

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.02.006

基于梁截面的商用车驾驶室多目标优化研究^{*}

汤金帅¹, 刘夫云^{1*}, 邓聚才², 刘凯扬²

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 东风柳州汽车有限公司, 广西 柳州 544005)

摘要:针对汽车白车身试验设计运行时间长、近似模型拟合精度低的问题,以某商用车驾驶室为研究对象,提出了一种基于梁截面的商用车驾驶室多目标优化方法。首先,在 SFE-Concept 中建立了驾驶室的隐式参数化模型,通过与经过验证的有限元模型进行对比,完成了对该模型的精度验证;然后,利用 HyperMesh 分析了驾驶室梁截面力学特性,找出了梁截面的控制因素,采用比例向量法对截面形状进行了控制;并结合 HyperMesh、HyperMorph 分别对驾驶室零件厚度和梁截面进行了灵敏度分析,在试验设计之前筛选出了关键优化变量;最后,构建了驾驶室的径向基一响应面混合近似模型,并且采用第二代遗传算法对驾驶室进行了多目标优化。研究表明:经多目标优化后,驾驶室质量下降了 16.5 kg,减幅达 5.4%,一阶弯曲模态频率、一阶扭转模态频率基本不变,弯曲刚度提升 15.3%,扭转刚度提升 7.7%;该结果说明商用车驾驶室目标优化效果较佳。

关键词:梁截面;多目标优化;隐式参数化;灵敏度分析;优化效率

中图分类号:TH122;U469.21

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)02-0180-07

Multi-objective optimization of commercial vehicle cab based on beam cross section

TANG Jin-shuai¹, LIU Fu-yun¹, DENG Ju-cai², LIU Kai-yang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Dongfeng Liuzhou Motor Co. Ltd., Liuzhou 544005, China)

Abstract: Aiming at the problems of longer running time of experimental design and lower fitting precision of mixed approximation model, the cab of a commercial vehicle was taken as research object and a method was proposed that a multi-objective optimization method of commercial vehicle cab based on beam section. Firstly, implicit parameterized model of commercial vehicle cab was established with SFE-Concept. Model accuracy was verified by comparing with the verified finite element model. Then, Hyper Mesh was used to analyze mechanical characteristics of beam section to find control factors. The section shape was controlled by proportional vector method. Sensitivity analysis of cab parts thickness and beam section was carried out respectively with Hyper Mesh and HyperMorph. The key optimization varies were screened out before experimental design. Finally, mixed approximation model that radial basis function-response surface model was constructed. The non-dominated sorting genetic algorithm II was used to optimize the problem. The results indicate that the cab mass is reduced by 16.5 kg and reduced by 5.4% after multi-objective optimization. The basic performance is improved that the first bending stiffness is improved by 15.3% and the first torsional stiffness is improved by 7.7% under the condition of the low order vibration mode frequency is basically unchanged. The multi-objective optimization effect is better.

Key words: beam cross section; multi-objective optimization; implicit parameterized; sensitivity analysis; optimization efficiency

收稿日期:2021-09-03

基金项目:广西创新驱动发展专项资助项目(AA18242037)

作者简介:汤金帅(1996-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事产品数字化快速设计及优化设计方面的研究。E-mail:1215156997@qq.com

通信联系人:刘夫云,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:1355273765@qq.com

0 引言

汽车车身的各项性能指标不仅会影响用户乘车体验,还直接关系到其生命安全。每款汽车^[1]在批量生产之前,都必须经过 NVH(即:Noise-噪声、Vibration-振动、Harshness-声振粗糙度)、碰撞安全性、操纵稳定性、结构耐久性测试,性能达到要求后才能进入下一阶段。

众所周知,车身刚度^[2]极大地影响汽车各项性能。车身刚度不足,会造成汽车模态偏低,易发生共振。已有的研究表明,梁截面形状、板厚是影响车身刚度的两大主要因素。通过研究上述两种因素与车身刚度之间的主效应关系,能够帮助工程师设计出更符合市场需求的汽车。

