

飞行技术专业系列教材



直升机飞行原理

ZHISHENGJI FEIXING YUANLI

王永虎 编

飞行技术专业系列教材

直升机飞行原理

王永虎 编

西南交通大学出版社

· 成都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

直升机飞行原理 / 王永虎编. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.7
飞行技术专业系列教材
ISBN 978-7-5643-5529-6

I. ①直… II. ①王… III. ①直升机 - 飞行原理 - 教材 IV. ①V275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 152282 号

飞行技术专业系列教材

直升机飞行原理

王永虎 编

责任编辑 孟苏成

封面设计 刘海东

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印 张 22.5

字 数 562 千

版 次 2017 年 7 月第 1 版

印 次 2017 年 7 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-5529-6

定 价 88.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

总序

民航是现代综合交通运输体系的有机组成部分，以其安全、快捷、通达、舒适等独特优势确立了独立的产业地位。同时，民航在国家参与经济全球化、推动老少边穷地区发展、维护国家统一和民族团结、保障国防和经济安全、加强与世界不同文明沟通、催生相关领域科技创新等方面都发挥着难以估量的作用。因此，民航业已成为国家经济社会发展的战略性先导性产业，其发达程度直接体现了国家的综合实力和现代化水平。

自改革开放以来，我国民航业快速发展，行业规模不断扩大，服务能力逐步提升，安全水平显著提高，为我国改革开放和社会主义现代化建设做出了突出贡献。可以说，我国已经成为名副其实的民航大国。站在新的历史起点上，在2008年的全国民航工作会议上，民航局提出了全面推进建设民航强国的战略构想，拉开了我国由民航大国迈向民航强国的序幕。

要实现民航大国向民航强国的转变，人才储备是最基本的先决条件。长期以来，我国民航业发展的基本矛盾是供给能力难以满足快速增长的市场需求。而其深层次的原因之一，便是人力资源的短缺，尤其是飞行、空管和机务等专业技术人员结构不合理，缺乏高级技术、管理和安全监管人才。有鉴于此，国务院在《关于促进民航业发展的若干意见》中明确指出，要强化科教和人才支撑，要实施重大人才工程，加大飞行、机务、空管等紧缺专业人才的培养力度。

正是在这样的大背景下，作为世界上最大的航空训练机构，作为中国民航培养飞行员和空中交通管制员的主力院校，中国民航飞行学院以中国民航可持续发展为己任，勇挑历史重担，结合自身的办学特色，整合优势资源，组织编写了这套“飞行技术专业系列教材”，以解当下民航专业人才培养的燃眉之急。在这套教材的规划、组织和编写过程中，教材建设团队全面贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》，以培养适应民航业岗位需要的、具有“工匠精神”的应用型高素质人才为目标，创新人才培养模式，突出民航院校办学特色，坚持“以飞为主，协调发展”的方针，深化“产教融合、校企合作”，强化学生实践能力培养。同时，教材建设团队积极推进课程内容改革，在优化专业课程内容的基础上，加强包括职业道德、民航文化在内的人文素养教育。

由中国民航飞行学院编写的这套教材，高度契合民航局颁布的飞行员执照理论考试大纲及知识点要求，对相应的内容体系进行了完善，从而满足了民航专业人才培养的新要求。可以说，本系列教材的出版恰逢其时，是一场不折不扣的“及时雨”。

由于飞行技术专业涉及的知识点多，知识更新速度快，因此教材的编写是一项极其艰巨的任务。但令人欣喜的是，中国民航飞行学院的教师们凭借严谨的工作作风、深厚的学术造诣以及坚韧的精神品质，出色地完成了这一任务。尽管这套教材在模式创新方面尚存在瑕疵，但仍不失为当前民航人才培养领域的优秀教材，值得大力推广。我们相信，这套教材的出版必将为我国民航人才的培养做出贡献，为我国民航事业的发展做出贡献！

是为序。

中国民航飞行学院教材

编写委员会

2016年7月1日

前 言

根据目前国内通用航空大发展的趋势,为适应直升机飞行员培训市场的需求,以及众多通用航空企事业单位和直升机航空爱好者的强烈要求,在中国民用航空规章 61 部 (CCAR61 部)《民用航空器驾驶员、飞行教员和地面教员合格审定规则》框架下,经过多年的编撰,《直升机飞行原理》终于付梓,这对直升机飞行技术、通航运行和机务维修等方面的拓展有着积极和深远的意义。

