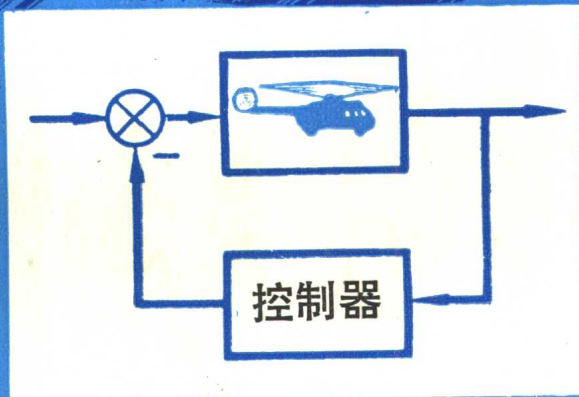


直升機 飛行控制器及其使用

王崑玉等 編 著



海 洋 出 版 社



直升机飞行控制器及其使用

王崑玉 李中修
赵振德 商建学 编 著

海 洋 出 版 社

1986年·北京

内 容 简 介

本书是直升机飞行控制器方面的专著。全书共分五章：第一章被控对象—单旋翼直升机；第二章控制器的组成、原理和控制规律；第三章几种直升机的控制系统；第四章直升机控制系统的稳定性分析；第五章控制器的使用与维护。作者经过长期的教学、科研、维修工作实践，积累和收集了大量资料，从航空维修工作的实际需要出发而编写的。本书旨在系统地介绍：直升机飞行控制系统的原理和基本组成部件的原理结构；应用自动控制理论分析直升机控制器系统的稳定性、准确性，说明诸因素对系统性能的影响；根据各有关单位在实践中积累的经验及遇到的问题，还介绍关于直升机飞行控制系统的空中使用及地面维护方面的知识。另外，还介绍了MN—8直升机的AП—34Б自动驾驶仪、“超黄蜂”直升机的PA112SC自动驾驶仪的特点及S—70直升机飞行控制系统(AFCS)的概貌。

本书在叙述方法上，力求深入浅出，理论联系实际，重点讲清物理概念。同时还加以必要的定量的数学分析。

本书可作为培养直升机自动化或直升机特种设备维护工程师的教材，也可供航空兵部队和民航直升机驾驶员及工程技术人员参考。

直升机飞行控制器及其使用

王崑玉等 编著

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街）

新华书店北京发行所发行 空军一专科印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张26 字数：530千字

1986年8月第一版 1986年8月第一次印刷

印数：1—1550

统一书号：13193·0738 定价：6.50元

序

近年来，国外军用直升机的数量增长十分迅速，例如美国所拥有的军用直升机在1960年才六千架，1975年便发展到二万多架，苏联与东欧各国合计每年增加500架，至1980年也已达一万二千架。直升机的数量之所以增长得如此之快，除空军应用外，更重要的是陆、海军也开始大量应用，特别是陆军，直升机已成为战术技术革命的重要内容之一。当然，民用直升机在民航、石油工业、冶金工业及农林等方面也都可能发挥很大的作用。显然，根据我国四个现代化的要求，无论军用或民用直升机势必会相应的发展。

由于直升机固有的动态不稳定性，没有自动控制系统（包括增稳系统在内），人工驾驶十分困难，因此，近代直升机毫无例外地带有自动控制器。不论从国外引进的米8、米6，超黄蜂、海豚、黑鹰，还是我国自行研制的直六，都配有不同类型的飞行自动控制器。要想了解直升机飞行自动控制系统的原理及性能，首先要了解直升机本身的工作原理与动态特性。如果飞行人员及地勤人员对飞行自动控制系统的基本理论不甚了解，那么，他们就无法自觉而正确地使用与维护这些装备，特别是当在飞行中遇到疑难故障时，往往无所适从。可惜的是，当前我国不仅中专和大学专科尚未正式开设“直升机飞行自动控制”专业课，没有这方面的教材，而且也未见到系统地讲述直升机飞行原理及飞行自动控制系统基本原理及其使用维护的书籍。

很高兴地看到王崑玉同志，在空军第一航空技术专科学校领导的大力支持下编著的《直升机飞行控制器及其使用》已经脱稿即将正式出版。

该书第一个特点是介绍了多种不同结构的直升机的工作原理及它们的动态特性分析。

第二个特点是结合几种控制器的控制规律分析了直升机飞行自动控制系统的稳定性。而且力求深入浅出，简明易懂。在作线性系统和非线性系统的稳定性分析时，只应用目前工程技术人员较为熟悉的频域法、根轨迹法、描述函数法。很显然，本书不仅可以作为大学专科的专业课教材，而且也可作为大学本科以及具有大专水平的空勤与地勤人员的参考书与自学资料。

