

Unmanned System Total Solution Supplier

无人系统整体解决方案供应商



深圳联合飞机科技有限公司

广东省深圳市龙岗区园山街道山水二路22号

No. 22, Shanshui Second Road, Yuanshan Street, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, China

Tel : +86 10 5994 3177 Fax : +86 10 5994 3188

e-mail : info@uatair.com

www.uatair.com



联合飞机官方微信二维码

中航智官方微信二维码

联合
飞机

UNITED AIRCRAFT

联飞动态 瞭望的窗口，传报无人机心灵的青鸟

WWW.UATAIR.COM

2024年09月 总第十一期



|行业应用|

联合飞机全场景解决方案 | 范堡罗航展全球首发亮相

|创新前沿|

航空发动机起发一体电机及控制系统关键技术研究

联合飞机
United Aircraft

内部资料 免费交流

镧影R6000

倾转旋翼飞行器

· 安全 · 易用 · 低成本

镧影R6000是联合飞机自主研制的六吨级倾转旋翼飞行器，融合直升机垂直起降与固定翼飞机高速巡航的双重优势，树立远距离、点对点高效运输的新标杆。其卓越的速度、航程和载重能力，使其在特殊地形和城市狭窄空间中执行多样化任务时游刃有余，引领城市空中交通进入新纪元。R6000不仅是一款创新产品，更是城市空中交通、物流运输、应急救援等领域的革命性突破。它以前所未有的便捷性和效率，推动我们进入一个高效、智能的立体交通新时代。

长度
11.832m

桨叶直径
7.5m

最大起飞重量
6100kg

最大航程
4000km

高度
5.326m(直升机模式)

折叠后尺寸
13.4 × 5.4 × 3.7m

最大商载
2000kg

任务半径
1500km

宽度
17.5m

起降场地需求
<11.9m × 17.5m

巡航速度
550km/h

实用升限
7620m

载货空间
7.6m³

无地效悬停高度
2000m



CONTENTS 目录

2024年09月
总第十一期

创新前沿

The Leading Edge of Innovation

06 无人机动态多目标实时追踪策略研究



16 航空发动机起发一体电机及控制系统关键技术研究

一线论坛

Frontier Forum

24 基于FlightLab的共轴双旋翼直升机建模和仿真

32 泡沫夹芯复合材料结构修理后低速冲击性能仿真

40 一种混杂芳纶纸蜂窝剪切性能研究

46 增材制造技术在航空发动机中的应用

56 高速轴承滚动体离心力对轴承滚道接触应力的影响分析

联飞动态

Lianfei News

60 万亿低空,携手并进 | 联合飞机2024供应商大会圆满成功



64 全球商业航空崛起下的中国力量 | 联合飞机助力低空经济进入无人化时代

72 世界无人机大会 | 联合飞机发布低空经济战略全景图



78 商业航空新势力 | 联合飞机低空物流解决方案火爆全球

84 双向奔赴 | 联合飞机牵手苏交科,共建低空经济高端智库型
科技企业



88 全球独角兽榜 | 联合飞机跻身中国商业航空航天Top10

92 联合飞机拉满“加速度”,黑龙江低空经济按下“快进键”

行业应用

Industry Application

96 电力无人机全新升级 | 联合飞机赋能国家全场景电力保障

100 联合飞机全场景解决方案 | 范堡罗航展全球首发亮相

104 筑牢应急通信“生命线”,联合飞机破解“三断”场景应急通
信保障难题



专利之窗

Patent Window

108

论文摘要

Quotations

110

资料索引

Data Index

124

编辑委员会

EDITORIAL BOARD

Editorial Board President 总编	田刚印
Editorial Board Vice President 副总编	李晓鸽 焦彦斌 赵巍 王谡
	张程 王晓明 孟月华 范欣林
	李德彪 刘芳国 闫怀强 洪军
	田刚强 向紫涛 蔡媛 孙立业
	田玲 田圣宽
Chief Editor 主编	田刚印
Executive Editor 执行主编	孙立业
Executive Deputy Editor 执行副主编	张元瑞 张亚军 樊建峰 袁琪
Technical Review 编审	李晓亮 刘淑彦 余洵 范珍涔
Art Editor 美术编辑	司倩
English Proofreading 英文校对	周霄月

编辑部联系方式

CONTACT

Add 地址 北京经济技术开发区同济南路20号院1号楼
Tel 电话 010-5994 3177
Website 网址 www.uatair.com www.zhz.com
E-mail 电子邮箱 info@zhz.com



(内部资料, 免费交流)

欢迎您提出宝贵的意见和建议, 和我们共同办好《联合飞机》!

无人机动态多目标实时追踪策略研究

文/刘展 谭敏哲

(深圳联合飞机科技有限公司 深圳)

摘要:本研究探讨了计算机视觉领域中尚未完全解决的问题——无人机动态目标追踪。相较于传统地面摄像机,无人机视角的数据存在明显差异,并常伴有小目标、多目标、高速运动和目标失真等挑战。为此,我们开发了一套基于深度学习检测模型的无人机目标追踪系统。系统首先采用yolov8n-p2模型进行多目标检测,根据检测得到的目标类别、位置和置信度信息,输入到bytetrack目标跟踪器。该跟踪器结合卡尔曼滤波预测和匈牙利算法进行目标检测框匹配。对于高、低置信度的目标,我们采取不同的匹配策略,并最终输出追踪结果。此外,为了提高对已丢失目标的再追踪概率,系统采用ARIMA模型对目标历史轨迹进行预测,并对预测结果进行二次匹配。最终,本研究在边缘计算设备Jetson Xavier NX上部署并验证了该算法模型,证实了其在实时无人机动态目标追踪中的有效性。

关键词:无人机目标追踪;目标检测;卡尔曼滤波;轨迹预测;边缘部署

Abstract:This study addresses an unresolved issue in the field of computer vision—dynamic object tracking with drones. Drone-captured data differs significantly from that of traditional ground cameras and often involves challenges such as small, multiple objects, high-speed movements, and object distortion. To tackle these issues, we developed a trajectory prediction-based drone target tracking system. Initially, the system employs the yolov8n-p2 model for multi-object detection, processing the detected category, location, and confidence level of objects to feed into the bytetrack object tracker. This tracker combines Kalman filter predictions and the Hungarian algorithm for matching detection frames. Different matching strategies are applied depending on the confidence levels of the objects, culminating in the output of tracking results. Furthermore, to enhance the re-tracking probability of lost targets, the system utilizes the ARIMA model to predict the historical trajectories of targets and performs a secondary matching on predicted results. Ultimately, this algorithm model was deployed and validated on the Jetson Xavier NX edge computing device, confirming its efficacy in real-time dynamic target tracking with drones.

Key Words:Drone Object Tracking; Object Detection; Kalman Filter; Trajectory Prediction; Edge Deployment

1.引言

无人机目标追踪技术涉及实时定位和监控特定目标的技术,这在军事、安全监控、物流运输、精准农业、地质灾害探测、城市规划等领域具有广泛的应用。与卫星、飞机等传统平台相比,无人机弥补了天气、时间等限制造成的信息缺失,其高机动性使其应用广泛。有效的目标追踪系统能够提高无人机的操作效率和响应能力,尤其是在复杂的环境中。

然而,目标识别与追踪领域面临诸多挑战,如物体遮挡、尺度改变、背景干扰、快速移动干扰等。早期的生成器模型主要有光流法、粒子滤波、Meanshift、Canshift算法等几种。此类方法首先建立目标模型或者提取目标特征,在后续的帧检测中利用相似的特征进行搜索,逐步迭代实现目标定位,但往往缺乏背景信息利用,单一数学模型有较大局限性,易受光照、动作、图像质量、遮挡影响。基于相关滤波的追踪方法也很多,衡量两个信号的相似程度,将其引入目标追踪,可以实时在线适应更新来适应物体外观,相关的一些跟踪算法如MOSSE、CSK、KCF等,速度很快,可以保证实时性,但精度一般。

深度学习以其强大的特征表达能力在物体识别方面具备明显优势,特别是在目标检测方面。本文内容主要采用“Tracking by Detection”的方法,即在检测到目标后进行追踪。深度学习模型负责目标检测,而传统的数据关联方法则负责关联数据,如检测框和相同目标等。这种方法具有较高的精度,尽管计算量增加,但可以在配备GPU的边缘设备上运行。

检测到目标后,进行相似度量和匹配的相关算法去实现检测框的匹配追踪。基于深度学习的目标识别跟

踪技术的深入研究将能够在遮挡、变形、小微目标、高空目标等复杂目标或环境下增加追踪成功率,使得无人机在监控、军事、精准农业等多行业发挥更高效、可靠的实际作用。

2.基于检测的无人机动态目标追踪策略

Tracking by Detection在精度、实时性方面实现了很好的平衡。主要流程如图1,通过对摄像头视频数据的实时分析和检测。其关键在于:一是要有好的目标检测模型,高效率、高精度地识别出图像中的感兴趣目标;二是对检测出的目标进行预测并且逐帧进行相似匹配实现追踪。



图 1 目标追踪测试流程

2.1 目标检测方法

2.1.1 YOLOv8

无人机目标检测需要保证实时精度和速度,YOLOv8继承了YOLO系列一贯的设计哲学——快速、准确且易于部署。YOLOv8的架构可以分为三个主要部分:Backbone(主干网络)、Neck(颈部网络)和Head(头部网络)。Backbone负责提取图像中的特征,它是模型识别对象的基础。YOLOv8的Backbone采用了CSP(Cross Stage Partial networks)架构,这是一种高效的神经网络设计,能够在减少计算量的同时,提高特征提取的能力。

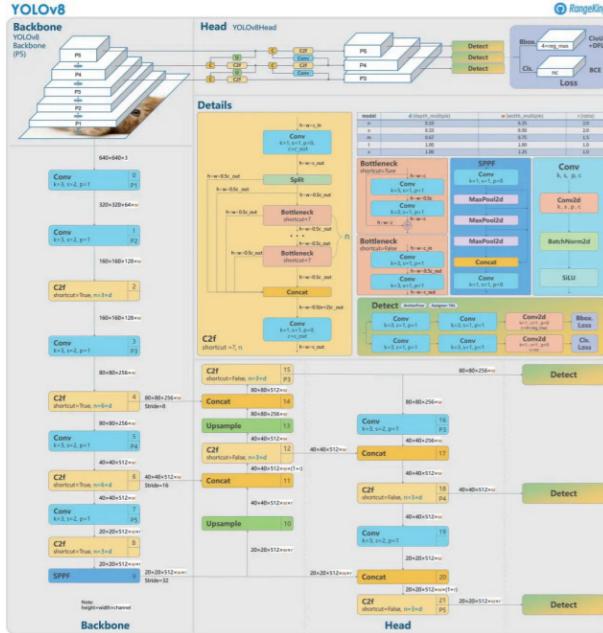


图 2 yolov8模型结构图

CSP的设计使得网络中的梯度和信息流可以在多个路径上流动,从而提高了特征的表达力和网络的学习效率。这种结构使得模型不仅能够捕捉到丰富的上下文信息,还能在处理高分辨率输入时维持高效率。

其Loss计算包括2个分支:分类和回归分支。

$$t = s^\alpha + u^\beta$$

1

s 是标注类别对应的预测分值, u 是预测框和GT框的IoU,两者相乘就可以衡量对齐程度。对于每一个GT,对所有的预测框基于GT类别对应分类分数,预测框与GT的IoU的加权得到一个关联分类以及回归的对齐分数alignment_metrics,对于每一个GT,直接基于alignメント_metrics对齐分数选取topK大的作为正样本。

分类分支依然采用 BCE Loss,回归分支需要和 Distribution Focal Loss 中提出的积分形式表示法绑定,因此使用了 Distribution Focal Loss,同时还使用了 CIoU Loss;

BCE(二元交叉熵)作为分类损失,每类别判断“是否为此类”,并输出置信度。

$$L = \frac{1}{N} \sum_i L_i = \frac{1}{N} \sum_i -[y_i \cdot \log(p_i) + (1-y_i) \cdot \log(1-p_i)]$$

2

CIoU边界框损失函数:IoU、中心点距离和长宽比这三个因素分别由方程中的各项表示。方程中涉及的关键参数在图3中进行了说明,其中p和g表示预测和实际情况,b、w和h分别是相应边界框的中心、宽度和高度。参数c是包围边界框的对角线(灰色虚线矩形)而ρ是欧氏距离。α是权重系数,α后的部分用于测量两个矩形框相对比例的一致性。

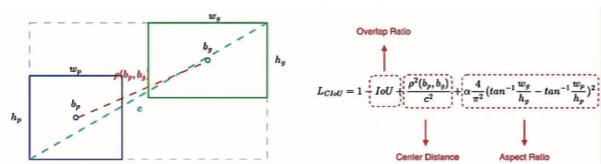


图 3 CIoU损失函数

另一个与边界框相关的损失函数是分布焦点损失(DFL)。DFL关注的是边界框回归的分布差异。YOLOv8中的网络不是直接预测边界框,而是预测边界框的概率分布。它旨在解决边界模糊或部分遮挡的挑战性对象。设计DFL使得网络聚焦于标签y附近的两个预测值 y_i 、 y_{i+1} 对应的概率: $S(i)$ 、 $S(i+1)$:

$$DFL(S_i, S_{i+1}) = -((y_{i+1} - y) \log(S_i) + (y - y_i) \log(S_{i+1}))$$

3

2.1.2 YOLOv8金字塔结构中P2层的使用

无人机目标检测多是小微目标检测。针对小微目标检测,常规的深度学习方法往往因为网络层数深,特征图在升维的过程中大小逐渐减小,使得小目标信息在越深的网络中逐渐难以被识别到,最后可能被网络丢弃,而yolov8的网络特征呈现金字塔结构,从p5到p1层特征图逐渐增大,p5层尺度为 20×20 ,p1层尺度为 320×320 ,yolov8的常规模型例如yolov8n,其采用了p3、p4、p5层作为最后的分类和边界框的预测特征,其未利用p1、p2这样的大型特征层,所以可以开启p2层特征,也作为预测的特征输入信息。

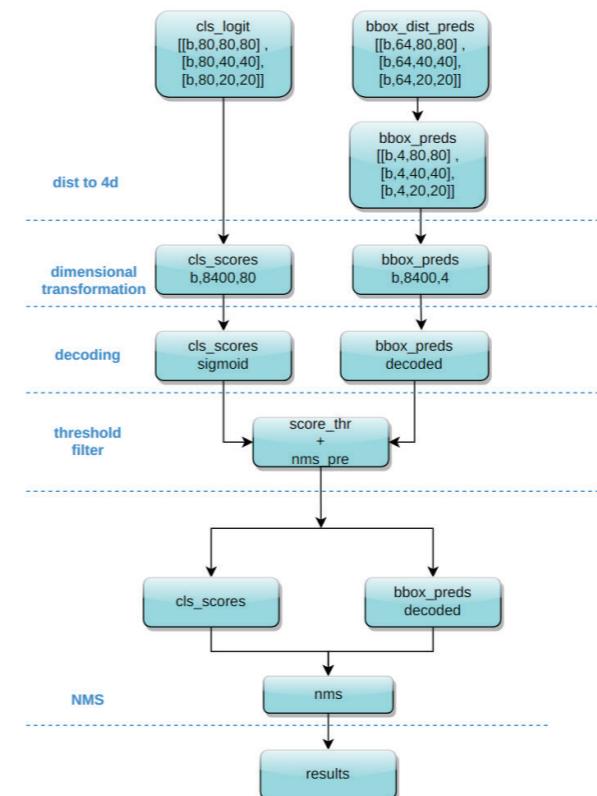


图 4 yolov8推理过程

推理过程如图4。图中是p3、p4、p5特征图的计算方式,就是将Head输出的bbox分支进行转换,利用Softmax和Conv计算将积分形式转换为4维bbox格式,我们的输出特征图尺度为 160×160 、 80×80 、 40×40 和 20×20 的四个特征图。Head部分输出分类和回归共7个尺度的特征图。

将4个不同尺度的类别预测分支、bbox预测分支进行拼接,并进行维度变换。为了后续方便处理,会将原先的通道维度置换到最后,类别预测分支和bbox预测分支shape分别为 $(b, 160 \times 160 + 80 \times 80 + 40 \times 40 + 20 \times 20, 80) = (b, 340000, 80)$, $(b, 34000, 4)$ 。分类预测分支进行Sigmoid计算,而bbox预测分支需要进行解码,还原为真实的原图解码后xyxy格式。随后遍历batch中的每张图,采用score_thr进行阈值过滤。在这过程中还需要考虑multi_label和nms_pre,确保过滤后的检测框数目不会多于nms_pre。基于前处理过程,将剩下的检测框还原到网络输出前的原图尺度,然后进行nms即可。最终输出的检测框不能多于max_per_img。

利用上yolov8的p2层特征,在无人机视角的目标检测上获得了比原有模型更好的效果。

2.1.3 visDrone数据集训练

无人机目标检测与追踪数据呈现小目标、多目标的特点,采用VisDrone数据集进行训练。VisDrone2019数据集由中国天津大学机器学习与数据挖掘实验室AISKY-EYE团队收集。基准数据集由288个视频片段组成,由261,908帧和10,209张静态图像组成,由各种无人机安装的摄像机捕获,涵盖了广泛的方面。包括位置(取自中国相距数千公里的14个不同城市)、环境(城市和乡村)、

物体(行人、车辆、自行车等)和密度(稀疏和拥挤的场景)。请注意,数据集是使用各种无人机平台(即不同型号的无人机)在不同场景、不同天气和照明条件下收集的。这些帧通过超过260万个经常感兴趣的目标(例如行人、汽车、自行车和三轮车)的边界框进行手动注释。为了更好地利用数据,还提供了一些重要的属性。包括场景可见性、对象类和遮挡。



图 5 Visdrone 数据集

其中,除了利用VisDrone数据集本身的目标检测数据(DET)部分外,本研究还使用了VisDrone数据的VIT视频追踪数据,每个文件里面都有视频数据sequences和标注数据annotations, sequences中有小文件夹,每个对应一段视频,其中有很多视频帧,在annotations中存储了对应的标注,一段视频对应一个txt标注。例如标注为:110,0,98,639,74,114,1,1,1,0,第一个数字代表frame_index,要和对应文件夹中的图片名对应上,第二个数字0代表target_id,不需要这个参数,舍去,然后98,639,74,114这四位数字代表<bbox_left>,<bbox_top>,<bbox_width>,<bbox_height>, 改为YOLO标注格式x,y,w,h,x,y是框的中心点坐标,w,h代表框的宽高,并且全部归一化。最后的yolo格式就五个参数:<类别><中心坐标x><中心坐标y><宽度><高度>。值得注意的一点是,我们舍去了原始标注中的0类别,所以只要1-11类,并且全部在类别代号上减去1,变为0-10类。

至此,我们构建了无人机训练用的数据集,总数量大

小为13GB,在NVIDIA A6000显卡上进行训练,模型采用yolov8n-p2,采用数据增强策略mosaic等,训练500个epoch至收敛。利用自行重新构建的visdrone目标检测数据集,模型在无人机视角的目标检测精度大大提高。

2.2 追踪器方法

2.2.1 bytetrack算法过程

基于tracking by detection方法进行目标追踪的方法,需要选择合适的追踪器,常见的跟在深度学习之后的检测器如BOT-SORT、bytetrack、iou tracker和Deep sort等,本文采用的是bytetrack,作为较新的追踪方法,利用YOLO 检测框的置信度和卡尔曼滤波器来优化目标跟踪。bytetrack 特别关注于维持低置信度目标的轨迹,从而显著提高了在复杂场景下的跟踪效果。

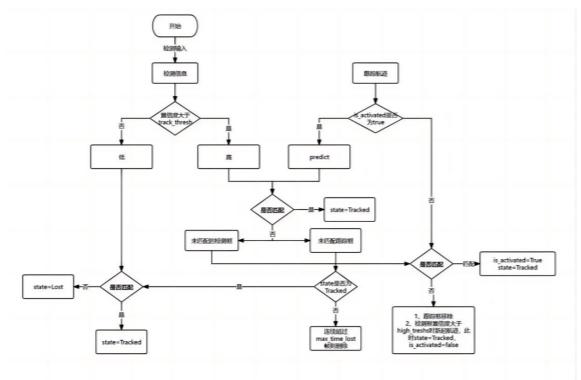


图 6 bytetrack 算法流程图

追踪器中主要部署以下几种目标状态:

激活状态:激活追踪了两帧以上的目标框(包括第一帧时目标框新建的轨迹);**未激活状态:**在视频中间出现的新轨迹,并且暂未匹配到轨迹的第二点;**新轨迹:**新生成的轨迹;**已追踪轨迹:**在前一帧成功追踪的轨迹;失

轨迹:在前n帧失去追踪的轨迹($n \leq 30$);**已删除轨迹:**在前n帧失去追踪的轨迹($n > 30$)。

算法流程可以参考图6。具体为:第一帧无任何轨迹,先将所有目标创建轨迹对象,都标注为已追踪;第二帧开始,逐步构建轨迹;1、对追踪轨迹(激活/未激活,两帧以上激活)和边界框(高分/低分,阈值0.5)进行分类;2、高分、激活状态的轨迹追踪:卡尔曼滤波预测边界框+匈牙利算法匹配边界框(匹配成功则追踪);3、低分、激活的轨迹再追踪:在把高置信度的目标匹配后,再对低置信度的目标算一次,假如有些目标只是被遮挡降分的话有用;4、对未激活的轨迹追踪:上一帧未激活,现在根据分值判断是否追踪;5、新建轨迹:新出现的目标,分配新轨迹和id。

2.2.2 卡尔曼滤波预测和更新目标位置

目标追踪中,我们不仅仅需要前一时刻的目标位置、速度等状态,还需要当前时刻的目标状态,将两者匹配才能够获得持续的追踪结果。但是单纯的将前后帧目标信息匹配会导致很多的误判,目标处于一种不被“监视”的状态,所以卡尔曼滤波就是负责监视目标的历史信息并且预测目标的当前信息。卡尔曼滤波器是一种高效的递归滤波器,它只需要当前的测量值和上一时刻的估计值,就可以对目标的状态进行预测和更新。其核心思想是将预测和测量结合起来,从而得到更准确的估计值。对于一个物体,如小车,采用卡尔曼滤波估计其位置,进行估计时,需要对几个变量进行定义和初始化,这里定义了六个变量的初始值:状态向量,状态向量协方差矩阵,状态向量协方差矩阵的噪声矩阵,动态转移矩阵,映射矩阵,测量值的协方差矩阵(假设小车是匀速运动,所以没有使用

控制矩阵和控制变量)。

使用具有等速运动和线性观测模型的标准卡尔曼滤波器进行目标追踪。目标的状态变量表示为 $x, y, a, h, vx, vy, va, vh$, 其中 x, y 表示目标框的中心坐标, a 表示目标框的高宽比, h 表示目标框的高,在卡尔曼滤波算法中也表示为 mean, vx, vy, va, vh 分别表示对应变量的速度,也称之为 covariance。

预测就是根据目标在 $t-1$ 时刻的状态来预测其在 t 时刻的状态。预测主要分为两部分。

$$\begin{cases} x = Fx \\ P = FPF^T + Q \end{cases}$$

4
5

在公式 4 中, x 为 track 在 $t-1$ 时刻的均值, F 称为状态转移矩阵,该公式预测 t 时刻的 x' 。在公式 5 中, P 为 track 在 $t-1$ 时刻的协方差, Q 为系统的噪声矩阵,代表整个系统的可靠程度,一般初始化为很小的值,该公式预测 t 时刻的 P' 。

更新是基于 t 时刻的检测结果(测量值)和根据跟踪轨迹预测目标在 t 时刻的状态(预测值),得到一个在 t 时刻更精确的结果(状态)。

$$\begin{cases} y = z - Hx' \\ S = HP'H^T + R \\ K = P'H^T S^{-1} \\ x = x' + Ky \\ P = (I - KH)P' \end{cases}$$

6
7
8
9
10

在公式 6 中, z 为 detection 的均值向量(均值向量的计算在 `initiate()` 函数中进行),不包含速度变化值,

即 $z=[x, y, a, h]$, H 称为测量矩阵, 它将 track 的均值向量 x' 映射到检测空间, 该公式计算 detection 和 track 的均值误差 y ; 在公式 7 中, R 为检测器的噪声矩阵, 它是一个 4×4 的对角矩阵, 对角线上的值分别为中心点两个坐标以及宽高的噪声, 以任意值初始化, 一般设置宽高的噪声大于中心点的噪声。该公式先将协方差矩阵 P' 映射到检测空间, 然后再加上噪声矩阵 R ; 在公式 8 中, 计算卡尔曼增益 K , 卡尔曼增益用于估计误差的重要程度; 在公式 9 和公式 10 中, 计算更新后的均值向量 x 和协方差矩阵 P 。

2.2.3 匈牙利算法进行前后帧匹配

利用卡尔曼滤波器预测后的目标检测框需要和检测到的实际目标检测框进行匹配, 以使得目标被分配到正确的追踪ID。用匈牙利算法求二分图的最大匹配数和最小点覆盖数。分为两组的数据, 前后两组直接可以相连, 但是同组直接不能相连。目标跟踪中, 视频前后帧中的检测框, 作为两组数据, 这两组数据之间存在匹配关系(同一个目标, 在前后帧中的检测框为一对), 而同一帧中的目标框经过非极大值抑制(NMS)之后, 我们认为他们都是不同的目标, 不存在匹配关系。显然 MOT 中前后帧中目标框的匹配问题就是一个求二分图的最大匹配数的问题(尽量匹配所有目标)。匈牙利算法需要输入一个代价矩阵(或者利益矩阵), 那么在目标跟踪问题中, 代价矩阵可以是从前后帧中提取的 ReID 特征的距离, 也可以是 IoU 的距离, 显然距离越小, 匹配的就越好, 所以整个问题就变成找到一组匹配, 使得总的代价最小。利用匈牙利算法实现前后帧目标检测框匹配, 将其分配为一个追踪目标。

2.2.4 ARIMA追踪目标轨迹预测

在实际追踪单个或者多个目标过程中, 会出现检目标丢失的情况, 除了增强检测器的性能, 还可以采用对目标历史进行记录, 并对后续出现的目标再次进行匹配的方法, 采用ARIMA根据追踪目标的历史轨迹进行建模, 预测后续1s-5s的目标轨迹, 根据预测轨迹重新匹配追踪目标, 可以使得整个无人机目标追踪系统的鲁棒性增加。

图7中绘制了ARIMA算法预测近似直线运动和弧线运动的状态, 可以看出其具有一定的预测能力, 对轨迹的预测有一定的倾向性。后续工作也可以继续围绕轨迹预测多尝试一些方案。

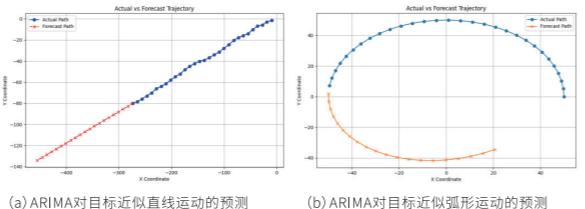


图7 ARIMA预测目标未来轨迹示意图

3.系统设计与实验

本文研究的无人机实时动态目标追踪系统流程图如图8所示, 主要包括视频流目标检测、追踪、轨迹预测三个部分, 综合考虑目标的位置和类别信息, 完成在无人机端的实时目标追踪任务。



图8 无人机目标检测追踪系统流程图

3.1 硬件框架

本文的测试实验计算平台Jetson xaiver nx边缘计算设备, 利用ROS将无人机目标追踪功能集成到设备上, 利用pytorch框架, 结合torchvision等深度学习库, 利用cuda和cudnn部署算法在GPU上进行运算, 利用tensorrt对算法部署进行加速, 采用fp16的精度模式, 在不降低过多精度的同时实现推理速度提升80%。



图9 边缘部署实验测试设备, Jetson xiaver nx和摄像头

3.2 软件框架

软件包含无人机目标追踪系统中摄像头rtsp数据的获取、追踪节点、追踪节点的控制服务、选择特定追踪目标的服务以及追踪信息的发布(包括特定目标的追踪信息以及多目标追踪信息)和读取功能等。Ros功能设计以及关键话题和服务展示在如图10的框架中。

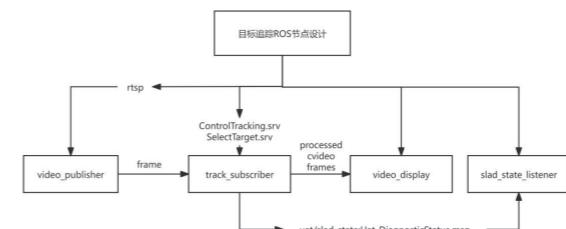


图10 目标追踪ros节点设计框架

3.3 实验结果

本节是无人机实时动态目标追踪系统的测试与实验。Tensorrt是NVIDIA用于深度学习推理的SDK, 可以在深度学习部署时优化运行时引擎, Xaiver NX支持度失小, 是最适合的精度模型。fp32、fp16、int8精度的模型。故对比了三者的运算效率, 并且列出了onnx基准推理速度在图11中, 综合考虑精度和运行效率, fp16精度的运行效率高、精度损失小, 是最适合的精度模型。

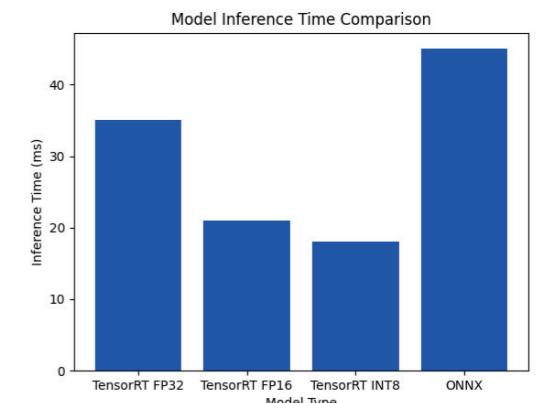


图11 不同数据精度的目标追踪模型在nx上的推理时间

图12展示了在利用原始yolov8模型和我们的解决方案下检测追踪视频帧的结果。可以看出, 我们的方案明显追踪到了更多更精细的目标, 包括小目标、多视角目标的识别都明显增强。



图12 原始模型和我们的追踪方案在视频帧中的追踪效果对比

为此我们还利用大疆mavic3采集了更多的测试视频。图13是利用我们的方案检测追踪的结果,对比可以看出,我方案对车辆、行人的识别效果更优异。



图13 利用大疆mavic3实采数据集测试检测追踪效果

4. 结论

本研究成功开发并实施了一种基于深度学习检测模型的无人机动态多目标实时追踪策略。该策略通过集成先进的目标检测和追踪技术,显著提升了无人机在复杂环境中的目标追踪性能。通过采用YOLOv8n-p2模型进行高效的多目标检测和ByteTrack算法优化追踪过程,我们的系统在处理小微目标、多目标、高速运动及目标失真等挑战时表现出色。

实验结果表明,该追踪系统在Jetson Xavier NX边缘计算设备上的部署,不仅保证了追踪的实时性,还通过使用FP16模式显著提高了推理速度,减少了精度损失。此外,系统通过ARIMA模型对丢失目标的轨迹进行预测和再追踪,增强实际追踪场景中算法有效性。

本研究的实现,为目前的无人机智能化提供了技术支持。未来,我们计划探索更多种类、更精确、更标准的数据集标注和训练,以进一步优化模型的泛化能力和追踪精度。同时,考虑到实际应用中对算法实时性的高要求,将继续研究更为高效的算法优化策略,以满足更广泛应用场景的需求。

综上所述,无人机动态多目标实时追踪系统具备较高的推广和应用价值。

参考文献

- [1] X. Gong, Q. Yao, M. Wang and Y. Lin, "A Deep Learning Approach for Oriented Electrical Equipment Detection in Thermal Images," in IEEE Access, vol. 6, pp. 41590-41597, 2018, 10.1109/ACCESS.2018.2859048.
- [2] Aharon N, Orfaig R, Bobrovsky B Z. BoT-SORT: Robust associations multi-pe. destrian tracking[J]. arxiv preprint arxiv:2206.14651, 2022.
- [3] Zhang Y, Sun P, Jiang Y, et al. Bytetrack: Multi-object tracking by associating every detection box[C]//European conference on computer vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 1-21.
- [4] Zeng F, Dong B, Zhang Y, et al. Motr: End-to-end multiple-object tracking with transformer[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 659-675.
- [5] A. Pujara and M. Bhamare, "DeepSORT: Real Time & Multi-Object Detection and Tracking with YOLO and TensorFlow," 2022 International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAIS), Trichy, India, 2022, pp. 456-460, doi:10.1109/ICAIS55157.2022.10011018.

Q100 农业无人机



航空发动机起发一体电机及控制系统关键

文/王晓伟 范欣林

(深圳联合飞机科技有限公司 深圳)

摘要:空天技术进入到大容量高密度发展阶段,在城市区间以有人直升机、无人直升机、倾转旋翼无人机、固定翼等为主的中大型载人载货航空器同样是空天技术的重要组成部分。本项目针对新一代飞行器发动机的起动和飞行需求,研制高功率密度的起发一体电机系统,实现发动机复杂动作运动下的平稳起动以及全机电力稳定输出。本系统具有高功率密度,高可靠性和多冗余性等优点,助于提高航空发动机配套核心零部件的自主研发水平。

关键词:空天技术;起发一体电机系统;高功率密度;高可靠性

Abstract:Space technology has entered the stage of large-capacity and high-density development. In the urban area, medium and large manned cargo aircraft, mainly manned helicopters, unmanned helicopters, tilt-rotor UAVs, fixed wings, etc., are also an important part of space technology. Aiming at the starting and flight requirements of a new generation of aircraft engines, this project develops a high-power density generator integrated motor system to achieve stable starting under complex engine movements and stable power output of the whole aircraft. This system has the advantages of high power density, high reliability and multiple redundancy, and improves the independent research and development level of supporting core components of aircraft engines.

