2008年自动控制系列课程国家优秀教学团队精品教材
江苏省一类优秀课程“飞行控制系统”配套教材

直升机飞行控制
（第4版）

Helicopter Flight Control（4th Ed.）

南京航空航天大学　杨一栋　等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

2008年自动控制系列课程国家优秀教学团队精品教材

江苏省一类优秀课程“飞行控制系统”配套教材

直升机飞行控制

（第4版）

Helicopter Flight Control (4th Ed.)

南京航空航天大学　杨一栋　等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从直升机飞行控制的教学及工程实践要求出发，论述了直升机飞行控制基本原理、姿态控制及轨迹制导技术。主要内容包括直升机飞行动力学基本特性，直升机的数学建模，增稳与控制增稳，经典姿态控制，显模型跟踪自适应控制，自动飞行控制，现代飞行控制，直升机的轨迹自主生成与制导，无人直升机的着舰控制技术及直升机光传操纵系统。

本书写作宗旨是重点突出物理实质，从物理概念入手解析直升机复杂的飞行控制理论，使工程设计方法有据可循。由于在控制方法讲叙中力求与固定翼飞机的控制相对照与衔接，因此内容深入浅出，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的教材，也可供从事直升机飞行控制技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直升机飞行控制 / 杨一栋等编著. —4 版. —北京：国防工业出版社，2019.4.

ISBN 978-7-118-11805-6

Ⅰ.①直… Ⅱ.①杨… Ⅲ.①直升机-飞行控制 Ⅳ.①V275②V249.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 019588 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 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 **印张** 18 **字数** 403 千字

2019 年 4 月第 4 版第 1 次印刷 **印数** 1—3000 册 **定价** 58.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)88540777 发行邮购：(010)88540776

发行传真：(010)88540755 发行业务：(010)88540717

编委会名单

主　编　　杨一栋

编著者　　杨一栋　王新华　袁锁中　江　驹

　　徐锦法　龚华军　曹花荣

校　核　　甄子洋

第4版前言

《直升机飞行控制》(第4版)对前一版的文字内容、图形的构建、公式的表达诸方面作了全面细致的订正与校核,以力求内容正确无误,通俗易懂,增进其可读性。除此以外,本版在以下三个方面作了重要补充:

1. 第2章“直升机飞行动力学”中增补了直升机6自由度全面运动小扰动微分方程组一节,建立了与其对应的结构图形式的数学模型,并逐一构建直升机纵向及侧向平面内运动的结构图形式的数学模型,它十分有益于解决“直升机飞行动力学”难讲难学的教学难题,也十分有益于对直升机飞行控制原理的理解,以及直升机飞行控制律的设计与仿真。

2. 建立了以结构图表示的直升机运动学数学模型,导出了从直升机姿态控制过渡到质点轨迹制导的纵向及侧向运动的运动学方程,也即轨迹制导系统中的运动学环节,这是构建与设计直升机轨迹制导的必要前提。

3. 第5章“直升机自动飞行控制系统”中,增设了“直升机旋翼转速自动控制方法”这一节,阐述了其工作原理,给出了旋翼转速自动控制数学模型及结构配量,从而将直升机的飞行控制由4个控制通道拓展到5个控制通道。

从本书的初版到如今的第4版问世经历了13个年头,我们衷心感谢广大读者对本书的需求与支持,感谢南京航空航天大学将本书的再版列入学校“十三五”重点规划教材;感谢国防工业出版社对本书出版工作一贯的大力支持。

最后,我们恳切期待广大读者对本书的不妥及谬误之处给予指正,我们定当不胜感激。

杨一栋

2018年8月

第3版前言

作为自动控制系列课程国家优秀教学团队精品教材(第2版)发行以来,至今已三年有余了。为了进一步充实教材内容,使其更具学科性,突出物理实质,面向航空工程实际,反映时代的先进性,本书对第2版作了全面修订与补充,使直升机的飞行控制技术由姿态与速度控制的内回路扩展至轨迹制导的外回路,主要体现在以下几个方面:

1. 全面论述了直升机在控制与制导领域所采用的多种坐标系及其互相转换关系,从而为轨迹制导,特别是为无人直升机的着舰引导这一复杂的制导技术作了铺垫。

2. 加深了对直升机动力学的研究,通过推导指出了动力学方程的物理实质,以及直升机动力学数学模型多项气动导数的物理意义,使直升机的控制有的放矢,并且起到了教材易讲易学的效果。

3. 为了使直升机现代控制技术由内回路的姿态与速度控制扩充到外回路的轨迹制导,增添了"基于显模型的飞行轨迹制导系统设计"这一节。

4. 为了跟踪直升机的国际先进控制技术,反映我国航空需求,增加了"无人直升机进场着舰轨迹制导系统"这一章。

5. 增加了附录。分别绘出了某无人直升机及UH-60直升机线性化小扰动数学模型,以供借鉴。

6. 补充了各章的思考题。

本书的再版得到了南京航空航天大学研究生院、教务处及自动控制系列课程国家优秀教学团队的支持与资助。

由于作者学识所限,难免有谬误及不妥之处,敬请读者指正,不胜感激。

杨一栋

2014年11月

第 2 版前言

为反映直升机飞行控制技术的发展及相应的教学需求，本书对 2007 年出版的《直升机飞行控制》(第 1 版)作了全面的修订与补充。在本版中更加深化了作者的原始写作思想，即力求将固定翼飞行器的飞行控制教学体系与方法移植到直升机飞行控制教学中。因为虽然直升机的旋翼起着升力、推进与操纵机构的多种作用，使直升机的控制方式不同于定翼机，但它毕竟也是飞行器。从控制角度，旋翼可理解为接受配平与控制信号的执行机构，起着类似于定翼机舵面的作用。通过改变旋翼的挥舞运动可完成对高度通道、俯仰与横滚通道的配平与控制。因此在再版时，作者进一步强化了将定翼机的控制思维运用于直升机上，实践证明这可起到易讲易懂的效果。

再版中，作者通过足够的篇幅讲述直升机旋翼的工作机理，以建立控制所必需的旋翼挥舞运动动力学数学模型。书中的第 1 章与第 2 章的最终目的是建立可与固定翼飞机相对照的直升机 4 个通道的动力学结构图数学模型，以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，从而清晰地显示出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，通道间的耦合因素，以及作用于直升机上的外界扰动等。因此，第 1、2 两章是直升机飞行控制的“根”，使直升机的飞行控制有的放矢。

为了描述直升机的动力学及相应的控制律，本书所采用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 ISO 1151/2—1985 所制订的航空工业标准相一致，与国内出版的“飞行控制系统”类教材相衔接，以适应与国际接轨的培养需求。

与固定翼飞机一样，亦可将直升机的飞行控制分为有人操纵下的飞行控制与自动飞行控制两大类。因此本教材先叙述有人操纵的飞行控制，设立第 3、4 两章。

第 3 章为增稳与控制增稳系统，将定翼机的增稳与控制增稳教学方法移植到直升机上，指出了直升机更需要以电子反馈方式改善直升机稳定性与阻尼特性的实质。

第 4 章为电传操纵方式下的显模型跟踪自适应控制。由于它使直升机四控制通道均具有优良的跟踪控制与解耦特性，这一控制方式已被直升机的控制领域所重视。再版时着重补充了四通道之间解耦原理的论证，以经典控制思维方式化解了读者难以理解的解耦原理学术难点。

第 5 章为直升机的自动飞行控制，与固定翼飞机一样，列出了自动飞行控制多种形式的模态结构，并着重叙述了自动过渡飞行这一特殊的、十分有用的模态。

第 6 章论述了直升机的现代飞行控制技术，以适应直升机动力学时变、多变量以及强耦合的控制需求。该章整理出了 3 种典型的现代控制方法，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,已服务于型号或已得到试飞验证。

