

浮空器技术发展趋势及工程化应用展望

刘建斌 黄鑫

贵州航天电器股份有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21035

[摘要] 浮空器凭借长时驻空、低能耗、可重复使用等优势,是空天一体化组网与低空经济的核心军民两用装备。当前高空极端作业需求持续增长,传统浮空器性能短板日益凸显。依托柔性膜材料、新型储能、智能控制等核心技术迭代,浮空器已逐步摆脱试验样机形态,向长航时、智能化、模块化、商业化迭代升级。本文系统梳理浮空器技术发展现状,剖析平台结构、囊体材料、动力能源、环境适配等技术演进特征,凝练产业核心技术瓶颈与优化路径,研判其在通信中继、应急保障、生态监测等场景的工程应用前景,可为浮空器装备研发、技术攻关及行业规划提供参考。

[关键词] 浮空器; 临近空间平台; 环境适应性; 智能控制; 发展趋势; 工程化应用

中图分类号: TB14 **文献标识码:** A

Development Trend and Engineering Application Prospect of Aerostat Technology

Jianbin Liu Xin Huang

Guizhou Space Appliance Co., Ltd

[Abstract] Aerostats, as vital dual-use aerospace equipment, have become core carriers for near-space exploration, space-air-ground integrated networking and low-altitude economy development due to their unique advantages of long-duration station-keeping, low energy consumption, high load adaptability and reusability. Nevertheless, traditional aerostats fail to meet the stringent requirements of modern engineering under extreme high-altitude environments. Benefiting from the rapid progress of flexible composite materials, advanced energy storage systems and high-precision intelligent control technologies, aerostats are evolving from experimental prototypes toward long-endurance, intelligent, modular and commercialized platforms. This paper systematically reviews the state-of-the-art development of aerostat technologies and analyzes the technological evolution in terms of structural design, envelope materials, energy power supply, environmental adaptability and intelligent control. The key technical bottlenecks restricting industrial application are summarized, and targeted optimization strategies are proposed. Furthermore, the engineering application prospects of aerostats in communication relay, emergency support and ecological monitoring are predicted. This work provides a reliable theoretical basis and technical reference for the research, development and industrial layout of advanced aerostat systems.

[Key words] aerostat; near-space platform; environmental adaptability; intelligent control; development trend; engineering application

引言

浮空器属于轻于空气的新型航空飞行器,以氦气等惰性气体为浮力介质,依靠大气静浮力平衡自身重力,以此实现稳定升空、定点驻留及低速机动飞行,主要包含系留气球、飞艇两大主流品类,作业空域可覆盖低空近地面至30km以上临近空间区域^[1]。相较于固定翼、旋翼类常规航空器,浮空器无需持续动力维持飞行姿态与高度,运行能耗更低、驻空时长更长、载荷布置空间更大;相较于轨道航天器,其具备部署周期

短、运维成本低、可重复起降、定点覆盖精准等独特优势,在全域监测、通信补盲、应急救援等场景中具备不可替代的应用价值。

近年来,国内低空经济配套政策持续完善,6G空地一体化通信网络建设进程提速,高海拔探测、立体安防、灾害应急保障等领域的实际需求持续释放,对浮空器的续航能力、环境耐受能力与自主作业水平提出了更为严苛的工程化标准^[2]。传统浮空器受限于囊体气密性不足、供能体系单一、极端温压环境适应

表 1 浮空器品类分类及特性

浮空器品类	作业空域	最大驻空时长	核心优势	主要应用场景	技术成熟度
系留气球	0~5km 低空	30 天级	定点稳定性强、部署速度快、运维成本低	应急通信、低空安防、大气环境监测	规模化商用
中低空无人飞艇	0~10km 中低空	21 天级	自主巡航、机动灵活、载荷适配性广	森林防火、生态巡查、低空物流运输	工程试用阶段
平流层浮空平台	20~30km 临近空间	15 天级(试验验证)	全域无遮挡覆盖、抗干扰能力强、作业范围广	6G 通信补盲、高空科学探测、广域立体监测	样机试验阶段

