



“九五”

中国石油天然气集团公司出版

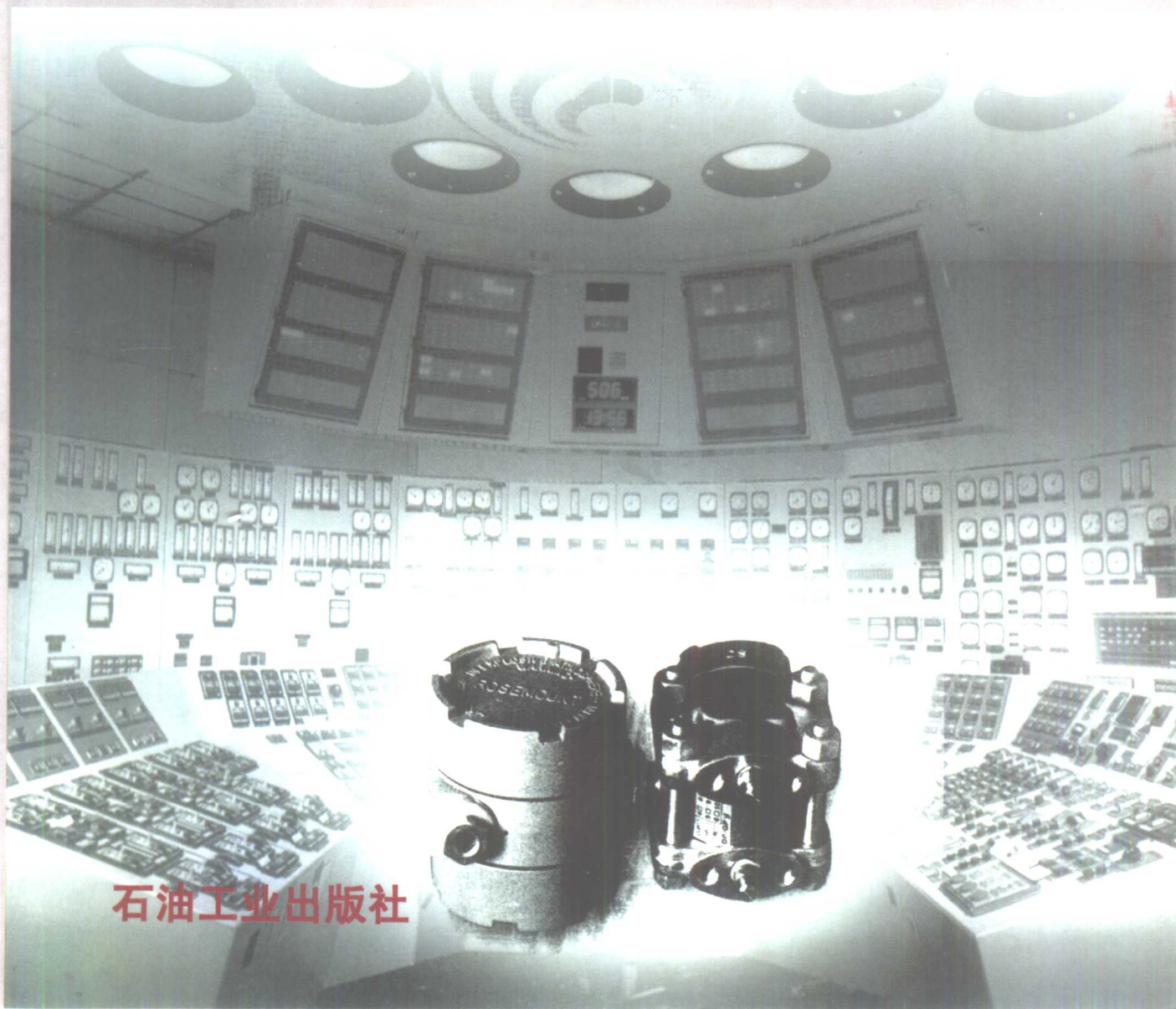


仪表控制系统

高等学校教学用书

仪表控制系统

吴九辅 主编



石油工业出版社

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讲述了仪表控制系统的组成、基本原理、基本特性及其参数整定、可靠性维修性及防爆。本书还论述了DCS系统，FCS现场总线系统，并介绍了利用现代模糊集合理论建立模糊控制系统的方法，为处理和解决复杂系统的最优化控制提供了新的途径。本书可作为高等学校自动化及仪表专业教材外，还可供从事工业自动化设计与改造工作的科技工作者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

仪表控制系统/吴九辅主编.

北京:石油工业出版社,2000.5

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材高等学校教学用书

ISBN 7-5021-2883-2

I. 仪…

II. 吴…

III. 仪表—控制系统—高等学校—教材

IV. TH868

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 76914 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 17 印张 423 千字 印 1—2000

2000 年 5 月北京第 1 版 2000 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2883-2/TE·2246 (课)

定价: 29.00 元

前 言

本教材是在吴九辅教授所著《仪表控制系统基础》(陕西科技出版社 1995 年出版)一书的基础上,延伸、扩展而成。

本教材参考学时为 90 学时,其主要内容讲述仪表控制装置和过程对象,以及由两者组成的系统及控制,全书分为 12 章。第 1 章为仪表控制系统基础,是全书的基本内容,讲授一些仪表控制的基础知识和原理,由吴九辅教授执笔;第 2 章为信号转换与变送,讲述一些工程检测内容,由沈阳工业学院莫春立老师等执笔;第 3 章讲述显示记录及打印仪表设备,由吴九辅、莫春立执笔;第 4 章讲述调节控制仪表装置,介绍一些新型智能仪表,由吴九辅教授执笔;第 5 章执行器仪表,由吴九辅教授、付清锋执笔;第 6 章讲述控制装置 PC, PLC 和 PCC,由西安石油学院霍爱清老师执笔;第 7 章讲述 DCS 集散控制系统,由西安石油学院汤楠副教授执笔;第 8 章讲述现场总线与 FBS 仪表控制系统,由吴九辅教授执笔;第 9 章讲述模糊控制,由霍爱清执笔;第 10 章讲述 PID 参数整定,由吴九辅教授执笔;第 11 章讲述仪表及系统可靠性、维修性和防爆,由吴九辅教授执笔;第 12 章讲述中央控制室,由吴九辅教授和中原油田周伟珍老师执笔。