Key Words:aerospace technology; Initiating integrated motor system; High power density; High reliability

1.研究目标

项目针对新一代飞行器航空发动机的起动和飞行需求,研制高功率密度的起发一体电机及控制系统,实现航空发动机复杂动作运动下的平稳起动以及全机电力稳定输出。研发吨级无人系统的起发一体电机与电控系统。

传统航空飞行器的起动机和发电机独立分布,空间占用率高、自重大、能效低;新一代倾转旋翼机的起发系统,通过提高电压、使用高磁通材料和宽禁带器件,达到更高的功率密度;通过冗余和优化设计,使得系统更加可靠;研究容错算法,使得系统运行更安全。



图1 倾转旋翼无人机

2.项目背景

2.1 产业现状和项目前景

深圳明确将空天产业纳入未来产业重点发展方向,重点扶持导航定位技术、空天装备制造等领域,推动航空航天材料及部件、无人机、卫星等技术创新,规划建设国内领先的空天技术产业研发与制造基地。还提出突破减速器、控制器、伺服系统等关键零部件和集成应用技术,扩展智能无人系统在电子信息制造、汽车、航空航天等高端制造应用场景,依托福田、南山、宝安、深汕等区及前海建设集聚区,打造智能无人系统产业技术创新、高端制造、集成应用示范区。

2023年4月24日,由深圳市科技创新委员会指导,哈工大(深圳)牵头组建的深圳市空天技术产业联盟正式成立。联盟将有效促进技术创新、成果转化和合作交流,推动深圳市空天技术产业快速发展。

2.2.面向经济、社会和科技发展需求

空天技术发展产业进行集群年营收达100亿元,空天技术经济产业集群培育20家以上专精特新企业,建设10个市级以上研究创新管理平台,以四大传统制造业片区和

国家高新区作为一个核心价值观承载区打造空天技术人才专业化园区,培育和引进一批产业链核心企业和上下游中小企业,形成影响企业通过技术集聚、人才集聚、创新教学资源集聚的规模化集群效应。

3.国内外现状

国外对起发一体电机及控制系统的研究较早,选择主要有三级式无刷同步电机、开关磁阻电机、感应电机。

三级无刷直流式起动/发电系统在飞行器上应用较广,美军的F-22战斗机,波音公司的B787客机,欧洲空客公司的A350和A380客机,中国商飞公司的C919客机以及中国新型歼击机均采用三级无刷直流式起动/发电系统。

针对三级无刷直流起动/发电系统,诸多国内外学者对起发一体机结构进行拓扑研究。文献提出了一种基于混合励磁的起动/发电系统,通过混合励磁,消除了旋转整流器,通过固定磁桥实现了无刷结构,提高了起动/发电系统的可靠性和效率。

又有文献研究了一种双馈感应电机作为飞行器起发一体机,仅利用液压恒速驱动器,实现起发一体机的变速运行,可大大降低功率转换器成本。开关磁阻电机由于其控制灵活、电气特性优良、适合高速高温运行,并且起动/发电功能切换方便,在航空航天的起动/发电系统中也得到广泛应用。后期F-35战机采用270V磁阻式起动发电系统。永磁同步电机逐渐也在飞行器系统中有所应用。永磁同步式起动/发电系统结构更加简单,只需双向功率变换器、控制器,无需励磁绕组,缩减了起动/发电系统体积,提

高了系统可靠性和功率密度。起动时,永磁同步起发一体机拖动发动机工作至某一临界转速,实现发动机点火启动;发电时,发动机拖动永磁同步起发一体机转动,输出电压为飞行器上的电气设备提供电源支持。

相比之下,我国的起发一体电机及控制系统技术相对落后,目前还处于样机研究阶段,没有实用化和产品化。国内开展此项技术研究的单位主要有哈尔滨工业大学、西北工业大学、南京航空航天大学、中航工业陕西航空电气有限责任公司等。南京航空航天大学开始研究起发一体电机及控制系统技术的时间较早,目前已取得了多项学术成果;西北工业大学与中航工业陕西航空电气有限责任公司通过多年合作,对航空三级式无刷同步电机起动控制系统进行了深入的研究,现已取得了包含电机起动控制、本体设计等在内的一系列阶段性成果。

哈尔滨工业大学设计了电机与飞轮整合为一体的永磁起发一体电机及控制系统,并设计了永磁无刷直流起发一体机的控制电路,应用于汽车14V低压直流电源系统。

西北工业大学刘卫国教授团队自2011年以来持续从事航空三级式起发一体电机及控制系统的研发,在该电机系统励磁策略、起动控制、系统建模、故障诊断、参数辨识、无位置传感器控制等方面已取得多项研究成果,与陕西航空电气有限责任公司合作成功研制了我国首台航空发动机用90kVA三级式起发一体电机控制及其控制器,完成了全部发动机台架试验,并已装备某新型飞机完成试飞。



图2 四种形式的起发电机对比

4. 研究内容与技术路线

4.1 产业现状和项目前景

航空发动机起发一体电机存在的问题总结。

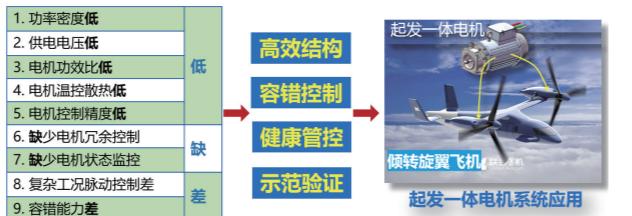


图3 航空发动机起发一体电机存在的问题总结

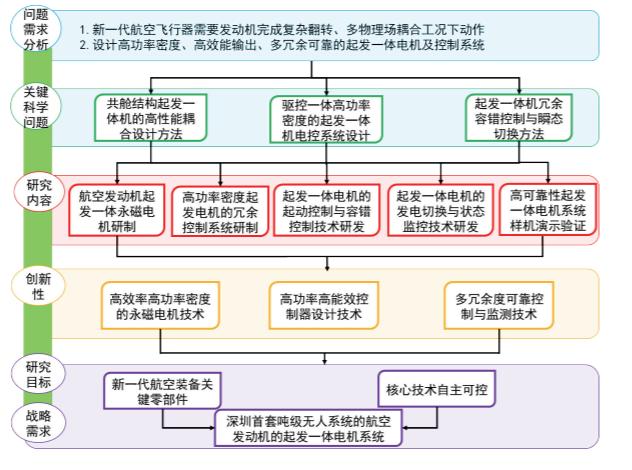


图4 项目研究路线图

4.2 需要突破的重大核心技术难题

新一代双旋翼飞行系统中发动机复杂变形动作下的起发一体电机系统的多功能传动、多场耦合设计、多目标优化和多冗余度控制的高可靠性系统实现问题。

如何能够设计出适应发动机复杂翻转动作下配合其工作的起发一体电机机构就是面临的首要问题;发动机工况和需求多变,如何合理优化设计出相互矛盾要求下的电机转子与线圈绕组参数是面临的具体挑战;飞行器飞行湍流带来的恶劣工况要求发电状态工作平稳和高效输出,是系统小自重约束下需要解决的技术难点;振动导致部分零件失效,如何提升整机的生存率是飞行器系统的最终落脚点;在连续动作翻转、多物理场耦合、频繁振动的状态下,如何设计出高功率密度、高效能输出、多冗余可靠的起发一体共轴电机系统是当今行业里面临的重大核心技术难题。

本项目应对上述挑战,研究起发一体永磁电机多场耦合设计与优化、高功率密度冗余控制系统、不依赖传感器的容错控制策略、起发一体电机的起发瞬态切换与状态监控、高可靠性样机演示验证等方法,突破共轴结构起发一体电机的高性能耦合设计方法、驱控一体高功率密度的电控系统设计、起发一体电机的冗余容错控制等关键技术,解决新一代双旋翼飞行器中发动机复杂变形动作下的起发一体电机系统的多功能传动、多场耦合设计、多目标优化和多冗余度控制的高可靠性问题。

(1) 高功率密度与高效能输出的起发一体电机

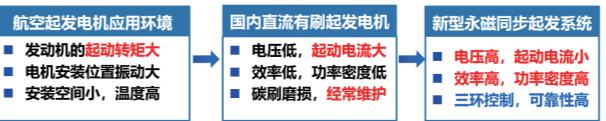


图5 起动发电机使用环境和电机类型对比

解决方案:研制面向多用途航空器设计需求,研制高功密和高效能的起发一体电机。

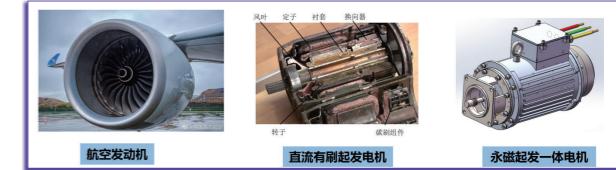


图6 直流有刷与项目电机对比

(2) 复杂工况下冗余与高可靠性控制

起动发电机的起动发电切换现状,技术痛点和应用风险



图7 技术痛点和应用风险

解决方案:研究针对起发一体电机控制系统复杂工况,开发冗余闭环控制和全寿命健康监控

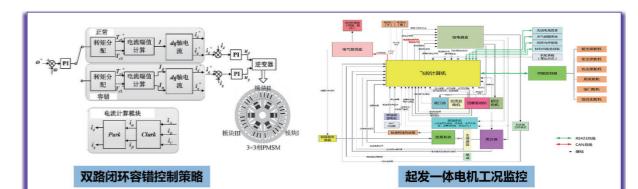


图8 控制策略与工况监控

4.3 拟解决的关键技术问题

(1) 共轴结构起发一体电机的高性能耦合设计方法

面向发动机复杂动作下的共轴约束条件,研究起发一体电机及控制系统的电-磁-热多场耦合下的多目标函数优化设计方法,突破低自重、小电流、大力矩输出的结构-材料协同结构设计技术,实现发动机复杂动作下的高性能起动和飞行中高稳定发电。

(2) 驱控一体高功率密度的起发机电控系统设计
面向当今起动和发电驱动系统独立设计的问题, 研究起动和发电一体化板载控制解决方案, 使用高性能功率器件, 研究板载功率器件的温升和散热规律, 设计共享散热和风冷设计抑制温升, 提升控制器在恶劣工况下的能效输出, 减小系统重量, 提升效能。

(3) 起发一体电机的冗余容错控制与瞬态切换方法
发动机系统工况恶劣, 为提高故障情况下的生存率, 高实时性的转子参数估计方法, 通过闭环容错自适应控制器抑制力矩的脉动波动。研究正电压的功率调节和能效输出方法, 对起动和发电过程对PWM变流器进行逆变和整流控制, 保证电气系统平稳的电能输出。

4.4 项目主要研究内容

(1) 航空发动机起发一体永磁电机设计与优化

设计耐高压、低漏磁转子结构, 采用铁基非晶材料, 提高效率; 通过设计独特的冷却风道, 提高散热能力, 提升功率密度; 通过转子位置精确控制, 降低起动电流, 解决航空发动机起发一体电机低功效和高热耗问题。

飞行器用起发一体机要兼顾起动和发电双重功能, 因此其设计方法与普通单一功能的电机有所不同。起动时, 起发一体机带动发动机点火启动, 此时要求较大的瞬时转矩输出能力; 发电时, 要求在较宽的转速范围内具有良好的稳压发电能力。对起发一体机不同运行工况分别进行电机设计时, 其电磁设计方案会产生矛盾, 平衡起动工况和发电工况的电机特性需求是起发一体机设计的关键问题。着重解决永磁同步起发一体机设计过程中的主要矛盾与关键问题, 研究起发一体机的设计方法, 根据飞行器运行工况, 设计适应发动机工况的起发一体电机, 结合电-磁-热等物理场对关键零部件进行设计和仿真优化分析。

图9 永磁电机设计与优化

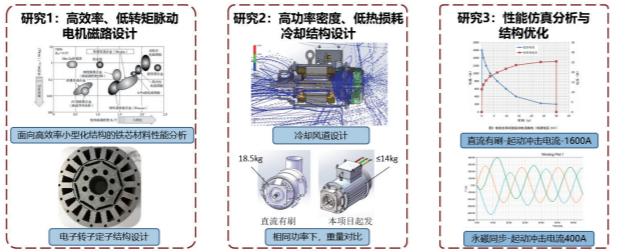


图9 永磁电机设计与优化

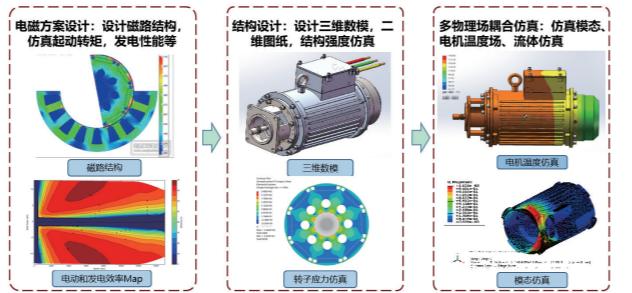


图10 电机电磁、结构、设计和仿真

(2) 高功率密度起发电机的冗余控制系统设计

研究碳化硅器件的并行输出特性并优化, 设计高功率密度的冗余通路控制器系统, 实现高效能稳定输出, 解决复杂环境起发电机单一控制回路故障引发系统失效问题。

控制器方案采用多冗余软硬件设计, 实现三环电机控制, 即位置环、速度环和电流环的闭环高速伺服控制, 并对关键控制参数进行多冗余采样设计。研究起发一体电机转速的控制, 完成高精度旋转变压器高速参数采样。研究软件解码和硬件解码的冗余感知方法, 保证其中一种方案失效后, 电机控制器仍能正常运行; 控制软件采用无感和有感两种方案, 可在有感传感器失效后, 软件可以进行无位置传感器的控制, 保证起发一体电机及控制系

统的冗余度和安全运行。研究高功率密度的控制器设计方案, 研究碳化硅技术的高性能MOSFET器件的并行输出特性, 实现高压低电流下的额定力矩输出控制, 通过合理设计, 将散热结构与温控方案合理优化, 减少控制器的体积, 提高发动机的性能输出, 降低起发电机系统的自身负载。

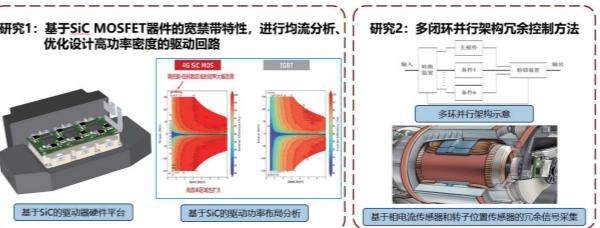


图11 SIC与IGBT高效区对比

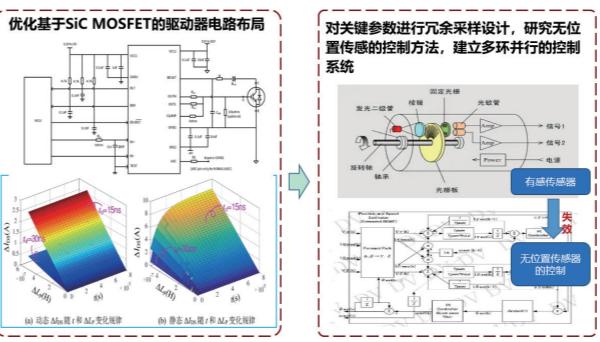


图12 SIC 驱动与冗余设计

(3) 起发一体电机的起动控制与容错控制策略

研究基于谐波空间的最大转矩/电流比起动控制策略, 以及单一相电流传感器故障时容错控制方法, 重构故障电流, 抑制谐波转矩脉动, 改善电机控制性能, 解决起发一体电机谐波脉动和单相故障导致控制失稳的问题。

起发一体电机的控制策略是起发一体电机及控制系统能否稳定运行关键。根据飞行器运行工况, 起发一体机起动时要求具有较大的启动转矩, 发电时则要求在宽泛的

转速范围内稳压发电。因此不同工况下设计合适的控制策略有助于起发一体电机及控制系统稳定运行。针对本项目设计的起发一体机, 研究矢量控制方法对起发一体机的电动工况和发电工况分别进行控制策略设计, 设计控制器并对其仿真分析; 研究无传感器的位置控制技术, 研究高精度高实时性的转子电机控制方法, 搭建自适应控制器对参数模型进行估计预测与力矩输出的脉动抑制。通过研究的闭环容错控制策略, 可将故障后的转矩脉动控制在很小的波动范围。实现航空发动机的高可靠性工作, 提高故障生存率。

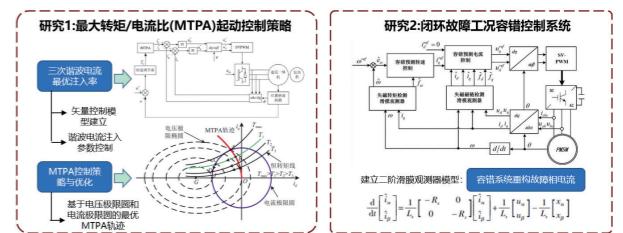


图13 起动控制策略与容错控制策略

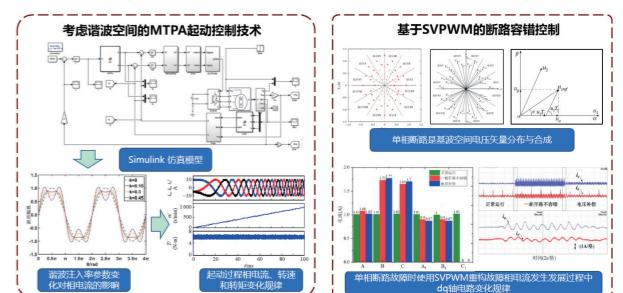


图14 起动控制和断路容错控制

(4) 起发一体电机的发电切换与状态监控研究

研究起动/发电集成系统多通道发电切换实现方法, 建立多模态信息融合起发一体电机状态监控和管理系统, 改善起/发切换瞬态冲击和实现关键部件全寿命健康管理, 解决起发一体电机发电切换脉动和关键元部件工况实时管控的问题。

起发一体电机的起动工况和发电工况是两种独立状态的控制策略,还没有考虑起动工况向发电工况的切换瞬态过程。转子平稳运动与过渡是起发一体电机及控制系统长时间稳定运行的关键。依据本项目起发一体机的结构特点,将研究起发一体电机及控制系统双通道电路和单通道电路,分析切换过程中起发一体机与功率变换器的运行特性,结合离线数据,研究正电压的功率调节和能效输出方法。研究起动和发电过程对PWM变流器进行逆变和整流控制,保证电气系统平稳的电能输出。为保证起发一体电机及控制系统的可靠性,对起发一体电机及控制系统进行全寿命周期监控和评估,控制器内部设计一套参数采集系统,采集每个SiC MOSFET器件的温升以及其他各个单元模块的关键器件的温升情况,采集控制器的振动数据与温湿度等影响器件运行的寿命数据,并进行数据分析,对起发一体电机的关键零部件进行有效监测。

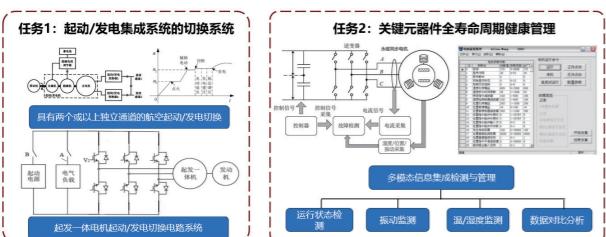


图15 起发切换与健康管理



图16 工况监控与状态监控

(5) 高可靠性起发一体电机系统样机演示验证
完成电机和控制器的组装,测试装配工艺和结构的可靠性;优化控制器布局设置,降低干扰故障,研制出高可靠性起发一体电机系统,并进行示范验证,解决起发一体电机整体高可靠性验证和航空器应用示范的问题。

针对吨级无人系统的航空发动机的工况和需求,设计一种共轴耦合起发一体电机系统,设计关键结构零部件,优化材料与材质的选配,测试电机的输出性能,实现低自重高力矩的输出。统筹考虑起动与发电阶段的力矩与转速要求,建立系统工作模型和工作约束条件,对电机的关键参数进行多参数寻优,给出符合整机工况的参数组合。搭建起发一体电机控制系统,针对高振动、高压、大电流等极端工作环境,使用最近技术的功率器件、铁芯材料以及整流技术,提升系统的功率密度。优化控制器内的器件布局设置,有效降低温升,提高控制器的整体力矩电流实时控制性能以及参数信息能力;通过电机结构与控制器端的结构设计和参数寻优,研制出面向新一代双旋翼无人系统的高功率密度起发一体电机系统,并进行演示验证。

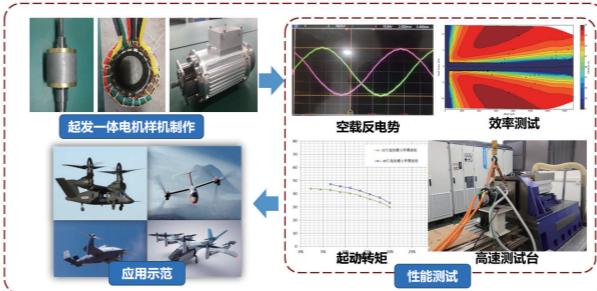


图18 系统测试

5. 结论

通过研究航空发动机起发一体永磁电机设计与优化、高功率密度起发电机的冗余控制系统设计、起发一体电机的起动控制与容错控制策略、起发一体电机的发电切换与状态监控研究、高可靠性起发一体电机系统样机演示验证等内容,突破共轴结构起发一体电机的高性能耦合设计方法、驱动一体高功率密度的起发电机电控系统设计、起发一体电机的冗余容错控制与瞬态切换方法等关键技术,解决新一代复杂构型航空旋翼机发动机的复杂动作下的稳定起动与平稳电力供应问题,实现发动机核心零部件的自主研发问题。

研发的起发电机可应用在吨级无人机以及倾转旋翼无人飞机,助力新型双旋翼飞机的成功研制,助力空天行业的高质量发展。



图17 起发一体电机控制系统集成

参考文献

- [1] Noland J K, et al. High-Power Machines and Starter-Generator Topologies for More Electric Aircraft: A Technology Outlook. IEEE Access, 2020, 08: 130104-130123.
- [2] Tom F, et al. The Doubly Fed Induction Machine as an Aero Generator. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(04): 3462-3471.
- [3] Song SJ, et al. Thermal analysis of a 30kW Switched Reluctance Starter/Generator system used in aircraft. Int. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Portugal, 2009, 03: 331-336.
- [4] Emadi K, et al. Aircraft power systems: technology, state of the art, and future trends. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(01): 28-32.
- [5] Bozhko S, et al. Flux-Weakening Control of Electric Starter-Generator Based on Permanent-Magnet Machine. IEEE Trans. on Transportation Electrification, 2017, 03(04): 864-877.

基于FlightLab的共轴双旋翼直升机建模和仿真

文/岳杰顺 邢立业

(深圳联合飞机科技有限公司 深圳)

摘要:本文基于FlightLab建立了样机TD550飞行力学模型并进行了配平计算。与试飞数据的对比可以看出,计算获得的操纵量和直升机姿态角在整个试飞速度范围内误差量比较小,证明了本文动力学数值方法和建立的模型的准确性。进一步计算了样机在不同海拔、重量情况下的配平结果。对以上影响因素进行了分析。给操纵机构和控制系统的设计提供了依据。

关键词:FlightLab;飞行力学;配平计算;姿态角;控制系统

Abstract: This paper established the flight dynamics model of the sample helicopter TD550 based on FlightLab and carried out trimming calculations. The comparison with the flight test data shows that the calculated control quantities and helicopter attitude angles have relatively small errors within the entire flight speed range, proving the accuracy of the numerical dynamics method and the established model in this paper. Further calculations were made on the trimming results of the sample aircraft under different altitudes and weights conditions. These influencing factors were analyzed. This provides a basis for the design of the control mechanism and control system.

Key Words:FlightLab; Flight dynamics; Trimming; Attitude angles; Control system

引言

在直升机领域中,出于不同的研究目的,国内外已经推导出多种直升机动力学建模方式。例如动量滑流理论,建模效率高,成本低,但是准确度一般,只能用于初步仿真和验证;叶素积分理论,模型置信度较高,仿真效果较好,但建模过程较复杂。

此外,由于计算机技术的迅速发展,出现了许多系列

的直升机仿真模型,如 TMAN、ARMCOP 系列、FlightLab 和 GENHEL 系列等。其中FlightLab 模型的仿真结果与试飞数据十分接近,模型置信度较高,并且可以用于实时仿真。

2002 年美国的 G.A.Ouellette 使用 FlightLab 搭建了 OH-6A 小马直升机动力学模型,效果较好,可以用于实时仿真,且可结合直升机飞行品质 ADS-33 评估模型。此外,美国先进旋翼飞行器技术公司专门使用FlightLab

软件搭建了 UH-60 系列的动力学模型(因为 UH-60 是目前直升机领域里气动数据最全和模型验证应用最多的机型)。最终 FlightLab 搭建的 UH-60 动力学模型的仿真数据和试飞数据十分相近。这些成功的案例充分验证了 FlightLab 强大的专业化建模功能,不仅可以应用于多种直升机机型,而且模型置信度均较高,仿真效果也较好。

本文简述了基于FlightLab建立样机TD550飞行力学模型的方法及模型的配平计算结果。与试飞数据的对比可以看出,计算获得的操纵量和直升机姿态角在整个试飞速度范围内误差量比较小,证明了动力学数值方法和建立的模型的准确性。进一步计算了样机在不同海拔、重量重心情况下的配平结果。对以上影响因素进行了分析。

1. 数值方法

为了能较合理地模拟桨叶绕流,1878年 W .Froude 首先提出叶素理论概念,将桨叶分为有限个微小段(称为叶素),然后根据翼型理论计算每一个叶素上的气动力,并认为绕过每个叶素的气流是二维的,因此叶素之间互不影响,相当于假定螺旋桨气流无径向流动(也就是通过桨盘的气流无滑流收缩),桨叶之间也无干涉,最后沿径向求桨叶上的总气动力(如图1)。与动量理论仅处理气流轴向流动相比,叶素理论可以算出作用在桨叶上的气动力,从而积分计算出整个旋翼的气动力。

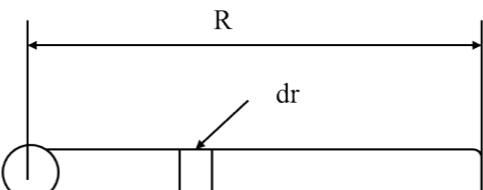


图1 叶素理论示意图

对于爬升或下降的旋翼,具有垂向运动速度,旋翼附近的诱导速度,则桨叶叶素处的当地攻角为:

$$\alpha_i = \delta + \gamma - \arctan\left(\frac{V_y + V_i}{V_{dr}}\right)$$

δ 为总角距, γ 为桨叶扭转角。通过查表可以得到叶素翼型的升力系数 $C_l(\alpha_i)$ 和阻力系数 $C_d(\alpha_i)$, 通过沿整个桨叶积分可以得到桨叶受到的力和扭矩。

2. 飞行力学建模

2.1 样机参数

样机模型主要参数如下表:

表 1 样机模型主要参数

建模参数	参数值/选项	备注
旋翼构型	共轴无铰式旋翼	
旋翼旋转方向	上旋翼:逆时针 下旋翼:顺时针	俯视
上下旋翼间距	h=544mm	
桨叶片数	上、下各2	
桨尖损失系数	0.95	
旋翼额定转速	580 rpm	
旋翼半径	3.2 meter	
倾斜盘相位角	-27eg	与提前操纵角有关
桨毂半径	300mm	
桨叶弦长	c=175mm	

2.2 Flightlab建模

本文可以构建出样机的非线性动力学模型,如图2。在建模过程还需考虑直升机部件之间的气动干扰。由于样例无人直升机是小型直升机,因此气动干扰问题主要集中在旋翼尾迹对机身等的下洗干扰以及机身对旋翼气

流的阻塞效应，忽略掉机身、平尾、垂尾等部件之间的气动干扰。

此外，由于直升机的结构特性和气动特性均十分复杂，对具体各部件进行建模时，还需要结合建模目的和样例无人直升机的自身特性，对部件的气动特性进行抽象、概括，通过仿真或试验建立数据库。

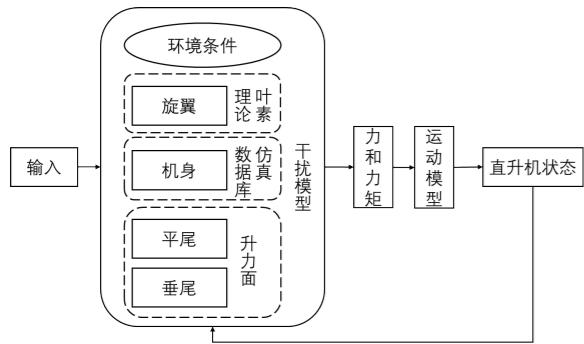


图2 样例无人直升机flightlab建模结构

具体模型设置如下：

(1) 旋翼模型

采用叶素旋翼模型。

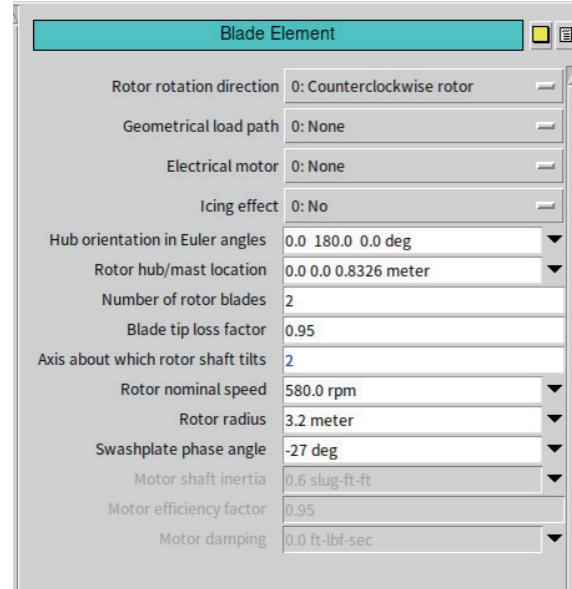


图3 旋翼叶素模型

(2) 桨叶结构模型

采用叶素方法的铰接旋翼模型，模型参数如下图。

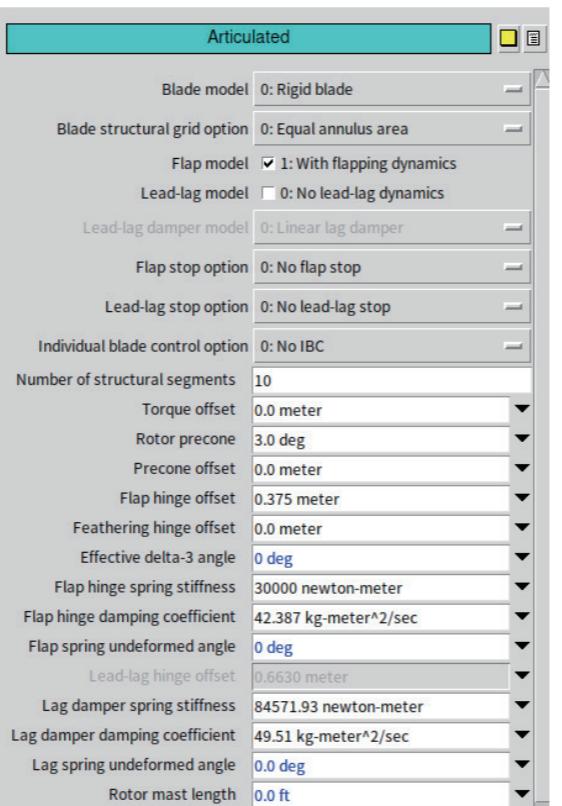


图4 铰接桨叶参数

(3) 旋翼气动模型

气动模型用于旋翼气动力计算，可选项包括线性非定常、准定常、非线性非定常、动态失速(包括Leishman-Beddoes模型和ONERA模型)以及预定环量模型，这里采用的是准定常模型。

翼型气动采用二维非均匀气动数据表的方式进行插值计算。

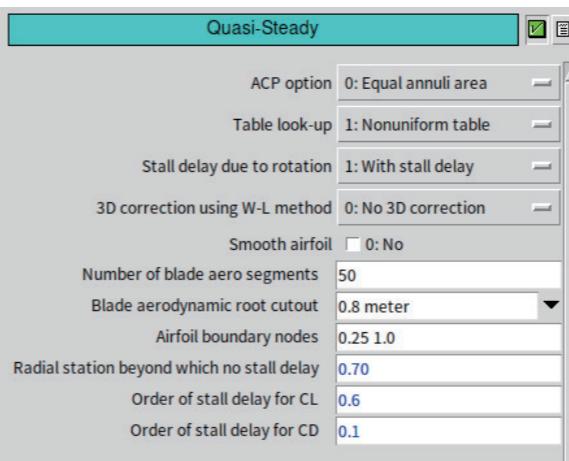


图5 准定常气动模型

(4) 诱导速度模型

诱导速度采用Peters-He六状态入流模型。

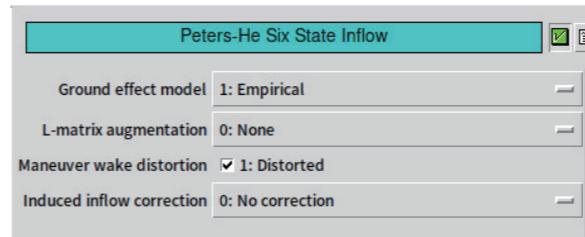


图6 Peters-He六状态入流模型

(5) 气动干扰模型

采用Peters-He六状态气动干扰模型，考虑对平垂尾和旋翼间的气动干扰。

(6) 机身模型

采用6自由度刚体模型进行机身建模，机身气动力采用非均匀气动数据表进行建模，目前机身气动数据来源于CFD计算结果。

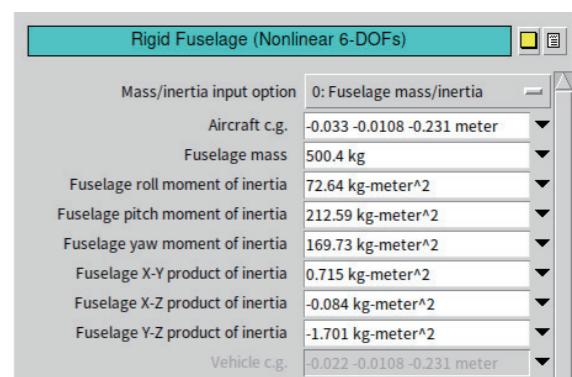


图7 六自由度刚体机身模型

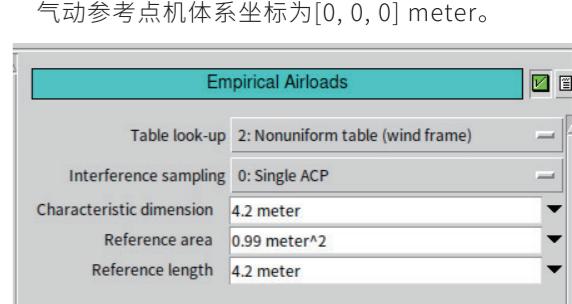


图8 机身边气动模型

(7) 平垂尾模型

采用二维数据气动面进行平垂尾建模。

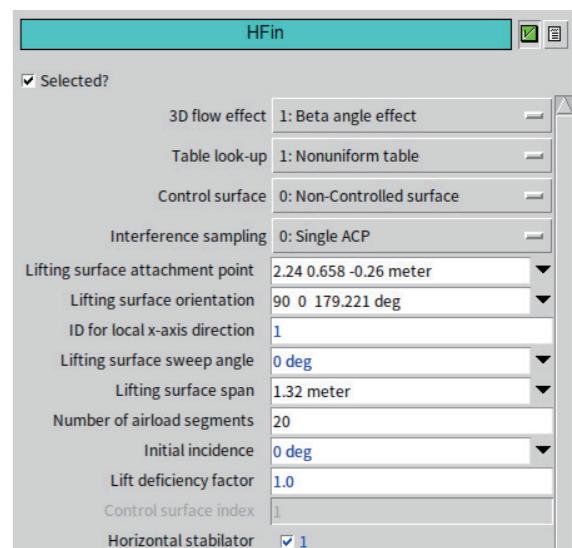


图9 气动面模型

(8) 动力系统模型

采用理想发动机模型, 旋翼转速恒定, 且不对输出功率做任何限制。

3. 方法验证

计算条件: 气压高度1200m, 大气温度0°C, 起飞重量525kg, 重心主轴前25mm, 旋翼提前操纵角63°。

试飞数据: 气压高度在1150m~1260m区间, 大气温度在-9~15°C区间, 起飞重量522~529kg, 重心主轴前25mm, 旋翼提前操纵角63°。

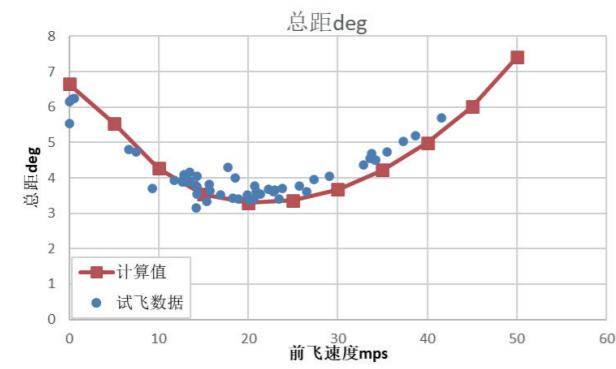


图10 机身气动模型

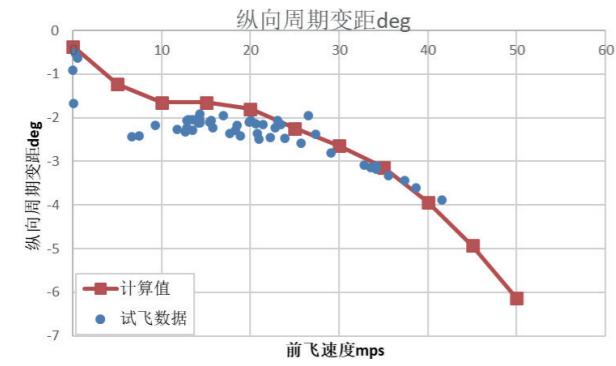


图11 纵向操纵量

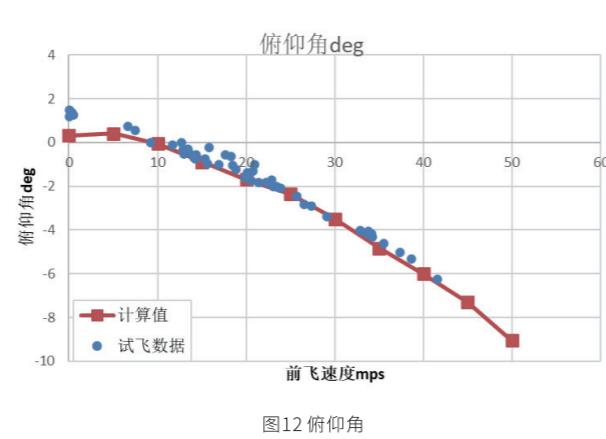


图12 俯仰角

计算得到的总距操纵量、纵向操纵量、俯仰角, 分别如图10~12所示。可以看出计算获得的操纵量和直升机姿态角在整个试飞速度范围内都比较符合试飞数据, 误差量比较小, 证明了本文的数值方法和建立的模型的准确性。

4. 计算结果

进一步计算了样机在不同海拔、重量重心情况下的配平结果。对以上影响因素进行了分析。

4.1 海拔影响

以起飞重量550kg、重心主轴前0.08m为例说明海拔对配平的影响。由图中结果可知, 总距、纵向、横向和航向操纵量随海拔上升而提高, 对总距和纵向操纵的影响尤为明显。

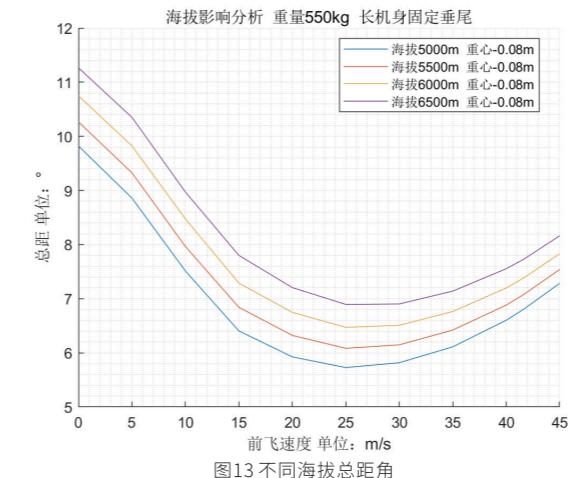


图13 不同海拔总距角

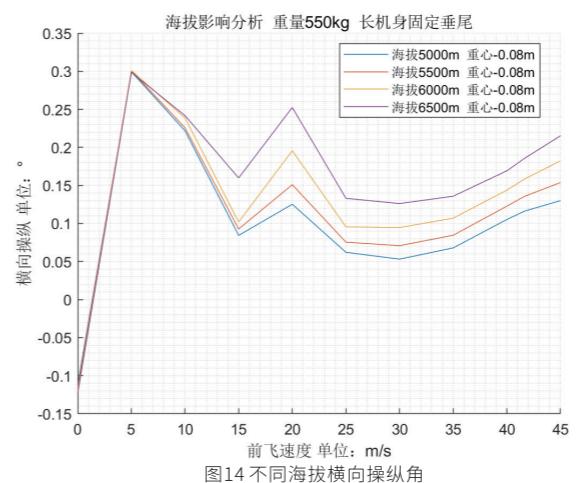


图14 不同海拔横向操纵量

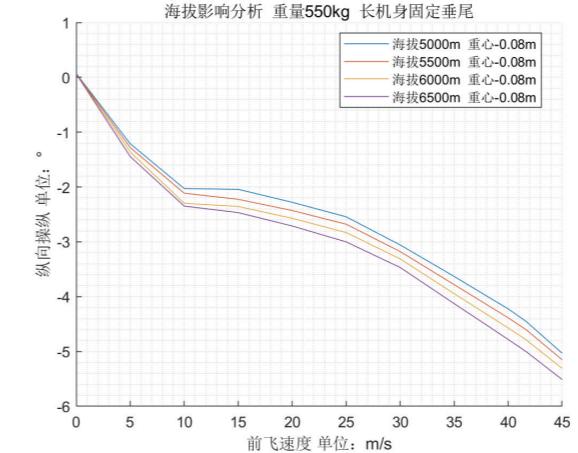


图15 不同海拔纵向操纵量

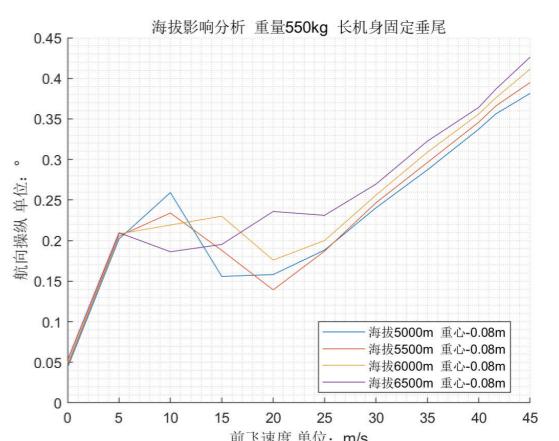


图16 不同海拔航向操纵角

4.2 重量影响

以海拔6500m、重心主轴前0.08m为例说明飞行重量对配平的影响。由图中结果可知, 随重量增大, 旋翼的操纵量有所增大, 对总距、纵向操纵的影响尤为明显。

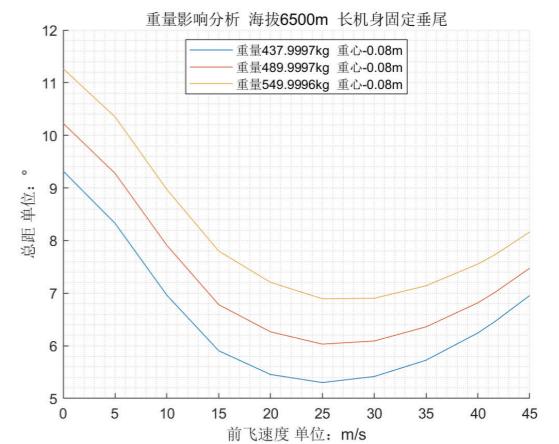


图17 不同海拔总距角

— Composite Products

5. 结论

本文基于FlightLab建立了样机TD550飞行力学模型的方法及模型的配平计算结果。与试飞数据的对比可以看出,计算获得的操纵量和直升机姿态角在整个试飞速度范围内误差量比较小,证明了动力学数值方法和建立的模型的准确性。

进一步计算了样机在不同海拔、重量重心情况下的配平结果。对以上影响因素进行了分析。总距、纵向、横向和航向操纵量随海拔上升而提高,对总距和纵向操纵的影响尤为明显。随重量增大,旋翼的操纵量有所增大,对总距、纵向操纵的影响尤为明显。

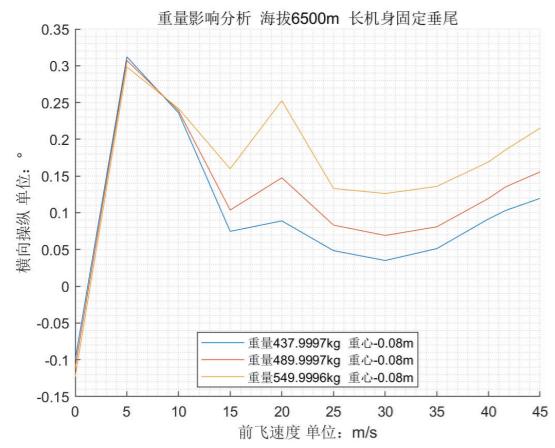


图18 不同海拔横向操纵角

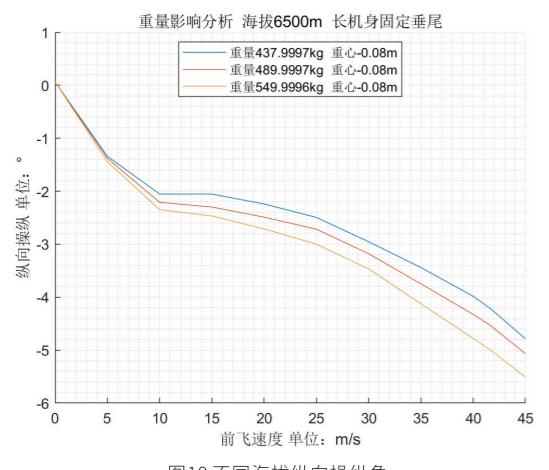


图19 不同海拔纵向操纵角

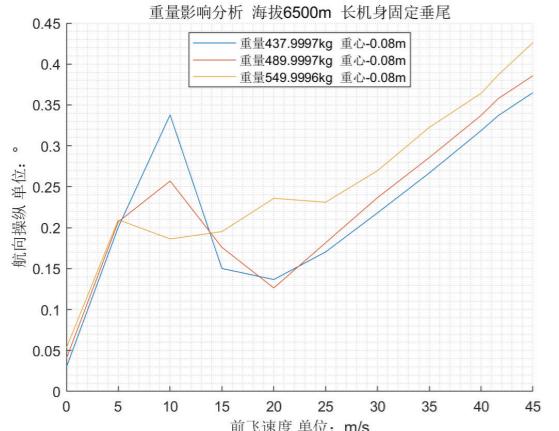


图20 不同海拔航向操纵角

参考文献

- [1]王适存.直升机空气动力学.南京:航空专业教材编审组,1985.
- [2]陈仁良.直升机飞行动力学建模及机动性研究,[D].南京:南京航空航天大学,1998,1~2,19~22.
- [3]Gregory A. Ouellette, Modeling the OH-6A using FlightLab and helicopter simulator considerations, MASTER Thesis, Monterey, CA Naval Postgraduate School,2002
- [4]C.J.He. FlightLab theory manual, Mountain View CA: Advanced Rotorcraft Technology Inc,2004.
- [5]宋于波.基于FlightLab的无人直升机建模与仿真技术研究[D].南京航空航天大学,2011.

