汽车制动盘关键技术研究综述

赵君豪[1] 李晨迪[1,2] 张飘飘[1,2] 郑义鑫[1] 韩涛[1,2]

（1.郑州财经学院 智能工程学院,郑州 450000;2.河南省智能冷链物流装备制造工程技术研究中心,郑州 450000）

摘要: 综述了制动盘关键技术的研究现状与发展趋势,主要包括制动盘温度场控制、疲劳寿命预测、轻量化设计、制动噪声控制等方面。研究表明,通过优化通风孔分布、散热筋布局和引入表面开槽等,并结合几何参数调控,可显著提升对流换热效率,有效降低温度梯度、降低热应力峰值、抑制热变形、降低热裂纹风险、提高疲劳寿命。引入优化算法实现散热性能与结构强度协同设计,通过拓扑优化重构材料分布及形状优化可显著减轻质量。优化振动源或改善热力学特性可有效抑制制动噪声。未来制动盘的优化需考虑实际制动过程中的动态热-力耦合、循环机械振动及极端工况的影响。

关键词: 制动盘 温度场 疲劳寿命 优化设计 轻量化

中图分类号: U463.512 **文献标志码:** B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250274

Review on Key Technologies of Automotive Brake Discs

Zhao Junhao[1], Li Chendi[1,2], Zhang Piaopiao[1,2], Zheng Yixin[1], Han Tao[1,2]

(1. School of Intelligent Engineering, Zhengzhou College of Finance and Economics, Zhengzhou 450000; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Intelligent Cold Chain Logistics Equipment Manufacturing, Zhengzhou 450000)

Abstract: This article provides an overview of the current research status and development trends of key technologies for brake discs. It primarily focuses on aspects such as temperature field control, fatigue life prediction, lightweight design, and brake noise control. Research indicates that by optimizing structures such as ventilation holes, heat dissipation rib layout, and surface grooves, combined with geometric parameter control, convective heat transfer efficiency can be significantly enhanced, temperature gradients effectively reduced, thermal stress peaks lowered, thermal deformation suppressed, the risk of thermal cracks reduced, and fatigue life improved. The introduction of optimization algorithms has facilitated the collaborative design of heat dissipation performance and structural strength. Through topological optimization, material distribution and shape optimization can be restructured, leading to significant weight reduction. Optimizing the vibration source or improving the thermodynamic characteristics can effectively suppress brake noise. In the future, the optimization of brake discs needs to consider the effects of dynamic thermal-mechanical coupling, cyclic mechanical vibration, and extreme operating conditions during actual braking processes.

Key words: Brake disc, Temperature field, Fatigue life, Optimization design, Lightweight

1 前言

汽车制动器在行车安全中发挥着重要作用,制动盘是盘式制动器的核心部件。对制动盘的优化主要体现在加强散热、提高疲劳寿命、轻量化设计以及减小制动噪声等方面[1-2]。散热问题是制动盘优化面临的主要挑战之一,温升过高会导致制动盘产生热变形、引发裂纹,影响制动效能[3]。疲

作者简介: 赵君豪(2002—),男,学士学位,研究方向为车辆设计与仿真。

通信作者:韩涛(1992—),男,讲师,硕士学位,研究方向为车辆设计与仿真、硬脆材料精密加工技术。

基金项目:河南省科技攻关项目(252102220045)。

参考文献引用格式:

赵君豪, 李晨迪, 张飘飘, 等. 汽车制动盘关键技术研究综述[J]. 汽车工艺与材料, 2026(5): 1-8.

ZHAO J H, LI C D, ZHANG P P, et al. Review on Key Technologies of Automotive Brake Discs[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 1-8.

