

文章编号: 1002-0268 (2010) 09-0154-05

城市公交客车车身结构拓扑优化设计

高云凯, 周晓燕, 余海燕

(同济大学, 上海 201804)

摘要: 根据某城市公交客车初步确定的造型和总布置的要求, 为了能在车身的概念设计阶段获得该客车车身骨架的合理布置方案, 在车身结构设计中引入了拓扑优化的设计方法, 并且将该优化结果应用于指导设计。利用有限元分析软件 Hypermesh 建立客车的拓扑优化的有限元模型, 并且在优化模块 Optistruct 中, 采用变密度法和线性加权法, 研究了多工况条件下城市公交客车车身结构的拓扑优化问题。根据得到的拓扑优化结果, 同时充分考虑实际的装配和性能要求, 完成城市公交客车车身骨架的初步布置。在此基础上, 进行进一步的尺寸优化, 得到满足设计要求的城市公交客车车身结构。拓扑设计得到的结果可为 12 m 的城市公交客车的车身骨架布置提供参考。

关键词: 汽车工程; 车身结构; 拓扑优化; 城市客车; 多工况

中图分类号: U463.82⁺2

文献标识码: A

Topological Optimization for Body Structure of City Bus

GAO Yunkai, ZHOU Xiaoyan, YU Haiyan

(Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to obtain a reasonable city bus body skeleton layout at the conceptual design stage according to the preliminary styling and requirements of general arrangement of the city bus, topology optimization was introduced for bus body structure design, and the optimization result was used for guidance of design. The topology optimization model of the bus was constructed with the FEM software Hypermesh, and variable density method coupled with linear weight sum method were employed into the optimization module Optistruct to study the optimization of city bus body structures under multiple-case conditions. The preliminary layout of the city bus body skeleton was completed according to the result of topology optimization in fully consideration of other practical assembly and performance requirements. A further size optimization was subsequently conducted to obtain the satisfactory designed body structure of the city bus. The result of the topology design can provide a recommendation for the body skeleton layout of 12 m city bus.

Key words: automobile engineering; body structure; topology optimization; city bus; multiple load case

0 引言

城市公交客车在我国国民的日常生活中占据重要地位。客车车身结构影响车身强度、刚度、模态和疲劳寿命等性能, 且对客车的安全性能起决定性作用。

现代汽车工程师认为, 应该在车身结构设计的初始阶段引入拓扑优化理论, 而不是仅凭经验来设

计或改造结构^[1]。结构拓扑优化是一种概念化设计, 开展于概念设计早期, 主要研究结构材料布局。在概念设计阶段为设计者提供科学依据, 使复杂的结构和部件可灵活、理性地进行优选^[2]。与形状优化和尺寸优化相比, 由于拓扑优化的结果决定了产品的最优拓扑, 即决定了产品的最终形状与性能, 应用拓扑优化技术, 可以在很大程度上保证车身结构设计后续的尺寸和形状优化是在材料分布最优初

收稿日期: 2009-09-16

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金资助项目 (20070991)

作者简介: 高云凯 (1963—), 男, 黑龙江宾县人, 同济大学教授、博导, 研究方向为汽车车身结构与工艺。(gaoyunkai@tongji.edu.cn)

始拓扑形式下进行的, 能够极大地提高材料利用率^[3]。具体到客车车身设计方面, 其目的是在考虑各种可能出现的危险工况下, 根据不同的约束条件, 在一个连续体的设计空间中确定出车身主要承载结构件的最佳布局^[4]。国内陆续开展对客车车身结构的拓扑研究, 目前的研究主要是针对客车的某单一部件进行拓扑, 或者是客车车身整体结构骨架的单工况拓扑优化设计。

本文基于变密度法, 根据线性加权法将多工况载荷下的多目标函数的优化问题转化为单目标函数问题。并根据拓扑优化结果, 完成客车车身骨架的初步布置。

1 客车拓扑优化模型

本文根据城市公交客车的初步造型建立拓扑优化模型, 总布置确定车长 12 m 车身是半承载结构。根据拓扑优化设计理论, 进行拓扑优化首先是要建立车身骨架的拓扑空间, 在这个设计空间上可以任意布置骨架材料, 考虑城市公交客车的基本功能、性能和装配等实际要求, 选取可能的尽量大的区域, 充分挖掘优化的潜力, 建立了基于造型的车身拓扑优化模型, 如图 1 所示。要求这种结构应既满足载荷及约束的特点, 又便于优化计算。将客车顶盖、窗台以下的侧围部分、底架和牛腿确定为拓扑优化空间, 其他非拓扑空间部分骨架根据参考车型进行布置。针对客车车身的基本结构采用曲面薄板建立拓扑空间基本结构, 同时考虑到计算效率和客车本身结构特点, 非拓扑优化空间部分采用梁单元进行离散, 板、梁单元之间根据节点对应关系采用 rbe2 单元连接。

