



普通高等教育“十三五”创新型规划教材
理论+实践+数字资源一体化规划教材

主编 张学军 韩君 张磊

ZIDONGKONGZHIZHUYUANLI 自动控制原理



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

自动控制原理

主 编 张学军 韩 君 张 磊
副主编 崔 治 赵 磊 闫 坤
薛大为 郭亚琴 刘瑞妮

 电子科技大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理 / 张学军, 韩君, 张磊主编. —成都:
电子科技大学出版社, 2019. 5

ISBN 978 - 7 - 5647 - 7090 - 7

I. ①自… II. ①张… ②韩… ③张… III. ①自动控
制理论 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 107894 号

内容简介

本书是作者为了贯彻教育部“十三五”教材建设规划精神而编写出版的高校本科教材之一。

本教材的内容包括自动控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频率分析法、控制系统的综合与校正、非线性系统分析、离散系统分析等, 结合工程实际介绍了 MATLAB 在自动控制理论中的应用, 并且配有控制系统的实例分析和一定的习题, 附有习题解答和常用函数的拉普拉斯变换对照表、Z 变换对照表。本书是电子电气信息类专业的相关课程的教材, 还可作为广大从事自动控制系统设计的技术人员的参考手册。

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

张学军 韩君 张磊 主编

策划编辑 高小红

责任编辑 熊晶晶

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028 - 83203399

邮购电话 028 - 83201495

印 刷 湖北鄂南新华印刷包装股份有限公司

成品尺寸 185mm × 260mm

印 张 17.5

字 数 450 千字

版 次 2019 年 5 月第 1 版

印 次 2019 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5647 - 7090 - 7

定 价 53.80 元

版权所有 侵权必究

前言

本书是作者为了贯彻教育部“十三五”教材建设规划精神而编写出版的高校本科教材之一。自动控制原理是电气机械自动化学科的重要基础理论，是学习控制理论的入门基石。它是主要研究自动控制系统的基本概念、原理、方法的一门课程。自动控制原理已成为我国高等学校自动化专业、电气工程自动化专业、电子信息类专业、机械类专业的主干课程之一。本书全面系统地介绍了经典理论的时域、复域、频域分析方法，以及离散控制理论基础和非线性控制理论。

全书共分8章。第1章主要介绍自动控制系统的基本概念、组成、典型结构、对控制系统的基本要求及自动控制理论简史；第2章主要介绍自动控制系统数学模型的建立，包括微分方程、传递函数、结构图、信号流图等；第3章主要介绍控制系统的时域分析；第4章主要介绍控制系统的根轨迹分析与设计；第5章主要介绍控制系统的频域分析；第6章主要介绍控制系统的校正与综合；第7章主要介绍非线性控制系统的分析；第8章主要介绍离散系统的分析与综合。第3~8章结合工程实际介绍了MATLAB在自动控制理论中的应用。附录常用函数的拉普拉斯变换对照表、拉普拉斯变换基本定理和Z变换对照表。

在本书编写过程中，作者结合多年的教学与科研工作经验，立足于基础性、系统性、实用性、工程性的论述，叙述简洁、层次分明，做到理论与应用并重。以经典控制的基础理论讲解为基础，配合控制系统的实例分析，结合工程实际介绍了MATLAB在自动控制理论中的应用。本书由电子科技大学出版社出版，由湖南城市学院张学军教师统稿并编写该书目录、附录和第7章，湖南城市学院教师崔治、南通理工学院教师郭亚琴和西安翻译学院刘瑞妮共同编写了第8章，蚌埠学院教师薛大为编写第1章、第6章，安徽信息工程学院教师张磊编写第2章，黄山学院教师赵磊编写第3章，长春汽车工业高等专科学校教师闫坤编写第4章，宿州学院教师韩君和宿州学院教师郭凯编写第5章。

本书参考、吸取了大量国内出版的教材、论文的长处，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在缺漏或不妥之处，敬请读者批评指正。

编者
2019年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统的基本概念	1
1.1.1 技术术语	1
1.1.2 反馈控制原理	2
1.2 开环控制与闭环控制	3
1.2.1 开环控制	3
1.2.2 闭环控制	3
1.3 自动控制系统的分类	4
1.3.1 线性连续控制系统	4
1.3.2 线性定常离散系统	5
1.3.3 非线性控制系统	5
1.3.4 SISO 系统和 MIMO 系统	5
1.3.5 集中参数系统和分布参数系统	6
1.4 对自动控制系统的性能要求	6
1.4.1 稳定性	6
1.4.2 快速性	6
1.4.3 准确性	7
1.5 自动控制系统示例	7
1.6 自动控制简史	9
本章小结	10
习题	10

