



科学技术翻译出版基金

Flight Formation Control

飞行编队控制

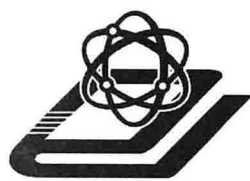
【西】 José A. Guerrero 【墨】 Rogelio Lozano 著
李静 左斌 晋玉强 译



WILEY



国防工业出版社
National Defense Industry Press

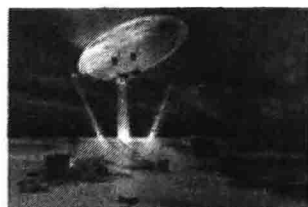


装备科技译著出版基金

飞行编队控制

Flight Formation Control

[西] José A. Guerrero [墨] Rogelio Lozano 著
李静 左斌 晋玉强 译



Flight Formation Control



国防工业出版社
National Defense Industry Press

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2013-115号

图书在版编目(CIP)数据

飞行编队控制 / (西) 格雷罗 (Guerrero, J. A.),
(墨) 洛萨诺 (Lozano, R.) 著; 李静, 左斌, 晋玉强译.
—北京: 国防工业出版社, 2014. 8

书名原文: Flight formation control

ISBN 978-7-118-09533-3

I. ①飞... II. ①格... ②洛... ③李... ④左... ⑤晋... III. ①无人驾驶飞机-编队飞行-飞行控制 IV. ①V279②V323.18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 095922 号

Flight Formation Control by José A. Guerrero and Rogelio Lozano

ISBN 978-1-848-21323-4

© ISTE Ltd 2012

This translation published under John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

All Rights Reserved.

本书中文简体版由 ISTE Led 和 John Wiley & Sons, Inc 授予国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16¼ 字数 324 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 79.00 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

译者序

多架航天器(航空器)的编队飞行与协同控制是最近几十年内备受关注的研究热点之一。伴随着计算机和通信技术的迅猛发展,激起了人们对自主飞行器更加广泛的兴趣,其中包括机器人、通信、自动控制等。一方面,具有协同行为的无人机所能覆盖的有效区域比单独一架自主飞行器更广泛;另一方面,重型和(或)大型建筑物起重、航行中补给(燃料、军需品、货物以及人员转移)和空中加油都是对协同作业要求非常高的工作。因此,本书的主要研究内容体现在多种样式的多自主飞行器系统中。

本书主要结合作者在自主飞行器编队飞行研究及其应用中已取得的最新研究成果,以作者在该领域的研究积累为主线,分别提出了多智能体协同策略、具有参数不确定性的多智能体系统鲁棒控制设计方法、强连通图中网络机器人系统的自适应与鲁棒控制同步方法、微型无人机建模与控制方法、微型无人机飞行编队控制策略、基于势函数的编队控制、基于视觉的四旋翼无人机控制、面向基于视觉的四旋翼无人机组协同控制、风场中旋翼无人机组编队飞行的最优导引方法、无线介质存储协议对四旋翼无人机编队飞行控制的影响以及无线通信 MAC 协议设计等方法。从算法设计、理论分析、仿真分析和应用实例等多方面进行了全面描述。本书内容翔实、层次分明、特色突出,为推动编队飞行控制方法研究的发展提供了新思路,具有较强的理论基础和应用指导价值。

全书的章节内容安排如下:

第1章介绍了飞行编队控制的研究意义及应用领域,回顾了人类飞行史的发展,并对比分析了现有飞行编队控制方法的特点。

第2章给出了一些关于无源性、图论和鲁棒控制的有用结论,这些知识将为全书提供理论基础。

第3章针对多智能体系统的可控性和可观测性,提出了几种实现速度与位置强制一致性的方法。通过多智能体系统质心的基础上使用反馈控制,可以实现对时变参考信号的编队跟踪。

第4章针对具有参数不确定性和控制输入时滞的动态系统的鲁棒控制设计问题,提出了一种多智能体系统的鲁棒控制设计方法,并进行了绝对鲁棒稳定性分析,可将其应用于多智能体系统。

