

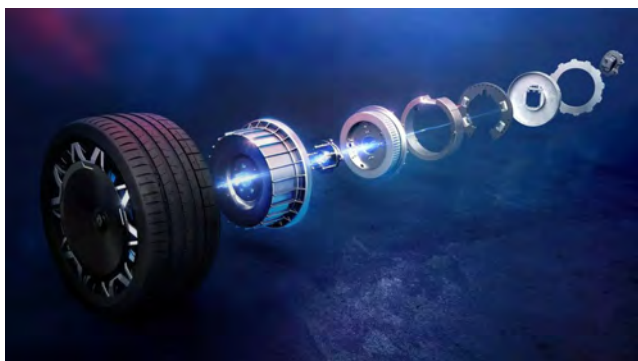
轮毂电机：电动汽车的变革性创新为何迟迟未普及？

文 | Andrei Nedelea 翻译 | 杨惠

费迪南德·保时捷(Ferdinand Porsche)早在 1900 年，便设计出全球第一辆前驱电动汽车 Lohner Porsche，为弥补原始铅电池的不足，该车还配备了汽油发动机，堪称如今“增程式电动汽车”的雏形。这款创新车型中，一项常被忽略的技术便是轮毂电机——1896 年保时捷已在英国为其注册专利，最终凭借这项技术诞生了全球首款全轮驱动车辆。与常见的内置电机不同，轮毂电机直接集成在车轮内部，无需复杂的传动轴或差速器。



1901 年保时捷的轮毂电机



轮毂电机能更直接地将动力传输至路面，有望实现更高效的动力传输与设计灵活性，还具备诸多其他优势，似乎也是低成本将传统燃油车改造为混合动力车的绝佳方式。然而，尽管部分汽车制造商和科技供应商曾进行尝试，却未取得实际成果。为何我们在量产电动汽车上极少见到轮毂电机，也未见到其作为第三方解决方案用于汽车电动化改造呢？



雷诺的电池方案

轮毂电机的显著优势

在传统电动汽车中，动力电池为驱动车轮的电机供电。多数现代电动汽车配备一个电机驱动前轮或后轮，或配备两个电机实现全轮驱动，部分车企甚至为车型增加三个乃至四个电机以获取更强动力。但这些电机均安装在车轮之间的内侧，集成于驱动桥内。既然电机尺寸日益缩小，为何不能将其安装在车轮内部呢？



雷诺的电池方案

保时捷早期的电动车

将电机安装在车轮内显然是增加车辆内部空间的好方法，既可为更大容量电池腾出空间，也能直接增加车内载货空间或乘客空间。轮毂电机还能简化电动汽车平台设计，更轻松调整轴距和轮距，使在同一平台上生产前驱、后驱和全轮驱动车辆成为可能，且只需进行少量改动。这种低复杂性无疑能帮助初创企业降低工程和制造的前期成本，缩短汽车制造时间，为新兴公司提供更大成功机会。

轮毂电机的另一大显著优势是大幅降低传动系统损耗。内燃机车辆的动力需经变速箱、差速器和传动轴传递至车轮，这些部件都会产生损耗；即便当前的电动汽车仍配备减速齿



轮、差速器和传动轴，动力从电机传递至车轮时仍会有部分能量损失。而将电机置于车轮内部直接驱动车轮，可减少摩擦力和能量浪费，不仅能确保电机大部分功率传递至地面，这种更简单、经济的传动系统还能增加续航里程。

此外，轮毂电机可实现更精确的扭矩控制和分配，不仅可模拟限滑差速器功能，还能进一步提升性能，通过精确控制每个电机达到传统方式无法实现的牵引力水平。

面临的多重挑战

与将电机置于车轮之间相比，轮毂电机虽有诸多优势，却也带来新问题。

首先是重量问题。轮毂处总质量增加，悬挂部件承受的额外重量会影响车辆舒适性、抓地力和操控精度。电动机转子可能直接与轮子相连，定子则固定在悬架上。由于定子实际已成为轮子的一部分，会增大转动惯量，使其更难改变速度和方向，降低车辆加速与转向的灵活性。虽可通过将沉重刹车装置置于车轮内侧弥补，但这会增加悬架和副车架的设计复杂性，很可能抵消轮毂电机的诸多优势。

其次是耐用性问题。轮毂电机承受的冲击远大于车体内部的电机。轮胎和悬挂系统遭受的任何损坏，都可能以某种方式传递至电机。路面坑洼或不平整会使电机受到震动，影响轴承、转子等运动部件的使用寿命。同时，电机长期接触水、雪和盐，可能加速密封件磨损，甚至渗入电机内部引发故障。

第三是散热难题。工程师或许能设计巧妙的车轮结构散热，也能找到将冷空气导向电机防止过热的方法——许多高性能汽车就采用类似方式冷却制动系统，但这种方法对驱动单元的散热效率可能不高，因为无法直接冷却发热的内部组件。