本教材是航空院校直升机飞行技术、直升机机务维修专业等学生的专业基础教材,也可作为相关科技人员以及航空爱好者的学习参考书。考虑到不同专业和方向的需求,本教材也提供一定知识选择的余地,书籍章节安排也力图与固定翼飞机飞行原理相对照和衔接,以便于飞行理论的理解掌握和进行自学。

本书在编写过程中参考了多本国内外同类或相近教材和书籍,并融入作者多年的学习和研究结果;针对直升机操纵和飞行执照要求的基础理论知识,翻译并融会了国外大量的资料,包括国外飞行航校教学材料和相关机型的训练手册,择其精华编入书中,强化对基本知识、基本技能和基本方法的介绍。本教材从直升机飞行操纵的方法出发,按照飞行理论学科体系,阐述了旋翼类航空器运动和控制所遵循的基本知识,涉及低速和高速飞行时的旋翼空气动力特性、直升机平衡性和稳操性、不同飞行状态的飞行性能和操纵技术等,通过介绍直升机旋翼的挥舞运动,通俗易懂地阐明直升机操纵的工作机理。

全书共分 10 章。第 1 章为绪论,主要介绍直升机的发展、特点、类型、基本组成和与固定翼飞机的区别。由于与固定翼飞机的低速和高速空气动力相似,第 2 章主要在翼型气动特性知识的基础上,重点介绍旋翼的气动特性及其作用,同时也特别给出了对称翼型的空气动力特点。第 3 章为本教材的突出亮点,也是在众多直升机方面书籍中所没有详细涉及的知识内容,即旋翼挥舞。旋翼挥舞运动对理解直升机稳定性和操纵性至关重要,这也是区别于固定翼飞机稳定性和操纵性的主要根源,通过旋翼挥舞运动的分析,给出自然挥舞特性和挥舞规律。第 4 章为直升机的平衡、稳定性和操纵性,主要阐述了包括静稳定性、动稳定性和操纵性的基本概念,以及影响因素等知识点。第 5 章为直升机平飞、上升和下滑,主要介绍基本概念及其性能,并详细给出相应飞行状态的操纵原理。第 6 章为垂直飞行状态,重点介绍直升机悬停性能及其影响因素,同时也阐述了垂直上升和垂直下降的基本性能及其操纵原理。第 7 章为侧滑和盘旋,主要介绍直升机产生侧滑的原因、判断侧滑的方法,以及消除侧滑的操纵原理,同时也介绍了直升机转弯性能和操纵原理。第 8 章为起飞和着陆,主要阐述了直升机起飞和着陆方式,以及包括低过载飞行和 Mast Bumping 等特殊运行情况。第 9 章为特殊飞行状态,从动态失速出发,介绍了旋翼失速的产生机理、预防和改出方法,然后针对直升机自转下降、涡环状态、尾桨失速等特殊飞行状态进行了详细介绍。第 10 章为重量与平

衡，主要介绍直升机重量与平衡的确定方法，重点是确定重心位置。最后，附录给出了直升机理论涉及的术语、美英制单位换算和直升机数据等，特别对目前升力的不同描述方法进行汇总，并突出强调美国联邦航空管理局（FAA）对升力比较完善的解释。

在教材编写过程中，得到飞行技术学院、教务处以及新津分院直升机大队等相关部门的大力支持，直升机大队队长犹轶（一级飞行员）、研究生处刘晓明教授对书稿提出了宝贵意见，中国民航飞行学院校长及功勋飞行员关立欣对本书进行了审定，作者在此表示诚挚的感谢。同时，对为本书编撰提供各类参考文献的国内外专家、学者以及相关网站和论坛表示谢意，感谢各位专家和众多的网友提供了很多实际可行的思路，也对教研室及其他老师、学生对第7、8章部分内容的文字录入工作表示谢意，特别感谢中国民航飞行学院大学生心理健康中心王红梅老师对整篇文字校正所付出的辛勤工作。

航空器飞行原理是飞行员驾驶的最基本技能，本书涉及的直升机飞行理论知识在深度和广度上更上一层楼。在本书中，涵盖了直升机类别私用驾驶员执照理论考试大纲，希望各位读者收获到对自己有益的直升机航空知识硕果，吾心足矣。

为方便读者阅读学习和交流，请扫描下方二维码“HelicopterHome”，即可共享执照考试大纲、考试题型、考试心得、考试技巧、题库更新状态、直升机运行视频、典型事故分析报告、国内外直升机发展态势等信息。此著作编写历经艰辛，但书中难免会有挂一漏万之处，为了力求尽善尽美，如有任何纰漏，欢迎读者指正，不胜感激，请直接通过电子邮件 cafucer@sina.com 联系作者。