第5章针对基于强连通图通信的网络机器人系统,提出了一种网络机器人系统的自适应与鲁棒控制同步方法。该方法利用自适应鲁棒跟踪控制算法,使得不同种类的机器人系统(具有动态不确定性)在跟踪期望轨迹的同时实现同步。此外,该控制算法对于常时滞通信情况所具有的鲁棒性也进行了论证。

第6章针对考虑气动力矩与力的微型无人机,给出了一般的动态模型,研究了两种样机的动态模型:双旋翼尾座式无人机和可转换四旋翼无人机。本章的主要贡献是对两种新设计的微型无人机进行了建模:采用变距螺旋桨的尾座式无人机和使用倾转旋翼的可转换四旋翼无人机。在垂直模态的稳定方面,采用线性和非线性控制律来实现姿态和位置的稳定。

第7章主要介绍了两种微型无人机飞行编队控制策略,分别是基于嵌套饱和的非线性控制和高阶一致性非线性控制。

第8章研究了一种二维编队控制方法,通过采用一个简单势函数产生期望的力,并利用一个嵌套饱和控制器将飞行器移至目标位置。

第9章针对微型四旋翼无人机的自主盘旋和轨迹跟踪问题,提出了一种基于视觉的控制方案。其中灭点技术被用于估计位于四旋翼无人机顶端的摄像机的旋转矩阵和平移矢量。这些方法采用实际图像进行了测试,试验结果与分析结果完全吻合。

第10章针对两架装备摄像机的四旋翼无人机在盘旋飞行中的位置协同问题,提出了一种基于视觉的控制方案。通过应用单应估计技术,各飞行器能够估计自身相对于各自对应目标的位置。仿真研究和实时试验说明了这种方法的性能。

第11章针对一组编队飞越强风场区域的旋翼无人机群,提出了一种时间最优导引律,其主要目的是为虚拟质心规划航向,使得两个航路点之间的飞行时间最小化,其中航向规划是通过利用 Zermelo 导航方法获得。

第12章针对介质存储协议对四旋翼无人机组无线网络在平均一致性问题上的影响,给出了明确的分析过程,所作的分析考虑了几组通过无线网络进行通信的四旋翼无人机,并同时考虑了具有有向和无向信息流图的情况。

第13章对无人机通信采用的无线 MAC 协议设计问题进行了研究,对定义和控制无线信道访问权限的协议进行了讨论,并提出了一种基于载波侦听多址访问—码分多址的新协议。

第14章提出了一种针对多机器人系统的天线阵列设计方案,其主要目标是展现按照统一的矩形和同心圆排列的天线阵列的辐射行为,并考虑其在广泛扫描范围内的扫描模式优化问题,以提供最大性能为目标的二维天线阵列扫描模式设计。

本书的出版得到了装备科技译著出版基金、海军航空工程学院“2110”工程的资助,在此表示衷心感谢!

目 录

第 1 章	介绍	001
1.1	研究动机.....	001
1.2	历史背景.....	002
1.2.1	人类航空史.....	003
1.2.2	无人机的进化史.....	005
1.2.3	无人机分类.....	007
1.3	飞行控制.....	007
1.4	飞行编队控制.....	008
1.4.1	多输入多输出方法.....	008
1.4.2	长机/僚机法.....	009
1.4.3	虚拟结构法.....	009
1.4.4	基于行为的控制.....	009
1.4.5	无源控制.....	009
1.5	本书内容梗概.....	010
	参考文献.....	011
第 2 章	理论预备知识	014
2.1	无源性.....	014
2.2	图论.....	015
2.3	鲁棒性问题.....	016
2.3.1	参数不确定性的表现形式.....	017
2.3.2	多项式族.....	018
	参考文献.....	019
第 3 章	多智能体协同策略	020
3.1	引言.....	020

