

文章编号:1674-8190(2019)S1-050-05

鸟撞风挡问题分析方法研究

宋波涛,苗志桃,池福俭

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司,西安 710089)

摘要: 因鸟撞问题引起的飞机结构破损等损失问题需要解决,采用对比分析的方法,对目前鸟撞风挡问题的地面试验法、工程算法及有限元仿真法进行详细介绍,比较不同方法的适用条件、范围及其优劣。选取某飞机风挡层合玻璃作为研究对象,采用有限元仿真法,建立风挡鸟撞模型,利用任意拉格朗日欧拉耦合法(ALE)完成相关分析,结果得到鸟撞风挡的变形及其速度、加速度等参数,并总结鸟撞风挡问题的三种分析方法的优劣性,为飞机风挡设计提供参考。

关键词: 风挡;鸟撞;地面试验法;任意拉格朗日欧拉耦合法

中图分类号: v215.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.S1.010

Study on Bird Strike Analysis Method for Aircraft Windshield

Song Botao, Miao Zhitao, Chi Fujian

(AVIC Xi'an Aircraft Industry(Group) Company Ltd, Xi'an 710089, China)

Abstract: To avoid the disasters caused by the bird strike problem, the method of comparative analysis is adopted. The ground test, engineering calculation and finite element simulation of the current method for bird strike are introduced in detail. A certain aircraft windshield laminated glass is selected as the research object, the bird strike windshield model by FEM is established, using the arbitrary Lagrange-Euler coupling(ALE) method for the simulation. Then the windshield's displacement, velocity, acceleration and other parameters are obtained. In the end, advantages and disadvantages of the three methods for bird strike is analyzed. The analysis results can be provided as reference for windshield design.

Key words: windshield; bird strike; ground test; arbitrary Lagrange-Euler coupling(ALE) method

0 引言

由于飞机飞行速度较高,与飞鸟撞击将产生巨大能量,引起飞机结构破损,严重时造成飞机坠毁,因此飞机设计过程中的抗鸟撞设计及分析非常重要。为提高飞机抗鸟撞能力,世界各国的飞机设计师进行了各种努力与尝试,也成立相应的组织机构,进行鸟撞问题研究,其中比较出名的有美国空

军的“鸟撞危险工作组”及欧洲的“鸟撞协会”,通过对各种鸟撞事故的统计分析发现,飞机风挡鸟撞最为频发^[1-8]。

飞机风挡一般为玻璃透明件,为飞行员提供良好视野并保证结构安全及气密良好,飞鸟撞击风挡后,可能造成飞行员视界受限,影响安全飞行及着陆,严重时可能导致机舱失压、飞行员受伤等。因此研究飞机风挡抗鸟撞意义重大,通过抗鸟撞设计,增强飞机安全性,减少鸟撞造成的损失。

收稿日期:2018-12-26; 修回日期:2019-03-12

通信作者:宋波涛,sobotao@163.com

引用格式:宋波涛,苗志桃,池福俭. 鸟撞风挡问题分析方法研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(增刊 1): 50-54.

Song Botao, Miao Zhitao, Chi Fujian. Study on Bird Strike Analysis Method for Aircraft Windshield[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(S1): 50-54. (in Chinese)

本文针对鸟撞风挡问题详细介绍了三种分析方法:地面试验法、工程计算法和有限元仿真法,并对三种方法进行了对比分析,对于飞机风挡设计具有一定参考性。

1 鸟撞问题研究方法

鸟撞时的相对撞击速度高达 $70 \sim 250 \text{ m/s}$ ^[9],作用时间 $3 \sim 4 \text{ ms}$,属于典型的瞬时冲击问题,分析难点主要有:(1) 鸟体材料非线性,很难准确定义本构关系;(2) 涉及大变形几何非线性;(3) 撞击载荷与结构动态响应之间有耦合现象。鉴于以上情况,各国均投入巨大人力、物力对鸟撞问题进行研究^[10-12],目前,的研究方法主要有以下三种:

(1) 试验法。

通过地面空气炮根据设计速度发射鸟弹撞击试验件,验证试验件的抗鸟撞能力并收集撞击过程中各种参数。

(2) 工程法。

通过大量试验数据的积累,拟合出结构鸟撞计算经验公式,该方法可以快速估算出飞机某部位结构的抗鸟撞冲击性能,但准确性较差。

(3) 有限元法。

通过有限元软件,建立飞机鸟撞模型,定义材料本构关系及撞击条件,通过数值迭代计算结构响应,可以较好的模拟飞机鸟撞全过程。

1.1 试验法

试验法是验证风挡抗鸟撞能力最准确有效的方法。地面试验装置主要包含发射系统及数据测量系统^[13-14]。该试验装置如图 1 所示。



图 1 地面鸟撞试验装置

鸟撞试验时,将试验件放置在发射炮管前,通过激光定位确定鸟撞部位,发射系统通过高压气体将模拟鸟体的鸟弹从炮管中发射,发射速度通过调节气罐压力进行控制,鸟体飞出炮管后,撞击试验件,完成鸟撞试验。

