

# 第1章 绪 论

## 1 从汽车巡航控制谈起



图 1. 汽车巡航控制系统

汽车定速巡航控制系统是现在日常生活中常遇到的控制系统, 如图 1 所示. 如何使得汽车受到干扰 (主要由道路坡度变化、路面摩擦等因素引起的干扰) 时仍然能够以给定的期望速度行驶?

- 发动机产生必要的转矩, 通过齿轮和车轮的传动, 产生使汽车车体前进的拉力. 由于道路坡度及路面摩擦等因素, 存在影响汽车速度的阻力, 有必要根据汽车速度, 实时调整发动机转矩大小. 此时, 为了达成定速巡航目标, 发动机、齿轮、车轮和汽车车体相互影响 (作用) 形成汽车定速巡航系统.

这里出现了“系统”的概念: 为了达成某种目标, 相互作用的功能组合体称为**系统**.

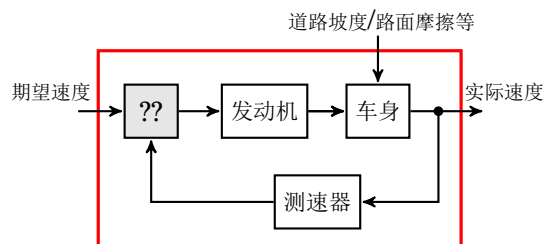


图 2. 汽车定速巡航系统的示意图

- 为简单起见, 我们通常将齿轮、车轮、车体简称为车身. 用于测量汽车速度的组件称为测速器. 汽车定速巡航系统各组成部分的相互关系由图 2 所示. 组成部分之间的连线表示系统中信号的流动.

根据图 2, 可以定性的分析汽车定速巡航系统的运行过程. 当车辆启动时, 汽车行驶速度明显低于期望速度. 此时, 通过增大油门, 增大发动机转矩, 提升汽车前进的拉力, 使得拉力大于阻力. 根据牛顿力学知识, 汽车的速度会一直增加, 直到超过期望速度. 此时, 减小油门, 使得拉力小于阻力, 汽车的速度开始降低. 当速度减小至低于期望速度时, 增大油门. 如此循环地执行增大和减小油门动作, 可以使得汽车速度将围绕期望速度上下波动, 实现定速巡航目标.

- 在这个实例中, 使得汽车以期望速度行驶所做出的增大或减小油门动作就是一种控制。  
控制被定义为: 为了达成某种目标, 施加于对象/过程的必要操作。
- 控制系统则定义为: 由相互连接的元部件组成的系统结构, 能够提供期望的系统响应。

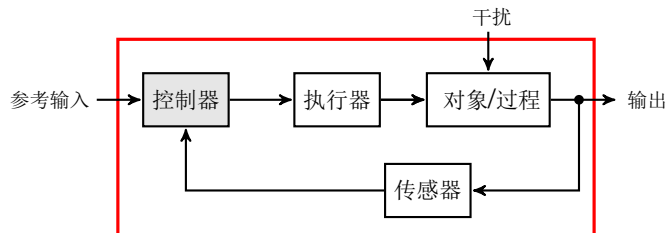


图 3. 控制系统组成结构

- 从该实例中, 可以初步认识到控制系统的一般组成结构, 如图 3.
  - ▶ 执行器: 可以用来改变过程被控变量的装置, 如发动机;
  - ▶ 传感器: 可以用于测量被控变量的组件, 如测速器;
  - ▶ 控制器: 用于计算控制信号的组件。

汽车的定速巡航控制问题可以描述为: 设计控制器, 使得系统即使受到干扰影响, 仍能在满足稳定前提下使得其输出渐近跟踪参考输入/参考值。

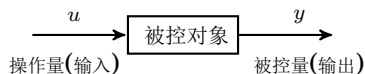


图 4. 被控对象、被控量和操作量的关系

- 为简化分析与设计, 本课程将执行器、过程及传感器合称为被控对象. 被控对象的输出一般被称为被控量, 外部输入包含无法改变的干扰以及可以改变/设计的输入. 可以改变/设计的输入也被称为操作量. 被控对象、被控量和操作量的关系如图 4 所示. 因此, 控制是为了使被控制对象的被控量达到预期值而对操作量进行操控。

