

高等学校教材

自动控制原理

(第二版)

西安交通大学 谢麟阁 主编



高等学校教材

自动控制原理

(第二版)

西安交通大学 谢麟阁 主编

水利电力出版社

1。

版社

shin

Wil

esig

981。

1975

内 容 提 要

本书所阐述的自动控制原理主要以线性系统经典的时域和频域法为主,对于非线性系统和现代控制理论的基础部分(离散系统、状态空间法)也给予了较详细的阐述。在阐述一般原理的同时,着重结合了热工过程控制上的特点加以应用举例。每章后附有适量习题供选作。本书内容取材较新颖,在多年教学实践的基础上,修订成为第二版,使教材内容更加详实、完善,可作为100学时左右热、电类专业的自控原理课教材,也可供从事自动控制专业的工程技术人员参考。

高等学校教材

自动控制原理

(第二版)

西安交通大学 谢麟阁 主编

责任编辑 顾希衍

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 26.25印张 598千字

1986年6月第一版

1991年5月第二版 1991年5月北京第三次印刷

印数15421—19670册

ISBN 7-120-01289-4/TP·49

定价6.75元

第一版前言

这本《自动控制原理》教材，是根据一九八三年制订的高等工业学校电厂热工测量及自动化专业的教学大纲编写的。它也可作为其他工业自动化专业的参考教材以及供从事自动控制的科技人员学习之用。

自动控制原理的发展过程紧密地与其他学科相联系。例如，它与力学、电学以及目前正在蓬勃兴起的系统工程、智能工程、生物工程等学科都有着许多共同之处。因此，很容易理解它是一门重要的技术基础理论课程。

本书共分九章。第一至第六章着重对线性系统的基本原理作较详细的介绍，以使读者能有一个较坚实的理论基础并能牢固地掌握一些最基本的分析方法。第七章为非线性系统。第八和第九章分别为离散控制系统、状态空间分析法，这两章是学习现代控制理论的基础并为后续选课或进一步阅读奠定基础。

在本书的编写过程中，作者力求符合本课程大纲的要求，并充分注意课程内容的精炼、循序渐进、深入浅出、联系实际等要求，以利于教学的进行。每章末均附有一定数量的习题，以巩固所学内容。在讲授本课程的同时，各校最好能根据实验设备的条件安排一些实验项目。例如，在模拟实验装置上或直接利用模拟机、数字计算机做一些基本的仿真实验，以弥补理论学习的不足。实践证明，这是有益的。

全书由西安交通大学谢麟阁主编并编写第一、第二及第七章；翁思义编写第六章及第九章的一至四节；宋又祥编写第八章及第九章的五至七节；武汉水利电力学院陈松桂编写第三、第四及第五章。

本书由重庆大学周其鉴教授主审。他仔细地审阅了书稿并提出了许多宝贵的意见和建议。在此谨表示衷心的感谢。在编写过程中还得到南京工学院、华北电力学院、东北电力学院、浙江大学、华中工学院以及上海电力学院等有关同志的建议和支持，在此一并表示感谢。

由于我们水平有限，书中缺点和错误在所难免，竭诚欢迎批评指正。

编者

一九八五年五月于西安

第二版前言

自本书第一版问世以来,受到了广大读者和兄弟院校师生的爱护与欢迎,来函给予积极的评价;与此同时,也指出了书中存在的一些问题和改进建议,使我们受到很大的鼓舞和鞭策,作者于此表示衷心的感谢。

近几年来的教学实践及学科发展的要求,也都反映了对于原书存在的问题应及时进行修订,因此,经能源部热动类教学专业委员会决定现修订再版。

作为一本教材,在修订中我们仍本着内容精炼、循序渐进、深入浅出和联系实际等要求,基本上保留了原书的体系。为了使各章内容上能更好地衔接,将离散控制系统、状态空间分析法及非线性系统分析,相应调整为第七、第八和第九章,以方便教学。为了充分利用有限的学时和篇幅,我们对第三、第四、第五和第八章的前四节,作了较大的变动,侧重于一些较新颖的内容,使理论和实际的联系也更为密切,并可供有关自动控制方面的工程师们参考。

必须指出,由于近年来国内计算机的应用已较广泛,控制系统的计算机辅助设计及其在教学上的应用也得到了很大的发展,已有许多这方面的书籍问世和软件开发。但因教材本身任务所限,本书只涉及这些新技术的应用,而对具体程序等内容则请参阅有关的参考书或辅助教材。此处顺便提及,辅助本书教学的《自动控制原理习题集及解题程序》一书不久也将出版。

