

# 轮机自动化

主编 初 忠

主审 李世臣



*Lunji Zidonghua*

大连海事大学出版社

# 轮机自动化

主 编 初 忠  
主 审 李世臣

大连海事大学出版社

© 初 忠 2014

图书在版编目(CIP)数据

轮机自动化 / 初忠主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2014. 3  
ISBN 978-7-5632-2988-8

I. ①轮… II. ①初… III. ①轮机—自动化 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 048318 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: 16.75

字数: 409 千

印数: 1 ~ 1500 册

出版人: 徐华东

责任编辑: 苏炳魁

版式设计: 解瑶瑶

封面设计: 王 艳

责任校对: 张 华

ISBN 978-7-5632-2988-8 定价: 33.50 元

# 内 容 提 要

本书以培养合格的技能型人才为目标,着重介绍轮机自动化的基本概念及实际应用。全书共分五章。第一章介绍了反馈控制系统的基本概念、调节器的调节规律及船用自动化仪表等;第二章以冷却水温度控制及燃油黏度控制为例介绍实船应用的反馈控制系统;第三章介绍了船舶辅锅炉控制系统、分油机控制系统、自清洗滤器控制系统及阀门控制系统等;第四章介绍了主机遥控的基本概念、常用阀件、典型控制回路、气动操纵系统及典型船舶主机遥控系统;第五章介绍了船舶机舱监视报警系统基础知识、检测传感器、曲柄箱油雾浓度监视报警系统、船舶火灾监视报警系统及典型的机舱监视报警系统等。

本书可作为水运院校轮机工程技术、船舶工程技术等专业三年制专科(高职)的试用教材,也可作为成人高等教育轮机工程技术专业的培训教材,还能供与轮机相关的技术人员参考。

# 前 言

青岛远洋船员职业学院于2012年获批为山东省首批技能型人才培养特色名校,在“轮机工程技术和船舶电子电气技术重点专业建设方案”中,轮机自动化课程被确定为课程体系构建和核心课程建设中的优质核心课程。

在充分采纳各大航运企业专家意见的基础上,以技能型人才培养目标为主线,以工学结合为特色,并参照最新的《中华人民共和国海船船员适任考试大纲》编写了本教材。本书在讲解轮机自动化基本概念的基础上,着重阐述轮机自动化中具有普遍性和规律性的内容,特别注重理论联系实际,对基础理论内容进行了精简,去除了与专业岗位关系不大的基础理论及工作原理部分。在系统实例的选择上力求体现当前船舶机舱自动化系统的现状,紧密结合船舶机舱新技术,注重提高实际应用能力。

全书由青岛远洋船员职业学院组织教师编写。其中,第一、二、四章由初忠编写;第三章由高兴斌编写;第五章的第一至四节由殷志飞编写,第五节由许敏编写,第六节由许建编写。全书由初忠定稿,由大连海事大学李世臣教授/高级轮机长主审。

由于本书内容广泛,编写时间仓促,编者水平有限,书中难免会有不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2013年12月

## 目 录

绪论	1
<b>第一章 反馈控制系统基础</b>	5
第一节 反馈控制系统的基本概念	5
第二节 调节器的调节规律	12
第三节 气动仪表的基础知识	23
第四节 船用自动化仪表	34
第五节 调节器的参数整定	49
<b>第二章 船舶机舱反馈控制系统</b>	54
第一节 柴油机冷却水温度控制系统	54
第二节 燃油黏度控制系统	70
<b>第三章 船舶辅机自动控制系统</b>	83
第一节 船舶辅锅炉控制系统	83
第二节 燃油净油单元自动控制系统	100
第三节 自清洗滤器的自动控制	115
第四节 阀门遥控及液舱遥测系统	120
<b>第四章 船舶主机遥控系统</b>	128
第一节 主机遥控的基本概念	128
第二节 主机遥控系统常用的气动阀件	134
第三节 起动逻辑回路	141
第四节 换向与制动逻辑回路	152
第五节 转速控制及限制回路	154
第六节 主机气动操纵系统	163
第七节 AUTOCHIEF - IV 主机遥控系统	179
第八节 现场总线型主机遥控系统	199
第九节 电控柴油机系统基本知识	205

<b>第五章 船舶机舱监视报警系统</b> .....	208
第一节 船舶机舱监视报警系统基础知识.....	208
第二节 检测传感器.....	217
第三节 常规机舱监视报警系统.....	228
第四节 网络型监测与报警系统.....	232
第五节 曲柄箱油雾浓度监视报警系统.....	242
第六节 船舶火灾监视报警系统.....	247
<b>参考文献</b> .....	254

