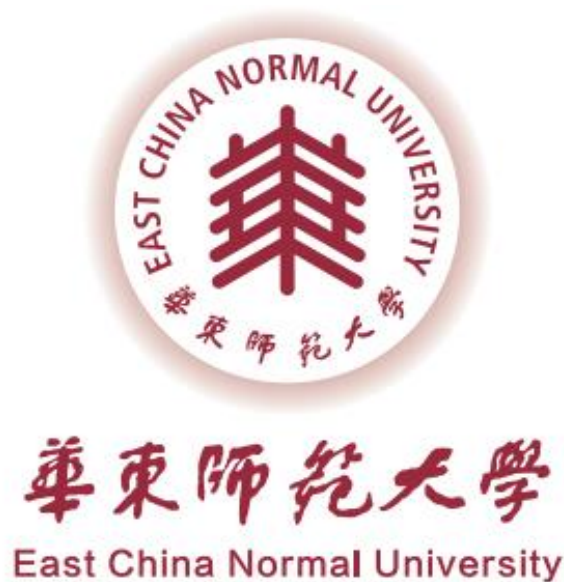


成绩：

课程名称： 高端软件开发方法

项目名称：

**平衡车（直流无刷电机） 的建模分析**



项目成员：

姓名	项目分工
姜睿宇（组长） 10195101443	平衡车 Sysml 建模 直流无刷电机开环调速 simulink 建模与仿真

时间： 2022 年 7 月 4 日

## 1. 背景和摘要

电动平衡车，又叫体感车、思维车、摄位车等。市场上主要有独轮和双轮两类。其运作原理主要是建立在一种被称为“动态稳定”（Dynamic Stabilization）的基本原理上。

它利用车体内部的陀螺仪和加速度传感器，来检测车体姿态的变化，并利用伺服控制系统，精确地驱动电机进行相应的调整，以保持系统的平衡。是现代人用来作为代步工具、休闲娱乐的一种新型的绿色环保的产物。

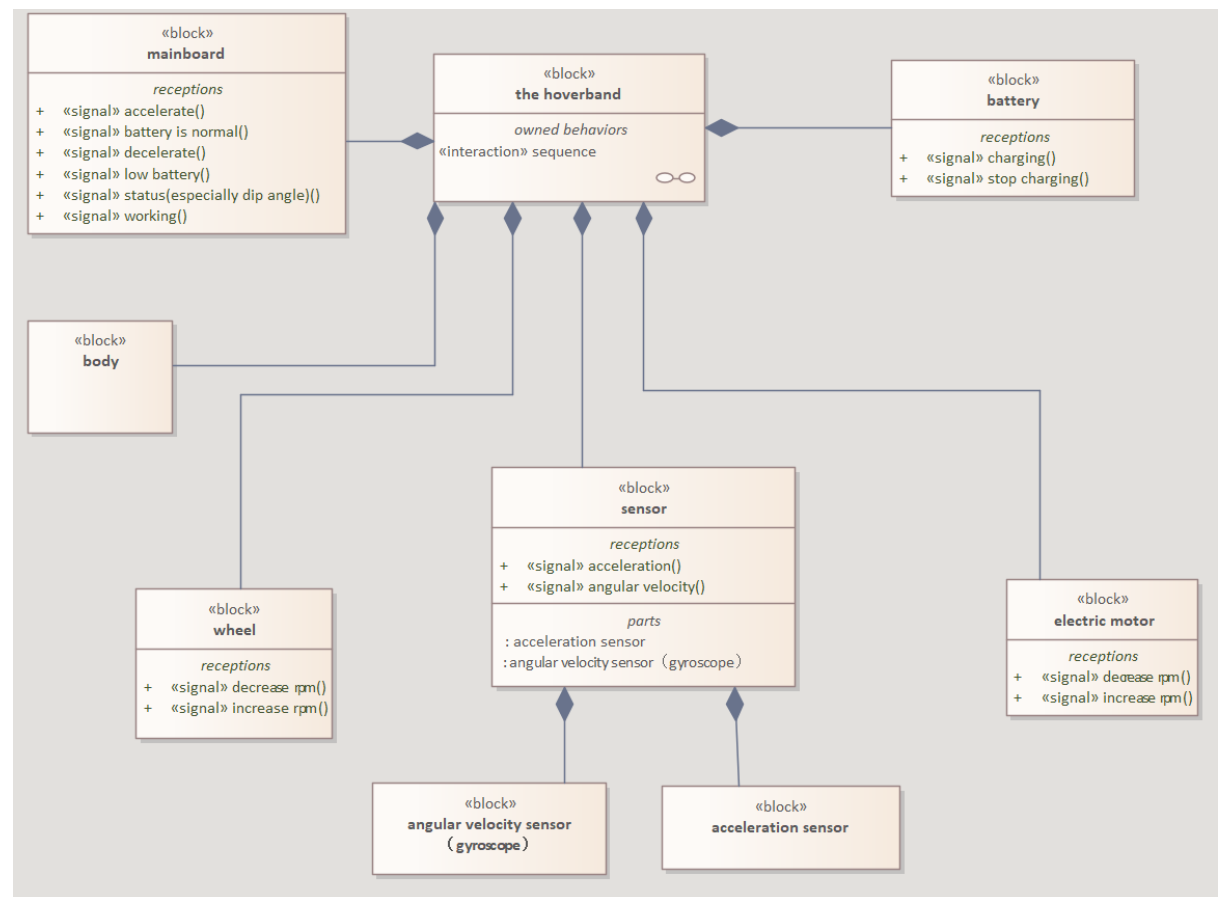
平衡车使用了直流无刷电机作为电动机。无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成，是一种典型的机电一体化产品。电动机的定子绕组多做成三相对称星形接法，同三相异步电动机十分相似。电动机的转子上粘有已充磁的永磁体，为了检测电动机转子的极性，在电动机内装有位置传感器。驱动器由功率电子器件和集成电路等构成，其功能是：接受电动机的启动、停止、制动信号，以控制电动机的启动、停止和制动；接受位置传感器信号和正反转信号，用来控制逆变桥各功率管的通断，产生连续转矩；接受速度指令和速度反馈信号，用来控制和调整转速；提供保护和显示等等。直流电机具有响应快速、较大的起动转矩、从零转速至额定转速具备可提供额定转矩的性能。本次课程设计正是对无刷直流电机进行了模拟仿真

