

高等学校电子信息类系列教材

# 自动控制原理

蒋大明 戴胜华 主编

清华大学出版社

北方交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书从拓宽专业面,打好专业理论基础出发,结合自动化专业和其他相近专业的教学需要,将经典控制理论和现代控制理论有序地结合在一起。全书共分 11 章,包括:自动控制的一般概念,模型,自动控制系统的时域分析,根轨迹法,频率法,控制系统的校正,采样系统分析,非线性系统理论,控制系统的状态空间分析与设计,最优控制,系统辨识与自适应控制。本书涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基本内容,淡化繁冗的理论推导,加强理论与实际的结合,注重工业特色的生产实践背景,注重基本概念和基本方法的讲解,每章都备有小结和习题。

本书可作为高等学校自动化专业及通信工程、电子科学与技术等专业的教材或教学参考书,也可供其他科技开发、工程技术人员自学、参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/蒋大明,戴胜华主编.—北京:北方交通大学出版社,2003.3

(高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 7-81082-053-2

.自... . 蒋... 戴 .自动控制理论 - 高等学校 - 教材 . TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 105947 号

责任编辑:闫 聪

印 刷 者:黄坎印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 邮编:100044 电话:010 - 51686045 62237564

清华大学出版社 邮编:100084

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:28.25 字数:700千字

版 次:2003年3月第1版 2003年3月第1次印刷

印 数:3000册 定价:36.00元

# 前 言

自动控制理论自从 20 世纪 40 年代建立以来,像一棵根深叶茂的大树,从 40 年代的经典控制理论,60 年代的现代控制理论,80 年代的大系统、智能控制,一直到今天仍然不断地繁衍出新枝,许多致力于控制理论研究的人们在这个领域内勤奋耕耘,使控制理论这棵大树不断地开花结果。

随着理论的发展,自动控制理论在国民经济的各个方面也得到了越来越广泛的应用。无论是在工业、农业、军事、交通,还是在商业、经济管理等方面都不乏自动控制理论的典型应用实例,自动控制已经渗透到了生产生活的各个角落。特别是近年来,随着科学技术的发展,自动控制理论从理论到实践都有了长足的发展,特别是计算机、微电子技术的日新月异,为自动控制理论的应用提供了充足的技术手段,也为自动控制理论这一经典学科注入了新的活力。

经典控制理论是整个控制理论的基础,是进一步学习研究其他控制理论的“先导课程”,而现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,相当完善成熟且具有更广泛应用前景的控制理论,可以说经典控制理论和现代控制理论组成了控制理论的最基础最主要的部分。本书结合自动化专业和其他相近专业的教学需要,将经典控制理论和现代控制理论有序地结合在一起,涵盖了经典控制理论和现代控制理论的基本内容,作为一本比较完整的控制理论教材或参考书,即可以作为相应课程的教材,也可供其他科技开发工程技术人员自学和参考。

我们在 20 年教学实践的基础上,针对工科院校的特点,编写了这本教材。为了适应自动化专业及其他相近专业扩大学生知识面,更新知识结构,培养宽口径专业人才的需要,本书着重加强理论与实际的结合,尽量淡化了繁冗的理论推导,注重了基本概念和基本方法的讲解,力求做到由浅入深,融会贯通。在全书的编写过程中,我们力求将枯燥的理论与生动的实例结合起来,用自动控制理论在日常生活和生产中的实际应用,使读者在提高学习兴趣的同时,加深对理论的理解。书中适当的增加了现代控制理论中最优控制、系统辨识与自适应控制等实用性较强章节的比重,强调软件算法及其应用。另外为了便于读者自学,在每章后面都备有小结、习题及部分习题参考答案。

全书共分为 11 章,其中第 1~3 章由蒋大明编写,第 4~6 章由戴胜华编写,第 7 章由苗宇编写,第 8 章、第 10 章由张三同编写,第 9 章、第 11 章由黄赞武编写。全书由蒋大明、戴胜华共同主编,张凤翥教授担任主审。在全书的编写过程中,得到了褚敏芬、蒋智勇、李萍的大力协助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处恳请读者指正。

