

国家机械工业委员会统编

热工仪表检修工工艺学

(高级工通用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

本书介绍了热工自动控制的基本概念, 气动与电动调节器的原理、结构及整定方法, 自动控制系统的应用, 调节器故障的分析排除, 仪表盘的制作与安装, 仪表的量程更换及二次线路图等。本书是高级热工仪表检修工的培训教材, 也可供有关工程技术人员参考。

本书由沈阳机电工业学校侯永基、沈阳中捷友谊厂马潜和宁秀梅编写, 由沈阳中捷友谊厂郑盘石、朱有成审稿。

热工仪表检修工艺学

(高级工适用)

国家机械工业委员会统编

责任编辑: 卢若薇

责任校对: 宁秀娥

封面设计: 林胜利 方芬

版式设计: 乔玲

责任印制: 张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号楼)

(北京市书刊出版业营业性出版单位登记证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $11\frac{5}{4}$ · 字数 256 千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 00 001—19,100 · 定价 4.00 元

ISBN 7-111-01166-X/TH·192

前 言

1981年，原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》，确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此，组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲（试行）》，编写了相应的教材，有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作，初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况，取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准（通用部分）》进行了全面修订，原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求，而且缺少高级部分；编写的教材，由于时间仓促、经验不足，在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此，原机械工业部根据新《标准》，重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划，培训大纲》（初、中、高级），于1987年3月由国家机械工业委员会颁发，并根据培训计划、大纲的要求，编写了配套教材149种。

这套新教材的编写，体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神，坚持了文化课为技术基础课服务，技术基础课为专业课服务，专业课为提高操作技能和解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上，力求以基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本

知识，注重能力的培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 自动控制的基本概念	1
第一节 自动控制的定义	2
第二节 闭环控制系统	9
第三节 闭环控制系统的传递函数	27
第四节 开环控制系统	39
复习题	49
第二章 调节器	52
第一节 调节器的作用特性	53
第二节 气动PID调节器原理、结构、主要技术参数	73
第三节 电动PID调节器主要技术参数和整定方法	100
复习题	133
第三章 自动控制系统的應用	137
第一节 恒温控制系统	137
第二节 液位控制系统	173
复习题	190
第四章 调节器故障分析与排除	191
第一节 调节器故障检修的一般方法	191
第二节 气动调节器常见故障及排除方法	203
第三节 电动调节器常见故障及排除方法	228
复习题	246
第五章 热工控制盘的布置与安装	248
第一节 热工控制盘的选择	248

第二节	热工控制盘正面设备布置	258
第三节	热工控制盘内部设备布置	269
第四节	热工控制盘的安裝	274
第五节	控制盘台上仪表设备的安裝	281
第六节	控制盘盘面布置图的绘制方法	286
第七节	安裝时的抗干扰措施	290
复习题		292
第六章	仪表量程更换与二次线路图	294
第一节	热工仪表的量程更換	294
第二节	热工仪表二次线路图	333
复习题		361
附表	本书字、符的新旧标准对照表	362

第一章 自动控制的基本概念

工业自动化水平的高低，是衡量一个国家科学技术水平与生产技术先进程度的重要标志之一。在实现我国工业现代化的过程中，迫切地需要提高整个工业生产的自动化水平。自动控制技术是实现工业生产自动化的不可缺少的一种技术手段。在生产过程中广泛地采用自动控制技术可以加快我国工业现代化的进程。

目前，自动控制技术已广泛地应用在热工生产过程中的温度、压力、流量、物位和成分分析的测量、显示、记录调节和控制上。比如可以实现对加热炉、干燥窑等各部位、各阶段炉温的测量、显示与控制；可以实现对生产过程中蒸汽、高压水、热空气以及炉气废气等温度的测量、显示与控制；可以实现对锅炉、加热炉、煤气发生炉压力的测量、显示、记录、调节和控制；可以实现对蒸汽、高压水、压缩空气、冷却水、保护气体流量的测量、调节与控制；还可以实现液体的贮槽容器（如油罐、锅炉、水箱等）液位的测量，高低位报警和控制以及热处理炉保护气体成分分析，加热炉的炉气、废气、保护气体成分分析等。

