

车身结构概念设计系统多目标优化模块设计^{*}

刘宝越¹ 侯文彬¹ 张红哲² 胡平¹

(1. 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学机械工程学院, 大连 116024)

【摘要】 为了避免汽车车身设计后期的反复修改,开发了车身结构概念设计系统(VCD-ICAE)的多目标优化模块,设计了以车身结构刚度和模态为设计目标的多目标优化算法,可实现在车身质量不增加的前提下提高车身总体结构性能,从而为概念设计阶段实现车身轻量化提供依据,节约时间和成本。最后结合具体车型的概念设计过程,对该车身进行了多目标优化设计,提高了该车身的弯曲刚度、扭转刚度、一阶弯曲频率和一阶扭转频率,验证了多目标优化模块的有效性和正确性。

关键词: 车身 概念设计 多目标优化 轻量化

中图分类号: U463.82 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0017-05

Design of Multi-objective Optimization Module in Vehicle Body Structure Concept Design System

Liu Baoyue¹ Hou Wenbin¹ Zhang Hongzhe² Hu Ping¹

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract

In order to avoid modifying vehicle body repeatedly in the later design stage, the multi-objective optimization module in vehicle concept design intelligent CAE system (VCD-ICAE) was developed. A multi-objective optimization algorithm was designed with the objectives of body structure stiffness and modal. The whole body structure performance could be improved on the premise that mass of body didn't increase. The basis for realization of body lightweight in concept design stage was provided, so the time and cost were economized. Combining concept design process of a concrete body model, the multi-objective optimization was carried on. The bending stiffness, torsion stiffness, first bending frequency and first torsion frequency of body were increased. The validity and correctness of the proposed multi-objective optimization module was verified.

Key words Vehicle body, Concept design, Multi-objective optimization, Lightweight

引言

汽车车身概念设计阶段,首先要实现对车身分析模型的快速构造和对结构尺寸的编辑修改,其次是快速实现多个方案的性能比较和结构优化设计^[1]。以并行工程为主要模式的现代车身设计方法要求设计与分析并行,车身结构分析贯穿于整个

设计过程,优化的思想在概念设计开始的阶段就被引入,以寻找最优的方案,并将其贯穿于整个设计阶段^[2]。

车身刚度包括静刚度和动刚度。车身静刚度一般包括弯曲刚度和扭转刚度。动刚度用车身低阶模态来衡量,其模态频率应与载荷的激振频率相差较大。汽车在工作过程中,动载荷较小时,可忽略不

收稿日期: 2010-04-08 修回日期: 2010-06-23
^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z101)、国家自然科学基金资助项目(10802018)和辽宁省自然科学基金资助项目(20092153)
作者简介: 刘宝越,硕士生,主要从事车身结构概念设计阶段多目标优化研究,E-mail: baoyueliu@163.com
通讯作者: 侯文彬,副教授,主要从事车身结构概念设计研究,E-mail: houwb@dlut.edu.cn

计,只需进行静刚度分析。若所受动载荷较大,或者虽然不大,但作用力的频率与车身结构的某一固有频率接近时,就可能引起结构共振,造成车身强度破坏或产生不允许的大变形。此时在分析汽车静刚度的同时,必须对汽车的结构进行动力学分析,即动刚度分析。一般情况,通过改变车身结构来提高车身的低阶模态固有频率,即一阶弯曲振型频率和一阶扭转振型频率,从而达到避开共振的目的^[3~5]。为了实现车身的最优化设计,实现车身的轻量化和降低成本,需要对车身进行优化设计。在车身的概念设计阶段,对车身的结构性能进行优化可保证后续的设计参数更加合理可靠。但是一般的优化设计仅仅对其中某个指标进行单一目标的优化,很难得到满足实际车身设计需要的最优结构参数,因为对单一目标优化可能会对其他结构性能产生不利的影响。因此需要进行以多个结构性能指标同时作为优化目标的多目标优化。

本文通过对多目标优化算法的研究,在车身结构概念设计系统(VCD-ICAE)中构建多目标优化模块,对轿车白车身快速建立参数化的几何模型和有限元模型,支持以车身板厚和截面形状为设计变量的多目标优化设计。

