



Course

Principle of Automatic Control I

Instructor: 李世华

PhD., Prof., SMIEEE
Director of Mechatronic Systems Control
Vice Dean of School of Automation
Southeast university

Any comments, please feel free to contact me
(中心楼 608, E-mail: lsh@seu.edu.cn, Tel.:83793785(o), 13913881900)

Course Introduction

课程特点:

是高校**电类学科**各专业的**一门重要专业基础课**;

(自动化、电气、仪科、无线电、电子、机械、数学、交通等)

是从事**系统分析与设计**的技术人员所必须**掌握**的一门**专业课**。

Course Introduction

课程教材:

田玉平主编,自动控制原理(第二版),科学出版社,06

主要参考书:

- 1.胡寿松主编,自动控制原理,科学出版社,2004
- 2.吴麒主编,自动控制原理,清华大学出版社,1992
3. K. Ogata, Modern Control engineering (Third edition), Prentice Hall, 1998

Course Introduction

课程主要任务:

理解自动控制系统和反馈控制的基本概念;
掌握建立控制系统数学模型的基本方法;
掌握分析控制系统稳定性、动态性能和稳态性能的时域和频域方法;
掌握校正控制系统的常用方法。

每章内容在控制系统分析和设计中作用

- Chap 1: 绪论, 自动控制系统基本概念
- Chap 2: 系统的模型(根据系统工作机理得到模型)
- Chap 3: 系统的状态空间模型(另外一个模型体系)
- Chap 4: 控制系统稳定性分析 (稳定压倒一切)
- Chap 5: 控制系统运动性能分析(不同稳定系统的性能优劣分析和提高)
- Chap 6: 系统校正方法(性能不够好, 添加环节, 改变系统模型→改善性能)
- Chap 7: 线性系统的状态空间分析(现代控制理论)
- Chap 8: 非线性系统(经典的非线性分析设计工具)

第一章 绪论

1.1 引言

什么是

自动控制?

(Automatic Control)

什么是

自动控制系统?



自动控制—在**人不直接参与**的情况下, 能够使某些被控量按指定的规律变化。

(操作的不精确性, 不稳定性, 工作场所危险性, 低效率)

第一章 绪论

1.1 引言

一、自动控制是一门技术科学

研究内容：构成自动控制系统的一般规律。

研究对象：各种各样的自动控制系统，例如连续系统、离散系统。

研究手段：现代数学分析工具。

拉普拉斯变换和传递函数-经典控制理论
矩阵理论等工程数学-现代控制理论

1.1 引言

二、自动控制理论的发展

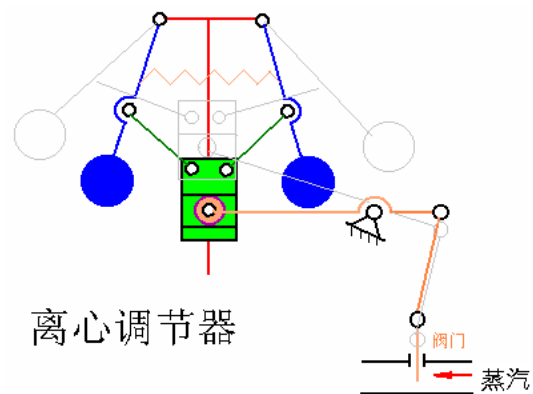
自动控制理论的产生和发展是和工业技术的发展紧密相联。

1. 经典控制理论的发展
2. 现代控制理论的发展
3. 当代控制理论的发展

1. 经典控制理论的发展

自动控制领域中的**第一项重大成果**

18世纪(1788)**James Watt**(英国格拉斯哥大学仪器修理工)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器



1. 经典控制理论的发展

离心调节器装置缺点：易于**振荡**，稳定性能或动态性能不好，有稳态误差。

(书中4、5章的内容涉及到这个问题)

1868, **J.C.Maxwell** (剑桥大学)才对这一系统的动态特性进行了分析。第一个对反馈控制系统的稳定性进行系统分析并发表论文的人,“论调节器”(On Governors),导出了调节器的微分方程,指出稳定性取决于线性化特征方程的根是否具有负实部。



→ Routh-Hurwitz判据(1877,1895)

俄国**A·M·Lyapunov**博士论文《论运动稳定性的一般问题》(1892年)

1. 经典控制理论的发展

第一次世界大战爆发后, **军事工业的需要**召唤了自动控制理论的发展。

为什么需要控制理论?

