

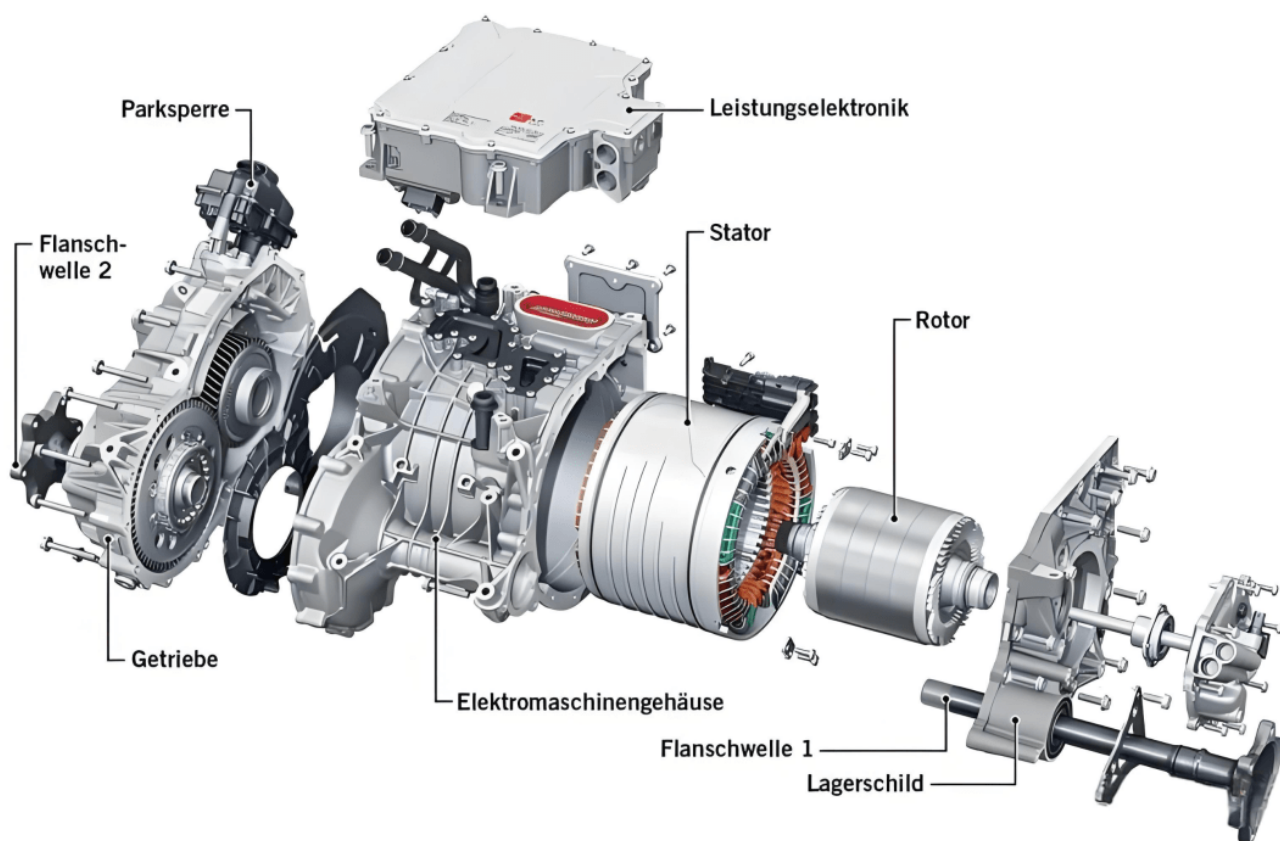
汽车驱动电机突破3万转，为何能在短期内实现飞跃式突破？

文 | 智能车研究所

在短短数年的时间内，电动汽车驱动电机的转速取得了令人瞩目的重大突破，从昔日的1万转迅猛攀升至现今的3万转，这无疑是一次具有里程碑意义的实质性跨越。以小米超级电机V8S为例，其转速高达27200转，充分展露了强大的动力特质。而比亚迪最新披露的电机表现则更为卓越，

最高转速成功突破3万转，达到了令人拍案叫绝的30511转。

在这令人心潮澎湃的成就背后，实则是多种因素相互交织、协同发力的产物。技术革新毋庸置疑是其中最为关键的要素之一，众多科研人员坚持不懈地探索新的材料和制造工艺，从而在极大程度上提升了电机的转速和效率。



