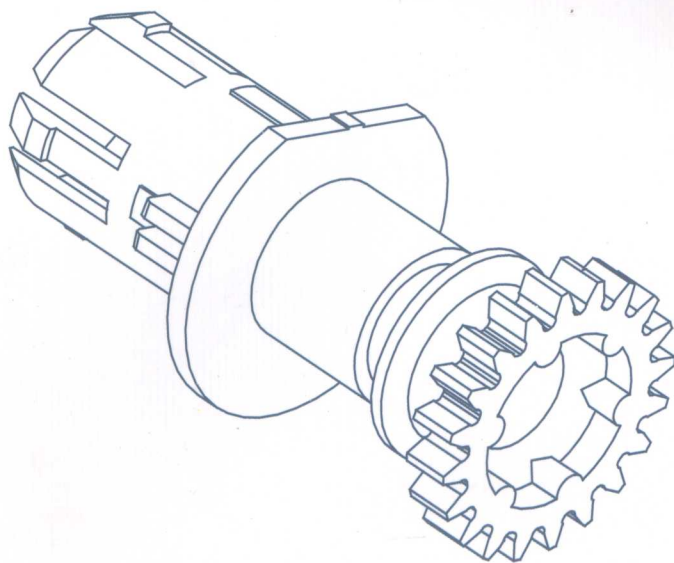


普通高等院校机械工程学科“十五”规划教材

机械控制 工程基础

JIXIE KONGZHI
GONGCHENG JICHU

主 编 廉自生
副主编 杨 康 周 巍



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TP273
662

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材

机械控制工程基础

主 编 廉自生

副主编 杨 康 周 巍

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共分8章,主要内容包括:反馈控制的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统时间响应及稳态误差分析、控制系统的频率特性分析、控制系统的稳定性、系统的综合与校正、采样控制系统、控制系统的MATLAB分析与设计。在简要阐明经典控制理论基本内容的基础上,对广泛应用的PID调节器、采样控制系统及基于MATLAB的控制系统的分析与设计等内容适当增加了篇幅。

本书主要适用于机械设计、制造及自动化专业大学本科生使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/廉自生主编. —北京:国防工业出版社,2008.8

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-05838-3

I. 机... II. 廉... III. 机械工程—控制系统—高等学校—
教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第098699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100044)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 362 千字

2008年8月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 29.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材 编委会名单

名誉主任	艾 兴	山东大学
	王先逵	清华大学
主 任	吕 明	太原理工大学
副 主 任	庞思勤	北京理工大学
	朱喜林	吉林大学
秘 书 长	杨胜强	太原理工大学
委 员	吴宗泽	清华大学
	潘宏侠	中北大学
	轧 刚	太原理工大学
	任家骏	太原理工大学
	陈 明	北华航天工业学院
	谭晓兰	北方工业大学
	李德才	北京交通大学
	杨 康	佳木斯大学
	石望远	北华航天工业学院
	王好臣	山东理工大学
	王卫平	东莞理工学院
	张平宽	太原科技大学

序

国防工业出版社组织编写的“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”即将出版,欣然为之作“序”。

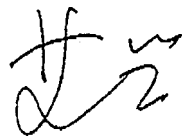
随着国民经济和社会的发展,我国高等教育已形成大众化教育的大好形势,为适应建设创新型国家的重大需求,迫切要求培养高素质专门人才和创新人才,学校必须在教育观念、教学思想等方面做出迅速的反映,进行深入教学改革,而教学改革的主要内容之一是课程的改革与建设,其中包括教材的改革与建设,课程的改革与建设应体现、固化在教材之中。

教材是教学不可缺少的重要组成部分,教材的水平将直接影响教学质量,特别是对学生创新能力的培养。作为机械工程学科的教材,不能只是传授基本理论知识,更应该是既强调理论,又重在实践,突出的要理论与实践结合,培养学生解决实际问题的能力和创新能力。在新的深入教学改革、新课程体系的建立及课程内容的发展过程中,建设这样一套新型教材的任务已经迫切地摆在我们面前。

