

# 需要基于 Abaqus 的定钳制动器仿真分析及优化

张兴琦 斯梦悦 顾樱红 陈 锋

浙江万安科技股份有限公司 浙江诸暨 311822

**摘要:** 针对某汽车定钳制动器在实际应用中出现刚度不足、变形过大等问题,采用有限元方法推导固定钳制动器变形运动微分方程,借助 ABAQUS 软件对制动器进行建模计算。通过对结构变形云图分析,发现了影响钳体变形过大的两个关键因素:内钳体支撑臂厚度、外钳体侧边过渡处的结构刚度。随后针对上述问题进行讨论分析与结构优化,提出一种新型固定钳钳体设计方案,变形量减小了 0.267mm。后试验验证新结构刚度实测与仿真分析结果一致,证明本文模型和方法具有有效性和可行性,可为固定钳制动器刚度性能提升提供理论指导。

**关键词:** 固定钳制动器;有限元分析;结构优化;刚度分析

## Simulation analysis and optimization of fixed caliper brake based on Abaqus

Xing-qi Zhang , Meng-yue Si, Ying-hong Gu Feng Chen

Zhejiang Vie Science and Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient stiffness and excessive deformation of an automobile fixed caliper in practical application, the deformation motion differential equation of the fixed caliper is deduced by using the finite element method, and the brake is modeled and calculated with the help of ABAQUS software. Through the analysis of structural deformation cloud chart, two key factors affecting the excessive deformation of body are found: the thickness of support arm of inner caliper body and the structural stiffness at the side transition of outer caliper body. Then, the above problems are discussed, analyzed and optimized, and a new design scheme of fixed clamp body is proposed, with the deformation reduced by 0.267mm. The post test verifies that the measured stiffness of the new structure is consistent with the simulation analysis results, which proves that the model and method in this paper are effective and feasible, and can provide theoretical guidance for improving the stiffness performance of the fixed clamp brake.

**Keywords:** Fixed clamp brake; Finite element analysis; Structural optimization; Stiffness analysis

### 引言

随着汽车工业的快速发展,对汽车的制动性要求越来越高。一方面要求汽车制动效能足够大,制动距离短;另一方面要求制动踏板过程具有一定的舒适性,这就要求制动器的刚度足够大,使制动时需液量降低,减少踏板制动行程。

本文针对某新能源汽车固定钳制动器存在刚度弱、需液量多的问题进行研究分析,借助 Abaqus 软件建立盘式制动器总成有限元分析模型,分析计算钳体受载后的应力分布和结构变形。随后对上述内、外钳体进行针对性的结构优化,并提出一种“H形”外钳体设计方案。经过有限元计算,新

钳体结构在 20MPa 油压下最大变形量为 0.587mm,相对原方案减少 0.267mm,最大米塞斯应力为 188.9MPa,同样减少了 60.6MPa。最后对优化后的方案进行实物刚度试验,同油压工况下,产品实测最大变形为 0.565mm,与仿真计算结果相差在 5% 以内,说明本

文搭建的有限元模型具有较高准确度、分析方案合理有效,可有效仿真预测产品刚度变形量以及最大米塞斯应力等关键性能参数。

### 一、有限元基本理论

采用有限元分析方法对制动器数模进行结构单元离散化,同时建立位移函数多项式,利用节点位移将单元内任意点的位移、应力或应变随位置变化的关系式通过矩阵方程表示,如下:

$$\{d\}=[N]\{\delta_n\} \quad (1)$$

式中,  $\{d\}$  为单元内任意点的位移列向量,  $[N]$  为形状函数矩阵,  $\{\delta_n\}$  为节点位移列向量。

采用几何方程中位移与应变的关系进行单元的力学特征分析,通过位移表达式推导单元应变表达式:

$$\{\varepsilon\}=[B]\{\delta_n\} \quad (2)$$

式中,  $\{\varepsilon\}$  为单元内任意点的应变矩阵;  $[B]$  为几何矩阵,  $\{\delta_n\}$  为节点位移列向量。

然后利用物理方程,即应力应变关系  $\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}$

及应变与位移关系式推导出单元应力表达式:

$$\{\sigma\}=[D][B]\{\delta_e\} \quad (3)$$

式中,  $\{\sigma\}$  为单元内任意点的应力矩阵,  $[D]$  为与材料性能相关的矩阵, 在弹性范围内表示广义虎克定律,  $[B]$  为几何矩阵,  $\{\delta_e\}$  为节点位移列向量。

