

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

刘胜◎主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书全面系统地介绍自动控制理论经典部分的基本分析、设计方法及应用,重点加强了对基本理论及其工程应用的阐述。全书共分9章,深入浅出地介绍了自动控制的基本概念,控制系统在时域和复域中的数学模型及其结构图和信号流图;比较全面地阐述了线性控制系统的时域分析法、复域根轨迹法、频域分析法及校正与设计等方法;详细讨论了线性离散系统的基础理论、数学模型、稳定性及稳态误差、动态性能分析以及数字校正等问题;在非线性控制系统分析方面,探讨了相平面法和描述函数法等非线性系统的基本分析方法。并以船舶航向控制系统、船舶横摇减摇鳍控制系统、船载稳定平台控制系统为主要研究对象贯穿全书。

全书内容取材新颖,阐述深入浅出,理论分析紧密联系工程应用,凸显船海工程领域特色。各章均附有丰富的例题和习题。

本书可作为高等工科院校自动化、电气工程及其自动化、探测制导与控制技术、测控技术与仪器、机械设计制造及其自动化、船舶与海洋工程、通信工程、计算机科学与技术、电子信息工程等专业的本科生教材,也可供相关专业的研究生或从事自动化类的各专业工程技术人员做参考书,特别适合于面向船舶自动化方向的本科生和从事船舶自动化领域研究的研究生及工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/刘胜主编. —北京:国防工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-118-08294-4

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动控制理论 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第181118号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 34 1/2 字数 883 千字

2012年8月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 79.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

自动控制技术已广泛地应用于工业、农业生产，交通运输和国防建设的各个领域。自动控制技术以自动控制理论为基础，在科学技术现代化的发展与创新过程中，正在发挥着越来越重要的作用。尤其是在工业化、信息化两化融合中，扮演着越来越重要的角色。20世纪50年代发展起来以传递函数为核心的经典控制理论，至今仍被成功地应用于控制工程领域。

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础，是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程，是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程。本书是作者在多年讲授的“自动控制原理”课程讲义的基础上，经不断修改和完善，并结合多年自动控制领域的科研成果而完成的。内容涉及自动控制的基本概念、控制系统的数学建模、线性系统的时域分析法、线性系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、线性系统的校正与设计、非线性控制系统分析以及线性离散系统的分析与设计等。

本书以船海工程领域为背景，以教育部“自动化”特色专业点、教育部工程研究中心“船舶控制工程研究中心”为平台，以省级教学名师牵头，以省级优秀教学团队骨干成员为核心进行编写。从基本概念、基本分析方法入手，结合工程和生活中的实例，并将作者部分科研成果引入教学内容，写入本书，可丰富学生的知识结构，使学生所学知识具有前沿性、创新性、学术性，从而缩短了理论和实践的距离。全书共分9章。

第1章简要回顾了自动控制理论的发展历史，介绍了控制系统的一般概念与基本原理、控制系统基本组成、分类和基本要求，并给出了自动控制系统的应用举例。

第2章介绍了拉普拉斯变换的基本概念、性质及其反变换， z 变换的基本概念、性质及其反变换以及拉普拉斯变换与 z 变换的联系。

第3章介绍了控制系统的数学模型。建立了描述控制系统运动的微分方程、传递函数等数学模型，并着重探讨了结构图等效变换及简化、信号流程图及梅森公式等方法。

第4章介绍了线性控制系统的时域分析法。重点讨论了典型一阶、二阶和高阶系统的动态响应与动态性能指标分析方法、稳定性的基本概念和稳定性代数判据以及稳态误差分析方法。完整推导并给出了劳斯稳定判据和赫尔维茨稳定判据的证明过程。

第5章介绍了线性控制系统的根轨迹分析法。给出了根轨迹及根轨迹方程的概念，并重点介绍了根轨迹的基本绘制规则以及基于根轨迹的控制系统性能分析方法。增加了延迟系统的根轨迹及其分析。

第6章介绍了线性控制系统的频域分析法。介绍了频率特性的基本概念、典型环节的频率特性以及开环系统频率特性，重点介绍了奈奎斯特稳定判据，给出了更易于理解的奈奎斯特稳定判据的推导过程。探讨了稳定裕度以及系统频率特性与时域性能指标的关系。

第7章介绍了线性控制系统的校正设计，包括串联校正、反馈校正和复合校正。重点探讨了串联超前校正、串联滞后校正和滞后—超前校正设计方法。

第8章介绍了非线性控制系统分析。给出了典型非线性特性，并着重探讨了非线性系统的描述函数法和相平面法。

第9章介绍了线性离散系统的分析和设计方法。介绍了数字控制系统的一般概念和数学基础，并重点探讨了数字控制系统的数学模型、分析及其设计方法。

本书面向自动化、电气工程及其自动化、探测制导与控制技术、测控技术与仪器、机械设计制造及其自动化、船舶与海洋工程、通信工程、计算机科学与技术、电子信息工程以及相关专业的本科生，适于作为开设“自动控制原理”课程的教材。在全面系统地介绍自动控制理论经典部分的基本分析、设计方法及应用基础上，本书配备了多层次的自动控制系统工程实例。并以船舶航向控制系统、船舶横摇减摇鳍控制系统、船载稳定平台控制系统为主要研究对象贯穿全书。

本书的特点体现在以下几个方面：

1. 内容取材新颖，凸显鲜明的船海工程特色

以船舶航向控制系统为例探讨了恒值控制系统的性能分析与设计；以船舶横摇减摇鳍控制系统为例阐述了控制系统的抗随机干扰性能的分析与设计；以船载稳定平台控制系统为例研究了随机信号输入下随动系统的分析与设计，内容新颖，特色鲜明。

