第一篇　航海自动化基础

航海技术是一门综合性的学科。现代航海中，大量应用了计算机技术和自动化技术，作为从事海洋船舶驾驶的高级航海人员，懂得一些自动控制理论的基本知识，对于更好地掌握和操纵现代化船舶的自动化仪器和设备，经济而又安全的驾驶船舶，显得十分必要。

第一章　航海自动化概况

第一节　船舶自动化发展概况

随着国际贸易的发展，世界海运量迅速扩大，使得海上航行的船舶，数量显著增加，单船吨位急剧扩大，船速也在不断提高，造成海上交通密度加大，航行更加复杂。为了在日益激烈的竞争中占据领先地位，提高航行的安全性和经济性，运输船舶采用了自动化技术，引起航运事业的变革，其直接结果是出现了程度不同的各类自动化船舶。

一、船舶自动化的概念

自动控制　就是在无人参与的情况下，利用控制装置（控制器）使被控对象或过程自动的按预定的运行规律去运行。导弹能准确地命中目标，人造卫星能按预定轨道运行并返回地面，宇宙飞船能准确地在月球上着落并安全返回，都是自动控制技术发展的结果。

自动控制现在已愈来愈广泛地应用到各种工程专业中，自动控制水平往往是衡量技术先进水平的重要标志之一。从学科发展看，自动控制吸收了很多专业技术和科学的成就，理论和实践得到了很快的发展；而另一方面，现代的各种工程学科又包含着本专业的自动控制技术，也即自动控制理论和技术在该工程中应用的专门知识。因此自动控制与很多学科建立起密切和广泛的关系，自动控制成为一门多科性的科学技术。

随着自动控制在各种工业中获得应用、发展和成熟，船舶自动控制技术也得到很快发展，并成为二次大战结束以后，船舶技术发展的几个主要方面之一。所谓船舶自动化是船舶操纵与机舱设备运转过程自动化的简称，具体地说，就是在船舶需要人工操作与管理的设备上配备一些船用自动化装置，全部或部分地代替操作管理人员的直接劳动，使船舶操纵与设备运转过程在不同程度上自动地进行，这种采用船用自动化装置来操纵与管理设备的形式，称为船舶自动化。

二、船舶自动化的发展概况

船上使用自动控制，已有很长的历史。　20 世纪　50 年代以来，船舶自动化经历了单元自

动化，机舱集中监测与控制，以及主机驾驶室遥控等几个阶段。随后，由于大规模集成电路的出现和微处理机在自动化方面的实船应用，船舶的自动化，由机舱自动化朝向全面自动化的方向发展。

船舶自动化的研究始于 60 年代初期，至 80 年代初共经历了四个发展阶段，目前正处于第五个发展阶段。

60 年代的着眼点，是以机舱集中控制，集中监测为主，驾驶室也可进行主机遥控。其特点是在机舱内设置集中监视屏和控制台，并将它们安装在有隔音和空调设备的机舱中，只需要一个值班人员在这里对动力装置进行监视和控制。这类船舶称为第一代自动化船。日本在 1961 年建造的“金华山丸”就是最早的这种自动化船之一。 60 年代中期，陆续发展成以无人值班机舱为核心的第二代自动化船，丹麦 1964 年在日本建造的 65 型油船“ Selma Dan”——世界上最早的夜间和假日无人值班船，这类船舶为数众多，至今仍占自动化船舶的多数。所谓“无人机舱”，就是利用自动化设备代替轮机人员在机舱值班期间的操作管理工作，从而实现在一段时间(如 8h、12h、24h 甚至 36h ）内无需人员值班。可见，“无人机舱”实际上是定期无人值班机舱。

60 年代末，自动化已经不局限机舱，进入船舶全面实现计算机控制的超自动化船——第三代自动化船的研究。这种船舶的显著特点是超出了机舱自动化范围，在导航、机舱、货物装卸、报务甚至医疗等方面实现了全面的自动化。如 1970 年 10 月日本的第一艘超自动化油轮“星光丸”投　运行，该船动力装置的一切监测信息都传输到驾驶室内的船舶指挥中心，不设机控室，计算机应用程序共 11 项：装卸货控制程序、船体状态计算程序、最佳配载程序、避碰程序、卫星导航定位程序、船位推算程序、导航计算程序、最佳航线程序、轮机记录程序、机舱故障应急处理程序、以及医疗诊断程序等。后来，日本又相继建造了“三山峰丸”等共七艘，作为超自动化的实验船。根据几年的营运情况， 1976 年对上述七艘船舶做过一项调查和总结，肯定了计算机系统在船上大多数领域的成功应用，在导航、控制货油装卸、轮机自动化方面更给予高度评价，但共用一台计算机计算，需要的软件非常复杂，难以成套，且通用性差。此外，这类船舶投资巨大，船员人数的过度减少，对正常的维修保养工作和船员的日常生活也带来一些问题。因此，未获推广。

1977 年开始对船舶的超自动化作进一步研究，于 1979 年在日本诞生了高度合理化的超自动化船，即第四代自动化船，计有“白马丸”等十四艘。这些高度合理化船均采用分散的单项计算机控制系统，以微处理机为中心，更加完善了各种控制程序，如设有最佳航次程序(包括配载、船舶纵倾、航速、燃料消耗、船期、进坞间隔、航线设计等最佳选择)。1982 年，日本还建造了世界第一艘大型声控主机的自动化船“纪川丸”，船长的口述命令，可以直接转换成操纵主机的信号，去控制操纵主机。

随着电子技术、信息技术及其它高技术的发展和在海运业的应用，海运业正朝着技术密集型、信息密集型的方向转变，但完全自动化、信息化的船舶航行管理系统仍未出现。至今为止，船舶驾驶管理的绝大部分工作还依赖于船舶驾驶员来完成，在“人 + 船 + 环境”这样一个系统中，船舶驾驶员对船舶状况、航行状态、周围环境等一般是依据其知识和航行经验定型的判断,并根据这样的判断作出决策。很明显,这种决策不一定正确,更谈不上最佳。因此,为了提高船舶航行的安全和效率，有必要研制自动化的船舶信息收集和处理系统。

随着关于气象、海况及波浪对船舶运动状态的影响的定量评价和航行操纵的定量描述等研究取得进展，随着各种高精度传感器、超大规模集成电路的开发应用，使得在船内对船舶

状况、航行环境进行定量的科学评价成为可能；又随着空间技术、通信技术的发展，使得船舶与陆地之间大信息量的交换成为可能。船舶可以获得更准确的船位、各种导航信息、气象海况数据，同时也可以将一部分原来在船上完成的工作移交给陆地部门，最终根据陆地部门的信息处理结果和船舶上的信息评价结果，给出正确决策所必须的基础信息。另外，随着计算机技术的发展，人工智能技术广泛地应用于船舶航行操纵、营运管理，集航海学科知识、船长经验之大成的专家系统，可赋予船舶智能化的逻辑思维决策功能，从而实现船舶的航行操纵和营运自动化的智能管理。这种具有高度信息收集功能和综合判断推理决策功能的船舶——智能化船舶，标志着船舶自动化的研究已进入第五个阶段。

