

矿物加工工程卓越工程师培养 • 应用型本科规划教材

# 选矿过程自动化

张翼 主编

XUANKUANG  
GUOCHENG  
ZIDONGHUA



化学工业出版社

中国矿业大学北京矿业工程系列教材 · 选矿工程系列教材

# 选矿过程自动化

第二版

◎ 王德明 主编



《选矿过程自动化》为矿物加工专业本科生和相关领域工程技术人员培养教材,结合自动化专业和矿物加工专业的相关知识,本书共十章,包括控制理论基础和模糊控制理论基础等相关内容,在此基础上对选矿厂破碎、磨矿分级、重磁浮、过滤脱水、烧结配矿等过程的自动控制方式进行了阐述。

本书可供从事选矿研究的科技人员、生产企业的管理和技术人员以及一线工人参考,也适用于大专院校的教师和学生。

# 选矿过程自动化

张翼主编

编委:(按姓氏拼音排序)

高惠民 何东升 李凤文

邵一松 邱敬琴 肖庆飞

陈峰瑞 张 蒙 张 蕾

赵礼兵

## 图书在版编目(CIP)数据

选矿过程自动化/张翼主编. —北京:化学工业出版社, 2017.11

矿物加工工程卓越工程师培养 应用型本科规划教材  
ISBN 978-7-122-30668-5

I. ①选… II. ①张… III. ①选矿-自动化-高等学校-教材 IV. ①TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 232475 号

责任编辑:袁海燕

责任校对:王素芹

文字编辑:向 东

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:北京国马装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数304千字 2018年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:45.00 元

版权所有 违者必究

## 前言

FOREWORD

矿物加工工程专业是实践性非常强的工科专业，国家教育部大力提倡应用型人才培养，各高校积极开展卓越工程师培养计划、专业综合改革等本科教学工程建设，在此背景下，化学工业出版社会同贵州大学、武汉理工大学、华北理工大学、武汉科技大学、武汉工程大学、东北大学、昆明理工大学的专家教授，规划出版一套“应用型本科规划教材”。

随着选矿行业的发展和国家节能降耗相关政策的实施，以往所采用的粗放式生产方式将不再适用，这就对选矿行业的技术进步和升级提出了更高的要求，选矿自动化、智能化控制逐渐成为关注的重点。

针对选矿行业的技术发展趋势，本书重点放在自动控制理论在选矿领域的应用方面，部分章节会涉及少量在线检测技术。需要指出的是，本书所讲述的选矿控制理论以现在控制理论和模糊控制理论为主，这也体现了选矿控制理论与现代控制理论前沿的融合，在此基础上，本书还介绍了人工神经网络等理论在选矿领域中的应用，以此培养一批具有自动化相关知识的选矿领域技术人才。

《选矿过程自动化》共10章，第1章介绍控制理论入门基础知识，由于篇幅有限，仅介绍了部分必需的基础知识，若要具备一定的自动控制理论基础还需要辅助相关书籍。

第2章介绍了模糊控制理论基础，模糊控制技术已成为现代控制理论中的重要组成部分，在该章节中简要地介绍了模糊理论的概念和模糊控制规则及控制器的设计方法。

第3章介绍了破碎筛分过程控制系统，从破碎系统中常见的给矿量、功耗、料位等参数着手，详细介绍了相关控制方法。

第4章为磨矿分级过程控制系统，磨矿分级控制系统在选厂中占据重要位置，一直以来该部分的节能降耗智能控制技术是国内外研究人员研究的重点。在该章节中，除了磨矿过程中常规的浓度控制和给矿量控制以外，还介绍了磨机钢球补加和磨矿分级专家系统等方面的知识。

第5~第7章分别介绍了重选、磁选和电选设备的自动控制；对跳汰、重介、离心、强磁和电选设备的自动控制方式进行了介绍。

第8章主要介绍了浮选过程的在线检测和自动控制；浮选是选厂中极其重要的环节，本章节针对浮选过程的加药系统、浮选槽的控制和浮选柱的控制方法进行了详细阐述，同时，本章重点介绍了图像处理技术在浮选过程中的应用。

第9章介绍了过滤脱水自动控制。该章针对矿物水分的检测方式和常用过滤设备的自动控制进行了讲述,如陶瓷过滤机和浓密池等装备的自动控制。

第10章介绍了烧结过程配矿控制。作为传统选矿领域的延伸,烧结球团生产环节是较早使用人工神经网络和专家系统的领域,作为前沿技术应用的代表,选矿工程师们有必要了解相关知识。

本书在编写过程中引用了大量文献资料,谨向各位作者、出版社致以诚挚的谢意。

本书融合了多学科领域的相关知识,知识涉及面较为广泛,由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2017年11月