2. 层次化工程实例循序渐进，强化基本理论与工程实践的联系

在对控制系统建模、分析与设计等基本理论进行清晰阐述的同时，突出自动控制理论的工程背景，强化基本理论与工程实践的联系。每章配备两个层次的实际工程实例。第一层次，常见控制系统的工程实例，夯实学生的理论基础，引领学生掌握控制系统的分析与设计的详细过程；第二层次，船舶与海洋工程装置系统的研究实例，探讨了非典型输入信号下复杂系统的建模、分析与设计等基本方法。

3. 理论阐述深入浅出，逻辑性强

加强了基本理论和基本概念的阐述，增加了通用性的内容，理论阐述循序渐进，利用通俗易懂的叙述加深读者对理论的理解；突出逻辑性，加强对线性系统时域分析法、根轨迹分析法以及频域分析法之间联系的论述，使学生形成对自动控制理论的整体认识；首次在国内能见到的《自动控制原理》教材中完整给出了劳斯稳定判据和赫尔维茨稳定判据的证明过程。

4. 配备立体化的学生自学与自我反馈资源体系

设计了基本例题、实际工程实例以及多层次不同用途的课后习题，力求由浅入深和突出重点，构建出立体化的学生自学与自我反馈资源体系，同时给学生自学留有充分的空间，也为进一步激发和调动学生的潜能和积极性创造了条件。

本书为哈尔滨工程大学“十二五”规划教材，由哈尔滨工程大学刘胜教授主编，并负责编写了第1章、第2章和第4章以及船舶航向控制系统、船舶横摇减摇鳍控制系统、船载稳定平台控制系统的原理及构成、数学建模、性能分析以及设计校正等部分内容。陈明杰副教授、王辉副教授和原新副教授为副主编，其中，陈明杰副教授负责了编写第5章和第6章，王辉副教授负责编写了第3章、第7章和第8章，原新副教授负责编写了第9章以及第2章中的 z 变换理论部分。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工程大学的大力支持，哈尔滨工程大学金鸿章教授审阅了全书并提出宝贵意见，对提高本书的质量起到了重要的作用。哈尔滨工程大学张兰勇博士在本书的资料搜集、编辑校稿等方面做了大量工作，在此一并表示衷心的感谢。同时，感谢哈尔滨工程大学李高云、常绪成博士对本书在控制系统建模方面的贡献。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请专家和广大读者批评指正。

作者

2012年6月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统基本原理	1
1.2 自动控制系统基本组成	4
1.3 反馈的含义及作用	6
1.4 自动控制系统应用举例	8
1.5 自动控制系统类型	14
1.6 对自动控制系统的基本要求	18
1.7 控制系统的分析与设计	19
1.8 自动控制理论发展概况	20
习题	23
第 2 章 控制理论的数学基础	26
2.1 复变量和复变函数	26
2.2 拉普拉斯变换	28
2.3 拉普拉斯反变换	38
2.4 应用拉普拉斯变换求解线性常微分方程	41
2.5 z 变换理论	42
2.6 拉普拉斯变换与 z 变换的联系	53
习题	55
第 3 章 控制系统的数学模型	57
3.1 控制系统的数学模型概述	57
3.2 控制系统的时域数学模型	59
3.3 控制系统的复域数学模型	69
3.4 控制系统的结构图和信号流图	82
3.5 反馈控制系统的传递函数	98
3.6 控制系统建模实例	101
习题	119
第 4 章 线性控制系统的时域分析法	124
4.1 系统时间响应的性能指标	124
4.2 一阶系统的时域分析	128

4.3	二阶系统的时域分析	131
4.4	高阶系统的时域分析	149
4.5	线性控制系统的稳定性分析	157
4.6	线性控制系统的稳态误差计算	174
4.7	线性控制系统的时域分析实例	190
	习题	200
第 5 章	线性控制系统的根轨迹法分析	207
5.1	根轨迹的基本概念	207
5.2	反馈控制系统根轨迹的绘制	212
5.3	线性控制系统性能的根轨迹法分析	241
5.4	线性控制系统的根轨迹法分析实例	253
	习题	257
第 6 章	线性控制系统的频域分析法	262
6.1	频率特性	262
6.2	开环频率特性曲线的绘制	269
6.3	频率域稳定性分析	290
6.4	系统频率特性与时域性能指标的关系	306
6.5	线性控制系统的频域分析实例	322
	习题	328
第 7 章	线性控制系统的校正设计	335
7.1	系统设计与校正的基本问题	335
7.2	分析法串联校正	348
7.3	根轨迹法校正	374
7.4	综合法校正	382
7.5	复合校正	391
7.6	线性控制系统校正设计实例	399
	习题	407
第 8 章	非线性控制系统分析	410
8.1	非线性控制系统概述	410
8.2	描述函数法	422
8.3	相平面法	447
8.4	利用非线性特性改善控制系统性能	466
8.5	非线性控制系统分析实例	468
	习题	477

第 9 章 线性离散控制系统的分析与校正	481
9.1 引言	481
9.2 信号的采样与保持	483
9.3 线性离散控制系统的数学模型	489
9.4 线性离散控制系统的稳定性分析	500
9.5 线性离散控制系统的时间响应	508
9.6 线性离散控制系统的数字校正	517
9.7 线性离散控制系统的分析与设计实例	531
习题	538
参考文献	542

第1章 绪论

本章主要介绍自动控制系统的基本概念及基本原理，给出了自动控制系统的基本组成，分析了反馈对于控制系统性能的影响，介绍了自动控制理论的发展概况，并举例说明了自动控制系统在各个领域的应用。

