

证券研究报告
交通运输行业/行业深度报告
2026年2月28日

低空“心脏”：eVTOL电驱系统详解

——eVTOL动力篇

证券分析师：李景星 S0370522090001

行业评级：增持

目录



- 一、电驱系统：eVTOL的动力“心脏”
- 二、电驱系统的工作原理
- 三、技术壁垒墙高筑，国产替代进行时
- 四、行业催化：eVTOL适航取证密集期+新能源车产业辐射
- 五、相关上市公司

风险提示：产业化进程不及预期；技术突破与工艺创新遭遇瓶颈；政策支持力度不及预期；原材料成本和制造成本压降不及预期

一、电驱系统：eVTOL的动力“心脏”

1.1 eVTOL电驱系统的重要性

eVTOL主要以**电驱系统**作为动力系统，是eVTOL的“心脏”，它不仅直接决定飞行续航、载重、安全性、成本与商业化进程，更是eVTOL产业链中技术壁垒最高、价值量最集中、国产替代空间最大的核心环节。整套电驱系统（含电机、电控、减速器）的BOM在整机中占比约40%，是占比最高的组成部分。电驱系统的重要性和优势主要体现在**飞行安全、续航与载重、整机与运维成本和商业化进度**4个方面：

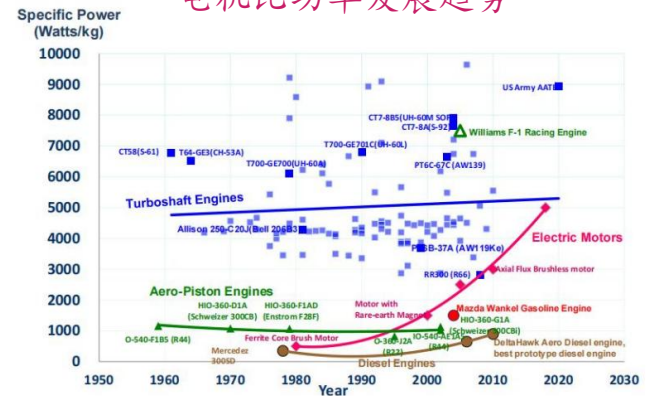
一、飞行安全底线：多电机分布式驱动（DEP）是eVTOL实现安全冗余的基础，电驱与电控的可靠性直接决定整机适航认证能否通过。据测算，3000kg级eVTOL悬停功率需求约1MW，通过6-8个独立电机分散布置，单电机功率控制在125-166kW，在800V高压系统下工作电流仅166A，显著降低线缆热负荷与重量。分布式架构天然具备失效容错能力，在单电机失效的情况下，电控系统通过毫秒级响应快速重新分配推力，以维持姿态稳定，有效规避传统直升机单点失效风险。

二、续航与载重上限：电驱效率、功率密度、轻量化水平直接影响电池能量利用率，是实现商业化运营的关键指标。当前航空级永磁同步电机比功率已达5kW/kg（接近涡轴发动机），正向7kW/kg演进；配合效率超93%的电机与7kW/kg的逆变器，1MW总功率下动力系统总重可控制在340kg以内。相比燃油发动机25%-30%的热效率，电驱系统同等能量可输出更多有效推力，直接提升航程与有效载荷能力。

分布式电推进方案



电机比功率发展趋势



1.1 eVTOL电驱系统的重要性

三、整机与运维成本：动力系统占 eVTOL 整机成本约 40%，其寿命与可靠性决定全生命周期运营支出。电池系统为运行成本最主要来源：

- **直接运行成本优势显著。**eVTOL 目标直接运行成本为 0.67 美元/海里/人，低于贝尔 407 直升机的 0.74 美元/海里/人，运营经济性有所提升。
- **机械复杂度大幅降低。**类比电动车零件数（约 11,000 个）仅为燃油车（约 30,000 个）的 1/3，eVTOL 运动部件显著减少，维护频次与备件成本同步下降。
- **电池健康管理与梯次利用实现全生命周期价值闭环。**退役电池可二次应用于 Vertiport 储能，延长价值周期。
- **单位能耗成本远低于燃油。**假设 eVTOL 单次典型任务能耗 1.5kWh/km，每里程单位的能源成本约为 1.5 元/km，仅为航油单位成本的 1/5 左右。

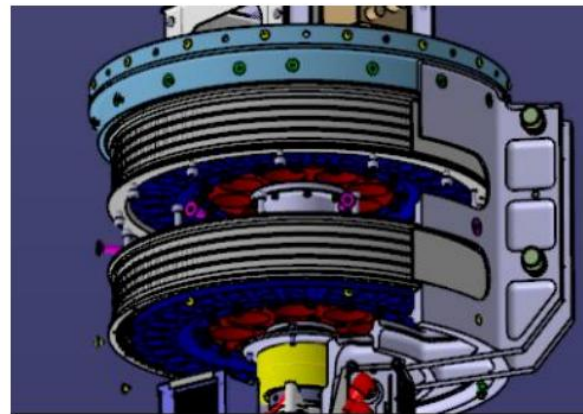
四、商业化速度：高压化与冗余设计是适航认证及量产落地的技术焦点。头部企业向高压平台升级，以降低电流、减轻线缆重量。在冗余设计层面，叠层电机冗余、绕组冗余、电推模块冗余三类技术路径已成熟，其中叠层三冗余方案成为适航审定重点关注领域，直接影响整机认证周期与市场准入速度。

不同机型的经济性和性能参数

	Bell 407GX _i	Airbus H130	Airbus H125	Generic eVTOL
BASE AIRCRAFT PRICE (USD)	\$3,225,000	\$3,450,000	\$3,200,000	\$1,000,000
MANUFACTURER	Bell	Airbus Helicopters	Airbus Helicopters	Generic
AIRCRAFT TYPE	407GX _i	H130	H125	eVTOL
DIRECT OPERATING COST*	\$589	\$640	\$627	<\$500
DOC / NM	\$4.43	\$5.00	\$4.61	\$3.33
DOC / NM / SEAT	\$0.74	\$0.71	\$0.77	\$0.67
MAX CRUISE SPEED (KTS)	133	128	136	108
MAX RANGE (NM)	337	327	340	150
USEFUL LOAD (LBS)	2300	2286	2370	1100
TOTAL SEATS	6	7	6	5

