

Stress Analysis of Thin-Walled Double-Chamber Structure with Torque

Shuo Wang, Zheng Zhang, Yuliang Huang

Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing
Email: ws719229592@outlook.com, jordanzhang@buaa.edu.cn

Received: May 16th, 2017; accepted: Jun. 3rd, 2017; published: Jun. 6th, 2017

Abstract

In this paper, the stress distribution on thin-walled double-chamber structural partitions is studied. Firstly, we establish the finite element model based on a simplified structural model, and then, the stress distribution of the partition structure is revealed by the computational results of ANSYS software. The results show that the stress distribution of the partition wall of the closed rooms is common in nature, so they can provide a reference for the design of partition.

Keywords

Thin-Walled Closed Chamber Structures, Partition, Torque, FEM, Stress Distribution

扭矩作用下薄壁双闭室结构的隔板应力分析

王 硕, 张 铮, 黄裕梁

北京航空航天大学, 固体力学研究所, 北京
Email: ws719229592@outlook.com, jordanzhang@buaa.edu.cn

收稿日期: 2017年5月16日; 录用日期: 2017年6月3日; 发布日期: 2017年6月6日

摘 要

本文对薄壁双闭室结构隔板上的应力分布情况进行了研究。首先对结构型式进行简化, 建立有限元模型, 然后用ANSYS软件进行计算, 揭示了多闭室结构隔板的应力分布状况, 此结果对薄壁闭合结构多闭室的隔板应力分布问题具有共性, 为隔板设计提供了借鉴。

关键词

薄壁闭合结构, 扭转, 有限元, 应力分布

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 背景介绍

在飞机结构设计中,薄壁闭合结构是一种非常重要的结构形式,也是机翼的典型结构形式。初期的飞机因受材料、工艺和设计水平的限制,采用比较简单的杆系骨架作为总体承力系统,在骨架外覆盖布质蒙皮,用以承受分布的空气动力载荷并将其传递给骨架。布质蒙皮不能严格保持空气动力所要求的外形,而且骨架和蒙皮分工承担各自的任务,对结构重量是不经济的。

金属蒙皮和桁条组成的加劲壁板既有足够的局部弯曲刚度,又能参加总体承力,所以薄壁结构与杆系结构相比具有显著的优点,从30年代起就取代了杆系结构,成为航空结构的主要形式,广泛用于机翼、尾翼、旋翼、机身。薄壁结构也用于航天器和火箭结构,如箭翼、箭体、舱体等。

为了满足强度与刚度要求,机翼剖面通常由两个以上的闭室构成,如图1所示,常见的双梁式机翼有三个闭室,多墙式的机翼闭室数量将更多[1]。根据机翼的结构特性,这些闭室的主要作用就是承担扭矩,其截面上剪流分布可以基于薄壁结构理论求得,对于具有两个或两个以上闭室的情况,则是借助各闭室的变形协调条件来求解。

但在一般研究中,多是注重机翼剖面的整体剪流分布,而将相邻闭室间的隔板剪应力当作是均匀的,是左右闭室剪流叠加的结果。实际上,相邻两闭室的剪流闭环交汇在隔板上,其应力大小以及分布也应予以必要的重视,有必要进一步研究其分布规律[2],从而保证结构整体的安全。

2. 基本模型和理论分析

在多闭室结构中,任意相邻闭室的隔板都具有近似性质的应力分布,因此,本文以双闭室为例进行隔板应力分析,所得结果对多闭室情况也适用;另外,虽然薄壁闭合结构的外形不尽相同,但为了分析方便,本文采用矩形截面形式,所得结果也同样适用于其他截面形式的多闭室薄壁闭合结构。因此,不妨将机翼剖面简化成如图2所示的矩形双闭室结构。

该模型分左右两个闭室,左闭室长度 $a = 20 \text{ mm}$,右闭室长度 $b = 20 \text{ mm}$,高度 $H = 20 \text{ mm}$,壁厚 $t = 2 \text{ mm}$ 。施加扭矩 $T = 2 \text{ N}\cdot\text{m}$,翼段长度取 25 mm 。机翼截面形状长的方向为 x 轴,高的方向为 y 轴,机翼纵长方向为 z 轴(如图3所示)。材料弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

双闭室结构属于一度静不定结构,利用图3所示的应力状态叠加法,将静不定问题化为静定问题,即无隔板状态(如图3左图所示),与预设的一种应力状态的线性叠加进行处理。

根据结构力学[3]公式可知剪流可以设为

$$q_i = q_Q + X_1 q_{i1}, \quad i = 1, 2 \text{ 分别表示闭室 } 1, 2$$

其中 $q_Q = T/(2\Omega)$, Ω 为整个周缘所围的区域面积;设 $q_{11} = 1$, 则 $q_{12} = -1$, 根据刚性截面假设,正则方程为