第二版全书由西安交通大学谢麟阁主编并编写第一、二、三、四及第九章;宋又祥编写第七及第八章;上海电力学院翁思义编写第五及第六章。

本书由重庆大学自动化系周其鉴教授主审;吴志清、何均正两位副教授也细致地审阅了再版书稿。他们提出了许多宝贵的修改意见,在此谨表示衷心的感谢。在编写过程中还得到东南大学、华北电力学院、东北电力学院、武汉水利电力学院、浙江大学和华中理工大学等有关同志的支持和帮助,在此一并致以谢忱。

由于我们的水平有限,无疑在第二版中仍会存在一些缺点和错误,竭诚欢迎继续给予批评指正。

编者

1990年5月于西安交通大学能源系

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 自动控制的基本概念	1
§ 1.1 生产过程控制的分析	1
§ 1.2 自动控制系统与常规控制器	3
§ 1.3 静态特性	5
§ 1.4 动态特性	10
§ 1.5 对自动控制系统性能的要求	14
§ 1.6 自动控制系统的分类	16
习题	18
第二章 自动控制系统及其组成部分的数学描述	20
§ 2.1 动态方程与传递函数	20
§ 2.2 典型环节的动态特性与传递函数的综合	37
§ 2.3 系统框图的等效转换与信号流程图	51
§ 2.4 常规控制器的动态特性及其组成	59
§ 2.5 热工对象的动态特性	63
§ 2.6 多变量控制系统与传递矩阵	66
习题	68
第三章 时间响应分析	71
§ 3.1 引言	71
§ 3.2 一阶系统和二阶系统的瞬态响应	71
§ 3.3 二阶系统的性能指标	76
§ 3.4 稳态误差、系统分类与积分性能指标	85
§ 3.5 高阶系统	89
§ 3.6 稳定性概念与代数判据	93
习题	102
第四章 根轨迹法	105
§ 4.1 根轨迹的概念	105
§ 4.2 绘制根轨迹的步骤和规则	106
§ 4.3 广义根轨迹与控制系统的分析	115
§ 4.4 纯迟延系统的根轨迹分析	123
习题	129
第五章 频率响应分析	132
§ 5.1 频率特性的基本概念	132

§ 5.2 典型环节的频率特性	135
§ 5.3 系统的开环频率特性	140
§ 5.4 奈奎斯特稳定判据	143
§ 5.5 对数幅相频率特性	155
§ 5.6 用频率响应法分析控制系统的相对稳定性	169
§ 5.7 闭环幅相频率特性	178
习题	190
第六章 控制系统的设计和校正方法	193
§ 6.1 概述	193
§ 6.2 串联校正方法	196
§ 6.3 反馈(并联)校正方法	206
§ 6.4 采用根轨迹法的设计和校正方法	211
§ 6.5 采用频率特性法的设计和校正方法	222
§ 6.6 零点极点抵销的设计与校正方法	229
§ 6.7 采用前馈-反馈复合控制的设计和校正方法	233
§ 6.8 纯延迟时间的补偿和校正	238
习题	240
第七章 离散控制系统	242
§ 7.1 概述	242
§ 7.2 脉冲函数—— δ 函数	243
§ 7.3 信号的采样	246
§ 7.4 信号的恢复	248
§ 7.5 Z变换及其基本性质	252
§ 7.6 离散控制系统的数学描述	263
§ 7.7 广义Z变换	271
§ 7.8 离散控制系统的分析	274
§ 7.9 离散控制系统的数字校正	282
习题	289
第八章 状态空间分析法	292
§ 8.1 概述	292
§ 8.2 线性定常系统的状态空间表达式	295
§ 8.3 多输入多输出(MIMO)系统的状态空间表达式和传递矩阵	311
§ 8.4 线性定常系统状态方程的求解	319
§ 8.5 离散系统状态空间表达式和状态方程解法	328
§ 8.6 线性系统的能控性与能观测性	338
§ 8.7 控制系统的状态空间综合法	356
习题	365
第九章 非线性系统分析	369
§ 9.1 概述	369
§ 9.2 典型非线性环节的描述函数	372

§ 9.3	用描述函数分析非线性系统的稳定性	379
§ 9.4	相平面分析的基本概念	384
§ 9.5	奇点分析	386
§ 9.6	相轨迹的作图法——等倾线法	399
§ 9.7	线性和非线性控制系统的相平面分析	401
习题		409
参考文献		411

第一章 自动控制的基本概念

在工业生产过程中，为了保证生产的安全性、经济性以及产品的质量，需要对生产设备或工艺过程进行控制，以使被控的物理量保持恒定或者按照一定的要求变化。我们把这些被控制的设备或过程称为**被控对象**和**被控过程**，所要求保持的物理量称为**被控量**，例如热工过程中的压力、温度、液位、流量、成分和转速等。这些被控量在运行中总要经常受到许多因素的影响而偏离所要求的值，因此运行操作人员就要随时加以控制，这称为**人工控制**。假若采用机械或电气等装置来代替人的控制，这就称为**自动控制**。

