

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

The Virtual Simulation and Experimental Design of
Automatic Control Theory

自动控制理论虚拟仿真 与实验设计

姜增如 ○ 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



投稿邮箱: xueshu@bitpress.com.cn
咨询电话: (010) 68911947 68911085

The Virtual Simulation and Experimental Design of
Automatic Control Theory

自动控制理论虚拟仿真 与实验设计

策划编辑: 张海丽 国 珊
执行编辑: 李丁一
封面设计: OICA 原创任玮

ISBN 978-7-5682-8941-2



9 787568 128941 2 >

定价: 58.00元

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

The Virtual Simulation and Experimental Design of
Automatic Control Theory

自动控制理论虚拟仿真 与实验设计

姜增如 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共包含4章内容。第1章为自动控制理论实验基础,介绍了自动控制及系统的组成、稳定性的概念及传递函数的建立方法。第2章利用MATLAB提供的强大数据处理、绘图函数和命令设计了12个小实验。第3章使用Simulink仿真工具设计了7个小实验。第4章结合电机及倒立摆硬件对象设计了11个实验内容。在此基础上,读者可根据虚拟仿真实验算法在硬件平台上扩展。这些实验从时域、频域、根轨迹、非线性及状态空间几个方面,完成对系统性能指标验证及控制系统设计。书中还使用APP编写了实验界面,通过人-机交互完成PID控制参数设计。每个实验通过说明、案例列出了详细操作步骤,引导读者自行完成实验内容。本书中的实验包括实验目的、实验内容、操作步骤及实验要求,最后附有思考题。本书最后使用附录的形式增加了绘图及函数的使用方法,帮助读者在完成从仿真分析到实物验证、再到设计控制参数时,通过输出图形进行对比分析,能直观地判别性能指标。书中的实验案例列举了大量图形,使抽象的理论变得生动形象,不仅能帮助读者理解自动控制理论知识,还能使其在实验中增加兴趣。

本书可作为高等院校工科自动化、电气工程自动化、机械工程及自动化、仪表及测试等专业的教科书,亦可作为自动控制类的各专业工程技术人员自学参考的实验教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论虚拟仿真与实验设计/姜增如编著. —北京:北京理工大学出版社, 2020.9

ISBN 978-7-5682-8941-2

I. ①自… II. ①姜… III. ①自动控制系统-仿真系统-实验-教材 IV. ①TP273-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第160539号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/16.75

字 数/396千字

版 次/2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷

定 价/58.00元

责任编辑/张海丽

文案编辑/张海丽

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

自动控制理论是自动化专业及其相关专业的必修实验课程。本书所有实验围绕课堂自动控制理论知识点而设计，可作为自动控制原理课程的辅助教材。书中实验数据从虚拟仿真到实物设计均采用了程序运算，提高了计算精度也节省了计算时间。书中第2章实验十二，由刘士涵同学帮助编写了程序。第4章实验结合了 Quanser 公司 QUBE - Servo 2 实验设备，该部分内容得到了北京优诺智奇科技有限公司总经理刘洋的大力支持，书中的大量实验图形和结果均是他提供的；同时，该部分实验内容也得到上海鲲航智能科技有限公司总经理马凯的支持。没有他们的帮助，本书无法完成，在此深表感谢。

由于控制科学已经发展到以复杂系统为研究对象的智能控制阶段，利用互联网实现远程控制也成为一种研究方向。书中的实验均可作为远程控制实验内容，结合了中国大学 MOOC 的《自动控制理论实验》需求，引入的案例可与 MOOC 同步学习。

本书的最大特色是案例实验教学，在内容上将 MATLAB 函数、编程方法、仿真、实际硬件平台对象分析融为一体，将传统控制理论实验手段与计算机的应用相结合，讲解过程从虚拟仿真到实物验证，内容精炼，重点突出，帮助读者理解理论知识和实际运用，同时，也对参加大学生创新、增强学生实验设计能力具有很好的辅助作用。

