

# 船舶驾驶自动化

周 锋 主编  
孔凡邨 主审



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

主编

本书以《国际海上人命安全公约》(SOLAS)和《国际海上避碰规则》(COLREGS)为基础,结合我国《海商法》和《海上交通安全法》等相关法律法规,系统介绍了船舶驾驶自动化的基本概念、原理、组成、应用及发展趋势。全书共分8章,主要内容包括:船舶驾驶自动化的基本概念、船舶驾驶自动化的组成、船舶驾驶自动化的应用、船舶驾驶自动化的发展趋势、船舶驾驶自动化的关键技术、船舶驾驶自动化的应用案例、船舶驾驶自动化的发展趋势等。

# 船舶驾驶自动化

周 锋 主编

孔凡邗 主审



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书仅从全面理解船舶驾驶自动化和智能化的角度,简要介绍了船舶驾驶所涉及的智能控制理论,回顾了航海技术的发展历程,系统论述了船舶自动化所涉及的导航、定位、通信、避让、自动航线设计和综合船桥等关键系统,分析与研究了这些系统的发展趋势。同时,在大航海背景下,详细介绍了未来 e-Navigation 实施战略,研究和指出了实现这一战略的关键要素和亟需克服的问题。

本书可作为海事教育和培训机构的教材,也可供航海驾驶人员、船舶管理人员参考学习。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶驾驶自动化/周锋主编. —上海:上海交通大学出版社,2016

ISBN 978-7-313-15868-0

I. ①船… II. ①周… III. ①船舶操纵—自动控制系统

IV. ①U664.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 225857 号

## 船舶驾驶自动化

主 编:周 锋

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:上海万卷印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:217千字

版 次:2017年1月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-15868-0/V

定 价:26.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:9.5

印 次:2017年1月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928277

## 前 言

航海技术随着科技的进步已发生了巨大变化。从最初的抛物测量船舶速度、航迹推算以及测量天体高度确定船舶位置,到现在卫星定位,航海对航海者的技能和知识体系要求也随之发生了较大变化。传统大洋航行靠舵手的状况,随着自动舵的出现,驾驶台一人值班已经成为事实。传统的航线设计和海图更新是一项既繁琐又耗时的工作。当前,最佳航线设计系统,电子海图系统和气象导航的出现,使这项工作仅需几步计算机程序操作即可完成;传统分散的罗经、计程仪、雷达、海图和通导信息显示模式,也已经由现代集成驾驶台系统所取代;集成驾驶台系统为航海者完成了信息的收集和初步处理工作,航海者的工作已经简化为在既有信息上的分析和决策。伴随着通导、测量和智能控制技术的进一步发展,岸基对船舶操纵的监控和控制将进一步加强,自主导航加岸基控制的模式正在加速出现,传统的将船舶视为海上孤立移动物的局面也将随之消失;高科技和自动控制技术已渗透到航海技术的各个方面。

近年来,由于自动控制技术以及 e-Navigation 的发展和持续推进,船舶海上航行行为正在成为大航海系统的一环,一个崭新的航海时代正在到来。审视这个时代和行业的需要,这个新的航海时代将具有高度自动化、高效率、高能效的鲜明特征,高度自动化是高效率和高能效的基础;这种高度自动化的航海必将对航海者提出新的要求,综合来看,主要体现在:一方面,为更好地掌控船舶,最大限度地减少人为因素对安全和海洋环境的负面影响,高度自动化的船舶操纵环境,要求新时代的航海者对船舶自动化原理有基本的了解和把握,以方便他们能做出最优化的决策和操船指令。另一方面,随着 e-Navigation 战略的持续推进,船舶控制自动化、智能化和高度集成化程度将越来越高,为适应这种工作环境要求,航海者也需要对各种自动化或智能控制系统有基本认识。再者,未来高度自动化、自主航行的船舶并非无需船员,由此带来的可能是船员工作场

所的变化,船舶的控制台可能位于岸基,这种情况下,船舶必将由同时具有丰富航海知识又具有现代船舶控制系统知识的现代高级航海者统一监控和控制。在这种形势下,笔者认为,有必要编辑一本涵盖船舶操纵控制领域的符合航海者需求的航海自动化书籍,在目前航海自动化尚处在快速上升阶段时,为提高我国航海人员对船舶自动化的认识水平起到抛砖引玉的作用。

本书的第一、二、四、五、六、七、九章由周锋编写,第三章由陈宇里编写,第八章由李宁编写。书中存在的不确切的地方,望读者批评指正。

在本书编辑过程中,受到众多业内专家和上海海事大学通导教研室全体同仁的指导,他们的宝贵意见和建议最终使本书得以面世,在此一并表示深深的感谢!同时感谢编者在本书的编写过程中给予的帮助,上海交通大学出版社为本书的出版做了大量工作,编者在此一并致谢!