1 车身结构概念设计系统

车身结构概念设计系统(vehicle concept design intelligent CAE,简称为 VCD-ICAE),基于汽车行业常用的软件 UG/NX 平台进行二次开发,以 CAE 技术为核心,融合了参数化设计、模板技术和优化方法等先进的设计分析技术,可快速建立参数化概念车身的几何模型;生成有限元网格模型和边界约束载荷;通过调用外部求解器 NX/Nastran 进行刚度和模态计算,生成后处理视图和产品设计报告;还可对概念车身的梁和板组合结构进行灵敏度分析及参数优化、形状优化,指导和帮助用户得到满意的设计方案,最终实现“分析驱动设计”这一新的概念设计理念^[6]。该系统包括概念车身的几何建模模块、有限元建模模块、求解与后处理模块、车身结构优化模块。

该系统的多目标优化模块可对白车身有限元概念模型的结构刚度和低阶模态多个目标同时进行灵敏度和优化分析,得到最优设计方案,从而为用户提供更加满意的改进建议。

2 车身结构参数多目标优化算法

多目标优化问题的本质困难在于大多数情况下各子目标是相互冲突的,某子目标性能的改善可能

引起其他子目标性能的降低,同时使各子目标均达到最优一般是不可能的。解决这样的问题需要在各子目标之间进行协调权衡和折中处理,使各子目标函数尽可能达到最优。传统的多目标优化问题采用线性加权法、层次优化法、目标规划法等把多目标问题转换为单目标问题。文献[7]对某轿车提出了拓扑优化和尺寸优化两种结构优化方案,研究了在增加较少质量的条件下提高低阶频率的方法,具有指导意义。本文采用折衷规划法结合平均频率法研究了同时考虑车身结构刚度和低阶模态的多目标优化算法,其多目标优化综合目标函数^[8]为

$$\min F(\rho) = \left[\omega^2 \left(\sum_{k=1}^m \omega_k \frac{C_k(\rho) - C_{k,\min}}{C_{k,\max} - C_{k,\min}} \right)^2 + (1 - \omega)^2 \left(\frac{\Lambda_{\max} - \Lambda(\rho)}{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

- 式中 $F(\rho)$ ——综合目标函数
- m ——静态工况个数
- ω_k ——第 k 个工况的权重
- $C_{k,\max}$ 、 $C_{k,\min}$ ——第 k 个工况柔度目标函数的最大值和最小值
- ω ——柔度目标函数的权重
- $\Lambda(\rho)$ ——平均频率
- $\Lambda_{\max}$ 、 $\Lambda_{\min}$ ——频率目标函数最大值和最小值

式(1)综合考虑刚度和模态两方面优化目标,对于静态结构刚度多目标优化目标函数,可以采用折衷规划法研究多目标优化问题^[9],通常把刚度最大问题等效为柔度最小问题来研究。本文研究了弯曲刚度和扭转刚度两种静态工况,即 $m = 2$,则可得静态多工况刚度多目标优化目标函数

$$\min C(\rho) = \left(\omega_1 \frac{C_1(\rho) - C_{1,\min}}{C_{1,\max} - C_{1,\min}} + \omega_2 \frac{C_2(\rho) - C_{2,\min}}{C_{2,\max} - C_{2,\min}} \right)^2 \tag{2}$$

- 式中 $C_1(\rho)$ 、 $C_2(\rho)$ ——弯曲工况柔度值和扭转工况柔度值

对于动态固有频率多目标优化目标函数,采用平均频率法^[10]来研究,可以有效避免优化过程中频率振荡问题。本文采用模态一阶弯曲振型频率和一阶扭转振型频率作为固有频率优化目标。则可得到低阶模态多目标优化的目标函数

$$\max \Lambda(\rho) = \lambda_0 + s \left(\frac{\psi_1}{\lambda_1 - \lambda_0} + \frac{\psi_2}{\lambda_2 - \lambda_0} \right)^{-1} \tag{3}$$

- 式中 λ_1 、 λ_2 ——模态一阶弯曲振型频率和一阶扭转振型频率
- λ_0 、 s ——给定参数,用来调整目标函数
- ψ_1 、 ψ_2 ——一阶弯曲振型频率和一阶扭转振型频率的权重系数

3 车身多目标优化模块设计

通过对 UG/NX 进行二次开发,将以上多目标优化方法的相应函数设为响应,从而作为多目标优化模块中优化类型的目标函数,应用到 VCD-ICAE 系统中,开发了多目标优化模块,实现了对白车身概念模型结构刚度和低阶模态的多目标优化。

该多目标优化模块基于 NX 系统,采用开放的二次开发语言 NX/Open API,通过 NX/Styler 界面工具建立了向导型界面,通过 NX Spreadsheet 功能实现了优化参数的存取和更新,系统无缝集成了 NX Nastran 作为概念模型分析的求解器,采用 NX OPT 模块作为优化器进行优化迭代。

