

第28篇 过程控制

主稿、编写人 陆德民 北京石油化工工程公司 高级工程师
编写人 俞金寿 华东理工大学 教授

1 控制理论基础	28-4	(3) 差压式液位计	28-27
1.1 自动控制系统概述	28-4	(4) 电容式液位计	28-28
(1) 自动控制系统的类型及组成	28-4	(5) 音叉料位信号器	28-28
(2) 闭环控制系统的过渡过程及控制指标	28-5	(6) 阻旋式料位信号器	28-28
1.2 传递函数及方框图	28-6	(7) 超声波物位计	28-29
(1) 环节微分方程的列写	28-6	(8) 放射性物位计	28-29
(2) 传递函数	28-7	(9) 雷达波液位计	28-30
(3) 方框图及其变换	28-9	2.3 流量测量仪表	28-30
(4) 信号流图	28-10	(1) 椭圆齿轮流量计	28-30
1.3 线性连续控制系统	28-12	(2) 差压法流量计	28-31
(1) 时间特性和频率特性	28-12	(3) 旋涡流量计	28-31
(2) 稳定性和稳定裕量	28-14	(4) 涡轮流量计	28-32
(3) 多变量系统的分析方法	28-16	(5) 电磁流量计	28-32
1.4 线性离散控制系统	28-17	(6) 转子流量计	28-33
(1) 采样器及保持器	28-17	(7) 超声波流量计	28-33
(2) z 变换及脉冲传递函数	28-18	(8) 科氏力质量流量计	28-33
(3) 线性离散控制系统的分析方法	28-20	(9) 间接法测量流体质量	28-34
1.5 化工过程动态数学模型	28-21	(10) 测固体重量的冲板式流量计	28-34
(1) 动态数学模型的作用	28-21	(11) 流量计的选用	28-35
(2) 动态数学模型的类型	28-21	2.4 温度测量仪表	28-36
(3) 机理模型的建立	28-22	(1) 玻璃液体温度计	28-37
(4) 系统辨识和参数估计	28-22	(2) 双金属膨胀式温度计和压力式温度计	28-37
1.6 最优控制系统	28-24	(3) 热电阻	28-37
(1) 概述	28-24	(4) 热电偶	28-38
(2) 静态优化控制	28-24	(5) 非接触式温度计	28-39
(3) 动态最优控制	28-24	(6) 温度测量仪表的选用	28-39
2 检测仪表及控制仪表	28-25	2.5 过程分析仪表	28-40
2.1 压力测量仪表	28-25	(1) 热导式气体分析器	28-40
(1) 压力的分类及计量单位	28-25	(2) 磁导式氧气分析器	28-41
(2) 弹性管压力表	28-25	(3) 红外线分析器	28-41
(3) 电测法压力测量仪	28-26	(4) 工业用气相色谱仪	28-42
(4) 压力测量仪表的选用	28-26	(5) 电化学式分析器	28-42
2.2 物位测量仪表	28-26	(6) 氨气浓度分析器	28-44
(1) 直读式液位计	28-27	(7) 电导式分析器	28-44
(2) 浮力式液位计	28-27	(8) 热化学式分析器	28-44

(9) 光电比色分析器	28-44	(4) 选择性控制系统的工程设计	28-67
(10) 工业粘度计	28-44	3.8 双重控制系统	28-68
(11) 轴位移和轴振动测定仪	28-45	3.9 纯滞后补偿控制系统	28-68
2.6 控制仪表	28-45	3.10 采用计算指标的控制系统	28-70
(1) 控制的基本规律	28-45	(1) 被控变量通过变量计算而得到的控制 系统	28-70
(2) 控制仪表的选用	28-46	(2) 设定值通过变量计算而得到的控制 系统	28-70
2.7 显示仪表	28-46	3.11 推断控制	28-70
(1) 模拟式显示仪表	28-46	(1) 推断控制系统	28-70
(2) 数字式显示仪表	28-47	(2) 推断反馈控制系统	28-72
(3) 信号报警器	28-47	3.12 解耦控制	28-72
2.8 变送器及单元组合仪表	28-48	(1) 系统的关联分析	28-72
(1) 电动变送器	28-48	(2) 解耦控制	28-72
(2) 智能式变送器	28-48	(3) 工程设计中有关问题	28-73
(3) 电动单元组合仪表 (DDZ-Ⅲ)	28-49	3.13 预测控制	28-73
(4) 电动单元组合数字仪表 (DDZ-S 系列)	28-51	3.14 模糊控制	28-74
2.9 执行器	28-52	(1) 概述	28-74
(1) 电动执行器	28-52	(2) 模糊控制器结构和算法原理	28-74
(2) 气动执行器	28-53	4 集散控制系统 (DCS)	28-75
(3) 调节阀附件	28-56	4.1 产生背景及发展概况	28-75
(4) 调节阀的选用	28-56	4.2 DCS 的硬件结构组成	28-76
3 化工常用控制系统	28-58	(1) 过程控制站	28-77
3.1 简单控制系统	28-58	(2) 操作站	28-77
(1) 被控变量的选择	28-58	(3) 通信网络系统	28-78
(2) 操纵变量的选择	28-58	4.3 DCS 的软件	28-79
(3) 控制规律的选择	28-58	(1) 操作系统软件	28-79
(4) 调节阀的选择	28-59	(2) 组态软件	28-79
(5) 调节器参数的工程整定	28-59	(3) 控制软件	28-79
3.2 串级控制系统	28-60	(4) 操作站软件	28-79
(1) 串级控制系统的结构及方框图	28-60	(5) 应用软件	28-79
(2) 串级控制系统的优点	28-61	(6) 通信软件	28-79
(3) 串级控制系统的设计	28-61	(7) 访问的安全性	28-79
3.3 均匀控制系统	28-61	4.4 可编程序控制器 (PLC)	28-79
(1) 均匀控制系统的基本原理	28-61	(1) PLC 的发展过程	28-79
(2) 均匀控制系统的结构形式	28-61	(2) PLC 的基本结构组成	28-80
3.4 比值控制系统	28-62	(3) PLC 的应用注意事项	28-80
(1) 比值控制系统的类型	28-62	5 化工单元操作控制方案	28-82
(2) 比值系数的设置	28-63	5.1 流体输送设备的控制方案	28-82
3.5 前馈控制系统	28-63	(1) 离心泵的控制方案	28-82
(1) 前馈控制的基本概念	28-63	(2) 往复泵与位移式旋转泵的控制方案	28-83
(2) 前馈控制系统的类型	28-64	(3) 离心式压缩机的控制方案	28-83
(3) 前馈控制系统的设计	28-64	(4) 离心式压缩机的防喘振控制	28-83
3.6 分程控制系统	28-65	5.2 传热设备的控制方案	28-84
3.7 选择性控制系统	28-66	(1) 一般传热设备的控制方案	28-84
(1) 基本原理	28-66	(2) 管式加热炉的控制	28-85
(2) 超驰控制系统	28-66	(3) 锅炉设备的控制	28-86
(3) 其他类型的选择性控制系统	28-67		