复合材料产品

联合飞机深耕航空航天复合材料领域研究,致力于从材料、工艺、设计、验证、使用维护五个维度控制成本,进而降低产品全寿命周期费用。

现具有丰富的复合大、中、小型机体结构设计经验,具备结合产品需求和特点提供包括结构设计方案论证、详细设计、尺寸优化、铺层优化、工艺优化、试验验证、动静疲劳强度分析等专业的全复合材料结构方案。



>>复材航空部件产品

轻量化、高性能、一体化

复合材料的高比强度、高比刚度、可设计性能、抗疲劳性和耐腐蚀性好等特点,被越来越广泛应用于各类航空飞行器,极大促进了飞行器的轻量化、高性能化、结构功能一体化发展。尤其复合材料的共固化、共胶接、二次胶接或液体成型等技术手段,极大减少了零件和紧固件数目,因而在机身和机翼部件制造中得到了大量运用。

>>复材弹体领域产品

轻量化、低成本、耐高温

据分析,火箭等航空器及其发动机质量每减少1kg,就可让火箭射程增加20km,而复合材料的结构轻量化、低成本、高防热和耐高温性能优势,使得复合材料在航空市场、火箭领域有很好的市场需求,可以广泛应用于弹体、弹翼、尾翼、雷达罩、进气道等部件制造。

>>复材定制零部件产品

先进性、专业化、定制化

碳纤维复合材料是先进复合材的典型代表,具有强度大、重量轻、耐腐蚀、耐疲劳、蠕变小等性能优势,成为传统金属的理想替代材料,适用于多种机械设备的零部件,进而发挥低能耗、便捷、寿命长、承载性好等特殊应用价值。

部件产品



复材航空部件产品
Composite Aviation Components



复材弹体领域产品
Composite Ammunition Body Products



复材定制零部件产品
Tailored Composite Parts and Components

泡沫夹芯复合材料结构修理后低速冲击性能仿真

文/ 聂国际

(北京中航智科技有限公司 北京)

摘要:本课题研究的是泡沫夹芯复合材料结构修理后的低速冲击性能。泡沫夹芯复合材料具有显著的减重作用,而且几乎没有孔洞,防水性能良好,因此在航空航天领域得到广泛应用。而在使用和维护中经常会发生低速冲击损伤。通过研究玻璃纤维板泡沫夹芯复合材料受到低速冲击以及被破坏再修补之后的力学性能,对修复前后的数据进行对比,分析此种材料修复后强化或者劣化的程度,进而对此类材料的修理性能提供合理的参考。

关键词:泡沫夹芯复合材料;损伤修复;低速冲击;仿真模拟

Abstract: This topic is to study the low speed impact performance of the foam sandwich composite material structure after repair. The foam sandwich composite material has significant weight reduction effect, and almost no holes, so it is widely used in the aerospace field because of its good waterproof performance. Low speed impact damage often occurs in use and maintenance. The mechanical properties of fiberboard foam sandwich composites were studied after being damaged and repaired by low speed impact. By comparing the data before and after repair, the degree of strengthening or deterioration of such materials after repair can be analyzed, and a reasonable reference can be provided for the repair performance of such materials.

Key Words:Foam sandwich composite material;Low speed impact;simulation

1. 泡沫夹芯结构及修补建模

本实验的建模包括冲击冲头,泡沫夹芯板以及损伤后再修复的建模过程,材料的尺寸以及属性已知(参考测量纤维增强聚合物基复合材料在落锤冲击事件下的抗损伤性的标准试验方法),冲头的半径为8mm;泡沫夹芯复合材料的尺寸为125mm*75mm,底层和顶层面板的厚

度为 $2 \times 0.75\text{mm}$;泡沫夹芯材料的厚度为5mm。因为材料为各向同性材料,为节省算力和时间,只取用原面板的四分之一大小进行实验,即只取用以观察原设计尺寸的四分之一,由于材料各向同性,冲击和受力完全对称,所以不会对实验结果的准确性造成影响。

1.1 泡沫夹芯结构建模

1.1.1 创建部件及划分网格

首先创建冲头和泡沫夹芯板的中心对称的1/4部分,冲头形状为半径8mm,长度23mm的弹头形状。泡沫夹芯板采用层层铺叠的形式。创建底层面板作为铺层的参考面,其长为62.5mm,宽为37.5mm。

划分网格,拆分草图为内径8mm外径10mm的圆环,此举同样是为了节省算力,根据设计的受力情况合理划分网格密度,由冲击点到边缘逐渐稀疏。然后为边布种。圆环以内的部分近似单元尺寸设置为0.5,圆环以外的部分为10。指派圆环网格控制属性为四边形结构,圆环以外的部分为自由四边形。设置完成后为部件划分网格,如图1-1所示。

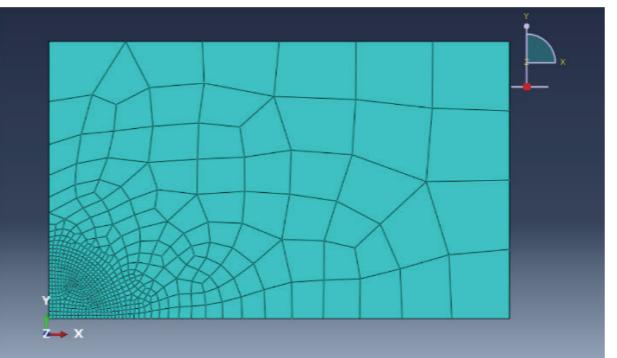


图1-1 夹芯板网格划分

1.1.2 创建网格部件并设置单元类型

编辑网格,按角度创建实体层。泡沫夹芯复合材料结构总体分为三层,底层和顶层都是0.75mm厚的复合材料夹板,夹芯为5mm厚的泡沫材料。为了更好地解析受到低速冲击的过程,将底层和顶层夹板各自分为0.25mm的三层,一共六层。而夹芯分为0.5mm厚的十层。即整个泡沫夹芯结构一共分为16层,在底层参考面的基础上从下

至上层层铺叠而成。过程中删除基础壳单元并为每一部分(夹芯和夹板)创建集合,为每层分解集。创建完成后如图1-2所示。

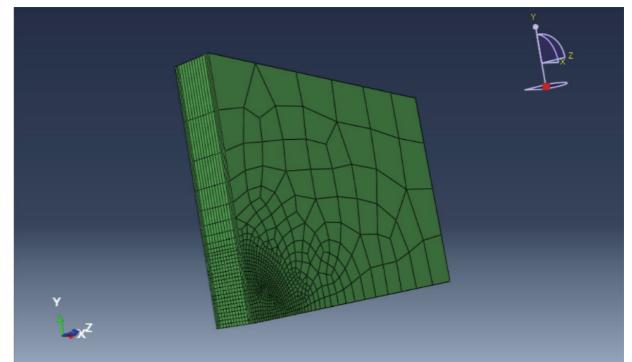


图1-2 夹芯板网格铺层部件

设置单元类型。选用Explicit单元库,沙漏控制改为松弛刚度,其他均为默认值。

1.1.3 创建材料并设置材料属性

材料一共分为三种,分别是冲头,夹芯材料和夹板。按照实验标准,冲头质量密度设置为7.8E-009,弹性杨氏模量为2060000,泊松比为0.3。夹板材料质量密度设置为1.78E-009,设置非独立变量以及材料的力学常数。泡沫夹芯材料则包括剪切损伤断裂应变,密度弹性以及塑性可压碎泡沫硬化等参数。

1.1.4 创建截面并给部件附材料属性

创建均质实体截面,其作用是为材料附加属性时区别各部件,三种材料属性分别对应冲头,两夹板以及泡沫夹芯。然后使用截面指派管理器分别为六层夹板,十层泡沫夹芯以及冲头附加对应的材料属性。

1.1.5 定义铺层方向

定义方向之前先创建三点式基准直角坐标系,原点为(0,0,0),X轴(1,0,0),Y轴(0,1,0),Z轴(0,0,1)。选中所有单元并根据创建的坐标系指派材料方向,由于此实验中材料铺层方向设计为一致,故选择单元等参方向(底到顶)。

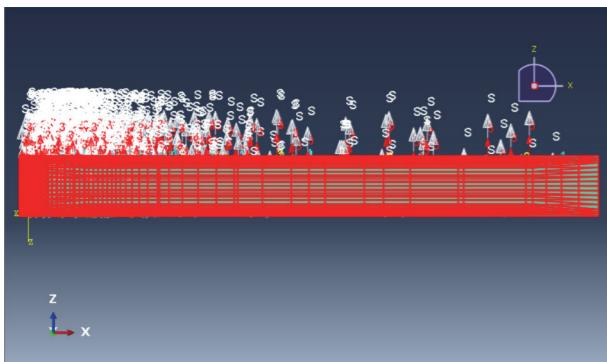


图1-3 铺层方向(底到顶)

1.2 泡沫夹芯结构建模

1.2.1 修复工艺

复合材料泡沫夹芯结构的泡沫芯由于属各向同性材料,相较于蜂窝芯,其机械加工简单、成型过程中不易受到压力变形,又由于其100%的闭孔率,使得其具有更低的吸湿,故而在保证性能的基础上可以最大限度减小使用维护成本。复合材料泡沫夹芯结构在制造与使用过程中不可避免面临分层、脱粘和夹层等缺陷,从而导致零件使用周期缩短甚至报废,进而大大增加了使用成本。因此国内外对复合材料夹层结构的修补术进行了大量研究。其主要集中在面板与芯子间脱粘的研究。但是有关夹层结构中面板产生缺陷后的修补技术研究相对较少。

包啸、龚志红等研究了复合材料泡沫夹层结构面板损伤缺陷贴补修补工艺,研发了低成本、高效的复合材料夹层结构面板损伤的修补技术。他们采用的是对缺陷试样进行贴补修补,并且对修补后的试样进行了无损检测、力学性能试以及微观结构测试分析,为复合材料泡沫夹层结构面板损伤缺陷贴补修补技术提供依据。

复合材料修补工艺有很多种,包括胶接贴补法,树脂注射填充法,胶接挖补法和机械铆接修补等等,其中胶接挖补法可以在增加最少的质量的同时,获得最优的恢复强度且较为平整的表面,从而降低对修复后气动外形的影响。胶接挖补法根据挖补打磨方式的不同分为斜接式和阶梯式。两种方法的效果相似,但斜接式挖补法相较于阶梯式挖补法具有操作方便,工艺要求比较低的优点,故实际中较为常用,但此次研究中为了方便建模和分析而采用阶梯式挖补法。所以结合实际以及本次实验的特点,采用阶梯式胶接挖补法。

具体操作方法如图1-4所示,首先挖掉原材料的损伤部分,然后铺一层胶膜用于固定,再按照阶梯式铺层来填补受损的部分,最后在表面增铺一层附加修理层。需要修复的夹板一共三层,由于实验损伤半径为8mm,所以挖补半径分别设置为R1=10mm, R2=12.5mm, R3=15mm,最后表面需再补一层附加层, R4=30mm。

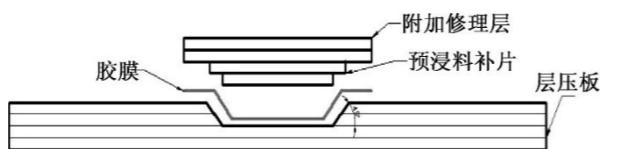


图1-4 胶接挖补法

1.2.2 修补建模过程

此过程模拟泡沫夹芯结构在表面层材料收受到损伤后进行修补的建模过程。由于泡沫夹芯材料不易受到压力变形,穿孔后100%闭合的特性,所以本次研究中穿孔损伤时不考虑泡沫夹芯的损伤,故只需修复损坏的顶层夹板材料。由于冲头半径为8mm,所以设计损伤半径为8mm。

划分网格时以8mm, 15mm, 30mm处为节点划分,为后续分析提供更加准确的数据。建模完成后模拟损伤,泡沫材料无损伤,夹板复合材料从内到外依次挖去半径为R1, R2, R3的三层同心圆结构,呈阶梯状,如下图所示。

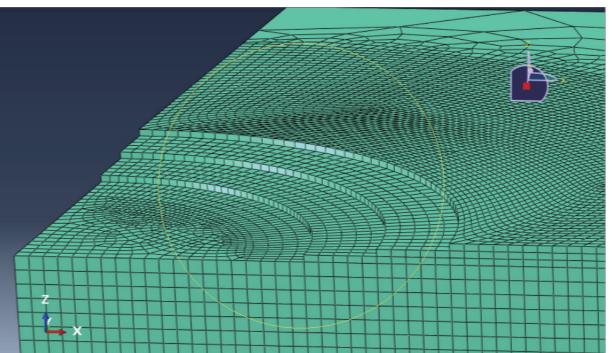


图1-5 夹芯板板面挖补过程

接下来进行修补过程的建模,以泡沫夹芯最顶层的一层为基本参考面,依次对三层夹板进行铺层建模,此处省略实际中胶膜铺贴的过程。尺寸以及材料属性都与挖去的原夹板材料保持一致。按照挖补修复工艺,最后再在最上层铺一层半径为30mm的,远大于损伤半径的附加层,建模过程如图所示:

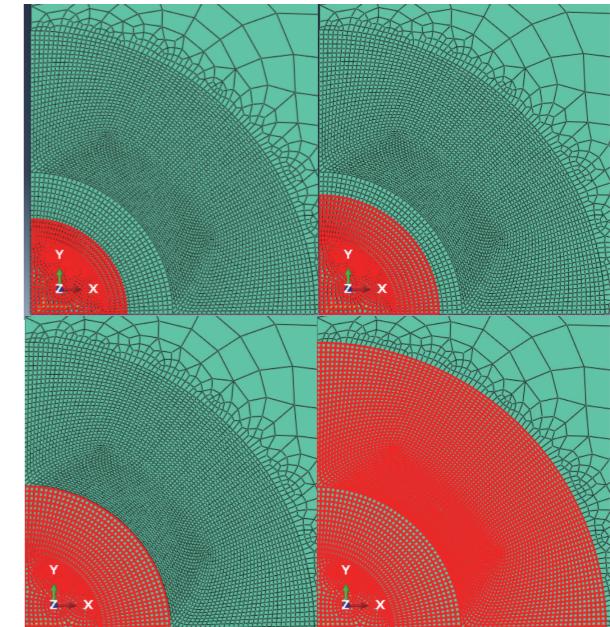


图1-6 上表面夹板损伤修补过程

1.3 冲头设置

1.3.1 创建惯量并装配

选择参考点为(0,0,0),以此为参考点创建点质量/惯性,设置质量为0.002kg。接下来将冲头和泡沫夹芯结构进行装配,部件装配到同一界面后调整冲头的位置,通过冲头的旋转和位移,将冲头和泡沫夹芯版调整到冲击接触之前的位置(此处设置为相距0.01mm)。

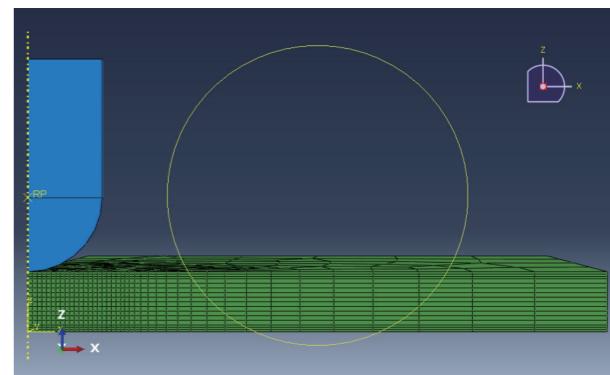


图1-7 冲头的定义和装配

1.3.2 定义接触

创建集合及表面，即可能接触的范围。特征集类型为结点类型，以参考原点为中心，范围比冲头半径稍大即可。

创建相互作用属性。接触属性包括法向行为和切向行为，法向行为选择允许解除后分离，切向行为包括摩擦，弹性滑动和剪应力，其中摩擦系数为0.5。

最后创建相互作用，接触表面分别为冲头表面和刚刚创立的泡沫夹芯版结点的集合。使用运动接触法的力学约束公式以及有限滑移公式。

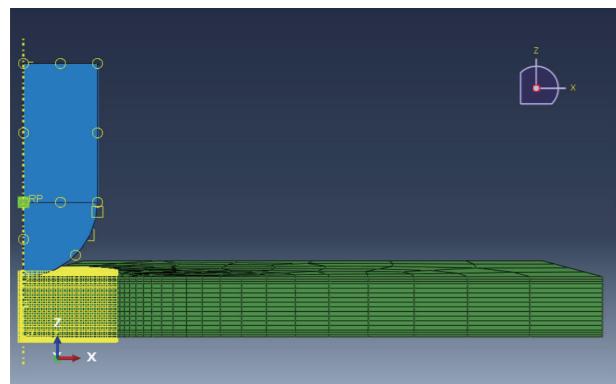


图1-8 定义接触

2. 低速冲击过程分析

冲击损伤的分析过程使用的是VUMAT用户子程序VUMAT-Tsai-Wu.for，结合Tsai-Wu张量强度理论，并修改相应状态变量以及通过单元删除控制，实现层压板类复合材料，也就是本次材料夹板的损伤分析。通过改变VUMAT子程序中的变量调整为本实验所需的分析程序。在此基础上进行本次实验的分析过程。

2.1 创建分析步

在分析步项目里创建动力，显示分析步，时间长度设置为1s，其余均为默认值。然后设置输出变量，时间单位频率设置为0.001，输出变量选择应力(S, 应力分量和不变量)，应变(E, 总应变分量)，位移速度和加速度(U, 平移和转动)。最后创建历程输出，输出变量选择位移速度和加速度，包括法向的平移和转动(U3)，平移和转动速度(V3)，平移和转动加速度(A3)。

2.2 创建边界条件

冲击过程中需要保持泡沫夹芯结构的稳定才能得到可用的速度和位移等数据，所以需要对部件进行约束保证其不会在作用方向产生位移。包括约束冲头的水平位移以及各个方向的旋转；夹芯板各个方向的位移和旋转，即完全固定。

然后创建预定义场，即冲头的初速度，设置V3方向上的初速度为1m/s。

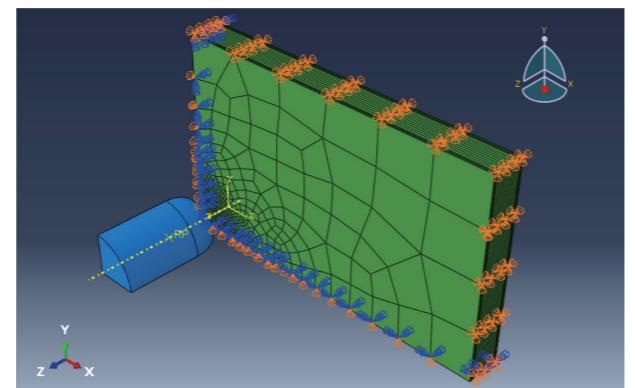


图2-1 边界条件的创建

2.3 创建分析及结果

进入作业模块，创建作业，选择VUMAT-Tsai-Wu.for用户子程序，提交分析。以下是分析完成后的过程资料及数据分析。

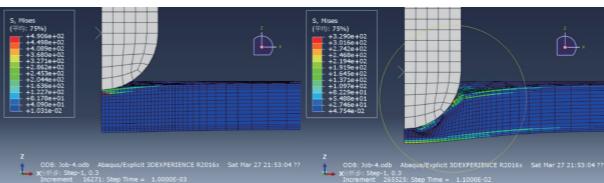


图2-2 低速冲击过程(第一次冲击)

2.3.1 泡沫夹芯结构低速冲击分析过程

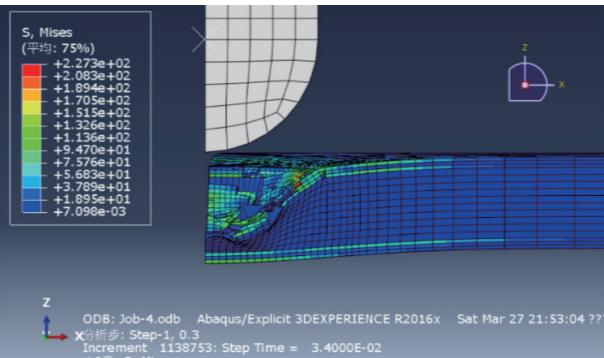


图2-3 冲击反弹过程(第一次冲击)

图2-2以及图2-3展示了冲头从接触到到达最大位移，再弹回的动态过程。通过过程数据可以看出，冲头位移最大的时候速度也几乎降为0，同时加速度也达到最大值。冲击过程中应力的变化非常集中，都集中在比冲头半径稍大的一个小范围以内，稍远的地方几乎没有受到力的作用以及形变。

冲击过程中顶层面板直接被破坏，泡沫夹芯材料受到力之后产生弹性形变，没有产生较大的损伤，且在冲头达到最大位移时给与冲头强大的反力。而底层面板由于

受到泡沫夹芯的缓冲，并没有出现被破坏的现象。冲头弹回后由于整个过程时间较短，泡沫夹芯材料还没有出现明显的回弹。

过程结束之后在泡沫夹芯结构的接触面上留下了稍大于冲头半径的孔状损伤。

2.3.2 材料修复后低速冲击分析过程

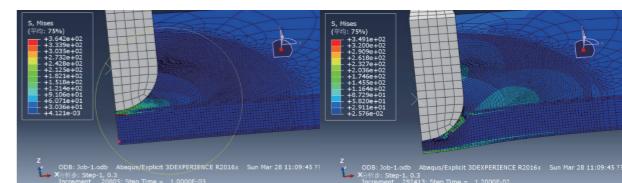


图2-4 低速冲击过程(第二次冲击)

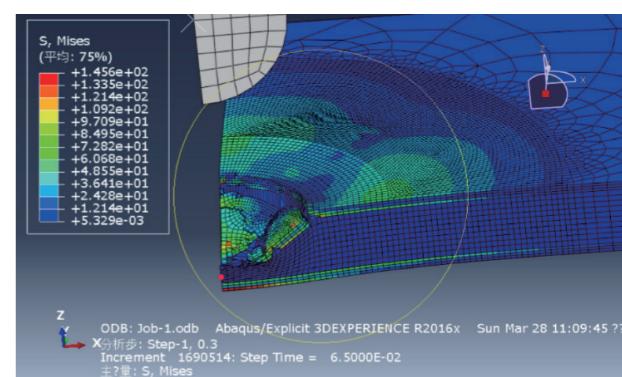


图2-5 冲击反弹过程(第二次冲击)

同样的，图2-4以及图2-5展示了冲头从接触到到达最大位移，再弹回的动态过程。通过数据对比，修补后冲击的整个过程中冲头的运动规律以及泡沫夹芯结构的形变大体和第一次冲击大体相同。都是达到最大位移后反向加速度也达到最大值。且造成的损伤模式也大体相同。

不同点在于，修补后上层夹板的受力范围明显增大，而且和修补过程中挖补部分的范围有相关联之处。应力分散的过程也变得不均匀，呈现多中心的辐射状。对此现

象暂时并没有合理的推测，可能是修补过程中附加层的影响，对此还需要进一步的研究和分析。除此之外，底层面板受到的最大应力也明显大于第一次冲击实验，分析可能是修补后影响了夹芯结构的弹性和塑性，导致应力更多的传导至下层面板，或者也受到了附加层的影响。

2.3.3 数据分析

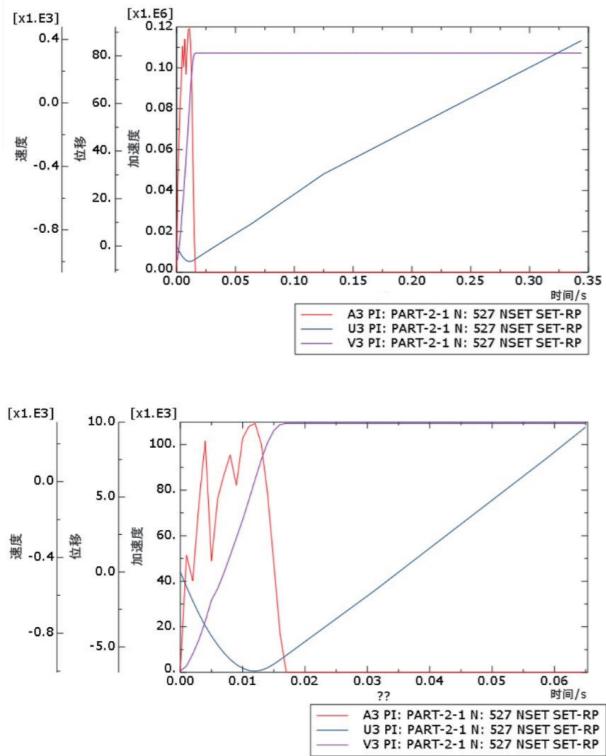


图2-6 两次冲击过程位移、速度、加速度—时间变化曲线

通过导出并分类整理以上数据后可以得出两次冲击过程中位移速度以及加速度的对比曲线，如图2-7, 2-8, 2-9所示。

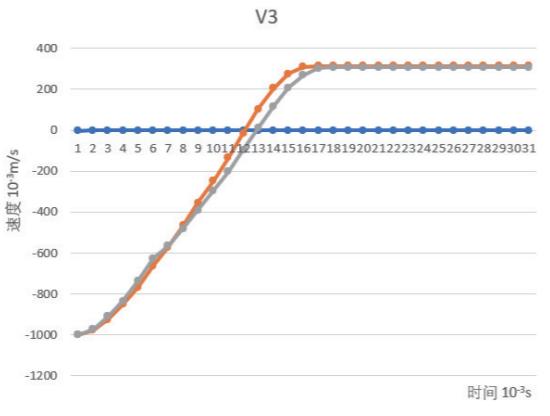


图2-7 两次冲击速度—时间曲线

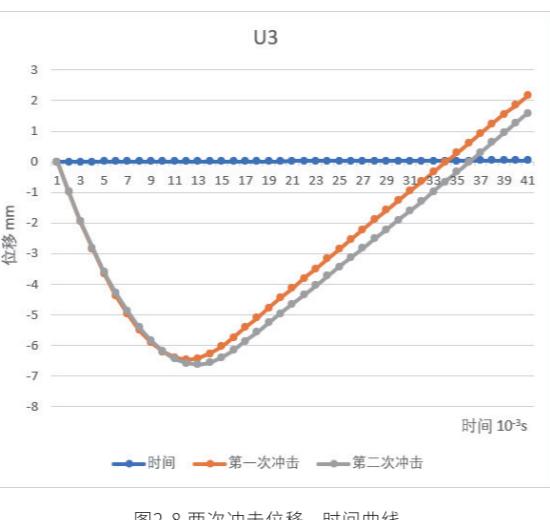


图2-8 两次冲击位移—时间曲线

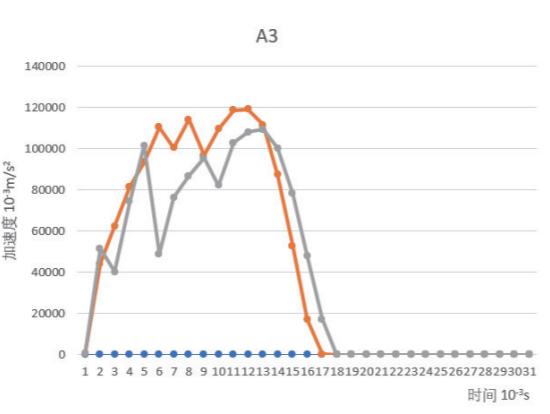


图2-9 两次冲击加速度—时间曲线

通过两次冲击冲头速度随时间变化的对比，可以发现第一次冲击和第二次冲击的速度变化趋势基本吻合，特别是在开始阶段。到0.009s时，第二次冲击的速度开始放缓并持续到结束。说明此过程中第二次冲击加速度小于第一次冲击，即冲头受到的反力低于第一次冲击。但整个过程变长了。

位移速度变化曲线也基本验证了以上分析，第二次冲击过程中冲头的最大位移略高于第一次冲击，反弹过程中位移相比第一次更加迟缓。

通过加速度时间曲线对比可以看出，第二次冲击的加速度整体低于第一次冲击，且变化过程更长，可以分析得出第二次冲击过程中冲头收到的平均反力较小，即受到泡沫夹芯材料的反力小于第一次冲击。

3. 结论

通过以上分析可以得出结论，泡沫夹芯结构复合材料受到单侧表面的低速冲击后受到穿孔损伤，在进行胶接挖补修复之后，结构的弹性和塑性会受到影响，具体表现为整体的刚性增强，再次受到相同的冲击时吸收缓冲的能量减少，更容易受到破坏，破坏的程度也更剧烈。但总体对比来看，泡沫夹芯结构在挖补修复后的抗冲击性能略有下降，但实验模拟的数据显示这种下降并不明显。

本次研究中最大的误差来自于胶接挖补修复过程的误差。实际中的胶接挖补修复采用的是胶接，每层与层之间都会额外铺一层胶膜。每层阶梯处也是胶接的工艺，这样的处理会使其强度会低于原先的状态，故需要额外补铺一层来加强强度。但使用ABAQUS模拟的理想过程中，修补后的抗冲击性能还是略低于原先的状态，这说明在

实际中，采用胶接挖补法修补的泡沫夹芯结构复合材料的抗冲击性能与原先相比还是有一定差距的。但在其他方面，例如弹性和塑性的变化带来的也不一定都是坏处。

所以在实际中，泡沫夹芯结构在受到低速冲击损伤时，使用胶接挖补法修补还是较为可靠的，虽然强度不及原先，但也只是在很小的范围内波动，而且在对气动外形要求不高的情况下，可以采取增加修补附加层数的方式来提高强度。总之，可以通过此类修复的方法来降低泡沫夹芯复合材料的维护成本。

参考文献

- [1] Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event[J]. 2007
- [2] 包啸, 龚志红等. 复合材料泡沫夹层结构面板损伤缺陷贴补修补工艺研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(11): 256-259.
- [3] 苏建, 田鹏飞等. 中温固化复合材料层压板分层缺陷挖补修补工艺研究[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(03): 3-7.
- [4] 江丙云, 孔祥宏等. ABAQUS分析之美[M]. 人民邮电出版社. 2020, 155-158.

一种混杂芳纶纸蜂窝剪切性能研究

文 / 杨伟超

(北京中航智科技有限公司 北京)

摘要:芳纶纸蜂窝具有优异的力学性能,在航空轨道交通等领域具有广泛的应用。本文针对一种掺杂植物纤维的混杂芳纶纸蜂窝开展研究,研究了其剪切性能。首先,开展试验获得了混杂芳纶纸的面内剪切性能。接着,建立了纸蜂窝有限元模型,使用仿真方法分析了纸蜂窝的剪切性能,并开展了蜂窝剪切性能。有限元结果和试验结果吻合较好,表明了测试的准确性。

关键词:混杂芳纶纸;纸蜂窝;剪切试验;性能表征

Abstract: The aramid paper honeycomb has excellent mechanical properties and is widely used in the field of aviation, rail transportation, etc. In this paper, the shear properties of the aramid and plant fiber hybrid paper honeycomb were studied. First of all, the in-plane shear properties of hybrid aramid paper are obtained. Then, with the finite element method, the model of the hybrid paper honeycomb is established, and the shear performance of the hybrid paper honeycomb is analyzed. Finally, the paper honeycomb compression performance is developed, and the finite element results are in good agreement with the experimental results, which indicates the validity of the test.