郭润清等人^[3]采用比例向量法,对乘用车的梁截面形状进行了控制,以轻量化为目标,利用粒子群优化算法对其进行了轻量化优化,优化后质量减轻了 1.86%;但该研究的轻量化百分比比较低,轻量化效果有待进一步提升。姚再起等人^[4]建立了乘用车白车身的隐式参数化模型,通过参数化技术将白车身划分为梁与接头,结合有限元前处理软件,找出了对性能影响最大的结构、厚度变量,之后从截面、厚度、工艺 3 个不同角度进行了优化,优化结果表明,在质量基本不变的条件下,乘用车白车身的静态性能得到了一定提升;但该研究以刚度、模态为优化目标,没有进一步考虑车身的轻量化。秦欢^[5]结合企业实际需求,通过尺寸优化、单截面优化、多截面优化、形状优化 4 个层级的优化,设计出了精确的迭代求精方法,为乘用车提供了实际有效的梁截面优化框架。

但乘用车与商用车的结构相差较大,结合企业实际需求,有必要面向商用车开展梁截面优化的相关研究。QIN H 等人^[6]采用比例向量法,对乘用车梁截面形状进行了控制,使用改进后的遗传算法进行了乘用车梁截面形状的优化,并通过 12 个测试函数对此进行了验证,结果表明,该方法能够极大地减少优化变量的数量,轻量化效果较佳;但该研究仅以轻量化为优化目标,考虑因素较少,还需进一步研究其多目标优化问题。

为解决上述问题,笔者提出一种基于梁截面的商用车驾驶室多目标优化方法;首先,建立驾驶室隐式参数化模型,并完成模型精度验证;其次,分析驾驶室梁截面力学特性,找出关键控制因素,利用比例向量法控制梁截面形状;再次,进行驾驶室厚度、梁截面灵敏度分析,筛选出关键优化变量,选用最优拉丁超立方方法进行试验设计;最后,构建径向基—响应面混合近似模

型,采用第二代遗传算法进行多目标优化。

1 隐式参数化模型建立

传统的梁截面优化方法大多是基于有限元模型进行的。但该方法有两个明显缺点:(1)优化变量上下限变化范围较小;(2)算法求解出的优化解,可能为局部较优解,而非全局最优解。

为了更好地解决上述问题,笔者采用隐式参数化模型来对商用车驾驶室的梁截面进行优化。

商用车驾驶室的有限元模型如图 1 所示。

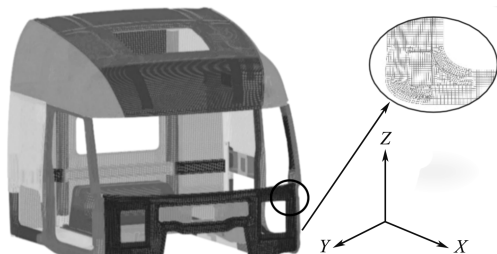


图1 商用车驾驶室有限元模型

驾驶室梁截面的优化流程框图如图 2 所示。

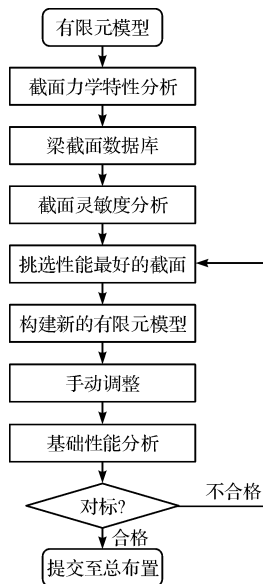


图2 梁截面优化流程框图

商用车驾驶室隐式参数化模型如图 3 所示。

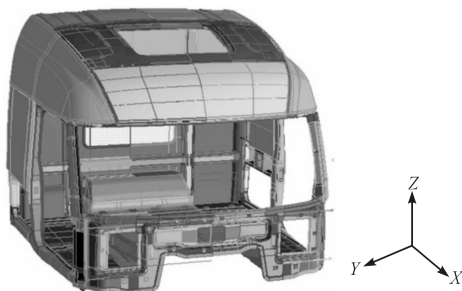


图3 隐式参数化模型

该隐式参数化模型可以录制任意符合工程实际的变量;当零部件的位置、截面、厚度发生变化后,可以利用 SFE-Concept 一键生成满足拓扑关系的高质量网格。相较于有限元模型,采用隐式参数化模型进行结构优化,用户能得到性能更优的解,且其优化过程也更加智能化。