国防工业出版社组织有关院校主持编写的这套“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”,可谓正得其时。这套教材的特点是以编写“有利于提高学生创新能力培养和知识水平”为宗旨,选题论证严谨、科学,以体现先进性、创新性、实用性,注重学生能力培养为原则,以编出特色教材、精品教材为指导思想,注意教材的立体化建设,在教材的体系上下功夫。编写过程中,每部教材都经过主编和参编辛勤认真的编写和主审专家的严格把关,使本套教材既继承老教材的特点,又适应新形势下教改的要求,保证了教材的系统性和精品化,体现了创新教育、能力教育、素质教育教学理念,有效激发学生自主学习能力,提高学生的综合素质和创新能力,为培养出符合社会需要的优秀人才服务。丛书的出版对高校的教材建设、特别是精品课程及其教材的建设起到了推动作用。

衷心祝贺国防工业出版社和所有参编人员为我国高等教育提供了这样一套有水平、有特色、高质量的机械工程学科规划教材,并希望编写者和出版者在与使用者的沟通过程中,认真听取他们的宝贵意见,不断提高该套规划教材的水平!

中国工程院院士



2008年6月

前 言

本书是根据国防工业出版社高等院校机械工程学科“十一五”规划教材研讨会制订的“机械控制工程基础”课程教学大纲编写的。

本门课程为技术基础课,教学总时数为 42 学时。教材经内容的舍取,适用范围为 36 学时~48 学时的课程。本书主要适用于机制设计、制造及其自动化专业大学本科使用。

本课程应达到的教学目的及要求是:学习运用经典控制理论的基本原理及方法,对机械工程中自动控制问题进行初步的分析与研究;结合后续课程的学习,能对机械工程中的控制系统进行初步设计;同时,学习用经典控制理论的方法研究机械系统动力学问题。

本书由 8 章和附录组成,全书内容概括如下:第 1 章主要介绍反馈控制的基本概念;第 2 章介绍控制系统的数学模型,重点是传递函数的概念和推导方法;第 3 章介绍控制系统时间响应及稳态误差分析;第 4 章介绍控制系统的频率特性分析,讨论了控制系统的 Nyquist 图和 Bode 图;第 5 章讨论了控制系统的稳定性,主要包括 Bode 判据、Nyquist 判据及相对稳定性问题;第 6 章介绍了系统的综合与校正,重点讨论了 PID 控制器的原理和设计方法;第 7 章对采样控制系统做了简单介绍,鉴于计算机控制技术已在机械工程中得到广泛应用,与现有的同类教材相比,本书对采样控制系统的内容介绍有所增加;第 8 章讨论了控制系统的 MATLAB 分析与设计。时至今日, MATLAB 已经发展成为优秀的适合多学科的功能强大的科技应用软件之一,更是控制理论教学和控制系统开发的基本工具和首选平台。因此,本书用了较大的篇幅讨论了如何用 MATLAB 分析和设计控制系统。

本书的内容主要参考了华中科技大学杨叔子及杨克冲教授主编的《机械工程控制基础》、北京机械工业管理学院朱骥北教授主编的《机械控制工程基础》、东南大学王积伟教授主编的《控制工程基础》等教材,这些教材都是目前我国广泛使用的优秀教材。另外在编写思路借鉴了国外一些流行的教材,如:Katsuhiko Ogata 著,卢伯英翻译的《现代控制工程(第一版、第四版)》,Richard C. Dorf 著,谢红卫等翻译的《现代控制系统(第八版)》。在此,谨向以上教材的作者表示衷心的感谢。

本书由太原理工大学廉自生任主编,佳木斯大学杨康、太原理工大学周巍任副主编。廉自生编写了第 1 章,杨康编写了第 2 章与第 3 章;中北大学刘广璞编写了第 4 章;周巍编写了第 5 章及附录 A,太原理工大学许小庆、庞新宇分别编写了第 6 章与第 7 章及附录 B;太原科技大学刘丽琴编写了第 8 章。全书由廉自生和周巍统稿。