*Direct operating cost 均为测算数据，eVTOL 数据为多个机型综合估算的目标数据

叠层电机冗余原理图



1.2 (1) 核心需求一：高功率密度

核心需求一：高功率密度

eVTOL独特的运行剖面决定了其对动力系统的核心性能需求在于极高的功率密度。与固定翼飞机不同，eVTOL需完成垂直起飞、降落及悬停等关键阶段，在这些阶段中，飞行器需要完全依赖动力系统产生升力以克服重力，因此动力负荷远大于固定翼飞机。研究表明，eVTOL起降阶段的功率要求与巡航阶段最高可相差10倍。这种极端且瞬时的功率冲击，要求动力系统必须在极小的体积和重量约束下输出峰值功率，高功率密度是满足起降动力需求的前提。eVTOL要求电机功率密度达到5kW/kg以上，约为新能源汽车电机的2倍。

eVTOL典型飞行任务剖面能量需求分解表

Mission:	Time/sec	Power Req/ kW	Energy Req/ kJ	Energy Req/ kWh	Climb rate (ft/min)	Altitude (m)	Energy breakdown
Hover climb	10	2200	22000	6.11	295.20	0-15	2%
Cruise Climb	600	440	264000	73.33	979.08	15-3000	29%
Cruise	2400	220	528000	146.67	—	3000	59%
Cruise Descend	600	110	66000	18.33	-979.08	3000-15	7%
Hover Descend	10	2200	22000	6.11	-295.20	15-0	2%

见左图可知，eVTOL起降阶段的功率需求远高于巡航阶段。数据显示，起飞悬停阶段功率最高可达2200kW，而巡航阶段仅需220kW，二者相差约10倍。这种极端且瞬时的功率冲击，要求动力系统必须瞬时在极小的体积与重量约束下输出峰值功率，因此高功率密度是满足起降动力需求的重要前提。同时，在起飞+爬升阶段虽仅持续610秒，却消耗能量仅80kWh，占主任务总能量的31%，表明起降阶段不仅对瞬时功率要求苛刻，对能量储备同样提出较高要求。

1.2 (2) 核心需求二：轻量化

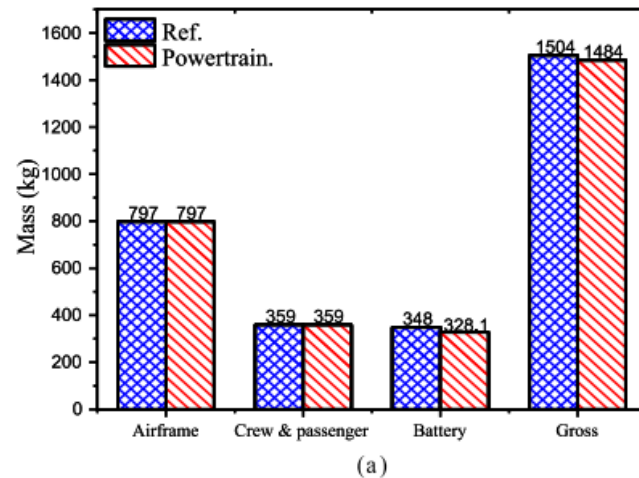
核心需求二：轻量化

- eVTOL动力系统的轻量化是其实现商业可行性的核心要素之一。在飞行器设计中，“每一克重量都直接消耗续航”是由能量守恒定律决定的客观约束。对于eVTOL而言，动力系统的轻量化水平直接决定了整机的有效载荷能力和航程性能，进而影响其运营经济性。
- 轻量化的量化价值体现在重量与航程的强关联性上。从重量分解来看，对于最大起飞重量3,178kg的eVTOL，电池重量约占31%，动力系统（电机+逆变器+螺旋桨）占比约15%。在相同电池能量密度水平下，动力系统每减轻10kg，即可增加约2-3km航程或提升5-8kg有效载荷。这意味着动力系统的轻量化水平直接转化为商业运营中的航程优势和载货能力。
- 动力系统轻量化对整机性能的提升具有显著的杠杆效应。通过将动力系统精细化建模纳入整机优化框架，可实现整机总重降低1.3%，同时所需电池能量减少8.8%。这一发现揭示了动力系统轻量化的深层价值——动力系统的重量优化会带来电池容量需求的连锁下降，进而形成正向减重循环，使轻量化的效益被放大。

eVTOL整机重量分解表（推测）

分类和子项		重量 (kg)	占比	
载荷		500	16%	
整备质量	电池	1000	31%	
	空重	结构	1043	33%
		内饰	66	2.1%
		电机	200	11%
		逆变器	143	
		线缆	45	1.4%
		航电	45	1.4%
		螺旋桨	136	4.3%
重量合计		3178	—	

动力系统模型精细化建模后的优化结果对比



1.2 (3) 核心需求三：高可靠性

核心需求三：高可靠性

eVTOL动力系统的高可靠性是其实现载人空中商业运营的根本前提。与地面交通工具不同，eVTOL需在高空复杂环境下持续稳定运行，面临振动、温差、湿度、电磁干扰等严苛工况考验，要求动力系统具备零失效率、强抗干扰、高稳定性，任何瞬间失效都可能导致灾难性后果。上述要求的严苛主要体现在以下两个方面：

- **航空级安全标准。**eVTOL动力系统需满足灾难性故障率低于 10^{-9} 次/飞行小时的可靠性要求，这一标准远高于车规级的 10^{-6} 量级。此外，动力系统必须经历加热测试、低温测试、冲击测试、碰撞测试、短路测试、穿透测试等数十项测试，确保在可预见的所有极端工况下行为可预测、故障可容忍。
- **动力系统层面的多维度技术挑战。**航空级电机需考虑在海拔8,000-12,000米、温度 -90°C 至 70°C 的极端环境下可靠工作。除此之外，持续的宽频振动（来自旋翼和电机自身）、高湿度（穿越云层）、沙尘（低空起降）以及复杂的电磁环境（通信、导航设备干扰），都对动力系统的结构强度、密封性能和电磁兼容性提出了远超工业级产品的设计要求。

叠层电机冗余



绕组冗余与电推模块冗余



面对上述挑战，冗余设计成为实现高可靠性的核心技术手段。主要冗余方法包括：叠层电机冗余（同一轴上配置多个独立电机）、绕组冗余（单个电机内部分绕组独立）和电推模块冗余（多个独立电机驱动多个螺旋桨）。分布式电推进系统（DEP）本身即提供天然冗余——即使单个或数个推进器失效，仍可通过调整其余推进器输出维持飞行，确保飞行器安全着陆。

1.2 (4) 核心需求四：长久寿命

核心需求四：长久寿命

eVTOL动力系统的长寿命是其从试点走向规模化的经济性基础。高频次、高强度运营下，电机寿命直接决定维修成本与出勤率，是商业模式能否跑通的关键。

电机作为eVTOL的核心动力部件，其寿命主要受两大因素影响：

- **热冲击导致的绝缘老化：**eVTOL每次起降都是一次强烈的“热冲击”。通过任务剖面可知，起飞悬停阶段功率高达1000kW，巡航阶段仅140kW，相差超过7倍。这种剧烈功率波动导致电机绕组温度急剧变化，绝缘材料反复热胀冷缩，微裂纹逐渐扩展。
- **高速旋转带来的轴承磨损：**高速旋转产生摩擦热，若散热不均，内环温度持续升高导致径向间隙减小，接触压力增加，最终引发磨损和点蚀，轴承寿命随之终结。



