

脱碳化航空地面运行：替代公 交车技术

白皮书 2025年11月



内 容

执行摘要3

引言 4

1 在机场运营巴士	5
-----------	---

1.1 运行概况	5
----------	---

1.2 公交车队拥有模式	6
--------------	---

2 机场巴士解决方案 : 技术概述和发展	9
----------------------	---

2.1 技术选项	9
----------	---

2.2 关键特性比较	11
------------	----

3 总拥有成本 (TCO) 分析 14

 3.1 参考案例研究和考虑的场景 14

 3.2 基于场景的总拥有成本结果和洞察 16

 3.3 敏感性分析 21

结论25

附录 1 : 方法论 26

附件2 : 每种情景的假设详细信息27

附录 3 : 补贴 29

贡献者 32

脚注 35

免责声明

本文件由世界经济论坛发布，作为对一项目、洞察领域或互动的贡献。此处表达的调查结果、解释和结论是经世界经济论坛促进和认可的合作过程的结果，但结果不一定代表世界经济论坛、其全部成员、合作伙伴或其他利益相关者的观点。

© 2025 世界经济论坛。保留一切权利。本出版物之任何部分均不得以任何形式或任何方式复制或传播，包括影印和录音，或通过任何信息存储和检索系统。

执行摘要

拥有成本分析是一种务实的工具，可赋予机场就净零地面运营制定战略决策的能力。

本文探讨了用替代的低排放技术（如改造的柴油-电力、电池动力和氢动力巴士）替代化石燃料机场巴士的技术经济可行性。目的是为寻求脱碳地面运营和提高当地空气质量的机场提供可行的见解。使用一个通过行业研究和利益相关者访谈验证的稳健的拥有总成本（TCO）模型，该分析探讨了资本、运营、维护和基础设施成本如何影响机场巴士运营及其成本。主要发现包括：

- 技术评估：加装电动动力的改装柴油车提供了一种具有成本效益的过渡性解决方案，能够在无需采购整个电池公交车队的情况下实现快速减排。电池公交提供零尾气排放，并且在其生命周期内成本竞争力日益增强，尤其是在机场路线可预测且充电基础设施能够与航班计划高效部署和运营的地方。氢燃料公交车（使用燃料电池电池或内燃机（ICE））提供更长的续航里程和更快的加油速度，使其适用于运营繁忙的大型机场，尽管它们目前面临更高的前期和基础设施成本。

- 总拥有成本：基于一个参考的欧洲枢纽机场的分析显示，改造后的电动巴士每公里可提供最低的总拥有成本（TCO），与更新的柴油车队相比，对预算有限的运营商具有吸引力。电池电动巴士需要更高的前期投资，但可以在长期内提供更低的运营成本，尤其是在得到政府补贴的支持下。氢燃料巴士虽然运营灵活，但由于技术和基础设施成本，目前可能是最昂贵的选项。

- 运营和战略考量：技术的选择取决于每个机场的运营概况、财务能力和长期可持续性目标。敏感性分析表明，司机的薪酬、利用率以及补贴的可用性是影响TCO最关键的参数。

尽管建议进行进一步研究以评估更详细的机场负荷分析、电池退化建模和实际世界的改造性能数据，但对机场的务实建议包括：

采用通用电动汽车（EV）充电和加氢标准，以简化基础设施部署和互操作性，包括地面设备和未来飞机之间。

- 将可再生能源整合用于为电动汽车队供电并减少生命周期排放，以及在预期依赖非电力驱动系统的可再生能源运输燃料。

- 探索二次电池应用以最大化资产价值、循环性和可持续性。

- 利用公私合作和绿色债券为大规模车队转型提供资金。

- 加强机场、运营商和能源供应商之间的协作，共享最佳实践，加速创新。

文章总结认为，实现公交运营脱碳在技术上可行且经济上具有优势，使机场成为航空业更广泛能源转型中的推动者。通过采用定制化、基于证据的方法，机场还可以提高运营效率，同时为航空业的碳中和之路做出实质性贡献。

引言

航空业致力于到 2050 年实现净零排放，航空公司、机场、地面服务公司和乘客等各方都在这场转型中发挥着关键作用。随着全球航空旅客数量预计将以 3.6% 的复合年增长率 (CAGR) 增长，到 2050 年，¹ 全球机场将迅速扩张，尤其是在新兴市场。迪拜的阿尔马克图姆国际机场、沙特阿拉伯的萨拉曼尼国际机场以及土耳其伊斯坦布尔机场等重大项目预计每年将容纳数亿新乘客，同时亚洲和欧洲的新航站楼和扩建进一步凸显了这一增长。

这股客运需求的激增正推动着机场基础设施的重大投资，包括地面运营的转型。飞行运营的潜力技术——如可持续航空燃料 (SAF) 和新型推进飞机 (氢能和电池电动) ——正快速发展，需要机场基础设施的同步升级。虽然这些技术主要针对范围3排放（通常占机场排放特征的90%以上），但人们对减少范围1和范围2排放（来自建筑物、车辆和地面运营）的关注度也在不断增长。在实地试验脱碳计划还可以为电池电动和氢能航空铺平道路，为测试、适应并熟悉最终可能为飞机提供动力的技术提供了一种实用手段。

机场不仅是航空业的战略枢纽，也是其周边产业和社区的战略枢纽。基础设施变化

实现脱碳所需可能使更广泛的利益相关者受益，使机场总体规划对航空业和潜在的未来的能源购买者（他们可以利用机场的能源转型）越来越重要。这种更广泛的方法可以加强基础设施升级的商业案例。

本文为处于这一过渡阶段的机场提供了一种实用工具，重点关注一个关键用例：机场巴士运营。将巴士车队进行电动化转型是一种具体且具有影响力的减少范围1排放的方式，许多机场已经正在试点或转型采用新的动力系统。机场巴士市场本身正在经历快速转型；据估计，2024年其价值为151.2亿美元，预计将以11.6%的复合年增长率增长，到2033年将达到443.5亿美元。欧洲预计将占据该市场超过37.8%的份额，这得益于严格的环境法规以及政府对电动和混合动力的巴士的大力支持。

本文中的分析涵盖了机场巴士可减少或消除尾气排放的主要技术方案：改装的柴油巴士、电池电动巴士和氢燃料电池巴士。它比较了每种方案的总拥有成本和技术可行性，同时承认不同的机场类型、地理位置、运营模式和所有权模式最终会影响新技术部署的可行性和成本。其他技术，如氢内燃机 (ICE)、化石燃料-生物燃料混合燃料以及天然气或生物甲烷巴士，未包含在定量分析中，但在技术替代方案讨论中进行了定性考虑。

1 在机场运营公交车

机场巴士运营受多种因素影响，包括机场规模、需要将乘客在航站楼和飞机之间运输的远机位数量、机场商业模式、在航站楼之间换乘的旅客数量以及员工流动数量。

机场边界，要求机场运营更长的航线。

在交通极为拥挤的国际枢纽，航站楼的扩建可能已经超出了原来的范围

所有这些因素都会影响汽车的行驶里程和利用率（通常称为使用周期）、其使用寿命、维护成本，以及最终它们的残值（汽车报废时的残余价值）。本研究考虑这些因素，以更好地理解替代动力技术的总拥有成本。

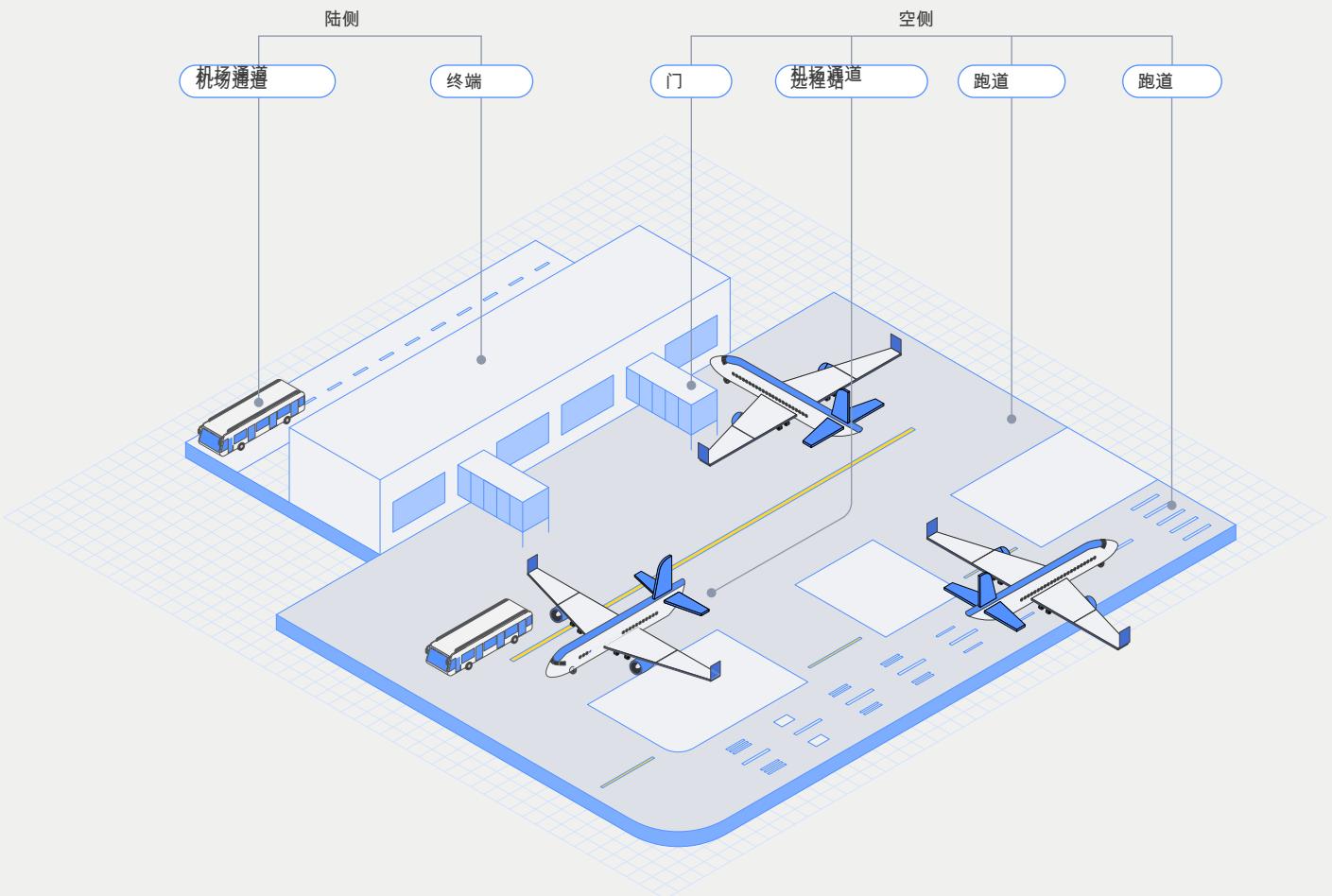
1.1 操作概况

机场巴士运营可分为两大主要类别：空侧和陆侧，每类服务一个

机场生态系统中的独特功能（见图1）。

图1

陆侧和空侧巴士运营



边防巴士在安保 perimeter 外运行，主要负责在机场航站楼、停车场、公共交通枢纽和其他非限制区域之间运送乘客、员工和偶尔的机组人员。这些服务对于确保抵达和离开的乘客在机场基础设施上的顺畅通行和连通性至关重要。

相反，场内巴士在机场的 secure area 内运行，便于旅客、机组人员和地勤人员在不同航站楼和飞机停机坪之间进行交通。鉴于其必须与飞机周转时间和登机程序精确同步，场内巴士的运营受到严格的安全和操作要求。

两侧运营的配置和复杂性因机场的运营特征而有显著差异。这会影响机场运营的巴士数量。例如，在拥有多个航站楼的大型枢纽机场，高客流量可能需要广泛的陆侧巴士网络来管理航站楼间交通并确保

高效的旅客流。一个例子是迪拜国际机场（DXB），它在2024年服务了超过9200万旅客：² 其200辆机坪巴士车队平均每月运送16000名乘客。³

相比之下，中间和区域机场可能依靠规模较小的巴士车队，通常在10到20辆之间。然而，这些区域机场通常受限于停机位基础设施，并可能承载大量低成本航空公司流量，这些流量通常倾向于使用巴士直客操作，以最大化快速飞机转场和成本效益，而不是使用停机位，停机位可能更有限且运营成本更高。

机场的运营时间通常由立法限制决定，这也影响巴士运营。24小时运营的机场需要持续的巴士可用性和维护。另一方面，受夜间运营限制的机场可能会以不同的方式规划其活动。这些限制影响维护成本、巴士使用寿命、人员需求以及加油计划。



