

---

# 《自动化认知与实践》之 机器人控制理论入门

---



哈尔滨工业大学（深圳）  
机电学院自动化 陈浩耀  
邮箱：hychen5@hit.edu.cn  
地址：G栋310

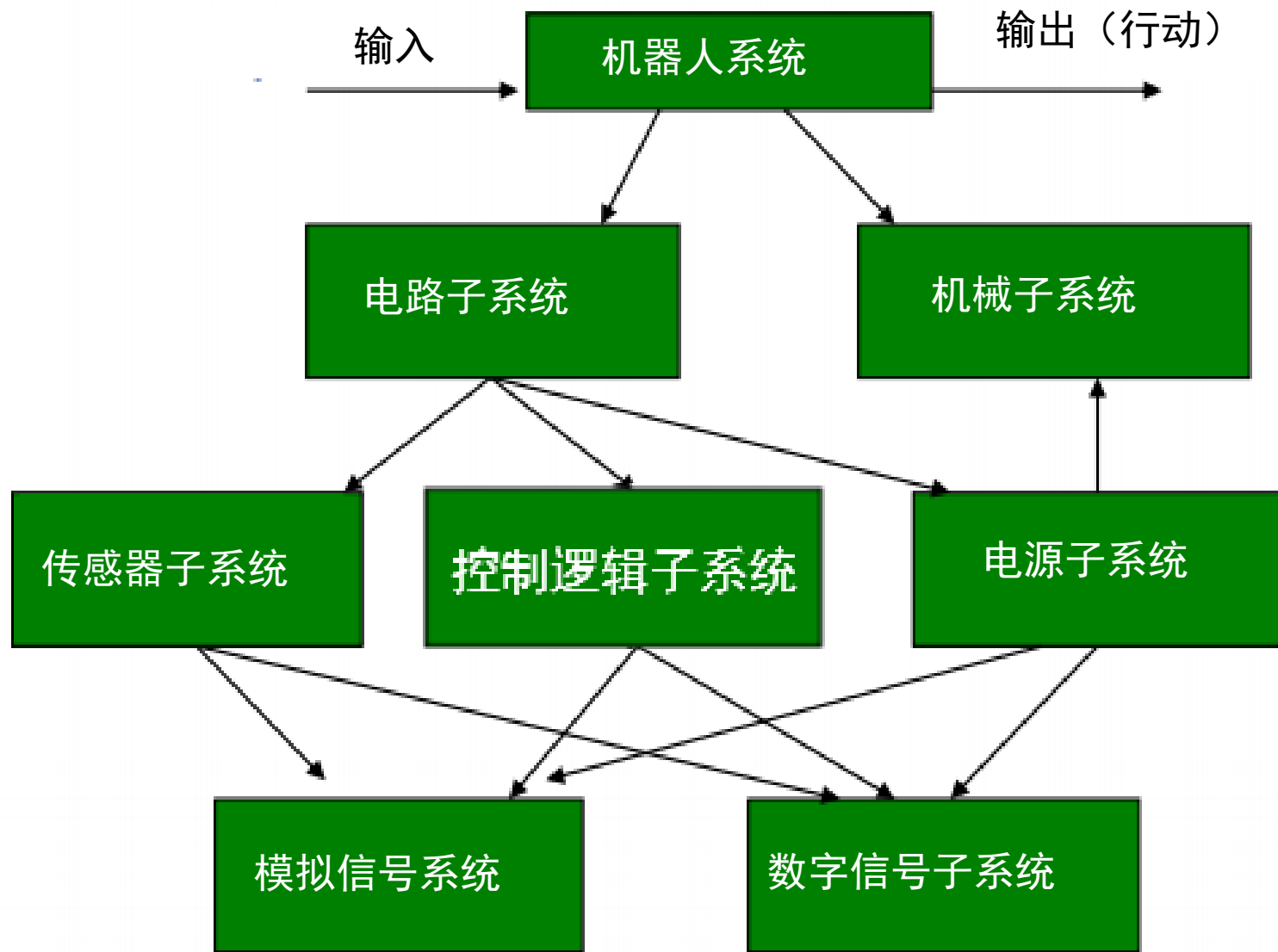
1. **Arduino**的数字I/O和模拟I/O（按钮实验和PS2摇杆实验）

2. **Arduino**编程里重要的函数或功能：

- 时间函数：阻塞式和非阻塞式
- 定时器**MsTimer2**如何使用？
- 中断功能：理解什么是中断，外部中断可以实现什么功能（对应的中断源），中断服务子程序，**delay**等时间函数及通讯函数避免在中断服务子程序里使用。

3. **Arduino**常用传感器：重点掌握巡线传感器、旋转式编码器（A、B相）

# 控制在机器人整个系统的哪个环节？？？



↓

- 基本组成元素：  
反馈、控制器

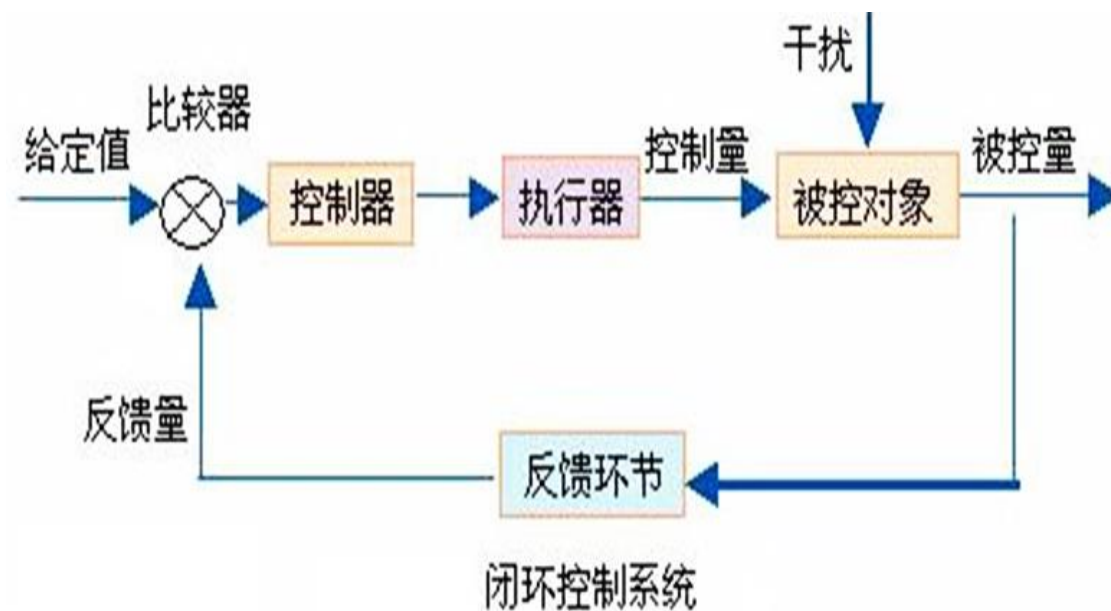
- 基本概念：  
输入、输出、状态

- 基本算法：  
开闭控制  
**PID**

.....

