



王富生 姚小虎 刘 军 著
李 磊 岳珠峰

飞机风挡鸟体冲击实验 与分析技术



科学出版社

飞机风挡鸟体冲击实验 与分析技术

王富生 姚小虎 刘 军 著
李 磊 岳珠峰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍飞机风挡鸟撞的危害和特点、飞机风挡鸟撞的实验技术和数值模拟方法、某型飞机风挡鸟撞的实验和数值模拟校核、飞机风挡鸟撞数值模拟的影响因素分析、飞机风挡材料子程序的二次开发、飞机风挡鸟撞的动态破坏分析、鸟体本构模型及其参数的优化反演方法和平台。

本书可作为航空、航天、力学、材料专业高年级本科生和研究生的冲击动力学课程教材,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

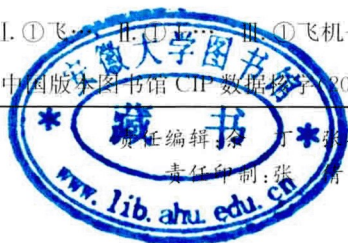
图书在版编目(CIP)数据

飞机风挡鸟体冲击实验与分析技术/王富生等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041949-1

I. ①飞… II. ①王… III. ①飞机—鸟撞击—研究 IV. ①V328.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第220505号



责任编辑:陈 丁 张艳芬 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 青 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:236 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

飞机鸟撞事故的频繁发生一方面归因于现代飞机向高速、低空、低噪音和大型化方向发展后对飞鸟的回避能力下降,另一方面也归因于人类环境保护意识提高后飞鸟的数量急速增大,目前已被国际航空联合会定位为 A 类灾难。作为飞机鸟撞最危险的部位,飞机座舱风挡抗鸟撞性能是飞机座舱罩关键的力学性能,也是飞机先进技术的标志之一。鸟撞击碎风挡后一方面从外部吹进来的强大气流会使飞行员透不过气来,另一方面若碎片击中飞行员头部往往造成操作失控而机毁人亡。同时,近几年来高速铁路建设方兴未艾,高速列车风挡的鸟撞问题也变得越来越突出。鸟撞风挡是发生在毫秒或微秒量级的冲击动力学问题,涉及材料动力学和结构动力学,不能采用准静态弹塑性力学或断裂力学的分析方法,具有瞬时强值动载荷、柔性撞击、大变形和高应变率等特点,问题比较复杂。

本书是在作者承担的国家自然科学基金项目(编号:11372113)、国家国际科技合作项目(编号:2011DFA53080)和各类国防科技项目资助下完成的,介绍了近十年来作者在飞机风挡鸟撞实验和数值分析方面的工作。全书共 9 章:第 1 章为绪论,介绍飞机风挡鸟撞的危害、抗鸟撞设计标准和特点;第 2 章介绍飞机风挡鸟撞实验技术和数值模拟方法;第 3 章介绍一般和老化飞机圆弧风挡的鸟撞实验;第 4 章介绍飞机风挡鸟撞数值模拟校核;第 5 章介绍飞机风挡鸟撞数值模拟的影响因素分析;第 6 章介绍飞机风挡材料子程序的二次开发;第 7 章介绍飞机风挡鸟撞的动态破坏分析;第 8 章介绍鸟体本构模型及其参数的优化反演;第 9 章介绍鸟体本构模型及其参数优化反演平台。本书涉及的内容覆盖了目前飞机风挡鸟撞研究的关键问题,也是多年来作者对飞机风挡抗鸟体冲击性能研究过程中逐渐形成的成果,有些研究在国内外具有一定的先进性,希望能对从事该领域研究的读者有所裨益,也希望本书的出版能对从事该领域深入研究的工程技术人员起到抛砖引玉的作用。

感谢西北工业大学和华南理工大学有关博士、硕士研究生富有成效的工作,感谢江西洪都航空工业集团公司、成都飞机工业(集团)有限责任公司、中国建筑材料科学研究总院、济南特种结构研究所等单位有关领导、专家和工程技术人员的大力支持,同时书中还引用了国内外其他专家学者的研究成果,在此一并表示感谢。

