



**2024-2025 学年度春季**



# **课程名称：《自动控制原理（一）》**

## **第12讲 控制系统的稳态性能**

**课程学时：共56学时**

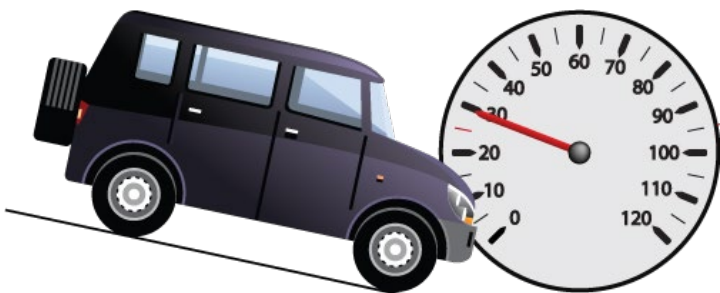
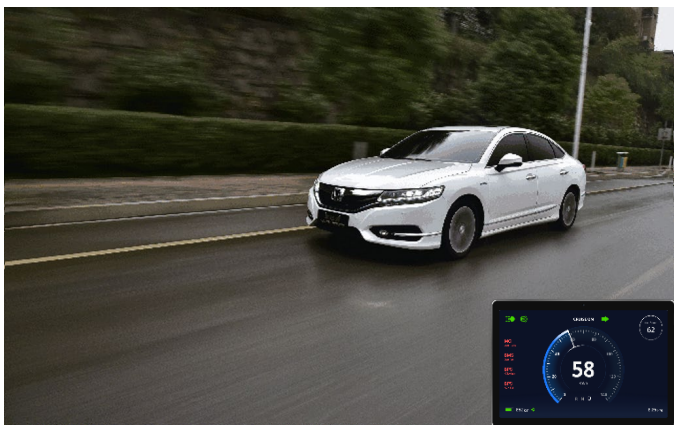
**课程性质：专业基础课**

**学生对象：自动化2305班  
(32人)**

**授课教师：刘骁康**

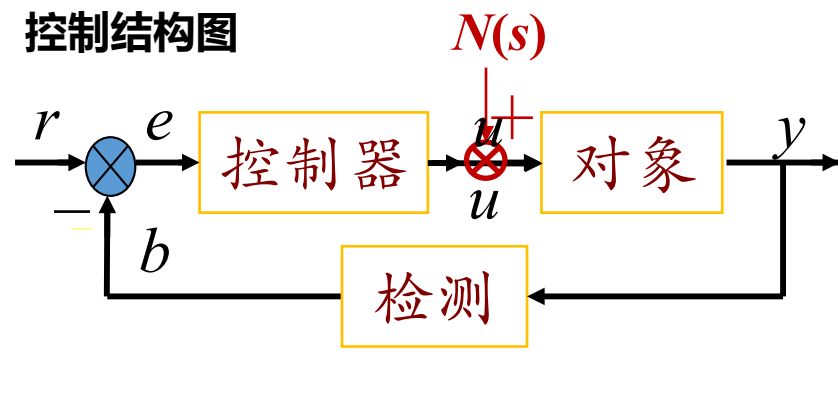
**课程目标：掌握自动控制的基本原理、控制系统的建模、性能分析和综合设计方法**

## ■ 车辆定速巡航



斜坡上运动

控制结构图



$$\dot{v}(t) = u(t)$$



$$\dot{v}(t) = u(t) + n(t)$$

重力分量作为外部干扰作用在加速度上

为什么车辆最后  
还能按照预设速度行驶?



## 第三章：控制系统的时域分析

# 第12讲 控制系统的稳态性能分析

## Steady Stability Analysis of Control Systems

### 本讲内容

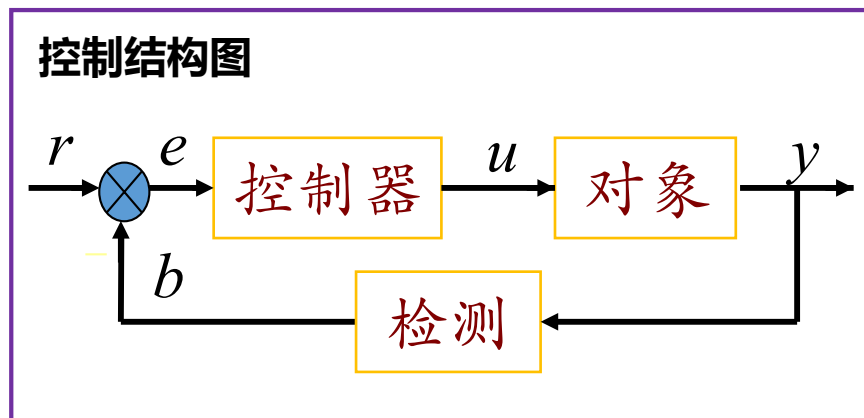
- 一、稳态误差的定义
- 二、扰动输入下控制系统的稳态误差
- 三、案例：定速巡航控制综合设计



