

# 铁路货车制动杠杆的优化与设计

王 刚, 郑明军, 赵路航, 高从行

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**针对某铁路货车制动杠杆的轻量化问题,进行了该模型的受力分析,并在此基础上完成了制动杠杆的变密度法拓扑优化设计。优化之后,从应力、变形、体积等方面与之前做了对比,并根据在工况下的受力进行了疲劳寿命的分析和总结。结果表明,优化之后的制动杠杆较优化之前质量减少了6.166%,应力状况有所改善。

**关键词:**制动杠杆;轻量化;拓扑优化;疲劳寿命

**中图分类号:**U270.33 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0058-05

## 0 引言

铁路货车在我国交通运输中占据了主导地位。对于铁路货车而言,制动系统是铁路货车正常制动和安全运行的重要组成部分。制动系统运行不良直接影响铁路车辆的制动效果,给车辆带来不可估计的后果。

拓扑优化作为一种结构设计方法,可以在不改变制动杠杆基本形状的情况下进行减重优化,使受力更加合理,进而减少事故发生的可能性。

拓扑优化的实现主要是通过通过在结构上打洞、开孔等方法去除结构上不必要的材料来实现优化配置节点的连接关系<sup>[1]</sup>。在结构上通过对材料位置、数量的调整,可以使结构在受到载荷的情况下,在保证满足强度、应力、疲劳寿命等约束条件的前提下,达到某种性能指标的最优化<sup>[2]</sup>。不仅减轻了制动杠杆的质量,达到了轻量化的目标,而且在力学性能方面也得到一定程度的改善。

## 1 拓扑优化数学模型

拓扑优化是一个“0~1”的问题,即结构材料“多少”的问题。由于不可能把设计区域中的所有节点都作为设计变量,所以必须对设计区域进行离散,但是离散问题在数学上很难处理,故通常情况下,将此问题转化为连续问题去研究,变密度法就是该思路的产物,基本思想是引入一种假想的密度可变的材料,在优化的过程中把材料密度作为设计变量,将结构拓扑优化的问题相应的转换为材料最优分布的问题。变密度法(SIMP)是当今工程上最有应用前景的一种材料差值模型方法<sup>[4]</sup>。变密度法(SIMP)材料插值模型假设材料的弹性张量各向同性,材料的属性随着单元的相对密度的变化而变化,具体关系式<sup>[5]</sup>为

$$\begin{cases} E(\rho) = \rho^p E_0 \\ \mathbf{K}(\rho) = \rho^p \mathbf{K}_0 \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_0$ 和 $E(\rho)$ 分别为初始和优化后的弹性模量; $\mathbf{K}_0$ 和 $\mathbf{K}(\rho)$ 分别为初始和优化后刚度矩阵; $P$ 为惩罚因子, $P > 1$ ; $\rho$ 为材料的密度; $\rho_{\min}$ 为材料模型为空的最小密度值;不等式表示对该模型材料用量的一个约束。

Bendsoe和Sigmund已经证明了变密度法(SIMP)存在的物理意义<sup>[6]</sup>。当 $p=1$ 时,SIMP成为一个线性的公式,此时失去了对中间密度单元的惩罚能力;当 $1 < p \leq 2$ 时,惩罚效果只能在某些部分满意;理

收稿日期:2016-09-06 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.11

基金项目:国家自然科学基金(11472180);河北省自然科学基金(E2013210018)

作者简介:王刚(1988-),男,硕士研究生,主要从事现代设计理论与方法的研究。E-mail:961361927@qq.com。

王刚,郑明军,赵路航,等.铁路货车制动杠杆的优化与设计[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):58-61.

