

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230524001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0109-10

引用格式: 宋晨旭, 孙鹏飞, 郑帅, 等. 基于“互联网+”电梯轿厢模块化结构变异设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 109-118.

Citation: SONG Chenxu, SUN Pengfei, ZHENG Shuai, et al. Variant design for modular structures of elevator cars based on "internet +" [J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 109-118.

基于“互联网+”电梯轿厢模块化结构变异设计

宋晨旭^{1,2}, 孙鹏飞^{1,2}, 郑帅³, 刘宏磊^{1,2}, 刘鑫⁴, 李宝童^{1,2}, 洪军^{1,2}

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710049; 3. 西安交通大学 软件学院, 陕西 西安 710049; 4. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】为了满足用户对低能耗、轻量化电梯轿厢模块化结构的快速定制化需求, 搭建了一种“互联网+”轿厢模块化结构变异设计框架。【方法】首先, 在B/S架构下, 采用Vue技术开发用户自定义设计数据采集前端, 获取用户定制化设计需求, 并通过Springboot技术开发模块化结构变异设计后端, 搭建前后端分离的Web框架, 实现前后端数据的双向绑定。其次, 在后端引入一种考虑应力约束的高比刚度拓扑优化设计方法, 以轿厢结构强度和体积分数为用户自定义约束条件, 以轿厢模块化结构刚度最大化为优化目标, 采用移动渐进线优化算法为求解器, 驱动轻量化电梯轿厢模块化结构的快速定制化变异设计。然后, 在优化方法中引入Heaviside函数, 以保证设计结果具有清晰的几何边界。最后, 以某型背包电梯轿厢架为例, 在用户自定义界面设定轿厢结构的几何与力学边界参数, 开展创新型轻量化轿厢架结构的变异设计, 并对其进行有限元仿真分析。【结果】在给定设计需求的前提下, 结构变异过程稳定、收敛性强, 所设计的结构几何边界清晰; 在相同的力学边界条件并满足材料的2倍最小安全系数条件下, 所设计的轿厢架结构的质量比原有结构的下降了16.09%, 其结构变形满足实际应用需求, 其比刚度得到了显著提升, 验证了所搭建结构变异设计框架的有效性。【结论】所搭建的设计框架能在保证结构强度的前提下提高结构的比刚度, 可有效应用于轻量化电梯轿厢模块化结构的快速定制化设计, 缩短了轿厢模块化结构的设计周期, 丰富了轿厢模块化结构的设计手段。

关键词: 互联网+; 变异设计; 电梯轿厢; 拓扑优化; 轻量化; 定制化设计

中图分类号: TU857

文献标志码: A

0 引言

电梯轿厢是电梯结构的核心承载部件, 由轿底、轿壁、轿顶、轿门和轿厢架等主要结构组成, 广泛应用于现代建筑中。自2009年5月1日起开始施行的新修订的《特种设备安全监察条例》中的一项重要内容就是高耗能特种设备节能管理制度, 电梯作为耗电大户之一, 其节能任重而道远^[1]。轿厢结构的轻量化作为响应国家节能减排号召的重要途径, 既能减少轿厢材料以及制造过程中能

源的消耗量, 又可以改善电梯的起动和制动性能^[1]。同时, 电梯轿厢种类和客户需求逐步多样, 电梯轿厢生产周期逐渐缩短, 而伴随着多次迭代改进的传统设计方法常造成设计周期的延长。因此, 轻量化电梯轿厢模块化结构的快速定制化设计需求已十分迫切。

近些年, 随着互联网技术的跨越式发展, 互联网、信息化高度融合, 迅速缩短了企业与用户之间的距离, 也为快速响应客户个性化需求并提供满意的个性化产品提供了一个新思路。同时, 客户个性化需求程度越高, 需企业设计的产品非标零

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-06-29; 接受日期: 2023-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1700703)

通信作者: 刘宏磊(1990—)(ORCID: 0000-0003-3409-8555), 男, 助理教授, 主要从事拓扑优化方面的研究。

E-mail: liuhonglei@xjtu.edu.cn

部件的种类就越多,复杂程度就越大,这导致非标零部件的设计过程也趋于复杂化。作为实现产品非标模块设计的一个重要途径,模糊配置可通过从实例库中搜索相似实例获得模糊配置结果,从而实现对非标零部件的设计。因此,为实现对产品非标模块的模糊配置,非标模块的重用技术^[2-3]、混合配置实例的求解方法^[4]、模块化产品的开发和生产协同框架^[5]等相继被提出。在此基础上,采用模糊算法等理论方法^[6-7]综合衡量客户技术需求与定制产品性能的关联度,构造线性配置优化数学模型,并采用基于最小二乘逼近的产品变型配置设计方法,可解决产品非标模块设计问题^[8]。同时,基于分布式模糊模型及协同分布式配置设计中的模糊性交互,建立基于语义的产品集成配置代理系统模型,在配置代理内部及代理之间的相互作用下产生一个满足客户需求和不同工艺约束的可选解决方案的模糊集合^[9]。一些学者还提出了一种基于已有实例确定产品模糊配置概率的方法,将预先确定产品结构作为条件,将一致性规则作为预处理步骤,设计了一种基于极大似然估计、以条件概率扩展为核心的判断阈值评价方法^[10]。此外,还可通过反馈设计对结果进行评估,从而反向推动产品设计修改,实现产品多样化需求下的非标设计^[11]。

综上所述,产品非标模块的定制化设计通常是通过通过对现有的非标模块数据进行收集来建立相应配置规则的。然而,由于产品模块、参数众多,在建立复杂配置产品的配置系统时,常需要企业内部经验丰富的设计人员花费大量时间手动定义配置规则并存储入库。因此,减少非标产品对设计经验的依赖对提高非标设计的效率和适应性具有深远意义。

