

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.03.020

# 加筋壁板长桁凸缘侧向稳定性 设计与研究

## Design and Study on the Lateral Stability of the Stringer Flange of Stiffened Panel

龚德志 王新栋 王爱军 叶聪杰 / GONG Dezhi WANG Xindong WANG Aijun YE Congjie  
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)  
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

研究加筋壁板在轴向压缩载荷作用下长桁凸缘的侧向稳定性。结合加筋壁板强度和刚度设计因素,对长桁凸缘的侧向屈曲临界载荷进行分析,并提出长桁支撑件的刚度设计指标计算方法,为工程设计人员提供指导以提高设计效率。

**关键词:**加筋壁板;长桁凸缘;侧向稳定性;支持刚度

**中图分类号:**V214.8

**文献标识码:**A

**OSID:**



[Abstract] The lateral stability of stringer flange of stiffened panel under axial compressive loading was studied. Combined the design factor of strength and stiffness of stiffened panel, the lateral buckling critical load of stringer flange was analyzed, and the calculation method of stiffness design criterion of support sheet of stringer flange was proposed. The method can provide some guidance for the engineering designers to improve the design efficiency.

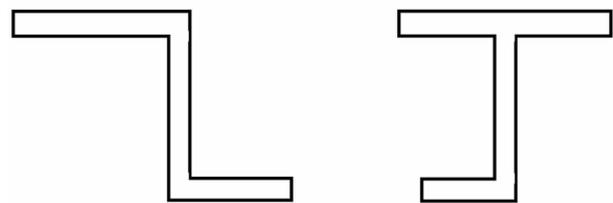
[Keywords] stiffened panel; stringer flange; lateral stability; support stiffness

## 0 引言

大型飞机翼盒结构中,承受轴向压缩载荷的加筋壁板的稳定性通常是制约机翼承载能力的关键因素。机翼壁板结构设计的合理与否直接关系到飞机的安全性,因而加筋壁板的稳定性设计是大型飞机结构静强度设计的关键。

在当前翼盒壁板结构的设计中,往往采用“Z”形或“J”形加强筋(图1所示),以期在兼顾制造维修性以及最小的重量代价下提高壁板组合截面的截面惯性矩,增大壁板的面外弯曲刚度。因而,设计长桁时将材料过分向长桁上、下缘条集中,导致长桁腹板过分纤薄。这样的设计虽然有效地提高了截面的面外弯曲刚度,但容易导致长桁凸缘的侧向弯曲刚度大幅度降低,且对长桁侧向支撑件的刚度设计的疏忽,更使得长桁凸缘存在过早失稳的隐患。若长

桁凸缘侧向先于壁板整体失稳,则会引起长桁截面形状的改变,从而降低壁板的面外弯曲刚度,使得壁板无法达到期望的结构效率。



(a)“Z”形长桁图

(b)“J”形长桁图

图1 典型“Z”形及“J”形长桁截面

加筋壁板的稳定性设计目前已有大量研究,在文献[1]~[3]中给出较为完善的加筋壁板在压缩载荷下的强度分析方法。对于加筋壁板的长桁凸缘在压缩载荷下侧向失稳问题的研究则相对较少,文献[2]中给出了长桁凸缘侧向失稳应力计算方法,

但该方法较为繁琐,需要查询一系列的图表,工程设计人员使用起来并不方便。对于长桁侧向支撑件刚度设计问题,文献[4]分析了弹性基座对杆的稳定性影响。上述文献针对加筋壁板长桁凸缘侧向失稳分析方法较为复杂且未给出侧向支撑件的刚度设计要求,不利于工程应用。

本文基于相关壁板结构的设计工程经验,结合合理的理论分析,从强度设计和刚度设计出发,系统地构建翼盒壁板结构的侧向稳定性设计方法,为后续翼盒壁板的工程设计提供必要的参考。

### 1 加筋壁板长桁凸缘侧向稳定性设计

典型的加筋壁板通常被肋、框、地板纵梁等分割为若干段。以图 2 所示的“J”形长桁加筋壁板为例,其被地板纵梁分隔为近似等间距的若干段,长桁及有效宽度蒙皮组成的组合柱一般可简化为多段由近似刚性支座支持的梁-柱,因此,各地板纵梁之间组合柱的屈曲临界应力可近似认为无相互影响<sup>[4]</sup>,分别计算各相邻地板纵梁间组合柱的屈曲临界应力,取最小值作为加筋壁板的许用屈曲应力。

