乘用车等效扭转刚度分析及优化方法研究

石德鹏　吴志国　邓国辉　牛冬妍

（一汽-大众汽车有限公司，长春 130011）

【欢迎引用】石德鹏，吴志国，邓国辉，等．乘用车等效扭转刚度分析及优化方法研究[J]．汽车文摘，2026(7)：18-22.

【Cite this paper】SHI D P, WU Z G, DENG G H, et al. Research on Equivalent Torsional Stiffness Analysis and Optimization Method for Passenger Cars[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(7): 18-22.

【摘要】为了精准评估并优化白车身的结构性能，以乘用车白车身为研究对象，开展等效扭转刚度分析及结构改进研究。基于前处理软件与有限元求解器，依据有限元分析理论建立了高精度的白车身有限元模型；采用等效扭转分析方法，获取了白车身的等效扭转刚度动态响应曲线，并据此识别出结构薄弱区域，针对性地提出了加强方案。仿真验证结果表明，通过实施天窗加强框、C环下拐角及横梁优化等低成本措施，白车身等效扭转刚度提升了3 225 N·m/(°)，同时质量仅增加2 198 g，实现了刚度与轻量化的有效平衡。该方法能有效指导白车身结构设计与优化，为提升整车的NVH性能与驾乘舒适性提供了理论依据与技术支持。

关键词：等效扭转刚度；白车身；能量密度；结构优化

中图分类号：U463.82　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250029

Research on Equivalent Torsional Stiffness Analysis and Optimization Method for Passenger Cars

Shi Depeng, Wu Zhiguo, Deng Guohui, Niu Dongyan

（FAW-Volkswagen Automobile Co., Ltd., Changchun 130011）

【Abstract】To accurately evaluate and optimize the structural performance of the Body-in-White (BIW), this study focuses on a passenger car BIW by conducting equivalent torsional stiffness analysis and structural improvement research. Based on the pre-processing software ANSA and the finite element solver Nastran, a high-precision finite element model of the BIW is established in accordance with finite element theory. The equivalent torsion analysis method is employed to obtain the dynamic response curve of the BIW's equivalent torsional stiffness. Subsequently, structural weak areas are identified, and targeted reinforcement schemes are proposed accordingly. Simulation verification results show that the proposed reinforcement scheme significantly enhances the torsional stiffness of the BIW, and the optimized dynamic curve of equivalent torsional stiffness is markedly improved. The proposed method effectively guides the structural design and optimization of the BIW, providing a reliable theoretical basis and technical support for improving the NVH performance and ride comfort of the vehicle.

Key words: Equivalent torsional stiffness, Body in White (BIW), Energy destiny, Structural optimization

0　引言

当前，汽车行业呈现轻量化、电动化与智能化发展趋势，用户对乘车舒适性提出了更高的要求。作为白车身（Body-in-White，BIW）的核心力学性能之一，扭转刚度对整车的噪声、振动与声振粗糙度（Noise, Vibration and Harshness，NVH）特性及结构可靠性具有决定性影响。传统扭转刚度试验在前后轴施加阶梯扭矩并布置多组位移传感器，存在工装复杂、测点繁多、测试周期长等局限[1-2]。本文以某轿车白车身为例，提出一种基于有限元分析的白车身等效扭转刚度仿真计算方法。通过建立高精度有限元模型并结合试验模态分析对仿真结果进行对标验证，在此基础上识别结构薄弱环节并给出方向性优化建议。

1 等效扭转刚度概述

1.1 等效扭转基本定义

传统静态扭转刚度测试需依据设计总质量(Gross Vehicle Mass, GVM)从前轴处施加阶梯式扭矩载荷(图1)。除获取刚度数据外,还需严格监控车身纵向变形分布的均匀性,并重点校核车门、发动机罩、行李箱盖及前风窗玻璃等关键开口处的变形量,以确保结构变形在许用范围内,避免因局部应变过大导致车身密封失效、异响或结构强度破坏[3]。

