绪　论

历史在前进,科技在进步,当今的社会已是一个知识化、智能化、信息化的社会,特别是计算机技术的突飞猛进以及在社会各个领域的广泛应用，对我国的经济腾飞，加快推进社会主义现代化具有重要的意义。

要使我国跨入世界科技强国行列，离不开现代科学技术的进步，生产自动化水平的完善和提高。生产过程自动化,不仅能保证产品质量,提高经济效益,降低消耗,节约能源,改善环境条件,而且能确保安全生产。

所谓生产过程自动化,简言之,就是利用某些仪器、仪表、计算机或自动化装置,来代替人工操作,把人们从繁重的、重复的、恶劣的劳动环境中解放出来。

生产过程自动化的发展，大体经历了如下三个阶段。

首先是在生产线上应用了一些自动监测仪表,例如监测液位、流量、温度、压力等的各类仪表，这些仪表主要用来监视生产过程的主要环节，向操作人员提供可靠、准确的数据。根据这些数据和工艺要求，操作人员做出正确判断，合理而正确地实施规范化操作，以保证产品质量和生产的安全。此阶段属于人工和仪表相结合的生产阶段，但实质上还是属于人工控制。不言而喻,人工控制不仅劳动强度大,人为误差大,而且对某些变化迅速、产品要求苛刻的现代化大生产过程根本无法适应。这是因为在实际的现代化大生产和科学实验中，往往有大量的现象需要观察和分析,成百上千个的参数要加以测量,甚至控制,如此细致、快速、繁重的任务,大大超出了人们的感官、大脑的反应处理能力。

随着生产和科学技术进一步的发展，仪表工业也得到了飞速的发展，使生产过程自动化进入了第二个阶段，控制仪表及一些控制机构开始应用于生产过程，组成了自动控制系统。在这种系统中,测量元件代替了人的眼睛,控制器代替了人的大脑,执行机构代替了人的手,这样就使被控变量能自动地稳定在某个预先给定的给定值上，而且对整个生产过程进行自动检测和控制,以达到实现最优的技术指标,大大减轻了操作人员的劳动强度。

第三阶段则是伴随着电子计算机的出现，在自动控制系统中广泛采用了计算装置(这里主要是指常规仪表中的计算单元)，使生产过程的自动控制又推向一个崭新阶段，生产过程的全部自动化已经展现在我们的面前。

与上述生产过程自动化发展相适应，自动化仪表最早出现在 20 世纪 40 年代,那时的仪表体积大、精度低,主要目的是用于测量,一般称为基地式仪表。50 年代出现了单元组合仪表(电动、气动),从而可以实现生产的集中控制,这类仪表体积小、精度高、可靠性大。60 年代以后，由于大规模集成电路的出现及微机的广泛应用，使带有电脑的各种数字检测、控制仪表开

需要全本请访问 www.ertongbook.com

始投运于实际生产中，并实现了分散一综合型控制。

可以说,在现代化大生产中,脱离了生产过程自动化,没有各种先进的控制仪表,高质量、高速度、高效益的生产将是不可能的。所以任何一个现代化生产过程都是由许多工艺、设备、机械和自动化仪表按一定的生产设计要求组合而成。而工艺、设备与仪表之间，既互相区别又紧密联系。对于从事计量技术工作的专业技术人员来说，学习和掌握自动控制及控制仪表的基础理论知识，对所从事的工作是非常必要的。

本课程的目的是使学生牢固掌握过程控制的基本知识和原理、典型环节、各种基本控制规律及常用的执行机构、变送器，熟悉并了解各种典型控制仪表的基本结构、工作原理和主要特点，并能根据实际需要正确地选择和使用仪表。

第一章　自动控制基本知识

第一节　自动控制的基本概念

一 、 概 述

任何自动化系统都是由被控对象和自动化装置两大部分组成。所谓被控对象，就是指需要控制的设备、机器或生产过程 所谓自动化装置,就是指实现自动化的工具。

通常生产过程自动化的内容包括以下四个方面：

1．自动检测

系指在生产过程中,对能正确反映生产进行情况的各种参数进行自动、连续、快速、准确地检测并显示，以向操作人员提供实时的生产情况，直接对生产进行监督。例如，在化工自动化系统中,将数字显示仪表与各种检测装置相连接,就可对各有关的温度、压力、流量、液位等参数进行自动测量，并直接以数字形式加以显示。由此可见，自动检测是实现生产过程自动化的首要基础。

2．自动信号保护连锁

由于设备、外界干扰或人为因素等原因,当生产出现不正常情况,甚至有可能发生危险时，自动信号保护连锁系统能及时地自动发出灯光、音响等报警信号，并迅速按生产安全要求切断有关电源或按一定顺序启停有关机器、设备的运转，以防止事故的发生和扩大，保护人身和设备的安全，这对安全生产有着十分重要的意义。

3．自动操纵

这是指对机器、设备等进行自动的启停或按要求的一定顺序自动操作投运。例如，弹道式导弹的自动控制系统，就是利用事先设计好的程序，来自动控制导弹的起飞和转弯等运动。若完全由人工通过按动按钮来控制导弹飞行，则就是人们常说的远距离操纵。

4．自动控制

生产中，为保证产品的质量和产量，通常要求有关的工艺参数必须保持在所要求的给定数值上。但实际生产中，总是存在着各种干扰因素，它们将使有关的工艺参数偏离要求的给定值，自动控制系统能自动克服这种不利的干扰影响，使工艺参数重新回到要求的给定值上。这种自动控制系统,在热工、化工、电力等实际生产中应用最多、最广,也是生产过程自动化中最重要的核心。

