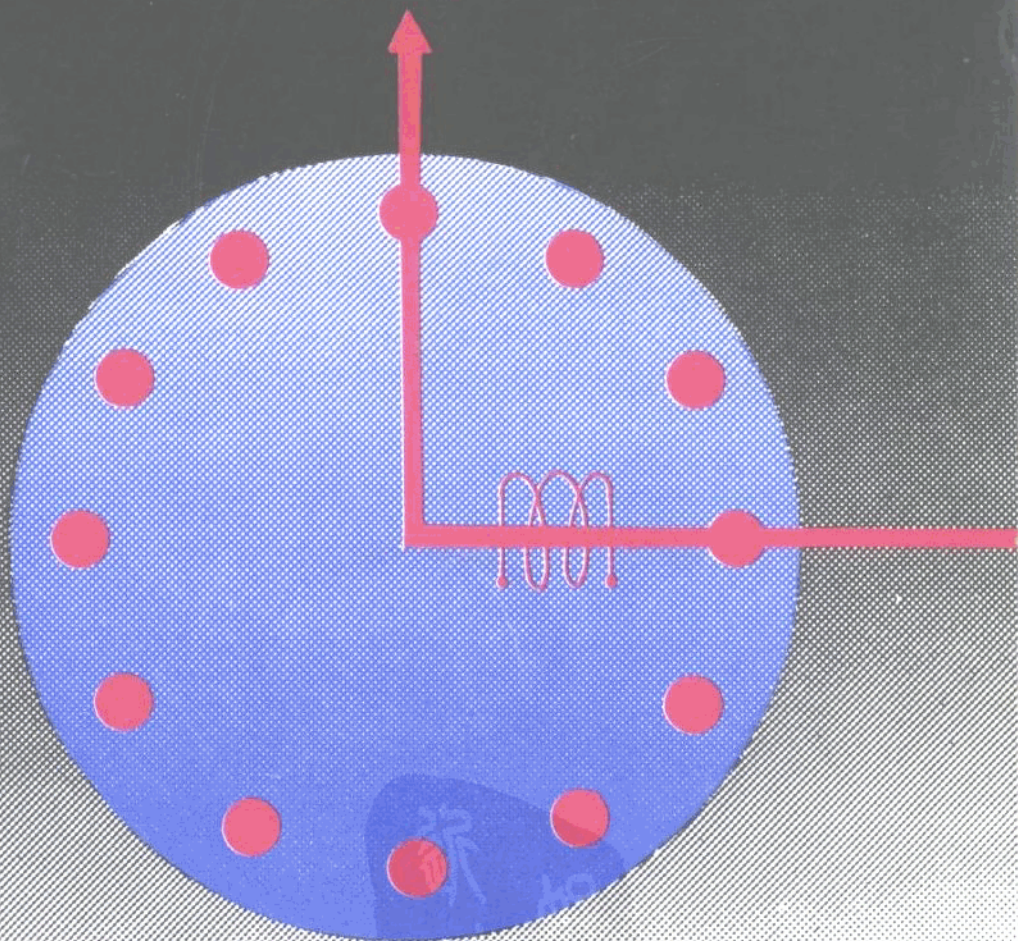


船舶控制系统工程

黎明森 涂光莹 合译

田玉申 校



大连海运学院出版社

U666.124-

1.13

457990

船舶控制系统工程

広田実 著
黎明森 合译
涂光莹
田玉申 校



00457990

大连海运学院出版社

(辽)新登字 11 号

1

内 容 提 要

本书是关于自动控制理论及其在船舶控制工程中的应用的专业教科书。作者紧密地联系船舶工程和船舶航行实际,既讲述自动控制理论的基本内容,又将船舶控制工程中的许多典型例子,贯穿于全书的始终,较全面地介绍了自动控制理论在船舶领域的应用。

本书既可作为我国高等学校船舶自动化、船舶电气设备管理及船舶工程类其它有关专业自动控制理论课的教材或教学参考书,也可供从事船舶工程和船舶航运的有关工程技术人员、设计研究人员参考。

DV10/22

船舶控制系统工程

広田実 著

黎明森 涂光莹 合译

田玉申 校

责任编辑:王宝忠 封面设计:王 艳

大连海运学院出版社出版、发行

大连海运学院出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:343 千

1992 年 8 月第 1 版 1992 年 8 月第 1 次印刷

印数:0001~1500 定价:3.60 元

ISBN 7-5632-0346-X/U·53

译者的话

本书由日本神户商船大学教授、工学博士広田実著,是一本关于自动控制理论及其在船舶控制工程中应用的专业教科书。内容包括古典控制理论和现代控制理论,并且介绍了大量的应用实例。

