

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.02.016

基于局部屈曲、压损载荷的帽型 长桁截面优化设计

Optimizing the Hat-Stringer Cross Section Based on Local-Buckling and Crippling

刘 卫¹ 何周理² / LIU Wei¹ HE Zhouli²

(1. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102209;

2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(1. COMAC Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102209, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

由于帽型长桁的截面尺寸较大,其两边突缘与蒙皮相连形成一个闭合截面,具有很高的受压稳定性,因此被广泛应用于复合材料机身壁板。在局部屈曲和压损载荷下,用 MATLAB 线性优化帽型长桁截面尺寸,并得出帽型长桁局部屈曲载荷与帽底宽度,帽腰和帽底夹角的关系曲线;压损载荷与帽底宽度,帽腰和帽底夹角的关系曲线,为设计师在初步尺寸设计时提供参考。

关键词: 帽型长桁;局部屈曲;压损;截面优化

中图分类号: V214.3⁺⁷

文献标识码: A

[Abstract] The hat-stringer has large cross section and the cross section is closed by flanges and skin, which leads to high stability when it compressed. For this reason the hat-stringer is widely used in composite panel. This paper optimizes the hat-stringer section in the condition of local-buckling and crippling by MATLAB, and obtains the buckling strength as function of hat-stringer width and the angle between hat-stringer width and the waist, and the crippling strength as function of hat-stringer width and the angle between hat-stringer width and the waist. These functions can provide references to designers in the preliminary design.

[Keywords] hat-stringer; local-buckling; crippling; optimization

0 引言

由蒙皮、长桁、框组成的半硬壳式壁板是大型商用飞机常见的结构。帽型长桁的截面尺寸较大,其两边突缘与蒙皮相连形成一个闭合截面,具有很高的受压稳定性^[1],是壁板结构中效率较高的纵向加强件。但帽型长桁为封闭结构,内部缺陷不易检查,内腔容易积液而产生腐蚀,因此在金属半硬壳式壁板中,帽型长桁的使用受到了极大的限制。随着比强度高、耐腐蚀性好的碳纤维复合材料大量应用于现代商用飞机上,帽型长桁成为了设计师首选

的纵向加强件。

国内外针对金属和复合材料壁板优化已经做了大量研究工作。Kidane 等采用了一种典型单元体模型分析格栅加筋筒结构总体屈曲^[2],Jaunky 等采用改进的等效法分析了不同类型壁板结构的稳定性,且结合职能算法对复合材料格栅加筋结构的优化问题进行了研究^[3],常楠、张铁亮等对加筋采用两级方法进行优化分析^[4-5],张国柱等通过代理模型进行金属加筋板的布局优化^[6]。但在初步尺寸设计^[7]时,帽型长桁的截面尺寸对设计师来说显得尤为重要。模型的适当简化是缩短研制时间的

重要途径之一,本文通过局部屈曲和压损工程算法来优化帽型截面尺寸,并得出:(1)帽型长桁局部屈曲载荷与帽底宽度,帽腰和帽底夹角的曲线;(2)压损载荷与帽底宽度,帽腰和帽底夹角的曲线,为设计师在初步尺寸设计时提供参考,缩短研发时间。

1 几何模型

选取一段长 200 mm 的共固化蒙皮、帽型长桁作为研究对象,其截面几何如图 1 所示。

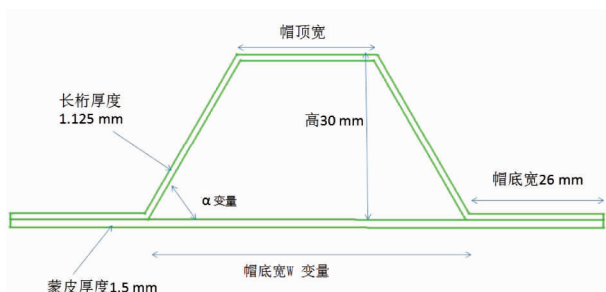


图 1 蒙皮、长桁截面

把帽底宽度 W ,帽腰和帽底夹角 α 作为变量, α 取值范围为 $50^\circ \sim 80^\circ$, W 的取值范围为 $60 \text{ mm} \sim 80 \text{ mm}$ 。

