

LUNJI ZIDONGHUA JICHU

# 轮机自动化基础

主编 贾宝柱 韩学胜

主审 李世臣



大连海事大学出版社

# 轮机自动化基础

主 编 贾宝柱 韩学胜

主 审 李世臣

大连海事大学出版社

© 贾宝柱 韩学胜 2011

### 图书在版编目 (CIP) 数据

轮机自动化基础 / 贾宝柱, 韩学胜主编. —大连: 大连海事大学出版社,  
2011.3

ISBN 978-7-5632-2545-3

I. ①轮… II. ①贾… ②韩… III. ①轮机—自动控制系统 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 032877 号

### 大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路1号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: [cbs@dmupress.com](mailto:cbs@dmupress.com)

大连华伟印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2011年3月第1版

2011年3月第1次印刷

幅面尺寸: 185 mm × 260 mm

印张: 16.5

字数: 417 千

印数: 1~1500 册

责任编辑: 姜建军

版式设计: 晓江

封面设计: 王艳

责任校对: 沈荣欣

ISBN 978-7-5632-2545-3

定价: 35.00 元

# 前 言

《轮机自动化基础》主要面向轮机管理专业成人教育本科、专科开设轮机自动化课程使用。本书在原有《轮机自动化》教材的基础上进行了一定的增删，内容符合 STCW78/95 公约所要求的关于轮机自动化课程的相关规定，也可作为海事院校轮机工程专业本科教材使用。

全书共分 7 章，其中绪论、第 1 章、第 4 章由贾宝柱副教授编写；第 5 章第 1、2 节、第 6 章第 1、2 节由韩学胜副教授编写；第 2 章由隋江华副教授编写；第 6 章第 3、4 节由曹辉博士编写；第 3 章第 1、2、3 节由甘辉兵讲师编写；第 3 章第 4 节由何治斌讲师编写；第 7 章由曾鸿讲师编写。全书由贾宝柱和韩学胜统稿，李世臣主审，贾宝柱、隋江华也参加了全书的审定工作。

在教材编写过程中，得到了李世臣教授、林叶锦教授的鼎力支持与无私帮助，在此编者致以深深的感谢。同时得到了张均东教授、王冬捷副教授的指导，一并表示作者诚挚的谢意。

鉴于编者水平有限，时间仓促，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 2 月于大连

# 目 录

绪 论.....	1
第1章 自动控制系统的基础知识.....	2
1.1 反馈控制系统基本概念.....	2
1.2 控制对象.....	10
1.3 调节器的作用规律.....	17
第2章 船用气动仪表.....	28
2.1 自动化仪表的基本知识.....	28
2.2 气动变送器.....	39
2.3 气动调节器.....	45
2.4 气动执行器.....	55
第3章 船舶辅助设备的自动控制.....	57
3.1 主机缸套冷却水温度控制系统.....	57
3.2 燃油黏度控制系统.....	67
3.3 辅锅炉的自动控制.....	74
3.4 分油机的自动控制.....	83
第4章 主机遥控系统基本概念.....	93
4.1 主机遥控系统的组成及功能.....	93
4.2 常用遥控阀件与遥控气源.....	98
4.3 车钟系统.....	105
4.4 起动逻辑控制.....	109
4.5 换向逻辑控制.....	123
4.6 制动逻辑控制.....	126
4.7 转速控制与负荷限制.....	128

<b>第5章 主机遥控系统实例</b> .....	144
5.1 MAN B&W S MC/MCE主机的气动操纵系统.....	144
5.2 AUTOCHIEF-IV 主机遥控系统.....	152
5.3 AutoChief C20型主机遥控系统.....	179
<b>第6章 机舱监视与报警系统</b> .....	195
6.1 概述.....	195
6.2 机舱中常用传感器.....	200
6.3 DataChief C20监视与报警系统.....	210
6.4 曲柄箱油雾浓度监视报警器.....	225
<b>第7章 轮机自动化实验</b> .....	237
实验1 气动差压变送器的调整和性能实验.....	237
实验2 电动差压变送器实验(选做).....	239
实验3 气动PID调节器的作用规律实验.....	241
实验4 热电阻温度变送器实验.....	244
实验5 反馈控制系统实验.....	246
实验6 燃油黏度控制系统演示实验(选做).....	249
实验7 主机缸套冷却水温度控制系统演示实验(选做).....	251
实验8 船舶分油机自动控制系统演示实验(选做).....	252
实验9 船舶锅炉自动控制系统演示实验(选做).....	254
<b>参考文献</b> .....	256

## 绪 论

自动化技术是指机器或装置在无人干预的情况下按规定的程序或指令自动进行操作或控制的过程。早期的自动化技术是用机器代替人类繁重的手工操作的一种工业化生产手段，它的大规模应用大大降低了人工操作的劳动强度，并且可以替代人类进行恶劣、危险环境下的生产任务，从而极大地提高了劳动生产率。随着科学技术的进步及计算机技术在自动化领域的广泛应用，自动化技术已经成为工业生产过程中不可或缺的部分。先进自动化技术的广泛应用大大提高了生产效率和生产精度，自动化程度的高低已经被看做工业、农业、国防和科学技术现代化的重要条件和显著标志。

