

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

飞行与作业

（活页式）

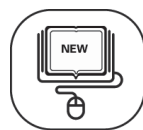
主 编 刘明鑫 何先定 陈宗杰
副主编 王 强 李 艳 魏春晓



课程思政



活页式



新形态



课件



微课



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

无人机飞行与作业 / 刘明鑫, 何先定, 陈宗杰主编
· 一成都: 西南交通大学出版社, 2022.2
ISBN 978-7-5643-8443-2

I. ①无… II. ①刘… ②何… ③陈… III. ①无人驾
驶飞机 - 飞行训练 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 257890 号

Wurenji Feixing yu Zuoye

无人机飞行与作业

主编 刘明鑫 何先定 陈宗杰

责任编辑 赵永铭

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 四川玖艺呈现印刷有限公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 9.75

字数 227 千

版次 2022 年 2 月第 1 版

印次 2022 年 2 月第 1 次

定价 38.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8443-2

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

李乐 国网乐山供电公司

刘清杰 四川航天职业技术学院

王福成 黑龙江八一农垦大学

王利光 成都纵横大鵬无人机科技有限公司

魏永峭 兰州理工大学

许云飞 成都航空职业技术学院

查勇 天府新区通用航空职业学院

江启峰 西华大学航空航天学院

李兴红 成都理工大学工程技术学院

卢孟常 贵州航天职业技术学院

王晋誉 上海民航职业技术学院

王永虎 重庆交通大学

吴道明 重庆航天职业技术学院

徐绍麟 云南林业职业技术学院

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

邓建军 成都航空职业技术学院

范宇航 成都航空职业技术学院

冯成龙 成都航空职业技术学院

何达 成都航空职业技术学院

何云华 成都工业学院

姜舟 成都航空职业技术学院

戴升鑫 成都航空职业技术学院

段治强 成都航空职业技术学院

房梦旭 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

何国忠 四川航天中天动力装备有限责任公司

胡浩 天府新区航空旅游职业学院

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	成都纵横大鹏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	成都纵横大鹏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 奔	成都纵横大鹏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	成都纵横大鹏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	成都纵横大鹏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	重庆交通大学
徐凤磊	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	成都纵横大鹏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	成都纵横大鹏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		

前言

PREFACE

无人机飞行与作业，以无人机驾驶飞行技术为基础，结合遥感传感器技术、遥控遥测技术、通信技术、GNSS（全球导航卫星系统）导航技术和遥感应用技术，实现无人机系统平台操作、飞行操控技术、输电线路巡检、航拍作业、航空测绘作业、农业植保作业和系统维护与保养等任务。随着技术的发展，无人机已经不仅局限于单个领域的产品，而是所有行业领域。无人机交互方式的更新换代以及“无人机+”概念的提出，使得无人机应用范围越来越广泛。同时，无人机技术由于有作业成本低、机动灵活、可执行危险任务和无人员伤亡的特点，已经被世界各国和地区争相研究与发展，是当今的新兴热门技术。

无人机飞行与作业是目前无人机应用技术的基本方向，是信息时代与人工智能时代新的产业革命的关键技术。由于其快速反应、时效性以及全面性的能力，无人机越来越多地应用于人们生活的各个方面。

本书共计七个模块，系统归纳了无人机操纵飞行和无人机作业应用，重点对无人机在不同行业的应用，对无人机系统和无人机飞行作业进行了概括，对无人机架空输电线路巡检作业、无人机航拍作业、无人机测绘作业、无人机农业植保作业和无人机系统维护与保养等进行了深入探讨。通过设计不同的应用场景，比较全面地梳理出不同作业的标准流程，整理出国家现有涉及无人机应用的管理规范与技术标准。模块 1 重点介绍了无人机系统原理及无人机法律法规和标准规范；模块 2 介绍了无人机飞行作业，主要包括无人机飞行作业准备，多旋翼无人机、固定翼无人机以及地面战的理论知识；模块 3 主要介绍了无人机架空输电线路巡检作业，包括无人机架空输电线路巡检系统的简介、无人机架空输电线路巡检标准化作业的具体流程和无人机架空输电线路巡检作业安全及注意事项等方面的内容；模块 4 主要介绍了无人机航拍作业，系统研究并介绍了无人机航拍

的作业系统、标准化作业和安全与应急措施；模块 5 主要介绍了无人机测绘作业，重点在于无人机测绘作业系统、无人机测绘作业标准化流程以及作业的安全与应急措施；模块 6 介绍了无人机农业植保作业，包括植保系统、标准化作业和安全与应急措施；模块 7 介绍了无人机系统的维护与保养，包括维护保养的基本要求，无人机本身及其各部分的保养。

本书是由西南交通大学出版社联合成都航空职业技术学院无人机产业学院无人机应用技术专业开发的专业教材。本书由刘明鑫、何先定、陈宗杰担任主编，王强、李艳、魏春晓担任副主编。刘明鑫、王强负责模块 1、2、7 的编写，陈宗杰负责模块 4、模块 5 的编写与部分内容统稿，李艳负责模块 3 的编写，魏春晓负责模块 6 的编写。本书在编写时参考了一些相关文献资料，在此一并感谢。

随着科学技术的飞速发展，无人机技术发展日新月异，无人机相关产业也无时无刻不发生着更新换代，由于编者水平有限，不能全面且精确涵盖无人机飞行与作业的各个方面，如有不当之处，请各位读者批评指正。

编者

2022 年 2 月

于成都航空职业技术学院

目录

CONTENTS

模块 1	无人机概述	001
任务 1	无人机系统原理	001
任务 2	无人机法律法规和标准规范	012
模块 2	无人机飞行作业	023
任务 3	无人机飞行作业准备	023
任务 4	多旋翼无人机的飞行	030
任务 5	固定翼无人机的飞行	036
任务 6	地面站飞行	044
模块 3	无人机架空输电线路巡检作业	056
任务 7	无人机架空输电线路巡检作业系统	056
任务 8	无人机架空输电线路巡检标准化作业	069
任务 9	无人机架空输电线路巡检作业标准化流程	074
任务 10	无人机架空输电线路巡检作业安全及注意事项	080
模块 4	无人机航拍作业	083
任务 11	无人机航拍作业系统	083
任务 12	无人机航拍标准化作业	087
任务 13	无人机航拍作业安全和应急措施	090
模块 5	无人机测绘作业	096
任务 14	无人机测绘作业系统	096
任务 15	无人机测绘作业标准化流程	102
任务 16	无人机测绘作业安全和应急措施	108