# 目 录

<b>第 1 章 自动控制基础</b> .....	<b>001</b>
1.1 自动控制概述 / 001	
1.2 控制和反馈控制 / 002	
1.3 反馈控制系统的构成和分类 / 004	
1.4 控制系统的响应和控制的优劣 / 006	
1.4.1 控制方式 / 006	
1.4.2 控制的评价 / 007	
1.5 智能控制理论 / 008	
1.6 启发式搜索 / 008	
1.6.1 图搜索算法 / 009	
1.6.2 启发函数 / 012	
1.6.3 A* 搜索算法 / 015	
1.7 遗传算法 / 015	
1.7.1 简单遗传操作 / 017	
1.7.2 一个示例 / 019	
1.7.3 遗传算法的优势 / 021	
1.8 霍普费尔德神经网络 / 023	
1.8.1 离散霍氏网 / 024	
1.8.2 连续霍氏网 / 026	
1.8.3 组合最优化 / 028	
<b>第 2 章 航海技术及自动化发展概况</b> .....	<b>031</b>
2.1 航海技术发展历程 / 031	
2.1.1 陆标定位 / 031	
2.1.2 天文航海 / 032	
2.1.3 航海计时技术 / 035	
2.1.4 传统航海技术的特点 / 035	
2.2 现代航海技术 / 036	

- 2.2.1 全球定位系统(GPS)/差分全球定位系统(DGPS) / 036
- 2.2.2 自动识别系统(automatic identification system, AIS) / 038

### 第3章 海上通信系统 ..... 049

- 3.1 GMDSS 概述 / 049
  - 3.1.1 功能要求 / 049
  - 3.1.2 无线通信服务 / 050
  - 3.1.3 GMDSS 海区 / 050
  - 3.1.4 设备配置要求 / 050
  - 3.1.5 GMDSS 设备和系统 / 050
- 3.2 GMDSS 发展 / 053
  - 3.2.1 GMDSS 技术方面的变化 / 053
  - 3.2.2 GMDSS 规则方面的变化 / 055
- 3.3 通信技术及 GMDSS 发展趋势 / 056
  - 3.3.1 通信技术发展趋势 / 056
  - 3.3.2 通信业务的发展趋势 / 057
  - 3.3.3 GMDSS 的未来发展趋势 / 059

### 第4章 船舶定位系统 ..... 060

- 4.1 定位系统发展过程 / 060
- 4.2 罗兰 C 导航系统 / 060
  - 4.2.1 概述 / 060
  - 4.2.2 系统组成 / 061
  - 4.2.3 基本原理 / 061
- 4.3 GPS 导航系统 / 062
  - 4.3.1 概述 / 062
  - 4.3.2 系统组成 / 063
  - 4.3.3 卫星信号 / 067
  - 4.3.4 导航电文(D 码) / 072
  - 4.3.5 GPS 信号调制与解调 / 074
  - 4.3.6 GPS 基本原理 / 075
- 4.4 GLONASS 导航系统 / 084
  - 4.4.1 概述 / 084
  - 4.4.2 系统组成 / 085
  - 4.4.3 基本原理 / 086
- 4.5 Galileo 导航系统 / 087
  - 4.5.1 概述 / 087
  - 4.5.2 系统组成 / 088

4.5.3	基本原理 / 088	
4.6	北斗导航系统 / 089	
4.6.1	概述 / 089	
4.6.2	系统组成 / 090	
4.6.3	基本原理 / 090	
<b>第 5 章</b>	<b>航行计划制定系统 .....</b>	<b>092</b>
5.1	最佳航线 / 092	
5.2	航线设计方法 / 093	
5.2.1	等时线法(作图法) / 093	
5.2.2	动态规划法 / 094	
<b>第 6 章</b>	<b>船舶自动舵系统 .....</b>	<b>097</b>
6.1	船舶自动操舵概述 / 097	
6.2	机械式自动舵 / 097	
6.3	PID 自动舵 / 098	
6.3.1	自动保向 PID 自动舵原理 / 098	
6.3.2	比例-积分-微分(PID)操舵 / 099	
6.3.3	PID 自动舵的局限性 / 100	
6.4	自适应自动舵 / 101	
6.4.1	自适应控制系统的概念 / 101	
6.4.2	自适应自动舵产生的原因与背景 / 102	
6.4.3	自适应自动舵的分类及各类自适应自动舵的技术水平 / 103	
6.4.4	自整定 PID 操舵仪的原理 / 104	
6.5	智能自动舵 / 105	
6.5.1	智能自适应控制技术的发展及现状 / 105	
6.5.2	模糊自适应控制 / 106	
6.5.3	神经网络自适应控制 / 107	
6.5.4	遗传自适应控制 / 107	
6.6	航迹舵 / 108	
6.6.1	航向保持原理 / 109	
6.6.2	船位数据的获得与处理 / 109	
6.6.3	自动转向原理 / 109	
6.7	自动舵的发展趋势 / 109	
<b>第 7 章</b>	<b>船舶自动避碰系统 .....</b>	<b>111</b>
7.1	船舶海上避碰行为认知 / 111	
7.1.1	海上避碰行动特征量 / 111	