# 一、稳态误差的定义

## □ 稳态误差：

**【误差】** 对图示典型控制系统，其误差 $e(t)$ 是参考输入信号 $r(t)$ 和反馈信号 $b(t)$ 的差值，即  $e(t) = r(t) - b(t)$ 。



**稳态响应：** 控制系统最终状态的表现形式。

**稳态误差：** 系统实际输出值与希望输出值之间的最终偏差。

# 一、稳态误差的定义

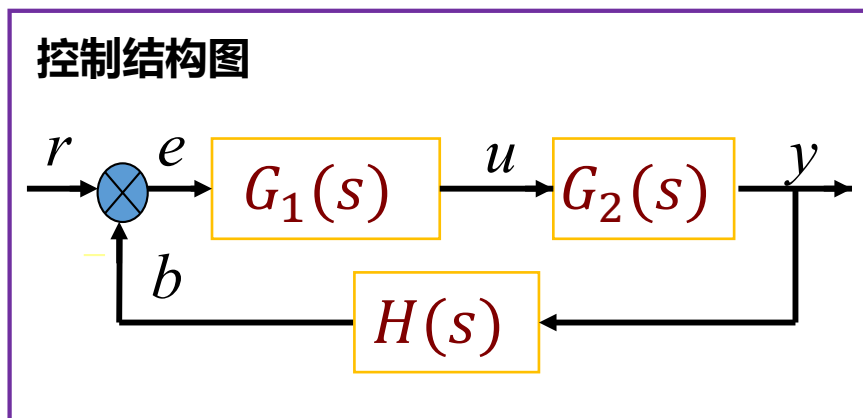
## □ 稳态误差的计算:

**时域:** 误差 $e(t)$ 在 $t \rightarrow \infty$ 时的值, 记为 $e_{ss}$ , 即

$$e_{ss} = e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [r(t) - b(t)].$$

**S域: (终值定理法)** 根据终值定理, 即

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s)$$



如何根据控制结构图求稳态误差呢?

求误差传递函数

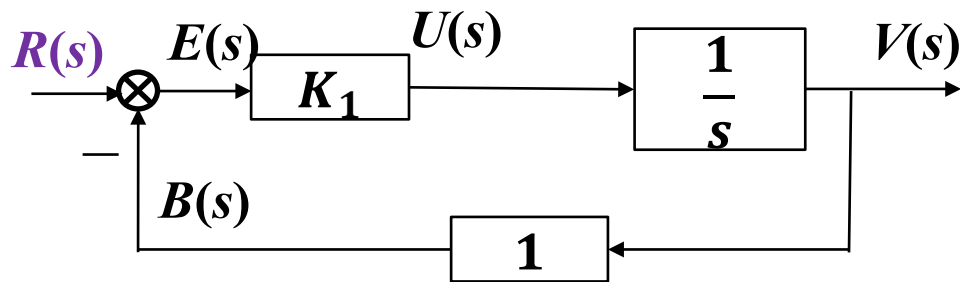
$$\Phi_{er}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

根据终值定理,

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{er}(s) R(s)$$

# 一、稳态误差的定义

**【案例】** 设车辆的动力学为  $\dot{v}(t) = u(t)$  车辆初始速度为 0 (m/s)，拟控制车辆以 30 (m/s) 的速度定速巡航。请计算稳态误差？



方法:

求误差传递函数

$$\Phi_{er}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

根据终值定理,

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{er}(s) R(s)$$

步骤 1: 求误差传递函数

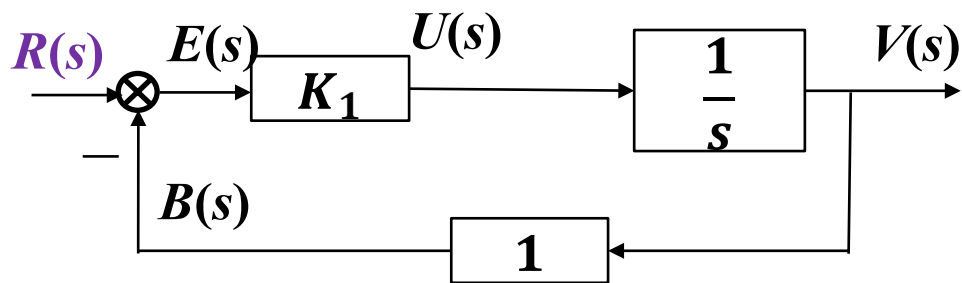
$$\Phi_{er}(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{K_1}{s}} = \frac{s}{s + K_1}$$