Key Words: Hybrid aramid paper; paper honeycomb; shear test; property characterization

1.引言

蜂窝夹层结构在许多对减重有高要求的领域得到广泛应用,如航空、航天和高速铁路。它展现出卓越的比弯曲刚度和比弯曲强度。与传统金属蜂窝芯相比,由芳纶纸制成的芳纶纸蜂窝芯具有更好的耐腐蚀性和耐疲劳性,因此已被越来越多地应用于次级承力部件,如方向舵、襟

翼和发动机舱。在实际应用中,夹层板总是承受平面外载荷,这导致蜂窝芯中产生剪切载荷和孔壁材料中的剪切应力。因此,研究蜂窝芯和芳纶纸的剪切性能以确保结构安全是必要的。

研究者开展了大量试验研究蜂窝芯在复杂载荷下的力学性能,例如压缩和剪切组合载荷作用下的蜂窝响应,

并通过细观力学理论和数值方法,从孔壁属性预测蜂窝芯的力学性能。为了构建细观力学模型,需要准确地表征芯材料的力学参数。

针对芳纶纸的拉伸性能,研究者开展了大量研究。然而,由于用于蜂窝芯的芳纶纸厚度相对较薄(小于0.3毫米),当其承受平面内剪切载荷时,纸张容易发生屈曲,因此难以准确获得芳纶纸的平面内剪切性能。据作者所知,目前还没有关于这个问题的已发表论文。为了使用细观力学模型进行芳纶纸蜂窝的剪切力学性能研究,许多研究采用了简化的材料模型。

Gornet等使用有限元方法研究了芳纶蜂窝的非线性特征,模型中,芳纶纸的剪切模量通过调整参数得到蜂窝剪切刚度并与制造商提供的数据进行对比得到。Kweon等使用试验和有限元方法研究了芳纶蜂窝板螺栓拔出过程中蜂窝的屈曲特性,有限元模型中,认为芳纶纸为正交各向异性材料,通过拉伸试验获得两个正交方向的弹性模量并进行平均,得到芳纶纸剪切模量。Rodriguez-Ramirez等使用试验和有限元方法研究了芳纶蜂窝在剪切作用下的非线性特性,在有限元模型中,假定芳纶纸为各向同性理想弹塑性材料,通过拉伸试验获得芳纶纸的剪切。刘等建立了芳纶蜂窝的动力学有限元模型,模型中,假定芳纶纸为各向同性材料,通过拉伸测试获得芳纶纸的剪切模量,忽略了剪切强度。Giglio等建立细观有限元模型,研究了芳纶蜂窝三点弯试验中的局部失效情况,模型中,将芳纶纸简化为各向同性理想塑性材料。

在所有之前的细观力学模型研究中,芳纶纸的剪切性能是通过简化假设来确定的,因为芳纶纸的剪切性能无法准确表征。这限制了在复杂载荷条件下芳纶纸蜂窝

芯强度研究以及芳纶纸蜂窝芯优化设计的范围。因此,准确表征芳纶纸的平面内剪切性能具有极大的必要性。

本文将碳纤维增强复合材料面内剪切性能研究的方法,应用到了夹杂芳纶纸剪切性能的研究中,首次获得了该芳纶纸的剪切性能,该方法同样可以使用到其它芳纶纸的性能研究中。接着,建立了蜂窝有限元模型,获得了蜂窝剪切性能,并通过试验进行了验证。最后,使用方法研究了蜂窝的剪切失效过程。

2.混杂纸剪切性能试验

混杂芳纶纸单层纸厚度大约为0.064mm,剪切过程中容易发生屈曲,无法通过单层纸的剪切试验获得其性能,因此将单层纸浸渍树脂后逐层铺设为层合板,固化后制备剪切试验并开展剪切试验,得到层合板模量和强度即为单层混杂纸的模量和强度。

将混杂纸原纸裁剪出尺寸为200mm×200mm的正方向试样,每件质量约为1.65g,共计35件。随后,将其放置入固含量为42%的酚醛树脂中浸泡40min,然后取出并去除表面多余酚醛树脂,在室温下悬挂60min晾干;之后再次放置入固含量相同的树脂中浸泡10min,取出并将表面多余树脂去除,在室温下悬挂60min晾干;然后将32层单层纸沿相同方向逐层铺设为层合板;之后,将层合板放置在压缩模具中,在90℃下保持1.8MPa压力40min;随后,加压至5MPa并保压3h,之后自然降温。最终得到名义厚度为2mm的层合板,重量为89.0g,树脂含量为40.7%的层合板。

根据复合材料的V型缺口梁法剪切性能标准测试方法(ASTM D5379/D5379M-12),从固化后的纸层压板中

加工出三个剪切试样。

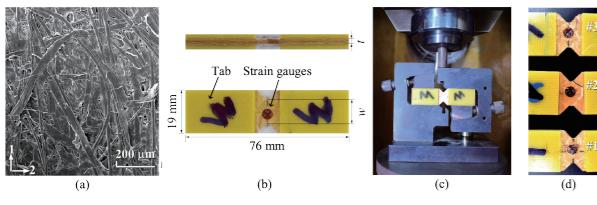


图1 剪切试验系统：

(a) 混杂纸原纸SEM, (b) 试验夹持, (c) 试样, (d) 失效试样

最终的层压板试样如图1(c)所示，三个试样的尺寸列于表1中。在Instron 8801试验机(如图1(b)所示)上对三个纸层压板试样进行了剪切测试，加载速度设置为2毫米/分钟。两个正交应变片位于缺口根部之间并居中，用于测量工程剪切应变。

表1 混杂纸剪切试验结果

	缺口尺寸 <i>w</i> / mm	厚度 <i>t</i> / mm	模量 <i>G_{p12}</i> / GPa	强度 <i>S_{p12}</i> / MPa
#1	11.40	1.91	2.19	53.08
#2	11.41	1.89	2.24	55.02
#3	11.41	1.93	2.14	52.49

图2显示了剪切试验的剪切应力应变曲线。剪切应力应变曲线具有明显的非线性，表明混杂纸在剪切载荷作用下，会发生一定的塑性变形；应力应变曲线的线性段，三个试样试验数据分散性较小。极限载荷时，试验件发生典型的剪切失效，如图1(c)所示。依据试验标准选取应变为0.25%~0.65%时的剪切应力和剪切应变数据进行线性拟合，可以得到试验件模量，结果如表1所示。

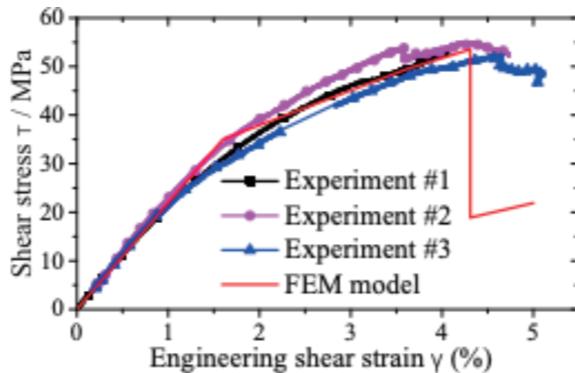


图2 混杂纸应力应变曲线

3.蜂窝数值模拟

3.1 混杂纸本构模型

混杂纸的压缩模量和压缩强度(如表2所示)。材料模型中的泊松比与文献中的Nomex纸相同，取0.36。根据正交各向异性材料的特点，材料剪切模量可以通过弹性模量和泊松比得到：

$$G_{p12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{p45}} - \frac{1}{E_{p1}} - \frac{1}{E_{p2}} + \frac{2\nu_{21}}{E_{p1}}} \quad (1)$$

式中， E_{p1} 、 E_{p2} 和 E_{p45} 分别表示混杂纸0°、90°和45°方向的弹性模量； ν_{21} 表示沿1方向加载的泊松比。

为计算蜂窝材料失效应力，在有限元计算中，使用渐进损伤分析方法分析蜂窝孔壁在压缩过程中的损伤发展过程。使用最大应力失效准则判断材料是否发生损伤，当材料中应力满足公式(2)中的相应表达式时，材料发生损伤。材料损伤后，使用Tan退化模型，得到材料发生损伤后的力学性能参数。Tan模型认为，将失效材料的原始本构模型乘以退化系数，即可得到损伤后的材料性能参数，

如公式(3)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_1}{S_{p1}^t} \geq 1, \quad \sigma_1 \geq 0 \\ \left| \frac{\sigma_1}{S_{p1}^c} \right| \geq 1, \quad \sigma_1 \leq 0 \\ \frac{\sigma_2}{S_{p2}^t} \geq 1, \quad \sigma_2 \geq 0 \\ \left| \frac{\sigma_2}{S_{p2}^c} \right| \geq 1, \quad \sigma_2 \leq 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中， σ_1 、 σ_2 分别表示材料1、2方向的应力。

$$\left\{ \begin{array}{ll} E_{p1}^d = 0.07E_{p1}, & 1\text{方向失效} \\ E_{p2}^d = 0.2E_{p2}, & 2\text{方向失效} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中， E_{p1}^d 、 E_{p2}^d 分别表示损伤材料1、2方向的弹性模量。

表2 混杂纸力学性能							
E_{p1} /Gpa	E_{p2} /Gpa	G_{p12} /Gpa	ν_{p21}	ν_{p32}	ν_{p13}	S_{p1}^t /Gpa	S_{p2}^t /Gpa
6.75	4.47	2.30	0.36	0.36	0.36	72	36.9
						130.7	

3.2 有限元模型

有限元建立的蜂窝模型中，孔格几何尺寸(如图3(a)所示)和蜂窝高度与试验用蜂窝相同，有限元模型中单个孔格的尺寸如表3所示。

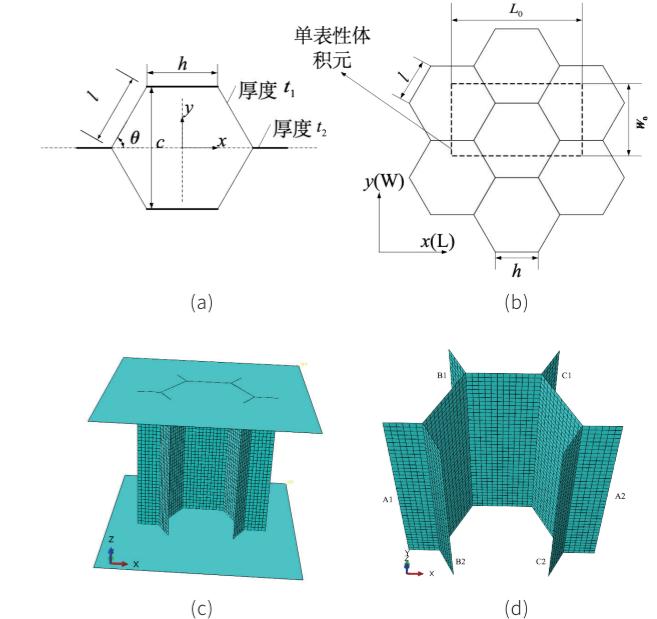


图3 蜂窝模型：

(a) 单胞元, (b) 代表性体积元, (c) 有限元模型, (d) 周期性边界

表3 蜂窝几何模型

<i>l</i> / mm	<i>h</i> / mm	<i>t₁</i> / mm	<i>t₂</i> / mm	<i>H</i> / mm
1.83	1.83	0.064	0.116	6

蜂窝材料是周期性结构，可以通过分析其代表性体积单元的力学特性，得到整个蜂窝材料的力学特性。根据六边形蜂窝材料的周期性，可以选择如图3(b)中矩形虚线所示的代表性体积元开展研究，代表性体积元尺寸的收敛性验证结果见第4节。蜂窝厚度方向为蜂窝轴线方向，用*Z*(3)表示。

建立如图3(c)所示有限元模型，在蜂窝材料两端建立两个刚性平板模型，通过两个刚性平板为蜂窝材料加载；刚性平板与蜂窝材料之间设置为绑定接触，即平板和

蜂窝边界不能发生相对位移；在下平板上添加固支约束；在平板在Z方向施加一定的压缩位移，其它自由度位移均为零。模型中，刚性平板使用刚体单元，每个平板为1个单元；蜂窝孔壁使用S4R壳单元，网格收敛性验证结果表明，网格尺寸为0.15mm时，计算具有足够的精度和效率。

对于周期性代表性体积元，需要在代表性体积元的棱边添加周期性边界，如图3(d)所示：A1和A2为一对边界，B1和B2为一对边界，C1和C2为一对边界。在成对周期性边界的节点上（蜂窝上下边界上节点除外），节点位移需要满足公式。

$$\begin{cases} u_{i1} - u_{i2} = u_i^{\text{ref}} \\ \varphi_{i1} - \varphi_{i2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， u 为节点位移， φ 为节点转角，取值为1、2、3。

对于多个代表性体积元的情形，采用相同的方法添加周期性边界。有限元分析过程中，考虑几何非线性的影响，使用弧长法开展计算。

3.3 结果和试验验证

根据夹芯材料剪切性能的标准测试方法(ASTM C273/C273M-16)，对蜂窝芯在XZ和YZ方向进行了剪切测试，以验证有限元模型(FEM)。所用的蜂窝夹芯板由两块厚度为1毫米的碳纤维增强层压板和一块厚度为6毫米的混合纸蜂窝芯制成。该夹层板被切割成6个尺寸为150毫米×50毫米的矩形试样，其中3个试样的长度沿X方向，另外3个试样的长度沿Y方向。为了对夹芯试样施加载荷，两个钢面板被粘合到夹芯试样的两侧。在加载过程中，使用引伸计测量试样的剪切变形。由于层合板的厚度较薄，为了满足测试标准的要求，使用了两个连接杆进行连接。

夹心板的剪切测试在Instron 8801试验机上完成，加载速度设置为0.5毫米/分钟。

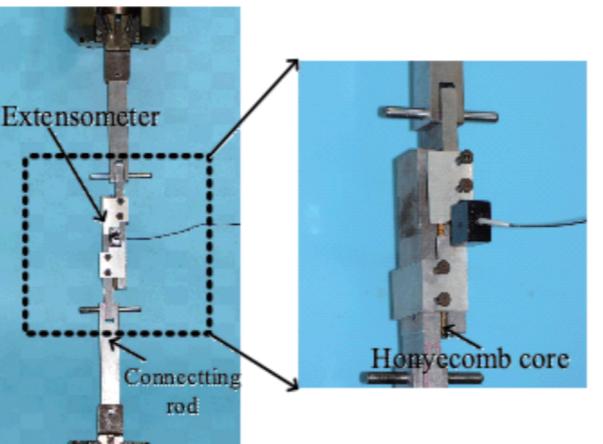


图4 蜂窝板剪切试验

给出了剪切试样的应力应变曲线，蜂窝剪切应力应变曲线具有明显的非线性特征，非线性来自于蜂窝孔壁的大变形、孔壁材料剪切非线性以及孔壁材料的失效。有限元计算的结果和试验吻合结果较好，说明夹杂芳纶纸试验能够有效得到其剪切性能；在非线性阶段，应力应变曲线有一定的偏差，这些主要来自于模型的简化。图5(a)中#3试验中，在试样失效后，夹具上的引伸计出现了滑移，导致应变采集出现了偏差，对强度结果没有影响。表4显示了蜂窝夹芯的剪切模量和剪切强度，夹芯两个方向性能差异明显，XZ方向模量和强度大大超过YZ方向。

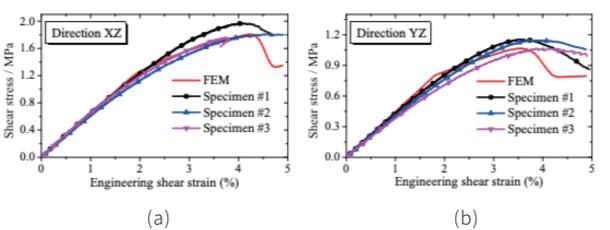


图5 蜂窝剪切应力应变曲线

表4 有限元和试验对比

方向	剪切模量 / MPa		剪切强度 / MPa	
	试验	仿真	试验	仿真
XZ	64.44±2.68	64.61	1.84±0.11	1.81
YZ	43.01±3.02	44.63	1.12±0.05	1.07

4. 结论

芳纶纸的剪切性能显著影响蜂窝结构性能，尤其是在纸蜂窝承受复杂载荷时，但这些性能难以准确测试。在本研究中，将混合芳纶纸制成立压板，并应用V型缺口梁法测试复合材料的剪切性能，首次获得了混合纸的剪切性能，并通过蜂窝剪切试验和仿真模型验证了测试结果的准确性。

参考文献

- [1] Tounsi R.,Markiewicz E.,Zouari B. 2017-Numerical investigation, experimental validation and macroscopic yield criterion of Al5056 honeycombs under mixed shear-compression loading[J]. Elsevier Ltd, 2017, 108: 348-360.
- [2] Ashab ASM,Ruan Dong,Lu Guoxing. Quasi-static and dynamic experiments of aluminum honeycombs under combined compression-shear loading[J]. Elsevier Ltd, 2016, 97: 183-194.
- [3] Ashab Asm,Ruan Dong,Lu Guo-Xing. Combined Compression-Shear Behavior of Aluminum Honeycombs[J]. Key Engineering Materials, 2015, 3432: 127-132.
- [4] Zhou Zhiwei,Wang Zhihua,Zhao Longmao. 00-2012-Experimental investigation on the yield behavior of Nomex honeycombs under combined shear-compression[J]. Lat. Am. j. solids struct., 2012, 9(4): 515-530.

[5] Pan,Shi-dong,Wu. 2006-Transverse shear modulus and strength of honeycomb cores[J]. Composite Structures, 2008, 84(4): 369-374.

[6] Akishev N.-I.,Zakirov I.-I.,Paimushin V.-N. Theoretical-experimental method for determining the averaged elastic and strength characteristics of a honeycomb core of sandwich designs[J]. Mechanics of Composite Materials, 2011, 47(4): 377-386.

[7] F. Lopez-Jimenez,N. Triantafyllidis. 2013-Buckling of rectangular and hexagonal honeycomb under combined axial compression and transverse shear[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(24): 3934-3946.

[8] Gornet L.,Marguet S.,Marckmann G.. 2007-Modeling of Nomex® Honeycomb Cores, Linear and Nonlinear Behaviors[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2007, 14(8): 589-601.

[9] Roy R.,Nguyen K.H.,Park Y.B. 00-2014-Testing and modeling of Nomex™ honeycomb sandwich Panels[J]

[10] Rodriguez-ramirez Juan-de-Dios,Castanie Bruno,Bouvet Christophe. Experimental and numerical analysis of the shear nonlinear behaviour of Nomex honeycomb core Application to insert sizing[J]. Elsevier Ltd, 2018, 193: 121-139.

[11] Giglio,M.,Manes. Investigations on sandwich core properties through an experimental- numerical approach[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(2): 361-374.



增材制造技术在航空发动机中的应用

文/王治国 孙占磊

(成都联合飞机科技有限公司 成都)

摘要:增材制造技术(Additive Manufacturing,AM)作为一种很有前景的技术,仅需使用液体材料、粉末或丝材作为起点,经过复杂的融熔过程就可以轻松生产零件。与传统的制造技术相比较,几乎任意形状、高集成度的航空发动机零部件可以在一步中完成制造,这大大降低了发动机研制的成本,并允许设计者设计更复杂、更轻量化的零部件,提高航空发动机燃油经济性、减少排放,并满足安全性和可靠性要求。

关键词:增材制造;AM;航空发动机

Abstract: Additive Manufacturing (AM) is a promising technology to produce parts easily and effectively, just by using liquid material, metallic powder or wire as starting material and a sophisticated melting process. In contrast to conventional manufacturing technologies virtually any shape and highly integrated parts can be built up in one step. That reduces the production costs and allows the implementation of complex, light new 3D designs to improve fuel efficiency, reduce emissions, and respond to safety and reliability requirements.

Key Words: Additive Manufacturing; AM; Aero Engine

3D打印是一种增材制造,增材制造是使用3D打印创建三维物体的过程。这两个术语可以互换。因此,提到增材制造或3D打印意味着增材制造方法,以区分它和减材制造工艺,即传统制造。传统制造(Conventional Manufacturing, CM),通常是从坯料或块料中去除材料以获得最终形状的减法技术,通常包括机械加工、模具成型、成形加工、连接成型,通常,单个零件的制造包含以上单个或多个工艺;而AM被认为是CM的一次革命性突破,其主要工作过程是将一个来源于三维设计或者其他电子数据方式完成的3D模型出发实现零件的直接净成形制造,大大简化了制造过程,提高了制造效率,帮助产品快速验证、快速迭代。

表1 CM与AM的对比

工艺方法	CM	AM
产品几何	有限制	灵活、复杂几何 (可设置减重空腔)
得到最终产品几何的步骤	一种或几种联合	一种
材料利用率	低	高
交货期	通常很长	较短

1.增材制造简介

1.1 增材制造的历史

现代市场对开发和生产过程的要求越来越严格,除了提高产品质量和提高开发和生产灵活性的要求外,还提出减少成本等要求,特别是缩短开发和生产时间,在市场上日益明显的一种趋势是放弃大规模生产,转而进行小批量生产,而且往往是个性化生产。

为了满足这样的需求,自20世纪80年代后半期以来,现代增材制造工艺得到了发展和应用。这些工艺的主要特点是添加材料,通常是一层一层,直到整个产品完整,这样的生产工艺使得制造复杂的产品几何形状成为可能。

增材制造工艺的另一个特点是直接从3D CAD模型制造产品,而不需要额外的工具或者夹具。

从2000年左右开始,AM技术不断发展,并开始越来越多地应用于航空航天、汽车等各个工业部门的原型增材制造。未来,其有望进一步革新产品的设计和生产方式,为定制化、可持续性和生产效率提供新的机遇。

1.2 增材制造原理

增材制造过程始于CAD软件创建所需对象的三维数字模型,然后通过切片软件将模型分成“薄层”,如图1,从而进入打印参数的设置阶段。这一步是至关重要的一步,将决定制造成功与否、并影响最终产品的质量。常规的层布置在X-Y平面上,沿着Z轴进行堆叠,这里需要注意的是,在所有的三个轴向,产品的制造精度和机械性能并不完全相同。其在X-Y平面内的精度由机器硬件决定,在切片过程中,可以改变层的厚度以控制产品沿着Z轴的精度,在产品几何变化大的位置降低层厚度,在尺寸相似的区域增加层厚度,如图2。

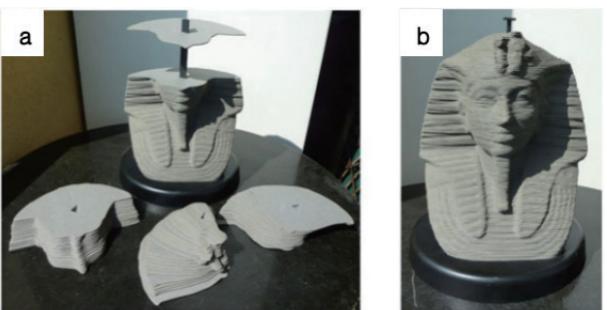


图1 增材制造原理 a切片的“薄层” b成品

在增材制造过程中,构建材料将被快速地沉淀或熔化、硬化或固化,然后每一层重复该过程,直到完成制造。

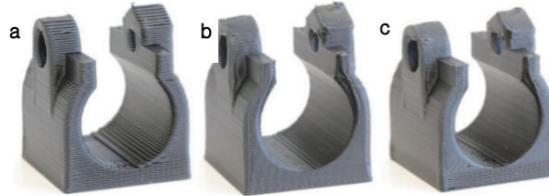


图2 不同层厚产品对比

a较厚的层 b较薄的层 c厚度优化的层

一旦产品完成，进一步的后处理。比如去除支撑、打磨、热处理、机加工，以达到最终形态。如图3。

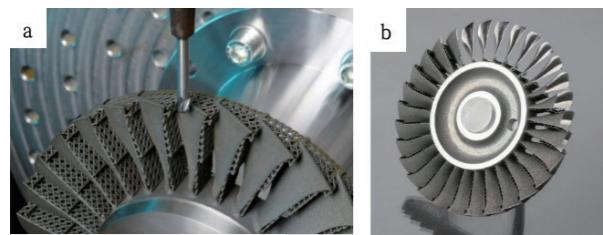


图3 a打印完成的整体叶盘 b经过后处理的整体叶盘

1.3 增材制造工艺的分类

美国材料测试协会国际委员会(ASTM) F42分类将增材制造技术分为7个大类:粘结剂喷射Binder Jetting (BJ)、直接能量沉积Direct Energy Deposition(DED)、材料挤压Material Extrusion、材料喷射Material Jetting(MJ)、粉末床熔融Power Bed Fusion(PBF)、片材层压Sheet Lamination和光固化Vat Photopolymerization。根据材料的使用情况,AM在航空发动机的应用主要是金属材料增材制造工艺Additive Metal Technologies(AMTs)和非金属材料增材制造工艺。

表2 AMTs分类		
Direct Energy Deposition	Power Bed Fusion	Other
■LMD/LENS	■DMLS	■Binder jetting
■EBW	■SLM	■SPO
■WAAM	■EBM	

1.3.1 金属增材制造工艺AMTs

金属材料增材制造主要有两种基本方式,A.粉末床熔融Power Bed Fusion(PBF). B.直接能量沉积Direct Energy Deposition (DED)。PBF主要包括直接金属激光烧结Direct Metal Laser Sintering (DMLS)、选区激光融化Selective Laser Melting (SLM)和电子束熔化Electron Beam Melting (EBM)以及粘结剂喷射Binder Jetting,超音速颗粒沉积Supersonic Particle Deposition (SPD),其中SPD为我们熟知的喷涂。

DED技术的工作原理是使用等离子弧、激光或电子束等聚集能源来熔化、沉淀通过喷嘴的粉材或丝材,通常在惰性气体气氛保护或真空中进行。激光直接沉积Laser Melting Deposition(LMD),激光净成形Laser Engineering Net-shaping(LENS),电子束焊接Electron Beam Welding(EBW),电弧增材制造Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM) 等都属于DED工艺。

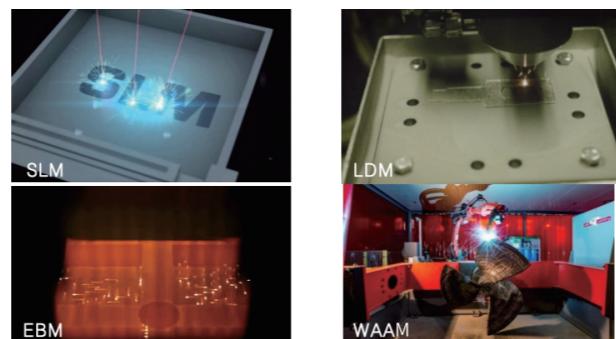


图4 一些AMTs技术

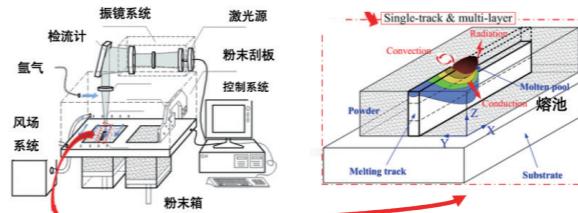


图5 一些AMTs技术

1.3.2 非金属增材制造工艺

非金属增材制造工艺主要有光固化立体造型Stereolithography Apparatus(SLA)、选择性激光烧结Selected Laser Sintering (SLS),熔融沉淀成型Fused deposition modeling(FDM)和紫外光固化PolyJet。

SLA,即光固化Vat Photopolymerization,是一种使用发光设备(激光或数字光处理)逐层照射和固化液体光聚合物树脂(热固性塑料)来创建零部件的方法。SLA能够产生精细的特征,并提供较好的表面粗糙度。

SLS是一种PBF工艺,通常使用激光能量源熔化聚合物粉末,通常被用于生产大型的非功能零部件,比如空气流导管。

FDM也称为熔融挤出成型,是目前市场上最流行的增材制造技术,广泛应用于聚碳酸酯、聚苯砜、聚乳酸和丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)材质的零部件,它也是3D打印爱好者、小型企业最广泛使用的打印技术。

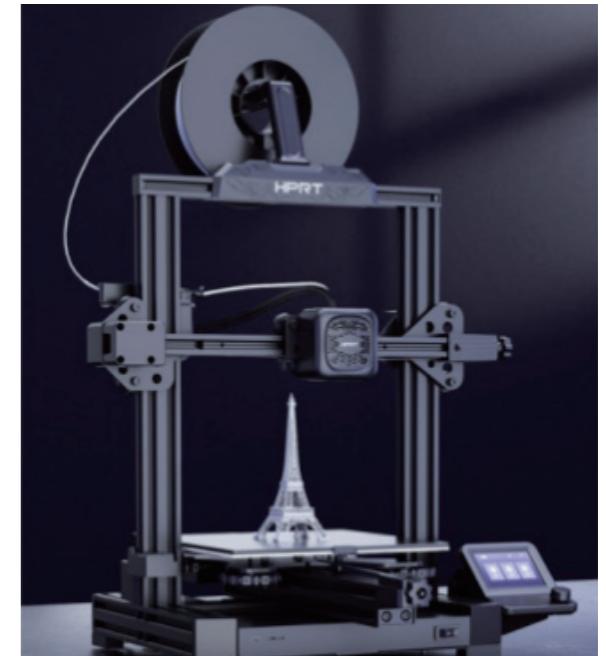


图6 FDM打印机

紫外光固化PolyJet,也被称为材料喷射,使用喷墨打印技术将液体光聚合物滴喷射到构建基板上,然后用紫外线固化。它能够制造出具有精细特征和良好表面粗糙度的零件。

2. 增材制造在航空发动机中的应用

2.1 航空发动机的材料及其要求

航空航天工业不断要求高的强度-重量比、提高燃油效率、减少排放、并具有安全性和可靠性要求的轻型飞机部件,为此,设计者努力将每个部件的材料用量降到最低,这导致了设计在结构、功能和性能方面的复杂性增加。而增材制造允许制造几乎任何形状的零件(自由形状制造)。

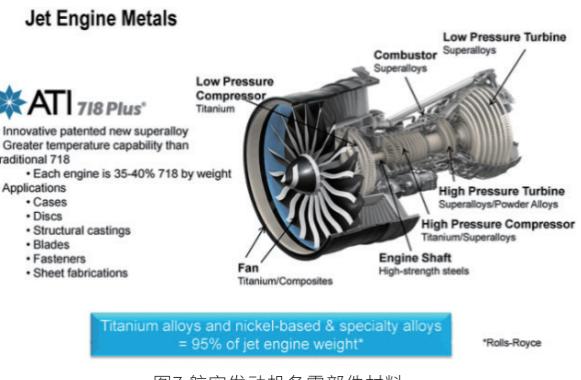


图7 航空发动机各零部件材料

表3 典型的热端部材料性能

Material	Use	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	UTS [MPa]	Temp. limit [°C]	A/C	IND
René 41	Discs, blades	8250	218	1172	700	X	
Wasalloy	Discs	8200	213	1335	650	X	X
Hastelloy X	Combustor parts	8220	205	755	580	X	X
CMSX-4	Blades, vanes	8700	133	942	1200	X	X
CMSX-10	Blades, vanes	9050	133	952	1200	X	X

2.2 国外厂商的一些案例

主流的主机生厂商如 GE Aviation、Sarfran、Rolls-Royce 等已经成功将 AM 技术制造的零部件应用于发动机中。其中 GE 作为 AM 技术的主要支持者, Sarfran 作为 AM 技术的先行倡导者, 他们制造的 AM 零件不但通过数千小时的使用功能、性能、可靠性的考核, 而且通过了 FAA 和 EASA 的适航认证。这意味着航空业产生了由 AM 技术所领衔的巨大变革。

2.2.1 GE Aviation

早在 GE 将 AM 技术应用于发动机的设计制造之前, 这项技术已在实验室完成了长达 40 年的研究。事实上, 早在 20 世纪 80 年代开始, 位于纽约尼克斯尤纳的通用电气全球研究中心 (GRC) 就一直积极参与增材制造研究。

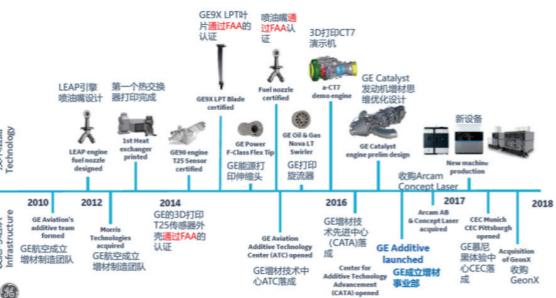


图8 GE Aviation

GE9X, 目前世界上投入运营的推力最大的商业涡扇发动机, 其使用了很多基于 AM 技术集成设计、制造的零部件。每一台 GE9X 中的 1 个 T25 温度压力传感器支座、1 个热交换器、16 个颗粒分离器、28 个燃油喷油嘴、228 个低压涡轮转子叶片 (LPT5, LPT6) 均由 AM 技术制造。值得关注的是, 涡轮转子叶片是极重要的转动零件。

T25 传感器支座是第一个经过适航认证且投入商业飞行的由 AM 技术制造的零件, 它由原来的 20 个零件集成设计为一个整体, 重量减轻了 25%, 耐用度是上一代的 5 倍, 成本效益提升 30%。

大量应用 AM 技术的 T901 涡轴发动机, 其作为美国陆军改进型涡轮发动机项目 (ITEP) 的一部分, 测试结果表明其性能甚至超过了 ITEP 的要求。

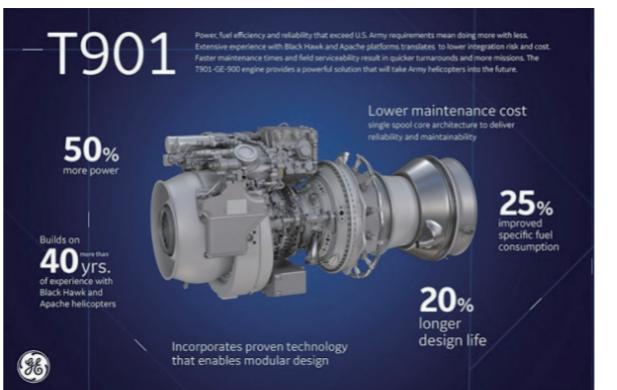


图9 T901发动机

2.2.2 Sarfran

作为商业航空发动机的主要制造商之一, 赛峰集团设置了增材制造研发部门, 服务于 AM 技术的应用与开发, 且具备向其合作伙伴提供增材制造零部件的能力。Sarfran 使用了 AM 技术制造的辅助动力装置 (APU) 的涡轮导向器, 已经过 EASA 的认证。另一个是 Sarfran 为 LEAP 发动机制造的滑油机匣, 已经过 EASA 和 FAA 的适航认证, LEAP 发动机为空客 A320neo、C919 等机型提供动力。

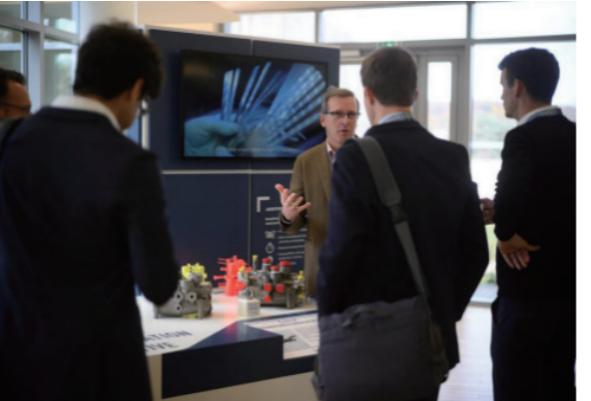


图10 Sarfran 展示其增材制造的滑油机匣

2.2.3 其他知名厂商

罗罗公司提供的、用于空客 A350-1000 的 XWB-97 型发动机, 可以产生 44 吨的推力。其主要提升来自新型涡轮技术和 AM 技术的应用, 一个直径 1.5、高 0.5 米, 含 48 个翼型面的镍基合金前轴承座是通过 AM 技术制造的。

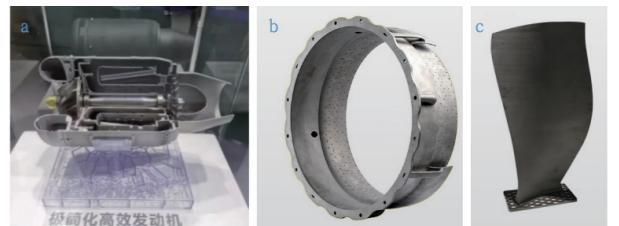
普惠公司与 TURBOCAM International 通过 AM 技术制造钛合金整体叶盘。通过评估发现, 其制造的整体叶盘质量与锻造件质量一样稳定, 通过 AM+ 传统五轴精加工, 可以明显缩短研发和制造进程。

霍尼韦尔是世界上首批使用陶瓷 3D 打印模具制造涡轮叶片的喷气发动机制造商之一。AM 技术帮助霍尼韦尔将下一代涡扇发动机系列的开发时间缩短了数月。

2.3 国内厂商的一些案例

2.3.1 中国航发集团

航发集团各大主机所已将 AM 技术应用于发动机各零部件开发中, 包括燃油喷嘴、尾喷管、燃烧室部件、机匣等静子件, 风扇叶片、涡轮叶片等转子件, 据悉, 部分零件已完成装机试车。

图11
a 一款集成度极高的涡轮发动机 b 由铂力特提供的高温合金机匣 c 风扇叶片

2.3.2 航天科工集团

这个不足手掌大小的零件, 过去却是生产的“老大难”: 内部流道的加工难以一步到位, 工艺人员需要先在两端打出穿丝孔, 通过线切割切出流道, 再进一步焊接。这种方式非但费时费力, 还极易在打孔时出现错串, 导致产品报废。而现在, 产品加工周期缩短 80%, 生产成本降低 60%, 合格率也有了显著提升。流道形状不再受到限制, 可以按需制造成弯、斜样式, 以实现更好的冷却效果。这些变化, 都是由增材制造技术创造的“奇迹”。

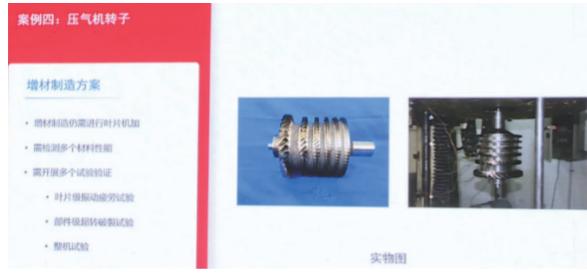


图12 三院31所制造的5级整体压气机转子

2.3.3 AM技术服务厂商

国内典型的代表有华曙高科、铂力特(BLT)、苏州倍丰(AmPro)，其中华曙高科主要提供SLM设备服务、粉末服务，其产品知名度高。BLT是西工大黄卫东教授科研技术落地的典型案例，主要的打印技术是SLM和激光成型修复技术SLF(同DED)，其产品已得到空客等主机厂商的认可。AmPro是增材制造专家、钛合金专家、澳大利亚工程院吴鑫华院士创立的增材制造产品服务提供商(主要提供SLM技术)。吴院士制造了全球第一台全尺寸的燃气涡轮发动机。值得一提的是，吴院士在欧美航空圈内的人气和名气一直很高。



图13 吴院士和她制造的全尺寸燃气涡轮发动机

3.关键技术、存在问题及发展方向

AM技术制造零件需要将材料开发与AM工艺相结合，这就要求开发新的原材料和设计新的熔炼参数，以使材料性能达到或超过CM技术制造的产品。AMTs的材料开发是一个非常复杂的过程，需要彻底了解熔化、凝固温度以及相对应的微观结构。除了材料开发之外，航空产品还需要经过适航的认证，材料认证非常耗时且成本高昂。

3.1 关键技术介绍

3.1.1 工艺规划

主要包括制造时的工艺参数的设置、支撑的设计。制造时的工艺参数如激光/电子束功率、激光/电子束扫描速度、扫描间距、搭接率等参数会对产品质量带来很大影响。部分材料热性能差，需要预热基板等方式以减少制造时热应力的集中，处理不当会造成零件开裂。SLM工艺中，支撑对零部件的制造有重要的影响，支撑的好坏直接影响到制造过程中稳定性和零件变形。

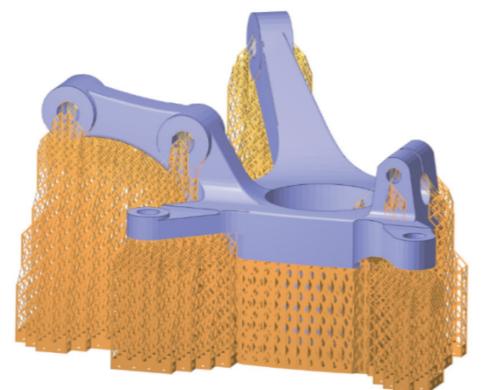


图14 SLM制造时使用的支撑(黄色部分)

3.1.2 原材料

粉末材料是目前最常用的原材料，金属粉末的关键属性(如形状、尺寸、流动性和化学成分)对于最终产品的质量有重要的影响，应用于航空发动机的材料需要专门制备，目前国内没有建立相关的标准(ASTM有镍基合金、钛合金的粉末标准)。同时粉末因素是制约AM规模化发展的主要因素之一。粉末质量评价指标有化学成分、粒度分布、球形度、流动性、松装密度、孔隙率等。

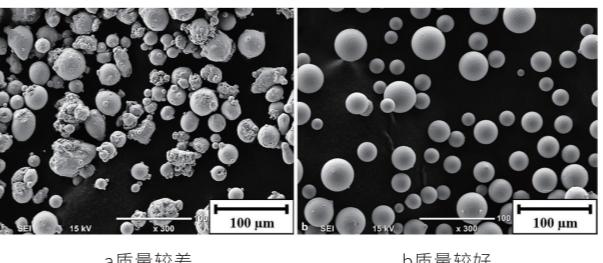


图15 扫描电子显微镜下的粉末形态

3.1.3 制造过程

制造过程中主要的影响因素来自于AM设备，以SLM技术为例，其设备的激光质量、振镜系统、风场系统对产品质量有着显著影响。

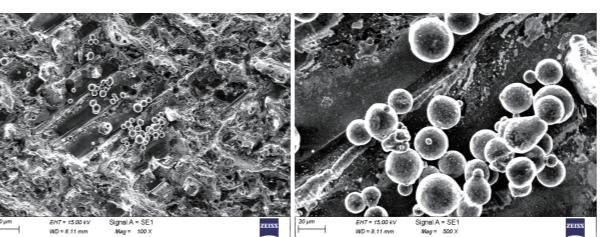
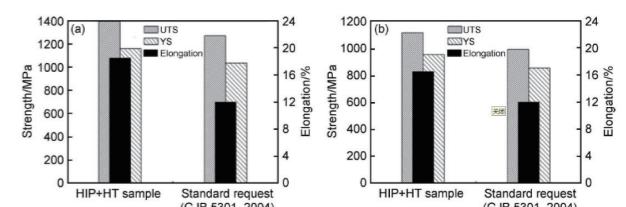


图16 扫描电镜照射下发现未熔融的粉末颗粒

3.1.4 后处理

主要包含清粉、热等静压(HIP)、热处理(HT)等，制造

完成后粉末容易停留在成型产品内部，这可能需要例如超声波清理，并增加额外的检验手段检查清理情况。热等静压可以使零部件内部一些大尺寸闭合气孔、裂纹得以愈合，小尺寸闭合气孔、裂纹得到有效消除，同时晶粒再结晶，使晶粒细化，组织致密；热处理可以改善制造零部件的纤维组织、力学性能和残余应力。

图17 HIP/HT试样室温a及650°C b拉伸性能^[16]

3.2 存在问题与发展方向

目前，国内各大科研院所、商业公司对于AM技术展现出浓厚的兴趣，部分院所、公司已建立自己的增材制造能力，正大量应用于产品设计制造。但与欧洲、美国、日本等发达地区和国家相比，我国在基础理论、关键工艺技术以及高端装备等方面仍存在较大的差距。

A. 原始创新和变革性不足：增材制造具有变革性的技术均来源于国外，一些显著影响增材制造全局的重大技术进步都来自于美欧国家，我国的原始创新能力还需加强。

B. 自主创新和标准体系有待完善：目前以欧、美、日等发达国家和地区构建的专业技术壁垒对我国企业在增材制造和激光制造领域的布局和研究产生了较大程度的冲击；标准层面来看，如何推行完善的行业准则，使增材制造的产品符合商业化的应用是我国增材制造标准化发展的瓶颈。因此，拥有一套核心自主知识产权体系，建立

完善的专用材料、工艺和设备,以及产品的检测和评价规范与标准是我国发展增材制造产业的一个方向。

增材制造控制难度较大:增材制造过程中材料往往存在强烈的物理、化学变化以及复杂的物理冶金过程,同时伴随着复杂的形变过程,以上过程影响因素众多,涉及材料、结构设计、工艺过程、后处理等诸多因素,这也使得增材制造过程的材料—工艺—组织—性能关系往往难以准确把握。因此,发展可控的增材制造技术和设备、构建完备的工艺质量体系是未来发展的一个方向。