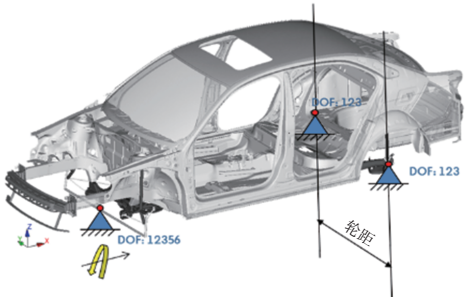


图1 静态扭转加载示意

等效扭转刚度(Equivalent Torsional Stiffness, ETS)与传统静态扭转刚度在加载机理及测试装备上存在显著差异。在测试装备方面,ETS方法无需配置前后车桥及转鼓等工装。在加载机理方面,该方法通过在弹簧腿安装点处施加一对大小相等、方向相反、幅值为1 N·m且频率呈扫频变化的激励力矩,可直接获取车身结构在全频段范围内的刚度动态响应特性。理论推导表明,当激励频率趋近于0 Hz时,ETS数值与静态扭转刚度等价,其数学表达式为:

$$C_{ETS}=\frac{M}{\frac{|Z_{p1}|+|Z_{p2}|}{Y_{Vorn}}+\frac{|Z_{p3}|+|Z_{P4}|}{Y_{Hinten}}}\times\frac{\pi}{180^{\circ}} \quad (1)$$

式中:M为施加的扭矩,Z_{p1}、Z_{p2}分别为前轴左、右加载点处的Z向位移,Z_{p3}、Z_{p4}分别为后轴左、右加载点处的Z向位移,Y_{Vorn}为前轴左、右测点间的横向轮距,Y_{Hinten}为后轴左、右测点间的横向轮距。

基于实车测试数据的经验统计表明,受加载机理与测试边界条件差异的影响,传统燃油车的等效扭转刚度值普遍低于其静态扭转刚度,差值通常在2 000~4 000 N·m/(°)范围内。

1.2 等效扭转意义

在测试装备层面,与传统静态扭转需约束前、后车桥不同,ETS无需复杂的轴系支撑,仅需通过弹簧腿安装点施加激励,大幅降低了台架搭建的难度与成本,简化了试验工装。

在结果表征层面,ETS能够获取全频段范围内的刚度动态响应曲线,直观揭示了车身结构的固有频率分布特征。对于无阻尼自由振动系统,其运动方程为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{x}(t)+\boldsymbol{K}\dot{x}(t)=0 \quad (2)$$

其特征方程为:

$$|\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M}|=0 \quad (3)$$

式中:$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{K}$分别为系统的质量矩阵与刚度矩阵,ω为固有角频率。

该系统具有与自由度数量相等的特征值,其特征根直接对应系统的固有频率。ETS的动态扫频加载机制能够有效激发车身在不同频率下的模态响应,从而精准识别这些关键频率点及其对应的刚度特性。

在工程应用层面,ETS对提升整车振动舒适性具有重要意义。如图2所示,路面激励经底盘传递至车身,其响应加速度是衡量乘员舒适性的核心指标。若响应加速度峰值超过0.3 m/s^2,将显著影响用户驾乘体验,必须进行结构优化。在路面输入恒定的前提下,改善车身的振动传递特性是优化关键[4-6]。车身传递特性与ETS密切相关:一方面,需关注频率为0 Hz时的刚度值(反映静态基础);另一方面,需重点考察曲线中波动出现的频率位置(反映模态分布),从而为车身结构的动力学优化提供参考。

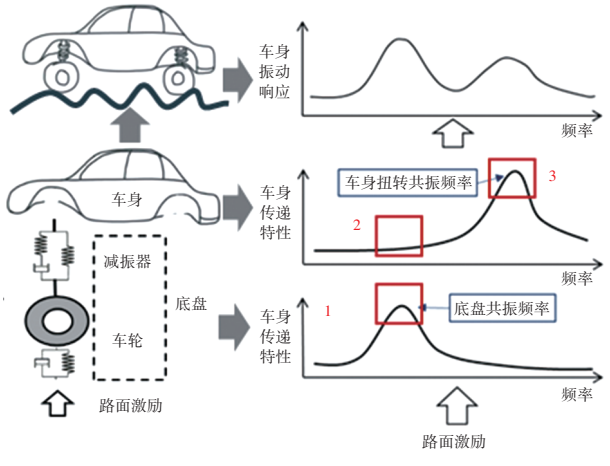


图2 振动舒适性原理

2 等效扭转模拟分析方法

2.1 加载定义

本文基于Nastran平台,建立白车身有限元模型,并定义等效扭转刚度的动态加载工况。等效扭转刚度加载点如图3所示。

选取模型中前后弹簧腿与车身的连接位置作为加载点,定义为P_1~P_4(图3)。依据单位载荷法,施加

一对大小相等、方向相反的激励力矩 T=1 N·m。为在节点上实现该力矩，需将其转换为节点力：将目标扭矩分别除以前、后轴左、右加载点间的横向轮距（Y向距离），计算得到各加载点的等效集中力。加载采用扫频模式，频率范围为0~80 Hz，步长为0.25 Hz。具体加载方案如表1所示。