【本章重点】

- 明确自动控制系统基本原理与基本组成，掌握根据系统的原理绘制其方框图；
- 理解反馈的含义及作用；
- 掌握对自动控制系统的基本要求；
- 了解自动控制理论发展概况。

1.1 自动控制系统基本原理

1. 自动控制的一般概念

所谓自动控制，就是指在没有人直接参与的情况下，利用外加设备和装置（称为控制装置或控制器）使机器、设备或生产过程（统称为被控对象）自动地按照给定的规律运行，使被控对象的一个或几个物理量（即被控量，如空间运动体姿态、电压、电流、速度、位移、温度、压力、流量、张力、浓度、化学成分等）能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。例如，船舶在海上航行时，能按预定的航迹航向航行；船舶横摇减摇系统能有效地减小横摇；数控机床按照预定程序自动地对工件进行切削加工；化学反应釜的温度或流量及压力自动地维持恒定；轧钢机按照预定的轧制速度和板材厚度自动地变化轧辊速度和压下装置的位移；无人驾驶飞行器按照预定的航迹自动起落和飞行；人造卫星准确的进入预先计算好的轨道和位置，自动地保持正确的姿态运行并准确地回收等，这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

为达到这一目的，由一些相互联系和相互制约的环节按一定规律组成并具有一定功能的整体，称为系统。每个系统都有输入量和输出量。由控制器、执行机构和被控对象所组成的整体就叫控制系统。在控制系统中，控制器接收输入信号，通过执行机构产生相应的控制作用去操纵被控对象，使其输出符合对系统所提出的性能要求。当被控对象能由控制器与执行机构自动操纵时，这样的系统就称为自动控制系统。

被控对象总是有惯性的，所以控制系统一般都是动态系统。在动态系统中，当输入量变化时，系统输出量的相应变化（称输出响应）不可能瞬时完成，存在着从一个稳态到另一个稳态的动态变化过程，称为动态响应，即过渡过程。

2. 开环控制与闭环控制

自动控制系统有两种最基本的控制形式，即开环控制和闭环控制。

开环控制是一种最简单的控制方式。开环控制的特点是，在控制器与被控对象之间只有顺向控制作用而没有反向联系，即控制是单方向进行的，系统的输出量对控制作用没有影响，控

制作用直接由系统的输入量经控制器产生。在开环控制系统中，对于每一个参考输入量，都有一个与之相对应的控制作用和相应的工作状态及输出量。开环控制的优点是系统简单易行；缺点是系统的控制精度取决于组成系统的元器件的精度和被控对象的参数稳定性，因此对于元器件的要求比较高。由于输出量不能反向影响控制作用，所以输出量受扰动信号的影响比较大，系统抗干扰能力差。

扰动是加入系统的某些不希望的信号作用或参数变化，它对被控制量产生不利影响。扰动可以分为内扰和外扰，内扰是由于组成系统的元器件参数的变化引起的；外扰则是由于系统的动力源或外部环境及负载等外部因素所引起的。在一定的输入量（信号）作用之下，这些扰动量都会使系统相应的输出量出现偏差，开环控制系统并不具有抑制这种偏差的能力。因此，开环控制系统的准确度或控制精度是较低的。开环控制系统的动态响应较差，其输出量往往不能及时跟随输入量的变化而变化。

闭环控制系统的特点是，在控制器与被控对象之间，不仅存在着顺向控制作用，而且存在着反向控制作用，即控制系统的输出量对控制作用有直接影响。闭环控制能够检测出输出量并将其送回到系统的输入端，与输入量进行比较，从而产生偏差信号，偏差信号作用于控制器上，使系统的输出量向着趋向于期望输出量而减小误差的方向变化。闭环控制的实质，就是利用系统的输出对控制器的作用来减小系统的偏差，提高控制的精度。

在研究自动控制系统时，为了便于分析并直观地表示系统各个组成部分间的相互影响和信号传递关系，一般采用方框（块）图表示。图 1.1 为一个开环控制系统的方框图。闭环控制系统方框图如图 1.2 所示。在方框图中，被控对象和控制装置的各元部件（硬件）分别用一些方框表示。系统中感兴趣的物理量（信号），如电流、电压、温度、位置、速度、压力等，标识在信号线上，其流向用箭头表示。用进入方框的箭头表示各元部件的输入量，用离开方框的箭头表示其输出量，被控对象的输出量便是系统的输出量，即被控量，一般置于方框图的最右侧；系统的输入量一般置于系统方框图的左侧。“+”和“-”分别表示参与比较的信号相加和相减。

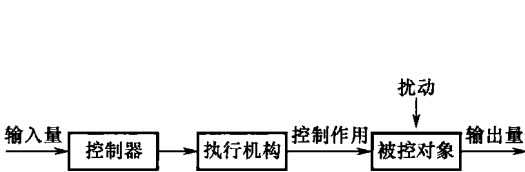


图 1.1 开环控制系统的方框图

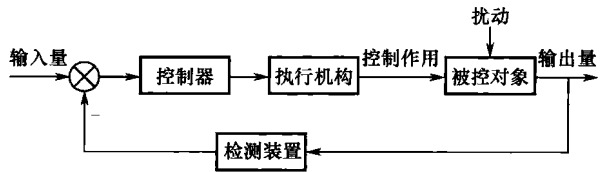


图 1.2 闭环控制系统方框图

3. 反馈控制原理

上述闭环控制系统中，系统的输出量通过测量装置返回到系统的输入端，并和系统的输入量进行比较的过程称为反馈，检测装置的输出信号称为反馈量。如果输入量与反馈量极性相反，两者合成的过程是相减，称为负反馈；反之则称为正反馈。因此，闭环控制又称为反馈控制。反馈控制系统一般采用负反馈方式，输入量与反馈量之差称为偏差信号，又称误差。

