

# 基于线性间隙单元的民机舱门破损安全分析

吕雄飞\* 袁强飞 张文斌 权泽芬

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 现代民用飞机的登机门、应急门等舱门多采用半堵塞式方案,这类舱门的部分结构,如导向轴、止动块等,大于门框的净开口尺寸。在承受正压载荷时,舱门止动块和门框止动块接触,同时导向轴和导向槽需要保持足够的间隙以保证增压载荷全部通过止动块传递至机身。在破损安全工况中,当某一止动块破损时,舱门变形可能导致导向轴和导向槽接触从而将一部分载荷传递至机身,显然这取决于二者之间的间隙大小。传统的破损安全分析中多忽略导向轴和导向槽之间的间隙,认为止动块破损后相邻的导向轴一定会承担一部分增压载荷。以某型飞机的半堵塞式登机门为研究对象,使用 MSC/NASTRAN 的线性间隙单元模拟导向轴和导向槽的初始间隙,对破损安全工况下登机门的受力情况进行分析,结合未考虑初始间隙的分析结果进行讨论,对比结果说明了线性间隙单元在民用飞机破损安全工况分析中的作用,进一步揭示了设计间隙对于载荷分配的影响规律,从强度角度给出舱门关键传力部件的设计依据。

**关键词:** 半堵塞式;舱门;线性间隙单元;破损安全

**中图分类号:** V214

**文献标识码:** A

**OSID:**



## 0 引言

现代民用飞机的舱门形式主要有堵塞式、半堵塞式和非堵塞式三类。堵塞式舱门为开启时初始运动向内的舱门,其门体结构尺寸大于机身开口尺寸;半堵塞式舱门的初始运动也向内,只有部分结构边界(如舱门止动块和导向轴等)大于机身净开口尺寸;非堵塞式舱门在开启时的初始运动向外,其门体结构尺寸不大于机身开口尺寸<sup>[1]</sup>。

现代民用飞机的登机门、服务门和应急门多设计为半堵塞的形式。半堵塞式舱门在关闭位时,舱门止动块与门框止动块以点对点的形式一一匹配,舱门导向轴位于连接在门框上的导向槽内但并不与导向槽两侧内壁接触。在开启时,舱门首先需要做向内并向上的提升运动,使舱门止动块避开门框上的止动块,舱门在提升的过程中,导向轴滚轮沿导向槽内壁滚动,使舱门的运动轨迹受到约束。

半堵塞式舱门不参与全机受力,仅受到气密载

荷和外部气动载荷的作用。当舱门承受正压时,作用在蒙皮上的均布气密载荷通过门体结构的纵、横梁传递至舱门结构两侧的止动块上,通过舱门止动块与门框止动块的接触,将正压载荷以集中力的形式传递至机身,由于在关闭位导向轴和导向槽存在间隙,二者不会接触产生力的传递;当舱门承受负压时,舱门止动块和门框止动块脱离接触,负压载荷需通过导向轴与导向槽内壁的接触传递至机身。

根据民航条款 CCAR 第 25.571 条要求,民用飞机的强度需满足破损安全工况,舱门的破损安全工况需考虑每一个止动块破损的情况,破损安全载荷为正常使用压差的最大值(包括 1 g 平飞时预期的外部气动压力)的 1.15 倍,即在该载荷下任意止动块破损都不会使舱门结构失效<sup>[2-3]</sup>。当止动块出现破损时,舱门变形可能使导向轴和导向槽接触,一部分载荷通过导向槽传递至机身。传统的破损安全分析方法是直接释放掉破损的止动块约束,并在临近的导向轴上施加约束,然而由于导向轴和导向槽之

\* 通信作者。E-mail: lvxiongfei@comac.cc

**引用格式:** 吕雄飞,袁强飞,张文斌,等. 基于线性间隙单元的民机舱门破损安全分析[J]. 民用飞机设计与研究,2022(3):72-79. LYU X F, YUAN Q F, ZHANG W B, et al. Fail-safe analysis for civil aircraft doors based on linear gap element[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(3):72-79(in Chinese).