本次课程项目基于 Sysml，使用 Enterprise Architecture 对平衡车进行了系统建模与分析。同时使用 simulink 对平衡车中无刷直流电机的开环调速控制进行了建模与仿真。

## 2. 对平衡车系统的 Sysml 建模

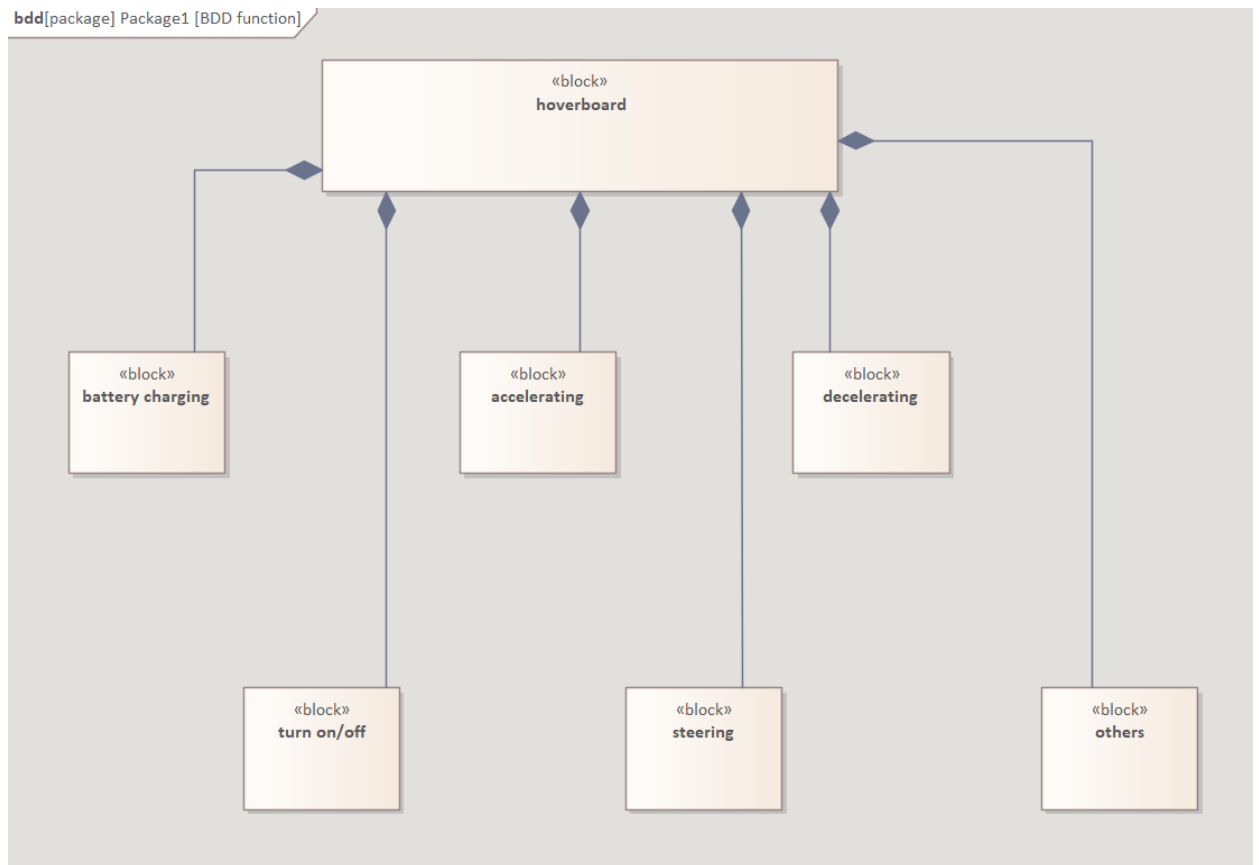
本次建模使用了 Sysml 中的块定义图（两张图，一张从结构来定义，一张从逻辑来定义），时序图，活动图和需求图，合计四种五张。

