

热工过程自动控制概述

在生产过程和科学实验中,自动控制起着越来越重要的作用。它通常包括如下两方面的内容。

(1) 自动调节。为了保证产品的数量和质量以及设备的安全经济运行,必须要求生产过程在预期的工况下进行。但是,由于不可避免的各种干扰因素的存在,使得运行工况发生偏离。自动调节系统的任务就是在干扰发生时,能避免或减小这种偏离,使生产过程维持在希望的状态。

(2) 顺序控制。它通常是在生产过程的启动或停止时,按照预先拟定的条件和程序,完成多个设备的启停操作。另外,在事故发生时,也自动采取保护措施,按顺序启动或停止相应的设备。

本书仅讨论自动调节的理论和方法。由于自动调节一直伴随着生产过程进行,对于生产过程具有特别重要的意义。现代化的生产系统如果没有自动调节系统的配合,将根本无法运行。同许多文献一样,本书也将自动调节称为自动控制,不再对二者加以区别。

1.1 自动控制系统的基本结构

在工业生产中,有许多参数需要维持常数或按人们希望的规律变化,从而提出了控制的要求。下面通过两个例子说明自动控制系统的基本组成。

例 1-1 加热器温度控制。

如图 1-1 所示。加热器通过电加热将进入其中的冷水(流量为 W , 温度为 t_1)加热成热水(流量为 W , 温度为 t_2)提供给用户,根据用户的需求,热水的温度 t_2 需维持某一常数,但是由于干扰的存在(例如水流量 W 、冷水温度 t_1 的变化以及电源电压的波动等), t_2 会偏离希望的数值,于是就产生了控制的要求。

为了实现热水温度的控制,首先要对 t_2 进行测量,在图 1-1 中,用温度传感器测量温度 t_2 。通常温度传感器输出的信号很小,需要用相应的变送器将其放大,这样图 1-1 中温度变送器的输出 I_{t2} 就代表实际温度 t_2 。

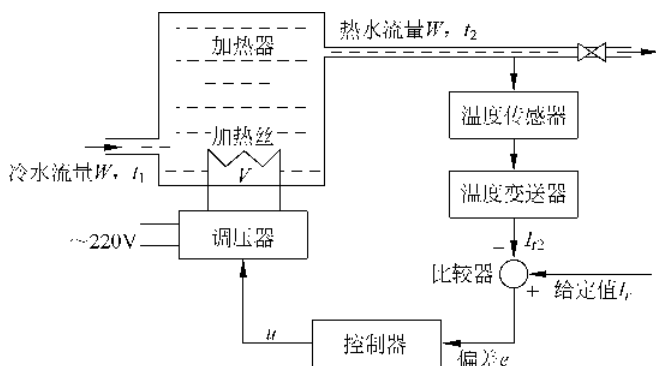


图 1-1 加热器温度控制系统

为了考察 t_2 是否满足要求,使 I_{t2} 通过一个比较器和从外部加入的给定值 I_r 进行比较(作减法), I_r 反映了对 t_2 的期望值,于是比较器的输出为

$$e = I_r - I_{t2}$$

式中, e 称为偏差信号。当反映实际温度的 I_{t2} 和代表期望温度的 I_r 相等时, $e=0$,即偏差为零,不需要进行调节。反之,如果 $I_r \neq I_{t2}$,则偏差 e 将不为零,需要进行调节。调节的方法是通过调压器改变加热丝的电压 V ,若 $I_r < I_{t2}$,说明实际温度高于期望温度,需减小 V ;反之,若 $I_r > I_{t2}$,说明实际温度低于期望温度,需增大 V 。

偏差 e 和电压 V 的关系是由图 1-1 中的控制器(或称调节器)决定的。控制器接收偏差信号 e ,输出决定加热电压 V 的信号 u 。 u 和偏差 e 的关系决定了控制系统的调节规律,即当偏差发生后,按照适当的规律改变加热电压 V ,以尽快地、平稳地消除偏差。

由于调节器的输出 u 通常为弱电信号,不能直接控制加热电压,因此用图 1-1 中的调压器实现 u 到 V 的转换。

例 1-2 锅炉汽包水位控制。

汽包是锅炉的一个重要部件,如图 1-2 所示。冷水通过省煤器进入汽包,在汽包中加热成饱和状态,从汽包流出的饱和蒸汽经过热器加热成过热蒸汽后,进入汽轮机做功。在锅炉运行过程中,汽包水位是一个很重要的参数,必须严格维持在固定的范围,过高过低都会引起严重事故,因此汽包水位控制系统是一切汽包锅炉的一个重要控制系统。