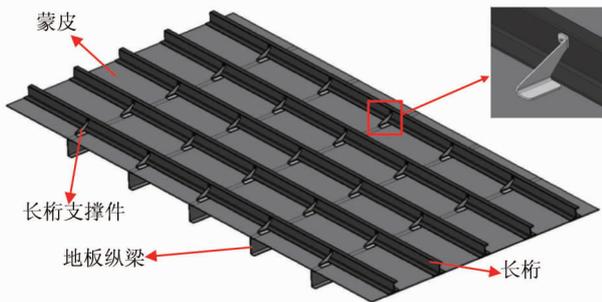


图 2 典型的“J”形长桁加筋壁板

同时,长桁凸缘的侧向稳定性计算及设计是加筋壁板长桁强度设计的必要环节。加筋壁板长桁凸缘由支撑件支持。在研究长桁凸缘的侧向稳定性问题时,必须考虑长桁腹板对长桁凸缘的弹性支持作用。因此,在对“J”形长桁加筋壁板进行长桁凸缘侧向稳定性分析时,可将问题抽象为弹性地基支持的连续梁-柱的屈曲问题。由于各支撑件间距基本相等,且支撑件刚度足够,各支撑件间长桁凸缘的侧向屈曲临界应力无相互影响,通过计算各相邻纵向支撑件间长桁凸缘的屈曲临界应力,取最小值作为长桁凸缘侧向失稳的许用应力,如图 3 所示。

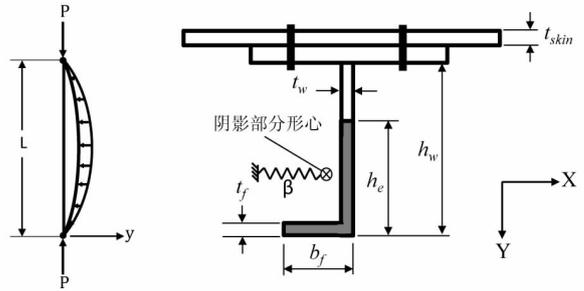


图 3 “J”形长桁凸缘模型简化示意图

进行加筋壁板强度设计时,其主要的参数为蒙皮厚度  $t_{skin}$ 、长桁的展向长度为  $L$ (即壁板被纵向加强件分隔的间距)和长桁的剖面参数,例如长桁腹板高度为  $h_w$ ,长桁腹板厚度为  $t_w$ ,长桁凸缘宽度为  $b_f$ ,长桁凸缘厚度为  $t_f$ 。

长桁凸缘截面取图 3 中的阴影部分,其中有效腹板高度  $h_e$  一般保守地取为  $0.75h_w$ 。长桁腹板对凸缘的支持刚度保守地取为全高度的单位宽度长桁腹板对单位长度长桁凸缘的支持刚度  $\beta$ ,即:

$$\beta = \frac{Et_w^3}{4h_w^3} \tag{1}$$

长桁凸缘侧向失稳的临界载荷可由里兹法<sup>[4]</sup>计算,经计算得到:

$$P_{cr}^* = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left( m^2 + \frac{1}{m^2} \frac{\beta L^4}{\pi^4 EI} \right) \tag{2}$$

式中, $E$  为长桁材料的弹性模量, $I$  为图 3 中阴影区域绕  $Y$  轴的形心惯性矩。 $m$  的取值仅为整数,表示发生屈曲时相邻支撑件间长桁凸缘上的半波数。长桁凸缘的屈曲可发生于  $m = 1, 2, 3 \dots$  时,但在实际情况下,仅当  $m$  的取值使得  $P_{cr}^*$  最小的临界屈曲载荷  $P_{cr}$  才是有工程意义的。此时,应有:

$$m = \text{INT} \left[ \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 4 \sqrt{\frac{\beta L^4}{\pi^4 EI}}} + 1 \right) \right] \tag{3}$$

