

行业投资评级

强于大市 | 维持

行业基本情况

收盘点位	1299.87
52周最高	1590.03
52周最低	999.45

行业相对指数表现（相对值）



资料来源：聚源，中邮证券研究所

研究所

分析师：鲍学博
SAC 登记编号：S1340523020002
Email: baoxuebo@cnpsec.com
分析师：马强
SAC 登记编号：S1340523080002
Email: maqiang@cnpsec.com

近期研究报告

《军工行业 2023 年报和 2024 一季报
综述：业绩短期承压，关注需求恢复
和新增长两条主线》 - 2024.05.06

低空经济专题之三：eVTOL 详细拆解

● 投资要点

电动垂直起降飞行器（Electric Vertical Takeoff and Landing, eVTOL）区别于常规飞机的主要技术特点包括可以实现垂直起降、采用分布式电力推进以及运用全电/混合动力技术。得益于电动机、电池和自动化技术的发展，与常规直升机相比，eVTOL 更加低碳环保、噪声更低、自动化等级更高，并由此产生了运行成本低、安全性和可靠性高的优势。随着城市空中交通（Urban Air Mobility, UAM）的兴起，引起了 eVTOL 的研制热潮。据统计，目前全球已有百余家 eVTOL 企业。

eVTOL 产业链较长，主机厂主要承担的是整机研发和集成的任务。eVTOL 的核心子系统主要包括机体、综合航电系统、飞控系统、能源系统、动力系统以及电气系统六大类。根据 Lilium 的数据，其 eVTOL 成本中，推进系统占比约 40%，结构和内饰占比约 25%，航电和飞控占比约 20%，能源系统占比约 10%，装配件占比约 5%。

1) 机体：主要采用碳纤维复材，低成本高效率的热塑性复材或为趋势。eVTOL 的复材使用占比 70% 以上，主要用于结构件和推进系统，其中，超过 90% 的复材为碳纤维复材，约 10% 的复材以保护膜的形式使用玻璃纤维增强。eVTOL 材料需求牵引下，低成本、高效率、规模化制造是碳纤维复材的重要趋势，热塑性碳纤维复合材料前景广阔。由于民航复材结构件验证采用“积木式方法”，传统航空碳纤维复材厂商占据先发优势。国外，碳纤维供应商包括日本东丽、美国赫氏、索尔维等，东丽已经与 Joby 和 Lilium 合作，美国赫氏和索尔维分别与 Archer 和 Vertical 建立了合作。

2) 动力和能源系统：采用分布式电推进，能源系统以纯电为主。分布式电推进飞机是随着电动飞机发展而产生的，由电机驱动分布在机翼或者机身上的多个螺旋桨或风扇构成推进系统为飞机提供推力。电机向更大功率、更高功率密度方向发展，Joby 采用的电机峰值功率达 236kW，重量仅 28kg。国内外 eVTOL 主要采用纯电动。相比新能源车电池，eVTOL 要求电池具有更高的能量密度。三元 NCM 电芯综合性能最佳，为当前 eVTOL 使用最广泛的电池。

3) 航电系统：飞机的中枢神经系统。航电系统是现代飞机的重要组成部分，主要功能包括飞行控制、通信、导航、监视、显示等。在 eVTOL 行业，全球主流机载航电公司基本都和相关 eVTOL 主机厂达成合作。Garmin 与 Joby 和 Archer 合作，提供 G3000 集成驾驶舱；Avidyne 航电与 Beta 和 Skydrive 合作；泰雷兹主要合作对象是 Eve；

霍尼韦尔推出云化航电平台，主要 eVTOL 整机合作商是韩国现代的 Supernal 和英国的 Vertical。国内，昂际航电与沃飞长空签署战略合作备忘录，共同开发 AAM 航电系统。

目前，国内亿航智能的 EH216-S 飞行器已取得中国民航局 TC、PC 许可；峰飞航空 V2000CG 货运版 eVTOL 取得中国民航局 TC 许可；沃飞长空、峰飞航空、沃兰特、时的科技、小鹏汇天、御风未来等主机厂多款 eVTOL 飞行器型号已申请中国民航局 CAAC 或欧洲航空安全局 EASA 适航认证，有望陆续取得 TC、PC。国内多款 eVTOL 飞行器型号有望陆续进入批量生产。

产业链相关标的包括：1) 低空基建相关标的莱斯信息、中科星图、国睿科技、四创电子、深城交、四川九洲、海格通信、纳睿雷达、航天南湖、泰豪科技、川大智胜等；2) 传统/eVTOL 飞行器相关标的亿航智能、中直股份、万丰奥威、卧龙电驱、应流股份、光威复材、吉林化纤、中航高科、高华科技、烽火电子、芯动联科、航新科技、安达维尔等；3) 飞行器运营和模拟飞行相关标的中信海直、海特高新等。

● 风险提示

低空经济相关支持政策不及预期；UAM 相关基建配套不及预期；eVTOL 研发、取证、量产进展不及预期；eVTOL 的 OEM 厂商给出的商运财务模型过于乐观等。

目录

1 eVTOL 迎来研制热潮，多型飞行器有望量产	5
2 eVTOL 产业链：整机包含六大子系统，机体、动力和能源系统、航电系统占主要成本	7
2.1 机体：主要采用碳纤维复材，低成本高效率的热塑性复材或为趋势	8
2.2 动力和能源系统：采用分布式电推进，能源系统以纯电为主	13
2.3 航电系统：飞机的中枢神经系统	17
3 eVTOL 配套商：传统航空头部供应商先发优势显著	27
4 投资建议	29
5 风险提示	32

图表目录

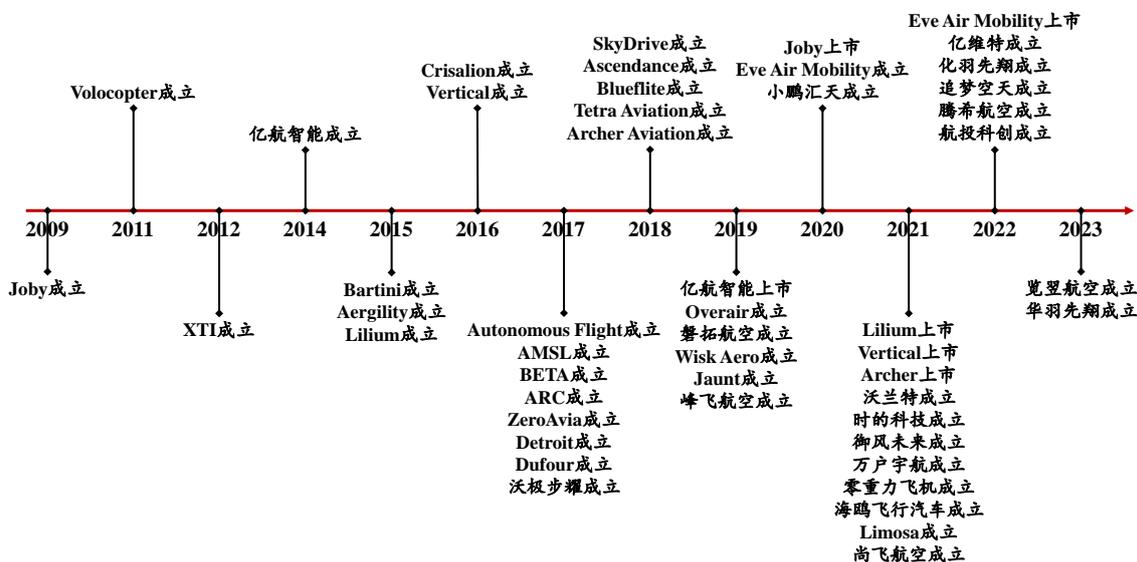
图表 1: eVTOL 企业成立及上市时间	5
图表 2: 融资规模前十的 eVTOL 企业	6
图表 3: Lilium 的 eVTOL 结构设计	7
图表 4: Lilium 公司 eVTOL 价值拆分	7
图表 5: 新能源汽车价值构成	8
图表 6: 大飞机价值构成	8
图表 7: 复合材料成型工艺	9
图表 8: 复合材料在 eVTOL 上的应用	10
图表 9: eVTOL 上碳纤维复合材料的应用占比	10
图表 10: 碳纤维复合材料热压罐成型工艺	10
图表 11: 热压罐工艺制造复合材料制件的成本构成	11
图表 12: 日本东丽给出的碳纤维复合材料需求预测	12
图表 13: 复合材料零件“积木式”试验框架	12
图表 14: eVTOL 制造商及其碳纤维材料合作厂商	12
图表 15: 国内部分碳纤维复材相关公司	13
图表 16: 一种复合翼 eVTOL 动力系统架构图	14
图表 17: Joby 的 eVTOL 电机	15
图表 18: 全球新能源航空器在研项目类型	15
图表 19: eVTOL 和新能车对电池性能要求的对比	16
图表 20: 主流化学体系锂离子性能对比	16
图表 21: 正力新能“三高—快”航空航天电池解决方案	17
图表 22: 航空动力电池相关企业及进展	17
图表 23: 通用飞机航电系统基本功能需求	19
图表 24: G1000 系统架构	20
图表 25: G3000 综合航电系统	21
图表 26: 不同陀螺的性能和功耗	23
图表 27: 低空物联网示意图	24
图表 28: 大气数据系统构成框图	25
图表 29: Lilium 的供应商	28
图表 30: Vertical 的部分供应商	28
图表 31: Eve 的供应商	29
图表 32: 相关标的	30

1 eVTOL 迎来研制热潮，多型飞行器有望量产

电动垂直起降飞行器（Electric Vertical Takeoff and Landing, eVTOL）区别于常规飞机的主要技术特点包括可以实现垂直起降、采用分布式电力推进以及运用全电/混合动力技术。得益于电动机、电池和自动化技术的发展，与常规直升机相比，eVTOL 更加低碳环保、噪声更低、自动化等级更高，并由此产生了运行成本低、安全性和可靠性高的优势。随着城市空中交通（Urban Air Mobility, UAM）的兴起，引起了 eVTOL 的研制热潮。

近几年，全球 eVTOL 主机企业数量显著增长，部分公司成功上市。根据航空产业网数据，2009 年-2016 年，全球仅数家 eVTOL 企业，自 2017 年之后，陆续有 40 余家企业进入 eVTOL 行业。2019 年，亿航智能成功在美股上市，2019 年-2023 年内，5 家 eVTOL 国际企业成功在美股上市。据统计，目前全球已有百余家 eVTOL 企业。

