

高校无人机应用技术专业新形态系列教材（总主编：何先定 刘建超 李屹东）

# 无人机 飞行原理

主 编 王永虎 王福成  
副主编 何云华 熊 斌



课程思政



资源库



校企合作

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

---

图书在版编目 (C I P) 数据

无人机飞行原理 / 王永虎, 王福成主编. —成都 :  
西南交通大学出版社, 2022.3  
ISBN 978-7-5643-8463-0

I. ①无… II. ①王… ②王… III. ①无人驾驶飞机  
—飞行原理 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 257354 号

---

Wurenji Feixing Yuanli

无人机飞行原理

主编 王永虎 王福成

---

责任编辑 何明飞

封面设计 吴 兵

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 24

字数 599 千

版次 2022 年 3 月第 1 版

印次 2022 年 3 月第 1 次

定价 68.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8463-0

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 高校无人机应用技术专业新形态系列教材

## 编写委员会

### 主任委员

刘建超 国家教学名师 成都航空职业技术学院

### 副主任委员

何敏 云影系列无人机总设计师 成都飞机工业(集团)有限责任公司  
李屹东 翼龙系列无人机总设计师 中航(成都)无人机系统股份有限公司  
李中华 国家英雄试飞员 中国人民解放军空军指挥学院  
冯文全 北京航空航天大学  
任斌 成都纵横自动化技术股份有限公司  
董秀军 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室  
张秦罡 自然资源部第三航测遥感院

### 总主编

何先定 刘建超 李屹东

### 执行编委(按拼音排序)

陈世江	重庆电子工程职业学院	江启峰	西华大学航空航天学院
李乐	国网乐山供电公司	李兴红	成都理工大学工程技术学院
刘清杰	四川航天职业技术学院	卢孟常	贵州航天职业技术学院
王福成	黑龙江八一农垦大学	王晋誉	上海民航职业技术学院
王利光	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	王永虎	重庆交通大学
魏永峭	兰州理工大学	吴道明	重庆航天职业技术学院
许云飞	成都航空职业技术学院	徐绍麟	云南林业职业技术学院
查勇	天府新区通用航空职业学院	周军	厦门大学

### 委员(按拼音排序)

陈宗杰	成都航空职业技术学院	戴升鑫	成都航空职业技术学院
邓建军	成都航空职业技术学院	段治强	成都航空职业技术学院
范宇航	成都航空职业技术学院	房梦旭	成都航空职业技术学院
冯成龙	成都航空职业技术学院	付鹏	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
何达	成都航空职业技术学院	何国忠	四川航天中天动力装备有限责任公司
何云华	成都工业学院	胡浩	天府新区航空旅游职业学院
姜舟	成都航空职业技术学院	蒋云帆	西华大学航空航天学院
李恒	成都航空职业技术学院	李林峰	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
李艳	成都航空职业技术学院	李宜康	成都航空职业技术学院

李懿珂	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	李志鹏	中航（成都）无人机系统股份有限公司
李志异	成都航空职业技术学院	廖开俊	中国人民解放军空军第一航空学院
刘 驰	四川航天中天动力装备有限责任公司	刘 旻	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
刘佳嘉	中国民用航空飞行学院	刘 健	山西机电职业技术学院
刘 静	重庆科创职业学院	刘明鑫	成都航空职业技术学院
刘 霞	重庆航天职业技术学院	马云峰	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
梅 丹	中国人民解放军海军工程大学	牟如强	成都理工大学工程技术学院
潘率诚	西华大学	屈仁飞	成都西南交大研究院有限公司
瞿胡敏	四川傲势科技有限公司	任 勇	重庆电子工程职业学院
沈 挺	重庆交通大学	宋 勇	四川航天中天动力装备有限责任公司
唐 斌	成都航空职业技术学院	田 园	成都航空职业技术学院
王 聪	成都航空职业技术学院	王国汁	中航（成都）无人机系统股份有限公司
王 进	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	王朋飞	西安航空职业技术学院
王 强	成都航空职业技术学院	王泉川	中国民用航空飞行学院
王思源	成都航空职业技术学院	王文敬	中国民用航空飞行学院
王 旭	成都航空职业技术学院	王 洵	成都航空职业技术学院
魏春晓	成都航空职业技术学院	吴 可	重庆交通大学
吴 爽	中航（成都）无人机系统股份有限公司	谢燕梅	成都航空职业技术学院
邢海涛	云南林业职业技术学院	熊 斌	西南大学
徐风磊	中国人民解放军海军工程大学	许开冲	成都纵横自动化技术股份有限公司
闫俊岭	重庆科创职业学院	严向峰	成都航空职业技术学院
杨 芳	成都航空职业技术学院	杨谨源	中航教育科技（天津）有限公司
杨 琴	成都理工大学工程技术学院	杨 锐	成都纵横自动化技术股份有限公司
杨少艳	成都航空职业技术学院	杨 雄	重庆航天职业技术学院
杨 雪	成都航空职业技术学院	姚慧敏	成都航空职业技术学院
尹子栋	成都航空职业技术学院	游 玺	成都纵横大鵬无人机科技有限公司
张 捷	贵州交通技师学院	张 梅	成都农业科技职业学院
张 松	四川零坐标勘察设计有限公司	张惟斌	西华大学
张 伟	成都纵横大鵬无人机科技有限公司	赵 军	重庆电子工程职业学院
郑才国	成都理工大学工程技术学院	周 彬	重庆电子工程职业学院
周佳欣	成都航空职业技术学院	周仁建	成都航空职业技术学院
邹晓东	中航（成都）无人机系统股份有限公司		