通过采用自动控制技术，对旧设备、旧工艺实行改造，是减轻劳动强度，提高经济效益的一个有效途径。

下面根据热工生产的特点，介绍有关自动控制的基本概念。

第一节 自动控制的定义

一、自动控制系统的组成

1. 人工控制与自动控制 在热工生产中,自动控制就是在热工生产设备上配置一些自动化装置来管理和操纵生产过程,以代替人的直接劳动,使热工生产过程严格地按照事先预定的要求自动进行。

任何一个生产过程进行得好与坏,都可从一个或数个工艺参数上反映出来。这些工艺参数可以是温度、流量、压力、位置、成分等等。使这些参数稳定在一定的范围内,或按预定的规律变化,就是自动控制的任務。

图 1-1 是一个重油燃烧供热加热炉人工控制与自动控制示意图。其工作过程是:为保证加热工件的质量,必须使炉温保持在规定的数值上。如果温度由于某种原因偏高或偏低,就要调整重油量,使温度下降或上升并稳定在规定数值上。

人工控制时,首先是通过人眼观察显示仪表上的温度数

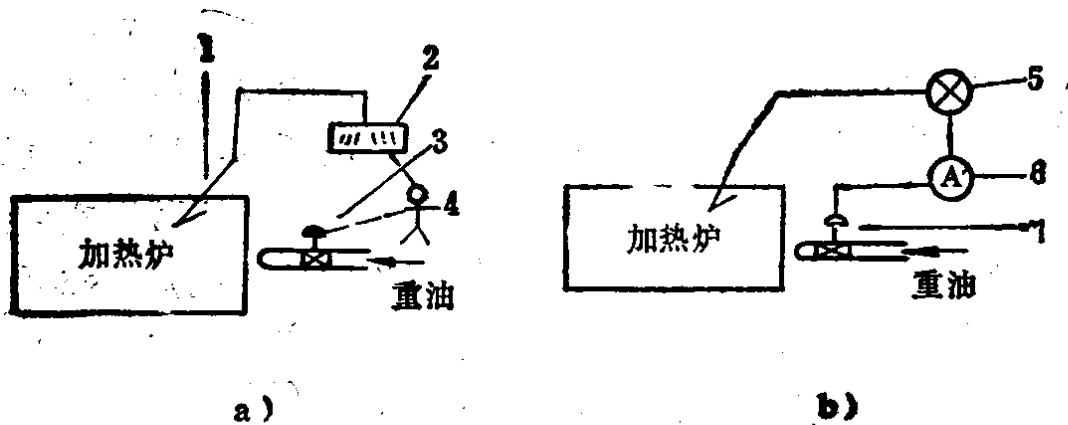


图1-1 人工控制与自动控制示意图

a) 人工控制 b) 自动控制

1—热电偶 2—显示仪表 3—控制阀 4—操作人员 5—变送器
6—控制器 7—气动薄膜控制阀

值（或用肉眼直接观察、再根据经验判断炉温高低），然后操作人员根据工艺要求作出判断，并用手调整重油阀门的开度，改变重油量，使温度稳定在规定数值上，这个过程见图1-1a。人工控制不仅劳动强度大，对于某些变化迅速、条件又要求严格的生产过程，很难满足要求。

如果采用一些自动装置代替人工操作，使被控制的过程（即加热炉生产过程），加上一些自动控制装置（测温仪表及变送器、控制器、执行机构、控制阀等），就构成了一个自动控制系统，如图1-1b所示。可以从图1-1看出，自动控制与人工控制的区别在于：使用了测温热电偶及变送器代替人眼、控制器A代替人脑、执行机构代替人手的作用，从而使被控制量（即加热炉温度）自动稳定在预先给定的数值上。很明显，在安装了一些自动装置之后，操作人员的劳动强度大为减轻，温度控制的质量也得到可靠的保证。

根据生产目的和工艺要求的不同，可以组成简单或复杂的自动控制系统。图1-2为一个简单的自动控制系统的组成框图。图中每一个方框，表示一个设备或装置，各个设备装置之间的关系或作用，则用它们之间的连线表示。