# 控制的定义

闭环控制：指作为被控的输出以一定方式返回到作为控制的输入端，并对输入端施加控制影响的一种控制关系



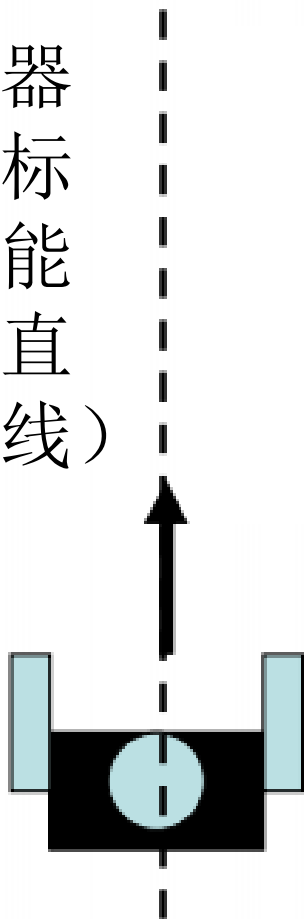
# 在你的机器人中进行的控制



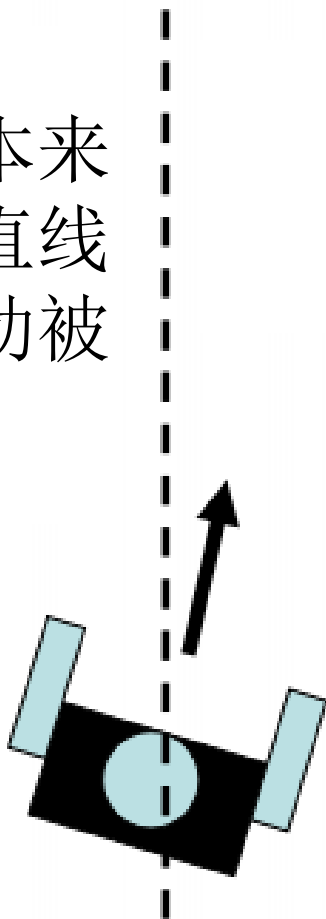


# 在你的机器人中进行的控制

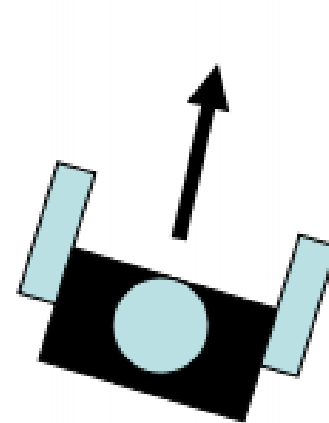
一个机器人的目标是尽可能的沿着直线（虚线）行走



如果本来沿着直线的运动被干扰



机器人将会偏离目标



因此，我们需要有一个基于运动和目标信息的控制器来实时的控制她的运动

# 两种控制方式

- **开环控制**

将机器人向一个预定的方向移动

例子：闭着眼睛走路

- **闭环控制（反馈控制）**

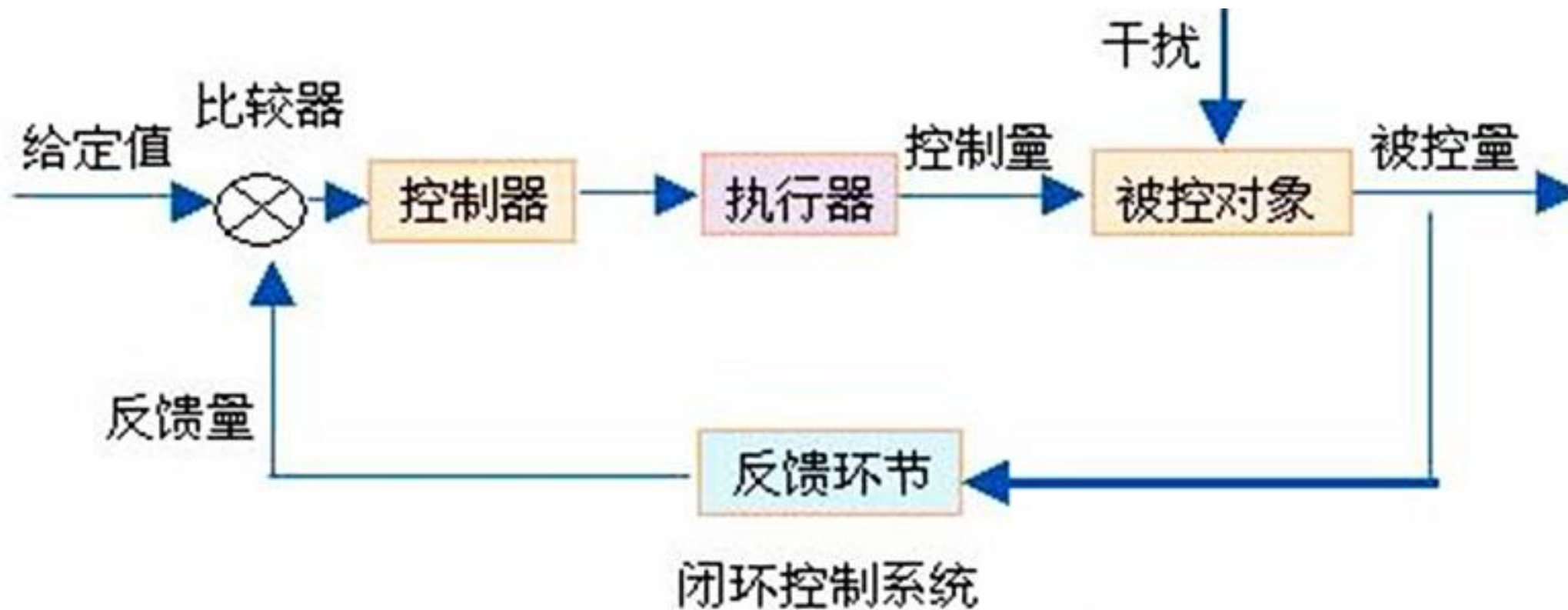
使用输出（机器人的位置）来调节机器人的运动量（方向或速度）

例子：睁开眼走路

- **我们通常希望通过闭环控制来使一个系统稳定**

# 控制系统的组成

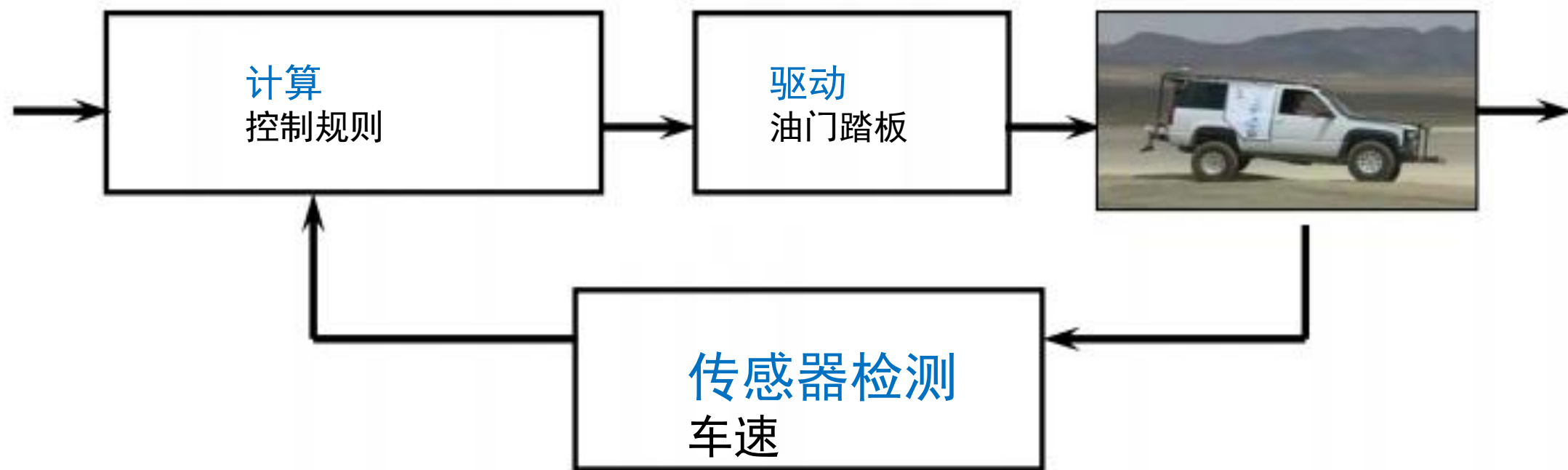
- 控制的一个目标是使被控对象稳定的输出期望被控量。



- 控制器只是一个计算单元，它计算被控对象需要的“最佳”或“期望”控制量。



# 控制系统举例：控制汽车前进速度



控制 = 传感 + 控制计算 + 执行驱动

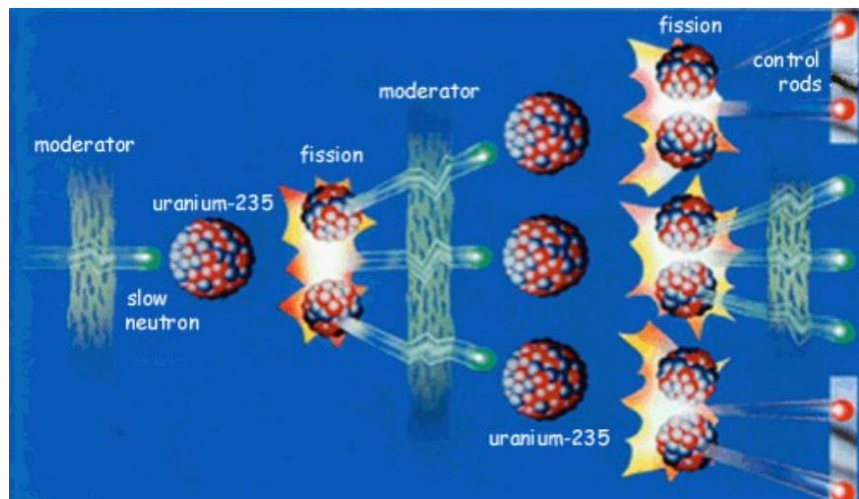
在反馈“环”

# 反馈与正反馈

- 部分输出可以从输入中添加或减去。
- 正反馈将输出增加到输入，因此输出将得到进一步加强，使输出越来越大，因此可能是不稳定的。

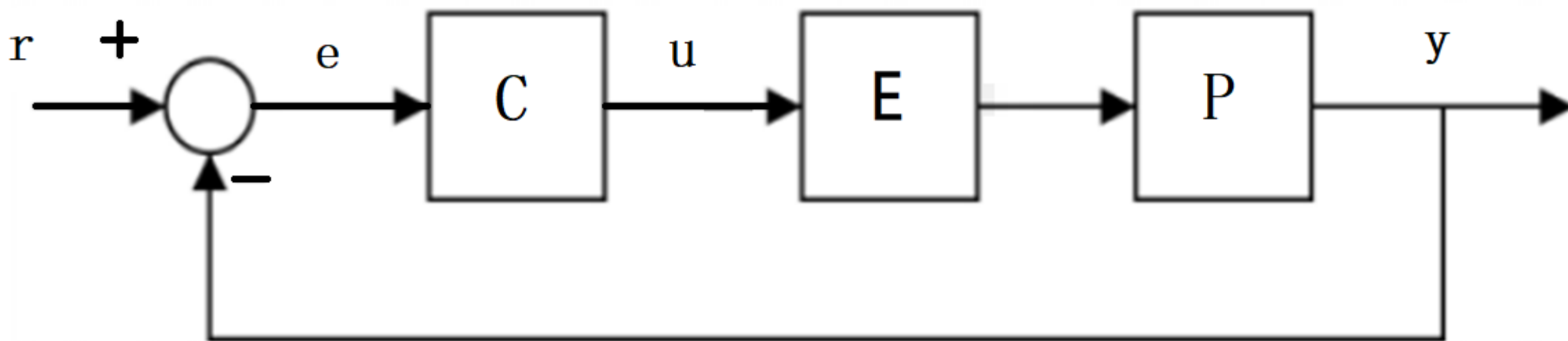
例子：

原子弹、激光、细菌生长等。



# 负反馈

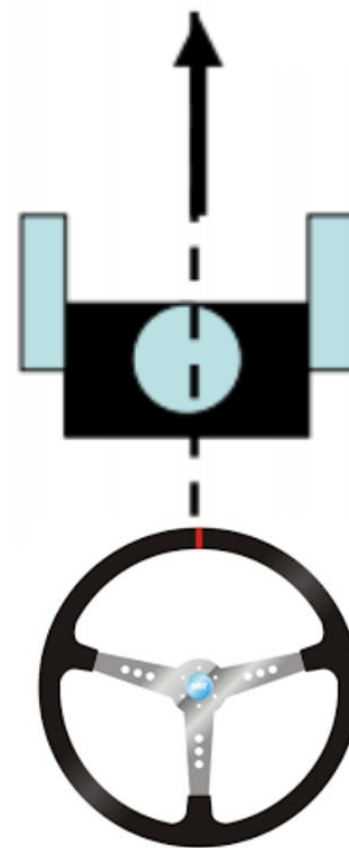
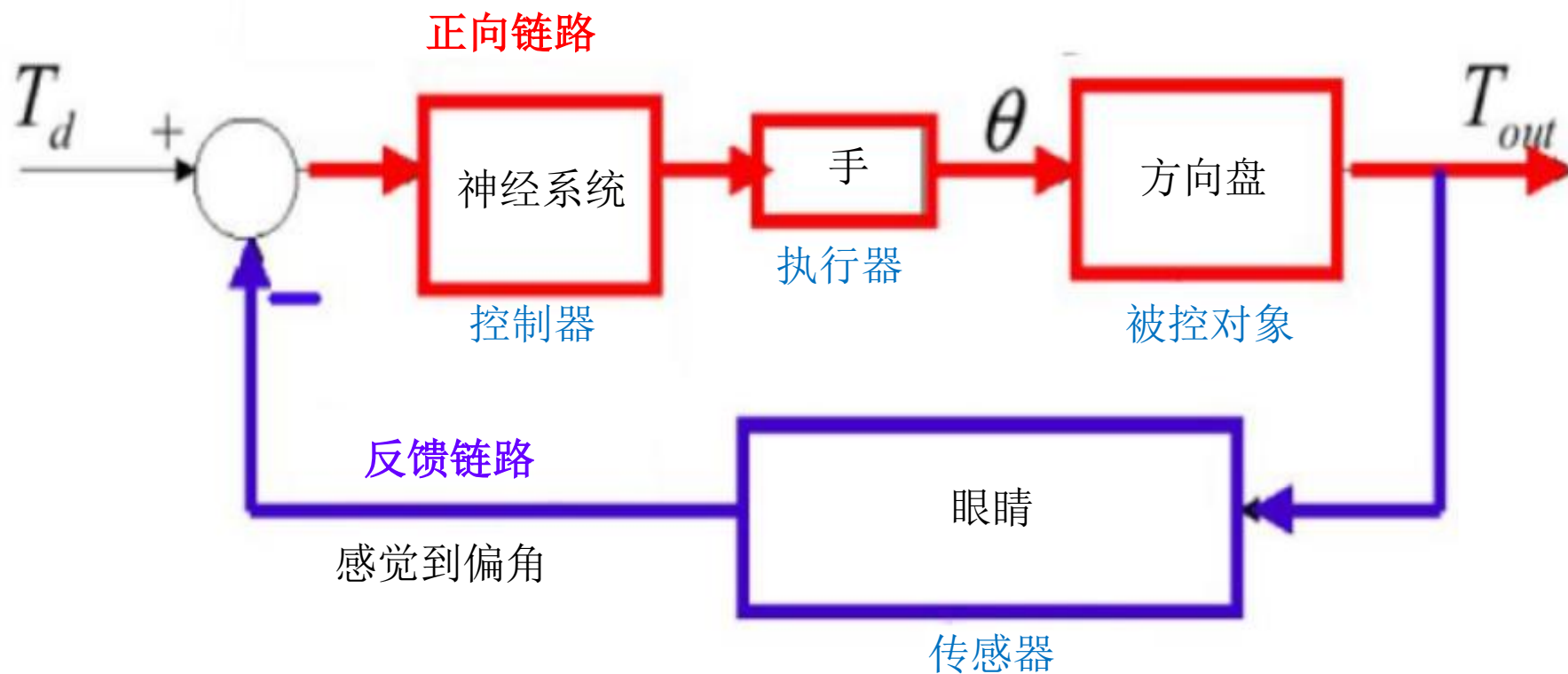
- 负反馈将期望值减去输出（这称为误差信号 $e$ ）。
- 误差信号告诉我们的输出离我们想要的期望有多远。



