



清华  
科技大讲堂  
前沿·科技·分享

Fundamentals of Multi-Rotor  
Unmanned Aerial Vehicle

# 多旋翼无人机 技术基础

符长青 曹兵 编著



清华大学出版社



Fundamentals of Multi-Rotor  
Unmanned Aerial Vehicle

# 多旋翼无人机 技术基础

符长青 曹兵 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

针对“大众创业、万众创新”的新时代培养高级人才、创新型人才和复合型人才的需要,本书系统而全面地介绍了多旋翼无人机技术基础的主要内容和知识体系。全书共分9章,主要内容包括概述、多旋翼无人机飞行原理和翼型设计、DIY 4旋翼无人机组装、多旋翼无人机动力装置、多旋翼无人机空气动力学、多旋翼无人机结构动力学、多旋翼无人机气动弹性力学、多旋翼无人机飞行控制技术和多旋翼无人机总体设计。每一章节最后都给出了该章的小结和习题。

本书取材来源于实践,选材新颖、内容丰富、概念清楚易懂,具有很强的可操作性,既适合作为高等院校相关专业大学生的专业基础课程教材,也适合作为相关专业研究生及从事多旋翼无人机科研、生产和培训机构工作人员,以及广大航模爱好者的学习培训教材,对于希望全面了解多旋翼无人机知识的其他读者,本书也是一本较好的参考读物。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

多旋翼无人机技术基础/符长青,曹兵编著. —北京:清华大学出版社,2017

(清华科技大讲堂)

ISBN 978-7-302-45652-0

I. ①多… II. ①符… ②曹… III. ①无人驾驶飞机—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第285162号

责任编辑:刘向威 薛 阳

封面设计:文 静

责任校对:梁 毅

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.25 字 数:467千字

版 次:2017年1月第1版 印 次:2017年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50元

# 前 言

多旋翼无人机,也称为多旋翼无人直升机,是一种没有搭载驾驶人员的旋翼飞行器,具有垂直起降、空中悬停、低空飞行和原地回转等独特飞行技能,在民用和军用市场上都大有用武之地。

在人类航空史上,多旋翼无人机从概念到应用,经历了一段漫长的发展过程。近年来,多旋翼无人机作为航空产品领域的一枝新秀,以新颖的结构布局、独特的飞行方式和广泛的用途引起了人们越来越多的关注和重视,风行全球,迅速成为新的创业、创新研究热点。特别是当这种简单而又可实现的飞行可能糅合进了人们头脑中从小就有的、总也挥之不去的飞行梦想时,就极大地激发起了大家对翱翔于蓝天白云的渴望和激情。一时间,研究者、投资者和广大的航模爱好者接踵而至,纷纷开始多旋翼无人机的研发、投资和使用,经过近5年起步阶段的实验研究、技术积累和市场摸索,多旋翼无人机大规模发展的序幕逐步被拉开。

现在,多旋翼无人机在国内外市场上商机无限,世界各国掀起了一股研发和广泛应用多旋翼无人机的热潮,特别是属于消费级的微型机,其操作简单、价格便宜,市场上有众多适合个人自己动手组装(DIY)的成套软硬配件出售,只要自己动动手,经过简单的组装,就能实现每个人自幼年就有的“飞行梦想”。遥望蓝天,每天都有成千上万架多旋翼无人机在空旷的田野上,在风景怡人的旅游胜地,在居民自家的后院或客厅中腾空而起,承载着人们的“飞行梦想”自由飞翔。

多旋翼无人机的第一大特点是具有多个旋翼,它采用旋翼变速或桨叶变总距(无周期变距)的方式改变旋翼升力的大小,因而取消了传统单旋翼直升机操纵系统中必不可少的自动倾斜器。多旋翼无人机通常都有4个或更多个旋翼,如4旋翼式、6旋翼式、8旋翼式、16旋翼式和32旋翼式等。多旋翼无人机的第二大特点是飞机上没有搭载驾驶员,即机上无人。事实上,多旋翼无人机并不是真正离开了人,虽然机上确实没有载人,但它却离不开身在地面上驾驶操纵它的人(驾驶员)。因此,多旋翼无人机要想真正完成一项特定的任务,光靠能在天空中自由飞行的旋翼机本身还是不够的,除了旋翼机及其携带的任务设备外,还需要有地面控制设备、数据通信设备、维护设备,以及指挥控制其必要的操作、维护人员等。因此,完整意义上的多旋翼无人机应称为多旋翼无人机系统,它是一种闭环控制回路的“人一机系统”。本质上,多旋翼无人机属于一种电子自动化和智能化控制的高科技产品,技术含量相当高,其研制设计和应用发展等问题需要引起大家足够的重视。