智能化船舶的最终目标是无人操纵状态下的自动驾驶航行，因此，它就应该具有完成船舶驾驶人员所要完成的工作的能力。驾驶人员在处理航行操纵工作时，要经过信息收集一状况判断一决策这样一个过程，因此也要求智能化船舶也具有完成这一过程的相应系统。

从功能上看，系统组成可分为两大类：一是信息收集子系统；另一类是判断决策子系统。

从航行状态、区域上所使用系统来分有：航行自动化系统、进出港自动化系统、以及其他辅助系统。

连结这些系统的是综合航行管理系统，它是智能化船舶的大脑。在这个大脑里，有高容量的中央处理装置(CPU)，航行资料与计算程序构成的系统软件，以及适当的显示装置。在陆地支援系统的支持下，该系统做出最佳操船措施决策，并通过其它系统实施操船指令。

从智能化船舶的总体构成以及根据对超自动化船上各种作业进行分析得出的结论，必须改革传统的船员分工体制，甲板部、轮机部应看作是一体，船员必须是多面手，具有驾驶和轮机两个专业领域的知识。近年来，世界上一些大航运公司在购置了一定数量采用高度自动化技术的船舶后，为进一步达到缩减船员、降低营运成本和方便公司对船员的人事安排，作出了优先雇佣具有双职证书船员，并将逐步不雇佣单职证书船员的决定。这一事实充分说明了上述结论的正确性。

自 1973 年“ 广河 ”“ 大城 ”“ 大田 ”等轮作为第一批具有无人机舱船级的自动化船加入我国远洋船队以来，随着远洋船队的不断更新和发展，一批又一批具有无人机舱船级的自动化船接踵而来。目前，我国远洋与沿海船队中，许多老船逐步被淘汰，较为先进的自动化船不断增多。这些自动化船大多属于第二代，有的还配置一些独立的微处理机系统，例如自动雷达标绘仪、自动配载、轮机自动化系统等，但一般仍以在驾驶室主机遥控、机舱定期无人值班为主。随着我国远洋船队向着现代化前进的步伐，相信自动化船舶会有更大的发展。

三、船舶自动化的基本内容

船舶自动化系统主要由航海自动化系统、轮机自动化系统和船体自动化系统三部分构成。

1. 航海自动化系统是船舶自动化的重要组成部分，它包括最佳航线编制系统、自动操舵系统、自动定位系统、自动避航系统以及综合航行管理系统。这一部分内容将在本书第二篇作详细介绍。

2. 轮机自动化系统主要由主辅机的遥控与自动操作、工况参数的自动控制、集中监视与报警这三部分构成。

3. 船体自动化系统主要由船体状态计算与控制、最佳装载计算、货物装卸控制、冷藏舱温度监测、控制、报警和纪录、火警探测与自动灭火系统等组成。

第二节　航海自动化基础概述

一、自动控制理论的产生及发展概况

自动控制理论是研究各种自动控制方法共同规律的科学技术。作为一门学科，它的产生可追溯到 18 世纪中叶英国的第一次技术革命。1765 年，瓦特发明了蒸汽机，进而应用离心式飞锤调速器原理控制蒸汽机，标志着人类以蒸汽为动力的机械化时代的开始。后来，工程界用自控理论讨论调速系统的稳定性问题。1868 年发表“关于调节器”一文中指出，控制系统的品质可用微分方程来描述，系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。1872 年劳斯和 1890 年赫尔维茨先后找到了系统稳定性的代数判据，即系统特征方程的根具有负实部的充分必要条件。1892 年俄国学者李亚普诺夫发表了“论运动稳定性的一般性问题”的博士论文，提出了用适当的能量函数——李亚普诺夫函数的正定性及其导数的负定性来鉴别系统的稳定性准则，从而总结和发展了系统的经典时域分析法。

随着通讯及信息处理技术的迅速发展，电器工程师们发展了以实验为基础的频率响应分析 法，1932 年美国贝尔实验室工程师奈奎斯特发表了反馈放大器的稳定性的著名论文，给出了系统稳定性的奈奎斯特判据。尤其是第二次世界大战期间，新武器的研制和战后经济的恢复与发展，都极大地激发了人们对控制理论的研究热情，使古典控制理论日趋成熟，并获得许多应用成果。

控制理论从形成到发展至今，已经历了六十多年的历程，可分为三个阶段。第一阶段是以 40 年代兴起的调节原理为标志，称为经典控制理论阶段；第二阶段以 60 年代兴起的状态空间法为标志，称为现代控制理论阶段 第三阶段则是 80 年代兴起的智能控制理论阶段。控制理论发展的三个阶段的主要特征对照见表 1.1.1。

自动 控制理论 发展阶段对照表　　表 1.1.1

阶　段	第 一 阶 段	第 二 阶 段	第 三 阶 段
形成时间	40~50 年代	60~70 年代	80 年代以来
理论基础	经典控制	现代控制理论	智能控制理论
研究对象	单因素控制	多因素控制	多层次众多因素控制
分析方法	传递函数，频域法	状态方程，时域法	智能算子，多级控制
研究重点	反馈控制	最优，随机，自适应控制	大系统理论，智能控制
核心装置	自动调节器	电子数字计算机	智能机器系统
应用	单机自动化	机组自动化	综合自动化

经典控制理论与现代控制理论被统称为传统（或常规）控制理论。传统控制理论的共同特点是：各种理论方法都是建立在对象数学模型基础上的，或者说，传统控制理论的前提条件必须能够在常规控制理论指定的框架下，用数学公式严格地刻划出被控制对象的动态行为。对象的数学模型可以是基于微积分理论，线性代数或矢量分析。因此我们可以把所有常规控制理论方法概括地称为“基于数学模型的方法”（Mathematical Mode Based Techniques）。常规控制理论对能够得到准确数学刻划的对象进行有效的控制。

传统控制理论最适用于人造设备的参数为对象的控制系统的设计问题。而在应用于过程任务（或追求目标）的控制时，传统控制理论遇到的最大困难是模型与环境的不确定性问题。对某些不确定性问题，传统控制理论中的随机最优控制、自适应控制或鲁棒性控制可以处理，

但当模型的不确定性超出了自适应控制或鲁棒性控制所处理的范围，传统的控制理论就不能获得满意的控制效果；或着当环境的变化不能被视为随机干扰时，即使是随机最优控制方法也无能为力。随着科学技术的不断进步和工业生产的不断发展，人们发现，许多现代军事和工业领域所涉及的被控过程和对象都难以建立精确的数学模型，甚至根本无法建立数学模型。如社会经济系统，生物医学系统等。即使对有些对象和过程可以建立模型，但由于极其复杂，难于实现高性能的有效控制。基于数学模型的传统控制理论面临着强有力的挑战。