## 目 录

### CONTENTS

## 第 1 章 经典控制理论基础

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1.1 自动控制概念 /001         | 1.6.1 控制系统数学模型的测定方法 /009 |
| 1.1.1 自动控制系统的原理 /001    | 1.6.2 被控对象常用数学模型 /010    |
| 1.1.2 自动控制系统的要求 /002    | 1.7 线性系统的时域分析方法 /012     |
| 1.2 自动控制系统的数学模型 /002    | 1.7.1 系统时间响应的性能指标 /012   |
| 1.2.1 控制系统的时域数学模型 /003  | 1.7.2 一阶系统的时域分析 /014     |
| 1.2.2 控制系统的复数域数学模型 /004 | 1.7.3 常用控制方式 /016        |
| 1.3 控制系统分类 /005         | 1.8 执行部件特性 /017          |
| 1.4 非线性微分方程的线性化 /006    | 1.8.1 气动执行机构的结构和原理 /018  |
| 1.5 控制系统的结构图 /007       | 1.8.2 调节机构 /019          |
| 1.5.1 系统结构图的组成 /007     | 1.8.3 气动执行器附件 /023       |
| 1.5.2 结构图的等效变换和简化 /008  | 1.8.4 电动调节阀 /025         |
| 1.6 控制系统的数学模型测定 /009    | 课后习题 /027                |

## 第 2 章 模糊控制理论基础

- |                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| 2.1 模糊控制系统的基本结构及控制原理 /029  | 2.2.2 模糊规则设计 /033  |
| 2.1.1 模糊控制系统的基本结构 /029     | 2.2.3 模糊控制状态表 /034 |
| 2.1.2 模糊控制器的工作原理和基本结构 /030 | 2.2.4 模糊判决方法 /034  |
| 2.2 模糊控制器的设计规则 /031        | 2.2.5 查询表的建立 /034  |
| 2.2.1 精确量的模糊化处理 /031       | 课后习题 /035          |

## 第 3 章 破碎筛分过程控制系统

- |                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| 3.1 破碎机控制系统简介 /036   | 3.5 破碎过程料位控制 /041     |
| 3.2 破碎机给矿量控制 /038    | 3.5.1 破碎机给矿量检测方法 /041 |
| 3.2.1 给矿量恒定控制 /038   | 3.5.2 破碎机料位控制 /042    |
| 3.2.2 破碎机功耗控制系统 /039 | 3.6 圆锥破碎机液压系统的控制 /045 |
| 3.3 破碎机排矿口控制 /040    | 课后习题 /046             |
| 3.4 破碎系统模糊控制 /040    |                       |

## 第4章 磨矿分级过程控制系统

- 4.1 磨机给矿控制 /048
- 4.2 磨矿浓度控制 /049
  - 4.2.1 磨机浓度的PID控制 /049
  - 4.2.2 基于磨机噪声的磨矿浓度控制 /051
- 4.3 磨机负荷控制 /051
  - 4.3.1 磨机负荷专家系统 /052
  - 4.3.2 磨机负荷专家控制系统的设计 /052
  - 4.3.3 智能控制器的设计 /053
  - 4.3.4 专家控制规则 /055
- 4.4 磨机钢球补加控制 /055
  - 4.4.1 磨机钢球填充率的检测 /056
  - 4.4.2 磨机钢球补加控制 /056
- 4.5 分级机溢流浓度的控制 /061
- 4.6 水力旋流器的控制 /063
  - 4.6.1 水力旋流器控制系统理论基础 /064
  - 4.6.2 水力旋流器生产过程 /065
  - 4.6.3 水力旋流器控制系统主要控制参数 /065
  - 4.6.4 水力旋流器控制系统建模 /066
- 4.7 磨矿分级系统的优化控制 /067
- 课后习题 /069

## 第5章 重力选矿过程控制系统

- 5.1 跳汰选矿控制 /070
  - 5.1.1 跳汰机的结构 /071
  - 5.1.2 跳汰机的自动控制 /073
- 5.2 螺旋溜槽自动控制 /080
- 5.3 重介分选过程控制 /081
  - 5.3.1 重介选煤控制过程分析 /082
  - 5.3.2 重介选矿悬浮液密度控制 /084
  - 5.3.3 煤泥含量的控制 /089
- 5.4 离心选矿过程控制 /090
  - 5.4.1 卧式离心选矿机的工作原理 /090
  - 5.4.2 卧式离心选矿机的控制 /091
- 课后习题 /093