7.1.2	采取避碰行动时两船距离统计 / 112	
7.1.3	采取避碰行动时目标船会遇最近距 / 113	
7.1.4	避碰行动的种类 / 115	
7.1.5	转向避碰行动的幅度 / 116	
7.2	船舶自动避碰技术 / 116	
7.2.1	船舶自动避碰决策系统研究的现状 / 116	
7.2.2	船舶避碰专家系统 / 117	
7.2.3	避碰领域知识库的处理 / 117	
7.2.4	避让决策的处理 / 119	
7.2.5	船舶避碰专家系统的构建 / 120	
<b>第 8 章</b>	<b>综合船桥系统</b> .....	<b>123</b>
8.1	IBS 概述 / 123	
8.2	IBS 的发展 / 123	
8.2.1	第一代综合船桥 IBS(20 世纪 70 年代初期) / 124	
8.2.2	第二代综合船桥 IBS(20 世纪 70 年代后期至 80 年代前期) / 124	
8.2.3	第三代综合船桥 IBS(20 世纪 80 年代中后期至 90 年代后期) / 125	
8.2.4	第四代综合船桥 IBS(20 世纪 90 年代中期至今) / 126	
8.3	综合船桥系统 IBS(Integrated Bridge System)的关键技术 / 128	
8.3.1	综合船桥系统的系统集成技术 / 129	
8.3.2	综合船桥系统的体系结构和信息流程 / 129	
8.3.3	最佳航线设计 / 129	
8.3.4	航迹控制技术 / 130	
8.3.5	多目标避碰辅助决策系统 / 130	
8.3.6	雷达图像与电子海图图像叠加 / 130	
8.4	IBS 的发展趋势 / 131	
<b>第 9 章</b>	<b>e-Navigation</b> .....	<b>132</b>
9.1	e-Navigation 概念及发展 / 132	
9.2	e-Navigation 战略实施计划 / 135	
<b>参考文献</b>	.....	<b>143</b>

# 第 1 章 自动控制基础

## 1.1 自动控制概述

人类具有使用工具的技能,从历史记载前开始,人们就为获得并加工资源(物质)而使用各种各样的工具;当然,无论是制造这些工具还是使它们发挥作用,都需要人力(能量),有时也使用畜力。在这之后,为了从繁重的体力劳动中解脱出来,利用了风力和水力,但这些受季节和地区的限制,且输出功率也有限。自 18 世纪后半期以来,从煤的燃烧中得到了动力,大规模的工厂出现了,火车和船舶等大运量运输手段也诞生了,人类进入了机械文明的时代。机器把人类从体力劳动中解放出来,可是由于机器本身的状态和没有理解人类思想(信息)的能力,人类为了机器的运行管理就不得不受单调、长时间工作的束缚,而在复杂、高速的工作情况下,往往造成极度的精神紧张。因此,人们一直在努力使机械实现自动化,以减轻精神负担,这就是控制技术。技术一般分为物质、能量和信息三类,控制技术与信息的联系最密切。

控制就是使对象适应某一目的所施加的必要操作,而自动控制(automatic control)则是依靠控制装置来控制操作自动地进行。

一般认为,自动控制最早开始于瓦特(J. Watt)的调速器。由于这个发明,自动地防止了转速的变化,使蒸汽机获得了实际应用。其后,在发动机的调速、发电机电压和频率的调节以及船舶的自动操舵等领域均实现了自动控制。特别是在第二次世界大战中,从军事目的出发,军舰、飞机和鱼雷的操纵以及炮塔的控制等也都实现了自动控制,自动控制在理论和实际应用方面都得到了大发展。这些主要是把位置、速度和角度等力学量作为控制对象,称为伺服机构(server mechanism)。另外,二次大战后,在化学工业中,由于过程测量仪表的进步,使控制温度、压力、流量、液位和浓度等状态量的过程控制(process control)得到了发展。与此同时,发动机和发电机的速度调节等也发展了,这称为自动调节(automatic regulation)。在理论上,先是用于通信工作中的反馈放大器理论,1940 年以后伺服理论又自成体系,且得知它可以用在自动调节和过程控制中,因而确定了作为这些理论的统一理论——自动控制理论。这就是称为古典控制理论的部分,其中主要是网络理论、复变函数论和拉氏变换等。