在传统控制理论形成和发展进程中，特别是在传统控制理论遇到困难时，人们已经开始注意到开辟控制理论的新途径——避开数学模型，直接用机器模仿工程技术人员的操作经验，实现对复杂过程的有效控制。实际上，这正孕育着新的一代控制理论—— 智能控制诞生。但是由于社会发展水平和科学技术发展水平的制约，智能控制实际上在 80 年代才开始形成，并有较大发展。

二、自动控制理论的基本内容

从自控理论的发展概况可知，自控理论的基本内容由经典控制、现代控制及智能控制三大部分构成。船舶自动化正是伴随着自控理论及计算机的发展，从单元自动化逐步发展到至今的大规模的智能化船舶的研究阶段。

鉴于航海自动化主要应用现代控制及智能控制，也限于篇幅，本书着重介绍这两部分的内容。对于经典控制，只取控制理论中最基本的、并与控制理论相关的概念和原理部分，如自动控制系统的基本概念、基本组成及原理、主要性能及基本方法等。对于现代控制为本书重点的自控理论部分，将在第三至第六章分别介绍状态空间分析、确定性系统的最优控制、状态最优估计与参数辨识及随机控制与自适应控制。对于智能控制部分，主要介绍智能控制的基本概念，同时简要介绍专家控制、模糊控制、神经控制及仿人智能控制，使读者对上述控制的基本原理及特点有初步的认识。

第一章　习题与思考题

1. 什么叫自动控制？什么叫船舶自动化？
2. 船舶自动化可分为哪几个发展阶段？各个发展阶段有什么特点？
3. 船舶自动化包括哪些基本内容？航海自动化由哪几部分组成？
4. 自控理论的发展可分为哪几个发展阶段？
5. 自控理论的基本内容主要由哪几个部分构成？

第二章　自动控制系统

第一节　自动控制系统的基本概念与组成

一、基本概念

被控对象　是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。如电机、锅炉、机床、飞行器、船舶及工业生产过程等。

控制装置　也称控制器，是指对被控对象起控制作用的装置的总称，目的是使被控对象完成既定任务。

自动控制系统　它是由控制装置和被控对象组成的，以某种规律或互相依赖的方式结合为一个有机整体，并使被控对象工作状态能自动控制。

被控量　在自动控制系统中，按给定的要求要加以控制的物理量，也称输出量。

控制量　作为被控量的控制信号，而加给自动控制系统的输入量。

干扰量　也称扰动量，在自动控制系统中，是使被控量偏离期望值的不利因素。如果干扰产生于系统的内部叫内部干扰，干扰产生于系统的外部叫外部干扰。扰动作用于系统中的任意部位，一般作为输出的偏差加以反映。

二、开环控制系统

开环控制　是指组成系统的控制装置与被控对象之间，只有顺向作用而没有反向联系的控制。

图1.2.1a)所示的炉温控制系统(电阻丝加热电炉)是一个开环控制系统,方块图如图1.2.1b)。炉子就是被控对象。炉温T是被控量(或称输出量)。转动调压变压器的滑臂K可改变控制量V_i从而调节炉温。这种控制系统当工作条件变化时，例如炉门开闭的次数变化，外界环境温度的变化,电源电压的变化等,都将使被控量(炉温T)不能保持在希望的数值(目标值)上。

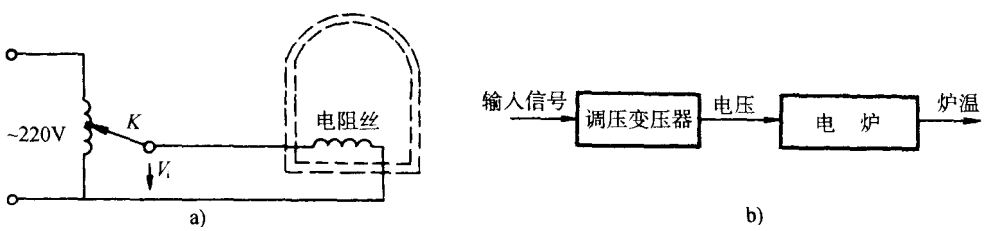


图 1.2.1　炉温控制系统

开环控制系统的特点　上述分析可知,系统输出量(被控量)对系统输入量(控制量)不发生影响，不需要对输出量测量，所以具有系统结构简单、控制容易实现等优点。它的问题是：对存在变化规律无法预测的干扰，往往无法实现控制，即没有反作用，因此，当开环系统存在干扰的情况下,控制精度低,抗干扰性能差。为保证系统精度高,组成系统的每一个部件(或

元件)质量要好,但部件或元件的高精度往往难以保证。

三、闭环控制系统

在开环控制的基础上，为了解决上述矛盾，人可以直接参与系统工作，通过观察实际炉温，然后根据实际炉温偏离希望炉温的高低来操纵调压器的滑动臂 K，改变控制电压的大小，从而使炉温保持在希望值。这里人的作用就是测量输出并改变输入的任务。为实现自动控制，只能用元部件代替人的作用。图1.2.2 a)电阻丝加热炉的闭环控制系统，方框图如图1.2.2 b)所示。系统中的热电偶用来测量炉温，并将炉温 T 转变成相应的电信号，再与给定的信号电压进行比较,相减得到的偏差 e，表示实际炉温和希望的炉温值之差，经电压和功率放大后驱动电动机去调节调压变压器的滑动臂改变控制量 V_1，从而使被控量 T 向目标值靠近。

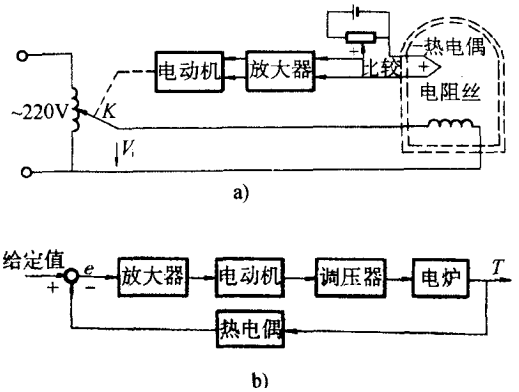


图 1.2.2　电阻丝加热炉的闭环控制系统

闭环控制　是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用，又有反向联系的控制。它的控制过程大致为：对被控(输量出量)进行测量,并与控制信号(输入量)进行比较,得到偏差信号；偏差信号进行处理(放大与变换），利用变换与放大后的偏差信号产生控制作用；这个控制作用使被控量(输出量)做与原来相反的方向运动。这种利用偏差产生控制作用,达到消除(或减小）偏差的控制原理，亦即“检测偏差用以修正偏差”的原理叫反馈原理。如果经过反馈使系统偏差增加，即为正反馈，它不能达到自动控制的目的，所以一般地说，反馈控制系统都是负反馈。

闭环控制系统的特点　通过闭环，随着扰动而变化的直接驱动信号，使输出恢复到扰动前的状态，因此对扰动有补偿、抵抗的能力；能用精度低的元件（或部件）组成精度较高的控制系统；因为闭环后可能超调、振荡，所以稳定性问题很重要，为此，在系统中通常要加入校正元件(环节)。

