

# 船舶电气与自动化

(下册: 船舶自动化)

卢冠钟 主编

陈和平 赵 逾 主审



大连海事大学出版社

# 船舶电气与自动化

## (下册:船舶自动化)

卢冠钟 主编  
陈和平 赵 逾 主审

大连海事大学出版社

© 卢冠钟 2014

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气与自动化:全2册/卢冠钟主编. —大连:大连海事大学出版社, 2014. 3  
ISBN 978-7-5632-2993-2

I. ①船… II. ①卢… III. ①船用电气设备—高等学校—教材②船舶—自动化系统—高等学校—教材 IV. ①U665②U664. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 053533 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

大连华伟印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2014年3月第1版

2014年3月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm

印张:48

字数:1187千

印数:1~1200册

出版人:徐华东

责任编辑:陆梅 刘牧园

责任校对:杨森 孙雅荻

封面设计:王艳

版式设计:解瑶瑶

ISBN 978-7-5632-2993-2 定价:110.00元(上、下册)

# 前 言

《船舶电气与自动化》是 STCW 公约马尼拉修正案后,按照中华人民共和国海事局的履约要求重新编写的教材。本课程分为上下两册,上册为船舶电气,下册船舶自动化。本书按照项目分块,在原有教材的基础上,结合各院校老师的教学经验和航运企业的需求,重新按照大纲进行了修订和编写,教材以大纲为依据,进行了内容编排。

本册《船舶电气与自动化(下册:自动化)》包含以下内容:项目八船舶反馈控制理论基础、项目九船舶辅助系统的自动控制、项目十船舶主机遥控系统、项目十一机舱监测报警系统、项目十二船舶火灾自动报警系统、项目十三微型计算机的基本概念。本书由浙江交通职业技术学院卢冠钟、鲍军晖、孙飞、张亮编写,同时得到了浙江交通职业技术学院姚建飞教授的大力参与和支持,并感谢浙江海事局陈和平处长、轮机主考官任德夫轮机长,浙江远洋运输有限公司的赵逾高级轮机长和周进路轮机长,浙江海运集团公司的陈逸宁轮机长在编写过程中提供的资料和宝贵意见。全书由浙江交通职业技术学院卢冠钟统稿。

由于时间仓促,书中还存在许多缺点,希望能够得广大到读者的指正和批评。

# 目 录

项目八 船舶反馈控制理论基础	1
任务一 反馈控制系统的基本概念与仪表基础	1
任务二 调节器及其调节作用规律	18
任务三 传感器、变送器与执行机构	38
项目九 船舶辅助系统的自动控制	58
任务一 蒸汽锅炉的自动控制	58
任务二 冷却水温度控制系统	81
任务三 燃油供油单元自动控制系统	93
任务四 燃油净油单元自动控制系统	104
任务五 自清洗滤器的自动控制	119
任务六 阀门遥控及液舱遥测系统	122
项目十 船舶主机遥控系统	130
任务一 主机遥控系统基本概念	130
任务二 主机遥控系统的逻辑控制	149
任务三 主机遥控系统的电/气转换装置和执行机构	176
任务四 船舶柴油主机气动操纵系统	179
任务五 微机控制的主机遥控系统	188
任务六 现场总线型主机遥控系统	220
任务七 电控柴油机控制系统	238
项目十一 机舱监测报警系统	256
任务一 监测报警系统的功能	256
任务二 单元组合式监视与报警系统	261
任务三 网络型监测与报警系统	267
任务四 曲轴箱油雾浓度监视与报警系统	291
项目十二 船舶火灾自动报警系统	299
任务一 火灾自动报警系统的基本功能及工作原理	299
任务二 火灾探测器	304
任务三 干货舱自动探火及报警系统	309
任务四 易燃气体探测报警系统	312

<b>项目十三 微型计算机的基本概念</b> .....	315
<b>任务一 计算机软件与硬件结构</b> .....	315
<b>任务二 可编程序控制器</b> .....	337
<b>任务三 船舶计算机网络基础知识</b> .....	357
<b>参考文献</b> .....	368



# 项

# 目八

## 船舶反馈控制理论基础

### 任务一

#### 反馈控制系统的基本概念与仪表基础

##### ● 知识目标

- 认识控制系统组成的基本环节
- 仪表品质参数

##### ● 能力目标

- 能够对控制系统的环节进行动态过程分析

#### 一、反馈控制系统的组成

反馈控制系统对机器设备或生产过程参数的控制过程实际上是直接模拟人的手动操作过程,图 8-1 画出了手动操作控制和自动控制下柴油机气缸冷却水温度的示意图。

柴油机在运行过程中需要保持一个最佳的冷却水温度。假如冷却水出口温度应为  $80^{\circ}\text{C}$ ，则在手动控制时，操作人员要用眼睛观察温度表，并把观察到的冷却水实际温度反映给大脑，大脑对水温进行分析(温度的实际值是否偏离了最佳值)、判断(实际水温是高于最佳值还是低于最佳值)和计算(实际水温离开最佳值的数量，即偏差值)，然后输出一个控制指令给双手，用双手来改变三通调节阀的开度，即改变旁通水量和经冷却器冷却后的冷水流量，从而可改变对气缸冷却水的冷却强度，使冷却水的实际温度逐渐恢复到冷却水温度的最佳值。