图表1：eVTOL 企业成立及上市时间

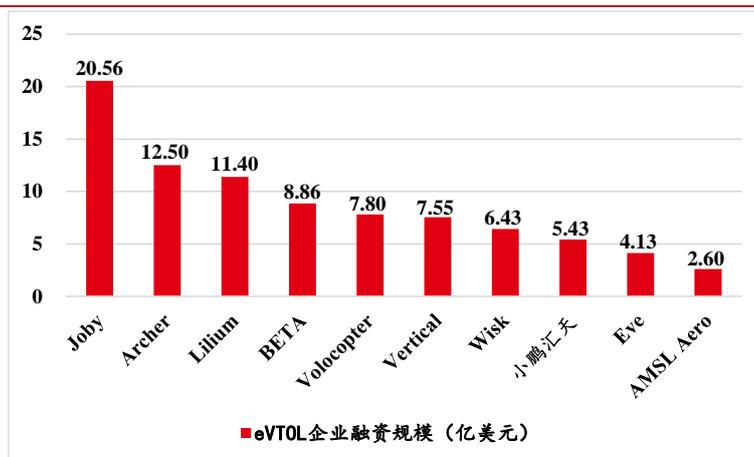


资料来源：航空产业网，中邮证券研究所

从 eVTOL 企业的地理分布上可以看到，eVTOL 企业大部分集中在中国、美国、欧洲等的沿海城市，呈现出中国企业数量多，欧美企业融资额度大的特点。

从融资规模看，根据航空产业网 2024 年 2 月 6 日的报告数据，eVTOL 行业累计融资规模超过 110 亿美元，其中，81% 的融资额由前 10 的企业拥有。大部分融资金额由头部少数企业拥有。Joby、Archer、Lilium 融资规模靠前，达到 10 亿美元以上。国内，小鹏汇天自 2021 年 10 月进行首次融资后，融资规模达到 5 亿余美元；亿航智能自 2014 年成立后，历时 5 年于 2019 年 12 月在美股上市，迄今为止获得近 2 亿美元的融资；广东海鸥飞行汽车、峰飞航空、时的科技、零重力飞机、沃兰特、御风未来、沃极步耀、亿维特等均进入“亿元俱乐部”。

图表2：融资规模前十的 eVTOL 企业



资料来源：航空产业网，中邮证券研究所

目前，国内亿航智能的 EH216-S 飞行器已取得中国民航局 TC、PC 许可；峰飞航空 V2000CG 货运版 eVTOL 取得中国民航局 TC 许可；沃飞长空、峰飞航空、沃兰特、时的科技、小鹏汇天、御风未来等主机厂多款 eVTOL 飞行器型号已申请中国民航局 CAAC 或欧洲航空安全局 EASA 适航认证，有望陆续取得 TC、PC。国内多款 eVTOL 飞行器型号有望陆续进入批量生产。

展望未来，eVTOL 主机企业数量或先增后减，未来市场或向头部集中。参考新能源汽车行业，2019 年，我国造车新势力有 300 多家，随着新能源车走向规模化量产，目前国内头部新能源车企业只有 10 家左右。2023 年，理想汽车成为继特斯拉、比亚迪之后全球第三家实现盈利的新能源汽车企业。eVTOL 作为航空器，相比新能源汽车有更严格的适航审定程序，为主机企业带来更大的研制生产壁垒，与新能源车市场相比，未来 eVTOL 的市场或更加集中。

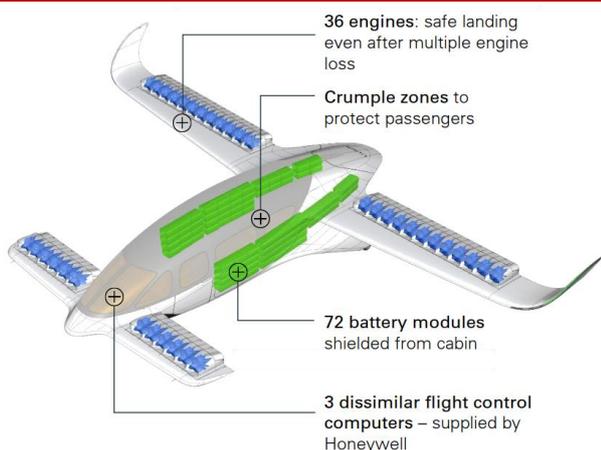
2 eVTOL 产业链：整机包含六大子系统，机体、动力和能源系统、航电系统占主要成本

eVTOL 产业链较长，主机厂主要承担的是整机研发和集成的任务。eVTOL 的核心子系统主要包括机体、综合航电系统、飞控系统、能源系统、动力系统以及电气系统六大类。

Lilium 给出其 eVTOL 成本占比，推进系统、结构和内饰、航电和飞控占主要成本。Lilium 的 eVTOL 拥有 36 个分布式电机和 72 个电源模块为飞行器提供能源和动力，采用了霍尼韦尔提供的 3 个不同的飞控计算机。在成本上，Lilium 给出，eVTOL 的推进系统占比约 40%，结构和内饰占比约 25%，航电和飞控占比约 20%，能源系统占比约 10%，装配件占比约 5%。

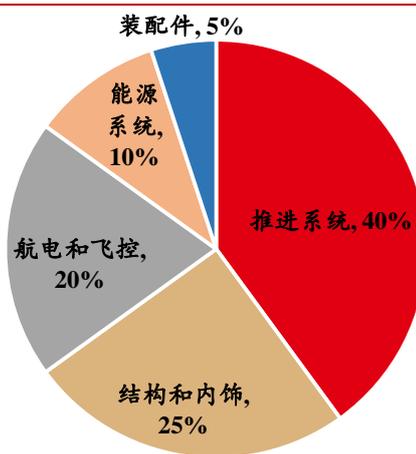
Lilium 的 eVTOL 采用矢量推力构型，相比多旋翼和复合翼构型的 eVTOL 飞行器，具有更高的巡航效率，因而其能源系统可以有相对较低的成本占比。Lilium 采用的硅阳极锂离子电池，能量密度大于 330Wh/kg，功率密度 2.8kW/kg，可在 15 分钟充电至 80%，30 分钟充电至 100%，实现大于 800 次充放电循环。

图表3: Lilium 的 eVTOL 结构设计



资料来源: Lilium 官网, 中邮证券研究所

图表4: Lilium 公司 eVTOL 价值拆分

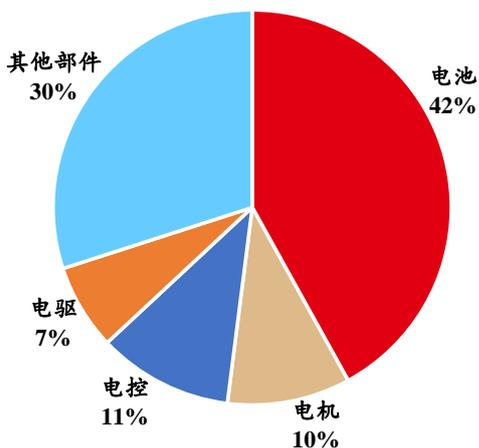


资料来源: Lilium 官网, 中邮证券研究所

对比同样采用电池作为能源、采用电机作为动力的纯电动汽车和同样需要满足适航的大飞机的成本构成，可以看到不论是新能源车、大飞机还是 eVTOL，动力系统是核心子系统之一，能源系统在电池动力中成本占比较大，航空器中航电、飞控等系统成本占比较大。在新能源汽车的成本占比中，电池成本占整车成本比

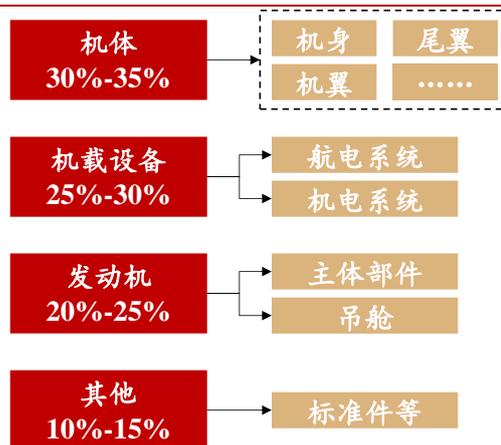
重约 42%，是纯电动汽车的核心部件，电机和电控成本分别占整车成本的 10%和 11%，电驱动零部件成本约占整车成本的 7%，其他部件约占整车成本的 30%。在大飞机的价值构成中，机体结构占比 30%-35%，动力系统发动机占比 20%-25%，航电和机电系统占比 25%-30%。

图表5：新能源汽车价值构成



资料来源：《新能源汽车价格认定探究》-安徽省发展改革委，中邮证券研究所

图表6：大飞机价值构成



资料来源：《打造并拓展中国大飞机产业链》-金伟，中邮证券研究所

2.1 机体：主要采用碳纤维复材，低成本高效率的热塑性复材或为趋势

碳纤维复合材料是以树脂、陶瓷、金属等为基体，以碳纤维为增强体，复合而成的结构材料，是目前世界上最先进的复合材料之一，因其具有质轻、高强、耐腐、耐高温等优势，被广泛应用在新能源、航空航天、交通运输等领域。碳纤维复合材料以树脂基碳纤维复合材料为主，占据市场近 90%的份额。航空航天和风力发电领域为树脂基碳纤维复合材料最大需求端，需求占比达 50%。在航空航天领域，树脂基碳纤维复合材料常用于制造民用飞机发动机罩、副翼、阻力板以及舱门等，能够达到减重效果。

碳纤维复合材料根据最终产品的形态和特性，有多种固化成型工艺。目前，碳纤维复合材料固化工艺较为先进且流行的是热压罐工艺和 RTM、VARI 等液体成型工艺。

图表7：复合材料成型工艺

成型工艺	概述	优点	缺点
拉拔成型	将浸渍液态树脂的碳纤维引入和穿过模具，对其加热固化的连续成型法，适用于杆状、管状等具有一定截面形状的成型品。	适合大批量连续生产，生产效率高，自动化程度高，纤维含量高。	制品形状单一，主要适用于制造简单形状的制品，如棒材、管材等，设备投资较大。
缠绕成型	将浸渍液态树脂的碳纤维束缠绕在心轴上之后，进行加热固化的成型法。适用于管状和罐状成型品。	通过缠绕方式实现对纤维取向的控制，制品强度高，适用于制造管状或柱状制品。	需要专门的缠绕设备和芯模，设备投资大，受到芯模尺寸限制，不适用于大型制品。
RTM 成型	在一对阴/阳的密封型模具中，配置碳纤维预成型件，将液态树脂压入、浸渍、加热固化的方法。	成型效率高，树脂的利用率高，成本相对较低，适用于制造大型复杂结构的制品。	对模具要求高，需要具备良好的密封性能和导热性能，树脂注入和固化需要精确控制。
冲压成型	将预浸料或 SMC 等浸渍树脂的薄片层叠在模具上，一边施加压力一边加热固化的方法。适用于大量生产产品的成型方法。	生产效率高，适合大规模生产，可以保证制品的一致性和稳定性，成本相对较低。	制品形状受限，难以制造复杂形状的制品，碳纤维取向不易控制。
热压罐成型	在成型模具上层叠预浸料，盖上膨胀薄膜进行减压，在热压罐内施加压力加热固化。适合制造高品质、高性能产品，但成型周期长，成本较高。	温度和压力场均匀，适用于多种先进复合材料的生产，适用范围广，生产效率高，产品质量可靠，可以实现高度自动化和批量生产。	设备成本高，生产包括加热、压制、冷却等多个环节，周期较长，技术要求高，在成型过程中可能会释放有害气体和废水，对环境造成污染。
注射成型	将碳纤维增强尼龙和聚碳酸酯等热塑性树脂原料(粒料)进行加热熔融，并注射到模具腔(间隙)的成型方法。适用于短周期、复杂形状成型。	生产效率高，适合大规模生产，制品的精度和表面质量较高，可以制备各种形状和大小的制品。	需要使用高性能的注射机和模具，设备成本较高，对于某些高性能复合材料，成型工艺参数需要精确控制，废料处理和回收利用难度较大。

