

【飞行器设计与制造】

低空经济下的未来城市单人飞行器设计研究

李 迪, 邱 晨, 李 辉

(中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448000)

摘 要:随着低空经济的兴起,城市单人飞行器为解决城市交通日益严峻的拥堵问题提供了新思路。围绕未来城市单人飞行器开展深入研究,旨在探索其在高密度城市环境中实现高效、安全出行的设计方案。首先通过调研国内外城市飞行器现状,分析现有交通问题和潜在需求,探讨单人飞行器现存问题及改进方式,并重点阐述了设计理念和和技术要求,提出了一种轻便、灵活的单人飞行器设计方案。其次进行分析计算,设计了一款飞行高度 1 000 m 以内,巡航速度可达 162 km/h 的未来城市单人飞行器,并计算出最大推力、翼展等总体参数。最后根据计算参数进行翼形流体仿真,建立单人飞行器气动外形并进行运动仿真。仿真结果表明:设计的三角翼具有高效的升阻比和不易失速的特性,在飞行中能够节省燃料、延长航程,且机翼表面压力分布均匀,有利于产生稳定的升力,机翼展开收缩实现单人飞行器高机动性和低占用空间,更适用于复杂的城市环境,符合设计要求。

关键词:低空经济;单人飞行器;气动外形设计仿真;运动仿真;三角翼

中图分类号: V 221 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.004

现有的多元化交通方式受地面交通压力和水域限制,难以提供快速便捷的出行体验,城市交通面临巨大的流速瓶颈。低空经济作为一种新兴交通产业被提出,旨在充分开发和运用低空空域这一自然资源^[1],以满足日益增长的出行需求。在此背景下,城市单人飞行器(Urban Single-person Aircraft)作为现代航空科技集中化、小型化的单人高新技术产物,受到了广泛关注,其应用为解决城市交通的流速瓶颈问题开辟了新的思路^[2]。

低空经济概念起源于欧美等发达国家,并得到推广应用,为低空经济的未来持续发展奠定了基础^[3]。Xiao 等研发了一款用于城际运输的电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing),该飞行器有效载荷 1 000 kg,航程最高可达 200 mile,该研究对航程和有效载荷之间的权衡关系进行了总体概述并得出结论:为了满足有效载荷和任务要求,需要提高电机性能指标并增加电池容量,但会提高运输成本^[4]。美国 Alaka'i Technologies 公司设计的城市飞行器首次将液氢作为飞行器动力系统的能源供给,该飞行器载重约 450 kg,巡航速度约为 185 km/h,航程可达 644 km,且结构简单可靠,拥有六台低速螺旋桨为飞行器提供垂直起降和水平飞行所需的动力,无须任何倾转装置或附加机翼,即便单发动力失效也可保持稳定飞行^[5]。荷兰公司 PAL-V International B. V. 发布了一款名为 PAL-V Liberty Sport 的飞行汽车,这款飞行汽车造型独特,其顶部设计有可折叠的螺旋桨和可伸缩的垂尾,下半部分则是车体,当作为汽车使用时螺旋桨和垂尾收放至车体后方,不会影响地面行驶,该飞行汽车的有效载荷为 246 kg,飞行

收稿日期:2024-12-24

第一作者简介:李 迪(1997—),男,湖北宜昌人,助理工程师,硕士,从事飞行器结构强度设计研究。

E-mail:dmzzly@126.com

速度最高可达 180 km/h,飞行高度可达 3 500 m^[6]。Dünder 等设计了一种轻量化且空气动力性能更佳的固定翼垂直起降飞行器,同时还分析了起飞、爬升、巡航和着陆等各阶段的功耗,其研究表明,相对于具有旋翼的固定翼垂起,结构简单的固定翼飞行器拥有更长的续航能力^[7]。

我国在低空经济建设中取得了较好的成绩。截至 2023 年底,我国共注册 690 家通用航空企业,拥有商业运营类飞机 2 900 架,平均每月飞行时长达 11.4 万小时,全国已建成的通用机场高达 449 个,初步构建了三级飞行服务保障体系^[8]。广州亿航智能技术有限公司设计了一款名为亿航 216 的两座载人 eVTOL,其续航时间 25 min,航程 30 km,并于 2020 年完成首次飞行^[9]。浙江吉利控股集团有限公司旗下的沃飞长空科技有限公司获得全国首个民航局适航审定受理批复的有人驾驶载人 eVTOL,并于 2023 年完成公开飞行演示^[10]。随着我国空域管制的逐步放宽,城市飞行器市场展现出更为广阔的发展前景,未来有望使消费者普遍体验到飞行带来的便捷与乐趣。