间的间隙使得二者并不能立即接触或根本不会产生接触,因此由该方法得到的导向槽作用力偏大,而临近止动块的作用力偏小,与实际情况不符。

本文以某型飞机的半堵塞式登机门为例,使用 MSC/NASTRAN 的线性间隙单元模拟登机门在承受正压载荷时导向轴和导向槽的间隙,对破损安全工况下登机门的受力情况进行分析,结合未考虑初始间隙的分析结果进行对比,以说明线性间隙单元在民用飞机破损安全工况分析中的作用,进一步分析破损安全工况下载荷分配受到间隙值的影响规律,给出舱门止动块、导向槽等关键传力部件的强度设计依据。

## 1 线性间隙单元

在工程实践中,经常会遇到结构之间相互接触的问题。接触问题通常非常复杂,需要考虑接触面之间的摩擦和相对滑动,以及可能伴随的材料和几何非线性,是典型的非线性问题。使用 MSC/NAS-

TRAN 处理接触问题时,需要建立间隙单元,预估间隙单元的刚度,并使用 Sol106 或 Sol129 非线性求解器求解,因此分析所需的工作量较大。为了使问题得到简化,MSC/NASTRAN 还提供了一种线性间隙单元分析技术。使用线性间隙单元求解接触问题,并不需要预估间隙刚度,且使用 Sol101 线性求解器,大大简化了分析工作量。该方法实际上是一种“约束迭代”的方法,将约束施加在节点或者标量点上,通过 MPC 建立这些点之间的关系,并设置迭代次数,当计算的接触面之间既没有重叠也没有拉力时,迭代结束,得到接触面的位移和接触支反力。线性间隙单元已经应用于航空航海等工程领域的分析计算中<sup>[4-6]</sup>。

图 1 给出了在 MSC/NASTRAN 中建立线性间隙单元的方法示意,如图所示需要引入两个标量点,对其中一个标量点设置 SUPORT 卡片,在建立 MPC 方程时表示预期产生接触的两点之间的相对距离;对另一个标量点设置 SPC 卡片,引入两点之间的初始距离,然后建立 MPC 方程约束各点之间的位移关系。

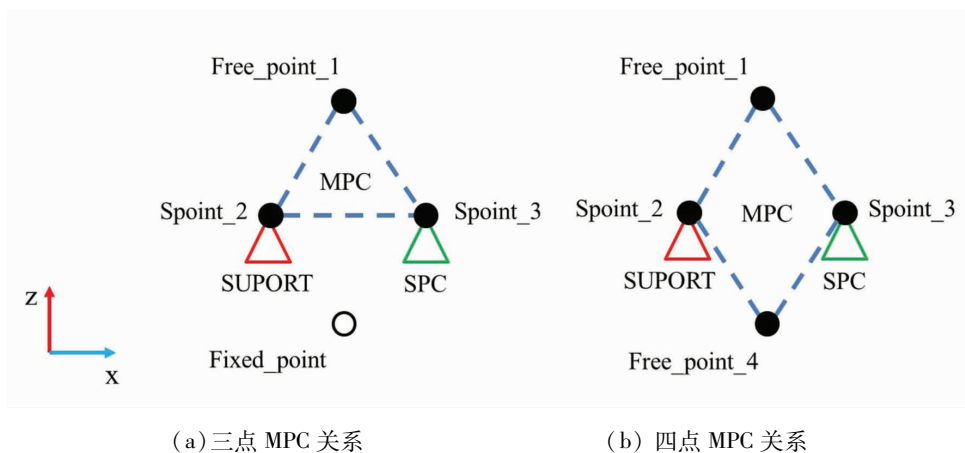


图 1 线性间隙单元的建立方法示意图

对于一个自由端和固定边界之间的接触问题,如图 1(a)所示,通过 MPC 建立自由端节点 1 和两个标量点约束关系:

$$d_{\text{SUPORT}} = d_{\text{SPC}} + U_{\text{grid}_1} \quad (1)$$

其中,  $d_{\text{SUPORT}}$  为自由端和固定端之间的距离,  $d_{\text{SPC}}$  为二者的初始间隙,  $U_{\text{grid}_1}$  为自由端的位移。

对于两个自由端之间的接触问题,如图 1(b)所示,需要建立四个点的 MPC 方程:

$$d_{\text{SUPORT}} = d_{\text{SPC}} + U_{\text{grid}_1} - U_{\text{grid}_4} \quad (2)$$

其中,  $d_{\text{SUPORT}}$  为自由端和固定端之间的距离,  $d_{\text{SPC}}$  为二者的初始间隙,  $U_{\text{grid}_1}$  为自由端节点 1 的位移,  $U_{\text{grid}_4}$  为自由端节点 4 的位移,若节点 4 固定,即