1768年瓦特发明蒸汽机，并在其上安装了离心调速装置来保持蒸汽机转速的稳定，这种离心调速装置成为世界上最早的自动化机器。发展到目前自动化技术已经成为一门控制理论与控制工程相结合的学科。在控制工程领域的主要研究目标是工业现场的自动化控制技术及实现方法，而控制理论中主要研究以精确控制为目的的研究准确、快速、有效的控制算法。

轮机自动化是研究工业自动化技术在船舶上应用的学科，主要包括船舶机舱动力装置、机舱设备及系统的自动控制、遥控管理及远程监测等内容，它是随着工业自动化技术的不断发展而逐渐完善起来的。20世纪60年代以前的几十年，机舱里的自动控制只是部分自动控制元件的简单应用，近20年以来，轮机自动化不断由单独设备、系统的独立控制走向系统化控制，其中具有代表性的成果是无人机舱的出现，它可以实现轮机管理人员在一定时间内无需到船舶机舱进行现场设备维护及巡检的轮机管理模式，大大降低了轮机管理人员的劳动强度，提高了船舶营运效益。无人机舱的出现依赖于船舶设备自动化技术的提高及计算机集中监控技术的成熟。进入20世纪90年代，出现了“驾机合一”型高度自动化船舶，应用计算机技术和智能控制手段相结合实现了船舶动力装置的优化控制、远程监控、故障诊断。

自动化技术的发展使船舶设备及系统功能日益强大、结构的日益复杂、维修管理难度越来越高，从而对轮机管理人员素质提出了更高的要求。只有不断跟踪技术的发展方向，学习新的技术知识、更新管理观念、提升管理手段，才能更好地保持轮机系统在船舶营运过程中可用性要求，发挥其最大功效，达到安全航行的目的。

本书首先简要介绍了自动控制的主要方式及基本原理，在此基础上针对轮机系统中主要设备及系统的控制手段和控制方式分别介绍了主机缸套冷却水系统、燃油黏度控制系统、船舶辅锅炉、船舶分油机系统及船舶主机遥控系统的基本原理、组成及管理使用等方法。全书的结构如下：

第1章 自动控制系统的基础知识；第2章 船用气动仪表；第3章 船舶辅助设备的自动控制；第4章 主机遥控系统基本概念；第5章 主机遥控系统实例；第6章 船舶监视与报警系统；第7章 轮机自动化实验。

# 第1章 自动控制系统的基础知识

## 1.1 反馈控制系统基本概念

### 1.1.1 控制系统的分类

控制系统可以按照多种方法进行分类，集中常用的分类方法如下：

#### 1.1.1.1 线性系统与非线性系统

按照系统特性，凡是由线性原件构成的系统被称为线性系统。线性系统可以用线性微分方程来描述系统动态行为。线性系统的主要特点是满足叠加原理和齐次原理。

若控制系统中至少有一个原件为非线性原件，则该系统就是非线性系统。

#### 1.1.1.2 开环控制系统与闭环控制系统

开环系统中不存在从输出端到输入端的反馈回路，即系统的输出不能直接影响输入量。开环控制系统结构简单，反应速度快，但是在原理上没有自动修正控制偏差的能力。

闭环控制系统一般是根据偏差进行控制的，能够自动根据偏差的大小和方向自动调整输入量使系统输出偏差稳定在允许范围之内。因此闭环控制系统具有较强的抗干扰能力，但是由于反馈的存在可能引起控制过程的振荡。

#### 1.1.1.3 定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统

根据控制系统给定值类型可以将其分为定制控制与随动控制两种类型。当控制系统的给定值为常量时称为定制控制系统，定值控制系统的控制任务是使输出量与给定值保持一致。

给定值如果是变化的，根据其变化规律可以分为随动控制和程序控制。随动控制系统中给定值一般为随机函数，其变化规律无法预知和预测，如船舶上的随动舵控制系统即为典型随动控制系统。

程序控制系统中给定值是按人们事先安排好的规律变化，它一般是一个时间函数，如船舶上的主柴油机加速速率限制环节即为典型的程序控制系统。

#### 1.1.1.4 单变量系统和多变量系统

单变量系统又叫单输入单输出控制系统（SISO），系统只有一个输入变量和一个输出变量。随着生产和科学技术的发展，被控对象越来越复杂，控制要求也越来越高，因而出现了多个输入/输出变量的控制系统，即多输入多输出控制系统（MIMO），这类控制系统中，变量之间相互耦合，控制难度较大，控制系统的结构也比较复杂。