## 第6章 磁力选矿过程控制

- 6.1 强磁选矿系统 /095
- 6.2 强磁选过程控制 /095
- 课后习题 /099

## 第7章 电选控制系统

- 7.1 摩擦电选控制系统 /100
  - 7.1.1 摩擦电选系统结构 /100
  - 7.1.2 风选机的控制 /102
- 7.2 电选机电源系统的控制 /104
- 课后习题 /106

## 第8章 浮选过程控制

- 8.1 浮选加药系统 /108
- 8.2 槽式浮选机的控制 /109
  - 8.2.1 槽式浮选机控制系统 /110
  - 8.2.2 加药量控制 /111
  - 8.2.3 浮选槽液位控制 /111
  - 8.2.4 浮选pH值控制 /112
- 8.3 浮选柱控制 /113
  - 8.3.1 浮选柱的结构与原理 /114
  - 8.3.2 浮选柱的操作参数 /114
  - 8.3.3 浮选柱液位检测与控制系统 /115
  - 8.3.4 充气量控制系统 /118
  - 8.3.5 浮选柱泡沫层厚度检测控制系统 /118
- 8.4 基于图像处理的浮选泡沫分析 /121
  - 8.4.1 浮选过程视觉监控的优点 /121
  - 8.4.2 泡沫图像处理与视觉特征提取方法 /123
  - 8.4.3 浮选泡沫图像表面视觉特点 /126
  - 8.4.4 视觉感知与图像统计建模 /128
- 课后习题 /143

## 第9章 过滤脱水过程控制

- |                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| 9.1 水分检测 /144        | 9.3.2 离心机控制系统 /165    |
| 9.1.1 微波水分检测 /144    | 9.4 浓缩过程控制 /168       |
| 9.1.2 红外水分检测 /148    | 9.4.1 浓密机加药控制 /169    |
| 9.2 过滤过程控制 /151      | 9.4.2 浓密机泥层高度模型 /171  |
| 9.2.1 压滤机自动控制 /151   | 9.5 干燥过程控制 /172       |
| 9.2.2 陶瓷过滤机自动控制 /156 | 9.5.1 滚筒式干燥设备的控制 /172 |
| 9.3 离心脱水过程控制 /163    | 9.5.2 微波干燥控制 /174     |
| 9.3.1 卧螺离心机工作原理 /163 | 课后习题 /176             |

## 第 10 章 烧结过程配矿控制

- |        |             |      |        |             |      |
|--------|-------------|------|--------|-------------|------|
| 10.1   | 配矿方案产生方式    | /178 | 10.4   | 配矿调整专家系统的结构 | /183 |
| 10.2   | 专家调整指导模块的确定 | /179 | 10.4.1 | 知识库的建立      | /183 |
| 10.3   | 预测模型的确定     | /180 | 10.4.2 | 知识的表示       | /184 |
| 10.3.1 | 输出参数的选择和确定  | /180 | 10.4.3 | 知识库的组织      | /185 |
| 10.3.2 | 输入参数的选择和确定  | /181 | 10.4.4 | 知识库的管理      | /186 |
| 10.3.3 | 人工神经网络预测模型  | /181 |        | 课后习题        | /186 |

## 参考文献

# 第 1 章

## 经典控制理论基础

### 1.1 自动控制概念

自动控制是指在没有人参与的情况下,利用外部设备和装置使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。例如,化学反应炉的温度或者压力自动维持恒定;磨矿粒度的自动维持和调节以及浮选流程中药剂制度的自动调节等。

自动控制理论发展初期主要是为了满足工业需求,以反馈理论和传递函数为基础,称为经典控制理论。随着电子技术的发展,为适应航空航天的发展,在经典控制理论上逐渐发展出一种针对多变量参数系统的最优问题的控制理论——现代控制理论。

目前,控制理论正在向智能控制理论深入发展。在选矿领域,越来越多的研究人员将模糊理论、专家系统和人工神经网络应用在磨矿、浮选等流程中,取得良好的效果。

#### 1.1.1 自动控制系统的原理

控制理论基础就是反馈控制理论,在各种控制系统中,要使被控量保持恒定值,必须对被控量的波动变化进行反馈,即将被控量实时值采集,与预先设定值进行对比计算其偏差大小,然后控制器根据偏差调节执行机构,使被控量逐步接近设定值,该被控量采集过程称为反馈,带有反馈的控制系统称为反馈控制系统,也可称为闭环控制系统。

若反馈信号与输入信号相减,使产生的偏差越来越小,则称为负反馈;若反馈信号与输入信号相加,使产生的误差增加,则称为正反馈。

一个典型的反馈控制系统的基本组成可用图 1-1 所示的方块图表示。图中,用“○”代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与输入量进行比较;“-”号表示两者符号相反,即负反馈;“+”号表示两者符号相同,即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称单回路系统;含有两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