鸟撞试验数据测量系统主要由激光测速装置,

位移、应变及载荷测量装置组成。激光测速装置安装在靠近试件前的位置,包含两套激光束发射及接收机构,机构间分开一定距离,在鸟弹出膛后,分别穿过激光束 1 和 2,通过接收机构可以测得通过两束激光的时间差,用以获得鸟弹在撞击试件前的速度。

一般在试验前利用活鸡制作鸟弹,其重量应满足设计要求。为了防止“鸟体”在接触靶体前解体或变形过大,一般用聚乙烯薄膜、亚麻线包扎置于弹壳中。校准弹着点位置后,将制作好的鸟弹装入空气炮中,根据设计速度选择合适的压力值,启动空气释放装置发射鸟弹,通过测量系统记录鸟撞过程中的相关数据。

1.2 工程法

多年来通过大量试验数据的积累,经过分析比较,工程人员将鸟撞风挡过程简化为下述数学模型^[15]:

(a) 风挡是完全刚硬的,撞击时鸟的速度不变;

(b) 撞击时鸟体呈现流体特性,鸟体被简化为一个圆柱,其长度是直径的 2 倍;

(c) 垂直风挡的鸟动量分量全部传给风挡。

鸟撞过程中,假设鸟体与撞击面法线的夹角为 θ ,则垂直风挡的鸟动量分量为:

$$I = mV \cos \theta \quad (1)$$

式中: I 为垂直风挡的鸟动量分量; m 为鸟的质量; V 为鸟与飞机的相对速度。

鸟撞中载荷作用时间为:

$$t_1 = l_{\text{eff}} / V = (l + d \tan \theta) / V \quad (2)$$

式中: l_{eff} 为鸟体的有效长度; d 为鸟体的当量直径; l 为鸟体的当量长度, $l = 2d$ 。

由式(1)和式(2)可得出鸟撞中风挡的载荷平均值为:

$$F_{\text{av}} = \frac{mV^2 \cos \theta}{l + d \tan \theta} \quad (3)$$

试验证实鸟体密度接近水的密度,由此不难算出鸟体的当量直径和当量长度:

$$d = 0.5l = \frac{1}{10} \left(\frac{2m}{\pi} \right)^{1/3} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可以得到:

$$F_{av} = \frac{11.625 m^{2/3} V^2 \cos\theta}{2 + \tan\theta} \quad (5)$$

通过式(5)求出鸟撞平均载荷后,可进行风挡的动响应计算。在计算前,首先必须确定鸟撞危险部位。鸟撞危险部位不在风挡中心,而在固定风挡边框的圆角和长边中点附近。

1.3 有限元法

有限元法主要通过对分析对象离散化,建立相应的数值模型,利用计算机资源采用数值迭代求解鸟撞问题。鸟撞过程中由于撞击速度高,作用时间短,鸟体主要表现为流体特征,所以鸟撞问题是一个典型的流固耦合问题。目前鸟撞有限元分析有拉格朗日法、欧拉法、ALE法和SPH法^[16-19]。

拉格朗日法主要用于固体力学问题的求解,其网格与结构在分析过程中始终保持一致,不会产生相对运动。

欧拉法主要用于流体力学问题的求解,在求解过程中,欧拉网格始终保持不变,分析对象在网格内运动。

ALE法是拉格朗日法和欧拉法的结合,是一种典型的流固耦合分析方法,该方法中,鸟体简化为欧拉网格,风挡简化为拉格朗日网格,通过在欧拉网格与拉格朗日网格界面上定义一对耦合面实现网格间载荷的传递,如图2所示。

