

文章编号:1671-8879(2006)04-0092-03

## 实验法求解汽车鼓式制动器对流换热系数

郭应时, 袁 伟, 付 锐

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**在传热学理论上,结合汽车鼓式制动器的结构和工作原理,建立了鼓式制动器热平衡关系式,分析了影响对流换热系数的主要因素。依据对流换热过程的 3 个相似准则,进行鼓式制动器恒定制动力持续制动实验,测试不同车轮转速条件下的温升过程,并利用最小二乘法拟合曲线,得到汽车鼓式制动器对流换热系数的求解公式。结果表明:实验法求解鼓式制动器的对流换热系数是可行的,运用量纲分析法和相似理论指导实验,能够有效简化实验程序,减少实验工作量。

**关键词:**汽车工程;鼓式制动器;对流换热系数;热平衡;实验法

**中图分类号:**U463.51

**文献标识码:**A

### Solution for heat convection coefficient of automotive drum brake with experiments

GUO Ying-shi, YUAN Wei, FU Rui

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the constitution and work principle of automotive drum brake, this paper builds the heat balance relation of drum brake, and analyzes the main influence factors of heat convection coefficient. According to the three similarity regulations of heat transfer theory, the temperature data of various drum speed are recorded in the braking test with constant brake force. The solution for heat convection coefficient of automotive drum brake is given with the least square method. It shows that solving heat convection coefficient with experiments is feasible and the dimension analysis and similarity theory can simplify the procedure and reduce the workload obviously. 1 tab, 2 figs, 8 refs.

**Key words:** automotive engineering; drum brake; heat convection coefficient; heat balance; experiment

## 0 引 言

通过对制动器的结构设计、制造工艺水平和材料性能的改善,可以提高制动器抗热衰退能力,减少交通事故的发生<sup>[1-4]</sup>。在评价各种改善措施的效果时,需要对制动器制动过程的温升情况进行模拟计

算。鼓式制动器工作时温度变化依赖于制动鼓内的热平衡关系,热量的产生来源于摩擦片同制动鼓内表面的摩擦过程,主要的热量散失方式是对流散热和辐射散热,其中对流散热量约占总散热量的 80%,辐射散热量约占总散热量的 5%~10%<sup>[5]</sup>。因此,寻找精确的对流散热量计算方法,是制动器制

收稿日期:2005-05-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200431822333-03)

作者简介:郭应时(1964-),男,辽宁凌海人,副教授,博士研究生。

动过程温升计算的关键。

在牛顿冷却公式中作为计算手段引进了对流换热系数 $h^{[6]}$ ,对分析和讨论传热过程以及拟订增强或削弱传热措施等方面有重要的意义。求解对流换热系数 $h$ 的方法一般有数学解析法、数值模拟解法和实验求解法。数学解析法常常要求解包括连续方程、动量微分方程和能量微分方程等非线性方程,必须加以简化才能解出,这就影响了结果的精度。数值模拟解法在很多情况下,必须用实验来不断地修正验证,才能达到预期的结果。实验求解法是目前一些复杂工程问题的有效解决办法。本文是在传热学基本理论的指导下,运用相似理论和量纲分析法来进行对流换热实验研究,求借对流微分方程组,得到鼓式制动器的对流换热系数的计算公式。

## 1 制动鼓热平衡分析

制动器工作时的热量来源于摩擦片同制动鼓内表面的摩擦过程,产生的热量一部分通过各种途径散发出去,剩余部分在制动鼓和摩擦片内部积累,使其温度升高<sup>[7-8]</sup>。根据热力学传递机理,制动器的换热包括传导换热、辐射换热和对流换热3种方式,传导换热量在3种换热方式中所占的比例很小,所以在计算时可以忽略。制动鼓热平衡关系式为

