

自动控制

原理

胡 廉 胡 惠 编

dongkongzhi yuan

宁夏人民出版社

自动控制原理

胡 廉 胡 惠

宁夏人民出版社

内 容 提 要

本书主要讲解单输入、单输出的线性定常反馈控制系统的基本理论。该理论是本世纪40年代末建立起来的，称为经典控制理论，至今已广泛应用于工程实践中。

作者力图做到简明扼要，深入浅出，将最基本的理论压缩在不大的篇幅里，作为一本入门书。书中避免采用烦琐的数学推导和进行复杂系统的设计，较多地结合简单的实例加以说明。

该书适合于从事机械工程专业初、中级技术人员自学阅读，也可供大专、职大、中专非自控专业的师生参考学习。

自 动 控 制 原 理

胡 廉 胡 惠

宁夏人民出版社出版发行

新华书店经销

常熟市印刷二厂印刷

787×1092 1/32 印张：9 字数：180千 插页：5

1988年2月第1版第1次印刷 印 数：6000册

ISBN7-227-00202-0/TH.6 定价：1.85元

前 言

随着科学技术和生产的不断发展，自动控制已成为现代技术中必不可少的一个部分。自动控制就是应用控制装置，自动地、有目的地控制、操纵机械设备或过程，使其具有一定的功能或状态。应用自动控制，能使空间技术、现代武器、自动驾驶、人工智能得以实现；使电气、化工、动力、冶炼等生产过程正常地运转；使机械制造过程和管理系统高质量、高效率地运行。人工控制是凭借感觉器官来接受外界的信息，在大脑里进行分析和判断，然后采取行动，进行控制或操纵。正常人的感觉能力如表0—1所示。对于复杂、快速、精确的控制系统，采用人工控制往往不能满足要求，也不利于减轻劳动强度。因此，目前在许多部门已由自动控制装置来部分或全部代替人工操作。

第一个自动控制系统，是1784~1788年英国人J. 瓦特发明的蒸汽机离心调速器(图0—1)。当外界负载变化使转矩减小时，由于蒸汽带入的能量未变，输出轴的转速增大，此时，离心调速器的飞球便转得越快，并且越向外移，通过杠杆机构而使阀门关小，使进入蒸汽机的蒸汽量减少，输出轴的转速便恢复

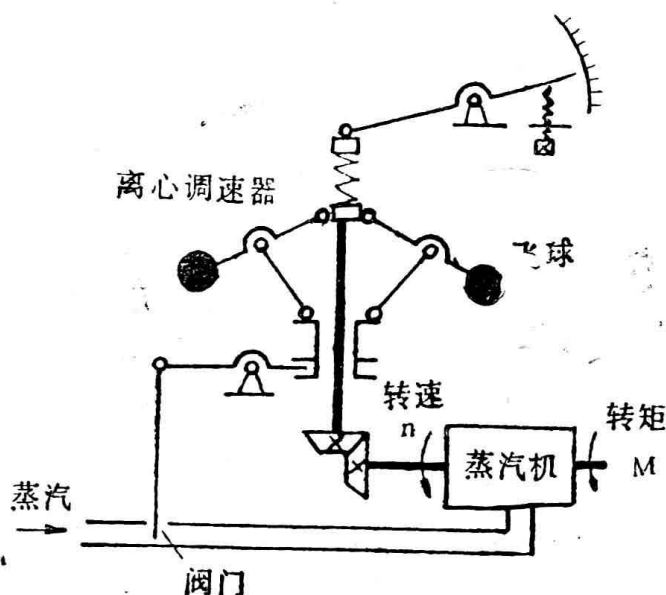


图0—1 蒸汽机离心调速器

正常。当外界负载变化使转矩增大时，情况正好相反，从而保持输出轴的转速不变。

表0—1 人的感觉能力

	感 觉 比 (%)	信息解释能 力 (bit/s)	残存率 (%)	
			3小时后	3日后
视觉	约83	430万	72	10
听觉	约10	8000	70	10
嗅觉	约4	—		
触觉	约2	—		
味觉	约1	—	85	65

