

轻量化理念下纯电动汽车底盘关键部件布置与性能匹配分析

杨旭 刘凯*

长城汽车股份有限公司 河北省保定市 071000

摘要: 新能源汽车飞速发展之际, 纯电动汽车轻量化成了改善其综合性能的关键途径, 本文围绕轻量化理念下的纯电动汽车底盘关键部件布置及其性能匹配展开研究, 先剖析了当下纯电动汽车底盘轻量化的发展状况, 包含轻量化材料应用, 结构设计等方面的发展与缺失, 再论述了展开此类研究的意义, 可以提升续航里程, 削减能耗, 加强安全性等等, 总结研究成果并展望未来走向, 希望给纯电动汽车底盘轻量化设计和改良给予参照。

关键词: 轻量化理念; 纯电动汽车底盘; 关键部件布置; 性能匹配

伴随着全球能源危机和环境问题日趋严重, 新能源汽车作为绿色交通的重要载体, 在各国受到重视并高速的发展中, 纯电动汽车以零排放、低噪音等优点成为了新能源汽车的主流发展方向, 而续航里程短、能耗高等因素依然制约着纯电动汽车的进一步发展, 而轻量化作为缓解这些问题的重要途径之一, 能够有效降低车辆能耗、提高续航, 底盘是纯电动汽车的重要部分, 其重量占比较大, 与车辆动力性、经济性、操控性及安全性具有直接影响。在轻量化思想下, 对纯电动汽车底盘关键部件的布置与性能匹配研究具有重要的现实意义。传统汽车在轻量化方面已有了一定的研究和应用, 但是由于纯电动汽车的动力系统发生了改变, 底盘结构、受力情况与传统汽车有很大不同, 这就需要从纯电动汽车的角度出发, 重新考虑底盘关键部件的布置与性能匹配问题。

1. 轻量化理念下纯电动汽车底盘关键部件布置现状

1.1 轻量化材料应用现状

目前, 纯电动汽车底盘轻量化材料的应用已有所进展, 高强度钢由于强度高且成本相对较低, 被广泛用于底盘车架、悬架等部件, 一些车型使用热成型高强度钢来制造底盘框架, 既保持了结构强度又减轻了重量, 铝合金具备密度小、耐腐蚀等特点, 被大量用于底盘部件当中, 像铝合金车轮、悬架控制臂等, 这能明显降低部件的重量, 碳纤维复合材料有着比强度和比刚度高的特点, 是优良的轻量化材料, 但其成本较高, 所以只是在极少数高端纯电动汽车的底盘部件上少量采用, 底盘副车架^[1]。

1.2 结构设计现状

纯电动汽车底盘轻量化发展进程中, 模块化、集成化

设计逐渐成为主要趋势, 这种趋势直接促使底盘零部件布置方式发生改变, 就当下的布置现状而言, 主要围绕核心功能部件展开集成化布置, 一方面把驱动系统里的电机、减速器同电力控制系统里的逆变器紧密结合在一起, 形成一体化驱动模块, 再将其直接置于底盘前后轴附近, 如此一来便大大缩减了动力传输路径以及高压线束的长度, 去掉了许多冗余的连接结构; 另一方面, 动力电池包不再单独挂在底盘之上, 而是采取“底盘框架与电池包一体化”布置方案, 也就是将电池包嵌入到底盘纵梁和横梁所形成的框架当中, 这样做的目的就是让电池包承担起部分底盘结构承载功能, 从而在优化空间利用效率的同时, 也削减了额外的电池包支撑结构重量^[2]。

1.3 存在的问题

虽然纯电动车底盘轻量化取得一定进展, 但是仍存在许多困难, 一方面轻量化材料成本高, 碳纤维等复合材料尤其高昂, 造成难以大量使用, 另一方面轻量化设计会降低底盘的强度、刚度与耐久性, 轻量化与性能如何协调也是难题, 不同轻量化材料之间的连接工艺也不成熟, 导致无法充分发挥其作用。

