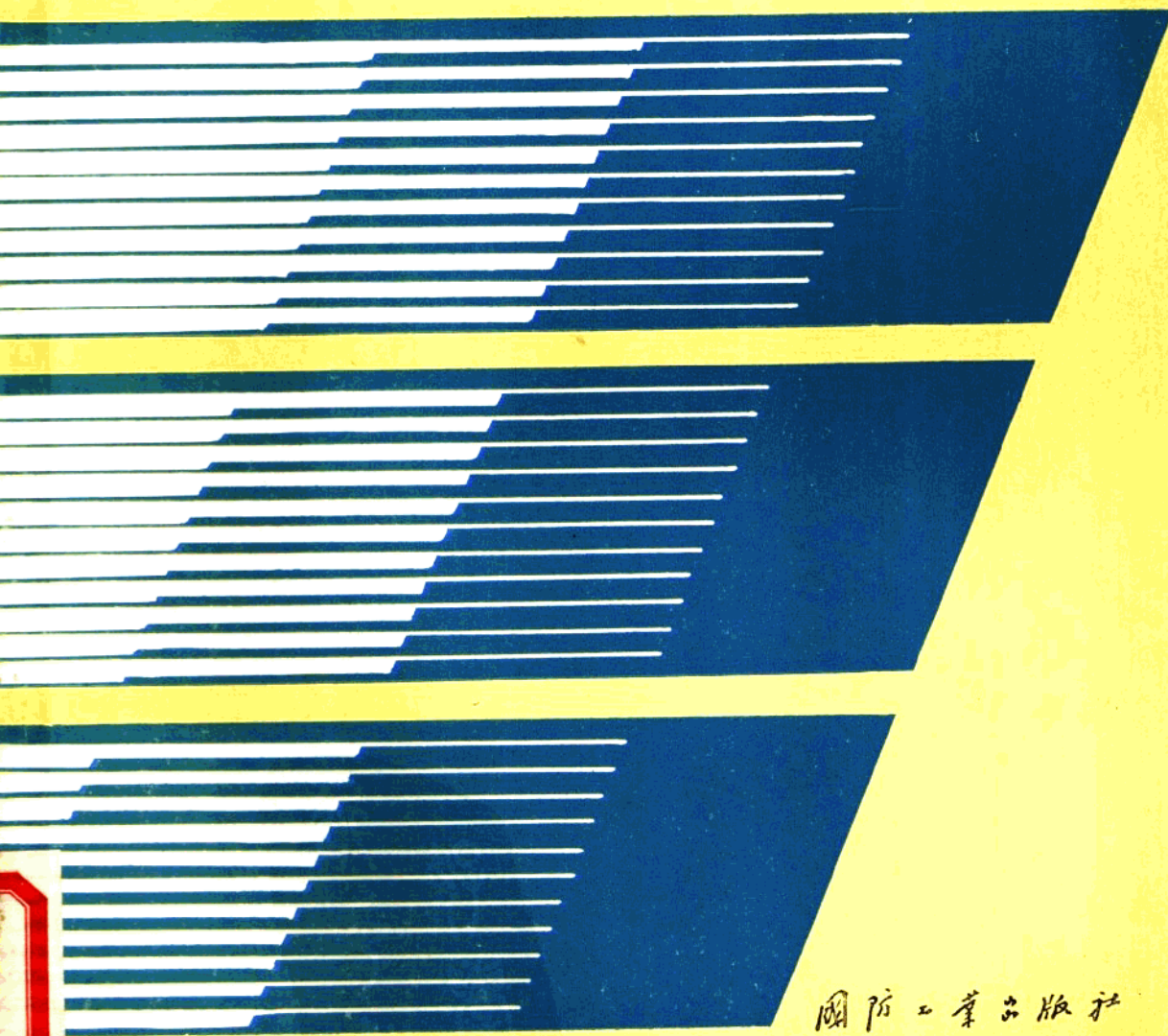


中等专业学校统编教材

# 船舶动力装置自动调节

王苏民 编



国防工业出版社

# 船舶动力装置自动调节

王苏民 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

全书共分五章，第一章介绍自动调节的基本概念，第二章介绍各种自动调节器，第三章介绍自动调节的主要元件——测量元件、放大元件和执行机构，第四章介绍船舶动力装置中主要参数的自动调节系统，第五章介绍调节系统的调试、整定及安装工艺。

本书可作为四年制中专船舶动力装置专业的教材或参考书，也可供从事动力装置专业的技术人员、轮机工人参考。

### 船舶动力装置自动调节

王苏民 编

\*

国防工业出版社出版发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 7 160千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷 印数：0,001—1,580册

ISBN 7-118-00341-7/U35 定价：

1.35元

## 前 言

船舶动力装置自动调节是船舶动力装置自动化的一个重要组成部分。通常动力装置自动化包括五个方面的内容：推进装置的远距离操纵；各系统运行参数的自动调节；辅机设备的自动控制；监视、报警和故障保护；火灾报警和自动灭火。这些内容中，参数的自动调节是基础。它是自动化技术发展的起点，也是最先广泛应用的技术。现代的控制理论就是在调节理论的基础上发展起来的。进行自动调节技术的学习，可以帮助我们掌握自动化的基本知识，为进一步的深造奠定基础。

由于造船技术的日益先进，自动化程度不断提高，对于从事动力装置制造、安装和管理的工程技术人员在知识结构上进行自动化技术的教育，是新的历史时期对中专工程技术教育提出的新要求。根据中专教学的客观规律，从基本概念出发，掌握基本的自动化理论，了解一般动力装置中的各种自动化系统，学习各种自动化元件的制造、安装、调试知识是本教材所要作的新的尝试。

本书为中国船舶工业总公司组织的统编教材，是根据1986年中国船舶工业总公司召开的中专教材编审会上通过的《船舶动力装置自动调节》编写大纲的要求进行编写的。本教材既讲了自动调节的原理，又讲了自动调节的系统，对安装调试工艺也作了比较详细的介绍。由于自动调节理论的内容极为丰富，因此本教材的立足点只是在自动调节理论的指导下，讨论动力装置的工作过程及如何实现动力装置的自动调节。本教材在理论部分着重介绍了经典的线性调节理论；在调节系统部分，以内燃动力装置为对象，介绍了整个船舶动力装置中各种自动调节系统的工作原理、工作特性以及实现正常工作的各种基本要求。考虑到自动化技术中机电结合的产品较多，选择了一定数量的机、电类型的调节器件为例子加以说明。另外，本教材还介绍了实际安装中的一些工艺性问题。因此本教材的特点是实用性强，比较适用于中等专业的教学。

