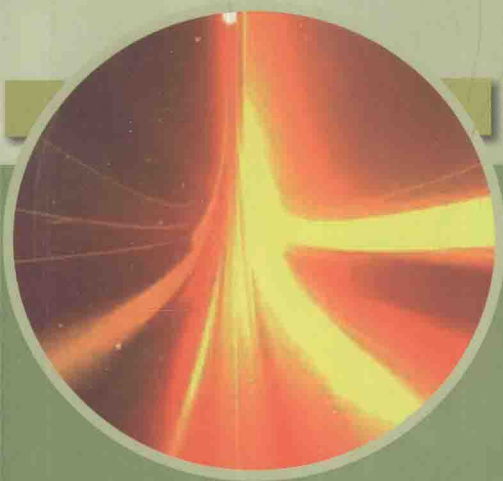


机械工程

控制理论及新技术研究

JIXIE GONGCHENG

KONGZHI LILUN JI XINJISHU YANJIU



主 编 赵 巍 李焕英 叶振环
副主编 任 伟 朱艺锋 张春友



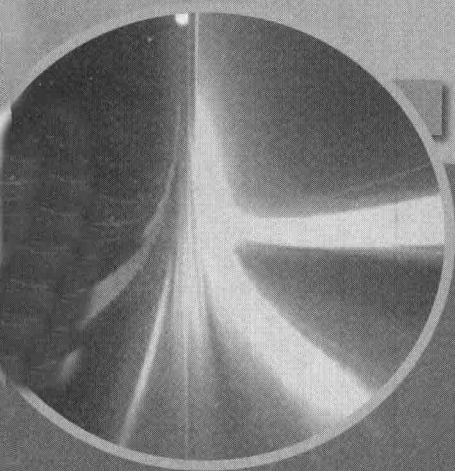
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

机械工程

控制理论及新技术研究

JIXIE GONGCHENG

KONGZHI LILUN JI XINJISHU YANJIU



主 编 赵 巍 李焕英 叶振环
副主编 任 伟 朱艺锋 张春友



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共 12 章主要阐述工程上广为应用的经典控制论中信息处理和系统分析与综合的基本方法,包括:控制系统的数学模型,控制系统的时间响应与误差分析,控制系统的频率特性分析,控制系统的稳定性分析,控制系统的性能分析与校正,非线性控制系统, MATLAB 在控制系统中的应用等内容。在论述上注重深入浅出、精讲多练、简洁实用。重点章节附有大量例题,方便分析理解。

本书可作为机械设计制造及其自动化、材料成形及控制和其他非电类专业学生的参考用书,也可供有关科技人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制理论及新技术研究/赵巍,李焕英,
叶振环主编. —北京:中国水利水电出版社,2014. 6
ISBN 978-7-5170-1908-4

I. ①机… II. ①赵…②李…③叶… III. ①机械工
程—控制系统—研究 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 075571 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:崔 蕾

书 名	机械工程控制理论及新技术研究
作 者	主 编 赵 巍 李焕英 叶振环 副主编 任 伟 朱云峰 叶春友
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www. waterpub. com. cn E-mail: mchannel@263. net(万水) sales@waterpub. com. cn 电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 25 印张 640 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	88. 00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着人类社会的发展,机械应用于在人们的日常生活、生产和交通运输、军事以及科学研究领域,发挥着越来越重要的作用。随着现代科学技术水平的发展,特别是计算机技术、电子技术的飞速发展,人们也开始不断地要求机械能够最大限度地代替人类的劳动,这就为控制理论在机械工程中的广泛应用提供了条件。目前,机械工程控制论所提供的理论和方法已经成为了机械工程类专业的重要理论和方法,并愈来愈多地成为了科技工作者分析和解决问题的有效手段。

现代机械工程控制理论不仅仅是一门重要的学科,它的形成、发展及其对相关理论的论述过程,本身也体现了科学的方法论。本书总结了编者多年来的实践及经验,并借鉴国内外同类优秀成果,力求在阐明机械工程控制理论的基础上,紧密结合机械工程实际,注重加强数理基础和专业知识之间的联系,旨在为将机械控制理论应用于实践打下基础。

总体来说,本书具有以下四个特点。

(1)结合机械工程各专业的需求,从工程应用角度出发,对自动控制的基本概念、基本原理和基本方法进行阐述。

(2)与社会发展相结合,充分利用现代计算机工具——MATLAB 软件,强化了在传统理论教学中的计算机辅助分析与辅助设计。

(3)以机械系统为对象,将自动控制理论与机械系统控制中的一些具体问题有机结合,通过进一步的学习,来消化、理解和掌握控制理论和控制技术。

(4)每个知识点的后面都配有相应的实际应用例题分析,以此来加深对所学知识的理解,并做到与实践相联系。

全书共分 12 章:第 1 章绪论,主要阐述机械工程控制的相关理论、研究对象、工作原理、系统分类及基本要求等知识点;第 2 章控制系统的数学模型,主要对控制系统数学模型的相关知识进行叙述,包括控制系统的微分方程、传递函数、相似原理、结构图及简化等;第 3 章控制系统的时间响应,主要包括一阶系统、二阶系统及高阶系统的时间响应等内容;第 4 章控制系统的频域响应分析,包括典型环节的频域特性,最小相位系统和非最小相位系统等内容;第 5 章控制系统的稳定性分析,重点对系统稳定性的概念及条件、劳斯稳定判断、奈奎斯特稳定判断、系统的相对稳定等进行了叙述;第 6 章控制系统的根轨迹分析,讲述根轨迹的特性及绘制原则,并对广义根轨迹进行了说明;第 7 章控制系统的综合校正,包括系统的性能指标及系统校正,其中重点是各种校正方法,如串联校正、并联校正及 PID 校正等;第 8 章、第 9 章对线性和非线性控制系统进行了分析研究,并对它们的设计方法加以讨论;第 10 章现代控制与系统辨识理论;第 11 章 MATLAB 在控制工程中的应用,讲述了 MATLAB 仿真软件的概念及其在控制系统时域、频域分析中的应用方法;第 12 章控制系统的计算机仿真研究,进一步对控制系统的仿真技术进行了探讨与总结。