单人飞行器的主要用途是解决城市交通问题。与私人飞机不同,未来城市单人飞行器采用垂直起降模式,因而无须建设跑道或停机坪等大型设施,能够在狭小空间内起降,这使其特别适合城市这类复杂环境^[11]。目前,现有单人飞行器尽管在技术层面取得一定进展,国外已研发出成品的单人飞行器,但其动力效率仍存在较大浪费,且飞行方式尚有改进空间^[12],在安全性、经济性和实际应用方面也面临诸多挑战。在安全性方面,电池技术、飞行控制系统以及操作员培训体系的成熟度不足导致潜在风险较高,同时适航认证标准的缺失也加剧了安全隐患;经济性方面,单人飞行器在垂直起降阶段需要消耗大量能量,而传统螺旋桨和多旋翼的设计导致起降能耗远高于巡航飞行,极大地影响了续航里程和运营成本,虽然固定翼的平飞效率更高,但需要额外跑道或复杂的混合动力系统实现垂直起降,因此,寻求更高效的动力系统以及更优化的飞行模式是降低单人飞行器能耗、提升经济性的关键;而在实际应用方面,续航里程短、载重能力有限以及空域管理法规滞后等因素,限制了其应用场景,难以满足例如长途通勤、货物运输等实际需求。因此,需要持续的技术革新、完善的法规体系才能克服这些瓶颈,真正实现单人飞行器的广泛应用。

本文针对单人飞行器的应用场景及现存问题,在现有基础上提出创新设计方案。首先通过 Profili 翼型编辑软件对比分析翼型、翼面积和升阻系数等关键参数,选取合适的翼型;其次将翼型导入 Xflr5 空气动力学分析软件,创建不同机翼几何模型,计算仿真压力分布、气动效率和升阻比等气动特性以选择最优解。最后,确定了单人飞行器的巡航速度、翼展和飞行高度等总体参数,并使用 CATIA 对其进行整体建模和运动仿真,模拟飞行姿态以验证设计的可行性。

1 单人飞行器设计

1.1 设计理念

本文设计的未来城市单人飞行器在现有喷气背包基础上,增加一对如图 1 所示的可伸缩机翼(Telescopic Wing),并将涡喷发动机的尾喷管改为俯仰式轴对称矢量喷管(Pitch Axisymmetric Vector Nozzle)。这种设计在确保单人飞行器体积较小、不会显得过于笨重的同时,解决了现有单人飞行器的一些不足之处。例如,伸缩机翼的增设不仅可以延长航程,还能提高燃油效率,提高单人飞行器的速度上限,并进一步增强高速飞行过程中的稳定性。俯仰式轴对称矢量喷管的设计使得发动机尾喷管的角度不再固定,能够在飞行器翼剖面(翼肋)方向上进行俯仰转动。这一创新设计有效解决了目前喷气背包在垂直飞行过程中的转弯不灵活和转弯半径过大的问题,并能与副翼协同作用,使单人飞行器在水平飞行中更为灵活地调整航向。

单人飞行器配备了两台小型涡轮喷气发动机(Turbojet Engine),其整流罩和主体承力结构采用了先

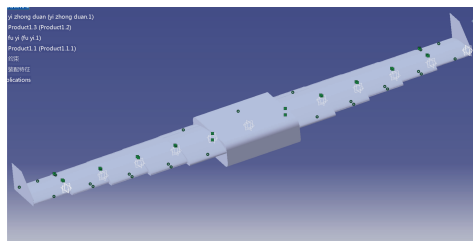


图 1 可伸缩机翼

进的钛合金材料,这不仅使整体质量更轻,同时保持了足够的强度。伸缩机翼的支撑和承力结构则采用质量轻、比强度高的碳纤维材料。此外,机翼表面还涂覆了新型复合材料喷涂层,有效防止在多次飞行任务后出现细微裂纹,从而影响气动性能。这些措施确保了单人飞行器在大迎角爬升或满载荷情况下,机翼不会发生弯曲变形,蒙皮也不会出现塌陷,从而显著延长机翼的使用寿命和提升安全性。