本教材的章节安排充分考虑了读者的思维习惯和工程技术教学的惯例。分五章介绍了船舶动力装置自动调节的理论、典型产品的实际应用、制造安装工艺。各章节的内容相互联系，前呼后应，既保证理论上的系统性，又强调典型产品的实用性，尽量使工艺知识系统化、完整化。由于学时的限制，在调节理论上只作了概述性的介绍，突出了调节系统中调节对象和调节器的内容。在介绍调节规律和主要调节元件的基础上重点介绍了动力装置中常用的几种自动调节系统。这些内容安排的目的，除了是让读者掌握船舶动力装置自动调节的知识以外，更主要的是为第五章的调试、整定、安装打下基础。为了增强教材的实用性，在第五章里我们结合典型的产品和调节系统，介绍了自动调节的实际使用方法、内外场的整定方法、安装原则、施工进度的安排，常见故障的排除和查找故障原因的思路等等符合实际施工运行的基本知识。通过本教材的学习，可以使读者在船舶动力装置自动调节方面得到一个全面、系统的训练，为今后的工作作好充分的准备。

本教材主审是哈尔滨船舶工程学院张凤春同志，插图描绘是王益良同志，在编写过程中曾受到渤海船校诸位教师的指点和关心，在此谨向他们表示衷心感谢。由于水平有限，时间紧迫，在教材中难免有错误之处，恳请同行们批评指正。

编 者

## 目 录

第一章 基本概念..... 1	一、船舶动力装置的工作过程 .....48
§ 1 自动调节的性质与任务..... 1	二、对调节系统的要求 .....50
§ 2 自动调节的定义和分类..... 3	§ 2 调节过程的特性及 品质指标.....52
§ 3 调节对象的基本特性..... 8	一、稳定性 .....55
一、调节对象的工况 .....8	二、准确性 .....55
二、调节对象的性质 .....9	三、快速性 .....55
复习思考题 .....13	§ 3 温度参数的自动调节.....56
第二章 自动调节器.....14	一、主机冷却循环温度的自动调节 .....56
§ 1 自动调节的基本原理.....14	二、加热温度的自动调节 .....62
一、典型调节规律及特点 .....14	三、特性参数 $\delta$ 对调节性能的影响 .....64
二、反馈的概念 .....17	§ 4 燃油粘度的自动调节.....66
三、各种调节形式的比较 .....18	一、燃油粘度的调节原理 .....67
§ 2 直接式调节器.....19	二、典型的粘度调节系统 .....68
一、减压阀 .....19	三、积分时间 $T_I$ 对调节性能的影响 .....73
二、蒸汽加热用的直接式温度调节阀 .....21	§ 5 压力参数的自动调节.....74
§ 3 间接式调节器.....23	一、压力参数的调节特点 .....74
一、基地式气动比例 (P) 调节器.....23	二、锅炉蒸汽压力的自动调节 .....75
二、液动积分 (I) 调节器.....26	三、空气中气压的自动调节 .....77
三、船用基地式气动比例积分 调节器 .....27	四、自动调节系统的识图方法 .....81
四、电动比例积分调节器 .....29	§ 6 液位参数的自动调节.....81
复习思考题 .....30	一、液位的测量 .....81
第三章 自动调节的主要元件.....31	二、液位的自动调节系统 .....85
§ 1 测量元件.....31	复习思考题 .....89
一、调节压力的测量元件 .....32	第五章 调试、整定与安装工艺.....91
二、液位的测量元件 .....34	§ 1 调节设备的调试.....91
三、温度测量元件 .....35	一、差压变送器的调试 .....91
四、调节流量的测量元件 .....37	二、调节器的调试 .....93
§ 2 放大元件.....38	三、执行器的调试 .....96
一、液动滑阀式放大器 .....38	§ 2 自动调节系统的参数整定.....97
二、气动放大元件 .....39	一、反应曲线法 .....98
三、电动放大元件 .....40	二、经验法 .....99
§ 3 执行机构.....42	三、衰减曲线法 .....100
一、气动执行器 .....42	四、临界比例度法 .....100
二、电动执行器 .....46	§ 3 调节器件的安装工艺 .....102
三、液动执行器 .....47	一、调节器件的安装 .....102
复习思考题 .....47	二、管路、导线的布置 .....104
第四章 船舶动力装置的自动调节.....48	三、自动化装置的施工进度 .....105
§ 1 船舶动力装置工作过程 及对调节系统的要求.....48	四、调节器件的常见故障及检修 .....106
	复习思考题 .....107
	参考文献 .....108

# 第一章 基本概念

## §1 自动调节的性质与任务

船舶动力装置由种类繁多的机械设备所组成。它为船舶提供的能量有动能、电能和热能。象其它生产过程一样，任何一种动力设备都是被用来把物质和能量由一种形式转换成另一种形式。动力装置在物质或能量的转换过程中，除了要保证自身体系所需的物质或能量的数量、质量外，还要保证整个系统的经济性和可靠性的要求，这正象生命持续的过程中，除了保证整体必需的热量之外，还要保证机体的最佳状态，并具有抗病毒的功能一样。在内燃动力装置中作为主机的内燃机就是把含于燃料中的能量通过燃烧膨胀做功变成动能，带动螺旋桨旋转变成推动船舶航行所必需的动力——推力。如果带动的是发电机，则产生电力，即电能。在蒸汽动力装置中，内燃机被蒸汽锅炉代替，由水蒸汽产生的热能通过汽轮机转变为机械能和电能，即实现了能量的转换。在蒸汽动力装置中，具有水的某种形式的蒸汽如果在冷凝器中，就能凝结成水的颗粒形式。亦即实现了物质由一种形式转变为另一种形式。

