

## 低空经济后续可能的新技术路线、新工艺梳理

2024年04月20日

➤ **本周关注：徐工机械、宏华数科、华翔股份、伊之密、海天精工**

➤ **eVTOL 四大螺旋桨构型均有应用场景，上游关注碳纤维切割和螺旋桨制造：**目前主流的 eVTOL 螺旋桨构型分为多旋翼、复合翼、倾转旋翼、倾转涵道四种，技术路线依次渐进。载人领域，安全性上以复合翼为最优，飞行性能上倾转旋翼最优，这两种构型主机厂采取较多，可能是未来发展重点。eVTOL 机翼和螺旋桨材料主要采用碳纤维和热塑复合材料，对精密切割有较大需求；螺旋桨和机翼主体设计制造由主机厂完成，涉及部分 3D 打印制造需求。

➤ **eVTOL 电机技术壁垒较高，需要高功率密度、高扭矩密度等核心要素：**  
1) 电机作为分布式电推进技术的核心，对于降低噪音、减少零部件数量、降低成本以及提供安全冗余至关重要；2) 永磁同步电机因其高功率密度及可靠性而被广泛采用，例如 Joby S4 和 Archer Midnight 等均采用此类电机；3) 飞行汽车对于电机要求较高，目前主流 eVTOL 公司均选择自主研发或国外主流电机公司提供电推进技术，卧龙电驱正积极携手商飞等合作研发及满足适航；4) 高效散热方式及材料的改进能够优化电机性能以及促进轻量化发展。

➤ **电池技术发展呈现多样化趋势，半固态电池有望率先量产，长期看好固态电池发展：**现阶段，国内普遍采用纯电技术路线，但续航能力弱，需提升电池能量密度突破载人航程限制。《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》对能量密度做出了具体要求：400Wh/kg 级航空锂电池产品投入量产，500Wh/kg 级产品小规模验证。目前，eVTOL 的主要选择是高镍三元液态锂电池。现阶段，电动航空领域的电池技术发展包括凝聚态电池、圆柱电池、半固态软包电池以及固态电池等多种形式。半固态软包电池具有更高的能量密度和更轻的重量，有望成为短至中期内的发展趋势。长期来看，发展趋势或通过半固态向全固态电池过渡，实现原材料迭代升级。

➤ **eVTOL 空管系统中需要一部多功能相控阵雷达替代多种单任务雷达：**当前的空中交通管理系统核心监控技术主要依赖于一次雷达、二次雷达以及广播式自动相关监控（ADS-B）。这些系统各自基于不同的工作原理和性能特点，被应用于特定的工作场景。然而，有源相控阵雷达（AESA）正在逐渐取代无源相控阵雷达，成为相控阵雷达技术的主流形式。有源相控阵雷达具备卓越的探测性能和反杂波能力，能够提供更完整的空域信息。其高灵活性和快速响应速度，结合更高的系统可靠性和更强的功率输出，使得其在功能多样性和机动性方面具有明显优势。能够应用在防空系统、海上防御系统、地面部署、气象监测、航空交通管理这些领域，以纳睿雷达为例他们与美国的 ATD、日本的 MP-PAWR 等技术路线一致，单套雷达的报价为 707.89 万元，可以应用到机场终端区以及航路监视领域，在提供高时空分辨率全极化三维气象信息的同时，还能提供独立于飞机自身设备以外的五维信息（距离、方位、俯仰、速度、航向），尤其适合用于未来的 eVTOL 空管系统。

➤ **投资建议：**地面空管系统中可能的变化，主要是雷达领域的种类替换，关注纳睿雷达；其次关注碳纤维材料的零部件加工可能拉动的新设备工艺，如爱科科技、精工科技。

➤ **风险提示：**1) 低空经济后续商业化落地不及预期。2) 低空经济后续技术路线发生较大变化。

推荐

维持评级



**分析师 李哲**

执业证书：S0100521110006

邮箱：lizhe\_yj@mszq.com

**分析师 占豪**

执业证书：S0100522090007

邮箱：zhanhao@mszq.com

### 相关研究

1. 大规模设备更新政策出台，轨交设备替换加速-2024/04/13
2. 一周解一惑系列：海工设备 FPSO 有望受益于高油价-2024/04/06
3. 一周解一惑系列：1-2 月出口强劲，美国补库或将开始-2024/03/31
4. 一周解一惑系列：“以旧换新”，工程机械受益几何-2024/03/24
5. 一周解一惑系列：AI 拉动晶圆、封测厂扩产，国产设备替代进行时-2024/03/11

# 目录

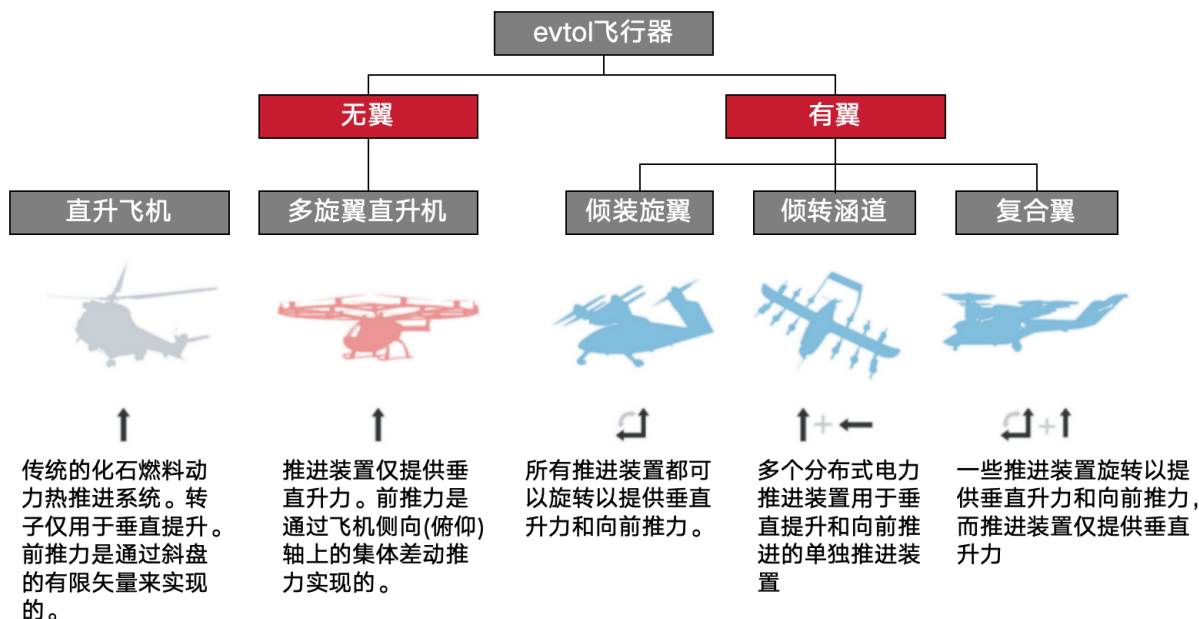
<b>1 飞行器构型、螺旋桨</b>	<b>3</b>
1.1 主流 evtol 螺旋桨构型及应用场景	3
1.2 主要翼形螺旋桨结构、材料特性与技术难点	6
<b>2 eVTOL 电机</b>	<b>8</b>
2.1 电机为 eVTOL 分布式电力推进技术核心	8
2.2 高功率密度、高扭矩密度为电机设计核心要素	10
2.3 永磁同步电机被广泛采用，颇具应用前景	10
2.4 电机技术要求较高，国内电机公司正积极开展研发适航项目	11
2.5 使用高效散热技术、新型材料以推进电机热管理及高性能轻量化发展	13
<b>3 能源系统、综合航电系统、飞控系统</b>	<b>16</b>
3.1 能源系统：电池技术发展呈现多样化趋势，半固态电池有望率先量产，长期看好固态电池发展	16
3.2 综合航电系统：部分采用进口，郊区载人运营已实现国产化	17
3.3 飞控系统：仍依赖于进口，国内飞控技术局限于无人机制造	18
<b>4 eVOLT 空管系统</b>	<b>20</b>
4.1 低空空域划分	20
4.2 空中管理系统	21
4.3 地面基础设施：起降平台	22
4.4 运行基础设施：监视、通信、导航	23
<b>5 投资建议</b>	<b>30</b>
<b>6 风险提示</b>	<b>30</b>
<b>插图目录</b>	<b>31</b>
<b>表格目录</b>	<b>31</b>

# 1 飞行器构型、螺旋桨

## 1.1 主流 eVTOL 螺旋桨构型及应用场景

### 1.1.1 四种 eVTOL 螺旋桨构型概览

图1: eVTOL 飞行器分类

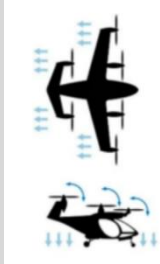


资料来源: 航空产业网, 民生证券研究院

表1: 四大 eVTOL 螺旋桨构型

构型	图示	技术原理	优势	劣势	应用场景
多旋翼		<ul style="list-style-type: none"> <li>通过成对变化定距桨旋转速度, 调整进入流量来实现飞行器姿态控制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>占地空间小, 可垂直起降, 精准悬停</li> <li>操作简单, 技术难度相对较小</li> <li>自重较轻、制造成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>能效较低</li> <li>航程短</li> <li>应用场景相对固定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>旅游观光</li> <li>消防救援</li> </ul>
复合翼		<ul style="list-style-type: none"> <li>将旋翼飞机和固定翼飞机的功能集合</li> <li>旋翼提供垂直矢量推力</li> <li>机翼提供升力和帮助巡航, 实现了垂直起降和平飞</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全性提升</li> <li>航程和巡航效率提升</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>固定翼占地面积较大, 不易折叠</li> <li>自重较大, 耗能较多</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>市内及城际间的通勤和物流</li> </ul>