1.2 公交车队所有权模式

机场所有权是制定脱碳战略和获取资金来源时需要考虑的因素。所有权模式（私人或国有）可能因地区而异。碳化的方法可能因所有权模式而异：政府资助的机场通常在国家或地区政策的框架内运营⁴，而私营机场则可能对其运营或市场环境有更大的灵活性来定义策略。

机场实现无排放巴士运营的路径可能受到不同机场所拥有权模式所引发的潜在商业策略的显著影响，同时也受到巴士所有权模式直接影响。在根本层面上，有三个主导类别盛行（见图2）：机场当局直接拥有巴士车队并运营；通过特许经营协议外包提供；以及第三方合同和结合两者的混合方式。

图2 机场现有公交运营所有权模式



可能不太常见的模式是，机场管理机构——通常是公共实体或垂直整合的机场运营商——完全拥有公交车队，并直接管理所有相关运营。尽管这种方法可以实现高度运营控制并与脱碳等更广泛目标保持战略一致，但它经常导致资本支出率更高，并伴随着长期财务和运营承诺。

机场通常采用基于承包的商业模式提供巴士服务，其中私人承包商可以在付费的前提下被授予在特定时期内独家运营巴士车队的权利，并可能需要遵守一定的车队要求、可持续性标准和绩效保证。从实际操作角度看，该系统允许机场将巴士服务纳入更广泛的地面处理合同中，在统一框架下，运营商负责一系列的机坪、行李和旅客运输服务。

此外，机场的航空业商业模式直接影响公交服务和合同。在服务提供商、航空公司和机场之间的谈判组合中，后者通常对支持地面运营所需的基础设施保持决策权，以及对与此相关的能源消耗和需求。这为机场通过投资绿色基础设施（如充电站）或通过地方排放和空气质量标准，来影响第三方对公交车队绿色化的投资创造了潜在途径。

最后，混合模式越来越普遍，特别是在大型或多个航站楼机场，不同的运营需求共存。在这种方法下，机场可以对战略关键服务保留直接控制权，同时将陆侧或非核心服务外包给外部供应商。这种配置允许机场在安全、安保或整合等运营的某些方面保持控制，同时从外包服务的效率和可扩展性中受益，尤其是在“敏感度较低”的领域。这种模式最终需要明确定义的治理结构和绩效监控机制，以确保服务提供商之间的协调一致。

航空公司对巴士运营的影响

机场服务的航空公司的商业模式也直接关系到班车运营和合同安排。例如，低成本航空公司（LCC）通常优先考虑快速周转时间和最低地面服务费，这影响了班车运营的设计，朝向高频次、低成本解决方案发展，以最大化飞机利用率。LCC经常使用远程停机位以减少机场费用，从而增加了对空侧班车的依赖。因此，包含班车运营的地面处理合同必须进行调整，以适应这些航空公司的成本敏感性和运营节奏。

相比之下，传统航空公司可能要求与休息室和登机口基础设施更紧密的集成。所有这些因素都会影响航空公司、机场和地面服务提供商之间的公交服务协调。因此，服务多种航空公司的混合的机场可能会采用混合所有权和运营模式，这些模式能够满足不同的服务期望和周转概况。

并且机场需要建立完善的监管机制以确保安全、质量和互操作性，特别是在相互竞争的供应商之间。因此，采购流程更加结构化，通常需要竞争性招标、多年服务水平协议和详细的绩效指标。最终，如果机场愿意改变公交线路所需的基础设施，所有这些因素都可能成为障碍。

区域法规影响所有权模式

在某些情况下，监管框架很大程度上决定了所采用的模型。例如在欧洲，欧洲地面处理指令⁵在塑造市场准入和服务提供模式方面发挥着关键作用。该指令要求放开地面服务，允许多个服务提供商在符合条件的商业机场竞争——在这种情况下，即年旅客量超过200万人次或货运量达到5万吨的机场。这导致了外包增加、价格竞争加剧。

总而言之，机场巴士队的商业模式和所有权模式既不是静态的，也不是一刀切的。它们反映了运营配置、商业需求和管理约束之间的复杂相互作用。随着机场加大力度减少其环境足迹，这些模式必须被仔细评估和利用，以寻求可持续发展的最低阻力路径。当车队脱碳成为战略优先事项时，公私合作以及从基于资产的所有权转向服务导向的流动性合同将日益突出——第四章将进一步探讨这一发展趋势。



机场巴士解决方案：技术概述与发展

地面交通——特别是公交车队——已成为机场寻求减少运营排放和推进可持续发展目标的关键重点。快速的技术发展正在推动车队战略的重新评估和采用创新解决方案。

本章概述了为机场巴士运营的未来发展进行TCO分析时所考虑的主要技术路径，包括电池电动、氢能

燃料电池和配备电池式电驱动的改造柴油车辆。虽然可再生生物燃料（加氢植物油，或HVO）和生物天然气巴士未纳入TCO模型，但也已进行评估。通过考察每种方案的操作特性、基础设施要求和脱碳潜力，本章旨在为决策者提供必要的洞察力，以应对技术选择复杂的环境，并将投资与即时的需求及长期气候目标保持一致。

2.1 技术选项

机场巴士队的脱碳化越来越多地受到三种主要技术的塑造：电池电动、氢燃料电池和改造柴油。

每种选项都具备独特的运行特性和基础设施需求，使其适用性取决于机场的具体运行环境。虽然它们共同的目标是减少温室气体排放和当地污染物，但底层技术在储能、加油或充电方式以及性能特征上存在显著差异。

理解每种技术的核心功能，并将其与财务考量相结合，可以使决策者获得一个完整的技经图景，指导战略性投资。

电动公交车

电池巴士从高容量的锂离子电池或新兴情况下从固态电池中获取推进能源，提供零尾气排放和高能源效率。

他们的主要优势是得益于汽车行业电动汽车的兴起以及快速扩大的供应链，技术的相对成熟，这降低了采购成本并提升了性能。电动公交车

它们尤其适合布局紧凑、路线可预测且休息时间与充电机会相匹配的机场。夜间仓库充电通常足以支持陆侧穿梭服务，而大功率机会充电则可以支持高占空比的空侧运营。

然而，电池电动技术并非没有局限性。续航里程和电池寿命会受到环境温度、重载乘客和辅助系统持续使用的影响，在极端寒冷或炎热潮湿情况下性能下降更为明显。充电基础设施需要与机场电力系统仔细整合，以避免电网负荷过重，可能需要升级以适应不断增长的能源需求，或在机场部署储能解决方案。此外，废旧电池管理和处置策略仍是一个关键考量；一些机场已经采用“再利用”应用程序。⁶ 将报废电池用于固定式储能，如果正确实施，可以帮助缓解环境和后勤方面的挑战。

实施电动公交车的机场必须考虑运营匹配度、路线长度、车队规模以及与运营高峰期协调充电的能力。电动公交车已被快速采用，特别是在欧洲的机场，如罗马机场，可再生能源为11辆全电动摆渡车供电。⁷ 或伦敦盖特威克。⁸ 它将完全用纯电动公交车替换其14辆巴士车队。



氢

氢燃料电池公交车通过电化学反应将气态氢转化为电能，从排气管仅排放水蒸气，这些水蒸气可以收集以供后续使用。它们的主要优势之一在于运行自主性：氢燃料电池车辆在一次加氢后通常可行驶350至500公里，这在拥有延伸防雨棚网络的大型机场（公交车是专门用于在航站楼和飞机之间运送乘客的车辆）或公交车按多班次循环运行且停机时间最短的地方尤其有利。

此外，氢能源系统无论环境温度如何，都能提供稳定的功率输出，使空调或车厢供暖等辅助系统运行时不会显著影响续航里程——这对于位于极端气候地区或对乘客舒适度要求严格的机场来说，是一个重要的考虑因素。加氢速度快，通常不到15分钟，能够提高车辆可用性并减少对大型备用车队的需求。

运营方面，氢燃料电池公交车特别适用于灵活性、长工作周期和减少周转时间至关重要的空侧使用案例，并且土地可用性允许安装专门的氢燃料加注设施。例如，多伦多机场管理局的氢燃料电池公交车采用计划与机场更广泛生态系统紧密相关。⁹得益于在机场边界外为轻型车和重型车安装加氢站。

改装公交车

改装柴油公交车通过用替代动力系统替代内燃机和相关部件提供了一种过渡性的脱碳途径——最常见的为全电池电动，但也可能是氢内燃机或结合燃烧和电动驱动系统的混合系统（包括插电式变体）。然而，就本次分析而言，仅详细研究了从柴油到全电池电动的转换。

对于拥有相对较新公交车队（基于化石燃料或生物燃料）的机场而言，这种中间解决方案尤为有趣。这使它们能够延长车队的使用寿命，同时实现尾气排放的大幅减少，避免了采购全新车辆的资金成本（一辆改造后的公交车可能比一辆全新的电动车便宜得多）。从技术角度来看，改造可以在车队完全更换所需时间的一小部分时间内完成，并且能够实现公交车厢和底盘的再利用，使内饰保持可使用状态。主要机遇在于传统车队脱碳，其中预算限制、长采购周期或可持续性目标要求快速减排。

但是，改造存在挑战：现有车队的规格多样性可能使转换过程复杂化，认证要求可能因地区而异，维护团队可能需要重新培训以管理新系统。

此外，考虑将此作为解决方案的机场可以再次确认，在改造后，公交车队是否能在效率、续航里程和可靠性方面，与专门制造的零排放车辆相比，尤其是在要求较高的场内环境中。

日内瓦机场¹⁰说明这种方法的可能性：2024年它投资了两辆翻新巴士，每辆平均成本为35万瑞士法郎，另外四辆将于2025年交付。连同其他车队措施，这使机场达到27辆电动巴士中的24辆，展示了翻新如何在下一代技术基础设施开发的同时，提供了一种具有成本效益的桥梁。

化石燃料和生物燃料混合公交车

HVO公交车代表着机场地面运输脱碳战略中一个日益增长的趋势。HVO是一种可再生的柴油替代品，由植物油或废油制成，可显著减少生命周期碳排放——与普通柴油相比最高可减少90%。这些燃料在大多数情况下与现有的柴油发动机和加油基础设施兼容，使其成为机场一个实用且即时的解决方案。¹¹试图在不进行大量新的基础设施投资的情况下降低其运营排放。

从基础设施角度来看，HVO与现有柴油加注系统的兼容性意味着机场可以将其车队平稳过渡，同时最大限度地减少运营中断或资本支出。这与先前分析的场景形成对比。因此，HVO是一种宝贵的桥梁技术，在短期内支持机场的脱碳目标，并补充向可持续航空燃料(SAF)和零排放地面运输的更广泛转变。

虽然本文主要关注电池电动和氢燃料电池等零排放技术，但由于氢化油(HVO)公交车是一种低碳而非零排放的解决方案，因此未将其纳入核心分析。然而，必须承认的是，越来越多的机场正在将氢化油公交车作为过渡性

技术。这些部署使机场能够在长期电气化和氢能基础设施得到发展的同时实现即时减排。

沼气动力公交车

这种替代方案利用生物原料生产的甲烷，例如有机废物、污水污泥或农业残留物，作为标准燃气发动机或混合系统的压缩或液化天然气的替代燃料。它使机场和交通运营商能够在不完全更换现有车辆或燃料基础设施的情况下实现车队脱碳。与柴油相比，生物甲烷公交车具有快速加燃料时间、长运行范围和显著降低的颗粒物和氮氧化物排放。当生物甲烷来源于废物流时，整体温室气体平衡可以接近碳中和。

慕尼黑机场的生物质燃气巴士¹²其续航里程高达80公里，加注时间仅需约五分钟。与欧六柴油公交车相比，它们的颗粒物排放降低了约90%，氮氧化物排放降低了超过60%。

氢内燃机

氢燃料内燃机是正在开发的一种再改造方案，尤其有望作为现有柴油发动机与零排放技术之间的桥梁，因为许多部件(如点火、冷却和变速箱)与传统公交车共享。

TRIMIS HyFLEET:CUTE等项目¹³柏林的试验已经证明了这种方法的潜力。虽然氢燃料内燃机目前未被纳入TCO分析，但它是一个值得关注的领域，其发展可以在未来的评估中捕捉，以提供更全面的脱碳路径图景。

2.2 主要功能比较

随着机场在脱碳进程中的推进，公交技术的选择不仅仅是一个技术决策——它受到不断变化的优先事项、运营现实以及创造更洁净未来的雄心的影响。

在所有可用技术——柴油、改造柴油、电池电动和氢燃料电池——

选择一条路径而非另一条路径的决定，需要对每个机场独特的运营约束、基础设施准备情况、监管环境和总拥有成本进行仔细分析。图3表示了这些选项在气候影响、投资、持续成本和运营匹配度方面的比较。