论上,  $p$  值越大惩罚的效果也越好, 但是当  $p \geq 6$  时, 全局刚度矩阵就将会产生奇异。因此, 在实际应用中, 一般取  $3 \leq p \leq 5$ 。

虽然 SIMP 法能有效地压缩中间密度, 但是依然会出现一些不稳定的现象, 如出现数值不稳定、棋盘格等现象。并且得到的拓扑结构不仅与惩罚因子  $p$  有关, 还与初始网格有关(网格划分质量的好坏)。该缺点可以通过与其他方法的结合使用来克服。如周长约束法、上限约束法等。

这里采用 Optistruct 软件对制动杠杆结构进行拓扑优化设计, 它利用 SIMP 插值方法作为材料模型, 同时还结合上限约束方法控制数值不稳定现象。

## 2 制动杠杆拓扑优化

### 2.1 制动杠杆有限元模型的建立

由于制动杠杆是通过闸瓦间隙自动调整器来固定的, 一端连接制动缸, 另一端通过连接杆件连接到转向架上。当闸瓦磨损间隙增大时, 闸调器会自动缩短; 当换上新闸瓦时, 间隙变小, 闸调器自动伸长, 将间隙调到正常范围。考虑到制动杠杆结构简单, 所以用六面体对其进行网格划分。划分网格之前, 先要进行实体切割, 要保证 4 个孔的位置、大小和各个孔之间的距离保持不变, 这样可以更好地设定设计变量区域。考虑到求解的精确度, 将网格单元大小设置为 5 mm, 单元总数为 16 593, 节点总数为 21 770 完成网格质量检查, 并保证单元密度分布合理。如图 1 所示。

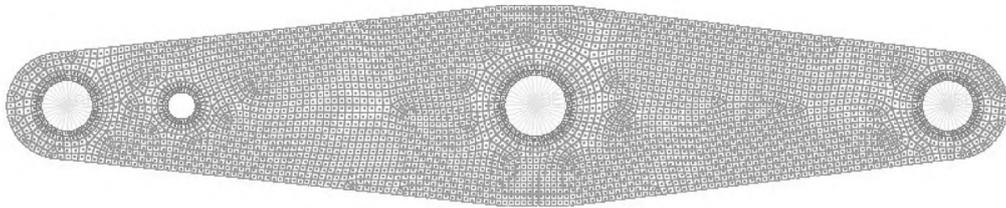


图 1 制动杠杆有限元模型

制动杠杆的基本属性参数: 材质 Q235, 密度  $7\ 850\ \text{kg/m}^3$ , 泊松比为 0.3, 弹性模量  $E=210\ \text{GPa}$ 。

### 2.2 机械载荷边界条件

边界条件: 制动杠杆一端连接制动缸, 另一端通过连接杆件连接到转向架上, 进而连接到闸瓦上。当闸瓦磨损间隙增大时, 闸调器会自动缩短; 当换上新闸瓦时, 间隙变小, 闸调器自动伸长, 将间隙调到正常范围。制动杠杆通过闸调器来固定其 5 个自由度 ( $X, Y, Z$  移动和  $X, Y$  的转动)。静态分析时, 需要限制制动杠杆的 6 个自由度 ( $X, Y, Z$  移动和  $X, Y, Z$  的转动)。该中间孔处制动杠杆与闸调器形成转动副。

机械载荷: 制动杠杆工况有两种, 即空车和重车(满载)。空车的制动率为 20.8%, 空车制动时施加在车轮上的制动力  $F_{\text{制动力}} = G \times 20.8\% = 9\ 784.32\ \text{N}$ , ( $G$  为货车车体自重,  $G=47\ 040\ \text{N}$ ); 重车的制动率为 18.4%, 载重状态下制动时施加在车轮上的制动力  $F_{\text{制动力}} = G \times 18.4\% = 32\ 096.96\ \text{N}$  ( $G$  为货车车体自重 + 载重,  $G=174\ 440\ \text{N}$ )。