本教材主要介绍自动控制系统及使之实现的各有关工具的基本原理及其实际应用。

二、人工控制与自动控制

下面通过一个具体例子加以说明。图 1－1 是一个热交换器加热过程的温度控制实例。

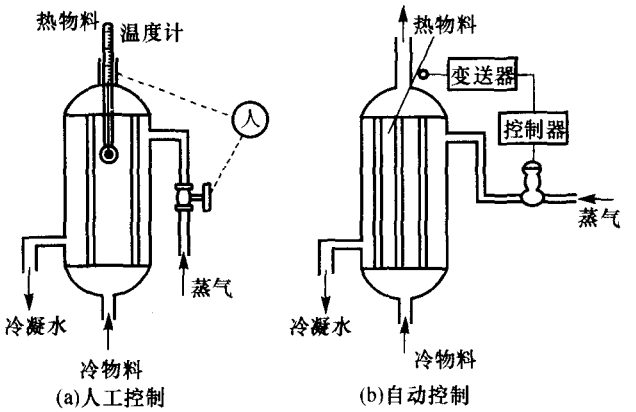


图 1－1　热交换器温度控制示意图

图中,受控制的设备是一个蒸气加热冷物料的热交换器,工艺要求其出口处的热物料必须加热到一定的温度，高于或低于这个温度均不合格。如果进入热交换器的物料比热、流量、进口温度以及加热蒸气的压力等诸因素，都保持恒定不变，则根据热平衡原理可知，被加热物料的出口温度也将保持恒定不变。但实际上，以上诸因素往往是不断变化的，例如，冷物料入口温度和流量的变化，加热蒸气压力的波动等。这些变化会直接影响热物料出口温度的恒定，为了保证热物料出口温度稳定在给定值上，就必须随时根据该出口温度与给定值的偏差来开大或关小蒸气进口阀门，以改变加热蒸气的流量，从而使热物料的出口温度符合要求。这就是热交换器的温度控制过程。

以上控制过程,如果由人工来完成,则称为人工控制或手动控制 如果由仪表及必要的自动装置代替人工来完成，则称为自动控制。

人工控制时,如图 1－1(a)所示，首先由人的眼睛去观察热物料出口温度，然后通过大脑的思考、比较、分析,再根据物料出口温度与其所要求的给定温度间的偏差大小、方向及其变化趋向，决定应把蒸气阀门的开度作如何变更，最后人手按大脑发出的控制命令去开大或关小阀门，其结果将使物料出口温度与要求的给定温度相一致。这就是人工控制的全过程。但是，这种控制有很多缺点,例如,工人劳动强度大,在一些变化频繁的工艺过程中,控制质量非常差，达不到工艺要求 在高温、高压、剧毒、辐照等恶劣生产条件下,将严重危害工人的身体健康 生产中占用人数很多,浪费劳动力……。于是，人们在长期生产实践的基础上，总结和提高了人工控制，最后发展为自动控制。

自动控制就是用仪表及一些必要的自动装置来代替人的眼、脑、手三个器官的上述功能。如图 1－1(b)所示，它用一个热电阻和一个温度变送器，来测量并感知物料的出口温度(相当于人眼的作用),并进一步将测得的温度信号送到控制器,控制器起着人脑的作用,它把得到的温度测量信号与要求的给定值相比较，计算出偏差的大小、方向、变化趋势并发出一个控制命令,最后用一个执行控制机构,即一种自动控制阀门,来接受控制器发出的控制命令,并自动地

按要求去开大或关小蒸气阀门(起着人手的作用),控制进入热交换器的蒸气量,以完成控制作用。必须指出，任何自动控制过程，都是仪表装置根据人们的意志，按照预先的设计和安排来动作的，它只能减轻和代替人们的部分劳动，而不能完全彻底地取代人的作用。

第二节　自动控制系统

一、自动控制系统的组成

从上节分析的例子中可以看到，一个自动控制系统是比较复杂的，但是无论多么复杂，从宏观上看，是由两部分构成的：一部分是起控制作用的全套仪表、自动装置，称为自动控制装置,通常包括测量元件、变送器、控制器和执行器即自动控制阀等;另一部分是控制装置所要控制的生产设备，称为被控对象。现分别加以讨论。

1. 被控对象(亦称受控过程)

在自动控制系统中，需要控制工艺参数的生产设备叫被控对象，简称对象。如化工生产中的各种塔类、反应器、热交换器等,都是常见的被控对象。在复杂的生产设备中,例如精馏塔，常常需要控制塔顶温度、压力,而塔底又需要控制液位,有时在塔的中部还需要控制进料流量，这种情况下，就只有塔的某一相应部分才是某一控制系统的对象(因为同时控制这些量是很困难的)。由此看来，对象不一定就是生产设备的整个装置，一个设备也不一定就只有一个控制系统。

2. 测量元件与变送器

是用来检测被控变量的变化并将其转换为一种特定信号(如气压、电流或机械位移等)的装置。在自动控制系统中起着获取信息的作用。它的精确度、灵敏度及可靠性直接影响自动控制系统的品质指标。

3. 控制器(亦称控制器)

它接收测量元件与变送器的信号，根据被控对象的数学模型及控制所要达到的要求，按照一定的控制规律进行运算,并输出相应的信号(气压或电流等)给执行器。在闭环控制系统中，它是将被控变量的测量值与工艺上需要保持的参数给定值进行比较，得出偏差。根据这个偏差的大小及变化趋势，按预先设计的运算规律进行运算，在自动控制系统中，可以采用模拟式控制器或数字式控制器。当用电子计算机来实现控制功能时，即构成计算机控制系统。

4. 执行器

它接收来自控制器的信号，改变操纵变量的大小或符号，从而实现对生产过程的控制，在过程控制系统中,常用的有电动、气动执行器。在化工、炼油等连续生产过程中,常用的是气动薄膜控制阀。

5. 定值器(给定机构)

将被控变量的给定值转换成统一信号的装置，以便使给定值送入控制器和测量信号进行比较。

自动控制系统除上述基本环节外,还有其他一些辅助装置,如电源、稳压装置、气源、减压阀、显示仪表等。显示仪表可以接收测量元件或变送器的信号，显示被控量的数值及趋势。在

需要全本请访问 www.ertongbook.com

自动控制系统中亦可以显示给定值、阀位或干扰量。必要时可采用图像显示和记录仪表来显示和记录控制系统的状态。此外还有开方器、乘方器、比值器、限幅器、选择器等，此处不再一一介绍。

