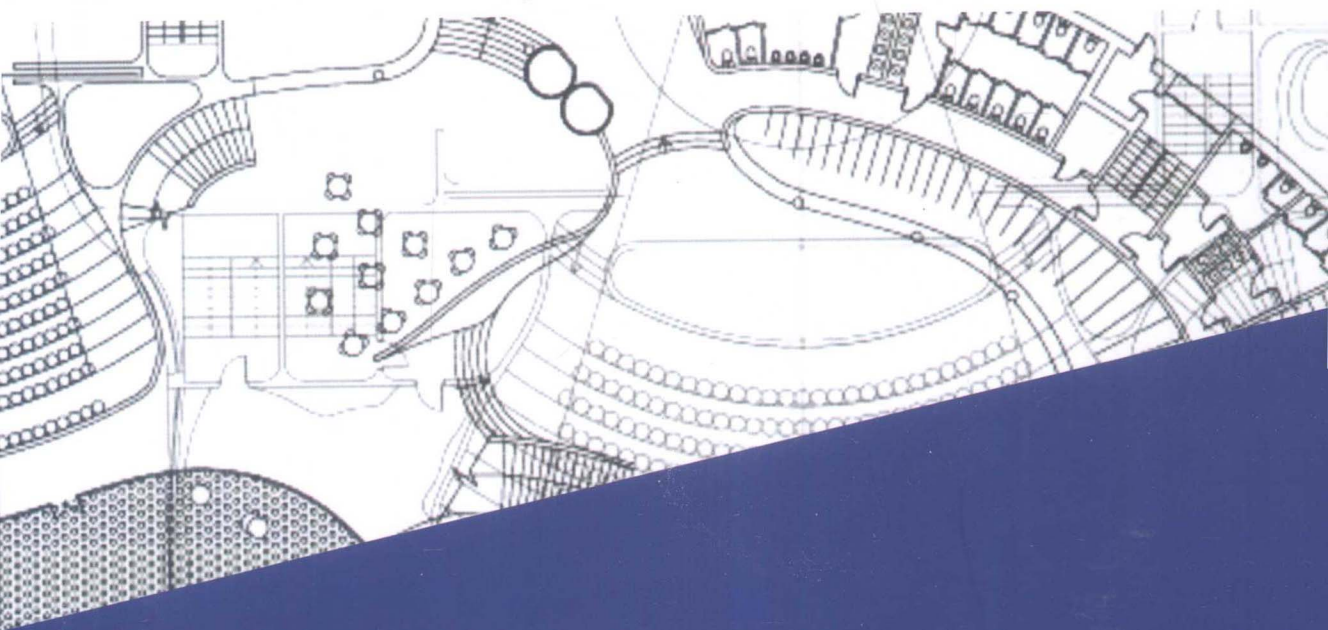


民机机身结构和内部设施适坠性设计 评估与验证指南

牟让科 刘小川 主编



西北工业大学出版社

MINJI JISHEN JIEGOU HE NEIBU SHESHI SHIZHUIXING SHEJI PINGGU YU YANZHENG ZHINAN

民机机身结构和内部设施适坠性 设计评估与验证指南

主编 牟让科 刘小川

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书对民机机身结构适坠性研究领域中的理论问题和工程问题进行了研究探讨,既有对过去研究工作成果的归纳和总结,也有新的研究成果,更有一些研究成果在民机结构中的应用。全书共分为 11 章,从民机机身结构适坠性研究的相关理论和工程应用入手,分别从民机机身结构(含内部设施)适坠性研究的基本理论、结构设计、验证、分析及评估等方面进行叙述。

本书可为有关工程技术人员和学者进行飞机器结构抗坠撞设计、分析和试验工作提供具体的技术指导,也可供飞机设计及固体力学专业的高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

民机机身结构和内部设施适坠性设计评估与验证指南/牟让科,刘小川主编. —西安:西北工业大学出版社,2016.3

ISBN 978-7-5612-4774-7

I. ①民… II. ①牟…②刘… III. ①民用飞机—机身—设计—指南 IV. ①V271-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043958 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:陕西金德佳印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11

字 数:256 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

本书编委会

主 编 牟让科 刘小川

编 委 (按姓氏笔画):

