

高等学校教材

船舶自动控制系统

牛宝来 主编



大连海运学院出版社

高等学校教材

船舶自动控制系统

牛宝来 主编

贾欣乐 主审

大连海运学院出版社

内 容 提 要

本书是作者多年来为船舶自动化专业高年级学生授课的讲稿，并在科研实践的基础上充实提高写成的。本书内容包括：船舶自动调节系统、柴油主机自动遥控系统和船舶微机监控系统。

本书可作为船舶自动化专业、自动控制专业和船电专业高年级学生的教材，也可供从事船舶自动化系统设计、维修与管理的工程技术人员和船舶动力装置专业的师生参考。

船舶自动控制系统

牛宝来 主编

贾欣乐 主审

大连海运学院出版社出版

大连海运学院出版社发行

大连海运学院出版社印刷厂印刷

责任编辑：王铭霞 封面设计：安 生

开本：787×1092 1/16 印张：21.5 字数：537千

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数：0001—1500 定价：4.25元

ISBN 7—5632—0073—8/U·4

登记证号：（辽）第11号

前 言

本书是根据交通院校船舶自动化专业《船舶自动控制系统》课程教学大纲编写的。总学时为 110 学时。

船舶自动控制系统是实现船舶自动化的重要组成部分。它涉及的内容极为广泛, 由于篇幅的限制, 这里不可能把所有的内容都给予详尽的讲述。为此, 从现代船舶自动控制系统出发, 在全面介绍船舶自动化的基础上, 重点阐明轮机自动控制系统组成的基本原理、基本概念以及实现控制的基本方法, 力求做到机电结合、中外结合和理论与实践相结合。

全书共分三篇十八章。第一篇是船舶自动调节系统, 主要介绍自动调节系统组成的基本原理; 调节对象的动态特性; 调节作用规律和常用的船舶自动调节系统。第二篇是船舶柴油主机自动遥控系统, 主要阐述柴油主机自动遥控系统实现的基本方法; 数字模型的建立; 系统的性能分析。第三篇是船舶微机监控系统, 重点介绍船舶微机监控系统构成的基本原理、接口技术和常用控制程序的设计。

本书第一、二篇由牛宝来编写, 第三篇由王本明编写。全书由牛宝来统编定稿, 贾欣乐教授审阅。

由于作者水平所限、加之时间短促, 书中不足之处在所难免, 望广大读者批评指正。

目 录

绪论 船舶自动化概述.....	(1)
第一篇 船舶自动调节系统	(5)
第一章 自动调节系统概述.....	(5)
§ 1—1 自动调节系统的组成.....	(5)
§ 1—2 自动调节系统的过渡过程及品质指标.....	(8)
§ 1—3 自动调节系统的分类.....	(11)
第二章 调节对象的动态特性.....	(14)
§ 2—1 影响调节对象动态特性的结构性质.....	(14)
§ 2—2 调节对象的动态特性.....	(18)
§ 2—3 对象容量系数和阻力对动态特性的影响.....	(25)
§ 2—4 多容对象的动态特性.....	(27)
第三章 对象动态特性的测量与识别.....	(31)
§ 3—1 飞升曲线法.....	(31)
§ 3—2 频率特性法.....	(36)
§ 3—3 用伪随机信号相关仪对系统在线识别.....	(38)
第四章 自动调节器的动作规律及其对调节过程的影响.....	(42)
§ 4—1 双位调节作用规律.....	(42)
§ 4—2 比例调节规律及其对调节过程的影响.....	(43)
§ 4—3 积分动作规律及其对调节过程的影响.....	(45)
§ 4—4 微分调节规律及其对调节过程的影响.....	(50)
第五章 自动调节器的参数整定.....	(55)
§ 5—1 动态特性参数.....	(55)
§ 5—2 法经验试凑法.....	(57)
§ 5—3 衰减曲线法.....	(59)
§ 5—4 稳定边界法.....	(61)
第六章 自动调节系统的方案设计.....	(61)
§ 6—1 被调参数的选择.....	(61)
§ 6—2 对象特性对调节质量的影响及调节参数的确定.....	(62)
§ 6—3 负荷变化对调节质量的影响及调节阀的选型.....	(67)
§ 6—4 测量滞后对调节质量的影响及克服滞后的办法.....	(70)
§ 6—5 调节规律对调节质量的影响及调节器的选型.....	(74)
第七章 复杂调节系统.....	(75)
§ 7—1 串级调节系统.....	(75)
§ 7—2 比值调节系统.....	(80)