近年来,我国无人机产业迅猛发展。工信部2017年12月发布的《关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见》,以及我国航空运输协会发布的《2019中国民用无人机发展报告》等文件均显示,当前我国民用无人机产业发展势头强劲,包括无人机产品、企业、规模等都增长明显。2019年以来,教育部批准开设无人驾驶系统工程专业的高等院校达20多所,这为无人机行业的发展提供了充足的人才储备。

为了顺应无人机产业发展和行业单位用人需求,高质量建设高校无人驾驶系统工程及其相关专业方向,依据无人驾驶系统工程专业人才培养目标、最新专业课程标准以及《民用无人机驾驶员管理规定》,高等院校一般会将无人机飞行原理作为一门专业必修课程。编者通过与相关无人机企业的专业人士深度交流和探讨,结合多年的飞行原理授课经验,以及对AOPA无人机执照考试的理解,涵盖多位参编者集体智慧,融合相关的专业知识、工作经验和对行业的认知编写了本书。考虑将无人机的多样性、理论性与实用性相结合,本书力求结构合理,内容宽泛适度、深浅适中,在编写风格上,深入浅出,通俗易懂,图文并茂,给读者提供必要的基础知识与先进信息,具有基础性、系统性、应用性等特点。

本书积极探索思政元素融入教材的新路径、新方法,推进课程思政建设。借助每一章的“航空思政讲坛”环节,西南大学马克思主义学院的思政教育者熊斌副教授团队搜集大量相关资料进行整理和拓展,通过航空历史故事、航空发展的案例讲述,展现一代中国航空人的理想信念、家国情怀、创新精神、工匠精神。在知识传授、智能培养的过程中加强价值引领,让学生学习诚实守信、善于沟通、团结互助、爱岗敬业、感恩坚守等优良品质,于潜移默化中融入思政教育,提升读者的思想境界,真正让该书成为具有“思政味道”的航空工程专业书籍。

按照无人机构型的多样性以及飞行原理的差异性,将此书内容分为5大部分:第1篇为基础知识,第2篇为固定翼无人机,第3篇为单旋翼无人机,第4篇为多旋翼无人机,第5篇为复合翼及其他类型无人机。其中,绪论由王永虎编写;第1章由王福成、王永虎编写;第2、3章由王永虎、何云华编写;第4章由何云华、王永虎编写;第5章由王永虎、曹跃杰编写;第6、7、8章由王永虎编写;第9、10章由王福成、史睿哲编写;第

11、12、13 章由付鹏编写，曹跃杰整理。另外，所有章节中的“航空思政讲坛”由熊斌、游志莲、邹欢编写。黄中桓提供了局方和行业制定的无人机法规和运行标准（清单见附录）。全书由王永虎和王福成统稿及校对。

本书的编写得到西北工业大学民航学院、中国民用航空飞行学院、重庆交通大学航空学院、西南大学马克思主义学院、成都工业学院等高校的大力支持，以及重庆市公安局警航办、四川省公安厅警航办、成都纵横无人机公司、重庆驼航科技有限公司等行业单位专业无人机教员和飞手的指导和帮助，在此深表感谢。同时，在本书编写的过程中，参考了大量教材、文献，并引用了网络资源资料和相关单位的影像、资料，有些引用体现在参考文献中，有些未能同原作者取得联系，在此一并表示衷心感谢。

本书可作为高等院校无人机等相关专业学生的专业教材，也可作为面向新时代要求的第二课堂前沿微课的辅助教材，还可作为从事无人机研发、制造、使用维护和培训工作人员，广大无人机爱好者的参考读物。

由于时间仓促和精力所限，书中难免会有一些疏漏和不足之处，敬请各位同行、专家和读者指正和交流。

编者

2021 年 10 月

## 第 1 篇 基础篇

绪 论 .....	003
0.1 定义和概念 .....	003
0.2 无人机分类 .....	004
0.3 无人机与航模的区别 .....	010
0.4 无人机的诞生与演变 .....	011
0.5 无人机运行管理法规 .....	018
1 大气环境 .....	024
1.1 大气的组成 .....	024
1.2 大气的基本物理特性 .....	027
1.3 国际标准大气 .....	030
1.4 航空气象 .....	031
1.5 气象信息 .....	042

