

# ▶ 驾乘低空经济新风 畅享新质出行体验

# // 联合发布单位



## 关于中国航空学会

中国航空学会是由航空航天科学技术工作者及相关领域的单位自愿结成并依法登记成立的全国性、学术性、非营利性法人社会团体，是中国航空工业的专业学术组织，旨在促进航空科技的发展和创新，服务航空行业的发展和应用。



## 关于中国汽车工程研究院检测工程事业部

中国汽车工程研究院股份有限公司检测工程事业部拥有国家机动车质量检验检测中心（重庆）、国家汽车质量检验检测中心（广东）、国家智能清洁能源汽车质量检验检测中心三大国检中心，拥有智能汽车安全技术全国重点实验室等科研平台。



## 关于天翎科

天翎科航空科技（上海）有限公司是一家空中专车 eVTOL（电动垂直起降飞行器）整机设计制造商，致力于用高安全、高性能、低噪声的倾转涵道翼飞行器构建未来城市空中交通网络，实现高品质的空中出行。

# 摘要

## //01 市场

以 eVTOL 为代表的低空经济成为新质生产力和新增长引擎代表，行业赛道持续火热，预计 2030 年前后将形成一个近万亿规模的庞大市场

## //02 商业化运营成本与应用场景

与传统交通方式相比较，eVTOL 在商业化运营单位成本上极具优势，预计纯电构型单台每公里综合运营成本将在 9.2-15.7 元之间，混动 eVTOL 单台每公里综合运营成本将低至 7 元

我们预计，以 eVTOL 为主要交通工具的商业化运营将首先城内 / 城际（无人）物流运输、短途载人运输和载人观光旅游等场景铺开。随着产业链和社会接受度逐步提高，市内通勤与城际交通将成为未来最大细分应用场景

## //03 eVTOL 主机厂

eVTOL 飞行器的研发与制造横跨多个学科且高度复杂，前期投入大，回报周期长。目前 eVTOL 主机厂在着力攻关高压电气动力系统和动力架构等共性技术难题。对主机厂而言，从产品构型选择上，坚持长期主义，审慎选择技术路线；从产业链垂直整合上，深入产业链上游，掌握核心技术；从产品规划与定义上，精准理解用户需求，抓准市场进入的时机和方式，将是决定主机厂成败的关键所在

## //04 低空经济产业链

eVTOL 飞行器量产价格与后期运维成本将成为决定该行业成败的关键因素之一。新能源汽车等行业发展经验与成熟产业链切入 eVTOL 赛道将为行业带来巨大规模效应和降本抓手。用户应用场景的多样性与产业链相关技术的不断成熟将不断突破产品性能边界，碳纤维机身、固态电池等领先技术将在 eVTOL 行业迎来大规模商业化落地契机。同时，端到端的数据安全合规与保障在后期商业化运营中对保障飞行安全和用户隐私也至关重要。另外，eVTOL 飞行器对低空大气环境影响剧烈，合理的机型选择和飞行计划安排对未来商业化运行密度和运营效率至关重要

# 时代潮涌： 专家寄语

低空经济在我国发展新质生产力大潮中脱颖而出，它将对中国经济全局以及长远发展产生重大影响。发展低空经济要以技术创新与场景拓展的深度融合引领产业升级，要持之以恒长期培育耐心经济，从而催生低空经济新技术、新产品、新业态。布局发展低空经济可以带动基础设施投资和制造业、服务业、文旅业等相关产业发展，促进消费升级，形成新的经济增长引擎。

- 中国航空学会

今天的技术基础和全新的应用场景，正在双向驱动低空航空器向完全区别于传统航空器的形态进化。这不仅是技术的革新，更是理念的颠覆。只有积极探索、勇于实践、敢于突破才能占据先机；同时认真研究、详尽验证、久久为功才能最终实现。

- 杨世春，北京航空航天大学交通科学与工程学院院长

近年来，新型航空器 eVTOL 在全球的迅速发展正成为推动未来交通变革的重要载体。eVTOL 在电动新能源、智能网联、无人驾驶方面与汽车产业供应链高度重叠，不仅降低了 eVTOL 的研发和生产成本，还加速了其商业化进程；未来，交通级 eVTOL 在低空融合空域运行环境的复杂性更接近于现有地面交通，汽车行业基于交通工具 - 消费者 - 应用场景的安全生态体系，可以为未来 eVTOL 的规模健康发展提供很好的借鉴。中国汽研作为国家级科研平台和载运工具检验检测机构，将致力于 eVTOL 的高质量适航检验检测，促进立体交通产业健康可持续的融合发展。

- 周建文，中国汽研检测工程事业部副总经理

在国家政策的大力支持和地方政府的积极推动下，中国低空经济正迎来历史性发展机遇，从 2D 向 3D 交通转变是大势所趋，eVTOL 必将成为未来城市和城际空中交通的主力军。中国面积广大，地理特征和经济发展不尽相同，各地政府和相关投资机构也必将根据当地特点，有针对性的推动低空产业在地方的落地。

- 宗佩民，华睿投资董事长

作为低空经济最早的投资人和并购人，我有幸见证了这个行业的早期发展，从愿景和概念到产品落地。从风险投资的角度来看，现在是最佳的入场时间，行业的爆发就在未来的 3-5 年间。而中国有机会领先新能源航空领域这一新的赛道，也必将诞生一批独角兽企业。

- 李轶梵，前吉利集团 CFO

当今世界，气候变化和能源危机日益严峻，航空电动化是一个重要发展趋势，中国作为一个负责任的大国，需要有能力为地区和世界输出解决方案，发展 eVTOL 等低空航空器是这一解决方案的关键所在。中国应在 eVTOL 等低空航空器的关键技术研究、产品研制和应用方面走到世界的前列！

- 郑日恒，国际宇航科学院院士



# 目录

<b>前言</b>	<b>06</b>
<b>01 大鹏一日同风起，扶摇直上九万里</b>	<b>08</b>
——中国 eVTOL 未来市场蓝图	
近一年来主要宏观政策变化	09
eVTOL 应用场景与客户需求	11
运营商视角下的商业化运营成本测算	14
商业化路径发展之思	17
中国市场未来可期	21
<b>02 长风破浪会有时，直挂云帆济沧海</b>	<b>25</b>
—— eVTOL 主机厂的制胜之道	
不同构型设计带来的商业化机遇与挑战	24
非倾转构型与倾转构型之比较	25
开放式螺旋桨与涵道风扇之比较	26
纯电、增程与氢能能源路线之比较	28
中国及世界主要 eVTOL 主机厂近期进展	30
eVTOL 主机厂成功要素	31
<b>03 千磨万击还坚劲，任尔东西南北风</b>	<b>36</b>
—— eVTOL 产业链发展之道	
主要子系统产业链发展趋势与制胜要素	37
eVTOL 产业链未来发展关键方向	43
<b>结语</b>	<b>46</b>

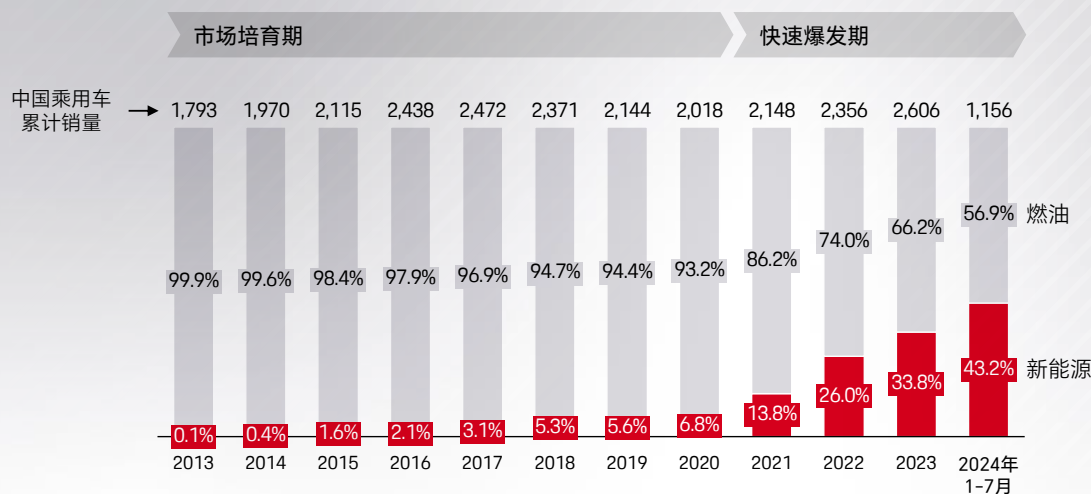
# // 前言

作为保时捷管理咨询新兴产业瞭望的系列白皮书之一，《2023 中国垂直出行市场展望报告》发表以来受到社会各界的广泛关注。过去一年，中国及世界范围内低空经济蓬勃发展，尤其自 2023 年 12 月中央经济工作会议将低空经济纳入战略性新兴产业和新质生产力代表行业之一后，低空经济正式上升为国家战略，政府、eVTOL 主机厂、产业链、生态体系伙伴、金融机构等各方通力协作有力地促进了行业的快速发展。

作为区别于传统交通方式的新物种，eVTOL 依托其安全、环保、经济、高效等独特优势，已在低空旅游、农林作业、空中物流等领域展现出巨大潜力。同时，eVTOL 产品的发展将持续推动空气动力学、飞行力学、结构力学、仿生学、材料学、计算机控制等多学科交叉融合发展。面向未来，其在缓解城市交通阻塞、

提升城市应急响应能力、推动航空业互补发展乃至国防军事领域都将拥有无可比拟的巨大潜力。

诚然目前低空产业仍处于早期探索和市场培育阶段，但纵观历史我们相信，未来 eVTOL 的发展路径将与新能源汽车发展路径存在相似性，蕴含丰富的早期投资机会。我们认为当前 eVTOL 所处阶段或类似于新能源汽车 2010-2013 年期间，此时新能源汽车处第一轮推广应用阶段。该阶段国家战略层面提出汽车业电动化技术转型战略，明确新能源汽车为战略新兴产业。而到 2024 年上半年，中国占世界新能源汽车份额已经超过 65%，7 月份新能源乘用车批发量占当月乘用车总销量更是超过 50%，正式标志着新能源汽车在过去十余年间政策引导下的快速崛起，从“少数派”成长为“多数派”（图 1）。



单位：万辆

注：新能源版块含纯电动、狭义插电混动和增程式三类能源路线市场份额。

资料来源：乘联会，案头研究

图1：中国新能源汽车市场渗透率概览

随着汽车电动化浪潮逐渐步入中局，电池技术的不断进步带来续航里程的不断增加，充电时间逐渐缩短，为智能化设备在车端稳定运行提供了持续可靠的能源基础。电动化促使汽车的电子电气架构从分布式架构向集中式架构转变，从而更好地将车辆控制功能集中到少数几个高性能计算平台上，提高了数据处理效率和系统协同工作能力，为智能化时代下自动驾驶、智能座舱等复杂场景应用提供了强大算力支持和数据传输保障。另外，电动化浪潮在供应链端带来关键零部件的技术成熟和成本降低，车企可在不大幅提高售价甚至降价的情况下为车辆配置更多智能化设备与功能。销量的提升反过来进一步促进了技术迭代与软硬件的持续降本。终端消费者在面对全新定义的汽车产品时，更加追求智能、便捷、个性化的产品交互体验，从而不断推高社会对汽车智能化的接受度和期待水平，在需求端加速了新能源汽车的智能化浪潮。

如今，eVTOL 作为低空经济的代表力量，行

业整体已经完成了从 0 到 1 的开拓，商业化进程蓄势待发，正以前所未有的速度塑造未来的四维立体交通格局，并在发展过程中呈现出与新能源汽车相似的政策依赖性与市场潜力。而与汽车行业不同的是，eVTOL 产品自诞生起就对飞行器的安全性、可靠性和运行环境的成熟度等存在更高要求，产品的性能指标以及对环境的适配性势必将在 eVTOL 行业商业化时期成为产品竞争力最重要的衡量因素。

随着 eVTOL 的商业落地，飞行器与公众的接触将越来越频繁密切，它不再是远离人们日常生活的独立个体，人们的观念和法规的关注点也将逐渐从飞行器本身延伸到机外环境和对公众的影响，融入人们的日常生活成为 eVTOL 产品的必要条件。

本文将在第一版白皮书的基础上，围绕 eVTOL 市场前景、商业运营、构型路线、产业链发展等维度带来保时捷管理咨询最新洞察成果，以期行业的快速健康发展贡献绵薄之力。

# 01

# 大鹏一日同风起 扶摇直上九万里

## 中国 eVTOL 未来市场蓝图

自 2023 年下半年以来，随着垂直起降产业的快速发展，全球头部 eVTOL 主机厂在产品研发、试飞验证、审批取证等阶段取得较快进展。随着产业政策逐步推出和落地，行业内生态合作伙伴纷纷入局，展现出万物竞发、百舸争流的蓬勃景象。基于保时捷管理咨询相关行业经验，结合业内专家输入，我们可以逐渐勾勒出一幅更切实可行、回报可期的商业化前景。



## // 近一年来主要宏观政策变化






参考新能源汽车产业历史发展，中央与地方政府出台了一系列政策鼓励产业发展，同时监管条例逐渐清晰。随着eVTOL技术与商业逻辑逐渐清晰，上下游产业链快速发展，自2023年9月以来，国家和地方层面均出台了多项鼓励低空载人飞行器产业发展的相关政策与法规。

在2023年12月召开的中央经济工作会议中明确提出：“一是以科技创新引领现代化产业体系建设……打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业”，这标志着低空经济产业正式上升至国家战略层面，作为新质生产力的代表，低空经济已成为推动中国经济转型升级、培育新动能的关键领域。

2024年3月，低空经济首次被写入政府工作报告，并被赋予了“新增长引擎”的重要地位。报告明确指出要“发展低空经济，推动通用航空和无人机产业健康发展”。

同月，工信部、科技部、财政部、民航局四部门联合发布了《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030年）》。该方案提出，到2030年通用航空装备将全面融入各个领域，推动低空经济成为经济增长的重要动力，预计形成万亿级市场，表明顶层政策设计显著提速。

低空空域管理的多轮试点和改革为低空经济的爆发奠定了坚实基础。随着低空空域管理权责逐渐下放至地方政府，责权统一的问题基本解决。同时，新空域分类方法进一步细化了空域划分，放宽了对G/W空域的管制，为低空经济的发展铺平了道路（图2）。

促进因素	主要进展
 空域开放	<p>2023 年 11 月，民航局发布了《中华人民共和国空域管理条例（征求意见稿）》，在真高 300 米以下画设了 G 类非管制空域。新的划分方法有利于低空飞行器在非管制空域灵活飞行。</p> <p>2024 年 11 月，中央空管委将在合肥、杭州、深圳、苏州、成都、重庆六市开展 eVTOL 试点，600 米以下空域管理权部分授权地方政府，相关地方政府需承担更多管理责任。</p>
 基建支撑	<p>截至 2023 年底，全国共建成飞行服务站 32 个，已有 28 个已经通过地区管理局的符合性检查，已有 27 个实现了与区域信息处理系统的互联互通。</p>
 法规完善	<p>2023 年 5 月，国务院、中央军委颁布《无人驾驶航空飞行管理暂行条例》，并将于 2024 年 1 月 1 日起正式实施，标志着我国无人机产业将进入“有法可依”的规范化发展新阶段。</p>
 产业政策推动	<p>2024 年 2 月，深圳市政府正式实施《深圳经济特区低空经济产业促进条例》，是全国首部低空经济产业促进专项法规。</p>
 审批加速	<p>2024 年 4 月，亿航智能获得全球首张 eVTOL 生产许可证，成为全球首家三证齐全的低空飞行器的生产商。</p>

