

直升机飞行控制

Flight Control for Helicopter

南京航空航天大学 杨一栋 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

直升机飞行控制

Flight Control for Helicopter

南京航空航天大学 杨一栋 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从直升机飞行控制的专业教学及工程实践要求出发,论述了直升机飞行控制的基本原理与实现技术。主要内容包括直升机飞行动力学基本特性、直升机的增稳与控制增稳、电传操纵方式下的显模型跟踪自适应控制、自动飞行控制、直升机的现代飞行控制技术以及光传操纵系统等内容。

本书内容力求突出物理实质,面向工程实际。并力图与固定翼飞机的飞行控制相对照与衔接,以便于理解与自学。

本书可作为飞行控制相关学科专业的本科生或研究生选用教材,也可供从事直升机飞行控制的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直升机飞行控制/杨一栋编著. —北京:国防工业出版社,2007.2

ISBN 7-118-04872-0

I. 直... II. 杨... III. 直升机—飞行控制 IV.
①V275②V249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 137684 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)
天利华印刷装订有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 245 千字
2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

编委会名单

编著 杨一栋

编委 王新华 顾冬雷 范玉梅 曹花荣

前 言

讲了几次“直升机飞行控制”的研究生课程,完成了一些直升机飞行控制的研究任务,研究了国内外有关直升机控制的技术文献,因此写就了本书。其实写这本书有个目的,有一种兴趣,想把固定翼飞行器的飞行控制教学方法移植到对直升机的飞行控制教学中。虽然直升机由于旋翼起着升力、推进与操纵机构的作用,使直升机的控制方式不同于定翼机,但它毕竟也是飞行器。从控制的角度,旋翼可理解成接受配平与控制信号的执行机构,起着类似于定翼机控制舵面的作用。通过改变旋翼的挥舞运动,可完成对飞行高度、纵向与横向三个通道的配平与控制。因此力图将定翼机的控制思维运用到直升机上,这样可收到易讲易懂的效果,要实现这一点,关键在于了解直升机旋翼的工作机理,建立旋翼挥舞运动动力学模型。因此第1章与第2章篇幅较多。这两章最终目的是建立可与固定翼飞机相对照的直升机四个通道的动力学结构图模型,使描述直升机动力学特性的各种气动与操纵特性导数都显露在结构图中,从而比较容易地讲清直升机操纵的基本机理、旋翼的挥舞作用、直升机的稳定与阻尼特性、各通道的耦合因素,以及作用于直升机的外界扰动等。因此,第1章和第2章就成了直升机飞行控制的“根”,离开这一“根”,控制就会无的放矢。为了描述直升机动力学及建立相应控制律,本书的坐标体系都统一在欧美体制上,以利于泛读国际文献,并可与我国参照国际标准 ISO1151/2-1985 所制定的航空工业标准相一致,又可与国内出版的“飞行控制系统”类教材相衔接。

与定翼机的飞行控制一样,直升机的飞行控制也分有人操纵的飞行控制与自动飞行控制两类。因此本教材先叙述有人操纵的直升机飞行控制,即第3章和第4章。第3章为增稳与控制增稳,与定翼机相比,直升机更需要以电子反馈与前馈方式改善其欠缺的稳定与阻尼特性。第4章为电传操纵方式下的显模型跟踪自适应控制,由于它赋予直升机四个控制通道优良的跟踪控制与解耦特性,因此这一控制方式已日益被直升机控制界所重视。第5章为直升机的自动飞行控制,与固定翼飞机一样,列出了一般自动飞行控制的模态结构,并着重开发了自动过渡飞行这一特殊模态。第6章为直升机的现代飞行控制技术,因为直升机动力学属时变、非线性、多变量强耦合,更应借助于现代多变量控制理论与方法去控制它。在这一章中,整理出三种典型控制方法,即高增益控制阵解耦的显模型跟踪、具有特征结构配置效应的隐模型解耦控制以及 H_∞ 回路成形优化控制。这些控制方法较适合于工程应用,已服务于型号或已经试飞验证。第7章阐述了直升机光传操纵