第八章 船舶自动调节系统的应用实例	(83)
§ 8—1 船舶锅炉自动调节系统	(83)
§ 8—2 燃油粘度调节系统	(92)
§ 8—3 自动操舵控制系统	(96)
§ 8—4 冷却水与滑油的温度调节系统	(97)
第二篇 船舶柴油主机自动遥控系统	(99)
第九章 柴油主机自动遥控系统概述	(99)
§ 9—1 主机自动遥控系统的组成与分类	(99)
§ 9—2 主机自动遥控系统的优越性与发展简况	(102)
第十章 自动遥控系统的对象特性	(103)
§ 10—1 柴油主机的动态特性	(103)
§ 10—2 螺旋桨的工作原理与特性	(105)
§ 10—3 柴油机与螺旋桨的配合特性	(109)
第十一章 主机自动遥控系统设计的基本要求	(111)
§ 11—1 对船用柴油机本身的要求	(111)
§ 11—2 驾驶室操纵控制台的设计要求	(112)
§ 11—3 机舱集中控制室与主机操纵台的设计要求	(113)
§ 11—4 自动遥控系统的基本功能要求	(115)
第十二章 自动遥控系统的换向起动逻辑回路	(119)
§ 12—1 逻辑回路分析的预备知识	(119)
§ 12—2 换向起动逻辑回路的设计	(119)
§ 12—3 换向起动逻辑回路设计中几个问题的分析	(129)
第十三章 船舶柴油主机转速的调节	(139)
§ 13—1 船舶柴油主机转速的设定	(139)
§ 13—2 主机设定转速发送速率的控制	(144)
§ 13—3 主机转速调节系统的速度限制功能	(149)
§ 13—4 主机转速调节系统的燃油限制功能	(152)
第十四章 柴油主机转速调节系统的初步设计	(158)
§ 14—1 柴油主机转速调节系统的性能指标	(159)
§ 14—2 柴油主机转速调节系统的型式选择	(160)
§ 14—3 柴油主机调速系统的元部件选择	(163)
§ 14—4 柴油主机调速系统的数学模型	(182)
§ 14—5 柴油主机调速系统的性能分析	(190)
第十五章 可变螺距螺旋桨自动遥控系统	(202)
§ 15—1 变距桨自动遥控系统的结构原理	(202)
§ 15—2 函数发生器	(206)
§ 15—3 系统的操作部位及其转换	(209)
§ 15—4 变距桨自动遥控系统的数学模型	(210)
第三篇 船舶微机监控系统	(215)

第十六章 船舶微机监控系统概述.....	(215)
§ 16—1 模拟控制系统和数字控制系统.....	§ (215)
§ 16—2 计算机控制系统的基本组成.....	(215)
§ 16—3 船舶计算机监控系统概况及其发展动向.....	(217)
§ 16—4 介绍几种集散型船舶微机监控系统.....	(225)
第十七章 船舶微机监控系统中的微型计算机接口技术.....	(232)
§ 17—1 I/O 接口的寻址方式.....	(232)
§ 17—2 Z-80 I/O 指令和时序.....	(236)
§ 17—3 程序查询传送方式中的同步传送接口技术.....	(239)
§ 17—4 Z-80 PIO 及其在程序查询传送方式中的应用.....	(250)
§ 17—5 程序中断传送方式.....	(258)
§ 17—6 Z-80 计数器定时器 CTC.....	(277)
§ 17—7 D/A 和 A/D 转换芯片及其应用.....	(290)
§ 17—8 船舶微机控制系统硬件设计的特殊要求.....	(299)
第十八章 船舶动力装置微机监控系统常用控制程序设计.....	(300)
§ 18—1 机舱微机监控系统的工作模式及应用软件程序块结构图.....	(300)
§ 18—2 数据采集程序.....	(303)
§ 18—3 数字滤波程序.....	(305)
§ 18—4 标度变换程序.....	(310)
§ 18—5 船舶动力装置监控系统上下限报警程序的设计.....	(313)
§ 18—6 船舶动力装置数字控制器 PID 控制算法程序设计.....	(318)
§ 18—7 微型机控制系统的可靠性和自诊断能力.....	(331)

绪论 船舶自动化概述

一、什么是船舶自动化

自动化就是不需要人的直接参与而能控制某些物理量按着指定的规律变化。船舶自动化是船舶操纵、管理及机械设备运行过程自动化的简称。具体地说，船舶自动化就是：

在船上需要人工操作与管理的设备上配上一些船用自动化装置，全部或部分地代替操作人员的管理劳动，使船舶操纵、管理与机械设备的运行过程在不同程度上自动地进行，这种用船用自动化装置来操纵船舶与管理船舶设备的办法，称为船舶自动化。

从这个定义上看，有两个问题尚须进一步说明，首先是船上有哪些需要人工操作与管理的设备，其次是什么是船用自动化装置。下面就这两个问题作一些简要介绍。

1. 船舶自动化的分类

在船上需要人工操作与管理的设备，按部门分工不同大致可归纳为船舶驾驶、船舶机舱和船舶舾装等三大部分。因此，船舶自动化分为船舶驾驶自动化，船舶机舱自动化和船舶舾装自动化。