沈阳工业学院李福刚教授担任本书的主审。

本教材考虑到基础要实、面要够宽、内容要精、选材要新,并充分考虑这一高速发展的高科技领域的最新成就,具有超前性、理论性、工程性。在体例内容上充分考虑到学生如何去学,从而尽快掌握这一学科领域的知识。本教材继承了原《仪表控制系统基础》的受欢迎之处,并将这几年的教学与科研经验成果也都融合到书中。

前 5 章是基础,后 7 章是延伸,可根据学时要求,选取内容。本教材除了适用于自动化专业的本科生、研究生学习外,还考虑到了在职自动化科技人员及非自动化专业人员的需要。

由于编者的水平有限,加上对新理论、新知识理解的局限性,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望读者给予批评指正。

编 者

于西安

2000 年 1 月

目 录

绪论	(1)
1 仪表控制系统基础	(3)
1.1 自动控制的意义	(3)
1.2 控制回路构成要素	(4)
1.3 反馈控制基础	(10)
1.4 过程特性	(15)
1.5 调节器的控制动作	(22)
1.6 微型计算机控制	(28)
2 信号转换与变送	(32)
2.1 信号转换与变送概述	(32)
2.2 信号转换原理	(36)
2.3 温度变送器	(40)
2.4 压力变送器	(43)
2.5 流量变送器	(47)
2.6 电—气转换器和气—电转换器	(53)
2.7 智能变送器	(54)
3 显示记录及打印设备	(56)
3.1 指示仪表	(56)
3.2 记录仪表	(66)
3.3 记录打印机	(79)
4 调节控制仪表装置	(84)
4.1 调节控制仪表	(84)
4.2 YS-80 系列仪表	(86)
4.3 YS-100 系列控制仪表装置	(112)
5 执行器	(131)
5.1 执行器概述	(131)
5.2 气动执行器	(132)
5.3 电动执行器	(143)
6 PC, PLC 与 PCC 控制器	(146)
6.1 概述	(146)
6.2 结构原理	(148)
6.3 梯形图	(151)
6.4 PCC 控制装置	(157)
7 DCS 仪表控制系统	(160)
7.1 DCS 结构原理及其发展	(160)

7.2	DCS 硬件结构及其功能	(162)
7.3	DCS 软件原理及其功能	(170)
7.4	μ XL 系统简介	(175)
8	现场总线与 FCS (FBCS) 仪表控制系统	(187)
8.1	概述	(187)
8.2	现场总线国际标准化状况	(200)
8.3	基金会现场总线情况	(207)
8.4	现场总线产生的影响	(210)
8.5	现场总线的一些问题	(213)
9	模糊控制系统	(216)
9.1	概述	(216)
9.2	结构原理	(219)
9.3	特点与应用	(229)
10	PID 调节器参数的整定	(234)
10.1	概述	(234)
10.2	人工整定	(235)
10.3	自整定	(237)
11	仪表及系统的可靠性与防爆安全性	(244)
11.1	仪表及系统的可靠性	(244)
11.2	仪表及系统的维修性	(247)
11.3	仪表及系统故障分析方法	(249)
11.4	仪表与防爆简述	(251)
12	控制中心 (中心控制室)	(254)
12.1	概述	(254)
12.2	中心控制室	(254)
12.3	控制中心的构筑	(255)
12.4	仪表控制盘	(260)
	主要参考文献	(264)

绪 论

仪表控制系统是自动化专业的重要专业课。它是从事自动化的科技人员必须掌握的基本知识。在工业生产中，现代生活中，对一些设备和过程，应用一些仪表自动化装置代替人的操作和管理，实现自动运行，这就是常讲的自动化。

一个国家现代化的重要标志就是自动化的程度。自动化是提高社会生产力，提高经济效益的重要措施之一。对减轻人类劳动，改善人类生存环境，有着重要作用，这也是人类为实现自动化，在广义上的目的。具体来讲就是保证产品质量；减少消耗，降低成本；提高经济效益；安全生产；减轻劳动强度。

从自动化发展历史来看，先是应用一些检测仪表监视生产；后来是应用自动控制仪表及一些控制装置，代替部分人工操作，按目标要求，使生产过程自动进行，进而使用智能仪表、电子计算机实现全部自动化；与办公自动化，信息系统连接，实现综合自动化。

从控制的视角来观察自动化，可以将其分为实现自动化的工具及为实现自动化的控制对象（过程），二者联系起来就是系统。

作为控制对象形式及过程，是各式各样的，小到家电加热器，大到机器设备，生产线乃至宇宙飞船。对于自动化工具，它包括仪表控制装置、计算机。按其功能又分为检测、控制、执行三大类。对于系统，主要是一些检测方法，分析方法，控制方法，算法，控制规律，语言，组态及软件。以上三大内容都是很重要的，关系密切，互为制约，呈现出协调发展的踪迹。

从自动化工具，也就是自动化仪表发展的历史看，大概经历是检测监视阶段，就地检测，监视调节，即基地式仪表阶段。基地式仪表至今还在一些独立的设备上应用。若是以应用核心元器件，硬件结构来划分，大概可以分成六代：第一代是以电子管为主要元件的，50年代末，60年代曾研制过的DDZ-I型电动单元组合仪表，但没有形成气候。第二代也就是以晶体管为主要元件的仪表，在我国是在60年代末70年初研制成功的，并得到广泛应用，称之为DDZ-II型电动单元组合仪表，它是我国第一套实用自动化仪表，为我国自动化作出了重大贡献，接近当时世界先进水平。第三代仪表是以集成电路IC为主要元件的仪表，称为DDZ-III型，研制于70年代中期，在80年初我国引进了与DDZ-III型同类的I系仪表和EK系列仪表。应该说明的是，单元组合仪表的出现是自动化的一大进步，对全世界自动化工程起了重要作用。单元组合仪表的出现也是系统思想取得的成就，特别是I系列全电子控制装置等，为模拟式仪表发展的顶峰，它的控制方法，设计思想对后来的发展、应用，有重大影响。第四代仪表，我国称DDZ-S系列，是以 μP 微处理器为主要元件的仪表装置，80年代一些国家相继研制成功，我国也引进了YS-80，YS-100系列仪表，KM系列等仪表，这是从模拟向数字仪表的跨跃，也就是说微机式智能控制仪表出现了。第五代是以微机为基础，计算机仪表化，仪表计算机化，出现了集散微机仪表控制系统，简称集散系统，即DCS系统（Distributed Control System），这是自动化发展又一飞跃，集散思想在控制及社会科学上有重要的指导意义。第六代是现场总线控制系统，即FCS控制系统（Field-bus Control System），有人称它是控制仪表装置的一次革命。