在反馈控制系统中，控制器对于被控对象的控制作用中具有来自被控对象输出量的反馈信息，用来不断修正被控输出量的偏差，从而实现对被控对象实施控制的目的，这就是反馈控制原理。

采用负反馈控制，可以有效地抑制被反馈通道（由输出到输入）所包围的顺向通道（由输入到输出）中各种扰动对系统输出量的影响，使系统的输出量能够自动地跟踪输入量，减少偏

差，提高系统的控制精度。除此之外，采用负反馈控制构成闭环控制系统，还具有其他优点：引进反馈通道后，使得系统对前向通道中各元部件参数的变化不灵敏，从而对前向通道中元、部件的精度要求不高；反馈作用还可以使得整个系统对于某些非线性影响不敏感；由于负反馈的存在，对应于一定输出量的输入量必然加大，因此在到达稳态之前的动态过程中，施于控制器的输入信号比较大，产生所谓的强激作用，提高了系统输出量跟踪输入量的速度等。但是，反馈控制的引入也给控制系统带来了新的问题：由于系统中惯性的存在，控制作用所起的效果是由时间延迟的，系统得不到及时的校正。如果控制器的强激作用与被控对象的惯性延时之间匹配不当，反馈控制的闭环控制系统可能产生振荡，甚至不稳定，不能正常工作。

4. 偏差控制与扰动控制

反馈控制原理是自动控制的基本原理，反馈控制的基本思想是按照被控对象的实际输出量偏离设定输出量（与给定输入量相对应的理想输出量）的方向（即偏差的极性）而向相反方向（即减小偏差）改变控制作用，所以也称为偏差控制，反馈控制原理就是偏差控制的原理。这是一种广泛使用的重要控制方式。

除了偏差控制之外，还有一种扰动控制的控制方式。在这种控制方式中，当扰动因素已知，并且可以直接地或间接地检测出来时，可以利用扰动信号产生一种补偿作用，即与扰动的影响相反的作用，以抵消扰动的影响。这种控制方式称为扰动控制或补偿控制。

在扰动进行控制时，是从扰动作用取得信息，产生控制作用，去影响输出量。信息和控制的作用是单方向传送的，没有反馈，而是顺馈；不构成闭环，而是开环。扰动进行控制实际上也是扰动补偿，其方框图如图 1.3 所示。

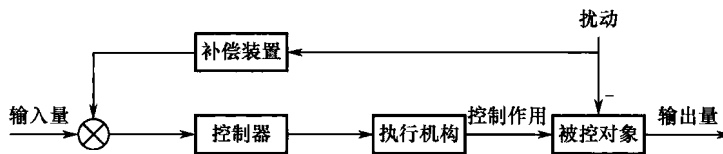


图 1.3 扰动控制系统方框图

扰动控制在技术上常常比偏差控制简单，但它只适用于扰动是可以测量的场合，而且一个补偿装置通常只能补偿一个扰动因素，对加于系统的其他扰动均不起补偿作用。如果系统中有多种扰动存在，要为每一种扰动配备一个补偿装置就显得复杂，可靠性也差；而且各种补偿装置之间有时还会有矛盾。因此，比较合理的控制方式是把偏差的反馈控制和扰动的顺馈控制结合起来，对于主要的扰动采用适当的补偿装置实现扰动的顺馈控制；同时，再组成闭环负反馈方式的偏差反馈控制，以消除其他扰动造成的偏差。这样，系统的主要扰动已被补偿或近似补偿，系统所受到的扰动大大减轻，偏差的反馈控制部分就比较容易设计，控制效果也会更好。这种偏差的反馈闭环控制和扰动的顺馈补偿控制相结合的控制方式称为复合控制方式。图 1.4 所示为按扰动补偿的复合控制系统。

除了扰动补偿的复合控制系统外，还有一种按输入补偿的复合控制系统，如图 1.5 所示。因为任何自动控制系统的输出量总是与一定形式的输入量相对应的，同一个控制系统对不同形式的输入量的控制精度是不同的，为了提高控制系统对不同形式输入量的适应性，当输入量形式发生变化时，系统的输出量仍能保持满意的控制精度，则可以构成按输入量补偿的复合控制系统。

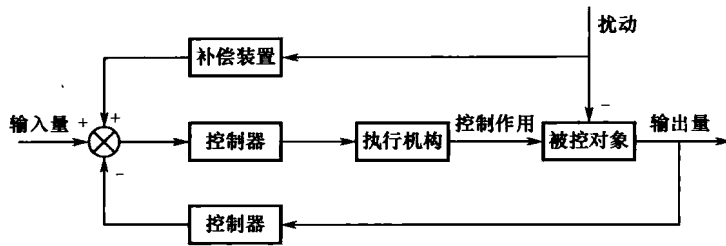


图 1.4 按扰动补偿复合控制方框图

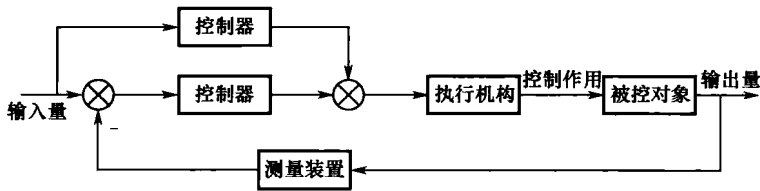


图 1.5 按输入补偿复合控制方框图

1.2 自动控制系统基本组成

自动控制系统通常都是带有输出量负反馈的闭环控制系统，是由各种结构不同的元、部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，自动控制系统是由被控对象和控制器这两大部分组成的，其中控制器又是由各种基本的部件或元件构成的，每个部件或元件发挥一定的职能。在不同系统中，结构完全不同的元、部件可以具有相同的职能，因此，按职能划分，控制系统基本上由以下基本元部件组成。