作为国内第一本关于飞机风挡鸟撞研究的专著,由于作者水平有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,希望读者不吝批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 鸟撞飞机的危害	1
1.2 飞机抗鸟撞设计标准	3
1.3 飞机风挡鸟撞的复杂性	5
1.4 本书的特点	6
1.5 本章小结	7
参考文献	7
第 2 章 飞机风挡鸟撞实验技术和数值模拟方法	8
2.1 飞机风挡鸟撞实验技术	8
2.1.1 实验目的	8
2.1.2 实验方法和设备	8
2.2 冲击动力学耦合分析的数值模拟方法	11
2.2.1 拉格朗日法	12
2.2.2 欧拉法	12
2.2.3 任意拉格朗日-欧拉法	13
2.2.4 无网格法	14
2.3 数值模拟方法在鸟撞飞机风挡中的应用	15
2.4 本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 飞机风挡鸟撞实验	32
3.1 一般飞机圆弧风挡的鸟撞实验	32
3.1.1 实验介绍	32
3.1.2 实验结果	36
3.2 老化飞机圆弧风挡的鸟撞实验	46
3.3 本章小结	53
参考文献	53
第 4 章 飞机风挡鸟撞数值模拟校核	54
4.1 有限元模型	54
4.2 材料性能	56

4.3 计算结果分析	57
4.3.1 风挡整体结构和鸟体变形	57
4.3.2 鸟撞圆弧风挡的位移计算结果	59
4.3.3 鸟撞圆弧风挡表面的应变计算结果	61
4.3.4 鸟撞圆弧风挡玻璃接触力计算结果	62
4.3.5 鸟撞圆弧风挡玻璃应力计算结果	64
4.4 本章小结	66
参考文献	67
第5章 飞机风挡鸟撞数值模拟的影响因素分析	68
5.1 UG(CATIA)-ANSYS-LS-DYNA 联合建模技术	68
5.2 鸟撞风挡及风挡结构有限元模型	69
5.3 鸟撞飞机风挡数值模拟结果	71
5.3.1 鸟撞过程	71
5.3.2 鸟撞过程中主要参数的变化	76
5.3.3 影响风挡鸟撞响应的因素	79
5.4 鸟撞飞机风挡结构的数值模拟结果	88
5.5 本章小结	94
参考文献	94
第6章 飞机风挡材料子程序的二次开发	95
6.1 子程序开发的必要性	95
6.2 LS-DYNA3D 材料子程序定义方法及验证	95
6.2.1 子程序输入与输出变量	95
6.2.2 计算输入文件关键字定义	97
6.2.3 自定义材料子程序实例验证	97
6.3 ZWT 本构模型以及在鸟撞飞机风挡中的应用	104
6.3.1 线性黏弹性体微分和积分型本构关系	104
6.3.2 ZWT 本构模型及其增量形式	105
6.3.3 ZWT 本构模型的程序验证	108
6.3.4 ZWT 本构模型在鸟撞飞机风挡中的应用	109
6.4 本章小结	113
参考文献	113
第7章 飞机风挡鸟撞的动态破坏分析	115
7.1 风挡鸟撞破坏的关键字定义方法	115
7.2 风挡鸟撞破坏的子程序定义方法	118
7.2.1 损伤型 ZWT 非线性黏弹性本构方程	118

7.2.2 损伤型非线性黏弹性本构方程及其破坏准则的增量迭代形式	119
7.2.3 损伤型本构方程及其破坏准则在鸟撞飞机风挡结构中的应用	123
7.3 本章小结	130
参考文献	130
第8章 鸟体本构模型及其参数的优化反演	132
8.1 鸟体本构模型及其参数的优化反演方法	132
8.1.1 优化反演方法介绍	132
8.1.2 优化反演实现过程	135
8.2 计算实例	139
8.2.1 算例描述	139
8.2.2 给定鸟体本构模型下的参数反演	139
8.2.3 鸟体本构模型及其参数的同时反演	147
8.3 本章小结	150
参考文献	150
第9章 鸟体本构模型及其参数优化反演平台	152
9.1 软件平台的功能	152
9.2 优化反演集成设计框架的整体设计	153
9.2.1 模块介绍	153
9.2.2 模块间的逻辑结构图	155
9.2.3 任务的设计	155
9.3 优化反演集成框架详细设计	156
9.3.1 数据结构的设计	156
9.3.2 主界面的详细设计	162
9.3.3 参数设定模块的详细设计	166
9.3.4 集成模块的详细设计	169
9.3.5 优化算法模块的详细设计	176
9.3.6 图形显示模块的详细设计	177
9.4 软件介绍	179
9.4.1 软件主界面	179
9.4.2 集成模块	181
9.4.3 参数设定	181
9.4.4 优化算法	182
9.4.5 计算器	182
9.4.6 解析操作窗口	183
9.4.7 仿真程序运行控制窗口	183