单人飞行器的涡喷发动机由小型电机启动,并配备锂电池组。飞行员首先背负飞行器点火启动,然后逐步加大发动机推力,直至飞行器离开地面。当单人飞行器垂直起飞达到能够平飞的安全高度时,飞行员可以通过操纵杆下达伸缩机翼展开的命令。机翼内部的伺服电机为伸缩机翼的展开提供动力,同时控制左右两翼的伸缩速度,确保其同步展开。飞行员通过操纵杆向飞行控制系统输入电信号,飞行控制系统随后调节副翼和发动机矢量喷口的偏转角度,实现单人飞行器从垂直飞行模式转为水平飞行模式。单人飞行器在平飞状态下需要降落时的操作步骤与起飞类似,飞行员增大发动机推力,使飞行器由平飞转为垂直姿态,随后控制飞行器收缩机翼。下降过程中飞行员需控制油门,利用发动机反推实现平稳降落,与此同时,矢量喷口在整个过程中进行角度调整以保持飞行姿态稳定。发动机启动后会为电池组充电,所使用的燃料为航空煤油,密度约为 0.78 g/cm^3 。

由于机翼设计为可伸缩,因此翼型的选择至关重要,关乎单人飞行器的飞行性能是否能够达到设计要求,保障飞行安全。根据低空空域管理规定,设计单人飞行器飞行高度上限为 $1\,000 \text{ m}^{[13]}$;考虑到飞行员的体重及发动机喷口的高排气温度,飞行员需穿戴含有隔热防护层的飞行服,因此估算飞行器自身质量为 70 kg ,有效载重为 90 kg ,设计整体最大载荷为 160 kg ;设计该飞行器的巡航速度为 162 km/h (固定翼平飞模式下)。设计要求强调节能省油以延长航程,因此需要选择高升力翼型,以减轻发动机负荷。在众多低速翼型中,Clark Y翼型及NACA系列的四位数翼型具备良好的高升力和较低的气动阻力特性,并且应用广泛,气动性能出色。在Profili中选取Clark Y、NACA 6413和NACA 4415三种翼型分析气动特性,总结如表1所示。

表1 三种翼型气动特性对照

特性	Clark Y	NACA 6413	NACA 4415
下表面	平直	微弯	微弯
弯度	适中	较小	适中
最大弯度位置	42%弦长处	41.8%弦长处	40%弦长处
阻力	较大	较小	适中
升力	适中	适中	良好
升阻比	低	高	适中
大攻角特性	较好	一般	一般
适用速度	低速	中高速	中低速
典型应用	早期的通用飞机	高性能滑翔机	通用飞机

1.2 翼型分析选取

飞行高度取极限值 $1\,000 \text{ m}$,弦长按翼根弦长计算,取 50 cm ,大致贴合成年人的背长,飞行速度取 50 m/s 。将以上3个参数导入Profili中,可以计算出雷诺数 $Re=1\,422\,874$ 。

$$L=C_L \frac{1}{2} \rho v^2 S, \quad (1)$$

式中: L 为升力, C_L 为升力系数, ρ 为空气密度, v 为自由来流速度, S 为翼面积。根据公式(1)可以看出单人飞行器在巡航模式下升力和重力平衡保持不变,空气密度不变,升力系数由翼型决定(看作定值),机翼面积和速度的平方成反比,速度越大翼面积越小。所以,在选取翼型时飞行速度选择最小巡航速度 162 km/h (换算为 45 m/s),如果飞行速度增大翼面积也可以向下兼容。

图 2 为三种翼型在同雷诺数、不同迎角下的气动系数曲线图。由图 2(a)可知,同一迎角中升力系数由大到小排序为:NACA 6413>Clark Y>NACA 4415。在图 2(b)中,当迎角为 $-8^{\circ}\sim-3^{\circ}$ 时,Clark Y 曲线纵轴较高;当迎角处于 $-3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,三条曲线无明显分离;从 10° 迎角开始,随着角度增大三条曲线逐渐分开,其中 NACA 6413 曲线明显高于其他两条曲线。由图 2(c)可知,三种翼型的升阻比(Cl/Cd)曲线区分非常明显,在迎角为 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 时,NACA 6413 曲线最高,NACA 4415 曲线居中,Clark Y 曲线最低,由此得出在该迎角范围内 NACA 6413 翼型升阻比最大。图 2(d)展示了三种翼型的俯仰力矩系数,该系数越大则抗干扰能力越强,可以看出 NACA 6413 翼型比其他两种翼型具有更好的飞行稳定性,不易出现失速情况。