当前国内外有关自动控制理论方面的教材或参考书颇多,但能象此书这样,紧密联系船舶工程和船舶航行的实际,既讲述自动控制理论的基本内容,又将船舶控制工程中的许多典型例子,贯穿于全书的始终,较全面地介绍自动控制理论在船舶领域的应用,尚属少见。这也是我们翻译本书的主要原因。

本书共分13章,主要介绍了系统的数字模型、过渡过程、频率响应、稳定性分析、非线性控制、动态特性试验、系统的状态空间法、最优控制及离散与随机控制等内容,其实际例子有船舶调速装置与自动舵、船体运动、船舶转首运动、液压伺服操舵、最短时间操舵控制、最短航程、锅炉燃烧自动控制、空气式PID调节器、卡尔曼滤波器应用等。

本书可作为我国高等学校船舶自动化、船舶电气设备及船舶工程类其他有关专业自动控制理论课的教材或教学参考书,同时也可供从事船舶工程和船舶航运的有关工程技术人员、设计研究人员参考。

本书1—8章及附录由涂光莹译,9—13章由黎明森译并负责全书统稿,由华中理工大学冯林根审阅,最后,全书由田玉申校订。在本书翻译过程中还得到了武汉水运工程学院黄世明、伍时和等同志的支持与帮助,在此一并致谢!

由于我们的水平有限,错误和不妥之处在所难免,衷心希望广大读者给予批评指正。

译 者

1992年3月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 自动控制的发展	(1)
1.2 控制和反馈控制	(2)
1.3 反馈控制系统的构成和分类	(3)
1.4 控制系统的响应和控制的优劣	(5)
习题	(7)
第2章 线性定常系统和拉氏变换	(8)
2.1 动特性和静特性	(8)
2.2 线性微分方程	(8)
2.3 交流现象和频率特性	(10)
2.4* 频率响应和动特性	(11)
2.5* 傅里叶变换	(13)
2.6 拉氏变换	(14)
2.7 拉氏变换公式	(17)
2.8 微分方程解法举例	(20)
2.9 部分分式的展开	(21)
习题	(23)
第3章 传递函数和方框图	(25)
3.1 信号和传递函数	(25)
3.2 传递函数举例	(26)
3.3 方框图	(29)
3.4 方框图的等效变换	(30)
3.5 控制系统方框图和扰动的处理	(33)
3.6 线性化和集中常数化	(34)
3.7 传递函数的意义和权函数	(38)
习题	(39)
第4章 瞬态响应	(41)
4.1 传递函数的基本形式和典型输入波形	(41)
4.2 惯性环节	(42)
4.3 振荡环节	(44)
4.4 衰减振荡的性质	(48)
4.5 闭环系统的瞬态响应和稳定性	(51)
4.6 极点、零点的配置和瞬态响应	(53)
习题	(55)
第5章 频率响应	(57)

5.1	响应试验法	(57)
5.2	频率响应和传递函数	(59)
5.3	典型环节的频率特性	(60)
5.4	环节的串联联接	(66)
5.5	开环特性和稳定性	(69)
5.6	闭环特性和尼科尔斯图线	(70)
	习题	(75)
第6章	稳定判据	(77)
6.1	反馈控制系统的稳定和不稳定	(77)
6.2	赫尔维茨和劳斯稳定判据	(77)
6.3	奈奎斯特稳定判据	(80)
6.4	波特图上的稳定判据和稳定度	(85)
	习题	(86)
第7章	反馈控制的特性	(88)
7.1	瞬态特性	(88)
7.2	稳态误差	(89)
7.3	反馈的效果(稳态特性)	(93)
7.4	瞬态特性和频率特性	(95)
	习题	(98)
第8章	控制系统的设计	(100)
8.1	控制系统的性能指标与设计	(100)
8.2	参数的调整	(101)
8.3	串联校正	(102)
8.4	反馈校正	(105)
8.5	过程控制的设计	(106)
8.6	过程调节器	(109)
8.7	串级控制及其它	(112)
	习题	(113)
第9章	非线性控制	(115)
9.1	非线性系统的特性	(115)
9.2	描述函数	(116)
9.3	基于描述函数的稳定判据	(119)
9.4	相平面分析法	(120)
9.5	采用继电器的控制系统	(123)
9.6	平衡点的稳定性	(126)
	习题	(129)
第10章	动特性试验和控制系统举例	(130)
10.1	动特性试验	(130)
10.2	传递函数的推算	(132)