### ● 块定义图（从结构上）



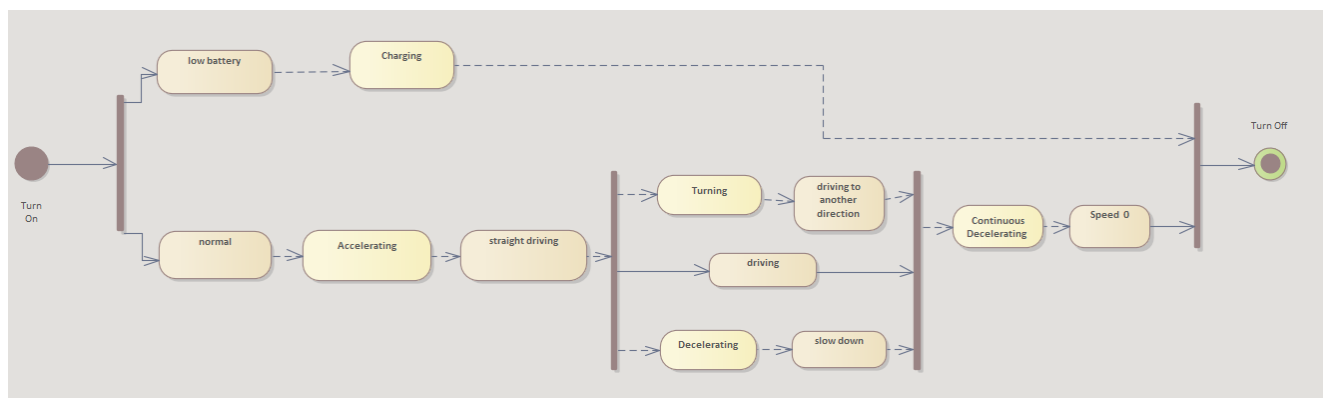
可见，块定义图中将平衡车按结构分为了主板，车身，轮子，传感器（角速度传感器（又叫陀螺仪）和加速度传感器），电池和电动机。

