Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

News & Highlights

电动空中出租车引发热议

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

对新兴电动垂直起降（eVTOL）飞行器产业而言，2021年具有里程碑意义，这一年各种大型投资以及伙伴关系不断涌现。几个eVTOL飞行器开发商雄心勃勃——可以说是极度乐观——他们希望最早在2024年就完成安全规格认证，实现飞行器载人。

2021年，4个eVTOL飞行器制造商接连上市，通过与特殊目的收购公司（SPAC）合作，共募集资金数十亿美元[1]。这4家制造商分别为：总部在美国加利福尼亚的Archer Aviation公司（帕洛阿尔托）、总部在英国布里斯托的Joby Aviation公司（圣克鲁兹）与Vertical Aerospace公司，以及总部在德国慕尼黑的Lilium Air Mobility公司。

eVTOL飞行器制造商已经和几条主要航空公司达成合作。2021年2月，美国联合航空公司（United Airlines）宣布与Archer Aviation公司一起研发飞行器，并表示一旦飞行器可以运行且达到标准，将购置200架飞行器[2]。2021年6月，美国航空公司宣称若Vertical Aerospace公司取得特定成果，将向其投资2500万美元，并提前预订250架以上飞行器（即潜在承诺支付其10亿美元）[3]。该公司声明当前预订量已经达到1350架，价值高达54亿美元[4]。Lilium Air Mobility公司于2021年8月宣布与巴西蔚蓝航空公司（Brazilian airline Azul）达成了一份10亿美元的潜在协议[5]，而2022年2月Joby Aviation公司宣布与日本全日空航空公司（ANA）达成合作[6]。

另外，2022年1月波音公司宣布为Wisk Aero公司投资4.5亿美元。Wisk Aero公司位于美国加利福尼亚山景城[7]，是波音公司与小鹰航空公司（Kitty Hawk Corporation，美国加利福尼亚帕洛阿尔托）共同创办的合资公司；也是除中国广东广州的亿航智能公司（EHang）[8]外，少数选择制造空中无人驾驶出租车的eVTOL制造商。

一般来说，小机翼飞行器的垂直升降方式与直升机类似，而其中eVTOL飞行器通过利用更多小型发动机旋翼，实现减重目的。升空后，部分或全部旋翼会向前倾斜，转变为飞机的节能巡航模式，此时，飞行器的机翼提供了大部分升力。研发人员计划利用此类飞行器运送在城镇与机场间、市区内或相邻城市间往返的乘客，或者用来运送货物。

大规模交易与合作需要相应的市场以及相关地面基础设施支撑[9]。投资银行摩根士丹利（Morgan Stanley）预测，到2040年，城市空中交通市场中飞行器规模将达1万亿美元，2050年将达9万亿美元[10]。除了经济利益，电动飞行器的研发还推动航天产业寻找减排办法，这将积极助力缓解气候变化[11]。

由于上述原因，世界各地设计的不同种类的eVTOL飞行器的数量前所未有。由垂直飞行协会[Vertical Flight Society, VES；前身是美国直升机协会（American Helicopter Society），总部位于美国弗吉尼亚州费尔法克斯]推出的世界eVTOL飞行器名录中[12]，截至2022年1月共收录了600余种设计，仅2021年就新收录了200余种。Pat Anderson说："这是继第二次世界大战以及喷气式发动机发明以来，航空领域最令人激动的时刻。这就像特技飞行的

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2022, 13(6): 5–8
引用本文：Sean O'Neill. Electric Air Taxis Create Megadeal Buzz. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.004

黄金时代。”Pat Anderson是一位航空航天工程专业教授，兼任美国佛罗里达州代托纳比奇恩布里·里德尔航空大学鹰飞行研究中心（Eagle Flight Research Center at Embry-Riddle Aeronautical University）主任。

当前设计中的差异范围较大，例如，Archer Aviation公司推出的与真机相似度达80%的两座式演示样机（图1）Maker，有12个水平旋翼，分别位于主翼前后两侧；前侧旋翼可前倾，负责在飞机升空后，为其提供向前的动力。该公司计划于2023年制作大量可配驾驶员的4座式飞行器，而Lilium Air Mobility公司的喷气式（Jet）飞行器则相反，该机型配有36个涵道电驱动螺旋桨，其中12个置于前翼，24个横跨机翼（图2）[14]。不过该公司下一代机型的螺旋桨数量更少（30个），动力更强（图2）[15]。涵道中螺旋桨转动，使得飞行器能垂直起飞，并为其提供向前的推力。