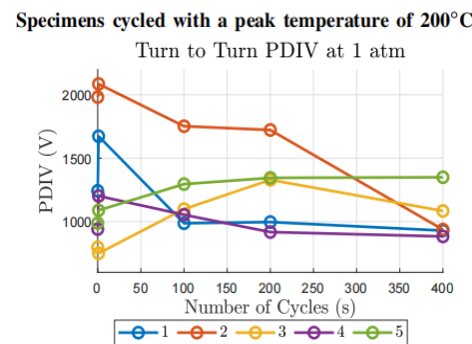
绝缘系统是现代电机的主要可靠性瓶颈，而热应力是其中最具影响力的因素。在每日6-8次起降的运营强度下，电机每年承受超过2,000次热循环，每次起降都是一次完整的热冲击。若绕组热点温度比设计值高出20°C，其绝缘寿命将显著缩短。轴承寿命则取决于散热效率和润滑条件。在实际运营中，当振动频谱出现特征性变化、温度异常升高或噪声特征改变时，即提示需要维护。

从下图来看，随热循环次数增加，电机核心绝缘性能持续下降，其中部分试样在400次循环后性能降幅达50%（#2橙色折线）。结合eVTOL每日起降的运营强度，频繁热冲击会快速加速绝缘老化。

电机轴承的损坏过程



eVTOL电机绝缘性能随热循环次数变化趋势



1.3 (1) 多项支持政策推动电驱系统发展

2023年10月工信部、民航局等四部门联合发布《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》，明确提出“加快发展高可靠性、高功重比、高效率的航空电推进技术”，提出“250kW级航空电机及驱动系统投入量产，500kW级产品小规模验证，功重比达到20Nm/kg”的要求。首次将eVTOL电推进系统相关技术攻关提至国家层面规划；随后多项支持政策陆续发布，提出要完善电驱系统技术标准与适航体系，肯定电推进技术作为航空动力电动化的主要技术路线选择，对eVTOL电驱系统产业发展起到积极推动作用。

电推进系统支持政策梳理

政策	时间	相关政策内容
《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》	2023年10月	加快发展高可靠性、高功重比、高效率的航空电推进技术，推动航空电动化转型；到2025年实现eVTOL试点运行，到2035年使新能源航空器成为行业主流。
《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》	2024年3月	以电动化为主攻方向，加快航空电推进技术突破，推进250kW及以下航空电机及驱动系统规模化量产，开展400kW以下混合推进系统研制，同时推进eVTOL等新型装备适航取证。
《动力提升航空器适航标准（征求意见稿）》	2025年12月	明确适用于采用纯电供能分布式电推进系统的有人驾驶eVTOL，对电动发动机、电子电气系统提出无单点灾难性失效、高强辐射场防护等严格适航要求，为电驱系统安全运行提供规范。
《低空经济标准体系建设指南（2025年版）》	2026年2月	明确将高功率密度电机、航空级电池系统、电驱控制系统纳入核心标准制定计划；推动建立适航认证中的电驱安全标准。



1.3 (2) 地方政策鼓励电驱系统研发制造

上海市于2024年率先发布《上海市低空经济产业高质量发展行动方案（2024-2027年）》，明确支持高功重比航空动力电驱的研发制造、形成低空航空器先进动力系统解决方案，作为行业获得地方政策扶持的关键信号。随后上海发布《上海市关于链接长三角加快建设低空经济先进制造业集群的若干措施》提出以新能源动力系统等核心零部件的研发制造作为长三角低空先进制造产业集群的核心发展目标，推动电驱技术从试点示范到规模化应用。其他地方（如四川、东莞）也在低空经济支持政策中提及对电驱系统技术突破、适航适配和产业化的支持。

各地对于eVTOL研发制造提出明确的支持政策

政策	时间	相关政策内容
《上海市低空经济产业高质量发展行动方案（2024-2027年）》	2024年9月	重点支持高功重比航空动力电驱系统研发及产业化，带动航空电机、电机控制系统等核心零部件产业链协同发展，为eVTOL电驱系统提供直接产业支撑。
《支持低空经济发展的若干政策措施》（四川）	2025年5月	专项支持企业攻关eVTOL电推进发动机等核心动力装备，按项目投入30%给予财政补贴（最高2000万元），助力电驱系统关键技术突破。
《东莞市支持低空经济高质量发展的若干措施》	2025年9月	新能源无人机、飞行汽车、eVTOL整机，以及关键设备、核心零部件、能源动力系统等重点领域，支持研发、制造和运营项目在本市建设，按项目实际建设投资的10%给予一次性补贴，单个企业累计不超过1000万元。
《上海市关于链接长三角加快建设低空经济先进制造业集群的若干措施》	2026年1月	对eVTOL动力系统等技术攻关与产业化项目，给予最高5000万元支持。长三角低空经济制造集群化，电驱系统成为产业集群核心抓手之一。



二、电驱系统的工作原理

2.1 电驱系统的结构组成

eVTOL电驱系统主要由电机、电控和减速器三大核心组件构成。三者协同工作，将电池储存的电能高效转化为旋翼旋转所需的机械能。从成本结构来看，电机：电控：减速器占比大约为4:4:2。

一、电机：价值占比最高的核心部件

电机是动力系统核心零部件，由定子、转子、永磁体、壳体、绕组、轴承等部件构成。电机主要作用是将电能转换为机械能，驱动螺旋桨旋转，从而产生升力和推力，实现飞行器的飞行，同时根据飞控系统的指令精准调节转速，满足飞行器在不同飞行状态（如起飞、悬停、巡航）下的动力需求。与传统飞行器不同，eVTOL通常配备多个电机，在飞行过程中，如果部分电机出现故障，其他正常工作的电机能够通过电机控制系统调整输出功率和推力方向，使飞行器保持稳定的飞行姿态，确保飞行安全。

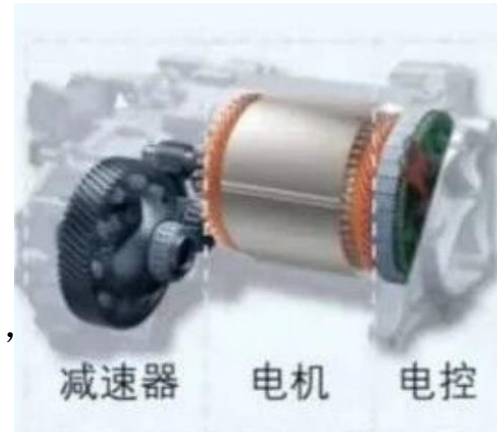
二、电控：技术壁垒最高的调节中枢

电机控制系统是技术壁垒最高的组件，其核心器件包括功率器件（SiC MOSFET/IGBT）、主控芯片（MCU/DSP）、PCB、电容和传感器等。电控可对电机的转速、扭矩、转向等参数进行精确调节和控制。它能根据飞行器的飞行指令和姿态信息，实时调整各电机的输出，确保飞行器能够按照预定轨迹飞行，实现垂直起降、悬停、平飞等多种飞行姿态的平稳转换。eVTOL通常采用多个独立电机，每台电机均配备独立电控，一旦某电机失效，电控需在毫秒级内完成推力重新分配。