拓扑优化设计方法作为一种智能化的设计方法,在不依赖结构初始构型的前提下可实现对具有特定结构性能需求的结构的优化设计^[12-15],已逐步应用于电梯轿厢主体支撑部件^[16]、轿厢架^[17]等结构的轻量化设计中,并取得了显著收益,例如,刘鑫培^[16]以电梯轿厢主体支撑结构的刚度最大化为优化目标,生成了一种轻量化创新型轿厢支撑结构,使轿厢架的质量降低了19.6%^[18]。因此,若将拓扑优化设计方法应用于电梯产品的非

标模块的设计中,则有望缩短对产品非标模块的构建周期,快速响应客户的定制化设计需求,减小结构质量,降低电梯能耗。

针对客户对电梯模块化结构的定制化设计需求,本文开发了一种基于“互联网+”的电梯轿厢模块化结构变异设计框架。首先,在前端搭建客户多样化设计参数输入平台,通过将设计参数输入到后端,实现对轻量化电梯轿厢模块化结构的定制化快速设计。然后,对某型电梯轿厢模块化结构开展优化设计,并通过有限元仿真分析验证所搭建的这种设计框架的有效性。

1 “互联网+”结构变异设计框架

定制化产品设计常将产品划分为标准模块和非标模块,其中,标准模块设计可以通过收集相关标准件参数构建相应的数据库,并通过配置实例的重用,提高设计的质量和效率。然而,对于非标模块,通常难以通过传统配置设计的求解获得配置结果。针对此类产品配置结果中的失配模块,传统的处理方法是安排设计人员对每一个失配模块单独进行设计。此过程极大地增加了设计人员的负担,降低了配置设计的求解效率。因此,本文提出了一种基于“互联网+”的结构变异设计框架,从而快速响应客户的多样化需求。

由于B/S架构^[19]通过服务器端来实现系统数据的操作和处理,用户可在浏览器中直接进入软件系统进行操作功能的选择,这样就降低了操作系统对客户端的性能要求。因此,本文在B/S架构下搭建了基于“互联网+”的电梯轿厢模块化结构变异设计框架,如图1所示。由图1可知,该设计框架由表现层、业务层和持久层3部分组成。其中,表现层的作用是建立用户与所提出的变异设计框架的接口,采集用户输入的变异结构的设计参数;业务层将表现层采集的用户需求设计参数通过Ajax请求发送给系统后端,并输入到结构变异模块中,驱动轿厢模块化结构的变异设计;持久层使用MySQL存储数据,负责各类数据的持久化,所保存的数据包含用户信息、用户历史请求信息以及所对应的结构信息等。

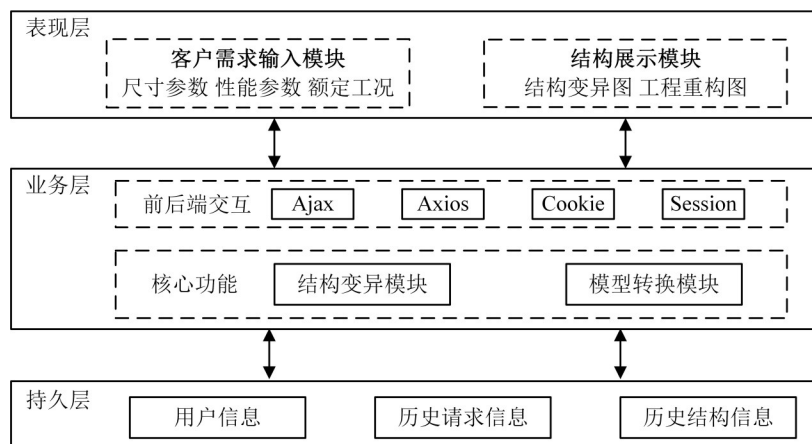


图1 结构变异设计框架

Fig. 1 The design framework of the structural variant design

1.1 用户自定义前端

为了满足用户定制化设计需求,在设计框架的表现层中,搭建设计参数用户自定义前端,采集不同用户对轿厢模块化结构的设计需求数据。此外,由于Vue是一款轻量级前端框架^[20],其采用的MVVM模型具有视图、数据、结构分离的特性,有利于更便捷地修改设计参数。因此,本文使用Vue技术构建用户自定义的前端页面,如图2所示。

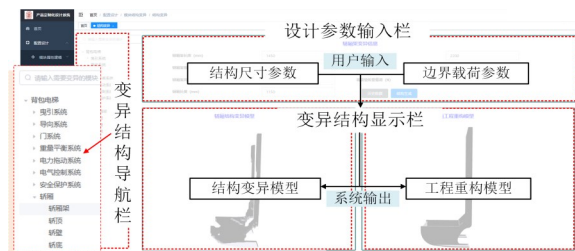


图2 用户自定义前端

Fig. 2 The user-defined webpage

由图2可知,所开发的前端主要分为3部分,依次为变异结构导航栏、设计参数输入栏和变异结构显示栏。其中,变异结构导航栏位于整体界面左侧,在此处用户可以选择需要进行变异设计的结构,采用树状形式对每个模块按所属的电梯子系统进行展示,也可以在最上方的搜索栏中快速搜索需要变异设计的模块化结构。设计参数输入栏位于界面右侧的上部,用于输入模块化结构变异设计参数,主要的参数包括电梯模块化子结构的长、宽、高等尺寸参数和额定负载。变异结构显示栏位于界面右侧的下部,用来显示所设计的结构特征。直接通过变异设计的轿厢架结构位于变异结构显示栏的“结构变异模型”框中,用户可以在此处对所设计的结构进行审阅和下载。同

