



西南交通大学
Southwest Jiaotong University

自动控制原理

PID控制器设计

任课教师： 马磊

电气工程学院

2020



PID控制器

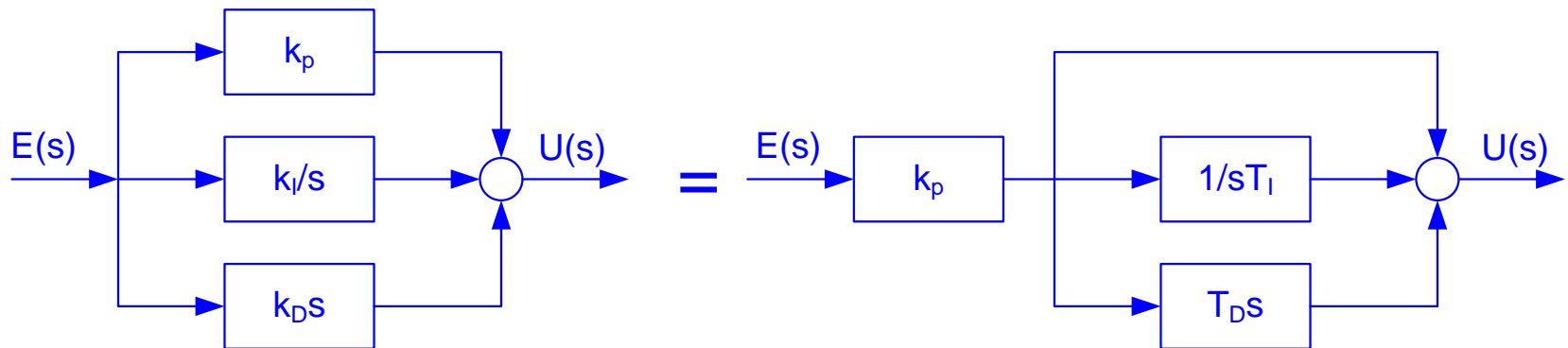
PID(比例-积分-微分)控制器是工业过程中广泛采用的一种控制器，也称为三项控制器

□ 传递函数：

$$G_c(s) = \underbrace{K_P}_{\text{比例增益 } K_P} + \underbrace{\frac{K_I}{s}}_{\text{积分增益 } K_I} + \underbrace{K_D s}_{\text{微分增益 } K_D}$$

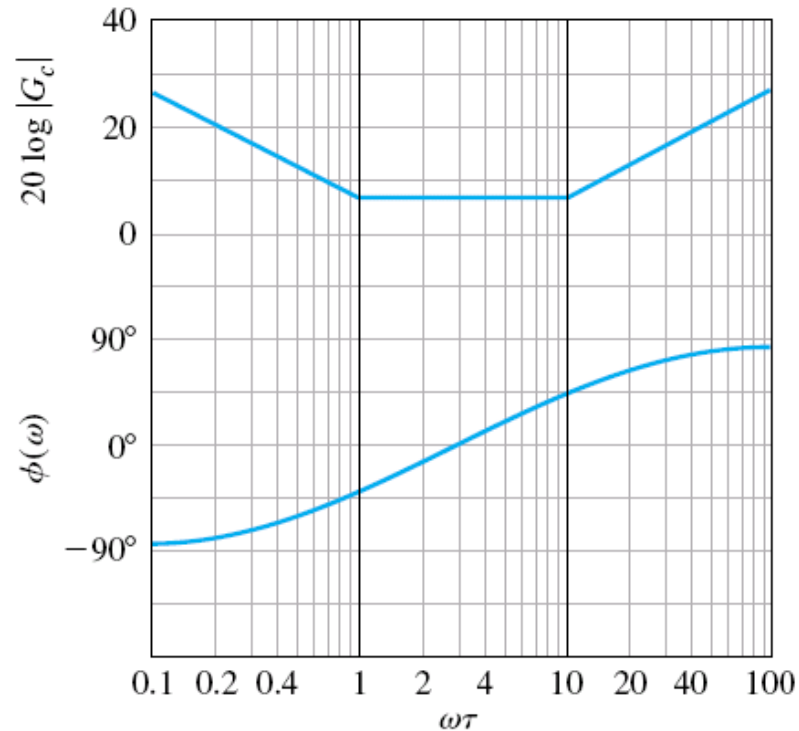
PID控制器

$$G_c(s) = \frac{K_I \left(\frac{K_D}{K_I} s^2 + \frac{K_P}{K_I} s + 1 \right)}{s} = \frac{K_I (\tau s + 1) \left(\frac{\tau}{\alpha} s + 1 \right)}{s}$$



频率特性

$K_P=2$, $\alpha=10$ 时, 以 $\omega\tau$ 为自变量的Bode图:





PID控制器的变化

PID控制器传函中的微分项实际上多为：

$$G_d(s) = \frac{K_D s}{\tau_D s + 1} \quad (6.11)$$

其中 τ_D 远小于受控对象的时间常数。

(6.10)中，当 $K_D = 0$ ，或 $K_I = 0$ 时，可分别得到：

- 比例-积分控制器(PI)：

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (6.12)$$

- 比例-微分控制器(PD)：

$$G_c(s) = K_P + K_D s \quad (6.13)$$



PID控制器的变化

超前校正环节相当于PD控制器中的微分环节采用

$$G_d(s) = \frac{K_D s}{\tau_D s + 1}$$

为带有滤波环节的PD控制器。

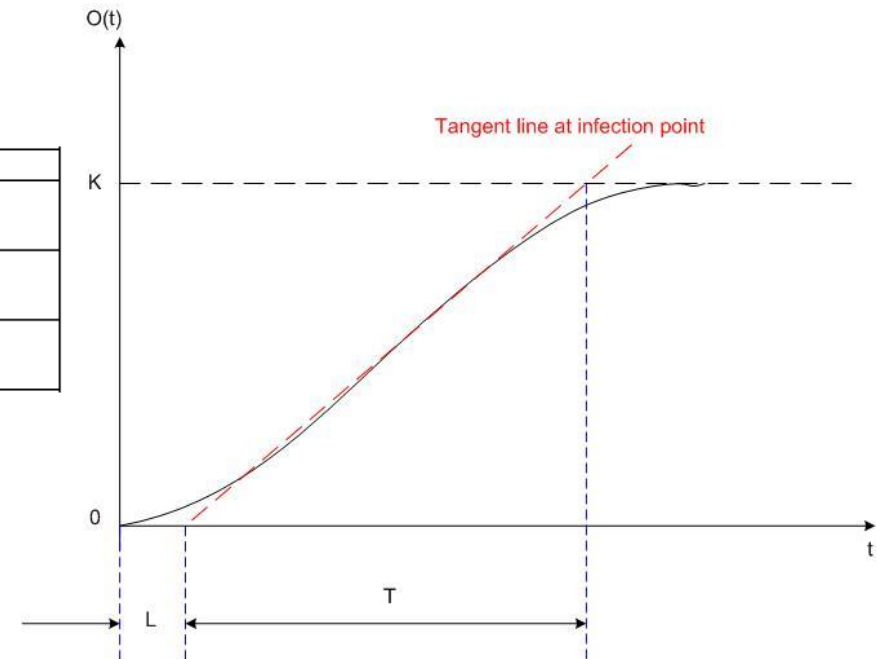
滞后校正环节的极点和零点一般为一对偶极子且紧靠坐标原点(这时, $T_{\beta} \gg 1$, β 很小), 滞后校正环节近似为PI控制器。