### ● 块定义图（从功能上）



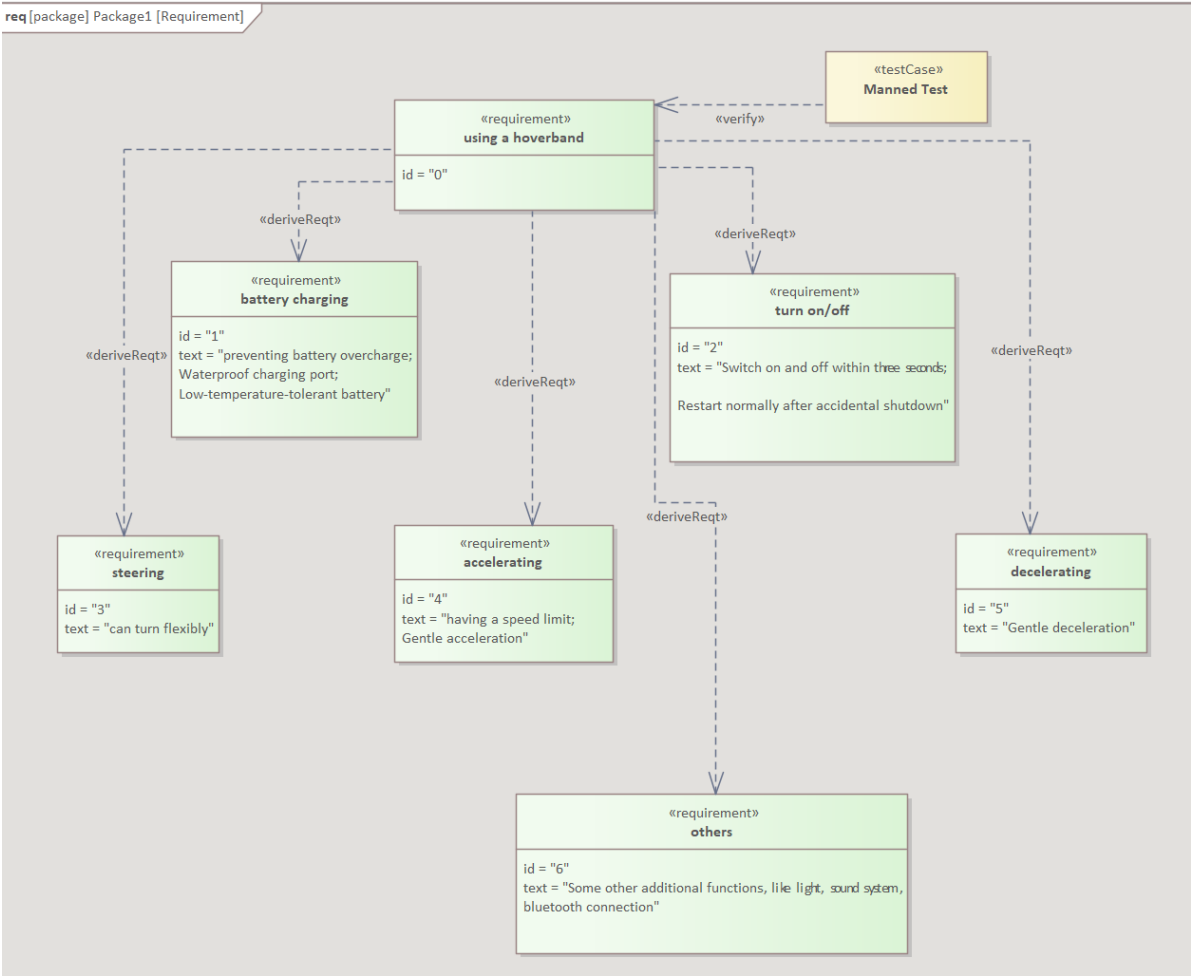
可见，功能上将平衡车分为电池充电，加速，减速，开关机，拐弯和其他功能。

## ● 活动图



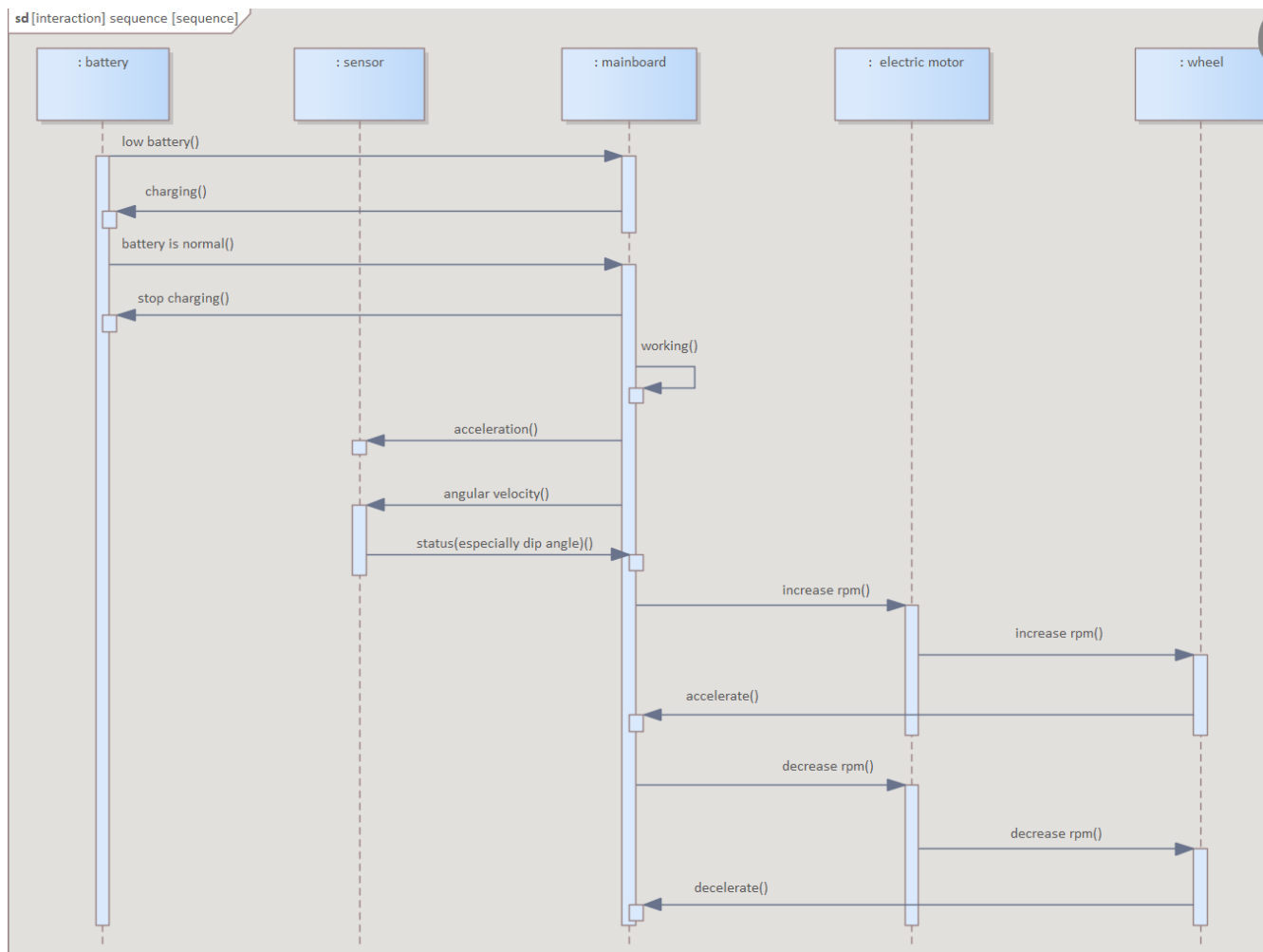
活动图将平衡车从开机到关机的活动流程进行了分析，包含直线行驶，拐弯行驶，以及电池缺电的各种情况。

● 需求图



需求图基于块定义图（从功能分析）构建而成，描绘了六个需求的名称以及具体情况，并且图中增加了一个载人测试的样例。

## ● 时序图



时序图则是从信号的角度分析平衡车各个模块间的通信。

要注意的是要定义一个新的包,并在包中建立一个 BDD 来存放信号,且时序图不能和其他图处在同一级目录,要在块的内部做子图(因为时序图表示的是内部交互)

