

知
识
点

敲黑板，本文需要学习的知识点有

控制理论 反馈信息

Planning 时域

频域 控制量

控制模块根据预测的轨迹和估计的车辆状态向油门、刹车或转向扭矩发送适当的命令。控制模块使汽车尽可能接近计划的轨迹。**控制器参数**可以通过最小化理想状态和观测状态之间的误差函数(偏差)来估计。

以下，ENJOY

本节主要介绍Apollo控制相关内容，包括**常用控制理论、功能限制与未来趋势、相似原理在不同模块中的应用**。目的是让大家了解控制模块的整体脉络及理论，通过案例讲解将理论转化成code及真正测试标准的方法。

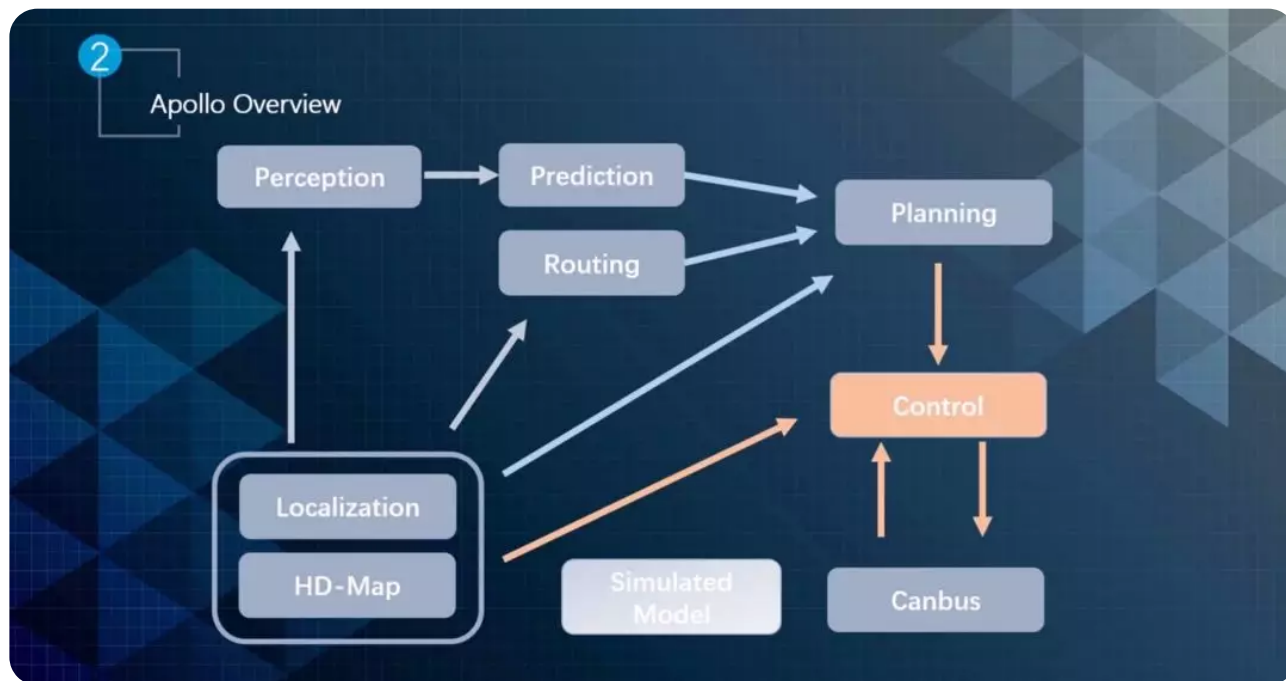


简介

本次课主要介绍以下三个方面的内容：

- 通用控制理论及其在Apollo自动驾驶平台上的应用。
- 功能的限制和未来的趋势。
- 类似的原理怎样应用于不同的模块。

首先我们回顾一下Apollo自动驾驶框架的基本结构，如图1所示。



▲图1 Apollo 软件框架

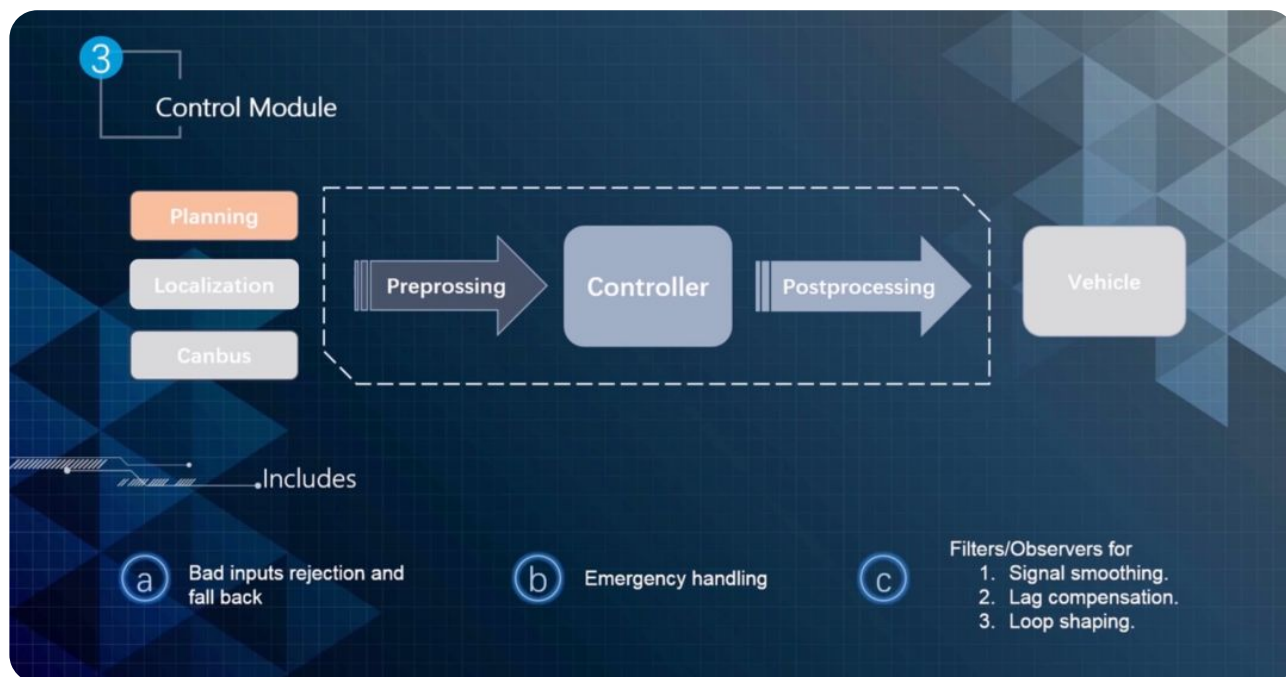
从图中可以看出，控制模块的输入一方面来自**planning（规划模块）**，另一方面来自**自反馈阶段信息（如localization和HD Map）**，此部分信息包括车辆位置、朝向、速度等。

其输出结果是控制指令，与下层模块canbus（车辆交互标准）进行交互；同时控制模块也会从底层车辆得到反馈信号（车辆本身in vehicle reference frame：速度信息、四轮转速信息、车辆健康状况信息、底盘是否报错信息、危险信息）