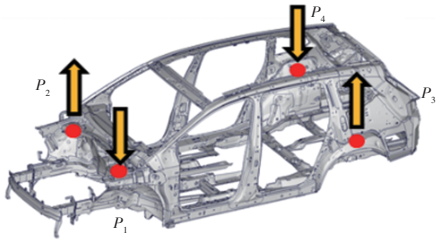


图3　等效扭转刚度加载点示意

表1　ETS加载定义　　N

加载位置	加载方向	加载力
左前连接点	全局Z负向	0.862 55
左后连接点	全局Z正向	0.862 55
右前连接点	全局Z正向	0.906 70
右后连接点	全局Z负向	0.906 70

2.2　结果后处理及解读

求解完成后，提取Nastran生成结果文件中的位移响应数据。通过对频率响应数据进行曲线拟合，可获得白车身等效扭转刚度随频率变化的动态曲线（图4）。

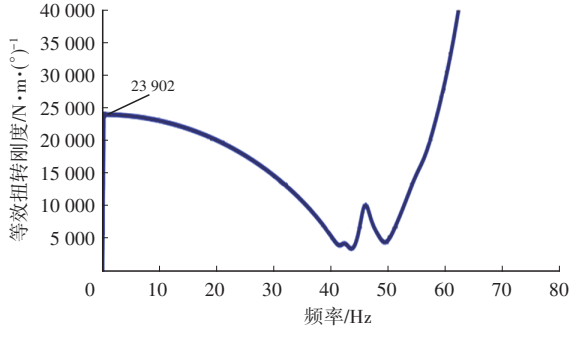


图4　等效扭转刚度结果

在该频率响应函数中，曲线出现的极值（波峰或波谷）通常对应车身结构的固有频率点。为进一步识别模态类型（如一阶扭转、一阶弯曲等），需在车身关键结构部位（如前后纵梁、门槛梁等）布置监控测点。结合各测点的相位差与振型，可准确判定极值点对应的具体模态属性，从而实现对车身动态刚度特性的精细化评估。

3　等效刚度提升

3.1　结构刚度影响机理分析

结构刚度表征了车身抵抗弹性变形的能力。刚度不足不仅会引发车身异响、NVH性能恶化及操纵稳定性下降，还会降低结构疲劳寿命。反之，刚度过高则会导致冗余质量增加，进而提高制造成本与整车能耗。因此，寻求刚度与质量的平衡是概念设计阶段的核心任务，而基于灵敏度的拓扑优化分析则是实现这一目标的关键手段[7-8]。

基于第一性原理分析，车身扭转刚度主要受以下结构特征影响（图5）。

（1）截面特性：关键传力路径上的梁系与立柱的截面形状与抗弯惯性矩。

（2）接头形式：梁柱连接处的搭接方式与接头刚度。

（3）闭环结构（扭力环）：车身是否构建了完整的封闭式环状结构以抵抗外部扭矩[9-10]。

在制造工艺（如冲压、焊接）固化后，梁截面与接头形式的改动空间极为有限。因此，构建或强化车身关键区域的扭力环结构，成为后期提升扭转刚度最具性价比的优化方向。

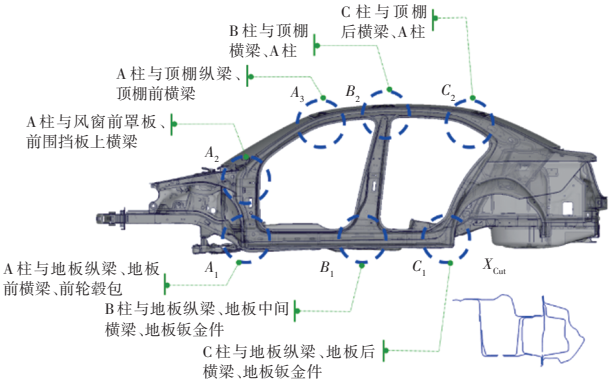


图5　梁、立柱截面形式示意

3.2　基于应变能的薄弱区域识别

在确定优化方向的基础上，需进一步量化各部件的承载贡献。通过有限元柔度法进行应变能分析，可有效识别结构薄弱区域。对有限元模型施加强制位移或载荷，输出应变能量密度云图（图6），能量密度越高的区域，表明该区域在抵抗变形过程中吸收了更多能量，即该部位刚度相对不足，为优化的重点对象。

