



普通高等教育“十二五”规划教材

# 自动控制工程 基础与应用

ZI DONG KONG ZHI GONG CHENG  
JI CHU YU YING YONG

主编 刘琪

航空工业出版社

013025767

TP13-43  
121

普通高等教育“十二五”规划教材

# 自动控制工程基础与应用

主编 刘琪



TP13-43  
121

航空工业出版社

北京



北航

C1633649

## 内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了自动控制系统的各种分析方法、基本理论及工程应用, 主要内容包括自动控制的基本概念、自动控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法、线性系统的校正方法、离散控制系统分析、非线性控制系统分析等。

本书内容精练, 重点突出, 注重能力培养, 把立足点放在工程技术应用上, 可作为高等院校自动化类、信息类和机电类相关专业应用型、技能型人才培养用书, 也可供电大、函授等其他类学校、培训班师生及工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目 (C I P) 数据

自动控制工程基础与应用 / 刘琪主编. -- 北京 :  
航空工业出版社, 2013. 2  
ISBN 978-7-5165-0140-5

I. ①自… II. ①刘… III. ①自动控制工程学 IV.  
①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 032598 号

## 自动控制工程基础与应用

Zidongkongzhi Gongcheng Jichu yu Yingyong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京忠信印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 2 月第 1 版

2013 年 2 月第 1 次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 21.25

字数: 530 千字

印数: 1—3000

定价: 39.80 元



为满足高等院校自动化类、电子电气类、机电制造类和能源动力类专业教学需要,根据社会对应用型、技能型人才培养的各类要求,我们编写了《自动控制工程基础与应用》一书。

自动控制是生产过程的关键技术,也是许多高新技术产品的核心技术,广泛应用于机电工程、轻工、冶金、化工、交通、农业、航空等众多领域,极大地提高了劳动生产率,改善了人们的劳动条件。

全书共分8章,第1章介绍自动控制的基本概念;第2章介绍自动控制系统的微分方程、传递函数、动态结构图、信号流图等数学模型及其相互关系;第3章介绍时域分析法,包括动态性能、稳态性能和稳定性等系统性能的分析;第4章简要介绍根轨迹分析法;第5章介绍控制系统的频域分析法,包括频率特性、奈氏图和伯德图等;第6章介绍线性系统的校正方法;第7章介绍离散控制系统的分析方法;第8章介绍非线性控制系统的分析方法。本书同时还将MATLAB辅助控制系统设计方法贯穿于相关章节中。

本书内容删繁就简,突出主线和重点,同时注意引入新知识、新技术,体现时代特征,优化知识结构,做到既能为后续课程服务,又能强化工程技术应用能力和创新能力的培养。

在内容安排和知识点取舍上,本书力求概念清楚,强调工程应用中常用知识的介绍,减少数学推导,弱化或删除了理论性较强的内容,同时加入了一些经验性的知识,有利于学生学习。本书还注意联系实际,通过例题适当反映控制工程在现代工业中的应用,使教学内容更加生动实用,体现了课程教学改革的特色。

本书由刘琪任主编并负责统稿,徐会彬任主审,刘伟、张鸿辉、张昭晗、王宏智任副主编,邵永刚、李娜娜、赵尚丽参与编写,具体分工是:周口师范学院刘琪(第1章、第3章)、周口师范学院刘伟(第2章2.1~2.6节)、周口师范学院张鸿辉(第4章)、周口职业技术学院李娜娜(第5章5.1~5.3节)、青岛远洋船员职业学院王宏智(第5章5.4~5.5节和第2章2.7节)、周口职业技术学院赵尚丽(第6章6.1~6.4节)、周口职业技术学院张昭晗(第6章6.5节、第8章)、河南省电力公司技术技能培训中心邵永刚(第6章6.6~6.7节)、上海师范大学天华学院徐会彬(第7章)。

