

2024年07月11日

电机电控：飞行汽车动力核心，国内供应商稀缺

——低空经济系列报告三：动力系统方案讨论

看好

本期投资提示：

- **低空经济产业：政策大力支持，产业稳定加速发展。**2024年3月，政府工作报告提出，要积极打造低空经济等新增长引擎。随后，多地发布支持低空经济的相关政策，低空经济进入发展快车道。电动垂直起降飞行器（eVTOL）为低空领域主要产品形态，其驱动方式和能源形式发生变化。
- **电机电控：核心动力系统，各家方案存在差异。**分布式电推进系统（DEP）技术使得飞行器的构型突破了传统架构的限制，eVTOL机型设计多样化，其采取的动力结构、数量、分布、性能参数存在较大区别。本文对三大主流eVTOL构型及其驱动方案进行梳理，例如选择多旋翼构型的亿航EH216，Volocopter Volocity；复合翼构型的空客CityAir Bus、峰飞；矢量推力构型的Joby S4，Lilium Jet、沃飞长空等。
- **市场空间：价值量占比高，未来潜在空间巨大。**参考Lilium公司的eVTOL的成本结构，推进系统占比30%以上，结合新能源汽车电机占比10%，估计eVTOL电机成本占比约10%；由于航空飞机对于安全性要求极高，为了保证故障率降低到要求范围内，全生命周期内通常要更换3次电机；市场规模参考Roland Berger较为保守的预测数据，预计2030/2040/2050年全球eVTOL电机市场规模将达到42/357/1890亿元。
- **进入壁垒：性能要求严苛，研发验证周期更久。**电驱系统是eVTOL的核心动力来源，对于飞机性能至关重要，电机的可靠性、安全性和环境适应性要求大幅提升。eVTOL电机的进入壁垒远高于汽车行业，难点包括材料、设计、政策和应用等方面。
- **竞争格局：格局较为集中，自研与第三方共存。**eVTOL电机电控参与者包括主机厂自研自制与第三方供应商。但进入壁垒高于新能源汽车，竞争格局更为集中。1) 主机厂自研：由于电机电控需随机型适航，亿航智能，Joby等选择自研或自制电机电控；2) 大部分主机厂选择与深耕行业多年、经验丰富的第三方供应商合作开发电驱系统，如Lilium与霍尼韦尔，赛峰与时的科技，卧龙电驱与商飞、沃飞等。
- **混合动力：弥补纯电劣势，续航能力优势明显，是低空飞行的另一种解决方案。**纯电驱动的效率虽高，但能量密度低，针对中长距离的低空出行，还不具备可行性。混合动力作为纯电方式的补充，其性能和前景类似于新能源汽车混合动力。全球多家飞机制造商，如波音、空客、巴西航空工业公司，以及罗罗、西门子、美国宇航局等选择这一方向。但目前相关产品较少，瓶颈主要来自于技术难度、成本、市场需求和政策导向等方面。
- **相关标的：**1)卧龙电驱：全球领先的电机制造商，前瞻布局低空经济赛道；2)英搏尔：新能源汽车动力系统，具备技术迁移能力；3)宗申动力：深耕发动机领域，推出系列航空动力产品；4)应流股份：航空零部件及装备制造，产品出口欧美多家企业。
- **风险提示：**政策效果不及预期风险、市场竞争加剧风险、技术突破、研发和商业化进程不及预期风险。

证券分析师

王珂 A0230521120002
wangke@swsresearch.com
戴文杰 A0230522100006
daiwj@swsresearch.com
李蕾 A0230519080008
lilei@swsresearch.com
刘建伟 A0230521100003
liujw@swsresearch.com

研究支持

胡书捷 A0230122070007
husj@swsresearch.com

联系人

胡书捷
(8621)23297818x
husj@swsresearch.com



申万宏源研究微信服务号

投资案件

结论和投资分析意见

政策推动下低空经济产业加速发展，电机电控作为 eVTOL 核心零部件，具有功能关键、价值量高、壁垒高、竞争格局优等特点，未来将极大受益于产业发展，建议关注这一环节的投资机会。

相关标的：1) 卧龙电驱：全球领先的电机制造商，前瞻布局低空经济赛道；2) 英搏尔：新能源汽车动力系统，具备技术迁移能力；3) 宗申动力：深耕发动机领域，推出系列航空动力产品；4) 应流股份：航空零部件及装备制造，产品出口欧美多家企业。

原因与逻辑

1) 市场空间：政策大力支持，产业稳定加速发展。电机电控作为飞机核心动力系统，价值量占比高，未来潜在空间巨大，保守预计预计 2030/2040/2050 年全球 eVTOL 电机市场规模将达到 42/357/1890 亿元；

2) 进入壁垒：性能要求严苛，eVTOL 电机的可靠性、安全性和环境适应性要求大幅提升，研发验证周期更久，进入壁垒远高于汽车行业；

3) 竞争格局：格局较为集中，少数设计和制造能力较强的主机厂自研，大部分主机厂选择与深耕行业多年、经验丰富的第三方供应商合作开发电驱系统；

4) 混合动力：弥补纯电劣势，续航能力优势明显，是低空飞行的另一种解决方案。

有别于大众的认识

市场认为电机电控的壁垒较低，对未来的竞争格局和盈利水平存在担忧。我们认为航空电驱系统的壁垒高，对于安全性、可靠性、功率密度和效率要求极高，相比电动车的技术门槛和客户门槛大幅提升。新进入者面临数年的开发和投资周期，目前有产品和技术储备的公司有先发优势，待行业爆发时将首先受益。

市场对新兴的飞行汽车领域技术层的认知较少，更多围绕着应用场景和政策展开讨论，认知还处于萌芽期。本篇报告详细梳理了核心动力系统-电机电控环节的情况，包括电机类型、下游要求、技术壁垒、各类构型 eVTOL 的应用情况，以及混合动力方式的优劣势等，从而加深市场对 eVTOL 的认知，便于把握其未来发展方向。

目录

1. 低空经济：动力系统变革，产业发展迅速	7
1.1 低空经济：政策大力支持，产业稳定加速发展	7
1.2 构型设计：三大主流构型，产品形态百花齐放	8
1.3 机电电控：核心动力系统，各家方案存在差异	10
1.4 市场空间：价值量占比高，未来潜在空间巨大	16
2. 竞争格局：壁垒和门槛高，竞争格局更优	19
2.1 进入壁垒：性能要求严苛，研发验证周期更久	19
2.2 横向对比：相比汽车行业，性能要求大幅提升	21
2.3 竞争格局：格局较为集中，自研与第三方共存	23
3. 混合动力：低空飞行的另一种解决方案	25
3.1 混合动力：弥补纯电劣势，续航能力优势明显	25
3.2 产业进展：目前玩家较少，处于早期研发阶段	29
4. 投资提示	31
4.1 产业链相关公司梳理	31
4.2 相关标的公司估值表	33
5. 风险提示	34

图表目录

图 1: 分布式电推进系统结构	7
图 2: NASA X57-Maxwell 采用分布式电推进系统	7
图 3: eVTOL 旋翼与传统直升机旋翼复杂度对比	8
图 4: eVTOL 部分构型结构俯视图	8
图 5: eVTOL 机型总结为三种主流构型	9
图 6: 亿航 EH216 型号 eVTOL	11
图 7: Volocopter Volocity 型号 eVTOL	11
图 8: 小鹏汇天 X2 型号 eVTOL	12
图 9: 零重力飞机工业 ZG-ONE 型号 eVTOL	12
图 10: 空中客车 CityAirBus NextGen	13
图 11: 西门子 SP200D 直驱电机	13
图 12: BETA Alia 250 型号 eVTOL	13
图 13: EVE Air Mobility 型号 eVTOL	14
图 14: 亿航 VT-30 型号 eVTOL	14
图 15: 峰飞 V1500M 型号 eVTOL	15
图 16: Joby S4 型号 eVTOL	15
图 17: Joby S4 旋翼及电机特写	15
图 18: Lilium Lilium Jet 型号 eVTOL	16
图 19: Lilium Jet 涵道风扇示意图	16
图 20: 沃飞长空 AE200 型号 eVTOL	16
图 21: 2040 年全球 eVTOL 市场规模将超万亿美元	17
图 22: 不同构型每座最大起飞重量和成本对比	17
图 23: 三种型号 eVTOL 制造成本	17
图 24: Lilium 公司的 eVTOL 构造	18
图 25: Lilium 公司的 eVTOL 成本构成	18
图 26: 无刷直流电机 (BLDC) 结构示意图	19
图 27: 永磁同步电机 (PMSM) 结构示意图	19

图 28: eVTOL 电机的技术壁垒	20
图 29: eVTOL 从生产到运营的取证过程, 亿航智能历时近 3 年	20
图 30: eVTOL 与其他出行方式对比	21
图 31: Joby S4 推进系统结构示意图	22
图 32: 特斯拉 Model X 动力系统结构示意图	22
图 33: Joby 自研航电系统.....	22
图 34: Joby 电机性能参数.....	24
图 35: Archer 电机设计示意图.....	24
图 36: Honeywell DENSO 电机	24
图 37: magniX 350 电机.....	24
图 38: 罗罗 EPU150 电机	25
图 39: Safran ENGINEUSTM 智能电机	25
图 40: HONDA 混合动力 eVTOL 结构和动力系统结构	26
图 41: 混合动力和纯电动 eVTOL 续航及航程对比	26
图 42: 根据驱动原理的不同, 混合动力包括串联、并联、串并联、涡轮等方式 ..	27
图 43: 不同动力类型的飞行器推进系统.....	28
图 44: 混合动力类型的最大起飞重量低.....	28
图 45: 混动和纯电机型对比: 飞行高度、飞行距离及载荷	29
图 46: 克莱因视觉 AirCar 型号.....	29
图 47: 吉利 Terrafugia TF-X 型号	29
图 48: 罗罗公司飞行汽车概念机	30
图 49: Elroy Air Chaparral 型号 eVTOL.....	30
图 50: Elroy Air 混合动力架构	30
图 51: 卧龙产品覆盖小、中、大三个功率等级航空电驱系统.....	32
图 52: 英搏尔的产品矩阵.....	32
表 1: 三种主流 eVTOL 构型优劣势	9
表 2: 部分 eVTOL 机型的电机电控情况梳理	10
表 3: 预计 2030 年全球 eVTOL 电机市场规模为 42 亿元.....	18
表 4: 当前市场主要航天电机型号及技术参数.....	23

表 5：部分其他混合动力飞行汽车型号及技术类型	30
表 6：相关标的公司估值表	33

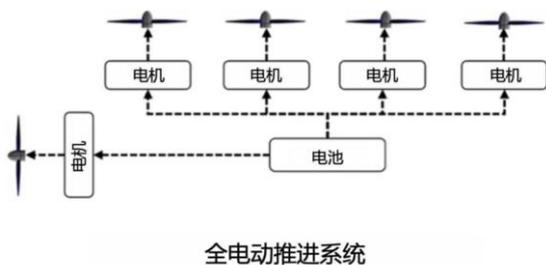
1. 低空经济：动力系统变革，产业发展迅速

1.1 低空经济：政策大力支持，产业稳定加速发展

利好政策频出，低空经济稳步快速发展。2023年12月，习总书记在中央经济会议提出，要打造低空经济等战略新兴产业；2024年起《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等相关法规正式实施；2024年3月，政府工作报告提出，要积极打造低空经济等新增长引擎。随后，多地发布支持低空经济的相关政策，低空经济进入发展快车道。

