

基于SPH方法鸟撞航空发动机进气风扇的数值分析

Numerical Analysis Based on the SPH for Bird Strike Aeroengine Intake Fan

杨瑞进 姜楠 池剑虹 孟宪国 邹宜勇 / 中航工业昌河飞机工业集团有限责任公司

摘要:目前鸟撞问题的数值分析方法主要以拉格朗日方法和欧拉方法为主。拉格朗日方法在计算时会遇到网格畸变和缠绕等问题,使计算无法进行。欧拉方法在确定模型的自由表面、变形边界和运动交界面时精确性较差。针对以上不足,本文创新性地应用一种无网格的SPH方法模拟鸟撞航空发动机进气风扇,旨在改善传统方法中网格畸形和精度不足的问题,并通过模拟数据和实验数据的对比,验证SPH方法对鸟撞问题分析的准确性。

关键词: 鸟撞; 航空发动机; SPH方法; 数值分析; 有限元

Keywords: bird strike; aeroengine; SPH method; numerical analysis; finite element

0 引言

随着越来越多的飞机投入商用和军用,鸟撞事件也随之增多。研究报告显示,仅在美国,鸟类及其他野生动物撞机事件造成的经济损失年均超过6亿美元,自1988年以来此类事故已造成至少219人死亡^[1]。为了避免鸟撞事故的发生,降低鸟撞事故带来的损

失,许多国家都开展了鸟撞飞机的研究工作。各国对飞机抗鸟撞问题的研究主要包括制定合理的设计规范、鸟撞试验研究、结构鸟撞数值分析、结构材料抗撞击研究、设计结构对抗鸟撞能力的影响研究、提高结构抗鸟撞能力综合途径的研究、评价结构抗鸟撞能力方法的研究等^[2]。航空发动机进

气风扇是飞机受鸟撞击次数最多的部位之一,所以对发动机进气风扇进行抗鸟撞方面的研究,对增强遭受鸟体撞击的发动机安全性、提高飞机的飞行安全、降低航空公司的财产损失、挽救旅客的生命等方面都具有重要的现实意义。

早期的鸟撞研究主要通过实验进

递误差等方法,将两者结合使用,降低齿轮箱体的振动响应。

AST

参考文献

[1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册(第12册)[M]. 北京:航空工业出版社.

[2] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M].北京:航空工业出版社,2005.

[3] Li Runfang, Yang Chengyun, Lin Tengjiao. Finite element simulation of the

dynamical behavior of a speed-increase gearbox[J].Journal of Materials Processing Technology,2004,150:170-174.

[4] 王建军,李润方. 齿轮系统参数振动问题研究综述[J].振动与冲击,1997(4):69-73.

[5] 王玉新,柳杨,王仪明. 考虑啮合时变刚度和传递误差的齿轮振动分析[J].机械传动,2002,26(1):5-8.

[6] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M].北京:科学出版社,1997.

[7] 王新敏. ANSYS工程结构数值

分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[8] SMT公司. Masta培训手册[Z].北京:SMT公司,2007.

[9] 薛延华. 齿轮箱箱体结构对其振动模态的影响研究[J].机械传动,2008,32(6):107-108.

作者简介

李锦花,硕士,工程师,主要研究方向是航空发动机动力传输技术。

行,但这类实验成本很高,并对经验的依赖性较强。随着计算机技术及有限元数值计算理论的发展,越来越多地采用数值分析方法进行鸟撞研究^[3]。目前,鸟撞问题的数值分析方法主要以拉格朗日方法和欧拉方法为主。拉格朗日方法的优点是可将单元质量分配到单元节点,保证了质量守恒,但是在计算时会遇到网格畸变和缠绕等问题,使计算无法进行下去,通常的解决方法是将严重畸变的单元体删除,但是却降低了计算精度。欧拉方法虽然可以避免网格缠绕,但是确定模型的自由表面、变形边界和运动交界面的精确性不足^[4]。为了避免以上不足,本文创新性地应用一种无网格的SPH方法模拟鸟撞航空发动机进气风扇,并将模拟数据与实验数据进行对比,验证了SPH方法对鸟撞问题分析的准确性。

1 SPH方法概述

SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)方法的全称为“光滑粒子流体动力学”,是Lucy和Gingold等人于1977年提出的一种无网格化拉格朗日算法^[5]。SPH方法的基本思想是把材料看成一组流体粒子的集合,每个粒子具有自己的质量、速度和能量特征,并描述为一个和流体性质相关的插值点,用规则的内插函数计算所有粒子的场函数,近似描述整个问题的场分布。