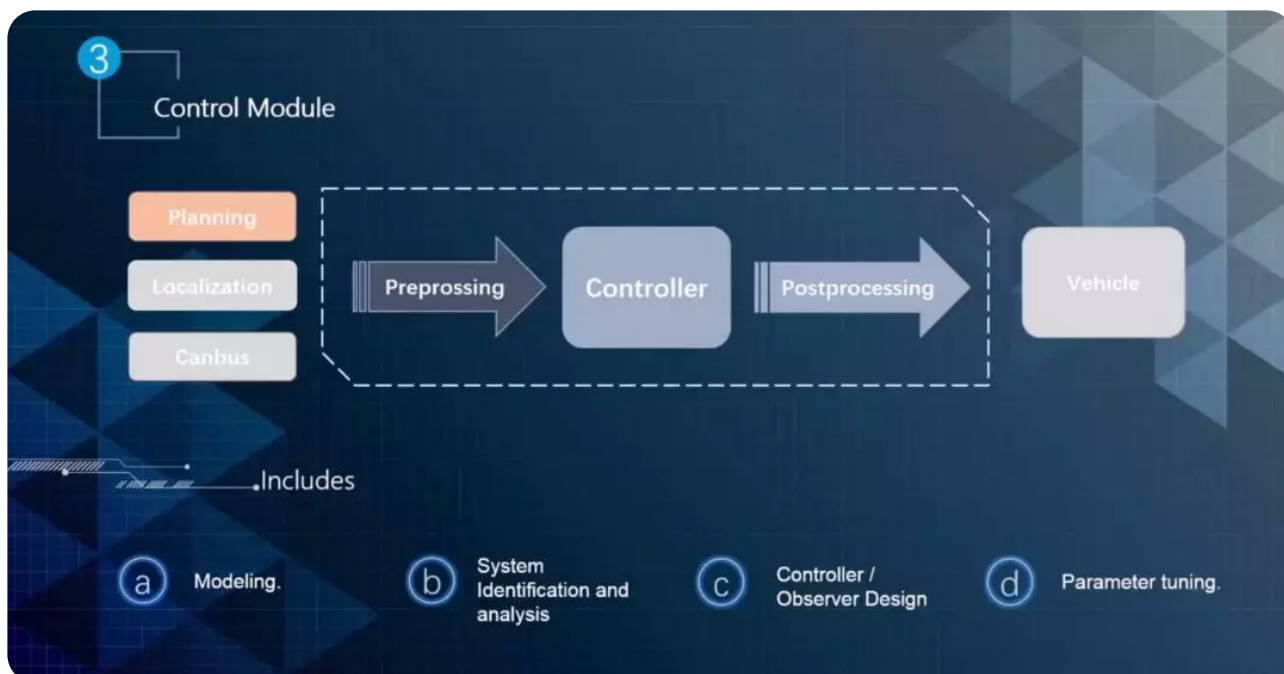
控制模块

如图2所示，控制模块包括三个部分：**预处理、控制器和后处理**。其中，预处理部分的主要功能包括三方面，第一是对输入信号的检查，对不正常信号的过滤；第二是做一些紧急处理，第三是做一些滤波操作，例如信号的平滑等。