原来随意、盲目、不知道设计出来的控制系统会不会崩溃, 理论对控制系统设计的指导性.

例如保证稳定性、性能最优(能量最小或时间最快)。

1. 经典控制理论的发展

1922年米纳斯基 (Minosky) 首先研制出船舶操纵自动控制器, 并给出了控制系统的稳定性分析(微分方程, Chap 4)。

1932年Bell实验室的奈魁斯特 (Nyquist) 提出一种利用系统频率特性图确定系统稳定性的简便方法(Chap 4)

1934年赫曾 (Hezen) 首次提出“伺服(servo)”的概念, 讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器伺服机构。

1. 经典控制理论的发展

➤ 第二次世界大战, 由于设计和建造飞机自动驾驶仪、大炮定位系统、雷达跟踪系统等军用装备的需要, 自动控制理论取得了长足的进步。

➤ 二战的战备要求使得各种运筹方法、控制方法, 博弈方法都得到了很大的发展。

由于战争的需要提出了各种实际问题, 如何布置炮火防御系统以便更好消灭敌方飞机的空袭, 如何搜索目标以便发现潜艇, 如何计算火炮发射提前量以便对付高速飞行的飞机等

1. 经典控制理论的发展

➤ 大批科学家转到了为国防、军事服务的方向上来; 使得一些军事上的科学研究问题得以很快的解决, 并从中提出一些新的概念方法。

➤ 二战结束以后, 科学工作者将战时研究的实际问题进行理论上的提高和升华, 建立了:

运筹学(Operational research)

管理科学(Management Science)

控制论 (Cybernetics源于希腊语, 意思是舵手)

及信息论(Information Theory)等

1. 经典控制理论的发展

➤ 控制论的先驱——诺伯特·维纳(N·Wiener)

美国数学家(1894.11-1964, 犹太人)。控制论的创始人。12岁入土夫兹学院学习, 15岁获数学学士学位。1913年以关于数理逻辑的论文获哈佛大学博士学位。

(18岁, $18^3=5832$, $18^4=104976$)



其后到欧洲从师于英国剑桥大学罗素和哈代、德国哥廷根大学希尔伯特等人。1919年到麻省理工学院任讲师之后, 开始了他的数学学术生涯。1932年以后一直为该校教授。1933年成为美国国家科学院院士。

维纳早期曾在数理逻辑、概率论、巴拿赫空间、布朗运动和分析等方面取得过重大成果。他同中国科学家李郁荣合作建立了“维纳滤波”。

1. 经典控制理论的发展

➤ 维纳在二战期间从事雷达和防空火力控制系统研究, 建立了控制论, 1948年出版名著

《控制论, 或关于在动物和机器中控制与通信的科学》

➤ 控制论(Cybernetics)是:

自动控制
电子技术
无线电通讯
数理逻辑
计算机技术
统计力学

神经生理学、心理学、医学
等多种学科相互渗透的产物。

1. 经典控制理论的发展

➤ 1942年 Harris引入了传递函数的概念。

➤ 1945年Bell实验室伯德 (Bode) 发表了关于控制系统频域设计方法的经典著作

➤ 稍后AT&T伊万思 (Evans) 提出了根轨迹方法。

➤ 至此, 以

频率特性法
根轨迹法
时域法

为核心的经典控制理论的框架已构建完毕。

2. 现代控制理论的发展

- 20世纪60年代，数字计算机的出现为复杂系统的基于时域分析的现代控制理论提供了可能。
- 从1960年到1980，基于状态空间方法的卡尔曼（Kalman）滤波理论，最优控制理论，自适应控制，在这一期间提出并得到发展。

3. 当代控制理论的发展

- 科技高速发展对于复杂环境下，复杂任务要求下，高性能要求下复杂系统的控制问题提出了更高的要求。
- 现代自适应控制，鲁棒控制方法被提出并得到发展。
- 引入了人工智能，运筹学思想的智能控制方法提出并得到迅速发展。

控制理论发展史上的著作

- 香农(Claude Elwood Shannon,1916-)的论文：《通讯的数学理论》(A Mathematical Theory of Communication) 1948年,奠定了信息论的基础。
- 控制论创立者维纳（Norbert Wiener）的经典论著：《控制论》，1948
- 钱学森(1911-2009),“中国航天之父”和“火箭之王”：《工程控制论》(Engineering Cybernetics. 1954)，从技术科学的观点，对各种工程技术系统的自动控制理论作了全面研究。
- 在中国，1954年出版了由刘豹编写的第一本《自动控制原理》专著（上海：中国科学图书仪器公司.1954）

