

机械设备

低空经济系列报告（一）：他山之石——Joby的前世今生

投资要点：

➤ **全球电动垂直起降飞机龙头，垂直整合符合公司发展历史。**

公司为一家纯电动垂直起降飞机制造商，成立于2009年，以66亿美元的估值在纽交所SPAC上市，成为电动飞机领域的闪耀之星。公司创始人Joe Ben Bevirt适应时代技术，涉足电机、电池等新型行业，为Joby发展积累深厚技术经验。融资给予企业资金支持同时赋能公司商业化发展，例如丰田在汽车领域的制造经验帮助Joby实现批产的各个环节的效率和质量。公司战略为垂直整合，生产技术的垂直整合构建公司广阔护城河，商业模式的垂直整合加速公司商业化发展。Joby S4适航认证全球领先，预计2025年获得FAA的民用适航证。

➤ **倾转旋翼型号标杆，安全性对标民航客机。**

产品稳步迭代，低噪音与安全冗余为基础。通过对比产品参数，得出：1) 产品在城市空中交通核心前提为低噪音和具备冗余（安全）；2) 未来发展方向为延长续航能力与轻量化。

载人级eVTOL的零部件和材料安全性对标民航客机。1) 机翼机身：具备优秀的强度重量比，碳纤维为主要材料；2) 螺旋桨：螺旋桨数量减少，低桨尖速度降低噪音，低桨盘负载降低功耗；3) 推进系统：DEP保证安全冗余，自创Direct Drive电机架构满足力矩要求；4) 飞控系统：自研统一飞控系统，产品向分布式发展；5) 电池：续航能力的核心，公司电池能量密度达到288Wh/kg，支持一万次充放电循环。

eVTOL技术路线各异，Joby S4为倾转机翼型领先者。公司倾转旋翼型eVTOL可实现更高的飞行速度和更远的航程，且气动效率高，有效载荷量大，适用于远距离的城内与城际交通。但其安全性能低，伴随更高的风险。在目前的倾转机翼产品中，各类性能在全球倾转旋翼型中明显领先，已经逐步得到美国FAA的航空标准验证。

➤ **社会环境：美国民用航空基建成熟，eVTOL在城市交通中优势明显。**

美国空域管理：逐渐宽松空域管理，空域利用率领先。美国85%的空域为民用空域，通用航空器可飞行的空域主要在中低空空域的E类空域和低空空域的G类空域。我国全空域飞行密度约为1.39飞行小时/平方公里，约为美国30.2%，美国空域利用率明显领先。

美国民航基建：通航基础设施完善，UAM架构成熟。美国重视民用通航基础设施建设，拥有4756座通用机场，这些通用机场能够满足目前美国通用航空的不同需求，对美国经济社会有巨大的补充作用。

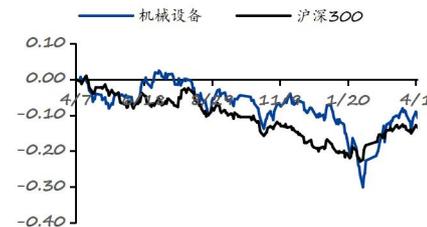
美国城市交通：相比直升机和出租车，eVTOL在城市交通中优势明显。载人eVTOL未来三种重要的使用场景是城市出租车、机场班车和城际交通。根据Roland Berger，2030年全球运营载人eVTOL数量有望达7000架，2050年全球运营载人eVTOL数量有望达16万架，分类别看，2025年城市出租车、机场班车、城际交通三类eVTOL占比分别有望达36%、35%和29%。在城市交通方面，相较直升机与出租车，飞行汽车具备各方面优势，因为：1) 美国地铁、道路基建相对落后；2) eVTOL在特定路程范围内，具有高效便捷、低噪音、低碳排放、舒适私密等优点，与直升机等传统飞行器相比，具有明显的成本和环保优势，相较出租车具有高效、便捷等优势。

➤ **风险提示**

技术面临不确定性、需求端渗透不及预期、适航证书流程不及预期。

强于大市（维持评级）

一年内行业相对大盘走势



团队成员

分析师：彭元立(S0210522100001)
PYL3957@hfzq.com.cn

相关报告

- 1、气柴价差保持高位，天然气重卡销量中枢有望上移——2024.03.18
- 2、高压清洗机：家用产品海外需求有望受益于补库周期和地产复苏——2024.02.24
- 3、回购股份彰显企业信心，关注低估值优质标的——2024.02.21



正文目录

1 全球电动垂直起降飞机龙头，垂直整合符合公司发展历史	4
1.1 历史：创办先驱先行，发展生逢其时	4
1.2 融资：提供资金支持，赋能商业发展	6
1.3 战略：核心零部件垂直整合构建护城河，商业模式垂直整合提供运输服务	7
1.4 产品定位：解决交通拥堵现状，增添安全、高效、快捷出行方式	8
1.5 适航认证：一波三折，预计 2025 年获得 FAA 的民用适航证	10
2 Joby S4：倾转旋翼型号标杆，安全性对标民航客机	12
2.1 产品：稳步迭代，低噪音与安全冗余为基础	12
2.2 零部件：要求对标民航客机，重点聚焦安全、低噪音和长续航	14
2.2.1 机翼机身：具备优秀的强度重量比，碳纤维为主要材料	15
2.2.2 螺旋桨：低桨尖速度降低噪音，低桨盘负载降低功耗	16
2.2.3 推进系统：DEP 保证安全冗余，Direct Drive 电机架构满足力矩要求	17
2.2.4 飞控系统：自研统一飞控系统，产品向分布式发展	18
2.2.5 电池：续航能力的核心，支持一万次充放电循环	20
2.3 eVTOL 技术路线各异，Joby S4 为倾转机翼型领先者	22
3 社会环境：民用航空基建成熟，eVTOL 在城市交通中优势明显	26
3.1 美国空域管理：逐渐宽松空域管理，空域利用率领先	26
3.2 美国民航基建：通航基础设施完善，UAM 架构成熟	27
3.3 美国城市交通：相比直升机和出租车，eVTOL 在城市交通中优势明显	28
4 风险提示	30

图表目录

图表 1：公司发展历史	4
图表 2：乔本·贝弗特经历	5
图表 3：Joby 管理层履历	6
图表 4：Joby 的融资历程	7
图表 5：全球主要 eVTOL 企业现金资金情况（单位：百万美元）	7
图表 6：Joby 产品考虑因素	8
图表 7：Joby 全球合作伙伴	8
图表 8：Joby 产品定位效果图	9
图表 9：Joby 的“叫车”服务	9
图表 10：Joby 的认证、生产、市场规划	10
图表 11：Joby 适航证时间表	10
图表 12：Joby 的适航证书进展情况	11
图表 13：美军“敏捷至上”示意图	11
图表 14：Joby 历年产品	12
图表 15：Joby 产品迭代示意图（从缩比机到原型机到适航机）	13
图表 16：Joby 起飞与航线的噪声对比	13
图表 17：冗余设计对比示意图	14
图表 18：飞行汽车基本构成	15
图表 19：S4 产品质量占比情况	15
图表 20：Joby S4 产品图片	16
图表 21：Joby S2 和 S4 产品的螺旋桨对比	16
图表 22：Joby 螺旋桨结构	17
图表 23：旋翼、电机工作原理	18
图表 24：2016 年电机架构	18
图表 25：Joby Direct Drive 电机架构	18
图表 26：典型飞控系统研制过程可能包含的项目	19
图表 27：Joby 飞控系统的一种方案变体	20
图表 28：Joby 的新老航电飞控	20



图表 29: Joby 与特斯拉 model 3 的电池指标对比	21
图表 30: Joby 电池分布情况	21
图表 31: 电池满足的航程地图	22
图表 32: 各种类型机型分析对比	23
图表 33: 全球主要厂商产品定位	24
图表 34: 国内外倾转旋翼型龙头企业产品性能对比	25
图表 35: 美国空域管理示意图	26
图表 36: 中美欧空域管理整体绩效比较	27
图表 37: 美国通航和无人机产业均处于全球前列	27
图表 38: 美国通用航空各类介绍与作用	28
图表 39: 美国通用航空器交付量 (单位: 架, %)	28
图表 40: 美国城市空中交通运行方式演变	28
图表 41: 全球载人 eVTOL 运营架次预测	29
图表 42: 主要城市出行距离情况	29
图表 43: 各类出行方式优劣势比较	30
图表 44: eVTOL 与现有主流交通运输方式出行用时对比	30

1 全球电动垂直起降飞机龙头，垂直整合符合公司发展历史

1.1 历史：创办先驱先行，发展生逢其时

Joby 是一家总部位于加利福尼亚州的纯电动垂直起降飞机（electric vertical take-off and landing，eVTOL）制造商，成立于 2009 年，并于 2021 年 8 月通过与特殊目的公司（SPAC）Reinvent Technology Partners 合并，以 66 亿美元的估值在纽交所 SPAC 上市，成为电动飞机领域的闪耀之星。

图表 1：公司发展历史

时间	定位	具体发展
2009	开端	由七名工程师组成的小团队，探索电动马达、飞行软件和锂离子电池等前沿技术，几乎从头开始设计每一个部件。
2012	合作	Joby 被选中与美国宇航局（NASA）合作几个开创性的电动飞行项目，包括 X-57 和 LEAPTech。
2015	演示	在经过多年非全尺寸原型机的测试和分析，Joby 达到了 2022 年直升机的配置，并第一次试飞该非全尺寸原型机。
2017	演示	Joby 的第一架全尺寸原型机试飞成功。
2019	测试	Joby 对其预生产原型机（pre-production prototype）开展严格的飞行测试项目。
2019	融资/合作	Joby 获得了战略投资者——丰田的技术支持。数十名丰田的工程师参与 Joby 的制造，主要在工厂布局、制造工艺开发和大批量生产方面提供专业意见。
2019	认证	Joby 获得美国联邦航空管理局（FAA）G-1 第二阶段的认证。
2020	适航批准	Joby 成为第一家获得美国空军适航批准的 eVTOL 公司。这使得 Joby 的飞机获准在美空军基地飞行，并使用国家的测试设施，这为 Joby 进一步提高飞机性能提供了难得的机会。
2020	融资/合作	Joby 与 Uber 达成更深层次的战略合作，双方同意在自己的应用程序中加入对方的空中拼车服务。除此之外，Uber 增加对 Joby 的投资，Joby 收购了 Uber 的空中出租车业务 Elevate，借此机会获得了其软件工具和商业推广方面的经验，为未来的商业化积累了能量。
2020	认证	Joby 获得 G-1 第四阶段的认证。
2021	上市	Joby 通过与公司 Reinvent Technology Partners 合并，在纽交所成功上市。
2021	飞行测试	Joby 的第一架预生产原型机飞行了 5300 英里，即超过 8500 公里，一次充电飞行 154.6 英里，约合 250 公里。
2022	产品迭代	Joby 生产了第二台预生产原型机，通过了 FAA 第一次制造符合性检查，离最终获得 FAA 的适航认证又近了一步。
2022	认证	获得第 135 部分航空承运证书，允许 Joby 经营空中出租车服务；同时通过与美国宇航局合作，低噪音满足城市交通需求。
2022	合作	与达美航空签署一项为期多年、跨城市的合作伙伴关系，以提供从家到机场的空中出租车服务，将 Joby 产品直接对接 Delta 客户中。
2023	生产	Joby 在加利福尼亚州试点生产工厂开始生产，第一架飞机于 2023 年 6 月下线并进行飞行测试。
2023	规模化生产	俄亥俄州代顿市建立规模化生产基地，年产能达 500 架飞机
2023	交付	向美国国防部签订交付和运营飞机的 1.31 亿美元合同，首次向美国空军交付飞机。
2024	认证	美国 FAA 公布了 Joby 倾转旋翼电动垂直起降飞行器（eVTOL）JAS4-1 的正式适航准则（适航审定基础文件，相当于专用条件），将自 2024 年 4 月 8 日起生效，也是 FAA 正式颁布实施的首款 eVTOL 适航准则。
2024	订单	2024 年 2 月 Joby 拿到迪拜政府长达 6 年的空中出租车独家经营权。

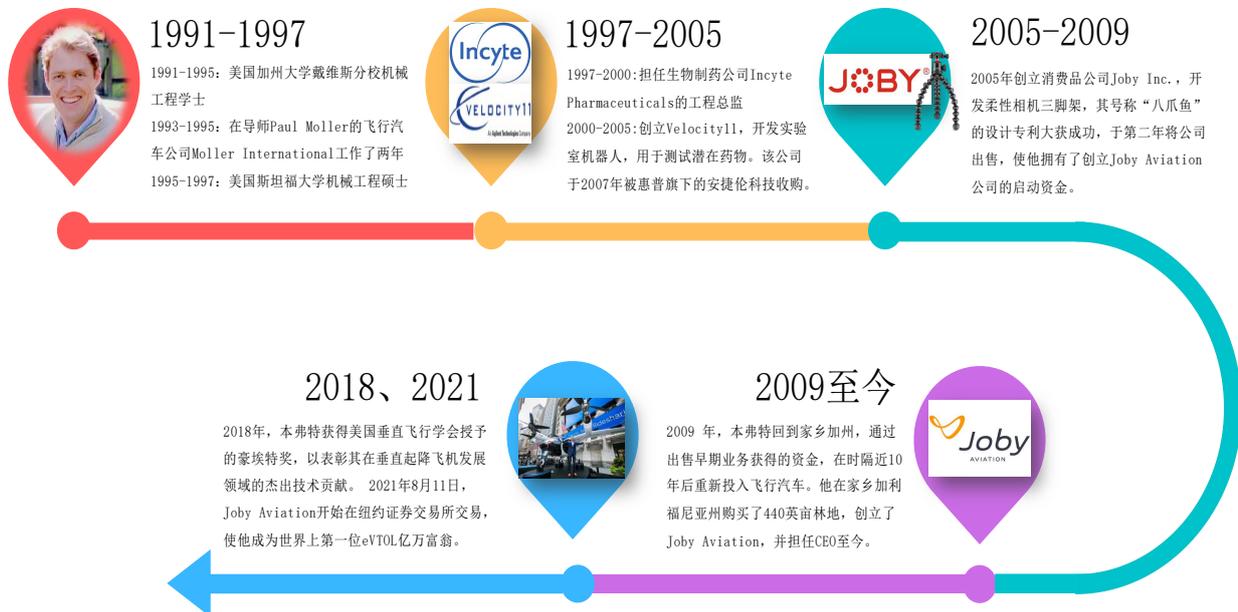
来源：公司官网，华福证券研究所

公司创始人 JoeBen Bevirt 适应时代技术，研发沉淀。JoeBen Bevirt 师从航空和机械工程教授 Paul Moller，由于技术限制无法实现飞车稳定悬停。JoeBen Bevirt 意识到机电等新兴行业将会是产业核心，因此先后成功创建过三家不同行业的公司，生命科学公司 Velocity11（后来卖给安捷伦），生产 GorillaPod“八爪鱼”相机三脚架