劳寿命也是制动盘优化的研究热点，提高其疲劳寿命可以有效节约成本。轻量化设计可以减轻簧下质量，提升操控性，同时减少能源消耗，减少制动噪声以提升驾乘舒适性。

本文拟综述国内外学者在制动盘温度分析与优化、结构优化、疲劳寿命提升、轻量化设计及噪声控制等方面的研究成果，并总结当前制动盘关键技术的研究进展和发展趋势，为制动盘的优化设计提供参考。

2 制动盘温度场控制

制动盘高温是汽车制动系统的常见问题，通常由频繁制动、散热较差导致，温升过高会严重影响制动效能的恒定性。对制动盘进行结构优化，如改变盘体形状以及通风孔参数，可以增强盘体散热，提高制动器的抗热衰退性能。

2.1 通过结构优化降低温度

制动盘的散热通道被灰尘、泥土等堵塞或者通风设计不佳会使热量堆积，从而导致制动盘高温，优化制动盘结构是解决高温问题的有效手段。

吴家虎[4]利用ABAQUS软件对制动器摩擦副温度场及制动过程中温度变化进行仿真。制动盘表面节点温度变化呈现锯齿状，温度场呈现轴对称分布，制动盘的直径和厚度对制动时的温升影响显著。潘公宇[5]等对如图1所示的带有散热筋结构的通风盘式制动器建立三维模型并进行瞬态温度场分布的仿真分析，借助Isight进一步对制动盘进行了结构优化，有效改善了制动盘摩擦表面温度场分布情况。

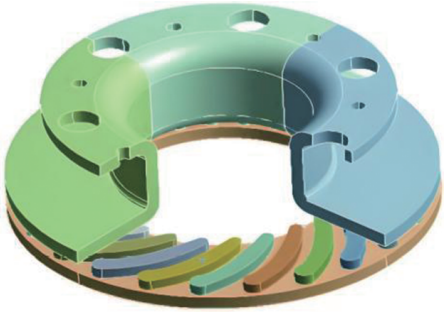


图1 带有散热筋结构的通风盘

吴波[6]等针对通风盘式制动器在制动时的流动与传热耦合问题，建立了三维流固耦合模型并使用计算流体动力学（Computational Fluid Dynamies, CFD）进行数值计算得到耦合系统的温度场，同时提出通风式制动盘通风肋板优化方案，以提高对流换热性能，优化后的制动盘在循环制动工况下最高温度降低了16 ℃。Soojin Park[7]等对制动盘进行有限元建模后，借助ANSYS进行了结构和热模拟，并运用集成优化设计软件包PIAnO对制动盘孔和狭缝的形状及布局进行了优化设计，优化后，应力降低了23.2%，温度降低了10.77 ℃。王所国[8]等对制动盘结构进行改进，建立有限元模型进行灵敏度分析并建立数学优化模型，利用Ansys Workbench求解并仿真验证。优化后最高温度降低了13.1%，最大应力降低了11.5%，实现了制动盘的多目标优化设计。戴海燕[9]等对制动盘进行优化，设计了一种侧面通风孔和表面通风孔的制动盘，并建立三维模型进行有限元分析，优化后大幅降低了制动温度，实现了轻量化并提高了使用寿命，表面和侧面开孔后有助于散热性能的提升。Suvan S Kudari[10]等对制动盘轮廓进行优化，以解决温升过高引起的磨损、热裂纹和制动衰减问题。借助SOLIDWORKS进行建模（采用如图2所示交叉钻孔类通风），并利用ANSYS进行瞬态热分析。优化后通风型VT-12制动盘比无通风制动盘的温度低50 ℃。

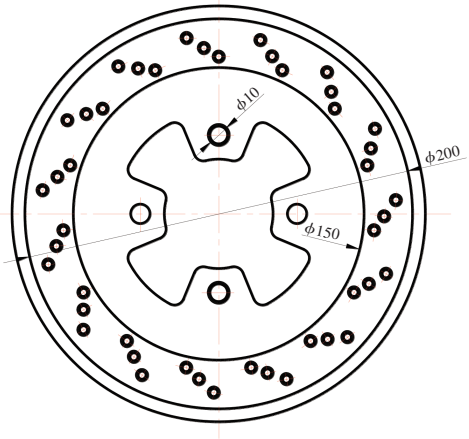


图2 交叉钻孔

汤进瑞[11]等针对紧急情况下制动失效问题，对通风制动盘进行了结构设计优化。借助SOLIDWORKS和ANSYS进行三维建模和分析后，采用表面散热孔通风设计对制动盘进行优化并对比验证。结果表明，优化后的通风式盘式制动器设计具有更强的散热性能，更能满足紧急制动需求。