步骤 2: 根据终值定理

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Phi_{er}(s) R(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \times \frac{s}{s + K_1} \times \frac{1}{s} \\ &= 0 \end{aligned}$$

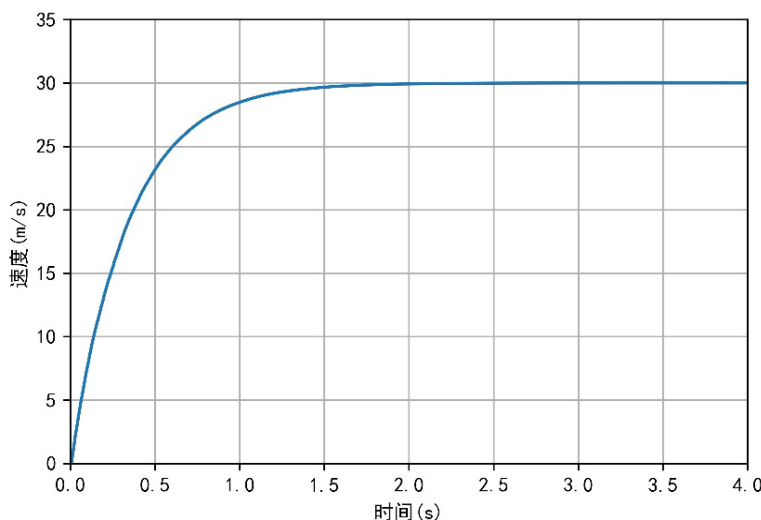
# 一、稳态误差的定义

**【案例】** 设车辆的动力学为  $\dot{v}(t) = u(t)$  车辆初始速度为 0 (m/s)，拟控制车辆以 30 (m/s) 的速度定速巡航。请计算稳态误差？



**控制器：**  $u(t) = K_1 e(t)$

**速度曲线  
(无干扰)**



```

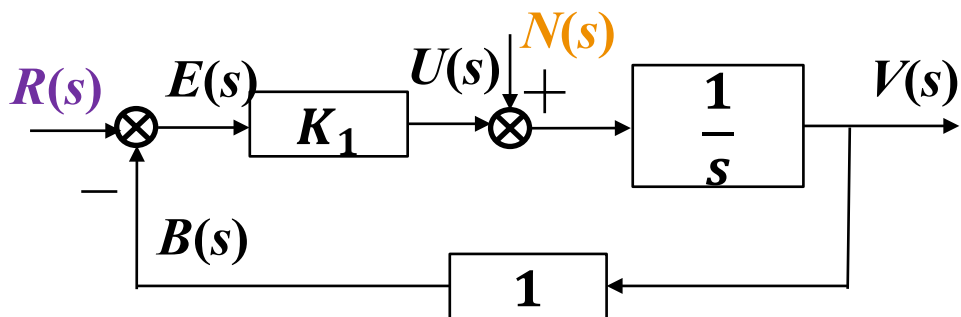
238 e = 30 - v
239 # statev = statev*5e-1/120
240 # state = state+(statev-v)*1/120
241 state = state+(3*e)*1/120
242
243 Background_sprites.speedx = -state/1.2
244
245 Car_sprites_Follow.speedx = 0
246 Car_sprites_Follow.speedbackground = Background_sprites.speedx
247
248 p_store[count,0] = (pygame.time.get_ticks()-3000)/1000
249 p_store[count,1] = v
250 count = count + 1
251 print("速度: "+str(round(v,3))+"米/秒")
252 Background_sprites.v = v
253
254 # Car_sprites_Follow.speedx = 1
255 # Car_sprites_Front.draw(screen)
256
257 if pygame.time.get_ticks()>7000 and flag == 1:
258
259     plt.plot(p_store[1:count,0], p_store[1:count,1], linestyle='-')
260     plt.grid()
261     plt.plot(p_store[1:count,0], np.ones(count-2)*30, linestyle='--',color='r')
262     plt.xlim([0,4])
263     # plt.yticks(range(36))
264     plt.ylim([0,45])
265     plt.xlabel('时间(s)')
266     plt.ylabel('速度(m/s)')
267     plt.savefig('Curve.jpg',dpi = 600)
268     flag = 0
269
270 #update
271 # Car_sprites.update()
272 Car_sprites.update()
273 # Car_sprites_Front.update()
274 Background_sprites.update()
275 pygame.display.update()
276
277
278
279
280
  