古典控制理论是针对有代表性的输入来研究其输出的理论,因此,在机器的组成和控

制目的比较简单的情况下,是非常有效的手段。但就复杂的机器来说,会发生在局部是合理的而在整体上不一定合理的情况,因而需要把整个机器作为一个功能实体来看待。系统(system)是由许多具有各种功能的元件为达到统一目的而组成的整体。系统的一部分,称为子系统(subsystem),但从另一个角度来看,它往往也构成一个系统。例如,船舶是运送旅客和货物的一个系统,它兼有移动式仓库和居住设施的功能。它是由船体、舵、发动机、螺旋桨、通信设备等主要部分组成。但在这些主要部分中,发动机本身就是产生动力的一个系统,它由活塞、气缸、曲轴和阀门等各种零部件装配而成。在此系统中,发动机调速器是保持转速一定的控制装置,而其最终目的在于确保在燃烧效率最高下安全可靠地运行。从全船来看,要在安全可靠、燃油消耗最少和时间最短的情况下到达目的港,但显然不能使全部目的同时是最优的。因此,在它们之间应进行加权处理,做出表示(收入)-(支出)关系的目标函数,从而选择使目标函数为最大的航行状态。

根据上述观点发展起来的新的控制理论,称为现代控制理论。在现代控制理论中,因控制目的的多样化和系统的复杂化,应该考虑的变量不是一个,故将这些变量集中起来看作矢量,用矩阵来表示并处理系统的特性。另外,为使目标函数最佳化,还引进了变分法等,而且多半具有用简单的模拟装置不能处理的庞大计算量。幸好有了电子计算机,它能在短时间内高精度地处理复杂的计算。

## 1.2 控制和反馈控制

所谓控制,就是使对象服从人的意志工作。成为这个对象的元件,称为控制对象。所有物体都可以认为是控制对象,但实际上只限于那些在技术上能够对其因果关系有某种程度了解的物体。

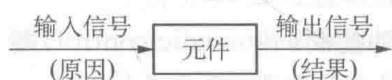


图 1-1 输入输出关系

为了用通用的语言表示这个因果关系(见图 1-1),规定:成为原因的变化称为输入信号(input signal),输入信号作用于元件(element)上,表现为结果的变化,称为输出信号(output signal),通常简称为输入和输出。

控制必有目的。如前所述,目的是各种各样的,为实现这些目的的要求,只要使控制对象的某个量与所希望的目标值(desired value)一致就可以。现在研究的就是这种情况。当这些过程自动进行时,则称为自动控制。此时被检测控制的特定量叫被控量(controlled variable)。

现在来研究一下:有一台由锅炉供给蒸汽而工作的蒸汽机,要求输出轴转速保持一定。在锅炉压力和温度一定时,如果蒸汽机的负荷转矩一定,固定蒸汽阀的开度就可以保持转速一定。为此,在蒸汽阀上刻有转速刻度,将阀开到与所要求的转速值相符的位置即可(见图 1-2)。



图 1-2 开环控制信号传输方式

蒸汽机转速随着①负荷转矩、②蒸汽压力和温度、③蒸汽量等的变化而变化。其中,为了控制被控量,可选择③作为操作量(manipulated variable)。如果被控量以外的参数从某一值起发生变化,则成为使控制系统状态发生变化的外部原因,故称为扰动(disturbance)。

运转中会出现扰动。蒸汽压力和温度随燃油质量、供给速度、进汽量等的变化而变化。此外,负荷转矩也会变动。因此,为了保持转速一定,且能可靠地运转,则需测量转速,与所要求的转速进行比较,并在转速下降时增大阀的开度,反之就减小阀的开度。这种由人工控制的过程称为手动控制(manual control),其本质是,连续地进行手动调节,如图1-3所示,它包括下列操作:检测转速并与希望值进行比较判断,再调节阀的开度。人不参与这些操作而全部自动进行的控制是自动控制。



图 1-3 闭环控制信号的传输方式

据资料记载,1784年瓦特在他的蒸汽机上使用了调速器。如图1-4所示,若转速升高离心锤放开,阀的开度则变小,于是转速随之下降。反之,若转速下降,则与上述动作相反。希望的转速由旋钮S来确定,指示器I上有转速刻度。此调速器由离心锤检出转速,并与目标值比较,随之进行判断和操作,这些都是自动进行的。

