

自动调节理论基础

刘 豹 编 著

上海科学技术出版社

自动调节理论基础

刘 豹 編 著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书介绍自动调节理论中工程应用方法,先介绍一般概念,自动调节系统线性方程式的求解和研究方法,自动调节系统的组成环节及其耦合,然后介绍自动调节系统的稳定性,自动调节系统的品质分析、镇定、校正和综合以及自动调节系统在随机作用下的分析与综合问题,非线性自动调节系统,书末附有计算所需的表格。

本书可供从事自动控制的工程技术人员及大专师生参考。

自动调节理论基础

刘 豹 编 著

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/27 印张 21 13/27 插页 1 排版字数 517,000
1963年11月第1版 1963年11月第1次印刷 印数 1—3,600

统一书号 15119·1751 定价(十四) 3.55 元

序

作者所編的“自动控制原理”出版将近九年了。在这九年中，我国社会主义建設事业得到了极大成就，科学技术队伍迅速成长。尤其是象自动化等一些新兴学科的生长和发展更显突出，这有力地說明了我国科学事业在中国共产党领导下，有充沛的生命力。

就自动控制原理学科本身的发展來說，这九年也是它在四十年代奠定的基础上，进一步充实和深入发展的时期。这一阶段发展的主要特点是：一方面提出了很多在工程实践中可以直接应用的分析和綜合自动控制系統的方法，这些方法都力求运算簡便、結論可靠及目的明确；另一方面在基本理論上进行了很多探索性的工作。后一方面的一些工作成果可以在計算机的帮助下解决复杂系統的分析 and 綜合問題，也为将来必然会提出的解决各种自动控制系統分析和綜合問題的工程方法打下了基础。

“自动控制原理”一书的内容，在目前看来，无论从学科本身发展或国内自动化科学技术队伍水平哪一方面說，都必须修訂改写。“自动控制原理”这一名称是作者当时从尚未統一的外文名称意譯过来的，今天来看，显然是不符合我国应用习惯的。本书实质上只是自动調节理論中工程应用方法这一部分，或簡称自动調节原理。現在“自动控制原理”一书的基础上重新編写，为了切合实际，书名就改为“自动調节理論基础”。

本书的主要藍本是作者編著的、由天津大学出版的“自动調节原理”一书。但是，本书主要目的是作为一般具有高等数学基础(即大学工科毕业生的数学基础)的工程技术人员自修讀本，它的内容必须由淺入深，而且在某些問題上应适当增加篇幅，方能解釋清楚。它不同于一般教材，后者由于有教师的輔導，很多問題是不必用文字說明的。在深度上，作者认为可以在有关自动調节系統的分析 and 綜合問題上加强，

便于讀者应用本书材料进行实际运算。在某些問題上，即使本书沒有提供具体方法，但也力求讀者能在本书所述的基础上，进一步閱讀专门文献，或在工作中进一步發揮以提出新的有效的方法。

本书第一章是一般性的介紹，在其中引出了必要的術語和自动調節的基本概念，并着重提出了自动調節系統与元件的静态和动态特性及其表示方法。最后还以实例說明了列写自动調節系統运动方程式的方法。第二章着重复习一些数学知識，并以諧波分析方法說明和提出了有关頻率特性、傅里叶变换与拉普拉斯变换等問題，使工程技術人員能掌握这些数学式的物理概念。第三章介紹組成环节及其耦合，示列了各类基本环节的数学式及其特性之特点，并以实例說明系統方框图的演化方法，最后还說明了系統的各种傳遞函数和誤差系数。这三章是自动調節原理的准备部分，只有熟悉了这三章的主要內容，才能深入学习自动調節原理本身的各种問題。

本书第四章研究系統的稳定性問題。自动調節系統最重要的特性是稳定，在工程上已有很多方法(称为判据)来判別系統的稳定性。本章列举了各种重要稳定判据及其应用实例，最后还提出了稳定余量的概念和結構稳定性的一般判定方法。第五章进一步提出了自动調節系統应满足的其他各种品质要求，并介紹了有关品质的基本術語，扼要介紹了以积分法鉴定系統品质的概念。重点闡明了两种分析系統品质的基本方法——頻率法及閉环系統极点和零点分布法，在后一种方法中又分別介紹了极零点分布的一般方法和根軌迹法。最后，介紹了索洛多夫尼柯夫从頻率特性繪制过渡函数曲綫的方法以及作者提出的从过渡函数曲綫繪制頻率特性曲綫的方法。

