

DOI: 10.3901/JME.2014.18.127

基于复杂工程约束的车身梁截面优化设计*

侯文彬¹ 王增飞¹ 张 伟¹ 张红哲²

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024;

2. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 通过对车身梁截面设计约束问题的研究,将车身薄壁梁截面形状优化设计问题和截面的材料、厚度等离散参数优化问题耦合起来。以工程设计中的可装配性和可制造性为设计约束,建立车身梁截面多目标优化方法。该方法以车身梁结构性能、成本、质量为目标,通过对梁截面形状进行独特的编码,实现以梁截面的形状、厚度、材料为设计变量的多目标优化模型,该模型采用 NSGA-II 遗传算法实现了多目标优化问题计算。基于该方法实现相应的软件模块并建立材料参数与厚度数据库。实例证明,该方法既可用于车身概念设计阶段确定满足设计目标且符合工程要求的梁截面形状参数,也适用于详细工程设计阶段对现有车身截面进行局部优化以增加车身刚度和减小部件质量。

关键词: 车身设计; 截面形状; 离散优化; 遗传算法

中图分类号: U463

Optimization Design for Auto-body Beam Section Based on Complex Engineering Constraints

HOU Wenbin¹ WANG Zengfei¹ ZHANG Wei¹ ZHANG Hongzhe²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024;

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

Abstract: Through the study of the automotive body beam cross-section optimization, the method couples the continuous optimization problem, such as cross-section shape, with the discrete variable optimization problems, such as types of section material and their thickness. With the assembly and manufacturability in the engineering design as design constraints, an automotive body thin-walled beam cross-section multi-objective optimization method is established. The method build a multi-objective optimization model with the vehicle body beam structure performance, cost, weight as design goals, the section shape, thickness, material as design variables by using a special coding way for the section shape. NSGA-II genetic algorithm is applied to solve the multi-objective optimization, and a material parameters and standard thickness database is built in the method. The case proves that this method not only can be used to quickly obtain the beam cross-sectional shape and material parameters, which meets the design goals and the requirements of engineering design in the conceptual design phase, but also can work in detailed engineering phase to optimize the local shape for the beam to improve the body stiffness while decreasing the body mass.

Key words: vehicle body design; section shape; discrete optimization; genetic algorithm

0 前言

汽车行业间的竞争要求不断缩短车身设计周期。在车身的概念设计阶段也要求应用 CAE 技术对车身设计性能进行早期的评估,一些操作简单、适用于车身结构概念设计的 CAE 软件技术被开发和

使用。如日本东京大学的 NISHIGAKI 等^[1]研究开发了 FOA 系统,以电子表格和二维图形等简单方式为车身设计人员提供简化车身框架的结构性能分析工具。德国的商业软件 SFE 系统^[2]为车身概念设计分析提供了隐式参数建模和网格自动生成的功能,可外接多种商业计算软件进行分析与优化。申请者及课题组成员也结合国家自然科学基金项目自主开发了“车身结构概念设计智能 CAE 系统”^[3]。但由于在车身概念设计阶段,用于车身性能评估的车身模型大多是由梁单元构成的简化框架模型,车身概念

* 国家自然科学基金(11272077)、辽宁省“百千万人才工程”(2010921057)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT12LK10)资助项目。20130930 收到初稿,20140323 收到修改稿

设计得到的是具体的梁单元的特性参数,无法为详细设计提供需要的详细的截面形状信息,设计者只能根据以往的经验 and 直觉来设计,这必然将截面形状的一些不合理性带到详细设计过程中,这已成为由车身概念设计线框模型顺利过渡到由曲面定义车身详细设计模型的瓶颈问题。此外,截面形状还直接影响了汽车的碰撞安全性,如果截面设计不合理,则需要在详细设计阶段根据需要对局部截面形状、材料或厚度进行调整,如为了提高车身侧面碰撞性,需要在 B 柱中增加加强板或改变加强板形状^[4]。因此,对于车身设计而言,无论是在前期的概念设计还是后续的详细设计阶段,都需要一个完整的车身截面优化设计方法及软件工具作为指导,以增强车身的碰撞安全性,实现车身的轻量化^[5]。