图3

基于气候影响的公交车跨技术比较 运营成本、投资和机场运营

类目	标准	柴油	Retrofit	电动	氢
气候影响					
CO ₂ 运行期间排放	高	零	零	零	零
能源消耗	高	中高	中高	中量级	中量级
燃料/能源	柴油	电	电	气体氢	气体氢
前期成本和投资					
机场巴士市场可用性	全球，>15家OEM*	增长，~10家OEM厂商 翻新专家	>10 OEMs，扩大迅速	~5个 OEM, 有限的 模型，试点项目	~5个 OEM, 有限的 模型，试点项目
基础设施要求	柴油站	充电站	充电站	气体氢站	气体氢站
技术成熟度	高	中量级	中量级	低	低
持续运营成本					
维护要求	高	中量级	低	中量级	中量级
预期服务寿命	15-20年	10-15年(电池) 需要替换)	12-18岁(电池) 需要替换)	12-18岁	12-18岁
持续运营成本					
机场规划影响	最小值	网格升级	网格升级	氢能生态系统	氢能生态系统
运行范围	广	中量级	中量级	广	广
加注/充电时间	短时间(分钟)	短/中 快速充电<25分钟 通宵充电3-4 小时	短/中 快速充电<25分钟 通宵充电3-4 小时	短(~10分钟)	短(~10分钟)
驾驶员/用户接受	中量级	中量级	高(需要培训)	高(需要培训)	高(需要培训)
注意：*OEM：原始设备制造商					
<h3>气候影响</h3> <p>机场巴士的环境故事始于柴油，这项技术几十年来一直可靠地为车队提供动力，但现在已成为排放和能源消耗的基准。柴油巴士虽然坚固且熟悉，但它们是机场温室气体排放和空气污染的主要地面交通贡献者。给这些车辆安装电动动力系统是一个有意义的进步步骤——减少排放和能源使用。</p>			<p>强调气候影响不仅关乎公交车队本身，更关乎支撑它的能源生态系统。</p>		
<p>真正的变革来自于电池电动和氢燃料电池巴士。这两种技术都承诺在使用时零排放，从根本上改变了机场的环境足迹。电池电动巴士可以大幅减少温室气体和局部污染物，尤其是在使用可再生能源供电时。氢燃料电池巴士也提供清洁运行，只排放水蒸气，但其更广泛的气候效益取决于氢是如何生产的。如果来自可再生能源，影响是深远的；如果不是，那么部分环境效益会被抵消。</p>			<h3>前期成本和投资</h3> <p>当考虑其前期成本时，柴油公交车对许多运营商来说仍然是可获取且价格合理的选项。它们广泛的供应和成熟的供应链使得购入价格保持较低水平。对柴油公交车进行改造为拥有较新车队的中提供了一种务实的替代方案，这使减排的成本低于购买新车。虽然通常被表述为大约是新公交车价格的一半，但实际花费会根据基础车辆的时代和状况而出现显著变化。较老的车辆通常需要大规模翻新——更换主要部件，有时还需要重新装修内饰。额外的物流费用，例如将公交车运送到专业的翻新中心，会增加进一步的投资。此外，改造市场虽然正在扩张，但仍然不如新的电动公交车市场那么标准化。</p>		

纯电动公交车代表着投资的新时代。这些车辆本身比柴油车更贵，并且对充电站的需求——以及相关的机场电力系统重大升级，包括电网升级和电池储能系统——可能使初始投资额巨大。然而，随着市场成熟和更多制造商进入该领域，成本正逐渐下降，长期价值主张正在改善。

氢燃料电池巴士同时处于创新的前沿。它们的高购置价格以及对专业、通常定制化的加注基础设施的需求，使它们成为资本投入最密集的选择。对于考虑氢燃料的机场而言，这一决策不仅关乎即时成本，也关乎未来准备状态和生态系统的发展。

持续运营成本

柴油公交车虽然购买成本便宜，但运行成本可能比其他选项更高。波动的燃料价格以及内燃机的维护需求随着时间的推移而累积。改造后的公交车可以提供一些缓解，更新的部件减少了维护需求，但它们仍然面临柴油和电力的双重成本，尤其是在机场选择暂时让两种系统共存时。

相比之下，电池电动公交车在持续成本效益方面表现优异。电力通常比柴油更便宜，价格也更为稳定，而电动驱动系统的简单性可以意味着更少的故障和更低的维护费用。在车辆的整个使用寿命中，这些节省可能非常显著，有助于抵消较高的前期投资。氢燃料电池公交车也受益于机械复杂性的降低，但氢燃料的成本和供应仍然是一个障碍。随着技术的成熟和氢燃料供应链的增长，这些成本可能会下降，但目前，它们是一个关键的考虑因素。

机场运营

柴油公交车易于加注和维护，并且非常适合既定的运营程序。加装改造的公交车能很好地融入这种模式，只需进行适当的调整以适应充电。然而，将车辆从服务中移除进行改装以及翻新的后勤需求可能会造成暂时的容量缺口，机场必须为此进行规划。

电池电动巴士引入了新的动态。充电时间表必须仔细管理，以确保车辆在需要时处于可用状态，并且路线规划可能需要适应续航里程的限制，特别是在对周期要求高的机场。

然而，电动公交车更安静、更干净，提升了乘客和员工体验，减少了机场的环境足迹。

氢燃料电池巴士提供长续航里程和快速加氢的承诺，结合了柴油的操作灵活性和电动车的环保效益。虽然氢燃料基础设施的缺乏仍然是一个挑战，但引入氢燃料同样需要定制化的培训和安全管理规范——这与其他燃料（如电力、柴油、丙烷或天然气）已做出的调整类似。正在投资氢燃料的机场已经展示了其可以安全可靠地部署，并且预计随着采用的扩大，氢燃料的可行性也将得到改善。

除此之外，向电池动力和氢燃料巴士的转型为机场运营商带来了新的复杂性和不确定性。由世界机场协会（ACI）领导的行业工作小组¹⁴建议解决这些问题的几个步骤，包括：

综合机场兼容性

在操作开始前进行学习，确保基础设施、安全操作程序适合用途——不仅适用于公共汽车，也为了迎接未来的氢能或电动飞机。

安全和消防安全，因为电池和氢燃料电池汽车都存在独特的风险。电池火灾可能持续时间较长，并释放有毒烟气，而氢气虽然燃烧清洁，但需要专门的检测和响应规程。

机场还必须规划显著增加的电力需求，因为站点需要支持同时为公共汽车和最终为飞机充电——这可能需要对能源基础设施进行重大升级。

引入新的燃料类型可能需要分开的停车场，这可能会降低场位容量并使地面支持设备物流复杂化。

此外，诸如在通电电缆前核实电气连接以及重新评估支架设计和风险管理等操作规程，对于确保安全和弹性变得至关重要。

最终，虽然每种技术都呈现出独特的环境效益、运营者量和投资需求之间的平衡，但任何机场的决策都将取决于这些因素如何转化为长期价值。为了提供更清晰的比较基础并支持基于证据的决策，下一节将深入探讨拥有总成本（TCO）分析——概述其方法、主要假设以及支撑对每种路径在整个车队生命周期内的财务和运营影响进行全面评估得出的见解。

③拥有总成本分析

本文提出的 TCO 分析评估了在机场环境中采用不同可持续公交车技术在预期服务年限内的高层次经济影响，考虑了资本支出 (capex) 和运营支出 (opex)。

资本性支出包括与车辆采购、配套设施安装相关的初始成本

基础设施，以及现有设施任何必要的修改，例如维修车间或加油站。运营支出涵盖了在运营过程中发生的经常性费用，包括燃料或电力供应、计划内和计划外维护（包括电池更换）、员工培训、保险、许可及其他持续的运营费用。

3.1 参考案例研究和考虑的场景

为了确保替代公交技术的简单比较，本研究选择了欧洲国际枢纽机场的原型。假设类似的机场可能运营一个50架机翼侧巴士车队。从3月到8月，利用对“未来机场”和航空利益相关者进行的超过20次采访

2025年定量研究，一些操作参数（例如公交车行驶距离）已被估计和验证，以确保分析尽可能代表潜在的实际应用。完整的方法论在附录中列出。

表 1

欧洲国际枢纽中型机场参考案例参数

运行参数	值	评论
车队规模 (公交车数量)	50	-
驾驶员数量 (每辆巴士)	3	-
公交车司机薪水 (欧元 / 司机)	36,580	-
营业时间 (小时 / 天)	18	-
运营天数	365	-
利用率 (%) / 班次	25	公共汽车在运营时间内所占的份额 运送乘客
公共汽车平均速度 (千米 / 小时)	20	-
公交距离出行 (km / 天 / 公交)	90	按利用率 × 运营时长 × 平均速度
公交年行驶里程 (公里 / 年)	32,850	-
投资日期 (年)	2030	适用于所有分析的技术选项
项目生命周期 (年)	15	公交车的预期使用寿命
加权平均资本成本 (%)	4.56	基于三个监管机场的平均值 ¹⁵
企业借款利率 (%)	4.10	基于欧洲中央银行 (2025) 数据 ¹⁶
银行部门金额 考虑 (%)	0	全部投资假设为一次性投入

运营细节已协调一致，所有这些均在不同技术场景中保持固定。假设校车在机场场内以平均每小时20公里的速度行驶，以确保能源消耗和维护估算的合理性。校车每天运营18小时，但仅在工作时间的25%（利用率25%）运送乘客，全年如此，估计校车每天续航里程为90公里。人员配备标准化，每辆校车每天配备三名司机，每位司机每年固定工资为36,580欧元。假设项目寿命为15年，因此财务计算以资本加权平均成本（WACC）4.56%的利率折现，符合基础设施投资的行业规范。

基于市场调研，每辆公交车假设配备386千瓦时（kWh）的电池，提供235公里的可用续航里程和每日103.45 kWh的充电负荷。充电在夜间进行，平均充电时间为3.82小时，充电器效率为95%。除电池更换外，维护成本通常低于柴油。在本分析中，假设电池更换发生在第九年。为反映旨在支持低排放公交车部署的潜在资助计划和相关激励措施，假设政府补贴了50%的资本投资。这种情况显著减少排放并符合长期可持续性目标，尽管它需要更高的初期投资和运营调整。

在本参考案例研究中，机场巴士运营继续依赖传统的柴油车队。这种方法要求基础设施投资最少，因为它利用了现有的加油和维护设施。资本支出主要分配给柴油巴士的采购，而运营支出主要由燃料成本、驾驶员工资、保修和保险以及维护构成。假设柴油的市场平均零售价为每升1.67欧元，每辆巴士的单位价格为259,000欧元，未考虑政府补贴。

考虑到各种技术选项，以下场景已根据影响机场总体规划决策的关键标准制定。

场景1

改装电动车队

在这种情况下，机场选择对现有的柴油公交车进行改造，安装电动驱动系统，从而为电动化提供一个过渡方案。改造成本假设为新电动公交车的50%，维护成本比新电动公交车高10%（每公里0.407欧元）。运营和基础设施要求与新的电动车队相同，包括充电设施和驾驶员培训。

场景3

氢燃料电池车队——场外制氢

本场景考虑了部署燃料电池巴士，氢气由场外生产设施供应。该巴士车队每天行驶约4500公里，消耗428公斤（kg）氢气，考虑了平均燃料电池巴士的燃油经济性。每辆巴士配备一个30-80公斤氢气罐，提供200-600公里/加注的续航里程，加注时间为10至20分钟。根据市场调研，每辆巴士的平均资本成本为60万欧元，具有3.5%的年度学习曲线，并且巴士资本支出有50%的政府补贴。

所有投资均预先投入，机场安装了专用加氢站。为符合航空脱碳目标，此情景的基本假设是使用绿色氢气，价格为每公斤2.87欧元。然而，TCO模型也可以反映替代氢气价格假设（例如灰色氢气或蓝色氢气），从而适应不同的区域背景和生产路径。此情景支持快速加氢和远程飞行，从而提高运营灵活性。

场景2

电动车队

该场景探讨了向纯电动公交车队转型的过程，需要在车辆和充电基础设施方面进行大量投资。资本性支出包括购买电动公交车（平均价格55万元欧元）和安装充电站，此外还有土木工程、电网更新、电气安装和设计的费用。营业性支出包括电池更换、充电成本、驾驶员薪酬、保修和保险、维护和驾驶员培训。

3.2 基于场景的总拥有成本结果和见解

本节详细比较了在一家欧洲国际枢纽机场的四种替代公交车队方案的总拥有成本（请参见图4）。该分析涵盖了初始投资、年度运营支出、每公里总拥有成本以及特定场景的运营见解。

基于柴油的车队作为比较的基准。初始投资为1197万欧元，专门用于公交车采购，因为没有额外的

需要基础设施。年运营支出为530万欧元，并在使用寿命结束时考虑了15%的残值。

总拥有成本受高燃料和维护成本的影响。缺乏政府补贴以及暴露于波动的柴油价格会侵蚀长期竞争力。值得注意的是，司机工资代表最大的成本组成部分，占总每公里TCO的近三分之二。