(a)

(b)

图1. （a）Archer Aviation公司的Maker飞行器，是一种与真机相似度达80%的样机，图中正在进行悬停实验。其主翼前侧的6个旋翼在飞行器转为水平飞行模式时能够前倾，作为推进器提供高能效的向前推力。来源：Archer Aviation（公有领域）。（b）与之设计相似的Vertical Aerospace公司的VA-X4将于2022年进行第一次试飞。来源：Vertical Aerospace（公有领域）。

美国马里兰大学（位于美国马里兰州）工程学院副教授、VFS的eVTOL技术委员会主席Anubhav Datta说道，当前电池技术发展水平——部分归功于电动汽车行业——已经可以为飞行器提供动力，但其有效载荷和航程非常有限。对于汽车电池的依赖会继续限制这项技术的发展，Datta称：“你不能把为汽车制造的电池直接拿来给飞机用。尤其是对于eVTOL来说，发电装置必须和飞行器一同进行设计，而不能相互割裂。我们距离最佳成果还有很长一段距离。”

(a)

(b)

图2. （a）从后方拍摄的全比例7座式Lilium Jet飞行器，拍摄地点位于Lilium Air Mobility公司在德国慕尼黑的总部，该飞行器内嵌分布式推进控制系统，且无机尾。（b）2021年，Lilium Air Mobility公司的技术样机在德国进行飞行测试，凭借36个纵向排列的涵道电动螺旋桨，飞行器得以在空中悬停。来源：Lilium（公有领域）。

虽然电池的质量并不是限制电动地面交通工具的主要因素，但是对航空工具而言，质量至关重要。主要任务是将尽量多的能源装进质量尽量小的电池结构中——以实现特定能源的最大化利用——以便将足够能量供给飞行器旋翼。全电池供能的eVTOL飞行器市场能否起飞，取决于能否有更轻型的电池。Anderson说：“而这一点需要重大科学发现。”Anderson还是VerdeGo Aero公司（美国佛罗里达州代托纳比奇）的联合创始人和首席技术官，该公司负责为新一代飞行器提供混合动力电力推进技术。

确实，“里程焦虑”是早期电车车主的主要担忧，现在则成为了eVTOL飞行器工程师要考虑的一个重要因素。Archer Aviation公司的Maker飞行器可搭载一名飞行员以及4名乘客，该公司声称该飞行器能以241 $km \cdot h^{-1}$的速度行驶97 km（巡航模式）[16]。与7座式Lilium Jet飞行器

相比，该机型承诺能以282 km·h^{-1}的速度行驶250 km。2021年7月，Joby Aviation公司公布了一份等比例样机的测试数据细节，该飞行器仅凭一节电池供电就飞行了248 km，其中还包括垂直起降等，以及无乘客时的远程操控等环节[17]。有了这样的成果，该公司的主要创始人兼首要执行官JoeBen Bevirt稍许夸张地宣称："许多人认为当今的电池技术不可实现的成就，我们成功实现了。通过这次机会，我们已经迈出了第一步，实现了旧金山和太浩湖、休斯顿和奥斯汀、洛杉矶和圣地亚哥之间的便捷，让零排放的空中旅行成为日常现实。"

此类飞行器要实现商业载人，需要满足一定的安全规则，而现如今未有一架飞行器完全通过检验。Anderson表示，考虑到要满足监管机构的要求，里程数就是一大问题。例如，美国联邦航空管理局（FAA）要求，在白天目视飞行规则下，配备充足燃料的飞行器需要有30 min的日间备用飞行能源，以及45 min的夜间（或仅借助仪器飞行）备用飞行能源[18]。若eVTOL飞行器制造商同样受到这种规则的束缚，其电池存储的大部分能源将只能用于预防紧急情况。这将大大削减飞行器的实际飞行里程。Anderson说："对于这种严苛规定的修改，FAA非常谨慎。如果商业飞机的备用能源本可以满足45 min的飞行时间，但是FAA被成功说服，从而将备用能源使用时间缩减到仅剩5 min，你真的愿意乘坐这种飞机吗?"