本书由太原理工大学权龙教授担任主审,另外还有太原理工大学任芳及赵利平副教授。他们提出了许多宝贵意见,在此特表示衷心的感谢。此外,廉自生教授的2006级的8位研究生在编写过程中付出了辛勤劳动,在此也一并致谢。

限于编者水平,书中缺点与错误在所难免,恳请读者指正。

编者

2008年5月于太原

目 录

第1章 绪论	1
1.1 自动控制系统的基本原理	1
1.1.1 控制系统举例	1
1.1.2 反馈控制系统的构成	4
1.2 自动控制系统的分类	5
1.2.1 按控制系统有无反馈来分	5
1.2.2 按控制作用的特点来分	6
1.3 控制理论发展简史	6
1.4 本课程的教学方法	7
习题	8
第2章 控制系统的数学模型	10
2.1 控制系统的微分方程	10
2.1.1 线性系统与非线性系统	10
2.1.2 线性系统微分方程的列写	11
2.1.3 系统非线性微分方程的线性化	12
2.2 传递函数	15
2.2.1 传递函数的定义	15
2.2.2 传递函数的主要特点	15
2.3 系统的方框图及其联接	16
2.3.1 控制系统的基本联接方式	16
2.3.2 扰动作用下的闭环控制系统	18
2.3.3 方框图的绘制	18
2.3.4 方框图的变换	19
2.3.5 方框图的简化	20
2.4 典型环节的传递函数	21
本章小结	30
习题	31
第3章 时间响应分析	33
3.1 时间响应的基本概念	33
3.1.1 概念	33
3.1.2 时间响应的组成	34
3.1.3 典型输入信号	34

3.2	一阶系统的时间响应	37
3.2.1	一阶系统的单位阶跃响应	37
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	39
3.2.3	一阶系统的单位斜坡响应	39
3.2.4	线性定常系统时间响应的性质	39
3.3	二阶系统的时间响应	40
3.3.1	二阶系统的单位阶跃响应	42
3.3.2	二阶系统的单位脉冲响应	45
3.4	瞬态响应的性能指标	46
3.5	误差分析与计算	51
3.5.1	基本概念	51
3.5.2	稳态误差的计算	53
3.5.3	输入信号作用下的稳态误差与系统的关系	54
3.5.4	干扰引起的稳态误差和系统的总误差	56
	本章小结	57
	习题	58
第4章	频率特性分析	61
4.1	频率特性的基本概念	61
4.1.1	频率响应和频率特性	61
4.1.2	频率特性的求取方法	62
4.2	频率特性的图示法	62
4.2.1	频率特性的极坐标图	62
4.2.2	频率特性的对数坐标图	62
4.3	典型环节的频率特性	63
4.3.1	比例环节	63
4.3.2	惯性环节	64
4.3.3	积分环节	66
4.3.4	微分环节	67
4.3.5	振荡环节	67
4.3.6	延迟环节	70
4.3.7	一阶超前环节	71
4.3.8	二阶微分环节	72
4.4	系统的频率特性	72
4.4.1	系统的开环 Bode 图的绘制	72
4.4.2	系统开环 Nyquist 图的绘制	74
4.5	最小相位系统	75
4.5.1	最小相位系统的定义	75
4.5.2	最小相位系统的特点	75
4.6	频域性能指标	76
4.6.1	闭环频率特性	76