车身截面优化问题主要包括对截面厚度、材料和形状拓扑的优化。目前已经有多种截面优化方法被提出,例如 BANICHUK^[6]最早研究了截面形状优化问题,提出了一种实现截面刚度最大化的优化方法。ENGER 等^[7]基于边界摄动方法在扭转、弯曲和剪切复合载荷下实现了截面优化方法。YOSHIMURA 等^[8]采用离散拓扑优化算法对车身截面形状进行设计。国内学者对截面设计及优化问题也做了许多研究工作,如高云凯等^[9]结合微型电动车非承载式车身骨架的研制过程采用普通机械优化方法确定合理的梁截面尺寸;蒋致禹等^[10]结合径向基函数法研究了一种薄壁结构在耐撞指标下的轴向冲击吸能特性,并根据耐撞性指标优化了这种吸能结构的截面。这些优化技术在特定的条件下都可以得到很好的应用,但是不能作为一个通用的技术解决车身截面的实际工程设计问题,没有充分考虑实际工程设计因素对于截面设计的影响。车身截面设计需要开发一个真正符合汽车行业标准的,满足结构性能、装配、制造要求的综合的、多约束的优化方法。

1 车身梁截面设计中的工程约束

车身截面是由多层板焊接而成的,如图 1 所示。截面层数一般由一层到五层,由一层板构成的截面称为开口截面,如车身前端的防撞梁;两层以上则构成封闭的闭口截面,如车身 A、B、C 柱等。车身截面的设计目标首先需要满足设计人员对截面结构特性的要求,截面特性主要包括截面面积(S)、惯性矩(I_x, I_y, I_{xy})、截面系数(W)和塑性力矩(M)等,此外还需要使车身结构最轻且材料成本最低。在实际工程应用中,要得到所需的截面特性不但需要选择适

合的材料和材料厚度,而且需要设计适合的截面形状,因此截面设计的约束主要在于组成截面不同板的材料和形状。

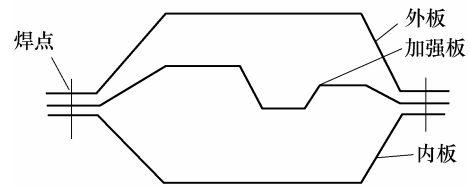


图 1 车身典型截面形状

1.1 材料约束

目前车身材料主要采用了价格较低的普通钢板,但高强度钢板的使用率在不断增加,镁、铝合金以及复合材料也逐步应用于车身某些部件,这些板的厚度一般从 0.5 mm 到 3.0 mm 设计者必须从市场可提供的标准厚度的材料中进行选择制造,因此材料类型和材料厚度的选择是一个离散问题,需要根据实际市场供应定义一个标准材料库,截面设计所需从材料库中选取。

1.2 形状约束

车身形状的优化设计一般可抽象为用于控制截面形状的坐标点的连续变化,这是一个连续问题。但是,车身截面形状的变化不是任意的,是受到装配、制造等工程因素制约的,如车身 B 柱是多层截面,其外板需要和车门进行装配,形状受到车门外形或内饰的制约,只能通过调整其加强板形状(图 2)进行局部形状优化设计。在进行截面形状设计时,还需要考虑制造因素,因为车身截面大多是冲压工艺的产物,所以截面形状不能产生负角(图 3),层板之间也不能交叉(图 4),车身截面纵向变形也不能过于剧烈。