$U_{\text{grid}_4} = 0$ , 式(2)退化为式(1)。

需要注意的是,式(1)和式(2)中 MPC 方程的系数应根据参考坐标系的实际方向和节点的位置关系设置。

## 2 有限元模型

### 2.1 登机门模型

本节以某型飞机的半堵塞式登机门为研究对象,共 12 个止动块和 4 个导向轴,舱门的左右两侧各分布 6 个止动块和 2 个导向轴,同侧 6 个止动块位于舱门主结构 6 根横梁的端部,2 个导向轴分别设置在靠近顶端的两个止动块之间以及靠近底端的

两个止动块之间。

根据半堵塞式舱门的受力特点,使用 ALTAIR/HYPERMESH 软件建立舱门的有限元模型<sup>[7-10]</sup>,模型如图 2 所示,本文中的止动块和导向轴编号同样在图 2 中标示出。

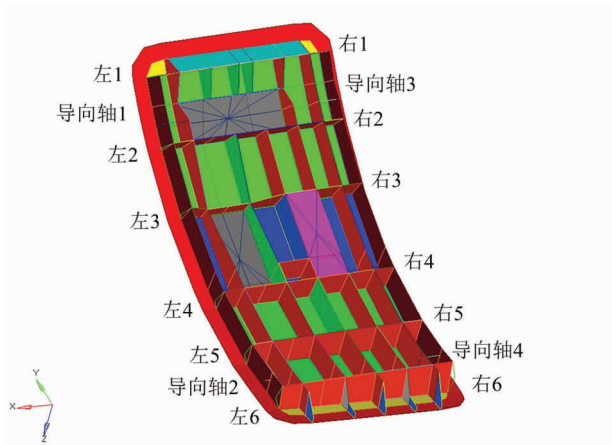


图 2 舱门有限元模型

模型简化说明如下:

a) 蒙皮简化为 SHELL 元;

b) 横梁、纵梁及边框根据弯曲刚度等效的方法简化为杆板结构,内外缘条简化为梁元,腹板简化为剪切板元;

c) 观察窗及增压预防门作开口处理,采用 RBE2 和 RBE3 单元组合的形式将开口区域所受气密载荷传递到开口周边节点上;

d) 导向轴简化为 BAR 单元,建立垂直于导向轴和导向槽接触面的局部坐标系,并按照图 1(a)所示的方法设置导向轴端点和固定边界的初始间隙;

e) 按照图 3 的方法将 12 个舱门止动块简化为 RBE2 和 BUSH 单元组合的形式,同时建立 3 方向为垂直于舱门止动块和门框止动块接触面的局部坐标系,将 BUSH 单元的 3 方向赋予远大于另两个方向的刚度值以模拟止动块受到的法向支撑,释放掉 1 个 SPC(123456)约束即可模拟该止动块破损的工况。

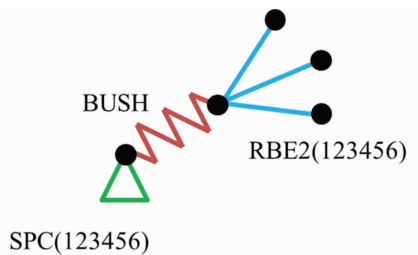


图 3 自然网格模型止动块建模示意图

## 2.2 登机门和门框组合模型

从全机有限元模型中截取门框子模型,在舱门止动块与门框止动块接触点以及导向轴和导向槽接触点处建立舱门和门框的连接,将舱门模型与门框模型连接,在门框周边节点处施加全机求解的位移约束,如图 4 所示。

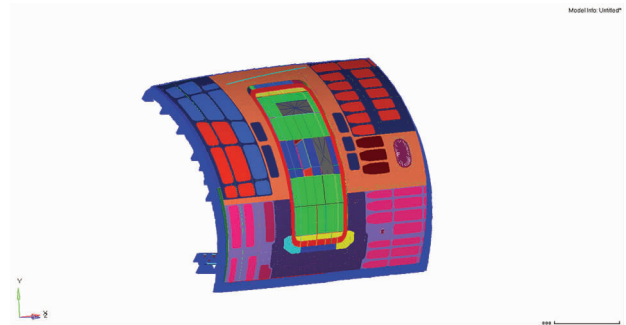


图 4 舱门和门框的组合模型

舱门和门框的连接方式如下:

a) 导向轴和导向槽连接

将导向槽简化为连接到门框的 RBE2 和 BUSH 单元的组合形式,建立局部坐标系并赋予 BUSH 单元刚度,同时按照图 1(b)所示的方法在导向轴端点和导向槽接触点之间设置线性间隙单元,如图 5 所示;