1.1 引言

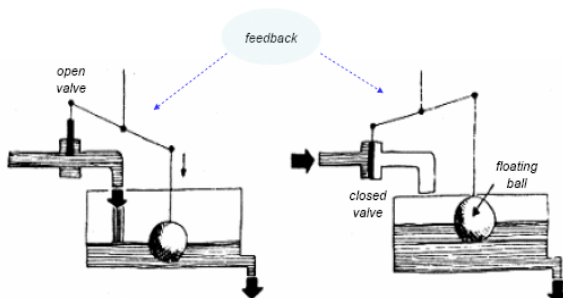
三、自动控制的应用举例

- (1)航空、航天和国防工业中：宇宙飞船系统、导弹制导系统和飞机的自动驾驶仪系统——复杂控制系统。
- (2)现代制造业和工业自动化生产过程：数控机床，工业过程中的流量、压力、温度、湿度的控制
- (3)新型应用：机器人控制、城市交通控制、信息技术中网络拥塞控制等

Lorenzo Farina,
Italy

Water level control

Note:请留心身边的控制系统，人类高度智能的体现！



1.1 引言

四、总结

- (1) 控制技术在工业应用 **呼唤/促进** 理论的形成、发展和完善
- (2) 控制的对象变化：
单输入/单输出(SISO) → 多输入/多输出(MIMO)
线性系统 → 非线性系统
确定性系统 → 不确定系统、随机系统
- (3) 控制的_{任务}变化：
输出定值、跟踪期望轨迹 → 复杂任务：例如智能机器人、计算机集成制造(CIMS)

Chap. 1 绪论

1.2 自动控制系统的构成

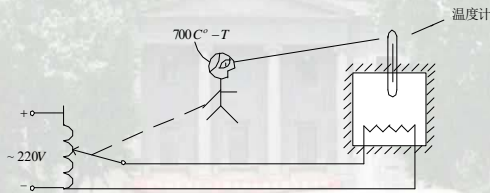


图1.1 手动控制电加热炉

1.2 自动控制系统的构成

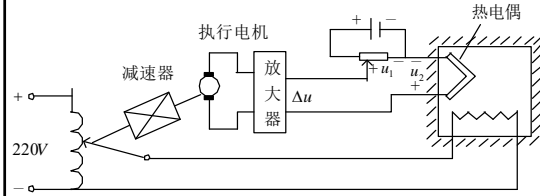


图1.2 自动控制电加热炉

为什么温度计换成热电偶？给定值如何实现？
比较如何实现？为什么用放大器？

1.2 自动控制系统的构成

- 手动与自动控制电加热炉分析

任务：控制炉温在给定值。

测量：温度计——**热电偶**温度计

比较：通过人眼观察温度计读数，在人脑中比较——
电路自动进行电压值比较

控制：根据比较结果(温度偏高或偏低)手动调节加热电阻丝两端的电压——**电压差值正负决定电机转向，最终控制加热电阻丝两端的电压。**

- 自动控制的优点：**各类信号的自动传递！**
不用人工干预，提高效率，精度提高。

1.2 自动控制系统的构成

- 自动控制系统特点
从测量——比较——控制——测量的**闭合回路**
信号的处理回路
- 在分析系统工作原理时，一般采用一个框图来描述系统的工作原理。

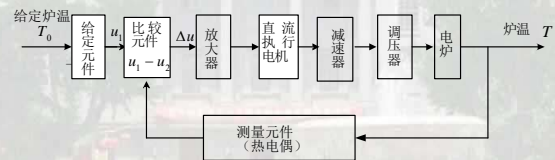


图1.3 系统构成框图

1.2 自动控制系统的构成（六大元件）

- **整定元件**：也称给定元件，给出被控量应取值：图1.2系统中的电位器。
- **测量元件**：检测被控量的大小,如热电偶，测速电机等
- **比较元件**：用来得到给定值与被控量之间的误差：常用差动放大器、电桥等。
- **放大元件**：用来将误差信号放大，用以驱动执行机构。它可以是电子元件网络，也可以是电机放大器等。
- **执行元件**：用来执行控制命令，驱动被控对象。电机是典型的执行元件。
- **校正元件**：用来改善系统的动、静态性能，模拟/数字电路来实现，也可以用计算机程序来实现。
- **能源元件**：用来提供控制系统所需的能量。