的企业 Joby Inc.和专注于机载风力发电的公司 Joby Energy。和特斯拉 CEO 马斯克一样,JoeBen Bevirt 利用了前几家创业公司成功退出的收益和积累的技术作为发展 Joby 的基石,创办了 Joby 航空,进行深度研究数十载。

图表 2: 乔本·贝弗特经历



来源: 滚石杂志, 福布斯杂志, 维基百科, 华福证券研究所

Joby 公司管理层均有航空领域背景, 专业功底深厚。首席财务官 Matt Field 拥有超过 20 年财务经验, 曾担任福特汽车公司北美首席财务官, 管理 1000 亿美元收入业务和 1000 名财务员工; 政府政策负责人 Greg Bowles 曾在美国通用航空制造商协会 (GAMA) 任职 14 年, 先后担任工程制造总监、欧洲监管事务总监、全球创新政策副总裁, 倡导现代监管改革, 为新形式的日常空中交通铺平道路; 运营总裁 Bonny Simi 曾在捷蓝航空工作 17 年, 先后担任机长、机场规划总监、客户服务总监、人力副总裁, 并一手创立了其风险投资子公司 JetBlue Technology Ventures。首席产品官 Eric Allison 是斯坦福大学航空和航天学博士, 曾担任飞行汽车公司 Zee Aero 的 CEO, 带领自主空中出租车 Cora 的开发, 也曾带领 Uber 的飞行汽车团队 Uber Elevate 开发软件工具, 实现按需移动。


图表 3: Joby 管理层履历

姓名	职务	履历
Matt Field	首席财务官	拥有超过 20 年财务经验，2021 年加入 Joby。此前在 福特汽车公司担任北美首席财务官 ，负责监督福特最大汽车部门的财务运营，管理 1000 亿美元收入业务和 1000 名财务员工。在加入福特之前，他曾在 高盛和美联储 工作。
Greg Bowles	政府政策负责人	2019 年加入 Joby。此前在 美国通用航空制造商协会 (GAMA) 任职 14 年，先后担任工程制造总监、欧洲监管事务总监、全球创新政策副总裁，倡导现代监管改革，为新形式的日常空中交通铺平道路。他曾担任 美国材料与试验协会 (ASTM) 通用航空飞机技术委员会 (F44) 的主席 ，负责制定轻型运动飞机的设计和性能标准，也是皇家航空学会会员、商用飞机和直升机飞行员。
Bonny Simi	运营总裁	2020 年加入 Joby。曾创立并领导了捷蓝航空公司 (JetBlue Airways) 的风险投资部门，并担任相关子公司 JetBlue Technology Ventures 的总裁 ，负责孵化科技、旅行和酒店领域的初创企业。在捷蓝航空的 17 年里，先后担任捷蓝航空机长、机场规划总监、客户服务总监、人力副总裁。
Eric Allison	首席产品官	Eric 是斯坦福大学航空和航天学博士，斯坦福大学航空航天硕士，以及密尔沃基工程学院学士。在航空航天研究、电力推进、储能、车辆自主性和复合结构方面有丰富经验，曾担任 飞行汽车公司 Zee Aero 的 CEO、工程总监 ，带领自主空中出租车 Cora 的开发；也曾带领 Uber 的飞行汽车团队 Uber Elevate，开发基于十多年经验的软件工具，实现按需移动。
Kate DeHoff	法律总监	Kate 于 2021 年加入 Joby，负责公司的法律、道德和合规职能。Kate 在航空航天行业有丰富经验，曾任工业陶瓷生产公司 CoorsTek 的法律事务副总裁， 两栖飞行器制造商 ICON Aircraft 的总法律顾问，Uber 的飞行汽车计划“Uber Elevate”的产品法律总监 。
Didier Papadopoulos	飞机代工业务 (OEM) 负责人	Didier 拥有麦吉尔大学机械工程和机器人硕士双学位，于 2021 年加入 Joby。此前有二十多年的航空经验，包括业务开发、项目管理、系统工程等。他曾在航空航天组件制造公司 CAE 担任航空电子系统专家，为商务航空开发飞行模拟器；随后在 航空 GPS 公司 Garmin 担任项目总监和航空业务副总裁 。

来源：公司官网，领英，华福证券研究所

1.2 融资：提供资金支持，赋能商业发展

融资给予企业资金支持同时赋能公司商业化发展。Joby 在 2016 年获得其 A 轮融资，一个月后又获得了五角大楼基金的资助，随后陆续获得 B 轮和 C 轮融资，并很快通过与 SPAC 合并的方式在 2021 年 8 月借壳上市，成为继亿航之后，第二家上市的 eVTOL 公司。其中，汽车制造商丰田 (Toyota Motor)、打车平台优步 (Uber) 和美国最大的航空公司达美航空 (Delta Air Lines) 在 Joby 上市前后的注资对于 Joby 未来的商业化发展具有战略意义：(1) 丰田在汽车领域的制造经验帮助 Joby 实现批产的各个环节的效率和质量；(2) 优步将其地面按需出租车管理经验和信息化系统注入 Joby 的空中出租车相关环节；(3) 达美航空协助 Joby 首先实现“从家到机场”

的航线运营（首先从纽约市和洛杉矶起飞）。

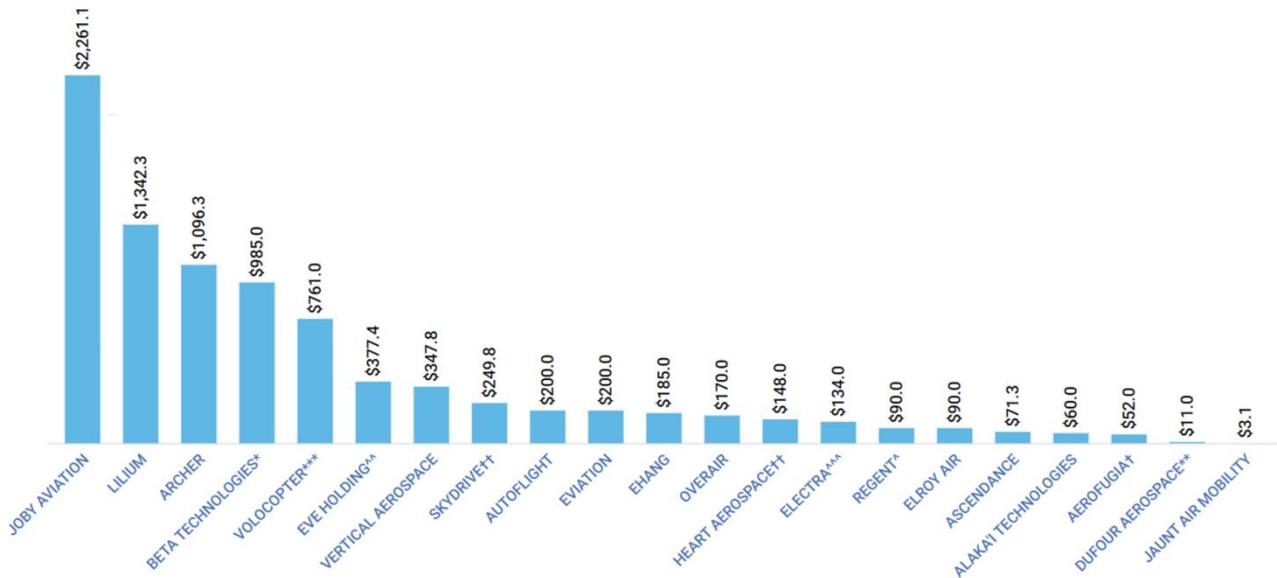
图表 4: Joby 的融资历程

时间	轮次	融资金额	主要投资者	估值
2016年12月1日	A轮	3000万美元	Capricorn Investment Group	
2017年1月1日	政府津贴	97万美元	五角大楼基金	
2018年2月1日	B轮	1亿美元	英特尔、丰田、捷蓝航空等	
2019年1月15日	B轮	-	Trucks Venture Capital	
2020年1月16日	C轮	5.9亿美元	Toyota Motor	25亿美金
2020年12月8日	企业债	7500万美元	Uber	
2021年8月10日	IPO	8.35亿美元	-	
2022年10月11日	股票增发	6000万美元	Delta Air Lines	

来源：中国金融案例中心，华福证券研究所

Joby 资金能力全球领先。相比国内主机厂公司资金情况，海外厂商资金实力遥遥领先。下图为各个主机厂商内部资金与融资资金的总额，可以看到 Joby、LILIUM、ARCHER 至今分别为 22.6、13.4、10.96 亿美元，明显领先亿航等国内企业。

图表 5: 全球主要 eVTOL 企业现金资金情况（单位：百万美元）



来源：SMG，华福证券研究所

注：1、*BETA TECHNOLOGIES 的资金不包括亚马逊于 22 年 6 月 23 日追加的气候承诺基金投资；2、**DUFOUR AEROSPACE 的融资不包括由 vistajet 牵头于 23 年 1 月 23 日进行的 B 轮融资；3、VOLOCOPTER 的融资不包括 Sumitono Corporation(2/21/23)、Sekisui Chemical Co(3/06/23)、SITA(3/14/23) 额外的 E 轮融资；4、REGENT 的资金不包括 Lockheed Martin Ventures 的融资(23 年 3 月 22 日)和 H.I.S. Group 的战略投资(24 年 3 月 7 日)；5、EVE HOLDING 的资金包括 spac 之前收到的资金；6、ELECTRA 的资金包括收购 ELECTRA 前获得的资金，但不包括 Statkraft Ventures 于 23 年 7 月 26 日获得的资金；7、AEROFUGIA 资金包括在 23 年 6 月 29 日融资之前收到的估计资金；8、HEART 航空航天资金包括欧洲投资委员会的赠款，作为 2020 年 9 月 18 日欧洲绿色协议的一部分；9、SKYDRIVE 融资不包括铃木于 24 年 10 月 1 日通过新股获得的额外 C 轮融资。

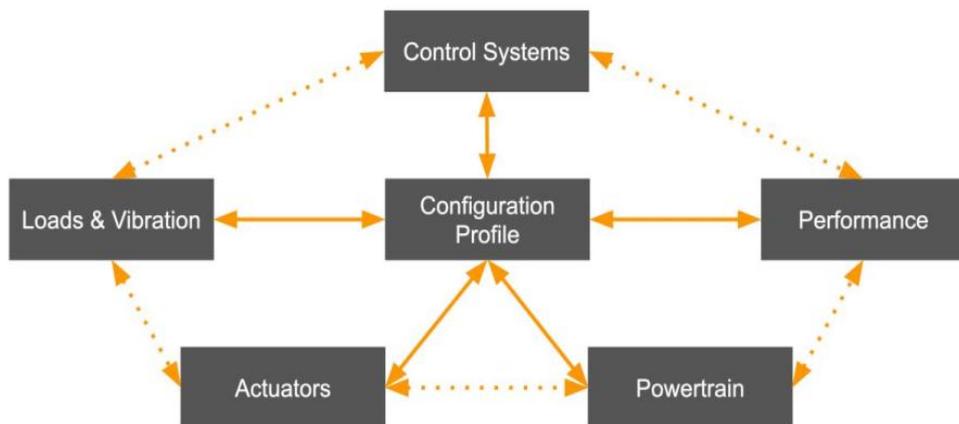
1.3 战略：核心零部件垂直整合构建护城河，商业模式垂直整合提供运输服务

生产技术的垂直整合构建公司广阔护城河。从公司发展历史角度来看，技术的垂直整合为无奈之举。公司创业之初 eVTOL 领域尚处于行业早期，没有成型的产业配套，没有成熟的供应链。因此，处于行业早期的科技型企业往往需要自主研发制



造的情形，比如要自行研制电机、舵机、逆变器、电池包、传感器和低噪音螺旋桨。公司经过 20 年的技术积累以及与上下游企业合作，使 Joby 对飞行器生产的 Know-How 更为了解，造出的飞行器高度集成、性能更优。