1. 测量元件

测量元件的职能是检测被控制的物理量。如果这个物理量是非电量，如温度、压力、流量、位移、转速等，一般要把它转换成电量。因此，测量元件是用电的手段测量非电量的元件，又称为传感器，通过传感器，可以把上述非电物理量变换成标准的电信号后作为反馈量送到控制器。

测量元件应当牢固可靠，其特性应当准确稳定，不受环境条件的影响。优良的测量元件是好的控制系统的基本保证。

2. 给定元件

给定元件的职能是给出与期望的输出量相对应的系统输入量，又称给定输入信号、参考输入信号或设定值。给定元件给出的给定输入信号必须准确、稳定，其精度应当高于系统要求的控制精度。

3. 比较元件

比较元件的职能是把测量元件检测到的、代表实际输出量的反馈信号与给定元件给出的设定信号进行比较，用以产生偏差信号来形成控制信号。常用的比较元件有差动放大器和信号比较器等。有些控制系统中，比较元件常常和测量元件或线路结合在一起，这时统称为偏差检测器或偏差传感器，如某些机械差动装置和电桥电路等。

4. 放大元件

放大元件的职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大。因为比较元件给出的偏差信号通常比较微弱，不能直接驱动执行元件去控制被控对象。放大元件的输出必须有足够的幅值和功率，才能实现控制功能。电信号放大元件，可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管及全控型电力电子器件等组成。

5. 执行元件

执行元件的职能是直接驱动被控对象，使被控对象的输出量发生变化。有时放大元件的输出可以直接驱动被控对象，但是大多数情况下被控对象都是大功率级的，而且其输入信号是非电物理量，因此需要进行功率级别或者物理量纲的转换，实现这种转换的装置就是执行元件，又称为执行机构。常见的执行元件有各类电动机、液压传动装置、阀以及气动驱动装置等。

6. 校正元件

校正元件又称为校正装置，也叫补偿元件。校正元件是结构或参数易于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。在某些控制系统中，由于控制器控制作用的动态特性与被控对象不相适应，其控制质量很差，甚至不能发挥控制作用，因此，实际系统中通常总要引入一些装置来改变控制器的动态性质，使其产生的控制作用既足够强，足够快，又能与被控对象的动态特性很好地配合，最好地发挥控制作用。这些引入的装置就是校正元件，它可以实现某种“控制规律”，是控制系统中极为重要的部分。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的校正元件可以含有控制计算机及控制软件。

7. 能源元件

能源元件的职能是为整个控制器及执行机构提供能源，如电源、液压源等。

8. 被控对象

被控对象是控制系统所要控制的对象。例如，电动机转速自动控制系统中，对象为电动机，也可能是与电动机同轴联接的负载（工作台、机床、空间运动体姿态控制面等）；船舶航向控制系统和船舶横摇减摇控制系统中的被控对象是船舶；汽车操纵控制系统中被控对象是汽车；宇宙飞船姿态控制系统中被控对象为宇宙飞船等。一般来说，被控对象的输出量即为控制系统的被控量。如电动机转速、船舶航向、横摇角、汽车速度、方向、宇宙飞船姿态等。

综上所述，一个典型的自动控制系统的基本组成可以用如图 1.6 的方框图表示。图中，信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路（或称通道）称为顺馈通路或前向通路；系统输出量经测量元件反馈到输入端的通路称为主反馈通路。顺馈通路和主反馈通路共同构成主回路（或称闭环）。此外，还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含主反馈通路的系统称单回路系统或单回环系统，简称单环系统；有两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统或多回环系统，简称多环系统。

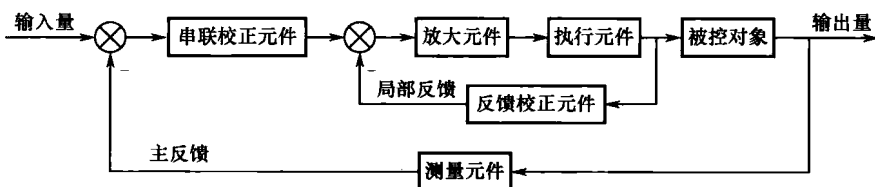


图 1.6 典型的自动控制系统基本组成方框图

1.3 反馈的含义及作用

反馈在控制系统具有深刻的意义。减小系统误差只是反馈对于系统的重要作用之一，反馈对于稳定性、带宽、总增益、阻抗和敏感度等系统品质均具有影响。

要理解反馈对系统的作用，就必须在广义上考察这种现象。如果反馈是为了实现控制而有意识地引入到系统中的，那么反馈的存在性是很容易识别的。但是，也有很多认为应该是无反馈的物理系统，却可以通过一定的方法观察到其中存在反馈。一般地说，只要系统变量中存在闭合的因果关系，系统就存在反馈。按这种观点，很多通常被认为是无反馈的系统都存在反馈。不过，控制理论不管系统是否具有物理反馈，只要能够确定其具有前面提到的反馈，就可以用系统的方法加以研究。

