



普通高等院校民航特色专业
“十三五”规划教材

飞行技术专业

直升机飞行 原理与性能

钱宇 刘小磊 陈曦光 主编

FLIGHT PRINCIPLE AND PERFORMANCE OF
HELICOPTER



中国民航出版社



普通高等院校民航特色专业“十三五”规划教材·飞行技术专业

直升机飞行原理与性能

主编 钱宇 刘小磊 陈曦光

中国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

直升机飞行原理与性能/钱宇, 刘小磊, 陈曦光主
编. —北京: 中国民航出版社, 2018. 8 (2018. 9 重印)
ISBN 978-7-5128-0561-3

I. ①直… II. ①钱… ②刘… ③陈… III. ①直升机-
飞行原理②直升机-飞行品质 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 130331 号

直升机飞行原理与性能

钱宇 刘小磊 陈曦光 主编

直升机飞行原理与性能

钱宇 刘小磊 陈曦光 主编

-
- 责任编辑 陈晨
出 版 中国民航出版社 (010) 64279457
地 址 北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
排 版 中国民航出版社录排室
印 刷 北京富泰印刷有限责任公司
发 行 中国民航出版社 (010) 64297307 64290477
开 本 787×1092 1/16
印 张 17
字 数 436 千字
版 印 次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 9 月第 2 次印刷
-
- 书 号 ISBN 978-7-5128-0561-3
定 价 49.80 元

官方微博 <http://weibo.com/phcaac>

淘宝网店 <https://shop142257812.taobao.com>

电子邮箱 phcaac@sina.com

中国民航出版社

前言

Preface

《直升机飞行原理与性能》是一本面向直升机驾驶技术专业的教材。本教材在编写过程中，注意吸收国内外同类教材的优点，把握飞行员应该掌握的航空知识主线，着重从物理概念的角度讲清问题的本质，突出基本原理的学习和基本方法的训练，起到为实际飞行打下基础的作用。

全书共分十二章。第一章为直升机概述，主要介绍直升机的概念、分类和基本组成。第二章为大气及升力、阻力，包括大气环境的一般介绍、流体流动的描述、翼型的空气动力学知识等。第三章为旋翼的空气动力，包括旋翼系统、旋翼拉力和旋转阻力的产生、所需功率以及桨叶的运动等内容。第四章为直升机平衡、稳定性和操纵性，主要介绍直升机稳定性和操纵性的基本概念、影响因素等有关知识。第五章为平飞、上升和下滑，主要介绍直升机在平飞、上升和下滑时的运动方程、基本性能和操纵原理。第六章为垂直飞行状态，主要介绍悬停、垂直上升和垂直下降的操纵原理。第七章为盘旋，主要介绍直升机的基本机动性能和转弯的操纵原理。第八章为起飞和着陆，主要介绍直升机的起飞和着陆性能以及基本操纵原理。第九章为直升机特殊飞行及运行，主要介绍旋翼自转、失速、涡环状态、共振、翻滚等内容。第十章为直升机性能，主要介绍直升机性能的计算及影响因素、直升机运行性能等。第十一章为重量与平衡，主要介绍直升机重心位置的确定原理以及一些主要的确定方法。第十二章为燃油计划，主要介绍基于现行规章下直升机燃油携带量的计算。

本书难易适当，既可作为直升机驾驶技术专业学生的教材，也可供直升机维修等工程技术人员参考使用。

本教材由中国民用航空飞行学院飞行技术学院教材编写组编写，其中第二章、第三章、第四章、第五章、第九章和第十二章由钱宇编写，第六章、第七章、第八章、第十章和第十一章由刘小磊编写，第一章由陈曦光编写。全书由钱宇统稿，编写组成员交叉审稿。

中国民用航空飞行学院飞行运行技术研究中心的同仁们是本教材出版的后盾。

中国民航出版社对本书的出版给予了大力支持，教材编辑部副主任刘庆胜、编辑陈晨在教材的出版中给了很好的建议，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，占有资料难全，加之编者水平有限，书中错漏之处在所难免，恳请各位读者和同行不吝指教。

编者

2018年7月

目录

Contents

前言

第1章 绪论	1
1.1 直升机的概念	1
1.2 直升机的发展	1
1.3 直升机的分类	4
1.4 直升机的基本组成	7
思考与练习	9
第2章 大气及升力、阻力	10
2.1 大气	10
2.2 翼型	14
2.3 空气流动的描述	16
2.4 升力	23
2.5 阻力	29
2.6 升阻比与极曲线	38
思考与练习	40
第3章 旋翼的空气动力	42
3.1 直升机旋翼系统	43
3.2 旋翼的拉力	49
3.3 旋翼的旋转阻力	55
3.4 旋翼的所需功率	57
3.5 桨叶的挥舞运动和旋翼锥体的倾斜	61
思考与练习	69
第4章 直升机平衡、稳定性和操纵性	70
4.1 直升机的机体坐标系	70

