



岳珠峰 高宗战 张峰 刘伟 等著
刘永寿 耿小亮 王心美

飞机舱门系统可靠性分析、 设计与实验

 科学出版社

014057417

V223
07

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

飞机舱门系统可靠性分析、 设计与实验

岳珠峰 高宗战 张峰 刘伟 等著
刘永寿 耿小亮 王心美



V223
07

科学出版社

北京



北航

C1742778

内 容 简 介

本书详细介绍飞机舱门系统可靠性分析、设计与实验的理论方法及工程应用。飞机舱门系统可靠性分析与设计部分主要包含舱门结构可靠性分析设计,基于可靠性的舱门结构拓扑优化设计、尺寸优化设计、形状优化设计,舱门机构可靠性分析,飞机舱门机电液一体化可靠性分析与设计技术;实验部分主要介绍某型飞机舱门结构气密性实验、水上应急出口舱门综合功能实验,包括实验原理与设计、实验技术与设备等。

本书可供从事飞机舱门系统综合设计工作的科研人员、大专院校的教师、研究生及高年级本科生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

飞机舱门系统可靠性分析、设计与实验 / 岳珠峰等著. —北京: 科学出版社, 2014.7

ISBN 978-7-03-040290-5

I. ①飞… II. ①岳… III. ①飞机门—系统可靠性—研究 IV. ①V223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 054782 号

责任编辑: 余 丁 孙 芳 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 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

*

2014年7月第一版 开本: 720×1000 1/16

2014年7月第一次印刷 印张: 12

字数: 232 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

飞机舱门系统是飞机系统的重要组成部分,飞机舱门包含登机门、服务门、货舱门、应急门等,舱门结构设计复杂,连杆、铰链数量众多,机构运动过程多阶段,运动关系复杂多变,它能否可靠的工作直接影响飞机的正常使用,甚至关系飞机安全,威胁到驾驶员和乘客的生命安全。

飞机舱门系统主要包含舱门结构设计、舱门机构设计和舱门机电液控制系统设计。飞机舱门结构设计应满足硬壳式结构的破损安全准则,其结构的使用寿命也应与飞机结构寿命大致相同。如果结构设计不合理,飞机在高空飞行时可能发生货舱门意外打开,造成压力舱减压或失压,同时还可能影响到飞行姿态,改变特性,严重时造成飞机坠落甚至解体。飞机舱门的结构设计还要保证舱门处于关闭状态时,机身刚度应保证尾翼在任何飞行情况下的载荷所引起的机身变形不会对飞机的稳定性及操纵性造成影响。

现代飞机设计中,为了提高飞机性能,越来越多的机构被引入设计中。机构越来越趋于复杂化和精密化。由于机构失效而引发的故障或失效比重逐渐增加,飞机舱门系统的机构设计问题逐渐成为人们更为关心和需要解决的问题。飞机舱门机构设计是飞机舱门设计中重要的组成部分,飞机舱门机构的运动功能能否正常实现直接影响到飞行任务的完成和飞机的飞行安全。

飞机舱门系统的设计合适与否直接关系到以后舱门的故障发生概率。因此,现代飞机舱门系统设计需从静态设计发展到可靠性设计,从单项设计指标发展到综合设计指标,从常规设计发展到精确设计。飞机舱门系统基于可靠性的设计和优化设计应该成为舱门系统设计的主要设计方法。

机电液系统是飞机舱门系统的重要组成部分,其控制飞机舱门运动,完成舱门开启、关闭等既定任务。因此,飞机舱门机电液系统的设计合适与否直接关系到飞机舱门的安全可靠。本书通过飞机舱门的机电液一体化仿真技术,模拟飞机在高空遇风情况下的开启功能可靠性分析,并提出相应的优化设计。飞机舱门实验是检验舱门能否满足设计要求、完成飞机舱门功能的重要方法,也是为舱门设计研制提供依据的重要途径。任何舱门投入工程实用都需经过实验步骤,任何舱门在设计之初也必须对舱门的典型实验数据有深入了解,这样才能更好地设计出安全可靠的飞机舱门系统,保证飞机安全可靠的运行。

本书介绍舱门系统的气密性实验和综合功能实验,包括舱门密封圈选型、舱

门整体气密性实验、舱门开关门实验、舱门强度实验等，完整涵盖能够衡量飞机舱门综合性能的实验。

感谢国防技术基础项目及中航工业第一飞机设计研究院、成都飞机设计研究所和沈阳飞机设计研究所等单位横向课题的资助。感谢课题组所有的研究生，本书的很多内容来源于他们艰辛的工作。感谢中航工业第一飞机设计研究院、成都飞机设计研究所和沈阳飞机设计研究所的工程技术人员，他们的支持和有益的建议使得本书得到了进一步完善。