电动垂直起降飞行器（eVTOL）为低空领域主要产品形态，其驱动方式和能源形式发生变化。低空领域飞行载具主要为工业级无人机以及载人飞行器两类，其中，电动垂直起降飞行器（eVTOL）是载人飞行器是主要产品形态。eVTOL使用分布式电推进系统，替代传统飞机的燃气涡轮发动机。“分布式”是指从传统的集中式大功率燃气涡轮发动机推进改为总功率相同的若干小功率电机推进，“电推进”是指通过电动机驱动涵道式风扇、螺旋桨或者其他装置产生动力，从而将电能转化为机械能。

图 1：分布式电推进系统结构



资料来源：《分布式电推进飞机背景下的永磁同步电机电流控制研究》，申万宏源研究

图 2：NASA X57-Maxwell 采用分布式电推进系统



资料来源：NASA 官网，申万宏源研究

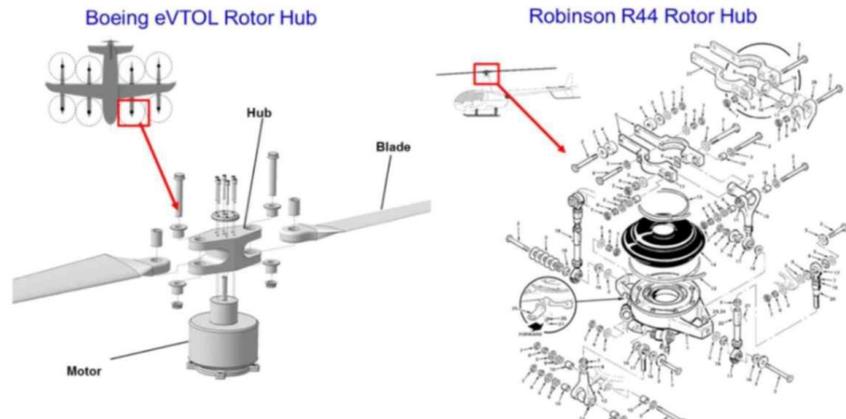
相比传统直升机，eVTOL 具有结构简单、效率、安全三方面的优势。

1) 结构简单：eVTOL 允许电气系统架构良好地交互，而无需相对复杂的机械部件，相比现有直升机或飞机控制更为简单；

2) 效率提升：eVTOL 允许飞机使用多个小型电机而不是一个大型电机，同时也允许机械结构增加电动机的总数，而无需牺牲重量。每个电机都能产生足够的推力来补偿其自身重量，其分布方式也使飞机能够实现整个飞机的最佳推力分布。NASA 和 Joby Aviation 的研究表明，分布式电推进技术的功率水平已达到与直升机相似的水平，但效率几乎是直升机的 3 倍；

3) 安全性高：eVTOL 包括一个由电动机、控制装置和电池结构组成的互连网络，使整个飞机都具有冗余性，发生故障概率降低，安全性大幅提高。

图 3：eVTOL 旋翼与传统直升机旋翼复杂度对比

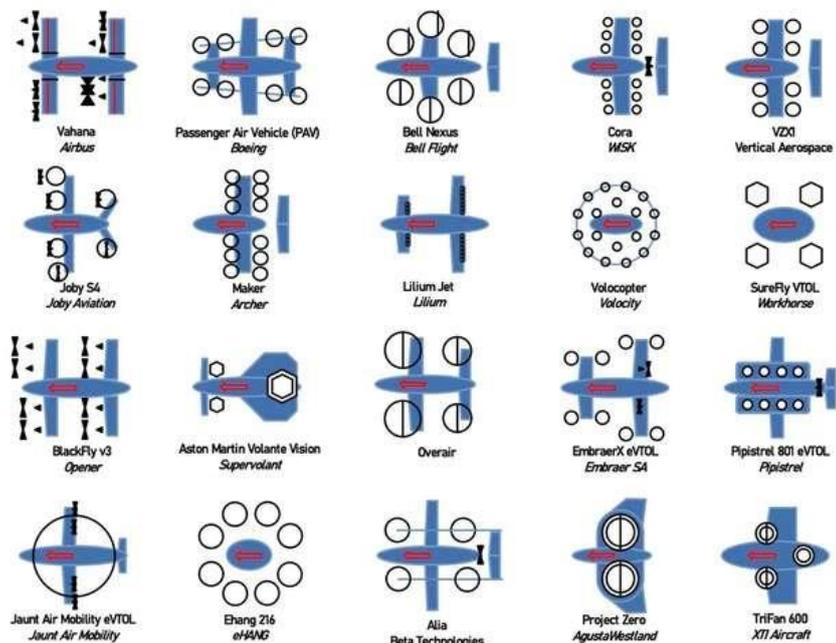


资料来源：A Study in Reducing the Cost of Vertical Flight with Electric Propulsion, 申万宏源研究

1.2 构型设计：三大主流构型，产品形态百花齐放

分布式电推进系统（DEP）技术使得飞行器的构型突破了传统架构的限制，eVTOL 机型设计多样化，不同产品都有各自独特的设计，产品形态百花齐放。

图 4：eVTOL 部分构型结构俯视图



资料来源：2022 eVTOL Design Short Course at SNU, 申万宏源研究

各类机型可总结为三大主流构型：多旋翼构型、复合翼构型、矢量推力构型/倾转构型。根据保时捷咨询和美国垂直飞行协会 2021 年对全球 eVTOL 制造商和机型的统计，

在 200 多个 eVTOL 型号中，40%为多旋翼构型，38%为矢量推力构型，22%为复合翼构型。

1) **多旋翼构型 (Multicopter)** 飞行器是由多个旋翼提供升力，通过调整各旋翼转速来控制姿态及讯飞，没有固定翼或倾转旋翼。

2) **复合翼构型 (Lift and Cruise)** 飞行器结合了多旋翼和固定翼的特点，垂直阶段和水平阶段使用不同的螺旋桨。在悬停和低速飞行时，飞机以垂直起降模式运行；在巡航时，由机翼提供升力，由水平推进螺旋桨提供向前的推力。

3) **矢量推力构型/倾转构型 (Vectored Thrust)** 飞行器有机翼和矢量推进器，推进器提供升力也帮助巡航，通过旋转（矢量控制）推力点来实现。矢量推力可能通过以下几种形式来实现：倾转旋翼-旋翼可以改变角度；倾转机翼-整个或部分机翼可以旋转；旋转涵道-涵道风扇可以倾斜来转换方向等。

图 5: eVTOL 机型总结为三种主流构型

	多旋翼	复合型	矢量推力
进入市场时间	认证快	认证较慢	认证慢
航行速度	~ 70-120km/h	~ 150-200km/h	~ 150-300km/h
航线	固定路线	随意路线	随意路线
潜在市场	~ 70% 城市内 0% 城际	100% 城市内 100% 城际	100% 城市内 100% 城际

资料来源：保时捷咨询，申万宏源研究

旋翼配置对飞机的航程、载荷、成本等方面有显著影响，不同构型各有优劣。机翼可以实现更高的巡航速度和更长的飞行距离；旋翼则提供了更好的机动性、悬停效率和垂直起降能力，但转子产生的升力会产生更多的阻力并产生更多的能量，从而降低飞行器的航程和有效负载能力。1) 多旋翼机型航程较短、速度较低，结构简单，技术实现难度低，成本较低、研发周期短；2) 复合型航程和巡航速度较高，结构较为复杂，生产维护成本和技术难度相对较低，有效载荷低；3) 矢量推力构型航程和巡航速度较高，有效载荷高，但倾转机械和电控系统复杂，开发难度大，成本高。

表 1: 三种主流 eVTOL 构型优劣势

构型	优势	劣势
多旋翼	作动盘大，悬停高效 操作性和机动性高，适合城市内飞行 由于具有多个旋翼，自稳性相对较高 机械结构相对简单，技术实现难度较低	受限于多个旋翼，能耗较高，限制了航程和续航能力 速度受限于空气动力学特性的限制，无法实现高速飞行 螺旋桨开放性设计，噪音较大，在事故时对地面人员伤害较高

复合翼	航程和巡航速度较高，可以实现中远距离出行及高速巡航 飞行控制系统和电控系统简单，技术门槛相对较低 生产于维护成本和难度相对较低 动力系统可在垂直起降和水平巡航之间转换 航程和巡航速度较高，具有高速和长距离飞行能力	垂直升力系统和平飞巡航时为“死重”，并产生额外阻力，有效载荷低；“死重”导致的推进系统动力低，爬升率和速度较低
矢量推力	倾斜旋翼构型可在城市垂直起降并长距离高速巡航，适应多种出行需求 倾转涵道构型气动效率更高，增程潜力大；噪音相对较低，私密性高；在事故时对地面人员伤亡较小	倾转机械和电控系统复杂，开发风险和试飞难度较大 研制风险和成本较高，开发周期和适航认证过程相对较长

资料来源：保时捷咨询，申万宏源研究

1.3 电机电控：核心动力系统，各家方案存在差异

电机和电控系统是飞行器的核心动力单元，决定了飞机的能源利用率和推进效能，与旋翼的分布紧密相关。不同构型和不同产品的机型差异较大，采取的动力结构、数量、分布、性能参数存在较大区别。我们对主流构型和具有代表性的机型进行梳理：

表 2：部分 eVTOL 机型的电机电控情况梳理

构型	型号	电机电控特点
多旋翼	亿航 EH216	自主研发电机，八轴十六翼结构
	Volocopter Volocity	自主研发电机，18 个旋翼采取圆形对称布局，后部旋翼面有额外安定面，类似垂尾和平尾
	小鹏汇天 X2	四轴八桨结构
	零重力飞机工业 ZG-ONE	六轴六桨结构，整体设计以太空登陆舱为原型
复合翼	Airbus CityAirbus NextGen	结构包括一对固定翼，一个 V 型的尾翼和 8 个电驱旋翼，100 千瓦的西门子 SP200D 直驱电动机驱动
	亿航 VT-30	8+1 旋翼布局，即八个垂起旋翼和一个水平推进翼。每个旋翼由一个电机驱动，并有一个倒 V 型设计的尾翼
	BETA Alia 250	4+1 旋翼布局，包括四个垂起旋翼和一个水平推进翼，电机由 BETA 完全自主生产
	峰飞 V1500M	8+2 旋翼布局，包括八个垂直旋翼和两个水平推进翼
矢量推力型	EVE Air Mobility	8+2 旋翼布局，包括八个安装在吊杆的垂直旋翼和两个安装在后尾翼的水平推进翼
	Joby S4	完全自研的电机电控系统，6 个可倾斜旋翼
	Lilium Jet	36 个可独立控制的襟翼，每个襟翼内包含一个涵道式螺旋桨并以 1:2 的比例嵌入前翼和主翼，襟翼由集成的伺服单元旋转
	沃飞长空 AE200	八个可倾转旋翼，采用了 X 型的尾翼设计