$$\Delta T m c = Q_{\text{摩擦}} - Q_{\text{辐射}} - Q_{\text{对流}} \quad (1)$$

式中: $\Delta T$ 为制动鼓温度变化值; $m$ 为制动鼓质量; $c$ 为制动鼓比热容。

制动过程摩擦生热量计算公式为

$$Q_{\text{摩擦}} = F_{\mu} S \quad (2)$$

式中: $F_{\mu}$ 为制动器的制动力; $S$ 为制动鼓圆周转动的距离。

现有车型装配的鼓式车轮制动器,其装配结构基本相同,即制动鼓完全被轮辋包裹,可以认为制动鼓外表面与轮辋的内表面构成一个封闭的辐射换热系统。根据辐射换热理论和制动器参数,推导出辐射换热流量公式为

$$Q_{\text{辐射}} = \frac{\sigma_b A [T_1^4 - T_2^4]}{1/\epsilon_1 + (A/A_1)(1/\epsilon_2 - 1)} \Delta \tau \quad (3)$$

式中: $T_1$ 、 $T_2$ 分别为制动鼓外表面和外掠空气的热力学温度(F); $\sigma_b$ 为黑体辐射常数,又称斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$ ;  $A$ 、 $A_1$ 分别为制动鼓的外表面面积和轮辋的内表面面积( $\text{m}^2$ ); $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 分别为制动鼓材料和轮辋材料的黑度; $\Delta \tau$ 为制动时间。

## 2 对流换热系数影响因素

对流换热是鼓式制动器最主要的散热方式。因为制动器室为防止异物进入,基本与外界环境隔离,空气流动不明显,所以鼓式制动器的对流换热计算只考虑制动鼓外表面与外界的对流换热,基本计算公式是牛顿冷却公式

$$Q_{\text{对流}} = h A (t_w - t_f) \Delta \tau \quad (4)$$

式中: $h$ 为对流换热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ); $t_w$ 、 $t_f$ 分别为制动鼓外表面温度和外界流体温度( $^\circ\text{C}$ )。

式(1)实质上只是换热系数的定义式,并未提出对对流换热过程本质的简化。对流换热是依靠导热和热对流两种方式来完成热量的传递,所以一切支配这两种方式的因素,如流动的起因、流动的状态、流体的物性、物相的变化、壁面的几何参数等都会影响对流换热过程。用数学方法表示各影响因素与对流换热系数的关系,则有描述无相变条件下鼓式制动器对流换热一般性方程

$$h = f(\rho, \eta, \lambda, u, l) \quad (5)$$

式中: $\rho$ 、 $\eta$ 、 $u$ 分别为外掠空气的密度、动力粘度和速度; $\lambda$ 、 $c_p$ 分别为制动鼓材料的导热系数和比热; $l$ 为制动鼓外表面几何特性尺寸。

## 3 量纲分析与相似分析

在式(5)中有6个参数影响换热系数,若在实验过程中每个参数仅改变10次,就要做 $10^6$ 次实验,这个工作量是非常巨大的。同时为了使实验结果能够推广应用到其他具有不同几何参数、物性参数和运行环境的鼓式制动器,本文采用无量纲分析法和相似理论来指导实验。通过量纲分析和相似分析,可以得到对流换热的3个相似准则。

$$\text{雷诺准则 } R_e (R_e \text{ 数}): R_e = \frac{u \rho l}{\eta} \quad (6)$$

$$\text{努谢尔特准则 } N_u (N_u \text{ 数}): N_u = \frac{h l}{\lambda} \quad (7)$$

$$\text{普朗特准则 } P_r (P_r \text{ 数}): P_r = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (8)$$

这3个相似准则从对流换热微分方程式变化而来,之间存在函数对应关系,由相似准则数构成的关系式称为相似准则方程式,相似准则方程式的一般形式为

$$N_u = C R_e^m P_r^n \quad (9)$$

因为车辆制动器的工作环境一般是在空气中,所以流体只有空气一种,即 $P_r$ 是常数,所以式(9)简化后带入式(7)可以得到

$$h = CR_0^2 \lambda / l = CR_0^n \tag{10}$$

因此,求解对流换热系数  $h$  就转化为确定对流换热相似准则关联式(10)中的系数  $C$  和  $n$ 。

4 对流换热实验

本次实验采用室内台架实验,以 EQ1092 型货车后轮制动器为研究对象,制动过程中制动力  $F_\mu$  保持恒定不变,车轮转速也保持恒定,选取分布在(0~100) km/h 之间的 9 种测试速度。实验整体设计思路如图 1 所示。