綫性系統的設計問題是本书第六章的主要內容。本章开始先扼要說明鎮定、校正和綜合的意义，隨即重点叙述頻率綜合法。以索氏法为基础，并介紹万百五有关頻率法的推广，最后介紹作者所提出的进一步推广頻率法的問題。同时也討論了多輸入、多回路系統以推广后的頻率法进行綜合的問題。在介紹系統以閉环极点和零点分布来綜合时，以盖列明方法为基础，同时也介紹了馬里奧蒂的直接法。作者在书中提出較多方法的用意有二，一方面使讀者既了解基本方法，又掌握便于

应用的直接法；另一方面使讀者了解綜合方法的改进途徑是：推广原有方法及其基本理論，使它具有更普遍的意义；或将它限在某一具体条件下，使它应用起来更直接更簡便。本章最后还說明了根軌迹法在綜合中的应用問題。

在分析和綜合綫性自动調节系統时，常常会遇到輸入或扰动信号是具有統計学特性的，这时必須以統計学方法来处理問題。第七章首先复习了有关統計数学的最基本的概念，随即提出以統計学方法測算系統及(或)对象动态特性的方法。其次介紹了分析系統在随机信号作用下的品质鉴定問題，最后提出了綜合方法。

很多自动調节系統是具有非綫性特性的，本书第八章首先說明了存在于一般系統中的各种非綫性特性的类型，并重点介紹以相軌迹法分析和綜合系統的方法。諧波平衡法便于处理高阶非綫性系統的分析問題，也适于分析承受随机信号的非綫性系統的特性，这将在本章后几节重点說明。

本书附录中包含了計算时最必要的参考数据及公式，其中附录 II 取自清华大学吳麒先生的有关論文，附录 III 取自天津大学 1962 年毕业生何恩智的畢業論文。

本书所引用的原始資料一般都在正文中注明，为便于讀者进一步学习，在书后还列有参考資料。

作者学識淺陋，本书一定会有不少缺点和錯誤，請讀者多加批評指教，以备今后再印时更正。

刘 豹 一九六三年二月于天津

目 录

序

第一章 概 論	1
1-1 自动调节系统的作用原理及其类型	1
1-2 自动调节系统的特性	9
1-3 系统及其元件运动方程式的列写方法	15
第二章 自动调节系统线性运动方程式的求解和研究方法	25
2-1 频率特性函数及其推演	25
2-2 傅里叶积分和傅里叶变换的应用	32
2-3 拉普拉斯变换的应用	37
2-4 传递函数、脉冲过渡函数和单位过渡函数	41
第三章 自动调节系统的组成环节及其耦合	45
3-1 非周期环节	46
3-2 振荡环节	51
3-3 积分环节	56
3-4 放大环节	59
3-5 一阶导数环节	60
3-6 二阶导数环节	61
3-7 滞后环节	62
3-8 环节的各种耦合	64
3-9 系统传递函数的其他各种形式	82
第四章 自动调节系统的稳定性	90
4-1 稳定性的基本概念	90
4-2 罗斯-奈维智稳定判据	93
4-3 米海依洛夫稳定判据	100

