

文章编号:1000-6893(2010)03-0638-05

飞机刹车副温度场的瞬态有限元模型

薛晶, 李玉忍, 田广来, 谭娟

(西北工业大学 自动化学院, 西安 陕西 710072)

Transient Temperature Finite Element Model of Airplane Disk Brakes

Xue Jing, Li Yuren, Tian Guanglai, Tan Juan

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 飞机制动过程中刹车装置产生的高温可使摩擦材料发生热降解, 导致摩擦系数变化, 出现热衰退现象, 影响飞机的安全性能, 因此飞机刹车副瞬态温度场分析日益受到关注。针对飞机刹车副瞬态温度场建立了具有对流和热辐射两种边界条件的有限元计算模型, 分析了边界条件对温度场的影响, 并用 ANSYS 对其进行仿真计算。仿真计算得到的温度与刹车副经验温度基本吻合, 证明了所建立的有限元计算模型合理、可行, 为飞机刹车装置温度场分析、计算和研究提供理论支持。

关键词: 计算机仿真; 飞机; 刹车; 有限元方法; 温度场

中图分类号: V226 **文献标识码:** A

Abstract: The heat energy generated during the braking of an aircraft has quite close relations with its safety; therefore, much research in this field has been performed. The article begins with a review of the existing literature on the temperature field of airplane braking, and reaches the conclusion that there is no theoretical mathematic model with the boundary conditions of heat convection and radiation. This article presents a three-dimensional model using the finite element method which takes into account both of the boundary conditions. The process of deriving the model is explained in detail. The numerical simulation results by ANSYS, which are in good agreement with the empirical data, show the importance of the boundary conditions and the validity of the model. This finding is potentially significant in optimizing the design of airplane disk brakes.

Key words: computer simulation; aircraft; braking; finite element method; temperature field

飞机的刹车装置是保证飞机能正常起飞、刹停的重要系统。对于一般的刹车装置而言, 刹车副温度在一次刹车后可以从室温上升到几百乃至上千摄氏度, 这严重削弱了刹车副材料的热机械性能。目前还没有足够的试验手段来获得飞机刹车装置的瞬态温度场。由于系统的非线性、模型的复杂性以及难以确定的边界和初值条件, 一般很难得到解析解。

国外对温度场的研究比较早, 发展也比较成熟。典型的一维温度场方程认为刹车副无限均匀接触, 压力处处相等, 二维轴对称方程则认为温度在圆周方向相同。A. Yevtushenko 等^[1]用 Hankel 积分变换及 Laplace 变换求解了二维轴对称热传导方程。F. Colin 等^[2]提出一种混合法, 对运动部分的热分析采用积分法, 对固定部分则采用有限元方法计算。这种方法适合于高速摩擦, 综合考虑了计算时间与结果存储空间。随后

A. Floquet 和 M. C. Dubourg 又发展了这一个理论^[3-4], 认为二维轴对称热传导方程与实验结果相比有较大的误差, 用傅里叶快速变换-有限元方法 (FFT-FEM) 求解了三维瞬态热传导方程。K. Lee 等^[5]推导出一个实用的刹车副模型, 此模型建立在两个有限厚度刹车盘滑动过程上并假设滑移速度为常值, 在研究刹车副热问题中被广泛使用^[6-7]。F. Kennedy 等^[8]介绍了一种研究飞机刹车副热性能的数值仿真方法, 此方法考虑了在正常压力下摩擦表面的磨损和由于温度引起的热变形; 但却假设每个刹车盘热机械特性关于中间盘轴对称。P. Zagrodzki^[9]进行了轴对称瞬态热性能分析, 随后又将有限元瞬态分析进行了发展^[10], 使用 Petrov-Galerkin 方法, 研究两个摩擦表面稳态二维热接触问题, 通过与 K. Lee 等^[5]的预测比较, 证明了仿真结果的正确性。O. P. Agrawal^[11]用分数导数方法进行刹车副温度分布求解, 避免了整数幂带来的误差。这种方法将模型理想化为一维模型, 要求测量一点的温

度,且用最小二乘法过滤测量的随机误差。最近 S. M. Zhao 等^[12]用 FRIC 实现轴对称有限元模型仿直接触表面摩擦特性,可以得到摩擦表面温度和接触压力分布。