图表 6: Joby 产品考虑因素



来源：《Joby Aviation proprietary information》，华福证券研究所

商业模式的垂直整合加速公司商业化发展。Joby 战略定位并不是单纯飞行器制造商，公司与丰田、Uber、达美航空等企业的战略合作体现公司旨在通过打造一个垂直整合的运输服务公司，为客户直接提供运输服务。该战略定位主要是由于目前社会环境造成的，在纽约和洛杉矶每天 99% 以上的行程在 50 公里之内。例如，Joby 曾在 C 轮融资中获得了 Uber 5000 万美元的投资，同年 12 月 Joby 又宣布收购 Uber 的“空中的士服务”业务—— Elevate，同时获得 Uber 另外 7500 万美元的投资。除此之外，两家公司同意将各自的服务整合到彼此的应用程序中，从而为未来的客户实现地面和空中旅行的无缝整合。

图表 7: Joby 全球合作伙伴



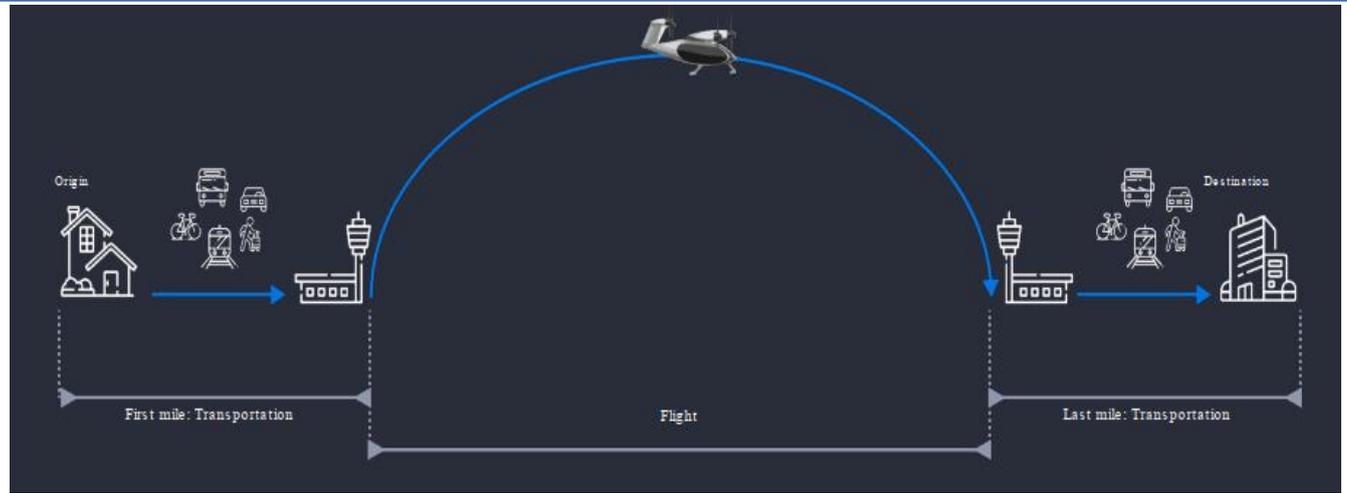
来源：《Joby Aviation Intro》，华福证券研究所

1.4 产品定位：解决交通拥堵现状，增添安全、高效、快捷出行方式

产品定位解决交通的“一百公里”拥堵现状。三种主流方式：1) 固定翼飞机需要较长的跑道辅助起飞，而高楼耸立、人流密集的城市中心无法为其提供完备的起飞条件，能执行城市间大型客运和货运任务，无法服务城市内部或临近城市市区点

对点交通。2) 直升机具有载重大、机动性强的优点，起降条件也不需要专门跑道与机场，能够节省通用航空机场的基建成本。但是其飞行时噪声大、运营成本高，维护保养贵，难以进一步普及。3) eVTOL 集成了自动驾驶、电动、低空航空元素为一体，噪音更小，成本更低，且能够垂直起降，省去了建造机场的成本，随时随地可以起飞和降落。

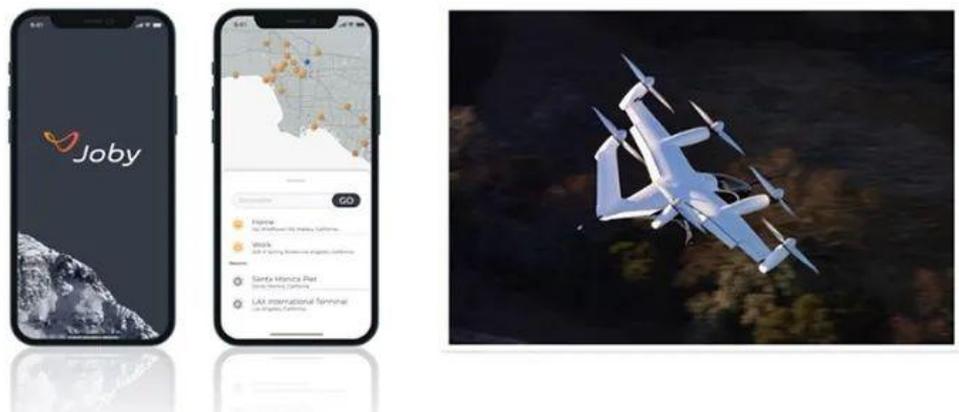
图表 8: Joby 产品定位效果图



来源:《AAM Presentation》，华福证券研究所

商业化合作加速“制造”向“制造+服务”发展速度。1) 通过与 Uber 合作, Joby 可以获得了宝贵的网约车业务运营经验, 将有助于其产品推向市场后的运营和成长, 使得公司在竞争激烈的市场中能够更加稳健地发展。2) 丰田又押注航空运输领域的发展, 其总裁兼首席执行官丰田章男对丰田向 Joby 的投资表示“丰田 eVTOL 和航空运输的态度是认真的”。3) 达美航空表示将把 Joby 往返机场的航空服务整合到达美乘客的预定系统中, 为乘客提供乘坐空中出租车往返于纽约和洛杉矶的机场的出行选择。

图表 9: Joby 的“叫车”服务



来源: Joby 官网, 中国金融案例中心, 华福证券研究所

Joby 与迪拜道路和运输局(RTA)签署最终协议, 将于 2026 年初在阿联酋推出空中出租车服务。该协议为 Joby 提供了为期六年的迪拜空中出租车独家运营权, 并将使迪拜成为通过 Joby 的革命性技术提供快速、清洁和安静的空中旅行的世界领导者。

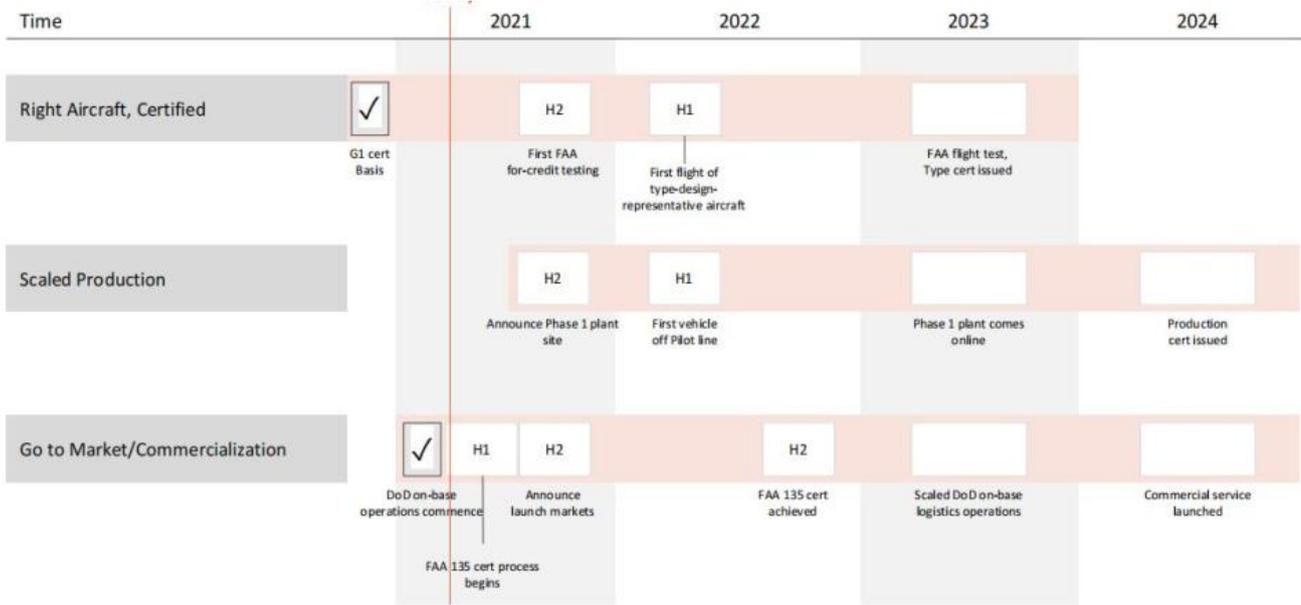


该协议确保了来自 RTA 的各种支持，包括金融机制，以进入和成熟迪拜的服务业务。

1.5 适航认证：一波三折，预计 2025 年获得 FAA 的民用适航证

初始规划：按照 Joby 的规划，公司预计在 2021 年首次 FAA 信用测试认证，在 2022 和 2023 年分别通过首次飞行测试与 FAA 飞行测试，并在 2024 年开始进行规模化生产与商业化运行。

图表 10: Joby 的认证、生产、市场规划



来源：eVTOL，华福证券研究所

目前进展：2023 年 11 月，S4 eVTOL 在纽约市区完成首次试飞，为该型 eVTOL 在城市中的首次飞行。更早之前，Joby 的第一架 eVTOL 产品已成功交付美国军方。截至 2024 年 3 月，FAA 发布了美国 Joby 公司的 JAS4-1 型五座倾转旋翼 eVTOL 的正式适航准则，将于 2024 年 4 月 8 日生效，这是 FAA 发布的第一个 eVTOL 适航专用条件。

图表 11: Joby 适航证时间表

时间	认证情况分析
2019	预生产原型机开展严格的飞行测试项目，通过 FAA G-1/2 阶段
2020	通过 FAA G-3/4 阶段
2021	第二台预生产原型机通过 FAA 第一次制造符合性检查
2022	已完成第一系列 AA 的符合性测试，第一架原型机坠毁
2023	通过 FAA G-1/2 阶段
2024	通过 FAA G-3 阶段，准备 FAA G-4 阶段，FAA 发布了美国 Joby 公司的 JAS4-型五座倾转旋翼 eVTOL 的正式适航准则

来源：航空产业网，华福证券研究所

项目认证计划的可行性除了受整机厂商自身规划的影响，也受适航监管法规政策的影响。1) 阶段一：FAA 原计划将 eVTOL 纳入 23 部固定翼飞机类别进行适航审定，再根据 eVTOL 的垂直起降部分的适航要求参考 27 部直升机和 29 部运输类旋翼类航空器部分适航标准增加专用条件。2) 阶段二：FAA 调整 eVTOL 的适航审定政策，为此将 eVTOL 纳入 21.17 (b) 所属的“特殊类别” (special class)，FAA 对 eVTOL



的适航审定就变成了一事一议，根据每个型号的情况相应制定专门的专用条件，增加了审定的复杂性、降低了审定效率。3) 阶段三：3月8日，FAA发布了美国Joby公司的JAS4-1型五座倾转旋eVTOL的式活航准则，将于2024年4月8日生效、这是FAA发布的第一个eVTOL活航专用条件。

未来预期：根据Joby2023公布的股东公开信，截止2023Q3，84%的认证计划已被FAA接受，其中包括涵盖电池和高压配电的储能和配电系统计划等。同时Joby倾转旋翼电动垂直起降飞行器（eVTOL）JAS4-1的正式适航准则将自2024年4月8日起生效，准则的确定将加速Joby的审批流程。另一方面，美国空军于2020年12月向Joby的五座eVTOL颁发了军用适航证，Joby的原型机已经取得FAA颁发的特许适航证。Joby预计，向美国空军24年交付的飞机将促使FAA向Joby Aviation颁发适航证书，预计2025年获得FAA的民用适航证。

图表 12: Joby 的适航证书进展情况

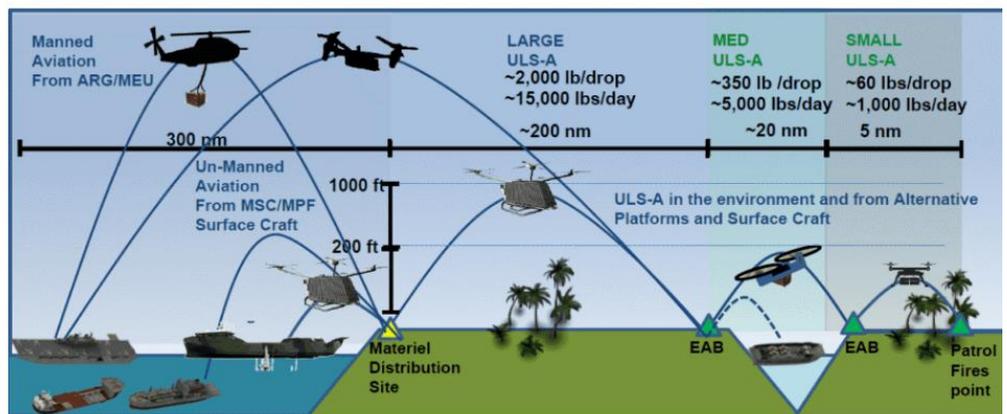
阶段 时间	Stage1		Stage2		Stage3		Stage4		Stage5	
	Joby	FAA	Joby	FAA	Joby	FAA	Joby	FAA	Joby	FAA
2023Q1	100%	100%	97%	93%	96%	63%	14%	5%	1%	0%
2023Q2	100%	100%	97%	97%	98%	68%	15%	5%	1%	0%
2023Q3	100%	100%	97%	97%	98%	84%	17%	7%	1%	0%
2023Q4	100%	100%	97%	97%	100%	100%	24%	9%	1%	0%

