



飞机刹车副瞬态温度场分析

薛 晶 李玉忍 田广来 著

西北工业大学出版社

飞机刹车副瞬态温度场分析

薛 晶 李玉忍 田广来 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地研究了飞机刹车副瞬态温度场的计算方法,分析了影响温度分布的各种因素。全书分为7章。第1~3章主要介绍飞机刹车装置的发展历程以及计算飞机刹车副温度场需要的热分析基础知识;第4~6章介绍各种条件下飞机刹车温度场计算模型的建立;第7章介绍针对飞机刹车副瞬态温度场进行仿真计算和试验验证的方法。

本书内容丰富,理论联系实际,适合作为高年级本科生和研究生学习飞机刹车装置温度分布的阅读书目,对于实际工作者和对飞机刹车副温度分布感兴趣的人士,也是很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机刹车副瞬态温度场分析/薛晶,李玉忍,田广来著. —西安:西北工业大学出版社,2011.12
ISBN 978-7-5612-3254-5

I. ①飞… II. ①薛…②李…③田 III. ①飞机—制动装置—温度场—有限元分析
IV. ①V227

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 264406 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:www.nwpup.com

印刷者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:9.625

字数:204 千字

版次:2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

定价:27.00 元

前言

飞机起降制动过程主要依靠刹车副将飞机的动能转化为热能,从而使刹车副温度迅速上升。过高的刹车温度可能会改变刹车副材料的热物理参数,影响刹车副热机械性能,使摩擦材料发生热降解,出现热衰退现象,从而危及飞机的制动安全,因此飞机刹车副瞬态温度场研究是当前该领域研究的热点问题之一,日益受到同行学者的关注。

本书主要介绍针对盘式刹车装置研究飞机刹车副三维瞬态温度场的计算方法。该方法是用有限元法建立飞机刹车副三维瞬态温度场计算的数学模型,重点研究影响瞬态温度分布的各因素,给出了模型的推导过程,热生成率的计算,热辐射和对流边界条件的处理,粗糙表面接触模型的建立以及不确定性对温度场的影响。主要内容涉及单元内部热传导余差方程的建立,粗糙表面的描述,接触条件的处理,从而得到瞬态温度场分布计算模型。最后进行了仿真分析,并与惯性台实验数据进行了比较,证实符合工程实际,从而说明本书所建立的刹车副三维瞬态温度场数学模型合理、可行。

一、本书介绍的主要工作内容和创新性研究

(1)针对 C/C 刹车材料热物理参数的各向异性,运用有限元算法中实用性很强的迦辽金法推导各单元热传导方程,采用对弯曲边界适应性较强的四面体结构划分有限元网格,在单元内采用一次函数来近似刹车副温度值,重点研究制动过程刹车副温度场的理论分析与计算。

(2)研究了刹车副热量的输入与输出。以飞机实际制动过程为基础,针对影响热量产生的刹车压力、机轮速度以及机轮滚动半径等参数计算热生成率。遵守 Stefan - Boltzmann 定律的热辐射边界条件,通过引入形状因数转化为净热流,并和热对流边界条件一并作为有限元方程的定解边界,从而获得刹车副三维瞬态温度场分布。

(3)分别采用统计理论和分形理论描述粗糙表面,在形变假设下建立粗糙表面 G - W 弹性接触模型和 Cantor 集塑性接触模型,用于研究刹车副粗糙表面对瞬态温度场的影响。G - W 弹性接触模型以接触分热阻为基础,运用经典 G - W 模型描述粗糙表面形貌,依据统计特性获得表面接触信息,获得粗糙表面的接触模型。而 Cantor 集塑性接触模型,采用分形理论中的 Cantor 集模型描述粗糙表面的形貌,按照体守恒原理建立塑性形变模型,考虑接触层对刹车副材料热物理性能的影响,进行 Cantor 集粗糙表面参数估计,当样本足够大时,模型可以以任意精度收敛于实际参数。针对 Cantor 集排列顺序对温度分布的影响,以 C/C 材料飞机刹车副为例进行了分析计算和仿真,为深入研究瞬态温度场分布以及粗糙表面的热物理效应提供了理论基础。

(4)将模糊随机参数模型引入温度场研究中,使用随机参数模型、 $L-R$ 模糊参数模型和模糊随机参数模型对温度场不确定性进行描述。基于随机参数模型提出解析法和 Neumann 展开 Monte - Carlo 法求解温度响应不确定性的统计特征。解析法以参数的概率分布为基础,积分获得统计特征参数;Neumann 展开 Monte - Carlo 法是在均值温度响应处使用 Neumann 展开,求出不同采样值时刻节点温度响应,根据数理统计求取温度统计特征。针对 $L-R$ 模糊参数模型给出了模糊求解迭代法和区间求解算法。模糊求解迭代法根据模糊系统方程构造迭代格式,直接求得温度响应的模糊表达。区间求解法是通过 λ 水平截集将 $L-R$ 模糊参数转化为区间数,求取温度的变化范围。最后给出模糊随机参数模型温度变化的求解方法,该方法对随机性进行泰勒展开,建立方程求解温度响应变化区间。