作者

2017年5月



HelicopterHome

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 直升机的的发展	1
1.2 直升机的特点	4
1.3 直升机的类型	5
1.4 直升机的组成	10
1.5 直升机基本仪表和操纵	20
1.6 直升机与固定翼飞机的区别	26
复习思考题	28
第 2 章 旋翼空气动力学	30
2.1 大气和气流特性	30
2.2 翼型的气动特性	50
2.3 旋翼的作用	62
2.4 旋翼的气动力特性	70
2.5 旋翼的气动理论	84
复习思考题	91
第 3 章 旋翼挥舞	93
3.1 旋翼和铰链	93
3.2 桨叶挥舞运动	99
3.3 旋翼挥舞特性	107
3.4 旋翼挥舞规律	118
3.5 直升机振动与噪声	122
复习思考题	131
第 4 章 平衡、稳定性和操纵性	133
4.1 直升机的重心	133
4.2 直升机的平衡	135
4.3 直升机的稳定性	138
4.4 直升机的操纵性	146
复习思考题	163
第 5 章 平飞、上升和下滑	165
5.1 功率曲线	165
5.2 平 飞	172
5.3 巡航性能	183
5.4 上 升	187

5.5 下 滑	195
5.6 偏差及其原因	202
复习思考题	202
第 6 章 悬停及垂直飞行	205
6.1 悬停和悬停转弯	205
6.2 垂直上升	218
6.3 垂直下降	222
复习思考题	224
第 7 章 侧滑和盘旋	226
7.1 侧 滑	226
7.2 盘 旋	233
复习思考题	242
第 8 章 起飞和着陆	243
8.1 滑 行	245
8.2 接地飞行	246
8.3 起 飞	251
8.4 着陆目测	259
8.5 着 陆	268
8.6 特殊运行情况	272
复习思考题	279
第 9 章 特殊飞行状态	281
9.1 旋翼失速	281
9.2 自转状态	291
9.3 涡环状态	303
9.4 尾桨失效	307
9.5 机动飞行	310
复习思考题	314
第 10 章 重量与平衡	319
10.1 重 量	319
10.2 平 衡	320
10.3 重量与平衡原理	324
10.4 重量与平衡的确定方法	325
复习思考题	331
附录 I 术 语	332
附录 II 英美制单位与国际单位的换算	335
附录 III 升力的不同描述	336
附录 IV 直升机数据	346
参考文献	350

第 1 章 绪 论

直升机是一种依靠航空发动机驱动一个或多个旋翼产生升力和推进力，实现垂直起落及悬停、前飞、后飞、定点回转等可控飞行的航空器。众所周知，直升机的成功飞行比固定翼飞机晚了几十年，但直升机具有垂直起降，能长时间在空中悬停和向任意方向飞行，以及悬停、小速度向前或向后飞行的特点，当发动机在空中停车时，直升机还可以利用旋翼自转下降，安全着陆，所以在航空界中占据一席之地，近年来呈迅速蓬勃发展之势。

在直升机发展史中，相对于固定翼航空器，直升机具有独特的飞行特性，成为一种不需要专用机场的空中交通工具，在军民通用性方面发挥着重要作用。在军用方面用于运输突击、空降空投、侦察搜索、火力支援、反潜反坦克、布雷扫雷等军事活动。在民用方面主要用于客运、货运、森林灭火、新闻摄影、环境监测、抢险救灾和医疗救护等民事活动，例如，直升机在“5·12”汶川大地震的抢险救灾中就发挥了巨大甚至无可替代的作用。

1.1 直升机的发展

中国的竹蜻蜓和意大利人达·芬奇的直升机草图，为最初直升机的发明提供了启示，它们被公认是直升机发展史的起点。中国的竹蜻蜓（公元前 400 年，见图 1-1）和意大利人达·芬奇的设计方案图（15 世纪，见图 1-2），体现了直升机的基本工作原理——利用螺旋桨的空气动力实现升空飞行。

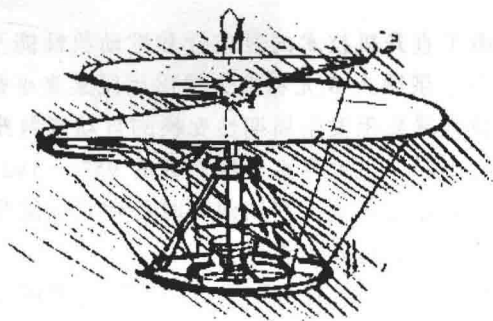
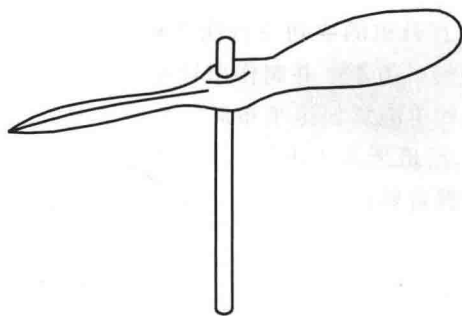