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1q} = 0$$

其中, $\delta_{11} = \int \frac{q_{11} \cdot q_{11}}{Gt} ds$, $\Delta_{1q} = \int \frac{q_{11} \cdot q_Q}{Gt} ds$, G 为截面扭转刚度, s 为截面周界;考虑到剪流公式,联立可求得 $X_1 = 0$, 故剪流 $q_1 = q_2 = q_Q = T/(2\Omega) = 1.25 \text{ N/mm}$, 由此可得到外框平均剪应力为

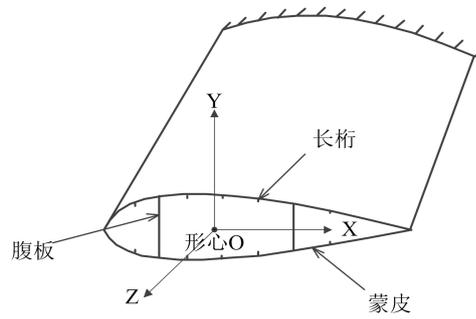


Figure 1. The diagram of wing structure
图 1. 机翼结构示意图

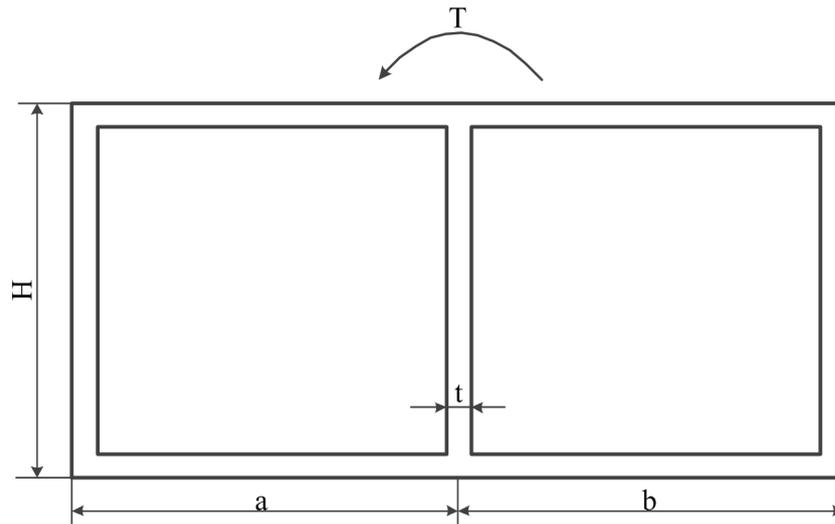


Figure 2. The diagram of wing structure
图 2. 机翼结构示意图

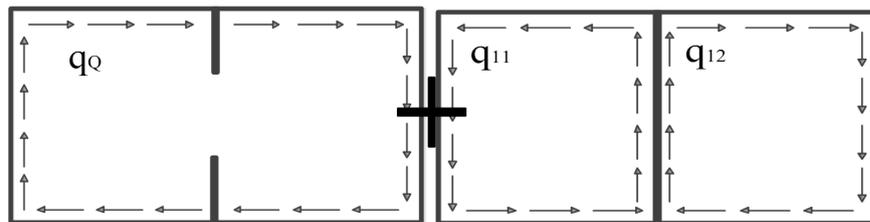


Figure 3. Theoretical calculation of torsional shear flow in double-chamber
图 3. 双闭室扭转剪流理论计算

$$\tau_{\text{外框}} = \frac{q_Q + X_1 q_{1i}}{t} = 0.625 \text{ MPa}$$

而隔板上的平均剪应力则为

$$\tau_{\text{隔板}} = \frac{X_1 (q_{11} - q_{12})}{t} = 0$$

3. 有限元模型和计算分析

用 ANSYS 15.0 软件建立如图 4 所示的三维结构模型[4], 其中使用的单元分别有 PLANE183 (用来划

分面网格), SOLID186 (用来划分体网格)以及 MPC184 (与模型耦合以施加扭矩)三种单元。

然后用 ANSYS 15.0 软件计算, 为了方便观察, 选取模型翼长方向中间处的一层单元, 面内剪流及应力分布如图 5 和图 6 所示(注: 云图中的红色表示剪力方向为正, 蓝色表示剪力方向为负), 可知在薄壁