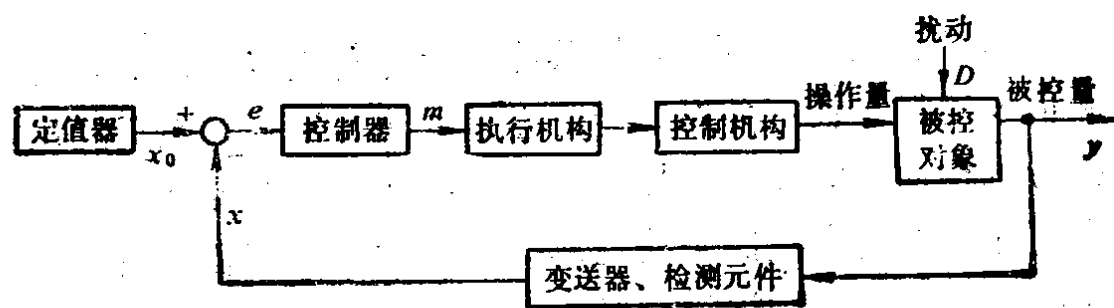


图1-2 简单控制系统方框图

x_0 —给定值 x —检测值 e —偏差 m —控制器输出(控制信号)
 y —输出(被控量) D —扰动

2. 自动控制系统的几个组成部分 一个自动控制系统一般由以下几部分组成:

(1) 被控对象 是指某些装置或设备中所进行的生产过程。被控对象也可称为过程。如加热炉的温度变化, 锅炉汽包水位的变化以及锅炉过热器出口汽温的变化等。当然被控制的参数(被控量)不同, 对于同一个设备所表现的被控对象的特性就不同, 例如同一个炉子, 控制温度与控制压力两种参数时, 所表现的被控对象的特性(后面将介绍)是不同的。

(2) 检测元件及变送器 检测元件的功能是感受并测出被控量的大小, 例如热电偶及孔板等。变送器的作用则是将检测元件测出的被控量变换成控制器所需要的信号形式, 例如气动控制器所需要的气压信号及电动控制器所需要的电信号。变送器必须与检测元件及控制器配套, 才能协调它们的工作。

(3) 定值器 其作用是将被控量的给定值(即生产工艺规定的数值), 以控制器所要求的信号形式(例如气压或电流)输送给控制器。定值器可以是控制器的一个部件, 也可以是一块单独的仪表。

(4) 控制器 即调节器, 其比较元件首先将给定值 x_d 与检测值 x 进行比较, 并对二者的差值 e 进行运算, 然后发出使执行机构动作的控制信号 m 。例如, 在加热炉温度控制过程中, 如温度给定值高于其检测值, 则控制器即发出命令, 要执行机构开大控制阀门, 增加重油量以提高炉温; 如给定值低于检测值, 则控制器即发出相反的命令, 减少重油量以降低炉温。给定值与检测值的偏差 e 就是控制器的输入信号, 控制器根据偏差的大小与方向(即给定值高于或低于检测

值),发出一个适当的控制信号,这就是控制器的输出。控制器的输出与输入之间可有不同的函数关系,这个关系称为调节规律(将在第二章中加以介绍)。

(5) 执行机构 它的作用是接受控制器发来的控制信号并放大,再推动控制机构(例如阀门)动作。在热工自动控制中常用的执行机构有电动执行器(如角行程电动执行器、直行程电动执行器等)、气动执行器(如气动薄膜调节阀、气动活塞调节阀等)、伺服电机、继电器等。

(6) 控制机构 常用的有各种控制阀或调节阀、晶闸管、接触器等,其动作直接受执行机构操纵,按照控制器的控制规律动作,改变操作量(例如电流、重油、煤气等的量),对被控对象施加控制作用,调整被控对象中能量的平衡,使被控量回复至给定值。

因此,自动控制就是采用自动控制装置使被控对象(如生产过程等)自动地按照预定的规律运行,使被控对象的被控量(如各种工艺参数)能够在一定的精度范围按预定的规律变化,或稳定在某一范围内。

在图 1-2 的方框图中可以看到,信号沿着箭头的方向前进,最后又会回到原来的起点,构成一个闭合回路。我们把这样的系统叫做闭环系统。如果信号前进至某处断开了,没有形成闭合回路,那么这样的系统就叫开环系统。在简单控制系统的方框图中,被控对象的输出(即被控量),经过检测(使用检测元件与变送器),将信号送入控制器中,使执行机构与控制机构动作,改变操作量,调整被控量大小使其符合工艺要求。被控量又作为过程的输出,返回到过程的输入端,即反馈回去。在图 1-2 中,由于反馈信号 x 送到输入端后,其作用方向与输出相位相反,故叫作负反馈,反之则叫作正反

