

船舶与港口电气及自动化问答(四)

王贤惠 陆祥润 编著

# 船舶自控理论及应用

科学技术文献出版社



364746

船舶与港口电气及自动化问答(四)

# 船舶自控理论及应用

王贤惠 陆祥润 编著



科学技术文献出版社

(京)新登字130号

## 内 容 简 介

本书为“船舶与港口电气及自动化问答”之四。全书共5章，分别介绍了自动控制理论、常见船舶自动控制元件、传递函数列写以及船舶自动控制系统的题例定性定量分析。对从事船舶与港口电气及自动化的工程技术人员、科研人员以及有关大专院校师生，可通过本书的目录查找，得到有关所需的问题解析与答案。

14477/05

船舶与港口电气及自动化问答(四)

船舶自动控制理论及应用

王贤惠 陆祥润 编著

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路15号 邮政编码100038)

大厂兴源印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米 32开本5.875印张 157千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数：1—5810册

科技新书目：278—111

ISBN 7-5023-1773-2/U 38

定价：3.90元

## 前 言

由大连海运学院船电系刘宗德副教授主编的《船舶轮机问答船舶电气设备分册》一书，自1976年出版以来，前后已印刷50000余册。由于该书简明、通俗、实用，因而深受广大船舶轮机员、电机员的欢迎。近十余年来，船舶电气及自动化技术迅速发展，日臻完美，为了满足船舶电机员、修造船厂及港口从事电气自动化技术工作的工程技术人员、广大工人，工作学习的需要，在科学技术文献出版社的大力支持下，现编写出版一套《船舶与港口电气及自动化问答》。

这套书拟分十个分册陆续出版：

第一分册：船舶电站及自动化装置

第二分册：船舶电气传动自动系统

第三分册：电气英语

第四分册：船舶自控理论及应用

第五分册：电气自动化及主机遥控

第六分册：港口及工厂供电及自动装置

第七分册：电机与变压器

第八分册：电路与电子技术

第九分册：电气工艺及管理

第十分册：计算机原理及应用技术

这套丛书由大连海运学院船电系刘宗德副教授、陆祥润教授主编，冒天诚教授主审，科学技术文献出版社出版，全国各地新华书店发行。

## 编著者的话

随着船舶自动化的发展,计算机控制系统日益增多,但是以经典控制为基础的控制系统还大量存在着,并且常常支配着整个船舶的正常运行,因此要选择好、调整好、维护好和管理好这些自动化设备,仍是目前船舶自动化工作者的主要工作职责。编著《船舶自控理论及应用》一书的目的,旨在服务于参与这些工作的同志在自动控制理论、概念和实践上有所帮助。此外,也考虑到现在船舶自动化技术日益发展,因而在船舶舵机控制中也适当介绍现代控制的有关概念和术语。

本书中的有关概念、名词解析和技术数据,是从国内外有关著作、手册中集取的,有些是编著者自己有关论文中汇集的。内容共分五章,第一章到第四章,分别为自动控制理论、常见船舶自动控制元件、传递函数列写等,第五章涉及船舶自动控制系统的题例定性定量分析。读者可以通过对这本书的目录查找,得到有关所需要的问题解析和答案。

