

新能源汽车白车身结构拓扑及尺寸优化设计研究

辛林

浙江零跑科技股份有限公司, 浙江 杭州 310051

摘要: 随着全球能源危机和环境污染问题的日益严峻, 新能源汽车以其高效、环保的特点成为汽车行业的重要发展方向。然而, 新能源汽车的车身结构设计面临诸多挑战, 尤其是在结构拓扑及尺寸优化设计方面。本文在分析新能源汽车白车身结构特点的基础上, 详细探讨了拓扑优化方法和尺寸优化技术的应用。通过引入具体案例, 如特斯拉 Model Y 的白车身设计, 阐述了如何在实际设计中应用这些优化方法, 以实现轻量化、提高刚度和降低制造成本的目标。研究结果表明, 结构拓扑及尺寸优化设计对新能源汽车的性能提升具有显著作用。

关键词: 新能源汽车; 白车身; 拓扑优化; 尺寸优化; 轻量化; 刚度提升

随着科学技术的不断进步, 新能源汽车凭借高效、低污染的优势成为汽车行业发展的新潮流。然而, 新能源汽车的车身结构设计相较于传统燃油车存在显著差异, 尤其是在动力系统替换导致载荷变化后, 车身结构需要适应新的力学特性。这就要求在白车身设计阶段就必须进行细致的拓扑及尺寸优化, 以确保在满足安全、刚度要求的前提下实现轻量化。轻量化不仅有助于提升新能源汽车的续航能力, 还能减少能源消耗和排放, 符合绿色、可持续发展理念。因此, 开展新能源汽车白车身结构拓扑及尺寸优化设计研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 新能源汽车白车身结构特点与挑战

新能源汽车的动力系统由电动机和电池组构成, 这一转变相较于传统燃油车的发动机和变速器, 带来了显著的质量和体积分布变化。传统燃油车的发动机和变速器通常位于车辆的前部, 占据了较大的空间和重量, 而新能源汽车的电动机和电池组则可以根据设计需求进行灵活布置。这种变化不仅影响了车辆的重心位置, 还导致了车身载荷的重新分布。由于电动机和电池组的质量分布更加均匀, 新能源

汽车的车身结构需要承受不同于传统燃油车的力学特性。例如, 电池组通常位于车辆底部, 这增加了车身底部的承载压力, 对车身结构的刚度和强度提出了更高要求。同时, 电动机的高效运行减少了振动和噪声, 但这也要求车身结构具有更好的密封性和隔音性能。此外, 新能源汽车的动力系统大大简化, 去除了复杂的发动机和变速器系统, 为车身结构轻量化提供了更大的空间。轻量化不仅可以提高新能源汽车的续航能力, 还能减少能源消耗和排放, 符合绿色、可持续发展理念。然而, 如何在保证刚度和安全性的前提下实现轻量化, 成为新能源汽车白车身设计的一大挑战。

在轻量化设计过程中, 需要综合考虑多种因素, 如材料选择、结构形式、制造工艺等。新能源汽车白车身设计通常采用高强度钢、铝合金等轻质材料, 以及先进的连接技术, 如激光焊接、铆接等, 以实现轻量化与强度的平衡。然而, 这些轻质材料和先进技术的应用也带来了制造成本的增加, 如何在保证性能的前提下降低制造成本, 同样是新能源汽车白车身设计需要解决的问题。

2 拓扑优化方法在白车身设计中的应用

拓扑优化是一种先进的结构优化设计方法，它通过去除无用材料，优化材料分布，以实现结构的最佳性能。在新能源汽车白车身设计中，拓扑优化方法被广泛应用于确定最优的材料分布和结构形式。

2.1 均匀化方法

均匀化方法作为连续体结构拓扑优化中的佼佼者，凭借其灵活性和高效性，在新能源汽车白车身设计中扮演着至关重要的角色^[1]。这一方法的核心思想是将复杂的拓扑结构材料细化成无数个微小的单胞结构，每个单胞都如同一个微小的“建筑单元”，通过精心设计和调整这些单胞的尺寸、形状乃至其有无，可以实现对材料分布的精确控制，进而影响到整个设计区域的密度分布状况。