为了实现汽包水位的自动控制,用水位测量设备实时测量实际水位 H ,水位测量设备的输出 I_H 通过比较器与给定值 I_r 进行比较,产生偏差信号 e 。当偏差不为零时,借助于给水管路上的调节阀改变进入汽包的给水流量 W ,达到使水位恢复到给定值的目的。由于调节器的输出信号 u 无法直接驱动调节阀,在控制系统中,设置一电动执行器,它对 u 进行功率放大,带动调节阀的开大或关小。

从上面的两个例子可以看出,要构建一个自动控制系统,需有如下几种设备。

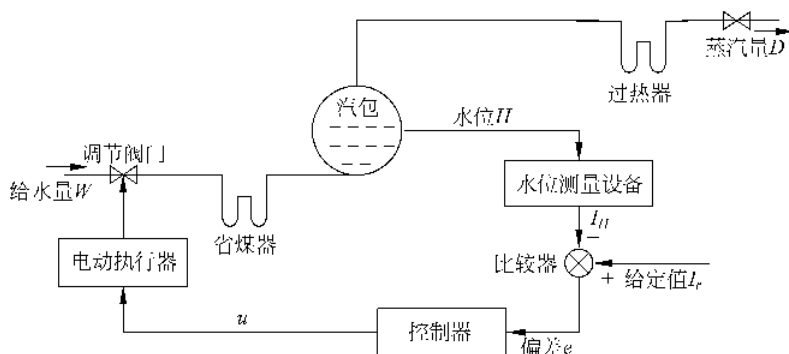


图 1-2 锅炉汽包水位控制系统

(1) 参数测量设备：它用来实时监测被控制的参数(如例 1-1 中的热水温度和例 1-2 中的汽包水位),这是实现该参数控制的前提。

(2) 比较和控制设备：它将实际测得的被控制参数和期望值进行比较,产生偏差信号,送往控制器,由控制器根据偏差的情况决定如何进行控制。

(3) 调节机关和执行机构：当出现偏差时,需要通过调节机关(如例 1-1 中的调压器和例 1-2 中的调节阀门)来调节系统中的某一个量(如例 1-1 中的加热电压和例 1-2 中的给水流量),如果调节器的输出无法直接驱动调节机关,还需要借助于适当的执行机构来实现(如例 1-2 中的电动执行器)。

实际上,自动控制是在手动控制的基础上发展起来的。设想一个操作员来控制某一参数的情况,他首先要用眼睛观察这个参数的大小,然后利用大脑将观察到的参数与期望值进行比较,并根据偏差的大小、方向、变化速度以及他积累的经验决定如何进行实际控制操作,最后通过手来执行。所以,自动控制系统中的参数测量设备、比较和控制设备以及调节执行机构分别实现手动控制中人的眼、脑和手的功能。