4.2	直升机的平衡	71
4.3	直升机的稳定性	75
4.4	直升机的操纵性	78
	思考与练习	89
第5章	平飞、上升和下滑	90
5.1	平飞	90
5.2	上升	104
5.3	下滑	110
5.4	巡航性能	117
	思考与练习	123
第6章	垂直飞行状态	124
6.1	悬停和悬停转弯	124
6.2	垂直上升	134
6.3	垂直下降	137
	思考与练习	139
第7章	盘旋	140
7.1	侧滑	140
7.2	盘旋	145
	思考与练习	153
第8章	起飞和着陆	154
8.1	滑行	154
8.2	接近地面飞行	157
8.3	起飞	162
8.4	着陆目测	168
8.5	着陆	177
	思考与练习	179
第9章	直升机特殊飞行及运行	180
9.1	旋翼自转下降和着陆	180
9.2	直升机的高度-速度图	194
9.3	旋翼失速	196
9.4	涡环状态	197
9.5	尾桨失效	200
9.6	地面共振	202
9.7	动态翻滚	205
	思考与练习	208

第 10 章 直升机性能	209
10.1 性能概述	209
10.2 直升机性能计算	210
10.3 运输类直升机运行性能	217
思考与练习	221
第 11 章 重量与平衡	222
11.1 重量与平衡基本概念	222
11.2 重量与平衡计算	226
11.3 重量与平衡示例	232
思考与练习	240
第 12 章 燃油计划	241
12.1 燃油政策规章	241
12.2 燃油计划示例	243
思考与练习	244
附录 1 国际标准大气表	245
附录 2 直升机 1、2 级运行性能的飞行剖面	247
附录 3 某型直升机典型的起飞性能图表	256
参考文献	264

第1章 绪论

关键词

直升机 旋翼系统 反扭矩系统 操纵系统

人类的飞行始于梦想。《山海经》中“羽人飞天”的传说诉说了人类对自由飞行的向往。梦想中的飞行方式多数是原地腾空而起、踏云而去。直升机的发明和使用，扩展了人类飞行的方式。本章主要介绍直升机的概念及发展、根据不同标准的分类、直升机的基本组成，为后续内容的学习奠定基础。

直升机由于其独特的飞行特性，在军事和民用的各个领域里得到广泛的应用。随着科学技术的日益进步，直升机无论在技术还是应用方面都得到迅速的发展。在现代直升机上综合运用了一系列基础科学、应用科学和工程技术的最新成果。直升机飞行原理与性能是一门建立在空气动力基础上的应用性强的课程，涉及空气动力学、飞行动力学、航空发动机、控制理论等多学科和专业技术领域。

1.1 直升机的概念

直升机是一种重于空气的飞行器，在旋翼旋转产生拉力的作用下，不仅可以前飞，还可以垂直起降。它凭借拉力克服自身重力腾空而起，借助拉力得以向前、后、左、右各个方向运动，在一定高度上还能悬停于空中。

直升机的突出特点是可以做低空、低速和机头方向不变的机动飞行，特别是能垂直起降，所以其起飞、着陆所需场地很小，对场地要求也不高。这些特点使得直升机具有广阔的用途及发展前景，它能承担其他交通工具无法完成的某些任务。在民用方面的应用主要有载客飞行、医疗救护、抢险救灾、紧急营救、吊装设备、地质勘探、护林灭火、空中摄影等。

1.2 直升机的发展

人类第一次尝试旋转翼飞行始于大约公元前400年的一种叫“竹蜻蜓”的玩具，如图1.1所示。它是由一根主轴及连接其上的叶片构成。通过双手旋转主轴，快速一搓，便可产生拉力，实现短时间的飞行。