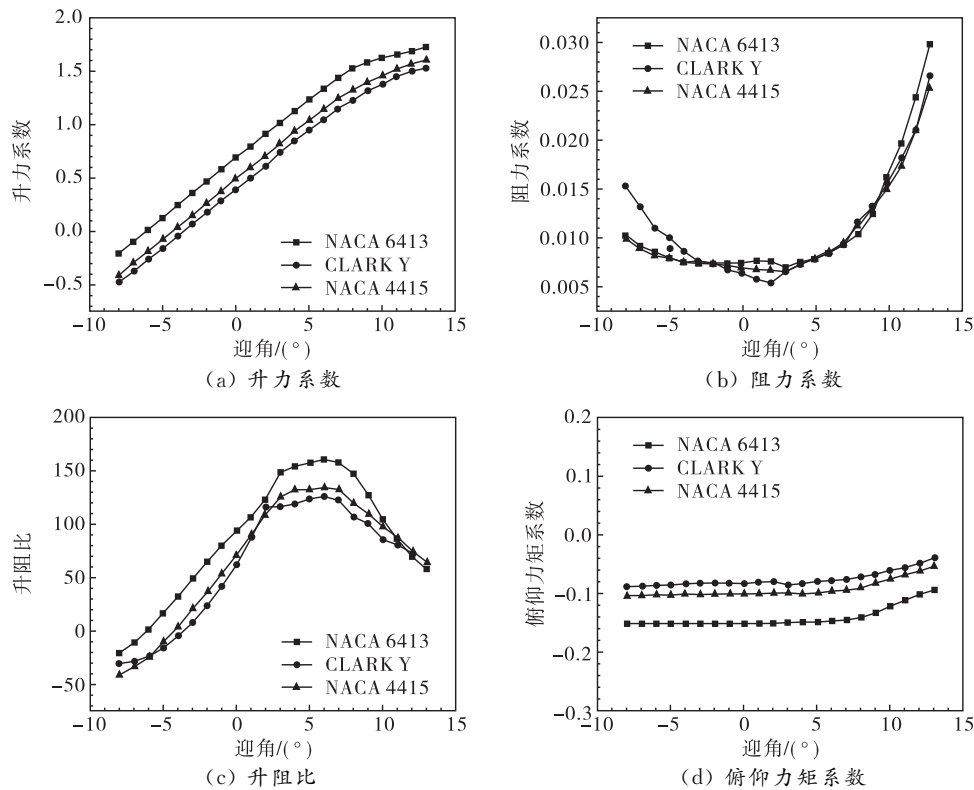


图 2 三种翼型气动系数曲线图

表 2 为三种翼型在同雷诺数、不同气动参数下的分析计算结果。对比发现,NACA 4415 翼型有利迎角为 5.5° ,Clark Y 和 NACA 6413 有利迎角均为 6° ,三种翼型有利迎角差别不大,但 NACA 6413 升阻比最高。经上述综合分析,最终得出结论,NACA 6413 翼型最符合设计要求。

表 2 三种翼型气动参数对照

迎角/ $^{\circ}$	NACA 6413		CLARK Y		NACA 4415	
	升力系数	升阻比	升力系数	升阻比	升力系数	升阻比
4.0	1.119 1	153.301 4	0.836 9	121.564 3	0.935 3	132.910 4
4.5	1.172 3	156.401 8	0.887 9	122.176 9	0.985 6	133.189 2
5.0	1.225 1	157.064 1	0.938 8	123.526 3	1.035 0	132.692 3
5.5	1.276 9	157.642 0	0.989 9	125.303 8	1.086 4	134.123 5
6.0	1.330 7	160.325 3	1.041 4	125.469 9	1.135 1	133.541 2
6.5	1.378 0	156.590 9	1.091 1	125.413 8	1.185 6	133.213 5
7.0	1.427 5	156.868 1	1.139 7	122.548 4	1.236 0	132.879 1

NACA 6413 翼型具有良好的气动性能,但其曲线轮廓较为复杂且最大厚度位置靠前,因此其结构复

杂度和制造成本也相对较高。考虑单人飞行器对轻量化和成本控制有严格要求,未来应积极探索和应用先进的复合材料成型技术,利用复合材料轻质高强的特性减轻机翼质量,简化制造流程,降低对高精度模具的依赖程度。此外,采用金属3D打印技术可以实现复杂翼型结构的快速成型和定制化生产,减少材料浪费,降低人工成本。同时,通过拓扑优化等技术对翼型内部结构进行优化设计,在保证结构强度的前提下尽可能减少材料用量,降低制造成本。

确定翼型后,即可获得相应的升力系数,进而根据式(1)计算出所需的机翼面积,并据此设计合理的展弦比。机翼在安装时会设置一个安装角,这不仅有助于飞行器在飞行中更容易接近有利迎角,获得更高的升阻比,还能为飞行器的爬升提供空间,避免因仰角过大导致失速,从而减少发动机功率浪费。

