



THE WORLD OF HELICOPTERS

直升机的世界

EVOLUTION OF HELICOPTER

岁月之旅

李成智 倪先平 编著

V275/1

:1

2007

直升机的世界

岁月之旅

李成智 倪先平 编著



北京航空航天大学出版社

内容简介

《直升机的世界》系列丛书共三册,包括《岁月之旅》、《扶摇直上》和《中国足音》,分别介绍直升机的发展、直升机的应用和中国直升机的发展。

直升机的发展历程可谓源远流长,《岁月之旅》简明地勾勒了直升机精巧的设计构思、悠久的历史、深奥的原理组成、精彩的更新换代,深入浅出地展现了直升机发展历程的坎坷和原理技术的精妙。

图书在版编目(CIP)数据

岁月之旅 / 李成智, 倪先平编著. —北京: 北京航空航天大学出版社, 2007. 8

(直升机的世界)

ISBN 978-7-81124-154-9

I. 岁… II. ①倪…②李… III. 直升机—航空航天工业—工业史—世界—普及读物 IV. F416.5-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第116039号

岁月之旅

李成智 倪先平 编著

责任编辑: 江小珍 胡 敏

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路37号(100083) 发行部电话: 010-82317024 传真: 010-82328026

www.buaapress.com.cn

E-mail: bhpress@263.net

北京地大彩印厂印装 各地书店经销

*

开本: 889×1194 1/16 印张: 13.75 字数: 330千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

ISBN 978-7-81124-154-9 定价: 35.00元

直升蓝天去放飞想象

王直华

在航空界，我有一批朋友。这些朋友，有年老的，有年轻的，有航空工程师，有航空科普作家，有航空人文学者。航空界的书事，他们做了不少。这一次，是甘立伟做主编，周日新、倪先平、王钟强、李成智执笔，出了一套科普书《直升机的世界》，共有三册，分别为《岁月之旅》、《扶摇直上》和《中国足音》。他们知道我是爱看书的人，就送来彩样给我欣赏。读着朋友们的新作，一些强烈的感想油然而生。

纵深是一种美。为什么哲人说“凝视月亮，你会生发灵感”？原因之一就是，月亮与我们有距离，从地球到月亮有令人遐想的纵深美。月亮在太空遥远的深处，加上玉盘、玉兔的优美形象，她便成了诗人灵感的源泉。

再说我们头顶上的蓝天。蓝天有莫测高远的纵深，又有鸟儿们翱翔蓝天的启迪，于是她就成了人类放飞想象的理想空间。看吧，“飞天”，那是中国古人的“天使”形象；天使，那是欧洲古人的“飞天”想象；中国古代的竹蜻蜓，是百姓手里的飞天玩具；达·芬奇在15世纪末设计的直升机草图，是艺术科学家笔下的天使翅膀。环顾世界航空历史，我们内心惊叹：人类想象力的火光何其璀璨，人类直上蓝天的理想殊途同归——我们要飞上蓝天，我们要直升蓝天！环顾世界航空历史，我们分明看到，人类的科学大旗上写着“同一个蓝天，同一个想象”。这与今天五环标志上“同一个世界，同一个梦想”的口号何其相似乃尔！环顾世界历史，我们为人类的智慧欢呼：多么可爱，这“和而不同”的人类！

纵深就是想象力；想象就是创造力。《岁月之旅》让我邂逅了一位德国科学家弗莱特纳，他是一个有思维纵深的人。他的想象之奇妙，他的思维之放射，让我在阅读时想为他叫好。

事情得从大家熟悉的体育运动说起。在排球和乒乓球赛场上，许多球手会打出“飘球”。这时，球会向一个方向旋转，它的运动轨迹就画出了一条弧线。在足球场上，极具观赏性的香蕉球，也是这样踢出来的。19世纪中期，德国科学家马格努斯对飘球做出了解释。他指出，球的旋转导致球的上下两侧气流的气压不同，使球飘忽不定。

20世纪20年代，弗莱特纳沉醉于船舶推进的研究。他想到那飘忽的球。他决定把马格努斯效应用到船上。他设想，在船上竖直安装一个巨大的圆柱体，当圆柱体高速旋转的时候，侧向风在柱体前后形成气压