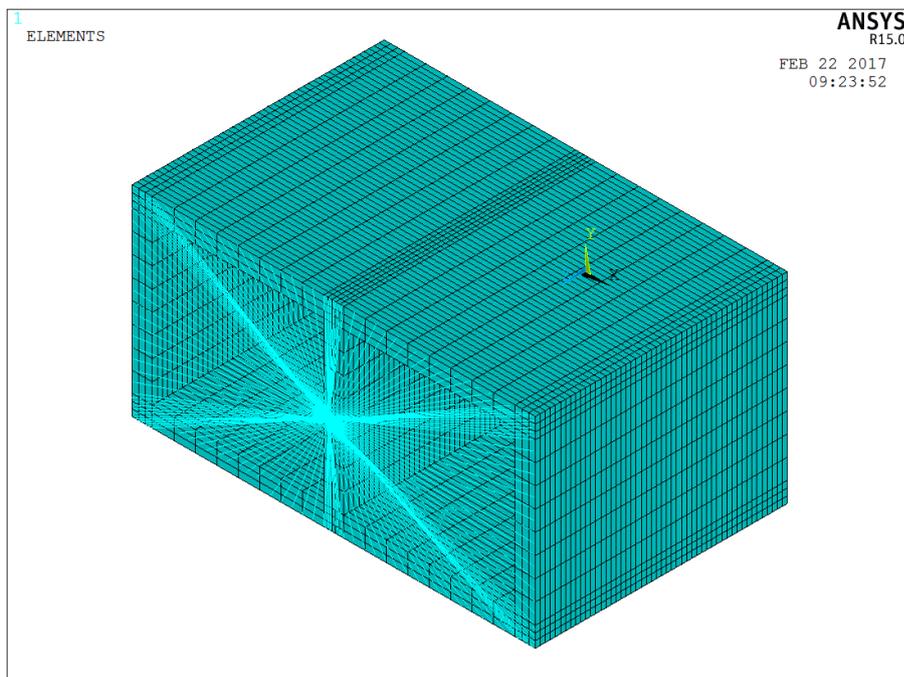


Figure 4. Three-dimensional finite element model

图 4. 机翼三维简化模型

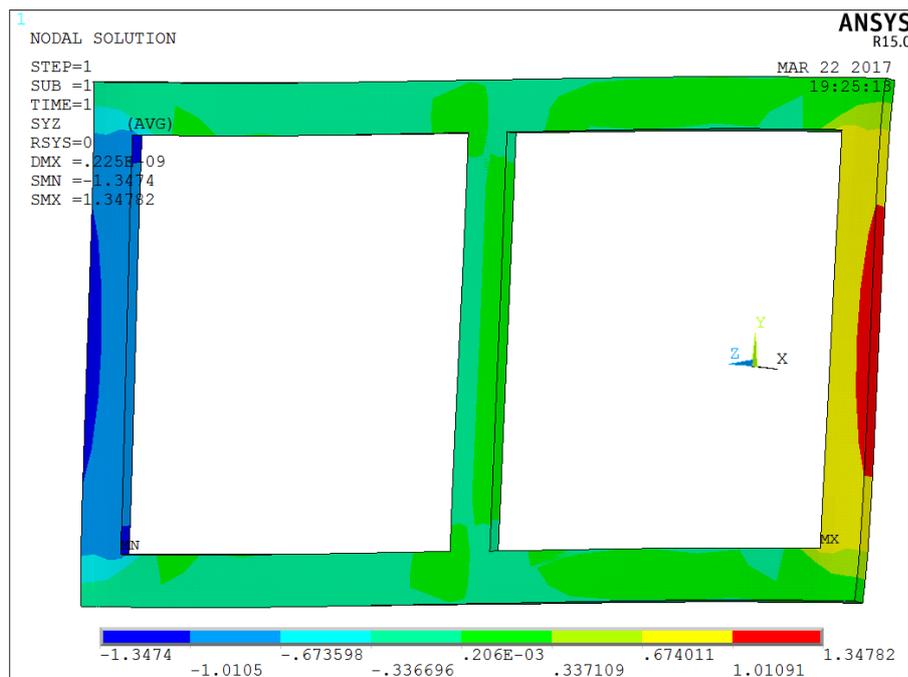


Figure 5. Contour of shear stress τ_{yz} (unit: MPa)

图 5. 剪切应力 τ_{yz} 云图(单位: MPa)