当冷却水实际温度升高时，通过眼睛从温度表上观察，为了维持希望的温度值，大脑指挥双手关小三通调节阀，减少旁通水量结果是使实际温度下降，并且在温度表上得到体现；眼睛再把这一调节结果传递给大脑，得到反馈。这个过程一般要反复进行，直至实际温度恢复到希望的温度值为止。其中，眼睛把调节结果传递给大脑的过程就叫作反馈。显而易见，因为利用了反馈，控制的最终目标才能得以实现。

在自动控制过程中，由于不需要人来干预控制过程，因此必须采用相应的自动化仪表来代替人的功能器官。比如可用温度传感器和变送器等效人的眼睛，随时测量冷却水的实际温度并把该值送给调节器。调节器代替人的大脑，并对冷却水实际温度进行分析和计算，然后输出控制信号给执行机构。执行机构代替人的双手，改变三通调节阀的开度。不论是手动控制，还是自动控制，反馈作用都是存在的。我们把包含反馈作用的控制过程称为反馈控制过程。

其实，对任何其他运行参数进行控制也都具有类似的过程。分析上述实例不难发现，组成一个反馈控制系统，必须有四个最基本的环节，即控制对象、测量单元、调节单元和执行机构，而且缺一不可。

### 1. 控制对象

控制对象是指所要控制的机器、设备或装置，而所要控制的运行参数则称为被控量。

- 在柴油机气缸冷却水温度自动控制系统中，柴油机是控制对象，柴油机冷却水出口温度是被控量；
- 在锅炉水位自动控制系统中，锅炉是控制对象，水位是被控量；在锅炉蒸汽压力控制系统中，锅炉是控制对象，蒸汽压力是被控量；
- 在燃油黏度自动控制系统中，燃油加热器是控制对象，燃油黏度是被控量；
- 在柴油机转速的控制系统中，柴油机是控制对象，转速是被控量。

### 2. 测量单元

测量单元的作用是，检测被控量的实际值，并把它转换成统一的标准信号，该信号称为被控量的测量值。在气动控制系统中，对应被控量的满量程，其统一的标准气压信号是  $0.02 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ；在电动控制系统中，对应被控量的满量程，其统一的标准电流信号是  $0 \sim 10 \text{ mA}$  或

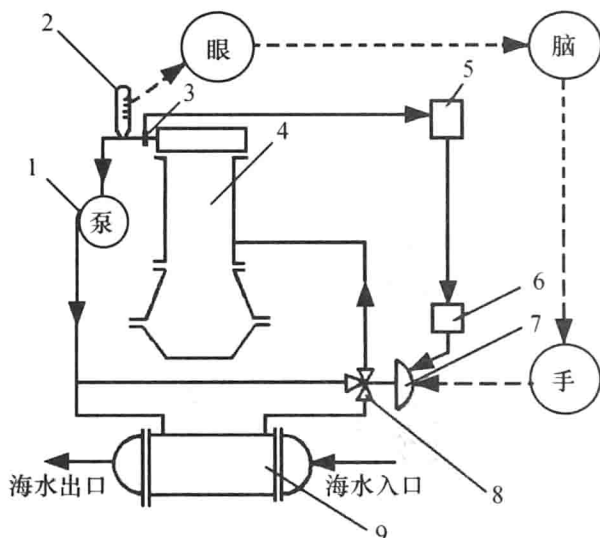


图 8-1 柴油机气缸冷却水温度控制过程示意图

- 1—淡水泵；2—温度计；3—温度传感器；4—柴油机；  
5—温度变送器；6—水温调节器；7—执行机构；  
8—三通调节阀；9—淡水冷却器





4 ~ 20 mA, 一般二型仪表使用 4 ~ 20 mA 信号居多(具有断线检测功能)。

【扩展内容】工业现场中仪表放大器输出信号进行长线传输,会产生以下问题:第一,由于传输的信号是电压信号,传输线会受到噪声的干扰;第二,传输线的分布电阻会产生电压降;第三,仪表放大器需要匹配一定的工作电源电压。故使用电流来传输信号,电流对噪声并不敏感。4 ~ 20 mA 电流环有二线制和三线制两种类型。需要通过长线驱动现场的驱动器件如阀门等,一般选用三线制。

测量单元一般包含两部分,即传感器和变送器,传感器用于对物理量进行检测,变送器则将传感器的输出转换为调节器能够接收的信号。例如,在温度自动控制系统中,测量单元常采用温度传感器和温度变送器;在压力自动控制系统中,测量单元常采用压力传感器和压力变送器;在锅炉水位控制系统中,测量单元常采用水位发讯器(参考水位罐)和差压变送器等。

### 3. 调节单元

调节单元是指具有某种调节作用规律的调节器接收测量单元传送来的被控量测量值,并与被控量的期望值相比较得到偏差信号,再根据偏差信号的大小和方向(正偏差还是负偏差),按照某种调节作用规律输出一个控制信号,送给执行机构,对被控量施加控制作用,直到偏差等于零或接近零为止。

在反馈控制系统中,一般把被控量的期望值称为设定值,被控量的测量值与设定值之间的差值称为偏差值。若将设定值表示为  $r$ ,被控量的测量值表示为  $z$ ,偏差表示为  $e$ ,则有:

$$e = r - z$$

若  $e > 0$ ,则说明测量值低于设定值,称为正偏差;