作 者

2003 年 2 月

# 目 录

第 1 章 自动控制的一般概念 .....	( 1 )
1.1 开环控制与闭环控制 .....	( 2 )
1.1.1 自动控制系统 .....	( 2 )
1.1.2 开环控制 .....	( 3 )
1.1.3 闭环(反馈)控制 .....	( 4 )
1.2 控制系统举例 .....	( 5 )
1.2.1 随动系统 .....	( 5 )
1.2.2 恒值控制系统 .....	( 6 )
1.2.3 数字控制系统 .....	( 7 )
1.2.4 计算机控制系统 .....	( 7 )
1.3 控制系统的组成与对控制系统的基本要求 .....	( 9 )
1.3.1 控制系统的组成 .....	( 9 )
1.3.2 对控制系统的基本要求 .....	(10)
1.4 现代控制理论 .....	(10)
1.4.1 最优控制 .....	(10)
1.4.2 自适应控制 .....	(11)
1.4.3 自学习控制 .....	(11)
小结 .....	(11)
习题 .....	(12)
第 2 章 模型 .....	(13)
2.1 模型的定义和分类 .....	(13)
2.1.1 模型的定义 .....	(13)
2.1.2 模型分类 .....	(13)
2.1.3 模型的构造 .....	(14)
2.2 控制系统的数学模型 .....	(14)
2.3 建立系统微分方程的一般方法 .....	(15)
2.4 用拉氏变换解线性微分方程 .....	(21)
2.5 传递函数 .....	(24)
2.5.1 传递函数的概念及定义 .....	(24)
2.5.2 关于传递函数的几点说明 .....	(26)
2.5.3 典型环节的传递函数 .....	(27)
2.6 动态结构图 .....	(33)
2.6.1 动态结构图的概念 .....	(33)
2.6.2 系统动态结构图的建立 .....	(34)

2.6.3	结构图的基本形式 .....	(36)
2.6.4	结构图的等效变换法则 .....	(36)
2.6.5	结构图变换举例 .....	(40)
2.7	自动控制系统的传递函数 .....	(42)
2.7.1	系统开环传递函数 .....	(43)
2.7.2	系统闭环传递函数 .....	(43)
2.7.3	闭环系统的误差传递函数 .....	(44)
小结	.....	(45)
习题	.....	(46)
<b>第3章</b>	<b>自动控制系统的时域分析 .....</b>	<b>(49)</b>
3.1	典型控制过程及性能指标 .....	(49)
3.1.1	典型控制过程 .....	(49)
3.1.2	典型时间响应 .....	(51)
3.1.3	阶跃响应的性能指标 .....	(52)
3.1.4	优化性能指标 .....	(53)
3.2	一阶系统分析 .....	(54)
3.2.1	一阶系统的数学模型 .....	(54)
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应 .....	(54)
3.2.3	一阶系统的单位脉冲响应 .....	(56)
3.2.4	一阶系统的单位斜坡响应 .....	(57)
3.2.5	三种响应之间的关系 .....	(58)
3.3	二阶系统分析 .....	(58)
3.3.1	二阶系统的数学模型 .....	(58)
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 .....	(67)
3.3.4	二阶系统的单位斜坡响应 .....	(69)
3.3.5	改善二阶系统响应特性的措施 .....	(70)
3.4	高阶系统分析 .....	(72)
3.4.1	三阶系统的单位阶跃响应 .....	(72)
3.4.2	高阶系统的单位阶跃响应 .....	(73)
3.4.3	闭环主导极点 .....	(75)
3.4.4	高阶系统的动态性能估算 .....	(75)
3.5	应用计算机求取系统的响应 .....	(78)
3.5.1	欧拉法 .....	(79)
3.5.2	预报-校正法 .....	(80)
3.5.3	龙格-库塔法 .....	(80)
3.6	稳定性与代数判据 .....	(82)
3.6.1	稳定的概念和定义 .....	(82)
3.6.2	稳定性的代数判据 .....	(86)
3.6.3	结构不稳定及其改进措施 .....	(90)