在新能源汽车白车身的设计实践中，均匀化方法被广泛应用于确定车身各部位的材料分布策略。以车身前部结构为例，这里是碰撞事故中首当其冲的部位，对材料的吸能能力有着极高的要求。通过均匀化方法，设计师们可以细致入微地调整前部结构中单胞的尺寸和形状，使得材料在碰撞时能够更加高效地吸收能量，保护乘员的安全。同样，在车身侧围结构中，抗侧倾能力是衡量车辆稳定性的重要指标。通过优化单胞的分布，可以使得侧围结构在受到侧向力时，能够更加均匀地分布应力，从而提高车辆的操控稳定性和乘坐舒适性。特斯拉 Model Y 的白车身设计，就是均匀化方法应用的一个生动案例。特斯拉的设计团队通过精细的单胞尺寸和形状优化，不仅实现了车身的轻量化，还确保了车身各部位在碰撞时的刚度和强度，真正做到了轻量化与安全性的完美平衡。

2.2 变密度法

与均匀化方法不同，变密度法则是在假设

各个单元材料具有相同密度结构的前提下，通过优化材料的密度分布来实现结构性能的提升。这种方法极大地简化了优化过程，提高了计算效率，使得设计师们能够更加快速找到最优的设计方案。

在新能源汽车白车身设计中，变密度法被广泛应用于确定最优的截面尺寸和板厚分布。以车身纵梁结构为例，纵梁作为支撑车身重量的重要部件，其抗弯能力直接影响到车辆的行驶稳定性和乘坐舒适性。通过变密度法，设计师们可以精确地调整纵梁的截面尺寸，使得纵梁在承受弯矩时能够更加合理地分布应力，从而提高其抗弯能力。同样，在车身蒙皮结构中，抗凹性能是衡量车身外观质量的重要指标。通过优化蒙皮的板厚分布，可以使得蒙皮在受到外力时能够更加均匀地分散应力，减少凹陷的发生，提高车身的整体美观度。值得注意的是，变密度法在应用过程中需要充分考虑材料的性能、制造工艺以及成本等因素，以确保最终的设计方案既满足性能要求，又具有良好的经济性和可制造性。

2.3 水平集法

水平集法作为一种基于界面传播的拓扑优化方法，其独特之处在于能够通过构建标数法向速度来驱动优化区域材料的边界运动，从而实现结构边界的拓扑及几何形状变化^[2]。这种方法为设计师们提供了一种全新的设计思路，使得他们能够更加灵活地调整结构的形状和边界，以满足不同的性能需求。

在新能源汽车白车身设计中，水平集法常被用于确定复杂结构的最优形状。以车身电池仓结构设计为例，电池仓作为新能源汽车中存储电池的重要部件，其刚度和密封性直接影响到电池的安全性和使用寿命。通过水平集法，设计师们可以优化电池仓的形状，使其更加符合力学原理，提高电池仓的刚度和密封性。同样，在车身座椅骨架结构设计中，舒适性和支撑性是衡量座椅性能的重要指标。通过水平集

法优化座椅骨架的形状,可以使得座椅在提供良好支撑的同时,还能够更好地贴合人体曲线,提高乘坐的舒适性。水平集法的应用不仅提高了新能源汽车白车身的设计效率,还为设计师们提供了更加多样化的设计选择,使得他们能够更加灵活地应对不同的设计挑战。