三、减速器：灵活变速的关键部件

eVTOL电驱系统依据是否配备减速器，可分为低速电机直驱式与高速电机-减速器式两种类型。减速器由精密齿轮（行星/谐波齿轮）、高温合金轴承、箱体和润滑冷却系统组成，核心功能是将电机的高转速、低扭矩输出转化为旋翼所需的低转速、高扭矩驱动力。随着发展，减速器的体积和重量将越来越小，以满足 eVTOL 轻量化的需求。减速器的传动效率也将不断提高，以降低 eVTOL 的能耗。

英搏尔电驱系统“三合一”集成芯



eVTOL电驱系统工作原理



2.2 电驱的关键技术指标

$$\text{功率} = \text{力矩 (N.m)} \times \text{转速 (rpm)}$$

- **功率**：功率分为起飞峰值功率和巡航持续功率。功率密度表示电机在单位时间内输出的能量。高功率设计有助于延长续航、提升载荷，需通过优化磁路、降低铁损与铜损来实现。
- **力矩**：eVTOL为了降低噪音，旋翼转速通常较低，这就要求电机在起飞瞬间能输出巨大的扭矩。
- **转速**：转速决定了电机的能量转换频率和螺旋桨的推力效率。eVTOL 直驱电机的转速通常设定在 1,500 - 4,500 RPM 之间。转速越高，电机可以做得越轻，但螺旋桨尖端的超音速噪音也会随之剧增。
- **电压**：电压等级决定了系统效率、线缆重量、功率电子器件选型及安全架构，是电驱系统电气设计的基础参数，需在系统层面综合考量。

不同eVTOL电驱系统参数对比

eVTOL	电机类型	峰值功率/kW	峰值扭矩/Nm	最高转速/r/min	母线电压/V	重量/kg	功率密度/kW/kg	转矩密度/Nm/kg
H3X HPDM-250	PMSM	250	95	20000	800	18	13.9	5.27
Joby S4	PMSM	236	1800	800	—	28	8.4	64
Archer Aviation	PMSM	125	—	12000	800	25	5	—
Lilium Jet	PMSM	100	100*	—	—	4	25	—
Evolito D250	AFPMSM	230	230	10000	—	8.3	27.7	27.7
ENGINEUS100	AFPMSM	100	150	2500	540	10#	10#	15#
EMRAX 268	AFPMSM	210	500	4500	830	21.4	9.8	23.4
EMRAX 348	AFPMSM	400	1000	4000	830	43.1	9.3	23.2
Magni 650	PMSM	700	3200	2300	800	206?	3.4?	15.5?
Magnomatics	MG	86	465	1950	800	14.6	5.89	31.8

注：PMSM代表永磁同步电机，AFPMSM代表轴向磁通永磁同步电机，MG代表磁齿轮电机，*代表额定值，^代表电机+控制器，&代表电机+齿轮箱，#代表电机+冷却系统，?代表电机+控制器+电缆。

2.3 电机工作原理与分类

电机的核心工作原理是基于电磁感应定律和安培力定律进行电能和机械能的转换。电流通过定子绕组产生旋转磁场，该磁场与转子上的永磁体（或感应电流）相互作用，产生电磁力矩驱动转子旋转，持续将电能转换为机械能。

- **定子**：通常由硅钢片叠压铁芯和绕组构成，旨在降低涡流损耗，绕组多采用高频性能良好的漆包铜线。
- **转子**：主要分为永磁转子与感应转子。永磁转子依赖稀土永磁体建立磁场，效率高；感应转子则通过感应电流生磁，结构简单但效率较低。

分类维度	产品	工作原理	特点	典型应用
工作电源	直流电机 (DC)	直流电流与磁场之间相互作用产生力矩	转矩大，转速稳定，易于控制	小型设备（如收音机），机床，电动车，医疗设备，家用电器
	交流电机 (AC)	通过交流电产生的磁场诱导电机内部的电流，从而产生旋转力矩	维护少，运行稳定，成本低	广泛用于无需精确调速的一般性驱动，如电力工业、制造业、建筑业等
换向方式	有刷电机 (Brushed)	通过电刷与换向器的机械接触，物理切换线圈电流方向。	结构简单、成本低、控制容易，但电刷磨损限制寿命	低性能要求、成本敏感的小型设备或简单调速场合（如玩具、小型风扇）
	无刷电机 (BLDC)	依靠电子控制器 (MCU) 感应转子位置，电子化切换电流方向。	构造简单、耐用，效率更高，噪音更低，并且无需维护电刷	广泛应用于工业自动化生产线精密设备驱动等对性能与稳定性要求较高的领域
工作原理	同步电机 (PMSM)	转子磁场由永磁体产生，转速与定子磁场旋转频率完全同步	恒定转速、转矩稳定，能提供稳定动力输出	常用于需要恒定转速的应用，如发电机等；需要精确控制转速的应用，如纺织机械等
	异步电机 (IM)	定子磁场感应转子产生电流，转速略低于磁场频率（存在转差）	结构简单、制造成本低，可靠性高，调速性能较差	在工业中大量用于风机、水泵等无需精确调速的一般性驱动场合
磁通方向	径向电机 (RFM)	磁力线沿半径方向（垂直于轴线）穿过气隙，属于传统结构。	工艺成熟，成本低，但体积大、功率密度受限	工业电机、传统电动车、家电
	轴向电机 (AFM)	磁力线沿轴向（平行于轴线）穿过气隙，呈盘式排列。	高功率密度、轻量化，但需解决散热和成本问题	电动汽车、风力发电、增程器

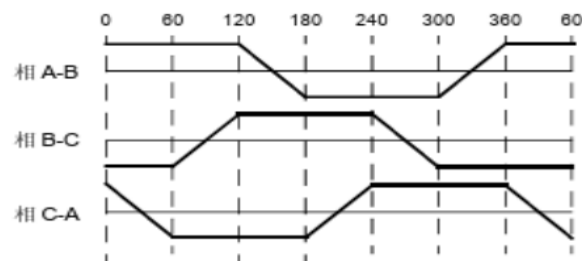
2.3 电机工作原理与分类——无刷直流同步电机（BLDC）

- 低空领域的电机主要分为两种类型:永磁同步电机（PMSM）和无刷直流电机（BLDC）。BLDC相较于有刷直流电机，通过电子换向替代了有刷直流电机的机械电刷与换向器，取消了易磨损的接触部件，因此在寿命、效率、可靠性、噪音、安全性上全面占优，大量减少维护、减少火花干扰、可实现更高转速，仅需配套专用控制器，成本与控制复杂度更高。
- 由于定子绕组的互联方式与PMSM不同，BLDC反电动势呈现梯形波形式、采用方波驱动，控制简单、成本更低，但转矩脉动较大、运行平顺性与噪音表现一般。与PMSM相比，具备结构简单、运行可靠、制造和维护成本更低等优点，在小型和中型多旋翼无人机中的应用更为广泛。