来源：公司季报，华福证券研究所

注：Stage1: Certification Basis, Stage2: Means of Compliance, Stage3: Certification Plans, Stage4: Testing & Analysis, Stage5: Show & Verify。

美国“敏捷至上”计划或将加速Joby的认证速度。2020年2月，美空军启动了名为“敏捷至上”（Agility Prime）项目，探索航空业新兴的电动垂直起降（eVTOL）技术在特种作战、救援搜索、短距运输等军事任务应用的可行性，推动商用技术向军事领域转化。美国空军敏捷至上项目于2023年4月25日向eVTOL制造商乔比（Joby）公司授予了总额5500万美元的9架S4飞机采购合同，首批2架S4飞机将于2024年3月前交付。这是敏捷至上项目首次签署采购合同，意味着eVTOL在军用领域获得重大进展。项目涉及的S4飞机预计将于2024年完成飞行器适航审定，2025年年初具备规模化应用的水平。

图表 13: 美军“敏捷至上”示意图



来源：高端装备产业研究中心，云脑智库，华福证券研究所



2 Joby S4: 倾转旋翼型号标杆, 安全性对标民航客机

2.1 产品: 稳步迭代, 低噪音与安全冗余为基础

十年磨一剑, 真正契合并解决了城市空中出行领域的核心关切问题, 有望成为 UAM 第一个真正商业落地运营的 eVTOL 飞行器。汇总 Joby 的产品参数, 总结龙头企业产品趋势:

变: 搭载人数/重量提升 (2 人→5 人, 180Kg→453Kg), 航程缩短 (320Km→241/161), 空重增加 (900Kg→1815/1950Kg), 螺旋桨/电动机数量下降 (16 个→6 个), 有主翼转为无主翼。

不变: 巡航速度 (保持 320Km/h), 机身 (碳纤维复合材料), 尾翼 (V 型), 安全冗余 (分布式电力推进系统)。

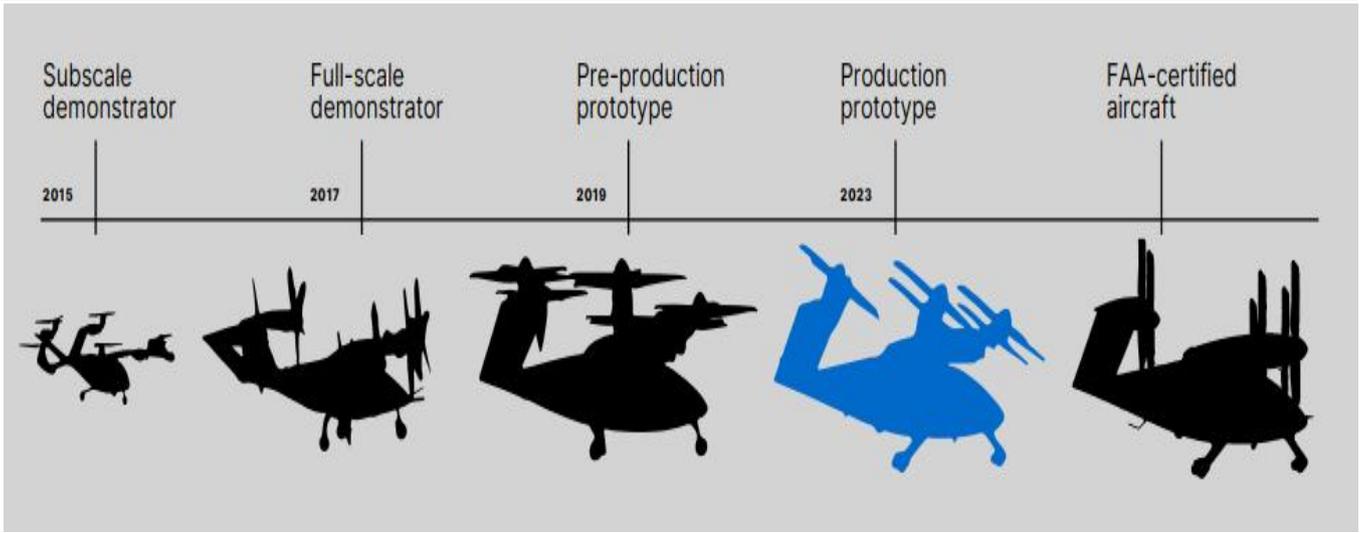
图表 14: Joby 历年产品

产品名称	Joby S2 (已停产)	Joby S4 2.0 (预生产原型)	Joby S4 (生产原型)
产品外观			
飞机类型	eVTOL 概念设计空中滑行飞机	eVTOL 客运空中出租车预生产原型机	eVTOL 客机
搭载人数(飞行员+乘客)	2 (1+1)	5 (1+4)	5 (1+4)
巡航速度 (km/h)	320	322	322
航程 (km)	320	241.4	161 (包括能量储备)
最大巡航高度 (m)	—	—	—
空重 (kg)	900	1815	1950
有效载荷重量 (kg)	180	—	453
最大起飞重量 (kg)	—	—	2404
螺旋桨	12 个垂直起降螺旋桨+4 个固定推进螺旋桨	6 个倾斜螺旋桨(2 个带有连杆结构)	6 个倾斜螺旋桨(2 个带有连杆结构)
电动机	16 台	6 台高性能电机	6 台高性能双绕线电动机
噪音	—	—	巡航时 45 dBA
电源	电池	采用尖端电池组设计的锂镍钴锰氧化物电池	电池
机身	碳纤维复合材料	碳纤维复合材料	碳纤维复合材料
窗户	顶篷	大窗户	整个机舱的大窗户
机翼	1 个主翼	—	—
尾翼	1 V 型尾翼	—	V 型尾翼
起落架	可伸缩式三轮车轮式起落架	三轮车轮式伸缩起落架	三轮车轮式起落架

来源: eVTOL, 华福证券研究所



图表 15: Joby 产品迭代示意图 (从缩比机到原型机到适航机)

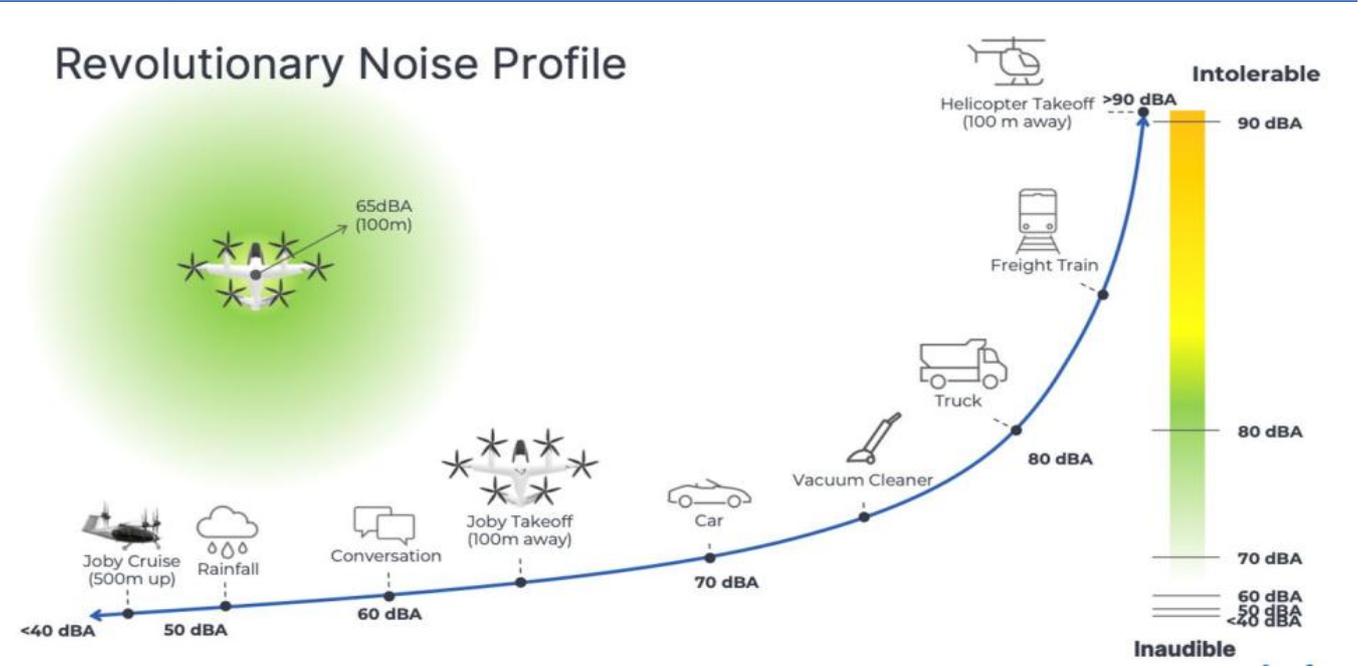


来源: 《Production Launch - Joby Aviation》, 华福证券研究所

城市空中交通核心前提: 低噪音和具备冗余 (安全)。

1) 低噪声: Joby 的 eVTOL 与传统直升飞机区别显著。传统直升飞机的能源效率低且噪音大, 尽管技术早已成熟但并不能在城市中作为民用交通得到普及, 而 Joby 研发的这一类利用清洁能源的低噪音“直升飞机”可以有效地解决传统直升飞机作为通用交通工具的最大难题。在悬停阶段噪音非常低, 而悬停阶段是飞机噪音最大的飞行阶段, 这使 Joby S4 成为目前已知满足城市空中交通噪音低于 88 分贝限制标准的飞机。

图表 16: Joby 起飞与航线的噪声对比

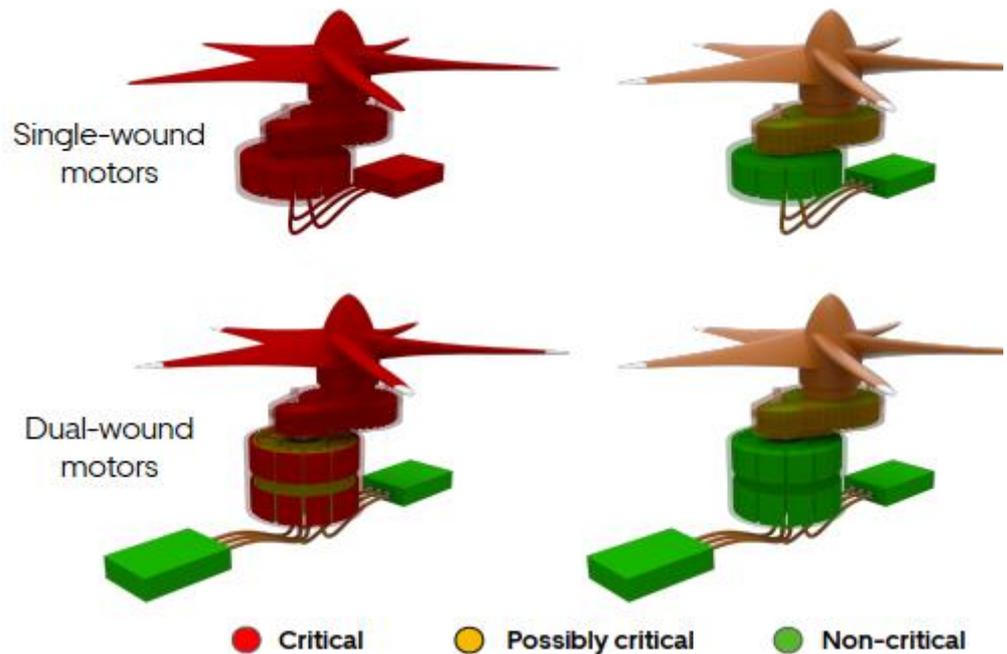


来源: 公司公告, 华福证券研究所

2) 安全性: 分布式电力推进 (DEP), 通过冗余为其乘客和/或货物提供安全保障。DEP 意味着在飞机上安装多个螺旋桨 (或涵道风扇) 和电机, 因此如果一个或多个螺旋桨 (涵道风扇) 或电机发生故障, 其他工作螺旋桨 (或涵道风扇) 和电

机可以安全降落飞机。实现该功能是因为：1) 六个螺旋桨中任意一个螺旋桨故障情况下都能保证安全飞行；2) 每个电机都由两个独立的逆变器供电；3) 每个逆变器都连接到一个单独的电池组；4) 飞行器有四个隔离的冗余电池组；5) 逆变器或电池发生故障，电机将保证继续工作。