任何一种过程都能用不同方式加以表达和说明，动力工程问题的表达习惯是采用参数这一概念，并且还分成数量工作参数和质量工作参数两大类。对于象动力装置这样的工作过程，数量工作参数是指物质经过设备时的消耗量。例如：燃油耗量、锅炉给水量、蒸汽量、主机产生的推力、发电机的电功率等等。同样，质量工作参数是指过程进行中能量所处的工作状态。例如：蒸汽压力、蒸汽温度、水柜中的水位、内燃机中空气过量系数、转速、粘度等等。由于数量参数在整个工作过程中会随外界情况而变化的，所以我们习惯上又称为“外负荷”。在内燃动力装置中，外负荷的变化意味着燃油耗量这一数量参数的变化，当外负荷增大时，内燃机必须增加燃油耗量以发出大功率来适应这种增加，当然这是相对的，是针对某一装置而言的。在外负荷变化范围内，作为一个系统的动力装置提供质量参数的保证是指表征系统工作状态的参数要控制在它的给定值的范围之内，而这种给定值便是影响系统性能的质量参数值。例如：内燃机装置中，由于外负荷的增大，使耗油量增大，放热量增加，主机本身的冷却水温度提高了，表示温度的质量参数发生了变化，但主机要求的冷却水温度有一个给定值，这时要使主机和各耗能部件都能可靠而经济地工作，就必须保证质量参数应限在给定值范围之内。

控制质量参数的变化可以满足各种工况的要求，为此要对动力装置进行必要的操作。表征生产设备正常运行的物理量称为质量参数，使它保持在规定值而进行的必要操作，我们称之为调节。动力装置有大量的系统参数是需要进行控制和调节的。动力装置的特点不同，决定采用的系统参数类型也不相同。例如：有主机的运行参数、辅锅炉的热工参数；各种压力、液位参数；燃油的粘度参数等等，使得整个动力装置的调节系统庞大而复杂。

早期陆地上的动力装置，如热电厂中的热工参数是用人工来调节的。随着发电机组容量的不断增大，参数不断提高，人工调节的热工参数变得愈来愈不可靠，并且使有些过程不可能实现人工调节，故又发展了自动调节，借助仪器仪表代替人的操作。自动调节技术的产生和发展，使船舶动力装置的自动调节得以实现和发展。

我们可以通过设备的人工调节来理解自动调节的任务和目的。图 1-1 所示为炉膛负压的人工调节。所谓炉膛负压是指锅炉炉膛中由于燃烧而产生的压力。它的调节过程是这样实现的：首先炉膛负压通过负压指示仪反映到人的眼里，再由人的头脑进行比较判断，然后用手去操作风门。在这种手动调节中，维持工作参数给定值的准确程度，亦即设备的工作可靠性和经济性完全取决于管理人员的技术熟练程度和反应灵敏程度。在这种情况下，人要用一定的体力来完成对工作过程连续监视和控制的作用，这样，人就成了调节回路中的“组成环节”如图 1-2 所示。因此，当工作过程尤其是快速进行的工作过程用手动调节时，使人在精神上 and 体力上会感到高度的紧张和难以胜任。如果有一种装置能把调节回路封闭起来，使它能连续地测量参数对给定值的任何偏移，并与此偏移成一定规律地来按需要的方向改变能量的供给，那么就可实现设备工作过程的自动调节。这就是自动调节的任务。它像人工调节一样，是在设备的所有可能的情况下，以给定的准确度来保持工作过程的质量参数。

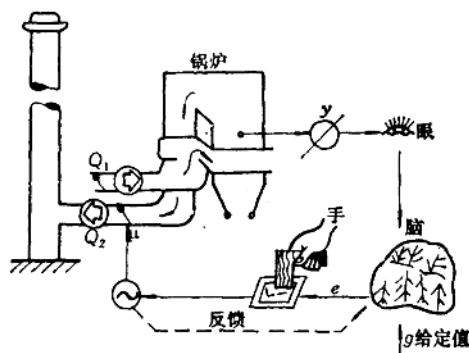


图 1-1 锅炉负压的人工调节示意图

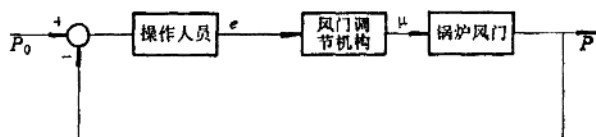


图 1-2 锅炉负压的人工调节回路图

显然，自动调节的采用，使上述人的作用完全由自动工作的装置来完成，因而使工作过程进行的准确性以及自动调节的机器工作的可靠性和经济性不决定于人的主观因素。从而把人从工作过程的控制工作中全部地或部分地解脱出来，这也是自动化技术的主要任务。在整个工业技术革命中，自动调节技术的不断发展和完善，为现代自动化理论打下了基础，并且发展成了一个独立的技术分支——自动控制学。船舶自动化经历了这样一个历程：由热工参数的自动调节，逐步发展到今天的无人机舱，实现全船的自动化控制。自动调节是最经常起作用的一种自动控制职能，它对运行过程的正常进行有很大的影响。所以，有些文献上就把自动调节称为自动控制。从自动调节的理论和船舶动力装置中自动调节技术的应用来看，自动化技术的关键是自动调节技术，自动调节技术包括调节器技术、调节系统的整定调试技术。这些技术的理论基础是自动调节原理，我们下一节中的内容就是学习简单调节原理，掌握一些常用的理论和定义，对各种类型的调节系统有一个初步的认识。

## § 2 自动调节的定义和分类

根据自动调节的目的和任务，我们可以给自动调节下这样的定义：在设备运行过程中，为了保持质量参数恒定或在某一给定范围内变动，采用一套自动化装置来代替运行人员的操作过程称为自动调节。在实际调节过程中，我们常用调节术语来表达调节过程，常见的有六种：

(1) 调节对象：被调节的动力设备或运行需要调节的系统称为调节对象。例如，我们进行柴油机冷却水温度控制或调节时，调节对象就是柴油机冷却系统。

(2) 被调量：表征设备运行过程是否符合规定工况的物理量，也就是调节所要维持为规定数值的这些物理状态（如温度、压力、流量等等）称为被调量或被调参数。

(3) 给定值：希望被调量应该具有的数值称为给定值或目标值。在很多情况下，给定值是不变的。如柴油机冷却水温在正常情况下是一个给定值或给定范围，这种给定值是考虑了冷却效果和冷却状态而得到的。但有些情况下给定值是变化的。如汽轮机启动过程中，转速给定值是不断改变的。

(4) 扰动：生产过程或运行过程中引起被调量偏离其给定值的各种原因称为扰动。在柴油机冷却系统中引起被调量水温偏离其给定值的原因之一就是外负荷的变化，所以这时的外负荷就是该系统的扰动量。