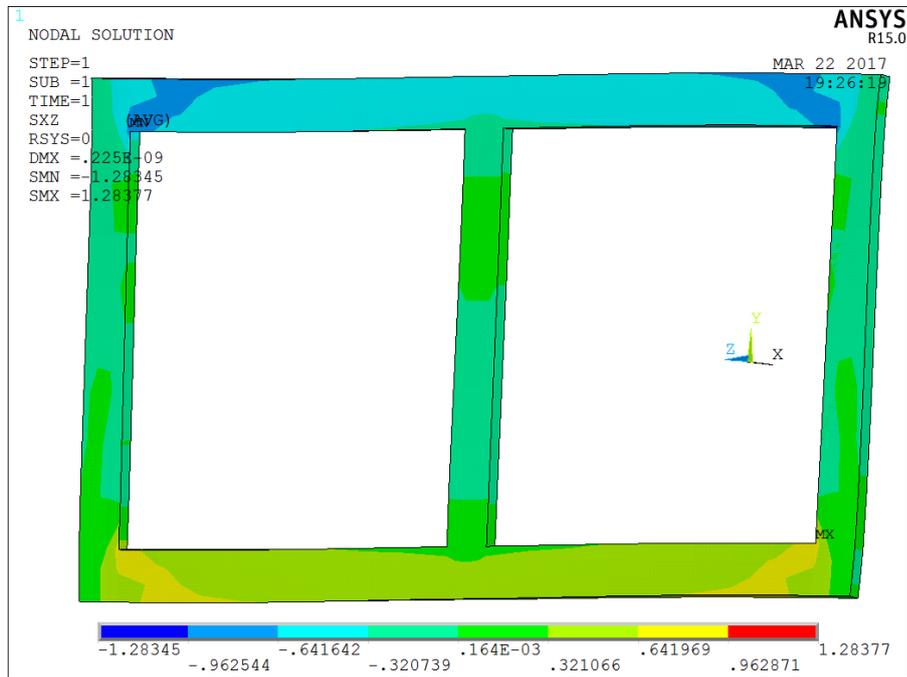


Figure 6. Contour of shear stress τ_{xz} (unit: MPa)
图 6. 剪切应力 τ_{xz} 云图(单位: MPa)

闭合结构的蒙皮厚度方向上,剪应力并不是完全均匀分布的,在蒙皮外表面的剪应力大于内部的剪应力;在拐角处应力会产生突变,因此实际应用中往往需要使用平滑过渡或者局部加强的措施来减轻应力集中产生的影响。

为了进一步明确多闭室结构,特别是隔板的应力状态,选取如图 7 所示的三条路径,并相应的绘制该路径上的应力分布如图 8、图 9 和图 10 所示。

根据上述计算结果可以得出以下结论:

(1) 上下框的平均剪应力 τ_{xz} 为 0.501 MPa,左右框的平均剪应力 τ_{yz} 为 0.976 MPa,隔板承受的剪应力 τ_{yz} 相对结构中轴线 $x = 0$ 呈反对称分布,并且其最大值为 0.073 MPa,远小于外框中的剪应力,这与理论计算的外框平均为 0.625 MPa,隔板为 0 的情况也是一致的,而由于有限元模型中出现应力局部集中的现象,所以导致外框的应力与理论出现较大的偏差;

(2) 根据三维有限元模型计算,剪应力在三个方向上均存在,特别是沿壁厚的应力很明显不是均匀的;

(3) 由于上述双闭室结构是对称的,因此隔板上的应力很小,符合理论认识,但沿隔板厚度的应力分布仍然呈现线性分布(参看图 8),剪应力 τ_{yz} 在隔板上的分布状况见图 11。

在隔板两端与外框交界处,由于几何形状的突变,其剪切应力分布比较复杂,并且在拐角存在应力集中现象;而在隔板中部剪应力呈现明显的梯度分布。

4. 拓展分析

上述模型的左右闭室大小相同,而在实际应用中各闭室往往大小不一,本节将讨论左右不对称闭室受扭时的应力分布状况。

将图 2 模型中右闭室宽改为 $b = 30 \text{ mm}$,其他条件保持一致,计算结果(结构整体剪应力分布)如图 12 所示,隔板处的剪应力分布如局部放大图 13 所示,与图 11 所示情况基本相同。