本书第一作者符长青有40多年的实践经验,其中有20多年从事直升机设计和研究,有20多年从事计算机软件开发,近几年来在广东科技学院担任专业课教师,有机会将工作实践、教学经验与理论研究相结合并完成了本书的编著工作。本书第二作者曹兵是辽宁天行健航空科技公司董事长,有多年从事多旋翼无人机研制和生产的工作经历。本书取材来源



于作者的工作实践和专业知识,系统而又全面地介绍了多旋翼无人机基本技术的主要内容。

在编著本书的过程中,作者得到了南京航空航天大学高正教授、张呈林教授、陈仁良教授、王华明教授的大力支持和帮助,他们提供了许多技术资料 and 编写意见,作者借此机会表示衷心的感谢。与此同时,本书在编著过程中还得到了广东科技学院副院长黄弢教授、计算机系主任曹文文教授,以及有关部门的领导、专家与同仁的大力支持与帮助,参考和引用了部分著作及文献资料,在此表示深深的谢意。

在编著本书的过程中,尽管作者付出了大量的艰苦努力,但由于学识有限,本书可能在许多方面存在不足,欢迎同行指正和交流(联系方式 fcq828@163.com)。作者十分希望能与国内同行携手,大家一起共同努力,将我国多旋翼无人机发展水平推向一个新的高度。

作 者

2016年9月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b>	<b>1</b>
▶ 1.1 与多旋翼无人机相关的基本概念	1
1.1.1 基本的物理概念和定律	1
1.1.2 系统论的基本概念	4
1.1.3 控制论的基本概念	5
▶ 1.2 多旋翼无人机系统的基本概念	6
1.2.1 多旋翼无人机的定义	6
1.2.2 多旋翼无人机系统及其飞行机组	8
▶ 1.3 多旋翼无人机的构型、用途及分类	10
1.3.1 多旋翼无人机的构型和用途	10
1.3.2 多旋翼无人机的分类	12
▶ 1.4 多旋翼无人机的发展历程和市场前景	14
1.4.1 多旋翼无人机的发展历程	14
1.4.2 多旋翼无人机市场	17
1.4.3 多旋翼无人机的典型案例	19
▶ 1.5 民用多旋翼无人机飞行管理	23
1.5.1 航空空域的划分	23
1.5.2 与民用多旋翼无人机飞行相关的法律问题	25
1.5.3 民用多旋翼无人机飞行管理文件	27
▶ 本章小结	28
▶ 习题	29
<b>第 2 章 多旋翼无人机的飞行原理和翼型设计</b>	<b>30</b>
▶ 2.1 多旋翼无人机的飞行原理和控制方式	30
2.1.1 多旋翼无人机的飞行原理	30
2.1.2 多旋翼无人机的飞行控制	32
▶ 2.2 多旋翼无人机的特点和对比分析	35



2.2.1	多旋翼无人机的特点	35
2.2.2	多旋翼无人机的对比分析	36
▶ 2.3	翼型的几何参数和主要类型	38
2.3.1	翼型的定义和几何参数	38
2.3.2	空气在翼型表面的流动和压力分布	40
2.3.3	翼型的主要类型	41
▶ 2.4	翼型空气动力特性和影响因素	42
2.4.1	翼型空气动力特性	43
2.4.2	影响翼型空气动力的因素	46
2.4.3	翼型的选择	49
▶ 2.5	多旋翼无人机飞行速度受限的原因和翼型设计	50
2.5.1	多旋翼无人机飞行速度受限的主要原因	50
2.5.2	多旋翼无人机桨叶翼型设计	51
▶	本章小结	55
▶	习题	56

