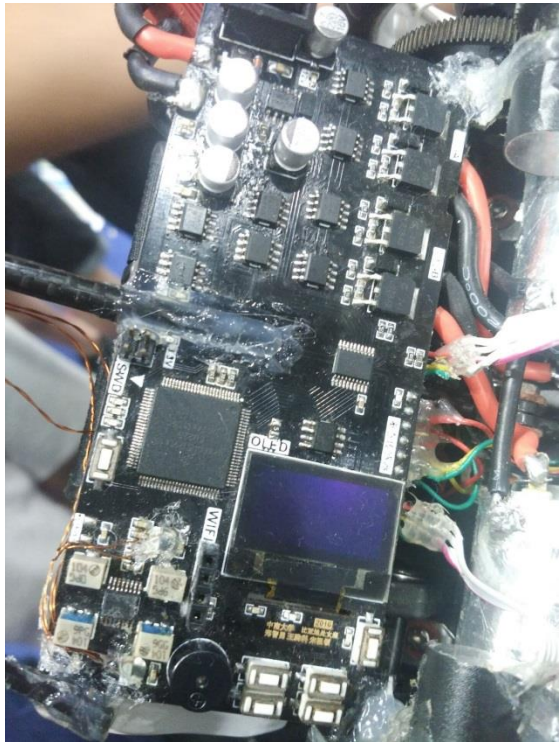
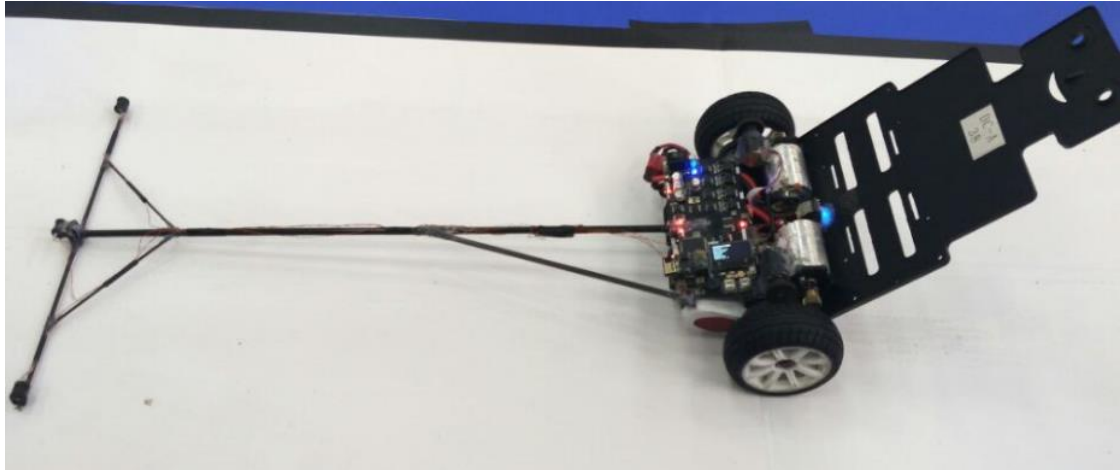
好啦，写到这我的废话就基本讲完了，最后我再附几张我认为机械设计比较精美的车模照片，也可以作为大家机械布局设计的参考。



东北电力大学中国队（全国第八）

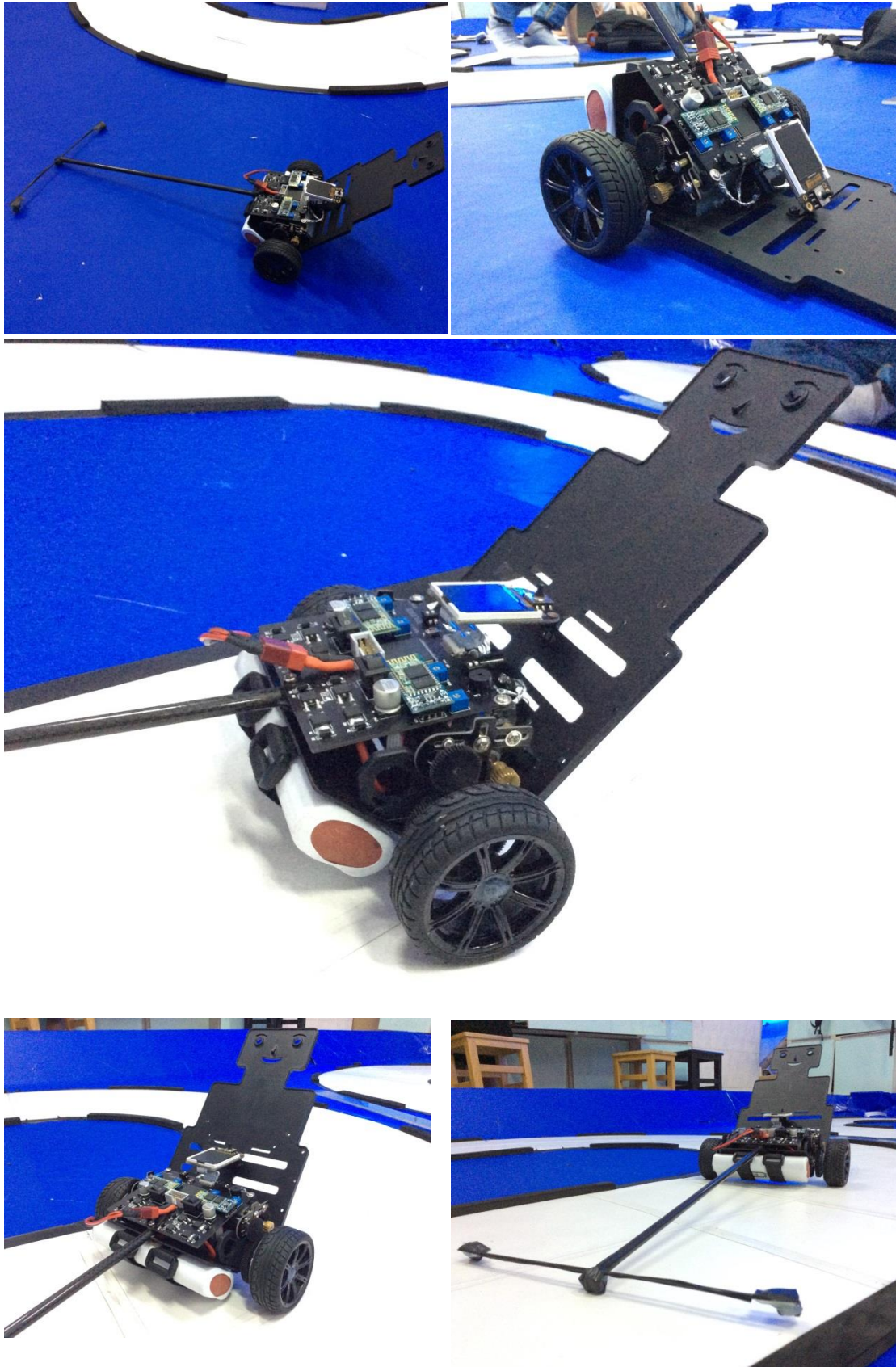


湖北工程学院伊克斯队（全国第三）



中南大学比亚迪处女座 2016（全国冠军）

我们队的车，见笑了。



海南大学复仇者联盟

最后这张是其实我不在，却假装我在的被 P 上去的合影：