本书除第五章1—14题由陆祥润编著外,其余由王贤惠编著。由于水平有限,缺点和错误有所难免,望读者多加指教。

# 目 录

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| 第一章 自动控制系统的基本概念及术语                           | ( 1 )  |
| 1-1 什么叫自动控制和自动控制系统?                          | ( 1 )  |
| 1-2 什么叫开环系统与闭环系统?                            | ( 2 )  |
| 1-3 试以电炉炉温的自动控制系统为例,<br>叙述系统中常用术语            | ( 2 )  |
| 1-4 详述反馈有哪些功能?                               | ( 3 )  |
| 1-5 如何降低系统的稳态误差?                             | ( 8 )  |
| 1-6 对一个良好的控制系统一般有什么要求?                       | ( 9 )  |
| 1-7 什么叫定常系统和时变系统?                            | ( 9 )  |
| 1-8 什么叫最小相位系统? 为什么称为相位最小?                    | ( 10 ) |
| 1-9 何谓控制系统的校正?                               | ( 12 ) |
| 1-10 试问在控制系统的控制器中, 常采用哪几种<br>基本控制规律? 各有什么特点? | ( 13 ) |
| 1-11 什么叫环节或系统的频率特性?<br>它与传递函数关系是什么?          | ( 13 ) |
| 1-12 频率特性常用的有哪几种表示法?<br>何谓频率响应?              | ( 14 ) |
| 1-13 什么叫根轨迹? 什么叫相轨迹?                         | ( 15 ) |
| 1-14 什么叫梅逊增益公式?                              | ( 17 ) |
| 1-15 进行系统分析时, 应如何选取典型的<br>试验信号?              | ( 18 ) |
| 1-16 什么叫绝对稳定性、相对稳定性和<br>稳态误差?                | ( 18 ) |
| 1-17 什么叫相角裕量和幅值裕量?                           | ( 19 ) |

|      |                                          |        |
|------|------------------------------------------|--------|
| 1-18 | 什么叫系统的数学模型? .....                        | ( 20 ) |
| 1-19 | 何谓调节器的微分时间、积分时间和放大倍数? .....              | ( 20 ) |
| 1-20 | 何谓调节器的比例带 $\delta$ 或 $P \cdot B$ ? ..... | ( 21 ) |
| 1-21 | 什么叫输入信号的频带宽度? 什么叫控制系统的频带宽度? .....        | ( 22 ) |
| 1-22 | 何谓前馈调节系统? .....                          | ( 22 ) |
| 1-23 | 何谓自治调节系统? .....                          | ( 23 ) |
| 1-24 | 何谓系统的模拟研究? .....                         | ( 24 ) |
| 1-25 | 什么叫非线性元件的描述函数? .....                     | ( 26 ) |
| 1-26 | 什么叫采样器(采样开关)? 什么叫采样过程? .....             | ( 27 ) |
| 1-27 | 什么叫保持器(保持电路)? .....                      | ( 28 ) |
| 1-28 | 试举一个采样系统的例子 .....                        | ( 28 ) |
| 1-29 | 控制系统技术改造的大致步骤是什么? .....                  | ( 29 ) |
| 1-30 | 试用Basic语言,分析单位反馈控制系统的相角和增益余量 .....       | ( 29 ) |
| 1-31 | 如何用数字机求解一阶方程组进行系统分析? .....               | ( 32 ) |

## 第二章 船用及工业用自动检测元件 .....

|     |                                      |        |
|-----|--------------------------------------|--------|
| 2-1 | 常用的敏感元件有哪些类型? .....                  | ( 40 ) |
| 2-2 | 变送器的功能是什么?电动差压变送器的<br>工作原理是什么? ..... | ( 40 ) |
| 2-3 | 热敏元件(热敏电阻)传感器的特点、<br>性能是什么? .....    | ( 41 ) |
| 2-4 | 常用热电偶有哪些? .....                      | ( 42 ) |
| 2-5 | 什么叫光电传感器? .....                      | ( 44 ) |
| 2-6 | 霍尔效应元件的基本原理是什么? .....                | ( 44 ) |
| 2-7 | 何谓气敏电阻传感器?举例说明 .....                 | ( 45 ) |

