

气路建模总结

气路建模总结

- 气路模型概述
- 发动机模型
 - 歧管模型
 - 气缸模型
 - EGR模型
 - 涡轮模型
- Matlab仿真参数设置及其代码
- 经验教训

1、气路模型概述

- 为满足相关排放法规限制，通常在柴油发动机中装备有EGR和VGT模块。EGR模块将废气再导入发动机中减低气缸氧含量和温度，从而减少了NOx的生成；VGT模块将进气歧管空气压缩，提高了气缸的氧燃比，从而减少燃烧不充分形成的烟尘。因此，如何解决二者之间的耦合关系，控制发动机EGR率和氧燃比处于理想位置成为研究难点
- 该气路模型旨在构建一个包含歧管压力、EGR、VGT的流体动力学的均值模型。为获得较短的仿真时间，模型仅仅包含8个状态量，且模型在实验条件经过了稳态和瞬态验证。最终建立模型能够描述该气路系统的动力学和非线性，其中各测量的变量相对误差不超过5.8%。

2、发动机模型

- 发动机关键参数：

参数名	标识	值
气缸数	n_{cyl}	6
空燃比	$(A/F)s$	14.57
排量(L)	V_d	12.7
压缩比	r_c	17

- 模型结构：

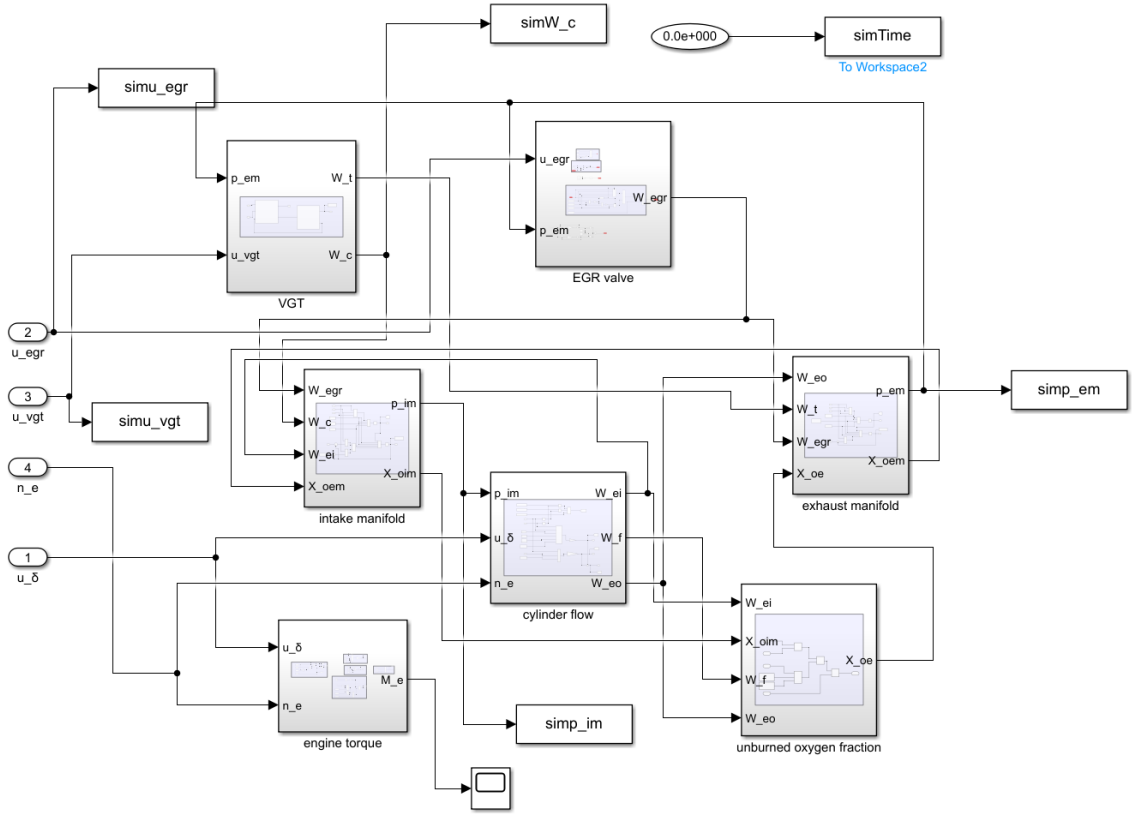
输入量： $\mathbf{u} = (u_\delta \ u_{egr} \ u_{vgt})^T$