可以断定新的控制装置系统还会不断出现。

本教材就是以工具、对象、系统为中脊编撰著作的。本教材第 1 章主要讲述基本原理，控制理论，这是重点。第 2 章讲检测与变送。第 3 章讲显示记录。第 4 章讲调节控制装置。第 5 章讲执行器。第 6 章讲 PC，PLC 和 PCC。第 7 章讲 DCS 系统。第 8 章讲现场总线控制系统。第 9 章讲模糊控制。第 10 章讲 PID 整定。第 11 章讲可靠性、维修性及防爆。第 12 章讲中控室。后几章为引深内容，可供非自动化专业、本科生、研究生教学选择。

学习上还是要抓住工具、对象、系统三大要素来掌握，分清作用、特性、联系之间的关系，内容上理清基本概念、原理，以典型为例，举一反三。当然这只是书本知识，更重要的是勇于实践，应从完成一个完整题目、项目的全过程中，培养自己的工作能力。

1 仪表控制系统基础

1.1 自动控制的意义

钢铁、化学、石油、石油化工、化纤等现代产业正在向社会提供大量的优质产品。这些产业的生产过程应用着自动控制技术，进行着自动化生产。若以石油化工企业为例，自动控制实质上成为保证产品质量不可少的手段。对于纯度、成分都有要求的产品，为了可靠地连续生产，自动控制也是不可缺少的手段。对于产品质量，有的可以直接测量，有的却很难直接测量，这就要通过控制温度、压力、流量、液位等操作条件，间接地对质量进行监控。为此，定量地测定操作条件就显得很重要。

在生产中直接控制运转生产过程的往往是仪表。因此，仪表盘的设计应以人机工程学为指导，以最容易进行监视来考虑问题。仪表设计应坚持可靠性第一的方针。

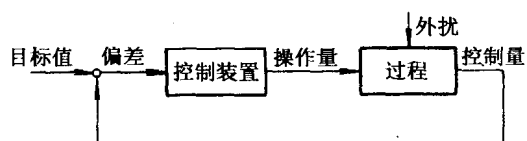


图 1-1-1 反馈控制系统

仪表过程自动控制分为闭环控制和开环控制两种。闭环控制的代表是反馈控制，图 1-1-1 为其概貌，从这个图上很容易明白，信号的流向正好是一周，当目标值与控制量有偏差时，判定其偏差的正负和大小，给出操作量。为了控制量与目标值一致，当有外扰加入到过程中时，它的影响表现在控制量上，产生偏差，利用偏差修正，从而消除外干扰，使控制量与目标值重合。

开环控制分为前馈控制和顺序控制两种。前馈控制不依靠偏差控制，而是检测对控制量有影响的过程变量，依此，决定操作量，如图 1-1-2 所示。主要特征是信息直通向前。在过程中有外扰时，如果外扰能够检测出来，在对控制量影响之前就消除它，对于外扰引起的控制量变化，可以防患于未然，得到好的控制结果。可是，实际的过程中，要想全部将外扰检测出来是不可能的。由于过程模型的完全获得很困难，仅有前馈控制，要想克服常值偏差，也是很困难的。图 1-1-3 是前馈与反馈控制并用的控制系统。

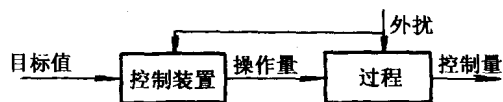


图 1-1-2 前馈控制系统

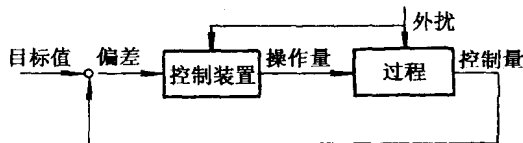


图 1-1-3 前馈和反馈控制系统

顺序控制是通过预先决定了的操作顺序，一步一步自动地进行操作的方法。顺序控制（简称顺控）分为时间的顺控和逻辑的顺控。很久以来，作为控制装置都是时间继电器和继电器的组合，这种情况是很多的。最近，应用磁芯存储器、新型电耦合器件，开发出可以简单地取得任意顺序的专用装置。新型的顺控装置 PLC 已开始大量应用。

作为控制方法，模拟控制是最常见的，目前数字控制也在大量采用。当今，工业企业大型化，复杂化，仅仅是一个一个回路的组合，是不能取得良好控制的，而数字控制可以处理回路相关问题，使全厂在最佳的条件下，高效率地进行控制。数字控制是将过程诸量转换成数字量，用计算机进行各种计算和数据处理，从而控制生产过程。仪表与计算机在相互渗透、融合，也是控制装置发展的重要特点。

种种控制方法，都有各自的特点，在过程中，组合应用，克服外扰的影响，依其控制要求将设备的操作条件确定下来，从而制造出均一的产品。

1.2 控制回路构成要素

1.2.1 基本控制回路

自动控制系统与手动控制系统非常相似，以图 1-2-1 的手动控制为例，用蒸汽加热流过管道的水，控制其出口温度。被加热的水的温度由热电阻检测，用温度显示仪表指示。工作人员用眼看其温度并读其值，与希望的温度在头脑中进行比较，判断是高，还是低。如果过高，就关闭阀门；如果过低，就打开阀门。依此，用手来进行操作；依靠阀的开闭，改变加入热交换器的蒸汽流量，水的温度就发生变化。在这个系统中，如果从信号的流程来看，则是温度—热电阻—温度指示仪—眼—大脑—手—阀—蒸汽流量—温度。这是借助人构成的反馈系统，见图 1-2-1 所示。