3 尺寸优化技术在白车身设计中的应用

尺寸优化技术主要通过改变结构件的截面尺寸和板厚来实现轻量化与性能提升的目标。在新能源汽车白车身设计中,尺寸优化技术常用于一维梁单元和二维板单元的优化。

3.1 一维梁单元截面尺寸优化

一维梁单元作为新能源汽车白车身骨架的基石,其截面尺寸的优化对于提升车辆整体性能至关重要。这一优化过程不仅仅是简单的尺寸调整,而是需要综合考虑梁的截面形状、材料属性、受力分布以及制造工艺等多方面因素,以实现刚性与轻量化的完美平衡。以某款新能源汽车白车身的A柱结构设计为例,研发团队深入运用了尺寸优化技术,对A柱的截面尺寸进行了细致入微的调整。他们首先分析了A柱在车辆行驶及碰撞过程中的受力特点,明确了关键受力部位和受力方向。基于这些分析,团队精心设计了多种截面形状,并通过计算模拟评估了它们在不同工况下的抗弯能力。经过多轮迭代,最终确定了一种既能有效提升抗弯能力,又能实现轻量化的截面形状和尺寸。这一优化策略不仅显著提高了A柱的力学性能,使其在面对侧面碰撞时能够更有效地吸收能量,保护乘员安全,同时,轻量化设计也有效降低了车辆的能耗,提升了续航能力。此外,团队还充分考虑了A柱的制造工艺性,确保优化后的截面尺寸能够在现有生产线上顺利加工,保证了优化成果的可实施性。

3.2 二维板单元厚度优化

二维板单元作为白车身蒙皮、地板等关键

部件的主要构成元素,其厚度的优化同样对车辆性能有着不可忽视的影响^[3]。在优化过程中,研究团队不仅要考虑板的材料属性、受力分布,还需兼顾制造工艺和成本效益,力求在保证刚度和安全性的前提下,实现最大程度的轻量化。以某款新能源汽车白车身的地板结构设计为例,团队采用了先进的尺寸优化技术,对地板各部位的厚度进行了精细化调整。他们首先通过有限元分析,明确了地板在不同工况下的应力分布和变形情况,然后结合材料的力学特性和制造工艺的约束条件,设计了多种厚度分布方案。经过严格的计算和验证,最终确定了一套既能显著提升地板刚度,又能有效隔绝噪音、提升乘坐舒适性的厚度优化方案。值得一提的是,在优化过程中,团队还特别关注了地板的制造工艺性,通过深入分析冲压工艺和焊接工艺的特点,确保了优化后的地板厚度分布既符合制造要求,又能保证产品的质量和一致性。这一优化策略不仅提升了车辆的整体性能,还进一步增强了地板的耐久性和乘客的舒适性,为新能源汽车市场的竞争注入了新的活力。

4 案例分析: 特斯拉 Model Y 白车身的拓扑与尺寸优化设计

特斯拉 Model Y 作为电动汽车领域的璀璨明星,自推出以来便以其卓越的性能、创新的设计和出色的用户体验赢得了全球消费者的广泛赞誉。其中,其白车身设计更是将轻量化、高刚度和卓越的安全性融为一体,展现了特斯拉在材料科学、结构与制造工艺上的深厚积淀与前瞻视野。这一成就的背后,离不开特斯拉在拓扑优化和尺寸优化领域的深入探索与实践^[4]。

4.1 拓扑优化

特斯拉 Model Y 的白车身设计是拓扑优化技术的杰出应用实例。拓扑优化这一先进的结构优化设计方法,通过数学算法探索材料的最优分布,旨在以最少的材料实现最大的结构效

能。特斯拉巧妙地采用了钢铝混合材质，结合一体压铸工艺，将轻量化与高强度完美结合，为 Model Y 的白车身设计奠定了坚实的基础：

1) 钢铝混合材质的智慧选择。钢与铝各自拥有独特的物理特性。钢以其高强度和良好的韧性，成为车身结构中承受主要载荷的理想材料；而铝则以其低密度和良好的耐腐蚀性，成为减轻车身重量的关键。特斯拉通过精密的计算与分析，将这两种材料巧妙地结合在一起，既保证了车身的刚性和安全性，又显著降低了重量，提升了能效。