图中输入量即为设定的目标值,使我们所期望的被控量需要稳定的状态;放大元件是将

输入量与反馈量误差放大的装置，一般来说是放大电路，可将  $0\sim 10\text{mV}$  的电压信号放大至  $0\sim 10\text{V}$ ；执行部件是可以调节的装置，通过调节执行部件可以改变被控量的大小，如阀门的开度和电机的频率；测量元件是能够采集被控量数值的装置，如浓度仪、粒度计等。

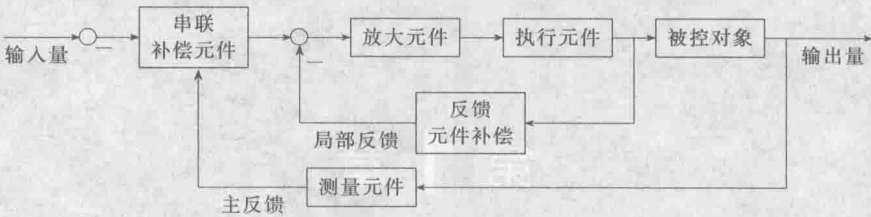


图 1-1 反馈控制系统的基本组成

一般来说，加到反馈控制系统上的外作用有两种类型：一种是有用输入，另一种是扰动。有用输入决定系统被控量的变化规律，如输入量；而扰动是系统不希望有的外作用，它破坏有用输入对系统的控制。在实际系统中，扰动总是不可避免的，而且它可以作用于系统中的任何元部件上，也可能一个系统同时受到几种扰动作用。电源电压的波动、环境温度、压力以及负载的变化、飞行中气流的冲击、航海中的波浪等，都是现实中存在的扰动。

1.1.2 自动控制系统的要求

虽然不同行业有不同类型的控制系统，并且每个系统的要求也不相同，但综合来说，可以归结为稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性

稳定性是保证控制系统正常运行的先决条件。一个稳定的系统，当被控量与目标值产生偏差时，经过一定的过渡调整时期后系统可以自行消除这样的误差。在选矿行业中存在很多大惯性的控制对象，例如，浮选槽的矿浆浓度调节过程，当调节开始后，由于浮选槽的容量较大，且矿物颗粒的分散过程较长，则存在被检测量的变化滞后于调节阀门动作的现象，这就使得调节滞后，要使被控量恢复至设定值，则需要一定的调节时间，这个过程称为过渡过程，过渡过程根据不同控制对象长短不一，但在任何系统中都存在该过程。

如果经过一段时间的调节，被控量可以恢复到设定值，我们称该系统为稳定系统；反之则为不稳定系统。

(2) 快速性

为了很好地完成控制任务，控制系统对调节的速度还有一定要求，如在磷矿加温浮选过程中，需要利用蒸汽对浮选矿浆进行加温处理，如果温度的调节过程过长，则会导致在很长一段时间内的浮选槽矿浆温度整体偏高或者偏低，恶化捕收剂等浮选药剂的作用效果。

(3) 准确性

当控制系统的调节过程结束后，被控量的稳定值与设定值之间会存在一定误差，该误差称为稳态误差，该误差值的大小是衡量控制系统精确度的重要标志。

1.2 自动控制系统的数学模型

针对一个系统进行控制，其前提是对该系统建立数学模型。控制系统的数学模型是描述系统内部物理量（或变量）之间关系的数学表达式。在静态条件下（即变量各阶导数为零），

描述变量之间关系的代数方程叫静态数学模型；而描述变量各阶导数之间关系的微分方程叫动态数学模型。如果已知输入量及变量的初始条件，对微分方程求解，就可以得到系统输出量的表达式，并由此可对系统进行性能分析。

建立控制系统数学模型的方法有分析法和实验法两种。分析法是对系统各部分的运动机理进行分析，根据它们所依据的物理规律或化学规律分别列出相应的运动方程。例如，电学中有基尔霍夫定律，力学中有牛顿定律，热力学中有热力学定律等。实验法是人为地给系统施加某种测试信号，记录其输出响应，并用适当的数学模型去逼近，这种方法称为系统辨识。