差，船舶就会被推动，就会向前进！

弗莱特纳绝不是学院里的书生，只会论证。他是手脑并用的人，他是工厂里的实践者，他是大西洋里的搏浪者。1926年，弗莱特纳设计的“巴登巴登”下水了，此行的目的地是纽约。它最引人注目的地方，是船上那两根50英尺高的“烟囱”。“烟囱”高速旋转起来，“巴登巴登”启动了。就是靠着马格努斯效应，5月9日，“巴登巴登”到达了纽约。

奇特的动力，使这艘船成了公众关注的焦点。航空大师冯·卡门和物理学大师爱因斯坦都对“巴登巴登”表示称赞。虽然这种旋转柱体推进效率不高，并不实用，但是我们不能不感叹，弗莱特纳的思路何其高妙，他的想象力何其精彩！20世纪30年代，弗莱特纳开始研制直升机。他的著名作品是“蜂鸟”，它是第一种在设计时就有明显军事目的的直升机。

阅读《直升机的世界》，我激情地欣赏着人类的想象力。那些直升机的发明家、设计者，都跟弗莱特纳相似，有着动人的头脑风暴故事。这三册书各有主题，又有一个相同点——述说创新的历程。这是一套歌颂想象力、启发想象力的书。

二

1907年，法国人保罗·科尔尼研制出“飞行自行车”。它靠自身动力垂直升空，并在空中连续飞行20秒钟。“飞行自行车”是人类第一架直升机，是1903年之后，在载人飞行器方面取得的又一突破。到今年，直升机已经走过了百年征程。

我国的直升机事业，也已经“年过半百”。1957年，西北工业大学决定开设直升机专业。我国直升机事业元老级人物王适存，那时正在莫斯科航空学院直升机专业留学。1961年，他在副博士学位论文中，提出直升机旋翼在前进状态飞行时涡流的算法。这个算法受到国际同行的高度评价，被称为“王适存涡流理论”。

王适存现任南京航空航天大学教授，他曾经这样说：“每年，我都对考入南京航空航天大学直升机专业的新生说两句话：直升机，第一，它是‘万用’的机种；第二，它是‘万岁’的交通工具。”朴实无华的一席话，令人过目不忘。直升机事业是老教授终身无悔的选择。

在我的记忆中，类似的感人故事还有一个。北京大学中文系一位教授，每年秋天开学时，都对考入北京大学中文系的新生说这样一句话：大家对自己献身的中文专业，要怀着敬畏之情。“万用”是社会上、空间上的全方

位，“万岁”是时间上的全方位。面对驰骋于全时空全社会的直升机事业，谁能不敬不畏！王适存的“万用”、“万岁”表达的就是对事业的敬畏之情。

直升机领域无数的拓荒者，都与王适存一样，拥有科学与人文和谐一体的魅力。此刻，我们忆起爱因斯坦的教育观念：“学校应该永远以此为目标：学生离开学校的时候，是一个和谐的人，而不是一个专家。”

三

我发现，这一群作者有一个特点：明白读者的“不明白”。

《岁月之旅》分册中的《直升机旋翼产生升力的奥妙》这一节讲述的是读者最感兴趣的问题。作者层层设问，层层释疑，不仅说理清楚，而且读来畅顺。看得出来，作者很了解青少年或者外行读者，知道他们的疑惑之处。读这一节的时候，我想起了一句有趣的话：“明白不明白的人为什么不明白才是真明白。”

人们常常把“直升机”说成“直升飞机”。这可能是千千万万国人在直升机领域最大的“不明白”。文章首先告诉读者，飞机与直升机的区别是，飞机用的是“固定的机翼”，直升机用的是“旋转的机翼”。看到这样的解释，我想称颂：“传播是一种艺术”。大家很困惑的一些事物，比如怎么区分新石器时代与旧石器时代，怎么区分大理石与花岗岩，都可以用一句话说明白。

“旋翼的升力是怎样产生的呢？”“为什么不把旋翼设计成一个大圆盘？”“旋翼的桨叶是不是越多越好？”这接踵而来的什么、怎么、为什么，调动起了读者的阅读动机，让你欲罢不能。坐过飞机的人很多，乘过直升机的人就少得多，人们很希望了解直升机的速度、高度、续航时间的世界纪录。这些问题或内容设计得非常好，因为它是读者自己曾经想过、不明白又急于知道的问题。这让我想起余秋雨的一件往事。一次，记者问他：“你的书为什么总是很畅销？”余秋雨用一句很富哲理的话回答：“我写每一封信的时候，都深知这信是写给谁的。”读着《直升机的世界》里许许多多趣味盎然的问题，我萌生了一个感想：这些作者太了解他们的读者了。