设计安装角为 4° ,相比有利迎角小 2° ,由表2可知 4° 时NACA 6413翼型的升力系数为1.119 1。空气密度在标准条件下(0°C ,1个标准大气压)为 1.29 kg/m^3 ,海拔每上升1 000 m,空气密度约降低10%,则极限高度下的空气密度约为 1.161 kg/m^3 。飞行速度取 45 m/s ,巡航速度下升力与重力平衡(重力加速度 $g\approx 10\text{ N/kg}$)取1 600 N。将以上参数带入公式(1)中,计算得出翼面积 $S\approx 1.2\text{ m}^2$ 。

1.3 翼形流体仿真

在Xflr5中设置NACA 6413翼型,使用多线程分析工具,将雷诺数赋值,选取设计巡航速度,马赫数设为0.13。

图3为翼型在安装角为 4° 时上下表面的压力系数曲线。可以看出在翼弦弦长约90%处,翼型上表面气流由负压变为正压。此处发生附面层分离,随着该点沿 x 轴向后,气流在逆压梯度的作用下发生倒流,倒流而上的气流和顺流而下的气流形成漩涡并被主流吹向后方,最后会在翼型后缘处形成涡流区,产生压差阻力。

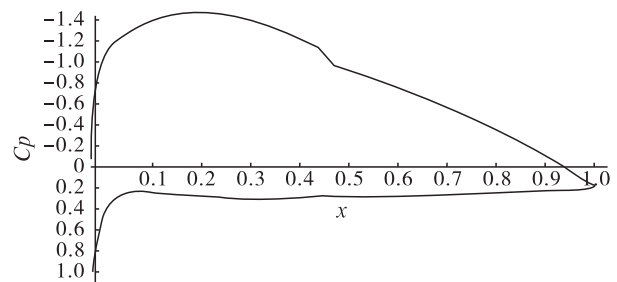


图3 压力系数曲线

利用计算出的翼面积 $S\approx 1.2\text{ m}^2$,根据NACA 6413翼型设计出三角翼、矩形翼和梯形翼三种机翼平面形状。表3给出了三种机翼的设计参数,将参数设定好后分别进行流体仿真,三种机翼仿真结果如图4所示。经过计算后分析得知,三角翼的气动效率为1.004,升阻比为27.177 3;梯形翼气动效率为1.007 1,升阻比为27.230 3,与三角翼参数大致相同;矩形翼的气动效率为0.985 6,升阻比为12.449 5,数值低于前两种机翼。

表3 三种机翼基本参数表

序号	参数	三角翼	矩形翼	梯形翼
1	翼展/mm	3 000	2 400	3 000
2	投影面积/ cm^2	12 000	12 000	12 000
3	翼根弦长/mm	500	500	500
4	翼尖弦长/mm	300	500	300
5	几何平均弦长/mm	400	500	400
6	平局气动弦长/mm	408.33	500	408.33
7	长宽比	7.5	4.8	7.5
8	锥度比	1.67	1	1.67

将图4中三图进行比对,可以明显看出矩形翼的下洗速度非常大,且从翼根向翼尖递增。过大的下洗速度会严重影响相对气流流经翼面,使相对气流向下倾斜,增大下洗角,加重对升力方向的偏离,最后造成诱导阻力上升,并且加速燃油消耗,缩短航程,因此矩形翼不符合设计要求。三角翼和梯形翼的气动效率大致相同,但三角翼下洗速度略小于梯形翼,且三角翼的表面压力由翼根沿翼展分布更加均匀。综上所述

述,采用三角翼更符合设计要求。

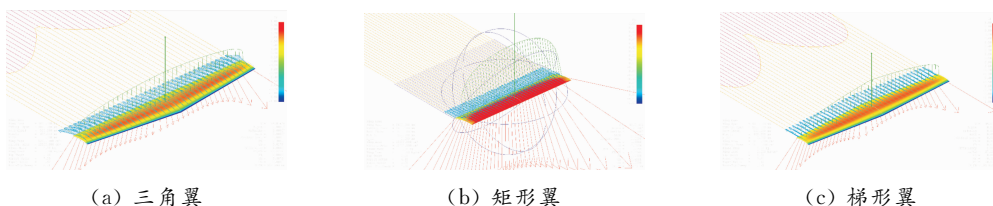


图 4 三种机翼流体仿真结果

1.4 总体参数设计

由于起降方式为垂直起降,因此推重比大于 1。考虑飞行员暴露在外环境中,应着重注意飞行安全问题,故设计两台发动机总推力为 1 920 N,富余整体质量的 20%,便于飞行员应急处理各种突发情况。阻力公式

$$X = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S, \tag{2}$$

式中: X 为阻力, C_x 为阻力系数。通过上述分析计算,已得到单人飞行器所有基本参数,现在由式(2)推算巡航模式下的飞行阻力。

取有利迎角下的阻力系数 $C_x = 0.008 1$,高度 1 000 m 时空气密度 $\rho \approx 1.161 \text{ kg/m}^3$,翼面积 $S \approx 1.2 \text{ m}^2$,速度取最小巡航速度 162 km/h,代入式(2)得 $X \approx 114 \text{ N}$ 。单人飞行器巡航飞行时为固定翼模式水平飞行,所需发动机推力较小,由于存在干扰和摩擦等阻力因素,因此预估巡航推力为发动机最大推力的 40%,则至少 768 N 的推力即可维持巡航速度。

