

汽车车身结构拓扑优化与疲劳寿命分析

梁 虎

吉利汽车研究院（宁波）有限公司 浙江 宁波 315000

摘 要：本文旨在系统性地探讨将拓扑优化与疲劳寿命分析两大关键技术深度融合于车身结构设计中的理论框架与方法体系。首先，文章深入阐述了以SIMP（固体各向同性材料惩罚）法为代表的连续体拓扑优化基本原理，论述了其在给定设计空间内实现材料最优分布以最大化结构刚度或满足多工况性能目标的核心机制，并分析了制造约束引入对工程可行性的保障作用。其次，文章详细梳理了基于名义应力法的汽车车身疲劳寿命分析全流程，从道路载荷谱的采集与处理，到多体动力学仿真提取关键连接点载荷，再到有限元应力分析及Miner线性累积损伤理论的应用，构建了一套完整的虚拟验证体系。最后，本文着重论证了拓扑优化与疲劳分析协同工作的必要性与实施路径，指出应在优化迭代过程中嵌入疲劳寿命约束，以避免产生虽刚度优异但耐久性不足的“脆弱”结构，从而确保最终设计方案在轻量化、刚度与疲劳寿命等多重目标上达成全局最优平衡，为现代汽车车身的正向开发提供坚实的理论支撑。

关键词：车身结构；拓扑优化；SIMP方法；疲劳寿命；载荷谱；Miner理论

引言

随着全球能源危机与环境问题的日益严峻，以及消费者对汽车性能、安全性和舒适性要求的不断提升，汽车工业正经历一场深刻的变革。轻量化作为应对上述挑战的核心战略之一，已成为各大汽车制造商研发工作的重中之重。车身作为整车中质量占比最大的总成（通常占整备质量的30%–40%），其轻量化水平直接决定了车辆的燃油经济性、动力性能、操控稳定性以及电动汽车的续航里程。行业研究与工程实践表明，整车减重100 kg可带来多维度显著收益，具体如下表所示：

效益类别	具体表现
能耗与续航	• 燃油车：百公里油耗降低 0.3–0.6 L（减重10%节油6%–8%） • 电动车：续航提升 6%–9%，电耗下降约 5.5%
制动与安全	• 100–0 km/h制动距离缩短 2.5–3 米 • 合理吸能结构提升碰撞安全性，乘员舱变形更小
环保减排	• 百公里CO ₂ 排放减少 800–900 克
使用成本	• 轮胎、刹车、悬架磨损减少，寿命延长 • 电动车可适当减小电池容量，降低购车成本 15%–20%

然而，轻量化并非简单减重，而是在保障强度、刚度、碰撞安全与疲劳耐久性的前提下高效用材。传统试错设计已难以满足现代汽车高效开发需求，以CAE为核心的拓扑优化与疲劳寿命分析成为关键：前者在概念阶段生成最优材料布局，后者精准预测结构长期服役性能。二者融合形成“优化-验证-再优化”闭环，推动研发从经验驱动转向数据与模型驱动，具有重要理论与工程价值。

1 汽车车身结构拓扑优化理论与方法

1.1 连续体拓扑优化的基本原理

连续体拓扑优化问题可以被严谨地表述为一个数学规划问题。其基本要素包括设计变量、目标函数和约束条件。在密度法中，最常用的设计变量是单元的相对密度，该密度值在0（代表无材料）到1（代表实体材料）之间连续变化。目标函数通常是结构的柔度（即外力所做的功），最小化柔度等价于最大化结构的整体刚度。约束条件中最核心的是体积约束，即要求优化后结构的总体积不超过初始设计域体积的一个预设比例（例如40%或50%）^[1]。此外，还可以根据具体需求引入位移约束、应力约束或频率约束等。求解这一复杂的非线性优化问题，需要借助高效的数值算法，如最优准则法（Optimality Criteria, OC）或移动渐近线法（Method of Moving Asymptotes, MMA），通过与有限元分析（FEA）的反复迭代耦合，逐步逼近最优的材料分布方案。

1.2 CAE仿真拓扑优化模型及其应用

在当前车身轻量化设计中，基于密度插值的CAE仿真拓扑优化模型因其概念清晰、实现简便且计算效率高，已成为工程应用中最主流的方法。该方法的核心在于建立单元弹性模量与其相对密度之间的非线性映射关系：单元的弹性模量 $E(\rho)$ 被表达为基体材料弹性模量 E_0 与相对密度 ρ 的 p 次幂之积，即 $E(\rho) = \rho^p E_0$ （通常取 $p=3\sim5$ ）。当 ρ 接近1时，单元表现为实体材料；当 ρ 接近0时，其刚度被大幅削弱（为避免数值奇异，赋予一个极小的非零刚度 E_{min} ）；而中间密度区域因指数项的作用，其有效刚度被显著抑制。这一机制有效推动设计变