- 负反馈控制类型，有助于稳定输出到所需的输入。

# 负反馈举例

- 当我们开车的时候



# 系统的性能

- 上升时间

从稳态值的10%到90%所需时间

- 稳态误差

$t$ 无穷时，期望值与稳态值之差

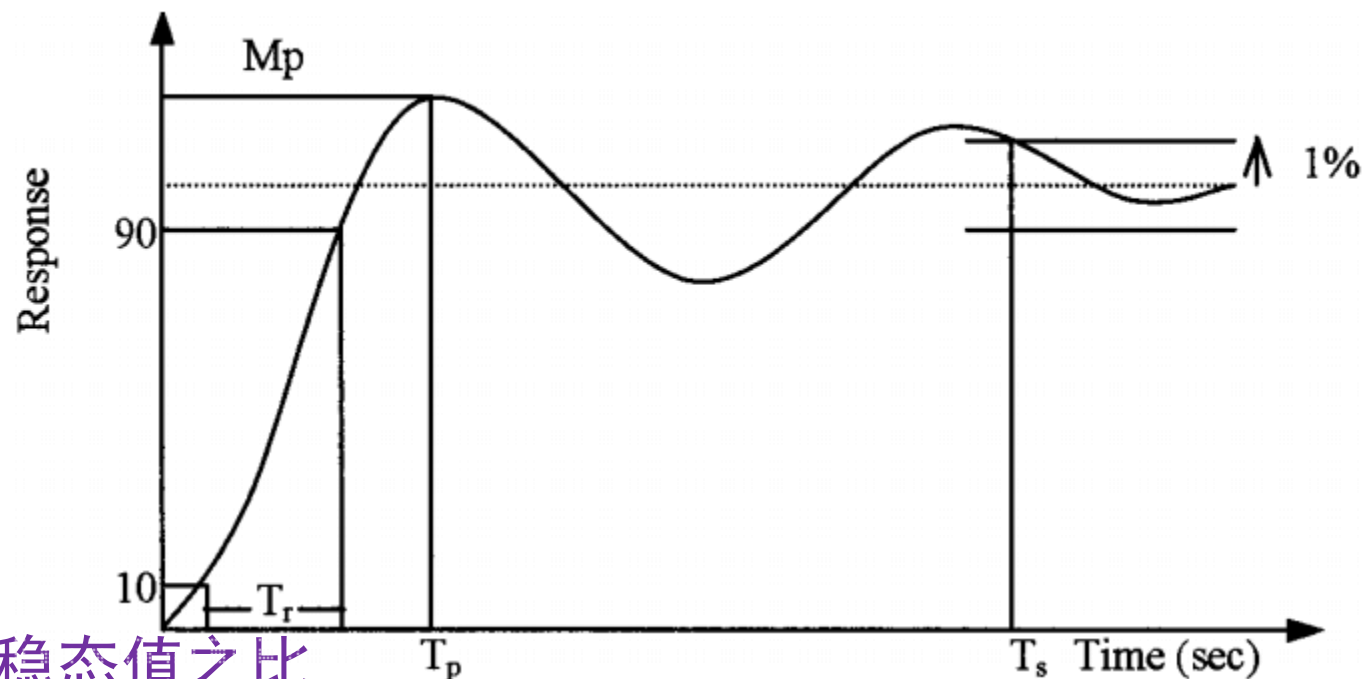
- 超调量

响应超出稳态值的最大偏离量与稳态值之比

- 调节时间（过渡时间）

误差达到期望值某个比例（1%）范围内，并不再超出

- 一个好的控制系统具有上升时间、超调量、调节时间和稳态误差小等优点。



如何设计控制算法/控制器？



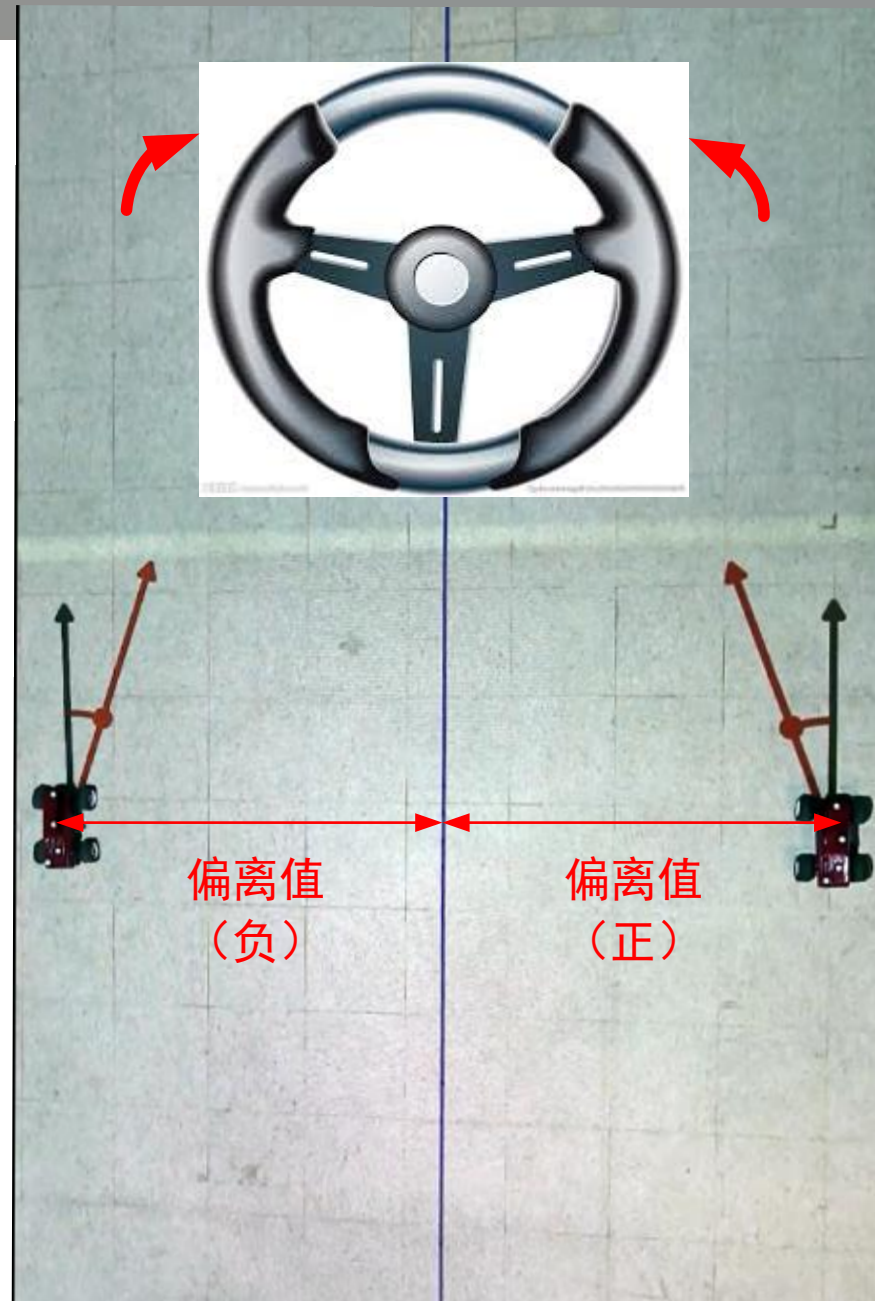
- 例子：汽车直线行走控制

如果偏离值  $D$  为正值，就向左拐。  
如果偏离值  $D$  为负值，就向右拐。

- 简单

期望值与当前值之差

- 过渡不平滑



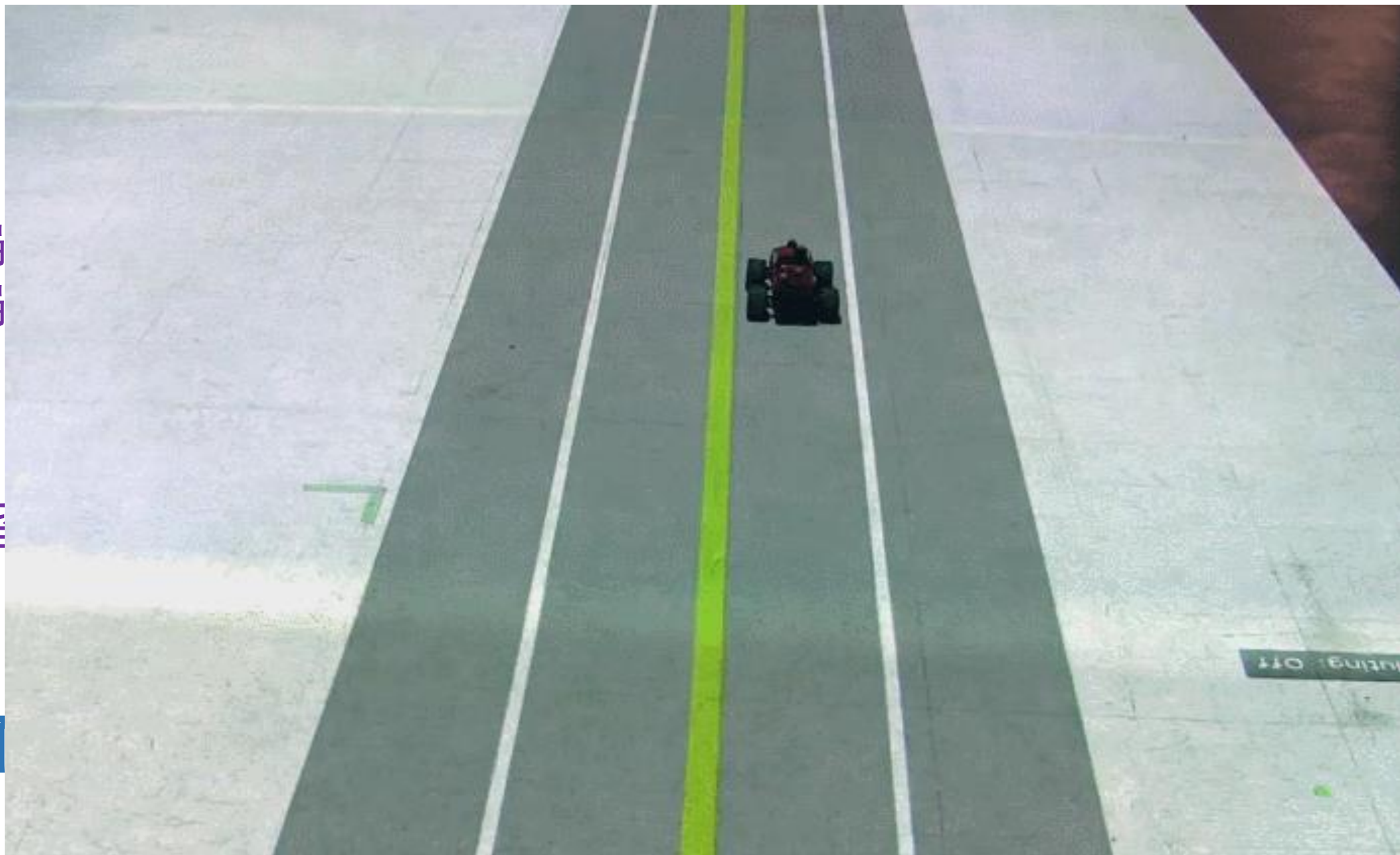
- 例子:

如果偏  
如果偏

- 简单

期望

- 过渡不



# 好吃你就多吃点 偏差大你就多拐点



值D为正值多一点, 就多拐一点。

值D为正值少一点, 就少拐一点。

值D为负值多一点, 就多拐一点。

值D为负值少一点, 就少拐一点。



- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。



- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。

$$W = K_p(D_0 - D)$$

$K_p$  是增益系数

$e_p := D_0 - D$  偏离误差



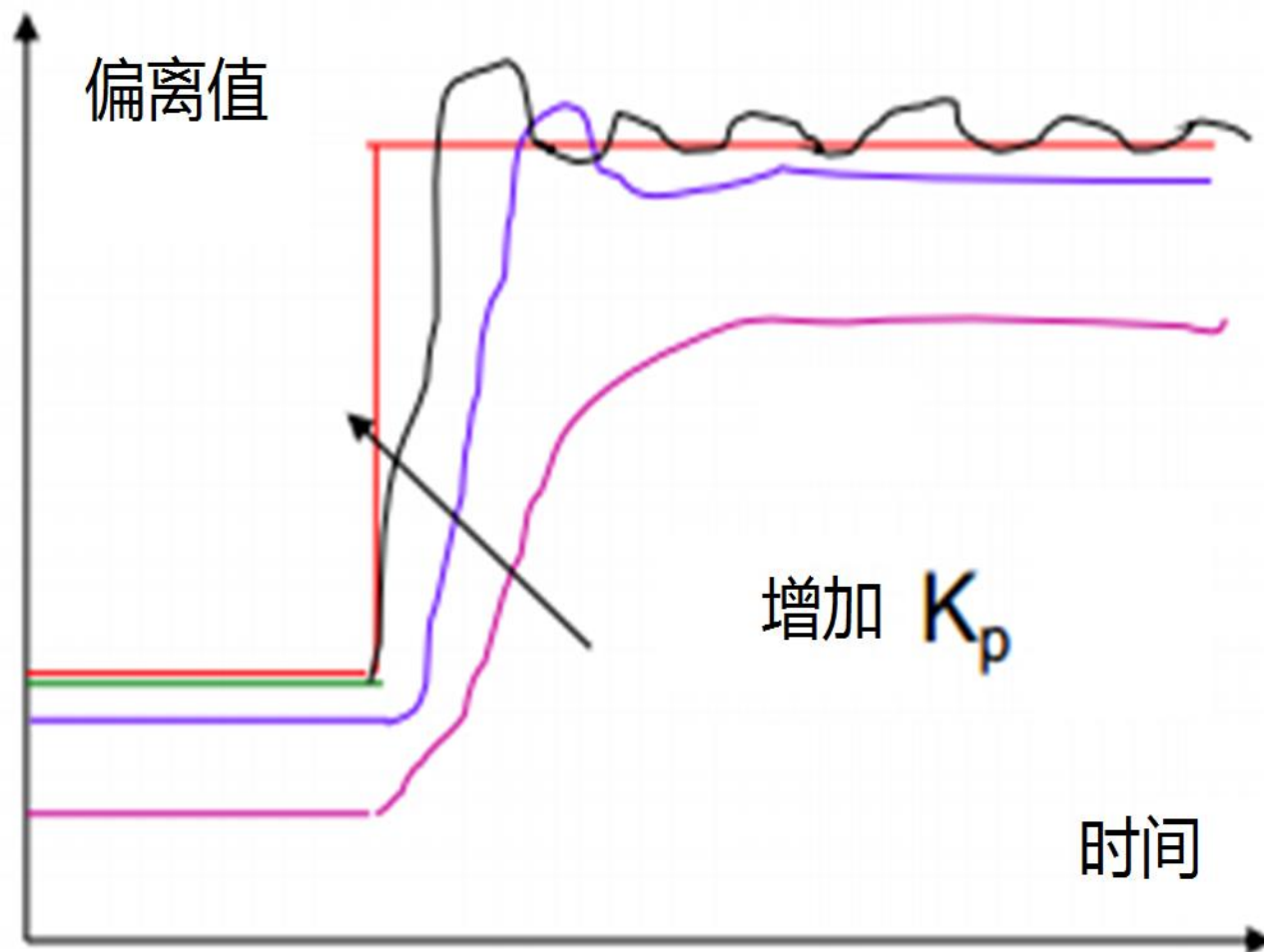
- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。

