

重型卡车动力电池系统轻量化设计

常 训

陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

摘 要：本论文针对重型卡车动力电池系统的轻量化设计展开研究，通过分析动力电池系统的结构特点和使用环境，研究动力电池系统轻量化设计的必要性和技术难点，提出轻量化设计方案。以陕汽某款纯电动重卡为例，运用电芯与电池框架集成技术（Module To Bracket, MTB）对动力电池系统进行轻量化设计。从电芯模组的高度集成、电池框架的结构创新和轻量化材料应用等维度进行优化设计，在保证动力电池系统安全性和可靠性的前提下实现降重25%以上的目标，从而提升动力电池系统的能量密度，为增加了整车续航里程和降低能耗提供了有效解决方案。

关键词：电池系统轻量化；电池包轻量化设计；动力电池框架；MTB技术

引言

近年来我国出台“双碳”战略：二氧化碳排放量于2028年前达到峰值，2035年碳排放总量较峰值下降20%，到2060年前实现碳中和。为了降低汽车的碳排放量，新能源重型卡车产业迎来了前所未有的发展机遇，预计2035年新能源重卡将成为主流。《节能与新能源汽车技术路线2.0》指出新能源汽车的轻量化率要达到35%，研究数据表明在等速行驶工况下，汽车自重降低10%，可增加10%左右的续航里程。目前重型卡车的动力电池系统约占整备质量的30%左右^[1]，因此动力电池系统如何降重是实现整车降低电耗、增价续航的关键措施。当前在电芯能量密度提升有限的情况下，通过动力电池包的结构创新、轻量化材料应用以及生产工艺的革新是实现动力电池系统轻量化的关键技术路径。

1 重型卡车动力电池轻量化技术概述

近几年新能源重型卡车市场化程度不断提升，但电芯的能量密度已达到瓶颈性能提升空间有限。为了提高动力电池系统能量密度，在结构创新方面新技术层出不穷，推动了动力电池系统向高度集成化方向发展，从传统的电芯组成模组，再由模组组成电池包（Cell To Module, CTM）向高度集成的技术路线发展。如电芯直接集成电池包技术（Cell To Pack, CTP）、模组与电池框架集成技术（Module To Bracket, MTB）、电芯直接与车身集成技术（Cell To Body, CTB）等结构创新，电池成组效率大幅度提升。当前主流新能源重卡采用电池包+电池框架方案，电池包需逐层安装在电池框架上，系统质量能量密度及体积能量密度较低，且装配效率低。本文基于MTB技术探讨重型卡车的动力电池系统轻量化技术，该技术通过将模组直接与电池框架集成，减少冗余层级，结合材料、结构以及工艺创新实现轻量化。

2 MTB 技术动力电池包轻量化设计与分析

MTB技术是指将电芯组成模组后直接集成在电池框架上，通过优化电芯模组的结构与电池框架的轻量化，实现了电池包的轻量化、提高系统能量密度及安全性。相较于传统的电池包+电池框架结构，MTB的技术优势在于电池框架有限的空间内布置尽可能多的电芯，增加电量，减少冗余层级，提升动力电池系统的能量密度，继而增加车辆续航里程。

动力电池包的重量主要集中在电芯模组上，其次是结构件。基于MTB技术的动力电池系统轻量化设计方案：从电芯模组优化、电池框架结构创新、轻量化材料应用以及加工工艺优化等方向进行设计。以陕汽某款纯电动重卡为例，采用MTB技术对动力电池系统进行优化设计。陕汽某款纯电动重卡的电池包+电池框架的总体尺寸：长×宽×高 = 2450mm×850mm×1450mm。电池框架采用铸钢件+成型钢材+钣金冲压组成，内置8个电池包，总电量276.5kWh，总重量2243.5kg（电池框架重量392kg+电池重量1699kg+防护罩重量152.5kg）。系统质量能量密度123Wh/kg，系统体积能量密度91.6Wh/L。

2.1 电芯模组优化

电芯模组是动力电池包的核心部件，其结构直接影响电池包的能量密度。选用高强度轻质合金和复合材料作为电池外壳和结构件减轻电池包相关辅件质量是在电芯规格参数确定的情况下，提升系统能量密度的最有效措施^[2]。本方案采用大模组设计，通过优化电芯模组结构，减少模组之间的连接件和支撑结构，降低模组重量，提高能量密度。将电芯紧凑化布置组成小模组（单个模组（1P11S），重量33.5kg，电量8.1kWh），电芯间隙填充石蜡基复合轻质相变材料，提高散热性能；将12个小模组组成大模组安装在水冷板上，大模组重量442kg