为讨论反馈对系统各方面性能的影响，设典型的反馈控制系统如图 1.7 所示。其中，设 r 代表输入信号， c 代表输出信号， e 是偏差， b 是反馈信号；参数 G 和 H 可以看做常量增益。于是得到反馈控制系统的输入输出关系

$$\frac{c}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (1.1)$$

根据反馈系统结构的基本关系，可以得到反馈的一些重要作用。

1. 反馈对于总增益的影响

由式 (1.1) 可以看出，图 1.7 所示的反馈系统的增益比无反馈系统的增益多了一个因子 $1+GH$ 。由于系统包含负反馈，反馈信号是负的，乘积 GH 自身可能是一个负信号，因此反馈的一般作用是它可以增加或减小增益 G 。在实际系统里， G 和 H 是频率的函数，所以 $1+GH$ 的幅值可能在某个频段大于 1，而在另一个频段小于 1。由此可知，反馈可以在一个频段增加系统增益，而在另一个频段减小系统增益。

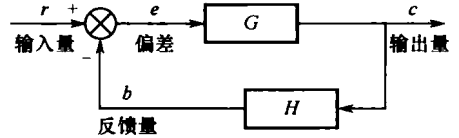


图 1.7 反馈系统图

2. 反馈对于稳定性的影响

稳定性概念用于描述系统能否跟随输入命令，也就是一般意义下的可用性，一般地说，系统输出失去控制时就称系统不稳定。为了研究反馈对于稳定性的影响，仍然考虑式 (1.1)，若 $GH = -1$ ，则任意的有限输入，系统输出均为无穷，系统不稳定。这意味着反馈可以使原来稳定的系统变成不稳定。确实，反馈是一把双刃剑，使用不当也会有害。需要指出的是，这里讨论的只是静态情况，而且一般情况下 $GH = -1$ 并非是使系统不稳定的唯一条件。有关系统稳定性的内容将在后面章节中讨论。

反馈的好处之一在于可以使不稳定系统变得稳定。假设图 1.7 所示的系统不稳定，因为 $GH = -1$ ，如果按照图 1.8 使用负反馈增益 F 引入另一个反馈环到系统中，则整个系统的输入输出关系为

$$\frac{c}{r} = \frac{G}{1+GH+GF} \quad (1.2)$$

显然，尽管因为 $GH = -1$ 而使得反馈系统内环不稳定，通过适当选择外环增益 F 可以使整个系统稳定。实际上， GH 是频率的函数，闭环系统的稳定性条件依赖于 GH 的幅值和相位。

综上所述，反馈可以改善系统稳定性，也会因为不恰当的使用而损害系统稳定性。

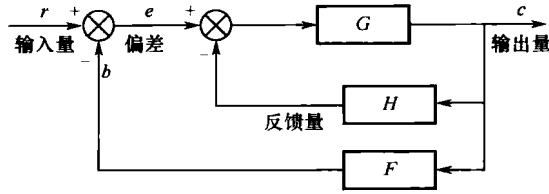


图 1.8 具有两个反馈环的反馈系统图

敏感度也是设计控制系统时需要考虑的一个重要因素。由于所有物理元件都具有随环境和使用时间而改变的性质，不能认为控制系统的参数在系统的使用寿命内是一成不变的。例如，电动机的绕线电阻在其运行时会随着温度的升高而改变。

一般而言，一个好的控制系统应该对参数变化不敏感，而对输入指令敏感。下面研究当参数变化时反馈对敏感度的影响。考虑图 1.7 所示系统， G 是可能变化的增益参数。整个系统的增益 M 对 G 的变化敏感度定义为

$$S_G^M = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} = \frac{M \text{变化的百分比}}{G \text{变化的百分比}} \quad (1.3)$$

这里 ∂M 表示 G 的增量 ∂G 引起的 M 的增量。使用式 (1.1) 敏感度方程可以写成

$$S_G^M = \frac{\partial M}{\partial G} \frac{G}{M} = \frac{1}{1 + GH} \quad (1.4)$$

式 (1.4) 表明，如果 GH 是正常数，可以在系统保持稳定的情况下，通过增加 GH 来减小敏感度函数的幅值。显然在开环系统里，系统增益与 G 的变化是一一对应的。如前所述， GH 是频率的函数； $1 + GH$ 的幅值在某些频段内可能小于 1，因此反馈可能在某些情况下增大系统对参数变化的敏感度。一般地，反馈系统增益对于参数变化的敏感度取决于参数所在的位置。读者可以推导出图 1.7 所示系统对于 H 的变化的敏感度。

3. 反馈对于外部干扰或噪声的作用

所有物理系统在运行时都会受到外部信号或噪声影响。电路中的热噪声电压和电动机电刷或换向器噪声，船在海上航行时，由于风、浪、流的干扰作用而对其航向、横摇的影响，作用在天线上的阵风等，在控制系统中均为常见的干扰或噪声。因此，控制系统应当被设计成对于噪声和干扰作用不敏感而对输入指令敏感的系统。