姜增如
2020年7月

目 录

CONTENTS

第 1 章 自动控制理论实验基础	001
1.1 自动控制及控制系统	001
1.1.1 常见的自动控制系统	001
1.1.2 开环与闭环控制	002
1.1.3 程序自动控制	005
1.2 控制系统的稳定性	005
1.2.1 稳定性的描述	006
1.2.2 稳定性的图形表示	006
1.3 传递函数模型	007
1.3.1 传递函数的定义	007
1.3.2 传递函数的性质	007
1.3.3 传递函数的主要应用	007
1.4 系统的开环和闭环传递函数	008
1.4.1 开环传递函数	008
1.4.2 闭环传递函数	008
1.5 传递函数的常用形式及建立方法	009
1.5.1 多项式传递函数形式	009
1.5.2 零极点传递函数形式	010
1.5.3 状态空间形式	010
1.5.4 标准传递函数形式	011
1.5.5 延迟环节传递函数形式	012
1.5.6 建立传递函数的方法	012
1.6 传递函数的形式转换	016
1.6.1 多项式到零极点传递函数	016
1.6.2 零极点到多项式传递函数	016

1.6.3	多项式传递函数到状态空间	016
1.6.4	状态空间到多项式传递函数	016
1.6.5	零极点 to 状态空间	016
1.6.6	状态空间到零极点传递函数	016
1.6.7	由传递函数获取系数	019
第2章	基于 MATLAB 虚拟仿真实验	021
实验一	框图化简	021
一、	实验目的	021
二、	实验案例及说明	021
三、	实验内容与要求	025
四、	思考题	026
实验二	控制系统的瞬态响应分析	026
一、	实验目的	026
二、	实验案例及说明	026
三、	实验内容与要求	028
四、	思考题	028
实验三	二阶系统阶跃响应分析	028
一、	实验目的	028
二、	实验案例及说明	028
三、	实验内容与要求	031
四、	思考题	032
实验四	稳定性分析	032
一、	实验目的	032
二、	实验案例及说明	032
三、	实验内容与要求	037
四、	思考题	037
实验五	线性系统的频域分析与根轨迹分析	037
一、	实验目的	037
二、	实验案例及说明	038
三、	实验内容与要求	048
四、	思考题	049
实验六	PID 控制器参数设计	049
一、	实验目的	049
二、	实验案例及说明	049
三、	实验内容与要求	069
四、	思考题	069
实验七	频域法超前和滞后校正设计	070
一、	实验目的	070

二、实验案例及说明	070
三、实验内容与要求	074
四、思考题	075
实验八 根轨迹校正设计	075
一、实验目的	075
二、实验案例及说明	075
三、实验内容与要求	082
四、思考题	083
实验九 状态空间极点配置控制系统设计	083
一、实验目的	083
二、实验案例及说明	084
三、实验内容与要求	096
四、思考题	096
实验十 二次型最优控制器设计	096
一、实验目的	096
二、实验案例及说明	097
三、实验内容与要求	101
四、思考题	101
实验十一 使用卡尔曼滤波器设计 LQR 最优控制器	101
一、实验目的	101
二、实验案例及说明	102
三、实验内容与要求	104
四、思考题	104
实验十二 利用工程整定法实现 PID 控制器设计	104
一、实验目的	104
二、实验案例及说明	105
三、实验步骤与要求	112
四、思考题	113
第 3 章 基于 Simulink 模块仿真实验	114
实验一 典型环节与二阶系统仿真	114
一、实验目的	114
二、实验案例及说明	114
三、实验内容与要求	122
四、思考题	125
实验二 串联超前、滞后校正仿真设计	125
一、实验目的	125
二、实验案例及说明	125
三、实验内容与要求	127

