

普通高等教育“十二五”规划教材

机械工程控制基础

主 编 李连进

副主编 呼英俊 肖永茂



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

机械工程控制基础

主 编 李连进
副主编 呼英俊 肖永茂
参 编 杨 佳 余庆玲
主 审 李会山

机械工业出版社

本书主要讨论控制系统的一般分析、综合方法以及基本理论, 主要包括: 绪论, 控制系统的数学模型、时域分析、频率特性、稳定性、根轨迹、误差分析、综合与校正, 并结合工程应用实际介绍了经典控制理论在现代工业生产中的应用。内容的编写上, 着重拓宽基础知识面, 加强工程背景知识, 以培养学生创新能力和工程实践能力为原则, 通过对应用实例的分析提高学生解决问题的能力。为帮助读者理解掌握各章内容, 书中有针对性地设置了一定量的习题。

本书的特点是论述深入浅出, 精讲多练, 简洁实用, 适用于应用型本科院校机械类专业, 也可作为相关专业的教学参考书, 同时还可供有关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程控制基础 / 李连进主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-42710-0

I. ①机… II. ①李… III. ①机械工程-控制系统-高等学校-教材
IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 115336 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 张丹丹

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 张 静 责任印制: 张 楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 12.75 印张 · 314 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-42710-0

定价: 26.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在编者二十几年教学和科研工作的基础上,总结同类教材的经验并吸收国内外有关本课程领域内最新的教学和科研成果,精心组织编写而成。

本书作为一门技术基础课教材,力求在阐述机械工程控制论的基本概念、基本知识和基本方法的基础上,密切结合工程实际,突出重点和实用性,使读者对经典控制理论有较全面的了解。论述时按认知规律编排教材内容和重点难点布局,注重课程内容衔接和工程概念,力求做到概念准确,层次清晰,深入浅出,易教易学,符合应用型本科院校的教学需要。全书取材新颖,舍弃了过时陈旧的内容。

本书介绍了机械控制的基本理论和基本方法。全书共8章,第1章绪论介绍机械控制的基本概念和本书结构体系与学习方法,第2章介绍控制系统的数学模型,第3章介绍控制系统的时域分析方法,第4章介绍控制系统的频率特性,第5章介绍控制系统的稳定性,第6章介绍控制系统的根轨迹,第7章介绍控制系统的误差分析,第8章介绍控制系统的综合与校正。

全书由天津商业大学李连进担任主编,由天津科技大学呼英俊和湖北文理学院肖永茂担任副主编,天津商业大学杨佳和北京交通大学海滨学院余庆玲参加编写。第1章、第2章、第5章的第1节和第3节由李连进编写,第6章、第7章、第8章由呼英俊编写,第4章由肖永茂编写,第3章和第5章的第2节由杨佳编写,第5章的第4节和第5节由余庆玲编写。李连进负责全书的总体结构设计,并修改初稿和整理定稿。

本书由军事交通学院李会山教授任主审,他对教材的编写提供了许多指导性的意见和建议,在此一并致谢。

在本书的编写过程中引用了书后有关文献中的材料和思想,谨向这些文献的作者表示谢意。

由于编者的水平所限,书中的疏漏和不足之处在所难免,恳切希望读者和专家批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 控制系统举例	1
1.2 自动控制系统的基本概念	3
1.2.1 自动控制系统的工作原理	3
1.2.2 对控制系统的基本要求	5
1.2.3 控制系统的基本控制方式	5
1.2.4 自动控制系统的基本组成	7
1.2.5 自动控制系统的名词术语	8
1.3 自动控制系统的分类	8
1.3.1 按输入量的变化规律进行分类	8
1.3.2 按系统中传递信号的性质分类	9
1.4 控制理论发展简史	9
1.5 本课程的教学方法	12
习题	12
第2章 控制系统的数学模型	14
2.1 概念	14
2.1.1 数学模型的概念	14
2.1.2 线性系统与非线性系统	14
2.2 控制系统的微分方程	15
2.2.1 建立微分方程的基本步骤	15
2.2.2 机械系统的微分方程	16
2.2.3 电气系统的微分方程	18
2.2.4 机电系统的微分方程	20
2.2.5 非线性微分方程的线性化	22
2.3 拉氏变换和反变换	23
2.3.1 拉氏变换的定义	23
2.3.2 几种典型函数的拉氏变换	23
2.3.3 拉氏变换的性质	27
2.3.4 拉氏反变换	29
2.3.5 应用拉氏变换解线性微分方程	32
2.4 传递函数	33
2.4.1 传递函数的定义	33
2.4.2 典型环节的传递函数	35
2.5 系统的方框图和信号流图	41
2.5.1 系统方框图的组成	41
2.5.2 环节的基本连接方式	42

2.5.3 方框图的变换与简化	44
2.5.4 系统的信号流图及其简化	46
2.5.5 梅逊公式及其应用	49
习题	51

第3章 控制系统的时域分析

3.1 时间响应与典型输入信号	53
3.1.1 时间响应及其组成	53
3.1.2 典型输入信号	54
3.1.3 瞬态响应的性能指标	56
3.2 一阶系统的时间响应	57
3.2.1 一阶系统的数学模型	57
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	57
3.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	58
3.2.4 一阶系统的单位斜坡响应	58
3.2.5 线性定常系统时间响应的主要特征	59
3.3 二阶系统的时间响应	59
3.3.1 二阶系统的数学模型	59
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	60
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	63
3.3.4 二阶系统的瞬态响应性能指标	64
3.4 高阶系统的时间响应	67
3.4.1 高阶系统的时间响应分析	68
3.4.2 高阶系统的简化	69
3.4.3 高阶系统的瞬态响应性能指标估算方法	70
3.5 计算机辅助时域分析	70
习题	72