四、控制系统的基本组成

综上所述，一个闭环控制系统由以下几个部分组成：

测量元件　它是对系统输出量(被控量)进行测量的元件,必要时还起信号变换的作用。

比较元件　它是用来对系统输出量与输入量进行代数运算并给出偏差信号的元件，起信号综合、比较和变换的作用。

放大元件　它被用来对微弱的偏差信号进行放大，使其输出足够大的幅值和功率。

执行机构　它根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，使输出量和目标值趋

于一致。

被控对象　它是指自动控制系统中需要进行控制的机器、设备或生产过程。

校正元件　实践证明，按反馈原理由上述元件组成的闭环控制系统，往往不能完成任务。例如船用自动舵，若简单的通过检测航向偏差，经过处理后直接作为舵角控制信号，操纵舵机工作，试图达到修正航向偏差的目的，那将是徒劳的。这是因为系统内部存在不利控制的因素：由于有干摩擦、死区，系统输出并不马上反映输入，只有当偏差信号达到一定程度时系统才有反应；由于惯性的存在，在反应控制信号的过程中还可能产生振荡，严重时，会破坏系统正常工作。为了使系统能正常工作，要加入能消除或减弱上述不利影响的一些元件，把这样一类元件称为校正元件。其参数或结构可以调整，用于改善系统性能。例如船用PID自动舵，所谓PID就是指自动舵中采用比例、积分和微分操舵规律的校正器或控制器，也就是这里所谓的校正元件。

第二节　自动控制系统的数学模型

一、数学模型的定义

对于系统的设计和分析,系统的动态性能是最重要的。为了研究分析系统的特性需要建立系统的数学模型。所谓模型,是系统物理特性的数学抽象。或者换句话说,表征系统的特性的数学表达式称为系统的数学模型。因此,控制系统的数学模型是可以描述系统内部各物理量(或变量)之间关系的数学表达式。在静态条件下(即变量的各阶导数为0)得到的数学模型称为静态模型；而用微分方程描述的、各变量在动态过程中的关系称为动态模型。许多动态系统，不管它们是机械的、电气的、热力的、液压的，还是经济学的、生物学的等，都可以用微分方程加以描述。

例如船舶在小舵角作用下，船舶回转运动微分方程为：

$$J\frac{\mathrm{d}^2\phi}{\mathrm{d}t^2}=KV^2\beta \tag{1-2-2-1}$$

式中：J ——船舶绕回转轴的转动惯量；

ϕ ——船舶回转角(偏航角)；

K ——与船舶结构有关的系数；

V ——船舶速度；

β ——偏舵角。

式(1-2-2-1)就是一个描述上述各变量相互关系的数学表达式，目前在船上普遍使用的PID自动舵,就是按上式作为被控对象——船舶的数学模型来加以分析研究的。

二、建立数学模型的方法

建立系统的数学模型通常有两种方法：即分析法和试验法。分析法就是根据系统内部已知的规律，例如机械系统中的牛顿定律，电气系统中的克希霍夫定律等，直接推导出系统的数学方程。如图1.2.3所示的RLC 网络中,若输入电压$v\ (t\ )$ 已知，欲求解网络电流，假如元件具有理想的特性，由克希霍夫电压定律(KVL)可以建立如下微分方程式：

$$LC\frac{\mathrm{d}^2i}{\mathrm{d}t^2}+RC\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+i=C\frac{\mathrm{d}vi(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-2-2-2}$$

这就是由电阻器、电容器与线圈串联组合系统的数学模型。系统模型的建立是有一定条件的，对于同一物理系统，在不同条件之下，可以得到不同形式的数学模型。严格地讲，只能得到近似的模型。例如，前面介绍的图1.2.3与式(1-2-2-2)只是在工作频率较低，而且L、C元件损耗相对很小的情况下的近似。如果考虑电路中的寄生参数，如分布电容、引线电感和损耗，而且工作频率较高，则系统模型要变得十分复杂，图1.2.3与式(1-2-2-2)就不能应用。再如，前面提到的传统的PID自动舵所采用的船舶回转运动数学模型式（1-2-2-1），只是小舵角作用下的近似。如果考虑船舶在大舵角作用下的运动，式（1-2-2-1)就不适应了。通常采用，诺莫托船舶动力学模型：

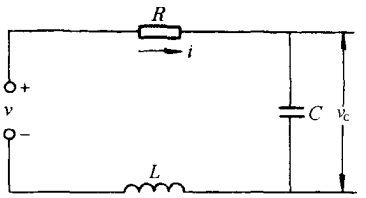


图 1.2.3 R-L-C 网络

$$\dddot{\phi}+a\ddot{\phi}+k'(a\dot{\phi}^3+b\phi)=k'\beta \tag{1-2-2-3}$$

式中：a_1、a、b、k' 近似为常数；ϕ、β含义同前。进一步研究各种不同系统的数学模型后，可以看出，对于不同的物理系统，经过抽象和近似，可能得到形式上完全相同的数学模型。在力学系统中，可以找到其数学模型与这里的电路方程的形式完全相同的对应系统。例如图1.2.4的机械位移系统，设位移x是系统的输入[m]，位移y是系统的输出[m]，M是质量[kg]，F是粘性摩擦系数[N/(m/s)]，k是弹簧常数。如果设f [N]为作用在质量M物体的弹簧伸长力，则由牛顿定律可得：

$$M\frac{d^2y}{dt^2}=f-F\frac{dy}{dt} \tag{1-2-2-4}$$

根据胡克定律又有：

$$f=K(x-y) \tag{1-2-2-5}$$

由式(1-2-2-4)和式(1-2-2-5)得：

$$M\frac{d^2y}{dt^2}+F\frac{dy}{dt}+Ky=Kx \tag{1-2-2-6}$$

公式(1-2-2-6)与式(1-2-2-2)的形式完全相同，说明了同一数学模型可以描述物理外貌截然不同的系统。

用分析法建立数学模型时，对于对象中出现的物理过程或化学过程，需要有十分详尽的了解，所得到的数学模型称为机理模型。

但是，有些复杂对象，人们对其规律的认识还很不清楚，或者其中某些重要的参数不能准确确定，例如热传导系数，化学反应速率等等。在这种情况下机理模型事实上很难推导出来，只能采用实验法来加以确定。实验法就是系统辨识的方法，它是一种利用输入输出数据建立受控系统（对象）数学模型的方法（系统辨识将在本篇第五章第三节作介绍）。值得指出的是：实验所得的模型只反映输入和输出之间的特性，对系统内在的信息反映不出来。因此，机理模型可以弥补实验法所得的模型在反映内在机理方面的不足。在条件许可的情况下，应该同时用实验法和分析法建模，以便取长补短，互相补充。

