

面向新能源汽车的电机控制器硬件集成与轻量化设计

何宏波

西安智德汽车电子控制系统有限公司 陕西 西安 710200

摘要：本文聚焦于新能源汽车电机控制器的硬件集成与轻量化设计。首先阐述了电机控制器在新能源汽车中的关键地位及其面临的挑战，接着深入探讨了硬件集成设计策略，包括功能模块整合、电路优化布局等方面，以实现高效集成。同时，详细分析了轻量化设计的路径，涵盖材料选择、结构创新等。最后通过实例验证了集成与轻量化设计对提升电机控制器性能、降低能耗及成本的重要意义，为新能源汽车电机控制器的进一步发展提供理论支持与实践参考。

关键词：新能源汽车；电机控制器；硬件集成；轻量化设计

引言

新能源汽车作为全球汽车产业转型升级的重要方向，正以迅猛的态势发展。电机控制器作为新能源汽车动力系统的核心部件之一，其性能直接影响整车的动力性、经济性和可靠性。它如同新能源汽车的“大脑”，精准调控电机的转速、转矩等参数，确保车辆在不同工况下稳定运行。

1 电机控制器硬件集成设计策略

1.1 功能模块整合

电机控制器作为新能源汽车动力系统的核心组件，通常涵盖多个功能模块，像功率驱动模块、控制模块、信号采集模块等。传统的模块化设计模式在汽车电子发展的早期阶段发挥了重要作用，它使得各个部分能够独立进行开发、测试与维护，降低了设计的复杂度和风险，便于工程师们针对特定功能进行深入优化。然而，随着新能源汽车技术对性能和集成度要求的不断提高，这种传统设计方式的弊端日益凸显。大量冗余的元件不仅增加了控制器的体积和重量，还使得连接线路错综复杂，这不仅提高了生产成本，还可能因线路间的干扰影响系统的稳定性和可靠性。功能模块整合成为硬件集成的关键方向，其核心思想是将相关功能进行有机融合，去除不必要的冗余部分，从而构建一个更加紧凑、高效的系统。以功率驱动模块和控制模块的整合为例，在传统设计中，功率驱动模块负责将控制信号转换为足够的功率来驱动电机，而控制模块则负责生成和调节这些控制信号，两者通过外部线路进行连接。如今，借助先进的集成电路制造工艺，如系统级芯片（SoC）技术，可以将功率驱动模块中的部分控制电路与主控制模块集成在同一芯片上^[1]。这种一体化设计带来了诸多显著优势，从体积方面来看，芯片内部的高度集成大大减小了控制

器在物理空间上的占用，为新能源汽车有限的车内空间布局提供了更多灵活性；在信号传输方面，由于控制电路和功率驱动电路在同一芯片内，信号传输路径大幅缩短，减少了信号在传输过程中的衰减和干扰，使得系统的响应速度得到显著提升，控制精度也更加精确。例如，在快速加减速等复杂工况下，控制器能够更及时、准确地调整电机的输出参数，为车辆提供更平稳、高效的动力支持。同时，模块间的接口设计优化和标准化通信协议的采用也是提升系统集成度和可靠性的重要环节。通过设计简洁、高效的接口，不同模块之间的连接更加稳固，减少了因接触不良等问题导致的故障风险。而标准化的通信协议则确保了各模块之间能够准确、快速地进行数据交互，无论模块来自哪个供应商，都能实现无缝对接和协同工作，进一步增强了系统的兼容性和可扩展性。

1.2 电路优化布局

电路布局的合理性犹如建筑设计的蓝图，对电机控制器的性能和集成度起着决定性作用。在硬件集成设计过程中，需要全面综合考虑电路的电气性能、散热需求以及空间限制等多方面因素，进行精心规划和优化布局。首先，依据电路的功能和信号流向对电路区域进行合理划分是关键一步。在电机控制器中，存在着高频信号电路和低频信号电路。高频信号具有传输速度快、能量集中的特点，但同时也容易受到外界干扰，产生信号失真等问题；低频信号则相对稳定，但传输速度较慢。将这两种不同特性的信号电路分开布置，可以有效避免它们之间的相互干扰。例如，将高频信号电路集中在控制器的一侧，并采取屏蔽措施，如使用金属屏蔽罩或采用特殊的电路板层结构，减少外界电磁场对高频信号的影响；同时，确保低频信号电路与高频信号电路之间保