图4

根据场景、技术、资本支出和运营支出划分的总拥有成本结果

运行假设					财务假设				
机场类型	舰队规模 (#)	每日公里	营业时间	使用率 (%)	驾驶员 (#)	驾驶员工资 (欧元)	WACC ¹	终身	投资年份
国际欧盟 中型的	50	每辆巴士90人	每天18	25%	每辆车3人	36.5k欧元/年	4.56%	15年	2030
柴油									
总投资支出	11.97百万欧元		5.11百万欧元*		930万欧元*		18.47百万欧元*		
Capex/km	0.49 €/km		0.20 €/km		0.37 €/km		0.35 €/km		
年度运营支出	5.30百万欧元		4.95百万欧元		491万元		5.45百万欧元		
OPEX/km	3.22 €/km		3.00 €/km		2.98 €/km		3.64 €/km		
TCO/千米	3.71 €/km		3.20 €/km		3.35 €/km		3.99 €/km		
氢 现场生产									

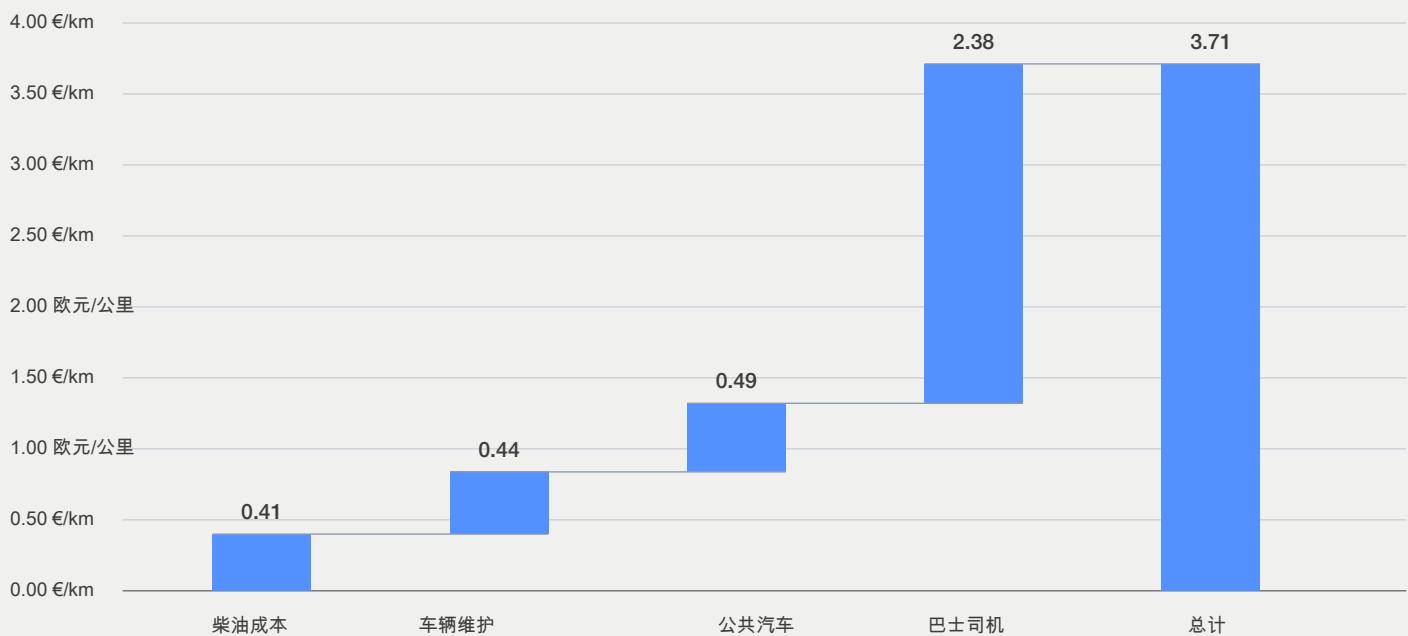
注意：所有情景中都包含的常见的关键运营和财务假设也包括在内

¹ 资本加权平均成本 * 50% 补贴后

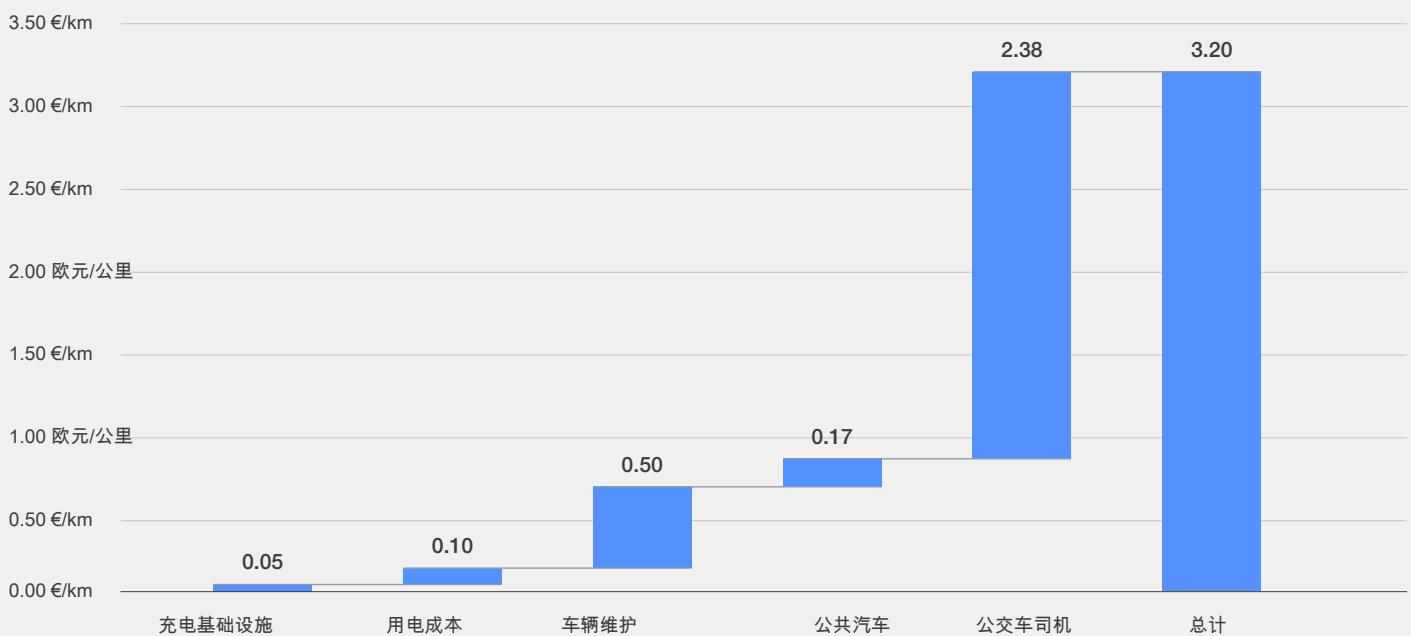


图5 所有场景的单位公里总拥有成本 (TCO) 结果

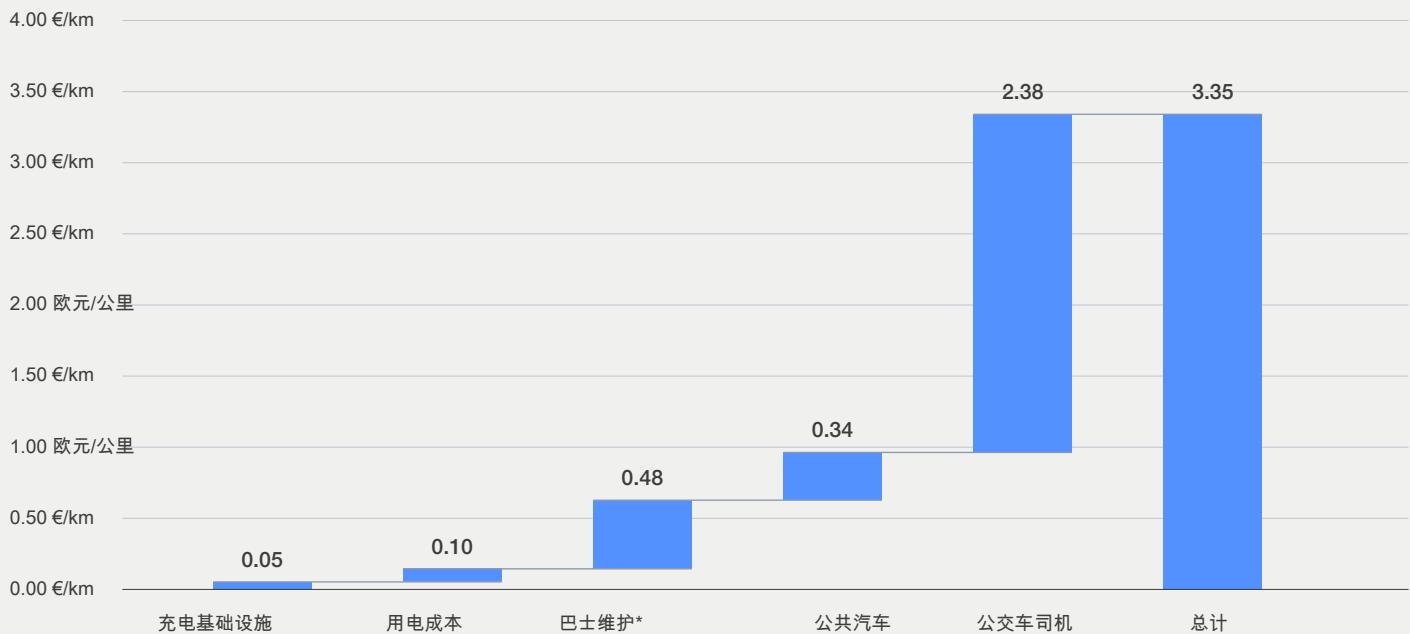
柴油巴士



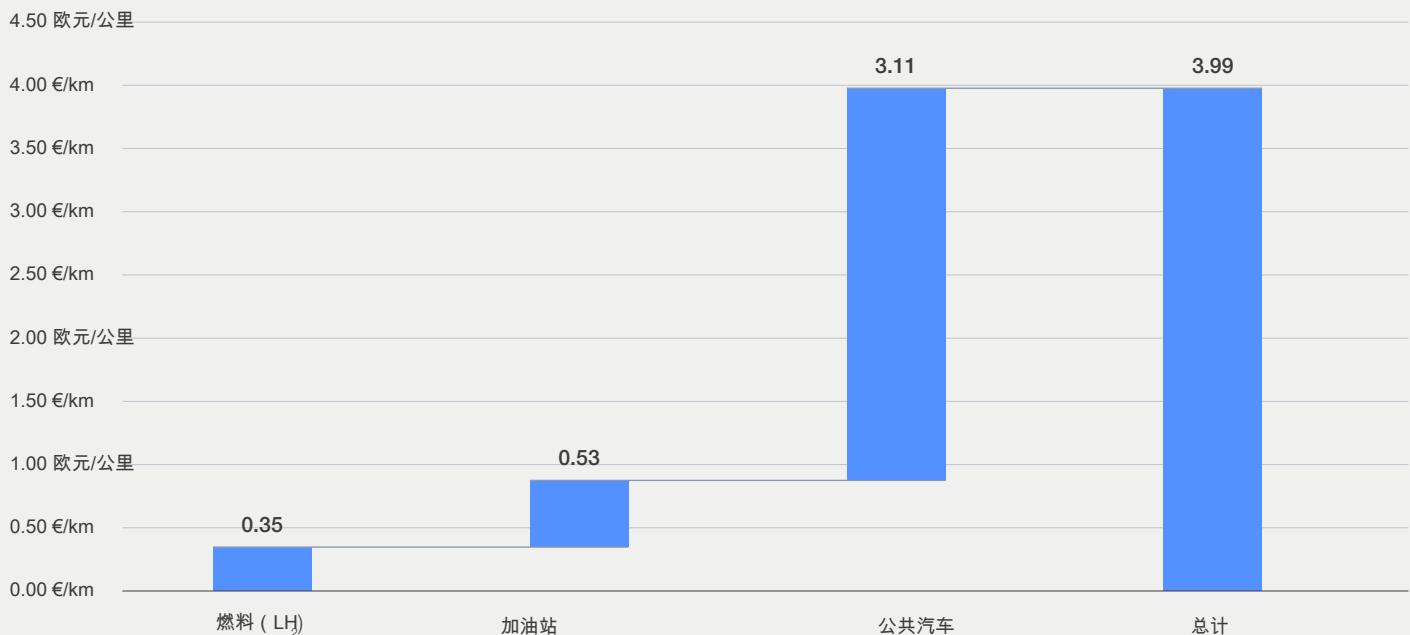
改造公交车



电动公交车



氢燃料电池巴士



在现有柴油公交车的电动化改造初期投资中，翻新费用为511万欧元，年运营支出为495万欧元，并假设设有25%的残值。

升级改造提供了一种务实、低成本的动力电气化途径，在所有方案中初始资本支出最低（见图6）。升级改造成本设定为新电动公交车的50%，其中50%的资本支出由政府补贴。该方案假设公交车与充电桩的比例为2:1（每个充电桩支持两辆公交车），并在第九年包含了显著的电池更换成本（公交车价格的35%）。虽然维护成本略高于新电动公交车，但总体TCO（总拥有成本）接近电池电动汽车方案，并在考虑政府补贴时可能更低，这使得该方案对预算有限且希望最小化运营中断的运营商尤为有吸引力。相对较低的电力和基础设施成本进一步增强了该方案的成本效益。