9.4.8 数据显示	184
9.4.9 测试计划执行情况	184
9.5 本章小结	187
参考文献	187

第 1 章 绪 论

1.1 鸟撞飞机的危害

随着新一代雷达的发展,飞机执行低空和高速的飞行任务增多,同时随着低噪声、大型化飞机的出现和环保公益事业对鸟类资源的保护,飞机遭受鸟撞的潜在危险不断提高,鸟撞问题的研究和事故预防一直是飞机设计和使用部门面临的问题。飞机与飞鸟在空中相撞所产生的事故称为“鸟体冲击”或“鸟撞”,它是随着飞机的诞生而出现的一种飞行事故。鸟撞是一种软体碰撞,由于在撞击过程中鸟体减速产生的强大压力远远超过鸟体组织的极限强度,使鸟体撕裂成碎片甚至发生流变。鸟撞这种突发性而又多发性的飞行事故潜在征候,对空勤人员及旅客的生命安全威胁极大,往往会引起飞机操纵失灵或关键部位严重受损,造成意想不到的经济损失和惨重灾难,已被国际航空联合会定位为 A 类空难。

随着世界首架飞机的诞生,鸟撞问题随之出现,距今已有 100 多年的历史。世界首例飞机鸟撞事件发生在 1912 年,飞行员驾机作飞行表演时与海鸥相撞,海鸥缠住了操纵杆控制线,飞机失控坠入大海,飞行员身亡。随着飞机从螺旋桨式发展到喷气式,由于飞行速度提高导致的鸟撞事故大量增加。例如,鸟撞对飞机动力系统的破坏会导致飞机失速坠毁,螺旋桨飞机鸟撞会导致桨叶变形乃至折断,使飞机动力性能下降;对于喷气式飞机鸟撞,飞鸟常常会被吸入进气道,使涡轮发动机的扇叶变形,或者卡住发动机使发动机停机乃至起火。据报道,1983~1987 年美国军用和直升机共发生 16000 次鸟撞,苏联民航每年发生 1500 次鸟撞,1990~1992 年中国民航因鸟撞使飞机损伤占事故总数的 21%,目前 F104、F-4、F-15、F-16、B-1B 和 T-38 等飞机都发生过因鸟撞而坠机的事故。图 1-1 给出美国航空航天理事会统计得到的 1956~1972 年鸟撞次数随年度的变化。鸟撞带来的经济损失也非常巨大,1976~1980 年欧洲由于鸟撞损坏了 338 台发动机和 1124 块风挡。表 1-1 给出美国空军 1980~1982 年的鸟撞次数及损失统计。图 1-2 给出美国航空航天管理局统计得到的 1990~2008 年鸟撞次数随年度的变化,仅美国商用飞机就有 90000 次鸟撞事故,由于鸟撞后飞机结构的修补、延迟和作废造成了巨大的经济损失^[1,2]。据统计,飞机每飞行 2000 次就会发生一次鸟撞事故。