系统,由于它具有抗电磁干扰、传输信息量大以及结构重量轻等优点,被誉为新一代操纵系统。对直升机而言,更需要由光传代替电传。

在编写本教材的过程中,得到中国航空工业总公司多项航空科学基金资助,得到南京航空航天大学直升机旋翼动力学国防科技重点实验室及中国直升机设计研究所的多项研究资助,并得到南京航空航天大学研究生院及教务处的热情支持与协助,在此表示深切的谢意。同时还应感谢为本书提供各类参考文献的专家与学者,感谢众多的研究生们,正是他们的科研活动为该书增添了很多工程实践内容,郑峰婴、陈敬志、朱华三位研究生还参与了第6章的编写,张树坤研究生参与了第7章的编写。

由于水平所限,加之时间仓促,难免有谬误与不妥之处,恳请读者指正,在此不胜感激。

南京航空航天大学 杨一栋
2006年12月

目 录

第 1 章 直升机的基本工作原理	1
1.1 绪言	1
1.1.1 直升机发展概况	1
1.1.2 直升机的分类	6
1.1.3 直升机的控制	7
1.1.4 主动控制技术在直升机控制中的应用	9
1.2 直升机旋翼气动特性	10
1.2.1 直升机的组成	10
1.2.2 旋翼系统的结构	11
1.2.3 旋翼的类型	12
1.2.4 旋翼基本参数	13
1.2.5 旋翼基本空气动力特性	13
1.3 桨叶的挥舞运动	17
1.3.1 垂直飞行的均匀挥舞	17
1.3.2 前飞时的周期挥舞	17
1.3.3 挥舞系数的物理解释	18
1.4 直升机的操纵原理	20
1.4.1 直升机稳定与操纵基本概念	20
1.4.2 直升机的操纵机构	21
1.4.3 直升机的操纵特点	25
第 2 章 直升机飞行动力学	26
2.1 坐标系及运动参量	26
2.1.1 坐标系	26
2.1.2 作用于直升机上的气动力	27
2.2 直升机的平衡动力学	30
2.2.1 直升机的平衡方程	30
2.2.2 直升机悬停时的平衡	30
2.2.3 直升机平飞时的平衡	33
2.3 直升机的稳定性与操纵性	34
2.3.1 直升机的纵向静稳定性	34
2.3.2 航向静稳定性	36
2.3.3 横滚静稳定	36

2.3.4	直升机的阻尼特性	37
2.3.5	直升机的操纵性	39
2.4	直升机运动方程	39
2.4.1	全量运动方程	39
2.4.2	小扰动线性化方程	40
2.4.3	自然直升机性能分析	43
2.5	小型无人直升机动力学建模及物理特性分析	51
2.5.1	直升机增稳动力学结构	51
2.5.2	数学模型的建立	52
2.5.3	增稳动力学的状态空间模型	55
2.5.4	小型直升机增稳动力学的结构	56
第3章	直升机的增稳与控制增稳系统	63
3.1	直升机结构图形式的数学模型	63
3.2	增稳与控制增稳系统原理及设计方法	66
3.2.1	增稳与控制增稳系统工作原理	66
3.2.2	增稳系统设计方法	66
3.3	典型控制增稳系统结构	68
3.3.1	具有漏泄积分器的增稳系统	68
3.3.2	具有姿态角微分信息的控制增稳系统	70
3.3.3	一种重型直升机的控制增稳系统	71
3.3.4	有前后两旋翼的重型直升机的控制增稳系统	71
3.3.5	具有高度自动化水平的重型直升机的控制增稳系统	72
3.3.6	具有模型跟踪的控制增稳系统	72
第4章	直升机显模型跟踪控制系统	75
4.1	显模型跟踪解耦自适应控制系统设计	75
4.1.1	基本 MFCS 工作机理	75
4.1.2	显模型的设计	76
4.1.3	控制阵 G_3 的设计	77
4.2	系统的控制及解耦性能	79
4.3	系统参数优化	82
4.3.1	控制矩阵 G_3 的增益矩阵 R 的选取	83
4.3.2	G_4 矩阵的选取	83
4.3.3	G_1, G_2, G_5 矩阵的选取	83
4.3.4	显模型带宽的选取	84
4.3.5	采样周期的选取	84
4.4	性能评估	85
4.4.1	跟踪性能	85
4.4.2	解耦性能	86
4.4.3	鲁棒性	86