资料来源：各公司官网，申万宏源研究

(1) 多旋翼构型 eVTOL

多旋翼构型 eVTOL 由旋翼提供全部垂起和巡航动力，没有机翼。以四轴八桨的多旋翼构型为例，垂直动力系统由 8 套垂起电机、电动调节系统、远端电路单元 (REU)、电机冷却系统和螺旋桨组成。此构型的代表主机厂及飞行器型号包括：亿航的 EH216S，德国 Volocopter 的 VoloCity，小鹏汇天 X2 和零重力航空的 ZG-One 等。

1) 亿航 EH216 配备 8 轴、16 个桨，每个电机驱动一个旋翼。

亿航 EH216S 是全球首个获得适航认证的飞行汽车型号，其电机是由亿航智能自主研发和生产。EH216 是一款八轴十六桨的构型，配备了 16 个电机，每个电机驱动一个旋翼，形成分布式电推进系统。每对同轴旋翼构成一个故障冗余系统，这两个旋翼由两个不同的电机驱动。当其中一个电机发生故障时，连接到该电机的螺旋桨会停止运转，而连接到未损坏电机的螺旋桨则会提供通常由这一对同轴旋翼产生的全部推力。EH216 飞行时间约 25 分钟，最大载重 100 千克，最大速度 100 公里/小时，最大航程 35 公里。

图 6: 亿航 EH216 型号 eVTOL



资料来源: 亿航智能官网, 申万宏源研究

2) Volocopter Volocity: 圆形布局的 18 个电机，独特安定面设计。

德国的 Volocopter 所设计的 Volocity 配备了自主研发和生产的电机系统。其使用 18 个电机采用圆形对称布局驱动 18 个旋翼，与常见多旋翼相比，其最大的特征是在后部旋翼面下方多了个安定面，类似垂尾和平尾。电机朝固定角度倾斜安装，电机座横梁结构有翼型设计。用于降低巡航阻力，提高升阻比。Volocity 的续航时间约为 30 分钟，航程约 35 公里。其最高速度可达到 110 公里/小时。

图 7: Volocopter Volocity 型号 eVTOL



资料来源: Volocopter 官网, 申万宏源研究

3) 小鹏汇天 X2: 四轴八桨设计，配备 8 个电机。

小鹏汇天 X2 主要设计用于短途运输，帮助缓解城市地面交通拥堵。X2 采用了四轴八桨的设计，配备了 8 个电动机，最大飞行速度 130 公里/小时，飞行时间约为 35 分钟。

图 8: 小鹏汇天 X2 型号 eVTOL



资料来源：小鹏汇天官网，申万宏源研究

4) 零重力飞机工业 ZG-ONE: 小型六轴六桨多旋翼构型飞行器。

零重力飞机工业成立于 2021 年 3 月，2022 年 5 月发布了主要用于旅游场景的第一代 eVTOL 产品 ZG-ONE。ZG-ONE 整体设计以太空登陆舱为原型，采用了六轴六桨的动力布局，可搭载两人，最大续航里程 30 公里，续航时间 25 分钟，巡航速度 75 公里/小时。

图 9: 零重力飞机工业 ZG-ONE 型号 eVTOL



资料来源：零重力飞机工业官网，申万宏源研究

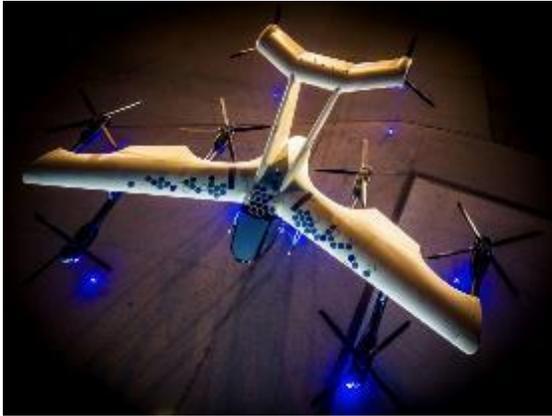
(2) 复合翼构型 eVTOL

飞行器结合了多旋翼和固定翼的特点，垂直阶段和水平阶段使用不同的螺旋桨。在起降阶段使用垂直推力，在巡航阶段使用水平推力，过渡阶段两者混合使用。这种构型具有高效巡航能力，因此受到众多主机厂青睐，代表型号为：空中客车 CityAirBus NextGen，亿航 VT30，峰飞 V1500M，沃兰特 VE25 和 BETA Alia 250 等。

1) 空中客车 CityAirBus NextGen: 八个旋翼由西门子特殊设计电机驱动。

CityAirBus 机型设计独特，包括一对固定翼，一个 V 型的尾翼和 8 个电驱旋翼，翼展长达 12 米，同时具备矢量推力、复合翼和多旋翼构型的特点。传动系统由 8 个螺旋桨和 8 个定制设计的 100 kW 的西门子 SP200D 直驱电动机组成，其扭矩密度达到 30Nm/kg。该机型最大起飞重量约 2.2 吨，续航里程 80 公里，巡航速度 120 公里/小时。

图 10: 空中客车 CityAirBus NextGen



资料来源：空客官网，申万宏源研究

图 11: 西门子 SP200D 直驱电机



资料来源：西门子官网，申万宏源研究

2) BETA Alia 250: 4+1 旋翼。

美国电动航空初创公司 Beta Technologies 成立于 2017 年，历经三年推出首架飞机 BETA Alia 250。BETA Alia 250 包含四个垂起旋翼、一个推进螺旋桨、一个高主拱翼、一个大 V 型尾翼，并有固定的四轮车轮式起落架。BETA Alia 250 配备 5 个电机，电机完全自主生产，确保完全为飞行器量身定制。BETA Alia 250 的最大起飞重量达到 2.7 吨，续航里程约为 463 公里，巡航速度可达 270 公里/小时。

图 12: BETA Alia 250 型号 eVTOL

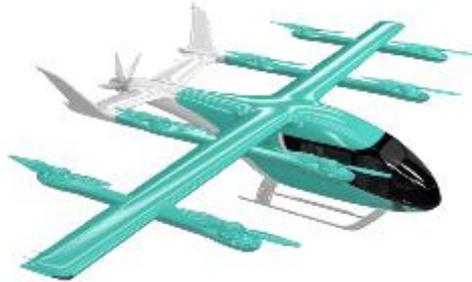


资料来源：Beta 官网，申万宏源研究

3) EVE Air Mobility: 8+2 旋翼布局，推进系统由多家大型供应商共同研发。

巴西航空工业公司控股的电动飞机制造商 EVE Air Mobility 通过与多家供应商的合作，研发了一款复合型 eVTOL，供应商包括利勃海尔，泰雷兹和 Flexjet 等。飞机有八个垂起旋翼和两个水平推进翼，航程大约 100 公里。

图 13: EVE Air Mobility 型号 eVTOL



资料来源：EVE 官网，申万宏源研究

4) 亿航 VT-30: 8+1 旋翼布局，双座载人复合构型。

除了专注于城市内空中交通的 EH 216 机型外，亿航在 2021 年推出长航距的双座载人级复合构型 eVTOL。亿航 VT-30 采用了八个垂起旋翼+水平推进翼+倒 V 型尾翼的结构，每个旋翼由一个电机驱动。VT-30 的最大航程为 300 公里，飞行时间为 100 分钟。

图 14: 亿航 VT-30 型号 eVTOL



资料来源：亿航智能官网，申万宏源研究

5) 峰飞 V1500M 盛世龙: 8 垂直旋翼+2 水平推进翼。

2021 年 9 月，上海峰飞首次在珠海航展上展示了其自主研发的 V1500M 型号 eVTOL。V1500M 共配有 10 个由单独电机驱动的旋翼，包括 8 个垂直旋翼和 2 个水平推进翼。飞机的飞行距离达 250 公里，巡航速度为 200 公里/小时，最大起飞重量 200kg，最大载荷 350kg。

图 15: 峰飞 V1500M 型号 eVTOL



资料来源: 峰飞官网, 申万宏源研究

3) 矢量推力型:

矢量推力构型 eVTOL 的推进器方向可以进行矢量控制。在起降和悬停阶段, 倾转系统将旋翼置于垂直位置, 飞行器类似于多旋翼飞行; 在巡航阶段, 倾转系统将旋翼或机翼置于水平位置, 飞行器相当于固定翼飞行; 在过渡阶段, 倾转系统将根据需要调节旋翼或机翼的角度。在垂直和水平阶段共用一套螺旋桨, 重量减轻, 在航程、巡航速度和载重比方面优势明显。另一种矢量推力构型为倾转涵道构型, 该构型将裸露在外的风扇结构装入涵道中, 在动力可靠性、地面伤害烈度、噪声控制、气动效率等方面实现了更好的平衡。但矢量推进的倾转机械结构对技术可靠性和飞行姿态控制要求高, 适航认证难度高。Joby, Lilium, Wisk 等主机厂均采用了此构型作为主要设计。

1) Joby S4: 完全自研的电机电控系统, 6 个可倾斜旋翼。

Joby 作为 eVTOL 领域的头部企业, 其整机总体方案经过了多种方案的迭代, 最终确定为现在的六倾转旋翼型。Joby 完全自主研发了整套动力系统, 包括电机、电池及航电电控。Joby 使用了 6 个倾斜旋翼, 位于外侧的 4 个旋翼与旋翼所在舱体机构一起倾斜, 位于内侧的 2 个旋翼采用独特的连杆机构, 使只有旋翼叶片倾斜而不会使旋翼所在舱体机构整个一起倾斜。其峰值功率达到了 236kW, 可提供约 160 公里的航程和 320 公里/小时的飞行速度。

图 16: Joby S4 型号 eVTOL



资料来源: Joby 官网, 申万宏源研究

图 17: Joby S4 旋翼及电机特写



资料来源: Joby 官网, 申万宏源研究

2) **Lilium Jet 推进系统包括多达 36 个涵道式螺旋桨。**根据 Lilium 首席执行官介绍, Lilium Jet 的推进系统由 36 个可独立控制的襟翼组成, 每个襟翼内包含一个涵道式螺旋桨, 12 个置于前翼, 24 个置于主翼。每个襟翼由集成的伺服单元旋转和驱动, 以控制悬停和巡航飞行。涵道风扇与开放式螺旋桨相比, 涵道和定子叶片的存在使得叶尖损失和涡流损失几乎被消除, 效率提高约 40%。Lilium Jet 的最大行程为 250 公里, 最大飞行速度为 300 公里/小时, 飞行时间为 60 分钟。

图 18: Lilium Lilium Jet 型号 eVTOL



资料来源: Lilium 官网, 申万宏源研究

图 19: Lilium Jet 涵道风扇示意图



资料来源: Lilium 官网, 申万宏源研究

沃飞长空 AE200: 八旋翼矢量推力构型。AE200 是成都沃飞长空自主研发的 5-6 座矢量推力构型 eVTOL。动力系统包括 8 个可倾转旋翼, 最新试飞机型相较前期机型, 新采用了 X 型的尾翼设计。飞机最大起飞重量达到 2500 千克, 巡航速度可达 248 千米/小时, 最大飞行高度为 1000 米, 最大航程 200 千米。沃飞长空 AE200 在 2024 年 6 月 23 日完成了全尺寸、全重量、全包线倾转过渡等一系列公开飞行试验的所有项目, 成为了中国首个完成此类试验的 eVTOL 企业。