在自动控制系统中，被控对象中需要控制的那个参数叫被控变量。被控变量要求保持的那个规定值称为给定值(亦称设定值)凡影响被控变量偏离给定值的各种因素，统称为干扰。

二、自动控制系统的方框图

自动控制系统取代了人的一部分工作，因此，分析一下人在进行某项工作任务中所经历的主要过程及所具有的基本功能，对深刻理解自动控制系统功能、任务、控制方式及各部分之间的联系是非常有益的。

为了有效地进行某项工作，人们总是要经常了解工作的进展和实际效果，摸清干扰正常工作进行的主要因素和条件，这个功能称之为调查或观察；然后将得到的各方面情况进行分析对比，看看实际结果与预期目标相差多少，并统观全局作出新的判断和安排，这个关键功能称之为分析决策 接下去应该是根据新的安排下达执行。执行的效果如何，需要再调查、再分析，循环往复直至工作任务结束。

工作中各种功能及相互联系人们往往用方框图表示。见图 1－2，图中各功能机构和工作对象均以方框图表示。

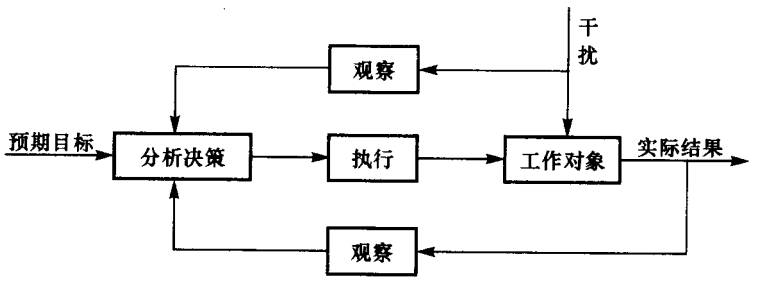


图 1－2　人工功能图

如果用技术装置和工程语言代换图 1－2，工作对象即被控对象，实际结果即被控变量，预期目标则相当于给定值(或参数输入)。而功能方框——观察、分析决策——分别以测量、计算取代，则自动控制系统组成的原理方框图，如图 1－3 所示。

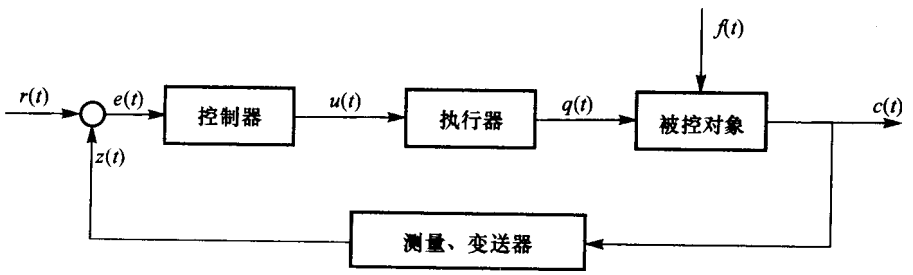


图 1－3　自动控制系统原理方框图

在方框图中，每个组成部分用一个方框表示，并标上该组成部分的名称，一个方框可以对应于一个元件或一个设备，或几个设备的组合，或一个局部的生产过程，通常称之为环节。方框图和生产流程图在形式上有某些相似之处，但它们所表示的内容却有本质的区别。生产流程图中的各个线条，表示了物料流通的来龙去脉，但方框图中的联络线条则表示两个环节之间的信号传递和相互作用关系，而与物料的实际流向无关。

在图 $1-3$ 中，图中的箭头方向表示相互作用的因果关系，指向方框的箭头表示环节的输入信号,它是引起该环节变动的原因,背离方框的箭头,表示该环节的输出信号,它是环节在输入信号作用下的变化结果。所以输入信号和输出信号是前因后果的关系。必须指出，信号只能沿箭头方向行进,不能逆行,否则将使输入输出关系紊乱,这也就是方框图的单向传递特性。

图 $1-3$ 中 $c(t)$是被控对象的被控变量,它是生产过程中需要控制的变量,如温度、压力、流量等。 $z(t)$是被控变量的测量值，$r(t)$是被控变量的希望值即给定值。$e(t)$是给定值与测量值之间的偏差，在控制系统中一般表示为：$e(t)=r(t)-z(t)$。

控制器根据 $e(t)$按一定的规律经过运算,得出控制变量 $u(t)$送到执行器，改变操纵变量 $q(t)$的大小,从而实现对被控变量 $c(t)$的控制。$f(t)$是作用于被控对象的干扰信号。凡是能够引起 $c(t)$变化的因素都可能成为干扰信号,如电压、电流、能源、物料量的波动等。

综上所述，方框图是研究自动控制系统的有力工具，任何一个自动控制系统都可以用方框图简明扼要地表示出来。

用方框图表示自动控制系统的优点是：只要依照信号的流向，便可将表示各元件或设备的方框连接起来，很容易组成整个系统。与纯抽象的数学表达式相比，它还能比较直观、形象地表示出组成系统的各个部分间的相互作用关系及其在系统中所起的作用。与物理系统相比，它能更容易地体现系统运动的因果关系。需要指出的是：方框图只关心与系统动态特性有关的信息，而不管组成该系统的各元件、设备的具体结构细节。因此，许多完全不同的系统可以用同一个方框图表示。当然，对于同一个系统，其方框图的表示也并非是唯一的，按照分析研究的目的、角度不同,同一个系统完全可以画出若干种不同的方框图。

在以后的学习中，还将看到方框图中列有数学表达式，这是定量地表征该环节特性的数学形式,称为传递函数。

三、自动控制系统的负反馈

从前面的分析中，可以看出任何一个自动控制系统都是一个闭合的回路，其中任何一个信号只要沿着箭头方向前进,最终总能回到原来的起点,再看图 $1-3$ 中,系统的输出参数是被控变量，但是它经过测量元件和变送器后，又返回到系统的输入端与给定值相比较，这种把系统的输出信号又返回到输入端的作法叫作反馈。关于反馈的概念，在其他课程中已经介绍过。从图 $1-3$ 中还可以看到,在反馈信号 $z(t)$旁有一个负号“$-$”,而在给定值信号 $r(t)$处有一个正号“$+$”,这里正和负的意思是在比较时,以 $r(t)$作为正值,以 $z(t)$作为负值，也就是说，输入到控制器的偏差信号在系统分析中是定义为 $e(t)=r(t)-z(t)$(但要注意,在仪表行业中定义的控制器输入偏差 $e(t)$恰好与系统分析的定义相反，这是历史的原因所造成的，但人们已约定成俗,予以公认的了),因为图 $1-3$ 中的反馈信号 $z(t)$是负的,所以叫负反馈,如果反馈信号 $z(t)$是正的,那么就叫作正反馈,在这种情况下,方框图中反馈信号 $z(t)$旁则要用