10.3	船体运动和自动操舵	(135)
10.4	自动舵的未来趋势	(141)
	习题	(144)
第11章	系统控制的基础	(145)
11.1	系统控制的必要性	(145)
11.2	一阶系统	(145)
11.3	状态方程和输出方程	(147)
11.4	动态系统的控制	(149)
11.5	状态方程的解	(151)
11.6	特征根与特征向量	(153)
11.7	对角化和标准形	(155)
11.8	能控性,能观测性	(157)
11.9	多变量反馈控制系统	(160)
11.10	反馈控制系统的稳定判据	(161)
	习题	(162)
第12章	系统的最优控制	(164)
12.1	静态最优化	(164)
12.2	有约束条件的最优化	(165)
12.3	变分法	(168)
12.4	附带条件的变分法的最优控制	(170)
12.5	哈密尔顿函数	(173)
12.6	最大值原理	(176)
12.7	反馈方式的最优控制	(178)
12.8	动态规划法	(181)
	习题	(186)
第13章	离散值与随机信号	(187)
13.1	数字控制和采样值	(187)
13.2	正态分布的随机信号	(189)
13.3	最优滤波器	(193)
附录	向量和矩阵	(198)
A.1	定义	(198)
A.2	矩阵的加法和减法	(199)
A.3	矩阵的乘法	(199)
A.4	矩阵的转置,行列式	(200)
A.5	逆矩阵	(201)
A.6	二次式和正定矩阵	(202)
	习题解答	(205)

第1章 绪 论

1.1 自动控制的发展

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),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发明了,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。

所谓控制就是使对象适应某一目的而加以必要的操作,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、飞机和鱼雷的自动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(servo 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、复数函数论和拉氏变换等,这也是本书的主要部分。

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

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。在本书的后半部分将概要地介绍现代控制理论。

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(controlled system 或 process)。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。

为了用通用的语言表示这个因果关系(图 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)。以后有时也简称输入和输出,且不仅是指力学中的力。

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, command)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)。

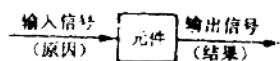


图 1.1 因果关系

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,如图 1.2 所示,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。



图 1.2 开环控制信号的传输方式

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。

据说,1784 年瓦特在他的蒸汽机上使用了调速器。如图 1.4 所示。如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,如转速下降,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。

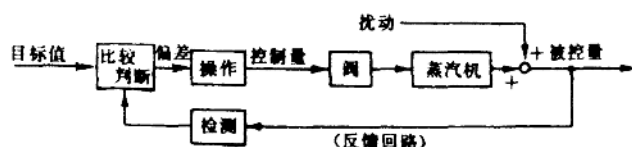


图 1.3 闭环控制信号的传输方式

一般,使输出信号反回到输入端称为反馈(feedback),调速器就具有这种反馈回路(feed-back loop),其中不包含人参与动作。象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,现在来研究一下电暖炉和电动洗衣机。将热膨胀系统不同的两种金属贴合在一起构成的双金属片,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

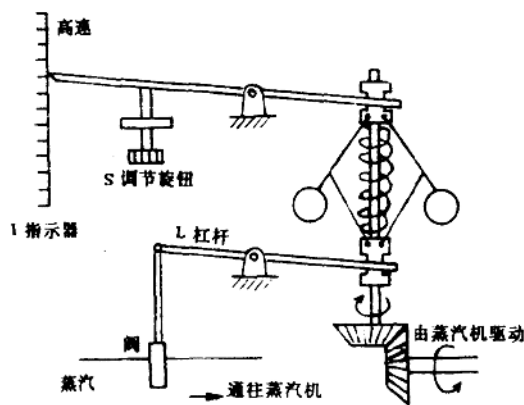


图 1.4 调速器的原理图

控制从接通电路启动动作后,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。象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(automatization)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,对此,本书未予涉及。

1.3 反馈控制系统的构成和分类

图 1.4 所示的调速器,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。现在,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。图 1.5 所示的负荷回转体是在和输入