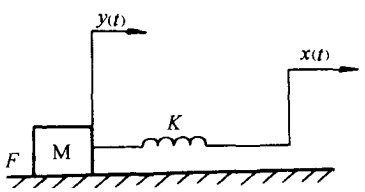


图 1.2.4

第三节　自动控制系统的分类

一、根据系统数学模型的差异来划分

连续时间系统与离散时间系统　若系统的输入和输出都是连续时间信号，则称此系统为连续时间系统。若系统的输入和输出都是时间间隔相同的离散时间信号，则称此系统为离散时间系统。

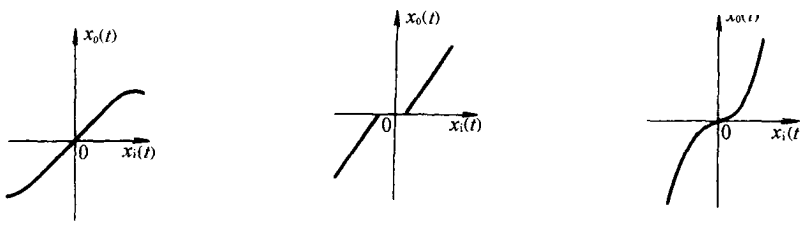
连续时间系统的数学模型常用微分方程描述,即为：

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \cdots\cdots + a_{n-1} y' + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \cdots\cdots + b_{m-1} x' + b_m x \qquad (1\text{-}2\text{-}3\text{-}1)$$

其中 x 代表输入函数，y 代表输出函数。而离散时间系统则用差分方程描述，在此略。

线性系统与非线性系统　如果系统的数学模型是线性的，这种系统就叫线性系统。如果微分方程的系数是常数，那么这种系统叫做线性定常系统。线性系统的最重要特性是叠加性，所谓叠加性是指当几个输入信号同时作用于系统时，总的输出响应等于每个输入单独作用所产生的响应之和。因此，线性系统对几个输入量的响应，可以一个一个地处理，然后对它们的响应结果进行叠加。由于这一特性，就能够由一些简单的解，得到线性微分方程的复杂解。在动态系统的实验中，如果输入量和输出量成正比，就意味着满足叠加性，因而可以看成线性系统。而不满足叠加性的系统或用非线性方程表示的系统，　叫非 线性系统。

虽然许多物理关系常以线性方程来表示，但是在大多数情况下，实际的关系并非真正线性的。事实上，对物理系统进行仔细研究后可以发现，只能在一定的工作范围内，保持真正的线性关系。例如，在大信号作用下，元件的输出量可能饱和，但元件中可能存在死区，影响小信号的正常工作 在某些元件中,可能还存在着平方律非线性,这些非线性系统如图 1.2.5所示。



a)饱和非线性曲线　　b)死区非线性曲线　　c)平方律非线性曲线

图1.2.5　各种非线性因素的特性曲线

非线性系统的最重要特性，是不能应用叠加原理，因此处理问题比线性系统要复杂得多。

时变系统与时不变系统　如果系统的参数不随时间而变化，则称此系统为时不变系统（或非时变系统、定常系统）,如果系统的参数随时间变化,则称其为时变系统(或参变系统)。在控制系统中，最常见的系统是线性定常系统（连续和离散），由于这种系统分析最简便，因此，某些非线性系统在条件许可的情况下，都尽可能简化为线性系统来处理。

二、根据控制系统的对象及其控制任务的不同来划分

1. **定值控制系统(自动镇定或调节系统)**系统的输入即控制信号是常值,或随时间缓慢的变化，系统的基本任务是在存在着扰动的情况下，使系统输出保持在给定的目标值上。船舶航向保持自动操舵仪、自动调速系统、前述的温度控制系统、及稳压、稳流的控制系统，均

属定值控制系统。

2. 随动控制系统(自动跟踪系统)系统的输入即控制信号是任一随时间变化的函数(事先无法预测其变化规律），系统的任务是保证系统的输出量以一定的精度跟随输入的变化而变化，所以也称自动跟踪系统。陀螺罗经的随动系统、导弹发射架的控制、工作机械的位置控制均是随动控制系统。

3. 计算机控制系统：由于数字计算机的迅速发展和不断完善，它的强大计算能力和信息处理能力给自动控制以极大的促进，计算机在自动控制系统中的应用不仅引起了量的变化，并且引起了质的变化。

从量变的角度来看，就是从单个生产环节的自动化发展到整个生产线的自动化，并向整个工厂、整艘船舶的自动化发展，实现综合自动化。电子计算机在整个自动控制中起着大脑的作用。

从质变的角度来看，着眼于建立高质量的控制系统：

最优控制‘最优’是指使控制系统实现对某种性能指标(称为目标函数)为最佳(即目标函数为最大或最小）的控制。例如船舶在海上航行希望在确保安全的前提下航行时间最短；钢铁冶炼过程往往希望时间最短或燃料最省；远程飞机希望实现每单位体积燃料的最大飞行距离；人造卫星运载火箭希望实现燃料消耗最省等。

自适应控制　系统能够在外部或内部条件不断变化情况下，不断地改变自身的结构和参数，使系统始终具有良好的性能。

自学习控制　具有辨识、判断、积累经验和学习的功能。在控制系统的特性事先不能确切知道，或不能确切地用数学方法描述时，采用自学习控制可以在工作过程中不断地测量、估计系统的特性,并决定最优控制方案,实现性能指标最优控制。

由于最优控制、自适应控制和自学习控制这些具有高质量的控制系统，比起一般的控制系统需要更大的计算工作量，依靠人工计算根本不可能实现，所以高质量的控制系统也只能在应用计算机的情况下方能实现。这里，计算机不只是作为计算工具，而是作为系统的核心部件参与工作，以完成高精度复杂系统的控制。

第四节　　自动控制系统的传递函数和方块图

系统的传递函数对我们分析较为复杂的控制系统是一种极为有用的工具。而拉氏变换是建立传递函数概念的数学基础，也是求解微分方程的有效方法，因此先简略介绍拉氏变换的定义、物理意义、性质及适用对象，以使读者认识拉氏变换的意义和作用。

一、拉氏变换有关知识

拉氏变换　函数$f(t)$的拉氏变换 $L[f(t)]$定义为：

$$F(s)=L[f(t)]=\int_0^{\infty} f(t)e^{-st}\mathrm{d}t$$

其中：$f(t)$当$t<0$时,有$f(t)=0$; 当$t>0$时,分段连续 当$t\to\infty$，$f(t)$不比指数函数增大更快。

s为复数：$s=\sigma+j\omega$

拉氏变换对$f(t)$的要求是很宽的，事实上在控制系统中通常所遇到的$f(t)$都能满足上述

要求。

拉氏逆变换　由函数的拉氏变换式$F(s)$求原函数的数学运算叫做拉氏逆变换，记为：

$$L^{-1}[F(s)]=f(t)$$

理论上求$F(s)$的拉氏逆变换可由下式得到：

$$f(t)=L^{-1}[F(s)]=\frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty}F(s)e^{st}\mathrm{d}s \qquad (t>0)$$