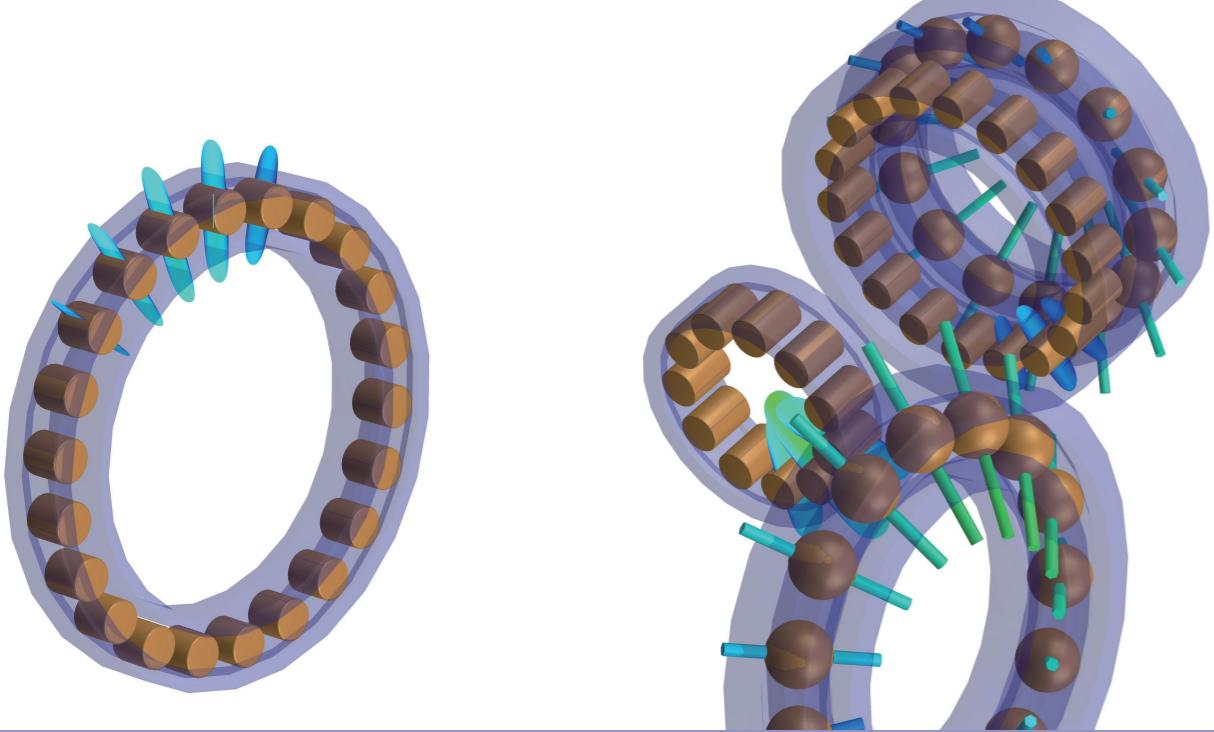
参考文献

- [1] 杨谦,增材制造在航空发动机燃烧室中的应用[J].航空动力, V263, 2018
- [2] K.V. Wong and A. Hernandez, A Review of Additive Manufacturing, ISRN Mech. Eng. 2012, 2012, p 208760. doi: 10.5139/ISRN.MECHENG.2012.513906
- [3] Damir Godec, Joaquin Gonzalez-Gutierrez, Axel Nordin, Eujin Pei, Julia Urena Alcazar. A Guide to Additive Manufacturing, 2022
- [4] Technologies, A.C.F.O. A.M. and A.C.F.O.A.M.T.S.F.O. Terminology, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, 2012.
- [5] R. Liu, etc.—Aerospace applications of laser additive manufacturing A2—Brandt, Milan, Laser Additive Manufacturing, Woodhead Publishing, 2017, pp. 351-371.
- [6] G.D. Goh, et al., Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): challenges and potential, Aerosp. Sci. Technol. 63 (2017) 140–151.
- [7] D-printed functional lightweight components with maximum flexibility in product design, EOS GmbH, March 4, 2013.
- [8] Brickipedia, Acrylonitrile Butadiene Styrene, 2017. Available from: http://en.wikipedia.org/wik/Acrylonitrile_Butadiene_Styrene.
- [9] Rick Kennedy. Outside the Box: How the GE Aviation Entered the Brave New World of Additive Manufacturing. From GE Aviation website.
- [10] Ilyong Jung. GE Additive, 21st century Paradigm Shifter Use cases in GE. From GE Website
- [11] Safran. Metal and polymer 3D additive manufacturing. From Safran Website
- [12] Mike Baldwin. Honeywell Jump Starts Jet Engine Innovation With 3D Printing. From Honeywell Website
- [13] 中国航天报,“打印”出来的发动机奇迹, 2023
- [14] Addup blog. Important considerations for material development in additive manufacturing. 2023
- [15] 闫雪, 阮雪茜, 增材制造技术在航空发动机中的应用及发展[J], 航空制造技术, 2016, 21.
- [16] 石磊, 雷力明, 王威, 付鑫, 张广平, 热等静压/热处理工艺对激光选区熔化成形 GH4169 合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(6):148-155
- [17] 卢秉恒, 增材制造技术—现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1):19-23

T1200 纵列式无人直升机

机体尺寸	6.65m×1.32m×2.85m (长×宽×高)	最大起飞重量	1400kg	最大有效载荷	650kg(含油)	续航时间	≥8h(载荷200kg) ≥2h(载荷500kg)
巡航速度	120km/h	最大平飞速度	180km/h	典型任务半径	200km (可扩展)	实用升限	6500m
最大起降高度	5000m	抗风能力	起降抗风 ≥13.9m/s(七级)	工作温度	-40°C~55°C	防雨等级	中雨





高速轴承滚动体离心力对轴承滚道接触应力的影响分析

文/汪文博

(北京中航智科技有限公司 北京)

摘要:滚动轴承计算分析,一般根据轴承外部载荷和轴承内部参数,对轴承载荷分解到单个滚动体上,进行应力分析。由于不考虑滚动体离心力带来的影响,内滚道载荷与外滚道载荷完全一致,受滚道曲率半径影响,内滚道接触应力高于外滚道接触应力。这与低速滚动轴承一般先出现内滚道疲劳失效的现象匹配。但不能解释以往型号研制过程中,高速轴承外圈滚道首先出现疲劳剥落的现象。本文在对高速轴承进行滚道接触应力分析时,考虑了滚动体离心力带来的影响。以某型直升机传动系统高速输入齿轮轴为例,对滚动体离心力的影响进行分析。

关键词:高速轴承;离心力;接触应力

Abstract: Calculation and analysis of rolling bearings, generally according to the external load of the bearing and the internal parameters of the bearing, the bearing load is decomposed into a single rolling element, and the stress analysis is carried out. Due to the influence of the centrifugal force of the rolling elements, the load of the inner raceway is completely consistent with that of the outer raceway, and the contact stress of the inner raceway is higher than that of the outer raceway due to the influence of the radius of curvature of the raceway. This is in line with the fact that low-speed rolling bearings generally have the first appearance of internal raceway fatigue failure. However, it cannot explain the fatigue peeling phenomenon of the raceway of the outer ring of the high-speed bearing first in the development process of the previous model. In this paper, the influence of the centrifugal force of the rolling elements is considered in the analysis of raceway contact stress of high-speed bearings. Taking the high-speed input gear shaft bearing of a certain type of helicopter transmission system as an example, the influence of the centrifugal force of the rolling element on the bearing life and raceway contact stress is briefly analyzed.

Key Words: high-speed bearing; Centrifugal force; Contact stress

1.概述

直升机传动系统轴承寿命及应力计算一般不考虑滚动体的离心力作用。但随着涡轴发动机的转速不断提升,直升机传动系统的输入轴转速已普遍超过了20000 rpm,高速旋转带来的离心力已成为考虑轴承性能不可忽略的因素。马莹,范雨晴,薛利峰等人考虑离心力作用,对高速轴承保持架的极限转速进行的计算分析;张霞,路长厚等人对离心力于过盈配合面间接接触应力,过盈量的影响进行了计算分析。但鲜有人对轴承滚动体离心力对轴承滚道接触应力的影响进行研究。当轴承转速过万转时,滚动体离心力的大小在量级上已接近滚动体最大理论载荷。此时滚动体离心力对轴承滚道接触应力的影响已不容忽视。本文以某型直升机传动系统输入齿轮轴为例,对滚动体离心力的影响进行分析。

2.工况介绍

输入齿轮轴采用简支支撑,小端采用圆柱滚子轴承1C支撑,大端采用圆柱滚子轴承1B和三点接触球轴承1A共同支撑(其中三点接触球轴承承受周向载荷,圆柱滚子轴承承受径向载荷)。输入齿轮轴仅受齿轮啮合载荷作用,扭矩通过齿轮轴尾部花键传出。

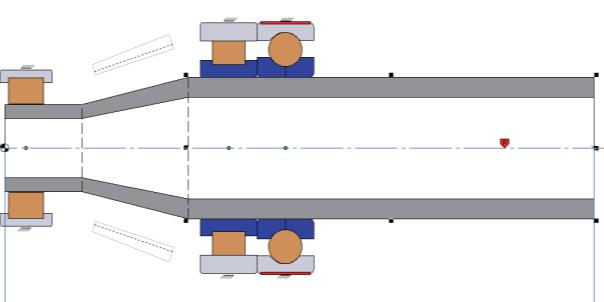


图1 输入齿轮轴支撑简图

表1 圆柱滚子轴承1B内部参数

参数	符号	值
内径/mm	d	60
外径/mm	D	106
宽度/mm	B	24
滚子直径/mm	d _r	10
滚子长度/mm	l	14
滚子分度圆直径/mm	D _r	80.5

3.对比分析

3.1 理论定性分析

根据传统计算方法,不考虑滚动体离心力,内外滚道载荷完全相同,受滚道曲率半径影响,最大接触应力出现在内滚道上。

根据轴承内部参数及钢材密度($\rho=7.85\text{g}/\text{cm}^3$),可计算得到单个滚子重量

$$m = \frac{\pi d_w^2}{4} l \rho = 8.36g$$

根据滚动体与滚道为纯滚动的理论假设,当内圈转速为20900 rpm,轴承保持架组件转速(既滚动体公转转速)为 $n_w=9150.9\text{rpm}$ 。工作状态下滚子离心力

$$F = m\omega^2 r = m \left(\frac{2\pi n_w}{60} \right)^2 \left(\frac{D_w}{2} \right) = 319N$$

当考虑滚动体离心力作用时,滚动体在径向上受力平衡,外滚道载荷等于内滚道载荷与离心力之和。

3.2 定量分析验证

在Romax软件中进行计算分析，在考虑离心力及不考虑离心力两种条件下，1B轴承的滚道载荷雷达图及内外滚道接触应力分别如图2、图3所示。

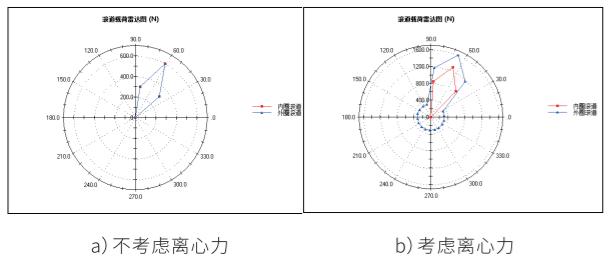


图2 滚道载荷雷达图

如图所示，在不考虑滚子离心力时，内外圈滚道载荷雷达图完全重合，与上文判断一致。当考虑滚动体离心力时，外滚道最大载荷为1611 N，内滚道最大载荷为1294 N，两者差值为317N(与上文计算的滚动体离心力极为接近，差异主要受滚动体圆角导致的重量差异产生)。

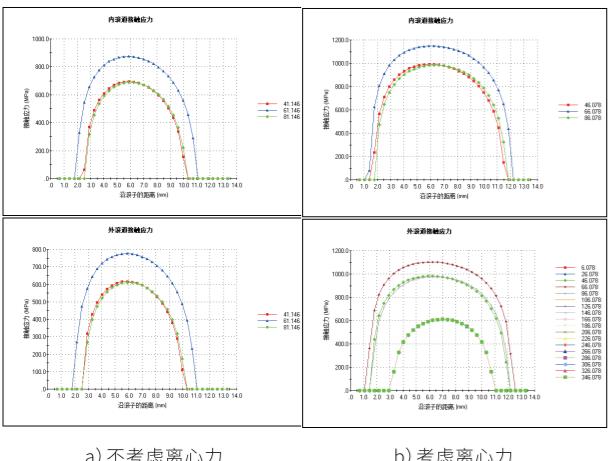


图3 内外滚道接触应力图

如图3所示，在不考虑滚子离心力时，内圈滚道最大接触应力为885MPa，外圈滚道最大接触应力为785 MPa。

受滚道曲率半径影响，内圈滚道应力明显高于外圈滚道应力，与上文判断一致。

当考虑滚动体离心力时，内圈滚道最大接触应力为1148MPa，外圈滚道最大接触应力为1102 MPa。内外圈滚道接触应力均显著增大且差异缩小，如轴承工作转速升高，滚动体离心力进一步增大，可能出现外圈滚道应力高于内圈滚道应力的情况。

4. 结论

高速轴承的滚动体离心力已不容忽视，引入滚动体离心力影响后，内外圈滚道载荷不再相等，轴承的最大接触应力及其出现位置均可能会发生变化。当转速足够高时，轴承的外圈滚道接触应力会超过内圈滚道接触应力。以往认为轴承套圈剥落会先从内圈滚道开始的传统观念并不适用于高速轴承。为了更准确地评估轴承的接触应力，在高速轴承用力分析时必须考虑滚动体离心力带来的影响。

参考文献

- [1] 马莹,范雨晴,薛利峰.离心力作用下直孔实体保持架极限转速的计算[J].轴承,2011(8):11-12,42. DOI:10.3969/j.issn.1000-3762.2011.08.004.
- [2] 张霞,路长厚. 离心力对高速主轴轴承内环过盈配合特性的影响[J]. 制造技术与机床,2010(9):39-42,46. DOI:10.3969/j.issn.1005-2402.2010.09.014.





万亿低空，携手并进 联合飞机2024供应商大 会圆满成功

文/许爱艳

7月25日，联合飞机集团股东大会暨2024年度供应商大会在哈尔滨召开，标志着联合飞机在低空经济领域的战略布局又迈出了坚实的一步。田刚印董事长就低空经济发展进行了《万亿低空，弹射起飞》主题演讲，发布集团低空经济发展战略，展示了联合飞机作为无人机行业领军企业的技术实力与市场洞察力，向供应商合作伙伴们传递了携手共进、共创低空经济新未来的强烈信号。他表示“联合飞机集团每一步的成长都与各位供应商伙伴的大力支持和紧密合作密不可分，联合飞机也非常珍惜彼此精诚合作的深厚感情积淀。未来，联合飞机愿与大家继续携手，为龙江发展带来低空新活力”。



演讲中，田刚印董事长首先表达了对近300家供应商伙伴代表的欢迎，并深刻阐述了中国低空经济的巨大潜力和发展前景，提出了联合飞机在低空经济时代下的发展战略，为联合飞机未来的发展指明了方向。他强调，低空经济作为新兴产业之一，是新质生产力的典型代表，具有创新引领、绿色低碳、数实融合等特点，已成为培育发展新动能的重要方向，将全面带动低空飞行、制造、基建、保障等诸多产业发展。

联合飞机凭借多年的技术积累和市场优势，正加速推进低空经济产业的全面布局，在清晰的战略规划指引下，聚焦“造”飞机、“搞”基建、“抓”应用等低空经济产业发展举措，强化工业级、航空级无人机研发制造能力，完善新型无人机起降基础设施建设，推动无人机产品进一步开拓应急救援、消防灭火、环保巡查等应用场景，促进低空经济产业蓬勃发展。上半年低空经济产业浪潮中收获大量订单，下半年R6000航空级倾转旋翼无人机的首架飞机将于2024珠海航展正式亮相。每一步都充满了对未来的信心与决心，当低空飞行的梦想之光照进现实，联合飞机在低空经济蓬勃发展的浪潮中又将再占鳌头。

会议期间，哈尔滨市平房区副区长余定志先生，联合飞机集团股东代表龙江基金赵玉迪先生，供应商代表深圳市格瑞普电池有限公司朱湘军先生分别作发言致辞。此外，联合飞机还启动了“万亿低空 供应商培育计划”，

旨在通过一系列举措帮助供应商伙伴提升能力，拓展市场，实现共同成长。供应商伙伴们也积极响应联合飞机的号召，双方继续保持开放合作的姿态，共同参与到低空经济时代的建设中，携手共进，推动低空经济产业链的优化升级。



随着科技的不断进步和政策的逐步落实，低空经济正在迎来前所未有的发展机遇。今年以来，黑龙江省、哈尔滨市相继出台了低空经济行动方案，紧抓国家促进低空经济发展的重大历史机遇，因地制宜发展新质生产力，加快培育新场景，拓展市场规模。联合飞机勇当低空经济产业引路先锋、龙江高质量发展排头兵，在哈尔滨打造涵盖大型无人机研究院、新一代大型无人机生产制造基地、大型无人机应用示范基地、有人机无人驾驶改造基地及无人机产业生态链基地在内的“一院四基地”。

今年4月，黑龙江省重点项目全面开工主会场，便设立在联合飞机黑龙江大型无人直升机产业基地项目现场。经过110天的努力，全力跑出项目建设“加速度”。目前，哈尔滨联合飞机无人机总装车间主体结构已封顶、有人机改造车间主体钢结构安装完成，一、二期同步建设方案的设计也在加速推进中。项目达产后将形成无人机产能万架以上，预计新增产值10亿元，可带动无人机产业生态规模达50亿元以上，打造航空产业集群“强支撑”，助力龙江打造千亿级航空产业，将龙江建设成为全国乃至全球低空经济产业高地！



支撑联合飞机产品的持续领先和商业成功，离不开自身组织能力的不断提升，更离不开合作伙伴的精诚协作。每一次精准交付，都离不开供应商伙伴们的专业与奉献、创新与卓越、信任与尊重。

联合飞机的供应链战略锚定体系完善、战术执行与能力提升三大核心方向，旨在构建一个健全、高效、安全的供应链管理体系，打造高质量、高效率的专业团队，加强供应链风险管理与质量管理。这不仅有助于提升集团内部的管理效率和响应速度，更能为供应商伙伴提供更加稳定、可预测的合作环境，从而共同抵御市场风险，实现共赢发展。在供应链管理中，廉政合规被视为联合飞机可持续发展的第一原则，这不仅是企业文化的深刻体现，更是联合飞机在全球竞争环境下企业社会责任的深刻认识。



此外，联合飞机还积极与供应商伙伴构建长期稳定的合作关系。在“安全、易用、低成本”的产品核心原则指导下，双方共同努力提升供应链服务质量与效率，推动产品竞争力的不断提升，为联合飞机在全球市场上赢得良好的口碑和广泛的认可。

随着全球化商业环境的不断变化，联合飞机将继续以航空创新发展为推手，坚持遵循最高标准的商业行为规范；积极推动航空创新链和无人机产业链深度协同，营造繁荣有活力的低空经济产业环境，与供应商伙伴携手并进，共同开创低空经济的新篇章，为实现可持续发展和全球竞争力贡献力量。



多冗余·高可靠·低成本·航空品质

Redundancy | High reliability | Low-cost | Aviation quality

1

双冗余飞行控制系统

Dual redundancy flight system

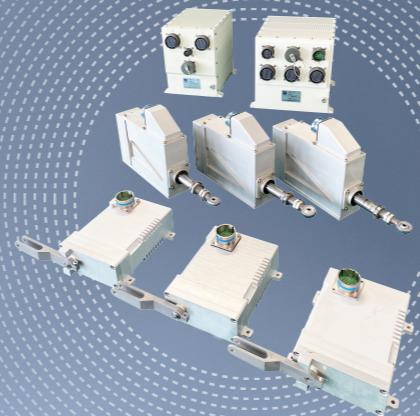
- 传感器信号双冗余配置
- 核心计算单元采用自监控对+双冗余
- 一次故障可工作
- 控制精度不大于全行程1%
- 故障检测率不小于85%
- 系统失效率不大于 1×10^{-5} 次/飞行小时



2

三冗余飞行控制系统

Triple redundancy flight system



3

高可靠飞控系统软件

High Reliability flight control system Software

- | | | |
|-----------------|--------------------------|-------------|
| ■ 交付前完成8000余项测试 | ■ 遵循GJB2786A、438B、5369标准 | ■ 高可靠、强实时 |
| ■ 超300个函数的基础代码库 | ■ 10年以上航空软件资深工程师开发 | ■ 代码复用率超60% |



英国范堡罗航展本周在范堡罗国际展览会议中心拉开帷幕。作为全球商业航空领域的独角兽和中国低空经济领域的领军企业，联合飞机代表中国展团出海参展。

凭借全球领先的航空级倾转旋翼无人机，自主知识产权的大载重长航时工业级无人机，技术前沿的镭影无人机及机库平台，联合飞机成为全场关注的焦点，被行业媒体评价为“全球无人系统技术创新引领者”。

联合飞机董事长田刚印先生表示，“联合飞机在航空报国的指引下，致力于在全球范围构建开放、共享、协作的共赢环境，为各行各业提供定制化的无人系统解决方案，推动产业升级和转型，赋能人类美好生活。”



新品R6000备受瞩目

■ 欧美市场反响热烈

范堡罗航展现场，联合飞机全球首次发布R6000航空级倾转旋翼无人机的宣传片，引起欧美市场及全球客商的极大兴趣与关注，标志着联合飞机在全球无人机产业中的领先地位获进一步巩固。

R6000兼具直升机垂起悬停与固定翼航速航程优势，大载重、高航速、航程远，最大载重可达2吨，航程、航速均达到直升机性能指标的2倍。不受地形和跑道限制，在山区、岛屿等特殊地形也能执行任务，结合各类舱室和载荷设置，在商务出行、应急救援和物资运输等场景中，可承担载人载货的多样任务，运输效能高。

全球客商聚焦解决方案

■ 创新引领未来趋势

联合飞机在航展上展示了全系列工业级无人机产品矩阵，包括TD550大载重无人直升机、镭影Q20智能飞行平台、Q100农业无人机和智能空域指控系统，这些产品凭借其卓越的性能与技术创新，成为全场的焦点。全球首发的全场景解决方案，覆盖应急消防、农业、电力、物流运输等多个领域和场景，满足不同行业、不同客户的多样化需求。联合飞机通过智能化的技术应用，提升全球应急管理能力，推动了农业、电力等领域的智慧化发展，为全球无人机物流的商业进程提供了强劲的动力。

TD550一机多用 | 满足应急消防全场景需求

在应急灾害救援中，TD550已不仅局限于单一领域，其独特的优势和服务能力，在自然灾害、事故救援、公共



安全事件等场景中，都展现出强大的应用潜力。TD550已衍生四大产品系列，应急通讯保障型、消防灭火型、救援运投型以及重油版运投无人机，在后勤物资保障、应急运输和电力基建运输等领域具有广泛的应用场景，成为无人系统领域的新标杆。目前，TD550的适航工作也在稳步推进中，各项符合性验证工作也在顺利开展。

TD550凭借高机动性、大载重、长航时等优势，可以快速响应各类应急需求，实现“30分钟内响应，2小时内到场”的目标。在安徽黄山防汛救灾行动中，联合飞机在安徽省应急管理部调度指挥下，第一时间紧急组织无人机救援队伍，通过预先设定的应急响应流程，救援小组在极短的时间内完成飞行检查、载荷配置等准备工作，确保在30分钟内实现响应，2小时内抵达任务区域。值得一提的是，联合飞机在前往黄山救援第一线时搭载了适配的公网基站，抵达失联村落上空时，冒雨悬停，迅速帮助当地村民恢复通信，仅第一架次就保障了八百多名群众的手机入网通信。救援小组昼夜不停，次日上午继续作业近6个小时，成为现场唯一调通且成功帮助失联群众恢复手机信号的飞行平台。



在“格美”超强台风登陆的关键时期，联合飞机同时在福建、安徽、广西、四川多个省份部署救援力量，提供专业技术支持、培训和维修服务，确保紧急时刻飞行团队能第一时间提供救援保障。航展现场，联合飞机丰富的成果案例，交付后的稳定运行能力与实际应用价值，赢得了国际市场的高度认可。联合飞机不断推出具有自主知识产权的无人机产品和技术解决方案，为应对全球应急灾害救援事业贡献中国智慧和力量。

创新无人值守作业 | 镜影机库赋能各类巡查场景

镜影Q20智能飞行平台将美学与科技完美融合，卓越的性能与设计，获得了2024年德国iF设计奖的最佳设计奖，其设计感、实用性和技术实力得到了国际工业设计界的认可和海外客户的青睐。多个行业的标杆案例，完善的售后服务体系，满足了海外市场的特定需求，成为全球市场关注的焦点。此次航展，联合飞机发布镜影机库设备，创新无人化作业模式，将自动化、智能化、远程监控等技术手段充分融入无人系统解决方案中，在各领域、各场景中实现高效安全的无人化作业过程。



无人值守解决方案

四大系统

· 镜影机库

专为提升无人机作业效率和安全性而研发的智能设备，采用蛙跳式巡检，创新作业模式；能与多种无人机型号适配协同工作，支持作业环境最高海拔达5000m，工作环境温度-20°C至50°C，防护等级达到IP55，待机时间长达80h。

- 结构简约，可靠性高
- 自动操控，自主飞行
- 支持多种负载集成
- 一键返航
- 固定/移动(皮卡车)
- 蛙跳式巡检，创新作业模式
- 环境感知，低压警报
- 立体存取
- 灵活高效
- 多模式部署
- 智能升降
- 精准降落

· 智能机库管控系统

通过智能化的预警机制与自动化的操作控制，确保机库运行的安全稳定，提升整体运营效率。

- 开箱即用，灵活便捷
- 模块化设计，弹性拓展
- 远程任务，一键执行
- 多机协同，掌控现场

· 无人机系统

目前以镜影Q20为主要机型。73min超长续航，10kg强大负载能力，多种任务载荷于一体，让Q20在低空物流、应急救援、农业巡检和电力巡查任务中都有广泛应用。先

先进的视觉和TOF感知技术，支持六向避障，通信范围20km，提高在特殊环境下飞行安全性和稳定性。

· 任务载荷系统

四光吊舱、微光夜视吊舱、喊话器、探照灯、四段抛投器、气体探测仪、物流箱、激光雷达、五轴相机、多光谱相机、SAR雷达、电动绞车、抓捕网枪、应急通信中继设备、医用冷藏箱等设备。

应用模式

- 单机库远程控制（固定/移动模式）
- 机库+智能遥控器协同控制
- 多机库协同控制

六大应用场景



电力巡检

石油与天然气应用



公共安全

农林应用



生态环保

城市物流配送

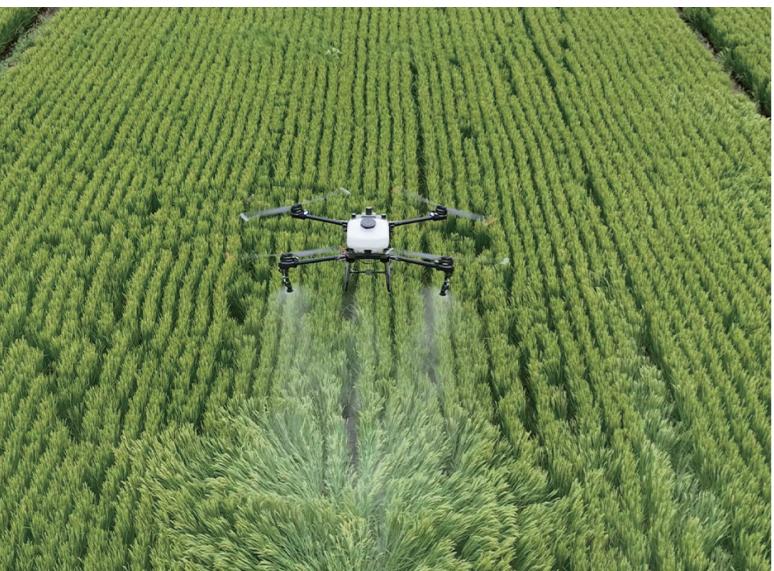
镭影机库，创新赋能电力巡检无人值守作业

镭影机库协同镭影Q20形成六大场景无人值守解决方案，覆盖输电、变电、配电、发电四个电力巡检全场景，对电力线路和关键设施进行通道巡检、精细化巡检和红外巡检，实现全天候、自动化的作业流程。利用Q20贴近电力设备，多角度巡检，有效解决盲区死角无法观测、巡检频率高、人力和专业性需求高、传统作业长途跋涉等难题，及时发现并处理潜在问题，提高整体电力巡检效率，保障电力供应的安全稳定。立足技术创新和应用模式创新，联合飞机在国际舞台上展示了电网数字化工程的“大国实力”，助力全球电力行业的智能化发展。

产品实力

彰显中国“新质生产力”

现场观众见证了正在我国最北方，黑龙江地区玉米和水稻作物区上空执行喷洒作业的Q100农业无人机，其高度智能化、自主化的飞行和作业能力，让东南亚、欧美地区的客户称赞。



每分钟20L的超大流量，一次可喷洒50公斤；全自动作业系统，可支持智能航线规划及一键自主作业，大幅提升防地避障能力，可适应多地形农业作业区域；IPX6高防护等级可实现整机水洗，有效防止农药侵蚀，维护更便捷；适用于喷洒、监测、运输、航测等多种场景，可进行大田、果树、养殖播撒和农产转运等多种作业，是农业生产中具有高安全、高可靠、低成本等优势的多面助手。

欧洲客户表示，“我们对农业的新技术、新方法很感兴趣，看到Q100现场作业的视频，我们很惊喜。它将在减少农药使用、节约水资源和提高作业效率方面有着广阔的发展空间，期待Q100有机会能‘飞’到我们农田上空”。随着南美地区农业现代化的推进和无人机技术的不断发展，Q100的市场潜力也将进一步释放。中东及非洲地区部分国家正在积极推进农业现代化进程，对无人机、无人值守作业等现代农业装备的需求不断增长。

此次航展现场，联合飞机也正式宣告，Q100将从技术创新、市场拓展、服务模式与国际合作等方面，开启全球化发展新布局；与Q20和T1200组成农业无人机“三剑客”，以“大中小”飞行平台的协同，形成全新智慧农业解决方案，服务全球新农业，极大提升农作物的生长效率与精确性，为农业植保提供全生命周期的保障。

智能空域指控系统 | 全盘管控安全、有序的低空飞行

智能空域指控系统作为整个空域的“指挥官”，包含飞行监控、信息管理、飞行培训和场景应用四大功能模块，可进行无人机指挥调度、高密度任务协同和可视化管理飞行等任务，提供飞行的全周期保障，实现空域内“时+空”资源管理，确保空域资源的高效、快捷配置。指控系统已在应急消防、低空物流配送、电力巡检等行业的服务场景中进行智能化、无人化和高效化的调度管理。未来还将继续拓展行业应用边界，解决城市和社会治理难题，提升治

理效率和质量。

物流配送作为全球低空经济重点赛道，联合飞机在“造飞机”“搞基建”“抓应用”三步战略下，聚焦低空物流赛道，探索低空多层次物流方案应用，构建“短-中-远”全覆盖的低空物流与货运配送体系，可根据需求匹配10公斤至200公斤不等的物资载荷，城市物流与物资运输双线并进。智能空域指控控制系统在全数字化框架下，将新技术与低空经济产业进行融合，全力保障各型无人机的飞行安全和有序运行，推动低空经济发展。

推进全球化战略

共谋合作新篇章

此次范堡罗航展，联合飞机展示了中国无人机产业走向世界的亮丽名片。联合飞机的品牌影响力在全球市场得到了显著提升，越来越多的海外客户开始了解和关注联合飞机及其产品，为联合飞机推进全球化战略奠定了的具有国际影响力的品牌基础。

来自世界各地的客商纷纷驻足参观、咨询洽谈，表达了与联合飞机合作的强烈意愿，开展首日3小时即获取法国100架工业级无人机意向订单，为双方企业的共同发展带来了新机遇。针对海外市场的特定需求，联合飞机提供了定制化的无人系统解决方案。这些方案充分考虑了海外地区的地理、气候、法规等因素，确保了无人机在全球市场的顺利应用和推广，这些合作也为联合飞机在海外市场的长期发展注入了强劲动力。

十二年发展积累，联合飞机打造了集设计研发、生产制造、部装总装、集成试验一体化基地，拥有无人机全产业链研发设计和制造能力。联合飞机完整产业链体系的



建立不仅为公司的技术创新和产品研发提供了有力保障，还为公司的国际化战略实施奠定了坚实基础。联合飞机将携手海外合作伙伴共建无人机生产线，提供生产工艺、设备操作、质量控制等技术和知识的转移与培训，实现双方技术共享与优势互补。

联合飞机在英国范堡罗航展上的亮眼表现，不仅展示了中国无人机企业的强大实力与显著优势，更为中国低空经济引领全球航空新潮流奠定了坚实基础。联合飞机将继续秉承创新精神，继续推进海外市场拓展战略，推动全球航空制造产业链供应链的发展，让“中国制造”激发全球无人机产业的新动能，引领世界航空科技的新潮流。



TD220 共轴无人直升机

· 军用标准设计 · 高抗风 · 纯惯飞 · 运输尺寸小 · 快速展开撤收 · 多用途 · 支持次高原使用

TD220共轴无人直升机是一款起飞重量为350公斤级的通用型无人直升机，自动化程度高、安全可靠且具有较强任务拓展能力。采用电控-分控旋翼控制技术和智能化、模块化设计，结合先进的H ∞ 控制算法，实现高精度、自适应控制，抗扰动能力强。是目前国内领先的一款载重大、航时长、升限高、尺寸小、环境适应能力强的小型无人直升机，具有较强的行业化定制能力。

机体尺寸
2.16×1.01×1.76 m (L×W×H)

最大起飞重量
350kg

最大有效载荷
50kg

续航时间
5h (载荷35kg) >4h (载荷50kg)

最大平飞速度
100km/h

巡航速度
80km/h

无地效悬停高度
2500m

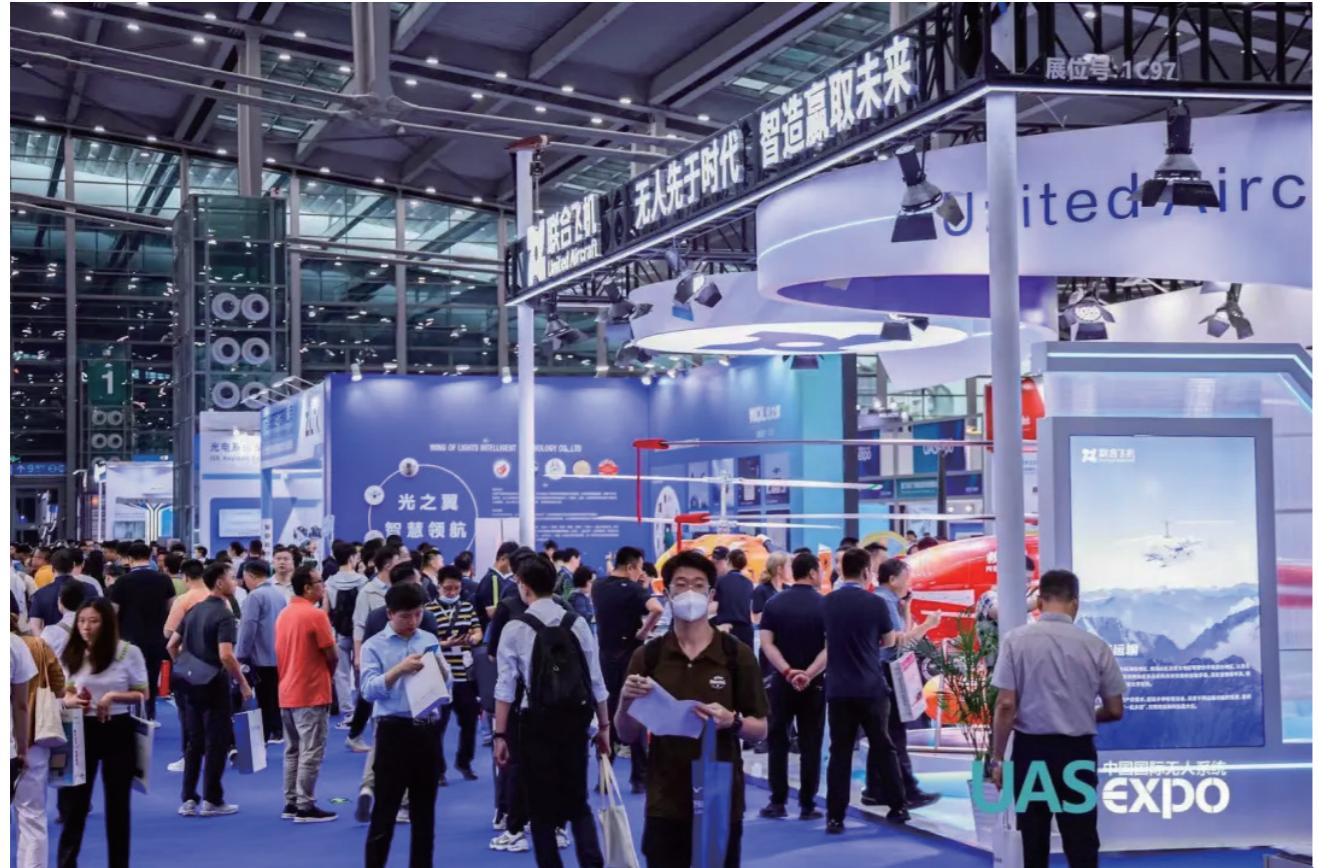
实用升限
3500m

任务半径
100km

抗风能力
起降抗风6级(12m/s)

防雨等级
小雨

工作温度
-40°C~+55°C



世界无人机大会 联合飞机发布低空经济战略全景图

5月24日，第八届世界无人机大会在深圳隆重开幕。这一行业盛会汇集了全球无人机领域的领军企业和创新精英，旨在共同探讨和展示无人机技术的最新发展和应用前景。

联合飞机集团创始人、董事长兼总裁田刚印在全体大会上发表《低空经济新机遇 无人机赋能中国产业升级》主旨演讲，并发布联合飞机低空经济发展战略及目标。聚焦业务战略，响应国家低空经济发展新格局，田刚印董事长提出，联合飞机作为无人机行业领军企业，发挥我国无人机产业现有优势，发展以有人机和无人机融合发展的“新低空经济”，聚焦“造”飞机、“搞”基建、“抓”应用三方面。持续推动无人机赋能产业升级，为行业提质增效，通过创新和技术的力量，推动中国无人机产业的全面升级。



■ 重磅发布 ■ 联合飞机低空经济战略全景图

① 造飞机：安全易用 低成本，全面提升产品竞争力

田刚印董事长指出：“十年前消费级无人机行业爆发，今天工业级无人机行业开始崛起，十年后航空级无人机市场必定引爆。”联合飞机作为行业领军企业，带头举起“造”飞机的大旗。不断提高自主研发能力，研制创新产品，赋能行业应用。

首次亮相的大载重大流量Q100农业无人机，最大喷洒载荷50公斤，流量达到每分钟20升，一小时可覆盖400亩地；最大播撒载荷60公斤。IPX6防护等级，能有效防护



农药侵蚀，整机水洗，使用更高效，更便捷。具备智能航线规划，一键自主作业能力。无论是喷洒、播撒、运输还是航测作业，都能为农业生产带来出色助力。



无人机凭借其机动灵活、作业高效、安全可靠、降低人员风险等优势，在应急救援和消防灭火中，得到广泛应用。此次展示的TD550全场景应急消防无人直升机，将其“大载重、长航时、功能多、速度快、可精准悬停”等独特优势，发挥在消防灭火、物资运投、应急通讯保障等作业中。联合飞机不断探索各场景需求，弥补空中滞留作业能力的不足，带来新质应急生产力。