(4) 蒸汽过热系统的控制	28-88	<i>M</i> 分子量, 总传输, 质量, 蓄存量
5.3 精馏塔的控制	28-89	<i>P</i> 压力, 比例作用
(1) 概述	28-89	<i>Q</i> 热流量, 操纵变量
(2) 质量指标的选择	28-89	<i>R</i> 气体常数, 阻力系数, 设定值
(3) 精馏塔的基本控制方案	28-90	<i>S</i> 分离度
(4) 精馏塔的新型控制方案	28-92	<i>T</i> 时间常数, 变送器
(5) 精馏塔的节能控制方案	28-94	<i>U</i> 传热系数, 控制作用
5.4 化学反应器的控制	28-95	<i>V</i> 蒸汽流量, 容积, 阀
(1) 概述	28-95	<i>W</i> 质量流量
(2) 取出料的成分或反应的转化率作为 被控变量	28-95	<i>X</i> 输入变量, 状态变量
(3) 取反应过程的工艺状态变量作为被 控变量	28-96	<i>Y</i> 输出变量, 膨胀系数
(4) 稳定外围的控制方案	28-97	<i>a</i> 系数
(5) 开环不稳定反应器的控制	28-98	<i>b</i> 系数
5.5 计算机仿真培训系统	28-98	<i>c</i> 被控变量, 比热, 转化率
(1) 概述	28-98	<i>d</i> 扰动变量
(2) 计算机仿真培训系统的构成与类型	28-99	<i>e</i> 偏差
(3) 计算机仿真培训系统的发展趋势	28-99	<i>f</i> 函数, 扰动
6 化工生产过程优化控制	28-100	<i>g</i> 重力加速度, 脉冲过渡函数
6.1 操作优化控制	28-100	<i>h</i> 压头, 过渡函数
6.2 优化控制的数学模型	28-101	<i>i</i> 组分 (作下标用)
(1) 目标函数	28-101	<i>j</i> 组分 (作下标用)
(2) 过程最优化模型	28-101	<i>k</i> 常数, 比值
(3) 约束	28-102	<i>m</i> 操纵变量
6.3 最优化方法	28-102	<i>n</i> 衰减比, 塔板数
(1) 线性规划法	28-102	<i>p</i> 压力, 极点
(2) 非线性规划法	28-103	<i>q</i> 流量, 操纵变量
6.4 化工生产过程优化控制应用示例	28-104	<i>r</i> 设定值
(1) 甲醇精馏塔的优化控制	28-104	<i>t</i> 时间
(2) 乙烯裂解炉的优化控制	28-105	<i>u</i> 操纵变量, 控制作用
参考文献	28-106	<i>v</i> 速度
		<i>x</i> 液相成分, 输入, 压差比
		<i>y</i> 气相成分, 输出
		<i>z</i> 零点, 进料成分
		<i>a</i> 相对挥发度
		<i>β</i> 特征因子
		<i>γ</i> 重度
		<i>δ</i> 比例度
		<i>ρ</i> 密度
		<i>τ</i> 时滞
		<i>ω</i> 频率
		<i>λ</i> 相对增益
		<i>θ</i> 温度
		<i>ζ</i> 阻尼系数
		<i>Δ</i> 差, 流图特征式
		<i>∂</i> 偏微分
		<i>π</i> 3.1416
		<i>σ</i> 超调量

符号说明

<i>A</i> 传热面积, 截面积, 最大偏差, 系数矩阵
<i>B</i> 塔底产品流量, 超调量, 系数矩阵
<i>C</i> 热容, 稳态值, 系数矩阵, 控制器, 容量系数
<i>D</i> 馏出液流量, 微分作用, 系数矩阵
<i>E</i> 效率, 偏差
<i>F</i> 进料流量, 扰动, 系数
<i>G</i> 传递函数, 质量流量
<i>H</i> 热焓, 反应热
<i>I</i> 积分作用
<i>J</i> 目标函数
<i>K</i> 放大系数, 比值系数, 平衡常数, 调节机构的流量系数
<i>L</i> 回流量, 液位

第28篇 过程控制

主稿、编写人 陆德民 北京石油化工工程公司 高级工程师
编写人 俞金寿 华东理工大学 教授

1 控制理论基础	28-4	(3) 差压式液位计	28-27
1.1 自动控制系统概述	28-4	(4) 电容式液位计	28-28
(1) 自动控制系统的类型及组成	28-4	(5) 音叉料位信号器	28-28
(2) 闭环控制系统的过渡过程及控制指标	28-5	(6) 阻旋式料位信号器	28-28
1.2 传递函数及方框图	28-6	(7) 超声波物位计	28-29
(1) 环节微分方程的列写	28-6	(8) 放射性物位计	28-29
(2) 传递函数	28-7	(9) 雷达波液位计	28-30
(3) 方框图及其变换	28-9	2.3 流量测量仪表	28-30
(4) 信号流图	28-10	(1) 椭圆齿轮流量计	28-30
1.3 线性连续控制系统	28-12	(2) 差压法流量计	28-31
(1) 时间特性和频率特性	28-12	(3) 旋涡流量计	28-31
(2) 稳定性和稳定裕量	28-14	(4) 涡轮流量计	28-32
(3) 多变量系统的分析方法	28-16	(5) 电磁流量计	28-32
1.4 线性离散控制系统	28-17	(6) 转子流量计	28-33
(1) 采样器及保持器	28-17	(7) 超声波流量计	28-33
(2) z 变换及脉冲传递函数	28-18	(8) 科氏力质量流量计	28-33
(3) 线性离散控制系统的分析方法	28-20	(9) 间接法测量流体质量	28-34
1.5 化工过程动态数学模型	28-21	(10) 测固体重量的冲板式流量计	28-34
(1) 动态数学模型的作用	28-21	(11) 流量计的选用	28-35
(2) 动态数学模型的类型	28-21	2.4 温度测量仪表	28-36
(3) 机理模型的建立	28-22	(1) 玻璃液体温度计	28-37
(4) 系统辨识和参数估计	28-22	(2) 双金属膨胀式温度计和压力式温度计	28-37
1.6 最优控制系统	28-24	(3) 热电阻	28-37
(1) 概述	28-24	(4) 热电偶	28-38
(2) 静态优化控制	28-24	(5) 非接触式温度计	28-39
(3) 动态最优控制	28-24	(6) 温度测量仪表的选用	28-39
2 检测仪表及控制仪表	28-25	2.5 过程分析仪表	28-40
2.1 压力测量仪表	28-25	(1) 热导式气体分析器	28-40
(1) 压力的分类及计量单位	28-25	(2) 磁导式氧气分析器	28-41
(2) 弹性管压力表	28-25	(3) 红外线分析器	28-41
(3) 电测法压力测量仪	28-26	(4) 工业用气相色谱仪	28-42
(4) 压力测量仪表的选用	28-26	(5) 电化学式分析器	28-42
2.2 物位测量仪表	28-26	(6) 氨气浓度分析器	28-44
(1) 直读式液位计	28-27	(7) 电导式分析器	28-44
(2) 浮力式液位计	28-27	(8) 热化学式分析器	28-44

(9) 光电比色分析器	28-44	(4) 选择性控制系统的工程设计	28-67
(10) 工业粘度计	28-44	3.8 双重控制系统	28-68
(11) 轴位移和轴振动测定仪	28-45	3.9 纯滞后补偿控制系统	28-68
2.6 控制仪表	28-45	3.10 采用计算指标的控制系统	28-70
(1) 控制的基本规律	28-45	(1) 被控变量通过变量计算而得到的控制 系统	28-70
(2) 控制仪表的选用	28-46	(2) 设定值通过变量计算而得到的控制 系统	28-70
2.7 显示仪表	28-46	3.11 推断控制	28-70
(1) 模拟式显示仪表	28-46	(1) 推断控制系统	28-70
(2) 数字式显示仪表	28-47	(2) 推断反馈控制系统	28-72
(3) 信号报警器	28-47	3.12 解耦控制	28-72
2.8 变送器及单元组合仪表	28-48	(1) 系统的关联分析	28-72
(1) 电动变送器	28-48	(2) 解耦控制	28-72
(2) 智能式变送器	28-48	(3) 工程设计中有关问题	28-73
(3) 电动单元组合仪表 (DDZ-Ⅲ)	28-49	3.13 预测控制	28-73
(4) 电动单元组合数字仪表 (DDZ-S 系列)	28-51	3.14 模糊控制	28-74
2.9 执行器	28-52	(1) 概述	28-74
(1) 电动执行器	28-52	(2) 模糊控制器结构和算法原理	28-74
(2) 气动执行器	28-53	4 集散控制系统 (DCS)	28-75
(3) 调节阀附件	28-56	4.1 产生背景及发展概况	28-75
(4) 调节阀的选用	28-56	4.2 DCS 的硬件结构组成	28-76
3 化工常用控制系统	28-58	(1) 过程控制站	28-77
3.1 简单控制系统	28-58	(2) 操作站	28-77
(1) 被控变量的选择	28-58	(3) 通信网络系统	28-78
(2) 操纵变量的选择	28-58	4.3 DCS 的软件	28-79
(3) 控制规律的选择	28-58	(1) 操作系统软件	28-79
(4) 调节阀的选择	28-59	(2) 组态软件	28-79
(5) 调节器参数的工程整定	28-59	(3) 控制软件	28-79
3.2 串级控制系统	28-60	(4) 操作站软件	28-79
(1) 串级控制系统的结构及方框图	28-60	(5) 应用软件	28-79
(2) 串级控制系统的特点	28-61	(6) 通信软件	28-79
(3) 串级控制系统的设计	28-61	(7) 访问的安全性	28-79
3.3 均匀控制系统	28-61	4.4 可编程序控制器 (PLC)	28-79
(1) 均匀控制系统的基本原理	28-61	(1) PLC 的发展过程	28-79
(2) 均匀控制系统的结构形式	28-61	(2) PLC 的基本结构组成	28-80
3.4 比值控制系统	28-62	(3) PLC 的应用注意事项	28-80
(1) 比值控制系统的类型	28-62	5 化工单元操作控制方案	28-82
(2) 比值系数的设置	28-63	5.1 流体输送设备的控制方案	28-82
3.5 前馈控制系统	28-63	(1) 离心泵的控制方案	28-82
(1) 前馈控制的基本概念	28-63	(2) 往复泵与位移式旋转泵的控制方案	28-83
(2) 前馈控制系统的类型	28-64	(3) 离心式压缩机的控制方案	28-83
(3) 前馈控制系统的设计	28-64	(4) 离心式压缩机的防喘振控制	28-83
3.6 分程控制系统	28-65	5.2 传热设备的控制方案	28-84
3.7 选择性控制系统	28-66	(1) 一般传热设备的控制方案	28-84
(1) 基本原理	28-66	(2) 管式加热炉的控制	28-85
(2) 超驰控制系统	28-66	(3) 锅炉设备的控制	28-86
(3) 其他类型的选择性控制系统	28-67		