4.5	具有非线性特性的显模型跟踪系统的控制策略	88
4.6	基于 MFCS 直升机协调转弯	91
4.6.1	直升机航向协调控制模态结构配置	91
4.6.2	航向协调控制的动特性响应	93
第 5 章	直升机自动飞行控制系统	94
5.1	直升机自动飞行控制一般结构	94
5.2	各类自动飞行模态一般控制律	94
5.2.1	三轴姿态保持模态	94
5.2.2	空速保持模态	95
5.2.3	地速保持模态	95
5.2.4	自动悬停模态	95
5.2.5	气压高度保持模态	96
5.2.6	航向保持模态	96
5.2.7	自动区域导航模态	97
5.2.8	对目标的自动航向修正模态	97
5.2.9	垂直速度保持模态	97
5.2.10	自动飞行控制系统结构	98
5.3	基于 MFCS 的自动飞行模态设计	99
5.3.1	外回路结构配置	99
5.3.2	传递矩阵 T 的确定	100
5.3.3	外回路 FCS $ _{u,v,h,\psi}$ 控制律设计	101
5.3.4	FCS $ _{u,v,h,\psi}$ 性能验证及分析	103
5.3.5	FCS $ _{u,v,h,\psi}$ 抗气流扰动特性性能	104
5.4	直升机自动过渡飞行控制系统设计	105
5.4.1	高度的自动过渡	105
5.4.2	速度的自动过渡	106
5.4.3	按指数规律拉平	107
5.4.4	自动过渡的高度与速度控制系统	107
5.4.5	自动过渡控制系统的性能	110
第 6 章	直升机现代飞行控制技术	111
6.1	引言	111
6.2	高增益控制阵解耦的显模型跟踪控制系统设计	111
6.2.1	高增益显模型跟踪系统	112
6.2.2	控制阵解耦的内回路结构	112
6.2.3	设计举例	113
6.2.4	数字仿真验证	116
6.2.5	外回路设计	116
6.3	隐模型解耦控制系统设计	119
6.3.1	引言	119

6.3.2	隐模型解耦控制的结构配置	119
6.3.3	状态反馈矩阵和前馈补偿矩阵的设计	120
6.3.4	内回路设计的仿真验证	125
6.3.5	隐模型解耦控制外回路设计	126
6.4	H_∞ 回路成形控制系统设计	127
6.4.1	H_∞ 回路成形控制的基本结构配置及设计方法	127
6.4.2	内回路的设计指标	129
6.4.3	外回路设计技术	131
6.4.4	H_∞ 回路成形内回路设计举例	133
第7章	直升机光传飞行控制系统	141
7.1	光传飞行控制系统概述	141
7.1.1	光传操纵系统概述	141
7.1.2	光传操纵系统总体配置	144
7.2	光传操纵系统的关键技术	144
7.2.1	光传操纵系统的关键组件	144
7.2.2	光纤数据总线	149
7.3	光纤多路复用技术	152
7.3.1	空分复用(SDM)	152
7.3.2	时分复用(TDM)	154
7.3.3	波分复用(WDM)	155
7.3.4	时分波分联合复用	157
7.4	直升机光传操纵系统	157
7.4.1	直升机光传操纵系统结构配置	157
7.4.2	直升机显模型光传操纵系统验证	159
参考文献	164

第 1 章 直升机的基本工作原理

1.1 绪 言

1.1.1 直升机发展概况

1946年3月8日,美国贝尔-47直升机获得航空适航证,揭开了直升机使用史的第一页。在以后的几十年里,由于直升机不需要机场便能起降及具有悬停等功能,得到了十分广泛的应用,以每年10%的速度迅速增长。

按直升机技术的发展可分为四代。

第一代直升机:从20世纪30年代末第一架可以正式飞行的直升机问世至60年代初期,是第一代直升机发展阶段。主要技术特征是:安装活塞式发动机;金属/木质混合式旋翼桨叶;机体为由钢管焊接成的双架式或铝合金半硬壳式结构;装有简易的仪表和电子设备。典型的机型如苏联的米-4和美国的贝尔-47等直升机。