上述积分比较复杂。事实上，在自动控制系统中常见的$f(t)$和其对应的拉氏变换式$F(s)$都已编进拉氏变换表之中，可以查找拉氏变换表求$f(t)$的拉氏变换$F(s)$。在工程上求复杂函数的原函数时，通常用部分分式展开法将复杂函数展成简单函数之和，再由拉氏变换表求原函数$f(t)$。

拉氏变换的物理意义为了说明问题，先回顾电工学中，非正弦周期信号作用下交流电路的分析。具体做法是将非正弦周期信号展开成三角级数，亦即傅里叶级数,简称傅氏级数。这种展开的结果，把一个复杂的周期运动变成许多不同频率的简谐振动的迭加。因此，利用叠加原理，将不同谐波分量的信号分别作用于电路上，再把结果叠加起来，即可得总的结果。在系统分析中，还会遇到各种非周期非正弦信号，这种信号可以看作周期无穷大的周期信号，一样可以采用展开为傅里叶级数，再求极限的方法（令$T\to\infty$),从而导出非周期信号频谱的表达式：

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}\mathrm{d}t$$

$$f(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)e^{j\omega t}\mathrm{d}\omega$$

称为傅里叶变换或简称付氏变换。

从拉氏变换和付氏变换的定义式可以看出，拉氏变换可以理解为付氏变换的推广，或称广义的傅里叶变换。对比两种变换对，拉氏变换将$e^{j\omega}$扩展为具有复变量s的指数$e^{st}(s=\sigma+j\omega)$,也即把时间函数$f(t)$看作无穷多项e^{st}之叠加。两者的区别在于傅氏变换建立了时域与频域ω间的联系,而拉氏变换则建立了时域与复频域(s域)之间的联系,这就是拉氏变换的物理意义。

从物理意义上看，ω只能描述振荡的重复频率,而s不仅能给出重复频率,还可以表示振荡幅度的增长速率或衰减速率，使描述的运动状态更具有真实性。

综上分析，由非正弦周期信号展开成付氏级数到各种非周期非正弦信号的傅氏变换与拉氏变换，从数学上看仅是一种变换的手法，其共同目的在于方便系统的分析。因为通过各种变换,可以把各种不同的信号化为由各种频率分量组成的正弦信号,再根据线性系统的叠加性,便可得出最后的结果。可见，拉氏变换只适用于线性定常系统的分析。

拉氏变换的性质　这里只列举一些在应用拉氏变换求解微分方程中极为有用的性质，从中可以进一步看出拉氏变换的优越性。

(1)线性性质

$$L[Af_1(t)\pm Bf_2(t)]=A\,L[f_1(t)]\pm B\,L[f_2(t)]$$
$$=A\,F_1(s)\pm B\,F_2(s)$$

(2)微分性质

$$L\left[\frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]=SF(s)-f(0)$$

其中：$f(0)$为$f(t)$在$t=0$时的值（$f(t)$的初值）

同样地 $L[\frac{d^2f(t)}{dt^2}]=s^2F(s)-sf(0)-\frac{df(0)}{dt}$

其中：$\frac{df(0)}{dt}$为$\frac{df(t)}{dt}$在$t=0$时的值（$\frac{df(t)}{dt}$的初值）。

(3)积分性质

$$L\left[\int f(t)dt\right]=\frac{F(s)}{s}+\frac{\int f(0)dt}{s}$$

上述性质表明，时域中复杂的微积分函数的运算，经拉氏变换后，转换到复频域中成为简单的代数运算，这也是拉氏变换优越性所在。

二、传递函数与方块图

在控制理论中，为了描述某一局部或系统的输入和输出的关系，表示整个系统中所起的作用，常常用到传递函数的概念。

传递函数　定义为初始条件为零时，输出量(响应)的拉氏变换与输入量(激励)的拉氏变换两者之比。

设系统的微分方程为：

$$a_0y^{(n)}+a_1y^{(n-1)}+\cdots\cdots+a_{n-1}y'+a_ny=b_0x^{(m)}+b_1x^{(m-1)}+\cdots\cdots+b_{m-1}x'+b_mx$$

式中y是系统的输出量，x是系统的输入量。将上述微分方程的两边进行拉氏变换，考虑到传递函数的定义中规定初始条件均为零，则有：

$$(a_0s^{(n)}+a_1s^{(n-1)}+\cdots\cdots+a_{n-1}s+a_n)Y(s)=(b_0s^{(m)}+b_1s^{(m-1)}+\cdots\cdots+b_{m-1}s+b_m)X(s)$$

传递函数

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_0s^{m+b}1s^{m-1}+.....+b_{m-1}s+b_m}{a_0s^n+a_1s^{n-1}+.....+a_{n-1}s+a_n}$$

上式说明应用了拉氏变换，将时域的输入和输出之间的复杂关系(微分和积分运算)变成了复频域中的简单关系(代数运算)。

传递函数性质

(1)$G(s)$描述既适用于元件，也适用于系统。它是描述其动态特性的一种关系式，与系统或元件的运动方程相对应。

(2)$G(s)$是通过复数形式来表征系统和元件的内在性质工具，与外作用无关，换句话说，传递函数仅与系统本身的特性有关，即与方程的系数a_0、$a_1\cdots\cdots a_n$、b_0、$b_1\cdots\cdots b_m$有关，而与输入量x无关。这一点对我们研究各种输入下的响应是极为有利的。

(3)$G(s)$是从实际物理系统出发，用数学方法抽象出来的，但是，它不代表系统或元件的物理结构，许多物理性质不同的系统或元件可以具有相同的传递函数。

(4)$G(s)$是复变量的有理分式，分母多项式的最高阶次n高于或等于分子多项式最高阶次m，即$n\geq m$这是因为实际系统或元件总具有惯性，以及能源为有限所致。习惯上以传递函数分母中s的最高阶数n来定义系统的阶数，常称该系统为n阶系统。

三、方 块 图

1. 方块图的组成　控制系统可以由许多元部件所组成，为了表明每一元部件在系统中的功能，常常采用方块图的方法。如图 1.2.6所示为一个方块图单元。

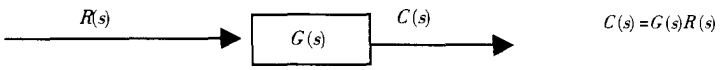


图1.2.6　方块示意图

$R(s)$ 为该单元输入的拉氏变换，$C(s)$为输出的拉氏变换，该单元的功能是以传递函数$G(s)$给出的，箭头表明信号的流向，也就是说信号只能沿箭头所指的方向通过。输出和输入的因果关系用上式表达。

在系统的方块图中，可以通过上面这样的方块图单元以及一些简单的符号（图 1.2.7中的相加点、分支点等),将所有的系统变量联系起来,下面我们以标准形式闭环系统为例说明之。