模块 6	无人机农业植保作业	113
任务 17	无人机农业植保作业系统	113
任务 18	无人机农业植保标准化作业	126
任务 19	无人机农业植保作业安全和应急措施	133
模块 7	无人机系统维护和保养	141
任务 20	无人机系统维护	141
任务 21	无人机及动力电池保养	143
参考文献	147



模块 1 无人机概述

任务 1 无人机系统原理

【情景创建】

竹蜻蜓是一种中国传统的民间儿童玩具，流传甚广，其外形呈 T 字形，横的一片像螺旋桨，当中有一个小孔，其中插一根笔直的竹棍子，用两手搓转这一根竹棍子，竹蜻蜓便会旋转飞上天，当升力减弱时才落到地面。在制作和玩耍竹蜻蜓的过程中，我们可以领略中国古老儿童玩具的趣味和科学技术的奥妙。

公元前 500 年，中国人从对大自然中蜻蜓飞行的观察中受到启示，制成了竹蜻蜓。随后 2000 多年来，竹蜻蜓一直是中国孩子手中的玩具，并在 18 世纪传到欧洲。被誉为“航空之父”的英国人乔治·凯利深受竹蜻蜓的启发，他的第一项航空研究就是在 1796 年仿制和改造了“竹蜻蜓”，并由此悟出螺旋桨的一些工作原理。他的研究推动了飞机研制的进程，并为西方的设计师带来了研制直升机的灵感。

【任务实施】

如何控制竹蜻蜓的飞行方向、飞行高度和滞空时间？

准备不同叶片长度、不同叶片安装角度的竹蜻蜓，由学生分别放飞竹蜻蜓，控制其朝向和双手旋转的速度，记录不同变量下竹蜻蜓的飞行方向、飞行高度和滞空时间，并分析原因。

知识点 1 无人机概述

无人机是无人驾驶飞机（Unmanned Aerial Vehicle 或 Drones）的简称，是控制站管理的遥控飞行或自主飞行的航空器，包括无人直升机、固定翼机、多旋翼飞行器、无人飞艇、无人伞翼机等。广义地看也包括临近空间飞行器（20~100 km 空域），如平流层飞艇、高空气球、太阳能无人机等。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，可以被看作是“空中机器人”。

通常所提的“无人机”主要指的是无人机空中飞行平台，从实际使用技术方面考虑，更重要的是“无人机系统”概念。

所谓“系统”，是指由若干个相互联系、相互作用、相互依存的组成部分（要素）结合而成的、具有特定功能的有机整体，从组成上来说，是指“相关部件（子系统）、软件与功能的有机集合”；从技术上来说，是指“具有相互依存功能的机械结构、电器、电子的一种集合”；从更广义上，还包括操作的人员与技术。

无人机系统是指无人机空中平台及与其配套的任务设备、数据链、控制站、起飞（发射）回收装置以及相关支持保障设备设施的功能系统。

知识点2 无人机系统组成

无人机系统一般由无人机平台、任务载荷、数据链和飞行控制与管理等飞机系统和运行支持系统组成（见图 1-1），各分系统组成和功能如下。

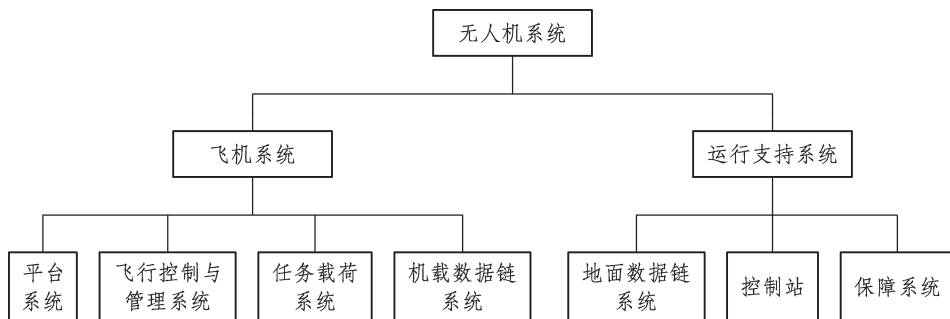


图 1-1 无人机系统组成

无人机平台系统：包括机体、动力装置、飞行控制与导航子系统等。无人机平台系统是执行任务的载体，它携带任务载荷，飞行至目标区域完成要求的任务与作业。

飞行控制与管理系统：包括飞行操纵设备、综合显示设备、飞行航迹与态势显示设备、任务规划设备、记录与回放设备、情报处理与通信设备、与其他任务载荷信息接口等。飞行控制与管理完成指挥，作战计划制订，任务数据加载，无人机地面和空中工作状态监视和操纵控制，以及飞行参数、态势和任务数据记录等任务。

任务载荷系统：完成任务与作业所需的机上设备实施等。任务载荷分系统完成要求的信息收集、载荷运输投送、作业等任务。

数据链系统：包括无线电遥控/遥测设备、信息传输设备、中继转发设备等。数据链系统通过上行信道，实现对无人机的遥控；通过下行信道，完成对无人机飞行状态参数的遥测，并传回任务信息。

知识点3 无人机操作技能

1. 俯仰操纵

使飞机绕横轴（ z 轴）做俯仰（纵向）运动的操纵叫俯仰操纵（见图 1-2），也称纵向操纵。

通过推、拉驾驶杆，使飞机的升降舵（或全动平尾）向下或向上偏转，产生俯仰力矩，从而使飞机低头或抬头做俯仰运动。

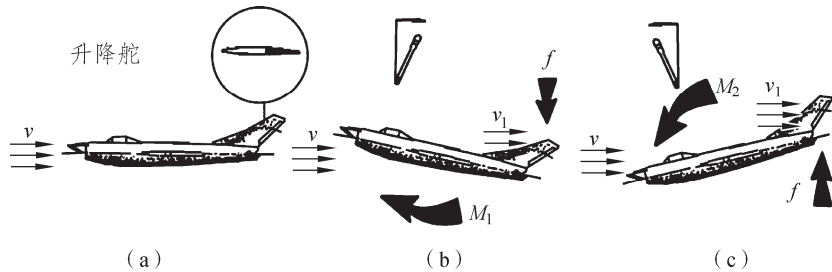


图 1-2 俯仰操纵

2. 方向操纵

使飞机绕立轴（ y 轴）做偏航运动的操纵叫方向操纵（见图 1-3），也称航向操纵。通过蹬脚蹬，使飞机的方向舵向左或向右偏转，产生偏航力矩，从而使飞机向左或向右做偏航运动。