状态变量： $\mathbf{x} = (p_{im} \ p_{em} \ X_{oim} \ X_{oem} \ \omega_t \ \tilde{u}_{egr1} \ \tilde{u}_{egr2} \ \tilde{u}_{vgt})^T$

扰动： n_e

状态空间： $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, n_e)$

- 模型全局



2.1、歧管模型

可调参数：进气歧管体积 $V_{im} = 0.022$ ，排气歧管体积 $V_{em} = 0.02$ ；

- 歧管压力：

应用理想气体方程： $PV = mRT$ 得到；此处假设歧管内是同温气体；

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} p_{im} &= \frac{R_a T_{im}}{V_{im}} (W_C + W_{egr} - W_{ei}) \\ \frac{d}{dt} p_{em} &= \frac{R_e T_{em}}{V_{em}} (W_{eo} - W_t - W_{egr}) \end{aligned} \quad (1)$$

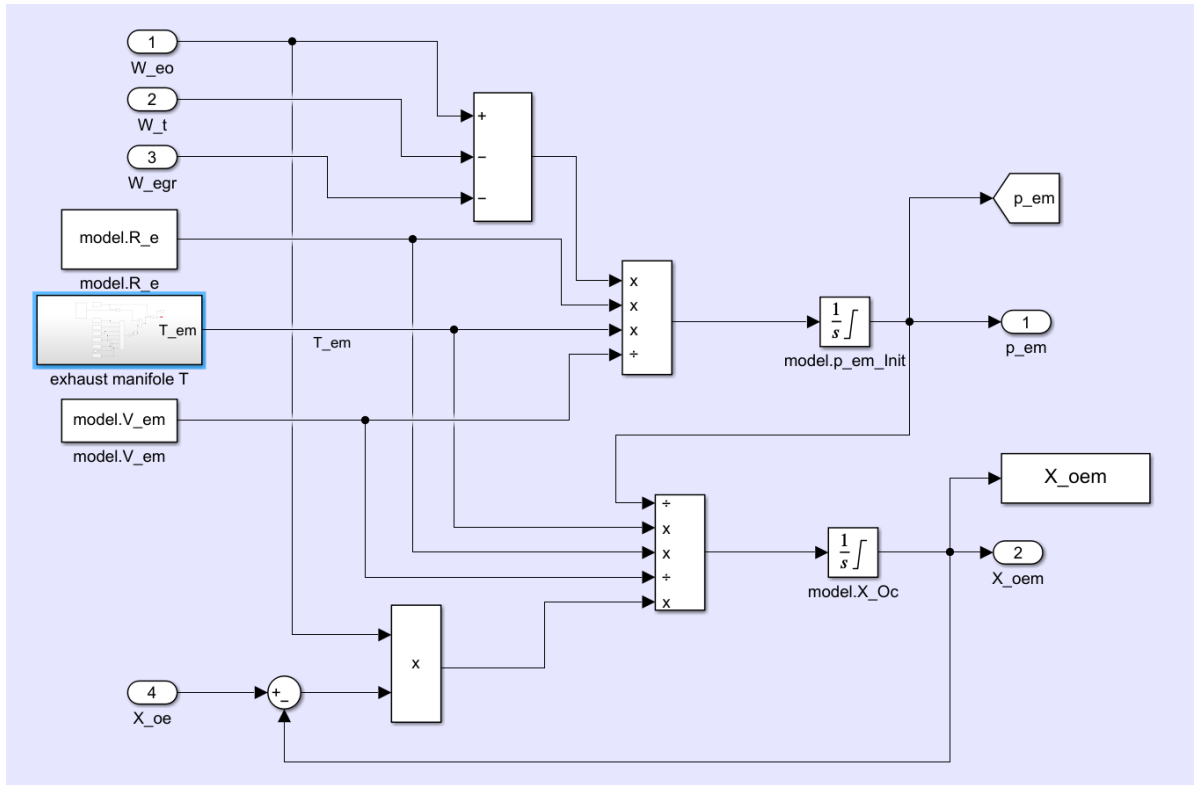
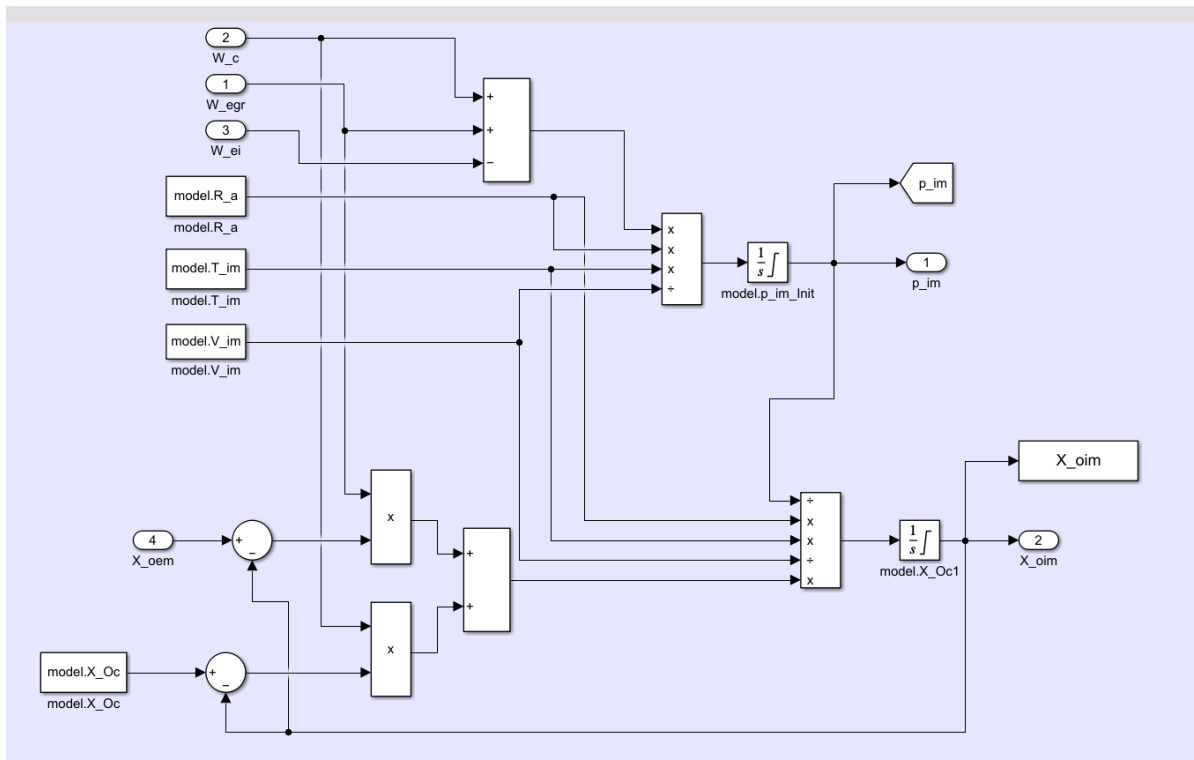
- 歧管氧气质量分数：