因此,对于任何一个自动控制系统,尽管被控制的物理对象完全不同,但控制系统却有大致相同的结构,如方框图 1-3 所示。

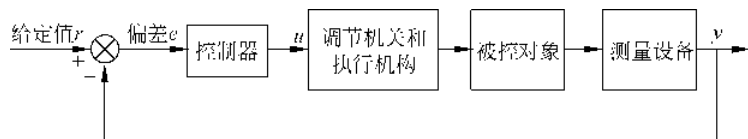


图 1-3 自动控制系统的基本结构

因为参数测量设备、调节机关和执行机构一旦确定就不再改变,故可以将它们视为被控对象的一部分,与原对象一起,称为广义对象,如图 1-4 所示。

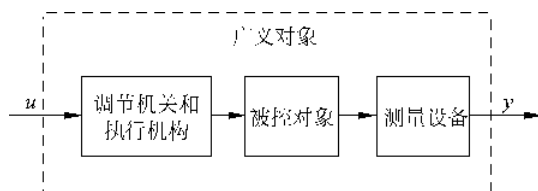


图 1-4 广义对象

将图 1-3 用广义对象表示后,自动控制系统的结构成为图 1-5 所示的简单形式(图中的对象即指广义对象),一般控制系统的分析研究均针对这种形式进行。

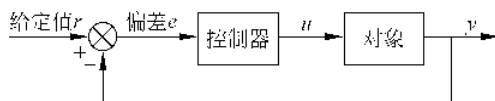


图 1-5 用广义对象表示的自动控制系统的基本结构

1.2 自动控制系统中的基本参数

下面针对图 1-5 所示的基本控制系统介绍有关参数和一些重要概念。

(1) 被调量 被调量是指自动控制系统要维持为规定值的物理量。在例 1-1 和例 1-2 中,被调量分别是热水温度和汽包水位,在图 1-5 中,被调量用 y 表示。

(2) 扰动 影响被调量的所有因素都称为扰动。在例 1-1 中,扰动(即影响热水温度的参数)有冷水的流量、温度、加热电压、加热器对外部的散热等。在例 1-2 中,扰动(即影响汽包水位的参数)有给水流量、出汽流量以及锅炉的燃烧状况等。

(3) 对象的输入和输出 被控对象即被控制的生产过程。在表示自动控制系统的方框图(图 1-5)中,对象的输入和输出并不是实际的物理输入和输出,而是以被调量为输出,以所有扰动为输入,如图 1-6(a)所示。

实际上,不同的扰动对于被调量的影响往往是不同的。为了表示这种区别,可将图 1-6(a)表示成图 1-6(b)的形式,它表示,各个扰动通过不同的规律产生各自的影响,总的被调量等于所有影响的代数和。

(4) 调节量 在存在偏差时,必须有某种控制手段,即通过调节器来改变某一个量,使被调量回到期望的值,这个量称为调节量,显然调节量必是扰动中的一个。如例 1-1 中的加热电压,例 1-2 中的给水流量。调节量在图 1-5 中用 u 表示。

在设计控制系统时,调节量应根据生产过程的要求进行选择。例如在例 1-2 中,给水流量和蒸汽流量都影响水位,但由于蒸汽流量是根据负荷的要求决定的,不能作为水位调

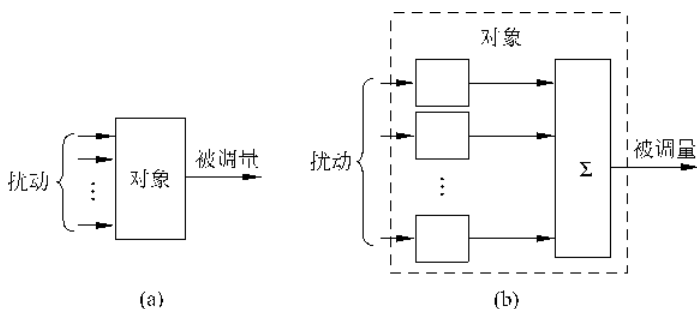


图 1-6 对象的输入和输出

节的调节量,故应该选择给水流量作为调节量。另外,在生产过程允许的前提下,应选择对被调量控制性能良好的扰动量作为调节量。例如当扰动发生后,被调量的变化具有很大的滞后,选取这样的扰动作为调节量将使系统的控制变得困难。

在图 1-5 中,没有画出调节量以外的扰动,实际上,扰动总是存在的。图 1-7(a)画出了调节量以外的另一个扰动 x ,图中,对象(u)表示在调节量 u 作用下对象的特性,对象(x)表示在扰动 x 作用下对象的特性。如果 x 和 u 对被调量 y 的影响完全相同,则图 1-7(a)可以简化成图 1-7(b)的形式,这种形式经常用来作为分析系统性能的典型结构。

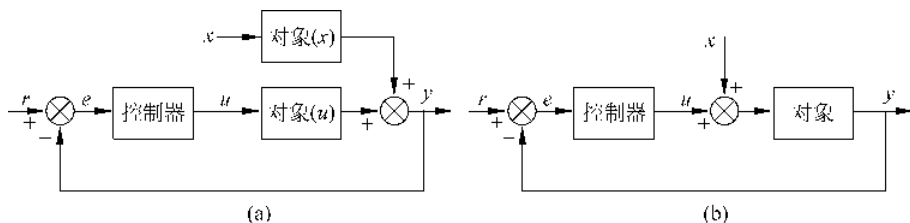


图 1-7 控制系统的方框图表示

由图 1-7 可以看出,调节量处于调节系统的内部,故称其为内部扰动,而其他扰动(如图 1-7 中的 x)处于调节系统的外部,称为外部扰动。

(5) 给定值 给定值为被调量的期望值,在图 1-5 和图 1-7 中,用 r 表示。如果希望被调量维持不变(如例 1-1 和例 1-2),则 r 为常数,其数值根据生产过程的要求进行设定。但在一些情况下,希望被调量按照一定规律变化或者跟踪系统中的某一参数,此时 r 不再是常数。

