

Design and Optimization of Electric Vehicle Disc Brake Based on Finite Element Method

Fengxian Zhang Yunhui Ma Xueyan Bai Huanwei Liu

Taishan University of Science and Technology, Tai'an, Shandong, 217000, China

Abstract

With the rapid development of electric vehicles, the safety and braking performance requirements of the braking system are increasing day by day. As the core component of the braking system, the performance of the electric vehicle disc brake directly affects the braking effect and safety of the whole vehicle. This paper studies the disc brake of an electric vehicle based on the structure and working principle of the disc brake. Firstly, determine the calculation of the vehicle parameters and the main parameters and establish the 3 D geometry model, using the 3 D modeling software, conduct modal simulation analysis of the brake disc and static simulation analysis of the friction block, and obtain the simulation analysis results. In this paper, the material characteristics of the brake disc and the friction block and the dynamic behavior are considered. The results show that with the increase of the autovibration frequency, the maximum deformation also occurs, which reduces the service life of the brake disc, and the low autovibration frequency will increase the probability of resonance. During braking, the contact surface of the block produces great stress, and the stress concentration occurs at the position along the center line of the block and is symmetrically distributed.

Keywords

disc brake; finite element; mode analysis

基于有限元的电动汽车盘式制动器设计与优化

张凤贤 马芸慧 白雪艳 刘焕伟

泰山科技学院, 中国·山东 泰安 217000

摘要

现如今电动汽车的快速发展,其制动系统的安全性和制动性能要求日益提高。电动汽车盘式制动器作为刹车系统的核心部件,其性能直接影响到整车的制动效果和安全性。本文以某电动汽车的盘式制动器作为研究对象,内容主要围绕盘式制动器的结构和工作原理展开。首先,确定整车参数、盘式制动器相关参数的计算和盘式制动器主要参数的确定,利用三维建模软件对盘式制动器的相关组成部件建立三维几何模型;然后利用有限元分析软件对制动盘进行模态仿真分析和对摩擦衬块进行静态仿真分析,进而得出仿真分析的结果。在分析方法上,本文综合考虑了制动盘与摩擦衬块的材料特性、制动过程中的动力学行为等因素。研究结果表明随着自振频率的升高,其最大变形也随之发生,降低了制动盘的服役寿命,过低的自振频率则会加大发生谐振的概率。在制动过程中,衬块的接触面产生了很大的应力,应力集中发生在沿衬块中心线位置处,并且是对称分布。

关键词

盘式制动器;有限元;模态分析

1 引言

随着汽车数量的不断增多以及交通事故的频繁出现,汽车行驶的安全性日益成为大众关注的焦点。在众多影响安全驾驶的因素中,汽车的制动性能直接关乎其安全刹车距离和交通事故的死亡率^[1]。车辆制动的主要目的是在尽可能短的时间内将车速降至零,并确保在行驶过程中车辆能够保持

稳定。制动效能的高低主要取决于制动系统的持久性,而制动时的稳定性和转向可靠性则是评价汽车制动性能的重要指标。目前,常用的车用制动器主要分为两类:一类是安装在车轮轮毂附近的制动器,如盘式制动器和鼓式制动器;另一类则是安装在传动轴附近的制动装置,例如缓速器。

相较于盘式制动器,鼓式制动器在散热性能和防泥水方面表现欠佳,特别是在沙尘环境长期作用下,其制动系统更容易受损。因此,在现代汽车制动技术中,鼓式制动器已逐渐被淘汰。然而,由于成本和经济性的考虑,仍有部分消费者选择配备盘式制动器的汽车。盘式制动器的工作原理是,在车辆需要停车或制动时,通过高液压推动制动盘上的活塞,使摩擦片与制动盘紧密接触,从而产生足够的摩擦力,使车速逐渐降低至零。在制动过程中,盘式制动器的摩擦片