时,后端服务设计人员可在“工程重构模型”显示框上传所设计的结构重构模型,以便于用户获取结构的准确几何信息。

1.2 结构变异设计后端

Java作为一门主流的业务开发语言,具有语法严谨、支持多线程等优点,但在对矩阵数组等数据的分析处理上存在缺陷^[21],而MATLAB在这方面具有十分突出的优势。因此,本文通过MATLAB和JavaWeb来实现业务层的结构变异功能^[22],搭建结构变异设计后端(图3)。

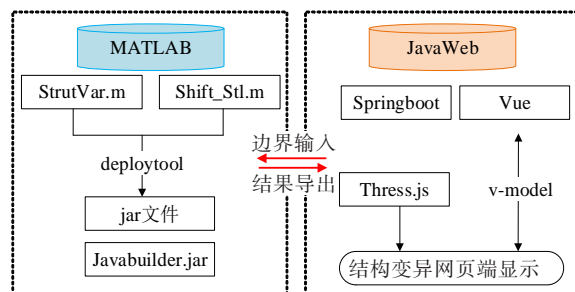


图3 结构变异设计系统后端

Fig. 3 The back-end of the structural variant design system

首先,引入一种考虑应力约束的高比刚度拓扑优化方法,并编译相应的StrutVar.m函数,驱动轿厢模块化结构的变异设计,从而获取所设计结构的几何信息参数;调用Shift_Stl.m函数将电梯轿厢模块化结构的几何信息参数转化为标准模板库三维模型。其次,在MATLAB环境中调用deploytool命令将StrutVar.m函数和Shift_Stl.m函数打包处理,通过选择Library Compiler选项,将MATLAB的m文件转换为jar文件。然后,采用Springboot技术构建系统项目工程后端框架,将由MATLAB函数打包形成的jar文件与Javabuilder.jar文件放入

系统后端的Springboot框架^[20]中。在进行变异设计时,通过v-model指令将前端采集到的用户自定义设计参数与系统进行数据的双向绑定,然后通过前后端交互技术传给后端,调用生成的jar文件,驱动模块化结构的变异设计流程,得到设计结果,最终通过Thress.js技术^[23]将其显示到前端。

2 拓扑优化设计方法

2.1 拓扑优化数学模型

产品的正向设计分为3个阶段,即概念设计、基本设计和详细设计。概念设计在于确定结构的基本构型,即确定结构的初始拓扑形态;基本设计是连接概念设计与详细设计的中间环节,主要立足于构建结构的最优边界形状以适应实际制造过程中的工艺要求,并改善设计结果的可制造性;详细设计确定结构的最佳尺寸与最佳材料性能之间的组合关系。本文的研究核心在于探索结构概念设计方法以及与其对应的“互联网+”设计平台的开发,因此采用的是拓扑优化设计手段。需要指出的是,本文采用所设计结构的初始构型来评估、校核结构轻量化的减重情况以及结构所受的应力和应变等,并将其作为所设计结构性能的评价指标。为了快速响应用户对轿厢结构的轻量化设计需求,本文在轿厢模块化结构变异设计后端,引入了一种考虑应力约束的拓扑优化设计方法,以实现结构的变异设计。该方法在无需配置初始构型数据的情况下,即可在特定工况和约束条件下获取设计域内最优的材料分布,从而使结构在满足结构强度和刚度的前提下减小结构质量。根据轿厢结构的工况可知,其模块化结构应同时满足强度和刚度要求,以保证电梯安全运行。为了驱动变异设计的进行,需要建立考虑应力约束的多约束优化数学模型:

$$\begin{aligned} \min c(\rho) &= \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^N (\rho_i)^{p_i} \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_i \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ \sigma_{\text{vm}, \max} \leq \sigma^* \\ V(\rho) \leq fV_0 \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: c 为结构柔度; \mathbf{U} 为位移矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{F} 为载荷矩阵; $\sigma_{\text{vm}, \max}$ 为结构的最大米塞斯应力值; σ^* 为结构的最大米塞斯应力约束限值; V 为结

构体积; V_0 为结构总体积; f 为体积分数; \mathbf{u}_i 为单元位移矢量; \mathbf{k}_0 为单元刚度矩阵; p_i 为杨氏模量的惩罚因子; ρ 为单元密度,即设计变量; ρ_i 为第*i*个单元的密度; ρ_{\min} 为单元最小密度; N 为单元个数。

单元投影密度 $\bar{\rho}_i$ 的计算式为:

$$\bar{\rho}_i = \frac{\tanh(\beta_h \eta) + \tanh(\beta_h (\rho_i - \eta))}{\tanh(\beta_h \eta) + \tanh(\beta_h (1 - \eta))} \quad (2)$$

式中: β_h 为Heaviside函数曲率的控制因子,用于使相对密度向0或1逼近,以此使优化后的结构具有清晰的几何边界; η 为极化因子,在本文中取0.5^[24]。

图4所示为 β_h 取不同数值时的Heaviside函数曲线。由图4可知, β_h 越大,单元密度的极化效果越明显。在本文中,为了保证数值求解的稳定性,将 β_h 取为2^[24]。