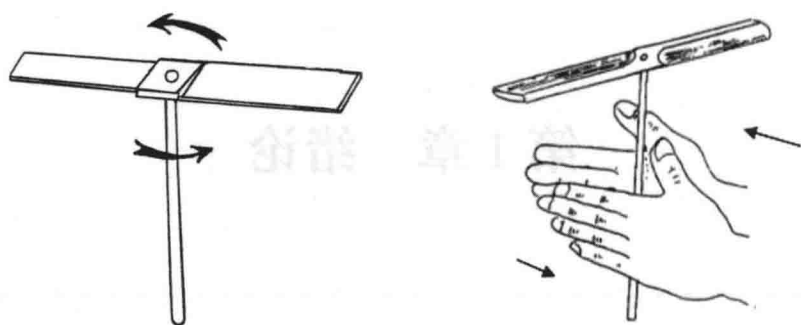


图 1.1 我国古代玩具竹蜻蜓

15 世纪，意大利人 Leonardo da Vinci（列奥纳多·达·芬奇）展示了他最具影响力的作品——旋转翼飞行器，如图 1.2 所示。该作品被视为直升机设计的雏形。1784 年，Launoy 和 Bienvenu 制造出一个双旋翼机械模型，该模型在同一个轴上加装了一对不同方向旋转的旋翼，通过操控弹簧和绳索得以飞行。此设计与现在的同轴双旋翼直升机结构比较接近。1810 年，George Cayley 发表了一篇奠定未来直升机发展基础的航空学论文。他设计的飞行器有两对反向旋转的旋翼，这对旋翼附着于帆布覆盖的主机身两侧，产生升力；旋翼桨叶为倾斜的扇形结构，无明显翼剖面；机身尾部装有一对螺旋推进器，提供前飞推力。现代旋翼飞机的许多特点，都源于该设计。由于缺少足够功率的发动机，这种设计理念只能停留在设计上，并不能使飞机真正飞离地面。

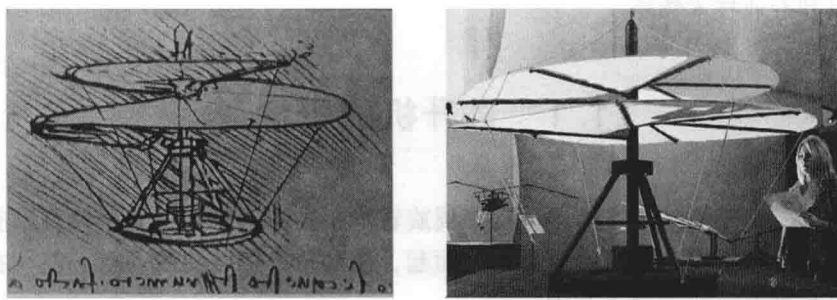


图 1.2 Leonardo da Vinci 的直升机理念

20 世纪初的直升机设计也常受制于缺乏强大的发动机这一难题。1907 年 9 月，Louis Breguet 设计了一架绑定旋转翼直升机，并成功承载一人进行了高度 2 ft 的 1 min 的飞行。不过，为了保持稳定，需要四个助手在飞行过程中扶住飞机。同年 11 月，Paul Cornu 设计出了公认的第一次“真正飞行”的直升机，实现了自由飞行。该架直升机飞行高度在 1~5 ft 之间变化，飞行时间 20 s，配有两个直径大约 20 ft、纵向安装的旋翼，如图 1.3 所示。它是用一个 4 轮车型支架支撑起前后两个长臂的“V”形双旋翼纵列式直升机，支架中部为动力装置，两个长臂中部各有一个自行车车轮模样的轮子与两片桨叶的旋翼相连，再通过皮带与中间的发动机相连。安装在旋翼桨盘下方的桨叶使旋翼产生向后向下的气流，从而为飞机提供向前的推力。

