

化工自动化丛书

线性调节理论基础

韩建勋 李光泉 编

化学工业出版社

EQB/1

本书叙述自动化的理论基础，即线性自动调节理论。第一章介绍自动调节系统的概念；第二章是系统的数学描述；第三章详细地讲解用以描述环节与系统的传递函数方法及其数学基础——拉氏变换；第四章讲系统的品质与结构；第五章叙述用于系统分析与设计的频率法；第六章介绍根轨迹法。

本书考虑到自学的要求，力求由浅入深，重点突出，系统而不烦琐地将理论讲清楚，此外还尽可能地与现代控制论相联系。

本书由天津大学韩建勋（第1~4章）、李光泉（第5~6章）执笔，全书由浙江大学王骥程审阅。

本书可供自动化技术人员及大专院校有关专业的师生参考。

化工自动化丛书
线性调节理论基础
韩建勋 李光泉 编

化学工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₃₂印张13⁷/₈字数307千字印数1—4,300

1983年2月北京第1版1983年2月北京第1次印刷

统一书号15063·3480定价1.40元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年，在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论，各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编委会成员

主任委员	周春晖	(浙江大学)
副主任委员	蒋慰孙	(华东化工学院)
	万学达	(化工部化工设计公司)
	王骥程	(浙江大学)
	沈承林	(北京化工学院)
委 员	韩建勋	(天津大学)
	庄兴稼	(抚顺石油学院)
	李乾光	(化工部第一设计院)
	林秋鸿	(北京燕山石油化学 总公司设计院)
	王 翼	(南开大学)
	徐炳华	(化工部第三设计院)
	钱积新	(化工部自动控制设 计技术中心站)
	俞金寿	(华东化工学院)
	孙优贤	(浙江大学)
	罗秀来	(上海炼油厂)
	蔡鸿雄	(兰州化学工业公司 石油化工厂)

引 言

在我们社会主义国家里，工业自动化是保障安全生产、提高产品质量、降低成本和提高劳动生产率的有力措施之一，是多快好省地建设社会主义的一个主要技术手段。在国民经济各个部门，广泛应用自动化技术，例如在电力系统中，要进行发电机的电压、频率和功率的调节；在锅炉设备中要对蒸汽压力、温度和水位进行调节；在石油、化学工业中，要对设备内的温度、压力、流量、液面、pH 以及化学成分等进行调节，更是比比皆是。

自动化系统是靠检测仪表、自动装置乃至计算机即靠自动化技术工具来进行生产控制的。自动控制或自动调节系统只是借助自动化技术工具及其构成的自动化系统模仿人的重复性的劳动（体力劳动和脑力劳动）。自动化可形象地说成是脑力劳动的机械化，但是自动化系统并不能代替人的创造性思维，不能代替人的大脑，更不能代替人应予强调的是它只能代替重复性劳动。

自动调节或自动控制是研究自动化系统和自动化技术工具的一门科学，自动调节理论是着重研究自动化系统中信号的传递、放大、运算和执行，即讨论检测仪表、自动装置和计算机是如何实现自动检测和自动控制的。在研究方法上，自动调节理论也和其它自然科学一样，既研究自动调节系统的分析，又研究自动调节系统的综合。所谓分析，是指据已知自动调节系统的方案和数据，来判断系统的性能品质；

所谓综合，是指根据对系统的性能品质的要求，来确定自动调节系统的方案和数据。

自动调节理论，按描述自动调节系统的微分方程式的类别可分为线性和非线性自动调节理论。线性自动调节理论研究的是用线性微分方程式所描述的系统。

线性微分方程式又分定常系数和变系数（时变）两种。由定常系数微分方程式所描述的自动调节系统，称为定常调节系统。线性自动调节理论最初是由定常调节系统的研究开始的，这方面的理论发展得比较完善，本书讨论与研究的主要就是这样一类自动调节系统。线性自动调节理论比较简单，但是比较重要，因为它是其它理论的基础。线性自动调节理论虽不能随意搬用，但是它所涉及的概念、理论和方法对进一步研究其它自动调节系统都是有用的。

随着电子计算机的出现，研究自动调节系统在方法上有了很大的进展，可借助计算机直接求解方程，即采用数值解法来分析综合问题。但是，作为经典的自动调节理论所采用的解析解法和分析问题的方法，仍然是分析与综合自动调节系统的重要方法。前者只能是后者的补充而不是代替后者。