多目标优化模块流程图如图 1 所示,具体步骤为:

- (1) 优化参数设置:设定优化最大迭代次数及收敛条件参数等。
- (2) 优化类型选择:选择刚度多目标优化、模态多目标优化或刚度和模态综合多目标优化,并设定优化目标方式,即求解优化目标最大还是最小。优化类型选择界面如图 2 所示。
- (3) 约束条件定义:多目标优化模块中 3 种优化类型均以白车身概念模型的车身质量为约束,在质量不增加的约束条件下进行优化分析。
- (4) 优化变量选择:多目标优化模块支持以车身板件厚度和梁截面形状为优化变量进行优化分析。

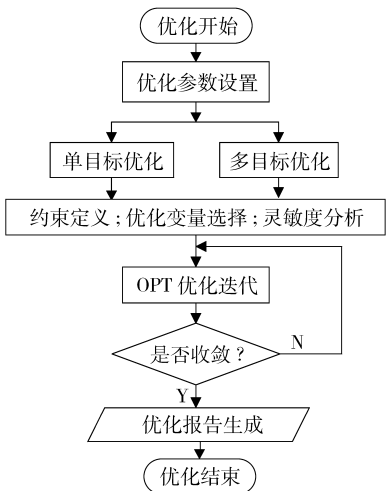


图 1 优化过程流程图

Fig.1 Flow chart of optimization process

(5) 灵敏度分析:对选取的所有优化变量进行灵敏度分析,输出结果,从而确定对优化目标贡献较大的变量。

(6) 优化迭代实现:根据灵敏度分析结果,选取对优化目标贡献较大的变量进行优化迭代分析,直

至满足收敛条件,本模块调用 NX 系统 OPT 模块实现优化迭代。

(7) 优化报告生成:主要包括目标函数迭代曲线、优化目标和变量的优化结果、约束条件变化结果。

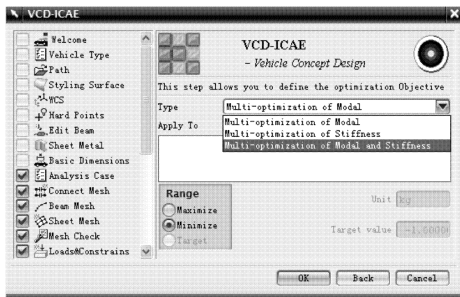


图 2 多目标优化类型选择界面

Fig.2 Selection interface of multi-objective optimization

4 优化设计实例

以国内某汽车生产企业真实车型使用 VCD-ICAE 实现概念设计过程为例,说明其多目标优化设计过程,车身概念模型如图 3 所示。

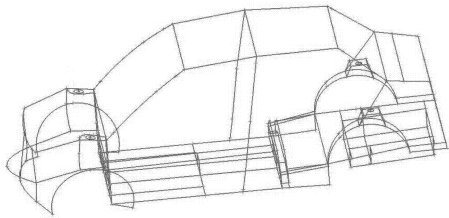


图 3 白车身有限元模型

Fig.3 Finite element model of body-in-white

4.1 灵敏度分析及优化过程

本次多目标优化过程的优化类型选取为车身概念模型的结构刚度和低阶模态综合多目标优化,即优化目标为弯曲刚度、扭转刚度、模态一阶弯曲频率和一阶扭转频率。约束条件为白车身质量不增加,以板件厚度作为优化变量,因此选取对刚度和模态 4 个指标影响较大的板件作为设计变量^[11],利用 VCD-ICAE 系统的多目标优化模块进行灵敏度分析,以便确定对目标函数贡献较大的变量。分析优化综合目标函数可知,当板件厚度变化时,目标函数应减小,而刚度和模态指标值增大,达到优化目的。而灵敏度定义是板件厚度变化对优化综合目标函数的贡献度,即灵敏度为负值且数值越小,说明相应板件厚度的变化对优化综合目标函数贡献越大。本次多目标优化灵敏度分析所选取的板件有 A 柱下板内板、外板、加强板,前风窗下横梁内板、外板、加强板,门槛纵梁内板、外板、加强板,地板横梁内板、外板,地板纵梁内板、外板、加强板,A 柱上板内板、外板、加强板,前风窗上横梁内板、外板,顶盖前纵梁内