第三个特点是书中反映了大量的空、地勤人员在使用中出现的实际问题，如“人一机”诱发振荡问题，非线性引起的自振问题等，也写入了排除故障的步骤和方法。这是一本理论与实际联系较好的书。

期望这本书的出版对于普及直升机飞行自动控制系统的正确使用与维护，加速这一学科

的工程技术人员的培养方面发挥应有的作用。

最后，我对这本书的出版表示衷心的祝贺！

西北工业大学 肖顺达

1985.6.7

前 言

随着直升机性能的改善，其应用范围越来越大，种类和数量日益增多。直升机的发展和有效地应用，很大程度上得助于直升机飞行控制系统的迅速发展和普遍采用。目前，我国引进的苏制МН—8直升机装有АП—34Б自动驾驶仪，МН—6直升机装有АП—30自动驾驶仪，法制“超皇蜂”直升机装有РА112SC型自动驾驶仪，仿法制“海豚”的直—9直升机装有А·Р·S·FIM—155自动驾驶仪，美制S—70直升机装有飞行自动控制系统(AFC S)。以上机种不仅在空军、海军、民航、石油工业部、农林部都有装备，而且数量也在逐渐增长，尤其是МН—8直升机还经常担负专机任务。

直升机飞行控制器性能的好坏，不仅直接影响着直升机的飞行性能，同时还直接影响着飞行安全。而对于直升机飞行控制系统的正确使用和有效地维修，又是保证直升机飞行控制系统良好的关键，但是，如今国内还没有一本较系统地介绍这方面内容的资料，使得许多飞行人员及从事维修工作的工程技术人员，都由于对直升机飞行控制系统的基本理论不清楚，从而对其使用和维修工作缺乏应有的自觉性，尤其是飞行中遇到疑难故障（如稳定性方面的问题），更是束手无策，编著《直升机飞行控制器及其使用》的目的，就是想系统地介绍：直升机飞行控制系统的原理，基本组成部件的原理结构；用自动控制理论分析直升机—控制器系统的稳定性、准确性，说明诸因素对系统性能的影响；根据各有关单位对设备的使用情况和所遇问题，介绍关于直升机飞行控制系统的空中使用及地面维护方面的知识。以作为培训直升机自动化方面的维修人员的教材和直升机飞行人员及从事维修工作的工程技术人员的参考资料。在叙述方法上，尽量深入浅出，理论联系实际，重点讲清物理概念。为说明问题，也加以必要的定量的数学分析。通过《直升机飞行控制器及其使用》使从事直升机飞行控制系统使用和维修工作的读者进一步理解和掌握现有设备，同时对将来学习和掌握有关方面的新设备也能起到指导作用。

编著者从1974年开始，多次到空军飞行部队进行改装教学、疑难故障的研究及事故分析。同时还经常去有关的研究所、高等院校、生产工厂学习，与飞行人员、工程机务人员、科研人员、生产人员广泛接触掌握信息，他们为编著者提供了大量的资料，为此表示诚恳的谢意。

编著者于1983年元月着手起草该书，李中修同志参与执笔了第二、三章的部分内容，并且设计了书中的大部分插图，至1985年六月完成送审稿。赵振德同志参与了本书的部分修

改及校对工作。书中根轨迹及描述函数法的计算程序与计算结果是由商建学同志完成的。书中插图由我校绘图室绘制，刘洪芝、董金同志从美工角度进行了校对。

本书在编写过程中，得到空军领导机关的关怀、鼓励。尤其是得到黄尊文、王德荣、付一文、伍斌俊、梁永泉、张云龙、汪立杰、高平、刘建安同志的大力帮助。特别是承西北工业大学肖顺达教授主审，南京航空学院许心钰副教授、空军第一研究所缪曙云工程师、空军工程部外场部李学忠同志、空军第一航空技术专科学校胡光定、周振镛也参加了审稿工作，提出了许多中肯的、宝贵的意见。特此致谢。