倾转旋翼



- 旋翼可以根据需要调整方向
- 起飞阶段，旋翼像直升机螺旋桨那样提供升力
- 平飞阶段，旋翼可以向前倾转，提供向前的推力
- 升力则依靠固定机翼来解决
- 自重较轻，推力较大，航程和有效载荷有明显优势
- 垂直飞行和高速巡航表现良好
- 技术难点较多
- 复杂的机械设计、较高的控制难度，导致安全性较低、风险高
- 悬停效率低
- 市内及城际间的通勤和物流

倾转涵道



- 有机翼，无控制舵面，升力、推力、航向和姿态控制均由倾转涵道风扇提供
- 消除了开放性螺旋桨在安全方面的隐患能够直接改变推力线，实现从平飞到直飞的转换。
- 无控制舵面的完全矢量控制技术还未被任何传统飞机采用或者验证过，并非主流构型，可参考经验少。技术的难度较大

资料来源：航空产业网《eVTOL 机型总览与数据分析报告》，民生证券研究院

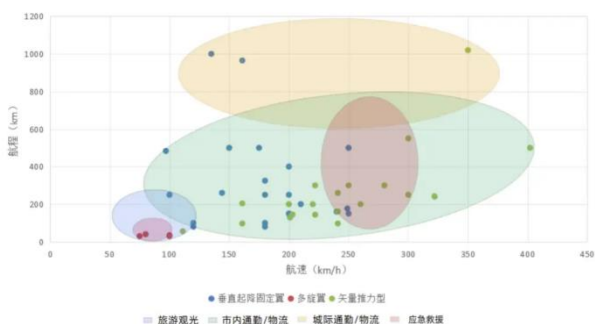
根据 eVTOL 在不同领域的应用情况，其应用场景大体可以分为三类：

一是相对较为成熟的场景，以多旋翼构型的轻小型无人机、农业植保无人机为主。在航拍、农业植保等代表性场景中，作为生产工具的 eVTOL 具有显著的成本、效率优势，已基本实现普及应用。

二是正处于成长期的应用，以复合翼构型的中大型无人驾驶 eVTOL 为主包括无人机的各类工业作业、城市物流配送等。由于空域管理与使用、运行风险等因素限制，成本优势不明显甚至更高，因此尚未实现大规模普遍应用。

三是仍处于创新探索阶段的应用，以面向城市载人交通运输（UAM）的大型 eVTOL 为主，多旋翼、复合翼和倾转旋翼等构型均有。这类机型需要建立专用通导监设施，使用专用起降场地。由于需要革命性技术跨越和数字绿色全新生态系统支撑，短期内尚难有成熟的产品进入实质性商业化运营。

图2：不同构型 eVTOL 应用场景



资料来源：航空产业网，民生证券研究院

## 1.1.2 多旋翼、复合翼与倾转旋翼的应用比较：

### (1) 从飞行性能来看

倾转旋翼通常被视为最优的选择，因为它在起降和巡航阶段都能展现出较好的性能。但是和复合翼相比，它的优势在 eVTOL 当前 200-300 公里航程范围内，倾旋翼型虽然在巡航时有很好的性能，但在起降时则可能需要更多的操作技巧和空间。多旋翼型则在起降时有着无可比拟的简便性，但在巡航阶段的性能并不理想。

### (2) 从安全性来看

复合翼型和倾转旋翼型都被认为是比较成熟的选择，而多旋翼型虽然在技术上较为简单，但可能在长期飞行中面临更多的安全风险。

### (3) 从 eVTOL 未来的应用方向来看

**货运将会是早期有限的尝试方向：**eVTOL 在货运的应用中最大的挑战将是经济性。使用这种新型飞行器，和传统的运输方式，卡车、火车或轮船等运输方式相比，从载重上来看，传统大运力的运载工具效率会更高很多，所以能够实现 eVTOL 货运商业闭环的场景将非常有限，但如果具备，其启动时机可能会比客运场景更早；**而客运有望是核心发展方向：**人的时间价值远远高于货物。广泛的空中出行将会是一个未来必然的方向，它会嵌入到人们的生活。效率上，可以极大提升城市交通的效率，同时因为没有颠簸及交通拥堵等问题，也会大大增加出行舒适度。因此更加注重安全性的复合翼可能更是未来方向。

### (4) 从适航认证的可行性来看

美国联邦航空管理局 FAA、欧洲航空安全局 EASA、中国民航局 CAAC 均有各自的适航要求。中国适航要求取得型号合格证 TC、生产许可证 PC、单机适航证 AC，一般需要 2~5 年。目前，市面上亿航智能、峰飞航空两家公司产品都取得了民航局的适航认证。



### 1.1.3 国内外主机厂构型

表2：国内外主机厂构型

构型	厂商	用途	用途	驾驶方式	
多旋翼	Volocopter	载人	VoloCity	有人驾驶	
			Voloregion		
	亿航智能	载货	VoloDrone	无人驾驶	
		载人	EH-216S	无人驾驶	
		消防	EH-216F		
复合翼	小鹏汇天	载人	“陆地航母”	有人驾驶	
	亿航智能	载人	VT30	无人驾驶	
			Eve	eVTOL	有人驾驶
			峰飞航空	盛世龙、V2000CG	无人驾驶
沃兰特航空	载人/载货	VE25	有人驾驶		
倾转旋翼	JobyAviation	载人	JobyS4	有人驾驶	
	ArcherAviation	载人	Midnight	有人驾驶	
	WiskAero	载人	Generation6	无人驾驶	
	VerticalAerospace	载人	VX4	有人驾驶	
	沃飞长空	载人	AE200	有人驾驶	
倾转涵道	Lilium	载人	LiliumJet	有人驾驶	

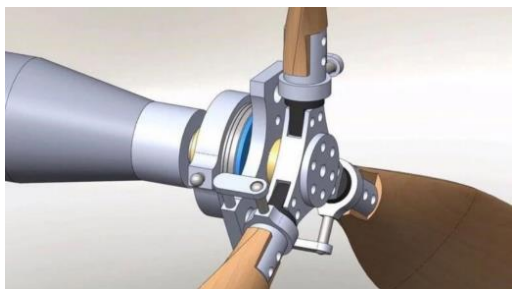
资料来源：各公司官网，民生证券研究院

当前国内外主流载人 eVTOL 公司采用最多的构型也是多旋翼、复合翼和倾转旋翼并且以后两者居多，中国的 eVTOL 头部公司亿航智能采取多旋翼构型在载人、载货、救灾三线并进，均使用无人驾驶技术，而其他构型有人驾驶居多。

## 1.2 主要翼形螺旋桨结构、材料特性与技术难点

### 1.2.1 eVTOL 螺旋桨结构：自动变矩螺旋桨

自动变矩螺旋桨作为一种成熟的技术，在 eVTOL 飞机中有着广泛的应用。与传统螺旋桨相比有显著不同，eVTOL 自动变矩螺旋桨（1）通过改变达到更大的安装角解决高速飞行时固定桨叶螺旋桨的推进力损失问题，扩大平飞飞行速度范围及抗风性；（2）通过调节桨叶角度顺桨，在电机失效时减小对应螺旋桨的飞行阻力，大大缓解风车状态对电动航空器电机及电池系统施加的压力，减轻或避免额外损害及向其他电气系统转移危险，以便在飞机起飞、悬停和降落时都能保持稳定。（3）部分电动倾转旋翼机采用变距螺旋桨提供反向推力，在没有起落架制动装置的情况下迫降过程使用螺旋桨提供制动力能够显著降低降落距离，对迫降点的环境要求大大减小。

**表3：螺旋桨变矩器结构**


(a) 螺旋桨变矩器结构



(b) 小鹏汇天公布的电动倾转旋翼机采用的自动变距螺旋桨

资料来源：飞行汽车之家，民生证券研究院

**变距螺旋桨的叶片部分多使用复合材料，如碳纤维增强塑料(CFRP)或者其他高性能复合材料。**因为复合材料具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点，适合用在螺旋桨叶片这样的高频振动部件上。同时，复合材料还可以通过精确控制纤维布局来实现对叶片性能的优化。

### 1.2.2 eVTOL 机翼材料特性：碳纤维材料为主，热塑复合材料为辅

根据 Stratview Research 的数据，eVTOL 中 90%以上的复合材料使用碳纤维进行增强，大约 10%的复合材料将以保护膜的形式使用玻璃纤维增强材。