因实验过程中制动鼓处于转动状态,所以将温度传感器埋设于制动蹄片靠近摩擦面的部位,图 2 为不同转速条件下的温度变化曲线。

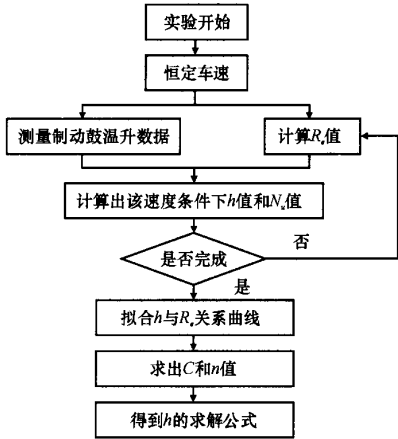


图 1 实验流程图

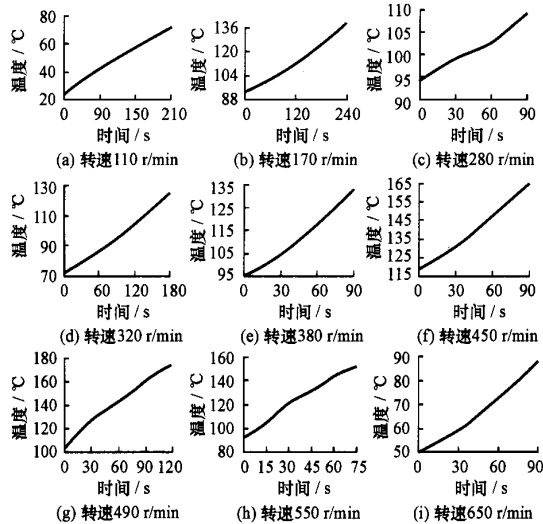


图 2 各种测试速度下制动鼓升温曲线图

5 数据处理

把式(2)、式(3)、式(4)代入式(1)中,结合实验测量的温度数据,可以计算出每种转速条件下的对

流换热系数  $h$  和  $R_e$  数。由式(9)可以计算出  $N_u$  数,实验数据处理结果如表 1 所示。

表 1 实验数据处理结果

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	$N_u(10^2)$	$R_e(10^6)$
110	54.885 217	0.082 367
170	93.985 626	0.127 294
280	182.916 425	0.209 661
320	206.548 488	0.239 613
380	200.1219 11	0.284 540
450	194.051 470	0.336 955
490	208.255 654	0.366 907
550	257.385 575	0.411 835
650	643.126 505	0.486 714

对式(10)两边取对数,根据计算的  $R_e$  数和  $N_u$  数的值,采用最小二乘法拟合曲线,得到

$$C = 0.258\ 23, \quad n = 0.893\ 42$$

因此,可得对流换热系数  $h$  的求解公式

$$h = 0.258\ 23 \frac{\lambda}{l} \left( \frac{u_0 l}{\eta} \right)^{0.893\ 42} \tag{11}$$

式(11)是通过对流换热实验得到的,实验过程中因传感器精度问题会存在一定的误差,此外在数据处理过程中忽略传导散热,也会存在误差。计算结果与实测结果对比,误差在 20% 以内。

在实验设计和数据处理过程中,运用了相似理论和量纲分析,所以研究结论适用于符合相似理论的汽车制动器。

6 结 语

(1)实验法求解鼓式制动器的对流换热系数是可行的,实验设计和数据处理过程中需要运用量纲分析法和相似理论,以简化实验程序,减少实验工作量。

(2)实验法求解的鼓式制动器对流换热系数计算公式为  $h = 0.258\ 23 \frac{\lambda}{l} \left( \frac{u_0 l}{\eta} \right)^{0.893\ 42}$ 。

(3)研究结论适用于符合相似理论的汽车制动器。

参考文献:

References:

[1] 余 强,陈荫三,马 建,等. 客车发动机制动下坡能力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(2): 95-97.