图 20: 沃飞长空 AE200 型号 eVTOL



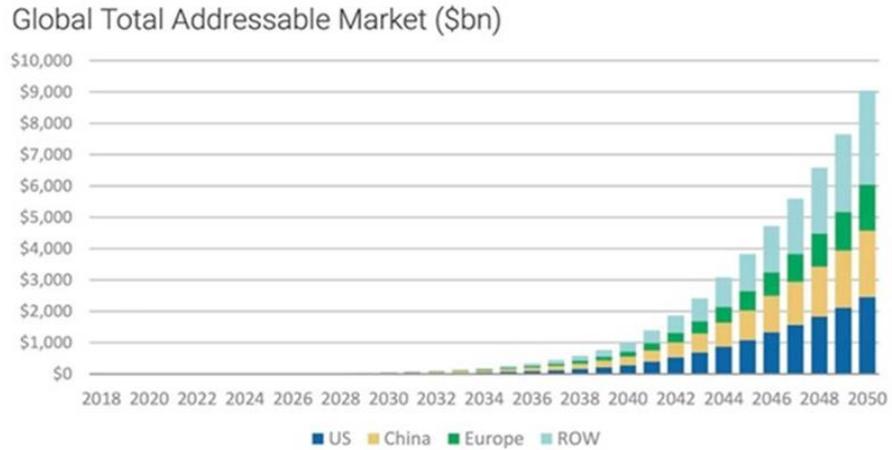
资料来源: 沃飞长空官网, 申万宏源研究

1.4 市场空间: 价值量占比高, 未来潜在空间巨大

eVTOL 未来应用前景广阔, 商业化快速推进。2021-2022 年全球仅有数千万美元订单预付款, 较为领先的玩家普遍预计在 2024-2025 年发布量产产品(部分已取得数十亿美元订单)。根据 Morgan Stanley 预测, 预计 2026 年全球 eVTOL 市场规模将达到

619 亿元，2040 年全球总体潜在市场规模为 1 万亿美元，2050 年将达到 9 万亿美元，中国将是全球最大的城市空中交通市场，预计中国市场占到全球的 20%-25%。按具体应用领域进行拆分，根据 Morgan Stanley、德勤等预测，2040 年 eVTOL 全球市场中 52% 为货运物流，46% 城市载人，3% 为城际通航和军政市场。

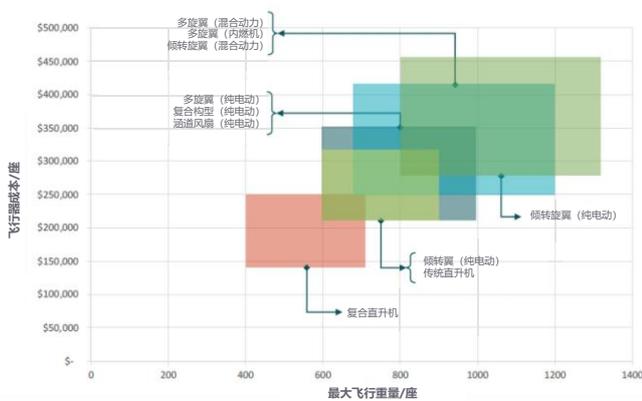
图 21: 2040 年全球 eVTOL 市场规模将超万亿美元



资料来源: Morgan Stanley, 申万宏源研究

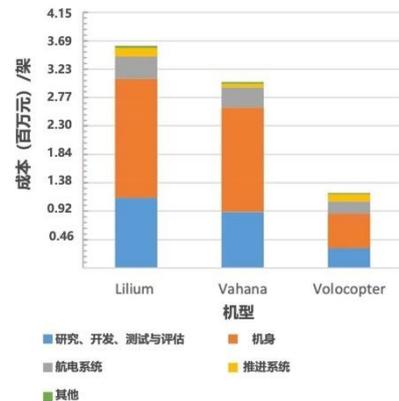
不同的技术路线/构型的机型，其成本的差异较大。根据论文《Cost Analysis of eVTOL Configuration Design for an Air Ambulances System in Japan》，以生产 60 架 eVTOL 为例，eVTOL 的生产成本包括 RDT&E（研究、开发、测试与评估）成本，制造成本（包括机身，航电和推进系统）以及额外成本（如降落伞），不同机型的总成本区别较大，制造成本约占总成本的 70%-75%。根据《2022 eVTOL Design Short Course at SNU》的研究结果，矢量构型中倾转旋翼的最大起飞重量最高，约为 360-590 千克，平均成本也为所有构型中最高，约为 27-45 万美元；其次为多旋翼、复合翼和涵道风扇构型；倾转机翼构型最大起飞重量最小，约为 270-450 千克，平均成本为 21-35 万美元。

图 22: 不同构型每座最大起飞重量和成本对比



资料来源: 2022 eVTOL Design Short Course at SNU, 申万宏源研究

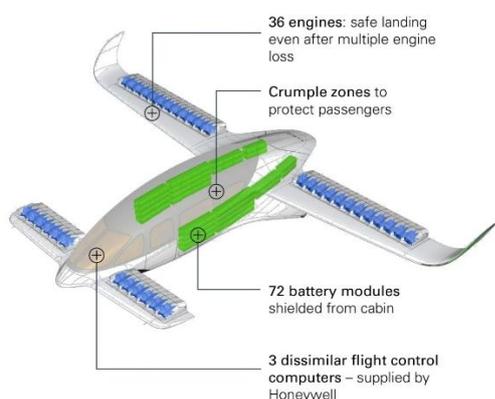
图 23: 三种型号 eVTOL 制造成本



资料来源: Cost Analysis of eVTOL Configuration Design for an Air Ambulances System in Japan, 申万宏源研究

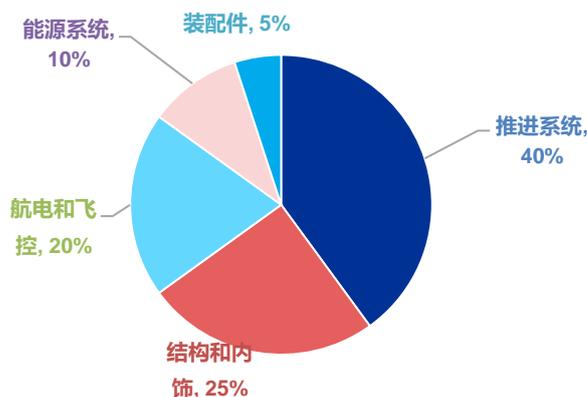
整个推进系统通常在 eVTOL 成本中占比 30%以上。以 Lilium 公司的 eVTOL 为例，根据官网介绍，Lilium 采用矢量推力构型，有 36 个分布式电机和 72 个电源模块为飞行器提供能源和动力，采用霍尼韦尔的 3 个飞控计算机。在 eVTOL 的成本构成中，推进系统（电池、电机、电控）占比最高，为 40%，结构与内饰占比 25%、航电与飞控占比 20%、能源系统占比 10%、装配件占比 5%。

图 24: Lilium 公司的 eVTOL 构造



资料来源: Lilium 官网, 申万宏源研究

图 25: Lilium 公司的 eVTOL 成本构成



资料来源: Lilium 官网, 申万宏源研究

根据测算，预计 2030/2040/2050 年全球 eVTOL 电机市场规模将达到 42/357/1890 亿元。核心假设：①根据 Roland Berger 预测，2030/2040/2050 年全球城市交通领域的 eVTOL 运营量分别为 5000 架/4.5 万架/16 万架，市场规模分别达到 20 亿/170 亿/900 亿美元；②假设 2030/2040/2050 年 eVTOL 单价分别为 280 万/264 万/394 万元，随着技术水平提高、规模增加，成本将有所下降，但远期随着应用场景向通航拓展，eVTOL 飞机的载人数量和平均单价将有所提高；③参考 Lilium 公司的成本结构，以及新能源汽车的电机的价值量占比约为 10%，eVTOL 的结构构成与新能源汽车相似度较高，假设电机成本占比为 10%；④由于航空飞机对于安全性要求极高，为了保证故障率降低到要求范围内，飞机全生命周期内通常要更换 3 次电机。

在政策推动之下，国内低空经济呈现加速发展态势，推动全球 eVTOL 行业快速发展，我们认为未来发展速度有望超过当前机构预测情况。

表 3: 预计 2030 年全球 eVTOL 电机市场规模为 42 亿元

	2030E	2040E	2050E
全球 UAM 规模 (万美元)	20	170	900
全球 evtol 运营量 (架)	5000	45000	160000
单价 (万元)	280	264	394
evtol 电机市场规模 (万元)	14	119	630
如果电机在全生命周期内更换 3 次:			
evtol 电机市场规模 (万元)	42	357	1890

资料来源: Roland Berger, 申万宏源研究 注: evtol 电机市场规模按美元汇率 7 来换算

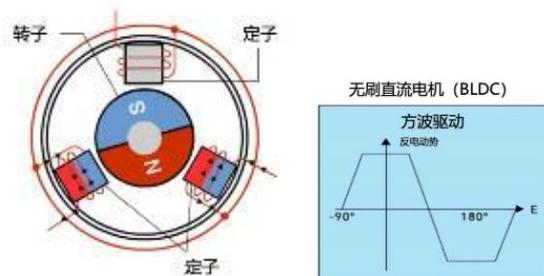
2. 竞争格局：壁垒和门槛高，竞争格局更优

2.1 进入壁垒：性能要求严苛，研发验证周期更久

电驱系统是 eVTOL 的核心动力来源，对于飞机性能至关重要。电机的功率密度直接影响着飞行汽车的有效载荷能力；电机的大范围变工况动力输出能力影响飞机的动力特性；电机的可靠性和环境适应性对飞机的安全性也有重要影响。

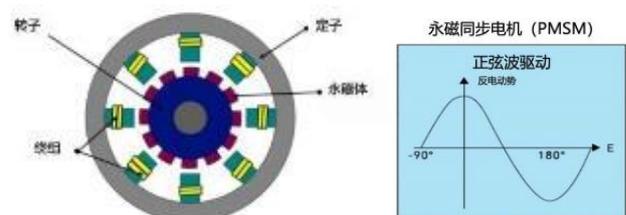
eVTOL 电机主要有两种类型：无刷电机和永磁同步电机。其中，无刷直流电机结构更简单成本更低，更适合无人机使用；永磁同步电机效率高噪音低，适合 eVTOL 运用场景。1) 无刷直流电机：由于省去了电刷和换向器，无刷直流电机具有效率高，维护成本低和寿命长等优点，但功率较小，适用于无人机；2) 永磁同步电机：基本结构与无刷直流电机相同，但其使用编码器测定转子位置并使用正弦波驱动电流。与无刷直流电机相比，具有更高、更平稳的扭矩、更高的效率和更低的噪音。并且其保持全扭矩的能力非常适合 eVTOL 在各阶段的动力要求。因此在 eVTOL 中，使用永磁同步电机较为常见，如 Joby S4、Archer Midnight 等均采用了永磁同步电机。