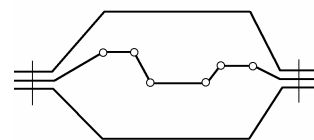


图 2 局部区域优化

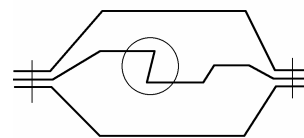


图 3 截面有负角

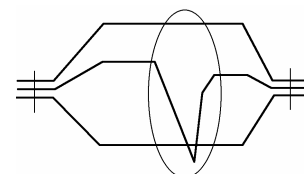


图 4 截面有交叉

针对上述问题，本文开发了一个可实际用于工程设计的车身截面优化方法，能够综合截面形状、层数、材料、厚度等离散设计变量和截面形状等连续设计变量，在满足多种工程约束条件下能够实现车身的结构最轻、材料价格最低且满足截面特性指标要求的多个目标。

2 车身梁截面优化模块设计

车身截面设计系统是一个可用于车身梁截面设计、管理和优化的软件模块。该模块采用 NX Open C++语言进行开发，基于 Siemens NX CAD 平台实现截面对象的建立和编辑，以及 CAD 数据的读取和导出。系统主要包括截面采集、截面管理、截面优化和截面导出模块，采用通用的电子表格文件作为数据库存储格式，通过现有的 NX Spreadsheet 接口实现对数据的存储访问。在使用时，该模块可通过 DLL 接口嵌入到车身结构概念设计系统中，也可以通过用户界面独立运行。

系统主要功能结构如图 5 所示，包括以下功能模块。

(1) 截面采集：系统可导入包含截面形状信息的 iges 格式或 step 格式的中性 CAD 文件，按照上述板的分类自动将截面分为若干条线段，通过交互式定义截面的内板、外板、加强板并将截面信息存入截面数据库中。

(2) 截面管理：包括截面属性的编辑、截面形状编辑、截面查询、截面删除等数据库的操作。

(3) 截面优化：支持截面特性的计算，并嵌入上述截面优化算法，可优化截面的形状、材料和厚度。该模块如结合车身概念设计系统，可实现通过

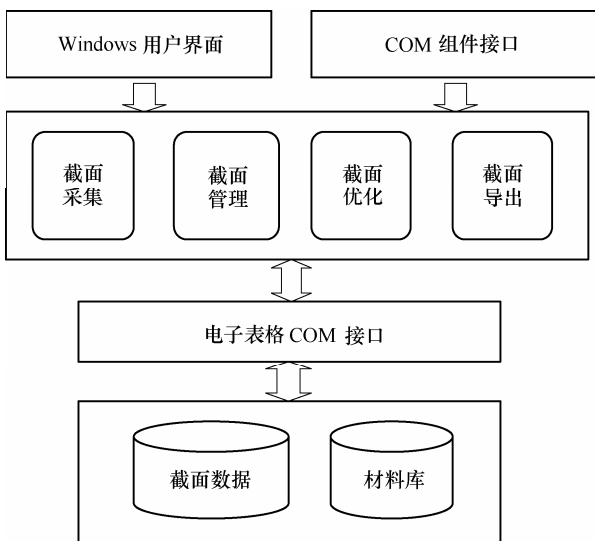


图 5 车身截面设计系统功能结构

截面形状的改变来优化车身的刚度。

(4) 截面导出：系统将支持以 iges 格式或 step 格式的中性 CAD 文件方式导出截面形状。

3 梁截面优化算法设计

解决车身截面优化设计问题需要确立适合的优化目标、约束和优化变量，设计求解响应的方法和选择适合优化求解的算法。下面进行本优化模型定义。

3.1 优化目标

本算法是一个多目标优化问题，优化目标包括截面的成本(C)和截面性能，截面性能主要参数包括截面面积(S)、惯性矩(I_z, I_y, I_{zy})、塑性弯矩($M_{p,y}, M_{p,z}$)和断面系数(W_t 和 W_z)。截面特性的计算方法和公式已经是比较成熟的理论，下面给出几个目标响应值的基本计算公式。