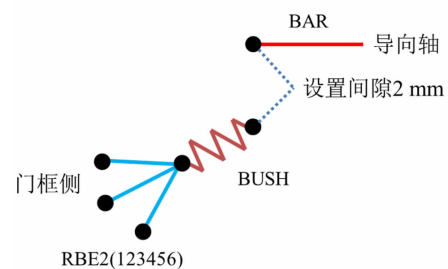


图 5 导向轴和导向槽接示意图

b) 舱门止动块和门框止动块连接

舱门止动块简化为 RBE2-MPC-Bush 组合的形式,将 BUSH 单元与门框止动块的 RBE2 单元连接,

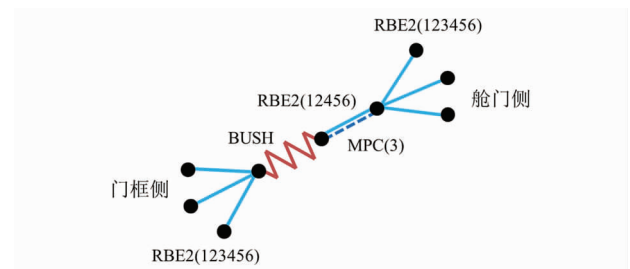


图 6 舱门止动块和门框止动块连接示意图

如图 6 所示,建立局部坐标系并赋予 BUSH 单元刚度,释放掉 1 个 MPC(3)即可模拟该止动块破损的工况。

3 计算结果与分析

3.1 舱门模型结果

首先考虑传统的分析方法,即导向轴和导向槽之间不存在间隙。在模拟破损安全工况时,释放掉破损止动块的 SPC 约束,并在相应的导向轴施加垂直于接触面方向的 SPC(3)约束。一般认为某一止动块破损后,如果它有相邻的导向轴,则会引起该导向轴上的支反力,增压载荷由该导向轴和剩余的 11 个止动块承担;如果没有相邻的导向轴,载荷全部由剩余的 11 个止动块承担,因此对于本例 12 个破损工况中有 8 个工况会引起导向轴上的支反力,表 1 给出了这 8 个工况中导向轴处的支反力大小,其中右 5 号止动块破损时右下导向轴的支反力最小,为 1 761 N;而左 6 号止动块破损时左下导向轴的支反力最大,达到 8 242 N。

设置导向轴和导向槽之间的间隙为 2 mm 后,表 1 中的计算结果表明仅有左 6 止动块破损时,左下导向轴和导向槽接触产生了 378 N 的支反力,而其余工况下均不会产生支反力,可见两种模拟方法的计算结果具有很大偏差。

表 1 舱门模型导向轴支反力

工况	引起支反力的 导向轴	支反力	
		未设置间隙 /N	设置间隙 2 mm/N
左 1 破损	导向轴 1	40 21	—
左 2 破损		3 581	—
左 5 破损	导向轴 2	2 062	—
左 6 破损		8 242	378
右 1 破损	导向轴 3	3 478	—
右 2 破损		3 375	—
右 5 破损	导向轴 4	1 761	—
右 6 破损		7 082	—

3.2 舱门和门框组合模型结果

表 2 给出了未设置间隙和设置间隙时,使用门和门框组合模型得到的导向轴支反力。在未考虑间隙时,直接约束导向轴的自由端得到的支反力会非

常大,与止动块上的支反力处于同一量级甚至超过相邻止动块的支反力,由于导向槽为薄壁结构,其承载能力远小于止动块,这样的载荷分配显然与舱门的设计原则不符,因此分析结果是不真实的。

设置导向轴和导向槽之间的间隙为 2 mm 后,在 8 个可能产生接触反力的工况中,只有 4 个实际产生了接触,导向轴最大支反力为左 6 止动块破损时导向轴 2 号的 3 410 N,此时左 5 止动块支反力为 28 754 N,该分析结果接近于理想的支反力分配情况。

表 2 舱门和门框组合模型导向轴支反力

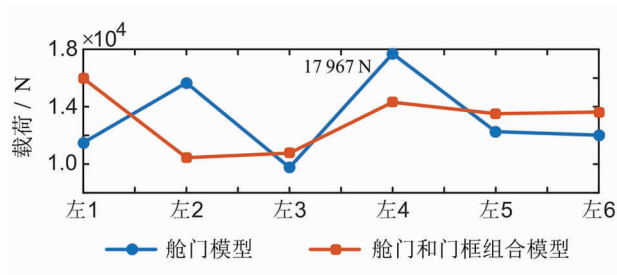
工况	引起支反力的 导向轴	支反力	
		未设置间隙 /N	设置间隙 2 mm/N
左 1 破损	导向轴 1	19 104	1 361
左 2 破损		15 018	—
左 5 破损	导向轴 2	11 001	—
左 6 破损		14 613	3 410
右 1 破损	导向轴 3	19 979	1 168
右 2 破损		14 911	—
右 5 破损	导向轴 4	10 225	—
右 6 破损		13 693	3 050