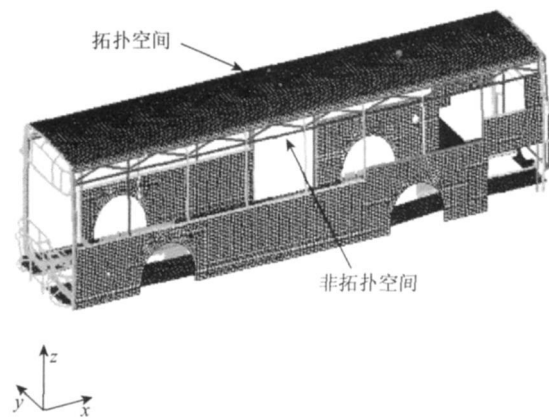


图 1 车身拓扑优化模型

Fig 1 Topology optimization model of city bus body structure

在前处理过程中, 根据造型, 参考某客车相应

部分的重量, 通过公式 (1) 计算各部分板单元的厚度, 确定了拓扑优化板单元应采用的初始厚度值。

$$d_i = 5 \times M_i / (\rho \times A_i) \tag{1}$$

其中, d_i 为各部分板单元的厚度; M_i 为参考车型相应部分的重量; ρ 为本文研究的客车车身的材料密度; A_i 为相应各部分拓扑空间的面积。

在分析过程中, 为得到最佳的拓扑优化结构布局, 综合考虑客车实际可能发生的危险工况, 包括一种弯曲工况和 4 种单轮悬空的弯扭组合工况。

1.1 载荷处理

根据客车车身骨架在各个工况下实际的载荷, 应用静力等效原则, 将载荷施加到相应的节点上。考虑到城市公交客车实际运行状况, 在进行静态弯曲工况分析时, 在实际载荷的基础上考虑 2.5 倍的动载系数, 4 种弯扭组合工况考虑 1.5 倍的动载系数。

1.2 约束条件

本文研究的城市公交客车车身总布置中, 车架通过钢板弹簧与前后车桥相连, 每一车桥的两端装有车轮。拓扑分析中约束车架钢板弹簧前后吊耳支座处, 如图 2 所示。

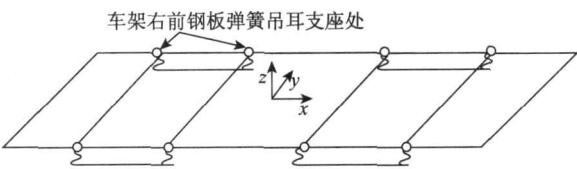


图 2 约束位置

Fig 2 Constraint positions

以弯曲工况为例, 车身骨架整体约束点及其约束自由度如表 1 所示。

表 1 车身骨架整体约束点及其约束自由度

Tab. 1 Constraint positions and DOFs of bus body skeleton

位置	钢板弹簧前吊耳	钢板弹簧后吊耳
左前钢板弹簧	Uy Uz	Uz
右前钢板弹簧	Uz	Uz
左后钢板弹簧	Ux、Uy、Uz	Uz
右后钢板弹簧	Uz	Uz

2 多工况拓扑优化方法

拓扑优化设计的基本要素包括设计变量、约束函数和目标函数。根据本文研究的客车车身结构, 选取优化区域的单元伪密度作为设计变量, 与传统优化设计不同, 拓扑优化设计变量是一个不断减小进而重组的过程, 结构拓扑优化的变密度方法是将结构中定义的设计区域, 进行有限元单元网格划分, 每一个单元都由相对密度为 0~1 的多孔材料组成,

在设计区域加上载荷和边界约束条件之后, 结构柔度达到最小值^[5]。

单工况的拓扑优化研究结果一般只适用于所研究的典型工况, 对于其他工况而言未必是最优的设计, 甚至可能是不合理的设计, 所以研究在多种工况下的综合拓扑优化设计更具有工程意义。