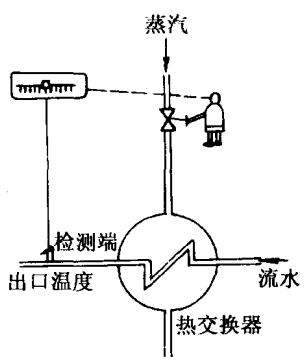


图 1-2-1 手动控制系统

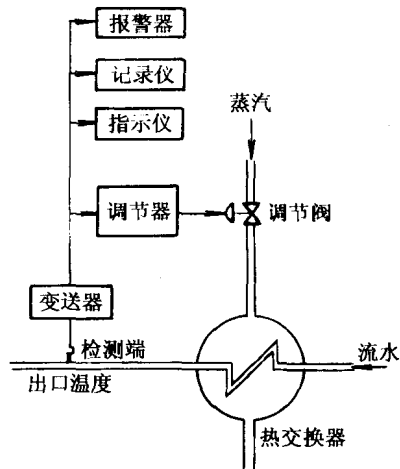


图 1-2-2 自动控制系统

图 1-2-2 是自动控制系统，设置的调节器代替了手动控制系统中的工作人员，由调节器进行判断并指示阀门动作。在此，出口温度用热电阻温度计进行检测，由变送器转换成电信号的信号，再送给调节器。在调节器上，希望温度就是目标值，在刻度盘上能够任意设定，与从变送器送来的测量信号比较，得出偏差，与偏差相对应，给出适当的运算输出信号作为调节阀的操作信号。调节阀依其操作信号进行开闭，调节蒸汽流量。将这种情况画成方框图，如图 1-2-3 所示，在图中，“→”的符号表现负反馈，当温度上升，关闭调节阀，意味着使温度向下降的方向变化。反之，正反馈时，当温度上升，调节阀打开，温度就不断上升，形成发散。正反馈导致不稳定，当有外扰出现，就会妨碍出口温度的稳定。例如水流的入口

温度等就是干扰。看看方框图，就很容易明白，反馈控制系统信号路径如图 1-2-4 所示，必须形成闭环。

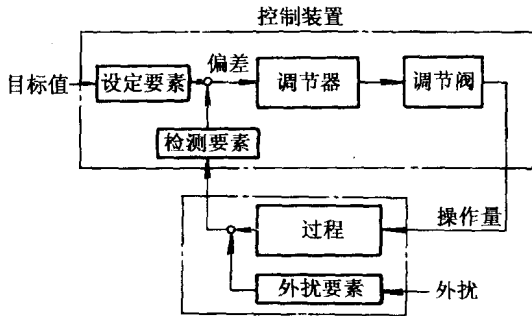


图 1-2-3 控制回路方框图

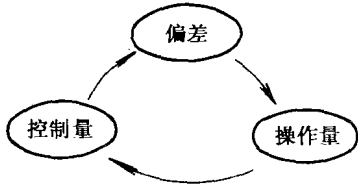


图 1-2-4 反馈系统的
信号路径

在控制回路中，以监视，管理过程为目的各种仪表，大量地被使用着。

1.2.2 构成要素

1. 检测端

作为温度检测端，在工程检测上用得最多的是热电阻和热电偶，它是利用温度—电阻特性，温度—热电势特性做成的。

铂电阻是纯铂的电阻，温度上升 1℃，其电阻增加大约为 0.3%。热电阻就是利用了这个性质做成的。温度的测量范围为 -200~600℃，在这区间几乎是线性的，图 1-2-5 是它的变化特性。

热电偶是将不同金属的一端连在一起，对应这端温度会产生热电势。热电偶就是利用这种特性，和热电阻一样被广泛使用着。热电偶的电势因其材料的不同而不同，差不多是数十毫伏，如图 1-2-6 所示，有各种各样的种类。使用什么样的热电偶，取决于使用温度和使用环境。

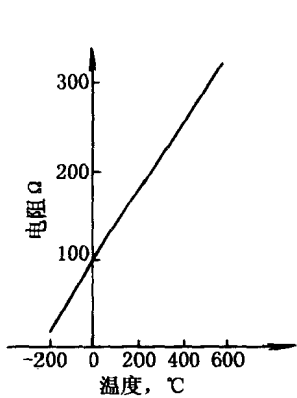


图 1-2-5 铂热电阻特性

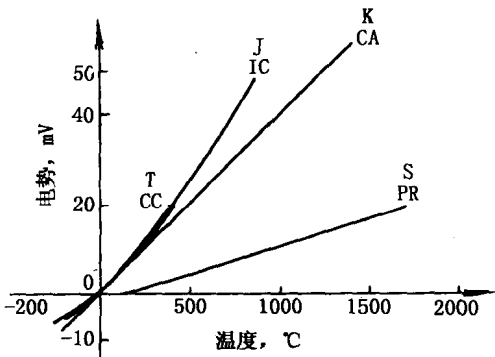


图 1-2-6 热电偶特性

为了保护热电偶和热电阻的检测部分，一般都将其装在金属保护管中，图 1-2-7 是其外观；图 1-2-8 是其温度测量范围。



图 1-2-7 热电阻与热电偶

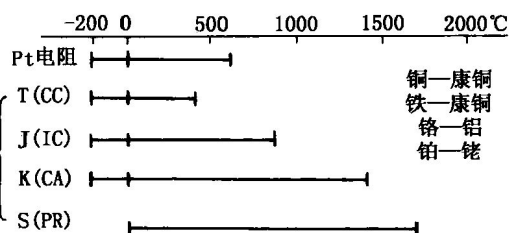


图 1-2-8 温度测量范围

2. 变送器

将检测端测量出来的控制量，送给远离的调节器或记录仪。实际上，这些检测出来控制量不能原封不动地传送，在传送时，必须变换成适当的信号。完成变换功能的装置称为变送器，或称为传送器。

例如，热电阻作为检测端时，原封不动地将电阻值进行传送，传输的阻抗误差也会带进来，效果很不好。如果将其变换成电流，

以电流信号进行传送，正如图 1-2-9 所示的回路原理，将热电阻作为电桥的一个臂，用电桥把电阻转换成电压，用放大器放大，最后得到电流信号，其电流信号依仪表厂家的不同而不同。目前，以 $0 \sim 10\text{mA} \cdot \text{DC}$ ， $4 \sim 20\text{mA} \cdot \text{DC}$ ， $10 \sim 50\text{mA} \cdot \text{DC}$ 为最多，并以此对应其测量范围。例如测量温度 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 时，选择适当的桥路参数，依此将 0°C 对应为 4mA ， 200°C 对应为 $20\text{mA} \cdot \text{DC}$ 。 $4\text{mA} \cdot \text{DC}$ 是给的偏置，偏置的设定是为了区别 0°C 的状态和传输线一旦中断这两种不同的情况。