资料来源：中国复合材料工业协会，中邮证券研究所

eVTOL 复材使用占比 70%以上，主要用于结构件和推进系统。eVTOL 作为新兴的交通出行载体，对飞行器的结构重量有着严苛的要求。现今市面上能看到的所有 eVTOL 企业，几乎无一例外的使用复合材料作为主要的机体结构。eVTOL 的复合材料占比达到 70%以上，其中，超过 90%的复材为碳纤维复材，约 10%的复材以保护膜的形式使用玻璃纤维增强。

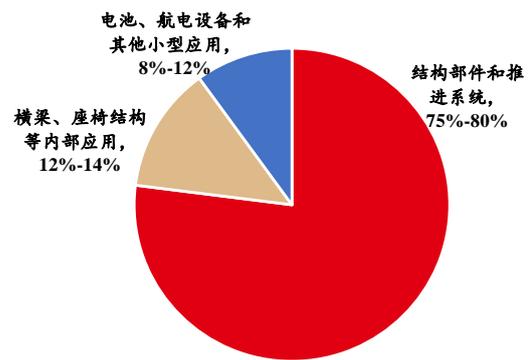
研究机构 Stratview 报告显示，在几乎所有飞行汽车项目中，约 75%-80%的复合材料用于结构部件和推进系统；其次是内部应用，包括横梁、座椅结构等，占 12%-14%；电池系统、航空电子设备和其他小型应用占剩余的 8-12%。小鹏汇天 X2 整机重 560 千克，机身部分由 100 多个碳纤维零件制成，重量仅为 85 千克。

图表8：复合材料在 eVTOL 上的应用



资料来源：中国复合材料工业协会，中邮证券研究所
注：图示飞行器为亿航智能 EH216-S

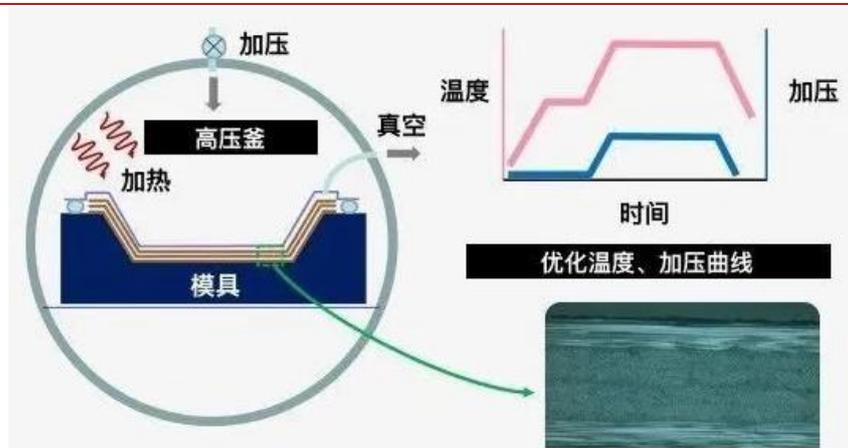
图表9：eVTOL 上碳纤维复合材料的应用占比



资料来源：中国复合材料工业协会，Stratview，中邮证券研究所

国内外航空复材结构件主要采用预浸料—热压罐工艺。部分 eVTOL 主机厂选择 T700、T1100 碳纤维材料，采用热压罐工艺制造飞行器主要机身部件。2022 年 7 月，Overair 宣布与东丽复合材料美国公司建立合作，采用东丽新一代 T1100/3960 碳纤维/环氧树脂预浸料建造试飞飞行器主要机身部件，如机身、部分机翼组件以及旋翼叶片，每个复合材料部件都采取人工铺放并通过热压罐固化成型。东丽公司提供的 3960 是一款高初型 177°C 固化环氧树脂，其玻璃化转变温度为 204°C，而 Torayca T1100 碳纤维是目前可实现应用的具有最高拉伸强度碳纤维。沃兰特研发中心指出复合翼 eVTOL 飞机相比传统固定翼飞机，结构上额外增加了多处电机臂，需要采用轻量化设计，尽量降低电机臂的重量，电机臂为 eVTOL 关键承载部件，除电机座外，电机臂上所有零件采用 T700 级碳纤维预浸料，采用热压罐工艺制造。

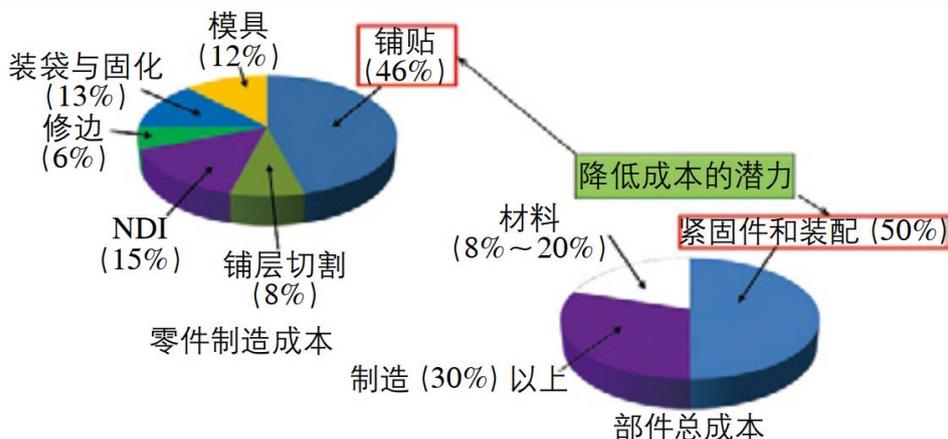
图表10：碳纤维复合材料热压罐成型工艺



资料来源：中国复合材料工业协会，中邮证券研究所

采用热压罐成型工艺的复合材料结构件，主要成本为制造成本。热压罐工艺制造的复合材料结构件，材料成本不到 20%，制造成本占 80%以上。

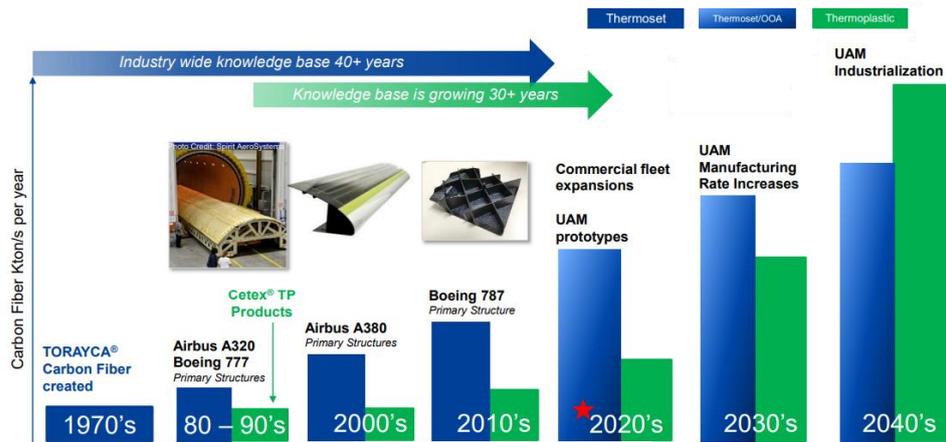
图表11：热压罐工艺制造复合材料制件的成本构成



资料来源：《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》-张璇等，中邮证券研究所

eVTOL 材料需求牵引下，低成本、高效率、规模化制造是碳纤维复合材料的重要趋势，热塑性碳纤维复合材料前景广阔。目前热固性复合材料在行业中仍占据主导地位，与传统热固性复合材料相比，热塑性复合材料成型周期短、化学成分毒性小，且具有高韧性、高抗冲和损伤容限、预浸料存储期长、量产能力强等优点。热塑性碳纤维复合材料结合了碳纤维和热塑性树脂的性能优点，且成型后不发生化学交联，能够二次熔化和再成型，便于材料的回收及循环利用，解决了热固性碳纤维复合材料使用期满后的处理问题。eVTOL 头部主机厂中，Jaunt Air Mobility 是一家研制富含热塑性复材机型的公司，其愿景是制造 99%可回收的飞机。Vertical Aerospace 的 VX4 中使用的转子叶片、电池外壳、内饰和支架等部件都是使用热塑性预浸料制成的。日本东丽给出，UAM 市场有望带动碳纤维复合材料需求增长，热塑性碳纤维复合材料基于其更低的成本和更高的生产效率，有望获得更快的增速。

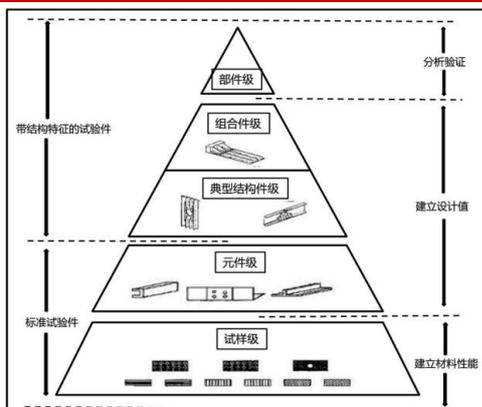
图表12：日本东丽给出的碳纤维复合材料需求预测



资料来源：《Advanced composites enabling eVTOL scalability》-TORAY，中邮证券研究所

民航复材结构件验证采用“积木式方法”，传统航空碳纤维复材厂商占据先发优势。民航复材结构件验证采用“积木式方法”，将飞机研制过程中的试验验证环节根据试验件尺寸的大小划分成试样试验、元件试验、结构细节试验、次部件试验和全尺寸结构试验 5 个级别。采用该方法可以减小试验风险和降低成本，同时使得复合材料设计和适航审定规范化，是目前在复合材料飞机结构研制中普遍采用的验证方法。由于“积木式方法”需要大量底层材料性能和试样级试验，传统航空碳纤维复材厂商占据先发优势。国外，碳纤维供应商包括日本东丽、美国赫氏、索尔维等，东丽已经与 Joby 和 Lilium 合作，这两家 eVTOL 主机厂属于行业头部厂商。美国赫氏公司和索尔维公司也是早期进入者，分别与 Archer 和 Vertical Aerospace 建立了合作。