图 1-1 中国古代“竹蜻蜓”（公元前 400 年） 图 1-2 达·芬奇的直升机手稿（15 世纪）

竹蜻蜓及其变种在 18 世纪传入欧洲，被西方称之为飞螺旋或“中国陀螺”，这是我们祖

先的奇特发明。现代直升机尽管比竹蜻蜓复杂千万倍，但其飞行原理却与竹蜻蜓有相似之处。现代直升机的旋翼就好像竹蜻蜓的叶片，旋翼轴就像竹蜻蜓的那根细竹棍儿，带动旋翼的发动机就好像用力搓竹棍儿的双手。竹蜻蜓的叶片前面圆钝，后面尖锐，上表面比较圆拱，下表面比较平直。当气流经过圆拱的上表面时，其流速快而压力小；当气流经过平直的下表面时，其流速慢而压力大，于是上下表面之间形成了一个压力差，提供向上大于其本身重量的力，竹蜻蜓就会腾空而起。其实，直升机旋翼产生拉力的道理与竹蜻蜓是相同的。

意大利著名科学家、工程师达·芬奇最早提出了直升机旋翼的设想。19世纪末，在意大利的米兰图书馆里发现了达·芬奇在1475年画的一张关于直升机的想象图。这是一个用上浆亚麻布制成的巨大螺旋体，看上去好像一个巨大的螺丝钉。它以弹簧为动力旋转，当达到一定转速时，就会把机体带到空中。驾驶员站在底盘上，拉动钢丝绳，以改变飞行方向。西方人都说，这是最早的直升机设计蓝图。俄国人M.B.罗蒙诺索夫于1754年第一次进行了以弹簧为动力的直升机模型试验。1790年，英国的凯利制造了以弹性元件为动力的模型，并且绘制了直升机草图。

1907年，在美国莱特兄弟制造了世界上第一架可操纵的固定翼飞机4年后，法国人保罗·科尔尼研制的直升机成功地升空到膝盖高度长达20s(见图1-3)，机身两端各有两个旋翼向相反方向旋转以保持扭矩平衡，这架直升机被称为“人类第一架直升机”。它类似于现代直升机的雏形并以其精巧的设计向具有旋翼的载人直升机迈出了成功的一步。早期，直升机面临着两个重要的技术突破，首先需要提供足够的航空动力；其次要抵消旋翼旋转引起的反扭转造成的机身晃动问题。

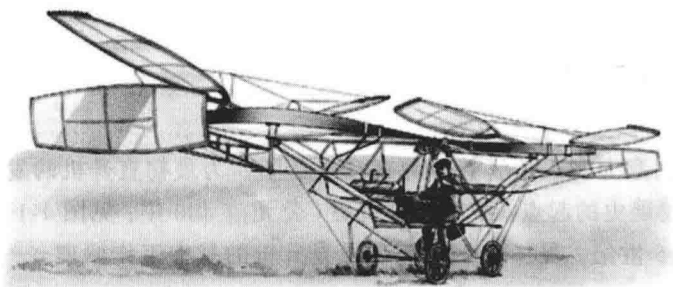


图 1-3 法国保罗·科尔尼与人类第一架直升机(1907年)

由于直升机技术的复杂性和发动机性能不佳，直升机的成功飞行比飞机晚了30多年。1911年，俄国人B.尤利耶夫提出用尾桨来平衡反扭转的方案，并制作出试验机，同年还发明了可使旋翼桨距发生周期性变换的自动倾斜器。这种单旋翼加尾桨布局的直升机成为现在最流行的布局，占世界直升机总数的95%。1923年，西班牙人J.切尔瓦将挥舞铰用到旋翼上，建造了C-4旋翼机，利用前飞时的相对气流吹动旋翼自转以产生升力，而直升机的旋翼有动力驱动，这是两者的差异。

第一架可正常操纵的载人直升机是德国人福克于1936年6月26日成功试飞的FW-61(见图1-4)。FW-61直升机属于并列双旋翼单座直升机，在1937年的试飞中，一举刷新了直升机飞行速度、升限、留空时间3项世界纪录。1939年9月14日，美籍俄国人西科斯基(I. Sikorsky, 1889—1972)设计的VS-300直升机试飞成功，1941年5月6日持续飞行了