此外，由于原始设备制造商的首要任务是尽快获得飞机认证，所以可以通过挑选经过测试和验证的材料来实现这一目标。迄今为止，由于热固性树脂一直是航空航天行业中使用最多的树脂类型，也是监管机构最熟悉热固性基体，因此超过 90%的 eVTOL 原始设备制造商正在通过热固性丰富平台进行认证。热塑性树脂系统仅用于第一代 eVTOL 的较小部分，然而随着产量增加到每年几千架飞机，向热塑性密集型结构的过渡是不可避免的，并且应用范围可以扩展到小部件以外。尽管如此，这一转变预计也将是渐进的，总的来说热塑性熟知材料可能在 2030 年之前占 eVTOL 中复合材料使用总量的 10%以下。

### 1.2.3 主要翼型技术难点：空气动力学问题

#### 难点一：气动干扰

倾转旋翼 evtol 在兼具直升机（或多旋翼）和固定翼无人机优点的同时也兼具二者的动力学问题，其复杂性也大于二者之和。在悬停状态下，旋翼-机翼气动干扰对该有效载荷具有重大影响，这种不利的气动干扰造成飞机有效载荷的降低。只有正确处理旋翼/机翼气动干扰，才能提高倾转旋翼无人机的有效载荷。

#### 难点二：飞行控制

为实现多种飞行模式多种飞行状态的操纵控制，倾转旋翼无人机的操纵控制系统可能是世界上最复杂的飞行器控制系统之一，尤其是倾转旋翼无人机在过渡模态时，存在明显的拉力矢量控制特性。同时，还存在着气动舵面操纵与拉力矢

量控制之间的协调问题，使得过渡模式下飞行控制系统设计变得更加复杂。

### 难点三：结构设计



倾转旋翼系统既要适用于高速前飞，又要兼顾垂直悬停效率，桨叶的形状、扭转及桨毂形式的设计都不同于常规的旋翼。而且，在机翼两翼尖处要安装旋翼系统，旋翼轴要相对机翼倾转，这就对机翼强度和气弹稳定性提出了更高的要求。

## 2 eVTOL 电机

### 2.1 电机为 eVTOL 分布式电力推进技术核心

电动垂直起降飞行器的动力系统采用**完全电气化的电推进技术**，从能源系统的源头重塑了飞行器动力体系架构，是航空电气化发展的新方向和更高级阶段。eVTOL 利用**电力推进电机**代替传统内燃机 (ICE) 为飞机提供动力。采用**分布式电力推进 (DEP) 技术**，通过多个电动机驱动轴直接连接到每个旋翼叶片上，无需传动装置，从而**降低噪音、减少零部件、降低成本**，并做到**安全冗余**，即使个别电动旋翼故障，也不至于像直升机那样直接坠落。与仅配备 1-2 个电机的电动汽车不同，飞行汽车需要 8-16 个电机且至少 8 个同步驱动，确保在最多一个电机故障的情况下依然能稳定悬浮，满足其对**安全性和可靠性**的高标准要求。

表4：国内外主要 eVTOL 公司产品及其电机概述

公司名称	产品名称	概述	图示
亿航智能	EH216-S	2023 年 10 月 13 日，亿航成功取得无人驾驶航空器许可证；2023 年 12 月 28 日，EH216-S 无人驾驶载人航空器获得由中国民用航空局颁发的标准适航证，成为全球首个获得适航证的无人驾驶载人电动垂直起降 (eVTOL) 航空器。2024 年 4 月，EH216-S 再次拿下行业内首张 PC。该飞机有 <b>16 个螺旋桨、16 个电动机</b> ，由电池供电。电池充电时间为 120 分钟。飞机的最大有效载荷为 220 公斤 (485 磅)。	
沃兰特航空	VE25	VE25 使用完全解耦的分布式动力架构 ( <b>8 升力系统+2 推力系统</b> )。独特的设计令叠加升/推力系统均可以进行独立起降，提供优于民航级别的应急着陆能力，可以轻松应对各种极限情况。复合翼架构，起飞重量 2.5 吨，可搭载 1 名驾驶员和 5 名乘客，是目前世界上已知载重能力最强、空间最大、研制等级最高的载人 eVTOL。	



峰飞航空	盛世龙	<p>峰飞航空自主研制的 5 座 eVTOL 航空器“盛世龙”，其<b>核心模组 100%国产化</b>，巡航速度可达 200 公里每小时。2023 年，“盛世龙”创造 2 吨级 eVTOL 单次充电飞行 250.3 公里的全球航程纪录，并且实现全球首次吨级以上 eVTOL 多架机、多机组、同空域、全转换的全尺寸验证机三机编队飞行任务。<b>峰飞航空科技具备强大的垂直集成能力，飞控航电、三电及核心零部件均具有完全自主知识产权，掌握超高功重比电机电控和大型机身轻量化高强度碳纤维复材核心技术。</b></p>	
小鹏	旅航者 X2	<p>旅航者 X2，最大起飞重量达到 800kg，<b>电机系统单体功率 50kW</b>；安全标准跟民航客机一个等级，电池、电机等动力系统双备份，飞控系统三备份，当一个系统“宕机”，另一个系统可以毫秒级切换。小鹏汇天公布了在 X2 上进行的单电机失效试验，当其中一个电机失效、桨叶停转后，X2 不仅能够做到在失效后依然保持姿态的平稳，还能继续可控飞行直至平稳着陆。这说明 X2 具有一定的动力冗余水平和飞控的容错控制能力，其研究成果也将应用在后续的飞行汽车产品上。</p>	
沃飞长空	AE200	<p>AE200 采用分布式电推进(DEP)技术，克服传统倾转机结构在可靠性和安全性上的短板，在机翼辅助下可在 300 米至 1000 米低空，以每小时 250 公里的速度飞行 200 公里至 300 公里，可用于城市群内的城际出行。</p>	
Archer Aviation	Midnight	<p>Midnight 飞机采用<b>永磁同步电机</b>，飞机有 12 台电动机。它的设计目的是，如果任何发动机在飞行过程中的任何时刻关闭（包括垂直起飞或着陆期间），都可以安全地完成飞行。在其推进系统的任何一个部分停止工作后，Midnight 仍可以继续安全飞行。Archer 的电机重量仅为 25 公斤，峰值功率输出为 125 千瓦，功率重量比为 5 千瓦/公斤。</p>	
Joby Aviation	Joby S4	<p>Joby Aviation 的 S4 是一款五座（一名飞行员和四名乘客）eVTOL，<b>该飞机有六个倾斜螺旋桨。四个螺旋桨垂直倾斜，包括整个电动机机舱。</b>两个螺旋桨通过连杆机构垂直倾斜。该飞机还拥有<b>六个由电池供电的高性能双绕电机</b>。据该公司称，该飞机的峰值功率几乎是特斯拉 Model S Plaid 汽车的两倍。<b>日本丰田汽车公司</b>将为 Joby Aviation 飞机的生产提供关键的<b>动力总成和传动部件</b>。</p>	

资料来源：各公司官网、搜狐网、东方财富网、eVTOL.news 等，民生证券研究院

## 2.2 高功率密度、高扭矩密度为电机设计核心要素

电推进技术通过**高功率密度电机**带动，为飞机提供部分或全部飞行推力。**电机重量**是电动飞机的设计要求的重要指标，高功率密度电机的优点是**重量轻以及效率高**。目前电机和控制器的最大功率密度在 10kW/kg 以下，未来商业化航空要求达到 20kW/kg。

根据表 5 中电动汽车驱动电机和电动飞机驱动电机的参数对比，飞行汽车对于电机的**扭矩密度**具有更高的要求。以美国通用 Bolt 电机为例，与罗罗公司用于电动飞机电机相比，其电机扭矩密度约为罗罗公司的 1/3。

**表5：电动飞机与电动汽车驱动电机参数对比**

	罗罗	magni650	EMRAX268	德国 宝马 i3	美国 通用 Bolt	日产 leaf
应用场景	电动飞机	电动飞机	电动飞机	电动汽车	电动汽车	电动汽车
峰值功率 kW	150	700	210	125	130	5.2/7.6
峰值扭矩 Nm	1500	3126 <sup>[2]</sup>	500	250	360	280
质量 kg	38	206.4	21.4	/	/	/
功率密度 kW/kg	3.9 <sup>[1]</sup>	3.4 <sup>[1]</sup>	9.8 <sup>[1]</sup>	2.6 <sup>[1]</sup> / 3.8 <sup>[2]</sup>	2.6 <sup>[1]</sup> / 4.6 <sup>[2]</sup>	1.5 <sup>[1]</sup> / 2.6 <sup>[2]</sup>
扭矩密度 Nm/kg	39.5 <sup>[1]</sup>	15.1 <sup>[1]</sup>	23.4 <sup>[1]</sup>	5.2 <sup>[1]</sup> / 7.6 <sup>[2]</sup>	7.1 <sup>[1]</sup> / 12.7 <sup>[2]</sup>	4.7 <sup>[1]</sup> / 8.5 <sup>[2]</sup>
效率	>95%	/	96%	97%	97%	97%