尽管作者慎之又慎，但由于水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正！

目 录

前言

第 1 章 舱门结构可靠性分析设计	1
1.1 舱门密封结构的气密性、可靠性分析	1
1.1.1 密封组件原理分析	1
1.1.2 密封圈压缩实验	3
1.1.3 密封结构压缩仿真	4
1.1.4 可靠性分析	7
1.1.5 小结	9
1.2 典型门框抗疲劳可靠性分析设计	9
1.2.1 有限元模型	10
1.2.2 材料参数	11
1.2.3 载荷和边界条件	11
1.2.4 疲劳寿命可靠性分析的原理	12
1.2.5 随机变量与极限状态函数	13
1.2.6 双框构型的关键部位的强度与寿命可靠性分析	15
1.2.7 单框构型的关键部位的可靠性分析	21
1.2.8 小结	27
参考文献	28
第 2 章 舱门结构优化设计	29
2.1 基于可靠性的舱门主支撑臂拓扑优化设计	29
2.1.1 支撑臂基结构	29
2.1.2 结构的拓扑优化	31
2.1.3 优化目标及约束	32
2.1.4 优化结果	32
2.1.5 优化前后的性能对比	33
2.1.6 与现用支撑臂结构的性能对比	35
2.1.7 小结	37
2.2 前起落架舱门结构优化设计	39
2.2.1 前起落架舱门的参数化建模技术	39
2.2.2 舱门结构静强度有限元分析	44
2.3 复合材料气密舱门形状优化设计	56

2.3.1	基于 HyperWorks 的形状优化	57
2.3.2	舱门的形状优化流程	58
2.3.3	形状优化模型	59
2.3.4	形状优化结果	62
2.3.5	结果分析	63
2.3.6	小结	64
2.4	复合材料气密舱门尺寸优化设计	64
2.4.1	气密舱门尺寸优化流程	64
2.4.2	尺寸优化模型	65
2.4.3	尺寸优化结果	66
2.4.4	小结	67
	参考文献	68
第3章	舱门机构可靠性分析	70
3.1	机构可靠性分析概述	70
3.1.1	机构可靠性分析内容	70
3.1.2	机构可靠性分析方法	71
3.1.3	机构可靠性分析数值仿真技术	72
3.1.4	小结	75
3.2	舱门收放机构可靠性分析	75
3.2.1	舱门收放机构组成及原理分析	76
3.2.2	舱门收放机构运动仿真分析	77
3.2.3	可靠性分析	82
3.2.4	小结	90
3.3	飞机舱门锁机构运动精度可靠性分析	92
3.3.1	舱门锁机构的组成及工作原理	93
3.3.2	舱门锁机构运动仿真分析	94
3.3.3	舱门锁机构运动精度可靠性分析模型	96
3.3.4	舱门锁机构运动精度可靠性分析	102
3.3.5	小结	106
3.4	应急舱门锁机构卡滞可靠性分析	106
3.4.1	应急舱门锁机构的组成及工作原理	107
3.4.2	舱门锁机构开锁力测试实验	108
3.4.3	舱门锁机构开锁力仿真分析	109
3.4.4	舱门锁机构卡滞可靠性分析	114
3.4.5	小结	116
	参考文献	117

第 4 章 飞机舱门机电液一体化可靠性分析与设计技术	119
4.1 飞机舱门系统机电液联合仿真	119
4.1.1 软件介绍	119
4.1.2 接口介绍	120
4.1.3 仿真算例	121
4.1.4 对于双余度舱门系统的不同步分析与解决	122
4.2 飞行环境下飞机舱门电液系统功能可靠性分析	124
4.2.1 地面舱门功能验证性实验	125
4.2.2 飞行环境模拟	126
4.2.3 舱门电液系统虚拟样机的建模	127
4.2.4 随机高空风场环境与机电液联合仿真	129
4.2.5 舱门空中开启功能可靠性分析	131
4.2.6 小结	135
4.3 飞机舱门系统空中保持工况下电液系统的改进设计	135
4.3.1 飞机舱门空中保持的电液控制系统	136
4.3.2 飞机舱门空中保持工况分析	137
4.3.3 空中保持工况的虚拟实现	137
4.3.4 虚拟仿真结果	138
4.3.5 对于液压系统的改进优化设计	139
4.3.6 小结	141
参考文献	141
第 5 章 飞机舱门典型结构、机构实验研究	143
5.1 某型飞机舱门结构气密性实验	143
5.1.1 试件与实验设备	143
5.1.2 气密构型选型实验	145
5.1.3 功能实验	154
5.1.4 气密性实验	155
5.1.5 强度加载实验	158
5.2 水上应急出口舱门综合功能实验	168
5.2.1 试件与实验设备	168
5.2.2 内-外开锁手柄力测试实验	170
5.2.3 调整阶差与密封圈压缩量后的开锁力实验	175
5.2.4 静强度加载实验	177
参考文献	183
索引	184