本书在编写过程中参考了大量的文献资料,在此向原作者表示感谢;同时得到了许多专家、教授的支持和帮助,他们提出了许多宝贵意见,在此致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。本书配有丰富的教学资源包,读者可以登录我们的网站(<http://www.bjjqe.com>)下载。


# 本书编委会

主 编：刘 琪

副主编：刘 伟 张鸿辉 张昭晗 王宏智

编 委：邵永刚 李娜娜 赵尚丽

主 审：徐会彬



# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 自动控制的基本概念	1
1.1.1 自动控制与自动控制系统	1
1.1.2 开环控制与闭环控制	2
1.2 自动控制系统的分类	4
1.3 自动控制系统的组成及性能要求	6
1.3.1 自动控制系统的组成	6
1.3.2 对控制系统的性能要求	7
1.4 自动控制理论的发展	9
1.4.1 经典控制理论	9
1.4.2 现代控制理论	10
1.4.3 智能控制理论	11
本章小结	11
思考与练习	12
第2章 自动控制系统的数学模型	13
2.1 控制系统的微分方程	13
2.1.1 微分方程的建立	13
2.1.2 拉氏变换及其应用	17
2.1.3 拉氏变换法求解微分方程	24
2.2 传递函数	26
2.2.1 传递函数的定义	27
2.2.2 传递函数的性质	28
2.2.3 传递函数的表达式	29
2.2.4 传递函数的求解方法	30
2.3 典型环节的传递函数	32
2.3.1 传递函数的一般形式	32
2.3.2 比例环节	34
2.3.3 惯性环节	35
2.3.4 积分环节	35
2.3.5 微分环节	36
2.3.6 振荡环节	37
2.3.7 延迟环节	37



2.4	动态结构图	38
2.4.1	动态结构图的概念与一般画法	38
2.4.2	动态结构图的等效变换与简化	40
2.5	信号流图与梅逊增益公式	45
2.5.1	信号流图	46
2.5.2	梅逊增益公式	47
2.6	反馈控制系统的传递函数	49
2.7	用 MATLAB 处理系统数学模型	52
2.7.1	建立模型	52
2.7.2	简化模型	54
	本章小结	55
	思考与练习	55
<b>第 3 章</b>	<b>时域分析法</b>	<b>59</b>
3.1	时域分析基础	59
3.1.1	典型输入信号	59
3.1.2	动态及稳态性能指标	61
3.2	一阶系统的时域分析	63
3.2.1	一阶系统的数学模型	63
3.2.2	一阶系统的时间响应及性能分析	63
3.3	二阶系统的时域分析	66
3.3.1	二阶系统的数学模型	66
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	68
3.3.3	欠阻尼二阶系统的动态性能指标	72
3.4	高阶系统的时域分析	80
3.4.1	高阶系统的单位阶跃响应	80
3.4.2	闭环零、极点对系统性能的影响	81
3.4.3	闭环主导极点	82
3.5	线性系统的稳定性分析	82
3.5.1	稳定性的概念及线性系统稳定的充要条件	82
3.5.2	劳斯稳定判据	83
3.5.3	劳斯稳定判据的两种特殊情况	84
3.5.4	劳斯稳定判据在系统分析中的应用	86
3.5.5	结构性不稳定系统的改进措施	87
3.6	线性系统的稳态误差分析	89
3.6.1	控制系统的误差与稳态误差	90
3.6.2	误差的数学模型	90
3.6.3	给定信号作用下的稳态误差	93
3.6.4	扰动信号作用下的稳态误差	100