6

馈。在自动控制系统中，大多是采用负反馈。因为当被控量受扰动的影响而升高时，反馈信号（检测值） x 与给定值 x_0 比较后，输入控制器的偏差信号 e 为负值（ $e = x_0 - x$ ），此时控制器发出的使控制机构动作的信号，其作用方向是改变操作量，使被控量下降（减少）以达到控制的目的，这就是负反馈的作用。

（7）扰动 是指破坏系统平衡状态、引起被控量变化的外界因素。除控制作用之外，引起被控量波动的一切外来因素，统称为扰动。在方框图中用 D 表示。由于扰动也是一种作用于被控对象的输入信号，所以箭头也是指向被控对象的。扰动是不可避免的，生产过程中前后工序的相互影响、电压、气压等能源的波动、气温的影响都可能产生扰动，并且常常是几种扰动同时存在，各自作用的位置、方式、幅度和频繁程度都互不相同，对被控量的影响也不相同。扰动和控制作用总是同时存在于整个控制过程中。

3. 汽包水位控制系统的组成 在热工生产中，维持汽包水位在给定的范围内是保证锅炉安全运行的必要条件，也是锅炉正常运行的主要指标之一。水位过高，会影响汽包内汽水分离效果，从而不能保证提供优质蒸汽。水位过低，则可能破坏自然循环锅炉汽水循环系统中某些薄弱环节，以致局部水冷管壁被烧坏，严重时会造成爆炸事故。这些后果都是十分严重的。随着锅炉容量的增加，水位变化速度愈来愈快，人工操作愈来愈繁重，因此，对汽包水位实现自动控制提出了迫切的要求。

图1-3是一个汽包水位自动控制系统。它是汽包水位自动控制中最简单、最基本的一种形式。在这个系统中，水位测量信号经变送器送到水位控制器（调节器），水位控制器根据

水位测量值与给定值的偏差去控制给水阀门，改变给水量来保持汽包水位在允许的操作范围内。其中被控对象是汽包的水位，给水量是锅炉的输入量；蒸汽量是输出量。当给水量等于蒸汽量时，汽包水位就恒定不变。而引起水位变化的主要扰动就是蒸汽流量的变化和给水流量的变化。

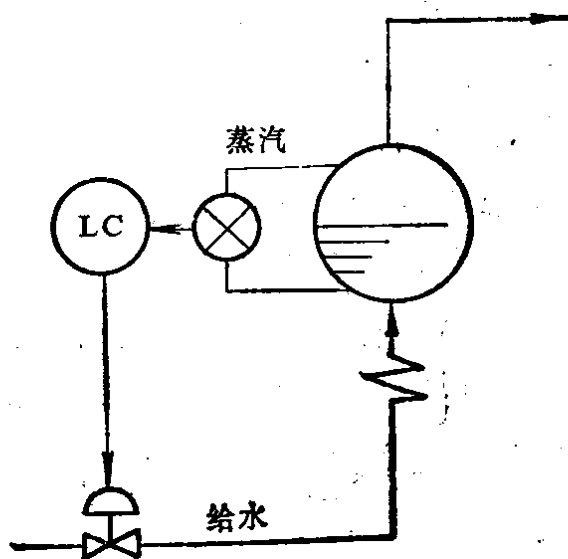


图1-3 汽包水位自动控制系统原理图

在这个系统中，由于它只根据水位调节给水量，在负荷变化时，由于“假水位”现象的存在，使在调节一开始，给流量的变化将与负荷变化的方向相反，扩大了进出流量的不平衡。但因它结构简单，故在汽包容量较大、水位在受到扰动后的反应速度比较慢、“假水位”现象不很严重的场合，还是可以满足生产要求的。

二、自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多，可以按被控量分类，例如温度控制系统、流量控制系统等，也可以按控制器的控制动作来分类，例如比例控制系统、比例积分控制系统等。为了便于分析自动控制系统的性质，可将控制系统按给定值形式的不同分为三类。

1. 定值控制系统 其给定值是恒定不变的或允许变化很小。工艺生产中往往要求控制系统的被控量保持在某一定值不变。当被控量波动时，控制器动作，使被控量回复到给

定数值（或接近给定数值）。前面提到的加热炉温度的自动控制，就是一种定值控制系统。在定值控制系统中，又可分为简单的控制系统和复杂的控制系统。一般来说，简单控制系统只包含一个由基本的自动控制装置组成的闭合回路。如果影响被控量波动的因素较多，采用一个回路不能满足工艺要求时，就需要采用两个以上的回路，这就组成了复杂的控制系统。在第三章中，我们将介绍一些复杂的控制系统。