目 录

4-4	奈魁斯特稳定判据	104
4-5	利用对数频率特性分析稳定性	117
4-6	多回路系统的稳定性	135
4-7	稳定余量	144
4-8	具有滞后环节的自动调节系统的稳定性	147
4-9	自动调节系统的结构稳定性	151
第五章 自动调节系统的品质分析		161
5-1	自动调节系统的品质指标	161
5-2	积分鉴定法	165
5-3	品质和传递函数极、零点分布的关系	173
5-4	根轨迹法	189
5-5	频率法	212
5-6	各种特性曲线的绘制方法	243
第六章 自动调节系统的镇定、校正和综合		253
6-1	自动调节系统的校正	255
6-2	随动系统综合的基础	266
6-3	频率法的推广	286
6-4	多输入及多回路系统的综合	302
6-5	按系统极点和零点分布来综合	319
6-6	根轨迹法在综合中的应用	339
6-7	各种综合方法的比较	354
第七章 自动调节系统在随机作用下的分析和综合问题		357
7-1	概率论的某些基本概念	358
7-2	相关函数和频谱密度	365
7-3	计算对象动态特性的统计学方法	377
7-4	自动调节系统的动态精度	384
7-5	线性系统在随机作用下的综合	391
第八章 非线性自动调节系统		404
8-1	概述	406
8-2	自动调节系统中非线性特性的类型	408

8-3 相轨迹法的基本概念.....	412
8-4 非线性系统的相图.....	428
8-5 点转换法.....	448
8-6 利用非线性特性改善系统动态的方法.....	458
8-7 谐波平衡法.....	474
8-8 非线性系统在随机信号作用下的分析方法.....	507
附 录	519
I. h 函数表	520
II. 由对数频率特性曲线 $L_m W $ 及 $\arg W$ 求 $L_m W \pm 1 $ 及 $\arg(W \pm 1)$	522
III. P, Q 函数表.....	523
IV. $\frac{\sin x}{x}, \frac{\cos x}{x}$ 函数表.....	534
V. 积分式 J_n 演算表	548
VI. 由对数幅频特性 $L(\omega)$ 求相频特性函数表	552
参考資料	560
索 引	566

第一章

概 論

1-1 自动調节系統的作用原理及其类型

1. 自动調节系統的作用原理 在生产过程中为了維持正常的工作条件常常需要将机器或設備中的某些参数,以一定精度保持在某一个定值上,或使它們按一定的規律变化。例如在一个气罐中进行的某一化学反应,必須将气罐中的压力維持在某一定值上,才能使罐內反应以最佳状况进行。要做到这一点,最原始的方法是在气罐上装一个压力計 1 (图 1-1),在进气管上装一个調节閥 2,操作工一方面随时观察压力計的讀数,看它是否和所需值相符,然后作出判断:应将閥开大或关小;另一方面就根据判断,开启或关闭閥門,直到压力計讀数符合所需值时为止。这种过程是人工操作的,人工操作生产过程的劳动强度很大,工作单调,易生差錯,同时劳动生产率也不高。人工操作时,不能远离生产机器或設備,因而很难保証安全,这对于某些必須在高温高压、有毒性气体等条件下进行生产的工业部門是特別重要的。此外,对某些变化迅速、精度要求較高的控制系統,如雷达的搜索系統,武器的瞄准系統等由于人的生理条件所限不能达到要求。这时就必须采用自动調节。如果用一个仪器,它一方面能随时感受气罐中的压力,并随时将此压力和給定值比較,另一方面,它又能按比較結果,以一定的方式和能量去控制調节閥。这样,图 1-1 所示的人工操作系統就变成图 1-2 所示的自动調节系統。气罐中的压力經過导管 5 作用在膜片 3 上,膜

片受压就产生一个向下的作用力,和彈簧4的反作用力相比較。当气罐中压力增大,膜片向下作用力大于原始位置上的彈簧的反作用力时,就使閥門关小,减少进气量,使罐中压力不再上升。反之,如果罐中压力降低,膜片向下作用力小于彈簧在当时的反作用力,就使閥門开大,增多进气量,使罐內压力不再下降。