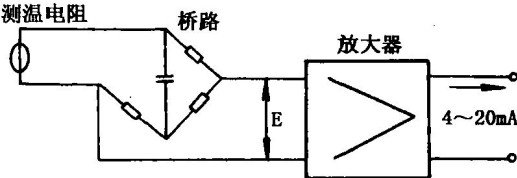


图 1-2-9 热电阻温度变送器原理

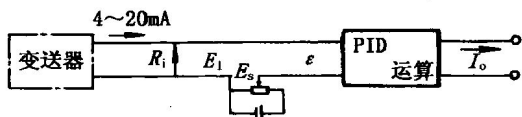


图 1-2-10 PID 调节器的构成

3. 调节器

调节器将控制量和目标值进行比较，对应其偏差的操作信号作为调节器的输出，根据偏差，进行必要的修正动作。输出有 2 位开关式调节器，还有连续输出信号的 PID 调节器等等。图

1-2-10 就是 PID 调节器原理图，从变换器来的电流信号，通过电阻 R_1 转换成 $1 \sim 5\text{V}$ 的电压输入信号 E_i 。调节器内部装有设定器，可以产生 $1 \sim 5\text{V}$ 的给定电压 E_s 。将此电压作为目标值，在调节器中对两者差 $\epsilon = E_s - E_i$ 进行 PID 运算，就可得到输出 I_o 。算式如下：

$$I_o = \frac{1}{P} \left(\epsilon + \frac{1}{T_I} \int \epsilon dt + T_D \frac{d\epsilon}{dt} \right) \quad (1-2-1)$$

P , T_I , T_D 是表示比例、积分、微分三个调节动作强度的常数, 可在仪表内进行整定。

图 1-2-11 是最常见 PID 调节器, 在仪表的前面装有两个指示表, 上面纵向安装的是指示输入 (控制量) 和给定值的, 如果两针相一致, 表示控制良好; 下面是横向安装的指示表, 表示的是输出 I_o 。 I_o 一般为 $4\sim 20\text{mA}$, 也有 $10\sim 50\text{mA}$ 的。为了节省仪表盘面积, 调节器都设计成小型的, 而且很多仪表是并列安装, 这样监视比较容易。

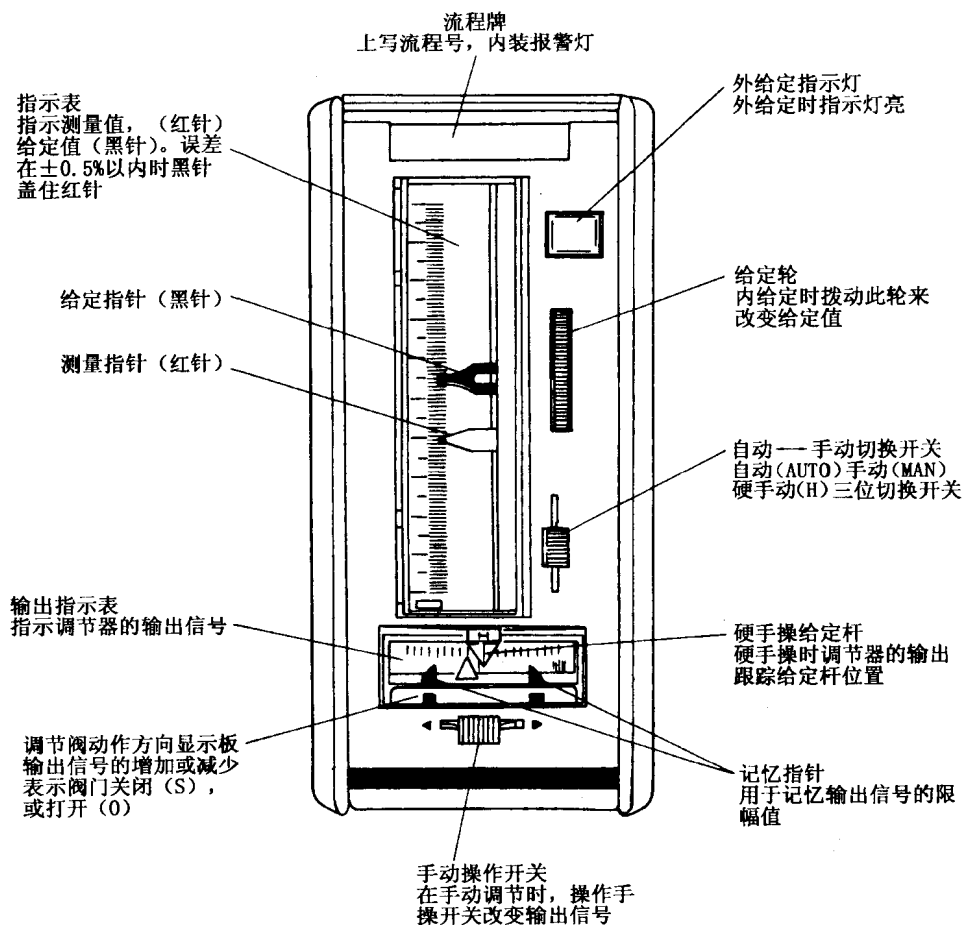


图 1-2-11 PID 调节器

4. 执行器

从调节器取得信号后, 改变进入热交换器的蒸汽量, 这就是执行器的作用。图 1-2-12 是一个调节阀, 阀的位置取决于所得到的信号电流, 执行器常常使用空气压力、液压力或电力等作为动力源, 因此, 有气动、液动、电动之分。图 1-2-12 就是气动 (空气压力) 薄膜调节阀的构造图。当把气动压力源接到薄膜的上部, 膜受压下移, 与下部的弹簧力相平衡, 决定了阀的位置, 加给薄膜的空气压力受调节器来的电流信号控制, 一般在调节器与气动执行器之间用电—气转换器, 使阀位与电流信号成比例。图 1-2-13 是电气阀门定位器的原理图。在永久磁铁产生的磁场中, 放有线圈, 当其通过电流时, 就变换成了电磁力, 再用喷嘴挡板进行变换, 用放大的气动压力推动薄膜, 再与阀位成比例的弹簧力相平衡。这样一来, 就使电流信号和阀位相对应。图 1-2-14 是带阀门定位器的调节阀照片。