图表13：复合材料零件“积木式”试验框架



资料来源：《民用飞机复合材料结构“积木式”验证试验规划探讨》-季文等，中邮证券研究所

图表14：eVTOL 制造商及其碳纤维材料合作厂商

原始设备制造商	合作企业	产品
Joby	Toray (东丽)	复合材料
Lilium	Toray (东丽)	复合材料
Archer	Hexcel (赫氏)	复合材料
Vertical	Solvay (索尔维)	复合材料
	Leonardo (莱昂纳多)	复合材料机身
Overair	Toray (东丽)	复合材料

资料来源：中国复合材料工业协会，中邮证券研究所

国内，光威复材、吉林化纤、中复神鹰等碳纤维厂商，惠柏新材、上纬新材等树脂厂商，以及中航高科、中国恒瑞、安泰复材等碳纤维复材预浸料和零部件厂商拥有丰富的产业经验，多型产品可用于 eVTOL 飞行器，有望率先受益。

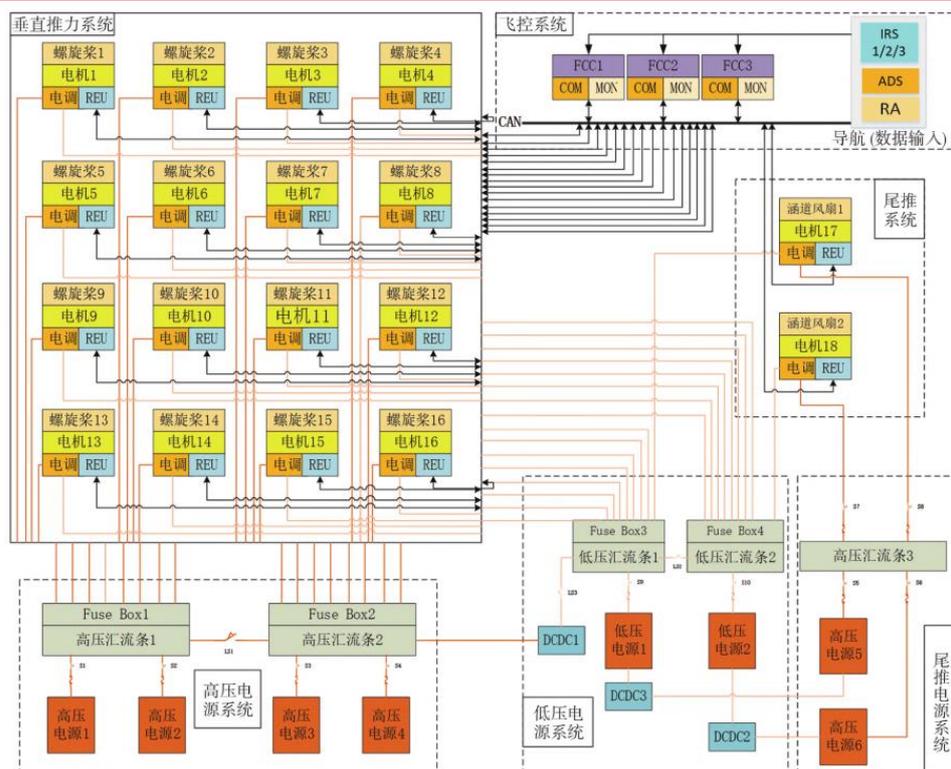
图表15：国内部分碳纤维复材相关公司

分类	公司	相关业务
碳纤维	光威复材	公司有已通过大飞机 PCD 适航认证且有成熟生产控制和应用体系的 T300 级，有在无人机上已得到广泛使用 T700S 级，还有在部分结构可能会用到的、在国内相对更成熟稳定的 M40J 级，还有更先进的 T800 级和 M55J 级可供选择。
	吉林化纤	公司合作企业有飞行汽车等领域，与恒瑞、亿航等企业均有合作。
	中复神鹰	公司高性能碳纤维材料目前已经在与国内几家知名的飞行汽车（飞行器）的研制生产单位进行测试评价与试验，进展顺利，部分产品已经得到应用并通过了适航认证等相关验证工作。T800 级航空预浸料通过商飞 PCD 预批准，碳纤维及增韧树脂均为公司自行生产。
环氧树脂	惠柏新材	公司正在研发的项目 HP-RTM 树脂可用于低空飞行器。
	上纬新材	公司预浸料用环氧树脂系列与各种增强纤维材料的含浸性好，具有优越的机械强度，根据不同的客户需求应用于机器人、飞行汽车等领域，目前已有相关产品在测试中。
预浸料和结构件	中航高科	公司已经为飞行汽车相关企业提供了复合材料原材料产品。
	中国恒瑞	承担沃兰特 VE25 X1 机身全部碳纤维零部件的模具开发制造、大部件生产，与沃兰特一起完成飞机部装和总装。
	安泰复材	安泰复材为相关企业提供 eVTOL 复合材料机身结构制造和装配。

资料来源：iFinD，航空产业网，中邮证券研究所

2.2 动力和能源系统：采用分布式电推进，能源系统以纯电为主

eVTOL 采用分布式电力推进技术 (DEP)。分布式电推进飞机是随着电动飞机发展而产生的，由电机驱动分布在机翼或者机身上的多个螺旋桨或风扇构成推进系统为飞机提供推力。DEP 飞机利用推进-气动耦合效应，大幅改善飞机空气动力特性，减小机翼面积，从而降低飞机结构重量。多推进器的冗余能力为飞机提供更可靠的推力保障。

图表16：一种复合翼 eVTOL 动力系统架构图


资料来源：《不同构型电动垂直起降飞行器动力系统的安全性评估》-刘巨江等，中邮证券研究所

永磁同步电机是 eVTOL 电机首选。永磁同步电机（无刷直流电机）是高功率电机，具有功重比较大、效率高和可靠性高的特点。电机具有相对尺度近似无关性，总功率相同时单个大功率电机和多个小功率电机系统的功率密度和效率基本一致，采用多个小功率电机驱动较小直径风扇的分布式电驱动系统可以在保证总功率不变的前提下有效增大涵道比、提高动力装置的控制和容错性能。同时，小体积的电驱动系统能够更方便地融入机身，提高飞机气动效率。

飞机电推进系统中电机向更大功率、更高功率密度方向发展。Joby 采用的电机峰值功率达 236kW，重量仅 28kg。罗罗公司电气部正在开发三款电推进装置，1) 升力电机重量不到 55kg，连续输出功率为 150kW，最大扭矩为 1600N·m；2) 一款适用于第 23/CS-23 型通勤飞机的高功率、中速电动推进装置，功率水平 320-400kW，电机重量不到 160kg；3) 一款全新设计的 600-1200kW 涡轮发电机，用于混合动力推进系统。涡轮发电机的功率重量比为 4kW/kg。罗罗公司开发的 eVTOL 升力电机将用于 Vertical 公司的 VX4 eVTOL。

图表17: Joby 的 eVTOL 电机



资料来源: Joby 官网, 中邮证券研究所

电推进技术采用电能作为动力系统的部分或全部能源, 包括油电混合动力、电池、燃料电池等, 通过电机驱动升力和推进装置来提供飞行器所需的部分或全部动力, 并通过顶层能量管理全面优化能量利用效率, 有效降低飞行噪声和污染物排放。同时, 电动力系统的功率特性对大气压力较弱的敏感性可显著增强动力系统的高原适应性, 使电动垂直起降飞行器展现出较高的高原适用潜力。

目前, 国内外 eVTOL 主要采用纯电动。从在研项目看, 对于短航程、垂直起降的航空器, 采用纯电动的方案占主要份额。考虑到飞机续航能力需求, UAM 市场对混合动力系统存在一定需求。

图表18: 全球新能源航空器在研项目类型



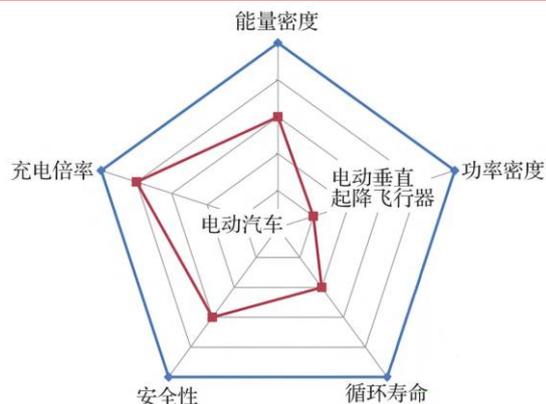
资料来源:《氢燃料电池支线飞机关键技术与发展展望》-纪宇晗等, 中邮证券研究所

相比新能源车电池, eVTOL 要求电池具有更高的能量密度。当前电池单体电芯的能量密度最高水平在 300Wh/kg 左右, 电池包能量密度约 220Wh/kg, 远低于航

空燃油的比能量。电池的技术限制了飞行器的航程，因此，航空业对动力电池单元能量密度提出了明显高于电动汽车能量密度的要求（近期 $>300\text{Wh/kg}$ ，远期目标 $>500\text{Wh/kg}$ ）。此外，eVTOL 独特的运行剖面 and 任务循环以及苛刻的运行环境对锂离子电池系统提出了更高的要求，为了应对紧急迫降需求，要在低电量状态下（如 20%SOC）依然保有高功率放电能力；为了满足空中出租业务等频繁使用场景，目前行业普遍需求在少于 15 分钟内充电至 80%。

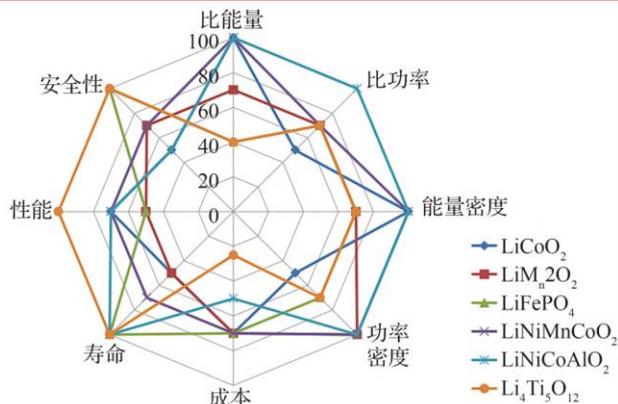
目前采用三元锂电，未来可能采用固态、半固态、金属电池等。当前主流化学体系锂离子电池中，三元 NCA ($\text{LiNi} - \text{CoAlO}_2$) 电芯具有最佳的能量和功率性能，但成本较高、安全性较低；LFP (LiFePO_4) 电芯具有最高的安全性，但能量密度只有三元 NCA 和 NCM 电芯的一半；相比之下三元 NCM (LiNiMnCoO_2) 电芯综合性能最佳，三元 NCM 电池为当前 eVTOL 使用最广泛的电池。