“+”,此时偏差信号为 $e(t)=r(t)+z(t)$。一般情况下，自动控制系统只有采用负反馈才能得到正确，预期的控制作用。例如，当被控变量 $c(t)$受到干扰的影响而升高时，反馈的测量信号 $z(t)$将高于给定值 $r(t)$，在负反馈的情况下，经过比较输入到控制器去的偏差信号 $e(t)$将为负值，此时控制器将发出信号而使执行器动作，其使用方向为负，从而使被控变量 $c(t)$降回到给定值，这样就达到了正确的控制目的。反之，如果采用正反馈，则控制作用将不仅不能克服干扰的影响,反而会推波助澜,使偏差越来越大,例如,由于干扰使被控变量增高时 $z(t)$也增高,在正反馈情况下,执行器的动作方向为正,从而使被控变量更加上升,偏差更大,直至被控变量超过安全范围而发生事故，所以在实际应用中，自动控制系统绝不能单独采用正反馈。

第三节　自动控制系统的过渡过程及品质指标

一、系统的静态和动态

在自动化领域内，把被控变量不随时间而变化的平衡状态称为系统的静态(也称稳态),而把被控变量随时间而变化的不平衡状态称为系统的动态。

当一个自动控制系统的输入(给定值和干扰)和输出均恒不变时，整个系统处于一种相对的平衡状态,系统的各个组成环节,如变送器、控制器、执行器等,都不改变其原先的状态,它们的输出信号也都处于相对静止状态，这种状态就是上面所述的静态。必须强调指出，此处所谓的静态与习惯上所讲的静止概念不同,习惯上说‘静止’是指静止不动,但这里的‘静态’并不意味着整个控制系统在生产过程中静止不动，而是生产照常进行，工艺中的物料、能量仍有进或出，只不过各种作用及信号的变化率为零，保持常数不变而已。

假若一个系统原来处于相对平衡状态即静态，由于某种外界干扰的作用，破坏了这种平衡状态时，被控变量就会立即跟着变化，从而使组成控制系统的控制器等各种自动化装置也相应地改变其输入、输出，最终克服干扰作用的影响，力图使系统恢复平衡状态。从干扰发生，经过控制，直到系统重新建立平衡，在这段时间里，整个系统的各个环节和参数都处于变动状态之中，所以这种状态叫作动态。

平衡(静态)是暂时的、相对的、有条件的,不平衡(动态)才是普遍的、绝对的、无条件的。

在自动控制系统中,了解系统的静态是必要的,但是了解系统的动态则更为重要。因为在生产过程中,干扰是客观存在的、随机的、不可避免的,干扰不断产生,控制器就要不断地克服干扰的影响。因此,自动控制系统总是处于一波未平,一波又起,往复不息的动态过程之中。所以,研究自动控制系统应以控制的动态过程为主，即研究干扰和控制这一对矛盾的相互作用而产生的被控变量的变化过程，以评价一个控制系统的动态和静态品质指标是否符合生产过程的要求。

二、自动控制系统的过渡过程

自动控制系统在动态过程中被控变量是不断变化的，这种随时间而变化的过程，称为自动控制系统的过渡过程，也就是系统由一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的全过程，或者说是自动控制系统的控制作用不断克服干扰影响的全过程。

在生产实践中，可能会遇到各种各样形式的干扰，但在分析和研究自动控制系统时，一般都采用阶跃形式的干扰。所谓阶跃干扰是指一种突如其来的变化，一经加上就不再消失，如图 1－4所示。阶跃干扰是一种对被控变量影响最大的干扰，也是一种对生产、设备最不利的干扰。如果一个自动控制系统能承受这种干扰，能及时消除这种干扰的影响，那末该系统对于其他形式的干扰影响就一定也能很容易地加以克服。同时，阶跃干扰是一种最符合生产实际情况的干扰形式，例如，负荷的突然增减 电压、气压的突然波动等，加上这种干扰形式简单，易于模拟实现，理论上的分析、处理也简单方便，所以它在分析自动控制系统中是应用最广的一种重要的典型干扰形式。