资料来源：民航局，中国政府网，保时捷管理咨询整理

图2. 近一年来中国eVTOL标志性政策进展

在适航审定领域，相较于美国联邦航空局（FAA）和欧洲航空安全局（EASA），我国在推进无人驾驶载客eVTOL的适航取证工作上展现出了更为积极的态度。截至目前，FAA与EASA尚未颁发民用无人驾驶载客eVTOL的适航证，而我国在这一领域已取得了显著进展。通过民航局今年持续优化低空航空器的审定流程，目前已有两型eVTOL通过适航认证，我国在低空飞行领域的适航审定积累的经验已处于国际领先地位。审定经验的积累和流程优化为低空经济的发展奠定了坚实基础。

2024年10月14日，15个城市联手多家企业宣布共建低空经济生态圈。这15个城市将与电信运营商合作，利用5G和北斗高精度定位技术开发低空飞行路线和示范区，打造集通信、导航、遥感和空域监管于一体的低空网络。通过建设低空综合运营平台，推广飞行监管、低空物流、应急救援等应用，计划到2025年实现

100个低空经济标杆项目。这意味着低空经济正从政策中的概念向实际应用加速落地。15城共建低空经济生态圈不仅能够完善技术和基础设施，还能够扩展低空飞行器的应用场景并为行业带来示范效应。

2024年11月18日，中国航空运输协会通航业务部、无人机工作委员会在2024国际电动航空（昆山）论坛上透露，中央空管委即将在六个城市开展eVTOL试点，六个试点城市初步确定为合肥、杭州、深圳、苏州、成都、重庆。试点文件对航线和区域都有相关规划，对600米以下空域管理权部分授权地方政府，意味着相关地方政府需承担更多管理责任，同时也有助于提高地方政府投资积极性，并为其城市布局低空经济提供相关参考。

2024年12月25日，发改委牵头交通、民航、工信、公安等部门，宣布低空经济司正式挂牌成立，这将有助于在政策制定、行动落实、产业协同等方面做到统筹一致，也有利于帮助低空经济健康有序地发展。国家层面的重视、配套政策法规的完善加上各级地方政府的全方位支持标志着技术、政策、市场三方面的力量正在合力推动低空经济进入高速发展阶段（图3）。

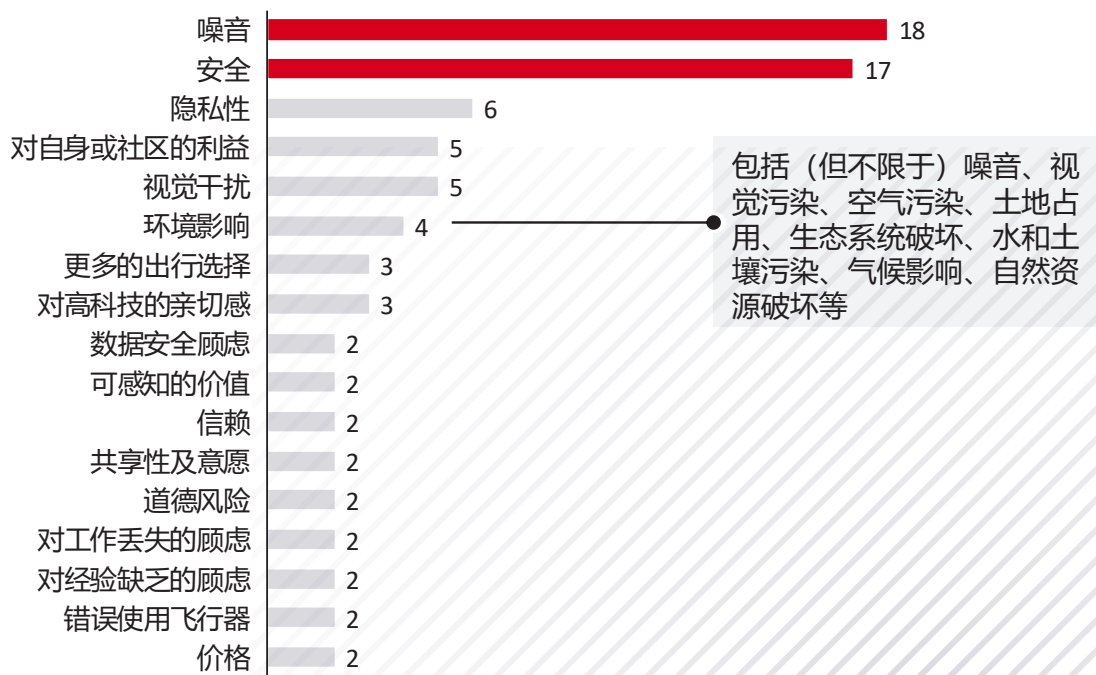
顶层设计	<p>《国家综合立体交通网规划纲要》</p> <p>国务院 2021.2 构建现代化高质量国家综合立体交通网</p>	<p>2023年中央经济工作会议</p> <p>国务院 2023.12：大搞低空经济等若干战略性新兴产业</p> <p>《2024年政府工作报告》</p> <p>国务院 2024.3：积极打造低空经济等新增长引擎</p>	<p>《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》</p> <p>工信部、科技部、财政部、民航局 2024.3 2027年，无人化、电动化、智能化新型通航装备在城市空运、物流配送、应急救援等领域实现商用 低空经济将在2035年左右形成万亿级市场规模</p>
	<p>《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》</p> <p>国务院、中央军委 2023.5 我国无人驾驶航空器管理的第一步专门行政法规</p>	<p>《国家空域基础分类方法》</p> <p>民航局、国家空管委 2023.12</p> <p>《中华人民共和国空域管理条例（征求意见稿）》</p> <p>低空空域管理改革，放开低空空域</p>	<p>《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》</p> <p>交通运输部 2023.12 适航/操作员/运行等链条管理</p>
地方政府积极响应	<p>《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案（2024-2027年）（征求意见稿）》</p> <p>《广州市低空经济发展实施方案》</p>	<p>《深圳市支持低空经济高质量发展的若干措施》</p> <p>《合肥市低空经济发展行动计划（2023-2025）》</p>	<p>北京、深圳、广东、广州、合肥、无锡、湖南、四川、山西、武汉、珠海、杭州、南京、苏州等</p> <p>中国约有30个省（市、自治区）将低空经济等相关内容写入政府工作计划，为eVTOL运营提供了利好的政策法规、大力的资金支持和补贴、以及基础设施和运营场地的支持，为建立可持续的低空生态系统铺平了道路</p>

资料来源：中国政府网，案头研究

图3. 各级政府部门大力支持低空经济发展政策节选

# // eVTOL应用场景与客户需求

eVTOL作为城市空中交通的载运工具，可渗透到人口密集的城市中心，开展点对点的交通运输。基于2021年欧洲航空安全局（EASA）的市场调研（图4），公众对城市低空交通方式的顾虑主要围绕噪音、安全性等因素，同时，对视觉和环境的干扰、隐私性等因素同样值得重视。



单位：%，n = 188个受访者提及了“社会接受度”关键词

资料来源：EASA, 2021年《欧洲城市空中交通的社会接受度研究》

图4. eVTOL社会接受度影响因素

为满足可持续、可以盈利的商业化运营，我们认为至少有五个关键条件需要满足：

**安全性：**eVTOL不能对机上和地面的生命安全造成威胁。不同于传统飞行器的运行环境较为偏远，与大众的日常生活隔离，eVTOL将在城市人口稠密区域运行，飞行器除了需对机上人员的安全性提供保障之外，也需要保证整体运行环境的安全。

**乘坐体验：**eVTOL需要具备优于直升机和小型固定翼飞机的乘坐体验，飞行更稳定、舱内噪音低，同时eVTOL的起降不能对地面社区造成噪声污染。

**实用性：**eVTOL需要满足多样化的出行需求，具备更大的续航里程，解决人们的里程焦虑。具有单次补能多次起降的能力，执行复杂的接驳任务。多种舱内布局适配不同的应用场景。

**合理价格：**eVTOL的使用成本必须远低于直升机，匹配更大受众群体地面出行的价格区间。

**高效率：**eVTOL需要实现相比现有的交通方式显著更优的效率。这包含了尽可能地缩短地面接驳的时间，简化上机流程，以更快的飞行速度到达目的地。

具体从应用场景而言，目前eVTOL涉及下列多个领域和不同的客户群体，对应了不同的用户需求。对于载人类eVTOL而言，主要有下列应用场景和用户需求：

**市内通勤：**主要解决城市居民和商务人士的城市交通拥堵问题，提供快速、便捷的短途城内或城郊通勤服务。

**城际交通：**为城市间的通勤者提供城市间快速连接，扩大人类的一小时生活半径。满足城市群更高效的商务差旅需求，实现一天多城的工作节奏。在地面交通不便的区域，如偏远地区或岛屿等，可提供班次化的出行服务，满足当地居民或者到访旅客的出行刚需。

**医疗救援：**针对医疗机构、急救服务等用户提供快速医疗人员和医疗器械运抵急救现场，或将重症患者快速转移至医院的服务。

**消防应急：**为消防部门提供快速响应火灾与救援服务，进行空中灭火和救援作业。

**警务巡逻/城市安防：**为政府机构开展空中巡逻、治安安防、监控搜索等公共任务提供便捷。

**旅游观光：**对于旅游行业、游客等群体提供独特的空中游览体验，增强旅游吸引力，增加旅游收入。





除载人类eVTOL, 载物类eVTOL还可以提供城市物流配送、农业作物检测与农药喷洒、国防军事防卫打击等重要服务。随着技术不断成熟、综合成本不断降低, 预计低空经济还将有更多全新场景涌现。鉴于短期内市场规模潜力与社会影响力, 我们详细总结了下列六大应用场景对应的用户需求、部分法律监管要求及飞行器的性能参数边界(图5)。

	警务安防	物流配送	医疗与消防救援	观光旅游	市内通勤	城际交通
场景描述	通常不涉及重型装备或大规模人员运输需求, eVTOL 在市区环境中低速飞行, 但因巡逻需持续数小时时间, 对飞行器最大航程提出较高要求	在非人口密集区以特殊场景 / 支线物流配送为主, 在人口密集区以市内配送 / “最后一公里”为主	eVTOL 飞行器需携带医疗设备、救护人员、伤员等, 对飞行器载荷提出较高要求。同时, 救人、救火等场景对飞行器飞行速度和航程也提出较高要求	景区、游乐园等场地开展空中旅游服务, 游客可通过 eVTOL 体验一览众山小的美景, 如深谷、高峰、瀑布、荒岛等	取代传统出租车等形式, 满足乘客按需、点到点的出行。一般乘客携带手提行李或以团体形式出行, eVTOL 需高频穿梭于城市复杂地形	常见于中短途跨城交通场景, 主要取代汽车、短途高铁等交通工具, 乘客一般会携带行李, 对出行时效性要求不一
一般运行高度 (m)	★★★ ~0-120	★★★ 市内 0-120 为主, 城郊 0-600 为主	★★★★★ ~0-600	★★★★★ ~0-600	★★★★★ ~0-600	★★★★★ ~0-600
最大时速 (km/h)	★★★ ~80-150	★★★ 市内 80-120 为主, 支线 >150	★★★★★ >200	★★ ~80-120	★★★★ ~80-150	★★★★★ >200
续航里程 (km)	★★ ~20-50	★★★★★ 支线 >300 km <sup>1</sup> , 市内 >100km <sup>1</sup>	★★★★★ ~200-400	★★ ~20-50	★★★ ~50-100	★★★★★ ~200-400
环境适应性	★★★ 可在一般天气下起降	★★★★ 可在较恶劣天气条件下起降	★★★★★ 可在极端天气下起降	★★ 可在天气良好时起降	★★★ 可在一般天气下起降	★★★ 可在一般天气下起降
低空运行安全性	★★★★★ 常在人口密集城区运行	★★★ 视配送场景而定	★★★ 视救援场景而定	★★ 常在人口稀少地区运行	★★★★★ 常在人口密集城区运行	★★★ 在人口密集 / 稀疏区运行
运行噪音	★★★★★ 夜间噪音需小于 45 dB 昼间噪音需小于 55 dB	★★★★★ 支线物流对噪音要求极低 市内物流参考市内通勤噪音标准	★★★ 通常对噪音要求较低	★★ 地面对噪音要求较低	★★★★★ 夜间噪音需小于 45 dB 昼间噪音需小于 55 dB	★★★ 夜间噪音需小于 50 dB 昼间噪音需小于 60 dB
低空运行经济性	★★★ 对运营成本要求较低	★★★★★ 对运营成本要求极高	★★★ 对运营成本要求较低	★★★★ 对运营成本要求较高	★★★★★ 对运营成本要求较高	★★★★★ 对运营成本要求较高

1. 满载时续航里程。

资料来源：专家访谈，案头研究

图5. eVTOL商业化初期主要应用场景与对应需求

# // 运营商视角下的商业化运营成本测算

作为区别于传统交通工具的新质载体，运营经济性的成功对于eVTOL的可持续健康发展至关重要。而作为行业内对全生命周期总拥有成本较为敏感的用户，低空经济的运营服务提供商在城内通勤、城际交通等大规模应用场景下扮演着举足轻重的作用。虽然整个低空经济产业发展尚处于早期，但本文希望通过探讨运营商视角下eVTOL业务的商业经济性，进一步识别商业化运营过程中可能存在的机遇与挑战。

财务测算将基于保守、中性和乐观三大情境下对应的参数变量与典型取值。同时，具体变量的数值计算亦着重参考了现有通航、民航等成熟行业内财务测算的部分通行算法。另外，鉴于不同构型、不同能源路线的eVTOL飞行器在巡航速度、最大航程、最大载荷、能耗效率等方面均存在差异，本文成本测算的主要前提假设具体参见附录1。