中国现在也有许多这方面的研究^[13-15],简正柱等^[15]阐述了飞机刹车副制动过程中温度场的计算方法,着重讨论了边界条件和各相关参数的确定方法,研究了摩擦材料物性参数对温度场的影响。

目前对于刹车副温度场的研究,大都仅限于应用,对于理论模型的建立,尤其是有限元方法的模型建立比较薄弱,为了计算方便边界条件只考虑了对流情况,几乎都忽略了高度非线性的热辐射边界条件,模型不够精确。本文所建立的模型避免了上述不足,重点放在边界条件的处理上,对此进行了理论分析与仿真计算,得到了刹车装置的温度场分布,分析了热辐射对温度场的影响,使计算精度有所提高。

1 飞机刹车副温度场模型

对于刹车副的热传导问题,根据热平衡原理可以得到三维各向异性物质的热传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k_x 、 k_y 和 k_z 分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴的导热率; c 为比热容; ρ 为密度; \dot{q} 为热生成率; T 为物质瞬时温度; t 为时间变量。

综合考虑计算精度和计算量,令在微元体内温度沿各轴线性变化,可写成

$$T = \mathbf{S}\Phi \quad (2)$$

式中: Φ 为用微元体节点温度表示的列向量; \mathbf{S} 为形函数,是用微元体节点及体内任意一点坐标 (x, y, z) 值表示的行向量。

计算模型余差方程为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^e = & \iiint_V k_x \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] dV + \\ & \iiint_V k_y \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right] dV + \\ & \iiint_V k_z \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right] dV + \iiint_V \mathbf{S}^T \dot{q} dV \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}^e 为单元 e 中计算的温度值对各个形函数的余量。

对辐射和对流边界条件处理思路是:将高度非线性的辐射对流边界条件转化为物体表面流出的热流,然后与热对流边界条件一起作为定解条件,代入余差方程,使热传导偏微分方程具有唯一解,从而确定刹车副的温度场分布。对仅有一种边界条件的表面,在计算中可令另一种边界条件流出的热量为零。

物体表面辐射遵循 Stefan-Boltzmann 定律:

$$q/A = \sigma T^4 \quad (4)$$

式中: q 为辐射热流; A 为物体表面面积; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

当 N 个物体之间相互发生热辐射时,R. Siegal 和 J. R. Howell 给出了与表面能量损失相关的能量平衡方程为^[16]

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ji}}{\epsilon_i} - F_{ji} \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} \right) \frac{Q_i}{A_i} = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (5)$$

式中: δ_{ji} 为克罗内克符号; ϵ_i 为表面 i 的辐射率; F_{ji} 为表面 i 到表面 j 的形状因数, $1 \leq j \leq N$; A_i 为表面 i 的面积; Q_i 为表面 i 的能量损失; T_i 为表面 i 的绝对温度。对于表面 i ,重新整理式(5),可得

$$\sum_{j=1}^N [\delta_{ij} - (1 - \epsilon_i) F_{ij}] q_j = \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (6)$$

$$q_i^{\text{net}} = q_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} q_j \quad (7)$$

式中: q_j 为表面 j 输出辐射量; q_i^{net} 为表面 i 净热流; F_{ij} 为表面 j 到表面 i 的形状因数。

式(7)可形成线性代数方程组,通过 Newton-Raphson 方法求得辐射量。然后通过式(6)可求出 q_i^{net} 。

通过计算每一个面上的辐射净热流为接下来的热传导分析提供了有限元模型的边界条件。对于表面 Γ 边界条件的数学表达式为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \mathbf{h}(T - T_f) + \mathbf{q}^{\text{net}} \quad (8)$$

式中: k 为物体热传导系数; \mathbf{h} 为表面对流换热系数; \mathbf{q}^{net} 为表面辐射净热流构成的矢量; T_f 为环境温度。将其投影的坐标轴的方向,代入式(3)计算的相关部分,经过最终处理可得到

$$\Theta \Phi = \mathbf{X}$$

式中: Θ 为 4×4 阶常数矩。

$$\mathbf{X} = - \iint_{A_i} \mathbf{S}^T (h_x T_f + q_x^{\text{net}}) \cos(\mathbf{n}, x) dA -$$

$$\iint_{A_i} \mathbf{S}^T (h_y T_f \cos(n, y) + q_y^{net}) dA - \iint_{A_i} \mathbf{S}^T (h_z T_f + q_z^{net}) \cos(n, z) dA - \iiint_V \mathbf{S}^T \dot{q} dV$$