(4) 蒸汽过热系统的控制	28-88	<i>M</i> 分子量, 总传输, 质量, 蓄存量
5.3 精馏塔的控制	28-89	<i>P</i> 压力, 比例作用
(1) 概述	28-89	<i>Q</i> 热流量, 操纵变量
(2) 质量指标的选择	28-89	<i>R</i> 气体常数, 阻力系数, 设定值
(3) 精馏塔的基本控制方案	28-90	<i>S</i> 分离度
(4) 精馏塔的新型控制方案	28-92	<i>T</i> 时间常数, 变送器
(5) 精馏塔的节能控制方案	28-94	<i>U</i> 传热系数, 控制作用
5.4 化学反应器的控制	28-95	<i>V</i> 蒸汽流量, 容积, 阀
(1) 概述	28-95	<i>W</i> 质量流量
(2) 取出料的成分或反应的转化率作为 被控变量	28-95	<i>X</i> 输入变量, 状态变量
(3) 取反应过程的工艺状态变量作为被 控变量	28-96	<i>Y</i> 输出变量, 膨胀系数
(4) 稳定外围的控制方案	28-97	<i>a</i> 系数
(5) 开环不稳定反应器的控制	28-98	<i>b</i> 系数
5.5 计算机仿真培训系统	28-98	<i>c</i> 被控变量, 比热, 转化率
(1) 概述	28-98	<i>d</i> 扰动变量
(2) 计算机仿真培训系统的构成与类型	28-99	<i>e</i> 偏差
(3) 计算机仿真培训系统的发展趋势	28-99	<i>f</i> 函数, 扰动
6 化工生产过程优化控制	28-100	<i>g</i> 重力加速度, 脉冲过渡函数
6.1 操作优化控制	28-100	<i>h</i> 压头, 过渡函数
6.2 优化控制的数学模型	28-101	<i>i</i> 组分 (作下标用)
(1) 目标函数	28-101	<i>j</i> 组分 (作下标用)
(2) 过程最优化模型	28-101	<i>k</i> 常数, 比值
(3) 约束	28-102	<i>m</i> 操纵变量
6.3 最优化方法	28-102	<i>n</i> 衰减比, 塔板数
(1) 线性规划法	28-102	<i>p</i> 压力, 极点
(2) 非线性规划法	28-103	<i>q</i> 流量, 操纵变量
6.4 化工生产过程优化控制应用示例	28-104	<i>r</i> 设定值
(1) 甲醇精馏塔的优化控制	28-104	<i>t</i> 时间
(2) 乙烯裂解炉的优化控制	28-105	<i>u</i> 操纵变量, 控制作用
参考文献	28-106	<i>v</i> 速度
		<i>x</i> 液相成分, 输入, 压差比
		<i>y</i> 气相成分, 输出
		<i>z</i> 零点, 进料成分
		<i>a</i> 相对挥发度
		<i>β</i> 特征因子
		<i>γ</i> 重度
		<i>δ</i> 比例度
		<i>ρ</i> 密度
		<i>τ</i> 时滞
		<i>ω</i> 频率
		<i>λ</i> 相对增益
		<i>θ</i> 温度
		<i>ζ</i> 阻尼系数
		<i>Δ</i> 差, 流图特征式
		<i>∂</i> 偏微分
		<i>π</i> 3.1416
		<i>σ</i> 超调量

符号说明

<i>A</i> 传热面积, 截面积, 最大偏差, 系数矩阵
<i>B</i> 塔底产品流量, 超调量, 系数矩阵
<i>C</i> 热容, 稳态值, 系数矩阵, 控制器, 容量系数
<i>D</i> 馏出液流量, 微分作用, 系数矩阵
<i>E</i> 效率, 偏差
<i>F</i> 进料流量, 扰动, 系数
<i>G</i> 传递函数, 质量流量
<i>H</i> 热焓, 反应热
<i>I</i> 积分作用
<i>J</i> 目标函数
<i>K</i> 放大系数, 比值系数, 平衡常数, 调节机构的流量系数
<i>L</i> 回流量, 液位

常用下标含义

- c 调节器
- d 微分作用, 前馈
- f 扰动通道, 最终
- i 输入, 积分作用
- k 临界
- m 检测变送器
- o 输出, 对象
- p 工作周期, 控制通道
- v 执行器, 调节阀
- w (器)壁

1 控制理论基础

1.1 自动控制系统概述^[1,2]

(1) 自动控制系统的类型及组成

在化工生产中, 对各工艺变量有一定的控制要求。有些工艺变量对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如, 精馏塔的塔顶或塔底的温度, 必须保持一定, 才能得到合格的产品。有些工艺变量虽不直接影响产品的数量和质量, 然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如, 用蒸汽加热的反应器或再沸器, 在蒸汽压力波动剧烈的情况下, 要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难。中间贮槽的液位和气柜的压力必须维持在允许范围内, 才能使物料平衡, 保持连续的均衡生产。还有些工艺变量是决定安全生产的因素, 不允许超出规定的限度。对于以上各种类型的变量, 在化工生产过程中都予以必要的控制。

为了实现控制要求, 可以有两种方式, 一是人工控制, 二是自动控制。自动控制是在人工控制的基础上发展起来的, 使用了自动化仪表等控制装置来代替人的观察、判断、决策和操作。

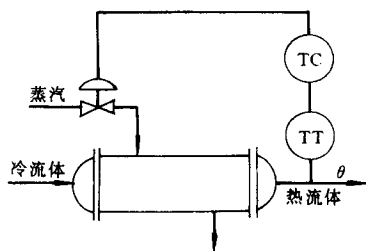


图 1-1 蒸汽加热器出口温度控制系统

图 1-1 所示是蒸汽加热器出口温度自动控制系统。加热器出口温度经检测元件和变送器 TT 测量出来, 并与工艺规定的温度设定值进行比较, 出现偏差时, 调节器 TC 根据偏差大小和方向按某种规律发布命令, 开大或关小蒸汽调节阀, 使出口温度恢复到规定值。由于冷流体流量、温度或加热蒸汽阀前压力等因素的波动, 将使出口温度偏离规定值。此时调节器重新工作, 使出口温度恢复到规定值。下面结合蒸汽加热器出口温度控制的例子来说明控制系统中常用的几个术语。

①被控对象或过程 需要实现控制的设备、机器或生产过程, 称为被控对象或过程, 本例中为蒸汽加热器。

②被控变量 对象或过程内要求保持规定数值 (接近恒定值或按预定规律变化) 的物理量, 称为被控变量, 本例中为热流体的出口温度。

③设定值 被控变量的规定值称为设定值。

④操纵变量 受到控制装置操纵, 用以使被控变量保持在设定值的物料量或能量, 称为操纵变量, 本例中为加热蒸汽。

⑤扰动变量 除操纵变量以外, 作用于过程并引起被控变量变化的因素, 称为扰动变量, 如本例中冷流体的流量和温度, 蒸汽阀的上游压力。

⑥偏差 偏差理论上应该是被控变量的设定值与实际值之差。但是能够获取的信息是被控变量的测量值而不是实际值, 因此通常把设定值与测量值之差作为偏差。

(1.1) 控制系统的类型

按控制系统的基本结构, 可以分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。

①开环控制系统 开环控制系统分两种, 一种是按设定值进行控制。如蒸汽加热器, 其蒸汽流量与设定值保持一定的函数关系, 当设定值变化时, 操纵变量随之变化。图 1-2 (a) 所示为其原理图。另一种是按扰动进行控制, 即所谓前馈控制。如蒸汽加热器中, 如果进料流量 (负荷) 是主要扰动, 则使蒸汽流量与进料流量间保持一定的函数关系, 当扰动出现时, 操纵变量按此函数关系随之变化, 图 1-2 (b) 为其原理图。