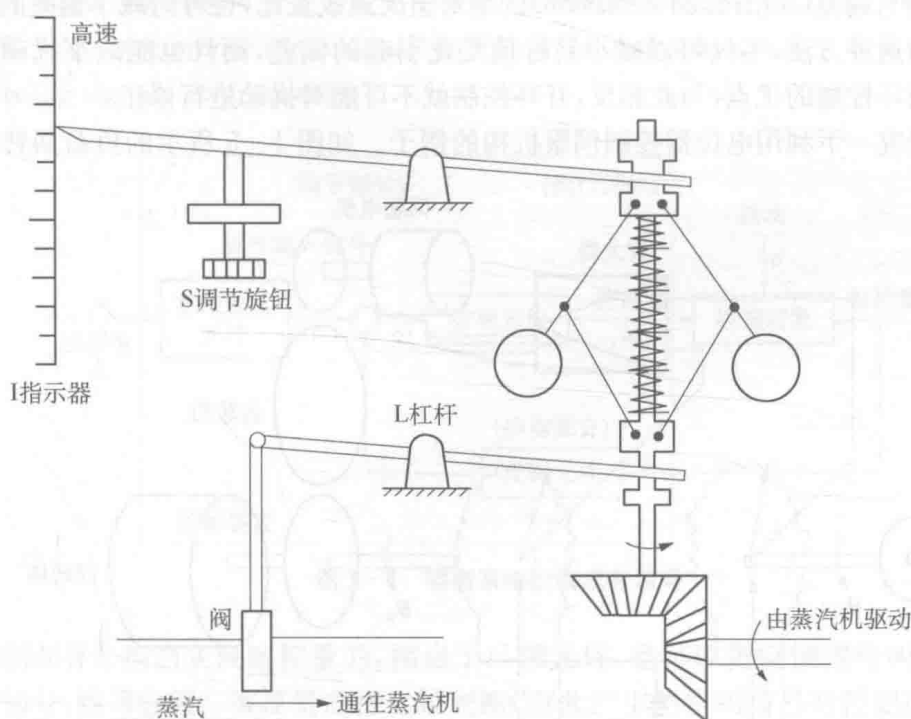


图 1-4 调速器原理

一般,使输出信号返回到输入端称为反馈(feedback),调速器就具有这种反馈回路(feedback loop),其中不包含人为动作,这样的控制方法称为反馈控制(feedback control)。如图1-3所示,反馈回路为闭合环路,故称为闭环控制(closed loop control)。与此相对应,图1-2的例子,因没有闭合环路,故称为开环控制(open loop control)。通常说的自动控制一般均指闭环控制。

作为身边的例子,现在来分析一下电暖炉和电动洗衣机。将热膨胀系数不同的两种金属贴合在一起构成双金属片,因温度变化而弯曲。利用这一点,在温度低时将电暖炉接入电路,在温度高时把它从电路断开,这样,电暖炉内的温度靠双金属片来反馈,所以是闭环控制。与此相反,电动洗衣机由于衣服清洁程度不能反馈,是开环控制。全自动洗衣机的控制从接通电路起启动动作后,依靠定时器定时进行加水、电机运转、排水和停止等,而且每个动作都是自动完成的。这样按照时间和规定的顺序一个接一个地进行的控制,称为时序控制(sequential control)。在自动化中,很多属于这种时序控制。例如,自动售货机或船舶发电机的自动起停装置等都是时序控制。时序控制由于数字技术的发展在很多场合应用逻辑电路。

### 1.3 反馈控制系统的构成和分类

在如图1-4所示的调速器中,检测转速(被控量)并与希望转速(目标值)相比较,随之根据差值进行适当的修正。给出定义:

$$\text{偏差值} = \text{目标值} - \text{被控量}$$

则调速器与偏差(controlled deviation)的绝对值大致成正比,且可向减小偏差的方向进行修正。利用这种方法,不仅可以减小目标值变化引起的偏差,而且也能减小扰动引起的偏差。这是闭环控制的优点,与此相反,开环控制就不可能对扰动进行修正。