建立隐式参数化模型时,有时会忽略一些工艺需求上的小尺寸结构(如开口、小凸台等),但这时的模型精度势必会受到影响。因此,在进行工况分析前还需要验证模型的精度。

模型精度验证步骤如下:

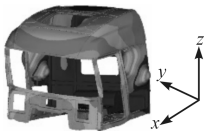
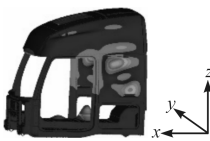
(1)确定对比分析对象。隐式参数化模型是在有限元模型的基础上建立的(有限元模型已得到试验验证),故需要将有限元模型与隐式参数化模型进行对比分析;

(2)确定验证内容。汽车在行驶过程中,会受到来自各方面的激励,如发动机等;当汽车低阶振动频率接近激励源频率时,易发生共振与噪声,造成疲劳失效现象的产生,故需对自由状态下的低阶振动频率(一阶弯曲模态频率、一阶扭转模态频率)进行分析;同时,质量、扭转刚度、弯曲刚度为优化目标,需要计算优化百分比。由此确定驾驶室的质量、扭转刚度、弯曲刚度、一阶扭转模态频率、一阶弯曲模态频率为验证内容;

(3)利用 optistruct 求解器求得驾驶室的基础性能值。

驾驶室隐式参数化模型一阶振动模态的仿真结果,如表 1 所示。

表 1 驾驶室隐式参数化模型一阶振动模态仿真结果

名称	频率值/Hz	振型	对应阶数
一阶扭转模态	21.0		4
一阶弯曲模态	39.5		19

根据相关企业的标准,商用车驾驶室一阶振动频率需避开易产生共振的频率范围。相关企业给定的频率范围为 24.6 Hz~28.6 Hz。

由表 1 可知:驾驶室一阶扭转模态频率为 21.0 Hz,一阶弯曲模态频率为 39.5 Hz,故驾驶室一阶振动

频率符合相关企业标准。

驾驶室基础性能值如表 2 所示。

表 2 驾驶室基础性能值

模型	质量/kg	一阶扭转模态频率/Hz	扭转刚度/(Nm·° ⁻¹)	一阶弯曲模态频率/Hz	弯曲刚度/(N·mm ⁻¹)
m	302.1	20.1	3 7991.0	38.7	33 901.0
n	307.6	21.0	38 990.0	39.5	34 689.0
误差/(%)	1.8	4.5	2.6	2.1	2.3

m—有限元模型;n—隐式参数化模型

由表 2 可知:驾驶室各项基础性能值的误差均在 4.5% 以内,满足相关的精度要求。

2 截面及灵敏度分析

2.1 截面力学特性分析

梁截面的几何特性与力学特性对驾驶室的刚度起关键性的作用^[7]。对驾驶室梁截面进行力学特性分析时,需要以垂直于梁的方向切割出梁截面,之后通过手动方式调整梁截面的几何形状,改变梁截面的力学特性,进而对车身进行优化,以提高其性能。

驾驶室梁截面截取示意图如图 4 所示。

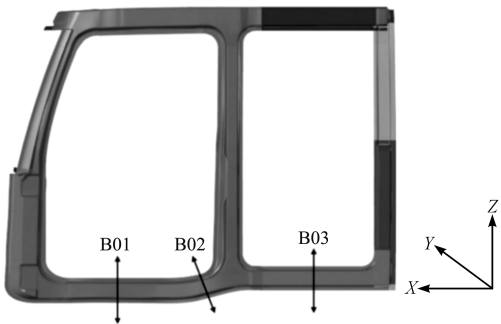


图 4 驾驶室梁截面截取示意图

梁截面的力学特性指标包括断面面积、截面惯性矩、封腔面积、扭转常数^[8]。

梁截面的惯性矩原理图如图 5 所示。

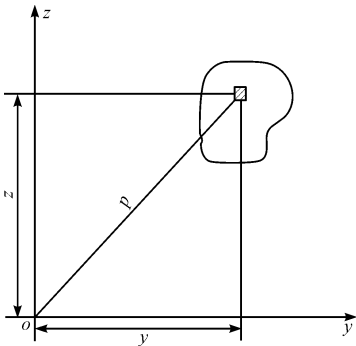


图 5 梁截面惯性矩原理图

梁截面惯性矩计算公式如下:

$$I_z = \int_A y^2 dA \tag{1}$$

$$I_y = \int_A z^2 dA \tag{2}$$

式中: I_y —面积元素至 z 轴的惯性矩; I_z —面积元素至 y 轴的惯性矩; A —零件断面面积。

扭转常数计算公式如下:

$$I_t = \frac{4B^2}{\oint ds/t} \tag{3}$$

式中: I_t —扭转常数; B —外形轮廓所围面积; t —薄壁杆厚度; S —截面中线周长。

部分梁截面力学特性分析结果如表 3 所示。

表 3 梁截面力学特性分析结果

截面名称	材料面积/mm ²	I_y /mm ⁴	I_z /mm ⁴	扭转常数	封闭面积/mm ²
B01	338.3	8.00E+05	3.18E+05	4.80E+05	7.55E+03
B02	303.6	6.88E+05	3.60E+05	5.04E+05	6.16E+03
B03	412.7	1.83E+05	1.18E+05	9.55E+04	1.53E+03

由于商用车驾驶室的结构复杂,所有零部件都通过焊接被连接在一起,当其中的一个钣金件发生变化时,都要对其关联结构进行调整。

为了满足工艺、装配的要求,在进行优化分析时,一般只对梁截面的内板以及加强板进行调整。此处以 B01 为例,用户利用 SFE-Concept 软件分别将梁截面内板位置向 z 向移动 2 mm、梁截面内板厚度增加 1 mm,可得调整后的梁截面力学特性值。

调整后的梁截面力学特性值如表 4 所示。

表 4 调整后的梁截面力学特性值

调整方式	材料面积/mm ²	I_y /mm ⁴	I_z /mm ⁴	扭转常数	封闭面积/mm ²
梁截面内板 Z 向平移 2 mm	350.6	8.20E+05	3.36E+05	5.01E+05	7.96E+03
梁截面内板 厚度增加 1 mm	360.8	8.15E+05	3.30E+05	5.20E+05	7.68E+03

表 4 中, z 向参照图 4 的坐标系。

一般认为^[9],截面形状、厚度为梁截面力学特性关键因素,由此,笔者选择截面形状与厚度作为优化变量。

2.2 梁截面形状控制方法

目前,控制梁截面形状的方法主要有 4 种:比例缩放法、极坐标法、矩形模拟法、比例向量法^[10]。其中,比例向量法控制变量少,能够有效减少优化变量数量,

且关于该方法的相关研究较多,理论上也较为成熟。

比例向量法的原理图如图 6 所示。

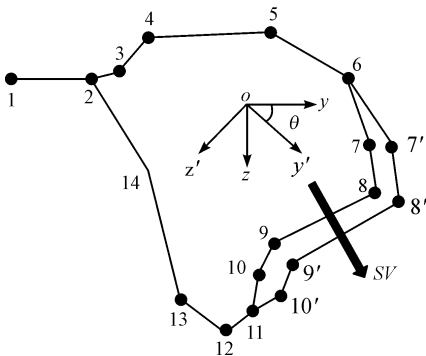


图 6 比例向量法原理图

图 6 中,比例向量法通过改变旋转角度的大小来控制变化的方向,然后通过控制变形度量值 SV 的大小,实现梁截面的变化。

在 yoz 坐标系中,点 7 的坐标为 (y, z) ,对该坐标系旋转一定的角度,在新的坐标系 $y'oz'$ 中点 7 的新坐标为 (y', z') 。其计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot y + \sin\theta \cdot z \\ -\sin\theta \cdot y + \cos\theta \cdot z \end{pmatrix} \tag{4}$$