由于编者水平和能力有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,真诚地欢迎大家提出批评和改进意见,以帮助我们更好地完善本书。

编 者

2014 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械工程控制理论概述	1
1.2 控制系统的工作原理及组成	3
1.3 控制系统的类型	11
1.4 对控制系统的要求	15
第 2 章 控制系统的数学模型	17
2.1 控制系统的微分方程	17
2.2 拉普拉斯变换及其逆变换	24
2.3 控制系统的传递函数	26
2.4 系统方框图及其简化方法	37
2.5 信号流程图和梅逊公式	45
第 3 章 控制系统的时域响应分析	47
3.1 时间响应及典型输入信号	47
3.2 一阶系统的时间响应	52
3.3 二阶系统的时间响应	55
3.4 控制系统的时域性能指标	60
3.5 高阶系统的时间响应	65
3.6 稳态误差分析	68
第 4 章 控制系统的频域响应分析	75
4.1 频率特性概述	75
4.2 典型环节的频率特性	83
4.3 开环频率特性曲线的绘制方法	95
4.4 闭环控制系统的频率特性	98
4.5 最小相位系统与非最小相位系统	99
4.6 闭环控制系统	101
第 5 章 控制系统的稳定性分析	105
5.1 系统稳定的概念及条件	105
5.2 劳斯稳定判据	106
5.3 奈奎斯特稳定判据	111
5.4 伯德稳定判据	122
5.5 控制系统的相对稳定性分析	125
第 6 章 控制系统的根轨迹分析	131
6.1 根轨迹与系统特性	131

6.2	根轨迹的幅值条件及相角条件	133
6.3	根轨迹绘制规则	134
6.4	广义根轨迹分析	140
第 7 章	控制系统的综合校正	148
7.1	系统综合与校正概述	148
7.2	控制系统的串联校正	163
7.3	控制系统的 PID 校正	172
7.4	控制系统的反馈和顺馈校正	179
第 8 章	线性离散控制系统	189
8.1	离散控制系统概述	189
8.2	信号的采样与保持	196
8.3	z 变换与反变换	205
8.4	线性离散控制系统的数学模型	213
8.5	线性离散控制系统的传递函数	214
8.6	线性离散控制系统的性能分析	225
8.7	线性离散控制系统的设计与校正	232
第 9 章	非线性控制系统	240
9.1	非线性控制系统概述	240
9.2	描述函数法	248
9.3	相平面法	256
第 10 章	现代控制理论及系统辨识理论	274
10.1	现代控制理论	274
10.2	系统辨识理论	285
第 11 章	MATLAB 在控制工程中的应用	291
11.1	MATLAB 仿真软件概述	291
11.2	控制系统数学模型的 MATLAB 描述	310
11.3	控制系统的性能分析	316
11.4	控制系统的校正设计	321
第 12 章	控制系统的计算机仿真研究	332
12.1	计算机仿真概述	332
12.2	控制系统仿真的数学模型	340
12.3	连续系统的数字仿真	347
12.4	采样控制系统的数字仿真	373
12.5	控制系统的优化设计及仿真	381
参考文献		394

第 1 章 绪论

1.1 机械工程控制理论概述

1.1.1 机械控制理论的发展历程

美国科学家、控制论创始人维纳(N. Wiener)在对火炮自动控制的研究中发现了极为重要的反馈(feed-back)概念,并于 1948 年出版了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书,由此奠定了控制论这门学科的基础。维纳发现,机器系统、生命系统及社会经济系统都有一个共同的特点,即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制,也就是控制论的信息、反馈与控制三个要素,即控制论的中心思想。在控制论建立后不久,其中心思想便迅速渗透到其它学科领域,大大推动了近代科学技术的发展,并派生出许多新的边缘学科。1954 年,我国著名科学家钱学森所著的《工程控制论》一书出版,他运用控制论的思想和方法把控制论推广到工程领域。而机械工程控制就是工程控制论在机械工程中的应用。

近年来,自动控制技术在农业、工业、国防和科学技术中的应用越来越广泛,它为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法,使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的人工操作中解放出来,大大提高了生产率。日常生活中,人们需要自动控制室内的温度和湿度;交通方面需要自动控制汽车和飞机使其正常运行;机械加工方面需要按照预设的工艺程序自动控制运行,加工出预期的工业产品;航空航天方面的自动攻击目标的导弹发射系统、无人驾驶的飞机,等等,这些都是自动控制系统的实例。

现代化工业生产的主要目的是探求最低成本、最低能耗、最高产品质量、最大效益及最大可靠性等最佳状态,对于机械系统和过程(例如生产过程、锻压、切削过程、焊接和热处理过程等)也要求最佳控制。因此,控制理论基础在机械系统以及机械工业生产中,得到了广泛的应用。自动控制技术之所以能有如此广泛的应用,是因为它使生产过程具有高度准确性,节约能源和降低材料消耗,并且能有效提高产品的性能和质量;极大地提高劳动生产率,同时改善劳动条件,减轻工人的劳动强度;在国防方面,能有效提高各种武器装备的现代化水平,增强攻击和防御能力等。随着电子技术和计算机技术的高速发展使其在自动控制领域的作用和地位日益突出,绝大部分现代机械系统都已离不开电子和计算机控制设备。

机械工程控制理论是研究以机械工程技术为对象的控制理论问题,是研究这一工程领域中广义系统的动力学问题,也是研究系统、输入及输出三者之间的动态关系。控制论的发展过程大体可分为三个阶段。