2) 一体压铸工艺的突破应用。一体压铸技术作为汽车制造领域的一次革命性创新，能够实现大型复杂部件的一次成型，大大减少零件数量和焊接点，从而提高了结构的整体性和强度，同时降低了制造成本。特斯拉 Model Y 的后底板等大型部件便采用了这一技术，不仅实现了轻量化，还显著提升了生产效率和质量控制水平。

在拓扑优化方面，特斯拉更进一步，采用了均匀化方法和变密度法两种策略，对车身不同部位的材料分布进行了精细调控。均匀化方法通过将车身划分为多个微结构单元，通过优化这些单元的形状、尺寸和排列方式，实现材料分布的均匀化，从而提升整体结构的效能。而变密度法则假设每个单元具有可变的密度，通过优化密度分布，使结构在满足性能要求的同时达到最轻。这两种方法的结合应用，使得特斯拉 Model Y 的车身在保证刚度和安全性的前提下，实现了前所未有的轻量化效果。

4.2 尺寸优化

除了拓扑优化，特斯拉 Model Y 的白车身设计还深度融入了尺寸优化的理念。尺寸优化，即对结构中的一维梁单元截面尺寸和二维板单元厚度进行精细调整，以达到最佳的性能表现：

1) 一维梁单元截面尺寸的精准调控。车身中的梁单元，如 A 柱、B 柱、纵梁等，承担

着支撑车身、传递载荷的重要任务。特斯拉通过对这些梁单元的截面尺寸进行细致分析与优化，确保了它们在不同工况下的刚度和稳定性。例如，A 柱的设计就充分考虑了碰撞安全性的要求，通过优化截面形状和尺寸，使其既能有效吸收碰撞能量，又能保持足够的刚性，保护乘员安全。

2) 二维板单元厚度的智能分配。车身的蒙皮、地板等板单元，不仅影响着车辆的外观和内饰，还直接关系到车辆的隔音、隔热和乘坐舒适性。特斯拉通过对这些板单元的厚度进行智能分配，既保证了车身的整体刚度，又提升了车辆的 NVH（噪声、振动与声振粗糙度）性能。例如，地板的设计就充分考虑了隔音和减振的需求，通过优化不同区域的板厚，有效降低了路面噪声和振动对车内环境的影响，提升了乘坐舒适性^[5]。

这一系列的尺寸优化策略，不仅进一步减轻了车身重量，提升了车辆的续航能力，还显著增强了车辆的动态响应能力和乘坐品质。特斯拉 Model Y 的白车身设计，正是将轻量化、高刚度和卓越的安全性完美结合的典范，展现了特斯拉在新能源汽车领域的创新领导地位。

结语

综上所述，新能源汽车白车身结构拓扑及尺寸优化设计是实现轻量化、提高刚度和降低制造成本的关键技术。通过引入拓扑优化方法和尺寸优化技术，可以在保证安全性的前提下实现车身结构的最佳性能。特斯拉 Model Y 的白车身设计为我们提供了宝贵的经验和启示。未来，随着新能源汽车技术的不断发展和完善，更加高效、环保的汽车产品将不断涌现，为人类的可持续发展贡献力量。同时，更多的研究者和工程师也将投身于新能源汽车白车身结构优化的研究中，共同推动这一领域的进步和发展。

参考文献

- [1] 汪跃中, 贺鑫, 董华东. 某纯电动汽车白车身弯曲刚度分析与优化设计[J]. 汽车零部件, 2019(8):3.
- [2] 荣升格, 周俊锋, 施帆君, 等. 基于DOE的汽车白车身结构优化[J]. 时代汽车, 2023(10):125-127.
- [3] 方泓升. 新能源汽车白车身轻量化分析[J]. 汽车知识, 2024(2):13-15.
- [4] 张浩锴. 新能源汽车车身结构的概念设计开发[D]. 华南理工大学, 2013.
- [5] 王赢利. 新能源汽车白车身结构拓扑及尺寸优化设计[D]. 大连理工大学, 2012.