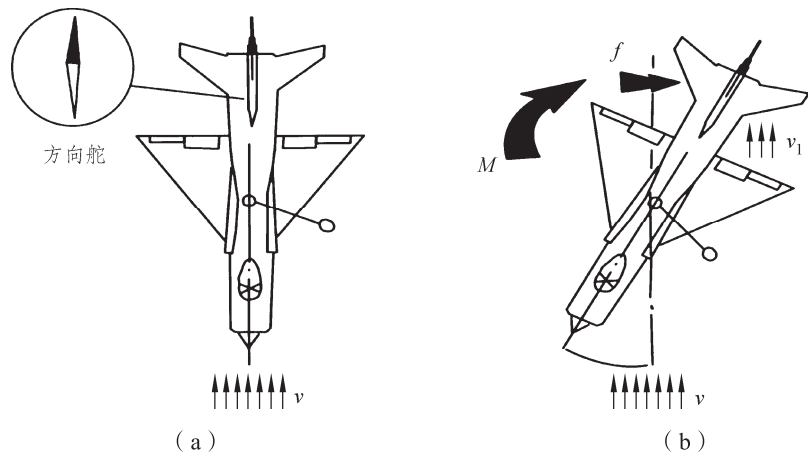
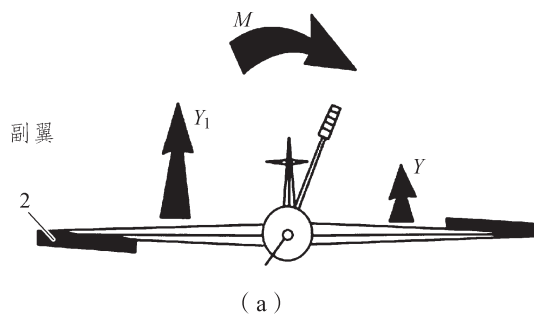


图 1-3 方向操纵

3. 侧向操纵

使飞机绕纵轴（ x 轴）做滚转（倾侧）运动的操纵叫侧向操纵（见图 1-4）。通过左压或右压驾驶杆（左转或右转手轮）使飞机的左、右副翼一侧向下另一侧向上偏转，产生滚转（倾侧）力矩，从而使飞机向左或向右做滚转（倾侧）运动。



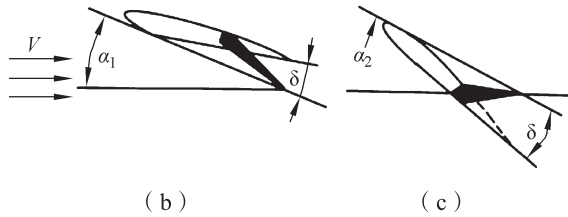


图 1-4 侧向操纵

4. 方向操纵与侧向操纵

在实际飞行中，方向操纵和侧向操纵也是不可分的，经常是相互配合、协调进行，因此方向操纵和航向操纵也常合称为“横侧向操纵”（见图 1-5）。

5. 无人机的操纵性与稳定性

无人机的操纵性与稳定性之间是一对矛盾关系，操纵性好，则放宽稳定性；稳定性好，则放低操纵性。

因此在无人机设计时必须统筹考虑，协调处理，根据不同需要协调操纵性与稳定性的指标（如长航时高空无人机更强调稳定性，无人作战机必须有较好的机动性）。

1) 无人机稳定性

对于一个处于平衡状态的系统，在受到扰动作用后都会偏离原来的平衡状态。若系统在扰动作用消失后，经过一段过渡过程后，系统仍然能够恢复到原来的平衡状态，则称该系统是稳定的（见图 1-6）。否则，则称该系统是不稳定的。

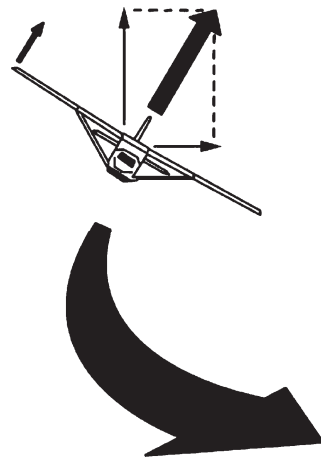


图 1-5 横侧向操纵



图 1-6 系统稳定性

(1) 稳定条件。

欲使处于平衡状态的物体具有稳定性，其必要条件包括：

① 物体在受到扰动后能够产生稳定力/力矩，使物体具有自动恢复到原来平衡状态的趋势。

② 在恢复过程中同时产生阻尼力/力矩，保证物体最终恢复到原来平衡状态。

(2) 飞行稳定性。

处于平衡状态的飞行器，受外界干扰后不需要进行操纵干预，靠自身特性恢复原来状态的能力。外界干扰可以是飞行中气流的影响，飞行器重量、重心的改变，发动机推力的改变等。

(3) 平衡状态。

飞行器在飞行时，所有的外力与外力矩之和都等于零的状态称之为飞行的平衡状态（见图 1-7）。匀速直线运动是一种平衡状态。

(4) 飞行稳定条件。

在飞行中，如果无人机由于外界瞬时微小扰动而偏离了平衡状态，这时若在无人机上能够产生稳定力矩，使其具有自动恢复到原来平衡状态的趋势，同时在无人机摆动过程中，又能产生阻尼力矩，那么无人机就能自动恢复到原来的平衡状态，也就是说无人机具有稳定性；反之，若无人机偏离平衡状态后产生的是不稳定力矩，那么它就会越来越偏离原来的平衡位置，因而不稳定的，也就是没有稳定性。

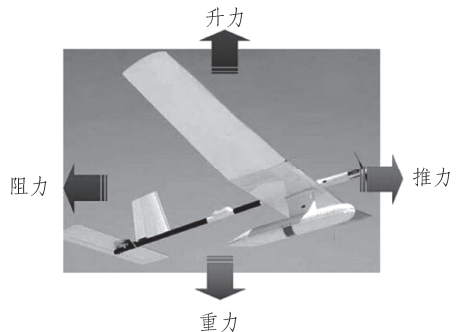


图 1-7 无人机平衡状态

显然，为了保证飞行安全和便于操纵，无人机应当具有良好的稳定性。

① 通常将稳定性分成静稳定性和动稳定性。

如果无人机在受到外界干扰后，在最初瞬间所产生的是恢复力矩，使其具有自动恢复到原来平衡状态的趋势，则称无人机具有静稳定性；反之，若产生的是不稳定力矩，无人机便没有自动恢复到平衡状态的趋势，故称为静不稳定性。静稳定性只表明无人机在外界扰动作用后的最初瞬间有无自动恢复到原来平衡状态的趋势，并不能说明其能否最终恢复到原来的平衡状态。