图表 17：冗余设计对比示意图

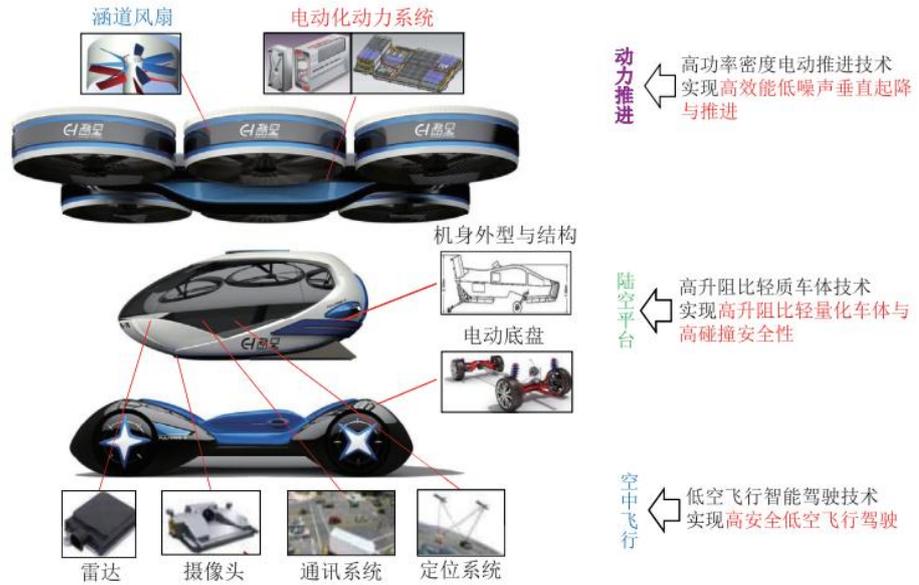


来源：Uber, 华福证券研究所

2.2 零部件：要求对标民航客机，重点聚焦安全、低噪音和长续航

载人级 eVTOL 的零部件和材料安全性对标民航客机。eVTOL 飞行汽车结构主要包括三大部分：动力推进系统、车体平台和飞行控制总系统，其中每个部分又可分为多个子系统。1) 动力推进系统的核心技术及零部件主要包含电池、电机、驱动器、伺服电机、减速器等；2) 车体平台系统主要包含机体外壳、桨叶、航空玻璃等，部分零部件可与飞机、直升机通用，目前该领域主要是航空航天企业在研发和制造；3) 飞行控制总系统分为四个主要部分：①飞行控制系统：包括起飞着陆控制、飞行姿态控制、路径规划、应急安全等；②传感器系统：包括摄像头、激光雷达、超声波、空速管，以及温度、气压、湿度传感器等；③通讯系统：包括无线电、5G、卫星通讯等；④导航系统：包括北斗导航和 GPS 的定位系统以及基站导航、惯导等导航系统。飞行控制系统、传感器系统的研发制造参与者主要以军工单位、研究所及高校为主。

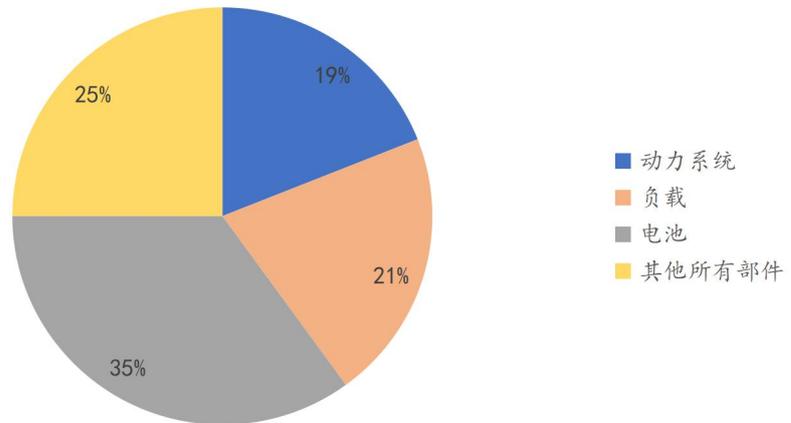
图表 18: 飞行汽车基本构成



来源:《飞行汽车的研究发展与关键技术-张扬军》(2020), 华福证券研究所

Joby S4 主要由电力系统、机身、电池与零部件组成。动力系统占整机重量的 19%，负载占整机重量 21%，其他所有的部件重量为 25%，电池占整机重量 35%。

图表 19: S4 产品质量占比情况



来源: 电动飞行器, 华福证券研究所

2.2.1 机翼机身: 具备优秀的强度重量比, 碳纤维为主要材料

S4 能够搭载一个飞行员和 4 个乘客, 其 1 号原型机的机翼翼展长 10.7 米, 机身长 7.3 米, 在其 2 号原型机上翼展长变为了 11.6 米, 机身长则为 6.4 米。产品前掠翼设计用于解决飞机的推力中心与重心之间的不重合而产生的小扭矩问题。根据 CEO 提供的信息, 在高速巡航状态下, S4 升阻比在 16-18 之间。

S4 的机身由复合材料制成, 采用三点式起落架。eVTOL 大量使用碳纤维复合材料, 进一步减轻结构重量, 缓解电池供电压力, 提供更加安静的飞行体验。碳纤维复合材料可提供航空航天应用所需的强度重量比, 以最大程度地提高飞机的航程和

速度。不断优化 Joby 飞机的各个方面，以最大程度地利用城市交通，而高质量的碳纤维材料是实现其目标的关键组成部分。值得注意的是，S4 V2 最大起飞重量为 2177 公斤，负载载重 454 公斤，满足 FAA 单座 91 公斤或 200 磅的座位重量分配要求。

图表 20: Joby S4 产品图片



来源：公司公告，华福证券研究所

2.2.2 螺旋桨：低桨尖速度降低噪音，低桨盘负载降低功耗

Joby S4 拥有 6 个高强度螺旋桨，螺旋桨直径达 2.9 米，每个螺旋桨上拥有 5 片桨叶。相较上一代产品，Joby S2 拥有 12 个螺旋桨，其直径约为 1m。S2 的桨盘负载为每平方米 80 公斤，然而 S4 的桨盘负载仅为每平方米 46 公斤，比所有当前正在投入使用中的传统倾转旋翼和倾转机翼的飞机都要小很多，低桨盘负载意味 S4 在悬停时拥有着更低的功耗和更高的效率。S4 的五个螺旋桨叶片均有一个反面翼尖，研究显示，反面翼尖使 S4 具有更好的悬停性能，在巡航阶段也具有更高的效率，同时能显著降低噪音。

S4 的桨尖速度只有 113m/s，相比较之下，作为同类产品中最畅销的直升机 Robinson，其桨尖速度为 215m/s，这是 S4 噪音水平如此之低的另一个原因。

图表 21: Joby S2 和 S4 产品的螺旋桨对比

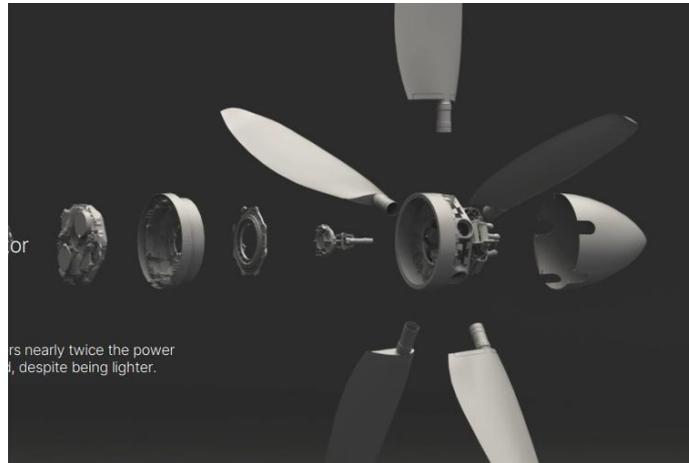


来源：电动飞行器，华福证券研究所

双绕线电机与逆变器组合共重 28 千克，峰值功率达 236KW。与特斯拉 Model S

Plaid 相比，Joby 以更轻的重量保证两倍的功率。同时螺旋桨最大扭矩达 1800Nm，平均扭矩 1380Nm，Joby 提供的扭矩相当于福特 F-350 重型卡车的发动机，使 eVTOL 能够在低速下产生推力，同时也是低噪音保障。

图表 22: Joby 螺旋桨结构



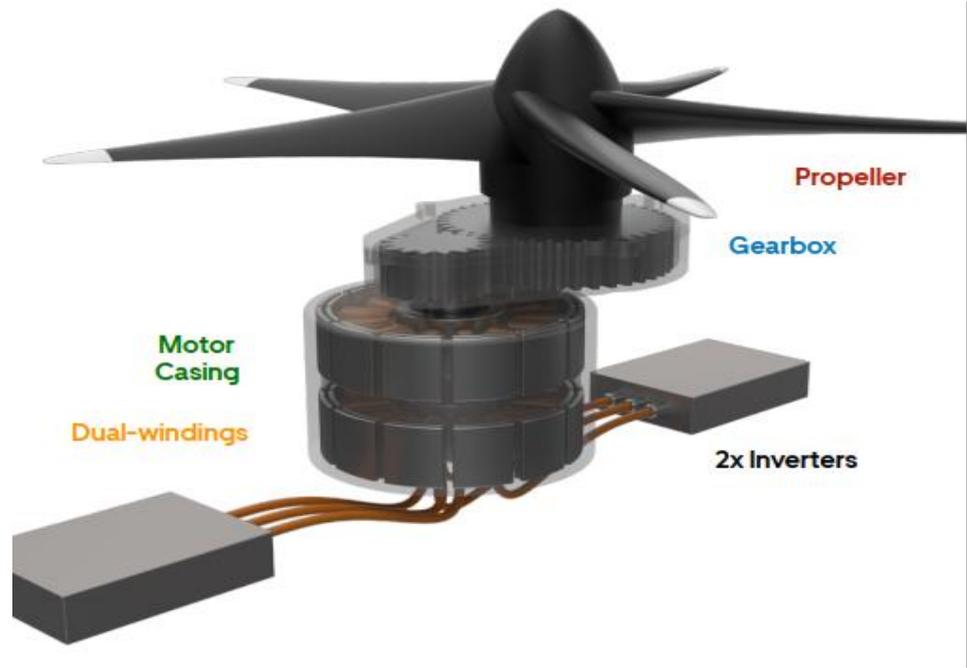
来源：公司公告，华福证券研究所

2.2.3 推进系统：DEP 保证安全冗余，Direct Drive 电机架构满足力矩要求

Joby S4 的推进系统由 6 个可倾转的电动螺旋桨构成，每个螺旋桨由两个电机驱动，每个电机的额定功率为 70KW，两个电机可以为每个螺旋桨工作提供一层冗余。推进系统的显著特点是其位于外侧的 4 个螺旋桨与螺旋桨所在舱体机构整个一起倾斜，而位于内侧的 2 个螺旋桨则是采用独特的连杆机构，使只有螺旋桨叶片倾斜而不会使螺旋桨所在舱体机构整个一起倾斜。

增添冗余为推进系统的核心。每个推进电机均由双冗余逆变器驱动提高任务可靠性，每个电机对应的双冗余中每个逆变器又由两个独立的电池供电从而防止电池故障蔓延，四块独立的多冗余电池包安装在远离乘客的位置来提高。在任何一个推进电机、逆变器或电池包失效的情况下，飞机仍然可以安全飞行，也就是说，整架飞机不存在单点故障。

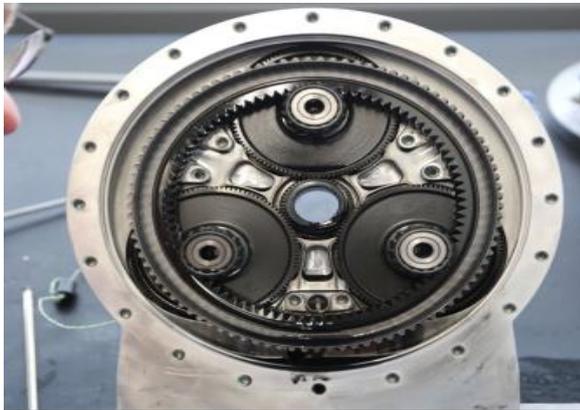
图表 23: 旋翼、电机工作原理



来源: Uber, 华福证券研究所

自创电机架构, 满足对力矩的所有要求。2016 年, Joby 开发并测试的七挡变速箱提供所需的扭矩, 但多个齿轮、轴承和齿都需要跟踪、检查、润滑和更换。目前, 公司设计 Joby Direct Drive 电机架构, 提供产品需要的所有动力和扭矩, 没有任何齿轮。

图表 24: 2016 年电机架构



来源: 公司公告, 华福证券研究所

图表 25: Joby Direct Drive 电机架构



来源: 公司公告, 华福证券研究所

2.2.4 飞控系统: 自研统一飞控系统, 产品向分布式发展

飞控系统是较为复杂的机载系统, 涉及机电设备、电子软硬件、算法等多个大方向, 不同的语境中, 飞控在不同的语境中, 可能指的是不同的部分。下图为典型飞控系统研制过程可能包含的项目, 图中的不同颜色展示了不同角色之间可能的分工。



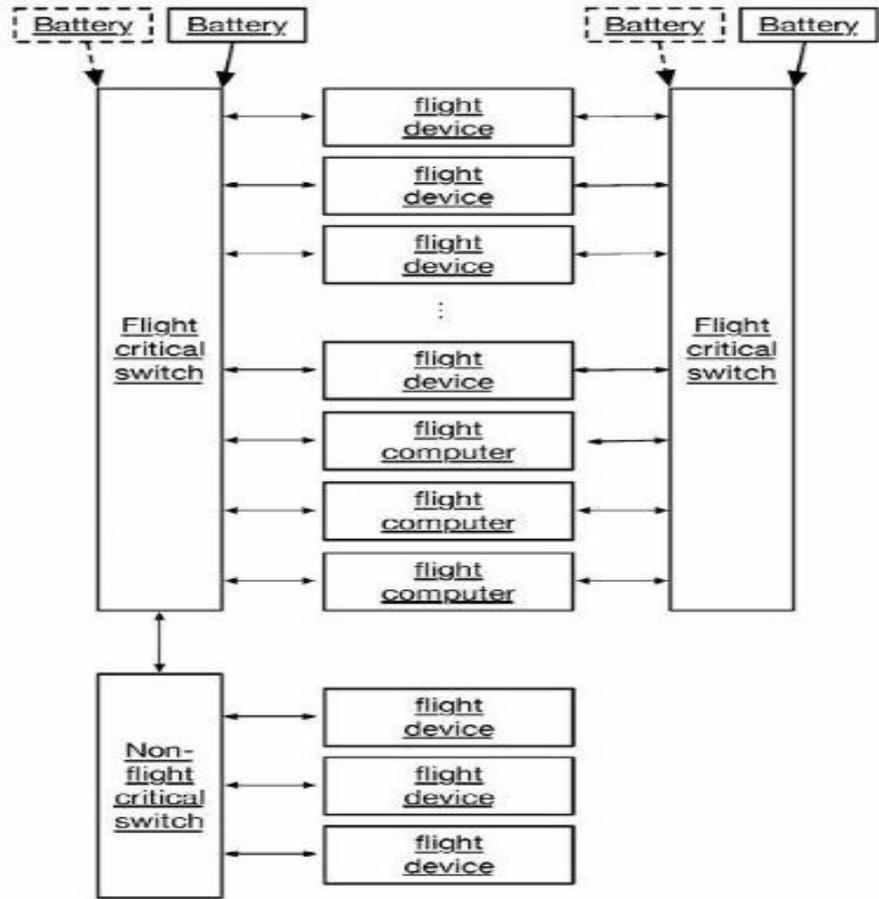
图表 26: 典型飞控系统研制过程可能包含的项目



来源: 空中的士 eVTOL, 华福证券研究所

Joby 飞控系统巧妙之处在于采用 POE 以太网交换机, 将供电和通信网络合二为一, 所有飞控计算机和其他设备均挂在该总线上, 并可能将安全关键部分和其他部分隔离的方式在物理上实现安全分区, 尽管当前看不到该架构在安全性指标, 但这不失为通过优化拓扑结构降低系统重量的可能途径。