第 2 章 自动控制系统的数学模型	12
2.1 系统动态微分方程模型	12
2.2 非线性数学模型的线性化	16
2.3 传递函数	18
2.3.1 传递函数的定义和性质	18
2.3.2 典型环节的传递函数	19
2.4 系统结构图及其等效变换	22
2.4.1 系统结构图	23
2.4.2 结构图的等效变换和简化	24
2.4.3 系统传递函数	29
2.5 信号流图与梅逊公式	31
2.5.1 信号流图	31
2.5.2 梅逊公式	32
本章小结	34
习题	35
第 3 章 时域分析法	39
3.1 典型输入信号和时域性能指标	39
3.1.1 典型输入信号	39
3.1.2 控制系统的性能指标	42
3.2 一阶系统的时域分析	43
3.2.1 一阶系统的数学模型	43
3.2.2 一阶系统的时域响应及性能分析	44
3.3 二阶系统的时域分析	46
3.3.1 二阶系统的数学模型	46
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	46
3.3.3 二阶系统的性能指标	49
3.3.4 二阶系统性能的改善措施	51
3.4 高阶系统的时域分析	53

3.5 系统的稳定性分析	56
3.5.1 系统稳定的概念	56
3.5.2 系统稳定的充分必要条件	56
3.5.3 劳斯稳定判据	57
3.5.4 劳斯判据的应用	59
3.6 系统的稳态特性分析	61
3.6.1 系统误差与稳态误差	61
3.6.2 参考输入作用下的稳态误差的计算	62
3.6.3 扰动输入作用下的稳态误差计算	65
3.6.4 减小或消除稳态误差的措施	66
3.7 MATLAB 在时域分析中的应用	67
本章小结	71
习题	72
第4章 根轨迹法	75
4.1 根轨迹的基本概念	75
4.1.1 根轨迹的定义	75
4.1.2 根轨迹方程	77
4.2 绘制根轨迹的规则和方法	79
4.3 控制系统性能的根轨迹分析方法	87
4.3.1 开环零极点变化时的根轨迹	87
4.3.2 增加开环零点的影响	88
4.3.3 闭环零极点分布与阶跃响应的定性关系	88
4.3.4 主导极点与偶极子	90
4.3.5 利用主导极点估算系统的性能指标	90
4.3.6 系统阶跃响应的根轨迹分析	91
4.4 MATLAB 在控制系统根轨迹分析中的应用	92
本章小结	97
习题	98

第 5 章 频率分析法	99
5.1 频率特性的基本概念	99
5.2 频率特性的表示法	102
5.2.1 频率特性的几种图示法	102
5.2.2 典型环节的频率特性	104
5.3 系统开环频率特性	115
5.3.1 系统开环幅相频率特性	115
5.3.2 系统开环对数频率特性	120
5.3.3 最小相位系统、非最小相位系统	123
5.3.4 传递函数的频域实验确定	124
5.4 频域中的稳定性判据	127
5.4.1 辐角定理	127
5.4.2 奈氏稳定性判据	128
5.4.3 对数频率稳定判据	131
5.4.4 奈氏判据应用举例	132
5.4.5 系统的稳定裕量	136
5.5 开环频率特性分析	137
5.5.1 基于伯德图的系统稳态性能分析	137
5.5.2 频率特性的两个基本关系	139
5.5.3 低频段和高频段特性斜率的影响	141
5.5.4 ω_c (或开环放大系数 K) 对相位裕量的影响	142
5.5.5 开环频率特性与时域性能指标的关系	145
5.6 闭环系统频率特性	147
5.6.1 闭环频率特性与开环频率特性的关系	147
5.6.2 闭环系统频率特性及其与暂态特性指标的关系	148
5.6.3 闭环系统等 M 圆、 θ 圆及尼氏图	150
5.6.4 非单位反馈系统的闭环频率特性	153
5.7 MATLAB 在控制系统频域分析中的应用	154

