

Rotorcraft Power Plant

旋翼飞行器 动力装置

符长青 符晓勤 马宇平 编著



清华大学出版社



清华
科技大讲堂
前沿·科技·分享

Rotorcraft Power Plant

旋翼飞行器 动力装置

符长青 符晓勤 马宇平 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”新时代培养高级人才、创新型人才和复合型人才的需要,本书系统而又全面地介绍了旋翼飞行器动力装置的主要内容和知识体系。全书共3篇9章,第1篇为概述篇,包括1章,内容为旋翼飞行器动力装置概述。第2篇电动机篇,包括3章,介绍相关的电磁基本知识、直流电动机原理与特性、无刷直流电动机与空心杯电动机。第3篇航空发动机篇,包括5章,介绍与航空发动机相关的基本知识、航空活塞式发动机、航空活塞发动机工作系统、航空涡轮轴发动机、航空涡轮轴发动机工作系统。每章最后都给出了该章的小结和习题。

本书取材来源于实践,取材新颖、内容丰富、深入浅出、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,又适合作为相关专业研究生及从事旋翼飞行器科研、生产和培训机构工作人员以及旋翼飞行器驾驶员、无人机飞手和广大航模爱好者的学习培训教材,对于希望全面了解旋翼飞行器动力装置知识的各类读者,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

旋翼飞行器动力装置/符长青,符晓勤,马宇平编著. —北京:清华大学出版社,2017
(清华科技大讲堂)

ISBN 978-7-302-47274-2

I. ①旋… II. ①符… ②符… ③马… III. ①旋翼机—动力装置 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 122625 号

责任编辑:刘向威 梅栾芳

封面设计:文 静

责任校对:李建庄

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

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.25

字 数:446千字

版 次:2017年8月第1版

印 次:2017年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00元



前言

旋翼飞行器(也称为直升机)是航空飞行器大家庭中的一员,其主要结构特点是具有一个或多个由发动机驱动的可旋转机翼(旋翼),用以产生克服机体自重的升力,以及提供推进力和操纵力,这是它在结构外形上和飞行原理上与固定翼飞机之间存在的最大的差别。正是这些差别,使得旋翼飞行器具有大多数固定翼飞机所不具备的飞行特点:垂直升降、空中悬停、小速度前飞、后飞、侧飞、原地回转和树梢高度飞行等。这些飞行特点使得旋翼飞行器在飞行和使用上要比固定翼飞机灵活得多,弥补了固定翼飞机因飞行速度快而存在的许多不足之处,在很多固定翼飞机无法涉及的领域或地区可以大显身手,大有用武之地。

旋翼飞行器根据其克服反扭矩方式所安装的旋翼数量是不同的,在设计上出现了各种不同结构的旋翼飞行器,主要有单旋翼带尾桨式、共轴双旋翼式、纵列双旋翼式、横列双旋翼式、多旋翼(旋翼数量多达4个或4个以上)式,以及其他特殊形式,如复合式、组合式、倾转旋翼式、涵道式等。近年来,旋翼飞行器,特别是多旋翼无人机在国内外市场上商机无限,世界各国掀起一股研发和应用的热潮。多旋翼无人机生产、制造和应用的“群众运动”就像滚雪球般越滚越大。与此同时,旋翼飞行器家族也随着具有各种各样用途的多旋翼无人机不断地大量涌入,已经变成一个非常庞大的家族,人丁兴旺、朝气蓬勃。放眼世界各地,在人类社会目前和平与战争并存已成常态化的状况下,无论是在和平、安详,人们忙忙碌碌的建设环境中,还是在硝烟滚滚、炮声隆隆、杀声震天的战场上,每天都有成千上万架各种类型的旋翼飞行器腾空而起,肩负着人们赋予的各式各样的任务在蓝天白云中忙碌地工作着。