利用虚功原理构建单元刚度方程如下:

$$\{R\}^e=[K]^e\{\delta_e\} \quad (4)$$

其中:

$$[K]^e=\int [K]^T[D][B]dv \int [K]^T[D][B]dv \quad (5)$$

式中,  $\{R\}^e$  为单元等效节点载荷,  $[K]^e$  为单元刚度矩阵,  $[B]$  为几何矩阵,  $\{\delta_e\}$  为节点位移列向量。

将单元载荷列阵与节点位移列阵组合, 构建制动器的载荷列阵和节点位移列阵, 得到的制动器工作状态平衡方程为:

$$[K]\{\delta\}=\{R\} \quad (6)$$

式中,  $[K]$  为制动器刚度矩阵,  $\{\delta\}$  为制动器位移列向量,  $\{R\}$  为制动器等效节点荷载列向量。

根据节点边界条件与平衡方程组成的偏微分方程组, 计算模型节点位移, 最后求解方程组计算出制动器各节点应力应变。

## 二、模型建立

固定钳制动器包括内钳体、外钳体、制动盘、内摩擦块、外摩擦块、活塞以及连接螺栓等部件。其中内钳体和外钳体通过连接螺栓紧固在一起。钳体内部开设活塞腔, 嵌套活塞构成制动建压腔。利用 Hypermesh 软件对固定钳制动器各个部件进行网格剖分, 建立定钳盘式制动器网格离散模型, 如图 1 所示。

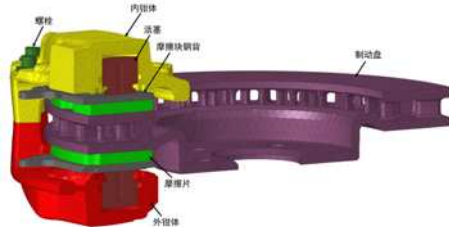


图 1 固定钳盘式制动器有限元模型

由于本文主要研究制动器结构在极限受压状态下一种稳态结构变形和应力分布问题, 不涉及建压过程中的油压冲击、各部件的碰撞等动力学问题, 因此采用静力学稳态分析步开展。整个制动器制动过程分为三个分析步: 螺栓预紧步(内、外钳体装配在一起)、油压加载分析步、制动分析步; 考虑结构受载后钳体变形较大, 模型刚度矩阵有一定变化, 在模型中开启“大变形”选项。

## 三、仿真结果分析

经过前述模型的仿真分析计算, 得到固定钳制动器应力分布云图及刚性变形云图, 如图 2 所示。仿真结果表明, 在 20MPa 油压工况下, 制动钳的最大米塞斯应力为 249.5MPa, 最大刚性变形为 0.854mm, 超过了设计需求(小于 0.8mm), 与实际产品反馈刚性不足、需液量大等问题吻合。

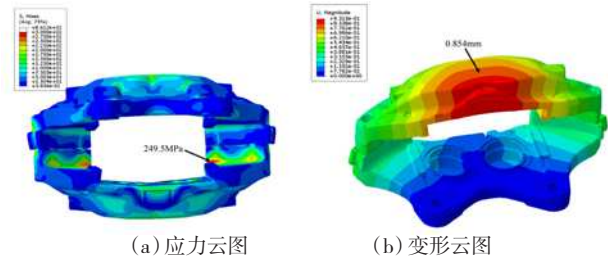


图 2 制动钳仿真分析结果云图

由变形云图 3(b) 可以看出, 固定制动器变形主要由内钳体变形、外钳体变形构成。两者相互作用, 产生了钳体整体的结构变形。

对比内钳变形云图 3, 可以发现当制动钳内无建油压时, 内钳体支撑臂轮廓线为一条水平线。当钳体内部建压后, 其轮廓线变成一条曲线。这说明内钳体的支撑臂处刚度不足, 钳体内部建压后该部位支撑力度弱, 引发了较大的弯曲变形。整个制动器通过支撑臂装配在汽车上, 支撑臂的过度变形必然会导致整个钳体发生向下的位移运动, 进而引发整个制动器变形过大的问题。