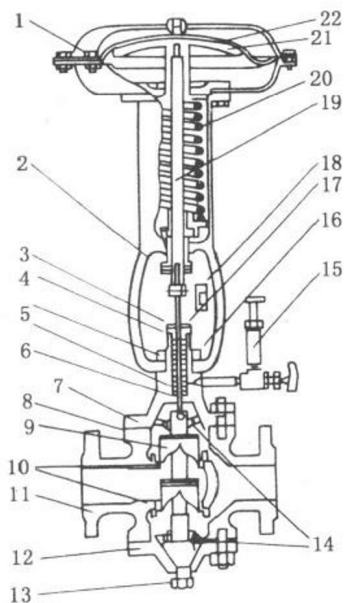


图 1-2-12 调节阀的构造
1—膜片盖；2—阀头架填充盒座；
3—螺母；4—座；5—花兰垫；
6—金属密封垫；7—阀盖；8—垫
片；9—阀芯；10—座；11—阀体；
12—底板；13—排污栓；14—导孔；
15—注油器；16—夹紧螺母；17—阀
杆；18—指示器刻度；19—膜片杆；
20—弹簧；21—膜片形板；22—膜片

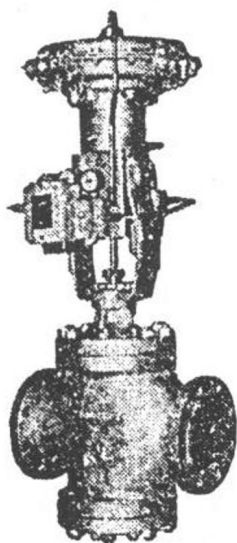


图 1-2-14 调节阀

5. 指示仪

指示仪用来监视过程。根据指示方式，指示仪分为模拟和数字型两种。模拟型有直接动作式和伺服平衡式（自动平衡式），不管怎样，指针的位置总是与过程量相对应，是很直观的。图 1-2-15 所示为数字型温度指示计。数字型指示仪读取数据准确性高，分辨能力也高。模拟型和数字型指示仪由于各有特点，可根据不同的应用目的选择使用。

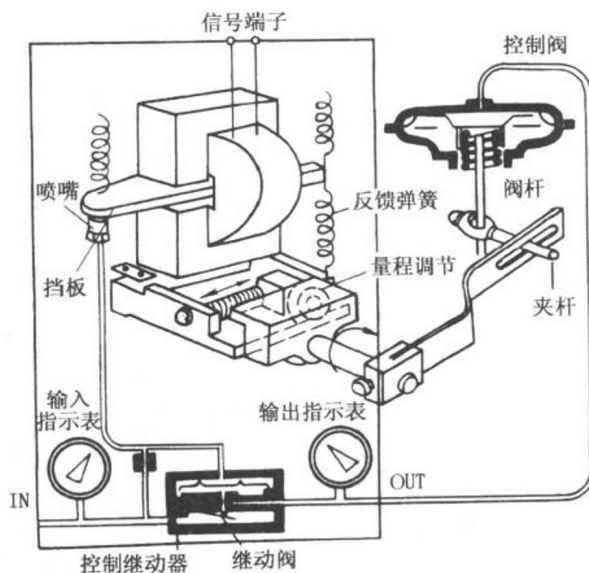


图 1-2-13 电—气阀门定位器

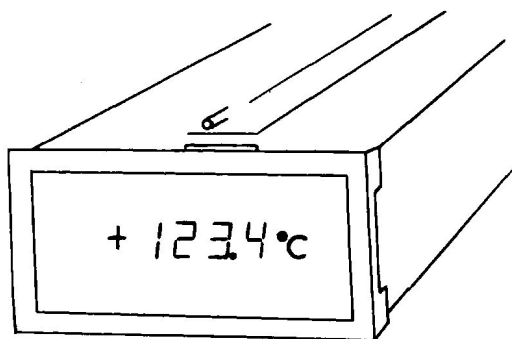


图 1-2-15 数字式温度指示仪

6. 记录仪

要想知道过程从过去到现在随时间变化情况或者进行记录时，就要使用记录仪。记录仪最一般的方式是用墨水笔在记录纸上书写的方法，可以是单笔、2 笔、3 笔、4 笔等。同时，在同一记录纸上，可以记录多个现象或参

量。由于过程的各个变量一般都有相关关系，能够在同一记录纸上记录，非常方便。要记录更多的现象或参量时，采用输入用顺次开关，进行切换的打点式记录仪更方便，这种记录仪可根据输入改变墨水的颜色，很容易识别。图1-2-16就是6点记录仪，也有到24点左右