性弱、姿态控制精度有限等固有缺陷,无法满足全天候、长周期、复杂风场工况下的稳定作业需求^[3]。

在 高 分 子 复 合 材 料、高 能 量 密 度 储 能、高 空 热 控 设 计、电 力 电 子 绝 缘 优 化 及 人 工 智 能 控 制 等 多 学 科 技 术 的 协 同 赋 能 下,新 一 代 浮 空 器 在 结 构 可 靠 性、续 航 能 力、环 境 适 配 性、智 能 化 水 平 等 方 面 实 现 全 方 位 升 级,工 程 化 研 制 与 商 业 化 落 地 速 度 显 著 加 快^[4]。基 于 近 年 国 内 外 浮 空 器 技 术 文 献 与 工 程 试 验 成 果,本 文 系 统 归 纳 浮 空 器 核 心 技 术 发 展 趋 势,为 后 续 产 品 研 发 与 布 局 提 供 参 考。

1 浮空器技术发展现状

经 过 长 期 技 术 积 累 与 工 程 迭 代,我 国 浮 空 器 产 业 已 形 成 分 层 递 进 的 发 展 格 局,呈 现 出 低 空 系 留 气 球 规 模 化 应 用、中 低 空 无 人 飞 艇、平 流 层 浮 空 平 台 稳 步 升 级、平 流 层 浮 空 平 台 试 验 突 破 的 发 展 态 势,整 体 产 业 迈 入 工 程 化 应 用 初 期 阶 段^[5]。在 全 球 低 空 经 济 与 临 近 空 间 开 发 热 潮 推 动 下,浮 空 器 装 备 市 场 持 续 扩 容,各 子 系 统 技 术 成 熟 度 稳 步 提 升,不 同 品 类 浮 空 器 形 成 差 异 化 互 补 的 应 用 体 系。

1.1 浮空器品类分类及特性

根 据 作 业 模 式、空 域 高 度 与 结 构 形 式 不 同,可 将 浮 空 器 分 为 系 留 气 球、中 低 空 无 人 飞 艇、平 流 层 浮 空 平 台 三 类,各 类 装 备 的 作 业 能 力、技 术 特 征 与 应 用 场 景 不 同,具 体 性 能 参 数 对 比 如 表 1 所 示。

1.2 平台构型技术现状

系 留 气 球 是 当 前 技 术 最 成 熟、落 地 范 围 最 广 的 浮 空 器 装 备,依 托 地 面 系 留 纜 绳 实 现 定 点 约 束 驻 空,结 构 简 洁、部 署 灵 活、抗 风 稳 定 性 优 异,适 配 野 外 复 杂 作 业 环 境^[6]。国 内 主 流 系 留 气 球 作 业 高 度 集 中 在 0~5km,可 实 现 数 十 天 连 续 定 点 驻 空,能 够 满 足 内 陆 及 沿 海 常 规 气 象 环 境 作 业 需 求,目 前 已 批 量 应 用 于 边 境 安 防、城 市 低 空 管 控、灾 害 应 急 通 信、大 气 污 染 物 监 测 等 场 景,实 现 标

准 化 列 装 与 常 态 化 运 维^[7]。

中 低 空 无 人 飞 艇 取 消 系 留 约 束,具 备 自 主 航 线 规 划 与 区 域 机 动 飞 行 能 力,当 前 技 术 研 发 重 点 聚 焦 长 航 时 续 航、静 音 化 设 计 与 远 程 跨 区 域 作 业 能 力 提 升^[8]。现 有 成 熟 型 号 可 完 成 百 公 里 级 自 主 巡 航,连 续 续 航 时 长 可 达 7 天,适 用 于 大 范 围 林 地 防 火、生 态 环 境 遥 感、流 域 水 资 源 巡 查 等 动 态 监 测 任 务。平 流 层 浮 空 平 台 作 为 临 近 空 间 开 发 的 核 心 载 体,作 业 高 度 可 达 20~30km,能 够 有 效 规 避 低 空 地 形 遮 挡、空 域 干 扰 及 复 杂 气 象 影 响。国 内 科 研 单 位 已 完 成 多 天 级 连 续 驻 空 试 验,在 高 度 精 准 控 制、强 风 场 姿 态 稳 定、昼 夜 能 量 平 衡 等 核 心 技 术 上 取 得 阶 段 性 突 破,为 后 续 超 长 航 时 驻 空 与 集 群 组 网 作 业 奠 定 技 术 基 础^[9]。