(1) 船舶驾驶自动化

船舶驾驶自动化主要包括：自动避碰系统；综合导航系统；自动操舵系统；船体应力监视等。应该指出的是：在船舶计算机控制系统出现之后才真正有船舶驾驶自动化。

(2) 船舶机舱自动化

机舱自动化主要包括：船舶主机自动化系统；各种辅机的自动控制；船舶电站自动化；集中监视与自动记录等系统。

(3) 船舶舾装自动化

船舶舾装自动化主要包括：自动装卸系统；系泊自动化；空调冷藏系统；自动消防系统以及生活、医疗自动化等。

2. 船用自动化装置

凡是用来实现船舶自动化的装置统称为船用自动化装置。船用自动化装置大致可归纳为两大类：一类是船用自动化仪表；另一类是船舶程序控制装置。

(1) 船用自动化仪表

船用自动化仪表种类繁多，就是同一类仪表其结构型式、工作原理也有不同，但从仪表的许多共性可以大致分类如下：

仪表按能源型式不同可分为船用气动仪表和电动仪表两种。按仪表的功能可分为船用检测仪表、调节仪表、执行器与显示记录仪表等。按仪表的结构型式又可分为单元组合仪表和基地式仪表两类，单元组合式仪表是按其功能的不同制成独立的单元仪表，而基地式仪表是将检测、调节和执行单元制成一体组合成一个仪表。

利用船用自动化仪表可构成各种工况参数的闭环自动调节系统，也称过程控制。过程控制是船舶自动化的重要组成部分之一。

(2) 船用程序控制装置

程序控制装置主要包括各种逻辑元件和程序控制器等。利用程序控制装置可构成船舶程序控制系统。所谓程序就是一系列指示操作命令的集合，或简称为操作步骤。程序控制系统就是按预先编好的程序（操作步骤）逐次顺序地进行操作。

船舶程序控制系统按程序进行的方式又分为两种：一种是按逻辑动作的程序控制叫逻辑程序控制系统。例如，船舶柴油主机的换向、起动逻辑程序控制系统。另一种是按时间顺序动作的程序控制系统，称为时序控制系统。例如，船用主、辅锅炉的点火时序控制系统。

应该指出的是：随着电子计算机在船舶自动化中的广泛应用，出现了船舶直接数字控制系统，称为DDC系统（DIRECT DIGITAL CONTROL）。它属于过程控制系统。同样，可利用计算机的逻辑判断等功能构成船舶计算机程序控制系统。可见，数字计算机也是实现船舶自动化的重要手段之一。

二、船舶自动化发展简况

远在第二次世界大战以后，随着世界上货运量的增加，各国的造船向着巨型化和高速化发展，必然要求船舶实现自动化，以求提高营运经济性、安全可靠性和减少固定船员的配置。但是，由于受到当时科学技术发展的限制，也影响了船舶自动化的进一步发展。直到六十年代中末期，现代控制理论和电子技术的飞快发展，促使船舶自动化迅速发展起来。船舶自动化的发展过程，大致可归纳为如下几个阶段：

1. 单装置自动化阶段（1960年以前）

在1960年以前，个别自动化设备在各类远洋运输船舶上已有应用。例如，驾驶方面有自动舵、自动航迹绘算器等，机舱方面有锅炉自动燃烧装置、给水自动调节以及各种热工参数的自动调节等。船舶舾装方面有自动火警信号和自动灭火设备等。但是在那时还没有构成一个完整的集中控制系统，故称为个别设备的单装置自动化阶段。在此阶段中，一般远洋船舶的船员数目约为45~50人。

2. 机舱集中监视与遥控阶段（1960年~1964年）

在1959年，日本设计了有机舱集中监视和遥控的万吨远洋货轮“金华山丸”，1961年开始航行，引起了世界各国造船业和航运界的极大注视。该船的特点是在机舱内设带有带隔音和空调设备的机舱集中控制室，只需一个人在控制室内值班，就可以对整个机舱的设备进行集中监视和遥控，同时在驾驶室也可以直接对主机进行遥控。

但是，就船舶自动化发展阶段来说，该阶段的特点并不是从驾驶室对主机进行遥控，而是具有独立的机舱集中控制室。在这个阶段中，远洋船舶的船员数一般为35~40人。

3. “无人机舱”操作阶段（1965年~1968年）

由于船舶主机、辅机和各种自动化设备的可靠性日益提高，在船舶正常航行时，机舱内各种设备已很少要人经常照料，为了进一步减少船员配置，就提出了在夜间或节假日无人值班操作的要求，从而出现了12小时、24小时、甚至36小时机舱无人值班操作的船舶。

这类船舶的特点是：除了在独立的机舱集中控制室内对主机、辅机等设备进行集中监视和遥控外，作为标准的“无人机舱”操作船，还必须能在驾驶台对主机进行自动遥控。为了保证机舱内各种设备能够安全运行，应设置较完善的各种自动控制系统。同时，机舱内还必须装设完善的火警探测装置以及呼叫系统。此阶段是船舶自动化发展的重要阶段，因此将在后面再较深入地作一介绍。在此阶段中，远洋船舶的船员数约30名左右。

4. “超自动化”船舶阶段（1969年以后）

由于电子计算机的设计、制造与应用技术的日益成熟，为了更进一步减少熟练船员，降低航运成本，保证航行安全，在1969年以后，世界上许多国家相继制造出装有电子计算机的自动化程度更高的船舶，即“超自动化”船舶。