如果无人机在外界瞬时扰动作用后，能自动恢复到原来的平衡状态，则无人机具有动态稳定性。动态稳定性研究的是整个扰动运动过程的问题。

静稳定性和动稳定性之间有着非常密切的关系。一般来说，只要恰当地选择静稳定性的大小，就能保证获得良好的动稳定特性。

② 无人机的稳定性包括纵向稳定性、航向稳定性、横向稳定性。

纵向稳定性，反映无人机在俯仰方向的稳定特性。

航向稳定性，反映无人机的方向稳定特性。

横向稳定性，反映无人机的滚转稳定特性。

③ 无人机的纵向稳定性——以固定翼无人机为例。

当无人机在飞行中，受到微小扰动而偏离其纵向平衡状态，并在扰动去除瞬间，不经操纵就具有自动恢复到原来平衡状态的趋势，则称无人机具有纵向静稳定性。

无人机是否有静稳定性，主要取决于其本身的特性，取决于平衡状态破坏后，无人机上产生的起稳定作用的力矩与起不稳定作用的力矩相互作用的结果。如果前者大于后者，无人机是静稳定的；反之，便是静不稳定的。

当迎角改变时，机翼升力也改变，升力增量的作用点，即为机翼的焦点。对目前无人机上常用的翼型来说，焦点一般位于离翼型前缘大约 1/4 弦长的位置。同样，当迎角改变时，机身、尾翼等所引起的升力增量也作用在机身和尾翼的焦点上。

从图 1-8 中可以看出，由于机翼、机身的焦点都在无人机重心的前面，因而升力

增量对重心形成一个使机头更加上仰的不稳定力矩，但水平尾翼焦点远在重心之后，因此尾翼上的升力增量对重心形成的是使机头下俯的稳定力矩，若后者大于前者，无人机是静稳定的，反之，则是静不稳定的。

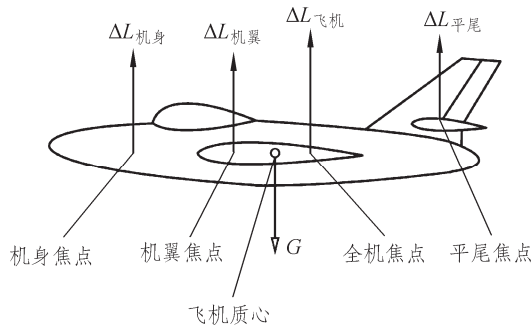


图 1-8 无人机平衡状态

从这里看出，水平尾翼的重要作用之一在于保证无人机具有纵向静稳定性。

当迎角变化时，无人机各个部件的升力都要改变。无人机各个部件升力增量的合力的作用点，称为无人机的焦点；换句话说，无人机焦点就是迎角变化而引起的整个无人机升力增量的作用点。机翼、机身、尾翼的焦点都不随迎角改变，无人机的焦点也不随迎角而改变。

无人机重心和无人机焦点之间的相互位置，决定了无人机是否具有纵向静稳定性。

若无人机重心位于焦点之前，如图 1-9 (a) 所示，则在无人机受到外界扰动后，例如迎角增加了 $\Delta\alpha$ ，那么在无人机的焦点上，就会产生一个向上的升力增量 ΔL ，它对无人机重心形成使机头下俯的静稳定力矩 ΔM_{y1} ，使无人机具有逐渐消除 $\Delta\alpha$ 而自动恢复到原来平衡迎角的趋势，即无人机是静稳定的。

反之，若无人机重心位于其焦点之后，如图 1-9 (b) 所示，升力增量对重心所形成的是不稳定的上仰力矩 ΔM_{y2} ，使无人机迎角越来越大，而没有自动恢复到原来平衡迎角的趋势，因此无人机是静不稳定的。

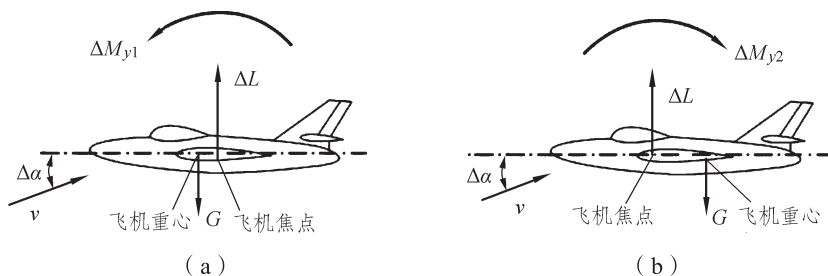


图 1-9 无人机纵向稳定性

由此可以得出一个重要结论：无人机的重心若位于无人机焦点之前，无人机具有纵向静稳定性；否则，无人机便不具备纵向静稳定性。

焦点的位置取决于机翼形状、机身长度，特别是机翼和尾翼的位置与尺寸。在进行常规固定翼无人机设计时，首先要合理地安排无人机重心的位置，并恰当地选择水平尾翼的位置和面积等参数，以确保无人机的纵向稳定性。

现代无人机由于采用主动控制技术，允许无人机纵向静不稳定，即允许无人机重心位于焦点之后。对于不稳定的无人机，随着迎角的增加，平尾在飞行控制器的作用下向下偏转，增大低头力矩，使无人机保持纵向稳定。这样，设计无人机时就不一定把无人机重心配到焦点之前，尾翼也不要很大的面积，从而可以大大减轻无人机的重量，提高无人机的飞行性能。

采用类似的方法，可以对固定翼无人机的航向稳定性与横向稳定性，以及其他类型无人机的稳定性进行分析，为无人机设计服务。

无人机的飞行稳定性，不是越强越好，而是要与操纵性结合起来考虑，使其具有最佳的飞行品质。

2) 无人机操纵性

无人机飞行时，不仅需要具有一定的稳定性，还要求具有良好的操纵性。

所谓操纵性，是指无人机对操纵指令做出反应、改变其飞行状态的特性，也就是无人机按照飞行指令的意图做各种动作的能力。

操纵性的好坏与稳定性的大小密切相关。稳定性太大，也就是说无人机保持原有平衡状态的能力越强，则要改变它也就越不容易，操纵起来也就越费劲。若稳定性过小，则较小的操纵就能引起较大的状态变化，很难把握操纵量的大小，容易造成操纵过量。因此，要正确处理好稳定性与操纵性之间的关系。