在工业上最早应用自动控制并获得成效的，要算控制原动机转速的调速器了，其次还有锅炉的水位控制器等。而现在自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输、宇航等各个方面，甚至它在日常生活中应用的发展速度也是非常快的。对于工业生产控制而言，现在已由常规的控制器的逐步向计算机、微处理机等数控方面发展，并已日见成效。自动控制的原理也由最基本的反馈和前馈控制原理向最优控制、多变量控制、自适应控制等现代控制理论方面迅速发展。

按照新教学大纲对本课程所规定的任务，本课程仍以反馈控制理论为主并适当考虑现代控制理论的基本内容和方法（如离散控制系统以及状态空间分析法等），其它较深入的部分将在专门的课程中学习。

§ 1.1 生产过程控制的分析

这里以电厂锅炉运行中要保持炉膛的负压为某一规定值为例，来分析生产过程的控制。在运行中，操作人员必须经常注视炉膛负压表的指示值是否符合规定值，假若偏正或偏负，他就要开大或关小引风机的调风挡板，直到炉膛负压表的指示值符合规定值并保持平稳为止。这里需要控制的负压就是被控量，通常用 c 来表示，规定的负压数值称为**给定值**或**参考输入值**，通常用 r 表示。被控量——负压的变化，受流入锅炉的空气流量（送风机送入的，或称**流入量**） Q_{λ} 和流出锅炉的烟气流量（引风机的吸风量，或称**流出量**） $Q_{\text{出}}$ 的影响。很明显，当负压为给定值并且流入与流出的气量平衡时是不需要控制的。一旦由于送风机的挡板开大（或关小）或其它原因使流入量发生变化时，流入量与流出量便失去了平衡，并必然反映为炉膛负压的变化，操作员就要开大（或关小）引风机调风挡板的开度，使流出量与流入量重新平衡并使被控量恢复为给定值。

这样，流入量的变化对运行产生了“干扰”，我们称它为**扰动量**，这里用 d 表示生产过程的负载干扰， $d = Q_{\lambda} - Q_{\text{出}}$ 。当然失去平衡也可能是由于流出量发生变化而引起的。通常采用控制引风机调风挡板的开度（这里用控制量 u 表示）来平衡送风量的方式，这一控制方式称为**控制手段**，而引风机的调风挡板就称为**控制机构**。也可能采取相反的方式来

保持炉膛的负压，即控制机构是送风机的调风挡板，用控制送风量来平衡或消除来自引风量的扰动。所以，根据不同情况，控制手段是可以适当选择的。

由上述可知，炉膛负压的控制流程是：负压信号通过指示仪表达到操作员的眼、脑，再由操作员操作引风机的调风挡板，这样便形成了一个闭环的人工控制系统，如图 1-1 所示。这里，锅炉便是被控对象或简称对象。

为了使以上分析具有普遍意义并对控制流程有更深刻的认识，可以把图 1-1 中的被控对象和操作人员用一个方框来表示，我们称它为方框图，如图 1-2 所示。这样，人是根据仪表指示的信号从事控制的，图上用两根带箭头的有向信号线与被控对象相连接。于是方框和信号线便组成了一个闭环控制系统。这是我们经常用来简明地表示控制系统结构的一种图形，因此又称为结构图。