|            |                                             |               |
|------------|---------------------------------------------|---------------|
| 2-8        | 何谓触点传感器?使用触点传感器要注意什么?.....                  | ( 43 )        |
| 2-9        | 接近开关的原理是什么?.....                            | ( 50 )        |
| 2-10       | 电子转速计的原理是什么?.....                           | ( 50 )        |
| 2-11       | 节流式流量计的原理是什么?.....                          | ( 51 )        |
| 2-12       | 步进电机的简单工作原理是什么?.....                        | ( 52 )        |
| 2-13       | 为什么两个自整角机在一定方式连接下能同步转动?.....                | ( 54 )        |
| 2-14       | 数字式位置传感器如何测量液位的高度?.....                     | ( 55 )        |
| 2-15       | 光电编码器是如何工作的?.....                           | ( 57 )        |
| 2-16       | 用电磁脉冲办法,如何测量转速和流量?.....                     | ( 58 )        |
| 2-17       | 简述磁粉离合器的构造、特点及有关特性.....                     | ( 59 )        |
| 2-18       | 何谓电动执行器?.....                               | ( 61 )        |
| <b>第三章</b> | <b>船用控制元件的运动方程与传递函数.....</b>                | <b>( 63 )</b> |
| 3-1        | 如何直观列写无源网络的传递函数式?.....                      | ( 63 )        |
| 3-2        | 如何直观列写输入电压与某一网孔电流的传递函数计算式?.....             | ( 67 )        |
| 3-3        | 如何直观列写含一个运算放大器电路输出电压与输入电压之间传递函数式?.....      | ( 69 )        |
| 3-4        | 微分变压器的传递函数如何推导?.....                        | ( 72 )        |
| 3-5        | 磁场控制式直流电动机运动方程及传递函数是什么?.....                | ( 73 )        |
| 3-6        | 电枢控制式直流电动机的运动方程、传递函数是什么?.....               | ( 75 )        |
| 3-7        | 两自整角机按变压器接法,试问输出电压跟两个自整角机转角差有什么关系?为什么?..... | ( 77 )        |
| 3-8        | 他激直流发电机、测速发电机、电机放大器各属什么类型环节?.....           | ( 78 )        |
| 3-9        | 两相伺服电动机运动方程中非线性因素                           |               |

|                                                                                      |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 如何考虑?.....                                                                           | ( 81 ) |
| 3-10 异步电动机的数学模型是什么? .....                                                            | ( 82 ) |
| 3-11 线性可变差动变压器的工作原理及传递函数<br>是什么? .....                                               | ( 87 ) |
| 3-12 物体运动的加速度计的传递函数式是什么? .....                                                       | ( 88 ) |
| 3-13 机械转动系统运动方程应如何列写? .....                                                          | ( 89 ) |
| 3-14 液压伺服马达运动方程如何列写?<br>如何进行线性化处理? .....                                             | ( 90 ) |
| 3-15 电阻式电位计的传递函数及分辨率是什么? .....                                                       | ( 92 ) |
| 3-16 鉴相器的输出与输入关系式是什么? .....                                                          | ( 93 ) |
| 3-17 船舶操舵运动数学方程是什么? .....                                                            | ( 94 ) |
| <b>第四章 有关实践中的一些问题</b> .....                                                          | ( 99 ) |
| 4-1 直流伺服电动机主要参数如何测取?.....                                                            | ( 99 ) |
| 4-2 试问如何对单回路系统参数进行实验整定?.....                                                         | (102)  |
| 4-3 在自动控制系统中采用力矩电机有什么优点?.....                                                        | (106)  |
| 4-4 齿轮传动系中的惯量、负载力矩等如何折算? .....                                                       | (107)  |
| 4-5 试说明几种常用材料如铸铁、钢、铜等摩擦<br>表面的摩擦系数大致范围(在压强 $P =$<br>$2\text{N}/\text{cm}^2$ 下) ..... | (109)  |
| 4-6 摩擦对控制系统有什么影响?.....                                                               | (109)  |
| 4-7 何谓传动链齿隙以及传动链齿隙对控制系统<br>性能有什么影响?.....                                             | (112)  |
| <b>第五章 船舶自动控制系统</b> .....                                                            | (116)  |
| 5-1 试述船舶随动操舵系统的原理,并简列系统<br>各环节的数学模型 .....                                            | (116)  |
| 5-2 试述船舶常规自动操舵系统的原理,并作出<br>其方框图 .....                                                | (118)  |
| 5-3 常规自动舵有什么特点?当前它为什么逐渐要<br>被自适应自动舵所替代?.....                                         | (120)  |