第4章 控制系统的频率特性

4.1 频率特性的基本概念	74
4.1.1 频率响应与频率特性	74
4.1.2 频率特性的求取方法	75
4.1.3 频率特性的表示方法	76
4.2 典型环节的极坐标图	78
4.2.1 比例环节	78
4.2.2 积分环节	79
4.2.3 微分环节	79

4.2.4 惯性环节	79	5.4.1 相位稳定裕度	117
4.2.5 一阶微分环节	80	5.4.2 幅值稳定裕度	118
4.2.6 振荡环节	80	5.4.3 影响系统稳定性的主要因素	120
4.2.7 二阶微分环节	81	5.5 切削的数学模型及稳定性分析	120
4.2.8 延迟环节	82	5.5.1 切削系统的数学模型	121
4.2.9 系统奈奎斯特图的画法	82	5.5.2 切削稳定性分析	122
4.3 典型环节的对数坐标图	84	习题	124
4.3.1 比例环节	84	第6章 控制系统的根轨迹	126
4.3.2 积分环节	84	6.1 根轨迹与控制系统特性	126
4.3.3 微分环节	85	6.1.1 根轨迹的基本概念	126
4.3.4 惯性环节	85	6.1.2 根轨迹与系统性能	127
4.3.5 一阶微分环节	86	6.2 绘制根轨迹的基本法则	128
4.3.6 振荡环节	87	6.2.1 绘制根轨迹的相位条件和幅值 条件	128
4.3.7 二阶微分环节	88	6.2.2 绘制根轨迹的基本规则	130
4.3.8 延迟环节	89	6.3 用根轨迹分析控制系统的性能	139
4.3.9 伯德图的一般绘制方法	89	6.3.1 根轨迹确定系统的有关参数	139
4.4 系统开环频率特性的实验确定方法	92	6.3.2 指定 K_1 时的闭环传递函数	141
4.4.1 开环频率特性的实验分析法	92	6.3.3 确定具有指定阻尼比 ξ 的闭环 极点和单位阶跃响应	142
4.4.2 由实验的开环对数坐标图确定 (估计) 系统的开环频率特性	93	6.4 利用 MATLAB 绘制系统根轨迹	143
4.5 闭环频率特性及频域性能指标	96	习题	149
4.5.1 闭环频率特性	96	第7章 控制系统的误差分析	151
4.5.2 闭环系统的频域性能指标	97	7.1 误差的概念	151
4.5.3 系统的频域指标与时域指标 之间的关系	98	7.1.1 误差	151
4.6 最小相位系统与非最小相位系统	99	7.1.2 偏差信号	151
4.6.1 最小相位传递函数与最小相位 系统	99	7.1.3 误差信号	152
4.6.2 产生非最小相位的一些环节	100	7.1.4 期望输出信号的确定	152
习题	101	7.1.5 偏差信号与误差信号的关系	152
第5章 控制系统的稳定性	103	7.2 系统的类型	152
5.1 稳定性的基本概念	103	7.3 静态误差	153
5.1.1 稳定性的定义	103	7.3.1 静态误差系数和静态误差的 计算	154
5.1.2 控制系统的稳定性条件	103	7.3.2 干扰输入作用下的静态误差	158
5.1.3 线性系统稳定的充分必要条件	105	7.3.3 复合控制系统的误差分析	158
5.2 代数稳定性判据	105	7.4 动态误差	159
5.2.1 劳斯判据	105	7.5 工程中的误差分析实例	160
5.2.2 赫尔维茨判据	108	习题	163
5.3 几何稳定性判据	110	第8章 控制系统的综合与校正	165
5.3.1 幅角定理	110	8.1 控制系统校正的基本概念	165
5.3.2 奈奎斯特稳定性判据	112	8.1.1 控制系统校正与校正装置	165
5.3.3 对数频率特性的稳定性判据	115	8.1.2 控制系统的性能指标	165
5.4 系统的相对稳定性	117		

8.1.3 校正方式	166	8.4.2 前馈校正（复合校正）	179
8.2 校正装置及其特性	167	8.5 控制器类型	180
8.2.1 超前校正装置	167	8.6 控制器控制规律的实现	181
8.2.2 滞后校正装置	168	8.6.1 PD 控制规律的实现	181
8.2.3 滞后—超前校正装置	170	8.6.2 PI 控制规律的实现	183
8.3 串联校正	171	8.6.3 PID 控制规律的实现	184
8.3.1 相位超前校正	171	8.7 按期望特性设计控制器	186
8.3.2 相位滞后校正	173	8.8 工程中的控制系统设计实例	187
8.3.3 串联滞后—超前校正	174	习题	195
8.4 并联校正	176	参考文献	197
8.4.1 反馈校正	176		

第 1 章 绪 论

控制理论不仅本身是一门极为重要的科学，而且又是一门哲理卓越的科学方法论。控制理论在工程技术领域中体现为工程控制论，在机械工程领域中体现为机械工程控制论。机械工程控制论是一门新兴学科，它紧密地将控制理论与工程实践结合起来，以解决实际问题。