5.7.1 用 MATLAB 作频率特性图	154
5.7.2 稳定性分析	154
5.7.3 相对稳定性分析	154
本章小结	160
习题	160
第 6 章 控制系统的综合与校正	164
6.1 系统校正基础	164
6.1.1 校正的基本概念	164
6.1.2 性能指标	165
6.1.3 校正方式	165
6.2 串联校正	166
6.2.1 相位超前校正	166
6.2.2 相位滞后校正	170
6.2.3 相位滞后—超前校正	173
6.3 PID 校正	176
6.4 局部反馈校正	178
6.4.1 局部反馈校正的基本原理	178
6.4.2 速度反馈校正	179
6.5 复合校正	180
6.5.1 按输入补偿的复合校正	181
6.5.2 按扰动补偿的复合校正	181
6.6 MATLAB 在控制系统综合与校正中的应用	182
6.6.1 使用 MATLAB 进行超前校正	183
6.6.2 使用 MATLAB 进行滞后校正	184
6.6.3 使用 MATLAB 进行滞后—超前校正	185
本章小结	188
习题	189

第 7 章 非线性系统分析	191
7.1 非线性控制系统概述	191
7.1.1 非线性控制系统的概念	191
7.1.2 控制系统的典型非线性特性	192
7.1.3 非线性控制系统的特性	196
7.1.4 非线性控制系统的分析方法	196
7.2 描述函数法	196
7.2.1 描述函数法的基本概念	197
7.2.2 典型非线性的描述函数	198
7.3 用描述函数法分析非线性控制系统	205
7.3.1 非线性系统的稳定性分析	206
7.3.2 自激振荡的分析与计算	206
7.4 相平面分析法	210
7.4.1 相平面和相轨迹的基本概念	210
7.4.2 相轨迹的绘制方法	211
7.4.3 相平面图的性质	213
7.4.4 奇点和奇线	213
7.4.5 非线性系统的相平面分析	217
7.5 MATLAB 在非线系统分析中的应用	223
本章小结	227
习题	227
第 8 章 离散控制系统分析	231
8.1 离散控制系统概述	231
8.1.1 离散控制系统的基本概念	231
8.1.2 离散控制系统的分析方法	233
8.2 信号的采样与复现	233
8.2.1 采样过程	233
8.2.2 采样定理 (Shannon 定理)	234

8.2.3 信号的复现及零阶保持器	235
8.3 Z 变换	237
8.3.1 Z 变换	237
8.3.2 Z 反变换	238
8.3.3 用 Z 变换解差分方程	239
8.4 离散控制系统的数学模型	240
8.4.1 离散控制系统的数学模型基本概念	240
8.4.2 开环系统的脉冲传递函数	241
8.4.3 闭环系统的脉冲传递函数	242
8.5 离散系统分析	244
8.5.1 离散系统的暂态响应分析	244
8.5.2 离散系统的稳定性分析	247
8.5.3 离散系统的稳态误差	249
8.6 MATLAB 在离散系统分析中的应用	252
8.6.1 连续系统的离散化	252
8.6.2 求离散系统的响应	253
8.6.3 MATLAB 在离散系统的时域分析中的应用	256
8.6.4 MATLAB 在离散系统的频域分析中的应用	257
本章小结	259
习题	260
附录 A 常用函数的拉普拉斯变换对照表	262
附录 B 拉普拉斯变换基本定理	264
附录 C 常用函数的 Z 变换对照表	265
参考文献	267

自动化技术是当代发展迅速，应用广泛，最引人注目的高技术之一，是推动新的技术革命和新的产业革命的核心技术。所谓自动控制，是指在没有人的直接干预下，利用外加的设备或装置，使机器、设备或生产过程的工作状态或参数自动地按照特定规律运行。自动控制系统，是指为了实现某一控制目标，将所需要的所有物理部件按照一定的方式连接起来组成的一个有机总体。自动控制的基础是反馈理论和线性系统理论，并综合应用了网络理论和通信理论的相关知识。因此，自动控制并不从属于任一工程学科，在航空航天、舰船、化工、机械、环境、电气以及核动力等工程学科中都有着广泛的应用。随着社会的发展，自动控制技术正逐步应用于生物、医学、商业和社会管理等领域。

1.1 自动控制系统的基本概念

典型自动控制系统的组成结构如图 1-1 所示。下面以图 1-1 来介绍自动控制系统中常用的一些技术术语。

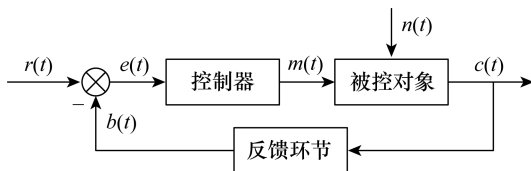


图 1-1 典型自动控制系统的组成结构框图

1.1.1 技术术语

(1) 被控对象。也称为受控对象，即被控制的对象。常指一个装备、工作机器等(如飞机、喷气发动机、汽车、宇宙飞船等)，其作用是完成特定的技术要求。

(2) 控制器。又称调节器、控制装置，由控制元部件组成，它接受指令信号，输出控制作用信号于受控对象。如果控制器不能直接驱动受控对象，需通过执行机构作用于控制受控对象。