3.3 分析与讨论

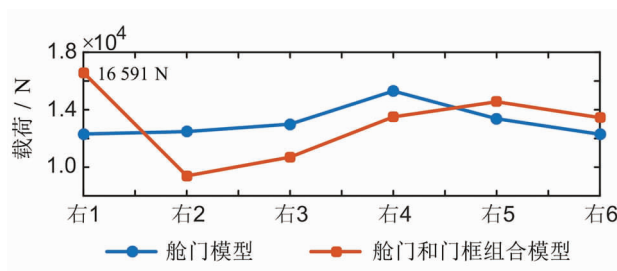
对于受到增压载荷的舱门结构,在某一工况下受到的总载是一定的,有限元分析给出的是各个止动块或导向轴上的支反力分布情况。在止动块未破损时,并不涉及导向轴的支反力分布,使用单独的舱门模型得到止动块的支反力总和为 157 648 N,舱门加门框的组合模型得到止动块支反力总和为 156 841 N,二者基本相同;在校核止动块强度时,需要取得所有止动块支反力中的最大数值,两种模型得到的止动块最大支反力分别为 17 697 N 和 16 591 N,二者相差不大,仅从该角度讲两种模型都是可靠的。

然而舱门在受正压载荷变形时,门框同样产生变形,仅采用舱门模型的约束是接地的,相比真实情况过于刚硬,而组合模型中门框提供了更真实的支撑刚度,得到的止动块支反力分布一定会更接近于真实情况,因此分析门本体的应力时更适合选择门和门框组合的模型,图 7 比较了使用两种模型得到

的止动块支反力结果,可见二者的支反力的分布具有较大差异,对比左右两侧止动块载荷的分布,使用组合模型得到两侧载荷具有相同的分布趋势,且同一横梁两侧的止动块载荷基本相同,而单独舱门模型得到的两侧止动块载荷较大差异。



(a) 舱门左侧止动块载荷分布



(b) 舱门右侧止动块载荷分布

图 7 两种模型的止动块载荷对比 (止动块未破损)

在分析破损安全工况时,尽管舱门受到的总载一定,但除了止动块上有支反力分布,导向轴上也可能承担一部分载荷。由于导向轴和导向槽之间存在的初始间隙,导向轴上是否会有作用力要根据实际情况具体分析,从表 1 和表 2 的计算结果可以看出仅在破损安全载荷下,并不是止动块破损后一定导致其与相邻的导向轴上的作用力,同时不同模型的计算结果差异也很大。表 3 给出了各破损安全工况下,未约束导向轴的位移,容易理解导向轴的相对位移若大于所设计的间隙值,则会产生支反力。根据表 3 的计算结果,使用单独的舱门模型分析时,由于舱门接地约束过强,导致门本体向气密载荷方向的位移过小,导向轴位移多小于初始间隙,不会引起支反力;将门与门框连接后,约束减弱,门本体的位移增大,此时完全约束导向轴会引起非常大的支反力,表 3 的位移数据合理地解释了表 1 和表 2 中的支反力结果,因此使用门和门框组合模型时需要结合线性间隙单元的应用才能模拟更真实的破损安全工况。

表 3 不同模型导向轴位移对比

工况	考察位置	位移/mm			
		舱门模型 导向轴	舱门和门框组合模型		
			导向轴	导向槽	相对位移
左 1 破损	左上	0.656	6.659	3.698	2.961
左 2 破损		0.665	3.982	2.388	1.594
左 5 破损	左下	0.361	2.588	0.870	1.718
左 6 破损		2.096	6.822	1.507	5.315
右 1 破损	右上	0.637	6.975	4.220	2.755
右 2 破损		0.824	4.679	2.865	1.814
右 5 破损	右下	0.294	2.336	0.697	1.639
右 6 破损		1.601	6.010	1.448	4.562

根据半堵塞式舱门的设计原则,舱门在关闭位受到增压载荷时,所有载荷只能通过止动块传递至机身,但是考虑到舱门的变形,如果导向轴和导向槽之间的间隙过小可能导致导向槽受力,因此设计时需考虑最小的间隙值。图 8 给出了使用线性间隙单元模拟不同间隙时导向轴的受力情况。表 3 中的位移结果表明舱门顶部的刚度大于底部刚度,因此在图 8 中下部导向轴的受力要大于上部导向轴,并且最小间隙应满足 0.7 mm,可以保证止动块未破损时,导向槽不受力,才能符合设计原则。