1.3 囊体材料技术现状

囊 体 材 料 是 决 定 浮 空 器 气 密 性、结 构 强 度、耐 候 寿 命 与 有 效 载 荷 比 例 的 核 心 关 键 材 料,直 接 影 响 整 机 驻 空 能 力 与 服 役 周 期^[3]。现 阶 段 工 程 应 用 的 浮 空 器 普 遍 采 用 多 层 复 合 柔 性 膜 结 构,由 阻 氦 密 封 层、结 构 承 载 层、耐 候 防 护 层 与 防 静 电 层 复 合 制 备 而 成,各 层 结 构 协 同 保 障 装 备 综 合 性 能^[9]。相 较 于 早 期 单 层 织 物 材 料,新 型 复 合 膜 实 现 了 轻 量 化 与 高 强 度 的 兼 顾,不 仅 有 效 降 低 面 密 度、提 升 载 荷 利 用 率,还 大 幅 降 低 氦 气 渗 透 速 率,同 时 优 化 了 高 低 温 耐 受、抗 紫 外 老 化、抗 撕 裂 等 核 心 性 能,可 适 配 -40℃~85℃ 高 空 宽 温 域 交 变 环 境,有 效 解 决 传 统 浮 空 器 气 体 渗 漏、囊 体 老 化 破 损 等 工 程 难 题^[10,11]。

1.4 能源与动力系统技术现状

能 源 续 航 能 力 是 长 期 制 约 浮 空 器 规 模 化 推 广 的 核 心 瓶 颈,当 前 行 业 已 全 面 完 成 从 传 统 燃 油 动 力 向 清 洁 能 源 供 能 体 系 的 转 型 升 级。传 统 燃 油 动 力 系 统 存 在 噪 音 大、能 耗 高、碳 排 放 高、续 航 受 限、运 维 繁 琐 等 缺 陷,已 基 本 退 出 民 用 浮 空 器 应 用 领 域。目 前 主 流 长 航 时 浮 空 器 普 遍 采 用“柔 性 太 阳 能 薄 膜+高 能 量 密 度 锂 电 池”的 组 合 供 能 模 式,依 托 临 近 空 间 强 光 照 环 境 实 现 日 间 光

伏发电,通过储能电池保障夜间持续供电,初步实现昼夜不间断驻空作业^[12]。

在动力推进系统方面,低空浮空器采用轻量化无刷电机搭配大尺寸低转速螺旋桨,适配低空空气密度特征,提升推进效率;平流层浮空器针对高空稀薄空气环境,优化推进气动布局与功率匹配策略,有效改善高空推力衰减问题^[12,13]。

1.5 环境适配性与智能控制

截至目前浮空器设备的供电、电气控制、结构等已逐步向低功耗、高可靠性、低成本与小型化迭代,产品设计充分考虑环境适配性,使产品在较宽温域、低气压、强辐射等极端环境中能够长时间正常工作^[14]。控制逻辑上,现有浮空器设备具有自动定高、自动飞行控制、驻空定点维持、环境自适应调节等功能,部分设备还集成了故障自诊断、降额设计、冗余备份、低空自主避障模块,降低地面手动调节频次^[15]。

就目前来说,我国浮空器产业已逐步实现工程化落地,但仍有部分问题需要解决,如缺乏超长航时稳定供电、在强风场中飞行姿态稳定性控制、电子设备在极端工况下稳定长时工作、集群协同的组网技术尚未成熟配套,要实现大规模商业化、常态化布置还需持续技术攻克。

2 主要技术发展趋势

当前技术更新规律与低空经济产业发展需求,使得未来浮空器技术将围绕长航时、高可靠、低成本、小型化、环保、智能化六大方向上发展,从单一作业走向集群化、模块化、商业化全面推进,整体技术发展趋势架构如下图所示。