1 h 32 min, 打破了 FW-61 的世界巡航时间纪录。1942 年, 在 VS-302 基础上制造的 R-4 (见图 1-5) 通常被认为是第一架切实可行的、真正可供使用的直升机, 西科斯基被称为现代直升机之父。直升机 R-4 是第一架大量生产的直升机, 在第二次世界大战期间制造了数百架。

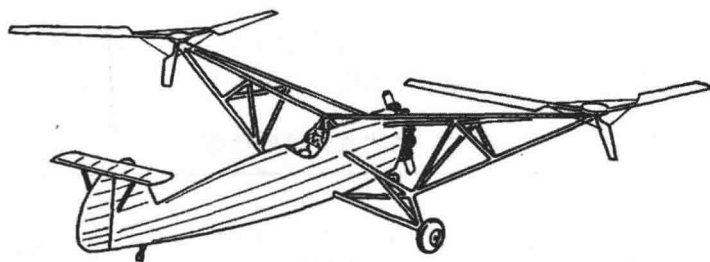


图 1-4 世界上第一架可正常操纵的直升机 (1936 年)



图 1-5 世界上第一种批量生产的直升机 (1942 年)

1946 年, 美国贝尔公司的 Bell 47-NC1H 直升机 (见图 1-6) 首次取得美国联邦航空局 (FAA) 颁发的民用适航证, 成为世界上第一种拥有商业型号合格证的直升机, 使直升机在民用方面逐渐获得了广泛的应用。从此, 直升机的发展由探索阶段进入到实用阶段, 并逐渐成为各国军事武器装备和国民经济发展的支柱。

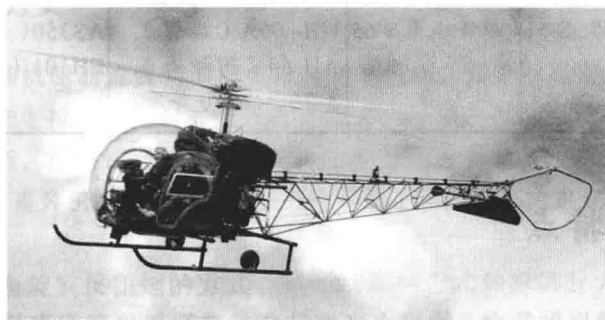


图 1-6 世界上第一种取得民用适航证的直升机 (1945 年)

直升机进入实用期后, 主要在动力装置和旋翼方面取得了许多重大的技术进展。首先是涡轴发动机的采用; 其次是采用复合材料的旋翼桨叶; 第三项重大进展是桨毂的结构形式。早期的全金属铰接式桨毂结构复杂且寿命仅有几百小时, 通过不断改进, 相继出现了用弹性

铰和其他柔性元件取代金属轴承的桨毂结构，直到近期出现的全复合材料无轴承旋翼，达到了简单、长寿、无维护的要求，是直升机发展的一个里程碑。除了旋翼和发动机这两个关键方面的重大进展之外，航空电子系统的迅速发展也为直升机的发展作出了重大贡献，对直升机的使用效能和飞行安全的改善起着重要作用。

在过去的大约半个世纪中，直升机经历了技术上的几项重大突破性进展。目前，直升机进入快速发展阶段，以旋翼和发动机发展为主要技术特征，大体上可分为4代，见表1-1。

表 1-1 各代直升机的比较

投产日期	第一代 1946—1960	第二代 1961—1975	第三代 1976—1990	第四代 1991 至今
主要技术特征	活塞式发动机，金属/木质混合式桨叶，机体为由钢管焊接成的桁架式或铝合金半硬壳结构，简易的仪表和电子设备	第一代涡轴发动机；全金属桨叶与金属铰接式桨毂构成的旋翼；机体主要仍为铝合金半硬壳式结构；开始采用最初的集成微电子设备	第二代涡轴发动机；全复合材料桨叶及带有弹性元件的桨毂构成的旋翼；机体部分采用复合材料；采用大规模集成电路的电子设备和较先进的飞行控制系统	第三代涡轴发动机；装有进一步优化设计的翼型、桨尖和先进的复合材料旋翼桨叶，无轴承或弹性铰式等新型桨毂；机体大部分或全部使用复合材料；操纵系统改为电传操纵；机载电子设备采用数据总线、综合显示和任务管理；先进的飞行控制、通信导航等系统
最大平飞速度 /km·h ⁻¹	<200	约 250	约 300	约 350
全机振动水平/g	约 0.2	约 0.15	约 0.10	约 0.05
噪声水平/dB	约 110	约 100	约 90	<80
旋翼桨叶寿命/h	600	1 200	3 600	近于无限寿命
典型机型	米-4、Bell-47、直-5、S-51 等	米-8、SA321（超黄蜂）、S-65 等	欧直 AS365（海豚）、Lynx（山猫）、UH-60A（黑鹰）、AH-64（阿帕奇）、S-76、卡-50 等	RAH-66（科曼奇）、NH-90、AS350（松鼠）、SA360（海豚）、EH101（灰背隼）、S-92 等