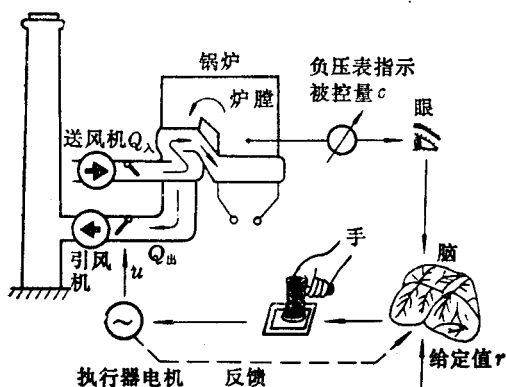


图 1-1 炉膛负压人工控制信息流程示意

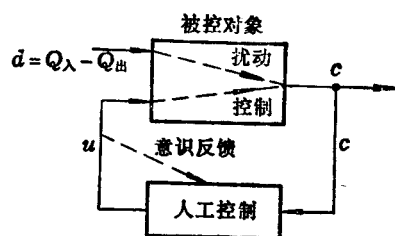


图 1-2 炉膛负压人工控制系统方框图

可以进一步分析，对象为什么需要控制？这是因为，对象的流入量和流出量从原来的平衡状态下发生了变化，失去了平衡，被控量 c 因而也偏离了给定值 r ，即被控量的偏差是对象受到扰动后造成的结果，扰动则是被控量变化的原因。扰动作用 d 在图 1-2 上也用一个有向的信号线表示。对于对象来说，由于流入量或流出量变化而产生的扰动，是它的输入信号，而仪表指示的负压力（通常应理解为相对于给定值的偏差量）或被控量 c 是它的输出信号（这里，也是整个系统的输出）。对于操作员来说，被控量 c 是输入信号，而操作员的“正确操作” u 则是输出信号。这里要特别说明，操作员的“正确操作”是指这个信号 u 作用到对象上要起控制作用，以排除扰动作用的影响。控制作用信号 u 和扰动作用信号 d 虽然都是对象的输入信号，但却是相互矛盾着的两个作用，二者对对象总应该起着恰恰相反的作用。因此，在控制作用 u 的信号上必须加注“-”号，而在扰动输入上应加注“+”号，以表示二者的极性相反。如果操作错误，则两者极性变成相同，这就要助长流入量和流出量之间已经存在的不平衡，即错误的控制操作意味着一个来自控制机构的扰动，这会导致异常运行或事故。

必须注意，在一般情况下图 1-2 中的控制信号 u 和扰动信号 d ，对于对象输出 c 影响的途径和特性不一定是完全一样的，所以它们应该在对象的输出端上进行代数相加；如果假

定 u 和 d 的影响的途径和特性是完全一样的，那就可以在对象的输入端上进行代数相加，例如后叙的图1-3 (b) 所示。以后除另有说明外，我们总假定 u 和 d 对于对象特性的影响是完全一样的，这样比较简单，同时也不失其一般性。

由上述可知，对于一个方框或一个系统，它的输入量和输出量之间是“因”与“果”的关系。这些因果规律指的是方框或系统的静态特性和动态特性，并且能用数学形式把它们的关系描述出来，称为数学模型。

§ 1.2 自动控制系统与常规控制器

1. 人工控制的“职能”

我们已经分析了人工控制炉膛负压这一具体的生产过程，并且抽象出有关控制的一些概念。但是，人究竟是如何进行“正确操作”的呢？现在让我们较深入地分析一下人在控制操作上的“职能”，从而用控制器（或称常规控制器）来代替人的这部分职能，以形成自动控制系统，如图1-3所示。人工控制的职能大体如下：

(a) 监视 操作员经常目视仪表指示的被控量 c ，监视生产过程的情况。

(b) 判断 人在监视被控量的过程中，随时在头脑中将被控量的指示值 c 与给定值 r 进行比较，由偏差的正负、大小和变化的速度等作出判断，即要不要操作？朝哪个方向操作？操作得快些还是慢些？等等。

(c) 操作 根据判断结果进行操作并改变控制机构的开度，直至最终使流入量和流出量重新达到平衡，被控量恢复到给定值为止。

操作控制机构可以是人手直接操作的形式，也可以通过电动、气动或液动执行器进行，称为间接作用形式。

(d) 反馈 一个熟练的操作员，他不仅能根据被控量偏离给定值的正负、大小和速度等决定操作的要求，而且还要预先估计并随时观察控制的结果，这就有机地形成了一个“反馈信号”。因为他在长期的操作实践中摸熟了对象的特性，了解输入量和输出量之间的因果规律，所以就可根据仪表指示和操作情况来随时估计“反馈”量，如恰当地变更控制速度（如停停开开的断续操作）。掌握好控制量，使控制机构的位移不过分，从而避免

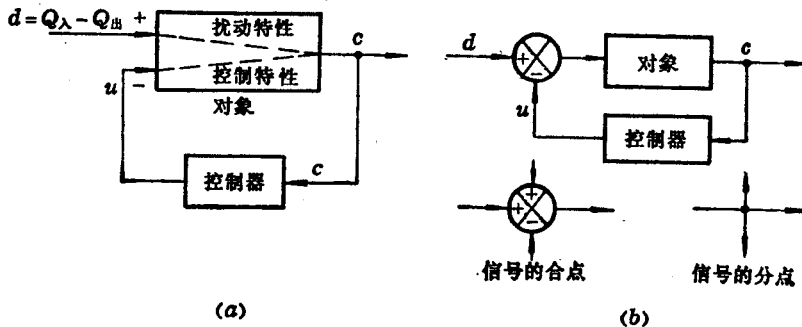


图 1-3 自动控制系统的简单方框图
(a) 扰动特性和控制特性不同；(b) 扰动特性和控制特性相同

多次反复的振荡，但也不使操作量不足，以致被控量偏差很大后才开始减小，拖长了控制的时间。熟练的操作员往往可以在很短的时间内排除扰动，使流入量、流出量重新达到平衡并使被控量重新稳定在给定值上。