扁线绕组技术迭代

早期的圆线电机存在一系列问题。其一，铜线填充率偏低（仅为 40% ~ 50%），由此导致电阻增大、发热增多，能量转化效率低下；其二，铜线间隙较大，从而引发磁力泄漏和涡流损耗，进一步加剧了噪音；其三，绕组结构较为松散，致使体积功率密度仅为 3.5kW/L，难以契合轻量化的需求。

扁线绕组工艺的日臻成熟，极大程度地推动了电机转速的提升。

2007 年，通用汽车于 DOE “先进集成驱动系统” 项目框架之中启动了扁线电机的研发工作，开创性地提出波绕组 + 开口槽结构的径向嵌线与轴向插线这两种技术方案。

2011 年，雪佛兰 Volt 车型所搭载的轴向插线式 Hairpin 绕组电机（MotorB），达成了该技术在新能源汽车领域的首次工程化应用。

2014 年，雪佛兰 Spark 运用数控精密成型技术，将绕组端部尺寸缩减 18%，直流电阻降低 22%，这一举措标志着扁线制造工艺取得了重大突破。

2017 年，雪佛兰 Bolt 通过增加每槽导体层数（达 8 层）以及优化槽绝缘结构，有效地抑制了高速工况下交流电阻的上升态势，使电机功率密度提升到了 8.5kW/kg。

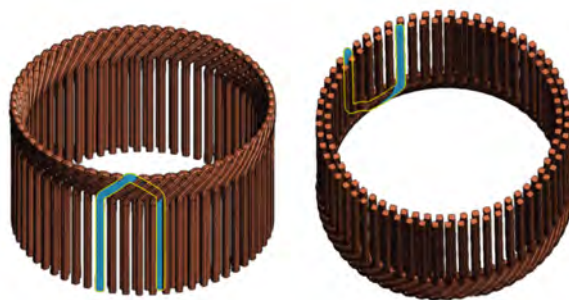
目前，扁线绕组电机在新能源汽车领域应用广泛。其绕组形式多样，常见的有 Hair - pin 绕组、I - pin、X - pin 以及连续波绕组等。

Hairpin 绕组（发卡式）

Hair - pin 绕组是最普遍且制造工艺成熟的形式，应用于丰田 Prius2017、Tesla Model Y 等车型。

Hair-pin 绕组运用漆包扁铜线预先弯曲成“H”形发卡状结构，插入定子槽后仅需于单侧进行焊接成型。扁铜线需

借助模具预弯成发卡形状，而后插入定子槽内，相较于 I-pin 绕组的直插式工艺，此工艺更为繁杂但也更具条理。



单边焊接，焊接端仅需处理一端，减少了焊点数量，降低了工艺的复杂程度。漆包扁线表面覆盖有绝缘涂层，能够在相同截面积下容纳更多导线，显著提高定子槽的铜线填充率（槽满率约 70%）。核心流程包含插绝缘纸、发卡成型、插线、端部分离（扩口）、扭头、焊接以及绝缘处理（如滴漆或涂粉）。

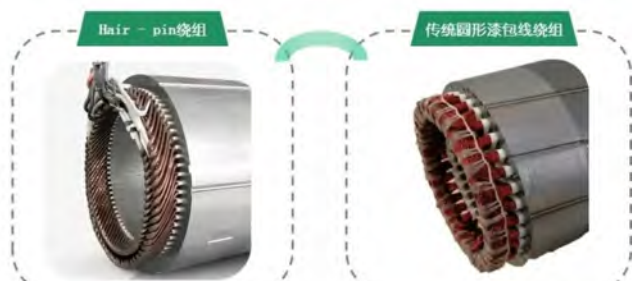


Hair - pin 绕组使得高槽满率与效率提升，槽满率较传统圆线电机提升 20% ~ 30%，降低了电阻和铜损，减少了能量损耗。端部尺寸缩短，端部尺寸缩短 5 ~ 10mm，进一步削减了端部绕组铜耗。紧凑结构，导线间通过扁铜线直接连接，形成紧凑的端部结构，降低了电阻、电感和电容的寄生效应，优化了电磁性能。更高的槽满率和更低的损耗使电机功率密度显著提升，适用于高功率需求场景。