## 绪 论

轮机自动化主要研究如何利用各种自动控制设备替代人工劳动,使得船舶动力装置能安全、高效地自动运行。自动化技术已渗透到社会的各个领域,它能节省人力,改善劳动条件;能提高动力装置的运行质量,增强设备的可靠性;能增加设备的工作效率,提高动力装置的经济性。

海运作为交通运输的一个重要分支,其船舶自动化技术在近几十年得到了飞速发展。不过,它相对于陆地上工业自动化发展仍有所滞后,主要原因是船上的工作环境较差(比如摇摆、震动、高温、潮湿等),陆地上的自动化仪表不能直接用在船上,需要特别设计可靠性很高的仪表,产品的投资就较高,影响了船舶自动化的发展,但船舶自动化与陆地工业自动化的差距在不断缩小。

船舶自动化包括导航自动化、舾装自动化及轮机自动化。导航自动化主要包括船舶自动定位、自动避碰、选择最佳航线等。舾装自动化包括自动装卸、自动平衡压载及船体状态的自动监控等。轮机自动化是船舶自动化的核心部分,也就是本书所要研究的内容。现代的轮机自动化通常包含舾装自动化的主要内容。

### 一、轮机自动化的发展历程

轮机自动化的发展与船舶的发展紧密联系在一起,只要船舶设置动力装置就必然涉及机舱设备的自动控制。轮机自动化的发展是逐步进行的,直到20世纪50年代,机舱中还只能实现单项自动化,即局部设备采用了自动化技术。例如,发电机上的调速器、制冷装置中的膨胀阀、温度和压力继电器、舵机的远距离操纵机构、锅炉的给水调节器、燃烧自动装置、空气压缩机的压力开关、自动火警等都是单项自动化设备。这个阶段的特点是还没有构成一个完善的集中控制与监视系统。20世纪60年代以后,随着现代科学技术的发展,轮机自动化得到了突飞猛进的发展,下面列出可代表轮机自动化发展历程的标志性船舶。

(1)1961年,日本建造了世界上第一艘具有集中控制室的自动化船“金华山丸”。

(2)1965年,日本为丹麦建造的柴油机船“Selme Dan”号和丹麦建造的柴油机船“Andorra”号是世界上最早的两艘无人机舱船。

(3)1970年,日本建造了世界上第一艘以中型计算机作为控制核心的超自动化船“星光丸”。

(4)1979年,日本建造了世界上第一艘以微型计算机作为控制核心的自动化船“白马丸”。

(5)1984年,原联邦德国驾机合一的第二代“未来船”(只配备了12名船员)下水。

(6)1998年,挪威建造了首次装有MAN B&W电控智能系统的柴油机船“Bow Cecil”。



(7)2001年,韩国建造了首次装有 Wartsila Sulzer RT-flex 电控智能柴油机船“Gypsum Centennial”。

(8)2009年,法国建造了带有风帆和太阳能动力的环保概念邮轮“Eoseas”。

未来轮机自动化的发展趋势主要体现在以下几个方面:

### (1) 计算机控制网络的普及应用

计算机船舶机舱控制经过了单机控制、多级分散控制、多级集散控制、多种网络混合控制的过程。现场总线技术是目前较多船舶机舱常用的网络控制技术,而 CAN 现场总线网络是各种现场总线技术的典型代表,也是今后一段时间内船舶网络控制技术的发展方向。

### (2) 智能控制兴起

自动控制理论包括古典控制理论、现代控制理论及智能控制理论。常用的智能控制形式主要有专家控制、模糊控制及神经网络控制等,这些高级的控制算法已经逐步用于船舶机舱控制中。智能控制的应用是最大限度地实现船舶节能减排的根本保证。

### (3) 船岸一体化

由通信卫星支撑的遥测系统的更广泛应用将改变传统的机务管理及船舶管理模式。陆地集控室的概念已经提出,在陆地的办公室就如同在实船一样。各种机舱设备的状态及参数、船舶的状态及参数、备件和物料存量等信息都可在陆地的办公室进行全方位、全功能的多媒体实时监视,同时,利用专家系统对实时数据进行综合分析,如发现系统有故障,可立即向船上发出指令,进行故障应急处理。