(5)以某型机轮为例,建立 C/C 复合材料刹车副三维瞬态温度场仿真模型,并用 ANSYS 对其进行仿真计算,得到刹车副三维瞬态温度场分布图、瞬态热流矢量分布图、关键点温度随时间变化曲线图和径向各点映射温度图。将仿真结果与惯性台制动实验比较,二者基本吻合,证明了本书所建立的刹车副瞬态温度场模型合理、可行,为刹车副工程热设计提供了理论支持。此外,还分析了各参数具有不确定性时,刹车副温度响应变化范围,得到了相应条件下温度场响应,完善了飞机刹车副瞬态温度场研究。

二、本书内容安排

本书主要研究飞机刹车副三维瞬态温度场分布,针对盘式刹车副使用有限元法建立瞬态温度场计算的数学模型,分别针对热传导模型、热生成率、热辐射和热对流边界、粗糙表面接触模型和参数不确定性五个影响瞬态温度分布的因素进行研究。最后将其仿真实现,并与惯性台实验数据进行比较,说明本书提出的刹车副三维瞬态温度场数学模型的可行性和合理性。

本书各章节安排如下:

第 1 章主要介绍刹车装置的结构及发展过程,科研的研究背景,以及目前国内外在刹车副温度场及相关领域的研究现状。

第 2 章给出了热分析的基础理论。

第 3 章介绍了温度场研究的数学基础,为后续研究飞机刹车副温度分布打下理论基础。

第 4 章给出了飞机刹车副温度场三维瞬态计算模型。由于环境的复杂性和特殊性,使用解析法很难求出刹车副温度场的分布情况。这一章采用对弯曲的边界条件适应性较强的四面体划分网格,权衡计算量与精度,在单元内部采用一次函数作为逼近函数,运用有限元法中实用性很强的迦辽金法,针对 C/C 刹车材料热物理参数的各向异性,建立三维热传导方程的计算模型。将遵守 Stefan - Boltzmann 定律的热辐射边界条件,通过引入形状因数转化为净热流,并和热对流边界条件一并作为有限元方程的定解边界条件。根据实际情况,计算影响刹车副温度场的关键因素——热量的产生。考虑以滑移率为控制对象,采用 PBM 加速度偏差控制,结合飞机制动过程机体模型、机轮模型,得到热生成率。此外,还涉及热流密度的计算、总刚度矩阵的计算、计算毕奥数数和傅里叶数以获得合理的时间步长,使用后向欧拉方程进行时间

积分以及使用高斯-勒让德积分方法处理积分计算。在各个单元内部得到了一个以节点的温度值为变量的代数方程组描述系统方程,因此可求得节点在各离散时间点上的温度,以及下一时刻各个节点的温度值,进而获得刹车副整体的温度场分布。

第5章主要针对粗糙摩擦表面对温度场的影响进行研究,分别采用基于统计的G-W模型描述和分形理论的Cantor集模型描述。经典G-W模型描述粗糙表面形貌,在弹性形变的假设下,根据接触分热阻的概念,建立了与常用的点接触模型相联系的粗糙表面接触模型,考虑了此情况下接触形貌对其传热规律的影响,然后以此为基础分析了粗糙表面形貌对温度场的影响。以分形理论为基础研究接触形貌对其传热规律的影响,主要是将Cantor集理论应用到接触形貌分析中,按照体守恒原理建立塑性形变下刹车副粗糙表面接触模型,并考虑接触层与刹车副材料热物理性能的相互作用。随后进行Cantor集粗糙表面参数估计,得出当样本足够大时,模型可以以任意精度收敛于实际参数的结论;研究排列不唯一时,微凸体之间不同的组合对温度分布的影响,以飞机刹车副C/C材料为例,对其进行计算分析而后推广,从仿真计算结果可以看出Cantor集的排列对温度场的影响,应该按照工程实际进行处理,为深入研究各种温度场分布以及各种粗糙表面的热物理效应打下基础。

第6章主要研究不确定性对温度场的影响。由于不确定性广泛存在于工程实际应用的各个方面,刹车副温度场的研究也包含了各种因素的不确定性。当使用随机模型描述各物理参数的不确定性时,可用Neumann展开Monte-Carlo法、解析法,分析温度响应的不确定性;当各物理参数的不确定性用L-R模糊模型表达时,为获得温度场的变化情况,可以使用相应理论构造模糊迭代格式进行求解,或通过 λ 水平截集将模糊数转化为区间数,进行区间求解。本章最后将应用于结构分析的摄动模糊随机有限元方法,应用到温度场分析领域,并使用模糊随机模型同时描述两种不确定性的性质,给出了此条件下温度变化的求解方法。

第7章根据前几章所建立的模型,进行瞬态温度场仿真计算。以某一机型C/C刹车副装置为例,按照给定的刹车条件,通过ANSYS来实现对刹车副三维瞬态温度场的数值计算,得到刹车副温度场分布图、热流矢量分布图、关键点温度随时间变化曲线图和径向各点映射温度图,以揭示该刹车副温度场的分布特征。根据温度场分布,可知刹车副组件一次刹车过程中温度上升最快的点,可得任意时刻整个温度场中温度最高的点,温度变化趋势、热流密度、温度梯度的变化情况,以及其对温度场变化的影响,并用其分析了粗糙接触模型、不确定性因素等对温度场的影响。将仿真结果与惯性台上进行制动实验获得的刹车副点温度相比较,说明该方法所建立的刹车副温度场模型合理、可行,为刹车副温度场分析、计算和研究提供了理论支持。