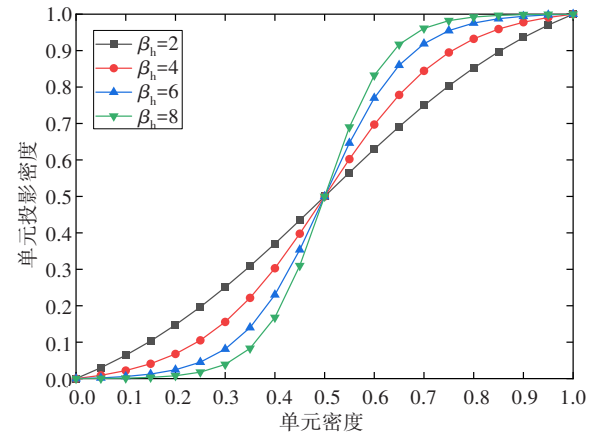


图4 β_h 取不同值时的Heaviside函数曲线

Fig. 4 Heaviside function curves with different β_h

2.2 敏度分析

为了驱动优化过程的进行,在拓扑优化方法中,常需要通过推导目标函数和约束条件对设计变量的一阶导数来获得相应的梯度信息,即敏度信息^[12]。因此,在用基于梯度信息的优化准则来求解优化模型的过程中,需获取目标函数和约束条件的敏度信息。单元投影密度对设计变量的一阶导数如下:

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial \rho_i} = \frac{(1 - \tanh^2(\beta_h (\rho_i - \eta)))}{\tanh(\beta_h \eta) + \tanh(\beta_h (1 - \eta))} \quad (3)$$

因此,目标函数对设计变量的一阶导数为:

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_i} = -p_i (\rho_i)^{p_i - 1} \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_i \quad (4)$$

p -norm 应力 σ_{PN} 对第*j*个设计变量 ρ_j 的简化一阶导数为:

$$\frac{\partial \sigma_{PN}}{\partial \rho_j} = A + B \quad (5)$$

其中,

$$A = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \sigma_{PN}}{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}} \left[\left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_i} \right)^T \frac{\partial \eta(\bar{\rho})}{\partial \rho_j} \sigma_i \right] \right) \quad (6)$$

$$B = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \sigma_{PN}}{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}} \left[\left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_i} \right)^T \eta(\bar{\rho}_i) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \rho_j} \right] \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{PN} = \left(\sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_{vm,i}^p \right)^{1/p} \quad (8)$$

式中: $\hat{\sigma}_{vm,i}$ 为第*i*个单元质心的米塞斯应力; σ_i 为第*i*个单元的等效应力; $\hat{\sigma}_i$ 为第*i*个单元的插值应力; p 为

-norm

应力凝聚参数,可减少局部应力约束导致的计算代价。

值得注意的是,当

趋近于无穷大时,

-norm

应力逼近于米塞斯应力 σ_{vm} 的最大值。然而,过大的

值在优化过程中会引起振荡现象,从而影响优化结果的收敛性。因此,需要选择一个合适的

值来保证优化过程的稳定收敛,通常

<30^[24]。在本文中,为了保证收敛过程光滑以及拥有足够的最大应力近似值,取

=25。

根据米塞斯应力的定义,单元米塞斯应力可表示为:

$$\sigma_{vm,i} = (\sigma_{ix}^2 + \sigma_{iy}^2 + \sigma_{iz}^2 - \sigma_{ix}\sigma_{iy} - \sigma_{iz}\sigma_{ix} - \sigma_{iy}\sigma_{iz} + 3\tau_{ixy}^2 + 3\tau_{iyz}^2 + 3\tau_{izx}^2)^{1/2} \quad (9)$$

式中: σ_{ix} 、 σ_{iy} 、 σ_{iz} 分别为单元应力的3个主应力分量; τ_{ixy} 、 τ_{iyz} 、 τ_{izx} 分别为单元应力的3个切应力分量。

由此可得米塞斯应力关于各应力分量的一阶导数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_{ix}} = \frac{1}{2\hat{\sigma}_{vm,i}} (2\hat{\sigma}_{ix} - \hat{\sigma}_{iy} - \hat{\sigma}_{iz}) \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_{iy}} = \frac{1}{2\hat{\sigma}_{vm,i}} (2\hat{\sigma}_{iy} - \hat{\sigma}_{ix} - \hat{\sigma}_{iz}) \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_{iz}} = \frac{1}{2\hat{\sigma}_{vm,i}} (2\hat{\sigma}_{iz} - \hat{\sigma}_{ix} - \hat{\sigma}_{iy}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\tau}_{ixy}} = \frac{3}{\hat{\sigma}_{vm,i}} \hat{\tau}_{ixy} \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\tau}_{iyz}} = \frac{3}{\hat{\sigma}_{vm,i}} \hat{\tau}_{iyz} \\ \frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\tau}_{izx}} = \frac{3}{\hat{\sigma}_{vm,i}} \hat{\tau}_{izx} \end{cases} \quad (11)$$

$\eta(\rho_i)$ 关于设计变量的一阶导数为:

$$\frac{\partial \eta(\bar{\rho}_i)}{\partial \bar{\rho}_j} = q \bar{\rho}_j^{q-1} \quad (12)$$

式中: q 为应力惩罚因子。

应力分量的解析形式可表示为:

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial \rho_j} = D_0 B_i \frac{\partial u_i}{\partial \rho_j} = D_0 B_i L_i \frac{\partial U}{\partial \rho_j} \quad (13)$$

式中: L_i 为一个0-1稀疏矩阵,用于表示全局位移矢量中第*i*个单元的节点位移; D_0 为实体材料的刚度矩阵; B_i 为第*i*个单元节点上的应变矩阵。

将式(13)代入式(7)中得:

$$B = - \sum_{i=1}^N \left(q \bar{\rho}_j^{q-1} \frac{\partial \sigma_{PN}}{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}} \left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_i} \right)^T D_0 B_i L_i \right) K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \rho_j} U \quad (14)$$