PID参数调整

■ Ziegler-Nichols 方法

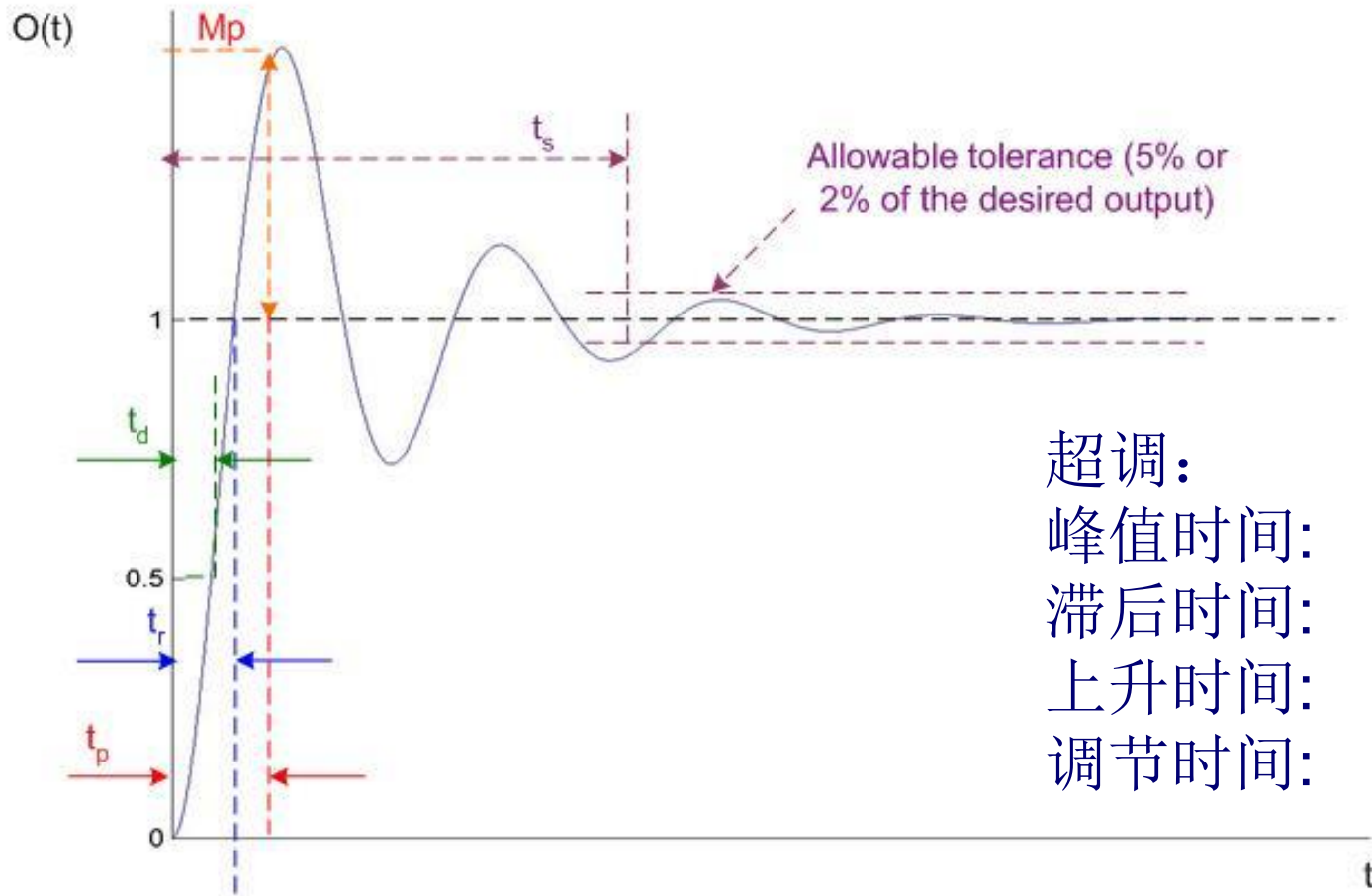
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + K_i \frac{1}{s} + K_d s = K_P \left(1 + \frac{K_i}{K_P s} + \frac{K_d}{K_P} s \right) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Type of controller	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$