有人说“我的设计，是为你做的。”科学是我们；艺术是我；设计是我，更是你。为读者写科普，是不是跟设计有点像？

四

在这个写作团队里，用得最多的一个词是“碰撞”。气象专家戏言“天气预报是讨论出来的”，作家戏言“好文章是改出来的”，如今甘

立伟他们戏言《直升机的世界》是碰撞出来的。他们碰撞出的一个理念，是“写故事”。《直升机的世界》的作者，为我们讲述了那么多动人心弦的故事。许多故事，我看过一遍之后，便能够再讲给别人听。故事把读者带进发明、探索的过程，使读者领略发明、探索的快乐，正所谓“人生如旅程，情趣在路上”。

甘立伟先生对我说：“丛书名、书名都是碰撞出来的。”大家对第2册的书名一直不满意，这事让一位编委知道了。他想起《庄子·逍遥游》句“扶摇而上者九万里”，想起李白的诗句“大鹏一日同风起，扶摇直上九万里”。就用“扶摇直上”！我听了高呼：“精彩，精彩！”为什么？“扶摇”指“盘旋而上的旋风”，在这里比作直升机非常贴切。另外，丛书第2册讲的是五花八门的直升机应用，用“扶摇直上”，给人强烈的动感：执行任务的直升机升天了！其三，标题“扶摇直上”展示了丛书的创作理念：在科学普及中感受深厚璀璨的中华文明，感受先人的丰富想象力。

《直升机的世界》的主编与作者，深谙学术，了解读者，长于表达。特别难能可贵的是，他们还习惯于“碰撞火花”。《直升机的世界》的概念精准、问题引人、故事感人，正是得力于作者团队的综合素养。

五

阅读科普图书，我们获得了许多新的知识，那无疑是宝贵的。如果你能从阅读中获得艺术的感染、人文的熏陶，那就更值得祝贺。爱因斯坦说：“伟大的科学家和伟大的作曲家在这一点上是相同的，他们都是伟大的诗人。”我们的职业五花八门，我们绝大多数人不是诗人，但是有一点是相同的，我们都应该拥有诗人那般的直觉、灵感和想象力。达·芬奇、爱因斯坦、冯·卡门、弗莱特纳的故事，都诉说着这样的道理：杰出科学家都是具有敏锐直觉、丰富想象的活生生的人。建设创新型国家，需要具有想象力、创造力的新一代。培养具有直觉、灵感和想象力的青少年，是教育家的使命，也是科学家、工程师、科学作家和科普作家的责任。

仰望蓝天，我们思索那坚苦卓绝的岁月之旅；仰望蓝天，我们领悟那惊天动地的扶摇直上；仰望蓝天，我们聆听那开拓创新的中国足音。我愿意看到，众多的读者跟着《直升机的世界》，去仰望蓝天，去放飞想象，去创造明天。

编委会

编委会主任委员

倪先平 李 慧

编 委

(按姓氏笔画)

王凤魁 王直华 王钟强 甘立伟 乔少杰

闫灵喜 李成智 周日新 赵延永 曹 凯

策 划

李 慧

主 编

甘立伟

办公室

支 鸣 白 雪 胡 敏 江小珍

组 织

中国航空科技工业股份有限公司



李成智，北京航空航天大学人文社会科学学院副院长、教授。1961年生，毕业于南京航空学院自动控制系。曾在哈尔滨飞机制造公司从事直9直升机的研究工作，现为北京航空航天大学教授，主要从事科技史与科技哲学、科技政策与科技管理研究与教学工作。撰写、发表、出版了大量科技类读物，特别是航空航天史方面的论著和普及读物。代表作有：《人类飞行的历程》（主编）、《航天技术与社会》（独著）、《征服天空之翼》（第一作者）、《通向宇宙之路》（独著）、《飞机的故事》（独著）、《空气动力学与航空》（独著）、《世界航空发展史》（策划、副主编）、《世界航天发展史》（策划、副主编）。论著总字数接近500万字。



