

有限元法分析影响刹车盘温度场的因素

Analysis of Influential Factor on Aircraft Brake Discs by Finite Element Method

西北工业大学自动化学院 薛晶 李玉忍 刘卫国

[摘要] 针对飞机刹车盘瞬态温度场建立了有限元计算仿真模型,重点研究了参数改变对温度场分布的影响,并用 ANSYS 对模型进行了仿真计算。仿真结果表明所建模型符合实际工程情况,此模型对于研制高性能刹车装置具有很好的理论价值。

关键词: 有限元 温度场 飞机刹车

[ABSTRACT] The finite element simulation model of aircraft brake discs transient temperature field is built up. The influence of parameters changing on temperature field distribution is studied specially. The simulation and calculation of model is carried out by ANSYS. The simulation results show that the model is suitable for the real work condition and is valuable for the research of high-performance braking.

Keywords: Finite element method Temperature field Aircraft braking

飞机的刹车装置是保证飞机能够正常起飞、刹停的重要装置。对于一般的刹车装置而言,刹车热库温度在一次刹车后可以从室温上升到 1 000℃ 以上。高温将严重削弱材料的机械性能,导致材料碎裂。严重时,当摩擦材料表层温度高于材料固有热分解温度时,摩擦系数将急剧下降,导致灾难性后果的产生。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。由于刹车系统的非线性、模型的复杂性以及难以确定的边界和初值条件等因素,一般很难得到刹车盘温度场的精确解,所以这个问题常用各种数值解法予以解决。由于差分方法计算精度不高,若要想提高精度,将带来计算量的增加^[1]。有限元方法的加权余量(余数)法在能量法可以应用的场合可以得到和能量法同样的结果,当泛函(如势能)不容易得到的时候特别有用,并且可以直接用于很难应用变分法的问题,也可以直接推导微分方程的有限元方程。因此,有限元方法的加权余量法是刹车盘温度场中常用的求解方法之一。

国外在刹车盘温度场方面的研究比较早,相对较

为成熟。1969 年英国剑桥大学学者 Barber 通过试验观测了列车制动器所产生的热点,并首次解释了有关滑动系统摩擦生热的热弹性不稳定的产生机制^[2-3]。Jang 和 Khonsari^[4] 得出一套普遍适用的方程并研究了由一个有限厚度的导热体和粗糙摩擦表面的绝热体组成的滑动系统。美国学者 Kennedy 和 Ling^[5] 首次对飞机多盘刹车装置的热机械特性进行了数值模拟。在他们的研究中,考虑到了摩擦面在正常压力情况下的热变形和磨损的情况,但他们假定了每一个摩擦盘的热机械特性都关于刹车盘中间平面对称。波兰学者 Zagroudzki 分析了钢摩擦盘湿式离合器工作时的温度和压力^[6],并在分析中提出一个假想,即摩擦表面正常数压力分布与其温度没有任何关系并认为它是均匀的。根据这个假设进行数值计算,出现了刹车盘的热应力低估。韩国学者 Sonn^[7] 对飞机多盘刹车装置的瞬态热机械性能进行了研究。研究表明,作为一个制动摩擦材料,正交异性刹车盘制动器比各向同性的制动器有更好的热特征,因为在摩擦表面具有更大的接触区域。此外,Zagrodzki 和 Truncone^[8] 研究了在短时间内变速运动热点的产生。这两人对基于有限元模型的热接触问题以及试验中经受检验的理论分析都有所介绍。Cho 和 Ahn^[9] 介绍了一种结合快速傅立叶变换和有限元方法(基于 FFT 的有限元法)的混合方案来研究三维汽车盘式刹车装置的瞬态热特性,并根据这些研究结果,对具有优良的力学性能和热学性能的碳/碳复合材料的热性能也进行了探讨。进一步地,Chio 等人^[10] 在防滑刹车条件下对碳/碳复合盘式刹车装置瞬态热分析也进行了探讨,也得到了各摩擦表面的压力、温度和热形变的瞬态演化结果。

国内在刹车温度场的有限元模拟方面研究得相对较少。目前国内在此方面虽然有些研究,但大都把刹车盘的热物性参数简化为各向同性,并没有对影响温度场分布的各参数进行分析。本课题考虑了热物性参数的各向异性,并就具体的模型进行了理论分析,同时分析了影响温度场分布的各参数。

1 飞机刹车盘温度场模型

对于刹车盘的热传导问题,根据热平衡原理可以得到三维各向异性的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 x 、 y 、 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。