注：1.本表来源于参考书〔9〕。

2.bit为量度信息的单位。

由于对离心调速器稳定性的研究，经典（或古典）控制理论便由此起源。从19世纪后半叶到20世纪初，关于自动控制的研究有所进展，特别在第二次世界大战期间，因为军事的需要，自动控制理论和技术的研究、开发得到了极大发展。到了本世纪40年代，自动控制终于发展成为一门独立的学科。1947年，第一本经典控制理论的教科书《伺服机件原理》出版；1948年，美国人N.维纳发表了著名的《控制——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书，形成完整的经典控制理论。

经典控制理论的内容，主要是以传递函数（即输入、输出间关系的描述）为基础，研究单输入、单输出的自动控制系统的分析和设计问题，其理论成熟，并在工程实践中得到广泛的应用。

自本世纪50年代末以来，由于空间技术的发展和军事工业的需要，对自动控制系统的精度和效能要求越来越高，另一方面由于电子计算机技术日趋成熟，从而在经典控制理论的基础上，产生了现代控制理论。它主要是利用状态空间分析来研究多输入、多输出复杂系统的分析和设计问题，实现在一定意义下的最优控制。

自动控制原理，特别是它的基础——经典控制理论，现在已成为每一位工程技术人员必须具备的基本理论知识。关于自动控制方面的书籍国内已经出版不少，但大多数的起点比较高，不太适合初学者的需要。为此，作者编写了这本供初、中级工程技术人员阅读的入门书，它也非常适合大专及中专机械制造工程专业的学生使用。

本书在编写过程中，承蒙上海交通大学洪迈生副教授的

关心和审校，在此表示衷心感谢。同时也由衷地欢迎广大读者及专家不吝指正，提出批评和建议。

作者

于1987年7月

目 录

前言

第一章 基本概念

§ 1.1 系统 (1)

一、系统的属性 (1)

二、对系统的研究任务 (3)

§ 1.2 控制系统 (4)

一、控制系统按反馈分类 (4)

1. 开环控制系统 2. 闭环控制系统

二、控制系统按输出变化规律分类 (8)

1. 自动调节系统 2. 伺服系统 3. 程序控制系统

§ 1.3 系统的方框图 (11)

一、符号和含意 (11)

1. 方框 2. 相加点 3. 分支点

二、通用方框图 (13)

1. 系统中的变量 2. 系统中的环节

三、实例 (15)

1. 切削速度适应控制系统 2. 电缆盘开卷控制系统

第二章 控制系统的微分方程

§ 2.1 系统微分方程的列写 (18)

一、实例 (18)

1. 机械系统 2. 电气系统 3. 流体系统

二、通式 (22)

§ 2.2	线性定常系统	(23)
一、	性质	(23)
二、	验证	(24)
	1.验证齐次性 2.验证叠加性 3.验证频率保持性	
§ 2.3	非线性系统	(26)
一、	系统的非线性	(27)
	1.饱和 2.死区 3.阻尼器 4.继电器	
二、	线性化	(30)
	1.应用小偏差概念线性化 2.实例	
第三章 控制系统的传递函数		
§ 3.1	拉氏变换	(34)
一、	复变数	(35)
	1.复数 2.复变数和复变函数 3.零点和极点	
二、	拉氏变换	(38)
	1.定义 2.性质 3.典型函数的拉氏变换	
三、	应用拉氏变换求解线性微分方程	(44)
	1.列写微分方程 2.求解微分方程 3.应用拉氏变换求解微分方程	
§ 3.2	传递函数	(48)
一、	定义	(50)
	1.通式 2.性质	
二、	典型环节的传递函数	(53)
	1.比例环节 2.惯性环节 3.积分环节	