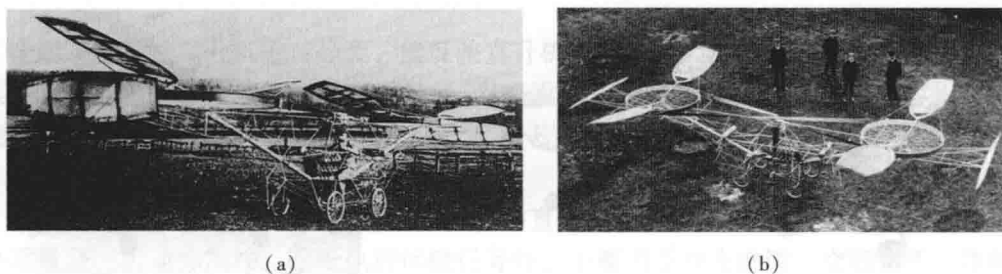


图 1.3 Paul Cornu 设计的直升机

自 Paul Cornu 之后, 英国、法国、德国、美国、丹麦、西班牙和俄国等国家的设计师们, 分别以各自的思维方式探索直升机的飞行。1910 年, Igor Sikorsky 制造了一架共轴式 3 片桨叶的双旋翼直升机, 它能升起 180 kg 的重物, 但不能升起自身重量加上飞行员的重量。1912 年, 丹麦飞行员 Ellehammer 通过使用周期桨距, 第一次成功实现了直升机的稳定可控飞行。他设计的直升机装有同轴的两个反向旋转的旋翼, 用以提供飞行动力, 桨叶被固定在这两个环形设计的旋翼上, 如图 1.4 所示。处于下方的旋翼装有飞机翼布, 以增加飞机向上飞行的动力, 同时通过安装常规推进器, 以实现直升机前飞。

第一次世界大战开始后, 性能较好的发动机的出现部分解决了直升机动力不足的问题, 但直升机的操纵问题越发突出, 使得发明者逐步明白只要解决了直升机的操纵问题就离实用直升机诞生不远了。随着人们对直升机探索的不断深入, 直升机的许多技术问题得到了逐步解决, 实用的直升机离人们越来越近了。

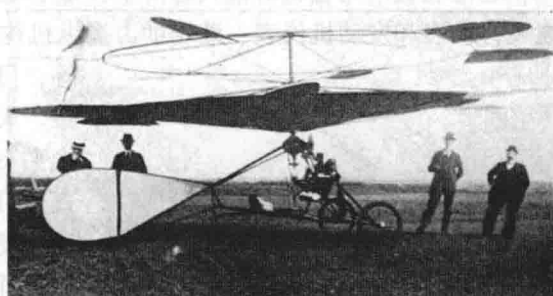


图 1.4 Ellehammer 设计的直升机

1939 年春, Igor Sikorsky 完成了 VS-300 直升机的全部设计工作, 在同年夏天制造出了第一架原型机; 同年 9 月 14 日, Sikorsky 亲自驾驶 VS-300 进行了第一次系留飞行; 之后 Sikorsky 对 VS-300 进行了改进; 1940 年 5 月 13 日, VS-300 进行了首次自由飞行; 至 1941 年, Sikorsky 制造的 VS-300 逐步成熟。VS-300 是 3 片桨叶单旋翼带尾桨的直升机, 如图 1.5 所示。通过旋翼的周期变距对直升机进行横向和纵向操纵, 通过尾桨进行航向操纵。1942 年, VS-300 的改进型 R-4 (VS-316) 制造出来了, 如图 1.6 所示。第二次世界大战期间, 这个型号的直升机被投入生产并制造了数百架。R-4 直升机通常被认为是第一架真正可供使用的直升机, 它的成功主要是因为其在机械设计上相对简单, 又可操纵, 并进行了批量生产且投入实际应用。至此, 第一架实用的直升机胜利诞生了。

自 VS-300 实现首飞以来, 直升机得到了突飞猛进的发展。在 20 世纪四五十年代, 直升机首先都是以满足军事用途为目的, 然后把军用直升机的技术用于民用直升机, 带动和促进民用直升机的发展。



图 1.5 VS-300 直升机



图 1.6 R-4 直升机

1945 年 12 月 8 日, 贝尔 47 直升机开始首飞, 它对直升机的发展具有深远影响, 如图 1.7 所示。1946 年, 贝尔 47 成为世界上第一种取得美国民航管理局 (CAA) 适航证的民用直升机, 标志着民用直升机开始真正走向实用阶段。贝尔 47 直升机的 2 片桨叶采用半刚性的全金属铰接结构, 尾梁上装有 2 片全金属桨叶尾桨。垂直安装了一台莱康明 VO-540-B1B3 6 缸卧式对置风扇冷却活塞发动机。机身分为座舱、中段和尾段 3 部分, 座舱采用有机玻璃座舱盖, 可并排乘坐 3 人; 中段为焊接钢管结构, 用于安装发动机和座舱; 尾段也是钢管结构, 三角形的横截面作为尾传动轴的支撑结构。传动系统采用离心式离合器和两级行星减速齿轮, 起落装置采用管材滑橇式起落架, 带小型地面操纵机轮。贝尔 47 直升机装有完善的目视飞行仪表和发动机仪表、液压助力操纵机构、28V50A 的发电机、电动机和大容量电瓶

等, 可选装夜航设备、喷洒设备、货物托架、担架、灭火器及急救包等。该机空重为 814 kg, 最大平飞速度 169 km/h, 航程为 402 km。贝尔 47 直升机于 1947 年 1 月开始交付第一架生产型, 其后共发展了贝尔 47A、贝尔 47B、贝尔 XH-13F 等 10 多个型别, 并用涡轴发动机代替活塞发动机且取得了 FAA 适航证。