程金润[12]等对制动盘进行优化设计,借助ANSYS对制动盘的三维模型进行应力场和温度场的仿真分析,在满足安全的情况下对其进行打孔和开槽,优化后提高了制动盘结构强度和安全系数,并可进一步实现轻量化且制动温度符合要求。Soojin Park[13]等对制动盘进行形状优化设计,以提升其热力学性能。借助有限元分析(Finite Element Analysis,FEA)和CFD分析得出优化模型并进行验证,优化后其结构性能和热性能均得到改善。

制动盘结构的优化主要是对散热筋、通风孔、狭缝及形状等进行优化设计,对通风盘侧面和表面进行打孔或开槽以增强其散热能力,并进一步实现轻量化,对盘体形状进行优化以提升其热力学性能和结构性能。

2.2　通过结构优化减小热变形

制动盘局部温度过高,热应力分布不均匀,长期反复热胀冷缩会导致制动盘产生热变形。变形后会导致制动抖动产生制动噪声,同时加剧异常磨损等。国内外学者针对制动盘热变形问题提出了不同的优化方案。

Indira Roy[14]等为提升通风制动盘的结构性能,采用响应面法对其进行多目标优化,构建二阶回归模型并借助方差分析(Analysis of Variance,ANOVA)检验制动盘几何参数的显著性,以最小变形量和最小等效应力为目标对几何特征进行多目标优化,优化后总变形量和等效应力分别显著降低了10.28%和9.12%。Huang Yaotien[15]等针对轮毂与制动盘交界处的温度突变导致制动盘产生锥度问题,借助ANSYS参数化设计语言创建完全参数化的模型并对其进行2种结构优化研究(最大化频率分离和最小化热扭曲)。优化结果表明,具有更薄的外侧盘和更厚的内侧盘的制动盘设计能够有效减少制动盘的锥度。Jian Yin[16]等为解决制动盘高温、振动以及变形等问题,提出了等效移动载荷(Equal Moving Load,EML)拓扑优化方法。建立多目标函数对制动盘内部和表面进行优化并验证。优化后制动盘最大变形量降低42.78%,前四阶模态频率分别提高20.23%、20.34%、18.22%、13.93%,制动盘的表面温度和应力分布得到缓解。詹剑良[17]为改善车辆制动系统的工作性能,借助HyperMorph和OptiStruct对制动盘进行了形状优化设计,不仅能有效提高了制动盘的动刚度特性,增强其抑制外界振动干扰的能力,还实现了结构轻量化。

龙江启[18]等针对通风制动盘制动抖动情况问题,采用正交试验设计方法,得到了通风制动盘各结构参数的最优解,对其进行有限元模拟分析,得到各结构参数对制动盘热变形影响的敏感性,优化后通风制动盘的最高温度及热变形量分别降低了5.3%和56.6%,且路试无制动抖动情况产生。耿开贺[19]等建立热机完全耦合模型,模拟制动过程并进行分析,通过寻求制动盘主要参数的最优组合降低了制动力矩的抖动率。研究表明,通过适当增加盘厚度、减小板条宽度,可以有效降低制动力矩的抖动率。

通过散热设计、几何参数调控等结构优化可以有效减少热变形。散热设计是通过合理分布通风孔、优化散热筋布局及引入表面开槽,可强化对流换热效率,降低温度梯度,从而减少热致变形。几何参数调控是对盘体厚度分布调整,来有效缓解因温度突变引发的锥度变形。