反馈对于噪声和干扰的作用在很大程度上取决于这类外加信号在系统中出现的位置，尽管没有一般性的结论，但是多数情况下反馈可以减小噪声和干扰对系统性能的影响。考察如图 1.9 所示的系统，设 r 表示指令信号， n 表示噪声信号。当系统没有反馈的情况下，即 $H = 0$ ，则当 n 单独作用时，输出 c 为

$$c = G_2 n \quad (1.5)$$

设系统在有反馈的情况下，当 n 单独作用时，系统输出为

$$c = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} n \quad (1.6)$$

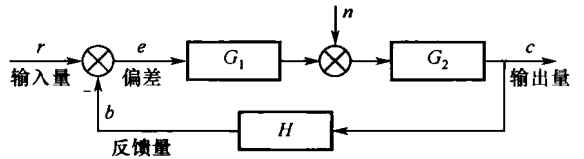


图 1.9 有噪声信号的反馈系统图

比较式 (1.6) 与式 (1.5) 可以看出, 当 $1 + G_1 G_2 H > 1$ 且系统保持稳定时, 包含在输出中的噪声被削弱了。

一般来说, 反馈对于带宽、阻抗、暂态响应、频率响应等品质特性也都有影响, 这些影响将在本书后续章节中讨论。

1.4 自动控制系统应用举例

1. 汽车操纵控制系统

在汽车操纵控制系统中, 如果设两个前轮的方向可当作被控量或输出量, 方向盘的方向是激励信号或输入量, 这样的控制系统或者类似的过程是由驾驶机构与整车动力系统组成的; 如果控制的目的是控制汽车的速度, 那么激励信号或输入量就是施加在加速器上的压力, 被控量就是车辆速度。因此, 可以认为简化的汽车控制系统有两个输入量 (方向盘和加速器) 和两个输出量 (方向和速度)。这里两个控制量和两个输出量互相独立, 图 1.10 是汽车方向、速度控制系统。

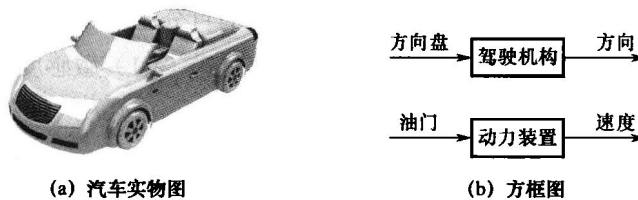


图 1.10 汽车方向、速度控制系统示意图

2. 汽车发动机速度控制系统

汽车发动机的速度控制系统是在发动机上施加诸如传动、电力辅助转向、空调等负载的情况下, 维持发动机以较低的速度运转, 以降低损耗。如果没有运转速度控制, 任何突加于发动机的负载都会造成发动机速度陡降, 甚至导致发动机熄火。因此, 汽车发动机的速度控制系统的主要目的在于: 当发动机上施加负载时, 消除或尽量减少转速下降, 且使发动机运转速度稳定在期望值上。图 1.11 所示为汽车发动机的速度控制系统的方框图。其中, 节气门调节角和负载转矩 (使用空调、电力辅助转向或电力制动产生的转矩) 是输入量, 发动机转速是输出量, 发动机则是被控过程或系统。

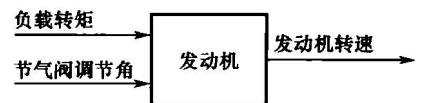


图 1.11 转速控制系统方框图

3. 直流电动机速度控制系统

图 1.12 所示是为直流电动机速度控制系统的原理图。图中, M 为直流电动机, 由功率放大器供电, K 是电压放大器, TG 是转速测量元件——测速发电电动机。这是一个速度自动控制系统。当速度给定电压 U_r 为某一数值时, 通过放大器使电动机 M 的速度维持在与 U_r 相对应的一个数值上, 由测速发电电动机 TG 产生的反馈电压 U_n 接近或等于 U_r 值, 系统处于稳定运行状态。当由于负载力矩的变化引起电动机 M 的速度 ω 发生变化时, 测速发电电动机 TG 输出的反馈电压 U_n 将会偏离原来的数值而降低, 从而使 U_n 与 U_r 的偏差变大, 经电压放大器 K 后, 送入功率放大器, 使得功率放大器的输出电压 U_d 升高, 逐步使电动机 M 的速度上升至原来的与给