图 1.7 贝尔 47 直升机

随着民用直升机引进速度的增快, 我国内地民用直升机机队规模越来越大。据统计, 截至 2017 年 6 月 30 日, 我国内地民用直升机数量共计 909 架, 涵盖 70 种机型、18 家制造商和 217 家运营企业。

活塞直升机约 415 架, 市场占有率约为 45.7%; 涡轴直升机约 494 架, 市场占有率约为 54.3%。目前, 我国内地 217 家直升机运营企业中, 飞机数量排前 10 的分别为中信海直、上海金汇通航、海直通航、中国飞龙通航、华彬天星通航、国网通航、南航通航、广东白云通航、四川西林凤腾通航和广州穗联直升机通航。

1.3 直升机的分类

目前, 全世界大约有 4 万多架直升机用于各个领域。直升机也因技术与应用的不同, 被划分成各种类型。

1.3.1 按起飞重量分类

按起飞重量对直升机进行分类,能反映直升机在技术、经济、使用等方面的差别。人们尤其重视运输直升机的吨位(起飞重量)、空机重量、有效载荷、客(货)舱容积、外部吊挂能力、航程及续航时间等。按直升机最大起飞重量的不同,将直升机大致分为小型、轻型、中型、大型和重型5类。

小型直升机是指最大起飞重量在2 t以下的直升机,通常能载2~4人。这类直升机的特点是重量轻、机动性能好,除能执行运输任务外,主要用于观光旅游、交通指挥、抓捕等军民领域,大部分教练机属于小型直升机。

轻型直升机是指最大起飞重量在2~4 t的直升机,通常能载4~10人。这类直升机除执行运输任务外,主要用于执行空投、空降、后勤支援以及抢险救灾、公务专机、医疗救护等任务,也可用于完成小型直升机所能承担的任务。

中型直升机是指最大起飞重量在4~13 t的直升机,通常能载10~30人。这类直升机执行的任务与轻型直升机相似,但由于其运载能力更强,所以使用范围更广。

大型直升机是指最大起飞重量在13~20 t的直升机,通常能载30~50人。主要用于军民领域中的人员、装备运输以及旅客和货物运输等。

重型直升机是指最大起飞重量在20 t以上的直升机,通常能载50人以上。这类直升机主要用于庞大笨重装备以及旅客运输等,具有外部吊运能力,同时可用于森林灭火、建筑安装以及大型机械设备吊装等。

1.3.2 按用途分类

直升机的性能、构造和外形基本上是由它的用途决定的。直升机按照用途不同可以分为军用直升机和民用直升机两大类。

1. 军用直升机

军用直升机是以执行军事任务为目的的直升机的统称。根据执行的任务不同,主要分为武装直升机、运输直升机和战斗勤务直升机3个类别。

2. 民用直升机

民用直升机是指用于客运、货运、吊装、公共事务以及抢险救灾和医疗救护等民事活动的直升机。在国民经济建设和公共事务方面,民用直升机具有广泛用途,以执行运输任务为主,能担负多种多样的空中作业。按用途不同,主要分为通用运输直升机、旅客运输直升机、公共服务直升机、特种作业直升机、起重直升机和教练直升机等。

1) 通用运输直升机

通用运输直升机既可内装与外挂物资,也可用于人员运输,必要时亦可安装担架用于救护,或用绞车对遇险人员进行营救。该类直升机上装有执行任务所需的物资或设施,能够实施多种空中特种作业,如空中摄影、摄像、转播以及护林灭火等。

2) 旅客运输直升机

机舱内设有较舒适的座椅及隔音、减振和其他设施,专门用于旅客运输。

3) 公共服务直升机

安装执行任务所需的设备,服务于各种公共事务,如公安执法、巡逻、观察、环保取

样、消防救火、医疗救护、抢险救灾等。这类直升机与通用运输直升机不同的是，在机上装有固定的任务设备，专门执行上述任务。

4) 特种作业直升机

机上装有执行特种任务所需的设备，专门执行各种空中特种作业。例如，地球物理探测，高压输电线路或石油、天然气管路巡检和维护，农业施肥或喷洒农药，畜牧和渔业应用等。

5) 起重直升机

这种直升机有很强的外部吊运能力，根据起飞重量的大小，可吊起数吨或十几吨的物资，可用于建筑、大型设备安装等起重吊运。

6) 教练直升机

用于民用飞行员的训练。

1.3.3 按结构形式分类

根据直升机平衡旋翼反扭矩的方式、驱动旋翼的方式以及提供升力和推进力的不同方式，从结构形式上对直升机进行分类，常见的有如下几类直升机。

1. 单旋翼带尾桨式直升机

单旋翼带尾桨式直升机是技术最成熟、应用最广的构型。它具有一副旋翼和一个尾桨，旋翼同时产生升力和推进力，旋翼的反作用力矩由尾桨产生的偏转力矩予以平衡。同时，尾桨还用于控制直升机的航向。