倪先平，湖南祁阳人，1956年3月5日出生。工学博士，自然科学研究员，国防科技工业突出贡献专家，国务院政府特殊津贴获得者。现任中国航空工业第二集团公司副总工程师，中国航空学会学术工作委员会副主任，航空科学技术奖评审委员会副主任，直升机专业委员会和可靠性专业委员会副主任委员，南京航空航天大学兼职教授、博士生导师。曾任中国直升机设计研究所所长，高新工程总设计师，旋翼原理样机总设计师，直升机并行工程等重大课题负责人。

AF0-27/09

目录

Contents

横空出世

1	直升机与飞机的区别	2
2	直升机的分类	7
3	中国竹蜻蜓	12
4	达·芬奇与直升机	16
5	罗蒙诺索夫的“小空气动力机”	21
6	“航空之父”乔治·凯利	23
7	19世纪的漫长探索	28
8	第一架载人直升机成功首飞	34
9	对旋翼飞行器情有独钟的法国人	37
10	单旋翼结构的发明者尤里耶夫	41
11	直升机研制一浪更比一浪强	44
12	挥舞铰接机构的发明者切尔瓦	52
13	早期军用直升机“蜂鸟”	59
14	西科斯基发明实用直升机	62

奥妙无穷

15	翼型如何产生升力和阻力?	74
16	直升机旋翼产生升力的奥妙	78
17	为什么大多数直升机需要尾桨?	80
18	直升机的“心脏”:动力系统	84
19	直升机神奇的飞行本领从哪里来?	88
20	什么是直升机旋翼的“铰接机构”?	92

21	五花八门的直升机起落架	94
22	浅谈直升机的机身结构	97
23	为什么直升机的飞行性能远不如飞机?	100
24	自转下滑——直升机独特的自救本领	105
25	直升机的地面效应是怎么回事?	107
26	直升机可以翻筋斗吗?	109
27	直升机地面共振及其防范	112
28	直升机涡环的危害与预防	114

日新月异

29	第一代直升机的特征与代表机型	118
30	第二代直升机的特征与代表机型	121





31	第三代直升机的特征与代表机型	124
32	最新的第四代直升机什么样?	129
33	涡轮轴发动机带来动力革命	132
34	涡轮轴发动机推陈出新	135
35	旋翼桨叶的不断进步	138
36	直升机旋翼气动设计的优化	143
37	旋翼系统连接方式的不断革新	146
38	机身材料的革命	149
39	薄壁式结构的普遍应用	152
40	直升机电传操纵系统	154
41	直升机自动驾驶仪	157

走向未来

42	军用直升机机载武器的发展	160
43	“隐形”直升机	164
44	倾转旋翼机——新原理直升机的代表	170
45	推进式复合直升机的明天	173
46	全新的共轴式直升机	175
47	“X-机翼”直升机	177
48	前景光明的迷你直升机	179
49	用途广阔的无人驾驶直升机	182
50	空中吉普——未来的空陆两用交通工具	186
51	未来的第五代直升机	189
附录:世界直升机发展大事记		191
后记		202
致谢		205



横空出世





1 直升机与飞机的区别



■ 法国SA365N“海豚”直升机

《中国大百科全书》(1985版)对飞机的定义是：“由动力装置产生前进推力，由固定机翼产生升力，在大气层中飞行的重于空气的航空器。”特别指出：无动力装置的滑翔机、以旋翼作为主要升力面的直升机以及在大气层外飞行的航天飞机都不属于飞机的范围。但在日常生活中，有人习惯地将气球、飞艇以外的航空器泛称飞机。

那么什么是直升机呢？《中国大百科全书》对

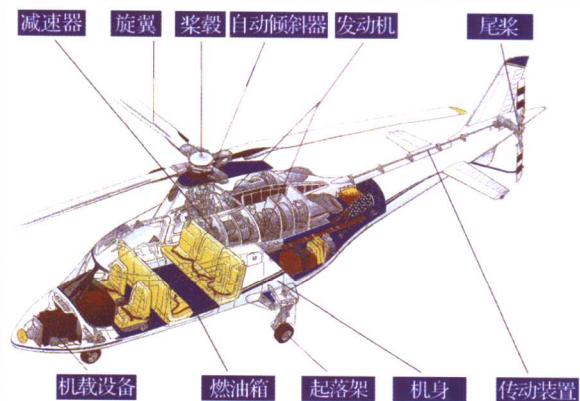
直升机的定义是：“以动力驱动的旋翼作为主要升力来源，能垂直起落的重于空气的航空器。”它既区别于以旋翼作为主要升力来源但不能垂直起落的旋翼机，又区别于不是以旋翼作为主要升力来源的垂直起落飞机。