(5) 调节量：由调节作用来改变或去控制被调量变化（使被调量恢复为给定值）的物理量称为调节量。在冷却水温调节系统中就是旁通阀开口和冷却阀开口的比值。

(6) 调节机构：接受调节作用去改变调节量的具体设备称为调节机构。

在介绍了术语后，以后的叙述就可以用术语来表达了。显然，调节就是抵消扰动的影响，使被调量回复到给定值。在前一节中讲的人工调节我们可以这样来认识：在膛炉负压调节系统中，调节对象是锅炉，被调量是负压，通过负压仪表指示值供运行人员监视，在监视的同时，运行人员在头脑里把被调量的指示值与给定值进行比较，根据偏差的大小、方向和变化作出是否进行调节和如何进行调节的判断。以判断的结果为依据，运行人员进行必要的操作，直至流入量和流出量重新平衡使被调量恢复到给定值为止。在操作中，不仅要根据判断的结果来决定操作的快慢，而且要运用反馈原理即根据执行机构移动后的预期效果恰当地变更调节的快慢，使调节机构的位移不至于过量而引起多次反复的振荡，但也不会使操作过量不足，以致拖长调节的时间。

如果我们使用一套自动调节装置来代替操作人员的调节作用，那么运行过程就不需要操作人员直接参与调节过程而有自动调节装置自动地执行调节任务。如图 1-3 是采用了自动调节装置的炉膛负压自动调节系统框图。与前面的人工调节回路图相比较可知：操作人员的功能和作用被定值单元、测量单元、调节单元、执行单元所取代。这不仅可大大减轻操作人员的劳动强度，而且还能避免人为因素的影响而提高了调节精度。

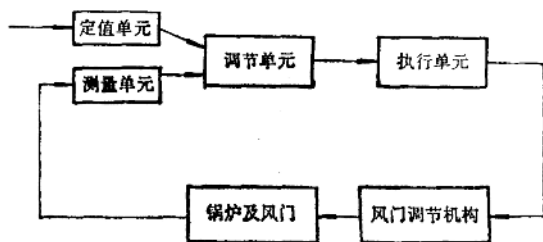


图1-3 炉膛负压自动调节系统图



图 1-3 所示的自动调节系统的工作原理与人工调节是相同的，只是用了一些设备，它们主要有以下四个单元组成：

测量单元；定值单元；调节单元；执行器。它们所完成的功能分为下列几部分：

(1) 测量变送：测量被调量的大小，即变化量。由变送器把被调量的大小及变化趋势变成不同的信号种类，如电压或电流信号，气压或液压信号，或者其它物理量信号送至调节器。

(2) 定值：定值单元的作用是人为设定给定值  $g$ （给定值的信号种类要和变送器送来的信号种类相同）作为被调量的标准值，用来与被调量的变化量进行比较。

(3) 比较：把被调量与给定值进行比较，发出一偏差信号（正或负），一般情况下，还有反馈或其它的辅助信号也在这里进行综合比较。

(4) 调节：把偏差信号按预定规律进行运算，然后发出调节信号。

(5) 放大：把调节信号放大到足以推动执行机构动作的程度。

(6) 反馈：调节作用的信号通过反馈元件变成反馈信号，反馈到放大元件以前的比较元件上，去抵消被调量的偏差值，即负反馈；或去增加偏差值，即正反馈。它的实质是当被调量尚未调节而开始变化以前，反馈信号就预先反映了调节效果，从而能起到一定的积极作用。

(7) 执行：按照放大后的调节信号通过执行机构去移动调节机构。

所以当被调量偏离给定值后，自动调节设备就能自动担负起上述功能，直至被调量等于给定值时为止。当然，不能认为自动调节设备一经安装，就能顺利地执行调节任务。为了使自动调节系统能满意地工作，必须研究调节系统的运动规律。这是在以下章节中我们要讨论的主要内容。

我们在讨论调节系统的运动规律之前，首先必须了解产生调节系统运动的原因。在自动调节系统中外界干扰或扰动，就是产生调节运动的根本原因。动力装置中的能量转换、形式转变受到了外界干扰或扰动的影响后，原先的稳定状态被破坏，在自动调节机构的作用下使不平衡的状态得到恢复。这方面的知识在第一节中已学过一些概念了。在船舶动力装置的各种系统中，影响系统正常工作的干扰是很多的，而且各具形式。例如：主机冷却水系统中影响平衡的干扰主要有三方面：主机的负荷、阀口的开度、冷却器的温差变化；辅锅炉系统中影响平衡的干扰主要有蒸汽输出量、水位、汽压等。这些干扰的作用使得系统的被调参数发生变化，要从根本上抵消掉这种变化首先就要从扰动开始。

在扰动理论中，我们把扰动分成外扰和内扰两种形式。象上述的负荷变化，它是系统外部产生的并对系统被调参数发生影响，因此我们称为外扰。象锅炉蒸汽压力调节系统中的给水温度和炉膛受热面的传热条件等等，都是偶然出现在系统内部的并对系统被调参数发生影响的，我们称为内扰。相比之下，外扰的影响比内扰为大。我们在讨论系统运动规律的时候，通常是给系统施加任意一种形式的输入作用（如扰动作用）然后去求出系统输出的过渡过程曲线（运动规律）。这样做是比较复杂的，也没有必要，所以我们往往是用具有典型意义的系统的输入作用，来分析这种作用或扰动在系统中的运动规律，使其具有普遍的实用价值。在选择这种典型扰动中，通常具有共同性的几种形式并可以用数学式表达的有下列四种：

(1) 单位阶跃函数  $I(t)$ 。单位阶跃函数的定义为:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

对于幅值为  $A$  的阶跃函数可表示为:

$$f(t) = A \cdot I(t)$$

(2) 单位斜坡函数  $f(t)$ 。单位斜坡函数的定义为:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases}$$

表示从  $t = 0$  时刻开始,  $f(t)$  随时间的推移, 以速度为 1 恒速变化, 对于速度为  $R$  的斜坡函数可表示为:

$$f(t) = Rt$$

(3) 单位脉冲函数  $f(t)$ 。定义:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases}$$

单位脉冲可以看成图示的面积为 1 的矩形脉动函数, 当宽度  $\tau \rightarrow 0$  时的极限

$$f(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} [1(t) - 1(t - \tau)]$$