由于研究工作的需要,参考了国内外大量的相关文献,在此对参考的所有文献的作者表示诚挚的谢意。

由于水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者和同行专家不吝指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 刹车装置结构及发展	1
1.2 研究背景	3
1.3 国内外研究现状	5
第 2 章 热分析基础知识	13
2.1 热物理相关物理量及其单位	13
2.2 热力学第一定律	14
2.3 传热学基本定理	14
2.4 边界条件	17
2.5 热分析相关概念	18
第 3 章 数学知识	19
3.1 随机变量及其数字特征	19
3.2 参数估计	25
3.3 模糊数性质及定理	29
3.4 $L-R$ 型模糊数和区间数的数学描述	39
3.5 模糊随机参数的数学描述	41
第 4 章 刹车副瞬态温度场模型的建立	43
4.1 数值算法研究概况	43
4.2 热传导有限元模型	45
4.3 边界条件有限元化	52
4.4 热生成率的计算	56
4.5 总刚度矩阵的计算	57
4.6 时间步的计算	59
4.7 积分的计算	60

第 5 章 刹车副粗糙表面接触热阻的计算	61
5.1 接触分热阻的引入	61
5.2 G - W 弹性接触模型	63
5.3 Cantor 集塑性接触模型	67
第 6 章 瞬态温度场的不确定性研究	85
6.1 基于 Neumann 展开 Monte - Carlo 法瞬态温度场不确定分析	85
6.2 随机温度场的统计模型	88
6.3 瞬态温度场不确定性的模糊模型	93
6.4 模糊随机有限元模型	98
第 7 章 刹车副瞬态温度场仿真	104
7.1 C/C 刹车副三维瞬态温度场算法仿真	104
7.2 热生成率 MATLAB 仿真	106
7.3 正常制动过程 ANSYS 仿真结果	108
7.4 Cantor 集接触表面刹车副温度场计算结果	114
7.5 G - W 集接触模型刹车副温度场计算结果	120
7.6 不确定性对温度场的影响	125
7.7 计算结果原因分析	131
7.8 实验验证	132
参考文献	135

第1章 绪论

1.1 刹车装置结构及发展

刹车装置是安装在机轮内的制动设备,是保证飞机正常刹停的重要部分,是一种能量转换装置。其主要原理是利用刹车副的相互摩擦产生刹车力矩,将飞机高速着陆滑跑的动能转化为热能,并将此热能储存和消散出去,实现飞机着陆制动。它可以使飞机很快减速,达到缩短滑跑距离的目的,其技术水平直接关系到飞机的刹车效率和使用安全。

早期的飞机只装备机轮而不装备刹车装置,因为当时飞机着陆速度很低,飞机向前运动的阻力足以使飞机在合适的距离内停止运动,机轮仅作为支撑飞机的构件。随着飞机质量和速度增加,开始在飞机上装备刹车系统。刹车系统的引入使飞机着陆距离更短,操纵更安全,而且差动刹车的引入极大地改进了飞机地面运动控制能力。随着对飞机制动要求的提高,机轮刹车装置的尺寸在增加,结构形式也在改进^[1]。

最初制造的刹车装置是弯块式的。两个刹车弯块的外层铆以用石棉增强的有机摩擦材料,制动时用一个活塞同时推动两个刹车弯块,与固定在机轮上的钢圈接触而发生摩擦^[2]。

20 世纪 50 年代,发展为软管式刹车装置。其结构是在软管的外表面布置一圈刹车块,制动时向软管充气,使之膨胀而发生摩擦。与弯块式刹车装置相比,其摩擦面积大大提高,刹车力矩可在更大范围内调整^[2]。

随着飞机着陆速度和刹车能量的增大,20 世纪 60 年代,出现了盘式刹车装置。盘式刹车装置中包含刹车动盘和静盘,两种盘子交替叠装,可以形成相当大的摩擦表面。制动时通过作动机构施加压力,使动、静盘之间发生摩擦。盘式刹车装置具有结构紧凑、刹车效率高、吸收动能大、使用安全、维护方便等优点。盘式刹车装置满足了现代飞机的使用要求,将刹车热库的使用温度提高了 300~400℃,使用寿命提高 1~3 倍。弯块式刹车、软管式刹车和盘式刹车的热库单位质量能载范围见表 1-1^[2]。

表 1-1 3 种刹车装置热库单位质量能载比较

刹车形式	弯块式	软管式	盘式
单位质量能载/(kJ·kg ⁻¹)	100~150	140~200	180~250

随着飞机质量的增加和着陆速度的提高^[3],不但刹车装置结构改进了,作动器也有所改变,历经了气压刹车、液压刹车、电静液刹车和全电刹车。与此同时,刹车控制系统也由电子防滑刹车控制系统变为模拟式电传刹车控制系统,而后成为数字式电传刹车控制系统。刹车效率的提高,对热库的需求也越来越大,刹车材料也经历了从借用地面交通工具刹车材料到研制飞机专用刹车材料的过程。