蒙皮铺层为:

[45/0/0/-45/0/90/90/0/-45/0/0/45]。

长桁铺层为:

[45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]。

材料:选取典型的 T300 碳纤维材料作为研究对象,材料参数见表 2。

2 局部屈曲

2.1 局部屈曲计算方法

长桁局部屈曲载荷计算方法采用参考文献[8] 5.7.1.3 节和 5.7.1.5 节中介绍的分析方法,分析模型如图 2 所示。

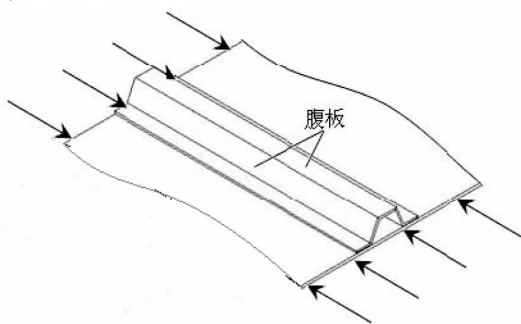


图 2 加筋壁板长桁中的腹板

开口薄壁剖面长桁的突缘可作一长边自由,另一长边简支的长板处理,按式(1)计算突缘的轴压局部屈曲载荷。

$$N_{\text{scr}} = \frac{12D_{66}}{b_f^2} + \frac{\pi^2 D_{11}}{L^2} \quad (1)$$

式中, N_{scr} 为单位宽度上的轴压屈曲载荷; b_f 为突缘的宽度; L 为长桁的长度; D_{11} 、 D_{66} 为层压板的纵向弯曲刚度和扭转刚度。

对于薄壁长桁的腹板,可当作两长边简支的长板处理,计算局部屈曲载荷

$$N_{\text{scr}} = \frac{2\pi^2}{b_f^2} (\sqrt{D_{11}D_{22}} + D_{12} + 2D_{66}) \quad (2)$$

式中, b_f 为腹板的宽度; D_{12} 、 D_{22} 为一层压板的泊松弯曲刚度和横向弯曲刚度。

取突缘和腹板局部屈曲载荷的最小值作为长桁的局部屈曲载荷。

2.2 局部屈曲分析方法

把帽缘条看作突缘,其两边可作一边自由,一边简支处理;把帽腰看作腹板,两边可作简支处理;把中间蒙皮看作腹板,两边可作简支处理,如图 3 所示。

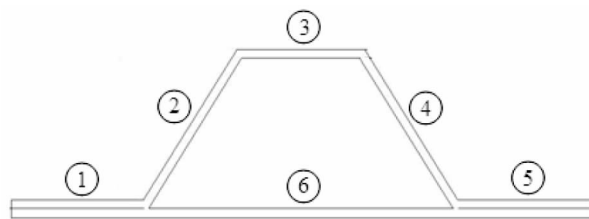


图 3 分析所对应的 6 个单元

2 个帽缘条①和⑤,2 个帽腰②和④,1 个帽顶③,以及帽底中间蒙皮⑥,共 6 个单元屈曲载荷,将最小值作为长桁的局部屈曲载荷。

各单元的弯、扭刚度如表 1 所示。

表 1 各单元弯、扭刚度

| 单元编号 | D_{11}/Nmm | D_{12}/Nmm | D_{22}/Nmm | D_{66}/Nmm |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ① | 123 688 | 24 410 | 54 537 | 26 767 |
| ② | 8 719 | 2 730 | 3 692 | 2 915 |
| ③ | 8 719 | 2 730 | 3 692 | 2 915 |
| ④ | 8 719 | 2 730 | 3 692 | 2 915 |
| ⑤ | 123 688 | 24 410 | 54 537 | 26 767 |
| ⑥ | 24 633 | 5 154 | 7 422 | 5 594 |

2.3 计算结果

当 $\alpha = 80^\circ$ 时,局部屈曲载荷取得最小值,如图4所示。在这种情况下,局部屈曲载荷随变量 W 的变化曲线如图4所示,显然,当 $\alpha = 80^\circ, W = 80 \text{ mm}$ 时,局部屈曲载荷取得最小值 $4\ 047 \text{ N}$,如图4所示。

