

一种飞翼式布局飞机波浪形压力舱的结构探讨

黄海东*

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 提出了一种“波浪形”压力舱的飞翼式布局飞机外形, 建立了波浪形壁板的力学模型并对壁板厚度和曲率进行了优化, 基于波浪形压力舱的受力特性对其进行了结构布置, 借助Nastran有限元方法, 对波浪形压力舱和多泡压力舱进行了初步计算和分析, 结果表明波浪形压力舱在结构上是可行的, 但重量稍重。

关键词: 飞翼式布局飞机; 波浪形压力舱; 优化; 计算和分析

中图分类号: V214.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 03-0023-4

美国B-2飞机的成功和X-47B无人机的成功试飞表明, 飞翼式布局飞机在提高气动效率和减重方面具有很大的潜力。但是, 将飞翼式布局应用于客机仍然面临着巨大的挑战, 其中最大的困难之一是飞机客舱的设计。与传统飞机机身压力舱不同, 传统飞机的机身为圆形(或近似圆形), 座舱气密载荷在机身蒙皮上产生的是膜应力, 这是机身蒙皮受载的最佳方式, 而飞翼飞机的压力舱为矩形, 气密载荷在蒙皮上会产生弯矩, 这会使结构设计付出很大的重量代价。针对这个问题, 世界各国的飞机设计者一直在寻求更好的解决方法。这里针对飞翼飞机的客舱设计, 从结构设计角度出发, 提出一种波浪形外形的座舱, 并对其进行结构布置和初步分析。

1 飞翼飞机压力舱结构布置概述

对于飞翼飞机的压力舱设计, 目前已被提出的结构布置方案主要有如下5种^[1-4], 见图1:

(1) 平面壁板方案: 压力舱上、下壁板为近似平板结构, 如图1(a)所示。

(2) 曲面壁板方案: 压力舱上、下壁板的内形面为圆弧曲面形状, 而外形面为近似平面形状。该方案在波音公司早

期的800座级BWB(Blended-Wing-Body Aircraft)飞机方案中被提出, 如图1(b)所示。

(3) 多泡方案: 整个压力舱被分为多个气密压力泡, 相邻压力泡通过工字肋分隔, 上、下结构由内蒙皮和外壁板组成, 内蒙皮以受膜应力的形式承受座舱气密载荷, 外壁板以受拉压应力(上壁板受压, 下壁板受拉)的形式平衡弯矩。这种布置率先由NASA提出, 如图1(c)所示。

(4) Y形肋方案: 鉴于多泡方案的双层蒙皮结构在制造上比较困难, NASA对其进行了改进, 进一步提出了Y形肋方案——壁板由双层改为单层, 以Y形肋代替工字肋, Y形肋在降低壁板与肋在相交处应力的同时, 并不会增加太多的重量。如图1(d)所示。

(5) 多支柱方案: 多支柱方案也是对多泡方案的改进, 一组支柱代替工字肋, 如图1(e)所示。

2 波浪形飞翼构型的提出

2.1 圆形压力舱和矩形压力舱

上述几种飞翼压力舱结构布置方案中, 其压力舱截面形状可以总结为两种, 一种为传统圆形截面的压力舱, 另一种为矩形截面的压力舱, 如图2所示。二者在承受气密载荷的特性

收稿日期: 2013-06-16; 退修日期: 2013-11-19; 录用日期: 2014-02-28

*通讯作者。Tel.: 029-86832065 E-mail: haydenhhd@163.com

引用格式: HUANG Haidong. Structural discussion of pressure cabin characterized with wave-section surfaces of fling-wing aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2014, 25(03): 23-26. 黄海东. 一种飞翼式布局飞机波浪形压力舱的结构探讨[J]. 航空科学技术, 2014, 25(03): 23-26.