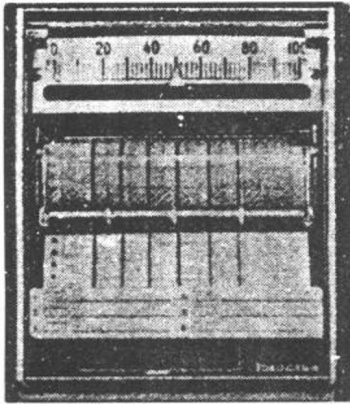


图 1-2-16 打点式
多点记录仪

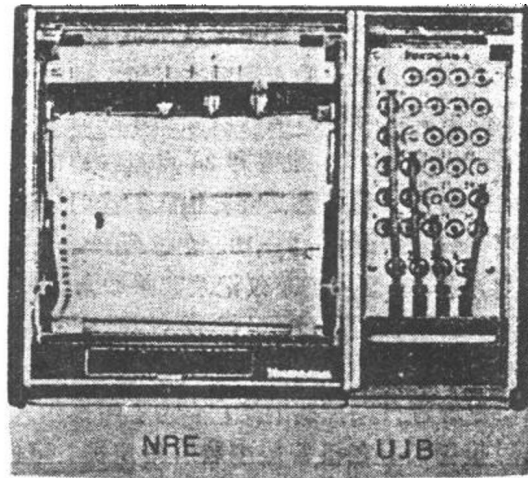


图 1-2-17 趋势记录仪

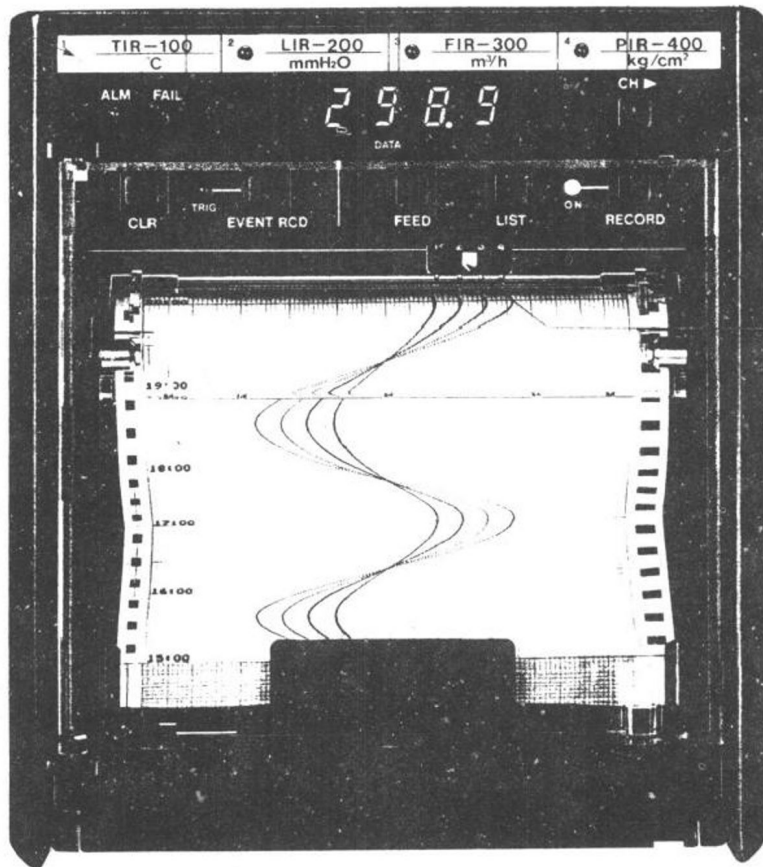


图 1-2-18 智能式记录仪

的记录仪。如果在很多输入当中，只有某几个量才是必要的输入，这时，记录仪可选用插孔盘式的趋势记录仪，如图 1-2-17 所示，在过程开始，例如预热时或停机时，或者发生异常时，这种记录仪记录起来非常方便。图 1-2-18 是记录并可打印的智能式记录仪。

7. 报警器

正在进行自动控制的工厂，为了使操作人员知道异常情况发生的位置，就要使用报警器。在报警器中装有给定器，可以任意设定上限或下限值，超过设定值，就会出现报警。报警一般通过蜂鸣器或指示灯进行指示。

1.3 反馈控制基础

1.3.1 控制的基本方式

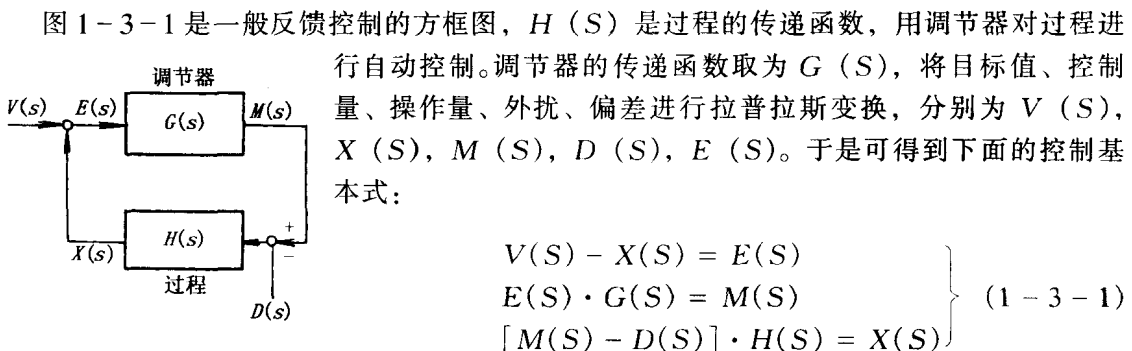


图 1-3-1 反馈控制系统

从式 (1-3-1) 中求控制偏差，得：

$$E(S) = \frac{1}{1 + G(S) \cdot H(S)} V(S) + \frac{H(S)}{1 + G(S) \cdot H(S)} D(S) \quad (1-3-2)$$

右边第一项是关于目标值的项，第二项是关于外扰的项。依此，可以显示出控制偏差受到怎样的影响。这些式子的分母全是 $[1 + (\text{回路一周的传递函数})]$ 的形式，而分子就是从 $V(S)$ 、 $D(S)$ 的加入点与偏差的传递函数。因此，使偏差为 0 时，回路一周的传递函数 $G(S) \cdot H(S)$ 要很大，只要稍有偏差就可获得很大的操作量，这当然是很有利的一面。

控制偏差是时间的函数，在静态时称作静差，在求静差时，将式 (1-3-2) 进行拉普拉斯反变换，得到的时间函数， $t \rightarrow \infty$ 也可求得，如果通过终值定理，可以简单地求得。

为了简单起见，外扰固定，目标值只是阶跃 a 变化时， $V(S) = \frac{a}{S}$ ， $D(S) = 0$ ，静差 ϵ 可用下述的计算求得。

$$\epsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} (t) = \lim_{S \rightarrow 0} [S \cdot E(S)] = \lim_{S \rightarrow 0} \left[S \cdot \frac{1}{1 + G(S) \cdot H(S)} \cdot \frac{a}{S} \right] \quad (1-3-3)$$

将这个偏差称作静态位置偏差或残余误差，为了静差很小 $G(0) \cdot H(0)$ (也就是对静态讲)，回路一周的增益要很大，才能满足，当调节器的传递函数是：

$$G(S) = \frac{G_V(S)}{S} \quad [G_V(S) \neq 0] \quad (1-3-4)$$

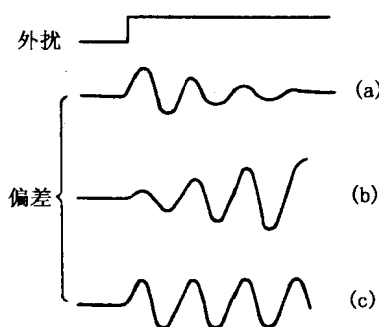
的形式，即有积分特性，可以消除阶跃输入的静差。当目标值一定，外扰只是阶跃 b 的形式，其静差为：

$$\epsilon = \frac{bH(0)}{1 + G(0)H(0)} \quad (1-3-5)$$

在这里要特别注意，由于 $H(S)$ 是很大的，回路一周增益 $G(S) \cdot H(S)$ 就很大。但是 ϵ 并不小，因此，必须 $G(S)$ 为很大时，由外扰引起的偏差才可能减小，这也是外扰静差的性质。注意外扰在控制系统中加入的位置，这是值得提示的地方，例如 $G(S)$ 是积分特性，对外扰产生的静差，同样也可消除。

1.3.2 稳定性

为了静差小，回路一周的增益就要很大，控制回路就会振荡，有不稳定的趋势。自动控制系统中，假如目标值和外扰值都变化，控制状态就一时紊乱，但适当的时间之后，偏差再次为 0，这是稳定的。当然对自控系统，稳定是绝对必要的。