基于假设，我们可以得到下列三种针对单台混动eVTOL飞行器在单位里程下的运营成本测算结果，具体见图6。

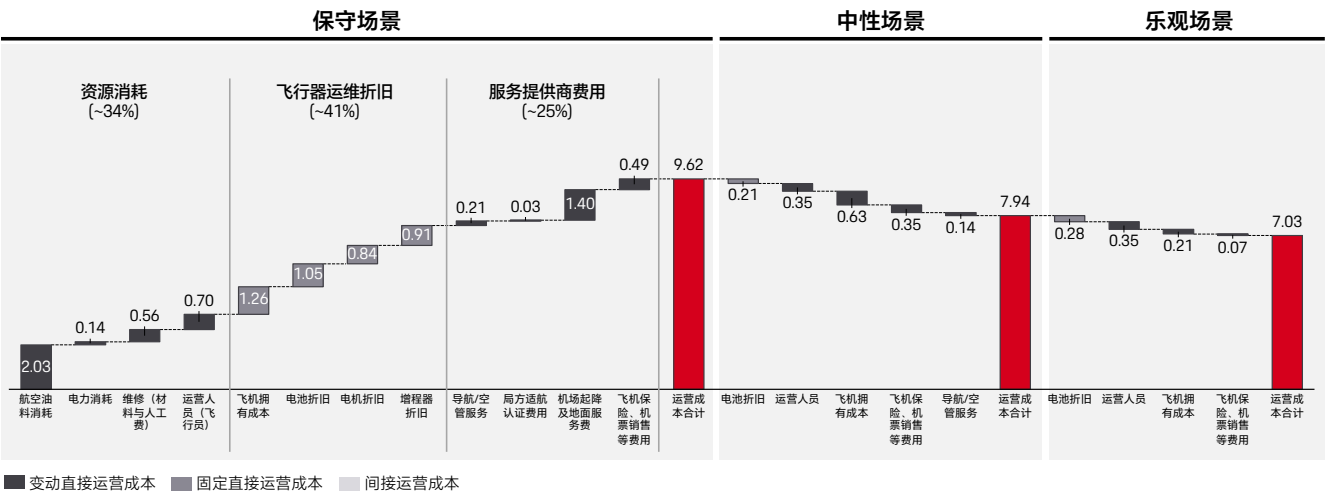


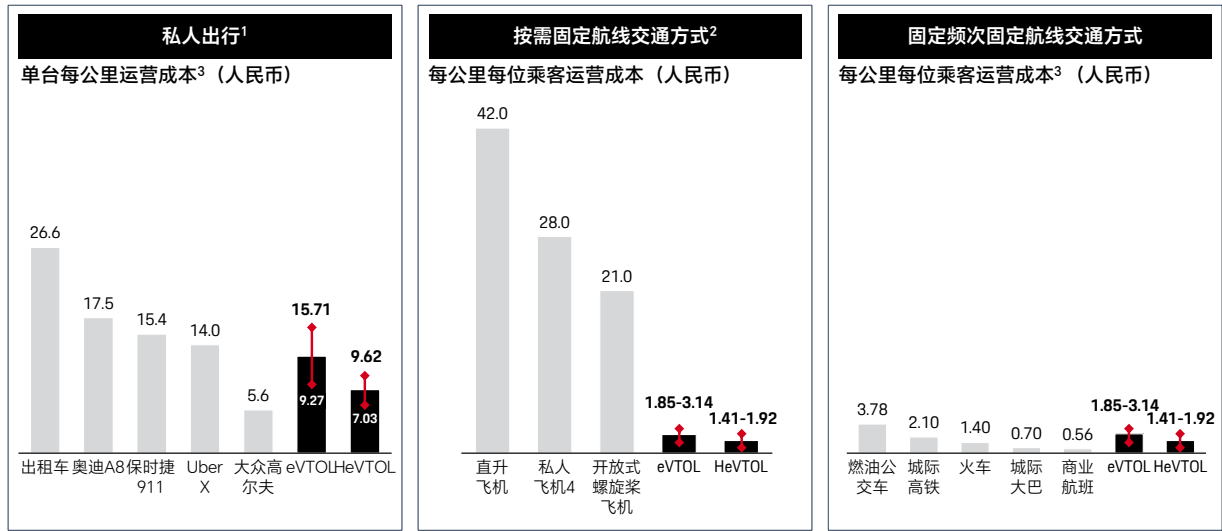
图6. 混合动力eVTOL商业化运营单台每公里成本估算

通过上述分析，我们至少可以得到以下四点洞察：

# 01

基于给定假设前提、飞行器构型等条件下，单台eVTOL每公里运营成本可低至7-9.6人民币/公里，而按一台eVTOL可搭载5名乘客计算，每公里每座成本将低至1.41-1.92元/公里/座，与传统交通方式在单位里程单位乘客的计算口径上相比具备较高成本竞争力(图7)。事实上，基于当前假设条件，以直线距离约100公里的旅程计算，如

果eVTOL单座票价按140-240元售卖，其票价已与同期售卖的高铁复兴号商务座(全价票约人民币160元)相当，具有极强的市场竞争力。而140元-240元的票价建立在运营商10%毛利率的基础上采取成本加成定价得出，相较于传统民航客机个位数的毛利率水平已有巨大优势。



↑ 基于保守、中性、乐观三种场景

1. 鉴于私人出行特点，其载荷系数（load factor）均未设置。2. 假设满座。  
3. 空中飞行交通方式（如商业航班）飞行距离按1.4倍等效地面交通路线长度换算。

资料来源：保时捷管理咨询分析

图7. 各类出行方式单位运营成本比较

# 02

飞行器运维与折旧成本占到总运营成本的41%，是第一大成本项。受制于尚不完善的供应链体系，现有eVTOL主机厂在关键系统和零部件的开发采购过程中，仍需大量依赖已有航空航天体系中的成熟供应商。而相对较小的采购量和较长的开发认证周期，又无法带来较好的规模经济效

应，导致飞行器BOM成本高昂，从而推动了飞行器全生命周期总拥有成本和关键零部件更换及大修的费用。中长期看，随着产业链逐步完善和规模经济效应持续释放，我们预计将迎来飞行器售价和运维成本的逐步下降。

## 03

基于现有测算假设前提，各项运营成本开支中，飞行器运行中对能源、人力等资源的占用和消耗占比为34%，为第二大成本开支项。而能源消耗中，因发动机耗油带来的成本又占到了资源消耗总成本的47%。如果飞行器能源路线更换为纯电，在相同续航里程的情况下，预计将带来约60%的能源消耗节降。但与此同时，现有的动力电池技术水平对于100公里的航程来说，单次

充满电情况下最多支持2次起降，高度依赖地面充电基础设施，无法满足有多次起降要求的复杂接驳任务。其次，频繁的电池充放电次数循环会加速电池老化，进而增加了电池折旧的成本。因此，虽然纯电路线相较于增程路线具有单位能耗上的优势，但在考虑到电池折旧成本后的总运营成本，纯电飞行器的经济性表现远不如混动飞行器（图8与图9）。

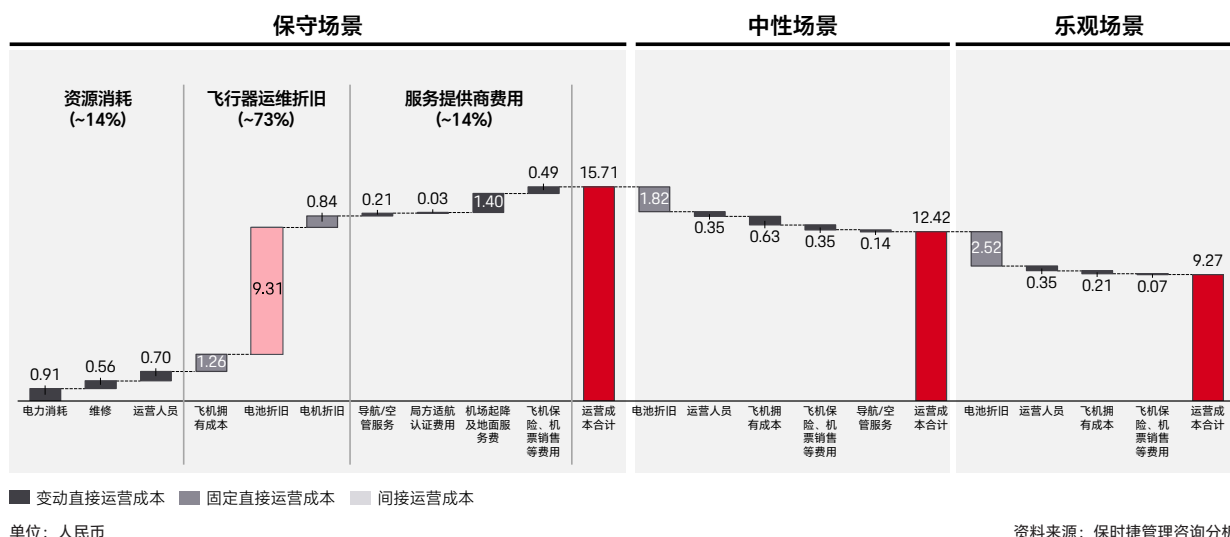


图8. 纯电eVTOL商业化运营单台每公里成本估算

## 04

与传统民航和新能源汽车等产业类似，更高的资产利用率和更高的智能化水平将为运营商带来进一步降本空间。我们预计，在eVTOL商业化运营初期，鉴于社会接受度、法规监管、消费者心理等多方因素，eVTOL商业化运营将以有人驾驶的方式进行。随着低空配套服务体系的逐步完善、自动驾驶技术的不断成熟，中长期看，商业化运营将逐步从有人向无人转变。基于类似逻辑，受限于用户需求、社会接受度、安全保障要求等因素逐步成熟，eVTOL机队资产利用率也将逐步提升，“空中出租车”的美好愿景也将逐步变成现实。

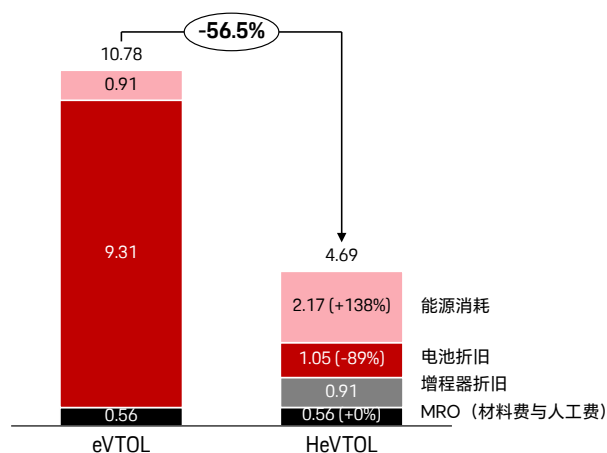


图9. 纯电与增程eVTOL部分直接运营成本¹比较



# // 商业化路径发展之思

基于eVTOL应用场景、相关方需求、运营经济性测算及现有构型的核心技术优势，我们可以大致勾勒和匹配出主流应用场景下相对适配的eVTOL构型(图10)。

运行环境	非人口密集区域 (参考 EASA SC-VTOL Basic Category 对飞行器的安全性要求)	主要适配构型	人口密集区域 (参考 EASA SC-VTOL Enhanced Category 对飞行器的安全性要求)	主要适配构型
观光旅游	<ul style="list-style-type: none"><li>用于景区观光</li><li>对运营成本较敏感</li><li>对续航、时速、噪音、起降场地等相对要求不高</li></ul>	<div>非倾转构型</div> <div>多旋翼型 复合翼型</div> <div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>用于城市观光</li><li>对运营成本较敏感</li><li>对续航、时速要求不高，但对噪音、起降场地要求高</li></ul>	<div>非倾转构型</div> <div>多旋翼型 复合翼型</div> <div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
市内通勤	-		<ul style="list-style-type: none"><li>用于城市内 / 城郊摆渡</li><li>对运营成本较敏感</li><li>对续航、时速要求不高，但对噪音、起降场地要求高</li></ul>	<div>非倾转构型</div> <div>多旋翼型 复合翼型</div> <div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
城际交通	<ul style="list-style-type: none"><li>用于跨城郊区 - 郊区摆渡</li><li>对运营成本一般敏感</li><li>对噪音、起降场地要求不高，但对续航、时速要求高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>用于跨城的城区 / 城郊摆渡</li><li>对运营成本一般敏感</li><li>对噪音、起降场地、续航、时速要求均高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
医疗 / 消防救援	<ul style="list-style-type: none"><li>用于不确定环境下的医疗 / 消防救援</li><li>对运营成本不敏感</li><li>对噪音、起降场地、续航、时速要求均高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>同左</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
警务 巡逻安防	<ul style="list-style-type: none"><li>用于郊区警务巡逻安防任务</li><li>对运营成本相对不敏感</li><li>对噪音、起降场地要求不高，但对续航、时速要求高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>用于城区警务巡逻安防任务</li><li>对运营成本相对不敏感</li><li>对噪音、起降场地、续航、时速要求均高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
物流	<ul style="list-style-type: none"><li>用于特殊场景 / 支线物流运输</li><li>对运营成本十分敏感</li><li>对噪音、起降场地要求不高，但对续航、时速要求高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>用于跨城配送 / 城内配送</li><li>对运营成本十分敏感</li><li>对噪音、起降场地、续航、时速要求均高</li></ul>	<div>倾转构型</div> <div>涵道风扇型</div>
国防军事	<ul style="list-style-type: none"><li>用于不确定环境下的不同任务</li><li>对运营成本不敏感</li><li>对噪音、起降场地、续航、时速要求均高</li></ul>	<div>非倾转构型</div> <div>多旋翼型 复合翼型</div> <div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型 涵道风扇型</div>	<ul style="list-style-type: none"><li>同左</li></ul>	<div>非倾转构型</div> <div>多旋翼型 复合翼型</div> <div>倾转构型</div> <div>开放式螺旋桨型 涵道风扇型</div>

构型大类

细分构型 1

细分构型 2

资料来源：案头研究，保时捷管理咨询

图10. eVTOL应用场景与适配构型分析

我们预计，大规模eVTOL商业化运营将首先建立在现有的通用航空运营场景之上，利用现有的基础设施、遵循现行的运行法规，能够快速实现飞行器的落地应用。基于当前各eVTOL厂商构型取证和落地进度，首先将在载人观光旅游、载人短途运输以及各类载物场景下铺开。

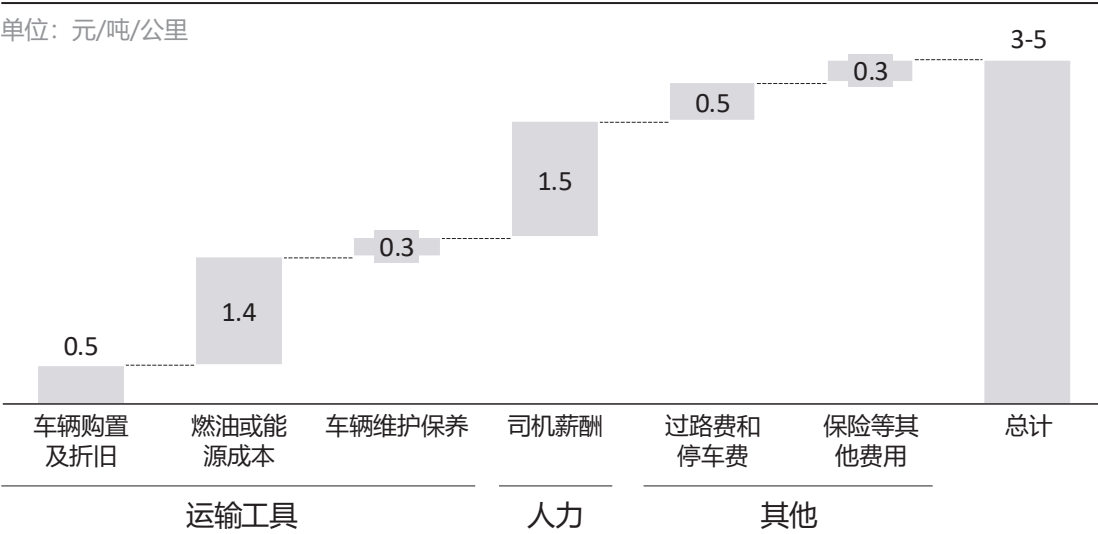
对于载人景区观光旅游而言，这类场景对飞行器续航、时速、噪音等要求相对不高，同时景区通常坐落在人口稀疏的郊区，飞行事故对地面建筑和人员生命财产安全构成的风险相对较小，飞行员及飞行器安全飞行小时数积累等工作，不断验证构型安全性和可靠性，为后续大规模进入人口密集城区运营奠定技术和运营经验的准备。