由于编著者水平所限，书中难免有不少错误与不妥之处，望读者指正。

编 著 者

1986.5.1

目 录

第一章 被控对象单旋翼直升机

第一节 直升机概述

- 一、直升机的类型..... 1
- 二、旋翼的基本结构及其主要参数..... 7
- 三、直升机的操纵原理.....16
- 四、直升机的主要特点.....19

第二节 桨叶的挥舞运动

- 一、桨叶的自然周期挥舞.....20
- 二、旋翼在操纵下的挥舞运动.....27

第三节 直升机运动的动力学微分方程式

- 一、坐标系.....39
- 二、直升机的运动参数及被控量.....40
- 三、直升机运动的动力学微分方程式.....42
- 四、作用在直升机上的力和力矩.....47

第四节 直升机运动的线性化方程组

- 一、直升机在扰动下各运动参数的基本表达式.....52
- 二、直升机的总操纵输入量及其增量基本表达式.....52
- 三、直升机受扰后的线性化方程.....54

第五节 单旋翼直升机的稳定性分析

- 一、稳定的基本概念和分析系统稳定性的基本方法.....56
- 二、直升机数学模型的简化.....57
- 三、直升机的特征方程.....58
- 四、直升机的稳定性分析.....60

第二章 控制器的组成、原理和控制规律

第一节 控制器的基本元件

- 一、测量元件.....67

(一) 电位计	67
(二) 变磁阻式传感器	70
(三) 单相自整角机	78
(四) 差动式自整角机	82
(五) 陀螺传感器	85
(六) 动力陀螺稳定平台	94
(七) 加速度传感器	101
(八) 气压式传感器	104
二、常用的电子电路	110
(一) 微分电路	110
(二) 积分电路	112
(三) 限幅电路	112
(四) 软化电路	114
(五) 解调电路	114
(六) 调制电路	117
(七) 正交切除器	119
(八) 延时电路	121
三、伺服电动机	123
(一) 直流伺服电机	123
(二) 交流伺服电机	124
(三) 磁滞电机	126
四、测速发电机	130
(一) 交流测速发电机	130
(二) 直流测速发电机	133

第二节 舵机和舵回路

一、液压助力器	135
(一) 液压助力器的工作原理	135
(二) 液压助力器的特性分析	136
二、舵机	138
(一) 电动舵机	139
(二) 液压舵机	144
三、舵回路分析	147
(一) 铰链力矩对舵机的影响	147

(二) 线性舵回路分析·····	153
(三) 非线性舵回路的振荡线性化·····	158
四、自动控制系统与人工操纵系统的联接方式·····	165
(一) 舵机与操纵系统的并联·····	165
(二) 舵机与操纵系统的串联·····	167
第三节 自动驾驶仪的工作原理与控制规律	
一、自动驾驶仪的基本原理·····	169
(一) 自动驾驶仪应具备的基本职能·····	169
(二) 自动驾驶仪的基本组成·····	170
(三) 自动驾驶仪的基本工作过程·····	172
二、自动驾驶仪的基本控制规律·····	173
(一) 比例式控制规律·····	173
(二) 积分式控制规律·····	175
三、自动控制直升机纵向角运动的原理·····	177
(一) 比例式自动驾驶仪对直升机俯仰角的控制·····	178
(二) 积分式自动驾驶仪对直升机俯仰角的控制·····	181
四、自动控制直升机侧向角运动的原理·····	183
(一) 自动控制直升机倾斜角的原理·····	183
(二) 自动稳定直升机航向的原理·····	184
五、自动稳定高度和速度的原理·····	188
第四节 阻尼器、增稳系统的工作原理和控制规律	
一、阻尼器的工作原理·····	190
(一) 纵向(俯仰)阻尼器·····	190
(二) 偏航阻尼器·····	194
(三) 横向(滚转)阻尼器·····	195
二、增稳系统的工作原理·····	196
三、控制增稳系统的工作原理·····	199
四、电传操纵系统简介·····	202
(一) 什么是电传操纵系统·····	202
(二) 简单电传操纵系统的基本原理·····	203