本书主要介绍控制理论中经典部分的主要内容及其在工程实际中的应用。

本章列举机械工程控制论的一些应用实例，着重介绍机械工程控制论的基本含义及其有关的几个重要概念，并且对本门课程的学习特点及内容作简要说明。

1.1 控制系统举例

机械工程科学的主要任务之一就是要了解、掌握机械工程系统或工艺过程的内在规律，这也就是系统或状态的动态特性。要研究其内部信息传递、变换规律以及受到外加作用时的反应，从而决定控制它们的手段和策略，使之达到人们所预计的最佳状态或最理想的状态，这正是机械 engineering 控制的主要内容。

大多数自动控制系统以及伺服机构，都是应用反馈控制原理控制某一个机械刚体（如机床工作台、振动台、电气机车、飞机），或是一个机械生产过程（如切削过程、锻压过程、焊接过程等）的机械控制工程实例。

图 1-1 所示工业机器人要完成将工件放入指定孔中的任务，其基本的控制方框图如图 1-2 所示。其中，控制器的任务是根据指令要求，以及传感器所测得的手臂实际位置和速度反馈信号，考虑手臂的动力学，按一定的规律产生控制作用，驱动手臂各关节，以保证机器人手臂完成指定的工作并满足性能指标的要求。

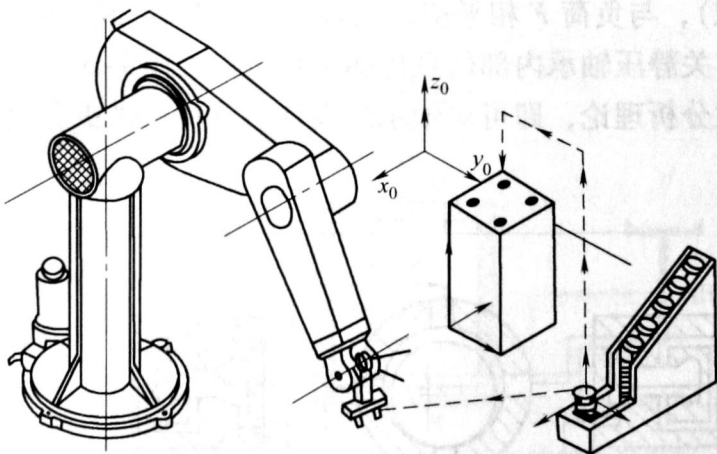


图 1-1 工业机器人完成装配工作

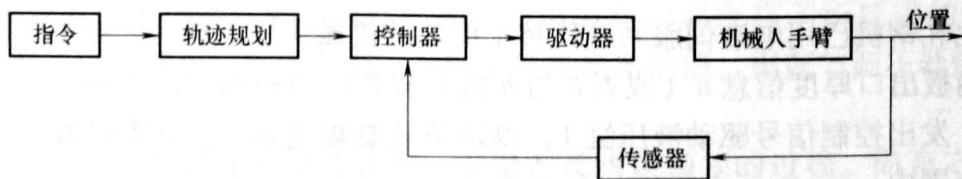


图 1-2 工业机器人控制方框图

图 1-3 所示的车削过程，往往会产生自激振动，这种现象的产生与切削过程本身存在内部反馈作用有关。当刀具以名义进给 x 切入工件时，由切削过程特性产生切削力 F_y 。在 F_y

的作用下，又使机床与工件系统发生变形退让 y ，从而减少了刀具的实际进给量，刀具的实际进给量变成 $a = x - y$ 。上述的信息传递关系可用图 1-4 的闭环系统来表示。这样，对于切削过程的动态特性，切削自激振动的分析，完全可以应用控制理论有关稳定性理论进行，从而提出控制切削过程、抑制切削振动的有效途径。

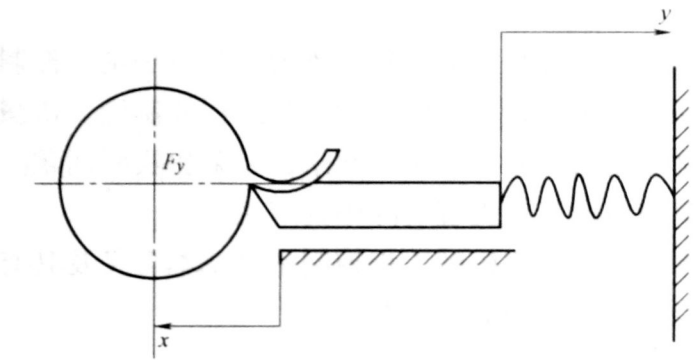


图 1-3 车削过程

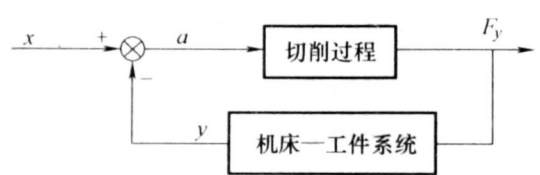


图 1-4 车削过程信息传递

图 1-5 所示为薄膜反馈式径向静压轴承。当主轴受到负荷 F 后产生偏移 e ，因而使下油腔压力 p_2 增加 Δp ，上油腔压力 p_1 减少 Δp 。这样，与之相通的薄膜反馈机构的下油腔压力增加 Δp ，上油腔压力减少 Δp ，从而使薄膜向上变形弯曲。这就使薄膜下半部高压油输入轴承的流量增加，而上半部减少，轴承主轴下部油腔产生反作用力 F_R ($F_R = 2A_r \Delta p$, A_r 为油腔面积)，与负荷 F 相平衡，以减少偏移量 e ，或完全消除偏移量 e (即达到无穷大刚性)。上述有关静压轴承内部信息传递关系可以由图 1-6 表示为一个闭环系统。利用控制论有关动态特性分析理论，即可对轴承的设计与分析提供更有效的途径。