再版后,增加了第7章,定名为直升机的轨迹生成与制导。以舰载直升机自主完成舰上起飞与降落为例,论述了直升机飞行轨迹的实时生成、轨迹跟踪及制导的机理与方法,从而使直升机的飞行控制的内容从姿态控制、速度控制过渡到飞行轨迹的自主飞行,使直升机的控制技术趋向完整。

第8章阐述了直升机光传操纵系统,由于光传操纵具有优良的抗电磁干扰、传输信息量大以及结构重量轻等优点,特别对直升机而言,更需要由光传替代电传,这是必然发展的趋势,被誉为新一代操纵系统。再版后,明显地充实了该章内容,充分反映了多年来作者所在学科对光传研究的成果。

从20世纪70年代末,作者就开始从事直升机飞行控制学科建设,至今已有30个年头。使作者永远难以忘记的是,这一工作一直得到中国航空工业总公司(航空部)、前国防科工委、中国直升机设计研究所,以及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等单位的多项科研基金资助。作者还应感谢为本书出版提供各类参考文献的专家与学者。感谢众多研究生们,正是他们辛勤的科研活动为本书增添了诸多工程实践内容。

本书的再版得到了南京航空航天大学研究生院、教务处及自动控制系列课程国家优秀教学团队的支持与资助。

由于作者水平所限,加之时间仓促,故渴望读者对本书存在的谬误及不妥之处加以指出,在此不胜感激。

杨一栋

2011年2月

第 1 版前言

讲了数次“直升机飞行控制”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。因为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。从控制的角度看，旋翼可理解成接受配平与控制信号的执行机构，起着类似于定翼机的控制舵面的作用。通过改变旋翼的挥舞运动，可完成对高度通道、俯仰与横滚 3 个通道的配平与控制。因此编者力图将定翼机的控制思维运用到直升机上，这样可起到易讲易懂的效果。要实现这一点，关键在于应花足够的精力去弄清直升机旋翼的工作机理，去建立旋翼挥舞运动动力学模型，因此本书第 1 章与第 2 章采用较多篇幅进行介绍。这两章最终目的是建立可与固定翼飞机相对照的直升机 4 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，从而比较容易说清楚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、2 两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 ISO 1151/2—1985 所制订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。

与定翼机的飞控一样，直升机的飞行控制也分有人操纵下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下的直升机飞控，设立了第 3、4 两章。第 3 章为增稳与控制增稳，与定翼机相比，它更需要以电子反馈与前馈方式改善直升机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，由于它赐给直升机四控制通道优良的跟踪控制与解耦特性，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，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 3 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，对直升机而言，更需要由光传替代电传，这是发展趋势，被誉为新一代操纵系统。

编著这一教材，得到中国航空工业总公司的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和教务处的大力支持与协助，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本书增添了很多工程实践内容，郑峰婴、陈敬志、朱华三位研究生还直接参与了第6章的写作，张树坤研究生参与了第7章的写作。