$$W = K_p(D_0 - D)$$

- 存在问题：

- 存在稳态误差

- 通过增大 $K_p$ 来更快达到稳态，可能会带来超调量变大。





- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。

$$W = K_p(D_0 - D)$$

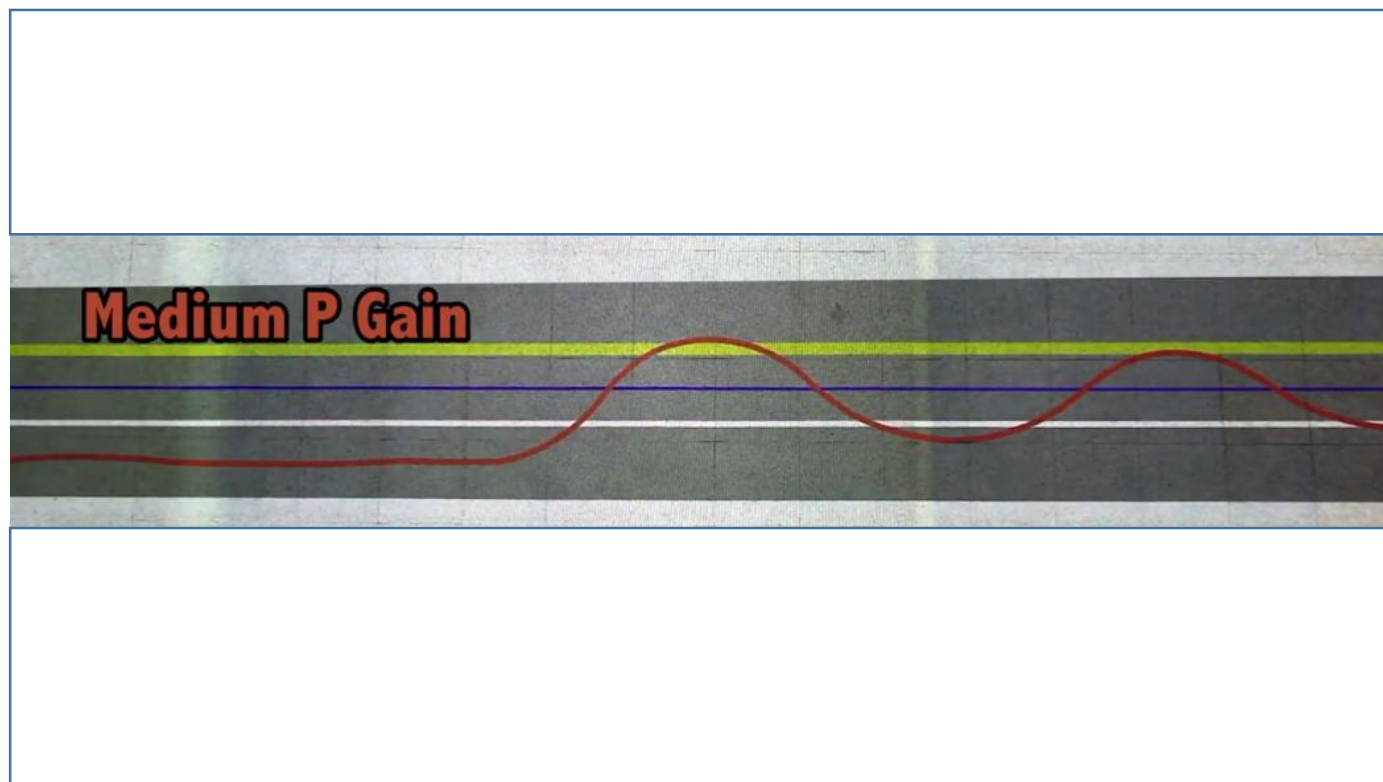
- 存在稳态误差
- 通过增大 $K_p$ 来更快达到稳态



- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。

$$W = K_p(D_0 - D)$$

- 存在稳态误差
- 通过增大  $K_p$  来更快达到稳态

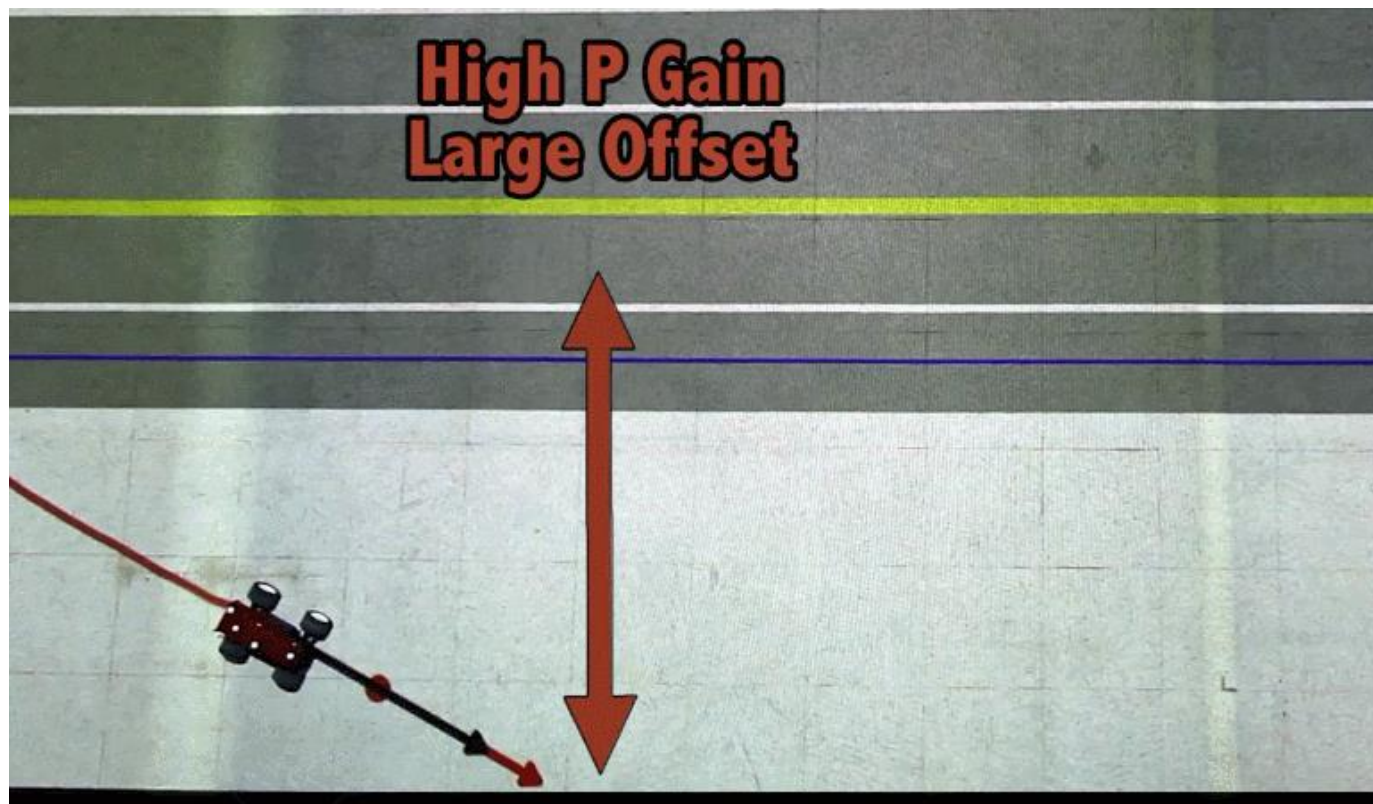


- 汽车拐的角度与车体和车道线之间的误差成正比。

$$W = K_p(D_0 - D)$$

- 存在稳态误差

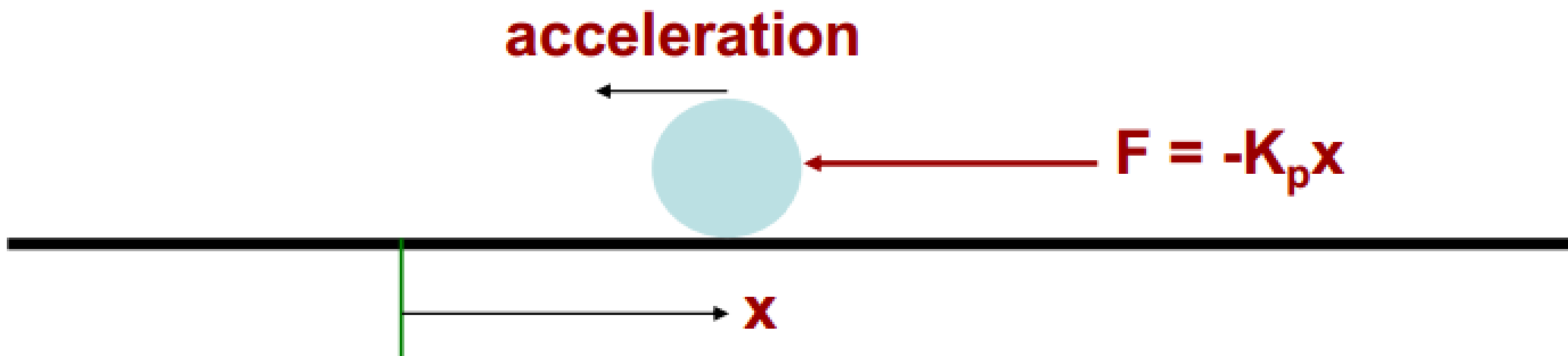
- 通过增大 $K_p$ 来更快达到稳态，可能会带来超调量变大。



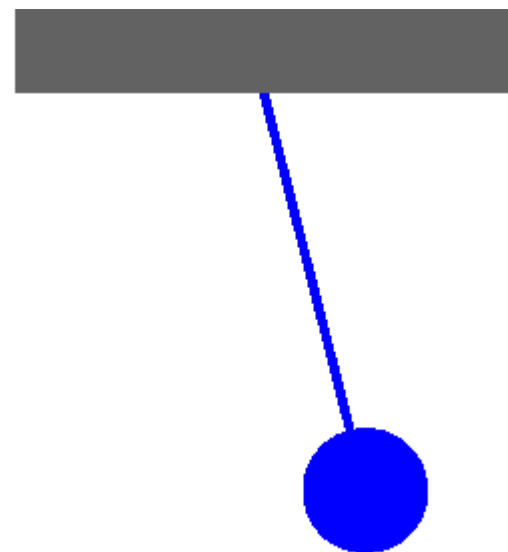
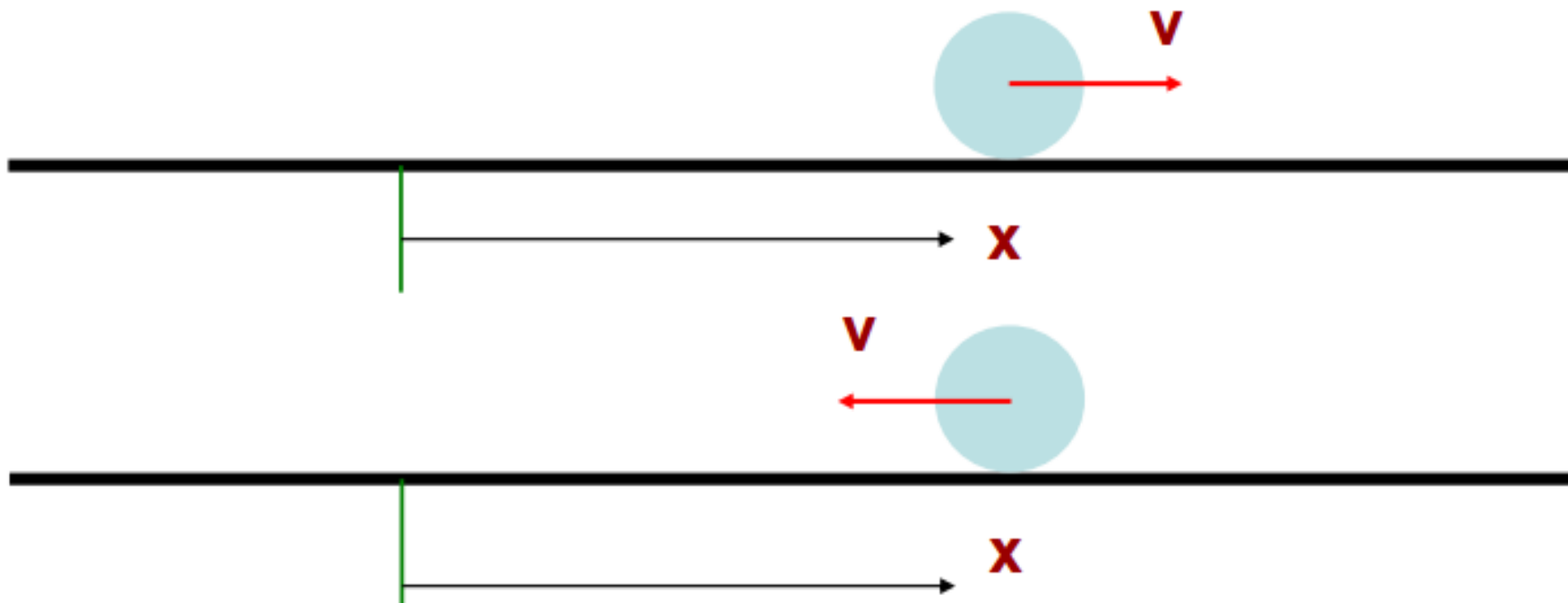
$$W = K_p(D_0 - D)$$



- 在一张平整的桌子上考虑一个球体。
  - 任何点都可以是平衡点（只选择一个）。
  - 运动可以用牛顿定律  $F = ma$  来描述，也可以用  $x'' = F/m$  表示。
  - 假设我们想把球保持在  $x=0$ ，误差为  $e = (0-x) = -x$ ；（为什么是负符号？）
  - 应用比例控制：  $F = K_p \cdot e = -K_p \cdot x$ 。
  - 反馈是负的，因为如果球位置误差是负的，它以正力推动，反之亦然。