【基金项目】泰山科技学院 2023 年度校级教学团队“机械创新设计教学团队”建设项目。

【作者简介】张凤贤(1991-),女,中国山东菏泽人,硕士,讲师,从事机械设计及理论研究。

会经历频繁的摩擦磨损，这增加了维护成本。此外，由于摩擦片的面积有限，一旦达到其极限值，就无法再扩大有效摩擦范围。这一限制要求制动液压力必须不断增加以满足制动需求，从而需要车辆配备相应的助力装置来提高制动效果。

2 盘式制动器性能参数

电动汽车盘式制动器，作为车辆制动系统的重要组成部分，其分类、结构与功能对于保障行车安全至关重要^[2]。根据工作结构，盘式制动器可以分成三类：摩擦片式制动、摩擦筒式制动和盘式制动。盘式制动是在一块制动片上加上一块制动盘，制动时靠制动片与装在制动盘上的凸起之间的缝隙来实现制动。根据其工作原理，盘式制动可以划分为无心型（弹性压力型）、双向力反馈（两个及以上）以及一方力反馈型（一个）四种^[3]。电动汽车盘式制动器的基本组成部分包括制动盘、制动钳、摩擦片、分泵和油管等部分^[4]。制动盘是制动器的主要部分，它随车轮转动；制动钳则通过油管与液压系统相连，负责施加制动力；摩擦片则是产生摩擦力的关键部件，它与制动盘接触并产生摩擦力以实现制动效果；分泵则是液压系统中的重要部分，负责将制动液的压力传递到制动钳上^[5]。

忽略掉路面对汽车车轮的滚动阻力和汽车回转质量的惯性力矩，则对任意角速度 $\omega > 0$ 的车轮，在制动时的力矩平衡方程是：

$$T_f - F_{xb}r_e = 0 \quad (1)$$

$$F_{xb} \leq F_\phi = F_z \phi \quad (2)$$

汽车制动时水平地面对前后轴车轮的法向反力 F_{z1} ， F_{z2} 分别为：

$$\left. \begin{aligned} F_{z1} &= \frac{G}{L} \left(L_2 + \frac{h_g}{g} \frac{du}{dt} \right) \\ F_{z2} &= \frac{G}{L} \left(L_1 - \frac{h_g}{g} \frac{du}{dt} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

当不同附着系数的路面上制动，前后轮都抱死，则上式为：

$$\left. \begin{aligned} F_{z1} &= \frac{G}{L} (L_2 + \phi h_g) \\ F_{z2} &= \frac{G}{L} (L_1 - \phi h_g) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

选取一台前轮为驱动轮的某电动汽车作为研究对象，所选取的车辆参数如下表 1-1 所示，地面附着系数取 0.7。

表 1-1 车辆参数

名称	数值 (单位)
整备质量	2195 (kg)
质心位置距离前轴距离	1.35(m)
质心位置距离后轴距离	1.40(m)
车轮工作半径	270(mm)
最高车速	200 (km/h)

$$\frac{F_{f1}}{F_{f2}} = \frac{\beta}{1-\beta} \quad (5)$$

$$T_{f1\max} = F_{z1} \phi r_e = \frac{G}{L} (L_2 + \phi h_g) \phi r_e \quad (6)$$

$$T_{f2\max} = \frac{1-\beta}{\beta} T_{f1\max} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{f1} + F_{f2} &= F_{xb1} + F_{xb2} = \phi G \\ F_{f1}/F_{f2} &= F_{xb1}/F_{xb2} = (L_2 + \phi h_g)/(L_1 - \phi h_g) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中： T_f ——制动器对车轮的制动力矩，也就是制动器的摩擦力矩，方向与车轮旋转方向相反，单位是 $N \cdot m$ ；

F_{xb} ——地面作用于车轮的制动力，

r_e ——车轮的有效半径，单位是 m 。

令 $F_f = \frac{T_f}{r_e}$ ，式中 F_f 为制动器制动力，单位是 N 。制动器制动力值由制动器结构参数所决定，即取决于制动器的形式、结构尺寸、制动器摩擦副的摩擦因数和车轮半径，并与制动系的液压或气压成正比。