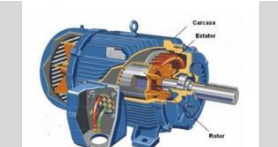

注：[1]功率和扭矩与质量比值；[2]数据来源：E-Mobility、国家机动车质量监督检测中心、美国阿岗实验室

资料来源：各公司官网、《电动航空用高性能动力系统的研发及应用》，民生证券研究院

## 2.3 永磁同步电机被广泛采用，颇具应用前景

与其他电机相比，**永磁同步电机**具有**高效率、高功重比、高可靠性**等优点，成为 eVTOL 电机的首选，是**电推进动力系统很具前景**的方案。当前电动垂直起降飞行器，如 Joby S4、Archer Midnight 等均采用了永磁同步电机。

表6: 永磁同步电机与其他电机优缺点对比

电机类型	优点	缺点	图示
永磁同步电机 (PMSM)	由于使用永磁体, <b>功率密度、效率和扭矩密度高</b> ; 结构坚固; 发热小, 电机冷却系统结构简单; <b>体积小, 重量轻</b>	成本较高, 由于稀土材料; 可能出现退磁现象	
感应电机 (IM)	结构简单、可靠性较高、成本易控; 弱磁控制容易	<b>扭矩效率、功率密度以及效率偏低</b> ; 需要更加高效和复杂的冷却系统; <b>体积、重量方面没有优势</b>	
同步磁阻电机 (SynRM)	无需永磁体, 降低成本; 结构坚固, 调速范围广; 动态性能好	<b>功率因数与 IM 相比较小</b> ; 成本增加以及逆变器功率损失	
开关磁阻电机 (SRM)	结构简单坚固; 高容错能力; 可靠性高; 成本低	显著的扭矩脉动; 噪声水平较高; <b>功率密度低</b> ; 维护成本高	

资料来源: 搜狐网、百度百科、与非网、频控科技官网, 民生证券研究院

## 2.4 电机技术要求较高, 国内电机公司正积极开展研发适航项目

电动飞机的驱动电机技术面临着严格的技术要求, 以确保其性能、环境适应性和安全可靠。这些技术要求包括实现 1) 高功率密度和高防护等级, 以适应复杂的飞行环境和提供优越的性能。同时, 2) 电机必须能够在极端的环境条件下运行, 包括高低温、湿热环境、低温低气压条件、盐雾、臭氧污染, 能够承受强烈的振动以及电磁兼容。为了确保安全可靠, 3) 驱动电机的设计还需要采用冗余设计和紧急降额设计, 以在关键时刻保证飞行安全。

目前, 国内外 eVTOL 代表企业如 Joby Aviation、Archer、亿航智能、峰飞航空等均选择自主研发电机电控装置; Volocopter 与赛峰达成了合作协议, 将从电推进系统 (EPS)、电池组导配电系统开展更广泛的工程合作; 沃兰特也选择赛峰为 VE25 配备电动智能电机; 罗罗公司为 Vertical Aerospace 以及空客 CityAirbus 提供电力推进装置; 此外美国 NASA 公司选择 GE 航空以及 magniX 公司为其开发飞机电推进技术。

## 2.4.1 国内电机领先企业卧龙电驱：正积极推进 eVTOL 电机产品研发及适航

卧龙电驱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。同时，公司与**中国民航科学技术研究院共建“联合实验室”**，参与**到航空电力系统相关标准制定**当中。研发产品主要在新能源汽车电驱系统的基础上，针对**飞行汽车安全性可靠性的更高的要求，以及更加严苛的轻量化要求**，在电驱的设计、算法、以及新材料的研发上有所突破。

自 2019 年起，遵循**“3+1”战略指导**，已成功构建涵盖**“小、中、大”三个功率等级的系列产品及一套民航适航标准**。截至 2022 年，2kW~30kW 的小功率产品，主要应用于工业无人机及 1~2 座 eVTOL，已开始向国内主流物流无人机企业小批量供样；50~175kW 的中功率产品，4 座 eVTOL 为主要应用，与国内主流 eVTOL 制造企业均有技术沟通，相关研发项目正在进行中；200kW 至 1MW 以上的大功率产品应用于十几座到几十座的支线飞机，以预研为主。在适航方面，公司牵头编写了 CCAR23-R4 H1801 条电推进适航标准及相关技术规范，并着力打造了满足适航环境测试要求 DO-160G 的综合试验中心。

2023 年 3 月 16 日，公司开发的小功率典型规格（17KW 电动力系统）完成所有台架及铁鸟测试；5 月 22 日，中功率典型规格（70kW 高功率航空电动力系统），顺利通过工信部组织的专家验收；6 月 18 日，小功率典型规格（30KW 涵道电动力系统），完成地面测试实验，所有指标均达到预期要求。

**表7：卧龙电驱“3+1”战略指导**

应用场景	功率范围	项目进度（截至 2022 年）
工业无人机及 1-2 座 eVTOL	小功率 2kW-30kW	已开始向国内主流物流无人机企业小批量供样
4 座载人 eVTOL	中功率 50kW-175kW	与国内主流 eVTOL 制造企业均有技术沟通，相关研发项目正在进行中
十几座到几十座的支线飞机	大功率 200kW-1MW	以预研为主

**牵头编写 CCAR23-R4 H1801 条电推进适航标准及相关技术规范**

资料来源：卧龙电驱官网，民生证券研究院

**表8：卧龙电驱与国外主流电机公司产品参数对比**

公司	最大功率 kW	最大扭矩 Nm	质量 kg	效率	冷却方式	功率密度 kW/kg	扭矩密度 Nm/kg	电池电 压
卧龙电驱	100	/	27	≥94%	风冷/液冷	2.59 (风冷)	/	400V
罗罗 (UAM)	150	1500	38	>95%	空气冷却	3.95	39.47	500-900V
magniX (magni650)	700	3216	206.4	/	油冷	3.39	15.58	500- 850Vdc
EMRAX	400	1000	43.1	92%-	空气冷却 (IP21) /	9.28	23.20	480-
			43.9	98%	液冷 (IP65)	9.11	22.78	800Vdc

资料来源：各公司官网、汽车产业上市公司研究、E-Mobility，民生证券研究院

## 2.5 使用高效散热技术、新型材料以推进电机热管理及高性能轻量化发展

为了满足飞行器电推进系统严苛的综合性能要求仍需进行技术创新与突破。新型电机材料、先进制造工艺和新型电机拓扑结构是提高推进电机功率密度、转矩密度、效率和可靠性的关键。大功率耐高温功率模块和智能化、高鲁棒性电机控制技术是电机控制器的重要发展方向。

### 2.5.1 高效散热技术

电机运行过程中产生的热量会降低电机的效率。温度和内部损耗会影响机器的扭矩/速度。温度必须保持在安全范围内，以确保电机有较长的使用寿命。为防止对机器造成危险，必须使用适当的冷却方法带走所产生的热量。

随着电机向高功率密度、高集成化和高可靠性方向发展，电机散热系统也逐渐向高效化、高可靠性和轻量化等方向发展。



表9：不同散热系统类型

散热系统类型	散热方式	优点	缺点
风冷（空气冷却）	自然风冷散热系统	制作工艺简单、成本低廉、可靠性高，广泛应用于小功率密度电机散热	适用电机发热量较小、电机可靠性要求较高、电机工作环境需要通风良好的散热场合
	强迫风冷散热系统	额外的风扇系统提高了电机的散热效率	一定程度上增加了电机系统的电力消耗和噪声，需要定期清理维护
液冷	水冷散热系统	无污染、成本低、比热容和导热系数较高	存在锈蚀、堵塞和渗漏等隐患
	油冷散热系统	具有极高的散热效率；可以降低定子绕组的平均温度，提高电机的功率密度	成本昂贵，需要严格的过滤系统对油介质进行过滤
蒸发冷却	自循环蒸发冷却	有效抑制电机温升，进而降低电机损耗，提高电机效率；效率显著高于油冷和水外冷；能耗低、可靠性高	蒸发冷却技术仍存在新型冷却介质选择、气液两相流的流动特性和传热计算方面的问题
	强迫循环蒸发冷却		
额外热路增强型	在电机原有风冷、液冷散热系统的基础上建立额外高效热路以提升电机散热效率	可以有效延长电机稳定运行时长、抑制电机温升，实现电机高效散热	系统组成复杂

资料来源：搜狐网，民生证券研究院

## 2.5.2 稀土材料钕铁硼（NdFeB）推进电机高性能轻量化发展

随着轻量化在航空领域变得越来越重要，基于钕铁硼（NdFeB）的电机可能会占据主导地位。钕铁硼（NdFeB）材料相较于其他材料，由于其高磁能积、出色的磁能密度以及矫顽力，使得电机能够在更小的尺寸以及更轻的重量内提供更高的磁场强度，从而提高电机的效率等性能。