截面面积

$$f_1 = S = \int dA \quad (1)$$

y 轴惯性距

$$f_2 = I_y = \int_A z^2 dA \quad (2)$$

z 轴惯性距

$$f_3 = I_z = \int_A y^2 dA \quad (3)$$

y 向塑性力矩

$$f_4 = M_{p,y} = \int_A z \sigma_z(y, z) dA \quad (4)$$

z 向塑性力矩

$$f_5 = M_{p,z} = \int_A z \sigma_y(y, z) dA \quad (5)$$

抗扭截面系数

$$f_7 = W_t = \frac{I_p}{\rho_{\max}} \quad (6)$$

抗弯截面系数

$$f_8 = W_z = \frac{I_z}{y_{\max}} \quad (7)$$

材料成本

$$f_9 = C = \int_A c dA \quad (8)$$

式中， I_p 是极惯性矩， ρ_{\max} 为最大计算半径， I_z 为相对中性层的惯性矩， y_{\max} 是相对于中性层的最大距离。

如果在考虑成本最低的情况下使截面性能最佳，可定义如式(9)所示的优化目标为

$$\begin{cases} \max(f_{i_1}) & i_1 = 2, 3, 5, 6, 7, 8 \\ \min(f_{i_2}) & i_2 = 1, 9 \end{cases} \quad (9)$$

3.2 优化设计变量定义

设计变量包括截面形状、材料、截面的层数和厚度。其中,形状属于连续变量,截面层数、材料类型和厚度属离散变量。离散的变量可通过建立相应的数据库,存储其可取的值来定义。而截面形状优化参数定义是本算法中要解决的关键技术,决定了后面优化算法的选取,车身截面形状优化涉及相应截面的装配约束和制造约束。由于截面优化是一个多目标优化问题,且优化变量包括离散变量和连续变量,比较适合采用遗传算法进行优化。但通常约束处理对于遗传优化方法是一个难点,特别是当约束不能够被显示的时候,其更难于表达。因此,考虑通过将约束问题转化为对于优化变量的限制来实现上述约束。下面给出优化变量的定义。

如图 6 所示,以截面两个焊点连线为 y 轴,过一个焊点垂直 y 轴直线设为 z 轴,建立截面局部坐标,可设定截面左边焊点位置为坐标原点。沿 y 轴方向将两焊点间距离等分成 $J+1$ 段得到 J 个点,每层截面上将产生相对应的 J 个点作为截面形状的控制点,每个控制点的坐标可表示为 $(y_{j,k}, z_{j,k})$ ($j=1, 2, \dots, K$), K 在这里表示截面的层数,其中横坐标 $y_{j,k}$ 可用 $jL/(J+1)$ 表示, L 为两个焊点间的长度。

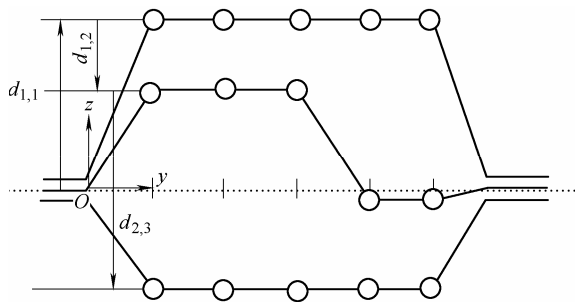


图 6 形状设计变量的定义

可定义设计变量为 $d_{j,k}$, 其中 $d_{j,1}$ 为第 1 层板上第 j 个点到 y 轴的距离, $d_{j,k}$ ($k>1$) 则表示第 k 层板的第 j 个点到第 $k-1$ 层板的第 j 个点的距离, 因此每个形状控制点 $z_{j,k}$ 坐标可以表示为设计变量 $d_{j,k}$ 的函数。控制点总个数为 KJ , 坐标公式即

$$(y_{j,k}, z_{j,k}) = \left(\frac{jL}{J+1}, d_{j,1} - \sum_{l=2}^k d_{j,l} \right) \quad (10)$$