通过方程所求得的  $m$  值,计算得到长桁凸缘侧向失稳的临界屈曲载荷  $P_{cr}$ ,长桁凸缘侧向失稳的临界屈曲应力  $\sigma_{cr}$  通过  $P_{cr}$  除以图 3 阴影区域面积得到。

上述分析计算均是在线弹性范围内的。当计算得到的  $\sigma_{cr}$  大于材料压缩屈服极限时,必须采用材料的切线模量进行塑性修正,即:

$$\sigma_{cr,修} = \frac{E_t}{E} \sigma_{cr} \tag{4}$$

其中,  $E_t/E$  可由 Ramberg-Osgood 方程确定。通过求解隐式方程得到塑性修正后的长桁凸缘侧向屈曲临界应力  $\sigma_{cr,修}$ 。方程的求解一般可通过数值方法进行, 例如牛顿迭代法等。

$$\left[1 + \frac{3}{7}n\left(\frac{\sigma_{cr,修}}{\sigma_{0.7}}\right)^{n-1}\right]\sigma_{cr,修} = \sigma_{cr} \quad (5)$$

式中,  $n$  为材料的 Ramberg-Osgood 参数 ( $n = 1 + \frac{0.8873}{\ln\sigma_{0.7} - \ln\sigma_{0.85}}$ ,  $\sigma_{0.7}, \sigma_{0.85}$  分别为过原点斜率为 0.7 和 0.85 的直线与材料应力-应变曲线交点对应的应力值)。

## 2 加筋壁板长桁支撑件的刚度设计

分段加筋壁板和长桁凸缘稳定性分析基于地板纵梁及长桁支撑件具有足够的支持刚度的基础之上。只有地板纵梁及长桁支撑件在壁板整体屈曲或长桁凸缘侧向屈曲时表现为足够刚性, 加筋壁板才能发挥其最大的结构效能。为此, 基于长桁凸缘侧向稳定性的加筋壁板设计, 应着重考虑长桁支撑件的必需刚度。

对于等间距弹性支座支持的连续梁-柱, 若在屈曲发生时弹性支座均表现为足够刚性, 则弹性支座必需支持刚度<sup>[4]</sup>为:

$$K = \frac{P_{cr}}{\gamma L} \quad (6)$$

式(6)中,  $P_{cr}$  为相邻支座间梁-柱的屈曲临界载荷,  $L$  是相邻支座的间距,  $\gamma$  是与连续梁-柱跨度数  $v$  相关的参数, 取值见图 4, 且当  $v$  趋于无穷时, 其极限值为 0.25。从图 4 中可看到, 当  $v$  取 2~6 时, 按图中  $\gamma$  的取值是很有工程意义的; 当  $v > 6$  时, 一般不必从图中获得的取值, 取  $\gamma = 0.25$  即可。

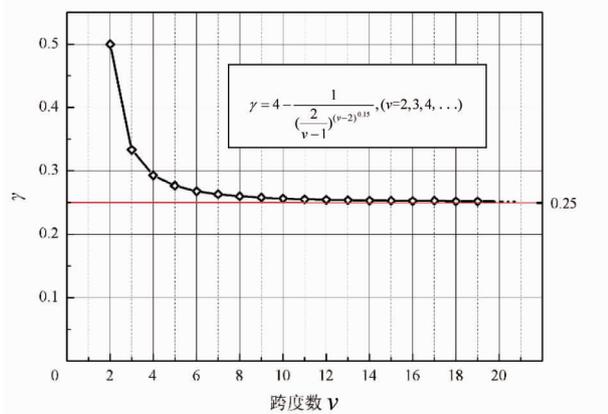


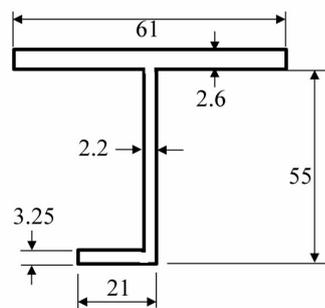
图 4 参数  $\gamma$  随跨度数  $v$  的变化

分析式(6)可以看到, 弹性支座必需的支持刚度  $K$  仅与梁-柱本身的屈曲临界载荷相关, 而与梁-柱的截面属性、材料等无关。因此, 通过确定梁-柱本身的屈曲临界载荷  $P_{cr}$ , 即可得到支座所必需的支持刚度, 而不必关心梁-柱的具体截面性能。