结合 (1) - (2) 式，本文中选择的某电动汽车。在 0.7 的附着系数路面制动，制动器能产生的前轮最大制动力矩为 $2217N \cdot m$ ，后轮最大制动力矩为 $820N \cdot m$ 。

标准的直径是在 70%~79% 范围的制动盘，若制动盘的直径相比于其他的来说较大，则可以增加制动盘的有效半径，从而减小了制动钳的夹持力，减小了摩擦衬块的单位压力及工作温度。而制动片的直径则由轮圈的直径所限定。根据表 1-1，制动盘的直径采用 $D = 300mm$ 。制动盘的厚度对制动盘的性能及运行时的温度有很大的影响。要保证制动片的重量不会过大，制动片的厚度应该做得更薄；制动盘的厚度也不宜太薄，以减少运转时的温度升高。制动盘可以是纯固体的，也可以是在制动盘的中部浇注一个通气孔来冷却和通气。整体式制动盘的厚度可以采取 10~20mm，制动盘可以取 20~50mm，采用较多的是 20~30mm。本优化设计中制动盘采用通风盘设计，取 $h = 12mm$ ，后制动盘采用实心盘设计，取 $h = 15mm$ 。推荐摩擦衬块的外半径 R_2 与内半径 R_1 的比值不大于 1.5。若比值较大，工作时摩擦衬块的外缘与内缘的圆周速度相差较大，磨损会不均匀，接触面积减小，最终会导致制动力矩变化较大。本文中取 $R_2 = 145mm$ ， $R_1 = 103mm$ 。

3 盘式制动器建模

基于上一节盘式制动器的尺寸参数，对盘式制动器通过用 CATIA 软件对其进行建模。在桌面上选取一个曲面，按照自身的尺寸为 360mm，画一个外圈。接着，凸起的厚度为 28mm。在最终的端面上划出一个小洞，用它在圆盘上开一个对称的小孔，依次建立制动盘三维模型、制动钳三维模型、支架三维模型、制动衬块三维模型如图 2.1 所示。

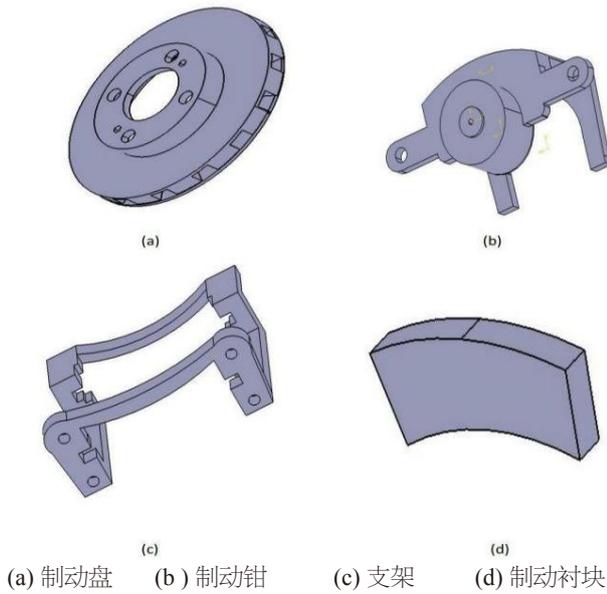


图 2.1 三维模型

4 有限元分析

基于上一节的三维模型，导入到 ANSYS 中完成网格的划分，生成的网格图如图 3.1 所示。预处理选择 SOLID187 单元类型，定义制动盘的弹性模量、泊松比和密度，运用 ANSYS 软件对制动盘进行了详尽的八阶振动分析，结果显示其最大变形量高达 0.697002 毫米。进一步观察发现，随着系统自振频率的提升，制动盘的最大变形量也随之增加，这一现象直接缩短了制动盘的使用寿命。为了有效延长制动盘的服役周期，合理提升系统的自振频率显得尤为重要。这一目标的达成，关键在于通过精细调节制动盘的质量与刚度分布来实现。