(模组重量402kg+水冷板40kg), 电量97.2kWh。

水冷板采用创新设计, 其内部铸造S型水道, 具有水阻低、冷却散热面积大、在冷却水泵的驱动下实现快速散热, 解决大模组热量聚集, 散热困难的问题。通过CFD流体分析在相同的工况下, 采用S形水道的电池包的温度比传统U形水道平均低 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$, 提高了电池包的稳定性和延长寿命。

2.2 动力电池框架轻量化设计

动力电池框架是承载电芯模组及相关零部件的支撑结构, 必须在满足电池包的可靠性和安全性的前提下进行轻量化设计, 同时制造工艺, 材料和结构是相辅相成的, 需找到相适应的先进工艺来共同实现轻量化^[3]。目前适合做电池框架的轻量化材料优选铝合金, 具有良好的加工性能, 可通过铸造、挤压等工艺加工成各种形状和尺寸的零部件, 满足动力电池框架的结构需求。同时铝合金材料具有良好的导热性能及电磁屏蔽性能, 有利于提高电池包的散热性能和电磁兼容性。

基于MTB技术动力电池框架采用高强度的半固态压铸铝进行优化设计, 其材料性能和铸钢件相当, 但重量相当于铸钢件的1/3。通过布置优化3层电芯模组总电量291.6kWh, 总重量1326kg。优于原方案电池包4层布置总电量276.5kWh, 重量1669kg。优化后的电池的电量增加15kWh, 重量降低373kg。

动力电池框架由优化前的四层变为三层(高度降低550mm), 优化后动力电池框架总重量245kg较优化前392kg, 降重147kg, 降重约38%。

运用有限元仿真(CAE)手段分析动力电池框架方案, 对框架进行拓扑, 将承重部位加强, 而非承重部位去除冗余材料减薄料厚, 提高电池框架的承载能力和抗变形能力, 在降低重量的同时提高强度和刚度, 确保动力电池框架的可靠性和安全性。电池框架整体结构模拟实车运行工况进行理论分析验证: 分析垂向工况(Z向加载 $\pm 6\text{g}$); 转弯工况(Y向加载 1g 、Z向加载 $\pm 1\text{g}$); 制动工况(X向加载 1g 、Z向加载 $\pm 1\text{g}$); 扭转工况(Z向加载 $\pm 3\text{g}$)这4种极限工况下的动力电池框架的结构强度和疲劳耐久性能。运用ANSYS Workbench仿真分析设置极限工况下的各材料的安全系数与位移^[4]。评价标准: 结构强度评价指标安全因子 > 1.08 ; 疲劳耐久评价指标最小疲劳周次 > 106 。

分析结果如图1所示, 该结构电池系统结构强度和疲劳耐久合格, 固有频率避开了主要整车激励频率范围, 有效避免了动力电池系统与整车共振问题。因此基于MTB动力电池框架轻量化设计方案满足需求。

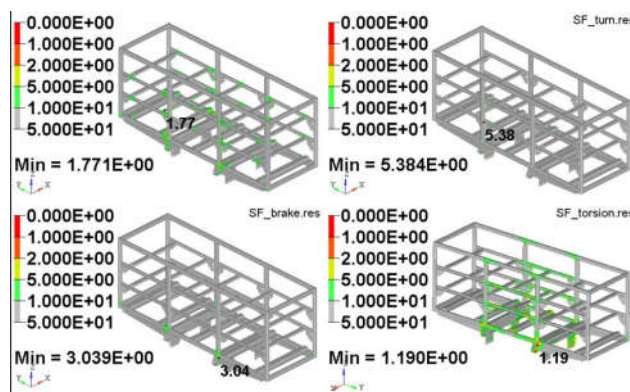


图1 CAE分析结果

2.3 防护罩轻量化设计

近年来非金属复合材料在动力电池系统设计中应用范围越来越广, 如电池包的防护罩、模组内部隔板等, 使用非金属材料能够实现显著的减重效果。常用的复合材料有玻璃纤维复合材料(GFRP)、碳纤维复合材料(CFRP)、陶瓷纤维复合材料等。基于成本考虑玻璃纤维复合材料(GFRP)成本较低, 具有重量极轻、易成型以及绝缘性好可以有效防止电池漏电, 提高电池系统的安全性。