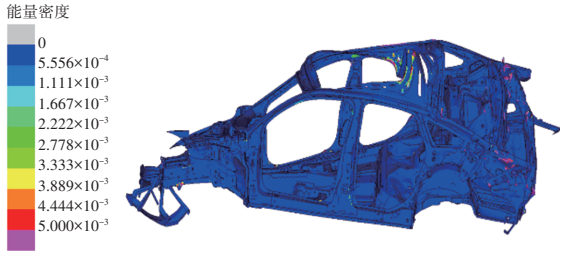


图6　薄弱区域分析

以某三厢轿车为例，其天窗加强框两侧后角及尾门开口区域的能量密度显著高于周边区域，该结论表明这些部位为主要的柔性环节，限制了车身整体刚度的提升[11]。在实际工程中，需结合制造可行性（如焊枪可达性、模具复杂度）综合评估，优先对上述高应变能量密度区域进行补强。

4 优化结果展示

4.1 优化必要性及方案介绍

在整车指标中，振动舒适性指标和等效扭转刚度指标强正相关，且这2个性能直接影响乘员的主观感受。当振动舒适性不满足开发目标时，制定高性价比的等效扭转刚度优化方案尤为重要。

基于前述机理分析与应变能诊断，优化方案聚焦于构建扭力环与高应变能区域加强2个维度。以典型轿车为例，车身扭力环主要分布在5个关键区域：前舱、前风窗/发动机舱后部、B柱合围区域/天窗区域、C柱合围区域以及尾门合围区域。按车身分段划分，可分为前端模块、乘员舱及后端模块（图7）。针对不同位置的结构特点，制定差异化的优化策略（表2）[12-14]。

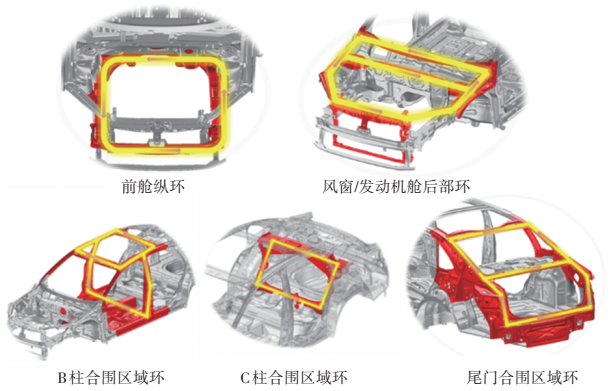


图7 车身重点扭力环示意

4.2 优化措施/结果

前舱、A/B柱区域是碰撞法规的重点考察位置，因其安全冗余低且出现问题概率大，对其进行优化均需进行碰撞试验。通过扭力环构建、应力云图分析，发现天窗/C柱/D柱附近的扭力环是刚度优化的重点区域。结合可制造性、材料、结构、工艺等多角度分析，结构优化是提升整车刚度性能的重点方向。本文结合具体项目实际，提出了多种优化方案，并进行了验证，优化措施及效果如表2所示。

表2 优化措施及效果

序号	优化措施	质量增加/g	等效扭转刚度提升/N·m·(°)$^{-1}$
1	天窗加强框增加角加强板从1.75 mm变为1.2 mm+2.2 mm拼焊	1 100	248
2	后部弹簧腿支架向下延伸到纵梁	900	664
3	增加两侧C环下拐角	300	1 648
4	C环下部横梁高度提高30 mm	798	1 329
5	C环一体化压铸（钢材改为铝材，厚度增加重量不变）	0	2 352
6	天窗前横梁截面高度从20 mm改为40 mm	600	200

由于法规、制造工艺、成本等诸多要求，驾驶舱和乘员舱的优化限制条件较多、可行性低，因此本文的优化主要集中在顶盖区域以及后舱位置，综合考虑成本、性能因素，本文采取了措施1、3、4作为优化方向。车身等效扭转刚度提升了3 225 N·m/(°)的同时车身质量增加了2 198 g。