四、思考题	128
实验三 稳定性及稳态误差仿真	128
一、实验目的	128
二、实验案例及说明	128
三、实验内容与要求	132
四、思考题	132
实验四 PID 控制器参数设计	133
一、实验目的	133
二、实验案例及说明	133
三、实验内容与要求	139
四、思考题	140
实验五 使用 Smith 预估器设计 PID 控制器	140
一、实验目的	140
二、实验案例及说明	140
三、实验内容与要求	143
四、思考题	143
实验六 非线性相平面分析与校正设计	143
一、实验目的	143
二、实验案例及说明	144
三、实验内容与要求	150
四、思考题	151
实验七 状态反馈控制器配置仿真设计	151
一、实验目的	151
二、实验案例及说明	151
三、实验内容及要求	155
四、思考题	156
第 4 章 基于 QUBE - Servo 2 电机及倒立摆的实验分析与设计	157
硬件说明 Quanser QUBE - Servo 2 组件	157
实验一 基于电机的一阶闭环系统时域分析	162
一、实验目的	162
二、实验内容	162
三、实验步骤	162
四、实验报告要求	170
五、思考题	171
实验二 基于电机二阶闭环系统的时域分析	171
一、实验目的	171
二、实验内容	171
三、实验步骤	172

四、实验报告要求	179
五、思考题	179
实验三 基于位置的二阶闭环系统稳态误差分析	180
一、实验目的	180
二、实验内容	180
三、实验步骤	181
四、实验报告要求	188
五、思考题	189
实验四 基于位置二阶闭环系统的频域分析	189
一、实验目的	189
二、实验内容	189
三、实验步骤	190
四、实验报告要求	197
五、思考题	199
实验五 基于电机的二阶系统的超前校正	200
一、实验目的	200
二、实验内容	200
三、实验步骤	201
四、实验报告要求	203
五、实验分析	203
六、思考题	203
实验六 基于电机的二阶系统 PD 控制器设计	203
一、实验目的	203
二、实验内容	204
三、实验步骤	205
四、实验报告要求	208
五、实验分析	208
六、思考题	208
实验七 基于电机的离散系统分析	209
一、实验目的	209
二、实验内容	209
三、实验步骤	211
四、实验报告要求	216
五、思考题	217
实验八 基于电机的非线性系统分析	217
一、实验目的	217
二、实验内容	217
三、实验步骤	218
四、实验报告要求	223

五、思考题	223
实验九 基于倒立摆的起摆控制	224
一、实验目的	224
二、实验方法	224
三、实验步骤	226
四、实验报告要求	231
五、实验分析	231
六、思考题	231
实验十 基于倒立摆的 PD 稳摆控制	231
一、实验目的	231
二、实验方法	231
三、实验步骤	233
四、实验报告要求	236
五、实验分析	236
六、思考题	236
实验十一 基于倒立摆的 LQR 最优控制	236
一、实验目的	236
二、实验方法	236
三、实验步骤	237
四、实验报告要求	240
五、实验分析	240
六、思考题	240
附录 常用绘图	241
F1 二维绘图	241
F2 三维绘图	246
F3 函数插值	251
F3.1 一维插值	251
F3.2 二维插值	255
F3.3 三维插值	257
参考文献	258

第 1 章

自动控制理论实验基础

控制系统的数学模型由系统本身的结构参数决定，系统的输出由系统的数学模型、系统的初始状态和输入信号决定。建立系统数学模型的目的，是在自动控制理论的基础上研究控制算法，根据模型进行仿真的结果，从理论上证明在一定的控制范围内算法的正确性和控制方法的合理性。

1.1 自动控制及控制系统

自动控制是指不需要人的直接参与情况下，按照预定的规律自动运行。自动控制系统是指使用自动控制装置，对生产或运行中某些关键性参数进行自动控制，使它们在受到外界干扰或扰动而偏离正常状态时，能够被自动地控制而回到工艺所要求的数值范围内。在生产过程中因受到各种工艺条件影响，工艺参数不可能是一成不变的。特别是化工生产，在连续性生产过程中各设备相互关联，当其中某一设备的工艺条件发生变化时，都可能引起其他设备中某些参数波动，偏离了正常的工艺条件。自动控制系统能抵御被控量受到的外部扰动，使得系统正常工作。

1.1.1 常见的自动控制系统

根据系统功能划分，常见的自动控制系统有温度、压力、位置、流量和速度控制系统等；按给定信号的特点分类，可分为定值控制、随动控制和程序控制系统。例如，要求被控量（温度、压力、液位、湿度、流量、速度等）不变的系统为定值控制，随时间变化被控量跟随变化的称为随动控制；被控量的给定值随程序变化的系统称为程序控制系统。