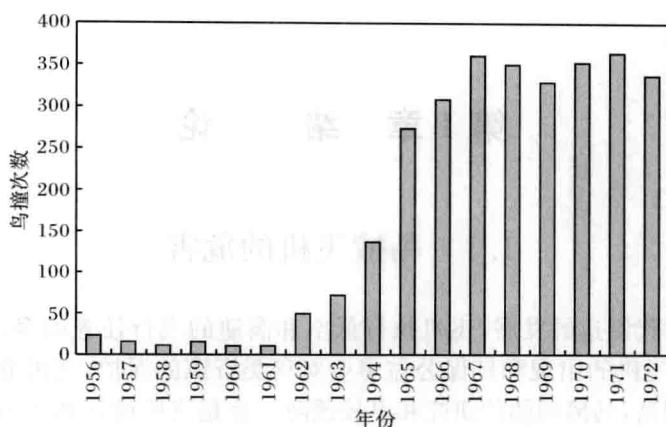
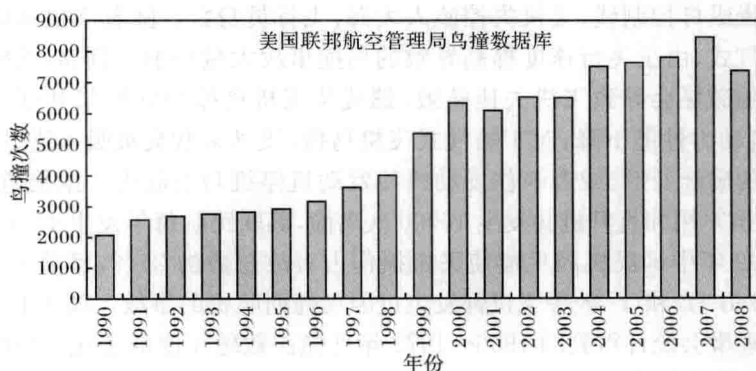


图 1-1 1956~1972 年鸟撞次数随年度的变化

表 1-1 美国空军 1980~1982 年鸟撞次数及损失统计

年份	鸟撞次数	总的损失/美元
1980	1051	5927376
1981	1082	6113611
1982	1894	14088483

图 1-2 1990~2008 年鸟撞次数随年度的变化^[2]

鸟撞事故与鸟的活动、数量和群体有关,一年中我国鸟类数量在春季和秋季有两次增长,一天中早晚发生的鸟撞事故占总鸟撞事故的 76.6%,其中夜晚占 55.3%。鸟撞事故大部分发生在低空,我国在 1000m 以下发生的鸟撞事故占总鸟撞事故的 85.5%,其中 500m 以下占 79.1%,300m 以下占 62.2%。我国 65.7% 的鸟撞事故发生在飞机起飞和降落阶段,曾发生过鸟体速度为 800km/h 的鸟撞事

故。鸟撞事故中有单鸟撞机和群鸟撞机,其中前者占58.3%,后者占41.7%,从鸟撞后飞机上的鸟体残骸确认鸟撞最多的是鹰和雁两种鸟类^[3]。图1-3~图1-8给出一些典型的飞机鸟撞事件。