对于多工况拓扑优化, 本文研究采用质量分数约束方法, 由于计算厚度时拓扑空间的质量为参考车型车身相应部位单元厚度的 5 倍, 考虑约束函数时, 定义质量分数上限为 20%。车身结构刚度是较强度要求更高的指标, 车身设计和优化时, 应以满足刚度要求为主要目标^[6]。为使客车车身发挥最大的承载能力, 定义整车结构的柔度最小作为目标函数。用变密度方法求解多工况下结构拓扑优化问题时, 因其目标函数取为结构柔度, 而柔度与相应工况有关, 故多工况下结构拓扑优化问题成为多目标优化问题^[7]。客车车身多工况拓扑主要面临的问题是如何根据客车的实际工况寻找到一种方法能够使所有的目标函数同时都达到最优化, 也即是要满足不同实际工况的最优需求。一般情况下很少能找到, 但可以找到一些可能存在的能满足工程要求的次最优化解或称 Pareto 最优解^[8]。多目标优化问题只有当求的解是非劣解或弱非劣解时才有意义, 劣解是没有意义的, 而绝对最优解存在的可能性最小^[9]。多工况下整车的柔度采用各子工况加权柔度, 根据:

$$\phi[F(X)] = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(X) \quad (2)$$

其中, f_i 为各子工况的柔度; λ_i 为各子工况的加权系数, $\lambda_i \geq 0 \quad i=1, \dots, m$ 且 $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ 。

于是把多目标极小化模型 (VMP) 的最优化问题转换为下列数值函数的极小化问题, 即求解:

$$\min_{X \in R} \phi[F(X)] = \min_{X \in R} \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(X)$$

其最优解便是按各分目标的重要程度, 使各分目标值尽可能小的解^[10]。

考虑到城市公交车所适应的道路条件, 将弯曲工况目标柔度权重系数 λ_1 定为 50%, 4 种弯扭组合工况权重系数 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 均为 12.5%。

3 车身结构拓扑设计

根据多工况综合拓扑优化分析得到的车身各部分的拓扑结构, 参考某运营中的城市公交客车的车身结构布置并考虑工艺可实现性, 进行车身骨架的

初步布置。骨架杆件的布置要考虑到功能需求、起加强作用及为安装附件的需要。车身结构构件布置应使车身构成一个连续完整的受力系统与合理的载荷路径^[11], 在主要受力横截面, 车身骨架形成一个封闭力流环。图 3 为车身各部分结构布置的初步设计方案:

(1) 牛腿: 根据拓扑结果, 将斜向杆件改成横向; 以右边牛腿为例, 第 2、3、7、8 根牛腿是设置吊耳所必需的; 在第 1、2 根牛腿之间, 左边由于转向器, 所以需多设置一根牛腿; 考虑支撑变速器、发动机、空调压缩机组、散热器和电瓶组安装点的需要和与窗台立柱形成完整的受力系统设置其他牛腿。

(2) 底架: 底架右边前门和中门门槛处作为非拓扑空间, 不布置杆件; 横担的设置根据拓扑结果, 同时充分考虑座椅和驾驶室隔断的安装所需承载骨架。

(3) 左、右侧围: 轮罩、水箱进气门、压缩机与空滤器门等不能布置杆件; 右侧围相比左侧围, 需要设置前门框架和中门框架; 根据拓扑结果, 及为与窗台立柱形成完整的受力系统布置骨架杆件。

(4) 顶盖: 紧急逃生口不布置杆件; 设置纵梁以承载天然气瓶组、天然气瓶罩和空调车顶组件; 设置横梁以和窗台构成完整的受力系统。

根据拓扑优化结果初步布置的车身骨架, 满足一般城市公交客车的实际装配和功能要求。针对拓扑优化结果初步设计布置的车身骨架, 做进一步的尺寸优化, 并对优化之后的车身骨架模型进行模态分析和强度刚度校核, 模态分析主要应用于评价系统的动态特性、载荷识别、振动控制等领域^[12]。分析结果表明, 拓扑设计的城市公交客车车身在经过进一步的尺寸优化之后, 关键的模态频率 (一阶扭转模态频率与一阶弯曲模态频率) 与参考车型相当, 最大应力值都满足车身所设计采用的材料 Q235 的允许应力, 模型的门窗口对角线变形量均在 5 mm 内, 满足一般客车对于开口结构变形量小于 5 mm 的要求。