考虑到未来无人驾驶的大面积应用，需要早期通过端到端的大量数据收集分析，训练飞行器自动驾驶模型。然而，由于景区观光旅游的场景的复杂程度相对单一，绝大多数路线仅涉及单点的飞行，飞行的时间较短，飞行高度也较低，采集到的数据的多样性和体量不

足以支撑未来城市空中交通出行的场景的复杂模型训练需求，因此从长期发展角度出发，进入市场的应用场景越接近未来的终极应用场景，越快能够实现城市空中交通的大规模“空中出租车”的终极目标。

综合考虑数据采集和风险评估的需求，通用航空短途运输市场是eVTOL商业化落地的理想切入点。短途运输的航线更接近未来的城际出行场景，在飞行数据的采集上更具有参考价值。短途运输的起降点和航路规划均在非人口密集区域运行，同样能够降低事故风险，积累安全飞行小时数，相较于景区观光旅游，更具有长期价值。

在偏远地区的载物场景是eVTOL先试先行最佳的应用场景之一，对飞行器的安全等级要求，相比上述载人场景是更低的。然而，从商业角度来看载物场景，仅有小部分特殊场景具备高时效性的需求，并且运送的高价值货物能够覆盖eVTOL使用的成本。在快递货运的市场中，以某快递公司为例，目前基于传统汽车等运输方式的单位运营成本为3-5元/吨/公里（图11）。



资料来源：行业调研，保时捷管理咨询分析

图11. 一般货运快递服务商主要运营成本构成

我们预计，在eVTOL商业化运营早期，综合运营成本不高于6元/吨/公里才具有一定竞争力。其他相关性能指标也需要达到一定水平才能对货运服务提供商具有商业吸引力(图12)。

设计构型要求

业载	300-400 kg
容积	货物密度 120-150 kg/m <sup>3</sup>
货物装卸	专门集装箱和装卸设备
动力	纯电或混动

性能指标要求

航程	满载时 >300 km
升限	6,000m
巡航速度	>150 km/h
使用率	4-5 次起降 / 天，每天 6-8 小时，每周 6-7 天
起降能力	可在 4000 米海拔机场起降
充电时间	支持快充，20%-100% SOC 充电时间 1 小时以内
适用温度	-30℃ - 60℃
飞行精度	巡航阶段航迹控制误差 <50 米，起降段 <5 米
通信链路	视距内具有至少一路高清图像下传能力，超视距全程通信，具有反链路劫持能力
抗风能力	≥5 级
环境适应性	抗雷雨，具有防除冰能力

资料来源：行业调研，保时捷管理咨询分析

图12. 货运eVTOL飞行器主要技术参数概览

任何技术的发展都有其自身科学规律可循。回望十年前新能源汽车技术的发展之路，政策端的大力支持可谓功不可没，而新能源汽车产品在早期并不能达到令人满意的性能表现，“低性能、低价格”是当时市场对新能源汽车的主流认知。作为早期新能源汽车商业化最快的细分领域之一便是以“低性能、低价格”著称的典型产品——四轮低速电动车（又称“老头乐”）。中国低速电动车市场早在新能源汽车的探索期与培育期就开始了高速发展，2013年开始更是连续数年保持50%以上高速增长，很快就形成了年产100万辆、拉动经济1,000亿元、上下游从业人员约100万人的产业规模。然而，随着2016-2019年国家相继出台针对低速电动车的监管措施，“老头乐”不具备可持续发展能力和大规模商用能力的弊端开始凸显，并作为落后产品代表逐渐退出主流市场。尽管如此，作为新能源汽车早期落地主要载体，“老头乐”取得了一定的成功，其在规模化、商业化领域积累的宝贵经验推动了新能源汽车市场的标准化、成熟化，也间接助力了“蔚小理”、华为等造车新势力的崛起。

相较于新能源汽车，eVTOL的落地更加依赖商业化场景，“高性能”为必选项。eVTOL的市场化进程对产品的技术和品质提出了更为严格的要求：

**01 电池系统方面，**

eVTOL在能量密度、功率密度、充电倍率、安全性、循环寿命等核心指标方面都有远高于新能源汽车的要求，其中eVTOL对功率密度的需求尤其突出，垂直起降飞行器在垂直起降阶段的高功率需求与新能源汽车的工况区别较大，其要求电池在降落阶段仍然有较多剩余电量，以保证飞行器垂直降落的高功率输出阶段不出现陡降从而威胁乘客和地面人员的安全；

**02 电推进系统方面，**

eVTOL所使用的电机在功率密度方面与高端电动汽车的电驱动系统相近，但在扭矩密度上则远远超过；

**03 产品迭代方面，**

汽车可以采用平台化开发方式实现快速产品系列化发展和版本迭代，如今凭借智能化技术甚至能将该过程缩短到6个月之内，而eVTOL的构型不存在快速切换技术路径的可能性，构型决定了飞行器整体设计布局以及控制逻辑，因此飞机产品迭代的速度远低于汽车产品。

**04 飞控技术方面，**

相较于新能源汽车的三维空间，增加了垂直维度的控制，在技术难度上更上一个台阶。飞行控制与飞机的构型设计强耦合，每架飞机需开发自己独特的控制律，不像不同品牌的汽车产品的控制技术上具有诸多的共性。eVTOL的自主飞行系统在功能上与传统民用飞机相似，其决策和控制过程主要依靠飞行管理系统和飞行控制系统的紧密配合。但

是，由于eVTOL在运行环境、运营效益和飞机结构等方面的独特性，其自主飞行系统的开发面临更高的成本要求和技术挑战。

**05 安全性要求方面，**

eVTOL适航认证对于飞机系统发生致命事故概率的要求介于一亿分之一（美国FAA）到十亿分之一（欧盟EASA）。

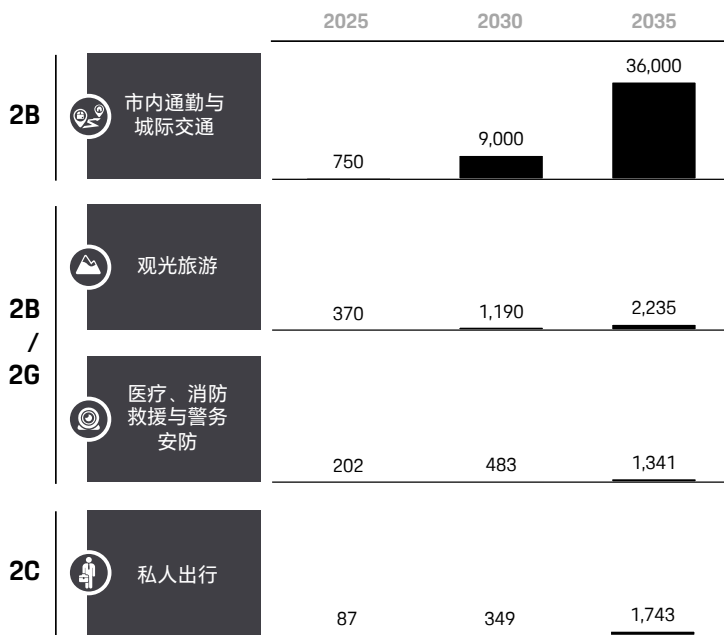
从早期雏形“老头乐”到当今纯电、混动、增程等各类新能源技术路线的百花齐放，技术先进性和产品性能的断代领先是任何创新事物诞生并站稳脚跟的第一步。卓越的产品性能不仅能快速带来流量效应，树立高端差异化的品牌形象，更可以吸引广泛的消费人群，改变市场传统认知，吸引大量簇拥从而推动技术不断迭代升级和供应链降本，最终实现对传统技术解决方案的替代。



## // 中国市场未来可期

基于对各类核心场景的需求分析、商业化运营经济性测算等方面的输入，我们更新了对于中国eVTOL市场规模的预测结果。更新后的市场规模匡算由主要应用场景下eVTOL整机销售规模和部分高潜场景下商业化运营带来的营业收入组成。

我们预计，由城内通勤、城际交通、私人出行、观光旅游、医疗与消防救援、警务安防六大场景组成的载人eVTOL飞行器年新增需求将在2030年突破1.2万台，2035年接近4.2万台（图13）。



资料来源：行业调研，保时捷管理咨询分析

图13. 中国载人类eVTOL市场新增需求量

商业化运营方面，我们预计景区观光旅游等主要载人场景将首先迎来爆发，而随着城内与城际交通快速放量和相关配套产业和基础设施的逐步完善，预计到2035年商业化运营的营业收入将突破3,000亿元，整机销售及上游供应链市场规模突破6,000亿元，其他支持性相关服务带来市场规模突破3,000亿元，最终到2035年形成一个逾万亿元的庞大市场（图14）。



单位：亿元

1. 商业运营部分仅考虑医疗服务运营带来的营业收入。消防救援与警务安防暂不考虑。2. 基于整机销售数据按比例折算。

资料来源：案头研究，专家访谈，保时捷管理咨询分析

图14. 中国载人类eVTOL年新增市场规模估算

## 02












# 长风破浪会有时 直挂云帆济沧海

## eVTOL 主机厂的制胜之道

作为低空经济生态体系的关键一环，eVTOL 主机厂在构型开发、系统集成、运营维保等环节扮演着至关重要的作用。航空业极高的质量安全要求和漫长的产品开发与认证过程决定了一家主机厂一旦选定某种构型，后期再想改弦更张将变得异常困难。本章将在探讨飞行器构型、能源路线的基础上，总结 eVTOL 主机厂在这轮产业大潮中的关键成功要素。

# // 新技术与新场景驱动的eVTOL技术收敛方向

从构型划分方式来看，eVTOL主要分为倾转构型和非倾转构型两大类，其中非倾转构型中包含复合翼(即升力与巡航复合型)和多旋翼构型，倾转构型中包含开放式螺旋桨和倾转涵道风扇(图15)。目前海外玩家多采用倾转构型，而国内目前以非倾转构型作为过渡阶段的方案，倾转构型为远期方向。

架构示意与代表玩家	非倾转构型		倾转构型	
	多旋翼型	复合翼	开放式螺旋桨	倾转涵道风扇
				
	   		  	
翼展 (含桨叶)	15-17 米		13-15 米	
最大时速	100-200 km/h		200-360 km/h	
最大航程	纯电：100-250 km 增程 / 氢电：400-1,000 km		纯电：250-300 km 增程 / 氢电：650-850 km	
噪音等级	>72 dB @ 100 m		60-65 dB @ 100 m	
构型特点	由多个旋翼产生升力，运动状态通过改变旋翼转速操控	结合多旋翼和固定翼，使用两套系统提供升力和巡航推进力	通过改变动力装置的推进方向实现不同的飞行姿态	通过改变动力装置的推进方向实现不同的飞行姿态
主要优点	垂直起降，无需跑道	具备垂直起降和长续航的优势	垂直起降，高飞行效率，低噪声以及成本优势	垂直起降，高飞行效率，更低噪声以及成本优势
主要缺点	航程短，续航能力差，巡航效率低	效率低下，噪音排放和成本高	设计复杂，技术要求高	设计复杂，技术要求高

资料来源：基于公开信息整理

图15. eVTOL各类构型主要参数与优劣势比较



## // 非倾转构型与倾转构型之比较

非倾转构型中多旋翼为分布式旋翼设计，无机翼等可产生升力的翼面，完全通过旋翼同时工作实现垂直起降和巡航；复合翼设计直接简单，有机翼，通过两套动力系统（垂直旋翼动力系统和推进动力系统）提供升力和巡航推力。而倾转构型通过倾转推进装置，一套动力系统既可以为飞行器提供升力和巡航推力。

### 01 系统功能方面：

多旋翼垂起时提供全部升力；巡航时提供全部推力和升力；复合翼垂起时一套旋翼提供升力，巡航时另一套旋翼提供推力；倾转构型垂起时所有动力装置提供升力，巡航时部分或所有动力装置提供推力。

### 02 飞行速度方面：

倾转构型能够在垂直起降和高速前飞之间切换，全倾转构型在高速前飞状态下可以达到200-360km/h的经济巡航速度；非倾转构型速度相对较为有限，经济巡航速度一般为100-200km/h，远低于倾转构型。

### 03 航程方面：

倾转构型由于可以更高的经济巡航速度飞行，在携带同等燃料的情况下能够飞行更远的距离，航程相对较长，纯电构型的极限航程约为250-300km；非倾转构型航程受到飞行速度和效率的限制，航程一般较短，纯电构型的极限航程约为100-250km。

基于巡航速度、航程来看，倾转构型优势明显，适用场景更为广阔，更能满足多样化的市场需求。目前，国外一些领先的eVTOL企业纷纷投入到倾转构型飞行器的研发中。例如，美国的Joby S4已处于第四阶段验证实施，预计2025年TC取证。我们预计，倾转构型在中长期将成为市场的主流构型方案。

# // 开放式螺旋桨与涵道风扇之比较

在飞机发展史上，开放式螺旋桨首先被应用于民用和军用航空领域，原因是螺旋桨推进理论和工艺更加简单，适配第二次工业革命所出现的简单内燃机。随着涡流理论的完善更加复杂的涵道发动机由于其更加优异的性能广泛适用在高性能航空器上。未来城市空中交通运行场景对航空器提出了高性能和高安全性的需求，涵道风扇由于其可实现更好的安全性、高效率 and 低噪音，更适合在人口密集的城市低空载人飞行，这是传统螺旋桨飞机没有涉及的运行领域(图16)。

	开放式螺旋桨	涵道风扇
	<div>Joby</div> <div>VOLOCOPTER</div>	<div>INFLYNC</div> <div>LILIUM</div>
构型示意		
低空运行安全性	开放螺旋桨作为高能转子和外界有诸多干涉风险	包容装置降低桨叶失效对机身和人员的潜在风险
高速巡航效率	100-200 km/h	200-360 km/h
最大航程	高效区间 <250km/h 适合低速飞行，在高速下因阻力增大导致效率降低	高效区间 >250km/h 在高效区间对比螺旋桨可提升 15% 效率
运行噪音	~65dB，降噪手段有限	<60dB，通过涵道声衬进一步降噪

资料来源：基于公开信息整理

图16. 开放式螺旋桨与涵道风扇构型比较

## 01 //

**涵道风扇更适应低空运行环境，更好的安全性以最大限度保障机上和地面人员安全。**eVTOL和传统航空器的运行环境具有诸多不同点，通用航空等传统航空器首先考虑的是飞机和机上成员的安全，而eVTOL在此基础上，更加需要关注的是运行环境的整体安全。城市低空运行环境远比高空复杂，除了在运行高度下容易遇到鸟类、电线等异物