3.2.1 截面可制造性约束的转化

截面可制造性工艺约束限制了截面形状不能产生负角、截面各层之间不能出现交叉的情况, 否则无法通过冲压工艺进行加工。由于在本项目中的形状优化变量没有直接选择形状控制点, 而是使用各层板控制点之间的偏移量 $d_{j,k}$, 这为解决可制造性约束提供了方便。

由于设计变量 $d_{j,k,m}$ 定义的是控制点位置的变化, 是在 j 点垂直于 y 轴方向进行上下移动, 这就决定了如果初始的截面形状没有负角, 优化后的截面形状也不会产生负角, 这就消除了负角情况。

为了约束同截面内出现形状交叉情况, 可通过对设计变量 $d_{j,k}$ 定义设计边界 d^L 和 d^U 来实现这个约束

$$d_{j,k}^L = \begin{cases} -d_{\max} & -d_{\max} \leq z_{j,k} - z_{j,k-1} \\ z_{j,k} - z_{j,k-1} & -d_{\max} > z_{j,k} - z_{j,k-1} \end{cases} \quad (11)$$

$$d_{j,k}^U = d_{\max}$$

式中, d_{\max} 是指在考虑材料和冲压工艺时允许的最大位移变化, $z_{j,k}$ 为截面上第 k 层板上第 j 点的 z 向坐标。对于单层板开口截面优化问题只需要设定 $d_{j,1}$ 的变化范围。

3.2.2 装配约束的设定

车身截面是由多层板组成, 在进行形状调整时, 由于考虑到装配设计或位置约束, 截面的部分形状并不能参与形状的调整。可考虑在采集截面形状时对截面各层板进行命名, 如内板、外板、加强板 1、加强板 2 等, 在优化设置时通过交互方式指定参与形状变化的板或控制点即可表示这一约束, 约束最终应转化为对控制点的描述, 即不参与优化的设计变量 $d_{j,k} = 0$ 。

3.2.3 材料约束设定

目前车身材料主要采用了价格较低的普通钢板, 同时高强度钢板的使用率在不断增加, 镁、铝合金以及复合材料也逐步应用于车身某些部件, 这些板的厚度一般从 0.6 mm 到 3.0 mm, 并且不同材料金属板的价格相差较大。笔者通过对金属相关资料的查询与市场调研, 建立了包含材料力学参数、厚度、价格的材料库。在优化过程中, 直接调用材料库中的数据进行材料类型和厚度的选择。

3.3 优化算法实现

由于本文问题是一个多目标优化问题, 且是一个连续优化问题和离散优化问题相耦合的问题, 非常适合采用遗传算法进行优化。在遗传算法中, NSGA-II 是 DEB 在其提出的 NSGA 算法的改进^[11]。该算法通过引入精英策略、密度值估计策略和快速非支配排序策略, 其优化结果已经优于其他相似算法, 因此在以往的研究中多有采用^[12-14]。本文的优化过程中, NSGA-II 以预期达到的梁截面的性能参数与低的质量作为目标函数, 进行带精英策略的快速非支配排序, 有效地降低了算法的时间复杂度。

4 实例分析

在本文算例中，首先采用课题组自主开发的车身结构概念设计智能 CAE 系统(简称 VCD_ICAE)进行一款三厢车车身结构的全新概念设计，该系统所采用的模版技术可直接生成车身概念结构，并进行所需的结构分析和尺寸参数优化，得到相关的设计参数。本文作为 VCD_ICAE 系统的后续技术，以 A 柱梁截面设计为例(图 7)，根据 VCD_ICAE 系统得到的梁截面设计参数对该截面进行详细设计和优化。该截面的设计参数 $I_y=92\ 769.95\ \text{mm}^4$ ， $I_z=218\ 764.26\ \text{mm}^4$ 。