## 第3章 DIY 4旋翼无人机组装 57

▶ 3.1	DIY 多旋翼无人机的基本概念	57
3.1.1	DIY精神和DIY多旋翼无人机的定义	57
3.1.2	4旋翼无人机的组成和DIY步骤	58
▶ 3.2	DIY 4旋翼无人机部件的要求和选择	60
3.2.1	DIY 4旋翼无人机部件的要求	60
3.2.2	DIY 4旋翼无人机机架、旋翼与动力装置的选择	61
3.2.3	DIY 4旋翼无人机自动驾驶仪的选择	66
3.2.4	DIY 4旋翼无人机传感器的类型	71
3.2.5	DIY 4旋翼无人机遥控系统的选择	75
▶ 3.3	DIY 4旋翼无人机的组装	78
3.3.1	DIY 4旋翼无人机组装前的准备工作	78
3.3.2	DIY 4旋翼无人机自制或组装机架	79
3.3.3	DIY 4旋翼无人机整体组装前的准备	81
3.3.4	DIY 4旋翼无人机的整体组装	82
▶ 3.4	DIY 4旋翼无人机的调试	84
3.4.1	DIY 4旋翼无人机无桨调试	84
3.4.2	DIY 4旋翼无人机有桨调试	85
▶ 3.5	DIY 4旋翼无人机的操作练习	87

3.5.1	飞行前的检查工作	88
3.5.2	DIY 4 旋翼无人机基本操作练习	88
3.5.3	DIY 4 旋翼无人机日常飞行练习	91
3.5.4	航模模拟器	92
▶ 3.6	民用飞机的适航管理	93
▶	本章小结	94
▶	习题	94

## 第 4 章 多旋翼无人机动力装置 96

▶ 4.1	多旋翼无人机动力装置的基本概念	96
4.1.1	多旋翼无人机发动机的分类、功用和要求	96
4.1.2	多旋翼无人机动力装置的组成	97
▶ 4.2	直流电动机	98
4.2.1	直流电动机的基本概念	98
4.2.2	无刷直流电机	99
4.2.3	有刷直流电机	101
4.2.4	空心杯电机	103
▶ 4.3	航空活塞式发动机	104
4.3.1	航空活塞式发动机的类型和结构	104
4.3.2	航空活塞式发动机的工作系统和原理	107
4.3.3	旋转活塞式发动机	109
4.3.4	航空活塞式发动机的工作特性	110
▶ 4.4	涡轮轴发动机	111
4.4.1	涡轮轴发动机的分类和工作原理	111
4.4.2	涡轮轴发动机的基本结构	112
4.4.3	涡轮轴发动机的工作特性	114
4.4.4	多旋翼无人机燃油发动机不同类型的比较	114
▶ 4.5	多旋翼无人机燃油系统和滑油系统	116
4.5.1	多旋翼无人机燃油系统	116
4.5.2	多旋翼无人机滑油系统	119
▶ 4.6	多旋翼无人机传动系统	122
4.6.1	多旋翼无人机传动系统的结构和部件	122
4.6.2	多旋翼无人机传动系统的动力学和临界转速	126
4.6.3	旋翼/动力/传动系统的动力学问题	127
▶	本章小结	128
▶	习题	129





## 第 5 章 多旋翼无人机空气动力学

130

▶ 5.1 旋翼飞行器空气动力学的基本概念	130
5.1.1 空气动力学的基本概念	130
5.1.2 旋翼飞行器空气动力学的定义、内容和工具	131
▶ 5.2 旋翼的几何参数和工作原理	132
5.2.1 旋翼的功用和几何参数	132
5.2.2 旋翼参数的无因次化	134
5.2.3 旋翼的工作原理	135
▶ 5.3 旋翼动量理论的基础知识	137
5.3.1 垂直飞行的动量理论	137
5.3.2 前飞时的动量理论	139
▶ 5.4 旋翼叶素理论的基础知识	140
5.4.1 垂直飞行的叶素理论	140
5.4.2 前飞时的叶素理论	143
▶ 5.5 旋翼经典涡流理论的基础知识	144
5.5.1 垂直飞行的经典涡流理论	145
5.5.2 前飞时的经典涡流理论	147
▶ 5.6 旋翼现代涡流理论的基础知识	149
5.6.1 悬停时旋翼自由尾迹分析	149
5.6.2 前飞时旋翼自由尾迹分析	151
▶ 5.7 旋翼 CFD 理论基础知识	154
5.7.1 计算流体力学的定义和特点	154
5.7.2 旋翼流场的控制方程	155
5.7.3 控制方程的离散化方法	157
▶ 本章小结	160
▶ 习题	161