### 1.1.1.5 连续系统和离散系统

若控制系统中各部分的信号都是时间的连续函数，称这类控制系统为连续系统。在控制系统中，只要有一处信号是不连续信号，则称其为离散系统。

以上系统分类中，本书所涉及的主要内容是单输入、单输出的闭环反馈控制系统，我们简单将这种类型的系统称为反馈控制系统，下面主要阐述这类系统的特点、组成及原理。

### 1.1.2 反馈控制系统类型

反馈控制是指将系统的输出信息返送到输入端与输入信息进行比较，得到的偏差作为控制器的输入从而对系统进行控制的方法。实际反馈控制系统中，常将返回至输入端的信息看做是负值而加上负号，因此通常称这类反馈控制为负反馈。负反馈控制方式可以逐渐消除系统的输出偏差，从而使系统输出量趋近于给定值，达到系统稳定。还有一类控制系统反馈是作为正值作用于输入端的，这样形成了系统输入信号与反馈信号的叠加作用，造成系统输出越来越偏离给定值，这类系统称为正反馈控制，正反馈可以使输出信号得到加强。

负反馈控制方式可以实现消除系统偏差、稳定控制输出的目的，因此在控制工程领域中被广泛采用。本书主要研究负反馈控制系统及其在轮机工程领域的典型应用，并将其简称为反馈控制。如不特殊提及，本书中所提到的反馈控制均指负反馈控制方式。

反馈控制按照实现方式可以进行如下分类：

#### 1.1.2.1 按信号传输介质分类

可以分为气动控制系统、液压控制系统、电动控制系统等。

气动控制系统中信号传输介质为气体，信号类型为压力信号。作为信号传输介质的压缩空气一般需经净化和干燥后处理，标准气源压力是 0.14 MPa，各种测量和控制气动仪表输入和输出压力为 0.02~0.1 MPa。

液压控制系统中信号传输介质为不可压缩的液压油，信号类型为压力信号。液压信号根据不同控制系统不同要求具有不同的标准信号强度。

电动控制系统中以电子作为传输介质，信号类型为电流信号或电压信号。标准电压信号强度为 0~10 V，标准电流信号强度为直流 4~20 mA。

#### 1.1.2.2 按仪表的结构形式分类

可分为单元组合仪表和基地式仪表。

单元组合仪表形式控制系统中的测量、调节、执行、显示等功能均由一台独立的仪表完成，各仪表之间通过统一的标准信号联系起来。基地仪表形式控制系统中由一台基地式仪表承担了控制系统中的测量、变送、调节、显示甚至执行单元的功能。

### 1.1.3 反馈控制系统结构

反馈控制系统的主要功能是消除系统偏差，把被控量维持在期望值附近运行。下面以柴油机

气缸冷却水温度控制系统为例（图 1-1），说明反馈控制系统的基本结构及基本概念。

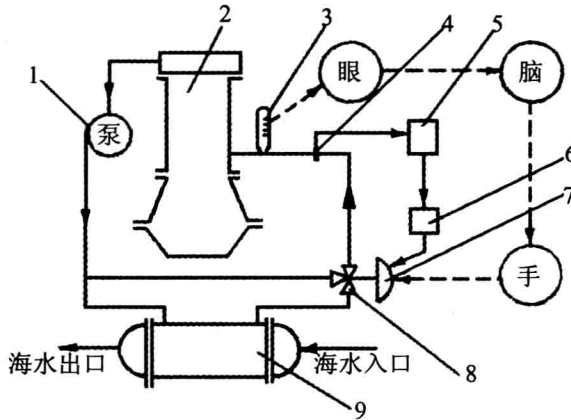


图 1-1 柴油机气缸冷却水温度控制系统

- 1—淡水泵；2—柴油机；3—温度表；4—感温元件；5—温度变送器；  
6—调节器；7—执行机构；8—三通电磁阀；9—淡水冷却器

人工操作的缸套水温度调节过程需要通过眼睛观察温度表读数，并把观察到的冷却水实际温度报告给大脑，大脑将这一温度值与期望温度值进行比较，计算偏差的大小及偏差方向，然后根据自身经验确定一个动作指令给手臂，操作进入缸套水冷却器的三通调节阀，改变流经冷却器与旁通部分缸套冷却水的比例，进而改变缸套冷却水的进口温度值趋近给定值。这一调节过程需要不断持续进行，直到缸套冷却水进口温度稳定在期望值上。当柴油机输出功率发生变化时，需要进行再次调节。

显然人工进行这一调节过程需要有专门的人来负责这一工作，并且调节质量要依赖于操作者的经验。为了降低船舶管理人员的劳动强度及提高控制精度，引入了自动控制方式完成该冷却水温度调节过程。系统中采用温度传感器代替眼睛观察的功能来感知缸套冷却水出口温度，传感器等比例地将缸套冷却水进口温度值转化为一个相应传递信号值送入温度调节器。调节器功能相当于人的大脑，对输入的测量温度信号与设定的温度值进行比较得到偏差的大小和方向，并据此计算得到输出量传送到执行机构；执行机构能够完成人工手动改变三通调节阀的开度的功能，实现调节柴油机缸套冷却水进口温度的目的。只要缸套冷却水温度与设定值不一致，即存在偏差就会导致执行机构动作，系统会一直向偏差减小方向动作，这就是用自动控制代替人工操作的原理及优势。