因为给定值的改变也将引起被调量的变化,故给定值也是一个扰动,称为给定值扰动。

(6) 偏差 偏差为期望值和实际被调量之间的差值,其大小和变化直接反映控制系统的工作品质。

1.3 控制系统的静态特性和动态特性

1. 静态特性

控制系统中各量均不随时间变化的状态称为静止状态或平衡状态,描写此状态下系统各量间关系的数学方程为静态特性方程,显然它是代数方程。

2. 动态特性和过渡过程

一个处于静止状态的控制系统如果发生扰动,则静止状态被破坏,系统中各变量将随时间发生变化,这种状态称为系统的动态。描写系统动态行为的方程为微分方程。一般来说,系统进入动态后,由于调节作用,系统会逐渐进入一种新的静止状态。在扰动作用下,系统从一个静止状态达到另一种新的静止状态的过程称为过渡过程,过渡过程的行为和特性是由系统的动态特性决定的。

在控制系统的分析设计中,研究其特性尤其是动态特性十分重要。图 1-7 所示的基本自动控制系统包括对象和控制器两部分,其中对象是生产过程本身的一部分,控制器是为了实现自动控制而加入的。显然对于不同的对象,需要采用不同的控制器,这里所说的不同,不是指物理上的不同,而是指动态特性的不同。如果有两个对象,在物理上完全不同,比如一个是电的对象,另一个是热的对象,但只要它们的动态特性(即描述它们的微分方程)相同,就可以设计相同的控制器。

显然,了解被控对象的动态特性是进行控制器设计、调整的基础,其中最主要的是在调节量作用下对象的特性。此外,也有必要了解一些主要外部扰动下对象的特性。

1.4 控制系统的分类

控制系统可以按不同的方式进行分类。

1. 按给定值的形式分类

- (1) 当给定值为常数时,称为定值控制系统。
- (2) 当给定值按预定规律变化时,称为程序控制系统。
- (3) 当给定值随机变化时,称为随动控制系统。

本书主要研究定值控制系统。

2. 按工作方式分类

按工作方式控制系统可分为闭环控制和开环控制系统。在图 1-5 和图 1-7 所示的控制系统中,信号沿箭头方向形成一个闭环,这种控制方式称为闭环控制。闭环控制的主要

标志是反馈,即对象的输出通过比较器、控制器又作用至对象的输入端,故闭环控制又称反馈控制。

从图 1-7 可以看出闭环控制的工作过程:假定开始系统处于静止状态,且被调量和给定值相等,即偏差为零,此时控制器不产生控制作用;在某一时刻有一个或几个外部扰动发生,于是系统进入过渡状态,被调量发生变化,偏差不再为零;控制器接收偏差信号后,产生控制输出,作为调节量作用于对象,抵消外部扰动的影响,使被调量恢复到等于或接近原来的数值,最后系统在一种新的状态下静止下来。

可见反馈控制有两个主要特点,第一,它是基于偏差的控制,只有当偏差存在时,才会产生控制作用。第二,无论何种扰动,系统都可以产生控制作用,因为不论扰动发生在哪里,最终都要在偏差上反映出来,正是因为反馈控制的这个特点使其得到广泛的应用,成为一种最基本的控制方式,一些复杂的控制系统都是在此基础上发展起来的。

对于图 1-7(b)所示的系统,考虑以 r 为输入,以 y 为输出,则反馈通道上没有任何部件,这种系统称为单位反馈系统。如果考虑以 x 为输入,以 y 为输出,则系统可以重画为图 1-8,这时控制器处于反馈通道上,系统不再是单位反馈系统。