## 第 2 篇 固定翼无人机

2 固定翼无人机构造 .....	053
2.1 无人机系统组成 .....	053
2.2 固定翼无人机机翼 .....	062
2.3 无人机载重控制 .....	080
3 固定翼无人机升力与阻力 .....	093
3.1 固定翼无人机的升力 .....	093
3.2 固定翼无人机的阻力 .....	107
3.3 无人机的综合气动性能 .....	115



4	固定翼无人机飞行原理与性能	129
4.1	平 飞	129
4.2	爬 升	140
4.3	下降和下滑	146
4.4	转弯和盘旋	149
4.5	失速与螺旋	154
4.6	起飞和着陆	157
5	固定翼无人机的稳定性和操纵性	169
5.1	固定翼无人机的平衡	169
5.2	固定翼无人机的稳定性	174
5.3	固定翼无人机的操纵性	189

### 第 3 篇 单旋翼无人机

6	单旋翼无人机的构造	203
6.1	无人直升机的分类	203
6.2	直升机的组成	207
6.3	涉及的基本概念	216
6.4	基本概念小结	221
7	无人直升机飞行原理	225
7.1	旋翼的空气动力学	225
7.2	旋翼挥舞原理	237
7.3	旋翼挥舞特性	242
7.4	直升机的控制和操纵	247
7.5	稳定性与操纵性	250
8	单旋翼无人机飞行性能	258
8.1	密度高度	258

8.2	悬停性能 .....	259
8.3	垂直飞行 .....	265
8.4	旋翼失速 .....	267
8.5	自转状态 .....	270
8.6	涡环状态 .....	273
8.7	斜坡起降 .....	275
8.8	机动飞行 .....	277
8.9	飞行性能分析 .....	278

## 第 4 篇 多旋翼无人机

9	多旋翼无人机特性 .....	289
9.1	多旋翼无人机基本结构 .....	289
9.2	多旋翼无人机的螺旋桨 .....	298
10	多旋翼无人机的飞行基本原理 .....	312
10.1	多旋翼无人机飞行基本原理 .....	312
10.2	多旋翼无人机的起飞、着陆与常规飞行 .....	315
10.3	多旋翼无人机的操纵性 .....	323
10.4	多旋翼无人机的应用案例 .....	328

## 第 5 篇 复合翼无人机

11	复合翼无人机基本结构 .....	337
11.1	复合翼无人机的诞生 .....	337
11.2	复合翼无人机的飞行模式 .....	340
11.3	复合翼无人机的基本结构 .....	341
11.4	旋翼系统与固定翼系统的匹配关系 .....	347
11.5	起降阶段的影响因素 .....	349
11.6	大气对复合翼无人机飞行的影响 .....	351

12 复合翼无人机的飞行基本原理 .....	356
12.1 复合翼无人机飞行基本原理 .....	356
12.2 复合翼无人机的升力 .....	357
12.3 复合翼无人机的阻力 .....	358
12.4 复合翼无人机的应急飞行 .....	359
13 复合翼无人机的稳操性 .....	363
13.1 复合翼无人机的受力 .....	363
13.2 复合翼无人机的平衡 .....	364
13.3 复合翼无人机的稳定性 .....	365
13.4 复合翼无人机的操纵性 .....	366
13.5 其他类型无人机简介 .....	366
附 录 .....	370
参考文献 .....	373

## 基础篇

本篇主要通过了解无人机的发展历史，知晓无人机的产生、发展、不断完善的过程，强调无人机与航模的区别，以及涉及国家民航局和各地方管理局公布的规章体系和行业标准。同时，了解无人机在使用过程中可以获取的飞行类执照；机翼飞行原理涉及的航空气象基础知识，包括无人机的飞行环境、风场等，掌握无人机翼型和桨型的基础知识。



# 0 绪 论

无人驾驶飞机简称“无人机”，实际上是无人驾驶飞行器的统称，它与载人飞机相比，具有明显的行业应用优势。世界上第一架无人机诞生于1917年，而无人机真正投入作战始于越南战争，主要用于战场侦察。随后，在中东战争、海湾战争、科索沃战争、阿富汗战争、伊拉克战争（第二次海湾战争）等局部战争中，无人机频频亮相、屡立战功。尤其在阿富汗战场上，无人机更是当之无愧的主角，多次成功实施“斩首”行动。

目前，无人机从最初的军用领域逐渐扩展到消费领域，消费级无人机市场十分火热，普通民众对无人机的认可程度和需求度也在逐渐攀升。现在无人机已经成为我国少有的在整个水平上步入世界一流，在部分品种和技术上走在世界前列的领域。

## 0.1 定义和概念

无人机（Unmanned Aircraft, UA）是由控制站管理（包括远程操纵或自主飞行）的机上无人驾驶的航空器，也称远程驾驶航空器（Remotely Piloted Aircraft, RPA）。