- 在一张平整的桌子上考虑一个球体。

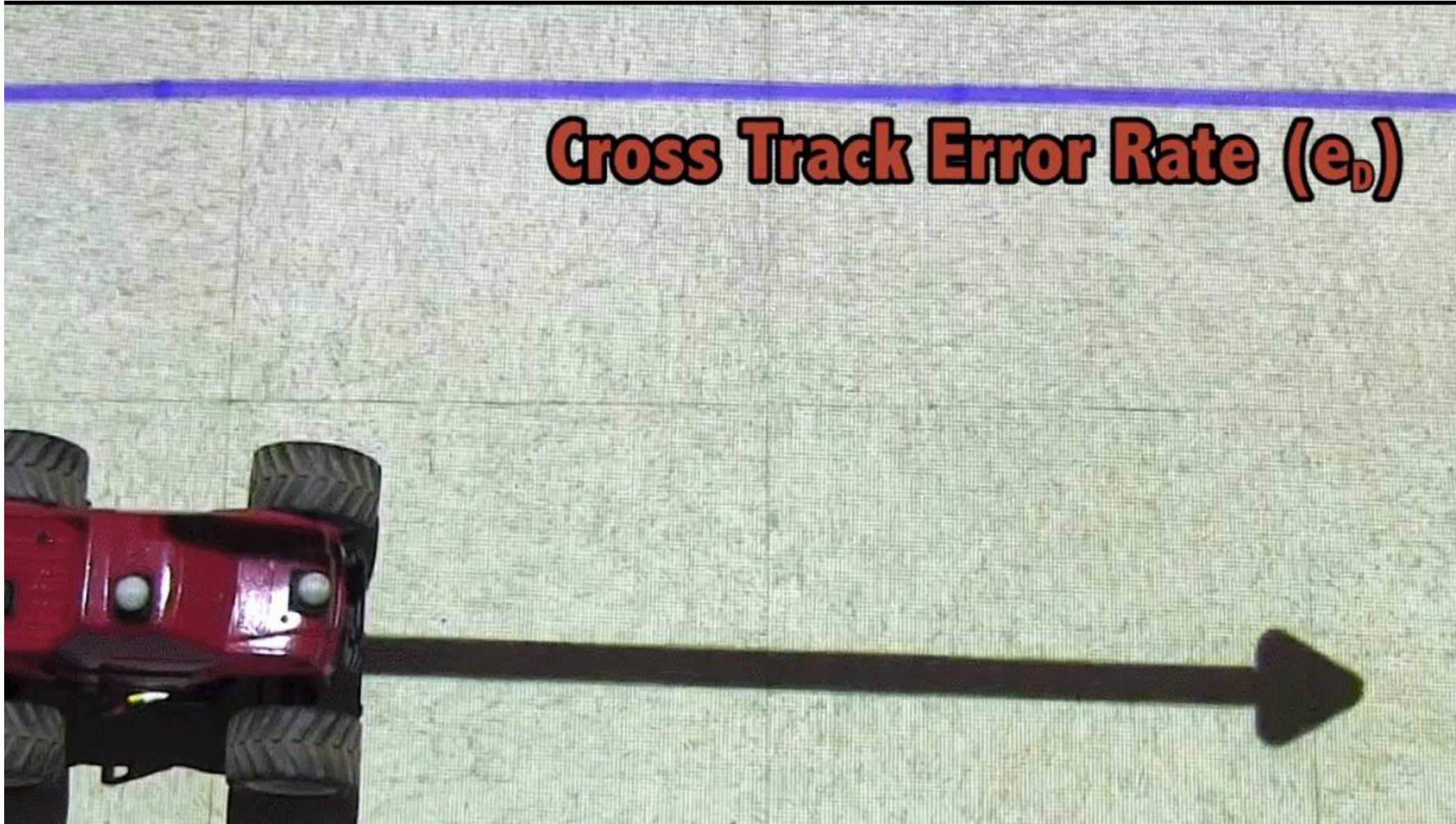


- 在球上施加的力是什么？ 两者都是  $-K_p x$  你怎么做得更好？
- 为场景1提供一个更大的力，并为场景二提供一个较小的力。
- 什么告诉我们什么时候有一个更大或更小的力量？



**Cross Track Error Rate ( $e_d$ )**

想一想  
“飞跃  
的感觉”



- 比例控制问题
  - 你想要快速达到想要的值
  - 一旦你接近期望值，你就想安定下来。
- 我们已经（或能）找到有关被控对象误差量变化率的信息。
  - 误差的变化率=它的导数

$$e_D = \dot{e}_p \text{ 误差的变化率}$$

- 比例控制问题
  - 你想要快速达到想要的值（高K）
  - 一旦你接近期望值（低k），你就想安定下来。
- 我们已经（或能）找到有关被控对象误差量变化率的信息。
  - 误差的变化率=它的导数

$$K_D \cdot e_D$$

微分增益系数

误差的变化率

- 比例控制问题
  - 你想要快速达到想要的值（高K）
  - 一旦你接近期望值（低k），你就想安定下来。
- 我们已经（或能）找到有关被控对象误差量变化率的信息。
  - 误差的变化率=它的导数

$$K_D \cdot e_D$$

- 比例控制问题
  - 你想要快速达到想要的值（高K）
  - 一旦你接近期望值（低k），你就想安定下来。
- 我们已经（或能）找到有关被控对象误差量变化率的信息。
  - 误差的变化率=它的导数，在比例控制中，如果误差变化大时，超调量（overshoot）\下冲（undershoot）将会很明显
  - 如何利用这个变化率信息

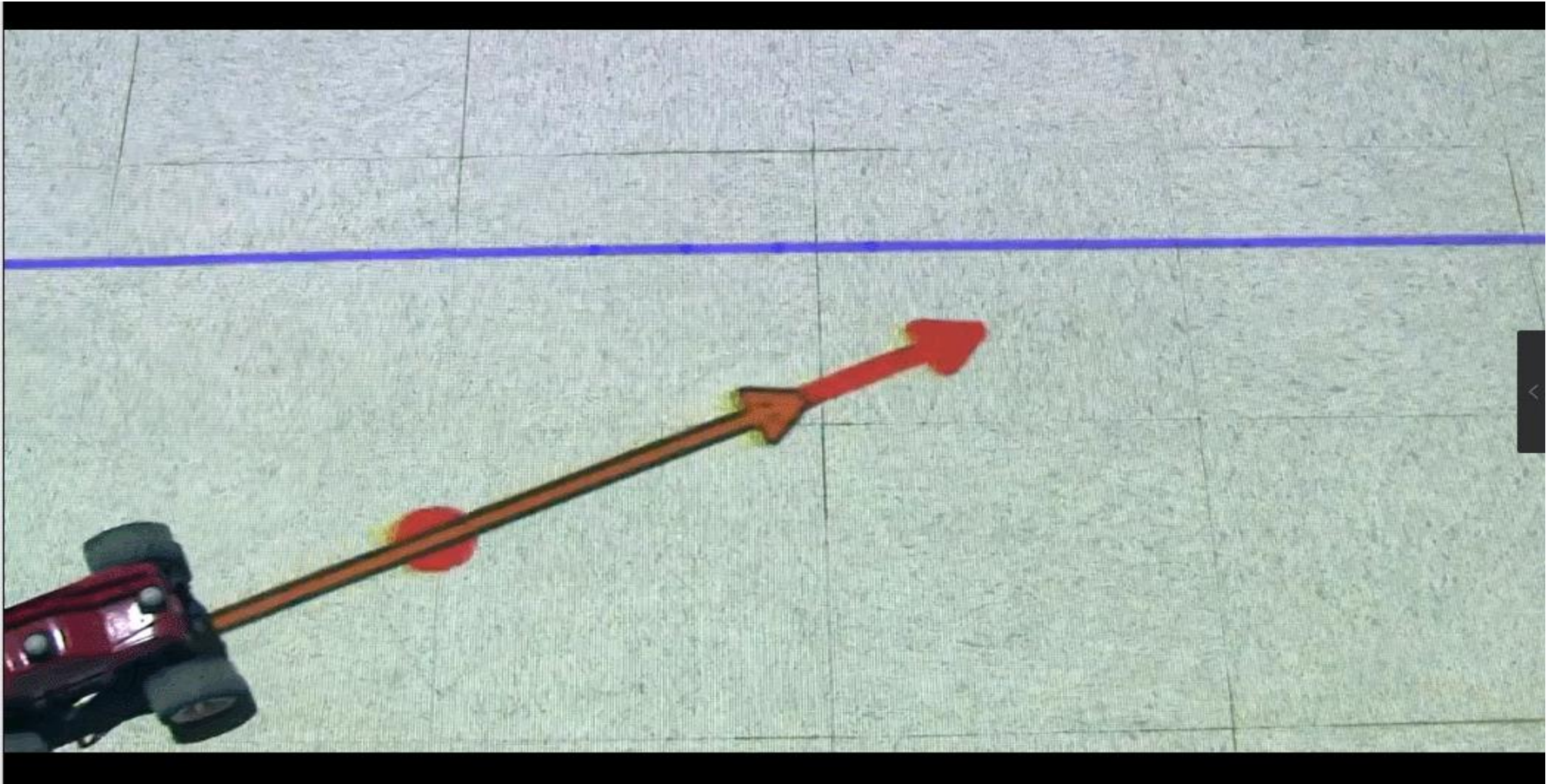
$$W = \underbrace{K_P \cdot e_P}_{\text{比例项}} + \underbrace{K_D \cdot e_D}_{\text{微分项}}$$

$$W = \underbrace{K_P \cdot e_P}_{\text{比例项}} + \underbrace{K_D \cdot e_D}_{\text{微分项}}$$