制动缸提供的制动力通过一系列杠杆传递到闸瓦上, 进而传递给车轮, 因此可以通过车轮制动力反推出制动缸在两种工况下分别提供多大的力。该两边孔处制动杠杆分别与制动缸活塞、连接杆件形成转动副。力的传递简图如图 2 所示, 制动杠杆力的加载位置如图 3 所示。制动时制动缸提供制动力, 制动力经过制动杠杆传递到连接杆件, 连接杆件将力传递到转向架, 进而传递给车轮, 实现制动。由以上分析得载重情况下, 制动杠杆受的力更大, 此时强度若能满足, 空车情况下也能满足, 所以取  $F_{\text{重}}$  为载重情况下所受的力。推导过程如下

$$\begin{cases} F_{\text{重}} \times a + F_b \times b = 0 \\ F_b = F_c \\ F_c \times c + F_{\text{制动力}} \times d = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $F_{\text{重}}$  为载重情况下, 制动时制动缸需要提供的力, 即制动缸端的力;  $F_b$  为制动杠杆另一端的力;  $F_c$

为经过上拉杆传递到转向架端的力; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为力臂。

由式(2)得出  $F_{重} = 13\ 439\ \text{N}$ 。

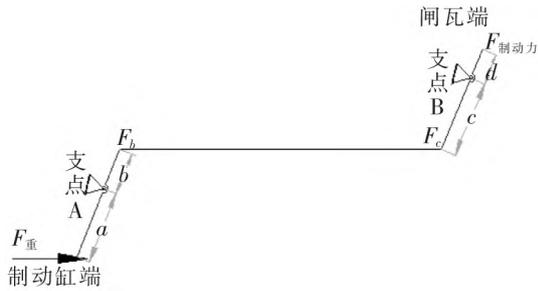


图 2 力的传递简图

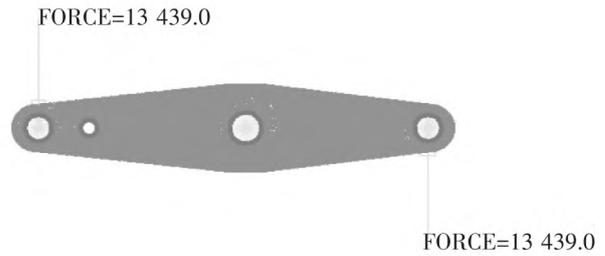


图 3 制动杠杆约束及受力模型

### 2.3 制动杠杆拓扑优化设计

考虑到零件的寿命、加工工艺的复杂性和机械加工的可实现性,设置拓扑优化条件的时候,需要在满足强度要求的基础下,综合考虑以上因素,采用变密度法,设置体积为优化目标,对设计区域的体积进行优化。根据优化的结果进行人工处理,图 4 为相对材料密度 0.01112-1 的制动杠杆拓扑结构,可知拓扑结果可以提供一种概念性的理论优化方案<sup>[7-8]</sup>。该结果表明中间孔两侧的区域为相对密度较小的区域,可以适当的去除。去除材料横截面为 48 mm×10 mm,倒角为 R3,位置为距中间孔 144 mm(中间孔垂直于  $x$  轴的中心面与长方体垂直于  $x$  轴中心面的距离)。图 5 为在图 4 的基础上以及综合考虑各种因素后所得到的结果。