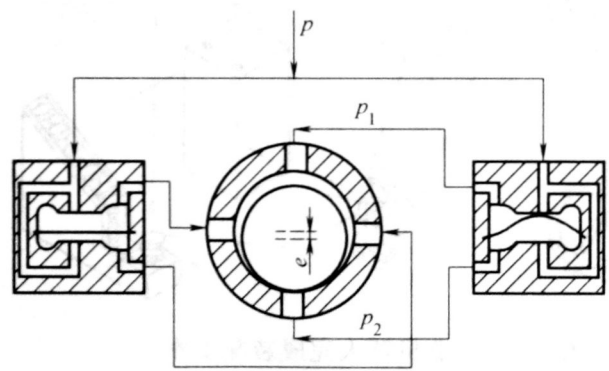


图 1-5 薄膜反馈式径向静压轴承

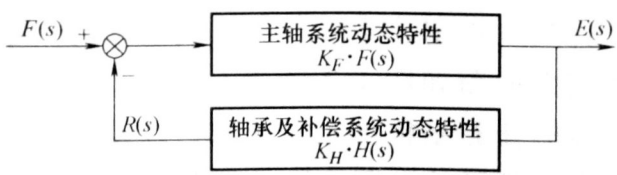


图 1-6 静压轴承信息传递

图 1-7 所示为反调控制的液压压下钢板轧机原理图。由于钢板轧制速度及精度要求越来越高，现代化轧钢机已用电液伺服系统代替了旧式的机械式压下机构。图 1-7 中工作辊的辊缝信息 δ 或钢板出口厚度信息 h (或者 δ 与 h 两者兼有) 由检测元件 3 测出并反馈到电液伺服系统 2 中，发出控制信号驱动液压缸 1，以调节轧制辊缝 δ ，从而使钢板出口厚度 h 保持在要求公差范围内。

为了使上述钢板轧机伺服系统能发挥其高灵敏度、高精度的优良特性，必须应用机械工程控制有关理论进行分析、综合。

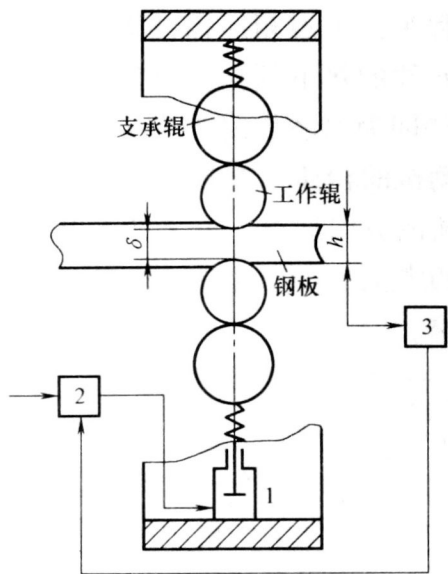


图 1-7 液压压下（钢板厚度自动控制）钢板轧机原理图
1—液压缸 2—电液伺服系统 3—检测元件

1.2 自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制系统的工作原理

所谓控制系统，是指系统的输出能按照要求的参考输入或控制输入进行调节的系统。下面以人工控制恒温箱温度为例，分析人工控制和自动控制的过程。图 1-8 所示为人工控制恒温箱温度的示意图。人工控制的目的是克服外界干扰（如电源电压波动、环境温度变化等），保持箱内温度恒定，以满足物体对温度的要求。操作人员可以通过调压器改变通过加热电阻丝的电流，以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计测量的。人工调节过程可归纳如下：

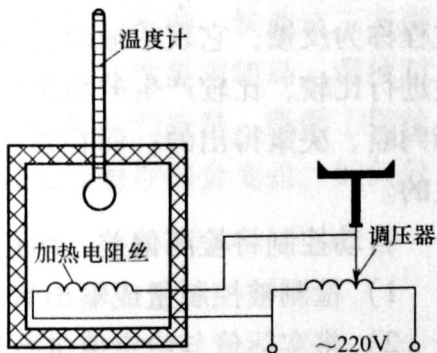


图 1-8 人工控制的恒温箱

- 1) 操作者观察温度计的温度读数（被控制量），这是人眼的功能。
- 2) 将实际的温度与给定的温度值（给定值）进行比较，得出温度偏离给定值的大小和方向，这是人脑的功能。
- 3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱内温度高于所要求的给定温度值时，就调节调压器使电流减小，温度降低。若温度低于给定的值，则调节调压器使电流增加，温度升到正常范围。

由此可见，人工控制过程就是观测、求偏差及纠正偏差的过程。简言之“求偏与纠偏”的过程。如果将上述人工控制过程中操作人员的作用由自动控制器来代替，一个人工调节的系统就变成一个自动控制系统。

图 1-9 所示为恒温箱的自动控制系统。在这个自动控制系统中，用热电偶作为测量元件代替人眼，用电位计作为比较器代替人脑，用放大器、电动机及减速器作为驱动环节代替人

手。恒温箱温度的自动控制过程为：恒温箱所需的温度由电压信号 u_1 给定，当外界因素引起箱内温度变化时，作为测量元件的热电偶把温度转换成对应的电压信号 u_2 ，并反馈回去与给定信号 u_1 相比较，所得结果即为温度的偏差信号 Δu ， $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经过电压、功率放大后，用以改变执行电动机的转速和方向，并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时，动触头向着减小电流的方向运动，反之加大电流，直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时，电动机才停转，这样就完成了所要求的控制任务。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