## 2 控制基本概念

操控操作量的方法有两种:

- 手动控制: 由人对被控对象进行监测并确定操作量的控制方式;
- 自动控制: 在没有人直接参与的情况下, 利用外加的设备或装置(控制系统、控制装置、控制器)使机器、设备或生产过程(被控对象)的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。

控制系统结构通常分为如下三种

- 开环/前馈控制系统: 在没有反馈被控量信息的情况下, 利用执行机构直接控制受控过程, 如图 5;

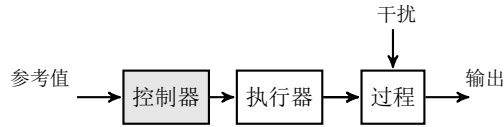


图 5. 前馈控制系统

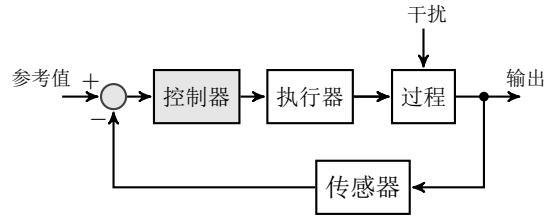


图 6. 反馈控制系统

- 闭环/反馈控制系统: 使用传感器测量被控变量, 然后把测量信号反馈给控制器, 通过控制器对被控变量产生作用, 如图 6;

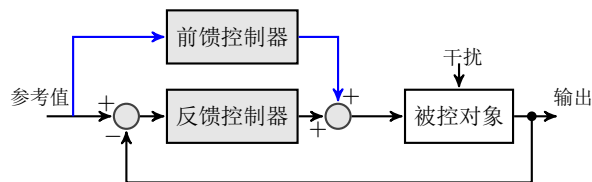


图 7. 复合控制系统

- 复合控制系统: 同时存在前馈与反馈的控制系统, 如图 7.

声明: 本课程重点讨论自动控制方式下的反馈控制系统.

### 3 反馈分析

为了证明反馈控制的价值, 我们回到汽车定速巡航控制系统实例. 为简单起见, 忽略汽车的动态响应, 仅考虑汽车的稳态行为 (注意: 动态特性是本课程涉及的主要内容). 假设:

- 1) 系统的各种关系近似为线性的;
- 2) 汽车以 105 km/h 的速度在水平路面行驶时, 油门每改变  $1^\circ$  的角度, 会引起速度变化 8 km;
- 3) 当路面坡度改变 1% 时, 速度变化 4 km.

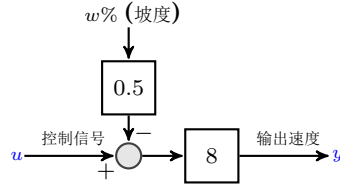


图 8. 定速巡航系统的方框图

根据上述关系, 可以绘制汽车定速巡航系统的方框图, 如图 8. 其中, 各连线表示信号的流动, 每个方框代表一个输入输出关系, 可以视为理想放大器. 用方框内的数值 (或矩阵) 乘以输入端的信号得到输出信号. 为了对两个或更多信号进行加法运算, 我们用信号线流入加法器来表示, 加法器用一个圈表示. 加法器的每个箭头用  $+$  或  $-$  符号表示该信号是加入到总信号还是从总信号中减去.

在下面的分析中, 设定期望速度为  $r = 105 \text{ km/h}$ , 然后比较有反馈和没有反馈 (即前馈) 两种情况下, 坡度对输出速度的影响.