3.6.5 减小稳态误差的方法	102
3.7 用 MATLAB 进行系统时域分析	104
3.7.1 用 MATLAB 分析系统的稳定性	104
3.7.2 用 MATLAB 分析系统的动态特性	106
本章小结	109
思考与练习	109
<b>第 4 章 根轨迹法</b>	<b>113</b>
4.1 根轨迹的基本概念	113
4.1.1 根轨迹的概念	113
4.1.2 根轨迹方程	115
4.2 绘制根轨迹的规则和方法	116
4.3 延迟系统的根轨迹	126
4.4 广义根轨迹	129
4.4.1 参数根轨迹	129
4.4.2 零度根轨迹	131
4.5 用根轨迹法分析系统性能	134
4.5.1 增加开环极点对控制系统的影响	135
4.5.2 增加开环零点对控制系统的影响	136
4.5.3 用根轨迹确定系统参数	136
4.5.4 用根轨迹分析系统的动态性能	140
4.6 用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	141
本章小结	143
思考与练习	144
<b>第 5 章 频域分析法</b>	<b>148</b>
5.1 频率特性	148
5.1.1 基本概念	148
5.1.2 频率特性的定义	150
5.1.3 频率特性的数学表示及作图	153
5.2 典型环节的频率特性	156
5.2.1 比例环节	156
5.2.2 积分环节	157
5.2.3 微分环节	158
5.2.4 惯性环节	160
5.2.5 一阶微分环节	162
5.2.6 振荡环节	163
5.2.7 二阶微分环节	166
5.2.8 延迟环节	167
5.2.9 最小与非最小相位系统	167





5.3 系统开环频率特性作图	169
5.3.1 开环幅相频率特性作图	169
5.3.2 开环对数频率特性作图	172
5.4 频域稳定性判据	177
5.4.1 开环极点与闭环极点的关系	178
5.4.2 频域稳定性判据	178
5.4.3 频域稳定性分析	182
5.4.4 奈氏稳定判据在伯德图中的应用	186
5.4.5 稳定裕度	188
5.4.6 闭环系统的频率特性	191
5.4.7 频率特性分析	192
5.5 用 MATLAB 进行系统频域分析	195
本章小结	201
思考与练习	202
<b>第 6 章 线性系统的校正方法</b>	<b>205</b>
6.1 控制系统校正的概念	205
6.1.1 控制系统的设计步骤	205
6.1.2 校正的概念与校正方案	206
6.1.3 校正方法	210
6.2 PID 控制器	211
6.2.1 P (比例) 控制器	211
6.2.2 PD (比例-微分) 控制器	211
6.2.3 PI (比例-积分) 控制器	212
6.2.4 PID (比例-积分-微分) 控制器	213
6.3 串联校正的分析法	214
6.3.1 超前校正	214
6.3.2 滞后校正	223
6.3.3 滞后-超前校正	229
6.4 串联校正的综合法	232
6.4.1 综合法的基本方法	232
6.4.2 按最佳二阶系统校正	233
6.4.3 按典型三阶系统校正	237
6.5 反馈校正设计	239
6.6 复合控制校正设计	242
6.6.1 复合控制的概念	242
6.6.2 按扰动补偿的复合控制系统	242
6.6.3 按输入补偿的复合控制系统	244
6.7 用 MATLAB 进行校正设计	247



本章小结	253
思考与练习	254
<b>第 7 章 离散控制系统分析</b>	<b>255</b>
7.1 离散控制系统的基本概念	255
7.1.1 采样过程	255
7.1.2 采样定理	258
7.1.3 信号的复现与保持	260
7.2 $z$ 变换	263
7.3 离散控制系统的数学模型	267
7.3.1 差分方程	267
7.3.2 脉冲传递函数	270
7.3.3 闭环系统的脉冲传递函数	275
7.4 离散控制系统稳定性分析	279
7.5 离散系统的稳态误差	284
7.6 离散系统的动态性能	288
本章小结	294
思考与练习	295
<b>第 8 章 非线性控制系统分析</b>	<b>298</b>
8.1 控制系统的非线性特性	299
8.1.1 继电特性	299
8.1.2 饱和特性	299
8.1.3 死区特性	300
8.1.4 滞环特性	301
8.1.5 摩擦特性	302
8.2 相平面分析法	302
8.2.1 相平面与相轨迹	302
8.2.2 相平面作图	304
8.2.3 相轨迹的运动特性	308
8.2.4 相平面图分析	314
8.3 描述函数法	319
8.3.1 描述函数的定义	319
8.3.2 非线性环节的描述函数	321
8.3.3 非线性控制系统的描述函数分析	324
本章小结	327
思考与练习	328