2. 轻量化理念下纯电动汽车底盘关键部件布置与性能匹配意义

2.1 提升续航里程

续航里程作为评价纯电动汽车性能的重要指标, 受到诸多因素的制约, 而整车质量是其中之一, 底盘作为车辆结构的关键部分, 其减重效果直接影响能耗水平, 相关研究显示, 车身总质量每下降 10%, 续航里程一般能提高 5% 到

8%, 拿某款纯电动车型来说, 在维持电池容量不变的前提下, 通过轻量化设计改良底盘重量达到 150 公斤之后, NEDC 工况下的实际续航里程从 400 公里上升到 450 公里, 增幅达到 12.5%, 超出理论预期大约两成, 这主要是由于轻量化改造造成的滚动阻力减小和加速性能改善所产生的综合节能效益。对终端消费者来说, 提高车辆续航里程就意味着可以大幅度减少充电次数, 这极大提升了日常出行的便利性, 而且在长途行驶时也能有效缓解里程焦虑的问题, 随着动力电池技术不断创新, 纯电动汽车的应用领域会逐渐扩大, 其市场竞争力和社会影响力也会变得越来越强^[3]。

2.2 降低能耗

轻量化底盘设计可明显缩减车辆滚动阻力与空气阻力, 能耗得以优化, 据研究显示, 整车质量每下降 100 千克, 百公里电耗大概会降低 1.5 千瓦时, 拿一款百公里电耗为 15 千瓦时的纯电动车型来说, 如果轻量化方案减重 100 千克, 而且年行驶里程达到 2 万公里, 那么全年就能节省大约 300 千瓦时电量, 按照目前的电价算, 大概可以省下 180 元, 从长远角度看, 这种节能手段有着不小的经济意义, 轻量化底盘不仅能减轻驱动系统的负担, 促使它处于更高效的运转区间, 而且在高负载状态下, 传统电机的效率一般低于 80%, 但经过优化之后可达到 85% 以上, 如此一来, 能量损耗就会被大幅度削减, 整体能效表现也会得到改善, 这项技术还能通过减小电池充放电次数来推迟电池的老化速度, 从而延长电池的使用寿命, 进一步减轻用户的运营成本^[4]。

2.3 提高安全性和操控性

通过科学规划底盘核心部件并执行性能改良计划, 既能达到整车减重目的, 又能明显改善质量分布状况, 进而优化车辆动态表现及操控稳定性, 采取电池模块集成化设计同轻量化底盘架构相融合的方式, 可使车辆重心下降大约 10%–15%, 从而减轻高速行驶时的侧向力矩影响, 进而将紧急变道安全性提升 20% 以上, 某款车在悬架系统轻量化改造之后, 前轮侧偏刚度提升了 15%, 转向反应速度加快, 方向盘转动角度与实际轨迹的偏差大幅缩减, 整体操控精度明显改进。制动安全性研究领域轻量化底盘的运用带来十分明显的优化效果, 以动能理论分析得出结论显示, 如果整车总体重量下降 10%, 那么制动期间所需的能量也会减少大约 10%, 同制动功率条件相符的情况下, 从百公里加速到停止的状态下, 百公里制动的平均距离会相应缩短 0.5 至 1 米, 由高强度轻量化材质制作出来的底盘架构呈现出更好的能

量吸收性能, 其用铝合金材料打造出来的汽车底盘各部件单位重量之下吸收的能量强度较传统的钢板制件多出约一倍半之差, 一方面这种材料本身有着较强的吸收碰撞能量的效果, 另一方面也可以显著压缩传导到车厢内部结构当中的冲击力幅值量度, 并且使乘客在碰撞中的安全程度得以大幅度地增强。