马小骏	马芳贤	马君峰	马晓利	王 中
王 妮	王亚锋	王俊安	王乾平	史庆起
史惟琦	付智才	白春玉	朱广荣	朱晓东
向锦武	齐丕骞	孙 秦	苏开鑫	李玉龙
杨智春	吴 慧	吴旭辉	邱 弢	何 欢
张 昕	张凌霞	陈国平	罗漳平	周苏枫
项小平	胡律行	段世慧	徐 浩	郭 军
郭伟国	曹明红	寇飞行	董登科	程普强
薛 璞				

主 审 孙 秦 苏开鑫

前 言

民机结构适坠性指结构在应急着陆过程中保护其乘员的能力,是民机安全性的重要体现,要求结构通过变形或可接受的破坏吸收撞击动能,并将传递到乘员的减速度限制在可承受的范围,为乘员提供生存空间,保持逃生通道的完整,为客舱设备提供系留。本书给出了民机机身段(含内部设施)适坠性设计、分析、验证和评估的一般工程方法。

第1章 绪论。分析适航条例对适坠性的相关规定,概述民机结构适坠性设计与验证的一般要求。

第2章 基本概念与定义。给出民机结构适坠性研究中涉及的一些基本概念和术语的定义。

第3章 机身舱段结构坠撞运动学分析。从运动学和能量的角度,给出机身段坠撞过程中的动力学分析方法,并简要分析提高机身结构适坠性的设计思路。

第4章 机身结构坠撞过程的数值计算方法。介绍机身机构坠撞过程的有限元数值模拟计算方法,给出计算方法的理论背景。

第5章 民机机身结构金属材料与连接件的动态力学性能。介绍机身结构金属材料和连接件动态力学性能试验方法,并给出典型金属材料和连接件的动态力学性能。

第6章 民机机身段下部结构吸能设计与分析。介绍民机机身下部结构吸能设计的一般性要求,典型结构元件的撞击失效模式与吸能特性,设计机身框吸能结构,并进行试验验证。

第7章 机身结构坠撞数值分析建模与评价。介绍动力学建模与分析方法,以典型机身段为研究对象进行计算分析,并根据计算结构给出坠撞试验状态。

第8章 典型机身段(含内部设施)坠撞试验。介绍坠撞试验方法,以典型机身段(含内部设施)为对象,介绍垂直坠撞试验的流程和数据处理的方法及结果。

第9章 含内部设施机身舱段适坠性评估体系及其分析。介绍含内部设施机身舱段适坠性评估体系和适坠性评估方法,并基于典型机身段(含内部设施)坠撞试验结果进行适坠性评估。

第10章 适坠性分析评估软件平台及其应用。对民机机身段适坠性分析评估所涉及的软件工具进行介绍,对评估软件平台的架构进行说明。

编写本书曾参阅了相关文献资料,在此,谨向其作者深致谢忱。

由于水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 民用飞机适坠性适航规定	2
1.2 民用飞机适坠性设计的一般要求	4
1.3 民用飞机机身结构适坠分析、评估与试验验证要求	6
1.4 本指南适用范畴	7
参考文献	7
第 2 章 基本概念与定义	8
2.1 飞机坐标系和姿态参数	8
2.2 与加速度相关的术语	10
2.3 与速度相关的术语	10
2.4 坠撞生存性	11
2.5 乘员生存包线	11
2.6 与结构相关的术语	12
参考文献	13
第 3 章 机身舱段结构坠撞运动学分析	14
3.1 坠撞过程中的运动关系	14
3.2 坠撞过程中的能量吸收	14
参考文献	16
第 4 章 机身结构坠撞过程的数值计算方法	17
4.1 机身结构坠撞过程的数值描述	17
4.2 更新拉格朗日格式的控制方程	18
4.3 离散化运动方程的数值算法	19
4.4 应力更新	21
4.5 接触力计算	21
参考文献	24