```

虚拟仿真平台( $K_1 = 3$ )



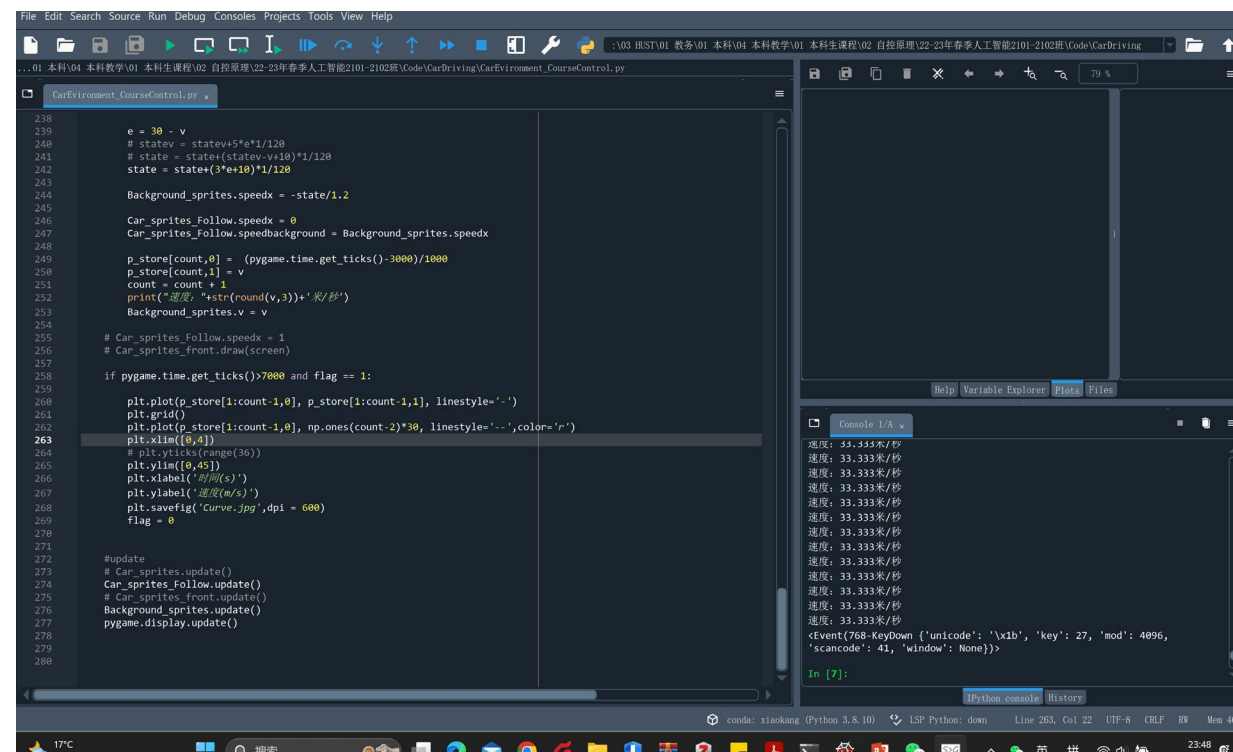
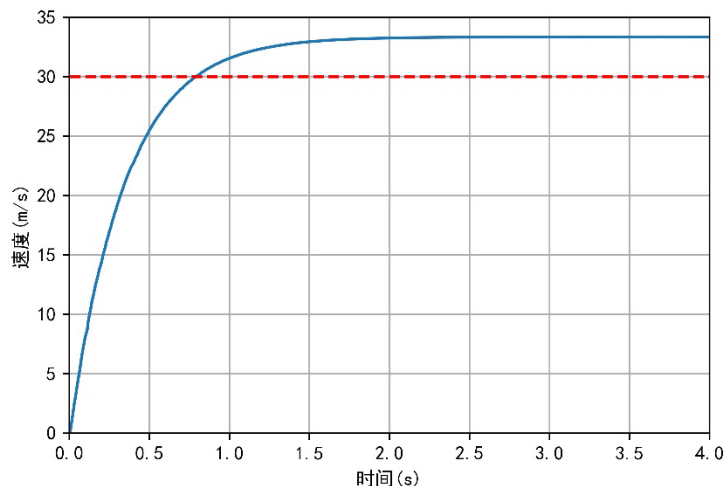
## 二、扰动输入下控制系统的稳态误差

**【案例】** 设车辆的动力学为  $\dot{v}(t) = u(t)$  车辆初始速度为 0 (m/s)，拟控制车辆以 30 (m/s) 的速度定速巡航，若存在  $n(t) = 10l(t)$  的扰动信号。请计算稳态误差？



**控制器:**  $u(t) = K_1 e(t) + n(t)$ ,  $n(t) = 10l(t)$

速度曲线  
(有干扰)