显然,  $f(t)$  函数的面积为 1, 即把脉冲面积为 1 的理想短脉冲称为单位脉冲函数。

(4) 单位正弦函数定义为:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \sin(\omega t + \varphi) & t \geq 0 \end{cases}$$

上述这四种典型输入可用图 1-4 表示。从扰动的角度来看, 阶跃函数所代表的阶跃扰动是系统遇到的最厉害的扰动。因为它的作用发生在瞬时, 而且幅值达到最大, 倘若系统在阶跃的扰动下能令人满意地工作, 则在其它缓慢地扰动下必然更能满足实际工作的要求。同时, 在实际工作中, 这种阶跃扰动也是经常出现的。阶跃扰动除了作用强烈之外, 还具有易于实现、便于分析、实验和计算的特点, 所以在自动调节理论中, 我们常用阶跃扰动作为系统的干扰, 所讨论的运动规律及各种特性都是针对阶跃干扰后产生的运动过程来进行的。

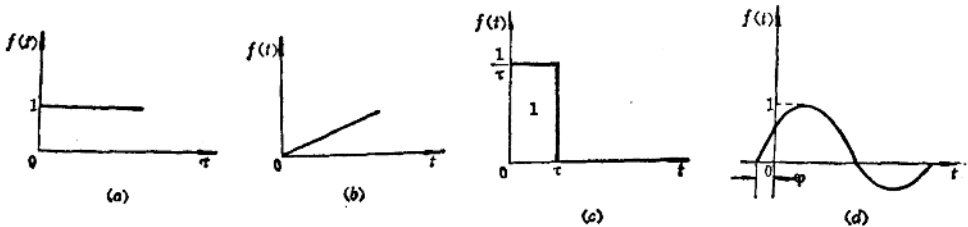


图1-4 典型扰动形式

(a) 单位阶跃函数; (b) 单位斜坡函数; (c) 单位脉冲函数; (d) 单位正弦函数。

同样道理，自动调节系统在实际调节过程中，根据不同的要求也有各种不同的形式。我们可以大致分成下列几个类型：

### 1. 按被调量的稳态值是否受影响分类

有无差调节系统和有差调节系统。前者是指稳态下的被调量在各种负荷下都保持为初始给定值。后者是指稳态下的被调量在各种工况下与给定值有一偏差，而且不同工况对应着不同的偏差，这种偏差决定了系统的调节不均匀度的大小，对系统的性质有较大的影响。

### 2. 按保持被调量的给定值来分类

有定值调节系统、程序调节系统和随动调节系统。

定值系统通常是指以给定的准确度，在调节对象的所有可能工况下保持被调量的值不变或基本不变，例如，蒸汽锅炉水位自动调节系统。这种系统的特点是它的主扰动作用（输入量）是调节对象的外负荷，此时用来调整被调量给定值的设备处在恒定的作用之下。

程序调节系统是指被调量（输出量）是按预先给定的程序来变化的。这类系统与给定系统有结构上的区别，程序自动系统有一辅助装置用以给出被调量变化的必要程序。如船用辅锅炉燃烧中，向喷油器供给的空气量的改变应按燃料量的变化来进行，因此，喷油器前的空气压力自动调节器是根据燃料量的程序来控制的。程序系统受到扰动作用一是来自程序发送装置，另一是来自外负荷的变化。

随动系统是指被调量（输出量）按相应的比例重复着供给到给定装置的量随时间而发生变化。它与程序系统的差别仅仅在于前者是没有什么程序的变化，而后者是按预先给定的程序变化。它的结构是使被调量连续同给定值相比较其差值（误差）就是主冲量即输入信号，以此来作用于调节机构，使差值趋于零。船用自动舵是典型的随动调节系统。

### 3. 按调节系统的结构分类

有开环调节系统、闭环调节系统和复合调节系统。

开环调节系统是指系统的输出量对系统的调节作用没有影响的系统，如图 1-5 所示。这系统中没有闭合的信号传递回路，亦即没有用被调量的变化信号作为反馈信号，调节器只按给定值的变化信号  $g$ ，通过执行机构对调节对象进行调节，被调量  $y$  随给定值  $g$  而改变，这是一个开环的随动系统。有时它还可以按主要的扰动作用（负荷变化）自动改变给定值，按预定的比例使调节作用  $\mu$  能够抵消扰动  $x$  对调节对象的直接影响，从而被调量  $y$  能够保持合理的数值，故这种系统还具有自动补偿的调节功能。这种系统对调节结果是不能自动检查是否符合所期望的数值，也无法予以纠正。所以开环系统只适用于被调量没有严格要求的场合。

闭环系统是指系统的输出量对调节作用有直接的影响，我们也称之为反馈调节系统，如图 1-6。这种调节系统的特点是利用输出量与给定值的偏差来进行调节，使系统的输出量趋于所希望的数值，闭环的含义是反馈，用反馈作用来减小偏差，从系统框图中可看出被调量变化信号以反馈方式送到调节器的输入端，与给定值信号  $g$  进行比较而产生偏差信号。这个偏差信号即作为调节的依据，只要被调量不等于给定值，调节作用就一直进行下去，直到偏差值减小到允许范围之内。闭环系统的缺点是当调节系统受到扰动

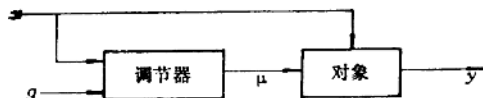


图1-5 开环调节系统框图

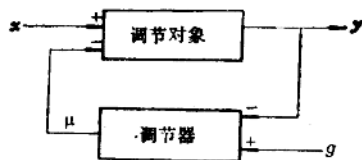


图1-6 闭环调节系统方框图

作用时，不能立即动作，只有在被调量与给定值出现偏差后，才开始调节，这样对于那些有延迟性即反应慢的调节对象来说，被调量出现的动态偏差较大。

复合调节系统是指开环调节和闭环调节相互配合使用的调节系统，如图 1-7 所示。当外界干扰  $x$  作用到调节系统而被调量还没有作出反应时，系统按开环调节进行粗调  $\mu_1$ ，调节量  $\mu_1$  一开始就抵消扰动  $x$  的大部分影响，使被调量  $y$  不会发生变化或变化很小。如果  $\mu_1$  不能起到完全补偿的作用，被调量  $y$  还存在一些偏差，还可以通过闭环回路进行细调  $\mu_2$ ，因此这种调节系统对于特定的扰动来说，获得的调节效果比一般闭环调节系统要好得多。

