

# 基于响应面法的盘鼓式制动器优化设计

喻高远 肖文生 孙瑞 裴正富 傅登伟 石永军

(中国石油大学(华东)车辆工程研究中心, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 提出具有制动增势特性的盘式制动结构, 将盘式制动结构和鼓式制动结构并联使用, 设计盘鼓式制动器。考虑制动力矩分配系数的影响, 对盘鼓式制动器进行动态建模, 通过最优超拉丁立方试验方法采样, 结合最小二乘法构建系统温度场的二阶响应面近似模型, 以制动器几何结构参数和制动力矩分配系数为设计变量, 温度场最高温度为设计目标, 采用基本粒子群算法对响应面近似模型进行优化。结果表明, 在相同制动仿真条件下, 优化后系统温度场分布更为均匀, 最高温度下降了20.46%。研究盘鼓式制动器的优化设计, 为制动器样机实验提供设计参数和理论依据。

**关键词:** 制动增势; 盘鼓式制动器; 响应面法; 优化

**中图分类号:** U463

## Optimization of Disc-drum Brakes Based on Response Surface Method

YU Gaoyuan SUN Rui PEI zhengfu Fu Zengwei SHI Yongjun

(Research Center for Vehicle Engineering( China University of Petroleum(East China)),Qingdao 266580,China)

**Abstract:**To optimize disc-drum brakes,the structure of disc brakes which have brake growth is presented and combined with the structure of drum brake.It is based on response surface method (RSM) and optimization technique.In the proposed method,a second-order response surface approximate mode of temperature field is built up,based on the influence of distribution coefficient of braking torque,dynamic finite element model,optimal latin hypercube sampling and the least squares method.The structural parameters of brake system and distribution coefficient of braking torque are taken as the optimization objective,and basic particle swarm algorithm is carried out, the results shows that the uniformity of temperature distribution is improved based on the same simulation conditions. The maximum temperature has decreased 20.46%.The optimization of the disc-drum brakes is studied,which provides design specifications and theoretical basis for prototype test of braking system.

**Key words:**Braking growth Disc-Drum brake Response surface method Optimization

## 0 前言

随着交通运业、能源勘探与开发业和航空航天工业等的发展,对制动器制动效能及其稳定性能提出了越来越高的要求。例如在重型载货汽车、高速动车组、3000m 超深钻机、大飞机等工具均含有高能量摩擦制动,对具有高制动效能及其稳定性的需求更加迫切。然而,制动器制动过程温度场的分布对于其制动效能及稳定性具有重要意义。普通的鼓式制动器单面传热,制动过程中温度场分布不均匀,内表面温度过高,制动效能稳定性较差;普通的盘式制动器相同制动压力下,稳定性较好,但制动效能差,无制动增势。研发在高能量制动条件下温度场分布均匀、温升低的制动器将逐渐成为各国学者的研究热点。

由于在实际工况条件下难以准确测量制动过程

中制动器的温度,所以目前国内外学者多采用计算机仿真技术来模拟制动器温度场的分布。例如,KENNEDY、LING 等<sup>[1-2]</sup>在 1974 年首先应用热弹性有限元法研究了制动器制动过程中制动盘温度场的分布;Rowson 等<sup>[3]</sup>采用恒定制动减速度研究了制动热能如何进入摩擦表面。国内赵海燕等<sup>[4]</sup>使用热循环历程有限单元法研究了不同行驶速度、加载方式下列车制动盘温度场的分布;刘立刚、孟召辉等<sup>[5-6]</sup>则采用等效热流有限单元法对鼓式制动器温度场的分布进行了预测,并将预测结果与试验结果对比,结果显示二者基本吻合,从而证明了利用有限单元技术能较准确的预测制动器制动过程中温度场的分布。目前,基于热循环历程和等效热流的有限元技术分别在盘式、鼓式部分制动过程温度场的分布研究中得到了广泛应用。

从现有研究工作来看,制动器温度场分布的优

化设计研究相对较少。Gao 和 Lin 等<sup>[7]</sup>在建立制动盘有限元模型的基础上,用最优化的方法对系统的温度场分布进行修改,提高了系统的抗热衰退性,该方法主要是在有限元与快速傅里叶变换相结合的基础上利用时域内微小时间增量解决移动热源模型造成的数值收敛性问题,进而对制动盘温度场的分布进行了优化。曲杰等<sup>[8]</sup>建立了制动器的热机耦合模型,针对系统几何参数和材料参数等建立了代理模型,采用序列二次规划算法对制动盘的温度场分布进行了优化,但没有涉及到制动器相互分担制动过程中产生的热负荷。