## 第 6 章 多旋翼无人机结构动力学

162

▶ 6.1 多旋翼无人机结构动力学的基本概念	162
6.1.1 多旋翼无人机结构动力学的定义和特点	162
6.1.2 多旋翼无人机结构动力学的研究方法和模型	164
6.1.3 多旋翼无人机振动的类型	165
6.1.4 简谐振动与谐波分析	167
6.1.5 单自由度系统的自由振动	168

▶ 6.2	多旋翼无人机旋翼结构动力学分析	170
6.2.1	旋翼的结构形式	170
6.2.2	多旋翼无人机的旋翼桨叶振动	172
6.2.3	多旋翼无人机旋翼整体振型	178
▶ 6.3	多旋翼无人机传动系统结构的动力学分析	180
6.3.1	多旋翼无人机传动轴的临界转速	180
6.3.2	多旋翼无人机传动系统的扭转振动	182
▶ 6.4	多旋翼无人机机体结构动力学分析	185
6.4.1	多旋翼无人机机体结构的类型和特点	185
6.4.2	多旋翼无人机机体结构动力学的研究方法	186
6.4.3	多旋翼无人机机体动力学有限元分析	187
▶	本章小结	189
▶	习题	190

## 第 7 章 多旋翼无人机气动弹性力学 192

▶ 7.1	多旋翼无人机气动弹性力学的基本概念	192
7.1.1	多旋翼无人机气动弹性力学的定义和特点	192
7.1.2	非定常气动力基础	195
7.1.3	非定常气动力计算的常用方法	201
▶ 7.2	旋翼桨叶运动自由度之间的耦合	204
7.2.1	旋翼桨叶运动自由度耦合的基本概念	204
7.2.2	旋翼桨叶运动自由度耦合的主要形态	205
▶ 7.3	多旋翼无人机旋翼气动弹性静力学	208
7.3.1	旋翼气动弹性静力学的基本概念	208
7.3.2	旋翼桨叶发散的基本原理和临界速度	209
▶ 7.4	多旋翼无人机旋翼气动弹性动力学	212
7.4.1	旋翼桨叶颤振的基本概念	212
7.4.2	旋翼桨叶的经典颤振	213
7.4.3	旋翼桨叶的失速颤振	215
7.4.4	旋翼桨叶其他类型的耦合稳定性分析	216
▶ 7.5	多旋翼无人机旋翼与机体耦合气动弹性稳定性	218
7.5.1	旋翼—机体耦合系统的动不稳定性	218
7.5.2	旋翼—机体耦合振动系统分析	219
▶	本章小结	221
▶	习题	222



## 第 8 章 多旋翼无人机飞行控制技术

223

▶ 8.1 多旋翼无人机飞行控制系统的基本概念	223
8.1.1 多旋翼无人系统的的基本概念	223
8.1.2 多旋翼无人机飞行控制的基本概念	225
▶ 8.2 多旋翼无人机飞行姿态的数学表示	227
8.2.1 坐标系统与欧拉角	227
8.2.2 旋转矩阵表示方法	229
8.2.3 四元数表示方法	231
8.2.4 多旋翼无人机姿态表示方法的比较	233
▶ 8.3 多旋翼无人机飞行动力学建模	234
8.3.1 建模假设和模型结构	234
8.3.2 多旋翼无人机刚体运动学模型和动力学模型	235
8.3.3 多旋翼无人机控制分配模型	236
8.3.4 多旋翼无人机飞行控制通道和线性简化模型	237
▶ 8.4 多旋翼无人机 PID 控制和卡尔曼滤波	238
8.4.1 PID 控制的基本概念	238
8.4.2 PID 参数调试	241
8.4.3 卡尔曼滤波器	244
▶ 8.5 多旋翼无人机的自动飞行控制	246
8.5.1 飞行控制系统的总体结构和分层结构	246
8.5.2 多旋翼无人机位置控制	247
8.5.3 多旋翼无人机姿态控制	250
8.5.4 多旋翼无人机控制分配	251
8.5.5 多旋翼无人机动力控制	253
▶ 本章小结	254
▶ 习题	254