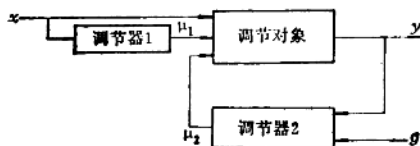


图1-7 复合调节系统方框图

#### 4. 按被调量数目分类

有单参数调节系统和多参数调节系统。

单参数调节系统是指调节系统中只有一个被调量和一个调节器的调节系统。调节器的任务只是为了保持被调量等于给定值。一般动力装置中的调节系统都是单参数的调节系统。

多参数调节系统是指调节系统中有多个被调量和多个调节器的调节系统。根据实际运行工况的要求，这些被调量之间必须保持一定的关系，或是通过共同的调节对象相互起着影响而不能各自独立地进行调节，当需要调节其中任何一个被调量时，各个调节器必须协调动作，以防止其它被调量受到不利的影 响。火电厂的直流式锅炉单元机组的负荷调节系统就是这种系统。

#### 5. 按调节系统的动态特性分类

有线性调节系统和非线性调节系统。

线性调节系统是指系统的动态特性可以用线性微分方程来描述，动态特性中各个参数是恒定的，或者在系统工作条件下可以近似看作是恒定的，线性调节系统的一个重要性质是在几个扰动同时作用于系统时，其总效果等于每个扰动单独作用时的效果之和，这就是线性调节系统的叠加原理。

非线性调节系统是指其动态特性参数中至少有一个不能保持恒定，随着系统的被调量的变化而变化的调节系统。这种调节系统的动态特性只能用非线性微分方程来描述，非线性系统就不能用叠加原理。

非线性因素在一般的调节对象和调节设备中都含有，如：不同负荷下对象特性的偏移、调节器的不灵敏区，执行机构的惰走等，在分析调节系统时，处理的办法有三种：一种是影响较小的因素就忽略不计，一种是进行线性化的近似处理，最后当作线性环节

来进行分析，还有一种是在调节系统中采用必要措施，特别是通过局部负反馈来缩小非线性因素的影响。总之，在调节系统中一般总是尽可能地避免和缩小非线性因素的不利影响，但在另一些场合，又需要引入非线性来改善调节系统的工作性能。

### 6. 按调节动作和时间的关系分类

有连续调节系统和断续调节系统。

连续调节系统是指这样的系统，在这种系统中如果不考虑不灵敏性，则被调量的连续改变与调节机构位置的连续改变相对应。也就是说，在这种系统中，所有元件的输入量和输出量的变化保持着连续的联系。

断续调节系统是指被调量的连续变化与调节机构位置的变化不是相对应的，也就是说在断续调节系统中，调节机构的动作只对被调量的连续变化中的几个量相对应而不是全部。我们根据调节机构可能有的位置数的不同，又可分为双位置和多位置系统。双位置系统中调节机构只可能占据两个极限位置中的一个，此时调节机构的一个位置对应于向对象供给全部的能量或物质，第二个位置则对应于完全停止供应。该系统的开始或停止工作是由被调量在很宽的范围内从某一最大值变到某一最小值而发生的。例如动力装置中的空压机控制回路就是断续调节系统。

除了以上六种分类法以外，还有其它的自动调节系统的分类方法。这些分类相互之间都是联系的，根据不同的要求给调节系统以不同的名称。例如定值调节系统可以有差调节，也可以是无差调节系统，也可以说闭环调节系统中包括定值调节系统和程序调节系统等。因为在调节过程中，不同类型调节系统适用的场合不同，要掌握各种系统的特性和要求，合理地选择调节系统。在动力装置中，经常接触的调节系统是定值、连续、闭环、单参数线性的自动调节系统，断续调节系统在位置调节中用得较多。要掌握自动调节系统的适用场合必须首先了解系统的性质，通常的系统性质是由调节对象的特性和调节器的特性所共同决定的，所以接下来我们要讨论的是调节对象的基本性质。

## § 3 调节对象的基本特性

### 一、调节对象的工况

组成自动调节系统的各种调节对象在整个动力装置中都有着一定的作用，随着船舶的运行状态的不同和各种外界干扰的影响，调节对象所处的工况就会发生变化。调节对象的运行工况通常规定为三种，即稳定工况、扰动工况和过渡工况。稳定工况就是指调节对象的输入与输出不随时间发生变化，能量或参数达到平衡，被调参数处于稳定状态。如图 1-8 所示，(0~ $t_1$ ) 段，这时的工作状态是设计状态，被调量对给定量没有发生偏移，自动调节器处在静止状态。扰动工况就是指原先的那种平衡被外界干扰所破坏，此时的被调参数随时间而变化。由于被调量的偏移，使调节器处在调节状态来克服干扰的影响，如图 1-8 所示 ( $t_1$ ~ $t_2$ ) 段。如果在  $t_2$  瞬间，干扰停止作用，并保证在一定值，则扰动工况结束，继而开始了过渡工况。过渡工况和扰动工况的区别在于调节器动作与否。在过渡

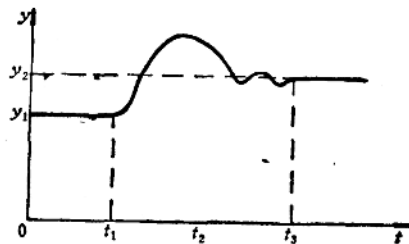


图 1-8 被调参数的变化曲线

工况期间，输入量对应于新的负荷值趋向平衡，使在工况始点被调量在有限的时间间隔内取得给定的常数值。因而，随着过渡工况的继续，对象的工作过程重新达到稳定工况。在调节理论中，从原状态过渡到新状态的过程称为过渡过程。

在外界变化停止后，过渡工况中被调量于有限时间间隔内能达到给定的常数值，则此过渡过程称为稳定的过程。如果被调量连续变化的时间不定，而且对应于给定值作正负向的波动，则此过渡过程是不稳定的过程。显然，这种不稳定的过渡过程不可能保证自动调节对象的正常运行。为了使调节对象能正常运行，除了保证稳定性的要求外，还应该使过渡过程在一定的时间里结束，并且最大的偏差不得超过运行条件给定的数值。因此，对任何调节系统都有一定的指标来衡量其调节质量的好坏。