### 1.2.1 控制系统的时域数学模型

时域是描述数学函数或物理信号对时间的关系。

以线性元器件为例，对基本的电阻电容电感无源网络建立微分方程，如图 1-2 所示。

设回路电流为  $i(t)$ ，由基尔霍夫定律可写出回路方程为：

$$L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t) = u_i(t) \quad (1-1)$$

$$u_o(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

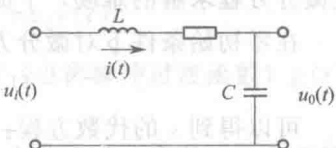


图 1-2 RLC 无源网络

消去中间变量  $i(t)$ ，便得到描述网络输入、输出关系的微分方程为：

$$LC \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (1-2)$$

上述方程即为该无源网络的时域数学模型。

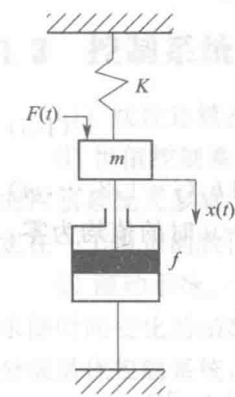


图 1-3 弹簧-质量-阻尼器

以弹簧拉力系统为例，图 1-3 是弹簧-质量-阻尼器机械位移系统，当质量为  $m$  的物体在外力  $F(t)$  作用下发生位移时，其位移的时域运动方程可做如下分析。设质量  $m$  相对于初始状态的位移、速度、加速度分别为  $x(t)$ 、 $dx(t)/dt$ 、 $d^2x(t)/dt^2$ 。由牛顿运动定律有：

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(t) - F_1(t) - F_2(t) \quad (1-3)$$

式中， $F_1(t) = f dx(t)/dt$  是阻尼器的阻尼力，其方向与运动方向相反，大小与运动速度成正比例； $f$  是阻尼系数； $F_2(t) = Kx(t)$  是弹簧的弹力，其方向与运动方向相反，其大小与位移成正比例， $K$  是弹性系数。将  $F_1(t)$  和  $F_2(t)$  代入式(1-3)中，经整理后即得该系统的微分方程为：

$$\frac{m d^2 x(t)}{dt^2} + f \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = F(t) \quad (1-4)$$

上述两个例子完整解释了控制系统的时域数学模型及系统微分方程的建立过程。

综合上述实例分析，建立系统时域模型微分方程的方法可分为如下几步：

- ① 根据元件的工作原理及在系统中所起到的作用，确定输入量和输出量；
- ② 分析元件所遵循的物理或者化学规律，列出相应的微分方程；
- ③ 消除中间变量，得到输出量与输入量之间关系的微分方程即可得到系统的时域数学模型。

## 1.2.2 控制系统的复数域数学模型

微分方程的建立可以直观地描述系统的动态性能,然而当系统结构发生变化时,需要重新建立微分方程,不利于对系统进行分析和设计。

用拉普拉斯变换求解微分方程时,可以得到控制系统在复数域内的数学模型——传递函数。传递函数可以表征系统的动态性能,还可以研究系统结构变化对系统性能的影响。

### (1) 传递函数的定义

我们将线性定常系统的传递函数定义为:零初始条件下,系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

当系统微分方程列出来后,只要给定输入量和初始条件,便可对微分方程求解,并由此了解系统输出量随时间变化的特性。线性定常微分方程的求解方法有经典法和拉普拉斯变换法(以下简称拉氏变换)两种,拉氏变换将复杂的微分运算简化成代数运算,降低了控制系统微分方程求解的难度,下面对无源网络的微分方程进行拉氏变换,从而引出传递函数。

在零初始条件下对微分方程中各项进行拉氏变换,并令

$$U_0(s) = \mathcal{L}[u_0(t)], U_i(s) = \mathcal{L}[u_i(t)]$$

可以得到  $s$  的代数方程:

$$(LCs^2 + RCs + 1)U_0(s) = U_i(s)$$

由此可以得到传递函数:

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

对任意一个线性定常系统而言,可用如下微分方程进行描述:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n}{dt^n} C(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} C(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} C(t) + a_n C(t) = \\ b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t) \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中,  $C(t)$  是系统输出量;  $r(t)$  是系统输入量;  $a_i (i=1, 2, \dots, n)$  和  $b_j (j=1, 2, \dots, m)$  是与系统结构和参数有关的常系数。设  $r(t)$  和  $C(t)$  及其各阶导数在  $t=0$  时的值均为零,即零初始条件,则对上式中各项分别求拉氏变换,并令

$$C(s) = \mathcal{L}[c(t)], R(s) = \mathcal{L}[r(t)]$$

得到  $s$  的代数方程为

$$[a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n] C(s) = [b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m] R(s)$$