如果边界条件和机场的经济财富使其投资于新的专用电动公交车队成为可能，则初始投资假设为930万欧元（包括约100万欧元用于充电基础设施，其余用于车辆采购）。年运营支出为491万欧元，考虑到生命周期结束时的25%残值（与之前的情况相同）。

虽然前期投资高于改造，但新电动车队具有更高的可靠性、更先进的功能和更低的维护成本。

电动公交车队情景利用了3.9%的年学习率来评估电动公交车的成本，并获得了50%的政府资本支出补贴，这有助于抵消较高的初始支出。在第九年，电池更换是一项显著的成本，模型假设这项重要的维护工作在改造型和电动公交车同时进行，因为该技术的成熟度是相当的。每公里总拥有成本（见图5）略高于改造情景，主要是由于资本支出较高，但在计入政府补助后，仍远低于柴油或氢燃料，该情景与长期可持续性和监管目标高度一致，在运营效率和环保性能之间取得了平衡。

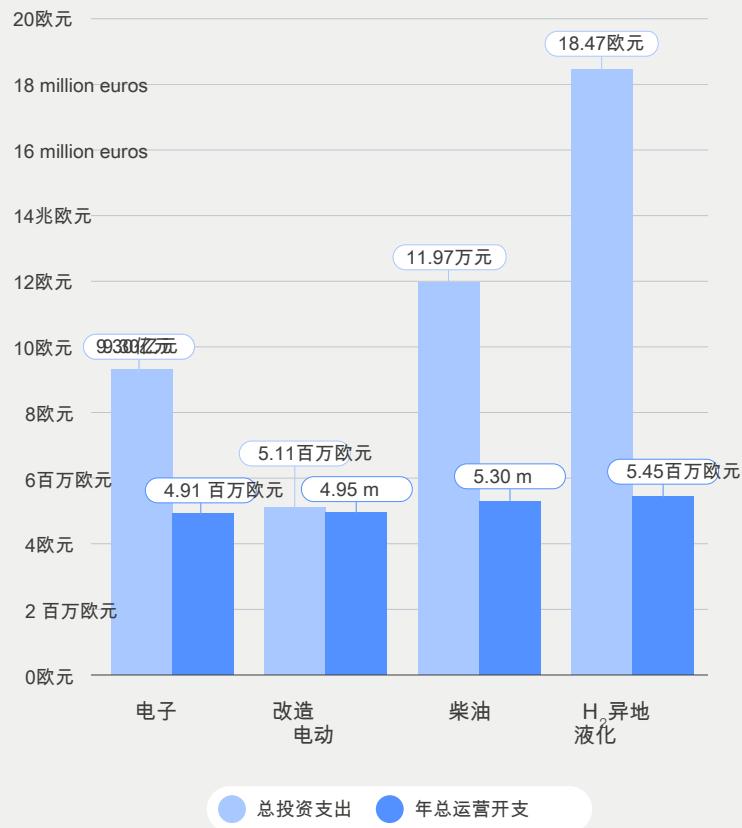
若选择的技术是氢气（由场外生产供应），则此方案需要最高初始投资，特别是车辆和加氢设施。总估算的资本支出为1847万欧元，其中12.52万欧元用于公交车购置，596万欧元用于加氢站。年运营支出为545万欧元，司机薪酬和氢燃料成本为主要支出项。虽然加氢站的初始资本支出相对于公交车队来说不高，但其运营支出仍保持较低水平。该方案的总体拥有成本主要受高司机成本和氢燃料相对于电力的较高成本驱动。

然而，氢气提供了运营灵活性和快速加氢，这对于高利用率或长距离应用可能有利。尽管在不降低成本或缺乏政策支持的情况下经济上仍具挑战性，但碳交易机制（如欧盟的排放交易系统（ETS））所带来的潜在收入¹⁷能够强化商业案例。然而，此类信用证的可用性和处理方式取决于不断发展的政策框架，并且可能不适用于其他技术，例如电池公交。

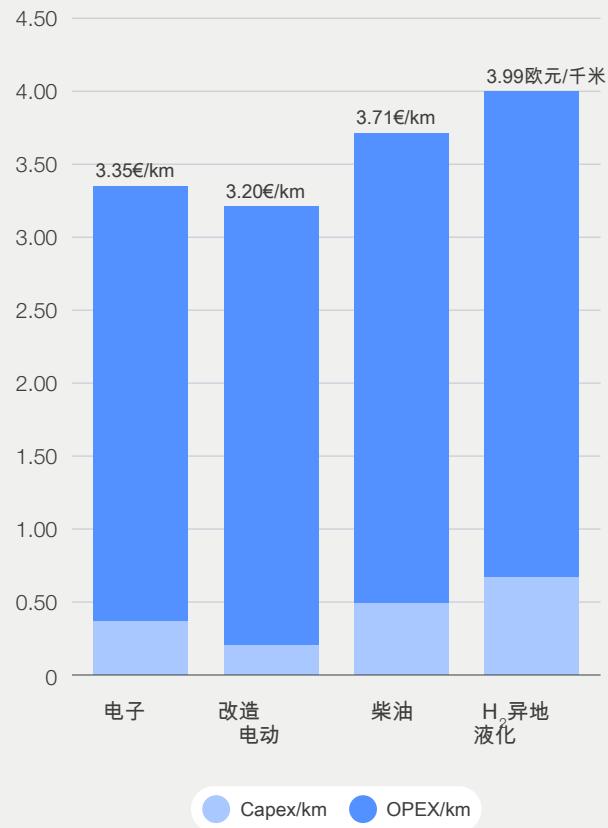


图6 按CAPEX和OPEX划分的各技术总拥有成本(TCO)结果对比

跨技术按资本支出和运营支出划分的总拥有成本
结果比较



每公里拥有总成本



3.3 敏感性分析

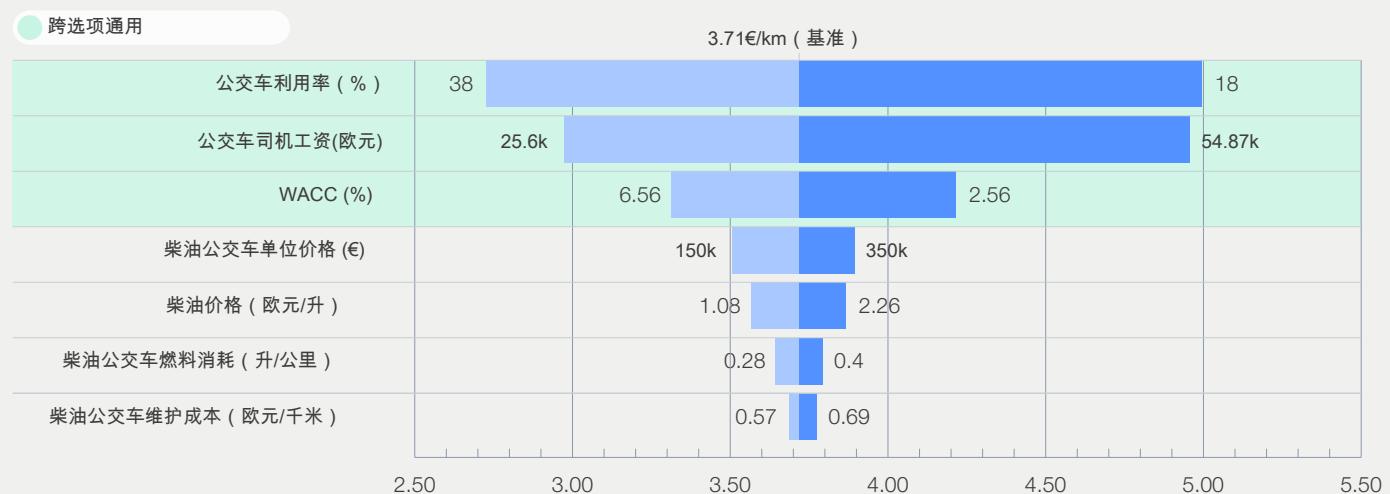
为了考虑现有数据点中的不确定性和可变性，以及可能根据区域和运营动态而变化的模型假设和未来成本轨迹，还进行了情景分析和敏感性分析。地理因素、市场动态和运营需求会影响分析中使用的假设，因此评估过程需要灵活性。因此，该敏感性分析旨在识别影响每种公交技术情景（柴油、改造、电池电动和氢燃料）的平准化拥有成本（LCO，€/km）的关键变量（见图7）。

某些变量，如公交车司机工资、运用率和政府补贴，是所有技术成本的重要驱动因素。特别是司机工资，代表了运营支出的一大份额。运用率——定义为公交车在服务中载客的时间比例——直接影响固定成本的摊销，并是所有情景下LCO的关键决定因素。公交车在服务中载客时间越长，其固定成本就越被摊薄，从而降低每公里的总成本。反之，如果公交车使用频率较低，每公里的成本可能会大幅上升，在某些技术情景中甚至可能高达300%。