图表19: eVTOL 和新能源车对电池性能要求的对比



资料来源:《电动垂直起降飞行器的技术现状与发展》- 邓景辉, 中邮证券研究所

图表20: 主流化学体系锂离子性能对比



资料来源:《电动垂直起降飞行器的技术现状与发展》- 邓景辉, 中邮证券研究所

正力新能采用超高容量的多元正极和硅基负极，提升单位重量活性物质的电容量，实现高能量密度，其航空电池在满足铝壳形态下的 320Wh/kg 高能量密度的前提下，依然可以达到 20%SOC 低电量状态下的 12C 以上大倍率放电性能。目前液态锂电池已接近能量密度上限，半固态/凝聚态、全固态电池可以大幅提升能量密度和安全性。国轩高科、卫蓝新能源、清陶能源、赣锋锂业等半固态电池单体能量密度达 360Wh/kg 及以上，宁德时代凝聚态电池能量密度达 500Wh/kg 。

图表21：正力新能“三高一快”航空航天电池解决方案



资料来源：新华网，中邮证券研究所

图表22：航空动力电池相关企业及进展

公司	研发进展
宁德时代	2024年4月，公司凝聚态电池能量密度最高可达500Wh/kg，正在进行民用电动载人飞机项目的合作开发。
比亚迪	公司将与空客电池公司(Airbus BatteryCoC)密切合作，双方致力于为航空航天各类飞行器研发新型电池。
孚能科技	2021年，公司与国际知名电动飞行器制造商合作，用于eVTOL的电池产品已量产，搭载285Wh/kg电芯，飞行时间43分钟，飞行速度320km/h，飞行距离250km，已完成了载人电动飞行器的飞行测试。
正力新能	2023年5月，公司推出了能量密度320Wh/kg的航空电池。
荣盛盟固利	公司与辽宁通用航空研究院研发出50Ah电池系统，电芯能量密度由240Wh/kg提升至300Wh/Kg
杰士汤浅	公司与关西大学合作开发出一款轻型高能量密度钒硫电池。
Amprion	公司已验证锂离子电池可提供500Wh/kg、1300Wh/kg，下一代电池定位为快速增长的航空产品提供动力。
NASA	2022年，NASA宣称其研发的航空用固态电池取得了重大突破，研发成功的固电池的能量密度达到了500wh/kg

资料来源：各公司官网，高工锂电，第一财经，中邮证券研究所

2.3 航电系统：飞机的中枢神经系统

2.3.1 综合航电系统

航空电子系统(Avionics)，简称航电系统，是飞机上所有电子设备的总和，常被形象地称之为飞机的中枢神经系统。航电系统作为现代飞机的重要组成部分，其设计水平直接影响飞机的安全性和可靠性，同时也影响飞机的经济性和舒适性。航电系统一般分为传感器系统(惯性导航系统、大气数据计算机、雷达、各种无线电导航接收机等)、控制系统(飞行控制系统、发动机控制系统等)，以及作为

人-机接口的综合电子显示系统。航空电子系统的主要功能包括飞行控制、通信、导航、监视、显示等。

不同类型的飞机根据其任务使命和应用环境不同，其航电系统的组成、功能和配置有一定区别。总体上看，航电系统主要功能是在飞机运行过程中，根据任务需要和环境特点，完成信息采集、任务管理、导航引导等基本飞行过程，为飞行机组提供基本的人机接口，保障飞机安全、可靠的完成相关任务。通常而言，军民用飞机通用的航空电子系统主要包括：

核心处理系统：以核心处理计算机、机载嵌入式实时操作系统和机载总线网络等为基础，完成机上设备的互联互通，为各项系统任务提供基本的处理平台。

综合显示系统：为机组人员提供全面、直观的飞行信息显示，如航向信息、姿态信息、高度信息、空/地速、位置信息、告警信息等，帮助机组人员准确及时地了解飞行状态和系统性能，从而更加安全高效地完成飞行操作任务。

通信系统：主要用途是使飞机与外部保持双向语音和数据传输，确保飞机与地面之间建立稳定的通信联络。

导航系统：通过多种导航传感器实时采集并解算飞机运行信息，为飞行中的飞机提供瞬时位置、方位等信息，从而引导飞机按照预定航线飞行。根据工作原理的不同，飞机导航系统又分为仪表导航系统、无线电导航系统、惯性导航系统等。

飞行管理系统：根据飞机的实际任务需要，完成飞行过程中的航迹预测、自动控制 and 性能优化等工作，确保飞机的飞行航迹和剖面能够满足执行相关任务的需要。

机载维护系统：实时接收、汇总和分析机上各系统提供的相关数据，及时发现、诊断和定位相关机载系统和设备的故障状况，并有针对性地制定并采取相关维护策略，保证飞机可靠运行。

基于飞机使用需求，通用飞机航电系统还可以扩展自动驾驶、广播式自动相关监视 (Automatic Dependent Surveillance—Broadcast, ADS-B)、基于数据链的气象/交通监视、合成视景、无线电高度表、自动定向机、测距器、防撞告警

系统 (Traffic Alert and Collision Avoidance System, TCAS)、地形提示告警系统 (Terrain Awareness and Warning System, TAWS) 等功能。

图表23：通用飞机航电系统基本功能需求

需求分类	功能描述
座舱飞行参数显示	大气、姿态、飞行计划、导航、发动机及机身传感器参数等信息
备份仪表显示	空速表、气压高度表、地平仪、磁罗盘等独立备份仪表显示
飞参采集	发动机、机电和传感器数据采集
通信	语音通信、机内通话、广播等功能
导航	地基无线电导航或卫星导航功能
监视	为管制台提供监视本机的航管应答功能
告警	飞机系统故障告警，包括灯光、显示、声音告警

资料来源：《通用飞机航空电子系统架构研究综述》-王焱滨，中邮证券研究所

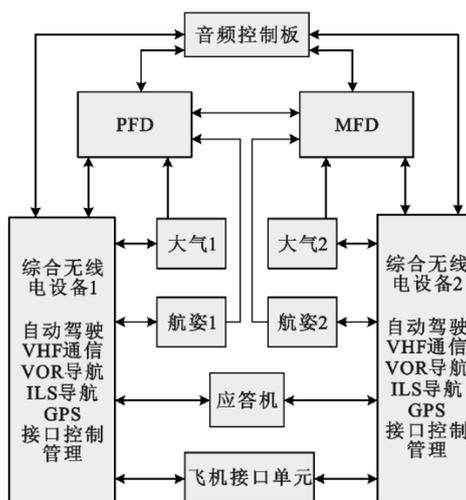
目前国际上，美国在通用飞机航空电子领域居于领导地位，有多家企业可以提供完整的通用飞机航电系统货架产品。Garmin 公司的 G1000 系统、Avidyne 公司的 Entegra 系统、L3Harris 公司的 SmartDeck 系统等均是具有代表性的航电系统。我国的通用航空研制体系还有不小的差距，国内通用飞机所使用的航电产品主要依赖进口，自主研发水平亟待提高。据公开报道目前有“海鸥”300 飞机采用了国产航电系统，但在系统架构设计、小型化设计和低成本化设计等方面尚属起步阶段。

Garmin 是通航飞机综合航电系统主要供应商。Garmin 航电系统是现代小型飞机上普遍采用的一种航电系统，在全球各种通用飞机上的市场份额超过了 90%，是通航飞机上标准配置的一种航电系统。在国内，由于 Garmin 航电系统操作简单、使用方便，已经广泛用于各轻小型飞机、直升机，涉及包括护林防火、飞播造林、紧急救援、空中旅游、航空摄影等各行业。

Garmin 公司的 G1000 系统是目前应用最广泛的通用飞机航电系统，世界上大部分 4-9 座中小型通用飞机均装备该航电系统。G1000 系统由两台或三台综合显示器 (PFD/MFD)、2 部综合无线电设备，以及大气机、航姿系统、S 模式应答机、发动机/机身参数采集单元等外围传感器和飞机接口设备组成。系统以两台综合显示器和综合无线电设备为核心，外接大气、航姿、航管、飞机接口单元等设备构建整个系统。系统综合化程度高，综合显示器除了完成系统的集中显示控

制功能外，还作为机载计算机，通过应用软件实现飞行管理、状态监控、合成视景等系统核心处理功能，实现显示控制与处理的综合；综合显示器之间采用分布处理、信息共享的处理架构；综合无线电设备集成了甚高频 (Very High Frequency, VHF) 通信、甚高频全向信标 (VHF Omni-directional Range, VOR)、仪表着陆系统 (Instrument Landing System, ILS)、全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、自动驾驶控制以及传感器数据接口控制管理等功能；大气、航姿、导航、通信等系统主要功能及其数据传输路径均具有多余度设计，保证了系统的安全性；采用普通以太网作为骨干网络，设备数据传输采用 ARINC429、RS485、RS232 等高可靠低成本的常规系统总线，利于控制成本；系统具备良好的扩展性，综合无线电设备预留部分接口，可扩展连接测距器、自动定向机、防撞告警等设备。

图表24：G1000 系统架构



资料来源：《通用飞机航空电子系统架构研究综述》-王焱滨，中邮证券研究所

在 eVTOL 行业，全球主流机载航电公司基本都和相关 eVTOL 主机厂达成合作。2021 年，Joby 宣布采用 Garmin 的 G3000 集成驾驶舱，Archer 的 Midnight eVTOL 也采用 Garmin 的 G3000 集成驾驶舱；Avidyne 航电和 Beta、SkyDrive 合作；泰雷兹主要合作对象是 Eve；霍尼韦尔推出云化航电平台，主要的 eVTOL 整机合作商是韩国现代的 Supernal 和英国的 Vertical。国内，昂际航电与沃飞长空签署战略合作备忘录，共同开发 AAM 航电系统。

图表25：G3000 综合航电系统



资料来源：Garmin 官网，中邮证券研究所

2.3.2 飞控系统

飞行控制系统简称飞控系统，可以根据飞行员的操纵指令、飞机飞行状态和环境参数，控制飞机机翼、舵面等，实现飞机稳定飞行和精确机动。目前，小型无人机的飞控系统和民航飞机及军用大型无人机的飞控系统均有成熟的解决方案。