第5章 民机机身结构金属材料与连接件的动态力学性能	25
5.1 航空铝合金材料动力学特性	25
5.2 金属连接结构动态失效模式研究	32
参考文献	40
第6章 民机机身段下部结构吸能设计与分析	42
6.1 机身段下部结构吸能设计的一般性要求	42
6.2 典型结构元件的撞击失效模式与吸能	43
6.3 机身框结构吸能设计与分析	78
6.4 壁板结构的适坠性设计	82
6.5 机身典型吸能结构部件的分析与试验	86
参考文献	94
第7章 机身结构坠撞数值分析建模与评价	95
7.1 结构撞击动力学数值分析建模技术	95
7.2 坠撞数值分析与试验的相关性评估	103
7.3 典型机身段和内部设施的坠撞分析	105
参考文献	111
第8章 典型机身段(含内部设施)坠撞试验	113
8.1 垂直坠撞试验方法与试验设备	113
8.2 水平冲击试验方法及试验设备	119
8.3 结构坠撞试验任务书编写	125
8.4 试验报告编写	126
8.5 民机典型机身段和内部设施垂直坠撞试验	126
参考文献	137
第9章 含内部设施机身舱段适坠性评估体系及其分析	138
9.1 人体的耐受度和机身结构的适坠性要求	138
9.2 综合适坠性评估指数	144
9.3 基于坠撞试验结果的机身段结构适坠性评估	145
参考文献	146

第 10 章 适坠性分析评估软件平台及其应用	148
10.1 软件平台功能介绍	148
10.2 适坠性分析与评估软件介绍	152
10.3 适坠性分析与评估软件平台应用	159
参考文献	164

第1章 绪 论

大型民用飞机作为现代最快捷的交通运输工具,在展现国家基础工业实力、引领技术进步、推动国民经济发展、提高国家核心竞争力等诸方面有着明显的战略地位与作用,也是世界范围内先进发达国家实现全球经济战略的主要技术增长点之一。

在民用飞机已成为当今世界主要交通工具的今天,空难无疑是人们最惧怕的灾难性事故。尽管民用飞机的失事率远低于其他交通工具,然而空难事故时有发生,给人们的生命财产带来了重大损失,增大了乘机的不安全感。因此,航空安全历来是世界范围内关注的重大问题。

民用飞机适坠性(Aircraft Crashworthiness)涵盖的安全性概念应包括结构和内部设施的适坠性、乘员保护(Occupant Protection)、消防安全(Fire Safety)、逃逸或撤离(Evacuation)以及机场应急服务(Airport Emergency Services)等方面。早先的飞机事故调查主要集中于飞机失事的原因,并非乘员的生存力。如今事故调查报告的详细研究表明,通过改进飞机结构的设计能够大大提高和改善乘员及机组人员的生存能力。因此,民用飞机的适坠性研究的核心问题是如何改善飞机结构的抗撞性和提高乘员的生存能力,这些作为民用飞机适航审定中主要考核指标需要在技术层面上给予设计、分析与试验验证。

飞机适坠性研究在学科上属撞击动力学范畴,技术内涵主要包括下述几方面:

(1)发展和验证结构抗坠撞分析与设计的计算方法和软件工具,以正确地理解和预估飞机撞击时结构和乘员所可能承受的载荷,为飞机抗坠能力评估提供技术支持。

(2)结合吸能材料应用和结构设计水平的提高,发展新的分析设计方法,预估飞机坠撞时的结构动态响应和乘员承受的过载,研究新型材料和组装部件(如地板和座椅)的高效吸能特性。

(3)采用基于验证的分析手段,评估飞机坠撞时的结构动态响应和传递到乘员上的冲击加速度历程,为满足适航条例要求提供低成本验证方法。

(4)研究坠撞对于飞机有关设备的冲击影响。

(5)研究坠撞动力学试验技术,为验证飞机结构及内部设施适坠性建模、完善评估方法提供依据。

适坠性研究的关键目标是在最小的或不增加飞机重量和成本的前提下,最大可能地增强乘员和机组人员的生存能力。本指南全面系统总结了“十一五”期间,我国自主研发的民用飞机机身结构和内部设施适坠性设计、分析评估与验证技术的最新科技成果,可作为我国 21 世纪研制新一代先进大型飞机机身结构在适坠性设计、分析与试验验证技术方面的综合性技术资料与手册,也可为其他结构部件的适坠性设计与分析提供借鉴和参考;同样,对于提高和改善其他在役在研各类飞机结构的适坠性提供技术支持。

民用飞机适坠性的设计目的是,当飞机发生意外导致非正常着陆情况时,为乘员提供尽可能的保护与足够的撤离空间,最大限度地改善乘员在坠撞过程中的生存能力。为实现这一安全技术目标,机身结构(机头部设备舱、中部货舱)作为重要的吸能部件必须具有抗坠撞能力,