伴随向量 λ 可表示为^[25]:

$$\lambda^T = \left(\sum_{i=1}^N q \bar{\rho}_j^{q-1} \frac{\partial \sigma_{PN}}{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}} \left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{vm,i}}{\partial \hat{\sigma}_i} \right)^T D_0 B_i L_i \right) K^{-1} \quad (15)$$

由此可得:

$$B = -\lambda^T \frac{\partial K}{\partial \rho_j} U \quad (16)$$

拓扑优化的求解算法主要分为优化准则法、数学规划算法和序列凸规划算法^[26]。其中,优化准则法具有算法简单、收敛速度快等优点,但由于其在多约束问题求解中每次都需要判断具体哪个约束能够起到实际的约束作用,且还需要求解相应的拉格朗日乘子,因此难以进行多约束问题的求解;数学规划算法的精确程度较高,适用于不同类型问题的优化,但其在计算过程中需要不断求解优化问题的目标函数和约束函数的梯度,大大增加了计算量,而且计算时间和设计变量相互捆绑,这对于复杂的多变量问题加重了计算量级;序列凸规划算法不仅将设置变量的隐式函数显式化,也将拓扑优化中的非线性优化问题线性化,这不仅大大降低了拓扑优化过程中的计算量,也能很好地用于求解多约束问题。由于本文所采用的拓扑优化方法是一种考虑多约束的优化方法,且求解对象为三维结构,因此本文将凸规划算法中的移动渐进线优化算法(method of moving asymptotes, MMA)^[25,27]作为求解器来求解本文的拓扑优化问题。

3 轿厢架结构轻量化设计

为了验证所搭建的变异设计框架的可行性,本文参考文献[28]中的背包式电梯轿厢结构,以其轿厢架结构为例,对轿厢架结构开展轻量化变异设计,背包式轿厢结构如图5所示。首先,根据文献[28]中的参数,在前端界面设置结构的优化设计域几何参数和力学边界条件。其中,轿厢架结构设计域的长、宽、高分别为1 450、1 430、3 400 mm,固定结构的上表面,限制与井道滑轨接触的轿厢架后侧壁面 x 、 y 方向的自由度,上轿底通过8个减震垫与轿厢架进行连接,在对应位置处施加相应的载荷 $F_1 \sim F_8$,如图6所示。然后,将结构体积分数设定为0.08。本文所采用的拓扑优化设计

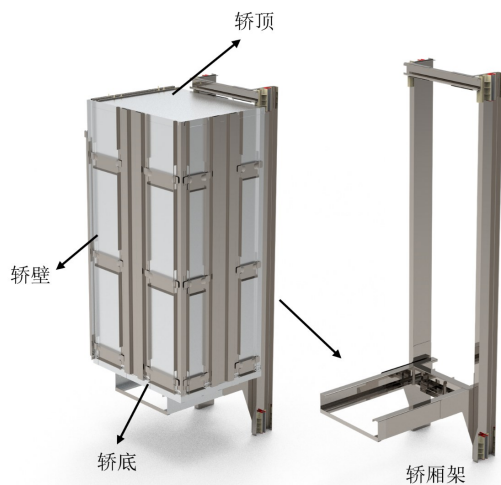


图5 电梯轿厢结构

Fig. 5 Elevator car structure

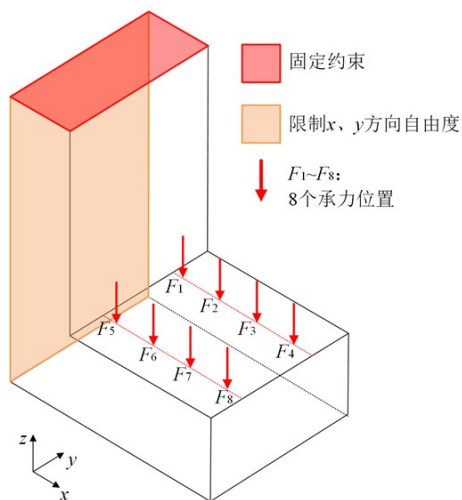


图6 轿厢架的边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of elevator car frame

计方法中的变量均为无量纲数值,因此将载荷的大小设定为 $F=-1$ 。最后,将在前端设定的设计参数输入到后端的优化设计流程中,开展轿厢架结构的轻量化变异设计。

优化过程中的迭代曲线如图7所示。由图7可知,随着优化过程的进行,柔度和应力的收敛速度较快,很快达到收敛值。最终,结构柔度稳定收敛在 3.28×10^4 ,最大米塞斯应力稳定收敛在22.04,说明本文所采用的拓扑优化设计方法是稳定的。

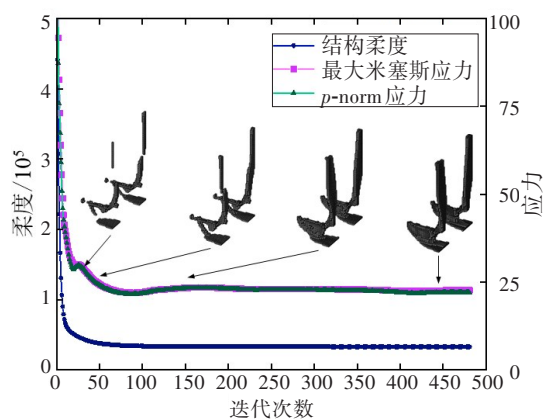


图7 优化迭代曲线

Fig. 7 The optimization iteration curve

4 轿厢架结构力学性能分析

在完成轿厢架结构的优化之后,本文对优化模型进行几何特征提取,实现对轿厢架结构三维特征的几何重构,并采用ANSYS Workbench仿真软件中的Static Structural模块对重构的轿厢架结构开展静力学有限元仿真分析,验证所优化结构的合理性^[29-31]。为了使仿真结构具有可比性,将重构结构的力学边界和用材与文献[28]中的保持一致,在上表面施加固定约束,限制与井道滑轨接触的轿厢架后侧壁面 x 、 y 方向的自由度,在上轿底与轿厢架连接的8个减震垫处施加载荷,载荷大小为2 882.2 N,重力加速度为9 806.6 mm/s²,如图8所示。