系统动态响应

■ 典型阶跃响应：实际速度 vs 指定速度



超调：
峰值时间：
滞后时间：
上升时间：
调节时间：

M_p
 t_p
 t_d
 t_r
 t_s

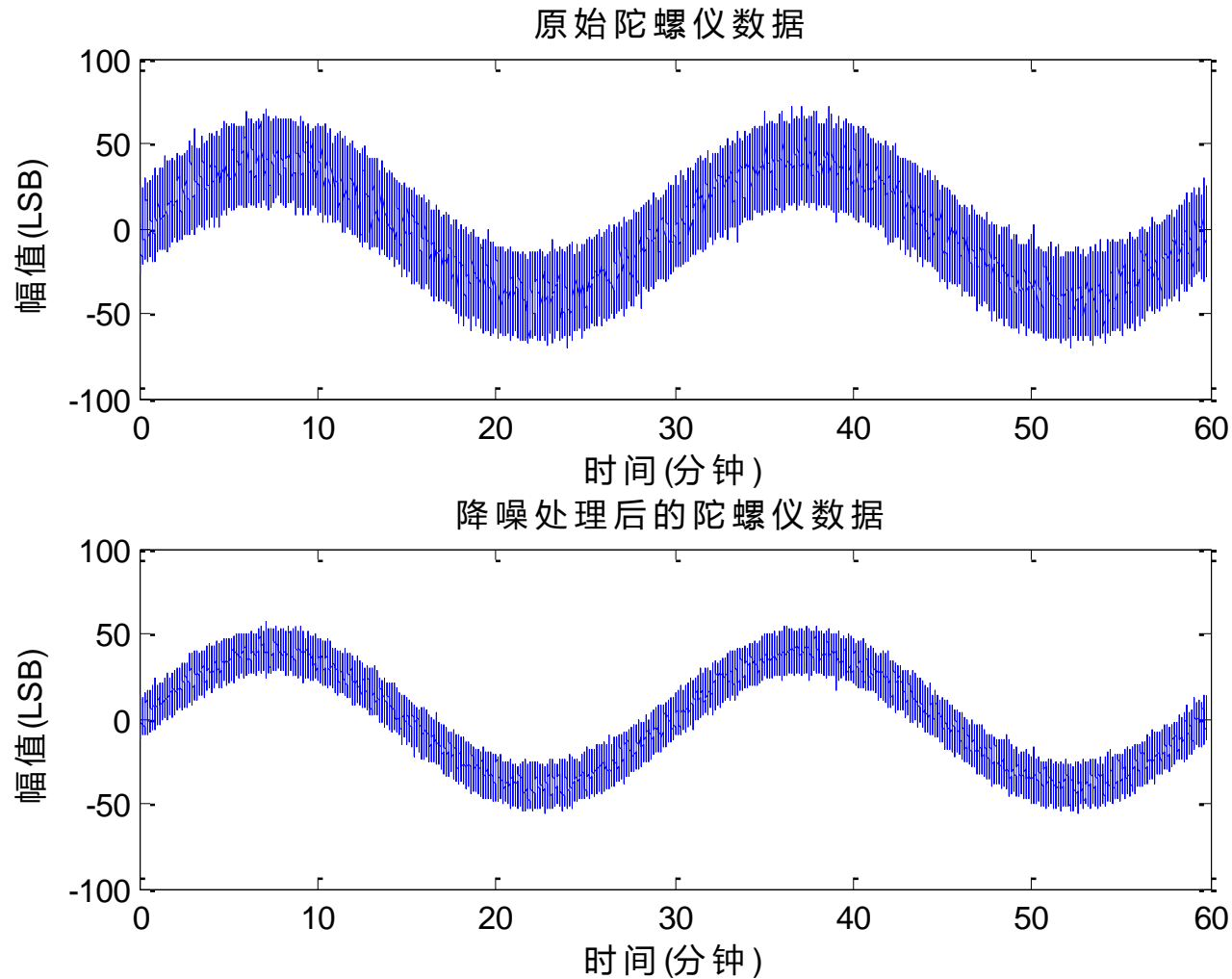
PID控制器参数整定

	上升时间	超调	调节时间	静态误差
K_p	减小	增加	变化不大	减小
K_i	减小	增加	增加	消除
K_d	变化不大	减小	减小	变化不大

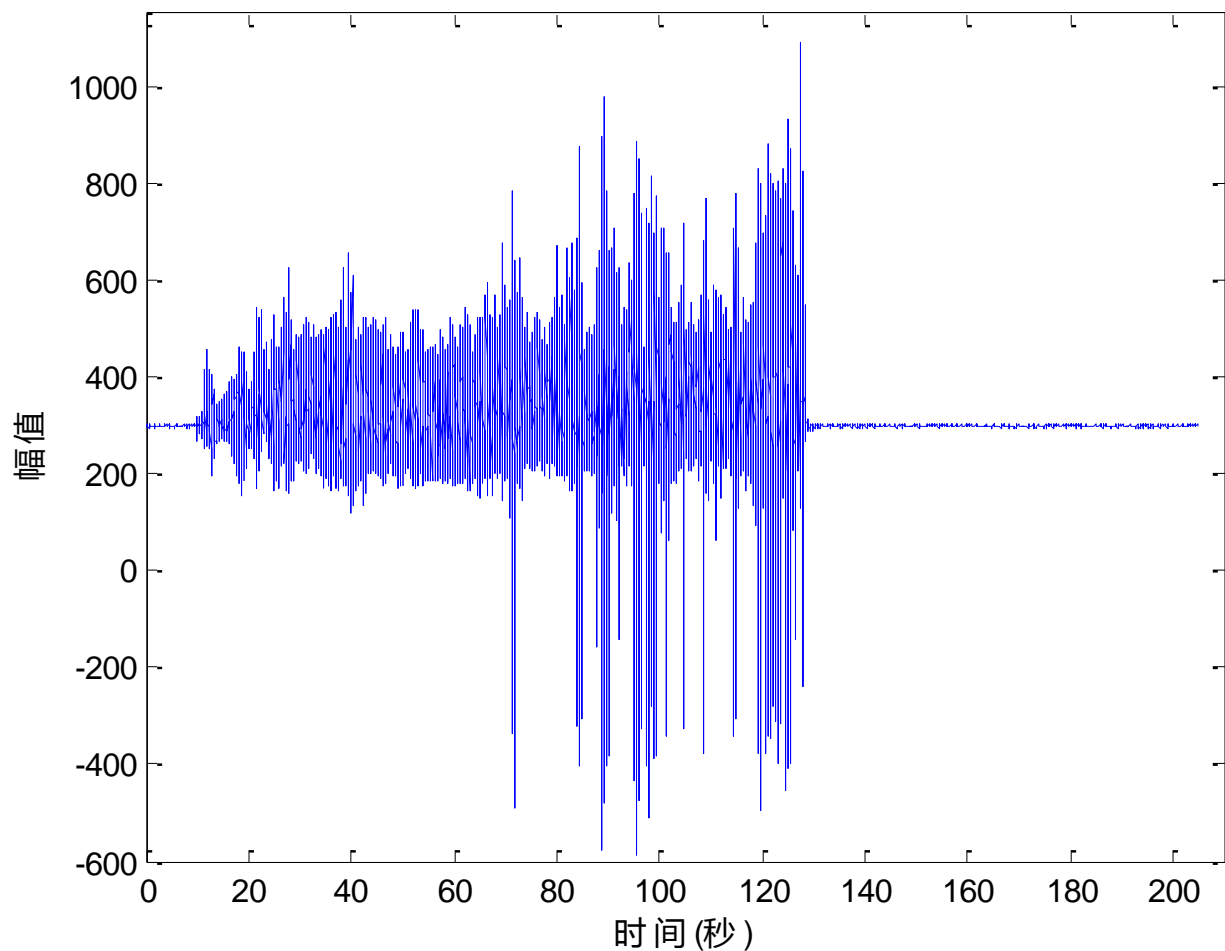
注意：

1. 经验：从比例控制开始，调节性能到极限后加入小积分环节继续调整。
2. 经验：使用微分控制时应加入滤波环节。

传感器数据处理

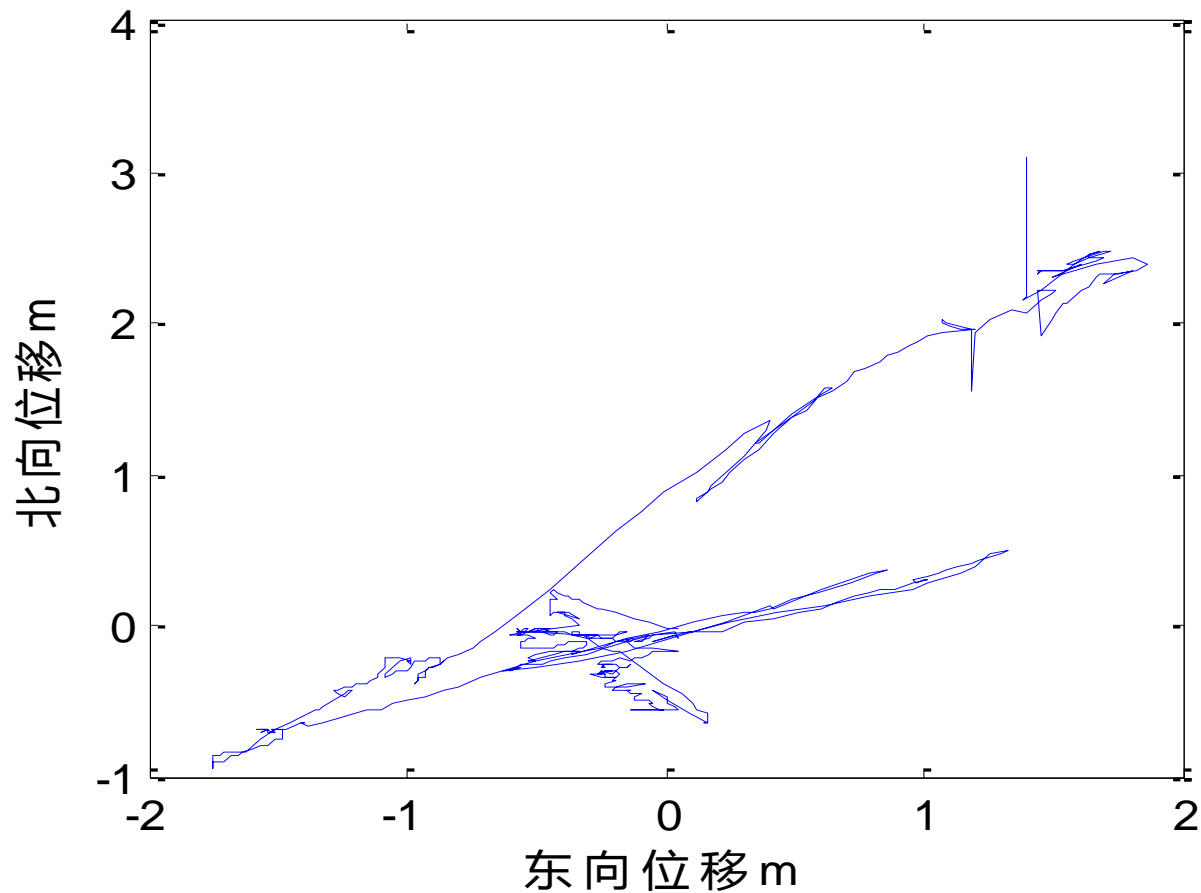


传感器数据处理



实测飞行数据的总加速度信息

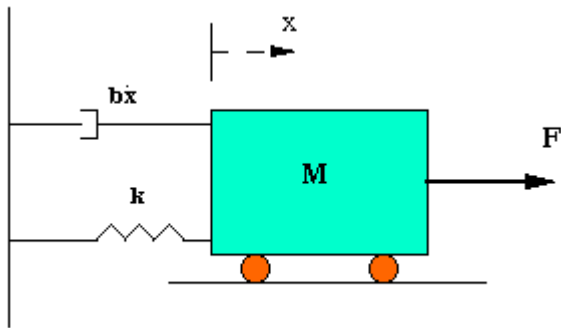
传感器数据处理



固定位置的**GPS**信息

应用例：速度控制

- 控制目标：较短的上升时间和超调、无静态误差



$$M\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + bs + k}$$

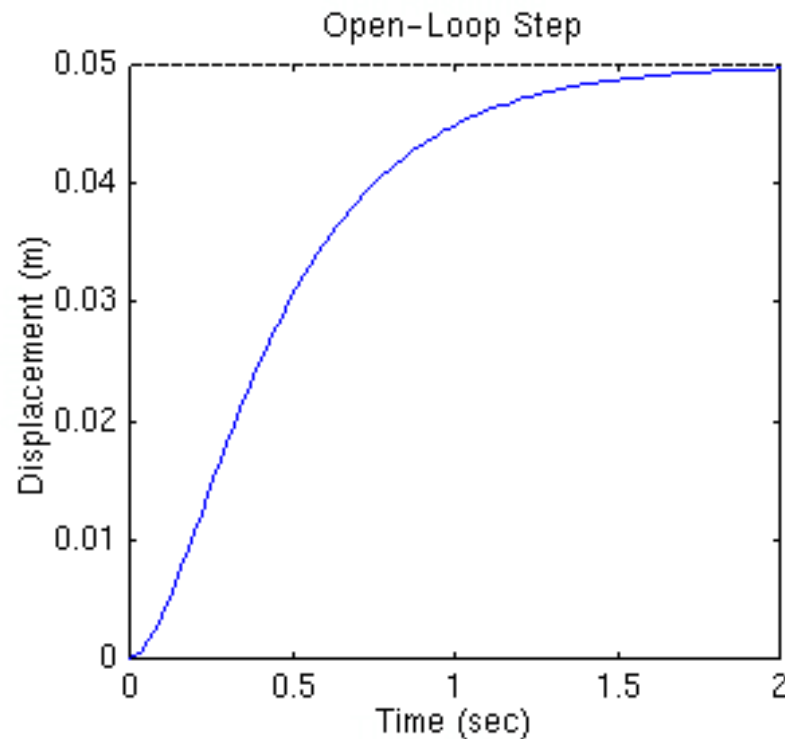