图 4 拓扑优化结果

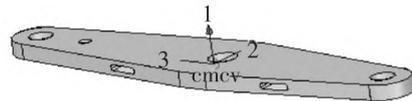


图 5 去除后的制动杠杆

## 3 优化前后结果分析

根据制动杠杆在工作中的受力状况对优化结果进行分析,优化后所得结果如图 6、图 7 和图 8 所示。

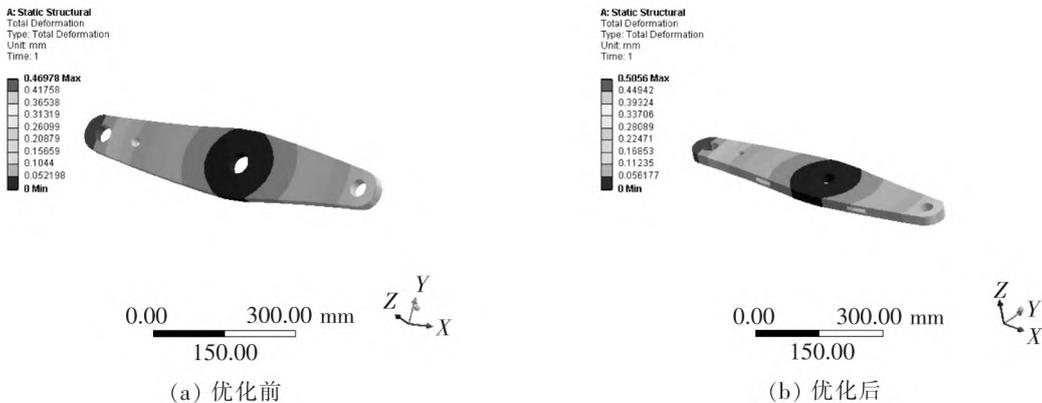


图 6 位移分布云图

(1)通过分析计算可得,制动杠杆体积由优化前的  $0.001\ 97\ \text{m}^3$  减少到  $0.001\ 85\ \text{m}^3$ 。在选择相同材料的情况下,质量较优化前减少了 6.166%,达到了减重的效果,并且由图 7、图 8 可得优化后制动杠杆的