(1)经典控制(Classical Control)理论阶段

20 世纪 40 至 50 年代为经典控制理论发展时期,是在复数域内以传递函数为基础的理论体系,主要研究单输入、单输出、线性定常系统的分析与设计。“经典控制理论”作为控制论的基础,在大多数实际工程中仍然是极为重要的,相当多的工程问题用它来解决还是非常有效的。

(2)现代控制(Modern Control)理论阶段

20 世纪 60 至 70 年代为现代控制理论发展时期,是在时间域内以状态方程为基础的理论体系,主要研究多输入、多输出系统的动态历程。该系统可以是线性的或非线性的,定常的或时变的,也可以是连续的或离散的,确定的或随即的。

(3)大系统与智能控制(Large Scale System & Intelligent Control)理论阶段

20 世纪 70 年代末至今为大系统与智能控制理论发展时期,是自动控制理论发展的高级阶段,主要研究那些用传统方法难以解决的具有不确定性模型、高度非线性及复杂要求的复杂系统的控制问题。“大系统理论”是控制理论在广度上的拓展,用控制与信息观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和控制问题;而“智能控制理论”是控制理论在深度上的挖掘,通过研究、模拟人类活动的机理,研究具有仿人智能的工程控制和信息处理问题。目前,智能控制理论已经形成了模糊控制、专家系统和神经网络控制等重要的分支。

制造第一把石刀是人类文明的开始,与此同时,也开始了“制造工艺过程”,开始了对制造工艺过程的“控制”。这时,对劳动着的人类而言,执行装置是手,用以操作生产工具—石刀,检测装置是感觉器官,感受着制造过程中的各种信息,中枢控制装置是人脑,对所获得的信息进行分析、比较,作出判断、决策。

由此可见,即使在极为原始的制造工艺过程中,也已经有了执行、检测、控制诸环节,它们构成一个闭环的自动控制系统。我们可以发现在制造工艺不断发展的过程中,一个明显的特点是,人逐步从对制造过程诸环节的直接参与中解脱出来。首先从加工(或执行)中;其次从检测中;最后是从直接的控制中解脱出来。伴随这一解脱过程的,是制造赖以进行的基础由本能与经验逐步转移到理性与科学上来。这就是说,人们对制造过程规律性的认识逐步深化的历史是制造过程发展的历史。“实践没有止境,创新也没有止境。”制造也正在从制造技术向制造科学发展。该历史发展的主要线索是,从对制造过程片面的局部的认识发展到系统的认识;从对制造过程的每一环节只作为一个孤立的环节来认识发展到作为一个大系统中的子系统来认识;从对制造过程的每一环节静态的定性的认识发展到动态的定量的认识。

控制理论发展的历程反映了人类社会由机械化步入电气化,继而走向自动化、信息化和智能化的发展特征。表 1-1 简要列出了机械系统自动化程度发展历程。由表 1-1 可以看出,机械的发展是一个由简单到复杂的发展过程。随着机械的发展,机械所能完成的工作越来越复杂,在越来越大的程度上帮助人完成越来越高级的工作。

表 1-1 机械系统自动化程度发展历程

项目	使用目的	传感与检测	决策与控制	发展程度	典型例子
简单工具	工作方便、提高效率、省力	人的五官	人	单一操作	扳手、锤子、螺丝刀
简单机械	完成简单工作	人的五官	操作者	简单机械化	小型提升机、除草机
复杂机械	完成复杂工作	人的五官	技术工人	复杂机械化	普通机床、普通汽车
自动机器	自动完成确定工作	传感器	人与控制器	自动机器	数控机床、工业机器人
智能机器	无人操作,自主完成任务	多种传感器	智能控制器	自主机器	各类智能机器人

1.1.2 机械工程控制的研究对象和任务

由上面的简单介绍可知,工程控制论所要研究的问题在机械制造领域中是极为广泛的。譬如,在机床数控技术中所要解决的问题是,数控机床接受指令后,机床的有关运动应符合要求。此处,调整到一定状态的仪器本身是系统,外界条件是输入,测量结果是输出。显然,这里所研究的问题是系统及其输入、输出三者之间的动态关系。再如,在现代测试技术中应充分注意到,某一仪器调整到什么状态方能保证在给定的外界条件下,获得精确的测量结果,这仍然是前述三者之间的动态关系问题。

正如前述,所研究的系统是广义系统。而这个系统可繁可简,可大可小,甚至可“实”可“虚”,完全由研究的需要而定。比如说,当研究某一产业集团(包括所谓的“虚拟企业”或“企业动态联盟”)或某一机器制造厂应如何调整产品生产以适应市场变化的需要时,则此集团或此工厂就是一个广义系统,输入是市场情况,输出是产品生产情况;研究此厂的某台机床在切削加工过程中的动力学问题时,切削加工过程本身是一广义系统;研究此台机床所加工的工件的某些质量指标时,这一工件本身可作为一广义系统;而研究此台机床的操作者在加工过程中的作用时,操作者的思维或操作者本身等则可作为一广义系统。

控制论研究的对象是一个控制系统,该系统可以是一些部件的组合(这些部件组合完成一定的任务),也可以是一个比较抽象的动态现象(如经济学中的现象),可以是地理学、生物学、人类学等各个方面的系统。而机械工程控制研究的对象,则特指机械工程领域的系统,如机器人、数控机床等。

工程控制理论实质上是研究工程技术中广义系统中的动力学问题,具体地说,它研究的是工程技术中的广义系统在一定的外界条件(输入或激励,包括外加控制与干扰)作用下,从系统的一定的初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性(由系统的结构与参数所决定的特性)所决定的整个动态历程,并同时研究这一系统、输入和输出三者之间的动态关系。

工程控制理论主要研究系统与输入、输出之间的动态关系,其研究任务内容大致可归纳为如下五个方面:

- 1)当系统已定、输入已知时,求出系统的输出,并通过输出来研究系统本身的有关问题,即系统分析问题。
- 2)当系统已定时,确定系统输入,并且所确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,即最优控制问题。
- 3)当输入已知时,确定系统,并且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,即最优设计问题。
- 4)当输出已知时,确定系统,并识别输入或输入中的有关信息,即滤波与预测问题。
- 5)当输入与输出均为已知时,确定系统的结构与参数,建立系统的数学模型,即系统识别或系统辨识问题。

1.2 控制系统的工作原理及组成

机械工程自动控制系统简称机械控制系统,它是一种自动控制系统,它的控制对象是机械。而不是指专门通过机械装置产生控制作用的系统。在机械自动控制系统的初级阶段或简单的机

械自动控制系统中,常用机械装置产生自动控制作用,如图 1-1 所示的蒸汽机转速控制系统和图 1-2 所示的水位控制系统。

在图 1-1 所示的蒸汽机转速控制系统中,控制的目的是使蒸汽机的转速 n 保持在一个恒定数值上,这个恒定数值称为控制系统的目标值,转速称为控制系统的被控量或控制量。如果给蒸汽机通入额定的蒸汽流量 Q ,负载为额定负载不变,又没有其他干扰,则蒸汽机的转速为额定转速 n ,即目标值。但在负载变化的情况下,蒸汽机的转速必然跟着变化。为了控制系统的被控量 n ,保持转速为目标值,采用离心机构检测被控量 n 。离心机构连接小球的连杆张开角度的大小取决于小球离心作用的大小,蒸汽机的转速越大,小球离心作用越大,所产生的张开角度越大,所以离心机构称为控制系统的检测装置。检测被控量的检测装置是自动控制系统必须有的部分。

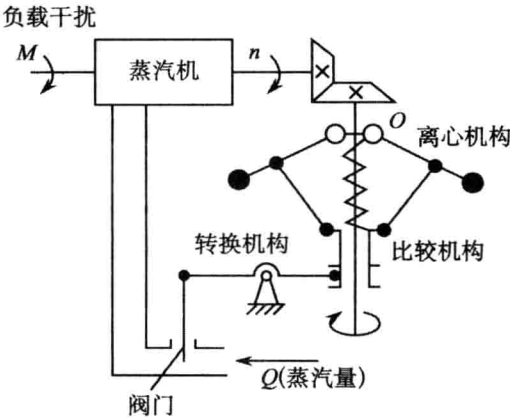


图 1-1 蒸汽机转速控制系统

如果负载增大,转速变小,使离心机构连接小球的连杆的张开角度变小,离心机构下部的滑块位置向下移动,通过由杠杆构成的转换机构增加阀门打开的程度,从而加大蒸汽量,提高蒸汽机的转速;如果负载减小,转速提高,增大了小球连杆的张开角度,使离心机构下部的滑块位置向上移动,通过转换机构减小阀门的开度,从而减小蒸汽量,降低蒸汽机的转速。

在图 1-2 所示的水位自动控制系统中,控制的目的是使水位保持在一定的高度上。水位高度是被控量。水位高度是通过浮球装置检测的,所以浮球装置是该系统的检测装置。浮球随水面高度的上升或下降通过杠杆转换成阀门的开闭程度。

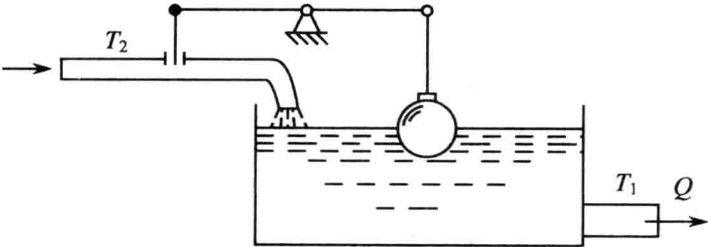


图 1-2 水位控制系统

通过以上两个用机械装置产生自动控制作用的例子可以看出自动控制系统自动调节的基本原理。同时通过分析也可以看到,用机械装置自动调节作用的调节范围、精度和可靠性都是很有

限的。由于科学技术的发展,机械系统变得越来越复杂,用机构作为自动控制系统的调节装置已不能满足对系统越来越高的要求。电子学和电子技术的发展,使自动控制系统的检测手段和控制方法产生了巨大的变革。原来用机械方法构成的检测装置改用各种电子元器件构成的传感器。现代传感器不但体积小、重量轻、精度高,而且大大地增加了使用寿命和可靠性。与机械调节装置相比,由电子元器件构成的控制器以及放大器能完成复杂得多、先进得多的控制功能。在现代机械工程自动控制系统中,总是把机械与电子融合在一起,构成机电一体化系统。因此对机械工程自动控制系统进行性能分析和设计时,必须把机械系统和电子控制系统作为统一的整体来考虑。下面举例说明用电子设备构成控制系统的机械自动控制系统的基本组成、基本结构、工作原理和一些基本定义。这个例子可以作为学习后面各章自动控制理论的实际背景。有了这个背景,就会明确学习自动控制理论的具体意义。

如图 1-3 所示为一个工作台的位置自动控制系统,系统的控制功能是:操作者(人)通过指令电位器设置希望的工作台位置,工作台将自动运动到操作者所指定的位置上去。如果这个系统是一个性能良好的自动控制系统,工作台的运动是稳定、快速和精确的;如果这个系统是一个性能差的自动控制系统,工作台的运动可能是不稳定的,比如工作台在指定位置附近来回振动,或者可能运动速度缓慢,或者不能准确地运动到指定位置。问题是:如何才能获得性能良好的自动控制系统呢?大体上要解决两大方面的问题:高水平的设计和精心的制造。在高水平的设计中,特别强调的是,要根据对系统动态特性的要求,对机械系统进行动力学设计和根据自动控制理论对控制系统进行多次设计—仿真—设计的过程,力求使整个系统达到最佳状态。这就需要掌握自动控制方面的知识。当然,高水平设计还包括采用各种现代设计方法,特别是三化设计(动态优化、智能化和可视化)的综合设计法对提高系统设计水平和提高产品质量具有重要的指导意义。此外选择先进的、具有足够精度和高可靠性的元器件,较高的性能价格比,友好的人机界面以及赏心悦目的造型等都是要反复考虑的。