4.6.2	频率特性的特征量	77
4.6.3	二阶系统的频域性能指标	77
4.7	频率实验法估计系统的数学模型	78
4.7.1	频率实验法一般步骤	78
4.7.2	举例	78
	本章小结	80
	习题	81
第5章	系统的稳定性	82
5.1	系统稳定的条件	82
5.1.1	稳定性的概念	82
5.1.2	系统稳定的充要条件	83
5.2	Routh-Hurwitz 稳定判据	84
5.2.1	Hurwitz 稳定判据	84
5.2.2	Routh 稳定判据	86
5.2.3	特殊情况	87
5.3	奈奎斯特稳定判据	89
5.3.1	理论基础	89
5.3.2	Nyquist 稳定判据	93
5.3.3	应用举例	94
5.4	稳定性裕量	102
5.4.1	相位裕量	103
5.4.2	幅值裕量	103
5.4.3	几点说明	104
	本章小结	105
	习题	106
第6章	系统的综合与校正	109
6.1	概述	109
6.1.1	控制系统的性能指标	109
6.1.2	控制系统的校正	111
6.1.3	设计准则	112
6.2	串联校正	113
6.2.1	相位超前校正	113
6.2.2	相位滞后校正	114
6.2.3	相位滞后—超前校正	115
6.3	PID 控制器	116
6.3.1	PD 控制器	116
6.3.2	PI 控制器	121
6.3.3	PID 控制器	126
6.4	反馈和顺馈校正	129
6.4.1	利用反馈校正改变局部结构、参数	130

6.4.2	利用反馈校正取代局部结构	131
6.4.3	顺馈校正	131
	本章小结	132
	习题	132
第7章	采样控制系统	137
7.1	概述	137
7.2	采样过程及采样定理	138
7.2.1	采样过程	138
7.2.2	采样定理	140
7.3	保持器	142
7.3.1	信号的恢复	142
7.3.2	零阶保持器	142
7.3.3	一阶保持器	143
7.4	采样系统的数学模型	145
7.4.1	差分方程	145
7.4.2	脉冲传递函数	147
7.5	采样系统的稳定性分析	155
7.5.1	采样系统稳定的条件	155
7.5.2	代数判据	155
7.5.3	采样系统的稳态误差	158
7.5.4	采样系统的动态性能分析	160
7.5.5	采样系统的校正	165
	本章小结	169
	习题	170
第8章	控制系统的 MATLAB 分析与设计	174
8.1	MATLAB 简介	174
8.1.1	引言	174
8.1.2	表达式及变量	175
8.1.3	矩阵	178
8.1.4	绘图	185
8.2	SISO 系统的数学描述	188
8.2.1	传递函数	188
8.2.2	控制系统的零极点模型	190
8.2.3	传递函数的特征根及零极点图	191
8.2.4	控制系统的方框图模型	192
8.3	SISO 系统的 MATLAB 分析	195
8.3.1	控制系统的时域响应	195
8.3.2	控制系统的频域响应	200
8.3.3	控制系统的稳定性	203

8.4	SISO 系统的 MATLAB 设计	207
8.4.1	相位超前校正	207
8.4.2	相位滞后校正	210
8.4.3	相位滞后—超前校正	213
8.4.4	PID 校正	215
8.5	采样控制系统设计	218
	本章小结	220
	习题	221
附录 A	拉普拉斯变换	223
A.1	拉普拉斯变换	223
A.1.1	拉普拉斯变换的定义	223
A.1.2	典型时间函数的拉氏变换	223
A.2	拉普拉斯变换定理	226
A.2.1	线性定理	226
A.2.2	平移定理	226
A.2.3	微分定理	227
A.2.4	积分定理	228
A.2.5	终值定理	229
A.2.6	初值定理	230
A.2.7	卷积定理	230
A.3	拉普拉斯反变换	231
A.3.1	拉普拉斯反变换	231
A.3.2	部分分式展开法	231
附录 B	z 变换	235
B.1	z 变换的定义	235
B.2	z 变换法	236
B.2.1	级数求和法	236
B.2.2	部分分式法	237
B.3	z 变换的基本定理	238
B.3.1	线性定理	238
B.3.2	实数位移定理	238
B.3.3	复数位移定理	239
B.3.4	初值定理	239
B.3.5	终值定理	239
B.3.6	卷积定理	239
B.4	z 反变换	240
B.4.1	部分分式法	240
B.4.2	幂级数法	241
B.4.3	留数法	242
	参考文献	244

第 1 章 绪 论

“机械控制工程”是研究用控制论的基本原理和方法来解决机械工程中的自动控制问题。自动控制是人类在认识世界和发明创新的过程中发展起来的一门重要的科学技术。依靠它,人类可以从笨重、重复性的劳动中解放出来,从事更富创造性的工作。自动化技术是当代发展迅速,应用广泛,最引人瞩目的高技术之一,是推动新的技术革命和新的产业革命的关键技术。