自主航空器（Autonomous Aircraft）是指飞行过程中驾驶员全程或者阶段无须介入控制的无人驾驶航空器。

无人机系统（Unmanned Aircraft System, UAS），也称远程驾驶航空器系统（Remotely Piloted Aircraft Systems, RPAS）是指由无人机、相关控制站、所需的指令与控制数据链路及设计规定的任何其他部件组成的，能完成特定任务的系统。

美国联邦航空局（FAA）将无人机正式命名为 Unmanned Aerial Vehicle（UAV）或 Unmanned Aircraft System（UAS），即无人飞行载具或称无人飞行器系统。虽然中国民航局（CAAC）将无人机的正式英文名命名为 Unmanned Aircraft，但国内外科技界很少使用这个单词，更多将其称为“Drone”，这是从法语转来的词汇，如无人机战争（drone warfare）、无人机产业（drone industry）等。

还有，在英语中最常用的 UAV（Unmanned Aerial Vehicle）和 RPA（Remotely Piloted Aircraft）都可以认为是无人机，但严格意义上，前者指自主无人机，后者指现有的所有无人机，即遥控飞行器。遥控驾驶航空器和自主航空器统称无人机，但不包括模型航空器。

从某种角度来看，无人机可以在无人驾驶的条件下完成复杂空中飞行任务和各种负载任务，可以被看成“空中机器人”。但真正的无人机是自主（控制）无人机，或可直称智能（AI）无人机，是指在飞行或执行任务时，完全不需要人去操纵和控制的无人机。

## 0.2 无人机分类

无人机是迄今为止品种最复杂、应用领域最广的航空器，在构型、用途、尺寸、质量、航程、航时、飞行高度、飞行速度等多方面有着很大差异。

目前，我国对无人机驾驶航空器实施两级三类五型管理。2013年11月，中国民用航空局下发了《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》，由中国 AOPA 协会协助负责民用无人机的相关管理。

由于无人机的多样性，产生了多种分类方法（图 0.1）：按照使用等级分为国家无人机和民用无人机；按照运行管理分为开放类、特许类和审定类三类；按照重量和性能分为微型、轻型、小型、中型和大型五类。

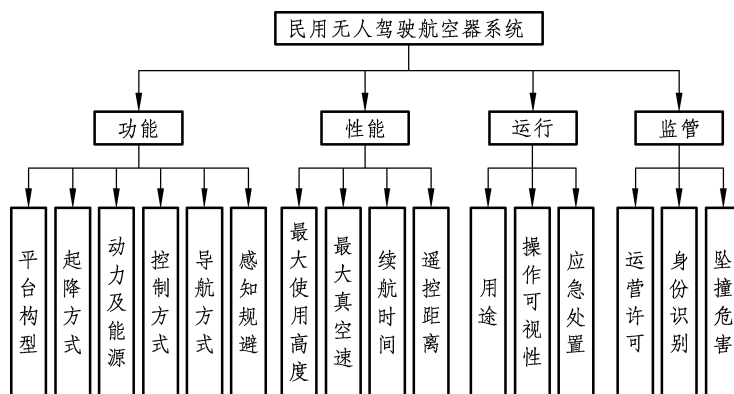


图 0.1 无人机驾驶航空器系统分类

### 1. 基于平台构型的分类

基于平台构型无人机可分为：固定翼、直升机（单旋翼）、多旋翼、其他构型（如扑翼无人机、倾转旋翼、复合翼无人机等）。主要机型包括无人飞机（固定翼无人机）、无人直升机、无人多旋翼飞行器、无人自转旋翼机、无人飞艇、无人伞翼机等，相对常用的是前三种。

无人飞机是军用和多数民用无人机的主流样式，特点是飞行速度较快；无人直升机是灵活性最强的无人机平台，可以原地垂直起飞和悬停；无人多旋翼机是消费类和部分工业级民用用途的首选平台，灵活性介于无人飞机和直升机之间，且操纵简单、成本较低。