航空采用的刹车材料,最早受汽车刹车材料的启发和影响。20世纪30年代,刹车材料均采用橡胶块、石棉树脂块、石棉纤维增强树脂基复合材料^[3],并逐步发展了无石棉有机刹车材料和半金属有机刹车材料等新品种。它的缺点是摩擦因数不稳定、热衰减严重、导热差、寿命低。

20世纪50年代中期,开始使用无机刹车材料,主要是烧结粉末合金刹车材料,包括铜基和铁基两类^[1]。最初的粉末冶金摩擦材料以铜基材料为主,但其耐高温性能和基体强度不能满足新型飞机的使用要求。随后粉末冶金研究的重点放在铁基材料和铜铁基材料上,其动摩擦因数一般为0.2~0.3^[4]。试验和使用证明,铁基或铜铁基粉末冶金/钢刹车副比铜基粉末冶金/钢刹车副有更高的耐高温性能和基体强度^[5],其代表机种为F-6,F-7,B-5,B-6等^[3]。

20世纪70年代,碳刹车材料被开发和应用。碳刹车盘被设计为碳质整体结构,具有摩擦功能、热库功能及传递力矩功能。而粉末合金刹车材料只有摩擦功能和热库功能,有机刹车材料则只有摩擦功能^[6]。

在刹车效果方面,碳复合材料(C/C)的优势和潜力最突出,被誉为当今世界刹车材料之冠。其质量轻,磨损小,寿命长,耐高温(-100~2 000℃),高温性能稳定,不变形,比热高,抗热冲击能力强,能载高,热膨胀系数小,热导率高。与粉末冶金刹车材料相比,质量可减轻40%,单位质量能载提高3~4倍,寿命提高3~5倍。碳复合材料集摩擦功能、热库和结构功能于一体,是一种优良的高温结构材料^[7],并且可用同一材料制造动静盘^[4]。由于具有如此突出优点,因而碳复合材料被广泛应用,最先在F-14,F-15,F-16和“幻影”2000等军用机型上采用^[8]。国外还用碳复合材料代替已采用的钢刹车材料,如波音747、波音757、波音767、协和飞机、鹞式飞机等^[2]。碳刹车材料的使用大大提高了飞机刹车系统的安全性、可靠性、维护性和适用性。不同刹车材料的性能对比见表1-2和表1-3^[8]。

表 1-2 不同刹车材料的寿命

刹车材料	每次刹车磨损/mm	寿命(起降次数)
粉末冶金	≤ 0.01	250~500
C/C	≤ 0.0015	2 000~3 000

表 1-3 不同刹车材料的刹车性能

刹车材料	正常着陆吸收能量/($9.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	中断起飞吸收的能量/($9.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
粉末冶金	35 000	71 000
C/C	100 000	250 000

现有的刹车装置及刹车副如图 1-1 和图 1-2 所示。

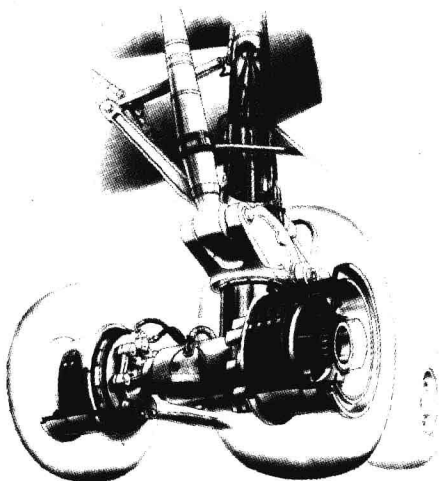


图 1-1 刹车装置图

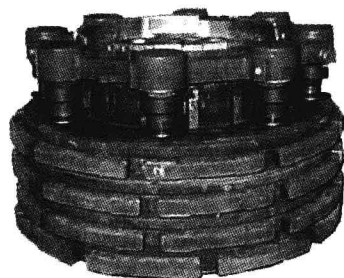


图 1-2 安装后盘式刹车副装置图

1.2 研究背景

目前,飞机正朝着大吨位、高速度的方向发展。载荷和速度不断提高,使得对航空机轮与刹车装置的性能要求也日趋苛刻。同时,作为机载设备的飞机刹车装置对飞机的着陆起着至关重要的作用,关系到飞机的安全返航、持续作战和适应机场的能力。刹车装置的工作原理是快速地将飞机着陆时绝大部分的系统能量(势能、动能)转化为热能,以至于飞机刹车副的热载荷急剧增加。因此,迫切要求人们对飞机刹车副的热性能进行深入研究,提高其热稳定性并改进其热防护设计,以满足现代飞机在各种工况条件下安全制动的需求。制动过程的复杂性、工作环境的多变性以及刹车材料的多样性,使得刹车副三维瞬态温度场研究成为当今刹车研究领域的瓶颈,同时也令其成为当前研究的热点^[9]。

航空机轮和刹车装置通常是按飞机一次起飞着陆进行设计的,因而有一定的使用温度限制。刹车过程对飞机刹车副来说是一个复杂的滑动摩擦问题,刹车副的相互摩擦产生制动,因此刹车装置属于一种能量转换装置,即从能量的观点出发,飞机制动过程是将系统能量(动能