图 26：无刷直流电机 (BLDC) 结构示意图



资料来源：Blauberg 官网，申万宏源研究

图 27：永磁同步电机 (PMSM) 结构示意图



资料来源：Blauberg 官网，申万宏源研究

eVTOL 电驱电机的壁垒高，包括材料壁垒、设计壁垒、政策壁垒和应用壁垒等方面：

eVTOL 运营环境更复杂，电机需要具有更好性能和更高安全性。eVTOL 要求电机具有更高的功率密度，以在较小的尺寸和重量下提供足够的推力，并由于 eVTOL 对冗余性的额外需求，电控系统需要具备冗余设计，能够在部分系统失效的情况下继续安全运行，以确保飞行安全。此外，由于航空级电机所处工作环境与新能源汽车不同，其对于不同环境如高温、湿热、低温低气压、盐雾、臭氧、电磁兼容、振动等方面的要求较高。

功率密度要求高，提升难度较大。航空推进电机需要更高功率密度，而功率密度的提升来源于电机的电磁结构设计，或者材料改进，包括更高耐温极限的绝缘材料、更高磁能密度的永磁材料、更轻的结构材料，均存在较大挑战。

图 28: eVTOL 电机的技术壁垒

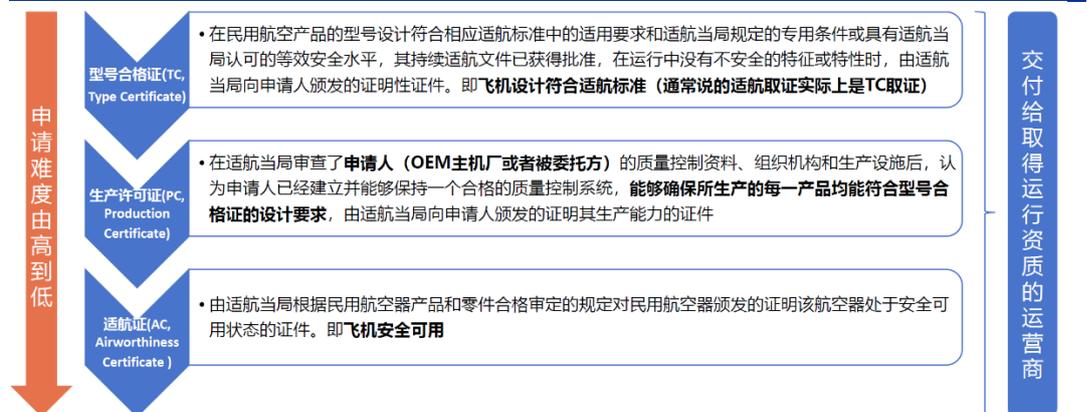


资料来源：申万宏源研究

eVTOL 市场尚处于起步阶段，主机厂进入壁垒高、研发周期长、适航取证难度大，配套供应商同样需要很长的研发和验证周期。目前亿航智能是全球首个同时取得型号合格证 (TC)、生产合格证 (PC)、适航证 (AC) 的公司，以亿航智能为例，其 EH-216 最早于 2018 年 2 月公开载人首飞，2020 年 12 月向中国民航局递交型号合格证申请，直到 2023 年 10 月，历时近 3 年时间才取得型号合格证。电驱系统作为核心动力单元，供应商需要在产品早期开发阶段就开始配合主机厂进行设计和研发，并参与后续适航取证过程，开发和验证周期很长；同时电机供应商在航空行业经验、航空级别的实验室和试验检测设备、高功率密度电机技术基础等方面也需要长时间和大量投入，才有机会得到下游主机厂认可。

根据国际民航组织对于民用飞行器的相关认证资质许可，其中包括 D0160, D0178, D0254 等标准，电机作为设备需通过 DO160 环境实用性测试，电控系统需要通过 DO-178 标准认证，对国内外主机厂及零部件供应商要求较高。

图 29: eVTOL 从生产到运营的取证过程，亿航智能历时近 3 年



资料来源：民航局官网、《中华人民共和国民用航空法》、《中华人民共和国适航管理条例》，申万宏源研究

2.2 横向对比：相比汽车行业，性能要求大幅提升

受益于新能源汽车三点系统的技术外溢，eVTOL 推进系统发展迅速，但在技术要求、设计复杂性和应用场景上与新能源汽车相比仍有不同。

(1) eVTOL 用于低空领域交通，对电机可靠性和安全性要求更高。eVTOL 飞行器主要用于城市空中交通、短途运输和空中出租车服务，可靠性和安全性至关重要，飞行器及核心部件需要满足航空级别的要求。相比之下，新能源汽车则主要用于地面交通，更注重高效的电能转换、较长的续航里程和快速充电能力，在可靠性和安全性方面的冗余要求相对较低。eVTOL 通常配备多个电机（4 个或更多），以实现分布式电推进系统，这不仅提高了飞行器的稳定性，还增强了其安全性。新能源汽车的电机数量通常为 1-2 个，多数乘用车采用单电机配置，而高性能或全驱车型可能采用双电机或四电机配置。

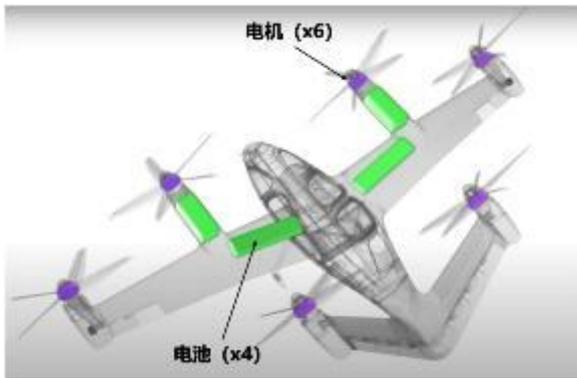
图 30：eVTOL 与其他出行方式对比



资料来源：保时捷咨询，申万宏源研究

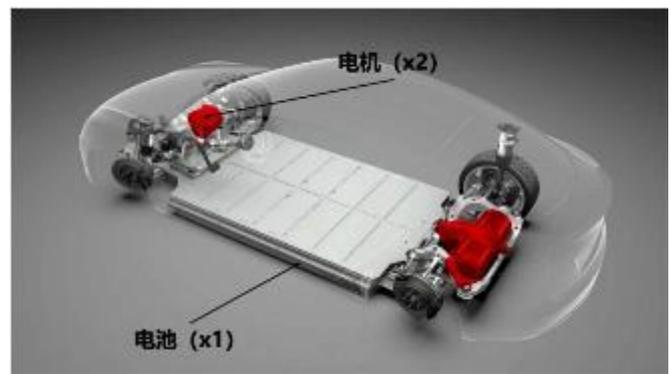
(2) eVTOL 所需电机电控系统性能要求更高。eVTOL 需要具备高效的垂直起降能力、稳定的悬停性能以及高效的巡航能力，对电机提出高功率密度和高效率的要求，因此电机通常采用无刷直流电机或永磁同步电机，能够提供足够的推力。eVTOL 电机仍然在努力提升功率密度，途径包括提升电磁设计技术、热管理技术和轻量化技术降低电机结构重量和散热系统辅助重量等；在冷却系统方面，由于电机在悬停和垂直起降时会产生大量热量，eVTOL 需要更高效的冷却系统。新能源汽车的电机技术已较为成熟，主要采用永磁同步电机或感应电机。

图 31: Joby S4 推进系统结构示意图



资料来源: Joby 官网, 申万宏源研究

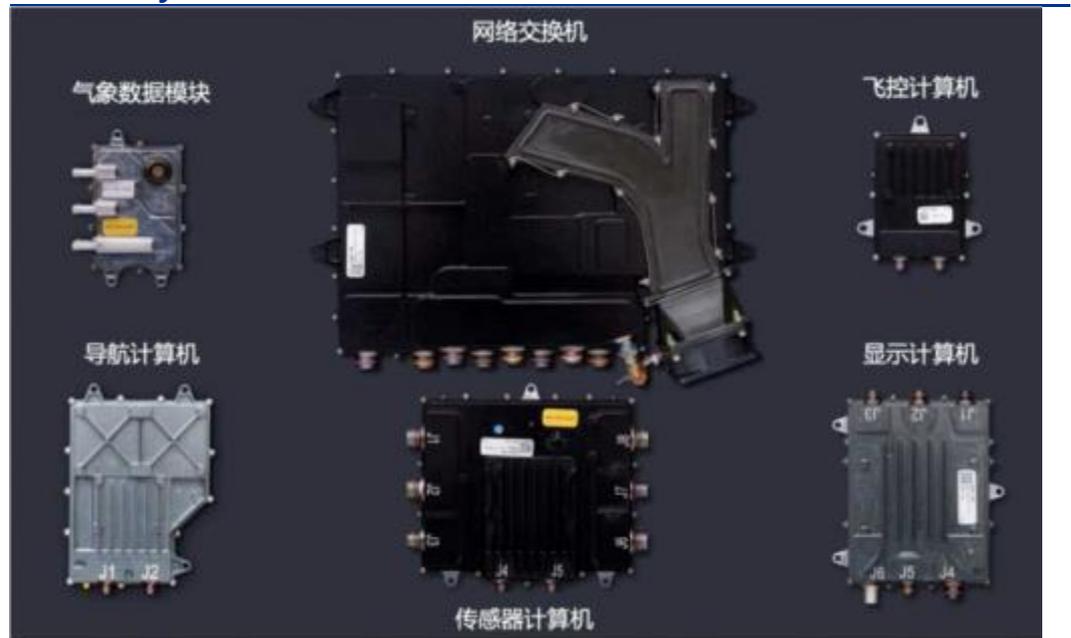
图 32: 特斯拉 Model X 动力系统结构示意图



资料来源: Tesla 官网, 申万宏源研究

(3) 电控系统: 飞行电控系统精度要求更严格, 以确保飞行安全。 eVTOL 的电控系统需要高度集成, 以实现多个电机的精确控制和协调。其飞行控制系统支持悬停、垂直起降和巡航等多种飞行模式, 并且必须具有高冗余性, 以确保任何单点故障不会导致飞行器失控。相比之下, 新能源汽车的电控系统则主要用于控制电机输出、能量回收和电池管理。车辆控制系统相对简单, 包含动力控制、稳定性控制和驾驶辅助系统, 复杂性较低, 目前技术相对成熟。

图 33: Joby 自研航电系统



资料来源: Joby 官方视频, 申万宏源研究

2.3 竞争格局：格局较为集中，自研与第三方共存

eVTOL 机电电控领域类似于新能源汽车行业，参与者包括主机厂自研自制与第三方供应商。但进入壁垒高于新能源汽车，因此竞争格局更为集中，参与者较少。

1) 主机厂自研：由于机电电控需随机型适航，准入门槛较高，供应商切换难度较大，部分主机厂选择了自主研发以及生产制造，完全适配自身的 VTOL 型号，如亿航智能，Joby 等。但这对于主机厂的设计、生产和制造能力要求较高。

2) 第三方供应商：大部分主机厂选择与第三方供应商合作，共同开发或改造适用于 eVTOL 电驱系统，如 Lillium 与霍尼韦尔，赛峰与时的科技，卧龙电驱与商飞、沃飞等。第三方供应商往往深耕工业或者航空发动机行业，在电机设计、制造和性能优化方面具有深厚的经验，可以针对下游客户产品的特征和需求做定制化设计，帮助客户提升飞行器的整体性能和可靠性，降低设计和制造成本、缩短研发周期、优化供应链管理。