旋翼飞行器是一种自身重量比重大于空气比重的航空飞行器,其升空飞行的首要条件是需要有动力。发动机是能够把其他形式的能量转化为机械能,进而产生拉力或推力的机器,是旋翼飞行器动力装置的核心,被视为旋翼飞行器的“心脏”。发动机特性的优劣对旋翼飞行器的各种使用性能都有很大影响,有了适用的发动机,才能实现真正有动力、可控制的飞行。常用的发动机有电动机和燃油发动机两大类。

电动旋翼飞行器以电动机作为动力来源,采用直流电动机作为驱动旋翼旋转的发动机,发动机类型大多为无刷直流电动机,也有部分使用有刷直流电动机的情况,所有电动机运转所需的能量由聚合物锂电池或新能源方式(如燃料电池)提供。油动旋翼飞行器以燃油发动机作为动力来源,包括航空活塞发动机和航空涡轮轴发动机等机型。在旋翼飞行器设计研制过程中,首先会碰到选用哪种发动机能最有效满足其技术要求的问题,要对发动机的性能和特点有深入的了解,以正确选择发动机,并达到与旋翼飞行器飞行性能的最佳匹配。

为了深化高校创新创业教育改革,优化专业结构,提高教育质量,促进学生在创新创业中全面发展,适应和服务经济社会发展和国家战略需求。要把创新创业教育融入人才培养体系,改革教育教学内容方法,改进课程,强化实践。高校应打破学科界限,实现交叉融合,改进科研组织模式,加强应用研究和协同创新,着力培养大众创业、万众创新生力军,提升创



业创新人才的综合能力和素质。

本书着眼于切实增强深入推进高校创新创业教育改革的责任感和紧迫感,全面提高人才培养质量,为促进大众创业、万众创新和建设创新型国家提供有力人才支撑,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旋翼飞行器科研、生产和培训机构工作人员,以及飞行驾驶员、无人机飞手和广大航模爱好者的学习培训教材,对于希望全面了解旋翼飞行器动力装置知识的各类读者,本书也是一本较好的参考读物。

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感谢。与此同时,本书在编著过程中还得到了有关部门的领导、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,但由于作者本人学识有限,本书可能在许多方面存在不足,欢迎同行批评指正(E-mail 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,将我国旋翼飞行器的发展水平推向一个新的高度。

作 者

2017 年 4 月

目 录

第一篇 概 述 篇

第 1 章 旋翼飞行器动力装置概述 3

- ▶ 1.1 与旋翼飞行器相关的基本概念 3
 - 1.1.1 飞行器的定义和分类 3
 - 1.1.2 旋翼飞行器的定义、特点、分类和用途 4
 - 1.1.3 旋翼的结构、功用和驱动方式 7
- ▶ 1.2 旋翼飞行器的发展历程和多旋翼无人机 8
 - 1.2.1 旋翼飞行器的发展历程 8
 - 1.2.2 多旋翼无人机的基本概念 12
 - 1.2.3 多旋翼无人机飞行控制特点、方式和安全保障 15
- ▶ 1.3 旋翼飞行器发动机的分类 16
 - 1.3.1 旋翼飞行器发动机的分类和品质要求 17
 - 1.3.2 电动和油动旋翼飞行器的特点和对比分析 19
- ▶ 1.4 旋翼飞行器动力装置系统的基本概念 21
 - 1.4.1 旋翼飞行器发动机数量要求 21
 - 1.4.2 旋翼飞行器动力装置系统的组成 24
- ▶ 本章小结 26
- ▶ 习题 27

第二篇 电 动 机 篇

第 2 章 相关的电磁基本知识 31

- ▶ 2.1 磁的基本知识 31



2.1.1	磁性、磁体和磁化的基本概念	31
2.1.2	磁场的基本概念	33
▶ 2.2	电的基本知识	35
2.2.1	电和电荷的基本概念	35
2.2.2	电场的基本概念	37
▶ 2.3	电磁效应的基本知识	40
2.3.1	电磁场、电流磁效应和安培定则	40
2.3.2	磁感线、磁感强度和高斯定理	42
2.3.3	磁化电流和磁场强度的基本概念	43
▶ 2.4	电路的基本知识	46
2.4.1	电路的基本概念	46
2.4.2	电路图的基本概念	50
2.4.3	电路常用的基本元件	52
2.4.4	基尔霍夫定律	55
▶ 2.5	磁路的基本知识	56
2.5.1	磁路的基本概念	56
2.5.2	永磁磁路的等效磁路图	59
▶	本章小结	61
▶	习题	62