氧气质量分数=氧气质量\总质量

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_{Oim} &= \frac{R_a T_{im}}{p_{im} V_{im}} ((X_{Oem} - X_{Oim}) W_{egr} + (X_{Oe} - X_{Oim}) W_C) \\ \frac{d}{dt} X_{Oem} &= \frac{R_e T_{em}}{p_{em} V_{em}} (X_{Oe} - X_{Oem}) W_{eo} \end{aligned} \quad (2)$$

- EGR率 χ_{egr} ：

$$\chi_{egr} = \frac{W_{egr}}{W_c + W_{egr}} \quad (3)$$



2.2 气缸模型

- 气缸的进气流量 W_{ei} :

可调参数: $c_{vol1} = -0.00020817, c_{vol2} = -0.0034, c_{vol3} = 1.1497$

$$W_{ei} = \frac{\eta_{vol} p_{im} n_e V_d}{120 R_a T_{im}} \quad (4)$$

$$\eta_{vol} = c_{vol1} \sqrt{p_{im}} + c_{vol2} \sqrt{n_e} + c_{vol3} \quad (5)$$

- 气缸中未燃烧氧分数 X_{oe} :

氧燃比(O/F)_s=空燃比*空气中氧气质量分数;

$$X_{Oe} = \frac{W_{ei}X_{Oim} - W_f(O/F)_s}{W_{eo}} \quad (6)$$

$$(O/F)_s = (A/F)_s \times X_{oc} \quad (7)$$

- 注油管的流量 W_f :

$$W_f = \frac{10^{-6}}{120} u_\delta n_e n_{cyl} \quad (8)$$

- 发动机扭矩 M_e :