在隔板上取如图 7 所示的路径 FUBAN_Y,其上的剪应力仍然很小,如图 14 所示。

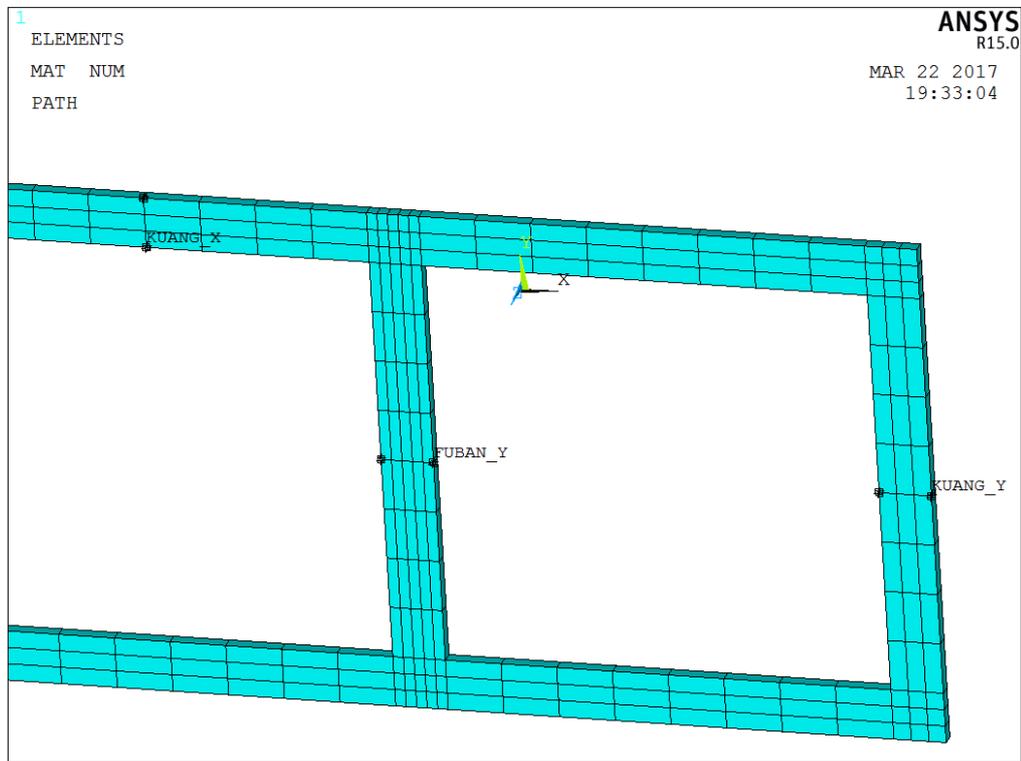


Figure 7. Diagram of path selection
图 7. 路径定义

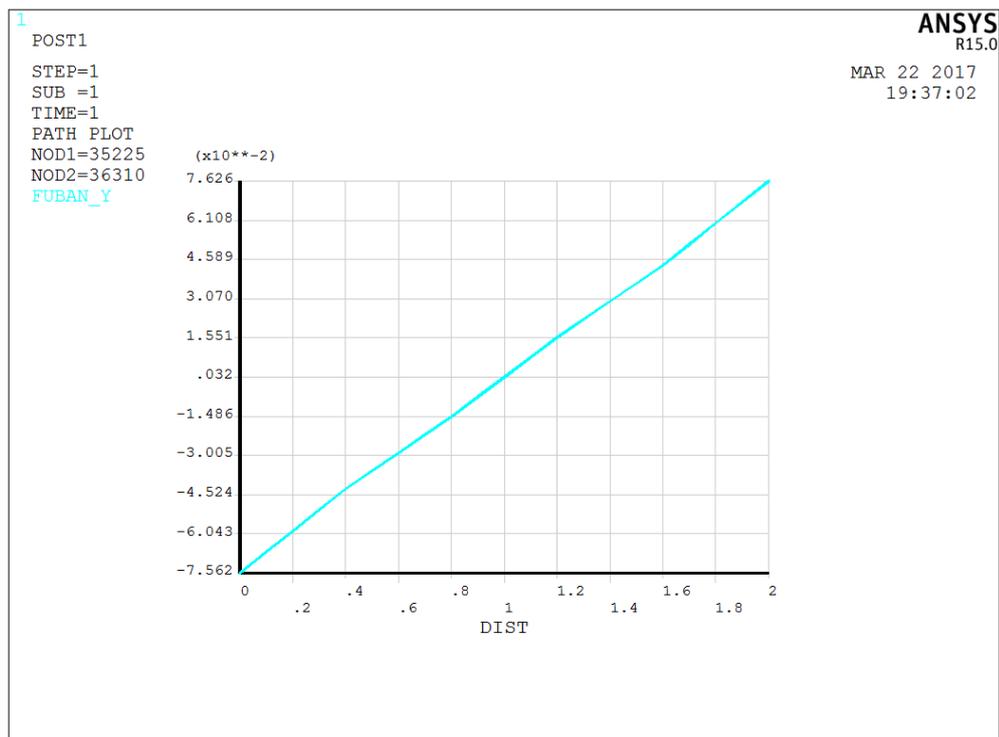


Figure 8. Distribution of shear stress τ_{yz} on the path named FUBAN_Y
图 8. 路径 FUBAN_Y 上的 τ_{yz} 分布