由以上例子可以看出，一个功能完善的反馈控制系统至少要包含以下几个主要组成部分：

(1) 被控对象。又称控制对象。在自动控制系统中，一般指被控制的设备或过程如锅炉、柴油机、分油机等或热交换过程、燃烧过程等。控制对象中需要控制的运行参数叫做被控量，如锅炉水位、柴油机转速、分油机时序、介质温度、燃烧过程的分油比等。

(2) 测量单元。测量单元是用来检测被控量的实际值，并把它等比例地转换成标准信号（测量值）传送到调节单元。测量单元需要具有测量及变送两种功能，测量功能是能够采集被测量物理量的实际值，要求具有较高的测量精度和良好的抗干扰能力。变送功能是指测量单元能将采集到的物理量的实际值按照一定比例转换成标准信号，并将其传送到调节单元。标准信号是调节器

可以接收的信号范围,气动调节器输入的标准信号为 0.02~0.1 MPa,电动调节器的标准信号范围为 0~10 V 的直流电压信号或 4~20 mA 的直流电流信号。对变送器的主要要求是要有较大范围的线性区间。

(3) 调节单元。调节单元又称控制器,是整个控制系统的核心。调节单元可以实现各类控制规律,根据测量单元输入的测量值与设定的给定值计算偏差量,根据偏差量和一定的控制规律计算出一个输出值给执行单元。轮机系统中调节单元的主要作用规律有位式调节、比例调节、比例积分调节、比例微分调节、比例积分微分调节等。随着电子技术及计算机技术的广泛应用,目前船舶系统正广泛采用微电脑芯片作为核心控制器,此类控制器内可以集成更为复杂的控制规律,如智能控制、模糊控制等。

(4) 执行机构。执行机构的功能是把调节单元送来的信号转换为相应的能够影响系统物流或能量变化的动作,从而减小偏差。执行机构需要与调节器输出类型相匹配,气动调节器输出气压控制信号,以便选择气动薄膜调节阀或气动活塞式调节阀。电动控制系统中可采用伺服电机。

除此之外,控制系统中通常还设有显示单元,用来指示被控量的给定值和测量值,气动控制系统设有气源装置和定值器,电动控制系统设稳压电源等辅助装置。

如将反馈控制系统中每个单元用一个方框表示,并用有方向的线表示信号传递方向将所有单元连接起来就构成了反馈控制系统框图,如图 1-2 所示。

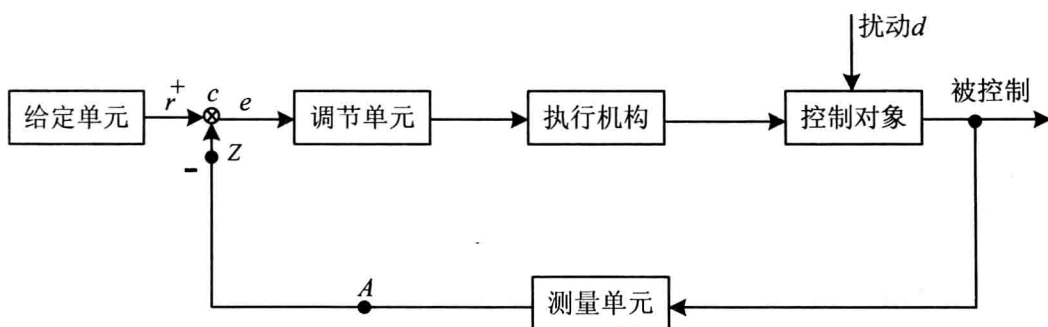


图 1-2 反馈控制系统传递方框图

图中每个小方框代表了一个单元,被称反馈控制系统中的环节。环节必须满足两个条件:一是要有输入信号或输出信号,用有方向的线表示信号传递方向,指向该环节的信号线为输入量,背离该环节的信号线为输出量;二是环节输出量的变化仅取决于输入量的变化及该环节的特性,输出量的变化不会直接影响输入量,这就是信号传递的单向性。

图 1-2 中  $r$  表示给定值,“+”表示信号方向为正向, $Z$  表示反馈值,“-”表示信号方向为负向,即负反馈。 $c$  为比较环节,该环节一般包含在调节单元中,在系统框图中单独表示为一个独立的环节。 $e$  表示给定值与反馈值经比较环节后得到的被控量偏差值,偏差值是调节单元真正的输入,并与控制规律一起决定了调节单元的输出值的大小和方向,按照偏差值的大小和方向可分类如下:

$$e = r - Z \begin{cases} r < Z(e < 0), & \text{负偏差} \\ r = Z(e = 0), & \text{零偏差} \\ r > Z(e > 0), & \text{正偏差} \end{cases} \quad (1-1)$$