无人机的操纵性——以固定翼无人机为例。

固定翼无人机飞行时的操纵，主要通过三个主操纵面——升降舵、方向舵和副翼来实现的（见图 1-10）。

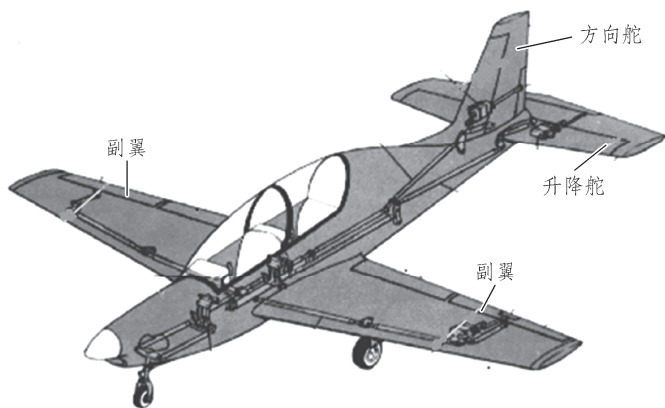


图 1-10 无人机操纵面

操纵手或者自动驾驶仪给出操纵指令，对操纵面进行偏转，使无人机绕其纵轴、横轴和竖轴转动，从而改变无人机的飞行姿态（见图 1-11）。

如果操纵手或者自动驾驶仪给出适当的操纵指令使操纵面偏转，无人机很快做出反应，按指令的意图改变飞行姿态，那么，无人机就具有良好的操纵性。如果反应迟钝，那就是操纵性不好。

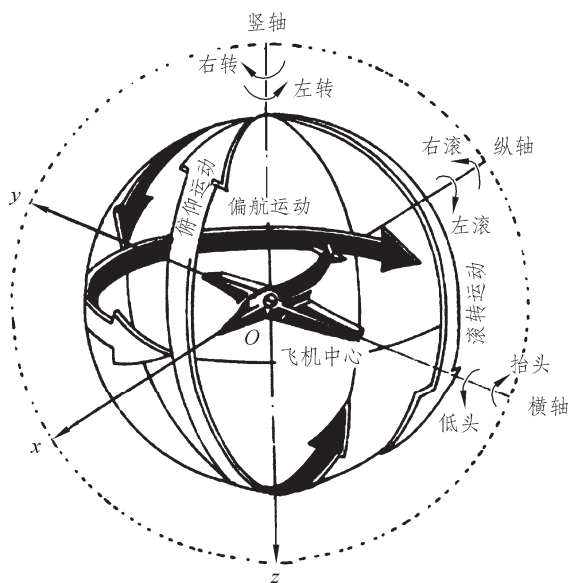


图 1-11 无人机操纵与姿态对应关系

固定翼无人机由于布局设计的不同，使用的操纵面有所差异，但其操纵的基本原理都相同，即通过操纵面的偏转改变升力面上的空气动力，增加或减少的空气动力相对于无人机重心产生一个使其按需要改变飞行姿态的附加力矩。

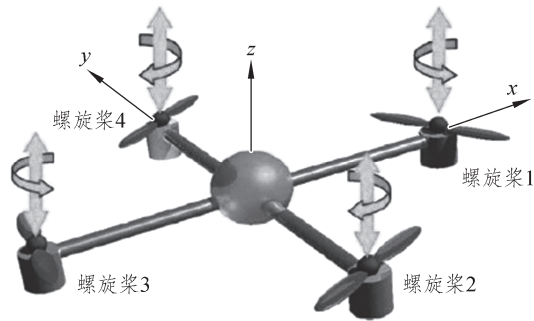
同稳定性一样，操纵性同样可分为纵向操纵性、航向操纵性、横向操纵性。

6. 多旋翼无人机飞行原理

常规直升机通过对总距和周期变距的控制来改变直升机的拉力大小和运动方向，而多旋翼无人机一般则通过调整各个电机与螺旋桨的转速，来实现对无人机的姿态与位置的控制（见图 1-12）。由于多旋翼无人器具有高度耦合的动态特性，一个螺旋桨转速的改变将至少影响三个自由度方向上的运动。



(a) 实物图



(b) 飞行原理

图 1-12 四旋翼无人机实物及其飞行原理

从飞行要求来看，多旋翼无人机应具备空间六个自由度和三个可控的基本运动状态。三个可控的基本运动为垂直运动、水平直线运动（前后/侧向飞行）、水平转动。控制运动状态的参数有：飞行高度、垂直速度、平飞速度、俯仰角、滚转角、偏航角。多旋翼无人机飞行控制——以四旋翼无人机为例。

(1) 垂直运动。

垂直运动控制较为简单，同时增加四个电机的输出功率，增加螺旋桨转速，使得总的拉力增大，无人机垂直向上飞行；反之，则垂直向下飞行。

垂直运动控制时，可将飞行高度、垂直速度作为控制状态参数。设定期望高度、期望垂直速度，采用一定控制方法（PID/模糊控制等），同时调整四个电机的功率，改变螺旋桨拉力，对飞行高度与垂直速度进行调整（见图 1-13）。

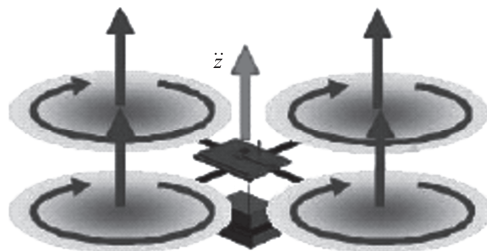


图 1-13 多旋翼无人机垂直运动飞行原理

(2) 水平直线运动（前后/左右运动）。

水平直线运动可分为前后运动与侧向运动，由于四旋翼无人机具有轴对称性，因此前后运动与侧向运动在操控方式上相同。

以前后运动为例，分别减小和增加前后螺旋桨的转速，产生拉力差，形成低头力矩，使机身低头，产生拉力的前向分量，使无人机向前运动；向后飞行类似。

水平前后运动控制时，可将俯仰角、水平速度作为控制状态参数。设定期望俯仰角、期望水平速度，采用一定控制方法（PID/模糊控制等），同时增加、减小前后两个电机的转速，使前后两个螺旋桨产生拉力差，对机身产生低头或抬头力矩，从而实现俯仰角和水平速度的调整（见图 1-14）。

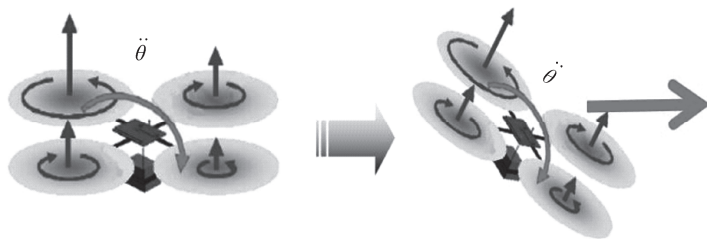


图 1-14 多旋翼无人机水平运动飞行原理图

(3) 水平转动。

四旋翼无人机的水平转动可以借助螺旋桨产生的反扭矩来实现。反扭矩的大小与螺旋桨转速有关，当四个螺旋桨转速相同时，反扭矩互相平衡，无人机不发生转动；当四个螺旋桨转速不同时，不平衡的反扭矩会引起四旋翼无人机的水平转动。