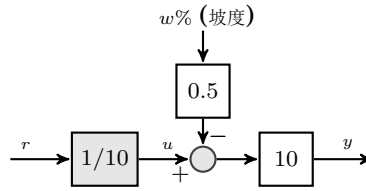


图 9. 开环巡航控制系统

- 开环/前馈控制系统:

如图 9, 控制器没有利用测速器的读数, 而是令  $u = \frac{1}{8}r$ . 此时系统输出为

$$\begin{aligned} y_{ol} &= 8(u - 0.5w) \\ &= 8\left(\frac{1}{8}r - 0.5w\right) \\ &= r - 4w \end{aligned}$$

其输出误差为

$$e_{ol} = r - y_{ol} = 4w$$

对应的误差百分比为

$$e_{ol}/r = \frac{4w}{r}$$

- ▶  $w = 0$ :  $e_{ol} = 0$ ;
- ▶  $w = 1$ :  $e_{ol}/r = 3.81\%$ ;
- ▶  $w = 10$ :  $e_{ol}/r = 38.1\%$ .

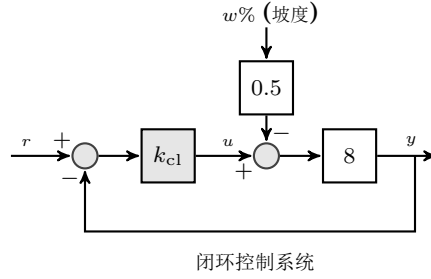


图 10. 闭环巡航控制系统

● 闭环/反馈控制系统:

如图 10, 控制器被设定为  $u = k_{cl}(r - y_{cl})$ . 此时系统输出满足关系式

$$\begin{aligned} y_{cl} &= 8(u - 0.5w) \\ &= 8(k_{cl}(r - y_{cl}) - 0.5w) \end{aligned}$$

由此解得输出

$$y_{cl} = \frac{8k_{cl}}{1 + 8k_{cl}}r - \frac{4}{1 + 8k_{cl}}w$$

其输出误差为

$$e_{cl} = r - y_{cl} = \frac{1}{1 + 8k_{cl}}r + \frac{4}{1 + 8k_{cl}}w$$

对应的误差百分比为

$$e_{cl}/r = \frac{1}{1 + 8k_{cl}} + \frac{4w}{(1 + 8k_{cl})r}$$

选择  $k_{cl} = 10$  时, 计算可得:

- ▶  $w = 0$ :  $e_{cl}/r = 1.23\%$ ;
- ▶  $w = 1$ :  $e_{cl}/r = 1.28\%$ ;
- ▶  $w = 10$ :  $e_{cl}/r = 1.70\%$ .

选择  $k_{cl} = 100$  时, 计算可得:

- ▶  $w = 0$ :  $e_{cl}/r = 0.125\%$ ;
- ▶  $w = 1$ :  $e_{cl}/r = 0.130\%$ ;
- ▶  $w = 10$ :  $e_{cl}/r = 0.172\%$ .

通过上述分析, 可以得到如下结论:

- ▶ 对于开环/前馈控制系统而言, 在标称 ( $w = 0\%$ ) 情形时可以“完美”实现控制目标, 但易受外部干扰、系统参数变动影响;
- ▶ 对于闭环/反馈控制系统而言, 在标称 ( $w = 0\%$ ) 情形时仍然存在 (但较小的) 误差, 但可以降低外部干扰、参数变化对系统输出的影响, 并且可以通过增大控制增益实现减少误差;

注意, 控制增益不能无限制增大, 过大的控制增益会是的系统响应变差, 并会导致闭环系统不稳定.

## 4 控制实例

- 汽车控制系统
- 航空航天系统
- 机器人
- 智能材料
- 金融
- ...

## 5 控制历史回顾

详细阅读参考文献 [2].

## References

- [1] G. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini, 李中华等译, 《自动控制原理与设计 (第 6 版)》, 电子工业出版社, 2014 年.
- [2] 黄一, 走马观花看控制发展简史, 《系统与控制纵横》, vol. 8, no. 1, pp. 19–43, 2021.