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

$$v_e = v_i - v_o$$

v_e 与偏差成比例。系统应这样连接: 将增加的电压 v_e 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_e 成比例, 如极性变为相反时, 则反转。

现在假定输入轴急剧地向右回转到某一角度后停止。这时产生与输出轴转角差成比例的电压 v_e , 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_e 的极性相反外, 其余完全相同。

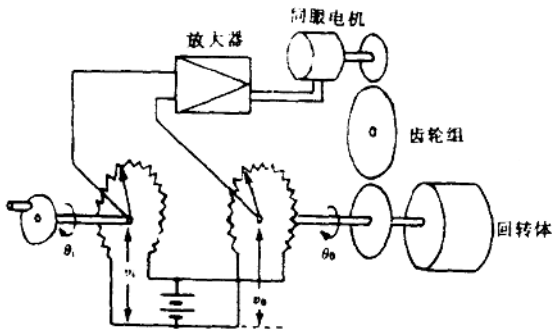


图 1.5 用电位器控制的伺服机构

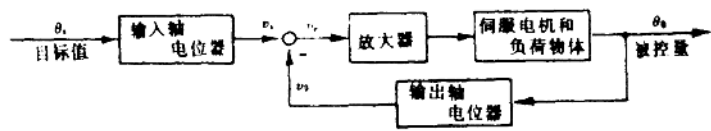


图 1.6 伺服机构的信号

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, 给出了统一的名词。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图 1.7 所示的原理结构图。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)。

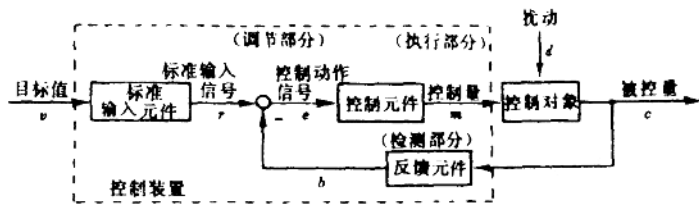


图 1.7 控制系统的构成与信号

在结构上, 控制系统可分为控制对象和控制装置 (controller, control device), 而控制装置又可分为检测部分 (detecting means)、调节部分 (controller means) 和执行部分 (final control element)。

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。

如 1.1 节所述,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。

如 1.2 节所述,根据反馈回路的有无,可分为闭环控制和开环控制。本书主要讨论闭环控制。

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);目标值随时间变化事前不能预测时,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,设定金属淬火过程的电炉温度,就是程序控制的例子。^①

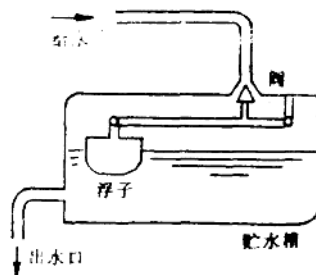


图 1.8 自行控制的例子

象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(自动)控制**(self-operated control)。图 1.8 示出的是自行控制的例子,它靠浮子的浮力关闭阀门,故能自动保持一定的液面。

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

控制方式

不论是手动控制还是自动控制,最重要的是,如图 1.3 所示,用具有反馈回路的闭环控制来实现被控量与目标值一致。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,阀门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 $V_s + \Delta V_o$ 。然而,在正比例控制作用下,为使阀开度增加 ΔV_o ,转速应下降 ΔN ,成为 $N_s - \Delta N$ 。即由于扰动 D ,阀开度仅增大 ΔV_o ,而转速却产生 ΔN 偏差。其结果,如图 1.9 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。

^① 广义地说,程序控制包括事先规定的程序,故时序控制中也有程序控制。

为防止偏差,增加一个与偏差 ΔN 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 ΔN ,就会一直增大阀开度,从而使转速增加,直到 ΔN 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,使阀开度的增量比例于 ΔN

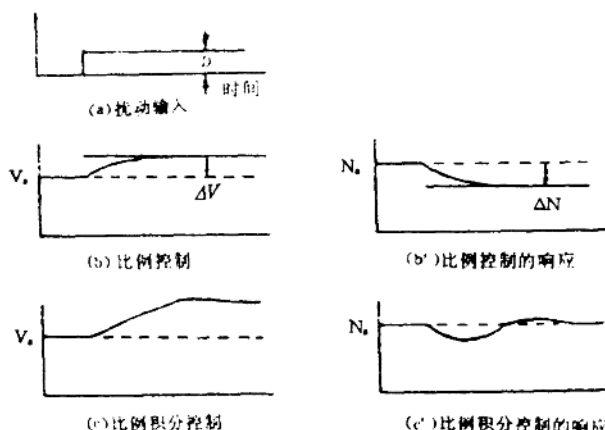


图 1.9 控制系统对阶跃定值扰能的响应

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量,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。熟练的驾驶员上斜坡时,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。当道路是曲曲弯弯时,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。