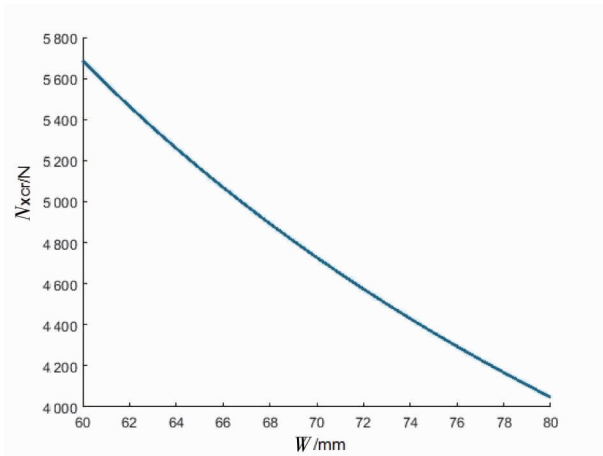


图4 局部屈曲载荷随 W 的变化曲线

给定 α 为 $50^\circ \sim 80^\circ$ 和 W 为 $60 \text{ mm} \sim 80 \text{ mm}$ 的条件下,计算出局部屈曲载荷随 W, α 变化如图5所示。

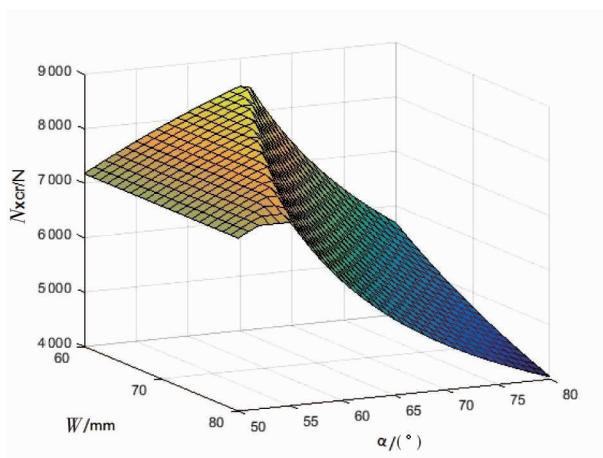


图5 局部屈曲载荷随 W, α 的变化曲线

3 压损

3.1 压损计算方法

长桁压损载荷计算方法采用参考文献[8]5.7.2.4节中介绍的分析方法,计算方法如下:

$$\sigma_{cc} = m \times \left(\frac{b\bar{E}}{tE_{xc}} \sqrt{\frac{\sigma_{cu}}{\sqrt{E_{xc}E_{yc}}}} \right)^e \frac{\sigma_{cu}\bar{E}}{E_{xc}} \quad (3)$$

$$\sigma_{cu} = \varepsilon_{cr} E_{xc} \quad (4)$$

$$\bar{E} = \frac{12D_{11}}{t^3} (1 - \mu_{xy}\mu_{yx}) \quad (5)$$

$$\mu_{yx} = \mu_{xy} \frac{E_{yc}}{E_{xc}} \quad (6)$$

式中, b 为腹板或者突缘的宽度; ε_{cr} 为层压板纤维方向的压缩许用值; E_{xc} 为层压板 x 方向的面内刚度; E_{yc} 为层压板 y 方向的面内刚度; μ_{xy}, μ_{yx} 为层压板面内等效泊松比。

对长桁的组成单元逐一计算:

对于一边自由、一边简支的组成单元: $m = 0.575, e = -0.797$ 。

对于没有自由端的组成单元: $m = 0.868, e = -0.869$ 。

取各组成单元的 σ_{cc} 和 σ_{cu} 中的最低值,求其加权平均值得到压损许用值:

$$\sigma_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^N \min(\sigma_{cc}^i, \sigma_{cu}^i) b_i t_i}{\sum_{i=1}^N b_i t_i} \quad (7)$$