“镭影”Q20及搭载的自研高性能电机产品，彰显了联合飞机在无人机动力系统上的创新能力。这款电机不仅具有高效率和高可靠性，还为Q20提供了更长的续航

能力和更强的负载能力,使其在巡查、监测、测绘、疏散等场景有不可比拟的优势,已广泛应用在电力、消防、海关、农林等行业领域。

TD220电力型无人机是联合飞机针对电力行业特定需求设计。能够适应复杂的电网环境,进行高效的电力巡检和维护工作,大幅提高电力设施的管理效率和安全性。集成先进的传感器和自主飞行控制系统,使其成为电力行业现代化的重要助手。



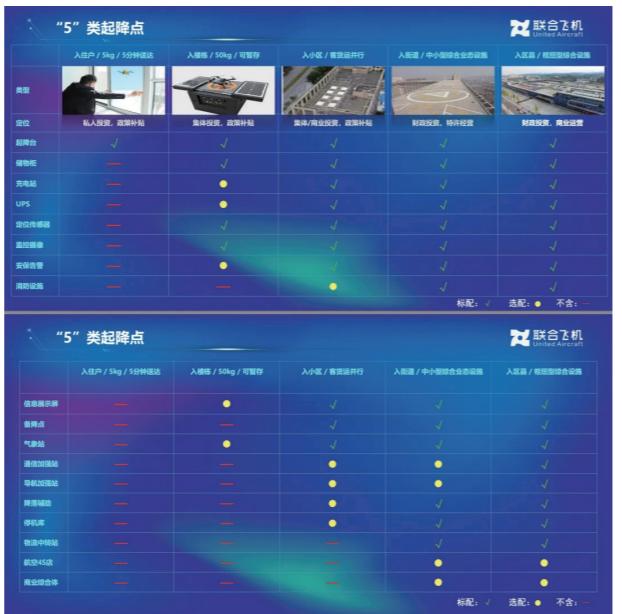
联合飞机在无人机设计和制造方面的强大实力,以及对行业发展的深刻理解和前瞻性思考,通过产品矩阵为行业的发展注入了新的活力。无论是提升电力行业的运维效率,增强公共安全领域的应急响应能力,还是推动农业现代化,联合飞机的产品都以其卓越的性能和创新的应用场景,展现了其在行业中的重要地位。

2 搞基建:发力空中新基建,翱翔万亿蓝海

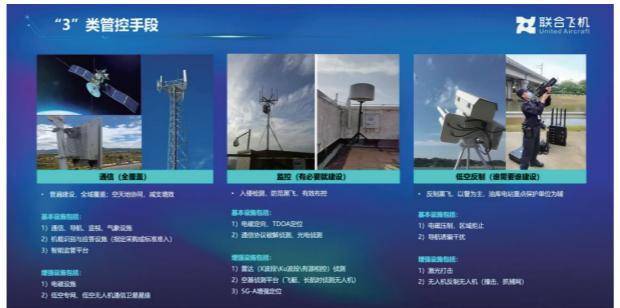
低空经济发展,基建要先行。田刚印董事长提出了联合飞机的“531”建议,作为低空新基建的实施方案,即五类起降设施、三类管控手段和一个“大脑”。



做好五类起降点建设。根据无人机大小、航程、载重能力等因素,将无人机起降点分为“入住户、入楼栋、入小区、入街道、入区县”5大类,这5类起降点将无人机从小到大、从近及远、从易到难进行了精确分类,支撑低空经济走进千家万户,真正做到有层次、规模化应用。



建立三类管控手段。低空飞行规模扩大,特别是无人机爆发式发展,将带来极大的互联互通需求和管理压力,必须在通信、监视、反制三个方面根据实际需求建设相应管控设施。



打造一个“大脑”。通过建设城市CIM系统、空域网格化系统,实现空域数字孪生底座,结合算力平台、智能算法平台形成低空管理服务“大脑”。通过“大脑”,联合飞机将主要统筹四层业务,确保空域资源的高效、快捷配置,确保航路的“稳、准、快”,负责对接物流运输平台形成响应式调度业务,以及对接终端用户,提供“空中高德”式的导航和空域授权管理服务。这四层业务,联合飞机正在深圳、芜湖、十堰、哈尔滨、天津等全国多地试点运营。



3 抓应用:聚焦行业场景,发挥优势能力

随着低空领域的开放,无人机已灵活应用于多个行业领域,开拓多种应用场景。应急消防领域,联合飞机已形成六大无人系统解决方案,针对10+种典型环境,凝练三类应用场景与五项作业任务,助力应急救援建设,构建力量布局更合理、能力更全面、效能更显著的无人机应急救援航空体系。

提高农业生产效率、保障农产品质量、保护生态环境,科技创新助力新农业生产方式的转变。此次大会上,联合飞机融合低空发展优势与资源,针对典型农业应用场景,分解任务,制定2C+2B+2G 商业模式,形成大型直升机与多旋翼无人机协同的产品矩阵解决方案,打造高效、经济、智能的植保利器。

● 智慧农业解决方案 ●

01 架构组成

农业无人机平台

地面设备

数字软件平台

02 农业无人机平台

Q100农业植保机

核心优势: 大载量、大流量(喷洒50公斤, 20升/分钟; 播撒60公斤, 190公斤/分钟); AI系统支持自主避障、仿地飞行; 智能航线规划, 一键自主作业

农业载荷设备: 农药喷洒套装、播种施肥装置、授粉装置等

地面设备: 可定制三轮专用作业平台, 搭载一体式起降平台, 一人一车高效轻松完成植保任务

智能化配件: 全能变频充电站、智能遥控器、智能飞行电池、智能充电桩

Q20农业遥感无人机

农业载荷设备: 多光谱可见光融合镜头、六镜头多光谱等

地面设备: Q20机巢, 车载或固定式, 支持自动起飞、自动降落、自动充电等全自主无人化作业模式

TD550大载重植保型无人直升机

农业载荷设备: 农药喷洒套装、播种施肥装置、吊挂抛投装置等

地面设备: 皮卡车运输, 适用于丘陵、山地地区, 大范围区域作业任务



大小飞机协同，配合车载平台、智能空域指挥控制系统等实现耕种管收全覆盖，为农业植保提供全生命周期的保障，带来经济效益、社会效益和生态效益的多重提升。



除了全新农业产品与解决方案的亮相与发布，大会期间，联合飞机在多场论坛和展区上，开展“室内无人机的应用与挑战”、“无人机赋能物流产业升级”、“无人机在应急救援领域的创新应用”、“无人机的空中指挥官--智能云平台”等主题演讲10余场，充分展示了联合飞机对多领域场景的深耕理解、强大的技术积累与丰富的应用经验。

■ 云起风涌 ■
联合飞机持续构筑低空经济竞争力

4 抢占未来低空战略制高，开启航空级无人机新纪元

联合飞机的低空经济发展战略，是对国家低空经济发展新格局的积极响应，也是对无人机赋能产业升级的有力实践。通过持续的技术创新和产品研发，联合飞机集团致力于构建一个安全、高效、智能的低空运营生态系统，为社会创造更大的经济价值，为行业树立更高的发展标杆。



展望航空级无人机的未来，联合飞机集团董事长田刚印表示，尚处在研发期的航空级无人机将成为城市空中交通和省际运输的关键角色，其更远航程和更快速度，满足未来的空中交通需求，预计将在未来10年迎来爆发，成为低空经济战略性新兴产业的亮点。推动航空级无人机更快发展，要加大航空级无人机资金投入和前沿技术布局，创造良好的研发环境、引进头部企业并支持发展，建设上下游产业集群。面对全球科技竞争新格局，低空经济更广阔的发展新空间。联合飞机集团将持续科技创新，不断丰富产品和行业解决方案，深度满足客户的多元化需求，让产业制造更智能，新低空经济更具潜力。



应急通信 TD550应急通信型无人直升机系统

系统组成

- TD550
- 光电吊舱
- 机载卫通
- 公网基站
- 机载PDT集群基站
- 机载宽带自组网设备

系统优势

- “三断”(断网、断电、断路)场景应用
- 高海拔能力强
- 覆盖面积大
- 续航时间长
- 响应速度快

典型任务

- 应急/消防专网通信
- 公众4G/5G网络通信
- 灾情侦察及时回传





商业航空新势力 | 联合飞机低空物流解决 方案火爆全球

万众瞩目的范堡罗国际航展首日，开展3小时，联合飞机迅即获取法国100架工业级无人机意向订单。作为中国展团和全球无人机企业在范堡罗航展上收获的首笔批量订单，意味着联合飞机无人机产品和低空经济业务影响力已遍及全球，公司市场地位获得欧美航空行业客户的高度认可。

尖端的技术实力与卓越的产品性能，倾转旋翼航空级无人机、TD550和Q20无人飞行平台在航展现场掀起了无人机“中国旋风”，吸引无数专业人士的目光。现场发布的联合飞机低空物流解决方案，获得欧美航空界专业客户的高度关注和好评，彰显了中国商业航空企业正在构建全球低空经济风口和世界航空行业全新格局。

联合飞机城市物流解决方案

■ 全球物流行业的新热点

随着科技的快速发展，今天的物流行业正在迎来一场前所未有的变革。具有快速、高效、灵活等优势的无人机，作为低空经济产业的重要新质生产力，不仅能大幅缩短配送时间，提高物流效率，降低物流成本，还解决了传统物流方式的堵点和痛点，对全球物流行业的发展具有重要意义，正逐渐引领着物流行业的未来。

近年来，全球无人机物流市场规模持续增长，中国在无人机物流领域的发展尤为迅速，已成为全球物流领域的领导者之一。美国、德国、荷兰等国家也在多方面推动无人机物流的创新发展，来解决日常用品快递、偏远地区配送和紧急医疗用品运输等需求。



为进一步提升防灾减灾救灾能力，加快推进大载重、长续航、任务能力强、智能化的无人机救援平台研制，对自然灾害应急能力与无人机航空应急能力的提升是十分必要的。联合飞机立足大震巨灾、“三断”等极端情况，综合灾害特点，森林草原防灭火、防汛等复杂环境差异，应急救援实战急需等要素，瞄准应急指挥通信、空中巡护侦察、灾情图像实时传输等关键核心能力短板弱项，形成可复制、可推广的典型案例，打造建设应用标杆，为全国无人机航空救援体系建设贡献力量。

联合飞机城市物流解决方案致力于在低空物流配送领域实现创新与突破，专注解决末端配送的难题，补齐现有物流运输短板，应对特殊或复杂环境下的物流挑战，实现常态化和非常态化物流运输业务结合。联合飞机在国内多个省市开展创新应用，运营平台“联飞快送”的试点应用和创新Q20物流无人机的服务模式，不仅在国内遍地开花，更在全球城市物流运输行业变革中，对解决偏远地区、最后一公里、紧急物资等场景需求具有重要意义。



方案组成

● 地面系统

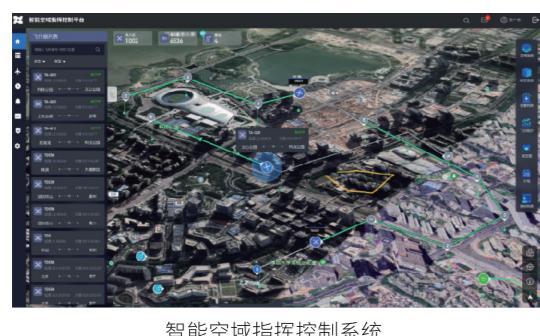


● 任务载荷分系统

挂载载荷：



● 运营调度系统



智能空域指挥控制系统

● 基础建设

简易起降点、综合起降平台等5类起降点，实现入区县、入街道、入小区、入楼栋、入住户（非密集住宅区）

● 通信及导航设备

通信设备：包含中继组网测控图传链路（含单波段和多波段）、4G/5G、北斗短报文

导航设备：包含北斗/GPS/GLONASS/GALILEO、MEMS组合导航、磁航向仪、视觉导航设备、毫米波雷达、ADS-B；可选配单北斗定位导航和光纤惯导

方案优势

运输航线更短，效率更高：

无人机的空中运输航线不受地形和道路的限制，可实现点对点直达

大载重 长航时：

镭影Q20单架次可运载10kg货物，最长续航时间73min

服务范围广：

Q20支持20km远程操控，支持北斗短报文通讯

安全性高：

Q20集成六向视觉避障系统、红外感知系统、卫星定位系统等先进技术于一体，夜间也能安全飞行，避障距离达30-40m；配备降落伞模块，开启多重保障；无人机故障声光告警装置，具备应急迫降能力，可提醒周边人员避让，避免人员伤亡风险。

经济、易用：

按照民用市场标准设计，飞行平台性价比高，无人机智能化作业，无需人员全程管控，操作简便，降低人力和运输成本。

智能管控：

打破飞行信息孤岛，打通业务系统，保证飞行合规性。实现“态势一张图”，支持数据和视频实时协同；远程控制无人机作业、多机协同任务管理，三维航线自动规划。

高环境适应性：

高原性能优势突出；复杂环境适应性强，在山区、大风、大雨等恶劣环境下，最大限度地减小地面/水面运输风险。

机动部署：

支持多机部署和协同飞行，根据运输需求灵活选用、快速响应。

多种座用模式：

-模式1 无人值守：同时部署镭影Q20与镭影机库实现固定场所的长期运营

-模式2 一站多机协同：具备一站多机和集中管控能力，可以大幅减少操作人员数量

-模式3 双站接力控制

-模式4 远程异地自主起降

应用场景

■ 01 低空物流配送 ■ 城市内的外卖配送



单架次可配送10kg物品，不受地形、天气与人力等外部因素影响，缩短配送距离，带来更安全、更高效、更便捷、更灵活的解决方案。

■ 02 低空物流配送 ■ 城乡间快递运输



单程运输距离长达30km，开通全国首条长距离物流配送航线，破解“急难险绕”环境下末端配送的运输难题。

■ 03 低空物流配送 ■ 易变质农副产品运输



支持一站20架协同运输，快速运输偏远地区的农副产品，打通农副产品物流体系“最初一公里”。

■ 04 应急物资运输 ■ 快速、精确投送救灾工具设备



可携带救生圈、救生衣、救生绳、急救工具设备、饮用水和食物、卫星电话、防毒面具、防火隔热毯、高效灭火器等救生装备，确保受困群众得到必要的救助；大风、大雨等恶劣环境下，降低救援人员作业的危险性和人力运输难度。

■ 05 应急医疗运输 ■
以快应“急”



运输血液血浆、检验样本、移植用器官活体官、AED、急救药品、鲜活疫苗、防疫药品、小型手术器械及检验设备、小型吸氧装置等急需的医疗物资，无论是城市内还是高海拔地区，大大提升紧急情况下的物流效率。

重塑格局

■ 代表中国低空物流“出海”征战

在冬季最寒冷的中国最北方，在地面交通受阻情况下，Q20不受极寒天气影响，安全起飞，缩短配送距离，为偏远地区派送新春消费品和农产品。新春时节，联合飞机以科技创新守护万家幸福。在安徽把城市消费品运输到偏远地区，运输农产品返回城市，完成全国首条长距离物流配送航线首飞，并开展常态化运营，单程运输距离20km+，物流效率提升50%。

在湖北十堰首条航路开通，运输当季蔬菜、水果，将原本40分钟的地面车程缩短至15分钟，时间效率提升60%。重庆巫山脆李果园，新鲜的“中华名果”现场采摘装货，20架Q20协同运输，通过“空空联运”的方式，8分钟配送到运输机场，陆运效率提高86.7%。

紧急救援和医疗用品运输领域，也是联合飞机重点拓展的物流配送场景。从南山医院到市血液中心，地面交通运输90~120min，Q20配送最快15分钟，节省近80%的时间，这条路，Q20已经安全运输30000+架次，飞行3000+公里。黄山暴雨洪涝灾害发生后，道路受损严重，救援物资靠人力运输难度大，危险性高，Q20携带救生装备沿河道飞行，搜寻落水人员，提供救生装备；跨越湍急河流，Q20空中运输光纤引导绳，为维修人员提供抢修设备。



科技日新月异的今天，中国无人机已成为全球科技版图上的璀璨新星。联合飞机领先的技术优势，安全、易用、经济的无人产品为中国无人机在国际市场上的竞争力提供了坚实基础。城市物流运输解决方案及服务不仅为国内传统物流配送带来了变革性的新鲜血液，引领着中国低空经济的繁荣发展，更为需求旺盛的全球多元化市场，提供了丰富的中国经验和成功案例，推动无人机物流运输在全球范围内的应用与发展，重塑未来无人机物流发展新格局。

森林消防灭火

T1200无人直升机，可配备灭火剂药箱、灭火弹、自吸式水桶等多种灭火载荷





低空经济合资项目签约仪式

**强强联合
为我国新型交通运输体系注入新活力!**

立足低空产业经济发展和交通运输体系构建
联合飞机携手苏交科
致力于开拓低空飞行服务新场景
构建低空交通运输新体系
孵化低空经济产业新业态
打造五类能力
建设低空经济发展的高端智库型科技企业

低空基建蓄势待发，强强联合筑高地

近日，联合飞机与苏交科牵手，顺利举行“低空经济合资项目”签约仪式，双方共同出资设立低空经济的合资公司。联合飞机作为国内无人飞行器制造以及飞行监控管理领域的龙头企业，与苏交科强大的基础设施咨询服务能力强的强强联合，战略合作意义重大。双方输出核心资源与能力，抓住全国建设低空经济示范市的重大机遇，共同打造国内低空经济领域的先导产业头部企业。



双向的奔赴，离不开外界形势的变化！当前，低空经济已成为国家战略性新兴产业，并得到国家和地方政府的高度重视与支持，各地配套产业政策的完善，为低空经济的发展提供了有力支持。聚焦“造”飞机、“搞”基建、“抓”应用三方面，发展以有人机和无人机融合发展的“新低空经济”，合资公司可以为低空经济的发展提供宏观形势和政策研判，为地方政府提供低空产业发展的顶层智库支撑；同时，做好技术体系建设，为各省低空经济发展提供因地制宜的解决方案，开展低空产业规划及应用场景策划；围绕政策咨询研究、低空基础设施总体规划设计、数字空域平台建设等核心业务，合资公司实现快速响应和落地，提供低空新基建投建运一体化等多维度咨询服务与技术支持。



联合飞机集团创始人、董事长兼总裁田刚印先生在签约仪式上表示，低空经济作为国家战略性新兴产业，未来将迎来巨大发展。合资公司要抓住时代机遇，一方面做好与国家及省、市各级政府部门的全面对接，保障政策、信息、数据等沟通渠道的畅通；另一方面要紧抓核心优质资源，以全国一盘棋的战略视角，为政府提供可落地的全过程解决方案，将合资公司建设成为全国低空经济领域的最强智库和技术服务公司。

新型交通运输体系，低空经济注入新活力

随着无人机技术的成熟和低空空域管制的逐步放开，低空经济正成为新的增长引擎。低空经济的崛起为建设新型交通运输体系带来新机遇，交通运输行业与低空经济的深度融合为交通运输新体系注入新活力。





未来，合资公司将成为联合飞机发展低空经济战略业务的重要载体，围绕低空经济产业发展与低空交通运输两大体系的构建，针对政府、平台公司、应用方等客群主体，打造“总体应用、基础设施、空域智联、检测认证（安全）、低空培训”五类能力，提供包括低空经济领域政策与产业发展全过程咨询、低空飞行运营服务一站式解决方案、低空基础设施与飞行管理平台投建管运一体化解决方案等技术服务，成为低空经济发展的高端智库型科技企业。

即时配送 先人一步



- 全域全时保障
- 提升运输效率
- 低成本高安全

物流运输

无人机助力物流运输行业客户实现全域全时业务覆盖，补齐现有物流运输短板，
实现常态化和非常态化物流运输业务结合。

2024全球独角兽榜

重磅发布

联合飞机荣登

「中国商业航空航天」
Top10

「全球商业航空航天」
Top15



全球独角兽榜

联合飞机跻身中国商业航空航天Top10

近日，胡润研究院发布《2024全球独角兽榜》，详列了推动全球新技术和新产品爆发式增长的独角兽，并分析了这些新锐企业所聚集的领域和新一轮科技革命和产业变革带来的影响。联合飞机凭借领先的技术、优质的产品、广泛的应用，与字节跳动、马斯克的SpaceX、贝索斯的蓝色起源(Blue Origin)航空公司等一同上榜，成为全球独角兽“新势力”，彰显了联合飞机强大的科技创新活力与发展潜力。

01

首次上榜：品牌价值升级的答卷获得全球肯定

在这份榜单上，全球独角兽企业数量达到1453家，中国以340家位居第二，较上年增加24家，56家新独角兽首次上榜。航空航天行业作为国内盛产独角兽的新兴领域，联合飞机首次跻身全球独角兽榜单，位列“中国商业航空航天”前十，全球Top15。

独角兽企业所在的行业以及所在的地域和城市，往往鲜明表达了哪些行业吸引了中国最顶尖的年轻人才和最聪明的资本，哪些地域和城市拥有最好的创业生态和发展潜力。2012年成立至今，联合飞机实现全国产业布局，在深圳、芜湖、北京打造无人机设计研发、生产制造、部装总装、集成试验一体化基地，在西安、成都、上海以及新加坡成立研究院，影响力覆盖京津冀、粤港澳大湾区、长三角、新加坡等世界级城市群。今年，黑龙江大型无人直升机产业基地项目正式启动，在十堰、东台等地布局低空经济示范项目与基地，打造一批标杆示范成果，海外业务的布局进程也跑出加速度。联合飞机成功塑造了“中国商业航空航天”企业的全球化品牌形象，诠释了未来航空级无人机在全球市场竞争中的强大潜力与商业价值。

2024全球独角兽榜 (全球商业航空航天领域)		
序号	企业名称	掌门人/联合创始人
1	SpaceX	Elon Musk
2	蓝色起源	杰夫·贝佐斯
3	Sierra Space	-
4	Relativity Space	Jordan Noone、Tim Ellis
5	维思达公务机	Lori Hanlon、Thomas Flohr
6	ABL Space Systems	Harry O'Hanley
7	Beta Technologies	Kyle Clark
8	天兵科技	康永来
9	长光卫星	宣明
10	Volocopter	Alexander Zosel、Stephan Wolf
11	Astranis	John Gedmark、Ryan McLinko
12	银河航天	徐鸣、张世杰
13	小鹏汇天	何小鹏
14	蓝箭航天	张昌武、吴树范
15	联合飞机	田刚印
16	中科宇航	杨毅强
17	Epirus	Bo Marr、Grant L. Verstandig、Joe Lonsdale、John Tenet、Max Mednik、Nathan Mintz

联合飞机深知品牌和文化是长久发展的基石,集团将秉持“持续为客户提供安全、经济、智慧的无人产品,惠及社会”的企业使命,全面提升品牌实力与价值,致力于成为“全球系统无人系统领域领军者,便捷物品运输和人类出行,引领时代变革”,为推动中国商业航空航天的蓬勃发展贡献力量。



02

实力上榜:“创新变革”支撑核心竞争力

独角兽企业具有高成长性,是新经济发展的“风向标”,是新质生产力的引领者。去年中央经济工作会议和今年全国两会,低空经济成为撬动中国经济高质量发展关键支点,联合飞机成为代表新质生产力的独角兽企业。2024年,联合飞机打破传统低空经济发展模式,创新发展,聚焦「造飞机」、「搞基建」、「抓应用」三大方向,积极探索中国低空经济发展新模式,为国民经济发展提供新动力,为社会公共服务提供新手段,为区域经济发展提供新空间,为国防建设提供新支撑。

技术创新是无人机企业的命根子,拥有自主知识产权与核心技术,才能生产具有核心竞争力的无人机,在激烈的全球竞争中立于不败之地。



2012年,联合飞机自主研制的中国第一架电控共轴无人直升机TD220首飞成功,2018年主持制定国内第一个无人直升机行业标准,2020年推出完成“长航时、大载重、高原性能强”三大突破的TD550共轴无人直升机,2022年启动航空级无人机--倾转旋翼飞行器的自研自制。回顾过去的发展历程,联合飞机始终以创新变革迎接每一个挑战,把技术自主可控、产品创新变革与产业发展主动权牢牢掌握在自己手中。凭借多年研发技术的潜心投入,联合飞机拥有国际领先的关键核心技术,不仅填补了国内空白,打破国外技术封锁,更积累了多项系统研制能力,开发了全球领先的无人化、智能化装备,打造了安全、易用和经济的无人飞行服务。

03

未来无限:崛起的新势力,领跑全球市场

联合飞机跻身全球独角兽榜,书写了中国无人机产业的攀登史,代表了在暗流汹涌的全球经济潮汐中,中国企业所取得的非凡成就。对联合飞机来说,一切辉煌过往皆为序章。未来,以联合飞机为首的中国无人系统领军企业,将在低空经济新蓝海下,展现新活力,勇创新价值,推动中国科技创新浪潮滚滚向前,在新一轮科技革命和产业变革中重构全球创新版图、重塑全球经济结构。

镭影Q20 智能飞行平台

外形尺寸	最大起飞重量	最大有效载荷	续航时间
1595×884×527mm (展开) 559×455×335mm (收纳)	16.7kg(空载), 22kg(最大)	10kg(定制版)、5.5kg(标准版)	73min(空载) 50min (5kg载荷)
最大航程	最大飞行海拔高度	通信距离	通信频段
60km	标准动力:5000m 高原动力:7000m	20km(无干扰)	2.4GHz / 1.4GHz
最大水平飞行速度	最大速度	最大可承受风速	防护等级
27m/s	6m/s(上升) 5m/s(下降)	15m/s	IP55
工作环境温度	悬停精度	RTK位置精度	六向障碍物感知范围
-40°C~ 60°C	垂直:±0.1m 水平:±0.1m	垂直:1.5cm±1ppm 水平:1cm±1ppm	0.1~15m(红外感知系统) 0.6~40m(视觉避障系统)





联合飞机拉满“加速度” | 黑龙江低空经济按下“快进键”

联 飞 喜 报

春光作序，万象更新。黑龙江大型无人直升机产业基地项目吹响了开工的号角，这标识着联合飞机黑龙江基地正式扬帆起航，亦是联合飞机以高新技术为牵引，布局黑龙江，不断擦亮“龙江航空产业”名片的重要里程碑。通过产业项目建设，联合飞机蓄足创新之势，积聚发展之力，为“龙江智造”注入强劲动能，开启省域低空经济产业高质量发展的宏图。

推新

联合飞机吹响项目开工的“冲锋号”

今天的重大项目，就是明天的生产力。4月3日上午，“黑龙江省2024年重点项目全面开工现场会”隆重举行。黑龙江省委书记、省人大常委会主任许勤出席现场，发表讲话并宣布项目开工，省委副书记、省长梁惠玲主持会议，省政协主席蓝绍敏等政府领导出席见证。此次活动主会场设在黑龙江大型无人直升机产业基地项目建设现场，彰显了联合飞机在全球无人系统领域的领军地位，更体现了全省对联合飞机产业基地项目的高度重视，对联合飞机勇当低空经济产业引路先锋、龙江高质量发展排头兵的赞扬与认可。



仪式现场，省委省政府领导考察了哈尔滨联合飞机基地现场，驻足展区，详细了解项目经营与建设计划，听取低空经济工作汇报，高度赞扬了频频出圈的联飞低空案例，鼓励联合飞机加快开发低空场景并打造具有龙江特色的示范应用。参加仪式的领导共同为黑龙江大型无人直升机产业基地项目奠基培土，送上美好祝愿。



主会场，联合飞机全系列无人机产品亮相，开工仪式现场靓丽的风景线。

作为仪式致辞环节的唯一企业代表，联合飞机集团创始人、董事长兼总裁田刚印先生表示，1903年，莱特兄弟发明了飞机。一百多年来，人类不懈努力，让飞机飞得更高、更远，运载能力更大、更重。如今，随着科技的发展，我们不仅关注飞机“身体”，更关注飞机的“大脑”。联合飞机作为工业与航空级无人机的领军企业，研制出我国第一架电控共轴无人直升机，主持制定了国内第一个无人直升机行业标准，承担了中国第一款无人直升机型号研发、设计和生产任务，在国防建设、航天保障、应急救援、电力巡检等众多领域打造了行业标杆案例。今天，黑龙江大型无人直升机产业基地项目正式开工，与黑龙江传统产业优势结合，将有越来越聪明的飞机——无人机在这里诞生，为龙江振兴注入新动能，助力龙江打造千亿级航空产业，将龙江建设成为全国乃至全球低空经济产业高地！



全省重点项目全面开工现场会
主会场



奠基培土仪式，黑龙江大型无人直升机产业基地项目正式“扬帆起航”。

焕新

龙江智造，打造新质生产力实践地

黑龙江省航空工业作为国家航空产业重要发源地之一，历经七十余年发展，现已拥有完善的航空制造产业链，大批飞机研发、制造人才，以及广阔的应用市场，为维护国家国防安全和区域经济发展做出了突出贡献。围绕产业优势，黑龙江省抢先布局无人机产业，大力发展战略性新兴产业。2023年，哈尔滨市又获批国家级航空装备创新型产业集群，成为黑龙江省唯一获批创新型产业集群，也是全国仅有的两个以航空装备产业为主体的创新产业集群之一。



加快形成新质生产力是大势所趋，联合飞机以创新引领龙江航空新一轮产业技术变革，助力“龙江制造”向“龙江智造”转型，焕发新机。

创新

布局三要素，发展龙江低空经济



此次以黑龙江大型无人直升机产业基地项目为建设重点，联合飞机将全面开展大型民用无人机技术与产品的研发生产，计划新建有人机改无人机和三吨级以上大型无人机等4条生产线，建成大型无人直升机研究院、有人机无人化改造基地、无人机生产基地，逐步推进工业级无人机发展，引领航空级无人机的变革；开拓“无人机+应急”、“无人机+农业”等低空新业态，打造黑龙江低空经济示范项目，聚力抢占低空经济发展新赛道，使其成为航空产业经济增长的新引擎。项目建成后预计年产无人机120台、有人机改无人航空器50台，带动黑龙江省无人机产业生态规模达50亿元以上，新增就业人员500人以上。



推动科技成果应用到低空产业链上，助力航空制造业深度转型升级，不止“造飞机”，更要“抓应用”。致力于开拓无人机更加广阔的应用前景，全面推广工业级无人机的创新应用，带领全省走上具有龙江特色的低空经济发展道路。以科技创新塑造发展新动能新优势。



打造龙江乡村“低空物流配送”标杆案例，低空经济新业态，加速农业无人机研发和应用落地，湖北省首条低空运输航线成功首飞，开创湖北省低空经济无人配送里程碑。

目前联合飞机同北大荒、森工及应急、消防救援等单位和战线合作，正在研制符合专业场景需要的无人机系统。与北大荒组建合资公司，打造大型无人机在农业领域应用的示范，并推广到全国和全球。



TD550大载重无人直升机顺利完成黑龙江省“两高”环境应急航空无人机能力实地测试，充分验证其高机动性、高性能的集成潜力更符合应急行业的需求。

作为未来航空民用市场的主流发展趋势，无人机行业迎来绝佳的发展时代，多项鼓励低空经济发展的政策相继出台，中央经济工作会议明确提出打造低空经济等战略性新兴产业，低空经济首次写入政府工作报告。黑龙江省在低空经济、无人机产业等方面迎来重大机遇。联合飞机落地黑龙江，依托黑龙江现有雄厚的产业基础与优势，发挥产业项目主力军作用，积极探索以科技创新推动产业创新，因地制宜，加速培育新质生产力，推动传统制造业转型升级；全力开拓低空经济服务场景，撬动新增长点，打造航空产业高质量集群发展的龙江标杆，推动黑龙江省航空产业向“千亿级”迈进。



电力无人机全新升级 联合飞机赋能国家全场景电力保障

我国的电力设备网络正在进行大幅升级扩建，输电配电线路穿越各种复杂地形，要适应多种极端、恶劣的气候条件。随着智能巡检技术的发展，无人机巡检已成为重要的电力设备运维手段。联合飞机根据电力行业应急保障需求，提出全新无人系统解决方案，TD220电力应急保障无人直升机历经不同季节的极端气候条件、自然灾害的磨炼，战胜不同地形环境的严苛要求，已实现全年度全季节的无人机应用，在国家重大活动的保电工作中发挥了突出作用。

风雨无阻，四时守护

TD220保障电力供应

受雨雪冰冻天气、暴雨灾害和地震等自然灾害影响，电网线路设备巡视抢修困难重重。TD220不畏严寒酷暑，无论何种恶劣环境，都能积极到场采取有效措施，帮助作业人员及时掌握现场设备运行情况，远程清除导线异物，相较传统人工爬线，效率更高更安全，实现全年度全季节的应用。

夏季高温来袭 | 以“迅”防汛

近期，北京、河北多地出现大范围高温天气，用电负荷增长迅速；同时，极端天气突发，晴热、暴雨天气快速切换，强降雨天气频发，导致山洪、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害及城乡积涝等灾害加剧，对电网系统的安全可靠运行提出更高要求。广东、广西、福建等地暴雨、雷雨大风、冰雹过境后，海岛村落的树木倒塌，水位高涨，多处供电线路不堪倾倒树木的重负，倒杆断线，甚至跌落在地面上，还有大面积电网设施受损，给当地的安全生产、村民生活带来了巨大损失和伤害。



许多电网员工依然要在高温炎热天气里，狂风暴雨中“逆行”坚守，争分夺秒，连夜开展抢修复电工作，保障群众生活用电和生命财产安全。汛前关键的“窗口期”，供电保障人员还要全天候24小时值班，做好重要线路防汛隐患排查治理和应急物资保障工作，人工巡检作业的安全性、及时性、精准性都面临极大的挑战。

冬季降雪寒潮 | 破冰清障

在雨雪冰冻天气，或者高寒地区，工作环境气候恶劣，巡检人员不仅要仔细勘察线路的老化问题，及时地对有安全隐患的位置进行标记和记录，对异物危险源的排查治理，加强输电线路防覆冰监测和除融冰准备，不间断运转加强电力设施特巡看护，保障电网运行平稳。人员进入巡线现场穿着厚重，行动不便，体力消耗巨大；部分地区积雪常年不化，人员巡视时需手持望远镜观察线路情况，冻伤时有发生；巡检人员步履维艰，工作效率低下，通信信号屏蔽，无法与外界及时联系，随时可能发生意外情况，影响生产和人身安全。



五大任务能力 | 一机多用

TD220电力应急保障无人直升机采用共轴双桨构型，与常规使用的电动多旋翼无人机相比，具有载重大、航时长、升限高、尺寸小、抗扰动等特点；具有固定翼不具备的垂直起降、定点悬停、精确回收等优势；实现了一键式自主升降、航线自动跟踪、轨迹实时展示、三维程控飞行、可见光与红外双重测试、自动巡检、多路双向同步传输、安全预警策略、红外热图分析等丰富功能，操作使用简单。曾参与过青藏高原“三断”试验，完全适应高寒环境，并在黑龙江黑河进行了低温试验，在低温大风等恶劣天气下正常完成预定任务。

1 可靠性高

采用燃油提供动力，不存在低温时电池瞬间电压骤降，出现飞行动作延迟等现象

2 续航时间长，作业半径大

每次飞行时间近5小时，任务半径可达100km，巡航速度80km/h

3 复杂环境适应性好

抗低温环境，空中抗风能力达到7级，中雨防雨等级，具备沙尘环境起降能力，可在-40°C~55°C环境下工作

4 操作便携简单

具备一键式自主升降，航线自动规划功能，避免了人工因素导致的操控手感下降，从而影响远距离操控飞机

5 机身尺寸小，强度高

和相同载重能力的常规直升机相比，尺寸更小，全复合材料机身，具有较高的强度，军用标准设计

作为空中平台，TD220搭载多种任务载荷，获取稳定、清晰的场景视频图像，实现昼/夜及复杂气象条件下，对目标进行搜索、侦察、探测和跟踪；还可以吊挂货物、自动脱钩，进行应急救援。在不同季节的极端气候条件、自然灾害发生时，在复杂山区、高原等不同地形环境的严苛要

求下，完成巡检、建模、保障、运输和救援五大任务。

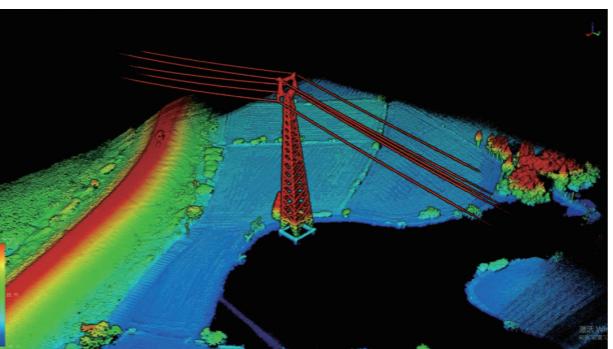


- 自然灾害或森林火灾等应急情况下，电网设备设施及环境的昼夜巡查
- 应急状态输电通道及滑坡塌陷区域的激光三维探测与建模
- 野外应急抢修作业区域的空中照明、喊话指挥、公网及专网通信中继保障
- 应急状态抢修及应急救援物资远距离空中投送
- 输电线路及塔架维修设备及维修材料的空中吊运
- 参与各地的泥石流、洪灾等自然灾害下的应急救援任务



针对架空线路和变电站的巡检任务，TD220不受地理环境的限制，可对长输电线路进行快速、重点范围巡检，

如发现异常，可迅速前往异常点精细巡检；现场及时处置检测到的缺陷，按照预设的路线对输电线路、铁塔进行拍照和视频拍摄，并将检测到的数据和图像实时传输到地面测控车的监控后台。



在抢修作业区域，大载重无人直升机可快速投放物资及设备，如远距离投送食品、急救药品、后勤补给和急救物资；针对复杂地形的电力、路桥等工程，空投导引线或施工材料；在人员和设备难以进入的地区，可迅速解决对物资的紧急需求，缩短地面物资运输时间。

立足电网保障需求 | 全新升级系统配置能力

联合飞机根据电力行业应急保障需求研制的大载重无人直升机，不仅对载重、续航和飞行速度等性能进行了提升，还进行了大量减重优化和降低成本设计手段，同时集成了光电吊舱、激光测绘雷达、吊挂抛投装置等载荷设备，一机多用，可在多种复杂场景下进行应用，具有更高的性价比。

全新升级系统能力

- 加强易用性，具备远程电启动、一站多机、双站接力控制等能力
- 可集成机载卫通，实现超远程测控与数据传输
- 配置4G/5G移动通信模块，具备集中管控和低空作业能力
- 配置中继组网测控链路，具备多机同空域执行任务能力
- 配置ADS-B航管应答系统，具备有人机同空域执行任务能力
- 配置北斗短报文应急定位和应急测控系统，具备超视距监视与控制能力

智慧电力解决方案围绕发电、输电、配电、变电等环节，针对不同场景，构建无人巡检、基建运投和应急运维保障等能力，不惧高山峡谷、狭窄空域、恶劣气象环境和复杂的融合空域，实现全年度全季节的无人机应用。同时配备针对电力设备安全运行工作需要而开发的电力设备运行管理一体化系统，让电力巡检作业更规范标准，信息化管理模式更智能。