图 1-2 中控制对象环节输出量即为被控量，而输入量有两种，一种是由执行机构动作所引起的进出系统物质或者能量的变化，这类输入通常被称为基本扰动。另外一种是由于外界不可测量、无法控制的因素所引起的被控对象输出变化的因素，被称为外部扰动。基本扰动和外部扰动共同作用与被控对象使系统被控量偏离给定值。控制器的功能是通过改变基本扰动对被控对象的输入抵消外部扰动对被控量的影响，从而消除被控量偏差。

以锅炉水位控制系统为例，被控量为锅炉水位值，当锅炉负荷变化时会破坏锅炉给水量和蒸汽输出量之间的物质平衡，引起锅炉水位偏离给定值出现偏差。此偏差驱动锅炉水位调节器输出一个可以减小偏差的控制量给执行机构（水位调节阀或给水泵），执行机构根据调节器输入改变锅炉给水量，从而消除由于外部扰动引起的偏差保持整个系统物质平衡。只要锅炉水位偏差存在，调节器就会不断改变输出值使调节机构动作。由此反馈控制系统通常也被称为偏差驱动的控制系统。此例中锅炉水位为被控量，用气量变化会引起水位变化，因此为扰动量；水位调节阀或者给水泵为执行机构，采用阀控方案可以实现锅炉水位的连续调节，采用泵控方案可以通过给水泵的起停实现锅炉水位的双位调节，如果采用变量泵作为锅炉给水泵则也可以实现锅炉水位的连续调节过程。

柴油机缸套冷却水温度控制系统中，主要通过改变三通调节阀的开度来改变经过冷却器与旁通的冷却水比例，保持柴油机缸套冷却水进口温度（或出口温度）值保持不变。当柴油机负荷、冷却海水温度及冷却器换热条件等发生变化时，会引起测量点缸套冷却水温度的变化，造成被控量偏差，调节器根据偏差会及时给出一个三通阀开度从而改变流经冷却器与旁通部分冷却水量比例，继而保持缸套水温度维持在设定温度上。此例中缸套冷却水温度为被控量，冷却水三通调节阀为执行结构，能够引起缸套冷却水温度变化的因素均为扰动量，其中海水温度是由所航行海域及气候条件所决定的，属于不可控量，因此为外界扰动。缸套冷却水温度控制系统根据测量点的不同可以分别采用进口温度控制方案和出口温度控制方案两种。

## 1.1.4 反馈控制系统特性

### 1.1.4.1 信号传递的单向性

输入信号（包括基本扰动和外部扰动）的改变会引起被控对象输出量的改变，而输出量的变化不会反过来直接影响到系统被控量的变化，要经过与设定值的比较得到偏差并且与调节器作用规律有关，这种系统中信号仅向单一方向传输的特性被称为传递信号的单向性。

### 1.1.4.2 闭环系统

反馈控制系统传递方框图中，前一环节的输出就是后一环节的输入。并且经过测量单元将输出信号引入到输入端形成一个封闭控制回路，因此系统称为闭环系统。

反馈控制系统必定是闭环系统。若在图 1-2 中由 A 处断开，系统就变为开环系统。如果要实现系统运行参数的自动控制则必须选择闭环系统。而开环控制系统，如主机遥控系统的启动、换向、制动等回路，均不具备参数自动调节功能。

### 1.1.4.3 负反馈

控制系统传递方框图中符号“ $\oplus$ ”称为比较环节。比较环节不是一个独立环节，一般为调节器的一个组成部分，即与调节器集成在一起。比较环节对给定值 $r$ （符号为“+”）与测量值 $Z$ （符号为“-”）进行比较，得到偏差值 $e$ 作为调节器的输入量。根据一定的调节器作用规律得到调节器输出至执行机构，执行结构动作改变流入控制对象的物质或能量流量，从而改变被控量的值。被控量经测量单元又反送到调节器的输入端，这个过程叫反馈。

总结反馈控制系统的动作过程如下：

系统在初始平衡状态下，受到一个扰动（可以是基本扰动或外部扰动），被控量将偏离给定值发生变化，测量单元将把被控量的实际值送至系统输入端与设定值相比较得到偏差值 $e$ 的大小和方向，并将其作为调节器的输入量，调节器根据某种调节作用规律输出一个控制信号使执行结构动作，从而改变系统物质或能量流量，从而可以克服扰动，逐渐消除偏差，最终使被控量又回到给定值或给定值附近，系统达到一个新的平衡状态。在测量环节中常常需要将系统输出量转变为统一的标准信号才能与设定值进行比较，因此测量环节常常不仅需要具有测量功能，通常还需要具有变送功能。

## 1.1.5 反馈控制系统的品质指标

### 1.1.5.1 反馈控制系统的动态过程

过程控制系统被控量不随时间变化而稳定在一个固定值的状态被称为稳态，理想控制系统稳态值一般为给定值，稳态下系统物质流或能量流处于平衡状态。当系统受到扰动后，被控量会偏离稳态值。由于自然界物理过程均具有惯性特性，因此动态过程是一个渐近的过程，与稳态相对应，这一渐近过程一般被称为动态过程。系统从受到扰动开始到被控量稳定在新稳态值，系统达到新的平衡状态的过程中，被控量随时间的变化规律，称为动态过程，也叫过渡过程。理想动态过程的应为一个衰减振荡过程。