确定好旋转角度之后,再确定变形度量值 SV 的数值;发生变形后,可进一步得到点 7 移动后的坐标 (y'', z'') 。其计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y' \cdot SV \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot y' \cdot SV - \sin\theta \cdot z' \\ \sin\theta \cdot y' \cdot SV + \cos\theta \cdot z' \end{pmatrix} \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)中,可得:

$$\begin{pmatrix} y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(\cos^2\theta \cdot SV + \sin^2\theta) + z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta(SV - 1) \\ z(\sin^2\theta \cdot SV + \cos^2\theta) + y \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta(SV - 1) \end{pmatrix} \tag{6}$$

根据上述计算公式可知:当 $\theta = 0^\circ$ 时,基点坐标随 y 向变化;当 $\theta = 90^\circ$ 时,基点坐标随 z 向变化。

在进行梁截面优化时,工程实践中一般取 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$ ^[11]。因此,笔者取 $\theta = 0^\circ$ 时,对上述商用车驾驶室梁截面进行优化研究。

除了以上 4 种主要的梁截面形状控制方法外,还可以通过控制基点坐标来控制梁截面的形状。

对于控制基点较少的单截面优化问题,可采用控制基点坐标控制截面形状,因为该方法原理相对较为简单,易于理解。而对于控制基点较多的多截面优化问题,采用比例向量法控制截面形状,可减少优化变量的数量。

2.3 灵敏度分析

工程实践中,一个优化问题往往有多个优化变量,如不加以筛选,会导致试验设计的运行时间过长。因此,需进行灵敏度分析,以筛选出对响应影响较大的变量,提升优化的效率。

灵敏度分析^[12]是一种研究敏感程度的方法,其分析公式如下:

$$s = \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}$$

(7)

式中: s —灵敏度; $\partial f(x)/\partial x_i$ —目标函数 $f(x)$ 对变量 x_i 的倒数; i —第 i 个零件的厚度或截面形状。

目前,基于隐式参数化模型的梁截面优化方法,大多以试验设计的方式进行灵敏度分析^[13]。该方法需要录制所有可能的优化变量,试验设计运行时间较长。

结合工程实际需求,笔者利用 HyperMesh、HyperMorph 分别进行厚度灵敏度分析、截面灵敏度分析,并在试验设计之前筛选出优化变量。该方法节省了计算资源,提升了优化效率。通过灵敏度分析可以计算出质量、一阶扭转模态频率、一阶弯曲模态频率、扭转刚度、弯曲刚度分别对于截面形状、板厚的灵敏度数值。

部分厚度灵敏度分析结果如图 7 所示。

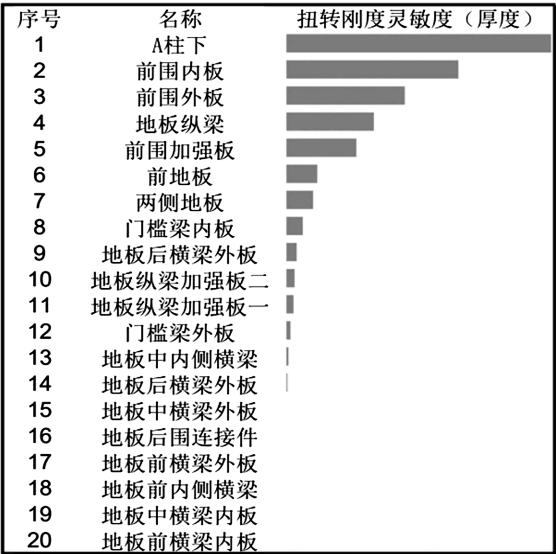


图 7 厚度灵敏度分析结果

部分截面灵敏度分析结果如图 8 所示。

柱状图的长短表示灵敏度数值的大小

由于灵敏度数值越大,表示变量对于目标的影响越大,笔者按照灵敏度数值大小降序排列,分别取每项前 20 个灵敏度数值最大的变量。经过筛选,笔者共选取 33 个厚度变量,45 个截面变量作为此次优化的设计变量。