2. 程序控制系统 在这种系统中，给定值按一定时间程序变化，被控量也按一定的时间程序变化。例如某些热处理炉温度的自动控制，需要采用程序控制系统。因为工艺要求有一定的升温、保温、降温时间，并且要按一定的程序进行，通过系统中的程序给定装置，可以使给定值按工艺要求的预定程序变化，从而使被控量也跟随给定值的程序变化。

3. 随动控制系统 在这种系统中，给定值随时间而不断变化，而且预先不知道它的变化规律，但要求系统的输出即被控量跟着变化，例如在燃料燃烧过程中，空气与燃料量之间的比值是有一定要求的。但是燃料需要量多少，则随生产情况而变，而且预先不知道它的变化规律。在这里燃料需要量相当于给定量，它随温度的变化而变化，空气量则相当于被控量，它必须跟随燃料量变化，所以把这样的系统称为随动系统。由于空气量的变化必须随着燃料量按一定比例而变，因此又称为比值控制系统。

值得指出的是，近年来随着计算机技术的飞速发展，采样控制系统的应用越来越广泛。在采样系统中，是每隔一段时间通过计算机对被控量进行一次测量和控制的，其测量值和控制值是不连续而是有间隔的。限于篇幅，我们对采样系统不作进一步介绍，读者如有兴趣，可参考有关资料。

第二节 闭环控制系统

一、闭环控制系统的定义

闭环控制系统是根据被控量与给定值的偏差进行控制的系统。在闭环控制系统中，偏差信号作用在控制器上，使系统的输出量趋向给定的数值，最后消除偏差。系统是由被控量的反馈构成一个闭合回路（见图1-2）。在实际工作中，也可能有一个以上的反馈信号（除被控量外，还有其他反馈信号），组成多回路的闭环系统。闭环控制系统的特点是，系统的输出量对控制量发生直接影响。

烘烤炉温度控制系统原理图见图1-4，其功能方框图见图1-5。它的控制任务是保持炉温 T 恒定。而炉温既受工件数量以及环境温度的影响，又受混合器输出煤气流量的控制，故调整煤气流量便可控制炉温。在系统中，被控对象是烘炉；被控量是炉温 T ；干扰是工件、环境温度、煤气压力等；给定

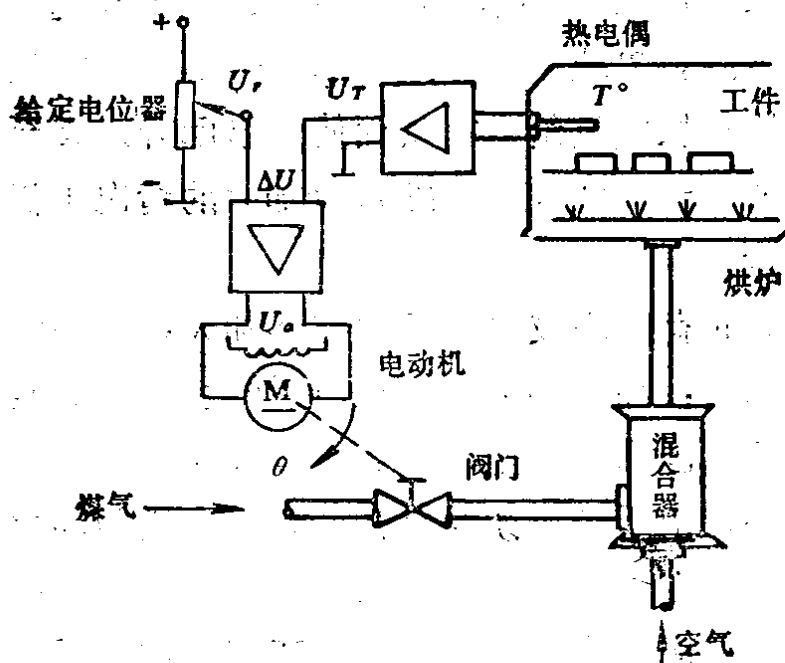


图1-4 烘烤炉温度控制系统原理图

电位器的输出电压 u_r ，相当于要求的炉温；测量元件热电偶将炉温转变为相应的电压 u_T ；比较元件完成减法运算，输出电压 $\Delta u = u_r - u_T$ ，相当于炉温的偏差量；执行机构为电动机及传动装置。显然，这是一个闭环控制系统。