局限性

工艺成本高昂：预成型和焊接工艺需要配备专用设备，初期投资规模颇为庞大。

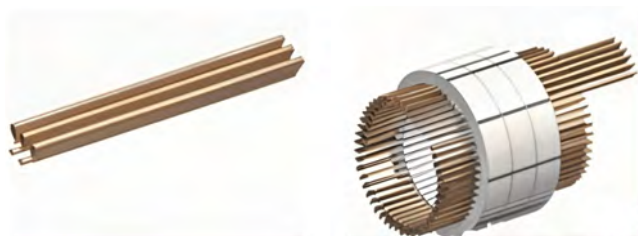
高频损耗问题：在高频工况之下，集肤效应或许会致使铜损有所增加，需通过优化导线排列的方式予以缓解。



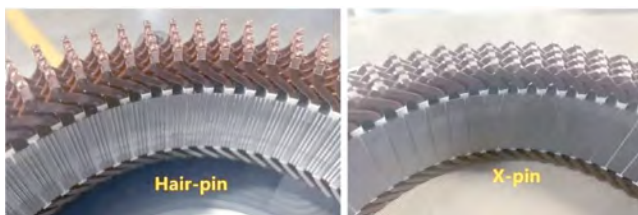
I-pin/X-pin 绕组

I-pin/X-pin 绕组是保时捷 Mission R 概念车搭载的新一代电机技术，通过创新的工字型 / X 型截面导体设计，将定子槽满率提升至 75%（传统扁线电机为 69%），实现单位体积功率密度提升 20% ~ 30%。

I-pin 绕组采用双平面工字型截面设计，通过独立逐槽插入技术实现动态成型，较传统 Hair-pin 绕组省去预弯工序，铜线长度缩短 8%、电阻降低 4.3%。



X-pin 绕组在 I-pin 基础上引入交叉端部结构，通过三维空间布局将槽满率从 74% 提升至 75.2%，端部高度缩减 27mm 的同时，交流电阻进一步降低 7%，显著提升电机功率密度和高效运行效率。



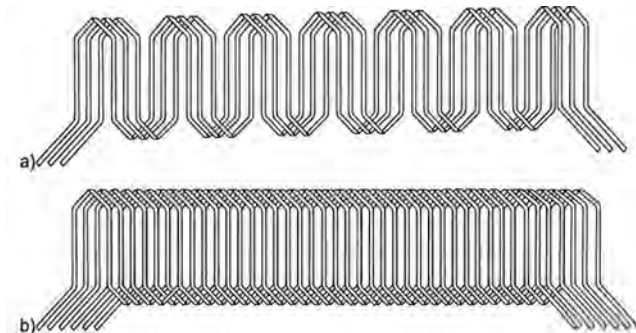
其核心优势包括：通过独立逐槽插入工艺缩短铜线长度，结合交叉端部结构降低 27mm 轴向尺寸；配合直油冷却系统，在 800V 高压平台下实现 1100PS 峰值功率输出。该技术需专用成型设备完成导体动态去皮、三维弯型等复杂工艺，单根成型时间 3 秒，对设备精度和产线智能化要求极高，目前联合电子等厂商已实现规模化量产。

I-pin/X-pin 绕组技术通过结构创新和工艺革命，重构了电机性能边界。随着第三代半导体技术的融合发展，预计到 2027 年，该技术将使电机系统效率突破 97%，推动新能源汽车向“零热衰减”时代迈进。

连续波绕组

连续波绕组的结构特点是通过特殊的绕制方式，使扁线呈连续的波状排列，焊点较少，设计灵活性高。不对称的绕

组结构可能增加电机附加损耗，导致局部过热。



连续波绕组颠覆了圆散线绕组和扁线发夹绕组的设计方法和理念，充分利用股线并绕、换位节距选择平衡漏磁链，可使附加损耗降到最低。兼顾圆散线绕组绕制和下线工艺优势，省去扁线发夹绕组的槽部插线、端部扭转、焊接等工艺过程，降低生产成本。



连续波绕组在一些对电机效率和工艺成本有较高要求的领域有一定应用前景，但由于绕组排布困难，容易交叠，放入定子槽中较困难，目前应用范围相对较窄。

超薄电工钢片铁芯工艺优化

随着电机性能要求的不断提升，超薄无取向电工钢作为定子铁芯的核心材料，其制造工艺对于电机性能有着至关重要的影响。上海交通大学所开展的“超薄电工钢片定子铁芯制造过程的尺度效应及控形控性方法”项目，针对超薄电工钢片的尺度效应以及磁性能劣化机理进行了深入研究。