|      |                                                                                 |       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 5-4  | 何谓自适应自动舵?从自适应控制角度它可分成哪几类?并简述其自适应控制系统框图·····                                     | (122) |
| 5-5  | 试列举自适应自动舵软件中采用的船舶运动及扰动的数学模型·····                                                | (124) |
| 5-6  | 试列举自适应自动舵软件中采用的性能指标·····                                                        | (126) |
| 5-7  | 试述用自校正控制(STC)的自适应自动舵动作原理·····                                                   | (128) |
| 5-8  | 试述用模型参考自适应控制(MRAS)的自适应自动舵动作原理·····                                              | (131) |
| 5-9  | 试分析日本YEW公司生产的PT-21自适应自动舵的动作原理·····                                              | (132) |
| 5-10 | 试述航线保持控制系统框图·····                                                               | (135) |
| 5-11 | 设船舶偏离计划航线的距离为 $y$ , 指令船首向为 $\psi$ , 试分析及建立以 $y$ 为输出、 $\psi$ 为输入的数学模型(考虑扰动)····· | (136) |
| 5-12 | 某集装箱装卸桥采用的电力拖动系统为电机放大机—电动机系统。试分析及建立其数学模型·····                                   | (139) |
| 5-13 | 试分析交流同步发电机的恒功率励磁系统电压调节环的数学模型·····                                               | (140) |
| 5-14 | 何谓ITAE最佳调节律?如何设计上题中的ITAE最佳调节律的调节器?·····                                         | (146) |
| 5-15 | 何谓相位补偿复式励磁系统?·····                                                              | (149) |
| 5-16 | 简述下列同步复励发电机自动稳定系统的原理, 并画出方块图·····                                               | (150) |
| 5-17 | 带碳阻式调压器自励恒压同步发电系统的原理是什么?·····                                                   | (153) |
| 5-18 | 试简述炉温控制系统原理, 并列写系统物理量之间的关系·····                                                 | (154) |

|      |                                           |       |
|------|-------------------------------------------|-------|
| 5-19 | 简述异步电动机—电磁转差离合器调速系统·····                  | (156) |
| 5-20 | 试举一个在船上具有传递延迟系统的例子·····                   | (157) |
| 5-21 | 简述汽轮机的转速自动调节系统, 并列写有<br>关系系统微分方程及方块图····· | (158) |
| 5-22 | 柴油机转速控制系统的原理是什么?<br>并列系统的数学模型·····        | (160) |
| 5-23 | 简述船舶减摇装置中基准水平面构成原理·····                   | (161) |
| 5-24 | 防摇鳍是如何稳定船舶的? 并列写数学式<br>及方块图·····          | (163) |
| 5-25 | 举例说明何谓串级调节系统·····                         | (166) |
| 5-26 | 试举一个张力控制系统的例子, 并列写驱动<br>部分的数学模型·····      | (163) |
| 5-27 | 简述锅炉炉压控制系统原理·····                         | (171) |

# 第一章

## 自动控制系统的基本概念及术语

### 1-1 什么叫自动控制和自动控制系统？

自动控制就是应用控制装置自动地、有目的地控制或操纵机器设备或过程，使之具有一定的状态和性能。被控制的机器设备或物体，称为控制对象，所用的控制装置，称为控制器。

例 1-1 水位自动控制系统（图 1-1）。水位自动控制的目的是维持水箱内水位恒定，当水的流入量与流出量平衡时，水箱水位维持在预定的（希望的）高度上。如图所示，预定高度或希望高度，由自动控制器刻度盘上的指针标定。当水流出量增大或流入量减少时，水箱水位下降，测量水位高度的浮子也下降，通过杠杆  $L$  带动电位计滑臂  $b$  也随着移动，使电桥电路平衡被破坏，电桥出现偏差（误差），经放大，控制电动机开大阀门，增大水的流入量，力图维持水位不变。反之，当水流出量减少，水位上升，反向偏差使阀门开小些，减少水的流入量，从而达到自动控制水箱水位不变的目的。