更为重要的是控制论为机械工程提供了一种方法论,不但从局部,而且从整体和系统的角度来认识和分析问题,进而去改进一个机械系统(或一台装备),以满足生产实际的需要。

本书介绍经典控制理论的基础内容,重点是怎样将其结合于机械工程,建立基本概念、掌握基本理论与方法,并能够进行运用。

1.1 自动控制系统的基本原理

自动控制是在没有人的直接参与下,利用控制器(例如机械装置、电气装置或电子计算机)使生产过程或被控制对象(例如机器或电气设备)的某一物理量(温度、压力、液面、流量、速度、位移等)按预期的规律运行。例如电冰箱自动地控制冰箱中的温度恒定,无塔供水系统保证楼宇自动恒压供水,加工中心根据加工工艺的要求,能够自动地、按照一定的加工程序加工出我们所要求的工件。总之,自动控制系统要解决的最基本问题就是如何使受控对象的物理量按照给定的规律变化。

1.1.1 控制系统举例

1. 温度控制系统

图 1-1 是由人工控制的恒温箱,其控制过程如下:

人工通过测量元件(温度计)观察出恒温箱的温度,与所希望的温度值进行比较,得到实际温度与希望温度的偏差的大小与方向,据此来调节调压器,进行箱温的控制。例如,当箱温低于所希望值时,向右旋转调压器的触头,增加电阻丝的电流,使箱温上升到希望值。反之,当箱温高于所希望值时,向左旋转调压器的触头,以减少电阻丝的电流,使箱温下降回到希望值。这种控制称为人工定值控制。

人在这种控制中的作用是观测、求偏差及纠正偏差,或简称为“求偏与纠偏”。将以上人工的作用由一个自动控制器来代替,于是一个人工调节系统就成为一个自动控制系统。

图 1-2 是恒温箱的自动控制系统。在这个系统中,图 1-1 中的温度计由热电偶代替,

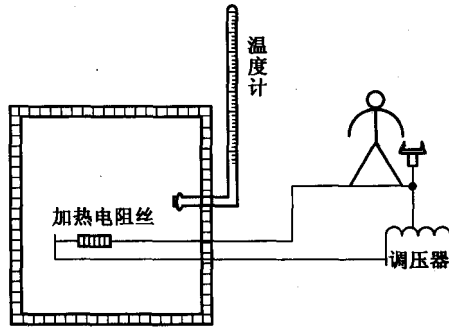


图 1-1 人工控制的恒温箱

并增加了电气、电机及减速器等装置。在这个系统中，热电偶测量出的电压信号 V_2 ，是与箱内温度成比例的，因此，选取电压 V_1 代表箱温的给定信号，并使 V_2 能够反馈回去与 V_1 进行比较，当外界干扰引起箱内温度变化时，则产生了温度的偏差信号 $\Delta V = V_1 - V_2$ ，经电压及功率放大后，控制电机的旋转速度及方向，又经传动机构及减速器使调压器的触头移动，使加热电阻丝的电流增加或减小，直至箱内温度达到给定值为止。这时偏差信号 $\Delta V = 0$ ，电机停止转动，完成控制任务。就是这样，箱内温度经自动调节，经常保持在给定值上，这个给定温度通过设定 V_1 来得到。