持足够的距离，防止低频信号受到高频信号的辐射干扰。对于功率电路部分，由于其承载的电流较大，功率损耗也相对较高，因此采用紧凑的布局方式尤为重要。通过缩短功率器件之间的连接距离，可以降低线路电阻和电感。线路电阻的减小直接减少了功率在传输过程中的损耗，提高了能源利用效率；而线路电感的降低则有助于减少电磁干扰的产生，避免因电感引起的电压波动对电路造成损害。此外，合理安排散热通道是保障功率器件稳定运行的关键。功率器件在工作过程中会产生大量热量，如果不能及时散发出去，会导致器件温度升高，性能下降，甚至损坏。因此，在设计电路布局时，要充分考虑散热器的位置和散热风道的走向，确保热量能够顺畅地散发到周围环境中。例如，将功率器件安装在靠近散热器入口的位置，使冷却空气能够优先带走器件产生的热量；同时，合理设计散热风道的形状和尺寸，避免出现气流死角，提高散热效率。其次，多层电路板设计技术的运用为提高电路集成度提供了有力支持^[2]。传统的单层或双层电路板由于空间有限，难以满足复杂电路的布局需求。而多层电路板通过增加电路层的数量，充分利用了电路板的空间资源。在多层电路板设计中，合理规划各层电路的功能至关重要。一般来说，将电源层和地层进行专门设置，电源层为各个电路模块提供稳定的电源供应，地层则为信号回流提供低阻抗路径，减少信号干扰。信号层则用于布置各种信号线路，通过将不同功能的信号线路分布在不同的信号层上，并采用合理的层间隔离措施，可以有效提高电路的抗干扰能力和信号传输质量。此外，表面贴装技术（SMT）的广泛应用也是实现硬件集成的重要手段。与传统的插装技术相比，SMT 技术将元件直接贴装在电路板表面，无需在电路板上钻孔，大大减小了元件的体积和占用空间。同时，SMT 技术还提高了电路板的组装密度，使得在有限的空间内可以安装更多的元件，从而实现更紧凑的硬件集成。例如，采用 SMT 技术贴装的芯片封装尺寸更小，引脚间距更窄，能够满足现代电机控制器对高集成度和小型化的要求。

2 电机控制器轻量化设计路径

2.1 材料选择

材料的选择是电机控制器轻量化设计的基石，在满足控制器各项性能要求的前提下，优先选用密度小、强度高、导热性能良好的材料是实现轻量化的关键。对于控制器的外壳而言，传统的金属材料如铝合金凭借其良好的强度和散热性能，在过去的电机控制器设计中得到了广泛应用。然而，随着新能源汽车对轻量化的要求

不断提高，铝合金密度较大的缺点逐渐凸显出来。近年来，碳纤维复合材料以其优异的性能逐渐成为控制器外壳材料的理想选择。碳纤维复合材料具有高强度、低密度的显著特点，其密度仅为铝合金的 1/3 左右。这意味着在保证相同结构强度的情况下，使用碳纤维复合材料制作的外壳重量可以大幅减轻，从而有效降低控制器的整体质量。除了轻量化优势，碳纤维复合材料还具有良好的耐腐蚀性，能够在恶劣的环境条件下长期稳定工作，减少因腐蚀导致的外壳损坏和性能下降问题。同时，它还具备出色的电磁屏蔽性能，可以有效阻挡外界电磁干扰对控制器内部电路的影响，保障控制器的正常运行。例如，在新能源汽车行驶过程中，会受到各种电磁辐射的干扰，如高压输电线路、无线通信设备等产生的电磁波，碳纤维复合材料外壳能够为控制器提供一个可靠的电磁防护屏障，确保其信号传输的准确性和稳定性^[3]。在内部电路板和电子元件方面，基板材料的选择同样对轻量化设计起着重要作用。高频高速覆铜板作为一种新型基板材料，具有较低的介电常数和介质损耗。介电常数是衡量材料在电场中存储电能能力的物理量，较低的介电常数意味着信号在传输过程中受到的阻碍较小，传输速度更快；介质损耗则反映了材料在电场作用下消耗电能的程度，较低的介质损耗能够减少信号在传输过程中的能量损失，提高信号传输质量。因此，高频高速覆铜板能够满足现代电机控制器对高速信号传输的要求，同时其相对传统基板材料重量更轻，有助于减轻控制器的重量。此外，对于一些非关键结构的零件，如固定支架、连接件等，可采用工程塑料等轻质材料替代金属材料。工程塑料具有密度小、成型工艺简单等优点，能够在保证零件基本功能的前提下，显著减轻零件重量，进一步为控制器的轻量化做出贡献。

