

第 1 章

绪 论

本章知识点：

- 过程控制系统的发展过程
- 过程控制系统的特点、任务和目标
- 过程控制系统的组成和分类
- 过程控制系统的性能指标

基本要求：

- 了解过程控制系统的发展过程、特点、任务和目标
- 掌握过程控制系统的组成和分类及性能指标

能力培养：

通过对过程控制系统的发展过程、特点、任务、目标、组成、分类及性能指标等知识点的学习，能明确过程控制系统的学习目的、内容与要求，初步建立过程控制系统的概念体系。

1.1 过程控制系统发展概述

多年以来，随着科学技术的大力发展，工业自动化也在突飞猛进地发生着变化。事实上，生产过程自动化的程度已经成为衡量工业企业现代化水平的重要标志。

过程控制技术是自动化技术的重要应用领域，伴随生产技术的提高和生产规模的不断扩大，对控制算法与控制策略的要求逐步提高，促使过程控制理论的研究不断深入。其中，过程控制的发展大致可以分为如下五个阶段或方面。

1. 仪表化与局部自动化系统

其主要特点是：采用的过程检测控制仪表为基地式仪表和部分单元组合式仪表，而多数是气动式仪表。其结构方案大多数是单输入—单输出的单回路定值系统。

仪表化与局部自动化系统运行设计分析的理论基础是以频域法和根轨迹法为主体的经典控制理论。它在控制性能上一般只能实现简单参数的 PID 调节和简单的串级、前馈控制，主要任务是稳定系统，实现定值控制；无法实现如自适应控制、最优化控制等复杂的控制形式。



碎石生产线流程



钢铁冶炼过程控制流程

2. 计算机集中式数字控制系统

由于生产过程的强化、控制对象的复杂和多样，即高维、大时滞、严重非线性、耦合及严重不确定性对象，上述简单的控制系统已经无能为力。随着计算机技术的发展，人们试图用计算机控制系统替代全部模拟控制仪表，即模拟技术由数字技术来替代。计算机集中式数字控制系统主要经历了两个阶段：直接数字控制系统 DCC (Direct Digital Control) 和计算机集中监督控制系统 SCC (Supervisory Computer Control System)。

计算机集中式数字控制系统所采用的主要理论基础是现代控制理论。各种改进或者复合 PID 算法大大提高了传统 PID 控制的性能与效果。多输入—多输出的多变量控制理论、克服对象特性时变和环境干扰等不确定影响的自适应控制、消除因模型失配而产生不良影响的预测控制，以及保证系统稳定的鲁棒控制等新理论与策略的应用，为计算机集中控制奠定了坚实的理论基础。

3. 集散式控制系统 DCS (Distributed Control System)

集中式计算机控制系统在将控制集中的同时，也将危险集中，因此可靠性不高，抗干扰能力较差，并且随着现代工业生产的迅速发展，不仅要求完成生产过程的在线控制任务，而且还要求实现现代化集中式管理。DCS 既有计算机控制系统控制算式先进、精度高、响应速度快的优点，又有仪表控制系统安全可靠、维护方便的特点。集散式控制系统的通信网络是连接分级递阶结构的纽带，是典型的局域网。它传递的信息以引起物质、能量的运动为最终目的。因而，它强调的是其可靠性、安全性、实时性和广泛的适用性。

对于那些工艺复杂、建模困难的过程控制对象，传统控制理论难以解决。而对于基于知识、仿人脑推理、学习、记忆能力的智能控制系统，不需要建立对象模型，通过获取有关信息，按仿人智能直接进行决策与控制即可。此外，还可以利用智能技术的特征提取、模式分类和聚类分析，建立较为精确的对象模型，再用传统的控制方法实施控制。智能控制方法有以下几种：分级递阶智能控制、专家控制、人工神经网络控制、拟人智能控制理论等。

4. 现场总线控制系统 FCS (Field Control System)