3.2	互联的可控性和可观测性	021
3.2.1	环状拓扑	021
3.2.2	链状拓扑:智能体 1 上有输入量和输出量	022
3.2.3	链状拓扑:智能体 2 上有输入量和输出量	022
3.2.4	系统的特征值与特征向量	022
3.2.5	一般情况	023
3.2.6	一般情况下的环状拓扑	024
3.2.7	一般情况下的链状拓扑	025
3.2.8	链状和环状拓扑组合	026
3.2.9	一些不可控或不可观测的简单结构	028
3.3	编队长机跟踪	029
3.3.1	一般情况下的编队长机跟踪	030
3.3.2	观测器设计	030
3.3.3	仿真试验	030
3.4	时变轨迹跟踪	033
3.5	线性高阶多智能体一致	035
3.6	结论	039
	参考文献	039
第 4 章	具有参数不确定性的多智能体系统鲁棒控制设计	040
4.1	引言	040
4.2	鲁棒控制设计	042
4.3	鲁棒稳定性分析	044
4.3.1	鲁棒严正实性	045
4.3.2	鲁棒绝对稳定性	047
4.4	时滞系统的鲁棒稳定性	048
4.5	在多智能体系统中的应用	049
4.5.1	环状拓扑	049
4.5.2	链状拓扑	052
4.5.3	平衡图拓扑	056
4.6	结论	059
	参考文献	059

第 5 章	强连通图中网络机器人系统的自适应与鲁棒控制同步	061
5.1	概述	061
5.2	引言	061
5.3	问题阐述	062
5.4	强连通图上的自适应控制同步	063
5.4.1	无时滞同步	063
5.4.2	有时滞同步	066
5.5	基于强连通图的鲁棒控制同步	067
5.5.1	无时滞同步	067
5.5.2	有时滞同步	069
5.6	数字仿真实例	071
5.6.1	自适应跟踪算法	071
5.6.2	鲁棒跟踪算法	073
5.6.3	扰动	074
5.7	结论	076
5.8	附录	076
5.8.1	机器人系统	076
5.8.2	图论	077
	参考文献	077
第 6 章	微型无人机建模与控制	080
6.1	引言	080
6.2	一般模型	081
6.2.1	平移运动	081
6.2.2	角运动	082
6.2.3	角速度	083
6.3	微型尾座式飞机控制	083
6.3.1	线性控制策略	084
6.3.2	考虑参数不确定性的鲁棒控制	087
6.3.3	仿真结果	090
6.3.4	试验结果	092
6.4	四倾转旋翼可变式微型无人机	094

6.4.1	模型建立	095
6.4.2	模式转换	099
6.4.3	盘旋飞行模式的控制策略	100
6.4.4	前向飞行模式的控制策略	102
6.4.5	仿真结果	103
6.5	总结性评述	106
	参考文献	107
第7章	微型无人机飞行编队控制策略	108
7.1	引言	108
7.2	编队几何学	109
7.2.1	三角型编队	109
7.2.2	直线型编队	110
7.3	通信网络	111
7.4	动态模型	111
7.5	基于协同的编队飞行控制	113
7.6	基于嵌套饱和的编队飞行控制	119
7.7	轨迹跟踪控制	123
7.8	仿真结果	127
7.8.1	基于高阶一致的编队	127
7.8.2	基于嵌套饱和的编队	127
7.8.3	时变跟踪	128
7.9	结论	130
	参考文献	131
第8章	基于势函数的编队	132
8.1	引言	132
8.2	动态模型	132
8.3	编队控制	133
8.3.1	相互作用的势能与力	133
8.3.2	空中防碰撞	135
8.3.3	障碍回避	135