图表 27: Joby 飞控系统的一种方案变体



来源：空中的士 eVTOL，华福证券研究所

Joby 的航电飞控系统是自研的“统一的飞行控制系统”。没有选择英国公司 Vertical Aerospace 的 VA-4X 无人机和德国公司 Lilium 的 Lilium Jet 无人机外包给霍尼韦尔的模式，而是依靠企业内部大量来自于军工巨头和特斯拉、苹果等 IT 产业巨头的研发人员自行研发，并在 F-35B 驾驶舱航电飞控架构上实施，将垂直飞行和巡航飞行结合到同一控制界面中。航电主管 Nate Martin 曾在苹果和特斯拉工作过，模拟器试飞员 James Denham 就参与了 F35 的“统一控制架构”的研发，产品由集中式向分布式发展。

图表 28: Joby 的新老航电飞控



来源：翱坤科技，华福证券研究所

2.2.5 电池：续航能力的核心，支持一万次充放电循环

Joby 改进了现有电池技术，开发出了专门针对航空用途的商用三元锂离子电池（正负极分别采用 811NMC 和石墨），能够更好地在能量密度、垂直起降功率和充放电循环寿命三方面取得平衡。根据 Joby 的披露，该电池支持超过 1 万飞行架次的充放电循环，同时具备优秀的充电速度。

Joby 电池阴极采用的 811NMC，这是在市场上已有的主流锂电池的基础上通过调整材料配比（80%的镍、10%的锰和 10%的钴）而获得的一种合成材料。NMC811 电池的核心特点是高能量密度。能量密度的单位为 Wh/kg，即瓦小时每千克。根据公司公告，公司电池能量密度达到 288Wh/kg，即每千克电池产生的能量可以供 10 瓦的电灯照 28.8 个小时以上。Joby 的动力总成负责人由特斯拉的前电池工程负责人 Jon Wagner 担任。

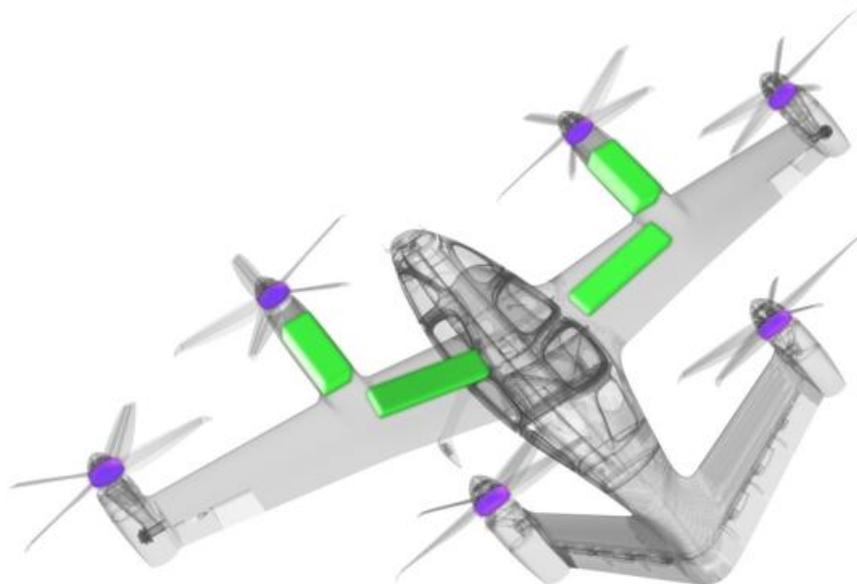
图表 29: Joby 与特斯拉 model 3 的电池指标对比

项目	特斯拉 Model 3	Joby
电池容量	75 kWh	2 X
扭矩密度	10 Nm/kg	6 X
总推进力	334 KW	3 X
重量	1847 kg	95%

来源：Joby 官网，华福证券研究所

电池采用隔离发布式，提升电力冗余。Joby 通过采购电池单元，然后再通过内部设计、工程和测试完成电池模块的开发，实现对整机性能目标的要求。S4 上有四个独立的冗余电池组，如果任何一个螺旋桨、逆变器或电池组出现故障，飞机可以继续飞行。

图表 30: Joby 电池分布情况

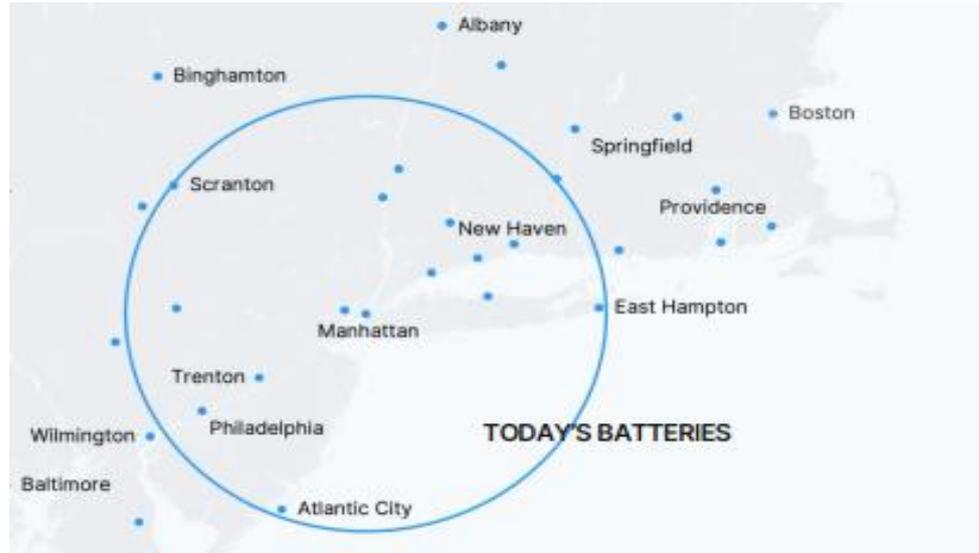


来源：《Production Launch - Joby Aviation》，华福证券研究所
注：绿色为电池模组，紫色为电机

航程范围达 100 英里，领域覆盖大部分核心区域。目前最好的飞行电池组，能量密度在 170Wh/Kg 左右。Joby 声称他们电池组的能量密度在 235Wh/Kg，根据前文计算 V2 电池总重量限额为 762 公斤，即使具有如此高的电池组能量密度，S4 的电池组容量也只达到 $762 \times 235 = 179 \text{ KWh}$ ，预计航程在 100 英里（161 公里）范围之

内。

图表 31：电池满足的航程地图



来源：《Production Launch - Joby Aviation》，华福证券研究所

2.3 eVTOL 技术路线各异，Joby S4 为倾转机翼型领先者

eVTOL 依据机翼构型主要可以分为多旋翼构型、升力+巡航型（复合翼构型）以及矢量推力构型。截至目前，倾转构型有 350 个设计，复合翼构型有 172 个设计、多旋翼构型有 284 个设计、飞行摩托有 109 个设计，海外已经走出来了一条相对统一的认知道路。

1) **多旋翼构型**：多旋翼构型有多个旋翼提供升力，无巡航用螺旋桨，没有机翼，完全通过调整各旋翼转速来控制姿态及巡飞。多旋翼构型 eVTOL 悬停飞行性能较好，且容易控制速度大小与方向，因此安全性较优，也便于操控。但此类飞行器设计结构相对简单，其载荷较小，飞行速度与航程表现相对较差，因此只适用于城市内短距离的航行，例如市内短距离空运、应急救援等。典型产品包括亿航的 EH216、小鹏汇天的旅航者 X2 等。

2) **升力+巡航型（复合翼构型）**：升力+巡航型通过完全独立的推进器（螺旋桨）分别提供升力和巡航推力，从而分别实现垂直起降和巡航。该设计有利于降低能耗，但升力和推力来源于不同的螺旋桨，意味着始终存在效率浪费，无法达到更高效率，速度也无法达到最快。此类飞行器飞行速度、航程和安全性与其他 eVTOL 相比处于中间水平，因此适用于城市内航行或城际交通，典型产品包括 Volocopter 公司的 VoloConnect 等；

3) **矢量推力构型**：矢量推力构型使用矢量推进器（倾转旋翼、倾转涵道风扇等）提供升力并辅助巡航，在不同使用阶段通过推力改变方向，实现垂直起降和巡航。矢量推力构型在不同飞行阶段采用不同的推进方式并存在过渡过程，总体设计复杂，可实现更高的飞行速度和更远的航程，且气动效率高，有效载荷量大，适用于更远

距离的城内与城际交通。但是其安全性能低，伴随更高的风险，典型产品包括中国时的公司的 E20 等。

图表 32：各种类型机型分析对比

分类	多旋翼构型	升力+巡航型（复合翼构型）	矢量推力构型
简介	由多个旋翼提供升力，通过调整各旋翼转速来控制姿态及巡飞，无人机翼	使用完全独立的推进器（非矢量推力）用于巡航和提供升力，由机翼提供巡航升力	使用矢量推进器（倾转旋翼、倾转涵道风扇等）提供升力并辅助巡航，由机翼提供巡航升力
旋翼系统功能	垂起时提高全部升力；巡航时提供全部拉力和升力	垂起时提供全部升力；模式切换时提供部分升力	垂起时提供全部升力；旋转过度时提供部分升力和拉力；巡航时提供全部拉力（倾转旋翼）
推进系统示意图			
典型产品	亿航的 EH216、小鹏汇天的旅航者 X2、零重力的 ZG-ONE；美国 Wisk 的 AERO-POC、德国 Volocopter 公司的 2X 等	Volocopter 公司的 VoloConnect、峰飞公司 V1500M “盛世龙”、BETA 公司的阿利亚 250、Eve 公司的 Eve eVTOL 等	中国时的公司的 E20、德国 LILIUM 公司的 Lilium Jet、乔比公司 Joby-S4、阿彻公司 Archer-Midnight、垂直公司 Vertical-VX4 等
外观示意			
市场准入	最早（设计简单）	较晚	最晚（设计复杂）
飞行速度	70-120km/h	150-200km/h	150-300km/h
航程	短	适中	长
最小比功率需求 (W/kg)	400	700	500
适用场景	主要适用于城市内大部分区域，应用于短距离空运、紧急救援、物流运输等场景	适用于城市内或城市到城市，应用于物流运输、紧急救援、城市交通运营等场景	适用于城市或城际交通运营、物流运输、紧急救援等
安全性	较优	优	较差
优点	悬停飞行性能较好，便于控制速度大小和方向，结构简洁，技术相对成熟，易操控	机翼的设计有利于提升航程，旋翼则便于实现垂直起降；前飞和垂直起降过程的主要升力来源不同，总能耗大幅降低	气动效率高，飞行速度高，航程和有效载荷有明显优势
缺点	飞行速度慢，载荷小，航程短，能耗较大	灵活度低，对起降地的选取也有较高要求	悬停效率低、研发技术难度和成本高、风险高

来源：《混合动力飞行汽车建模与性能仿真分析》，《2022 电动垂直起降飞行器主要进展》，《电动垂直起降飞行器的发展现状研究》，腾讯网，清华大学新闻网，与非网，华福证券研究所

海外的 eVTOL 研发基本定位为空中出租车。根据 SMG 数据显示，海外 eVTOL 企业以倾转构型为主，应用场景主要定位为空中出租车。同时，根据 OEM 宣布进入服务年度时间先后来看，预计 2025 年前进入市场的为亿航、Joby、Beta、Volocopter、Archer、Pipistrel、Elroy Air 和 REGENT。