从降低制动器系统温度场最高温度角度对制动器进行优化设计,需要在有限元模型的基础上求解其温度场的分布,进而获得最高温度。在有限元分析中,温度场是设计参数的隐式函数,二者之间没有明确的表达式,因而难以建立多部件参数优化模型。针对上述问题,考虑了制动力矩分配系数的影响,对盘鼓式制动器进行了动态建模,通过最优超拉丁立方试验方法采样,结合最小二乘法构建了系统温度场的二阶响应面近似模型,以制动器几何结构参数和制动力矩分配系数为设计变量,温度场最高温度为设计目标,采用基本粒子群算法对响应面近似模型进行了优化。优化结果表明,采用该方法对制动器进行优化,能有效改善系统温度场的分布,降低温度场的最高温度,提高制动器的抗热衰退性。

1 转子盘的建模与计算

1.1 制动器结构

本文借鉴材料等强度理论和组合创新理论,提出了具有制动增势特性的盘式制动结构,将盘式制动结构和鼓式制动结构并联使用,设计出盘鼓式制动器,如图 1 所示。

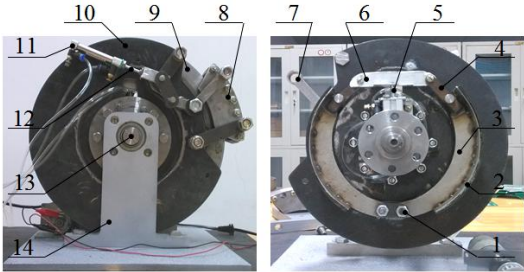


图 1 盘鼓式制动器样机模型

1.支撑销 2.摩擦片 3.制动蹄 4.鼓式制动推杆 5.鼓式制动轮缸 6.制动压板 7.制动上拉杆 8.制动钳 9.制动盘 10.制动底板 11.制动主缸 12.制动推杆 13.支撑轴 14.支撑架

制动器盘式部分由制动主缸、制动推杆、增力机构、四连杆机构、制动钳依次串联而成。工作时,制动主缸接受来自油箱的压力,制动推杆动作,

经增力机构变力后,使制动上拉杆带动制动钳以渐开线的型式做偏心运动,靠近具有楔形面的转子盘,实现盘式部分制动。采用四连杆机构实现盘式制动增势,通过增力机构和楔形面接触实现盘式增力。制动器鼓式部分依次由鼓式制动轮缸、制动压板、鼓式制动推杆、制动蹄串联而成。工作时,鼓式制动轮缸接受来自油箱的压力后,制动压板动作,下压对称的鼓式制动推杆,使两蹄张开,实现鼓式部分制动。

1.2 有限元建模

盘鼓式制动器转子盘模型如图 2 所示,其中  $r_1$  和  $r_2$  分别为鼓式部分的内径和外径,  $r_3$  和  $r_4$  分别为盘式部分摩擦片的内径和外径,  $\beta$  为楔形面夹角,面  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为转子盘外圆侧面、外工作面和内工作面。转子盘的基体材料为 ZG1Cr13,摩擦片材料为树脂基复合材料,其主要结构尺寸和材料属性如表 1、2 所示<sup>[9]</sup>。

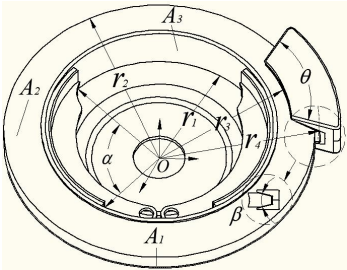


图 2 盘鼓式制动器转子盘模型

表 1 盘鼓式制动器主要结构尺寸

	内径 /mm	外径 /mm	包角 $\alpha/(^\circ)$	角度 $\theta/(^\circ)$	夹角 $\beta/(^\circ)$
转子盘	107	150	100	—	14
摩擦片	124	150	—	45	14

表 2 转子盘和摩擦片的材料属性

物理参数	摩擦片	转子盘
热导率 $\lambda/[W/(m \cdot K)]$	1.212	48.460
密度 $\rho/(kg/m^3)$	2595	7228
比热容 $c/[J/(kg \cdot K)]$	1465	419
热膨胀系数 $\alpha/(\times 10^{-5}K^{-1})$	3.0	1.1
弹性模量 $E/GPa$	1.5	175.0
泊松比 $\nu$	0.25	0.30