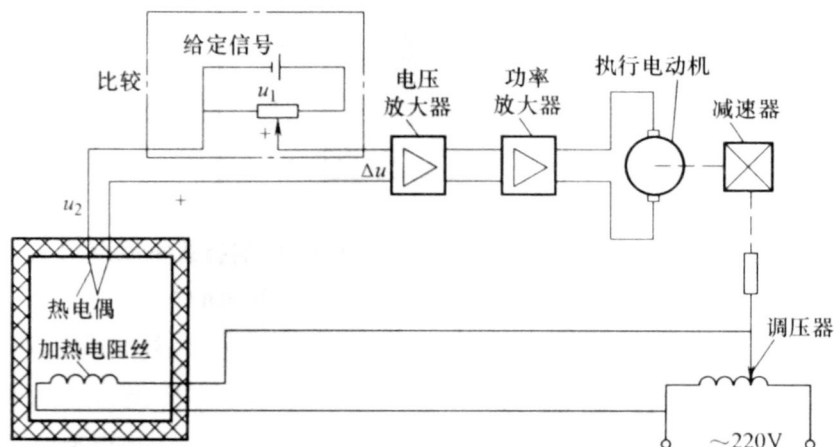


图 1-9 恒温箱的自动控制系统

在控制系统中，给定量又称系统的输入量，被控制量也称系统的输出量。输出量的返回过程称为反馈，它表示输出量通过测量装置将信号的全部或一部分返回输入端，使之与输入量进行比较，比较产生的结果称为偏差。在人工控制中，这一偏差是通过人眼观测后，由人脑判断、决策得出的；而在自动控制中，偏差则是通过反馈，由控制器进行比较、计算产生的。

自动控制将检测偏差、纠正偏差过程自动化。控制系统的工作原理可以归纳如下：

- 1) 检测被控制量或输出量的实际值。
- 2) 将实际值与给定值进行比较得出偏差值。
- 3) 用偏差值产生控制调节作用去消除偏差。

这种基于反馈原理，通过检测偏差再纠正偏差的系统称为反馈控制系统或闭环控制系统。通常反馈控制系统至少具备测量、比较和执行三个基本功能。

恒温箱自动控制系统方框图如图 1-10 所示。图 1-10 中箭头表示信号作用的方向， $\otimes$ 代表比较元件，每一个方框代表一个环节。每个环节的作用是单向的，且输出受输入控制。图 1-10 清楚地说明了反馈控制的基本原理。可以说，反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

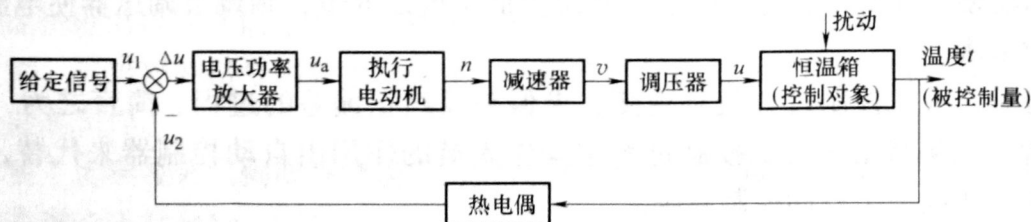


图 1-10 恒温箱自动控制系统方框图

1.2.2 对控制系统的基本要求

自动控制系统应用的场合不同,对系统性能的要求也不同。但从控制工程的角度出发,对每个控制系统却有相同的基本要求,一般可归纳为稳定性、准确性和快速性。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的首要条件。因为控制系统中都包含储能元件,若系统参数匹配不当,就可能引起振荡。稳定性就是指系统动态过程的振荡倾向及其恢复平衡状态的能力。对于稳定性满足要求的系统,当输出量偏离平衡状态时,应能随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。

2. 准确性

准确性是指控制系统的控制精度,一般用稳态误差来衡量。所谓稳态误差,是指以一定变化的输入信号作用于系统后,当调整过程结束趋于稳定时,输出量的实际值与期望值之间的误差值。准确性是衡量控制系统性能的重要指标,如数控机床稳态误差越小,加工精度就越高。

3. 快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时,系统消除这种偏差的快慢程度。快速性是在系统稳定的前提下提出的,它是衡量控制系统性能的又一个重要指标。快速性好的系统,消除偏差的过渡过程时间短,因而就能复现快速变化的输入信号,并具有较好的动态性能。

在实际中,由于控制对象的具体情况不同,各类控制系统对稳定、准确、快速这三方面的要求各有侧重。如调速系统对稳定性要求较严格,而伺服系统对快速性要求较高。即使对于同一系统,稳、准、快也是相互制约的。提高快速性,可能会引起强烈振荡,降低了系统的稳定性;改善了稳定性,控制过程可能会过于迟缓,快速性甚至准确性都会变差。如何分析和解决这些矛盾,正是本课程所要讨论和学习的重要内容。

1.2.3 控制系统的基本控制方式

控制系统的控制方式通常可以分为开环、闭环和复合三种。

1. 开环控制系统

如果系统只是根据输入量和干扰量进行控制,而输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量在整个控制过程中对系统的控制不产生任何影响,这样的系统称为开环控制系统。图1-11a所示的数控线切割机床进给系统是开环控制系统的实例,该系统的方框图如图1-11b所示。由图1-11可知,该系统信号传递是单方向的,对于每一个输入量 x_i ,系统都有一个输出量 x_o 与之对应,但系统对输出量没有检测和反馈。

开环系统的控制精度较低,无自动纠偏能力。但是如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定,而且外界的干扰也比较小,则这种控制系统也可以保证一定的精度。开环控制系统的最大优点是系统简单,一般都能稳定可靠地工作,因此对于要求不高的系统可以采用。