图3：永磁铁的特性，永磁铁、同步磁阻电机和永磁辅助同步磁阻电机的比较分析

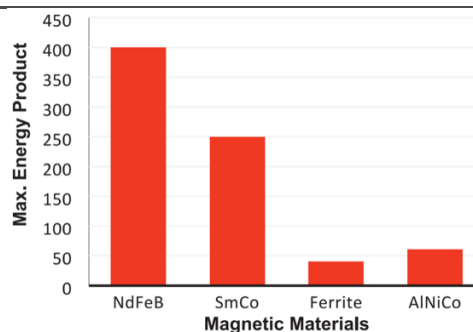
Magnet type	Residual flux density (Max) (B <sub>r</sub> ) - T	Coercive energy strength (Max) (H <sub>c</sub> ) - kA/m	Energy product (Max) BH <sub>max</sub> - kJ/m <sup>3</sup>	Cost, USD/kg
NdFeB	0.610-1.180	424.0-840.0	64.0-256.0	75.00
Ferrite	0.230-0.410	147.0-259.0	8.360-31.80	7.10
SmCo	0.830-1.000	480.0-600.0	128.0-192.0	100.00
AlNiCo	0.750-1.50	44.60-131.30	13.50-43.80	58.00

The kind of SynRel motor	The output torque (avg) (Nm)	Rise in torque (%) w.r.t the conventional SynRel motor	The permanent magnet mass (g)	Spike in the cost of material in \$ USD
Conventional SynRel motor	5.200	N/A	0	0
Type-1 (SmCo28)	7.130	37.110	464.80	46.480
Type-2 (NdFeB35)	7.520	44.610	414.40	31.080
Type-3 (AlNiCo9)	6.810	30.960	408.80	23.710
Type-4 (Ferrite)	6.280	20.760	274.40	1.940

资料来源：《Performance analysis of electric motors, comparing lightweight techniques and cooling methods: A review》Manoj Shrivatsaan M 等，民生证券研究院

图4：不同类型永磁体的最大能积



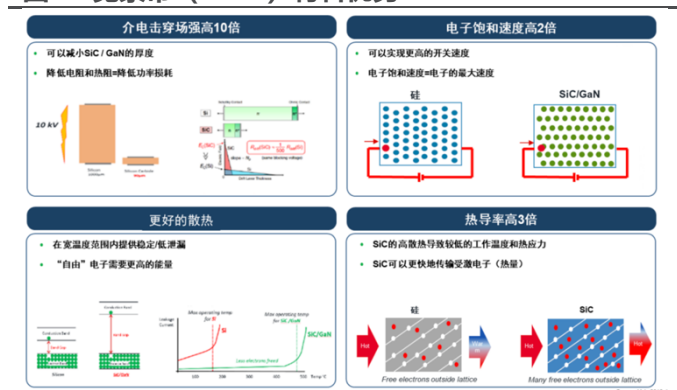
资料来源：《Performance analysis of electric motors, comparing lightweight techniques and cooling methods: A review》Manoj Shrivatsaan M 等，民生证券研究院

### 2.5.3 采用新一代碳化硅和氮化镓功率器件的电机驱动控制器是未来的发展方向

电机驱动控制器是保证永磁同步电机和超导电机高效可靠运行的必要设备，主要由控制模块和驱动模块两部分组成，控制电机速度、角度和方向。

采用新一代碳化硅和氮化镓功率器件的电机驱动控制器是未来的发展方向。近年来，电力电子领域最重要的发展是所谓的**宽禁带（WBG）材料**的兴起，即碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）。WBG 材料的特性有望实现**更小、更快、更高效**的电力电子产品。**碳化硅（SiC）功率器件**进入市场的时间比氮化镓（GaN）长，通常用于**更高电压、更高功率**的应用。

图5：宽禁带（WBG）材料优势



资料来源：亿伟世科技公司官网，民生证券研究院

### 2.5.4 非晶材料有望代替硅钢片

非晶电机，是用一种特殊的非晶合金代替电机里面的硅钢作为定子材料。非晶合金具有许多独特的性能，如**优异的导磁性、耐腐蚀性、耐磨性、高的强度和硬度**，**高的电阻率和机电耦合性能**，这些决定了非晶电机具有**体积小、效率高、损耗低、温升低**等优点，能大幅度提高电机效率、降低涡流损耗。

电机专用非晶带材拥有**低损耗、高磁导率、高饱和磁感应强度**等优势；非晶电机定子铁芯损耗可比硅钢铁芯降低**85%-95%**，可大幅度降低电机的铁损和温升，提高电机稳定性。具有高磁导率，可提高电机的响应速度，降低铜损以及磁性能高频衰减缓慢。

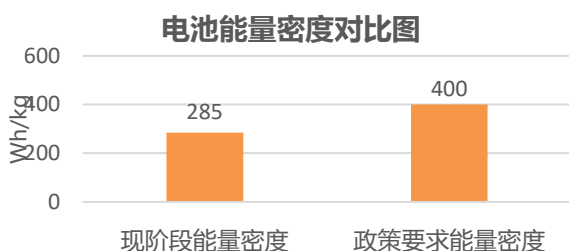
### 3 能源系统、综合航电系统、飞控系统

#### 3.1 能源系统：电池技术发展呈现多样化趋势，半固态电池有望率先量产，长期看好固态电池发展

相较于电动汽车，eVTOL 对电池高比能、安全性、快充及长寿命等的要求更高。目前，市面上量产的 eVTOL 动力电池（三元锂电池）能量密度已达到 285Wh/kg，飞行时间 43 分钟，最快飞行速度 320km/h，最长巡航距离 250km。

《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030 年）》对航空用锂电池的能量密度做出了具体要求：突破高能量密度锂电池、高比功率氢燃料电池、高效率电推进系统等关键技术，满足电动航空器使用需求和适航要求的 400Wh/kg 级航空锂电池产品投入量产，500Wh/kg 级产品小规模验证。

图6：现阶段和政府要求电池能量密度对比图（Wh/kg）



资料来源：澎湃新闻，航空之家，民生证券研究院

表10：eVTOL 动力电池各项指标参数

指标	参数	现阶段
能量密度 (航程范围)	2030 年目标 400Wh/kg 量产及 500Wh/kg 小规模验证; 2040 年目标 1000Wh/kg	285Wh/kg
功率密度 (安全性)	2030 年目标 1.25kW/kg; 2040 年目标 2.5kW/kg	
倍率	≥5C	5C
循环次数	≥10000 次	10000 次

资料来源：澎湃新闻，新华网汽车，民生证券研究院

目前，eVTOL的主要选择是高镍三元液态锂电池。使用三元材料（镍、钴、锰），高含镍量增加了能量密度和减少了钴的使用，故降低了成本，但能量密度仍未达到要求标准。现阶段，电动航空领域的电池技术发展呈现多样化趋势，包括凝聚态电池（宁德时代）、圆柱电池（正力新能、国轩高科）、半固态软包电池（孚能科技）以及固态电池（麻省固能、中创新航、亿纬锂能、欣视界）等多种形式。半固态软包电池相较于方形和圆柱电池，具有更高的能量密度和更轻的重量，有望成为短至中期内的发展趋势，暂时缓解目前全固态电池面临的技术挑战（生产成本高、规模化生产困难、电流密度较低等）。长期来看，未来产业化发展趋势会通过半固态向全固态电池过渡，实现原材料迭代升级，固态电池或成为eTVOL领域的最终解决方案。

表11：固态电池的优势及其现阶段发展

优势	现阶段发展
高能量密度	欣视界：>450Wh/kg；麻省固能：>417Wh/kg
长循环寿命 快速充电能力	实验室产品可达 5C 放电倍率 6000 次 循环，可几分钟内完成快速充电
高安全性能	在发生物理损害时不会像液态电池（液态电解质）容易发生泄漏或燃烧，极大降低安全风险
低温度敏感性	固态电解质对温度的敏感性较低，可在更广泛的环境温度下运行，增强应用灵活性

资料来源：东方财富网，投资界，中华汽车报，民生证券研究院

未来，若纯电电池能量密度得到大幅度提升，未必能直接减少市场对混动的需求，纯动的其他问题仍需同步解决，例如**充电基础设施普及，充电速度，高性能电池成本，电池寿命和回收处理等**。

## 3.2 综合航电系统：部分采用进口，郊区载人运营已实现国产化

eVTOL 这些系统的综合化和集成化对于确保飞行安全、提升飞行效率以及增强飞行员操作便利性至关重要。国产化综合航电系统可更好适应国内市场需求，针对国内城市特有地理和空域条件进行优化。国内已有企业正在进行研发和生产（华明航电、边界智控、昂际航电、磐拓航空等），表明中国在综合航电系统的国产化方面已经取得了相对成熟的进展，但目前只能做到郊区运营：大飞机综合航电系统采用进口（Safran 赛峰集团、Garmin 等），郊区载人运营综合航电系统国产化。

表12: eVTOL 综合航电系统子系统和组件定义及图示

子系统和组件	定义	图示
显示控制系统	飞行器驾驶舱内用于向飞行员提供关键飞行信息的系统，包括但不限于速度、高度、航向、飞行模式等。它通常由多个显示屏组成，配合控制面板，使飞行员能够实时监控飞行状态并进行必要操作。	
导航系统	用于确定飞行器的位置、速度和方向，通常包括 GPS（全球定位系统）、INS（惯性导航系统）、雷达等技术的应用，确保飞行器精确飞行至目的地。	
通信系统	涉及对飞行器各个系统状态的实时监控，包括发动机状态、电池电量、系统故障等，以便飞行员或自动驾驶系统做出快速反应。	
空中防撞系统	用于预防空中碰撞事故，通过监测周围空域中的其他飞行器，并在必要时向飞行员发出警告或自动进行避让操作。	
黑匣子	飞行数据记录器，用于记录飞行器的飞行数据和驾驶舱语音，以便在发生事故时分析原因，对提高未来的飞行安全至关重要。	