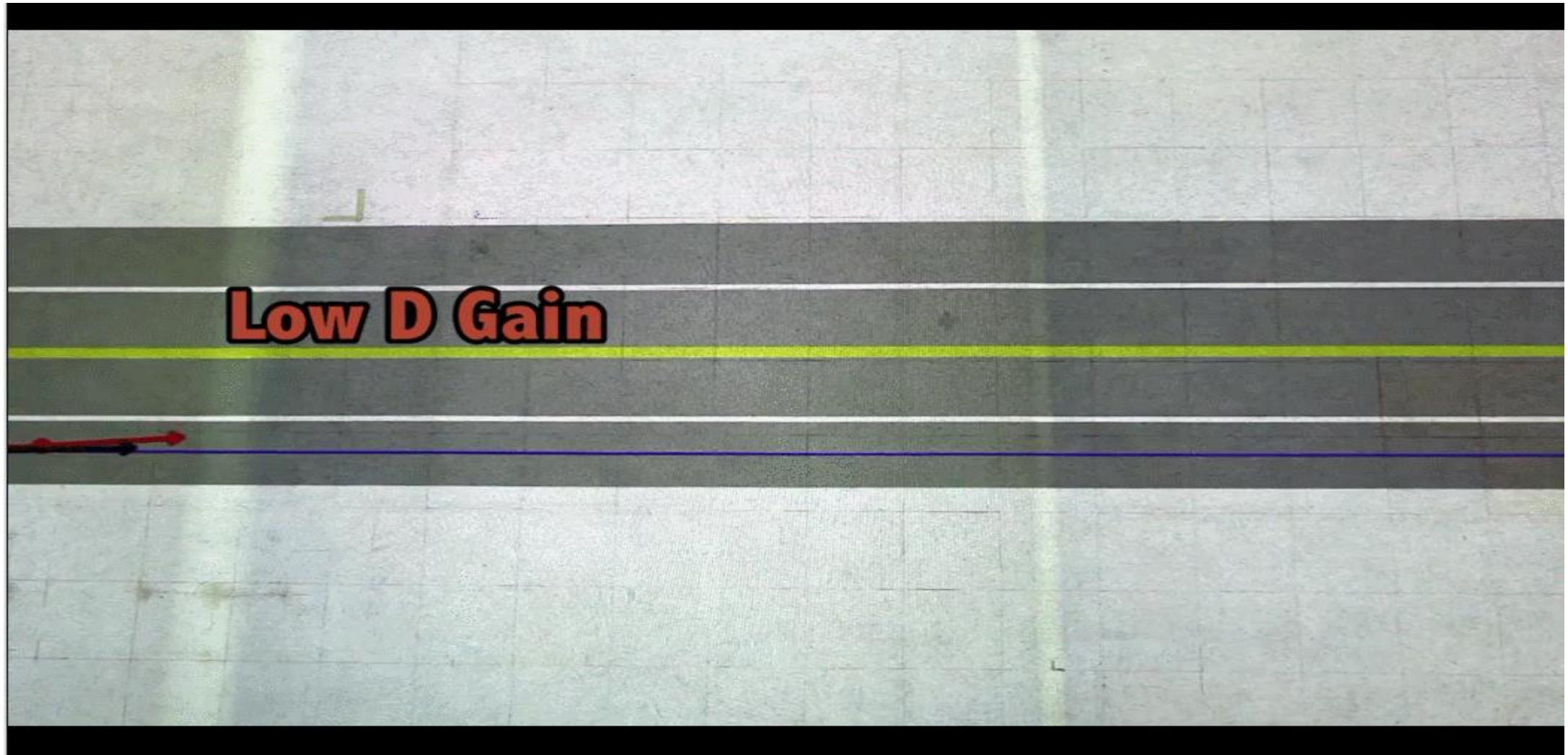
# 比例微分控制

$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$



$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$

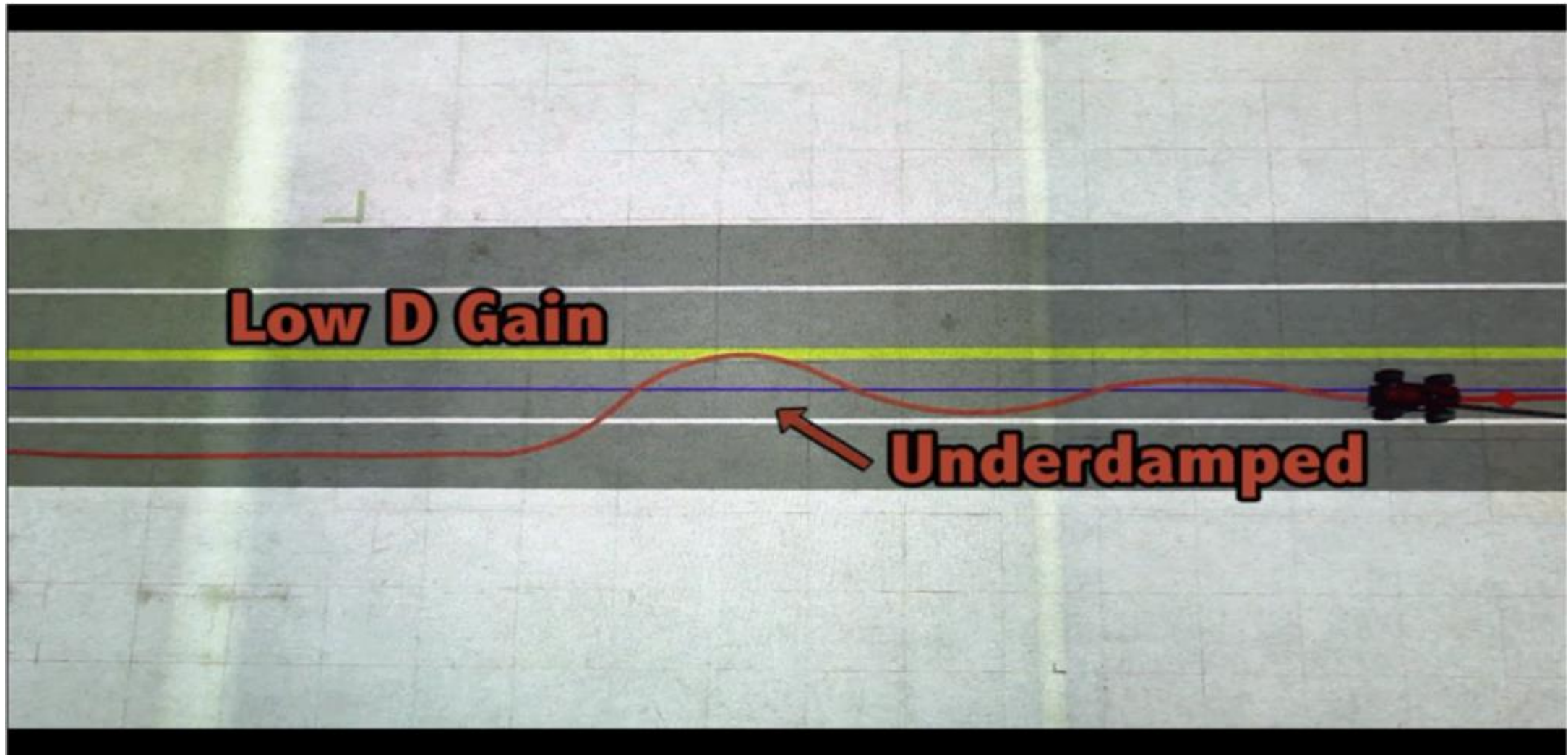
欠阻尼



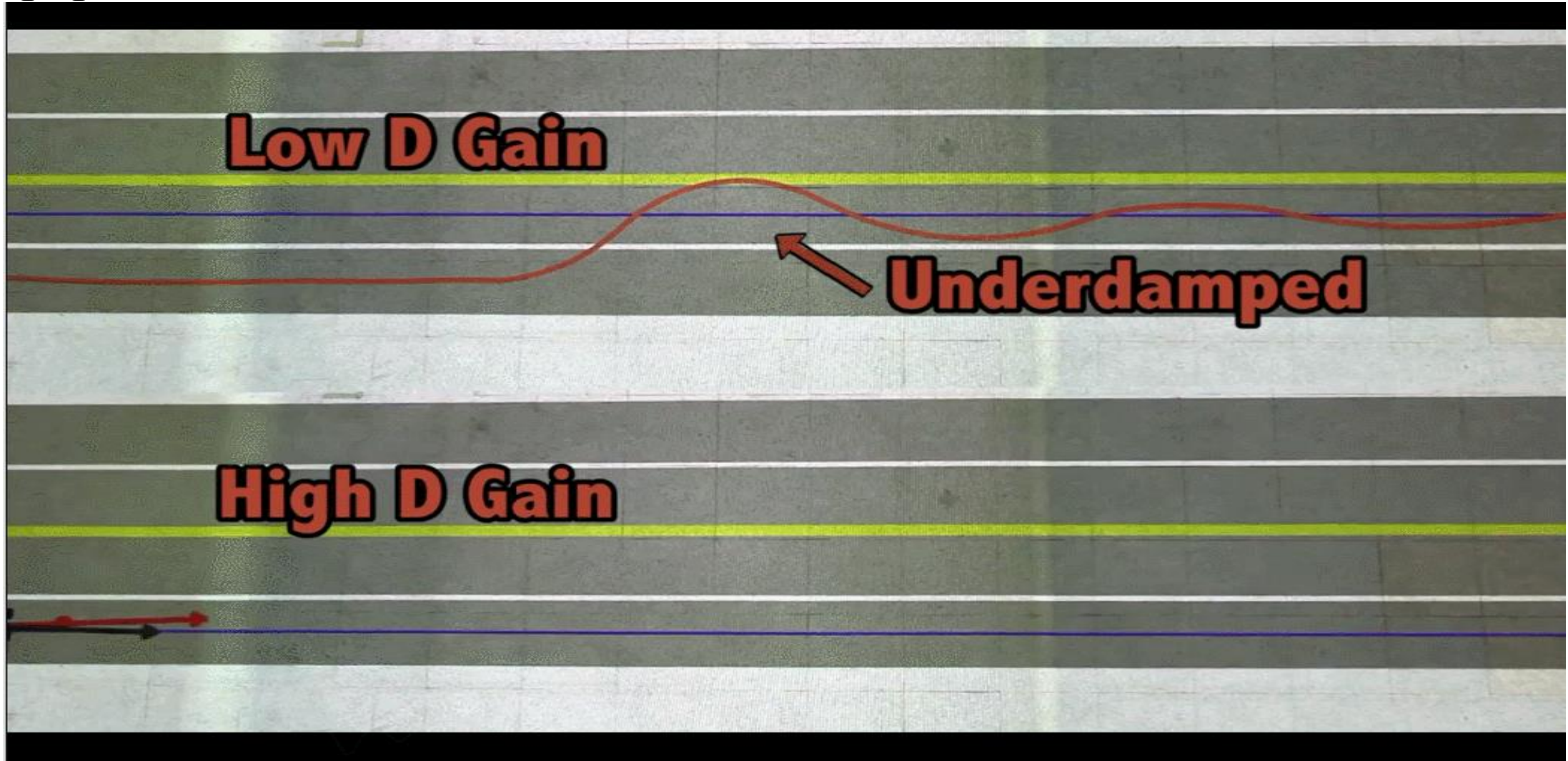


$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$

欠阻尼



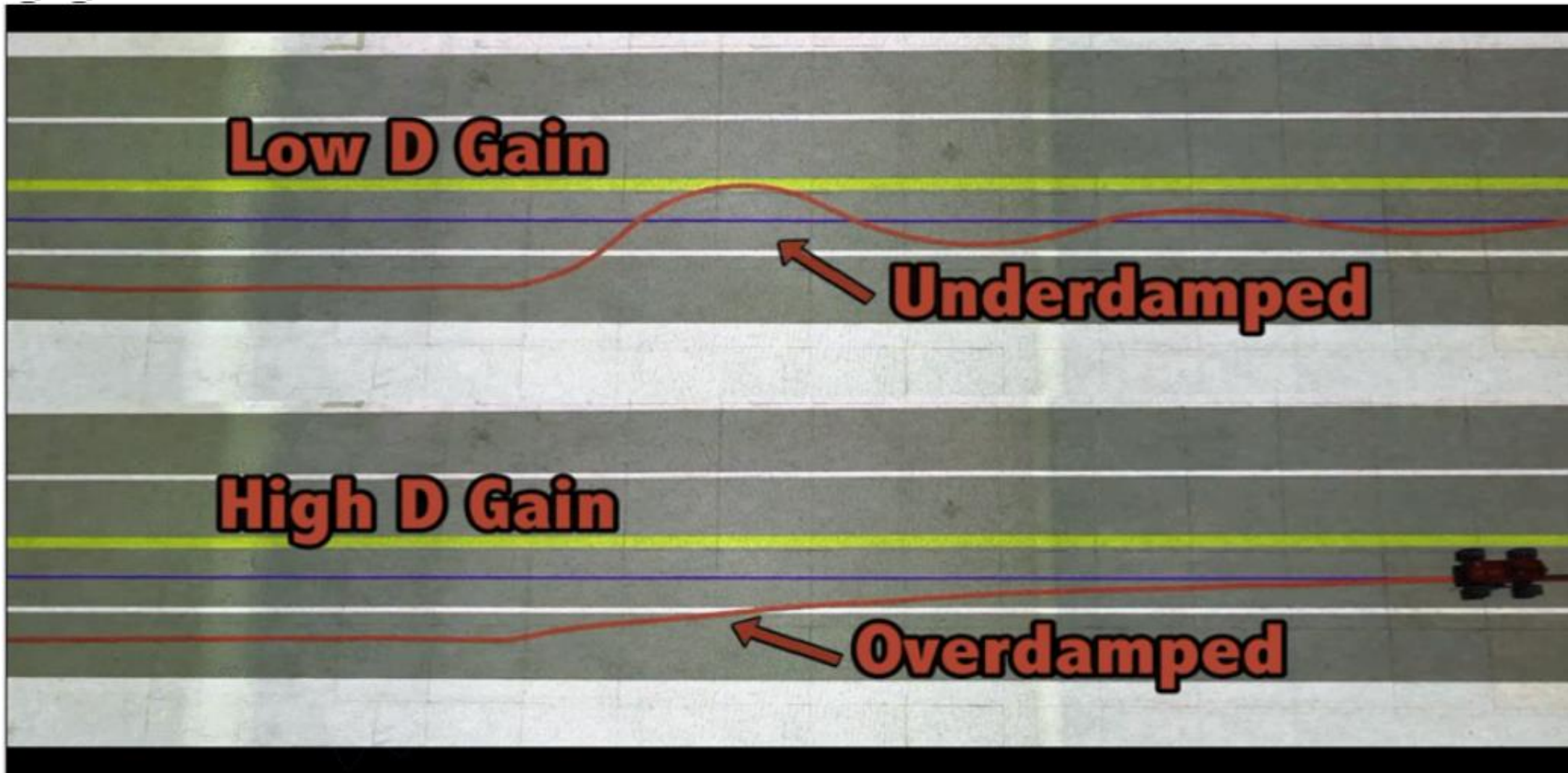
$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D \quad \text{过阻尼}$$