3.7	稳态误差分析	(92)
3.7.1	误差及稳态误差的定义	(92)
3.7.2	稳态误差的计算	(93)
3.7.3	系统的类型和静态误差系数	(94)
3.7.4	改善系统稳态精度的方法	(98)
	小结	(100)
	习题	(100)
第4章	根轨迹法	(105)
4.1	根轨迹的基本概念	(105)
4.2	绘制根轨迹的基本条件和基本规则	(106)
4.2.1	绘制根轨迹的基本条件	(106)
4.2.2	绘制根轨迹的基本规则	(108)
4.3	特殊根轨迹	(116)
4.3.1	参数根轨迹	(116)
4.3.2	正反馈回路的根轨迹	(118)
4.3.3	滞后系统的根轨迹	(120)
4.4	系统闭环零极点分布与阶跃响应的关系	(123)
4.4.1	用闭环零极点表示的阶跃响应解析式	(123)
4.4.2	闭环零极点分布与阶跃响应的定性关系	(124)
4.4.3	主导极点与偶极子	(125)
4.4.4	利用主导极点估算系统的性能指标	(125)
4.5	开环零极点的变化对根轨迹的影响	(127)
4.5.1	开环零点的变化对根轨迹的影响	(127)
4.5.2	开环极点的变化对根轨迹的影响	(130)
	小结	(132)
	习题	(132)
第5章	频率法	(136)
5.1	频率特性	(136)
5.1.1	幅相频率特性	(139)
5.1.2	对数频率特性	(139)
5.2	基本环节的频率特性	(140)
5.2.1	比例环节	(140)
5.2.2	惯性环节	(141)
5.2.3	积分环节	(143)
5.2.4	振荡环节	(144)
5.2.5	微分环节	(146)
5.2.6	一阶不稳定环节	(147)
5.2.7	时滞环节	(148)
5.3	系统开环频率特性的绘制	(149)
5.4	用频率法分析控制系统的稳定性	(152)

5.4.1	开环频率特性与闭环特征方程的关系 .....	(152)
5.4.2	奈奎斯特稳定判据 .....	(153)
5.4.3	虚轴上有开环特征根时的奈奎斯特判据 .....	(156)
5.4.4	用对数频率特性判断系统的稳定性 .....	(157)
5.4.5	控制系统的相对稳定性 .....	(159)
5.5	开环频率特性与系统动态性能的关系 .....	(163)
5.5.1	低频段 .....	(163)
5.5.2	中频段 .....	(164)
5.5.3	高频段 .....	(165)
5.6	系统的闭环频率特性 .....	(165)
5.6.1	等 M 圆图 .....	(166)
5.6.2	等 N 圆图 .....	(168)
5.6.3	根据闭环频率特性分析系统的时域响应 .....	(169)
	小结.....	(172)
	习题.....	(172)
第 6 章	控制系统的校正.....	(177)
6.1	控制系统校正的概念 .....	(177)
6.1.1	受控对象 .....	(177)
6.1.2	性能指标 .....	(177)
6.1.3	系统校正 .....	(178)
6.2	串联校正 .....	(178)
6.2.1	超前校正 .....	(179)
6.2.2	滞后校正 .....	(180)
6.2.3	滞后-超前校正 .....	(181)
6.3	反馈校正 .....	(182)
6.3.1	利用反馈校正改变局部结构和参数 .....	(183)
6.3.2	利用反馈校正取代局部结构 .....	(184)
6.4	前置校正 .....	(185)
6.4.1	稳定与精度 .....	(186)
6.4.2	抗扰与跟踪 .....	(188)
6.5	根轨迹法在系统校正中的应用 .....	(188)
6.5.1	串联超前校正 .....	(189)
6.5.2	串联滞后校正 .....	(191)
	小结.....	(193)
	习题.....	(193)
第 7 章	采样系统分析.....	(197)
7.1	采样系统 .....	(197)
7.2	采样过程与采样定理 .....	(199)
7.2.1	采样过程 .....	(199)
7.2.2	采样定理 .....	(203)