# 第 1 章 绪 论

## 【引 子】

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。本章将简要介绍自动控制的基本概念、自动控制系统的分类和组成、对控制系统的性能要求以及自动控制理论的发展概况等内容。

## 【学习目标】

- ◆ 掌握自动控制的基本概念和自动控制系统的基本形式。
- ◆ 了解自动控制系统的分类方法。
- ◆ 掌握自动控制系统的组成和一些常用术语。
- ◆ 了解对控制系统的性能要求以及自动控制理论的发展概况。

## 1.1 自动控制的基本概念

### 1.1.1 自动控制与自动控制系统

从 20 世纪 40 年代起,特别是第二次世界大战以来,由于工业活动的发展和军事技术上的需要,科学技术发展十分迅速。自动控制作为一门专门的学科,也得到了迅速的发展和广泛的应用。

如今,自动控制技术已经渗透到国民经济的各个领域和社会生活的各个方面,是目前发展最迅速、应用最广泛、最引人注目的关键技术之一,同时也是推动新的技术革命和新的产业革命的关键技术之一,在我国的工业化、信息化与现代化建设中发挥着巨大作用。

所谓**自动控制**,是指在没有人直接参与的情况下,利用控制器或控制装置来控制机器、设备或生产过程等,使其受控物理量自动地按照预定的规律变化,以达到控制的目的。



### 提示

自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中,在军事、农业、航空、航海、核能利用、导弹制导等领域也发挥着重要作用。例如在工业控制中,对压力、温度、流量、湿度、配料比等的控制,都广泛采用了自动控制技术。对于高温、高压、剧毒等对人体健康危害很大的场合,自动控制技术的应用更是必不可少。在军事和空间技术方面,如宇宙飞船能够准确地飞行和返回地面、人造卫星能够按预定轨道飞行、导弹能够准确地击中目标等,自动控制技术同样具有十分重要的意义。



自动控制理论的研究对象是系统。我们在日常生活中就接触到很多系统，如常说的电力系统、机械系统，还有教育系统、卫生系统等。事实上，系统是一个相当广泛的概念，一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网等都是一个系统，一个企业、一个社会组织也是一个系统。有小系统、大系统，也有把一个国家甚至整个世界作为对象的巨系统。

系统的种类如此繁多，又如此地千差万别，但它们有一个共同的特点，就是都具有一定的功能，自身的各部分是相互依赖、相互制约的。例如，一条生产线是为了加工某个产品而设立的，生产线的各个部分存在一定的结构关系和运动关系。

综上所述，系统是由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体。或者说，系统是为实现规定功能以达到某一给定目标，而构成的相互关联的一组元件。自动控制系统一般由控制装置（控制器）和受控对象组成。

《自动控制工程基础与应用》是自动控制的基础理论，也是一门理论性较强的工程科学。本课程的主要任务是研究与讨论控制系统的一般规律，从而设计出合理的自动控制系统，以满足工农业生产和各种工程上的需要。

自动控制理论的发展与应用，不仅改善了劳动条件，把人类从繁重的劳动中解放出来，而且由于自动控制系统能够以某种最佳方式运行，因此可以提高劳动生产率，提高产品质量，节约能源，降低成本。自控制学科创建以来，自动控制理论得到了充分的发展，必定会在未来得到更为广泛的应用。

### 1.1.2 开环控制与闭环控制

开环控制与闭环控制是控制系统的两种最基本的形式，如图 1-1a、b 所示。



(a) 开环控制系统

(b) 闭环控制系统

图 1-1 开环控制系统与闭环控制系统

开环控制是最简单的一种控制方式，是指在控制器与受控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用，即系统的输出量对控制量没有影响。相应的控制系统称为开环控制系统。