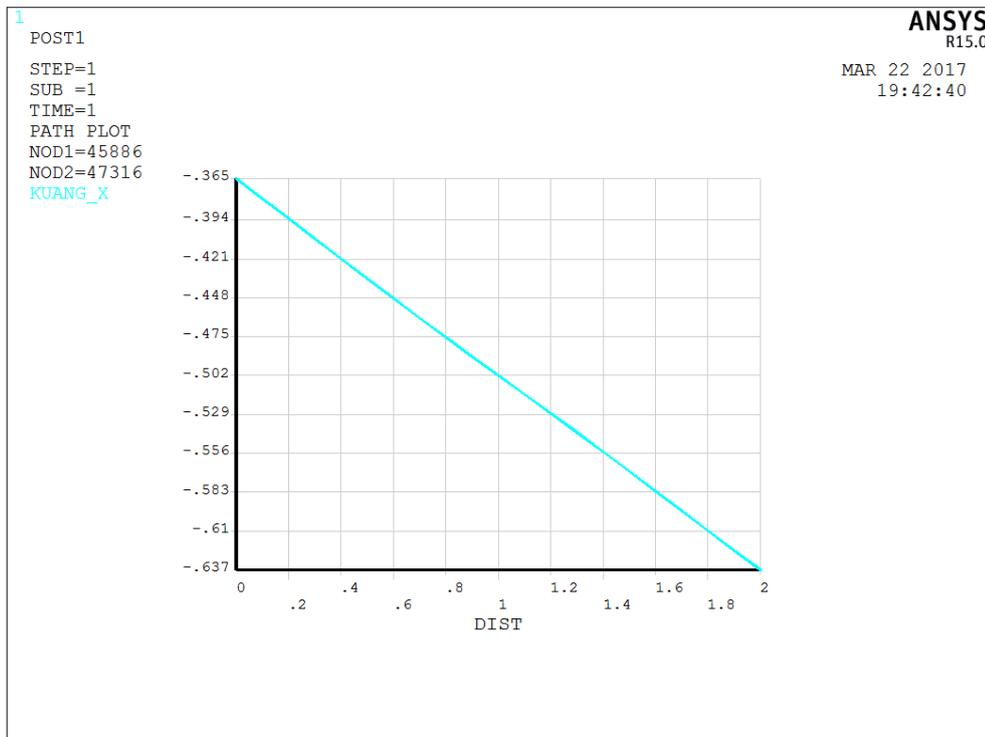


Figure 9. Distribution of shear stress τ_{xz} on the path named KUANG_X

图 9. 路径 KUANG_X 上的 τ_{xz} 分布

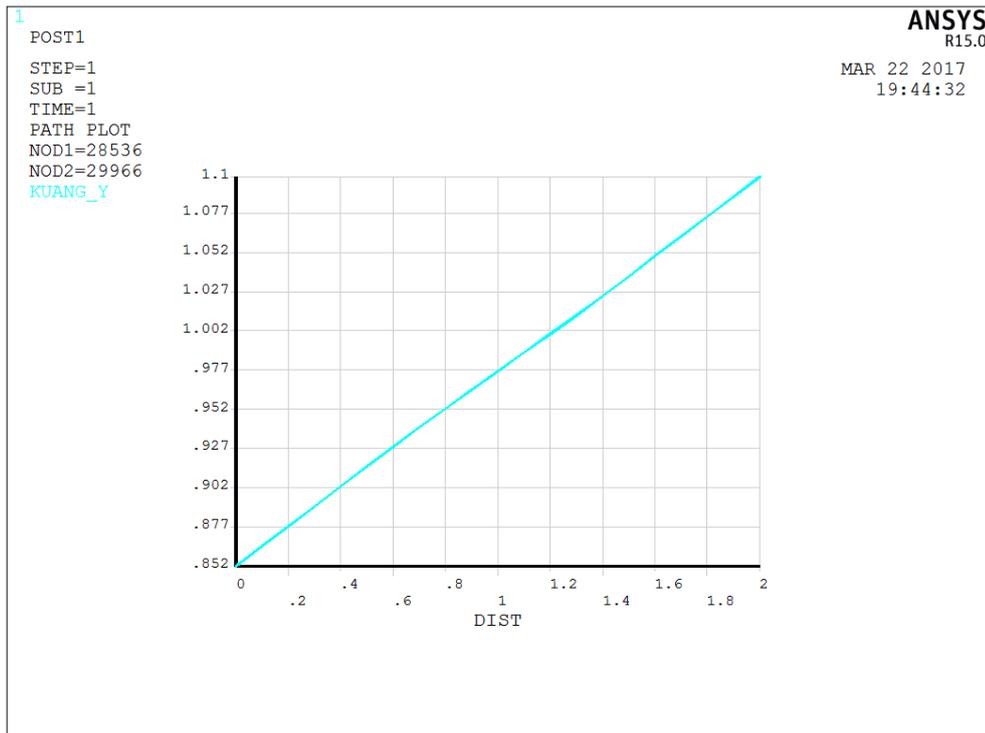


Figure 10. Distribution of shear stress τ_{yz} on the path named KUANG_Y