控制系统随处可见，如无人驾驶、航天火箭、卫星入轨是典型的自动控制。生活中也很常见，如空调控制的过程，当房间温度受到天气变化引起波动时，控制器使其保持在设定的温度值；楼房的电梯运行过程中，多部电梯的联动或处在不同楼层同时按电梯时，电梯根据预定程序自动控制。过程控制的化工生产中，反应釜内需要保持一个恒定值温度，才能生产出高精度产品，而生产过程中各种工艺条件、大气温度的变化，包括保温层等因素（称干扰）均会使反应釜内热量散发发生改变，为了达到温度保持不变的目的，需要通过控制器自动控制保持温度恒定值。

例如，锅炉气鼓水位控制系统，要求气鼓中的水液（被控量）保持一定的值，当高于或低于某个值时，就会发生危险。自动控制就是使用控制器替代眼睛、大脑和手的工作。锅炉水位控制的示意图如图 1.1.1 所示。

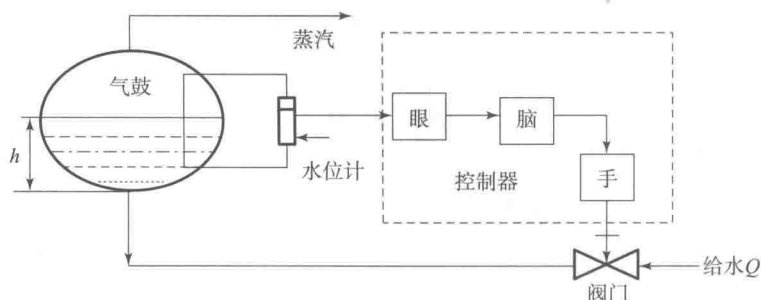


图 1.1.1 锅炉水位自动控制示意图

图中，被控量是液位 h ，控制参数 Q 为输入量，为了保持被控量 h 为一定值，需要控制器控制输入阀门的给水量，这就是液位的自动控制。

1.1.2 开环与闭环控制

1. 开环控制

1) 定义

输出量与输入量之间没有反向联系，只靠输入量对输出量单向控制的系统叫开环控制系统。因为控制作用是由输入信号直接向前输送，而不是由输出信号回输到输入信号来进行控制的，故开环控制又可称为前馈控制。

在开环控制系统中，控制精度和抑制干扰的特性都比较差，且控制的效果不能实时跟踪。开环控制主要应用于机械、化工、物料装卸运输等过程的半自动化控制。例如直流电机转速控制系统，通过改变电位器位置可改变电压值，电压 $0 \sim 10 \text{ V}$ 可使得电机转速为 $0 \sim 1000 \text{ r/min}$ ，控制电压即可控制转速，如图 1.1.2 所示。

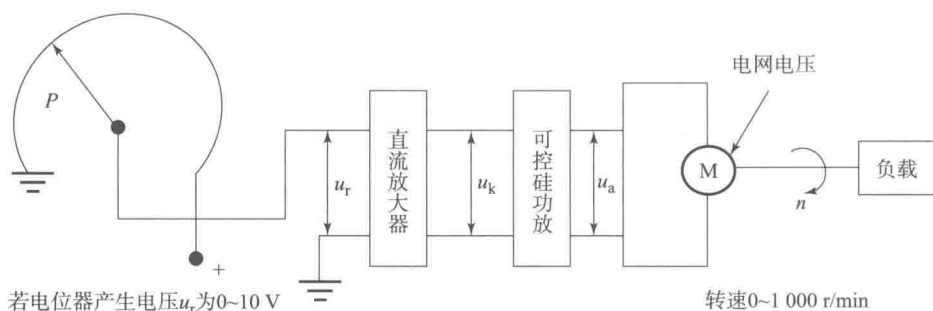


图 1.1.2 电机速度控制示意图

2) 开环控制结构

在开环控制系统中，被控量的值未在控制过程中构成控制作用，例如，图 1.1.2 所示电机控制未将直流电机的转速信息构成对电位器的控制作用，控制框图如图 1.1.3 所示。