以该方式进行灵敏度分析,共需 17.1 h,相较于以

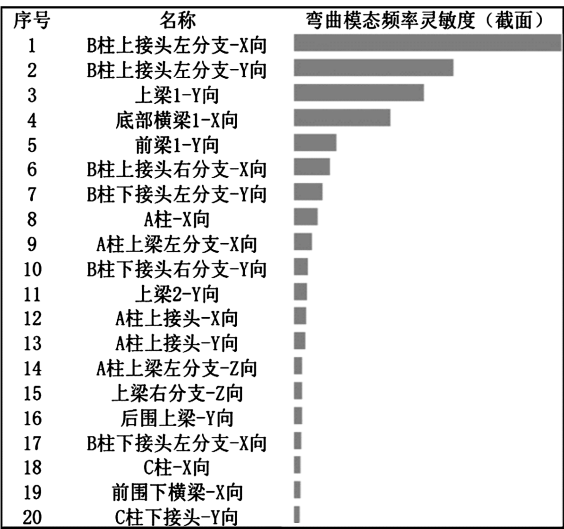


图 8 截面灵敏度分析结果

试验设计进行灵敏度分析的方式,运行时间缩短了 40%,提升了优化效率。

3 近似模型

如果直接使用原始模型进行优化,将会大大降低优化的效率,故笔者采用近似模型来替代原始模型。所谓近似模型^[14,15]即是通过采用一种数学模型的方式,来逼近输入与输出的函数关系。

近似模型拟合公式如下:

$$y(x) = \hat{y}(x) + \varepsilon$$

(8)

式中: $y(x)$ —响应实际值; $\hat{y}(x)$ —响应近似值; ε —响应实际值与响应近似值之间的随机误差。

由近似模型拟合公式可知,近似模型与原始模型存在精度差,只有精度达到要求后,才能代替原始模型进行优化。一般通过相关系数 R^2 及误差散点图进行评价。

R^2 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

(9)

式中: n —样本点数量; y_i —响应仿真值; y_{si} —响应预测值; $\bar{y}_i$ — y_i 的均值。

当 R^2 值越接近 1 时,表示近似模型拟合精度越高;当 R^2 值不小于 0.9 时,可认为近似模型的拟合精度满足精度要求。

响应面法可以用较少的样本点,最大限度地逼近目标函数;同时该方法拟合形成的近似模型简单,具有较强的鲁棒性。因此,工程实践中常采用响应面法来拟合近似模型。

但对于具有高度复杂函数关系的优化问题而言,该方法拟合效果较差,性能指标的相关系数值往往不能同时满足精度要求。拟合结果表明,采用响应面近似模型的质量、扭转刚度、一阶扭转模态频率、弯曲刚度、一阶弯曲模态频率相关系数值分别为 0.999、0.995、0.978、0.938、0.851,一阶弯曲模态频率相关系数值为 0.851,未达到精度的要求。