于是,由定义得系统传递函数为

$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad (1-6)$$

式中

$$M(s) = b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m$$

$$N(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n$$

### (2) 传递函数的性质

① 传递函数是复变量的有理真分式函数,具有复变函数的所有性质,  $m \leq n$ , 且所有系数均为实数。

② 传递函数是一种用系统参数表示输出量与输入量之间关系的表达式,它只取决于系

统或元件的结构和参数，而与输入量的形式无关，也不反映系统内部的任何信息。因此，可以用图 1-4 的方块图来表示一个具有传递函数  $G(s)$  的线性系统。

图中表明，系统输入量与输出量的因果关系可以用传递函数联系起来。



图 1-4 传递函数示意图

③ 传递函数与微分方程有相通性。传递函数分子多项式系数及分母多项式系数，分别与相应微分方程的右端及左端微分算符多项式系数相对应。故在零初始条件下，将微分方程的算符  $d/dt$  用复数  $s$  置换，便得到传递函数；反之，将传递函数多项式中的变量  $s$  用算符  $d/dt$  置换便得到微分方程。例如，由传递函数

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_1s + b_2}{a_0s^2 + a_1s + a_2}$$

可得  $s$  的代数方程： $(a_0s^2 + a_1s + a_2)C(s) = (b_1s + b_2)R(s)$ 。

在零初始条件下，用微分算符  $d/dt$  置换  $s$ ，便得到相应的微分方程

$$a_0 \frac{d^2}{dt^2}C(t) + a_1 \frac{d}{dt}C(t) + a_2C(t) = b_1 \frac{d}{dt}r(t) + b_2r(t)$$

④ 传递函数  $G(s)$  的拉氏反变换是脉冲响应  $g(t)$ 。脉冲响应（也称脉冲过渡函数） $g(t)$  是系统在单位脉冲  $\delta(t)$  输入时的输出响应。

传递函数是在零初始条件下定义的。控制系统的零初始条件有两方面的含义：一是指输入量在  $t \geq 0$  时才作用于系统，因此，在  $t = 0$  时，输入量及其各阶导数均为零；二是指输入量加于系统之前，系统处于稳定工作状态，即输出量及其各阶导数在  $t = 0$  时的值也为零，现实的工程控制系统多属于此类情况。因此，传递函数可表征控制系统的动态性能，并用以求出在给定输入量时系统的零初始条件响应。

### 1.3 控制系统分类

#### (1) 线性连续控制系统

① 恒值控制系统。该类控制系统的被控量通常被要求为一恒定值。在选矿领域所面对的控制系统的多属于这类系统，如磨矿浓度的控制、溢流粒度的控制，这些参数往往需要稳定在一个恒定的数值。

② 随动系统。该类控制系统被控量跟随参据量变化，而参据量是一个按某种规律和要求随时间变化的函数。在选矿厂的全流程优化智能控制中有该控制方式的存在，例如，磨矿分级最优控制系统，不再将给矿量和给水量恒定在一个数值，而是根据磨机的运行状态、钢球的损耗、磨机功率等综合因素随机调节磨机给矿量和给水量。

③ 程序控制系统。该类系统是控制被控量按照事先设计好的程序变化。例如，化工厂中的反应釜，在升温时须分为几个阶段，且在升温过程中存在保温流程，这就需要控制系统按照设定好的升温方式对反应过程进行加温处理。

#### (2) 线性离散系统

离散系统是指系统的某处或者多处信号为脉冲形式。目前所使用的计算机控制系统基本属于离散控制系统，以温度为例，在温度控制过程中，被控对象的温度变化是连续的，如果要计算机识别温度信号，则必须通过温度传感器将实际温度转变成一定数值的电压或者电流信号，而该信号为模拟量，仍不能被计算机所识别，因此需要模拟/数字转换器将模拟量转换为数字信号，在转换过程中，转换器存在采样周期，即每隔一定时间进行一次模拟信号的

采集,这就导致所采集到的信号为具有一定周期性的离散信号。

## 1.4 非线性微分方程的线性化

在实际控制系统中,组成控制系统的元器件并非完全是线性的,例如,弹簧的刚度与其

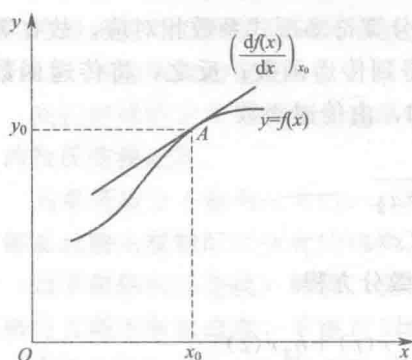


图 1-5 小偏差线性化示意图

形变有关系,因此弹性系数  $K$  实际上是其位移  $x$  的函数,并非常值;电阻、电容、电感等参数值与周围环境(温度、湿度压力等)及流经它们的电流有关,也并非常值;电动机本身的摩擦、死区等非线性因素会使其运动方程复杂化而成为非线性方程。