方案配置

便携式地面站、运输保障车、飞行平台，任务载荷等分系统、智能管控平台。

飞行平台

TD550无人直升机、TD220无人直升机、镭影Q20巡查无人机、镭影机场

任务载荷

可同时搭载双光吊舱、激光测绘雷达、喊话器、探照灯、公网通信中继设备、物资吊挂抛投装置等

为了配合国家电力建设，联合飞机将持续完善自然灾害应急处置能力，切实把人员伤亡、财产损失和社会风险降到最低，提高电网重要设施巡视作业质效和运维质量，助力实现“双碳”目标；在自然灾害发生后快速为人民群众提供更好的供电保障，维护社会稳定运行。

联合飞机全场景解决方案 | 范堡罗航展全球首发亮相

联合飞机无人系统全场景解决方案
首次海外正式亮相
满足农业、电力、物流运输、应急消防等多领域、多场景应用
全球领先的工业级无人机
掌握自主知识产权的产品矩阵

再次站在世界舞台的聚光灯下
打造有国际影响力的“中国制造”品牌
提速中国无人机全产业链“出海”步伐
让中国低空经济引领全球航空的新潮流

全场景解决方案

联合飞机首次海外发布

此次全球首发的全场景解决方案，是联合飞机国际化战略的重要组成部分，涉及应急、消防、农业、电力、物流等多个领域和场景，以满足不同行业、不同客户的多样化需求。全系列产品矩阵在范堡罗航展的舞台上尽显独特优势与中国技术创新的实力。以此次航展为契机，联合飞机还将进一步链接海外市场，携手全球合作伙伴，共促技术进步和产业升级。

◆ 应急消防：满足多样化应用场景

随着全球气候变化的加剧，地震、洪涝、台风、海啸、雪灾、地质灾害等自然灾害的发生频次和危害程度，显著增多增强，联合飞机针对10+种典型灾害类型，凝练三类应用场景与五项作业任务，提出六大无人系统解决方案，智能化的技术应用，满足多样化的应用场景和高效的作业模式，进而提升全球应急管理能力。



航展现场，全球客商将看到核心平台TD550无人直升机的百变能力和助力中国无人机航空救援体系建设的创新应用与案例经验。



◆ 智慧农业：开启全球化发展新布局

全球农业无人机市场呈现出快速增长的趋势，成为农业科技领域的重要发展方向。联合飞机不断创新技术、产品与服务理念，以安全、高效、可靠的无人化装备提高农业生产效率，为农业植保提供全生命周期的保障，带来经济效益、社会效益和生态效益的多重提升。



农业无人机“三剑客”Q20、Q100及T1200具备高度智能化、自主化的飞行和作业能力；“大中小”无人机产品协同的全新智慧农业解决方案，将开启全球化发展新布局，服务全球新农业。

◆ 智慧电力：技术+场景，见证实力与创新

全球能源结构的转型和电力需求的不断增长，使得电力设施巡检的重要性日益凸显。输电线路、枢纽变电站、发电厂等关键电力设施的稳定运行对于保障能源供应、促进经济社会发展具有重要意义。



联合飞机以准确的市场定位，创新的应用模式，始终在实用性、经济性和可靠性等方面追求极致，积累了不同场景需求的成功案例，为全球无人机物流的商业进程提供更强劲的动力。

中国低空经济“出海”

联合飞机的新机遇与大挑战

联合飞机智慧电力解决方案围绕发电、输电、配电、变电等环节，针对不同场景，构建无人巡检、基建运投和应急运维保障等能力。全场景电力行业解决方案的核心产品矩阵集体亮相本次范堡罗航展，在国际舞台上展示联合飞机在电网数字化工程方面的技术实力和创新能力。

◆ 物流运输：创新引领全球空中争霸赛

联合飞机的城市物流和物资运输解决方案展示了不受地形、天气和道路的限制，可点对点直达的空中运输方案，展现了广阔的市场潜力；具有大载重、长航时、服务范围广、安全易用等领先优势的TD550和Q20无人机，专注于解决末端配送的难题、满足劳动力短缺地区的物资供应需求，应对特殊或复杂环境下的物流挑战，在偏远地区实现了百倍于地面的运输效率。



数据显示，2023年我国低空经济规模超5000亿元，2030年有望达到2万亿元，成为全球瞩目的经济增长新曲线。随着低空经济的全球化发展，中国有机会在国际市场上占据更大份额。联合飞机也同中国低空经济一起，在全球化竞争中迎来了“出海”窗口期。

新机遇下也有大挑战，此次代表中国无人机企业走到范堡罗航展的舞台中心，联合飞机领先的核心技术、无人化装备以及成熟的解决方案，彰显了中国在全球竞争中的强大实力和显著优势。在市场扩容、技术迭代、场景创新、政策管控等多方挑战下，联合飞机也将继续带领中国低空经济走向世界。

变革全球无人机产业格局

航空级无人机加速飞进现实



联合飞机作为国内少数具备全产业链研发设计和制造能力的企业之一，再次踏上全球航展之旅的征程，将充分发挥技术创新与市场应用的成果，深化海外市场拓展战略，推动全球航空制造产业链供应链的发展，让“中国制造”激发全球无人机产业的新动能。

联合飞机创始人、董事长兼总裁田刚印先生表示，我国消费级无人机经过数十年的发展，已达到千亿级市场规模，约占全球市场份额的70%；工业级无人机正迎来一个百倍于消费级无人机的增长新赛道；而航空级无人机尚处在研发期，需要资本大规模进入、科研大规模活动、市场大规模应用的阶段，预计未来10年迎来爆发，市场规模将会是消费级无人机的1000倍。

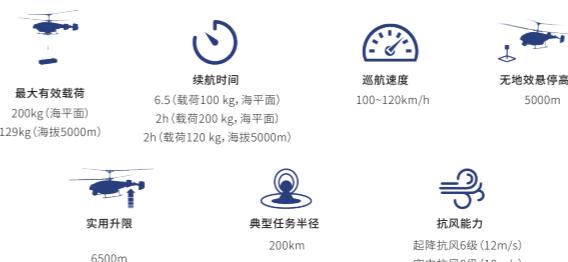
今年，联合飞机首次跻身《全球独角兽榜》，位列“中国商业航空航天”前十，全球Top15，书写了中国无人机产业的攀登史，成功塑造了“中国商业航空航天”企业的全球化品牌形象，诠释了未来航空级无人机在全球市场竞争中的强大潜力与商业价值。联合飞机正在自主研制的全球首款6吨级倾转旋翼无人机受到国内外媒体的高度关注，全球视野聚焦倾转旋翼无人机即将开启的全球无人机产业新格局。



聚焦“三断”场景的无人机航空应急能力建设，针对高寒、高海拔、海上、山区等环境出现的大震巨灾，导致的大范围区域通信失联、群众受困。联合飞机依托大载重、长航时、高海拔、多任务能力、安全可靠的无人直升机，着力破解应急通信保障难题，加快大型无人直升机救援平台的研制，满足应急通信保障、灾情实时侦察以及应急物资投送等需求，形成TD550应急通信型无人直升机系统。该系统在典型环境下进行飞行验证及功能演示，取得了多省应急部门的赞誉，并逐项完成第三方机构产品鉴定，强化经验，做法凝练，为全国多地应急指挥通信保障提供智能无人应急救援装备、组建力量、强化能力。



相比于固定翼无人机，无人直升机无需专用跑道或开阔的空间，即可垂直起降、低速悬停作业，适应更丰富的场景；相比于垂起固定翼无人机，无人直升机又能在固定的预设高度与水平位置进行悬停作业，在巡查、运投、检测等任务中具有明显优势；相比多旋翼无人机，无人直升机具有载重大、航时长、速度快、范围广等优点。



TD550大载重无人直升机是联合飞机针对高海拔、高寒等极端环境及相关行业场景需求推出的高原型无人直升机，具备优良的飞行性能、安全可靠，其电磁兼容性与环境适应性满足军用标准；200kg大载重能力的突破更是在各领域场景中发挥独特优势，能力不可限量。目前，TD550型无人直升机已获得由民航管理局颁发的特许飞行证，系统型号的适航合格审查会议也成功召开，审定工作进入实质性新阶段。

2024年2月，根据黑龙江应急通信无人直升机使用环境要求，开展低温环境的验证测试，包括飞行平台及机载设备的低温使用验证，取得了圆满成功。



2024年3月，黑龙江省应急厅组织开展高纬度、高寒地区，“三断”场景下应急航空无人机能力的实地测试。模拟地点位于群山环绕、冰雪覆盖导致交通不便、无公网覆盖的林区村屯，留守在村屯生活的主要是一些老年人与行动不便的人群，往常由政府部门每周定时运输生活物资与医疗用品，保障其正常生活；受连续暴雪天气影响，地面道路无法通行，已三周未运输保障物资，处于失联状态，通过侦察卫星发现该区域附近出现异常火点。政府相关部门迫切希望通过无人机快速侦察当地受灾情况、火点位置和火势情况，并提供公网通信保障，了解村民的生活状况与紧急需求，派遣大载重无人直升机投送物资补给，并决策是否需要出动灭火型无人机，快速扑灭初期火灾。起飞点位于靠近城市的平地区域，周边群山环绕，传统无人机在飞离5公里后，会因山体遮挡视距链路而导致自动返航，无法完成远距跨山灾情侦察、通信保障等需求。

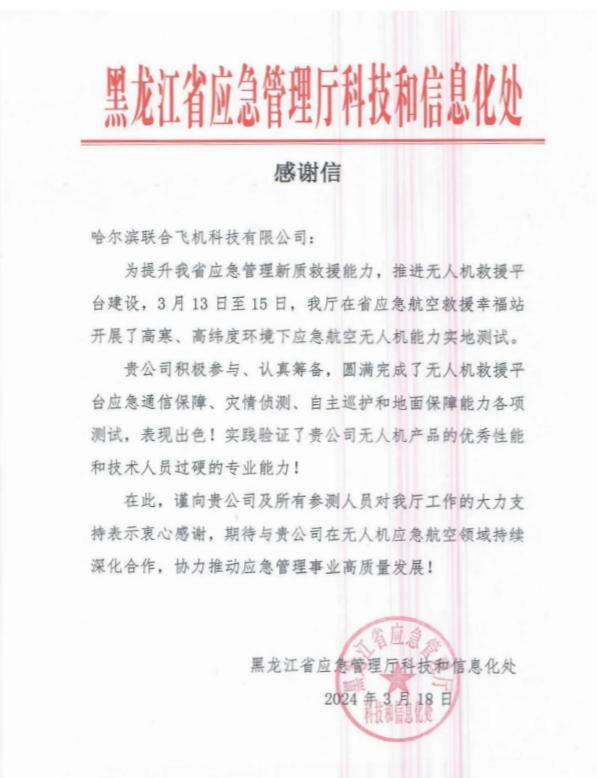




联合飞机TD550 应急通信型无人直升机系统搭载机载卫通设备、光电吊舱、公网通信设备等载荷，超视距飞行至57公里处后第一时间确认着火点位置及火势情况，全面侦察村屯受灾情况，及时传回村民生活与物资需求后安全返航。无人直升机通过卫通将现场高清视频实时回传至现场指挥车及省厅指挥中心，为现场救援决策提供信息支撑。

实测任务现场，联合飞机行动小组接到临时通知后，迅速响应，不到半小时就完成驻车到离地起飞的地面准备过程，其任务的执行能力、作业效率、专业的飞行保障能力，飞行平台的抗风能力，非常契合应急行业的迫切需求。目前，TD550已经在山西、浙江、江苏、福建多地圆满完成了测试和飞行演示任务，并得到了各地应急厅领导的高度肯定和赞誉。

为进一步提升防灾减灾救灾能力，加快推进大载重、长续航、任务能力强、智能化的无人机救援平台研制，对自然灾害应急能力与无人机航空应急能力的提升是十分必要的。联合飞机立足大震巨灾、“三断”等极端情况，综合灾害特点，森林草原防灭火、防汛等复杂环境差异，应



急救救援实战急需等要素，瞄准应急指挥通信、空中巡护侦察、灾情图像实时传输等关键核心能力短板弱项，形成可复制、可推广的典型案例，打造建设应用标杆，为全国无人机航空救援体系建设贡献力量。

Q12多旋翼无人机

Q12 Multi-Rotor UAV



一种无人直升机旋翼转速调试方法及调试装置

此发明专利阐述了一种基于无人直升机的旋翼转速调试方法，该方法将传统航模遥控器中的油门曲线和总距曲线信号控制旋翼转速的功能及方法创造性的通过软件算法实现，将遥控器一个通道的输入信号在无人直升机飞行控制装置内分为两个输入信号，通过无线电与地面调试软件相互配合，将无人直升机旋翼转速从静止至额定转速整个调试过程置于地面调试软件界面上，将遥控器通道信号映射到调试软件的二维曲线上，通过简单的鼠标拖动曲线上的调整点便可调整旋翼转速至期望转速，所形成的曲线信号可实时存储在飞行控制装置上，并且此曲线可作为后续旋翼转速控制律的前馈信号，大大减轻控制律的负担，降低控制律参数调整的难度，提高旋翼转速控制的响应。



该调试方法操作简单易用，充分利用了无人直升机自身飞行控制系统及地面控制软件，解决了通常飞行操作人员在调试旋翼转速时同时操控遥控器精力分散和调整方法繁琐的问题，并且提高了旋翼转速控制精度，具有成本低，工作效率高的优势。

一种共轴直升机配平方法

该发明专利阐述了降低旋翼载荷的一种配平方法，以解决常规直升机配平方法所存在的问题，传统六力矩直升机配平方法中，配平变量为6个，分别为4个操纵变量，即驾驶员总距、横向周期变距、纵向周期变距以及差动，2个姿态角：俯仰角和滚转角，配平方程为6个，即直升机重心处3个合力和3个合力矩为零，该发明中的方法在传统配平方法的基础上，解除上、下旋翼周期变距的4个量，即上旋翼横向周期变距、纵向周期变距，下旋翼横向周期变距、纵向周期变距，作为独立变量参与配平，消去原6自由度配平变量中的驾驶员横向周期变距和纵向周期变距，加入上下旋翼的4个周期变距，得到8个新得配平变量，即驾驶员总距、上旋翼横向周期变距、上旋翼纵向周期变距、下旋翼横向周期变距、下旋翼纵向周期变距、差动、俯仰角和滚转角，配平方程加入将上下旋翼滚转力矩差为零和俯仰力矩差为零，组成8个配平方程，对配平方程进行求解。本发明消除了共轴直升机上下旋翼的相互作用力，大幅降低了桨叶和桨毂结构疲劳载荷。

本发明通过新的配平方法，使得旋翼俯仰力矩、滚转力矩以及桨叶挥舞弯矩大大降低，尤其在大速度前飞的情况下，大大降低影响结构疲劳的动载，提高直升机关键结构件的寿命，降低直升机振动水平，为直升机减重及性能提升提供了很大空间。



一种点燃式重油发动机燃烧系统及点燃式重油发动机

两个发明涉及一种点燃式重油发动机燃烧装置、系统及点燃式重油发动机，属于航空发动机技术领域，解决了重油雾化效果差、不利于油气混合，导致燃烧室燃烧效率低的问题，极限低温下发动机起动困难问题。

发明的点燃式重油发动机燃烧系统及装置包括机体部件、传感器部件和机体控制部件；机体部件包括缸盖组件和燃油夹气喷射组件；缸盖组件包括缸盖体，缸盖体上连接有可调位预热塞；燃油夹气喷射组件，燃油夹气喷射组件包括加热体；传感器部件包括进气温度传感器和曲轴转速传感器；偏置燃烧室组件；机体控制部件能够接收并存储进气温度传感器采集的温度值和曲轴转速值，向加热体和可调位预热塞发出电子控制令。

本发明创新使用偏置燃烧室，可调伸缩预热塞，旋流雾化器，多点喷射等技术，有效解决重油发动机雾化问题，燃烧效率问题，涡流、滚流干扰问题，低温重油发动机起动困难问题等。

摘要 ■

随着社会经济的快速发展和人民生活对电力需求的急剧增长,高压输电线路逐渐延伸到社会的每个角落,由此所带来的高压输电线路的巡线工作量也迅速增大。随着技术的进步,传统人工巡线方式正逐渐过渡到挂线机器人巡线、固定翼飞机巡线和直升机巡线。但这几种巡线方式或多或少存在着一些缺点,例如操作复杂、准备周期长、无法精确悬停等。近年来,随着多旋翼无人机技术的不断完善,基于多旋翼无人机的电力巡线智能任务规划技术应运而生,多旋翼无人机因为其高效、易布置、可精确悬停、自动化程度高得到越来越多的关注。该技术不依赖人工操作,能够安全高效地完成高压输电线路巡线智能任务。本文针对基于多旋翼无人机的高压输电线路电力巡线任务规划问题的关键技术进行了详细研究。针对高压输电线路复杂的工作环境,提出一种基于柱状空间的高压输电线路及其附属设施建模方法。该建模方法借助化曲为直的思路,将不规则外形进行规则化处理,其建模精度高,减少建模工作量,降低任务前准备工作的复杂程度。接着阐述了柱状避障空间建模方法的实现步骤和常见障碍物的建模处理方法。

针对高压输电线路电力巡线中的常规巡线任务(粗巡),提出一种基于自适应混合粒子群算法。该算法通过将自适应收缩因子融入粒子群算法,动态调整原有粒子群算法的参数权重,以协调新算法的全局搜索能力和局部搜索能力,同时引入优化策略,使算法能够及时地把特定粒子按一定比例驱散到更大的范围内,在一定程度上进行重新搜索,算法早熟的现象将可能避免,最终趋向全局最优。同时,提出一种融合化学反应算法。该算法引入细菌觅食策略中的吸引-排斥概念,综合考虑多旋翼无人机实时位置、下一个待巡线兴趣点位置、最终位置三者的位置和特性信息,综合上述信息后调整化学反应算法中各反应类型的发生比例,引导算法取得全局最优解。最后,

通过标准测试函数和仿真验证了两种算法的效果。针对高压输电线路中多兴趣点巡线任务(细巡),提出一种混合人工势能场思想的改进型蚁群算法。将人工势能场策略引入到启发信息,以多旋翼无人机受到的总势能代替个体与下一步位置之间的距离关系作为启发信息,从而引导算法规避障碍,并趋向更有利于目标的方向运动。经标准函数测试和仿真验证了算法效果。同时,提出一种基于双容器的混合化学反应算法用于多旋翼飞行器编队的三维路径规划。该算法引入双容器的策略,增强了跳出局部极小的能力,再引入遗传算法中交叉算子和遗传算子用于更精确的控制化学反应发生后各个新生成分子的能量状态,同时反应发生概率由平均势能和势能阈值综合确定。上述两种算法在多个环境条件下进行了仿真,仿真结果表明,基于双容器的混合化学反应算法可以完成复杂线路环境以及多兴趣点的巡线任务,并能够获得满意的巡线效果。多无人机巡线的任务规划问题是编队巡线的基础。首先,分析了电力巡线中任务分配涉及到的不同于其他任务分配问题的约束条件、观测代价指标以及观测收益等;其次,针对多架多旋翼无人机协同巡线任务分配问题,提出了一种改进型蚁群算法。设计了符合电力巡线任务要求的收益指标和启发函数,随后继续强化其局部优化能力。为能够进行试飞试验测试,设计了电力巡线系统地面站。根据输电线路电力巡线任务的需求,对无人机地面监控系统的软件系统进行设计。软件方案中,首先基于Google Earth的SDK开发包,使用Qt语言开发了地面站监控软件,该软件能够实时反馈巡线无人机的航姿信息与航路轨迹。然后将该软件系统通信接口协议与无人机进行通信实验。最后,将该地面站与多旋翼无人机建立数据链路,对该机下达巡线任务,使其遵循电力巡线任务对某处高压输电线路执行巡线,并反馈任务数据。

(电力巡线无人机智能任务规划技术研究,南京航空航天大学导航、制导与控制专业,工学博士杨轻,导师杨忠)

摘要 ■

植保作业是农业生产的关键环节,植保无人机作为植保机械之一,与人工植保和地面植保机械相比,其在作业地块灵活适应和喷雾高效等方面有明显优势。植保无人机作业环境中通常分布着对飞行安全构成极大威胁的各类障碍物,目前植保无人机通常采用单一类型的环境感知传感器,通过悬停警报或紧急迫降的单一预设指令来实现避障功能。有些植保无人机通过预设避障路径实现障碍物的避障绕行,但避障绕行过程中会与障碍物之间预留2~5 m安全距离。并且现有植保无人机喷雾均聚焦在无障碍物场景的喷雾,在植保无人机避障绕行的情况下,未对障碍物周围进行针对性喷雾,障碍物周围雾滴沉积量较少,需要人工二次补喷以避免影响障碍物周围的作物生长。为提高植保无人机在障碍物环境下的自主作业能力和植保作业效果,满足植保无人机自主喷施、实时避障、精准作业的要求,本文从植保无人机避障和避障绕行时增加障碍物周围雾滴覆盖这两方面,开展了相关研究。针对植保无人机避障,主要涉及田间障碍物信息识别、避障算法改进、避障系统及飞行平台设计与搭建的研究;针对避障绕行时增加障碍物周围雾滴覆盖,主要进行了植保无人机侧喷技术研究。具体研究内容和主要结果如下。

(1)为提高植保无人机田间障碍物识别精度,使用毫米波雷达和单目相机作为植保无人机的环境感知传感器,搭建空间融合和多线程时间同步两模型以实现两者时空数据融合。以田间较为常见的树木和电线杆作为障碍物,使用该数据融合模型进行障碍物数据采集,通过加权平均灰度处理、Canny边缘检测、数学形态学处理对障碍物数据进行轮廓增强和提取。该数据融合模型的最大测距误差为8.2%,障碍物宽度最大测量误差为17.3%,高度最大测量误差为18.2%,根据障碍物图像所提取的轮廓边缘清晰且光滑,可为植保无人机避障决策提供障碍物依据。

(2)从植保无人机避障效率和路径平顺性要求出发,通过动态启发函数、搜索点选取策略优化、拐点数量优化提出了改进型A*飞行避障算法。相比较传统A*避障算法,本研究针对植保无人机作业环境和避障要求所提的改进型A*飞行避障算法在路径搜索上更具有目的性,可以在极少增加甚至不增加路径长度的基础上,至少减少68.4%的规划时间、74.9%的栅格搜索数和20.7%的拐点数量。

(3)在毫米波雷达和单目相机数据融合模型和改进型A*飞行避障算法的基础上,为实现植保无人机实际避障,进行了避障系统和飞行平台研究和搭建。结合所用植保无人机结构形式和参数进行坐标系转换和姿态描述并建立整机控制模型,通过对控制模型进行简化给出内外环控制策略,设计了基于NVIDIA Jetson TX2机载计算机(主控制器)和Pixhawk4飞行控制器(副控制器)的双层控制系统,设计和搭建了双层控制系统为核心的植保无人机避障系统和飞行平台,进行了实际的避障飞行试验。结果表明本文所搭建的植保无人机避障飞行平台能够将毫米波雷达和单目相机数据融合的障碍物识别、改进型A*飞行避障算法的路径规划、避障路径跟随的飞行控制整合为一个系统,在避障飞行过程中,实际飞行轨迹与路径规划轨迹的最小偏差为0.1 m、最大偏差为1.4 m,与障碍物之间最小距离为1.6 m、最大距离为2.8 m。

(4)为提高植保无人机避障过程中障碍物周围雾滴覆盖,进行了用于增加障碍物周围雾滴覆盖的侧喷技术研究,提出了侧喷装置设计方法。该方法探索了植保无人机避障绕行路径和避障喷雾模式与障碍物周围雾滴覆盖的关系;提出了植保无人机飞行路径和参数准确测量方法,获得了植保无人机在避障时的飞行路径即相对障碍物位置;结合相对位置进行侧喷装置喷雾扩散角设计和喷嘴选型;基于格子玻尔兹曼方法进行旋翼风场仿真,根据旋翼风场分布进行侧喷装置在植保无人机上的空间布局设计;探索了适合侧喷装置的喷雾模式,进行了使用侧

喷装置和未使用侧喷装置在不同作业环境和飞行参数组合下的障碍物周围雾滴覆盖情况对比试验,分析了飞行参数组合与侧喷装置的有效喷幅宽度和覆盖均匀性之间的关系,得到了回归模型及其线性关系。与未使用侧喷装置相比,相同飞行参数组合下,侧喷装置能有效提高避障绕行时障碍物周围的雾滴覆盖,有效喷幅宽度最低提高6.35%,最高提高35.32%,平均提高15.25%,验证了本文对该装置设计的有效性和合理性;建立的植保无人机侧喷装置雾滴覆盖均匀性和有效喷幅宽度与飞行高度、速度以及两者交互作用之间的回归模型和线性关系与试验值的误差不大于15%,该模型可指导侧喷装置在避障时的喷雾作业。综上所述,本文研究提高了障碍物环境下植保无人机的环境感知能力和避障能力,为植保无人机的安全自主飞行提供了一种新的解决方案;改善了植保无人机避障绕行时障碍物周围雾滴覆盖不足的问题,提高了植保作业效果。本文研究可为类似研究和同类型装置的研发奠定基础,为完善和推动植保无人机的应用提供新思路。

(植保无人机避障及侧喷技术研究, 江苏大学机械工程专业, 工学博士黄鑫, 导师邱白晶)

摘要 ■

丘陵山地占我国国土面积的近70%,其农业生产效率与平原地区相比存在较大差异,农业生产以经济果林作物为主,受地形条件限制,现代化地面作业农机通行困难,丘陵山地的机械化程度远低于全国平均水平。多旋翼无人机动作灵活、可垂直起降的特点非常适合山地果园的植保施药作业,无人机飞行轨迹的精准控制是其在山地果园高效植保作业应用的瓶颈。本文在分析四旋翼无人机动力学模型的基础上,针对无人机山地果园植保作业的飞行控制需求,分析基于多种导航方式组合的无人机自主导航飞行控制方法;针对山地苹果园果树树冠的

分布特性,研究基于机器视觉的果树行快速分割方法,进而探寻果树行趋势线提取算法,结合GNSS导航技术,提出基于GNSS-视觉组合的无人机山地果园作业水平航迹控制方法;针对山地果园的地形特点,研究基于双目视觉图像的三维点云提取算法,进而探寻基于双目视觉的多点测距方法,提出基于双目视觉的无人机仿形飞行控制方法;融合无人机水平航迹和高度仿形的飞行控制方法,提出基于多种导航方式组合的山地果园无人机自主导航方法;基于上述理论研究,设计并研发了无人机自主导航控制系统,对系统性能进行了实地试验验证。论文主要研究内容及结论如下。

(1) 开展了四旋翼无人机动力学数学模型研究,结合山地果园果树种植特点,分析了效率最优的最佳作业路径,针对效率最优飞行轨迹,提出了无人机山地果园作业的自主导航控制方法,将自主导航控制分解为水平航迹控制和高度仿形控制两个简单控制组合,使用PID控制算法结合动力学模型,计算得到无人机航向控制和高度控制的最优控制参数,最终确定航向控制选用PID控制,高度控制选用PD控制。

(2) 提出了基于GNSS-视觉组合的无人机山地果园植保作业航迹控制方法。分析水平航迹控制中的航向调整过程,开展控制系统整体设计,提出视觉导航实现实内作业航迹调整控制,GNSS导航实现作业行间转场航迹控制流程。选用2个NEO-M8P-2芯片搭建了RTK GNSS定位装置,并在PC机上开发了上位机软件,软件实时上传并记录位置信息,将实时位置和航向与目标位置进行计算得到偏航信息,以偏航信息作为PID控制器输入,航向调整控制量为输出,实现无人机水平航向调整;在RGB、Lab、HSV三个颜色空间内对果树行进行了分割,通过对分割效果、处理时间等综合评价,最终选用RGB空间下基于RGB分量线性组合的果树行提取方法,对分割后的果树行进行二次曲线拟合得到行趋势线,计算得到偏航角值,由PID控制器控制实现航向调整。将两种导航方式进行

组合,实现无人机山地果园植保作业时的水平航迹控制。定位和视觉导航精度验证结果表明,GNSS模块静态定位误差小于0.26m,动态测试最大误差为0.82m,平均误差为0.53m;视觉导航控制的航迹误差为-27+48cm,平均误差为23cm。

(3) 研究了基于双目视觉的无人机飞行高度仿形控制方法。针对人工遥控飞行精度差导致作业高度难以保持一致,以及树冠受下降气流扰动无固定高度等问题,采用双目视觉技术进行飞行高度控制。分析了双目图像匹配模型,设计了基于OpenCV的改进两步标定法对相机进行标定,标定误差均值为0.3489。探寻了双目视觉的立体匹配和空间定位算法,在OpenCV下对BM算法和SGBM算法进行了对比分析,结果表明,BM算法的执行效率可达80ms/f,效率明显优于SGBM算法,立体匹配选用BM算法。研究并实现了无人机仿形飞行控制方法。对仿形飞行控制算法的测距和控制精度进行了试验验证,结果表明,双目模块在0.5m-6m范围内效果较好,最大相对误差2.04%,平均相对误差0.36%;当飞行高度为2.5m时,仿形飞行控制的平均误差为0.01m,最大误差为0.15m。

(4) 研制了无人机自主导航控制系统,系统由飞行平台和地面控制站两部分组成。自主搭建了无人机飞行平台,平台尺寸 $720 \times 720 \times 320$ (mm),带负载能力4kg,选用NAZA商业飞控作为内控飞控。设计并研制了自主导航系统,开发了GNSS导航模块、视觉导航模块、仿形飞行控制模块和地面控制站。并对导航系统进行了试验验证,测试结果表明,研制的系统满足研究需求。

(5) 开展了自主导航系统集成测试与试验分析。分析并确定了系统各模块飞行参数,当RGB相机倾角为46°,飞行高度为2.0m时,相机的视场可达到18.7m,果树行趋势线提取的平均速度为6.53fps,确定视觉导航的控制率为3次/s。对山地苹果园的自主导航试验结果表明,当无人机飞行速度为2m/s,距离果树冠层高度约2m,相机倾角为46°,图像导航控制率为3次/s时,该系统航迹控制绝对

误差为-47+42cm,平均误差为19cm。

(山地果园植保无人机自适应导航关键技术研究, 西北农林科技大学农业电气化与自动化专业, 农学博士王东, 导师张海辉)

摘要 ■

作为全球农业大国之一,我国的农业资源总量十分可观,随着农村劳动人口的转移、农业规模化进程的加快以及科技的飞速发展,农业机械化水平取得极大提升。目前,在“耕、种、管、收”四大农业生产环节中,农业生产管理的机械化程度相对较低,主要则体现在农业植保上,传统依赖于人工的作业方式存在模式粗放、效率低下等问题。近年来,植保无人机的涌现极大地改善了植保作业的效率和质量,其中旋翼无人机的诸多优势使其在植保领域脱颖而出,但从应用现状上看,多数旋翼植保无人机是人工遥控的,此方式显然存在过度依赖飞手经验、超出视野范围易发生“炸机”事故等弊端,而逐渐开始普及的基于地面站的植保无人机集中管理模式,虽然可使植保机按照事先规划的航线飞行,但飞行过程中出现的未知障碍物仍会对无人机安全飞行造成巨大的威胁,因此,旋翼植保无人机必须具备自主避障能力且在避让后能回归原航线继续植保作业。为此,本文研究基于毫米波雷达和双目视觉传感器的多旋翼植保无人机自主避障技术,通过毫米波雷达进行飞行方向上的障碍物预警,进而通过双目视觉完成前方障碍物识别,并将识别的三维环境信息投影到二维栅格平面,形成局部导航图,最终采用基于预设航线的避障路径规划算法完成障碍物避让并回归原始作业航线。本文所做的工作主要有:

(1) 根据植保无人机的作业飞行特点,研究毫米波雷达有效目标筛选方法。通过设定航线警戒区域对有效目标进行初选,进而结合滤波算法和判定准则,判断前后两个周期中的有效目标是否为同一障碍物,完成有效目标

筛选,并通过仿真实验验证改进的Sage-Husa自适应滤波算法的动态目标跟踪精度,以及该方法对警戒区域内危险障碍物目标筛选的有效性,使植保无人机始终重点关注危险目标。

(2)研究毫米波雷达装置主探测方向的调整方法。根据植保无人机当前的俯仰角、飞行高度及毫米波雷达的垂直探测视角,调整雷达的主探测方向,使得雷达能有效探测到飞行方向上的障碍物,同时减少因农作物杂波影响而产生误判的情况,从而达到提升毫米波雷达障碍物探测的有效性和提高植保作业效率的目标。

(3)研究基于跨尺度自适应引导滤波的双目立体匹配算法。采用改进的ETCensus变换及匹配代价计算方法,分别以中心像素的领域像素为顶点构建等腰三角形,改变传统Census变换中的像素比较思想,以能够提高图像在相似纹理区域的匹配精度;采用改进的基于自适应引导滤波的匹配代价聚合算法,构建自适应形状的十字交叉窗口,以能够在弱纹理区域获得更多的有效像素,提高图像在弱纹理区域的匹配精度;最后,采用基于跨尺度代价聚合的自适应引导滤波算法,在多尺度上进行匹配代价计算和匹配代价聚合,进一步提高立体匹配精度。相关对比实验表明,算法在图像密集纹理、相似纹理和弱纹理区域获得了较好的匹配精度;最后,通过视差后处理,获得最优的立体匹配效果。

(4)研究高度降维的三维飞行环境表示方法。基于立体匹配获得的视差图,利用栅格法获得初始栅格地图,通过高度降维,将三维障碍物投影到二维障碍物栅格平面,解决三维环境描述精度与避障路径规划效率之间的矛盾,同时与植保无人机仿地飞行的背景吻合,以满足面向植保作业的农田三维环境建模需要。

(5)研究基于预设航线的多旋翼植保无人机避障路径规划方法。在传统人工势场法中,引入障碍物危险度和航线对障碍物的引力,达到减少植保无人机的避让次数,并使其在避障后能够回归原航线的目的;针对人工势场

法避障时存在的问题,进一步提出基于作业伴随的自主避障算法,通过构建多分辨率栅格地图,并采用边避障边作业的思想,实现在避障的同时提高植保无人机的作业质量和作业效率。

(6)设计多旋翼植保无人机避障系统的软硬件平台,提出毫米波雷达和双目视觉融合的避障策略,并对毫米波雷达目标筛选、双目视觉障碍物识别和避障飞行进行实地试验,验证本文相关理论与方法的可行性和有效性。

(基于毫米波雷达和视觉的旋翼植保无人机自主避障研究,东北林业大学机械电子工程专业,农学博士刘立臣,导师郭艳玲)

摘要 ■

聚变堆装置长期在极端条件下运行,会导致部件功能受损甚至影响聚变堆的稳定运行,因此需要定期的检查与维护。聚变堆内部巡检的设备主要是机械臂,但由于体积大、移动缓慢等原因,无法快速高效地对聚变堆装置进行巡检。而聚变堆外围采用传统的人工巡检的方式,耗时耗力。四旋翼无人机具有体积小且操作灵活等特点,可以辅助完成聚变堆的巡检任务,商用的无人机集成度较高且功能单一,无法直接应用于聚变堆维护任务。而且传统的四旋翼无人机飞行控制方法无法处理复杂的聚变堆环境,因此需要建立基于深度强化学习的四旋翼无人机飞行控制相应的理论模型和数值方法。聚变堆内部维护任务中由于传输信号不稳定或被聚变堆装置屏蔽等原因,导致难以采用手动模式来操作四旋翼无人机,需要对四旋翼无人机自主导航理论深入研究并进行实验验证。此外,聚变堆巡检障碍物众多,现有的路径规划方法计算效率低,因此需要更加快速高效的路径规划算法。基于上述目的,本文开展了如下研究:

(1)基于聚变堆维护的任务需求,对四旋翼无人机系统的设计方

案进行四旋翼无人机实验平台搭建,并且并对其系统架构进行分析,之后结合深度强化学习理论,完成了四旋翼无人机的动力学建模,推导出了四旋翼无人机的位置矩阵,速度矩阵,四元数,转矩,观测空间与动作空间等关键参数。根据四旋翼无人机在聚变堆维护中自主飞行的任务需求,对其基于深度强化学习的起飞、悬停以及轨迹追踪任务进行了定义。

(2)以PyBullet为物理引擎搭建了一种用于EAST的四旋翼无人机深度强化学习仿真环境Deque,用于模拟聚变堆真空室内四旋翼无人机基于深度强化学习的任务训练。基于PPO算法和SAC算法在stable-baselines3中对四旋翼无人机深度强化学习训练的网络架构进行理论设计,分别在起飞与悬停和轨迹追踪任务中定义了基于不同的任务的奖励函数。将基于PPO算法以及SAC算法的模型在模拟环境中测试,结果显示基于两种算法训练的模型均能完成相应任务,然而在轨迹追踪任务中,基于SAC算法的最大误差在XY平面上为1.437m,Z方向最大误差为0.008m,基于PPO算法的最大误差XY平面上为0.324m,Z方向最大误差为0.006m,基于PPO算法训练的模型稳定性以及精度要好于基于SAC算法训练的模型。最后,为验证深度强化学习模型的可迁移性,在实际场景完成了四旋翼无人机的轨迹追踪任务,并将其飞行轨迹与设定轨迹比较,XY平面上的最大误差为0.412m,Z方向最大误差为0.052m。

(3)在姿态估计以及路径规划中对四旋翼无人机进行了理论建模,提出了一种快速构建BIT*搜索树的无人机路径规划方法FCST-BIT*,完成了基于视觉惯导的四旋翼无人机多障碍物自主飞行实验,结果表明四旋翼无人机在悬停时定位精准,没有漂移,且在往目标终点飞行的过程中,姿态平稳,未出现失控状态,验证了视觉惯导融合用于四旋翼无人机在多障碍物空间中的自主导航的合理性。而在基于视觉惯导的四旋翼无人机聚变堆主机八分之一扇区内部巡检任务中,四旋翼无人机整个过程飞行

姿态平稳,抵达预定位置,按照指令完成巡检任务。这验证了本文采用的四旋翼无人机设备以及所采用的研究方法在聚变堆内部维护的可行性。

(4)基于Swin-Transformer模型部署了一种用于聚变堆外围管线防松标识目标检测的方法,构建了用于实时准确检测和定位管道的螺栓防松标识。同时构建了以管线上螺栓防松标识为主的数据集,其中包括1870张原始样本,经过图片增广技术,最终的数据集样本数总计为2244,1571个样本进行训练,673个样本用于测试。以Swin-Transformer模型进行了训练与测试,并将其结果与Faster R-CNN、SSD和YOLO V5算法进行比较。实验结果表明,基于Swin-Transformer算法的螺栓防松标识任务的识别精度高于Faster R-CNN、SSD和YOLO V5算法,识别精度高达97.2%。

(基于深度强化学习的聚变堆巡检四旋翼无人机关键技术研究,中国科学技术大学核能科学与工程专业,工学博士余超,导师杨庆喜、程勇)

摘要 ■

使用无人机进行植保施药作业具有地形适应能力强、作业成本低、作业效率高且不会对施药人员健康造成危害等优点,近年来在我国迅速发展且有着广泛的应用。而六旋翼无人机由于结构简单,运行稳定且易于操控被广泛采用。但无人机由于具有特殊的旋翼结构,在空中悬停时会产生强大的下洗气流,会影响喷头喷出的药液雾滴在沉降过程中的运动轨迹,将引起药液雾滴的飘移或造成施药不均匀。针对以上问题,本文以喷头喷洒平面的流场分布作为研究重点,通过叶素-动量理论及片条理论对六旋翼无人机螺旋桨滑流的产生及变化机理进行了深入研究,得到了螺旋桨产生的滑流轴向诱导速度沿螺旋桨径向分布的计算模型,通过计算得出螺旋桨滑流流速沿径向非均匀分布的特性。在此基础上,利用CFD仿真软件