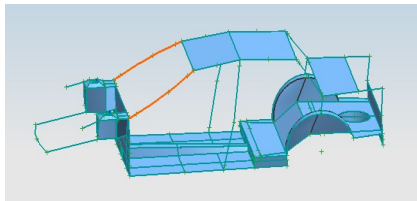


图 7 车身优化梁选取

从 VCD_ICAE 系统中的截面库中得到该截面的初始形状作为优化设计初值，如图 8 所示。通过本文算法进行优化设计。由式(2)可知，优化设计目标为

$$\begin{aligned}
 f_2 &= I_y = 92\ 769.950\ \text{mm}^4 \\
 f_3 &= I_z = 218\ 764.262\ \text{mm}^4 \\
 \max(f_{i_1}) \quad & i_1 = 5, 6, 7, 8 \\
 \min(f_{i_2}) \quad & i_2 = 1, 9
 \end{aligned}$$

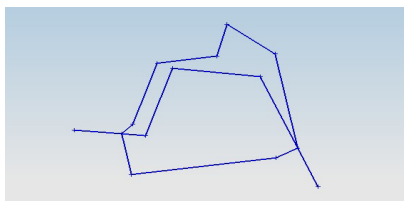


图 8 截面初始形状

在进行截面优化时，对参与截面形状优化变量的相关控制点进行了两种约束，第一种是考虑外板作为形状约束的加强板和内板形状的优化，该情况一般发生在车身造型确定以后的车身结构概念设计阶段；第二种是考虑以内板和外板作为形状约束的加强板的优化，该情况经常发生在在详细设计阶段外形和内饰都确定的情况下。