若  $e < 0$ ,则说明测量值高于设定值,称为负偏差;

若  $e = 0$ ,则说明测量值等于设定值,称为无偏差。

在实际应用中,调节器一般有位式调节器、比例调节器 P、比例积分调节器 PI、比例微分调节器 PD 和比例积分微分调节器 PID 五种,根据控制对象特性的不同及控制精度的要求,可选用不同调节作用规律的调节器。

### 4. 执行机构

执行机构接收调节单元输出的控制信号,并将该信号转换为作用到控制对象的实际控制作用。调节单元输出的控制信号一般都要经过执行机构才能作用到控制对象上,从而改变流入控制对象的物质或能量,使之能适应控制对象的负荷变化。在气动控制系统中,执行机构一般是气动薄膜调节阀或气动活塞式调节阀;在电动控制系统中,一般采用伺服电机。

以上四个单元是组成反馈控制系统必不可少的基本单元。对于一个完整的控制系统,一般根据需要还会有其他的辅助单元,例如用来指示被控量设定值和测量值的指示单元和设定给定值  $r$  的给定单元,气源装置或稳压电源等辅助装置。

## 二、反馈控制系统传递方框图

在分析反馈控制系统工作过程中,可把组成反馈控制系统的四个基本单元分别用一个小方框来表示,并用带箭头的信号线来表示各单元之间的信号传递关系。这样就构成了如图8-2所示的反馈控制系统传递方框图。

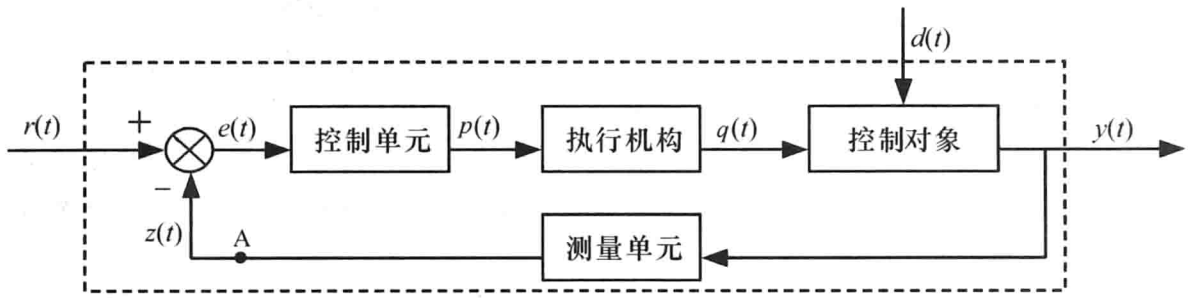


图 8-2 反馈控制系统传递方框图

$r(t)$ —设定值; $z(t)$ —测量值; $e(t)$ —偏差值; $y(t)$ —被控量; $q(t)$ —执行量; $p(t)$ —控制量; $d(t)$ —外部扰动值

### 1. 环节

在控制系统传递方框图中,代表实际单元的每个小方框称为一个环节。每个环节必须具有输入量和输出量,但不限定数量的,可以为一人一出、二人一出或多人多出等,但不能缺失输入或输出,并用带箭头的信号线来表示。其中箭头指向该环节的信号线为输入量,箭头离开该环节的信号线为输出量,在信号线上可标明输入量和输出量的名称,也可以不写。任何环节输出量的变化均取决于输入量的变化以及该环节的特性,而输出量的变化不会直接影响输入量,这叫信号传递的单向性。另外,如果信号线在某处出现分支,则各个分支的信号具有等值特性。

### 2. 扰动

控制对象作为反馈控制系统的组成环节,其输出量是被控量,而引起被控量变化的因素统称为扰动。分为两类:即基本扰动和外部扰动,扰动量是控制对象的输入量。

基本扰动是指来自控制系统内部控制通道(调节通道)的扰动,一般是人为的、有目的的或可控的输入施加信号。例如,在水位控制系统中,给水调节阀开度的改变将引起水位的变化;在冷却水温度控制系统中,三通调节阀开度的改变将引起水温的变化,等等。这种扰动通过系统内部的调节通道,改变流入控制对象的物质或能量的流量,从而影响控制对象的输出。

外部扰动是指来自系统外部环境的扰动。例如,以锅炉为控制对象的水位控制系统,水位是被控量,锅炉负荷(外部用汽量)的变化将引起水位的变化;在柴油机气缸冷却水温度控制系统中,水温是被控量,柴油机负荷的变化、海水温度的变化、淡水冷却器中水管结垢的多少等都会引起冷却水温度的变化。这种扰动是由于设备负荷或外界环境的扰动变化而导致控制对象内部的能量平衡遭到破坏而引起的。因此,外部扰动通过扰动通道影响被控量。

在图 8-2 中,有两个信号线的箭头指向控制对象,它们分别代表基本扰动(执行机构的输出  $q$ ) 和外部扰动(控制对象负荷或环境因素的变化  $d$ )。

### 3. 系统的输入与输出

前面提到的输入和输出的概念都是针对环节而言的,若从系统的全局角度来看,则可将图 8-2 所示的各个基本环节看作一个整体,如图中的虚框所示。不难看出,作为一个整体,系统具有两个输入,即设定值  $r$  和外部扰动  $d$ ,以及一个输出  $y$ ,即被控量。