水平转动控制时，可将偏航角作为控制状态参数。设定期望偏航角，采用一定控制方法（PID/模糊控制等），改变四个螺旋桨的转速，使四个螺旋桨产生的反扭矩不能相互平衡，对机身产生扭转力矩，从而实现对偏航角的调整（见图 1-15）。

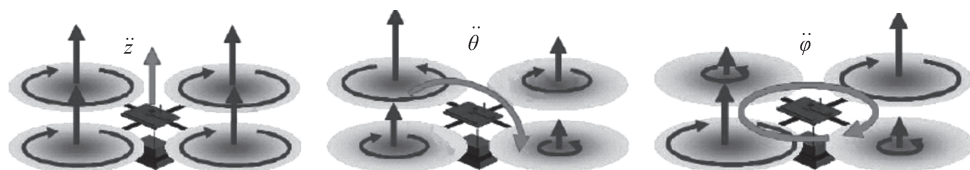


图 1-15 多旋翼无人机水平转动飞行原理图

多旋翼无人机的三个基本运动状态控制之间存在严重的耦合。某个基本运动状态控制时对螺旋桨转速产生的改变，极有可能破坏其他基本运动状态的平衡与稳定。因此，多旋翼无人机飞行时，应同时对三个基本运动状态进行控制，以保证飞行控制的全局稳定。

【任务测评】

将学生分成若干小组，请他们根据竹蜻蜓最优叶片长度以及安装角度，动手制作一个竹蜻蜓，放飞并测量记录其滞空时间和飞行高度，填入表 1-1 中，作为任务测评。

表 1-1 竹蜻蜓实验任务测评表

任务测评表			
小组	滞空时间（1 s = 10 分）	飞行高度（2 m = 10 分）	总分
1 组			
2 组			
3 组			
4 组			
5 组			
6 组			

续表

任务测评表			
小组	滞空时间 (1 s = 10 分)	飞行高度 (2 m = 10 分)	总分
7 组			
8 组			
9 组			
10 组			
11 组			
12 组			

【扩展阅读】

他，创造了中国民航史的一个传奇

1949年10月1日，新中国成立，一个多月后，国民党中国航空公司、中央航空公司的12架飞机从香港一路北上，投奔新中国。历史上将这次行动称为“两航起义”。潘国定驾驶的“空中行宫”号，就是其中一架，他作为机长，开着这架当时国际上最先进的飞机，拉着两航高管，直奔北京，降落北京后，这架飞机改名为“北京号”！

这12架飞机和同时起义的2000多名员工，就是新中国民航事业的起点。决定起义时，潘国定和妻子说好，安顿好再接家人过来，但两人就此失散。再见面是三十年后，潘国定是中国访美代表团成员，而他妻子是去迎接的美国华侨。两个老人流着泪，15分钟里一句话都没说！这是他们分别后的第一面，也是这一辈子最后一面！潘国定当年忍痛抛妻别子，是为民族大义，也是作为自己一个中国人的蓝天梦！

潘国定年轻时候曾在美国学习，当他向一个美国人请教飞行技术时，对方冷笑说：“你们黄种人要吃这碗饭，那黑人也要上天了！”这屈辱，潘国定终身难忘！他立志要为中国航空争气！青藏高原，一向被认为是“空中禁区”。20世纪40年代，西方冒险家为了寻找进入西藏的空中通道，上百名飞行员葬身冰峰。

1956年，中国决定试航拉萨。这条路有多难呢？当时世界上最难飞的路线，是在一万五千英尺高空飞行一个半小时。而北京-拉萨航线，要在两万英尺以上高空飞行三个小时。出发前，机组全体人员都写好了遗书，而潘国定又参与了这次传奇飞行，而且非常成功！

1950年潘国定机组的成员，其中有两位女性空中乘务员，就这在那个时代非常罕见，这群姑娘是新中国第一批“空姐”，一共18人。

那时飞机飞得慢，从北京到上海要中停两站，飞机餐也没有，乘客中途下飞机，去机场食堂吃饭。今天听来，那样的空中旅行似乎很遥远。但那不过是几十年前。新中国的民航的“第一飞”是1950年，那时只有两条线路，一条是天津飞往重庆，另一条是天津飞往广州。

现在，中国的定期航线有几千条，每年有超过 4 亿人次，在遍布全国的两百多个机场搭乘飞机。飞，已经成为中国人生活的一部分。

潘国定，一万三千小时，无事故！从仰望天空，到云端行走，飞得更高，走得更远，一直是中国人无止境的追求！这些带我们飞上天的人，蓝天会记住他们的身影。

任务 2 无人机法律法规和标准规范

【情景创建】

案例一：2017 年 4 月 21 日 12 时，戴某，男，未经西部战区空军和民航空中管制部门批准，在成都市双流区协和街道锦江路五段一无名路进行无人机飞行操作。成都市公安局双流区分局受理群众举报后派员处置，经调查此事属实。该区域属成都双流国际机场净空保护区范围，该男子对未经有关部门批准操作无人机飞行一事供认不讳。根据《中华人民共和国治安管理处罚法》第二十三条第一款第（二）项、第十一条第一款之规定，成都市公安局双流区分局对该男子作出了行政拘留 5 日并收缴无人机的处罚。

案例二：2017 年 4 月 22 日 16 时许，夏某，男，未经西部战区空军和民航空中管制部门批准，在成都市双流区永安镇凤凰村 11 组永安水库旁进行无人机飞行操作。成都市公安局双流区分局受理群众举报后派员处置，经调查此事属实。该区域属成都双流国际机场净空保护区范围，该男子对未经有关部门批准操作无人机飞行一事供认不讳。根据《中华人民共和国治安管理处罚法》第二十三条第一款第（二）项、第十一条第一款之规定，成都市公安局双流区分局对该男子作出了行政拘留 5 日并收缴无人机的处罚。

案例三：2017 年 4 月 23 日 15 时许，张某，女，未经西部战区空军和民航空中管制部门批准，在成都市双流区永安镇毛家公园足球场内进行遥控模型飞机飞行操作。成都市公安局双流区分局受理群众举报后派员处置，经调查此事属实。该区域属成都双流国际机场净空保护区范围，该女子对未经有关部门批准操作遥控模型飞机飞行一事供认不讳。根据《中华人民共和国治安管理处罚法》第二十三条第一款第（二）项、第十一条第一款之规定，成都市公安局双流区分局对该女子作出了行政拘留 5 日并收缴模型飞机、电池及遥控器的处罚。