②闭环控制系统 闭环控制系统又称为反馈控制系统, 它是按偏差进行控制的。在蒸汽加热器出口温度控制系统中, 温度调节器根据设定值与温度测量值的偏差大小及方向, 按一定控制规律去调整蒸汽阀门的开度, 改变蒸汽量。由此可以看出操纵变量 (蒸汽量) 会通过对象去影响被控变量 (温度), 而被控变量又会通过调节器去影响操纵变量。从信息的传递关系来看, 构成一个闭合回路, 所以称为闭环控制系统。被控变量的信息要送回到自动控制装置 (调节器), 所以亦称为反馈控制系统。图 1-2 (c) 即为其原理图。

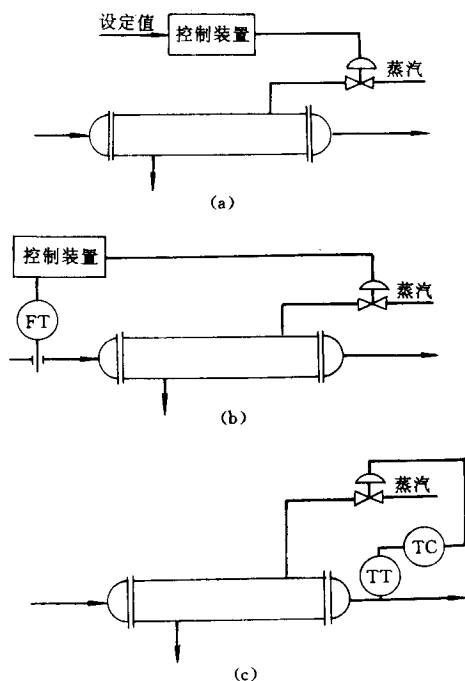


图 1-2 控制系统的基本结构

(a) 按设定值而控制的开环系统;

(b) 按扰动而控制的开环系统;

(c) 闭环控制系统

有时也采用自动调节系统一词,它就是指闭环控制系统。

在闭环控制系统中,按设定值情况的不同,又可分为三种类型。

①定值控制系统 设定值是一个恒值,它的基本任务是克服扰动对被控变量的影响,即在扰动作用下仍能使被控变量保持在设定值或其附近。在化工生产过程中的自动控制系统,凡要求工艺变量平稳不变的,都属于这个范畴。

②随动控制系统(伺服系统) 设定值是事先未知的的时间函数,它的主要任务是使被控变量能够尽快地、准确无误地跟踪设定值的变化。在化工自动化中,有些比值控制系统就属此类。例如,在燃烧系统中,燃料量应与空气量之间保持一定的比例,空气应按一定比例随着燃料流量的变化而变化。

③程序(顺序)控制系统 设定值是一个事先规定的时间函数,它要求被控变量能按照事先规定的时间函数变化。在化工自动化中,间歇反应器的升温控制系统属于此类系统。

(1.2) 闭环控制系统的组成

任何一个自动控制系统,总是由过程和自动控制装

置组成的。自动控制装置可以很简单,例如用浮球带动阀门的液位控制器;也可以相当复杂,例如采用工业控制机及其外围设备和接口。不论其结构如何,闭环控制系统的自动控制装置总要实现检测、判断、决策和操纵的功能,可以用图 1-3 所示的方框图来表示。

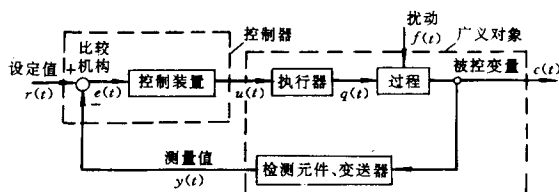


图 1-3 闭环控制系统的组成

①检测元件和变送器 它的作用是把被控变量 $c(t)$ 转化为测量值 $y(t)$ 。例如,用热电阻或热电偶测量温度,并用温度变送器转换为统一的气压信号(20~100kPa)或直流电流信号(0~10mA或4~20mA)。

②调节器(控制器) 它由比较机构和控制装置组合而成。比较机构的作用是比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 并输出其差值 $e(t)$ 。控制装置的作用是根据偏差的正负、大小及变化情况,按某种预定的控制规律给出控制作用 $u(t)$ 。目前应用最广的调节器是气动和电动调节器。

③执行器 它的作用是接受调节器送来的控制作用 $u(t)$,去改变操纵变量 $q(t)$ 。最常用的执行器是气动薄膜调节阀。在采用电动调节器的场合,调节器的输出 $u(t)$ 还需经电-气转换器将统一的电流信号转换成统一的气压信号。

④广义对象 控制系统中除调节器外,过程(对象)、检测元件、变送器和执行器的组合称为广义对象。

(2) 闭环控制系统的过渡过程及控制指标

(2.1) 静态和动态

对于一个控制系统,我们除了关心控制的最终结果外,更需要注意控制的变化过程,即对系统不仅需要从静态的观点来考虑,更需要从动态的角度作分析。

所谓静态是指系统或环节在某一输入作用下,当 $t \rightarrow \infty$ 时达到平稳时的情况。对于化工对象来说,静态特性由物料平衡、能量平衡及化学反应平衡等规律所确定。从严格意义上说,应称为稳态特性,因为它反映的是动态平衡情况。

所谓动态是指在输入作用下,系统或环节从原来的静态出发,逐渐随时间变化的过渡过程。动态特性亦称暂态特性,可以认为静态是动态特性在时间 $t \rightarrow \infty$ 时的特例。图 1-4 所示是过渡过程的几种形式。

(2.2) 控制指标

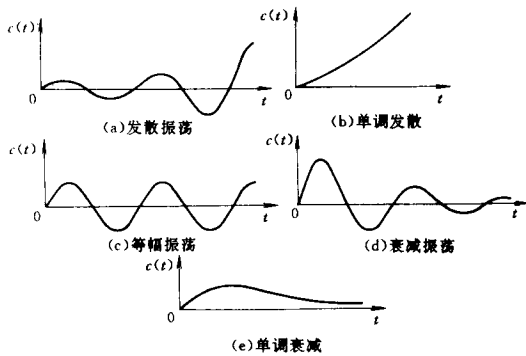


图 1-4 定值调节系统的过渡过程几种形式

一个控制系统在受到外扰作用时,要求被控变量要平稳、迅速和准确地趋向或恢复到设定值。因此应在稳定性、快速性和准确性三个方面提出各单项控制指标和综合指标。图 1-5 (a) 为定值控制系统在阶跃扰动作用下的衰减振荡过程;图 1-5 (b) 为随动控制系统在阶跃设定作用下的衰减振荡过程。

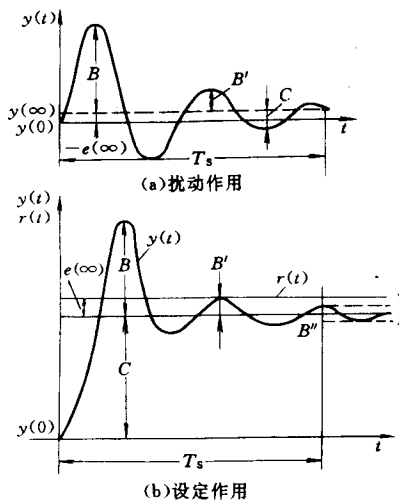


图 1-5 过渡过程控制指标示意图

① 单项控制指标

① 衰减比 n 它是衡量过渡过程稳定性的指标。它的定义是上一个波的振幅与下一个波的振幅之比 $B/B' = n$, $n < 1$ 表示振幅不衰减反而扩大,调节过程不稳定,系统不能正常工作。如果 $n = 1$,则为等幅振荡,系统处于稳定边缘。如果 $n > 1$,则称之为衰减振荡,是允许的。根据实际操作经验,为保持足够的稳定裕度,多数情况下 n 取 4~10。

② 最大偏差 e_{\max} 或超调量 σ 最大偏差常用于扰动作用下的控制系统即定值控制系统, $|e_{\max}| = B + C$ 。超调量常用于设定作用下的控制系统即随动控制系统, $\sigma = \frac{B}{C} \times 100\%$ 。这两项都是动态指标,它们都反映超调情况。在定值控制系统中 e_{\max} 应该有它的允许界限。

③ 余差 $e(\infty)$ 在阶跃外作用下的最终偏差称为余差,定值控制系统的余差 $e(\infty) = 0 - y(\infty) = -y(\infty) = -C$;随动控制系统的余差 $e(\infty) = r - y(\infty) = r - C$ 。余差是反映控制准确性的稳态指标,一般希望其为零,或不超过预定的范围。