$$\begin{aligned} M &= 1\text{kg} \\ b &= 10 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m} \rightarrow \\ k &= 20 \text{ N}/\text{m} \\ F(s) &= 1 \end{aligned}$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

<http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html#problem>

开环响应

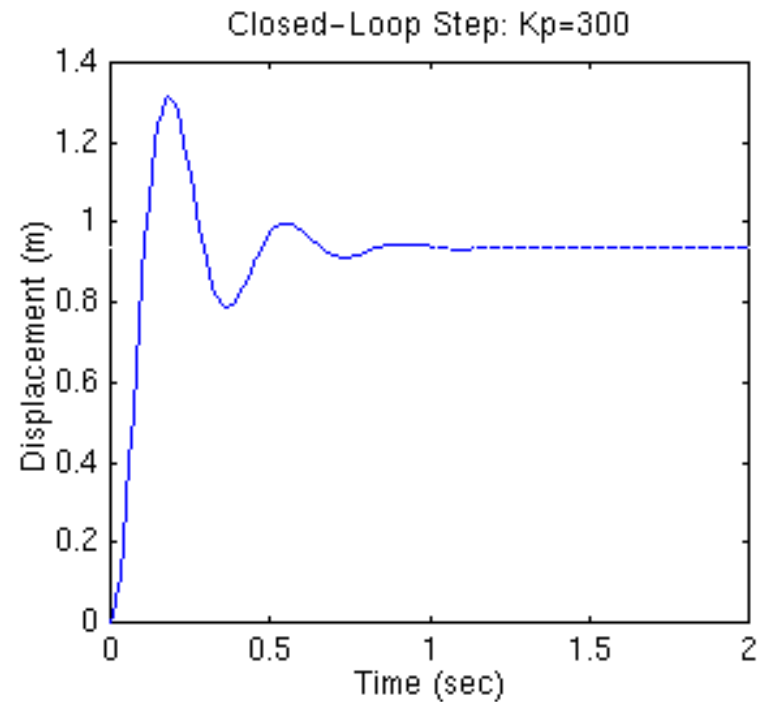
- 直流放大倍数为 $1/20 \rightarrow$ 稳态值仅为0.05



比例控制

- 比例放大倍数为300，导致超调、无法消除稳态误差

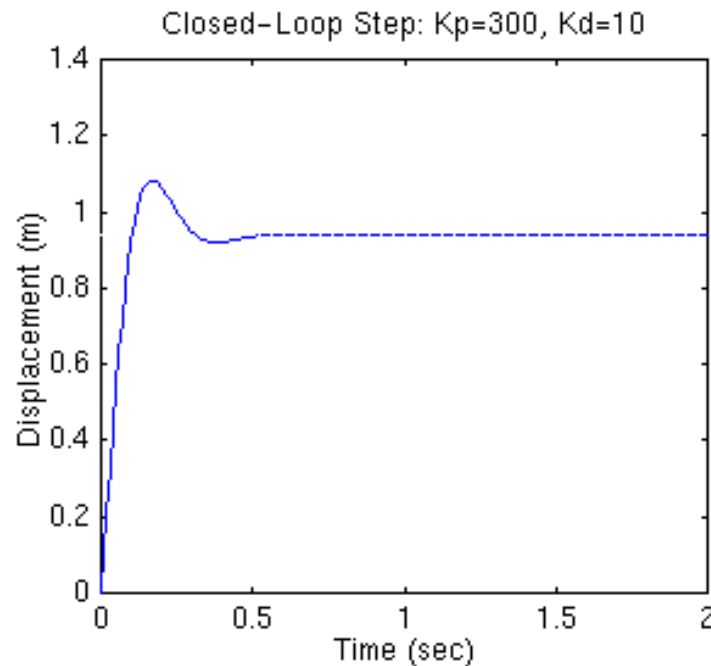
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_p}{s^2 + 10s + (20 + K_p)}$$



比例-微分控制

- 微分控制削减超调和调节时间，对上升时间和稳态误差影响不大

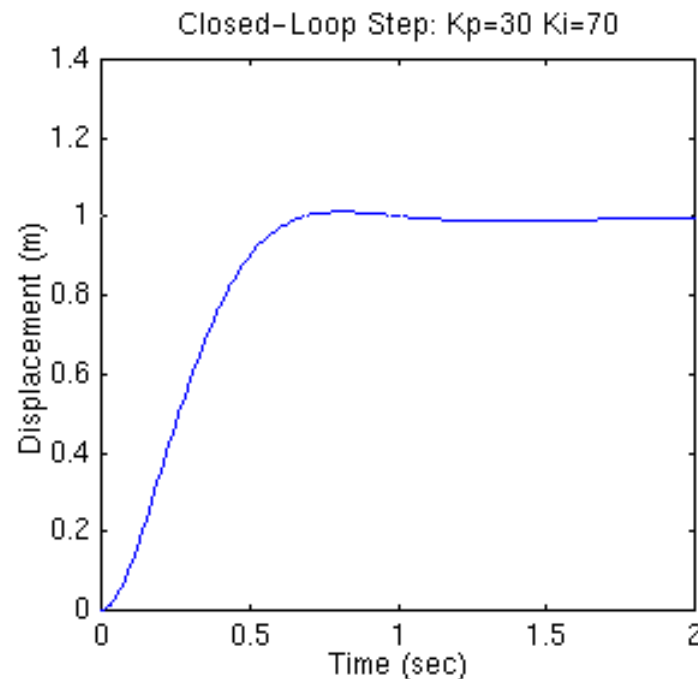
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_D s + K_P}{s^2 + (10 + K_D)s + (20 + K_P)}$$