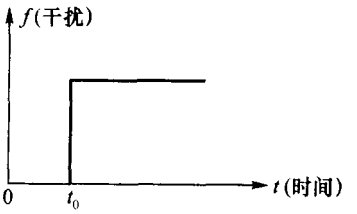


图 1－4　阶跃干扰

当系统受到阶跃干扰作用时，过渡过程可能出现如图 1－5所呈现的几种基本形式。

1．单调过程

被控变量在给定值的某一侧做缓慢变化，最后能回到给定值，如图 1－5(a)所示。

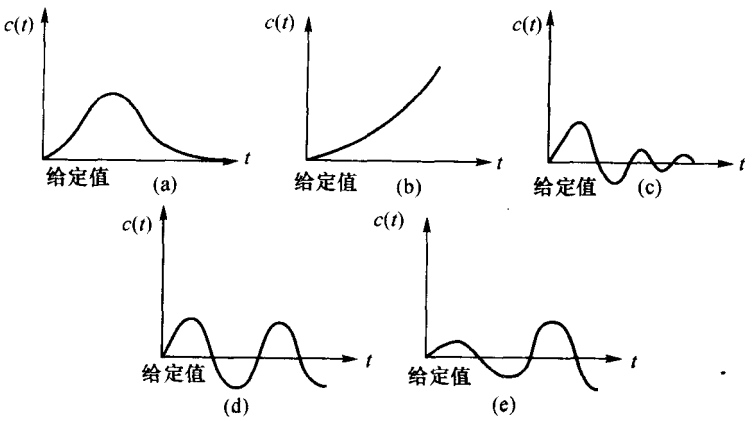


图 1－5　过渡过程的几种基本形式

2．非周期发散过程

被控变量在给定值的某一侧，逐渐偏离给定值，而且随时间 t 的变化，偏差越来越大，永远回不到给定值，如图 1－5(b)所示。

3．衰减振荡过程

被控变量在给定值附近上下波动，但振幅逐渐减小，最终能回到给定值，如图 1－5(c)所示。

4．等幅振荡过程

被控变量在给定值附近上下波动且振幅不变，最终也不能回到给定值，如图 1－5(d)所示。

5．发散振荡过程

被控变量在给定值附近来回波动，而且振幅逐渐增大，偏离给定值越来越远，如图 1－5(e)所示。

以上 5种过程可以归纳为两类：

第一类称为稳定的过渡过程，如图 1－5(a)和 (c)所示，它表明当系统受到干扰，平衡被破

坏，但经过控制器的工作，被控变量能逐渐恢复到给定值或达到新的平衡状态，这是我们所希望的。

第二类称为不稳定的过渡过程，如图 1－5(b),(e),(d)所示。(b),(e)所示的过程是被控变量随时间的增长而无限地偏离给定值，一旦超过生产允许的极限值就可能发生严重事故，造成不应有的损失，这样的过渡过程是绝对不能采用的。 (d)所示的过程是介于稳定和不稳定过渡过程之间的一种临界状态，但实际生产中也把它归于不稳定的范畴，因为，这意味着组成系统的各种设备、机构等将不断频繁地来回动作，各种参数也将不断大幅度地来回波动，这在实际生产中一般是不允许的。当然对于某些控制质量要求不高的场合，如果被控变量的波动是在工艺的允许范围之内，有时也有可能采用。

三、自动控制系统的品质指标

1．对控制系统的要求

自动控制作为重要的技术手段，能够解决哪类性质的工程问题，承担什么样的技术任务呢？

任何技术设备、机器和生产过程都必须按要求运行。例如，要想发电机正常供电，其输出电压必须保持恒定，尽量不受负荷变动的干扰；要想数控机床加工出高精度零件，其刀架的进给量必须准确地按照程序指令的设定值变化；要想热处理炉提供合格的产品，其炉温必须严格地按规定操纵，等等。其中发电机、机床、热处理炉是工作的主体设备，而电压、进给量、炉温则是表征这些设备工况的关键参数，那么额定电压、设定的进给量，规定的炉温就是在设备运行中对工况参数的具体要求。这样我们就可将被操纵的机器设备称作被控对象，将表征其工况的关键参数称作被控变量，而将这些工况参数所希望所要求达到的值称作给定值。不难想象，控制系统的任务就是使被控对象的被控变量按给定值变化，且使被控对象满足：$c(t)\approx r(t)$.

通常将系统受到给定值或干扰信号作用后，被控变量变化的全过程称为系统的动态过程，常以 $c(t)$表示。则系统控制性能的优劣，可以从动态过程 $c(t)$对 $r(t)$的比较中充分地、直观地显示出来。

控制精确度是衡量自动控制系统技术性能的重要尺度。一个高品质的控制系统，在整个运行过程中，被控变量对给定值的偏差应该是很小的。考虑到自控系统的动态过程 $c(t)$在不同阶段中的特点，工程上常从“稳”“快”“准”三个主要方面来要求。

(1)“稳”指动态过程的平稳性

如果控制过程中出现被控变量围绕给定值的摆动或振荡，首先振荡应逐渐减弱，如图 1－5(a),(c)。若要像图 1－5 中的(b),(e)呈发散型变化，显然是无法完成控制任务的。其次是振幅和频率都不能过大，应有所限制。

(2)“快”指动态过程的快速性

振荡型过程衰减很慢，或者虽然没有振荡，但被控变量迟缓地趋向平衡状态，都将使系统长时间地出现大偏差。过程的总体建立时间应有所限制，应尽快进入稳态。

“稳”和“快”反映了系统过渡过程的性能，即快又稳，则过程中被控变量偏离给定值较小，偏离的时间短，表明系统动态精确度高。

(3)“准”指动态过程的最终精确度

即系统进入平衡工作状态后，被控变量对给定值所达到的控制精确度。“准”则误差小，精确度高，它反映了系统后期稳态的性能。

被控对象不同，对稳、快、准的技术要求也有所侧重，随动系统对“快”要求较高，而温度控制系统对“稳”限制严格。同一系统稳、快、准是相互制约的，提高过程的快速性，常会诱发系统强烈振荡，改善平稳性，控制过程又可能延迟甚至最终精确度也有所下降。正确分析、解决这些矛盾也是自动控制理论着重讨论的重要内容。

2. 过渡过程的品质指标

为了便于定性、定量地分析，便于对各种自动控制系统在不同条件下具有可比性，一般在定值系统中某个时间加入一个单位阶跃扰动（即幅度为 1 的阶跃扰动），然后根据其过渡过程曲线如图 1-6 所示，使用表 1-1 中所列几个具体的品质指标。即可对该控制系统的品质作出客观公正的结论。

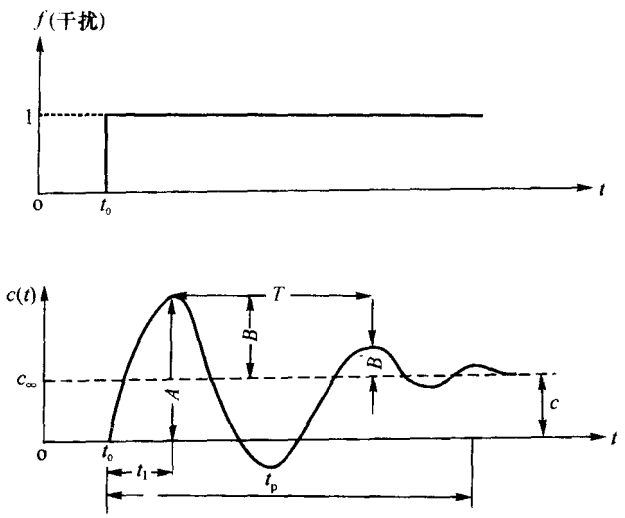


图 1-6　阶跃扰动作用时过渡过程品质指标示意图

表 1-1　　过渡过程品质指标（定值系统）

品质指标	符号	意　义	表示式	属　性
峰值时间	t_p	过渡过程达到第一个峰值所需要的时间		快速性
最大偏差	A	在过渡过程中，被控变量与给定值之间的最大差值	$A=c(t_p)$	动态误差
余差	c	过渡过程终了时新稳态值与给定值之差	$c=c(\infty)$	稳态精确度
衰减比	n	过渡过程曲线上同方向的相邻两个波峰（或波谷）之比	$n=\frac{B}{B'}$	稳定性