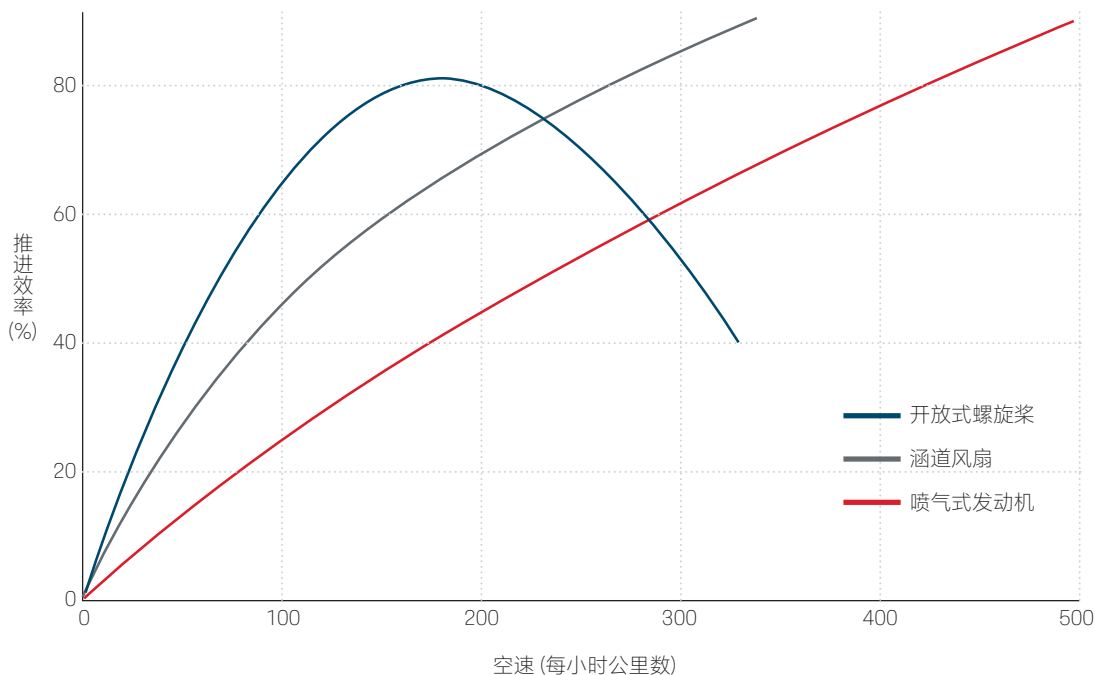
外，在频繁的上下机过程中也存在人员误触螺旋桨的风险。涵道风扇避免了转子与外界产生干涉，并且能够降低桨叶失效飞出后对机身和人员造成的次生灾害。涵道风扇构型也更利于整机降落伞的布局，避免了开伞时伞绳与桨叶的干涉，为机上人员提供最后的安全保障。

## 02

涵道风扇更高的推进效率,在高速巡航时拥有更低能耗。涵道风扇起降状态约50%的推力来自涵道唇口,降低了系统对风扇产生的推力要求。因此在垂直起降阶段,同等功率输出的情况下,可以降低桨盘面积,实现更小的飞机占地面积,从而更灵活地在城市中运行。在巡航阶段时,可以提高螺旋桨的高效速度区间,使得飞行器在更高的飞行速度下拥有更好的效率,实现更低的能耗(图17)。

## 03

相较于开放式螺旋桨,涵道风扇能更好地提效降噪。首先,翼尖是噪声产生最大的噪声源,降低螺旋桨的转速能够很大程度地降低噪声的产生。全倾转构型由于不需要考虑升力桨在巡航阶段停转减阻的需求,可以设计更多片桨叶,在产生满足飞行要求的功率的同时,降低螺旋桨的转速。在此之上,涵道壁面贴近风扇叶尖,减少了桨尖涡流的能量损失,能够有效提升整个动力系统飞行效率,同时避免了桨尖涡流产生的噪声。在涵道内壁布置声衬也是非常常用的降噪手段,可以进一步降低螺旋桨对周边环境的噪声影响。



资料来源:《空气螺旋桨理论及其应用》,2006年,北京航空航天大学出版社,保时捷管理咨询整理

图17. 不同气动构型驱动引擎配置下的推进效率比较\*

\*基于已有喷气式发动机等实际数据,结合理论公式推导得出。实际推进效率受飞行器构型、环境等多因素影响,与理论值可能存在差异

## // 纯电、增程与氢能能源路线之比较

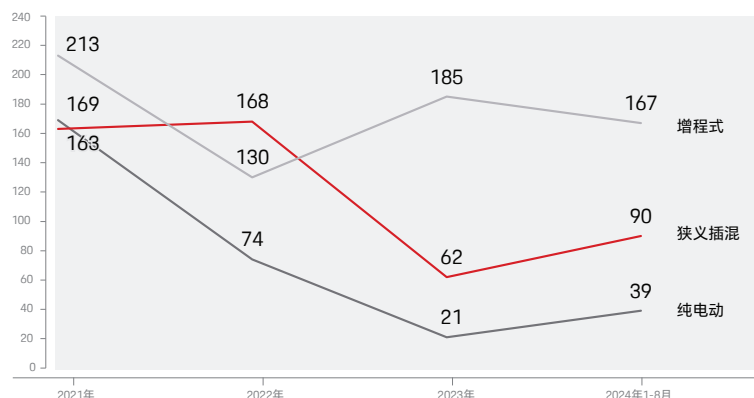
与新能源汽车发展初期所面临的挑战类似，纯电eVTOL在现阶段技术条件的前提下，在相当长的一段时间内都将面临来自运营商、乘客等相关方对成本、续航里程的焦虑与挑战。

相较于纯电能源路线，增程式混动在拓宽续航能力、降低运营成本、减少对基础设施依赖性等方面具有较大优势。增程式混动系统在eVTOL领域的应用原理为，在垂直起降阶段采用电池驱动电机，在巡航阶段使用增程器发电驱动电机，从而大大降低了对电池的使用和依赖。对比纯电eVTOL，增程式混动eVTOL单次充电可支撑超过5次起降，减少了电池在飞机全生命周期的更换次数，提升了飞机的经济性，全生命周期运营成本仅约为1.4-2.0元/km/座。而且，其无需在每个飞行任务后充电补能，也无需每个起降点都具备充电能力，大大提升了机队运行周转效率和机动性，降低了对基础设施的依赖性。

**// 增程式混动可以更好解决里程焦虑，降低运营成本。**相比国内eVTOL以纯电为主的市场格局，海外头部玩家正在同步布局混动技术路线。更好的续航能力将eVTOL的使用领域从城市内运输延伸到城际飞行、支线运输等场景，同时避免了充电等待的耗时，大大拓宽eVTOL商业化应用范畴。另外，凭借着较成熟的航空发动机、高功率高倍率动力电池，甚至车用发动机的改装等跨行业技术融合，相较于纯电路线，混动eVTOL将带来更低的电

池折旧与更换成本和更低的能源消耗。

**// 增程式混动对基础设施依赖性低，适合成长期商业推广。**增程式混动在新能源汽车的市场表现可以为eVTOL提供有价值的参考。2021年，增程式电动汽车仅占新能源汽车销量的3%，2024年上半年，这一数据已经飙升到了12%，增程式混动的扩张速度在同期新能源汽车所有技术路线中排名第一（图18）。最早主打增程式混动的理想汽车拿出了完全优于两位同时期竞争对手的市场表现，也带动更多车企陆续在增程式布局，增程式未来还有更高的扩张预期。在新能源基建已经较为完善的背景下，增程式混动的发展现状本质上反映了消费者依然拥有对于降低充电桩依赖性的需求。而eVTOL对于配套基础设施的依赖性更在新能源汽车之上。一方面，我国eVTOL基础设施目前数量稀少，并且普遍处于规划试点或建设之中，建设完成后还要历经复杂的适航认证，距离大规模基建配套完成还有较长周期。另一方面，纯电驱动eVTOL一次充能后也只能完成至多两次垂直起降。而增程式混动由于电池仅用于垂直起降，不用支持巡航，所以单次充电支持多次起降，且不要求每个起降点都具备充电能力，在



单位: %

资料来源: 乘联会, 保时捷管理咨询整理

图18. 新能源汽车三大能源类型销量增速趋势对比

eVTOL混动路线的另一主要方向为氢动力。氢动力eVTOL将氢燃料电池与锂电池互补, 在实现高续航的同时保持低噪声和环境友好。然而氢燃料电池在飞机上的应用需要攻克的技术壁垒依然较多, 如功重比较低、安全性较差等。加氢相较于充电, 对基础设施的依赖性更高。而由于氢能自身易燃易爆的特点, 加氢站在新能源汽车中的应用仍远未得到普及, 对eVTOL而言就更难在短期实现落地(图19)。

	纯电	增程式混动	氢动力
代表玩家	JOBY AVIATION VOLOCOPTER EHANG	INFLINE HONDA ELROY AIR DREAMFLY 追梦空天	Universal Hydrogen JOBY AVIATION ZERO AVIA
代表机型	Joby S4, Archer Midnight	Chaparral C1	Joby 氢电版 S4
续航里程	250km	650km	850km
主要优点	巡航阶段噪声低, 零碳排放	续航高, 运营成本低, 基础设施依赖性低, 技术相对成熟, 更安全	续航最高, 巡航阶段噪声低, 零碳排放
相对缺点	续航低, 运营成本昂贵, 对于基础设施依赖性高	系统复杂度高于纯电, 产生碳排放, 巡航阶段产生噪声	技术不成熟, 对于基础设施要求最高

资料来源: 基于公开信息整理, 保时捷管理咨询分析

图19. eVTOL各类能源路线比较



# // 中国及世界主要eVTOL主机厂近期进展

<div>亿航</div> <div>EH216-S</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2023年10月取得了中国民航局颁发的型号认证(TC), 并已陆续在广州、贺州、深圳、三亚等城市围绕旅游观光的应用场景开展试运行空中</div>	<div>非倾转构型</div>	<div>峰飞航空</div> <div>盛世龙</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2024年4月26日, 中国民航华东地区管理局正式受理了峰飞航空科技 V2000EM(盛世龙)的型号合格证(TC)申请, 盛世龙型号合格审定工作正式启动</div>	<div>非倾转构型</div>	<div>沃兰特</div> <div>VE25-100</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2023年9月28日, 「VOLANT 沃兰特」宣布收到由中国民航华东地区管理局发出沃兰特“VE25-100 型号合格证(TC)首次申请项目”受理申请通知书</div>	<div>非倾转构型</div>
<div>御风未来</div> <div>M1</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2024年1月10日, 民航华东局正式受理御风未来 M1B 型(即 M1 货运型)电动垂直起降无人驾驶航空器系统型号合格证申请</div>	<div>非倾转构型</div>	<div>零重力</div> <div>ZG-ONE</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>零重力于 2024 年珠海航展上发布 ZG-ONE 适航机“鹊飞”</div>	<div>非倾转构型</div>	<p>纵观世界范围内各eVTOL厂商的最新进展, 不难发现虽然中国企业起步相对较晚, 但依托国内顶层规划和鼓励政策出台, 以亿航为代表的中国eVTOL企业在适航认证和商业化运营方面已走在世界前列。国内厂商在构型选择上以多旋翼型和复合翼构型为主, 而以开放式螺旋桨和倾转涵道风扇构型为主要研发方向的厂商近年来在缩比验证机试飞、构型仿真模拟等方面也取得较快进展(图20)。</p>	
<div>沃飞长空</div> <div>AE200</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2024年6月, 沃飞长空 AE200 验证机完成全尺寸、全重量、全包线倾转过渡等系列飞行科目</div>	<div>倾转构型</div>	<div>时的科技</div> <div>E20</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2023年10月, E20 完成首轮飞行测试, 首飞采取无人驾驶模式, 型号合格证(TC)已受理</div>	<div>倾转构型</div>		
<div>追梦空天</div> <div>DF600</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2024年8月完成缩比混动倾转 eVTOL 第一阶段试飞, 预计 2025 年开始批量生产交付</div>	<div>倾转构型</div>	<div>小鹏汇天</div> <div>X5</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>该款 eVTOL 瞄准城际空中交通出行市场, 预计未来五年内实现量产</div>	<div>倾转构型</div>	<div>天翎科</div> <div>L600</div> <div></div> <div>发展阶段: <div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div>2024年5月完成缩比倾转涵道翼 eVTOL 过度试飞, 预计 2025 年推出全尺寸原型机</div>	<div>倾转构型</div>
发展阶段: <div><div>可行性验证阶段</div><div>概念与技术发展阶段</div><div>产品发展阶段</div><div>运营服务阶段</div></div>					资料来源: 公开信息整理

图20. 中国主要eVTOL主机厂与代表产品

从飞行器定价来看，依托于国内完善的供应链体系和成本优势，已发布的国产eVTOL飞行器售价普遍比海外同行具有较大竞争优势。飞行器定价受多种因素影响，包括构型、续航里程、载客量、能源路线等（图21）。我们预计，随着关键部件国产化加速替代，伴随规模经济效应，未来eVTOL整机产品线将逐步完善，同等配置下的飞行器售价将更有竞争力。

	厂商	机型	取证进展	构型	续航里程	载客量	量产后售价
国内厂商	峰飞航空	V2000EM (盛世龙)	2024 年 6 月召开首次型号审查会	非倾转构型	250 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 1,000 万元
	沃兰特	VE25-100	2024 年 10 月召开首次型号审查会	非倾转构型	200-400 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 2,000 万元
	时的科技	E20	2023 年 10 月型号合格证申请获受理	倾转构型	200 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 1,000 万元
	沃飞长空	AE200	2024 年 10 月召开 AE200 运行符合性评审启动会	倾转构型	300 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 1,000 万元
海外厂商	Eve Air Mobility	Eve	2024 年 2 月巴西国家民航局发布了 Eve 的审定基础	非倾转构型	100 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 2,030 万元 (290 万美元)
	Archer	Midnight	2024 年 5 月 FAA 颁布审定基础	倾转构型	80 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 3,500 万元 (500 万美元)
	Joby	Joby S4	2024 年第三季度适航机产线制造和测试取得重要进展	倾转构型	250 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 1,610 万元 (230 万美元)
	Vertical	VX4	2024 上半年 CAA 批准扩大其 DOA 范围	倾转构型	160 km	4 乘客 +1 驾驶员	约 2,800 万元 (400 万美元)

资料来源：基于公开信息整理

图21. 中国与海外部分eVTOL产品量产后预计售价

## // eVTOL主机厂成功要素

### 01 坚持长期主义， 审慎选择技术路线

与传统飞机相比，eVTOL是一个新生事物，还没有完成构型收敛过程，就如同100多年前的飞机一样，构型千差万别。但是构型的收敛过程是非常残酷的，与场景的特征、技术发展趋势的友好程度等综合因素相关。

与汽车主机厂类似，eVTOL主机厂主要承担的是整机研发和集成的任务。eVTOL企业基于运营场景和市场需求定义和设计整机构型，并在其基础上进行子系统的需求定义和设计。由于eVTOL构型决定了产品最终的市场和竞争力，且构型的更换不具备开发上的延续性，整机构型的选择与设计是主机厂最重要的能力和竞争壁垒。