### 4. 反馈

在控制系统传递方框图中,符号“⊗”是一个比较环节(它不是一个独立环节,而是调节器中的一个组成部分,为清楚起见,单独画出),它对被控量的设定值  $r$ (旁标“+”号)和测量值  $z$ (旁标“-”号)进行比较,得到偏差值  $e = r - z$ ,作为调节器的输入值。调节器的输出经执行机构改变控制强度,即改变流入控制对象的物质或能量的流量,引起被控量的变化(即系统输



出变化),而系统输出的变化经测量单元又送回到系统的输入端,这个过程叫反馈。只有通过反馈才能不断地对被控量的设定值和测量值进行比较,只要存在偏差值的变化,调节器就会调节执行机构动作,直到测量值回到设定值或设定值附近为止(偏差是否为零取决于调节器所采用的调节规律)。这时调节器的输出不再改变,执行机构的输出正好适应负荷的要求,控制系统达到一个新的平衡状态。这是一种根据偏差 $e$ 来进行控制的控制系统。

反馈有正反馈和负反馈之分。正反馈是指能够加强系统输入效应的反馈,它使偏差 $e$ 增大。如积分作用;而负反馈是指减弱系统输入效应的反馈,它使偏差 $e$ 减小。显然,按偏差进行控制的稳定系统必定是一个负反馈控制系统。但是,在自动化仪表中,特别是在调节器中,为实现某种作用规律和功能,常采用复杂的正、负反馈回路。

#### 5. 前向通道与反馈通道

在控制系统传递方框图中,从系统的输入端沿信号线方向到达系统输出端的通道称为前向通道;而相反方向的通道则称为反馈通道。

#### 6. 闭环系统

在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,系统的输出又经反馈通道送回到系统的输入端,控制系统就形成了一个封闭的控制回路,称为闭环系统。反馈控制系统必定是闭环系统。如果在闭环系统的某处把回路断开,例如在图8-2中的A点断开,那么该系统就由闭环系统变成了开环系统。开环系统不再是反馈控制系统,无法根据偏差来实现设备或生产过程的参数自动控制。

### 三、反馈控制系统的工作过程

根据前面介绍的概念,反馈控制系统的工作过程可以描述如下:

假设系统处在平衡状态(即系统稳定运行)时突然受到一个外部扰动,被控量将离开初始稳定值发生变化,测量单元将把被控量的实际值送到调节器,在调节器内部,被控量的给定值与测量值进行比较,得到偏差值 $e$ ,调节器依据某种调节作用规律输出一个控制信号,通过执行机构改变流入控制对象的物质或能量的流量。被控量朝着偏差减少的方向变化,这一信号又通过测量单元送至调节器,重复上述过程,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。改变给定值后,系统的工作与上述过程类似。

### 四、评价反馈控制系统的品质指标

为评定控制系统动态过程品质,通常给系统施加一个阶跃输入,然后研究系统的输出量(被控量)随时间的变化曲线,即系统的动态过程。根据控制系统接受的扰动途径,可以分为两种情况:一种是外部扰动不变,改变给定值(如随动控制系统);另一种是给定值不变(定值控制系统),改变外部扰动。由于控制器规律或系统参数的不同,控制系统的动态过程将出现不同的反应。

图8-3所示为控制系统在受到外部阶跃扰动后可能出现的4种不同情况。图8-3(a)所示为振幅不断增加的发散过程,(b)为振幅相同的等幅振荡过程。显然这两种情况都是不稳定的过程,作为一个实际的控制系统,这是不能够接受的。(c)是一个振幅不断减少的衰减振荡过程,(d)则是一个非周期过程。虽然这两种情况均属于稳定过程,但非周期过程往往会出现

较大的偏差,或者整个调节过程所经历的时间过长,实际中也是不可取的。因此,一个实际可用的控制系统,最起码的要求是其过渡过程属于振荡衰减过程。

但是,即便是衰减振荡过程,还存在衰减快慢的问题,并不是所有衰减振荡过程都符合要求。为了便于讨论控制系统动态过程品质,通常采用一些定量指标加以衡量。在定值控制和随动控制两种情况下,评定动态过程品质的指标有些相同,有些不同。