对于高度复杂的函数关系,径向基法逼近效果较佳。因此,笔者构建径向基—响应面混合近似模型,以提升一阶弯曲模态频率的拟合精度。

混合近似模型的拟合精度如表 5 所示。

表 5 混合近似模型拟合精度

混合近似模型	质量	扭转刚度	一阶扭转模态频率	弯曲刚度	一阶弯曲模态频率
R^2	0.999	0.995	0.978	0.938	0.901

由表 5 可知:混合近似模型的一阶弯曲频率相关系数值为 0.901,到达了精度要求。

质量拟合精度误差散点图如图 9 所示。

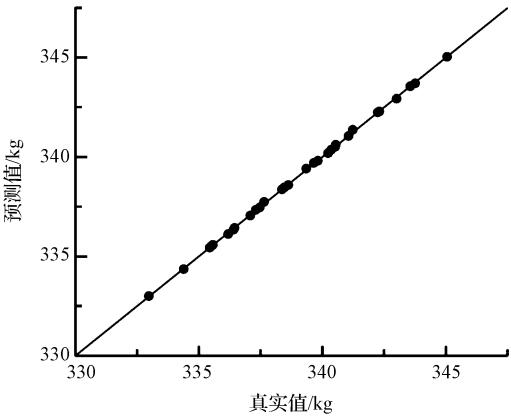


图 9 质量拟合精度误差散点图

扭转刚度拟合精度误差散点图如图 10 所示。

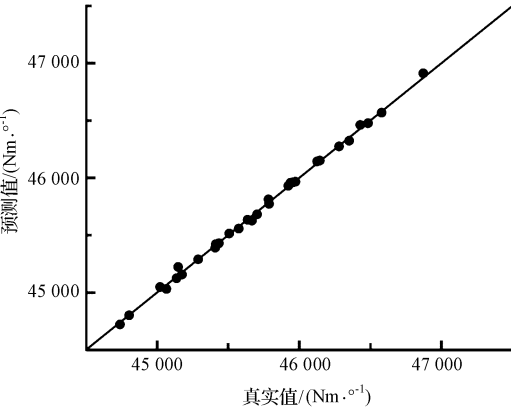


图 10 扭转刚度拟合精度误差散点图

●—进行误差分析的样本点,样本点越贴近倾斜直线表示指标拟合精度越高

4 优化仿真

4.1 优化算法

在工程实践中往往需要同时优化多个相互冲突的目标,而进化算法是解决多目标优化问题最有效的方法。现有的研究成果表明^[16],对于 2~3 个优化目标的多目标优化问题,第二代遗传算法可以得到收敛性、多样性较好的 pareto 解集。

上述优化问题共 3 个目标,即质量最小、弯曲刚度最大、扭转刚度最大。使用传统单目标优化算法并不能很好解决问题,故笔者选择第二代遗传算法。

4.2 优化问题描述

此次优化选取梁截面形状 $S_n (n=1,2,\cdots,45)$ 、厚度 $T_n (n=1,2,\cdots,33)$,共 78 个设计变量;约束条件为一阶扭转模态频率 ≥ 21 Hz、一阶弯曲模态频率 ≥ 39.5 Hz,以质量最小、扭转刚度最大、弯曲刚度最大为优化目标。

优化问题的数学描述为:

Variable: $T = (T_1, T_2, \cdots, T_{33}), S = (S_1, S_2, \cdots, S_{45})$

Objective: $\{M_{\min}(S, T), F_{T\max}(S, T), F_{B\max}(S, T)\}$

s. t. $f_{TM\min} \geq 21; f_{BM\min} \geq 39.5$ (10)

式中: $M_{\min}$ —质量最小值, kg; $F_{T\max}$ —扭转刚度最大值, $Nm/^{\circ}$; $F_{B\max}$ —弯曲刚度最大值, N/mm ; $f_{TM\min}$ —一阶扭转模态频率最小值, Hz; $f_{BM\min}$ —一阶弯曲模态频率最小值, Hz。

4.3 结果分析

笔者采用第二代遗传算法,对商用车驾驶室进行了多目标优化。优化前后性能值如表 6 所示。

表 6 优化前后性能值

类别	初始模型	优化模型	改变量/%
质量/kg	307.6	291.1	5.4
一阶扭转模态频率/Hz	21.0	21.1	0.5
一阶弯曲模态频率/Hz	39.5	39.3	0.5
扭转刚度/ $(Nm \cdot ^{\circ}^{-1})$	38 990.0	42 000.0	7.7
弯曲刚度/ $(N \cdot mm^{-1})$	34 689.0	40 000.0	15.3

由表 6 可知:优化后驾驶室的质量下降 16.5 kg,下降幅度 5.4%;扭转刚度提升了 7.7%,弯曲刚度提升了 15.3%,一阶扭转模态频率提升了 0.5%,一阶弯曲模态频率降低了 0.5%;

由此可见,在低阶振动频率基本不变的情况下,驾驶室质量下降,扭转刚度、弯曲刚度均有较大提升,多目标优化效果较佳。

5 结束语

本研究利用 SFE-Concept 软件构建了商用车驾驶室隐式参数化模型,并完成了模型精度验证,之后采用比例向量法控制梁截面形状,然后结合有限元前处理软件进行了灵敏度分析,最后构建了混合近似模型,并进行了多目标优化。