2.3　通过算法优化散热结构

制动盘的散热结构可以借助算法快速优化,国内外学者从制动过程控制、疲劳寿命预测和散热结构优化等角度出发,通过控制制动压力、预测故障、优化散热结构来提升制动盘的散热性能,改善热稳定性,缩短制动时间。

Jie Li[20]等为提高通风式制动盘通道内回流区的对流散热性能,借助遗传算法对制动盘多个结构参数进行优化,得到帕累托(Pareto)最优解优化后的槽叶片制动盘泵送的质量流量比直叶片制动盘增加了12%,通风制动盘内部努塞尔数比直叶片制动盘增加了5.6%,整体努塞尔数提高了9%。Park Soojin[21]等在不影响制动性能的前提下对制动盘的形状进行优化,借助ANSYS分析应力和温度分布,并通过PIAnO进行形状优化设计,通过试验设计正交表(Orthogonal Array,OA)得出多个测试点并对其进行结构和热分析。基于数值分析结果进行优化设计,通过混合模因算法(Hybrid Memetic Algorithm,HMA)和多目标遗传算法(Multi-Objective

Genetic Algorithm，MOGA）得出制动盘的最优形状并进行制动测试，发现优化后的制动盘温度和应力均低于现有制动盘，且摩擦因数稳定。Zhu Shunpeng[22]等借助有限元软件在动态对流传热系数条件下对盘式制动器进行瞬态传热分析，采用中心复合设计（Central Composite Design，CCD）将优化变量和目标变量转化为决策空间的多个设计点，根据多元二次回归模型，构建响应面函数，得到优化分析的近似模型并通过顺序二次规划方法，找到最优数学模型的Pareto最优解集。优化后有效提升了盘体的传热能力和性价比，进而增强了制动器的抗热疲劳性能与热稳定性。

路东[23]针对制动时间长及制动盘厚等问题，搭建模糊优化数学模型，通过模糊评判和模糊优化确定摩擦因数及各相关参数。优化后，制动时间缩短5%，制动盘厚度减小9%，验证制动时间缩短与模型优化结果基本一致，且制动盘的温度不变。Junchao Zhou[24]等针对制动时间长、制动盘厚以及温升高等问题，构建了盘式制动器的多目标优化模型，并采用非支配排序遗传算法-层次分析法（NSGA-AHP）进行分析优化。优化后，制动盘厚度增加3.17%，制动时间缩短8.59%，制动温升显著降低18.06%。郑尧刚[25]等借助Isight对盘式制动器进行优化改进并分析校核，基于多目标优化得到了满足设计要求和性能指标的最优解，缩短了制动时间并减小了制动盘的外型尺寸。

制动盘结构的算法优化主要是对通风孔布局、狭缝形状等关键参数进行全局寻优，生成最优解集，以优化其性能。另外，多目标协同设计是通过搭建优化模型，进行算法优化来实现多目标性能优化。

3 制动盘疲劳寿命分析

制动盘疲劳寿命是评估制动盘在多种循环工况下能正常承受的工作次数，是评价制动盘可靠性和耐用性的关键指标。增强其疲劳寿命可以有效节约成本，减少制动衰退，保证行车安全。热应力、机械应力、工作环境等都会影响制动盘的疲劳寿命，国内外学者针对如何提高制动盘疲劳寿命进行了研究。