控制系统的响应

下面举一个船舶操舵系统的例子。如图 1.10(a)所示,设目标航向 θ_0 为目标值,现航向 θ_1 为被控量,如考虑偏差进入控制装置(自动驾驶仪)后产生舵角 δ ,则与前述伺服机构的例子相对应。因为手动操舵是由舵工操作,即在控制装置处进行操舵,所以容易理解闭环控制系统的响应。

首先研究比例控制作用。设舵角与目标航向和现航向之差成比例。如果按一定航向航行的船舶,其目标航向突然改变,若给出比偏差小的舵角(比例系数小),船首则如图 1.10(b)所示的曲线 A 慢慢地接近目标航向。这样过分小心谨慎地达到目标,会造成过度滞后。因此,如给出比偏差大的舵角,则会使船舶转首速度过大,即使在与目标航向一致时舵角为 0,也因惯

性作用而超过目标航向。其后因舵角变反向,转首速度为 0,航向又相反,再一次超过目标航向。这是慌乱者的操舵情况,在极端时如曲线 C 所示,振幅不断地在增大,这称为振荡(hunting),是不能控制的,也叫做不稳定状态。但是,当针对偏差决定适当比率的舵角时,则可象曲线 B 那样,取得滞后与超过目标航向都不大的稳定结果。

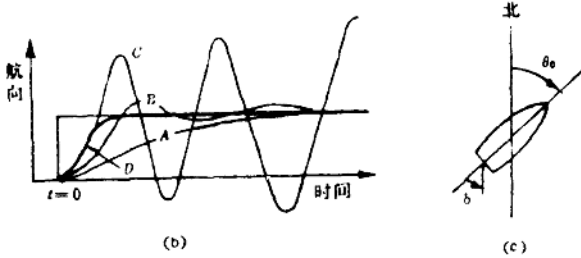
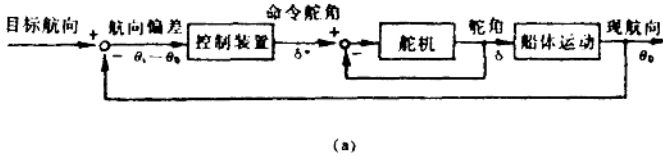


图 1.10 船舶操舵系统和响应特性

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,可取目标航向和现航向的偏移,即取偏差 $e(t)$ 绝对值的积分:

$$\int_0^{\infty} |e(t)| dt = \int_0^{\infty} |\theta_i(t) - \theta_o(t)| dt$$

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 $e^2(t)$, $t|e(t)|$, $te^2(t)$ 的积分,也有取其它量的情况。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象图中曲线 C 那样,既有充分的快速响应性,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。

习 题

1. 利用双金属片的电暖炉进行反馈控制,试举出外部扰动的原因。
2. 根据外界光线的明暗程度开关的路灯是否是反馈控制。
3. 汽车行驶基本上是采用手动控制系统进行,试以方向盘为例说明反馈控制的原理。
4. 试列举在船内进行自行(自动)控制的情况。
5. 有人参与的控制系统和自动控制系统在性能上有哪些不同。

第2章 线性定常系统和拉氏变换

2.1 动特性和静特性

所谓控制是为了达到某种目的而加给对象的操作,如果不能完全预料对象会怎样动作,则不能进行控制。在研究对象的运动时,总是先试探地加上某些动作,然后观察由此引起的对象的反应。

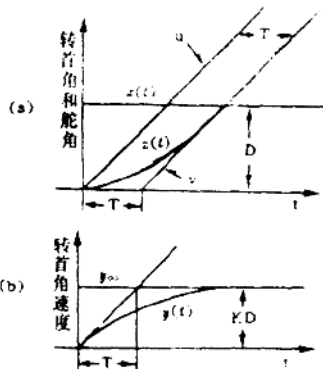


图 2.1 动特性

现在来研究一下船舶的操舵情况。为了避免对实验产生不良的影响,首先在静水中在固定航向和航速下航行,然后再加上某一舵角 $x(t) = D$,记录航向对时间的变化 $z(t)$,则得到图 2.1(a)。