资料来源：搜狐新闻，金融界，民生证券研究院

### 3.3 飞控系统：仍依赖于进口，国内飞控技术局限于无人机制造

eVTOL 的飞行控制系统是确保 eVTOL 飞行安全、稳定和高效的核心技术之一。飞控系统是中国航空电子领域面临的主要挑战之一，尤其是在冗余性和安全性方面难以满足民用要求。国内供应商相对稀缺，存在少数飞控供应商，但技术只能用在无人机产业，其在民用领域的发展仍有待加强。国内有两类飞控系统供应商：技术成熟的传统供应商，包括军工单位、研究所和高校（例如中航工业 618 所、航天、北京航空航天大学 and 南京航空航天大学等）；新兴民营企业（例如边界智控、创衡、致导等）。目前，尽管国内个别厂家已掌握部分技术，但飞控系统的完整技术仍依赖于国外飞控供应商（Amazilla Aerospace、Daedadean、利勃



海尔航空航天等)。

表13: eVTOL 飞控系统主要系统硬件定义及图示

子系统和组件	定义	图示
传感器	<p>执行器的一种，通常用来精确控制飞行器上的控制面（如襟翼、方向舵等）或旋翼的位置。它们根据飞控计算机的指令调整角度，从而改变飞行器的姿态和飞行方向。传感器套件包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>惯性测量单元 (IMU)</b>：通过加速度计和陀螺仪测量飞行器的加速度、角速度，用于确定飞行器的姿态和运动状态。</li> <li>• <b>全球定位系统 (GPS) 接收器</b>：提供精确的地理位置和速度信息，对于路径规划和导航至关重要。</li> <li>• <b>气压计</b>：测量空气压力，从而推算飞行高度。</li> <li>• <b>磁力计</b>：测量地磁场强度，辅助确定飞行器的方向。</li> </ul>	
操纵杆	<p>飞行员用以输入控制指令的设备，可以控制飞行器的方向、高度和速度。在自动飞行模式下，操纵杆的作用可能会被计算机接管。</p>	
飞控计算机	<p>接收来自传感器的数据，计算并发出控制指令给执行器（如电机和舵机），是飞控系统的大脑。</p>	
电源管理系统	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>电池管理系统 (BMS)</b>：监控电池的状态，如电量、电压、温度等，确保电池安全、高效运行。</li> <li>• <b>配电板 (Power Distribution Board)</b>：负责将电源分配到飞控系统各个组件。</li> </ul>	
电机控制器	<p>调节电机的功率输出，控制飞行器的推力和旋翼的转速。</p>	
电动机	<p>驱动飞行器旋翼或推进器，提供垂直起降和水平飞行所需的推力。</p>	
通信系统	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>数据链路 (Data Link)</b>：确保飞行器与地面控制站之间的通信，传输控制指令和飞行数据。</li> <li>• <b>遥控/遥测系统 (Remote Control/Telemetry)</b>：允许远程控制飞行器并实时获取飞行状态信息。</li> </ul>	

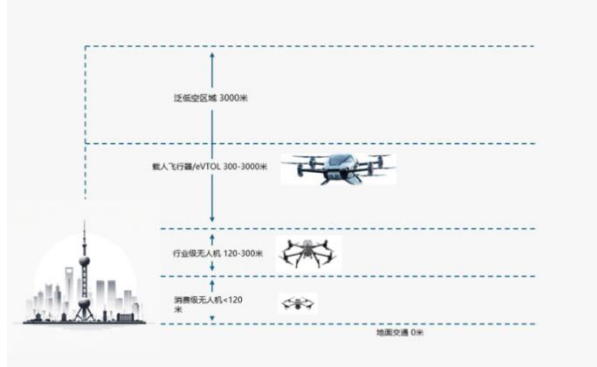
资料来源：华科尔无人机官方，电子发烧友，民生证券研究院

## 4 eVOLT 空管系统

### 4.1 低空空域划分

低空空域的多数应用活动集中在 1000 米以下，目前已扩展到了地面至 3000 米的高度区间。在这个高度层内，各类飞行器在指定的飞行层面执行任务，不同类型的飞行器运行在不同空域，不断完善着各自的使用场景。下图为各高度的飞行器类型以及各高度飞行器的适用场景。

图7：低空空域范围中的飞行器



资料来源：百度百科、DJI 官网、小鹏汇天官网，民生证券研究院

表14：各类飞行器使用场景

飞行器种类	飞行高度	飞行场景
消费无人机	< 120 米	个人摄影和航拍
		娱乐和休闲活动
		社交媒体内容创作
行业级无人机	120-300 米	农业监测，建筑和房地产
		基础设施检查
		地理信息系统 (GIS) 城市空中出行
载人/物电动垂直起降飞行器 (eVTOL)	300-3000 米	货物运输和递送
		特殊任务执行，紧急医疗服务

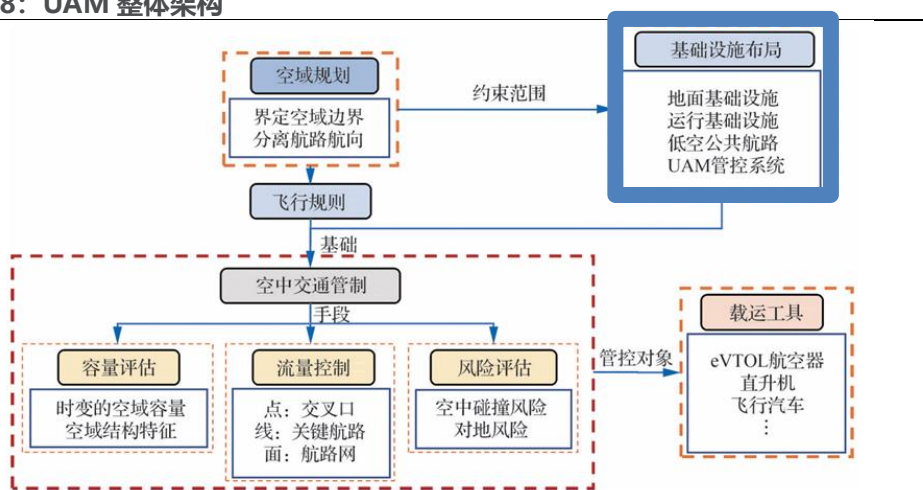
资料来源：百度百科、中国政府网，民生证券研究院

## 4.2 空中管理系统

空中交通管理系统 (Air Traffic Management System, 简称 ATMS) 是一个综合体, 其中包括现代空管系统主要组成包括空中交通管理系统、通信系统、导航系统、监视系统, 其中空管雷达是空管监视系统的重要组成部分。随着低空经济与城市低空空域的发展, 2018 年美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 明确定义“城市空中交通 (Urban Air Mobility, UAM)”。UAM 以 eVTOL 作为核心载运工具、以个人用户出行为特点, 旨在通过无人机和载客空中出租车等新型运载工具, 在人口稠密地区建立一个安全高效的空中运输系统。

UAM 作为一种新型交通方式, 其运行范围不再局限于水平空间, 且与地面交通联系紧密, 其引入会给城市内部交通系统带来根本性变革。下图为 UAM 涉及的全部基本内容, 其中主要关注的部分是基础设施布局板块的“地面基础设施”与“运行基础设施”。

图8: UAM 整体架构



资料来源: 中国知网, 民生证券研究院

地面基础设施主要关注点是垂直起降机场, 运行基础设施包括监视、通信和导航三大核心技术。具体分类情况见下方表格。

表15: 城市空中系统基础设施架构

主系统	基础设施布局	细分系统
城市空中交通	地面基础设施	起降平台 /
	运行基础设施	监视系统 雷达、ADS-B 通信系统 /

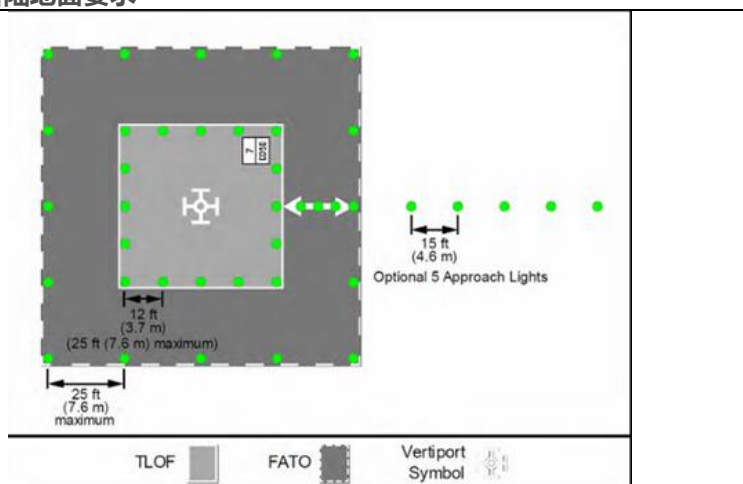
	导航系统	/
低空公共航路	/	/
UAM 管控系统	/	/

资料来源：中国知网，民生证券研究院

### 4.3 地面基础设施: 起降平台

UAM 地面基础设施可充分利用现有的城市设施，例如垂直起降机场可选用在火车站等重要交通枢纽处，也可以是建筑物顶层、直升机位等已有基础设施处，这有利于降低前期基础设施建设成本。美国联邦航空局（FAA）推荐使用垂直起降机场识别符号，如下图中间所示。