王强[26]等搭建有限元模型分析打孔对工程车辆制动盘温度场及应力场的影响，结果表明：工程车辆在低速下紧急制动时，温度场和应力场的耦合使制动盘的热应力更大，疲劳强度降低；搭建制动器试验台进行试验，打孔后温度上升大于平面式制动器，工程车辆不宜采用打孔制动盘。Kalita Kanak[27]等为增强通风制动盘的疲劳寿命，对其进行优化设计。基于有限元分析模拟得到的疲劳寿命和轴向变形数据，构建了多项式回归元模型，基于灰狼优化算法对设计变量进行优化，以提高通风制动盘的疲劳寿命。优化后，通风制动盘的基准疲劳寿命提升了近20%。Dinesh Shinde[28]等基于响应面法规划的试验流程，对通风制动盘进行建模和有限元分析，运用ANOVA对结果进行解读并建立预测模型，分析后预测了最佳参数设置。借助遗传算法和粒子群优化确定了最佳设计参数设置，比预测结果提升了7.67%。Ali Belhocine[29]等提出一种结合热-结构有限元分析与基于进化优化的新方法，对制动盘进行优化。借助SOLIDWORKS对多种制动盘设计进行建模，并运用ANSYS进行热分析与结构分析，通过三维表面图分析其设计参数，用等高线图确定最大响应，借助统计回归分析进行解读和预测建模，最后借助遗传算法（Genetic Algorithm，GA）和粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法优化通风制动盘设计参数并进行验证，优化后其疲劳寿命提高了12.74%。

制动盘疲劳寿命主要由应力、温度以及盘体强度决定。通过优化通风孔布局及开槽结构可以减少应力集中，避免局部过热。优化盘体厚度分布及散热通道倾角，可降低轴向变形并增强热稳定性，抑制热裂纹萌生。

4 制动盘轻量化设计

汽车轻量化设计可以提高汽车动力性，并改善经济性。制动盘作为盘式制动器的核心部件，其轻量化是整车轻量化设计的重要方向。针对制动盘轻量化设计，国内外学者进行了研究。

Zhang Shengfang[30]等针对制动盘承受移动载荷问题，运用圆形向内多边形逼近算法建立数学

模型,并通过几何逼近,将动态载荷作用等效为多个有限的工况,利用EML方法对制动盘结构进行优化实现结构减重57.95%。张钰[31]等利用CATIA和ANSYS Workbench对盘式制动器进行建模分析并求解其热应力,对其进行拓扑优化设计,在节省约31.3%材料的前提下,拥有了更好的通风冷却性能且最大热应力未发生较大改变,保证了汽车制动系统拥有更加持续稳定的制动力。Stergios Topouris[32]等针对制动盘过重、散热差等问题,通过形状优化和拓扑优化流程设计了一种如图3所示的指状轮毂(礼帽式)设计的制动盘,形状优化使最大主应力降低了32%且扭转安全系数达到3.57,拓扑优化在保持低应力水平的同时质量减轻了1.5%。



图3　指状轮毂(礼帽式)设计的制动盘

Mit Patel[33]等借助ANSYS对多种不同制动盘进行热-结构耦合分析,确定了等效应力并计算出制动盘的使用寿命,与有限元分析获得的结果进行比较并利用田口方法对多种不同模型进行建模和有限元分析,优化后的制动盘在保证性能的前提下质量减轻达20%。何代澄[34]等借助有限元软件创建了瞬态热仿真分析模型和温升响应面分析模型对制动盘进行优化,优化后的制动盘单次制动温升为93.4 ℃,连续10次制动温升为375.9 ℃,制动盘质量、单次制动结束时温度、第10次循环制动结束时温度结果误差分别为1.05%、0.48%、0.32%,同时制动盘优化后质量减轻了约16.31%,具有显著轻量化效果。

制动盘轻量化设计主要通过拓扑优化、形状优化等实现。拓扑优化是对盘体材料分布重构,在平均减重25%的同时可维持低应力水平。形状优化是轮毂与通风结构创新设计,在提升散热性能的前提下可实现少量减重。

5　制动噪声分析

制动噪声是车辆NVH性能的关键问题,直接影响驾乘舒适性与行车安全性。高频尖叫与低频颤振噪声不仅引发听觉不适,还可能干扰驾驶员的判断。噪声振动会影响制动器稳定性,导致摩擦片异常磨损、制动盘热裂纹等问题,缩短使用寿命,增加维护成本。