### (4) 新型船舶依赖于控制技术

当前,新型船舶层出不穷,其建造目标主要是在安全可靠的前提下实现节能减排。新型船舶采用的新技术主要有两个方面。一是改进船舶动力技术,包括研制新型柴油机、船用燃料电池、风帆动力及太阳能电池等。二是采用船舶减阻技术,如船底注入气泡技术,采用船舶气腔系统等。上述船舶新技术都需要有完备的控制技术为基础。

## 二、轮机自动化的基本内容

轮机自动化所涉及的内容十分广泛,对不同类型的船舶,其轮机自动化的内容会有所差异,而同类型船舶中同样的机电设备也可以配不同厂家的控制产品,机舱控制设备呈现多样化。但从控制功能来看,轮机自动化主要包括以下几个方面的内容。

### 1. 参数自动调节

参数自动调节也称反馈控制,它能自动地使机舱中的运行参数保持在规定值或规定值附近的一定范围内。参数自动调节的理论基础是自动控制理论,它是轮机自动化的核心,也是轮机自动化的基础,它在机舱中有着广泛的应用。例如,柴油机转速控制,主、副机冷却水温度及滑油温度控制,主机燃油黏度控制,燃油及滑油分油机温度控制,锅炉水位及蒸汽压力控制,船舶航向控制,发电机电压控制等。

### 2. 程序控制

程序控制指的是顺序控制。它是一种按照预定的逻辑程序或时序程序逐项地完成一连串操作的断续控制。例如,船舶发电机自动起动、自动并车和自动转移负载等一系列控制,辅锅炉自动进行预扫风、预点火、喷油点火、锅炉预热、负荷控制的时序控制,分油机自动分油及自动排渣的时序控制,故障泵与备用泵的自动切换等。

### 3. 远距离操纵

远距离操纵也称遥控,是指远离机旁对机械设备的操纵。例如,在驾驶台或集控室操纵主机,在集控室起动或停止发电机、各种泵及开关各种阀等。其中,主机遥控系统是一个比较复杂的庞大系统,既有逻辑程序控制,也有连续转速控制,要使驾驶台的控制命令能安全、有效地控制主机运转,必须有一套完善的控制装置和执行部件作保证。

### 4. 集中监测与报警

它主要包括机舱主、副机工况参数及运行状态的测量、变送及集中显示,参数的越限报警和机舱火警,定时记录轮机日志,自动记录车钟车令,以及机舱内外的通信联系等。

### 5. 安全保护和自动灭火

安全保护是自动化的必要补充。在正常情况下,安全保护系统是不起作用的,只有当发生不正常情况时,安全保护系统才会采取保护措施,以免引起严重事故。例如,当锅炉出现水位过低或突然熄火时,它的安全保护装置就会立即使锅炉断油,停止燃烧;若主机滑油压力过低,安全保护装置就会自动降低主机转速或使主机停车。

船舶火警装置是在船舶发生火灾的情况下保护船舶和人身安全的重要设备。机舱和整个船舶设置了各种传感器、火警中央处理装置以及自动灭火装置。当中央处理装置接收到探测器传来的火警信号后,立即发出声光报警信号至声响装置,并根据需要可起动灭火机构自动灭火。

## 三、轮机自动化对管理人员提出的要求

轮机自动化有两个显著特点,一是内容非常广泛,机舱中有各种不同的机电设备,大部分机电设备都需要有一个或多个控制系统来维持它的正常运行,因此,机舱中有数量众多、内容不同的自动控制系统。二是理论性特别强,前面已经提到,自动化技术的基础是自动控制理论,无论是古典控制理论,还是现代控制理论,或是智能控制理论,都需要复杂的数学工具。另外,轮机自动化还需要逻辑代数、数字电路等基础知识。尽管本教材去除了纯理论的知识,但学习轮机自动化会遇到很多困难,要想掌握它,必须付出艰苦地努力,不断增强学习的信心。下面给出了学习轮机自动化的几点建议。

### 1. 掌握自动控制基本概念

尽管自动控制理论以复杂的数学作为研究工具,但作为轮机管理人员来说,不必学习太多的数学,要把主要精力放在学习自动控制的基本概念上,并不断联系实际,加深理解。在参数自动调节方面,基本概念的掌握主要以古典控制理论推导的结论为主,现代控制理论和智能控制理论也是在古典控制理论的基础上发展起来的,其基本控制回路是相同的。在程序控制方面,主要掌握逻辑回路和时序控制的基本概念。