## 第 9 章 多旋翼无人机总体设计

256

▶ 9.1 多旋翼无人机设计的基本概念	256
9.1.1 多旋翼无人机研制流程和设计定义	256
9.1.2 多旋翼无人机设计的重要性、设计要求和原则	257
9.1.3 多旋翼无人机设计任务和工作要求	260
▶ 9.2 多旋翼无人机总体设计及后续过程	260
9.2.1 多旋翼无人机总体设计定义和概念设计	261

9.2.2	多旋翼无人机初步设计和总体设计特点	262
9.2.3	多旋翼无人机详细设计、设计定型和生产定型	263
▶ 9.3	多旋翼无人机的类型分析与选择	265
9.3.1	多旋翼无人机的类型分析	265
9.3.2	多旋翼无人机类型的选择	270
▶ 9.4	多旋翼无人机总体参数的分析与选择	273
9.4.1	多旋翼无人机旋翼参数的分析与选择	273
9.4.2	多旋翼无人机重量与动力参数的分析与选择	278
▶ 9.5	多旋翼无人机总体布局设计	284
9.5.1	多旋翼无人机总体布局设计的任务和要求	284
9.5.2	多旋翼无人机总体布局设计的内容	285
▶	本章小结	289
▶	习题	290

## 参考文献

291

# 概 述

## 主要内容

- (1) 与多旋翼无人机相关的基本概念。
- (2) 多旋翼无人机系统的基本概念。
- (3) 多旋翼无人机的构型、用途和类型。
- (4) 多旋翼无人机的发展历程和市场前景。
- (5) 民用多旋翼无人机的飞行管理。

## 1.1 与多旋翼无人机相关的基本概念

近年来,多旋翼无人机作为航空产品领域的一枝新秀,以新颖的结构布局、独特的飞行方式和广泛的用途引起了人们越来越多的关注和重视,风行全球航空业界,迅速成为国际上新的研究热点。深入研究有关多旋翼无人机的研制设计和应用发展等技术问题,首先要回顾一些有关的物理学基本概念,以便了解和掌握多旋翼无人机飞行的基本原理和特性。

### 1.1.1 基本的物理概念和定律

多旋翼无人机(也称为多旋翼无人驾驶直升机或多旋翼无人直升机)的设计、生产和应用都必须遵循人类科学技术的基本定律,并从不断探索的实践中总结出一套严谨的理论体系,指导其进一步的创新和发展。

#### 1. 速度和加速度

(1) 速度。平均速度是指运动物体通过的一段位移和所用时间的比值,即  $v=s/t$ ,常用单位为米/秒,公式中  $v$  为速度,  $s$  为位移,  $t$  为时间。运动物体在某一时刻(或某一位置)的速度,称为瞬时速度,平时人们所说的速度大多是指瞬时速度。速度是有方向的,所以是矢量。

(2) 加速度。加速度即速度的改变率,是指运动物体速度的变化量  $\Delta v$  与发生这一变化



所用时间  $\Delta t$  的比值,即  $a = \Delta v / \Delta t$ ,常用单位为米/(秒·秒),公式中  $a$  为加速度。加速度是矢量,它的方向是运动物体速度变化(量)的方向,与外力的合力方向相同。如果加速度是负数,则代表减速。

## 2. 牛顿三大运动定律

牛顿三大运动定律指明了作用力和物体运动的关系,属于动力学研究的基本问题,是经典力学的基本定律。这三条定律之间有着紧密的内在联系,共同构成了牛顿力学的完整理论体系。