直升机属于旋翼航空器，装有一副或几副类似于大直径螺旋桨的旋翼。旋翼安装在机体上方近于铅垂的旋翼轴上，由动力装置驱动，能在静止

的空气和相对气流中产生向上的升力。旋翼由自动倾斜器控制，又可产生向前、向后、向左或向右的水平分力，因此直升机既能垂直上升下降、空中悬停，又能向前后左右任一方向飞行。直升机可以在狭小的场地上垂直起飞和降落而无需跑道。装有轮式起落架的直升机也可滑跑起飞。当发动机在空中停车时，直升机还可以利用旋翼自转下滑，安全着陆。

直升机与固定翼飞机各有所长、优势互补。直升机的突出特点是可以做低空飞(离地面数米)、低速飞(从悬停开始)、倒飞和侧飞等机动飞行，特别是可在小面积场地垂直起降。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，它已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，它已应用于短途运输、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。海上油井与基地间的人员及物资运输是民用的一个重要方面。

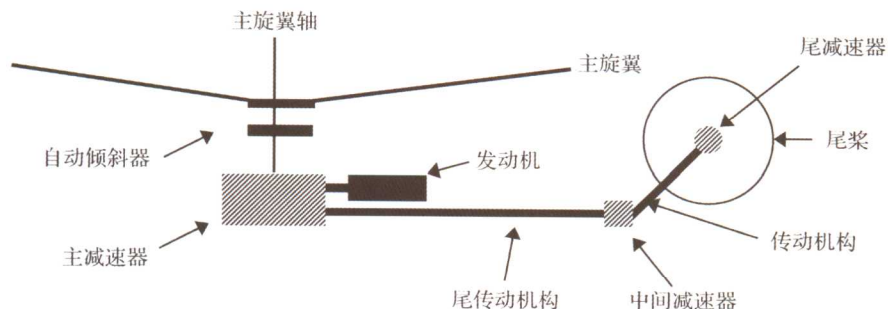
在直升机发展过程中，人们曾对各种结构类



■ 直升机基本组成与结构

型进行过探索，而目前最流行的主要有单旋翼直升机和双旋翼直升机两种。双旋翼式直升机又分成旋翼同轴上下安装的共轴式直升机、旋翼左右安装的横列式直升机和旋翼前后安装的纵列式直升机三类。比较而言，单旋翼加尾桨式直升机最为常见。

单旋翼直升机仅由一副旋翼产生升力。旋翼分机械驱动式和桨尖喷气驱动式两种。机械驱动式单旋翼直升机由于构造简单和传动效率高，应



■ 直升机结构组成示意图



用最为广泛。这种形式的直升机为了平衡旋翼反扭矩及进行航向操纵往往在尾梁末端安装有一副尾桨，产生侧向力，称为带尾桨单旋翼直升机。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。中国生产的直9直升机就是其中典型的代表。20世纪80年代提出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。

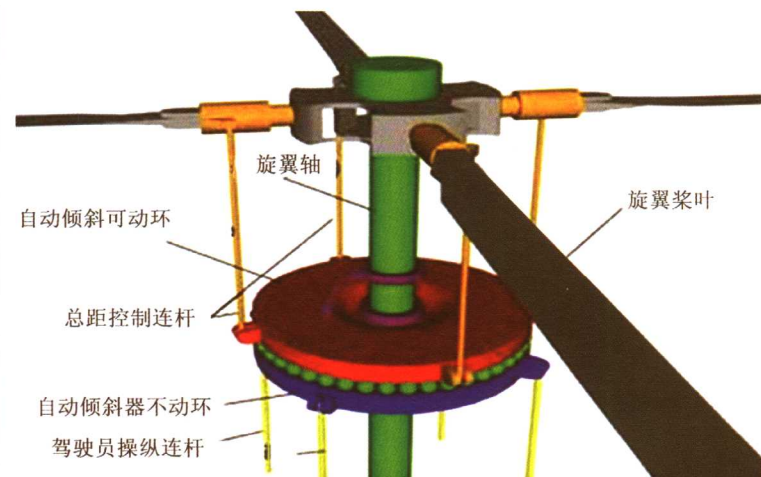
直升机一般由机身、发动机、减速器、旋翼系统、操纵系统、尾桨、起落架及仪表系统等组成。下面择要作一简单的介绍。

