

# 自动控制基础

曾乐生 编著



北京理工大学出版社

# 自动控制基础

曾乐生 编著

北京理工大学出版社

〔京〕新登字149号

### 内 容 简 介

本书介绍常用的自动控制元件(比较元件、放大元件、执行元件、校正元件)、自动控制理论(经典线性连续系统与离散系统理论)、自动控制系统设计初步及系统线路示例。全书内容丰富,叙述简明扼要,理论紧密结合实际。可作高等学校工科非自控专业本科生的教材。也可供工程技术人员参考。

### 自 动 控 制 基 础

曾乐生 编著

\*

北京理工大学出版社出版发行

各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印刷

\*

850×1168毫米 32开本 13印张 335千字

1993年8月第一版 1993年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-760-3/TP·88

印数: 1—4000册 定价: 6.20元

# 前 言

现代科学技术的迅速发展,新兴学科的不断出现和高精尖技术的广泛用于生产实践,使得自动控制技术已成为高等院校各工科专业学生必须掌握的基础知识。《自动控制基础》一书就是为了适应这种需要而编写的。全书共分十章及有关附录,第一章介绍自动控制系统的基本概念、系统的结构组成、数学模型和系统的性能指标;第二、三、四章分别简要介绍控制系统中常用的比较元件、放大与变换元件及执行元件的基本工作原理;第五、六、七章介绍自动控制理论的基本内容,即系统的时域分析、频率响应分析和根轨迹方法;第八章论述控制系统的设计内容、步骤和方法;第九章列举了三个具体的控制系统线路及它们的工作原理与数学模型;第十章介绍采样控制系统的基本理论。自动控制理论中用到的数学基础(如拉普拉斯变换)及几种常用元件的技术数据与校正电路特性以附录和图表形式安插在本书的末尾和有关章节中。本书的特点是综合常用的控制元件、控制原理与控制系统设计为一体,内容简明扼要,理论紧密结合实际,给非自控专业读者提供比较完整的自动控制方面的基础知识。

本书除可作高等学校工科专业教材外,也可供工程技术人员参考。

编写本书时,得到北京理工大学自动控制系、231教研室、校教材科及出版社的大力支持与帮助,并参考了许多文献;清华大学自动化系戴忠达教授负责审稿并提出了宝贵意见。在此,谨向以上单位的同志、文献作者、审稿者表示衷心感谢。

书中若有错误或不妥之处,请读者指正。

编著者

1992.1.

# 目 录

## 第一章 自动控制系统入门

|                     |        |
|---------------------|--------|
| § 1-1 引言            | ( 1 )  |
| § 1-2 开环控制与闭环控制     | ( 3 )  |
| § 1-3 自动控制系统的基本组成部分 | ( 5 )  |
| § 1-4 自动控制系统的性能指标   | ( 6 )  |
| 1 动态性能指标            | ( 6 )  |
| 2 稳态性能指标            | ( 7 )  |
| § 1-5 控制系统的线性化数学模型  | ( 9 )  |
| 1 非线性特性的线性化         | ( 10 ) |
| 2 建立数学模型的步骤         | ( 10 ) |
| 3 建模举例              | ( 11 ) |
| § 1-6 传递函数          | ( 16 ) |
| 1 传递函数的定义           | ( 16 ) |
| 2 传递函数的性质           | ( 19 ) |
| 3 传递函数的基本因子——典型环节   | ( 20 ) |
| § 1-7 系统方框图及其等效变换   | ( 32 ) |
| 练习题                 | ( 38 ) |

## 第二章 控制系统部件——比较元件

|              |        |
|--------------|--------|
| § 2-1 概述     | ( 41 ) |
| § 2-2 位置比较元件 | ( 42 ) |
| 1 电位计        | ( 42 ) |
| 2 自整角机与旋转变压器 | ( 46 ) |
| 3 感应同步器      | ( 51 ) |
| 4 差动变压器      | ( 53 ) |
| 5 三自由度陀螺仪    | ( 54 ) |
| 6 霍尔位移传感器    | ( 55 ) |
| 7 光电编码器      | ( 56 ) |

|                    |        |
|--------------------|--------|
| § 2-3 精—粗测角线路..... | ( 58 ) |
| 1 “假零”问题.....      | ( 60 ) |
| 2 信号选择电路.....      | ( 62 ) |
| § 2-4 速度测量元件.....  | ( 64 ) |
| 1 直流测速发电机.....     | ( 64 ) |
| 2 交流测速发电机.....     | ( 66 ) |
| 3 光电测速器.....       | ( 67 ) |
| § 2-5 温度测量元件.....  | ( 69 ) |
| 1 电阻温度计.....       | ( 69 ) |
| 2 热电偶.....         | ( 70 ) |
| 练习题 .....          | ( 72 ) |