图8所示的轿厢架结构采用的Q235结构钢为仿真材料,其泊松比 $\mu=0.3$,杨氏模量 $E=210$ GPa,屈服强度 $\sigma_s=235$ MPa,密度 $\rho=7 830$ kg/m³。为了保证仿真结果具有更好的收敛性,采用六面体结构化网格对优化模型进行单元划分,网格数量为9.921 4万个。

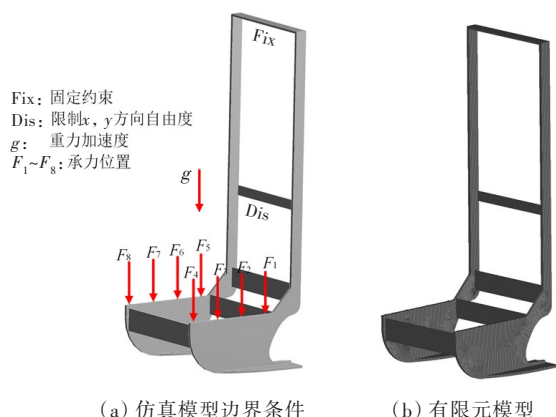


图8 优化结构的仿真条件

Fig. 8 Simulation conditions of the optimized structure

轿厢架结构应变与应力的仿真结果如图9所示。由图9可知,优化模型的最大变形为0.076 54 mm,相较于轿厢架结构的尺寸,该变形量属于小变形,且主要出现在背包轿厢架悬臂结构的最前端;最大应力为13.374 MPa,主要集中在背包轿厢架悬臂结构与上轿底最前端相搭接的受力点处,相较于Q235结构钢235 MPa的材料屈服极限,其仍能满足文献[28]提出的材料的2倍最小安全系数。此外,重构的轿厢架结构的质量为605 kg,相比于文献[28]中轿厢架结构721 kg的质量,下降了16.09%,满足轿厢架结构在常规工况下轻量化的设计需求。

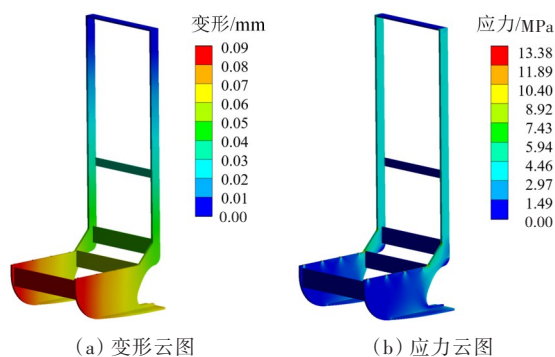


图9 轿厢架结构的应变与应力分布

Fig. 9 The deformation and stress distribution of elevator car frame

除正常运行工况外,文献[28]中的电梯背包轿厢在制动过程中还会受到运行过程中的加速作用。因此,需要对所设计的结构进行制动工况的分析。根据文献[28]中的试验测试,轿厢的最小减速度为0.447g,最大减速度为1.012g,取重力加速度 $g=9\ 806.6\text{ mm/s}^2$ 。所设计的轿厢架质量为605 kg,轿厢系统的总质量为1 706 kg,轿厢在除

去轿厢架后的质量为1 101 kg,额定载重量为1 250 kg。在本文中,同时考虑重力和最大减速度的共同作用,得到制动工况下作用在轿厢架上的力的最大值为46.388 kN,将其平均分为8份,在电梯轿厢架8个减震垫处各施加一份载荷,载荷大小为5 798.5 N,受力及边界条件的位置如图8所示。重力加速度为 $9\ 806.6\text{ mm/s}^2$,轿厢架的自身加速度为 5.88 mm/s^2 。

安全钳制动工况的仿真结果如图10所示。由图10可知,优化模型的安全钳制动工况的最大变形为0.135 49 mm,相较于轿厢架结构的尺寸,该变形量仍处于小变形范围内,且主要出现在背包轿厢架前端的连接结构处;最大应力为64.165 MPa,集中在背包轿厢架底部安全钳的安装点处,相较于Q235结构钢235 MPa的材料屈服极限,其也满足材料的2倍最小安全系数的条件。上述两种工况的仿真结果验证了本文所搭建的设计框架的有效性。

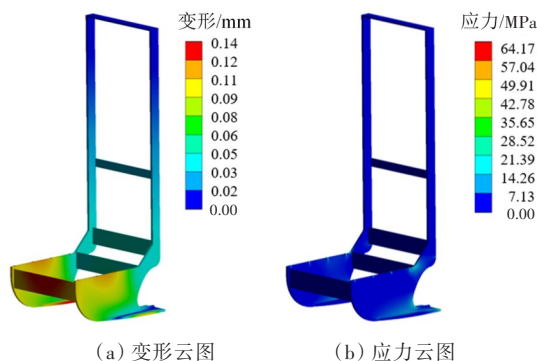


图10 安全钳制动工况下轿厢架结构的应变与应力分布

Fig. 10 The deformation and stress distribution of the elevator car frame structure during the operation of safety gear