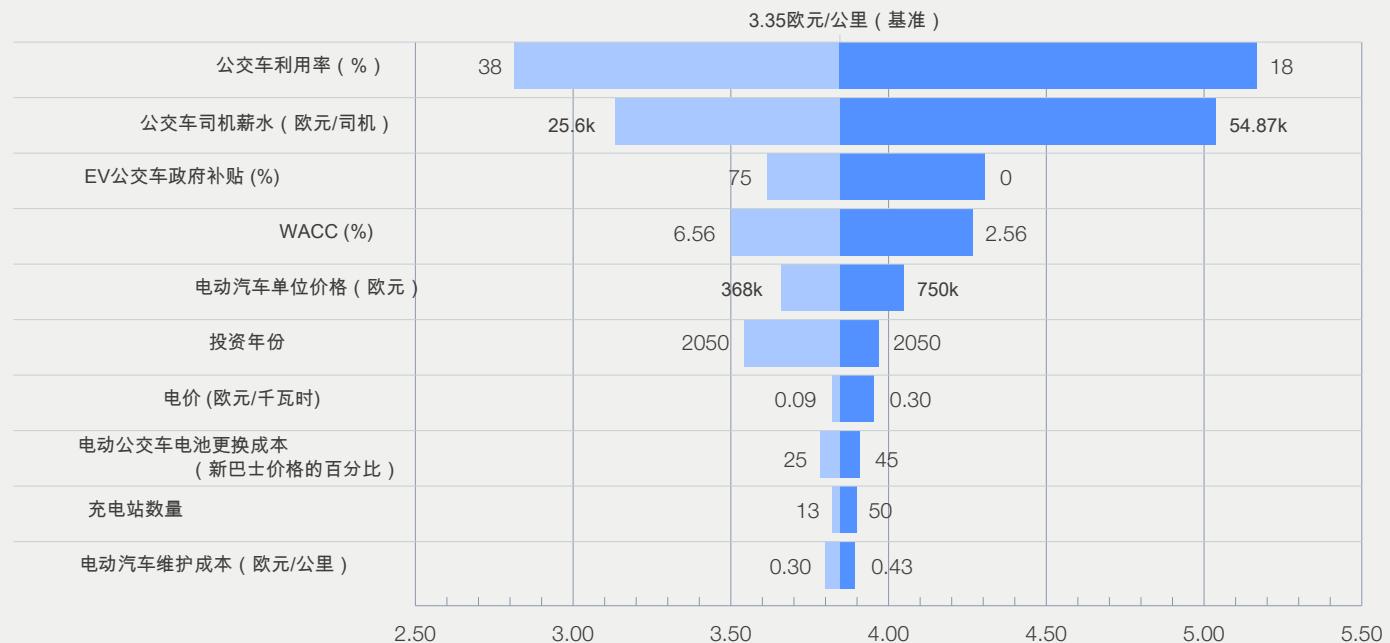
图7

对每种技术情景的敏感性分析 –
驱动levelized €/km价格的主要参数

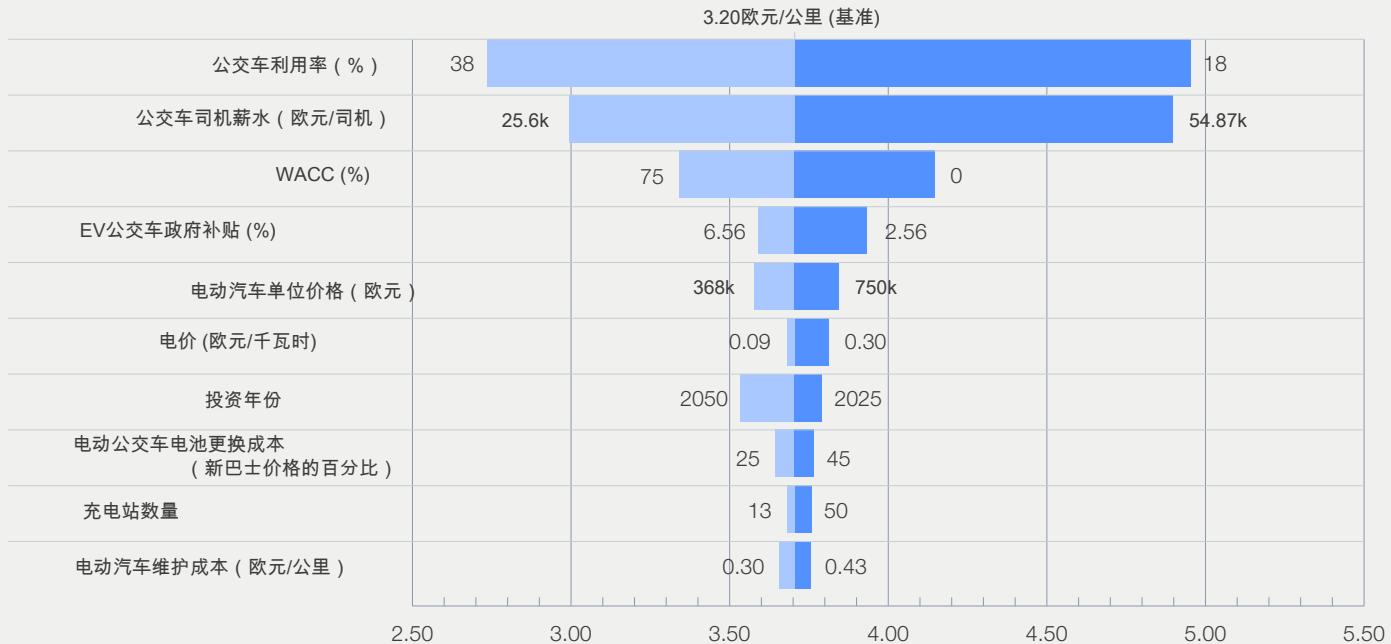
柴油公交车TCO敏感性



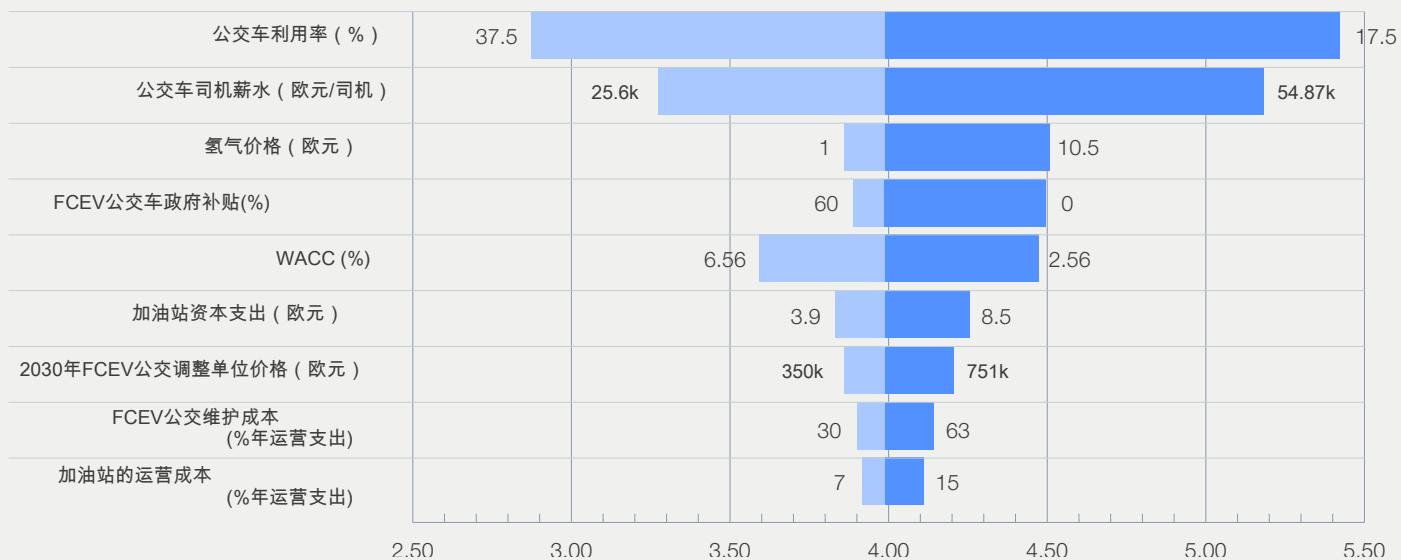
电动公交车TCO敏感性



改造电动公交车的TCO敏感性



氢燃料巴士总拥有成本敏感性



政府补贴和激励是塑造TCO的另一个关键因素。机场和地面服务设备供应商可以获得针对零排放公交车和相关基础设施的一系列支持计划。在北美和欧洲，项目通常通过拨款、退税或税收抵免的方式覆盖40-100%的车辆和充电基础设施的增量成本。值得注意的例子包括美国联邦航空管理局（FAA）的零排放机场车辆计划、加拿大的零排放交通基金以及欧盟的替代燃料基础设施设施，所有这些都为机场项目提供了量身定制的有力支持。此外，通常还通过国家、省级或公用事业级别的计划存在更多机会。

在湾地区，虽然公开招标资助不太常见，但通过政府主导的试点项目、采购要求和与国家可持续发展战略一致的战略伙伴关系提供支持。也经常提供如税收减免等非货币激励措施，进一步改善了采用的财务案例。附录中包含了一个详细的各区域可用补贴和激励措施的表格供参考。

每种公交技术也都有其独特的敏感性。例如，燃料成本对柴油公交车尤为重要，而考虑HVO的潜在溢价后，此价格可能还会进一步变化。电费和初始购买成本对电动公交车最为重要。氢燃料公交车对使用时长特别敏感，因为它们的初始投资和基础设施成本很高。如果车队规模没有正确规划，或者维护和加氢的灵活性有限，就很难控制成本。

其他因素，如公交车的平均速度和机场运营时间，也会发挥作用，它们通过影响公交车行驶的时间，进而影响维护成本和加油及充电的闲置时间。在附录2中，对每种技术的假设进行了进一步的分析。

总而言之，虽然能源价格、购买成本以及公交车使用时长在所有场景中都是最关键的因素，但政府补贴及其对资本支出的影响会直接影响前期成本，并决定这些成本是否能够在资产的使用寿命内得到弥补。

该分析的主要例外情况涉及氢燃料公交车场景。在此，氢燃料公交车的技术成熟度和氢燃料的本地可用性都可能显著影响资本支出。此外，成本和可靠性

氢气供应——与氢气生产基础设施相关——可能影响运营支出。对于考虑使用氢燃料电池巴士的机场，建议对技术准备情况和燃料供应物流进行更详细的评估，以确保车队的高效运营。这些见解突出了在机场选择和管理替代燃料巴士技术时，仔细规划和当地背景的重要性。

额外反思

转向氢能地面运营已经具有挑战性，但与此同时，航空运输也在探索这种技术，存在显著的合作机会，但也面临复杂的挑战。虽然一些机场目前正在研究支持氢能公交车队的基础设施规划——主要通过气态氢供应——未来氢能飞机的需求将要求在规模和技术上根本性转变，特别是转向液态氢生产、储存和处理。（LH²

一个关键的观察是当前地面车辆氢能基础设施与航空的预期需求之间的脱节。随着氢能航空的成熟，机场需要弥合这一差距，整合能够灵活支持气态和液态氢的基础设施，并确保今天做出的投资能为明天的多模式氢能生态系统做好准备。这是因为行业和学术界都建议未来飞机推进可能更适合液态氢，尽管目前的地面操作主要依赖气态氢。

这个面向未来的情景也是本研究的一部分。场外制氢情景（先前描述的第3号情景）与场内制氢情景的主要区别在于，后者需要在景观已完全转型的机场边界内部署氢燃料电池巴士车队所需的基建，包括液氢生产、储存和配送能力。场内制氢和液化所需的资本支出相当可观，估计超过4.5亿欧元，而年运营支出受电价和液化效率的影响很大。液化仍然是主要成本驱动因素，总拥有成本对绿色氢气的价格和电力的成本都高度敏感。预计到2050年，技术进步将降低资本支出和运营支出，但在短期内，传统燃料的“绿色溢价”需求将持续存在。

重要的是，长期购销协议和定向补贴等机制可以帮助管理早期氢能基础设施相关的高初始成本和财务风险。此外，可再生能源的可用性——尤其是风能和太阳能的均衡组合——可以显著降低氢能供应成本，并减少对超规模基础设施的需求。对于地理位置不太有利的机场，结合现场氢能生产与通过船舶或管道的进口，可以进一步优化成本并提高韧性。

随着氢燃料飞机的推出，为公交车场外制氢与航空现场制氢之间的相互作用可能会驱动新的价值链概念，特别是当液氢的物流和处理挑战变得更加明显时。总而言之，旨在成为区域氢能枢纽的机场必须采取全面、面向未来的方法——协调氢能和电力基础设施的投资，预测地面和空中运输的需求，¹⁹ 并构建灵活性以适应技术和发展中的法规。这种多利益相关方、系统层面的视角对于实现深度脱碳和长期运营弹性至关重要。



结论

机场可以通过采用创新的、经济高效的地面运营脱碳解决方案，引领航空业的净零转型。

机场地面运行的脱碳化对航空业而言既是紧迫任务也是战略机遇。正如本文所展示的，机场通过对其地面机队采用低排放和零排放技术，能够推动有意义的减排。对柴油车、改造后电动车、电池电动车和氢燃料电池巴士的比较分析，为决策者在平衡运营需求、财务现实和可持续发展目标时提供了可行的见解。

加装改造的电动公交车成为近期的一种务实且经济高效的解决方案，使机场能够利用现有资产，在尽可能小的运营中断下实现快速减排。对于拥有较新柴油车队或资本有限的机场而言，这条路径尤其有吸引力，它可作为在基础设施和员工能力得到发展的同时，通往全面电气化的桥梁。

投资新的电池电动公交车队代表了一种具有前瞻性的战略，符合不断变化的监管要求和中长期可持续性目标。虽然初期投资较高，但持续的运营成本显著降低，通过更安静、更清洁的运营提升了乘客和员工的体验。政策激励和成熟的技术格局进一步强化了电气化的经济性，使得对于拥有稳定财务资源和可预测运营特征的机场而言，这一选项越来越可行。

氢燃料电池公交车，尽管目前面临成本较高和基础设施挑战，但对未来机场运营具有重大潜力——特别是在大型枢纽，其运营周期要求高且致力于成为区域能源枢纽。随着可再生氢气越来越容易获得且技术成熟，氢气公交车可能会成为寻求运营灵活性和与更广泛能源转型目标保持一致的机场的战略选择。

要成功实现低碳地面运行，需要价值链各环节的协调行动。机场必须与航空公司、能源供应商、基础设施规划者和政策制定者合作，共同构建强大的供应链，投资于员工培训，并倡导支持性的政策和激励措施。早期采用和试点项目，特别是在区域机场，可以为更大的枢纽和整个行业创造可扩展的模型。

最终，公交技术的选择应以各机场独特的运营环境、财务能力、监管支持和战略愿景为指导。通过采用量身定制、基于证据的方法，并利用多利益相关方合作，机场可以将自己定位为可持续地面运营的领导者——为乘客、员工和周边社区提供更洁净的空气、更安静的环境和长期价值。向低碳地面运营的转型不仅是一项环境要求，也是一项战略机遇，旨在为机场运营的未来做好准备，并为航空业的净零路线图做出有意义贡献。

附录1：方法论

本文提出的研究分析基于一种全面且多维度的方法，结合了各种数据收集方法，以确保从“未来机场”社区的视角获得现实的观点。

本文提出的见解基于以下阶段：

在2025年第一季度进行的一项广泛的案头研究，由剑桥大学的Judge商学院MBA学生领导，重点关注氢燃料电池巴士作为基准测试和比较的主要替代技术。未来机场社区通过研讨会和双边电话，验证了本阶段考虑的不同情景和采用的理论假设。