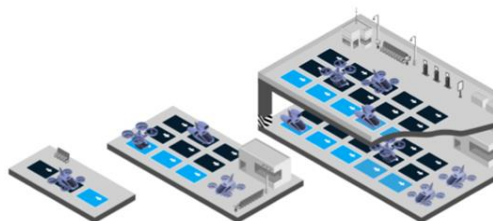
图9：着陆地面要求



资料来源：Federal Aviation Administration (美国联邦航空管理局)，民生证券研究院

根据麦肯锡的报告，飞行汽车需要在地面建立起支持其运营的基础设施包括垂直起降场（VTOL）用于飞行器的起降、电池充电或燃料加注站，以及为飞行器提供维护、停放的设施以及停机坪主要组成和成本

图10: eVTOL 停机坪



资料来源: McKinesy&amp;Company, 民生证券研究院

表16: 飞行汽车停机坪的主要组成和成本

	Vertipad (垂直停机坪)	Vertibase (垂直基地)	Vertihub (垂直中心)
面积	100x60 英尺长	230x100 英尺长	400x175 英尺(两层)
着陆/起飞垫	1	3	10
停车/充电点	2	6	20
资本支出 (百万美元)	0.2-0.4	0.5-0.8	6.0-7.0
业务支出 (百万美元)	0.6-0.9	3.0-5.0	15.0-17.0

资料来源: McKinesy&amp;Company, 民生证券研究院

#### 4.4 运行基础设施: 监视、通信、导航

空中交通管理系统中运行基础设施发挥着至关重要的角色, 它包括监视、通信和导航三大核心技术。监视系统通过雷达和自动相关监视-广播 (ADS-B) 等技术, 实时监控空域中的所有航班动态, 为空管提供精确的飞行数据, 保障飞行安全。通信系统是空管系统的神经中枢, 确保了空中交通管理人员与飞行员之间的实时、清晰通信以及各类信息。导航系统则为飞行员提供准确的位置信息, 确保航班能够按计划路线飞行, 这包括了从传统的地面导航到先进的全球卫星定位系统 (GPS)。这三大系统相互依赖, 共同构成了空中交通管理的基础, 确保了航空运输的高效和安全。更加先进的有源相控阵雷达 (Active Phased Array Radar, APAR) 已经小规模应用。



#### 4.4.1 监视系统简述

雷达系统中的一次、二次雷达、广播式自动相关监控（ADS-BA）和相控阵雷达为空管系统提供核心的监控技术，它通过环境感知与避障、空中交通监控、天气监测，以及精确导航和着陆辅助等功能，大幅提升了eVTOL的安全性和操作效率。

表17：各雷达细分、工作原理以及优劣势

雷达细分系统	工作原理	优势	局限性
一次雷达	一次雷达通过发送无线电波并接收从物体（如飞机、船只、车辆等）上反射回来的信号来工作。	自主性 全面覆盖	有限的信息  易受干扰
二次雷达	二次雷达依赖于目标物体上的一个被动设备，称为应答机（transponder），一次雷达发出的信号被应答机收到后，它会发出一个响应信号。	丰富的信息 高精度 效率高 抗干扰	应答机依赖性强  隐私和安全低
ADS-B	基于飞行器自身的卫星导航系统（如GPS）来确定其精确位置、速度和其他飞行参数。这些信息随后通过飞行器上的ADS-B发射器以电磁波的形式自动且定期广播出去。	提高空中交通安全 增加空域容量 提升飞行效率	设备升级成本高 隐私顾虑 易受干扰 依赖外部系统
相控阵雷达	有源相控阵雷达包含多个独立的发射/接收模块（T/R模块），每个模块都拥有自己的发射源和接收器，安装在雷达的天线阵列中。	灵活性和响应速度 更高的系统可靠性 更强的功率输出	成本高 维护复杂 散热需求
	无源相控阵雷达使用共享的发射源，其天线阵列仅包含接收模块，不包含独立的发射模块。	成本低 简化的维护 较低的功率消耗	灵活性较低 响应速度较慢 功率输出限制

资料来源：百度百科，民生证券研究院

#### 4.4.2 一次雷达简介：

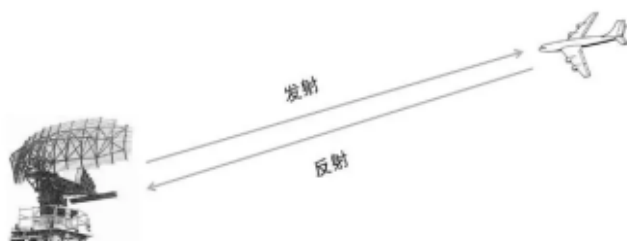
一次雷达可以分成机场监视雷达、航路监视雷达、机场地面探测设备三类。

- 1) **机场监视雷达（ASR: Airport Surveillance Radar）**：它的作用距离为100海里，主要是塔台管制员或进近管制员使用。
- 2) **航路监视雷达（ARSR: Air Route Surveillance Radar）**：设置在航管控制中心或相应的航路点上。它的探测范围在250海里以上，高度可达13000米。它的功率比机场监视雷达大，在航路上的各部雷达把整个航

路覆盖，这样管制员就可以对航路飞行的飞机实施雷达间隔。

- 3) **机场地面探测设备 (ASD)**：它的功率小，作用距离一般为 1 英里，主要用于特别繁忙机场的地面监控，它可以监控在机场地面上运动的飞机和各种车辆，塔台管制员用来控制地面车辆和起降飞机的地面运行，保证安全。它主要的作用是在能见度低的时候提供飞机和车辆的位置信息，由于它的价格较高，机场通常没有这种设备。

图11：一次雷达示意图



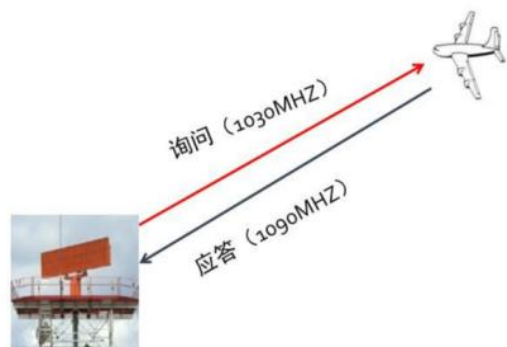
资料来源：简说民航，民生证券研究院

#### 4.4.3 二次雷达简介：

二次雷达是由询问雷达和应答雷达所组成的无线电电子测位和辨认系统。询问雷达发射电磁波，应答雷达(又称雷达信标)接收到询问电磁波后被触发，发射应答电磁波，询问雷达根据接收到的应答电磁而工作，实现识辨和测位。

二次雷达的询问雷达和目标上的应答雷达之间按主动扫描询问和被动应答配合工作。询问雷达一般固定在地面，其扫描波束的脉冲用询问信号编码，应答雷达的应答脉冲带有自身代号的编码。

图12：二次雷达示意图



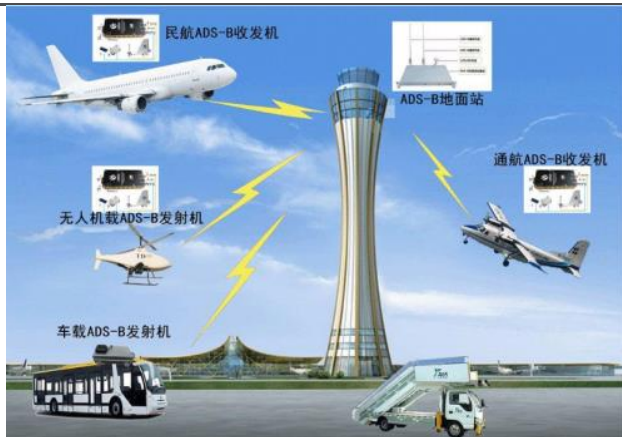
资料来源：中国知网，民生证券研究院

#### 4.4.4 广播式自动相关监控 (ADS-B) 简介

广播式自动相关监控 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B) 是一种先进的航空监控技术。它使得飞行器能够基于卫星定位系统 (如

GPS) 确定自身的位置、速度和其他飞行数据, 并通过无线电信号自动广播这些信息。这些信息可以被地面接收站和空中的其他飞行器接收, 从而提高空中交通的透明度和安全性。

图13: ADS-B 示意图



资料来源: 三航雷达官网, 民生证券研究院

#### 4.4.5 有源相控阵雷达简介

有源相控阵雷达 (Active Phased Array Radar, APAR) 是一种高度先进的雷达系统, 它利用多个小型发射/接收模块 (T/R 模块) 组成的大型阵列进行操作。这些 T/R 模块分布于雷达的整个天线面上, 每个模块都具有自己的发射和接收功能, 使得雷达能够通过电子方式快速、灵活地控制波束的方向、形状和频率。这种设计显著提升了雷达的性能和可靠性, 广泛应用于军事防御、气象监测、航空交通控制和海洋监视等领域。