由图可知,由某一舵角引起的航向变化不断增大,在经过足够的时间之后,逐渐与直线 v (渐近线)重合。此渐近线与横轴相交的时刻 T ,则表示航向变化时间滞后的一个指标。其次,描述转首速度 $y(t) = dz(t)/dt$ 的是图 2.1(b)。由图可知,转首速度不断增加,最后达到最终转首速度 y_{∞} 。图 2.1 表示输出随时间的变化,故称为动特性(dynamic characteristics)。

图 2.2 所示的舵角 D 与最终转首速度 y_{∞} 之间的关系,表示在稳态状态下的特性,故称为静特性(static characteristics)。从此特性曲线可知,舵角与最终转首速度大致成正比。因为在操舵过程中多半使用较小的舵角,所以往往只重视小舵角附近的曲线,且用切线 w 来近似。象这样的近似称为线性化(linearization)。在相当宽广的舵角范围内,这条直线 w 的斜率 K 表示舵角和最终转首速度之间关系的比例常数,可作为表示舵效的指标。

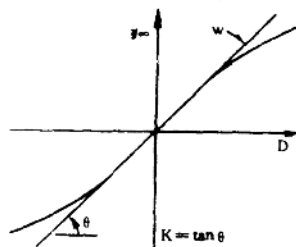


图 2.2 静特性

控制工程中在大多数的情况下是处理随时间变化的问题,故研究的中心是动特性。从上述的操舵特性来看,为求得航向和转首速度对舵角随时间变化的响应,必须借助微分方程。下面举出一个电路的例子讨论一下微分方程的解法。

2.2 线性微分方程

图 2.3 表示电阻 R 和电容 C 的串联电路上加有直流电压 E 。如果输入端 1-1' 上的电压为 $v_i(t)$,则输出端 2-2' 出现电压 $v_o(t)$,由克希荷夫定律,下式成立,即

$$v_i(t) - v_o(t) = Ri(t) \quad (2.1)$$

设电容储存的电荷为 $q(t)$, 则

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv_0(t)}{dt} \quad (2.2)$$

将上式代入式(2.1)中, 则

$$RC \frac{dv_0(t)}{dt} + v_0(t) = v_1(t) \quad (2.3)$$

在开关 K 接通电源后某时刻 $t(0 \leq t < \infty)$,

$v_1(t) = E$ 。假定解为

$$v_0(t) = E + Ke^{\lambda t} \quad (2.4)$$

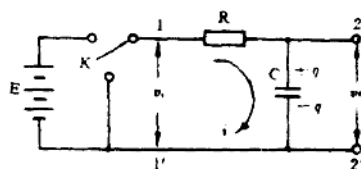


图 2.3 RC 电路

将其代入式(2.3), 得

$$RC\lambda Ke^{\lambda t} + E + Ke^{\lambda t} = E$$

$$\therefore (RC\lambda + 1)Ke^{\lambda t} = 0$$

为了使 $e^{\lambda t}$ 的 t 变化时上式也成立, 应使

$$RC\lambda + 1 = 0$$

$$\therefore \lambda = -1/T (T = RC) \quad (2.5)$$

因此, 解可用下式给出:

$$v_0(t) = E + Ke^{-t/T}$$

作为初始条件, 设 $t=0$ 时, 电容 C 上有剩余电荷 $v_0(0) = E_0$, 把它代入上式决定 K 时, 则

$$K = E_0 - E \quad (2.6)$$

由此式得出满足初始条件的解

$$v_0(t) = E(1 - e^{-t/T}) + E_0e^{-t/T} \quad (2.7)$$

作为例子, 设 $R=100\text{k}\Omega$, $C=10\mu\text{F}$, 则 $T=1\text{s}$ 。当给出 $E=10\text{V}$, $E_0=0\text{V}$, 用图 2.4 表示式(2.7)时, 则在相当长的时间后 $v_0(t) = E$ 。另外, 在 $t=0$ 处引曲线的切线, 由此在 $t=T$ 时得到最终值 E , 此 T 称为时间常数(time constant)。在 $t=T$ 时的实际值为 $v_0 = E(1 - e^{-1})$, 是最终值的 63.2%。