7.3	信号保持 .....	(203)
7.4	Z 变换理论 .....	(206)
7.4.1	Z 变换定义 .....	(206)
7.4.2	Z 变换方法 .....	(206)
7.4.3	Z 变换性质 .....	(209)
7.4.4	Z 反变换 .....	(213)
7.4.5	用 Z 变换法求解差分方程 .....	(216)
7.5	脉冲传递函数 .....	(218)
7.5.1	脉冲传递函数定义 .....	(218)
7.5.2	脉冲传递函数的物理意义 .....	(219)
7.5.3	脉冲传递函数的求法 .....	(220)
7.5.4	开环系统脉冲传递函数 .....	(221)
7.5.5	闭环系统脉冲传递函数 .....	(224)
7.6	采样系统性能分析 .....	(226)
7.6.1	稳定性分析 .....	(226)
7.6.2	稳态误差分析 .....	(233)
7.6.3	动态性能分析 .....	(236)
7.6.4	根轨迹法在采样系统中的应用 .....	(239)
7.6.5	频率法在采样系统中的应用 .....	(241)
	小结 .....	(243)
	习题 .....	(244)
第 8 章	非线性系统理论 .....	(247)
8.1	非线性系统的一般概念 .....	(247)
8.1.1	非线性系统的特点 .....	(247)
8.1.2	典型的非线性特性 .....	(248)
8.2	相平面法 .....	(249)
8.2.1	相轨迹的作图方法 .....	(250)
8.2.2	相轨迹的基本特点 .....	(254)
8.2.3	线性系统的相轨迹 .....	(255)
8.3	相平面图的分析 .....	(257)
8.3.1	由相平面图求时间 .....	(257)
8.3.2	极限环 .....	(258)
8.3.3	非线性系统的相平面分析 .....	(259)
8.4	描述函数法 .....	(264)
8.4.1	描述函数的概念 .....	(264)
8.4.2	典型非线性元件的描述函数 .....	(265)
8.5	非线性系统的描述函数法分析 .....	(269)
8.5.1	非线性系统稳定性分析 .....	(270)
8.5.2	非线性系统自振荡分析 .....	(271)
8.5.3	非线性系统的结构简化 .....	(273)

小结.....	(276)
习题.....	(276)
第 9 章 控制系统的状态空间分析与设计.....	(279)
9.1 控制系统的状态空间描述 .....	(279)
9.1.1 系统状态空间描述常用的基本概念 .....	(279)
9.1.2 线性定常连续系统状态空间表达式的建立 .....	(282)
9.1.3 状态空间模型和 $V O$ 模型之间的等价变换 .....	(284)
9.1.4 线性定常连续系统状态方程的解 .....	(292)
9.2 控制系统的可控性与可观测性 .....	(297)
9.2.1 系统可控性 .....	(298)
9.2.2 系统可观测性 .....	(307)
9.2.3 对偶原理 .....	(311)
9.3 线性定常系统的线性变换 .....	(313)
9.3.1 线性变换 .....	(313)
9.3.2 化系数矩阵 $A$ 为对角阵或约当阵 .....	(314)
9.3.3 化系统 $\{A, B\}$ 为可控标准型 .....	(315)
9.3.4 化系统 $\{A, C\}$ 为可观测标准型 .....	(317)
9.3.5 系统的规范分解 .....	(320)
9.4 控制系统的状态空间设计 .....	(326)
9.4.1 线性定常系统常用反馈结构及其对系统特性的影响.....	(327)
9.4.2 状态反馈的极点配置设计法 .....	(329)
9.4.3 状态观测器设计及分离特性 .....	(333)
小结.....	(346)
习题.....	(347)
第 10 章 最优控制 .....	(352)
10.1 最优控制问题.....	(352)
10.1.1 被控对象的数学模型 .....	(353)
10.1.2 边界条件与目标集 .....	(353)
10.1.3 容许控制集合 .....	(353)
10.1.4 性能指标 .....	(354)
10.1.5 最优控制的研究方法 .....	(355)
10.2 最优控制中的变分法.....	(355)
10.2.1 泛函与变分 .....	(355)
10.2.2 欧拉方程 .....	(359)
10.2.3 横截条件 .....	(361)
10.3 对控制变量无约束的最优控制问题.....	(363)
10.3.1 末端时刻 $t_f$ 固定时的最优控制问题 .....	(364)
10.3.2 末端时刻 $t_f$ 自由时的最优控制问题 .....	(367)
10.4 极小值原理.....	(370)
10.4.1 古典变分法的缺陷 .....	(370)