第1章 舱门结构可靠性分析设计

飞机舱门结构设计应满足硬壳式结构的破损安全准则,其结构的使用寿命也应与飞机结构寿命大致相同^[1]。如果结构设计不合理,飞机在高空飞行时,可能发生货舱门意外打开,将造成压力舱减压或失压,同时还可能影响到飞行姿态,改变气动特性,严重时造成飞机坠落甚至解体^[2]。一般情况下,舱门只承受压差载荷(货桥大门还承受货物的重量),不参与机身总体受力。货舱门结构和零件尺寸的确定必须保证组件在单个载荷和一个组合载荷的最大限制载荷下使用的安全性。为防止组件破坏,必须考虑一个最小的安全系数(一般取1.5),对于门的铰链及与其相连的连接件,可增加15%的安全裕度^[3];对于铸件和焊件,必须同时考虑有关的附加系数要求;当确定承受内压结构的尺寸时,需要附加额外的安全裕度值。为了不影响飞机的稳定性和操纵性,当舱门关闭时,舱门结构应具有足够的刚度,确保在任何飞行工况下不会发生较大的变形^[4]。

保证飞机舱门的可靠性是舱门设计的主要目的之一^[5]。可靠性和其他性能一样,在研发设计过程中都必须予以充分考虑。舱门结构的可靠性设计涉及静强度设计、疲劳强度设计及有限寿命设计等一系列的研究工作^[6]。

本章主要对舱门关键结构的可靠性进行研究,主要包括组合密封组件结构的气密性能、典型门框结构的疲劳性能及在设计阶段就应该予以考虑的材料、载荷、尺寸、间隙等因素的不确定性,并在相应失效模式下对相关结构的可靠性、结构参数灵敏度进行了分析。

1.1 舱门密封结构的气密性、可靠性分析

1.1.1 密封组件原理分析

飞机舱门密封是防止舱内漏气或失压的重要保障,与舱门的气密性能和密封结构的设计密切相关^[7]。图1.1是某型飞机舱门关闭时的结构图,图1.2是对应的组合密封结构截面示意图,主要由P形密封圈、密封压条、Z形挡件、门体和门框组成。

由于制造误差、安装同轴度及在使用过程中产生的磨损等因素的存在,密封结构实际位置与设计值之间存在随机性偏差,这种随机性偏差严重影响舱门的刚度特性和气密可靠性^[8]。