常见的一些专用术语

- **被控量和控制量 (Controlled variable and controlling variable) :**

被控量是指被测量和被控制的量或状态，如上述系统中的**炉温**。

控制量是一种由控制器改变的量或状态，它将影响被控量的值，如上述系统中加热电阻丝两端的**电压**。

被控量通常是系统的**输出量**，而控制量则是**输入量**。

常见的一些专用术语

- **(被控)对象 (Plant)**：它一般是一个设备，通常由一些机器零件有机的组合在一起，我们通常将被控物体称为对象，如电加热炉。
- **系统 (system)**：系统是一些部件的组合，这些部件组合在一起，完成一定的任务。物理系统，广义的系统
- **扰动 (disturbance)**：扰动是一种对系统的输出量产生不利影响的因素或信号。

内部扰动--如果扰动来自于系统内部
例如：电源电压的波动

外部扰动--如果扰动来自于系统外部
例如：电加热炉中被加热物体的增多或减少。

1.2 自动控制系统的构成

- 简单的系统框图只用到：
控制器+对象+比较器。

第一章 绪论

1.3 自动控制的基本原理

- 一、开环(open loop)系统



优点：设计简单，实现简单，成本低。 调压实例：假设系统无惯性...

缺点：抗干扰差，控制精度低。应用场合有限。

1.3 闭环控制和开环控制

- 二、闭环控制(closed loop)
反馈控制 (feedback control) 原理是设计自动控制系统的**最基本原理**。

反馈的定义：

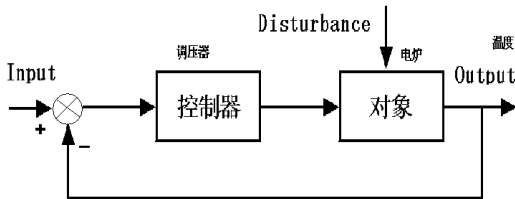
将被控输出量**反向传递**到系统的输入端并与**给定**输入信号**比较**，根据所得的**偏差**信号来实现对被控量的**控制**(在有不可预知的**扰动**的情况下，使得输出量与给定量之间的偏差尽可能小)。

由于在这种控制系统中，信号的流程构成一个**闭环**，所以也称为**闭环控制**。

1.3 闭环控制和开环控制

- (1) 反馈的本质：利用偏差进行控制。
- (2) 反馈的两大作用：形成闭环控制，可使系统从不稳定到稳定，**提高稳定性**；**抑制扰动**，精度高。

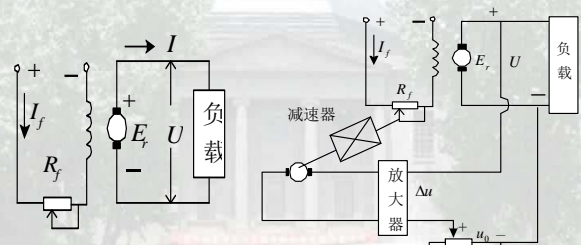
Why?



调压实例：假设系统无惯性...

- (3) 绝大多数控制系统都是反馈系统。
早期最典型的例子：1788年**James Watt**设计的蒸汽机系统(离心调节器)

1.3 闭环控制和开环控制



$$U = E_r - IR - L \frac{dI}{dt}$$

$$E_r \propto I_f$$

图 1.5

对扰动有较好的抑制作用，为什么？

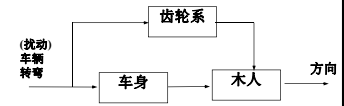
原因：与开环比较，干扰和控制输入同样作用于被控对象上，但干扰引起的系统偏差通过闭环同样出现在给定值与实际值的偏差项中，可以被反馈抑制。

1.3 闭环控制和开环控制

三、前馈(顺馈)控制(feedforward compensation)



中国古代的指南车(公元前2689-78)



1960年代—扰动补偿控制原理！

设计思想：

对于扰动可以测量或者估计的情况，可以直接将扰动折算到系统输入端，对控制量的大小进行修正(补偿控制)

1.3 闭环控制和开环控制

三、前馈(顺馈)控制(feedforward compensation)