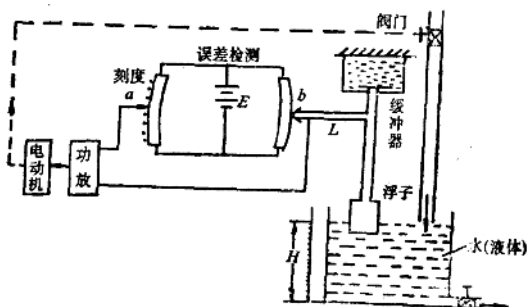


图 1-1 水位自动控制系统

控制器和控制对象的总和，称为控制系统。

## 1-2 什么叫开环系统与闭环系统？

图 1-2(a) 表示一台直流电动机转速的开环控制系统。电动机带动某一负载以一定转速旋转，电动机转速由电位计来改变，不同的电位器位置对应相应的电动机转速。在这个系统中只有电位器对电动机转速的控制，而转速对电位器的控制作用没有影响，即没有反作用。这种输出量对输入量没有影响的系统，叫做开环系统（非反馈系统）。

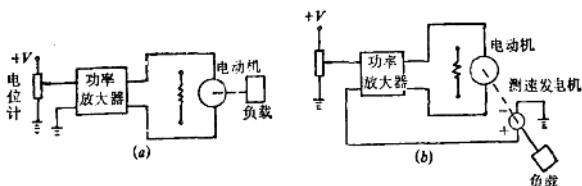


图 1-2 直流电动机转速开环与闭环控制

图 1-2(b) 所示例中，电位器电压作为输入，用测速发电机作为检测元件，将测速发电机电压送至输入端与电位器电压进行比较，放大后，控制电动机转速，形成电动机转速自动控制系统，这是闭环的，输出量对输入量有反馈作用。

对外部扰动和内部系统参数的变化，由于系统闭环，使系统的响应变为不敏感。但稳定性对闭环系统来说，始终是一个重要问题，因为闭环可能引起过调，从而造成系统作等幅振荡或变幅振荡。

## 1-3 试以电炉炉温的自动控制系统为例，叙述系统中常用术语

在该系统中，热电偶用来测出炉温，即将炉温转变成毫伏电信号  $V_a$  和给定毫伏信号  $V_r$  进行比较，相减之差即为实际炉温和要求

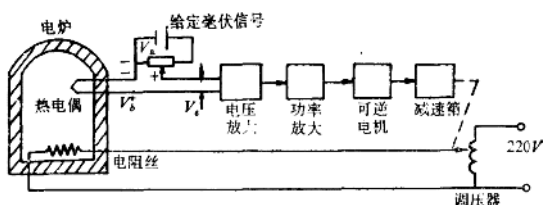


图 1-3 炉温控制系统

炉温偏差的毫伏信号，经电压放大和功率放大后，选择适当的极性驱动可逆电机。当炉温偏高时，使调压器减小加热电流，反之加大加热电流，从而完成自动控制炉温的任务。

被调量（或称输出量）指被控制系统需要控制的物理量（如例中的炉温），一般就是系统的输出量。对象即是电炉。给定值（或称给定信号），是根据生产要求，被调量需达到的数值（例如要求炉温为  $680^{\circ}\text{C}$ ，或对应的毫伏值）。扰动（或称干扰），指引起对象中被调量变化的各种外界原因（如电源电压波动等）。输入量，泛指输入到系统中的信号，包括给定值和扰动。反馈，将输出量的全部或一部分信号返回到输入端，称为反馈。反馈的结果若是有利于加强输入信号则称为正反馈；反之，其作用减弱的则称为负反馈。在自动控制系统中主要应用的是负反馈。

#### 1-4 详述反馈有哪些功能？

##### 1. 反馈对系统总增益发生影响

以典型的反馈系统为例，如图 1-4 所示，反馈使无反馈系统的增益  $G$ ，被除一个因子  $1+GH$ ，所以反馈的结果使系统总增益减少了。但是  $GH$  值本身也可以包含负号，这样总的反馈效应又可使系统总增益增加。在一个实际的控制系统中， $G$  和  $H$  都是频率的函数，这样在某个频率范围内可能是  $GH < 1$ ，所以在某个频率范围内反馈可能会增加系统的增益，而在另一频率范围内则又可能会减