这些船舶的一个显著特点是：跳出了机舱自动化的范畴，把全船作为一个统一整体，应用电子计算机在驾驶、机舱和舾装等各方面进行了全盘控制，实现了全盘自动化。

目前，在使用微型计算机的船舶自动化中，微机系统的结构可分为集中型计算机系统与分散型系统两种。分散型系统，在可靠性、安全性和可维修性上，都有较大的好处，而集中型系统虽具有通用性的功能，但其缺点较多，特别是操作人员掌握能力有限，采用集中型系统就会带来更大困难。所以，最好是采用分散型系统，由各个单元构成各自的微机系统。

船舶自动化的未来发展总目标是要实现以下两个方面：一个是改进船舶操纵的可靠性。具体办法是改进船舶动力装置和自动化仪表的设计，改进自动化系统的设计。其次是改进故障检测技术，确定预防、保养和维修系统。只有运行可靠，故障又能预先检测、预先采取维护措施，才能保证安全、经济的操作。

三、“无人机舱”自动化

“无人机舱”是指：船舶在正常航行时，机舱内可以定期不需要值班人员对机舱设备进行操作管理。所以确切地说，应称为定期无人值班操作机舱。所谓正常航行是船舶离港后，在额定工况下，以经济航速航行。相对于正常航行“无人机舱”，在工程船舶中，还有停港(HARBOR)“无人机舱”船舶。

1. 实现“无人机舱”的基本要求

船舶实现“无人机舱”自动化的基本条件，世界各国有各自的要求，均列入各自的船舶建造规范中。尽管各个国家的具体要求有所不同，但要实现“无人机舱”自动化都必须满足以下几个基本条件。

(1) 船舶推进装置的驾驶台自动遥控

“无人机舱”船舶，驱动推进器的主机，必须能在驾驶台进行自动遥控。自动遥控系统本身应能够模拟轮机人员按要求进行各种操作。

(2) 机舱设备运行的重要工况参数应能自动调节

例如，船舶柴油主、辅机的冷却水温度自动调节系统，滑油温度(或压力)自动调节系统，主机燃油粘度调节系统等等。

(3) 辅助锅炉(或废气锅炉)的全自动控制以及重要辅机的自动切换

辅锅炉的全自动控制，就是全自动化辅助锅炉，它主要包括气包的水位控制；燃烧自动控制；自动点火程序控制和安全保护装置等。

重要的辅机，如锅炉给水泵，主机冷却水泵，辅机滑油泵与沪器等，在一台运行出现故障后，应能自动切换，使备用设备自动投入运行。

(4) 船舶电站自动化

电站自动化主要包括：自动调频、调载系统；自动并车系统；自动调压和自动保护装置；原动机的自动起动等等。

(5) 通讯联络与延伸报警(EXTENSION ALARM)

“无人机舱”船舶应能保证在任何时候，或任何情况下(包括全船断电)，机舱与驾驶台都应有召唤轮机值班人员的手段，因此，除设有常规电话外，应设置呼叫系统

(CALLING SIGNAL DEVICE)。

此外, 监视机舱中设备运行的重要工况参数的报警系统应扩展到监视站, 监视站设在驾驶台、轮机员居室和公共娱乐场所。在监视站中设有组报警(按故障重要程度分若干组)。延伸报警系统只有在机控室无人值班的情况下才起作用。

(6) 机舱火警检测装置

“无人机舱”船舶, 在机舱中易于引起火灾的危险区域, 或者在易于发生溢油或漏油的地方, 如分油机室、辅锅炉间、主配电盘以及各种日用油柜等, 在这些地方的顶部天花板上应装有火警检测器, 当有火警发生时, 其声光报警应延伸至机舱外或驾驶台上的监视控制站, 在监视站的监视板上应能关断风源、油源等设备。

2. “无人机舱”的船级符号

各国船级社关于“无人机舱”船舶的入级符号如下表所列:

国 别	船级社简名	“无人机舱”符号	备 注
日 本	NK	MO	至少24小时“无人机舱”
挪 威	DNV	EO	至少24小时“无人机舱”
西 德	GL	AUT	航行或停港均可实现“无人机舱”
		H	停港时“无人机舱”
英 国	LR	UMS	
法 国	BV	AUT—MS	航行与停港“无人机舱”
		AUT—OS	航行“无人机舱”
美 国	A.B.S	ACCU	
苏 联	PC	A ₁	
		A ₂	控制室需有人值班
意 大 利	RI	IAQ	
中 国	ZC	AUT—0	
		AUT—1	机控室有1人值班

有关世界各国“无人机舱”的详细规定请参照各国的钢质海船建造规范。

第一篇 船舶自动调节系统

工况参数自动调节系统是船舶机舱自动化的基础，也是实现“无人机舱”自动化最基本、最重要的条件之一。

例如，柴油机冷却水温度、滑油温度、燃油粘度、锅炉气包的水位和压力等热工参数，在船舶动力装置运行过程中，必须维持在一定数值或在允许的范围内变化，以提高动力系统的经济性和运行的安全可靠。这项任务就是由热工参数自动调节系统来完成的。