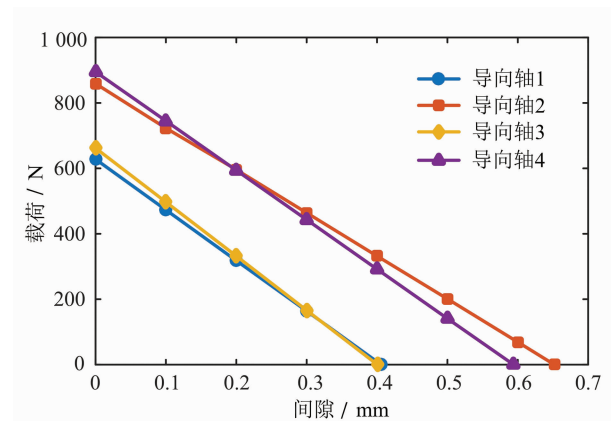


图 8 导向轴载荷随间隙变化 (止动块未破损)

从止动块的布置形式可知,当位于 4 个角落的止动块破损时,其载荷只能由 1 个与它相邻的止动块承担,而其余 8 个止动块破损释放掉的载荷都可以分配给相邻的 2 个止动块,同时 4 个角落的止动块破损形成的悬臂端对该区域的应力影响也比较大,因此是最危险的破损安全工况,在设计时应重点



考察这四个工况。图9和图10给出了这四个严重工况下,导向轴和止动块的载荷随间隙的变化情况,随着间隙的增大,导向轴的支反力减小(图9),相邻止动块的支反力增大(图10),载荷变化呈现出了良

好的线性关系,同时二者变化量基本相同,说明间隙值只改变了二者的分配关系,对其余止动块载荷无较大影响。图9也表明了设计间隙应大于0.7 mm才能使其余三个导向轴不受力。

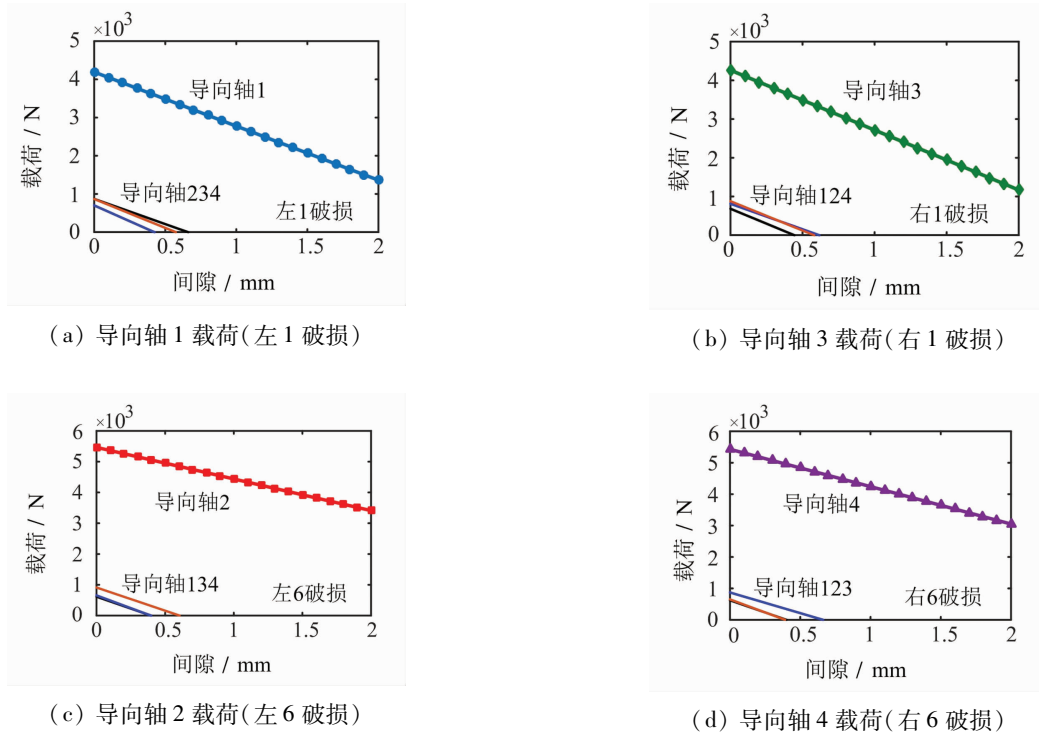


图9 导向轴载荷随间隙变化(破损安全工况)