目 录

引言

第一章 自动调节系统的基本概念	1
第一节 自动调节的作用与自动调节系统	1
第二节 自动调节系统的过渡过程	17
第二章 环节与系统的运动方程式	24
第一节 示例	24
第二节 非线性特性的线性化及增量方程式	26
第三节 无量纲化运动方程式	38
第四节 微分方程式的列写	41
第五节 微分方程式的求解	65
第六节 状态变量与状态变量方程	74
第七节 线性系统的瞬态响应	81
第三章 拉氏变换与传递函数	91
第一节 拉氏变换的定义	92
第二节 拉氏变换的主要运算定理和性质	98
第三节 用拉氏变换求解常微分方程	104
第四节 部分分式方法	117
第五节 传递函数的定义与性质	120
第六节 典型环节的传递函数和单位过渡函数	123
第七节 环节的三种基本联接方式	142
第八节 定值系统与随动系统	147
第九节 方块图的等效变换	149
第十节 变换阻抗法	154
第十一节 信号流图	171

第四章 自动调节系统的品质与结构分析	189
第一节 误差信号	190
第二节 稳态误差	192
第三节 稳态误差与临界放大系数	200
第四节 前馈调节	203
第五节 多变量调节系统	209
第五章 频率特性分析和设计方法	221
第一节 频率特性	221
第二节 系统的稳定性	256
第三节 调节过程的品质分析	304
第四节 系统的校正和调节器参数的整定计算	333
第六章 根轨迹法	365
第一节 根轨迹的基本概念	365
第二节 根轨迹的基本性质	370
第三节 根轨迹的绘制示例	394
第四节 多回路系统的根轨迹	407
第五节 具有纯滞后系统的根轨迹	410
第六节 闭环系统零、极点对过渡过程的影响	418

第一章 自动调节系统的基本概念

第一节 自动调节的作用与自动调节系统

自动调节是从人工调节演变过来的。在一比较完善的自动调节系统中，自动调节虽然是重复地自动地实现人工调节的既有规律，但是它在精确性和快速性等方面往往优越于人工调节。当然，这里要求自动调节具有足够的稳定性和可靠性为前提。人的思维是无限的，但人的五官手脚，对外界的观察与控制，其精确度和速度是有一定限度的而且由于体力的限制，人直接操纵的功率有限。火力发电厂大型锅炉的水位控制，如果一旦不进水只出汽，不到10秒钟锅炉汽包就会烧干。具有连锁反应的化学反应器，如果只靠人操纵就会不及时而出危险。

1. 人工调节到自动调节

我们先分析人工操作的过程，然后再介绍自动调节过程。

图1-1所示为一液（水）位调节系统。调节目的是使水槽中的液位稳定于一定高度。图中 Q_1 为进水流量（米³/时）， Q_2 为出水流量（米³/时）。外界干扰，如进出水的压力变化、进出水管上阀门开度的变化等等，导致进水流量与出水流量不相等，就破坏了水槽进出物料的平衡，使液位发生波动。当 $Q_1 > Q_2$ 则液位 h 上升；当 $Q_1 < Q_2$ 则液位 h 下降。

人工调节过程是这样：取液位为操作指标，例如以玻璃

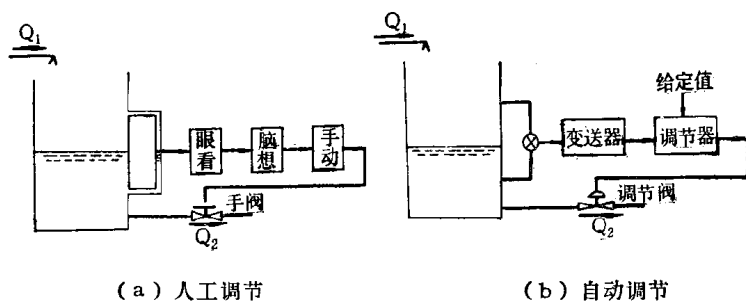


图 1-1 液位的调节系统

管中间位置为正常液位。一旦因干扰发生液位波动，人见液位上升则开大出口阀门；见液位下降则关小出口阀门，即改变出水流量 Q_2 以抵消或削弱外界干扰对液位的影响。如图示，改变出水流量作为调节手段（也称调节作用），从而使液位回复到原定高度或其附近。图1-1(a)人工调节示意图说明，人们首先用眼镜观察液位的高低，告诉大脑，来判别液位指示值比规定高度是高了还是低了。然后根据操作经验，经过运算（思考）发出命令，最后由双手执行命令，改变出水阀门开度，关小或开大，从而把水位保持在所需的高度上。人工调节过程就是通过眼、脑、手三个器官，分别担负了检测、运算和执行三个作用来完成保持液位的操作过程。