### 2. 充分发挥专业优势

各种控制系统的设计都是为控制对象及相关设备服务的,熟悉机舱中各种控制对象及相关设备的工作原理、功能及操作方法是十分重要的,这也是轮机管理人员的优势。只要我们充分发挥这一优势,深刻理解自动控制模拟手动控制这一概念,学好自动化也就成功了一半。

### 3. 学好计算机知识

随着计算机和网络技术的飞速发展,其在轮机自动化中的应用也越来越广,掌握计算机技术是轮机管理人员管好自动化船的必备条件。用微机可以控制各种系统和设备,可以说它是

一种万用控制工具,一旦轮机管理人员掌握了这种万用工具,就会受益无穷。掌握了一个计算机控制系统,就很容易掌握其他各种系统。因为各种计算机控制系统的工作原理和硬件结构形式是相似的,差别就在于控制功能不同,控制功能是由计算机控制程序决定的。对轮机工程人员来说,要想学好计算机,首先要消除计算机的神秘感,通过不断学习和使用计算机,就会逐步走进计算机的世界;必须掌握计算机的基本工作原理和硬件的基本概念,这是学好计算机的基础;重点掌握计算机在某一控制项目中所具有的功能及各种操作、维修方法,通过举一反三来学习其他计算机控制系统,会收到事半功倍的效果。

#### 4. 改进学习方法

不断探索和改进学习方法,提高学习兴趣,也是学好轮机自动化的一个重要方面。例如,可以采用师生共同参与的“任务驱动法”。它是以解决问题、完成任务为主的多维互动式的学习理念,围绕任务展开学习,以任务的完成结果检验和总结学习过程等,这种方法能使学员处于积极的学习状态,提高学习效率。

## 第一章 反馈控制系统基础

反馈控制也称参数的自动调节,它是轮机自动化的基础及核心,其理论基础是古典控制理论。在船舶机舱中,常见的反馈控制系统包括冷水温度、滑油温度、燃油黏度、燃油温度、主机转速、副机转速、发电机电压、船舶航向、锅炉水位和蒸汽压力等控制系统。

### 第一节 反馈控制系统的基本概念

反馈控制系统的作用是按照动力装置的要求,把系统中的某些运行参数(如上面所提到的机舱中各种运行参数)控制在所希望的最佳值上。尽管这些参数的种类不同,其控制系统的结构形式也不相同,但是组成这些控制系统的基本单元及其工作过程大致是相同的。下面以柴油机气缸冷却水温度控制为例,引出反馈控制系统的共性知识。

#### 一、反馈控制系统的组成

如图 1-1 所示手动和自动控制柴油机气缸冷却水温度的控制过程,图中只画出了冷却水系统中的柴油机、冷却器、水泵、三通阀及温度计等基本部件。

冷却水温度控制的基本方法是通过改变三通阀的位置,来改变经过冷却器的水量和旁通水量的分配比例,当经过冷却器的水量增加,而旁通水量减少时,冷却水温度就会降低;反之,冷却水温度就升高。由于自动控制过程实际上是直接模拟手动操作过程,所以,先讲手动操作,然后再过渡到自动控制。

柴油机在运行过程中需要保持一个最佳的冷却水温度,这个最佳值是由柴油机厂家给出并由使用者设定的。

假设所要讨论的柴油机冷却水进口温度的最佳值为  $70^{\circ}\text{C}$ 。在手动控制时,管理人员要用眼睛观察温度计,并把观察到的冷却水实际温度报告给大脑,大脑对温度值进行分析和计算,其内容包括冷却水的实际温度是否偏离了最佳值。如果偏离了最佳值,是

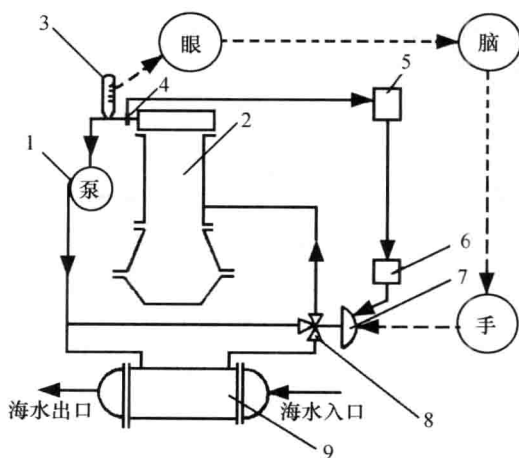


图 1-1 柴油机气缸冷却水温度控制过程示意图  
1—淡水泵;2—柴油机;3—温度计;4—感温元件;5—温度变送器;6—调节器;7—执行机构;8—三通电磁阀;9—淡水冷却器

