

# 基于 Hypermesh 的动车组侧墙滑槽安装梁结构设计优化

张璟鑫, 张苗苗, 冯 振

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:** 随着信息技术的飞速发展以及高速列车装备功能的不断发展, 伴随而来的车辆总体重量只增不减, 对于内装结构件的轻量化研究仍是一个重要的课题。本文针对某型动车组侧墙座椅连接处的局部结构, 使用有限元计算平台 HYPERMESH 软件对其在规定的座椅负载条件下进行拓扑优化, 通过不同加工约束寻找不同结构尺寸条件下整体应力的变化规律, 最终在增加轴对称约束、实现了结构的产品化设计的同时, 根据结果云图的受力路径对侧墙座椅安装座进行了结构优化, 形成新的设计方案, 为进一步实现轻量化设计提供参考。

**关键词:** 高速列车; 拓扑优化; 结构优化; 有限元分析

**中图分类号:** U266

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.14.037

随着信息技术的飞速发展以及高速列车运营速度的不断提高, 内装结构件以及设备件功能日益增多, 车辆总体重量问题也随之而来。目前轻量化设计是高速列车车辆设计的发展趋势, 同时轻量化内装设计是一个很重要的课题<sup>[1]</sup>。对于乘客座椅, 基于总装及维护便利性的需求, 逐渐由以往的丝套安装向滑槽安装形式过渡, 因此, 侧墙滑槽安装梁在满足载荷工况的条件下实现进一步轻量化设计显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

结构拓扑优化设计是优化设计领域最富有生命力、最具有发展前景的一个研究方向。针对某型动车组内侧墙座椅安装座结构, 目前的设计方案如图 1 所示, 基于有限元仿真软件 Hypermesh, 本文对于在规定的座椅负载条件下对该概念设计区域进行拓扑优化分析, 通过不同约束方向寻找不同结构尺寸条件下整体应力的变化分布, 最终增加轴对称约束, 实现了结构的产品化设计<sup>[3]</sup>。

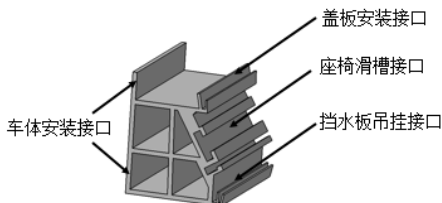


图 1 某型动车组侧墙座椅安装梁设计方案

针对拓扑优化结果, 进行结构优化形成新设计方案, 对新方案与原设计方案结构静强度是否满足要求的问题进行了数值仿真, 在仿真结果的基础上与原方案进行对比分析, 验证了该拓扑优化方法的可行性, 为轻量化设计提供新的设计思路。由于本文暂不考虑螺栓连接中的松动问题, 故计算模型中假设螺栓连接完好。

## 1 优化设计流程

结构设计通常是满足设计规范的设计, 最初的设计往往是通过工程师足够的经验或直觉反复试验来寻求的一种具备安全性或稳定性的设计, 此种设计往往安全系数太高, 不经济。拓扑优化理论是将以材料分布作为优化对象, 在概念性设计前期经过数值计算而达到的理论上的最佳分布方案。此种方案通常无法直接工程化运用, 需要设计者对通过优化后的受力路径进行产品化设计, 再结合工艺性、经济性等设计概念, 执行正确的优化设计, 形成新的方案模型。新方案是否有效, 必须用最初的设计规范来衡量, 本文通过数值计算代替试验, 在产品前期很好地规避了产品试验带来的经济损失, 因此, 有限元仿真计算是有必要的。

在工程或物理问题的数学模型(基本变量、基本方程、求解域和边界条件等)确定之后, 有限元法作为对其进行分析的数值计算需注意以下三点。

(1) 将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个子域, 并通过边界上的节点互相联结成为一个组合体。(2) 用每个单元中所假设的近似函数来分片, 表示求解域内待求解的位置场变量和与其对应的差值函数表达。由于处在联结相邻单元的节点上, 因而将它们作为数值求解的基本未知量。求解原待求场函数的无穷多自由度问题转换为求解场函数节点值的有限自由度。(3) 通过和原数学模型(例如基本方程、边界条件等)等效的变分原理或加权余量, 建立基本未知量(场函数节点)代数方程组或常微分方程组。此方程为有限元求解方程, 并表示成规范化的矩阵形式, 接着用相应的数值方法求解该方程,

从而得到原问题的解答<sup>[4]</sup>。

因此,优化流程可概括为进行优化模型建立、拓扑优化设计、产品化设计、新方案模型建立、仿真模型计算。如满足要求,则新方案可行;如不满足要求,需要进行结构再优化,重新进行优化模型建立,重复以上步骤。