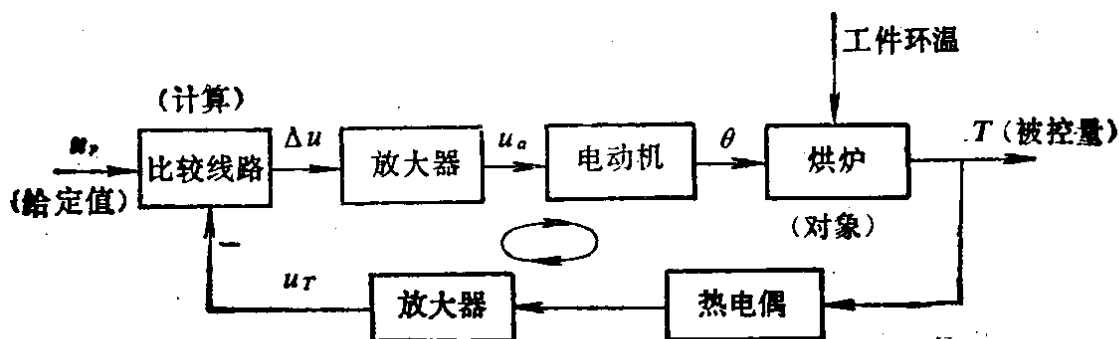


图1-5 烘烤炉温度控制系统功能方框图

系统的控制过程是：假定炉温恰好等于给定值，经事先整定，这时 $u_T = u_r$ ，即 $\Delta u = 0$ ，故电机连同调节阀门静止不动，煤气流量一定，烘炉处于规定的恒温状态。

如果增加工件，烘炉的负荷加大，而煤气流量一时没变，则炉温下降。 T 减小将导致 u_T 减小， $\Delta u > 0$ ，故电机将阀门开大，增加煤气供给量，从而使炉温回升，直至重新等于给定值（即 $u_T = u_r$ ）为止。在负荷加大的情况下仍然保持了规定的温度。

如果负荷减小或煤气压力突然加大，则炉温升高。 T 大， u_T 随之加大， $\Delta u < 0$ ，故电机反转关小阀门，减少供气量，从而使炉温回降，直至等于给定值为止。

另外，由于负反馈的存在，可以抑制闭环之内的扰动及内部参数的变化，因此可以采用一些精密度差些，成本较低的元件来组成精度较高的系统。在闭环控制系统中，还要按照被控对象（过程）的特性，选用适当的控制器，只有这样，

✶ 能使一个系统正常工作。

二、被控对象的特性

在实际工作中，常会看到有的被控对象很容易控制，即使不用控制器，在某些扰动作用下，被控量虽有波动，但不久就能自行稳定。这样的被控对象，我们称其具有自平衡的能力。在控制炉温时，一般炉子多是具有自平衡的被控对象。此外，如果炉子的热容量大，则在扰动作用下，炉温变化小并能自行稳定；如果炉子热容量小，则在同样扰动下，炉温虽能稳定，但炉温的变化却要大些。这就说明同一被控对象在不同条件下特性是不一样的。当工艺要求一定时，被控对象特性不同，所选用的控制装置和组成的控制系统往往不相同。另外在控制系统使用之前，还要根据被控对象的特性以及工艺要求，事先整定好控制装置。因此掌握被控对象的特性不仅对选用控制装置组成控制系统是不可缺少的，而且对已设计安装好的控制系统的正确投入使用都是一个很重要的问题。

被控对象的特性一般有以下几个方面：

1. 被控对象的负荷 当自动控制过程处于稳定状态时，在单位时间内流入或流出被控对象的物料量或能量叫做被控对象的负荷。比如在恒温室的控制中，当被控量(空气温度)保持恒定时，单位时间内流入或流出恒温室的热量就是被控对象的负荷。如对象的负荷变化速度快，则要求控制装置灵敏度要高，动作要快，能够在偏差很小时就开始迅速动作，因而对控制装置要求较严。如果对象的负荷变化速度比较缓慢，则对控制装置的要求就可以放宽一些。

2. 被控对象的容量及容量系数 在稳定状态时，被控对象中所能储蓄的物质质量或能量叫做对象的容量。如恒温室的