表 4：当前市场主要航天电机型号及技术参数

制造商	主机厂	质量	额定功	额定扭	转速	功率密度	扭矩密度
			率	矩			
			(kW)	(Nm)	(rpm)	(kW/kg)	(Nm/kg)
Joby	Joby (自研)	28	236*	1800*	745	8.43	64.29
Archer	Archer (自研)	25	125	-	-	5	-
霍尼韦尔 DENSO	Lillium, Eviation, Faradair	4	100	-	-	25	-
magniX (magni350)	Eviation, Harbour Air	128	350	1608	2300	2.73	12.56
magniX (magni650)		206	700	3216	2300	3.4	15.61
罗罗 (EPU150)	Vertical Aerospace, 空客	38	150	1300	1100	3.95	34.21
罗罗 (EPU320)		140	320	1329	2300	2.28	9.49
赛峰 (ENGINEUSTM)	时的科技	28	100	-	3500	3.57	-
EMRAX (268)	Vertical Aerospace	22.3	117	250	4500	5.24	11.21
EMRAX (348)		43.9	210	500	4500	4.78	11.39
YASA	-	28.2	60	200	8000	2.13	6.99
天津松正 (SZ-240)	-	75	240	2500	3200	3.2	33.3
卧龙电驱	沃飞长空, 商飞	-	30	-	2500-4000	-	-

资料来源：各公司官网，申万宏源研究，注：Joby 数据均采用峰值功率计算

(1) 主机厂自研：

1) Joby 依靠企业内部大量来自军工企业、特斯拉、苹果的企业的工程师、设计师和研发人员，开发了完全自研的机电电控系统。根据 Joby 公布的性能参数，其电机峰值扭矩达 1800Nm，持续扭矩达 1380Nm，高扭矩用于平衡低桨叶转速。在相同的输出轴功率下，扭矩和转速呈反比。Joby 的电机和桨叶采用直驱的形式，并没有采用减速齿轮组的设计，降低了电机的维护成本。每个电机均采用了双绕组直驱的驱动方式，对应的两个逆变器各由两个独立的电池供电从而防止电池故障蔓延。在任何一个推进电机、逆变器或电池包失效的情况下，飞机仍然可以安全飞行，从而使得整架飞行器不存在单点故障。

2) Archer 自主研发其 eVTOL 电机。Archer 的电机重量 25 公斤，峰值输出功率 125kW，功率密度 5kW/kg，比现有的飞机和新能源汽车电机重量更低、功率密度更高。

图 34: Joby 电机性能参数



资料来源: Joby 官方视频, 申万宏源研究

图 35: Archer 电机设计示意图



资料来源: Archer 官方视频, 申万宏源研究

国内部分主机厂同样采用了自研电机电控的方案。例如，亿航的电机系统为无刷直流电机并采用共轴双桨的设计，节约了螺旋桨和电机安装所需的空间和结构零件，并降低了飞行器重量。通过无感 FOC 驱动器控制使其具有高功率，发热率低的特点。

(2) 第三方供应商:

1) 霍尼韦尔 (Honeywell) 作为全球领先的航空航天系统供应商，通过与电装公司 (DENSO) 的合作，共同研发了适用于 eVTOL 的电机及电推进技术，并与 Lilium, Eviation 和 Faradair 等主机厂展开了合作。其电力推进装置将电机控制器、齿轮组件和高功率密度电机组合在一个集成封装中，峰值功率达到了 100kW。

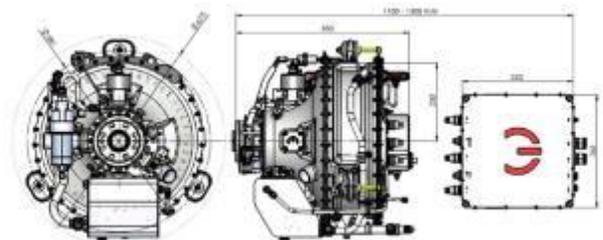
2) 马达动力 (magniX) 是一家专注于电动航空推进系统的公司，以高性能电机和创新技术而闻名。其电动推进系统具有模块化设计，能够灵活适应不同类型和尺寸的 eVTOL 飞行器。magniX 的电动推进系统包括其标志性的 magni350 和 magni650 电机。与马达动力合作的主机厂包括 Eviation, Harbour Air 等。

图 36: Honeywell|DENSO 电机



资料来源: 霍尼韦尔官网, 申万宏源研究

图 37: magniX 350 电机

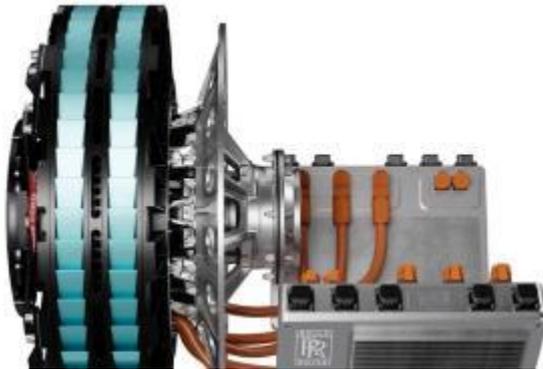


资料来源: E-Mobility Engineering, 申万宏源研究

3) 罗罗 (Rolls-Royce) 为 Vertical Aerospace 的 VA-X4, 空客的 CityAirbus 等均提供电动推进系统。其中包括一个由 200 kW 的电机, 以及相关电力电子设备、控制器以及电力保护和分配系统, 用来产生、分配和管理机电设备所需的高扭矩。

4) 法国的航空设备制造商赛峰 (Safran) 为时的科技 E20 eVTOL 提供电机。其 ENGINeUS™ 智能电机最大转速达到 3500 RPM, 峰值功率密度为 5 kW/kg。起飞时最大输出功率可以超过 100kW, 包含一套完全集成的电机控制器。

图 38: 罗罗 EPU150 电机



资料来源: 罗罗官网, 申万宏源研究

图 39: Safran ENGINeUSTM 智能电机



资料来源: Safran 官网, 申万宏源研究

国内航空级电机主要供应商包括卧龙电驱, 江苏迈吉易威, 天津松正, 深圳北极鸥等, 国内 eVTOL 电机配套产业大多和无人机行业相混合, 针对航空级标准的供应商较少。

卧龙电驱与商飞、吉利沃飞等企业建立了合作关系, 在航空级电机方面处于行业领先地位。卧龙采用了“3+1”的产品布局, 即小、中、大三个功率等级的驱动产品及一个适航标准。其中小功率产品 (2kW~30kW) 应用于工业无人机及 1-2 座 eVTOL。中功率产品 (50kW~175kW) 应用于 4 座载人 eVTOL。

其他国内企业如江苏迈吉易威, 目标客户群体偏向于军方, 从事于军用高功率密度轮毂电机系统并在中国电机博览会展出了多款航空电推进产品; 天津松正针对载人级电动航空领域专注于高效功重比的电推进系统的开发, 在纯电驱多旋翼垂直起降、涵道风扇等不同构型的飞行器均有研究及产品应用; 深圳北极鸥非晶动力与中研非晶合作, 共同开发及量产了非晶无人机盘式电机; 产品已应用至小鹏汇天 X2。

3. 混合动力: 低空飞行的另一种解决方案

3.1 混合动力: 弥补纯电劣势, 续航能力优势明显

纯电驱动的效率, 但能量密度低, 针对中长距离的低空出行, 纯电动目前还不具备可行性。若仅考虑单独部件效率, 传统推进系统 (内燃机) 的效率约为 20%-36%, 而电

推进系统（电池和电机）的效率可以达到 75%-83%，是内燃机的 3 倍。然而电池最高声明的电池能量密度比内燃机的喷气燃料低约 30 倍，因此内燃机与电推进系统的推进功率比将转变为约 10:1，这限制了纯电动飞机的续航里程和飞行时间。纯电动飞机要想达到传统飞机 25-50%的航程，其电池能量密度需要超过 1000Wh/kg，现有电池无法达到。

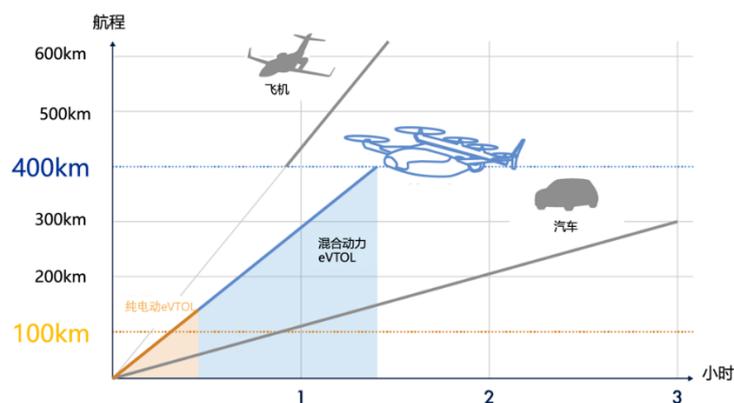
混合动力是低空领域的另一种驱动方案，作为纯电方式的补充，其性能和前景类似于新能源汽车混合动力。全球多家飞机制造商，如波音、空客、巴西航空工业公司，以及罗罗、西门子、美国宇航局、代尔夫特理工大学和德国航空航天中心等企业和机构致力于开发混合动力飞机。**国内政策也在鼓励以混合动力研究方向。**工信部《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》中提到，以电动化为主攻方向，兼顾混合动力、氢动力、可持续燃料动力等技术路线，并开展 400kW 以下混合推进系统研制。

图 40: HONDA 混合动力 eVTOL 结构和动力系统结构



资料来源: Honda 官网, 申万宏源研究

图 41: 混合动力和纯电动 eVTOL 续航及航程对比



资料来源: Honda Technology, 申万宏源研究

根据驱动原理的不同，混合动力包括串联混合动力、并联混合动力、串并联混合动力、涡轮电动混合动力等：

1) **串联混合动力**：内燃机驱动发电机，发电机输出的电驱动电机，电机连接旋翼。在需要低推进力的飞行阶段（例如巡航阶段），发电机转换的能量也可以为电池充电。优

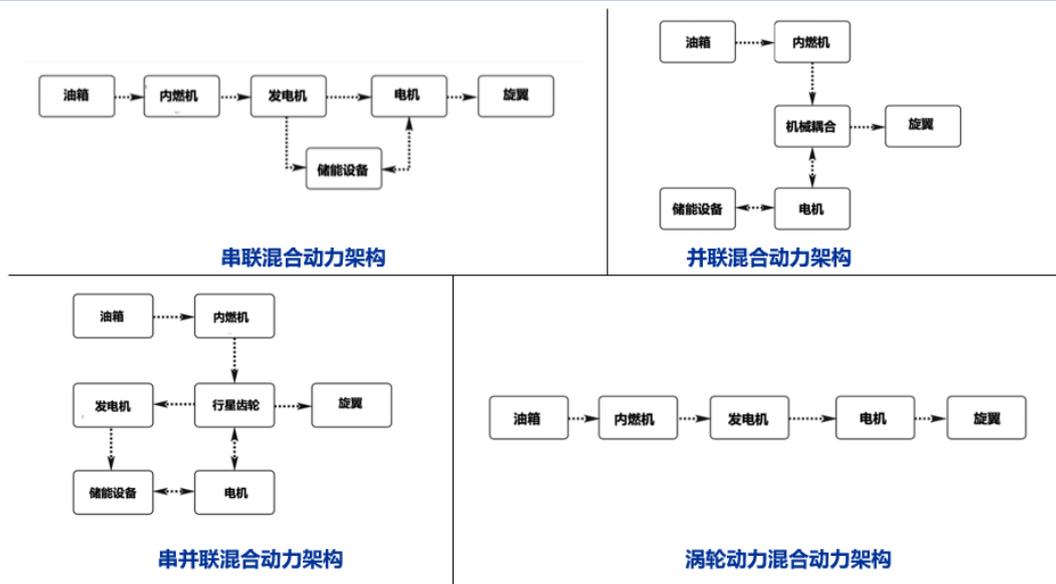
点在于，内燃机不与推力产生机械耦合，始终以最佳运行功率和速度运行；概念简单，易于控制推进力。缺点在于，电机必须单独提供整个推进力，需要使用高功率电机和更大的电池，这会增加传动系统的重量和体积。