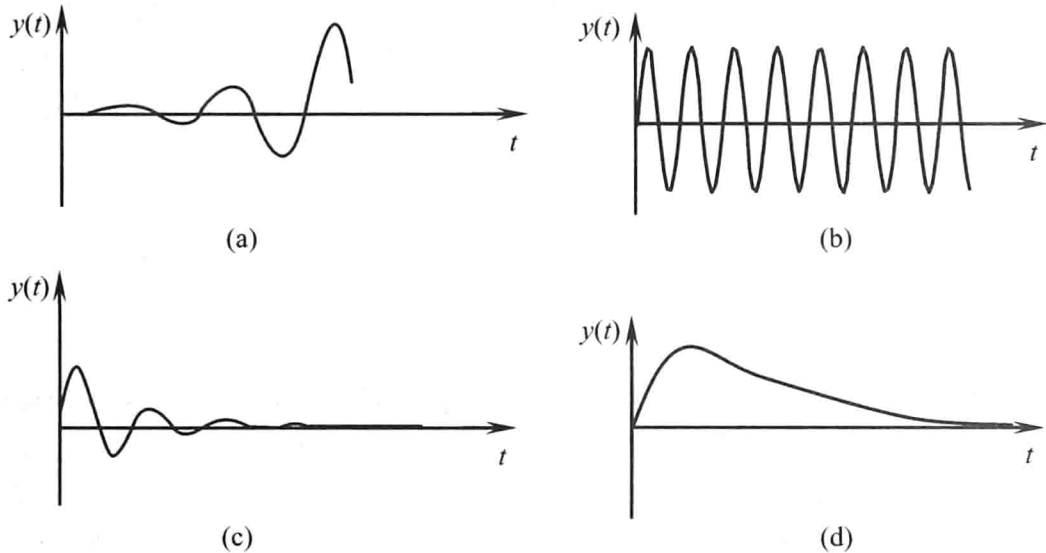


图 8-3 过程曲线基本类型

图 8-4 和图 8-5 分别给出了定值控制和随动控制系统在  $t_0$  时刻给定值阶跃变化和外部扰动阶跃变化的动态过程曲线。归纳起来,评定控制系统动态过程品质的指标包含以下三个方面。

### 1. 稳定性指标

#### (1) 衰减率 $\varphi$

衰减率  $\varphi$ ,是指在衰减振荡中,第一个波峰值  $y_1$  与第二个同相波峰值  $y_3$  的差值跟第一个波峰值  $y_1$  之比,即

$$\varphi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$$

与衰减率相对应的另一种衡量指标是衰减比。所谓衰减比是第一个波峰值  $y_1$  和第二个同相波峰值  $y_3$  的比值,即  $y_1/y_3$ 。

衰减率  $\varphi$  是衡量系统稳定性的指标,要求  $\varphi = 0.75 \sim 0.9$ 。当  $\varphi = 0.75$  时,  $y_1$  是  $y_3$  的 4 倍,此时衰减比 4:1,  $\varphi$  不能小于 0.75,否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不息而加长。特别是当  $\varphi = 0$  时,其动态过程是等幅振荡,系统变成不稳定系统。

#### (2) 振荡次数 $N$

振荡次数  $N$ ,是指在衰减振荡中,被控量的振荡次数。一般要求被控量振荡 2 ~ 3 次就应该稳定下来。

### 2. 精确性指标

#### (1) 最大动态偏差 $e_{\max}$

最大动态偏差  $e_{\max}$ ,是指在衰减振荡中第一个波峰的峰值,它是动态精度指标。 $e_{\max}$  大,说明动态精度低,要求  $e_{\max}$  小些为好,但不是越小越好,因为  $e_{\max}$  太小,有可能使动态过程的振荡加剧。