### 第三章 控制系统部件——放大器、调制与解调器

|                    |        |
|--------------------|--------|
| § 3-1 电子放大器.....   | ( 73 ) |
| 1 晶体管放大器.....      | ( 74 ) |
| 2 线性集成电路运算放大器..... | ( 77 ) |
| § 3-2 磁放大器.....    | ( 81 ) |
| § 3-3 调制器与解调器..... | ( 84 ) |
| 1 调制器.....         | ( 85 ) |
| 2 解调器.....         | ( 87 ) |
| § 3-4 可控硅整流器.....  | ( 91 ) |
| 1 单向可控硅整流器.....    | ( 91 ) |
| 2 双向可控硅整流器.....    | ( 94 ) |
| § 3-5 交磁放大机 .....  | ( 95 ) |
| § 3-6 液压放大器 .....  | (100)  |
| 1 滑阀式液压放大器 .....   | (100)  |
| 2 喷嘴挡板式液压放大器.....  | (101)  |
| 3 针阀式液压放大器.....    | (111)  |
| 练习题 .....          | (102)  |

### 第四章 控制系统部件——执行元件

|                     |       |
|---------------------|-------|
| § 4-1 直流伺服电动机.....  | (104) |
| 1 直流伺服电动机的基本原理..... | (104) |
| 2 直流伺服电动机的传递函数..... | (105) |

|       |              |       |
|-------|--------------|-------|
| 3     | 直流伺服电动机的机械特性 | (107) |
| § 4-2 | 直流力矩电动机      | (112) |
| § 4-3 | 低惯量直流伺服电动机   | (113) |
| 1     | 杯形转子直流伺服电动机  | (114) |
| 2     | 无槽转子直流伺服电动机  | (115) |
| § 4-4 | 交流伺服电动机      | (115) |
| 1     | 交流伺服电动机的基本原理 | (115) |
| 2     | 交流伺服电动机的机械特性 | (117) |
| 3     | 交流伺服电动机的传递函数 | (117) |
| § 4-5 | 步进电动机        | (121) |
| § 4-6 | 液压马达与液压缸     | (126) |
| 练习题   |              | (127) |

## 第五章 控制系统的时域分析

|       |                       |       |
|-------|-----------------------|-------|
| § 5-1 | 控制系统的稳定性              | (129) |
| 1     | 稳定性的定义                | (129) |
| 2     | 系统稳定的必要与充分条件          | (130) |
| 3     | 劳斯(Routh) 稳定性判据       | (132) |
| § 5-2 | 控制系统的典型输入信号           | (139) |
| § 5-3 | 二阶系统的时间响应             | (140) |
| 1     | 阶跃输入时间响应              | (140) |
| 2     | 恒速输入时间响应              | (144) |
| § 5-4 | 高阶系统的时间响应             | (146) |
| § 5-5 | 系统参数对系统动态性能的影响        | (148) |
| 1     | 速度阻尼 $F$ 对系统动态性能的影响   | (151) |
| 2     | 放大系数 $K_0$ 对系统动态性能的影响 | (153) |
| 3     | 转动惯量 $J$ 对系统动态性能的影响   | (153) |
| § 5-6 | 系统的稳态误差               | (154) |
| 1     | 0型系统的稳态误差             | (155) |
| 2     | I型系统的稳态误差             | (156) |
| 3     | II型系统的稳态误差            | (157) |
| 4     | 误差系数                  | (158) |
| § 5-7 | 误差积分性能指标与最佳系统         | (163) |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 1 误差积分性能指标.....      | (164) |
| 2 四种误差积分性能指标的比较..... | (166) |
| 3 最佳系统的参数计算.....     | (167) |
| 练习题 .....            | (171) |