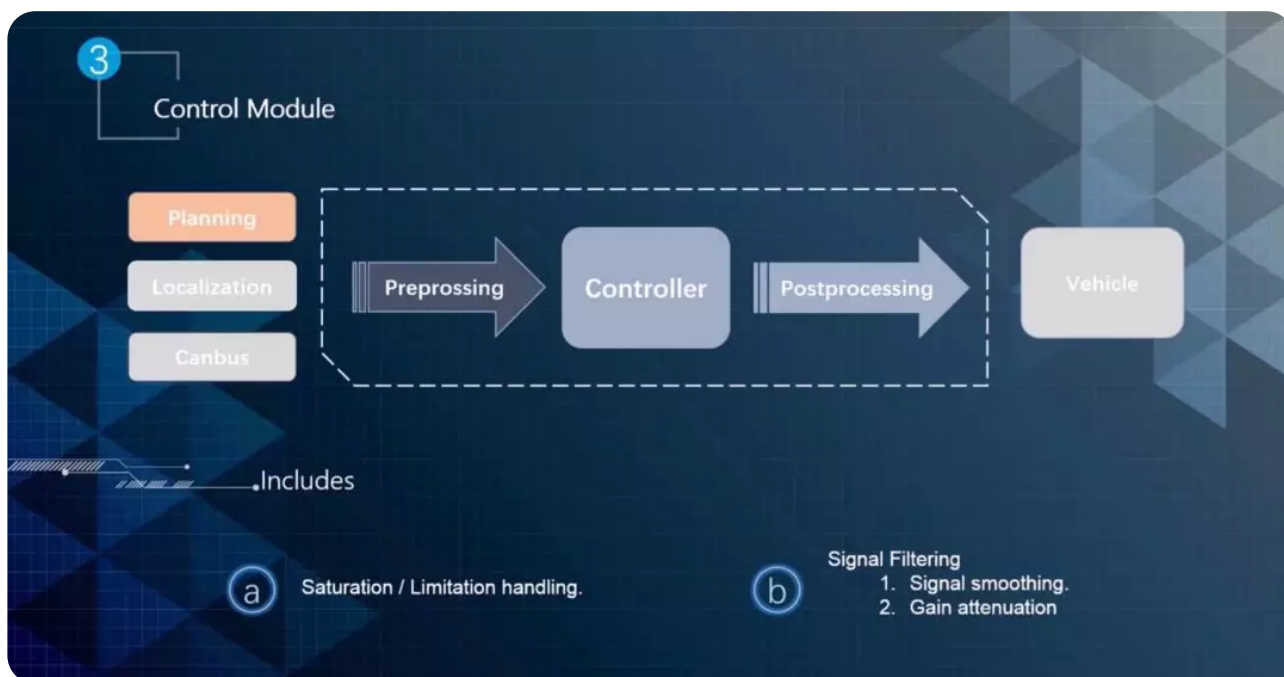
▲ 图2 控制模块的组成

控制器主要功能包括：**模型建立、系统识别和分析**，控制器/观察器设计以及参数调优等功能，如图3所示。



▲ 图3 控制器的主要功能

后处理部分将信号发送给执行器，包括**限制的处理以及信号滤波**，如图4所示。因为油门、刹车、转向这种执行器本身有上下限、滞后（回滞曲线），所以需要对这些信号进行一些相关处理。



▲ 图4 后处理



什么是控制

为什么需要控制

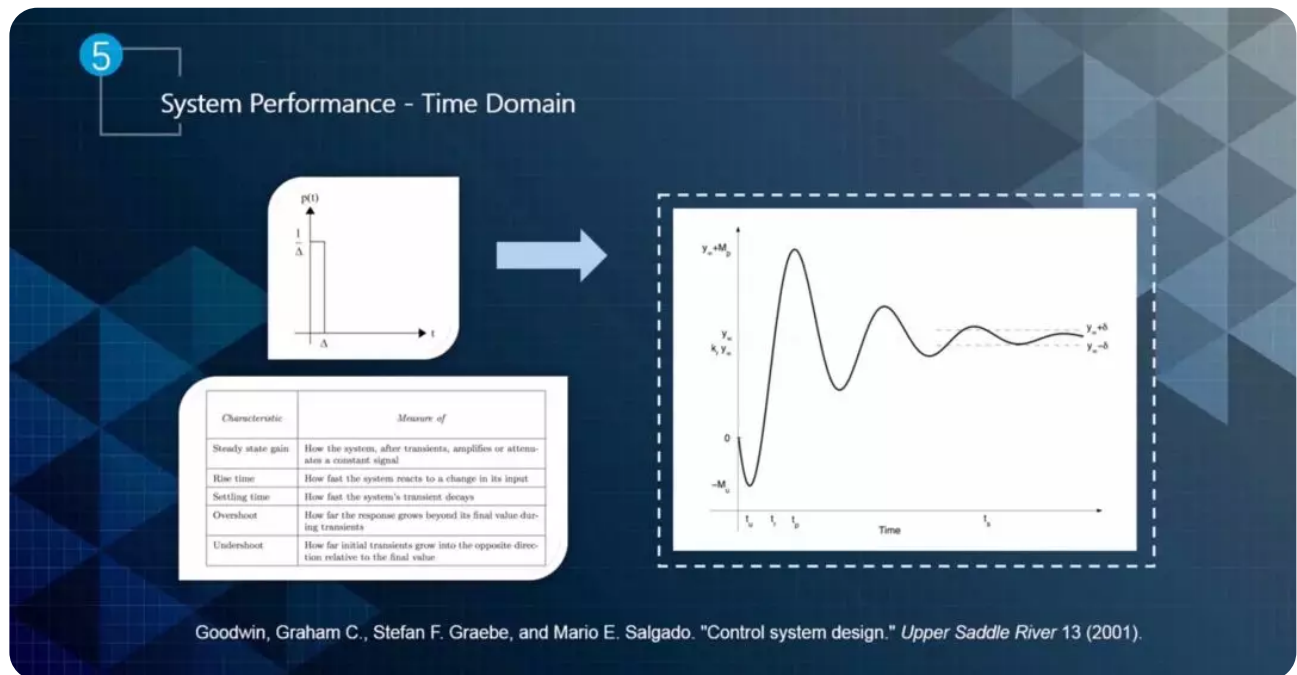
控制主要是为了弥补数学模型和物理世界执行之间的不一致性。对于自动驾驶而言，规划的轨迹和车辆的实际运行轨迹并不完全一致，控制器按照规划轨迹在条件允许下尽可能地调节车辆本身。为了能够安全、舒适的行驶，自动驾驶系统对性能的要求需要控制模块，主要体现在以下几个方面，如图5所示。

- 首先是稳定性，包括在所有场景下的车辆行为稳定和安全。
- 其次是稳定状态的行为，减少或者消除规划和实际车辆行为的差别。
- 最后是瞬时状态的行为。



▲图5 自动驾驶系统对性能的要求

具体而言，自动驾驶系统是否满足性能要求可以从三个角度去评测：**时域、频域以及discrete domain（离散域）**。时域是指输出在时间轴上应该满足的要求。其衡量的指标包括steady state gain、rising time、setting time、overshoot和undershoot。每个指标对应的具体含义如图6所示。