以可控、可预见的方式发生变形与破坏,将最小的冲击载荷和过载系数传递给座舱结构和乘员座椅,保持乘员座舱结构的基本完整性,并提供可逃生通道;同时为乘员、内部设施(含座椅、行李架等)提供足够的系留强度,避免可能的次生伤害。这意味着机身结构的适坠性设计任务应充分考虑结构构件的大变形吸能特性以及强度破坏的能量耗散行为,利用分析与试验技术设计可控的吸能破坏方式,并具备正常承受飞行载荷的强度。对于适坠性而言,结构强度裕度过大或过小的机身结构都是不可接受的,过大可导致结构重量的增加,产生过高的撞击载荷响应(加速度),反而降低乘员生存性;过小使整体结构变形增大,破坏乘员座舱结构的完整性。在能量较小的坠撞中(称作硬着陆),需避免对飞机和设施的过度变形和破坏,规避影响人员逃生以及发生设施与人员接触伤害的可能。

本着上述民用飞机结构适坠性设计的目的与技术需求,以工程应用为目标,本指南主要针对民用飞机应急着陆过程中可能造成的机体结构破坏和乘员生存力问题,通过对民机机身结构、内部设施(座椅及其安装系统、约束系统,行李架固定连接装置等)以及仿真假人在应急着陆过程中的动响应数值分析和地面试验技术等课题研究工作总结,系统归纳整理了多种材料、构件、框段以及全尺寸舱段结构的吸能特性、变形行为和破坏特征,撞击动力学有限元数值分析方法、建模技术以及仿真计算结果,全尺寸舱段垂直坠撞试验设计技术、先进试验设备和测量技术,提出了多种机身地板下部吸能结构概念和吸能典型构件构形设计新技术,积累了大量的分析与试验数据和经验,为机身结构适坠性设计、分析及试验技术的工程化应用奠定了强有力的技术工作基础。可以相信,本书研究工作的技术成果以及技术指南的推广应用,必定可为我国大型飞机适坠性设计、分析、试验验证以及适航标准的补充修订起到切实、客观的科学促进作用;尤其可为我国民用飞机结构符合适航安全要求的结构适坠性设计、分析、评估和试验工作提供所需的详实细节技术支持,也必然对于我国民用航空产业技术的发展产生深远的作用与意义。

1.1 民用飞机适坠性适航规定

我国和世界其他航空大国在民用飞机设计规范和适航标准中(CCAR-25, FAR-25, JAR-25, RAAR-25),均对适坠性要求(应急着陆情况)提出了具体明确的技术指标。需要指出的是,作为乘员生命安全最终保障的民用飞机适坠性要求达到了近乎苛刻的程度。适坠性要求规定在飞机发生意外导致紧急迫降时,机体结构应能保护乘员避免遭受致命伤害。适坠安全性要求直接推动了民用飞机“适坠性设计”概念的形成与相关技术的发展。

我国运输类飞机适航标准 CCAR-25 部与适坠性相关的共计 38 条适航条款,两个附录内容,总结归纳如下:

C 分部 2 条

- 总则
- 应急着陆动力要求

D 分部 24 条

- 25.721 起落架 总则
- 25.772 驾驶舱舱门
- 25.783 舱门

- 25.785 座椅、卧铺、安全带和肩带
- 25.787 储存舱
- 25.789 物件的固定
- 25.791 旅客通告告示
- 25.793 地板表面
- 25.801 水上迫降
- 25.803 应急撤离
- 25.807 应急出口
- 25.809 应急出口的布置
- 25.810 应急撤离辅助设施和撤离路线
- 25.811 应急出口标记
- 25.812 应急照明
- 25.813 应急出口通路
- 25.815 过道宽度
- 25.817 最大并排座椅数
- 25.819 下层服务舱
- 25.851 灭火器
- 25.853 座舱内部设施
- 25.854 厕所火焰保护
- 25.855 货舱和行李舱
- 25.857 货舱等级

E 分部 2 条

- 25.963 燃油箱 总则
- 25.994 燃油系统部件的防护

F 分部 7 条

- 25.1362 应急状态供电
- 25.1411 安全设备 总则
- 25.1415 水上迫降设备
- 25.1421 扩音器
- 25.1423 广播系统
- 25.1439 保护性呼吸设备
- 25.1447 分氧装置设置的规定