2. 双旋翼共轴式直升机

双旋翼共轴式直升机具有绕同一轴线一正一反旋转的上下两副旋翼，由于转向相反，两副旋翼产生的扭矩在航向不变的飞行状态下相互平衡。通过上下旋翼总距差动产生不平衡扭矩可实现航向操纵，共轴双旋翼在直升机的飞行中，既是升力面又是纵横向和航向的操纵面。两副旋翼桨盘间有一段垂直的距离以适应横向挥舞的需要。

3. 双旋翼纵列式直升机

双旋翼纵列式直升机机身前后各有一个旋翼塔座，两副旋翼分别安装在两个塔座上，两副旋翼完全相同，但旋转方向相反，它们的反作用扭矩可以互相平衡。通常后旋翼稍高于前旋翼，以避免互相影响。双旋翼纵列式直升机主要优势是载重量大、空间尺寸小、利于舰载，同时具有很高的悬停效率。

4. 双旋翼横列式直升机

双旋翼横列式直升机的特征是，两副旋翼一左一右分别安装在机身两侧的两个支架上。两副旋翼完全相同，但旋转方向相反，其旋转时反作用力相互抵消。

双旋翼横列式直升机的最大优点是平衡性好，其缺点与双旋翼纵列式直升机差不多，操纵也比较复杂。双旋翼横列式直升机要在机身两侧增装旋翼支架，无形中会增加许多重量，而且也加大了气动阻力。

此外，横列式独特的旋翼/机翼构型使其在悬停、低速前飞时，旋翼的下洗流会直接冲击机翼表面，产生较大的向下载荷，双旋翼下洗流在机翼处交汇还将形成“喷泉效应”产生部分向下载荷，这直接影响到横列式直升机的有效载重和操纵品质；同时，这些载荷以低

频形式传递到驾驶室, 又是噪声的主要来源。横列式直升机旋翼的桨毂结构、桨叶的负扭转及尖削, 使其下洗流场特性与传统单旋翼直升机的也有较大不同。

5. 双旋翼交叉式直升机

双旋翼交叉式直升机简称交叉式直升机, 其两副旋翼位于机身两侧, 横向左右排列且横向轴距很小, 两旋翼轴不平行, 向外倾斜呈“V”字形, 两副旋翼交错方向协调旋转。其优点是机身短、外形小、稳定性好, 适宜执行起重、吊挂作业; 其缺点是因双旋翼横向布置, 气动阻力较大, 转动系统复杂。

6. 倾转旋翼机

倾转旋翼机是一种将固定翼飞机和直升机融为一体的新型飞行器, 它是在类似固定翼飞机机翼的两翼尖处, 各装一套可在水平位置与垂直位置之间转动的旋翼倾转系统组件。当飞机垂直起飞和着陆时, 旋翼轴垂直于地面, 呈横列式直升机飞行状态, 并可在空中悬停、前后飞行和侧飞。在倾转旋翼机起飞达到一定速度后, 旋翼轴可向前倾转 90° 角, 呈水平状态, 旋翼当作拉力螺旋桨使用, 此时倾转旋翼机能像固定翼飞机那样以较高的速度做远程飞行。它既具有普通直升机垂直起降和空中悬停的能力, 又具有涡轮螺旋桨飞机的高速巡航飞行的能力。倾转旋翼机采用了新的思维方法来设计直升机的旋翼和总体布局, 设计思想已突破了传统直升机的范畴, 属于新原理旋翼构型, 是直升机行业革命性的一项高技术, 也是直升机技术发展的必然结果。

倾转旋翼机的优点是速度快、噪声小、航程远、载重量大、耗油率低、运输成本低以及振动小; 主要缺点是技术复杂且不完全成熟、动力学和过渡飞行控制技术难、桨盘载荷高、座舱容积率小。