与闭环控制相对应,还有一种开环控制(前馈控制,扰动补偿)系统。

由于闭环控制是基于偏差的控制,无论何种扰动,只有在其影响到被调量即产生偏差后,系统才能产生控制作用。这虽然是反馈控制的一个突出优点,但另一方面,这种基于偏差的控制却会使系统的控制作用滞后。因为虽然扰动产生了,但由于对象的惯性或滞后,被调量并不马上随之变化,因而也不能及时产生控制作用。这种控制作用的滞后,往往会使系统的性能恶化,甚至达到不能允许的地步。

因为偏差是由扰动产生的,一个合理的设想是采用基于扰动的控制方式,即当扰动一产生,便随即产生控制作用(而此时可能尚未产生偏差),这种控制方式叫做前馈控制或扰动补偿,如图 1-9 所示。

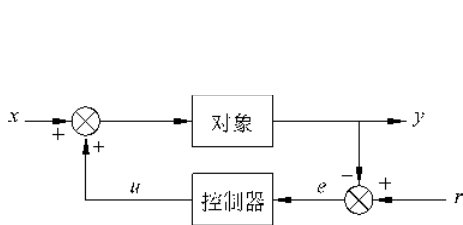


图 1-8 非单位控制系统

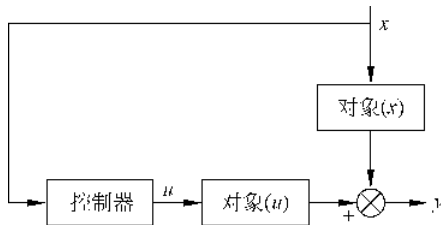


图 1-9 前馈控制

图 1-9 中, x 为某一扰动,它通过对象(x)影响输出量 y 。在前馈控制系统中,使 x 直接进入控制器。这样,当 x 扰动产生时,一方面通过对象(x)引起 y 的变化,另一方面通过控制器改变控制量,及时产生控制作用。适当设计控制器的特性,可使上述两种作用相

抵消,达到维持被调量不变的目的。

但是,一个控制系统不能仅采用前馈控制,因为这要求对系统的所有扰动都要进行控制,这往往是难以做到的。实际系统中往往将前馈控制和反馈控制结合起来,构成前馈-反馈控制系统,这些内容,将在第4章中详细讨论。

3. 按系统的复杂程度分类

按系统的复杂程度,控制系统可分为单回路控制系统和多回路控制系统。所谓单回路控制系统,是指控制系统中只有一个闭环,如图1-7所示的系统。但在某些情况下,采用单回路系统难以达到要求,这时需要采用多回路或其他复杂的控制系统结构。

4. 按系统的动态特性分类

1) 线性系统和非线性系统

如果系统的特性可用线性微分方程来描述,则为线性系统;反之,如果其特性需用非线性微分方程描述,则为非线性系统。线性系统的一个突出特点是它具有相加性,即如果系统的输入为 x ,输出为 y ,当 $x=x_1$ 时, $y=y_1$,当 $x=x_2$ 时, $y=y_2$,则如果输入为 $x=ax_1+bx_2$ (a, b 为常数)时,输出 $y=ay_1+by_2$ 。

线性控制系统的研究在理论和实际应用上,都比非线性系统成熟得多。另外,有许多非线性系统,当系统在规定工况工作时,只要扰动不大,都可以作为线性系统处理,因此,本书仅讨论线性系统。

2) 时变系统和定常系统

如果系统的特性不随时间而改变,称为定常系统;反之,则为时变系统。线性定常系统是本书讨论的对象,其动态特性可用常系数线性微分方程来表示。

5. 按系统中信号的形式分类

一个控制系统,如果其中所有的信号和设备都是连续的,则称为连续系统;反之,只要有一个信号或设备是离散的,则称为离散系统。热工设备大都是连续的,即它要求连续信号输入,输出的也是连续信号。但在大多数工业控制中,控制器都是由计算机实现的,而计算机为离散设备,这样控制系统便成为了离散系统。由于连续系统的分析方法是系统分析的基础,故本书主要针对连续系统,有关离散系统的内容在第7章专门介绍。

6. 按系统中被调量和调节量的数目分类

以上的举例和讨论中,涉及的控制系统只有一个被调量和一个调节量,称为单输入、单输出系统。如果有一个以上的被调量和调节量,则为多输入、多输出系统,它的分析设计方法要比单输入、单输出系统复杂得多。