闭环控制系统动态过程中，被控量偏差会引起控制器输出的改变，控制执行机构改变系统物质或能量流入、流出，使系统被控量逐渐趋向稳态值变化。这一过程中，扰动初始引起系统偏差时，由于偏差绝对值较小，因此控制器的输出也相对较小，无法立即克服系统扰动而造成偏差逐渐增大。随着偏差值的增大，调节器输出的控制信号也增强，克服扰动能力增强，直到系统恢复至新的稳态值为止。新的稳态值可以等于系统受到扰动之前的值，也可以是一个新的平衡状态值。

### 1.1.5.2 动态过程曲线

扰动一般为一个随机信号，根据扰动信号随时间的变化规律可以归纳为四种扰动形式，分别为阶跃扰动、线性扰动、脉冲扰动、正弦扰动。其中阶跃扰动对系统的稳态干扰最为严重，也最难以控制，因此对控制系统进行分析和设计时一般取阶跃的输入形式作为基本扰动。

阶跃扰动是指在 $t=0$ 时刻，扰动量瞬间突变为一个固定值。如果这个固定值为一个单位，则称为单位阶跃扰动。阶跃扰动形式在实际系统中很难实现，可以用一个近似的过程来模拟。

控制系统受到的扰动分为两种情况，一种是外部扰动不变，给定值改变。这时在调节器作用下，被控量将跟踪新的给定值变化，并围绕给定值振荡，并最终稳定在新的给定值上，这种情况通常称为随动控制。另一种情况是给定值不变，外部扰动发生变化，在调节器作用下被控量将绕给定值振荡且最终稳定下来，这种情况通常称为定值控制。

为评定控制系统动态过程品质，要在阶跃扰动输入下，评价系统被控量随时间的变化曲线。为方便起见，一般把控制系统受到扰动的时刻定义为坐标的原点。

图 1-3 为给定值不变而改变外部扰动时的动态过程曲线。图中曲线 1 是等幅振荡，曲线 2 是发散振荡。这两种动态过程被控量无法稳定在给定值上，因此称为不稳定系统。曲线 3 表示控制系统的动态过程为非周期过程，被控量没有波动地逐渐达到新稳态值。但是它的动态精度和稳态精度都很低，且被控量达到稳定值所需时间很长。曲线 4 中每一振荡周期过程曲线振幅逐渐减小，这一过程称为衰减振荡。衰减振荡过程是控制系统设计所要求的结果，符合动态过程品质要求。

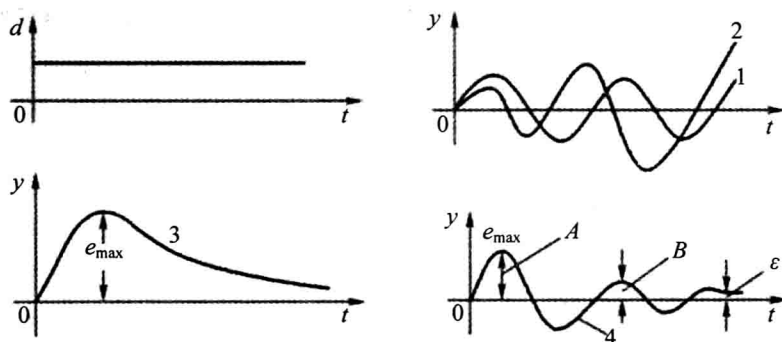


图 1-3 改变外部扰动控制系统的动态过程

图 1-4 为扰动不变，给定值发生变化的动态过程曲线。曲线 1 与 2 为发散振荡过程，曲线 3 为非周期振荡过程，曲线 4 为衰减振荡过程。其中曲线 4 的控制过程可以使被控量最终稳定在新的给定值上。

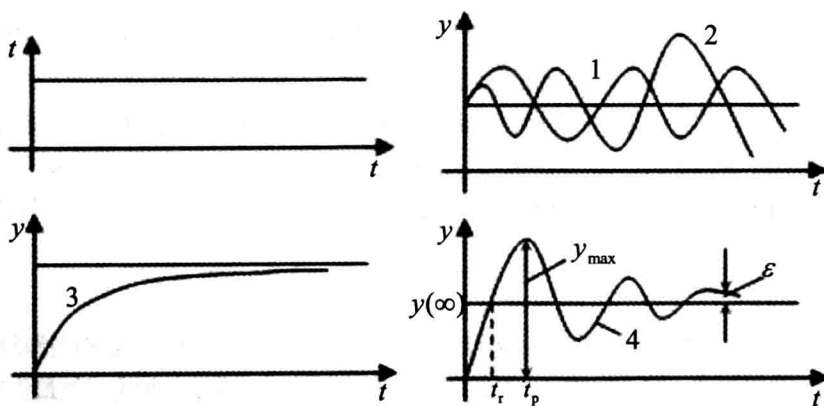


图 1-4 改变给定值控制系统的动态过程

## 1.1.5.3 评定控制系统动态过程品质的指标

与系统所受到扰动的两种情况相对应,对动态系统动态过程品质的评价指标可以分为两种情况来讨论。

第一种情况是给定值不变,外部扰动发生变化的情况,即通常所说的定值控制系统,其动态过程评价指标包括最大动态偏差  $e_{\max}$ 、衰减率  $\varphi$ 、过渡过程时间  $t_s$ 、振荡次数  $N$  及静态偏差  $\varepsilon$  等(见图 1-3 曲线 4)。