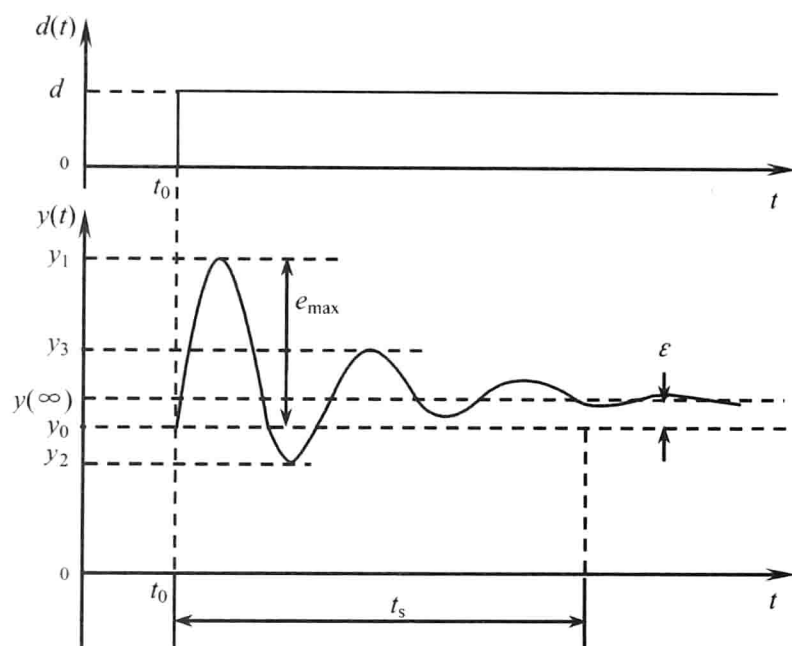


图 8-4 定值控制系统的动态过程

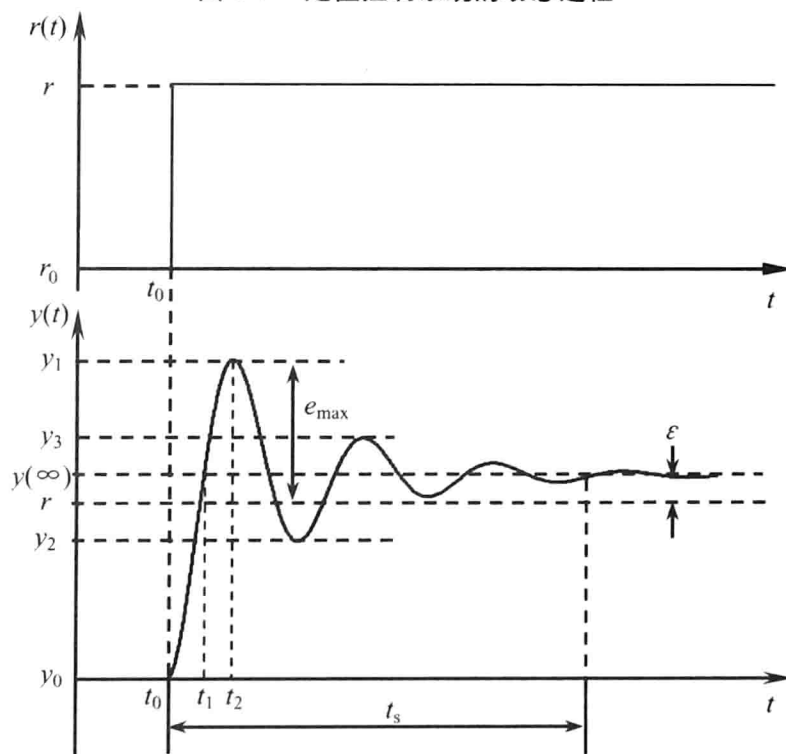


图 8-5 随动控制系统的动态过程

### (2) 静态偏差 $\varepsilon$

静态偏差  $\varepsilon$ , 是指动态过程结束后, 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, 使用不同作用规律的调节器, 静态偏差的情况也不相同。有的控制系统受到扰动后, 在调节器控制作用下, 被控量最终不能稳定在给定值上, 只能稳定在给定值附近, 存在一个数值较小的静态偏差, 称为有差调节, 即  $e \neq 0$ ; 有的控制系统受到扰动后, 在调节器的控制作用下, 被控量最终能够稳定在给定值上,  $\varepsilon = 0$ , 称为无差调节。

### (3) 超调量 $\sigma_p$

对于随动控制系统, 通常采用超调量  $\sigma_p$  来衡量其动态精度。所谓超调量  $\sigma_p$  是指在衰减振

荡,第一个波峰值  $y_1$  减去新稳态值  $y(\infty)$  与新稳态值  $y(\infty)$  之比的百分数,即

$$\sigma_p = \frac{y_1 - |y(\infty)|}{|y(\infty)|} \times 100\%$$

超调量是评定控制系统动态精度的指标。超调量太大,说明被控量偏离规定的状态太远,对于一些要求比较严格的场合,都有允许的最大超调量要求。在实际系统的过渡过程中,一般要求  $\sigma_p < 30\%$ 。

### 3. 快速性指标

#### (1) 过渡过程时间 $t_s$

过渡过程时间  $t_s$ ,是指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,这个时间是无穷大的。因此,通常这样定义过渡过程时间  $t_s$ :当  $t \geq t_s$  时,满足

$$\frac{|y(t) - y(\infty)|}{y(\infty)} \leq \delta$$

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  $\delta = 0.05$ 。上式的物理意义是,在  $t \geq t_s$  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值  $y(\infty)$  的 2% 或 5%。

#### (2) 上升时间 $t_r$

在讨论随动控制系统时,通常还用到上升时间  $t_r$  和峰值时间  $t_p$ 。所谓上升时间  $t_r$  是指在衰减振荡中,被控量从初始平衡状态第一次达到新稳态值  $y(\infty)$  所需的时间。在图 8-5 中, $t_r = t_1 - t_0$ 。

#### (3) 峰值时间 $t_p$

所谓峰值时间  $t_p$ ,是指在衰减振荡中,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。在图 8-5 中, $t_p = t_2 - t_0$ 。 $t_r$  和  $t_p$  都是反映动态过程进行快慢的指标。 $t_r$  和  $t_p$  越小,说明系统惯性越小,动态过程进行得越快。

## 五、自动化仪表的基本知识

在船舶机舱中,自动化仪表的应用是相当广泛的。自动化仪表不仅能在反馈控制系统中,对运行参数进行自动控制,同时也能对运行参数进行测量和显示。

自动化仪表按用途分类,有测量仪表、显示仪表、调节器和执行机构;按使用能源分类,有气动仪表和电动仪表;按结构形式分类,有基地式仪表和单元组合仪表。所谓单元组合仪表是指,控制系统的各种功能都分别用一台独立的仪表来实现,包括测量仪表、显示仪表、调节器等,各仪表之间用统一的标准信号联系起来。气动仪表的统一信号是 0.02 ~ 0.1 MPa;电动仪表的统一信号是 0 ~ 10 mA 或 4 ~ 20 mA。所谓基地式仪表是指,把测量仪表、显示仪表和调节器组装在一个壳体内,成为不可分的整体,它们之间也不用统一信号联系。

在船上所采用的气动仪表中,基地式仪表和单元组合式仪表两种形式都有,而气动单元组合仪表应用得更多一些。因此,本章除介绍气动仪表的基础知识外,重点是介绍各种气动单元组合仪表的结构、工作特性及在管理中应注意的问题。

### (一) 自动化仪表的主要品质指标

在自动控制和监视系统中,我们希望仪表所检测的参数值能完全反映出该参数的实际值,



但是,不论品质多么好的仪表,所测结果与参数的真值之间总有一定的差别,习惯上称为“误差”。对自动化仪表品质的要求,主要是看它能以多大的准确度来反映被测量参数的真值。测量值与真值越接近,仪表的误差就越小,测量精度也就越高。但仅用误差来描述仪表的好坏是不够的,还必须从多方面来鉴别仪表的品质。