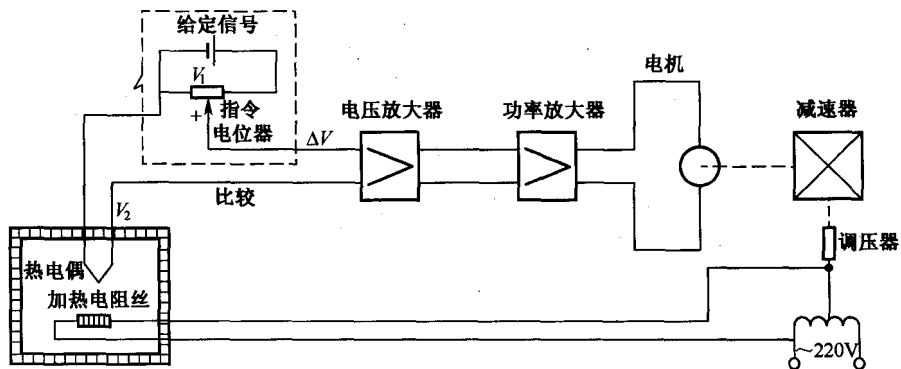


图 1-2 恒温箱的自动控制装置

将以上人工控制系统与自动控制系统对比，可以看出：

- (1) 测量 前者靠操纵者的眼睛，而后者由热电偶输出 V_2 来测量。
- (2) 比较 前者靠操纵者的头脑，而后者靠比较电路。
- (3) 执行 前者靠操纵者的手，而后者由电机等完成执行作用。

为了便于对一个自动控制系统进行分析以及了解其各个组成部分的作用，经常把一个自动控制系统画成方框图的形式。

图 1-2 系统的方框图如图 1-3 所示。图中方框表示系统的各个组成部分。直线箭头代表信号作用的方向；在其上的标注表示对方框的输入及输出物理量； \otimes 代表比较元件。热电偶是置于反馈通道中的测量元件。从系统的方框图可以明显地看出系统是有反馈的。反馈就是指将输出量(或通过测量元件及其它)反回输入端，并与输入量相比较，比较的结果称为偏差。

由图 1-3 还可以清楚地看出,系统的输入量就是给定的电压信号,系统的输出量(即被调节量)就是被控物理量——温度。控制系统是按偏差的大小与方向来工作的,最后使偏差减小或消除,从而使输出量随输入量而变化。

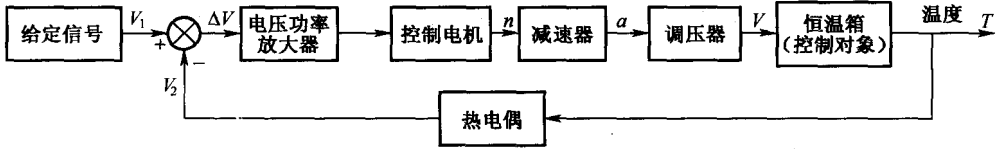


图 1-3 恒温箱自动控制系统方块图

一般在自动控制系统中,偏差是基于反馈建立起来的。自动控制的过程就是“测偏与纠偏”的过程,这一原理又称为反馈控制原理,利用此原理组成的系统称为反馈控制系统,即为控制论的中心思想。

2. 速度调节系统

图 1-4 是著名的离心式调速机构示意图,图 1-5 是其原理图,图 1-6 是其系统方框图。调速器广泛用于水轮机、汽轮机和内燃机,作用是使这些工作机器保持转速恒定。其工作原理简述如下:

当发动机转动时,通过圆锥齿轮带动一对飞球作水平旋转。飞球通过铰接杆可带动套筒上下滑动,套筒内装有平衡弹簧,套筒上下滑动时可拨动连杆,通过连杆调节供汽阀门的开度。在发动机正常运行时,飞球旋转所产生的离心力与弹簧的反弹力相平衡,套筒保持某个高度,使阀门处于一个平衡位置。如果由于扰动,使发动机转速 ω 下降,则飞球因离心力减小而使套筒向下滑动,引起动力活塞向上运动,增大了燃料阀的开度,从而使发动机的转速回升。同理,如果发动机的转速 ω 增加,则飞球因离心力增加而使套筒向上滑动,引起动力活塞向下运动,减小了燃料阀的开度,迫使蒸汽机转速减慢,直至达到希望的速度时为止。

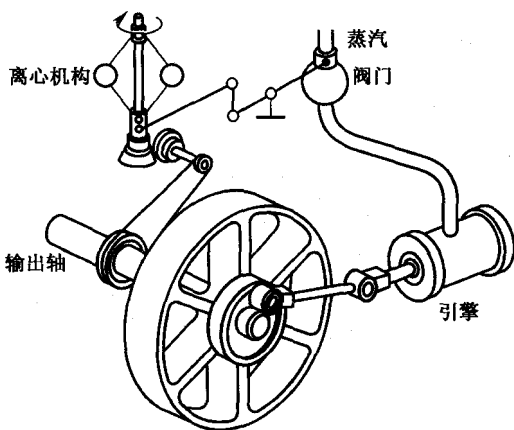


图 1-4 离心式调速机构示意图

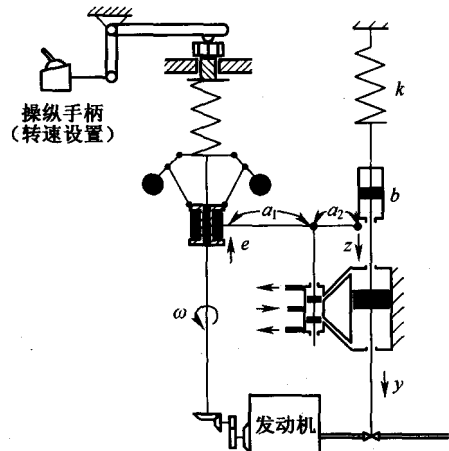


图 1-5 离心式调速机构原理图

随着科学技术的不断发展,近些年来开发和应用了电子调速装置,图 1-7 为电子调速装置控制原理简图,图 1-8 是其系统方框图。当受到外界干扰时,发动机的实际转速相对于设定转速发生变化,实际转速通过电子传感器检测,并反馈给控制计算机,与设定转