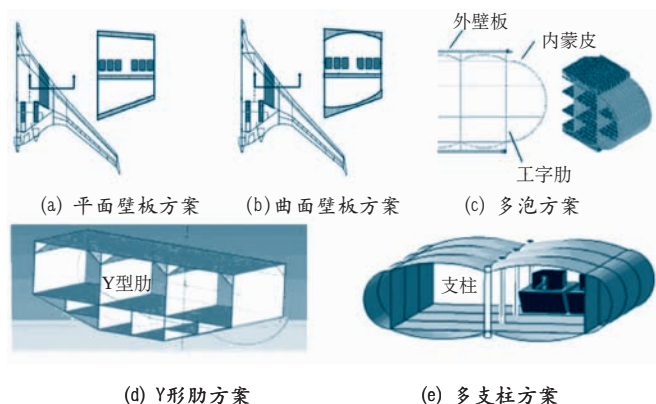


图1 几种飞翼式布局飞机压力舱结构布置方案

Fig.1 Some structure layout schemes of pressure cabin for flying-wing aircraft

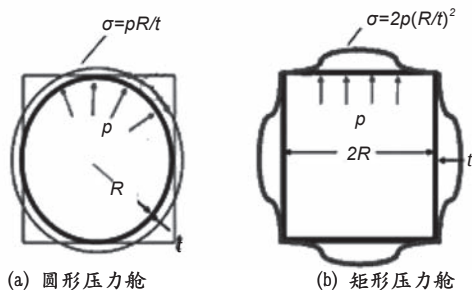


图2 圆形压力舱和矩形压力舱受载对比

Fig.2 Loading contrast of circular pressure cabin and rectangular pressure cabin

上有着本质的不同:传统飞机机身截面形状为圆形,气密压力在蒙皮上产生的是膜应力,其大小为 $\sigma = pR/t$,而飞翼飞机的压力舱截面形状为矩形,根据工程经验,壁板可以简化为两端支持介于固支跟简支之间的等截面直梁,气密压力在梁上产生弯矩,弯矩引起的最大应力为 $\sigma = 2p(R/t)^2$,远大于前者。其中, σ 表示应力, p 表示气密压力, R 表示半径, t 表示厚度。

2.2 波浪形飞翼构型

为了保留圆形压力舱以膜应力的形式承受气密载荷的优点和单层压力舱壁板结构在制造上的优势,提出一种新的



图3 波浪形飞翼式布局飞机构型

Fig. 3 Wave shaped configuration of flying-wing aircraft

飞翼飞机构型——波浪形飞翼式布局飞机构型:将压力舱的横截面外形设计为波浪形,如图3所示。

3 波浪形压力舱的结构布置

3.1 波浪形壁板的厚度和曲率的优化

波浪形壁板可以简化为简单支持的曲梁模型,以上壁

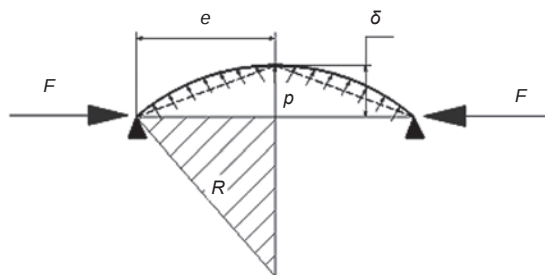


图4 波浪形壁板的受力模型

Fig.4 Force model of wave-section panel

板为例,在承受气密载荷 p 的同时,也承受由弯矩引起的压力载荷 F ,如图4所示。

单纯承受气密载荷 p 时,壁板厚度 t_p 可根据公式(1)求得:

$$t_p = pR/\sigma_b \quad (1)$$

单纯承受压力 F 时,压力在弧顶产生最大的弯矩,其所需厚度 t_F 可通过如下步骤计算得到:

a. 压力 F 产生的最大弯矩 M 为

$$M = F\delta \quad (2)$$

其中 δ 为力臂,可根据图4中阴影三角形的胡克定律求得:

$$e^2 + (R - \delta)^2 = R^2 \quad (3)$$

b. 根据弯曲应力公式有

$$\sigma_b = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4)$$

其中,

$$I = \frac{1}{12} b t_F^3 \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{2} t_F \quad (6)$$

c. 联立式(2)~(6),从而可求得壁板厚度 t_F 为:

$$t_F = \sqrt{\frac{6F(R - \sqrt{R^2 - e^2})}{b\sigma_b}} \quad (7)$$

式(1)~(7)中: R 为圆弧半径; σ_b 为强度极限; y 为横截面上的点距离中性轴的最远距离; I 为截面惯性矩; b 为截面宽度。

从 t_p 和 t_F 的计算中可以看出,他们均与圆弧半径 R 的大小相关联,其关系曲线见图5(参考文献[6],取 $\sigma_b = 340\text{MPa}$,