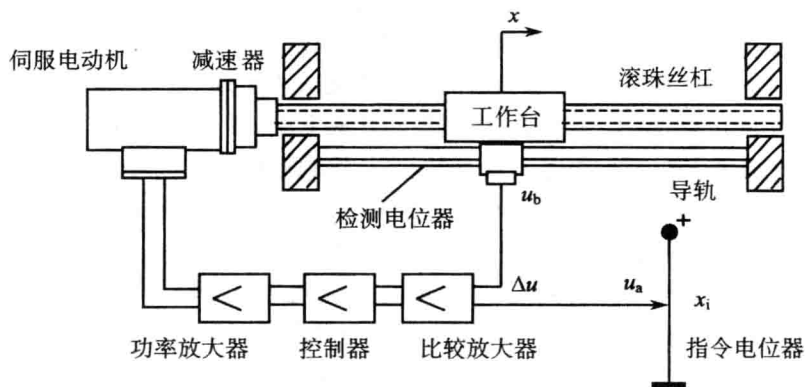


图 1-3 工作台位置控制系统

在图 1-3 中,系统的驱动装置是直流伺服电动机,它是将电能转换成机械运动的转换装置,是连接机和电的纽带。功率放大器提供给直流伺服电动机定子的直流电压为一定值,形成一个恒定的定子磁场。如果转子由永久磁铁制成,则称这种电动机为永磁直流伺服电动机。电动机的转子电枢接受功率放大器提供的直流电,此直流电的电压决定电动机的转速,电流的大小与电动机输出的扭矩成正比。

工作台的传动系统由减速器、滚珠丝杠和导轨等组成。减速器起放大电动机输出扭矩的作用。伺服系统中常用的有行星轮减速器和谐波减速器等。行星轮减速器有背隙,改变转动方向时电动机有空回程,小背隙高精度的行星轮减速器价格较高。波导减速器无背隙,但价格高,使用寿命较低。滚珠丝杠和导轨是将电动机的转动精确地转换成直线运动的装置。丝杠与减速器输出轴相连,滚珠丝杠的螺母与工作台相连。直流伺服电动机经减速器驱动滚珠丝杠转动,工作台在滚珠丝杠的带动下在导轨上滑动。滚珠丝杠较普通丝杠的优点不仅精度高,而且无回程间隙,有专门厂家生产,可以根据需要提供图纸订货。同样,导轨可以根据需要选型订货,如图 1-4 所示。

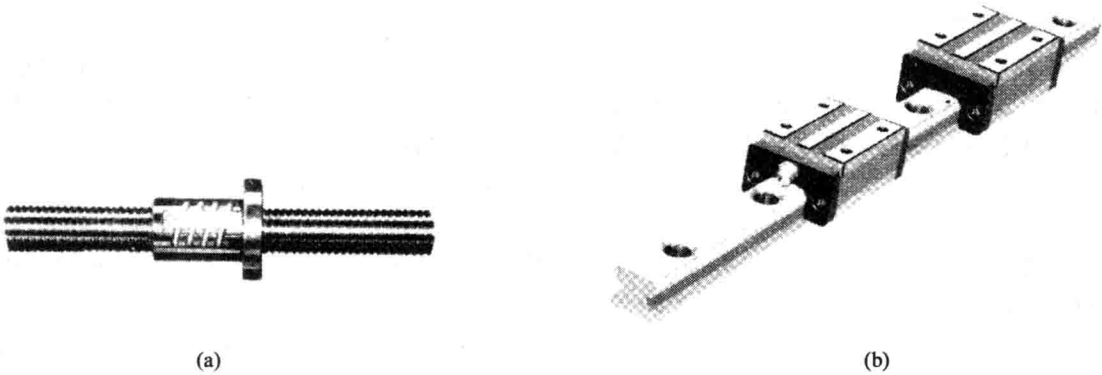


图 1-4 滚珠丝杠

此工作台位置自动控制系统的控制量显然是工作台的位置。和任何其他机械自动控制系统一样,系统拥有输入控制量和检测控制量的环节——指令电位器和检测电位器。电位器按其结构形式可分成转动电位器和直线电位器,本系统中使用的电位器均为直线电位器。

操作者通过指令电位器将指令输入给系统。在本系统中,操作者通过指令电位器指定工作台运动目的位置,指令电位器将操作者指定的位置转化成相应的电压信号输出。检测电位器用来检测工作台的实际位置,将工作台的实际位置转化成电压信号输出。

在指令电位器面板上应有控制量刻度,刻度要与控制量相对应。例如,工作台的位置范围是 0~1 000 mm,在指令电位器面板的全量程上可以均匀地刻上 10 个小格,每个小格代表 100 mm,并在对应的刻度线上标注数字 0,1,2,3,...,10。电位器的 3 个引脚中,1 个是直流稳压电源输入端,将它与电源高电位相连;1 个公共端,即接地端;1 个电压信号输出端。电路接法如图 1-5 所示。设电源电压是 10 V,则刻线刻度板上的每个小格对应 1 V 电压,指令电位器的指针与电压信号输出端相连,这样,指针指到 0 时,输出端电压为 0;指针指到 10 时,输出端电压为 10。如果操作者把指令电位器的指针指到刻度为 6 的位置,就代表让工作台运动到 600 mm 的位置上,这时指令电位器的输出端电压为 6 V。操作者就这样把工作台的位置指令输入给了控制系统。指令电位器是把位置指令转换成电压信号的元件,在控制理论中也称为环节。如果用 x_i 表示给定的位置,即该环节的输入;用 u_a 表示对应的输出电压。这种转换关系可用如图 1-6 所示的框图表示,也可用下式表示