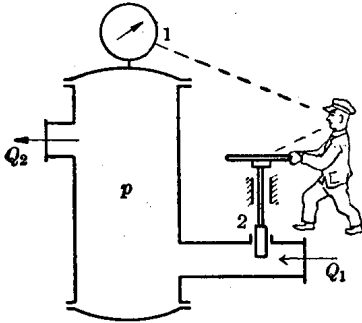


图 1-1

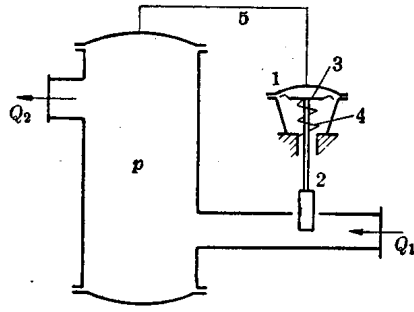


图 1-2

从图 1-2 可知,要自动調节生产过程中的某一参数,首先要用测量仪表(或称发送器、敏感元件)把該参数测量出来,然后再将测得信号送到調节器的比較元件中去和給定值比較。比較結果就是系統中实际参数值和要求值之間的誤差。这一誤差信号在調节器中經過某些运算和放大,使它具有一定动作規律和一定功率,再送入执行机构去控制閥門。閥的启閉直接控制了輸入气罐的气量,进气量和出气量相平衡时,气罐中的压力也就稳定在某一定值上。由此可見,图 1-2 所示压力自动調节系統是由气罐、仪表、調节器、执行机构和閥等組成的,其中气罐中的压力变化过程是被調节的对象,又簡称对象。以后,为了便于研究自动調节系統的结构起見,常常用若干方框来表示系統中的每一个元件,方框的輸入信号表示輸入該元件的各种物

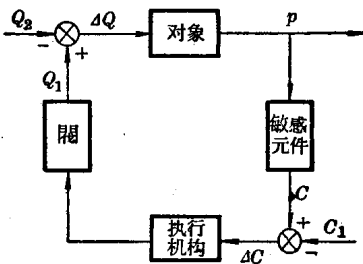


图 1-3

理量或化学量;方框的輸出信号,同样亦表示該元件受到輸入作用后所引起的反应。图 1-2 的系統可用图 1-3 的方框图来表示。

气罐中的压力 p , 亦即对象的輸出是被控制参数, 或被調节参数、

被調量,在任何自动调节系统中都存在着若干使被調参数偏离給定值的原因,这些原因通常都称作扰动。例如在图 1-2 中,使 p 发生偏离的主要原因是气罐输出气量 Q_2 的变化, Q_2 的变化可能就是气罐的負荷变化,或由于下一工序中压力变化所引起的变化。可以使对象輸出量 p 变化的另一个因素是 Q_1 ,它往往是自动调节的结果,是自动调节系统中賴以补偿扰动作用,使被調参数保持在給定值上的調节量。調节量和扰动的作用方向是相反的,从图 1-2 或图 1-3 可知,当 Q_2 增大时, p 减小;而当 Q_1 增大时, p 增加。所以,真正使对象的輸出量发生变化的是 $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ 。图 1-3 中符号 $\otimes$ 表示比較元件,在这种元件上往往作用着好几个輸入量和一个輸出量,輸出量等于各輸入量之和或差,由輸入信号綫路上的正負号表明。压力 p 輸入敏感元件的膜片,使膜片产生一个向下的作用力 C ,即其輸出量,这一力只有和給定装置(即执行机构中的彈簧)上的給定力 C_1 相比較之后,才有余力 $\Delta C = C - C_1$ 去推动执行机构。执行机构受力作用就使閥門开启或关闭,并以此調节进气量 Q_1 。

在方框图中,每一个方框上都有两个信号,一个是它的輸出量,另一个是輸入量。从整个系統來說,它有二个以上的輸入量,例如图 1-3 中,一个是对对象的負荷 Q_2 ,另一个是系統的給定值 C_1 ;它有一个可以任意取定的輸出量,例如图 1-3 中,对象的被調参数 p 是系統的輸出量,但是,如果要研究系統的誤差 ΔQ (或称偏差),也可以取它作为輸出。

自动调节系統的作用就是按被調参数和給定值的偏差,使系統产生足够的調节量去抵消扰动的作用,从而保持被調参数在一定的精度范圍內等于給定值。由此可知,系統的輸出量一定要引回来和給定值相比較,再去調节系統,調节的结果是随时利用这种反饋的方法来加以檢查和校正的。現代自动调节系統絕大多数都是利用反饋构成的,所以也叫做反饋控制系統。

