

## 平衡小车速度控制原理与串级 PID

在之前的电机速度闭环控制里面，我们介绍了相关的算法。但是平衡小车的速度控制与之相比，要复杂很多，因为小车的两个电机需要进行直立控制的同时去进行速度控制。

我们先使用常规的速度负反馈算法试一下，看在平衡小车上是否奏效。首先我们给定一个目标速度值，由于小车在直立控制的作用下，此时小车要向前倾斜以获取加速度，车轮需要往后运动，这样小车速度就会下降。因为是负反馈，速度下降之后，速度控制的偏差增大，小车往前倾斜的角度增大，如此反复，小车便会倒下。常规的速度负反馈在直立控制的影响下起到了正反馈效果。如图1所示。

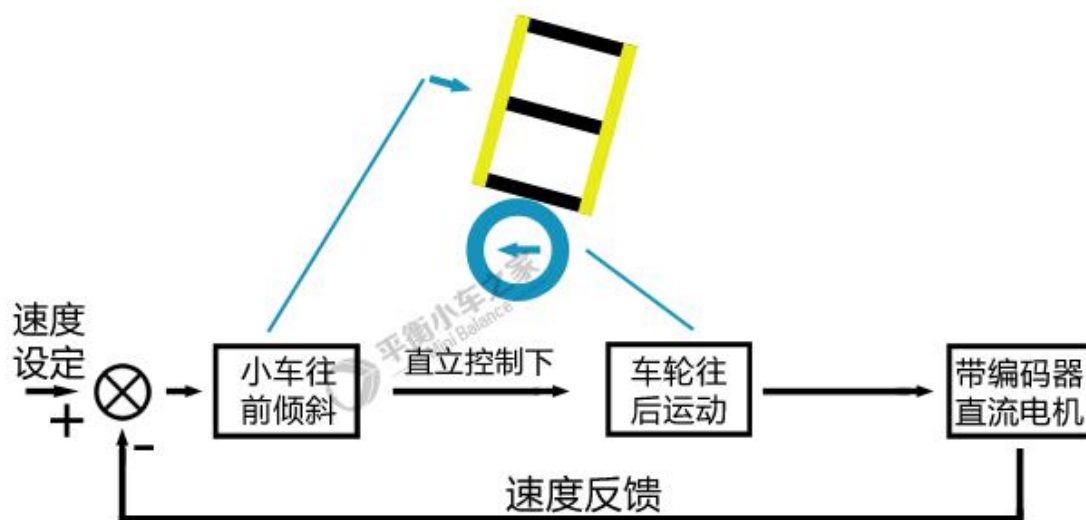


图1 直立控制下的速度负反馈控制

根据以上的分析，在直立控制里面加入速度负反馈无法达到速度闭环的目的，而且还会破坏直立控制系统。下面我们换一种思路。

为保证直立控制的优先级，我们把速度控制放在直立控制的前面，也就是速度控制调节的结果仅仅是改变直立控制的目标值。因为根据经验可知，小车的运行速度和小车的倾角是相关的。比如要提高小车向前行驶的速度，就需要增加小车向前倾斜的角度，倾斜角度加大之后，车轮在直立控制的作用下需要向前运动

保持小车平衡，速度增大；如果要降低小车向前行驶的速度，就需要减小小车向前倾斜的角度，倾斜角度减小之后，车轮在直立控制的作用下向后运动保持小车平衡，速度减小。图2为控制原理图。