$$K_p = \frac{u_a}{x_i} \quad (1-1)$$

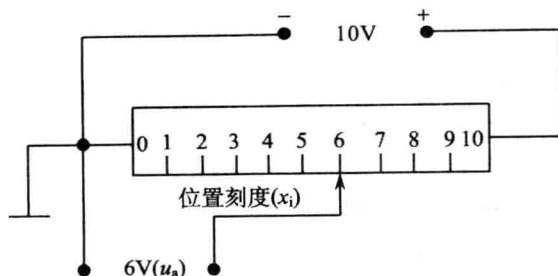


图 1-5 位置指令电位器

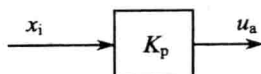


图 1-6 位置指令电位器框图

用于自动控制系统中的电位器应具有很好的线性度。选用具有良好线性度的电位器作为位置指令电位器,使式(1-1)中的 K_p 为常数,这里 $K_p = 0.01 \text{ V/mm}$ 。如果工作台的位置范围是 z , 电位器的电源电压为 u ,则可以根据 $K_p = \frac{u}{x}$ 来计算 K_p 的值,然后就可以根据式(1-1)计算对应 x_i 的 u_a 了。

检测电位器测量长度应与工作台的运动范围一致,供电电压一般与给定电位器的一样。检测电位器可以安装在导轨的侧面,电位器指针与工作台相连,把工作台的位置转换成相应的电压信号。例如,工作台运动到 500 mm 处,检测电位器输出电压为 5 V,如图 1-7 所示。检测到的位置 x 和检测电压 u_b 之间的关系如图 1-8 所示。6 在位置控制系统中,如果系统的输出已经达到控制目标后就不需要能量输入时,如本例的情况,让给定电位器电源电压与检测电位器的一样并使 $K_i = K_p$,是较方便的设计方法。

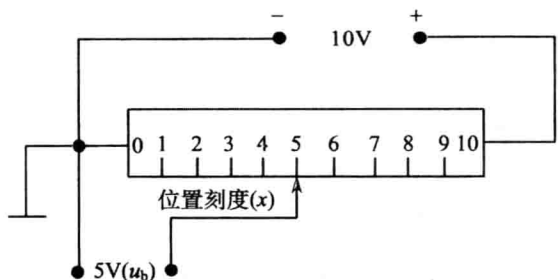


图 1-7 位置检测电位器

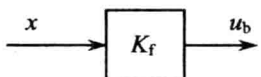


图 1-8 位置检测电位器框图

在了解指令电位器和检测电位器的工作原理以后,就不难理解如图 1-3 所示的位置控制系统的控制原理了:工作台的操作者通过指令电位器发出工作台的位置指令 x_i ,指令电位器就对应输出一个电压 u_a 。电压 u_a 与位置 x_i 成正比,比例系数为一常数 K_p 。工作台在导轨上的实际

位置 x 由装在导轨侧向的位置检测电位器检测,位置检测电位器将实际位置 x 转换为电压 u_b 输出。电压 u_b 与工作台的实际位置 x 也成正比,比例系数 $K_f = K_p$ 。电压 u_b 需要反馈回去与 u_a 进行比较(相减),产生偏差电压为 $\Delta u = u_a - u_b$,由比较放大器完成这一工作,并同时可将偏差信号加以放大。比较放大器可由高阻抗差动运算电路实现,如图 1-9 所示。

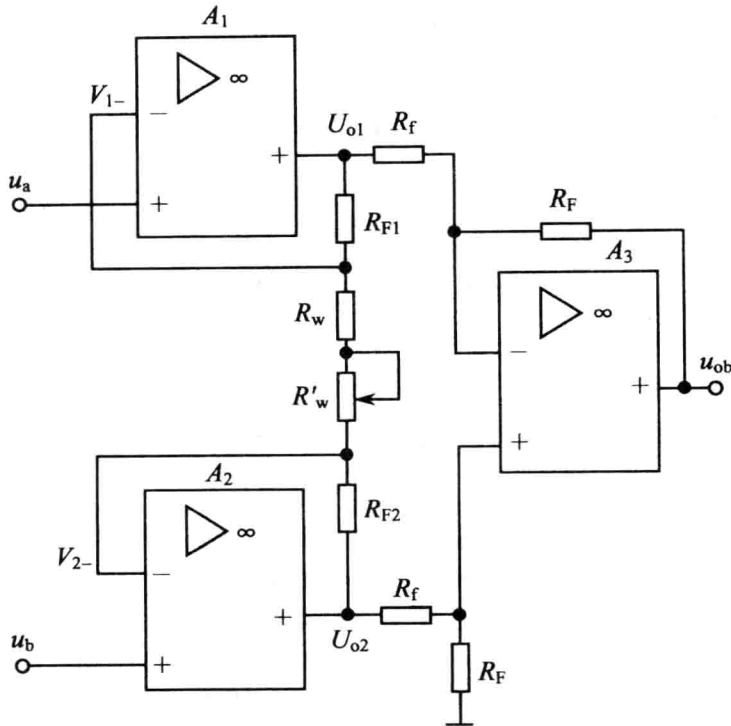


图 1-9 比较放大器电路

由图 1-9 可知,此比较放大器的输入为给定电位器输出 u_a 和检测电位器输出 u_b ,其输出为

$$u_{ob} = K_q (u_a - u_b) = K_q \Delta u \quad (1-2)$$

其中, K_q 为比较放大器的增益

$$K_q = -\frac{R_F}{R_f} \left(1 + \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_w + R'_w} \right)$$