集散系统大多采用网络通信体系结构，采用专用的标准和协议，加之受到现场仪表在数字化、智能化方面的限制，它没能将控制功能彻底地分散到现场。而现场总线控制系统是计算机技术、通信技术、控制技术的综合与集成。通过现场总线，将工业现场具有通信特点的智能化仪器仪表、控制器、执行机构等现场设备和通信设备连接成网络系统。连接在总线上的设备之间可直接进行数据传输和信息交换。同时，现场设备和远程监控计算机也可实现信息传输。这样，将现场控制站中的控制功能下移到网络的现场智能设备中，从而构成虚拟控制站。通过现场仪表就可构成控制回路，故实现了彻底的分散控制。FCS 系统较好地解决了过程控制的两大基本问题，即现场设备的实时控制和现场信号的网络通信。它不仅实现了智能下移，数据传输从“点到点”发展到采用“总线”方式，而且用大系统的概念来看整个过程控制系统，即整个控制系统可以看作一台巨大的计算机按总线方式运行。故全数字化、全分散式、全开放、可互操作和开放式互连网络是其主要特点和发展方向。

基于人工神经网络、模式识别、模糊理论基础而开发的软测量技术，为 FCS 系统提供了强大的信息监测功能。过程优化即稳态优化和最优控制等各种先进控制理论，以及多学科和技术

的交叉与融合,为 FCS 系统提供了坚实的理论基础。而计算机网络技术的发展和成熟又为 FCS 系统的实现提供了技术。

5. 计算机集成过程系统 CIPS (Computer Integrated Process System)

尽管各种先进的控制系统能明显提高控制质量和经济效益,但是它们仍然只是相互孤立的控制系统。从过程控制系统的发展必要性和可能性来看,过程控制系统必将向综合化、智能化的方向发展。因此,CIPS 作为一种全集成自动化系统,既是对设备的集成,也是对信息的集成。CIPS 覆盖操作层、管理层、决策层,涉及企业生产全过程的计算机优化。它的最大特点是多重技术的综合与全企业信息的集成。它表现的最大特征是仿人脑功能,这一点在某种程度上是回到初级阶段的人工控制,但更多是在人工控制基础上的进步和飞跃。

计算机集成过程系统的实现与发展依赖于计算机网络技术、数据库管理系统、各种接口技术、过程操作优化技术、先进控制技术、远距离测量技术等的发展,分布式控制系统、先进过程控制及网络技术、数据库技术是实现 CIPS 的重要技术和理论基础。

综观过程控制系统的发展,从仪表化与局部自动化系统到刚刚形成的计算机集成系统 CIPS,过程控制系统无论在结构组成上,还是在控制策略与方法上都有了质的变革和飞跃。过程控制系统的最新发展,如 CIPS,代表着信息时代自动化的总方向,它的发展必将带动各种学科理论的交叉、综合与发展,必将大大促进自动化水平和生产技术的进步。

1.2 过程控制系统的特点、任务及目标

1.2.1 过程控制系统的特点

1. 过程控制系统的多样性

过程控制系统中,被控对象是核心,由于生产工艺不同,被控变量表现出的性质也不同,即使是同一个被控变量,对控制品质的要求也不会完全相同,有的过程原理简单,有的则很复杂。比如,具有多变量、大惯性、大滞后、强非线性等复杂特点的过程就难以实现稳定控制,有些过程的被控参数变化缓慢,有的则变化迅速,如流量、压力等参数。正是由于被控对象的多样性,各自的要求不一样,使得相应的过程控制系统也是种类繁多。