图 1-3 鸟体对风挡的撞击



图 1-4 鸟体对发动机的撞击



图 1-5 鸟体对机头雷达罩的撞击



图 1-6 鸟体对机翼的撞击



图 1-7 鸟体对直升机的撞击

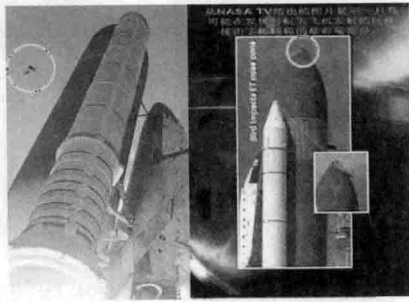


图 1-8 鸟体对航天飞机的撞击

1.2 飞机抗鸟撞设计标准

据统计,鸟撞飞机发动机(螺旋桨)、进气道(包括唇口)和散热器占鸟撞总数

的 48.2%，鸟撞风挡和座舱盖占 14.5%，鸟撞机翼和襟翼占 16.3%，鸟撞机头、雷达罩和空速管占 12.3%，鸟撞减速板和起落架占 8.2%，鸟撞尾翼占 3.2%，鸟撞副油箱、火箭梁、机炮和照相舱等占 7.3%。飞机抗鸟撞的设计目标就是使飞机遭受鸟撞后仍能继续飞行与安全着陆^[3,4]。国外在 20 世纪 70 年代的新机研制中就制定了一系列鸟撞设计标准，如针对军机的美式 MIL-W-18752(AS)标准和英式 ASTM-330-79 标准，针对民机的美式 FAR-25 标准和欧式 CS-25 标准。我国也制定了军标《飞机鸟撞实验要求》、航标《民用飞机结构抗鸟撞设计与实验要求》和针对民机的 CCAR-25 标准，一些非鸟撞专业技术文件如《飞机风挡设计规范》、《军用飞机强度和刚度规范其他载荷》和《飞机座舱盖设计》等也对鸟撞要求有明确的规定。另外，国外也成立了一些鸟撞研究的专门机构，如国际鸟撞委员会(IBSC)、欧洲鸟撞委员会(BSCE)和美国鸟撞委员会(BSCUSA)^[5]。

图 1-9 给出飞机结构上的鸟撞分布情况，对应不同的构件有不同的鸟撞要求^[6,7]。飞机风挡或军用飞机座舱盖以前由脆性玻璃制作，现已改为可延展的 PC、PMMA 玻璃或者可伸展的单向、多层丙烯酸塑料。除要求风挡玻璃具有较好的可视性和气密性之外，还要求风挡在飞机巡航速度下能够抵抗 1.8kg(4lb)的鸟撞而不击穿。

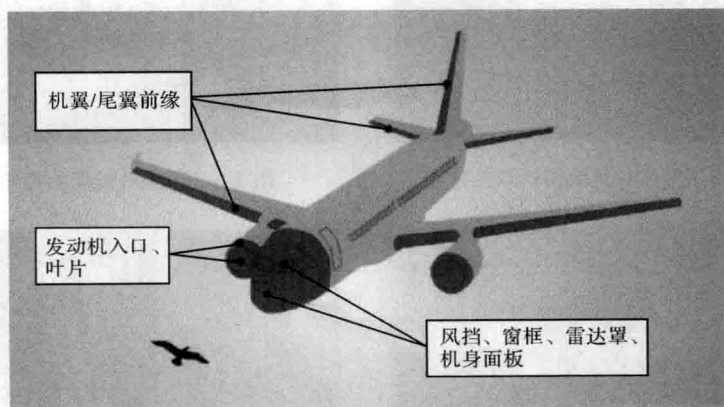


图 1-9 飞机鸟撞分布^[7]

对于机翼前缘认证标准要求即使在前缘鸟撞穿透的情况下，前部的梁元或翼盒也不能出现严重的破坏，保证在飞机鸟撞后安全飞行和着陆，一般要求证明在运行速度下机翼和尾翼的前缘分别可以抵挡 1.8kg(4lb)和 3.6kg(8lb)的鸟撞。

所有燃气涡轮发动机特别是涡轮风扇发动机必须能够抵抗吸入发动机的鸟体撞击，对于小型或中型鸟体撞击认证规范要求发动机结构完整，且具有 75%能

量的推力,对于大于 1.8kg(4lb)的鸟撞要求证明发动机在未点火的情况下能够控制关闭,发动机的进口也需要抵抗 1.8kg(4lb)的鸟撞而不毁坏。虽然飞机生产商在设计中会进行单个或多个叶片的鸟撞实验,但还需开展发动机的鸟撞认证实验。

1.3 飞机风挡鸟撞的复杂性

飞机座舱风挡抗鸟撞性能是飞机座舱罩关键的力学性能,也是飞机先进技术的标志之一。同时飞机鸟撞最危险的部位也是风挡和座舱盖,由于飞行员位于飞机风挡后,若鸟撞击碎风挡,从风挡破洞中吹进来的强大气流会使飞行员透不过气来;若碎片击中飞行员头部,相当于飞机神经中枢失控,极易失事^[3,4]。1975~1983年,美国空军飞机事故研究小组(BASH)记录了 1000 多次风挡和座舱盖的鸟撞事件。表 1-2 给出飞机机型与鸟撞次数统计,结果显示风挡和座舱盖的鸟撞击率平均在 15%左右。