(3) 自动控制系统。受控对象和控制器按照一定方式连接起来，组成一个有机整体，能提供预期的系统响应，以实现各种控制任务。

(4) 被控量 $c(t)$ 。表征受控对象工作状态的物理参量(或状态参量)，如转速、压力、温度、电压、位移等。

(5) 给定值或指令信号 $r(t)$ 。要求控制系统按一定规律变化的信号，是系统的输入信号。

(6) 干扰信号 $n(t)$ 。又称扰动值，是一种对系统的被控量起破坏作用的信号。如果干扰产生在系统内部，称为内扰；产生在系统外部，称为外扰。外扰也是系统的一种输入信号。

(7) 反馈信号 $b(t)$ 。是指被控量经测量元件检测后回馈送到系统输入端的信号。

(8) 偏差信号 $e(t)$ 。是指给定值与被控量的差值，或指令信号与反馈信号的差值。

(9) 控制信号 $m(t)$ 。又称为控制量，是指作用于被控对象的信号。

1.1.2 反馈控制原理

在自动控制系统中，被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以是一个恒定值，如温度、压力、转速等；也可以是一个变量，如飞机、导弹的飞行轨迹。作为对受控对象施加控制作用的控制装置，可以采用不同的原理和方式完成赋予的任务。其中，最基本的控制原理就是反馈控制原理。基于反馈控制原理组成的控制系统称为反馈控制系统。

在反馈控制系统中，控制装置对受控对象施加控制作用，而控制装置接收的信号是被控量的反馈信号与给定值相比较产生的偏差，根据偏差值的大小产生控制作用，实现控制任务。这就是反馈控制的工作原理。

反馈控制在现代工业和社会生活中的应用十分普遍。理论上讲，人体本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统，人们平日任何最简单的活动都体现着反馈控制原理。例如，如果将驾驶一辆汽车视为一个反馈系统，对其进行分析，首先，人要用眼睛连续目测预定的行车路线，并将信息输入大脑(给定值)，然后与实际测量的行车路线相比较，获得行驶偏差，通过手来操作方向盘，调节汽车使其按照预定行车路线行驶。如图 1-2 所示的汽车驾驶控制系统可以用如图 1-3 所示的框图来表示这一控制系统的组成部分和工作原理。

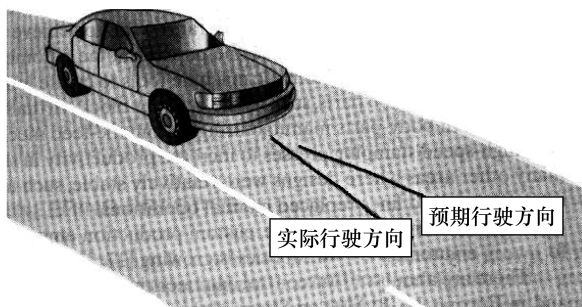


图 1-2 汽车驾驶示意图

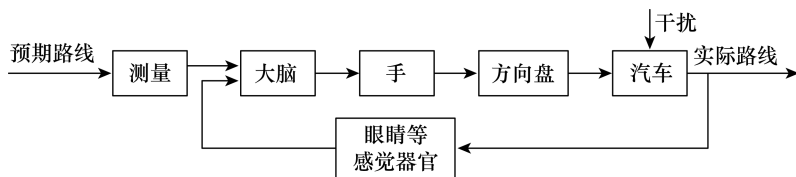


图 1-3 汽车驾驶控制原理框图

在这里，人是控制装置，方向盘是执行装置，汽车为受控对象，实际行车路线为被控量，预期路线为给定值。

1.2 开环控制与闭环控制

1.2.1 开环控制

开环控制原理是指，需要控制的是受控对象的被控量，而控制装置只接收给定值，信号只由给定值单向传递到被控量，信号只有顺向作用，无反向联系，控制系统的输出量对系统没有控制作用，称为开环控制。其原理框图如图 1-4 所示。