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

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 …… 5

1.1.3　直升机的控制 …… 11

1.1.4　主动控制技术在直升机控制中的应用 …… 13

1.2　直升机旋翼气动特性 …… 14

1.2.1　直升机的组成 …… 14

1.2.2　旋翼系统的结构 …… 15

1.2.3　旋翼的类型 …… 16

1.2.4　旋翼基本参数 …… 17

1.2.5　旋翼基本空气动力特性 …… 18

1.3　桨叶的挥舞运动 …… 21

1.3.1　垂直飞行的均匀挥舞 …… 21

1.3.2　前飞时的周期挥舞 …… 22

1.3.3　挥舞系数的物理解释 …… 23

1.4　直升机的操纵原理 …… 25

1.4.1　直升机稳定与操纵基本概念 …… 25

1.4.2　直升机的操纵机构 …… 26

1.4.3　直升机的操纵特点 …… 30

思考题 …… 31

第 2 章　直升机飞行动力学 …… 32

2.1　坐标系及其转换 …… 32

2.1.1　地球坐标系 O_e-$X_eY_eZ_e$ …… 32

2.1.2　地面坐标系 O_E-$X_EY_EZ_E$ …… 33

2.1.3　机体坐标系 O-XYZ …… 34

2.1.4　速度坐标系 O-$X_aY_aZ_a$ …… 36

2.1.5　机体坐标系 O-XYZ 与地面坐标系 O_E—$X_EY_EZ_E$ 之间的关系 …… 37

2.1.6　地理坐标与地面坐标的转换 …… 40

2.1.7　三维空间坐标系之间的转换 …… 40

2.2　作用于直升机上的气动力及气动力矩 …… 41

2.3 直升机的平衡动力学 …… 44
2.3.1 直升机的平衡方程 …… 44
2.3.2 直升机悬停时的平衡 …… 44
2.3.3 直升机平飞时的平衡 …… 47
2.4 直升机的稳定性与操纵性 …… 49
2.4.1 直升机的纵向静稳定性 …… 49
2.4.2 直升机的航向静稳定性 …… 51
2.4.3 直升机的横滚静稳定性 …… 51
2.4.4 直升机的阻尼特性 …… 52
2.4.5 直升机的操纵性 …… 54
2.5 直升机运动学方程及特性分析 …… 54
2.5.1 直升机动力学方程 …… 54
2.5.2 小扰动线性化方程 …… 58
2.5.3 小扰动全面运动微分方程及结构图数学模型 …… 68
2.5.4 小扰动纵向运动微分方程及结构图数学模型 …… 74
2.5.5 小扰动侧向运动微分方程及结构图数学模型 …… 76
2.6 小型无人直升机动力学建模及物理特性分析 …… 77
2.6.1 直升机增稳动力学结构 …… 78
2.6.2 数学模型的建立 …… 79
2.6.3 增稳动力学的状态空间模型 …… 81
2.6.4 小型直升机增稳动力学的结构 …… 82
思考题 …… 88
第3章 直升机的增稳与控制增稳系统 …… 90
3.1 直升机增稳与控制增稳系统的结构配置 …… 90
3.2 增稳与控制增稳系统原理及设计方法 …… 93
3.2.1 增稳与控制增稳系统工作原理 …… 93
3.2.2 增稳系统设计方法 …… 93
3.3 典型控制增稳系统结构分析 …… 95
3.3.1 具有漏泄积分器的增稳系统 …… 95
3.3.2 具有姿态角微分信息的控制增稳系统 …… 97
3.3.3 一种重型直升机的控制增稳系统 …… 98
3.3.4 有前后两旋翼的重型直升机的控制增稳系统 …… 98
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 …… 99
3.3.6 具有模型跟踪的控制增稳系统 …… 101
思考题 …… 101
第4章 直升机显模型跟踪控制系统 …… 102
4.1 显模型跟踪解耦自适应控制系统设计 …… 102
4.1.1 基本 MFCS 工作机理 …… 102
4.1.2 显模型的设计 …… 103