开环控制系统结构简单，维护容易，成本低，不存在稳定性问题，因此广泛应用于许多控制设备中。但也存在一些缺点，例如控制精度取决于组成系统的元件的精度，因此对元器件的要求比较高；由于输出量不能反馈回来影响控制量，所以输出量受扰动信号的影响比较大，系统抗干扰能力差等。根据上述特点，开环控制方式仅适用于输入量已知、控制精度要求不高、扰动作用不大的情况。



#### 提示

开环控制系统一般是根据经验来设计的。如普通的洗衣机对输出量即衣服的洁净度不作监测（现在能监测衣服洁净度的“洗净即停”洗衣机为闭环控制系统）；普通电烤箱不考虑开门时的扰动对烤箱温度的影响等，所以系统只有一条从输入到输出的前向通路。

**闭环控制**是指在控制器与受控对象之间, 不仅存在着正向作用, 而且存在着反馈作用, 即系统的输出量对控制量有直接影响。相应的控制系统称为闭环控制系统。将检测出来的输出量送到系统的输入端, 并和系统的输入量作比较的过程称为**反馈**。

与开环控制系统相比, 闭环控制系统不仅有一条从输入端到输出端的前向通路, 还有一条从输出端到输入端的反馈通路。输出信号的物理量通过一个反馈元件(测量变送元件)被反馈到输入端, 与输入信号比较后得到偏差信号来作为控制器的输入。

由于反馈的作用是减小偏差, 以达到满意的控制效果, 故闭环控制又称为**反馈控制**。若反馈信号与输入信号相减, 则称为**负反馈**, 反之, 若二者相加, 则称为**正反馈**。控制系统中一般采用负反馈方式。偏差信号作用于控制器上, 使系统的输出量趋向于给定的数值。



在闭环控制系统中, 由于输出信号的反馈量与给定信号作比较产生偏差信号, 利用偏差信号实现对输出信号的控制或调节, 所以系统的输出信号能够自动地跟踪给定信号, 减小跟踪误差, 提高控制精度, 抑制扰动信号的影响。

除此之外, 负反馈构成的闭环控制系统还有其他的优点, 例如引进反馈通路后, 使得系统对前向通路中元件参数的变化不灵敏, 从而降低了对前向通路中元件的精度要求; 反馈作用还使得整个系统对于某些非线性影响不灵敏等。

下面来举例说明开环控制和闭环控制。

图 1-2 是直流电动机转速开环控制示意图。在该图中, 电动机带动负载以一定的转速转动。当调节电位器的滑臂位置时, 可以改变功率放大器的输入电压, 从而改变电动机的电枢电压, 最终改变电动机的转速。所以, 电动机的转速可以通过调节电位器来给定。但是当电动机受到负载变化影响时, 电动机的转速是要发生变化的。

在这个系统中, 电位器滑臂的分压值是系统的输入量, 放大器作为控制器, 电动机是受控对象, 电动机的转速是系统的输出量。当外界有扰动时, 即使输入量没有变化, 输出量也会改变。这种开环控制系统的输出转速在负载扰动影响下不可能稳定在希望的数值上, 所以开环控制系统不能做到自动调节, 控制的精度是比较低的。为了实现系统的自动控制, 提高控制精度, 可以改变控制方法, 增加反馈回路来构成闭环控制系统。

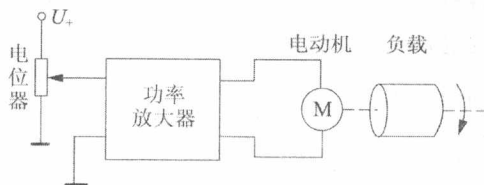


图 1-2 直流电动机转速开环控制

图 1-3 是直流电动机转速闭环控制示意图, 它在原来开环控制的基础上, 增加了一个由测速发机构成的反馈回路, 检测输出转速的变化并反馈。由于测速发电机的反馈电压大小与电动机的转速成正比, 反馈电压与输入值(电位器滑臂的分压值)作差值运算后, 再经过控制器(功率放大器)来控制电动机的转速, 可以实现电动机转速的自动调节。