2. 控制方案的多样性

由于工业生产的特点及被控过程的多样性,决定了过程控制系统的控制方案必然是多样的。早期的控制器采用的是模拟调节仪表。随着现代工业生产的发展,工业过程越来越复杂,对过程控制的要求也越来越高,传统的模拟式过程检测控制仪表已经不能满足控制要求,因而采用计算机作为控制器组成计算机过程控制系统。从控制方法的角度看,有单变量过程控制系统,也有多变量过程控制系统。同时,控制算法多种多样,有 PID 控制、复杂控制及包括智能控制的先进控制方法等。另外,有为提高控制品质而出现的串级控制系统、补偿控制系统、解耦控制系统等;还有为满足工艺特殊要求的比值控制系统、均匀控制系统、分程控制系统、选择性控制系统等。

3. 物理参数控制

过程控制系统中，为了连续、稳定地生产，经常涉及大量的物料及能量储存，这直接导致了过程对象常常是一些缓慢的过程，也就是说，过程对象常常是一些有纯滞后或者大时间常数的过程。并且其间涉及大量的传热、传质及复杂的物理、化学变化，就会对许多相关参数有一定的要求，如温度、压力、流量、物位、成分等，只有在这些物理参数被控制在要求的范围内时，生产过程的目标才有可能实现。

4. 定值控制

在大多数过程控制系统中，设计的目标之一是要求被控变量稳定在预先设定好的变化范围内，即稳定在设定值的目标范围内。因此，大多数过程控制系统属于定值控制系统。定值控制系统的特点是系统对给定的跟踪能力的要求低于运动控制系统，但要求有较高的抗干扰能力。

1.2.2 过程控制系统的任务及目标

工业自动化涉及的范围极广，过程控制是其中最重要的一个分支。它覆盖了许多工业部门，如电力、石油、化工、冶金、纺织、陶瓷及食品等。因而，过程控制在国民经济中占有极其重要的地位。

生产过程是指物料经过若干加工步骤而成为产品的过程。该过程中通常会发物理化学反应、生化反应、物质能量的转换与传递等。伴随这一系列变化的信息包括体现物流性质（物理特性和化学成分）的信息和操作条件（温度、压力、流量、液位或物位等）的信息。生产过程的总目标，应该是在可能获得的原料和能源条件下，以最经济的途径将原物料加工成预期的合格产品。为了达到该目标，必须对生产过程进行监视与控制。

过程控制主要针对六大参数，即温度、压力、流量、液位（或物位）、成分和物性等参数的控制问题。但进入 20 世纪 90 年代后，随着工业和相关科学技术的发展，过程控制已发展到多变量控制，控制的目标也不再局限于传统的六大参数，尤其是复杂工业控制系统，它们往往把生产中最关心的诸如产品质量、生产效益、能量消耗、废物排放等作为控制指标来进行控制。工业生产对过程控制的要求是多方面的，最终可以归纳为安全性、稳定性和经济性。

过程控制的任务就是在了解、掌握工艺流程和生产过程的静态和动态特性的基础上，根据生产工艺的要求，应用相关理论对控制系统进行分析和综合，最后采用适宜的技术手段加以实现。值得指出的是，为适应当前工业生产对控制的要求越来越高的趋势，必须充分注意现代控制技术在过程控制中的应用，其中过程模型化的研究起着举足轻重的作用，因为现代控制技术的应用在很大程度上取决于对过程静态和动态特性认识及掌握的广度与深度。因此可以说，过程控制是控制理论、工艺知识、计算机技术和仪器仪表等知识相结合而构成的一门应用科学。有人认为在研究探索的实践中，可能会形成一门更适合工业过程控制特点的新的控制理论，从而使过程控制迅速提高到一个新的水平。

1.3 过程控制系统的组成及分类

1.3.1 过程控制系统的组成

图 1-1 所示的储液罐液位控制系统就是一个典型的简单过程控制系统。

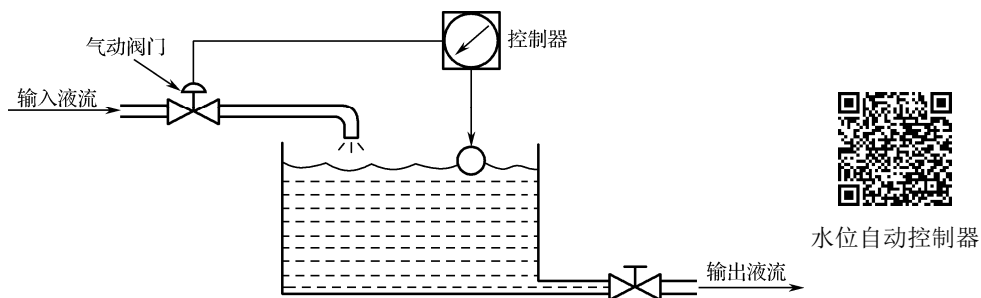


图 1-1 储液罐液位控制系统

如图 1-1 所示的系统中，悬浮球对储液罐中的液位高度进行检测，把被控量（即液位高度）转换成电信号（电流或电压）再反馈到控制器中。控制器将此液位测量值与给定的液位值进行比较，并按照一定的控制规律产生相应的控制信号驱动执行器（即气动阀门）工作，通过调节气动阀门的开度，来使测量液位值跟踪给定液位值，从而使液位稳定在给定值附近，实现过程控制的目的，原理如图 1-2 所示。

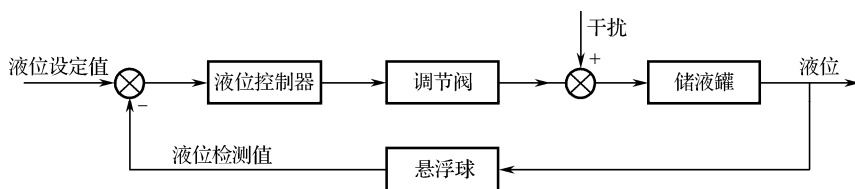


图 1-2 储液罐液位控制系统方框图

由此可以看出，过程控制系统由被控对象、检测变送装置、控制器（调节器）、执行器等部分组成，可以表达成如图 1-3 所示的系统框图。

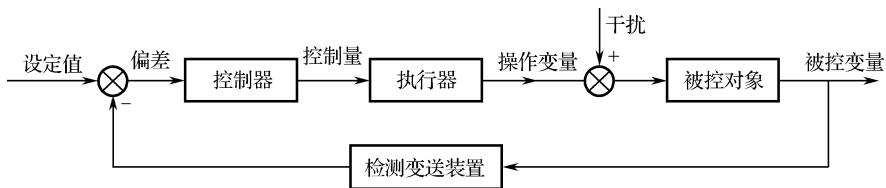


图 1-3 反馈控制系统方框图

1) 被控对象

被控对象也称被控过程，是指被控制的生产设备或装置。工业生产中的各种反应器、换热器、泵、塔器和压缩机及各种容器、储槽都是常见的被控对象，甚至一段管道也可以是一个被

控对象。在复杂的生产设备中，经常有多个变量需要控制。例如，锅炉系统中的液位、压力和温度等也均可作为被控参数；又比如，反应塔系统中的液位、进出流量和某一层塔板的温度等也均可作为被控参数，这时一个装置中就存在多个被控对象和多个控制系统。对这样的复杂系统在确定被控对象时，就不一定是生产设备的整个装置，而只有该装置的某一个与控制有关的相应部分才是某一个控制系统的被控对象。

2) 检测变送装置

检测变送装置（又称检测变送仪表或测量变送器）一般由测量元件和变送单元组成。其作用是测量被控变量，并按一定算法将其转换为标准信号输出作为测量值，即把被控变量转化为其测量值。例如，用热电阻或热电偶测量温度，并将其测量信号通过变送器转换为统一的气压信号（0.02~0.1MPa）、直流电流信号（0~10mA 或 4~20mA）或直流电压信号（1~5V）。

3) 执行器

在过程控制系统中，常用的执行器有电动调节阀和气动调节阀等，其中以气动薄膜调节阀最为常用。另外，在特定的应用中，调功装置和变频器等也常作为执行器的一个执行部件。执行器接收控制器送来的控制信号，直接改变操作变量；操作变量是被控对象的一个输入变量，通过操作这个变量可以克服扰动对被控变量的影响，操作变量通常是执行器控制的某一工艺变量。

在过程控制系统中，往往把被控对象、检测变送装置和执行器三部分串联在一起统称为广义被控对象。

4) 控制器

控制器也称调节器，它将被控变量的测量值与设定值进行比较得出偏差信号，并按某种预定的控制规律进行运算，给出控制信号去操纵执行器。

5) 报警、保护和联锁等其他部件

在过程控制系统中，为防止某些部件故障或者其他原因引起的控制失常，通常还要采用必要的报警及保护装置。对于正常的开停车及为了避免事故扩大，系统还需要设置必要的联锁逻辑及部件。

1.3.2 过程控制系统的分类

1. 按系统结构特点划分

1) 反馈控制系统

在图 1-3 中，反馈是过程控制的核心内容，只有通过反馈才能实现对被控参数的闭环控制，所以这类系统是过程控制中使用最为普遍的。

反馈控制是根据系统被控参数与给定值的偏差进行工作的，偏差是控制的依据，最后目的是减小或消除偏差。反馈信号也可能有多个，从而可以构成串级等多回路控制系统。

2) 前馈控制系统

前馈控制系统是根据扰动量的大小进行工作的，扰动是控制的依据，属于开环控制。前馈控制系统方框图如图 1-4 所示。鉴于前馈控制的种种局限性，所以在实际生产中不能单独采用。



过程控制系统分类树

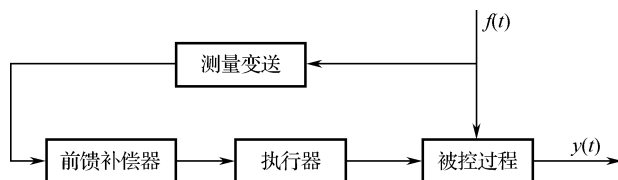


图 1-4 前馈控制系统方框图

3) 前馈-反馈复合控制系统

为了充分发挥前馈和反馈的各自优势，可将两者结合起来，构成前馈-反馈复合控制系统，如图 1-5 所示。这样可以提高控制系统的动态和静态特性。

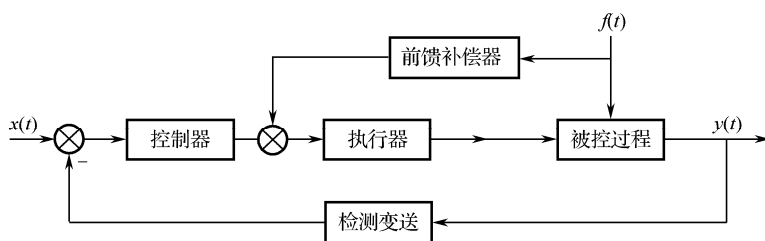


图 1-5 前馈-反馈复合控制系统方框图

2. 按设定值划分

1) 定值控制系统

定值控制系统是工业生产过程中应用最多的一种过程控制系统。在运行时，系统被控量的给定值是不变的。有时根据生产工艺要求，被控量的给定值保持在规定的范围附近波动。定值控制系统在于恒定，要求克服干扰，使系统的被控参数能稳、准、快地保持接近或等于设定值。

2) 随动（伺服）控制系统

随动（伺服）控制系统是一种被控量的给定值随时间任意变化的控制系统。它的主要作用是克服一切扰动，被控量随时跟踪给定值。随动（伺服）控制系统的主要目标是跟踪，即稳、准、快地跟踪设定值。

3) 程序控制系统

程序控制系统的给定值按预定的时间程序来变化。如机械工业中的退火炉的温度控制系统，其给定值是按升温、保温、逐次降温等程序变化的。家用电器中应用程序控制系统的也很多，如电脑控制的洗衣机、电饭煲等。