(1) 牛顿第一运动定律。任何一个物体在不受外力或受平衡力的作用时,总是保持静止状态或匀速直线运动状态,直到有作用在它上面的外力迫使它改变这种状态为止。物体具有保持运动状态不变的性质称为惯性。一切物体都具有惯性,惯性是物体的物理属性,所以牛顿第一运动定律又称为惯性定律。

(2) 牛顿第二运动定律。物体的加速度跟物体所受的合外力成正比,跟物体的质量成反比。牛顿第二运动定律也称为加速度定律,它表明力的瞬时作用规律:力和加速度同时产生,同时变化,同时消失。牛顿第二运动定律可以用一个矢量方程表示:  $F = ma$ 。公式中  $m$  为物体的质量,  $a$  为加速度,  $F$  为外力,应用计算时应规定正方向,凡与正方向相同的力或加速度均取正值,反之取负值。

(3) 牛顿第三运动定律。两个物体之间的作用力和反作用力,在同一直线上,大小相等,方向相反。牛顿第三运动定律也称为作用力与反作用力定律。

## 3. 动能、势能和压力

(1) 动能。动能是指物体因运动而具有的能量。动能是能量的一种,数值上  $E = mv^2 / 2$ ,公式中  $E$  为动能,  $m$  为物体的质量,  $v$  为速度。它在国际单位制下单位是焦耳(J)。动能具有瞬时性,是指力在一个过程中对物体所做的功等于在这个过程中动能的变化。动能是状态量,无负值。

动能定理:运动质点的动能的增量等于其他物体对它所做的功。动能定理一般只涉及物体运动的始末状态,通过运动过程中做功时能的转化求出始末状态的改变量。但是总的能是遵循能量守恒定律的,能的转化包括动能、势能、热能、光能等能量的变化。

(2) 势能。势能是由相互作用的物体之间的相对位置,或由物体内部各部分之间的相对位置所确定的能量。按作用性质的不同,势能可以分为引力势能、弹性势能、电势能和核势能等。势能不是属于单独物体所具有的,而是相互作用的物体所共有的。

(3) 压力。垂直作用于流体或固体界面单位面积上的力即为压力。

## 4. 空气属性

(1) 连续性假设。大气连续性假设是在进行空气动力学研究时,将大量的、单个分子组成的大气看成是连续的介质的过程。所谓连续介质就是组成介质的物质连成一片,内部没有任何空隙。在其中任意取一个微团都可以看成是由无数分子组成的,微团表现出来的特性体现了众多分子的共同特性。对大气采用连续性假设的理由是与所研究的对象(飞机)相比,空气分子的平均自由行程要比飞机的尺寸小得多。空气流过飞机表面时,与飞机之间产生的相互作用不是单个分子所为,而是无数分子共同作用的结果。

(2) 黏性。流体都是有黏性的,空气也是有黏性的。黏性是施加于流体的应力和由此产生的变形速率以一定的关系联系起来的流体的一种宏观属性,表现为流体的内摩擦。由

于黏性的耗能作用,在无外界能量补充的情况下,运动的流体将逐渐停止下来。黏性对物体表面附近的流体运动产生重要作用,使流速逐层减小并在物体表面上为零,在一定条件下也可使流体脱离物体表面。凡是有黏性作用的地方,各层气流的速度是不均一的,这也是摩擦阻力产生的根源。

### 5. 伯努利方程

伯努利定律的实质是流体的机械能守恒,即动能+重力势能+压力势能=常数。其最为著名的推论为:等高流动时,流速大,压力就小。空气的密度是很容易随压强(压力)而改变的,但是当空气流速不大时,由流速引起的压强变化还不足以使空气的密度有显著的变化,这样的流动称为不可压缩流动。空气中的伯努利方程通常写为

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = C \quad (1-1)$$

式中, $C$ 为常数; $p$ 为静压; $\frac{1}{2}\rho V^2$ 为动压,即单位体积的动能,与高度和速度有关。

伯努利方程表明:空气的压力是由两部分相加而来的,一部分是静压,为空气静止时对外界的压力;另一部分是动压,是空气流动时对外界的压力。如果空气不流动,那么空气此时的静压值就是常数 $C$ 值,当空气流动起来就产生了动压,空气流动越快,动压就越大,静压比就越小。