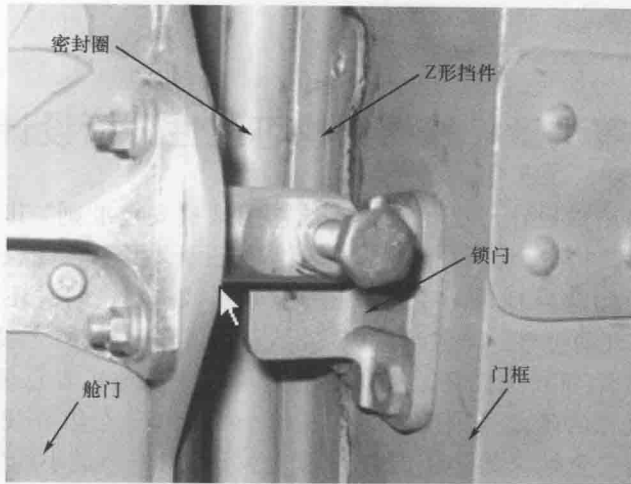


图 1.1 某型飞机舱门密封结构图

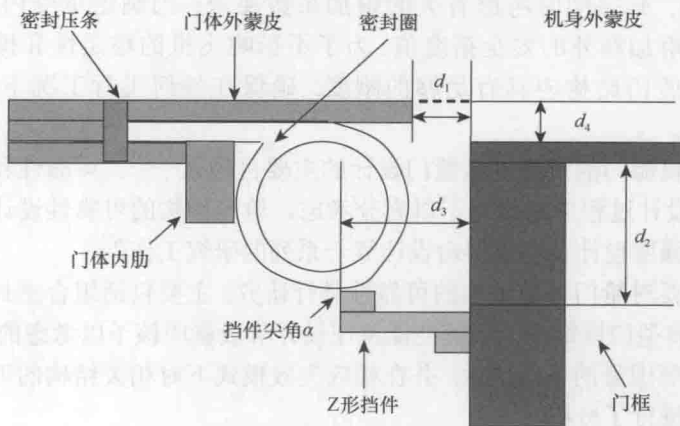


图 1.2 舱门密封结构截面示意图

图 1.2 抽取了图 1.1 门体密封结构形式的截面示意图，其装配关系主要取决于以下关键结构参数：门体与门框间隙 d_1 、挡件在门框上的纵向距离 d_2 、Z 形挡件自身的横向尺寸 d_3 、舱门关门行程 d_4 及挡件倒角半径 r 。

密封圈是一种能够发生大变形的高弹性橡胶材料，其压缩变形特性对舱门整体的气密刚度起主导作用。因此，压缩变形特性是选型的重要依据之一。目前，已经有很多学者基于有限元方法分析了实心橡胶圈的压缩应力特性，针对指尖密封、O形密封、球型密封等密封形式研究了密封材料、仿真及结构参数对密封性能的影响^[9]。

本节选取了飞机舱门设计中应用较为广泛的P形密封圈组合密封结构，考虑到密封结构参数的随机性，采用密封圈压缩实验结合有限元仿真，应用

Monte Carlo法抽样分析了密封结构的气密可靠性和参数灵敏度。

1.1.2 密封圈压缩实验

舱门密封圈实验件如图1.3所示, 尺寸为660mm×1360mm、内径为10mm的P形截面, 其橡胶的硬度值(邵氏)为50。实验测试的两种密封圈分别为: ①平纹型织物增强, 厚度为1.5mm; ②无织物增强, 厚度为2mm。实验测试压缩量均为0~7mm。根据实验件的尺寸及加载类型, 本节选用了FTS复杂加载系统作动筒进行实验(量程: 10kN, ±60mm)。实验装置示意图如图1.4所示。