图 10. 路径 KUANG_Y 上的 τ_{yz} 分布

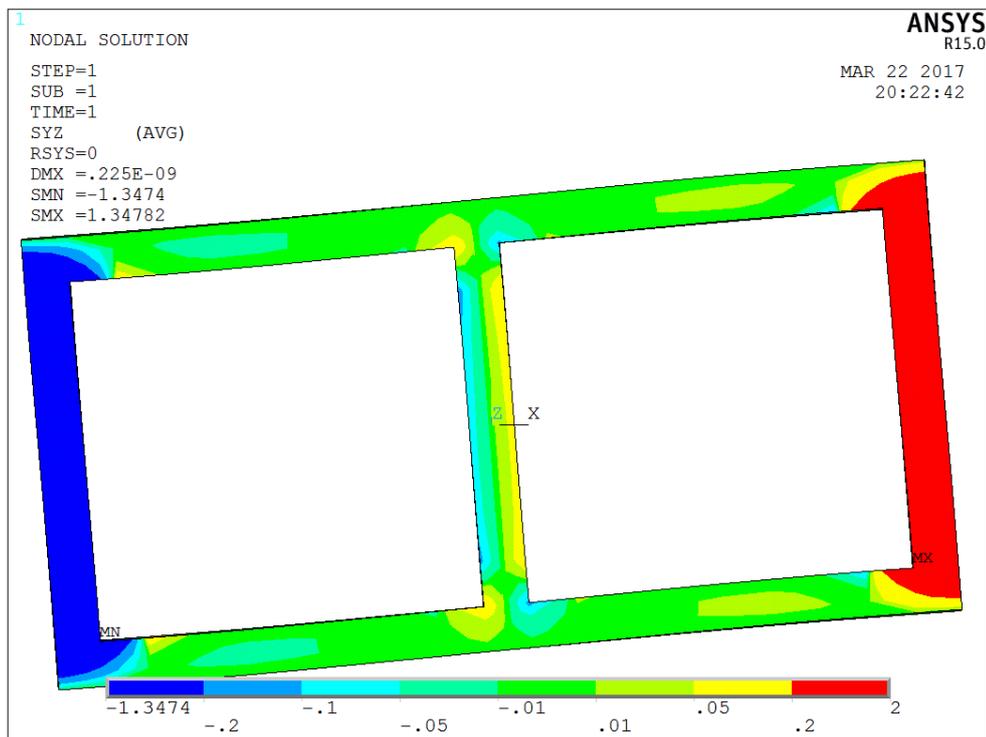


Figure 11. Distribution of shear stress τ_{yz} on partition

图 11. 隔板上的 τ_{yz} 分布



Figure 12. Contour of shear stress τ_{yz} (unit: MPa)

图 12. 纵向剪切应力 τ_{yz} 分布(单位: MPa)