### 2. 基于起降方式的分类

（1）基于起飞方式无人机分为：滑跑起飞、垂直/短距起飞、导轨动能弹射、气压弹射/液压弹射/橡筋弹射/电磁弹射、空中挂飞投放、火箭助推、车载助飞、手抛起飞等。

（2）基于降落方式无人机可分为：滑跑着陆、垂直降落、伞降回收、空中拦收、撞网/撞绳拦阻回收、气囊回收等。

### 3. 基于动力的分类

基于动力无人机可分为：活塞发动机（往复式、转子等）、涡轮发动机、电动机、火箭发动机、压缩空气驱动动力、组合/混合动力等，见表 0.1。

表 0.1 按照发动机类型分类

序号	名称	发动机类型	发动机型号	推力/功率
1	Global Hawk	Turbofan	Rolls-Royce AE 3007	34 kN
2	GeneraJ Atomics Avenger	Turbofan	Pratt & Whitney PW500	17.7 kN
3	MQ-1 Predator A	piston	Rotax 914	115 hp
4	MQ-9 Reaper	Turboprop	Honeywell TPE333-10	900 hp
5	RQ-7 Shadow 200	Piston	UEL AR 741	28.3 kW
6	Northrop Grumman Firebird	Piston	Lycoming TO-540	260 kW
7	DJI Mavic 2 Pro quadcopter	Electric	4820 mAh at 15.2V	4×73 W
8	AeroVironment RQ-11 Raven	Electric	Aveox brushless 27/26/7	250 W
9	Arcturus UAV T-20	Piston	Avgas 110 LL	7.5 kW
10	Aurora Perseus B	Piston	Rotax 94	73 kW

#### 4. 基于能源的分类

基于产生动力的能源无人机可分为：

- (1) 燃料：甲醇、生物燃料等。
- (2) 燃油：航空煤油（重油）、汽油、柴油等。
- (3) 电池：锂电池、氢电池、燃料电池等；组合/混合能源等。
- (4) 其他：太阳能、风能等。

所以，与有人机一样，无人机可分为油动无人机、电动无人机、固态氧化物燃料无人机、太阳能无人机、混合动力无人机。油动包括燃油驱动活塞、涡喷、涡轴等；电动包括多样化的电力来源驱动电机，如燃料电池、太阳能电池、超级电容器、无线能量传输或其他种类的电池等。无人机常用电池见表 0.2。

表 0.2 无人机用电池类型

序号	电池类型	能量密度 $E_D/(W \cdot h/kg)$	比功率	缩写	额定电压/V
1	锂离子电池	100 ~ 250	300 ~ 900 kJ/kg	Li-ion	3.6 ~ 3.8
2	聚合物锂电池	100 ~ 265	360 ~ 950 kJ/kg	LiPo	
3	镍镉电池	40 ~ 60	150 W/kg	NiCd	1.2
4	铅酸电池	30 ~ 42	180 W/kg		2.1
5	镍氢电池	60 ~ 120	250 ~ 1 000 W/kg	Ni-MH	1.2
6	碱性电池	160Wh/L		L	1.5

#### 5. 基于控制方式的分类

基于控制方式无人机可分为：

- (1) 人工遥控：驾驶员使用指令通过舵面或者控制增稳功能进行直接操纵。
- (2) 自动控制：机载系统按照预先输入的飞行计划和性能约束，在全飞行任务范围内自动连接连续完成飞行任务，机载系统可根据不同的飞行阶段及设备有效状态提供安全保护和故障处理功能。



(4) 自主控制：具备自适应和自决策能力的程序控制飞行。

(5) 组合控制方式。

### 6. 基于导航方式的分类

基于导航方式无人机可分为：

- (1) 惯性导航。
- (2) 卫星导航。
- (3) 无线电导航。
- (4) 组合导航。
- (5) 其他（图像匹配导航、天文导航等）。

### 7. 基于感知与规避能力的分类

基于感知与规避能力无人机可分为：

- (1) I类：具备感知与规避能力。
- (2) II类：不具备感知与规避能力。

### 8. 基于最大设计适用高度的分类

基于最大设计使用高度无人机可分为：

- (1) I类：最大设计使用高度不大于 20 m（相对高度）。
- (2) II类：20 m（相对高度）<最大设计使用高度 ≤ 50 m（相对高度）。
- (3) III类：50 m（相对高度）<最大设计使用高度 ≤ 120 m（相对高度）。
- (4) IV类：120 m（相对高度）<最大设计使用高度 ≤ 600 m（相对高度）。
- (5) V类：600 m（相对高度）<最大设计使用高度 ≤ 3 000 m（相对高度）。
- (6) VI类：最大设计使用高度大于 3 000 m（相对高度）。

常见不同升限的无人机见表 0.3。

表 0.3 各种不同升限的无人机

序号	名称	起飞质量/kg	载荷	机翼面积/m <sup>2</sup>	b/m	功率或推力	实用升限	最大速度	航程	航时/h
1	Predator B Reaper	4 760	1 700 kg	20.2	20.1	712 kW Turboprop	50 000 ft	260 knot	5 926 km	14~28
2	Global Hawk	14 628	2 000 lb	69	39.9	31.4 kN Turbofan	65 000 ft	V <sub>c</sub> 345 knot	14 000 nm	41
3	Predator A	1 020	—	11.5	14.8	86 kW Piston	25 000 ft	117 knot	726 km	24
4	YaInaha R-MAX	94	30 kg	Rotor diameter: 3.115 m	—	15.4 kW Piston	—	—	1 hour	—
5	ScanEagle	18	—	—	3.1	1.5hp Piston	16 000 ft	70 knot	—	20+
6	X-45A UCAV	6 804	—	—	10.23	31.4 kN Turbofan	—	Mach 0.75	—	—
7	X-45C UCAV	16 555	—	—	14.9	50.03 kN Turbofan	12.19 km	Mach 1	2 220 km	—
8	RQ-5A Hunter	885	90 kg	14.28	10.57	2 × 64 hp Piston	18 000 ft	89 knot	125 km	12
9	RQ-7 Shadow 200	170	—	4.5	4.3	28 kW Piston	15 000 ft	110 knot	400 km	6
10	Raven	1.9	0.4 kg	0.32	1.37	250 W Electric	—	30 km/hr	10 km	1