高于最佳值还是低于最佳值,偏离最佳值的数值是多少,水温的变化速度是多少,根据某种计算规则求出三通调节阀的开度改变量。大脑会把这一改变量作为输出命令指挥双手改变三通调节阀的开度,通过一次或多次调整,使冷却水的实际温度逐渐恢复到冷却水温度的最佳值上。

注意,在上述手动控制过程中,人的三大器官——眼、脑、手——缺一不可。用眼睛观察实际水温,用脑对观察到的实际水温和最佳水温进行分析和计算,并得出计算结果,产生控制命令。用手执行大脑的控制命令,改变三通阀的开度。如果想用自动控制系统来实现水温自动控制,就必须有能代替人的三大器官的控制仪表。在图 1-1 中,由温度传感器和变送器组成的测量单元来代替人的眼睛,随时测量冷却水的实际温度并把该值送给调节器。调节器相当于人的大脑,对冷却水实际温度和最佳温度进行分析、判断和计算,然后输出控制信号至执行机构。执行机构相当于人的双手来改变三通调节阀的开度。通过这个实例可以看出,反馈控制系统由四个基本单元组成,即控制对象、测量单元、调节单元、执行机构。

### (一) 控制对象

控制对象也称被控对象,它是指控制系统所要控制的机器、设备或装置,具有储存物质或能量的能力,这也是控制对象的一大特点。控制系统所要控制的工况参数叫做被控制量。例如,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;在柴油机气缸冷却水温度控制系统中,淡水冷却器是控制对象,冷却水温度是被控量;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;在空气压力的自动控制系统中,空气瓶是控制对象,空气压力是被控量;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;在船舶航向控制系统中,船舶是被控对象,航向是被控量。

在设计控制系统或对其进行参数整定时,必须研究控制对象的特性,以保证控制装置能更好地对控制对象实施控制。根据储存容积的个数,控制对象可分为单容控制对象和多容控制对象。单容控制对象只有一个储存容积,例如,机舱中的锅炉、空气瓶、压力水柜、燃油柜等。多容控制对象具有两个或两个以上的储存容积。例如,机舱中的柴油机(双容)、加热器(三容)、冷却器(三容)等。控制对象所具有的储存容积数量与描述控制对象微分方程的阶数是一一对应的,例如,描述三容控制对象的微分方程是三阶的。另外,控制对象还有下面两个共同点:当控制系统受到扰动后,会伴随有物质或能量流入和流出,物质或能量在流动过程中会受到阻力;物质或能量在流动过程中或信号在传递过程中,会存在时间上的延迟。

机舱中控制对象的结构复杂程度不同,但由于控制对象有如上所述的共同特点,可能使内部物理过程完全不同的控制对象具有相同的数学模型。这样,我们从简单、直观的控制对象——单容水柜入手,分析其动态和静态特性,所得结论推广到其他控制对象,例如冷却器的数学模型可通过三个相互串连的单容水柜来获得。

### (二) 测量单元

测量单元一般由测量元件和变送器组成。测量元件用于检测被控量的实际值,变送器把测量元件输出的测量信号转换成标准的统一联系信号,即被控量的测量值送至调节器。在气动控制系统中,对应被控量的满量程,其标准的统一联系气压信号是  $0.02 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ;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  $4 \sim 20 \text{ mA}$ ,现在一

般多采用 4 ~ 20 mA。

### (三) 调节单元

调节单元是指具有各种调节作用规律的调节器。把被控量所希望控制的最佳值叫给定值,用  $r(t)$  表示;被控量的测量值用  $z(t)$  表示。把被控量的测量值离开给定值的数量叫偏差值,用  $e(t)$  表示。一般表示为  $e(t) = r(t) - z(t)$ 。当给定值大于测量值时,  $e(t) > 0$ , 称为正偏差;当给定值小于测量值时,  $e(t) < 0$ , 称为负偏差;当测量值等于给定值时,  $e(t) = 0$ , 称为无偏差。

调节器首先接收测量单元送来的被控量的测量信号,并与被控量的给定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),依据某种调节作用规律输出一个控制信号,送至执行机构,对被控量施加控制作用时,直到偏差等于零或接近零为止。在实际应用中,调节单元有位式调节器、比例调节器、比例积分调节器、比例微分调节器、比例积分微分调节器五种,其中,位式调节器采用断续控制方式,适用控制精度低的系统,其余的调节器采用连续控制方式,根据控制对象的特性不同及对被控量控制精度的要求,可选用不同调节作用规律的调节器。