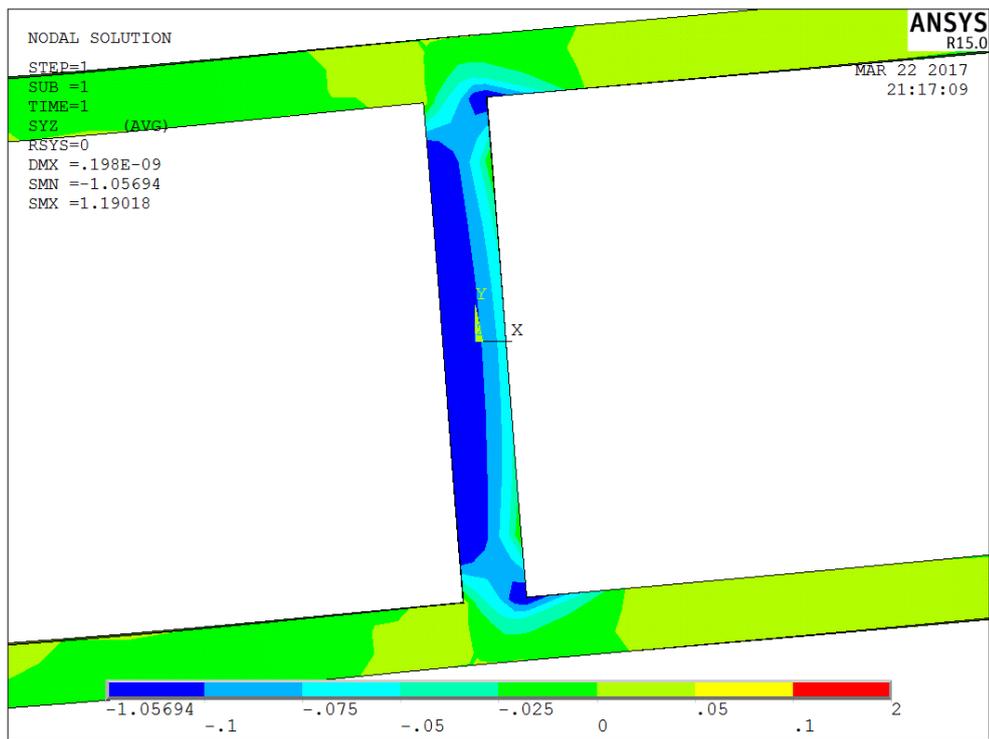


Figure 13. Distribution of shear stress τ_{yz} on partition

图 13. 隔板上的剪切应力 τ_{yz} 分布

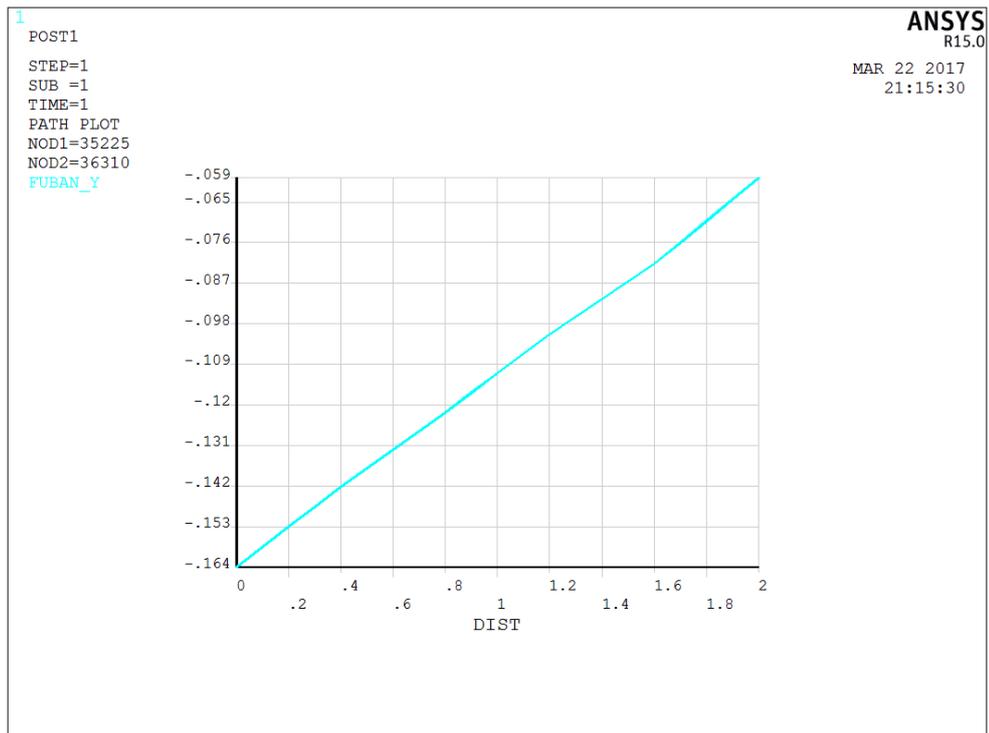


Figure 14. Distribution of shear stress τ_{yz} on the path named FUBAN_Y

图 14. 路径 FUBAN_Y 上的剪切应力 τ_{yz} 分布

据此可得以下结论:

(1) 由于不同大小的闭室所受的剪应力不同,因此,隔板厚度方向的剪应力分布也不再呈反对称状态;本例中,隔板两侧面剪应力方向相同,且大小相差一倍左右。可见,闭室尺寸对隔板的应力大小和分布有明确影响;

(2) 此时左闭室上下框的平均剪应力为 0.381 MPa,右闭室上下框的平均剪应力为 0.309 MPa,左闭室左框的平均剪应力为 0.779 MPa,右闭室右框的平均剪应力为 0.885 MPa。由此可知闭室越大,其分配承担的扭矩也越大,其应力也更加不均匀。所以闭室的截面积应尽量均匀并保持长宽一致,这样才能充分发挥多闭室的效果。

5. 总结

本文通过有限元分析,讨论了双闭室结构的剪应力分布形态,其中隔板上的剪流分布受到相邻闭室的尺寸影响,呈现较为复杂的分布,但是隔板上所受的剪应力比外框小得多,所以该类结构的强度校核重点在结构形状的连接处。另外值得注意的是,设置隔板的作用在于分配扭矩到各个闭室,增强结构扭转刚度,避免出现颤振[5]。在求解多闭室机翼剖面的扭转刚度特性,推导具有多闭室机翼剖面的扭转刚度和剖面刚心的计算公式时,隔板上剪流较小,为了简化计算,可以近似假设隔板不参与承担。

参考文献 (References)

- [1] 张鹤,何景武,初洪宇. 具有多闭室机翼剖面扭转刚度特性的分析计算[J]. 飞机设计, 2013, 33(1): 21-25.
- [2] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
- [3] 龚尧南. 结构力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.
- [4] 李黎明. ANSYS 有限元分析实用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] 酆正能. 飞行器结构学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org