图 1.1.3 电机速度控制框图

3) 开环控制系统的特点

- (1) 结构简单经济。
- (2) 调试方便。
- (3) 抗干扰能力差，控制精度不高。

2. 闭环控制

1) 定义

输出量与输入量之间有反向联系，靠输入量与主反馈信号之间的偏差对输出量进行控制的系统叫闭环控制系统，即闭环控制系统是控制系统的一种类型。具体内容是指：把控制系统输出量的一部分或全部，通过一定方法和装置反送回系统的输入端，然后将反馈信息与原输入信息进行比较，再将比较的结果施加于系统进行控制，避免系统偏离预定目标。闭环控制系统利用的是负反馈，即由信号正向通路和反馈通路构成闭合回路的自动控制系统，又称反馈控制系统。图 1.1.2 对应的闭环控制示意图如图 1.1.4 所示。

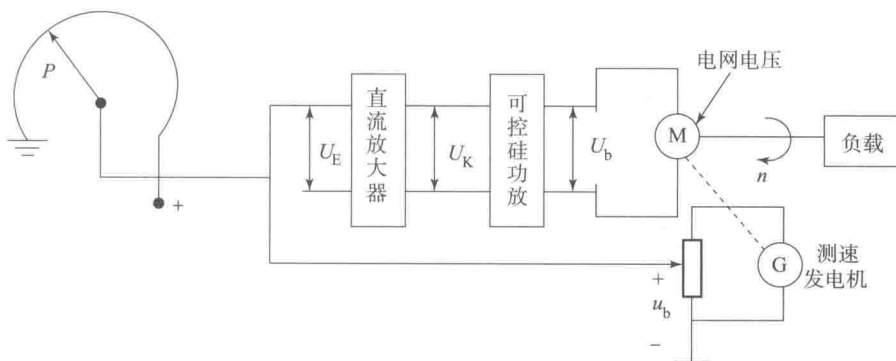


图 1.1.4 电机速度闭环系统控制示意图

图 1.1.4 对应的电机速度控制闭环框图如图 1.1.5 所示。

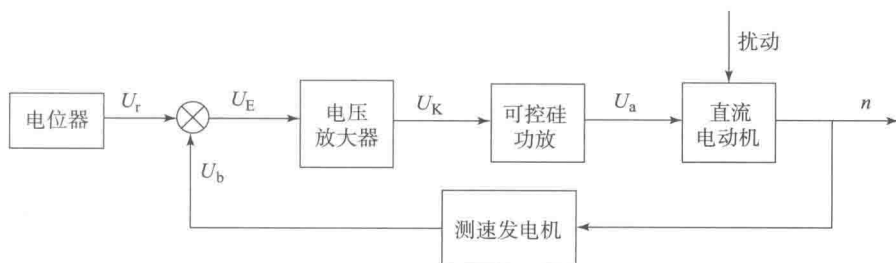


图 1.1.5 电机速度控制闭环框图

2) 闭环控制系统的结构与术语

一般控制系统的结构框图如图 1.1.6 所示。

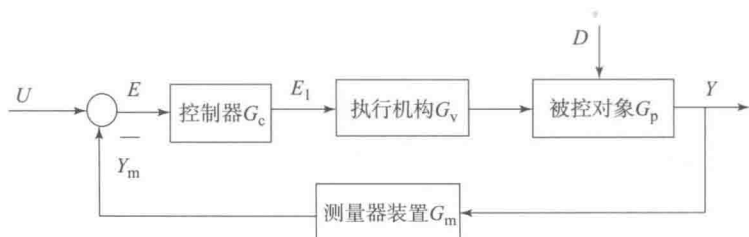


图 1.1.6 闭环自动控制框图

闭环控制系统中的基本术语有：

- (1) Y ：被控量或输出量。
- (2) E_1 ：控制量。
- (3) U ：设定量或输入量。
- (4) D ：扰动量。
- (5) Y_m ：反馈量。
- (6) E ：偏差量。
- (7) 从输入量 U 到输出量 Y 为前向通道或正向通道。