人们在长期的生产斗争和科学实验中，创造了自动检测仪表与调节装置，代替了人工操作，实现了自动调节过程。所要控制液位的水槽，加上检测仪表与自动调节器在一起，就构成了一个液位自动调节系统。如图1-1(b)所示，在自动调节系统中，水槽是调节对象，其余部分统称为自动装置部分，这部分实际上包括三部分：第一部分如图所示是液位

变送器，将液位转换为特定的信号（如气压、电流或机械位移），这就是检测仪表部分；第二部分是自动调节器，它接受变送器来的信号，与工艺需要保持的液位高度相比较，并按某种运算规律算出结果，将此结果用特定的信号（气压或电流）发送出去；第三部分是执行机构，通常是自动调节阀，简称调节阀。这一套自动装置具有类似于上述人工调节过程中眼、脑、手的功能，从而实现了自动调节。

自动调节系统中，如图 1-1 所示，水槽称为调节对象，简称对象（参见图 1-2）。水槽的液位 h 值是表征生产设备运行工况而需加以调节的量，称为被调量或被调参数。它所希望保持的液位值 h_0 ，称为被调量的给定值，简称给定值。水槽对象如前所述会受到各种外界干扰（简称干扰 f ）而引起被调量液位的波动。干扰往往是导致自动调节系统中被调量变化（并非所望的）的主要原因。在生产过程中，有时据工艺操作的要求，需改变液位所期望的高度，这时给定值 h_0 就要变化，（是所希望的）在自动调节系统中，当然就希望被调量 h 能跟随着它的给定值 h_0 变化。在自动调节系统中，被调量就是系统的输出量，简称输出，它是我们最关心的自动调节系统中的一个量。引起输出量变化的干扰和给定值，统称为系统的输入量，简称输入。研究自动调节系统的输入与输出关系就是我们的主要任务。在化工过程中，给定值多半为恒定值即不变化，这种系统称定值调节系统，这时，系统的输入就是干扰量。

自动调节过程如下（参见图 1-2）。当系统受到干扰后，被调量液位 h 发生了变化，通过检测仪表转换为测量信号 h^* ，经与给定值 h_0 相比较，调节器接受偏差信号 $e(=h_0-h^*)$ ，经过运算，调节器送出控制信号 P 作用于执行机构

(通常为调节阀)。阀的输出信号 q 称为调节作用。阀的开大或关小, 改变了出水流量, 以克服干扰的影响, 使被调量逐步回到原来数值, 也即通过自动调节过程, 要求被调量仍然等于它的给定值。换句话说, 对一自动调节系统, 其基本任务, 就在于使一个乃至几个被调量的变化符合特定的规律, 也即使被调量符合于给定值的要求。

2. 自动调节的结构与方块图

为清楚说明自动调节系统的结构、系统各部分之间相互关系、信号的传递及其相互作用, 一般习惯用方块图加以表示, 如图1-2所示。

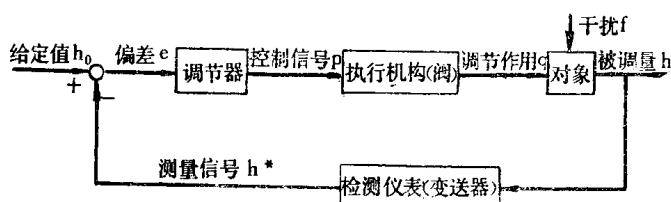


图 1-2 液位自动调节系统方块图

方块图是研究自动调节系统的基本工具, 对它的作用与画法应有个较清楚的了解。由于第三章要作详细说明, 所以这里先作一简单介绍。

(1) 方块图画法

水槽液位自动调节系统是由对象、检测仪表(变送器)、调节器、执行机构(调节阀)四个部分(环节)所组成。它们之间有信号的联系, 用箭头表示出来。调节器之前的符号 $\bigcirc$ 称比较机构(环节)或加减点, 它往往是调节器内的一部分, 是实现被调量与给定值的比较, 即偏差 $e = h_0 - h^*$ (详见第三章 § 3-9)。