从式(2.7)看, 当输入电压增加 1 倍时, 输出电压 v_0 也增加 1 倍, 即比例关系成立①, 更正确地, 对应于输入 E_1 有输出 v_{01} , 对应于输入 E_2 有输出 v_{02} , 而对应于输入 $(E_1 + E_2)$ 有输出 $(v_{01} + v_{02})$ 。这种关系可以说迭加原理(principle of superposition)成立, 它是线性系统(linear system)的重要性质。

此外, 还有一个重要的性质, 不管开关在何时接通, v_0 在接通后的变化是相同的。这在线性微分方程中的定常系统(也叫做时间不变系统(time-invariant system))中成立。本书讨论线性定常系统。

现将输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 的关系用下式表示:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y$$

① 这里没有考虑含有初始条件 E_0 项, 它受开关接通前的过程的影响。另外, 一般控制系统都是长时间连续加入输入, 在此期间含初始条件的项为零。

$$= b_0 \frac{d^m x}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{dx}{dt} + b_m x$$

系数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 中含有 x 和 y 及其导数时, 这个系统则为非线性系统 (non-linear system)。

另外, 这些系数如果是 t 的函数, 则是变参数系统 (time-varying system), 也叫做时变系统。假如这些系数或输入 x 是时间 t 的函数, 则因输出 y 受时间 t 的影响, 故称为非自控系统 (non-autonomous system)。

众所周知, 船舶航速与发动机轴功率不成比例, 是非线性的例子。另外, 当船舶通过有潮流的海峡时, 即使以同样的马力航行, 但由于对岸速度不同, 也属于非自控系统的例子。一般, 输入和输出的关系是非线性的。实用上通常都是在无多大妨碍的范围内加以线性化。在非自控系统中, 多半采用把时间的影响折合成第 2 次输入等方法, 将系统看成定常系统。

2.3 交流现象和频率特性

如图 2.5 所示, 在与前述相同的电路中, 把交流电压

$$v_1(t) = A \sin \omega t \quad (2.8)$$

作为输入。假定, 输出为

$$v_0(t) = B \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.9)$$

将式 (2.8), (2.9) 代入式 (2.3) 电路方程中, 则

$$\begin{aligned} B\{\omega T \cos(\omega t + \varphi) + \sin(\omega t + \varphi)\} &= A \sin \omega t \\ \therefore B \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \left\{ \frac{\omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \cos(\omega t + \varphi) \right. \\ &\left. + \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \sin(\omega t + \varphi) \right\} = A \sin \omega t \end{aligned}$$

这里, 设 $\sin \rho = \omega T / \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$, $\cos \rho = 1 / \sqrt{1 + \omega^2 T^2}$, 从三角公式得到

$$B \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \sin(\omega t + \varphi + \rho) = A \sin \omega t$$

为使在 t 变化时上式也成立, 必须使 $B \sqrt{1 + \omega^2 T^2} = A$, $\varphi + \rho = 0$ 因此, 解 (稳态解) 为

$$\left. \begin{aligned} v_0(t) &= B \sin(\omega t + \varphi) \\ B &= A / \sqrt{1 + \omega^2 T^2}, \varphi = -\rho = -\tan^{-1} \omega T \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

当改变角频率 ω 时的幅值比 B/A 和相位 φ 的变化, 称为频率特性 (frequency characteristics)。代入和前例相同的数值后, 频率特性则如图 2.6 所示。由此图可知, 频率增大会使输出振幅减小, 相位滞后增大。

下面用交流电路理论来求解式 (2.3)。考虑到振幅是频率的复数函数, 输入用 $v_1(t) = V_1(j\omega)e^{j\omega t}$, 输出用 $v_0(t) = V_0(j\omega)e^{j\omega t}$ 表示^①。代入式 (2.3), 则得下式:

$$V_0(j\omega)(1 + j\omega T)e^{j\omega t} = V_1(j\omega)e^{j\omega t}$$

即使 t 值变化, 上式也成立。如将输出振幅和输入振幅之比定义为频率传递函数 $G(j\omega)$, 则

① 设 $V_1(j\omega) = A$, $V_0(j\omega) = Be^{j\varphi}$, 取 $v_1(t)$ 和 $v_0(t)$ 的虚部, 则分别为 $A \sin \omega t$, $B \sin(\omega t + \varphi)$, 这与前例的输入式 (2.8) 和输出式 (2.9) 一致。如取实部, 则分别为 $A \cos \omega t$ 和 $B \cos(\omega t + \varphi)$ 。