可调参数: $c_{fric1} = 0.9727, c_{fric2} = -0.6769, c_{fric3} = 0.5982$

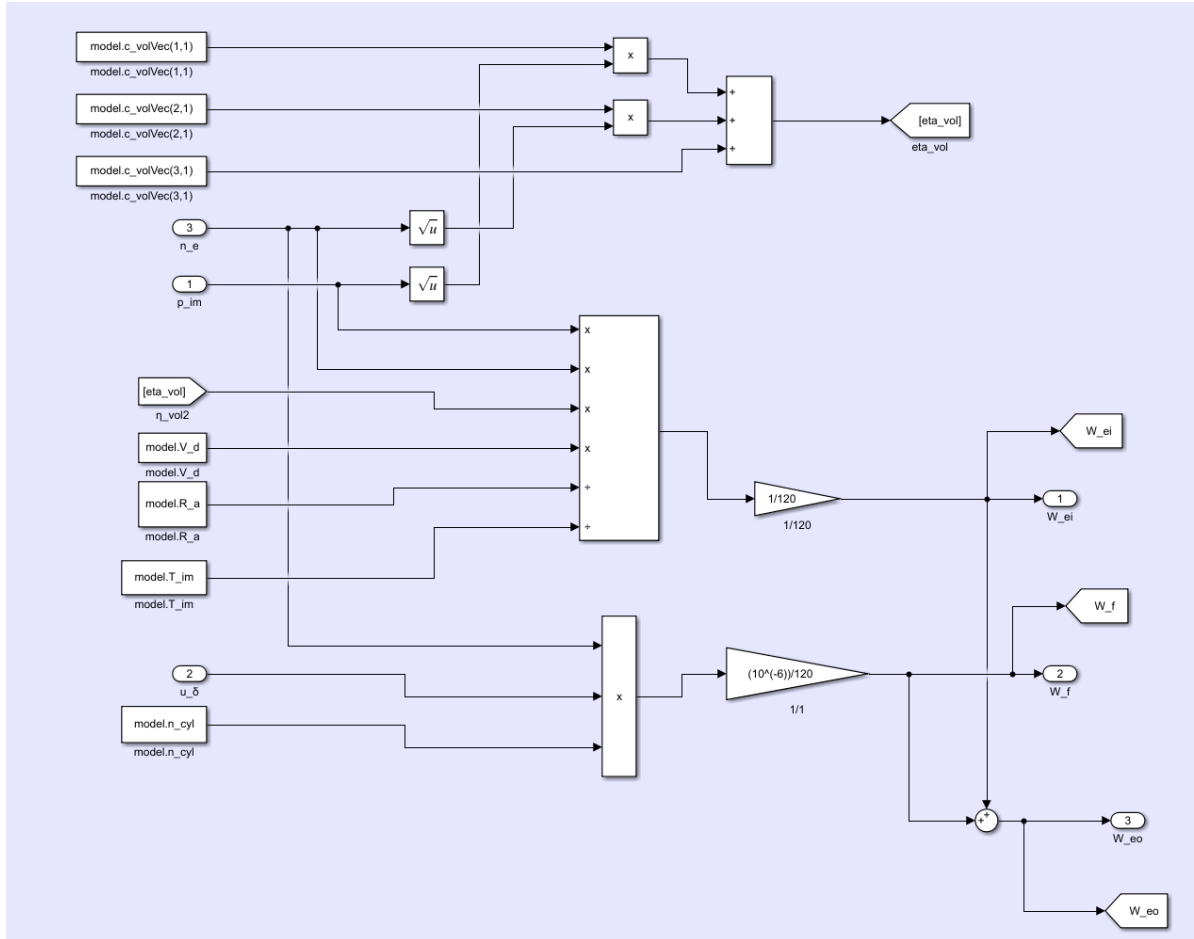
M_{ig} 理想扭矩, M_p 泵气扭矩, M_{fric} 摩擦扭矩

$$M_e = M_{ig} - M_p - M_{fric} \quad (9)$$

$$M_p = \frac{V_d}{4\pi} (p_{em} - p_{im}) \quad (10)$$

$$M_{ig} = \frac{u_\delta 10^{-6} n_{cyl} q_{HV} \eta_{ig}}{4\pi} \quad (11)$$

$$M_{fric} = \frac{V_d}{4\pi} (c_{fric1} n_{eratio}^2 + c_{fric2} n_{eratio} + c_{fric3}) \quad (12)$$