2. 闭环控制系统

如果系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,输出量对控制过程产生直接影响,这种

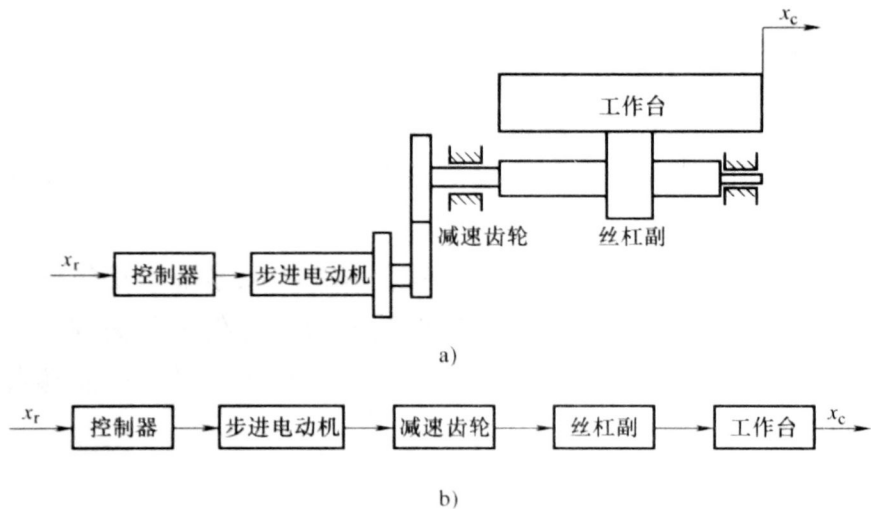


图 1-11 数控线切割机床进给系统的开环控制系统方框图

系统称为闭环控制系统。这里，闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。因此，反馈控制系统必是闭环控制系统。例如，前述的恒温箱温度自动控制系统就是一个闭环控制系统。图 1-12 所示为一个较完整的闭环控制系统。

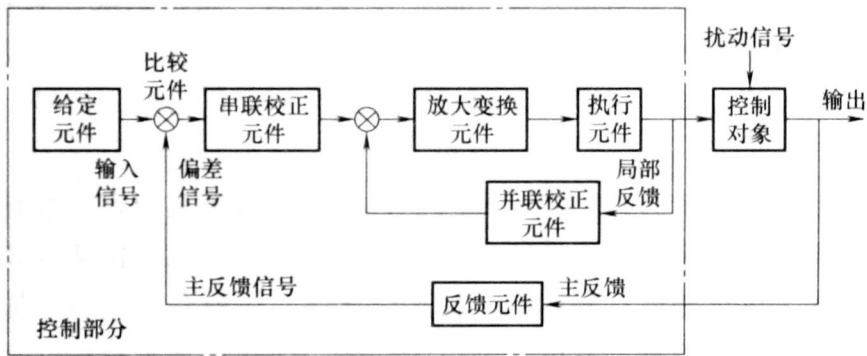


图 1-12 闭环控制系统方框图

闭环控制系统的突出优点是控制精度高，不管遇到什么干扰，只要被控制量的实际值偏离给定值，闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。

闭环控制系统也有缺点，这类系统是靠偏差进行控制的，因此，在整个控制过程中始终存在着偏差，由于元件的惯性（如负载的惯性），若参数配置不当，很容易引起振荡，使系统不稳定而无法工作。

3. 闭环与开环控制系统的比较

闭环控制系统的优点是采用了反馈，因而使系统响应对外部干扰和内部系统参数变化很不敏感。这样，对于给定的控制对象，就有可能采用不太精密的成本低的元件，构成精确的控制系统。相反，在开环系统的情况下，则不能做到这一点。

从稳定性的观点出发，开环控制系统比较容易建造，因为对开环系统来说，稳定性不是重要问题。另一方面，在闭环控制系统中，稳定性始终是一个重要问题，因为闭环系统可能引起过调，从而造成系统作等幅振荡或变幅振荡。

应当强调指出，当系统的输入量能预先知道，并且不存在任何扰动时，建议采用开环控制。只有当存在着无法预计的扰动和（或）系统中元件参数存在着无法预计的变化时，闭

环系统才有其优越性。还应当指出,系统输出功率的大小,在某种程度上确定了控制系统的成本、重量和尺寸(或者在商业系统中,确定了主要投资和人力等)。为了减小系统所需要的功率,在可能情况下,应当采用开环控制。将开环和闭环控制适当地结合在一起,通常比较经济,并且能够满足整个系统的性能要求。

4. 复合控制系统

如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出,而是间接地取自中间的测量元件,例如在图 1-12 所示的控制系统中,局部反馈信号检测装置安装在控制对象的前端,间接测量被控制对象的实际输出,则这种系统称为复合控制系统。

复合控制系统可以获得比开环系统更高的控制精度,但比闭环系统要低;与闭环系统相比,它易于实现系统的稳定。目前大多数数控机床都采用这种复合控制进给伺服系统。

1.2.4 自动控制系统的基本组成

图 1-13 所示为反馈控制系统的组成框图,通常称为闭环控制系统。由图 1-13 可见,闭环控制系统一般由给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等单元组成。开环系统较闭环系统简单,其系统组成中没有反馈元件和比较元件。