这样,当 x 和 x_i 有偏差时,对应偏差电压为 $\Delta u = u_a - u_b$,该偏差电压在比较放大器中被放大成 $K_q \Delta u$ 。经比较放大器放大后的偏差信号进入控制器,控制器中加一个反相器就可以将 K_q 中的负号“—”去掉。通过控制器处理后的信号经功率放大器放大驱动直流伺服电动机转动。电动机通过减速器和滚珠丝杠驱动工作台向给定位置 x_i 运动。随着工作台实际位置与给定位置偏差的减小,偏差电压 Δu 的绝对值也逐渐减小。当工作台实际位置与给定位置重合时,偏差电压 Δu 为零,伺服电动机停止转动。当工作台位置 x 和给定位置 x_i 相等时, u_b 和 u_a 也相等,没有偏差电压,也就没有电压和电流输入电动机,工作台不改变当前位置。当不断改变指令电位器的给定位置时,工作台就不断改变在机座上的位置,以保持 $x = x_i$ 的状态。在系统机械结构设计合理的情况下,控制器的设计是系统性能好坏的关键。好的控制器设计需要自动控制理论知识和丰富的经验。

为了简化系统的描述,进一步分析系统的性质以及进行系统设计,在自动控制理论中,常用方块图表示系统的结构及工作原理。上面介绍的工作台位置控制系统可用如图 1-10 表示。图中的比较环节和前置放大器实际上由比较放大器一个元件完成,为了更清楚地描述系统的原理,将分别画出来。图中每一个方框代表系统中的一个元器件,也称为一个环节,也可以代表几个环节按一定的方式连接在一起的部件,也可以用一个方框表示一个系统。在一个方框图中,方框之间用有向线段连接,表示环节之间信息的流通情况。



图 1-10 工作台位置控制原理方块图

由图 1-10 可知,系统的输入量为系统的控制量,是工作台的希望位置 x_i ,是通过指令电位器给定的,所以指令电位器为系统的给定环节。给定环节是给定输入信号的环节。此系统的输出量为工作台的实际位置 x 。系统通过检测电位器检测输出量,检测电位器为测量环节。测量环节的输出信号要反馈到输入端,经比较环节与输入信号比较得出偏差信号 Δu 。用于比较模拟量(如连续的电压信号)的比较环节常用运算放大器配以外电阻电路构成,在比较两个模拟量的同时,对它们的差进行一定的放大,即图中的前置放大器。但是,要比较的物理量必须是同种物理量。如若测量环节的输出信号与系统输入信号不是同一物理量,则需将其转化成同种物理量,以便比较。由前置放大器输出的信号经控制器、功率放大器后驱动伺服电动机。功率放大器必须线性度好、工作频率范围宽和响应迅速快。现代功率放大器采用脉宽调制(PWM)技术,保证了自动控制系统对功率放大器的要求。线性度好的放大器在控制系统中作为比例环节。直流伺服电动机为执行环节。执行环节驱动被控对象,使其输出预定的输出量。系统的控制量被检测并反馈到输入端,与输入量比较,产生偏差信号,偏差信号控制系统的控制量,构成一个闭环,称这样的系统为闭环控制系统。精确的自动控制系统大多数采用闭环控制。

若系统控制量未被检测,未反馈到输入端参加控制,也没有其他与控制量相关的输出量被检测和参与控制,则称这样的系统为开环控制系统。对于运动控制系统,用步进电动机做驱动的开环系统也能实现较好的系统性能。而对于像温度、压力、流量等,采用开环控制就很难保证系统性能了。

当系统的自动调节作用使控制量达到给定值时,称系统达到平衡状态。当系统达到平衡状态时,比较环节输出的偏差有两种情况:一种为零,一种不为零。在上述工作台位置自动控制系统中,随着工作台位置不断接近给定位置,偏差电压 Δu 不断减小,当工作台位置达到给定位置时,系统调节到平衡状态,偏差电压 Δu 为零。另一种情况是当系统的控制量达到预定值时,起控制作用的偏差为一确定值,以维持系统的平衡状态。工作台的速度控制就属于这种情况,如图 1-11 所示。

系统的控制功能是,操作者通过指令电位器设置希望的工作台运动速度,工作台将在导轨上自动地按所设定的速度运动。

要控制工作台的运动速度,就需要检测并反馈工作台的运动速度。检测环节由测速发电机和比例调压电路组成,检测环节的输出电压 u_b 与工作台运动速度成比例关系,即

$$u_b = k_v v \quad (1-3)$$

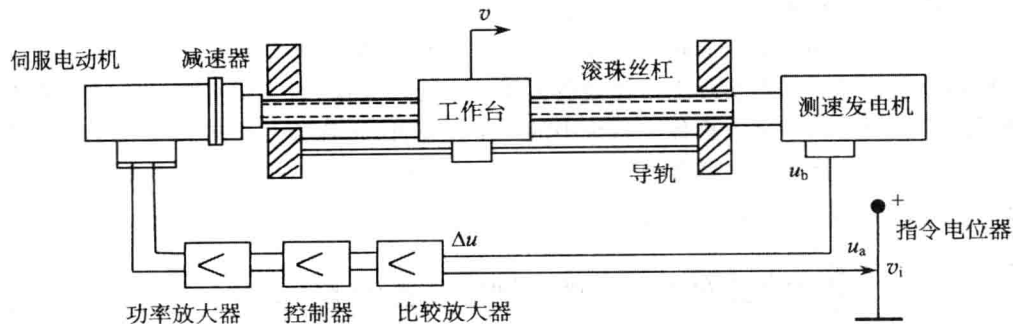


图 1-11 工作台速度控制系统

其中, k_{v0} 为测速反馈系数, 是一个可以通过检测环节中的比例调压电路调解的系数, 单位为 Vs/mm , 其值为工作台运动速度为 1 mm/s 时的反馈电压。