### (四) 执行机构

执行机构的输入量是调节单元输出的控制信号,执行机构的输出量通常是调节阀的开度。调节单元输出的控制信号经执行机构直接改变调节阀的开度,从而可改变流入控制对象物质或能量流量,使之能符合控制对象负荷的要求,被控量会逐渐回到给定值或给定值附近,系统将会达到一个新的平衡。

上述四个单元是组成反馈控制系统的基本单元,缺一不可。另外,一个完整的控制系统一般都设有显示单元,用来指示被控量的给定值和测量值,气动控制系统应设有气源装置和定值器,电动控制系统需设稳压电源等辅助装置。

## 二、反馈控制系统的方框图

为了表示自动控制系统的组成、各组成单元的功能及它们之间的相互作用关系,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,各个方框内对应单元的名称,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 1-2 所示的反馈控制系统传递方框图。由于上述方框图可以不考虑具体结构形式和特点,因此,它是具体控制系统的抽象,可表示各种控制系统,具有普遍意义。

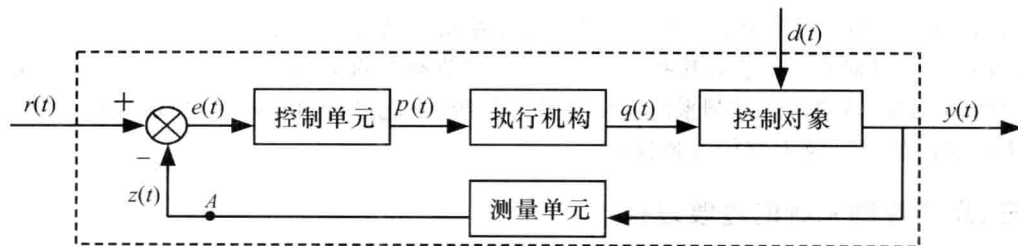


图 1-2 反馈控制系统传递方框图

$r(t)$ —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

在上述方框图中,代表实际单元的每个小方框称为一个环节。作为一个环节必定有输入



量和输出量,一般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。环节的基本特性是信号传递的单向性,即环节输出量的变化取决于输入量的变化及该环节的特性,而输出量的变化不会直接影响输入量。

在上述方框图中,系统的输出量只有一个,即被控量;系统的输入量有两个,即给定值变化量和扰动变化量。引起被控量变化的一切因素统称为扰动。扰动既是整个控制系统的输入,也是控制对象这个环节的输入。扰动可分为两类,一类是轮机人员无法控制的扰动,称为外部扰动。例如,在锅炉水位控制系统中,锅炉负荷(外部用汽量)的变化会引起水位的变化是外部扰动;在柴油机气缸冷却水温度控制系统中,柴油机负荷的变化、海水温度的变化、淡水冷却器中热阻的变化等都是外部扰动。另一类是轮机人员可以控制的扰动,称为基本扰动。例如,水位控制系统中给水调节阀开度的变化,冷却水温度控制系统中三通调节阀开度的变化,这些扰动是管理人员可以控制的,属于基本扰动。在图 1-2 中,有两个信号线的箭头指向控制对象,执行机构的输出是基本扰动;扰动  $d(t)$  是外部扰动。

在控制系统传递方框图中,符号“ $\otimes$ ”是比较环节(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)。它随时对被控量的给定值  $r(t)$ (旁标“+”号)与被控量的测量值  $z(t)$ (旁标“-”号)进行比较,得到偏差值  $e(t)$ ,作为调节器的输入量。调节器根据  $e(t)$  的大小按照某种调节规律输出控制信号,经执行机构改变调节阀的开度,即改变流入控制对象的物质或能量流量,目的是不断消除外部扰动对被控量的影响。而被控量的变化经测量单元又反送到调节器的输入端,把输出信号反送到输入端的过程叫反馈。只有反馈才能随时对被控量的给定值和测量值进行比较,只要存在偏差,调节器就会指挥调节阀改变开度,直到测量值回到给定值使偏差  $e(t) = 0$  为止。这时调节器输出不再改变,调节阀的开度正好适应负荷的要求,控制系统达到一个新的平衡状态。可见对运行参数的自动控制必须要有反馈过程,这就是把参数的自动控制系统称为反馈控制系统的原因。在反馈中,有正反馈和负反馈之分。正反馈是指经反馈能加强闭环系统输入效应,即使偏差  $e(t)$  增大。负反馈是指经反馈能减弱闭环系统输入效应,即使偏差  $e(t)$  减小。显然,按偏差控制运行参数的控制系统,必定是负反馈控制系统。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,但是,负反馈作用总是大于正反馈作用,因此,综合反馈的结果还是负反馈。