现代飞行器是典型的高复杂度、技术密集型产品，总体设计过程需要在功能、安全性、性能、研制和运行成本、研制风险等方面寻求平衡，并在设计细化的过程中找到尽可能优化的技术方案和实施路径。飞机总体设计决定了飞机的主要尺寸、总体布置、主要重量参数、主要性能和使用特性等，总体设计阶段虽然所占时间较短、投入人员和花费较少，但决定了一架飞机约80%的全生命周期成本。对于eVTOL主机厂而言，动辄长达数年的产品开发和验证周期和数以亿计的资金投入注定了一旦选定某种构型，推倒重来的成本将十分高昂。因此eVTOL这条赛道不仅是技术实力的比拼，更是用户洞察、商业模式、生态合作体系的全方面竞赛。

### 02 深入产业链上游， 掌握核心技术

eVTOL产业链较长，涉及动力推进、航电飞控、能源等诸多系统的相互协调配合。这些子系统和汽车的“三电”类似，是产品的核心技术。但是和汽车不同的是，各核心技术高度耦合，需要主机厂更深入的了解。

在eVTOL各子系统中，航电飞控被形象地称为飞机的“中枢神经系统”，和飞行员配合控制着飞机的姿态、速度和高度；

动力推进系统和传统航空发动机不同，分布式的推进不仅是速度的来源，同时也是姿态控制力的来源；

另外和汽车的地面力学控制不同，eVTOL飞行力学更多的和机型本身的特征相关，所以eVTOL企业无法完全采用供应商货架产品，而是需要更深入供应链，与供应商联合定义产品，才能最契合满足整体要求。

对于未来新进入行业的eVTOL主机厂而言，在最终决定选择哪种构型之前，对上游供应链的调研、对自身资源禀赋和实力的权衡以及由此做出的商业模式和供应体系的战略决策恐怕将是摆在每个企业面前的必答题。

03 做好产品定义，  
抓准市场进入的时机和方式

eVTOL长周期、高投入的行业特点注定了对于eVTOL初创企业而言，基于场景的客户需求洞察定义产品卖点，找准合适市场进入时机和方式将是决定成败的关键因素。特斯拉 Roadster 作为一款具有标志性意义的产品，为初创企业在产品定义以及把握市场进入时机和方式方面提供了宝贵范例。

在产品定义方面，特斯拉 Roadster 明确以高性能电动跑车为定位。它打破传统燃油跑车的局限，将先进的电动技术与出色的设计和性能相结合。Roaster在2008年初出茅庐时的性能设计就超过了保时捷911，快速吸引了追求速度与激情以及爱好高科技新鲜事物的消费者。随后，特斯拉通过采用大容量电池组和高效的电驱系统，2023款Roaster在前代基础上，大幅提升了峰值扭矩、零百加速等关键参数，进一步凸显了产品卓越的动力性能定位，实现了比肩法拉利的加速性

能(图22)。初创企业应像特斯拉一样，深入了解目标市场的需求和痛点，精准确定产品的独特价值主张，打造出具有差异化竞争优势的产品。

在市场进入时机方面，特斯拉选择在人们对环保意识逐渐增强、对新能源汽车的关注度不断提高的时期推出Roadster。当时，传统燃油汽车面临着环境污染和能源危机等问题，市场对于新能源汽车的需求开始萌芽。特斯拉敏锐地抓住了这个时机，以 Roadster 作为先锋产品，向市场展示了电动汽车的可行性和潜力。初创企业需要密切关注市场动态、技术发展趋势以及社会环境变化，准确判断最佳的市场进入时机，以便在竞争中抢占先机。

在市场进入方式上，特斯拉 Roadster 首先以高端小众市场为切入点。通过吸引对新技术

	2008年款				2023年款（预估）
	特斯拉 Roadster	法拉利 F430	奥迪 R8	保时捷 911	特斯拉 Roadster
起售价格	\$98,950	\$186,925	\$109,000	\$73,500	\$200,000
最大扭矩	374 Nm	465 Nm	430 Nm	370 Nm	10,000 Nm
零百加速	3.9s	3.9s	4.4s	4.6s	1.9s

资料来源：特斯拉官网，案头研究

图22. 特斯拉Roaster产品迭代与同期相似性能竞品比较

---

充满热情且具有较高消费能力的消费者群体，建立起品牌的高端形象和口碑。这种方式有助于在产品初期获得较高的利润空间，同时为后续产品的推出和市场拓展积累资金和经验。初创企业可以借鉴这种策略，根据自身产品特点和资源优势，选择合适的细分市场作为突破口，逐步扩大市场份额。

总之，特斯拉 Roadster 为初创企业提供了一个成功的模板，即在地面车辆电动化和智能化之前，就在产品定义上精准定位，用相较传统产品更优的性能、体验和经济性体现创新的意义。在市场进入时机上要敏锐洞察、把握政策和市场趋势，当产业潮流涌向某一个方向的时候，已经做好了所有的准备，从而顺应潮流脱颖而出。

eVTOL同样切中了航空电动化的机遇，同时更进一步提出要为大多数人提供空中交通解决方案；但这种更加靠近公众的运行场景，是之前航空业没有遇到的，相信这会给eVTOL提出更多的挑战，也会有很多的意外等待着人们去解决。



用相较传统产品  
更优的性能、体验和  
经济性体现创新的意义。



# 03

## 千磨万击还坚劲 任尔东西南北风

### eVTOL 产业链发展之道

随着下游 eVTOL 整机的不断发展，其上游产业链也将步入蓬勃发展的黄金时期。在材料供应领域，高强度、轻量化的新型材料研发与生产将持续升温，满足整机对结构强度与能耗优化的严苛要求。航空电子设备方面，先进的导航、通信与飞行控制系统会不断革新，为 eVTOL 提供精准、智能且安全可靠的运行保障。动力系统供应商将聚焦于高效能、低噪音的电动推进技术研发，推动电池能量密度提升与电机性能优化。而座舱内饰系统制造企业则凭借精密制造工艺，打造高质量、高适配性、高舒适性的智能座舱产品，全方位助力整机的品质升级。未来，上下游企业通过紧密协作，将形成一个充满活力与创新的生态系统，共同开拓城市空中交通及相关新兴应用领域的广阔市场，创造出前所未有的经济价值与社会效益，重塑未来航空产业新格局。

与商用大飞机类似，eVTOL产业链涵盖航电通讯、导航传感、飞管飞控、电池能源等多个行业(图23)。相比很多颠覆式创新的领域需要着力培养自己的产业链(如早期的 iPhone、新能源汽车等)，eVTOL 可以借助的产业链已经有成型的厂商参与。我们预计，随着上游产业链在产品技术、规模量产、质量品质、国产化替代等方面的快速发展，现有eVTOL产品在性能表现、运营经济性、用户体验等方面将持续优化。具体而言，基于各子系统材料成本的BOM占比见图24。

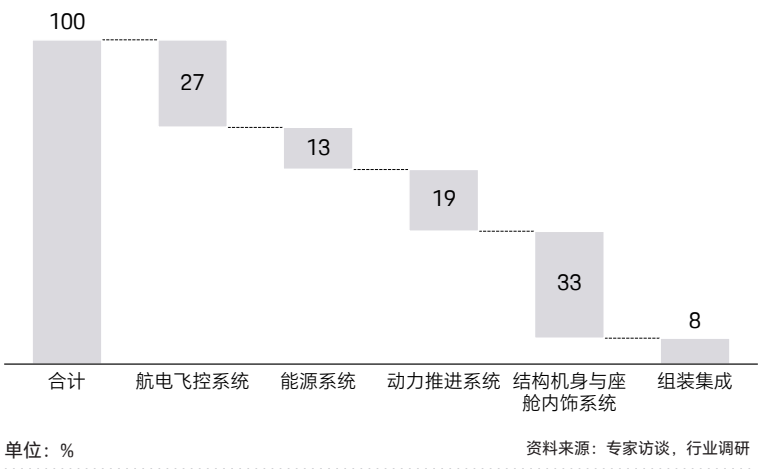
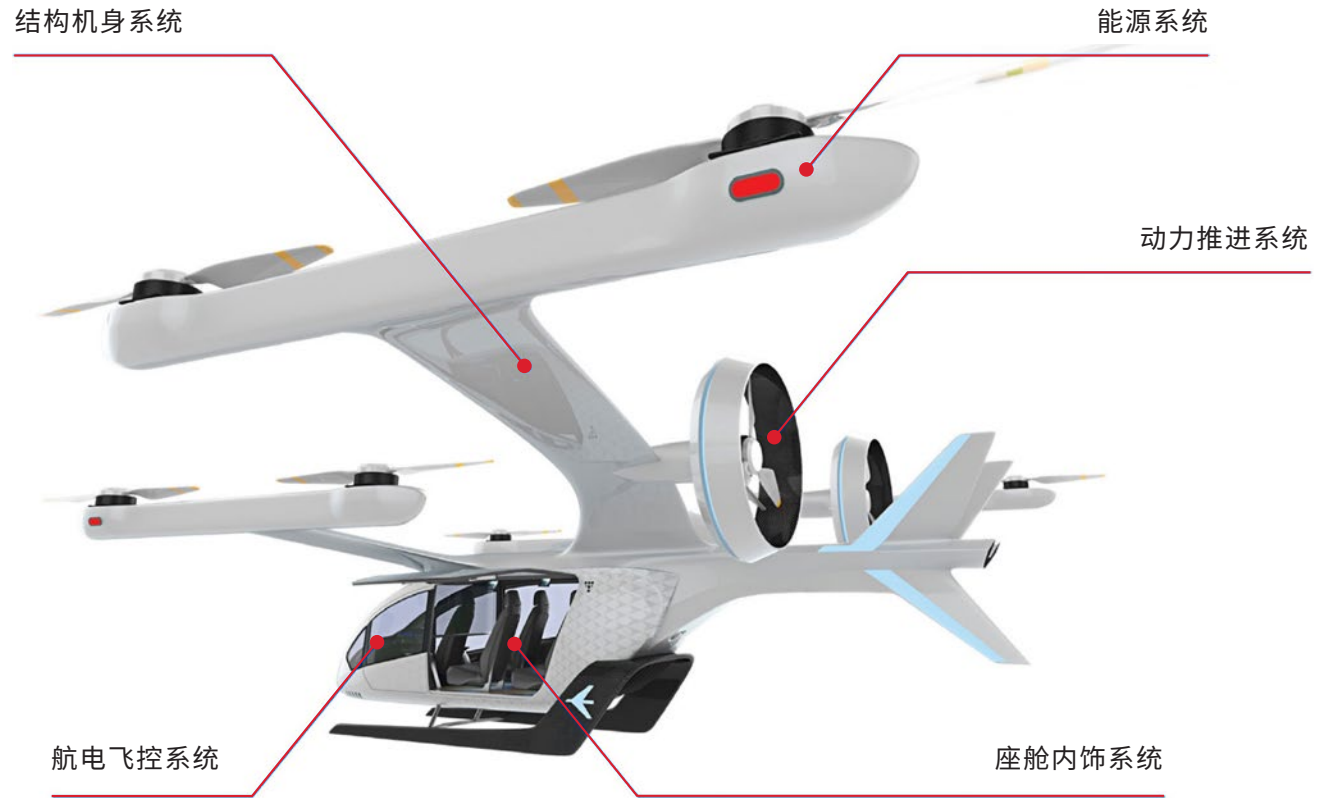


图24. 各子系统占整机直接材料成本构成



资料来源：案头研究

图23. eVTOL主要子系统示意

## // 主要子系统产业链发展趋势与制胜要素



### 整机集成

掌握自主研发、快速迭代能力

由于制造技术复杂、各部分核心技术门槛较高,大飞机产业链已经形成了“主机厂+上游供应商”的制造模式,主机厂主要承担整机研发和集成的角色。作为eVTOL主机厂核心技术实力的体现之一,整机集成代表了主机厂对各个子系统掌控与调教能力,提高系统的可靠与协同,从而进一步减少死重、增加续航,在保证运行安全性的同时降低噪音和能耗。除此以外,通过模块化和标准化的接口和模块设计,主机厂可以提高零部件通用性和互换性,从而增加产品的可维修性,减少后期使用运维的调试和维护成本,提高全生命周期内的整体性价比,从而增强产品的市场竞争力。

具体到制造和运营层面,采取自建产能的方式可以更好地掌握工艺制造参数,保持在产能爬坡和后续产品迭代时的协同开发与质量管理,进而有利于产品性能和设计的持续优化。然而,对资金并不充裕的初创企业来说,自建产能也意味着企业现金流存在较大压力,并且也意味着未来产能增长会有巨大的内部阻力。归根到底,自建产能亦或是外包代工,需要综合评估企业自身竞争力与真实资源约束之间孰轻孰重。



### 航电设备与飞控系统

自主研发与国产化合作驱动

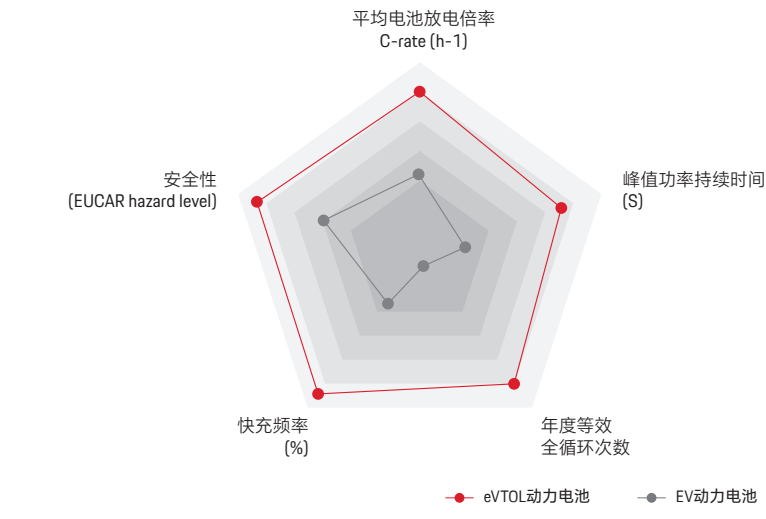
国际上,欧美在通用飞机和eVTOL航电和飞控系统领域处于绝对领先地位。全球主流机载公司基本都和相关eVTOL主机厂达成合作。2021年,Joby宣布采用Garmin的G3000集成驾驶舱,Archer的Midnight eVTOL也采用Garmin的G3000集成驾驶舱,Avidyne航电和Beta、SkyDrive合作,泰雷兹主要合作对象是Eve,霍尼韦尔推出云化航电平台,主要的eVTOL整机合作商是韩国现代的Supernal和英国的Vertical。这些系统被广泛应用于通用航空及新兴的eVTOL市场,涵盖从导航显控、飞行管理、飞控计算机等各种功能。相比之下,中国的航电和飞控系统研发仍处于起步阶段,尽管有如“海鸥”300飞机等个别机型已尝试使用国产航电系统,但在系统架构设计、小型化设计和低成本化设计等方面仍有很大提升空间,通用航空航电和飞控产品依然主要依赖进口。随着eVTOL近几年在国内的发展,逐步带动了航电和飞控初创企业以及中航工业的军品转民用化发展趋势。但目前的解决方案都处于研制阶段,尚未取得相关资质。因此,从当前的行业态势来看,中国的eVTOL企业想要在供应链上实现自主可控,需与国内机载设备供应商共同成长,实现最终航电和飞控系统的产品化应用。