速进行比较,得到转速偏差。经过比例、积分、微分控制计算,产生控制信号,再经过放大及执行机构驱动燃料控制阀门来增加或减少燃料的进给,调节发动机转速与给定值相等。

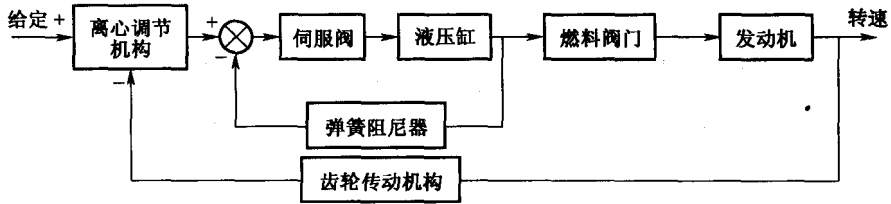


图 1-6 离心式调速机构系统方框图

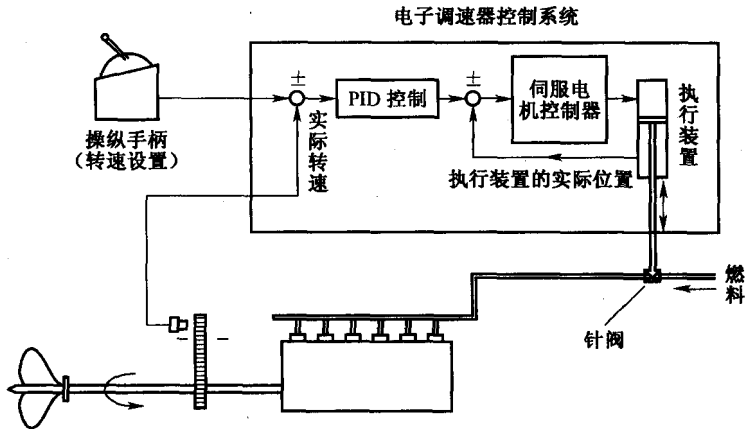


图 1-7 电子调速装置控制原理简图

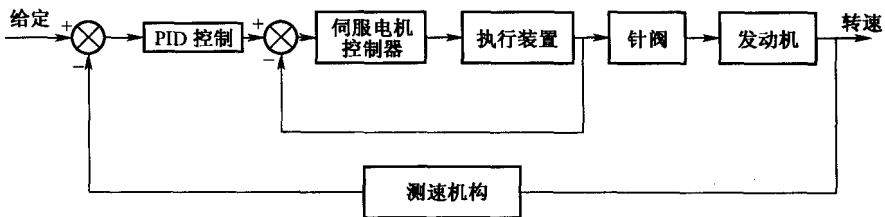


图 1-8 电子调速装置控制系统方框图

1.1.2 反馈控制系统的构成

图 1-9 示出了典型反馈控制系统的组成图。一个系统主反馈回路(或通道)只有一个,而局部反馈可能有几个,图中画出一个。各种功能不同的元件,从整体上构成一个系统来完成一定的任务。

控制元件 用于产生输入信号(或称控制信号)。如图 1-2 中的指令电位器就是控制元件。移动电位器滑臂的力即控制作用。

反馈元件 主要指置于主反馈通道中的元件。反馈元件一般用检测元件,若在主反馈通道中不设反馈元件,即输出为主反馈信号时(见图 1-9),称为单位反馈。

比较元件 用来比较输入及反馈信号,并得出二者的偏差信号。

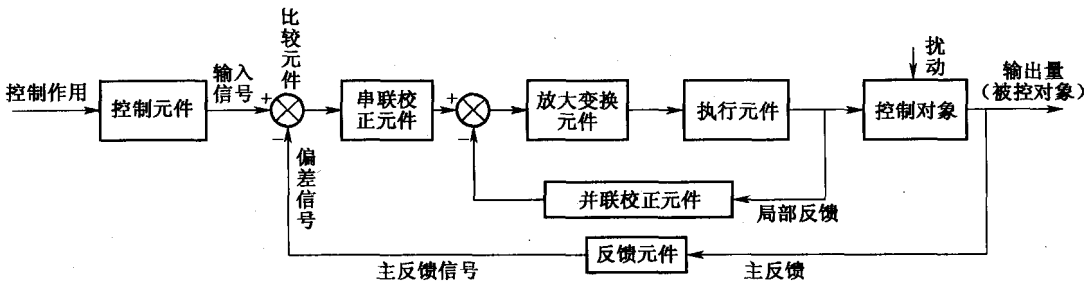


图 1-9 典型反馈控制系统的组成图

放大元件 把弱的信号放大以推动执行元件动作。放大元件有电气的、机械的、液压的及气动的等。

执行元件 根据输入信号的要求直接对控制对象进行操作，例如用液压缸、液压马达及电动机等。

控制对象 就是控制系统所要操纵的对象，它的输出量即为系统的被控制量，例如，发动机、恒温炉等。

校正元件 它的作用是改善系统的控制性能。

以上介绍了系统的基本组成。以下介绍有关变量的名词术语。

输入信号(输入量、控制量、给定量) 从广义上指输入到系统中的各种信号，包括对输出控制有害的扰动信号。一般来说，输入信号是指控制输出量变化规律的信号。各种典型的输入信号将在以后的章节中介绍。

输出信号(输出量、被控制量、被调节量) 输出是输入的结果。它的变化规律应与输入信号之间保持有确定的关系。

反馈信号 输出信号经反馈元件变换后加到输入端的信号称反馈信号。若它的符号与输入信号相同者，叫正反馈；反之，叫负反馈。主反馈一般是负反馈，否则偏差越来越大，系统将会失控。系统中的局部反馈，主要用来对系统进行校正等，以满足控制某些性能要求。

偏差信号 为输入信号与主反馈信号之差。

误差信号 指输出量实际值与希望值之差。常常希望值是系统的输入量。

扰动信号 偶然的无法加以人为控制的信号，称为扰动信号或干扰信号。根据产生的部位，分内扰与外扰。扰动也是一种输入量，一般对系统的输出量将产生不利的影响。人为的激励或输入信号称为控制信号。

1.2 自动控制系统的分类

1.2.1 按控制系统有无反馈来分

1. 开环系统

控制系统的输出量不影响系统的控制作用，即系统中输出端与输入端之间无反馈通道时称开环系统，如图 1-10 所示。