4.微分环节 5.振荡环节 6.延时环节

§ 3.3 方框图的等效变换…………… (62)

一、基本组成形式的等效变换…………… (63)

1.串联连接 2.并联连接 3.反馈连接

二、分支点移动规则…………… (66)

1.分支点前移 2.分支点后移

三、相加点移动规则…………… (68)

1.相加点前移 2.相加点后移

四、实例…………… (68)

1.例一 2.例二

§ 3.4 实例…………… (72)

一、R-C低通滤波电路…………… (72)

二、车削工艺系统…………… (74)

三、直流电动机位移伺服系统…………… (76)

第四章 控制系统的时域分析

§ 4.1 典型输入信号…………… (81)

一、单位阶跃函数…………… (82)

二、单位斜坡函数…………… (83)

三、等加速函数…………… (84)

四、正弦函数…………… (84)

五、单位脉冲函数…………… (84)

§ 4.2 一阶系统的时间响应…………… (84)

一、一阶系统的单位阶跃响应…………… (85)

1.计算 2.讨论

二、一阶系统的单位脉冲响应…………… (89)

1.计算 2.讨论

三、实例…………… (91)

1. 调节时间 t_s 2. 满足 $t_s \leq 0.1(s)$ 的反
馈系数 K_H

§ 4.3 二阶系统的时间响应…………… (92)

一、过阻尼二阶系统的单位阶跃响应…………… (92)

1. 计算 2. 讨论

二、欠阻尼二阶系统的单位阶跃响应…………… (95)

1. 计算 2. 讨论

三、实例…………… (103)

1. 传递函数 2. 当放大系数 $K = 200$ 时

3. 当放大系数增大到 $K = 1500$ 时 4. 当放
大系数减小到 $K = 13.5$ 时

§ 4.4 系统的稳定性…………… (105)

一、稳定性概念…………… (106)

1. 稳定与不稳定 2. 实例

二、稳定条件…………… (110)

1. 情况一 2. 情况二 3. 实例

三、赫尔维茨判据…………… (118)

1. 赫尔维茨判据 2. 实例

§ 4.5 系统的稳态精度…………… (122)

一、误差及稳态误差…………… (123)

1. 误差 2. 稳态误差

二、稳态误差的计算…………… (124)

1. 计算 2. 实例

三、系统的型别…………… (131)

第五章 控制系统的根轨迹分析

§ 5.1 根轨迹的概念…………… (133)

一、传递函数的零点和极点…………… (133)

1.说明 2.实例

二、根轨迹及绘制基本法则…………… (141)

1.根轨迹 2.绘制根轨迹的基本法则

3.典型系统的根轨迹

§ 5.2 根轨迹应用的实例…………… (149)

一、初步计算…………… (149)

1.考虑过渡过程特性 2.考虑稳态精度

二、校正…………… (151)

1.校正方式 2.本例题的“校正”

第六章 控制系统的频域分析

§ 6.1 频率特性的概念…………… (158)

一、频率特性…………… (158)

二、数学表达式…………… (159)

1.利用关系式 $c(t) = L^{-1} [G(s) R(s)]$

求取 2.将传递函数中的 s 换为 $j\omega$ 求取

三、说明…………… (165)

§ 6.2 典型环节的频率特性…………… (167)

一、惯性环节(一阶系统)…………… (167)

1.幅频和相频特性 2.对数幅频和相频特性
3.幅相频率特性

二、振荡环节(二阶系统)…………… (176)

1.幅频和相频特性 2.对数幅频和相频特性
3.幅相频率特性

三、比例环节(零阶系统)…………… (185)