曾康[35]等针对盘式制动器制动噪声问题,对制动盘进行仿生设计。在制动盘表面加工出4种不同数量及深度的M型沟槽,并进行了台架试验,结果证明,M型沟槽能有效减小高频噪声,并减少制动钳的低频振动。韦健[36]等针对制动啸叫问题,借助ABAQUS进行复特征值分析,预测其尖叫频率,得出摩擦因数及制动盘刚度对制动啸叫影响显著的结论,改变摩擦片两端倒角可明显抑制啸叫噪声。袁琼[37]等基于瞬时动态分析法,研究了3种不同通风筋结构的制动盘如图4所示,在低速状态下对制动器稳定性的影响,以减轻制动盘结构变化对制动器颤振尖叫行为的影响。研究发现,具有通风筋的制动盘在钳指侧能够有效降低制动器的振动强度,其中螺旋形最优,但对活塞侧的振动行为没有明显影响。

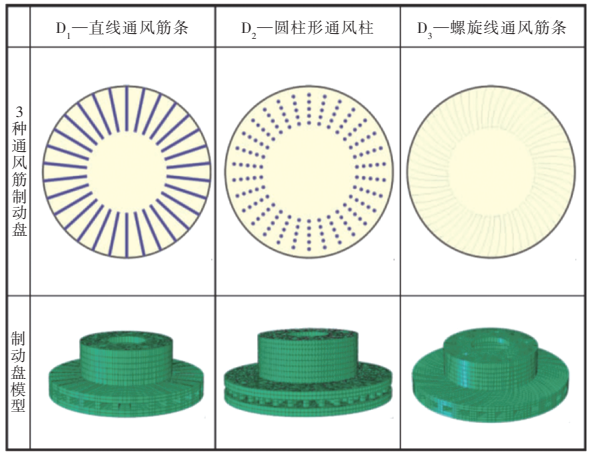


图4　3种不同通风筋结构的制动盘

祝丹晖[38]等为解决纯电动汽车全速段低频制动噪声问题,对其进行了整车和系统级分析,提出并验证了通风盘位移波动量是引起通风盘表面振动并导致车内噪声的假设,并对其关键参数进行研究,得出了其核心优化参数是散热筋跨距。优

化仿真结果表明，此类制动噪声问题得以解决。Gongyu Pan[39]等针对汽车盘式制动器的制动尖叫问题，借助Ansys Workbench建立有限元模型，并结合多种方法对制动盘进行结构优化设计。优化后盘式制动器的加权制动尖叫倾向系数从0.009 566降低到0.002 835，降低了70.36%，从而有效地抑制了制动尖叫噪声的产生。Zhang Sen[40]等对制动盘进行优化，基于动态对流的传热控制方程和散热边界条件，建立了有限元模型，根据NVH测试和模态计算，对制动噪声特性进行了测试分析并对传热仿真进行验证。优化后除一阶谐振频率外，噪声水平可以被显著降低。李志刚[41]等对制动盘结构进行有限元分析与优化，借助SolidWorks建立三维模型，使用ANSYS进行静力学与模态分析对制动盘进行结构优化并分析验证，优化后制动热和制动噪声均有一定程度降低。

通过优化通风筋布局可降低钳指侧振动强度，而调整散热筋跨距能减少位移波动量，抑制表面振动传递。制动盘表面开沟槽、改进摩擦衬片结构可抑制高频噪声；优化散热孔布局及板条倾角可提升对流换热效率，减少热应力波动，避免噪声产生。

6 结束语

本文综述了制动盘温度分析与优化、疲劳寿命分析、轻量化设计及噪声控制等方面的研究成果，总结了制动盘关键技术的研究现状和发展趋势。

优化制动盘结构（如通风孔、开槽结构、散热筋布局及倾角、非对称厚度），可显著提升对流换热效率，降低热应力峰值，抑制热变形。调整盘体厚度分布及散热通道倾角，能减少轴向变形、抑制热裂纹萌生。算法优化可实现多目标协同设计，提升多方面性能。优化散热筋的布局与跨距，可抑制低频表面振动。表面开沟槽、改进摩擦片结构，可抑制高频噪声。提升散热性能、减少热应力，可降低制动噪声水平。