5 结论

本文针对用户对低能耗、轻量化电梯轿厢模块化结构的快速定制化需求,研究了一种“互联网+”轿厢模块化结构变异设计框架,对某型轿厢架结构进行了变异设计,并通过有限元分析获取了其力学性能,主要结论如下:

1) 数值仿真结果表明,相较于原有的轿厢架结构,在满足材料的2倍最小安全系数的条件下,所设计的轿厢架结构的质量下降了16.09%,且结构变形处于小变形范围内,满足实际应用需求。

2) 本文所搭建的“互联网+”轿厢模块化结构变异设计框架可有效应用于电梯轿厢架结构轻量化设计中,并能针对不同客户的设计需求对轿厢架结构进行快速定制化设计,拓展了轿厢模块化结构的设计形式。

【参考文献】

- [1] 夏艳光, 夏崇俊, 许迪. 电梯轿厢架轻量化的分析研究[J]. 节能, 2012, 31(1): 63-66. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2012.01.016.
XIA Yanguang, XIA Chongjun, XU Di. Analysis and research on lightweight of elevator car frame[J]. Energy Conservation, 2012, 31(1): 63-66. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2012.01.016.
- [2] 徐剑. 产品非标模块配置设计关键技术及其在数控装备中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
XU Jian. Product non-standard module configuration design key technologies and its application in CNC equipment industry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [3] FUXIN F. Configurable product views based on geometry user requirements [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(9): 957-966. DOI: 10.1016/j.cad.2004.09.022.
- [4] 鞠永兵. 一类订单型产品的混合配置实例求解与非标方案评价技术及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
JU Yongbing. Mixed-configuration instance solving and non-standard scheme evaluation technologies for a type of order product and their application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [5] HUNG H F, KAO H P, KU K C. Evaluation of design alternatives in collaborative development and production of modular products [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(11-12): 1065-1076. DOI: 10.1007/s00170-006-0548-9.
- [6] DECIU E R, OSTROSI E, FERNEY M, et al. Configurable product design using multiple fuzzy models [J]. Journal of Engineering Design, 2005, 16(2): 209-233. DOI: 10.1080/09544820500031526.
- [7] FOUGÈRES A J, OSTROSI E. Fuzzy agent-based approach for consensual design synthesis in product configuration [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2013, 20(3): 259-274. DOI: 10.3233/ica-130434.
- [8] 王海军, 孙宝元, 张强, 等. 支持个性化产品定制的变型配置设计方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 90-97. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6686.2006.01.017.
WANG Haijun, SUN Baoyuan, ZHANG Qiang, et al. Variant configuration design supporting personalization product customization [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(1): 90-97. DOI: 10.3321/j.issn: 0577-6686.2006.01.017.
- [9] OSTROSI E, FOUGÈRES A J, FERNEY M, et al. A fuzzy configuration multi-agent approach for product family modelling in conceptual design [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(6): 2565-2586. DOI: 10.1007/s10845-011-0541-5.
- [10] XUANYUAN S S, JIANG Z L, LI Y, et al. Case reuse based product fuzzy configuration [J]. Advanced Engineering Informatics, 2011, 25(2): 193-197. DOI: 10.1016/j.aei.2010.08.002.
- [11] HSU H Y, LIN G C I. A design-for-assembly-based product redesign approach [J]. Journal of Engineering Design, 1998, 9(2): 171-195. DOI: 10.1080/095448298261615.
- [12] BENDSØE M P, SIGMUND O. Topology, optimization: theory, methods, and applications [M]. Berlin: Springer, 2003.
- [13] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in MATLAB [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127. DOI: 10.1007/s001580050176.
- [14] 张新超, 荣见华, 陈晨晨, 等. 基于 Heaviside 密度和灵敏度过滤的多位移约束结构拓扑优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 9(2): 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.02.010.
ZHANG Xinchao, RONG Jianhua, CHEN Chenchen, et al. Structural topological optimization with multiple displacement constraints based on Heaviside density and sensitivity filtering [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2012, 9(2): 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2012.02.010.
- [15] 荣见华, 彭罗, 易继军, 等. 一种新的多输入多输出柔顺机构拓扑优化方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 66-78. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.01.009.
RONG Jianhua, PENG Luo, YI Jijun, et al. A new topology optimization method for multi-input-multi-output compliant mechanisms [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 66-78. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.01.009.
- [16] 刘鑫培. 一种大吨位电梯轿厢架稳健可靠性优化设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
LIU Xinpei. Robust reliability optimization design on a large tonnage car frame [D]. Suzhou: Soochow University, 2008.
- [17] 姜程. 曳引电梯轿架力学性能分析及结构优化[D].