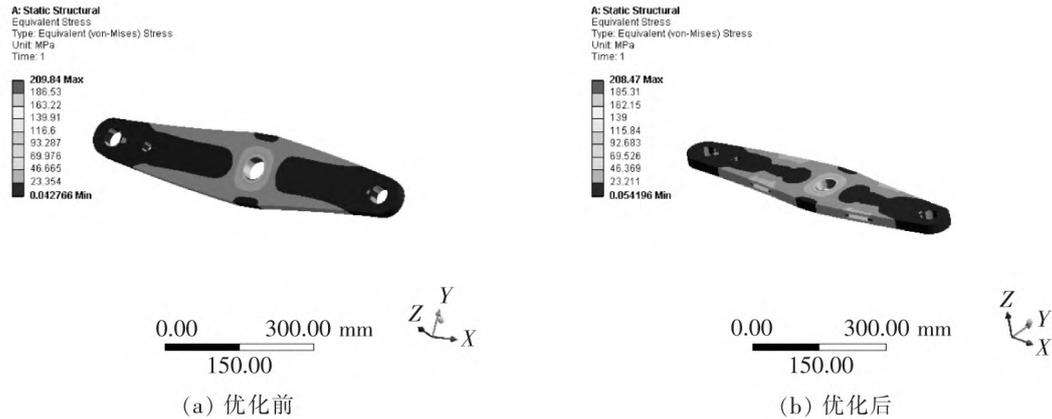


图 7 等效应力分布云图

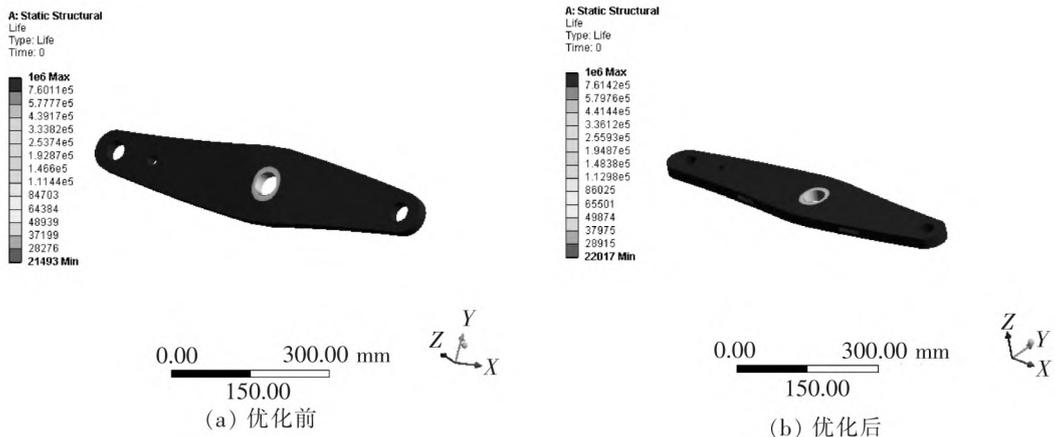


图 8 使用寿命云图

最大位移和最大应力均比优化前有所改善,优化前最大位移为 0.469 78 mm,优化后为 0.505 6 mm,略有增大,但在允许范围内;优化前最大应力为 209.84 MPa,优化后为 208.47 MPa,有所减小,充分发挥了材料的使用性能,达到了优化设计的目的。

(2)由图 8(b)可以看出,优化后的制动杠杆最容易发生疲劳,有效使用时间与优化前的相比,寿命有所增长。

## 4 结论

采用变密度拓扑优化方法对制动杠杆进行了优化分析计算,得到了较为合理的结构优化方案,并通过强度及疲劳寿命分析对制动杠杆的轻量化进行了分析。研究表明:优化后制动杠杆的质量减轻了 6.166%,同时优化前后该零件的最大应力、最大变形及疲劳寿命基本不变,其中零件的最大应力及疲劳寿命还略有改善,达到了制动杠杆轻量化的目标。

## 参 考 文 献

- [1]霍心达,郑明军,吴文江,等.基于拓扑优化的某活塞轻量化分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013,26(1):87-92.
- [2]杨姝.复杂机械结构拓扑优化设计若干问题研究[D].大连:大连理工大学机械工程学院,2007.
- [3]范文杰,范子杰,桂良进,等.多工况下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.
- [4]左孔天.连续体结构拓扑优化理论与应用研究[D].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2004.
- [5]左孔天,陈立平,钟粮芳,等.基于人工材料密度的新型拓扑优化理论和算法研究[J].机械工程学报,2004,40(12):31-37.

(下转第 67 页)

**Abstract:** Based on the DEM, a simulation model through EDEM software by using Hertz-Mindlin contact model gives the physical properties of sand and the geometric characteristics of sand collection shovel. The sand quantity, speed, and energy, etc. of sand pile are analyzed for the sand shovel revolving speed is of 90 r/min, 100 r/min and 120 r/min, and the calculated power respectively required under the three kinds of speed are 4.24 kW, 5.29 kW and 7.46 kW. Optimization is made of sand shovel blade shape at a fixed speed of 120r/min. Simulation experiments are made to compare the stress of flat sand shovel when the sand shovel end arc radius is 700 mm, 500 mm and 300 mm, which shows a better working condition can be obtained at 500 mm.

**Key words:** sand-cleaning car; sand collection shovel; simple sand collection shovel model; the numerical simulation



(上接第 61 页)

- [6] 范文杰, 范子杰, 桂良进, 等. 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): 1505-1508.
- [7] Bendsoe M P, Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization [J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69(9/10): 635-654.
- [8] Guan-Chun Luh, Chun-Yi Lin. Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2009(4): 1343-1353.

## Optimal Design for Brake Lever of Wagon

Wang Gang, Zheng Mingjun, Zhao Luhang, Gao Conghang

(College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** To solve the light weight of a brake lever, this paper makes the force analysis of this model and topology optimization design based on variable density method. In order to validate the optimization effect, the results are compared from the aspects of stress, deformation and volume, and the fatigue lifetime is analyzed according to the forces under the condition of working. The results show that, the mass of optimized brake lever reduces 6.166% while the material density is the same, and an improvement on stress is effected.

**Key words:** brake lever; light weight; topology optimization; fatigue lifetime