机身用来支持和固定直升机部件、系统，把它们连接成一个整体，并用来装载人员、物资和设备，使直升机满足既定技术要求。

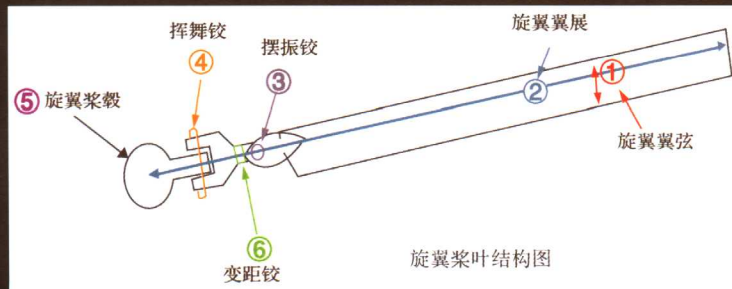
发动机是全机动力的来源，动力装置大体上分为两类，即航空活塞式发动机和航空涡轮轴发动机。在直升机发展初期，均采用技术上比较成熟的航空活塞式发动机作为直升机的动力装置。但由于其振动大、功率质量比和功率体积比小、控制复杂等许多问题，人们就利用已经发展起来的涡轮喷气技术寻求性能优良的直升机动力装置，从而研制出直升机用涡轮轴发动机。

减速器由一组齿轮及传动装置构成，它将高转速、小扭矩的发动机功率变成低转速、大扭矩的发动机功率传递给旋翼轴，并按转速、扭矩需要将功率传递给尾桨、附件等。减速器是直升机上主要的动部件之一，也是传动装置中最复杂、最大、最重的一个部件。

旋翼系统是直升机最重要的活动部件，既为直升机提供升力，又用于对直升机进行操纵。旋翼系统包括桨叶、桨毂、拉杆、扭力臂、自动倾斜器等部件。旋翼桨叶是产生升力的关键部件，其横剖面具有一定的翼型形状，通常由金属材料或复合材料制成。桨毂是连接桨叶和旋翼轴的部件，由旋翼轴带动进而驱动桨叶旋转。为了保证直升机能够正常飞行，桨毂与桨叶的连接往往采用铰接式，这是直升机得以发明的关键技术之一。变距拉杆的两端分别连接桨叶和自动倾斜器，传递周期变距和总距操纵。扭力臂固定在桨毂上，带动自动倾斜器的旋转部分转动，保证与旋转部分相连的拉杆只传递桨距操纵，而



■ 旋翼及自动倾斜器结构图



■ 直升机旋翼桨叶结构图

不受侧向力干扰。自动倾斜器用来传递来自操纵系统的周期变距和总距操纵，由动环和不动环两部分构成。

旋翼的基本功能类似于飞机机翼，其桨叶剖面采用一定的翼型形状。当旋翼旋转时，它可以产生向上的升力。对直升机来说，旋翼既起到了飞机机翼的作用，又起到了螺旋桨的作用。不仅如此，旋翼还起到飞机副翼、升降舵和方向舵的作用。为了实现上述功能，旋翼总的空气动力矢量即拉力，方向可变，大小可变。此外，旋翼工作引起的振动、噪声是全机主要振源、声源。总之，旋翼关系到直升机的性能、飞行品质，影响到直升机的可靠性、舒适性。

尾桨是用来平衡反扭矩和对直升机进行航向操纵的部件。旋转着的尾桨相当于一个垂直安定面，能对直升机航向起稳定作用。虽然尾桨的功用与旋翼不同，但是它们都是由旋转而产生空气动力，并在前飞时处于在不对称气流中工作的状态，因此尾桨结构与旋翼结构有很多相似之处。