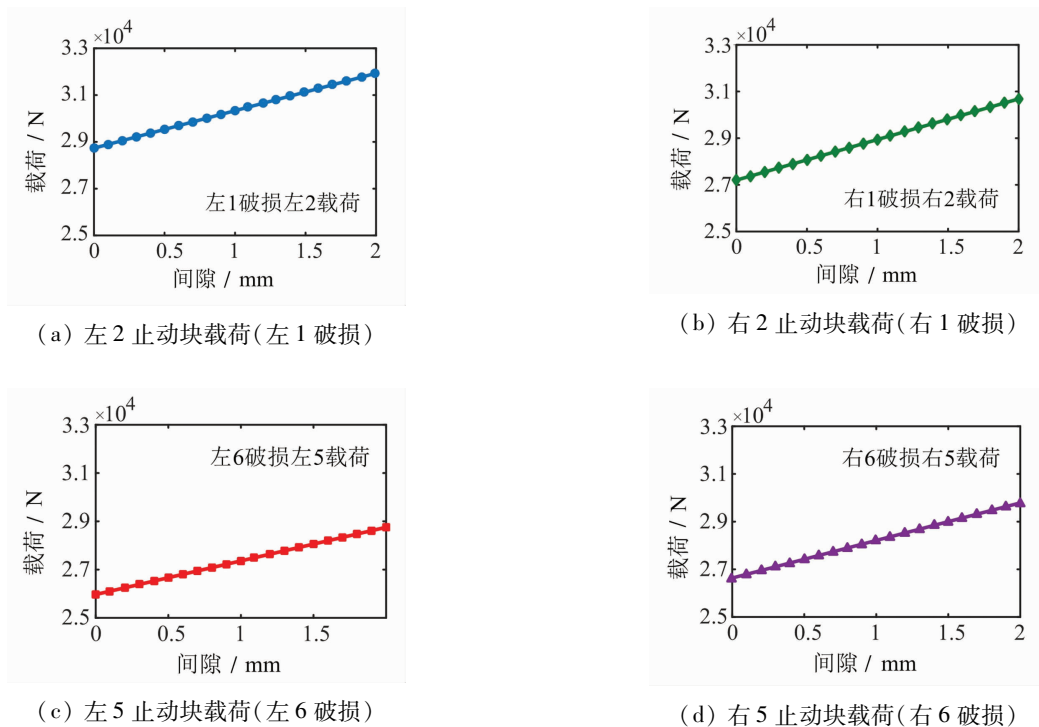


图10 止动块载荷随间隙变化(破损安全工况)

在实际的舱门设计中,既要保证止动块在所有工况下的裕度为正,也要保证导向槽在受载时不能发生破坏。考虑到二者的结构形式以及材料性能的差异,止动块的承载能力可以达到导向槽的 6 倍~10 倍。在不补强结构提升重量和成本的前提下,可以通过调节导向轴和导向槽的间隙值,优化止动块和导向槽上的载荷分配,从而满足强度要求。

图 11 给出了图 10 中止动块载荷与图 9 中导向轴载荷之比随间隙的变化情况,结合图 9 和图 10 可以对间隙值以及止动块和导向槽结构进行设计。按照止动块和导向槽的实际承载能力,通过调整导向槽和导向轴的间隙值以达到最优化的载荷分配,在图 11 中,上部两个止动块破损时(止动块左 1 和右 1 破损工况),随着间隙的增大,载荷比急剧增大,超过二者实际承载能力之比,而下部两个止动块破损时(止动块左 6 和右 6 破损工况)的载荷比例基本维持在较合理的范围内,因此在设计时可以考虑将上部导向槽和导向轴的间隙减小。在间隙值已经确定的情况下,也可以根据图 9 和图 10 中导向轴与止动块的载荷去设计止动块和导向槽的结构,以避免材料性能过剩或不足,最大化材料的利用率。