需要全本请访问 www.ertongbook.com

续表

品质指标	符号	意　义	表示式	属　性
建立时间(回复时间)	t_p	系统受到阶跃信号作用后,被控变量从过渡状态恢复到新的平衡状态所需要的时间。通常以从干扰开始作用之时起,直至被控变量进入稳态值的规定允差范围内并不再越出时所经历的时间来表示		快速性
振荡周期	T	过渡过程中,同向相邻两个波峰(或波谷)之间的间隔时间		
振荡频率(工作频率)	ω		$\omega=\frac{2\pi}{T}$	

为深刻理解过渡过程的品质指标，对几项指标做进一步的说明：

(1) 衰减比 n

根据 n 的数值,很容易判断控制过程的品质,即

$n=1$　表示过渡过程曲线不衰减,呈等幅振荡,由于振荡频繁,不够安全,不宜采用；

$n<1$　是发散振荡,不能采用；

$n>1$　为衰减振荡；

$n\gg1$　接近非周期衰减。

通常在实际生产过程控制中认为 $n=4:1$ 是比较适宜的,称之为 4:1 衰减曲线。因为,此时意味着过渡过程的开始阶段变化速度较快，即被控变量在同时受到扰动影响和控制作用影响后的初始阶段，能比较快地达到一个峰值，然后就下降，能较快地达到一个低峰值。有经验的操作人员看到这种现象后，心里比较踏实，知道被控变量再振荡几次就会稳定下来，最终的稳态值必在此两峰值之间，决不会出现太高太低的现象，更不会出现造成事故的数值。也有一些生产过程希望合适的 n 为 10:1。

(2) 最大动偏差(超调量)

前已述及,所谓偏差即给定值与被控变量之差。在衰减振荡过程中,最大偏差就是以给定值为基准的第一个波的峰值，在图 1-6 中以 A 表示。希望 A 越小越好,A 越大表明被控变量偏离给定值越大，系统恢复到给定值所需时间越长，这对控制不利，甚至可能出现控制器尚未消除第一个干扰引起的偏差,第二个、第三个干扰又接踵而来,从而引起偏差迭加,这是极不利的情况。另一方面,最大动偏差 A 太大，很可能超过生产允许的限度，甚至引起严重的事故。

(3) 余差

当过渡过程结束时,系统达到新的平衡状态,被控变量也会稳定在一个新的稳态值上,不再变化。通常这个新稳态值与给定值是不同的,两者之差叫系统的余差,如图 1-6 中的 c,余差可以为正，也可以为负。在生产中，给定值是生产工艺上要求的技术指标，被控变量越接近给定值越好，最好等于给定值，亦即余差越小越好。但在实际生产中，也不能过分单纯追求这个指标，因为要求的余差越小，意味着要求的控制系统越复杂，投资也越高。所以要根据产品

的具体情况，提出合适的要求，比如，一般贮槽液位控制要求不高，允许液位有较大的变化范围，此时余差可以大一点。但在某些温度控制系统中，要求很高，则应当尽量消除余差。

(4) 建立时间(亦称回复时间)

从阶跃信号作用于系统开始到被控变量从过渡状态恢复到新的平衡状态所需要的时间，叫作建立时间(或回复时间)。一般希望建立时间越短越好，这样才能保证下一次干扰来到的时候，上一次干扰所引起的控制过程已结束。从理论上讲，被控变量完全达到新的稳态值，需要无限长的时间，但是实际上由于仪表灵敏度所限，当被控变量接近稳态值，不再越出稳态值规定的允差范围时，仪表指示就已不再改变了，这时就认为被控变量已经达到稳态值，如图1－6中的 t_p 所示。至于振荡周期，振荡频率等就不再详细论述了。

第四节自动控制系统的数学模型

一、环节(或系统)的特性

在研究自动控制系统时，应用第二节中所介绍的环节概念有很大的方便，一个方框就代表一个环节，一个环节对应于一个元件、一个设备或一个组合体。它是对实际设备的抽象化，许多与自控系统工作无关的一些具体结构细节可以不管，而着重去研究自动控制系统中各环节所起的作用，特别是它在信号的传递和转换中所起的作用。

所谓环节(或系统)的特性，是指输入信号与输出信号之间的函数关系，它们在稳态时的关系称为静态特性，它们在变动状态时的关系称为动态特性。

对环节的静态和动态特性的研究，有重要的意义。因为多数自动控制系统是在相对稳定的条件下运行的，此时各类设备的静态特性(如测量仪表的误差)起着决定的作用，同时只有很好地熟悉和了解设备的静态特性，才能正确使用、维修设备。这也就是为什么在研究环节(或系统)动态特性时，静态特性不容忽视的原因。

然而，研究自动控制系统的动态特性比研究其静态特性更为重要、现实和普遍。它更能反映事物的本质，因为生产过程总是经常处于变动之中，自动控制系统是在变动中充分发挥其自控作用的。此时，整个系统，各个环节、每个信号都在变化，为了分析和预测控制过程中出现的各种情况，必须对各个环节和整个系统的动态特性进行认真的分析研究。

二、动态数学模型

把握动态过程 $c(t)$ 对自动控制系统的分析和计算是非常必要的。但是仅仅依据系统的工作原理和一些结构、参数资料，动态过程是无法直接地直观地辨识的。尽管如此，系统在动态运行中被控对象内部及控制器各部件的有关变量、变量的速度和加速度之间的相互关系，倒是可以通过对工作原理的了解和掌握的基本物理定律建立起来，通常是一些微分方程，求解这些微分方程，便可得到动态过程。