8.3.4	总体结构力	136
8.4	位置控制	136
8.4.1	高度和航向控制	136
8.4.2	嵌套饱和控制	137
8.4.3	稳定性分析	140
8.4.4	互联系统的稳定性分析	141
8.4.5	有界力	145
8.4.6	排斥距离	146
8.5	仿真结果	147
8.5.1	障碍回避	148
8.5.2	复合编队	149
8.6	结论	151
	参考文献	151
第9章	基于视觉的四旋翼无人机控制	152
9.1	引言	152
9.2	四旋翼无人机动态模型与控制	154
9.2.1	动态模型	154
9.2.2	非线性控制	154
9.2.3	轨迹跟踪控制	155
9.3	计算机视觉预备知识	156
9.3.1	摄像机模型	156
9.3.2	投影畸变消除	159
9.3.3	仿射畸变消除	159
9.4	视觉目标跟踪	160
9.4.1	边缘检测算法	161
9.4.2	多边形特性	161
9.4.3	正方形检测算法	162
9.4.4	图像校正	163
9.4.5	解决三维定位问题	163
9.4.6	光流测量法	165
9.5	基于灭点检测的视线跟踪	166

9.6	嵌入式结构	170
9.7	试验结果	171
9.7.1	视觉目标位置稳定	171
9.7.2	无标记视线跟踪	174
9.8	结论	177
	参考文献	177
第 10 章	面向基于视觉的四旋翼无人机组协同	180
10.1	引言	180
10.2	问题阐述	181
10.2.1	过程描述	181
10.2.2	所提方法的目标	182
10.3	四旋翼无人机的动态模型与控制	182
10.3.1	动态模型	182
10.3.2	飞行器稳定	183
10.4	基于视觉的位置估计	183
10.4.1	视觉系统设置	184
10.4.2	三维位置计算	185
10.4.3	平移速度	186
10.4.4	着陆平台的位置预测	187
10.5	两架四旋翼无人机的协同位置控制	187
10.6	实验平台结构	189
10.6.1	四旋翼无人机系统	189
10.6.2	地面站	190
10.6.3	单目成像系统的实现	190
10.7	试验结果	192
10.8	结论及未来研究工作	194
	参考文献	194
第 11 章	风场中旋翼无人机组编队飞行的最优导引	197
11.1	引言	197
11.2	预备知识	199

11.2.1	动态模型	199
11.2.2	无人机控制	199
11.3	航迹规划	200
11.3.1	机组的质心	200
11.3.2	Zermelo 导航问题:二维情况	200
11.3.3	Zermelo 导航问题:三维情况	202
11.4	四旋翼无人机编队控制方案	206
11.5	四旋翼无人机轨迹跟踪控制	206
11.6	仿真结果	207
11.6.1	参考信号输给长机	207
11.6.2	参考信号输给所有无人机	209
11.7	结论及未来研究工作	210
	参考文献	210
第 12 章	无线介质存取协议对四旋翼无人机编队控制的影响	212
12.1	引言	212
12.2	多架四旋翼无人机的一致性	213
12.2.1	四旋翼无人机的动态模型与控制	213
12.2.2	从个体到集体行为	214
12.3	基于无线网络的多智能体一致性	216
12.3.1	CSMA/CA	216
12.3.2	TDMA	216
12.3.3	网络分析	216
12.4	基于无线网络的四旋翼无人机一致性	218
12.5	仿真结果	219
12.6	结论及未来研究工作	222
	参考文献	223
第 13 章	无线通信 MAC 协议	225
13.1	引言	225
13.2	介质存取控制协议	226
13.2.1	时隙 ALOHA	226

13.2.2	载波侦听多址访问	229
13.2.3	抑制传感多址	230
13.2.4	性能评估结果	232
13.3	提出的 MAC 协议	234
13.4	实验设计与结果	236
13.5	结论	238
13.6	致谢	238
	参考文献	238
第 14 章	以提供最大性能为目标的二维天线阵列扫描模式优化	240
14.1	引言	240
14.2	平面天线阵列设计	241
14.2.1	理论模型	241
14.2.2	用于优化平面阵列的目标函数	242
14.2.3	平面阵列设计的结果	242
14.3	同心圆阵列设计	250
14.3.1	理论模型	250
14.3.2	同心圆阵列设计的结果	252
14.4	讨论与公开性问题	255
14.5	结论	256
14.6	致谢	256
	参考文献	256