1.4 直升机的基本组成

本书主要通过单旋翼带尾桨的直升机来阐述直升机的飞行原理及性能, 单旋翼带尾桨直升机主要由旋翼系统、反扭矩系统、动力装置、传动系统、操纵系统、起落装置、机身和机载设备组成。

1.4.1 旋翼系统

旋翼系统是直升机的核心部件, 一般由两片或多片桨叶和桨毂组成。直升机上可以有单套主旋翼或双主旋翼系统, 旋翼系统产生直升机飞行所必需的升力、拉力和操纵力。常见的旋翼系统有全铰接式、半刚性式和刚性式。全铰接式旋翼的桨叶可以做挥舞、变矩和摆振3种运动, 半刚性旋翼桨叶可做挥舞和变矩, 刚性旋翼桨叶可做变矩。桨毂的结构形式、设计水平及制造工艺对直升机的性能、飞行品质、使用寿命、维修、安全和舒适性都有很大的影响。根据铰链的情况, 桨毂可分为铰链式桨毂、无铰桨毂、星形柔性桨毂、无轴承桨毂等几种结构。

1.4.2 反扭矩系统

直升机运行时, 旋翼系统在高速旋转提供升力、拉力和操纵力的同时, 也产生了旋转扭

矩。反扭矩系统的作用是平衡旋翼系统产生的旋转扭矩使直升机保持航向，以及对直升机进行航向操纵。调整反扭矩系统的推力，可以在主旋翼力矩改变时控制航向，或者在悬停的时候改变机头的朝向。常见的反扭矩系统有常规尾桨、涵道尾桨和无尾桨系统。

1. 常规尾桨

大多数单旋翼直升机需要一个单独的尾桨来克服主旋翼旋转产生的扭矩。常规尾桨由尾桨叶和尾桨毂组成。尾桨毂有轴向铰和水平铰，轴向铰允许尾桨叶转动，增加或减小桨叶迎角；水平铰允许尾桨叶做挥舞运动。

2. 涵道尾桨

涵道尾桨常称为“尾翼中的风扇”，是另外一种反扭矩系统。它将尾桨叶和尾桨毂安装在筒形涵道中，利用涵道产生的附加气动力来平衡旋翼扭矩。涵道尾桨由法国宇航公司研究，已成功应用在“海豚”等直升机上。涵道尾桨的功能与普通尾桨相同，但优点在于：结构设计可以减少前飞的阻力；安全性好，不易被杂物打桨；转子桨叶位于涵道内，旋翼下洗流干扰的影响较小，有利于低空飞行；振动小，噪音低。它也存在缺点：受外涵道结构影响，尾桨的直径受到限制；阻尼小，在垂直和悬停飞行时其效率不如普通尾桨；由于涵道结构的存在，使得达到同样要求时尾桨结构总重较大。

3. 无尾桨系统 (NOTAR)

NOTAR 系统在引擎的驱动下，用喷气引射和主旋翼下洗气流的有利交互作用形成反扭力。主旋翼产生的下洗气流从尾梁两侧流经尾梁，发动机产生的压缩空气通过尾梁一侧的向下开槽喷出，促使这一侧的下洗气流向尾梁表面吸附并加速（即所谓射流效应或 Coanda 效应），形成尾梁两侧气流的速度差，产生向一侧的侧推力，实现没有尾桨的反扭力。通过控制旋转喷嘴除了可以提供部分反扭力，还可以为直升机提供更精细的方向控制。不像一般露在外面的尾桨，尾梁上的喷气装置设置在机体内部，因此降低了直升机起降时地面人员的安全风险，另外噪音也大大降低。优点主要有：降低了飞行噪音；消除了直升机在起降时因尾桨造成的人员伤害风险；因消除了尾桨翼端产生的空气涡流，所以降低了机体飞行时的振动；由于降低了振动，也减轻了飞行员的疲劳程度。不足之处表现在：NOTAR 系统比起有尾桨机，效率较低；NOTAR 系统直升机的机动性稍差；由于尾梁太大，NOTAR 系统直升机的空气动力特性稍差。

1.4.3 动力装置

动力装置为直升机提供动力，主要分为两类，活塞式发动机和涡轴发动机。发动机可以采用垂直安装或者水平安装的方式，通过转动系统将动力传递到主旋翼和尾桨上。典型的小型直升机使用的是活塞式发动机，如施瓦泽 300C。活塞式发动机具有耗油率低、价格便宜等优点。涡轴发动机具有功重比大、维修简单和振动小等优点。