第一章 自动调节系统概述

§ 1—1 自动调节系统的组成

我们首先以一个简单的锅炉水位自动调节系统为例，来说明自动调节系统是由哪些部分组成的，它们的作用是什么，彼此间有什么联系，然后由特殊到一般，给出自动调节常用术语和基本概念。

一、什么是自动调节系统

锅炉运行时，它的水位是一个重要参数。水位过低，将导致受热面烧毁，造成严重事故。水位太高，蒸气湿度增加，影响用气机械的正常运行。因此，控制好锅炉水位，使其始终维持在正常位置附近的一个允许范围内，是保证锅炉安全运行的必要措施。

在生产过程中，锅炉的供气量（负荷）决定于用气设备的实际需要，它是经常变化的。如果给水量不随着相应变化，那么无论给水量小于或大于供气量，流入和流出锅炉的物质流量都不能平衡，结果必然引起锅炉水位的降低或升高，欲保持锅炉水位，就必须进行调节。水位上升时，应减少给水量，水位降低时，就应增加给水量，使给水量适应锅炉负荷变化的要求，水位才能维持在要求的位置上。

调节锅炉的水位，可以通过手工操作来完成，称为手动调节或人工调节。也可以采用一套仪表装置代替人工自动地完成调节任务，后一种情况就叫做自动调节。自动调节是在总结人工调节经验的基础上发展起来的，要回答仪表装置如何代替人工完成自动调节任务这一问题，应首先分析一下手动调节是怎样进行的，人在这里面究竟起哪些作用，然后看如何从手动调节演变到自动调节。

图 1-1 是从对比的角度示出了手动调节和自动调节的示意图。手动调节时，看水师傅必须兼用眼、脑和手，三个器官协同动作。首先眼睛要经常看水位表，观察出水位的高低，报告给大脑，然后由大脑进行思考判断，发出调节命令；最后用双手执行命令，操作给水阀，调节给水量，把水位保持在要求的位置上。在这里，人的作用是通过眼、脑、手三个器

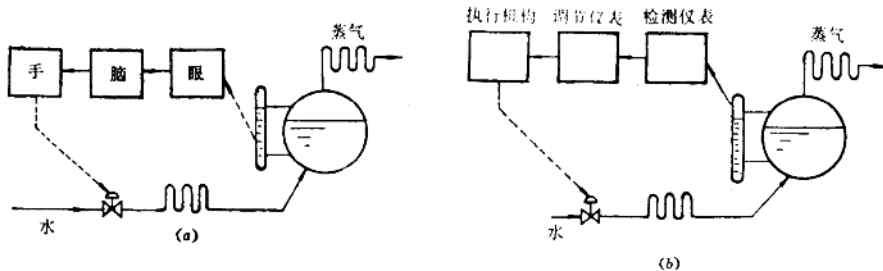


图1-1 锅炉水位调节系统示意图

官分别发挥着观察、思考、操作三种功能，从而完成了水位调节的任务。

自动调节是怎样进行的呢？在自动调节中，采用检测仪表代替人的眼睛对水位进行连续地测量工作，把测量的结果，即水位的高度转变成气的、电的或机械的信号发送出去；然后用调节仪表代替人的大脑进行比较运算，发出调节命令，即控制信号；最后用执行机构代替人的双手开关给水调节阀，产生调节作用。这就是从手动调节演变为自动调节的简化图景。不管所用仪表装置的结构复杂程度如何，也不论采用的是哪种工作能源，就其本质和作用来说，仪表装置完成的测量、运算、执行等职能和手动调节时人所发挥的观察、思考、操作等功能是完全一致的，可以说前者就是对后者的直接模拟。

在图1-1中，锅炉是被调节的热工设备，在自动调节中称之为调节对象。水位是需要加以调节的热工参数，称为被调参数或被调量。在锅炉水位计上通常标有记号，示出正常水位的高度，这是被调参数应该保持的值，称为给定值。被调参数的实际数值，即当时水位的真正高度，称为测量值。测量值偏离给定值时，叫做出现偏差，偏差值可表示为

$$e = g - y$$

式中 e 代表偏差； g 代表给定值； y 代表测量值。如果 $e > 0$ ，即给定值大于测量值，称为正偏差，反之 $e < 0$ 时称为负偏差。引起锅炉水位发生变化的各种因素称为扰动量，其中最主要的是锅炉负荷的变化。其他如燃烧强度的改变，给水压力的变化，给水温度的变化等对水位也有一定的影响。

通过上述具体例子，我们可以看出，所谓自动调节就是用仪表装置来代替人的手工操作，仪表装置取代了人的地位。仪表装置的总和称为自动调节装置，简称为调节器。调节器和调节对象共同构成一个有机的整体，这个整体称为自动调节系统。

二、自动调节系统的传递方块图

一个自动调节系统，一般由调节对象、测量仪表、调节仪表和执行机构等单元组成，各单元之间由一定的连接关系构成一个有机的整体，共同完成参数调节任务。为了清楚地表示出调节系统中各组成部分之间的相互作用，可以把每一个单元用一个小方块来代替，各方块之间用带箭头的作用线连接，代替各单元之间的信号传递关系，这样就得到了系统的传递方块图。图1-2就是按照这种方法作出的锅炉水位自动调节系统的传递方块图。