2) 并联混合动力：内燃机和电源并联驱动，并以机械耦合，可以单独或共同提供推进力。优点在于，内燃机的轴上没有发电机，机器的尺寸可以更小；因为推进力由两者提供，重量也相应减轻。缺点在于，机械耦合增加了额外的质量；推进控制系统更复杂，由于内燃机参与推进，在不同的飞行阶段的运行效率需要优化。

3) 串并联混合动力：内燃机、电机、发电机和螺旋桨通过联轴器机械连接。内燃机的机械动力可用于驱动螺旋桨，或通过发电机转换为电能为电池充电。优点在于，允许在运行期间轻松改变拓扑结构，并且是混合动力汽车中最常用的架构。缺点在于，在控制和重量预估方面复杂性过高，技术难度大。

4) 涡轮电动混合动力：与串联类似，但不依赖电池来提供推进能量，由内燃机驱动发电机，所有电力都来自燃料，没有额外的储能设备。与串联一样，将内燃机推进器与电磁推力产生装置分离可提高推进性能，内燃机可以在接近其峰值效率功率与速度条件下运行，并且可以位于飞机的最佳位置，其电力被分配到多个电机驱动的旋翼。

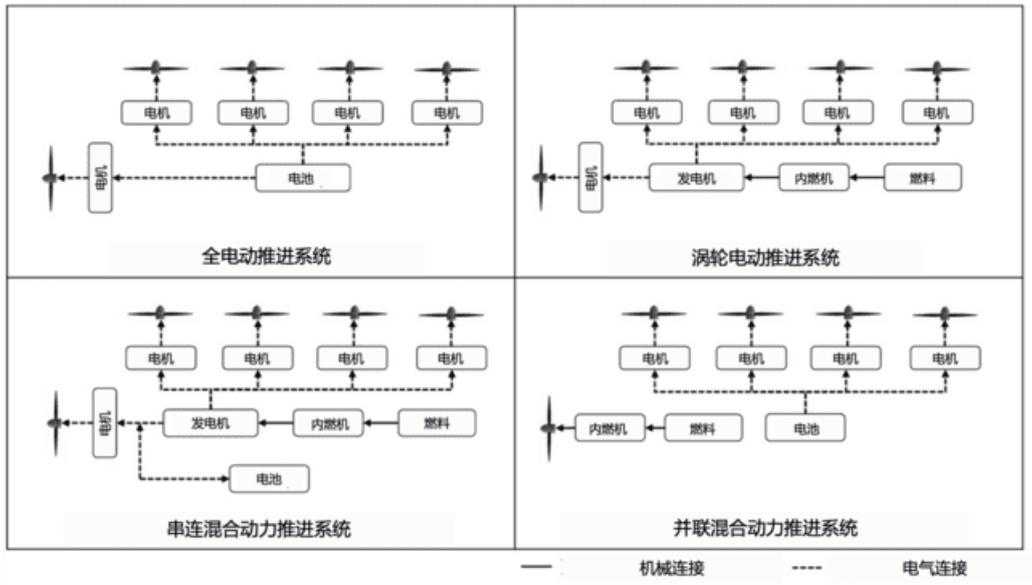
图 42：根据驱动原理的不同，混合动力包括串联、并联、串并联、涡轮等方式



资料来源：Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems, 申万宏源研究

不同的混合动力所用能源系统存在差异。涡轮电力推进系统和全电力推进系统为单一能源系统；并联混合动力系统垂起过程和水平推进过程相互独立，垂起过程的电力需求由电池提供，水平推进过程的电力需求由内燃机提供；串联混合动力系统内燃机和电池可同时工作，因此其机理比其他推进系统更为复杂。

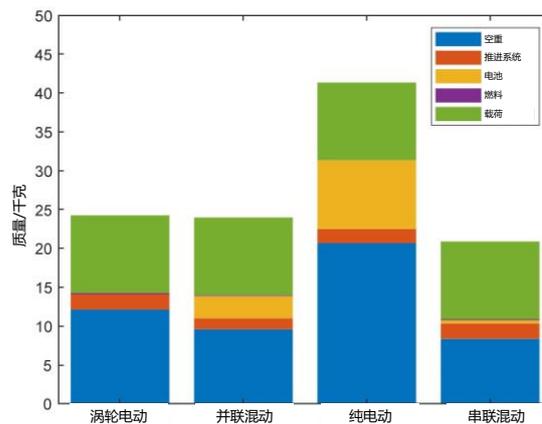
图 43：不同动力类型的飞行器推进系统



资料来源：Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems, 申万宏源研究

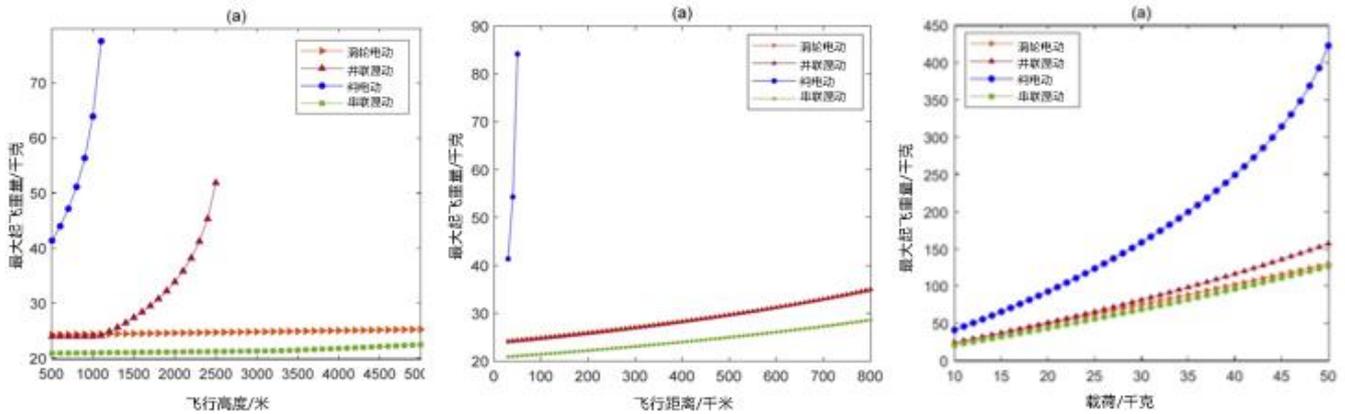
混合动力结合了传统燃油飞机的特点，相比纯电动飞行汽车的性能优势明显：最大起飞重量和电池重量降低、巡航高度更高、巡航距离更长、载荷能力更强。参考 Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems 的对比实验，以无人机为例：1) 在固定的性能要求和飞行参数下，混合动力类型的最大起飞重量和电池重量更低；2) 巡航高度更高：全电动飞行器的最高巡航高度仅 1100m，并联混合动力飞行器为 2500m，涡轮电动和串联混合动力均超过 5000m；3) 巡航距离远高于纯电方式；4) 载荷能力强，最大飞行重量对载荷的敏感度低。

图 44：混合动力类型的最大起飞重量低



资料来源：Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems, 申万宏源研究

图 45：混动和纯电机型对比：飞行高度、飞行距离及载荷



资料来源：Evaluation and Comparison of Hybrid Wing VTOL UAV with Four Different Electric Propulsion Systems, 申万宏源研究

3.2 产业进展：目前玩家较少，处于早期研发阶段

全球多家飞机制造商，企业和机构在推进全电动垂直起降飞行器（eVTOL）之外，也在同时致力于开发混合动力飞机或飞行器，但目前进度基本处于概念或早期研发阶段。

1) **克莱因视觉 Klein Vision**：斯洛伐克公司克莱因视觉开发的 AirCar 飞行汽车采用了混合动力设计，搭载宝马一款 160 马力汽油发动机。其电推进系统采用了可伸缩机翼、折叠尾翼、降落伞展开等设计，折叠尾翼有助于实现更好的纵向稳定性和起飞特性。其设计最高时速 250 公里，飞行最高高度 3000 米，航程可达 1000 公里。

2) **吉利**：吉利旗下的 Terrafugia 公司所设计的 TF-X 型号飞行汽车采用混合动力驱动。TF-X 搭载两台插电式混合动力 500 千瓦电动机并以此驱动两个旋翼，车上配有一台 300 马力的内燃机为电池充电，同时驱动涵道风扇的运转。

图 46：克莱因视觉 AirCar 型号



资料来源：克莱因视觉官网，申万宏源研究

图 47：吉利 Terrafugia TF-X 型号



资料来源：公司官网，申万宏源研究

3) **罗罗**：罗罗是英国老牌发动机公司，2018 年宣布其混合动力飞行汽车项目。概念机采用混合动力系统，使用 RR Model 250 为倾斜机翼上的四个螺旋桨和倾斜尾翼上的两个螺旋桨发电。飞机可以搭载 4-5 名乘客，速度 400 公里/小时，飞行里程约为 800 公里。

图 48: 罗罗公司飞行汽车概念机



资料来源: 罗罗官网, 申万宏源研究

4) **Elroy Air: Chaparral** 是一款混合动力货运 eVTOL, 采用了八个垂起旋翼和四个水平旋翼的配置。其独特的设计在于中央机身下方有一个可携带 300 磅 (136 公斤) 货物的吊舱。拥有一个矩形细长的空气动力学形状的机身和 T 型尾翼, 并配有固定的四轮式延伸起落架。起落架横跨吊舱。动力方面采用了涡轮发电机混合动力架构, 通过将燃气涡轮驱动的发电机与电池相结合解决了全电动系统的局限性。其最大续航里程 483 千米, 巡航速度约 230 公里/小时。

图 49: Elroy Air Chaparral 型号 eVTOL



资料来源: Elroy Air 官网, 申万宏源研究

图 50: Elroy Air 混合动力架构



资料来源: Elroy Air 官网, 申万宏源研究

表 5: 部分其他混合动力飞行汽车型号及技术类型

型号	构型	动力类型	续航里程/km	载人数/位
NEX Aero GmbH NEX	复合翼	氢动力	400	4
Ascendance Flight Technologies ATEA	复合翼	混合动力	450	3
Horizon Aircraft Cavorite X-5	复合翼	混合动力	500	4
Alaka' i Technologies Skai	多旋翼	氢动力	640	4
Bell Textron NEXUS 6HX	矢量推力	混合动力	240	4
Zuri SE Zuri 2.0	矢量推力	混合动力	700	4