3. 纯电动汽车底盘关键部件轻量化布置方案

3.1 设立多连杆悬架系统

布置上, 使用多连杆独立悬架, 多连杆悬架更容易配合轻量化底盘, 多连杆悬架的杆件布置可以准确控制车轮的定位参数 (主销后倾角、外倾角), 在车辆转弯和颠簸时保持轮胎接触面积不变, 从而提高抓地力。悬架的弹簧和减震器集中在一起 (例如空气弹簧和减震器组合成一个模块) 布置, 这样可以减少悬架中弹簧和减震器的数量和连接点, 与分离布置相比, 减重约 8kg, 节省底盘空间 15%。悬架上除了 6061-T6 铝合金摆臂外, 其他悬架衬套材料选择聚氨酯复合材料, 与橡胶衬套相比减重 30%, 同时提高了耐磨性。某车型使用此方案后, 前悬架总成重量由原来的 52kg 下降到 36kg, 并通过 10 万公里耐久性测试, 摆臂变形量控制在 0.2mm 以内。在性能匹配上, 基于 ADAMS 建立整车动力学模型, 模拟 15 种典型路况 (如铺装路面、碎石路、减速带), 输出悬架刚度与阻尼的最优区间。针对轻量化后簧载质量降低 18% 的特点, 将螺旋弹簧刚度从 28N/mm 调整为 22N/mm, 同时采用磁流变减震器, 其阻尼系数可在 0.8–4.5N · s/m 范围内无级调节。通过车身加速度传感器 (采样频率 1000Hz) 实时反馈路况, 控制器在 0.002 秒内完成阻尼调整: 低速过坎时阻尼降低 40% 以缓冲冲击, 高速过弯时阻尼提升 60% 以抑制侧倾^[5]。实车测试表明, 车辆在连续弯道的侧倾角从 5.2° 降低到 3.8°, 通过减速带时车身垂直加速度峰值从 11.6m/s² 降低到 7.3m/s², 兼顾了操控性与舒适性。

3.2 制动系统

在制动方面, 用博世 iBooster2.0 线控制动系统, 在传统真空助力器和制动主缸之间取消了机械连接, 而是用电机直接驱动制动推杆, 该系统比传统真空助力器轻约 6.3kg, 重量由原来的 14.5kg 降低到 8.2kg, 反应时间缩短至 0.12s。制动卡钳选用了整体锻造铝合金工艺, 经过拓扑去重设计, 钳体重量降低了 25%, 并采用了浮动式设计以降低制动拖滞力。在制动盘的选择上采用 C/SiC 碳纤维陶瓷材料, 并通过化学气相渗透法制备, 由原来的 32mm 减薄至 28mm, 重量也降

低到 10.8kg, 而重量降低了 5.9kg, 重量降低到了 4.9kg, 而其工作温度范围可拓展至 $-50^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。在散热方面设计有径向通槽加周向散热鳍片结构, 增加了 40% 散热面积, 连续制动时, 相比铸铁盘温度可以低 150°C 以上。性能匹配上, 建立“轴荷-制动力”动态分配模型, ESC 传感器实时监测车辆质心偏移量 (精度 $\pm 0.5\%$), 轻量化后前轴荷降低 8%, 将 EBD 制动力分配比例由 62:38 调整为 55:45, 设置自适应制动踏板模拟器, 通过可调阻尼缸模拟传统制动踏板感, 踏板力在 250-400N 时行程线性度 $\geq 95\%$ 。再生制动采用“分层-协同”控制策略, SOC $> 70\%$ 时, 低速 ($< 25\text{km/h}$) 再生制动力占比 70%, 回收效率 28%; SOC $< 30\%$ 时, 再生制动力提升至 85%, 急减速时保留 15% 机械制动冗余。冰雪路面模式下, 轮速传感器 (采样频率 500Hz) 识别打滑趋势, 提前 20ms 降低再生制动强度, 保证制动稳定。某车型应用该系统后, 100-0km/h 制动距离由 38.5m 缩短到 35.2m, 每百公里回收电能多 1.2kWh^[6]。