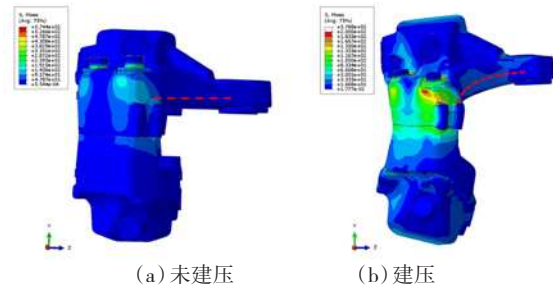


图 3 内制动钳变形对比云图

由外钳体的变形云图 4 可知, 当外钳体没有建压时, 其轮廓线为一条水平虚线; 建压后, 外钳体轮廓线为一条底部略平, 两侧有较大弯曲弧度的曲线。说明外钳体变形最大位置发生在钳体侧梁与底部端面结构的连接过渡处。当外钳体内部制动建压后, 缸壁受压发生向外侧的弯曲变形, 外钳体两侧通过螺栓固定在内钳体上, 这样就形成了一种中部结构受压, 两侧支撑的受力方式。而外侧端面与侧梁连接处结构设计偏弱刚度偏小, 必然会使外钳体发生一种“弓”形弯曲变形, 进而导致结构整体变形量增大。

通过上述分析, 可以发现导致固定钳制动器变形过大主要原因是: (1) 钳体支撑臂刚度不足, 钳体建压后, 导致钳体整体发生向下的位移; (2) 外钳体侧臂与底部端面连接过渡处刚度不足, 该部位受载后发生了较大的弯曲变形, 加大了整个结构的变形量。另外过大的变形也导致结构内部应变变大, 进而导致应力提高, 超过了材料许用应力, 引起了强度不合格问题。

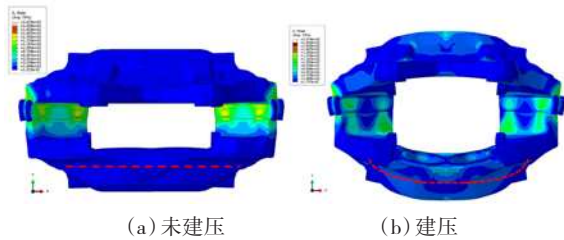


图4 外制动钳变形对比云图

#### 四、结构优化

经过前述有限元建模及结构变形分析, 本文找到了导致固定钳刚性不足的影响因素。为提高产品的刚度, 本节针对上述部位进行针对性的结构优化。

##### 4.1、内钳体支撑臂加厚

针对内钳体支撑臂不足的问题, 在原方案结构基础上对内钳体 1、2 处加厚 3mm, 提高其支撑刚度, 如图 5 所示。

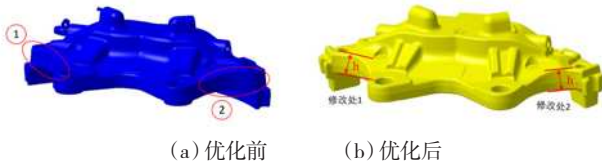


图5 内钳体结构优化前后的对比图

##### 4.2、外制动钳增加“H形加强筋”和边梁

针对外钳体刚度不足问题, 在外钳体背部 1、2、3、5 处设计加强筋。如图 7 所示, 从而整体上增强外制动钳抵抗变形的能力。

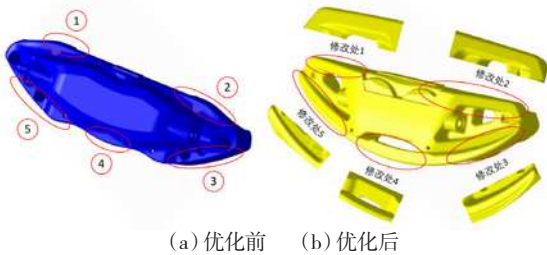
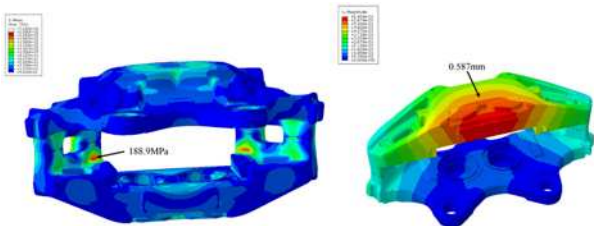