【任务实施】

合法飞行需具备哪些条件？安全飞行注意哪些事项？

知识点 4 无人机系统的规范和规定

(1) 尺寸：无人机机长、翼展、机高及系统各部分尺寸应满足产品图样或专用规

范的要求。

(2) 任务起飞重量: 包括任务载重、燃油重量和空机重量。全机重量因装载不同可分为最大起飞重量和正常起飞重量。对于火箭助推发射的无人机的发射重量中应给出包含火箭助推装置的重量和不含火箭装置的重量。

(3) 载荷重量: 为执行任务所需的设备以及为保证其正常工作所需的能源和可以拆卸的辅助装置的重量的重量。对于不同任务所需的任务设备及其重量, 应在专用标准中给出。

(4) 燃油重量: 分为最大载油量(最大载油量是指机内油箱满载时的燃油重量)、非可用燃油量(非可用燃油量是指不能用于飞行的残余燃油)和任务燃油量(任务燃油量是根据执行规定任务所需的油量)。在具有外挂副油箱的条件下, 还应给出带副油箱时的最大载油量。

(5) 空机重量: 包括机体重量、动力装置和其他动力源重量、机载传感器和回收装置机载部分以及保证无人机飞行控制所需的机载设备的重量。

(6) 重心: 在设计文件中应分别给出不同重量和载荷情况下的重心变化范围。

(7) 起飞(发射): 发射起飞一般包括火箭助推、弹射发射等, 应确定主要性能指标, 包括推力、时间和发射角度等; 车载滑跑起飞应确定主要性能指标, 包括起飞重量、起飞速度、起飞角度、滑跑距离等; 自主滑跑起飞应确定在规定的挂载构型、正常及最大起飞重量、规定的发动机状态条件下的起飞滑跑距离、离地速度等指标; 投放起飞一般包括空中投放和人工抛投等方式, 应确定投放的速度、高度及角度等指标。

(8) 爬升: 爬升性能通常应确定不同外挂和发动机不同状态下的爬升速度、爬升率。

(9) 降落: 伞降回收一般应确定开伞高度、速度和抗风性能等指标; 撞网回收一般应确定撞网速度、角度和位置等指标; 自主滑跑降落应确定接地速度、着陆滑跑时间和距离等指标。

(10) 速度和高度一般应确定如下指标:

- ① 最大平飞速度;
- ② 巡航速度;
- ③ 实用升限;
- ④ 最大使用高度。

(11) 航程:

- ① 最大飞行距离。

无人机的最大飞行距离应按下列条件确定:

- (a) 给定的起飞重量;
- (b) 最大燃油装载量/动力电池电量, 并耗尽可用的机载燃油量/可用电量;
- (c) 给定的高度, 并以远航速度飞行;
- (d) 考虑起飞、爬升、下滑和着陆所消耗的燃油量/可用电量和飞过的水平距离。

- ② 控制半径。

按规定的任务构型, 无人机的控制半径按下列条件确定:

(a) 对于油动无人机, 正常燃油装载量, 扣除作业任务段所需的燃油量和着陆剩余燃油量后的可用燃油量;

(b) 对于电动无人机, 正常动力电池电量, 扣除作业任务段所需的电量和着陆剩余电量后的可用电量;

(c) 考虑起飞、爬升、下滑、着陆所消耗的燃油量/动力电池可用电量和飞过的水平距离;

(d) 考虑数据链测控距离。

③ 导航与定位。

无人机根据需要选择定位方式和导航方式, 并应明确定位精度。

(12) 飞行品质: 各项飞行品质要求, 应尽可能用三个级别来表示。

① 一级飞行品质: 飞行品质能确保无人机顺利地各项规定的飞行任务;

② 二级飞行品质: 飞行品质适合于无人机完成各项飞行任务, 但完成任务的效果有所降低, 操纵员需进行适当的干预;

③ 三级飞行品质: 飞行品质能满足操作员安全地遥控无人机, 但操作员的工作负担过重, 或完成任务的效果不好, 或两者兼有。

(13) 环境适应性: 无人机系统所有分系统和设备应能承受贮存、运输、地面工作所规定的各种环境条件, 其中无人机、数据链和任务设备还应能承受发射(起飞)、飞行、回收(着陆)条件下各种自然与诱发的环境条件, 包括气候、力学、生物环境适应性等。

(14) 抗风: 无人机在起降阶段和飞行阶段应能抵抗风的影响。不同类型无人机的抗风性要求应满足专用标准要求。

(15) 高温、低温: 无人机应能在用户或专用标准规定的大气环境温度范围内正常工作、贮存。一般应满足以下要求:

① 机载设备。

(a) 在 $-40\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下正常工作;

(b) 在 $-50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下贮存时不产生物理损坏或性能下降。

② 地面设备。

(a) 在 $-20\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下正常工作;

(b) 在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下贮存时不产生物理损坏或性能下降。

(16) 温度冲击: 无人机在经受周围大气温度急剧变化(温度冲击)时, 应不产生物理损坏或性能下降。

(17) 冲击、振动: 无人机及其部件应能承受正常使用环境及运输过程中所遇到的冲击、振动。

(18) 湿热: 无人机系统的各设备应确保在湿热的环境下, 其机械性能、电气性能、化学性能及热性能不发生改变。

(19) 霉菌: 无人机应具备一定的防霉菌能力, 确保在高湿、温暖空气及无机盐存在等有利于霉菌生长的条件下, 其工作效能不受影响。

(20) 盐雾: 无人机应具备一定的防盐雾能力, 确保在盐雾大气中, 其不产生金属的腐蚀、活动部件的阻塞或卡死、绝缘失效、接触器和无涂覆导线的损坏等现象。

(21) 防雨: 无人机一般应具备一定的防雨能力, 确保在一定的淋雨环境下作业或经受淋雨后, 其工作效能不受影响。

(22) 防沙: 无人机应具备一定的防沙能力, 确保在风或气流所携带的沙尘条件下, 其工作效能不受影响。

(23) 流体敏感性: 用于农林植保等用途的无人机应具备承受农药等流体污染的危害影响。

(24) 电磁兼容性: 无人机系统应能在一定的电磁环境下保证全系统兼容工作。无人机的电磁兼容性一般应满足以下要求。

① 静电放电抗扰度应满足 GB/T 17626.2—2018《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》的相关要求;

② 射频电磁场辐射抗扰度应满足 GB/T 17626.3—2016《电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验》的相关要求;

③ 辐射骚扰应满足 GB 17799.4—2012《电磁兼容 通用标准工业环境中的发射》的相关要求;

④ 天线端传导杂散应满足 YD/T 1483—2016《无线电设备杂散发射技术要求和测量方法》的相关要求。

(25) 可靠性: 无人机系统的可靠性一般应满足以下要求。

① 无人机的可靠性指标包括平均故障间隔时间 (MTBF) (根据设备不同也可以是平均无故障工作次数、平均无故障里程数等) 和/或任务可靠度等, 具体值一般由用户与研制方协商确定;