项目通过构建尺度相关材料本构模型以及冲裁变形和焊



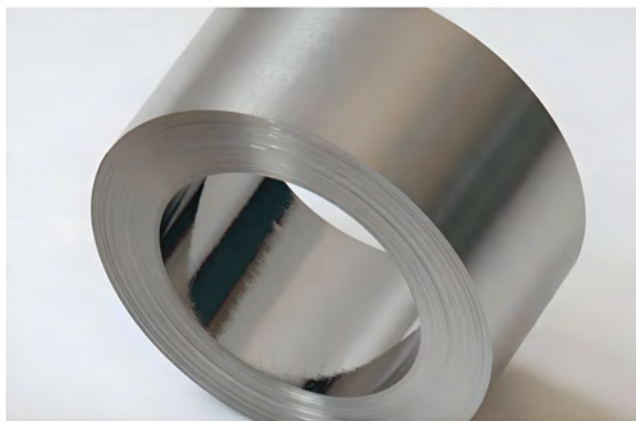
接过程仿真建模的方法，精准预测铁芯制造过程中材料的流变特性与断裂行为。与此同时，引入冲裁、焊接等制造效应，构建力、热、电、磁多场耦合模型，达成铁芯制造精度与电磁性能的综合把控。凭借该项目所研发的技术，成功明确了冲裁的最优间隙和激光焊接的工艺窗口，并应用于新能源汽车驱动电机的制造，降低了电机磁性能的损耗。

非晶 / 纳米晶合金铁芯制造工艺改进

非晶、微晶及纳米晶合金材料在轴向磁通电机铁芯应用中具有优异的磁性能和低损耗特性。美国 Honeywell 公司、日本日立公司、美国梅特格拉斯公司等非晶定子铁芯制造工艺上不断探索。安泰科技股份有限公司在 2008 年提出先热固化处理制备非晶块体，再整体切割成型的方法，减少了拼接处气隙，提高了铁芯磁性能。

深圳华任兴科技有限公司提出拼接法，突破了非晶合金带材宽度限制，实现大尺寸定子铁芯的制造。在制造过程中，通过优化切割参数、采用超硬合金模具等方式，提高切割精度，减少废料；采用无机或有机绝缘涂层，减少层间涡流损耗；在低氧环境下进行热处理，改善纳米晶结构，提升铁芯性能，为高转速电机提供支持。

碳纤维以其高强度、高模量、低密度等特性，成为制造



非晶带材

高速电机转子的理想材料。在材料性能优化方面，通过改进碳纤维编织工艺、树脂基体配方以及复合材料成型技术，提升碳纤维转子的力学性能、热稳定性和耐腐蚀性。在结构设





计上,采用空心轴结构、多层复合结构等,降低转子转动惯量,提高系统动态响应能力和能量转换效率。

在制造工艺上,碳纤维转子制造涉及预浸料制备、铺层设计、模具制造、固化成型等多个环节。通过引入先进自动化制造设备和精密加工工艺,实现对制造过程的精确控制,提高产品质量和一致性。小米通过激光转子缠绕技术,利用激光固化套筒,避免湿法缠绕的热胀冷缩问题,带来1000MPa的预紧力和更高的制造良率,使电机转子在实验室中成功实现35000转的惊人转速。

冷却结构一体化铸造

为提升电机散热能力,保障高转速下的稳定运行,机壳制造工艺不断创新。福建省科技厅主导的大功率永磁伺服驱动电机项目,采用水冷结构,将金属管材卷绕成环形流道,

通过铸造方式直接铸在电机壳中。

这种一体化铸造工艺,无需金加工机壳内套、外套和焊接工序,不仅节省了加工时间和材料浪费,提高了生产效率,还增强了机壳的可靠性,有效提升了电机的散热强度和功率密度。

从绕组到铁芯,从转子到机壳,零部件制造工艺的每一次进步,都为汽车驱动电机转速的提升筑牢根基。在零部件制造工艺与技术革新、市场需求和产业协同的共同推动下,未来汽车驱动电机有望在更高转速、更高效率、更高功率密度的道路上继续前行,为电动汽车产业的发展注入新的活力,引领未来出行的变革。MFC