在微元体内部选取一次函数近似温度值,主要是当逼近函数由一次升为二次时,解算精度提高不大,但计算量却大大提高了。由于此方程主要针对三维刹车盘的瞬态温度场计算,而四面体单元又能够较好地满足弯曲的边界条件,所以在此采用四面体的网格划分。假设在微元体内温度函数沿各轴线性变化,则 $T = T(x, y, z)$ 可写成^[12]:

$$T = \Phi \mathbf{S}$$

式中, Φ 是用四面体 4 个节点的温度表示的列向量; \mathbf{S} 为形函数,是用 4 面体 4 个节点的坐标值及四面体内任意一点坐标 (x, y, z) 表示的行向量。因此当温度 T 对坐标微分时,只对 \mathbf{S} 起作用;而当温度 T 对时间 t 微分时,只对 Φ 起作用。

计算模型余差方程为:

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

可整理,变形得:

$$R^e = \iiint_V \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \iiint_V \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \iiint_V k_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{S}^T \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \iiint_V \dot{q} dV - \iiint_V k_x \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dV - \iiint_V k_y \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} dV - \iiint_V k_z \frac{\partial \mathbf{S}^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} dV \quad (4)$$

考虑对流边界条件,在刹车过程中,忽略热辐射,对于四面体某一个平面可以满足第 3 类边界条件。以 z 方向为例,由于边界为 $-k_z \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Gamma} = h(T - T_f)$, Γ 为边界曲面。对形如(4)式的积分形式的影响仅为在 z 方向进行的计算。经过最终处理得到形式: $\Phi \dot{\Phi} = \mathbf{X}$ 。

其中, $\mathbf{X} = - \iiint_V \dot{q} dV + \iint_V h \mathbf{S}^T T_f \cos(n, z) ds$, Φ 仍为 4×4 阶常数矩阵。

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 $\mathbf{Z} \dot{\Phi} + \Theta \Phi = \mathbf{X}$, 解其方程组,可获得在各个节点上的温度值。

2 算法仿真及结果分析

以某飞机为例,飞机的刹车速度为 240km/h,刹车压力为 $5.5 \times 10^5 \text{Pa}$,运用以上算法,用 ANSYS9.0 进行仿真研究,其仿真结果如图 1 所示,最高点温度出现在图上 MX 位置。

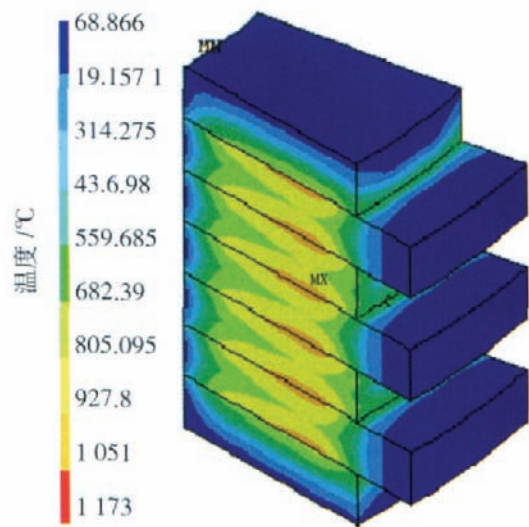


图 1 最高温度出现时刹车盘温度场分布
Fig.1 Temperature field distribution of brake discs during appearance of the highest temperature

由图 1 可以看出,最高温度达 1 173℃,轴向整体趋势为中间温度较高,两端温度低,由于中间散热条件不好,造成最高温度出现在中间刹车盘的摩擦面。由于半径越大,单位摩擦面产生的热量越大,所以径向温度最高点出现在距离外径较近的部位。同时也可以看到,空气的对流换热远不如结构内部热传导对温度场分布的影响大,这基本符合刹车的实际情况。仿真结果表明运用有限元进行刹车盘温度场分析的方法是正确的,所建立的有限元计算模型是合理、可行的,仿真结果较真实地反映了刹车过程的温度场变化。

3 参数变化对温度场的影响

计算刹车盘瞬态温度场,其中一个作用就是对刹

车盘进行热设计。因此,本课题不改变刹车条件,仅针对刹车盘本身的参数来分析影响刹车盘温度场分布的因素,并且会对刹车盘的尺寸有所改动。

3.1 热系数对温度场的影响

把换热系数由原来的 h_{hot} [$W/(m^2 \cdot K)$],降低为 $h_{hot}/2$ 和升高到 $2h_{hot}$ 时,可以分别得到以下的温度分布规律:条件改变刹车盘组件的内部温度、最高温度出现时间和刹车结束时间几乎没有变化,而内外径表面的温度和左右端面的温度则有所改变。随着换热系数的增大,内外径表面和左右端面的温度会降低。这是因为在外围通过换热方式散掉的热量更多一点。总的来说对流换热对温度场的分布影响不大。