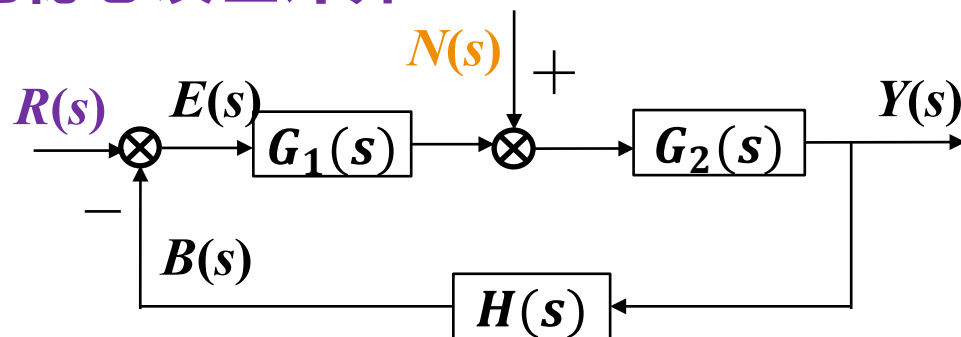


虚拟仿真平台( $K_1 = 3$ , 有干扰)

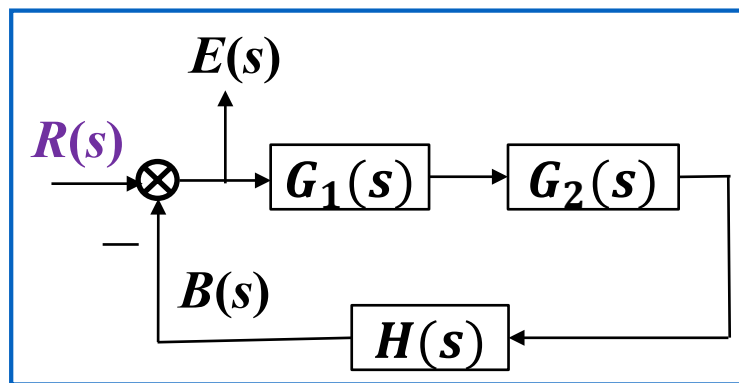


## 二、扰动输入下控制系统的稳态误差

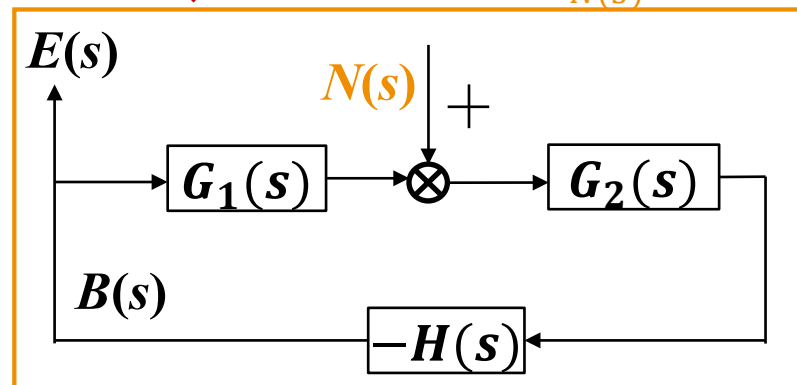
### □ 扰动输入下的稳态误差计算：



计算  $\Phi_{er}(s) = \frac{E(s)}{R(s)}$  ↓



↓ 计算  $\Phi_{en}(s) = \frac{E(s)}{N(s)}$

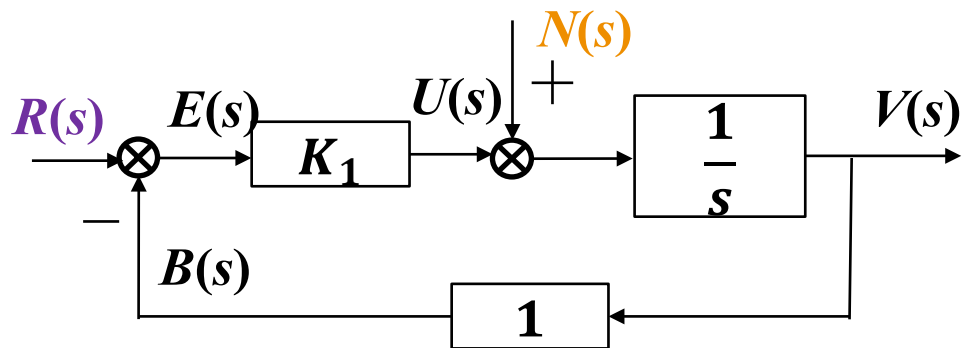


$$E(s) = \Phi_{er}(s)R(s) + \Phi_{en}(s)N(s) = \frac{R(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} + \frac{-G_2(s)H(s)N(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