3) 确定控制器的正反作用

根据图 1.1.6 的输入和输出关系，首先确定被控对象 G_p 增益的正负，保证控制系统成为负反馈。

- (1) 负反馈准则：控制系统开环总增益为正。
- (2) 开环总增益：各组成环节的增益之积。
- (3) 环节的增益为正：当环节输入增加时，其输出也增加。
- (4) 负反馈准则： $G_c G_v G_p > 0$ 。
- (5) 根据检测变送环节的输入 - 输出关系，确定检测变送环节增益的正负。
- (6) 根据负反馈准则，确定控制器的正反作用。

4) 锅炉水位控制系统框图

为了实现各种复杂的控制任务，被控对象的输出量（被控量）是要求严格加以控制的物理量。系统分析需要将控制对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成系统框图，图 1.1.1 所示的锅炉水位控制系统框图如图 1.1.7 所示。

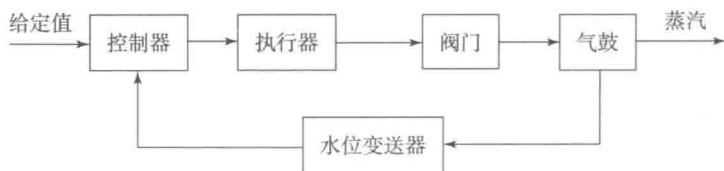


图 1.1.7 锅炉水位控制系统框图

5) 闭环控制系统的特点

- (1) 具有纠正偏差的能力。
- (2) 抗扰性好，控制精度高。
- (3) 包含元件多，结构复杂，价格高。
- (4) 参数应选择适当，可形成自动控制。

1.1.3 程序自动控制

随着计算机技术的广泛应用，生产过程中程序控制应用比较普遍，如多种液体自动混合加热控制、药品生产中按照配方控制比例均属于程序控制，它的设定值是按照一定的时间函数变化的，即设定值要按照预定的程序来控制被控制量，控制器按照给定功能预设一个程序，按照时间变化控制整个过程。例如，数控机床中的加工中心，自动换刀过程就是程序控制，原则上程序控制可以是开环的，但常用闭环的反馈来消除加工误差，提高被加工工件的精度。

例如，图 1.1.7 所示的锅炉水位控制系统，可以使用程序控制方式，控制框图如图 1.1.8 所示。

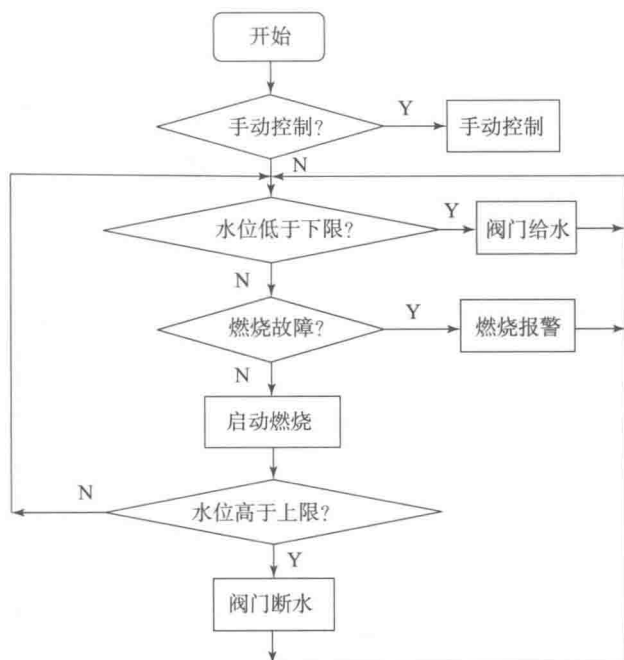


图 1.1.8 锅炉自动控制控制流程

污水处理中要用到大量的阀门、泵、风机等机械设备，它们常常要根据一定的程序、时间和逻辑关系定时开、停水。处理的工艺过程需要在一定的温度、压力、流量、液位、浓度等工艺条件下进行。由于外界干扰等原因，这些数值总会发生一些变化，与工艺设定值产生偏差，为了保持参数设定值，就必须对工艺过程施加一个作用，以消除这种偏差，从而使参数回到设定值，这时可使用程序控制。