反映部件及系统动态运行的微分方程，称作(原型的)动态数学模型。

建立数学模型是对系统进行理论研究和数学仿真的基础性工作和前提条件。

系统或环节的动态数学模型有各种不同的表示方法，常用的有微分方程法、阶跃反应曲线法、频率特性法、根轨迹法以及由微分方程派生出来的传递函数、动态方框图等。根据本书学习对象的实际情况，本书侧重介绍微分方程法、阶跃反应曲线法和传递函数法的基本概念，其他方法不予涉及。为了叙述方便，本节只介绍微分方程法和阶跃反应曲线法，传递函数，动态方框图等放在第二章中介绍。

1. 微分方程法

微分方程法是基于物理规律,列写出环节(或系统)的输入量和输出量及其导数的微分方程(或叫作动态方程),用以描述系统的动态特性。这种方法适用于结构比较简单,性质比较单纯的元件、设备或系统，其优点是定量准确、直观。列写环节或系统微分方程的方法、步骤如下：

①明确环节或系统的输入量和输出量；

② 按物理、电学、化学的基本规律,列写出所有的微分方程(包括进行线性化)；

③联立所有微分方程，消去除环节或系统的输入、输出量以外的所有其他中间变量；

④整理微分方程，按输出量在方程之左，输入量在方程之右，全部按其导数项的阶次由高到低顺序排列，得出符合规定格式的最后的微分方程。

下面通过两个例子说明建立微分方程的过程。

[例 1]如图 1－7所示,由电阻、电容、电感组成的串联电路,以电压 u_r 为输入量,电流 i 为输出量,现在要求建立此电路的输出量 i 与输入量 u_r 之间的以微分方程表示的函数关系。

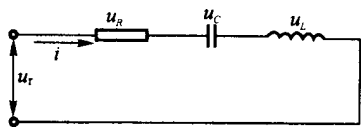


图 1－7　R,C,L 串联电路

第一步 由题意和图中可知,该系统的输入量是 u_r,输出量是 i；

第二步 根据所学电工知识,列写出各元件电压与电流之间的关系式；

电阻 R：$u_R = Ri$

电容 C：$u_C = \frac{1}{C}\int i\,dt$

电感 L：$u_L = L\frac{di}{dt}$

第三步：列出微分方程：

因为
$$u_r = u_R + u_C + u_L \tag{1-1}$$

所以
$$u_r = Ri + \frac{1}{C}\int i\,dt + L\frac{di}{dt}$$

对上式两边求导,得

$$\frac{du_r}{dt} = R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} + L\frac{d^2i}{dt^2} \tag{1-2}$$

第四步 把方程(1－2) 按规定的格式整理，输出量写在方程左端，输入量写在方程的右端,并全部按导数项的阶次由高到低排列,得

$$L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du_r}{dt} \tag{1-3}$$

这就是图 1－7所示电路的输出量 i 与输入量 u_r 之间的微分方程表达式。

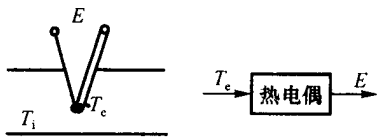
[例 2]热电偶(无保护套管)测温。如图 1－8所示,其输入信号为被测介质温度 T_i,输出信

号为热电偶的热电势 E。

热电偶的静态特性：在平衡状态时，被测介质温度 T_i 等于热电偶温度 T_e，因此，热电偶所产生的热电势 E 和介质温度 T_i 的关系可表示为

$$E = kT_e = kT_i \tag{1-4}$$

图 1－9 为某种热电偶的静态特性，k 是静态特性曲线的斜率。



(a)测量装置　　(b)方框图

图 1－8　无保护套管的热电偶

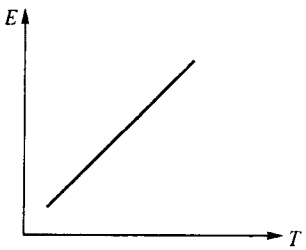


图 1－9　热电偶静态特性

热电偶的动态特性 由于介质温度 T_i 的变化，热电偶温度 T_e 也将发生变化，并且不同于介质温度 T_i，它们之间存在着温差，发生热交换，而热电势 E 只反映了热电偶温度 T_e 的变化与介质温度 T_i 的变化无关。为此，热交换过程可分为三个环节，如图 1－10 所示。

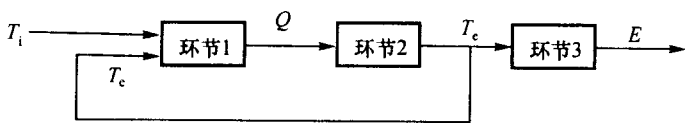


图 1－10　热电偶方框图

环节 1 表示由于介质温度 T_i 与热电偶温度 T_e 之差的变化，使流向热电偶的热流量 Q 发生变化的过程，显然温差 $T_i - T_e$ 是环节 1 的输入信号，热流量 Q 是输出信号，按热交换过程有

$$Q = \frac{1}{R}(T_i - T_e)$$

式中：R——热阻。

环节 2 表示由于热电偶吸收的热量 Q 的变化，使热电偶热端温度 T_e 发生变化的过程，故环节 2 的输入信号是 Q，输出信号是 T_e，由热量与温度的关系有

$$T_e = \frac{1}{C}\int_0^t Q\mathrm{d}t$$

式中：C——热容。

环节 3 表示由热电偶热端 T_e 的变化，引起热电势 E 的变化过程，所以环节 3 的输入信号是 T_e，输出信号为 E，即

$$E = kT_e$$

式中：k——比例系数(热电偶每升高 1℃所产生的热电势)。

在上面三个环节的输入信号与输出信号的关系表达式中，消去中间变量 Q、T_e，就得到所求的输入信号 T_i 与输出信号 E 之间的关系：

$$CR\frac{dE}{dt}+E=kT_i \tag{1-5}$$

这就是所求的热电偶的输出信号热电势 E 与其输入信号介质温度 T_r 之间的以微分方程形式表示的动态特性。这是一个一阶微分方程式，所以热电偶测温元件在自动控制系统中被称为一阶元件，也叫一阶环节，或称一阶滞后环节。