### 三、定速巡航控制综合设计

重点

**【案例】** 设车辆的动力学为  $\dot{v}(t) = u(t)$  车辆初始速度为 0 (m/s)，拟控制车辆以 30 (m/s) 的速度定速巡航。车辆控制系统如下图所示， $N(t) = l(t)$  为控制输入的外部干扰，请问车辆是否能够通过调节参数  $K_1$  消除稳态误差？



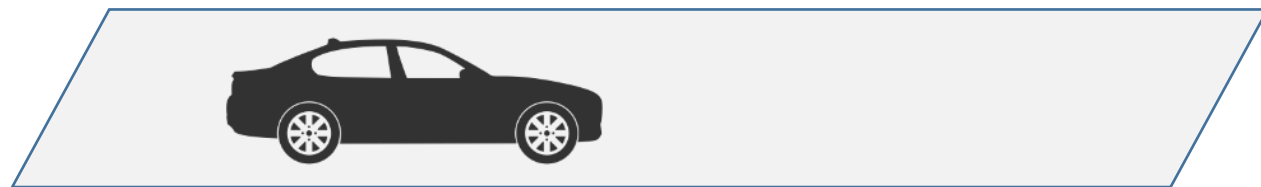
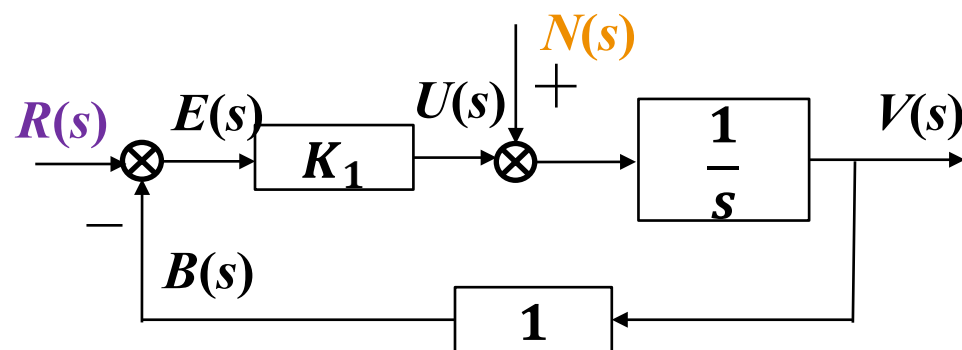
$$E(s) = \frac{R(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} + \frac{-G_2(s)H(s)N(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$$
$$= \frac{\frac{30}{s}}{1+\frac{K_1}{s}} + \frac{-\frac{1}{s} \times \frac{1}{s}}{1+\frac{K_1}{s}} = \frac{30s-1}{s+K_1}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{30s-1}{s+K_1} = -\frac{1}{K_1}$$

### 三、定速巡航控制综合设计

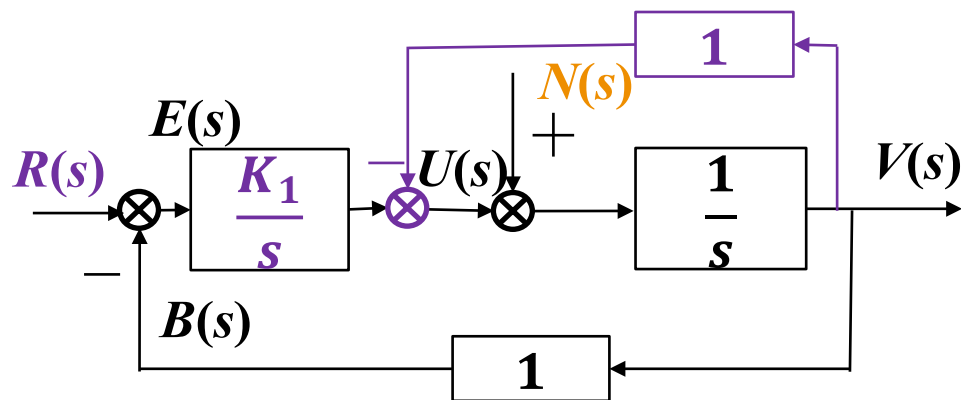
重点

【案例】设车辆的动力学为 $\dot{v}(t) = u(t)$ 车辆初始速度为0 (m/s)，拟控制车辆以30 (m/s)的速度定速巡航。如何设计控制器，消除稳态误差？