### 6. 飞行器、飞行力学和空气动力学

(1) 飞行器:空气中的运动体,一个复杂的被控对象,要想控制它,需要了解气流特性与飞行器在气流中飞行时的特性。

(2) 飞行力学:研究飞行器在大气中飞行时的受力与运动规律,建立飞行器动力学方程。

(3) 空气动力学:空气动力学是力学的一个分支,研究物体在同气体进行相对运动情况下的受力特性、气体流动规律和伴随发生的物理和化学变化。

### 7. 自动控制和自动控制系统

(1) 自动控制。自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。自动控制是相对人工控制概念而言的,是工程科学的一个分支。它利用反馈对动态系统的自动影响,使得输出值接近人们想要的值。从方法的角度看,它以系统理论为基础。

(2) 自动控制系统。自动控制系统,简称自控系统,是在无人直接参与下可使操纵过程或其他过程按期望规律或预定程序进行的控制系统。自动控制系统是实现自动化的主要手段,包括实现自动控制功能的装置及其被控制对象,由控制器、被控对象、执行机构和变送器4个环节组成。

### 8. 微机电系统(MEMS)

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)是集微传感器、微执行器、微机械结构、微电源微能源、信号处理和控制电路、高性能电子集成器件、接口、通信等于一体的微型器件或系统。它是在微电子技术基础上发展起来的,融合了光刻、腐蚀、薄膜、电铸、注塑、硅微加工、非硅微加工和精密机械加工等技术,来制作高科技电子机械器件。

其尺寸为几毫米乃至更小,其内部结构一般在微米甚至纳米量级,是一个独立的智能系统,主要由传感器、执行器和微能源三大部分组成,具有微型化、智能化、多功能、高集成度和



适于大批量生产等特点。常见的产品包括 MEMS 加速度计、MEMS 麦克风、微马达、微泵、微振子、MEMS 光学传感器、MEMS 压力传感器、MEMS 陀螺仪、MEMS 湿度传感器、MEMS 气体传感器以及它们的集成产品等。

### 1.1.2 系统论的基本概念

系统论是研究系统的模式、性能、行为和规律的一门科学。它为人们认识各种系统的组成、结构、性能、行为和发展规律提供了一般方法论的指导。

#### 1. 系统的分类

所谓系统,是混乱、无秩序的反义词,通俗地说就是有组织、有秩序地达到某种目的的一个组合体。在自然界和人类社会中普遍存在着各种系统。

(1) 自然系统。自然系统就是由自然物所组成的系统,它的特点是自然形成的。

(2) 人造系统。人造系统是由人工造出来的系统,主要有三种类型。

① 工程技术系统:由人们从加工自然物中获得的零、部件装配而成的系统。

② 管理系统:由一定的制度、组织、程序、手续等所构成的系统。

③ 科学体系:根据人们对自然现象和社会现象的科学认识所创立的系统。

(3) 复合系统。复合系统是自然系统与人造系统相结合的系统。现实生活中的大多数系统都是复合系统。

(4) 静态系统与动态系统。静态系统是指系统的性能与功效不随时间而改变,反之就是动态系统。应注意的是静态系统并非指系统中一切都绝对静止,即使是静态系统,仍存在着少量的物质、能量交换。

(5) 封闭系统与开放系统。当系统与环境联系不密切,即很少与环境发生能量、物质、信息的交换时,该系统称为封闭系统。封闭系统不易变化发展,往往形成静态系统。与外界环境完全没有联系的系统称为孤立系统,它在宇宙间实际上是不存在的,只是为了方便研究与计算,把某些封闭系统中与外界联系不密切的因素忽略不计,近似地将系统作为孤立系统来对待。开放系统是指与环境经常有较多的物质、能量、信息的交换的系统,而且这种交换影响着系统的结构、功能和发展,一旦与外界的联系切断便会影响系统的稳定,甚至破坏系统。任何系统欲构成高速度发展的动态系统,首先必须改封闭系统为开放系统。

(6) 实体系统与虚拟系统。实体系统是以矿物、生物、机械、人类等实体物理方面的存在物为组成部分的系统。与此相对应,虚拟系统是以概念、想象、原理、法则、方法、制度、步骤、手续等非物理方面的存在物为组成部分的系统。