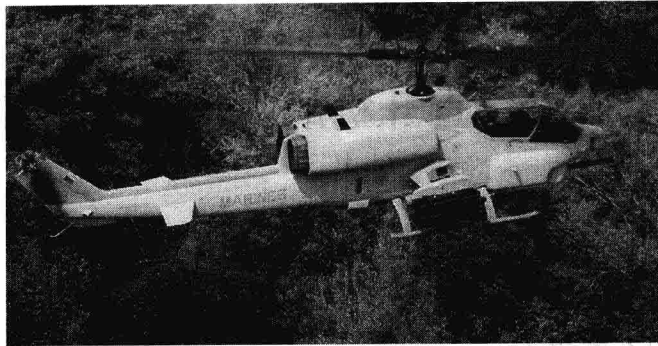
第二代直升机:从20世纪60年代初到70年代中期,发展了第二代直升机。主要技术特征是:安装了第一代的涡轴式发动机;全金属桨叶与金属铰接式桨毂构成的旋翼;机体主要仍为铝合金半硬壳结构;开始采用最初的集成微电子设备。典型的机型有苏联的米-8、法国的“超黄蜂”等直升机。

特别应指出的是,这一时期直升机发展的一个显著特点是军用带动民用。为了适应未来陆、海、空、天、磁多维战争的需要,陆军向空天化方向发展,产生了以武装直升机为作战主体的陆军航空兵,让陆军插上了翅膀。

武装直升机是1960年由贝尔直升机公司开始研制的,至1965年9月,美国军方编号为AH-1的超眼镜蛇专用直升机诞生,并参加了1967年的越南战争及1991年的海湾战争。该武装直升机已可全天候昼夜作战,有自主能力,最大起飞重量达到了6697kg,最大飞行速度达227km/h,可续航2.5h,如图1-1(a)所示。

第三代直升机:从20世纪70年代中期至80年代末,属于第三代直升机发展时期。主要技术特征是:安装第二代涡轴式发动机;全复合材料桨叶及带有弹性元件的桨毂构成的旋翼;机体结构部分使用复合材料;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。典型的机型有:

(1) 法国的“海豚”轻型直升机,如图1-1(b)所示,主要用于战术空运及战场救护等。主要技术性能:机长13.46m,机宽2.03m,机高4.01m,空重1975kg,最大起飞重量3400kg,最大飞行速度315km/h,巡航速度280km/h,升限4575m,航程870km;动力装置为两台涡轴式发动机,最大功率 2×710 轴马力;可运送8名~10名士兵或内载1836kg货物或外挂1700kg货物。



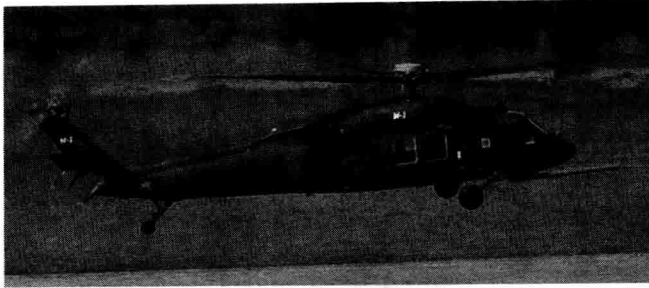
(a)



(b)



(c)



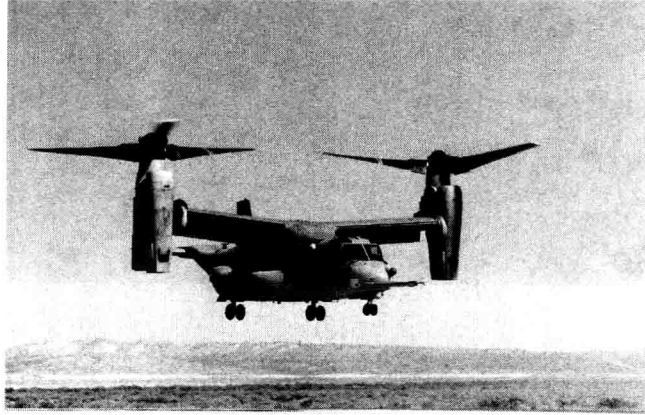
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

图 1-1 直升机的主要类型

- (a) AH-1W 武装直升机; (b)“海豚”轻型直升机; (c)“山猫”多用途直升机; (d) UH-60“黑鹰”直升机;
 (e)“阿帕奇”AH-64A 直升机; (f)“科曼奇”RAH-66 直升机; (g) V-22“鱼鹰”倾转翼多用途直升机;
 (h) 卡-50 双发共轴式武装直升机; (i) CH-47 纵列双旋翼全天候重型运输机; (j) 卡-22 横列双旋翼直升机。