### 1. 基本误差与附加误差

基本误差是由于仪表结构中的间隙、摩擦、刻度不均或分度不准等原因所造成的误差,即为仪表本身缺陷所造成的误差。因此,一台好的仪表在加工制造时,应制作得很精密,尽量减小基本误差。

附加误差是仪表在使用中,由于外界条件的影响,如环境温度、湿度、振动等所引起的误差。一般在仪表设计中预先都采取了一些补偿措施来减小附加误差,但不可能彻底消除。在仪表的说明书中,规定了使用方法和使用条件,以免带来过大的附加误差。

### 2. 绝对误差

绝对误差又称指示误差,若仪表表示的被测参数值为 $A$ ,而被测参数的真值是 $A_0$ ,则绝对误差 $\Delta A = A - A_0$ ,被测参数的绝对真值是很难得到的,一般是用精度高的标准仪表所测得的平均值作为被测参数的真值 $A$ ,绝对误差是不能完全反映仪表的精度的,比如 $\Delta p = 0.01 \text{ MPa}$ ,若测量范围是 $10 \text{ MPa}$ 的话,该误差可忽略不计。但若测量范围是 $0.02 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ,这个误差已大到该仪表不能再使用了。

### 3. 相对误差

相对误差 $\delta$ 是指,仪表的绝对误差所占该仪表指示值的百分数,即

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} \times 100\%$$

相对误差是反映测量仪表精确度的指标。

### 4. 仪表的精度

仪表的精度就是仪表盘或说明书中所写的精度等级,常见的等级有 $0.1$ 级、 $0.2$ 级、 $0.35$ 级、 $0.5$ 级、 $1.0$ 级、 $1.5$ 级、 $2.0$ 级、 $2.5$ 级等,其中 $0.1$ 级、 $0.2$ 级和 $0.35$ 级多用于标准仪表。

仪表的精度是指测量中的最大指示误差 $\Delta A_{\max}$ 占仪表的最大测量范围(量程) $A'$ 的百分数 $\delta_0$ ,即

$$\delta_0 = \frac{\Delta A_{\max}}{A'} \times 100\%$$

通常用去掉百分号的数字表示仪表精度的等级。

### 5. 仪表的灵敏度

灵敏度是指,仪表对输入信号开始有反应的灵敏程度,若仪表的输入量变化 $\Delta x$ ,相对应的输出量变化 $\Delta y$ ,则仪表的灵敏度 $S$ 为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

可见,仪表的灵敏度越大,越能测出微小的输入变化。一般小量程仪表的灵敏度比大量程的灵敏度高。

### 6. 仪表的不灵敏区、灵敏限、变差

由于仪表活动部件的摩擦、间隙、弹性元件滞后现象的存在,当输入信号有一微小变化时,

仪表输出仍然不变,这就是不灵敏区。

灵敏限是指,引起仪表输出有一微小变化时,所需输入量的最小变化值,一般认为灵敏限等于  $1/2$  不灵敏区。

仪表的变差是指在外界条件不变的情况下,多次由不同方向使仪表输入为同一真值时,仪表指示值之间的最大误差。即仪表在同一测量点,其正行程和反行程指示值之差。可见,仪表的不灵敏区是由输入量的变化来表示的,而变差是以输出量的指示变化来表示的,它们都是仪表结构不完善程度的标志。

## (二) 气动仪表的元部件及组成原理

### 1. 气动仪表的主要元部件

气动仪表的种类繁多,功能相同仪表的结构也是千差万别的。但是,构成这些仪表的元部件为数并不多,主要有弹性元件、节流元件、气体容室、喷嘴挡板机构和功率放大器等。

#### (1) 弹性元件

弹性元件有弹性支承元件和弹性敏感元件两类,螺旋弹簧和片簧属于弹性支承元件,用于支承、平衡或增强弹性敏感元件的刚度。弹性敏感元件的作用是将承受的压力或轴向推力转变成位移信号。弹性敏感元件的刚度较小,灵敏度(刚度的倒数) $\delta$ 较大。当对弹性敏感元件施加一定的轴向推力时,其变形位移量较大,也就是说,它们对轴向推力的变化反应是敏感的。螺旋弹簧刚度较大,通常与弹性敏感元件组合使用,以增加其刚度,也多用于调整弹性敏感元件的初始位置,如图 8-6 所示。

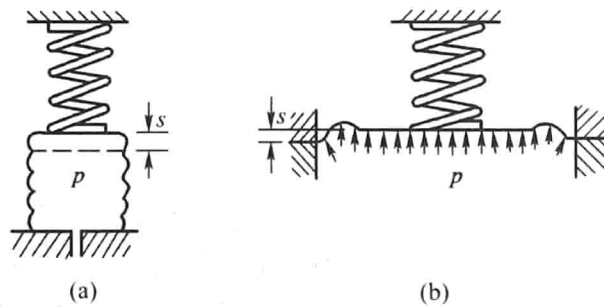


图 8-6 弹性元件组合示意图

弹性敏感元件有波纹管、金属膜片、橡胶膜片、弹簧管和金属膜盒等,如图 8-7 所示。假定送入波纹管的气压信号  $p$ ,它是弹性敏感元件的输入量,波纹管的位移量  $s$  是弹性敏感元件的输出量,显然输出与输入的关系是

$$s = \frac{p \cdot F_e}{E}$$

式中, $F_e$  是波纹管的有效面积,这个有效面积要大于波纹管顶部的几何面积  $\pi d^2/4$ ;  $E$  是波纹管和支承弹簧的总刚度。

从上面的式子可以看出,弹性元件在弹性变形范围内,其刚度  $E$  为常数,波纹管的有效面积为常数,则弹性元件的输出量  $s$  与输入量之间是成比例关系的。实验结果表明,对波纹管的压缩变形比拉伸变形具有更好的线性关系,且处于压缩状态能承受较大的压力。如果一开始让波纹管处于自由状态,其工作过程中是处于拉伸变形,则它的变形量不大就进入了非弹性变形区。为此,在实际安装波纹管时,常采用预压缩的办法来提高波纹管的线性使用范围。



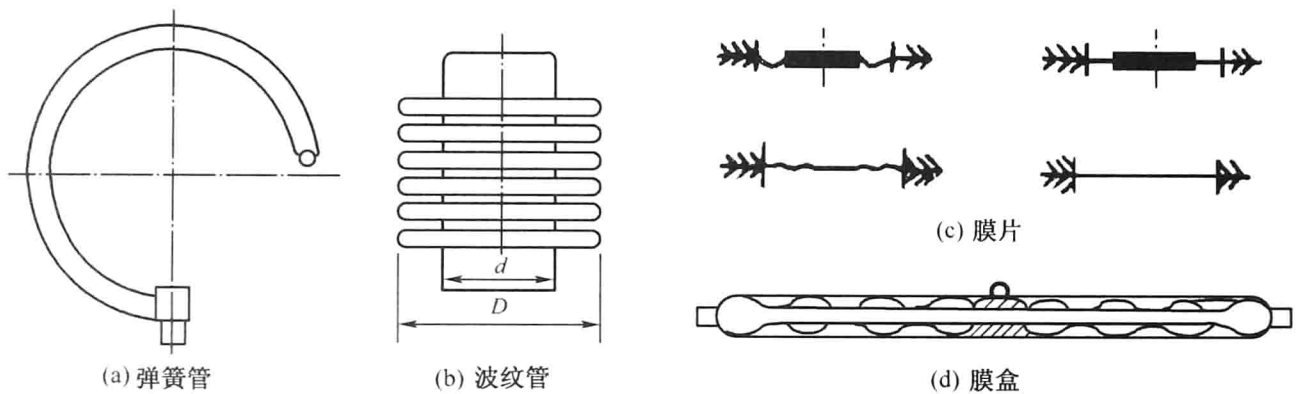


图 8-7 主要弹性敏感元件

金属膜片在弹性变形范围内,其变形量很小,为增加它的线性范围,常制成波纹状,且与水平面成一定角度。弹簧管有单圈弹簧管和多圈弹簧管。单圈弹簧管自由端位移量较小,如果在弹性变形范围内要得到较大的变形,可采用多圈弹簧管。橡胶膜片很软,在小的工作范围内,其刚度可近似看成零。在实际使用中,往往制成波纹状且中间加硬芯。

## (2) 节流元件

在气动仪表中,节流元件起着阻碍气体流动的作用。它能产生压降和改变气体的流量。节流元件按其工作特点可分为恒节流孔和变节流孔两种类型。

常用的恒节流孔节流元件有:毛细管式和小孔式,如图 8-8 所示。毛细管式可用不锈钢或玻璃管制成,直径为 0.18 ~ 0.3 mm。小孔式恒节流孔的内径有几种常用规格,即 0.25 mm、0.30 mm、0.50 mm,长度为 4 mm。

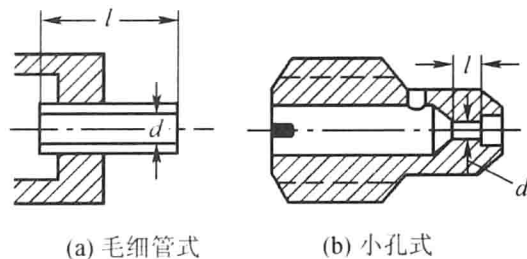


图 8-8 恒节流孔

衡量节流元件特性的参数是气阻。通常把气体流过节流元件在两端产生的压降,与气体流量之间的对应关系称为节流孔的流量特性。显然,节流孔内径越小,产生的压降也就越大。我们常用气阻  $R$  来表示节流元件对气体流动阻碍作用的大小,气体在节流孔中处于层流状态时,气阻  $R$ 、压降  $\Delta p$  和流量  $G$  之间的关系为

$$R = \frac{\Delta p}{G}$$

$$\Delta p = G \cdot R$$

由于恒节流孔内径不能改变,气阻不能调整,所以常称为恒气阻或固定气阻。

变节流孔是指,气体经过节流孔流通时的流通面积是可以调整和改变的,其结构形式有:圆锥-圆锥形;圆柱-圆柱形;圆球-圆锥形等,如图 8-9 所示。由于变节流孔的流通面积是可调的,故在气体流过节流孔产生相同压降的情况下,其流量是不同的,即气阻  $R$  不同,所以变节流孔的气阻  $R$  叫可调气阻。常用变节流孔组成变节流阀,用于调整比例带、积分时间和微分时间。