本文通过拓扑优化设计、产品化设计、有限元仿真计算验证对侧墙滑槽安装梁进行结构优化设计。

## 2 拓扑优化设计

### 2.1 网格模型的建立

建立准确可靠的结构有限元计算模型事关结果的准确性,然而实际的工程问题往往较复杂,因此,在建立计算模型的过程中有必要的简化使得计算模型只能近似地反映工程实际问题,或者说计算模型在不同程度上具有一定的近似性。本文认为侧墙座椅安装梁断面拓扑优化受力路径的概念设计阶段,只需要建立安装梁设计区域的简化模型,在后面进行校核时整个模型的静强度计算也需要对安装梁模型进行简化,以便使有限元计算方便并顺利进行。具体简化情况如下。

(1)侧墙滑槽安装梁长度的简化。通常侧墙座椅安装座使用型材制造,截面尺寸相同;考虑计算经济性及精度,将实例简化为仅为25mm的模型(仅装一组螺栓的长度),单元尺寸定为5mm,采用六面体网格。(2)省略非承载件。对于专门为结构和使用要求而设置的构件,因其对结构的变形和应力分布影响较小,可忽略不计。本文中座椅安装梁涉及盖板、挡水板插接位置盖板及挡水板应力分布影响较小,产生的力和力矩在此忽略不计。(3)对于倒角、圆角的简化。为降低划分网格的困难,考虑安全性,因制造工艺的原因增加的倒角和圆角简化为直角形式。(4)构件表面光顺化。对构件表面上的方便、没必要的孔洞予以圆整光滑,当然有些孔洞对车体强度有明显削弱作用,应加以考虑,本文中安装梁上部开口用于风道接口考虑表面光顺要求,不进行模型的建立。(5)对于各种交叉点和临近节点作适当简化。对于两个考的较近而又补充和的交叉连接点,考虑简化为一个节点处理。在软件中取用容差不大于0.1来进行网格缝合,这样在一些网格疏密边界形成连续性较强的网格分布,有利于计算精度。

### 2.2 材料属性赋值

根据设计要求,滑槽型材为铝6063-T5。弹性模量和泊松比分别设为 $7 \times 10^5 \text{Mpa}$ 和0.3。

### 2.3 边界条件和约束设定

按照考虑安全余量的载荷要求,传递至安装座的力载荷为3000N,作用区域为滑槽承载面,在HYPERMESH中选择面载

荷Pressure载荷类型大小为0.57MPa,另外,盖板与挡水板挂在插槽上,产生的力和力矩在此忽略不计<sup>[5]</sup>。

滑槽型材与车体侧墙相连接,在满足螺栓连接作用理想的情况下,滑槽型材与侧墙间的接触面不发生滑动,故将安装座背面上下区域分别设置一个M6的螺栓大小的位置进行6个自由度的全约束。

在拓扑优化程序中须建立设计区域和非设计区域,考虑到座椅安装梁连接接口复杂,接口位置不在优化范围内,因此车体连接安装位置、滑槽造型区域、盖板插接位置设为非设计区域,设计区域仅为安装梁断面部分。

### 2.4 两种方向性约束及目标约束设定

为了考虑结构成型约束对受力路径的影响,本文建立无约束方向、拔模方向、挤压成型约束方向共三种计算模型,体积约束均保留20%的材料,为了提高刚度,柔度越小越好,因此三种模型均设定以柔度最小化为目标函数。载荷、约束以及设计区域非设计区域,成型约束方向设置如图2所示。

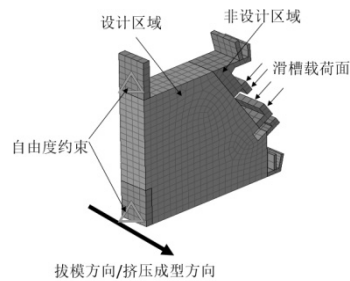


图2 设计区域与非设计区域示意

## 3 产品化设计

所谓产品化设计就是对概念性产品通过权衡制造工艺以及制造过程而进行可实现工程化内部结构设计,外观造型设计以及功能设计。

经过拓扑优化计算三种有限元模型非轴对称约束得到的单元密度分布结果如图3上半部分所示。根据拓扑优化后的三种模型的结果云图,再对模型施加轴对称约束,得到了非轴对称约束和轴对称约束对比模型共6种拓扑优化结果,如图3所示。

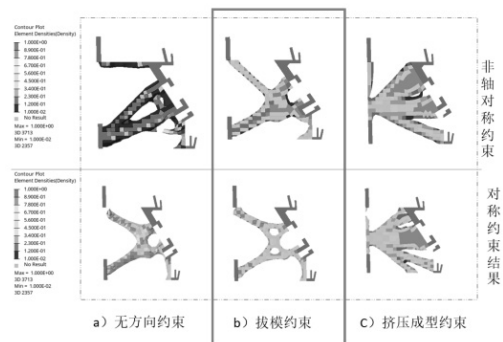


图3 六种单元密度云图

本次计算两种约束方向的拓扑优化结果不同,对单元密度分布影响较大。通过对比分析:(1)拔模约束、挤压成型两种约束方向的拓扑优化结果不同,对单元密度分布影响较大。(2)无方向约束和拔模约束在施加对称约束后得到的模型大致相似,唯一不同的是无方向约束出现材料的大部分堆积,不利于同厚度型材的制作;而挤压成型经过施加对称约束后,材料分叉离散材料较严重,不利于工艺性制作;再权衡某型动车组现车线缆铺设需求及风道口布置要求,采用施加拔模方向约束结合对称要求的模型更能实现工程化应用,从而得到最初的概念性模型。