比例-积分控制

- 引入积分控制，消除稳态误差
- 比例放大倍数可相应减小
- 比例控制削减上升时间，增大超调

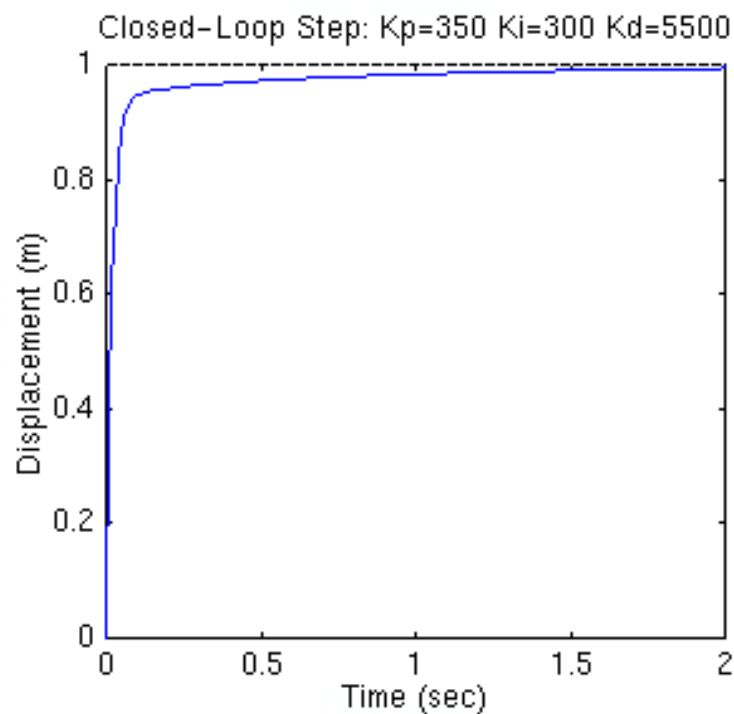
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_P s + K_I}{s^3 + 10s^2 + (20 + K_P)s + K_I}$$



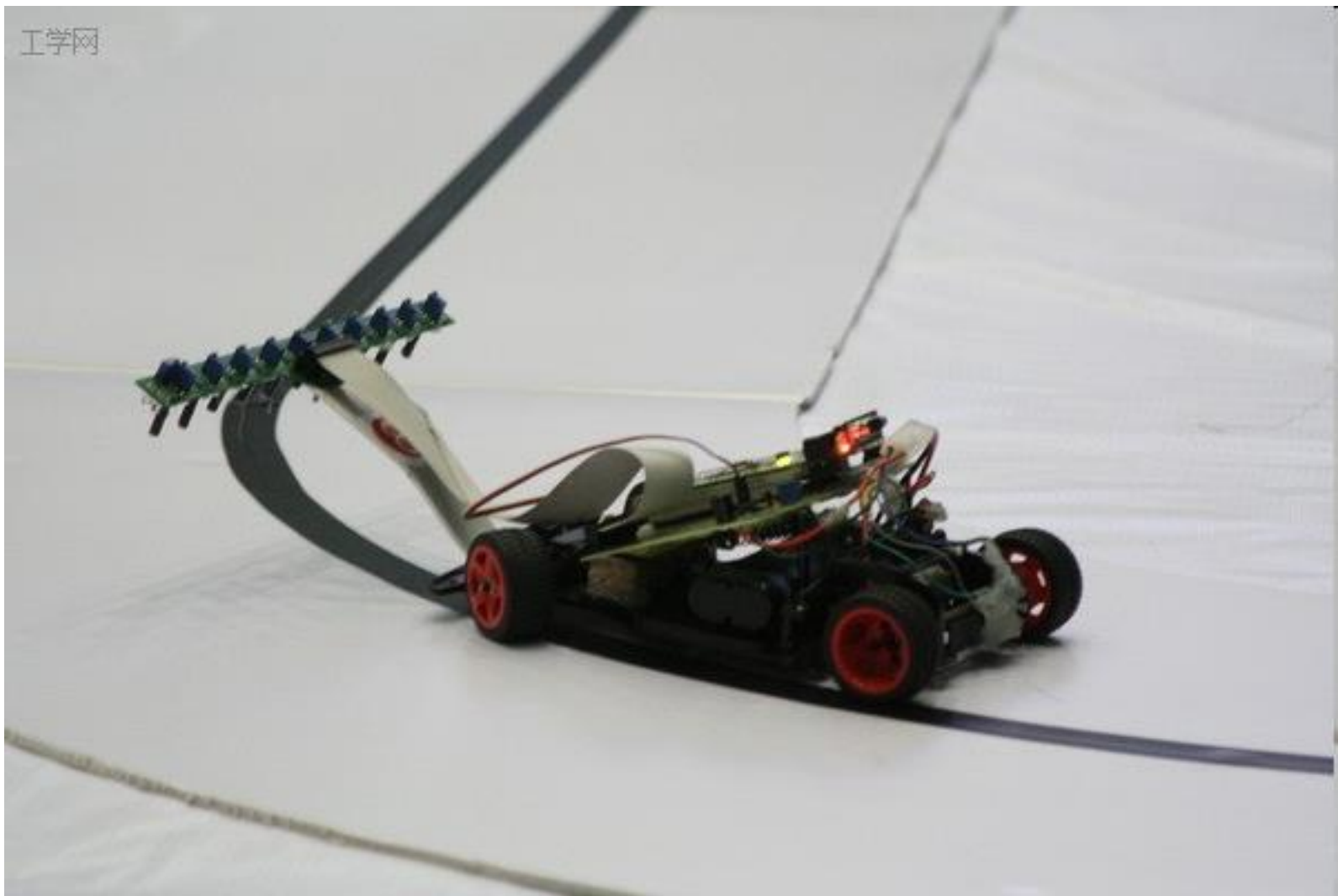
PID控制



$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s^3 + (10 + K_D)s^2 + (20 + K_P)s + K_I}$$