## 第六章 控制系统的频率响应分析

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| § 6-1 频率响应和频率特性的基本概念..... | (174) |
| § 6-2 频率特性的图形表示.....      | (178) |
| 1 幅相频率特性曲线.....           | (178) |
| 2 对数频率特性曲线.....           | (180) |
| 3 对数幅相特性曲线.....           | (183) |
| § 6-3 典型环节的频率特性.....      | (183) |
| 1 比例环节的频率特性.....          | (183) |
| 2 纯微分环节的频率特性.....         | (184) |
| 3 一阶微分环节的频率特性.....        | (186) |
| 4 积分环节的频率特性.....          | (187) |
| 5 惯性环节的频率特性.....          | (188) |
| 6 振荡环节的频率特性.....          | (189) |
| 7 二阶微分环节的频率特性.....        | (192) |
| § 6-4 控制系统的频率特性.....      | (193) |
| 1 开环系统的幅相频率特性.....        | (193) |
| 2 开环系统的对数频率特性.....        | (196) |
| 3 闭环系统的幅频特性.....          | (200) |
| § 6-5 奈魁斯特稳定判据.....       | (203) |
| 1 米哈依洛夫定理.....            | (204) |
| 2 奈魁斯特稳定判据.....           | (206) |
| § 6-6 稳定裕量.....           | (214) |
| 1 幅值裕量.....               | (215) |
| 2 相角裕量.....               | (215) |
| § 6-7 评定控制系统性能的频率域指标..... | (216) |
| 1 二阶系统动态性能与频率特性的关系.....   | (216) |
| 2 高阶系统动态性能与频率特性的关系.....   | (220) |
| 练习题 .....                 | (222) |

## 第七章 根轨迹方法

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| § 7-1 概述                | (224) |
| § 7-2 相角 (幅角) 条件与幅值条件   | (226) |
| § 7-3 根轨迹的特性及其绘制法则      | (229) |
| 1 根轨迹的起点和终点             | (229) |
| 2 根轨迹的条数                | (230) |
| 3 根轨迹的对称性               | (230) |
| 4 实轴上的根轨迹               | (230) |
| 5 根轨迹的渐近线               | (231) |
| 6 根轨迹与虚轴的交点             | (235) |
| 7 根轨迹与实轴的分离点与会合点        | (236) |
| 8 根轨迹的起始角和终止角           | (244) |
| 9 闭环极点之和与积              | (245) |
| § 7-4 控制系统的根轨迹分析        | (252) |
| 1 按根轨迹曲线分析系统的动态性能       | (252) |
| 2 闭环系统的零、极点分布对系统动态性能的影响 | (258) |
| 练习题                     | (261) |

## 第八章 控制系统设计

|                    |       |
|--------------------|-------|
| § 8-1 控制系统的技术要求    | (263) |
| 1 位置控制系统的技术要求      | (263) |
| 2 速度控制系统的一般技术要求    | (264) |
| § 8-2 控制系统的设计步骤    | (265) |
| 1 方案论证             | (265) |
| 2 静态计算             | (266) |
| 3 动态计算             | (266) |
| § 8-3 控制系统的静态计算    | (267) |
| 1 执行元件的选择          | (267) |
| 2 减速器传动级数的选择与传动比分配 | (277) |
| 3 比较元件的选择原则        | (281) |
| 4 放大器的选择与设计原则      | (282) |
| § 8-4 控制系统的综合校正    | (283) |
| 1 用对数频率法综合校正系统的步骤  | (283) |

|       |                        |       |
|-------|------------------------|-------|
| 2     | 希望特性 $L_s(\omega)$ 的绘制 | (281) |
| 3     | 串联校正                   | (286) |
| 4     | 并联校正                   | (288) |
| § 8-5 | 复合控制与扰动补偿              | (297) |
| 1     | 复合控制系统原理               | (297) |
| 2     | 扰动补偿                   | (299) |
| 3     | 不变性原理                  | (300) |
| 4     | 复合控制系统的设计计算            | (301) |
| 练习题   |                        | (305) |

## 第九章 自动控制系统举例

|       |                |       |
|-------|----------------|-------|
| § 9-1 | 具有交磁放大机的随动系统   | (308) |
| 1     | 系统结构           | (308) |
| 2     | 系统的信号传递        | (312) |
| 3     | 系统的传递函数及方框图    | (313) |
| § 9-2 | 具有可控硅整流的随动系统   | (321) |
| 1     | 系统结构           | (323) |
| 2     | 磁触发器的基本工作原理    | (325) |
| 3     | 系统的信号传递        | (328) |
| 4     | 系统的传递函数及方框图    | (330) |
| § 9-3 | 单相可控硅直流电动机调速系统 | (333) |
| 练习题   |                | (338) |