下面来研究一下利用电位器控制伺服机构的例子。如图1-5所示的负荷回转体是在

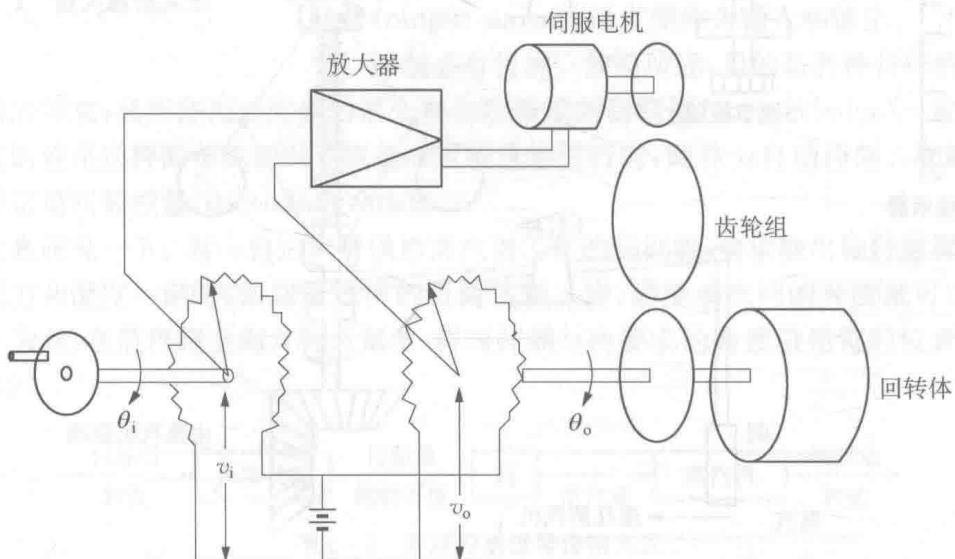


图1-5 用电位器控制的伺服机构

和输入轴完全相同的转角下回转的。输入轴的转角  $\theta_i$  为目标值, 输出轴的转角  $\theta_o$  为被控量。在这个装置中, 依靠电池和电位器把  $\theta_i$ 、 $\theta_o$  转换成电压  $v_i$ 、 $v_o$ , 并取其差值

$$v_\theta = v_i - v_o$$

$v_\theta$  与偏差成比例。系统应这样连接: 将增加的电压  $v_\theta$  加在伺服电动机上, 使其带着负荷朝减小偏差的方向回转。转速与  $v_\theta$  成比例, 若极性变为相反时, 则反转。

现在假定输入轴急剧地向右回转 to 某一角度后停止。这时产生与输出轴转角差成比例的电压  $v_\theta$ , 于是伺服电动机回转, 随着转角差变小, 转速则下降, 直到转角差为零时停止。输入轴向左回转的情况, 除  $v_\theta$  的极性相反外, 其余完全相同。图 1-6 给出了伺服机构的信号。

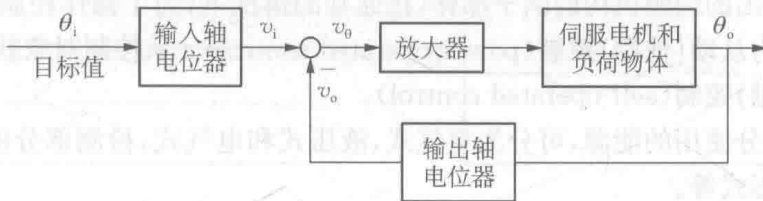


图 1-6 伺服机构的信号

从调速器和伺服机构的例子可知, 目标值和控制对象不同时, 具体名称也不同, 为便于理论上进行处理, 给出了统一的名称。把迄今所研究的量称为信号, 现在把重点放在信号传输上来研究如图 1-7 所示的原理结构。当目标值与被控量直接比较有困难时, 需要适当的元件进行变换。这些元件是标准输入元件和反馈元件, 这在伺服机构的场合是电位器, 而在调速器时, 目标转速可变换为旋钮的位置, 蒸汽机转速则可变换为离心锤的平衡位置。此标准输入信号(reference input signal)和反馈信号(feedback signal)之差称为控制作用信号(actuating signal, error signal)。

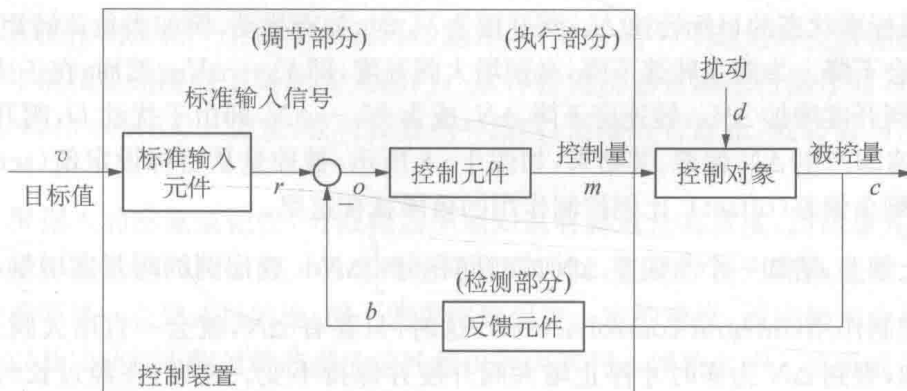


图 1-7 控制系统的构成与信号

控制部分是检测变换被控量的, 相当于反馈元件, 也可以把反馈信号叫做检测信号。在调节部分, 将目标值与被控量进行比较判断, 由此产生的作用信号对控制进行必要的修正, 故具备一种计算功能。调节部分除图 1-7 中的标准输入元件外, 还包括一部分控制元



件。控制元件的其余部分是执行部分。在大多数情况下,操作需要比较大的功率,因而修正作用信号需通过执行部分的放大器(amplifier)和执行机构(actuator)变换成操作量。

控制系统的分类方法很多,这里归纳如下:

从应用方面看可分为:伺服机构、过程控制、自动调节等,但在理论上可以统一处理。

根据反馈回路的有无可分为:闭环控制和开环控制。

另外,根据目标值随时间的变化,可做如下分类:目标值一定时,称为恒值控制(fixed command control);目标值随时间变化不能预测时,称为随动控制(follow-up control);而事前能决定时,称为程序控制(program control)。例如,能保持船舶一定航向的自动驾驶仪就是恒值控制系统。在此系统中也包括舵机的随动控制系统,它跟随驾驶室的指示给出舵角。