#### 2. 系统论的基本理论

系统论的基本理论可以概括为以下 4 个方面。

(1) 整体的功能不等于各部分功能之总和。系统论的这一理论也称为“整体性原则”。它要求人们在研究和处理问题时,要牢固地树立全局观念,始终把研究对象看作一个有机的整体。

(2) 系统的结构决定系统的功能。结构是系统内部各个要素的组织形式,功能是系统在一定环境下所能发挥的作用。系统的结构决定系统的功能,不同的结构可以发生不同的功能。

(3) 动态观点。任何系统都是一个运动过程,如思维过程以感觉、知觉、记忆、分析、综



合等来表征它的运动过程。系统论、控制论、信息论都是以动态的观点去分析考查事物,注意事物的运动状态,考察研究事物运动的过程,从而选择恰当的过程。

(4) 最优化观点。人们对系统进行研究和改造的最终目的是为了使系统发挥最优的功能。一个系统可能有多种组成方案,要选择最优的方案,使系统具有最优功能。例如,生产系统要求高产、优质、低成本、低消耗、高利润等,具有多种目标。为了使生产系统具有最优的功能,必须将这些目标综合起来考虑,采用功能最优的方案,这就需要进行最优的设计、控制和管理。

### 1.1.3 控制论的基本概念

#### 1. 控制和控制论的定义

控制是施控者作用于受控对象的一种主动行为,使受控对象按照施控者的意愿行动,如领导、指挥、管理、教育、设计、调节等都是主动的控制行为。控制是有目的的,如果控制系统的目的是一个,则称其为单目标控制系统;如果是多个,则称其为多目标控制系统。

控制论是研究各种不同系统所共同具有的控制规律的科学。控制论的研究表明,无论是自动机器,还是神经系统、生命系统,甚至是经济系统、社会系统,撇开各自的性质、形态、特点,都可以看作是一个自动控制系统。在这类系统中有专门的调节装置来控制系统的运转,维持自身的稳定和系统的目的功能。控制机构发出指令,作为控制信息传递到系统的各个部分(即控制对象)中去,由它们按指令执行之后再把执行的情况作为反馈信息输送回来,并作为决定下一步调整控制的依据。整个控制过程就是一个信息流通的过程,控制就是通过信息的传输、变换、加工、处理来实现的。根据这一理论,任何一个系统都能进行运算和记忆。美国麻省理工学院的一位教授为了证实这个观点,曾用石块和卫生纸卷制造过一台简单的、能运行的计算机。

系统控制方法分为两种:一种是反馈控制,又称为被动控制或闭环控制;另一种是前馈控制,又称为主动控制或开环控制。两种控制形式的主要区别是有无信息反馈。

#### 2. 反馈控制

所谓反馈就是指在完成控制的过程中,收集行动效果的响应信息,并把其响应同目的要求相比较,进行工作的调整。这种行动后果的响应信息就称为反馈信息,当行动响应同目标要求一致时,控制过程便完成了;当行动响应效果偏离目标甚至背道而驰时,就需要对系统进行调节,使其逐步接近目标,最后使系统能得到合理的发展,如图 1-1 所示。

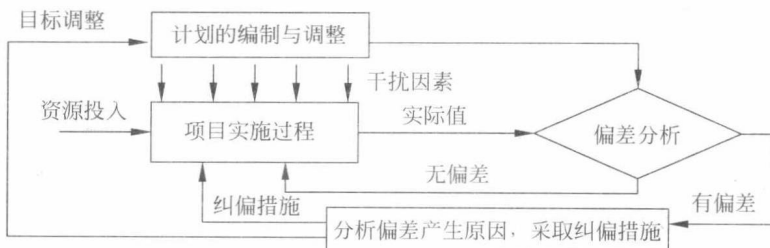


图 1-1 反馈控制示意图

反馈控制是一种技术方法,“控制信息→反馈信息→控制信息”形成闭环的信息通道,可以应用于各种场合,完成具有各种目的性的控制任务。按照反馈信息通道的多少,单路或多