飞控系统是 eVTOL 最核心的子系统之一，技术难度较大。eVTOL 主要依赖飞控系统实现飞行器的感知、控制和决策。eVTOL 的飞行控制技术相比小型无人机或民航飞机更加复杂，需要解决基于多旋翼垂直起降、基于常规固定翼水平飞行以及垂直-水平两种飞行模态的平稳切换等技术难题，并且平衡好 eVTOL 市场化过程中对飞控系统产生的轻量化、经济性、适航等现实需求。目前的电传操纵系统主要应用于民航客机上，但是 eVTOL 机型的最大起飞重量多为一两吨，在整机重量、体积小得多的情况下，再加上旋翼类飞机是静不稳定的，必须在本就小巧的机身上加配飞控计算机和 IMU 等传感器，对飞控系统的体积和重量提出了更苛刻的要求。

eVTOL 对飞控系统有低成本要求。eVTOL 与传统民航客机有着明显不同的使用场景，作为一种新型的中短途空中交通工具，更侧重于在城市客运 (UAM)、区域客运 (RAM)、货运、个人飞行器、紧急医疗服务等非长距离场景的应用。在追求高效率的同时，还需要做到可以面向大众市场的低成本。与民航客机动辄几百万美金的飞控系统预算不同，eVTOL 的飞控系统提供商需要让产品和服务匹配 eVTOL 的成本结构。小型的电子零部件甚至车规级部件的使用、更先进的仿真系

统、MBD (Model Based Design) 等新技术及工具的引进使得更低成本的飞控系统成为可能。

适航要求飞控系统需要具有高可靠性。适航要求 eVTOL 主机厂必须选择可适航的高可靠性的飞控系统。

国外航空飞控系统厂商包括泰雷兹、BAE System 等。泰雷兹是航空飞控系统领先厂商，公司称超过 12000 架飞机配备了其 FlytRise 飞行控制系统，日本 eVTOL 制造商 SkyDrive 也将采用其 FlytRise 飞行控制系统。2022 年，BAE System 和 Supernal 宣布达成协议为 Supernal 的 eVTOL 飞行器设计开发飞控计算机。

国内飞控供应商主要有两类，一类是老牌飞控系统供应商，以军工单位、研究所及高校为主，包括中航工业 618 所、航天、北航、南航等；另一类是新兴的民营企业，包括边界智控、致导、创衡、翔仪等。国内 eVTOL 主机厂御风未来采用自主研发的飞控系统。

2.3.3 导航系统

导航系统是飞行器核心子系统之一，不仅为飞行器提供姿态、方位、速度和位置的信息，还提供飞行器的加速度和角速率，用于飞机的正确操纵和控制。

导航系统的最关键的指标是精度和可靠性，这两个指标的提升一般有个途径：

1) 采用更高级别的传感器，提升传感器的精度和可靠性；**传统民航客机多采用这一途径**，使用三套独立的大气数据惯性参考单元组成大气数据惯性参考系统 (Air Data Inertial Reference System, ADIRS)，每一个传感器都是具备高精度和高可靠性。**这种方法的优点是算法和软件简单，满足软件的适航较为容易，但价格昂贵。**

2) 采用组合导航，组合多种不同工作原理的传感器，形成一套可靠性和精度都远高于单一传感器的组合导航系统。导航传感器/子系统的种类较多，如惯导系统 (INS)、卫星导航 (GNSS)、磁罗盘、空速计、气压高度表/雷达高度表等。目前 eVTOL 主流方式是采用 MEMS 传感器、GNSS 等，通过数据融合算法提升性能和鲁棒性以满足飞机对于导航系统的要求，例如边界智控提出基于

INS/MAG/ADS/GNSS 构成的组合导航系统。INS 是组合导航的核心，由加速度计和陀螺仪组成，战术级 MEMS 已经具备较好的性能，可满足 eVTOL 的基本需求。

图表26：不同陀螺的性能和功耗



资料来源：边界智控，中邮证券研究所

eVTOL 导航系统有低成本要求，体积、重量、功耗等限制下技术难度较高。传统航空产业的组合导航系统过于昂贵，动辄上百万的价格无法满足 eVTOL 成本结构的需求。同时，eVTOL 飞机空间和电量有限，对组合导航系统的体积和功耗要求比传统民航高。低沉本要求和体积、重量、功耗等限制下，开发适合 eVTOL 的组合导航技术难度较高。此外，eVTOL 飞行空域较民航客机更加复杂，有更多干扰因素，机队规模和密度也会大幅度提升，对单机智能化提出了更高要求。

2.3.4 通信系统

在民航飞机中，航空空地通信系统按服务对象的不同，可分为驾驶舱通信系统、客舱通信系统；按通信体制不同，可分为基于卫星中继模式的空地通信系统、基于 ATG 地面基站模式的空地通信系统。

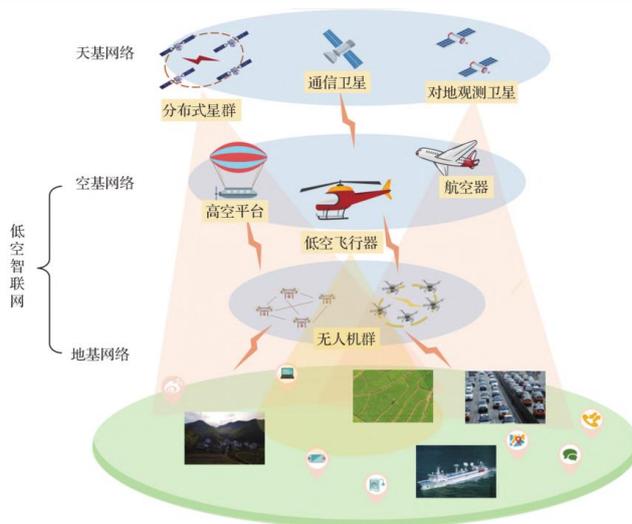
驾驶舱通信系统：飞机驾驶舱内的飞行员与地面管制员之间的通信一般使用甚高频无线电 (VHF) 和高频无线电 (HF)。甚高频通信系统的有效作用范围较短，只在目视范围之内，作用距离随高度变化，也是目前民航飞机主要的通信工具，用于飞机在起飞、降落或通过控制空域时机组人员与地面管制人员的双向语音通信。遇到险情时，也可通过甚高频向地面发出求救信号。

基于卫星中继的空地通信系统：卫星通信模式是指飞机飞行过程中，通过接收无线卫星通信信息，实现机舱旅客空中上网的解决方案。

基于地面基地的空地通信系统：AGT 地面基站模式是在飞机航路航线下架设数个地面基站，地面 AGT 基站向高空发射无线网络信号，飞机用安装在腹舱 ATG 接收器接收无线信号，飞机在航路上飞行，一路接收地面 ATG 基站发射的无线信号，实现机舱旅客空地互联无线上网及飞机机组飞行信息与地面互联。

低时延、高稳定的通讯链路是保障 eVTOL 航空器在复杂城市低空环境下安全运行的有效前提条件。相比较甚高频通信系统 (VHF)、卫星通信等传统航空通信方式，地面移动通信中的 5G 毫米波蜂窝数据链路在低成本、高可靠、广覆盖等方面具备突出优势。eVTOL 在低空空域飞行，更适合于基于 5G/5G-A 地面通信基站的通信模式。未来，随着卫星互联网的发展，地面基站与卫星互联网可协同满足 eVTOL 对通信的需求。此外，适航性要求，所有按照中国民航规章第 23 部适航的飞机，均至少配置双套 VHF 电台。

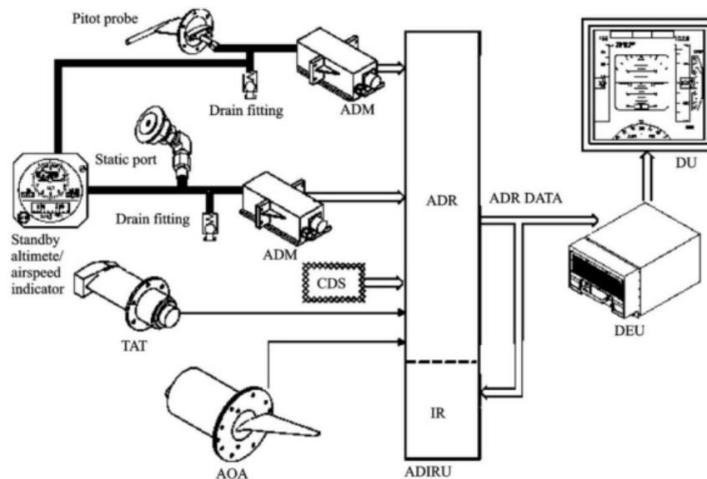
图表27：低空智联网示意图



资料来源：《低空智联网组网与控制理论方法》-吴启晖等，中邮证券研究所

2.3.5 大气数据系统

飞行器大气数据传感技术是用于测量表征飞行器运动与来流空气相互关系的，包括飞行器运动时所处的静态大气压力（静压）、来流冲击压力（总压），所处环境的大气温度，机体与气流之间的夹角（攻角、侧滑角）等。飞行器的速度和压力高度等关键飞行参数依赖于这些压力测量，因此，大气数据必须要准确可靠。

图表28：大气数据系统构成框图


资料来源：《针对 B737-800 飞机大气数据系统的故障排除》-张铭裕，中邮证券研究所

泰雷兹是全球头部航空大气数据系统供应商，向全球客户交付了超过 5 万个航空数据单元/模块，累积了数百万飞行小时。泰雷兹开发的适用于飞机、直升机和 eVTOL 的大气数据系统，采用内部 MEMS 压力传感器，在低速下具有高精度，并且具有质量轻、功耗低的优势。Eve 和 Wisk 等 eVTOL 厂商均采用了泰雷兹的大气数据系统。

2.3.6 健康和使用的监测系统

健康和使用的监测系统（HUMS）是一个集机载航空电子设备、直升机故障诊断与预测算法、地面维护支持与管理于一体的系统。HUMS 在直升机中用于监测轴承和其他关键部件的状况，通过提供故障预警，允许操作员在其他计划维护活动期间主动更换组件，从而提高安全性并减少停机时间。

HUMS 系统主要由机载设备和地面配套设备两部分组成，机载设备主要包括数据采集与处理单元以及各类（振动、转速、旋翼轨迹等）传感器，地面配套设备有地面分析系统、手持终端设备等。HUMS 系统主要功能包括：数据采集与监控功能、旋翼锥体动平衡及机身振动监测功能、传动系统振动健康监测功能、发动机健康监测功能、使用监测功能、超限告警功能、记录直升机规定的各类超限告警信息以及实时数据传输功能等。