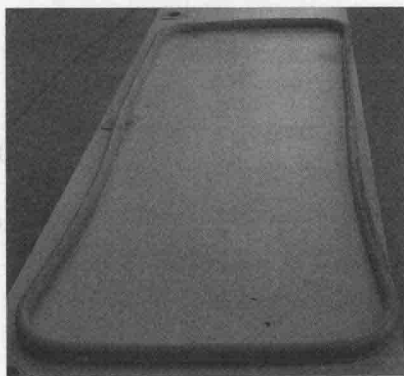


图 1.3 密封圈实验件实物图

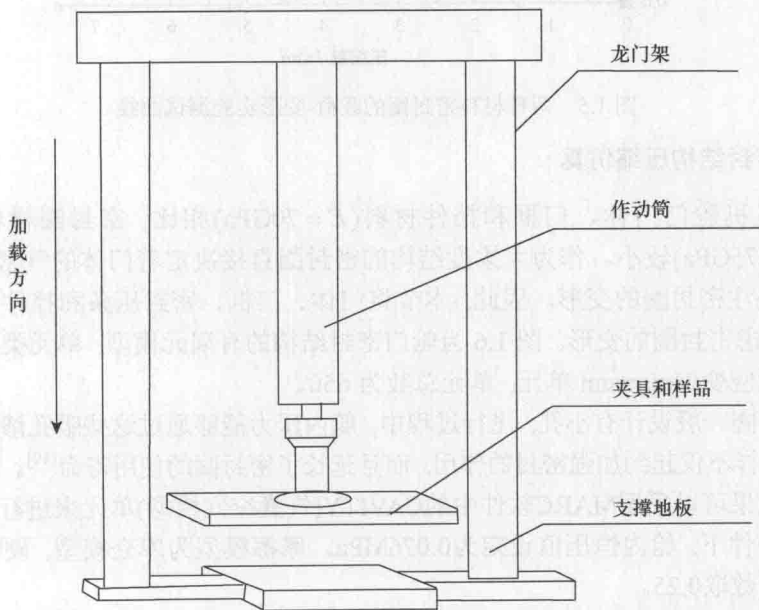


图 1.4 密封圈压缩实验装置示意图

将实验件固定在舱门密封圈卡槽上,平面门体与油缸连接,通过实验机作动筒控制压缩量,作动筒加载速率设置为0.2mm/s,可视为静态加载。实验加载平板舱门压头稍大于密封圈,尺寸为700mm×1400mm。为保证平板的加载刚度,平板舱门压头材料采用45号钢,厚度为20mm。为了消除重力对夹具的影响,实验前对FTS设备的测试力进行标定,同时利用水平仪对加载夹具进行水平校核。

实验过程中,密封圈压缩量每增大1mm,测量并记录相应的加载力。实验结果如图1.5所示,压缩量随压缩力呈非线性上升趋势,并且在相同变形量下,织物增强型密封圈的压缩力明显高于普通橡胶密封圈,具有更大的压缩比。

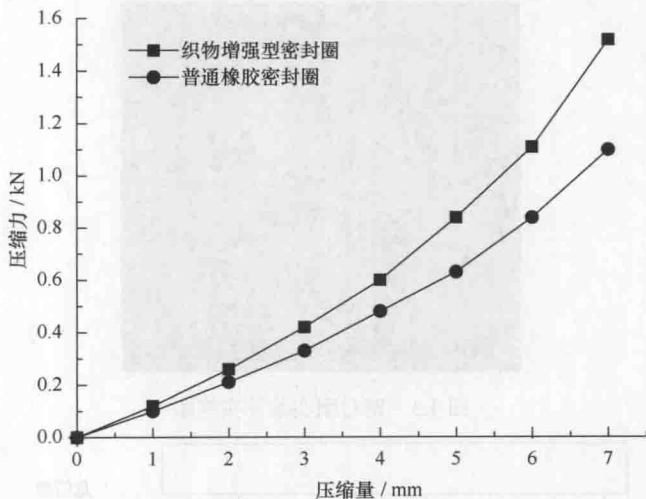


图 1.5 两种材料密封圈的载荷-变形实验测试曲线

1.1.3 密封结构压缩仿真

与飞机舱门门体、门框和挡件材料($E = 70\text{GPa}$)相比,密封圈材料的模量($E = 0.0075\text{GPa}$)较小。作为大柔度结构的密封圈直接决定着门体的气密刚度,需要着重关注密封圈的变形。因此,本节将门体、门框、密封压条和挡件近似为刚体,只考虑密封圈的变形。图 1.6 为舱门密封结构的有限元模型,单元类型选择四节点平面应变 Herrmann 单元,单元总数为 650。

密封圈一般设计有小孔,飞行过程中,舱内压力能够通过这些眼孔渗透进密封圈内。这样不仅起到加强密封的作用,而且延长了密封圈的使用寿命^[10]。圈内气压的作用效果可以采用MARC软件中的CAVITY(气囊空穴模型)单元来进行模拟。正常飞行条件下,舱内恒压值设定为0.076MPa。摩擦模型为库仑模型,硬铝与橡胶的摩擦因数取0.25。

密封圈是橡胶材料,工程上通常采用Mooney-Rivlin模型或Ogden模型来描述

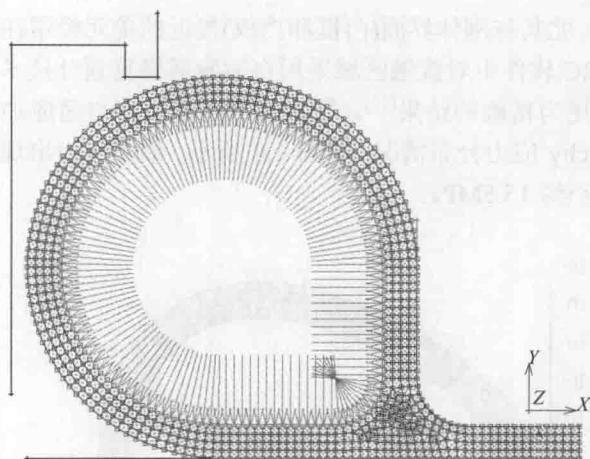


图 1.6 飞机舱门密封结构的有限元分析图

其材料特性^[11]。利用MARC软件中的“Evaluate Material”，分别采用上述两种模型对密封圈压缩实验数据进行拟合后，发现Ogden模型与实验数据基本吻合(图 1.7)。其应变能函数定义为

$$W = \sum_{k=1}^N \frac{\mu_k}{\alpha_k} (\lambda_1^{-\alpha_k} + \lambda_2^{-\alpha_k} + \lambda_3^{-\alpha_k} - 3) \quad (1.1)$$