Datta认为，像FAA这类监管机构可以促进这一新兴产业的成长，但eVTOL飞行器制造商需要证明其飞行器安全性。Datta说："当前并未有针对电动飞行器的法规，因此需要制定新的法规。样机运行测试的次数越多，我们就越能在规则制定方面更快达成一致。"

规格认证要求对此类飞行器的商业飞行进行规范，而认证流程可能因地域不同会有所差别。在美国，eVTOL飞行器可按照现存的FAA标准进行认证，而其他方面，如分布式推进器、电传飞行控制系统、噪声标准，则需要各监管机构通力合作[19]。而欧洲航空安全局（European Union Aviation Safety Agency, EASA）审查了"处于不同发展阶段的150多个VTOL项目配置"，从而开发出一整套专用于eVTOL种类的飞行器技术规格，该规格种类被命名为"特殊种类"[20]。EASA也尽力寻求与FAA标准第23部分"大体保持一致"[21]，该部分涉及小型飞行器的适航性。采用多个发动机反而很安全，因为其中可动结构较少，再加上许多独立控制旋翼上的分布式推进器。这一点可能有助于通过认证流程。发动机无需太多维护，而且在一个发动机失效的情况下，发动机数量越多，可用冗余也越多[22]。最后，这种正在开发的无人驾驶电动飞行器，无疑还会面临更多的审查，因此距离实现商业应用还有很长一段路要走。不过中国民用航空局（Chinese Aviation Administration）已经于2022年2月正式采纳并发布"特殊条款"（Special Conditions），亿航智能公司声明该条款将为两座式的EH216-S自动飞行器提供规格验证的基础[23]。

Archer Aviation公司预计，到2024年其飞行器均可以完成规格认证，并将在美国多个城市间运输客户。Lilium Air Mobility公司同样将其商业产品的发布定在2024年[25]。但由于目前eVTOL飞行器的新式设计越来越多，难以对这些飞行器进行快速的规格认证。Anderson表示："由于对于此类仅由电池供电的eVTOL飞行器而言，上述设定的目标时间非常不现实，因此至少要到2030年才能见到成果。"

Datta表示，将eVTOL飞行器规格认证完成日期设定如此之近，可能还有其他目的："除了加速脱碳，可能还迫使监管机构迅速采取行动，帮助投资者树立信心。"

当然，投资方信心高涨，甚至有些不合理。航空行业分析师Richard Aboulafia于2021年3月在航空周（Aviation Week）广播频道6 [26]说道："目前市场还未实现正常运行，但是已经有数十亿资金流入，这将导致泡沫的出现。"

eVTOL飞行器制造商要想开拓一个成功的市场，就要确保产品不仅符合监管验收，还要确保公众能够接受。eVTOL飞行器要想融入城市生活，其发展应循序渐进。英国索尔福德大学声学研究中心（University of Salford Acoustics Research Centre）教授、美国国家航空航天局领导的城市空气流动噪声工作组（Urban Air Mobility Noise Working Group）成员Antonio Torija-Martinez说："这种新型交通工具虽然可以带来经济、社会及环境效益，但是可能会给沿途的社区带来噪声问题。"

虽然发动机固有结构产生的噪声比内燃机更小，但其基本构造通过旋翼驱动空气，意味着噪声是不可避免的。发动机产生的噪声在整体噪声中的占比并不确定，但制造商却急切地想告知人们，他们制造的飞机不会过度打扰人们的生活。Lilium Air Mobility公司宣称，当他们制造的飞行器盘旋在距离地面100 m的高空时，产生的噪声大概在60 dB [25]，相当于在一米外正常对话的音量[27]。Archer Aviation公司则表示，他们的飞行器在600 m高空巡航时对地面产生的噪声为45 dB，相当于冰箱的嗡嗡声[28]。Torija-Martinez说："eVTOL飞行器比传统直升机体积更小、扇叶数量更多，会产生高频噪声，更惹人厌烦。大气吸收可以有效减弱噪声，但对于沿途社区中产生的高频噪声问题，需要可验证的实验数据。"

虽然eVTOL飞行器制造商引起了大量媒体关注，但并不是只有他们着眼于电动空中旅行业务。例如，美国联合航空公司于2021年7月宣布了一项交易，即从瑞典哥德堡的Heart Aerospace公司购买100架符合特定标准的19座式电动飞机。该公司计划于2026年将上述飞机投入运行[26]。而Kadima公司以及总部位于以色列的Eviation Aircraft公司将为一架名为Alice的9座式全电动推进式飞机进行测试。