拓扑优化重构材料分布，在大幅减重的同时可维持低应力水平，但多数拓扑优化依赖静态载荷假设，忽略制动过程中动态热-力耦合对材料疲劳的影响。未来的研究需考虑动态制动中非均匀温度场与瞬态热冲击的复杂性，以及循环热冲击与机械振动的耦合效应。

参考文献：

[1] BELHOCINE A, ABDULLAH I O. Design and Thermomechanical Finite Element Analysis of Frictional Contact Mechanism on Automotive Disc Brake Assembly[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(1): 270-301.

[2] HAN M, LEE C, PARK T, et al. Low and High Cycle Fatigue of Automotive Brake Discs Using Coupled Thermo-Mechanical Finite Element Analysis under Thermal Loading[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(12): 5777-5784.

[3] KAKANDAR E, ROY R, MEHNEN J. A Simulation Based Approach to Model Design Influence on the Fatigue Life of a Vented Brake Disc[J]. Procedia CIRP, 2017: 5941-46.

[4] 吴家虎. 盘式制动器温度场和尺寸的多目标优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(12): 18-23.

[5] 潘公宇, 阚云峰. 散热筋结构盘式制动器温度场有限元分析与优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(7): 12-19.

[6] 吴波, 孙磊. 基于流固耦合传热的制动盘瞬态温度场研究[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 117-120.

[7] SOOJIN P, KIBUM L, SUNWOO K, et al. Brake-Disc Holes and Slit Shape Design to Improve Heat Dissipation Performance and Structural Stability[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1171-1171.

[8] 王所国, 沈精虎, 石乐. 家用车制动盘的多目标优化设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021, 36(4): 95-100.

[9] 戴海燕, 张继华, 李长玉. 某危险品运输车制动器设计及瞬态传热分析[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(3): 264-268.

[10] KUDARI S S, BHARATISH A. Optimization of Brake Disc Profile Based on the Thermal Performancefor Electric Vehicles[J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2023, 25(2): 48-63.

[11] 汤进瑞, 尚慧琳. 基于极端工况的通风制动盘结构设计优化[J]. 应用技术学报, 2024, 24(4): 426-431.

[12] 程金润, 秦宇晖, 赵娜, 等. 大学生巴哈赛车制动盘热力耦合分析[J]. 上海电机学院学报, 2022, 25(1): 33-39.

[13] PARK S, KIM S,KIM J.A Study on the Improvement of Structural and Thermodynamic Performance through Optimal Design of the Brake Disc Surface[J].대한기계학회 춘추학술대회, 2022(4): 9-22.

[14] ROY I,A B.Optimization of Ventilated Brake disc Rotor Geometry for Enhanced Structural Characteristics[J]. Journal of Measurements in Engineering, 2020, 8(3): 98-106.

[15] HUANG Y T, LIU Y C, CHEN K N, et al. Structural Optimization of Vented Brake Rotors with A Fully Parameterized Model[J]. Applied Sciences, 2022, 12(4): 2184-2184.

[16] JIAN Y, QIANG H, YU L, et al.Multiobjective Optimization of Internal and Surface Structure of High-Speed and Heavy-duty Brake Disc[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(1): 1-19.

[17] 詹剑良. 基于动态频率响应的制动盘结构优化设计[J]. 煤矿机械, 2022, 43 (2): 126-129.

[18] 龙江启,林坚,陈先兵,等.通风制动盘结构参数对制动抖动的敏感性[J]. 中国机械工程, 2020, 31(24): 2966-2971.

[19] 耿开贺, 贺敬良, 王康, 等. 通风盘式制动器热抖动优化分析[J]. 计算机仿真, 2019, 36(9): 156-160+294.

[20] LI J, TAO L, CHEN Y, et al. Heat Dissipation Optimization of Ventilated Brake Disc Recirculation Zone Based on NSGA-II Algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024, 238(5): 1263-1276.