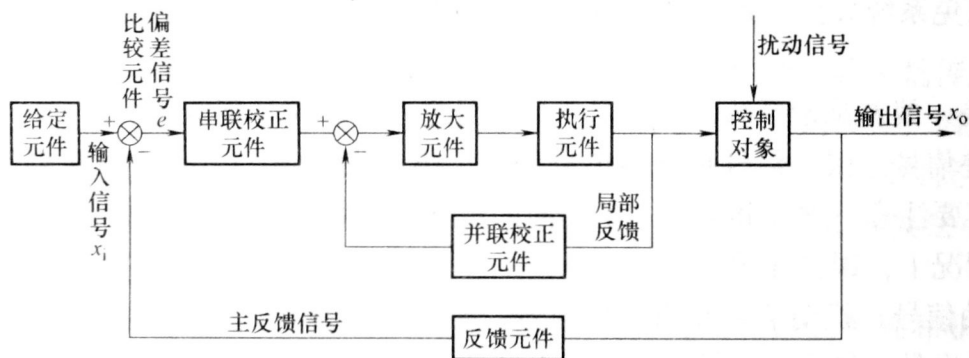


图 1-13 反馈控制系统的组成

(1) 给定元件 给定元件主要用于产生给定信号或输入信号。

(2) 反馈元件 反馈元件测量被控制量或输出量,产生主反馈信号。反馈元件一般使用检测元件,为了便于传输,这些检测元件通常是用电量来测量非电量的一些元件。例如,用电位计或旋转变压器将位移或转角变换为电压信号;用热电偶将温度变换为电压信号;用光栅测量装置将直线位移变换为数字电信号等。

(3) 比较元件 比较元件用来接收输入信号和反馈信号并进行比较,产生反映两者差值的偏差信号。

(4) 放大元件 放大元件对较弱的偏差信号进行放大,以推动执行元件动作。放大元件有电气的、液压的和机械的等。

(5) 执行元件 执行元件直接对控制对象进行操纵,如伺服电动机、液压马达及伺服液压缸等。

(6) 校正元件 校正元件不是反馈控制系统所必须具有的,它是为了改善系统控制性能而加入系统中的元件。校正元件又称校正装置,串联在系统前向通道上的校正装置称为串联校正装置,并联在反馈回路上的校正装置称为并联校正装置。

1.2.5 自动控制系统的名词术语

下面将常用的控制系统的一些名词术语归纳如下:

(1) 控制对象 在控制系统中,运动规律或状态需要控制的装置称为控制对象或被控对象。

(2) 控制器 在控制系统中,控制对象以外的所有装置,统称为控制器。因此,控制系统可以说由控制器和控制对象两部分组成。

(3) 输入信号 输入信号又叫输入量、控制量或给定量。从广义上讲,输入信号是指输入到系统中的各种信号,包括对系统输出不利的扰动信号。一般来说,输入信号是指控制输出量变化规律的信号。

(4) 输出信号 输出信号又叫输出量、被控制量或被调节量,它是表征被控对象运动规律或状态的物理量。输出信号是输入信号作用的结果。因此,它的变化规律应与输入信号之间保持确定的关系。

(5) 反馈信号 反馈信号是输出信号经过反馈元件变换后加到输入端的信号。若反馈信号的符号与输入信号相同,称为正反馈;反之,称为负反馈。控制系统中的主反馈通常采用负反馈,以免系统失控。系统中的局部反馈主要用于对系统进行校正等,以满足控制系统的性能要求。

(6) 偏差 偏差是指系统的输入量与反馈量之差,即比较环节的输出。

(7) 误差信号 误差信号是指输出量的实际值与期望值之差,通常期望值是系统的输入量。这里需要注意,误差和偏差不是相同的概念,只有在单位反馈系统,即反馈信号等于输出信号的情况下,误差才等于偏差。

(8) 扰动信号 扰动信号又叫干扰信号。扰动信号是指偶然的无法加以人为控制的信号。扰动信号也是一种输入信号,通常对系统的输出产生不利的影响。

(9) 自动控制 自动控制是指在无人直接参与的情况下,利用一组装置使被控对象的被控制量按预定的规律运动或变化的控制方式。

(10) 自动控制系统 自动控制系统是指被控对象和参与实现被控制量自动控制的装置或元件的组合。

1.3 自动控制系统的分类

控制系统的种类很多,在实际中可以从不同的角度进行分类。

1.3.1 按输入量的变化规律进行分类

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的输入量是一个恒定值,一经给定,在运行过程中就不再改变(但可定期校准或更改输入量)。这种控制系统的任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒定值。

工业生产中的温度、压力、流量、液位等参数的控制,以及某些原动机的速度控制,机床的位置控制等均属此类控制。

2. 程序控制系统

程序控制系统的输入量不为恒定值,其变化规律是预先知道和确定的。可将输入量的变化规律预先编成程序,由程序发出控制指令,在输入装置中再将控制指令转换为控制信号,经过全系统的作用,使控制对象按照指令的要求运动。

3. 随动系统

随动系统又称伺服系统。这种控制系统输入量的变化规律是不能预先确定的。当系统的输入量发生变化时,要求输出量迅速平稳地随着输入量变化,并且能排除各种干扰因素的影响,准确地复现控制信号的变化规律。控制指令可以由操作者根据需要随时发出,也可以由目标物或相应的测量装置发出。

1.3.2 按系统中传递信号的性质分类

1. 连续控制系统

连续控制系统是指系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统。连续控制系统又可分为线性系统 and 非线性系统。能用线性微分方程描述的系统称为线性系统,不能用线性微分方程描述、存在着非线性部件的系统称为非线性系统。