1.2 直升机的特点

直升机是利用旋翼提供升力、推进力来操纵自身进行各种姿态飞行。由于旋翼工作原理和构造的独特，导致直升机与其他航空器不同。固定翼飞机主要依靠机翼产生升力，靠舵面实现姿态的控制；而直升机依靠旋翼能垂直起落、空中悬停、向任一方向灵活飞行。直升机在功能上属于垂直起落机，在构造形式上属于旋翼飞行器。

直升机的最突出特点是可以做低空（离地面数米）、低速（从悬停开始）和机头方向不变的机动飞行，特别是可在小面积场地垂直起降。直升机的主要特点包括直升机空气动力特点、

飞行特点、操纵特点和构造特点等，可以归纳如下：

- (1) 能垂直起飞、着陆和飞行。
- (2) 对起降场地没有特殊要求。
- (3) 能在空中悬停和定点转弯。
- (4) 能沿任何方向飞行。
- (5) 能吊装体积比货舱大得多的物件。

直升机的最大速度可达 300 km/h 以上，俯冲极限速度近 400 km/h，使用升限可达 6 000 m（世界纪录为 12 450 m），一般航程可达 600 ~ 800 km。携带机内、外副油箱转场航程可达 2 000 km 以上。根据不同的需要直升机有不同的起飞重量。当前世界上投入使用的重型直升机最大的是俄罗斯的米-26（最大起飞重量达 56 t，有效载荷 20 t）。

由于以上这些特点使直升机具有广阔的用途及发展前景。在军用方面，直升机广泛应用于对地攻击、机降登陆、武器运送、后勤支援、战场救护、侦察巡逻、指挥控制、通信联络、反潜扫雷、电子对抗等。在民用方面，直升机主要用于短途运输、医疗救护、救灾救生、紧急营救、吊装设备、地质勘探、护林灭火、空中摄影等。海上油井与基地间的人员及物资运输也是直升机应用于公共事务中的一个重要体现。

1.3 直升机的类型

随着直升机技术的长足发展与进步，已有数以万计不同吨位、不同类型和用途的直升机被研制、生产和投入使用，仅《国外直升机手册》一书收编的直升机就有近几百种之多，但由于其发动机、传动系统、旋翼、尾桨之间的关系和相对位置基本固定，使得各种型号的直升机都具有基本相像的形状。目前，一般按直升机的结构形式、起飞重量、用途、使用的发动机种类和有无人驾驶等对直升机进行分类。

1.3.1 按结构形式分类

直升机是依靠发动机驱动旋翼转动产生拉力而飞行的，升力和推进力均由旋翼产生。根据牛顿第三定律，旋翼产生拉力的同时，空气必定以大小相等、方向相反的力矩作用于旋翼，这个反作用力矩叫反扭矩，反扭矩会传递到机体上，使机体向旋翼旋转的反方向转动。为了平衡这个反作用力矩，保证直升机的航向平衡，直升机采取了不同的布局形式，从而造成直升机结构形式多种多样。

直升机主要从平衡旋翼反扭矩的方式、驱动旋翼的方式和提供升力与推进力的不同方式来进行结构分类。直升机按平衡旋翼反扭矩的方式可分为单旋翼带尾桨式、双旋翼式、多旋翼式；按驱动旋翼的方式可分为机械驱动式、桨尖喷气驱动式；按提供升力与推动力的方式可分为正常式、带翼式、倾转旋翼式、复合式等。在这些构型中，有的构型通过不断地发展，技术较成熟，已研制出实用的型号，并在军民领域大量使用，如单旋翼带尾桨式、双旋翼共轴式、双旋翼纵列式、双旋翼交叉式、倾转旋翼式等。