1.5 控制系统的质量评定

1. 评价系统质量的主要特征

一个控制系统的质量,可从如下三方面加以评定。

1) 稳定性

系统的稳定性可直观地用控制系统受扰后过渡过程的形态来说明。图 1-10 是可能的几种过渡过程形态(图中纵坐标为被调量 y)。

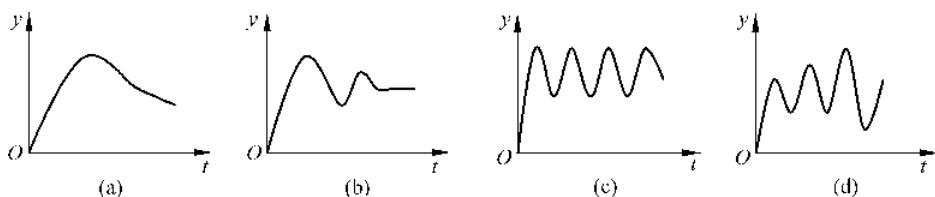


图 1-10 过渡过程的几种形态

当 $t \rightarrow \infty$ 时,图 1-10 中(a),(b)所示的过渡过程能稳定在某一数值,系统是稳定的,其中(a)所示为非周期过程,(b)所示为衰减振荡过程。图中(d)为扩散振荡过程,系统不稳定。图中(c)为等幅振荡过程,系统处于临界稳定状态。

一个控制系统,必须稳定,才能正常工作,不稳定或临界稳定的系统是不能运行的。

2) 准确性

准确性可用系统的偏差大小来表示,偏差为被调量和给定值的差,在图 1-7 中偏差表示为

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

偏差可分为静态(稳态)偏差和动态偏差两种,前者指 $t \rightarrow \infty$ 时,偏差的大小 e_{∞} ,后者指系统在过渡过程中 $e(t)$ 的最大值,记为 e_M 。

一个好的控制系统,应要求有尽量小的静态偏差和动态偏差。

3) 快速性

系统的调节时间(即系统受扰动后,从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态所需的时间)可反映系统的快速性,显然,人们总希望系统有尽量短的调节时间。

2. 积分指标

系统的稳定性、准确性和快速性往往相互矛盾,故希望有一种综合指标,尽量全面地反映这三方面的要求,其中积分指标被广泛采用。常用的积分指标有如下几种。

1) 偏差绝对值积分指标(IAE)

$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

它表示在整个过渡过程中($t=0 \sim \infty$),偏差绝对值的累计。因为偏差可以是正值或负值,故取绝对值,避免其相互抵消。

2) 偏差平方积分指标(ISE)

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

与绝对值积分指标不同,平方积分指标取偏差 $e(t)$ 的平方进行积分,这是一种被广泛采用的积分指标。

3) 时间偏差平方乘积积分指标(ITSE)

$$\text{ITSE} = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt$$

ITSE 考虑调节时间的影响,适用于强调过程快速的系统。

4) 综合积分指标

$$J_L = \int_0^{\infty} L[e(t), u(t), t] dt$$

在有些情况下,还把控制量 $u(t)$ 纳入积分指标中,因为 $u(t)$ 表示系统的控制作用,亦即控制付出的代价或能量,当然其越小越好。另外,在热工控制系统中,要求系统能平稳运行,控制量 $u(t)$ 的频繁动作不但不利于这种要求,也会加剧执行机构和调节机关的损坏。

在综合指标的表达式中, L 是被积函数,它根据需要构建,但通常应保证为正值,例如取 $J_L = \int_0^{\infty} [ae^2(t) + bu^2(t)] dt$, 其中 a 和 b 为加权系数。

可以看出,几种积分指标均综合考虑了系统的稳定性、准确性和快速性,它们越小越好。另外,如果系统存在静态偏差,即 $e_{\infty} \neq 0$, 以上积分均不存在,这时可考虑将其积分区间变为有限区间。

3. 鲁棒性

控制系统中的控制器是根据被控对象的特性设计的,由于得到的对象特性不可避免地与实际特性存在误差,而且在实际运行过程中,对象的特性也会发生变化,控制系统适应这种改变的能力称为鲁棒性。

习题

1-1 针对图 1-1 所示的加热器温度控制系统:

(1) 画出表示调节对象特性的方框图。要求:对象以 u 和 W 为输入,以 I_{t2} 为输出,