② 应根据用户的可靠性定量要求逐级分配可靠性指标;

③ 应对无人机各系统及设备的设计进行故障模式及影响分析, 对关键的或重要的元器件、电路应进行容差分析, 并采取相应措施;

④ 应根据对重量、体积、经济性、基本可靠性与任务可靠性的权衡分析, 确定是否采用余度设计。

(26) 维修性: 系统维修性一般包括可达性、互换性、防差错及识别标志、维修安全、检测诊断、零部件可修复性、减少维修内容、降低维修技能要求等。保障与维修分系统的配置一般要按现场级和返厂两个层次配置, 详细指标和要求按照专用标准执行。

现场级维修与保障设备主要完成无人机系统发射时的地面供电、无人机装卸、油料加注、无人机综合检测、系统的日常维护, 并把无人机系统故障定位到可更换的设备和部件级。

返厂保障与维修应能对无人机系统的各个分系统、设备和部件进行检测和维修, 确保系统任何故障均能修复。

(27) 保障性: 无人机系统的保障性一般应满足以下要求。

① 保障性设计要求和保障资源要求包括维修人员数量、随机备件清单等应满足使用要求;

② 保障设备、工具品种和数量应合理, 便于使用维护, 必要的保障设备和工具应与无人机同步交付;

③ 对于保障维修设备, 也应考虑其可靠性、维修性设计问题。

(28) 测试性: 系统应合理划分功能与结构, 设置测试点, 确定嵌入式诊断、有

关外部诊断测试、兼容性及维修能力，有关指标按专用标准执行。

(29) 安全性：无人机系统进行安全性设计时一般应满足以下原则。

① 在无人机系统研制过程中，可参照 HB 7583 ——1998《飞行区域安全性分析》，应充分考虑采取的工作原理、使用方式、材料与器件的安全合理性，确保人员和设备安全；

② 无人机系统的安全性应从设计制造、质量控制、可靠性、维修性、人-机-环境系统工程、健康保障、经济性等方面综合协调，确保安全技术措施的实施；

③ 当安全性技术措施与其他因素发生矛盾时，应首先保证安全技术措施的落实；

④ 安全技术措施的保障途径优先次序为最小风险设计、采用安全装置、采用报警装置与标志、制定专用规程和进行专门培训等。

(30) 运输性：无人机系统研制时应考虑便携性，优先选择易拆卸、可伸缩或可折叠的结构连接方式。在运输过程中，应防止无人机系统损伤。

(31) 人机交互：无人机系统人机交互设计一般应满足以下要求。

① 地面控制单元的设计应满足安全、高效、舒适的要求；

② 地面控制单元设计应满足人机交互界面友好、匹配，人机功能分工合理的要求；

③ 帮助和提示信息应简明、清晰、易懂；

④ 操作应灵活、方便，自动化程度高，减轻长期操作的劳动强度。

(32) 材料：应按现行的国家标准和行业标准选用材料。所选材料的强度、刚度、抗疲劳性、物理化学性能及电性能等应满足设计要求。材料的选用应考虑到维修中的互换、备料和代料。

(33) 标准件：应按照国家有关标准选用标准件。标准件（含紧固件）的类型、尺寸规格应尽量少，应优先在专用标准限定的范围内选用。所有螺栓、螺钉、螺母连接应满足连接强度要求并有防松措施。

(34) 颜色：应符合专用标准要求。订购方如有特殊要求，可按合同或技术协议约定执行。

(35) 标识：应按专用标准要求提供标识。标识应标明产品的型号、名称、序号、出厂日期、生产单位。

(36) 零组件标记：可互换的备用零组件需要标明零件号。

知识点 5 无人机驾驶员的相关标准和规定

1. 管理机构

无人机系统分类较多，所适用空域远比有人驾驶航空器广阔，因此有必要对无人机系统驾驶员实施分类管理。

(1) 在下列情况下，无人机系统驾驶员自行负责，无须证照管理：

① 在室内运行的无人机。

② I、II类无人机（如运行需要，驾驶员可在无人机云系统进行备案。备案内

容应包括驾驶员真实身份信息、所使用的无人机型号，并通过在线法规测试)。

③ 在人烟稀少、空旷的非人口稠密区进行试验的无人机。

(2) 下列情况下，无人机驾驶员由行业协会实施管理，局方飞行标准部门可以实施监督：

① 在隔离空域内运行的除 I、II 类以外的无人机。

② 在融合空域内运行的 III、IV、V、VI、VII 类无人机。

(3) 在融合空域运行的 XI、XII 类无人机，其驾驶员由局方实施管理。

2. 行业协会对无人机系统驾驶员的管理

(1) 实施无人机系统驾驶员管理的行业协会须具备以下条件：

① 正式注册五年以上的全国性行业协会，并具有行业相关性；

② 设立了专门的无人机管理机构；

③ 建立了可发展完善的理论知识评估方法，可以测评人员的理论水平；

④ 建立了可发展完善的安全操作技能评估方法，可以评估人员的操控、指挥和管理技能；

⑤ 建立了驾驶员考试体系和标准化考试流程，可实现驾驶员训练、考试全流程电子化实时监测；

⑥ 建立了驾驶员管理体系，可以统计和管理驾驶员在持证期间的运行和培训的飞行经历、违章处罚等记录；

⑦ 已经在民航局备案。

(2) 行业协会对申请人实施考核后签发训练合格证，在第 5 条第 (2) 款所述情况下运行的无人机系统中担任驾驶员，必须持有该合格证。

(3) 训练合格证应定期更新，更新时应对新的法规要求、新的知识和驾驶技术等内容实施必要的培训，如需要，应进行考核。

(4) 行业协会每六个月向局方提交报告，内容包括训练情况、技术进步情况、遇到的困难和问题、事故和事故征候、训练合格证统计信息等。

3. 局方对无人机系统驾驶员的管理

(1) 执照要求。

① 在融合空域 3 000 m 以下运行的 XI 类无人机驾驶员，应至少持有运动或私用驾驶员执照，并带有相似的类别等级（如适用）；

② 在融合空域 3 000 m 以上运行的 XI 类无人机驾驶员，应至少持有带有飞机或直升机等级的商用驾驶员执照；

③ 在融合空域运行的 XII 类无人机驾驶员，应至少持有带有飞机或直升机等级的商用驾驶员执照和仪表等级；

④ 在融合空域运行的 XII 类无人机机长，应至少持有航线运输驾驶员执照。

(2) 对于完成训练并考试合格的人员，在其驾驶员执照上签注如下信息：

① 无人机型号；

② 无人机类型；