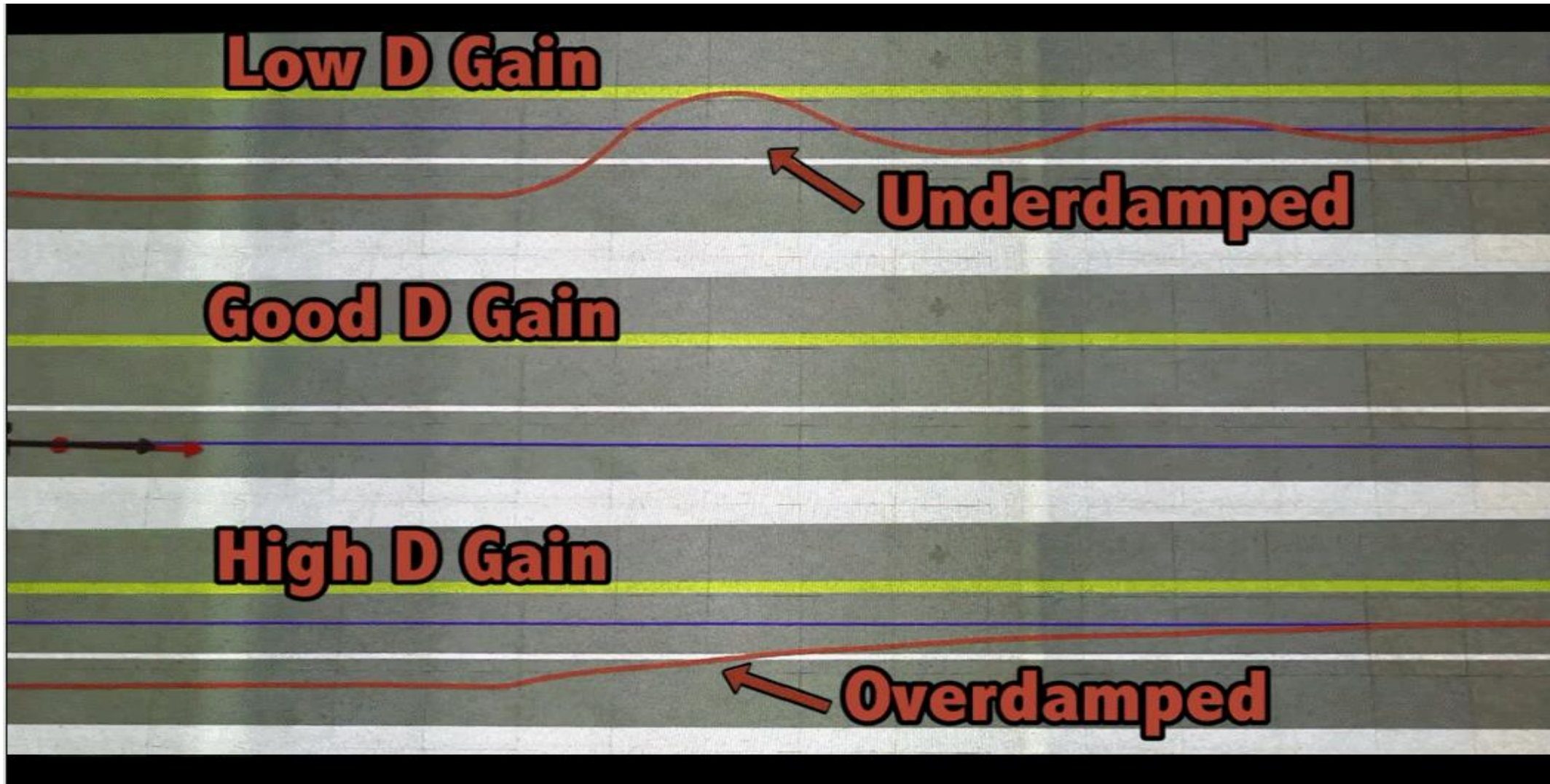


$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$

过阻尼

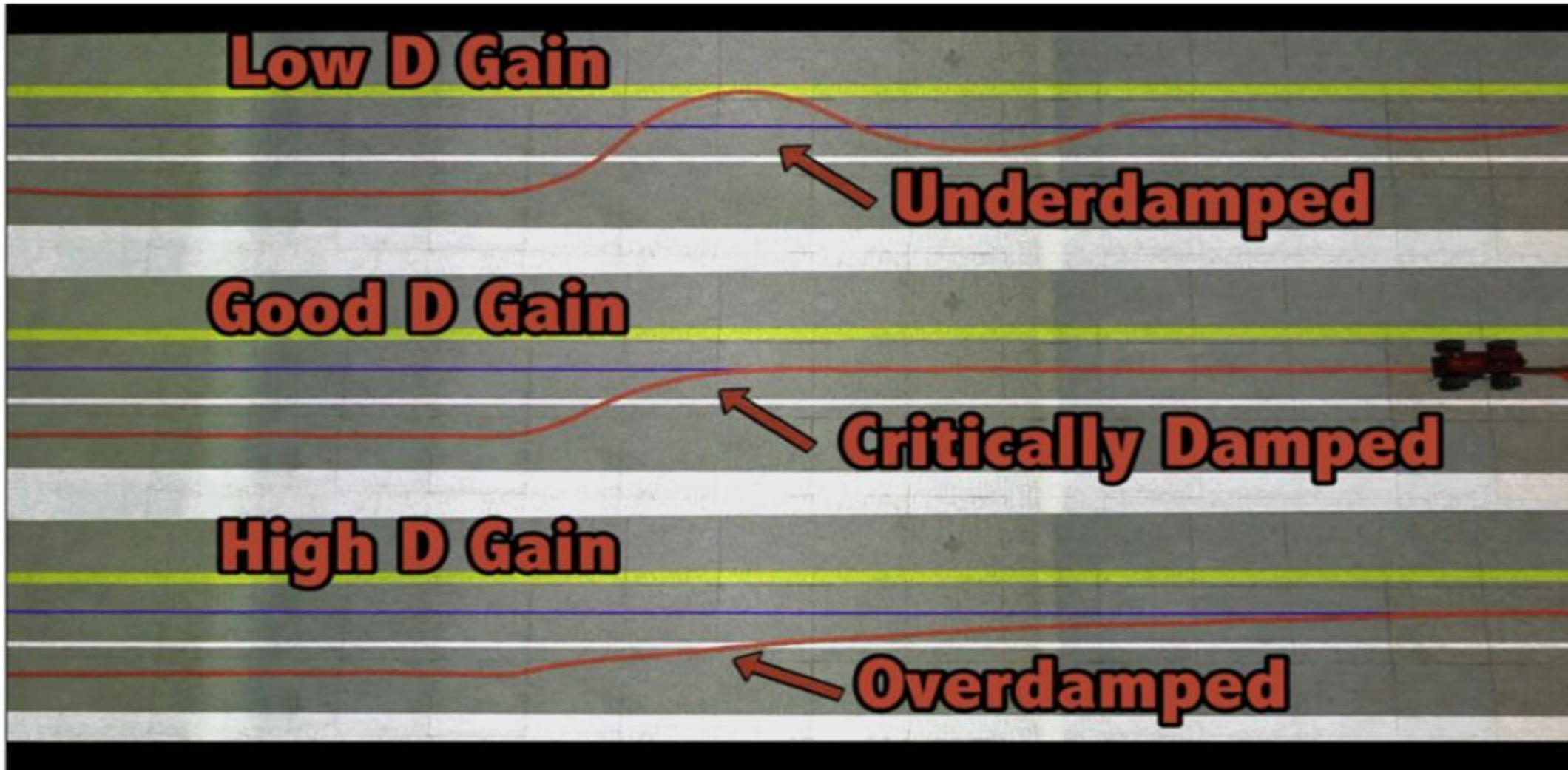


$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$





$$W = K_P \cdot e_P + K_D \cdot e_D$$





- **比例控制问题**

- 你想要快速达到想要的值
- 一旦你接近期望值，你就想安定下来。

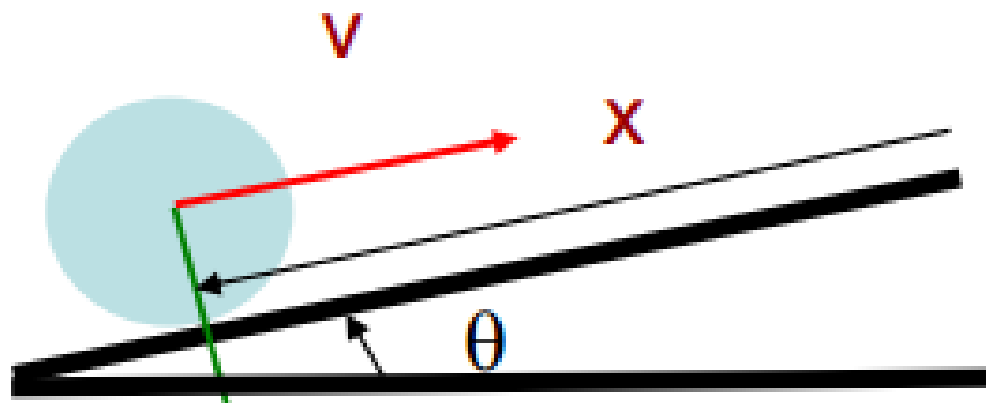
- **我们已经（或能）找到有关被控对象误差量变化率的信息。**

- 误差的变化率=它的导数
- 观察如果误差变化大，超调量（overshoot）\下冲（undershoot）将会很明显，利用这个现象来减少超调量

- **PD控制器**

与比例控制器相比，响应时间较慢，超调和纹波更小。

- 在一个具有一定坡度的平面上考虑一个球。



如果  $v=0$  且  $-K_p x = mg \sin\theta$

球无法到达坡顶！  
我们该怎么做？

当误差仍然存在时，提供更大的力量...

但是我们该怎么样提供更大的力量呢？

## 比例微分控制问题

- 由误差触发的驱动信号的变化=输出的期望值和当前值的差异
- 导数只告诉你两个连续的输出值是如何变化的。
- 如果误差不足以触发任何操作呢？



## 比例微分控制问题

- 由误差触发的驱动信号的变化=输出的期望值和当前值的差异
- 导数只告诉你两个连续的输出值是如何变化的。
- 如果误差不足以触发任何操作呢？



- 比例微分控制问题

- 由误差触发的驱动信号的变化=输出的期望值和当前值的差异
- 导数只告诉你两个连续的输出值是如何变化的。
- 如果误差不足以触发任何操作呢？

- 还有其他的东西需要把被控对象推向设定点。

$$W = \underbrace{K_P \cdot e_P}_{\text{比例项}} + \underbrace{K_D \cdot e_D}_{\text{微分项}} + ?$$



- 比例微分控制问题

- 由误差触发的驱动信号的变化=输出的期望值和当前值的差异
- 导数只告诉你两个连续的输出值是如何变化的。
- 如果误差不足以触发任何操作呢？

- 还有其他的東西需要把被控对象推向设定点。

$$W = \underbrace{K_P \cdot e_P}_{\text{比例项}} + \underbrace{K_D \cdot e_D}_{\text{微分项}} + \underbrace{K_I \cdot e_I}_{\text{积分项}}$$

积分增益系数

过往误差总和



# PID 控制

- 比例微分控制问题

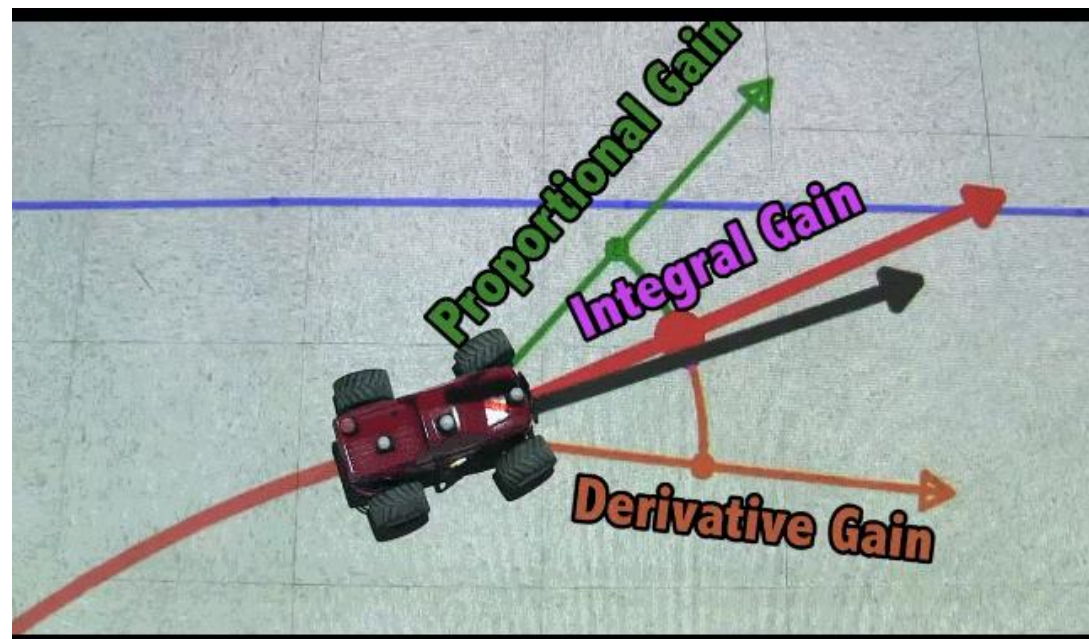
- 由误差触发的驱动信号的变化=输出的期望值和当前值的差异
- 导数只告诉你两个连续的输出值是如何变化的。
- 如果误差不足以触发任何操作呢？