1.4.4 传动系统

直升机的传动系统与动力系统、旋翼系统和反扭矩系统共同构成了直升机上完整的机械运动系统。传动系统主要由减速器（包括主减速器、中间减速器和尾减速器）、传动轴、自由行程离合器等部件组成。

主减速器是传动系统中最复杂的部件,一般采用齿轮式传动,包括发动机的功率输入端和与旋翼、尾桨传动轴相连的功率输出端。它将高转速小扭矩的发动机功率变成低转速大扭矩传递给旋翼轴,同时按转速、扭矩要求将功率传递给尾桨等。中间减速器一般采用一对螺旋锥齿轮传动,以改变传动方向,它安装在尾梁和垂尾结合部。尾减速器将功率传递给尾桨,用于改变传动轴的转速和传动方向,带动尾桨旋转;此外,还用于传动尾桨叶进行变矩,以保证直升机的操纵。

传动轴是发动机和主减速器之间、主减速器和中间减速器之间、中间减速器和尾减速器之间,以及附件之间的连接件,用于传递功率。

自由行程离合器实际上是一个单向离合器。通过它,发动机可以带动旋翼和尾桨转动,而旋翼不能反过来带动发动机转动。这样当发动机停车或直升机处于自转飞行状态时,自由行程离合器保证使旋翼与发动机脱开,旋翼可以自由地进行自转。在直升机安装多台发动机时,任何一台发动机停车,都不能影响其他发动机及旋翼系统的工作。

1.4.5 操纵系统

直升机操纵系统由3个部分组成,即油门总距系统、脚操纵系统和周期变距操纵杆操纵系统,具体由周期变距操纵杆、脚蹬、油门变距杆、自动倾斜器、液压助力器、加载机构、卸载机构、旋翼刹车以及连杆摇臂等组成。驾驶飞机时,常用到的四种基本操纵装置为驾驶杆、桨距杆、油门和脚蹬。

1.4.6 起落装置

直升机起落装置一般由主起落架、前起落架和尾撑等组成。起落架不仅用于地面滑行和停放,而且在直升机着陆时吸收垂直下降速度产生的能量,减小接地时的过载,起缓冲作用。另外,它还防止直升机在起飞、着陆以及地面开车时出现地面共振。

直升机起落架一般有轮式起落架、滑橇式起落架、浮筒式起落架以及同时装有浮筒和机轮的两用起落架等。

1.4.7 机身

机身一般由前机身、中机身和尾梁组成,用于装载空勤人员、旅客、货物、设备以及燃油等,并支撑和固定发动机、旋翼、减速器、尾桨和起落装置等,起装载和连接的作用。

思考与练习

1. 简述直升机的分类。
2. 简述直升机的基本组成及各部分的功用。
3. 简述直升机尾桨的功用。

第 2 章 大气及升力、阻力

关键词

国际标准大气	翼型	相对气流	连续性定理	伯努利定理
迎角	动压	升力	阻力	升阻比

航空器在大气中飞行，将受到升力、阻力的作用，其空气动力的大小与机翼的形状有很大关系。本章在介绍大气和翼型参数的基础上，首先通过对空气流动的描述，刻画出流体的特性；然后分析升力、阻力的产生及影响因素；最后介绍升阻比的相关概念。

2.1 大气

直升机是在大气中飞行的飞行器，直升机空气动力特性的好坏除了与其本身的结构有关，还与大气特性密切相关。因此，要研究飞行技术，必须对大气有基本的了解。

2.1.1 大气的特性

空气是一种无色、无味的气体，看不见、摸不着，没有固定形状，占据一定空间，可自由运动，可以被压缩。空气是具有特殊性质的物质，下面介绍空气的物理特性。

1. 空气密度

空气密度是指在一定的温度和压力下单位体积内的空气质量。空气和其他物质一样，是由分子组成。空气密度大，说明单位体积内的空气分子多，比较稠密；反之，空气密度小，说明空气比较稀薄。

空气的密度与气温、海拔高度等因素有关，温度越高、海拔越高，空气的密度越小。在标准海平面、压力为 1013 hPa、温度为 15℃ 时，空气的密度为 1.225 kg/m^3 ；在 22000 ft (6500 m) 的高空，空气密度降为海平面密度的一半。大气密度随高度的变化规律如图 2.1 所示。

2. 空气压力

空气压力即气压，是指空气的压强，即单位面积上所承受的空气的垂直作用力，等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱的重量。气压的单位是帕斯卡，简称帕，符号为 Pa，常用的计量单位还有毫米汞柱 (mmHg)、毫巴 (mbar) 等。一个标准大气压为