当然对自控系统，稳定是绝对必要的。若用图表示的话，图 1-3-2 (a) 就是稳定的；图 1-3-2 (b) 偏差渐渐扩大就不稳定；图 1-3-2 (c) 以一定振幅振荡，介于两种之间，称作临界状态或稳定界限。

为什么反馈系统会产生不稳定现象呢？因为反馈有正和负，正反馈由于助长不平衡，是不稳定的。但是对图 1-3-1 那样的负反馈系统，也不一定是稳定的。如果回路一周传递函数 $G(S) \cdot H(S)$ 的相位迟后 180° ，结果就成了正反馈，当然就会产生振荡。也就是信号沿反馈回路一周的相应滞后和增益对稳定性有着密切关系。图 1-3-2 的持续振荡，一个周期后又返回到原出发点，成为同相位，并且是等幅的振荡。

当负反馈本身包含 180° 的相位差在内来考虑时，持续振荡条件是回路一周传递函数的相位差是 180° ，并且其增益刚好是 1，当然回路中就是这种频率的振荡。如果回路一周的增益比 1 小，是衰减振荡，是稳定的；比 1 大时，就会发散，就是不稳定的了。

反馈控制系统的稳定判别法有种种数学上的表述，其中，应用最广泛的是乃奎斯特判据。这种方法是着眼回路一周传递函数的相位和增益，采用图解法，可以这样来表述：沿着控制系统回路一周传递函数的频率响应 $G(j\omega) \cdot H(j\omega)$ 的向量轨迹，从 $\omega = 0$ 到 $\omega = \infty$ 的方向前进，如果 $(-1, j0)$ 是在左面见到就是稳定的，如果是在右面看到就是不稳定的。

用图 1-3-3 乃奎斯特曲线图说明，三根曲线分别是 $G(j\omega) \cdot H(j\omega)$ 的向量轨迹。 $(-1, j0)$ 点就是增益为 1，相位差为 180° ，A 比 1 小，是稳定的，B 比 1 大是不稳定的，C 与 1 相等是临界状态。下面举例加以讨论。

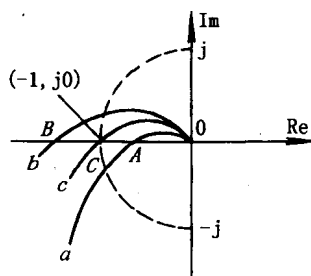


图 1-3-3 $G(j\omega) \cdot H(j\omega)$ 的向量轨迹

例 1 一阶迟后过程进行比例控制时， $G(S) = K$ ，

$K(S) = \frac{1}{1+TS}$, 回路一周传递函数的增益和相位为:

增益: $|G(j\omega)H(j\omega)| = \frac{\sqrt{K^2 + (\omega T)^2}}{1 + (\omega T)^2}$

相位: $\angle G(j\omega)H(j\omega) = -\tan^{-1}\omega T$

因此, 使 ω 从 0 到 ∞ 变化, 描出量轨迹, 如图 1-3-4 所示, 这是一个半圆。这个乃奎斯特线图, 不管 K 值如何, 总是在左边见到 $(-1, j0)$ 点, 相当于图 1-3-3 中的 a , 是稳定的。这里是比例控制一阶迟后环节, 即使比例增益 K 再大, 也没有振荡的危险。

例 2 对二阶容量过程进行比例控制。

回路一周传递函数 $G(S) \cdot H(S) = \frac{K}{(1+T_1S)(1+T_2S)}$ 向量轨迹如图 1-3-5 所示, 随着比例增益增大, 所描的弧也越大, 如果 K 是有限的, 就不会包围 $(-1, j0)$ 点, 相当于 A 的情况, 当然是稳定的。

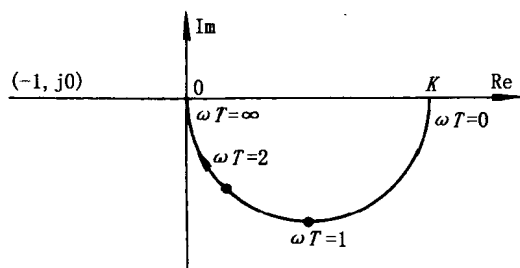


图 1-3-4 一阶控制系统的向量轨迹 $\frac{K}{1+j\omega T}$

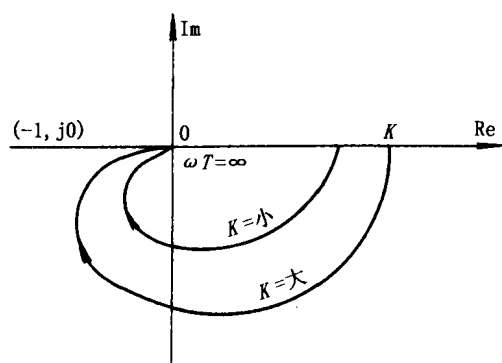


图 1-3-5 二阶控制系统的向量轨迹

例 3 将二阶容量过程用积分控制。

如图 1-3-6 的方框图, 回路一周传递函

数 $= \frac{K}{(1+T_1S)(1+T_2S)}$, 向量轨迹图如图 1-3-7 所示。 K 小时, $(-1, j0)$ 点是在左边看见, 是稳定的; K 大时是在右边看见的, 是不稳定的。所以, 这种三阶系统, 增益常数 K 过大必然导致不稳定。

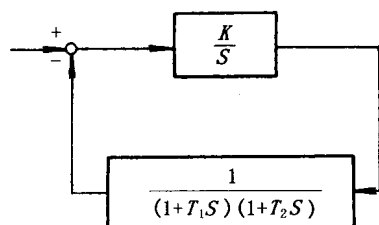


图 1-3-6 三阶控制系统

乃奎斯特方法是依据控制系统回路一周的传递函数 $G(S) \cdot H(S)$ 的频率向量轨迹来进行稳定判定的。 $G(S) \cdot H(S)$ 是数学式, 但不能清楚地表明其涵意, 通过其频率响应的实验值, 就可以判别稳定性, 这是它的优点。

向量轨迹图将增益和相位在一个平面上表示出来, 用其它方式来表示的还有波特图, 利用这种图也是方便的。

图 1-3-8 就是三阶控制系统的波特图, 相位是 -180° , 其幅频特性增益在 0dB 以下, 则是稳定的; 0dB 以上则是不稳定的。