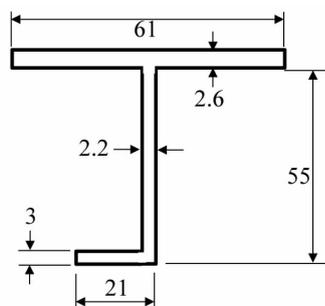
根据第 2 节内容, 可计算屈曲临界载荷  $P_{cr}$ , 进而可计算长桁凸缘侧向支持件所必需的支持刚度  $K$ 。长桁支撑件的支持刚度可通过综合考虑其本身的刚度(弯曲及拉压)、其与长桁连接的刚度、支持件与地板纵梁连接的刚度以及地板纵梁缘条的刚度计算得到。所设计的长桁支撑件对长桁凸缘的支持刚度必须大于其所必需的支持刚度  $K$ , 由此保证长桁侧向失稳时, 不发生跨过长桁支撑件的失稳, 从而使壁板获得最佳的承载效率。

## 3 设计实例

机翼壁板蒙皮和长桁材料分别采用 7055-T7751 和 7055-T76511。长桁初始设计截面参数如图 5(a) 所示; 蒙皮厚度均匀, 且为 3 mm; 长桁间距相同, 且为 290 mm; 纵梁间距相同, 且为 600 mm。忽略机翼壁板的曲率, 将其近似为加筋平板, 经计算该加筋平板的柱强度为 379.1 MPa。采用本文方法计算其侧向屈曲临界应力为 337.0 MPa, 详细过程见表 1。



(a) 初始设计的长桁截面参数



(b) 优化后的长桁截面参数

图 5 长桁截面参数(单位:mm)

表1 长桁凸缘侧向失稳临界应力计算

参 数	$\beta$	$h_e$	$I$	$A$	$m$	$P_{cr}$	$\sigma_{cr}$	$\sigma_{cr,修}$
	$/(N \cdot mm^{-2})$	$/mm$	$/mm^4$	$/mm^2$		$/N$	$/MPa$	$/MPa$
数 值	1.09	43.69	6 503	157.21	1	53 098	337.5	337.0

在该设计下,长桁凸缘侧向屈曲临界应力低于壁板的柱强度,应适当进行优化以提高其侧向稳定性。优化后的截面尺寸如图5(b)所示,优化后长桁截面面积相比原长桁减少1.5%,且其柱强度为380.3 MPa,长桁凸缘侧向屈曲临界应力为387.0 MPa,两者亦基本相当。

长桁凸缘被长桁支撑件分隔为等长度的6跨,应用式(6)计算,则长桁凸缘侧向支撑件的必需刚度为:

$$K = \frac{P_{cr}}{0.2630L} = 426.2 \text{ N/mm}$$

通过支撑件的支持刚度计算,进而合理设计长桁支撑件,使得其对长桁凸缘的支持刚度符合该要求。

## 4 结论

本文系统地阐述了承压加筋壁板长桁凸缘侧向稳定性设计方法。设计加筋壁板时,除充分考虑增强壁板的柱强度外,也应充分保证长桁凸缘的侧向

稳定性,即要求设计长桁截面时,不能过分将材料集中于长桁缘条,导致长桁腹板过于纤薄,凸缘侧向稳定性不足,无法充分发挥结构效能。此时,应设计满足一定刚度要求的支撑件为长桁凸缘提供侧向支持。

## 参考文献:

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第9册:载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001:469-472.
- [2] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京:航空工业出版社,2009:535-576.
- [3] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1996:137-177.
- [4] 铁木辛柯. 弹性稳定理论[M]. 张福范,译. 北京:科学出版社,1958:112-115.

## 作者简介

龚德志 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计与分析。E-mail:gongdezhi@comac.cc

王新栋 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计与分析。E-mail:wangxindong@comac.cc

王爱军 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料结构强度设计与分析。E-mail:wangaijun@comac.cc

叶聪杰 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度设计与分析。E-mail:yecongjie@comac.cc