模拟了六旋翼无人机的整体下洗气流场,并对流场中各喷头位置的喷洒平面进行了分析,得到了喷洒平面内的气流运动规律,初步确定螺旋桨正下方为喷头的合理安装位置,并根据滑流流速分布提出了喷头布置方案。设计一种六旋翼无人机喷洒模拟试验台,进行滑流流速分布测量试验,对理论计算结果及仿真结果进行了验证。并利用该试验台进行螺旋桨滑流下的喷雾试验,探究了喷头在螺旋桨下方不同位置进行喷洒时,气流对喷雾沉积效果的影响情况,结果得出在螺旋桨正下方安装喷头喷洒时,雾滴飘移最少,总沉积量最高,雾滴沉积分布受到气流的负面影响也最小,在此位置增加螺旋桨转速还有助于提高雾滴的沉积分布均匀性。结合室内喷洒试验结果及无人机下洗气流场模拟结果,根据无人机的飞行方式共提出7种不同的喷头分布方案,在室外进行了喷洒试验。最终通过试验结果得出,对于六旋翼植保无人机来说,当采用X型螺旋桨结构飞行时,在机体后侧螺旋桨下方安装2个喷头,且喷头上方螺旋桨为外旋时沉积效果最好,有效喷幅为2m,有效喷幅平均沉积密度为95个/cm²;当采用I型螺旋桨结构飞行时,在机体后侧螺旋桨下方安装3个喷头时沉积效果最好,有效喷幅为2.75m,有效喷幅内的平均沉积密度为127.5个/cm²。

(六旋翼植保无人机下洗气流变化机理及喷头安装位置的研究,黑龙江八一农垦大学农业机械化工程专业,农学博士廉琦,导师谭峰)

摘要 ■

作为新兴的智能化农业装备,植保无人机集成了机电一体化、计算机、信息通信、自动控制与地理信息定位等多个研究领域的相关技术,是当前农业航空领域高新技术的研究热点。随着航空技术与控制技术的发展,作业自主化成为当前植保无人机的主要研究方向。航线规划是自主作业无人机系统的重要组成部分,规划效果直接

影响无人机的作业质量,关于植保无人机航线规划方法的相关研究内容较少,且具有相对局限性,因此本文对植保无人机航线规划方法展开深入研究,根据不同的作业环境提出了多种全覆盖航线规划方法,使作业航线在能耗与药耗方面达到最优,在农业植保应用方面具有理论与实际意义。

本文基于高斯-克吕格正形投影法构建了环境坐标系,对不同作业航向进行了坐标系转换,为无人机航线规划研究提供了有效的数学环境。针对凸边形单作业区域,提出了一种基于改进栅格法的作业航线规划方法,有效地减少了无人机植保作业的多余覆盖率,在未指定作业航向情况下,可根据该算法给出推荐的作业航向与其对应的航线,使整个作业过程的能耗和药耗最优。针对凹多边形单作业区域,通过分析确定凹多边形作业区域的凹角与无人机航向对作业航线的影响规律,将区域划分成多个子区域,由此提出了基于改进深度优先遍历法的子区域位置关系连通图的有效遍历路线搜索方法,实现了子区域的局部合并,有效减少了子区域数量,避免了过多的区域间调度航线,降低了非作业航线距离。针对含障碍的单作业区域,采用牛耕单元分解法对作业区域进行划分,将子区域的衔接顺序规划转化为Reeb图边的遍历问题,由此基于Floyd算法与匈牙利法构建了Reeb图对应的欧拉图,并基于改进的Fleury算法计算出欧拉回路,进而提出了基于Reeb图欧拉回路的航线规划方法,最终实现子区域衔接顺序规划,使调度航线距离为最优。针对多作业区域,或凹多边形单作业区域划分的子区域,采用整数编码遗传算法确定各区域的覆盖顺序,提出了基于改进二进制编码方式遗传算法的区域间调度航线规划方法,减小了无人机非作业航线距离,降低了无人机能耗,提高了作业效率;由于载药量限制,本文提出了多作业架次无人机返航航线规划方法,通过构建无人机位置坐标与作业距离的关系方程和各架次施药量的递归不等式,实现了最少作业架次情况下的最优返航航线规划,降低了无人机能耗。利用Windows

Form平台进行人机交互界面设计,通过JavaScript与C#环境的代码互调,实现电子地图与Windows Form窗体的信息交互,开发了无人机航线规划软件,实现了作业区域绘制、作业参数设置、航线规划与航点导出功能。在航线规划方法研究与软件开发基础上,进行无人机作业田间试验,试验结果验证了所设计规划航线方法的可行性,通过多作业架次航线规划试验与其他规划方法的比对,证明了本航线规划方法的优化性与实际应用的有效性,节省了作业能耗与药耗。本文研究成果使作业管理更加方便,而且有助于推动农业植保朝着更加智能、高效、绿色、节能和无人化的方向发展。

(植保无人机航线规划方法研究,中国农业大学机械电子工程专业,农学博士徐博,导师谭彧、陈立平)

摘要 ■

无人机作为新型农业机械的机载平台具有操控灵活、能在空中悬停、便于携带等诸多优点,在植保作业中得到了日益广泛的应用。而有关农用飞行器的生产与销售无统一的行业规范和标准,飞行器性能无明确度量标准,不利于农业航空植保产业的健康有序发展。因此有必要研究开发植保无人机飞行性能和作业质量评估系统,对农用飞行器平台的各项性能指标进行检测与鉴定,以评估其是否满足农业生产与管理相应领域应用的实际需求,以便对农用飞行器产品进行规范管理、技术认定、更好地引导其发展,为我国农业航空建设与发展提供检测与鉴定技术服务。本文针对植保无人机飞行性能监测评估、航线规划能力评估和作业地图重构三个方面的关键技术,展开了较为深入的研究。具体研究内容如下:

(1)设计了一套基于LabVIEW的无人机飞行状态实时监测评估系统,利用IG-500N采集无人机的飞行状态信息,利用STM32F103ZE对采集的数据进行预处理,经由无线传输模块GE MDS EL805将信息传输至PC机,基于

LabVIEW设计了上位机软件程序,对飞行状态参数进行处理、分析、显示和存储。提出了一种航线平滑处理算法和航迹偏差求解算法,测试了传感器的精度、无人机飞行状态监测评估系统的性能和飞控手的操控水平。结果表明该系统可准确地获取无人机实时飞行状态数据,实现了数据的可视化;测试系统输出的结果可信,可为无人机的性能或飞控手操控水平评估提供参考。

(2)为了评估无人机的航线规划能力,设计了一款植保无人机覆盖作业路径规划软件。分析了传统农业机械的覆盖作业路径规划方式,确定了“往复式”的覆盖路径规划方式,并将路径规划分解为航线起点、转弯点和结束点的规划。提出了转弯区域的最小平行四边形规则和横坐标极值求解方法,分析了不同情形下的航线规划方法。指出航线评价的指标包括航线总长度、转弯次数、冗余覆盖率、重喷率和漏喷率,研究了航线评价指标的计算方法,提出了一种基于加权评分的航线评价方法。以五边形地块作为作业对象进行了航迹规划试验,结果表明该算法的规划结果优于以往算法,最多减少作业过程中的航线总长度为39.41m,即减少15.49%的作业航线总长度,可用于自动规划无人机作业路线,也可用于提取被检测对象规划的作业航线参数,从而对其航线规划能力进行评估。

(3)分析了植保无人机作业覆盖区域评估的主要方式,提出了一种可即时在线评估的,基于断点分割的植保无人机作业地图重构算法。首先将作业地图构建问题简化为作业覆盖子区域的构建和合并问题,采用理想化模型构建作业覆盖子区域。定义了区域断点,依据区域顶点的二值化结果提取出断点和相交线,并利用断点将区域顶点分割为若干条有效连接段。分析了两线段相交的所有情形,制定了相交线处的区域交点求解规则,基于两区域的断点数目制定了不同情形下的区域合并规则。并且设计了基于该算法理论的作业覆盖地图重构软件,在理论航线、直线路径和不规则航线条件下进行了试验测试,

结果表明该算法运行结果与理论计算结果一致,最高可适应的坐标数据更新频率为25Hz。(4)两区域可能在非断点的位置相交,为了解决这一问题,提出了一种基于有效交点的植保无人机作业地图重构算法。该算法首先初步求解出两区域的所有边界线之间的交点,并提取相交线,依据相交线处的顶点有效性制定多重交点的删除规则。利用剩余有效交点处的相交线索引号,将区域顶点分割为若干条有效连接段。之后选择多重交点较少的区域作为主动区域,基于有效交点的个数,区分不同的区域合并情形,制定不同的区域合并规则。并且设计了基于该算法理论的作业覆盖地图重构软件,在理论航线、直线路径和不规则航线条件下进行了试验测试,结果表明该算法运行结果与理论计算结果一致,最高可适应的坐标数据更新频率为189Hz。

(5)为了完整构建植保无人机作业区域地图,提出了一种基于边界网格化的区域合并算法。定义了网格尺度,制定了区域顶点网格化规则,以其中一个顶点所在网格为起点网格,确定了网格的生长规则。制定了网格分类处理的规则,将网格序列划分为有效网格、无效网格、重合网格和重叠网格,并利用重叠网格将网格序列分割为若干条有效网格连接段。最后基于各区域的有效网格连接段的种类和数目,制定了不同情况下的区域间网格连接规则。设计了基于该算法理论的作业覆盖地图重构软件,在理论航线、直线路径和不规则航线条件下进行了试验测试,并测试了不同网格尺度下的运算准确度和运算速度。结果表明该算法运行结果存在较小误差,运算速度较慢;且网格尺度越大,运算误差越小,运算速度越慢。最后对比分析了三种植保无人机作业地图重构算法的优缺点和适用情形。

(植保无人机飞行性能和作业区域评估的研究,华南农业大学农业机械化工程专业,农学博士张昆,导师张铁民)

摘要 ■

病虫害是阻碍农作物健康生长、制约粮食产量的主要影响因素。化学防治是目前解决病虫害问题的主要举措。植保无人机凭借其高效、灵活、环境适应度高等优点逐渐替代传统施药工具,并得到广泛应用。然而,由于雾化原理、雾滴运动机制以及药液与靶标叶面交互过程的不明确,雾滴存在飘移和流失等问题,不仅危害生态环境甚至威胁人畜安全。因此,全面了解植保喷雾过程中雾滴的空间分布、沉积效果,建立可靠的喷雾雾滴沉积预测模型是提高农药利用率的关键。本研究着眼于植保无人机喷雾的全过程,提出“机-液-叶”三步走的研究路径,探究了四旋翼无人机的旋翼风场分布规律,建立了雾滴粒径分布预测模型,分析了液滴性质和表面性质对液滴在叶面静态和动态交互作用结果的影响,并通过计算流体动力学(Computational fluid dynamics,CFD)进行数值模拟,实现了无人机旋翼风场分布、雾滴沉积分布以及雾滴撞击叶面等动态过程的可视化分析,对指导喷雾参数的设定和喷雾模式的调整具有重要意义。主要的研究内容如下:

(1)针对旋翼风场空间连续分布不明、数值模拟分析较少的问题,探究了四旋翼无人机的旋翼风场分布规律,建立了旋翼风场分布的模拟模型。通过三向风速无线传感器网络测量不同高度下旋翼风场的横向分布,并比较了不同湍流模型的模拟效果,实现了旋翼风场空间分布的可视化。结果表明:(a)垂直于地面的Y向风速是旋翼风场的主体风速,随着离中心位置距离的增大,Y向风速呈现先减小后增大的趋势。(b)通过与测量精度较好的测试点的实测风速对比发现,SST6)-模型的模拟效果最好,累计总误差率仅有11.458%。(c)靠近旋翼外侧的区域会出现卷扬气流;随着离旋翼高度的增加,Y向风速呈现先增大后减小的趋势,xoy平面的X向风速和zoy平面的Z向风速先增大后又逐渐衰减至较低水平;受旋翼旋转方向的影响,

“内外流”的现象会导致不同平面的风场宽度有所差异;对于不同高度的xoz平面而言,随高度增加Y向最大风速值减小,风场宽度增加,高速区域逐渐聚拢并最终形成一个椭圆形风场分布区域。

(2)针对雾滴粒径分布缺乏多因素综合考虑、预测效果欠佳的问题,研究分析了喷施参数和空间参数对雾滴粒径分布的影响,并基于机器学习的方法建立了雾滴粒径空间分布定量分析模型。通过喷雾测试系统测量了不同喷施流量、不同喷嘴以及不同空间位置的雾滴粒径分布,基于多层感知机(Multi-layer perceptron,MLP)、极限学习机(Extreme learning machine,ELM)、决策树(Decision tree,DT)、支持向量机回归(Support vector regression,SVR)、径向基神经网络(Radial basis function neural network,RBFNN)和多项式回归建立了雾滴体积中径(Volume median diameter,VMD)和粒径相对分布跨度(Relative span,RS)的预测模型。结果表明:(a)喷嘴孔径的增大和流量的减小都会使VMD增大和RS减小。(b)VMD和RS曲线在空间分布上呈中心对称。随着喷雾高度和水平距离的增加,VMD增大;RS曲线水平位置上有明显拐点,RS随水平距离增加和高度的降低会明显减小。(c)基于机器学习建立的VMD和RS预测模型均取得了优于多项式回归的结果。其中,对于VMD定量分析而言,SVR模型的预测效果最好,预测集相关系数(Correlation coefficient of prediction,R_p)和均方根误差(Root mean square error of prediction,RMSEP)分别为0.9929和6.0690。对于RS定量分析而言,MLP模型的预测效果最好,R_p和RMSEP分别为0.9537和0.0398。

(3)针对雾滴沉积分布测试受田间实验、风洞实验限制大的问题,通过数值模拟研究分析了喷雾雾滴空间分布规律。基于离散相模型(Discrete phase model,DPM)模拟还原了空心锥形喷嘴的喷雾过程,并分析了在不同风速和沉积高度下,喷雾雾滴的沉积分布规律和以及飘移情况。结果表明:(a)模拟TR80-02C和TR80-03C喷嘴

的喷雾效果较好,相对误差小于10%。(b)当沉积面高度大于0.5 m,沉积量峰值随风速值的增大呈现先增大后减小的趋势。当沉积面高度小于0.5m或风速值小于0.5 m/s时,雾滴的有效沉积率均达到了95%以上。沉积面高度越高,风速越大,雾滴的有效沉积率越低。(c)在风速的影响下,喷雾雾滴在空间上出现“分层”现象,小雾滴更易发生飘移位于下风口,且风速越大“分层”现象越明显。随着风速增大,雾滴飘移量以及飘移雾滴的粒径分布(D10、VMD和D90)先快速增大而后趋于平缓。

(4)针对叶面润湿性影响因素考虑单一、交互作用机理不明的问题,研究分析了液滴性质以及表面性质对叶面润湿性的影响。以油菜为研究对象,通过接触角的测量探究不同农药类型、雾滴粒径和助剂的添加对润湿性的影响,通过表面自由能(Surface free energy,SFE)的计算和表面微观结构的观察评估表面性质对润湿性的影响。结果表明:(a)不同试验药液在油菜叶片表面的接触角与液滴的表面张力呈正相关,相关系数为0.941。(b)雾滴体积在7μL内对润湿性能没有显著影响。(c)添加有机硅助剂后,对于本身润湿性能较差的农药溶液改善效果更好。(d)油菜叶片的表面自由能低,其中色散分占很大比例,复杂的微观结构使其表面粗糙,因此,具有较高疏水性。

(5)针对雾滴与叶面碰撞机理不清晰、碰撞结果难预测的问题,分析了不同特性的液滴和表面结构对碰撞结果和铺展特性的影响,并基于数值模拟技术还原了液滴碰撞叶面的过程。基于液滴碰撞分析系统观察了不同液滴冲击不同表面(油菜、水稻、辣椒、石蜡和水敏纸)的碰撞结果以及铺展情况,模拟了液滴冲击油菜叶面的过程。结果表明:(a)对于疏水叶面而言,液滴在润湿性差的水稻近轴面更易发生反弹和破碎,液滴冲击亲水的辣椒近轴面时无反弹结果,液滴韦伯数增大后会直接破碎。(b)水稻和辣椒叶面对液滴敏感性更高,当液滴直径增大时,水稻叶面“反弹-破碎”过渡区域的起始和结束韦伯数会

有略微下降,辣椒叶面“粘附-破碎”过渡区域的起始和结束韦伯数明显增大。(c) 助剂会增加液滴润湿性并提高油菜叶面的粘附几率。“反弹-破碎”过渡区间的关键韦伯数与助剂浓度有较高相关性,起始和结束韦伯数与浓度的线性拟合决定系数分别达到了0.9386和0.9604。(d) 数值模拟得到的液滴在油菜叶面的冲击特性与实际观测结果有较高的一致性,对分析液滴与叶面交互作业具有重要参考价值。

(植保无人机喷施雾滴沉积分布规律及评价方法研究,浙江大学农业机械化工程专业,农学博士吴剑坚,导师何勇)

摘要 ■

针对当前应急管理机制无法有效应对突发事件的情形,有必要创新应急管理理论和方法,为今后高效应对突发事件特别是社会安全类突发事件提供有效的解决方案,以提升突发事件应急管理水平。本文在深入分析和总结多无人平台相关研究的基础上,提出将多无人平台应用于突发事件应急管理的思想,综合运用管理学、系统科学、计算机科学、控制理论、应急管理理论等,构建基于多无人平台的突发事件应急管理办法,从管理和控制相结合的角度探索基于多无人平台的应急管理理论、方法和技术,并将其应用于突发事件的事前预警预防、事中应对处置、事后管理三个阶段,分别给出基于多无人平台的应急管理策略或解决方法,以期进一步增强未来我国在应对突发事件特别是社会安全类突发事件的应急管理能力,提高应急管理水平。主要研究内容与研究结果如下:

(1)首先给出基于多无人平台的应急管理系统框架,对网络化多平台系统体系结构、多平台系统软件体系结构、有人平台人机协同交互界面等进行总体设计,设计多平台通信协议,为今后多平台应急系统的构建奠定基础。

(2)研究同构无线传感器网络节点的栅栏覆盖部署

问题,基于二部图理论,对1-栅栏覆盖问题进行数学描述,采用基于拍卖的1-栅栏构建算法求解该问题。提出基于异构移动传感器节点的覆盖漏洞检测和修复策略,以使被监测区域达到完全覆盖,保证整个区域任何地点可能发生的异常情况均能被传感器监测到。

(3)提出在“硬”数据传输机制和“软”信息云应急平台的基础上,构建基于软/硬数据的预警策略,构建社会安全类事件预警指标体系,为我国建立和完善社会安全类突发事件预警和应急管理提供理论参考。

(4)采用离散粒子群优化算法对多无人平台多目标分配问题进行研究,结果表明该算法可较快速找到最优解或可行解。对多无人平台持续作业问题进行建模,提出混合整数线性规划模型,形式化多无人平台系统的调度问题,使任务可被多个无人平台以“接力”的形式不间断地执行。

(5)系统研究了协同跟踪的三种模式,即对峙跟踪、尾随跟踪和接力型跟踪,丰富了目标跟踪理论及其应用。提出基于微分几何的协同对峙跟踪控制律,使得多个无人机与目标保持对峙距离,且各无人机间保持一定相位。设计了协同尾随跟踪控制律,该控制律可使多无人平台保持编队形式对运动目标进行尾随跟踪。设计了基于Voronoi图和UGV运动控制的接力型跟踪策略。

(6)提出构建融无线个域网技术/无线局域网技术/无线城域网技术、移动通信技术(3G/4G)和卫星通信技术为一体的多无人平台参与的应急搜救系统,以有效应对日益严峻的突发事件。对于静止目标,基于平行线扫描思想对目标进行搜寻,研究无人平台投放策略及现场指挥中心选址问题。针对运动目标的情形,设计面向运动目标的平行线搜寻策略和X型搜寻策略两种协同搜寻策略,通过仿真、分析得出X型搜寻策略更优的结论。

(多无人平台在突发事件应急管理中的应用研究,南京大学管理科学与工程专业,管理学博士宋志强,导师周献中)

摘要 ■

我国是一个地质灾害频繁的国家。发生地质灾害后,快速获取灾后地区影像是灾害监测及救援关键。地质灾害应急监测成像具有区域范围小、时间紧、分辨率高的特点,常规的遥感卫星和航空遥感手段无法满足。无人机低空遥感系统为这种小范围、危险区域遥感监测任务的特殊需求提供了新的技术途径。无人机飞行姿态稳定性差,成像系统受到相对运动、机械振动、光照和大气湍流效应等影响,导致影像畸变大、影像质量差、航带的排列不整齐和拼接累积误差大等问题。

本文面向地质灾害应急响应快速处理灾区高精度影像存在的问题展开了一系列的关键技术研究和仿真实验。首先,针对海量无人机影像人工筛选流程存在的问题,研究高效的影像质量客观评价模型应用到自动筛选无人机影像。综合分析了现有的NR-IQA方法,主要有针对特定失真类型的方法和需要样本采集基于机器学习的方法。本文利用视觉相关特征信息,提出一种基于单演信号的相位一致性结构特征的NR-IQA方法。该方法结合结构特征对应的一阶和二阶Riesz变换系数,不需要训练学习样本。在LIVE和TID2008图像数据测试库上验证模型评价效果,从整体上和分失真类型分别测试,算法评价结果与主观评价都具有较好的一致性。其次,分析了无人机影像在航拍实时传输过程中以及传感器本身拍摄影像时遭受噪声的干扰,引起影像退化原因。论文阐述了经典的空间域去噪方法,并分析了这些方法存在细节结构保持与平滑难以平衡的问题。NLM是一种新兴的性能优良去噪方法,但时间复杂度高。针对NLM效率问题提出一种选择性计算的改良优化方法。该方法基于L2范数的逐次消元法和图像积分图降低计算强度,并根据图像空间相关性提出一种基于Patch测地线距离寻找同质信息的自适应调整搜索窗口。实验表明,选择性计算的NLM既较好地降低运行时间又提升去噪效果。第三,地质灾害伴随着恶劣天气的

发生,不良天气极大地影响无人机影像质量。对雾天的无人机降质影像进行去雾清晰化研究是面向灾害应急响应无人机影像快速处理的重要环节。本文分析了雾图成像的物理模型,介绍了基于大气散射模型的去雾算法,然后以暗通道统计先验为基础,根据影像纹理和边缘结构自适应权重的引导滤波法,提出一种新的透射率细化的方法。实验表明,该方法对于薄雾影像处理质量基本可以达到晴天效果,对于浓雾的近景影像场景得到增强并不会出现人工光晕现象,可以较好地满足航拍实时和处理效果应用的需要。第四,在自然灾害快速应急响应任务中,实时、鲁棒、误差小的拼接算法是无人机影像处理平台研究重点。

本文分析了影像拼接现状和存在的不足,选用了特征检测效率高以及匹配快速的二进制描述符为特征信息。结合NNDR和RANSAC为影像配准提供精确稳定的控制点,以高效的汉明距离匹配二进制描述符完成自动配准步骤,根据影像亮度和色度完成颜色补偿,基于引导滤波的渐入渐出融合法拼接影像并消除拼接线。最后,利用快速处理的序列影像构成的全景图对飓风灾害房屋损坏识别的应急评估受灾情况的应用研究。根据影像中房屋纹理和颜色特征利用灰度共生矩阵分割出房屋区域,形态学腐蚀操作填充提高识别精度。经实验与人工解译比较,算法识别精度较好,达到了灾害破坏房屋损毁应急评估的快速响应。本文研究成果与创新点如下:

(1)针对海量无人机影像人工筛选流程存在的问题,利用视觉相关特征信息,提出一种基于单演信号的相位一致性结构特征的无参考影像质量评价方法。

(2)针对非均值去噪效率问题,提出一种选择性计算的优化方法,并应用到无人机影像去噪。该方法基于L2范数的逐次消元法和图像积分图降低计算强度,并根据图像空间相关性提出一种基于Patch测地线距离寻找同质信息的自适应调整搜索窗口。

(3)针对无人机有雾影像清晰化研究,提出一种基于

影像纹理和边缘结构自适应权重的引导滤波大气透射率细化方法,提高无人机影像清晰化效果,减少块效应和光圈效应。

(4) 提出一种多尺度快速定向二进制简单描述符特征描述方法。该方法采用定向二进制简单描述符代替高维数的SIFT特征提取算法作为拼接流程的特征提取算法,利用改进的渐入渐出融合法应用在无人机影像拼接中。

(5)本文研究成果在飓风灾害房屋损毁识别的应急评估中的应用。

(面向灾害应急响应的无人机影像快速处理技术研究,成都理工大学地质资源与地质工程专业,理学博士罗学刚,导师王华军)

摘要 ■

应急通信场景具有突发性强等特点,可能导致通信拥塞或地面基础通信设施损坏,短时间内难以恢复正常的服务。无人机搭载微型通信设备作为低空通信平台,借助其灵活性高、易于部署等优势,可在第一时间实现对应急区域的覆盖,并为用户提供高概率视距通信。但是无人机机载能量受限、带宽资源稀缺和用户趋利性移动等问题,严重制约无人机对应急区域的覆盖。更大的应急通信覆盖面积和更快的部署速度,可快速保证更多用户的正常通信,满足高效救援行动的需求。为此,研究应急通信场景下无人机通信平台覆盖最大化技术具有重要的现实意义。本文深入研究了应急通信场景下无人机的位置部署及功率-带宽资源分配对于室内-室外用户通信覆盖的影响。分析了适用于室外用户的空-地链路模型,以覆盖室内用户为突破口,建立适用于无人机为室内用户提供服务的路径损耗模型。以此模型为基础,在考虑用户公平性原则和网络稳定性的前提下,研究无人机覆盖室内用户时的节能部署和资源分配问题,保证无人机以最小能耗快速完成对室内用户的全覆盖。鉴于用户趋利

移动性导致的模型非归一化混合等问题,进一步研究无人机对混合室内-室外用户的最大覆盖。本文的主要研究内容及创新点如下:

(1) 针对室内-室外用户服务性能的差异化,提出了适用于室内用户的无人机快速部署策略,实现对室内用户的节能全覆盖。联合考虑室外-室内传输路径、室外传输损耗、穿墙损耗和室内传输损耗,设计可应用于室外-室内通信的信号传输损耗模型。用户位置信息未知时,通过大量数据拟合,得到无人机最优位置与建筑物长宽高之间的函数关系式。用户位置信息已知时,精确计算通信链路的损耗,提出基于块坐标下降的无人机快速部署算法。多无人机协作覆盖多栋建筑物时,在保证无人机对室内用户全覆盖的前提下,决策多机网络的控制单元,增强多机网络自身的主动鲁棒性。仿真结果表明,本文提出的收敛算法能快速部署无人机,保证无人机以最小的发射功率完成对室内用户的全覆盖。

(2) 针对远距离中继覆盖网络稳定性差的问题,提出了基于中断概率的无人机部署及资源分配策略,实现对室内用户的稳定全覆盖。将网络稳定性量化为中断概率,研究室外基站与室内用户之间所建链路的中断概率。通过优化室外-室内路径损耗模型,推导出所有链路中断概率之和的封闭表达式。进一步提出基于公平性的无人机位置-功率分配-带宽分配(Location-Power-Bandwidth Allocation fairness,LPB-fairness)方案及块坐标下降算法,将具有非凸非凹特性的原问题进行分解-迭代优化。仿真结果表明,所提方案对部署位置、功率分配和带宽分配进行快速优化,保证无人机以最小的中断概率实现对室内用户的覆盖,并且不同链路间中断概率的差异维持在1%以内。

(3) 针对由于室内用户趋利性移动导致的传输模型混合及资源利用率低,并进一步导致网络总传输速率低等问题,提出了基于部署位置和资源分配的“室内-室外-迭代优化”(Indoor-Outdoor-Iterative,IOI)的快速覆盖



总方案,实现对混合室外-内用户的最大覆盖。IOI方案可避免建立无法归一处理的混合传输模型。根据用户密度和无人机高度提出了一种具有低计算复杂度的室外用户分布估算方法,并进一步提出了一种基于三维位置、功率和带宽分配的子方案。根据剩余资源与室外用户所需资源的度长絜大,分三种情况提出相应算法并讨论该方案的可行性。仿真结果表明,所提算法可实现快速收敛,并在满足对室外-内用户最大覆盖的基础上,确保用户之间的通信速率差异小于0.5%。

(应急通信场景下无人机通信平台覆盖最大化技术研究,北京邮电大学信息与通信工程专业,工学博士崔键,导师陈山枝)

(摘自中国知网)

Data Index

- [1]曹晓桢,吴健,查泽超. 无人机激光扫描测绘系统误差的模型检校技术及实验研究. 科技创新与应用, 2024, 14 (20): 88-90+95.
- [2]张利平,郑春雨. 基于无人机遥感影像的芒果树株数快速提取. 测绘工程, 2024, 33 (04): 60-67.
- [3]乔智,姜群鸥,律可心,等. 无人机高光谱遥感和集成深度置信神经网络算法用于密云水库水质参数反演. 光谱学与光谱分析, 2024, 44 (07): 2066-2074.
- [4]高皓宇,国海,王洋,等. 基于AprilTag的农用无人机起降标识与定位算法. 安徽科技学院学报, 2024, 38 (04): 78-86..
- [5]甘路,蔡敏娟,罗婉芳. 植保无人机防治柑橘病虫害的推广应用分析——以广西为例. 南方农机, 2024, 55 (13): 86-88.
- [6]李旭光. 基于无人机倾斜摄影的大比例尺地形图测绘研究. 家电维修, 2024, (07): 68-70.
- [7]刘亮亮,张柯,张敬坤,等. 自贡有人机与无人机双跑道运行安全风险分析. 中国民航飞行学院学报, 2024, 35 (04): 15-18+23.
- [8]景会成,曹育铭,葛超,等. 基于混合策略改进蟻蟻优化算法的无人机三维路径规划. 现代电子技术, 2024, 47 (13): 144-152.
- [9]赵拓,高家隆,黄健. 基于DoDAF的无人登陆作战体系结构建模及仿真. 计算机仿真, 2023, 40 (12): 46-54.
- [10]邹泽海,郑恩辉,丁凯,等. 低空自主无人机数字孪生系统设计. 现代电子技术, 2024, 47 (13): 123-128..
- [11]李仁凤,韩顺凯,杨风波. 长合风场四旋翼植保无人机下洗流与雾滴分布研究. 中国农机化学报, 2024, 45 (07): 81-86..
- [12]鲁军,杨杰,郝永平,等. 基于领航-跟随的无人机编队避碰飞行控制. 沈阳理工大学学报, 2024, 43 (04): 38-43+50.
- [13]陈思婷,周明,黄华冰,等. 植保无人机投放螟黄赤眼蜂防治稻纵卷叶螟田间效果评价. 广西植保, 2024, 37 (02): 32-34.
- [14]崔琬苗. 无人机技术水土保持监测中的应用分析. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (06): 123-127.
- [15]关利杰. 无人机系统在水利工程征迁实物调查中的技术应用与分析. 黑龙江水利科技, 2024, 52 (06): 98-100..
- [16]程翔,杜军. 基于红外感应技术的海上即时搜救无人机设计. 设计, 2024, 37 (12): 112-115.
- [17]彭荣庆. 无人机遥感测绘技术在矿山测量中的应用. 新疆有色金属, 2024, 47 (04): 30-31..

- [18]戴良军,陈炜军,李智军,等. 一种基于模糊PID算法的无人机横滚姿态控制器设计与仿真. 教练机, 2024, (02): 23-27.
- [19]袁涛,符松海,刘新玉,等. 外军低成本无人机成本控制技术浅析与启示. 教练机, 2024, (02): 9-14.
- [20]王宏胜,徐静,陆俊豪,等. 网络RTK支持下的轻小型无人机航测制图案例分析. 能源技术与管理, 2024, 49 (03): 226-229.
- [21]段涛,邓宇峰,郭猛猛,等. 无人机低空遥感技术在崩塌地质灾害动态监测中的应用. 能源技术与管理, 2024, 49 (03): 31-34.
- [22]甘发金,王朝阳,闫东,等. 长航时无人机燃油温度仿真及分析. 现代机械, 2024, (03): 7-12..
- [23]杨欣宇. 专利视域下成都工业无人机产业创新现状及发展对策. 决策咨询, 2024, (03): 26-31+35.
- [24]智奇彬. 无人机摄影技术对采动区房建变形实时监测方法. 江苏建材, 2024, (03): 136-138.
- [25]王炳文,唐菁敏,宋耀莲. 智能反射面辅助无人机中继的资源优化算法. 数据通信, 2024, (03): 34-40.
- [26]郜士彬,毛云华,何南,等. 无人机机载LiDAR在光伏发电项目大比例尺地形图测量中的应用. 太阳能, 2024, (06): 64-70..
- [27]孙瑶,吴定邦,杨智翔,等. 像控点布设对无人机倾斜摄影测量精度的影响. 人民长江, 2024, 55 (S1): 109-112.
- [28]田柏栋,李莉,马杨杨. 针对附有玻璃幕墙类建筑的无人机倾斜摄影建模方法优化研究. 西部资源, 2024, (03): 117-120..
- [29]周伟. 论无人机测绘技术在工程测量中的应用. 产品可靠性报告, 2024, (06): 95-96.
- [30]金振阳,章迪,方田野,等. 一种无人机正射影像地类自动识别方法. 城市勘测, 2024, (03): 83-87.
- [31]陈露阳. 浅谈无人机航测技术在南水北调中线工程(临城段)运行管理中的应用. 河北水利, 2024, (06): 47+34.
- [32]武文龙. 无人机倾斜摄影测量在大比例尺地形图测绘中的应用——以晋城市基础测绘项目为例. 经纬天地, 2024, (03): 38-43.
- [33]陈福金. 基于CLGWO的无人机三维路径规划研究. 经纬天地, 2024, (03): 77-82.
- [34]宋秉红. 无人机倾斜摄影测量技术在三维数字测图中的应用. 经纬天地, 2024, (03): 83-86.
- [35]邱焕翔,翟虎,王冀鹏,等. 基于无人机航摄的地质踏勘及风险评估. 科学技术与工程, 2024, 24 (18): 7905-7912.
- [36]李聪,汪陈微,金衍科,等. 面向森林火灾的人工巡视与无人机巡视效益评估. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (06): 17-25.
- [37]张琦,王璐,秦伟. 无人机在油田环保监督中的应用. 化工安全与环境, 2024, 37 (07): 86-88.
- [38]谈玲,曹博源,夏景明,等. 一种面向随机计算卸载的两层无人机能耗优化方法. 电讯技术, 2024, 64 (06): 910-919..

- [39] 杜智勇,周源利,彤鑫. 基于信干噪比的无人机集群分布式编队控制算法 . 电讯技术, 2024, 64 (06): 920-927..
- [40] 全昌文,李翔,盘贻峰,等. 中航时无人机在自然资源调查监测中的应用 . 地理空间信息, 2024, 22 (06): 57-60.
- [41] 缪志修,罗远刚. 无人机LiDAR点云与无人机影像匹配点云分析比较 . 科技创新与应用, 2024, 14 (19): 86-89+94..
- [42] 陈波. 多旋翼无人机仿地飞行倾斜摄影测量技术在地质灾害处置项目中的应用 . 四川地质学报, 2024, 44 (02): 317-321.
- [43] 袁茂珂,郑小敏,等. 基于无人机倾斜摄影的地质公园三维实景建模探讨及应用 . 四川地质学报, 2024, 44 (02): 329-333.
- [44] 胡海峰,等. 无人机场景下基于Transformer的轻量化行人重识别 . 南京邮电大学学报(自然科学版), 2024, 44 (03): 48-62..
- [45] 谭凯亮,何舢. 无人机技术在高速公路水土保持监测中的应用 . 水利科学与寒区工程, 2024, 7 (06): 101-104.
- [46] 侯金龙,等. 采用无人机搭载高清可见光及红外热成像法进行外墙渗漏检测的应用与分析 . 中国建筑防水, 2024, (06): 39-42..
- [47] 冯思伟,颜军,刘璐铭,等. 无人机倾斜摄影精细化模型构建及应用 . 测绘与空间地理信息, 2024, 47 (06): 48-50+54.
- [48] 邢志坤. 35 kV交流输电线路直线塔无人机巡检自动化控制系统设计 . 自动化与仪表, 2024, 39 (06): 44-48..
- [49] 白晓晖,赵林. 四旋翼无人机的有限时间输出反馈姿态跟踪控制 . 自动化与仪表, 2024, 39 (06): 49-56+61..
- [50] 谭国平,等. 无人机辅助MEC车辆任务卸载与功率控制近端策略优化算法 . 电子与信息学报, 2024, 46 (06): 2361-2371.
- [51] 张旭东,于丽娅,李少波,等. 元启发式算法在植保无人机路径规划中的研究进展 . 农机化研究, 1-9[2024-07-12]..
- [52] 赵楠,黄香港,邓娜,等. 无人机高能效立体覆盖中轨迹与资源优化.电子与信息学报, 1-10[2024-07-12]..
- [53] 王军,王佳慧,李玉莲,等. 地下空间无人系统研究综述 . 智能系统学报, 2024, 19 (01): 2-21.
- [54] 郭燕,王来刚,贺佳,等. 基于多层次特征筛选和无人机影像的冬小麦植株氮含量预测 . 农业工程学报, 1-9[2024-07-12]..
- [55] 喻正辉,胡斌,马景豪. 关于利用无人机检验起重机械金属结构的探讨 . 特种设备安全技术, 2024, (03): 53-54.
- [56] 韩玉宝,姬江涛,张瑞瑞,等. 固体颗粒撒施无人机槽轮结构优化设计与试验 . 农机化研究, 1-10[2024-07-12]..
- [57] 王一桥,杨波,江承雨,等. 基于改进YOLOv5的无人机视觉目标检测 . 电光与控制, 1-9[2024-07-12]..
- [58] 李松林,江剑. 改进YOLOv5的无人机小目标检测算法 . 测试技术学报, 2024, (04): 354-362[2024-07-12]..

征稿启事

《联合飞机》(逢季末出版)系深圳联合飞机科技有限公司(国家级双高新企业)主办的内部资料性出版物,秉承“科学性、大众性、开放性”宗旨,坚持“联飞动态瞭望的窗口,传报无人机人心灵的青鸟”定位,紧扣无人系统研究与全产业链的关键点、热难点、前沿点,以及联飞集团工作动态、重大事件,以服务决策、交流思想、分享经验为重点,助推国家无人系统和航空事业发展。栏目包括创新前沿、一线论坛、技术广角、联飞故事、特别报道、行业短讯和论文摘要、资料索引。

现进行征稿:

- █ 来稿可围绕无人系统技术、市场、法规与监管、企业研究或其他自选研究角度。
- █ 观照应用与实践,谈透谈实,切勿空泛。字数在3500—5000之间、配图3张以上且像素均大于1M为宜。
- █ 规范撰写(GB/T 7714—2015),“参考文献”于文末呈现,文首需要摘要和关键词。
- █ 稿件录用后会给作者邮寄样刊和一定稿酬。
- █ 文末注明姓名、单位、职称(职务)、课题、电话、邮箱、收刊人及详细地址、邮编等信息。

请自留原稿,概不退稿。

期待关心、支持、从事无人系统研发、制造、服务和实践工作的各界人士不吝赐稿。

地址: 北京经济技术开发区同济南路20号院1号楼

电话: 010 - 5994 3177

网址: www.uatair.com

邮箱: info@uatair.com