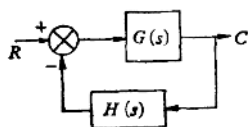


图 1-4 反馈控制系统

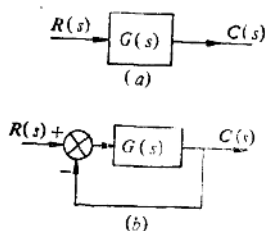


图 1-5 反馈系统

少系统的增益。

## 2. 负反馈能减小参数变化的影响

为了比较，举一个开环系统和闭环系统例子。如图 1-5 (a) 所示，由于参数的变化，使  $G(s)$  变为  $G(s) + \Delta G(s)$ ，式中  $|G(s)| \gg |\Delta G(s)|$ ，那么，在图 1-5 (a) 中输出为：

$$C(s) + \Delta C(s) = [G(s) + \Delta G(s)] R(s) \quad (1-1)$$

因此输出的变化是：

$$\Delta C(s) = \Delta G(s) R(s) \quad (1-2)$$

在图 1-5 (b) 所示的闭环系统中

$$C(s) + \Delta C(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + G(s) + \Delta G(s)} R(s)$$

即

$$\Delta C(s) = \frac{\Delta G(s)}{1 + G(s)} R(s) \quad (1-3)$$

于是，由于  $G(s)$  中的参数改变所引起的闭环系统的输出的变化减小为原来的  $1/(1 + G(s))$ 。在许多实际情况中， $1 + G(s)$  的值远远大于 1。所以，常常为了减小元件参数变化对系统的影响，通常对精度低的元件并联一个反馈回路。

## 3. 反馈可以改变时间常数 $T$

考虑图 1-6 (a) 所示系统，系统时间常数为  $T$ ，加一个负反馈包围这个环节，如图 1-6 (b) 所示，得到系统如下：两者前向通道

传递函数是相同的,但后者系统的时间常数减小到  $T/1+K\alpha$ , 其中  $\alpha$  为比例系数。

图 1-6(b) 系统

$$\begin{aligned}\frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{K/1+TS}{1+\alpha K/1+TS} = \frac{K}{1+\alpha K+TS} \\ &= \frac{K/1+\alpha K}{1+(T/1+\alpha K)S}\end{aligned}\quad (1-4)$$

若不用负反馈,而用一个正反馈,如图 1-6(c) 所示,则

$$\begin{aligned}\frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{K/1+TS}{1-bKS/1+TS} = \frac{K}{1+ST+bKS} \\ &= \frac{K}{1+(T-bK)S}\end{aligned}\quad (1-5)$$

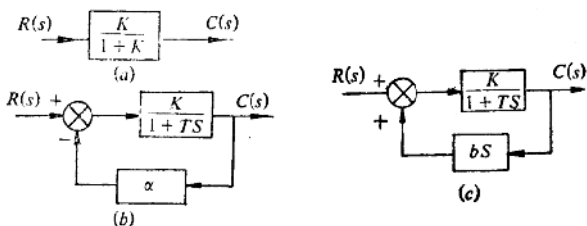


图 1-6 利用反馈改变时间常数  $T$

所以通过适当地选择  $b$  的值就能使时间常数减小, 如果使  $b$  等于  $T/K$ , 那么时间常数就变成零。然而, 应注意, 如果扰动引起的  $T-bK$  是一个不为零的负值, 那么系统就变成不稳定。因此, 如果应用正反馈使时间常数减少到很小值时, 必须非常小心以保证  $T-bK$  决不变成负值。

#### 4. 反馈对稳定性会产生很大影响

一个系统的稳定性, 粗略地讲, 当其输出失去控制或无限制地增大时, 就说它是不稳定的, 如图 1-7 所示。如果当内环的负反馈