3. 按被控变量类型划分

工业生产过程的被控量种类不一样，有温度、压力、流量、物位、成分等参数，根据对参数的控制要求，过程控制系统可以划分为温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、物位控制系统、成分控制系统等。

4. 按被控变量数目划分

有的生产过程只需要控制某一个参数，有的则需要同时控制彼此联系的多个参数，相应的

过程控制系统则划分为单变量控制系统和多变量控制系统。若将被控变量数对应于控制回路的数量，则可理解为单回路控制系统和多回路控制系统。

5. 按参数性质划分

就生产过程中某一个参数的变化来说，其分布性质不尽相同。通过这个特点可以把过程控制系统划分为集中参数控制系统、分布参数控制系统。

6. 按控制算法划分

就控制器的算法实现来说，需要根据被控对象的特点来设计。当被控对象的特点并不复杂，工作机理比较简单时，常常采用常规控制算法，如PID控制器就可以满足要求；当被控对象过于复杂，就需要借助人工智能等近年发展起来的先进控制算法来实现控制目标。根据控制算法的不同，可以将过程控制系统划分为简单控制系统、复杂控制系统、先进或高级控制系统。

7. 按控制器形式划分

从控制设备的角度来看，可以把过程控制系统划分为计算机过程控制系统、常规仪表控制系统等。计算机过程控制系统包含的范围比较广，除了上述提到的基于可编程序逻辑控制器的控制系统外，还有直接数字控制系统、计算机监督控制系统、分布式控制系统和现场总线控制系统等。

1.4 过程控制系统的性能指标

过程控制系统的性能是由组成系统的结构、被控过程与过程仪表（检测变送装置、执行器和控制器）各个环节特性所共同决定的。在运行中系统有两种状态。一种是稳态，此时系统没有受到任何外来干扰，同时设定值保持不变，因而被控变量不会随着时间而变化，整个系统处于平稳的工况。另一种是动态，当系统受到外来干扰的影响或者设定值发生改变时，使得原来的稳态遭到破坏，系统中各组成部分的输入、输出量都相继发生变化，被控变量也将偏离原来的稳态值而随时间变化，这时就称系统处于动态过程。经过一段调整时间后，如果系统是稳定的，被控变量将会重新回到稳态值，或者到达新的稳定值，系统又恢复到稳定平衡工况。这种从一个稳态到达另一个稳态的历程称为过渡过程。一个性能良好的过程控制系统，在受到外来扰动作用或给定值发生变化后，应能平稳、准确、迅速地回复（或趋近）到给定值上。过程控制系统性能的评价指标可概括如下：

- (1) 系统必须是稳定的。
- (2) 系统应能提供尽可能好的稳态调节（静态指标）。
- (3) 系统应能提供尽可能好的过渡过程（动态指标）。

稳定是系统性能中最重要、最根本的指标，只有在稳定的前提下，才能讨论系统静态和动态指标。

控制系统性能指标是根据生产工艺过程的实际需要来确定的，特别需要注意的是，不能不切实际地提出过高的控制性能指标要求。

1. 单项控制性能指标

评价控制系统的性能指标应根据工业生产过程对控制的要求来制定，这种要求可概括为稳

定性、准确性和快速性，这三方面的要求在时域上体现为若干性能指标。图 1-6 表示一个闭环控制系统在设定值变化下被控变量的阶跃响应。该曲线的形态可以用一系列单向性能指标来描述，下面来分别讨论这些指标。