## 第十章 采样控制系统

|        |             |       |
|--------|-------------|-------|
| § 10-1 | 采样控制系统的基本概念 | (339) |
| 1      | 采样系统概述      | (339) |
| 2      | 离散时间信号      | (342) |
| 3      | 采样信号的数学描述   | (343) |
| 4      | 零阶保持器的数学模型  | (347) |
| § 10-2 | 采样定理        | (349) |
| § 10-3 | $z$ 变换      | (351) |
| 1      | $z$ 变换的定义   | (351) |
| 2      | $z$ 变换方法    | (352) |
| 3      | $z$ 变换定理    | (355) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 4 $z$ 反变换 .....           | (358) |
| § 10-4 差分方程及其解法 .....     | (360) |
| 1 差分方程 .....              | (360) |
| 2 差分方程的解法 .....           | (362) |
| § 10-5 脉冲传递函数 .....       | (363) |
| 1 脉冲传递函数的定义 .....         | (363) |
| 2 脉冲传递函数的求法 .....         | (363) |
| 3 串联环节的脉冲传递函数 .....       | (364) |
| 4 并联环节的脉冲传递函数 .....       | (365) |
| 5 闭环系统的脉冲传递函数 .....       | (366) |
| § 10-6 采样系统的分析 .....      | (368) |
| 1 采样系统的稳定性 .....          | (369) |
| 2 采样系统的动态性能 .....         | (373) |
| 3 采样系统的稳态性能 .....         | (376) |
| 练习题 .....                 | (378) |
| 附录 I 拉氏变换 .....           | (380) |
| 1 拉氏变换的定义 .....           | (380) |
| 2 拉氏变换定理 .....            | (382) |
| 3 拉氏反变换及其对照表 .....        | (389) |
| 附录 II 检验正弦跟踪精度公式的证明 ..... | (391) |
| 附录 III 校正装置及其特性 .....     | (393) |
| 参考文献 .....                | (402) |

# 第一章 自动控制系统入门

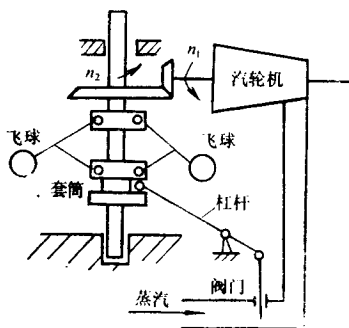
## §1-1 引言

自动控制系统是按输入信号驱动被控对象自动完成希望动作而相互关联的诸部件的组合体。这些部件可能是电气、机械、液压、气动、光电等物理器件，被控对象可能是高射火炮、雷达天线、飞船舵机、机床刀架刀具、机械开关阀门等等。

自动控制系统能在没有人参与的情况下，高速度与高精度地自动完成被控对象的运动，因而在宇宙航行与军事装备自动化等领域中获得广泛应用。它使宇宙飞船、导弹等运动载体精确地按预定轨道运行；使雷达天线、高射火炮等瞄准装置精确地自动跟踪瞄准目标。在现代工业生产自动化与机器人技术等领域中，自动控制系统也是极重要的技术手段，它使机床刀具按图样精确地切削加工，使被控对象保持希望的速度，或自动地完成其他操作。总之，它使人们从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来，并能大大提高产品的质量与数量，降低生产成本，提高劳动生产率。可见，自动控制在促进生产与科学技术的发展过程中起着极重要的作用，随着自动控制理论、实践的发展和普及，将会进一步给人类社会带来不可估量的社会效益与经济效益。所以高等学校一般工科专业的本科生、研究生以及其他高级工程技术人员，现在都必须具备一定的自动控制基础知识。

有关控制的概念和实例应追溯到千余年前我国劳动人民先后发明的铜壶滴漏计时器、自动定向指南车与多种自动天文仪器。但是，迄今被各国学者公认的没有人参与的第一个控制系统例子是1784年吉米·瓦特(James Watt)发明的飞球离心调速器，如

图1-1所示。从图中可以看出：这个调速器是一个简单的纯机械稳速装置，其基本原理是当汽轮机转速 $n_1$ 升高时，调速器轴的转速



$n_2$ 升高，飞球转动加快，离心力增大，飞球向上运动，套筒沿转轴向上滑动，通过杠杆关小阀门，汽轮机进汽减少，使转速降低到期望值；当汽轮机转速下降时，飞球作相反运动，通过杠杆开大阀门，使汽轮机转速升高到期望值。调速器用于工业控制始于19世纪初期，随后出现了诸如船舶驾驶之类的自动控制装置。