- 广州:华南理工大学,2019.
- JIANG Cheng. Analysis of mechanical property and structure optimization for car frame of traction elevator [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [18] 陈玮玮. 基于有限元的电梯轿架强度分析及其结构优化[D]. 杭州:中国计量大学,2020.
- CHEN Weiwei. Strength analysis and structural optimization of elevator car frame based on finite element method [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2020.
- [19] 王进. B/S模式下的三层架构模式[J]. 软件导刊, 2011, 10(3): 30-31.
- WANG Jin. Simply discuss three-tier system under the pattern of B/S[J]. Soft Ware Guide, 2011, 10(3): 30-31.
- [20] 焦鹏琰. 基于Springboot和Vue框架的电子招投标系统的设计与实现[D]. 南京:南京大学,2018.
- JIAO Penghui. The design and implementation of electronic bidding system based on Springboot and Vue framework[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [21] STEWART G W. 矩阵计算引论[M]. 王国荣,黄丽萍,徐锦龙,等译. 上海:上海科学技术出版社,1980.
- STEWART G W. Introduction to matrix computations [M]. Translated by WANG Guorong, HUANG Liping, XU Jinglong, et al. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1980.
- [22] 杨斌. Linux系统下Java与MATLAB混合编程及应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2010(8): 29-31. DOI: 10.16184/j.cnki.comprg.2010.08.013.
- YANG Bin. Mixed programming and application of Java and MATLAB based on Linux [J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2010(8): 29-31. DOI: 10.16184/j.cnki.comprg.2010.08.013.
- [23] 高辰飞. 基于WebGL的海洋样品三维可视化的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- GAO Chenfei. Research of ocean sample 3D visualization based on WebGL [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [24] DENG H, VULIMIRI P S, TO A C. An efficient 146-line 3D sensitivity analysis code of stress-based topology optimization written in MATLAB [J]. Optimization and Engineering, 2022, 23(3): 1733-1757. DOI: 10.1007/s11081-021-09675-3.
- [25] SVANBERG K. The method of moving asymptotes: a new method for structural optimization[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1987, 24(2): 359-373. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- [26] 左孔天. 连续体结构拓扑优化理论与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- ZUO Kongtian. Research of theory and application about topology optimization of continuum structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [27] 王雷,闫素娜,赵强强,等. 基于单元过滤的自支撑结构拓扑优化方法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 45-55. DOI: 10.7652/xjtub202105006.
- WANG Lei, YAN Su'na, ZHAO Qiangqiang, et al. A topology optimization method for self-supporting structures based on element filtering [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 45-55. DOI: 10.7652/xjtub202105006.
- [28] 任明权. 一种背包式电梯轿厢架的分析与设计[D]. 苏州:苏州大学,2017.
- REN Mingquan. Analysis and design of a backpack elevator car[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.
- [29] 武彬,伍文广. FSAE赛车差速器支撑架可靠性与轻量化协同优化设计[J]. 公路与汽运, 2020(2): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.02.002.
- WU Bin, WU Wenguang. Collaborative optimization design of reliability and lightweight of FSAE racing differential support frame [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (2): 6-10. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2020.02.002.
- [30] 李传习,雷智杰,冯峥,等. 轻量化STC-钢组合桥面板静力性能研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 26-33. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.005.
- LI Chuanxi, LEI Zhijie, FENG Zheng, et al. Research on static performance of lightweight STC-steel composite deck [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 26-33. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.005.
- [31] 周芷萱,蒋友宝,刘军,等. 基于拓扑优化和模块化组成的UHPC围护结构受力性能研究[J/OL]. 中外公路, 2023: 1-9 [2023-09-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20230830.1224.002.html>.
- ZHOU Zhixuan, JIANG Youbao, LIU Jun, et al. Research on mechanical performance of UHPC envelope structure based on topological optimization and modularization[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 2023: 1-9 [2023-09-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20230830.1224.002.html>.

Variant design for modular structures of elevator cars based on "internet +"

SONG Chenxu^{1,2}, SUN Pengfei^{1,2}, ZHENG Shuai³, LIU Honglei^{1,2}, LIU Xin⁴,
LI Baotong^{1,2}, HONG Jun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] In order to meet the customized requirements of low energy-consumption and lightweight elevator car, a variation design framework of modular car structure based on "Internet + " is constructed. [Methods] First of all, under the B/S architecture, Vue technology was used to develop user-defined design data acquisition front-end to obtain customized design requirements, and Springboot technology was used to develop modular structure variation design back-end. A Web framework for front-end separation was built, which can realize bidirectional binding of front-end and back-end data. Secondly, a topology optimization design method for high-specific stiffness considering stress constraints was embedded in the back end. The strength and volume fraction of the car structure was considered as user-defined constraints, and the maximum stiffness of the car modular structure was optimized as the optimization goal. The moving asymptotic optimization algorithm was used as the solver to drive the rapid customized variation design of the lightweight car modular structure. Then, the heavyside function was introduced into the optimization method to ensure that the design results have clear geometric boundaries. Finally, taking a certain type of backpack elevator car frame as an example, the geometric and mechanical boundary parameters of the car structure were set in the user-defined interface to carry out the variation design of the innovative lightweight car frame structure, and the finite element simulation analysis was carried out. [Findings] Under the premise of given design requirements, the structural variation process was stable and convergent, and the geometric boundary of the designed structure was clear. Under the same mechanical boundary conditions and meeting the 2 times minimum safety factor of the material, the mass of the designed car frame structure reduced 16.09% comparing with the original structure. The structural deformation was ensured to meet the practical application requirements, and the specific stiffness was significantly improved, which verified the effectiveness of the structural variation design framework established in this paper. [Conclusions] The proposed design framework can improve the specific stiffness of the structure under the premise of ensuring the strength of the structure, which can be effectively applied to the rapid customized design of the lightweight elevator car modular structure. It can shorten the design cycle of the car modular structure, and enrich the design means of the car modular structure.

Key words: internet +; variant design; elevator car; topology optimization; lightweight; customized design

Manuscript received: 2023-05-24; **revised:** 2023-06-29; **accepted:** 2023-06-29

Foundation item: Project (2018YFB1700703) supported by the National Key R&D Plan of China

Corresponding author: LIU Honglei(1990—)(ORCID: 0000-0003-3409-8555), male, assistant professor, research interest: topology optimization. E-mail: liuhonglei@xjtu.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:彭卓寅)