另外，最先进的飞行器要数由Rolls-Royce公司制造的全电动“创新精神”（Spirit of Innovation）号飞行器。该公司总部位于英国古德伍德，部分资金由英国政府支持的“加速飞行电气化（Accelerating the Electrification of Flight, ACCEL）项目”提供。在2021年11月，该飞机打破了两项空中速度世界纪录，3 km速度为556 km·h^{-1}（之前的纪录是213 km·h^{-1}），15 km速度为532 km·h^{-1}，最高速度可达623 km·h^{-1}，成为世界速度最快的纯电动载具。

图3. Rolls-Royce公司的“创新精神”号全自动飞机在英国国防部Boscombe Down军事基地打破飞行速度纪录。来源：Rolls-Royce（公有领域）。

对于eVTOL空中出租车及短途电动通勤飞机还需要多长时间才能在天空中自由行驶，我们仍不确定；但我们相信这一天终会到来，只是不要期望太高，不要急于求成。Datta说道：“对于新兴科技，这是一个老生常谈的话题；但我认为，目前各公司都高估了短期影响，而政府又低估了长期影响。”

References

[1] Vertical aerospace becomes fourth eVTOL company to go public [Internet]. Winter Park: Flying Magazine; 2021 Dec 16 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.flyingmag.com/vertical-aerospace-becomes-fourth-evtol-company-to-go-public/.

[2] United to work with Archer Aviation to accelerate production of advanced, short-haul electric aircraft [Internet]. Chicago: United Airlines; 2021 Feb 10 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.united.com/en/us/newsroom/announcements/cision-125140.

[3] American airlines invests in the future of urban air mobility [Internet]. Fort Worth: American Airlines; 2021 Jun 10 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://news. aa. com/news/news-details/2021/American-Airlines-Invests-in-the-Future-of-Urban-Air-Mobility-FLT-06/default.aspx.

[4] Vertical hires renowned test pilot as it enters next phase of development [Internet]. Bristol: Vertical Aerospace; 2021 Oct 4 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://vertical-aerospace.com/vertical-hires-renowned-test-pilot-as-it-enters-next-phase-of-development/.

[5] Lilium holds capital markets day, announces plan for $1 billion commercial deal & strategic alliance with leading Brazilian airline Azul and the appointment of new board members following business combination with Qell [Internet]. Munich: Lilium Air Mobility; 2021 Aug 2 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://lilium. com/newsroom-detail/capital-markets-dayplanned-1-billion-commercial-deal-with-brazilian-airline-azul-appointment-of-new-board-members.

[6] ANA holdings and Joby partner to bring air taxi service to Japan [Internet]. Santa Cruz: Joby Aviation; 2022 Feb 14 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.jobyaviation.com/news/ana-holdings-and-joby-partner-bring-air-taxi-service-to-japan/.

[7] Wisk aero secures $450 million from the Boeing company [Internet]. Mountain View: Wisk Aero; 2022 Jan 24 [cited 2022 Feb 17]. Available from https://wisk.aero/news/press-release/wisk-aero-secures-450-million-from-boeing.

[8] EHang 216 [Internet]. Fairfax: Electric VTOL News; [cited 2022 Mar 10]. Available from: https://evtol. news/ehang-216/#: _: text=EHang% 20is% 20an% 20autonomous%20aerial,eight%20arms%20instead%20of%20four.

[9] Infrastructure barriers to the elevated future of mobility [Internet]. London: Deloitte; 2019 May 30 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html.

[10] eVTOL/Urban air mobility TAM update: a slow take-off, but sky's the limit [Internet]. New York City: Morgan Stanley; 2021 May 6 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://assets.verticalmag.com/wp-content/uploads/2021/05/Morgan-Stanley-URBAN_20210506_0000.pdf.

[11] Terrenoire E, Hauglustaine DA, Gasser T, Penanhoat O. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. Environ Res Lett 2019;14:084019.

[12] eVTOL aircraft directory [Internet]. Fairfax: Electric VTOL News; [cited 2022 Mar 10]. Available from: https://evtol.news/aircraft.