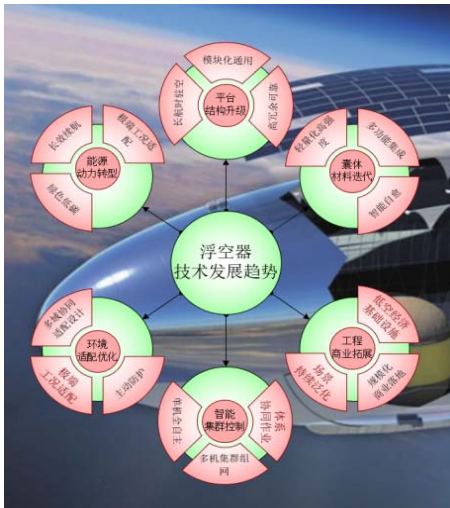


图1 浮空器技术发展趋势

2.1 平台结构: 低成本、模块化、高可靠一体化升级

未来浮空器设备的设计模式将完全摒弃以往的定制化、一产品一研发的思路,将以通用化、模块化为主,以解决长时间驻空、多环境适配、高可靠为目标,重新布局系统设计思路^[4]。

结构设计层面,模块化、通用化成为核心发展方向,载荷舱、能源舱、控制舱、推进子系统均采用标准化机械与电气接口,可根据通信中继、遥感探测、安防监控等不同任务需求快速换

装载荷,实现一机多用、场景复用,有效降低装备研制与运维成本。同时,多气囊冗余布局、轻量化加强结构、柔性缓冲连接等设计逐步普及,大幅提升平台在复杂湍流、突发阵风环境下的结构安全性与姿态稳定性。

2.2 囊体材料: 高性能、多功能、自修复集成迭代

囊体材料技术将持续朝着轻量化、高强度、多功能集成的方向迭代升级,成为提升浮空器综合性能的核心突破口。一方面,通过优化高分子基材配比与多层复合成型工艺,在保障结构抗拉、抗撕裂性能的前提下持续降低材料面密度,进一步提升浮空器有效载荷占比与作业效率;另一方面,整合超高阻氮、耐超高温、抗紫外老化、防静电、防盐雾腐蚀等多重功能,减少层间脱层、气体渗漏、材料老化等失效问题,有效延长装备服役周期^[3,11]。

此外,环境自适应柔性材料、微损伤自修复膜材料逐步进入工程化落地阶段,可自动修复高空气流摩擦、微小撞击产生的破损缺陷,无需频繁落地检修,从源头降低长周期驻空的运维成本,为超长航时免维护作业提供坚实支撑^[16]。

2.3 能源动力: 绿色化、长效化、高效化转型

目前浮空器规模化应用瓶颈的主要是能源供给发展的限制,按照目前的政策支持与商业规划,未来能源动力系统会全面向绿色、长时续航、极端环境适配方向发展。行业发展将持续向柔性光伏薄膜与宽温域储能电池为主的供电方式发力,主要思路是通过提高光伏材料光电转换率与储能电池低温性能,优化白日产电、夜晚放电的供电机制,打造稳定的昼夜自持供电系统^[12]。

对于高空低气压绝缘性能较低、对流散热弱的问题,浮空器搭载的电源系统将进一步优化器件布局间距与相关的绝缘工艺,搭配2相相变散热与结构散热,保障直流变换器、伺服驱动等重要设备在极端环境下的稳定运行^[17]。

2.4 环境适配: 被动防护向主动一体化转变

针对浮空器实际使用过程中需面对昼夜温差、强紫外线、高空低气压、气流干扰、静电等多种因素耦合极端环境,设备的环境适应性已成为主要衡量浮空器工程化成熟度条件。以往的浮空器主要依靠设备壳体防护、结构加固等实现被动防护,适配极端环境的能力有限,未来设计思路将全面转向主动防御、多因素一体化协同。

在电气设计上,可通过低气压电场仿真识别风险,进而优化设备绝缘结构与器件布局,能够抑制局部放电,电晕击穿等故障,确保电气系统稳定运行;在热控设计上,可通过优化散热结构的流场设计与相变散热策略,解决低气压环境下散热难题,精准把控核心器件温升范围^[18];在整体设计上,综合热管理设计、强度设计、紫外线防护设计等多种工况的影响,实现电路、结构、工艺一体化适配设计,全面提升装备全环境的适应能力。