Dufour Aerospace Aero3	矢量推力	混合动力	800	7
Transcend Air Corporation Vy 400R	矢量推力	混合动力	800	5
Urban Aeronautics CityHawk	多旋翼	氢动力	145	4

资料来源：A holistic review of the current state of research on aircraft design concepts and consideration for advanced air mobility applications, 申万宏源研究

尽管混合动力 eVTOL 在续航、性能、补能等方面相较当前纯电 eVTOL 技术具有明显优势，但市场上从事混合动力 eVTOL 研发的企业仍然相对较少，背后原因可能在于：

- ① **技术挑战：**混合动力系统的设计和集成相较纯电动系统更为复杂。需要同时管理传统燃油发动机和电动机，对初创 eVTOL 主机厂来说，这会导致更高的研发难度和更长的开发周期。
- ② **成本原因：**混合动力系统的开发和制造成本较高，需要同时拥有出色的内燃机和电动机及联动系统技术。相较之下，纯电动系统的研发成本更低，且第三方供应商电池和电机技术更为先进，成本更低。
- ③ **市场需求和监管因素：**当前市场对零排放、低噪音的电动航空器有着强烈的需求。纯电动 eVTOL 能够提供更为环保和安静的解决方案，符合许多城市和政府可持续发展目标。与早期新能源汽车类似，纯电动方案更符合监管机构倾向的路线。

4. 投资提示

4.1 产业链相关公司梳理

(1) 卧龙电驱：全球领先的电机制造商，前瞻布局低空经济赛道

卧龙电驱成立于 1984 年，并于 2002 年在上交所上市。主要生产项目包括各类电机、发电机，控制驱动及工业自动化产品。并在中国、越南、德国、英国等多个国家拥有 42 个制造工厂和 5 个技术中心。根据 Omdia 统计，其中高压和低压工业电机全球市场份额分别为 11.5%和 7.5%，位列全球第一和第四。并通过与商飞、吉利沃飞等公司的合作，开始布局低空经济领域。

卧龙公司从 2019 年起开始投入研发航空电驱系统，并逐渐形成小、中、大三个航空电驱系列产品及一个民航适航标准的“3+1”战略布局。小功率产品主要应用于工业无人机及少座 eVTOL，目前已开始向国内主流物流无人机企业小批量供样；中功率产品覆盖 50-175kW 功率，主要应用在四座载人 eVTOL，与国内主流 eVTOL 制造企业均有技术沟通，并正在进行相关研发项目；大功率产品为 200kW 以上，主要应用于民用航空领域，用于多乘客的直线飞机，目前以预研为主。

图 51: 卧龙产品覆盖小、中、大三个功率等级航空电驱系统

卧龙策略	暂不介入	定制化 差异化	适航审定与体系	
技术要求	30W-3kW 24V/100V	4kW-30kW 100V/350V	50kW-175kW 600V/800V	4kW-30kW 100V/350V
业务场景	无人机 航拍、植保无人机、 巡检、测绘、任务载荷等	工业无人机及1-2座eVTOL ➢ 物流运输	4座载人eVTOL 通用航空	19座 支线飞机
	微功率	小功率	中功率	大功率
	2021年	2025年	2028年	2035年

资料来源：卧龙官网，申万宏源研究

(2) 英搏尔：新能源汽车动力系统供应商，具备技术迁移能力。

珠海英搏尔成立于 2005 年，是新能源汽车领域动力系统领域领先企业，2017 年在深交所创业板上市。公司深耕新能源汽车动力系统近 20 年，目前已具备新能源汽车电驱系统和电源系统自主开发的能力。根据公告，公司与吉利、上汽、长城、小鹏、江淮等车企有长期合作关系。公司拥有珠海和山东两大生产基地，具备年产百万套产品的生产能力。同时在珠海、上海、北京和深证等地设有研发中心和研发部门，具备先进和专业的研发能力。

根据公司互动平台的回答，近年来公司密切关注各地低空经济政策的发展及电动化发展趋势，与多家通航企业、初创主机厂及拥有车企背景的整机厂商展开多次技术探讨。其产品的轻重量，高效率，小体积等特性符合 eVTOL 市场对动力系统的要求，并基于其出色的驱动系统和电源系统技术和设计实验能力，有望为低空领域提供系统解决方案。

图 52: 英搏尔的产品矩阵



资料来源：英搏尔公告，申万宏源研究

(3) 宗申动力：深耕发动机领域，推出系列航空动力产品

宗申动力成立于 1982 年，制造工厂遍布国内的重庆、广东、江苏、河北、天津和国外的越南、泰国、墨西哥等地，产品出口 180 多个国家和地区。其产品以发动机为主，在摩托车动力、通机动力、船艇动力等中小型发动机领域技术优势明显。近年来宗申转型聚焦于高端制造和绿色制造两条主线。在新能源领域布局发卡电机、电控、CVT 变速器等新能源核心部件，并已投资开展储能新技术项目。

宗申创新研究院（宗申集团技术中心）是宗申创新平台和战略驱动动力源。根据公司公告，公司于 2004 年成为国家认定的企业技术中心，2005 年其检测中心被录入国家实验室名录，2017 年被认定成为国家级工业设计中心，2018 年认定成为重庆市新型高端研发机构。截止 2023 年，宗申拥有各类专利超过 5600 项，并主持和参与制定了大量国家标准和行业标准。

根据公司在互动平台的回答，公司承办了首届重庆低空飞行消费周活动，其控股子公司宗申航发致力于航空发动机设计研发、生产制造、销售、售后服务等一体化业务，主要为旋翼、固定翼的通航飞机和无人机等航空飞行器提供动力装备，产品应用场景与低空经济发展方向吻合。

(4) 应流股份：航空零部件及装备制造商，产品出口欧美多家企业

安徽应流股份 1990 年起进入铸造行业，2014 年在上交所上市。公司主营业务涵盖高端部件、航空科技和先进材料三大领域。根据公司公告，2023 年公司航空航天新材料及零部件业务实现营收 7.88 亿元。

公司 2016 年收购德国 SBM 公司并成立应流航空，开始进军航空发动机整机及配套直升机、无人机领域。根据公司公告，公司目前已建成 8 栋高标准厂房及 4 个投入使用的发动机试车台；并已深入研发 100kW-300kW 级涡轴发动机和 400kW 以下混合动力总成，同时已完成起飞重量 270 千克和 1000 千克两款无人直升机的开发；2024 年计划完成起飞重量 600 千克无人机的研发和产品鉴定。

4.2 相关标的公司估值表

表 6：相关标的公司估值表

公司代码	公司简称	2024/7/10	EPS (元/股)				PE				PB
		收盘价 (元/股)	23A	24E	25E	26E	23A	24E	25E	26E	
600580	卧龙电驱	11.63	0.40	0.89	1.04	1.19	29	13	11	10	2
300681	英搏尔	12.60	0.33	0.33	0.68	0.88	39	38	19	14	3
001696	宗申动力	10.42	0.32	0.57	0.64	0.73	33	18	16	14	2
603308	应流股份	11.72	0.45	0.62	0.78	0.95	26	19	15	12	2

资料来源：iFinD、申万宏源研究 注：盈利预测均为 iFinD 一致预测

5. 风险提示

(1) 政策效果不及预期风险

低空经济发展首先需求充足的空域资源，若低空开放缓慢，或将拖累低空经济产业链上游发展。政策制定与实施可能受到技术壁垒、市场需求变化、监管要求等多重因素影响，导致推进速度放缓或效果不佳。

(2) 市场竞争加剧风险

随着 eVTOL 行业和低空经济高速发展，市场空间不断增加，吸引众多新玩家参与市场竞争。如果市场参与者数量快速增加，将会导致整机、基础建设和电推进系统等各环节的竞争格局变差，甚至导致低价竞争，压缩全行业的利润空间。

(3) 技术突破、研发和商业化进程不及预期风险

eVTOL 用分布式电推进系统目前尚处于理论和原型机阶段，还未真正实现大规模商业化，分布式电推进系统实际飞行效果尚不明确，若研发和商业化过程比预期缓慢，将会导致 eVTOL 整机的放量进度放缓。

信息披露

证券分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

与公司有关的信息披露

本公司隶属于申万宏源证券有限公司。本公司经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司关联机构在法律许可情况下可能持有或交易本报告提到的投资标的，还可能为或争取为这些标的提供投资银行服务。本公司在知晓范围内依法合规地履行披露义务。客户可通过 compliance@swsresearch.com 索取有关披露资料或登录 www.swsresearch.com 信息披露栏目查询从业人员资质情况、静默期安排及其他有关的信息披露。

机构销售团队联系人

华东组	茅炯	021-33388488	maojiong@swwhysc.com
银行团队	李庆	021-33388245	liqing3@swwhysc.com
华北组	肖霞	010-66500628	xiaoxia@swwhysc.com
华南组	李昇	0755-82990609	lisheng5@swwhysc.com
华东创新团队	朱晓艺	021-33388860	zhuxiaoyi@swwhysc.com
华北创新团队	潘烨明	15201910123	panyeming@swwhysc.com

股票投资评级说明

证券的投资评级：

以报告日后的 6 个月内，证券相对于市场基准指数的涨跌幅为标准，定义如下：

买入 (Buy)	：相对强于市场表现 20%以上；
增持 (Outperform)	：相对强于市场表现 5% ~ 20%；
中性 (Neutral)	：相对市场表现在 - 5% ~ + 5%之间波动；
减持 (Underperform)	：相对弱于市场表现 5%以下。

行业的投资评级：

以报告日后的 6 个月内，行业相对于市场基准指数的涨跌幅为标准，定义如下：

看好 (Overweight)	：行业超越整体市场表现；
中性 (Neutral)	：行业与整体市场表现基本持平；
看淡 (Underweight)	：行业弱于整体市场表现。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议；投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者应阅读完整篇报告，以获取比较完整的观点与信息，不应仅仅依靠投资评级来推断结论。申银万国使用自己的行业分类体系，如果您对我们的行业分类有兴趣，可以向我们的销售员索取。

本报告采用的基准指数：沪深 300 指数

法律声明

本报告由上海申银万国证券研究所有限公司（隶属于申万宏源证券有限公司，以下简称“本公司”）在中华人民共和国内地（香港、澳门、台湾除外）发布，仅供本公司的客户（包括合格的境外机构投资者等合法合规的客户）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。客户应当认识到有关本报告的短信提示、电话推荐等只是研究观点的简要沟通，需以本公司 <http://www.swsresearch.com> 网站刊载的完整报告为准，本公司接受客户的后续问询。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的真实性、准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

客户应当考虑到本公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突，不应视本报告为作出投资决策的惟一因素。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本公司特别提示，本公司不会与任何客户以任何形式分享证券投资收益或分担证券投资损失，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。本公司未确保本报告充分考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。本公司强烈建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。市场有风险，投资需谨慎。若本报告的接收人非本公司的客户，应在基于本报告作出任何投资决定或就本报告要求任何解释前咨询独立投资顾问。

本报告的版权归本公司所有，属于非公开资料。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记，未获本公司同意，任何人均无权在任何情况下使用他们。