图1-1 飞球离心调速器原理图

控制系统中出现的不稳定问题（例如汽轮机飞球调速器的转速可能围绕期望值波动的问题等）给人们提出了理论研究的课题。1868年吉·克·马克士威尔（J·C·Maxwell）对飞球调速器进行了稳定性研究。随后1875至1895年，劳斯（E·Routh）、霍尔维茨（A·Hurwitz）、李雅普诺夫（Liapounov）等人开始用数学方法对控制系统的稳定性进行分析，并建立了系统稳定性的判据，他们对自动控制理论的建立作出了重要贡献。20世纪30年代，奈魁斯特（H·Nyquist）与波德（H·W·Bode）等人建立了判定自动控制系统稳定性的频率法。

第二次世界大战期间，由于军事需要，大大促进了自动控制技术的迅速发展，开始了兵器与军事装备的自动化，如雷达自动跟踪系统、火炮随动系统、坦克炮与瞄准仪的稳定系统、舰船稳定与自动驾驶系统等等。相应地，自动控制理论也得到进一步发展。1940至1950年期间，发展了两种分析设计自动控制系统的方法，即频率响应法与根轨迹法，二者现在仍是我们分析设计控制系统的基本方法，建立在这两种方法上的理论就是我们常说的古典控制理论。

近20余年来,半导体器件与电子计算机的发展对控制系统的理论与实践产生重大影响,快速数字计算机将控制范围扩大到同时测量与控制一系列物理量的大型复杂系统,形成计算机控制的新领域。同时,控制理论也发展到一个新阶段——现代控制理论阶段。现代控制理论的数学基础是矩阵理论等近代数学,它适用于多输入与多输出系统的分析与设计,根据它所设计出的系统性能对于给定指标是最优的。

《自动控制基础》是阐述自动控制系统基本理论与实践的综合技术课程,由于篇幅与课程学时数的限制,本书只介绍线性系统的经典控制理论与常用控制系统元部件的基本知识和系统设计方法,不包括现代控制理论与非线性系统的内容。

## §1-2 开环控制与闭环控制

工程上应用的控制系统,一般可分为开环控制系统与闭环控制系统。输出量不参与控制的系统称开环控制系统;输出量参与控制的系统称闭环控制系统或反馈控制系统。下面,以机床主轴转速的控制为例来说明这两种控制系统的重要差异。

图1-2是开环控制简化示意图,图中, $V_r$ 是系统的输入电压,又称参考电压; $V_a$ 是电子放大器的输出电压,即电动机的输入电

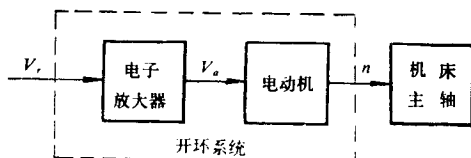


图1-2 开环控制

压; $n$ 是电动机的输出转速,即系统输出,也代表机床主轴转速。在正常运转时, $n$ 的大小与 $V_a$ 成比例,而 $V_a$ 与 $V_r$ 成比例,故 $n$ 与

$V_r$ 成比例。所以改变系统输入 $V_r$ 的大小就可控制机床主轴转速的高低。但是,输出 $n$ 不参与控制,当系统受到扰动时(例如机床主轴阻力矩发生变化或电子放大器、电动机的特性因环境条件的较大变化而变化等),系统的输出 $n$ 将偏离期望值,而不能自动纠正偏差,只有人工重新调整 $V_r$ 的大小时,才可能使机床主轴转速 $n$ 重新达到期望值。这是开环控制的极大缺点。所以开环控制不能抗干扰,精度低,只能用于精度要求不高及干扰极小的场合。

在电动机输出轴上安装一个测速发电机,将测速发电机的输出电压 $V_f$ 反馈到系统的输入端,与输入电压 $V_r$ 进行比较(即代数相减),再将比较结果 $\Delta V = V_r - V_f$ 送入电子放大器,便得到闭环控制系统,如图1-3所示。图中,输入电压 $V_r$ 代表输出转速 $n$ 的期望值,反馈电压 $V_f$ 代表输出转速 $n$ 的实际值,二者之差 $\Delta V$ 称系统误差。因为与输入电压 $V_r$ 相比,反馈电压 $V_f$ 是负值,故称这种反馈为负反馈, $V_f$ 为负反馈信号。从图中可以看出,系统输出转速的高低取决于误差电压 $\Delta V$ 的大小,故闭环控制又称误差控制或反馈控制。由于输出量参与控制,当系统输出 $n$ 因扰动而减小时,则反馈电压 $V_f$ 减小,导致系统误差电压 $\Delta V$ 增大,因而电子放大器的输出 $V_a$ 增大,电动机转速 $n$ 基本上回升到期望值。相反,当 $n$ 因扰动而增大时,则 $V_f$ 增大, $\Delta V$ 减小, $V_a$ 减小,使电动机转速 $n$ 基本上降低到期望值。所以闭环控制系统抗干扰能力强,能自动纠正偏差,具有自动调节的性能,它比开环控制系统优越得多。我们常说的