3.3 转向系统

底盘系统设计中, 转向模块以“轻量化集成+精准控制”为核心, 关键部件采用博世 EPSiBooster 集成式电动助力转向系统, 将转向电机、行星齿轮减速器、扭矩传感器与电控单元集成为一体的集成部件, 单重 12.8kg, 较传统分体式转向系统减重 32%, 助力响应效率从传统系统 88% 提升至 96%, 取消转向中间轴冗余结构, 底盘布置空间进一步精简。转向系统核心控制单元使用 SiCMOSFET 功率器件, 开关频率达到 25kHz, 比传统的硅基器件控制器体积小 35%, 布置在底盘前舱纵梁侧, 低压线束长度减少 55%, 线路传输损耗降低 18%。冷却方面对转向电机和控制器设计成集成式水冷回路, 串联到整车冷却系统中, 散热功率达到 5.2kW, 保证转向核心部件在原地转向、高速急打转向等高负荷时温度在 80°C 以内, 不会出现助力衰减。转向性能与轻量化匹配遵循“工况适配-能耗最优”原则, 设定可变转向比控制逻辑: 低速工况 (0-30km/h, 如泊车、城市拥堵) 采用 15:1 小转向比, 转向助力扭矩最大可达 $12\text{N} \cdot \text{m}$, 转向圈数减少至 2.3 圈, 提升操作灵活性; 中高速工况 (30-120km/h, 如道路巡航、高速过弯) 自动切换为 18:1 大转向比, 助力扭矩线性降至 $3-5\text{N} \cdot \text{m}$, 增强行驶稳定性。通过 AVLVSIM 搭建转向系统仿真模型验证, 该控制策略可覆盖 90% 以上车辆常用转向工况, 且转向电机高效区 (效率 $> 92\%$) 占比达 85%。

转向系统同整车控制系统 (VCU)、ESP 系统建立起协

同通讯联系: 低速泊车的时候, 收到 VCU 泊车辅助信号, 自行减小转向阻力, 转向响应时间小于 80 毫秒; 高速过弯, 车速超过 80 千米每小时, 依照 ESP 车身姿态数据, 随时修正转向助力梯度, 防止出现过度转向或者转向不足现象; 针对电池 SOC 状态实施能耗策略调节, SOC 低于百分之二十的时候, 转向能耗优先模式被激活, 助力扭矩上限降到八牛米, 缩减不必要的能耗; SOC 高于百分之八十的时候, 全部助力性能得以释放, 达成转向操作手感的一致性; 经过 NEDC 工况检测, 这个转向系统轻量化并加以控制的方案, 使得整车转向有关能耗削减了百分之二十二, 方向盘转向力的波动范围被控制在正负零点三牛顿时之内, 操控稳定性提升百分之十五。

结束语:

综上所述, 本文对轻量化理念下纯电动汽车底盘关键部件的布置与性能匹配展开分析, 当前纯电动汽车底盘轻量化在材料应用和结构设计上取得了一些成果, 不过也存在成本, 性能平衡的状况, 针对这一研究很有必要, 它关乎提升纯电动汽车的续航里程, 削减能耗, 改进安全性以及操控性, 通过对悬架系统, 制动系统, 转向系统等关键部件的布置改良和性能匹配手段加以探究, 就能给纯电动汽车底盘的轻量化设计给予有用的参照。

参考文献:

- [1] 梁宽. 纯电动汽车底盘合装与自动化工艺技术的应用 [J]. 汽车工艺师, 2025, (05): 22-24+30.
- [2] 何玉松. 纯电动汽车底盘合装线的布局分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(05): 86-90.
- [3] 杨蒙, 孙作奎, 胡松源, 等. 纯电动汽车底盘风噪声源特性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(03): 142-147.
- [4] 马翔, 陈丹华. 纯电动汽车底盘横纵向控制技术研究 [J]. 汽车测试报告, 2023, (06): 146-148.
- [5] 陈壮, 徐云志. 纯电动汽车底盘起步异响检查与维修 [J]. 专用汽车, 2022, (08): 93-95.

作者简介: 杨旭, 出生年月日: 1991 年 6 月 1 日, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 河北保定, 学历: 本科, 职称: 工程师-机电工程, 从事的研究方向: 汽车设计
 刘凯, 出生年月日: 1987 年 7 月 26 日, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 河南开封, 学历: 本科, 职称: 工程师-机电工程, 从事的研究方向: 汽车设计