## 9. 基于最大真空速的分类

基于最大真空速无人机可分为：

- (1) I类：最大真空速不大于 50 km/h。
- (2) II类：50 km/h < 最大真空速 ≤ 120 km/h。
- (3) III类：120 km/h < 最大真空速 ≤ 367.5 km/h (0.3 Ma)。
- (4) IV类：367.5 km/h (0.3 Ma) < 最大真空速 ≤ 980 km/h (0.8 Ma)。
- (5) V类：980 km/h (0.8 Ma) < 最大真空速 ≤ 1 470 km/h (1.2 Ma)。
- (6) VI类：最大真空速大于 1 470 km/h (1.2 Ma)。

## 10. 基于续航时间的分类

基于续航时间无人机可分为：

- (1) I类：续航时间 ≤ 0.5 h。
- (2) II类：0.5 h < 续航时间 ≤ 2 h。
- (3) III类：2 h < 续航时间 ≤ 12 h。
- (4) IV类：12 h < 续航时间 ≤ 24 h。
- (5) V类：续航时间大于 24 h。

## 11. 基于遥控距离或活动半径的分类

基于遥控距离无人机可分为：

- (1) I类：遥控距离 ≤ 50 m。
- (2) II类：50 m < 遥控距离 ≤ 1 km。
- (3) III类：1 km < 遥控距离 ≤ 50 km。
- (4) IV类：50 km < 遥控距离 ≤ 200 km。
- (5) V类：200 km < 遥控距离 ≤ 500 km。
- (6) VI类：遥控距离大于 500 km。

根据活动半径，无人机也可以分为超近程无人机、近程无人机、短程无人机、中程无人机和远程无人机。

- (1) 超近程无人机：活动半径在 15 km 以内。
- (2) 近程无人机：活动半径在 15 ~ 50 km。
- (3) 短程无人机：活动半径 50 ~ 200 km。
- (4) 中程无人机：活动半径在 200 ~ 800 km。
- (5) 远程无人机：活动半径大于 800 km。

各种不同航时和航程的无人机见表 0.4。

表 0.4 各种不同航时和航程的无人机

序号	名称	航时	航程	起飞质量/ $W_{TO}$	载荷重量/ $W_{PL}$	$W_{PL}/W_{TO}$
1	RQ-4 Global Hawk	32 hours	22 800 km	32 250 lbs	3 000 lbs	0.093
2	Raven RQ-11B	90 minutes	10 km	4.2 lbs	6.5 oz	0.097
3	Scan Eagle	23 hours	100 km	48.5 lbs	13 lbs	0.27

续表

序号	名称	航时	航程	起飞质量/W <sub>TO</sub>	载荷重量/W <sub>PL</sub>	W <sub>PL</sub> /W <sub>TO</sub>
4	RQ-7B Shadow	7 hours	110 km	375 lbs	100 lbs	0.27
5	MQ-IC Gray Eagle	30 hours	3 750 km	3 600 lbs	800 lbs	0.22
6	A-160 Hummingbird	24 hours	4 023 km	6 500 lbs	1 000 lbs	0.15
7	MQ-8 Fire Scout	8 hours	203 km	3 150 lbs	500 lbs	0.16
8	Black Eagle 50	4 hours	260 km	77 lbs	22 lbs	0.28
9	Silver Fox	12 hours	32 km	28 lbs	4 lbs	0.14
10	Killer Bee	18 hours	100 km	250 lbs	20 lbs	0.08
11	Northrop Grumman Firebird	40 hr	11 200 km	5 000 lbs	1 240 lbs	0.25
12	RQ-5 Hunter	21 hr	125 km	885 kg	90 kg	0.102
13	Yamaha RMAX	1 hour	90 km	94 kg	31 kg	0.33
14	Predator B Sky Guardian	30 hours	11 000 km	4 500 kg	340 kg internal payload+1 360 kg external payload	0.38

## 12. 基于用途分类

基于用途无人机可分为以下类型（除农业植保用途外，其他用途允许一机多用）：农业植保、电力巡线、道路监视、航空拍摄、航空遥感、海洋监测、物流空、航空体育、气象探测、环境保护、森林防护、水务监管、空基地通信、影视航拍、消费娱乐等。