经过对概念性模型的结构再优化,多选用铝型材制作,厚度均匀,将对称孔洞改为容易脱模成型的四边形,最终呈现座椅安装梁新断面。

#### 4 数值仿真验证

经过拓扑优化及产品化设计,得到新座椅安装梁断面;新方案模型是否能满足满静载荷要求,是否达到轻量化设计效果,须对模型进一步验证。

Hypermesh 是一个高效的有限元前后处理器,涉及大量求解器,不仅包括 Hypermesh 的 OptiStruct、Radioss 等,也包括 Tcl/Python 等公开程序的相关应用。面向高级工程应用,涉及复合材料、多模型、非线性优化等复杂话题。本文采用有限元思想结合 Hypermesh 软件平台中的 OptiStruct 模块进行数值仿真验证,新模型与现有模型进行静强度对比分析来实现。

经过仿真计算,原方案与新方案设计的座椅安装梁模型得到的 Mises 应力分布结果及最大应力点位置示意,如图 4 所示。

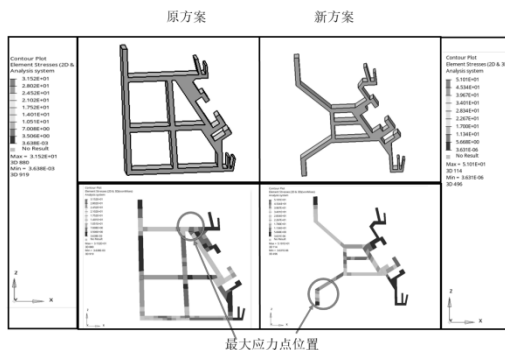


图 4 原模型/新模型应力分布图及最大应力点位置示意

提取各模型的最大应力值以及各模型的重量结果进行对比,如表 1 所示。

表 1 两种计算模型的结果对比

模型	最大应力/MPa	重量/kg	重量减小/%
原模型	31	0.193	67%
新模型	51	0.131	78%

根据以上对比结果分析:(1)原方案最大应力值为 31MPa,新方案最大应力值为 51MPa,由于材料的条件屈服强度值为 170MPa,所以此两种设计方案的静强度安全系数大于 1,满足静强度的指标要求。(2)原方案最大应力点位置距离滑槽较近,新方案距离滑槽较远,在模型之初可采用圆角结构进行局部调整,降低应力集中影响。(3)原方案重量是 0.193Kg,新模型重量是 0.131Kg,与最初优化前设计模型相比分别减重 67%, 78%;新方案较原方案减重 11%;座椅安装梁每米减重约 2.48Kg,以某型动车组二等座椅车为例,以客室长度 21m 计算,左右侧对称分布,共 42m;每列动车组侧墙座椅安装梁整体减重将近 104Kg,经济效益可观,很好地实现了轻量化设计。

#### 5 结语

本文基于既有的设计方案,对某型动车组内侧墙座椅安装梁断面区域进行拓扑优化、产品化设计,通过对新、旧结构方案的局部结构的静强度进行有限元分析,得到的结论如下。

(1)拔模约束与挤压成型约束对拓扑优化设计单元密度分布影响较大,在优化设计中建议设计师优先考虑安装座起筋方向。

(2)目前车体侧墙与座椅连接处局部结构的设计安全系数大于 1,在螺栓连接完好的条件下能够满足静强度要求,不会发生静载破坏。

(3)根据在满足静强度要求的前提下,整体重量在原有方案的基础上减轻了 11%,实现了该部件的轻量化指标,新方案可行,同时此优化设计为轻量化设计研究提供了新的设计思路。

#### 参考文献:

- [1] 李永恒. 动车组轻量化内装设计探讨 [J]. 研究与探讨, 2014, (03): 41-44.
- [2] 贾旭, 战雪. 国内动车组客室座椅安装方式探讨 [J]. 企业技术开发, 2016, 35 (28): 37-38, 50.
- [3] 张璟鑫, 梁伟, 夏洋. 结构多目标拓扑优化目标函数构建方法的研究 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (07): 899-903.
- [4] 王爱彬. 高速动车组拖车车体结构强度分析及优化设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [5] 刘伟, 孙林峰. 基于 ABAQUS 的动车组侧墙滑槽连接结构设计优化 [J]. 装备制造技术, 2020, (09): 173-175.

作者简介: 张璟鑫 (1989-), 男, 山西朔州人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事车辆内装结构研究。