2. 离散控制系统

离散控制系统是指系统中某一处或数处的信号是以脉冲序列或数字量传递的系统,又称数字控制系统。由于连续控制系统和离散控制系统的信号形式差别较大,因此在分析方法上有明显的不同。连续控制系统以微分方程来描述系统的运动状态,并用拉氏变换法求解微分方程;而离散控制系统则用差分方程来描述系统的运动状态,用 Z 变换法引出脉冲传递函数来研究系统的动态特性。

此外,还可以按描述系统的数学模型将控制系统分为线性控制系统和非线性控制系统;按系统部件的类型分为机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统、电气控制系统等。

1.4 控制理论发展简史

控制理论发展至今,大体上可分为三个阶段,即经典控制理论阶段、现代控制理论阶段和大系统与智能控制理论阶段。为了深入了解现代控制工程产生和发展的背景,有必要介绍一下控制理论的发展简史。

控制理论是把自动控制技术在工程实践中的一些规律加以总结和升华,进而又去指导和推动工程实践发展的理论。它作为一门独立的学科存在和发展,至今还不到百年历史。但是,人类利用自动控制技术的历史,可以追溯到很久以前。最有代表性的是1765年瓦特(J. Watt)发明的蒸汽机离心调速器,反映出人们当时已经认识了控制理论中最为重要的反馈原理。瓦特发明的这种装置容易产生振荡,1868年,英国学者麦克斯韦(J. C. Maxwell)发表了《论调速器》,对蒸汽机调速系统的动态特性进行了分析,指出了控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定可用特征方程根的位置判断,从而解决了蒸汽机调速系统中出现的激烈振荡问题,并总结出了简单的系统稳定性代数判据。第一次世界大战爆发后,军事工业的需要也促进了控制理论的发展。1922年,美国的米诺斯基(N. Minorsky)研制出船舶操纵自动控制器,并给出了控制系统的稳定性分析。之后,又相继有鱼雷的航向控制系

统、航海罗经的稳定器、放大器电路的镇定器等自动化系统和装置问世。这些成功事例的经验，加上探索者们在漫长实践中为解决技术难题而积累的智慧，促进了控制理论的形成和发展。控制理论就这样伴随着科技的进步从经典控制理论发展成现代控制理论，再到现在热点研究的大系统与智能控制理论。

20 世纪 30 ~ 40 年代，奈奎斯特 (H. Nyquist)、伯德 (H. W. Bode)、哈里斯 (H. Harris)、伊万斯 (W. R. Evans) 和维纳 (N. Wiener) 等人为自动控制理论的形成作出了创造性的贡献，他们的著作奠定了自动控制理论的基础。到 1948 年，自动控制理论第一阶段的基本框架已经构成，这就是以单输入—单输出线性定常系统为主要研究对象，以传递函数作为系统模型的数学描述。以频率法和根轨迹法来分析和设计控制系统的理论，通常被称为经典（古典）控制理论。

有了理论的指导，实际应用成果就会不断涌现。这个时期的工业生产得到了迅速发展，如用于飞机的自动导航系统，以及情报雷达和炮位跟踪系统等，就是应用反馈控制理论的产物。

应该看到，经典控制理论虽然具有很大的实用价值，但也有着明显的局限性。它只适用于单输入—单输出线性定常系统的研究，难以推广到多输入—多输出线性定常系统，对时变和非线性系统更是无能为力。用经典控制理论分析、设计控制系统，一般都是依据幅值裕度、相位裕度、超调量、调节时间等指标进行，与通常所要求的性能指标，如最快速度、最小能量等，难以建立直接的对应关系。再者，在运用经典控制理论设计系统时，往往需要借助经验进行试探，难以达到复杂、高精度控制系统的要求。

20 世纪 50 年代，世界进入了一个和平发展的时期。当时，核能技术、航空航天和空间技术蓬勃兴起，控制系统越来越复杂。面对那些具有多变量、高精度、时变参数的控制问题，经典理论显露出它的局限性，难以满足这些复杂系统的分析和设计要求。在此期间，计算机技术突飞猛进发展，高速、高精度的数字计算机相继推出，为控制理论的发展提供了有力的工具。在航空航天技术的推动和计算机技术的支持下，控制理论的发展步入了重要的转折期，在 1960 年前后有了重大的突破和创新。在此期间，苏联数学家庞特里亚金 (Л. С. ПОНТЯГИН) 提出了极大值原理，美国著名学者贝尔曼 (R. Bellman) 创立了动态规划理论。极大值原理和动态规划理论为解决最优控制问题提供了理论依据，促使最优控制理论得到了极大的发展。美籍匈牙利学者卡尔曼 (R. E. Kalman) 系统地把状态变量法引入到控制系统的分析中来，并提出了能控性、能观测性的重要概念和新的滤波理论。“现代控制理论”一词也就在 1960 年卡尔曼的文章发表后出现。这些重要的研究成果构成了现代控制理论的基础和支柱，发展了经典控制理论，形成了自动控制理论的新体系。

现代控制理论是为解决多输入—多输出系统的控制问题而发展起来的，较之经典控制理论，其研究对象要广泛得多，既可以是单变量的、线性的、定常的、连续的系统，也可以是多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。现代控制理论以状态空间描述作为系统的数学模型，以状态变量法为基础，用时域的方法来分析和设计控制系统，它分析和设计控制系统的目标是在揭示系统内在规律的基础上，实现系统在一定意义上的最优化。它的构成带有更高的仿生特点，控制方式已不限于单纯的闭环控制，而扩展到适应环、学习环等，现代控制理论的形成是控制理论发展历程上的又一个里程碑。

理论源于实践，又对实践产生巨大的推动作用。在现代控制理论的推动下，世界上出现