1. 单旋翼直升机

单旋翼带尾桨式直升机常称为单旋翼直升机，旋翼系统为一副旋翼和一副尾桨（见图 1-7），旋翼既产生升力又产生推进力，可以使直升机垂直飞行、前飞、后飞和侧飞。安装在机身尾部的尾桨提供平衡旋翼反作用力矩的平衡力矩（见图 1-8）及航向操纵。改变尾桨拉力的大小，能够改变直升机的航向，进行机动飞行。单旋翼直升机的优点是机械驱动，构造简单效率高，其组成除了旋翼和尾桨外，还有发动机，主、尾减速器，传动系统和自动倾斜器等。与其他类型的直升机相比，其气动、平衡、操稳、振动等问题较易解决，操纵灵便，性能和成本均可接受，目前设计制造技术日趋成熟，是世界上使用最广的发展最完善的一种构型，约占目前直升机总数的 80%。我国目前使用的直升机（如直-5、米-8、云雀-3、“超黄蜂”和 BO-105 等）都属于这种类型。



图 1-7 单旋翼带尾桨式直升机

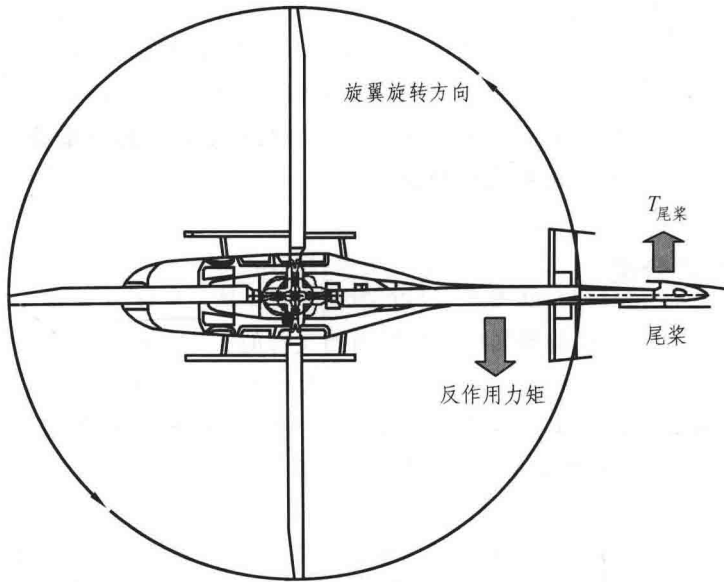


图 1-8 直升机的反作用力矩

这种形式的不足之处是需要一副尾桨来平衡旋翼的反扭矩，这无疑增加了全机的功率消耗和重量，一般尾桨在起飞、悬停状态下的功耗占总功耗的 7%~12%。尾桨高速旋转并处于旋翼的下洗流之下，受载复杂，造成噪声和结构件的疲劳。目前，采用涵道尾桨、增加垂直尾翼（简称垂尾）面积及采用无尾桨式单旋翼等措施来解决这些问题。对于轻型单旋翼直升

机，可把尾桨安装在尾梁末端的涵道内，这种尾桨称为涵道风扇尾桨。20世纪80年代，出现了另外一种平衡旋翼反扭矩及进行航向操纵的方法，它根本不需要尾桨来产生侧向力，采用这种方式的单旋翼直升机称为无尾桨单旋翼直升机。

2. 双旋翼直升机

双旋翼直升机是用两副机械驱动式旋翼产生升力的直升机。两副旋翼尺寸相同而旋转方向相反，其反扭矩互相平衡，因而不需要安装尾桨。这种形式又可分为共轴式双旋翼直升机、纵列式双旋翼直升机、横列式双旋翼直升机和横列交叉式双旋翼直升机，如图1-9所示。