式中， W 为应变能密度； $\lambda_i^{-\alpha_k}$ 为伸长率； μ_k 、 α_k 为模型系数，可以通过拟合应力-应变实验数据得到。

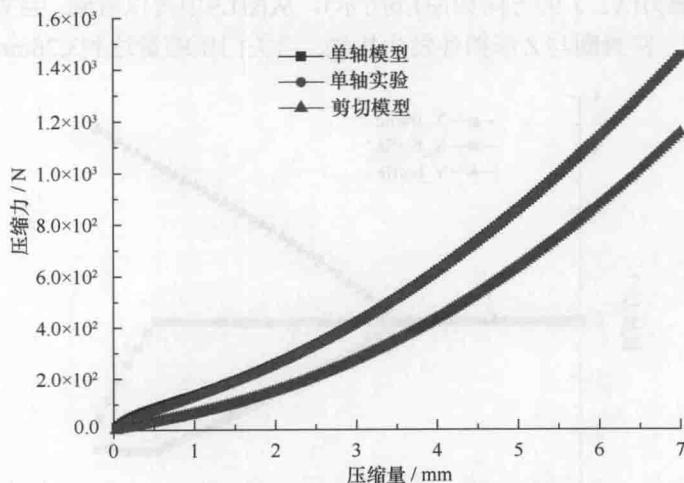


图 1.7 采用 Ogden 模型拟合密封圈材料实验数据

舱门关闭过程中，密封圈要经历一个大变形、大应变过程，其有限元网格不断

发生移动、扭曲, 尤其与刚体界面(门框和挡板)接近的单元经常在接触与非接触之间变动, 在 MARC 软件中对接触区域采用自适应网格重划分技术来解决网格畸变问题, 可以获得更为精确的结果^[12]。采用接触区域网格自适应加密技术计算得到密封圈截面 Cauchy 应力分布情况, 如图 1.8 所示, 最大应力出现在密封圈与挡件的接触部位, 大小约 15.5MPa。

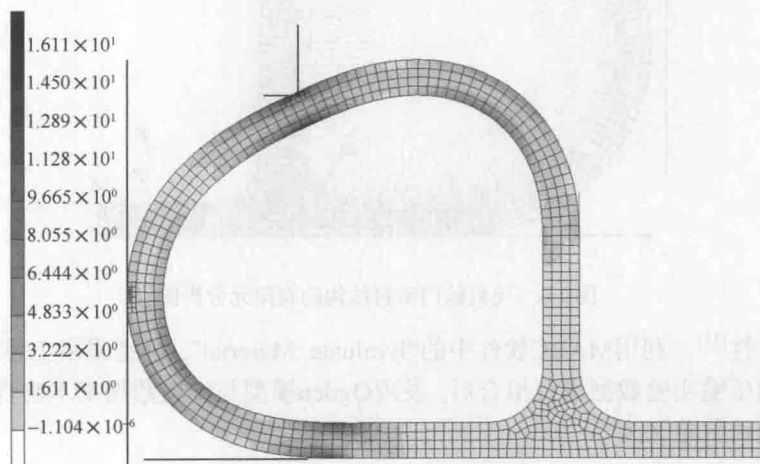


图 1.8 舱门关闭时密封圈的 Cauchy 应力及接触区域网格重划分

密封圈、门框及 Z 形挡件的单位面积法向压缩力如图 1.9 所示, X_{frame} 表示密封圈、门框的 X 方向接触力, X_{baffle} 、 Y_{baffle} 表示密封圈、挡件的 X 方向和 Y 方向的接触力(X、Y 的方向如图 1.6 所示)。从图 1.9 中可以看到, 当关门压缩量达到 1.05mm 时, 密封圈与 Z 形挡件发生接触; 当关门压缩量达到 3.26mm 时, 密封圈