图14: 有源相控阵雷达工作示意图



资料来源: 纳瑞雷达官网, 民生证券研究院

表18：有源相控阵雷达的使用场景、优劣势及技术挑战

雷达细分系统	工作原理	优势	局限性	技术挑战
有源相控阵雷达	防空系统 海上防御系统 地面部署 气象监测 航空交通管理	灵活性和响应速度 更高的系统可靠性 更强的功率输出	成本高 维护复杂 散热需求	高成本 散热问题 技术复杂性

资料来源：百度百科，民生证券研究院

#### 4.4.6 有源相控阵雷达的优势

根据美国强风暴实验室了解到美国政府需要一部多功能多任务的相控阵雷达替代多种单任务雷达（包括气象雷达、空管雷达和边境防御雷达等），可有效减少美国本土的雷达总数。

在空管应用领域，中国民航局制定的《低空飞行服务保障体系建设总体方案》指出要提升低空通信监视能力和低空航空气象服务能力等。国务院办公厅制定的《国务院办公厅关于促进通用航空业发展的指导意见》提出要研发适用我国低空空域通信、导航、监视、气象与空中交通服务需求的核心装备，开展重大适航审定实验室等建设，提升行业运行、服务、安全的管理和技术水平。

有源相控阵雷达正取代无源相控阵雷达，成为相控阵雷达的主要形式，有源相控阵雷达的优势：

- 1) 灵活性和响应速度，同时相控阵天线通常采用数字化工作方式，雷达与数字计算机相结合，大大提高了自动化程度，简化了雷达操作，使之具有较高的反应速度
- 2) 更高的系统可靠性，相控阵雷达应用固态器件越来越多，甚至已出现全固态相控阵雷达。由于单个固态组件功率小，故障率低，所以具有极高的可靠性。其次，相控阵雷达的阵列组较多，且并联使用，即使有少量组件失效，仍能正常工作，突然完全失效的可能性很小。
- 3) 更强的功率输出，相控阵雷达可以利用分布在天线子 L 径上的多个辐射单元合成非常高的功率，并能合理地管理能量和控制主瓣增益，可以根据不同方向上的需要分配不同的发射能量，易于实现自适应旁瓣抑制和自适应抗各种干扰，有利于发现远离目标和小雷达反射面目标
- 4) 功能多，机动性强，可同时监测气象目标和非气象目标。

美国、日本在全球领域民用相控阵雷达研究进展较快。2002 年，美国强风

暴实验室 (NSSL) 联合多家单位把宙斯盾舰船上的 1 部相控阵雷达 (SPY-1A) 改装成相控阵天气雷达 (NWRT)，并进行了外场探测试验，这是天气雷达历史上的第一部具有相控阵快速扫描的雷达，随着 NWRT 外场试验展现出的精细化探测结果，相控阵技术逐渐走入天气雷达领域。

以纳睿雷达为例子，纳睿雷达的有源相控阵雷达，单套雷达的报价为 707.89 万元采用微带贴片阵列天线的技术路线，与美国的 ATD、日本的 MP-PAWR 等产品的技术路线一致。可以应用到机场终端区以及航路监视领域，在提供高时空分辨率全极化三维气象信息的同时，还能提供独立于飞机自身设备以外的三维信息 (距离、方位、俯仰、速度、航向)。

图15：纳睿雷达示意图



资料来源：纳睿雷达官网，民生证券研究院

图16：纳睿雷达性能参数

项目	参数	性能指标
协同相控阵雷达指标	探测覆盖范围 (4台)	~3000km <sup>2</sup>
	雷达探测范围	~250km
相控阵控制指标	相控阵扫描分辨率	≤0.2s
	相控阵方位角分辨率	≤2°
	相控阵扫描控制精度	≤10%
协同探测数据处理指标	相控阵扫描控制精度	≤0.01s
	基本气象产品生成速度	H~20km (H代表雷达扫描高度，无降水信息时)
	从数据生成到产品生成用户桌面时间	≤10s
	协同探测数据空间分辨率	30°30m
	协同探测数据时间分辨率	45s

资料来源：纳睿雷达官网，民生证券研究院

表19：各雷达工作场景对比

雷达细分系统	细分雷达	工作场景
一次雷达	机场监视雷达	它的作用距离为 100 海里，主要是塔台管制员或进近管制员使用易受干扰
	航路监视雷达	设置在航管控制中心或相应的航路点上。它的探测范围在 250 海里以上，高度可达 13000 米。它的功率比机场监视雷达大，在航路上的各部雷达把整个航路覆盖
	机场地面探测雷达	它的功率小，作用距离一般为 1 英里，主要用于特别繁忙机场的地面监控，它可以监控在机场地面上运动的飞机和各种车辆，塔台管制员用来控制地面车辆和起降飞机的地面运行，保证安全。



<b>二次雷达</b>	/	询问雷达和目标上的应答雷达之间按主动扫描询问和被动应答配合工作。询问雷达一般固定在地面，其扫描波束的脉冲用询问信号编码，应答雷达的应答脉冲带有自身代号的编码
<b>ADS-B</b>	/	无需人工操作或者像二次雷达一样去询问，飞机会自动地将自己的位置、高度、速度、航向、识别号等信息向其他飞机或地面站广播，以供管制员及飞行员对飞机状态进行监控
<b>有源相控阵雷达</b>	/	可以应用到机场终端区以及航路监视领域，在提供高时空分辨率全极化三维气象信息的同时，还能提供独立于飞机自身设备以外的五维信息（距离、方位、俯仰、速度、航向）

资料来源：百度百科、纳睿雷达官网，民生证券研究院

## 5 投资建议

电机领域与海外差距较大，螺旋桨领域技术路线的变化并不会直接导致生产工艺的变化，依然是大量使用“碳纤维”材料，核心的差异在于螺旋桨的设计。

因此重点推荐地面空管系统中可能的变化，主要是雷达领域的种类替换，关注纳睿雷达；其次关注碳纤维材料的零部件加工可能拉动的新设备工艺，如爱科科技、精工科技。

## 6 风险提示

### 1) 低空经济后续商业化落地不及预期。

当前低空经济主要响应政策指引，各地政府陆续出具发展规划，但实际的场景落地方式和商业化仍需要一段时间才可有具体落地案例与运营数据测算，因此低空经济相关商业模式的可行性有一定不确定性。

### 2) 低空经济后续技术路线发生较大变化。

当前低空经济的商业化仍处于初期阶段，因此只能从理论角度分析未来硬件端、配套基础设施端需要的技术趋势，但伴随着政策和商业化。

## 插图目录

图 1: eVTOL 飞行器分类.....	3
图 2: 不同构型 eVTOL 应用场景.....	4
图 3: 永磁铁的特性, 永磁铁、同步磁阻电机和永磁辅助同步磁阻电机的比较分析.....	14
图 4: 不同类型永磁铁的最大能积.....	14
图 5: 宽禁带 (WBG) 材料优势.....	15
图 6: 现阶段和政府要求电池能量密度对比图 (Wh/kg).....	16
图 7: 低空空域范围内的飞行器.....	20
图 8: UAM 整体架构.....	21
图 9: 着陆地面要求.....	22
图 10: eVTOL 停机坪.....	23
图 11: 一次雷达示意图.....	25
图 12: 二次雷达示意图.....	25
图 13: ADS-B 示意图.....	26
图 14: 有源相控阵雷达工作示意图.....	26
图 15: 纳睿雷达示意图.....	28
图 16: 纳睿雷达性能参数.....	28

## 表格目录

表 1: 四大 eVTOL 螺旋桨构型.....	3
表 2: 国内外主机厂构型.....	6
表 3: 螺旋桨变矩器结构.....	7
表 4: 国内外主要 eVTOL 公司产品及其电机概述.....	8
表 5: 电动飞机与电动汽车驱动电机参数对比.....	10
表 6: 永磁同步电机与其他电机优缺点对比.....	11
表 7: 卧龙电驱“3+1”战略指导.....	12
表 8: 卧龙电驱与国外主流电机公司产品参数对比.....	13
表 9: 不同散热系统类型.....	14
表 10: eVTOL 动力电池各项指标参数.....	16
表 11: 固态电池的优势及其现阶段发展.....	17
表 12: eVTOL 综合航电系统子系统和组件定义及图示.....	18
表 13: eVTOL 飞控系统主要系统硬件定义及图示.....	19
表 14: 各类飞行器使用场景.....	20
表 15: 城市空中系统基础设施架构.....	21
表 16: 飞行汽车停机坪的主要组成和成本.....	23
表 17: 各雷达细分、工作原理以及优劣势.....	24
表 18: 有源相控阵雷达的使用场景、优劣势及技术挑战.....	27
表 19: 各雷达工作场景对比.....	28

## 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登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、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。

## 评级说明

投资建议评级标准	评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
	谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
	中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上
行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
	中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上

## 免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。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而导致的任何可能的损失负任何责任。

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准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

## 民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026