在反馈控制系统方框图中,前一环节的输出就是后一环节的输入。这样,控制系统就形成了一个封闭控制回路,称为闭环系统,反馈控制系统必定是闭环系统。如果在某处把回路断开,比如在图 1-2 的 A 处断开,这时系统就由闭环系统变为开环系统,不能对被控量进行自动控制。但是,如果调节器安装在集控室内,可通过调节器中的手动装置进行手动遥控。如果在调节器的输出端信号断开,控制系统也变为开环系统,不能进行自动控制,但还具有遥测功能,通过集控室内的显示仪表进行参数显示。

### 三、反馈控制系统的过渡过程

#### (一) 反馈控制系统控制过程特点

在反馈控制系统运行过程中,若被控量不随时间变化稳定在给定值上或给定值附近的平衡状态称为稳态或静态,而把被控量随时间变化的不平衡状态称为动态。稳态是暂时的、相对

的,而动态是永恒的、绝对的,因为系统经常会受到扰动,系统的平衡状态就会遭到破坏,被控量就会不断地变化。因此,研究反馈控制系统的动态更为重要。

下面分析一下反馈控制系统的工作过程。假设系统在初始平衡(受到扰动前,系统稳定运行)状态时,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检测下来并转变成统一的标准信号送至调节器的输入端,调节器随时对被控量的给定值与测量值进行比较,得到偏差值,调节器根据偏差值的大小按照某种调节作用规律输出一个控制信号,改变调节阀的开度,也就是改变流入控制对象的物质或能量流量,向减少偏差的方向来改变被控量。上述控制过程是一个连续控制过程,为了理解方便,可分解成很多次闭环调节,不断克服扰动,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。当新的扰动到来时,上述平衡又被破坏,闭环调节又不断进行,以便建立新的平衡。当系统的扰动频繁产生时,系统不会达到平衡状态,一直处于不断的调节之中。

### (二) 反馈控制系统过渡过程的几种主要形式

在研究反馈控制系统时,需要分析被控量随时间的变化情况。我们把被控量从一个稳态变化到另一个稳态的过程称为过渡过程或动态过程。扰动是过渡过程产生的根本原因,在分析反馈控制系统的过渡过程时,通常采用阶跃信号作为一种典型的扰动输入,如图 1-3(a)中的上部曲线所示。这种输入是一种突变作用,从坐标 0 点突然增加一个量,并且一直持续下去,保持不变。采用阶跃信号的原因主要有下面几个方面,首先是研究控制系统方便,用阶跃输入得到的过渡过程能直观地反映控制系统的性能;其次是阶跃信号容易实现。例如,按下一个按钮,突然改变阀门开度,突然改变给定值等;最后,阶跃输入是一种最厉害的扰动,若系统能克服阶跃扰动,必能克服其他类型的扰动,保证所调试的系统能在实际运行中可靠地工作。下面讨论反馈控制系统在阶跃扰动输入下过渡过程的几种主要形式。

#### 1. 发散振荡过程

如图 1-3(b)中的曲线 2 所示,被控量的波动幅度越来越大,它是一个不稳定的过程,在实际中不能采用。造成不稳定的动态过程原因有多方面,但主要原因是调节器控制作用太强,可通过参数调整来解决。

#### 2. 等幅振荡过程

如图 1-3(b)中的曲线 1 所示,被控量的波动幅度相等,也属于不稳定的过程,在实际中也不能采用。

#### 3. 非周期过程

如图 1-3(c)中的曲线 3 所示,被控量在给定值的某一侧缓慢变化,只有一个波峰值,最后稳定在某一数值上。它是最稳定的动态过程,但是,它的动态精度和稳态精度都很低且被控量达到新稳态值所需时间很长,因此,在实际中一般也不采用这种动态过程。产生非周期过程的