- 还有其他的東西需要把被控对象推向设定点。

- 积分项

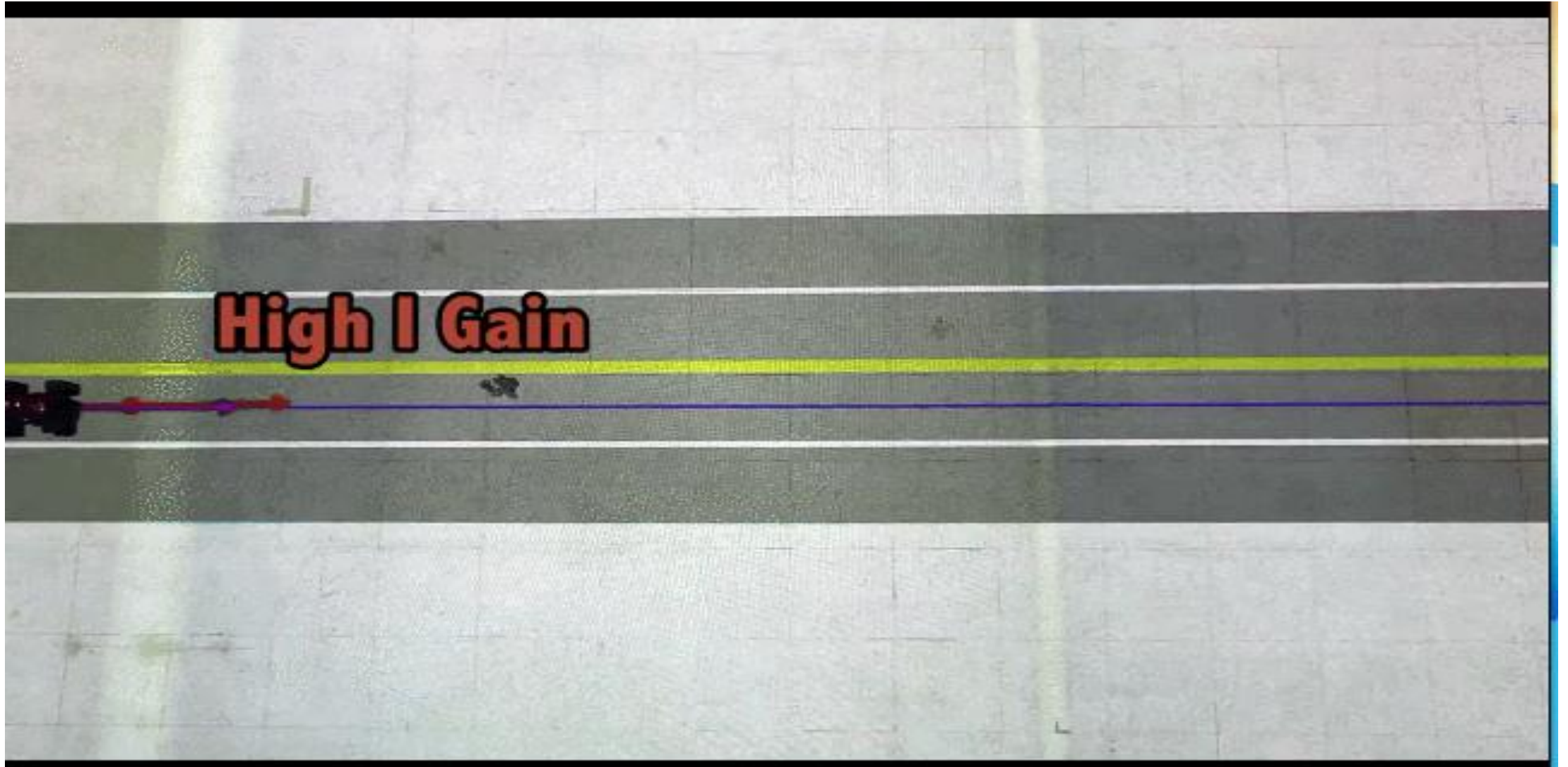
- 被控对象的输出中过去所有误差的总和
- 持续的误差最终会使总和变大。
- 积分项迫使驱动信号发生变化。

- 比例，积分和微分组合= PID



# PID 控制

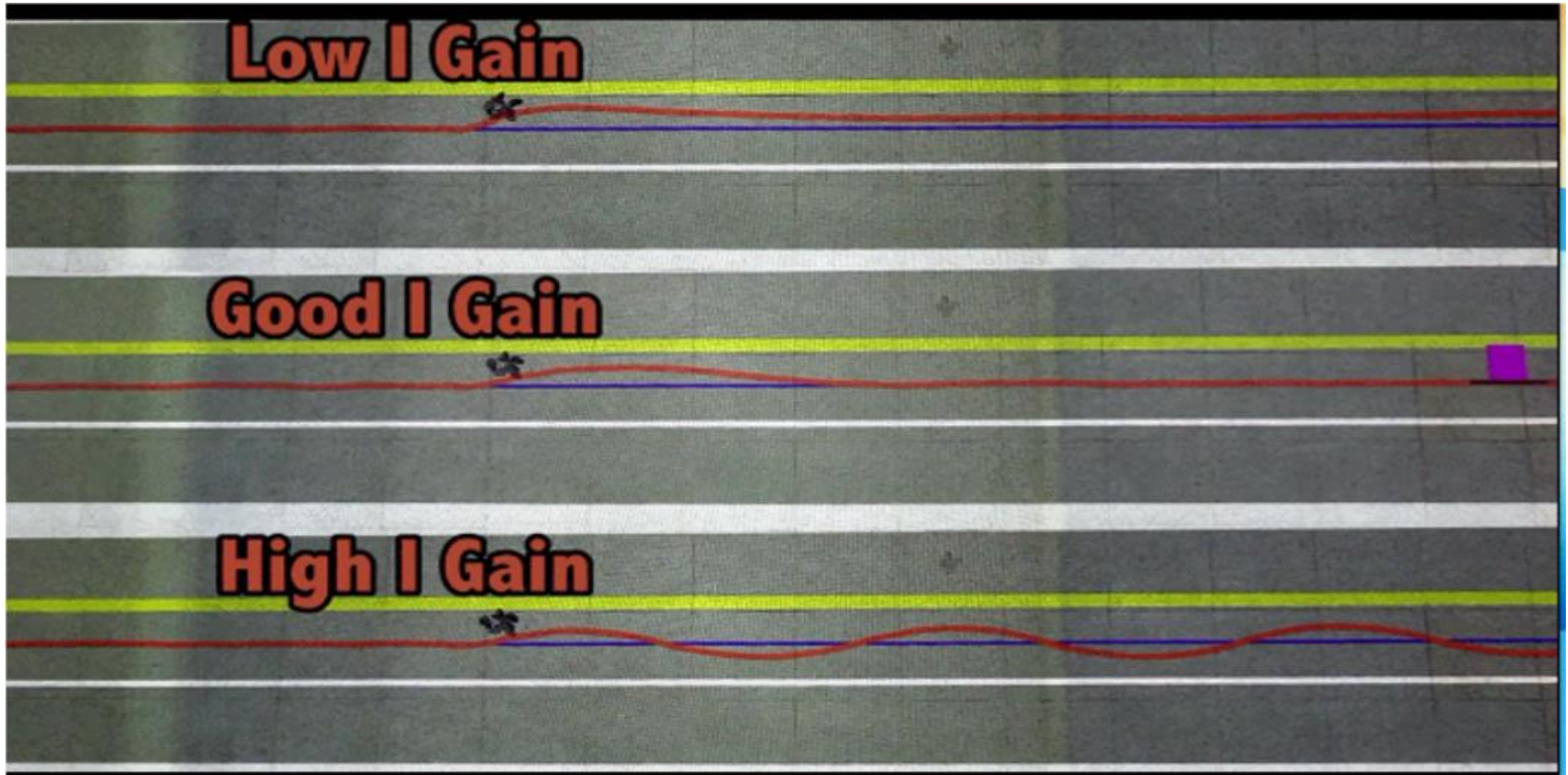
- 不同的积分增益系数





# PID 控制

- 不同的积分增益系数



# 增量式PID 控制

- 由前述得到了连续型PID控制

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d e'(t) \right]$$



离散化PID控制（位置式算法）

$$u(k) = K_p \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right]$$

局限性：由于全量输出，所以每次输出均与所有的过去状态有关，计算时要对误差 进行累加，工作量大。

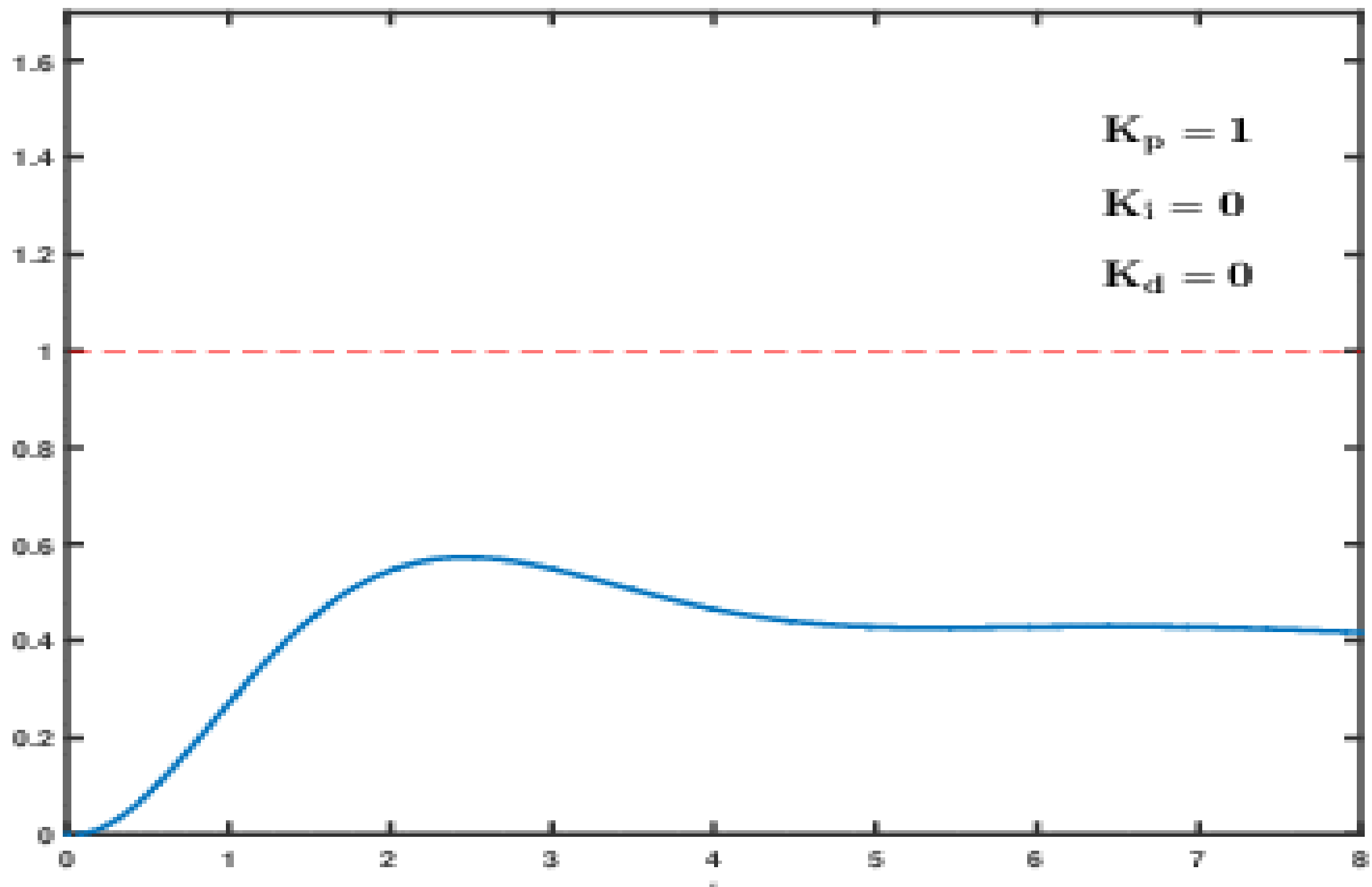
# 增量式PID 控制

- 由前述得到了连续型PID控制

$$u(k) = K_p \left[ e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right]$$



$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p \left[ e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_i} e_k + T_d \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} \right] \\ &= K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e_k - K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{k-1} + \frac{K_p T_d}{T} e_{k-2} \end{aligned}$$





# PID 控制器

- 工业过程中使用的控制器有90%以上是PID控制器。
- 一个典型的化工厂有100多或者更多的PID控制器。
- PID控制器广泛应用于：
  - 化工厂
  - 炼油厂
  - 制药行业
  - 食品行业
  - 纸米尔斯
  - 电子设备



## 知识要点：

### 1. 机器人的控制系统包括哪些部分？

参考输入，控制器，反馈，执行器，被控对象

### 2. 开环控制与闭环控制的区别

有没有反馈环节，通过闭环控制来使一个系统稳定

### 3. 正反馈和负反馈的区别

### 4. Bangbang控制（公式）

### 5. 为直流电机的转速控制设计一个增量式PID控制器（下一页）

<https://zh.wikipedia.org/wiki/PID%E6%8E%A7%E5%88%B6%E5%99%A8> PID

- 将本次课程学习的知识，应用到直流电机的速度控制，设计电机调速的控制器。

编码器：可以获得当前电机转速；（反馈）

PWM：驱动直流电机转动，值越大，转动越快；（执行器）

期望转速：目标转速

- 1. 画出控制框图；
- 2. 写出控制器算法

# 实验课：PID调参秘籍



参数整定找最佳，从小到大顺序查  
先是比例后积分，最后再把微分加  
曲线振荡很频繁，比例度盘要放大  
曲线漂浮绕大湾，比例度盘往小扳  
曲线偏离回复慢，积分时间往下降  
曲线波动周期长，积分时间再加长  
曲线振荡频率快，先把微分降下来  
动差大来波动慢，微分时间应加长  
理想曲线两个波，前高后低四比一  
一看二调多分析，调节质量不会低

若要反应增快，增大 $P$ 减小 $I$

若要反应减慢，减小 $P$ 增大 $I$

如果比例太大，会引起系统震荡

如果积分太大，会引起系统迟钝