3.2 摩擦系数对温度场的影响

将摩擦系数从原来的0.27降低到0.25和增加到0.3时,可以分别得到以下温度分布规律:当摩擦系数减小(或者增大)时,其他条件不变,则摩擦力会减小(或者增大),导致刹车力矩减小(或者增大),刹车时间就会延长(或缩短),从而在相同时间摩擦产生的热量会降低(或者增大),刹车盘的最高温度就会有所减小(或者增大),温度梯度也会降低(或者增大)。

3.3 刹车盘的厚度对温度场的影响

把刹车盘的厚度由原来的 $height$,降低为 $3/4 height$ 和增加到 $3 height/2$ 时,分别可以得到以下温度分布规律:当刹车盘厚度增大(或者减小)时(由于其密度较小,重量的改变相对于飞机而言可以忽略),其他条件不变,则摩擦力不变,同时刹车力矩不变,刹车时间也会不变,由于其他刹车条件不变,刹车产生的热量不变,刹车盘升高相同的温度时,厚盘能吸收的热量就越多(或者越少),由于吸收的热量相同,刹

车盘升高的温度也会降低(或者升高),因此,刹车盘的最高温度会有所降低(或者升高),此时刹车盘的热库温度就会增大(或者减小),所以刹车盘达到最高温度的时间会改变。

改变上述3个条件所得温度场具有以下相同点(如图2所示):

① 三轴向和径向的温度分布曲线的趋势大致是相同的;

② 最高温度值出现点的温度变化曲线的趋势大致相同。

通过对影响温度场分布各个参数的分析可知,对于碳刹车盘组件,要降低整体的温度,可以通过增大

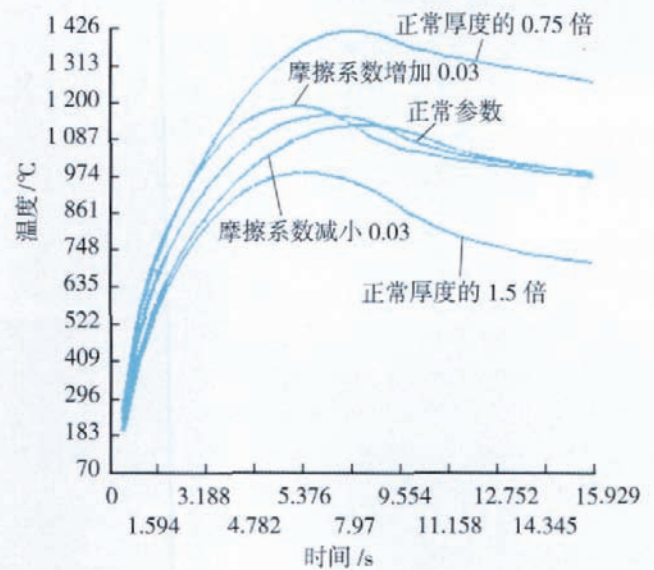


图2 改变各参数时最高点温度变化曲线
Fig.2 Temperature changing curves of the highest point when parameters are changed

表1 各个参数下的刹车状态对比

刹车条件	最高温度 / $^{\circ}C$	最高温度出现的时间 /s	刹车结束时间 /s	刹车结束时的最高温度 / $^{\circ}C$	15.9s时刹车盘的最高温度 / $^{\circ}C$
正常参数	1 173	7.245	9.662	1 103	998.092
0.75倍正常厚度	1 421	8.211	9.662	1 385	1 285
1.5倍正常厚度	999.74	6.279	9.662	880.07	721.052
摩擦系数减小0.03	1 139	8.211	10.922	1 080	998.819
摩擦系数增加0.03	1 203	5.796	8.374	1 129	987.484
0.5倍换热系数	1 176	7.245	9.662	1 106	1 003
2倍换热系数	1 172	7.245	9.662	1 102	997.401

换热系数、减小摩擦系数和增加刹车盘厚度来实现,所以需要制备更好的摩擦材料,使得该材料既有很好的热容能力,又有较小的摩擦系数。但是摩擦系数不能太低,不然会出现刹车力矩不够的问题;至于刹车盘的厚度,应当考虑经济效益和机轮轮毂的容量大小适当增加。

4 结束语

本课题主要分析有限元计算的过程,计算中做了一些忽略次要因素的假设,从计算结果可知,工作过程中刹车热库的温度相当高。应用三维有限元计算模型,可以有效地进行机轮的热库计算和仿真,这给飞机刹车盘和热库的设计提供了重要的理论依据。当改变相关参数时,如热系数、摩擦系数以及刹车盘的厚度,得到的温度场分布与温度场分布相关结论及理论分析是一致的,可以比较真实地模拟刹车盘的温度场,为研制性能更好的刹车盘提供理论指导。

参 考 文 献

[1] 苗恩铭. 温度场计算中差分法的应用. 工具技术, 2005, 8 (39): 19-22.