对于瞬态温度场的计算,考虑热能存储项后,得到整体刚度矩阵 $\mathbf{Z}\dot{\Phi} + \Theta\Phi = \mathbf{X}$, (\mathbf{Z} 为常数矩阵)使用欧拉方程来进行时间积分:

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\mathbf{Z} + \Theta\right)\mathbf{T}_{p+1} = \mathbf{X} + \mathbf{Z}\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\mathbf{T}_p + \frac{1-\theta}{\theta}\dot{\mathbf{T}}_p\right) \tag{9}$$

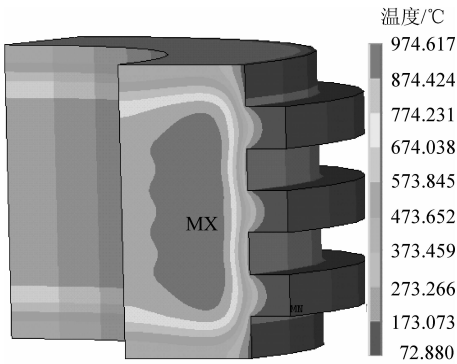
式中: θ 为欧拉系数; Δt 为时间步; \mathbf{T}_p 为第 p 个时间步时物体的温度; $\dot{\mathbf{T}}_p$ 为第 p 个时间步时温度对时间的导数。

式(9)为系统方程,反复进行上述过程则可以求出节点在各离散时间点上的温度。

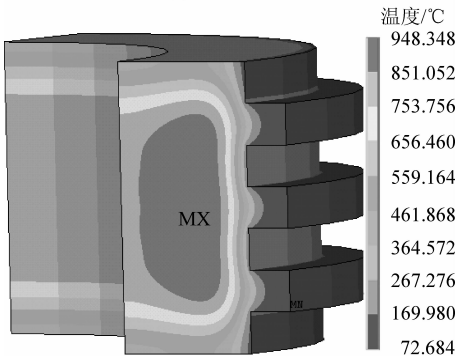
2 算法仿真及结果分析

以某型号飞机中止起飞为例,刹车盘为 C/C 材料,刹车盘为 7 个,刹车能量为 56.67 MJ,跑道为干燥状态,刹车压力为 12.5 MPa,运用以上算法,用 ANSYS9.0 进行仿真研究,其仿真结果如图 1,最高点温度出现在图上 MX 位置。图 1 为制动结束和计算结束时刹车副三维温度场分布。

图 2 给出两种边界条件下最大温度出现时温度场和热流的分布情况,为观察方便仅显示侧视图。从图中可以看出,轴向上由于中间散热条件不好,造成最高温度出现在中间刹车副的摩擦面;径向上由于热生成率及边界条件的影响,最高温度点出现在距离外径较近部位。对比图 2(a)和图 2(c)可以看出当具有两种边界条件时,最高温度点出现的位置稍偏内,这是由于具有两种边界条件时流出的热量稍大。图中最高温度分别为