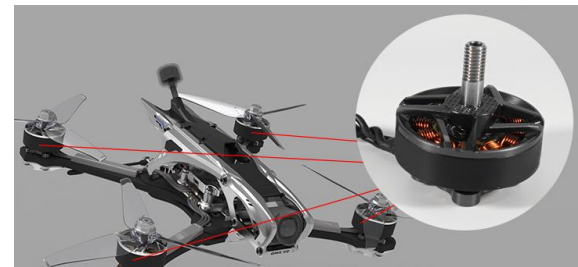
BLDC vs 有刷直流电机

特性	BLDC	有刷直流电机
换向方式	电子换向（控制器+传感器）	机械换向（电刷+换向器）
效率	85%-95%	60%-75%
寿命	2万小时以上（是有刷电机的3-5倍）	几百到几千小时
维护需求	低（几乎免维护）	高（定期更换电刷）
噪音与振动	低（运行噪音 $\leq 35\text{dB}$ ）	高
控制精度	高	中等
成本	较高	较低

BLDC的梯形反电动势



BLDC广泛应用于无人机中



应用领域

优势

典型应用

消费电子与智能家居	噪音小和节能	无人机、扫地机器人、电动工具、相机稳定器、电动牙刷等
汽车工业	高功率重量比	电动窗、电动座椅、电子水泵、热管理系统、电动汽车驱动电机等
工业自动化	精密速度控制和高可靠性	CNC机床主轴、AGV驱动、工业机器人关节、自动化流水线传输系统等
医疗设备	高可靠性和极低的电磁干扰	手术器械、呼吸机泵、离心机、医疗影像设备等

2.3 电机工作原理与分类——永磁同步电机（PMSM）

- 永磁同步电机（PMSM）由于其高功率密度、响应速度快、噪音低以及能效高等特点，成为eVTOL的首选。其工作原理基于高磁能密度的永磁体在转子上提供稳定磁场，通过定子三相分布式或集中式绕组产生旋转磁场，二者之间的磁场交互作用实现机械能输出，强大的磁场能够使电机在较小的体积和重量下输出更大的功率。
- 相比异步电机，它效率更高、功率密度更大、转子几乎不发热；相比 BLDC，它转矩脉动更小、运行更平顺安静、高速性能更优；相比有刷电机，它无磨损、寿命长、可靠性高。整体在效率、功重比、控制精度、静音性与耐久性上具备综合优势，是新能源汽车、eVTOL、高端装备等领域的主流最优方案

永磁同步电机的核心优势：

1) 极致能效，显著降耗

永磁同步电机转子无需励磁，从根本上消除了转子铜损，系统效率轻松突破92%。在相同的运行工况下，相较于异步电机，可实现能耗降低高达15-30%。

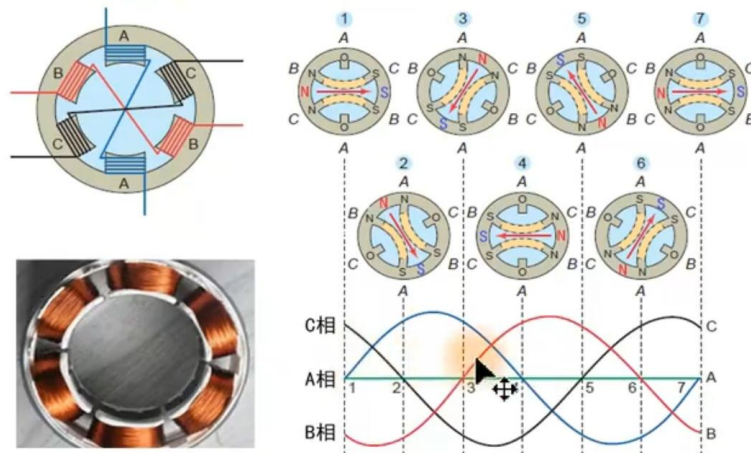
2) 高功率密度，强劲动力

采用高性能稀土永磁体，电机在同等体积下能输出更大转矩，从而实现“小身材，大能量”。

3) 宽范围高效，全域出色

无论是低速运动还是高速巡航，永磁同步电机都能在全转速范围内保持极高效率，解决了异步电机在轻载、低速时效率骤降的痛点。

永磁同步电机工作原理



eVTOL驱动



典型应用

新能源汽车驱动



高性能伺服系统，如机器人



家用高端/变频电器



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



首都机场集团
Capital Airport Holdings



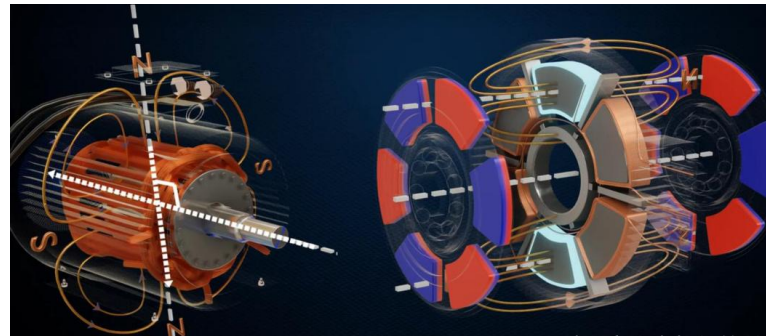
金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

资料来源：FOSEN孚盛科技，金元证券研究所整理

2.3 电机工作原理与分类——轴向磁通电机

在无人机飞行器领域中，电机的安装空间常常受到限制，而轴向磁通电机可以较好解决这一需求。轴向磁通电机的磁场沿电机轴向分布，定子与转子呈盘状面对面布置，通过轴向磁场与定子绕组相互作用产生转矩；与传统径向磁通电机相比，它具有更短的轴向长度、更大的有效力臂、更高的转矩与功率密度，散热与结构刚性更适配多极低速直驱场景，在相同体积下输出能力显著更强，同时控制精度与动态响应更优；凭借超薄、高功率密度、低速大扭矩的特点，适用于eVTOL。

径向（左） VS 轴向（右）磁通电机



体积更小
重量更轻
轴向长度更短
摩擦损耗更少

转矩更高
功率密度更高
高效区间更大

YASA 轴向磁通电机



YASA的轴向磁通电机主要应用于试验性质的混合动力跑车中。其轴向磁通电机扭矩密度和功率密度分别达160Nm/L和14.9kW/kg，是传统车用径向磁通电机的4倍。