图表 33: 全球主要厂商产品定位

公司	评级变化	AIR	融资(百万美元)	开发车辆预期应用	车辆类型	推进	操作	首次飞行年份	宣布进入服务年度	国家
Volocopter	↓	8.0	\$761.0*	Air Taxi	Multicopter/Lift+Cruise	Electric	Piloted	2021/2022	2024/2026	Germany
Ehang (NASDAQ:EH)	↔	8.0	\$185.0	Tourism, EMS, Firefighting, Air Taxi	Multicopter/Lift+Cruise	Electric	Autonomous	2018/2021	2023/-	China
Joby Aviation (NYSE:JOBY)	↔	8.0	\$2,261.1	Air Taxi	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2018	2025	USA
Beta Technologies	↔	8.0	\$985.0*	Cargo, Regional, Air Taxi	Conventional/Lift+Cruise	Electric	Piloted	2020/2022	2025/2026	USA
Archer (NYSE:ACHR)	↔	7.9	\$1,096.3	Air Taxi	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2023	2025	USA
Wisk (Boeing)	↔	7.4	Corporate backed	Air Taxi	Vectored Thrust	Electric	Autonomous	-	-	USA
Eve Air Mobility (NYSE:EVEEX)	↔	7.2	\$377.4	Air Taxi	Lift+Cruise	Electric	Piloted	2024	2026	Brazil
Aerofugia	↑	7.1	\$52.0	Air Taxi, Cargo, Tourism	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2023	2026	China
Vertical Aerospace (NYSE:EVTL)	↔	7.1	\$347.8	Air Taxi, Cargo, EMS	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2023	2027	UK
Lilium (NASDAQ:LILM)	↔	7.0	\$1,342.3	Regional, Cargo, Biz Av	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2024	2026	Germany
Pipistrel (Textron)	↔	7.0	Corporate backed	Cargo	Lift+Cruise	Hybrid	Autonomous	2024	2025	USA
AutoFlight	↔	6.9	\$200.0	Cargo, Air Taxi	Lift+Cruise	Electric	Autonomous /Piloted	2023/2022	2024/2027	China
Elroy Air	↔	6.8	\$90.00	Cargo	Lift+Cruise	Hybrid	Autonomous	2023	2024	USA
SkyDrive	↑	6.7	249.8*	Air Taxi, Tourism, EMS	Multicopter	Electric	Piloted	2024	2026	Japan
Airbus Helicopters	↔	6.5	Corporate backed	EMS, Tourism, Air Taxi	Lift+Cruise	Electric	Piloted	2024	-	France
Supemal	↔	6.5	Corporate backed	Air Taxi, Cargo	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2024	2028	South Korea
Alaka'i Technologies	↔	6.3	\$60.0	Air Taxi, Cargo, EMS	Multicopter	H2 Fuel Cell	Piloted	2022	-	USA
Evation	↔	6.2	\$200.0	Regional, Cargo, Biz Av	Conventional	Electric	Piloted	2022	2027	USA
Ascendance	↔	6.2	\$71.3	Regional, Cargo	Lift+Cruise	Hybrid	Piloted	2025	2027	France
Overair	↔	6.2	\$170.0	Air Taxi, Cargo, EMS, Tourism	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2024	2028	USA
REGENT	↔	6.1	\$90.0*	Regional	Augmented Lift	Electric	Piloted	2024	2025	USA
eAviation(Textron)	↔	5.9	Corporate backed	EMS, Air Taxi, Cargo	Vectored Thrust	Electric	Piloted	2024	2030	USA
Dufour Aerospace	↔	5.7	\$11.0*	EMS, Regional	Vectored Thrust	Hybrid	Piloted	-	-	Switzerland
Honda Motor Company	↔	5.5	Corporate backed	Air Taxi	Lift+Cruise	Hybrid	Piloted	2024	2030	Japan
Electra	↔	5.4	\$134.0*	Regional, Cargo	Augmented Lift	Hybrid	Piloted	2023	2028	USA
Heart Aerospace	↔	5.1	\$148.0	Regional	Conventional	Electric/Hybrid	Piloted	2026	2028	Sweden
Jaunt Air Mobility	↔	4.4	\$3.1	Air Taxi, Cargo	Lift+Cruise	Electric	Piloted	2025	2028	USA
Volkswagen	↔	3.7	Corporate backed	Air Taxi	Lift+Cruise	Electric	Autonomous	2023	-	Germany

来源: SMG, 华福证券研究所

针对大规模城市低空交通出行, Joby 选择倾转旋翼型。倾转机翼构型 eVTOL 动



力系统具有动力冗余不足的特征，任意一侧丧失两个推力之后，不足以进行推力配平完成垂直着陆；在飞行中遇到风切变、失控、失速等情况时，倾转机翼型需要数秒到数十秒的倾转过程，倾转机翼速度慢，无法实现保护能，失效概率为 1.265×10^{-6} ，远高于航空业确立的对于大型客机和大型通航飞机 10^{-9} 飞行小时的特征事故率标准。但公司通过对电机、电池、结构等做的安全冗余的定制化设计，已经逐步得到美国 FAA 的航空标准验证，各类性能在全球倾转旋翼型中明显领先。

图表 34：国内外倾转旋翼型龙头企业产品性能对比

产品名称	Joby S4 (生产原型)	Midnight(生产型)	Lilium Jet(7座)	时的-E20(原型)
产品外观				
分类	倾转机翼型	倾转机翼型	倾转机翼型	倾转机翼型
搭载人数(飞行员+乘客)	5(1+4)	5(1+4)	7(1+6)	5(1+4)
巡航速度(km/h)	322	241	250	260
航程(km)	161(包括能量储备)	80	—	200
最大巡航高度(m)	—	610	3000	600
空重(kg)	1950	—	—	—
有效载荷重量(kg)	453	456+	—	450
最大起飞重量(kg)	2404	3175	3175	—
螺旋桨	6个倾斜螺旋桨，4个螺旋桨垂直倾斜，包括整个电动机短舱，2个螺旋桨垂直倾斜，带有连杆机构	12个螺旋桨(每个倾斜螺旋桨有5个叶片。每个仅限 VTOL 的螺旋桨有2个叶片)	36个电动矢量推力(DEVT)风扇	6个螺旋桨(4个倾斜螺旋桨，2个双层垂直起降螺旋桨)
电动机	6个高性能双绕线电动机	12台	36台	6个电动机
噪音	巡航时 45 dBA	前向飞行时的噪音水平： 45 dba	—	—
电源	电池	6个独立电池组	电池	电池
机身	碳纤维复合材料	—	碳纤维复合材料	碳纤维复合材料
窗户	整个机舱的大窗户	全景窗户	窗户比传统窗户略大	全景环绕式窗户，可向前、向左、向右和向上可见
机翼	—	高翼	鸭翼，尾翼有副翼	1个主海鸥机翼
尾翼	V型尾翼	V型尾翼，带有短的向下垂直稳定器	—	常规机身安装尾翼
起落架	三轮车轮式起落架	固定式三轮车轮式起落架	三轮固定轮式起落架	三轮固定轮式起落架
安全功能	分布式电力推进 (DEP)	分布式电力推进 (DEP)	分布式电力推进 (DEP)	分布式电力推进 (DEP)

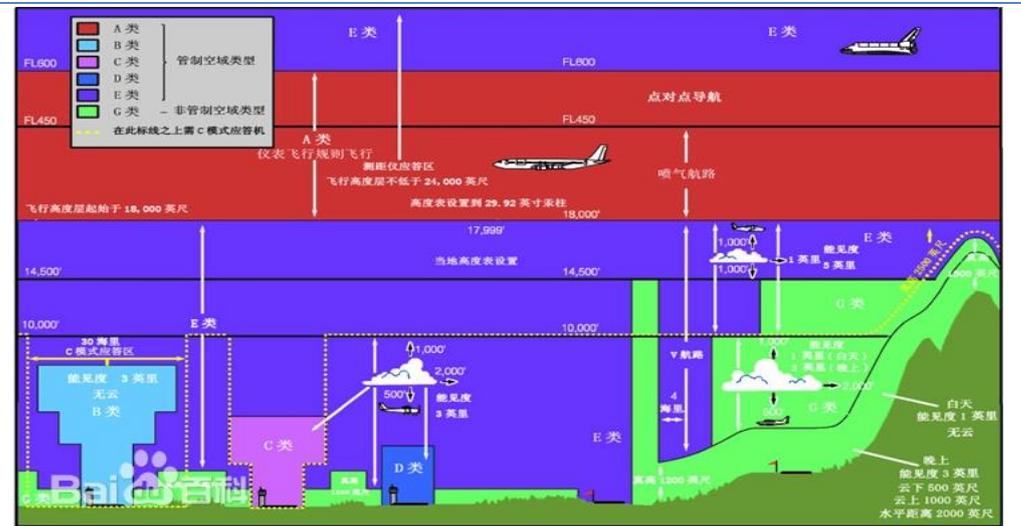
来源：eVTOL，华福证券研究所

3 社会环境：民用航空基建成熟，eVTOL 在城市交通中优势明显

3.1 美国空域管理：逐渐宽松空域管理，空域利用率领先

美国联邦航空管理局（FAA）将空域划分为 A、B、C、D、E、G 六个等级，A-E 级为管制空域、G 级为非管制空域和临时性限制空域。FAA 下属的空中交通组织（Air Traffic Organization）按照不同空域的交通繁忙程度和飞机类型对空域进行分类管理。美国 85% 的空域为民用空域，仅部分限制区和禁飞区属军管。通用航空器可飞行的空域主要在中低空空域的 E 类空域（垂直范围为 1200-18000ft，西部山区为 14500-18000ft）和低空空域的 G 类空域（垂直范围为 1200ft 以下），占空域的 80%。在目视飞行规则下，E 类和 G 类空域为非管制空域，飞行员不需要向管制部门办理飞行申请，只需在起飞前用无线电告知飞行计划和航线即可。

图表 35：美国空域管理示意图



来源：前瞻产业研究院，华福证券研究所

美国空域管理宽松，通用航空主要在低空域飞行。二战后，政府将大部分空域划给民用，其中大部分供通用航空使用。1987 年，美国颁布《航空公司放松管制法》，允许航空公司自主选择航线和航班，促进了通用航空发展。然而，随着事故增多，FAA 意识到需要加强空域安全。911 事件后，国会通过《航空运输安全与系统稳定法》，加强安全措施，增加禁飞区，开放飞行报告，形成了今天美国繁荣且有序的空域管理体系。

美国空域整体利用率较高。根据《中美欧空域管理效率比较研究》测算，我国全空域飞行密度约为 1.39 飞行小时/平方公里，约为美国 30.2%，欧洲的 48.4%。我国军民航飞行总量不到美国的 1/3 和欧洲的 1/2，我国空域整体利用率较低，美国领先明显。

图表 36: 中美欧空域管理整体绩效比较

	美国	欧洲	中国
地理面积 (万平方公里)	1004	1150	960
管理员数量	12170	17794	8851
总雇员数量	31647	55130	17757
年度管制飞行数量 (万架次)	1530	1040	610
通用航空比例	19%	3.5%	0.4%
有管制塔台运输机场数量	517	406	235
时刻协调机场	3	>100	21
管制飞行小时 (万)	2380 (仪表飞行, 含通航)	1600 (仪表飞行, 含通航)	1158 (仅我国运输航空公司)
高空飞行密度 (小时/平方公里)	2.37	1.39	1.21
通用航空飞行小时 (万)	2561.3	1598.5	93.71
全空域飞行小时 (万)	4418.5	3198.5	1251.7
低空空域通用航空飞行密度	2.55	1.39	0.098
空域民航飞行密度	4.40	2.78	1.30
全空域飞行密度 (估算军航飞行)	4.60	2.87	1.39

来源:《中美欧空域管理效率比较研究》, 华福证券研究所

3.2 美国民航基建: 通航基础设施完善, UAM 架构成熟

美国重视民用通航基础设施建设。基础设施建设方面, 美国的通用航空 (GA) 行业拥有丰富的机场网络, 保障了飞行器的顺畅运行。除了机场资源之外, 还提供了全面的基础服务设施。这些设施包括但不限于供油服务、维修保养、飞行导航辅助以及实时气象信息等, 这样的基础设施为美国低空飞行产业的稳健增长奠定了坚实的基石。根据前瞻研究院数据, 美国因为通用航空发展的领先奠定了其低空经济的先发优势, 拥有 4756 座通用机场, 86.6 万架无人机。

图表 37: 美国通航和无人机产业均处于全球前列

国家	通用机场数量 (座)	无人机在册数量 (万架)
美国	4756	36.6
巴西	3350	
英国	81	18.12
俄罗斯	161	5.6
中国	399	95.8
澳大利亚	2300	

来源: 前瞻产业研究院, 华福证券研究所

据《国家一体化机场系统计划 (2019~2023)》, FAA 列出了 2941 个通用航空机场, 划分为国家级、地区级、本地级、基本级和未分类五大类, 分 FAA 认为, 这些通用航空机场能够满足目前美国通用航空的不同需求, 对美国经济社会有巨大的补充作用。



图表 38: 美国通用航空各类介绍与作用

国家级	区域级	地区级	基本级
84个机场有空中救援服务	98%的机场有空中救援服务	80%的机场有空中救援服务	40%的机场有空中救援服务
11+ based 喷气飞机, 20+ 国家飞行, 或 500+ 跨州飞行	运营机场的花费平均在 1 千万美元/年	运营机场的花费平均在 2 百 20 万美元/年	运营机场的花费平均在 54 万美元/年
10 年提供 12 亿美元资金补助, 平均 1.610,297 美元每个机场。	10 年提供了 24 亿美元资金补助, 平均 575,016 美元每个机场	10 年提供了 26 亿美元无资金补助, 平均 230,203 美元每个机场	10 年提供了 1 亿美元资金补助, 平均 182.384 元每个机场
均有 200 架基地飞机	均有 90 架基地飞机	均有 37 架基地飞机	均有 10 架基地飞机
66 个机场是减压 rollover 机场	137 个机场是减压 rollover 机场	42 个机场是减压 rollover 机场	
84 个机场无固定航空服务			29 个机场有固定航班服务
飞行活动强度大	飞行活动强度大	飞行活动强度中等	飞行活动强度中等偏下