1.2 控制系统的稳定性

稳定性是控制系统的关键因素，如果系统不稳定就无法完成自动控制。稳定性表示了当控制系统承受各种扰动时还能保持其预定工作状态的能力，只有稳定的系统才可能获得实际应用。

1.2.1 稳定性的描述

例如，放在平面上的两个圆锥，如图 1.2.1 所示。在没有外力推动（干扰）状态下，两个锥体处于平衡状态，属于稳定系统；当推动锥体时（加扰动），图 1.2.1 会偏离其平衡状态而产生初始偏差，扰动消失后图 1.2.1 (a) 受到重力作用还能回到原始状态，图 1.2.1 (b) 无法到达原始状态，则称图 1.2.1 (a) 是稳定的，而图 1.2.1 (b) 是不稳定或小范围稳定的。稳定性是指扰动消失后，由初始偏差回复到原平衡状态的能力。若系统在受到外界扰动情况下，扰动作用消失后能恢复到原平衡状态，该系统是稳定的。若偏离平衡状态的偏差越来越大，则系统是不稳定的。

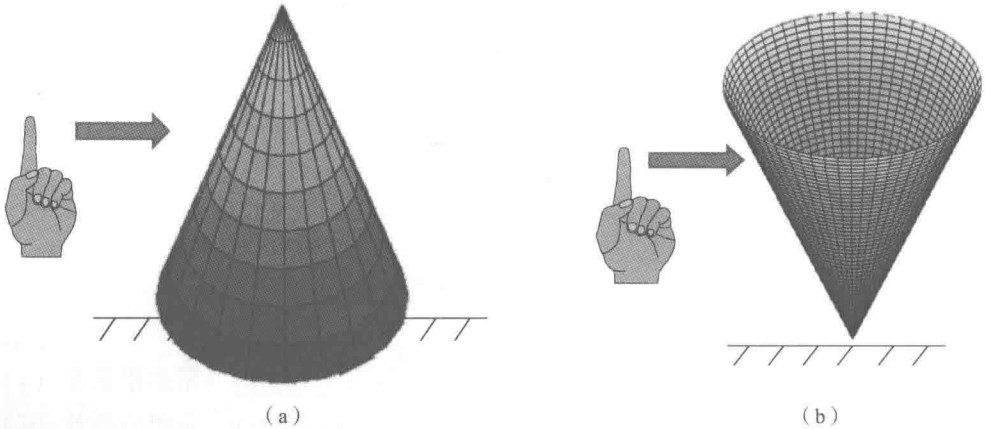


图 1.2.1 稳定与不稳定状态
(a) 稳定系统；(b) 不稳定系统

稳定性又分大范围稳定和小范围稳定，如果系统受到扰动后，不论它的初始偏差多大，都能以足够的精度恢复到初始平衡状态，这种系统就叫大范围内渐近稳定的系统。如果系统受到扰动后，只有当它的初始偏差小于某一定值才能在取消扰动后恢复到初始平衡状态，当大于限定值时，就不能恢复到初始平衡状态，这种系统就叫做在小范围内稳定的系统。

例如，飞机飞行时受到气流（扰动）后，飞行员无须进行任何操纵的情况下仍能够回到初始状态，则称飞机是稳定的，反之则称飞机是不稳定的。飞机本身必须是稳定的，当遇到强气流等扰动时，飞行员不用干预飞机，飞机会自动回到平衡状态；如果飞机是不稳定的，在遇到扰动时，飞行员必须对飞机进行操纵以保持平衡状态，否则飞机就会偏离轨道，造成飞行事故。因此，稳定性是系统本身的特征。

1.2.2 稳定性的图形表示

稳定性可以用定量表示或用图形描述，其目的是确定随时间变化输出与输入的关系。例如，设定了输入温度，测量实际输出温度的变化，或设定了航线，测量飞机跟踪飞行轨迹等，当系统的输出能跟随输入值时，称系统是稳定的，否则不稳定。只有满足稳定性的要求，设备才能正常工作。若针对被控系统输入 0-1 的阶跃信号，系统的输出能跟随输入就是稳定系统，如图 1.2.2 所示。