和势能)变为热能储存和消散的过程。这些热量一部分通过热传导使刹车副温度升高,一部分通过对流散发于大气中。大量的理论及试验研究表明:摩擦热及相关的热现象对刹车副的摩擦行为有着非常重要的影响,摩擦表面接触温度及温度梯度受载荷、速度、摩擦因数、材料的热物理特性、耐久性、摩擦部件的设计尺寸和工作环境等因素综合制约^[10]。

刹车副摩擦表面温度的升高会引起刹车材料发生一系列物理、化学变化,使刹车装置的安全性能得不到保证。对于一般的刹车装置而言,刹车副温度在一次制动后可以从室温上升到几百乃至上千摄氏度,高温将严重削弱材料的机械性能。当摩擦材料表层温度高于固有热分解温度时,摩擦因数将急剧下降,黏结剂汽化,制动性能降低,出现热衰退现象。由于刹车副内存在巨大的温度梯度,耦合热性能与机械特性产生巨大的热应力,其破坏作用非常大,极可能产生一些不利状况,如引起接触表面变形、黏着点撕裂和永久变形,甚至损坏热库的外围部件等严重后果^[11]。

飞机在制动过程中,主要依赖刹车副的相互摩擦,虽然宏观上刹车副之间的接触是完全的,但实际上由于材料表面并非绝对光滑,而是存在无数微凸体,因此制动过程中飞机刹车副之间仅部分微凸体相互摩擦产生热。如果某一微凸体承担不适当的载荷,温度比周围表面高,它将膨胀并伸出“平均水平面”,形成“热点”(hot spotting)。局部热点的形成导致制动压力不均匀分布,其承受过大的应力,进一步发展,反过来又造成局部温度的进一步升高和表面温度梯度增大(热弹性不稳定性(ThermoElastic Instability, TEI))。如此反复相互作用,加速了制动器的磨损及疲劳破坏。这不仅严重威胁刹车副,还将影响并损坏热库的外围部件,如机轮、汽缸座、轮胎等,降低其性能和使用寿命。机轮过热将严重削弱材料的机械性能以致碎裂,而轮胎爆破后碎片可能击穿飞机蒙皮、打坏发动机。严重时,当摩擦材料表层温度高于固有热分解温度时,摩擦因数将急剧下降,有可能造成刹车困难或刹不住车。因此,为保证飞机的安全性、外围部件不受热损害,必须对能量的转换、热量的产生与耗散过程、刹车热库及受热单元的温度进行深入的研究和详细分析^[12],温度场的瞬态计算就是通过计算获得刹车副温度的瞬态分布,深入认识制动器制动的全过程,从热分析角度指导机轮和刹车装置设计,在保证制动安全范围内减少热库容量。

在刹车副进行设计的初期,如果通过试验的方法来解决刹车副材料选取、结构优化等问题,需耗费大量的人力、物力和财力,而且试验周期长;再者由于测试手段的限制,很多瞬时参数(如温度、热应力等)测试精度低或者根本无从测量。因此,对刹车副制动过程进行三维瞬态温度场计算具有重大的工程意义^[13]。根据刹车副温度场的热分析结果,可以确定整个刹车装置温度最高及薄弱部位,然后针对热薄弱部分改进设计方案^[14]。除此之外,只要保证温度场的计算精度,较少引入假设,就可以得到测量非常困难的瞬态热应力场,并且计算结果也能达到较高的精度^[15]。通过对瞬态温度场的研究,找出影响刹车装置热学性能的主要因素,也可进一步用于分析刹车副的热疲劳强度,进而可以为整个刹车副组件的热设计提供理论支持。三维瞬态温度场的研究为刹车装置设计和分析以及疲劳分析提供了更好的研究手段。

在对飞机刹车副进行热分析时,要能计算或估算出刹车副温度分布,以便保证刹车装置结

构分析和设计能满足实际要求。但是,由于所研究对象的复杂性,以及认识客观世界水平和手段的限制,以至于在研究过程中往往存在不同程度的误差或不确定性^[16],从而导致所得温度分布也具有不确定性。

不确定性广泛存在于工程分析和设计过程中,不确定性概念在很多研究中具有重要作用^[17]。虽然在多数情况下这些误差或不确定性可能很小,但这些误差或不确定性累计在一起就可能对系统的分析和设计产生大的、意想不到的偏差或不可预知性,尤其是在比较复杂的结构中就更为明显^[16],不能简单地进行忽略。这些不确定性使刚度矩阵、载荷矩阵成为不确定参数的函数,使温度场也具有不确定性。正确估计不确定参数对刹车副温度分布的影响,对于机轮刹车装置的工程化设计具有十分重要的意义^[18]。

传统的工程分析和设计,通常针对确定性模型进行研究。即在计算分析中所涉及的一些相关参数都是确定量,不承认或完全忽略了系统中的不确定性,其实质是利用某种意义上的均值参数系统来代替具有不确定性的系统。研究表明,只有当本原系统的不确定性较小时,这种处理方法能给出较为符合实际的结果。可见,在传统分析设计中,通过采用较大安全系数的方法来避免不确定性的影响,已经很难满足现代分析设计的要求。因此,在实际分析设计中考虑不确定性因素对系统的影响,具有重要的工程应用价值和理论意义^[16]。