## 能源系统

### 期待固态电池获得突破

作为eVTOL技术的核心，电池的性能和安全性直接决定了整机的市场接受度。能量密度方面，eVTOL垂直起降所需的动力是地面行驶的10-15倍，商用门槛高达400Wh/kg，且未来或将达到1000Wh/kg的能量密度要求，远超当前车用动力电池。起降阶段对电池瞬时充放电倍率的要求在4C-5C以上。此外，eVTOL对电池的安全性和循环寿命亦有极高要求。相比传统液态电池，固态电池以固态电解质替代电解液和隔膜，能够提升电池性能，增强安全性，尤其在应对热失控和机械挤压方面表现突出(图25)。



#### 电池系统性能

#### eVTOL 和新能源汽车动力电池性能区别

能量密度	eVTOL 对电池能量密度的要求远高于汽车。目前主流航空器使用的动力电池能量密度在 280Wh/kg-500Wh/kg 之间，而航空燃油比能量高达 1,200Wh/kg。当前技术水平条件下的电池能量密度仅能满足小型全电飞行器短程飞行要求
平均电池放电倍率	eVTOL 电池瞬间充放电倍率需在 4C-5C 以上，而量产的新能源汽车动力电池充电倍率普遍从 1C-2C 阶段向 3C-4C 阶段过渡。目前仅有在急加速、爬坡等场景下汽车需要高倍率放电，但不会持续很长时间
峰值功率持续时间	eVTOL 在起飞和着陆时需要高功率，这一过程通常持续 30 至 120 秒。因此，eVTOL 电池的峰值功率应在比 EV 电池（通常为 10 秒）更长的时间尺度上进行评估
等效全循环次数	商业运营场景中，高频率的快充和放电对提升飞行器综合利用率至关重要。目前已知适配 eVTOL 飞行器的主流货架产品等效全循环次数约为 500 次，预计未来 5 年内提升至 1000 次。而新能源汽车动力电池等效全循环次数因电池化学路线不同有所差异，三元锂电池 5 约为 800-1500 次，磷酸铁锂电池可达到 2,000-2,500 次左右。动力电池等效循环次数将极大影响 eVTOL 后期运维保养成本
峰值电流功率损耗	在 eVTOL 的起飞和着陆阶段，电芯通常会经历超过 5C 的峰值电流，在电池系统中产生 10% 的功率损耗，而电动汽车损耗仅 4%。电池老化后的功率损耗将会进一步加剧
安全性	相比新能源汽车，eVTOL 的动力电池对安全性有更严格的要求。例如 1. 热蔓延要求：各电芯相互独立不发生热蔓延；2. 包容性要求：20% 电芯热失控，也可以满足包容性要求；3. 适坠性要求：15.2 米跌落不发生热失控等

资料来源：Xiao-Guang Yang、Teng Liu 等人，Challenges and key requirements of batteries for electric vertical takeoff and landing aircraft，保时捷管理咨询整理

图25. 动力电池在新能源汽车和eVTOL上的要求差异

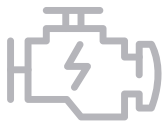
国家层面，2024年3月27日，工信部等四部门印发的《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》明确提出推动400Wh/kg级航空锂电池产品量产。鉴于传统液态锂电池在能量密度上的局限和eVTOL对电池性能的苛刻要求（图26），eVTOL市场渴望实现新型电池的大规模应用。

	能量密度 上限	隔膜	目前 生产成本	电解质 化学窗口上限	对锂金属负极 兼容性	液体 含量	安全性 (热稳定，抗针刺)
液态锂电池	较低 (<300Wh/kg)	需要	较低	较窄 (<4.3V)	差	>10%	热极限 140-180℃， 针刺即燃
半固态锂电池	中等 (>400Wh/kg)	需要	中等	中等	抑制锂结晶力度弱	<10%	热极限 >180℃
固态锂电池	较高 (>500Wh/kg)	不需要	较高	较高 (>5V)	抑制锂结晶力度强	0	热稳定 >300℃， 免疫针刺甚至剪切

资料来源：华金证券，案头研究，保时捷管理咨询分析

图26. 各类动力锂离子电池综合比较分析





## 动力推进系统

### 高效与安全性驱动的国产化优势

目前,电机厂商与eVTOL主机厂的合作多基于随机适航的需求,形成了高客户粘性。由于适航认证要求复杂且严格,一旦通过,主机厂与电机供应商之间的合作关系往往会非常稳固,切换供应商带来的产品可靠性风险较大。

从全球市场来看,早期进入eVTOL领域的主机厂如Joby、峰飞等,普遍倾向于进行电推进系统的自主研发。时的科技则采用了赛峰提供的高性能、高功率密度电机。在国内市场,主要的eVTOL电机电控供应商包括卧龙

电驱、天津松正和迈吉易威等公司,与国内主机厂建立了密切合作关系,以满足日益增长的市场需求。

从技术指标来看,国产驱动电机在关键性能上已经接近甚至达到国际领先水平(图27)。国产电机在峰值功率、转速和效率等方面处于领先地位,在功率密度和转矩密度等方面表现优异与国际知名品牌,与宝马和通用的电机相比不相上下。这表明,国产电机在eVTOL的应用中一定程度可以满足高标准的动力需求。

技术指标	国内驱动电机	德国 - 宝马 i3	美国 - 通用 Bolt	美国 - Remy HVH250-90	日本 - 日产 Leaf
峰值功率 (kW)	128	125	130	82	80
最高转速 (rpm)	12800	12800	8810	10600	10390
峰值扭矩 (Nm)	270	250	360	325	280
峰值效率 (%)	97	97	97	97	97
功率密度 (kW/kg)	2.3/3.8	2.6/3.8	2.6/4.6	2.44	1.5/2.6
转矩密度 (Nm/kg)	4.3/7.1	5.2/7.6	7.1/12.7	9.7	4.7/8.5

资料来源: 案头研究, 保时捷管理咨询整理

图27. 各国主流驱动电机性能参数比较

对于涉及飞行安全和适航认证车企是没有经验的,需要来自主机厂更加明确的技术需求和算法方案。

针对电机控制算法和系统集成,企业可以考虑自主研发,确保技术的领先性和安全性,

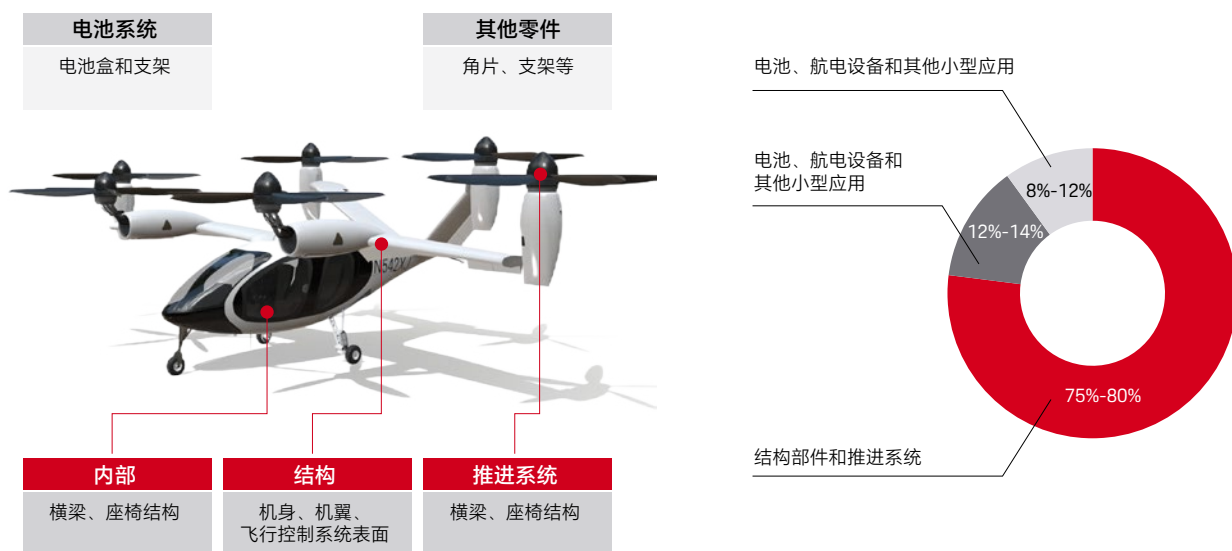
还可以更好地适应不断变化的市场需求。与此同时,对于标准化程度较高、技术成熟的电机组件,尤其是在成本控制和生产效率方面,可与国内领先的供应商合作或外包的方式进行,在确保技术质量的同时,大幅降低生产成本和缩短产品上市时间。



## 结构机身

### 全球碳纤维市场国产化崛起

碳纤维因其卓越的强度与轻量化特性,成为eVTOL机体结构的核心材料之一。其拉伸强度是钢铁的五倍,重量却仅为钢铁的四分之一,这使得它在航空领域尤其是eVTOL中具有极大的应用潜力。在当前的eVTOL设计中,机体结构中高达70%的材料为复合材料,其中碳纤维复合材料占据了90%的比重。根据Stratview Research 预测,eVTOL行业对复合材料的需求预计将在6年内增长约20 倍。这一趋势表明,碳纤维将成为未来航空材料的关键。



资料来源: 中国复合材料工业协会, Stratview, 中邮证券

图28. 碳纤维在eVTOL产品中的主要应用与碳纤维复合材料在各子系统中应用占比

碳纤维的主要优势包含质轻高强度、耐腐蚀性、高温耐受性、电磁干扰防护等特点。在eVTOL材料需求持续牵引下,低成本、高效率、规模化制造将是碳纤维复合材料在该行业的重要发展趋势。另外由于eVTOL必须借助复杂的翼型和机身曲面来获得更好的飞行性能,而复合材料的成型特点有利于复杂曲面的生产,使得更先进构型的生产成本与

简单构型几乎没有差异,这是eVTOL先进构型得以出现的重要原因。

供应链布局方面,国外碳纤维供应商主要包括日本东丽、美国赫氏、索尔维等。它们凭借在民航复材结构件上的技术积累,形成了强大的市场壁垒。在国内,光威复材、吉林化纤、中复神鹰等碳纤维厂商正在不断提升

技术能力，缩小与国际先进制造商之间的差距。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也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29)。

分类	公司	相关业务
碳纤维	光威复材	公司已有通过大飞机 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 VE25X1 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

图29. 国内部分碳纤维复材相关公司

基于碳纤维复合材料低成本、高效率的特性，机身结构高达70%由碳纤维复合材料构成的eVTOL将具备更强的轻量化、低运维成本特性。随着国内碳纤维复合材料技术逐步成熟，相关企业实力逐渐增强，供应链配套日趋完善，将为后续整机规模制造和后期运维更换提供强大供应体系保障（图30）。

eVTOL OEM	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

图30. 部分eVTOL主机厂与碳纤维供应商合作概览

# // eVTOL产业链未来发展关键方向

## 01 依托新能源汽车产业链规模效应带来成本领先优势

eVTOL作为新兴的交通方式,目前仍处于高成本投入阶段。随着市场对高性价比产品的追求,降本需求愈发迫切。而新能源汽车产业链为eVTOL企业提供了重要途径。新能源汽车产业经过多年发展,在技术融合降本、规模化生产降本、供应链协同降本等方面,具有无可比拟的优势。

具体到技术融合降本方面,目前新能源汽车行业对eVTOL企业而言,在推进系统复用、能源系统复用等方面存在较大优势,与eVTOL产品开发需求高度重合。

推进系统的复用主要体现在现有燃油发动机和新能源电机在高效动力输出和低能耗控制方面具有独特优势。例如,以梅赛德斯奔驰OM642发动机为基础,大陆航空科技开发的CD300发动机也实现了车用产品的航空认证,并获得EASA、FAA、CAAC的独立TC(VTC)认证,打通了车用产品的航空化之路。小鹏汇天的eVTOL产品采用了与新能源汽车相似的永磁同步电机,这种电机具有功率密度高、效率高、可靠性强等优点。相信车用产品的航空应用会越来越广泛,成为支持eVTOL规模化的重要助力。

在能源系统方面,eVTOL可以借鉴新能源汽车的电池技术实现降本。新能源汽车产业经过多年的发展,电池技术不断进步,能量密度不断提高,成本不断降低。新能源动力电池行业龙头宁德时代于2023年4月发布了凝聚态电池,其单体能量密度最高可达500wh/kg,电动载人飞机和eVTOL成为该系列电池主打应用

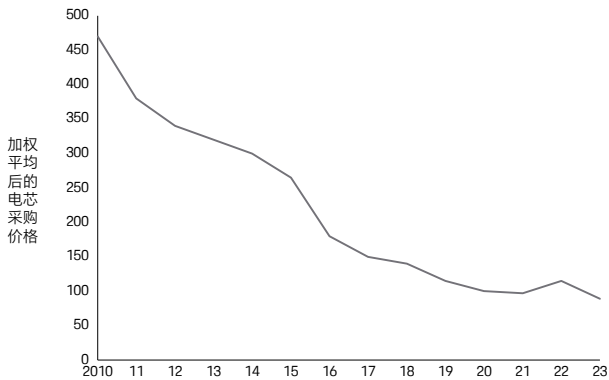


资料来源: Continental Motors, 梅赛德斯奔驰, 保时捷管理咨询整理

图31. Continental Motors CD300发动机与奔驰OM640/OM642发动机

领域。动力电池行业另一玩家孚能科技在eVTOL动力电池领域同样走在前列,其高能量密度的三元软包动力电池为电动飞行器的长续航、高性能提供了坚实保障。

未来eVTOL一定会进行规模化发展。而在规模化降本方面,随着eVTOL产业生产规模逐渐壮大,单位产品固定成本将逐步降低。以新能源汽车动力电池为例(图32),基于各化学体系和包装形态的出货量加权平均电芯单位度电成本从2010年的470美元/kWh(折合人民币3,300元/kWh)逐步降低到2023年的89美元/kWh(折合人民币630元/kWh),降幅超过80%。2024年以来,磷酸铁锂电芯采购价格进一步下探到400元/度附近,三元锂电芯采购价降至500-600元/度区间。随着行业竞争持续加剧,核心零部件的价格下跌将为eVTOL企业降本打开新空间。



单位: 美元/度

资料来源: Bloomberg NEF, 保时捷管理咨询整理

图32. 新能源动力电池加权平均电芯采购价格走势

02 端到端的数据安全合规与保障

eVTOL载人飞行过程中需要与地面控制中心、其他飞行器、交通管理系统等相关方保持实时通信,传输大量的飞行数据、位置信息、状态信息等,因此通信系统安全、飞行控制系统安全及数据存储的安全对整个行业的安全运行至关重要。其中通信系统安全又涉及到数据传输过程加密、通信链路可靠、网络访问控制等诸多环节,通信系统冗余和严格的网络访问控制对于保障司乘安全、飞行器可控等都具有十分重要意义。

eVTOL在飞行过程中产生大量飞行数据、用户信息等需要安全存储和备份。在数据存储过程中,可能会遇到硬件故障、软件故障、人为误操作等导致数据丢失或损坏的情况。因此,需要建立定期的数据备份机制,将重要的数据备份到多个存储介质中,确保数据的可恢复性。