板、外板、加强板,顶盖后纵梁内板、外板、加强板,后风窗上横梁内板、外板,C 柱内板、外板、加强板。灵敏度分析结果如图 4。

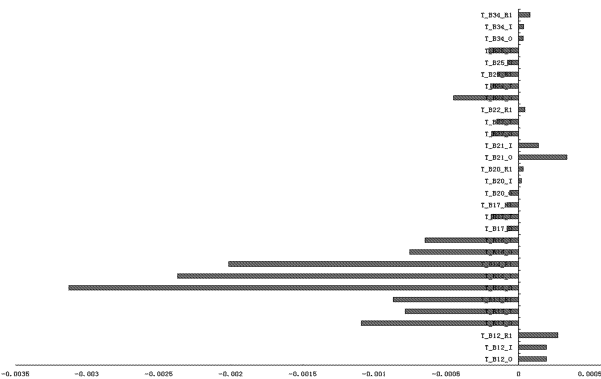


图 4 灵敏度分析结果

Fig. 4 Results of sensitivity analysis

通过灵敏度分析结果可知,板件的厚度变化对综合多目标优化函数贡献较大,因此选取这些板件作为优化变量,利用 VCD-ICAE 系统多目标优化模块实现多目标优化过程。优化迭代过程如图 5,各指标的优化结果如表 1。各板件厚度变化如表 2。

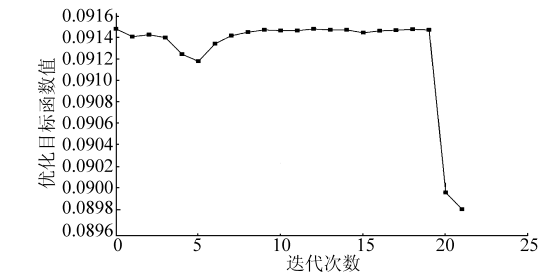


图 5 优化目标迭代曲线

Fig. 5 Iterative curves of optimization objective

表 1 各指标优化前后对比

Tab.1 Comparison of index value before and after optimization		
参数	优化前	优化后
综合目标函数值	0.092	0.090
弯曲刚度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	8 625.341	9 160.912
扭转刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot(^{\circ})^{-1}$	6 196.722	6 335.413
模态一阶弯曲频率/Hz	26.261	26.501
模态一阶扭转频率/Hz	37.436	37.960
白车身质量/kg	184.888	184.816

通过优化结果可以看出,综合目标函数值减小,而弯曲刚度、扭转刚度、模态一阶弯曲频率和一阶扭转频率均有所增大,同时白车身质量基本保持不变,初步达到了优化预期目的。

4.2 综合多目标优化验证与刚度多目标优化对比

由于优化时板件厚度是连续变化的,一些板厚数值不是标准尺寸,因此对结果进行了重新取值,如

表 2,把所取的板件厚度赋予白车身概念模型,此新模型采用与原模型相应各工况相同的约束和载荷方式,求解各指标值,得到刚度模态综合多目标优化验证结果,并进行对比验证,结果如表 3。

表 2 板厚优化前后对比及取值

Tab.2 Comparison of thickness before and after optimization and actually adopted value			
板件类别	优化前	优化后	取值/mm
A 柱下板内板	0.700	0.840	0.850
A 柱下板外板	0.700	0.840	0.850
A 柱下板加强板	1.000	1.171	1.200
门槛纵梁外板	0.700	0.840	0.850
门槛纵梁内板	1.200	1.440	1.400
门槛纵梁加强板	0.700	0.816	0.800
地板横梁外板	1.000	0.938	0.950
地板横梁内板	0.600	0.720	0.700
地板纵梁外板	1.000	0.800	0.800
地板纵梁内板	0.600	0.480	0.500
地板纵梁加强板	1.500	1.200	1.200
A 柱上板外板	0.700	0.560	0.600
顶盖前纵梁外板	0.700	0.560	0.600
顶盖前纵梁内板	1.000	0.800	0.800
顶盖后纵梁外板	0.700	0.840	0.850
顶盖后纵梁内板	1.000	0.920	0.900
顶盖后纵梁加强板	1.000	0.812	0.800
后风窗上横梁外板	0.750	0.600	0.600
后风窗上横梁内板	0.600	0.480	0.500

表 3 各指标对比验证

Tab.3 Comparison and verification of the index value			
参数	原模型	综合多目标优化验证	刚度多目标优化对比
白车身质量/kg	184.888	185.000	185.032
弯曲刚度/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	8 625.341	9 169.056	8 972.755
扭转刚度/ $\text{N}\cdot\text{m}\cdot(^{\circ})^{-1}$	6 196.722	6 295.284	6 322.181
模态一阶弯曲频率/Hz	26.261	26.483	26.271
模态一阶扭转频率/Hz	37.436	37.914	37.438