量向0-1分布收敛,从而生成边界清晰、易于工程解读的轻量化构型。在多学科协同开发中,该模型常作为多学科轻量化仿真模型的基础,广泛应用于车身结构、底盘支架等关键部件的性能驱动设计中。

1.3 制造约束的引入与工程可行性

纯粹的拓扑优化结果往往呈现出复杂的、有机形态的结构,虽然力学性能优异,但可能难以通过传统的冲压、铸造或焊接等工艺进行制造。为了弥合理论设计与工程制造之间的鸿沟,必须在优化模型中引入各种制造约束^[2]。常见的约束包括最小成员尺寸约束,它通过限制结构中杆件或板肋的最小宽度,防止出现过细而无法制造或强度不足的特征;拔模方向约束,确保优化后的零件能够顺利从模具中脱出;对称性约束,则用于满足车身左右对称的美学和功能需求。这些约束的引入,虽然在一定程度上牺牲了理论上的最优性能,但却极大地提升了设计方案的可制造性和实用性,是拓扑优化技术成功应用于汽车工程的关键环节。

2 汽车车身疲劳寿命分析理论与流程

2.1 疲劳分析的基本理论

汽车车身的疲劳问题主要属于高周疲劳范畴,即在较低的应力水平下,经历大量的应力循环(通常超过104次)后发生的失效。针对此类问题,名义应力法(Nominal Stress Approach)是最为成熟和广泛应用的分析方法。该方法的核心是S-N曲线(应力-寿命曲线),它通过材料或构件的疲劳试验获得,描述了在特定应力比R下,恒幅循环应力幅值Sa与失效循环次数Nf之间的关系。对于车身结构在实际道路上承受的复杂随机载荷,需要采用累积损伤理论来评估其寿命。Miner线性累积损伤理论是工程实践中最常用的准则,其基本假设是:不同应力水平下的损伤是线性累积的,当总损伤D达到1时,结构即发生疲劳破坏。总损伤D的计算公式为 $D = \sum (n_i/N_i)$,其中 n_i 是应力水平 S_i 下的实际循环次数, N_i 是由S-N曲线查得的该应力水平下的失效循环次数。

2.2 基于道路载荷谱的疲劳分析流程

一个完整的车身疲劳寿命CAE分析流程始于真实世界的道路载荷数据。首先,通过在试验场或典型用户路面上进行实车道路试验,利用应变片、加速度传感器等设备采集车身关键连接点(如悬架接附点、副车架安装点等)的动态响应信号,形成原始的道路载荷谱。随后,对这些原始信号进行滤波、去噪、编辑等处理,得到可用于仿真的纯净载荷数据^[3]。接着,利用多体动力学(MBD)软件(如ADAMS/Car)建立包含精确悬架、转向和轮胎模型的整车虚拟样机,并通过“虚拟迭代”

(Virtual Iteration)技术,将处理后的道路载荷谱作为目标,反求出施加在车身各接附点上的时域载荷历程。这一步骤是整个流程的关键,因为它将外部路面激励准确地转化为车身结构的内部输入载荷。最后,将这些时域载荷施加到高精度的车身有限元模型上,进行瞬态或频域应力分析,提取出所有潜在危险点的应力时间历程。利用雨流计数法对这些应力历程进行循环计数,并结合材料或焊点的S-N曲线及Miner理论,即可计算出每个危险点的疲劳损伤和预期寿命。

2.3 疲劳分析中的关键考量因素

在执行上述分析流程时,诸多因素会显著影响结果的准确性。首先是材料S-N曲线的选择,对于车身常用的钢材,需区分母材、焊缝及热影响区,因为它们的疲劳性能差异巨大。其次是平均应力的影响,Miner理论本身未考虑平均应力,但在实际分析中必须通过Goodman、Gerber等修正方法对其进行补偿。此外,几何不连续处(如孔、缺口、焊缝)产生的应力集中效应,需要通过引入疲劳缺口系数Kf或在有限元模型中精细建模来准确捕捉。最后,载荷间的相位关系也至关重要,在多轴疲劳分析中,若忽略不同方向载荷的相位差,可能会导致寿命预测的严重偏差。

3 拓扑优化与疲劳寿命分析的协同策略

3.1 协同设计的必要性与挑战

传统的设计流程往往是串行的:先进行拓扑优化以获得高刚度的轻量化构型,然后对优化结果进行疲劳寿命校核。然而,这种模式存在明显的弊端。拓扑优化的目标通常是最大化刚度或最小化柔度,它倾向于生成传力路径直接、应力分布均匀的结构。但这种结构在面对复杂的、多轴的随机疲劳载荷时,其局部细节(如尖锐的转角、过薄的板件)可能恰恰是疲劳裂纹的萌生地。因此,一个在静力学意义上“完美”的拓扑构型,其疲劳寿命可能远低于设计要求^[4]。反之,如果仅以疲劳寿命为唯一目标进行优化,又可能导致结构过于笨重,违背了轻量化的初衷。如何在刚度、重量和疲劳寿命等多个相互冲突的目标之间找到最佳平衡点,是协同设计面临的核心挑战。