系统自动调节电动机转速的过程为：当系统受到负载扰动作用时，如果负载增大，则电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小，功率放大器的输入电压增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机的转速增加。如果负载减小，则电动机转速调节的过程与上述过程相反。这样就消除或抑制了负载扰动对于电动机转速的影响，提高了系统的控制精度。

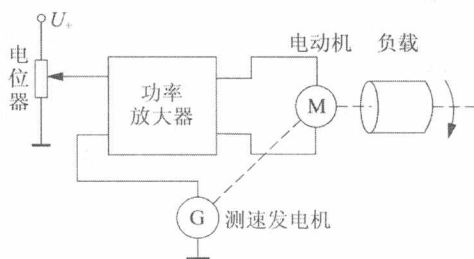


图 1-3 直流电动机转速闭环控制

综上所述，闭环控制系统的自动控制或自动调节作用是基于输出信号的负反馈作用而产生的，所以经典控制理论的主要研究对象是负反馈的闭环控制系统，研究目的是得到它的一般规律，从而可以设计出符合设计要求的，满足实际需要的，性能优良的控制系統。

本书所讲的自动控制系统主要是闭环控制系统。

## 1.2 自动控制系统的分类

自动控制系统多种多样，按照不同的标准可以分成不同的类型。前面已经介绍过开环控制系统和闭环控制系统，这是按照控制原理来分的。下面再介绍几种常见的分类方法。

### 1. 恒值控制系统与随动控制系统

根据给定的参考输入信号的不同，可将自动控制系统分为恒值控制系统和随动控制系统。

若系统的参考输入信号为恒值或者波动范围很小，系统的输出量也要求保持恒定，这类控制系统称为**恒值控制系统**。例如恒温控制系统、转速控制系统等。

**随动控制系统**又称伺服控制系统，其参考输入量不断地变化，而且变化规律未知。控制的目的是使得系统的输出量能够准确地跟随输入量而变化。随动控制系统常用于军事上对于机动目标的跟踪，例如雷达跟踪系统、坦克炮塔自稳系统等。

### 2. 线性系统与非线性系统

根据系统数学性质的不同，可将自动控制系统分为线性系统和非线性系统。

线性系统的主要特征是满足叠加原理。即当输入信号分别为  $r_1(t)$ 、 $r_2(t)$  时，系统的输出分别为  $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ ，如果输入信号满足  $ar_1(t) + br_2(t)$ ，则系统的输出为  $ac_1(t) + bc_2(t)$ 。其中系数  $a$ 、 $b$  可以是常数，也可以是时变参数  $a(t)$ 、 $b(t)$ 。这样的系统称为**线性系统**，否则称为**非线性系统**。

由于线性系统的理论比较成熟，其中特别是**线性定常系统**，可以方便地用于系统的分析与设计，因此本书主要研究和讨论的是线性定常系统。



若控制系统的结构或参数在系统运行过程中不随时间变化,则称此系统为定常系统,否则称为时变系统。而结构或参数不随时间变化的线性系统则称为线性定常系统,它是一种简单而重要的系统,关于这种系统已有较为成熟的研究成果和分析设计方法。

### 3. 连续系统与离散系统

根据信号的传递方式的不同,可将自动控制系统分为连续系统和离散系统。

若系统的输入信号与输出信号均是由连续时间函数  $r(t)$  与  $c(t)$  来表示,则称为连续系统。若系统的输入信号与输出信号均是由离散时间量  $r(kT)$  与  $c(kT)$  来表示,则称为离散系统。两类时间信号如图 1-4 所示。