表 1-2 飞机机型与鸟撞次数统计

机型	鸟撞次数	撞击率*	风挡和座舱盖鸟撞次数
A-10	754	95.7	93
F-111	404	65.3	71
F-16	121	61.9	25
F-4	1492	60.7	222
T-38	866	37.9	200
F-15	233	33.8	27
T-37	516	29.5	121
A-7	212	29.2	38

* 100000 飞行小时的鸟撞率。

鸟撞飞机风挡是发生在毫秒或微秒量级的冲击动力学问题,鸟和风挡的相对撞击速度一般高达 70~250m/s,涉及材料动力学和结构动力学,不能采用准静态弹塑性力学或断裂力学的分析方法。其具有以下特点:瞬时强值动载荷、柔性撞击、大变形和高应变率。由于作用时间短,所以结构惯性影响不可忽略,即应进行导致应力波传播和相互作用的分析;由于是柔性撞击,所以撞击载荷与结构动态响应之间有耦合现象;结构大变形引起几何非线性;高的撞击速度引起高应变率,从而使风挡的屈服应力、强度极限大大提高,所以需要考虑材料率型本构关系方面的问题^[8]。与准静态变形通常被看做热力学的等温过程不同,强冲击载荷下的高速变形则接近于绝热过程。

鸟撞飞机风挡研究的复杂性主要表现在以下四个方面^[9]：

(1) 选用材料具有高度非线性特性,这些非线性特性在很大程度上取决于温度和应变率等参数,其对有机透明件的影响尤为明显。目前对航空材料在高应变率下的性能研究还很少。

(2) 鸟撞作用于结构上的压力是瞬态压力,具有复杂的时空分布,而实际上确定鸟体对风挡的冲击力具有较大的难度,目前从有限的测量报道中不能了解具体的实验设备,无法了解冲击力的空间分布。

(3) 鸟撞载荷和飞机风挡动力响应之间存在耦合作用,有机玻璃透明件柔性越大耦合作用越强,在数值分析方面耦合求解十分必要,但给计算程序设计带来一定的难度。

(4) 鸟撞分析时与撞击力、撞击响应确定具有莫大关系的重要因素是鸟体力学模型的建立,目前还没有提出准确的鸟体材料本构关系,在数值模拟时只能采用近似的鸟体模型和参数,其影响了分析的真实程度。

1.4 本书的特点

鸟撞问题长期以来一直受到飞机设计师和飞机用户的广泛关注,飞机要完全避免飞鸟的撞击几乎不可能,只有通过提高飞机结构的抗鸟撞能力才能将鸟撞事故造成的损失减小到最低限度。由于风挡、座舱盖等透明件迎风面积大,因此它们与鸟体相撞的概率也较大。鸟撞飞机风挡结果的严重程度取决于所撞飞机风挡的部位、风挡材料、风挡结构形式、风挡尺寸、风挡边界支撑条件、鸟体重量、鸟体速度、鸟撞角度、环境温度和湿度等因素,在风挡结构抗鸟撞设计中这些因素需要加以综合考虑。故在航空工业快速发展的今天,风挡作为现代飞机上极为关键的部件,其抗鸟撞研究对高速低空飞机的飞行安全至关重要,关系到飞行员和整个飞机的安全,但要想对鸟撞问题建立完善的数学和力学模型并求其解析解几乎不可能。起初人们对鸟撞问题的研究只是停留在实验阶段,计算机的不断发展促进了对鸟撞问题的数值模拟,但要想真实地模拟鸟撞问题仍是一件比较困难的事情。

本书详细介绍了近十年来作者在鸟撞飞机风挡实验和数值模拟方面的研究工作,第1章概括介绍飞机风挡鸟撞的危害、抗鸟撞设计标准和特点,第2章综述介绍目前飞机风挡鸟撞的实验技术和数值模拟方法,第3章介绍两类飞机圆弧风挡的鸟撞实验,第4章和第5章介绍飞机风挡鸟撞的数值模拟,第6章和第7章介绍飞机风挡材料子程序的二次开发及基于此的鸟撞动态破坏分析,第8章和第9章介绍鸟体本构模型及其参数的优化方法和平台。全书围绕实验研究—数值模拟—二次开发—参数反演的思路,着力阐述目前飞机风挡鸟撞研究的关键问题,突出飞机风挡鸟撞数值模拟的实验验证,强调飞机风挡鸟撞数值模拟中的重要因