2. 自动调节系統的类型 反饋控制系統按其輸入量和輸出量間的关系,可以分成:定值調节系統、随动控制系統和程序控制系統三大类。

象图 1-2 所示系統,輸出量要以一定精度等于給定值,而給定值在

工作过程中一般都是不变或变化很少的常数,其扰动是随时变化的负荷。所以这种系统就是定值调节系统。在生产过程中,定值调节系统是最常见的,例如保持蒸汽压力和质量一定不变的蒸汽锅炉自动调节系统、保持炉温炉压恒定不变的燃炉自动调节系统等等。

在某些调节系统中,负荷变化往往不是主要的输入量,而希望系统的输出量以一定精度跟随给定值变化。这种系统叫做随动控制系统,或简称随动系统或伺服系统。随动系统的应用也很普遍,如雷达的搜索、武器的自动瞄准、测量仪器的自动指示及记录等。如图1-4所示的电子电位计,系统的输入量是被测量的电势 U_r , 当它不等于电位计两端 ab 的电压降 U_o 时,就形成了输出电压差 $U_e = U_r - U_o$ 。 U_e 作用在振动变流子上,使后者有一输出电压 U_1 , 经过电子放大器 $\mathcal{A}$, 转变为可逆电动机 M 上控制绕组的电压 U_2 。 U_2 和 U_e 成比例, U_2 之正负号控制了电动机的旋转方向。电动机转速 ω 和 U_2 成比例,再经过减速齿轮组和滑动接触头 a 相连,使 a 偏移 α 。这样就使电位计 ab 端电压 U_o 自动地和 U_r 接近,直到 U_o 完全等于 U_r , 使电位计恢复平衡为止。另一方面,以 a 通过指针或记录仪器直接指出了被测量电势 $U_o = U_r$ 。

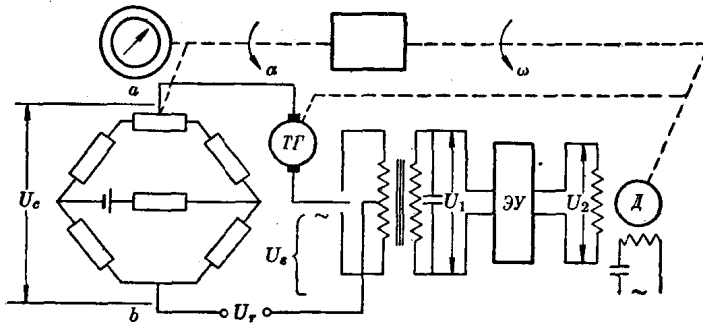


图 1-4

这种电位计是自动补偿式的测量仪器,它实质上是一个具有反馈作用的随动控制系统,所以在方框图上看(图1-5)是一个闭环系统。在方框图中,振动变流子(转换元件)的作用是将电压差 U_e 转换成交流电压 U_1 。电子放大器是一个放大元件,可逆电动机是一个执行机构。减速齿轮组的输入是转速 ω , 输出为角位移 α , 也是一种转换元件。角位移 α 在电位计线路(测量元件)上形成了输出电压 U_o , 这样,就从系统的具

体结构图化成了方框图。

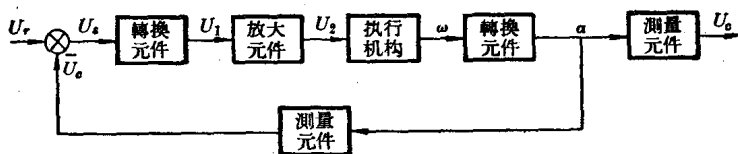


图 1-5

上面所述两种系统,都只有一根反馈线路,这种形式叫做单回路系统。有时候,在图1-4的电子电位计中为了改善特性,必须在电位差 U_e 线路中串联一个测速电机 TT ,用以将电动机输出 ω 的变化率反馈回来,即将测速电机的输出量 $U_T = k \frac{d\omega}{dt}$ 和 U_e 相比较。这样,它的方框图就如图1-6所示,这种类型的系统叫做多回路系统。多回路自动调节的形式是极多的,在比较复杂的生产过程自动调节系统中往往有很多参数需要加以控制,如果每一个参数都用一个反馈系统来调节,则整