④ 调节时间(回复时间) T_s 要使 $y(t)$ 完全趋近于 $y(\infty)$,时间要无限地延长。然而,要使 $y(t)$ 进入 $y(\infty)$ 附近一定范围,并继续保持在此范围内,时间还是有限的。从扰动开始到被控变量 $y(t)$ 进入 $y(\infty)$ 附近 $\pm 5\%$ 或 $\pm 3\%$ 区域内所需时间,称为调节时间(或回复时间)。提高振荡频率或增大衰减比都能缩短调节时间。

各项指标须结合具体系统的控制要求来选择,要分清主次,因为要求这四个质量指标都要很高是困难的。

② 综合控制指标

综合控制指标往往通过偏差的某些函数对时间的积分值来表述,它们兼顾了衰减比、超调量和调节时间几方面的因素,较常用的有三种:

① 偏差绝对值对时间的积分 $IAE = \int_0^{\infty} |e| dt$ 如果直接按偏差对时间的积分,则将产生上下积分面积相消现象,采用偏差的绝对值后可以避免这一点。

② 偏差平方值对时间的积分 $ISE = \int_0^{\infty} e^2 dt$ 与 IAE 比较,它对最大偏差的数值更为敏感。

③ 偏差绝对值与时间乘积对时间的积分 $ITAE = \int_0^{\infty} |e| t dt$, 与 IAE 比较,它对消除偏差所需时间更为敏感。

在现代控制理论中,常采用某种目标函数 J 作为品质指标,常用的二次型指标可以说是 ISE 的一种发展。

1.2 传递函数及方框图

(1) 环节微分方程的列写

为了研究控制系统的动态特性,必须了解系统各个组成环节的动态特性。根据各环节本身的物理及化学规律,列写微分方程是获取动态特性的一条重要途径。

(1.1) 环节微分方程的列写方法与步骤

① 原始微分方程的列写 对于化工过程来说,原始微分方程的列写主要依据是物料平衡和能量平衡的关系式,一般可用下式表示:

单位时间内进入环节的物料量 (或能量)
 - 单位时间内由环节流出的物料量 (或能量)
 = 系统内物料 (或能量) 蓄存量的变化率

② 中间变量的消除 为了找到输出变量 y 与输入变量 x 之间关系, 必须设法消除原始微分方程中的中间变量, 常常要用到相平衡关系, 用到传热、传质及化学反应速率关系式等。

③ 增量方程式 在控制理论中, 增量方程式得到广泛的应用。它不仅便于把原来非线性特性线性化, 而且通过坐标的移动, 把工作点作为原点, 使输入输出关系更加清晰, 便于运算, 求取传递函数也十分方便。

对于线性系统, 增量方程式的列写很方便, 只要将原方程中变量用它的增量代替即可。对于非线性特性则需要线性化, 在输入和输出工作范围内, 把非线性关系近似为线性关系。最常用的是切线法, 在工作点附近展开成泰勒级数, 只保留一次项后, 即可得到变量 (增量) 的线性函数关系式。

现以图 1-6 所示液位系统作为微分方程列写的例子。

① 原始微分方程的列写

取流入量 q_i 为输入, 液位 h 为输出, 根据物料平衡关系有

$$q_i - q_o = C \frac{dh}{dt} \quad (1-1)$$

式中 C 为贮槽的截面积。

② 消去中间变量

由流量公式得知

$$q_o = C_v \sqrt{2gh} \quad (1-2)$$

式中 C_v 是阀门的流通能力。

③ 增量方程式

$$\Delta q_o = \left. \frac{\partial q_o}{\partial h} \right|_{h_0} \Delta h = \frac{C_v \sqrt{2g}}{2 \sqrt{h_0}} \Delta h \quad (1-3)$$

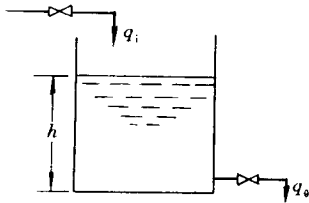


图 1-6 液位系统

将上式代入原始微分方程, 并写成增量方程

$$\Delta q_i - \frac{C_v \sqrt{2g}}{2 \sqrt{h_0}} \Delta h = C \frac{d\Delta h}{dt} \quad (1-4)$$

$$T \frac{d\Delta h}{dt} + \Delta h = K \Delta q_i \quad (1-5)$$

$$\text{式中 } T = RC; R = \frac{2 \sqrt{h_0}}{C_v \sqrt{2g}}; K = R.$$

上式就是液位系统的增量方程式。

(1.2) 一阶滞后环节

表 1-1 以浓度混和、间壁加热和液位贮槽对象为例, 说明微分方程的列写步骤。

浓度混和、间壁加热和液位贮槽的微分方程形式相同, 都是

$$T \frac{d\Delta y}{dt} + \Delta y = K \Delta x \quad (1-6)$$

式中 Δy —— 输出的增量;

Δx —— 输入的增量;

T —— 时间常数, 可以认为是容量系数 C 与阻力系数 R 的乘积;

K —— 放大系数。

这三种对象都属于有自衡的、单容量的环节, 微分方程式相同, 常称一阶滞后环节或一阶非周期环节。当输入 Δx 作阶跃变化时, 输出 Δy 的变化过程 (如图 1-7):

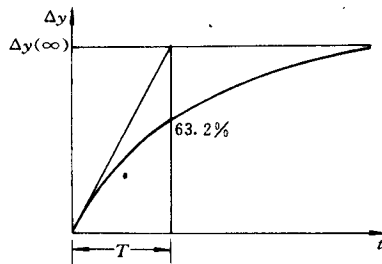


图 1-7 一阶滞后环节的阶跃响应

$$\Delta y = K [1 - \exp(-t/T)] \Delta x \quad (1-7)$$

放大系数 K 是环节在输入作用下, 输出的变化量与输入的变化量之比:

$$K = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x(\infty)} \quad (1-8)$$

时间常数 T 的物理意义是: 当环节受到阶跃输入作用后, 输出变量 $\Delta y(t)$ 如果一直保持初始速度变化下去, $\Delta y(t)$ 达到新的稳态值 $\Delta y(\infty)$ 所需的时间, 或输出变量达到新的稳态值 63.2% 所需的时间。因而时间常数的大小, 反映了过渡过程的快慢。 T 越小, 过渡过程时间越短, 反之 T 越大, 则过渡过程时间越长。所以时间常数 T 是环节的动态参数。

(2) 传递函数

(2.1) 传递函数的概念

在控制理论中, 对于线性定常系统, 特别是单变量系统, 为了表示系统的输入-输出关系, 广泛应用传递函数。

表 1-1 微分方程列写的例子

对 象			
输入变量	入口浓度 c_1	壁温 θ_w	进液量 Q_i
输出变量	出口浓度 c_0	出口温度 θ_0	液位 h
物料或能量衡算, 并用输入输出变量代入	$G_1 c_1 + G_2 c_2 - G_0 c_0 = M \frac{dc_0}{dt}$ $G_0 = G_1 + G_2$	$G_c \theta_1 - G_c \theta_0 + \alpha A (\theta_w - \theta_0) = M_c \frac{d\theta_0}{dt}$	$Q_i - Q_0 = A \frac{dh}{dt}$ $Q_0 = C_v \sqrt{2gh}$
容量系数 C	蓄存量 M	热容量 M_c	截面积 A
增量化	$G_1 \Delta c_1 = (G_1 + G_2) \Delta c_0 + M \frac{d\Delta c_0}{dt}$	$\alpha A \Delta \theta_w = (\alpha A + G_c) \Delta \theta_0 + M_c \frac{d\Delta \theta_0}{dt}$	$\Delta \theta_1 = \frac{C_v \sqrt{2g}}{2 \sqrt{h_s}} \Delta h + A \frac{dh}{dt}$
整理	$\Delta c_0 + \frac{M}{G_1 + G_2} \frac{d\Delta c_0}{dt} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \Delta c_1$	$\Delta \theta_0 + \left(\frac{M_c}{\alpha A + G_c} \right) \frac{d\Delta \theta_0}{dt} = \left(\frac{\alpha A}{\alpha A + G_c} \right) \Delta \theta_w$	$\Delta h + RA \frac{d\Delta h}{dt} = R \Delta Q_i$ $R = \frac{2 \sqrt{h_s}}{C_v \sqrt{2g}}$
通式	$\Delta c_0 + T \frac{d\Delta c_0}{dt} = K \Delta c_1$ $T = \frac{M}{G_1 + G_2}$ $K = \frac{G_1}{G_1 + G_2}$	$\Delta \theta_0 + T \frac{d\Delta \theta_0}{dt} = K \Delta \theta_w$ $T = \frac{M_c}{\alpha A + G_c}$ $K = \frac{\alpha A}{\alpha A + G_c}$	$\Delta h + T \frac{d\Delta h}{dt} = K \Delta Q_i$ $T = RA$ $K = R$