定电压 U_r 相对应的数值附近，从而实现了电动机速度 ω 的自动调节过程。直流电动机速度控制系统方框图如图 1.13 所示。

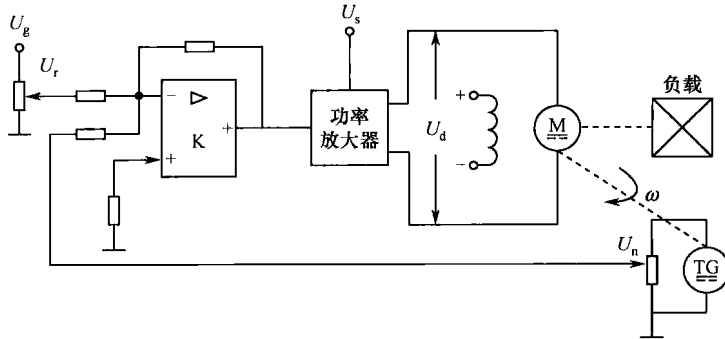


图 1.12 直流电动机速度控制系统的原理图

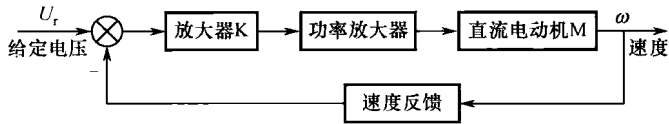


图 1.13 直流电动机速度控制系统方框图

4. 电阻炉温度控制系统

用于工业生产中的电炉温度控制系统，具有精度高、功能强、经济性好、无噪声、显示醒目、操作简单、灵活性和适应性好等一系列优点。许多新建和在建的工业过程控制系统，几乎都采用微型计算机实现了电炉温度的实时控制。图 1.14 所示为电阻炉微型计算机控制系统的原理图。图中，电阻丝通过固态继电器主电路加热，炉温的设定值用微型计算机键盘预先设置，炉内温度的实际值由铂电阻检测，并转换成电压信号经放大器放大滤波后，再经模/数 (A/D) 转换器将模拟量电压信号变换为易被计算机接受的数字量信号进入计算机。在这里计算机是控制器的核心，其具有比较、校正补偿等作用。在计算机中，经 A/D 转换后送入计算机的反映电炉实际温度的反馈电压数字量信号与预先设置的炉温的设定值进行比较后产生偏差信号，计算机根据预定的控制算法（即控制规律）计算出相应的控制量，该控制量是数字信号，需经数/模 (D/A) 转换器将其变换成模拟电压（或电流），控制固态继电器的通断时间，调节电阻丝通电时间的长短，达到控制电炉温度的目的。该电阻炉温度微机控制系统，具有比较精确的温度控制功能，还可以兼有实时温度显示以及超温、极值和电阻丝、铂电阻损坏报警功能等。

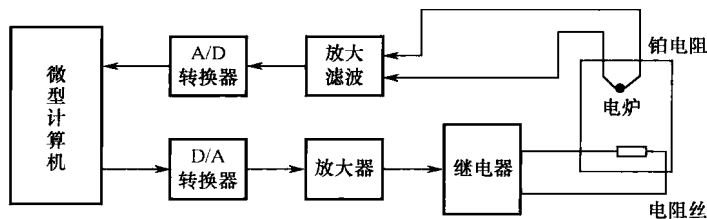


图 1.14 电阻炉温度微型计算机控制系统示意图

5. 液面控制系统

在化工与制药等行业中，有许多反应釜等被控对象，经常需要控制釜内液面的位置，存在各种不同的液面控制系统。图 1.15 所示为储槽液面自动控制系统。图中 V_1 和 V_2 分别是输入液流和输出液流的阀门， M 是电动机， K 是放大器。该液面自动控制系统，不论阀门 V_2 的开度多大，或通过 V_2 的输出液流如何变化，也能维持储槽内液面的高度在一定水平上，不超过允许的偏差值。该系统储槽内浮子的位置就是测量出来的液面的实际高度，它与电位器的滑动端相连，电位器的中点接地（电源的零电位）。当液面的实际高度恰好为某一希望高度 h 时，电位器的滑动端正处于中点位置，电位器没有输出电压，电动机不转。当储槽内液面的高度偏离希望高度 h 时，电位器的滑动端便会偏离中点，于是电位器便输出一个电压 u_e ， u_e 经放大器 K 后作用于电动机 M 上，随着电动机 M 的旋转，调节阀门 V_1 的开度，从而调节输入液流的流量，使储槽内液面的高度恢复到希望高度 h 值附近。反映液面高度的浮子也使电位器复原，滑动端移到中点，电压 $u_e = 0$ ，电动机 M 停止转动；储槽内液面高度维持在 h 值附近不超过允许误差的范围。液面自动控制系统的方框图如图 1.16 所示。

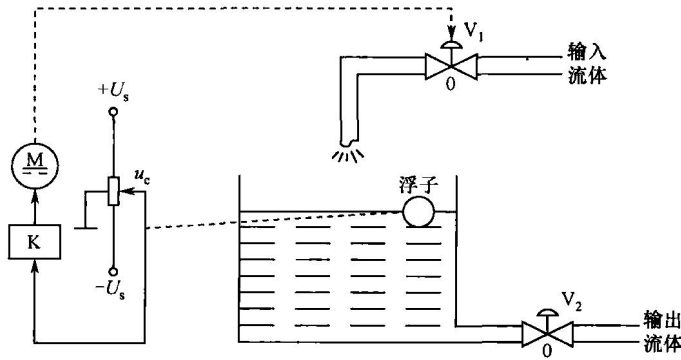


图 1.15 液面自动控制系统示意图

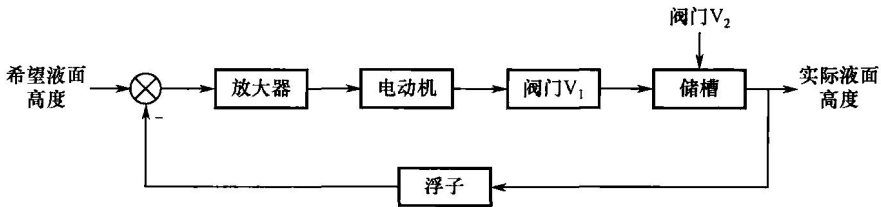


图 1.16 液面自动控制系统方框图

6. 船舶航向保持控制系统

船舶作为空间运动体，在海上航行时，具有 6 个自由度运动。如图 1.17 所示。有 3 个摇摆运动，3 个位移运动。沿 x 轴方向位移运动称为纵荡运动，沿 y 轴方向位移运动称为横荡运动，沿 z 轴方向位移运动称为垂荡运动，绕 x 轴旋转的运动称为横摇 (φ)，绕 y 轴旋转的运动称为纵摇 (θ)，绕 z 轴旋转的运动称为艏摇或航向 (ψ)。

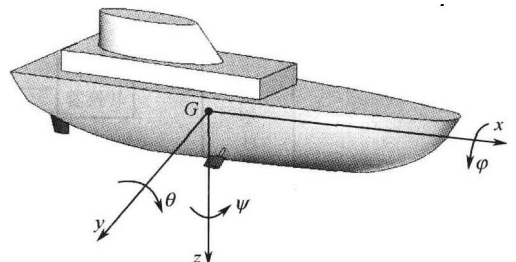


图 1.17 船舶六自由度运动示意图

在船舶控制工程中，船舶的航向控制是最基本