$p=0.137\text{MPa}$, $F=290000\text{N}$, $e=1450\text{mm}$, $b=500\text{mm}$)。 t_p 曲线表示壁板承受气密载荷 p 时, 壁板厚度与圆弧半径的关系, 半径越小, 壁厚也越小; t_F 表示壁板承受压力 F 时, 壁板厚度与圆弧半径的关系, 半径越大, 壁厚越小。那么, 壁板同时承受气密载荷 p 和压力 F 时, 其厚度必须同时满足 t_p 和 t_F 的要求, 也就是说壁板厚度取 t_p 和 t_F 中较大的一个。从图5中可以看出, 两条曲线的交点对应壁板的最小厚度和最佳圆弧半径, 即半径约18m时, 壁板所需厚度最小为24mm。

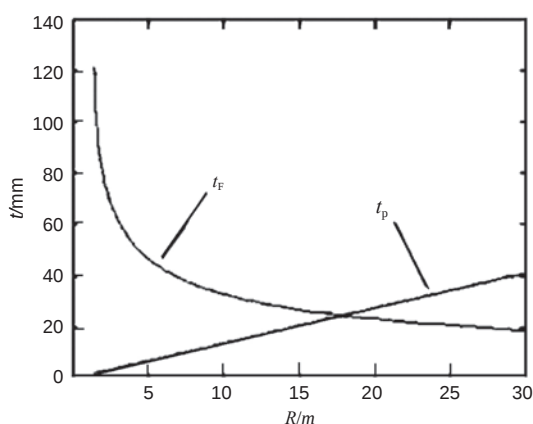


图5 壁板厚度与圆弧半径关系曲线

Fig.5 Relationship curve between panel thickness and circular arc radius

3.2 压力舱的结构布置

从上节中的优化结果来看, 波浪形压力舱壁板厚度远大于传统飞机机身壁板厚度。从图5中可以看出, 造成壁板厚度太大的原因是 t_F 值的影响, 圆弧半径越小, 所需厚度越大。所以, 弯曲的壁板不利于承弯。那么在波浪形压力舱的结构布置中, 为尽量避免弯曲壁板承弯, 提出“波浪形压力舱结构布置方案”(简称波浪方案): 上、下波浪形壁板在两侧通过圆形壁板连接形成封闭舱, 以承受气密载荷; 机翼弯矩主要通过翼梁来平衡, 梁上缘条受压, 下缘条受拉; 为了降低波浪形壁板与翼肋相交处的应力水平, 翼肋缘条设计成Y形, 通过肋缘条分散应力集中; 非气密区域的机翼同常规机翼没有本质区别, 采用典型的盒式结构, 只是从平直段到波浪段之间的过渡段需要精心设计。结构布置和传力如图6所示。

4 计算和分析

根据文献[1]的分析结果, 多泡方案、Y形肋方案和多支柱方案的结构重量均轻于平面壁板方案和曲面壁板方案, 前三者中, 多泡方案为基本方案, 所以将波浪方案与之进行比较, 借助Nastran有限元计算软件, 以重量为目标来分析波浪形方案的优劣。

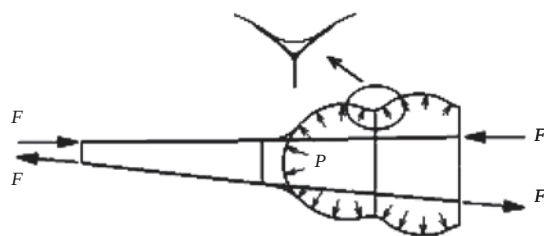


图6 波浪形压力舱结构布置和传力示意图

Fig. 6 Structure layout and force diagram of wave-section pressure cabin

二者的几何模型如图7所示, 具有相同的地板面积, 由压力舱和非压力舱组成, 这样对于波浪方案来说, 它包含了波浪段和平直段, 有利于考察平直段到波浪段的传力。

有限元模型中, 梁缘条、肋缘条和壁板长桁取梁元, 梁腹板、肋腹板和蒙皮取板元。材料均为铝合金。多泡方案的有限元模型只建立了外层壁板的模型, 没有建立内层蒙皮的模型, 因为内层蒙皮仅承受气密载荷, 根据公式(1)就能计算出它的厚度, 从而算出它的重量, 最后加上有限元模型的重量即为多泡方案模型的总重量, 故多泡方案模型只加由弯矩产生的等效拉力和压力。波浪方案模型除了加由弯矩产生的等效拉力和压力外, 还加了气密载荷。其中, 弯矩为 $3.7 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$ ^[6], 气密载荷为 0.137MPa ^[1]。两个模型的边界条件均为内端固定, 外端自由。