在方块图上，不考虑实际装置的具体结构和仪表的动作细节，着重指出的是各单元在系统中的地位和彼此之间的关系，因此它是实际系统的抽象。图1-2集中地反映了锅炉水位调节系统矛盾运动的规律，当被调量水位由于某种扰动而发生改变时，测量仪表将这一变化传递给调节仪表，调节仪表根据给定信号与测量信号之间的偏差进行比较运算并发出控制信

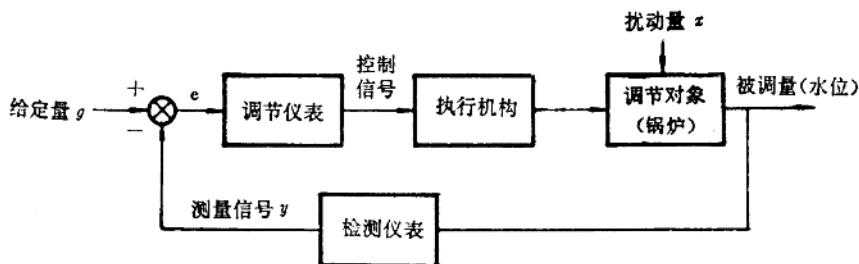


图1-2 锅炉水位调节系统传递方块图

号，这一控制信号传递给执行机构，改变给水阀的开度，产生给水量的变化，给水量的变化作用于锅炉，抵消了扰动作用，使水位重新回到给定量。对于一个自动调节系统来说，上述的信号传递关系是起主要作用的因素，传递方块图的优点就在于抓住主要因素，忽略次要因素，以简略的方式表示了调节系统的本质，所以它是研究调节系统的一个很好地表达方式和有效的分析工具。通过分析自动调节系统的传递方块图，可以建立如下几个概念：

1. 在传递方块图中，作为实际单元抽象出来的每个方块称为一个环节，各环节受它前一个环节的作用，又施加作用于后一个环节。一个环节所接受的作用称为该环节的输入量，一个环节给予后一个环节的作用称为该环节的输出量。输出量是由于输入量的作用引起该环节状态变化而产生的，如图 1-3 所示。

2. 环节输入和输出信号的传递关系具有单向性，即环节的输入影响输出，输入量变化了，输出量就跟着变化，但是输出量不会反过来影响输入量。例如 图 1-2 中的执行机构这一环节，如果采用气动薄膜调节阀，其输入量是控制气压，而输出量是给水量，前者的变化将引起后者变化但后者变化却不会直接影响前者，因为控制气压是气动调节仪表给出的。环节输入和输出作用线上的箭头就是用来指出信号传递这种单向性的。

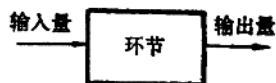


图1-3 环节的输入和输出

3. 既然作用线表示信号的传递，箭头表示信号传递的方向，因此不应把它和真实系统的物料的流动混为一谈，以图 1-2 中锅炉这一环节为例，供气量的变化是引起水位变化的因素（扰动），是该环节的输入量，故箭头指向内，与蒸气自锅炉流出是两回事。

4. 调节系统传递方块图中，每一个环节的输出就是后一环节的输入，信号从调节仪表输出，经过调节阀、锅炉、测量仪表各环节，最后又回到调节仪表输入端，组成了一个闭合回路，这种系统称为闭环系统。对于闭环自动调节系统来说，给定量和扰动量都是外界对系统的作用，是系统的输入量，而被调量是系统的输出量。

5. 对于调节仪表来说，它接受的是水位给定信号及水位测量信号，发出的是控制信号，调节仪表的两个输入信号，在其比较机构上进行比较，以符号 $\otimes$ 表示。应该指出，比较机构不是独立的元件，它是调节仪表的一部分。在图 1-2 中把它单独画出来，是为了着重说明其比较作用。

6. 在一个闭环调节系统中，把系统的输出，又通过检测单元送回到系统的输入端，这种情况叫做反馈。为了达到消除偏差的目的，在闭环调节系统中均采用负反馈，没有这种反馈，就无法实现比较，因而也就不能进行自动调节，这就是按偏差进行调节的自动调节系统

有时被称为反馈控制系统的原因。

在图 1-2 中, 给定信号 g 旁标有“+”号, 而测量信号(反馈信号)旁标有“-”号, 就是用来突出表明负反馈性质的。

§ 1—2 自动调节系统的过渡过程及品质指标

一、系统的稳态与动态

在自动调节系统中, 被调量不随时间而变化的平衡状态称为系统的稳态(也称静态), 被调量随时间而变化的不平衡状态称为系统的动态。

当一个系统的输入量恒定不变时, 整个系统处于一种相对平衡状态, 组成系统的各个环节, 如变送器、调节单元和调节阀等暂不动作, 它们的输出信号都处于相对静止状态, 这种状态就是上面所述的稳态。仍以简单的锅炉水位调节系统为例, 当流入量和流出量平衡时, 系统的扰动量 $x=0$, 并且 $y=g$, 即被调量的变化为零时, 系统才处于稳态。一旦系统受到扰动, 平衡被破坏, 被调量发生变化, 调节器就开始调节动作, 改变流入量以克服扰动的影响, 当流入量和流出量重新达到平衡, 而且 $y=g$ 时, 系统又重新进入稳态。这样, 系统就经历了下述一个调节过程:

稳态 I (平衡) $\xrightarrow[\text{(平衡被破坏)}]{\text{扰动作用}}$ 动态过程 $\xrightarrow[\text{(排除扰动)}]{\text{调节作用}}$ 稳态 II (平衡)

综上所述, 一个自动调节系统, 从产生扰动开始, 经过调节, 直到系统又重新建立平衡为止, 这一段时间称为系统的调节时间, 或叫过渡过程时间。在这段时间内, 系统的各个环节和参数都处于变动状态之中, 这种状态叫做动态。在自动调节系统中, 了解系统的稳态是重要的, 了解系统的动态则更为重要, 因为扰动引起系统变动后, 需要知道系统中的被调量是如何变化的, 系统能否再建立平衡和怎样去建立平衡。平衡总是暂时的、相对的、有条件的, 而不平衡才是普遍的、绝对的、无条件的。扰动作用不断地产生, 调节作用就要不断地去克服扰动的影响, 自动调节系统总是一直处于运动过程之中, 故研究自动调节系统应该以其动态过程为主, 即研究扰动和调节这一对矛盾的相互作用而产生的被调参数的变化过程, 以便来评定一个调节系统的动态和稳态品质指标是否符合生产过程的要求。

二、自动调节系统的过渡过程

自动调节系统在动态中, 被调参数随时间变化的过程, 称为自动调节系统的调节过程或过渡过程, 亦即系统从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的过程。在过渡过程中, 被调量随时间变化的曲线称为过渡过程曲线, 它是分析系统动态特性的一个很重要的曲线。不管系统是在设计或运行阶段, 衡量系统质量的依据主要是系统的过渡过程。

在生产过程中, 扰动的出现多半属于随机性质, 没有固定形式, 为了分析研究方便, 通常假设一些典型的扰动形式, 其中最常用的是阶跃扰动, 系统受到阶跃扰动后, 其过渡过程的基本形式如图 1-4 所示。

1. 稳定的调节过程

如果自动调节系统经受到一次扰动后, 经过调节能够达到新的平衡状态, 即被调量能够达到新的稳定数值, 这种调节过程叫做稳定的调节过程, 稳定的调节过程又分为衰减振荡和非周期过程两种, 如图 1-4 (c) (d) 所示。前者表明, 当系统受到扰动后, 平衡被破坏,

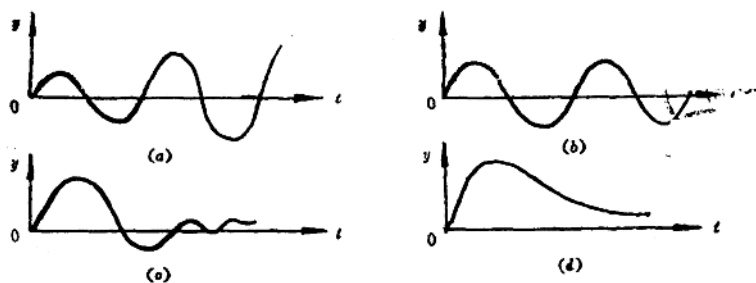


图1-4 过渡过程的几种基本形式

经过调节，被调量经过几次衰减波动而趋于稳定；后者表明被调量没有经过什么波动就平稳而缓慢地回到了给定值，或者在允许的范围内。由于非周期调节过程变化缓慢，过渡过程时间较长，且被调量在动态中幅值变化大，不能满足热工生产过程的要求，故一般不予采用，而多采用衰减振荡的调节过程。

2. 不稳定的调节过程

当自动调节系统受到扰动后，如果被调量的变化呈发散振荡或等幅振荡的形式，这种调节过程称为不稳定的调节过程，如图1-6 (a) (b) 所示。

图1-4 (a) 所示的过程是被调量随时间的增长而无限增加，到某一时刻，被调量的数值就可能超过生产允许的极限值而发生危险，故发散过程是非常危险而不能采用的过程。

图1-4 (b) 所示过程是一个不衰减的等幅振荡过程，这种过程处于稳定与不稳定之间，称为稳定边界。等幅振荡过程属于不稳定的范畴，它也是不能采用的过程。

三、系统的品质指标

同样是衰减振荡的过渡过程，但它也有好坏之分，评定一个自动调节系统过渡过程的好坏主要从稳定性、准确性和快速性三方面的指标来综合考虑。

1. 稳定性

稳定性是决定一个调节系统能否实际应用的首要条件。一个自动调节系统必须要求其调节过程达到一定的稳定程度。在时间域中，一般用衰减率这个概念来定量地表示调节系统的稳定程度，衰减率是指每经过一个波动周期，被调量波动幅值衰减的百分数。用符号 ψ 表示，即