如同前面举出的伺服机构的例子那样,在通常的情况下,为了操作控制元件,需从外部供给能量,这称为从动(他励)控制(power-operated control)。从控制对象获得操作能量时,则称为自行(自励)控制(self-operated control)。

根据执行部分使用的能源,可分为空气式、液压式和电气式,检测部分的构成也有混合式的,如电气液压式等。

## 1.4 控制系统的响应和控制的优劣

### 1.4.1 控制方式

不论是手动控制还是自动控制,最重要的是,用具有反馈回路的闭环控制来实现被控量与目标值一致(见图 1-3)。而且,在此回路内的元件的功能中,最接近人的动作的是比较和判断功能。在调速器中,此功能用杠杆 L 的简单比例控制作用(proportional control action)来实现。也就是说,阀关闭程度大致与转速高低成比例。但是,对于控制装置来说,这样是否充分?以调速器为例,还应考虑扰动的影响及其对策。

对于某标准状态的目标转速  $N_s$ , 阀开度为  $V_s$  时,如有扰动,例如当负荷转矩增加  $D$  的话,转速就会下降。为防止转速下降,必须增大阀开度,即  $V_s + \Delta V_D$ 。然而,在正比例控制作用下,为使阀开度增加  $\Delta V_D$ , 转速应下降  $\Delta N$ , 成为  $N_s - \Delta N$ , 即由于扰动  $D$ , 阀开度仅增大  $\Delta V_D$ , 而转速却产生  $\Delta N$  偏差。其结果,如图 1-8 所示,被控量从目标设定值(set point) 偏移,这叫做剩余偏差(offset)。比例控制作用的极限就在这里。

为防止偏差,增加一个与偏差  $\Delta N$  的时间积分  $\int \Delta N dt$  成比例的阀开度增量,这种方法称为积分控制作用(integral control action),这时,只要有  $\Delta N$ , 就会一直增大阀开度,从而使转速增加,直到  $\Delta N$  为零时才停止增大阀开度并保持不变。这样,在经过长时间之后可以消除剩余偏差,但在负荷转矩变化迅速时,会使响应滞后。因此,为了消除这个滞后作用,使阀开度的增量正比于  $\Delta N$  的时间微分  $dN/dt$ 。这称为微分控制作用(derivative control action)。根据转速变化速度来改变阀开度的增置,因而使滞后减小。归纳上述各作用,则分别称为 P(比例), I(积分), D(微分)控制作用,这是最基本的控制形式。