第三章 几种直升机的控制系统

第一节 A Π—34Б自动驾驶仪

一、工作原理与控制规律	210
(一) 航向通道	210
(二) 倾斜通道	212
(三) 俯仰通道	215
二、部件介绍	218
(一) 操纵台	218
(二) 回零放大器	218
(三) 伺服放大器	219
(四) 零位指示器 (NH-4)	223
(五) 速度传感器 (K3CΠ)	223
(六) 备妥信号器 (BCΓ)	223
三、AΠ-34B的主要特点	225
第二节 SFIM PA112SC自动驾驶仪	
一、几种基本工作状态的原理和控制规律	227
(一) 同步状态	228
(二) 稳定状态	228
(三) 控制状态	230
二、转弯状态	236
(一) 航向的控制	236
(二) 协调转弯	237
(三) 3°/秒转弯状态	239
三、气压高度定高	240
(一) 气压高度同步 (基准状态的建立)	241
(二) 气压高度稳定	241
四、多普勒稳定工作状态	242
(一) 为什么设置这一状态	242
(二) 多普勒稳定工作状态的特点	242
(三) 多普勒稳定工作原理	243
五、自动过渡悬停状态	245
六、主要元、部件特点介绍	249
(一) 飞行控制台	249
(二) 计算机	250
(三) PA112SC舵回路简介	256

附录 (I) 几个基本插件的原理电路	264
一、伺服机构放大器的原理电路图.....	264
二、测速机放大器原理电路图.....	265
三、同步放大器原理电路图.....	266
四、最小值继电器原理电路图.....	266
五、门限继电器总原理电路图.....	269
六、配平控制放大器原理电路图.....	270
七、步进继电器 (软化放大器) 原理电路图.....	274
第三节 S—70 直升机飞行控制系统简介	
一、S—70 直升机的气动力特点.....	275
二、飞行自动控制系统 (AFCS) 功能及方块图.....	278
三、飞行自动控制系统 (AFCS) 的增稳 (SAS)	281
(一) 模拟增稳系统 (SAS ₁)	282
(二) 数字增稳系统 (SAS ₂)	287
四、飞行航迹稳定系统 (FPS)	287
五、数字计算机.....	290
六、全动平尾系统.....	293

第四章 直升机控制系统的稳定性分析

第一节 基本概念

一、对象一直升机受扰后的动态过程 (渡过过程) 的可能形式.....	295
二、直升机的短周期和长周期运动.....	297
三、直升机有关稳定性 (安定性) 的飞行品质.....	298

第二节 直升机线性控制系统稳定性分析

一、直升机线性控制系统的数学模型.....	299
(一) 纵向运动的数学模型.....	300
(二) 横侧向运动的数学模型.....	303
二、直升机飞行控制系统的稳定性分析.....	308
(一) 直升机飞行控制系统纵向运动的稳定性分析.....	308
(二) 直升机飞行控制系统横侧向运动的稳定性分析.....	309
三、利用根轨迹法分析参数变化对直升机飞行控制系统稳定性的影响.....	311
(一) 讨论纵向运动控制规律中各参数变化对系统稳定性的影响.....	311

(二) 讨论横侧向运动控制规律中各参数变化对系统稳定性的影响	314
第三节 驾驶员参与操纵对系统的影响	
一、“直升机—控制器”纵向俯仰角控制系统的动态结构图及其根轨迹	322
二、“直升机—控制器”和“直升机—驾驶员”系统的动态结构图及其根轨迹	324
三、驾驶员参与操纵时对系统稳定性的影响	325
第四节 非线性因素对系统的影响	
一、间隙对系统稳定性的影响	327
(一) 物理概念解释	328
(二) 用描述函数法分析	329
二、摩擦对系统稳定性的影响	333
附录 (I) 关于利用PC机进行计算的程序及其使用说明	337
一、代数方程求根程序 (R T)	337
二、线性系统根迹程序 (R T L O C)	337
三、具有延迟环节的系统的传递函数近似处理程序 (E T S)	339
四、描述函数法程序 (F N S P)	340
五、IBM—PC机计算程序	343

第五章 控制器的使用与维护

第一节 自动驾驶仪的典型故障

一、系统参数不当引起的故障	367
二、自动回零系统 (A II—34B型) 的故障	369
三、线路故障	370
四、部件故障	371
(一) 舵机部分的故障	371
(二) 角速度陀螺仪的故障	371

第二节 自动驾驶仪的空中使用

一、稳定飞行	372
二、转弯飞行	373
(一) 左、右转弯时旋翼产生的陀螺效应对直升机的影响不同	374
(二) 左、右转弯时桨叶自然挥舞对直升机平衡的影响不同	375
(三) 左、右转弯时所需功率不同	376