未来城市单人飞行器设计参数如下:巡航速度为 162 km/h,相对最大飞行高度为 1 000 m,发动机最大推力为 1 920 N,机翼展开最大翼展为 3 m,最大起飞质量为 160 kg,自身质量为 60 kg。

2 单人飞行器建模仿真

2.1 气动外形建模

根据分析计算出的机翼展长和弦长,将单边机翼设计为 5 段伸缩,然后从 Profili 中导出需要尺寸的翼型工程图,并在 CATIA 中打开,如图 5 所示。图 6 展示了翼 1 段三维模型,在翼 1 段凹槽前缘和后缘上表面可以看到有两个细长的半圆柱,这是专为机翼伸缩设计的滑轨,5 段机翼每段翼前缘和后缘均设计有滑轨,如翼 2 段前缘处滑轨用于翼 2 段向翼 1 段伸缩,翼 1 段后缘的滑轨用于翼 1 段向翼盒伸缩。以此类推,翼 3 段伸缩于翼 2 段中,翼 4 段伸缩于翼 3 段中,翼 5 段伸缩于翼 4 段中,最终 5 段机翼可完全收进翼盒,翼盒如图 7 所示。

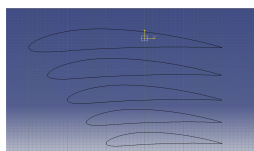


图 5 五段翼肋形状

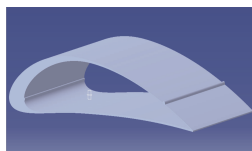


图 6 翼 1 段

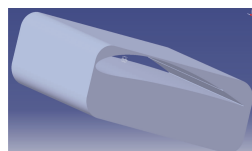


图 7 翼盒

图 8 为机翼的翼 5 段,可以看到在翼 5 段的后缘处有一块矩形区域,此处为副翼,当单人飞行器垂直离地一定高度时机翼展开,副翼配合俯仰式轴对称矢量喷管使单人飞行器从垂直飞行改为水平飞行。翼 5 段是伸缩机翼的最后一个翼段,此翼段还设计有翼尖小翼,其可以阻碍气流从翼根流向翼尖,从而减少涡流的形成,有效降低诱导阻力。当 5 段机翼完全收缩,仅留翼尖小翼在外时,可大幅缩小单人飞行器整体体积,机翼完全收缩状态如图 9 所示。翼盒上的凹槽为第 1 段翼的翼型,并在凹槽的内表面设计有滑轨用于伸缩。翼盒内部集成了机翼、油箱、电气系统以及油泵等关键组件,并配备应急降落伞,一旦发动机发

生故障,飞行员可立即启动降落伞,确保安全着陆。

发动机尾喷管按设计要求制作成俯仰式轴对称矢量喷管,如图 10 所示。该尾喷管区别于同类发动机尾喷管,其喷口可以上下微调,转动一定角度,单人飞行器左右双发的矢量喷管既可单独转动,也可以同向转动或差动,飞行时通过改变尾流喷射方向,并配合副翼以提高单人飞行器飞行操纵能力。小型涡喷发动机需要一种固定结构或支架才能安装到飞行器上。图 11 为两台发动机撑架,三条弧形合金管连接翼盒,除了起固定位置作用,也承担起输油管路和电路等职责。