在图1-2上，反馈信号是用一条虚线表示的，它决定于人的操作技巧。

2. 常规控制器的元件

由以上分析可知，控制器应该由能完成上述职能的一些元件所组成，如图1-4所示。控制器的相应的元件如下：

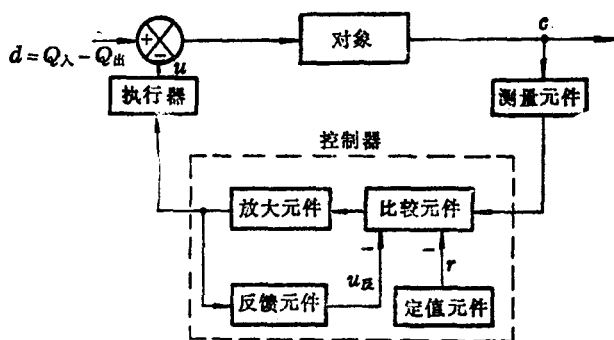


图 1-4 自动控制系统的元件方框图

(a) 测量变送元件 通常它是指装在现场的变送器或传感器，它把被控量变成电压、电流、气压、液压或其它的信号然后送到控制器去。上述信号的类型也可能是经过中间变换的，总之应使它与控制器所用的信号相一致。

(b) 定值元件 通常它装在控制器的内部或操作台上，用以产生给定信号，该信号一般由人来设定（或由另外的自动装置给定）。给定信号的类型应与变送器的一致，也就是与控制器所用的信号类型相一致。

(c) 比较元件 在该元件中把被控信号与给定值信号进行比较并发出偏差的指挥控制信号。一般控制器的反馈信号也在此进行代数的综合，其中给定信号和反馈信号都有负的极性，如图1-4所示。

(d) 放大元件 它把偏差指挥信号放大，使能动作执行器并为反馈信号提供信号源。

(e) 反馈元件 在该元件中把控制信号变成反馈信号并反馈到放大器前的比较元件上，以抵销指挥偏差信号，即以放大器的输出制约其输入（它类似于一般的放大器中所采用的），也称为负反馈（不过这里所谈的反馈元件的反馈信号应根据控制规律的要求而定。这在以后还要谈及）。反馈信号意味着在控制的同时，被控量尚未因受控而真正变化以前就按某一规律预估了控制的效果，从而防止了控制的过量并能减小被控量的波动幅值和减少波动的次数。反馈元件对控制器的特性起着极重要的影响，实际上主要由它决定控制的规律。

(f) 执行元件（执行器或执行机构） 它按照控制器的控制信号去移动控制机构。

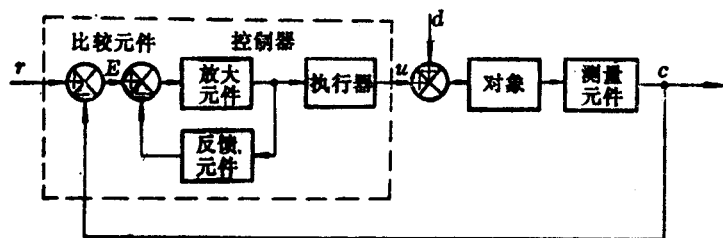
图1-4表示了这些元件的典型组合并构成控制系统。应该注意到，方框之间任何信号

以上是常规控制器包括的主要元件，图1-4上虚线方框内表示控制器的整体。

图1-3和图1-4表示了一个单输入单输出（SISO）的最简单的自动控制系统，或称单回路自动控制系统。现仍以炉膛负压自动控制系统为例进行分析。对象和控制器的信号随时都在相互作用着。我们说系统处于静态（或稳态），是指流入量和流出量相平衡（ $Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}}$ ），即系统的扰动量 $d = Q_{\text{入}} - Q_{\text{出}} = 0$ ，并且被控量等于给定值（ $c = r$ ），图上各信号都处于平衡状态，是不变的静止量或认为它是零（坐标原点）。一旦 $Q_{\text{入}} \neq Q_{\text{出}}$ ，即系统遭到了扰动， $d = Q_{\text{入}} - Q_{\text{出}} \neq 0$ ，此时被控量 c 发生变化， $c \neq r$ ，控制器即进行控制，系统便进入动态过程（或瞬态过程），直到控制器经过一段时间的控制使流入量和流出量再度相等，并且 $c = r$ ，达到新的平衡，于是系统又重新进入静态（稳态）。这一过程可表示如下：

平衡、静态I 扰动作用 → 动态过程 控制作用 → 平衡、静态II
(或稳态I) (平衡破坏) (或瞬态过程) (扰动排除) (或稳态II)