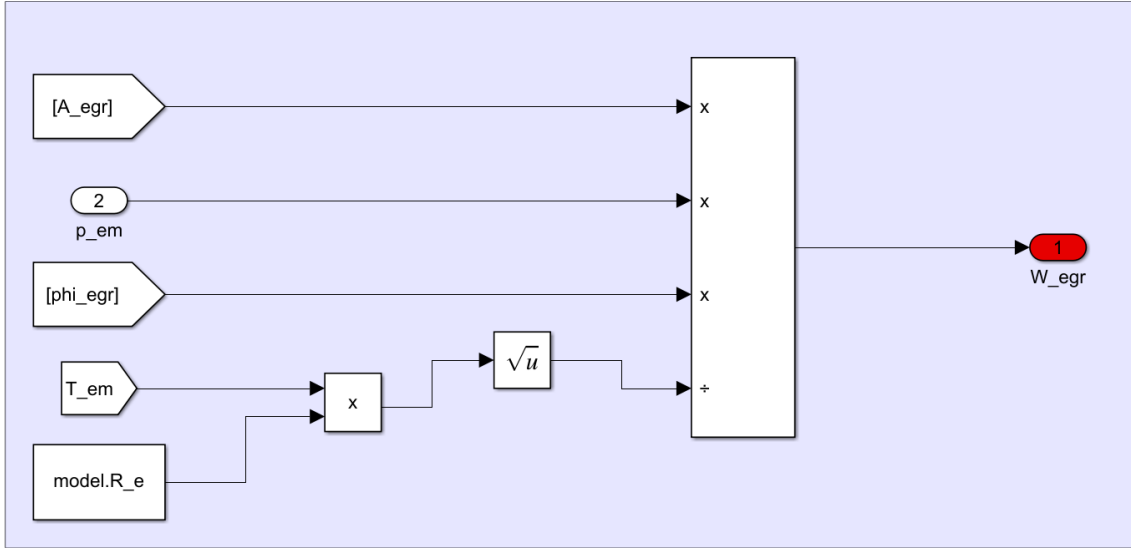


2.3 EGR模型

- EGR流量 W_{egr} :

此处假设当排气歧管压强小于进气歧管压强时气体无倒流;

$$W_{egr} = \frac{A_{egr} p_{em} \Psi_{egr}}{\sqrt{T_{egr}} R} \quad (13)$$



• EGR阀执行器：

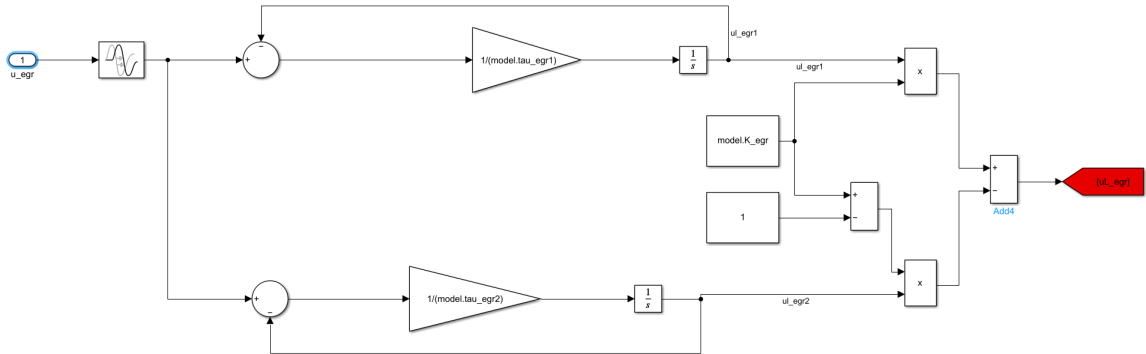
EGR开度由两个一阶系统组成的有超调和延时的二阶系统；

可调参数：

时间常数： $\tau_{egr1} = 0.05, \tau_{egr2} = 0.13$ ；延时： $\tau_{degr} = 0.04$ ；超调因子： $K_{egr} = 1.8$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \tilde{u}_{egr1} &= \frac{1}{\tau_{egr1}} [u_{egr}(t - \tau_{degr}) - \tilde{u}_{egr1}] \\ \frac{d}{dt} \tilde{u}_{egr2} &= \frac{1}{\tau_{egr2}} [u_{egr}(t - \tau_{degr}) - \tilde{u}_{egr2}] \\ \tilde{u}_{egr} &= K_{egr} \tilde{u}_{egr1} - (K_{egr} - 1) \tilde{u}_{egr2} \end{aligned} \quad (14)$$