2025年第二季度，伦敦帝国学院的博士生们探索了纯电动巴士和改造柴油巴士，重点在于成本结构、基础设施要求和运营适用性。与第一阶段一样，机场

明天社区验证了研究过程中做出的理论假设，并提供了输入以确保两种分析互补。

在整个活动期间，对来自机场生态系统各方的20多名专家进行了深度访谈，以确保涵盖所有行业特征：机场运营商、地面处理服务提供商、巴士制造商、巴士运营商、基础设施开发商和能源供应商。

从这些不同来源收集到的见解经过仔细分析，以提供对行业挑战和风险的公正客观的看法。虽然TCO模型中使用的假设大部分得到了验证，但其中一些被简化了，可能无法完全反映行业内的多样性观点。因此，最终数据应被视为有充分支持的估计，其依赖于特定条件，并受访谈范围的限制。即便如此，这项分析为机场提供了有用的工具，以帮助其在脱碳计划的一部分中做出关于过渡地面服务设备的战略决策。

附录 2：每个场景的假设

十一 柴油车

电动和改造公交车

论文中的表1展示了适用于所有三种技术的通用假设。这些假设包括平均车队规模、续航里程、利用率、预期车辆寿命和贴现率等变量。下表2总结了针对特定技术的成本和性能假设，例如加注时间

充电基础设施要求与电池更换周期。为此次分析创建的总拥有成本（TCO）模型可按需获取，所有来源均详细说明（包括涉及敏感数据时的所有平均假设）。该模型可适用于不同区域和运营环境。

表 2 按总线技术划分的基线参数

基线参数			
	参数	值	评论
平均公交车价格 (欧元/辆)	259,000	基于六种不同公交车型平均值	
维护成本 (欧元/公里)	0.61	三个独立来源的平均值	
能源消耗 (升/千米)	0.34	基于七种公交车型的平均值	
柴油价格 (欧元/升)	1.67	10个欧洲国家的平均零售价格	
寿命 (年)	15	各种来源	
残值 (采购价格的百分比)	15	-	
驾驶员培训成本 (欧元)	0	无需额外训练	
保险成本 (欧元)	0	假设为自我承保	
注册费用 (€)	0	假设不适用注册费	
政府补贴 (购买价格的百分比)	0	柴油公交车无补贴	
平均公交车价格 (€/公交车) *	55万 (电动) 改装公交车 大约50%的 新能源公交	五辆电动公交车的平均值	
资本支出学习率 (%/年)	3.9	随着电池技术的规模化，预计将出现减排	
维护成本 (欧元/公里) *	0.37/0.40	电动/改造，不含电池成本	
能源消耗 (千瓦时/公里)	1.15	七辆不同公交车的平均值	
电价 (欧元/千瓦时)	0.12	经利益相关者验证	
电池更换频率 (年)	9	经利益相关者验证	
电池更换成本 (占新车电动公交车的百分比)	35	基于多个来源和利益相关者输入	
电池容量 (千瓦时)	386	六辆不同公交车的平均值	
公交到充电桩比率	2:1	一个充电器为两辆巴士；经验证 利益相关者	
总线输出功率 (kW)	150	每个充电器有两个插座；每辆公交车一个插座	
充电器效率 (%)	95	典型市场平均；输入功率降至143 kW	



充电模式 (最小-最大 %)	20-90	70% 可用容量以限制退化
充电单元成本 (€/kWh)	408.48	基于市场各种充电器
充电器隐藏成本 (占单位成本的百分比)	60	包括设计、网格升级、场地工作
充电时间 (小时)	3.77	根据输入功率、可用容量 夜间充电
充电器维护成本 (欧元/单位/年)	2,300	涵盖软件更新和冷却维护
直流充电器保修成本 (欧元/单位/年)	736	基于制造商保修率
充电器残值 (单位价格的百分比)	25	由于数据有限，假定与公交车相似
汽车残值 (单位价格的百分比)	25	由于电池价值较高，转售潜力大
寿命 (年) **	15	根据各种来源
驾驶员培训成本 (欧元)	231	基于加拿大电动公交车要求 以及英国
保险成本 (欧元)	0	假设为自我承保
注册费用 (€)	0	假设不适用注册费
政府补贴 (购买价格的百分比)	50	覆盖了公共汽车和的一半的资本支出 充电基础设施
平均公交车价格 (€/辆)	598,240	六辆氢燃料电池巴士的平均值
资本支出学习率 (%/年)	3.5	预期随着氢能技术的扩展而降低
公交维护成本 (欧元/公里)	0.42	六种不同资源的平均值
公共汽车油耗 (kg/LH)	0.10	四种不同公交车的平均值
氢气价格 (€/kg ; 灰色，蓝色，绿色)	1.84, 1.89, 2.87	来源平均。到2030年的价格预测。 已通过利益相关者验证。
加注时间 (分钟)	15	基于市场调研
汽车残值 (单位价格的百分比)	15%	资产价值带来的转售潜力。基于 各种来源
寿命 (年) **	15	根据各种来源
保险成本 (欧元)	0	假设为自我承保
注册费用 (€)	0	假设不适用注册费
政府补贴 (购买价格的百分比)	50	覆盖了公交车和充电站的一半资本支出 基础设施

* 区分新电动公交车和改造** 假设寿命相同以比较相似周期

附件3：补贴

为了补充敏感性分析，本附录提供了一个详细表格，列出了可用于支持零排放机场巴士及其相关基础设施的补贴和激励措施。信息按地区组织，包括直接的财务机制——例如补助金、退税和税收

信贷——以及非货币激励措施，包括免收过路过桥费、税收减免和优先准入。虽然该表格很全面，但它并非详尽无遗，并且反映了在撰写当时已确定的主要项目。其目的是给读者一个综合性的视角，了解那些在不同市场中可能显著影响总拥有成本的支持计划。

表3

美国 (US) 的补贴

补贴程序	管辖权(国家/州)	金额/百分比	覆盖范围
零排放机场车辆和基础设施试点程序 ²⁰	联邦	高达项目成本的50%	机场拥有，道路零排放车辆 (ZEVs，如作为公共汽车和穿梭巴士等)以及支持充电基础设施仅供机场专用
低或无排放(低-无)拨款程序 ²¹	联邦	高达85%用于公交车；高达90%用于设施组件	购买或租赁低/零排放公共客运巴士支持设施和劳动力发展。机场专用服务不符合资格。
商用清洁车辆税收抵免(45W) ²²	联邦	每辆车高达 40,000 美元	企业购买合格商业产品的税收抵免整车型号总重 (GVWR) 为 14000 磅或更高
替代燃料基础设施税信用 (30C) ²³	联邦	6%的成本，高达 10万元每单位	企业安装充电基础设施的税收抵免
EnergIIZE 商业车辆项目 ²⁴	加利福尼亚	变化；针对性资助车道	电动汽车充电和加氢基础设施中重型卡车、公共汽车和设备
德克萨斯大众环境缓解计划(TxVEMP) - 全电动授权 ²⁵	德克萨斯	高达100%增量成本 政府部门；75%对于非政府	用全电动车型替代老旧柴油车包括穿梭/公交车和机场地面支持设备，加上辅助基础设施
ComEd业务和公共部门电动汽车返利 ²⁶	伊利诺伊州 (ComEd 服务区域)	高达120,000美元 一辆公交巴士；高达 18万元用于精选客户	购买或租赁新车队或二手车队返利电动汽车，包括公共汽车
ComEd 准备就绪程序 ²⁷	伊利诺伊州 (ComEd 服务区域)	每级最高8000美元 (L2) 充电器接口；高达 \$1000/kW for direct-当前快充器 (直流斩波器)	为升级所需的电气基础设施提供返利 为非住宅客户提供电动汽车充电器安装
佐治亚电力电动汽车充电器加码返利 ²⁸	佐治亚 (GA Power 服务区域)	\$250/千瓦 for L2充电器； \$150/千瓦 for DCFC。 每份最高30,000 项目	购买和安装商用电动汽车的返利充电器
冲锋前进科罗拉多 ²⁹	科罗拉多	高达80%的充电器成本 (最高70,000美元) 对于双端口DCFC)	二级和直流(DC)快充补贴 公共机构、商业和公租房站点
舰队-ZERO奖程序 ³⁰	科罗拉多	高达50万美元/ 奖项	为电动汽车充电基础设施提供资金支持轻型-中重型车队车辆

表4 加拿大的补贴

补贴程序	管辖权(国家/省份)	金额/百分比	覆盖范围
零排放公交基金 (ZETF) - 资本项目 ³¹	联邦	高达50%的符合资格成本；最高350加元每个项目百万	采购零排放公交车 (ZEBs)，充电/加油基础设施和设施升级
零排放公交基金(ZETF) - 规划项目 ³²	联邦	高达80%的符合条件的成本	可行性研究，建模，生命周期分析 全面电气化规划
激励措施针对中-以及重型零排放汽车(iMHZEV) ³³	联邦	每单项最高可达20万加元教练车；按.....分层车辆类别	合格新品的购买或租赁的零售点返利 中 heavy-duty ZEVs
CleanBC电动车返利 ³⁴	不列颠哥伦比亚	最高50,000加元 机场特种车辆 (制造商建议 零售价, 建议零售价) (>\$300,000)	各种零排放汽车 (ZEV) 的返利，包括专门类别 机场和港口特种车辆
BC Hydro电动汽车队程序 ³⁵	不列颠哥伦比亚	高达100% 基础设施成本 公共实体	车队电气化规划及电气 支持电动汽车充电的基础设施安装
生态巴士激励程序	魁北克	每台电CAD240,000 校车	购买电动校车的补贴
电动汽车充电程序(EVCP) ³⁶	阿尔伯塔	高达46%的充电器 安装成本 (最大) 每台DCFC 75,000加元)	购买和安装电动汽车充电桩的返利 市政府、企业和其它组织

表 5

欧洲的补贴

补贴程序	管辖权	金额/百分比	覆盖范围
零排放巴士区域地区(ZEBRA)方案 ³⁷	英国 (英格兰)	高达75%的成本 ZEB之间的差异 和柴油巴士；高达 75%的基础设施成本	购买新的双层和三层ZEB (单层和双层) 关联充电/加油基础设施
公交服务运营商格兰特 (BSOG) ZEB激励 ³⁸	英国 (英格兰)	每公里 0.22 英镑运营	经认证的 ZEB 运行的运营补贴 公共路线。这可能不包括空侧运营，但可能 应用于机场的路线
联邦资金征集用于替代驱动程序公共汽车	德国	高达80%的额外 车辆成本；高达40% 基础设施成本。 最多1500万欧元 每个项目	购买电池电动和燃料电池巴士，改造和 充电/加油/维护设施
公交资金节目(示例) ⁴⁰	德国 (巴伐利亚)	高达105,000欧元/ articulated (更长的 比平时更多)，电子公交车，加上 基础设施建设拨款	国家层面购买“气候公交车”的补贴 (electric, hydrogen, biogas)和仓库电气化
先锋计划 ⁴¹	法国	€960-€2,200每 充电桩	支持安装充电站 商用车辆
MOVES III 程序 ⁴²	西班牙	高达70%的充电 基础设施成本 (最高 €2.5 百万) 公司)；高达7000欧元 对于乘用车	购买电动汽车和安装充电桩的补助 基础设施，加上税收优惠
替代燃料基础设施 (阿菲夫)	欧盟 (EU)	因项目而异	欧盟层面的替代燃料基础设施资金，包括 主要机场地面服务电动化

表6 中东地区的补贴

补贴程序	国家	关键特性/类型 of support	覆盖范围
DEWA 绿色充电站倡议 ⁴⁴	阿拉伯联合 Emirates	历史上免费提供公共充电非-商业EV用户	迪拜公共充电基础设施网络
沙特愿景2030 ⁴⁵	沙特阿拉伯	直接政府对电动汽车的投资制造和公共部署通过e-bus服务公共运输管理局(PTA)	主要城市的公共交通车队，包括机场穿梭巴士服务
卡塔尔国家愿景2030/电动汽车策略 ⁴⁶	卡塔尔	免税补贴注册费用，关注实现同等TCO商业船队	所有车辆，重点关注公共交通和商业船队

注意：并非所有这些补助金和激励措施都可能适用于机场。

贡献者

世界经济论坛

利亚·巴巴拉
头部，气候战略

达里奥·卡莫·达尔·奥托
专家，未来机场

佩德罗·戈麦斯
头部，行业议程

乔治·帕罗里尼
铅，航空脱碳

亚历山大·德·基罗·科德罗
铅，未来的机场

致谢

论坛感谢以下专家，没有他们的贡献，这份白皮书不可能完成。然而，本文不一定反映这些个人或其公司的观点。专家建议仅供参考，并不表示与本白皮书所提出的要点或结论有任何关联。