外界干扰往往是在对象处受到的，现笼统用 f 表示，见图1-2。参见图1-1，如果干扰是进水量 Q_1 的变化，设 Q_1 增加，则对象输出，也即系统的被调量将增加即 h 上升。如果干扰来自出水一侧，例如由于后续设备水压偏低，会使出水量 Q_2 增加，这时使对象输出、被调量将降低，即 h 下降。所以图1-2中，从干扰 f 到被调量 h ，这之间环节的性质是未予说明清楚的。但是，不论是 Q_1 或 Q_2 侧扰动，在自动调节系统中，通过调节器产生调节作用，总是能克服或削弱干扰（无论哪种干扰）对被调量的影响。这是由自动调节系统的负反馈的特性所决定的（负反馈概念下面将再深入阐述）。

（2）环节

自动调节系统中每一部分是一个环节，在系统方块图中，每一环节用一方块形象地加以表示。这些环节不外乎实现了信号的转换、放大、运算和执行。每一环节都有其输入（信号）和输出（信号）。输出是环节对输入的响应，输入是因输出是果。应予指出的是，在线性自调系统中，环节具单向性，它的输出单向地被输入所决定。此含意有二：一是输出与输入是单值函数关系，输出一一对应于输入，二是此环节的特性（可用数学公式表达）应与下一环节的特性无关。举电子放大器为例，设有两级放大，前一放大级视为一环节，它的输出是输入乘以放大倍数，显然我们要求放大器没有变差（变差会导致输出-输入为多值函数关系）、输出与输入为单值函数关系，再一是希望与下一级阻抗匹配理想，否则下一级放大器的输入阻抗将影响这一环节的放大倍数。进一步对单向性的分析详见第三章 § 3-10。

线性环节的输出-输入的定量关系可通过环节的传递函数来讨论，详见第三章 § 3-5。

(3) 信号传递与物料流向

方块图中箭头表示该处信号及其传递方向而不是指物料及其流向。在生产过程的设备中,就物料和能量平衡的角度来看,流向设备的各股物料与能量视为输入,从设备流出的各股物料和能量视为输出。但在自动调节系统中,我们着眼于讨论信号在系统中变化。对一线性环节或系统来讲,能引起输出信号变化的各种因素(假设环节或系统特性不漂移),我们就称之为输入信号。举例来说,图1-1所示水槽作为一个对象环节,其输出信号就是液位 h 。能引起液位变化的进入物料流量 Q_1 当然是其输入信号之一;其实,流出物料流量 Q_2 也是其输入信号之一。更仔细分析,可以发现,能引起 Q_1 和 Q_2 变化的各种因素(如水的压头、管线上阀门开度等)都可能成为对象环节的输入信号。对于液位自动调节系统来讲:各种外界干扰能引起系统输出液位信号的变化,所以可视干扰 f 为系统输入信号;给定值变化也能引起系统输出液位的变化,所以给定值 h_0 也可视为系统输入信号。

(4) 通道

对一环节来讲,引起输出(信号)变化的输入(信号)可能不只是一个。单输出单输入情况下,称这个环节具有一个通道;单输出多输入情况下,则称这个环节具有多个通道。不同的通道,当然具有不同的特性。作为线性环节来考虑,不同的通道具有不同的传递函数。(传递函数用符号 $W(s)$ 表示,其定义见参见第三章第五节)而且对多通道的环节,其(总)输出是多股输入引起的多股输出(分量)之(代数)和。对于液位对象,如果认为有两个输入 Q_1 与 Q_2 ,则其环节的方块图表示可用图1-3表示。

对一系统来讲(参见图1-2)引起输出的输入信号一般

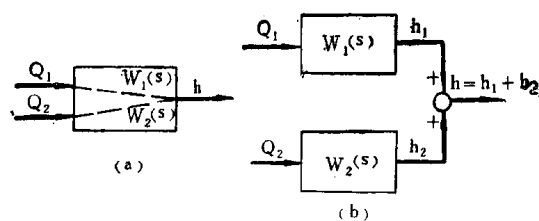
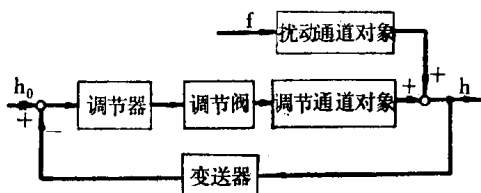
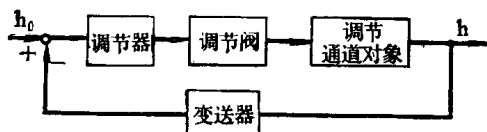