四、微分环节……………

五、积分环节……………

六、延时环节……………

§ 6.3	奈奎斯特稳定判据	(191)
一、	系统开环频率特性	(191)
二、	奈奎斯特稳定判据	(193)
	1.说明 2.实例 3.稳定裕量	
§ 6.4	校正	(204)
一、	增益校正	(204)
	1.说明 2.实例	
二、	相位滞后校正	(206)
	1.说明 2.实例 3.R-C相位滞后网络	
三、	相位超前校正	(211)
	1.说明 2.实例 3.R-C相位超前网络	
§ 6.5	按频域性能估计时域性能	(216)
一、	定性分析	(216)
二、	定量估计	(217)
§ 6.6	控制系统的测试	(218)
一、	时间响应测试	(219)
二、	频率响应测试	(219)

第七章 非线性控制系统分析

§ 7.1	概念	(222)
一、	连续的和不连续的非线性	(223)
二、	非线性效应	(225)
§ 7.2	描述函数分析法	(227)
一、	谐波线性化	(227)
	1.周期信号的分解 2.谐波线性化	

第五章 控制系统的根轨迹

§ 5.1	根轨迹的概念	(232)
一、	传递函数的零点和极	

三、典型非线性特性的描述函数…………… (233)

1. 饱和 2. 死区 3. 磁滞

§ 7.3 稳定性分析…………… (236)

一、说明…………… (237)

1. 线性系统的稳定性 2. 非线性系统的稳定性

二、实例…………… (242)

第八章 线性离散控制系统简介

§ 8.1 数字控制系统…………… (244)

一、概述…………… (244)

二、A/D转换器 …………… (249)

1. 工作情况 2. Z变换

三、D/A转换器 …………… (258)

1. 工作情况 2. 零阶保持器的传递函数

四、应用数字式电子计算机的控制系统…………… (260)

§ 8.2 脉冲传递函数…………… (262)

一、概述…………… (262)

1. 线性连续控制系统 2. 线性离散控制系统

二、闭环脉冲传递函数…………… (265)

三、数字式环节脉冲传递函数的确定方法

…………… (267)

附录一 常用拉氏变换表

附录二 常见系统的信号和环节的相似性

主要参考书…………… (273)

第一章 基本概念

这一章主要介绍系统、控制系统、反馈、方框图等。

§ 1.1 系 统

自然界和人类社会的事物，大至太阳系、生物、工矿企业、房屋、飞机、导弹，小至普通的水箱、电熨斗等，分析起来，都是由若干相互作用和相互依赖的组成部分结合而成的、具有特定功能的集合体，这样的集合体称为系统。系统可总分为两大类，一类是自然系统，就是自然界本来存在的系统，如太阳系、自然生态系统，一类是**人造系统**，就是经过人们改造的或由人们创造的系统，如切削加工系统、工厂、飞机等。我们要讨论的是人造系统。

一、系统的属性

人造系统有四个主要的属性。

1. 集合性。系统至少是由两个或两个以上的可以区别的要素所组成。

2. 相关性。系统内的要素是相互联系相互作用的。

3. 目的性。人造系统都有它的整体目的性，而且往往不是单一的目的。

4. 环境适应性。把一个系统看成它所从属的一个更大系统的组成部分，这个更大的系统对它所属的系统来说就是环境。系统应当能够适应环境的变化。

环境和系统之间的相互作用，通常表现为物质、能量和信息的流动。从环境向该系统的流动称为输入，从该系统向

环境的流动称为输出，如图1—1所示。

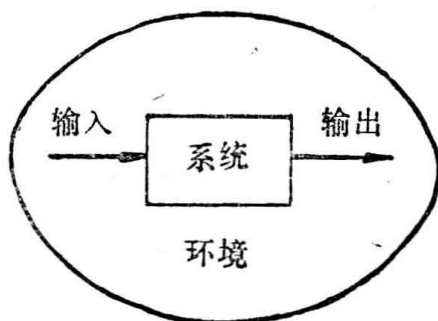


图1—1 系统与环境

举例来说，可以把一般机床的切削加工过程中涉及的各个环节——操作工人管理下的加工设备、加工对象和测量装置等等看作为一个系统（图1—2），该系统的输入为零件的图纸要求，输出为零件成品。这个系统受到来自机床、夹具、刀具、量具、毛坯、切削过程本身和车间环境各方面的作用和干扰。所谓干扰，就是一种对系统的输出产生相反作用的信号。如果干扰生产在系统的内部，称为内扰；干扰产生在系统的外部，则称为外扰。