研究表明:

(1)相较于传统优化方法,采用隐式参数化模型进行的商用车驾驶室梁截面优化,扩大了优化算法的寻优空间,增加了算法寻到最优解的几率;

(2)通过研究驾驶室梁的截面力学特性,找出了梁截面的控制因素(截面形状、厚度),利用比例向量法用较少变量控制梁截面形状,减少了优化变量数量;

(3)提出了通过结合 HyperMesh、HyperMorph 分别进行驾驶室厚度灵敏度分析、梁截面灵敏度分析的方法;相较以试验设计进行灵敏度分析的方式,该方法试验设计时间缩短了 40%,优化效率提高;

(4)构建了径向基—响应面混合近似模型,以提升近似模型拟合精度,使驾驶室性能指标的相关系数值都在 0.9 以上,达到了精度要求;

(5)采用第二代遗传算法,对该问题进行多目标优化,优化结果表明,在固有低阶振动频率基本不变的情况下,驾驶室质量下降 16.5 kg,减幅 5.4%,弯曲刚度提升了 15.3%,扭转刚度提升了 7.7%,多目标优化效果较佳。

目前,该研究还存在一些不足,如利用比例向量法控制截面形状时,并未给出选取 $\theta = 0^\circ$ 进行研究的原因。在后续的工作中,笔者还将就此问题进行进一步的研究,以更科学地确定旋转角度的取值。

参考文献 (References):

- [1] YUL, GU X, QIAN L, et al. Application of tailor rolled blanks in optimum design of pure electric vehicle crashworthiness and lightweight[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161(7-8):107410.
- [2] LI S, FENG X. Study of structural optimization design on a certain vehicle body-in-white based on static performance

and modal analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135:106405.

- [3] 郭润清,侯文彬,胡平,等. 车身轻量化中梁截面优化的研究与实现[J]. *汽车工程*, 2012, 34(1):40-45.
- [4] 姚再起,门永新,李落星,等. 基于梁与接头灵敏度分析的车身刚度模式优化[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2017, 44(4):9-15.
- [5] 秦欢. 车身正向概念轻量化设计关键问题研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2018.
- [6] QIN H, GUO Y, LIU Z, et al. Shape optimization of automotive body frame using an improved genetic algorithm optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 121(7):235-249.
- [7] MA Y, WANG X, ZUO W. Analytical sensitivity analysis method of cross-sectional shape for thin-walled automobile frame considering global performances[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2020, 21(5):1207-1216.
- [8] 尹双. 概念车身建模及其断面尺寸优化[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2018.
- [9] 梁伟强. 轿车白车身梁截面和接头结构研究[D]. 重庆:重庆大学汽车工程学院, 2016.
- [10] 王超. 概念设计阶段车身接头结构优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2015.
- [11] HUANG X, WANG J. Lightweight vehicle control-oriented modeling and payload parameter sensitivity analysis[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(5):1999-2011.
- [12] 王登峰,蔡珂芳,马明辉,等. 基于隐式参数化模型的车身轻量化设计[J]. *汽车工程*, 2018, 40(5):610-616, 624.
- [13] 侯振方,胡海欧,张爱兵,等. 车门结构多目标轻量化研究[J]. *机电工程*, 2020, 37(4):359-364.
- [14] 周定智,王霄,刘会霞,等. 基于稳健性和多目标优化的车顶结构轻量化设计研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(9):1170-1175.
- [15] 刘海洋,张钰浩,李广超. 三通道特斯拉阀门结构设计与优化[J]. *轻工机械*, 2020, 38(3):59-64.
- [16] MA X, YU Y, LI X, et al. A survey of weight vector adjustment methods for decomposition based multi-objective evolutionary algorithms[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2020(99):1.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

汤金帅,刘夫云,邓聚才,等. 基于梁截面的商用车驾驶室多目标优化研究[J]. *机电工程*, 2022, 39(2):180-186.

TANG Jin-shuai, LIU Fu-yun, DENG Ju-cai, et al. Multi-objective optimization of commercial vehicle cab based on beam cross section[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(2):180-186.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>