1.3 加载条件

本文为模拟重 1.5t 汽车在紧急制动工况下转子盘的温度场,采用的加载条件如下:车辆制动初速度为 120km/h,制动时间为 3.2 s,制动距离为 45 m,摩擦因数为 0.3。

1.4 转子盘温度场计算方法

在模拟中设定盘式部分、鼓式部分摩擦片与盘

体之间全接触，运动形式为滑动摩擦。为方便计算，将转子盘视为固定不动，在转子盘鼓式部分的摩擦表面施加等效热流，盘式部分的摩擦表面施加沿圆周移动的等效热流，以模拟转子盘的热输入载荷。转子盘温度场分析中的热载荷为热流密度，加载于各摩擦片对应的转子盘工作面上<sup>[4]</sup>。

#### 1.4.1 鼓式部分等效热流计算

盘鼓式制动器的结构形式和工作原理决定了器工作方式为联合制动。设力矩分配系数为 $\alpha$ ，则：

$$T_{f1} = \alpha T_f \quad (1)$$

$$T_{f2} = (1 - \alpha) T_f \quad (2)$$

式中， $T_f$ 为转子盘摩擦阻力矩， $T_{f1}$ 和 $T_{f2}$ 分别为鼓式部分和盘式部分的摩擦阻力矩。

转子盘鼓式部分热载荷 $q$ 为<sup>[5]</sup>：

$$q = \frac{\xi \cdot T_{f1} \cdot S(v_0 - at)}{AR_w} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{1 + (\frac{\rho' \cdot c' \cdot \lambda'}{\rho \cdot c \cdot \lambda})^{1/2}} \quad (4)$$

式中， $S$ 为鼓式部分吸收能量占其制动能量的比例，取0.9， $v_0$ 为转子盘初速度， $a$ 为制动减速度， $A$ 为鼓式部分摩擦面积， $R_w$ 为车轮半径， $\xi$ 为转子盘吸收能量占总能量的比值， $c$ 、 $c'$ 分别为转子盘、摩擦衬片的比热， $J/kg \cdot ^\circ C$ ， $\rho$ 、 $\rho'$ 分别为转子盘、摩擦衬片的密度， $kg/m^3$ ， $\lambda$ 、 $\lambda'$ 分别为转子盘、摩擦衬片的导热系数， $W/m \cdot ^\circ C$ 。

#### 1.4.2 盘式部分移动热流计算

制动器工作时，假定摩擦表面压力分布均匀，则制动器的制动力矩为：

$$T_{f2} = \frac{4}{3} f F_0 \cdot \frac{r_4^3 - r_3^3}{r_4^2 - r_3^2} \quad (5)$$

式中， $F_0$ 为单侧制动块对制动盘的压紧力， $r_3$ 和 $r_4$ 分别为盘式部分摩擦衬块的内半径和外半径， $f$ 为摩擦因数。制动盘热输入为：

$$q(t, r) = Z f \frac{F_0}{S} \varpi(t) \frac{r}{\cos \gamma} \quad (6)$$

式中， $q(t, r)$ 是 $t$ 时刻转子盘表面半径 $r$ 处吸收的热流密度， $W \cdot m^{-2}$ ； $Z$ 是转化到转子盘的热能份额，为0.85<sup>[10]</sup>； $S$ 为盘式部分摩擦片的有效接触面积；

$\omega(t)$ 为制动盘的角速度， $rad \cdot s^{-1}$ 。

转子盘侧面 $A_l$ 的换热系数为 $h_{A1}$ ，制动盘摩擦面部分散热作为圆盘表面换热处理，换热系数为 $h_{A2}$ ，则<sup>[12]</sup>：

$$h_{A1} = 29.80 \cdot (\omega(t) \cdot r_4)^{0.6} \quad (7)$$

$$h_{A2} = 0.875 \cdot (\omega(t) \cdot r_4)^{0.5} \quad (8)$$

## 2 盘鼓式制动器优化设计

### 2.1 构建响应面模型

基于热循环历程和等效热流的有限元技术在盘式、鼓式部分制动模拟计算时工作量非常大，抽样点不能太多。基于上述考虑，采用最优拉丁超立方试验设计方法获取设计样本点<sup>[13-14]</sup>。构建二阶响应面近似模型的完全多项式为<sup>[13]</sup>：

$$\tilde{y}(x) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

当获得 $M$ 个样本点对应的响应量 $y = (y^{(1)}, y^{(2)} \dots y^{(M)})$ 后，通过最小二乘法可得到系数列阵：

$$a = (\Phi^T \Phi)^{-1} (\Phi^T y) \quad (10)$$

式中， $\Phi$ 为响应面样本矢量点，可以表示为：

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,N} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{M,1} & x_{M,2} & \dots & x_{M,N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