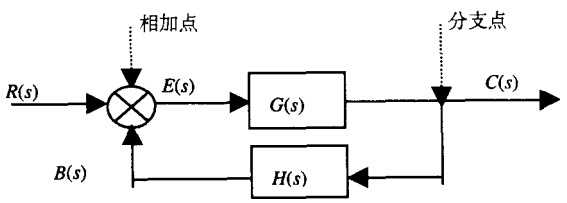
图中,$R(s)$为输入量(拉氏变换表达式,以下同)，$C(s)$为系统输出量，经过反馈环节$H(s)$得到反馈信号$B(s)=H(s)\cdot C(s)$ ，反馈信号在相加点与输入信号相比较，结果为作用误差信号$E(s)=R(s)-B(s)$,并通过$G(s)$产生输出 $C(s)$。

下面，我们介绍几种经常用到的传递函数的概念。对于图 1.2.9的标准形式闭环系统,前向通道传递函数$G(s)$、反馈通道传递函数$H(s)$、闭环传递函数 $\Phi(s)$分别由以下式子定义，即

$$G(s)=\frac{C(s)}{E(s)}$$

$$H(s)=\frac{B(s)}{C(s)}$$

$$\Phi(s)=\frac{C(s)}{R(s)}=\frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$



1.2.7　标准形式闭环系统方块图

在实际绘制方块图中,首先列出系统图中描述每一元件动态特性的微分方程，然后用拉氏变换得到其传递函数，这就是该元件的方块图单元，最后将这样的方块图单元结合起来，并且加以简化，构成系统的方块图。

2. 方块图的特点

方块图也是从实际物理系统抽象出来的信号关系，不代表系统或元件的物理结构；元部件功能、相互关系、流向是单向不可逆的，只有依据信号流向连接起来，方块图才有效；一定系统的方块图不是唯一的，由于分析角度不同，同一系统可画出不同方块图。

3. 几种典型元部件的传递函数

比例环节(放大环节)它的传递函数形如 K的环节。图 1.2.8所示，这种环节输出量与输入量保持一定的比例关系。

微分环节　传递函数Ts、$Ts+1$、$T^2s^2+2\xi Ts+1$ 等的任何一种环节都称微分环节，它们分别称为纯微分环节、一阶微分或比例加微分环节和二阶微分环节。上述环节因输出量中均包含有输入量的微分，也即传递函数中均含有 s 的项，因而称为微分环节。测速发电机、$R—C$微分由路 等都是经常采用的微分环节。

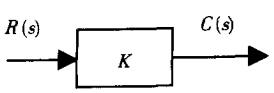


图 1.2.8　比例环节方块图

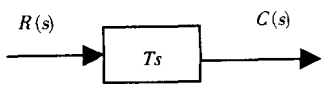


图1.2.9　纯微分环节方块图

积分环节　传递函数形如 $1/Ts$ 的环节(图 1.2.10)称积分环节,因为这种环节的输出量是输入量的积分。转子转动惯量足够小的何服电机、 R-C 积分电路等都是积分环节。

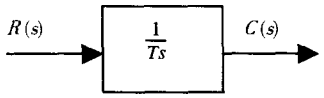


图 1.2.10　积分环节方块图

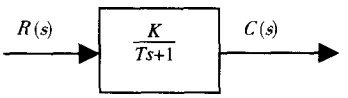


图 1.2.11　惯性环节方块图

惯性环节　传递函数形如图 1.2.11所示，$K/(1+Ts)$的环节称惯性环节(若是系统则称为一阶系统)也可称为一阶环节。这里的惯 性二字是因为这种环节具有惯性的缘故，系统往往都具有储能元件。电路网络中的 R-C 电路，直流他激电动机、热力学系统等都是惯性环节。传递函数 $K/(1+TS)$中的 K称为增益、T 称为惯性环节的时间常数。

二阶环节　传递函数形如图 1.2.12所示的环节，因为传递函数分母的最高阶次为 2故称二阶环节。对二阶环节 ,若 $\xi>1$,令分母等于零，则可得 s 的二个实根,此时二阶环节可分解成二个惯性环节。若 $\xi<1$,还令分母等于零时，则可得 s 的二个共轭复根,此时的二阶环节则称为振荡环节。此时环节的输出将是振荡的。

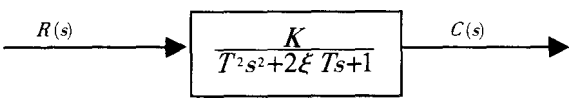


图 1.2.12　典型二阶环节方块图

第五节　　自动控制系统的基本分析方法

在确定系统的数学模型后，可以用几种不同的分析方法分析系统的性能。在经典控制理论中。基本的分析方法有三种，它们是系统的时域分析法、频域法和根轨迹法。

时域分析法要求求解系统的微分方程，其解则为系统的动态特性和稳态性能，俗称系统的时间响应。根据微分方程理论,微分方程的解是由两部分组成:一是系统的稳态响应,二是系统的瞬态响应,前一部分决定了系统的稳态程度,后一部分决定了系统的动态指标,有时也称为动态品质。闭环系统的稳定性、动态特性等,主要是从系统的瞬态响应来分析的。不过,在实际工作中,稍微复杂的一些系统,譬如三阶以上的系统,微分方程很难解出,因此就很难用瞬态响应来分析系统的动态性能,这时就要用一些间接的方法来解决问题,频域法(频率响应法)和根轨迹法就是古典控制理论最常用的两种间接的方法。因古典理论不属本书讨论的范围，有兴趣的读者可参阅参考文献[3]。

一、对控制系统的一般要求

为了实现自动控制的基本任务，必须对系统在控制过程中所表现出来的行为提出要求，对控制系统的基本要求，通常是通过系统对输入特定信号（或叫试验信号）的响应，例如单位阶跃信号的过渡过程及稳态的一些特征来表示。其基本要求可综述为三个方面，即系统的稳定性、动态特性和稳态特性。

1. 系统的稳定性

当系统受到外来作用时,系统的输出量产生的过渡过程随时间的推移而衰减,而回到(或接近）原来的稳定值，或跟踪变化了的输入信号，则称系统稳定。反之，输出量过渡过程随时间的推移而发散或持续等幅振荡，则称系统不稳定。

2. 系统的动态特性

由于系统的对象和元件通常都具有惯性或贮能特性的元件（如电磁惯性、机械惯性），又由于能源功率的限制，系统中的各物理量，如电压、电流、温度等的变化不可能突变。因此，系统从一个稳定状态过渡到另一个新的稳定状态，都需要经历一个过渡过程，它反映了系统的动态特性，通常用能描述过渡过程的特征值来表示。现以单位阶跃信号作用下，典型二阶控制系统的过渡过程来说明，如图1.2.13所示。