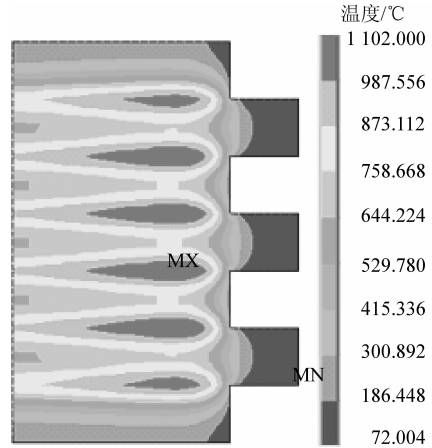
(a) 制动结束时



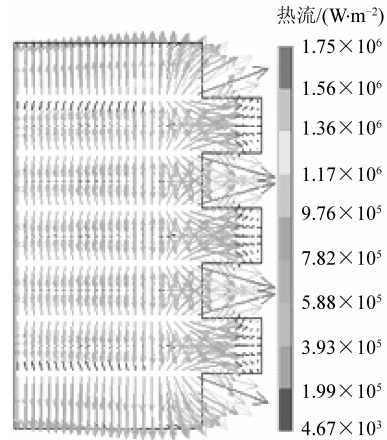
(b) 计算结束时

图 1 刹车过程中刹车副三维温度场分布

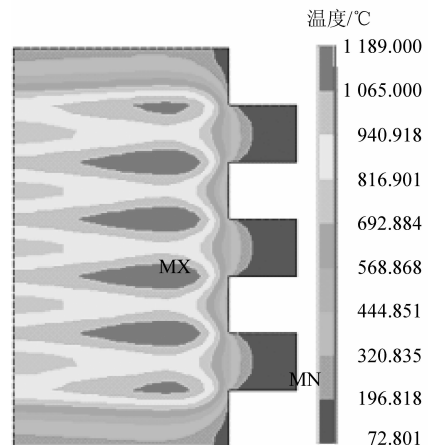
Fig.1 3D temperature field of disk brakes while braking



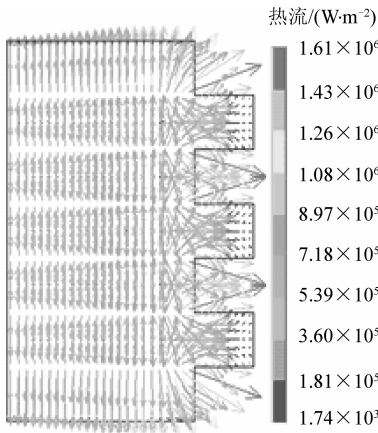
(a) 温度场分布(具有辐射和对流边界条件)



(b) 热流分布(具有辐射和对流边界条件)



(c) 温度场分布(仅有对流边界条件)



(d) 热流分布(仅有对流边界条件)

图2 最高温度出现时刹车副温度场分布和热流分布

Fig. 2 Temperature field and heat flow of disk brakes when the highest temperature occurs

1 189 °C和1 102 °C。由于刹车盘温度场的测量十分困难,对于此制动条件下,刹车盘表面最高温度的经验值一般为1 100~1 150 °C左右,当同时考虑两种边界条件时,仿真结果所得温度更接近经验值。

图2(b)和图2(d)显示了在刹车副内部热流的流动情况。通过对比可以看到,两种情况下热流方向大致相同;但同时具有两种边界条件时,流出的热流稍强,反映了热辐射边界条件对温度场分布的影响,这基本符合刹车的实际情况。

图3所示为两种边界条件下,最高点温度变化曲线。由图可以看出同时具有辐射和对流边界条件,散失的热量更多,所以在产生较多热量的时候达到最高温度,因此出现最高温度的时间有所提前,最高温度略低。

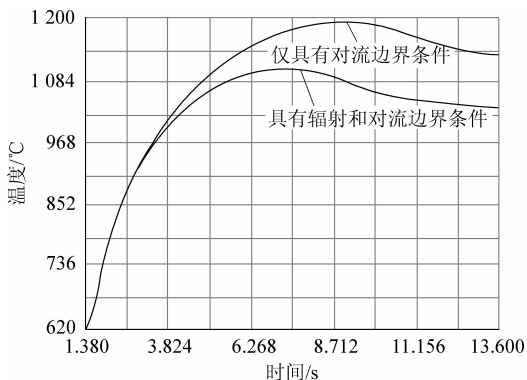


图3 边界条件改变时最高点温度变化曲线

Fig. 3 Curves of the highest temperature point changing with boundary conditions

现将两种边界条件下,各数据列于表1中进行对比。从表中可以看出,辐射边界条件对刹车

盘温度场的影响主要体现在对外的热量散失方面。同时具有两种边界条件的模型由于热量散失大,所以对于相同的热生成率,更早达到最高温度;相同时间下,仅具有对流边界条件的模型由于其温度相差较大,所以成为影响热流输出的主要因素。

表1 两种边界条件下的刹车状态对比

Table 1 Contrast between two boundary conditions

边界条件	对流边界	对流和辐射边界
最高温度出现的时间/s	8.68	6.88
最高温度/°C	1 189	1 102
最高温度出现时最大流出热量/MJ	1.61	1.75
刹车结束时间/s	11.02	11.02
刹车结束时最高温度/°C	1 124	975
刹车结束时最大流出热量/MJ	1.02	1.38
13.6 s时刹车副最高温度/°C	1 072	948
13.6 s时刹车副最大流出热量/MJ	0.89	1.15