图 1-3 多通道的环节

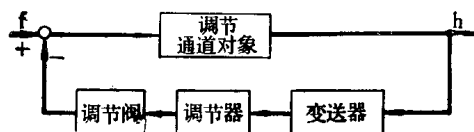
至少有二，一是干扰 f ，一是给定值 h_0 ，这样，系统就具有两通道，一是扰动通道，一是给定值通道。在系统方块图中，一般输入绘在图之左侧输出绘在图之右侧，见图1-4。液



(a) 双输入系统



(b) 给定值通道形式



(c) 干扰通道形式

图 1-4 自动调节系统的不同通道

位对象本身也是多通道的，一般有两股输入，一是由调节阀动作改变了出水流量引起，通常称此输入为调节作用 q ，另一是由干扰 f 引起。相应地对象就具有两通道特性：一是调节作用通道特性，一是扰动通道特性。图1-4(a)表示兼有两种输入的情况。

只考虑给定值 h_0 作为输入时，这时系统呈给定值通道形式，见图1-4(b)。

只考虑干扰 f 作为输入时，这时系统被调量的给定值不变，所以系统为定值调节状态，系统呈干扰通道形式。为简化起见，认为干扰也来自图1-1中出水一侧，则系统示意方块图如图1-4(c)所示，(方块图转换细节见第三章)。

(5) 方块图的简化

系统方块图可简可繁，具体应用上应能清楚表达所需研究的信号之间的变化关系和突出所要研究的环节性能即可以。

参见图1-4(b)与(c)，系统内四个环节一般可以简化分为对象与调节器两大部分。图1-5(a)中，除对象环节以外，其余三环节(变送器、调节器和调节阀)可合并称为广义调节器。图1-5(b)中，除调节器环节以外，其余三环节(调节阀、对象和变送器)可合并称为广义对象。

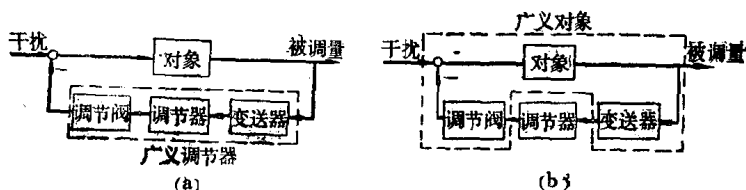


图 1-5 自动调节系统的简化方块图

系统方块图的简化的具体方案主要取决于研究课题的具体任务。方块图的转换的细节详见第三章。图 1-5 只是示意图，细节与详图可参阅图 3-24 及有关公式。

3. 反馈调节系统

多数的自动调节系统，如图 1-2 所示都是具有反馈作用的闭环系统，这种系统是按被调量对给定值的偏差，使产生相应的调节作用，而这个调节作用使偏差减小或消除。所以这种系统称为反馈调节系统或偏差反馈调节系统。

这一系统的特点是系统的输出一定要返回输入端与输入进行比较，这就称之为反馈，参见图 1-4 (a) 与 (b)。返回到输入端的信号称反馈信号。如系统输入信号与反馈信号极性相反，则称此系统为负反馈系统；否则，极性相同，则称为正反馈系统。作为一个整个自动调节系统都是负反馈系统，只有在仪表中的局部才采用正反馈。反馈系统中，输出返回到输入端，信号形成一个闭合的回路，所以反馈系统又称闭环系统。

例如，参见图 1-1、1-2 和 1-4 (c)，设系统输入为干扰 f ，是水槽进水流量 Q_1 的变化。对水槽来讲，无干扰即 Q_1 未变化之前，系统处于平衡状态，进水流量等于出水流量： $Q_1 = Q_2$ ， $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 0$ ，所以液位保持于给定值处，即 $h^* = h_0$ ， $e = h_0 - h^* = 0$ 。一旦当干扰发生，设 Q_1 增加，则 ΔQ 增加，水槽中水量积聚， h 上升， h^* 上升， e 下降，通过调节器与调节阀使 q 增大即 Q_2 增加，从而使 $\Delta Q \downarrow$ 。 ΔQ 的趋小，使被调量又趋于给定值，甚至偏差消除。对应于图 1-4 (c)，其调节过程如下：