对于扰动可以测量情况，可以直接将扰动折算到系统输入端，对控制量的大小进行修正(补偿控制)

I大, U小, U_m大, I_r大, E_r大, U大

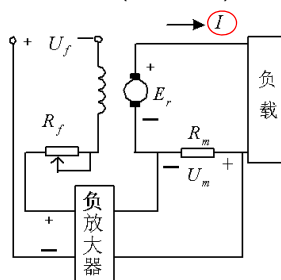
优点：简单经济, 精度提高。

缺点：仍是开环控制, 只抑制某种可测扰动, 有时甚至负作用。

速度n小, E_r小, U小; I小, U_m小, I_r小, U更小!

改进：复合控制=前馈+反馈

调压实例：如何设计前馈补偿...



1.4 控制系统的分类

一、恒值调节系统和随动系统(任务)

1. 恒值调节系统

(1)定义：恒值调节系统任务是保持被控制量为给定的常值。

例如实际系统：冰箱，炉温控制系统、电压控制系统

(2)主要问题是：如何抑制各种使系统输出量偏离常值的扰动。

(3)系统反应的灵敏性(快速响应)是次要矛盾,即惯性的问题在这里并不是主要矛盾

1.4 控制系统的分类

2. 随动系统

(1)定义：随动系统的任务是:保持被控制量跟随某个变化着的不能预知的量。

例如，跟踪系统，雷达高射炮的角度控制系统

(2)主要矛盾是如何克服系统的惯性，使之能随被跟踪信号而灵活地变动，

(3)抗干扰问题降为次要矛盾。

1.4 控制系统的分类

二、线性系统和非线性系统(系统的特性)

1. 物理定义：

凡是具有叠加性和齐次性的系统称为线性系统，否则称为非线性系统。

叠加性是指： $u_1 \rightarrow y_1, u_2 \rightarrow y_2 \rightarrow u_1+u_2 \rightarrow y_1+y_2$

齐次性是指： $u \rightarrow y \rightarrow ku \rightarrow ky$

(1) $y=3u+2$, (2) $y=du/dt+u$,

(3) $y=u(u-1)$, (4) $y=usint$

Note: 与线性函数区别!!

1.4 控制系统的分类

2. 数学定义

凡是用线性方程（线性微分方程、线性差分方程或线性代数方程等）描述的系统，称为**线性系统**；

用非线性方程描述的系统称为**非线性系统**。

线性系统控制理论：较为完善

原因：良好的性质(叠加原理)，好分析，数学工具较为成熟

1.4 控制系统的分类

• 实际的应用，可以用线性系统理论来处理非线性系统，为什么？

(1)绝对的线性系统在自然界和工程实际中是**不存在**的，实际系统严格说来都是非线性的。**非线性程度不高的系统，可近似看作线性系统来处理。**

例如：热电偶特性，许多传感器的非线性特性

(2)即使是一般的非线性系统，也通常可以在其工作点附近进行线性化，在一定范围内将它当作线性系统来处理。

泰勒展开

1.4 控制系统的分类

三、定常系统和时变系统（参数随时间）

定常系统又称为时不变系统，

$$u(t) \rightarrow y(t) \rightarrow u(t-m) \rightarrow y(t-m)$$

时变系统中含有时变元件，其数学模型中某些参数随时间而变化。航天卫星系统,电机定子绕组

(1)时变系统的分析比定常系统要困难得多。

(2)对大多数工业系统来说，其参数随时间变化并不明显，通常可以当作定常系统来处理。

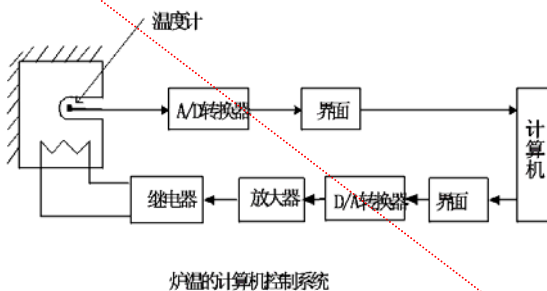
1.4 控制系统的分类

• 四、连续系统和离散系统（信号的特点）

连续系统中各部分的信号均是时间变量的连续函数，描述它的数学模型是**微分方程**。

有些系统中某处或多处的信号为脉冲序列或数码的形式，这些信号变量在时间上是**离散**的，这样的系统称为**离散系统**。

1.4 控制系统的分类



1.4 控制系统的分类

五、集中参数与分布参数(与系统的空间分布有关)