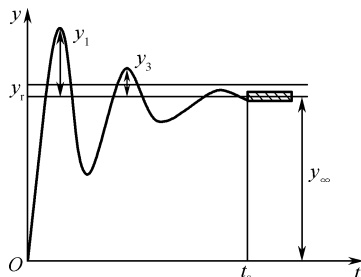


图 1-6 闭环控制系统在设定值阶跃扰动下的响应

1) 衰减比和衰减率

它们是衡量一个振荡过程衰减程度的指标，衰减比 n 是阶跃响应曲线上两个相邻的同向波峰值（见图 1-6）之比，即衰减比 $n=y_1:y_3$ 。衡量振荡过程衰减程度的另一个指标是衰减率，它是指每经过一个周期以后，波动幅度衰减的百分数，即衰减率 $\psi=(y_1-y_3)/y_1$ 。 n 为 4:1 就相当于衰减率 $\psi=0.75$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度，在过程控制中一般要求衰减比为 4:1~10:1，这相当于衰减率为 75%~90%。这样，大约经过两个周期以后系统就趋于稳态，看不出振荡了。

2) 最大动态偏差和超调量

最大动态偏差 y_p 是指设定值发生阶跃变化下，过渡过程在 $t>0$ 后第一个波峰超过其新稳态值的幅度，如图 1-6 中的 y_1 ，即为 y_p 。最大动态偏差占被控变量稳态变化幅度的百分数称为超调量。对于二阶振荡过程而言，可以证明，超调量与衰减率之间有严格的对应关系。一般来说，图 1-6 所示的阶跃响应并不是典型的二阶振荡过程，因此超调量只能近似地反映过渡过程的衰减程度。最大动态偏差更能直接反映在被控变量的生产运行记录曲线上，因此它是控制系统动态准确性的一种衡量指标。

3) 残余偏差

残余偏差是指过渡过程结束后，被控变量新的稳态值 y_∞ 与设定值 y_r 之间的差值，它是控制系统稳态准确性的衡量指标。

4) 调节时间和振荡频率

调节时间是从过渡过程开始到结束所需的时间。理论上它需要无限长的时间，但一般认为当被控变量已进入其稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内，就可以认为过渡过程已经结束。因此，调节时间就是从扰动开始到被控变量进入新稳态值的 $\pm 5\%$ 范围内的这段时间，在图 1-6 中以 t_s 表示。调节时间是衡量控制系统快速性的一个指标。过渡过程的振荡频率也可以作为衡量控制系统快速性的指标。

2. 误差积分性能指标

根据实际的需要，还有一种误差积分指标，可以用来衡量控制系统性能的优良程度。它是过渡过程中被控变量偏离其新稳态值的误差沿时间轴的积分（这里用 $e(t)$ 来表示这种偏差）。

无论是偏差幅度大还是时间拖长都会使误差积分增大，因此它是一类综合指标，希望它越小越好。误差积分有几种不同的形式，常用的有以下几种。

1) 误差积分 (IE)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

2) 绝对误差积分 (IAE)

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

3) 平方误差积分 (ISE)

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

4) 时间与绝对误差乘积积分 (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t/e(t)/dt$$

以上各式中， $e(t)=y(t)-y(\infty)$ ，见图 1-6。

采用不同的积分公式意味着估计整个过渡过程优良程度时的侧重点不同。例如，ISE 着重于抑制过渡过程中的大误差，而 ITAE 则着重抑制过渡过程拖得过长。人们可以根据生产过程的要求，特别是结合经济效益的考虑来加以选用。

误差积分指标有一个缺点，它不能保证控制系统具有合适的衰减率，而后者则是人们首先关注的。特别是，一个等幅振荡过程是人们不能接受的，然而它的 IE 却等于零。如果用它来评价过程的控制性能，显然极不合理。为此，通常的做法是首先保证衰减率的要求。在这个前提下，系统仍然可能有一些灵活的余地，这时再考虑使误差积分为最小。

习题

1-1 什么是过程控制？它的特点是什么？

1-2 简述过程控制系统的分类。

1-3 简述过程控制系统的发展概况。

1-4 过程控制系统的性能指标有哪些？

1-5 试举出 2~3 个过程控制的例子，并分别指出它们的被控量和操作量。