除此以外,用户隐私保护、飞行控制系统软硬件运行安全和冗余备份对保障地面人身财产安全和用户体验同样至关重要。

在数据安全与隐私保护等方面,汽车行业的领先实践经验对eVTOL企业而言同样具有参考借鉴意义。基于汽车行业2021年10月执行的《汽车数据安全若干规定(试行)》有关规定,特斯拉作为外商独资企业,面临中国用户数据采集、境内存储、本地数据处理与分享等诸多环节的监管要求,特别是Autopilot自动辅助驾驶系统对城市环境地理信息的识别和使用同样需要满足国家安全等方面的具体要求。相信随着产业链、生态链逐步完善,eVTOL主机厂与保险公司、运营商、交通管理部门甚至终端客户等相关方会产生越来越多的信息安全责任与义务探讨,未来eVTOL行业的数据安全将向着身份认证与访问控制精细化、安全监控与预警系统智能化、软件安全测试自动化、供应链数据风险管理严格化的方向发展,在各方合力下,促进多方协同防护机制建立和行业标准与规范的统一。同时数据安全管理未来“低空数据安全管理”有关规定将为中国eVTOL整机企业和供应链企业提供一定保护,确保在一定时间内的运营优势。

	数据采集	数据存储	数据分析
《汽车数据安全若干规定(试行)》	<p>第八条:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>在处理个人信息时,应当<b>取得个人同意</b>,或符合法律、行政法规规定的其他情形。</li></ul> <p>第九条:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>在保证行车安全的前提下,以适当方式提示收集状态,为个人<b>终止收集提供便利</b>。</li></ul>	<p>第十一条:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>重要数据应<b>依法境内存储</b>。</li><li>向境外提供数据需通过国家相关部门安全评估,未列为重要数据的个人信息出境适用相关法律法规。</li></ul>	<p>第六条:</p> <p>国家倡导汽车数据处理者在数据处理活动中坚持:</p> <ul style="list-style-type: none"><li><b>车内处理原则</b>,除非确有必要不向车外提供;</li><li><b>默认不收集原则</b>,除非驾驶人自主设定,每次驾驶时默认设定为不收集状态;</li><li><b>精度范围适用原则</b>,根据所提供功能对数据精度的要求确定摄像头、雷达等的覆盖范围、分辨率;</li><li><b>脱敏处理原则</b>,尽量匿名化、去标识化等处理。</li></ul>
特斯拉	<ul style="list-style-type: none"><li><b>数据分享需同意</b>:特斯拉的“车队学习”摄像头录像仅在用户同意“数据分享”后才会被分享。</li><li><b>分享可控</b>:用户可以随时通过车载触摸屏开启或关闭数据分享功能。</li><li><b>隐私保护</b>:分享的摄像头记录每段限制在30秒以内,并保持匿名状态,不与用户或车辆直接相关联。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><b>境内存储</b>:我们依照法律法规,将在境内运营中收集的您的个人数据存储于中华人民共和国境内。</li><li><b>境外传输合规</b>:如需将您的个人数据进行境外传输,我们将会遵循相关法律法规要求执行。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><b>本地处理与数据分享</b>:Autopilot自动辅助驾驶数据默认在车辆本地处理,仅在开启数据分享后,摄像头记录才会被传输和分享用于车队学习。</li><li><b>匿名传输与安全事件</b>:分享的数据以匿名方式传输,不与人或车辆直接关联,除非发生安全事件。</li></ul>

数据来源:中国政府网,特斯拉中国,保时捷管理咨询整理

图33. 部分中国汽车行业数据安全法规要求与特斯拉数据安全举措



# 结语

随着科技的不断进步,电动垂直起降飞行器这一全新物种正以惊人的速度崛起和演化。这一创新的交通方式在近年来取得了重大突破,从技术研发到实际应用都展现出了巨大的潜力。有潜力成为中国科技和工业产品的新名片,面向未来,eVTOL行业有望迎来更加广阔的发展空间,更长的续航里程、更安静舒适的用户体验、更安全便捷的运营方式将带来越来越多的适用场景,重塑未来城市天际线。

我们对eVTOL行业充满期许,在产业端,中国也将首次在载人航空行业完成研发、制造、运行、维护等全生命周期的产业闭环,甚至为其他国家提供完整的解决方案。希望eVTOL主机厂和供应商伙伴能够继续加大技术创新力度,不断提升飞行器的性能和安全性。政府部门应积极制定合理的政策和法规,引导行业健康发展。同时,社会各界也应加强对eVTOL的认知和接受度,共同推动这一新兴交通方式的普及。

随着eVTOL运行的管理权限逐步下放到地方政府,eVTOL与人的接触越来越密切也成为必然,低空航空再也不是远离人的生活的孤立存在,而是融入大众的生活;传统观念和法规中更多的关注飞行器自身的思路,需要更多的转向关注机外环境和公众的生命财产安全。

目前低空风起云涌,但总体还处于发展的早期,机遇与挑战并存,需要各方的清醒思考和大胆尝试。同时,航空电动化已经成为历史的必然,未来的智能化航空也在向我们招手。相信在不久的将来,eVTOL飞行器将成为我们日常生活中不可或缺的一部分,为人们带来更加便捷、高效、绿色的出行体验,为城市的可持续发展做出重要贡献。

附录

1. 混合动力及纯电eVTOL运营经济性测算前提假设

		变量名称	典型值	解释
旅程		单次旅程长度（km）	100	以中等距离的城际交通为主要场景测算
		单次旅程耗时（小时）	0.42	包括约 13 分钟巡航时间，9 分钟起降、调姿、爬升、下降时间，3 分钟起飞前和降落后的滑行时间
飞行器		飞行器最大起飞重量（kg）	2800	基于倾转混动 eVTOL 构型估算
		有效载荷（kg）	500	
		巡航时速（km/h）	300	
		巡航阶段功率（kw）	200	
		起降阶段功率（kw）	650	
		座位数（个）	6	包括 1 名驾驶员和 5 名乘客
		单台 eVTOL 飞行器零售价（万美元）	150	国内 5-6 座 eVTOL 平均售价，海外类似构型产品售价约 300-650 万美元
		使用年限（年）	10	商业大中型飞机使用年限通常在 20 年以上。此处采取较为保守的计算假设，采用平均折旧法摊销
		飞行器残值（%）	10	商业大中型飞机报废前残值约为购入价格的 5%-10% 之间，此处取 10 作为计算假设
		单台全生命周期内飞行时长（小时）	40,000	商业大中型飞机全生命周期内飞行时长约 50,000 小时。eVTOL 商业化初期取 40,000 小时作为保守假设
		电机材料成本（美元 / 架）	143,000	基于现有国产新能源汽车级电机技术在满足航空安全要求下估算得出
营业收入		动力电池材料成本（美元 / 架）	72,000	基于现有国产新能源汽车级电机技术在满足航空安全要求下估算得出
		电机全生命周期寿命（小时）	5,000	基于现有国产新能源汽车级电机技术在满足航空安全要求下估算得出
		运营商毛利率（%）	10	基于通航和商业航班运营商综合利润率（<10%）的基础上的估算
		单次旅程上座率（%）	100	运营商可基于市场需求灵活调整班次。本测算将单次旅程上座率简化为 100%
运营成本	变动成本	电池能耗（kWh）	10.7	基于增程型 eVTOL 在巡航阶段采用增程器提供动力，起降阶段采用电池的供能方式计算
		度电成本（美元 / kWh）	0.18	基于工商业用电价格估算得出
		燃油成本（美元 / kg）	1.42	基于汽油平均价格计算得出
		发动机大修间隔时长（小时）	1,000	基于现有国产新能源汽车级增程器技术在满足航空安全要求下估算得出
		发动机大修费用（美元）	30,000	基于现有国产新能源汽车级增程器技术在满足航空安全要求下估算得出
		单次起降维保材料费（美元 / 次）	8.76	基于通用航空运营商历史数据测算得出
		机修师工资（美元 / 小时）	42.86	基于通用航空运营商历史数据测算得出
		单次旅程所需飞行员数量（名）	1	基于现有有人驾驶 eVTOL 估算得出
		飞行员工资（美元 / 年）	71,500	基于通用航空运营商历史数据测算得出
		航路费（美元 / 年）	22,000	基于通用航空运营商历史数据测算得出
	固定成本	起降、停机等地面费用（美元 / 次）	20	基于通用航空运营商历史数据测算得出，其中单次起降机场管理费 7 美元，停机费约 13 美元
		适航认证费用（美元 / 年）	1,500	基于中国民航局适航认证费计算逻辑，最大起飞重量为 2800 公斤的飞行器年度适航认证费约 9000 元
		销售费用、管理费用、财务费用（%）	3.1-5.1	基于航司财务数据测算，其中销售费用按单次旅程总成本的 5.12% 计，管理费用按 3.1% 计，财务费用按 5.1% 计
		飞行器折旧（美元 / 年）	135,000	基于单台 eVTOL 飞行器售价、折旧年限、残值比例计算得出

# 附录

## 经济性测算前提假设

		场景			解释
变量名称		保守	中性	乐观	
运营	执行率（%）	85	88	90	121 部 <sup>1</sup> 航司通常执行率约在 98% 以上。eVTOL 受天气等因素影响，初期执行率稍低
	单次补能时长（小时）	0.75	0.5	0.25	具体时长取决于补能方式（充电 / 换电）和能源技术（纯电 / 混动 / 氢能）路线
	单次等待时长（小时）	0.25	0.15	0.1	单次起降之间所需时间，通常包括飞行申请时间，例行检查 2 分钟，上下乘客 5 分钟，总计约 6-10 分钟
	单日计划起降次数（次）	10	20	30	121 部航司平均日利用率约 9-12 小时
	净年利用率 <sup>1</sup> （次）	3102	6424	9855	通过单日起降次数 *365 天 * 执行率计算得出
收入	单次旅程票价（人民币 / 座）	240	200	145	基于成本加成定价法，在单次总运营成本的基础上加利润计算得出
成本	航空器保险费（%/ 台）	1.5	1	0.8	基于单台 eVTOL 飞行器售价基础上收取不同比例的飞行器保险费
	电池总充放电循环（次）	800	1000	1500	基于现有高功率密度电池技术在满足航空安全要求下估算得出
	飞行员数量（名）	1	1	0	取决于飞行器智能化程度与适航监管要求。远期乐观场景下不需要飞行员执飞
	导航 / 空管服务（人民币 / 次）	21	10.5	7	由航路年费 / 净年利用率计算得出

1. “121 部”适用于在中国境内依法设立的航空运营人所实施的公共航空运输飞行，包括使用使用最大起飞全重超过 5,700 千克的多发飞机实施的定期载客运输飞行、使用旅客座位数超过 30 座或者最大商载超过 3,400 千克的多发飞机实施的不定期载客运输飞行、使用最大商载超过 3,400 千克的多发飞机实施的全货物运输飞行等三大类。

资料来源：案头研究，保时捷管理咨询分析

# 附录

## 2. 参考文献

[01] 《欧洲城市空中交通的社会接受度研究》，欧洲航空安全局 (EASA)，2021年

[02] 《空气螺旋桨理论及其应用》，北京航空航天大学出版社，2006年

[03] <Challenges and key requirements of batteries for electric vertical takeoff and landing aircraft>, ScienceDirect, 2021年

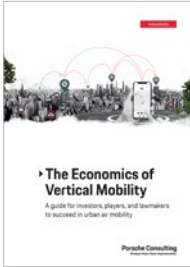
[04] 《2024低空经济场景白皮书》，中国航空学会，2024年

[05] 《新能源飞行器发展白皮书》，中国航空工业发展研究中心，2024年

## 3. 保时捷管理咨询过往关联白皮书



保时捷管理咨询, 2023年,  
《蓄势待发, 乘风破浪-2023中国  
垂直出行市场展望报告》



保时捷管理咨询, 2023年,  
<The Economics of Vertical  
Mobility- A guide for investors,  
players, and lawmakers to succeed  
in urban air mobility>



保时捷管理咨询, 2018年,  
<The Future of Vertical Mobility –  
Sizing the market for passenger,  
inspection, and goods services until  
2035>

---

## 作者



董钧天  
保时捷管理咨询  
合伙人



吕东泽  
保时捷管理咨询  
项目经理

---

## 联合作者



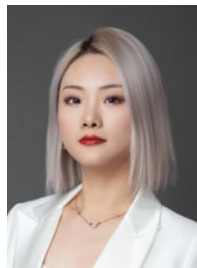
金镭  
中国航空学会  
航空器适航分会及  
电动航空分会委员



闵敏  
中国航空学会  
飞行汽车分会  
总干事



蒋彬  
天翎科  
创始人兼CEO



卢懿  
天翎科  
联合创始人兼CMO



周建文  
中国汽研检测  
工程事业部  
副总经理



于人杰  
中国汽研检测  
工程事业部  
安全中心专家

---

## 联系方式

### 保时捷管理咨询

董钧天: [juntian.dong@porsche-consulting.cn](mailto:juntian.dong@porsche-consulting.cn)

吕东泽: [shane.lyu@porsche-consulting.cn](mailto:shane.lyu@porsche-consulting.cn)

### 天翎科

卢懿: [luyi@inflync.com](mailto:luyi@inflync.com)

### 中国航空学会

[office@csaa.org.cn](mailto:office@csaa.org.cn)

### 中汽研

于人杰: [yurenjie@caeri.com.cn](mailto:yurenjie@caeri.com.cn)

---

## 关于保时捷管理咨询

保时捷管理咨询成立于1994年,作为全球知名跑车制造商保时捷公司的子公司,保时捷咨询主要提供战略与管理咨询服务。我们满怀激情,以好奇心及创新精神迎接每一个挑战,与客户并肩前行并助力他们成为各自领域中的“保时捷”。

---

## 谋于思, 践于行

作为一家擅长将战略付诸实践的全球领先咨询公司,我们有一个明确的使命:在可衡量的结果基础上创造竞争优势。我们具有战略性思考,并始终采取务实的行动。我们始终以人为本,坚持原则。这是因为,只有依靠与客户及其员工的良好合作才能带来成功。只有当我们激发每个人的热情,让他们做出必要的改变,我们的目标才能实现。



PORSCHE

Porsche Consulting

Strategic Vision. Smart Implementation.

## 保时捷管理咨询

斯图加特 | 汉堡 | 慕尼黑 | 柏林 | 法兰克福 | 米兰 | 巴黎 | 圣保罗 | 亚特兰大 | 帕洛阿尔托 | 上海 | 北京 | 合肥

上海市自由贸易实验区世纪大道 826 号 13 楼

上海市浦东新区花园石桥路 66 号东亚银行金融大厦 2 楼

北京市朝阳区酒仙桥北路 9 号恒通国际创新园 C7 栋 1 楼

合肥市经济技术开发区锦绣大道 6155 号中德合作创新园 1 栋 14 层

ServiceEnquiry@porsche-consulting.cn

www.porsche-consulting.com | © 2023 年保时捷管理咨询版权所有



保时捷管理咨询  
微信视频号



保时捷管理咨询  
微信公众号



保时捷管理咨询  
官方网站