素如鸟体的模拟、风挡的模拟以及它们之间的耦合关系,探索风挡玻璃冲击破坏的实现方法,寻求基于实验结果反演得到鸟体的本构模型及其参数的方法。有些研究与国内外相关研究比较具有一定的先进性,如作者全面开展了各类飞机风挡和自然老化飞机风挡的鸟撞实验,通过子程序开发的方法研究了鸟撞飞机风挡的破坏性能,提出了鸟体本构模型及其参数的优化反演方法等。全书覆盖面较广,信息量较大,在描述上力求循序渐进,由浅入深。

1.5 本章小结

首先结合国内外典型的飞机鸟撞事故及危害,介绍了目前的飞机抗鸟撞设计标准,突出飞机不同位置的抗鸟撞要求;接着针对典型的鸟撞风挡事故,从四个方面分析了飞机风挡抗鸟撞的复杂性;最后详述了本书的特点。

参考文献

- [1] Dolbeer R A, Wright S E, Weller J, et al. Wildlife strikes to civil aircraft in the United States 1990-2008. FAA National Wildlife Strike Database, Serial Report Number 15, 2009
- [2] 朱书华. 鸟撞飞机风挡响应分析与仿真实验平台研究. 南京: 南京航空航天大学博士学位论文, 2009
- [3] 周加良. 飞机鸟撞事故分析、预防及建议. 宁波大学学报, 1994, 7(1): 16-23
- [4] 蒋耘生. 鸟撞冲击动力学的有限元数值仿真研究. 西安: 西北工业大学工程硕士学位论文, 2002
- [5] 李玉龙, 石膏鹏. 民用飞机鸟撞研究现状. 航空学报, 2012, 33(2): 189-198
- [6] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册第9册: 载荷、强度和刚度. 北京: 航空工业出版社, 2001
- [7] Heimbs S. Computational methods for bird strike simulation: A review. Computers and Structures, 2011, 89: 2093-2112
- [8] 王礼立, 朱锡雄, 施绍裘, 等. 鸟撞高速飞机风挡若干问题的冲击动力学研究. 航空学报, 1991, 12(2): B27-B33
- [9] 臧曙光. 飞机风挡抗鸟撞设计研究. 北京: 中国建筑材料科学研究院硕士学位论文, 1999

第 2 章 飞机风挡鸟撞实验技术和数值模拟方法

2.1 飞机风挡鸟撞实验技术

2.1.1 实验目的

通过鸟撞实验可以检验飞机风挡的抗鸟撞能力,确定风挡破损时飞机的临界速度,验证风挡系统抗击鸟撞指标是否达到设计要求;测量风挡在撞击过程中的动态响应如应变、位移和撞击力等,为风挡的设计定型及改进提供实验数据;测定航空有机玻璃材料的撞击性能,为改进材料力学性能提供实验依据;认识航空结构的鸟撞规律,为鸟撞的理论研究和数值分析提供实验数据,为其他类型的撞击实验提供参考^[1]。

飞机风挡的鸟撞破坏分为安全破坏、不安全破坏和临界破坏。安全破坏指风挡玻璃无裂纹,风挡框架不变形,即使风挡玻璃有裂纹但不会导致气密座舱大量漏气,微量掉落的风挡玻璃碎渣不会伤及飞行员;不安全破坏指风挡玻璃产生裂纹、掉渣或被击穿,风挡框架严重变形,气密座舱大量漏气;临界破坏指虽然风挡玻璃有裂纹和少量掉渣、框架有变形、气密座舱有漏气,但此时没有破坏整个风挡的完整性,飞机是否具有完成本次飞行的能力可以通过飞行速度进行评估^[2]。