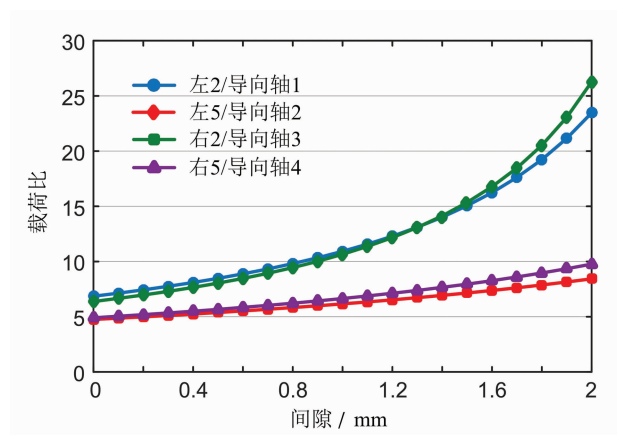


图 11 止动块与导向轴载荷之比随间隙变化(破损安全工况)

## 4 结论

本文以民用飞机半堵塞式舱门为研究对象,利用线性间隙单元建立导向槽和导向轴之间的间隙,对止动块破损安全工况下舱门的受力情况进行分析。

1)通过对比单独舱门模型和舱门加门框组合

模型的计算结果,说明了二者结果的差异性并给出了差异的合理性解释,确定了以组合模型并结合线性间隙单元作为模拟民用飞机半堵塞式舱门破损安全工况的基本方法;

2)基于该模型进一步研究了设计间隙值对于载荷分配的影响规律,明确了间隙值必须满足的最小量以及根据止动块和导向槽承载能力确定的合理载荷分配范围,为舱门关键传力部件的强度设计提出依据。

## 参考文献:

- [1] 姚雄华,邓军锋,冯蕴雯. 运输类飞机舱门设计[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
- [2] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,1985.
- [3] 王哲. 飞机舱门设计要求研究[J]. 航空标准化与质量,2015(5): 40-42; 52.
- [4] 章仕彪,蔡庆荣. “线性”间隙处理技术在工程中的应用[J]. 民用飞机设计与研究,2006(3): 6-9.
- [5] 叶旭,赵文斌,江森. 间隙单元在独立舱式液货船强度计算中的应用[J]. 船舶设计通讯,2018(1): 67-71.
- [6] 杨柳明,张少雄,许允. 独立舱式沥青船强度直接计算中线性间隙单元的应用[J]. 船海工程,2019, 48(4): 47-54.
- [7] 赵鑫. 典型工字梁结构有限元方法分析[J]. 科技视界,2017(7): 231-232.
- [8] 张伟,陶金库. 基于 Patran 和 MSC Nastran 的现代飞机舱门主结构校核方法[J]. 计算机辅助工程,2013, 22(增1): 206-208.
- [9] 张友坡. 基于有限元法的飞机舱门结构仿真技术[J]. 中国高新技术企业,2013(7): 21-24.
- [10] 吕国成,陈瑞东,刘可佳,等. 民用飞机半堵塞式舱门细节有限元模型[J]. 沈阳航空航天大学学报,2015, 32(2): 80-84.

## 作者简介

吕雄飞 男,博士,工程师。主要研究方向:民用飞机结构强度分析。E-mail: lvxiongfei@comac.cc

袁强飞 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机结构强度分析。E-mail: Yuanqiangfei@comac.cc

张文斌 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机结构强度分析。E-mail: Zhangwenbin@comac.cc

权泽芬 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机结构强度分析。E-mail: Quanzefen@comac.cc

## Fail-safe analysis for civil aircraft doors based on linear gap element

LYU Xiongfei \* YUAN Qiangfei ZHANG Wenbin QUAN Zefen

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The passenger door, emergency door and other doors of civil aircraft are mostly designed semi-plugged, of which some marginal structures, such as guiding shaft and doorstop, exceed the net opening of the door frame. When subject to positive pressure, the doorstops compress the matched stops on the door frame, meanwhile the guiding shaft and the guiding groove should maintain sufficient clearance to ensure that the pressurized load is transferred to the fuselage only through the doorstops. In the failsafe loading condition, since one of the doorstops is damaged, the deformation may make the shaft and the groove contact, thus a portion of load is transferred through the contact which greatly depends on the gap size. The gap is usually ignored in traditional failsafe analysis, and it is considered that the adjacent shaft definitely bears a part of the load after the stop is damaged. In this paper, the failsafe analysis on the semi-plugged door using linear gap element in Nastran as well as the analysis without considering the gap was given, the comparison and discussion demonstrate the significance of using the linear gap in fail-safe analysis, and the effect of the design gap on the load distribution was further revealed, the design basis of the key load-carrying components of the aircraft doors was presented from the perspective of mechanics.

**Keywords:** semi-plugged; aircraft door; linear gap element; failsafe

---

\* Corresponding author. E-mail: lxiongfei@comac.cc