G 分部 3 条

- 25.1541 标记和标牌 总则
- 25.1557 其他标记和标牌
- 25.1561 安全设备

附录 2 个

- 25 部附录 F I-V 部分
- 25 部附录 J 应急撤离演示

本书主要关注机身结构适坠性,特别关注应急着陆的动力要求以及应急着陆过程中乘员和结构动态响应。如 25 部第 561 条和第 562 条对应应急着陆情况的乘员约束、动力学条件、人体的生理指标和结构变形等提出了明确的技术指标^[1],给出的具体规定如下:

(1)尽管飞机在陆上或水上应急着陆情况中可能损坏,但飞机必须按本条规定进行设计,以在此情况下保护乘员。

(2)结构的设计必须能在轻度撞损着陆过程中并在下列条件下,给每一乘员以避免严重受伤的一切合理机会:

1)正确使用座椅、安全带和所有其他为安全设计的设备;

2)机轮收起(如果适用);

3)乘员分别经受到下列每一项相对于周围结构的极限惯性载荷系数:

①向上,3.0;

②向前,9.0;

③侧向,对于机身为 3.0,对于座椅及其连接件为 4.0;

④向下,6.0;

⑤向后,1.5。

(3)设备、客舱中的货物和其他大件物品应符合下列要求:

1)除了本条(3)2)中的要求之外,必须妥善安置这些物体,如果松脱也不太可能:

①直接伤及乘员;

②穿透油箱、管路或损坏相邻系统而引发火灾或伤害性的爆炸;

③使应急着陆后使用的任何撤离设施失效。

2)如果这种安置方式(例如,机身安装的发动机或辅助动力装置)不可行的话,则这种设计应能在第(2)条第 3)点所确立的载荷条件下固定住每一质量项目。若这些质量项目因为经常拆卸而承受严重磨损和撕拉(例如快速更换内部物件),那么这些局部连接设计应可承受 1.33 倍的规定载荷。

(4)在直到第(2)条第 3)点所规定的各种载荷作用下,座椅和质量项目(及其支撑结构)不得变形以至妨碍乘员相继迅速撤离。

[中国民用航空局 1990 年 7 月 18 日第一次修订,中国民用航空总局 2001 年 5 月 14 日第三次修订]

1.2 民用飞机适坠性设计的一般要求

飞机系统或机体结构的适坠性(Crashworthiness)、抗撞击性能(Resistance)以及可能提供的安全性保障必须符合应急着陆时的动力学条件(Dynamic Conditions),应在标准规范的设计输入条件下完成机体结构、吸能设施的设计、分析与考核验证。

描述应急着陆的坠撞严重程度的工程参数有以下两个。

(1)速度变化量(Δv),指飞机着地的瞬时速度与坠撞结束时刻速度(通常为零)的差值,它可直观描述坠撞能量的大小,以及对坠撞结构的严酷程度做出预估。在某种机身设计构型的适坠性评估中,首先就需要确定设计要求的速度改变量,如 2007 年,为了证明 B787 飞机复合材料机身具有等同于金属机身的适坠性,参照对象为 B777, B777 的适坠性设计水平是速度改

变量 7.73 m/s 时乘员腰椎处的过载为 $15g$ 。波音公司开展了全尺寸机身段的垂直坠撞试验,试验的速度改变量为 9.5 m/s 。

(2)速度变化率,指撞击过程的瞬时减速度,工程上用重力加速度 g 的倍率系数描述,又称惯性载荷系数或过载系数,用于精确量化结构、乘员以及质量装载在坠撞过程中的瞬时承载数值。设计中,一般需要根据给定的速度改变量作为输入条件,限制客舱地板处的过载水平,一般不允许超过 $20g$ 。

通常,机体结构(包括硬点连接接头)以及乘员、质量设施的系留约束系统可直接按照上述规定的每一应急着陆条件开展工程设计分析,并作为验证性试验设计、测量与考核评估的基本依据。起落架、座椅等其他吸能设施的设计则需通过运用规定的动力学条件,计算分析并转换为相应有明显技术特征的其他参数(如撞击停止距离)。

适航标准规定的动力学条件是统计意义上的撞击载荷环境,也是机体结构在保障乘员可逃生条件下应具备的最低抗撞击能力。事实上,飞机撞击的动力学条件及环境非常宽泛与复杂,包含从最简单的单向撞击到旋转和多方向的复杂组合等。飞机应急着陆撞击的外部环境非常复杂,可能包括的环境条件有:平地、丘陵、林地等,平地又可能是混凝土、泥土和沙土等。适航标准并未对外部撞击环境作出具体明确要求,因此,设计、试验机构可自行制定符合标准动力学环境的撞击条件。美国针对轻型固定翼飞机和旋翼机的适坠性设计指南^[2](MIL-STD-1290)中,就规定了用加州杂草丛生的地面条件(常年干旱少雨)作为机体结构适坠性设计的标准输入。