## 二、调节对象的性质

自动调节系统能否得到满意的调节品质指标，不仅决定于调节特性，同时还决定于调节对象的特性。研究调节对象就能正确使用调节器，并且为调节器的参数整定工作提供依据，从而改善调节质量。

调节对象的性质有静态和动态之分。对自动调节系统来说，任何对象都是为了保证预先给定的工艺过程而设计和制造的，在大多数情况下，对象的性质是完全确定了的，所剩下的工作是要相当全面正确的评定这些性质，并为它选择最满意、工作最简单的调节器。然而对调节器来说，对象的不稳定工况是主要的工况，只有在这种工况中才有必要进行调节。所以我们了解调节对象的不稳定工况下的特性及被调参数的变化特点有着重要的意义。

### 1. 对象的动态特性及其曲线的表示

我们先看一下船用淡水加热器温度自动调节时的动态特性。如图 1-9 所示，在船舶航行中，受外界因素的影响是经常发生的，淡水加热器的温度也是经常变动的。例如，用热淡水量变化了，或者供给的淡水温度变化了等等，这些外来的干扰破坏了原来淡水加热器的吸热量与加热蒸汽供热量之间的热量平衡，致使被调参数温度发生了变化。

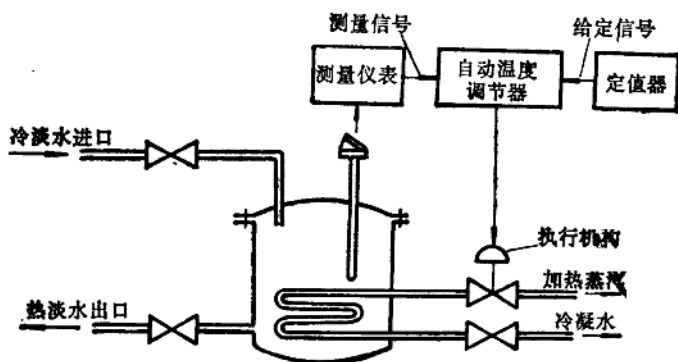


图1-9 淡水加热器温度自动调节系统示意图

这时的调节器就要根据温度变化的情况，开大或关小加热蒸汽调节阀门，以抵消外来扰动的影响，使温度恢复到给定值。这里，蒸汽调节阀门开度改变后，调节对象的被调参数随时间的变化情况，就称为调节对象的动态特性。

当加热蒸汽阀门突然开大,并保持某一开度时,淡水加热器的温度开始上升,但这个温度上升的过程是缓慢进行的,最后上升到一定温度后就不再变化了。我们用曲线把这一过程表示出来,如图1-10所示。图中的温度变化曲线称对象的动态特性曲线,也称对象的过渡过程或飞升曲线。

从曲线可以看出,调节阀在 $t_0$ 时刻增大 $\Delta\mu$ 以后,淡水加热器的温度是慢慢上升的,就是说,加热器的温度对于调节阀的调节作用是有惯性的或者是有滞后现象的。进一步研究说明,这种滞后现象是调节对象的一个很重要的动态特性。它影响着调节器的工作也影响着调节过程。

## 2. 表示动态特性的特征参数

在表示动态特性的时候,如果每次都用工示的整条曲线来表示,就很不方便,特别是在研究动态特性的情况下,带来许多麻烦。所以理论上希望用几个特征的数值来表示这种特性。如图1-10所示的曲线,我们通过分析和数学推导,可以求出以上曲线的方程式,

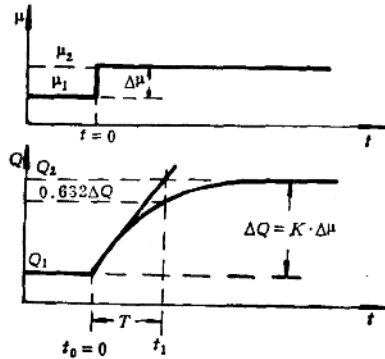


图1-10 加热器温度动态特性线

$$Q = Q_1 + K \cdot \Delta\mu \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (1-1)$$

可以看出,这是一个指数方程式,说明图1-10所示的曲线在数学上是一条指数曲线,这种数学表达式也称为该淡水加热器调节对象的数学模型。方程式中的两个常数值 $K$ 、 $T$ 是该动态特性的两个重要参数,分别称为时间常数和放大系数。

下面我们进一步来分析这两个参数的物理意义及对动态特性的影响。

(1) 假设加热器受到突然的扰动(阶跃扰动)以后,即 $t = \infty$ 时,代入公式(1-1)可得:

$$e^{-\frac{t}{T}} = 0$$

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = K \cdot \Delta\mu$$

就是说温度的变化为 $K \cdot \Delta\mu$ 。这里的加热器是一个单元(也称环节),可以用图1-11来表示。当输入量 $\Delta\mu$ 产生时,它的输出量 $\Delta Q$ 改变了 $K \cdot \Delta\mu$ ,也即输入量在通过这一单元后,放大了 $K$ 倍而输出,所以我们把 $K$ 叫做放大系数。可见, $K$ 表示了调节对象受到扰动后,被调参数最终变化( $t = \infty$ )的大小,从物理意义上讲,放大系数大的调节对象比较灵敏,但稳定性差,而放大系数小的调节对象,调节起来比较迟钝,但稳定性好。一般在稳定性上希望 $K$ 小一点,在灵敏度上希望 $K$ 值大一点,至于最佳的配合状态,是需要通过调整来实现的。

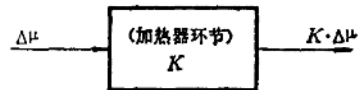


图1-11 静态放大系数示意图

(2) 又假设在刚加上扰动的瞬间,即 $t = t_0 = 0$ 时,温度变化的速度是多少?可用求曲线方程的导数来实现,如式:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{K \cdot \Delta\mu}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-2)$$

$t = 0$  时:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{t=0} = \frac{K \cdot \Delta\mu}{T} \quad (1-3)$$