10.4.2	极小值原理 .....	(371)
10.5	时间最优控制 .....	(374)
10.5.1	线性系统的时间最优控制 .....	(375)
10.5.2	线性系统时间最优控制问题解的必要条件 .....	(376)
10.5.3	双积分装置的时间最优控制系统 .....	(378)
10.6	二次型性能指标的最优控制问题 .....	(381)
10.6.1	状态调节器问题 .....	(382)
10.6.2	定常状态调节器问题 .....	(386)
10.6.3	输出调节器问题 .....	(387)
10.7	动态规划 .....	(389)
10.7.1	最优性原理 .....	(389)
10.7.2	离散时间线性二次型问题 .....	(393)
10.7.3	连续动态规划与哈密顿-雅可比方程 .....	(394)
	小结 .....	(396)
	习题 .....	(397)
第 11 章	系统辨识与自适应控制 .....	(400)
11.1	随机系统的数学描述 .....	(400)
11.1.1	输入输出模型 .....	(400)
11.1.2	状态空间模型 .....	(402)
11.2	系统辨识概念与基本方法 .....	(402)
11.2.1	系统数学模型的建立 .....	(402)
11.2.2	系统辨识的实验设计 .....	(403)
11.2.3	系统辨识的方法 .....	(404)
11.2.4	系统辨识的最小二乘法 .....	(404)
11.2.5	最小二乘估计的递推算法 .....	(409)
11.2.6	时变系统的最小二乘估计 .....	(411)
11.2.7	有色噪声情况下的最小二乘法 .....	(411)
11.2.8	辨识的其他问题 .....	(412)
11.3	自适应控制概念与基本方法 .....	(415)
11.3.1	自适应控制概述 .....	(415)
11.3.2	模型参考自适应控制 .....	(416)
11.3.3	自校正控制系统 .....	(420)
	小结 .....	(430)
	习题 .....	(430)
	部分习题参考答案 .....	(432)
	参考文献 .....	(439)

# 第 1 章 自动控制的一般概念

在现代的工业、农业、国防和科学技术领域中,自动控制技术得到了广泛的应用,自动控制理论起着极为重要的作用。

所谓自动控制,就是不需要人的直接参与,而能控制某些物理量按照指定的规律变化。

按照上述定义,自动控制在生产和生活中的例子举不胜举。

在空间技术方面,导弹能够正确地命中目标,人造卫星能按照预定的轨道运行并返回地面,都是不用人的直接参与(不用人来驾驶),而能控制其运行的方向和速度,使其物理量按照事先指定的规律变化。

在城市交通方面,随着计算机的应用,采用按时间控制的交通管制系统在我国各大城市中已很普遍。但是由于近几年来城市运输车辆的增加,势必要求提高对交通的管制,对等待通行信号的汽车数量进行不断的测量,并将这种信号传递到发出运行信号的控制中心计算机,由中心计算机根据所有道路的综合情况,发出最佳的控制信息,则这种系统就变成了更高阶段的智能交通自动控制系统。

在铁路运输方面,要求有更多的控制系统为其服务,才能保证运输安全并发挥其运输效能。目前世界各国普遍采用较完善的列车控制系统,称为列车自动控制系统 ATC (Automatic Train Control)。它由行车指挥自动化和列车运行自动化两大部分组成。行车指挥系统以控制中心计算机为主体,实现集中管理分散控制的集散控制方式;列车运行自动化包括列车自动防护 ATP (Automatic Train Protection) 及列车自动驾驶 ATO (Automatic Train Operation) 两个子系统。ATC 结构框图如图 1-1 所示。世界各国均有各自不同的列车运行控制系统,比较典型的有德国的 LZB 系统、法国的 V-T 系统和日本的数字 ATC 系统。

图 1-1 列车自动控制系统框图

在日常生活中,厨房中的电冰箱是一个典型的自动控制系统,它不需要人的直接参与(不用人去频繁地开关电源),能自动控制温度这个物理量按照指定的温度变化(通过通断电源来保持恒定的温度)。厕所中的水箱也是一个自动控制系统,不用人开关阀门,控制水箱内的水位就能按照指定的规律变化(通过开关进水阀门来保持水位的恒定)。

自动控制技术各个领域中的应用广泛,不仅保证了安全,提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。

自动控制理论就是研究自动控制共同规律的技术科学,它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,随着工业生产和科学技术的发展,现已发展成为一门独立的学科——控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。工程控制论主要研究自动控制系统中的信息变换和传送的一般理论及其在工程设计中的应用;而自动控制原理则仅仅是工程控制论的一个分支,它只研究控制系统分析和设计的一般理论。

