

# 电子机械制动器的建模仿真

芦杰, 孙奎洲

江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2024年8月29日; 录用日期: 2024年9月22日; 发布日期: 2024年9月30日

## 摘要

电子机械制动器是以电机驱动元件作为制动执行器, 代替传统的液压制动方式, 来解决液压制动系统存在的响应滞后问题。本文对电子机械制动器进行了设计建模、仿真分析。首先根据汽车参数对电子机械制动器的电机、行星齿轮减速器、滚珠丝杠进行设计。采用CATIA对电子机械制动器各部件进行三维建模, 然后利用ANSYS/Workbench对刹车盘和刹车片进行瞬态动力学仿真, 验证了模型的有效性和制动效果的稳定性。本研究的建模仿真为电子机械制动器的性能提升和优化设计提供了有力的理论支撑和技术参考, 有助于推动其在汽车及相关领域中的广泛应用。

## 关键词

电子机械制动器, 行星齿轮减速器, 滚珠丝杠

# Modeling and Simulation of Electronic Mechanical Brakes

Jie Lu, Kuizhou Sun

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: Aug. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Electronic mechanical brakes use motor-driven components as brake actuators to replace traditional hydraulic braking methods and solve the response lag problem in hydraulic braking systems. This article presents the design, modeling, and simulation analysis of electronic mechanical brakes. Firstly, the design of the electronic mechanical brakes motor, planetary gear reducer, and ball screw is based on the vehicle parameters. CATIA is used for three-dimensional modeling of the components of the electronic mechanical brakes. Subsequently, transient dynamic simulations of the brake disc and brake pads are conducted using ANSYS/Workbench to validate the effectiveness of

the model and the stability of the braking performance. The modeling and simulation of this study provide strong theoretical support and technical reference for the performance improvement and optimization design of electronic mechanical brakes, which will help promote their widespread application in the automotive and related fields.

## Keywords

Electronic Mechanical Brake, Planetary Gear Reducer, Ball Screw

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着汽车工业的不断发展, 制动系统的性能和可靠性要求日益提高。电子机械制动器作为一种新型的制动技术, EMB 电驱动制动系统, 作为新能源汽车领域的一项革命性技术, 正逐步成为未来智能汽车的标配。相较于传统的液压制动, EMB 以其独特的优势引领着制动技术的新一轮变革, 其装配工艺和测试技术对于保障系统性能和安全性至关重要。具有响应速度快、控制精度高、易于集成等优点, 汽车电子机械制动器是目前国内研究的热点[1]。汽车底盘本土龙头厂商伯特利在 2023 年报中表示已开展对 EMB 的研发工作, EMB 的 A 轮首样已于 2023 年 8 月完成制作, 并已进行冬季试验验证。对电子机械制动器进行准确地建模仿真, 能够更好地模拟汽车制动时, EMB 的制动情况, 为产品的研发和优化提供技术性支持。本文对 EMB 进行设计建模、仿真, 模拟真实汽车制动情形[2]。依据目标车型参数, 对 EMB 各部件如电机、减速增矩装置、运动转换装置进行选型设计; 利用 CATIA 绘制出其三维结构图, 利用 ANSYS/Workbench 对其三维模型中的刹车片和刹车盘进行瞬态动力学的有限元分析。

## 2. 电子机械制动器的设计

### 2.1. EMB 组成及工作原理

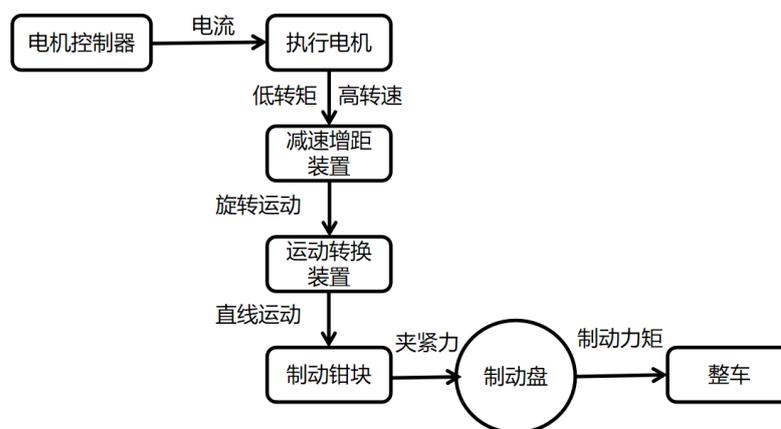


Figure 1. EMB working principle diagram

图 1. EMB 工作原理图

电子机械制动器主要由电机、行星齿轮减速器、滚珠丝杠、制动钳和制动盘等部件组成[3]。其工作

原理是给电机供电, 电机转动产生的动力经行星齿轮减速器进行减速增扭, 然后通过滚珠丝杠将旋转运动转换为活塞的直线运动, 从而推动制动钳对制动盘施加制动力, 实现汽车减速。

EMB 工作原理图如图 1 所示。

## 2.2. 制动效能校核

乘用车的液压盘式制动器制动管路最大油压为 12 MPa, 制动器活塞直径为 50 mm [4] EMB 最大制动力的计算如下式:

$$F_{\max} = \frac{\pi * d^2}{4} \times P_{\max} \quad (1)$$

式中:  $F_{\max}$ ——最大夹紧力;  $P_{\max}$ ——制动最大油压;  $d$ ——活塞直径。

汽车制动过程是一个高温、高扭矩、高压下的滑摩过程, 忽略惯性力偶和阻力力偶, 参考车辆车轮在良好的路面上的受力情况如图 2 所示。

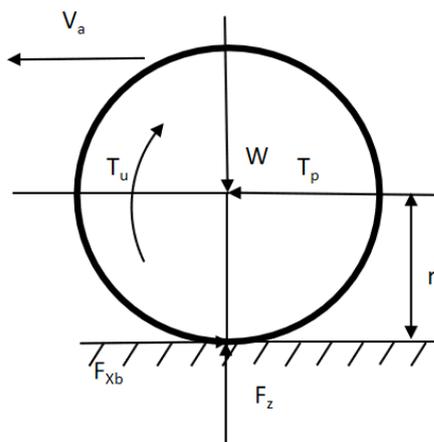


Figure 2. Wheel stress situation  
图 2. 车轮受力情况

由力矩平衡原理可知:

$$F_{xb} = \frac{T_u}{r} \quad (2)$$

式中:  $F_{xb}$ ——地面制动力;  $T_u$ ——摩擦扭矩;  $r$ ——轮胎半径。

地面最大制动力是地面对车轮的法向作用力和摩擦系数的乘积, 因此地面制动力要小于等于地面约束条件, 即:

$$F_{xb} \leq F_{\phi} = F_z \times \phi \quad (3)$$

式中:  $F_{\phi}$ ——地面最大制动力;  $F_z$ ——地面对车轮的法向作用力;  $\phi$ ——附着系数。

单个制动器的制动力:

$$F_{\mu} = \frac{T_u}{r} \quad (4)$$

## 2.3. 力矩电机选型

电子机械制动器的力矩电机选型要求力矩电机的转速要超过 380 r/s, 初选减速器的减速比为 16, 初

选 EMB 的电机型号为 80BF0140U30-24VD 的无刷直流力矩电机。

## 2.4. 滚珠丝杠选型计算

滚珠丝杠的选型由平均载荷和平均转速决定, 汽车行驶过程中一般不会出现猛踩刹车踏板的情况, 整体处于中上等制动[5], 因此取 2/3 的平均载荷即可。参考车辆的刹车盘和刹车片的间隙为 2 mm, 消除间隙的时间 0.1 s。取平均转速的 1/3 用于丝杠额定动载荷的校核。校核公式如下:

$$C_a \geq \frac{K_h}{K_n} \times K_F \times K_H \times \frac{2}{3} F_{\max} \quad (5)$$

## 2.5. 行星齿轮减速机构的设计

行星齿轮减速机构具有传动比大, 效率高等优点, 因此电子机械制动器采用行星齿轮减速机构[6] [7]。一般行星齿轮传动机构中, 行星齿轮数目一般为 3 个, 安装时应当满足以下条件:

a) 相邻两个行星齿轮的齿顶圆半径之和要小于它们的中心距。

b) 考虑到安装的需要, 太阳轮齿数、内齿圈齿数、行星齿轮的齿数通常要满足太阳轮和内齿圈齿数之和是行星齿轮的整数倍的关系[8]。

根据上述条件取太阳轮齿数  $Z_1 = 12$ , 内齿圈齿数  $Z_2 = 66$ , 传动比  $i = 3$  则:

行星齿轮齿数:

$$Z_3 = \frac{Z_1 + Z_2}{3} \quad (6)$$

得到行星齿轮  $Z_3 = 26$ 。

## 3. Catia 三维建模

基于上述选型计算结果, 使用 Catia 软件创建电子机械制动器各部件的三维模型, 并进行精确装配, 确保模型的准确性和完整性, 为其相关零部件的有限元分析做铺垫。三维图形如图 3 所示。

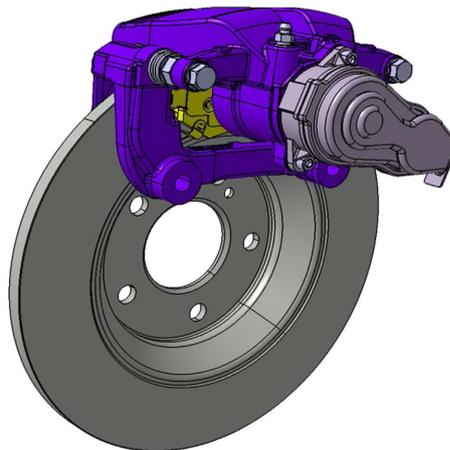


Figure 3. Three dimensional model of electronic mechanical brake

图 3. 电子机械制动器的三维模型

## 4. ANSYS 瞬态动力学仿真

EMB 产品研发过程中, 利用 ANSYS 进行仿真, 能够对其研发提供技术支持, 能够规避其在实际使

用工程中出现的问题[9], 据此可进行改进和优化, 可大大缩短研发周期, 提高产品的可靠性。由于在刹车过程中只有刹车盘和刹车片进行接触摩擦。

### 1) 模型导入与处理

将 Catia 建立的刹车盘和刹车片模型导入 ANSYS/Workbench, 进行必要的简化和清理。

### 2) 材料属性定义

盘式制动器刹车片的材料为陶瓷, 因此设置刹车片材料属性时, 密度为  $3900 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量为  $300 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.23$ 。刹车盘的材料一般为灰铸铁, 密度为  $7300 \text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量为  $130 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.25$ 。

### 3) 网格划分

制动时, 滚珠丝杠将行星齿轮减速机构传来的旋转运动, 转换为直线运动, 并且推动活塞前进, 活塞推动刹车片夹紧刹车盘, 依靠刹车片和刹车盘的摩擦作用实现汽车的减速因此, 为了更加精确地模拟 EMB 的受力情况, 在 Geometry 中对刹车盘、刹车片进行分切割及共节点操作, 并且为了提高其计算精度, 采用合适的网格类型和尺寸对模型进行划分如图 4 所示, 以平衡计算精度和效率。

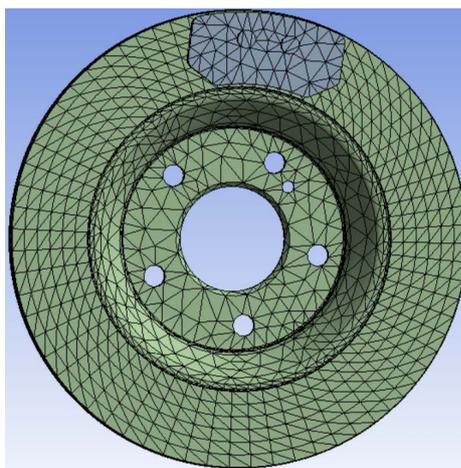


Figure 4. Grid division of brake pads and brake discs  
图 4. 刹车片和刹车盘的网格划分

网格划分后总共形成 26,428 个单元, 42,567 个节点, 设置接触条件, 将刹车盘和刹车片的接触设为摩擦的, 并且设置摩擦系数为  $0.2$ 。由于制动过程中, 刹车盘随着车轮一起转动, 因此还要设置旋转副, 并且设置旋转速度为  $3.14 \text{ r/s}$ , 即每秒转半圈。

### 4) 边界条件与载荷施加

对模型施加约束, 对刹车片施加分量类型的正压力, X 方向和 Z 方向施加  $0 \text{ MPa}$  的压力, Y 方向施加  $-2 \text{ MPa}$  的正压力。添加位移约束, 并且设置在 X 和 Z 方向的分量上不允许模型移动, 在 Y 方向上设置自由的分量, 来观察刹车盘在正压力下的变形情况。

### 5) 求解设置

添加总变形、等效应力、接触工具来观察仿真结果, 分析设置里面修改初始时部为  $0.05 \text{ s}$ , 最小时部为  $0.05 \text{ s}$ , 最大时部为  $0.1 \text{ s}$ , 启动瞬态动力学求解。

## 5. 仿真结果与分析

经过求解得到力收敛图如图 5 所示。

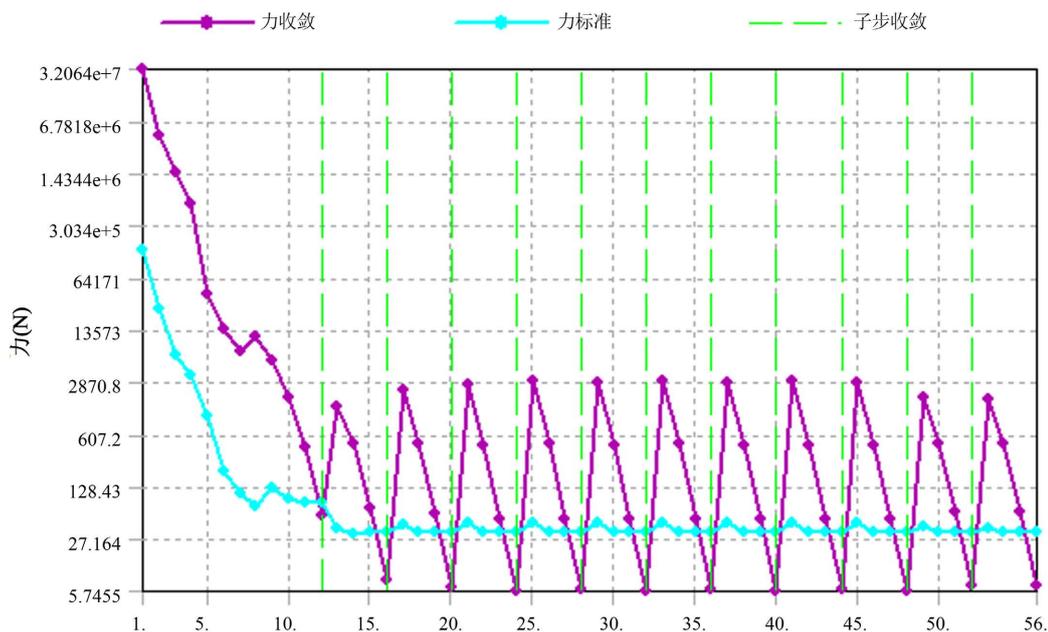


Figure 5. Force convergence diagram

图 5. 力收敛图

由图 5 结果可知, 随着刹车盘的转动, 力收敛曲线呈现周期性收敛。制动力响应曲线如图 6 所示。

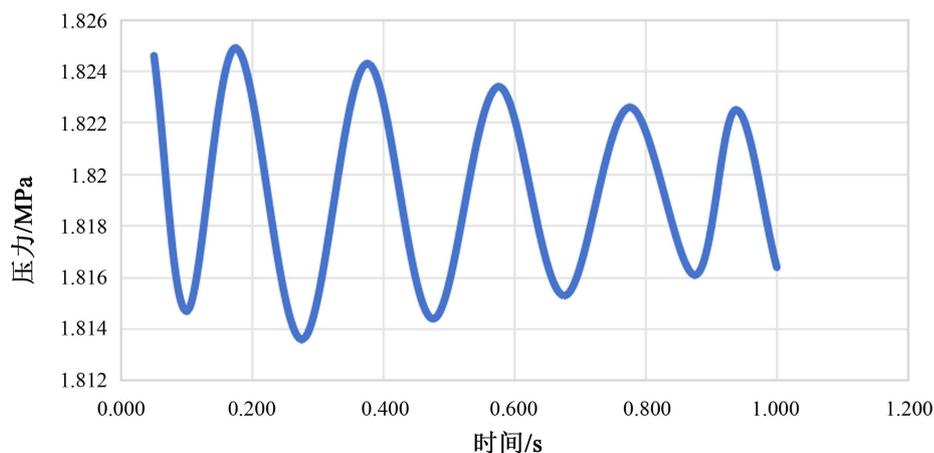


Figure 6. Braking force response curve

图 6. 制动力响应曲线

获得制动力随时间的变化曲线, 由曲线可知制动力随着时间的增加在 1.81 MPa 处呈现周期性上下波动。

总变形、压力分布云图如图 7、图 8 所示。

由总变形和压力分布云图可知[10], 刹车盘的最大变形处发生在与刹车片接触的最外侧边缘处, 最大应力发生在刹车片的下方左右两侧边缘, 最大应力为 118.39 MPa。陶瓷的主要成分是  $Al_2O_3$ , 其抗压强度为 850 MPa。灰铸铁的抗压强度则在 600~1000 MPa。取安全系数为 2, 因此根据第三强度校核, EMB 制动时的最大应力仅为安全极限的 27.85%, 满足设计要求。

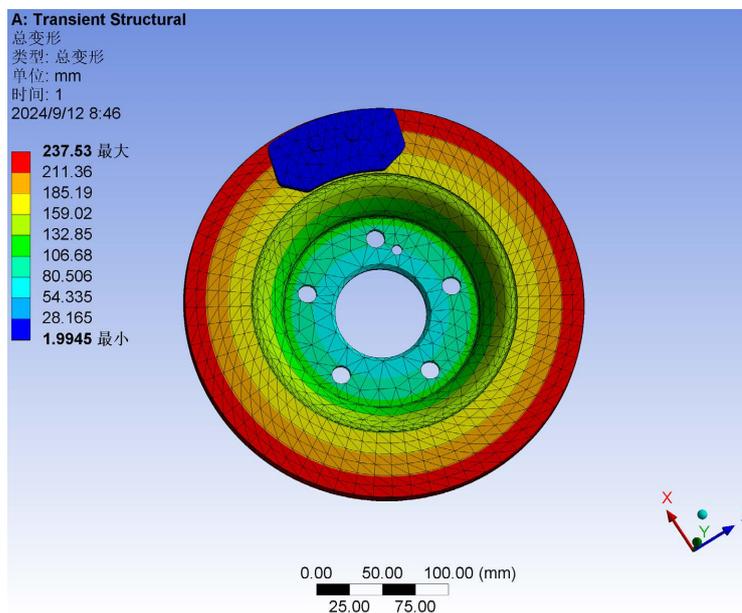


Figure 7. Cloud map of total deformation distribution  
图 7. 总变形分布云图

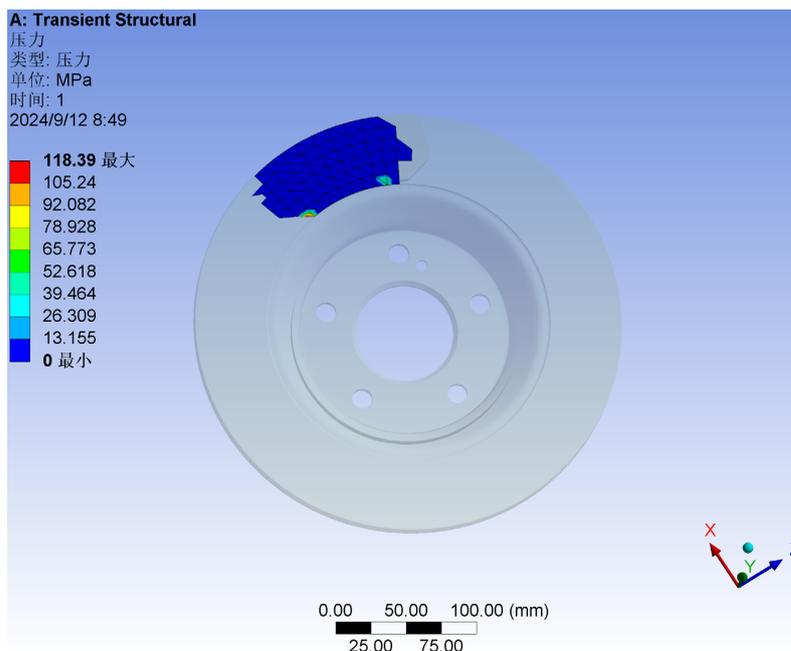


Figure 8. Cloud map of pressure distribution  
图 8. 压力分布云图

## 6. 结论

通过详细的选型计算、Catia 建模和 ANSYS/Workbench 瞬态动力学仿真, 对电子机械制动器的性能进行了全面评估。研究结论如下:

- 1) 最大应力为 118.39 MPa, EMB 制动时的最大应力仅为安全极限的 27.85%, 满足制动强度的要求。
- 2) 根据地面最大制动力的约束条件所选的电机、滚珠丝杠和行星齿轮减速器能够满足制动需求, 各

部件的应力和变形在合理范围内。

3) 仿真结果与实际结果吻合度在 90% 以上, 可以有效提高车辆行驶的安全性, 为 EMB 的研发提供理论基础。

## 参考文献

- [1] 吴亚军. 汽车电子机械制动系统的设计及性能测试[J]. 机械管理开发, 2024, 39(3): 130-132.
- [2] 孔皓. 汽车电子机械制动系统制动执行器研究[J]. 汽车测试报告, 2023(20): 49-51.
- [3] 王振. 电子机械制动系统控制策略设计与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [4] 刘志强, 王振, 陈玉锦. 电子机械制动器的建模、仿真和实验研究[J]. 机电工程, 2023, 40(4): 485-493.
- [5] 秦勤. 汽车电子机械制动关键技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(13): 162-165.
- [6] 杨磊, 苗峰, 王帅, 等. 电子机械制动夹钳的设计及其试验研究[J]. 机电工程, 2022, 39(5): 648-654.
- [7] 邓美俊, 孙仁云, 潘湘芸, 等. 汽车电子机械制动系统技术发展分析[J]. 汽车零部件, 2021(9): 103-109.
- [8] 许本博. 机械式线控制动系统关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东交通学院, 2021.
- [9] 王赛. 汽车电子机械制动(EMB)系统设计与稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [10] 袁培佩. 新型汽车电子机械制动系统设计与仿真研究[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(2): 67-68.