4.1.3 控制阵 $\boldsymbol{G}_3$ 的设计 …… 104
4.2 系统的跟踪性能及解耦机理分析与仿真验证 …… 106
4.3 系统参数优化 …… 114
4.3.1 控制阵 $\boldsymbol{G}_3$ 的增益阵 $\boldsymbol{R}$ 的选取 …… 114
4.3.2 $\boldsymbol{G}_4$ 阵的选取 …… 114
4.3.3 $\boldsymbol{G}_1,\boldsymbol{G}_2,\boldsymbol{G}_5$ 阵的选取 …… 115
4.3.4 显模型带宽的选取 …… 115
4.3.5 采样周期的选取 …… 116
4.4 性能评估 …… 117
4.4.1 跟踪性能 …… 117
4.4.2 解耦性能 …… 117
4.4.3 鲁棒性 …… 118
4.5 具有非线性特性的显模型跟踪系统的控制策略 …… 120
4.6 基于 MFCS 的直升机协调转弯控制 …… 123
4.6.1 直升机航向协调控制模态结构配置 …… 123
4.6.2 航向协调控制的动特性响应 …… 124
思考题 …… 125
第 5 章 直升机自动飞行控制系统 …… 126
5.1 直升机自动飞行控制一般结构 …… 126
5.2 各类自动飞行模态一般控制律 …… 128
5.2.1 三轴姿态保持模态 …… 128
5.2.2 空速保持模态 …… 128
5.2.3 地速保持模态 …… 128
5.2.4 自动悬停模态 …… 129
5.2.5 气压高度保持模态 …… 129
5.2.6 航向保持模态 …… 130
5.2.7 自动区域导航模态 …… 130
5.2.8 对目标的自动航向修正模态 …… 131
5.2.9 垂直速度保持模态 …… 131
5.2.10 自动飞行控制系统结构 …… 131
5.3 基于 MFCS 的自动飞行模态设计 …… 132
5.3.1 外回路结构配置 …… 133
5.3.2 传递矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的确定 …… 133
5.3.3 中回路 $\mathrm{FCS}\big|_{u,v,h,\psi}$ 控制律设计 …… 135
5.3.4 $\mathrm{FCS}\big|_{u,v,h,\psi}$ 性能验证及分析 …… 136
5.3.5 $\mathrm{FCS}\big|_{u,v,h,\psi}$ 抗气流扰动特性 …… 137
5.4 直升机自动过渡飞行控制系统设计 …… 139
5.4.1 高度的自动过渡 …… 139
5.4.2 前向速度的自动过渡 …… 140

5.4.3 按指数规律拉平 …… 141
5.4.4 自动过渡的高度与速度控制系统 …… 141
5.4.5 自动过渡控制系统的性能 …… 144
5.5 直升机旋翼转速自动控制方法 …… 144
思考题 …… 147
第6章 直升机现代飞行控制技术 …… 148
6.1 引言 …… 148
6.2 高增益控制阵解耦的显模型跟踪控制系统设计 …… 148
6.2.1 高增益显模型跟踪系统 …… 149
6.2.2 控制阵解耦的内回路结构 …… 149
6.2.3 设计举例 …… 151
6.2.4 数字仿真验证 …… 153
6.2.5 中回路设计 …… 154
6.3 隐模型解耦控制系统设计 …… 156
6.3.1 引言 …… 156
6.3.2 隐模型解耦控制的结构配置 …… 157
6.3.3 状态反馈阵和前馈补偿阵的设计 …… 158
6.3.4 内回路设计的仿真验证 …… 163
6.3.5 隐模型解耦控制中回路设计 …… 165
6.4 H_∞回路成形控制设计 …… 165
6.4.1 H_∞回路成形控制的基本结构配置及设计方法 …… 165
6.4.2 内回路的设计指标 …… 167
6.4.3 中回路设计技术 …… 169
6.4.4 H_∞回路成形内回路设计举例 …… 172
6.5 基于显模型的飞行轨迹制导系统设计 …… 179
6.5.1 控制器设计 …… 179
6.5.2 仿真与分析 …… 181
思考题 …… 185
第7章 直升机轨迹生成与制导 …… 186
7.1 引言 …… 186
7.2 制导系统的一般结构 …… 186
7.3 直升机舰上起飞过程及轨迹生成 …… 188
7.3.1 Z_E轴的轨迹生成 …… 189
7.3.2 X_E轴的轨迹生成 …… 190
7.4 直升机着舰过程及轨迹生成 …… 192
7.4.1 返航进场阶段轨迹生成 …… 192
7.4.2 降落段轨迹设计 …… 197
7.5 直升机起降自主飞行的仿真验证 …… 200
7.5.1 LQR显模型飞控系统设计 …… 201