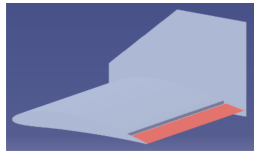


图 8 翼 5 段

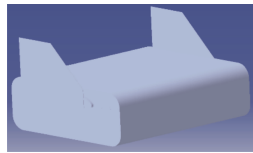


图 9 机翼完全收缩状态

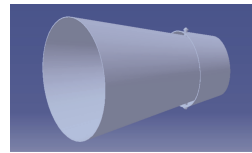


图 10 轴对称矢量喷管

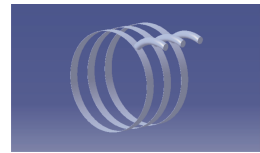


图 11 发动机撑架

图 12 为涡喷发动机前整流罩,前端加装整流罩可以优化发动机外部的的气流分布,减小整体阻力并提高燃烧效率,涡喷发动机整体装配如图 13 所示。图 14 为飞行操纵杆,操纵杆和翼盒连接,内部设有电路,末端两个摇杆由飞行员手动操控用来改变航向或前进后退,单人飞行器的飞行控制系统通过控制副翼摆动和矢量喷管偏转,两者配合改变飞行方向,摇杆上装有小型显示屏和功能面板,显示屏上标注燃油余量、飞行高度、飞行速度、电瓶余量、发动机温度等各项参数。功能面板上的按钮,可以实现机翼伸缩、一键巡航、逃生等功能。未来城市单人飞行器整体三维模型如图 15 所示,整体建模过程中对多处边角过渡区进行打磨、圆润处理,使其更加舒适贴合,符合人体工学。

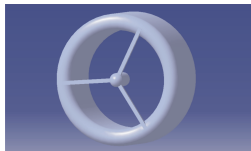


图 12 前整流罩

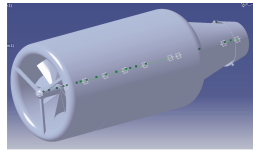


图 13 涡喷发动机



图 14 飞行操纵杆

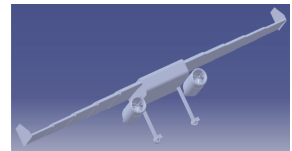


图 15 单人飞行器三维模型

2.2 运动仿真

在数字样机(Digital Mock-Up)机构模块中对单人飞行器进行运动仿真,使用新增机械装置命令,机械装置的自由度无论刚开始有多少,使用各类工具约束后自由度等于零,才可使用命令仿真。

机翼建模时设计的滑轨在此处发挥关键作用,伸缩机翼的运动模拟则采用圆柱接合工具实现。在实际运动中,机翼伸缩时翼盒束缚在飞行员背后,翼盒保持固定位置,因此给翼盒一个固定命令,机翼以它为参考伸缩运动。将翼盒与第 1 段翼的圆柱结合,如图 16 所示,其中直线 1 和直线 2 分别代表翼盒凹槽滑轨轴线和第 1 段翼上翼面滑轨轴线,两条轴线重合来回移动,偏移长度为各翼段宽度 300 mm,负号表示运动方向,这里不需要旋转所以角度设置为零。



图 16 翼段圆柱接合

机翼分为左右两边,每边各 5 个翼段,所以需圆柱接合 10 次,副翼无须移动则将其和第 5 段翼刚性连接。所有运动部件接合完后,使用命令即可对机翼运动仿真。图 17 和图 18 分别为单人飞行器机翼收缩

和展开后的运动仿真效果。单人飞行器机翼收缩状态适用于短途慢速飞行,有利于在复杂空间中高频快速起降;单人飞行器机翼展开后可改为平飞姿态且适用于长途高速飞行,飞行速度快有利于缩短任务周期。运动仿真不仅生动地展示了单人飞行器的工作方式,还直观呈现了其设计优点。

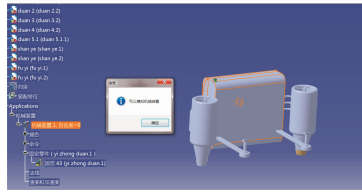


图 17 机翼收缩效果

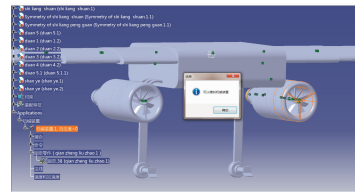


图 18 机翼展开效果

3 结论

本文聚焦低空经济背景下的未来城市单人飞行器,探讨其作为低空经济的重要载体,在缓解交通拥堵、构建高效出行模式中的关键作用,并验证其在高密度城市环境中安全运行的可行性。通过调研分析,提出一种轻量化、高机动性的创新设计方案,兼顾安全性和经济性。随后,设计了一款飞行高度 1 000 m 以内、巡航速度 162 km/h 的未来城市单人飞行器,并推导其关键参数。为验证方案合理性,进行了流体仿真分析和运动仿真。结果表明,该飞行器具有出色的升阻比、良好的失速特性和优异的机动性。Xflr5 在模拟复杂三维流动时存在一定的局限性,湍流模型和网格划分较为简单,为提高设计精确性,后期可以辅助使用 ANSYS Fluent 等 CFD 软件提高关键区域的网格分辨率以捕捉精细的流动细节,进行更精确的三维模拟,同时探索集成更先进的湍流模型以加强对复杂湍流现象的模拟能力。