4 结论

(1) 城市公交客车车身结构布置在概念设计阶段采用拓扑优化设计是可行的;

(2) 开展多工况下连续体结构优化设计研究将更符合工程实际, 具有工程应用价值。综合工况下, 可根据拓扑结果, 同时考虑载荷和典型部件的分布及力流环原则布置车身骨架杆件;

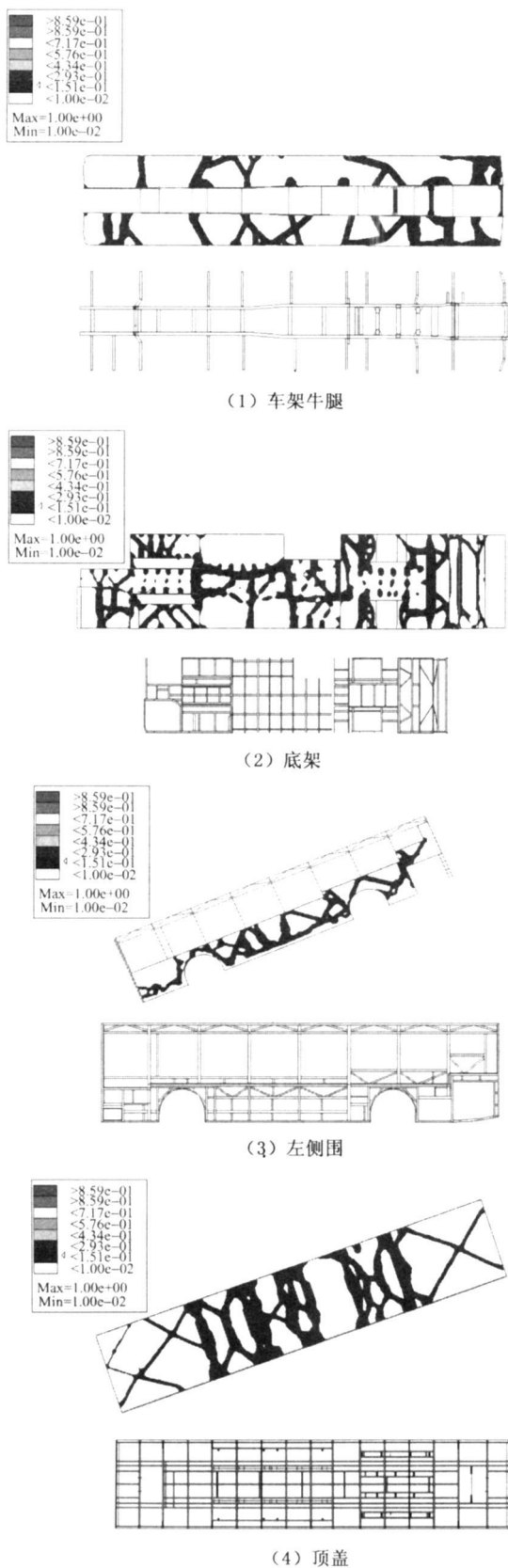


图 3 拓扑结果及初步结构设计

Fig 3 Topology optimization results and preliminary structural design

(3) 配合尺寸优化, 本文研究的城市公交客车

性能方面满足设计要求, 且比参考车型降重约 2.05%。

参考文献:

References

- [1] FUKUSHIMA J, SUZUKI K, KIKUCHIN. Shape and Topology Optimization of a Car Body with Multiple Loading Conditions [J]. SAE paper 920777, 1992-02-01
- [2] 范文杰, 范子杰, 桂良进, 等. 多工况客车车架结构多刚度拓扑优化设计研究 [J]. 汽车工程, 2008, 30 (6): 531-533
FAN Wenjie, FAN Zijie, GUI Liangjin, et al. Multi-stiffness Topology Optimization of Bus Frame with Multiple Loading Conditions [J]. Automotive Engineering, 2008, 30 (6): 531-533
- [3] KIRSCH U. Optimal Topologies of Structures [J]. Applied Mechanics Review, 1989, 42: 223-249
- [4] 高云凯, 孟德建, 姜欣. 电动改装轿车车身结构拓扑优化分析 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (23): 2522-2525
GAO Yunkai, MENG Dejian, JIANG Xin. Topology Optimization Analysis for Modifying Body Structure of Electric Car [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17 (23): 2522-2525
- [5] RUCHS M B, SHEMES N N Y. Density-based Topological Design of Structures Subjected to Water Pressure Using a Parametric Loading Surface [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 28: 11-19
- [6] 凯墨尔 M M, 沃尔夫 J A. 现代汽车结构分析 [M]. 陈励志, 译. 北京: 人民交通出版社, 1987.
KAMAL M M, WOLF J A. Modern Automotive Structure Analysis [M]. CHEN Lizhi translated. Beijing: China Communications Press, 1987.
- [7] 杨德庆, 隋允康, 刘正兴. 多工况应力约束下连续体结构拓扑优化映射变换解法 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34 (8): 1061-1065
YANG Deqing, SUI Yunkang, LIU Zhengxin. Mapping Transformation Method for Topology Optimization of Continuum Structures under Multiple Loading Cases and Stress Constraints [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34 (8): 1061-1065
- [8] 李治多, 王明强. 多工况载荷下连续体结构拓扑优化设计研究 [J]. 现代制造工程, 2008 (9): 70-73
LI Zhiduo, WANG Mingqiang. Research on Topology Optimization Design for Continuum Structures with Multiple Load Cases [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008 (9): 70-73

- [9] 孙靖民. 机械优化设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
SUN Jingmin. Optimal Design of Mechine [M]. Beijing China Machine Press 2002
- [10] 傅英定, 成孝予, 唐应辉. 最优化理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
FU Yingding CHENG Xiaoyu TANG Yinghui. Optimization Theory and Method [M]. Beijing National Defense Industry Press 2008
- [11] 黄金陵. 汽车车身设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007
HUANG Jinling. Car Body Design [M]. Beijing China Machine Press 2007
- [12] 沈浩, 陈昌明, 雷雨成, 等. 客车车身模态分析及评价 [J]. 公路交通科技, 2003 20 (2): 128—134
SHEN Hao CHEN Changming LEI Yucheng et al. Vehicle Body Modal Analysis and Evaluation Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development 2003 20 (2): 128—134
- (上接第 153 页)
- [5] 何兆益, 许茂增, 唐伯明. 基于公路增量投资的重庆市干线公路超限车辆补偿费分析 [J]. 重庆交通学院学报, 2002 21 (4): 88—92
HE Zhaoyi XU Maozeng TANG Boming. The Out-of-limit Vehicles Supplementary Fee Analysis of Chongqing's Main Highway Based on Highway Supplementary Invest [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University 2002 21 (4): 88—92
- [6] 王建伟, 马建, 杨铭. 收费公路计重收费定价理论模型 [J]. 中国公路学报, 2004 17 (3): 99—100
WANG Jianwei MA Jian YANG Ming. Pricing Theory Model on Toll-by-weight Turnpike [J]. China Journal of Highway and Transport 2004 17 (3): 99—100
- [7] 曹锦文. 计重收费定价理论研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008
CAO Jinwen. Research on Pricing Theory of Toll-by-weight [D]. Xi'an Chang'an University 2008
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 关于上报公路水路运输量专项调查月度波动系数的通知 [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2008
P. R. China Ministry of Transport. Notification of Reporting the Monthly Fluctuation Coefficients for Special Investigation of Highway and Waterway Transport Volume [R]. Beijing Ministry of Transport of PRC 2008
- [9] 黄晓明, 朱湘. 沥青路面设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
HUANG Xiaoming ZHU Xiang. Asphalt Pavement Design [M]. Beijing China Communications Press 2002
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006
P. R. China Ministry of Communications. JTG D50—2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S]. Beijing China Communications Press 2006
- [11] 刘伟铭, 王哲人, 郑西涛, 等. 高速公路收费系统理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
LIU Weiming WANG Zheren ZHENG Xitao et al. The Theory and Method for Expressway Toll Collection System [M]. Beijing China Communications Press 2001
- [12] 周国光, 何俐俐, 贾丽娜. 公路行业财务管理学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
ZHOU Guoguang HE Lili JIA Lina. Financial Management for Highway Industry [M]. Beijing China Communications Press 2001
- [12] 左庆乐. 渝黔高速公路重庆段收费研究 [R]. 西安: 长安大学, 2002
ZUO Qingle. Research on Tolling of Expressway in Chongqing [R]. Xi'an Chang'an University 2002