自动控制更加复杂。下面研究一下由人进行上述 PID 控制的情况。例如,汽车在某一

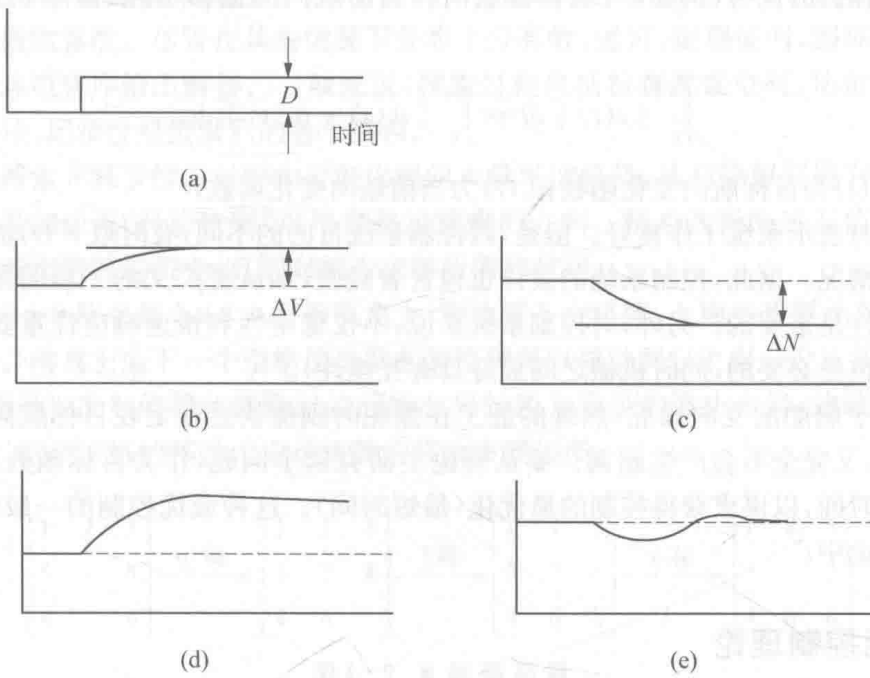


图 1-8 控制系统对阶跃定值扰能的响应

(a) 扰动输入; (b) 比例控制; (c) 比例控制的响应; (d) 比例积分控制; (e) 比例积分控制的响应

速度下行驶时,在水平直线道路上踩下油门直到转速表的指示与目标值一致,当达到目标值时,则保持其值不变。这时,踩下油门的多少和速度大致成比例,故是 P 控制作用。

当汽车驶到具有一定斜度的上坡时,因惯性作用,速度将下降而低于某一值。如果在速度回到目标值之前一直加大油门,这就是在 P 控制作用下加 I 控制作用。若为熟练的驾驶员,根据发动机响声或加速度就能感觉到速度在下降,并立即踩下油门,这乃是 D 控制作用。

总之,反馈控制是在产生偏差以后再加操作,故滞后是不可避免的。熟练的驾驶员上坡时,多半能预见速度的下降而加大油门。这样检测扰动自动进行操作时,称为前馈控制(feed-forward control)。但是,在与预测不一致时,需要进行修正,故必需与反馈控制一起使用。

此外,根据人的感觉或记忆,可以相当早地知道有斜坡及其坡度,因而事先就知道,待到斜坡中间时,就能达到目标值。当道路是弯弯曲曲时,就只好预先降低速度。在这些情况下,虽然希望早一点到达目的地,但不能单纯地保持一定的速度,而应把安全行驶和遵守交通规则,以及发动机不能过载和燃油消耗量少等因素列入评价之中。这将成为最优控制理论所研究的对象。

#### 1.4.2 控制的评价

从控制目的来考虑,首先要求被控量与目标一致,且是稳定的。其次,希望响应迅速。因此,古典控制理论的主要部分在于稳定性和快速响应性的数学分析。



为评价控制的优劣,例如,可取目标航向和当前航向的偏移,即取偏差  $e(t)$  绝对值的积分

$$\int_0^{\infty} |e(t)| dt = \int_0^{\infty} |\theta_1(t) - \theta_0(t)| dt$$

式中,  $\theta_1(t)$  为目标航向变化函数;  $\theta_0(t)$  为当前航向变化函数。

此值小时表示系统工作良好。但是,因控制系统目的的不同,有时取  $e^2(t)$  的积分,也有取其他量的情况。据此,控制系统的设计也包含着经验(如从更广义的工程的角度来说,经济性和可靠性是重要的。另外,对控制系统来说,不仅稳定性和快速响应性重要,而且通用性和扩展性也是必要的,同时机械之间最好具有互换性)。

若只限于船舶的变向操舵,熟练的舵工在操舵时则能快速稳定在目标航向上,既有充分的响应性,又完全不会产生超调。要从理论上研究这个问题,作为目标函数可取操舵开始到结束的时间,以谋求获得控制的最优化(最短时间)。这种最优控制的一般论述包含在现代控制理论中。

## 1.5 智能控制理论

随着现代工业日益大型化、复杂化,对控制理论的要求也越来越高,控制理论也随之经历了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三个发展阶段。尤其是在过去的 30 多年中,经典控制理论和现代控制理论在工业生产过程中遇到了前所未有的困难,这正是由于它们研究的都是线性时不变系统的控制问题,而且越来越严重地依赖于精确的数学模型。然而,一般意义的线性系统只是对非线性系统的一种理想化或近似的描述,忽略了非线性系统存在的多平衡点、极限环、分歧与混沌等现象。实际船舶系统常具有不确定性、非线性、非稳定性和复杂性,很难建立精确的模型方程,甚至不能直接进行分析和表示。

智能控制系统的概念最早是由美籍华裔科学家傅京孙教授在 1971 年提出的,20 世纪 80 年代末开始迅速发展。智能控制理论是以无模型或非精确模型为特征的更接近人类思维方式的控制理论,它是以知识信息为基础进行学习和推理,用启发式方法来引导求解过程,是含有复杂性、不确定性和模糊性而且一般不存在已知算法的非传统数学公式化过程。智能控制的研究越来越被国内外研究者所重视,相关学术组织不断出现,学术会议经常召开,智能控制应用研究也取得了一大批成果。

船舶航行状态及海洋环境复杂多变,使得船舶操纵运动存在严重的非线性、参数不确定性及干扰的随机性。经典控制已难以满足人们对船舶航向、横摇这类非线性随机系统控制性能的要求。智能控制是新兴的控制方式,它不依赖于被控对象的精确模型,具有鲁棒性强、算法简单可行等优点,非常适合于船舶这类非线性系统和不确定性系统的控制。以下章节将围绕船舶驾驶台设备常涉及的智能控制理论展开论述。

## 1.6 启发式搜索

启发式搜索方法依靠任务无关信息来简化搜索进程。在很多情况下,问题求解可视为