第3章 直流电动机原理与特性 63

▶ 3.1	电机的定义、分类与电动机的结构类型	63
3.1.1	电机的定义、类型和用途	63
3.1.2	旋转电机的分类及其区别	64
3.1.3	电动机的类型和结构	65
▶ 3.2	直流电动机工作原理、基本结构和分类	66
3.2.1	直流电动机工作原理、性能和发展特点	66
3.2.2	直流电动机的基本结构和分类	68
▶ 3.3	直流电动机的电枢绕组与基本方程式	75
3.3.1	直流电动机电枢绕组	75
3.3.2	直流电动机的基本方程式	78
▶ 3.4	直流电动机的工作特性和机械特性	80
3.4.1	直流电动机的工作特性	80
3.4.2	直流电动机机械特性	82
▶ 3.5	直流电动机起动、调速、制动与电气控制系统	85

3.5.1	直流电动机起动特性与电气控制系统	85
3.5.2	直流电动机调速特性与电气控制系统	88
3.5.3	直流电动机制动特性与电气控制系统	93
▶	本章小结	97
▶	习题	98
 第4章 无刷直流电动机与空心杯电动机		99
▶	4.1 无刷直流电动机基本结构和工作原理	99
4.1.1	无刷直流电动机的基本结构和分类	99
4.1.2	无刷直流电动机的工作原理及其优缺点	102
▶	4.2 无刷直流电动机的绕组结构	107
4.2.1	无刷直流电动机绕组结构的基本概念	107
4.2.2	无刷直流电动机绕组的类型与分数槽绕组	109
▶	4.3 无刷直流电动机转子位置检测技术	110
4.3.1	无刷直流电动机转子位置传感器	110
4.3.2	无位置传感器的转子位置检测技术	113
▶	4.4 无刷直流电动机运行特性与转速控制技术	117
4.4.1	无刷直流电动机运行特性	118
4.4.2	无刷直流电动机转速控制技术	122
▶	4.5 电池	127
4.5.1	电池的定义和发展历程	128
4.5.2	原电池的基本概念	129
4.5.3	可充电电池的基本概念	130
4.5.4	锂电池	131
4.5.5	燃料电池	132
4.5.6	其他新型电池	133
▶	4.6 DIY 四旋翼无人机动力装置	134
4.6.1	DIY 精神与四旋翼无人机动力装置的组成	135
4.6.2	四旋翼无人机动力装置的主要部件	136
▶	4.7 空心杯电动机基本结构、原理与特性	140
4.7.1	空心杯电动机基本结构与原理	140
4.7.2	空心杯电动机的主要特性与应用范围	141
▶	本章小结	143
▶	习题	144



第三篇 航空发动机篇

第5章 与航空发动机相关的基本知识 147

▶ 5.1 气体的基本知识	147
5.1.1 气体运动的特点和工质的定义	147
5.1.2 理想气体和气体的属性	148
▶ 5.2 热力系统的基本知识	149
5.2.1 热力系统、状态和状态参数	149
5.2.2 热力系统平衡状态、气体状态方程和热力过程	151
▶ 5.3 气流的基本知识	152
5.3.1 稳定流动和连续方程	153
5.3.2 能量方程和伯努利方程	153
5.3.3 音速和马赫数	154
5.3.4 气流的滞止参数和管道中气流参数的变化	155
▶ 5.4 燃烧和火焰传播的基本知识	157
5.4.1 燃料燃烧的基本知识	157
5.4.2 火焰传播的基本知识	160
▶ 5.5 热力学基本定律	163
5.5.1 热力学第一定律	163
5.5.2 热力学第二定律	165
▶ 5.6 航空发动机概述	168
5.6.1 航空发动机的类型和基本要求	169
5.6.2 航空发动机的由来与发展	170
▶ 本章小结	174
▶ 习题	175