•



2.4 涡轮模型

• 涡轮模型：

◦ 涡轮转速：

由 $P = M\omega, M = J \frac{d\omega}{dt}$ 可得：

$$\frac{d}{dt} \omega_t = \frac{P_t \eta_m - P_c}{J_t \omega_t} \quad (15)$$

◦ 废气对涡轮做功 P_t ：

此处用涡轮稳态功率 $P_{t,s}$ 替代 P_t

$$P_t \eta_m = \eta_{tm} P_{t,s} = \eta_{tm} W_t c_{pe} T_{em} (1 - \Pi_t^{1-1/\gamma_e})$$

$$\eta_{tm} = \eta_{tm,max} - c_m(BSR - BSR_{opt})^2 \quad (16)$$

$$BSR = \frac{R_t \omega_t}{\sqrt{2c_{pe} T_{em} (1 - \Pi_t^{1-1/\gamma_e})}}$$

- 涡轮流量 W_t :

$$W_t = \frac{A_{vgtmax} p_{em} f_{\Pi_t}(\Pi_t) f_{vgt}(\tilde{u}_{vgt})}{\sqrt{T_{em} R_e}} \quad (17)$$

- VGT执行器:

VGT建模为一个有时延的一阶系统;

$$\frac{d}{dt} \tilde{u}_{vgt} = \frac{1}{\tau_{vgt}} (u_{vgt}(t - \tau_{dvgt}) - \tilde{u}_{vgt}) \quad (18)$$

- 压缩机模型:

- 压缩机功率:

视为等熵过程-绝热可逆

$$P_c = \frac{W_c c_{pa} T_{amb}}{\eta_c} (\Pi_c^{1-1/\gamma_a} - 1) \quad (19)$$

- 压缩机的流量 W_c :