为获取飞机刹车副的热性能数据,人们必须进行不断的研究、分析,融合新理论、新方法、新技术,提高刹车副热稳定性并改进其热防护设计,以满足现代飞机在各种工况条件下安全制动的需求。刹车副三维瞬态温度场研究是重要的航空支撑技术,是发展现代航空制动技术必须先行的基础,对缩短刹车副的研制周期,提高刹车副性能,降低研制费用具有非常重要的意义。

随着有限元软件的发展,瞬态温度场的计算已经成为可能。各先进工业国家对飞机刹车装置和研制开发均投入了大量的人力、财力和物力,国外对热应力和热温度场的分析已经和刹车装置与机轮作为一个整体用专用的有限元分析软件进行分析,计算出刹车副以及机轮各部位的温度分布来指导具体的结构设计和热设计。相比之下,国内在热防护研究方面还存在较大的差距。

面对这样的背景,对刹车副三维瞬态温度场进行研究,有非常重要的意义。通过对瞬态温度场的研究,找出影响刹车装置热学性能的主要因素,为整个刹车装置的热设计提供支持,为航空工业发展奠定坚实基础。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 温度场计算研究现状

前人关于刹车装置温度场的研究多是关于机车的盘式制动器,相对来说,针对飞机刹车副瞬态热特性的研究工作比较少。研究方向主要涉及以下几个方面:①温度场计算模型及求解

方式;②各参数的取得;③热生成模型和分配机制;④表面形貌接触模型和磨损对温度场的影响,以及所引起热弹性不稳定问题;⑤热机械耦合问题。

1. 温度场计算模型及求解方式

在刹车副温度场的研究初始,多将刹车副简化成二维模型,建立二维轴对称热传导方程,认为温度在角度方向没有变化。这样得到的计算结果只能对整个温度场有一个大致粗略的描述,因为在实际工况中,刹车副在三维空间的热传递方式以及刹车副复杂的几何结构都对其温度场有较大影响。早期刹车盘大多由粉末冶金、单金属及铸铁材料制成(简称为钢刹车盘)。对于钢、铝材料,各向异性表现不明显,导热系数、比热容随温度变化范围不大,故之前所作的三维模型研究多将热物性参数做常数处理,建立各向同性的旋度方程模型以求解温度分布。随着材料技术的研究发展,出现了碳刹车盘,此时需深入探讨碳刹车副温度场分布^[19-21],需考虑材料的各向异性建立热传导方程。韩国学者 Sonn^[22]对刹车副瞬态热机械性能进行了研究。研究表明,作为制动摩擦材料,正交异性摩擦材料比各向同性的有更好的热特征,因为其在摩擦表面具有更大的接触区域。

Yevtushenko^[23]用 Hankel 积分变换及 Laplace 变换求解了二维轴对称方程,假设减速率和摩擦热分配系数是常数,得出结论:最高温度在圆盘的中心;最高温度随着制动时间的增加而减小;最高温度取决于总动能和最大压力到达时间。Floquet^[24]用 FFT-FEM 方法求解了三维瞬态热传导方程,认为二维轴对称热传导方程和实验有比较大的误差。Cho 和 Ahn^[25]也采用了 FFT-FEM 方法研究三维汽车盘式制动器的瞬态热特性,为研究滑动系统瞬态问题打下了基础。AL-shabibi 和 Barber^[26]发展了一种基于模态的分析方法。

2. 各参数的取得

简正柱^[27-28]为获取刹车副制动过程中温度分布情况,重点讨论了边界条件和各相关参数的确定方法。李涛、吴瑞祥等^[29]针对飞机刹车装置的循环对称结构,合理考虑各种相关参数,使用 MSC. Marc 软件计算刹车装置三维瞬态温度场。杨志斌^[30]介绍了“飞机结构三维温度场分析”程序及参数的应用。

3. 热生成模型和分配机制

关于摩擦副之间的热分配问题,很多学者作了大量的研究。Carslaw^[31]最早提出忽略两个摩擦副之间的热交换,用热分配系数来分配热流的方法,为广大研究者所接受。Kennedy^[32]给出的热分配系数不但考虑了材料的影响,还分析了接触状况以及温度的影响。虽然其考虑了温度的影响,但假设温度是已知的,而实际上,温度在确定分配系数前是未知的。在这种情况下得出的热分配系数有很大误差。林谢昭^[33]通过有限元仿真,探讨制动过程中摩擦热流强度的变化给温度场带来的影响,得出结论:制动初始动能和摩擦力增长过程是影响盘表面温度场的关键因素。陈辉^[34]建立了在不同滑动速度下干接触体的滑动接触模型,利用快速傅里叶变换,求解拉普拉斯热传导方程,获得光滑及粗糙表面接触时,瞬时温升以及接触体内部各离散点的温度分布。Brian^[35]假定接触区为矩形,计算了在多点滑动接触情况下,粗糙度形状和分布对温度上升的影响。Bos^[36]运用多重网格法对不同相对滑动速度光滑接触体表