本次优化参数设置如下。种群大小为 200 个，迭代次数为 400 次，变异率为 0.05，交叉概率为 0.8。终止条件为达到预定的代数或进化停止。

图 9 和图 10 为第一种优化工况的优化过程和

截面形状；图 11 和图 12 为第二种优化工况的优化过程和截面形状。

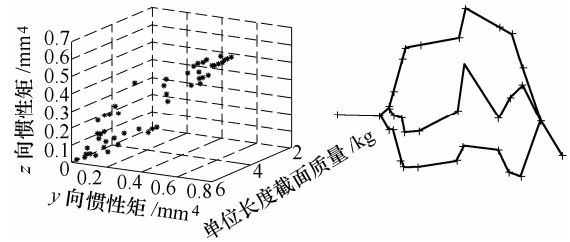


图 9 工况 1：内板、加强板优化值 1

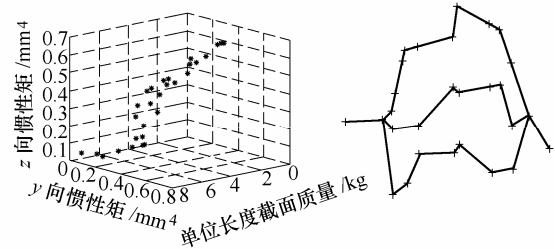


图 10 工况 1：内板、加强板优化值 2

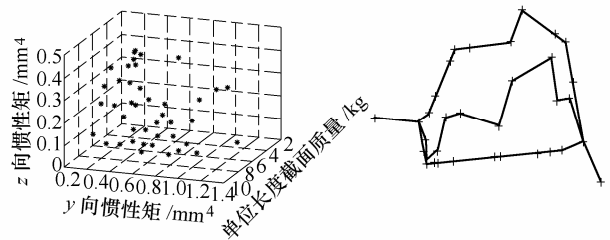


图 11 工况 2：加强板优化值 3

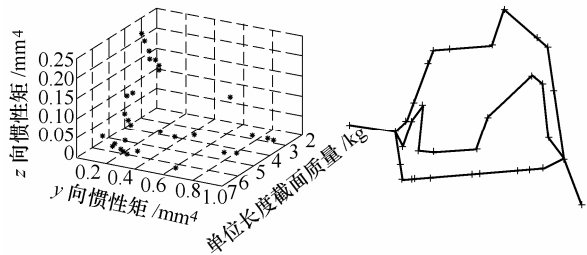


图 12 工况 2：加强板优化值 4

表 1 给出这两种工况优化结果。工况 1 为考虑外板作为形状约束的加强板和内板形状的优化设计，工况 2 为以内板和外板作为形状约束的加强板优化设计。优化值(1)、(3)只采用普通钢板和高强钢材料进行优化设计，优化值(2)、(4)增加了铝合金等其他材料。与设计目标相比，优化值(3)的误差最小，为 0.08%，材料成本较低；优化值(1)成本最低，但质量最大；优化值(4)的质量最小，但材料成本也较高。考虑到目前的车身连接工艺以焊接为主，采用优化值(3)的设计方案为佳。随着将来铝合金材料成本降低，以及铝合金和钢的连接工艺的成熟，也可选择优化值(4)的设计方案。

表 1 A 柱截面优化结果

项目	工况 1		工况 2	
	优化值(1)	优化值(2)	优化值(3)	优化值(4)
A 柱梁质量/kg	5.92	5.46	5.38	3.73
材料花费/元	28.32	33.64	32.64	45.01
y 轴惯性距/mm ⁴	92 711.09	92 119.76	92 802.70	93 062.68
z 轴惯性距/mm ⁴	229 285.59	222 343.85	218 934.54	217 680.04
外板材料、厚度/mm	高强度, 0.60	45 钢, 0.80	45 钢, 0.90	高强度, 1.00
内板材料、厚度/mm	45 钢, 1.50	铝合金, 2.00	高强度, 1.20	铝合金, 3.00
加强板材料、厚度/mm	45 钢, 1.80	高强度, 0.60	高强度, 1.60	45 钢, 1.00
误差(%)	0.80	1.63	0.08	0.32

5 结论

车身梁截面的设计是车身概念设计阶段的重要内容, 直接决定了车身的结构特性、安全性和 NVH 特性, 是车身概念设计过渡到详细设计的瓶颈。本文通过对车身骨架截面优化问题的研究, 将截面形状连续优化问题和截面的材料、厚度、加强板的层数等离散变量优化问题耦合起来, 以工程设计中的可装配性和可制造性为约束, 建立了车身截面多目标优化方法, 实现以满足设计性能且降低车身质量和成本为目标的车身截面设计和优化的整体技术, 为工程人员在概念设计阶段进行截面形状的设计提供指导。实例表明该方法可在达到预定刚度的目标下, 能够有效地减小梁的质量。因此利用这种方法可以在概念设计阶段对车身梁截面的设计提供参考, 能有效提高梁截面设计效率。

参 考 文 献

- [1] NISHIGAKI H, NISHIWAKI S, AMAGO T, et al. First order analysis for automotive body structure design[C]//Proceedings of DETC2000, ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2000: 1-10.
- [2] ZIMMER H, UMLAUF U, THOMPSON J E. Use of SFE CONCEPT in developing FEA models without CAD[R]. SAE, 2000-01-2706, 2000.
- [3] HOU W B, ZHANG H Z, CHI R F, et al. Development of an intelligent CAE system for auto-body concept design[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(2): 175-180.
- [4] KIM H S, WIERZBICKI T. Effect of the cross-sectional shape of hat-type cross-sections on crash resistance of an 'S'-frame[J]. Thin-Walled Struct., 2001, 39(7): 535-543.
- [5] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 27-35.
- LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminium hybrid structure car body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 44(6): 182-197.
- [6] BANICHUK N V. Optimization of elastic bars in torsion [J]. Int. J. Solids Struct., 1983, 12: 275-286.
- [7] EGNER W, ZYCZKOWSKI M. Optimal plastic design of a bar under combined torsion, bending and shear[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 22(5): 394-406.
- [8] YOSHIMURA M, NISHIWAKI S, IZUI K. A multiple cross-sectional shape optimization method for automotive body frames[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(1): 49-57.
- [9] 高云凯, 邵力行, 张海华. 微型电动车非承载式车身轻量化研究[J]. 汽车工程, 2008(9): 808-810.
- GAO Yunkai, SHAO Lixing, ZHANG Haihua. Development of skeleton structure for the frame/body construction of a mini electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2008(9): 808-810.
- [10] 蒋致禹, 顾敏童, 赵永生. 一种薄壁吸能结构的设计优化[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 111-116.
- JIANG Zhiyu, GU Mintong, ZHAO Yongsheng. Design and optimization of an energy-absorbing thin-walled structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 111-116.
- [11] DEB K, PRATAP A, MEYARIVAN T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [12] 胡朝辉, 成艾国, 陈少伟, 等. 多材料—多零件规格组合结构多目标优化的应用[J]. 机械工程学报, 2011,