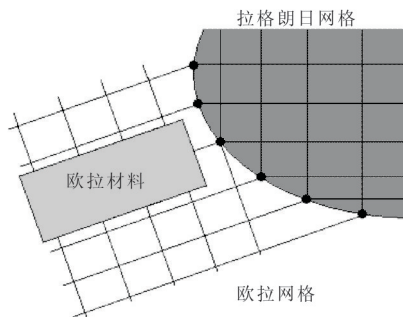


图2 ALE耦合

分析中鸟体在欧拉网格中运动,撞击耦合面并将载荷传递给拉格朗日网格,耦合面随着拉格朗日网格的变形而移动。

SPH法是一种特殊的无网格型的拉格朗日方法,使用中并不是将分析对象离散为有限元网格,而是将其离散为可移动的质量点,如图3所示。质

量固定在质点的坐标系上,所需的基本方程是守恒方程和鸟体材料本构方程。



图3 鸟体SPH模型

2 实例分析

某飞机风挡玻璃为平面层合结构,由四层增强的硅酸盐无机玻璃及PU胶片、PVB胶片层合而成(如图4所示),安装于正副驾驶正前方,为气密舱结构的组成部分,用于为驾驶员提供良好的观察视野,并具备防冰、除霜、除雾、排雨以及电磁防护等功能,设计要求该风挡满足1.8 kg鸟体以480 km/h撞击而不影响飞机安全返航。

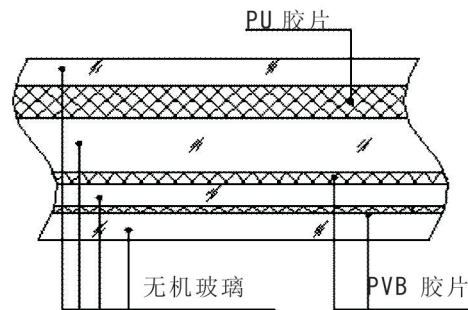


图4 风挡结构模型

2.1 建模

本文采用ALE方法通过有限元软件MSC.Dytran进行建模分析。将玻璃、PVB胶片、PU胶片分别简化为拉格朗日体单元,形成由7层体单元组成的风挡模型,在风挡外表面生成一层板单元,作为拉格朗日—欧拉耦合界面,在拉格朗日单元外建立欧拉网格,作为鸟体活动区域。将鸟体简化为圆柱体,其长度是直径的2倍,如图5所示。风挡玻璃由DMATEP定义其本构关系。试验证明:在高速鸟撞情况,鸟体呈现出流体特性,所以鸟体采用HYDRO(理想流体)定义其本构关系。

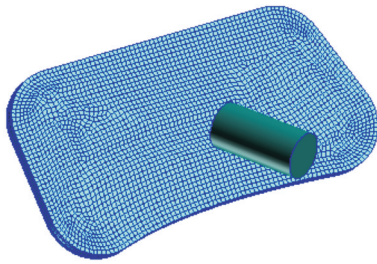
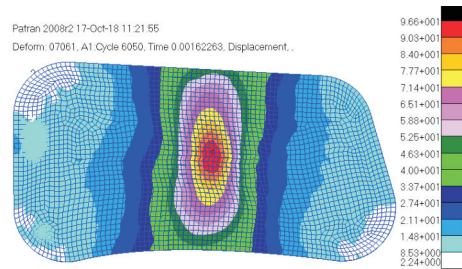


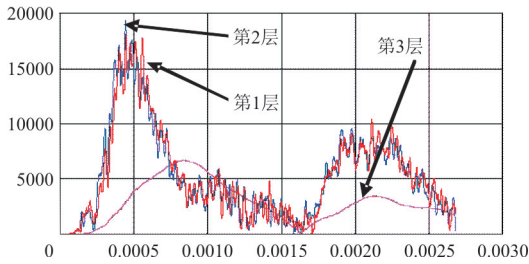
图 5 风挡有限元模型



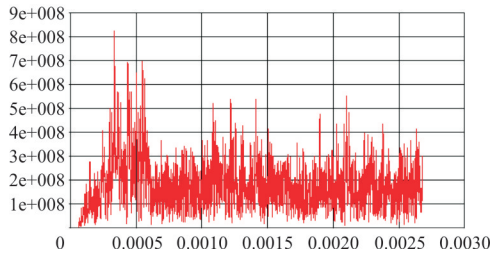
(d) 风挡外表面应力云图

2.2 分析及结果查看

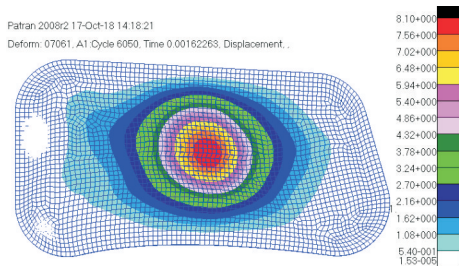
计算中在风挡边缘处进行约束,定义完成后,提交 Dytran 进行计算,计算结果通过 Patran 进行查看,如图 6 所示,(a)为风挡速度响应曲线,(b)为风挡表层加速度响应曲线,(c)为表层玻璃位移云图,(d)为表层玻璃应力云图。