本研究不仅为低空经济下的城市交通提供全新方案,也为单人飞行器研发提供理论依据和技术支撑,证实了其在城市低空交通领域的巨大潜力,为实现城市交通立体化、智能化和高效化奠定基础,并有望推动低空经济相关产业发展,最终实现更便捷、高效、可持续的城市生活。

参考文献:

- [1] 刘先江,宋丹,徐政.以低空经济打造新质生产力发展新引擎[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2024,37(5):134-144.
- [2] HUANG H,SU J,WANG F Y. The potential of low-altitude airspace: the future of urban air transportation[J]. IEEE transactions on intelligent vehicles,2024,9(8):5250-5254.
- [3] 郑相毅,孙茹.湖北省低空经济发展探索[J].合作经济与科技,2025(1):8-11.
- [4] XIAO J Q,SALK N,HARAN K. Conceptual design of an eVTOL air shuttle for rapid intercity transport[C]//2020 IEEE Power and Energy Conference at Illinois(PECI),Champaign,2020. New York:IEEE,2020. DOI:10.1109/PECI48348.2020.9064631.
- [5] 国际文传. Alaka'i Technologies 推出全球首创氢动力空中交通系统[EB/OL]. (2019-05-31)[2024-11-20]. <https://news.yesky.com/36/924569536.shtml>.
- [6] 复材大世界. 荷兰 PAL-V 飞行汽车赴江苏考察,探索低空经济新机遇[EB/OL]. (2024-06-05)[2024-11-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1800983161826808600&wfr=spider&for=pc>.
- [7] DÜNDAR Ö,BILICI M,ÜNLER T. Design and performance analyses of a fixed wing battery VTOL UAV[J]. Engineering science and technology, an international journal, 2020,23(5):1182-1193.
- [8] 中国民航报社. 中国民用航空局召开低空经济专题新闻发布会[EB/OL]. (2024-03-29)[2024-11-20]. <http://www.caacnews.com.cn/special/2024NZZT/8024/>.

- [9] ÇINAR E, TUNCAL A. A Comprehensive analysis of society's perspective on urban air mobility [J]. Journal of aviation, 2023, 7(3): 353-364.
- [10] 朱克力. 拆解低空经济产业链[J]. 企业管理, 2024(12): 6-12.
- [11] PAK H, ASMER L, KOKUS P, et al. Can urban air mobility become reality? Opportunities and challenges of UAM as innovative mode of transport and DLR contribution to ongoing research [J]. CEAS aeronautical journal, 2024; 1-31.
- [12] 时伟, 包建东. 基于最优 LQR 单人飞行器高度控制[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(11): 153-159.
- [13] 赵光辉, 李重荣. 低空经济协同发展助推新质生产力发展的逻辑与路径[J]. 企业科技与发展, 2025(1): 22-28.

Research on the design of future urban single-person aircraft under low-altitude economy

LI Di, QIU Chen, LI Hui

(China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448000, China)

Abstract: With the rise of low-altitude economy, urban single-person aircraft provides a new idea to solve the increasingly serious congestion problem of urban traffic. In this paper, in-depth research is carried out around the future urban single-person aircraft, aiming at exploring its design scheme to achieve efficient and safe travel in high-density urban environment. Firstly, by investigating the present situation of urban aircraft at home and abroad, analyzing the existing traffic problems and potential demand, discussing the existing problems and improvement methods of single-person aircraft, and focusing on the design concept and technical requirements, a lightweight and flexible single-person aircraft design scheme is put forward. Secondly, through analysis and calculation, a future urban single-person aircraft with a flying altitude of less than 1 000m and a cruising speed of 162 km/h is designed, and the overall parameters such as maximum thrust and wingspan are calculated. Finally, according to the calculated parameters, the wing fluid simulation is carried out, the aerodynamic shape of the single-person aircraft is established, and the motion simulation is carried out. The simulation results show that the designed delta wing has the characteristics of high lift-drag ratio and difficult stall, which can save fuel and extend the flight range, and the pressure distribution on the wing surface is uniform, which is conducive to stable lift. The expansion and contraction of the wing achieve the high maneuverability and low occupation space of the single-person aircraft, which is more suitable for complex urban environment and meets the design requirements.

Keywords: low-altitude economy; single-person aircraft; pneumatic exterior design simulation; motion simulation; delta wing

(责任编辑:唐立平)

引用格式 李迪,邱晨,李辉. 低空经济下的未来城市单人飞行器设计研究[J]. 山东航空学院学报, 2025, 42(2): 27-35.

LI D, QIU C, LI H. Research on the design of future urban single-person aircraft under low-altitude economy[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(2): 27-35.