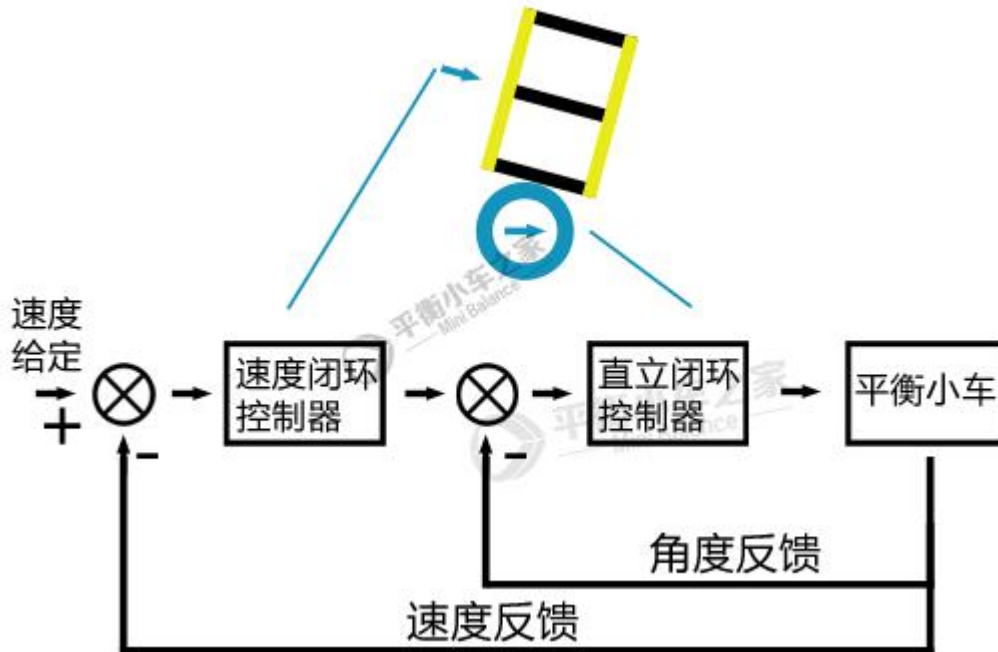


图2 串级控制系统

根据上面的原理图，我们把速度和直立两个控制器串联起来工作，其中速度控制的输出作为直立控制的输入，而直立控制的输出作为系统的输出，这其实就是一个串级控制系统。直立控制在前面有介绍，使用的PD控制。因为编码器可能存在的噪声，为防止噪声被放大并消除系统的静差，这里我们速度控制使用PI控制。

$$a = kp * (\theta - a_1) + kd * \theta' \quad (1)$$

$$a_1 = kp_1 * e(k) + ki_1 * \sum e(k) \quad (2)$$

式（1）为直立控制算法，式（2）为速度控制算法。 $\theta$ 是角度、 $\theta'$ 是角速度， $e(k)$ 是速度控制偏差、 $\sum e(k)$ 是速度控制偏差的积分。为了方便我们后面的PID参数的整定，可以对控制系统做进一步的简化。合并式（1）和式（2）得到式（3）

$$a = kp * \theta + kd * \theta' - kp[kp_1 * e(k) + ki_1 * \sum e(k)] \quad (3)$$

至此，我们得到了让小车保持直立且速度为给定值的控制算法，由一个负反馈的直立PD控制器和一个正反馈的速度PI控制器组成。控制原理图进行了演变，

如图3所示。

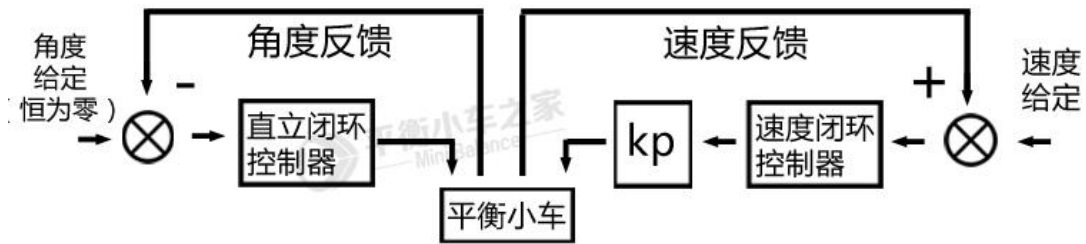


图3 控制原理图

因为常规的速度控制都是负反馈，为了验证一下在这里的速度控制器确实是正反馈，我们做一个实验。首先把式（3）中直立控制部分屏蔽，只留下速度控制部分，得到式（4）

$$a = -kp[kp_1 * e(k) + ki_1 \sum e(k)] \quad (4)$$

我们在小车上上面实践一下这个算法。使用一款调试好的小车，屏蔽程序中的直立控制和转向控制（后面有介绍转向控制），在车轮悬空的时候给一个干扰，并测量一下车轮受到干扰之后的响应曲线。如图4所示。



图4 正反馈响应曲线

可以看到，车轮受到干扰之后沿相同的方向速度快速增大，直到饱和。这是典型的正反馈的现象。最终，速度控制的偏差经过积分和比例直接叠加在电机控制量上。速度控制在刚开始讨论的时候是通过调整小车倾角来实现，通过上面进行的简化和改进，最后已经演变成对于电机的直接控制了。

虽然最后我们没有直接使用串级控制系统，但是经过我们的实验，直接使用串级PID对平衡小车的直立和速度进行控制也是可以的，并且，在串级PID控制系统里面，速度控制是负反馈。

参考文献：直立行车参考设计方案(第二版)-freescale智能车比赛组委会