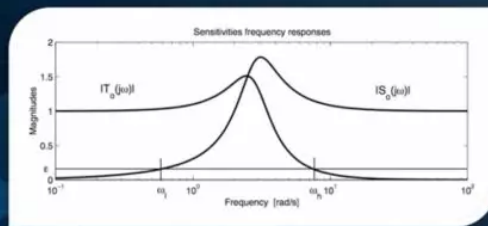


▲图6 控制模块在时域上的性能要求

类似的，系统在频域里也需要满足一定的要求。在频域空间，**X轴是输入频率，Y轴是输出跟输入的比例**，理想状态下输出和输入比例应该为1。系统性能在频域中的评价指标包括pass band、cutoff frequency等，如图7所示。

6

System Performance - Frequency Domain



Goodwin, Graham C., Stefan F. Graebe, and Mario E. Salgado. "Control system design." Upper Saddle River 13 (2001).

| Characteristic | Measure of |
|-------------------|---|
| Pass band | Frequency range where the system has minimal impact on the amplitude of a sinusoidal input |
| Stop band | Frequency range where the system essentially annihilates sinusoidal inputs |
| Transition band | Frequency range between a system's pass- and stop bands |
| Bandwidth | The frequency range of a system's pass band |
| Cut-off frequency | A frequency signifying a (somewhat arbitrary) border between a system's pass- and transition band |

▲图7 频域的评判指标

除了时域和频域的要求，还需要满足discrete domain的要求。

7

System in Time Domain VS models in Frequency Domain (Laplace Transformation)

| $f(t)$ | $\mathcal{L}\{f(t)\}$ | Names |
|---|---|-----------------------|
| $\sum_{i=1}^n a_i f_i(t)$ | $\sum_{i=1}^n a_i F_i(s)$ | Linear combination |
| $\frac{dy(t)}{dt}$ | $sY(s) - y(0^-)$ | Derivative Law |
| $\frac{d^2y(t)}{dt^2}$ | $s^2Y(s) - \sum_{i=1}^2 s^{i-1} y^{(i-1)}(0^-)$ | High order derivative |
| $\int_0^t y(\tau) d\tau$ | $\frac{1}{s} Y(s)$ | Integral Law |
| $y(t - \tau)u(t - \tau)$ | $e^{-s\tau} Y(s)$ | Delay |
| $ty(t)$ | $-\frac{dY(s)}{ds}$ | |
| $t^2y(t)$ | $(-1)^2 \frac{d^2Y(s)}{ds^2}$ | |
| $\int_0^t f_1(\tau)f_2(t - \tau) d\tau$ | $F_1(s)F_2(s)$ | Convolution |
| $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$ | $\lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$ | Final Value Theorem |
| $\lim_{t \rightarrow 0^+} y(t)$ | $\lim_{s \rightarrow \infty} sY(s)$ | Initial Value Theorem |
| $f_1(t)f_2(t)$ | $\frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F_1(s)F_2(s - \zeta) d\zeta$ | Time domain product |
| $e^{at}f_1(t)$ | $F_1(s - a)$ | Frequency Shift |

| $f(t)$ | $\mathcal{F}\{f(t)\}$ | Description |
|---|---|-----------------------|
| $\sum_{i=1}^n a_i f_i(t)$ | $\sum_{i=1}^n a_i F_i(j\omega)$ | Linearity |
| $\frac{dy(t)}{dt}$ | $j\omega Y(j\omega)$ | Derivative law |
| $\frac{d^2y(t)}{dt^2}$ | $(j\omega)^2 Y(j\omega)$ | High order derivative |
| $\int_0^t y(\tau) d\tau$ | $\frac{1}{j\omega} Y(j\omega) + \pi Y(0)\delta(\omega)$ | Integral law |
| $y(t - \tau)$ | $e^{-j\omega\tau} Y(j\omega)$ | Delay |
| $y(at)$ | $\frac{1}{ a } Y\left(\frac{j\omega}{a}\right)$ | Time scaling |
| $y(-t)$ | $Y(-j\omega)$ | Time reversal |
| $\int_0^t f_1(\tau)f_2(t - \tau) d\tau$ | $F_1(j\omega)F_2(j\omega)$ | Convolution |
| $y(t)\cos(\omega_c t)$ | $\frac{1}{2} [Y(j\omega - j\omega_c) + Y(j\omega + j\omega_c)]$ | Modulation (cosine) |
| $y(t)\sin(\omega_c t)$ | $\frac{1}{2j} [Y(j\omega - j\omega_c) - Y(j\omega + j\omega_c)]$ | Modulation (sine) |
| $F(t)$ | $2\pi F(-j\omega)$ | Symmetry |
| $f_1(t)f_2(t)$ | $\frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F_1(s)F_2(s - \zeta) d\zeta$ | Time domain product |
| $e^{at}f_1(t)$ | $F_1(j\omega - a)$ | Frequency shift |