扰动可能发生在系统的任何部位而且是多种多样的，而消除扰动的控制作用只能由控制器来担当。



对于用给定信号 r 作为输入信号的控制系统，可以将图1-4改绘成图1-5。图1-5是将图1-4中执行器输出 u 的负号向前移到控制器的输入处，则来自测量元件的输出信号 c 便变成负号，而定值信号 r 就变成正的了，所以以上两图中的符号仍是一致的，仅仅是负号所处的位置不同而已。在以后各章中，我们总是以 c 的单位反馈作为系统的负反馈。图1-5的另一特点是以测量元件的输出 c 作为整个控制系统（或对象）的输出信号。这是因为，控制器（或人）都只凭测量仪表的信号控制的。由这一系统不难看出，在静态时，输出 c 将等于给定值 r 或跟踪给定信号 $r(t)$ ，这种系统又常称为跟踪系统或伺服控制系统。

在 § 1.2 中我们已经知道, 反馈控制系统在历次的扰动下会交替出现静态和动态两种状态, 我们通常用系统的静态(稳态)特性和动态(瞬态)特性表明这两种状态。最普通

且直观的是在平面坐标上绘出静态（或稳态）的特性曲线和动态（或瞬态）的过程曲线。这样，静态特性便可表示出控制系统（或元件、部件）在平衡状态下的输入信号（以流入量和流出量的平衡值来表示）与输出信号之间的关系。它只表明输入和输出在平衡状态下的关系，而不表明怎样达到这一平衡的过程以及所经历的时间。以下我们用两种控制系统和一些元件的静态特性为例来进一步说明。

1. 无差系统的静态特性与控制器及反馈元件的关系

如前所述，炉膛负压自动控制系统的输出是被控量 c ，静态下 $c = r$ （ r 为给定的常数）；输入可以用空气和烟气的流量 Q 来表示，静态下 $Q = Q_{\lambda} = Q_{\text{出}}$ ，是平衡的。图 1-6 绘出了该系统的静态特性。它是一条水平的直线，它表明锅炉（或对象）在 Q_{min} 到 Q_{max} 的任一负荷（坐标上都标出了实际的单位）下，其炉膛负压的静态值都保持为给定的常数值。一般炉膛负压的给定值约为 -30Pa 。但实际上控制器总有很小的不灵敏区（或死区） Δ ，并且生产上也允许有约 $\pm 10\text{Pa}$ 的变动范围（如图示的虚线范围）。

图 1-6 所示的不仅是控制系统的静态特性，也是该系统所用控制器的静态特性。因为系统（或对象）的输出就是控制器的输入，系统（或对象）的输入就是控制器的输出，在静态下相互平衡，被控量 c 在各种负荷下都保持为给定值 r ，即静态无差，所以这种控制器是

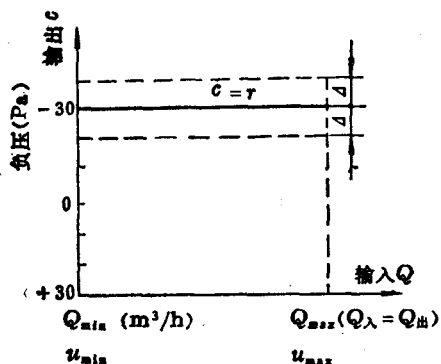


图 1-6 无差系统的静态特性

器是**无（静）差控制器**。采用这种控制器的系统称为**无差控制系统**。控制器怎样能保证无静差呢？这主要是由它所采用的反馈元件决定的。这种反馈元件仅仅在动态过程中，或者说在控制器动作时有反馈信号，而在进入静态或控制器不动时，反馈信号就消失为零，于是在比较元件上建立平衡， $c - r = 0$ ，（或 $c = r$ ）。具有这种性质的控制器，以往被称为**弹性反馈的控制器**。另外可以看到，控制器的输入 c 总被保持为定值，而控制器的输出却可以

停留在任意的位置 u 上（对应于其负荷 Q ），所以又称为**不定位的控制器**。

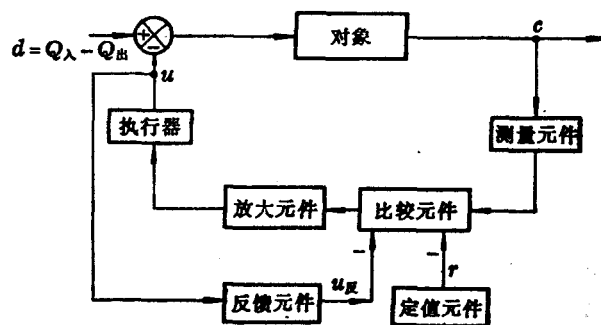
反馈元件具有这种特性的控制器，其结构都比较复杂。液动、气动或机械式控制器的反馈元件都由弹簧和具有泄漏孔的活塞机构所组成，在控制器动作时起反馈作用，而在进入静态或控制器不动时，弹簧保持在原来的位置，不再有反馈信号。在电气控制器中，则由电阻和电容组成的微分电路作为反馈元件，在控制器输出信号不再变动时，输出的微分为零，此时反馈信号为零。由此可知，控制器的静特性由它的反馈元件来确定。