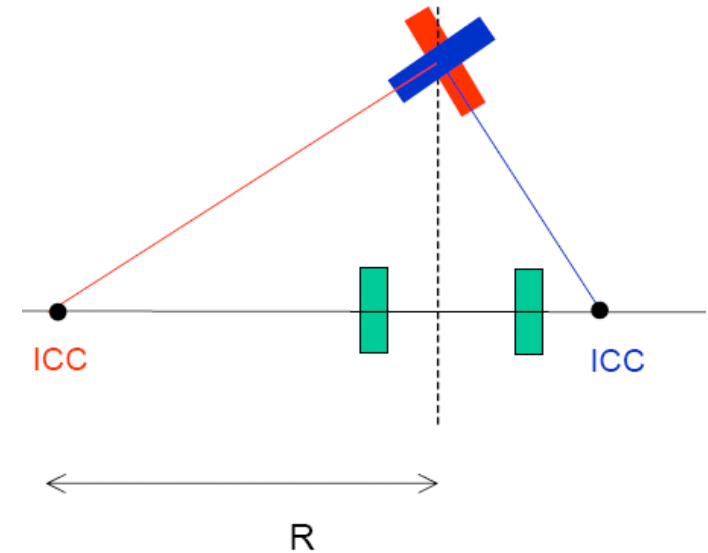
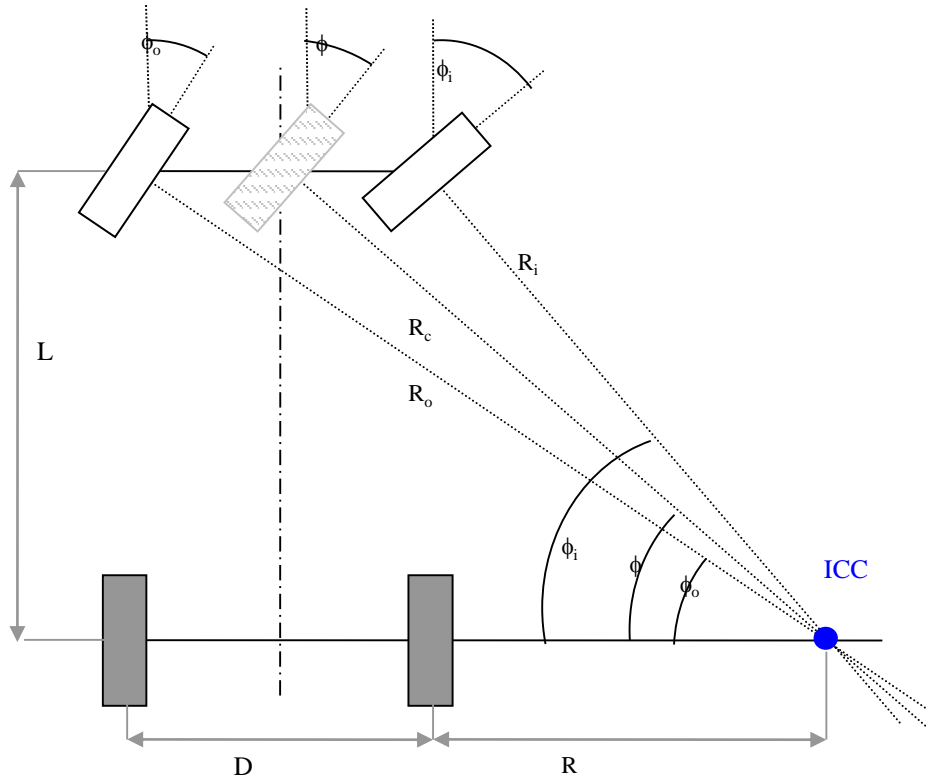


应用例：智能车速度控制

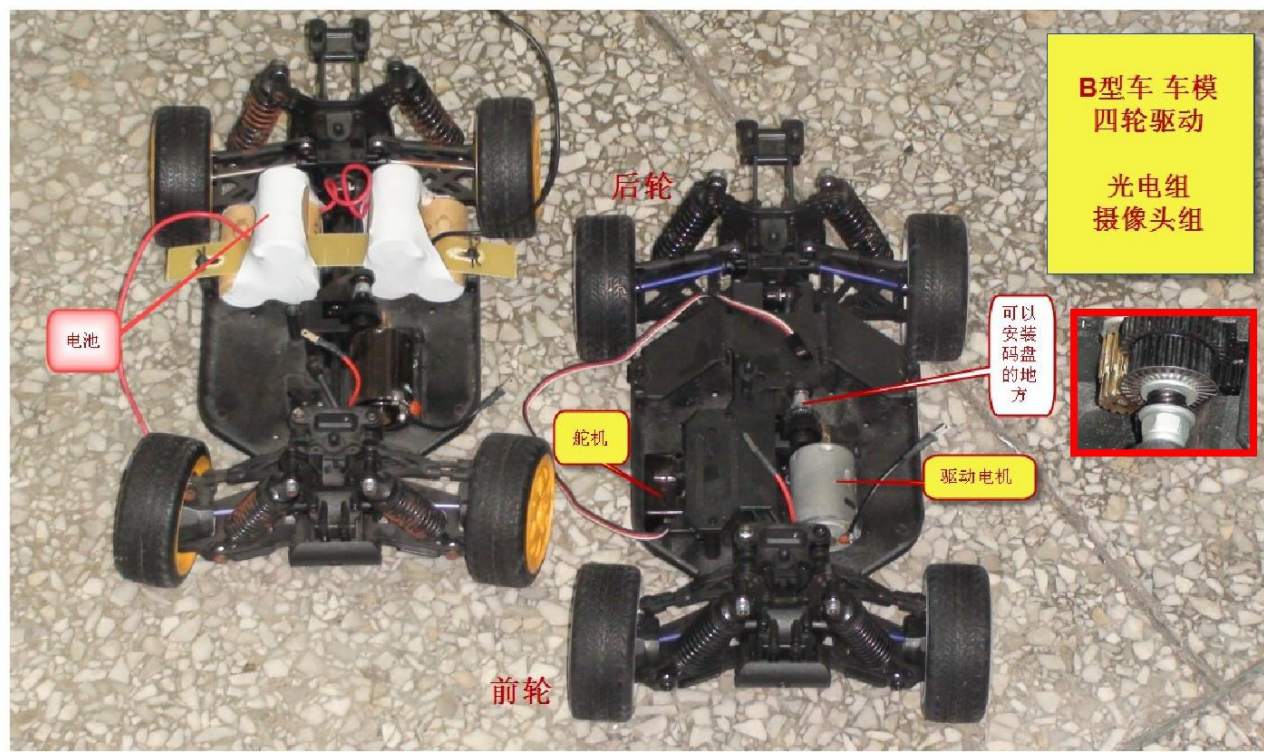


智能车结构

- 采用所谓Ackermann Steering, 车体转弯半径由前、后轮间距和前轮转向角确定。
- ICC: Instantaneous Center of Rotation



车模全景



电子系统





速度传感器

■ 原理

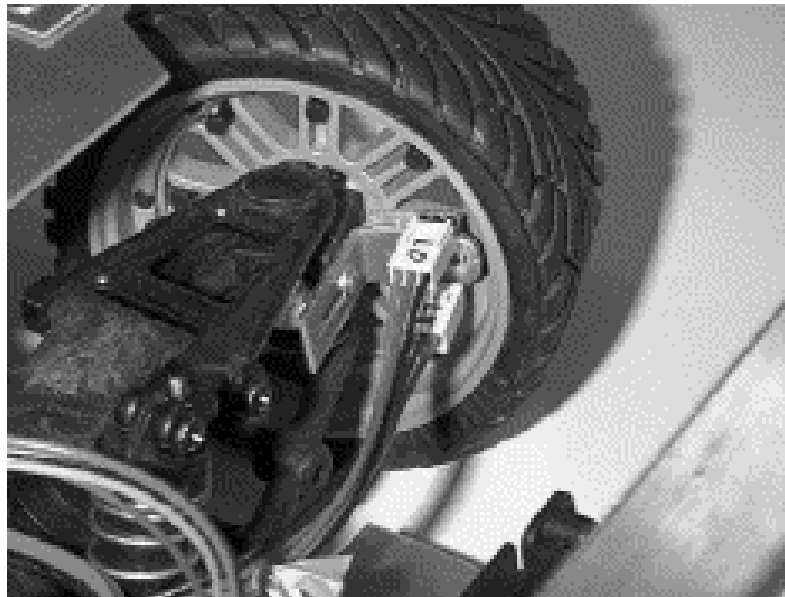
- 将车轮转动转化为电脉冲信号
- 根据单位时间内脉冲数推算车轮转速，从而获得车速