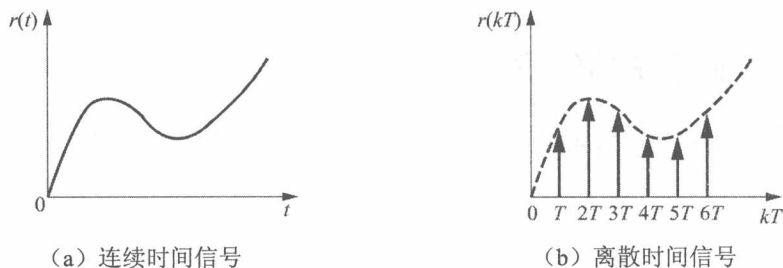


图 1-4 连续时间信号与离散时间信号

在数字化与计算机控制的当今时代,是将连续系统等价为离散系统来分析与研究的,这样可以方便地利用计算机作为控制器来实现系统的控制。计算机控制系统的结构如图 1-5 所示。

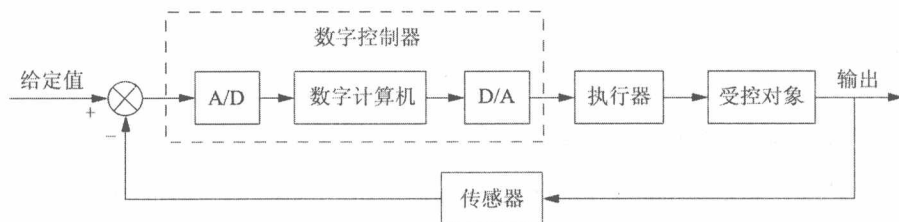


图 1-5 计算机控制系统的结构图

### 4. 单输入单输出系统与多输入多输出系统

根据端口关系的不同,可将自动控制系统分为单输入单输出系统(SISO, Single-Input Single-Output)和多输入多输出系统(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)。单输入单输出系统和多输入多输出系统如图 1-6 所示。