下面我们将述及刚性反馈的控制器。它的反馈信号是刚性的，结构比较简单，不过它是“有差”的，所以静态精确度较差。

2. 有差系统的静态特性与控制器及反馈元件的关系

图 1-7 所示是一种最简单却又能表明其工作原理的汽轮机转速自动控制系统，或简称**调速器**。它的方框图如图 1-8 所示。这一框图与图 1-4 的区别，仅在于反馈元件的输入是由执行器（油动机）5 上部端杆（刚性反馈杆 6）的位移作用到比较杆 3 上。这就与前述弹性

1—离心测速器; 2—定值弹簧; 3—比较杆; 4—错油门; 5—活塞油动机; 6—反馈杆;
7—调节阀, u ; 8—汽轮发电机



设控制器处于某一初始平衡静态工况 I。经调节阀 7 流入汽轮机 8 的蒸汽能量 Q_{λ} 与发电机送出的能量 $Q_{出}$ 两者刚好相平衡，此时扰动量 $d = Q_{\lambda} - Q_{出} = 0$ ，被控量 $c = r$ ，为一不变的转速，对象处于静态平衡。图中用实线 $abcd$ 表示的传动杆 3 也是控制器的比较元件， c 点上所联的错油门 4 的进出口这时都被盖死，油动机和调节阀位置 u 就不会变动。设这时的转速为 c_1 ，飞锤的离心力克服主簧拉力后作用到杆 3 上的力矩与辅助簧（即定值簧 2）拉力的力矩相平衡。以上力矩均以 d 点为支点， d 点位置是由油动机或调节阀的位置确定的。

7

并使滑套 a 向上滑到 a' 点,也即杆3以 d 点为支点沿顺时针方向转动到 $a'c'd$ 的位置。 c 点上升到 c' 点, c 点所联的错油门4也上升,使油动机5上部进油,下部排油,活塞下移,关小调节阀7的位置 u ,于是进入汽轮机的蒸汽量减少,以平衡发电机所降低的负荷,排除这一干扰。这表明控制器的指挥控制动作是正确的。但是,调节阀究竟应该关到什么位置呢?一般要经过一定的过调和若干次的振荡后,控制器才能稳定下来,系统才进入静态。我们知道,这是一个动态过程,这里不多分析。但我们可以注意到,在静态时油动机关小,由 d 点到达 d' 点是以 a' 为支点顺时针向下旋转的,使 c' 点降低并使 c' 刚好回到原来的 c 点位置上,把错油门再度关死,油动机又停止不动。此时,若 $Q_{\lambda}=Q_{\text{出}}$,系统便进入平衡静态了。在这一新的平衡静态工况II,扰动量 $d=Q_{\lambda}-Q_{\text{出}}=0$,虽然 $c_{\text{II}} \neq c_1$ 与原来的定值 r 并不相同,但控制器却静止不动,系统进入静态II。

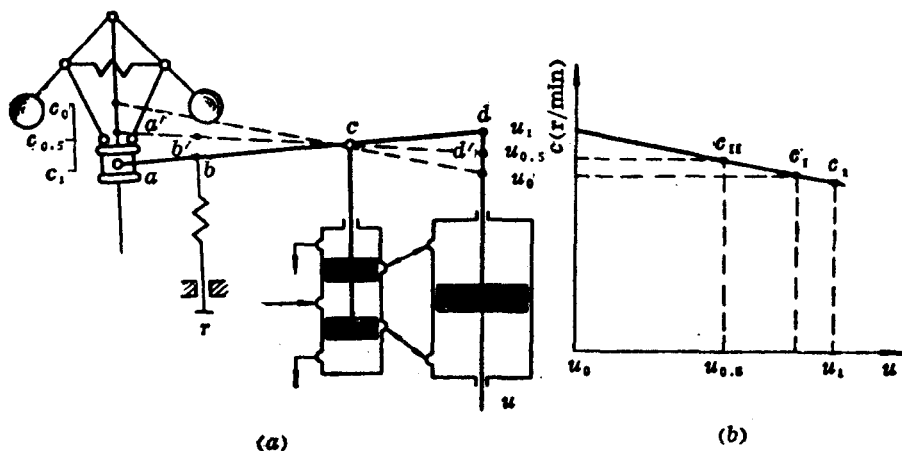


图 1-9 汽轮机转速控制系统静态特性的绘制
(a) c 和 u 的对应关系; (b) 静态特性

汽轮机转速 c_1 为什么会变成 c_{II} 呢?由图1-9(a)可以看出,杆3在新工况下的平衡位置为 $a'b'cd'$ 。由于在静态时 c 点位置总是不变的,便可以把它看成是杆3在静态下的支点。若 d 点下降到 d' 点,则 a 点就要上升到 a' 点。显然, c_{II} 较 c_1 为高,即汽轮机在低负荷下保持的转速要高些。这时,定值簧虽然未经过人为的变动,但由于反馈杆的刚性反馈作用,却使被控量 c 保持在一个较高的定值下。因此可以把刚性反馈作用看作是使给定值按某一规律变化的作用,即给定值 r 是与调节阀开度 u 成比例变化的,它不是一个常数。