第二次世界大战以后,由于生产和军事的需要,自动控制技术开始迅速地发展起来。到20世纪50年代末期,自动控制理论已经形成比较完善的理论体系,并在工程实践中得到成功的应用。一般把这个时期以前应用的自动控制理论称为经典(古典)控制理论。这一时期,由于宇航技术的发展,要求组成高性能、高精度的复杂控制系统,这样经典控制理论已不能完全满足要求;另一方面,电子计算机的高度发展,又在客观上提供了必要的技术手段,使得自动控制理论又发展到一个新的阶段——现代控制理论。

“经典控制理论”的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论由于其发展较早,现已成熟。在工程上,也比较成功地解决了自动控制系统的实践问题。

“现代控制理论”是20世纪60年代在经典控制理论的基础上,随着科学技术的进步和工程实践的需要而迅速发展起来的。它无论在数学工具、理论基础还是在研究方法上,都不是经典理论的简单延伸和推广,而是认识上的一次飞跃。现代控制理论主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题,最优控制、最佳滤波、系统识别、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展而日新月异地向前发展。

“现代控制理论”是建立在“经典控制理论”的基础之上,因此学习经典控制理论是学习控制理论(包括现代控制理论)的基础。

## 1.1 开环控制与闭环控制

### 1.1.1 自动控制系统

能够对被控制对象的工作状态进行自动控制的系统,称为自动控制系统。它一般由控制装置和被控制对象组成。被控制对象(简称被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程,例如飞机、火车、机床,以及铁路行车指挥过程或工业生产的某种过程等。控制装置

则是指对被控制对象起控制作用的设备总体。

由于控制装置可以取代人的一部分工作,因此剖析在完成一项有目的的工作任务中所经历的主要过程和所需要具备的基本职能,对寻求自动控制的原则、方法无疑是有所裨益的。

在工作中,各种职能的作用及其相互联系可用方框图 1-2 表示。图中职能机构和工作对象均以方框表示,箭头方向指示了各部分的联系。

图 1-2 人工职能图

为了有效地进行某项工作,人们总是要经常了解工作的动态,观察实际的结果,观察干扰工作正常进行的各种因素和条件,这个步骤被称为观察或调查。

然后将所获得的各方面情况进行分析、对比,看看实际的结果和预期的目标相差多少,并统观全局,进而做出新的工作安排,这个关键步骤被称为分析比较或决策。

接下去应该是根据新的安排去执行决策。执行的效果如何,需要再观察、再分析、循环往复直至工作结束。

如果用技术装置和工程语言代换图 1-2,即:工作对象——受控对象,实际结果——被控量,预期目标——给定值或参考输入,观察机构——测量元件或传感器,分析、决策——计算机或控制器,则由此得出自动控制的系统方框图,如图 1-3 所示。

图 1-3 自动控制系统方框图

从图 1-3 中可看出,控制装置应具备三种基本功能,即测量、计算和执行。这需要相应的元部件来承担。

参与控制的信号来自两条通道:干扰和被控量。这是控制的主要依据。

基于这些分析,可以获得三种自动控制的基本方式,即按给定值操纵的开环控制、按干扰补偿的开环控制,以及按偏差调节的闭环(反馈)控制。

## 1.1.2 开环控制

开环控制又分为按给定值操纵和按干扰补偿两种。

### 1. 按给定值操纵

这种控制方式的原理是:需要控制的是受控对象的被控量,而测量的只是给定值。控制装置和受控对象的系统方框图如图 1-4 所示,信号由给定值至被控量单向传递,故常称为开环控

制。

图 1-4 按给定值操纵的开环控制系统方框图

这种控制较简单,但有较大的缺陷。当受控对象或控制装置受到干扰,或工作过程中特性参数发生变化,会直接波及被控量,而无法自动补偿。因此,系统的控制精度难以保证。但是如果系统结构参数稳定、干扰很弱,还是可用的。这从另一种意义理解,意味着对受控对象和其他控制元件技术要求较高。