2.1.2 实验方法和设备

目前鸟撞实验方法有火箭滑车法和空气炮法^[2~6]。火箭滑车法是将鸟悬于空间的固定位置,将风挡试件安装在滑车上,通过火箭推动滑车以实现风挡试件撞击悬空的鸟,但火箭滑车实验费用比较昂贵。鸟撞风挡实验一般采用空气炮法,如图 2-1 所示,该实验主要由发射系统、实验靶架系统、速度测量系统、位移测量系统、应变测量系统、高速摄影和高速摄像系统等组成,目前国内的中国建筑材料科学研究总院、江西洪都航空工业集团公司和中国飞机强度研究所等都建有一定规模的鸟撞实验基地。空气炮法的鸟撞实验过程如下:鸟弹预先放在炮管里,待气罐压力达到预定值并稳定后,开启压力阀,高压气体突然释放,推动鸟弹在炮管内滑行直至离开炮口射向固定在实验台架上的结构件,采用有关仪器测量被撞靶体的位移、应变和撞击力等参数,采用高速摄影拍摄鸟撞瞬态的全过程,图 2-2 给出鸟撞圆弧风挡的实验图。

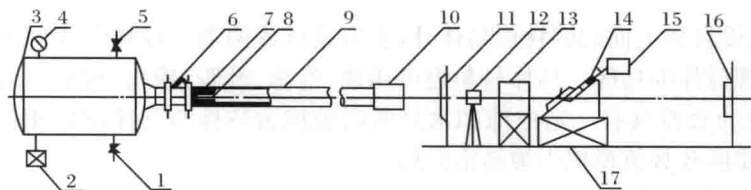


图 2-1 鸟撞实验装置示意图

- 1-泄气阀;2-空气压缩机;3-储气罐;4-容器压力表;5-安全阀;6-空气释放机构;7-鸟弹衬壳;8-鸟弹;
9-炮管;10-鸟弹衬壳止动装置;11-挡气屏;12-高速摄影装置;13-速度测量装置;14-实验件;
15-位移和应变测量装置;16-防护屏;17-实验台

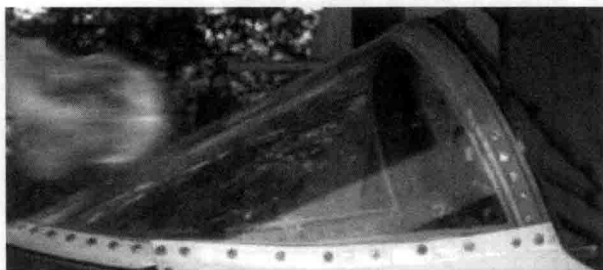


图 2-2 鸟撞圆弧风挡的实验图

发射系统主要由储气罐、炮管、附属设备和发射控制装置组成。储气罐由过渡气罐和高压气罐组成，过渡气罐为前端压力输送设备，接受空气压缩机送来的压缩气体，主要用于稳定气压；高压气罐为后端压力输送设备，装有安全阀和压力表，压力表的显示可以用于预测鸟体速度。炮管长度一般为5m，对1.8kg的鸟弹炮管直径取90mm，而对3.6kg的鸟弹炮管直径取120mm，发射的鸟弹在炮管中加速可以稳定发射方向，在工艺上对炮管的加工精度及光洁度要求较高。高压气罐是发射鸟弹的动力源，气罐内的压力决定了鸟弹的速度，鸟撞速度范围一般为100~300m/s。炮管前端有一个鸟弹衬壳止动装置，用于鸟弹脱壳。发射控制装置通过自动控制系统驱动电磁阀快速打开阀门，在极短的时间内推动鸟弹射向实验靶体。

鸟撞实验时鸟弹的制作一般采用家禽现宰或者使用密度与鸡肉类似的明胶代替。现形成两种鸟弹制作方法：其一是将鸡或鹅的头部放在鸟弹的弹头位置，在弹头模具中将鸡或鹅填压成圆锥形弹头后捆扎，在鸟弹后部通过成型泡沫塑料形成圆柱弹体并与炮管内壁相贴合；其二是将鸡包扎后直接放入泡沫塑料成形的弹壳中，无需填压成型。我国多在鸟撞实验前才将家禽杀死以接近实际的鸟撞情况，国外除采用实验前杀死的方法外，还采用将家禽杀死后快速冷冻到-18℃的环境中，滞留时间不超过30天。使用时在室温下解冻，实验的鸟弹温度为21℃±