内容中有主板和电池之间的交互,角速度和加速度传感器的数据使主板获得车身姿态这类的实际情况

### 3. 无刷直流电机的开环调速 simulink 仿真

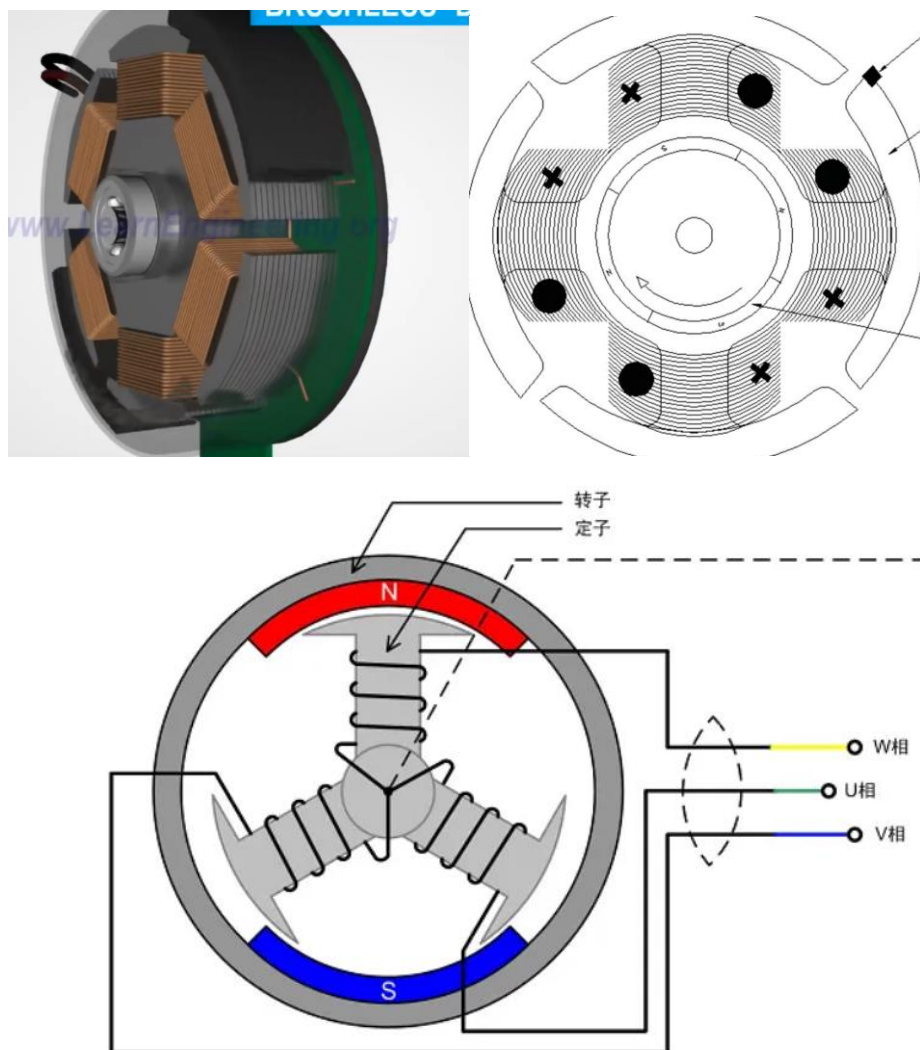
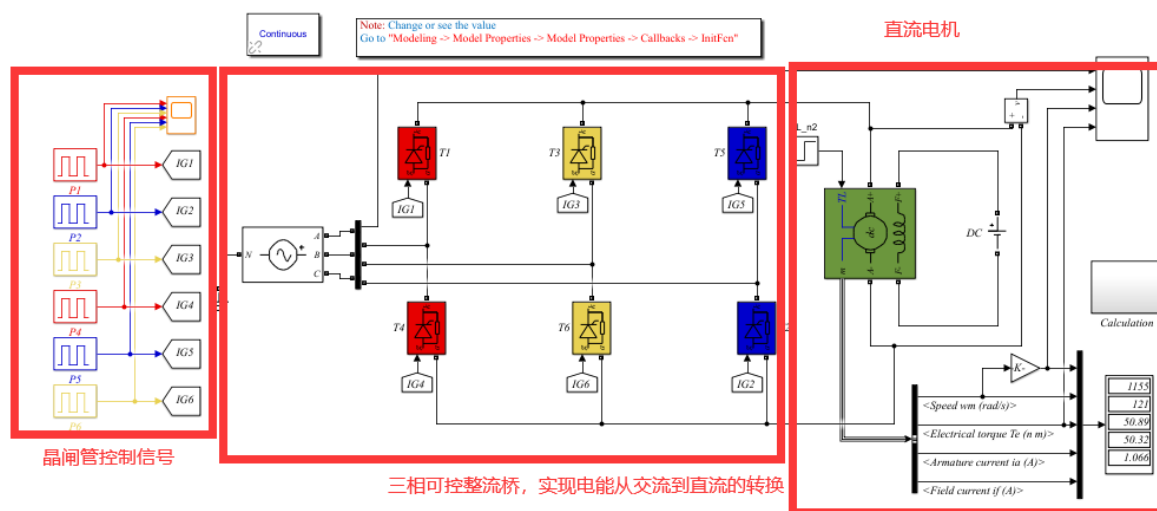


图 1.3 无刷直流电机模型

无刷直流电机的定子为导线圈，转子为永磁体，根据物理知识，通电导体切割磁感线时会产生力。通电后，导线圈励磁成为电磁铁，电磁铁和永磁体相互作用，就可以让电动机运转。具体参见

[https://www.bilibili.com/video/BV1Lb411u7RA?spm\\_id\\_from=333.337.search-card.all.click&vd\\_source=e768cc9ebdc995c1a0689753b9908a](https://www.bilibili.com/video/BV1Lb411u7RA?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=e768cc9ebdc995c1a0689753b9908a)