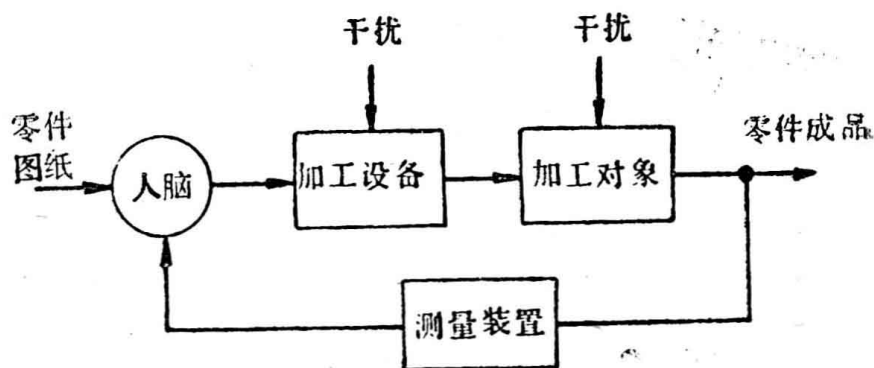


图1—2 切削加工系统

由于电子计算机的出现和发展，特别是微处理机的出现和发展，给人们提供了强有力的技术手段，使得整个切削加工过程可以自动进行，工人只需定期地或连续地对其保持监视（图1—3）。此时，不仅要求整个系统稳定，而且要求切削加工过程实现所预期的最优指标。

当然，系统有大有小，其概念也不仅限于上述物理系统。例如，在研究一个机器制造厂应当如何调整产品的生产，以适应市场需求的变化时，可以把这个工厂整体看作是一个待研究的系统，而变化着的市场的需求情况就是输入，产品生产的情况是输出。总之，在机械制造领域中，大至整个企业的生产过程，小至一个刀齿的切削过程，莫不充满着物质、能量和信息的获取、传递、交换，莫不经历着动态变化过程，在处理时都可以认为它们是一个系统。

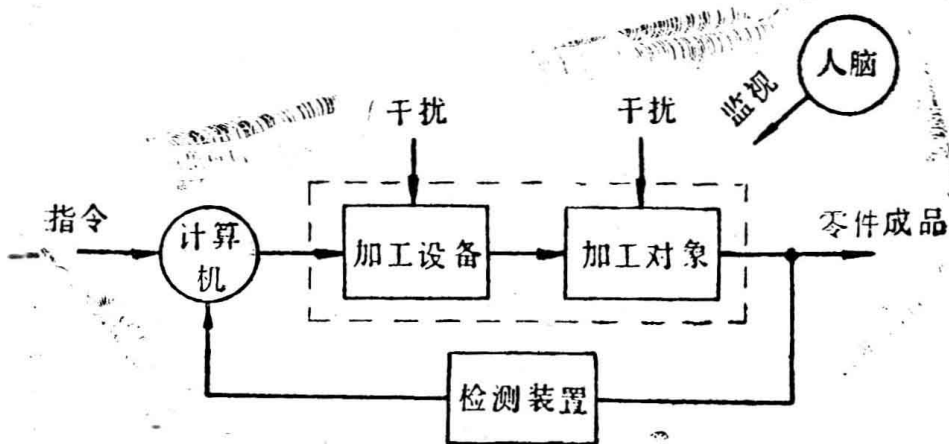


图1—3 自动切削加工系统

二、对系统的研究任务

对于系统的研究，是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系（系统的输出也称为响应）。所研究的任务大致可以