压损载荷 F_{cc} 计算公式为:

$$F_{cc} = \sigma_{cc} \sum_{i=1}^N b_i t_i \quad (8)$$

3.2 压损分析

分析2个帽底、2个帽腰、1个帽顶和帽底中间蒙皮共6个组成单元的压损许用值,再进行加权平均得到整个长桁的压损许用值,如图2所示。该帽型长桁的材料力学参数见表2。

表2 材料力学参数

| 单元编号 | D_{11}/Nmm | E_{xc}/MPa | E_{yc}/MPa | μ_{xy} | $\varepsilon_{cr}/\mu\varepsilon$ |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|
| ① | 123 688 | 76 999 | 37 148 | 0.364 | 3 300 |
| ② | 8 719 | 73 040 | 34 425 | 0.433 | 3 300 |
| ③ | 8 719 | 73 040 | 34 425 | 0.433 | 3 300 |
| ④ | 8 719 | 73 040 | 34 425 | 0.433 | 3 300 |
| ⑤ | 123 688 | 76 999 | 37 148 | 0.364 | 3 300 |
| ⑥ | 24 633 | 79 387 | 39 108 | 0.316 | 3 300 |

3.3 计算结果

压损许用值 σ_{cc} 的计算结果如图6所示。当 $\alpha = 50^\circ, w = 61.62 \text{ mm}$ 时,压损许用值取得最大值 145.9 MPa ; 当 $\alpha = 80^\circ, w = 80 \text{ mm}$ 时压损许用值取得最小值 120.77 MPa 。

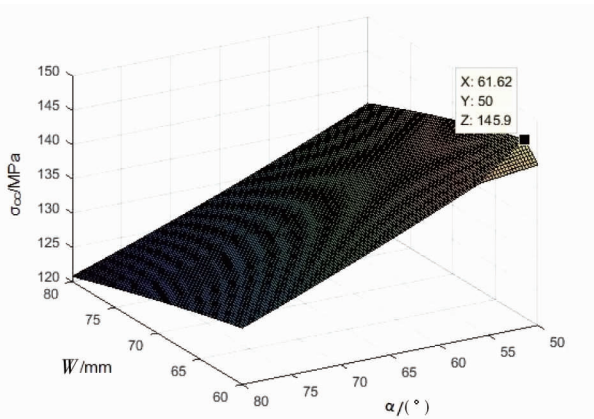


图 6 压损许用值随 W, α 的变化曲线

压损载荷 F_{cc} 的计算结果如图 7 所示。当 $\alpha = 80^\circ$, $W = 80$ mm 时,压损载荷取得最大值 48.69 kN;当 $\alpha = 50^\circ$, $W = 60$ mm 时,压损载荷取得最小值 46.68 kN。

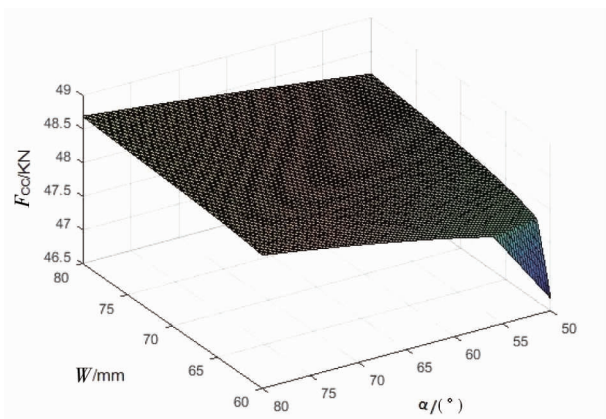


图 7 压损载荷随 W, α 的变化曲线

4 结果对比

给定角度 α ,局部屈曲载荷和压损许用值的计算结果如图 8、图 9 所示。

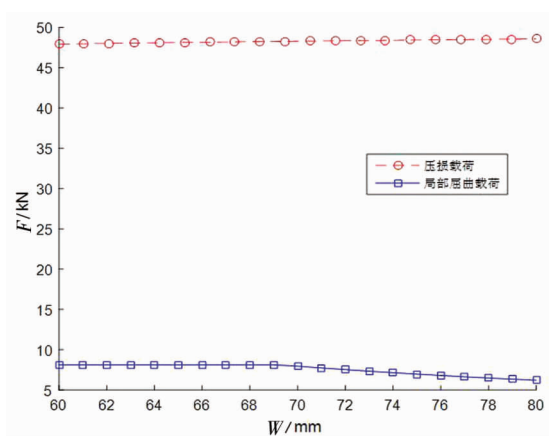


图 8 压损、局部屈曲计算结果对比 ($\alpha = 60^\circ$)