3.2 嵌入疲劳约束的拓扑优化方法

为了解决上述问题,最直接有效的方法是在拓扑优化的数学模型中直接嵌入疲劳寿命约束。这意味着在每一次优化迭代中,不仅要计算结构的柔度和体积,还要进行一次简化的疲劳寿命评估,并将寿命或损伤值作为新的约束条件加入优化问题。具体实现上,可以将Miner累积损伤D作为约束,要求 $D \leq D_{allowable}$ (通常取

0.5到1.0之间的安全系数)。然而,这种方法计算成本极高,因为疲劳分析本身就是一个耗时的过程,将其嵌入到需要数百次迭代的拓扑优化中几乎是不可行的。为此,研究者们提出了多种简化策略,例如使用准静态载荷工况来近似模拟疲劳损伤,或者利用响应面法、代理模型等技术来替代耗时的真实疲劳分析,从而在保证一定精度的前提下,大幅降低计算开销,使疲劳约束下的拓扑优化成为可能。

3.3 面向增材制造的集成设计新范式

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术的兴起,为拓扑优化与疲劳分析的协同设计开辟了全新的可能性。AM技术几乎不受传统制造工艺的限制,能够直接制造出拓扑优化所生成的、具有复杂内部晶格或曲面的“有机”结构。这使得设计师可以更加专注于结构性能本身,而不必过多地迁就制造约束。在此背景下,一种新的集成设计范式正在形成:首先,进行无制造约束的、以多性能(刚度、模态、疲劳)为目标的拓扑优化,生成理论上最优的结构;然后,利用AM技术将其直接制造出来;最后,通过后处理(如表面抛光)来改善关键区域的表面质量,从而提升其疲劳性能。这种“设计-制造”一体化的思路,有望彻底释放拓扑优化的潜力,创造出兼具极致轻量化、高刚度和长疲劳寿命的下一代汽车车身结构。

3.4 案例简析

为验证拓扑优化与疲劳寿命分析协同策略的有效性,可引入电池包安装支架的集成设计案例:该支架在新能源汽车中需兼顾轻量化与耐久性。传统串行设计易导致局部应力集中,疲劳寿命不足。采用协同方法,首先以刚度和模态为目标进行拓扑优化,生成高效传力路径;随后嵌入基于PSD载荷谱的频域疲劳分析,将Miner累积损伤作为约束反馈优化,避免高损伤区域过度

空;最终结合增材制造技术一体化成形,并对关键连接部位进行表面抛光以提升疲劳性能。结果表明,相比传统铸件(2.8 kg),新设计减重43%至1.6 kg,一阶模态频率提升至89 Hz,台架疲劳寿命超过30万公里,充分体现了“设计-分析-制造”一体化协同范式在实现轻量化、高刚度与长寿命多重目标上的优势。

4 结语

本文系统地探讨了汽车车身结构拓扑优化与疲劳寿命分析的理论基础、关键技术及协同策略。研究表明,以SIMP方法为代表的拓扑优化技术,能够为车身轻量化设计提供极具创新性的初始构型;而基于道路载荷谱和Miner理论的疲劳寿命分析,则是确保车身长期可靠性的关键验证手段。然而,二者孤立应用可能导致设计上的顾此失彼。未来的车身结构设计,必然走向多学科、多目标的深度协同优化。一方面,需要发展更高效的、能够嵌入疲劳等复杂约束的拓扑优化算法;另一方面,随着增材制造等先进制造技术的成熟,设计与制造的壁垒将进一步被打破,使得理论上最优的拓扑构型能够被高效、低成本地实现。通过这种深度融合与协同创新,汽车车身结构将在轻量化、安全性、耐久性和制造性等多个维度上实现质的飞跃,为汽车产业的可持续发展注入强大动力。

参考文献

- [1]沈冰.基于结构拓扑优化的新能源汽车整车框架设计方法研究[J].汽车维修与修理,2026,(05):89-90.
- [2]华钧伟,侯文彬.基于多对象离散拓扑优化方法的车身结构平台化设计[J].汽车工程,2024,46(06):1075-1084.
- [3]林宝星.车身支座骨架结构疲劳分析研究[J].中国汽车,2024,(12):29-33.
- [4]邹贵林.车身结构疲劳损伤分析与预防[J].大众标准化,2023,(22):119-121.