由表 3 中数据得到刚度模态综合多目标优化后的弯曲刚度提高 6.30%、扭转刚度提高 1.59%、模态一阶弯曲频率提高 0.85%、一阶扭转频率提高 1.28%,且白车身质量只提高 0.06%,在允许范围内,本次刚度模态综合多目标优化达到了预期目的,提供了最优的参数设计和改进方案。

为了对比 VCD-ICAE 系统对于不同子目标的多目标优化的效率和差别,选取与刚度模态综合多目

标优化过程相同的优化工况、约束条件和优化变量，对该车身有限元概念模型进行基于刚度(子目标为弯曲刚度和扭转刚度)的多目标优化，验证结果如表 3 所示。分析表 3 数据可知，与原模型相比白车身质量提高 0.08%、弯曲刚度提高 4.03%、扭转刚度提高 2.02%。可以看到其低阶模态频率值变化微小。结果表明刚度多目标优化之后，车身静态结构刚度性能有所提高，但是动态模态频率未有提高。

基于刚度和模态的综合多目标优化可在一次优化过程中同时得到弯曲刚度、扭转刚度、模态一阶弯曲频率和模态一阶扭转频率的具体优化数值，使 4 个指标同时满足设计要求，具有较高的设计效率，可

为车身设计者同时提供车身静态结构刚度数据和动态模态频率数据。

5 结束语

构建了 VCD-ICAE 系统的多目标优化模块，该模块可对白车身有限元概念模型进行结构刚度和低阶模态各指标多目标优化。阐述了该多目标优化模块所采用的优化算法和开发过程，并以某车型的多目标优化过程为实例，进行了灵敏度分析和优化过程的实现，对于不同子目标的多目标优化结果进行了对比，验证了该车身结构概念设计系统中多目标优化模块的有效性和实用性。

参 考 文 献

- 1 庄蔚敏,兰凤崇,于多年,等. 轿车参数化分析模型的构造及在车身开发中的应用研究[J]. 机械工程学报,2004,40(7):145~149.
Zhuang Weimin, Lan Fengchong, Yu Duonian, et al. Study on auto body parametric analysis model & its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(7):145~149. (in Chinese)
- 2 Detwiler D, Ekhande S, Kistner M. Computer aided structural optimization of automotive body structure[C]//Proceedings of International Congress & Exposition. Detroit, MI., USA: SAE, 1996.
- 3 雷明准. 轿车车身刚度分析与结构优化研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.
Lei Mingzhun. Stiffness analysis and structure optimization of car body[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2009. (in Chinese)
- 4 朱茂桃,何志刚,徐凌,等. 车身模态分析与振型相关性研究[J]. 农业机械学报,2004,35(3):13~19.
Zhu Maotao, He Zhigang, Xu Ling, et al. Mode analysis of car-body and its correlative research shape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(3):13~19. (in Chinese)
- 5 Nima Bakhtiary, Peter Allinger, Matthias Friedrich, et al. A new approach for sizing shape and topology optimization[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1996,5(8):541~554.
- 6 侯文彬,张红哲,迟瑞丰,等. 车身结构概念设计集成系统的实现[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(2):240~244.
Hou Wenbin, Zhang Hongzhe, Chi Ruifeng, et al. Development of integrated system for conceptual design of vehicle body structure[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(2):240~244. (in Chinese)
- 7 Wang Liangsheng, Basu Prodyot Kleiva, Juan Pablo Leiva. Automobile body reinforcement by finite element optimization[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40(8):879~893.
- 8 范文杰,范子杰,苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究[J]. 中国机械工程,2008,19(12):1 505~1 508.
Fan Wenjie, Fan Zijie, Su Ruiyi. Research on multi-objective topology optimization on bus chassis frame [J]. China Mechanical Engineering,2008,19(12):1 505~1 508. (in Chinese)
- 9 Rao S S, Freiheit T I. A modified game theory approach to multi-objective optimization[J]. ASME Journal of Mechanical Design,1991, 113(3):286~291.
- 10 Ma Zhengdong, Noboru Kikuchi, Cheng H C. Topological design for vibrating structures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1995, 121(1~4):295~280.
- 11 王志亮,刘波,马莎莎,等. 基于弯曲刚度和扭转刚度的白车身优化分析[J]. 机械科学与技术,2008,27(8):1 021~1 024.
Wang Zhiliang, Liu Bo, Ma Shasha, et al. On body-in-white optimization based on bending stiffness and torsional stiffness [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008,27(8):1 021~1 024. (in Chinese)