如图 1-12 所示, 系统通过指令电位器发出工作台运动速度指令 v_i , 指令电位器的输出是电压 u_a , 它与工作台的运动速度指令 v_i 对应。电压 u_a 与速度 v_i 成正比, 设比例系数为 $K_{vi} = \frac{u_a}{v_i}$ 。在实际设计时, 选取 K_{vi} 使 $K_{vi} > K_{v0}$ 。这样, 当工作台速度 $v = v_i$ 时, 也存在偏差电压 $\Delta u = u_a - u_b = K_{vi}v_i - K_{v0}v_b = (K_{vi} - K_{v0})v_i$ 。在设计系统时, 调整放大器的放大倍数, 使得工作台速度秒和给定速度秒 i 相等。显然, 当偏差电压 Δu 为零时, 电动机将停止转动, 工作台速度为零。

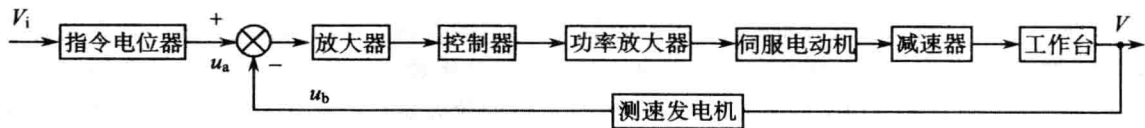


图 1-12 工作台速度控制原理图

此系统的速度自动控制作用在于:

如果系统受到某种干扰作用引起工作台速度变化, 如速度小于给定值 v_i , 检测环节输出的反馈电压 u_b 降低, 偏差电压 $\Delta u = u_a - u_b$ 相应增大, 使伺服电动机转速增高, 工作台速度提高, 直到工作台速度为给定值 v_i 时止, 即调节达到了平衡状态; 反之, 如果工作台速度大于 v_i , 则反馈电压 u_b 增高, 偏差电压 $\Delta u = u_a - u_b$ 相应降低, 使伺服电动机转速减低, 工作台速度减小, 直到工作台速度为给定值 v_i 时止。这样, 工作台的速度只取决于给定的输入电压 u_a , 而不受干扰的影响。

如果给定速度 v_i 提高, 比如是原来速度的 2 倍, 则指令电位计输出电压 u_a 提高到原来的 2 倍, 偏差电压 Δu 提高, 电动机的转速提高, 工作台速度提高。由于工作台速度提高, 反馈电压也随之提高。当工作台的速度达到新设定值时, 反馈电压为原来的 2 倍, 偏差电压也为原来的 2 倍, 系统达到了新的平衡。

在以上两个例子中, 系统的输出量不断地跟随系统的输入量, 这种输出量能够迅速而准确地跟随输入量的系统称为随动系统。导弹、火炮和卫星跟踪天线等自动定位系统以及船用随动舵等都属于随动系统。具有机械量(如位移、速度、加速度)输出的随动系统称为伺服系统。因此, 机械工程中的随动系统绝大多数为伺服系统。

1.3 控制系统的类型

1.3.1 开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统

按有无反馈划分可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统三类。

1. 开环控制系统

如果自动控制系统的输出端和输入端之间不存在反馈通道,这样的系统称为开环控制系统,开环控制系统的输出量对系统的控制作用没有影响。开环控制系统的特点是:系统仅受输入量和扰动量控制,输入—输出关系需要经过事先准确调好;信号是单向传递的,输出端和输入端之间不存在反馈回路;在整个控制过程中输出量对系统的控制不产生任何影响,无抗干扰能力。开环控制系统的优点是:稳定、简单、可靠。若组成系统的元件特性和参数值比较稳定,并且外界干扰较小,则开环控制能够保持一定的精度。其缺点是:无自动纠偏能力,精度通常较低。一旦系统受到干扰,使得输出偏离了正常值,系统便不能使输出返回到预设值。故一般开环控制系统很难实现高精度的控制。图 1-13 表示了开环控制系统输入量与输出量之间的关系。

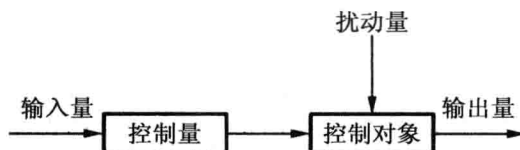


图 1-13 开环控制系统示意图

2. 闭环控制系统

反馈控制系统也称为闭环控制系统,控制系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,即输出量对控制作用有直接影响。闭环控制系统的特点是:输出端和输入端之间存在反馈回路,有反馈检测环节,输出量对控制过程有直接影响;受偏差控制,有抗干扰的能力。闭环控制系统的优点是:对外部扰动和系统参数变化不敏感,精度高,不管出现什么干扰,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。其缺点是:系统性能分析与设计比较困难,存在稳定、超调、振荡等问题。该系统是通过检测偏差来纠正偏差,或者说是靠偏差进行控制。在工作过程中系统总会存在着偏差,由于元件的惯性(如负载的惯性等),很容易引起振荡,使系统不稳定。因此,精度和稳定性是在闭环系统中存在的一对矛盾。闭环控制系统中闭环的作主要是应用反馈减少偏差。图 1-14 表示了闭环控制系统输入量、输出量和反馈量之间的关系。

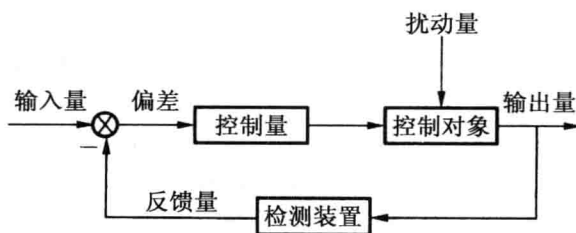


图 1-14 闭环控制系统示意图