主要特点:采用了大量复合材料;涵道式尾桨提高了安全性;起落架为前三点可收放式。

(2) 英国与法国共同研制的装有两台涡轴发动机的“山猫”多用途直升机,如图 1-1(c) 所示。最大起飞重量为 5125kg,平飞速度为 289km/h,续航时间为 2h57min。

(3) 美国的西科斯基公司研制的双发动机单旋翼具有战斗、突击、运输功能的 UH-60“黑鹰”直升机,如图 1-1(d) 所示。起飞重量可达 11113kg,最大飞行速度为 361km/h,飞行高度 5790m,飞行航程 2222km,续航时间 2h18min。

(4) 美国波音直升机公司的先进 AH-64“阿帕奇”攻击直升机如图 1-1(e) 所示。起飞重量为 10107kg,飞行速度 365km/h,升限为 3800m,续航 3h。在海湾战争中被称为坦克杀手,参战 315 架,击毁 3000 多辆坦克,2000 多辆战车。

第四代直升机:从 20 世纪 90 年代以来,直升机技术发展进入第四代,也是当今最先进的代。主要技术特征包括:安装第三代涡轴发动机;装有进一步优化设计的翼型、桨尖和先进的复合材料旋翼、无轴承或弹性铰式等新型桨毂;机体结构大部分或全部使用复合材料,操纵系统改为电传;机载电子设备采用数据总线、综合显示和任务管理;采用先进的飞行控制及通信导航系统。

典型的机型有美国的“科曼奇”直升机,如图 1-1(f) 所示。它是双座侦察攻击空战直升机,由美国波音、西科斯基两大公司联合研制,最大起飞重量 7896kg,续航 2.5h,最大平飞速度 324km/h,航程可达 2334km,被称为空中隐身杀手。

现代直升机发展的一大成就是美国研制出的 V-22 倾转旋翼机,如图 1-1(g) 所示。它的最大特点是将传统的涡旋式飞机与直升机融为一体。该直升机是由波音与贝尔两家直升机公司联合研制的,它可转动发动机的短舱,使直升机以不同形式飞行,当正转 20°,直升机可在不平路面上进行短距垂直起降;当发动机短舱处于水平位置时,直升机便成为一般的固定翼飞机,此时的飞行速度可达 510km/h;它又是超重型直升机,最大起飞重量可达 27400kg。V-22 的出现不但对直升机界,而且对整个航空界都将产生深远的影响。直升

机舆论界认为,V-22 直升机上最先进的系统是三余度数字电传飞行控制系统,它与发动机全权数字式控制系统完全结合在一起,采用了三套双重主飞机控制系统处理机,以及三套单故障工作具有控制增稳功能的自动飞行控制系统处理机,且装有全球定位导航系统、多普勒导航系统及武装火控系统。

我国直升机工业开始于 20 世纪 50 年代末。1958 年我国仿制米-4 的直-5 直升机获得成功。我国自行设计的中型多用途直-8 直升机于 1989 年交付使用。直-9 是我国仿制法国海豚轻型直升机,并于 1986 年开始国产化,1997 年将国产化的直-9B 交付使用。

1.1.2 直升机的分类

1. 按用途划分

按用途划分,直升机分为军用直升机和民用直升机。

军用直升机包括武装、运输、战斗勤务三大类。

(1) 武装直升机:机上有武器系统,用于攻击地面、水面(或水下)及空中目标,也称为攻击直升机(attack helicopter)或战斗直升机(combat helicopter)。现代武装直升机机载武器系统通常包括:反坦克(装甲)导弹、反舰导弹、空空导弹、航炮、火箭及机枪等。

(2) 运输直升机:主要承担运送作战人员、武器装备及各种军用物资、器材等任务。这类直升机可有大小不等的运载能力,重型直升机可吊运大型武器装备或物资。

(3) 战斗勤务直升机:用于执行各种特定作战勤务,例如执行侦察、通信、指挥、电子对抗、校射、救护、营救、布雷、扫雷、中继制导和教练等不同任务。配备有完成特定使命的机载任务设备。

民用直升机在国民经济建设和公共事务方面具有广泛用途,以执行运输任务为主,能担负多种多样的空中作业,按用途可分为以下几类:

(1) 通用运输直升机:既可内装或外吊物资,也可用于人员运输(有折叠或快速拆装座椅),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。此外还能实施多种空中特种作业,如空中摄影、摄像和转播、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声、减振和其他所需设施,专用于旅客运输。

(3) 公共服务直升机:安装任务所需设备(设施),服务于各种公共事业,例如公安执法、巡逻、观察、环保取样、消防救火、医疗救护、抢险救灾等。

(4) 特种作业直升机:机上装有任务所需的设备(设施),专门执行各种空中特种作业,例如地球物理勘探,铺设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,牲畜放牧,渔业应用等。

(5) 起重直升机:这类直升机具有很强的外部吊运能力,视起飞重量的大小可吊起数吨或十余吨重的物资。可用于建筑、大型设备安装、原木运输等起重吊运。

(6) 教练直升机:用于民用飞行人员和私人驾驶员的训练。

2. 按结构形式划分

按结构形式划分,直升机可分为以下几类:

(1) 单旋翼机械驱动式,这是当今最流行的一种结构,它不仅有旋翼,还有尾桨以平衡反扭矩,如图 1-1(a)~(f) 所示。

(2) 共轴双旋翼式,两旋翼共轴,相互逆转以抵消反扭矩,如图 1-1(h) 所示的俄罗斯的卡-50 双发共轴武装直升机。

(3) 纵列双旋翼式,两旋翼前后排列,相互逆转以抵消反扭矩,如图 1-1(i) 所示的 CH-47 重型运输直升机。

(4) 横列双旋翼式,两旋翼左右横向排列,相互逆转以抵消反扭矩,如图 1-1(j) 所示的俄罗斯的卡-22 横列式直升机。

(5) 旋翼换向式,起飞时为横列式,起飞后旋翼轴相对机体倾转,使直升机前飞。如同普通的固定翼飞机,靠机翼产生升力,靠旋翼产生向前的力,如图 1-1(g) 所示的 V-22 直升机。

3. 按起飞重量分类

同其他飞行器一样,重量问题是直升机研制、生产和使用中令人非常关注的问题。按重量对直升机分类,具有技术、经济、使用多方面的内涵。在武装、运输和战勤三大类直升机中,人们尤其重视运输直升机的吨位(起飞总重)、空机重量、有效载重、客(货)舱容积、外吊能力、航程及续航时间等。

按最大起飞重量可将直升机大致分为小型、轻型、中型、大型和重型。

(1) 小型直升机:最大起飞重量 2t 以下的直升机。

(2) 轻型直升机:最大起飞重量 2t ~ 4t 的直升机。

(3) 中型直升机:最大起飞重量 4t ~ 10t 的直升机。

(4) 大型直升机:最大起飞重量 10t ~ 20t 的直升机。

(5) 重型直升机:最大起飞重量大于 20t 的直升机。

4. 其他分类形式

为研制或使用的需要,有时也用其他方法来区分不同的直升机。例如按安装发动机的数量,可分为单发、双发或多发(装三台以上)直升机。按驾驶员座位区分,可分为单驾驶或双驾驶,按座位也有横列式或串列式之分。

按允许的起降场地不同可分为:只能在陆地起降的陆用直升机(大部分直升机属于这一类);可在陆地及水面起降的水陆两用直升机;以军舰或船只作为起降基地的舰(船)载直升机。

随着现代战场对军用直升机提出的隐身要求,人们将在降低直升机的雷达散射面积、红外辐射强度以及在光学、声学等目标特性等方面做出努力,因而直升机以隐身能力的不同,又可区分为隐身、准隐身或非隐身直升机。

随着电子技术的发展,出现了可以按照一定程序自动飞行或由地面(或他机)进行遥控的直升机,这种直升机没有驾驶员。因而,也可分为有人驾驶和无人驾驶直升机。

1.1.3 直升机的控制

直升机有其独特的优点,能够垂直起落不需要机场跑道,能够空中悬停便于观察和救护,能够任意方向飞行(前飞、侧飞、后飞等),机动灵活。但直升机也存在自身的缺点,如载重较小、经济性低、振动较大、舒适性差、操纵困难、稳定性差等。

直升机作为控制对象,与固定翼飞机相比具有更复杂的气动特性。如果把固定翼飞机看成六自由度的运动体,那么对直升机而言,还必须考虑旋翼和尾桨对机身的转动,桨叶