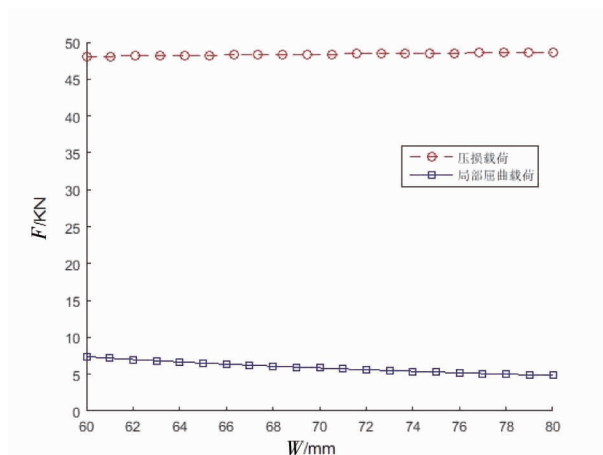


图 9 压损、局部屈曲计算结果对比 ($\alpha = 70^\circ$)

从图 8 中可以看出,当 α 为 60° 时,影响长桁截面设计的载荷是局部屈曲载荷。局部屈曲载荷在 W 为 60 mm ~ 70 mm 的区间内变化微弱,曲线表现为平直;局部屈曲载荷在 W 为 70 mm ~ 80 mm 的区间内变化较为明显,曲线有一定的斜率,且随着 W 的增大,局部屈曲载荷变小。

从图 9 中可以看出,当 α 为 70° 时,影响长桁截面设计的载荷也是局部屈曲载荷。局部屈曲载荷在 W 为 60 mm ~ 80 mm 的区间内变化较为明显,曲线有一定的斜率,且随着 W 的增大,局部屈曲载荷变小。

4 结论

- 1) 影响帽型长桁截面设计的载荷是局部屈曲载荷;
- 2) 在局部屈曲状况下,屈曲载荷随帽型长桁底宽的增大而减小;
- 3) 在局部屈曲状况下,屈曲载荷先随帽腰和帽底的夹角 α 增大而增大,当 α 为 63° 时屈曲载荷为最大,随后 α 变大屈曲载荷变小;
- 4) 在压损状况下,压损许用值随帽型长桁底宽、帽腰和帽底的夹角 α 增大而减小。

参考文献:

[1] 朱庄梅,沈真. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
 [2] KIDANE S, LI G Q, HELMS J, et al. Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders[J]. Composite Part B: Engineering, 2003, 34(1): 1-9.
 [3] JAUNKY N, KNIGHT N F, AMBUR D R. Optimal design

of grid-stiffened composite panels using global and local buckling analyses[J]. Journal of Aircraft,1998,35(3):478-486.

[4] 常楠,刘江,赵美英. 复合材料蒙皮/长桁壁板结构优化设计[J]. 飞机设计,2007,27(6):28-32.

[5] 张铁亮,丁运亮. 复合材料加筋壁板的结构布局优化设计[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(1):8-12.

[6] 张国柱,姚卫星,刘克龙. 基于进化 Kriging 模型的金属加筋板结构布局优化方法[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(4):497-500.

[7] 牛春匀. 实用飞机结构工程设计[M]. 北京:航空工业出

版社,2011.

[8] Composite Materials Handbook Volume 3. Polymer Matrix Composites Materials Usage, design, and Analysis; MIL-HDBK-17-3F [S]US: [s. n.], 2002.

作者简介

刘卫 男,学士,工程师。主要研究方向:民用飞机复合材料结构设计与研究;E-mail: liuwei81@comac. cc

何周理 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机复合材料结构设计与研究;E-mail: hezhouli@comac. cc