46(22): 111-116.

HU Zhaohui, CHENG Aiguo, CHEN Shaowei, et al. Application of multi-objective optimization of multimaterial-multi-part specification composite construction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 46(22): 111-116.

- [13] LI Jun, LIU Lijun, FENG Zhenping. Multiobject optimization of a centrifugal impeller using evolutionary algorithms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(3): 389-393.

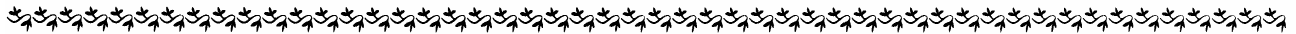
- [14] LAI Yinan, DAI Ye, BAI Xue, et al. Discrete variable structural optimization based on multidirectional fuzzy genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 255-261.

作者简介: 侯文彬, 男, 1973年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车身结构设计与优化。

E-mail: houwb@dlut.edu.cn

张红哲(通信作者), 女, 1970年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品优化设计。

E-mail: zhanghongzhe@dlut.edu.cn



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

基于随机动态规划的混合动力履带车辆双侧驱动与能量管理协调控制及优化*

项目负责人: 邹渊(E-mail: zouyuan@bit.edu.cn)

依托单位: 北京理工大学

项目批准号: 50905015

1. 项目简介

以双电机独立驱动的混合动力履带车辆为研究对象和应用背景, 从优化控制理论角度对履带车辆混合动力动态特点及系统控制设计开展研究。重点研究履带车辆混合动力驱动系统电耦合瞬态模型、最优化控制设计方法以及混合驱动系统参数与控制协同优化设计。研究表明, 最优控制理论能够有效指导混合动力驱动系统控制优化设计。其中确定性动态规划获得理论的控制最优解可以作为系统控制学习和标定的样本。随机动态规划引入功率需求的随机性, 通过策略迭代获得最优控制律具备多工况适应性。庞特里亚金极值原理从系统解析角度来获得最优控制的必要条件, 该方法能降低计算量。混合驱动系统参数与控制协同优化能揭示系统动/静态特性与控制的耦合规律。为混合驱动系统集成及控制设计开辟新的理论途径与参考。

2. 主要创新点及主要研究进展

(1) 提出了混合驱动系动态模型随机性表征、模型降维及其最优控制理论框架, 形成了应用动态规划和庞特里亚金极值原理的最优控制设计系统性方法。

(2) 提出了混合驱动系部件动/静态特性和控制的动态匹配新方法, 形成了以过程泛函和性能指标综合优化协同设计理论。

(3) 发展了面向混合驱动系的最优控制和锂电池储能状态最优估计算法, 提高了最优控制算法在混合驱动系中适用性, 提出了高/低阶 Kalman 组合滤波电池容量衰退估计方法, 提高了估计精度。所提理论和方法在国家科技支撑项目中获得应用与验证。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上作为候选项目推荐参加“国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目”的评选。