2.5 智能控制

随着自动控制技术、人工智能与大数据的发展融合,必将推

动浮空器控制系统由人操控向自主智能控制与集群协同方向发展优化^[19]。针对单机设备,未来的浮空器将搭载高精度的风场感知、气象预测、姿态感知,搭配自适应控制算法,实现自主起降操作、飞行策划、定点驻空维持、健康判断与冗余切换等工作,实现无人化自主作业^[20]。

2.6 工程应用: 商业化、规模化场景持续拓展

伴随技术成熟度持续提升与制造成本逐步下探,浮空器应用场景持续泛化,彻底摆脱传统军用特种装备的单一特定,逐步转型为低空经济与空天信息体系的新型基础设施。在通信领域,平流层浮空器可作为高空虚拟基站,有效弥补地面基站在山区、海洋、偏远地区的覆盖盲区,为6G通感一体化网络建设提供支撑;在应急保障领域,可在地震、洪涝、山体滑坡等突发灾害中快速部署,临时搭建空中通信、遥感监测与搜救链路,弥补地面基础设施损毁后的保障短板。同时,浮空器在生态环境遥感、海洋动态巡查、森林防火预警、低空物流转运、高空科学探测等领域快速落地,商业化运营模式日趋成熟^[21]。

3 浮空器工程化发展挑战与突破方向

3.1 核心发展瓶颈

当前我国浮空器产业虽已迈入工程化阶段,但距离大规模商业化、常态化落地仍存在多重约束。其一,超长航时能源供给能力不足,现有光伏-储能体系在弱光照、低温环境下供电稳定性较差,难以支撑数级自持驻空作业^[22,27];其二,高空强风场扰动下,浮空器姿态与定点位置控制精度不足,轨迹偏移问题频发,难以满足高精度通信、监测的工程需求^[23];其三,临近空间多因素耦合极端工况下,机载电子设备、密封结构、连接部件易出现老化失效,整机无故障运行时长较短,运维成本偏高^[24];其四,浮空器核心浮力介质氦气属于稀缺资源,国内储量有限、对外依存度高,大幅推高装备制造与运营成本,制约规模化普及^[25];其五,国内浮空器空域管理、适航认证、运维规范等标准体系尚未完全统一,空域审批流程繁琐,商业化合规运营成本较高^[26]。

3.2 重点突破方向

针对上述产业发展瓶颈,结合技术迭代趋势,未来需从技术攻关、材料升级、体系优化、产业规范四个维度精准突破。一是攻坚高效长效能源系统,研发高转换效率柔性光伏、宽温域储能电池及氢能供能技术,优化能量均衡调度算法,破解超长航时自持供能难题;二是深化高空环境适配技术研究,优化低气压绝缘、高空热控与多工况耦合可靠性设计,提升机载设备极端环境运行稳定性;三是迭代核心材料与结构设计,研发轻量化、高气密、自修复囊体材料,优化冗余结构布局,降低装备自重与运维损耗;四是完善智能控制与集群组网技术,优化风场自适应控制算法,突破多平台协同调度、分布式作业核心技术,构建体系化作业能力;五是健全行业标准体系,搭建浮空器分级空域管理规则,统一适航认证、安全运维、质量检测标准,简化商业化运营审批流程,推动产业规范化发展。

4 结论

浮空器凭借长驻空、低能耗、大载荷、部署灵活、可重复使用的独特优势,已成为我国低空经济发展与临近空间资源开发的战略性核心装备,在空天地一体化通信、应急安全保障、全域环境监测等领域具备极高的应用价值与发展潜力。目前我国浮空器产业已完成基础技术积累与初步工程验证,形成低空规模化应用、高空试验突破的分层发展格局,正处于从试验样机向工程化、商业化转型的关键窗口期。

在新材料、新能源、电力电子、人工智能等多学科技术的交叉赋能下,浮空器整体技术正朝着长航时、绿色低碳、智能自主、高可靠、模块化的方向快速演进,环境适配能力、超长驻空能力与集群作业能力持续提升。同时,产业发展仍受能源续航效率不足、极端环境可靠性偏弱、核心资源紧缺、标准体系不完善等问题制约,需要持续开展核心技术攻关与产业制度优化。未来,随着关键技术不断突破与行业规范日趋完善,浮空器将实现规模化、常态化工程落地,深度赋能低空经济与空天信息产业高质量发展,具备广阔的工程应用前景与产业发展空间。