■ 类型

- 霍尔传感器
- 编码盘
- 光电编码器

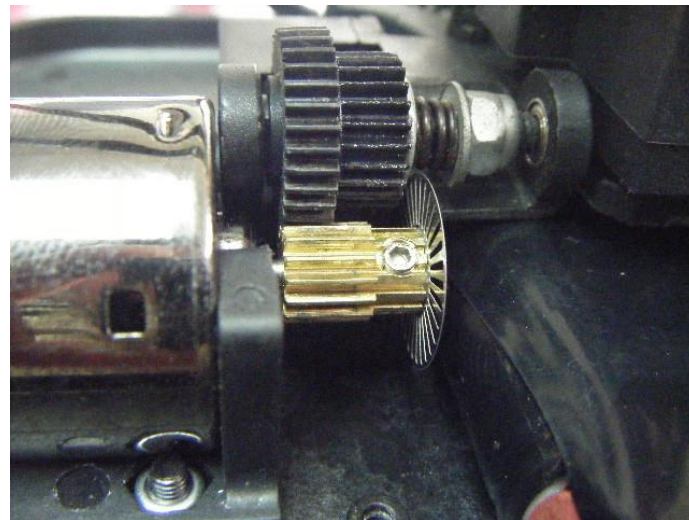
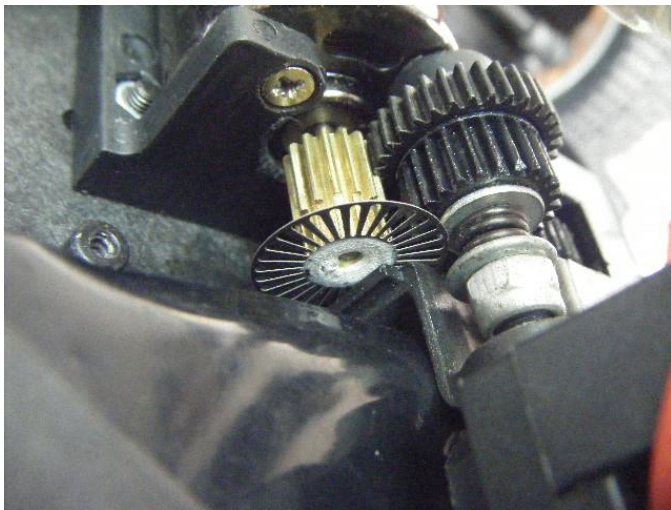
霍尔传感器

- **霍尔效应：** 当电流通过金属箔片时，若在垂直于电流的方向施加磁场，则金属箔片两侧面会出现横向电位差。
- **接口：** 安装在车轮上的永磁铁经过霍尔元件集成的开关，触发脉冲。使用两个开关可判断车轮转向。



编码盘

- **原理：** 在码盘两边分别安装光源及光电元件。当码盘随被测物体的工作轴转动时，每转过一个缝隙，光电元件所获得的光强就发生一次明暗转换，光电转换电路就产生一定幅值和功率的电脉冲输出信号。



光电编码器

■ 原理

- 由对射式或反射式光电开关和边缘刻有一圈方孔的旋转编码盘组成
- 输出脉冲频率与转速成正比
- 在编码盘上刻有数量相等但位置交错的两圈方孔，用两个光电开关输出两个相位相差 90° 的脉冲，通过判断脉冲的相位可以判断电机的运转方向。

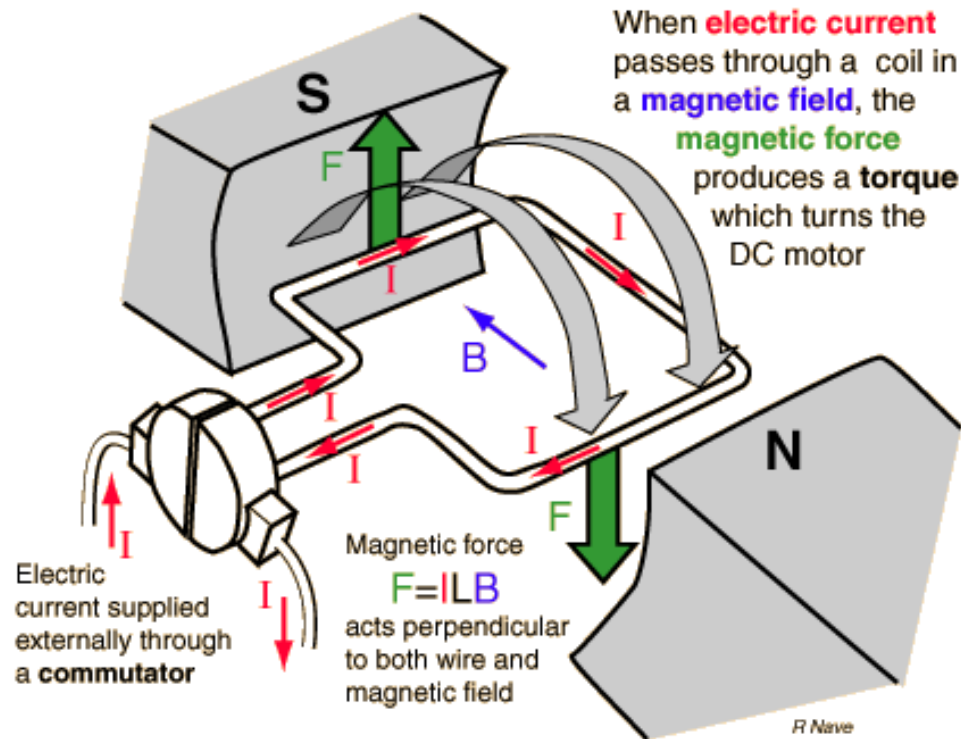
■ 接口

- 需外接倍频电路或鉴相器等进行计数和判别转向



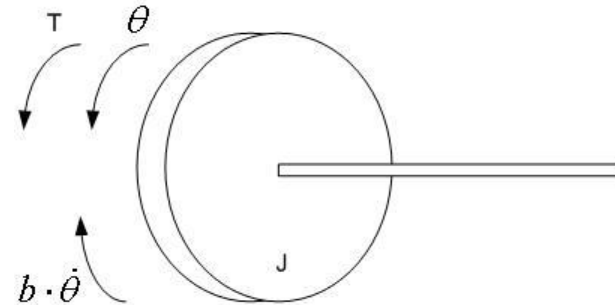
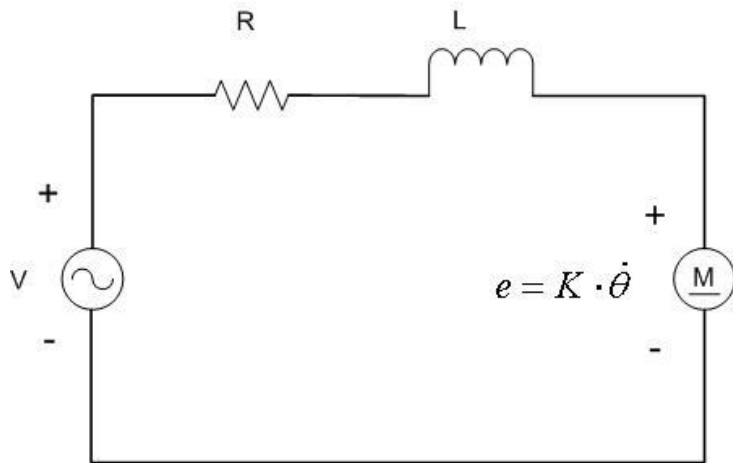
驱动电机原理