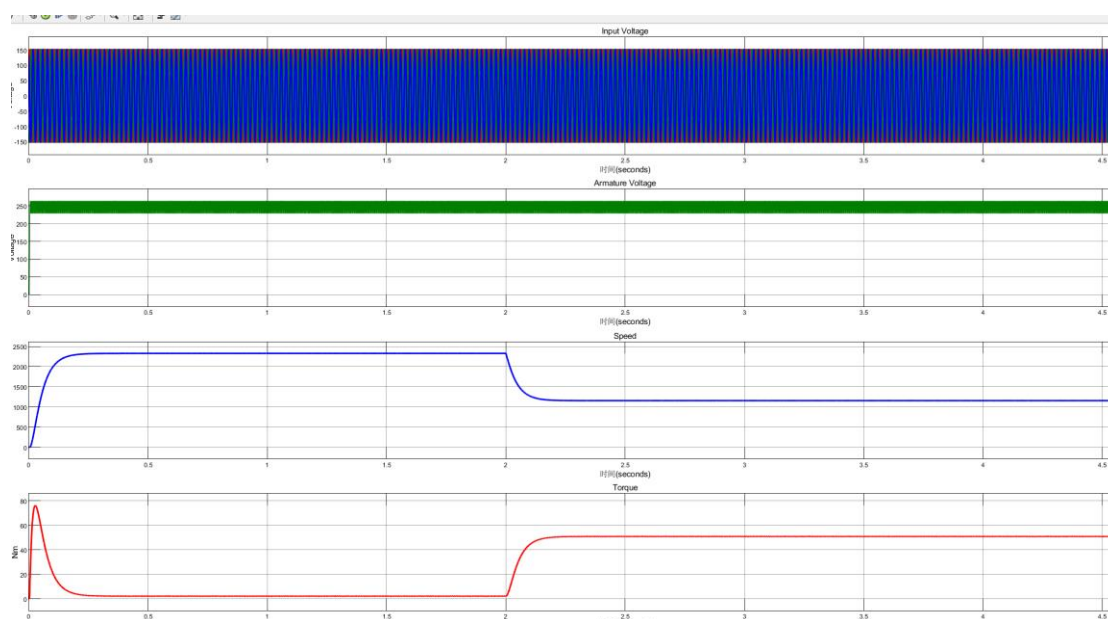
根据电动平衡车的工作原理，可以用 simulink 抽象建模并进行仿真。（需要安装 Simscape 和 Simscape Electrical）



整个系统可以抽象为三大部分。

最左边是晶闸管信号控制部分，中间是三相可控整流桥（交流电源转直流电给电动机供电），最右边则是直流电机和结果显示部分。

## 仿真结果





输入为电流和力矩，输出为电枢电压（是指外加在电枢(转子)上的电压，即电枢反电动势是电枢在磁场中转动时，线圈中产生的感应电动势，由于方向跟外加电压方向相反，称为反电动势）和转速。同时为了更加严谨，对参数的设置做了研究和计算。

**【例 6-1】** 已知直流电动机额定参数为  $U_{nom} = 220V$ ,  $I_{nom} = 136A$ ,  $n_{nom} = 1460r/min$ , 四极,  $R_a = 0.21\Omega$ ,  $GD^2 = 22.5N \cdot m^2$ 。励磁电压  $U_f = 220V$ , 励磁电流  $I_f = 1.5A$ 。采用三相桥式整流电路, 设整流器内阻  $R_{rec} = 0.5\Omega$ 。平波电抗器  $L_d = 20mH$ 。仿真该晶闸管—整流电动机开环调速系统, 观察电动机在全电压起动和起动后加额定负载时电动机的转速、转矩和电流变化。

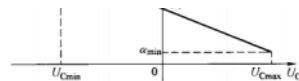


图 6-3 移相特性

仿真步骤:

1) 绘制系统的仿真模型如图 6-2 所示。

2) 设置模块参数

① 供电电源电压

$$U_2 = \frac{U_{nom} + R_{rec} I_{nom}}{2.34 \cos \alpha_{min}} = \frac{220 + 0.5 \times 136}{2.34 \cos 30^\circ} V = 142V$$

② 电动机参数

励磁电阻:

$$R_f = U_f / I_f = (220 / 1.5) \Omega = 146.7 \Omega$$

励磁电感在恒定磁场控制时可取“0”。

电枢电阻:

$$R_a = 0.21 \Omega$$

电枢电感由下式估算:

$$L_a = 19.1 \frac{CU_{nom}}{2\pi n_{nom} I_{nom}} = 19.1 \frac{0.4 \times 220}{2 \times 2 \times 1460 \times 136} H = 0.00021 H$$