此外还有安全问题。从电池到电机的传动系统中铺设的高压电缆，在车辆因碰撞失去车轮时可能暴露，对车内人员及周围紧急救援人员构成严重触电危险。虽可通过某些方式降低风险，但会给本以简单性为特色的系统增加复杂性。而轮毂电机的稀缺性推高了其价格，经济因素在很大程度上影响了汽车制造商的采用意愿。

技术的持续创新探索

不过，目前仍有部分企业在努力推动轮毂电机上车应用。当前，仅有东风和雷诺的轮毂电机在量产车上得到应用。

2023年3月，东风推出的E70搭载ProteanDrive Pd18轮毂电机，成为全球首款完成轮毂电机乘用车认证公告的车型；同年4月，东风旗下岚图“追光”搭载轮毂电机亮相上海车展；11月，搭载东风14吋轮毂电机的纳米01在广州国际车展正式亮相，其采用电动轴与两个轮毂电机的组合，能实现类似“坦克掉头”的功能。

2025年3月，雷诺正式发布R5 Turbo 3e，这是全球首款搭载量产轮毂电机的车型，配备两个轮毂电机，每个后轮由一个电机单独驱动，功率达400千瓦。雷诺强调，轮毂电机的一大优势是响应速度快，“效果类似过去的涡轮增压器，但无延迟时间”。对每个车轮功率分配的精细控制，能使车辆在高速转弯时表现更出色，还可实现标准漂移模式。该车型采用集制动盘于一体的驱动单元，节省了后桥重量和空间，需配备20英寸轮毂适配驱动单元，每个单元可产生268马力（约200千瓦），总峰值功率达540马力（约402千瓦），峰值扭矩达4800牛·米。雷诺预计，该车能在约3.5秒内加速至62英里/时（约100公里/时），极速可达167英里/时（约270公里/时）。

现代汽车是少数研发轮毂电机的车企之一，其“单轮（Uni Wheel）”项目旨在为电动汽车及其他产品设计多种驱动装置，强调优化空间布局 and 增加车内空间等优势。该制造商表示，未来计划在从小型汽车到高性能电动汽车的各类车型中使用轮毂电机。

汽车传动系统供应商Neapco与轮毂电机专家Elaphe合作，专门设计出“超级熊（SuperBear）”轮毂电机，凸显上述优势。其驱动单元内置两速变速箱，设计用于安装在常规商用级轮毂上，适用于前轮和后轮驱动场景。

2023年，Lordstown Endurance皮卡曾配备4个Elaphe轮毂电机，可惜未能量产。此次失败可能因采用独特电机及配备小电池的增程式电动系统，过于超前于时代。增程式电动汽车虽可能成为下一个热门品类，但目前尚无增程式汽车安装轮毂电机。

总部位于英国的轮毂电机技术初创公司Protean Electric成立于2008年，专注为乘用车、商用车及更重型车辆研发轮毂电机，东风采用的正是该公司产品。其最新第五代Proteandrive电机功率达138马力（约102千瓦），在4电机配置下总功率可达552马力（约411千瓦）。该电机可安装在18英寸车轮内，据公司称适用于重达11400

磅（5.2吨）的车辆。

DeepDrive是电动汽车领域的创新型公司，基于双转子设计开发出新型轮毂电机技术，在效率、成本降低和功率密度方面有显著改进，能更高效利用磁通量，实现更高功率密度。该技术在材料节省上优势明显，所需磁性材料减少50%，铁减少80%，且无需重稀土磁铁。采用DeepDrive技术的车辆效率可提升多达20%，每立方米成本降低30%，这意味着电动车价格可进一步压低，更利于消费者。不过，该技术也存在挑战：较低转速使其用于高性能车时需配合2挡变速箱；更高的制造工艺要求会增加生产流程复杂性；应用于现有车辆平台时，在设计调整和兼容性方面存在挑战。目前，该公司正与十大汽车制造商中的八家合作，预计2028年将该电机整合到量产车辆中。

轮毂电机还有外置式类型。与完全集成到轮毂中的传统轮毂电机不同，外置式轮毂电机通常安装在轮子上，不直接集成于轮毂内。其优势在于：承受的机械应力小于完全集成式电机，更坚固，不易出现轴承故障或磨损等问题；散热性能更好，能提升整体性能和电机寿命；车辆设计灵活性更高，车企可更好地根据不同需求调整车辆架构，不必受限于特定轮毂尺寸或设计，为平台设计优化开辟新可能。此外，这些电机通过直接作用于轮子提供更好的牵引力和加速性能，使动力传输更高效。

尽管轮毂电机目前尚未成为主流产品，但其在革新车辆设计和功能方面的潜力毋庸置疑，且在特定应用中展现出颇具前景的优势。它们在城市车辆、混合动力车及独特汽车设计中的潜力仍在不断探索。随着Protean等创新公司开发出可扩展解决方案，轮毂电机的实际应用价值或许很快就能实现，其采用可能会重新定义汽车行业的效率、设计和性能。

MFC