一些自动化生产流水线,如包装机等,多为这类控制。一般家中常用的洗衣机也是开环控制。它是根据事先设定好的程序,循环地重复进水、漂洗、甩干等过程,不管衣物是否洗干净,到时自动停机。

## 2. 按干扰补偿

按干扰补偿的系统方框图如图 1-5 所示。这种控制方式的原理是:需要控制的是受控对象的被控量,而测量的是破坏系统正常运行的干扰。利用干扰信号产生控制作用,以补偿干扰对被控量的影响,故称干扰补偿。而信号和干扰经测量、计算、执行等诸元件至受控对象的被控量,也是单向传递的,故亦称开环控制。

图 1-5 按干扰补偿的开环控制系统方框图

由于测量的是干扰,故只能对可测干扰进行补偿。不可测干扰及受控对象、各功能部件内部参数变化对被控量造成的影响,系统自身无法控制,因此控制精度仍然受到原理上的限制。

工作机械的恒速控制(如稳定刀具转速),以及电源系统的稳压、稳频控制,常用这种补偿方式。

## 1.1.3 闭环(反馈)控制

闭环(反馈)控制是按偏差调节,其系统方框图如图 1-6 所示,这种控制方式的原理是:需要控制的是受控对象的被控量,而测量的是被控量对给定值的偏差,无论是由干扰造成的,还是由结构参数的变化引起的,只要被控量出现偏差,系统就自行纠编,故称这种控制方式为按偏差调节。显然,这种系统原理上提供了实现高精度控制的可能性。

系统中控制信号往复循环,沿前向通道和反馈通道闭路传递,故按偏差调节又称闭环控制或反馈控制。反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式,在工程中获得了广泛的应用。

由于反馈控制只有在偏差出现后才产生控制作用,因此系统在强干扰作用下,控制过程中被控制量可能有较大的波动。对于这种工作环境,同时采用偏差调节和干扰补偿的开、闭复合控制更为合适。

图 1-6 按偏差调节的闭环控制系统方框图

在图 1-4 至图 1-6 中,除受控对象外,其他统称为控制装置或调节器。故自动控制系统是由受控对象和控制装置组成的,其任务是使受控对象的被控量自动跟随给定值变化;实现的方式是开环控制和闭环控制;控制装置的功能是测量、比较、计算和执行。把握这些基本特点,对分析或组合一个控制系统是很有帮助的。

一些新型的控制系统,也是在这几种基本控制方式的基础上发展起来的。如何使测量结果更准确,如何对控制对象的内部变化了解得更清楚,又怎样实现对某些技术指标来说是最好的控制方案,即所谓最优滤波、最优识别和最优控制,都是在图 1-4 至图 1-6 的基础上通过复杂的控制器结构(计算机算法)来实现的。

## 1.2 控制系统举例

### 1.2.1 随动系统

对反馈控制系统来说,如果其控制信号  $r(t)$  为一任意的时间函数,其变化规律无法预先予以确定,且当控制信号作用于系统之后,要求系统准确复现上述控制信号,那么将承受这类控制信号的反馈控制系统叫做随动系统。随动系统在工业生产中有着极为广泛的应用,如函数记录仪、雷达导引系统等都是典型的随动系统。下面以函数记录仪为例加以说明。

函数记录仪是一种通用的自动记录仪,可以在直角坐标上自动描绘两个电量的函数关系;同时,它还带有走纸机构,用以描绘一个电量对时间的函数关系。铁路行车自动控制系统中的运行图记录仪就是函数记录仪的一种应用。

函数记录仪一般采用负反馈原理,其结构通常由衰减器、测量电路、放大装置、伺服电动机、测速机组、齿轮系及绳轮组成,其原理示意图如图 1-7 所示。系统的输入信号是待记录的电压。这个电压也可以是待记录的其他物理量,如列车运行图记录仪所记录的是列车运行的地理位置。记录仪器的被控对象为记录笔,其位移即为被控制量,函数记录仪控制系统的任务是控制记录笔位移,使其在记录纸上描绘出待记录的电压曲线。