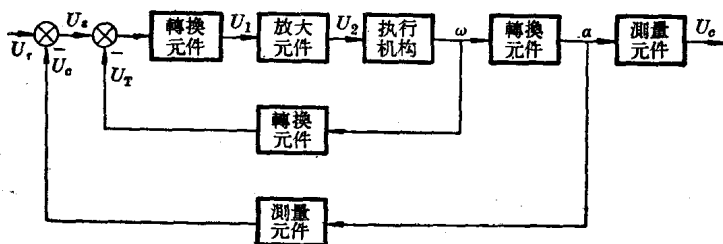


图 1-6

个系统就是由很多独立的单个回路所形成的多回路系统。在某些自动调节系统中,由于对象的滞后很大,要把对象最后输出量经过反馈再进行调节,往往就感到太慢,这时也可以从对象的中間引出辅助参数进行调节,如图1-7。显然,这也是一种多回路系统的形式。

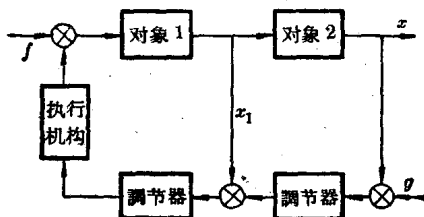


图 1-7

程序控制系統的給定值是按工艺过程的需要而設計得随時間以一定規律变动的。这种变化規律和随动系統中給定值变化規律的区别在于前者是一种預先确定的時間函数,而后者是未知的,最多只是知道它的

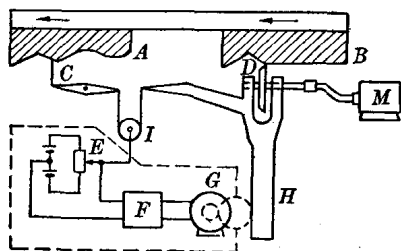


图 1-8

的統計学特性罢了。此外,在程序控制系統中,負荷变化往往也是系統的一个主要輸入量,所以研究程序控制系統时应当从輸出量和給定值以及輸入量两方面的关系来进行。图 1-8 所示靠模銑床是一种简单的程序控制系統。

靠模样板 A 使指示杆 C 沿着一定的預計的規律上下升降,当指示杆 C 上升时,切削刀 D 因受工作物 B 的阻力而不能即时深入工作物进行切削。这时切削刀和指示杆間有偏差,使滑輪 I 带动电位計上的触头 E 上升,遂有一定电压差輸入放大器 F ,激发电动机 G ,它使刀架 H 上升,在很短時間内,使切削刀受到一定压力,深入工作物完成切削过程。当样板曲面上下波动值不同时,压紧刀架的力也不同,因而切削刀所受負荷也不同。

上面这些系統都是反饋系統,在反饋系統中产生調节作用的主因是偏差,所以也叫做按偏差进行調节的系統。系統既然是按偏差进行調节的,那么显然,系統中必須发生偏差是系統能自动調节的一个必要条件。在这种系統中,調节只是使偏差尽可能减小,却不能完全消除。看来,要彻底消除偏差还必须另找其他途徑。我們再来研究一下图 1-2 的例子,是什么原因使得系統的被調节参数(压力 p)发生波动的呢?显然,这是因为对象的負荷发生了变化,亦即 Q_2 由于某些原因发生了变化。如果是这样,那么我們就很自然的会想到,調节 Q_1 ,使它随时都等于 Q_2 ,对象中的压力 p 一定不会波动。所以,在輸出管綫上装一个測量輸出气量 Q_2 的仪器,直接以 Q_2 的信号控制 Q_1 ,如图 1-9。这种方案在理論上可以做到无偏差調节,这种系統是按扰动进行調节的,它的方框图如图 1-10 所示。从方框图可知,系統的調节动作是由輸入信号直接引出,再向前輸送的,所以也叫做正饋。由于沒有反饋,无法檢查調