压缩机流量

$$W_c = \frac{p_{amb} \pi R_c^3 \omega_t}{R_a T_{amb}} \Phi_c \quad (20)$$

3、Matlab仿真参数设置及其代码

- 模型及其仿真文件: <https://github.com/RIOTerN/Lars-model.git>
- 求解器: ode23s; 可变步长
- 仿真代码:

```
clear
load parameterData.mat %加载参数文件

for step=1:2%
    switch step
        case 1
            %设置第一种工况初始输入值
            %第一列为时间序列
            %第二列为数据序列
            simU.n_e=[0 1500];
            simU.u_delta=[0 110];
            simU.u_egr=[0 80];
            simU.u_vgt=[0 75];
            %初始条件下运行lars模型达到稳态
            sim('lars.slx',20)
            %设置vgt: 75->65
            simU.u_vgt=[0 1]' [75 65]';
```

```

case 2
    %设置第二种工况初始输入值
    %第一列为时间序列
    %第二列为数据序列
    simU.n_e=[0 1500];
    simU.u_delta=[0 110];
    simU.u_egr=[0 80];
    simU.u_vgt=[0 30];
    %初始条件下运行lars模型达到稳态
    sim('lars.slx',20)
    %设置vgt开度: 30->25
    simU.u_vgt=[[0 1]' [30 25]'];
end

%使用模型稳态条件的终值作为下一步仿真的初值
model.x_r_Init=simx_r(end);
model.T_1_Init=simT_1(end);
model.uInit_egr=simu_egr(end);
model.uInit_vgt=simu_vgt(end);
opt=simset('InitialState',xFinal);

%给定条件下运行lars模型达
sim('lars.slx',8,opt)

%仿真结果存入simEngine文件中
%压力 [Pa]
simEngine.p_im=simp_im;
simEngine.p_em=simp_em;
%压缩机流量 [kg/s]
simEngine.W_c=simW_c;
%vgt开度
simEngine.u_vgt=simu_vgt;
%时间 [s]
simEngine.time=simTime;

figure(step)
clf
subplot(2,2,1)
plot(simEngine.time,simEngine.u_vgt)
ylabel('vgt开度 [%]')
oldaxis=axis;
axis([0 8 oldaxis(3)-1 oldaxis(4)+1])

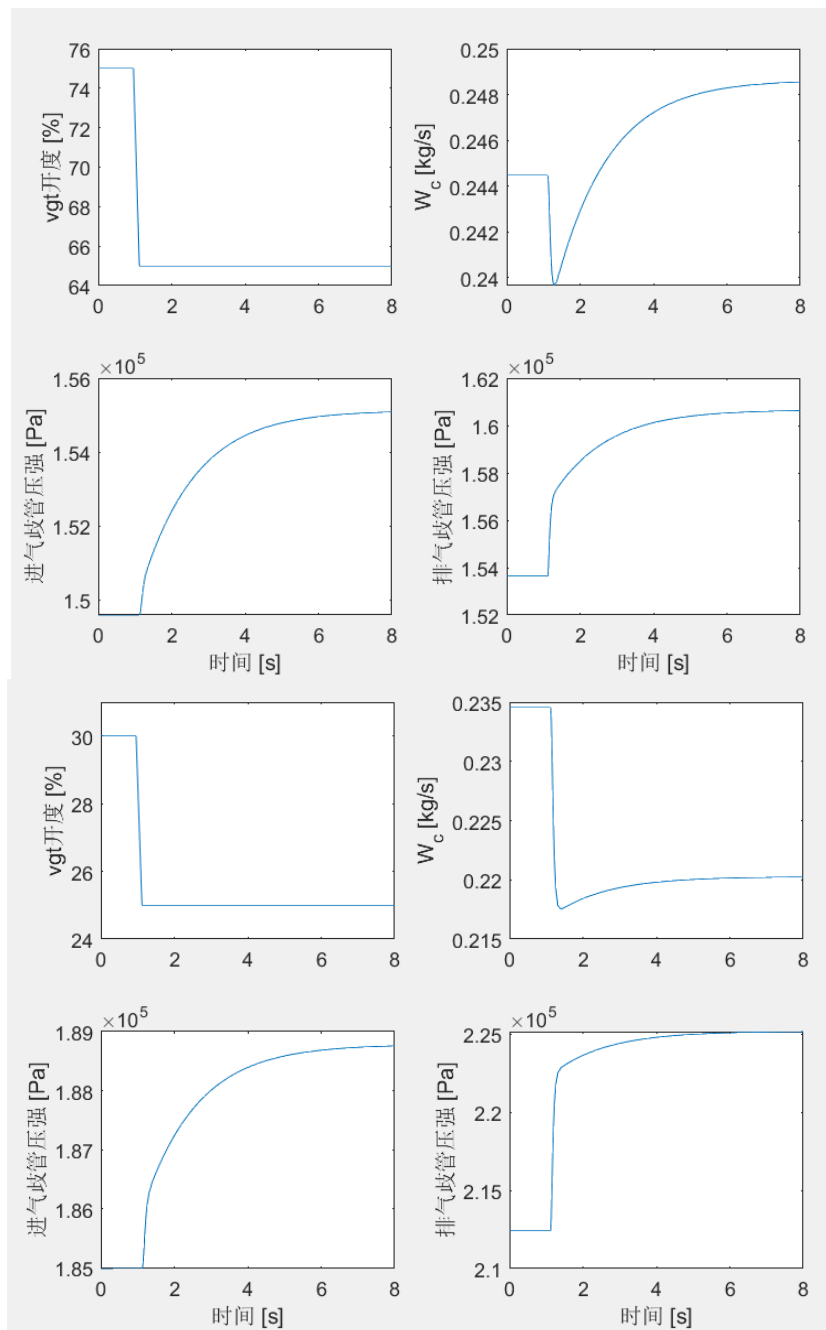
subplot(2,2,2)
plot(simEngine.time,simEngine.W_c)
ylabel('W_{c} [kg/s]')

subplot(2,2,3)
plot(simEngine.time,simEngine.p_im)
ylabel('进气歧管压强 [Pa]')
xlabel('时间 [s]')

subplot(2,2,4)
plot(simEngine.time,simEngine.p_em)
ylabel('排气歧管压强 [Pa]')
xlabel('时间 [s]')
end

```

- 仿真结果



4、经验教训

- 自顶向下建模时，需要逐项对子模块进行验证，最后对整个模块验证。
- 在simulink里面使用function模块建立复杂的方程，更方便。
- 建模要细心仔细，修改子模块要及时重新验证。