$$\text{S域: } U(s) = K_1 E(s)$$

$$\text{时域: } u(t) = K_1 e(t)$$



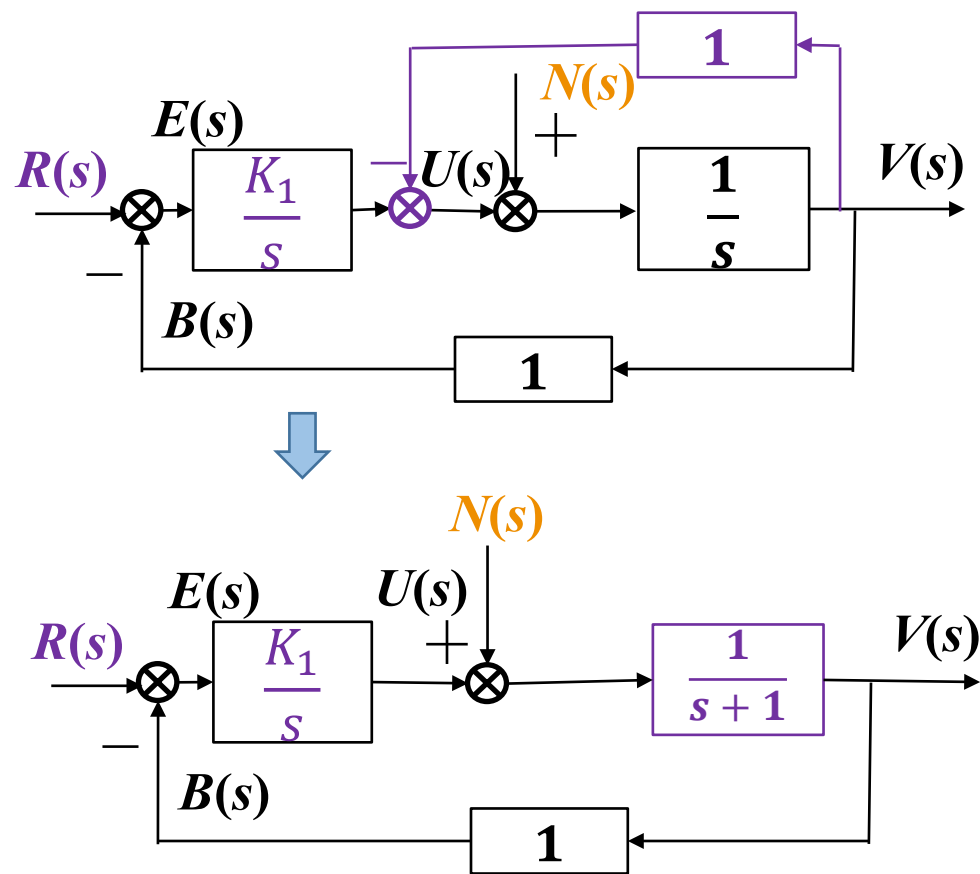
$$\text{S域: } U(s) = \frac{K_1}{s} E(s) - V(s)$$

$$\text{时域: } \begin{cases} \dot{z}(t) = e(t) \\ u(t) = K_1 z(t) - v(t) \end{cases}$$

### 三、定速巡航控制综合设计

重点

**【案例】** 设车辆的动力学为  $\dot{v}(t) = u(t)$  车辆初始速度为 0 (m/s)，拟控制车辆以 30 (m/s) 的速度定速巡航。如何设计控制器，消除稳态误差？



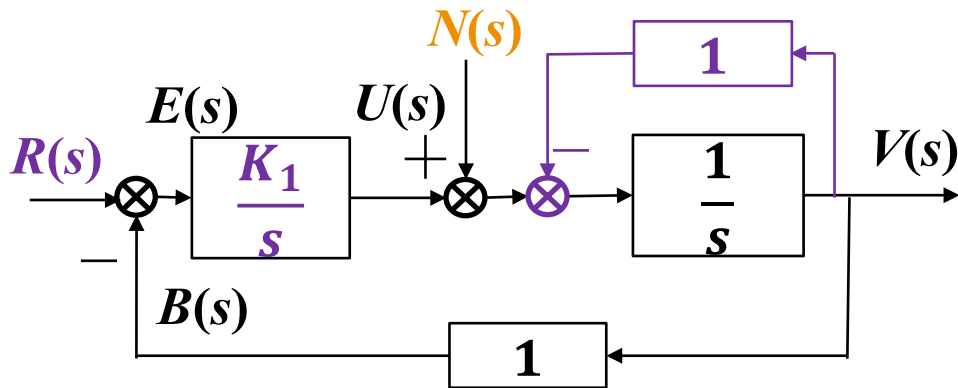
$$E(s) = \frac{R(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} + \frac{-G_2(s)H(s)N(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)}$$
$$= \frac{\frac{30}{s}}{1+\frac{K_1}{s(s+1)}} + \frac{-\frac{1}{s+1} \times \frac{1}{s}}{1+\frac{K_1}{s(s+1)}} = \frac{30s-1}{s^2+s+K_1}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(30s-1)}{s^2+s+K_1} = 0$$