SPH方法基本理论是:设函数 $f(x)$,对粒子 i 所在位置 x_i 进行泰勒展开,引入核函数 $W_{ij}=W(|x_j-x_i|,h)$, h 为光滑长度,此时忽略二阶以上小量,在解域中积分后便可得到函数 $f(x)$ 一阶偏导数的核估计,写成求和形式为:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N m_j (f_j - f_i) W_{ij\alpha\beta} / \rho_j \\ & = \frac{\partial f}{\partial x_i^\alpha} \sum_{j=1}^N m_j (x_j^\alpha - x_i^\alpha) W_{ij\alpha\beta} / \rho_j \quad (1) \end{aligned}$$

采用(1)式对守恒方程中的空间导数项进行离散,便得到直角坐标下守恒方程组的SPH离散格式^[6]。

2 航空发动机风扇的有限元建模

本文的实验数据来自鸟撞航空发动机风扇实验,完全按照实体实验风扇进行建模。实验方法是通过空气炮发射鸟弹撞击安装在试验台上的风扇。鸟弹用幼鸡代替,重140g。空气炮是发射鸟弹的动力源,它由高压气罐、发射管、压力阀和弹托分离器等装置构成。鸟弹预先放在发射管里,待高压气罐压力达到预定值后开启压力阀,高压气体突然释放,推动鸟弹射向固定在实验台架上的风扇,实验测得鸟体撞击速度为187m/s。风扇为某型全尺寸风扇,材料为TC4钛合金。本次鸟撞试验中,主要采集的试验数据为应力、应变及位移。由于鸟撞的时间达到了毫秒级,所以实验数据的采集所使用的是高频设备,实验使用应力测量仪、磁感应位移传感器、超动态应变仪、PVDF压电片力传感器、信号前置放大器和阻抗变换器,使用瞬态数字记录仪存储各种测试信号。瞬态记录仪与计算机连接,进行信号的显示及处理。

本文使用的有限元分析软件为ANSYS10.0/LS-DYNA。SPH方法的运算通过LS-DYNA后处理器LS-PREPOST进行。叶片的尺寸、厚度、角度等完全按照实验的实型风扇进行建模,风扇由18片叶片组成,材料定义为钛合金,其杨氏模量105GPa,密度4429kg/m³,泊松比0.23,屈服应力1003MPa,塑性硬化模量1150MPa。叶片采用SOLID185单元,每片叶片的单元数为758个,风扇的转速为14000r/min。毂的材料模型定义与风扇相同,但采

用SHELL181壳单元,对单元的壳厚实常数进行了隐式定义。鸟体材料模型选用LS-DYNA中的*MAT_NULL,鸟体为椭球体,长短轴直径分别是0.1m和0.05m,密度取950 kg/m³,采用SOLID185单元,鸟体划分为432个体单元。鸟体状态方程(EOS)选用EOS_GRUNEIS-EN,接触为CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE接触,撞击位置与实验位置相同。建模后,其有限元模型如图1所示。

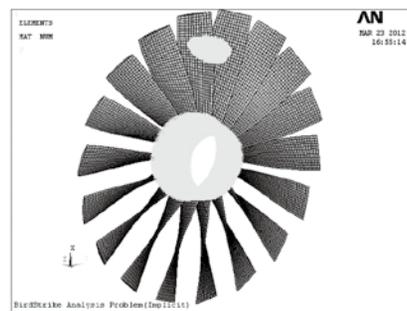


图1 发动机风扇与鸟体的有限元模型

3 鸟撞航空发动机风扇的数值分析

3.1 应力分析

鸟撞的速度为187m/s,在此速度下的鸟体近似于流体,同时叶片以14000 r/min的速度旋转,鸟体与不同的叶片发生碰撞,并产生巨大的应力,此时应力值远远大于鸟体的屈服应力,致使鸟体发生流变。图2给出了鸟体撞击风扇某4个时刻上的应力云图,可以清晰地看到鸟体飞溅的整个过程。图3为实验与模拟得到的冲击方向上的应力—时程曲线对比。可以看出,模拟结果和实验结果得到的应力值基本吻合。