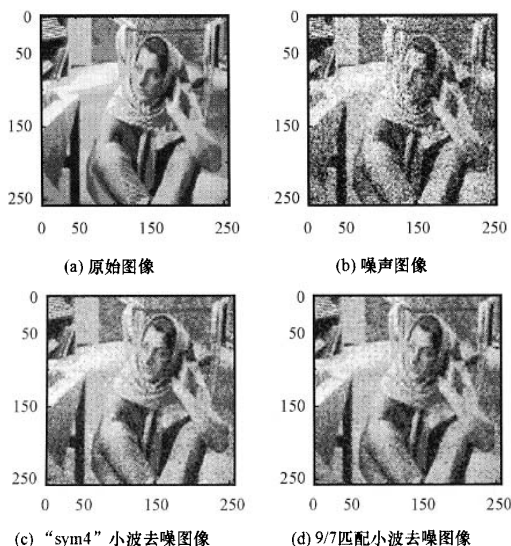


图8 利用“sym4”小波函数及9/7滤波器组匹配小波去噪的效果图进行了对比分析。仿真试验结果表明,应用最优匹配小波能够较明显地提高信号或图像的信噪比。

#### 参考文献:

#### References:

[1] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and pro-

cessing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(3): 617-643.

[2] Donoho D L. Denoising by soft thresholding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.

[3] Chapa J O, Raghuveer M R. Algorithm for designing wavelets to match a specified signal[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(12): 323-331.

[4] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. Commun Pure APPL, 1992, 45(3): 485-560.

[5] David B H. Rationalizing the coefficients of popular biorthogonal wavelet filters[J]. IEEE Trans on Circuits and System for Video Technology, 2000, 10(6): 998-1005.

[6] 袁小滨,李京华,许家栋. 自适应滤波和子波变换在信号消噪中的应用[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(6): 96-97.

YUAN Xiao-bin, LI Jing-hua, XU Jia-dong. Application of RLS recursive least-squares adaptive filter and wavelet transform method in canceling signal noise[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 94-97.

(上接94页)

YU Qiang, CHEN Yin-san, MA Jian, et al. Ability of bus engine-braking at downhill[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(2): 95-97.

[2] 余强,陈荫三,马建,等. 客车发动机制动与缓行器联合作用的制动能力[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(2): 87-90.

YU Qiang, CHEN Yin-san, MA Jian, et al. Brake ability of engine brake and retarder brake when bus downhill[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 87-90.

[3] 余强,陈荫三,马建,等. 发动机制动、排气制动与缓速器联合作用时的非线性控制系统的研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 117-121.

YU Qiang, CHEN Yin-san, MA Jian, et al. Study of non-continuous linear control system of combining action with engine brake, exhaust brake and retarder[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 117-121.

[4] 陈燕. 汽车气压制动系统动态分析键图仿真模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 69-72.

CHEN Yan. Dynamic simulation model of automobile

compressed airbrake system based on bond graph theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 69-72.

[5] 鲁道夫 L. 汽车制动系统的分析与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1985: 42-78.

Rudolf L. Analysis and design of automotive brake systems [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985: 42-78.

[6] 姚仲鹏,王瑞君,张习军. 传热学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995: 103-135; 209-240.

YAO Zhong-peng, WANG Rui-jun, ZHANG Xi-jun. Heat transfer[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 103-135; 209-240.

[7] 刘牧众. 汽车制动鼓内表面温升计算[J]. 上海工程技术大学学报. 1999, 13(1): 41-45.

LIU Mu-zhong. Calculating the temperature rise of automobile brakes[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 1999, 13(1): 41-45.

[8] 蒋京,夏群生,余志生. 盘式制动器重复制动温度计算[J]. 汽车工程, 1996, 18(3): 168-174.

JIANG Jing, XIA Qun-sheng, YU Zhi-sheng. Calculation of disc brake temperature in repeated braking[J]. Automotive Engineering, 1996, 18(3): 168-174.