▲图8 时域和频域的相互关系

对系统来说，在time domain跟frequency domain中的系统需求是可以等价转换的。系统在时域中的要求、响应、数学表达跟频域是可以相互对应的。

此外，系统性能要求还有一些其它的考量指标，如图9所示。

9

System Performance Requirement - Additional

- **Desired behavior.** This needs to be specified as part of the design problem.
 - **Feasibility.** This means that the solution must satisfy various constraints, which can be of technical, environmental, economic or other nature.
 - **Uncertainty.** The available knowledge about a system will usually be limited and of limited accuracy.
 - **Action.** The solution requires that action be somehow applied to the process typically via one or more manipulated variables which command the actuators.
 - **Disturbances.** The process to be controlled will typically have inputs other than those that are manipulated by the controller. These other inputs are called disturbances.
-
- **Approximate behavior.** A feasible solution will rarely be perfect. There will invariably be a degree of approximation in achieving the specified goal.
 - **Measurements.** These are crucial to let the controller know what the system is actually doing and how the unavoidable disturbances are affecting it.

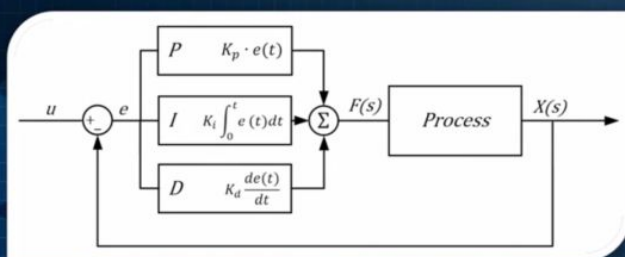
▲图9 满足系统性能要求的额外考量指标

前面介绍了自动驾驶系统需要满足一些性能需求，如果没有控制器的话，这些性能指标可能难以满足，这就是为什么在自动驾驶系统中需要引入控制器的原因。

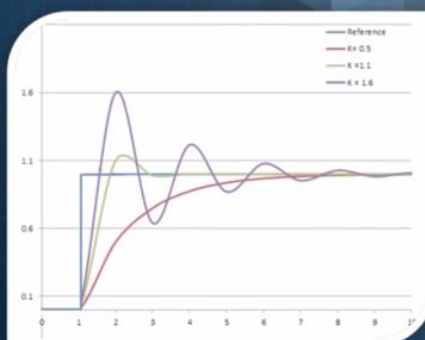
那么怎么样设计出好的控制模块呢？最简单的控制器就是**PID控制器**，即比例、积分、微分控制，它是一个**model free**的控制方法，也就是说PID控制具有通用性。PID控制的基本原理如图10所示。

10

Design Model Free Control Module



"Introduction: PID Controller Design". University of Michigan.



▲图10 PID 控制器

U是参考量，它和反馈信号之间的差距用**error**表示，即图中的e。比例控制P的意思是该控制量与误差成比例，用 **$k_p \cdot e(t)$** 表示。当kp比较小的时候，接近终值的速度会非常慢，如右图的红线所示，但

是它有超调与undershoot现象。当 k_p 设置比较大时，则达到稳态速度变快，但会超调，如右图紫色曲线所示。如果系统中存在损耗，比如汽车上坡的动力或者摩擦损耗，使得比例控制每次增加的控制量就等于或者小于损耗时，出现稳态误差，这就是引入积分控制的目的，它可以将之前的误差进行积分，消除稳态误差。而微分控制的目的是**使系统更快的从瞬态转化为稳态**。系统的控制量就是 $P+I+D$ 三项的和。