在一定条件下,为了简化控制系统,可忽略这些元器件的非线性影响,将其视为线性化原件,除此之外,还可以利用切线法(小偏差法)对其进行线性化处理,如图 1-5 所示。

设连续变化的非线性函数为  $y=f(x)$ 。取某平衡状态  $A$  为工作点,对应应有  $y_0=f(x_0)$ ,当  $x=x_0+\Delta x$  时,有  $y=y_0+\Delta y$ 。设函数  $y=f(x)$  在  $(x_0,y_0)$  点连续可微,则将它在该点附近用泰勒级数展开为:

$$y=f(x)=f(x_0)+\left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0}(x-x_0)+\frac{1}{2!}\left(\frac{d^2f(x)}{dx^2}\right)_{x_0}(x-x_0)^2+\dots$$

当增量  $x-x_0$  很小时,略去其高次幂项,则有:

$$y-y_0=f(x)-f(x_0)=\left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0}(x-x_0)$$

$$\text{令 } \Delta y=y-y_0=f(x)-f(x_0), \Delta x=x-x_0, K=\left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0}$$

则线性化方程可简记为  $\Delta y=K\Delta x$ ,略去增量符号  $\Delta$ ,便得函数  $y=f(x)$  在工作点  $A$  附近的线性化方程为  $y=Kx$ 。式中,  $K=[df(x)/dx]_{x_0}$  是比例系数,它是函数  $f(x)$  在  $A$  点的切线斜率。对于有两个自变量  $x_1, x_2$  的非线性函数  $f(x_1, x_2)$ ,同样可在某工作点  $(x_{10}, x_{20})$  附近用泰勒级数展开为

$$\begin{aligned} y=f(x_1, x_2)=f(x_{10}, x_{20}) &+ \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{x_{10}, x_{20}} (x_1-x_{10}) + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)_{x_{10}, x_{20}} (x_2-x_{20}) \right] \\ &+ \frac{1}{2!} \left[ \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} \right)_{x_{10}, x_{20}} (x_1-x_{10})^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \right)_{x_{10}, x_{20}} (x_1-x_{10})(x_2-x_{20}) \right. \\ &\left. + \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} \right)_{x_{10}, x_{20}} (x_2-x_{20})^2 \right] + \dots \end{aligned}$$

略去二阶以上导数项,并令

$$\Delta y=y-f(x_{10}, x_{20}), \Delta x_1=x_1-x_{10}, \Delta x_2=x_2-x_{20}$$

可得增量线性化方程为:

$$\Delta y=\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_{x_{10}, x_{20}} \Delta x_1+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_{x_{10}, x_{20}} \Delta x_2=K_1 \Delta x_1+K_2 \Delta x_2$$

式中

$$K_1 = (\partial f / \partial x_1)_{x_{10}, x_{20}}; K_2 = (\partial f / \partial x_2)_{x_{10}, x_{20}}$$

这种小偏差线性化方法对于控制系统的大多数工作状态是可行的。事实上,自动控制系统在正常情况下都处于一个稳定的工作状态,即平衡状态,这时被控量与期望值保持一致,控制系统也不进行控制动作。一旦被控量偏离期望值产生偏差时,控制系统便开始控制动作,以便减小或消除这个偏差,因此控制系统中被控量的偏差一般不会很大,只是“小偏差”。在建立控制系统的数学模型时,通常将系统的稳定工作状态作为起始状态,仅研究小偏差的运动情况,也就是只研究相对于平衡状态下,系统输入量和输出量的运动特性,这正是增量线性化方程所描述的系统特性。

## 1.5 控制系统的结构图

控制系统的结构图是描述系统各元部件之间信号传递关系的数学图形,它表示系统中各变量之间的因果关系以及对各变量所进行的运算,是控制理论中描述复杂系统的一种简便方法,结构图既可用于线性系统,也可用于非线性系统。

### 1.5.1 系统结构图的组成

控制系统的结构图是由许多对信号进行单向运算的方框和一些信号流向线组成的,它包含如下四种基本单元:

① 信号线。信号线是带有箭头的直线,箭头表示信号的流向,在直线旁标记信号的时间函数或象函数,见图 1-6(a)。

② 引出点(或测量点)。引出点表示信号引出或测量位置,从同一位置引出的信号在数值和性质方面完全相同,见图 1-6(b)。

③ 比较点(或综合点)。比较点表示对两个以上信号进行加减运算,“+”号表示相加,“-”号表示相减,“-”号可省略不写,见图 1-6(c)。

④ 方框(或环节)。方框表示对信号进行的数学变换,方框中写入元部件或系统的传递函数,见图 1-6(d)。

显然,方框的输出变量等于方框的输入变量与传递函数的乘积,即

$$C(s) = G(s)U(s)$$

因此,方框可视作单向运算的算子。

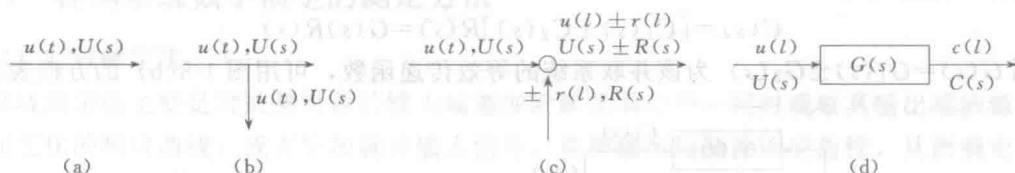


图 1-6 结构图的基本组成单元

绘制系统结构图时,首先考虑负载效应,分别列出系统各元部件的微分方程或传递函数,并将它们用方框表示;然后,根据各元部件的信号流向,用信号线依次将各方框连接,便得到系统结构图。因此,系统结构图实质上是系统原理图与数学方程两者的结合,既补充了原理图所缺少的定量描述,又避免了纯数学的抽象运算。从结构图上可以用方框进行数学运算,也可以直观了解各元部件的相互关系及其在系统中所起的作用;更重要的是,从系统

结构图可以方便地求得系统的传递函数。所以系统结构图也是控制系统的一种数学模型。

要指出的是,虽然系统结构图是从系统元部件的数学模型得到的,但是结构图中的方框与实际系统的元部件并非是一一对应的。一个实际元部件可以用一个方框或几个方框表示,而一个方框也可以代表几个元部件或者一个子系统,或者一个大的复杂系统。

### 1.5.2 结构图的等效变换和简化

一个复杂的系统结构图,其方框间的连接必然是错综复杂的,但方框间的基本连接方式只有串联、并联和反馈连接三种。因此,结构图简化的一般方法是移动引出点或比较点,交换比较点,进行方框运算将串联、并联和反馈连接的方框合并。在简化过程中应遵循变换前后变量关系保持等效的原则,具体而言,就是变换前后前向通路中传递函数的乘积应保持不变,回路中传递函数的乘积应保持不变。

#### (1) 串联方框的简化(等效)

若传递函数分别为  $G_1(s)$  和  $G_2(s)$  的两个方框,设  $G_1(s)$  的输出量作为  $G_2(s)$  的输入量,则  $G_1(s)$  与  $G_2(s)$  称为串联连接,见图 1-7(a)。

由于:

$$U(s)=G_1(s)R(s), C(s)=G_2(s)U(s)$$

消去中间量  $U(s)$  可得到:

$$C(s)=G_1(s)G_2(s)R(s)=G(s)R(s)$$

则  $G(s)=G_1(s)G_2(s)$  为该串联系统的等效传递函数,可用图 1-7(b) 的方框表示。

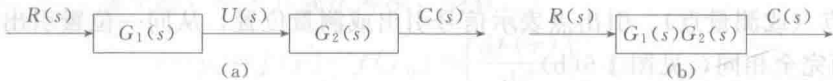


图 1-7 方框串联连接及其简化

#### (2) 并联方框的简化(等效)

若传递函数  $G_1(s)$  和  $G_2(s)$  有相同的输入量,而输出量等于两个方框输出量的代数和,则  $G_1(s)$  与  $G_2(s)$  称为并联连接,见图 1-8(a)。

因为:

$$C_1(s)=G_1(s)R(s), C_2(s)=G_2(s)R(s), C(s)=C_1(s)\pm C_2(s)$$

消去中间量可得:

$$C(s)=[C_1(s)\pm C_2(s)]R(s)=G(s)R(s)$$

则  $G(s)=G_1(s)\pm G_2(s)$  为该并联系统的等效传递函数,可用图 1-8(b) 的方框表示。

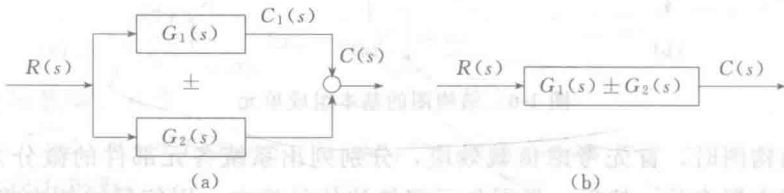


图 1-8 方框并联连接及其简化

#### (3) 反馈连接方框的简化(等效)

反馈是自动控制系统一个重要的特征,即使用传感器将被控量的实时值采集后反馈到比