1.2.1 机身结构的适坠性设计要求

机身结构适坠性设计即指通过在结构上采取的合理、恰当的技术措施,使飞机在非正常着陆(着水)的情况下最大限度地保障乘员生命安全,并符合适航标准要求。运输类航空器机身结构作为重要的抗坠撞部件,在坠撞过程中的主要功能包括以下几方面。

- (1)为乘员保持可生存空间;
- (2)保护乘员隔离外部可能的灾难性环境;
- (3)提供安装座椅、货物等的连接硬点;
- (4)提供起落架载荷的反力支持,并通过构件扩散起落架撞击载荷。

前已述及,机身结构需以可控、可预见的变形、垮塌和破坏方式来保护座舱结构部分的完整性(指有充分的可逃生空间)。机身结构的抗撞击性是指用这种变形与破坏的方式保护座舱结构的承载能力,并以最小的冲击载荷和过载系数传递给座舱结构和乘员座椅。同时,机身结构的适坠完整性还包括为乘员、内部设施(含行李架等)提供足够的系留强度,保证逃生通道的通畅性,避免次生伤害。于是,机身结构适坠性设计的动力学强度技术要求包括以下几项。

- (1)保持乘员座舱壳体结构变形在可控范围内(原座舱空间的 85%);
- (2)提供足够的乘员系留、辅助设施安装连接强度;
- (3)极小化传递给乘员的过载,不致形成伤害;
- (4)维持足够的逃生通道、门框与舱门刚度以及必要的救援措施实施能力;
- (5)保证地板与座椅的足够连接强度(允许适度的塑性形变);
- (6)保证行李架固定连接装置有足够的强度(允许适度的塑性形变)。

1.2.2 结构、内部设施的适坠性安全指标

我国运输类飞机适航标准 CCAR-25 部对应应急着陆情况下机体内部乘员、设施及结构的动力学技术指标要求(25.562 条款)做出了下述具体明确的规定。

(1)座椅和约束系统必须设计成在应急着陆时并在下列条件下能保护乘员:

1)正确使用在设计中规定得有的座椅、安全带和肩带;

2)乘员受到本条规定条件所产生的载荷。

(2)凡批准在起飞和着陆时用于机组成员和乘客的每种座椅型号设计,必须按照规定的每一应急着陆条件(本指南 1.2 节),成功地完成动力试验,或根据类似型号座椅的动力试验结果经合理分析给予证明。进行动力试验,必须用适航当局认可的拟人试验模型(假人)模拟乘员,其名义质量为 77 kg(170 lb),坐在正常的向上位置。

(3)在按(2)进行动力试验时,下述性能测量值不得超出:

1)在机组成员使用上部躯干系带的情况下,单系带上的拉伸载荷不得超过 7 784 N (793 kg, 1 750 lb)。如果使用双系带约束上部躯干,则系带总拉伸载荷不得超过 8 896 N (906 kg, 2 000 lb)。

2)在拟人模型骨盆和腰部脊柱之间测得的最大压缩载荷不得超过 6 672 N (680 kg, 1 500 lb)。

3)上部躯干约束系带(在安装的情况下)在撞击时必须保持在乘员肩上。

4)在撞击时安全带必须保持在乘员骨盆处。

5)在(2)规定的条件下,必须保护每一乘员,使头部免受严重伤害。在可能发生座椅或其他构件触及头部的情况下,必须提供保护措施以使头部伤害判据(HIC)不超过 1 000。头部伤害判据(HIC)由下式确定:

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{\max}$$

式中 t_1 ——积分初始时间, s;

t_2 ——积分终止时间, s;

$a(t)$ ——头部撞击总加速度对时间的关系曲线(a 用 g 的倍数表示)。

6)在可能与座椅或其他构件碰撞导致腿部受伤的情况下,必须提供防护措施使每一股骨上的轴向压缩载荷不超过 10 008 N (1 019 kg, 2 250 lb)。