[2] Barber J R. The influence of thermal expansion on the friction and wear process. *Wear*, 1967, 10(2):155-159.

[3] Barber J R. Thermoelastic instabilities in the sliding of conforming solids. *Proc. R. Soc.* 1969, A312: 381-394.

[4] Jang J Y, Khonsari M M. A generalized thermoelastic instability analysis. *Proc. R. Soc.* 2003, A459: 309-329.

[5] Kennedy F E, Ling F F. A thermal. *ASME J. Lubr. Technol.*, 1974, 97(9): 497-507.

[6] Zagrodzki P. Numerical analysis of temperature fields and thermal stresses in the friction discs of a multidisc wet clutch. *Wear*, 1985, 101(3): 255-271.

[7] Sonn H W. Thermoelastic analysis of carbon/carbon composite brake disks. Daejeon, Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1995.

[8] Zagrodzki P, Truncone S. Generation of hot spots in a wet multidisc clutch during short-term engagement. *Wear*, 2003, 254(5-6): 474-491.

[9] Cho C, Ahn S. Transient thermoelastic analysis of disk brake using the fast fourier transform and finite element method. *J. Therm. Stresses*, 2002, 25(3): 215-243.

[10] Choi J, Han J, Lee I. Transient analysis of thermoelastic contact behaviors in composite multidisc Brakes. *J. Therm. Stresses*, 2004, 27(12): 1 149-1 167.

[11] 夸克工作室. 有限元分析基础篇 ANSYS 与 Mathematica. 北京:清华大学出版社,2002, 2. (责编 玉龙)

(上接第 82 页)

接近人脑,能够通过学习训练,自身适应环境,总结规律,完成某种运算、识别和过程控制。运用这种方法进行国防企业技术创新能力评价时,无需人为地确定评价指标的权重,有效地避免了层次分析法(AHP)、模糊综合评判法和灰色聚类法中人为因素的影响。

本课题根据自组织理论构建了国防企业技术创新评价指标体系,运用 BP 神经网络方法构建仿真模型,并用现实国防企业的各指标进行模型训练,进而对多家企业的评价数据进行仿真运算,所得结果与专家评价结果基本一致。可见,运用 BP 神经网络方法对国防企业技术创新能力进行评价具有一定的可行性、便捷性和准确性。

参 考 文 献

[1] 夏维力,杨海光,张莹. 基于生态位理论的虚拟企业 BP 神经网络评价模型研究. *工业工程*,2007,10 (2): 71-74.

[2] Pinto J. Critical success factors across the project life cycle. *Project Management Journal*, 1998,4 (5): 21-23.

[3] Burgelman R A, Maidique M A, Wheelwright S C. *Strategic Management of Technology and Innovation*. 2nd ed. 北京:机械工业出版社,1998:85-103.

[4] 傅家骥. 技术创新学. 北京:清华大学出版社,1998: 27-34.

[5] Jacobs D, DeMan A P. Clusters industrial policy and firm strategy: a menu approach. *Technology Analysis & Strategic Management*, 1996,10 (8): 425-428.

[6] Lu Luan-Yuan, Chen Chie-Bein, Wang Chun-Hsien. Fuzzy multiattribute analysis for evaluating firm technological innovation capability. *International Journal of Technology Management*, 2007,2 (1): 114-117.

[7] 吴贵生. 技术创新管理. 北京:清华大学出版社,2000: 83-90.

[8] 高建. 中国企业技术创新分析. 北京:清华大学出版社,1997: 102-106.

[9] 李子彪,胡宝民,于新凯. 区域技术创新系统效能测度体系分析. *科学学与科学技术管理*,2005 (1): 48-52.

[10] Prigogine N G. *Self-organization in Non-equilibrium System From Dissipative Structures to Order Through Fluctuation*. New York: Wiley,1977:205-206.

[11] Haken H. *Information and Self-organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Berlin & New York: Springer-Verlag,1988:127-128.

[12] 胡宝明,刘秀新,王丽丽. 基于神经网络的技术创新扩散建模探讨. *科学学与科学技术管理*,2002 (8): 58-60. (责编 良辰)