2.2 结构创新

除了材料选择，结构创新也是实现电机控制器轻量化的重要手段。通过优化控制器的结构设计，去除不必要的结构部件，采用先进的制造工艺，可以在保证控制器性能的前提下，有效减轻其重量。拓扑优化技术作为一种先进的结构优化方法，为电机控制器的轻量化设计提供了有力的工具。拓扑优化是一种基于有限元分析的数学方法，它能够在给定的设计空间内，根据特定的性能目标和约束条件，自动生成最优的材料分布方案。在电机控制器的结构设计中，通过拓扑优化技术，可以对控制器的外壳、支架等结构件进行分析和优化。例如，在设计控制器外壳时，首先确定外壳的承载要求、散热要求等性能目标，以及设计空间、材料属性等约束条

件。然后，利用拓扑优化软件进行计算分析，软件会根据这些目标和条件，自动调整材料在空间中的分布，去除结构中冗余的材料，生成一个既满足性能要求又重量最轻的外壳结构方案。通过这种方式，可以在保证控制器结构强度和刚度的前提下，实现结构的轻量化设计。一体化成型工艺的采用也是结构创新的重要体现。传统的设计中，控制器的外壳和散热结构往往是分开制造，然后通过螺栓等连接件进行组装。这种设计方式不仅增加了零件数量和连接部位，还可能导致结构整体性下降，散热效率不高。而采用一体化成型工艺，如将外壳与散热结构一体化设计制造，可以将两者整合为一个整体，减少零件数量和连接部位。这样不仅能够减轻控制器的重量，还能提高结构的整体性和散热效率。例如，通过注塑成型工艺将外壳和散热翅片一体成型，散热翅片可以直接与外壳相连，形成一个高效的散热通道，使热量能够更快速地从功率器件传导到外界环境中^[4]。同时，优化控制器的内部布局也是实现轻量化的有效方法。合理安排各功能模块的位置，使结构更加紧凑，减少空间浪费，可以在不增加控制器体积的情况下，为其他部件的安装和布局提供更多空间，同时也有助于提高控制器的整体性能和可靠性。例如，将控制模块和功率驱动模块紧密排列，缩短它们之间的连接线路，不仅可以减少信号传输损耗，还能降低因线路过长而产生的电磁干扰，提高系统的稳定性和效率。

3 实例验证与分析

以某款新能源汽车电机控制器为例，通过实施上述硬件集成与轻量化设计策略，取得了显著的效果。在硬件集成方面，对该电机控制器的功能模块进行了深度整合，将功率驱动模块中的部分控制电路与主控制芯片集成在一起，同时优化了电路布局，采用多层电路板设计和表面贴装技术。经过集成设计后，控制器内部的元件数量减少了约 30%，信号传输路径缩短了 40%，系统的

响应速度提高了 20%，功率损耗降低了 15%。在轻量化设计方面，外壳采用了碳纤维复合材料，内部部分结构件采用工程塑料替代金属材料，并通过拓扑优化技术对结构进行了优化。经过轻量化设计后，控制器的整体重量减轻了 25%，同时结构强度和散热性能均满足设计要求。实际装车测试表明，经过硬件集成与轻量化设计后的电机控制器，有效提升了新能源汽车的动力性能和经济性。车辆的续航里程增加了约 8%，加速性能得到了明显改善，同时由于控制器体积和重量的减小，为车辆内部布局提供了更多空间，提升了整车的舒适性和安全性。

结束语

展望未来，随着新能源汽车技术的不断发展，电机控制器硬件集成与轻量化设计将面临更高的要求和挑战。一方面，需要进一步探索更高性能的集成技术和新型轻量化材料，以满足新能源汽车对控制器功率密度和轻量化的更高需求；另一方面，应加强多学科交叉融合，将人工智能、大数据等先进技术应用于电机控制器的设计与优化中，实现控制器的智能化和自适应控制，提升新能源汽车的整体性能和用户体验。相信在不断的研究与创新下，新能源汽车电机控制器硬件集成与轻量化设计将取得更加卓越的成果，推动新能源汽车产业迈向新的发展阶段。

参考文献

- [1] 李智, 刘春伟, 张敏. 新能源汽车双电机控制器试验设计研究[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2023, (11): 13-16.
- [2] 陈登峰, 孙臣玉, 陈雷, 等. 新能源汽车用电机控制器的设计与测试[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(07): 95-99.
- [3] 马伏韬, 马超文, 王坤俊, 等. 电动汽车电机控制器功能安全设计研究[J]. 客车技术与研究, 2025, 47(03): 22-26.
- [4] 田祥杰. 低速电动汽车驱动电机控制器设计[D]. 天津职业技术师范大学, 2024.