表 1-2 典型环节的微分方程和传递函数

类 型	微 分 方 程	传 递 函 数
比例环节	$x = Ku$	$G(s) = K$
积分环节	$\frac{dx}{dt} = Ku$	$G(s) = \frac{K}{s}$
一阶滞后环节	$T \frac{dx}{dt} + x = Ku$	$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$
二阶振荡环节	$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{dx}{dt} + x = Ku$	$G(s) = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi s}{\omega_0} + 1}$
纯滞后环节	$x(t) = u(t - \tau)$	$G(s) = e^{-s\tau}$
一阶超前环节	$x(t) = K(u + T_d \frac{du}{dt})$	$G(s) = K(1 + T_d s)$

线性定常系统对象或环节的传递函数定义是：当初始条件为零时，系统、对象或环节输出变量的拉氏变换式与输入变量的拉氏变换式之比。

设有一线性定常系统，它的微分方程是：

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + ay = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (n \geq m) \quad (1-9)$$

式中 y —— 系统的输出变量；

x ——系统的输入变量。

初始条件为零时,对上式进行拉氏变换,得系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-10)$$

或 $Y(s) = G(s)X(s) \quad (1-11)$

(2.2) 常见环节的传递函数

现将几类常见环节的传递函数列于表 1-2,有些环节是以上某几种环节的组合。如 PI 环节可看作比例环节与积分环节的并联,传递函数是相加关系。实际 PD 环节可看作一阶滞后环节与一阶超前环节的串联,传递函数是相乘关系。

(2.3) 由传递函数求时间特性

对于一阶滞后环节,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts+1} \quad (1-12)$$

当输入作单位阶跃变化时, $X(s) = \frac{1}{s}$

$\therefore Y(s) = \frac{K}{s(Ts+1)} \quad (1-13)$

展开成部分分式:

$$Y(s) = \frac{K}{s} - \frac{TK}{Ts+1} \quad (1-14)$$

将上式反变换后,可得时间特性的表达式:

$$y(t) = k[1 - \exp(-t/T)] \quad (1-15)$$

对于任何一个环节或系统的传递函数,使其分母为零的 s 值常用 p 表示,称为传递函数的极点;使其分子项为零的 s 值常用 z 表示,称为传递函数的零点。以一阶滞后环节为例,极点是 $P = -\frac{1}{T}$,但没有零点。

(3) 方框图及其变换

方框图是环节和系统的一种图示方法,也是一种有效的运算工具。在方框图中,每个环节用一个方块来表示,在其内填写传递函数,以表明输入和输出信号间的定量关系。输入和输出信号用带有箭头的线段表示,如图 1-8 所示。

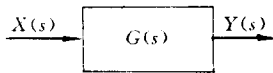


图 1-8 方框图单元

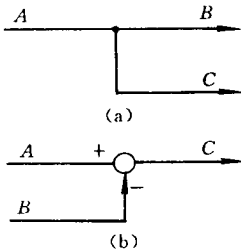


图 1-9 分支点和相加点

各环节间用信号线相联系。一个信号送往两个以上环节的分支点用图 1-9 (a) 形式表示, $A=B=C$ 。两个或更多信号进行代数相加的点叫相加点,用图 1-9 (b) 的形式表示, $C=A+B$ 。各个环节间的联接方式基本上有三种:

① 环节间相串联时的传递函数 图 1-10 (a) 所示是两个环节相串联的方框图,前一环节的输出即为后一环节的输入。由图可知:

$$W(s) = G_1(s)U(s) \quad (1-16)$$

$$X(s) = G_2(s)W(s) = G_2(s)G_1(s)U(s) \quad (1-17)$$

$\therefore \frac{X(s)}{U(s)} = G(s) = G_1(s)G_2(s) \quad (1-18)$

由此可知,若干个环节相串联时的传递函数等于各个环节传递函数的乘积。

② 环节间相并联时的传递函数 图 1-10 (b) 是两个环节并联时的方框图,各环节的输入是相同的,而输出的代数和是环节组的总输出,由图可知:

$$X(s) = G_1(s)U(s) + G_2(s)U(s) = [G_1(s) + G_2(s)]U(s) \quad (1-19)$$

$\therefore \frac{X(s)}{U(s)} = G(s) = G_1(s) + G_2(s) \quad (1-20)$

由此可知,各环节并联时,其总的传递函数等于各个传递函数之和。

③ 反馈时的传递函数 图 1-10 (c) 是具有负反馈时的方框图,由图可知:

$$X(s) = G(s)[U(s) - H(s)X(s)] \quad (1-21)$$

$\therefore \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-22)$

对于正反馈系统的传递函数为:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{G(s)}{1 - G(s)H(s)} \quad (1-23)$$

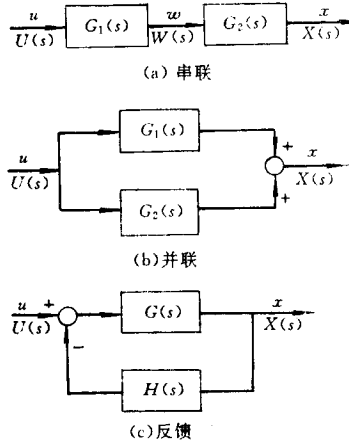


图 1-10 环节间的基本联接方式

有时系统或环节的方框图并不一定是上述三种基本联接方式的简单组合,而可能具有较复杂的联接形式。这时可以通过等效变换,将方框图逐步简化为上述三种基

本的联接形式。然后应用上述各公式求得整个系统或环节的传递函数。表 1-3 列举了一些重要框图的等效变换。

图 1-11 是方框图简化的例子。

(4) 信号流图^[3]

表 1-3 方块图的代数法则

	原方块图	等效方块图
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

对于复杂系统,方框图简化的过程有时还较繁冗。采用信号流图法,可直接用梅逊公式求取系统输入输出间的函数关系,相当简捷。信号流图法不仅可用于控制系统的分析,而且还可用于复杂化工系统的工艺衡算。

为前向通路。前向通路中各支路传输的乘积称为前向通路增益。如图 1-12 中 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6 \rightarrow x_7 \rightarrow x_8$ 及 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_7 \rightarrow x_8$ 为前向通路,前向通路相应的增益为 $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ 及 a_1, a_2, a_{10} 。

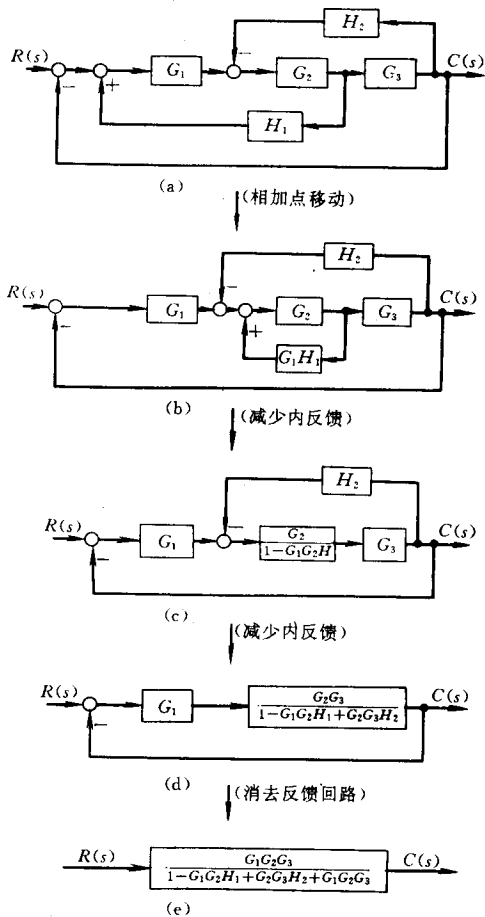


图 1-11 方块图简化示例

(4.1) 信号流图中的名词术语。

节点 表示变量或信号的点。

支路 连接两个节点的定向线段。

传输 支路的增益叫传输。

输入节点或源点 只有输出支路的节点,称输入节点或源点。它对应于自变量。如图 1-12 中 x_1 。

输出节点或阱点 只有输入支路的节点,称为输出节点或阱点。它对应于因变量,如图 1-12 中 x_8 。

混合节点 既有输入支路,又有输出支路的节点,称为混合节点,如图 1-12 中 x_2, x_3, \dots 。

通路 从一节点出发,沿箭头方向的一串支路,这串支路与中间任何一节点相遇不能多于一次,最后到达另一节点,此串支路称为通路,相应的所有支路传输的乘积称为通路增益。

前向通路及增益 从输入节点到输出节点的通路称

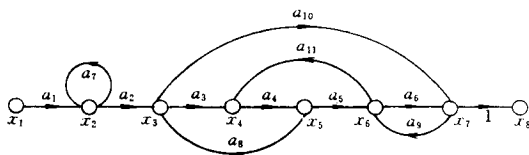


图 1-12 信号流图

回路 从一节点出发,沿箭头方向经若干支路返回到这节点的闭合通路称为回路,如图 1-12 中 $x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_6$ 是一回路。另外 $x_2 \rightarrow x_2$ 亦是回路,它只与本节点相交,故此回路又称自回路。