至此,我们可以得出,任何控制系统要进入静态,必须同时满足两个条件:对象平衡($d=0$,即 $Q_{\lambda}=Q_{\text{出}}$)和控制器平衡(即比较元件上的偏差指挥信号为零)。

图1-9(a)和(b)是按调速器杆的对应位置绘出的调速器静态特性线,同样它也是控制系统的静态特性。这样的控制器称为**有差控制器**。采用这种控制器的系统称为**有差控制系统**。因为控制器的输出开度 u 和输入的被控量 c 有一一对应的关系,所以又称为**定位控制器**。从上述分析中已经知道,反馈是刚性的,它不仅在动态时起作用,在静态时也起作用,所以又称为**刚性反馈的控制器**。

图1-9(b)还表示了反馈元件的静态关系。设反馈杆的输入是 u ，输出为 $u_{\text{反}}$ ，便不难得出下式：

$$\frac{-u_{\text{反}}}{u} = \delta; \text{ 或 } u_{\text{反}} = -\delta u \quad (1-1)$$

式中， δ 是静态特性线的斜率或称为**控制器的反馈率**；“ $-$ ”号表示负反馈作用，即 u 有某一正偏差量时 $u_{\text{反}}$ 就有一负偏差量。 δ 的单位决定于 u 和 $u_{\text{反}}$ 的单位。 u 可以用汽轮发电机的负荷(kW)为单位，也可以用调节阀的行程(mm)为单位；有时也用调节阀最大行程的相对量来表示，即 $u = \frac{\Delta u}{\Delta u_{\text{max}}}$ 。 $u_{\text{反}}$ 要与 c 的单位相一致，可以采用滑套的行程(mm)，也可用转速(r/min)为单位。

若 u 采用相对量， c 和 $u_{\text{反}}$ 用转速(r/min)，则 δ 表示汽轮机从零到额定负荷的最大转速变化(r/min)。若 c 和 $u_{\text{反}}$ 也采用以被控量的平均转速 $c_{\text{平均}} = \frac{c_1 + c_0}{2}$ (c_1 为额定负荷下转速， c_0 为零负荷下转速)的相对量表示时，则

$$\delta = \frac{c_0 - c_1}{c_{\text{平均}}} \quad (1-2)$$

δ 是一个无量纲的数值，称为汽轮机调速器的**不均匀率**，通常这一数值的范围约为4%~10%。

以后我们会知道，这类控制器属于比例作用的动态特性，用百分数表示的 δ ，一般称为**比例带**（有时也称为比例度或比例限）。

由以上分析可知，控制系统的静特性一般取决于控制器，而控制器的静特性又取决于其反馈元件的特性。因此，控制器反馈元件的特性（包括动特性）是非常重要的。

3. 线性和非线性元件的静态特性举例

同样，对于一个元件（或部件）来说，其静态特性也是指在平衡状态下，它的输入和输出之间的关系。上述反馈杆的静态特性就是一个很明显的例子。

很多控制元件的静态特性都是线性的，或可近似地认为是线性的。例如，测量炉膛负压的变送器，其输入量（负压 Δp ）和输出量（直流电流 I_0 ）之间的关系，为如图1-10所示的静态特性曲线。当炉膛正常负压 Δp 为-30Pa时，变送器的输出为5mA，它与给定值电流 r (5mA)相平衡。此时，控制器的偏差电流为零。在最大的风压运行范围内，它和输出量成直线关系，而当超过这一范围时，出现饱和的非线性关系。事实上，在所使用的范围内，我们可以认为它是**线性元件**。对线性的其它要求是在递增或递减输入量时，依次测出两个方向上输出的读数相差（**变差**）要很小，静态特性的斜率（**灵敏性**）也要符合要求，并且仪表的稳定性要好，反应要快等。这是对所有测量变送元件静态特性的一般要求。一些元件可以在使用范围内忽略掉很小的非线性和变差，并

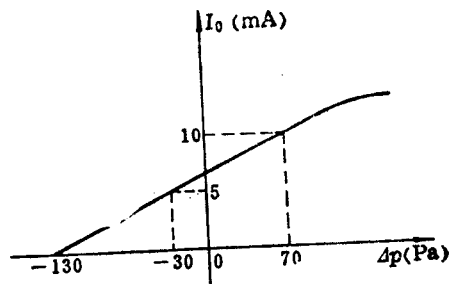


图 1-10 风压变送器的静态特性