结合式(9)、(10)求得二阶响应面近似模型的表达式。分别选取力矩分配系数 $\alpha$ 、转子盘内径 $r_l$ 、转子盘外径 $r_4$ 为设计变量，对应的初值分别为：0.0，106，150。取样本点10个，通过编写有限元程序计算，选取温度场最高温度。试验设计下温度场最高温度的试验结果见表3。

表3 最高温度的试验设计结果

试验次数	试验设计变量			温度场最高温度 $T_{max}$ ℃
	力矩分配系数 $\alpha$	转子盘内径 $r_l$	转子外径 $r_4$	
1	0.78	107.56	153.889	231.64
2	0.67	108.0	148.33	223.83
3	0.89	106.89	146.11	234.94
4	0.44	106.22	152.78	211.8
5	1.0	106.44	151.67	290.78
6	0.33	107.11	145.00	335.19
7	0.0	106.67	150.56	390.59
8	0.56	106.0	147.22	207.59
9	0.11	107.78	149.44	364.98
10	0.22	107.33	155.0	229.41

根据试验设计结果,用最小二乘法计算回归系数矩阵,构造温度场最高温度的二次多项式响应面近似函数为:

$$T_{\max} = 10^7 \times (-0.0355 - 0.0003\alpha + 0.6119r_1 + 0.0386r_4 - 0.0017\alpha r_1 + 0.0029\alpha r_4 - 0.3257r_1 r_4 - 2.6226r_1^2 - 0.0197r_4^2) \quad (12)$$

得到响应近似模型后,为保证拟合精度,需进行显著性检验,分析结果如表4所示。

表4 响应面模型的显著性分析

响应面模型	拟合误差 $S_R$	残差 $S_C$	$F$ 值 ( $S_R/S_C$ )
$T_{\max}$	$1.8202 \times 10^4$	$3.0674 \times 10^{-5}$	$5.9338 \times 10^8$

由  $F$  检验知  $F > F_{0.01}(9,10) = 4.94^{[15-16]}$ ,这表明盘鼓式制动器温度场最高温度的响应面模型的不可靠概率小于 1%,与真实有限元模型的逼近程度高,能够较好地满足预测精度要求。

### 2.2 优化设计

以制动器几何结构参数和制动力矩分配系数为设计变量,温度场最高温度为设计目标,则盘鼓式制动器系统的优化数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min f(H) &= T_{\max} \\ \text{s.t. } x_{il} &< x_i < x_{ih} \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $H$  为设计变量,  $T_{\max}$  为温度场最高温度,  $x_{il}$ 、 $x_{ih}$  为设计变量下限和上限,各变量取值范围见表5。

表5 设计变量初始值和取值范围

设计变量	初始值	下限	上限
力矩分配系数 $\alpha$	0.5	0.0	1.0
转子盘内径 $r_1/mm$	107	106	108
转子盘外径 $r_4/mm$	150	145	155

基本粒子群算法易实现、精度高、收敛快,故采用基本粒子群算法对式(12)所示模型进行优化计算<sup>[17]</sup>,学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  均取 1.4962,惯性权重 0.7298,最大迭代次数 1000,初始化群体个体数目 40,迭代后设计变量、目标函数的寻优值以及最终取值如表6所示。

表6 优化前后设计变量和目标函数的对比值

设计变量	初始值	寻优值	最终取值
力矩分配系数 $\alpha$	0.5	0.776	0.78
转子盘内径 $r_1/mm$	107	106.0	106.0
转子盘外径 $r_4/mm$	150	147.95	148.0
温度场最高温度 $T_{\max}/^\circ\text{C}$	245.13	200.02	206.18

为了验证优化结果的正确性,将优化后的设计变量的最终取值代入有限元模型,通过仿真计算,

结果显示系统温度场的最高温度出现在制动过程中 1.596s 时,对应的最高温度为 203.93℃,响应面法寻优结果误差仅为 1.09%。优化前后系统温度场的最高温度随时间变化对比如图3所示。二者的温度变化趋势一致,但优化后温度场的最高温度由 256.39℃降到了 203.93℃,下降了 20.46%,系统温度场分布均匀性得到明显改善。