初始结构参数根据参考资料[5]中的方法和公式计算得到, 根据有限元计算的应力水平调节结构参数, 直到两种模型相似部件的应力水平相当且不超过许用应力, 最终计算出多泡方案的结构重量为4920kg, 波浪方案的结构重量为5070kg, 比前者高出3%。两种模型的应力云图如图8所示。

5 结束语

提出了一种新的飞翼式飞机构型——波浪形飞翼式布局飞机, 其主要特征为压力舱横截面的上、下外形均呈波浪

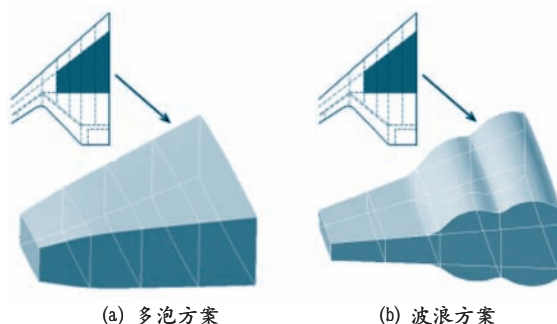
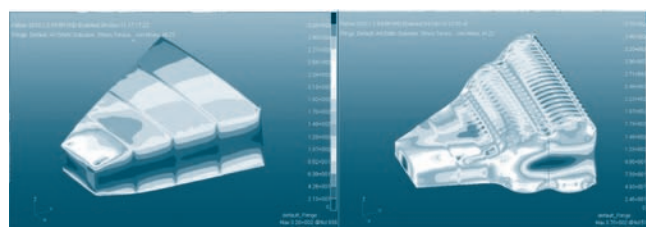


图7 几何模型

Fig.7 Geometric model



(a) 多泡方案

(b) 波浪方案

图8 应力云图

Fig. 8 Stress nephogram

形,建立了其压力舱壁板受力模型并对壁板厚度和曲率进行了优化,在此基础上,进一步提出了“波浪形压力舱结构布置方案”。其结构特点为:壁板采用单层结构,纵向通过Y形缘条的肋进行支撑,壁板强度弱于常规机翼壁板,主要以膜应力的形式承受气密载荷;而梁要强于常规机翼的梁,因为它要承受绝大部分的机翼弯矩。通过初步的有限元计算和分析,证明波浪形压力舱结构布置方案在理论上是可行的,但可能会付出一定的重量代价。以上对一种波浪形飞翼飞机压力舱结构布置方案的探讨,为飞翼飞机的设计提供了参考和借鉴意义。

AST

参考文献

- [1] Mukhopadhyay V. Blended Wing Body (BWB) Fuselage

Structural Design for Weight Reduction. AIAA 2005-2349, 2005.

- [2] Mukhopadhyay V, Sobieszczanski-Sobieski J, Kosaka I, et al. Analysis Design and Optimisation of Non-cylindrical Fuselage for Blended-Wing-Body (BWB) Vehicle. AIAA 2002-5664, 2002.

- [3] Cho S H, Bil C and Adams R. Design and Analysis of BWB Military Cargo Centre Body Structure. AIAA 2011-7026, 2011.

Sung Hwan Cho, Cees Bill and Javid Bayandor. Structural

- [4] Design and Analysis of a BWsB Military Cargo Transport Fuselage. AIAA 2008-165, 2008.

Howe D. Aircraft loading and structural layout. Professional

- [5] Engineering Publishing, 2004.

HUANG Haidong. Optimal Design of a Flying-Wing Aircraft

- [6] Inner Wing Structure Configuration[D]. Cranfield: Cranfield University, 2012.

作者简介

黄海东(1981—)男,工程师,硕士。主要研究方向:结构和机构设计。

Tel: 029-86832065

E-mail: haydenhhd@163.com

Structural Discussion of Pressure Cabin Characterized with Wave-Section Surfaces of Fling-Wing Aircraft

HUANG Haidong*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: A flying wing aircraft with a wave-section pressure cabin is proposed, and the mechanical model of the wave-section panel of the cabin is established. The optimization of the thickness and curvature of the panel is then carried out. A structural layout of the pressure cabin is proposed based on the optimization results. The preliminary analysis with respect to the structural layout is done by comparing with the multi-bubble configuration by employing the Nastran solver. The results suggest that the structural layout for the wave-section pressure cabin is sensible, however it probably brings more weight.

Key Words: flying-wing aircraft; wave-section pressure cabin; optimization; analysis

Received: 2013-06-16; Revised: 2013-11-19; Accepted: 2014-02-28

* Corresponding author. Tel.: 029-86832065 E-mail: haydenhhd@163.com