7.5.2 自主起飞轨迹跟踪仿真 …… 203
7.5.3 返航进场段轨迹跟踪仿真 …… 203
7.5.4 着舰降落段轨迹跟踪仿真 …… 203
思考题 …… 205
第 8 章 无人直升机进场着舰轨迹制导系统 …… 206
8.1 无人直升机三维基准轨迹的生成 …… 206
8.1.1 直升机及舰在不同坐标系中的运动轨迹 …… 206
8.1.2 无人直升机三维期望基准轨迹表达式 …… 208
8.1.3 基于着舰点的三维期望轨迹的生成 …… 209
8.2 无人直升机进场着舰三维制导系统结构 …… 210
思考题 …… 213
第 9 章 直升机光传操纵系统 …… 214
9.1 光传飞行控制系统概述 …… 214
9.1.1 光传操纵系统发展及研究现状 …… 214
9.1.2 光传操纵系统总体配置 …… 222
9.2 光传操纵系统的关键技术 …… 224
9.2.1 光传操纵系统的关键组件 …… 224
9.2.2 光纤数据总线技术 …… 229
9.2.3 光传余度技术 …… 233
9.3 光纤多路复用技术 …… 245
9.3.1 空分复用 …… 245
9.3.2 时分复用 …… 248
9.3.3 波分复用 …… 249
9.3.4 时分波分联合复用 …… 251
9.4 直升机上的光传操纵系统 …… 252
9.4.1 直升机光传操纵系统结构配置 …… 252
9.4.2 直升机显模型光传操纵系统验证 …… 253
思考题 …… 256
附录 A 某型无人直升机小扰动线性化数学模型 …… 257
附录 B UH-60 直升机动力学模型 …… 259
附录 C 某 10kg 级模型直升机非线性全量数学模型 …… 264
参考文献 …… 270

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，由于直升机不需要跑道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。

直升机按技术的发展可分为4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：安装了第一代的涡轮轴式发动机；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“超级黄蜂”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，且参加了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：安装第二代涡轮轴发动机；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。

典型的机型有以下几种：

(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。主要战术技术性能：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；动力装置为两台涡轮轴发动机，最大功率2×710轴马力；可运送8~10名士兵或内载1836kg货物或外挂1700kg货物。

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轮轴发动机的“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AH-64“阿帕奇”先进攻击直升机，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，也是当今最先进的一代。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，续航时间2.5h，最大平飞速度324km/h，航程可达2334km，被称为“空中隐身杀手”。

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桨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°时，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27.4t。V-22的出现不但对直升机界，对整个航空界都产生了深远的影响。V-22飞机上最先进的系统是三余度数字电传飞行控制系统，它与发动机全权限数字式控制系统完全结合在一起，采用了三套双重主飞行控制计算机，以及三套单故障工作具有控制增稳功能的自动飞行控制计算机，且装有全球定位系统、多普勒导航系统及武装火控系统。

从1956年10月16日中国直升机工业正式建立至今，60多年来，我国直升机工业从引进苏联米格设计局的米-4直升机生产专利起步，经历了仿制起步、探索研制、自主研发和跨越发展等阶段，取得了举世瞩目的成就。特别是20世纪80年代之后，我国直升机工业认真总结了历史的经验教训，系统地提出了中国直升机型号研制和发展的规划。20世纪80年代初，我国引进了属于当时最新水平的法国原宇航公司的SA365N/N1型（“海豚”）直升机生产专利，并加大直-8大型直升机研制力度。20世纪90年代初开始了直-11轻型多用途直升机的研制，这3种型号成为我国直升机三大主流型号，构建了我国直升机产品的基本框架。近年来，为了适应国家国防建设和国民经济建设的需要，在直-8、直-9和直-11这3个型号的基础上，积极开展国际合作，新的改进改型直升机不断投入市场，我国直升机事业呈现出一片欣欣向荣的局面。