[参考文献]

- [1]俞朝阳,李源源.浮空器学科发展研究[C]//2014-2015航空科学技术学科发展报告.[出版者不详],2016:37-60+228.
- [2]韩孟达,曹利峰,雷依翰,等.空天网络安全切换技术研究综述[J].计算机工程与应用,2022,58(16):56-70.
- [3]董莉.浮空器囊体材料的气密性研究[J].真空,2024,61(02):68-72.
- [4]倪勇,许军.浮空器研究及应用展望[J].中国航天,2024,(11):32-42.
- [5]韩爽,刘杉.高空风力发电关键技术、现状及发展趋势[J].分布式能源,2024,9(01):1-9.
- [6]高国柱.TCOM中小型系留气球发展及对我国启示[J].中国科技信息,2024,(07):122-124.
- [7]盛万兴,段青,沙广林,等.系留气球平台在应急通信保障中的应用[J].电力信息与通信技术,2022,20(08):22-28.
- [8]陈宇.复合动力无人飞艇的设计与研究[D].南昌航空大学,2017.
- [9]邓小龙,李魁,于春锐,等.准零风层新型临近空间浮空器区域驻留性能[J].国防科技大学学报,2019,41(01):5-12.
- [10]田越,肖尚明.平流层飞艇囊体材料的发展现状及关键技术[J].合成纤维,2013,42(04):11-15.
- [11]杨秋萍,席德科,张彬乾.我国飞艇艇囊用复合材料的研制[J].合成纤维,2011,40(06):35-37.
- [12]徐国宁,张衍奎,陈康,等.临近空间飞艇电源系统技术难点及发展趋势[J].北京航空航天大学学报,2025,51(08):2573-2586.
- [13]郑学科,王晓亮.考虑螺旋桨动力学模型的临近空间飞艇控制[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(07):1428-1436.
- [14]李一健,黄宛宁,周江华,等.临近空间天文台发展现状与展望[J].空间科学学报,2024,44(06):1068-1085.

[15]别广磊,王剑颖,童晟翔,等.基于直接力的动能拦截器自适应终端滑模姿态控制方法[J/OL].控制工程,1-11[2026-05-14].

[16]牛慕琦,黄频波,李璋琪.外源式自修复复合材料研究进展及应用[J].纤维复合材料,2025,42(04):62-68.

[17]黄皓宇.高空太阳能电池标定用跟踪控制系统的设计与实现[D].燕山大学,2024.

[18]尹永娟.基于相变气囊的平流层浮空器驻空保持研究[D].山东科技大学,2023.

[19]郭蓉,李华福,景艳梅,等.基于浮空器的复杂多山环境应急通信及覆盖预测[J].无线电通信技术,2022,48(05):891-897.

[20]王襟越,黄宛宁,杜浩,等.基于Mesh的临近空间多浮空器组网通信系统设计及试验[J].空天技术,2025,(04):87-98.

[21]何悦.基于移动式基站的偏远地区动态网络规划研究[D].北京邮电大学,2023.

[22]马东立,张良,杨穆清,等.超长航时太阳能无人机关键技

术综述[J].航空学报,2020,41(03):34-63.

[23]温余彬.基于预测理论的浮空器定点悬停控制方法研究[D].上海交通大学,2019.

[24]陈福利,李欣,闫林,等.中国氦气资源特征与氦资源勘查储备战略[C]//中国地球物理学会.首届全国矿产勘查大会论文集.中国石油勘探开发研究院,2021:638-652.

[25]陶威,万蓉.标准引领浮空器产业发展研究[J].中国标准化,2021,(22):21-26.

[26]杨跃能,刘仕坚,张士峰,等.平流层飞艇长航时区域驻留控制关键技术研究综述[J].宇航学报,2026,47(04):829-839.

[27]万鑫森.基于数字孪生技术的浮空器智能化保障技术[J].数字技术与应用,2025,43(08):141-143.

作者简介:

刘建斌(1985--),男,汉族,湖南邵阳人,硕士,研究方向为军用一体化设备研究与设计。