节系统的输出量 p 是否符合要求,而且如果不符合要求,也无法自动补偿。这是单纯按扰动进行调节的主要缺点。

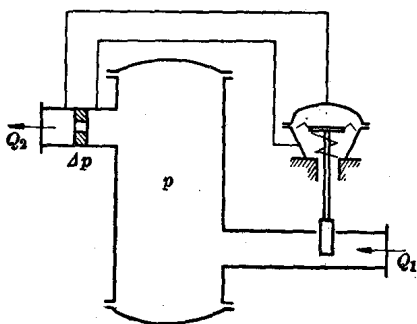


图 1-9

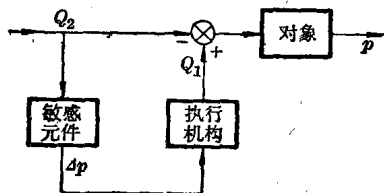


图 1-10

结合按偏差和按扰动进行调节的两种方法的优点,是可以大大提高自动调节系统的性能的,这种系统叫做复合调节系统。从图 1-2 和图 1-9 可以推出压力自动调节的复合调节线路,如图 1-11,其方框图如图 1-12。为了节省执行机构,图 1-12a 可化成图 1-12b。

前面介绍过的各种自动调节系统中的参数变化都是连续进行的,这些系统都称为连续调节系统。反之,如果系统中有一个以上的断续变量,这种系统就叫做断续调节系统。最简单的断续调节系统是双稳态调节系统,也称继电器控制系统,如图 1-13 是一个继电器式温度调节系统。介质在导管中被加热,当介质在导管中排出时温度过高,水银温度计中的水银柱升高而使电路接通,这样就激励了常闭式继电器,将加热电流切断,停止供热,使介质温度不再升高。反之,当介质温度降低,水银温度计中水银柱下降,切断电路,使继电器释放,加热电路就闭合,继续向介质供热,使其温度回升。由此可知,这种调节系统的作用是在被调节参数超出或低于某一给定值时,不停地开关能量供给装置,使被调节参数在给定值上下允许范围内波动。它的方框图是图 1-14。显然,继电器控制系统所用控制设备比较简单,在某些情况下具有良好的性能。

如将图 1-15 所示落弓式温度调节器代替图 1-13 中的水银温度计就构成了另一种形式的断续调节系统,叫做脉冲控制系统或采样控制系统。 A 是等速回转的凸轮,落弓 B 紧压在凸轮上,随 A 转动而上下升

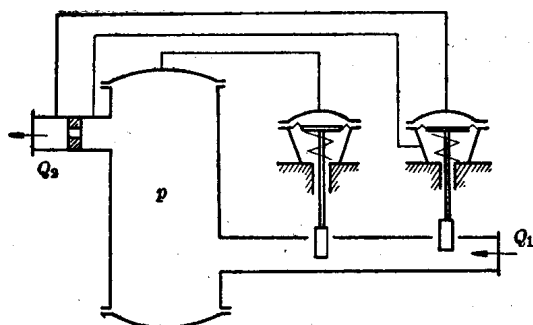
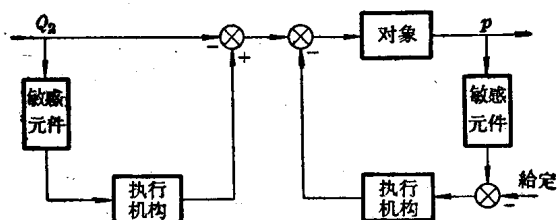
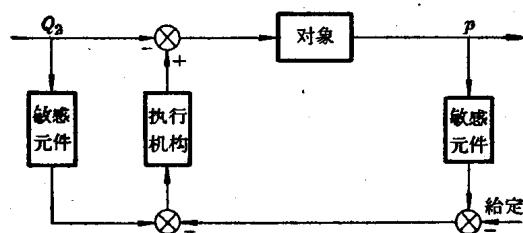


图 1-11



(a)



(b)

图 1-12

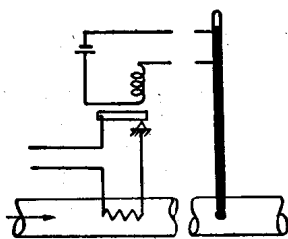


图 1-13

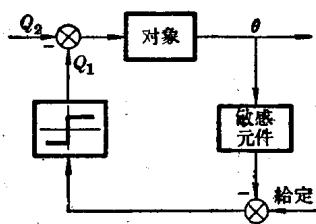


图 1-14