基于MTB技术动力电池系统的防护罩由钣金件优化为高强超轻的玻璃纤维复合材料(GFRP)。运用CAE仿真分析GFRP防护罩的各项性能临界值精准分析其在电池包中的冗余部分和应力集中区域, 并对这些区域进行优化设计, 进一步降低重量。优化后防护罩的重量94.5kg较优化前152.5kg, 降重58kg, 降重约38%。通过CAE分析同等工况下GFRP材料强度性能较钣金件提升20%。

2.4 安全防护设计

重型卡车的使用工况和工作环境非常恶劣, 对电池包进行安全防护设计确保在碰撞等极端情况下的安全性; 防护等级达到IP68以上, 防止水分和灰尘进入电池包导致短路, 车辆无法正常运行。

(1) 结构防护设计: 根据重型卡车运营场景, 对电池包设置防撞梁、防护罩、缓冲泡沫等防护结构设计, 防止泥沙、石子、甚至异物碰撞对电池包的伤害, 提高电池包极端工况下的安全性和稳定性。

(2) 热失控防护设计: 采用新型隔热材料设计隔离舱或者隔离层, 防止热失控蔓延到其他电芯; 采用高效散热系统, 防止电池包发生热失控。

(3) 电气安全设计: 采用绝缘材料确保电池内的电气绝缘性能, 防止高压击穿、短路和漏电。

2.5 工艺优化

动力电池系统的加工工艺创新是实现系统轻量化设

计的重要组成部分。基于MTB技术加工生产过程中伴随着加工工艺的复杂化，需要选择合适的制造工艺甚至需要进行一系列技术革新：通过采用先进的制造工艺，可以提高加工质量和可靠性，降低生产成本。以下是基于MTB技术的电池包轻量化工艺改进方法。

（1）精密铸造：采用轻量化高精度模具，用新型材料和优化模具结构等措施，降低模具的重量，提高使用寿命，降低制造成本。可以生产出形状复杂、尺寸精确的零部件，提高零部件的强度和刚度，降低重量，满足动力电池包的结构和轻量化需求。

（2）铆接技术：具有连接强度高、可靠性好等优点，解决传统电池框架采用螺栓连接，装配效率低。可以提高电池框架的制造精度和效率，降低制造成本和重量。

（3）3D打印技术：可以实现复杂形状和结构的零部

件的快速制造，但成本较高。

（4）自动化生产：自动化生产是提高电池包生产效率，控制质量的重要方法之一。建立自动化生产设备可以实现电池包生产流程和检测手段的自动化控制，提高生产效率和质量稳定性，降低成产成本。

2.6 动力电池系统轻量化结果

基于MTB技术对陕汽某款纯电动重型卡车电池包+电池框架结构进行轻量化设计，优化后动力电池系统层数由4层减少到3层，高度降低550mm，降低重心增加车辆的稳定性；系统重量降低577.3kg，降重比25.7%；系统质量能量密度提升约46.8%，体积能量密度提升约69.8%。采用MTB技术动力电池系统实现降重、提升系统质量能量密度及体积能量密度效果显著。优化前后参数对比见表1。

表1 优化前后参数对比

项目	优化前	优化后	优化结果
电池框架层数（层）	4	3	降低1层
系统电量（kWh）	276.5	291.46	电量增加15kWh
系统重量（kg）	2243.5	1666.2	重量降低577.3kg
质量能量密度（Wh/kg）	119.2	175	提升46.8%
体积能量密度（Wh/L）	91.6	155.5	提升69.8%

结论

基于MTB技术对动力电池系统进行轻量化设计，为动力电池的轻量化提供了新的思路和方法，其优势在于系统降重效果明显，提升系统质量能量密度和体积能量密度，有效实现整车降重及提升续航里程。其劣势在于热管理和维修便利性面临很大挑战，技术难度大，如动力电池出现损坏，维修困难；如果直接更换动力电池费用昂贵。因此基于MTB技术降低动力电池的故障率是此项技术能否成功的关键，要增加动力电池系统的整体强度尽量减少动力电池遭受外力碰撞造成系统故障。总之动力电池系统采用MTB技术是动力电池轻量化的重点方

向，在纯电动重型卡车领域会得到更广泛的应用，对于纯电动重型卡车的轻量化技术发展具有重要意义。

参考文献

[1]侯迪.动力电池箱体轻量化技术综述[J].时代汽车,2021,(20):84-85+130.
[2]宋孝炳,林志宏.动力电池包轻量化设计技术研究[J].科技视界,2020,(13):68-69.
[3]程萍,程凤.动力电池系统轻量化技术综述[J].电源技术,2019,43(01):171-173.
[4]乔鹏程,李海丰,王戎.某型商用车动力电池托架的轻量化设计[J].汽车实用技术,2022,47(02):53-56.