第6章 航空活塞式发动机 176

▶ 6.1 航空活塞式发动机概述	176
6.1.1 航空活塞式发动机的基本结构和分类	176
6.1.2 航空活塞式发动机的基本组成	178
▶ 6.2 航空活塞发动机工作原理与旋转活塞发动机	183
6.2.1 航空活塞式发动机工作原理	183

6.2.2 旋转活塞式发动机	186
▶ 6.3 航空活塞发动机混合气燃烧过程	188
6.3.1 航空活塞发动机混合气正常燃烧过程	188
6.3.2 航空活塞发动机混合气的不正常燃烧	191
▶ 6.4 航空活塞发动机功率、经济性和工作状态	195
6.4.1 航空活塞发动机的功率	196
6.4.2 航空活塞式发动机的经济性	198
6.4.3 航空活塞式发动机常见的工作状态	200
▶ 6.5 航空活塞发动机的特性	201
6.5.1 航空活塞式发动机负荷特性	202
6.5.2 航空活塞式发动机螺旋桨特性	203
6.5.3 航空活塞式发动机高度特性	204
6.5.4 航空活塞式发动机增压特性	205
▶ 本章小结	205
▶ 习题	206

第 7 章 航空活塞发动机工作系统

208

▶ 7.1 航空活塞发动机燃油系统	208
7.1.1 燃油系统的定义、功用和类型	208
7.1.2 燃油系统的组成部分	210
7.1.3 汽化器	212
7.1.4 直接喷射式燃油调节器	219
▶ 7.2 航空活塞发动机滑油系统	221
7.2.1 滑油系统的功能和要求	221
7.2.2 滑油系统的润滑方式	222
7.2.3 滑油系统的组成和工作原理	223
7.2.4 滑油系统的监控	224
▶ 7.3 航空活塞发动机点火系统	225
7.3.1 点火系统的功能和组成	226
7.3.2 磁电机的组成和工作原理	227
7.3.3 电嘴的结构和工作原理	230
▶ 7.4 航空活塞发动机起动系统	231
7.4.1 起动系统的组成和工作原理	231
7.4.2 活塞发动机起动时高压电的产生	232
▶ 7.5 航空活塞发动机散热系统	234



7.5.1 气冷式散热系统的组成和工作原理	234
7.5.2 汽缸温度的影响因素与调节	236
▶ 本章小结	237
▶ 习题	238

第 8 章 航空涡轮轴发动机 239

▶ 8.1 喷气发动机概述	239
8.1.1 喷气发动机的分类和工作原理	239
8.1.2 无压气机的空气喷气发动机	240
8.1.3 有压气机的空气喷气发动机	241
▶ 8.2 航空涡轮轴发动机的基本概念	245
8.2.1 航空涡轮轴发动机的类型和基本构造	245
8.2.2 航空涡轮轴发动机的工作原理、性能参数和特点	246
▶ 8.3 航空涡轮轴发动机冷端部件结构和原理	249
8.3.1 进气道	249
8.3.2 压气机	252
8.3.3 排气装置和减速器	256
▶ 8.4 航空涡轮轴发动机热端部件结构和原理	257
8.4.1 燃烧室	257
8.4.2 涡轮	261
▶ 8.5 航空涡轮轴发动机工作特性和比较	264
8.5.1 航空涡轮轴发动机工作特性	265
8.5.2 旋翼飞行器航空发动机不同类型的比较	267
▶ 本章小结	269
▶ 习题	270

第 9 章 航空涡轮轴发动机工作系统 271

▶ 9.1 航空涡轮轴发动机控制系统	271
9.1.1 航空涡轮轴发动机控制的内容	271
9.1.2 航空涡轮轴发动机控制原理和方式	272
9.1.3 航空涡轮轴发动机全权限数字控制系统	276
▶ 9.2 航空涡轮轴发动机燃油系统	278
9.2.1 航空燃油	278
9.2.2 燃油系统基本组成和工作	279