面温度进行了计算分析。Gao^[37]利用FFT方法提高了计算闪温的速度。Tian^[38-39]研究了在不同形状热源以及不同滑动速度下,表面或粗糙峰接触时温度上升情况,并给出了最大闪温和平均闪温的拟合公式。近年来,Jen^[40]通过建立分形模型求解了界面温度。Schneider^[41]通过实验研究了界面温度对磨损的影响。陈学文^[42]针对磨削温度场根据流体动压润滑理论和边界层理论,建立了磨削区冷却液边界层对流换热系数微分方程组的完整形式,并解得磨削区冷却液的对流换热系数,还建立了磨削区内热量分配比例模型,联合对流换热系数模型,获得了温度场最大温度的求解公式。王营^[43]从汽车制动过程的能量转换及摩擦生热机理出发,建立了制动器的热流密度分配模型,并结合有限元法对盘式制动器摩擦片的温度场进行了计算。王志刚^[44]从能量传递的角度分析了盘式制动器制动过程能量的转换,摩擦热量的产生机理以及在制动器中的传递与耗散。马保吉^[45]应用局部热流和整体热流的概念,将摩擦制动器接触界面的温升分成局部表面温升和名义表面温升,并且将圣维南原理应用于名义表面温升的计算中,从而建立了摩擦制动器接触界面最高温度的计算模型。

4. 接触问题

1969年,英国剑桥大学学者Barber通过实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性的产生机制^[46-47]。1973年,美国西北大学学者Burton等人介绍了基于摄动法的分析模型,以探讨两个滑动半平面接触的稳定性^[48]。Lee和Barber^[49]扩展Burton模型到两个有限厚度半平面滑动情况。结果表明,该有限层厚度影响热弹性接触稳定性。Lee和Barber的模型也被相当广泛运用于刹车和离合器工业的热稳定性分析^[50-52]。最近,使用有限元方法^[53-54]确定伯顿摄动法滑模系统的稳定边界时,提出了一个特征值问题。然而,其假设滑动速度是常数,而实际滑动系统,如刹车和离合器,都经历了长时期的变速滑动过程。考虑实际情况的解决方法是用数值方法模拟耦合瞬态热接触问题的特性。Jang和Khonsari^[55]研究了由一个有限厚度导热体和粗糙摩擦表面绝热体组成的滑动系统,得出一套普遍适用的方程。Chichinadze^[56]认为,表面温度等于与均匀热流相关的平均温度和局部热流产生的闪点温度之和。对于平均温度,由于是均匀热流引起的,一般采用一维热传导方程求解;对于闪点温度的模型就比较复杂了,假设一刚性绝热体在半无限平面上滑动求解。

最近,Zagrodzki^[57]采用伽辽金算法针对静止层和滑动层的二维热弹性接触问题的摩擦热不稳定性实施了瞬态有限元模拟。此外,Zagrodzki和Truncone^[58]研究了在短变速时间内热点的产生,还介绍了两种基于有限元模型的热接触问题,以及实验中经受测试的理论分析。韩国学者Choi^[59]对盘式制动器轴对称耦合热弹性接触问题进行了模拟,发展了有限元模型,并研究在拖曳制动过程中刹车副的热弹性现象,针对在反复制动情况下的刹车副热弹性特性进行了数值模拟^[60]。此外,最近他们还研究了热弹性不稳定现象,并且为了方便盘式制动系统的概念设计,研究了材料性能对最高温度和摩擦表面接触率的影响。

5. 热机械耦合问题

美国学者Kennedy和Ling^[61]对飞机盘式刹车副的热机械特性进行了数值模拟,研究了

当摩擦面承担正常刹车压力时的热变形和磨损,但假定每一个刹车副的热机械特性都关于刹车盘的中间平面对称。波兰学者 Zagroudski^[62] 分析了钢摩擦盘湿式离合器工作时的温度和压力,在分析中提出一个假想,摩擦表面正常的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,出现了对刹车盘的热应力低估。为了解决这个问题,Zagrodski^[63] 进行轴对称刹车副的瞬态热分析时不作此假设。结果表明,热变形对刹车副摩擦表面正常压力分布有很大的影响。Shuangmei Zhao 完成了在二维情况下的瞬态温度位移耦合分析^[11],得到了摩擦表面的接触压力和温度分布。李衡^[64] 按照制动盘与摩擦片的实际几何尺寸,建立了具有速度可变效应三维瞬态结构应力有限元模型,利用非线性有限元方法,较真实地模拟了制动器的制动过程。

其实大部分学者同时研究了上述问题中的两个或几个,很难将其准确分类。因为只有深入研究热机械耦合问题,才能更好地理解热弹性不稳定性,这就必然需要通过热分配机制分配热量,而这些都离不开模型的建立以及参数的选取,所以温度场的研究是一个整体性研究,各部分密不可分。

针对飞机盘式刹车装置以及具有优良力学性能和热学性能的 C/C 复合材料,Choi 等人^[65] 在防滑刹车条件下,对刹车副瞬态热分析进行了探讨,得到了在二维条件下各摩擦表面的压力、温度和热变形的计算结果。尽管如此,关于 C/C 飞机刹车副三维瞬态温度场的研究依然非常有限。

1.3.2 接触热阻研究现状

在过去二三十年中,接触热阻一直是传热学中一个活跃问题。虽然宏观上刹车副之间的接触是完全的,但是任何一个表面,无论其光滑程度如何,在微观上都是粗糙的,真正的光滑表面实际上是不存在的。由于粗糙表面间不完全接触,热流通过时会产生收缩现象,产生接触热阻。为此,表面形貌的观测与描述是刹车副温度场研究中的一个重要因素^[66]。