三、垂直飞行	377
四、悬停	379
(一) 保持悬停的条件	379
(二) 悬停时的所需功率	380
(三) 影响悬停的因素	381
五、特殊情况下的处置	382
(一) 发动机停车后, 直升机以旋翼自转状态下降和着陆以前, 应断开控制系统	382
(二) 进入很强的大气湍流区, 应断开控制器	383
(三) 对象直升机在空中发生强烈振动时, 应及时断开控制器	383
第三节 控制系统的地面维护	
一、保证控制系统良好的基本措施	387
二、分析、判断控制系统故障的基本方法	387
(一) 系统故障检查程序表	389
(二) 故障树简介	392
三、飞行控制器实物仿真——疑难故障的研究方法	394
(一) 简单介绍几种仿真设备的组成和要求	396
(二) 实物仿真的基本步骤	400

第一章 被控对象——单旋翼直升机

第一节 直升机概述

一、直升机的类型

随着科学技术的发展，各种飞行自动控制器和增稳装置不断出现，使直升机的飞行品质改善，操纵简化，经济性、可靠性逐渐提高，使用范围日益扩大。由于直升机技术、战术的不断发展，直升机的类型也越来越多，仅《国外直升机手册》一书收编的直升机就近150种之多。

(一) 按用途分类

按用途不同，直升机可分为军用和民用两大类。军用的主要有：多用途运输直升机、反潜艇直升机、反坦克直升机和侦察通讯使用的直升机等；民用的主要有：中型运输直升机、起重直升机和农业多用途直升机等。

(二) 按重量级别分类

按重量级别不同，直升机主要分为以下四类：

轻型直升机。其总重量约为2~8吨，可乘2~20人，如“贝尔”(Bell-212)“海豚”(SA-365)和“云雀-3”(SA-313/319)等。

中型直升机。其总重量约为8~15吨，可乘20~30人，如CH-46A和米-8(МИ-8)等。

重型直升机。其总重量约为15~20吨，可乘30~60人，如CH-53E和“超黄蜂”(SA-321)等。

超重型直升机。其总重量为40吨以上，可乘80~120人，如米-6(МИ-6)和米-12(МИ-12)等。

(三) 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。旋翼产生拉力的同时，还会产生一个与旋翼转向相反的反作用力矩(也叫反扭矩)，该反作用力矩会使机体向旋翼旋转的反方向转动。为保证直升机的航向平衡，采取了不同的措施，从而带来结构型式差异。根据结构形式的区别，直升机主要分为以下几种：

带尾桨的单旋翼直升机如图1-1(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)所示。它除有一个

旋翼外，尾部还有一个螺旋桨（简称尾桨）。尾桨旋转时所产生的拉力对直升机重心构成的力矩，可平衡旋翼产生的反作用力矩；改变尾桨拉力的大小，能够改变直升机的航向。这种直升机构造简单，操纵灵便，是世界上使用最广的一种直升机，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，因而是本章重点讨论的对象。该型直升机存在的缺点是尾桨要消耗一部分功率。

共轴式双旋翼直升机，如图1—1(g)所示。它有两个同轴线安装、转向相反的旋翼。由于两旋翼转向相反，故反扭矩可互相平衡，苏联的KA—18、KA—25和美国的XH—59A，都属这种类型。该机外廓尺寸较小，但操纵机构复杂，两旋翼易互相干扰，且振动较大。

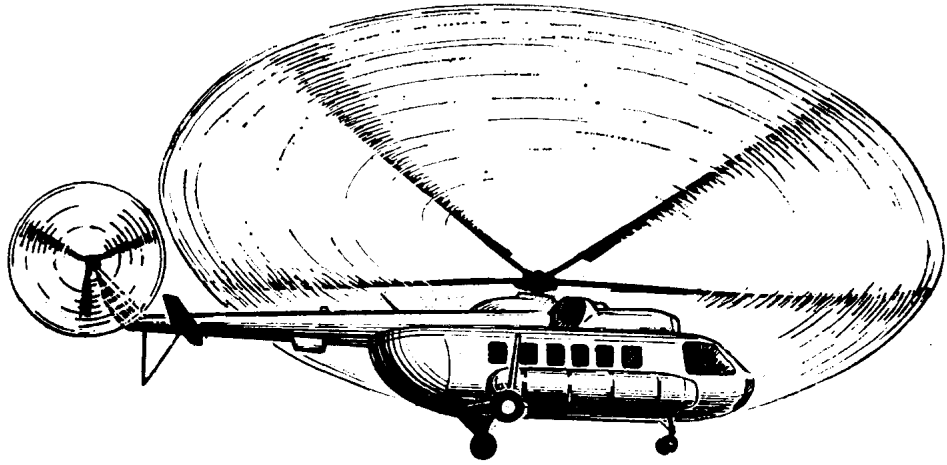
纵列式双旋翼直升机，如图1—1(h)所示。这种直升机的两个旋翼，沿机体一前一后纵向排列。为避免相互影响，后旋翼安装位置较高。两旋翼转向相反，反扭矩互相平衡。该机机身比较宽敞，且重心移动的允许范围较大；但操纵机构复杂，后旋翼气动性能也较差。美国的BV—234和CH—46D等均为这种型式。