几乎所有欧美制造商新研/改型的运输类旋翼航空器都安装有 HUMS 系统。实践表明 HUMS 系统在保证直升机飞行安全、提高其维修性和减少维修费用等方面，

具有极好的效费比。欧洲很多国家已通过运行规章要求运输类载客的旋翼航空器强制安装 HUMS 系统。

代表性的 HUMS 系统包括已被广泛应用于型号中的 GENHUMS、IMDHUMS、ZingHUMS 等成熟产品,以及 Honeywell 公司的 RECON(能够进行实时数据传输)、空客直升机公司的 FlyScanTM(能够基于大数据分析进行智能故障诊断与预测)等新一代 HUMS 产品。

在 eVTOL 领域, GPMS 的 HUMS 系统 Foresight MX 已被选用于 Beta Technologies 的 Alia eVTOL 原型机。Lilium 与 Plantir 合作开发飞行器健康监测平台,通过软件保障 eVTOL 飞行器安全、高效运行。

2.3.7 感知和避撞系统

飞行器在城市环境中飞行时,一些高层楼宇和建筑物将不可避免的对飞行过程产生影响,需要考虑城市低空域复杂场景下的飞行安全问题。eVTOL 可以载人飞行,在系统设计上需要考虑乘客安全,除了通过保障飞行器结构的可靠性外,飞行器是否具备避障功能也是决定安全性的关键因素。

传统的民航飞机主要通过“空中交通警戒与防撞系统”(TCAS)和“地面迫近警告系统”(EGPWS)两个系统相互配合实现避障。TCAS 针对其他飞机,由自身飞机发送询问信号,其他飞机检测到信号后反馈应答信号,再通过机载计算机进行数据计算得出相对位置信息,但是 TCAS 的配套设备复杂,维护费用高,没有经济性优势,只能给出警告信息,需要飞行员配合执行;EGPWS 将飞机的飞行数据与提前导入机载计算机的地形数据进行比较,为飞行员提供警告提示,缺点是环境地图无法实时更新,不能满足城市低空域存在建筑楼宇等障碍物时执行避障动作所需的精度要求。

霍尼韦尔、L3Harris 等开发 eVTOL 感知和避撞系统。L3Harris 正在开发感知和避撞(detect-and-avoid, DAA)系统,以更好地确保安全飞行。其将空中交通警戒与防撞系统(TCAS)、广播式自动相关监视系统(ADS-B)、应答器和地形感知与距离测量设备、雷达和其他传感器系统等附加功能集成。系统将为飞行员提供飞行期间交通和障碍物的整体视图,提供更好的态势感知能力。2022 年,霍尼韦尔宣布其 DAA 雷达系统 RDR-84K 测试成功,可以在没有人工干预的情况下执行

回避功能。霍尼韦尔的 RDR-84K 系统将支持 eVTOL 应用。Iris Automation 的 DAA 系统基于多摄像头，利用计算机视觉技术提供完整的 360° 径向检测能力。

2.3.8 其他机载系统或设备

紧急定位发射器：紧急定位发射器 (Emergency Locator Transmitter, ELT) 用于飞机遇险后发射搜救信号，帮助搜救人员确定事故位置并展开针对性的救援。如果飞机是正常降落，ELT 不会打开；当飞机受到巨大外力撞击或触水时，一般位于机身后方的 ELT 装置会自动开启并发射信号，持续时间一般不少于 24 小时，国际卫星搜救组织的卫星系统可以接收信号。Heico 的子公司 Dukane Seacom 披露其 ELT 型号 DK-406-AF 获得了 eVTOL 市场的很大份额。

无线高度计：无线电高度计 (Radio Altimeters) 输出的高度数据是飞行中的重要参数之一，该数据用于着陆飞行阶段。同时，空中交通警戒与防撞系统 (TCAS)、地形指示和警告系统 (TAWS) 和风切变 (Windshear) 等其他系统也会用到无线电高度数据。

3 eVTOL 配套商：传统航空头部供应商先发优势显著

载人飞行器具有严格的适航审定要求，传统航空头部供应商拥有丰富的经验积累和适航取证经验，先发优势显著。国外 eVTOL 主机厂如 Lilium、Vertical、Eve 等多与传统航空头部供应商合作，以加快自身产品研发和适航取证。

(1) Lilium

Lilium 拥有强大的供应商体系，合作厂商为航空航天领域头部供应商。Lilium 官网披露，其 eVTOL 的航电和飞控计算机由霍尼韦尔提供，航空结构件由 Aciturri 和 Aernnova 生产，座椅由 Expliseat 生产，内饰灯和地板由 DIEHL 提供，引擎轴和桨叶由 Aeronamic 生产，轮胎采用 Michelin，接收器系统采用 Collins Aerospace，窗户和风挡由 Saint-Gobain 提供，起落架、机轮和支柱由 Magroup 提供，能源管理系统由 Astronics 提供，电源由 Customcells 提供，发机电子马达由 Honeywell 和 Denso 提供，电气互联系统采用 GKN Automotive，电动机轴承采用 SKF 的，大气数据系统由 AeroSonic 提供。

图表29: Lilium 的供应商


资料来源: Lilium 官网, 中邮证券研究所

(2) Vertical Aerospace

与 Lilium 相同, Vertical 的航电和飞控系统也由霍尼韦尔提供, 韩华集团提供机电驱动器。Vertical 采用罗罗公司的推进系统和 Molicel 的电池, 采用 Syensqo 的复合材料, 并由 Leonardo 为其制造机体。

图表30: Vertical 的部分供应商


资料来源: Vertical 官网, 中邮证券研究所

(3) Eve Air Mobility

Eve Air Mobility 研制的 eVTOL 采用复合翼构型, 拥有 8 个用于垂直起降的专用螺旋桨和用于巡航飞行的固定翼。Eve 已开始组装首个全尺寸 eVTOL 原型机, 将于 2024 年进行测试。Eve 的 eVTOL 计划于 2026 年开始交付并投入使用。

Eve 选择了 Garmin、利勃海尔、霍尼韦尔、泰雷兹、Intergactic、FACC、日本电产航空航天公司、DUC Hélices Propellers、RECARO、BAE System 等作为子系统、设备或零部件供应商。

图表31: Eve 的供应商

供应商	产品
Garmin	为 Eve 的 eVTOL 提供 G3000 集成驾驶舱，该驾驶舱直观的触摸屏界面专为满足 eVTOL 需求量身定制，可以直接访问全套航空电子功能，包括集成飞行管理系统、NAV/COM 无线电、转发器音频管理和各种访问权限，减少飞行员工作量。
利勃海尔	为 Eve 的 eVTOL 的电传飞行控制系统开发机电执行器(EMA)，执行器由飞机的电气系统提供动力。
霍尼韦尔	提供导航产品，包括磁力计、GPS 辅助姿态和航向参考系统以及惯性参考系统。还提供外部照明。
泰雷兹	将提供大气数据系统，包括传感器和计算机，用于收集空速、高度和环境条件等关键数据，并将数据传递给飞行员和机载系统，以保障飞机在各种天气条件下都能安全高效飞行。
Intergactic	将提供热管理系统，该系统将为包括电池和其他电子元件在内的设备维持最佳温度范围，还将有助于确保飞机机舱内的舒适温度。
FACC	为 eVTOL 提供水平尾翼和垂直尾翼（包括方向舵、升降舵和飞机副翼）的开发和生产。
日本电产航空航天公司	为日本电产公司和巴航工业的合资企业，将为 Eve 的 eVTOL 提供电力推进系统。
DUC Hélices Propellers	提供转子和螺旋桨。
RECARO	提供 eVTOL 座椅。
BAE System	提供储能系统。

资料来源：Eve 官网，航空产业网，中邮证券研究所

4 投资建议

eVTOL 区别于常规飞机的主要技术特点包括可以实现垂直起降、采用分布式电力推进以及运用全电/混合动力技术。得益于电动机、电池和自动化技术的发展，与常规直升机相比，eVTOL 更加低碳环保、噪声更低、自动化等级更高，并由此产生了运行成本低、安全性和可靠性高的优势。随着城市空中交通（Urban Air Mobility, UAM）的兴起，引起了 eVTOL 的研制热潮。据统计，目前全球已有百余家 eVTOL 企业。

eVTOL 产业链较长，主机厂主要承担的是整机研发和集成的任务。eVTOL 的核心子系统主要包括机体、综合航电系统、飞控系统、能源系统、动力系统以及电气系统六大类。根据 Lilium 的数据，其 eVTOL 成本中，推进系统占比约 40%，

结构和内饰占比约 25%，航电和飞控占比约 20%，能源系统占比约 10%，装配件占比约 5%。

目前，国内亿航智能的 EH216-S 飞行器已取得中国民航局 TC、PC 许可；峰飞航空 V2000CG 货运版 eVTOL 取得中国民航局 TC 许可；沃飞长空、峰飞航空、沃兰特、时的科技、小鹏汇天、御风未来等主机厂多款 eVTOL 飞行器型号已申请中国民航局 CAAC 或欧洲航空安全局 EASA 适航认证，有望陆续取得 TC、PC。国内多款 eVTOL 飞行器型号有望陆续进入批量生产。

产业链相关标的包括：1) 低空基建相关标的莱斯信息、中科星图、国睿科技、四创电子、深城交、四川九洲、海格通信、纳睿雷达、航天南湖、泰豪科技、川大智胜等；2) 传统/eVTOL 飞行器相关标的亿航智能、中直股份、万丰奥威、卧龙电驱、应流股份、光威复材、吉林化纤、中航高科、高华科技、烽火电子、芯动联科、航新科技、安达维尔等；3) 飞行器运营和模拟飞行相关标的中信海直、海特高新等。

图表32：相关标的

分类	上市公司	相关产品或业务
	莱斯信息	民用空管系统国内龙头供应商，2024 年 1 月，公司中标安徽省新技术融合应用低空飞行服务平台项目，该项目建设一套集飞行态势监视、军民航空域管理、飞行计划管理、航行情报、气象情报、数据资源管理和统计分析等功能于一体的低空飞行服务平台。
	中科星图	公司自 2020 年开始部署低空经济领域，前期已具备低空通航产品及项目基础。未来，低空经济相关的业务布局将包括但不限于：1) 低空服务基础平台产品研发；2) 低空服务全套解决方案研发；3) 围绕低空进行相关产业生态建设。
	国睿科技	公司的多款低空监视装备、系列气象雷达产品等，可满足低空飞行产业、低空保障产业、低空制造产业等多个应用场景的需要。公司自身高度重视战略性新兴产业发展，成立战兴产业领导工作小组，推动低空经济相关产业布局，抢占未来产业发展制高点。
基础设施	四创电子	公司成立“低空经济”专班，推进安徽省低空经济工作谋划，牵头编制的《安徽省低空智联基础设施建设工作方案》顺利通过评审，为安徽省低空空域管理领域顶层方案设计奠定基础；与北京航空航天大学共建“低空智联技术联合实验室”，推动产学研用一体化发展。
	深城交	公司与另外一家深圳研究咨询机构组成的联合体承接深圳低空智能融合基础设施建设项目一期项目，开发可覆盖全市范围的智能融合系统的软件平台，建设配套的管服中心、数据中心及无人机测试场，接入典型的城市场景，进行软件平台的验证等。此外，公司中标了无锡市低空经济发展规划及实施方案（二次）项目。
	四川九洲	公司主要从事空中交通管理及相关航电设备的研发、制造和销售，产品主要集中于空管、监视、通信、导航等业务范围，已形成 6 个系列 100 余种具有自主知识产权的空管领域产品，具体产品为空管二次雷达、机载防撞系统、S 模式应答机、ADS-B 系统、西方体制监视识别系统等。