3.2 应变分析

叶片在遭受鸟体撞击后会在短时间内产生应力值很高的冲击峰,此时的应力值超过了叶片的屈服强度,使叶片产生局部塑性变形。图4给出了冲击

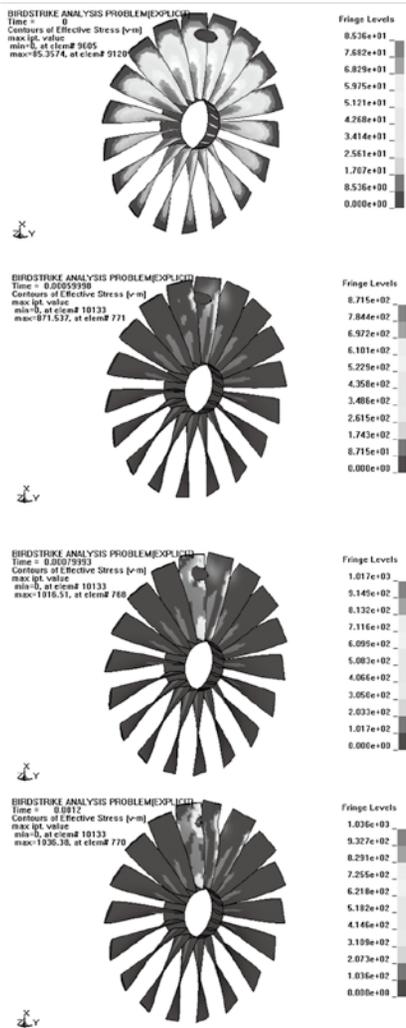


图2 鸟撞航空发动机风扇某4个时刻的应力云图

方向上实验与模拟的应变—时程曲线的对比,可以看出,两者产生最大峰值的时间只有约1ms的误差。

3.3 位移分析

当鸟体高速撞击风扇时,巨大的冲击力会在叶片的根部产生很大的弯矩,容易引起整片叶片折断。本文对比了实验和模拟得到的冲击方向上风扇的位移—时程曲线。如图5所示,两者曲线吻合程度较好。

4 结束语

本文创新性地运用SPH方法对

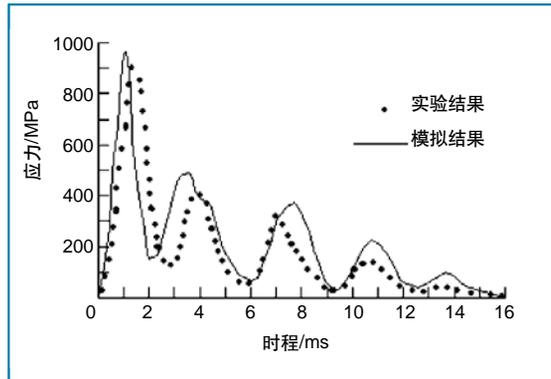


图3 应力—时程曲线对比

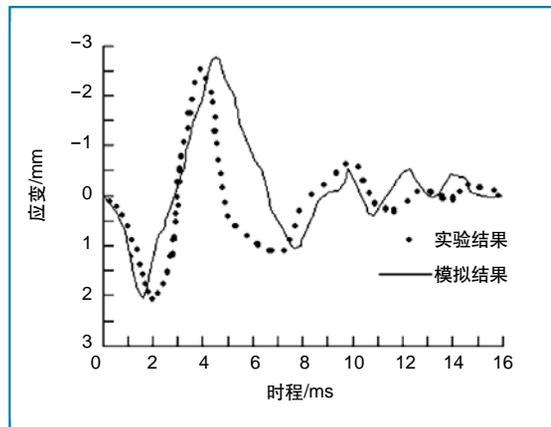


图4 应变—时程曲线对比

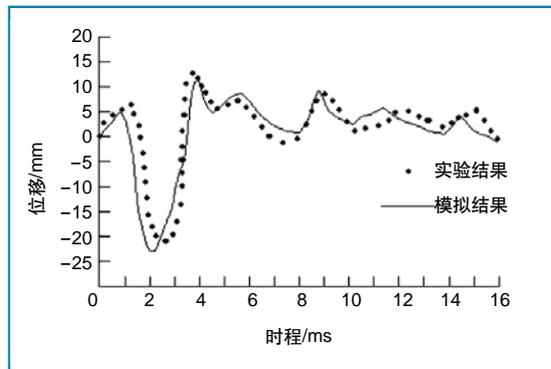


图5 位移—时程曲线对比

鸟撞航空发动机风扇进行了有限元分析,通过观察鸟体撞击风扇某4个时刻冲击方向上的应力云图,可以准确和直观地观察鸟体撞击风扇产生的各种应力以及变形,更加清楚了解鸟撞对航空发动机的危害,而且通过对比实验和模拟的应力、应变、位移时程曲

线,验证了使用SPH方法对航空发动机鸟撞问题分析的准确性。

参考文献

[1] 孟永强. 基于ABAQUS的风挡鸟撞有限元分析及试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

[2] 杨兵伟. 基于优化的鸟撞有限元模型修正技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[3] 朱书华, 童明波. 鸟体形状对飞机风挡鸟撞动响应的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(4): 551-555.

[4] 张志春, 强洪夫, 高巍然. 一种光滑粒子流体动力学—有限元法转换算法及其在冲击动力学中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 105-110.

[5] 杨波, 欧阳洁. 基于SPH方法的瞬态粘弹性流体的数值模拟[J]. 计算物理, 2010, 27(5): 679-684.

[6] 卞梁, 王肖钧, 章杰, 赵凯. 高速碰撞数值计算中的SPH分区算法[J]. 计算物理, 2011, 28(2): 207-212.

作者简介

杨瑞进, 工程师, 主要研究方向为计算机辅助工程。