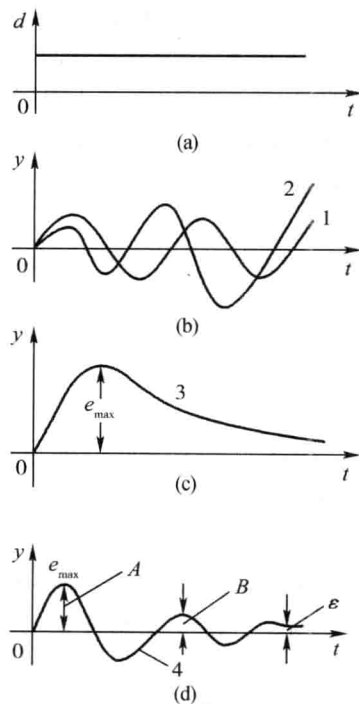


图 1-3 改变外部扰动控制系统的动态过程



主要原因是调节器的控制作用太弱。

#### 4. 衰减振荡过程

如图 1-3(d) 中的曲线 4 所示, 被控量上下波动, 但波动幅度越来越小, 最后稳定在某一数值上。它是实际中采用的动态过程。当然不是所有的衰减振荡都能在实际中采用, 只有满足下面将要介绍的控制系统品质指标的衰减振荡动态过程, 才符合要求。

### (三) 评定控制系统动态过程品质的指标

为评定控制系统动态过程品质, 要在阶跃扰动输入下, 画出系统被控量随时间的变化曲线。为说明问题方便起见, 我们总是把控制系统的初始平衡状态定为坐标的零点。控制系统接受到的扰动有两种情况, 一种情况是给定值不变, 改变外部扰动 (定值控制), 在调节器控制作用下, 被控量将围绕原给定值变化且最终稳定下来。图 1-3 示出了在外部扰动输入下控制系统过渡过程的几种主要形式。另一种是外部扰动不变, 改变给定值。这时在调节器控制作用下, 被控量将围绕新的给定值变化, 最终稳定在新的给定值上或给定值附近。如图 1-4 示出了在给定值扰动输入下控制系统过渡过程的几种主要形式。两种扰动输入控制系统的品质指标是有差异的, 改变外部扰动的控制系统品质指标主要用衰减率、衰减比、振荡次数、最大动态偏差、静态偏差、过渡过程时间等。改变给定值的控制系统品质指标主要用超调量、振荡次数、静态偏差、过渡过程时间、上升时间、峰值时间等。

对反馈控制系统的基本要求是保证系统有良好的稳定性、准确性和快速性, 反馈控制系统的品质指标也可与之相对应分为稳定性指标、准确性指标和快速性指标。

#### 1. 稳定性指标

稳定性指标主要包括衰减率、衰减比、超调量、振荡次数等。

衰减率  $\varphi$  是指在衰减振荡中 [如图 1-3(d) 曲线 4], 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

$$\varphi = \frac{A - B}{A}$$

$\varphi$  值越大, 系统的稳定性就越好, 要求  $\varphi = 0.75 \sim 0.9$ 。根据  $\varphi$  值的大小很容易判别过渡过程的形式和稳定程度。 $\varphi < 0, A < B$ , 为发散振荡过程;  $\varphi = 0, A = B$ , 为等幅振荡过程;  $0 < \varphi < 1, A > B$ , 为衰减振荡过程;  $\varphi = 1, B = 0$ , 为非周期过程。

衰减比  $\lambda$  是指在衰减振荡中, 第一个波峰值  $A$  除以第二个同相波峰值  $B$ 。 $\lambda$  越大, 系统的稳定性越好。显然, 衰减率  $\varphi$  与衰减比  $\lambda$  是同一概念的不同表达形式, 它们是相互关联的, 知道了  $\varphi(\lambda)$  的值就可求出  $\lambda(\varphi)$  的大小。例如, 已知  $\varphi = 0.75$ , 则  $\lambda = 4$ , 即衰减比为 4:1, 正常衰减率范围  $\varphi = 0.75 \sim 0.9$ , 所对应的衰减比范围  $\lambda = 4 \sim 10$ 。

超调量  $\sigma_p$  是指在衰减振荡中 [如图 1-4(d) 曲线 4], 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

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

超调量越小, 控制系统动态过程波动越小, 稳定性越好。但若  $\sigma_p$  太小, 甚至  $\sigma_p = 0$  时, 被控量无波动地逐渐靠近给定值, 成为非周期过程。系统稳定性虽然最好, 但系统的快速性较差, 这是不可取的。若  $\sigma_p$  太大, 控制系统动态过程的振荡明显加剧, 使系统稳定性变差。由于振荡不息, 系统的快速性也较差。在实际过程中, 要求  $\sigma_p < 20\%$ 。