直升机机载设备是指在直升机上保障飞行、完成各种任务的设备和系统的总称。直升机机载设备品种繁多，包括电气设备、显示和控制设备、导航设备、通信及电子对抗故障诊断设备等。随着现代直升机技术的发展，机载设备的地位越来越重要。机载设备性能的优劣已成为现代直升机先进与否的重要标志之一，先进的机载设备在提高直升机的使用效能和保证经济性、安全性方面具有不可替代的突出作用。据有关统计资料，20世纪80年代中期的民用直升机上，机载设备只占总价的5%；军用直升机上，机载设备占总价的30%~40%。

直升机操纵要比飞机复杂得多，其特有的操纵系统包括总距操纵杆、周期变距操纵杆、自动倾斜器等。

总距操纵杆简称“总距杆”，是用来控制旋翼桨叶安装角变化的操纵杆，一般位于驾驶员座位的左侧，可绕支座轴线上、下转动。驾驶员左手上



■ CH-47“支奴干”运输直升机

提杆时，使自动倾斜器上升从而增大旋翼桨叶桨距角，使旋翼升力增大，反之升力减小，由此来控制直升机的上升、下降运动。这是直升机特有的一种操纵机构。通常在总距操纵杆的手柄上设置油门操纵机构，用来调节发动机油门的大小，以便使发动机输出功率与旋翼桨叶安装角变化后的旋翼需用功率相适应。因此，总距杆又被称为总距油门杆。随着电传、光传操纵技术的发展，座舱操纵机构也在向新型侧杆操纵方式发展，总距操纵杆将有可能与周期变距操纵杆合并成一个很简单的侧置操纵杆。

周期变距操纵杆简称驾驶杆。它通过连杆机构与自动倾斜器相连接，一般位于驾驶员座椅的正前方最显著的位置上。驾驶员前、后(或左、右)操纵周期变距操纵杆，可使自动倾斜器相应地向前、后(或左、右)倾斜，从而使桨叶的桨距(倾角)作每圈一次的周期改变，后(或左、右)飞和俯仰(或横滚)飞行的目的。周期变距操纵杆在结构上必须保证纵向、横向操纵的独立性。在周期变距操纵杆上，还可根据不同的要求，装设各种开关、按钮和把手。

自动倾斜器又称倾斜盘，是把直升机总距杆和周期变距杆的操纵位移，分别转换成旋翼桨叶的总距操纵和周期变距操纵的主要操纵机构。它是直升机操纵系统特有的复杂而重要的构件。自动倾斜器



■ AW139直升机



■ 直升机主旋翼及桨毂

一般由与操纵杆系相连的不旋转环和与桨叶变距拉杆相连的旋转件组成。不旋转环通过径向止推轴承与旋转环相连。由操纵杆系输入的操纵量，经过不旋转环转换成旋转环的上下移动和倾斜运动，再由旋转环通过与桨叶变距摇臂相连的桨叶变距拉杆去改变桨叶桨距，使旋翼拉力的大小和方向改变，从而实现直升机的飞行操纵。倾斜盘旋转环的转动由与旋翼桨毂相连的扭力臂带动。

那么直升机又是如何在水平面上进行旋转的呢？这个功能是通过直升机的尾桨来完成的。对于单旋翼直升机来说，如果把机身和旋翼看作一对施力和受力体的话，旋翼旋转所产生的反作用力必然会使机身向相反的方向转动。要保持机身的稳定，就必须增加一个额外

的力矩来抵消这种旋转，这也是设计师在直升机尾部安装尾桨的原因。当直升机处于直线飞行时，尾桨的推力力矩与旋翼的反作用力矩恰好平衡。如果改变尾桨的输出功率，破坏这一平衡，机身就可以在水平面上进行旋转。大多数直升机都是通过驾驶员前方的一对脚踏板来调整机头方向。

直升机可以做各种类型的飞行动作，但每种飞行动作都能分解为升降、位移和旋转三个基本的运动形式。以起飞为例，直升机在起飞时通常是先启动主旋翼，使飞机垂直升至1米~1.5米的高度，然后驾驶员会一方面加大主旋翼的桨叶桨距角来加快爬升，另一方面还会让主旋翼向前倾斜以提升飞行速度。随着旋翼功率的增加，驾驶员还需不断调整尾桨的功率使机身保持直线飞行。可以说直升机在飞行中的每时每刻都贯穿着多个力的平衡与失衡。所以，直升机的操纵要比飞机复杂得多。从某种意义上说，驾驶直升机比开飞机难得多。**H**