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{y_3}{y_1}$$

式中： y_1 为第一个波的幅值；

y_3 为第三个波的幅值。

如图1-5所示。从图中可以看出， ψ 也就是同方向两个相邻波幅之差与第一个波幅的比值。 y_1 与 y_3 的幅值均以波动曲线的中心线为准进行计算。

根据 ψ 的数值大小，便可很容易地判别调节过程的性质：

若 $\psi < 0$ ，则调节过程是发散振荡过程；

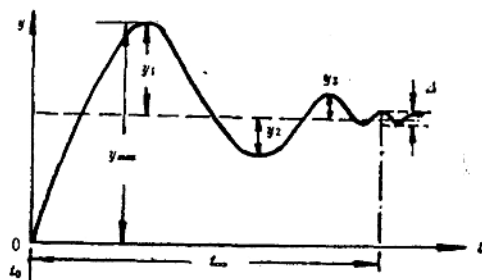


图1-5 调节过程品质指标示意图

若 $\psi = 0$ ，则调节过程是等幅振荡过程；

若 $0 < \psi < 1$ ，则调节过程是衰减振荡过程；

若 $\psi = 1$ ，则调节过程是非周期过程。

热工调节过程的实践表明， $\psi = 0.75 \sim 0.9$ 的衰减振荡过程是较好的，因为 ψ 在 $0.75 \sim 0.9$ 之间时，过渡过程开始阶段的变化速度比较快，被调参数在受到扰动的影响和调节作用的校正后，能比较快地达到一个峰值，然后就立刻下降并较快地达到一个低峰值，被调参数经过几次波动后就会趋于稳定。

此外，也可用衰减比来表示振荡过程的衰减程度。衰减比就是前后两个同方向波幅的比，即 $y_1:y_3$ 。最佳的过程衰减比是 $4:1$ 到 $10:1$ 这个范围，其对应的衰减率为 $0.75 \sim 0.9$ 。

在频率域中，一般用相角裕量和幅值裕量来衡量系统的稳定程度，一个好的调节系统，其幅值裕量为 $10 \sim 20\text{dB}$ ，相角裕量为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。

2. 准确性

调节过程的准确性可用被调量的动态偏差和稳态偏差来表示。

(1) 动态偏差：动态偏差是指整个调节过程中被调量偏离给定量的最大短期偏差，即图 1-5 中第一个波峰的高度 $y_{\max}$ 。如果动态偏差越大，偏离的时间越长，说明系统离开规定的生产状态越远。对于热工调节过程，在实际可能出现的最大扰动下，被调量的最大偏差不应超过正常生产允许的变动范围。

(2) 稳态偏差（也称静差）：稳态偏差是指调节过程结束后，被调量与给定量的长期偏差，也叫剩余偏差或简称余差，其值可以为正，也可以为负。在图 1-5 中，以 Δ 表示。一般来说，自动调节系统的稳态偏差愈小愈好。

3. 快速性

快速性可用过渡过程时间和截止频率（幅值穿越频率）来表示。通常总希望过渡过程时间要尽可能短一些，这样才能保证下一次扰动到来的时候，上一次扰动所引起的调节过程已经结束。严格地说，被调量完全达到新的平衡状态需要无限长的时间，但实际上由于仪表灵敏度的限制，被调量接近稳态值时，仪表的指示值就不再改变了，所以在可以测量的区域内，在稳态值上下有必要规定一个小的范围，当指示值进入这一范围而不再越出时，就可以认为被调量达到了稳态值。这个小范围为新稳态值的 5% 左右。

在频率域中，系统的快速性可用截止频率 ω_c 表示。从控制理论中已知，调节系统的共振频率 $\omega_{r.}$ 与截止频率很相近，而系统的自由振动频率 $\omega_{z.} = (1.01 \sim 1.10)\omega_{r.}$ ，在初步估算时，可以为 $\omega_{z.} \approx \omega_{r.}$ ，因此系统的自由振动频率 $\omega_{z.} \approx \omega_c$ ，所以可以用 ω_c 表征过渡过程的快速性，从这一点出发， ω_c 越大越好。

还有一些次要的指标，如振荡次数。振荡次数是指过渡过程时间内被调量振荡的次数，所谓过程两个波，就是指在过渡过程时间内被调量振荡两次就能稳定下来，这时，其衰减率约为 0.75 。上升时间是指扰动发生之时起，至第一个波达最大幅值所需要的时间，显然上升时间以短些为宜。

综上所述，过渡过程的质量指标可以概括为：稳定性、快速性和准确性三个主要品质指标，衰减率说明稳定性，动态和稳态偏差说明准确性，过渡时间与振荡频率说明快速性。这三个品质指标常常是互相矛盾、互相制约的，所以不能片面地追求某一指标，而应综合具体生产过程及其要求。在热工生产过程中，对调节系统的首要要求是稳定性，在满足 $\psi = 0.75 \sim$