[例 3] 传动轴如图 1－11所示，试求输入、输出端两齿轮转角 $\theta_1\theta_2$ 的动态方程。设齿轮 1 突转某个角度 θ_1。

如果传动轴看作是绝对刚体，转动中不产生变形，输入端和输出端的齿轮转角恒等，即 $\theta_2(t)\equiv\theta_1(t)$，但准确地说，传动轴并非绝对刚体，在齿轮惯量较大，轴体过细过长的情况下尤为明显，实际上是一个惯量·阻尼·弹性动力系。

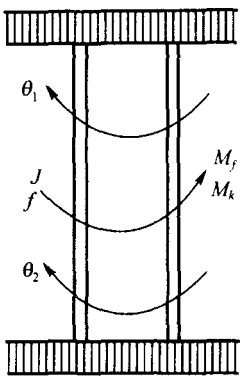


图 1－11　传动轴及受力分析图

第一步 由题意和图中可知，输入量为 θ_1、输出量为 θ_2。

第二步 确定动态联系。根据牛顿第二定律，使用于传动轴上的外力矩和等于惯性矩，则得

$$M_f+M_k=J\frac{d^2\theta_2}{dt^2} \tag{1-6}$$

式中：M_f——阻尼力矩；

M_k——弹簧恢复力矩；

J——转动惯量。

由阻尼器、弹簧的特性，可写出：

$$M_f=-f\frac{d\theta_2}{dt} \tag{1-7}$$

$$M_k=k(\theta_1-\theta_2) \tag{1-8}$$

式中：f　　阻尼系数；

k——弹性系数。

第三步，将式(1－7)、式(1－8)代入式(1－6)，消掉中间变量，得

$$J\frac{d^2\theta_2}{dt^2}+f\frac{d\theta_2}{dt}+R\theta_2=R\theta_1 \tag{1-9}$$

这是一个典型的动力学方程，二阶常系数线性微分方程。

当然，在多数情况下，传动机构中的传动轴较粗短，齿轮较小，即 J,f 小，R 大，完全可以忽略动态效应，近似认为 $\theta_2=\theta_1$。但是在一些特殊场合，J,f 将成为破坏控制系统平稳性的潜在根源，而必须给以考虑。

从以上三例中，可以看出，列写的动态方程是否正确，首先决定于对被分析对象的工作原理了解得是否充分和正确，这需要多方面的知识，本节只是提供了列写方程的一般步骤和方法。

2. 阶跃反应曲线

第三节中已对阶跃式干扰做了说明，如果在系统的输入端突然加上一个阶跃信号 r_0，在这个信号作用下，输出信号的变化过程称为阶跃反应曲线。图 1－12示出了一个一阶元件的阶

跃反应曲线。

图 1－13表示 L,R,C 串联电路，在突然加上一个阶跃输入电压 u_r 时(K 闭合)所得到的电流(输出信号)的反应曲线，当 R 不很小时，这是一个逐步衰减的振荡过程。如果对微分方程：

$$\frac{du_r}{dt} = L\frac{d^2i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}i$$

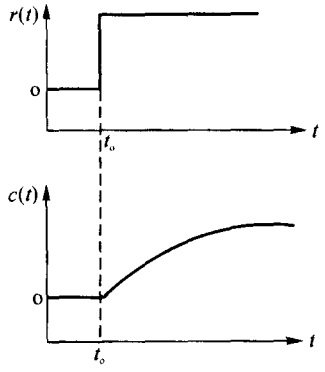


图 1－12　一阶元件阶跃反应曲线

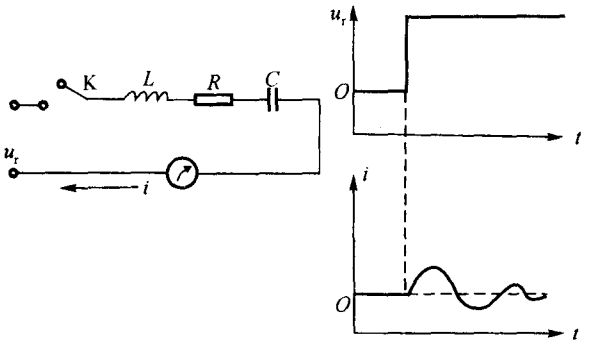


图 1－13　LRC 串联电路的动态特性

求解，亦可得到相应的时间函数，即

$$i = Ae^{-\alpha t}\sin\beta t \qquad (1-10)$$

式中的常数 α 和 β 完全取决于 LRC 的数值，振幅 A 则随 u_r 的大小而改变。

在分析、研究一个自动控制系统的时候，首先应研究掌握系统中被控对象的动态特性，然后，据此选择或设计出正确合理的控制器动态特性和整定好控制器参数。只有这样，才能得到预期的控制效果。如果两个不同工艺参数的系统，它们具有相同的被控对象动态特性，则它们完全可以选用相同的控制器动态特性和控制器参数，以满足生产要求。

第五节　自动控制系统实例

在熟悉了自动控制系统的一般原理的基础上，本节将通过几个实例来具体分析自动控制系统的过程及其工作原理。

一、水塔水位自动控制系统

图 1－14是一个水塔的水位自动控制系统，它由水箱(对象)、水泵电机(执行器)、晶体管 3AX31B组成的电路(测量元件)，继电器 J_1、J_2(控制器)组成。被控变量是水箱的水位。

当水箱流出量加大，水位降低到 b 点以下时，触点 b 与接地点 c(它们之间以水为导电介质)断路，此时晶体管 3AX31B基极开路，$I_b = 0$，管子截止，灵敏继电器 J_1 的线圈无电，常闭接点 5 闭合，导致继电器 J_2 的线圈有电，J_2工作，使常闭接点 1 断开，而常开接点(2,3,4)闭合，于是水泵电机起动，向水塔供水。随着供水量增加。水箱内的水位不断升高，当水位上升到 a 点以

需要全本请访问 www.ertongbook.com