单输入单输出系统只有一个输入量和一个输出量。由于这种分类方法是从端口关系上来分类的,故不考虑端口内部的通路与结构。单输入单输出系统是经典控制理论的主要研究对象。

多输入多输出系统有多个输入量和多个输出量,其主要特点是输出与输入之间呈现多路耦合。与单输入单输出系统相比,多输入多输出系统的结构要复杂得多,本书不做过多介绍。

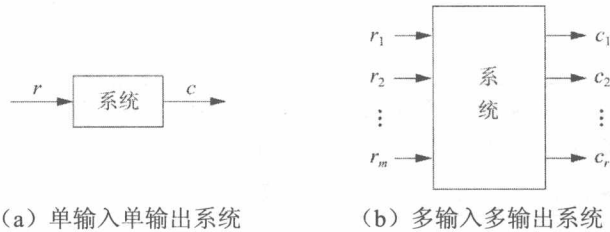


图 1-6 单输入单输出系统与多输入多输出系统

除了以上提到的分类方法外，自动控制系统还有其他的分类方法，如集中参数系统与分布参数系统、确定性系统与随机控制系统等。

## 1.3 自动控制系统的组成及性能要求

### 1.3.1 自动控制系统的组成

自动控制系统的基本结构如图 1-7 所示。下面以此图为例来介绍自动控制系统的一些常用术语及组成部分。

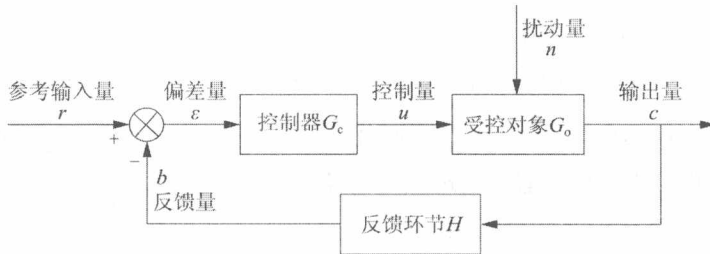


图 1-7 典型自动控制系统

#### 1. 控制系统的一些常用术语

- **受控对象**：即受控制的装置或设备（如电动机、车床等），有时也指受控的物理量，一般用符号  $G_o$  表示。受控物理量的变化过程称为受控过程，例如化学反应过程、水泥窑炉的温度变化过程等。
- **参考输入量（设定值）**：即系统的给定输入信号，或称希望值，一般用符号  $r$  表示。
- **控制量**：即施加给受控对象的外部信号，其作用是使受控对象按照一定的规律运行，一般用符号  $u$  表示。
- **输出量**：即控制系统的输出，也就是受控的物理量，一般用符号  $c$  表示。
- **偏差量**：即系统的参考输入量与反馈量之差，它是自动控制系统中的一个重要参数，一般用符号  $\varepsilon$  表示。
- **扰动量**：即外界或系统内部影响系统输出的干扰信号，一般用符号  $n$  表示。外部的扰动称为外扰，它是系统的一个不希望的输入信号；内部的扰动称为内扰，也可以等价为系统的一个输入信号。在设计控制系统时要采取一定的方法来减少或





者消除扰动量的影响。

- **前向通路**：即从输入端到输出端的单方向通路。
- **反馈通路**：即从输出端到输入端的反方向通路。对于一个复杂系统而言，前向通路和反馈通路都不止一条。

## 2. 自动控制系统的组成

虽然实际自动控制系统复杂多样，但它们都是以典型的控制系统为基础的。一个典型的控制系统由以下几部分组成。

- **受控对象**：如前所述，指接收控制量并输出被控制量的装置或设备。
- **定值元件**：在常规仪表控制中用它来产生参考输入量或设定值。设定值既可以由手动操作设定，也可以由自动装置给定。参考输入量的值根据实际情况而定，其类型与变送器的类型一致。在当前的计算机控制中，参考输入量或设定值一般可以由计算机给出，因此不需要专用的定值元件。
- **控制器**：接收偏差信号或输入信号，通过一定的控制规律给出控制量，送到执行元件。如某种专用运算电路、常规控制仪表（电动仪表，气动仪表）、可编程逻辑控制器（PLC）、工业控制计算机等都属于控制器。
- **执行元件**：有时控制器的输出可以直接驱动受控对象，但是大多数情况下受控对象都是大功率级的，控制信号与受控对象功率级别不等。另外控制信号一般是电信号，而受控对象的输入信号多是其他形式的非电物理量，物理量纲不等。因此控制器的输出不能直接驱动受控对象。两者之间实现功率级别转换或者物理量纲转换的装置称为执行元件，又常称为执行机构或执行器。常见的执行元件有步进电动机、电磁阀、气动阀、各种驱动装置等。在图 1-7 中是将执行元件并入控制器中来考虑的，因此未画出。
- **测量变送元件**：又称传感器，用于检测受控对象的输出量，如温度、压力、流量、转速等非电量，并转换成标准信号（一般是电信号）后作为反馈量送到控制器。例如各种压力传感器、流量传感器、差压变送器、测速发电机等。
- **比较元件**：用以产生偏差信号来形成控制，有的系统以标准装置的方式配以专用的比较器，大部分是以隐藏的方式合并在其他控制装置中，如计算机控制系统等。

### 1.3.2 对控制系统的性能要求

对于任何控制系统而言，首要的条件便是系统能够正常稳定运行。否则，可能毁坏设备，造成重大损失。诸如直流电动机的失磁、导弹发射的失控、运动机械的增幅振荡等都属于系统不稳定。在系统稳定的前提之下，要求系统的动态性能和稳态性能要好。

对系统性能的基本要求主要有稳定性、动态性能和稳态性能三个方面。

#### 1. 稳定性

所谓**稳定性**，是指控制系统偏离平衡状态后，自动恢复到平衡状态的能力。它是控制系统最基本的性质。当系统受到扰动后，其状态偏离了平衡状态，在随后所有时间内，如果系统的输出响应能够最终回到原先的平衡状态，则系统是稳定的；反之，如果系统的输出响应