[21] SOOJIN P, DI S, CHANGHWAN J, et al.Optimal Design and Verification through Bench Experiment to Secure Structural Stability and Improve Thermodynamic Performance of Ventilated Brake Disc[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2023, 15(1): 1-12.

[22] SHUNPENG Z, NAIQIANG X.Multi-objective Optimization of Disc Brake Structure Based on Heat Transfer Performance[J]. Vibroengineering PROCEDIA, 2022, 41191-41197.

[23] 路东. 基于模糊优化方法盘式制动器优化设计[J]. 机械设计与制造, 2017(4): 33-36+39.

[24] JUNCHAO Z, JIANJIE G, KAIZHU W, et al. Design Optimization of A Disc Brake Based on a Multi-Objective Optimization Algorithm and Analytic Hierarchy Process Method[J]. Transactions of FAMENA, 2019, 42(4): 25-42.

[25] 郑尧刚, 熊新. 基于多目标优化车辆盘式制动器优化设计分析[J]. 机械设计与制造, 2019(11): 107-110.

[26] 王强, 崔志华, 杨保海. 工程车辆盘式制动器孔盘结构对散热影响分析[J]. 机械设计与制造, 2019(9): 42-45.

[27] KANAK K, DINESH S, SHANKAR C.Grey Wolf Optimizer-Based Design of Ventilated Brake Disc[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43: 1-15.

[28] SHINDE D, ÖKTEM H, UYGUR I. A Nature-Inspired Optimal Design for A Ventilated Brake Disc[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2024, 238 (6): 2587-2598.

[29] BELHOCINE A, SHINDE D, PATIL R. Design of Ventilated Brake Disc Based on Thermo-Mechanical Coupling Analysis Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization[J]. JMST Adv. 2021(3): 41-54.

[30] SHENGFANG Z, JIAN Y,Yu L,et al. Structural Topology Optimization of Brake Disc Using the Equivalent Moving Load Method[J]. Journal of Engineering and Technological Sciences, 2019, 51(6): 791-791.

[31] 张钰, 张振东, 刘韬. 某品牌盘式制动器热应力分析及优化设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(1): 97-100.

[32] TOPOURIS S, Tirovic M.Design Synthesis and Structural Optimization of a Lightweight, Monobloc Cast Iron Brake Disc with Fingered Hub[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(10): 1710-1726.

[33] MIT P, VINAY K, AKASH P, et al.Topology Optimization of Disc Brake Rotor[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019, 9(2): 3150-3153.

[34] 何代澄, 郑德金. 某乘用车制动盘温升分析与优化设计[J]. 机电工程技术, 2024, 53(3): 319-322.

[35] 曾康, 张雪刚, 王书文. M型沟槽仿生制动盘的减振降噪性能研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(增刊1): 292-295.

[36] 韦健, 孙跃东, 王书文, 等. 基于ABAQUS的盘式制动尖叫分析[J]. 机械设计与制造, 2016(6): 151-154.

[37] 袁琼, 李仕生, 王国明, 等. 通风筋结构对盘式制动器颤振尖叫行为影响的仿真分析[J]. 机械设计, 2020, 37 (7): 36-44.

[38] 祝丹晖, 杨乐, Charles Zhang. 基于某纯电动车的低频制动噪声优化研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(9): 1411-1417.

[39] GONGYU P, ZHIKANG L, Qizhao X, et al. Optimal Design of Brake Disc Structures for Brake Squeal Suppression[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2101(1): 1-9.

[40] SEN Z, JIAN Z. Effect of Heat Transfer Optimization on Brake Noise Characteristics of Automotive Disc Brake[J]. Journal of Vibroengineering, 2019, 21(3): 792-802.

[41] 李志刚, 何春, 郑彬. 汽车盘式制动器有限元分析与结构优化[J]. 机械设计, 2021, 38(增刊1): 79-82.

AT&M