然而轴向磁通电机距离大规模产业化仍有一定差距，主要难点在于：

- **制造装配精度与一致性：**轴向磁通电机采用“转子-定子-转子”的三明治结构，对气隙控制要求极高。任何微米级的平行度或装配偏差，都会导致气隙不均匀，引发轴向磁拉力不平衡，产生振动、噪音，甚至导致扫膛。这要求从磁钢定位到整机装配的全过程都必须实现极致的公差控制。
- **散热与热管理：**高功率密度意味着单位体积发热量大，而扁平的结构又导致散热面积小、热量积聚快。定子绕组和转子磁钢夹在中间，散热路径长。如果散热设计不当，绕组高温会加速绝缘老化，永磁体过热则会发生不可逆退磁，导致电机性能永久衰减。
- **承受强度：**大直径转子在高速旋转时承受巨大的离心力，对转子结构强度和固定方式提出了极高要求。
- **材料成本：**依赖高性能稀土永磁、异形铁芯、高精度轴承、定制绝缘件，上游供应链不成熟，BOM 成本显著高于径向电机。



三、技术壁垒墙高筑，国产替代进行时

3.1 (1) 电机性能壁垒：高功率密度与轻量化的挑战

一、高功率与高扭矩密度双重需求

- **瞬时高功率：**eVTOL在起飞阶段对动力系统有极高的瞬时功率要求，要求电机功率密度达到5-10kW/kg，远超车规级电机（约2-3kW/kg）标准。这对定子绕组的充填率及转子磁钢的排列工艺提出了极高的物理极限要求。
- **轴向磁通电机应用：**相比传统径向电机，轴向磁通电机在同等质量下可提供更高的扭矩密度（达30-35Nm/kg），磁路更短。其盘式结构允许在相同直径下增加有效力臂，输出效率较传统电机提升2%-5%，是实现动力系统减重、提升航程的关键。

二、制造与可靠性难点

- **气隙控制精密度：**盘式结构中定子与转子间的气隙极小（微米级），微小偏差会导致磁拉力不平衡，诱发高频振动与轴承磨损。
- **热管理挑战：**轴向电机的高比功率导致其热容量极低。需采用定子直冷技术、油冷系统或相变材料，解决极限工况（起/降落）下磁钢退磁风险

三、碳纤维复合材料减重

- 动力系统外壳及螺旋桨需大规模应用碳纤维复合材料以维持刚度并减重，对于材料成本控制、结构力学设计与加工工艺都提出更高要求。

3.1 (2) 电控壁垒：800V/1000V高压化与SiC高度集成

一、高压化降本增效：

- **系统减重：**为减少大电流带来的热损耗并降低线束重量，电压平台由400V向800V-1000V升级，在同等功率下可大幅减小线束直径，降低整机电缆重量达30%以上。
- **SiC MOSFET的应用：**SiC器件具备耐高压、耐高温、开关损耗低的特性，可显著减小电体积（减重），并提升系统效率2%-4%。采用全SiC MOSFET功率模块，其开关损耗可降低约70%，系统综合效率提升至98%以上，且高频特性有助于缩小被动元件（如电感、电容）体积。

二、集成工艺一体化

- **深度集成化：**参考英搏尔的“集成芯”方案，将电机控制、DC/DC、车载充电机等高度集成。这不仅是元器件的堆叠，更涉及高压母排连接、共模干扰屏蔽及高性能散热基板的复杂设计，是实现动力总成轻量化的核心路径。

三、抗电弧与绝缘挑战

- 高海拔低气压环境下，高压系统更易发生电晕放电和电弧问题，这对电机的绕组绝缘等级及连接器封装提出了航空级的严苛要求。

3.1 (3) 可靠性壁垒：安全、冗余架构与适航认证标准

一、从“车规级”向“航空级”安全标准的跨越

- **失效安全性：**eVTOL要求动力系统失效率不高于 10^{-9} 飞行小时，需满足功能安全ISO 26262及航空DO-254、DO-178最高等级标准。
- **非预期扭矩控制：**严控电驱系统在复杂电磁干扰下的异常动作，确保在各种单点故障下依然能维持基本的飞行控制。

二、分布式电推进（DEP）冗余架构

- **DEP协同：**动力系统需支持多电机、多电控的解耦协同运行。当某一电控单元失效时，系统需在毫秒级内完成动力分配，确保飞行器的姿态稳定。
- **激励熔断器应用：**相较传统热熔断器，激励熔断器通过主动信号触发，响应速度更快，能有效应对高压系统的突发故障保护。

三、适航认证的长周期与高壁垒：

- **认证周期长：**动力系统作为适航审定（如CAAC TC认证）的核心部件，认证周期通常在3-5年，且与整机深度绑定，构成了强大的先发优势和行业前提。
- **严苛的标准体系：**
 - 硬件保证（DO-254）：涵盖复杂电子硬件的设计与验证。
 - 软件保证（DO-178）：对飞行控制及电机控制算法的安全性进行等级评估。
 - 环境试验（DO-160）：确保动力系统在-90度至70度、高海拔、强磁干扰等极端环境下稳定运行。
- **适航绑定与客户粘性：**电机电控需与主机厂进行随机适航认证，一旦通过，供应商与整机厂的粘性极高，更换成本较大。



3.2 海内外对比差异

作为eVTOL的心脏和高价值量部件，航空级电驱系统在电机性能、电控和可靠性认证上都具备较强的技术壁垒。海外技术经验更为丰富，近年来随着我国新能源车产业爆发以及低空经济飞行器快速发展，我国正处于快速追赶阶段；国内厂商在功率密度上已初步具备竞争力，在适航认证、高可靠长寿命部件、系统级集成方面仍需 2-3 年追赶时间。

- 海外厂商在“适航取证”和“全球运营”具备优势，其电驱系统是按照FAA/EASA的最严苛标准从头设计，拥有更完整的验证数据链，更容易获得欧美市场准入，另外海外在复杂气动布局的电驱匹配（如倾转旋翼）上经验更丰富。
- 中国厂商产生在“成本控制”、“量产速度”和“供应链安全”上更胜一筹，中国凭借电动车产业链的积累和规模优势，能将同等性能的电驱系统成本控制在海外的60%-70%左右，且能在更短时间完成从设计到样机的交付。