来源: 飞行邦, 华福证券研究所

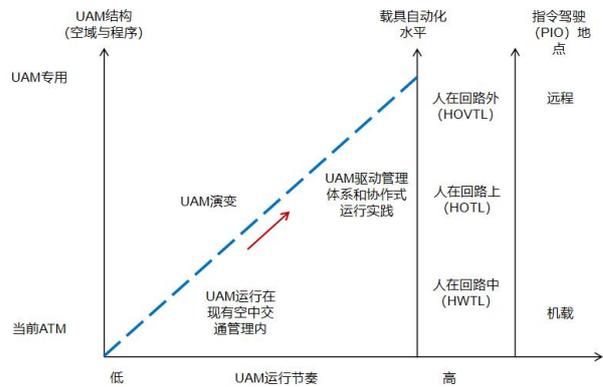
美国通用航空器交付量波动上升, 2022 年为 1755 架。2023 年 5 月, 美国联邦航空管理局发布《城市空中交通运行概念 2.0》白皮书, 设计了 UAM (Urban Air Mobility) 管理体系架构, 特点是市场参与度高、FAA 仅作宏观把控。城市空中交通 (UAM) 发展方向为随着航空器自动化水平提升, 飞行器从载人 to 机长远程控制。

图表 39: 美国通用航空器交付量 (单位: 架, %)



来源: 美国联邦航空管理局, 前瞻产业研究院, 华福证券研究所

图表 40: 美国城市空中交通运行方式演变

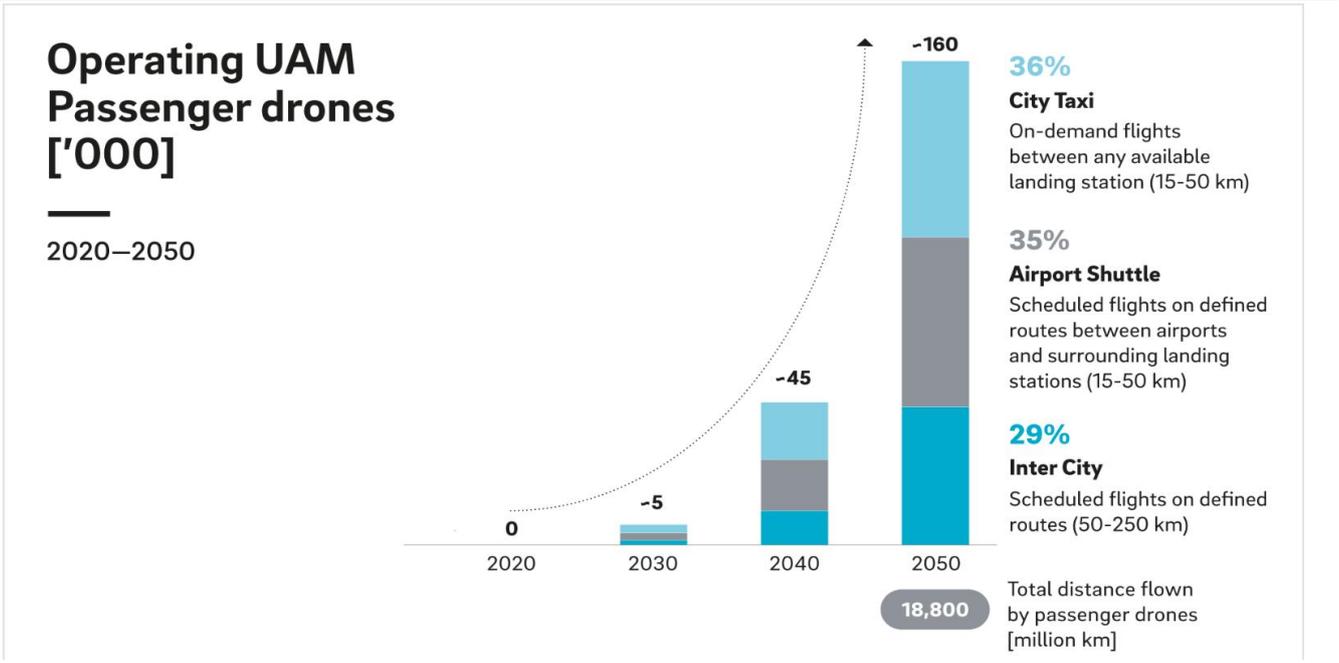


来源: 美国联邦航空管理局, 前瞻产业研究院, 华福证券研究所

3.3 美国城市交通: 相比直升机和出租车, eVTOL 在城市交通中优势明显

载人 eVTOL 未来三种重要的使用场景是城市出租车、机场班车和城际交通。根据 Roland Berger, 2030 年全球运营载人 eVTOL 数量有望达 7000 架, UAM (城市交通) 市场规模有望达 20 亿美元, 2050 年全球运营载人 eVTOL 数量有望达 16 万架 (2030-2050 CAGR 为 85%), UAM (城市交通) 市场规模有望达 900 亿美元 (2030-2050 CAGR 为 21%)。分类别看, 2025 年城市出租车、机场班车、城际交通三类 eVTOL 占比分别有望达 36%、35%和 29%。

图表 41: 全球载人 eVTOL 运营架次预测



来源: Roland Berger, 华福证券研究所

在城市交通方面, 相较直升机与出租车, 飞行汽车具备各方面优势。

1) 地铁道路基建相对落后: 美国的大城市及其城市间的轨道快速交通体系相对我国和欧洲来说已经较为落后, 所以在美国, 机场专线类城市空中交通的需求是有其社会基础的。

图表 42: 主要城市出行距离情况

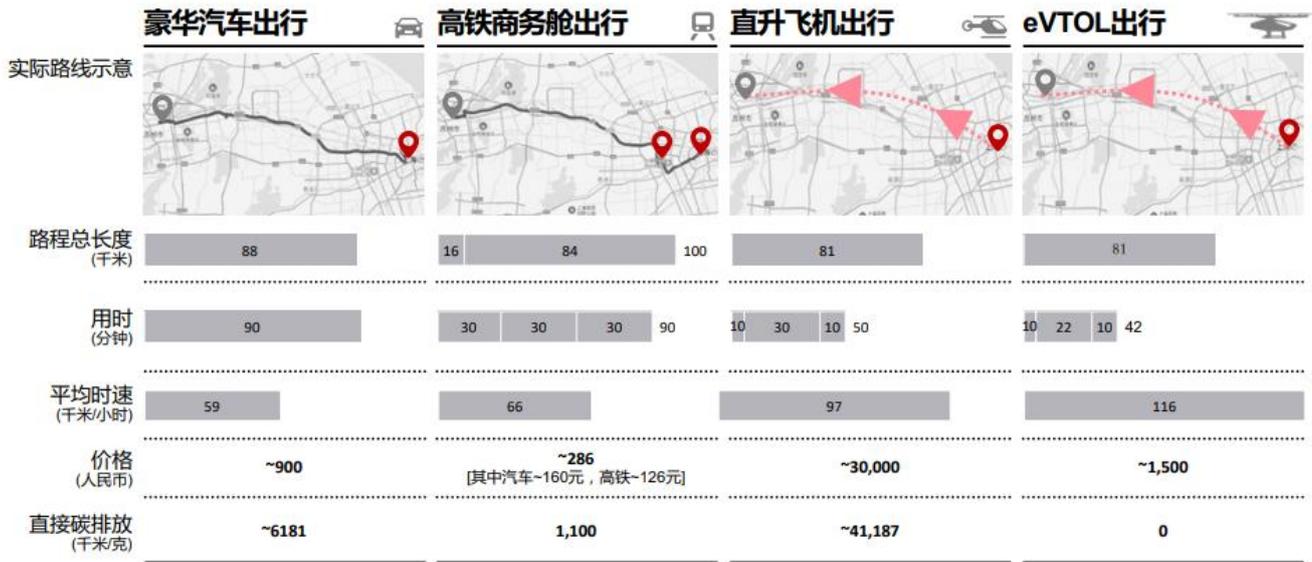


来源: 公司公告, 华福证券研究所

2) 直升机、出租车弊端突出: 与汽车、高铁等传统出行方式相比, eVTOL 在特定路程范围内, 具有高效便捷、低噪音、低碳排放、舒适私密等优点, 与直升机等传统飞行器相比, 具有明显的成本和环保优势。同时, 因其轻量化、模块化和分布式电驱动架构的产品特点, 飞行器整体运营维护成本和复杂度较直升机相比, 也具有比较优势和竞争力。随着 eVTOL 产品的大规模量产, 预计单程票价将继续下探, 并最终与豪华汽车趋同。而与直升飞机相比, eVTOL 同样可以体现出在价格、时间、舒适便捷性、低噪音、零碳排放等方面的核心优势。

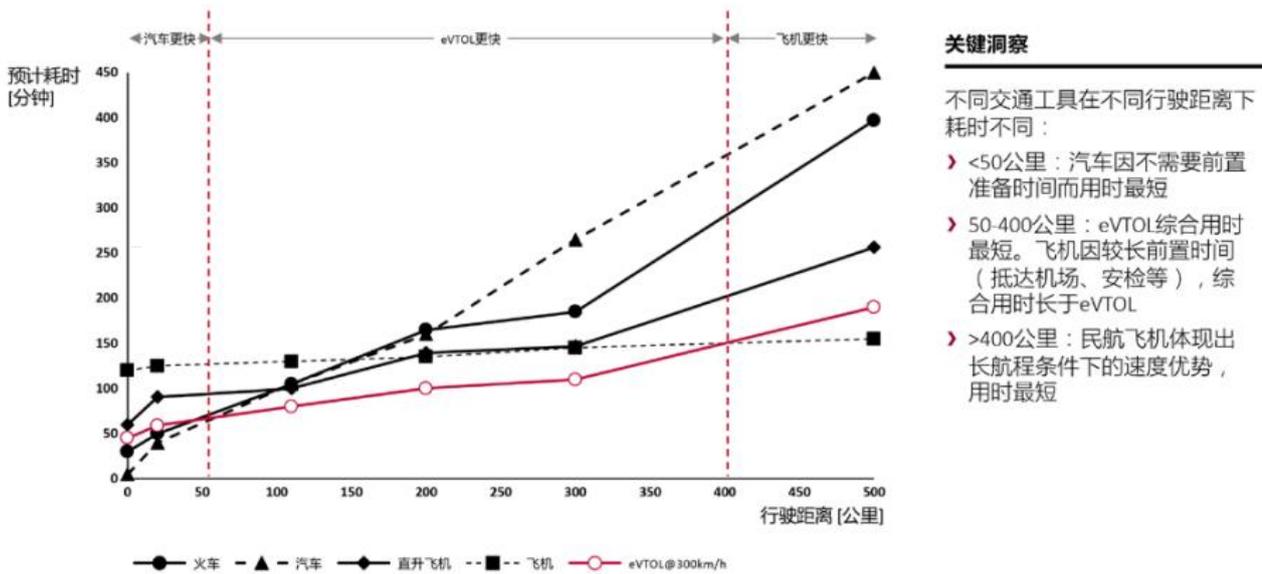


图表 43: 各类出行方式优劣势比较



来源: 保时捷咨询, 华福证券研究所

图表 44: eVTOL 与现有主流交通运输方式出行用时对比



来源: 保时捷咨询, 华福证券研究所

4 风险提示

1) 技术面临不确定性: 无人机和飞行汽车部分技术涉及多个路线, 主题投资阶段退潮后, 随着赛道玩家拥挤, 部分技术路线可能进展落后甚至被证伪。

2) 需求端渗透不及预期: 电动飞行汽车处于行业商业化应用初期, 初代产品往往成本和定价偏高, 如果产业链磨合进度缓慢, 市场规模扩展速度可能不及市场预期。

3) 适航证书流程不及预期: 飞行汽车进行商业化运营需要通过官方的审批, 弱审批速度不及预期将拖慢行业的商业化进程。



分析师声明

本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告清晰准确地反映了本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

一般声明

华福证券有限责任公司（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。本报告仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告的信息均来源于本公司认为可信的公开资料，该等公开资料的准确性及完整性由其发布者负责，本公司及其研究人员对该等信息不作任何保证。本报告中的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，之后可能会随情况的变化而调整。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

在任何情况下，本报告所载的信息或所做出的任何建议、意见及推测并不构成所述证券买卖的出价或询价，也不构成对所述金融产品、产品发行或管理人作出任何形式的保证。在任何情况下，本公司仅承诺以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告以供投资者参考，但不就本报告中的任何内容对任何投资做出任何形式的承诺或担保。投资者应自行决策，自担投资风险。

本报告版权归“华福证券有限责任公司”所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。未经授权的转载，本公司不承担任何转载责任。

特别声明

投资者应注意，在法律许可的情况下，本公司及其本公司的关联机构可能会持有本报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司正在提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

投资评级声明

类别	评级	评级说明
公司评级	买入	未来 6 个月内，个股相对市场基准指数涨幅在 20%以上
	持有	未来 6 个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于 10%与 20%之间
	中性	未来 6 个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于-10%与 10%之间
	回避	未来 6 个月内，个股相对市场基准指数涨幅介于-20%与-10%之间
	卖出	未来 6 个月内，个股相对市场基准指数涨幅在-20%以下
行业评级	强于大市	未来 6 个月内，行业整体回报高于市场基准指数 5%以上
	跟随大市	未来 6 个月内，行业整体回报介于市场基准指数-5%与 5%之间
	弱于大市	未来 6 个月内，行业整体回报低于市场基准指数-5%以下

备注：评级标准为报告发布日后的 6~12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的相对市场表现。其中 A 股市场以沪深 300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普 500 指数或纳斯达克综合指数为基准（另有说明的除外）

联系方式

华福证券研究所 上海

公司地址：上海市浦东新区浦明路 1436 号陆家嘴滨江中心 MT 座 20 层

邮编：200120

邮箱：hfjys@hfzq.com.cn