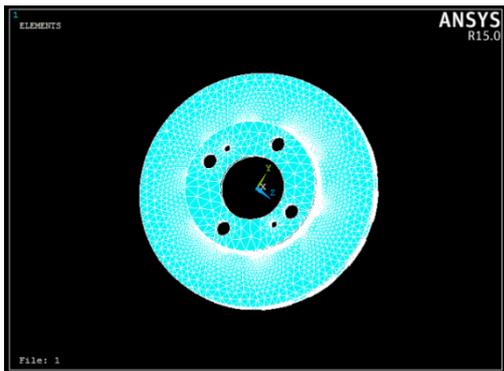


图 3.1 制动盘有限元网格模型

其次选择铜系粉末冶金作为选择的衬垫材质。铜基合金具有 7.8×10^6 千克/立方公尺的密度， 6×10^2 的弹性模量和 0.33 的泊松比。将 CATIA 零部件存储为 modle，然后开启有限元机械 APDL15.0，单击 File> Import>CATIA，选中模型文件并开启，按顺序选择 Plottrls>Style>Solid Mode

Facets>Fine，然后选取 Plot>Volumes。顺序选取主菜单>预处理器>元素类型>添加/编辑/删除，以确定 SOLID187 的定义类型。按顺序选取主菜单>预处理>材料程序>材料模块，在其中输入弹性模数为 600、泊松比为 0.33、密度为 $7.8000e-06$ 。

按顺序选择主菜单>图像>定义载入>应用>字符串>分配>在区域。在进行限制时，选用了完全限制的方式，即对衬垫与后板接合表面进行完全限制，然后在 DOF 中求解，输出的应力图如图 3.2 所示，该图表示制动衬块与制动盘接触后的应力分布。由图 3.2 可以看出，在制动盘与摩擦垫的接触面处于中心位置，产生了很大的变形，并且呈现对称分布的特征，其最大直径达到 0.729547mm。

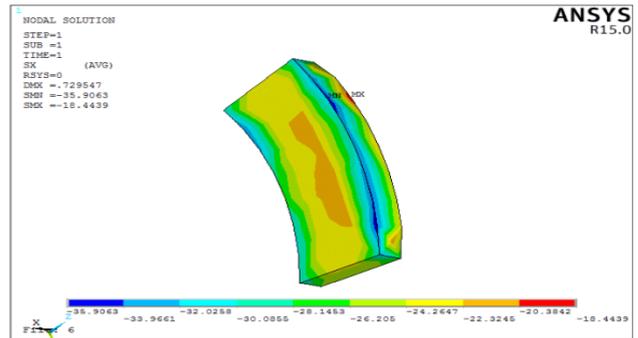


图 3.2 应力云图

5 结论

本文对某电动汽车盘式制动器进行有限元分析，通过对盘式制动器三维建模、理论计算和有限元分析方法对盘式制动盘的主要参数以及制动盘和摩擦衬块应力的分析。研究结果表明随着自振频率的升高，其最大变形也随之发生，降低了制动盘的服役寿命，过低的自振频率则会加大发生谐振的概率，因此需要合理地提高系统的自振频率，能有效延长制动盘的服役寿命。其次，本文对盘式制动器的摩擦衬块进行静态分析，结果发现在制动过程中，衬块的接触面产生了很大的应力，应力集中发生在沿衬块中心线位置处，并且是轴对称分布。

参考文献

- [1] 林军涛,王桂锋,刘娟,等.基于轻量化需求的制动器底板有限元分析[J].农业装备与车辆工程,2023,61(04):182-184.
- [2] 李乃斌,李耀平.基于ANSYS workbench鼓式制动器制动鼓的有限元分析[J].价值工程,2017,36(08):91-93.
- [3] 乔臻,黄金.圆盘式磁流变制动器磁饱和有限元分析[J].机械传动,2016,40(05):139-144.
- [4] 刘闯,苏小平,王宏楠,等.基于HyperMesh的盘式制动器有限元分析[J].机械科学与技术,2014,33(04):583-587.
- [5] 匡博.盘式制动器制动噪声有限元分析[D].长沙:湖南大学,2013.