7)尽管结构可能屈服,但座椅必须始终连接在所有连接点上。

8)在(3)的 1)和(2)的 2)规定的试验中,座椅不得屈服到阻碍飞机乘员迅速撤离的程度。

1.3 民用飞机机身结构适坠分析、评估与试验验证要求

除非采用经过试验或坠撞事件验证过的成熟结构设计技术(可采用技术说明的方式提交文本文件供适航部门审查),航空器研发部门必须对所设计结构的坠撞安全性予以验证,并对结构的抗撞击能力作出恰当评估,提交详实的技术文件通过适航部门审查。

相关的舱内设施,如座椅系统、行李架及餐车等成品件也必须通过适航部门的型号合格审定,并具有有效证明文件。

1.4 本指南适用范畴

为满足我国大型民用飞机结构适坠性设计、分析与试验技术发展的紧迫需求,本指南主要总结了当前我国在民用飞机机身结构和内部设施(含乘员)适坠性设计、分析评估与验证技术方面所开展的研究工作及其技术成果。

本指南系统归纳、整理了多种材料、构件、框段以及全尺寸舱段结构的吸能特性、变形行为和破坏特征,结构坠撞动力学有限元数值分析建模与仿真技术,全尺寸舱段垂直坠撞试验设计与先进测量技术等,适用于民用飞机、运输类飞机的结构适坠性工程设计技术范畴;可作为结构适坠性工作规划、详细工程设计、数值计算分析以及全尺寸结构坠撞试验等相关工作的技术指南与参考资料;部分适用于其他类型飞机结构抗撞击能力设计时的技术借鉴。

本指南不用于航空假人、系留装置以及其他舱内硬件设施本身的设计技术工作。

参 考 文 献

- [1] 中国民航总局. 中国民用航空规章——运输类飞机适航标准. CCAR-25-R3, 2001.
- [2] Aircraft Crash Survival Design Guide. Volume III — Aircraft Structural Crash Resistance. USAAVSCOM TR-89-D-22C. ADA218436. SIMULA INC, 1989.
- [3] 孙侠生. 民用飞机结构适坠性评估技术现状与发展趋势. 结构强度研究. 2006(3).

第2章 基本概念与定义

本章给出了民用航空器机身结构适坠性分析、评估与试验验证中一些主要的基本概念及术语的定义。本指南出现的其他专业术语将在相应的各章中给予解释和说明。

2.1 飞机坐标系和姿态参数

2.1.1 飞机坐标系

在坠撞分析中,通常采用两个坐标轴系来表示在坠撞前和坠撞后的姿态,即速度、加速度和坠撞载荷等参数的方向。一个坐标轴系是地面坐标系 $Ax_d y_d z_d$,在定义地面坐标系时,通常忽略地球曲率,即采用所谓的“平板地球表面假设”,并假设地面坐标轴系为惯性坐标系。在水平地面上选一点作为原点 A (通常选为发生坠撞的初始接地点), x_d 轴在水平面内并指向某一方向, y_d 轴铅垂向上为正, z_d 轴在水平面内,构成符合右手法则的直角坐标系,如图 2-1(a) 所示。

另一个坐标轴系为固连在飞机机身上的坐标轴系 $Ox_b y_b z_b$ (机体坐标系),原点 O 取在飞机的质心处,纵轴 x_b 在飞机对称面内并平行于飞机的纵向设计轴线,指向机头为正;垂直轴 y_b 在飞机纵向对称面内垂直于纵轴,向上为正;横轴 z_b 垂直于纵向对称面指向右机翼为正,亦构成符合右手法则的直角坐标系,如图 2-1(b) 所示。