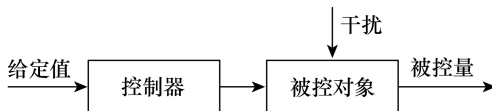


图 1-4 开环控制原理框图

这种控制方式的特点是简单，但控制精度低。控制精度完全取决于所用元件的精度和校准的精度，且抗干扰能力差。但由于其结构简单、成本低，在精度要求不高的情况下，有一定的实用价值。一些自动化流水线，如包装机、交叉路口的红绿灯控制、自动售货机等多采用这种控制方式。

1.2.2 闭环控制

闭环控制原理是把系统的输出量检测出来，经过物理量的转换，再反馈到系统的输入端去与给定量进行比较(形成偏差)。该偏差信号经放大后送到执行元件，去操纵受控对象，使被控量按预定的规律变化，力图消除偏差。只要被控量偏离了给定值，无论是干扰影响，还是内部特性参数变化导致的，或是给定值变动，系统均能自动纠正。这种控制方式也称为按偏差调节。显然，该系统从理论上提供了实现高精度控制的可能性。

把取出的输出量回送到输入端，并与指令信号比较产生偏差的过程，称为反馈。指令信号与被控量相减为负反馈，相加则为正反馈。不做特别说明，一般指负反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程，是自动控制系统中最基本的控制方式，在工程获得了广泛的应用。其原理框图如图 1-5 所示。

闭环控制有三大特点：信号按箭头方向传递是封闭的(闭环)、负反馈和按偏差控制。因此，闭环控制也称为反馈控制或按偏差控制。

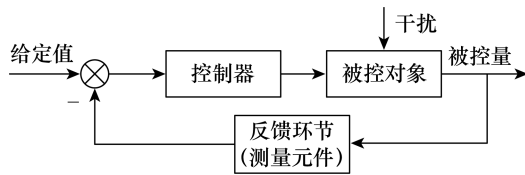


图 1-5 闭环控制原理框图

闭环控制的主要优点是控制精度高，抗干扰能力强。缺点是使用的元件多，线路复杂，系统的分析和设计都比较麻烦。

必须指出，开环控制和闭环控制之间的基本区别在于有无负反馈作用。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统形式多种多样，按照不同的分类方法可以分成不同的类型。例如，按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等；按系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和非确定性系统等；按输入量形式可分为恒值控制系统、随动系统和程序控制系统等。为了全面反映控制系统的特点，经常会将上述各种分类方法组合使用。

1.3.1 线性连续控制系统

该类系统用微分方程表示，形式为

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_m r(t) \end{aligned}$$

其中， $c(t)$ 为被控量， $r(t)$ 为系统输入量。当 a_0, a_1, \dots, a_n 及 b_0, b_1, \dots, b_m 是常数时，系统为定常系统；当 a_0, a_1, \dots, a_n 及 b_0, b_1, \dots, b_m 随时间变化时，系统为时变系统。线性连续控制系统按输入量的变化，又可分为恒值控制系统、随动控制系统及程序控制系统。

(1) 恒值控制系统。此类控制系统的输入量为一个常值，要求被控量亦为一个常值。但由于扰动的影响，被控量会产生偏差，控制系统因此产生控制作用，以克服扰动的影响。因此，对于恒值控制系统的分析和设计，主要集中在研究扰动对系统的影响和抗扰动的措施。在恒值控制系统中，输入量可以随生产要求的变化而改变，要求一经整定后，被控量就应随之做出调整。在工业生产中，如果被控量为温度、流量、压力、液位等生产过程参量，则该系统就称为过程控制系统。

(2) 随动系统。此类控制系统的输入量为预先未知的随时间任意变化的函数，要求系统输出以尽可能小的误差跟随输入量的变化。在随动系统中，扰动的影响是次要的，主要的研究重点是输出量跟踪输入量变化的快速性和准确性。在控制领域，如果被控量为机械

位置或其导数，则通常称之为伺服系统。

(3) 程序控制系统。此类控制系统的输入量为按预定规律随时间变化的函数。程序控制系统和随动系统的输入量都是时间的函数，区别在于前者是已知的的时间函数，后者是未知的任意时间函数。恒值控制系统也可看作是程序控制系统的特例。

1.3.2 线性定常离散系统

线性定常离散系统是指系统的某处或多处的信号为脉冲序列或数码形式，因而信号在时间上是离散的。连续信号经过采样开关就可以转成离散信号。连续时间信号与离散时间信号如图 1-6 所示。一般在离散系统中既有连续的模拟信号，也有离散的数字信号，因此，离散系统要用差分方程描述。线性差分方程的一般形式为

$$\begin{aligned} a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{n-1} c(k+1) + b_m r(k) \end{aligned}$$