集中参数：参数不是按空间分布的系统，可以用有限个状态(常微分方程)描述。

分布参数系统：参数与空间分布有关，不能用有限个状态描述。

许多物理系统都是，例如：对于长线来说,随着传输线长度的不同，或是沿线传播电磁波的波长不同,在传输线上本身就具有分布电容和分布电感。

近似用集中参数代替。

1.5 控制系统的性能和典型测试信号

1.5.1 控制系统的基本要求

稳定性 (stability)

瞬态性能 (dynamic performance)

稳态性能 (static performance)

稳定系统的性能优劣比较→改善

- 瞬态/动态响应-指系统从初始输出到最终输出的响应过程 (品质问题) 惯性, 阻尼
- 稳态响应是指当时间 t 趋于无穷大时系统的输出 (精度问题) 系统输出最终复现输入的程度。

考虑空调系统?

例子

2007年8月6-12日上海国美空调销售排行榜监测

排名	产品型号	价格
1	三菱电机空调MSH-EC12VD	3400
2	日立空调RAS/C-A36MH	3080
3	美的空调KFR-35GW/DY-MG(E5)	2524
4	春兰空调KFR-32GW/T101	2630
5	海尔空调KFRD-35GW/HC(F)套机	2700
6	美的空调KFR-23GW/DY-J(E5)	2137
7	日立空调RAS/C-A26BH	2550
8	松下空调HA4009KB	3190
9	日立空调RAS/C-A33BH	2900
10	志高空调KFR-35GW/ED(E46B)+5	2380

三菱电机空调产品性能说明

全新设计遥控器
 室外机卓越的耐久品质
 绿色信号, 省电看得见
 I FEEL体感控制, 冷热一指间
 强劲制冷运转, 快速制冷除湿
 电子除湿
 自我诊断
 保护电路
 低震动, 低噪音
 旋转式压缩机
 制冷、制暖、效果出众

1.5.2 控制系统的典型测试信号

分析和设计控制系统时, 对各种控制系统性能应该有评判或比较的依据。

往往通过**典型输入信号**对系统的运动性能进行测试;
 对系统输出响应进行分析;
 据此进行控制系统设计;
 对设计好的控制系统同样可以进行响应性能分析。

1. 脉冲函数(Impulse)

$$r(t) = A\delta(t) \quad \begin{cases} \delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1 \end{cases}$$

A 为脉冲函数的阶跃值

$$L[\delta(t)] = 1 \quad Z[\delta(t)] = 1$$

实际脉冲

$$\delta_{\Delta}(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \text{ 与 } t > \Delta \text{ 时} \\ \frac{1}{\Delta}, 0 \leq t \leq \Delta \text{ 时} \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta_{\Delta}(t)dt = \Delta \times \frac{1}{\Delta} = 1$$

2. 阶跃函数 (Step)

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases} \quad A \text{为阶跃值}$$

$$L[r(t)] = \frac{A}{s} \quad Z[r(t)] = \frac{Az}{z-1}$$

3. 斜坡函数（或速度阶跃函数）

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Bt & t \geq 0 \end{cases} \quad B \text{ 为速度阶跃值}$$

$$L[r(t)] = \frac{B}{s^2} \quad Z[r(t)] = \frac{BTz}{(z-1)^2}$$

4. 抛物线函数（或加速度阶跃函数）

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2} Ct^2 & t \geq 0 \end{cases} \quad C \text{ 为加速度阶跃值}$$

$$L[r(t)] = \frac{C}{s^3} \quad Z[r(t)] = \frac{CT^2 z(z+1)}{2(z-1)^3}$$

5. 正弦函数

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} A \text{ 为正弦函数的阶跃值,} \\ \omega \text{ 为频率} \end{array}$$

$$L[r(t)] = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \quad Z[r(t)] = \frac{Az \sin \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$$

本章总结

- 本课程讨论内容：
自动控制理论的一些基本概念
对象：定常系统：线性(重点)和非线性，
连续和离散情况
集中参数(有限维)系统
方法：经典理论分析方法：时域法、根轨迹法、
频域法
- 自动控制原理II内容：状态空间法(Chap 7)，非线性系统分析(Chap 8)