对比维度	海外头部厂商 (Joby, Archer, Lilium)	中国头部厂商 (亿航, 沃飞长空, 小鹏汇天, 峰飞)	差异评价
构型技术路线	倾转旋翼为主 (Joby, Archer)，强调巡航效率与航程； 分布式涵道风扇 (Lilium)。	多旋翼/复合翼为主 (亿航EH216, 峰飞V2000)； 倾转旋翼追赶中 (沃飞长空AE200)。	海外在复杂气动布局的电驱匹配上经验更丰富； 中国在多旋翼高冗余控制上领先。
电机功率密度	8-12 kW/kg，部分原型机突破20 kW/kg。 大量采用轴向磁通+Halbach阵列。 全自研，深度集成飞控。	5-8 kW/kg (主流)，头部企业实验室数据达15kW/kg。 快速跟进轴向磁通技术。 自研+合作 (联合华为、汇川等)。	海外占优。海外在航空级轻量化设计 (如碳纤维转子工艺) 上略领先1-2年。
电控系统 (SiC)	强调DO-178C/DO-254航空软件适航标准。 双/三相冗余设计成熟。	硬件性能强，但航空级软件认证经验相对欠缺。 正在加速补齐适航短板。	核心差距在“软”实力。中国硬件不输，但符合FAA/EASA标准的底层代码验证体系尚需时间积累。
减速器/传动	高精度行星齿轮，静音与可靠性极致优化。 部分采用直驱以简化结构。	依托新能源车供应链，成本控制极佳。 高精度齿轮加工能力提升快，但在超长寿命验证上数据较少。	中国成本略优。中国得益于庞大的EV齿轮供应链，制造成本低30%以上。
适航认证进展	FAA/EASA领先。Joby已获G-1基础认证，进入TIA阶段；Archer紧随其后。	CAAC领先。亿航EH216-S已获TC/PC证 (全球首个)。但在FAA/EASA认证上落后海外2-3年。	海外占优。欧美适航标准是全球通用门槛，海外厂商在电驱系统的适航符合性验证上更成熟。
供应链与成本	依赖航空特种供应链，成本高，产能爬坡慢。	全产业链自主。磁材、SiC、复材均在国内，成本低30%-40%，响应速度快。	中国占优。中国拥有全球最完整的电动车供应链，能迅速将车规级技术升级为航空级。

3.3 国外替代关键

差异类型	具体原因	影响范围
研发经验	航空电机研发历史短（5-10 年 vs 海外 20-30 年）	可靠性设计、适航经验
材料技术	高端永磁体、绝缘材料、航空轴承等基础材料落后	功率密度、寿命、可靠性
制造工艺	微米级气隙控制、绕组工艺、整体充磁技术不足	良率、一致性、成本
标准体系	eVTOL 专用适航标准缺失，测试验证能力薄弱	认证周期、市场准入

- 我国的差距主要来自于研发经验、材料技术、制造工艺和标准体系的积累不足。目前，国产替代的方向主要聚焦于电机技术中的轴向磁通电机、Halbach阵列、油冷技术和绕组工艺；以及电控系统中的一体化深度集成技术和适航软件在开发流程/认证经验/试验数据上的积累。
- 一方面，海内外积极技术融合，中国厂商正在通过收购海外团队、引进航空人才快速补齐适航软件短板；海外厂商则开始寻求与中国供应链合作（如使用中国的磁材和SiC）以降低成本。另一方面，海内外技术方向或出现分化，海外倾转旋翼方案凭借高效率，主要发力高端长航时市场（跨城交通）；国内的多旋翼/复合翼方案凭借极致的性价比和快速获批优势，发力中短途物流/观光市场，并瞄准亚洲、中东及“一带一路”国家市场。
- 我们认为，国产替代进程的关键变量在于轴向磁通电机的量产良率和航空级电控的适航认证标准体系建设。

1. 电机技术：轴向磁通与轻量化工艺迭代

➤ 海外优势：

- 轴向磁通量产化：Joby和Archer较早与YASA（已被奔驰收购）轴向磁通专家合作，其盘式电机的功率密度和扭矩响应经过数千小时飞行验证，可靠性数据更扎实。
- 极端轻量化工艺：在转子碳纤维绑扎、无铁芯定子工艺上，海外厂商积累了更多航空级工艺诀窍（Know-how），能在保证安全系数的前提下将重量压得更低。

➤ 中国进展：

- 快速迭代：依托人形机器人和高端EV的需求爆发，中国在2025-2026年迅速掌握了Halbach阵列和油冷轴向电机技术。例如，卧龙电驱、湘电股份等企业已推出对标海外的航空电机样机。
- 差距缩小：在纯硬件指标（如最高转速、峰值功率）上，中国头部产品已与海外持平，主要差距在于长周期运行后的性能衰减数据和极端工况下的失效数据。

2. 电控系统：SiC应用与适航软件追赶

➤ 海外优势：

- 功能安全等级：海外厂商的电控软件严格遵循DO-178C Level A（最高安全等级）标准开发。这意味着每一行代码都有可追溯的验证记录，这是获得FAA/EASA认证的关键。
- 深度集成：Joby的电控与飞控系统深度耦合，能实现毫秒级的故障切换和动力分配，这是其倾转旋翼能平稳飞行的核心。

➤ 中国现状：

- 硬件强悍：中国在SiC模块（如比亚迪半导体、斯达半导）和控制器硬件制造上全球领先，在散热设计和功率密度上快速追平。
- 软件短板：国内多数厂商的软件架构仍带有浓厚的“汽车思维”或“工业控制思维”，缺乏航空级适航软件的开发流程和认证经验。这是目前中国eVTOL出海面临的巨大技术壁垒之一。



四、行业催化：eVTOL适航取证密集期+ 新能源车产业辐射

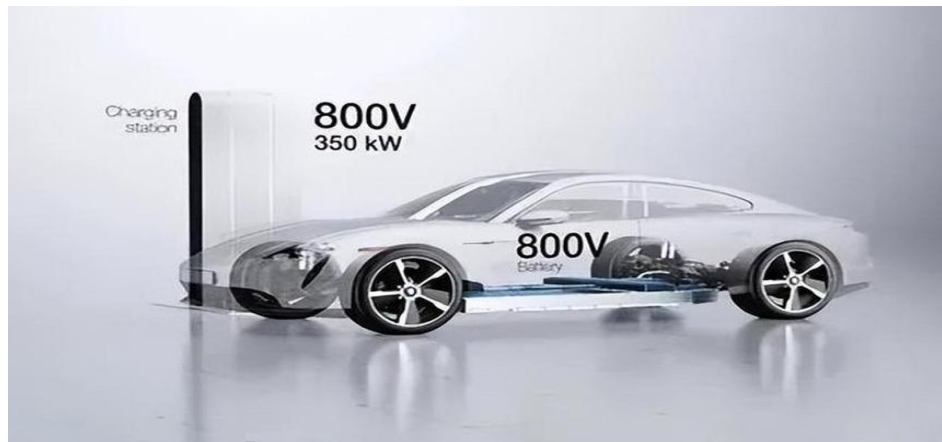
4.1 短期因素：eVTOL密集取证期 + 高压平台普及

◆ 2026-2027年迎来eVTOL密集取证期，打开市场空间



一批eVTOL机型（如 AE200、盛世龙、陆地航母等）有望在2026-2027年取得三证齐全，随后将进入量产阶段，并陆续投入商业化运营。截至2025年，多个eVTOL头部厂商仅仅是在航展展示期间就已斩获超千架订单，eVTOL成功取证后将进一步促进订单增长，eVTOL动力系统的需求空间也将进一步打开。