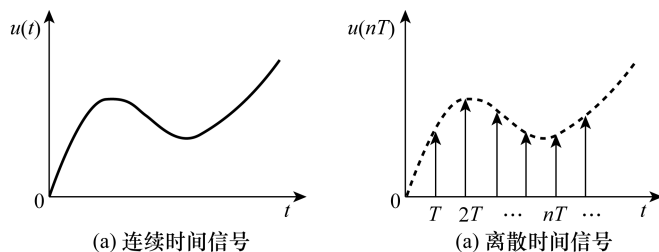


图 1-6 连续时间信号与离散时间信号

工业计算机控制系统就是典型的离散系统。

1.3.3 非线性控制系统

系统中只要有一个元部件的输入—输出特性是非线性的，这类系统就是非线性系统，一般用非线性微分方程(或差分方程)描述系统特性。非线性方程的特点是系数与变量有关，或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项，例如：

$$\begin{aligned} y''(t) + y(t)y'(t) + y^2(t) &= r(t) \\ y(t) &= r(t) \cos \omega t \end{aligned}$$

严格地说，实际物理系统中都有不同程度的非线性元部件，例如放大器和电磁元件的饱和特性，运动部件的死区、间隙、摩擦等特性。由于非线性方程在处理上比较困难，对于一些非线性程度不十分严重的部件，可采用在小范围内线性化的方法，将非线性控制系统近似为线性系统。

1.3.4 SISO 系统和 MIMO 系统

按照输入信号和输出信号的数目，可分为单输入单输出(SISO)系统和多输入多输出(MIMO)系统，如图 1-7 所示。SISO 系统通常称为单变量系统，这种系统只有一个输入(不包括扰动输入)和一个输出。MIMO 系统通常称为多变量系统，这种系统有多个输入和

多个输出。单变量系统可以作为多变量系统的特例。

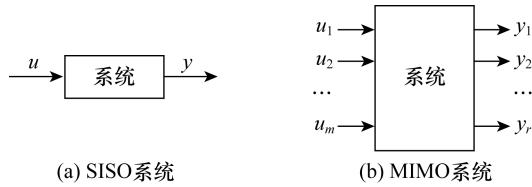


图 1-7 SISO 系统和 MIMO 系统

1.3.5 集中参数系统和分布参数系统

如果在系统分析与设计中，可以把一个系统看作是有限多个理想的分立部件的总体，这类系统称为集中参数系统，例如电阻、电容、电感、阻尼、弹簧、质量等集中参数系统用常微分方程描述。如果系统只能看作是由无穷多个无穷小的分立部件组成，则该系统称为分布参数系统，用偏微分方程描述。例如，导线上的电压分布是时间和位置的函数，因此只能用偏微分方程描述，是一个分布式参数系统。分布参数系统的分析和设计比较复杂，此书不涉及这部分内容。

1.4 对自动控制系统的性能要求

自动控制系统有很多种类型，对每一个系统的要求也不一样。但对各类系统来说，在已知系统结构和参数的情况下，系统是否能够很好地工作，系统的输出值是否都能满足要求，这取决于系统参数之间的匹配是否得当。在理想情况下，被控量 $c(t)$ 和给定值 $r(t)$ 在系统运行全过程中时时相等，没有误差，不受干扰的影响。而实际上，由于每个系统都存在着或大或小的惯性，系统的功率也是有限的，因此不是在任何时刻系统都会满足 $c(t) = r(t)$ 的要求。后面所要研究的是在某种典型输入信号的作用下，被控量变化的整个过程。通常将系统的给定值变化或受到干扰作用后被控量变化的整个过程称为系统的动态过程。控制系统动态过程的基本性能要求可以归纳为稳定性、准确性、快速性三个方面，即稳、准、快。

1.4.1 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件。对于稳定的控制系统，被控量偏离期望值后，经过一段过渡时间后，被控量应恢复到原来状态。对于不稳定的控制系统，其被控量偏离期望值会越来越来，最终发散。显然，不稳定的控制系统是无法实现控制功能的。线性控制系统的稳定性由系统的内部结构所决定，与外界因素无关。由于系统中一般都含有如电感、电容、质量等惯性元件，因此系统的控制过程不会立即发生，而是有一个逐渐变化的过程。

1.4.2 快速性

如果控制系统的过渡过程太长，虽然最后系统能够到达稳定状态，但系统性能会受到