## 13. 基于操作可视性的分类

基于操作可视性无人机可分为：

（1）目视视距内操作：在满足一定的气象条件下，无人驾驶航空器处于驾驶员（或观察员）直接目视视距内半径 500 m，飞行真空不大于 120 m 的区域内。

（2）目视视距外操作：在目视视距以外运行。

## 14. 基于应急处置的分类

民用无人驾驶航空器系统的应急处置有以下几类，可单独或组合应用：一键迫降、自动悬停、失控返航、在线监控、手动避障、低电返航、降落伞备降。

## 15. 基于运营许可的分类

从运营许可视角综合考虑民用无人驾驶航空器系统的重量、动能、飞行高度、飞行速度、应急处置等，评估运营风险，可将民用无人驾驶航空器系统分为：

（1）开放类：低风险民用无人驾驶航空器系统，运营时无需适航审定，也没有针对运营商和飞行员的资质要求。

（2）特许经营类：中等风险民用无人驾驶航空器系统，运营时需要通过额外的限制或通过设备和人员能力提出更高的要求来控制风险。

（3）审定类：高风险民用无人驾驶航空器系统，运营的风险上升到载人航空器的风险水

平，运营时需要通过与有人机类似的适航审定程序。

### 16. 基于身份识别的分类

基于身份识别无人机可分为：

- (1) 不可识别：不具备任何身份标识。
- (2) 静态可识别：未安装支持身份识别的设备和软件，但可通过铭牌、二维码等实现识别。
- (3) 动态可识别：
  - ① 动态被动识别，即运行中应答监管平台发送的身份核实信息。
  - ② 动态主动识别，即运行中主动向监管平台报告身份信息。

### 17. 基于坠撞危害的分类

基于坠撞危害（坠撞危害用动能表征）无人机可分类为：

- (1) I类：动能 $\leq 10$  kJ。
- (2) II类： $10$  kJ $<$ 动能 $\leq 95$  kJ。
- (3) III类： $95$  kJ $<$ 动能 $\leq 1\ 000$  kJ。
- (4) IV类：动能 $>1\ 000$  kJ。

其中，动能计算公式为

$$E_{DN} = \frac{1}{2}mv_{DX}^2 \quad (0.1)$$

式中  $E_{DN}$  ——飞行撞击功能，焦耳（J）；

$m$  ——无人驾驶航空器运行质量，千克（kg）；

$v_{DX}$  ——等效速度（1.4倍最大飞行速度），米每秒（m/s）。

### 18. 按照运行风险分类

无人机按运行风险大小分类见表 0.5。

表 0.5 无人机的分类（按运行风险大小分）

无人机的分类	无人机的运行风险大小
微型无人机	空机质量小于 0.25 kg，设计性能同时满足飞行真高不超过 50 m、最大飞行速度不超过 40 km/h、无线电发射设备符合微功率短距离无线电发射设备技术要求的遥控驾驶航空器
轻型无人机	同时满足空机质量不超过 4 kg、最大起飞质量不超过 7 kg、最大飞行速度不超过 100 km/h，具备符合空域管理要求的空域保持能力和可靠被监视能力的遥控驾驶航空器（不包括微型无人机）
小型无人机	空机质量不超过 15 kg，或最大起飞质量不超过 25 kg 的无人机（不包括微型、轻型无人机）
中型无人机	最大起飞质量超过 25 kg 不超过 150 kg，且空机质量超过 15 kg 的无人机
大型无人机	最大起飞质量超过 150 kg 的无人机

### 19. 按照民航法规分类

根据 2015 年中国民航局发布针对民用无人机运行管理的咨询通告《轻小型无人机运行管

理规定（试行）》，将无人机进行分类见表 0.6。

表 0.6 无人机的分类（按民航法规分）

分类	空机质量/kg	起飞全重（质量）/kg
I	0<W≤1.5	
II	1.5<W≤4	1.5<W≤7
III	4<W≤15	7<W≤25
IV	15<W≤116	25<W≤150
V	植保类无人机	
VI	无人飞艇	
VII	可 100 米之外超视距运行的 I、II 类无人机	

- 注：1. 实际运行中，I、II、III、IV 类分类有交叉时，按照较高要求的一类分类。  
 2. 对于串、并列运行或者编队运行的无人机，按照总质量分类。  
 3. 地方政府（例如当地公安部门）对于 I、II 类无人机质量界限低于本表规定的，以地方政府的具体要求为准。

### 0.3 无人机与航模的区别

无人机与航空模型有时难以区分，所有现代航空器都是从航空模型（简称“航模”）进化来的。在人类飞上蓝天的探索实践中，毫无例外都是先静态模型，后动力模型；先模型样机，后实物真机。没有模型，就没有航空创造，就没有航空发展。