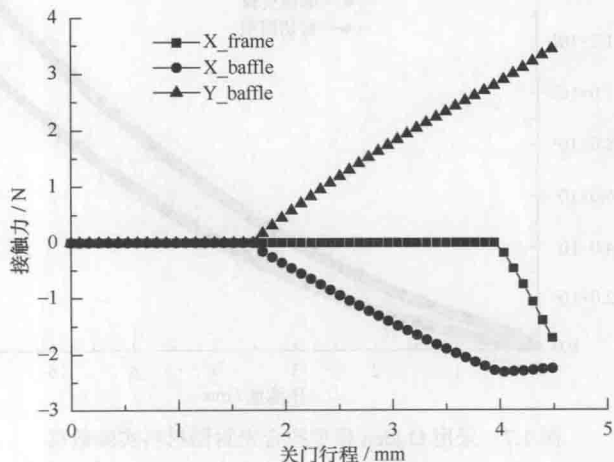


图 1.9 门体与门框二次接触力与关门行程的关系

与门框发生接触,属于二次接触。在接触点,接触力与关门量呈现折线关系(连续但不可导)。随着关门量增大,由于克服摩擦接触面产生微小滑移,使得接触力出现小幅跳动。这说明接触力与舱门密封结构参数密切相关。

1.1.4 可靠性分析

装配尺寸(门体与门框间隙 d_1 、挡件纵向距离 d_2)、Z形挡件横向尺寸 d_3 、关门行程 d_4 及挡件倒角半径 r 等参数对密封压缩力有重要影响。由于制造误差、安装偏差或使用过程中门轴等结构的磨损,将导致实际装配尺寸与设计理想值发生随机偏差,使密封圈的压缩接触力达不到密封要求。

本节着重评估上述变量对舱门密封性能的影响。根据中心极限定理,一般认为结构尺寸服从均值为设计值、标准差为 ρ 的正态分布。假如上述变量相互独立,随机变量及其分布特征信息如表 1.1 所示。

表 1.1 随机变量及其分布特征

尺寸随机变量	分布类型	均值	标准差
d_1/mm	正态分布	1.0	0.1
d_2/mm	正态分布	23.5	0.3
d_3/mm	正态分布	7.5	0.2
r/mm	正态分布	0.5	0.05
d_4/mm	正态分布	4.5	0.1

密封失效是可靠性评估中一种重要的失效模式。密封圈通过发生弹性变形填满相互接触的门体与门框表面的间隙,并维持一定的接触压力,从而达到气密效果,泄漏率是定量评估舱门密封效果的重要指标。密封压缩力不足是导致泄漏的最常见原因,因此,常常把接触力作为密封结构气密性的评判指标。一般来说,舱门设计要求能够承受3倍设计压差载荷的内外压差,折算到单位接触面积上的压缩力必须大于0.25N。因此,密封失效的极限状态方程 g 可以定义为

$$g(d_1, d_2, d_3, d_4, r) = f(d_1, d_2, d_3, d_4, r) - 0.25 \geq 0 \quad (1.2)$$

式中, f^* 表示门体与门框的二次接触力,与舱门密封结构参数密切相关,其隐式响应关系可以通过有限元确定性计算得到。

本节采用 Monte Carlo 法进行可靠性计算,主要基于以下三点考虑:

(1) 密封结构计算涉及接触问题,其压缩响应具有非线性隐式关系,对于隐式极限状态方程的可靠性分析, Monte Carlo 法计算思路简单且易于编程实现。

(2) 由上述确定性分析发现,密封圈与门框属于二次接触问题,结构参数不但决定了接触力的大小,还决定了能否发生接触。

(3) Monte Carlo法的结果可信度要高于其他方法,常常作为校核其他方法的依据。本节密封圈单次确定性仿真计算的时长较短, Monte Carlo法的计算成本可以接受。

采用编程实现数据的随机化处理与抽样,同时调用 MARC 软件进行上述确定性计算。计算完成后,提取密封圈与门体的接触力进行失效统计,并代入可靠度和灵敏度计算公式,获得舱门密封结构的失效概率和各个随机参数的灵敏度,分析流程如图 1.10 所示。