电枢绕组和励磁绕组互感  $L_{af}$ :

$$\text{因为 } C_e = \frac{U_{nom} - R_a I_{nom}}{n_{nom}} = \frac{220 - 0.21 \times 136}{1460} V \cdot \min/r = 0.132 V \cdot \min/r$$

$$K_E = \frac{60}{2\pi} C_e = \frac{60}{2\pi} \times 0.132 = 1.26$$

$$\text{所以 } L_{af} = K_E / I_f = (1.26 / 1.5) H = 0.84 H$$

电机转动惯量

$$J = GD^2 / 4g = (22.5 / 4 \times 9.8) kg \cdot m^2 = 0.57 kg \cdot m^2$$

③ 额定负载转矩

$$T_L = 9.55 C_e I_{nom} = 9.55 \times 0.132 \times 136 = 171.4 N \cdot m$$

④ 模型参考参数见表 6-1。

编写了一个 matlab 脚本用于存储公式并且计算变量值。

```
clear all
Ra = 2.581; % 电枢电阻
La = 0.028; % 电枢电感
Rf = 281.3; % 励磁电阻
Lf = 156; % 励磁电感
Vf = 250; % 励磁电压
Laf = 0.9483; % 励磁电枢互感
J = 0.02215; % 转动惯量

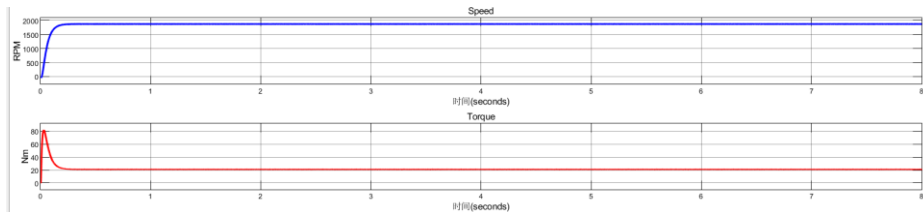
Ka = 1 / Ra; % 电枢回路放大倍数
Ta = La / Ra; % 电枢回路电磁时间常数
If = Vf / Rf; % 励磁电流
Ce_phi = (Laf*If)*2*pi/60;
Ct_phi = Laf*If;
Tm = J*Ra/(Ce_phi*Ct_phi); % 机电时间常数
Tfn = 1e-3; % 速度反馈回路时间常数=1ms
Tfi = 200e-6; % 电流反馈回路时间常数=200us
Tb = Tfi; % 电流反馈延时环节时间常数
K0 = 1;
T0 = 200e-6; % pwm频率=1/200us
alpha = 1; % 速度反馈系数
beta = 1; % 电流反馈系数

% 电机额定值
Udc = 300;
n0 = Udc / Ce_phi;
nN = 0.8*n0;
TN = ((Udc-nN*Ce_phi)*Ct_phi)/Ra;
IaN = TN / Ct_phi;
```