▶ 9.3 航空涡轮轴发动机滑油系统	281
9.3.1 航空发动机滑油的类型和性能指标	281
9.3.2 滑油系统的总体结构、类型和主要部件	282
▶ 9.4 航空涡轮轴发动机起动点火系统	287
9.4.1 航空涡轮轴发动机起动点火过程和阶段划分	287
9.4.2 航空涡轮轴发动机起动点火系统的组成和工作	289
▶ 9.5 航空涡轮轴发动机附件传动装置	294
9.5.1 发动机附件传动装置的基本概念	294
9.5.2 恒速传动装置	295
9.5.3 双速传动装置	298
▶ 9.6 旋翼飞行器传动系统	301
9.6.1 旋翼飞行器传动系统的组成和原理	301
9.6.2 旋翼飞行器传动系统的主要部件	302
▶ 本章小结	306
▶ 习题	307

参考文献

308

第一篇 概 述 篇

第1章 旋翼飞行器动力装置概述

第 1 章

旋翼飞行器 动力装置概述

主要内容

- (1) 与旋翼飞行器相关的基本概念；
- (2) 旋翼飞行器的发展历史和趋势；
- (3) 旋翼飞行器发动机的分类；
- (4) 油动和电动旋翼飞行器的特点；
- (5) 旋翼飞行器动力装置系统的基本概念。

1.1 与旋翼飞行器相关的基本概念

旋翼飞行器(也称为直升机)是航空飞行器大家庭中的一员,其主要结构特点是具有一个或多个可旋转的机翼(旋翼),用以产生克服机体自重的升力,以及提供推进力和操纵力,这是它在结构外形上和飞行原理上与固定翼飞机之间存在的最大差别。

1.1.1 飞行器的定义和分类

1. 飞行器的定义

飞行器是指以某种方式联结在一起的变形体的任意组合,能在地球大气层内或大气层之外的空间(含环地球空间、行星和行星际空间)飞行的物体。例如:步枪弹丸是最简单的一种飞行器,飞机和宇宙飞船等则是较为复杂的飞行器。

2. 飞行器的分类

1) 飞行器总分类

通常,飞行器可分为三大类:航空飞行器、航天飞行器、火箭和导弹,如图 1-1 所示。



(1) 航空飞行器。航空飞行器是指飞行动力依靠空气,只能在大气层内飞行的飞行器,如孔明灯、风筝、热气球、地效船和飞机等。



图 1-1 飞行器的分类

(2) 航天飞行器。航天飞行器是指飞行动力不依靠空气而是依靠自身携带气体的反作用力来推动的飞行器,航天飞行器主要在大气层之外的空间飞行,如卫星、空间站、宇宙飞船等。

(3) 导弹和火箭。依靠制导系统控制其飞行轨迹的飞行武器称为导弹;靠火箭发动机提供推进力的飞行器称为火箭。

2) 航空飞行器分类

航空飞行器根据其自身重量的比重(单位体积的重量)是否重于空气(大气)的比重,又分为两种:

(1) 无动力航空飞行器。自身重量的比重比空气的比重轻,如孔明灯、热气球等,或是靠风的推力升扬于空中,如风筝等,其特点都是不需要安装动力装置就能飞上天空,统称为无动力航空飞行器。

(2) 动力航空飞行器。自身重量的比重比空气的比重大,需要依靠动力装置提供飞行动力才能升空的航空飞行器,称为动力航空飞行器,如旋翼飞行器和固定翼飞机等。

1.1.2 旋翼飞行器的定义、特点、分类和用途

1. 旋翼飞行器的定义和特点

1) 旋翼飞行器的定义

旋翼飞行器是指具有一个或多个由发动机驱动的旋转机翼(旋翼),具备垂直起落和空中悬停飞行性能的动力航空飞行器。

旋翼飞行器和固定翼飞机都属于动力航空飞行器的范畴,即它们自身重量的比重都比空气的比重大,需要依靠动力装置提供飞行动力,能够且必须处在空气环境中(空中)进行持续、可控飞行的飞行器。两者相比较,固定翼飞机具有续航时间长、飞行速度快、飞行效率高和载荷大等优点,缺点是起飞降落时机场需要有长距离跑道,以及不能进行空中悬停等。