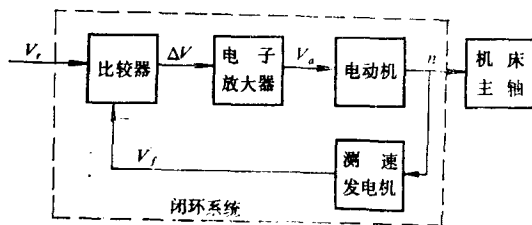


图1-3 闭环控制

自动控制系统是指闭环控制系统，闭环负反馈的概念是我们分析与设计自动控制系统的基础。

### §1-3 自动控制系统的基本组成部分

图1-4(a)与(b)是两个自动控制系统方框图。这种闭环控制系统主要由比较元件、放大元件、执行元件与校正元件组成。

**比较元件** 又称测量元件或敏感元件。它由给定元件和反馈元件组成。它的作用是将系统的输出 $y$ 与输入 $x$ 进行比较，并将比较所得的系统误差 $e = x - y$ 转换成误差信号送给放大元件。

**放大元件** 又称放大器，包括电压放大与功率放大。它的作用是将功率很小的误差信号进行放大后去推动执行元件，使执行元件带动被控对象(又称负载)运动。

**执行元件** 执行元件的作用是根据放大元件提供的信号驱动被控对象按输入信号 $x$ 的变化规律运动，或者说使输出 $y$ 复现输入 $x$ 。

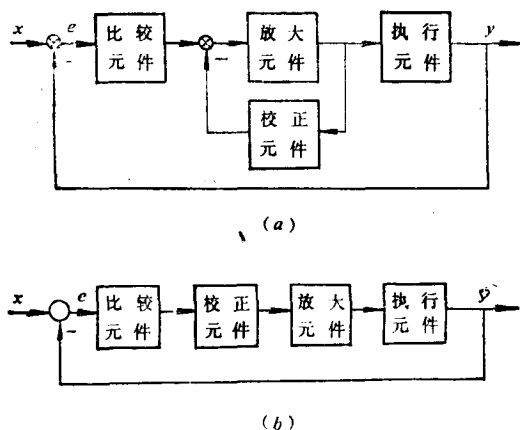


图1-4 自控系统的方框图

**校正元件** 又称校正装置或补偿装置。它的作用是调整原有系统的参数,使系统性能满足自动控制的技术要求,或者说,使系统输出 $y$ 能及时跟踪输入 $x$ (即 $y$ 复现 $x$ )。

以上四类元件是自动控制系统的基本组成部分。常用的比较元件、放大元件与执行元件将分别在第二、第三与第四章介绍,常用的校正元件及其特性见附录Ⅲ。

## §1-4 自动控制系统的性能指标

在设计或分析自动控制系统时,需要有评定系统性能好坏的标准,这个标准通称系统的性能指标。

自动控制系统是由若干电子、电磁、机电、液压、机械等元件组成的,由于其中某些元件的储能作用,使系统输出滞后输入。同时,为了构成闭环控制,将输出反馈到输入端,使信号在系统中往返循环。如果系统结构及各元件参数配合不当,则系统输出与输入不能同步,会使输出产生振荡甚至发散,系统不稳定(参见第五章§5-1),不能正常工作。所以系统稳定是评定系统性能指标的根本前提。

自动控制系统的结构与用途各不相同,系统的性能要求不可能完全一致。这里,我们只介绍位置控制系统的一般性能指标。

控制系统的性能要求主要有两个方面,一是快速性能好,即系统对输入信号响应快,且过渡过程时间短、振荡小;二是精度高,即系统输出与输入之间的误差小。前者称动态性能指标,后者称稳态性能指标。

### 1. 动态性能指标

动态性能指标也称暂态性能指标或过渡过程指标。动态性能指标一般用最大超调量、过渡过程时间及振荡次数来表示。