描述表面形貌的模型有 G - W (Greenwood - Williamson) 模型、BGT (Bush Gibson Thomas) 模型、BGK (Bush Gibson Keogh) 模型和 ASPRSIM 模型。表面微凸体形变模型主要有 Bush, Gibson 等提出的粗糙表面的弹性接触模型, Sridhar, Yovanovich 等提出的弹塑性接触模型和 Nayak 等提出的主要适用于塑性粗糙表面静接触的粗糙表面随机过程模型^[66]。

接触热阻是由于两接触面微观上的凹凸不平使得接触不完全而产生的热阻。接触热阻的大小与接触表面的材料、连接方式、表面状况及接触压力大小等多种因素有关^[67]。

1. 接触热阻的理论研究

如果把离散的局部接触面积称为点,接触热阻理论的一般方法是:研究单接触点的接触热阻算法,确定接触点数量,完成对多接触点接触热阻的计算。

(1) 单点接触理论。对单接触点接触热阻的计算,大多将接触点简化为圆台、圆柱及圆盘三种计算模型。黄志华^[68-69] 建立静态接触单热流通道上接触分热阻的截锥体模型和热流通道上的温度分布方程,研究了接触热阻中的三维传热现象。沈军^[70] 在二维情况下分别采用截

锥体、圆弧形和三角形模型来模拟静止状态物体接触面的接触热阻。赵宏林^[71]总结了前人在结合面接触热阻特性理论计算模型,提出了具有收缩性质的圆锥综合接触模型。

(2)多点接触理论。多点接触理论是将接触范围内的接触热导视为单点接触热导之和,依赖于粗糙表面的描述方法:经典的统计学规律、分形理论等。

张涛^[66]主要分析了接触热阻研究中多种不同理论模型及主要优缺点,其中涉及表面形貌模型和形变模型。钟明^[72]在静止状态下取服从高斯分布的随机数作为粗糙峰高度,用蒙特卡罗随机模拟法计算了固体接触界面间的接触热阻。龚钊^[73]分析了机械加工表面的粗糙度曲线形貌参数的统计特征。基于单点接触热导理论模型和弹性形变理论模型,建立了在二维静止情况下总接触热阻与总压力之间的一般关系。赵剑锋^[74]在粗糙度曲线统计特征分析的基础上,研究不同接触峰的评定标准对接触热阻的影响。李鹏^[75]根据 Hertz 理论建立了一个在静止状态下弹性接触热阻的数值求解方法。应济^[76]分析了两固体粗糙表面接触热阻的机理,依据统计数学假设高度服从 Gauss 分布,用接触力学的方法推导出粗糙表面接触热阻的理论计算公式,并用实验进行了验证。许敏^[77]应用分形数学和传统热传导理论,基于实际接触面积和名义接触面积建立了接触热阻的分形解析模型。赵兰萍^[78]在二维 M-T 接触导热分形模型的基础上,考虑了各接触点的收缩热阻修正了 M-T 模型,并在此基础上分析了表面分形参数、界面温度及材料物性等因素与接触热阻的关系。徐瑞萍^[79]采用 Cantor 集分形理论对固体粗糙表面的拓扑形貌进行了描述,基于固体弹塑性理论解决了在塑性守恒条件下的表面粗糙度在法向载荷作用下的变形问题,推导出基于分形理论的递归接触热阻网络模型。刘智^[80]基于三维分形理论建立了粗糙表面接触热传导模型,并对其摩擦滑动界面的传热规律进行了研究。基于三维分形布朗曲面理论,将工程粗糙表面摩擦生热问题简化为具有分形特性粗糙表面的实体和具有光滑表面的实体作相对滑动摩擦生热的问题。考虑了两个物体摩擦接触的热弹性耦合问题,并利用热-结构顺序耦合建立了瞬态有限元计算模型,以制动器摩擦副材料为例,对温度场/压力场/应力场的耦合进行了计算。高友遐^[81]基于 G-W 接触模型,将静止情况下两个粗糙表面弹性接触简化为有规则排列的长方体微凸体的粗糙表面与光滑表面接触,利用热-结构顺序耦合建立了三维瞬态有限元计算模型。

此外,还有其他研究方法:孔祥安^[82]用接触力学计算方法中的缩聚技术,通过能量传递建立了接触表面温度和热流边界条件,得到了热接触边界有限元方程组。应济^[83]提出了平均换热系数以表征热量在传递过程中的散失或吸收,构筑了一个新的二次函数,利用已有的实验数据,估计了接触热阻的大小。韩玉阁^[84]对传热规律进行了研究,利用数值计算方法归纳出具有接触热阻和摩擦生热的接触边界条件,利用接触分热阻的概念,完善了接触界面传热边界条件的描述。张洪武^[85]发展了基于界面热阻本构模型的热接触耦合问题有限元分析的新算法。在接触面传热本构模型方面,采取压力相关热接触模型进行接触面传热模拟,构造适用于热阻模型分析的接触非线性参数变分原理。

2. 接触热阻的实验研究

湛利华^[86]给出了影响界面接触热阻因素的实验研究。顾慰兰^[87]设计完成了一套界面接