测量电路是由电位器  $R_0$  和  $R_M$  组成的桥式线路。记录笔就固定在电位器  $R_M$  的电刷上,因此测量电路的输出电压  $u_p$  与记录笔位移成正比。当存在输入信号  $u_i$  时,在放大装置输入口得到偏差电压  $u = u_i - u_p$ 。经放大后,驱动伺服电动机,并通过齿轮系及绳轮而带动记录笔移动,使偏差电压减小。当偏差电压  $u = u_i - u_p = 0$  时,电动机停止转动,记录笔也静止不动,即记录笔位移与输入信号相对应。如果输入信号随时间连续变化,记录笔便描绘出随时间连续变化的相应曲线。

函数记录仪控制系统方框图如图 1-8 所示。图中,测速发电机反馈一个与电动机转速成正比的电压信号,以增大系统阻尼而达到改善性能的目的。

图 1-7 函数记录仪原理方框图

图 1-8 函数记录仪系统方框图

由于函数记录仪输入信号(待记录电压)的变化规律一般事先是不知道的,它可以是时间的任意函数,而系统的输出(记录笔的位置)又是随着输入信号的变化而变化,故这种控制系统通常称为随动系统。

### 1.2.2 恒值控制系统

如果反馈控制系统的控制信号  $r(t)$  为恒定的常数(特殊情况下  $r(t) = 0$ ),而要求被控制信号也保持在相应的常量上,则将这类反馈控制系统叫做恒值控制系统,也称为恒值调整系统或恒值系统。这类系统在工业生产中的应用非常广泛,如压力控制系统、电压控制系统、速度控制系统等。下面介绍一些简单的具体例子。

如图 1-9 表示一个压力控制系统。炉内的压力由挡板的位置控制,并由压力测量元件进行测量,测出的压力值作为控制信号传递到控制器中,与希望值

图 1-9 压力控制系统

进行比较,比较后若有差值即误差存在,控制器便将输出量送往执行机构,后者根据差值而相应地转动挡板,达到使误差减至最小,实现恒定炉内压力的目的。

### 1.2.3 数字控制系统

数字控制是一种用数字来控制设备运行的方法。所谓数字,是与上面所举控制实例中的模拟量相对应的。前面所分析的控制过程,在系统中通过传递连续变化量(模拟量)对系统进行自动控制,如系统的压力控制、速度控制、电压控制等。在数字系统中,对象的控制是通过二进制信息来实现的。

在这种控制系统中,利用电的(或其他形式的)信号,可以将数字符号转化为物理量(大小或数量),这样就把电码译成直线运动或圆周运动。因此,在整个系统中所采用的控制信号或者是数字(脉冲)量,或者是模拟(时变电压)量。下面以机床的数字控制为例加以说明。

图 1-10 是机床数字控制的原理图。系统的输入端按照对加工工件 P 的要求,用纸带穿孔机对纸带进行二进制编码。当设备启动后,将纸带上的信息通过读出器送进系统。输出调频脉冲信号与反馈脉冲信号进行比较,随后数/模转换器将脉冲信号转变为模拟信号,即转变为具有一定数值的电压值,从而使伺服马达转动起来。刀架的位置由伺服马达的输入信号控制。与刀盘连接在一起的转换器,将刀具的运动转变为电信号,然后通过模/数转换器,又将它转变为脉冲信号。这一脉冲信号与输入脉冲信号进行比较,控制器根据脉冲信号的差值进行数学运算。如果在两个脉冲信号之间存在某一差值,便有信号电压输入到伺服马达,以减小这一差值。

图 1-10 机床的数字控制

机床用数字控制可以实现以最大的速度加工复杂的零件,使产品的公差保持不变。

### 1.2.4 计算机控制系统

近年来,除了大幅度地发展通用计算机之外,用来直接控制生产过程的专门计算机也得到了发展。这种计算机牺牲了通用性,简化了设计,增强了操作的可靠性,加快了在控制过程中出现问题的解决速度,使得反应速度提高。

生产过程控制机与通用计算机相比,主要差别在于它们是直接通过输入测量仪表和输出执行元件与外界相联系的。这就不需要人参与该系统的工作了,整个计算机控制系统就是:被控对象 + 控制计算机。

图 1-11 是一个地下铁道行车自动控制系统的实例。

在这个系统中,中央控制计算机是整个指挥系统的控制中心。计算机的输入是根据运输需要预先安排的列车运行图、列车自动运行的数据,以及列车自动防护设备所提供的数