图6 外制动钳结构优化前后对比图

接下来利用 ABAQUS 软件重新建立新结构的有限元分析模型。经过有限元计算, 如图 7 所示, 在同油压工况下, 新结构方案的外钳体最大变形量为 0.587mm, 相对减小了 0.267mm; 结构最大米塞斯应力值由 249.5MPa 降低到 188.9MPa, 产品刚度、强度得到较大提升, 这说明前述模型与分析优化方法具有合理性和有效性。



(a) 应力云图 (b) 变形云图

图7 制动钳结构优化后仿真结果云图

#### 五、试验验证

为验证模型的准确性和有效性, 对优化后的固定钳制动器进行实物刚度测试, 如图 9 所示。

表 5 为固定钳制动器在 20MPa 油压工况下零件变形的三次试验测试结果。试验表明新钳体方案最大变形量为 0.575mm, 有效提高了产品的实际刚度值, 也表明本文建模理论合理, 模型仿真准确度高。

表 1 定钳制动钳仿真与试验变形量对比

试验工况	测试油压	仿真分析值 (mm)	试验测试值 (mm)	误差 (%)
工况 1	20MPa	0.587	0.565	3.7%
		0.587	0.559	4.7%
		0.587	0.575	2.0%

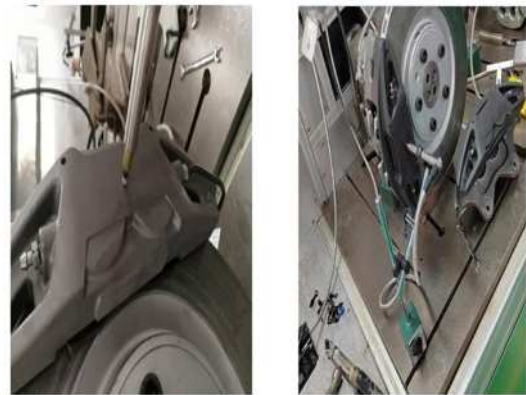


图8 固定钳制动器刚性试验台

#### 六、结论

本文利用 Abaqus 有限元软件搭建了固定钳制动器总成有限元仿真模型, 通过分析钳体的结构变形并结合其应力-应变特点, 讨论钳体变形过大的产生机理。然后优化关键局部结构有效提升了产品的结构强度、刚度性能。

经过结构优化, 提出了一种新型固定钳制动器结构方案, 经过分析计算 20MPa 油压工况下该结构的最大变形量为 0.587mm, 最大米塞斯应力值为 188.9MPa, 产品刚度和强度性能较好。后刚度实测与仿真误差在 5% 以内, 表明本文搭建的固定钳制动器有限元分析模型具有较高的可靠性和准确性, 可在产品设计阶段指导提升制动器刚度、强度等关键性能指标。

#### 参考文献:

[1] 胡武超, 晋民杰, 荆华, 等. 盘形制动器的结构特点及故障分析 [J]. 煤矿机械, 2017, 38(08): 151-153.  
[2] 孟德建, 张彬, 徐杰, 等. 制动钳及其约束对制动器热机耦合特性的影响 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2019, 47(05): 704-713.

[3] 汪家利. 基于车身刚度及变形分析法的结构优化设计 [D]. 武汉理工大学, 2010: 64.

[4] 洪玉玲. 基于 Abaqus 的矿车紧急制动仿真 [J]. 煤矿机械, 2019, 40(12): 199-201.

[5] 高普, 杜永昌, 王宇健. 盘式制动器闭环耦合

模型耦合刚度的优化 [J]. 汽车工程, 2016, 38(11): 1357-1361.

作者简介: 张兴琦 (1988—), 浙江诸暨人, 工程师, 硕士, 现主要从事盘式制动器有限元仿真分析的研究工作, 电子信箱: zhifengqx@163.com.