回路增益 回路中所有支路传输的乘积称为回路增益。

不接触回路 如果一些回路没有任何公共节点,就称它们为不接触回路,如图 1-12 中 $x_3 \rightarrow x_4 \rightarrow x_5 \rightarrow x_3$ 回路与 $x_6 \rightarrow x_7 \rightarrow x_6$ 回路是不接触回路。

(4.2) 信号流图的代数法则

① 只有一个输入支路的节点的值等于支路传输与上一节点数值的乘积,如图 1-13 中 $x_2 = a_1 x_1$ 。

② 串联支路的总传输等于所有支路传输的乘积,如图 1-13 中, $x_3 = b x_2 = a b x_1$ 。

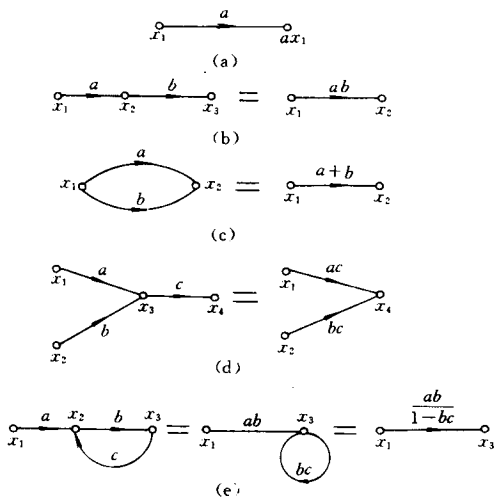


图 1-13 信号流图及其简化

③ 并联支路的总传输等于所有支路传输的总和,如图 1-13 中 $x_2 = (a+b)x_1$ 。

④ 混合节点与回路可以消掉,如图 1-13 中 (d)、(e)。

运用以上法则，可用图解法对信号流图简化。

(4.3) 梅逊 (S. J. Mason) 增益公式

利用梅逊公式可以计算从源点到阱点的总传输，其公式是：

$$M = \frac{x_o}{x_i} = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n M_k \Delta_k \quad (1-24)$$

式中 M —— 从源点到阱点的总传输或总增益；

x_o —— 阱点变量 (输出变量)；

x_i —— 源点变量 (输入变量)；

M_k —— 第 k 条前向通路的通路增益；

Δ —— 流图本身的特征式， $\Delta = 1 - \sum_m P_{m1} + \sum_m P_{m2} - \sum_m P_{m3} + \dots$ ，其中 $\sum_m P_{m1}$ 是所有不同回路增益之和， $\sum_m P_{m2}$ 是每二个互不接触回路增益乘积之和， \dots ；

Δ_k —— 除去与第 k 条前向通路 (M_k) 相接触的所有回路的 Δ 值，又称第 k 条前向通路特征式的余因子。

例 求图 1-11 (a) 所示系统的 $C(s)/K(s)$ 。

解：① 画出图 1-14 所示信号流图。

② 前向通路只有一条：

$$M_1 = G_1 G_2 G_3 \quad (1-25)$$

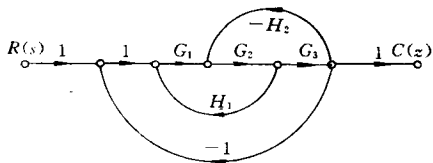


图 1-14 本系统的信号流图

③ 有三个回路，其传输：

$$P_1 = G_1 G_2 H_1 \quad (1-26)$$

$$P_2 = -G_2 G_3 H_2 \quad (1-27)$$

$$P_3 = -G_1 G_2 G_3 \quad (1-28)$$

④ 因 P_1 、 P_2 、 P_3 都通过 G_2 支路，因此没有不接触回路。

$$\Delta = 1 - G_1 G_2 H_1 + G_2 G_3 H_2 + G_1 G_2 G_3 \quad (1-29)$$

⑤ 因为 P_1 与前向通路接触。

$$\therefore \Delta_1 = 1 \quad (1-30)$$

$$\textcircled{7} M = \frac{M_1 \Delta_1}{\Delta} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 - G_1 G_2 H_1 + G_2 G_3 H_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (1-31)$$

1.3 线性连续控制系统

(1) 时间特性和频率特性

(1.1) 时间特性

对于一个系统或环节，当输入作用 $x(t)$ 为某种形式

的时间函数时，输出 $y(t)$ 反映了时间特性。输入作用 $x(t)$ 通常考虑有三种形式：

① 单位阶跃函数 $x(t)=1$ 这时输出 $y(t)$ 称为过渡函数 $h(t)$ ，如图 1-15 所示。

② 单位脉冲函数 $x(t)=\delta(t)$ 这时输出 $y(t)$ 称为脉冲过渡函数 $g(t)$ ，如图 1-16 所示。 $h(t)$ 与 $g(t)$ 间存在积分和导数关系：

$$h(t) = -\int_0^t g(\tau) d\tau \quad g(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (1-32)$$

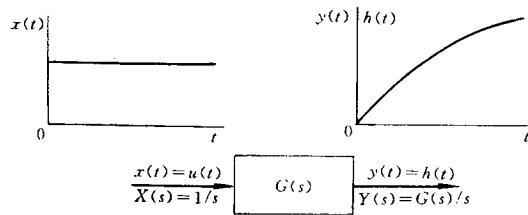


图 1-15 阶跃输入作用下的过渡过程

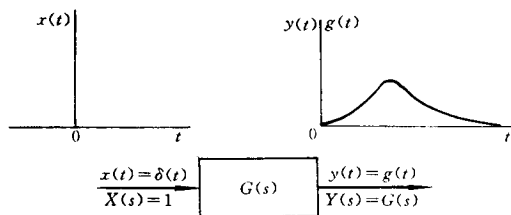


图 1-16 脉冲输入作用下的过渡过程

③ 单位斜坡函数 $x(t)=t(t \ge 0)$ 此时输出如图 1-17 所示。

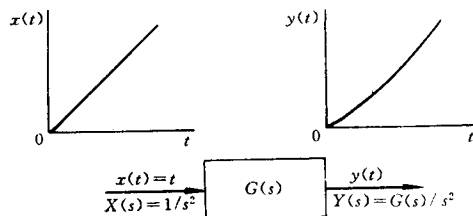


图 1-17 单位斜坡输入作用下的过渡过程

另外对于任意的时间函数 $x(t)$

$$Y(s) = G(s)X(s) \quad (1-33)$$

$$x(t) = \int_0^t g(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (1-34)$$

(1.2) 二阶振荡环节的阶跃响应

在化工自动控制系统的分析中，二阶振荡环节的阶跃响应具有特别重要的意义。因为绝大多数的闭环控制

系统可以用二阶振荡环节来近似,同时调节品质往往用阶跃输入下的过渡过程情况来衡量,所以有关的结论不仅适用于单一的二阶环节,而且适用于大多数的闭环系统。

图 1-18 所示是一个二阶闭环系统,由图可知,定值控制系统的传递函数是:

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{K_f}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1 + K_c K_0} \quad (1-35)$$

而随动控制系统的传递函数是:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_c K_0}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1 + K_c K_0} \quad (1-36)$$

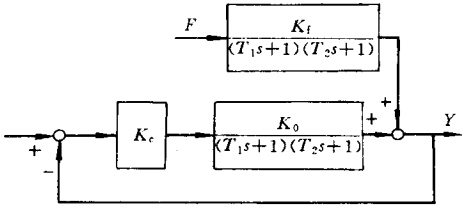


图 1-18 二阶系统的方框图

定值与随动控制系统的传递函数可以转化为标准的二阶振荡环节的传递函数:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + 2\zeta s/\omega_0 + 1} \quad (1-37)$$