为了弥补固定翼飞机不能垂直起落的缺点,人们经历了艰辛而漫长的技术探索过程。从 1903 年美国莱特(Wright)兄弟创造的固定翼飞机滑跑起飞成功,到 1939 年春天美籍俄罗斯人西科斯基(Sikorsky)设计制造出世界公认的第一架实用的单旋翼飞行器 VS-300 垂直起落飞行成功,中间又经历了差不多 36 个春夏秋冬。由此可见,旋翼飞行器与固定翼飞

机相比,不论是在理论研究方面,还是在设计制造和应用使用方面都不比固定翼飞机简单,甚至更加复杂。

2) 旋翼飞行器的特点

旋翼飞行器的旋翼转轴都近于铅直,在动力装置的驱动下高速旋转,产生向上的拉力,因而旋翼飞行器从功能上来讲是以旋翼作为其主要升力来源的垂直起落飞机。旋翼由发动机驱动在空气中旋转,给周围空气以扭矩,因而空气必定以大小相等、方向相反的扭矩作用于旋翼,继而传递到机体上。如果不采取补偿措施,这个反扭矩将使机体发生逆向旋转。为了消除这个反扭矩作用以保持旋翼飞行器机体的航向,可以采用不同的方式,在设计上也就出现了不同构造型式的旋翼飞行器。在此需要说明的是:虽有旋翼但不能垂直起落的飞行器,或虽能垂直起落但不是以旋翼作为其升力来源的飞行器,都不包括在本书所指的旋翼飞行器范围之内。

旋翼飞行器与固定翼飞机在结构外形上和飞行原理上的差别,使得旋翼飞行器具有大多数固定翼飞机所不具备的飞行特点:垂直升降、空中悬停、小速度前飞、后飞、侧飞、原地回转和树梢高度飞行等。这些飞行特点使得旋翼飞行器的飞行和使用上要比固定翼飞机灵活得多,弥补了固定翼飞机因飞行速度快而存在的许多不足之处,在很多固定翼飞机无法涉及的领域或地区可以大显身手,大有用武之地。当然,任何事物都不是完美无缺的,都要一分为二,旋翼飞行器与固定翼飞机相比,具有速度低、耗油量较高、航程较短等缺点。

2. 旋翼飞行器的分类

旋翼飞行器的分类有好几种方法,其中主要分类方法包括按照重量分类和结构分类两种。

1) 按重量划分

旋翼飞行器依据其重量分类有:

- (1) 微微型旋翼飞行器。空机重量和起飞全重小于 1.5kg。
- (2) 微型旋翼飞行器。空机重量介于 1.5~4kg 之间,起飞全重介于 1.5~7kg 之间。
- (3) 超轻型旋翼飞行器。空机重量介于 4~15kg 之间,起飞全重介于 7~25kg 之间。
- (4) 轻型旋翼飞行器。空机重量介于 15~116kg 之间,起飞全重介于 25~150kg 之间。
- (5) 小型旋翼飞行器。空机重量大于 116kg,起飞全重介于 150~3000kg 之间。
- (6) 中型旋翼飞行器。起飞全重介于 3~16t 之间。
- (7) 大(重)型旋翼飞行器。起飞全重大于 16t。

2) 按结构划分

旋翼飞行器根据其克服反扭矩方式所安装的旋翼数量是不同的,在设计上出现了不同结构的旋翼飞行器,主要有如下几种。

(1) 单旋翼式。它是一种单旋翼带尾桨的旋翼飞行器(图 1-2),用尾桨推力来平衡主旋翼反扭矩。这种结构是传统直升机中最流行的形式,比双旋翼飞行器简单,但要多付出尾桨的功率消耗(约占发动机总功率的 15%~20%)。

(2) 共轴式双旋翼。两旋翼在同一轴线上,相逆旋转,因此反扭矩彼此相消(图 1-3)。这种结构的外廓尺寸较小,但传动和操纵机构复杂。