横列式双旋翼直升机，如图1—1(i)所示。该机的两旋翼分别装在机身两侧的短翼上，其转向相反，反作用力矩互相平衡。这种直升机的操纵机构也比较复杂。由于具有短翼，增加了结构的重量和迎面阻力。但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。美国的贝尔—301（Bell—301）、V—76和苏联的MH—12等均属这种结构。

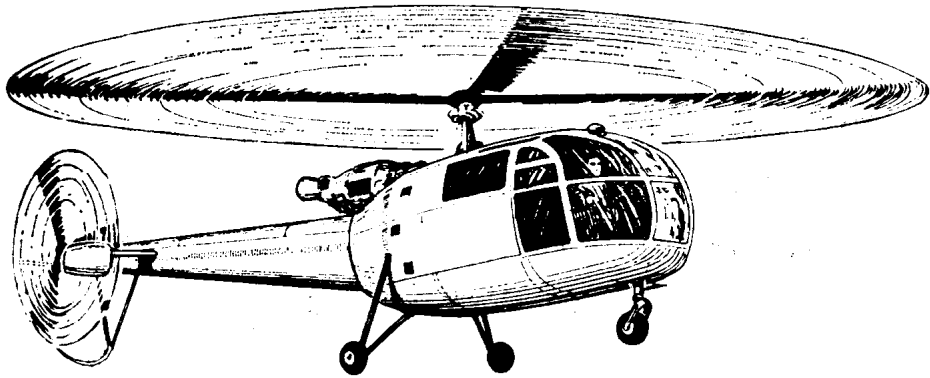
交叉式双旋翼直升机，如图1—1(j)所示。该机的两旋翼相距很近，且交叉成一定角度，两旋翼的反扭矩互相平衡。其优点是机身短，体积小。其缺点是转动部分复杂，且旋翼旋转必须协调。美国的HH—43就是这种结构。

单旋翼桨尖喷气直升机，如图1—1(k)所示。这是一种依靠桨叶尖部喷气的反冲力推动旋翼旋转的直升机，因而机身不受反作用力矩作用，不需要尾桨，传动机构比较简单。但桨叶构造复杂，燃料消耗量大，故目前数量不多。英国的“罗托达因”（Rotodyne）就属该种直升机。

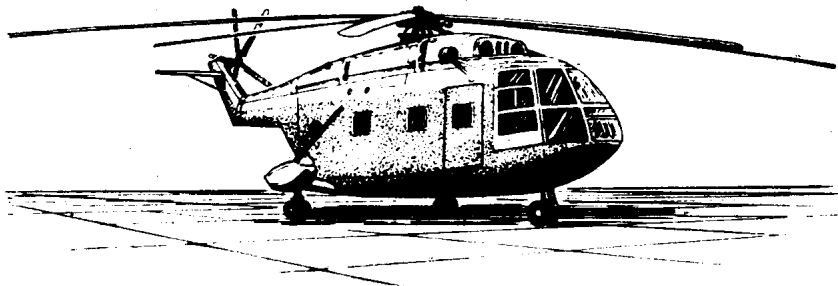
此外，还有倾转机翼直升机，如图1—1(l)所示。美国的XV—15就属于该种。它通过传动装置，驱动装在机翼翼端的两台发动机上的旋翼。发动机位于垂直位置时，旋翼轴向上，旋翼产生的拉力可使直升机垂直起飞。在巡航飞行时，发动机连同旋翼轴一起倾转至水平位置，使旋翼变成螺旋桨，此时，旋翼产生拉力，机翼产生升力，以维持直升机水平飞行。这种飞机目前还在试验阶段。除此还有多旋翼直升机，其特点是稳定性、操纵性较好，但构造复杂、笨重，如今尚未投产。



(a) MN-8



(b) SA-319B 云雀



(c) SA-321 超黄蜂

图 1-1 直升机的主要类型