■ 电机结构



驱动电机原理

■ 电机方程



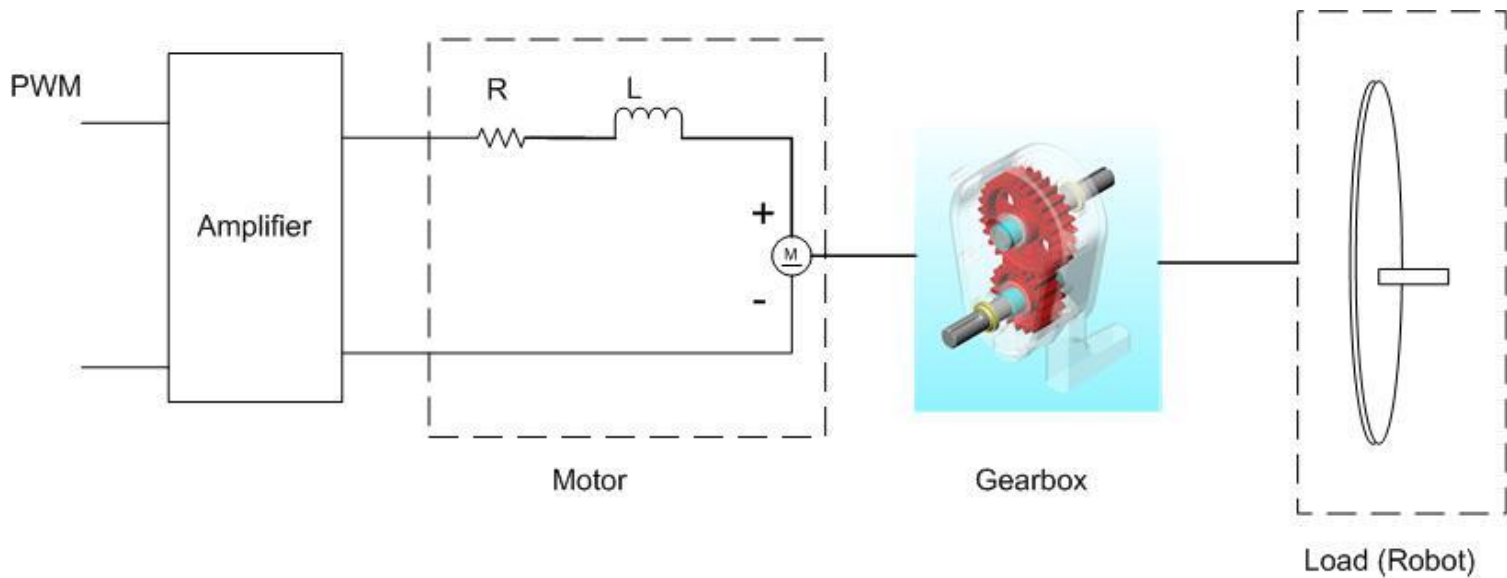
$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_i$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = v - K\dot{\theta}$$

$$\frac{\dot{\theta}}{V} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2}$$

驱动电机原理

■ 驱动接口



驱动电机原理

■ PWM（脉宽调制，Pulse Width Modulation）

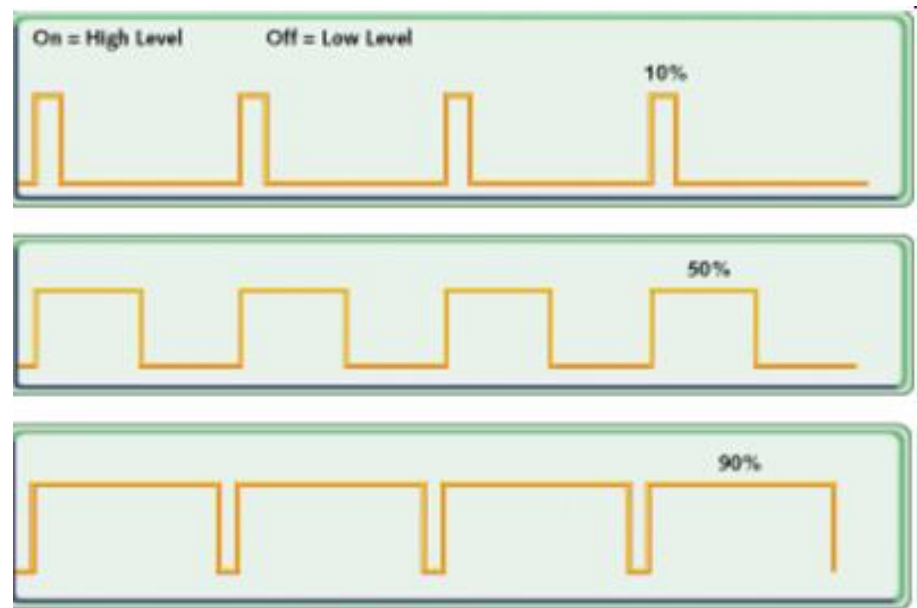
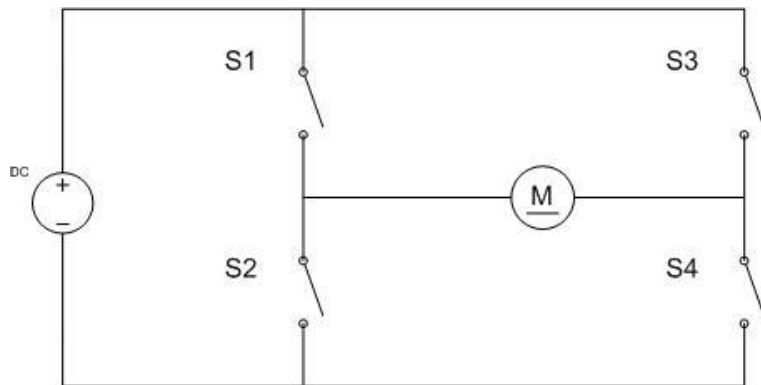
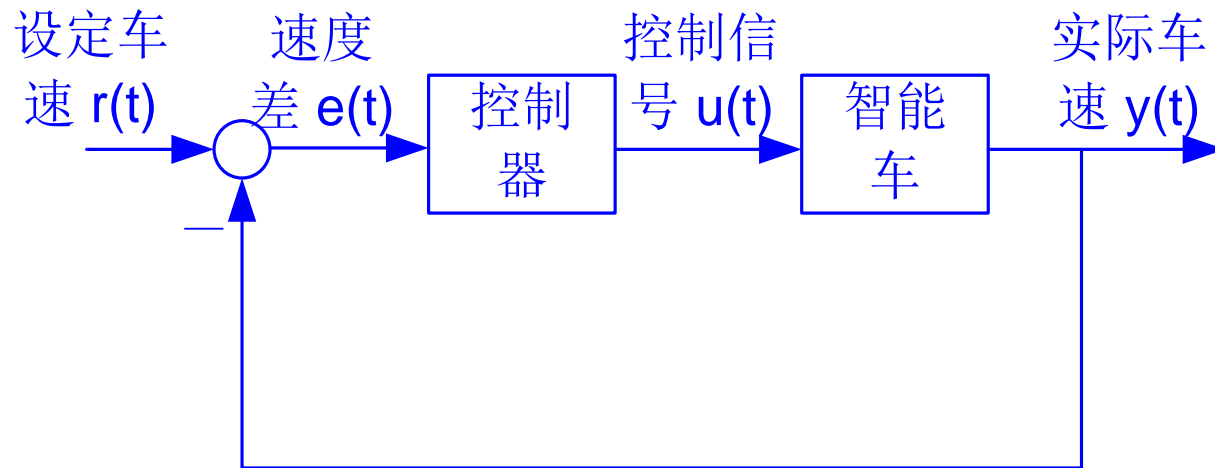


图1(a)、(b)、(c)，PWM波形

速度控制

■ 速度控制原理



实际应用中，**PID**控制器参数的设定还需要考虑电机-车轮转速变换、**PWM**值与电机空载转速等多方面因素！

速度控制

- 实用中，常常根据在”标准路面”上的实验结果，设计一个PWM值 \leftrightarrow 速度的表格，并据此引入一个前馈控制。在路面情况（摩擦、坡度等）发生变化是，由反馈控制回路提供速度补偿。