[13] Archer taps FCA's scale and expertise to accelerate electric vertical take off and landing aircraft (eVTOL) production [Internet]. Palo Alto: Archer Aviation; 2021 Jan 12 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.archer.com/news/archer-taps-fcas-scale-and-expertise-to-accelerate-electric-vertical-take-off-and-landing-aircraft-evtol-production.

[14] McIntosh A. Technology behind the Lilium Jet [Internet]. Munich: Lilium Air Mobility; 2021 Apr 8 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://lilium. com/newsroom-detail/technology-behind-the-lilium-jet.

[15] Nevans J. Lilium expands flight test program, unveils new design configurations [Internet]. Kitchener: evtol. com; 2022 Mar 4 [cited 2022 Mar 14]. Available from: https://evtol. com/news/lilium-expands-flight-test-program-unveils-new-design-configurations/.

[16] Archer's Maker aircraft [Internet]. Palo Alto: Archer Aviation; [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.archer.com/maker.

[17] Joby completes flight of more than 150 miles with electric vertical take-off air taxi [Internet]. Santa Cruz: Joby Aviation; 2021 Jul 27 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-flight-of-more-than-150-miles/.

[18] 14 Code of Federal Regulations Part 91. General operating and flight rules [Internet]. Washington, DC: US Government; [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91.

[19] eVTOL certification: where are they now and the challenges that still lie ahead [Internet]. Rockville: Aviation Today; 2021 May 24 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.aviationtoday.com/2021/05/24/evtol-certification-now-challenges-still-lie-ahead/.

[20] Special condition for small-category VTOL aircraft. Cologne: European Union Aviation Safety Agency; 2019.

[21] 14 Code of Federal Regulations, Part 23. Small airplanes: regulations, policies & guidance [Internet]. Washington, DC: US Government; [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2021-title14-vol1/pdf/CFR-2021-title14-vol1-part23.pdf.

[22] eVTOL: making the electric dream a safe one [Internet]. Reston: Aerospace America; 2021 Sep [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://aerospaceamerica.aiaa.org/features/evtol-making-the-electric-dream-a-safe-one/.

[23] CAAC formally adopts special conditions for EH216-S AAV type certification [Internet]. Guangzhou: EHang Holdings Limited; 2022 Feb 23 [cited 2022 Mar 10]. Available from: https://www.ehang.com/news/860.html.

[24] Archer announces launch of urban air mobility network partnerships with LA and Miami by 2024 [Internet]. Palo Alto: Archer Aviation; 2021 Mar 9 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://archeraviation.medium.com/archer-announces-launch-of-urban-air-mobility-network-partnerships-with-la-and-miami-by-2024-7b34d6fdd66c.

[25] Building radically better ways of moving—Lilium factsheet [Internet]. Munich: Lilium Air Mobility; 2021 Sep [cited 2022 Feb 17]. Available from https://lilium.com/files/redaktion/refresh_feb2021/newsroom/mediakit/Lilium_Factsheet_September_2021.pdf.

[26] Podcast: UAM skeptics on the hot seat [Internet]. New York City: Aviation Week Network; 2021 Mar 15 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://aviationweek.com/aerospace/podcast-uam-skeptics-hot-seat.

[27] Fundamentals of noise and sound [Internet]. Washington, DC: Federal Aviation Administration; 2020 Jul 13 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/noise/basics/.

[28] How loud is an eVTOL? [Internet]. Palo Alto: Archer Aviation; 2021 Oct 21 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://archer.com/news/how-loud-is-an-evtol.

[29] Electric aircraft set to take flight by 2026 under new agreements with United Airlines Ventures, Breakthrough Energy Ventures, Mesa Airlines, Heart Aerospace [Internet]. Chicago: United Airlines; 2021 July 13 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.united.com/en/us/newsroom/announcements/electric-aircraft-set-to-take-flight-by-2026-under-new-agreements-with-united-airlines-ventures-breakthrough-energy-ventures-mesa-airlines-heart-aerospace-2653765004.

[30] Eviation's maiden flight could usher in electric Aviation Era [Internet]. New York City: IEEE Spectrum; 2022 Feb 7 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://spectrum.ieee.org/eviations-maiden-flight-to-usher-in-era-of-electric-aviation.

[31] The 'Spirit of Innovation' officially breaks speed record and becomes the world's fastest all-electric vehicle [Internet]. Goodwood: Rolls-Royce; 2022 Jan 20 [cited 2022 Feb 17]. Available from: https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx.