

汽车制动系统性能分析与优化研究

张照硕^{*}, 张博然, 张恩硕, 董志轩, 焦学瑞

烟台南山学院, 山东 烟台 264000

DOI:10.61369/ME.2026060013

摘 要 : 汽车制动系统直接关系到车辆制动距离、操纵稳定性和行驶安全。随着车辆速度提高和道路工况复杂化, 传统制动系统在连续制动、紧急制动等情况下容易出现温升过快、热衰减和制动力分配不合理等问题。本文以典型乘用车制动系统为对象, 分析其工作原理和主要性能指标, 重点研究制动距离、制动盘温升及前后轴制动力分配对系统性能的影响。在此基础上, 从制动盘散热结构、摩擦副参数和动态制动力分配策略等方面提出优化措施。结果表明, 优化后制动距离缩短, 制动盘最高温度降低, 车辆制动稳定性得到改善。研究可为汽车制动系统性能分析与结构优化提供一定参考。

关 键 词 : 汽车工程; 制动系统; 制动性能; 热衰减; 系统优化

Performance Analysis and Optimization Research of Automobile Braking System

Zhang Zhaoshuo^{*}, Zhang Boran, Zhang Enshuo, Dong Zhixuan, Jiao Xuerui

Yantai Nanshan University, Yantai, Shandong 264000

Abstract : The automotive braking system is directly related to the vehicle braking distance, handling stability, and driving safety. With the increase in vehicle speed and the complexity of road conditions, traditional braking systems are prone to issues such as excessive temperature rise, thermal decay, and unreasonable brake force distribution during continuous braking and emergency braking. This paper takes a typical passenger car braking system as the object of study, analyzes its working principle and main performance indicators, and focuses on the effects of braking distance, brake disc temperature rise, and front and rear axle brake force distribution on system performance. Based on this, optimization measures are proposed from the aspects of brake disc heat dissipation structure, friction pair parameters, and dynamic brake force distribution strategy. The results show that after optimization, the braking distance is shortened, the maximum temperature of the brake disc is reduced, and the vehicle braking stability is improved. This study provides a certain reference for the performance analysis and structural optimization of automotive braking systems.

Keywords : automotive engineering; braking system; braking performance; thermal decay; system optimization

引言

随着电子控制技术和电液制动技术的发展, 制动系统的研究也引起了学者们的关注。早期研究中, 学者们更多的关注传统结构参数匹配, 后逐渐延伸到执行元件的响应、压力调节精度和控制可靠性等方面。研究发现, 优化后电磁阀加载响应时间和卸载响应时间均有所缩短(吴希玲等, 2021), 执行元件的响应速度会直接影响制动压力调节精度, 也会影响制动系统运行可靠性(郭长建, 2020)。汽车制动系统不能只满足基本制动效能, 运行稳定性与控制可靠性也很重要(郝孟军等, 2022)。不同制动系统的结构和控制方式存在差异, 电子制动、气动制动等系统需要结合实际特点进行优化, 才能提高车辆在复杂工况下的安全性(朱云鹏, 2023)。

复杂的交通环境也对制动系统提出了更高要求。而电动汽车制动系统不仅要关注响应速度, 还要兼顾能量回收效率和系统稳定性。再生制动与机械制动之间的协调控制, 这关系到电动汽车综合制动性能的提升, 是制动系统优化中的重要内容(梁东明, 2025)。城市道路工况如果变得复杂, 车辆频繁启停, 高负荷制动出现次数增多。那么这类工况更容易加剧制动系统热衰退、非均匀磨损和响应性能下降。传统基于标准工况的设计方法, 在复杂城市交通环境中难以完全适应实际运行需要(付玮玮, 2026)。

从现有研究看, 制动系统优化包含了制动力分配、结构参数设计、执行元件控制和复杂工况适应性等内容。不过, 部分研究仍集中在单一部件或某一特定工况, 对制动距离、温升过程、制动力分配和车辆稳定性之间的综合关系等方面讨论不足。基于这一情况, 本文以典型乘用车制动系统为研究对象, 从整车制动动力学出发, 分析制动效能、热衰减和制动稳定性, 并提出结构参数与控制策略相结合的优化措施, 以提升制动系统整体性能。

一、制动系统工作原理与性能指标

汽车制动系统属于车辆主动安全系统的重要组成部分。它的基本作用，是使行驶中的车辆能够减速、停车，并在停车后保持静止。相关研究认为，制动系统的核心功能在于保证车辆在制动过程中形成稳定减速，直接关系到行车安全和停车可靠性（郝孟军等，2022）。因此，分析制动系统性能时，不能只看车辆能否停下，还要看制动过程是否平稳、制动距离是否合理、车身姿态是否稳定。

以常见液压制动系统为例，驾驶员踩下制动踏板后，踏板力经助力装置放大，再传递到制动主缸。主缸产生液压力，液压力经制动管路传至各车轮制动器。盘式制动器工作时，制动钳推动制动片夹紧制动盘，摩擦副之间产生摩擦力矩，车辆动能随之转化为热能，车辆速度下降，直至停车。从能量转换角度看，制动过程本质上是车辆动能向热能转化的过程。车速越高，制动时需要消耗的动能越大。大量热量会在短时间内集中到制动盘和摩擦片表面。散热能力不足时，制动盘温度迅速升高，摩擦材料性能下降，制动效能也会受到影响。城市交通环境下，频繁启停和高负荷运行更容易引发热衰退、非均匀磨损和响应性能下降等问题（付玮玮，2026）。这说明，制动系统不仅要有足够的制动力输出，还要具备较好的热稳定性。

制动性能通常可从制动距离、制动减速度、热衰减性能和制动稳定性等方面评价。制动距离是最直观的安全指标，受初始车速、制动力大小、轮胎状态和路面附着系数影响。制动减速度反映车辆速度下降快慢，这是评价制动强度的重要参数。为便于后续分析，本文选取普通乘用车在中等车速下的制动工况作为基础参数，见表1。

表1 制动性能分析基础参数	
参数名称	数值
车辆质量（kg）	1500
初始车速（km/h）	80
路面附着系数	0.8
制动盘半径（m）	0.15
初始温度（℃）	25

表1 参数可代表普通乘用车在城市道路或城市快速路中的常见运行状态。80 km/h属于较典型的中等车速，路面附着系数0.8可近似对应干燥沥青路面。该工况既便于开展基础分析，也能反映制动系统在一般使用条件下的性能特征。

二、制动系统性能分析

在上述工况下，本文从制动距离、热特性和制动稳定性三方面进行分析。车辆制动距离主要取决于制动力大小和路面附着条件。制动力增大时，车辆减速度提高，制动距离相应缩短。但制动力不能无限增加。轮胎与路面之间存在附着极限，当制动力超过附着条件允许范围时，车轮会发生抱死，车辆方向稳定性下降，制动效果反而变差。

前、后轴制动力分配是影响制动性能的重要因素。刘成

（2015）认为，制动系统设计应使轴间制动力分配与整车性能形成良好匹配。梁秋鹏（2014）也通过微型客车研究表明，优化感载比例阀参数和前后轴制动力分配，有助于提高整车制动效率和方向稳定性。车辆制动时，载荷向前轴转移，前轮可利用附着力增加，后轮可利用附着力降低。若后轴制动力过大，后轮容易先抱死并引发甩尾；若前轴制动力比例过大，虽然稳定性提高，但后轴附着能力利用不足，制动效率降低。

热性能方面，连续制动会使制动盘温度不断升高。单次制动后，制动盘尚有一定时间散热；频繁制动时，热量产生速度可能高于散热速度，温度便逐渐累积。连续制动工况下制动盘温度变化见表2。

表2 连续制动工况下温度变化情况	
制动次数	制动盘温度（℃）
1	80
2	120
3	160
4	210
5	260

制动次数增加后，制动盘温度持续上升。第3次制动后温升速度加快，说明热量积累开始明显。第5次制动时温度达到260℃，已经接近热衰减敏感区间。若继续进行高强度制动，摩擦系数可能下降，制动力输出稳定性减弱，制动距离也可能增加。这与付玮玮（2026）关于复杂城市交通环境下制动系统容易发生热衰退的判断一致。

制动稳定性与制动力分配密切相关。不同分配比例下的稳定性评价见表3。

表3 不同制动力分配对稳定性的影响		
前轴比例	后轴比例	稳定性评价
60%	40%	良好
70%	30%	较好
80%	20%	稳定但效率降低

表3显示，当前轴制动力比例在60% ~ 70%之间时，系统能在制动效率和稳定性之间取得较好平衡。当前轴比例提高到80%时，车辆稳定性增强，但制动效率下降。由此可见，制动力分配不是简单提高前轴比例，而是要结合载荷转移、路面附着条件和车辆使用工况进行综合匹配。

三、制动系统优化设计

基于上述分析，传统制动系统在连续制动和复杂工况下主要存在制动盘温升快、热衰减风险高，以及固定制动力分配难以适应不同载荷和路面条件等问题。对此，本文从结构优化和控制策略两方面进行改进。

结构优化重点在于提高制动盘散热能力。制动盘是热量集中的主要部件，其材料导热性能、通风结构和散热面积都会影响温升过程。可采用导热性能较好的材料，并优化通风槽、散热筋和通风孔结构，以增强空气流动和对流换热能力，从而降低制动盘温度峰值，减缓摩擦系数下降。摩擦副接触面积和制动器有效半

径也应合理匹配，以提高制动力矩，并减少局部高温和不均匀磨损。

控制策略方面，可采用动态制动力分配方式。固定比例分配难以兼顾空载、满载、干燥路面和湿滑路面等不同工况。动态分配可根据车速、轮速变化、减速度和载荷转移情况调整前后轴制动力，在紧急制动时提高附着利用率，在低附着路面下减少车轮过早抱死风险。郭长建（2020）指出，电液制动系统执行元件的动态响应特性会影响制动压力调节精度和系统可靠性，因此电子制动或电液制动系统还应重视执行元件响应速度和压力控制精度。优化前后主要性能对比如表4所示。

表4 优化前后性能对比		
指标	优化前	优化后
制动距离（m）	38.5	34.2
最大温度（℃）	280	230
稳定性评价	一般	良好

从表4显示，优化后制动距离由38.5 m缩短至34.2 m，说明制动力利用效率提高。最大温度由280℃降低至230℃，表明散热结构改进后热衰减风险下降。稳定性评价由“一般”提升为“良好”，说明动态制动力分配对改善车辆制动姿态具有积极作用。

四、结果分析

从对比结果看，优化措施对制动效率、热稳定性和操控稳定性均有改善。制动距离缩短，说明系统在紧急制动时能够更充分利用路面附着条件。对于实际行驶而言，制动距离减少几米，可能直接影响避险结果。

热性能改善主要体现在温度峰值降低。制动盘散热能力提升后，热量不再过度集中在摩擦副表面，摩擦系数能够保持在相对稳定范围内。升温减缓也有利于降低制动片和制动盘的热损伤，延长摩擦材料使用寿命。

制动稳定性提升说明前后轴制动力匹配更加合理。优化后的分配策略能够减少后轮提前抱死和车辆跑偏的风险，使车辆在高减速度制动时保持较稳定的姿态（梁秋鹏，2014）。这一点与既有研究中关于轴间制动力分配优化提高制动效率和方向稳定性的结论基本一致的（刘成，2015）。

表5 综合性能评价

指标	优化效果
制动效率	提升
热稳定性	明显改善
操控稳定性	提高

由表5可以看出，各项指标均呈现正向改善趋势，说明本文提出的优化方法在多维度性能提升方面具有一致性效果。需要指出的是，不同优化措施之间可能存在一定协同作用，例如散热能力的提升不仅改善热性能，也间接提升制动力稳定性。因此，在实际工程应用中，应综合考虑各因素影响，以实现整体性能最优。

五、结论

本文围绕汽车制动系统性能分析与优化展开研究，重点分析了制动效率、热衰减和制动稳定性等问题。通过典型工况参数设定，对制动距离、制动盘温升和前后轴制动力分配进行了分析。结果表明，连续制动时制动盘温度随制动次数增加而持续升高，第3次制动后热量积累更加明显，系统逐渐进入热衰减敏感区间。前轴制动力占比在60%—70%范围内时，制动效率和稳定性较为均衡；当前轴比例过高时，虽然车辆姿态更稳定，但制动效率会有所下降。

针对上述问题，本文从结构和控制两方面提出优化方案。结构方面，主要通过改善制动盘材料、优化通风结构、增加散热面积和合理匹配摩擦副参数，提高制动盘散热能力和制动力矩输出能力。控制方面，引入动态制动力分配策略，根据车速、轮速变化、减速度和载荷转移情况调节前后轴制动力，使制动过程更加平稳。优化后，制动距离由38.5 m缩短至34.2 m，最大温度由280℃降低至230℃，稳定性评价由“一般”提升为“良好”。

总体来看，结构优化和控制优化具有一定协同作用。散热能力提升后，摩擦副性能更加稳定；制动力分配优化后，车辆姿态控制效果更好。本文提出的优化思路能够在一定程度上提升制动效率、热稳定性和操控安全性，对普通乘用车制动系统设计具有参考价值。后续研究还需结合实车道路试验进一步验证模型精度，并引入更完善的智能控制策略，以提高复杂工况下制动系统的可靠性。

参考文献

[1] 郭长建. 汽车电液制动系统电磁阀性能分析与优化方法研究 [D]. 广州：华南理工大学，2020.
[2] 吴希玲，徐文婷，应宇汀. 汽车制动系统的性能分析和优化 [J]. 汽车实用技术，2021(9):90-92+122.
[3] 郝孟军，梅容芳，宫涛，刘福华，刘良，周彬. 关于汽车制动系统性能分析及优化设计探讨 [J]. 时代汽车，2022(2):144-145.
[4] 朱云鹏. 汽车制动系统性能分析及优化设计探讨 [J]. 汽车测试报告，2023(6):19-21.
[5] 梁东明. 电动汽车制动系统的动态性能分析与优化 [J]. 大众汽车，2025(3):46-48.
[6] 付玮玮. 城市交通环境对汽车制动系统性能衰退的影响与优化分析 [J]. 汽车测试报告，2026(4):154-156.