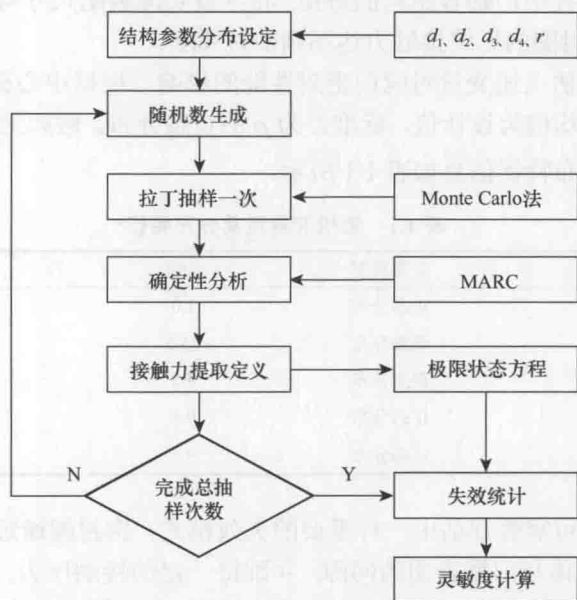


图 1.10 采用 Monte Carlo 法分析舱门密封结构气密可靠性流程图

采用 Monte Carlo 法抽样 5000 次,计算得到两种密封圈的失效概率如表 1.2 所示, P_r 为抽样计算得到的可靠度。从表 1.2 中可以看到,两种密封圈的敏度分析结果基本一致,织物增强型密封圈有较好的压缩比,具有更高的密封可靠度。

表 1.2 两种密封圈的气密可靠度及其概率敏度分析结果

类型	灵敏度	d_1	d_2	d_3	r	d_4	P_r
织物增强型密封圈	均值	1.087	0.6234	-0.1043	0.2683	-0.7538	0.8786
	方差	-0.1842	0.3585	0.1557	1.001	-0.1989	
普通密封圈	均值	2.185	1.502	-0.1237	0.1608	-1.4776	0.8043
	方差	-0.5599	0.4069	0.1250	0.5428	-0.4937	

织物型密封圈结构的随机变量灵敏度分析结果如图 1.11 所示。从图 1.11 中可以看到,减小门框间距 d_1 、挡件纵向距离 d_2 和挡件倒角半径 r , 或者增大 Z 形挡

件横向尺寸 d_3 和关门压缩量 d_4 ,都能够提高舱门的气密可靠性。在这些变量中, d_1 、 d_2 、 d_4 的均值和 r 的方差对气密性的影响较大,设计和生产、维修检验过程中需要严格控制尺寸的检查。

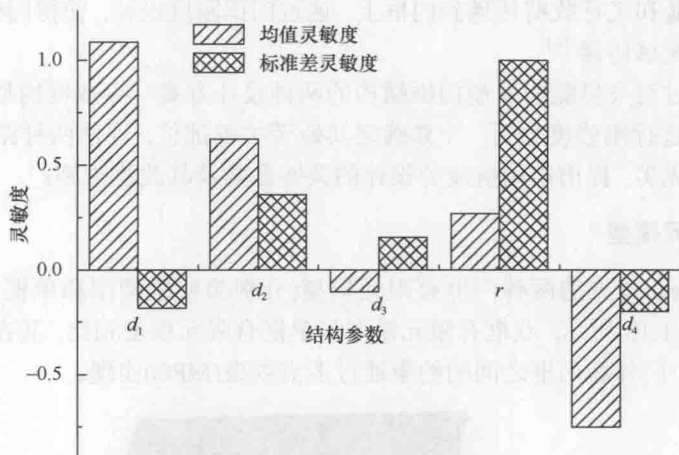


图 1.11 密封结构随机变量灵敏度分析结果(织物型密封圈)

此外,设计过程中还应注意上述随机变量对舱门其他性能的负面影响。例如:① d_1 太小会使密封圈被挤出或“碰框、磨框”影响关门便利性和增大磨损;②减小 d_2 或增大 d_4 虽然能够增大接触应力,但会增大开关门手柄力,在保证气密性的前提下设计合适的关门压缩率是至关重要的;③增大 d_3 会减小舱门有效面积,甚至可能会与开关门连杆机构发生干涉;④增大 r 会导致密封圈的应力集中,削弱其使用寿命。所以,设计过程中,在保证密封的基础上应综合考虑上述因素和性能指标,制定出合理的设计方案。

1.1.5 小结

(1) 设计过程中,在保证密封可靠性的基础上,还必须综合考虑参数的两面性,结合性能指标确定合理的设计方案。

(2) 织物型密封圈具有更高的压缩比,比非织物型密封圈具有更高的气密可靠度,建议优先选用。

(3) 装配尺寸(门框间距、挡件纵向间距)和关门行程量的均值和挡件倒角的方差对失效较为敏感,设计、装配和维修检验过程中需要对这些尺寸进行严格检查。

1.2 典型门框抗疲劳可靠性分析设计

舱门的刚度匹配特性是舱门气密性、开关门操作及机身力流传递的重要保障。