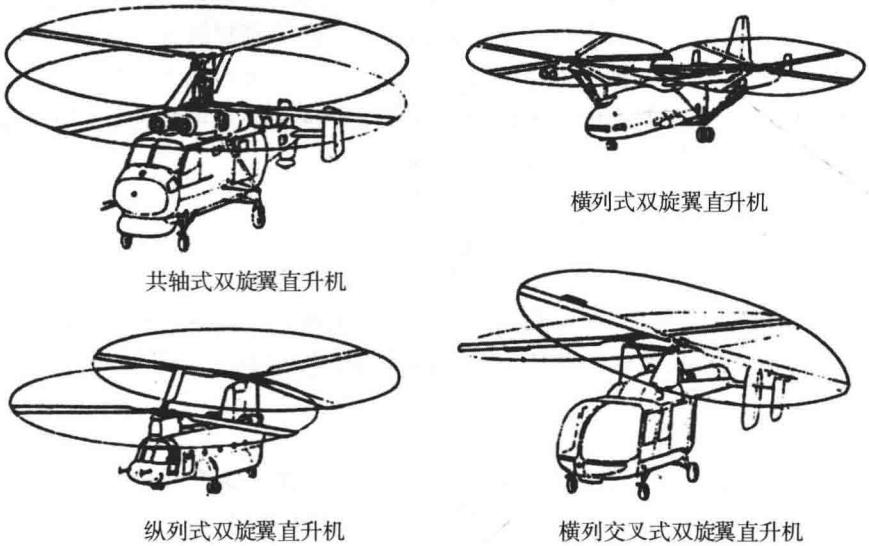


图 1-9 双旋翼直升机

3. 共轴式双旋翼直升机

共轴式双旋翼直升机是在同一旋转轴线上以一定间距上下排列两副旋转方向相反的旋翼。由于两旋翼转向相反，故反扭矩可互相平衡，不需要尾桨便可抵消反扭矩，并通过旋翼的倾斜和转速的调整，来产生实现直升机各种飞行状态所需的力。这种形式结构紧凑，外部尺寸小，但操纵机构复杂，一般用于中、轻型直升机，苏联的KA-25、KA-50和美国的XH-59A都属这种类型。共轴式双旋翼直升机与单旋翼直升机相比具有以下特点：由于取消了尾桨及其传动系统，在相同总重下，旋翼直径只有单旋翼的70%~80%，因而该机外廓尺寸大大减小；在性能方面，由于旋翼间相互干扰，在悬停时产生的有利影响会使共轴式悬停效率高。此类机型的主要不足为操纵机构复杂、重量大，两旋翼易互相干扰，振动较大。共轴双旋翼布局是唯一能够较好克服单旋翼加尾桨布局不足的构型布局，而这一技术的创造者是俄罗斯的卡莫夫设计局。

4. 纵列式双旋翼直升机

纵列式双旋翼直升机，其旋翼系统的两副旋翼沿机体一前一后纵向排列。为避免相互影

响，后旋翼安装位置较高。两旋翼转向相反，反扭矩互相平衡。通过旋翼的倾斜、转速的调整来产生各个运动方向的力，实现直升机的各种飞行运动。与单旋翼直升机相比，其主要特点为：一方面，主减速器和旋翼所占重量比例较大，采用纵列式可减小全机重量，该机机身比较宽敞，且纵向重心移动的允许范围较大，对于直升机的使用极为有利，适用于重型运输直升机；另一方面，操纵机构复杂，后旋翼气动性能也较差，在最经济状态的飞行性能明显不如单旋翼直升机。因此，纵列式构型一般只在设计吨位较大的直升机时采用。目前，世界上只有美国的 BV-234 和 CH-46D 等采用这种形式。

5. 横列式双旋翼直升机

横列式双旋翼直升机，其旋翼系统的两副旋翼通过构架或短翼分别横向并排装在机身上，旋翼旋转相反，反作用力矩互相平衡。通过倾斜旋翼，调节旋翼转速，来实现直升机各个方向的运动。这种直升机的操纵机构也比较复杂。由于具有短翼所以平衡特性较好，但增加了结构的重量和迎面阻力。在前飞中，短翼产生的升力能减轻旋翼的负荷，因而能提高飞行速度。美国的 V-76 和苏联的 MH-12 等均属这种结构。

6. 横列交叉式双旋翼直升机

横列交叉式双旋翼直升机，其旋翼系统的两旋翼相距很近，且交叉成“V”形，是介于共轴式与横列式的一种中间形式。两旋翼的反扭矩互相平衡。其优点是机身短，体积小。其缺点是转动部分复杂，且旋翼旋转必须协调。美国的 HH-43 就属于这种结构。

7. 倾转旋翼式直升机

目前，实际应用并进行批生产的是共轴式和纵列式双旋翼直升机。此外，还有倾转旋翼式直升机，如图 1-10 所示，其旋翼系统由两副横向并列布置在机翼上的旋翼组成，两副旋翼的转向相反，以平衡反扭转。在垂直起飞和飞行时，依靠旋翼的升力提供垂直方向的力，因此，可像普通的直升机那样进行垂直、侧向、偏航等方向飞行。前飞时，两副旋翼向前倾斜，由升力螺旋桨转为推力螺旋桨，而由机翼提供克服飞机重量的垂直方向的力，变直升机为定翼螺旋桨式飞机。很显然，这种构型大大提高了前飞速度，直升机状态功率消耗大幅度降低，有效解决了失速问题。目前，美国的 V-22 已投入试用，其他国家也在竞相发展，倾斜旋翼机有可能部分代替经典直升机和支线客机，而成为未来的主力机种之一。



图 1-10 倾转旋翼式直升机