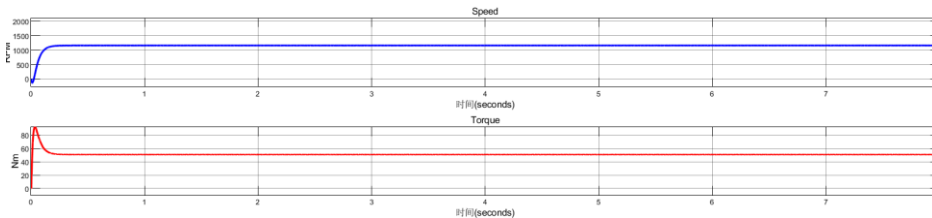
简单对建模结果进行验证：

## 1. 验证扭矩和速度间的关系

当扭矩值为  $20\text{N}\cdot\text{m}$  时，转速大概是 1800-1900 rpm



而当扭矩值来到  $50\text{N}\cdot\text{m}$  时，转速掉到 1100-1200rpm



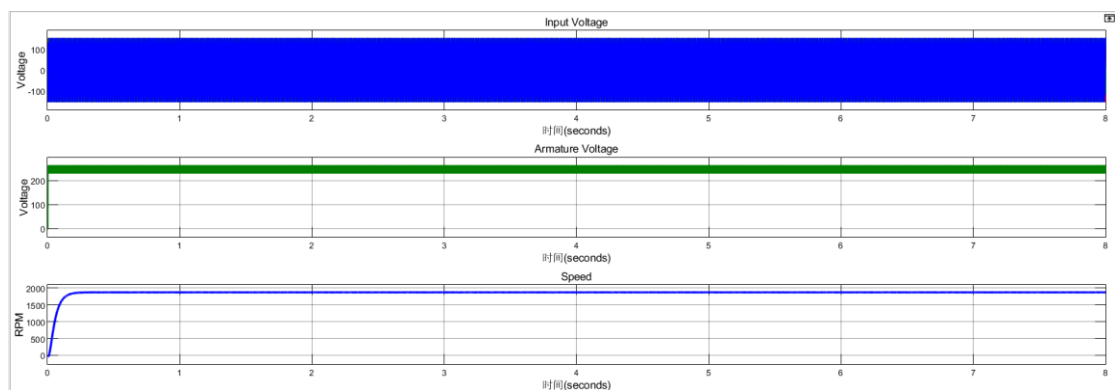
**符合负载越大，车速越慢**

## 2. 验证输入电压和速度之间的关系

六个脉冲信号分别是 0,60,120,180,240,300 时，速度大概是 1800-1900 rpm

模型初始化函数：

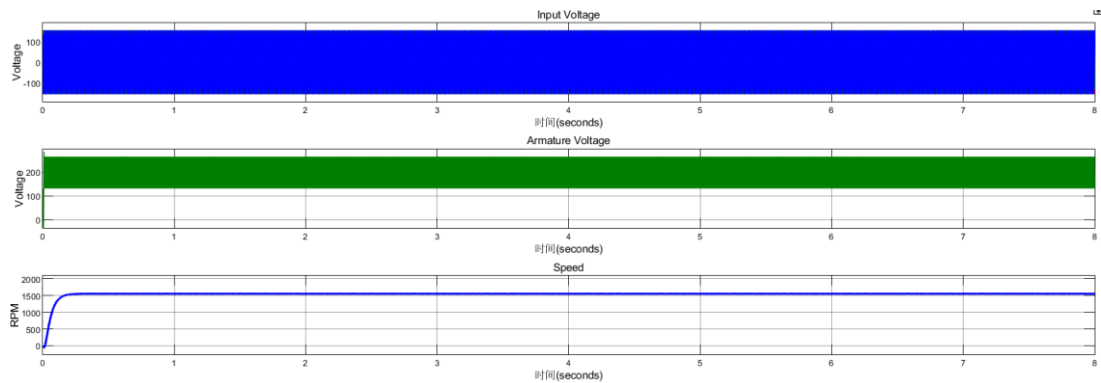
```
v=300  
a=0  
b=60  
c=120  
d=180  
e=240  
g=300
```



给每个信号加 60，速度掉到 1500 rpm

模型初始化函数：

```
v=300  
a=0+60  
b=60+60  
c=120+60  
d=180+60  
e=240+60  
g=300+60
```



**符合供电越少，车速越慢**

这几个值是晶闸管的触发角（也可以叫作偏移角），影响的是整流桥输出电压

由于是开环控制系统，控制部分做的也就比较简单。主要还是练习了 simulink 的使用。

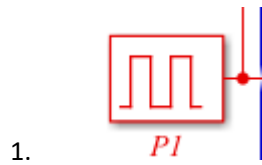
#### 4. 总结反思

通过本次暑期课程的学习和课程设计的制作，我深入地理解了系统建模和模拟仿真对软件开发的重要性。并且也熟悉了 EA, matlab, simulink 等各种工具，并在课设中做出了一些实践。自己的视野得到了开拓，动手能力也获得了很大的提升。

特别是在做电动机的仿真过程中，学习了很多电学的知识，感受到了物理学和计算机科学交叉的魅力。

但是仍然有一些不足，例如没有实现电动机调速的闭环控制；在尝试电动机运行可视化的探索中没有收获，最后只有示波器结果等等，这让我认识到自己还有很多需要学习的东西。

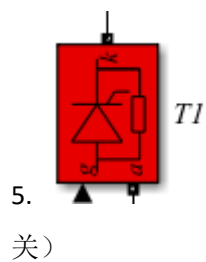
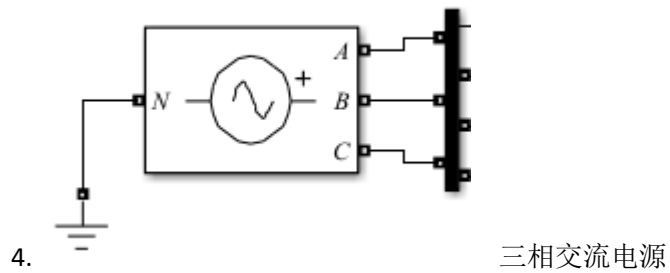
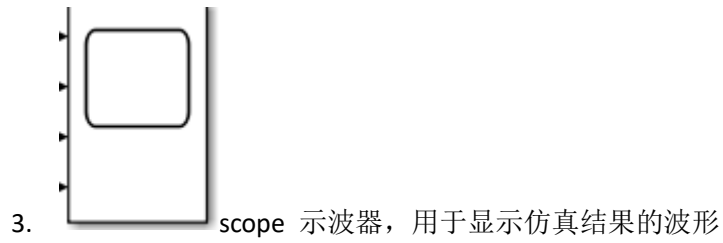
## 附录：simulink 仿真中各个符号的意义



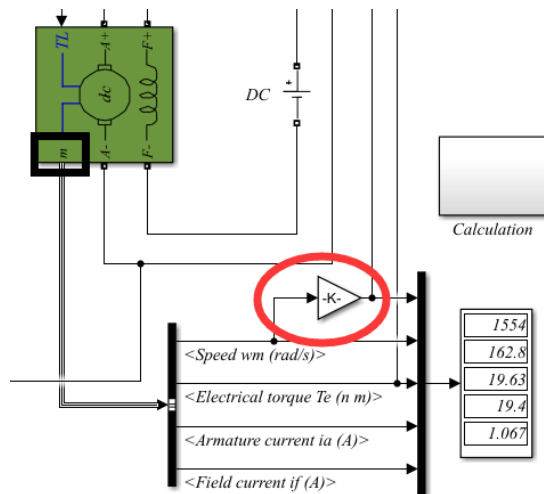
pulse, 脉冲, 用于描述晶闸管的相关信息



作为转接器的作用, 因为图太大不方便把两处用线直连, 就会在两处各放一个 IG。



T, 晶闸管, 是一种电力电子功率器件 (开关器件, 相当于高频率开关)



6.

绿色部分就是直流电动机

抽象出三个输入

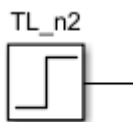
F 由 DC source 直流供电

A 交流电转化的直流电进行供电（输入电压）

TL 力矩，相当于车的负载

而整个电动机是一个整体，端口 m 则是把电动机所有的参数输出到显示部分

K 这个部件是把转速的角速度换成了圈数。（rad→rpm）



7.

用一个阶梯式可变数值的模块来描述力矩（可以直接理解为负载）