3 结论

(1) 主要分析了应用有限元方法计算瞬态温度场的过程,并仔细考虑了辐射和对流边界条件对温度场分布的影响。

(2) 仿真结果表明运用此方法处理边界条件和进行刹车副温度场分析的方法是合理、可行的,可以较真实地反映刹车过程的温度场变化,为飞机刹车副的设计、开发提供依据。

(3) 所建立的有限元计算模型为分析飞机刹车副温度场,以及综合计算量与计算精度的判断是否要忽略辐射边界提供了一个很好的理论支持。

参考文献

- [1] Yevtushenko A, Ivanky E. Determination of temperatures for sliding contact with applications for braking systems [J]. *Wear*, 1997, 206(1-2): 53-59.
- [2] Colin F, Floquet A. Combination of finite element and integral transform techniques in a heat conduction quasi-static problem [J]. *International Journal for Numerical Method Engineering*, 2005, 23(1): 13-23.
- [3] Floquet A, Dubourg M C. Realistic braking operation simulation of ventilated disk brakes [J]. *ASME Journal of Tribology*, 1996, 118(3): 466-472.
- [4] Floque A, Dubourg M C. Nonaxisymmetric effects for three-dimensional analysis of a brake [J]. *Journal of Tribology*, 1994, 116(3): 401-408.
- [5] Lee K, Barber J. Frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes [J]. *Journal of Tribology*,

- 1993, 115(4): 607-614.
- [6] Lee K. Frictionally excited thermoelastic instability in automotive drum brakes[J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(4): 849-855.
- [7] Decuzzi P, Ciavarella M, Monno G. Frictionally excited thermoelastic instability in multi-disk clutches and brakes[J]. *Journal of Tribology*, 2001, 123(4): 865-871.
- [8] Kennedy F, Ling F. A thermal thermoelastic and wear simulation of a high-energy sliding contact problem[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1974, 97: 497-507.
- [9] Zagrodzki P. Analysis of thermomechanical phenomena in multidisk clutches and brakes[J]. *Wear*, 1990, 140(2): 291-308.
- [10] Zagrodzki P, Lam K, Bahkali E, et al. Nonlinear transient behavior of a sliding system with frictionally excited thermoelastic instability[J]. *Journal of Tribology*, 2001, 123(4): 699-708.
- [11] Agrawal O P. Application of fractional derivatives in thermal analysis of disk brakes [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2004, 38(1-2): 191-206.
- [12] Zhao S M, Hilmas G E, Dharani L R. Behavior of a composite multidisk clutch subjected to mechanical and frictionally excited thermal load[J]. *Wear*, 2008, 264(11-12): 1059-1068.
- [13] 郭应时, 付锐, 杨鹏飞, 等. 鼓式制动器瞬态温度场数值模拟计算[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2006, 26(3): 87-90.
- Guo Yingshi, Fu Rui, Yang Pengfei, et al. Numerical simulation and calculation for transient thermal field of drum brake[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2006, 26(3): 87-90. (in Chinese)
- [14] 雷宝灵, 易茂中, 徐惠娟. 炭/炭复合材料制动过程中温度场的仿真[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 377-382.
- Lei Baoling, Yi Maozhong, Xu Huijuan. Simulation of temperature field of carbon/carbon[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 377-382. (in Chinese)
- [15] 简正柱, 姚萍屏, 周萍. 飞机刹车副制动过程中温度场的数值计算[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(9): 42-46.
- Jian Zhengzhu, Yao Pingping, Zhou Ping. Numerical calculation of temperature field of brake during air craft braking[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(9): 42-46. (in Chinese)

作者简介:

薛晶(1982—) 女, 博士研究生。主要研究方向: 飞机刹车装置的温度场计算、机体的数学模型。

Tel: 13571810206

E-mail: xuejing0413@163.com

李玉忍(1962—) 男, 博士, 教授, 硕士生导师。主要研究方向: 电力电子与电力传动、电力系统及其自动化、飞机电源系统检测与控制。

E-mail: Li_yuren@nwpu.edu.cn

(编辑: 蔡斐, 杨冬)