基于某量产轿车的振动舒适性仿真验证结果如图8所示。在15 Hz特征频率处，优化前的振动响应幅值显著超出预设目标限值，该频段与发动机怠速激励主频重合，极易诱发整车共振，严重影响用户的驾乘品质。针对其NVH痛点，实施了分步优化策略：采取措施1、3、4后，该频段峰值得到明显抑制；进一步融合措施1、2、3、4、6的综合优化方案后，振动响应幅值被有效控制在目标线以内，验证了该优化路径的有效性。

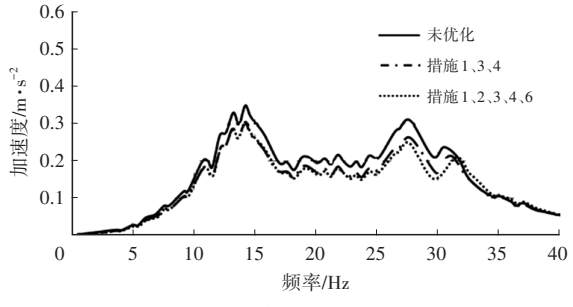


图8 振动舒适性优化结果

5 结束语

本文阐述了等效扭转刚度的定义、加载及测试方法，并阐述了其实际应用场景。本文所提出的方法在简化扭转刚度分析的同时，为固有频率的确定提供

参考依据，可以作为现行刚度考察方法的补充，指导车辆开发过程中的车身刚度仿真及测试。针对该指标进行优化不仅可以改善扭转刚度性能，更能够降低乘员舱感受到的振动，提升驾乘体验。验证数据显示，优化方案有效解决了15 Hz怠速共振问题。在未引入复杂结构变更的前提下，仅通过局部加强便使等效扭转刚度提升了3 225 N·m/(°)，成功将振动响应幅值控制在目标限值以内，显著消除了因共振导致的NVH隐患，优化了整车NVH性能。

参 考 文 献

[1] 岳涛, 汪小朋, 陈乐强. 基于白车身静刚度优化车身轻量化研究[J]. 客车技术, 2022(12): 54-55.

[2] 马倩昀, 冯国胜, 贾素梅, 等. 某纯电动汽车白车身弯曲刚度仿真分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022(3): 123-126.

[3] ZUO W J. Bi-Level Optimization for the Cross-Sectional Shape of a Thin-Walled Car Body Frame with Static Stiffness and Dynamic Frequency Stiffness Constraints[C]// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(8): 1046-1059.

[4] 郑郧. 汽车振动舒适性的测量与评价[J]. 客车技术与研究, 2000(4): 23-26.

[5] ZHANG W, RAVEENDRA R. Interior Noise Prediction Based on Energy Finite Element Method[C]// SAE Noise and Vibiration Conference and Exhibition, 2005.

[6] STRIBERSKY A, MOSTER F, RULKA W. Structural Dynamics and Ride Comfort of a Rail Vehicle System[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33(7/8/9/10): 541-552.

[7] 田佩, 华睿. 基于白车身扭转刚度的板厚灵敏度分析[J]. 汽车实用技术, 2022(13): 85-87.

[8] 张坤, 马心坦, 王传青, 等. 基于模态识别的参数化白车身轻量化优化设计[J]. 现代制造工程, 2022(7): 57-63.

[9] 杨甄鑫, 廖抒华, 石登仁, 等. 基于接头与截面灵敏度分析的白车身结构改进[J]. 广西科技大学学报, 2022, 33(1): 7-11.

[10] 肖杰, 雷雨成, 张健, 等. 车身主断面几何特性对白车身刚度影响的研究[J]. 汽车技术, 2007(2): 15-18.

[11] 刘宏涛. 均匀应变能密度法在车身结构刚度设计的应用分析[J]. 时代汽车, 2022(2): 123-126.

[12] 郭福森. 白车身模态和刚度的响应面构建及多目标优化[J]. 机电技术, 2022(6): 78-82+90.

[13] 李长玉, 林佳鹏, 钱宇晨, 等. 基于有限元分析的某轿车白车身轻量化设计[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 144-149.

[14] 郝琪, 杨林松, 曹立波. 基于响应面法的车身刚度特性的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11): 1569-1573+1577.

（责任编辑　**明慧**）