海格通信	公司布局 and 开展“北斗+5G+卫星互联网”空天地一体全域通导一体网络和综合时空基准服务底座；打造服务低空经济的智能无人系统，为生产作业、公共服务和航空消费等新场景提供智能无人机平台；打造低空无人飞行器空域管理平台，提供低空频谱规划与动态管理、无人飞行器管理、无人机侦测防御管理（反无人）等功能；提供低空经济无人平台飞行训练培训和认证服务等。	
纳睿雷达	公司目前所生产的产品主要为 X 波段双极化有源相控阵雷达及配套的软硬件产品及算力算法服务，目前主要应用于气象探测、水利测雨等领域，并逐步在民用航空、海洋监测、公共安全等领域进行市场化推广。	
航天南湖	公司积极参与低空经济建设，成立了低空事业部，依托在军用防空预警雷达领域积累的数十年研制经验，发挥在低空目标预警探测等方面的技术优势，积极开拓低空雷达探测及相关业务。	
泰豪科技	公司旗下天津七六四通信导航技术有限公司所生产的多普勒甚高频全向信标、测距仪等产品进入《民用航空空中交通通信导航监视设备使用许可目录》	
川大智胜	公司所研制的民用航空空中交通管制自动化系统(中小型)、记录仪等产品进入《民用航空空中交通通信导航监视设备使用许可目录》	
亿航智能	公司是一家全球领先的智能自动驾驶飞行器科技企业，致力于让每个人都享受到安全、自动、环保的空中交通，EH216-S 已取得 CAAC 颁发的 TC、PC 许可。	
中直股份	公司努力成为绿色低碳航空器的领跑者和通航产品的核心供应商，狠抓民机科研，加速 AC332、AC313A 等机型适航取证进程，Y12F 飞机货运型取得 TC 证；把握低空经济发展机遇，加快电动垂直起降飞行器等新产品开发及市场推广，推动低空经济发展。	
万丰奥威	子公司万丰钻石飞机与全球某知名主机厂中国总公司战略合作拟成立合资公司，将在 eVTOL 领域深度合作。	
卧龙电驱	公司在电动航空赛道布局多年，和包括商飞在内的主流主机厂携手研发，加速电动航空技术的商业化应用。公司与中国民航科学技术研究院共建“联合实验室”，参与到航空电力动力系统相关标准制定当中。飞行汽车是公司电动交通板块的重点赛道之一。	
应流股份	公司 2016 年自德国引进了 2 款涡轴发动机及 2 款有人直升机，又陆续自主研发了其他型号的发动机和重载无人机，核心技术主要是涡轴发动机生产制造技术。目前已经完成发动机试车厂房建设，4 个试车台已投入使用，发动机装配线、无人机装配线已形成中批生产能力。	
飞行器	光威复材	公司作为碳纤维领域的主力供应商，有着货架式的碳纤维产品体系以及预浸料、复合材料制部件的专业配套能力，能够满足各种低空飞行器对碳纤维的力学性能、功能、以及经济性目标追求和配套要求，公司有已经通过大飞机 PCD 适航认证并且有着成熟生产控制和应用体系的 T300 级等产品。
	吉林化纤	公司主要从事粘胶长丝和碳纤维产品的生产、销售，以及粘胶短纤受托加工业务，对于低空经济有业务布局，与恒瑞、亿航等企业均有合作。
	中航高科	公司已经提供复合材料原材料产品给低空电动飞行器相关企业。
烽火电子	公司主导产品包括短波通信设备、超短波通信设备、航空搜救定位设备、车机内音频控制系统，未来有望开拓低空市场。	
高华科技	公司是高可靠性传感器及传感网络系统核心供应商，在航空装备及无人机领域有着长期配套经验及较为突出的技术能力，在低空经济领域具备广阔的发展空间。2024 年 1 月，公司以自有资金投资南京邦盛赢新二号，积极切入低空经济、人工智能、新能源、新材料等新兴产业。	
芯动联科	公司产品可用于飞行汽车和低空飞行器，目前飞行汽车需要配备 3 个 IMU（主 IMU、备份、第二备份），同时对于性能、规格的要求更高，相应单价也更高。	
航新科技	公司以通航维修为切入点，将继续结合自身优势聚焦探索为空域安全和低空飞行提供服务保障的各类产业的介入机遇，主要包括低空空域管控系统、通航产业相关设备与系统研制、无人机飞行信息系统、载人无人机健康管理系统以及通讯、导航、维修等相关产业。	

安达维尔	公司在航空座椅、航空导航系统、客舱设备、测控保障类设备及航空复材构件上有着丰富的产品谱系及装机经验，相关产品已配套通用直升机，部分产品已获得适航认证，其核心技术可延伸至低空经济领域，产品应用场景与 eVTOL 适配度较高。公司目前正在以现有产品为基础开发 eVTOL 产品，并广泛与行业客户进行业务接洽及技术对接，部分客户就具体产品已进入到后期商务洽谈阶段。
中信海直	公司与多家 eVTOL 公司接洽，并与个别公司建立合作关系。公司与德国 Lilium 签署合作备忘录，进行后期无人垂直起降航空器的运营和市场需求探索，及应用场景网络的搭建。公司以运营服务为核心，在舟山、深圳等地开展低空经济运营项目，并开发相关系统程序，为 eVTOL 运行做前期验证。
海特高新	公司目前和 eVTOL 主流厂家从分系统的仿真模拟和系统集成仿真模拟进行广泛合作，开展适航取证工作。随着产业的发展，公司将在 eVTOL 模拟机制造和飞行员培训领域进行布局。

资料来源：iFind，国睿科技微信公众号，四川九洲公告，纳睿雷达公告，中直股份公告，金融界，《民用航空空中交通通信导航监视设备使用许可目录》-中国民用航空局，中邮证券研究所

5 风险提示

低空经济相关支持政策不及预期；UAM 相关基建配套不及预期；eVTOL 研发、取证、量产进展不及预期；eVTOL 的 OEM 厂商给出的商运财务模型过于乐观等。

中邮证券投资评级说明

投资评级标准	类型	评级	说明
报告中投资建议的评级标准： 报告发布日后的 6 个月内的相对市场表现，即报告发布日后的 6 个月内的公司股价（或行业指数、可转债价格）的涨跌幅相对同期相关证券市场基准指数的涨跌幅。 市场基准指数的选取：A 股市场以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指为基准；可转债市场以中信标普可转债指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普 500 或纳斯达克综合指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期基准指数涨幅在 20%以上
		增持	预期个股相对同期基准指数涨幅在 10%与 20%之间
		中性	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		回避	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	行业评级	强于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		中性	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		弱于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	可转债评级	推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		谨慎推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 5%与 10%之间
		中性	预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%与 5%之间
		回避	预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%以下

分析师声明

撰写此报告的分析师（一人或多人）承诺本机构、本人以及财产利害关系人与所评价或推荐的证券无利害关系。

本报告所采用的数据均来自我们认为可靠的目前已公开的信息，并通过独立判断并得出结论，力求独立、客观、公平，报告结论不受本公司其他部门和人员以及证券发行人、上市公司、基金公司、证券资产管理公司、特定客户等利益相关方的干涉和影响，特此声明。

免责声明

中邮证券有限责任公司（以下简称“中邮证券”）具备经中国证监会批准的开展证券投资咨询业务的资格。

本报告信息均来源于公开资料或者我们认为可靠的资料，我们力求但不保证这些信息的准确性和完整性。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价，中邮证券不对因使用本报告的内容而导致的损失承担任何责任。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策。

中邮证券可发出其它与本报告所载信息不一致或有不同结论的报告。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且不予通告。

中邮证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或者计划提供投资银行、财务顾问或者其他金融产品等相关服务。

《证券期货投资者适当性管理办法》于 2017 年 7 月 1 日起正式实施，本报告仅供中邮证券客户中的专业投资者使用，若您非中邮证券客户中的专业投资者，为控制投资风险，请取消接收、订阅或使用本报告中的任何信息。本公司不会因接收人收到、阅读或关注本报告中的内容而视其为专业投资者。

本报告版权归中邮证券所有，未经书面许可，任何机构或个人不得存在对本报告以任何形式进行翻版、修改、节选、复制、发布，或对本报告进行改编、汇编等侵犯知识产权的行为，亦不得存在其他有损中邮证券商业性权益的任何情形。如经中邮证券授权后引用发布，需注明出处为中邮证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节或修改。

中邮证券对于本声明具有最终解释权。

公司简介

中邮证券有限责任公司，2002年9月经中国证券监督管理委员会批准设立，注册资本50.6亿元人民币。中邮证券是中国邮政集团有限公司绝对控股的证券类金融子公司。

公司经营范围包括：证券经纪；证券自营；证券投资咨询；证券资产管理；融资融券；证券投资基金销售；证券承销与保荐；代理销售金融产品；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问。此外，公司还具有：证券经纪人业务资格；企业债券主承销资格；沪港通；深港通；利率互换；投资管理人受托管理保险资金；全国银行间同业拆借；作为主办券商在全国中小企业股份转让系统从事经纪、做市、推荐业务资格等业务资格。

公司目前已经在北京、陕西、深圳、山东、江苏、四川、江西、湖北、湖南、福建、辽宁、吉林、黑龙江、广东、浙江、贵州、新疆、河南、山西、上海、云南、内蒙古、重庆、天津、河北等地设有分支机构，全国多家分支机构正在建设中。

中邮证券紧紧依托中国邮政集团有限公司雄厚的实力，坚持诚信经营，践行普惠服务，为社会大众提供全方位专业化的证券投、融资服务，帮助客户实现价值增长，努力成为客户认同、社会尊重、股东满意、员工自豪的优秀企业。

中邮证券研究所

北京

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：北京市东城区前门街道珠市口东大街17号

邮编：100050

上海

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：上海市虹口区东大名路1080号邮储银行大厦3楼

邮编：200000

深圳

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：深圳市福田区滨河大道9023号国通大厦二楼

邮编：518048