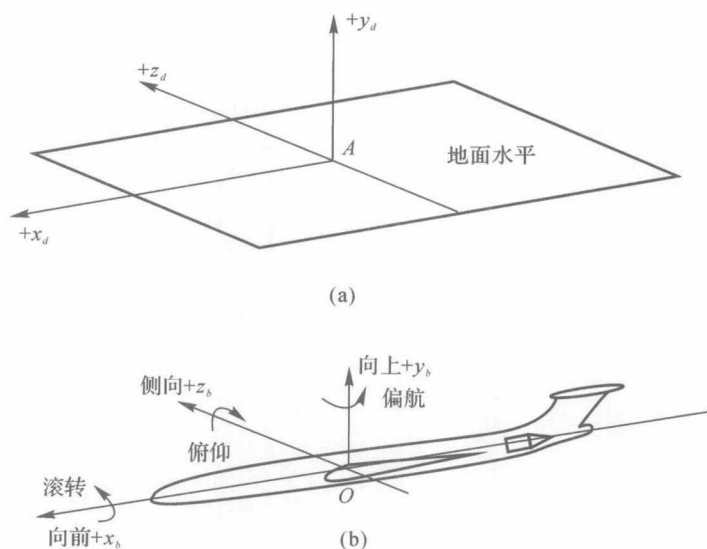


图 2-1 坐标系规定
(a) 地面坐标系; (b) 机体坐标系

当飞机处在任一飞行姿态时,其速度、加速度和力分量,以及俯仰、滚转和偏航等姿态的正方向分别沿相应的飞机坐标系的坐标轴正方向。分析地面撞击情况,如:结构破坏的发生、飞机几何尺寸的变化及撞击的反作用力,通常要用到如图2-1(a)所示的地面坐标系 $Ax_d y_d z_d$ 。

2.1.2 飞机的撞击姿态

飞机撞击时,飞机的姿态用飞机的俯仰角、滚转角和偏航角来描述^[1],如图2-2所示。

飞机俯仰角(θ)是指飞机纵轴 x_b 与水平面之间的夹角。当飞机机头指向水平面以上时俯仰角为正,当飞机机头指向水平面以下时俯仰角为负。

飞机偏航角(ψ)是指飞机纵轴 x_b 在水平面上的投影与地面坐标系 x_d 轴之间的夹角。

飞机滚转角(γ)是指飞机垂直轴 y_b 与通过飞机纵轴的铅垂面之间的夹角。

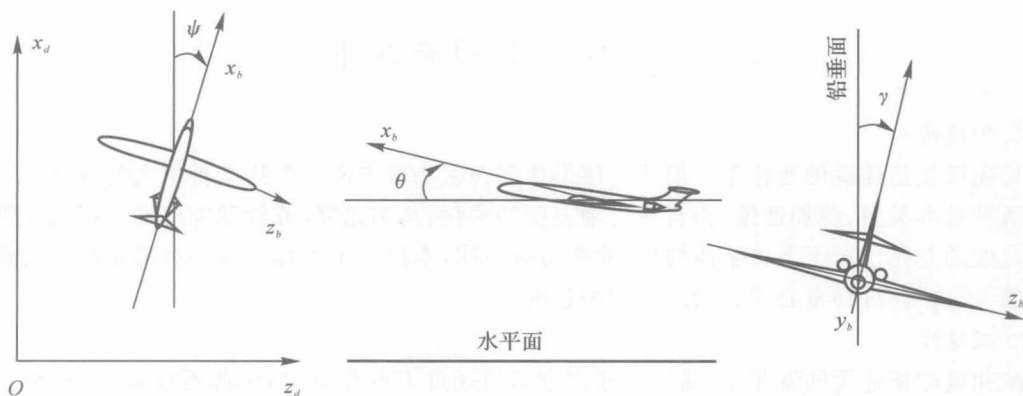


图2-2 飞机的撞击姿态角

2.1.3 撞击时的角度定义

航迹角(p)是指在撞击发生的瞬间,飞机航迹速度矢量与水平面之间的夹角。

斜坡角(β)是指在铅垂平面内撞击(地形)表面与水平面之间的夹角,上坡情况斜坡角为正,下坡情况斜坡角为负。

撞击角(q)是指在撞击发生的瞬间,飞机航迹速度矢量与撞击(地形)表面之间的夹角,撞击角是航迹角和斜坡角的代数和。

撞击角的定义如图2-3所示。

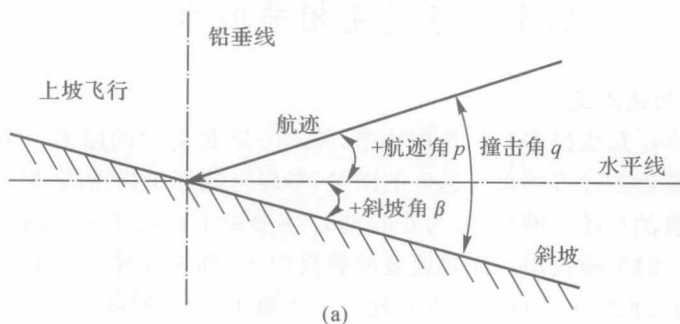


图2-3 撞击角的定义