从图 1-10 上看, 就相当在曲线  $t = 0$  时的切线的斜率, 而这条切线在新稳定温度  $Q_2$  上截得的一段时间就等于  $T$ 。可见, 时间常数的定义就是: 当温度一直以  $t = 0$  时的最大速度变化到新的稳态温度所需要的时间。可是, 温度实际的变化速度是愈来愈小的, 所以温度变化到新的稳定状态所需要的时间要比  $T$  长得多。理论上说, 需要无穷长的时间, 因为只当  $t = \infty$  时,  $\Delta Q = K \cdot \Delta\mu$  最终结果在  $t = \infty$  时达到的, 但实际上一般认为当  $\Delta Q = 0.95 \Delta\mu \cdot K$  时, 可以近似地认为变化过程已经基本结束。

当  $t = 3T$  时,  $\Delta Q \approx 0.95 K \cdot \Delta\mu$ , 说明扰动发生后, 要经过  $3T$  的时间温度的变化过程才基本结束。从物理意义上看,  $T$  是变化过程的时间参数,  $T$  越大, 温度变化过程的时间越长, 这也意味着调节对象的惯性越大。时间常数  $T$  也可以认为是表示对象惯性大小的一个参数。

一般求  $T$  值的方法有作图法和算法两种。前者求得的数值不易准确, 所以往往采用计算的方法。

令  $t = T$ , 得:

$$\Delta Q = K \cdot \Delta\mu (1 - e^{-1}) = 0.632 K \cdot \Delta\mu$$

从稳态 I 变化到稳态 II 时, 当变化量达到 0.632 倍的  $\Delta Q_{t \rightarrow \infty} = K \cdot \Delta\mu$ , 所需要的时间就是  $T$ 。

通过  $T$  值的讨论, 我们知道了对象是有惯性的, 从普通物理我们也许记得惯性是物体速度和质量的产物, 那么调节对象惯性又是什么呢? 它影响动态特性的因素有哪些?

我们以船用重力润滑油柜为例来认识对象的惯性及意义, 见图 1-12 所示。滑油不断从上面的管中流入, 同时又不断从下面的管中流出, 流入和流出都由调节阀来控制流量的大小。油柜要求保持油位高度  $H$  一定, 因此, 这是一个被调量为液位  $H$  的油柜油位调节对象。

如果流出量为  $Q_2$ , 要保持油位高度  $H$  不变, 在平衡时, 流入量  $Q_1$  应等于流出量  $Q_2$ , 这时, 对象的负荷即能够储存工质或能量的能力为:

$$W = H \cdot F \text{ (m}^3\text{)} \quad (1-4)$$

式中  $F$  是柜的截面积 ( $\text{m}^2$ )。这种能力我们称为容量,  $W$  是该对象的体积容量。容量是由于对象中存在某种阻力的缘故。上例中, 油柜流出管路上的调节阀就是一个阻力元件, 由于它的阻力, 阻碍了液体的流出, 才使油柜能保持一定的油位高度, 具有一定的容量。反之, 没有阻力的话, 油柜中盛不住油, 当然也就没有容量了。另外, 容量可以通过阻力的大小来调节的, 因此, 对象的容量与阻力及截面积 (也称之为容量系数) 有关。我们可以通过公式的变换得到容量系数与容量变化  $\Delta W$  的关系, 即

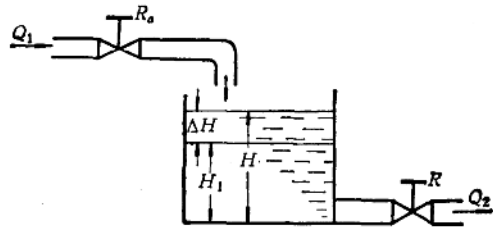


图1-12 重力润滑油柜示意图



$$C = \frac{\Delta W}{\Delta H} \quad (1-5)$$

这就是说对于相同的容量变化 $\Delta W$ 容量系数越大，油位 $H$ 即被调量的变化量就越小，反之就越大。所以容量系数反映了油柜的惯性。通过这种分析，我们就不难理解调节对象的惯性概念，就是这种惯性使调节系统的工作有了一个动态过程，要使动态过程达到一定的指标就要根据不同对象的不同惯性来配备调节装置。从理论上讲，就是要改善调节系统中的特性参数值。这种改善在今后的学习中就是调节技术中的一个重要内容：调节系统参数的整定。

船舶动力装置中的各种调节对象受到重量和尺度的限制，它们的惯性是相当小的。同时它们的种类特别繁杂，对调节器的要求各不相同，有的只要简单的调节器，有的则需要复杂的调节器。在进行自动化设计时有这样的设计原则：尽量运用最简单、最适用的技术方法。然而，究竟使用什么样的调节器还得从调节对象的另一重要特性——自平衡能力来判断。

调节对象的自平衡能力是指对象受到扰动作用后，在没有操作人员或调节机构的作用下能借助对象被调参数变化的作用，使对象又重新自动处于平衡状态的能力。如图1-13所示，被调参数液位的改变，可以使调节对象的介质能力——流量发生变化。当

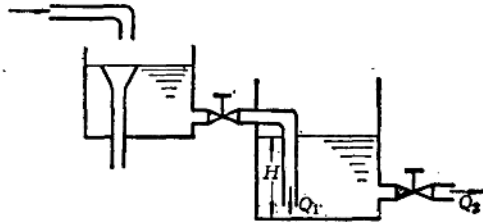


图1-13 具有自平衡能力的调节对象

$Q_2$ 受到扰动而变化时，液位 $H$ 可以调整 $Q_1$ 的流量，使该系统重新处于平衡状态。这种自平衡能力并不是每个系统都具备的。如图1-14所示，就是典型的没有自平衡能力的对象。水箱的给水管位于水面之上，而水是用泵来排出的，于是当给水量 $Q_1$ 和排水量 $Q_2$ 不相等时，如果不对给水装置进行调节作用，则过了一段时间不是溢满就是流空。

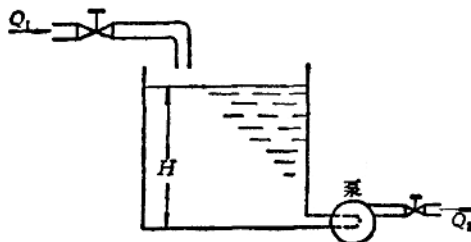


图1-14 没有自平衡能力的调节对象

在船舶动力装置中，水箱对象中的液位、换热器对象中的温度、压力容器对象中的压力等参数就是有自平衡能力对象所对应的被调参数。锅炉对象中的水位调节则是没有