◆ 高压平台在新能源车市场普及，推动电驱升级，并提升部件价值量



新能源车800V高压平台有望更大规模普及，电机因需升级高压绝缘材料、高转速工艺、高速轴承与强化散热设计；电控则需要采用高价SiC功率模块，叠加高压驱动芯片、加强型EMC与高压安全设计，二者综合提升电驱系统的价值量，预计电驱价值量或将提升15-25%。



4.2 长期因素：新能源车产业辐射+技术与产业链配套逐渐成熟

◆ 新能源车的产业辐射作用

• 技术层面：

1. **SiC 功率器件规模化应用：**高压平台新能源车 800V 平台推动 1200V SiC MOSFET 量产，其高频、低损、高温特性匹配 eVTOL 需求，使电驱系统效率提升5%左右、体积重量减少20%-30%，成为eVTOL高压架构的标配。

2. **高压电机设计经验复用：**车用扁线绕组、Halbach 阵列、直接油冷等技术，经轻量化优化后移植到eVTOL电机，帮助电驱功率密度从2-3kW/kg提升至8-10kW/kg，满足垂直起降的瞬时大功率需求。

3. **集成化电驱架构落地：**新能源车“电机 + 电控 + 减速器”三合一集成方案，演变为 eVTOL “电机 + 电控 + 冷却系统”一体化设计，进一步降低重量与故障率，适配DEP布局。

• 成本层面：

1. **规模效应降本：**新能源车庞大的市场规模使 SiC 模块、高压绝缘材料、高速轴承等核心部件成本下降，eVTOL有望共享红利。

2. **跨界入场与供应链复用：**宁德时代、比亚迪半导体、汇川技术等车用三电供应商直接切入 eVTOL 领域，提供航空级定制化产品，缩短研发周期。

◆ 技术进一步升级

1. **轴向磁通电机：**目前轴向磁通电机的技术性能已获验证，但大规模量产仍需时日，目前处于从‘手工作坊’向‘工业流水线’爬坡的阶段。其难点在于气隙控制、散热、稀土依赖、自动化生产方面，随着需求市场打开和技术升级（如Halbach阵列优化、PCB绕组、定子内置微通道油冷等）

2. **智能化与一体化集成：**包括电驱与底盘域、飞控深度融合，AI算法实现毫秒级扭矩控制、故障预测、健康管理；电驱 - 减速器 - 电控 - 热管理高度集成，系统复杂度与成本大幅下降。

3. **新材料突破：**软磁复合材料（SMC）、非晶/纳米晶硅钢、高温超导、碳纤维壳体研发落地，使得电驱重量/成本再下降。

◆ 产业链配套更加完善

产业链有望垂直整合，电驱企业与eVTOL主机厂、电池、飞控深度绑定，形成“动力 - 能源 - 控制”一体化生态；如英博尔与亿维特联合开发适用于ET9 eVTOL的高性能一体化电机电控；英博尔与亿航智能共同设立合资公司（英搏尔持股60%），围绕定制化开发满足亿航智能各类eVTOL产品指标并符合民航局严格适航要求的电驱动系统；卧龙电驱与沃飞长空成立合资公司，将专注于为市场提供最大起飞重量750公斤至5700公斤适航航空器的电推进动力系统及相关产品，包括电机、驱动器、集成化解决方案及实验测试服务等。

五、相关上市公司

相关上市公司

卧龙电驱（600580.SH，未评级）：中国电机行业龙头，全球主要电机供应商之一

- 与中国商飞（COMAC）成立了联合实验室，专门研发航空电驱系统。
- 与沃飞长空成立合资公司，专注 750kg-5700kg 适航航空器电推进系统。
- 通过卧龙电驱最新公开的轴向磁通电机专利显示，其通过独特的定子齿分段设计，显著提升了功率密度，达到了7.5kW/kg，同时降低了40%的振动和30%的噪音；同时采用碳纤维缠绕转子，重量较传统方案减少30%，并配备浸没式油冷系统，耐受温度提升至航空级200°C。

湘电股份（600416.SH，未评级）：前身湘潭电机厂，在大型特种电机和军工领域底蕴深厚

- 建设中小型高速电机核心制造基地，其产品将广泛应用于无人机、纯电动及混合动力飞机、特种航空飞行器等航空领域，应用于大型无人机的45kW涵道风扇电推进系统已实现产品交付。
- 公司与宗申航发合作开发航空辅助起动永磁发电系统，目前已完成原理样机验证，正在开展工程化产品试制。

英博尔（300681.SZ，未评级）：国内领先的新能源汽车动力系统供应商，积极布局低空经济

- 英博尔与亿航智能开展深度合作，定制化开发满足亿航eVTOL产品指标、并符合民航局严格适航要求的电驱动系统。（1）公司斥资1260万美元战略入股亿航智能；（2）双方共同成立的合资子公司云浮英航厂房基建基本完成，已进入试产阶段；（3）亿航新机型VT35的电推进系统由公司研发团队历经一年多完成开发工作，其技术基础延续了公司乘用车独有的“集成芯”技术，团队结合飞行器实际工况需求，对其电磁、结构、流体、热、工艺等多重技术进行攻关和打磨，将双绕组+双电控+油冷+扁线+外转子等多重、高难度技术相融合，集多冗余、高可靠性、IP67防水全天候运行于一体，目前VT35电推进系统样机已经交付。
- 另外，英博尔与亿维特ET9机型的电推进系统已开发完成，整机开发正在推进中。



风险提示

风险提示

- 产业化进程不及预期
- 技术突破与工艺创新遭遇瓶颈
- 政策支持力度不及预期
- 原材料成本和制造成本压降不及预期



投资评级说明

金元证券行业投资评级标准：

增持：行业股票指数在未来6个月内超越大盘；

中性：行业股票指数在未来6个月内基本与大盘持平；

减持：行业股票指数在未来6个月内明显弱于大盘。

金元证券股票投资评级标准：

买入：股票价格在未来6个月内超越大盘15%以上；

增持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为5%~15%；

中性：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~+5%；

减持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~-15%；。

免责声明

本报告由金元证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被金元证券认为可靠，但金元证券不保证其准确性或完整性。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专业财务顾问的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，金元证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。投资者需自主作出投资决策并自行承担投资风险，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。

本报告所载的信息、材料或分析工具仅提供给阁下作参考用，不是也不应被视为出售、购买或认购证券或其他金融工具的要约或要约邀请。该等信息、材料及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，金元证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

金元证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。金元证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。金元证券的自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

在法律许可的情况下，金元证券可能会持有本报告中提及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争取提供投资银行业务服务。因此，投资者应当考虑到金元证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。

本报告的版权仅为金元证券所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