1.1 研究动机

在过去的几十年里,多架航天器(航空器)的飞行编队与协同控制是一个备受关注的研究热点。此外,在技术进步的推动下产生的新成果也激起了人们对自主飞行器的广泛兴趣。计算和通信性能的爆发以及小型化技术的出现增强了人们对很多研究领域的兴趣,其中包括机器人、通信、自动控制等。一方面,一组具有协同行为的无人机所能覆盖的有效区域比单独一架自主飞行器更大;另一方面,重型和(或)大型建筑物起重、航行中补给(燃料、军需品、货物以及在航行过程中从一艘船到另一艘船的人员转移)和空中加油都是对协同要求非常高的作业。因此,本文的主要研究动机能够在多种多样的多自主飞行器系统中得到体现,比如下面这些例子。

编队飞行已被用于测量作业、国土防卫等领域。在第二次世界大战(World War II, WW II)期间,成群的 B-17 轰炸机习惯于以一种紧密的编队飞行,同时护航的 P-51 野马战斗机也采取编队飞行方式,从而使整个机群得到更好的保护。在敌方的炮火之下以紧密编队方式长时间驾驶飞机是容易疲劳且充满压力的,现代战斗机和轰炸机的飞行速度比第二次世界大战时期要快得多,这可能增加飞行员的压力并导致他们在精神上的痛苦。图 1.1 为法国国庆日阅兵式上九机编队飞越的情景。

重型和(或)巨型负载运输,诸如 Helistat 和 Skyhook 工程中的重型和(或)巨型负载运输飞行器同时结合了软式小飞艇和四旋翼直升机的特点。Helistat 计划为美国林务局运送大型负载,它由一部软式小飞艇和四架 Sikorsky 直升机构成,通过金属框架进行连接,全部四架直升机均由飞行人员操控。Skyhook 则计划在不补给燃料的情况下,在 320km 的飞行范围内运送 40t 以上的负载。图 1.2 所示为 Skyhook 在偏远地区运送重型负载的虚拟场景。

空中加油是一种将燃料从一个飞行器(加油机)转移到另一个飞行器(受油机)的任务。这种作业在飞行器需要携带更大大有效载荷的武器、货物或人员时实施,它要求加油机和受油机之间进行良好的协同。历史上曾发生过执行救援任务

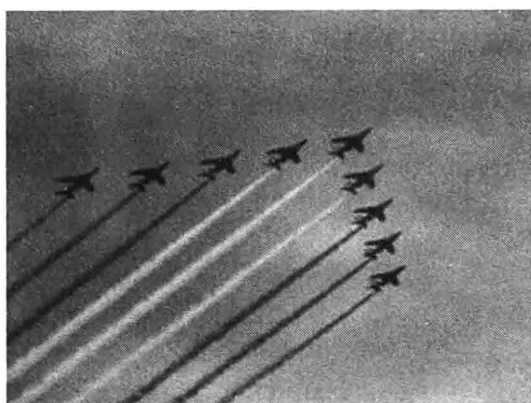


图 1.1 飞行器编队飞行



图 1.2 SkyHook 重型起降飞行器
(SkyHook 国际有限公司授权)

的 UH-60L 直升机尝试空中加油超过 20 次却仍以失败告终的事实,这使我们认识到空中加油作业的难度和重要性。图 1.3 所示为一架美国空军 KC-135R 加油机与两架 F-15、两架 F-16 战斗机进行空中加油作业的情景。

航天器编队飞行是美国国家航空和宇宙航行局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 类地行星探索计划中的一项重要工程。图 1.4 所示为一种多航天器编队方案的虚拟画面。航天器编队要求更加紧密的精度水平、更加缓慢的位移以及比人工控制更胜一筹的自动控制。