在航空探索的早期，航空模型具有强烈的科学实证性质，至今，利用航空模型进行技术验证仍是航空研发的重要手段。图 0.2 给出两者之间的逻辑关系。

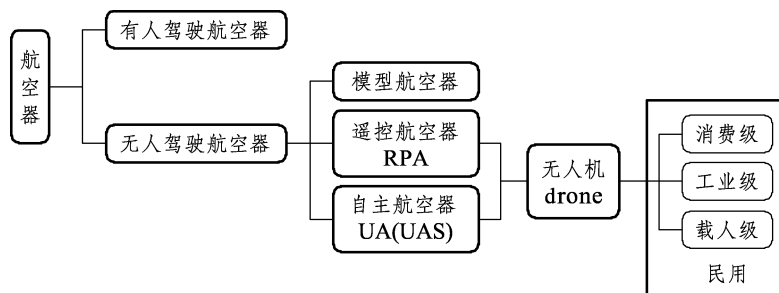


图 0.2 无人机与航模的逻辑关系图

根据国标对无人机驾驶航空系统给出的术语，模型航空器（Model Aircraft）定义为重于空气、有尺寸和重量限制、不载人，不具有控制链路回传遥控站（台）功能或者自主飞行功能，仅限在操纵员目视视距内飞行或者借助回传图像进行第一视角遥控操纵飞行的无人驾驶航空器。

注：模型航空器的控制模式可分为自由飞、线控、无线电遥控。

现阶段无人机与航模的最大相同点在于机上均无人，都需要人的掌控。二者之间又有很大区别，主要体现在功能与性能两方面。

首先是功能不同。航模除早期的试验验证作用外，逐步转向主要供运动用的不载人小型航空器，即特定的、狭义的航空模型。在成立于1905年的国际航空联合会（FAI）的推动下，航模逐渐演化成一项全球性、群众性竞技运动的工具。FAI 管辖的航空活动包括特技飞行、模型飞机、航天记录、通用航空、滑翔机、悬挂式滑翔和飞行伞等。有各种分类的航模，如模型直升机、自由飞模型、线操纵模型等，并在继续变化和丰富。其基本功能，主要是完成各种竞技性或表演性任务。通过这种活动，去实现社会价值和倡导科学精神，以致对航模本身的技术内涵和丰富的探索有所淡化。而无人机的功能则有明确的个性化要求，由机上任务载荷（又称有效载荷）来体现完成使命任务的能力。在这个意义上，无人机可以理解为载荷与搭载平台的组合体，有时还包括地面设施在内组成的系统。例如，侦察型无人机就是在具有一定飞行能力的平台上安装侦察设备和传输设备；攻击型无人机通过装载武器或战斗执行部件完成攻击任务。即使是科学验证用无人机，为获取飞行数据，也要安装必要的感知、测量和数据传输设备，以实现特定功能。所以，也可以说无人机是通过机上有效载荷来体现不同功能的系统。

其次是控制不同，即控制方式和控制系统的不同。无人机通过装置在机上的飞行控制系统，控制自身的姿态和机动；一般可以做到远距控制，可以事先设定程序，也可以通过数据链将地面控制参数与无人机进行交互，以实现自动运行。随着技术进步，还能实现部分或完全的自主控制，即不需人的干预。而航模的控制是通过人的直接控制或无线电远距遥控实现机动和姿态调整，机上一般没有自动飞行控制系统。高端航模通过采用FPV（第一视角）技术已可实现视距外操纵，但距离多在几千米范围。形象地说，无人机是带着大脑飞行，这副头脑可以极为聪明，也可以不那么智慧；而航模的大脑始终是在地面，是在操纵人员的脖颈之上。

随着航模操纵性能的持续提升和控制部件的低成本化，单就操纵性而言，高端航模与中低档无人机在这方面的差异在缩小，有时甚至已无高下之别。一般来说，除保障飞行的控制系统外，只有机上载有任务载荷，才可以称之为现代意义上的无人机。

总而言之，无人机与航空模型的区别可以总结为：

（1）从飞行方式上，航空模型始终需由人操纵且无法超视距飞行；而无人机除了人为操纵，由传感器、机载计算机和伺服动作设备组成的飞控系统可以实现自主飞行。

（2）从系统组成上，航空模型由飞行平台、动力系统、视距内遥控系统组成，科技含量较低。无人机由飞行平台、动力系统、任务系统、地面站等组成。

（3）从管理方面上。在我国，航空模型主要由国家体委下属航空运动管理中心管理；民用无人机由民航局统一管理，军用无人机由军方统一管理。

## 0.4 无人机的诞生与演变

无人机的发展已超百年，其发展也伴随着军事航空的发展。无人机的研发其实是早于有人机的，但其真正受到关注是在第一次世界大战期间。无人机因其结构简单，造价低廉，能完成有人驾驶飞机不宜执行的多种任务，而在军事上得到广泛应用。无人机的诞生与演变总起来可以分为三个阶段，具体如下：