# 三、定速巡航控制综合设计

重点

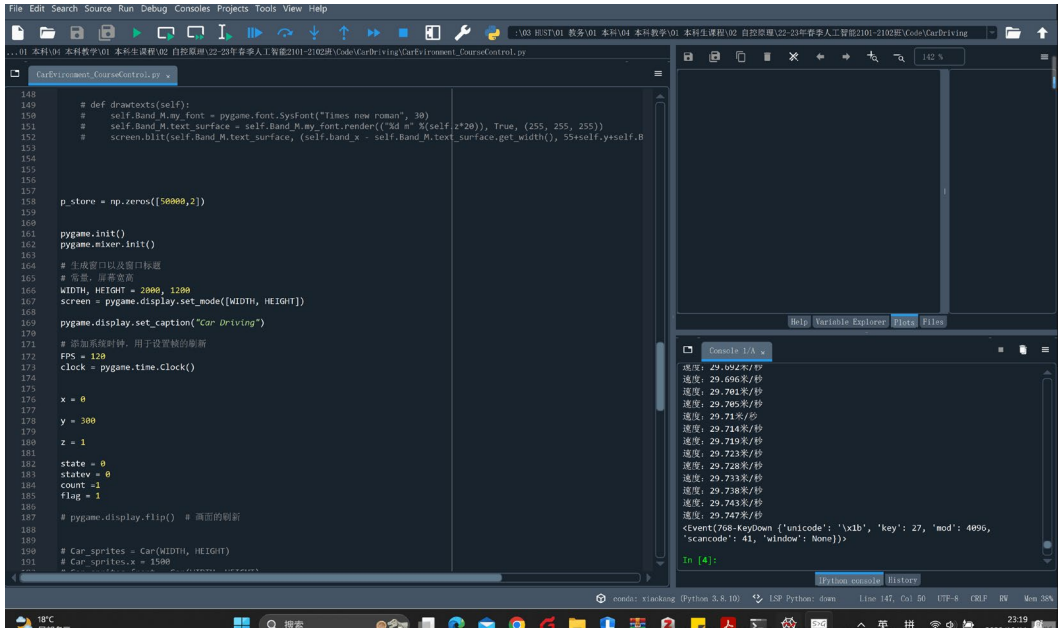
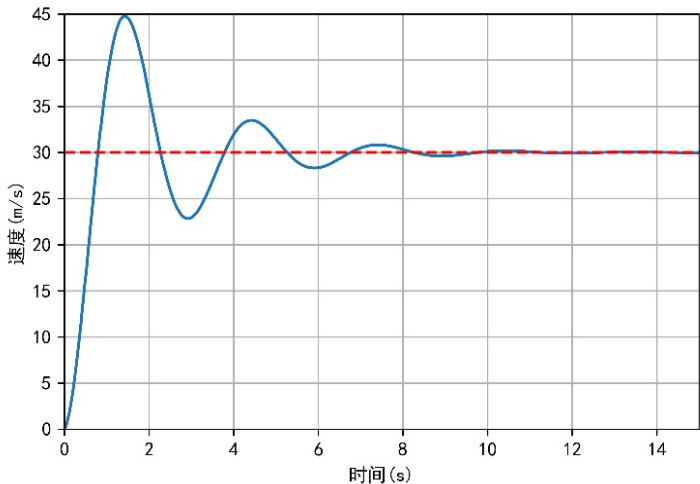
【案例】设车辆的动力学为 $\dot{v}(t) = u(t)$ 车辆初始速度为0 (m/s)，拟控制车辆以30 (m/s)的速度定速巡航。如何设计控制器，消除稳态误差？



改进的控制器:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = e(t) \\ u(t) = K_1 z(t) - v(t) + n(t) \end{cases}$$

速度曲线  
(有干扰)



虚拟仿真平台( $K_1 = 3$ , 改进控制器, 有干扰)

- 控制系统的稳态性能分析：
  - 概念：稳态误差（系统实际输出值与希望输出值之间的最终偏差）
  - 计算：终值定理求解稳态误差
  - 案例：车辆定速巡航控制综合设计
  - 思考：如何改善车辆的动态性能呢？
- 作业：
  - 作业3.8和3.10