图 1.3 一架 F-15 战斗机进行空中加油(美国空军授权)

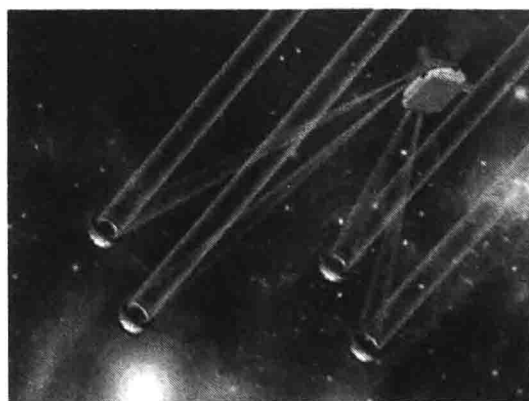


图 1.4 编队更紧密、精度水平更高的航天器编队飞行(NASA 授权)

1.2 历史背景

人类的飞行梦想可以追溯到远古时期,希腊神话中由羽毛和蜡做成的 Daedalus 翅膀就是例子。然而,最早的一种能够水平和(或)垂直飞行的装置却出现在中国。早在公元前 400 年,他们用竹蜻蜓——一种由一根棍子和装在其末端的羽

毛构成的玩具——向飞行迈出了第一步,这可以被看作最早的无人机(Unmanned Aerial Vehicles,UAV)之一。无人机可以被定义为一种没有机载驾驶人员的飞行器,它可重复使用且能够有控飞行、运送有效载荷等。多年以来,无人机一直是人类航空史上的一个特色。无人机的起源与巡航导弹联系紧密,二者的主要区别在于:无人机是为执行多种任务而设计的,而巡航导弹的设计目的则是与目标一起毁灭。因此,巡航导弹不能被看作是无人机,而无人机则可被看作是一种近似自主飞行器的进化版。

1.2.1 人类航空史

长期以来,人造飞行器一直在以多种不同的方式进化着,如气球、飞船、旋翼无人机、直升机、固定翼飞机等^[1,2]。表 1.1 给出了记录航空技术进化的时间表。

表 1.1 飞行器进化史

年份	名称	设计者	类型	国家
400 BC	竹蜻蜓	—	直升机	中国
1483	Aerial screw	Leonardo Da Vince	直升机	意大利
1670	Lighter than air	Francesco Lana de Terzi	气球	意大利
1709	Lighter than air	Bartolomeu de Gusmao	气球	葡萄牙
1754	Prototype	M. Lomonosov	直升机	俄罗斯
1783	Lighter than air	Montgolfier 兄弟	气球	法国
1843	Prototype	Sir G. Cayley	直升机	英国
1856	L' Albatros artificiel	Jean - Marie Le Bris	固定翼飞机	法国
1861	Prototype	Bright	直升机	—
1874	Monoplane type	Felix du Temple	固定翼飞机	法国
1878	Prototype	Forlanini	直升机	意大利
1884	Monoplane type	A. Mozhaysky	固定翼飞机	俄罗斯
1890	Eole	Clement Ader	固定翼飞机	法国
1902—1905	Glider	Wright 兄弟	滑翔机	美国
1907	Hopper	P. Cornu	直升机	法国
1913	Albatros	—	固定翼飞机	—
1915	MS type L	Morane - Saulnier	固定翼飞机	法国
1917	Dr I Triplane	Fokker	固定翼飞机	德国
1920—1924	Prototype	Pescara	直升机	—
1923—1935	C1 - C30	Juan de la Cierva	旋翼无人机	西班牙
1926 至今	Vega, Sirius 等	Lockheed	固定翼飞机	美国
1939 至今	S - 1 等	Sikorsky	直升机	俄罗斯