式中

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_c K_0 + 1}{T_1 T_2}} \quad \zeta = \frac{1}{2} \frac{T_1 + T_2}{\sqrt{T_1 T_2} \sqrt{1 + K_c K_0}}$$

$$K = \frac{K_f}{1 + K_c K_0} \quad (\text{定值}) \quad K = \frac{K_c K_0}{1 + K_c K_0} \quad (\text{随动})$$

对于复数极点情况,如传递函数为 $\frac{K(a^2 + \beta^2)}{(s + a)^2 + \beta^2}$,

$$\text{则 } \zeta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \beta^2}}, \omega_0 = \sqrt{a^2 + \beta^2}, a = \zeta \omega_0, \beta = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

对于 $\zeta < 1$ 时的阶跃响应为:

$$y(t) = K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_0 t} \right] \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-38)$$

$$\text{式中 } \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}$$

对于 $\zeta < 1$ 的二阶振荡环节,若干品质指标与 K 、 ζ 、 ω_0 的关系如下:

①稳定性 $\zeta > 0$ 时,系统(或环节)是渐近稳定的,逐渐趋于最终值; $\zeta < 0$ 时,系统不稳定,振荡会越来越大; $\zeta = 0$ 时,系统处于稳定边缘,等幅振荡。

②衰减比 出现峰值时, $dy(t)/dt = 0$, 据此可求出达到第一个峰值的时间 $t_r = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{\pi}{\beta}$, 依据 t_r 及 $(t_r + T_p)$ 时的幅值比,求得衰减比

$$n = \exp \frac{2\pi\alpha}{\beta} = \exp (2\pi\zeta / \sqrt{1 - \zeta^2})$$

常用衰减比为 4 或 10, 对应的 ζ 为 0.216 或 0.343。

③最大偏差或超调量 依据 t_r 可以求得定值控制系统的最大偏差

$$A = \frac{K_f}{1 + K_c K_0} \left[1 + e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}} \right] = \frac{K_f}{1 + K_c K_0} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{n}} \right]$$

随动控制系统的绝对超调量

$$B = \frac{K_c K_0}{1 + K_c K_0} e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}}$$

相对超调量

$$\sigma = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}} = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

④最终值和余差 系统的最终值为 K , 定值控制系统的余差 $= -K = -\frac{K_f}{1 + K_c K_0}$, 随动控制系统的余差 $= 1 - K = \frac{1}{K_c K_0 + 1}$ 。

⑤振荡频率 ω 和调节时间 T_s . $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$, 周期 $T_p = \frac{2\pi}{\omega}$, 当 ζ 很小时, ω 接近自然频率 ω_0 。按过渡过程曲线进入终值的 $\pm 5\%$ 之内所需时间计算, 调节时间 $T_s = \frac{3}{\zeta \omega_0} = \frac{3}{\alpha}$ 。

(1.3) 传递函数极点分布与时间特性关系

传递函数极点(亦即特征根)在 s 平面上的分布可以与时间特性联系起来。设极点 $p = -\alpha \pm \beta j$ (与传递函数 $\frac{K(a^2 + \beta^2)}{(s + a)^2 + \beta^2}$ 形式相对应), 依据上一小节可知:

①稳定性 所有极点都位于虚轴以左, 即具有负实部时, 系统渐近稳定。在图 1-19 中, 即为有阴影线区域。

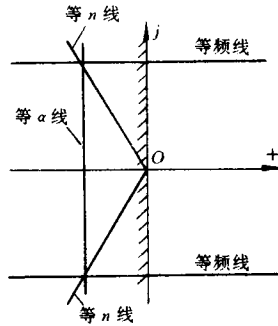


图 1-19 极点分布

②等频线 β (或 ω) 为恒值的线是等频线。 β 越大, 频率越高。

③等 n 线(等 ζ 线), 斜率 $\beta/\alpha = \sqrt{1 - \zeta^2}/\zeta$ 为恒值的线为等衰减比线(等 n 线或等 ζ 线)。对于共轭极点所对应的波动分量, $n = 4$ 相应于 $\beta/\alpha = 4.52$; $n = 10$ 相应

表 1-4 典型环节的 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$

	$G(j\omega)$	$A(\omega)$	$\varphi(\omega)$
比例环节	K	K	0
积分环节	$\frac{K}{j\omega}$	$\frac{K}{\omega}$	$-\frac{\pi}{2}$
一阶滞后环节	$\frac{K}{Tj\omega+1}$	$\frac{K}{\sqrt{1+T^2\omega^2}}$	$-\arctg T\omega$
二阶振荡环节	$\frac{K}{(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2})+j\frac{2\zeta\omega}{\omega_0}}$	$K[(1-(\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2+(2\zeta\frac{\omega}{\omega_0})^2]^{-1/2}$	$-\arctg \frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_0}}{1-(\frac{\omega}{\omega_0})^2}$
一阶超前环节	$K(1+T_d s)$	$K\sqrt{1+T_d^2\omega^2}$	$\arctg T_d\omega$
纯滞后环节	$e^{-s\tau}$	1	$-\tau\omega$

于 $\beta/\alpha=2.73$ 。总之 β/α 越小，则衰减比越大。

④等调节时间线 α 为恒值的线是等调节时间线。极点离虚轴越远，则调节时间越短。

如果有许多极点存在，则离虚轴越近的极点为主要极点，对调节过程起决定性作用。

(1.4) 频率特性

对于一个线性环节或系统来说，当输入信号为正弦波时，则在达到稳态后，输出信号也将成为同样频率的正弦波，但是两者在幅值和相位上会有差别。振幅比 A 与相位差 φ 都与系统的静、动态特性有关系，所以这两个参数可以用来代表系统的特性，又因振幅比与相位都将随着频率 ω 而变化，故称做频率特性。

假设该环节或系统的传递函数为 $G(s)$ ，可以证明^[4]，将 $s=j\omega$ 代入 $G(s)$ 中即可得到频率特性 $G(j\omega)$ ，模值 $|G(j\omega)|$ 就是 $A(\omega)$ ，相角 $\angle G(j\omega)$ 就是 $\varphi(\omega)$ 。

频率特性的常用表示方法有三种：

①极坐标图，即奈魁斯特 (Nyquist) 图 这是用极坐标形式表示 $A(\omega)$ 与 $\varphi(\omega)$ 的关系，它实质上是 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 的区间内 $G(j\omega)$ 在复平面上的轨线，图 1-20 所示即为一例。这种图示法形式直观，便于定性分析。

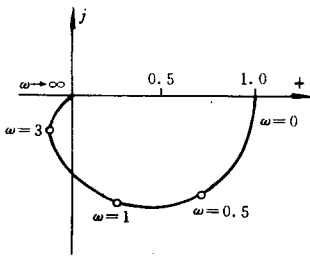


图 1-20 极坐标图示例 (串接的两个一阶滞后环节)

②对数坐标图，即伯德 (Bode) 图 幅频特性和相

频特性分别用 $\lg A \sim \lg \omega$ 和 $\varphi \sim \lg \omega$ 形式表示。在对数坐标图上振幅比用分贝数 db 表示，即 $20\lg|G|$ 。这种图示法的优点是便于制作和运算。如对数幅频特性可用几段直线近似，而且几个环节串联时只要将幅频特性和相频特性线分别相加即可。

③对数幅相图，即尼柯尔斯 (Nichols) 图 这是用 $\lg A \sim \varphi$ 标绘的，有特殊的优点，在采用 M 轨线法分析闭环频率特性时经常应用。

若干典型环节的 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 式见表 1-4，它们的极坐标图和对数坐标图见表 1-5。

从表 1-4 中公式可以看出，频率特性不仅与静态参数如放大系数 K 有关，而且是动态参数的函数。尽管频率特性是环节或系统达到稳态后的特性，并不考虑暂态过程，然而仍能反映环节或系统的动态特性。

(2) 稳定性和稳定裕量

(2.1) 线性系统稳定的必要条件

线性系统的稳定性，完全取决于系统极点的分布。从 s 平面来看，极点全部位于虚轴以左 (即特征根具有负的实部) 是系统稳定的充分与必要条件。如果有极点位于虚轴上 (即有纯虚根或有零根)，则处于稳定的边缘。如果有极点位于虚轴之右 (即特征根具有正的实部)，系统不稳定。

由离虚轴最近极点的位置可定出稳定裕量，一种是依据它离虚轴的距离 α ，另一种依据它至原点连线与虚轴的夹角 (其正切为 α/β)。这在前面已有说明。

如果已经求出全部闭环极点，那么闭环系统的稳定性问题就完全清楚了。以下介绍的两种判据是不不求出闭环极点的解，而直接从闭环特征方程或从开环频率特性来判断闭环系统的稳定性。

(2.2) 劳斯 (Routh) 稳定判据

设系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-39)$$