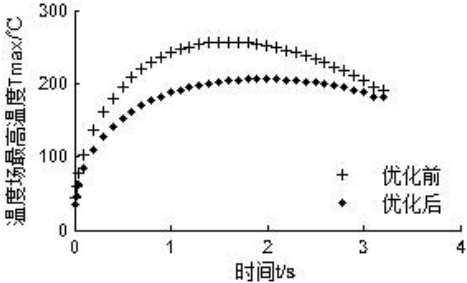


图3 优化前后系统最高温度随时间变化关系

### 3 结论

(1) 本文将响应面法引入到盘鼓式制动器的优化设计中,构建了制动器几何结构参数和制动力矩分配系数为设计变量,温度场最高温度为设计目标的盘鼓式制动器系统优化近似模型,采用基本粒子群算法对响应面近似模型进行优化,减少了优化计算工作量。

(2) 对盘鼓式制动器的分析和优化结果表明,基于响应面法的盘鼓式制动器优化设计,可有效降低系统温度场的最高温度,改善系统温度场的分布,为制动器样机实验提供设计参数和理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] Kennedy. Surface temperatures in sliding system-a finite element analysis. J. Lubrication Technology, Transactions of the ASME, 1974:497-505.
- [2] Kennedy Jr FE, Ling F E. A thermal thermo-elastic, and wear simulation of a high-energy sliding contact problem. J. Lubrication Technology, Transactions of the ASME, 1974:497-505.
- [3] D.M.Rowson. The interfacial surface temperature of a disc brake. Wear, 1978 (2):323-326.
- [4] 赵海燕,张海泉,汤晓华,林健,蔡志鹏.快速列车盘型制动热过程有限元分析[J].清华大学学报(自然科学版), 2005,45(5): 589-592.
- [5] 孟召辉.汽车鼓式制动器热性能有限元分析[D].吉林大学. 硕士论文.20070508.
- [6] 刘立刚.重型越野车鼓式制动器的有限元分析[D].华中科技大学. 硕士论文 20030508.
- [7] GaoCH, LinXZ. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three dimensional

- model [J].Journal of Material Processing Technology, 2002, 129(1/2/3):513-517.
- [8] 曲杰, 苏海赋.基于代理模型的通风盘式制动器制动盘结构优化设计[J].工程力学, 2013,230 (2) : 332-335.
- [9] GAO Chenghui,HUANG Jianmeng,LIN Xieshao, et al. Stress analysis of thermal fatigue fracture of brake disks based on thermomechanical coupling[J]. ASME ,.Tribology, 2007, 129: 536-543.
- [10] 王望予.汽车设计[M].北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] Gao C H, Lin X Z. Transient temperature field analysis of abrake in a non-axisymmetric three-dimensional model [J].Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129:513 517.
- [12] Koetniyom S, Brooks P C, Barton D C. The development of a material model for cast iron that can be used for brakesystem analysis [J]. Proc Instn Mech Engrs, Part D: JAutomobile Engineering, 2002, 216: 349 362.
- [13] 吕辉, 于德介, 谢展, 路怀华.基于响应面法的汽车盘式制动器稳定性优化设计[J].机械工程学报, 2013,49 (9) : 56-59.
- [14] PAPILLA M. Accuracy of response surface approximations for weight equations based on structural optimization [D]. Gainesville: University of Florida, 2001.
- [15] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. LIU Wenqing. Experimental design [M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2005.
- [16] PAPILLA M. Accuracy of response surface approximations for weight equations based on structural optimization [D]. Gainesville: University of Florida, 2001.
- [17] 李建勇.粒子群优化算法研究[D].华中科技大学.硕士论文 200403.

---

**作者简介:** 喻高远, 男, 1993 年出生, 河南省南阳市, 硕士研究生。主要研究方向为制动器的优化设计, 已发核心论文两篇。

Email: 961023731@qq.com; Tel: 15588600571

石永军 (通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 硕士生导师。主要研究方向为石油特车设计与制造理论、激光热加工技术、高能摩擦制动技术。

E-mail: syjgl@126.com

尊敬的主编老师您好:

由于评奖需要, 特别希望能够快速得到回复, 是否被录用, 希望能在一个月左右得到通知。谢谢了!

喻高远 15588600571

邮箱: 961023731@qq.com