(a) 风挡速度响应曲线



(b) 风挡外表面加速度响应曲线



(c) 风挡外表面位移云图

图 6 有限元计算结果

由计算结果可知,在第 6 050 循环步(对应时刻 $t=1.623 \text{ ms}$)时,风挡变形最大,此时,风挡各层对应位移及应力计算结果如表 1 所示。分析结果表明风挡玻璃满足强度设计要求,鸟撞后不会出现破坏。

表 1 风挡计算结果

Table 1 Calculation results of windshield

层数	位移/mm	应力/MPa
第 1 层	8.10	96.6
第 2 层	8.10	49.0
第 3 层	5.17	32.8
第 4 层	5.17	32.8
第 5 层	5.17	23.0
第 6 层	5.17	51.8
第 7 层	5.17	98.7

3 结论

(1) 试验法是最真实有效的鸟撞分析方法,但该方法成本高、周期长,不利于飞机设计过程,一般用于最终的验证试验。

(2) 工程法简单方便,可以对鸟撞问题进行快速的工程估算,但其应用范围较窄,只能粗略估算出某部位的抗冲击性能,主要用于飞机初步设计阶段。

(3) 有限元法可以快速完成飞机鸟撞分析,可以较好的模拟鸟撞过程,分析结果与实际结果误差较小,主要用于飞机详细设计阶段,但最终依然需要通过地面试验法进行验证。

参考文献

- [1] Wisnom M. Prediction of penetration of curved metal stiffened panels due to birdstrike[J]. *Aeronautical Journal*, 1990, 94(939): 314-316.
- [2] Benz W, Asphaug E. Simulations of brittle solids using smooth particle hydrodynamics [J]. *Computer Physics Communications*, 1995, 87(1): 255-260.
- [3] 臧曙光, 武存浩. 飞机前风挡鸟撞动力响应分析[J]. *航空材料学报*, 2000, 20(4): 41-45.
- [4] 彭迎风, 滕春明. 飞机风挡鸟撞动响应分析方法研究[J]. *南昌航空工业学院学报*, 2003, 17(4): 27-31.
- [5] 张志林, 姚卫星. 飞机风挡鸟撞动响应分析方法研究[J]. *航空学报*, 2004, 25(6): 577-580.
- [6] 姚小虎, 韩强. 飞机圆弧风挡的抗鸟撞击问题研究[J]. *华南理工大学学报*, 2007, 35(2): 6-12.
- [7] Gard K, Mark S. Spatial analysis of bird aircraft strike hazard for moody air force base aircraft in the state of georgia[J]. *Georgia Journal of Science*, 2007, 65(4): 161-169.
- [8] 简成文, 李书. 民机机头复合材料风挡结构鸟撞分析[J]. *民用飞机设计与研究*, 2015, 116(1): 39-46.
- [9] 庄茁, 王向东, 张朝晖, 等. 力学在飞机结构设计中的应用与发展[J]. *工程力学*, 2007, 24(1): 65-69.
- [10] 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.
- [11] 朱书华. 鸟撞飞机风挡动响应分析与仿真试验研究平台[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [12] 李治方. 风挡鸟撞模型的有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [13] 贾建东. 飞机典型结构抗鸟撞设计与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [14] 王生楠. 飞机结构设计与强度专业发展研究[R]. 航空科学技术学科发展报告, 北京: 中国科学技术出版社, 2014.
- [15] 解思适. 飞机设计手册第 9 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 1140-1142.
- [16] 王富生, 岳珠峰, 王新军, 等. 鸟撞飞机风挡的一体化数值模拟技术[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(5): 107-111.
- [17] 瞿承玮, 郑百林. GLARE 层板鸟撞数值模拟分析[J]. *力学季刊*, 2007, 28(1): 65-69.
- [19] 罗军. 基于 SPH 算法的鸟撞座舱盖分析与研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [18] 贾建东, 李志强, 杨建林, 等. 用 SPH 和有限元方法研究鸟撞飞机风挡问题[J]. *航空学报*, 2010, 31(1): 136-142.

作者简介:

宋波涛(1986—), 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机结构强度设计、复合材料强度设计及流固耦合分析。

苗志桃(1990—), 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 飞机结构静强度设计。

池福俭(1990—), 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 飞机结构静强度设计。

(编辑: 沈惺)