早在 1754 年, Mikhail Lomonosov 就建造了如图 1.5 所示的一种基于机械发条的装置,它能够垂直起飞并在空中盘旋片刻。

尽管几个世纪以来,人类一直在尝试飞行,但人类航空史上最重要的进步可能始于 20 世纪, Wright 兄弟在 1902 年首次成功试飞他们的滑翔机(图 1.6)。Wright 兄弟的滑翔机是在 Sir George Cayley 和其他 19 世纪航空先驱们所做工作的基础上设计成功的,同期研究的其他航空先驱还有 Gustave Whitehead、Samuel P. Langly、Lyman Gilmore、Richard Pearse 等。20 世纪期间开发的大多数固定翼飞机都是以 Wright 兄弟成功研制的滑翔机为基础的。

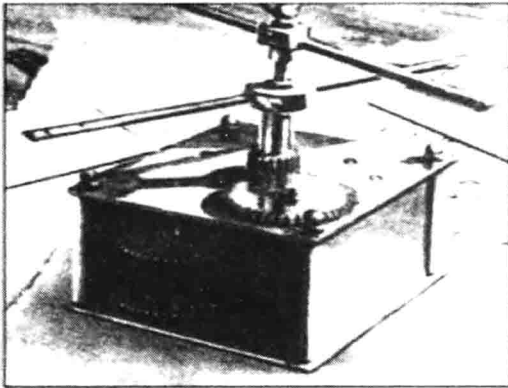


图 1.5 Lomonosov 设计的直升机(Aviastar 授权^[3])

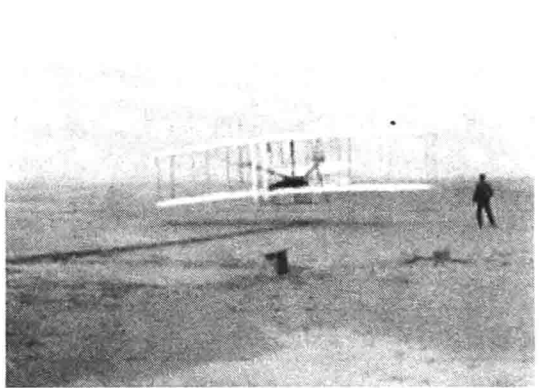


图 1.6 Wright 兄弟首飞(Wikipedia 授权^[4])

人类航空史上的另一个值得注意的时刻是有人驾驶直升机的首飞,众所周知,它于 1907 年在法国从地面升起。图 1.7 所示的直升机是一种由 Paul Cornu 开发的实验直升机。据报道,它曾进行了几次简短的跳跃,上升不超过 2m。

然而,第一种成功的旋翼飞机却不是一架真正的直升机,而是由 Juan de la Cierva 在 1919 年开发的一种飞机。随后, Sikosky 在 20 世纪 30 年代提出了几种直升机构造方案并沿用至今(图 1.8)。

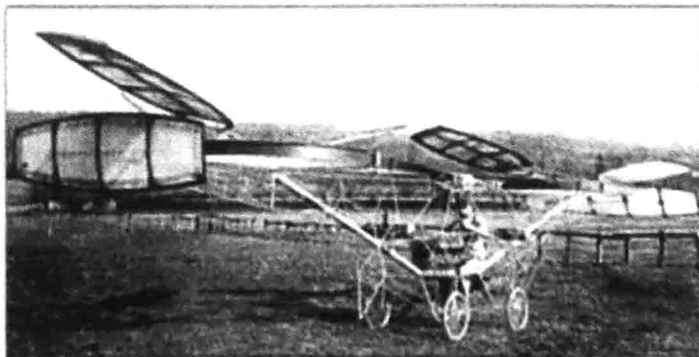


图 1.7 Paul Cornu 设计的直升飞机

在第一次世界大战(World War I, WWI) 期间及战后,在全世界范围内迎来了直升机和固定翼飞机的爆发式发展。一种比较新型的飞行器是尾座式飞行器,它