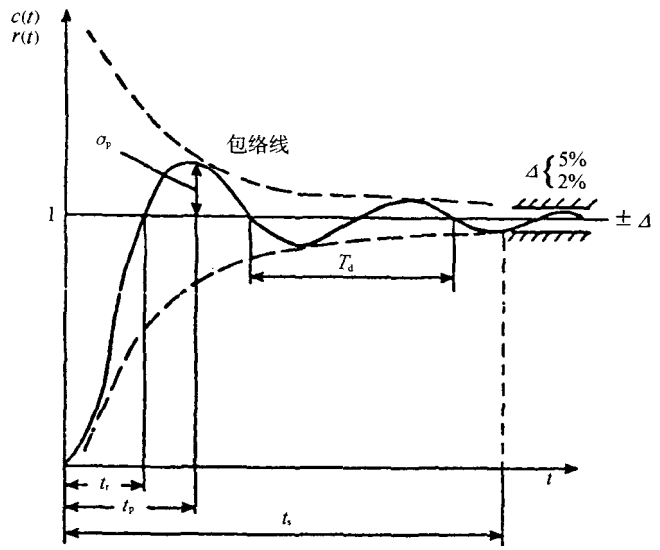


图 1.2.13　单位阶跃响应特性

(1)系统上升时间t_r：系统过渡过程首先达到新的状态所需的时间，它是说明系统反应速度的。

(2)系统超调量σ。：对于稳定系统而言，系统过渡过程的第一次超调量为最大，第一个超调的峰值和系统的稳态值之比的百分比定义为系统的超调量。它是说明系统阻尼性的即振荡性的。阻尼大振荡小，即超调量小，说明系统过渡过程进行得比较平稳。不同的控制系统，对超调量要求也不同，一般最大超调量M_p不超出50%，如一般调速系统，σ_p=10%~35%。

(3)系统的过渡过程时间t_s：它是从给定输入作用于系统开始，到输出量进入离期望值的±5%(或±2%)区域所需的时间。当$t \geqslant t_s$时，则有

$$| c(t)-c(\infty) | \leqslant \Delta \quad (\Delta=0.05\text{或}\ \Delta=0.02)$$

过渡过程时间t_s是说明系统惯性的，反映了系统反应速度，如造纸机t_s=0.3。

(4)系统振荡次数N：它是指过渡过程时间内，输出量在期望值上下摆动的次数。振荡次数N小，说明阻尼性好。如普通机床N=2~3次；造纸机传动N=0，即不允许有振荡。

3. 系统的稳态特性

对于稳定系统，输出的稳态值与其期望值之间出现的偏差称为系统的稳态误差e_{ss}。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度，说明了系统的准确程度。系统的稳态误差必须满足对系统精度的要求。

综上，对控制系统的性能要求，可归结为稳定性好、动作快(即快速性好)、精度高。

二、典型二阶系统的时域分析

现代控制理论的系统分析法是采用状态分析法、状态分析法的实质就是时域分析法，因此，下面将对时域分析法作一简介。

由于许多高阶系统的时间响应常常可用二阶系统的时间响应来近似，而系统的动态指标都是以系统在单位阶跃输入下的瞬态响应定义的，作为例子，亦为实际了解一种自动控制系统的时城分析方法，下面利用二阶系统的传递函数，分析研究典型二阶系统在单位阶跃输入下的瞬态响应以及动态和稳态性能指标。

任何一个典型的二阶系统，都可以用一个标准的闭环传递函数来表示。

$$G(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{\omega^2_n}{s^2+2\xi\ \omega_n s+\omega^2_n}$$

其中参数 ω_n称无阻尼自然振荡频率，ξ称阻尼系数,这些参数的命名,是由随动系统(位置控制系统）中的物理意义而获得的。在其它具有不同物理意义的二阶系统中，这些参数都具有其不同的含义。获得这些参数的器件和手段也不相同,不过在分析二阶系统时,其数学模型是相同的,都可以统一考虑。由 $Y(s)=\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2}R(s)$ ，利用拉氏逆变换可以求出典型二阶系统对单位阶跃信号的响应。$Y(s)$式分母等于0的方程，是系统的极点方程，亦称系统的特征方程，为 $S^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2=0$。特征方程根的性质直接影响到系统的响应，而根的性质又依赖于系统的参数,下面着重分析系统参数 ξ 的变化对系统响应的影响结果：

情况一： $\xi>1$(过阻尼),特征方程的根为二个不相等的实根,系统的阶跃响应为：

$$y(t)=1+\frac{1}{2\sqrt{\xi^2-1}(\xi^2+\sqrt{\xi^2-1})}e^{-(\xi+\sqrt{\xi^2-1})\omega_n t}-\frac{1}{2\sqrt{\xi^2-1}(\xi+\sqrt{\xi^2-1})}e^{-(\xi+\sqrt{\xi^2-1})\omega_n t}$$

情况二： $\xi=1$(临界阻尼),特征方程的根是二个相同的实根,系统的阶跃响应为：

$$y(t)=1-e^{-\omega nt}-t(1+\omega_n t)$$

情况三： $0\leqslant\xi<1$(欠阻尼),特征方程的根为一对共轭复根，系统的阶跃响应为：

$$y(t)=1$$

情况四： $\xi=0$(无阻尼)特征方程的根为一对虚根,系统的阶跃响应为：

$y(t)=1-\cos\omega_n t$ 是一个等幅振荡角频率为 ω_n,由于 $\xi=0$表示无阻尼,故 ω_n称为无阻尼自然振荡频率。

我们可以用一组曲线来表示典型二阶系统在单位阶跃输入下的瞬态响应。从图1.2.14中可以看到,当 $\xi>1$，系统比较迟缓地达到稳态，瞬态过程经历的时间较长；当 $\xi<1$ 时,系统响应超出稳态值，经过几次幅值衰减的振荡后，达到稳态；当 ξ在0.5与0.8之间时，系统能比临界阻尼或阻尼状态更快地达到稳定值，所以一般控制系统中，ξ值总是设计在0.7左右。

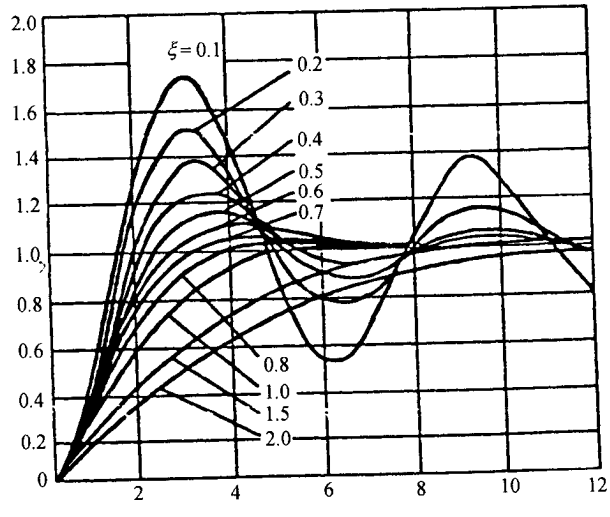


图 1.2.14　阶跃输入下二阶系统的响应曲线

从上面分析可知，随着系统参数的改变，控制系统的性能也要作相应的变化。对于不同的控制系统,由于使用条件的不同,都有其特定的要求。譬如载人的电梯,要求平稳,不能振荡,而停车时稍为迟缓一些则是允许的；而对别的一些机械定位系统，往往又要求定位迅速,而稍微有一点振荡倒是许可的。当分析中发现系统性能不满足要求时，则可通过调整系统参数，使系统输出响应满足系统提出的动态特性（如前述