最大动态偏差  $e_{\max}$ : 在衰减振荡中第一个波峰的峰值,它是动态精度指标。 $e_{\max}$  越大说明动态精度低,理想控制系统要求  $e_{\max}$  相对较小些。

衰减率  $\varphi$ : 在衰减振荡中,第一个波峰值  $A=e_{\max}$ , 减去第二个同相波峰值  $B$  除以第一个波峰值  $A$ , 即

$$\varphi = \frac{A-B}{A} \quad (1-2)$$

$\varphi$  是衡量系统稳定性指标,要求  $\varphi=0.75\sim 0.9$ 。当  $\varphi=0.75$  时,  $A$  是  $B$  的 4 倍,衰减比为 4:1。 $\varphi$  小于 0.75 则系统动态过程的振荡倾向增加,降低了系统稳定性,过渡过程时间也因振荡而加长。当  $\varphi=0$  时,动态过程是等幅振荡,系统变成不稳定系统。 $\varphi$  过大过渡过程时间  $t_s$  随之变大,当  $\varphi=1$  时,其动态过程没有振荡,成为非周期过程。

过渡过程时间  $t_s$ : 从控制系统受到扰动开始到被控量重新稳定下来所需的时间。理论上讲,这个时间是无穷大。实际过程中通常把过渡过程时间  $t_s$  定义为:

当  $t \geq t_s$  时,满足

$$\frac{|y(t) - y(\infty)|}{y(\infty)} \leq \Delta \quad (1-3)$$

式中:  $y(t)$  是系统受到扰动后,在时间为  $t$  时的被控量值;  $y(\infty)$  是被控量的最终稳态值;  $\Delta$  是选定的任意小的值,一般取  $\Delta=0.02$ , 或  $\Delta=0.05$ 。

上式物理意义是,当  $t \geq t_s$  的所有时间内,被控量  $y(t)$  的波动值  $|y(t) - y(\infty)|$  均小于或等于最终稳态  $y(\infty)$  的 2% 或 5%,  $t_s$  即被看做是过渡过程时间。

振荡次数  $N$ : 衰减振荡中,被控量的振荡次数。一般要求被控量振荡 2~3 次就应稳定下来。

静态偏差  $\varepsilon$ : 动态过程结束后,被控量新稳态值与给定值之间的差值。 $\varepsilon$  越小说明控制系统的静态精度越高。在实际控制系统中,根据调节器作用规律的不同可以分为有差控制和无差控制。控制系统受到扰动后,在调节器控制作用下,被控量最终只能稳定在给定值附近,存在一个数值相对较小的静态偏差的控制过程称为有差控制过程;而无差控制系统在调节器作用下,被控量能最终稳定在给定值上,即  $\varepsilon=0$ 。

另外一种情况为外部扰动不变而改变给定值。这种控制系统的动态过程评价指标中包括的过渡过程时间  $t_s$ , 振荡次数  $N$ , 静态偏差  $\varepsilon$  等与定值控制系统是一样的。另外评定稳定性指标不用衰减率  $\varphi$ , 而是用超调量  $\sigma_p$ 。同时增加了反映控制系统响应速度的两个指标上升时间  $t_r$  和峰值时间  $t_p$  (见图 1-4 曲线 4)。

上升时间  $t_r$ : 衰减振荡中, 被控量从初始平衡状态第一次达到新稳态值  $y(\infty)$  所需时间。

峰值时间  $t_p$ : 衰减振荡中, 被控量从初始平衡状态达到第一个波峰峰值所需要的时间  $t_p$ 。

$t_r$  和  $t_p$  都是反映动态过程进行快慢的指标,  $t_r$ 、 $t_p$  越小, 说明系统惯性越小, 动态过程进行得越快。

超调量  $\sigma_p$ : 是指在衰减振荡中, 第一个波峰值  $y_{\max}$  减去新稳态值  $y(\infty)$  与新稳态值之比的百分数, 即

$$\sigma_p = \frac{y_{\max} - |y(\infty)|}{|y(\infty)|} \times 100\% \quad (14)$$

超调量是评定控制系统稳定性的指标, 超调量越小, 控制系统动态过程波动越小, 稳定性越好, 相应的过渡过程时间会增大。当  $\sigma_p=0$  时, 被控量无波动地逐渐靠近给定值, 成为非周期过程, 此时系统稳定性虽然最好, 但过渡过程时间  $t_s$  过大, 无法满足控制性能要求。若  $\sigma_p$  太大, 控制系统动态过程的振荡明显加剧, 系统稳定性变差。在实际过程中, 要求  $\sigma_p < 30\%$ 。

以上分析可以看出, 评价动态过程的各种性能指标之间会相互影响, 理想控制系统需要综合考虑各性能指标因素, 通过合理的控制参数设置得到良好的动态过程。对于一些特殊要求的工业控制系统还需要考虑具体要求, 对某些性能指标进行重点考虑。

## 1.2 控制对象

控制对象也称被控对象, 轮机系统中的主要控制对象包括船舶主柴油机、发电柴油机、船舶锅炉、热交换器、空压机、分油机、自清洗滤器、油水分离装置、舵机、减摇装置、船舶电站、各类水柜/油柜等。各种控制对象原理、功能不尽相同, 从影响被控量变化的基本因素来看, 各种控制对象又有共同特点:

(1) 所有的控制对象都有储存物质或能量的能力, 且当控制系统受到扰动后, 会伴随有物质或能量流入或(和)流出;

(2) 物质或能量在流动过程中会受到阻力;

(3) 物质或能量在流动过程中或信号在传递过程中, 会存在着时间上的迟延。

学习反馈控制系统, 首先需要了解控制对象的动态特性和静态特性。控制对象动态特性是指控制对象在基本扰动下被控量随时间的变化规律特性, 静态特性是指控制对象在基本扰动下被控量达到新稳态值的变化量。分析控制对象的动态、静态特性时常采用阶跃信号作为基本扰动形式, 一方面这种扰动形式符合多数控制对象的工作实际, 另一方面阶跃扰动是对控制对象工作最不利的输入信号形式。通过考察阶跃扰动下被控量的输出值可以更加清晰地观察到控制对象的动、静态特性。

自然界中最普遍的控制对象是容器式控制对象, 对其特性进行分析具有典型代表性。容器式控制对象又可以分为单容控制对象、双容控制对象和多容控制对象。本节主要介绍单容控制对象和双容控制对象的动、静态特性。



## 1.2.1 单容控制对象

单容控制对象是指只有一个物质或能量储存单元的控制对象。船舶机舱中单容控制对象包括以液位作为被控量的各类水柜、油柜以及以水位为被控量的船舶锅炉。单容控制对象中被控量为液位，输出量为物质流出容器的体积流量，输入量作为基本扰动，一般为液体流入容器的体积流量，外部扰动一般为液体流出量变化及温度、压力等能够引起液位变化的外界因素。

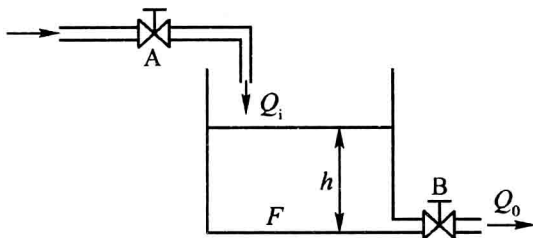


图 1-5

图 1-5 画出了一个单容控制对象最简单的例子，它只有一个储存水的容器。容器水位  $h$  是被控量，给水阀 A 开度的变化是基本扰动，出水阀 B 开度的变化是外部扰动。对这一简单单容控制对象分析如下：

## 1.2.1.1 容积系数

规则形状单容控制对象内液体容量  $V$  为其底面积  $F$  与液位高度  $h$  的乘积，即：

$$V = F \cdot h \quad (1-5)$$

为了方便考察单容对象容量与液位之间的关系，引入容积系数  $C$  这个概念。容积系数  $C$  指被控量变化一个单位其容量的变化量，即：

$$C = \frac{dv}{dh} \quad (1-6)$$

也就是容积系数  $C$  等于容量的变化量  $dv$  与水位变化量  $dh$  的比值。

如图 1-5 所示单容水柜的容积系数  $C$  等于水柜的底面积  $F$ 。水柜底面积越大说明容量系数越大，要使水柜液位改变一个单位高度，水柜内液体容量的变化量相对较多。

图 1-5 中当给水阀 A 和出水阀 B 的开度保持不变，且给水流量  $Q_i$  与出水流量  $Q_o$  相等时，水位  $h$  保持恒定，单容控制对象处于初始平衡状态。如果此时开大出水阀 B 的开度对水柜施加一个阶跃的外部扰动，同时保持给水阀 A 开度不变，单容控制对象出水量  $Q_o$  大于进水量  $Q_i$ ，引起水位  $h$  变低。被控量  $h$  的变化速度为可以用下式描述：

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C}(Q_i - Q_o) \quad (1-7)$$

由上式可以看出，在扰动  $(Q_i - Q_o)$  相同的情况下，容积系数  $C$  越大，被控量  $h$  的变化越慢，即单容控制对象的惯性越大。反之  $C$  越小，在相同扰动下，被控量变化越快，单容控制对象惯性也就越小。因此容积系数  $C$  可以看做是标志单容控制对象惯性大小的参数。