ACI世界

詹妮弗·德·沙纳耶
高级总监，环境保护与可持续发展

胡安·曼努埃尔·曼里克斯
总监，安全

索菲娅·奥尔莫斯
经理，环境保护与可持续发展

安派尔

凯文·诺尔特克
联合创始人兼首席执行官

飞升

贝诺阿·费兰
联合创始人兼首席技术官

阿特金斯雷利斯

尼尔·戴维斯
资深公交和铁路规划专家

凯德·佩珀雷尔
高级可持续发展与碳顾问

亚历克斯·辛克莱
战略增长客户总监

超越航空

艾瑞·克尔伯里欧
机场运营经理 铅H²

卡尔森能源

杰森·范·吉尔
总统

COBUS

Nuno Lago de Carvalho
首席商务官；执行委员会委员，CaetanoBus

安德里亚斯·冯克
销售总监

保罗·马奎斯
首席技术官

Joana Mota Trindade
客户服务及售后负责人

帕特里夏·瓦斯科内洛斯
首席执行官

dnata

罗伯特·鲍威尔
阿联酋技术服务副总裁；全球GSE战略

迪拜机场

阿克布丁·阿洪
高级经理，可持续发展战略

斯文·德克尔斯
总监，可持续性、战略与规划

Electra Aero

戴安娜·西格尔
VP商业

费尔韦亚尔

卡洛斯·德·里奥·加达里拉斯
高级经理

日内瓦机场

盖埃尔·普瓦捷
首席军事官

多伦多机场管理局

托德·厄恩斯特
总监，能源与环境

斯特凡尼娅·索蒂莱
环境副总监

日立零碳

康拉德·扬森
业务发展主管，电动移动和智能车队脱碳

汇丰控股

布莱恩·马修·皮尔斯
全球可持续交通和燃料负责人

HYCAP

克里斯蒂安·塔贝
GCC负责人

门齐斯航空

乔纳森·汉金
副总统，GSE安全和可持续发展

凯蒂·里德
可持续发展与企业责任负责人

Mundys

罗杰罗·波利
能源与脱碳化总监

索非亚机场

安东扬娜·斯托扬诺娃
ESG总监

奥格尼安·特兰迪法洛夫
策略分析师

S&P 全球

尼克·埃德斯特罗姆
氢管理编辑

爱丽丝·曼森
能源转型高级副总裁

韦斯利·蒙蒂罗
中东市场参与经理

世界经济论坛也对以下参与剑桥大学MBA全球咨询项目和伦敦帝国学院MSc咨询项目的剑桥大学和伦敦帝国学院学生表示感谢，他们为这项分析做出了贡献。

剑桥大学

Christian Conitsiotis , MBA
Sander D'hondt , MBA Rika
ko Osanai , MBA Mitali Wa
ghmare , MBA Yu Zhang ,
MBA

伦敦帝国学院

阿卜杜拉齐兹·阿尔法贾，商业分析硕士学生尼希塔·巴
多拉，商业分析硕士学生老潭·法吉，商业分析硕士学
生阿迪布·卡蒂布，商业分析硕士学生阿布·蒙古诺，商
业分析硕士学生瑞安·普里马迪，商业分析硕士学生卡
纳·索达尼，商业分析硕士学生

生产

阿尔伯特·巴迪亚·科斯塔
设计师

比安卡 盖-富康尼斯
设计师，1-协议版

马德赫·辛格
编辑

脚注

1. 国际机场理事会世界 (ACI世界) , (2025年1月28日) , 联合ACI世界-国际民航组织旅客运输报告、趋势和展望[新闻稿] <https://aci.aero/2025/01/28/joint-aci-world-icao-passenger-traffic-report-trends-and-outlook/>
2. 迪拜机场 , (2025年1月30日) , 迪拜机场在2024年实现了年度最高客流量，庆祝其成为全球最繁忙的国际机场[新闻稿]。 <https://media.dubaiairports.ae/dxb-records-highest-annual-traffic-in-2024-celebrating-a-decade-as-the-worlds-busiest-international-airport/>
3. 科布斯工业公司 , (2021年秋季) , dnata将其迪拜停机坪巴士运营基于质量。 https://www.cobus-industries.com/wp-content/uploads/2021/11/Airside-International_Autumn-2021_dnataCOBUS.pdf
4. 世界经济论坛 , 未来的机场 , (2023年11月) , 为未来的机场融资：绿色转型工具包[白皮书] <https://www.weforum.org/publications/financing-the-airports-of-tomorrow-a-green-transition-toolkit/>
5. 欧洲联盟 , (2024年5月20日) , 关于进入社区机场地面服务市场的1996年10月15日理事会指令96/67/EC <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1996/67/oj>
6. 罗马 机场 , (2022) , 综合年度报告 , https://www.adr.it/documents/17615/27825263/ADR_RAI_2022_ENG.pdf
7. mundys , (2025年3月14日) , E-Shuttle车队：罗马机场的可持续创新[新闻稿] <https://www.mundys.com/en/w/e-shuttle-fleet-sustainable-innovation-at-rome-airports->
8. irizar电动出行 , (2025年7月9日) , irizar电动出行将为伦敦盖特威克提供电动巴士[新闻稿] <https://irizar-emobility.com/en/events-and-latest-news/news/irizar-e-mobility-will-provide-london-gatwick-with-electric-buses>
9. 多伦多皮尔逊 , (2023年7月6日) , 多伦多皮尔逊机场和卡尔森能源宣布为轻型及重型车辆启用安大略省首个公共氢燃料加注站 [新闻稿] <https://www.torontopearson.com/en/corporate/media/press-releases/2023-07-06>
10. 日内瓦机场2024年度报告 (2024) , 日内瓦机场[报告] , https://www.gva.ch/getmedia/173727de-4dac-4f26-9791-4568aa933d5e/Rapport_Annuel_2024_EN.pdf
- 11.航空业新闻 (2022年5月9日) , 爱丁堡机场使用HVO燃料为场内车辆供电 <https://airportindustry-news.com/edinburgh-airport-uses-hvo-fuel-to-power-airside-vehicles/> ; 机场世界 (2024年11月5日) , 伦敦卢顿机场投资新款可持续巴士车队 <https://airport-world.com/london-luton-airport-invests-in-new-sustainable-bus-fleet/> ; 航空专家 (2024年5月21日) , 伦敦希思罗机场将部署HVO、电动COBUS客运车辆 [新闻稿] <https://www.aviationpros.com/directory/passenger-loading-systems/press-release/55041407/cobus-industries-gmbh-london-heads-to-deploy-hvo-electric-cobus-passenger-vehicles>
- 消除可再生生物甲烷巴士 12.机场世界 , 2020年8月26日 , 慕尼黑机场发布CO₂ <https://airport-world.com/renewable-bio-methane-fuelled-bus-to-help-munich-airport-further-reduce-co2-levels/>
13. 欧洲委员会 , 欧洲清洁城市交通的氢能 <https://trimis.ec.europa.eu/project/hydrogen-clean-urban-transport-europe>
14. 国际机场理事会 (ACI) 世界 (2025年2月11日) , 电池或氢燃料驱动的飞机的操作概念 (CONOPS) <https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/concept-of-operations-of-battery- and-hydrogen-powered-aircraft-at-aerodromes.pdf>
15. 标准普尔全球评级 (2023年5月5日) , 希思罗机场融资 https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/investor/credit-ratings/sp/Ratings_Summary_RatingsDirect_HeathrowFundingLtd_54814058_May_05_2023.pdf ; 皇家史匹坦集团2024年度报告(2024), 财务表现 https://assets.ctfassets.net/biom0eqyyi6b/5Xy4TNquAYI0MFsZMPA17A/f14da5395610e29c3d72fd7b24de744c/Financial_performance.pdf ; 弗拉普尔特2022年年度报告 , 综合管理报告 , <https://www.annual-report.fraport.com/annual-report/2022/en/combined-management-report/situation-of-the-group/control-system/#:~:text=The%20WACC%20is%20also%20used,%2C%202021%3A%206.1%25>
16. 欧洲中央银行 (2025年4月2日) , 欧元区银行利率统计数据 : 2025年2月 [新闻稿] <https://www.ecb.europa.eu/press/stats/mfi/html/ecb.mifri2504~86702ea969.en.html>
17. 路透社 (2025年4月30日) , 行业协会和企业呼吁英国和欧盟连接碳市场 <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/industry-groups-business-call-britain-eu-link-carbon-markets-2025-04-30/>
- H动力航空基础设施 : 从初步开发到市场 18. F. 施耐克 (2025) , 规划LH² ² 渗透 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261925013935?via%3Dihub>
- 19.世界经济论坛未来机场 (2025年4月) , 机场发展成为能源枢纽的路径 https://reports.weforum.org/docs/WEF_AoT_Pathways_for_Airports_to_Develop_into_Energy_Hubs_April_2024.pdf
20. 美国能源部 (2024年5月) , 机场零排放车辆 (ZEV) 和基础设施激励 <https://afdc.energy.gov/laws/10394>
21. 美国交通运输部 (2025年) , 低排放或零排放拨款计划-5339(c) <https://www.transportation.gov/rural/grant-toolkit/low-or-no-emission-grant-program>

22. 伊利诺伊州清洁交通联盟 (2025年7月)，资金来源 <https://il-act.org/resources/funding-resources/>
23. 同上24 24。加利福尼亚州能源委员会，清洁交通项目 <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program>
25. 德克萨斯州北部中央地区政府合作委员会 <https://www.nctcog.org/trans/quality/air/funding-and-resources/volkswagen-settlement>
26. 同24 27. 同24 28. 乔治亚电力，电动汽车充电器额外退款 <https://www.georgiapower.com/business/products-programs/business-solutions/electric-transportation-business-programs/electric-vehicle-charger-rebate.html>
29. 美国能源部 (2025年)，电动汽车 (EV) 充电器补贴 <https://afdc.energy.gov/laws/6578>
30. 科罗拉多多能源办公室 (2025年10月)，车队零电动汽车充电拨款 <https://energyoffice.colorado.gov/fleet-zero>
31. Ryan, 零排放交通基金 (2025) <https://funding.ryan.com/government-funding/capital-investment/zero-emission-transit-fund/>
32. 同上 33 33. CAA AMA，电动汽车补贴 <https://ama.ab.ca/electric-vehicles/buying/rebates>
34. 插件 (不列颠哥伦比亚省) BC <https://pluginbc.ca/goelectricrebates/>
35. BC Hydro Power Smart，电动汽车队规划及基础设施的激励措施 <https://www.bchydro.com/powersmart/electric-vehicles/industry/fleets/incentives.html>
36. 超荷电 (2025年2月6日)，阿尔伯塔省为企业、共管公寓和市政府提供新的电动汽车充电资金 <https://hypercharge.com/blog/new-alberta-ev-charging-funding-for-businesses-condos-and-municipalities/>
37. zemo合伙企业加速交通实现零排放，拨款资金与激励措施 <https://www.zemo.org.uk/work-with-us/buses-coaches/low-emission-buses/grant-funding-incentives-.htm>
38. 同上39 39. 可持续公交车，(2025年7月9日)，德国启动新的全国性资助计划，以促进零排放公交车的采购，包括改造 <https://www.sustainable-bus.com/news/germany-bmv-funding-zero-emission-buses-2025/>
40. Electrive (2025)，巴伐利亚州在2024年为220辆电动公交车提供补贴。 <https://www.electrive.com/2025/02/18/bavaria-granted-subsidies-for-220-electric-buses-in-2024/>
41. 欧洲汽车制造商协会驾驶机动性为欧洲，(2025)，税收优惠和激励 <https://www.acea.auto/files/Zero-emission-commercial-vehicles-Tax-benefits-purchase-incentives-2025.pdf>
42. 欧洲委员会，欧洲替代燃料观测站 <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/spain/incentives-legislation>
43. 欧洲委员会 (2025年2月11日)，替代燃料：欧盟拨款4.22亿欧元推动零排放交通 <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/news/alternative-fuels-eu422-million-eu-funding-boost-zero-emission-mobility>
44. yocharge (2024年6月28日)，以节省成本提升动力：迪拜电动汽车车队补贴 <https://yocharge.com/news/ev-fleet-incentives-in-dubai/>
45. Setupinsaudi.com (2025)，沙特愿景2030：电动汽车进展 <https://www.setupinsaudi.com/en/saudi-vision-2030-progress-in-ev>
46. Tazweed (2025年2月20日)，卡塔尔的电动汽车：购买或租赁前您需要了解的事务 <https://qatar.tazweedapp.com/articles/electric-cars-in-qatar-what-you-need-to-know-before-buying-or-renting>



COMMITTED TO
IMPROVING THE STATE
OF THE WORLD

世界经济论坛致力于改善世界
状况，是公私合作国际组织。

论坛邀请社会最顶尖的政治
、商业及其他领袖来塑造全
球、区域和行业议程。

世界经济论坛
91-93 路德维希大道 CH-12
23 科隆尼/日内瓦 瑞士

电话 : +41 (0) 22 869 1212
传真 : +41 (0) 22 786 2744
contact@weforum.org www.weforum.org