

文章编号:1674-8190(2019)02-212-09

民用飞机翼身对接斜撑板结构分析

汤平,刘婷,张明星

(上海飞机设计研究院 飞机结构强度工程技术所,上海 201210)

摘要:斜撑板结构可以充分发挥分散载荷和降低区域应力水平的作用。对不同机型的斜撑板结构的传力特性进行分析,总结斜撑板结构的设计要点。并以某机型选用斜撑板结构的设计为例,提出一种斜撑板结构的改进方案(斜撑板侧边和后梁框刚性连接、下边和对接带板充分连接),并与其他两种设计方案进行对比分析。结果表明:改进方案的斜撑板结构翼上区和舱上区的剪应力分别降低了 19% 和 23%,后梁框的集中载荷降低了 67%,结构效率更高、稳定性更好。

关键词:对接结构;后梁;斜撑板;起落架舱;应力分布

中图分类号: V224. 1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.010

Analysis on Trap Panel Structure for Aircraft Outer Wing-fuselage Connection

Tang Ping, Liu Ting, Zhang Mingxing

(Aircraft Structure & Strength Engineering Institute, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The trap panel structure can give full play to the role of dispersing load and reducing regional stress level. The force transfer characteristics of different types of trap panel structures are analyzed, and the main design points of trap panel structures are summarized. Taking the design of a certain type of aircraft with diagonal brace plate as an example, an improved scheme of diagonal brace plate structure (rigid connection of side brace plate and rear beam frame, full connection of lower side and joint strip plate) is proposed, and compared with the other two design schemes. The results show that the shear stresses of the upper wing and upper cabin of the improved brace plate structure are reduced by 19% and 23%, respectively, and the concentrated load of the rear beam frame is reduced by 67%. The structure has higher efficiency and better stability.

Key words: joint; rear beam; trap panel; landing gear compartment; stress distribution

0 引言

翼身对接结构是飞机外翼载荷传递转换到机身的部位,此处载荷大,协调复杂^[1]。对接结构的设计与中央翼的形式、对接界面的位置密切相关。目前先进民用飞机中央翼是在左右对接肋间

为等直段,中央翼独立成为一部件,和外翼有明确的对接界面。外翼中央翼后梁对接结构和起落架舱上缘会形成开口转折区,转折区的载荷大且结构受限,通常会布置斜撑板结构来过渡,以改善局部应力分布^[2],使得传力合理顺畅。

苗强等^[3]对某机型的斜撑板承载进行了研究,

收稿日期:2018-06-02; 修回日期:2018-08-11

通信作者:汤平,652589300@qq.com

引用格式:汤平,刘婷,张明星. 民用飞机翼身对接斜撑板结构分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 212-220.

Tang Ping, Liu Ting, Zhang Mingxing. Analysis on trap panel structure for aircraft outer wing-fuselage connection[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 212-220. (in Chinese)

并优化分析了斜撑板的形状和筋条布置;赵莉等^[4]对斜撑板补强起落架舱的作用进行了阐述,并分析了斜撑板和机身侧壁板的载荷传递。

本文是对不同机型的斜撑板结构的传力特性进行分析,总结斜撑板结构设计要点。并以某机型选用斜撑板结构的设计过程为例,提出一种设计方案,并与其他两种设计方案进行对比。

1 斜撑板的运用

1.1 斜撑板概述

斜撑板结构属于中机身,在飞机中位置如图 1 所示。

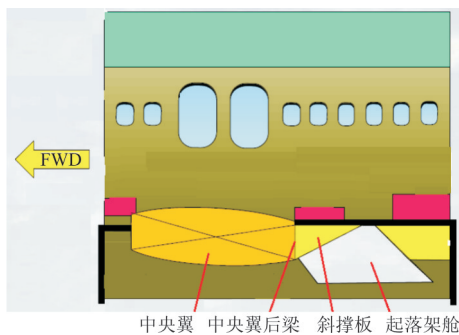


图 1 斜撑板在机身位置示意图

Fig. 1 Trap panel position in the fuselage

图 1 中可见斜撑板位于起落架舱开口的前上角部区域,其侧面连接在机翼后梁对接处,上边连接在起落架舱的上缘处。起落架舱使得机身下方产生了大开口,破坏了原受力结构的完整性、连续性^[3],斜撑板即是对此开口的加强。斜撑板区域载荷示意如图 2 所示。

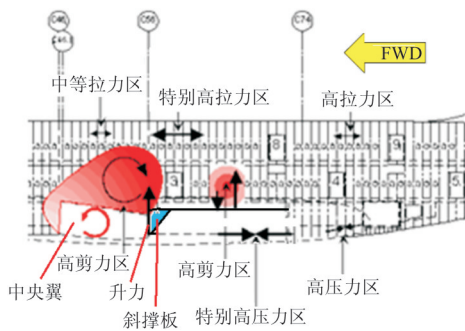


图 2 斜撑板区域载荷示意图

Fig. 2 Load around trap panel

从图 2 可以看出:斜撑板位于多种(多路)载荷的交会位置,有利于其发挥分散载荷、减少应力集中的重要作用。外翼升力载荷主要通过外翼后梁

腹板传递到对接结构上,再传递到后梁框和斜撑板^[5],外翼扭矩在对接肋的上/下缘条产生剪力,上缘条剪力主要传递到翼上侧壁板,下缘条剪力传递到中央翼下壁板和斜撑板;起落架舱上缘承受机身弯矩造成的水平压力,会传递到斜撑板;舱上壁板垂直方向的剪力会传递到斜撑板。

总之,在斜撑板的位置,既有垂直方向的剪力载荷,也有水平方向的剪力载荷。通过布置斜撑板,改变了对接肋后梁区的刚度分布,即重新分配了外翼载荷和机身载荷在该区域的分配比例,使得翼上区和舱上区的高应力得到降低^[6]。

具体斜撑板上边连接的机身框根数,侧边连接对接接头还是后梁框侧边,下边是否连接对接带板等,各机型都有各自的不同。

1.2 机型选用情况

鉴于斜撑板改善应力分布的作用,民用客机大都布置有斜撑板,如表 1 所示。

表 1 机型与斜撑板结构

Table 1 Trap panel structure

机型	斜撑板	侧壁板加强件	发动机布置
A 机型	无	有	尾吊
B 机型	有	有	翼吊
A320	有	有	翼吊
A350	有	有	翼吊
波音 737	有	有	翼吊
波音 787	有	有	翼吊
C 系列	有	有	翼吊

从表 1 可以看出:国际先进民机代表的 A320/A350 飞机,波音 737/波音 787 飞机都布置有斜撑板;A 机型没有斜撑板布置,这是和其机型规模较小、发动机尾吊布置有关的。

A 机型是 70 座级的支线客机,发动机为尾吊布置,整机重心相对后移,距离外翼气动力的合力点相对较近,飞行中需要尾翼压力产生的平衡弯矩也相对较小;同时 A 机型整机重心距离起落架着地点也相对较近,在动着陆工况下,起落架瞬间冲击时在机身产生的弯矩也相对较小;机翼后梁对接处及起落架舱开口前端处的应力分布相对不是很严重;故不布置斜撑板。A 机型重心及起落架位置如图 3 所示。在飞机着陆的仰角范围内,整机重心垂线距离主起轮中心最大距离为 137.53 mm。

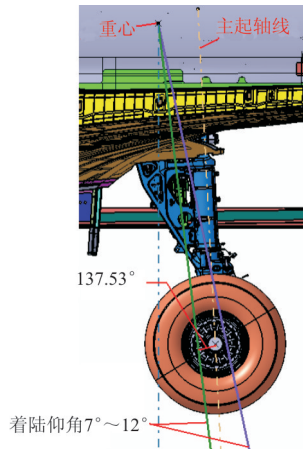


图 3 A 机型整机重心位置
Fig. 3 Center of gravity of A model

B 机型布置有斜撑板, 发动机是翼吊布置, 为 150 座级的干线飞机, 其整机重心及起落架位置如图 4 所示。在飞机着陆的仰角范围内, 整机重心垂线距离主起轮中心最大距离为 1 057.85 mm。

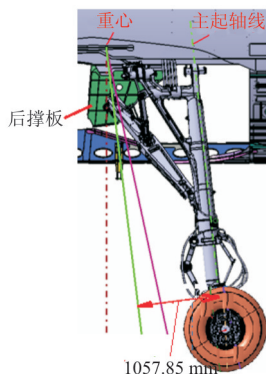


图 4 B 机型整机重心位置
Fig. 4 Center of gravity of B model

A 机型空重 = 24 613 kg; 偏心距 $\Delta 1 = 137.53$ mm; 偏心引起的弯矩 $M_1 = 24\ 613 \times 9.8 \times 0.137\ 53 = 33\ 173.3$ Nm;

B 机型空重 = 46 358 kg; 偏心距 $\Delta 2 = 1\ 057.85$ mm; 偏心引起的弯矩 $M_2 = 46\ 358 \times 9.8 \times 1.057\ 85 = 480\ 590.1$ Nm;

比较: $n = M_1 : M_2 = 1 : 14.5$ 。

从 n 值可以看出: 两种机型由于发动机布局和机型大小的差别, 造成斜撑板布置区受力状况的很大不同, 也造成两种机型对斜撑板选择的不同。

2 典型飞机斜撑板

2.1 A320 飞机斜撑板

A320 飞机斜撑板布置如图 5 所示。

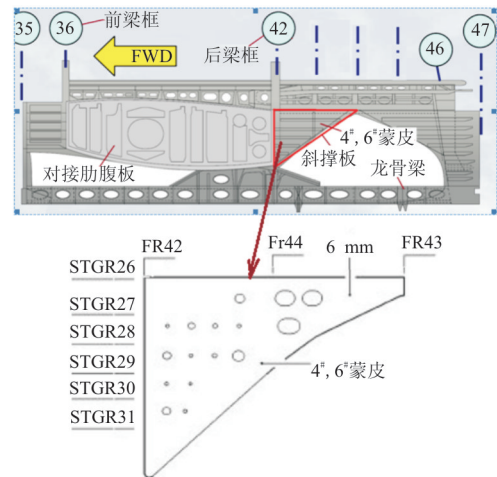


图 5 A320 飞机斜撑板布置示意图
Fig. 5 A320 trap panel in the fuselage

A320 飞机的斜撑板可以看作是机身侧壁板的延伸, 是蒙皮带有长桁的壁板, 和机身壁板不同的是斜撑板的长桁在蒙皮外侧。斜撑板蒙皮为中机身 4 号和 6 号两块对称的蒙皮, 位于机身 FR42 ~ FR44 处, 材料为 2024-T351, 厚度为 6.0 mm, 可以传递较大的剪力。斜撑板的斜边沿是 U 形板^[7]。斜撑板结构如图 6 所示。

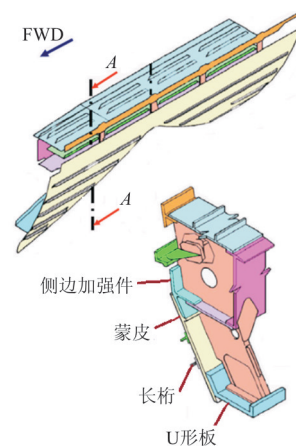


图 6 A320 飞机斜撑板结构示意图
Fig. 6 A320 trap panel structure

A320 飞机后梁框框端是背靠背的两块 U 形板组成, 如图 7 所示。外翼升力载荷通过三叉接头传递到后梁框绿色部分, 再通过蓝色部分的侧边传递到斜撑板, 由于蓝色部分的侧边沿机身外形切线方向内倾, 斜撑板分担的外翼升力载荷相对较少。斜撑板不和对接带板(连接外翼中央翼下壁板)连接, 故不能分担对接肋下缘条上因外翼扭矩而带来的剪力。

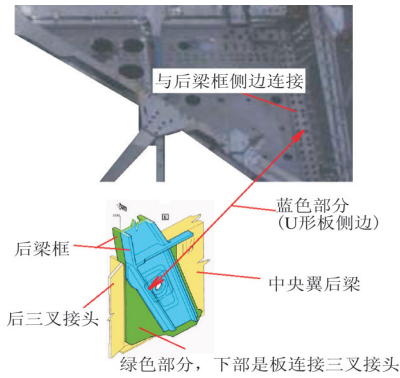


图 7 斜撑板与后梁框连接示意图
Fig. 7 Joint of trap panel and rear beam frame

2.2 A350 飞机斜撑板

A350 飞机的斜撑板位置与 A320 飞机的类似,如图 8 所示。

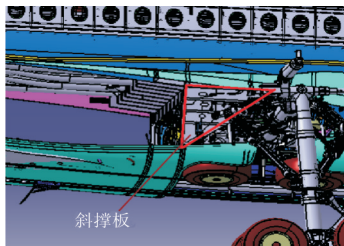


图 8 A350 飞机斜撑板位置示意图
Fig. 8 Position of A350 trap panel

A350 飞机斜撑板侧边不是和后梁框连接,而是和机翼后梁对接的对接接头(十字形)连接,斜撑板在外翼一侧,和对接肋的肋腹板对齐,有利于外翼扭矩形成的面内剪力的传递;外翼升力的一部分也直接由十字形接头传递到斜撑板,再分散传递到机身侧壁板。斜撑板的连接及结构如图 9 所示^[8]。

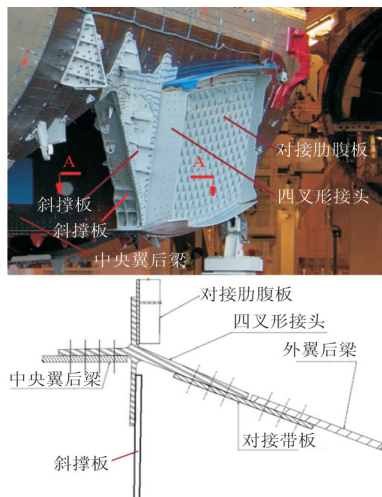


图 9 A350 飞机斜撑板结构和连接
Fig. 9 A350 trap panel structure and joint

图 9 中斜撑板的斜撑边和下缘条中央翼一侧的侧边外伸段 1 排钉连接,连接部分很短,并不能使得斜撑板有效分担外翼扭矩。

2.3 C 系列飞机斜撑板

C 系列某型飞机的斜撑板是一整块加筋板,位置如图 10 所示。

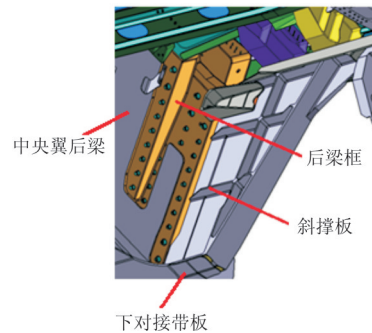


图 10 C 系列某型飞机斜撑板
Fig. 10 Bombardier C trap panel

斜撑板的侧边和中机身后梁框的侧边单排钉连接,后梁框的侧边垂直地面,斜撑板分担外翼升力较直接,但分担的量不大,这从斜撑板只连接 2 个机身框也可得出;斜撑板下边和对接带板伸出部分连接,可以分担部分外翼扭矩。

2.4 波音 787 飞机斜撑板

波音 787 飞机的斜撑板位置与 A350 飞机的类似,如图 11 所示。

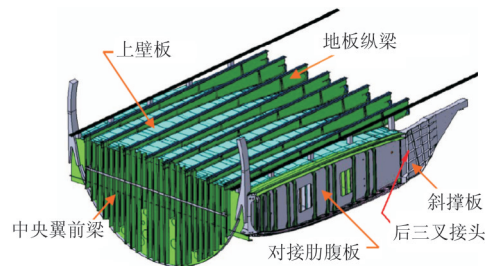


图 11 波音 787 飞机斜撑板位置示意图
Fig. 11 Position of Boeing 787 trap panel

波音 787 飞机斜撑板的侧边和柔性连接件连接,连接件和后三叉接头都是“T”形,背靠背连接;由于中机身没有后梁框^[9],所以外翼升力大部分都通过斜撑板传递到机身,如图 12 所示。斜撑板下边和对接带板连接,可以分担外翼扭矩。

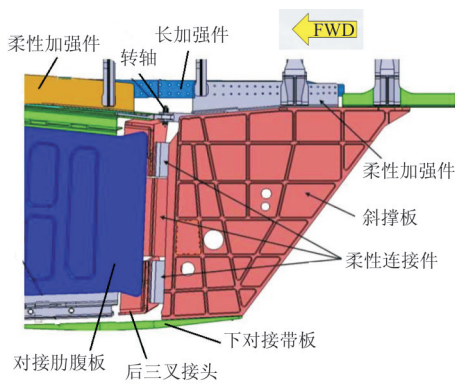


图 12 波音 787 飞机斜撑板结构和连接
Fig. 12 Boeing 787 trap panel structure and joint

波音 787 飞机斜撑板的上边和中央翼一侧连接是通过一个侧边加强件,而侧边加强件是通过一根螺栓与中央翼一侧的侧边加强件连接,螺栓如同销子可以传力,也可以作为旋转轴^[10];斜撑板侧边连接的柔性连接件也可以转动,斜撑板在外翼向机身传递载荷的协调变形时会转动,如图 13 所示。

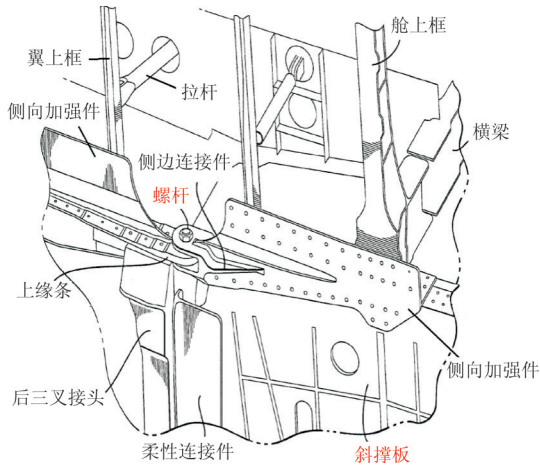


图 13 波音 787 飞机斜撑板连接示意图
Fig. 13 Boeing 787 trap panel joint

波音 787 飞机斜撑板需要设计成可转动结构,这和翼上框的连接结构设计是相关联的。翼上框的端头和对肋上缘条连接是柔性连接接头,如图 14 所示^[9]。

图 14 中柔性接头是由一个“T”形件和一个“II”形件组成,框腹板上的剪力可以通过柔性接头传递到对接肋的上缘条,而框的弯矩会因为柔性接头的变形得到释放,如图 14 所示。因外翼上壁板和翼上侧壁板形成闭角^[11],当外翼上壁板压力传递到翼上侧壁板,翼上侧壁板会有向机身外侧倾斜

的变形趋势,在靠近机翼后梁位置,外翼上壁板传来的压力非常大,靠近后梁的三根翼上框倾斜变形会很大,乃至需要在框端处加装拉杆,以限制此变形,如图 13~图 14 所示。

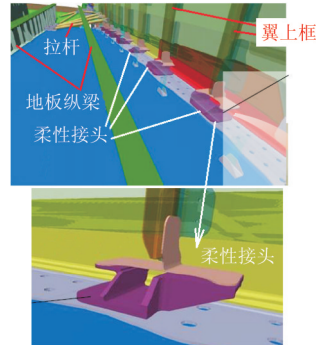


图 14 波音 787 飞机的翼上框及连接结构
Fig. 14 Boeing 787 over wing frame joint

图 13 中可见,舱上框的框端头是刚性的短横梁结构,并且左右短横梁间有横贯起落架舱上壁板的横梁相连接,如图 15 所示^[9]。舱上框端不受类似外翼上壁板的压力,舱上侧壁板的外倾变形很小。在翼上侧壁板变形很大和舱上侧壁板变形较小之间,两侧向加强件的连接采用可以相对转动的连接。

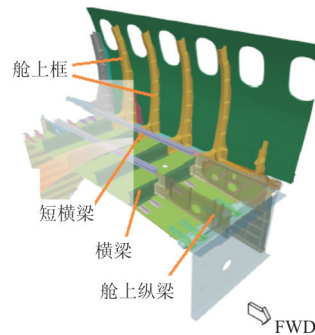


图 15 波音 787 飞机舱上框及连接结构
Fig. 15 Boeing 787 over compartment frame

斜撑板的作用是通过其分散外翼升力载荷和分担外翼扭矩载荷实现的。通过以上四种机型斜撑板结构的分析,A320/A350/C 系列三种机型的斜撑板都只能部分起到这些作用,波音 787 飞机的斜撑板较充分地发挥了作用,但其斜撑板与周边结构的连接过于复杂。

3 斜撑板设计要点

斜撑板设计的关注点:一是在其上边、侧边和

下边的连接结构;二是在斜撑板本体加筋布置等细节。

3.1 斜撑板的连接

图 13~图 15 说明了波音 787 飞机翼上框端柔性连接对斜撑板上边、侧边连接结构的影响。因为变形的协调,斜撑板上边和侧边的连接接头须满足有柔性可转动的要求。

A320、A350 等机型的翼上框端的连接并非柔性形式,而是和通过翼上框接头的较刚性的连接,如图 16 所示^[7]。

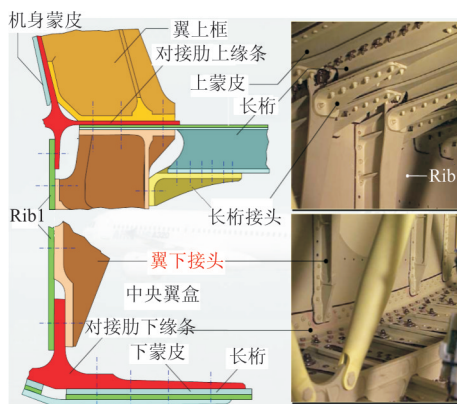


图 16 翼上框和翼下框接头连接

Fig. 16 Over wing frame and under wing fitting

翼上框采用刚性连接,翼上侧壁板和舱上侧壁板没有变形协调的问题,斜撑板的侧边连接无须是柔性的,即可以连接在十字形后梁对接接头上,或后梁框的侧边上。

斜撑板的下边和对接带板可以选择连接或不连接,连接单排钉或多排钉。

3.2 斜撑板的本体

斜撑板本体设计有组合式和整体机加式; A320 飞机和 A350 飞机的斜撑板是组合式;波音 787 飞机和 B 机型的斜撑板是整体机加式。

斜撑板材料可以选铝合金和钛合金,目前先进民机的机身蒙皮都是复合材料;斜撑板选铝合金和复合材料蒙皮在热膨胀和异电位上相容性较差,但铝合金加工性好,经济性相对较好;选钛合金则会和复合材料蒙皮在热膨胀和异电位上相容性较好^[12],但钛合金加工粘刀严重,残余应力大,工艺复杂^[13],经济性相对较差。

4 B 机型斜撑板设计

为充分发挥斜撑板的作用并降低结构的复杂性,在 B 机型斜撑板的设计上做了改进:斜撑板侧边和后梁框刚性连接、下边和对接带板充分连接。

4.1 斜撑板位置和连接

B 机型的斜撑板结构包括斜撑板本体和其上边的侧边加强件,其位置如图 17 所示。

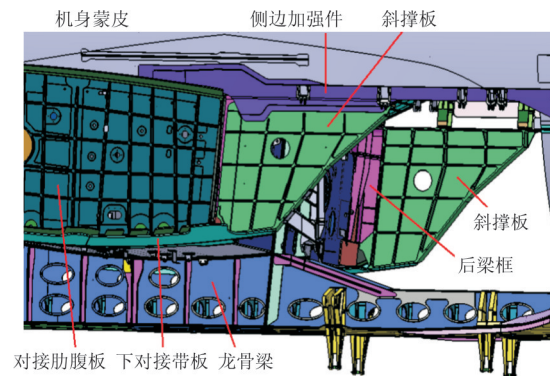


图 17 B 机型的斜撑板结构

Fig. 17 B model trap panel

该机型的对接肋上缘条和中机身侧蒙皮的配合面及过渡面是曲面,因此侧向加强件上部也是曲面和蒙皮曲面配合,下部是平面和斜撑板本体连接。翼上框端采用短横梁结构,是一种刚性连接,翼上侧壁板和舱上侧壁板变形差别不大,斜撑板结构的侧边加强件延伸到翼上侧蒙皮;斜撑板的侧边和后梁框连接,也是刚性连接。某机型斜撑板侧边连接示意图如图 18 所示。

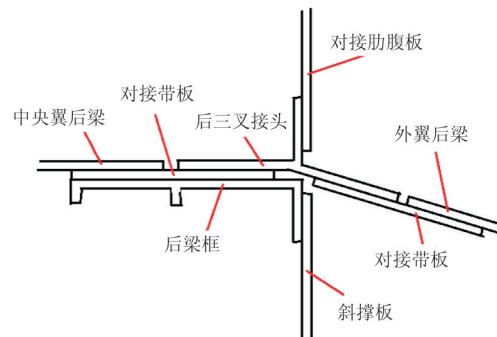


图 18 某机型斜撑板侧边连接示意图

Fig. 18 Some trap panel joint

B 机型斜撑板的上边航向尺寸较大,为

1 092 mm, 跨越 2 个机身框距, 即可以连接 3 个机身框, 有利于分散斜撑板传递的升力载荷到机身侧壁板; 斜撑板钉排布如图 19 所示。

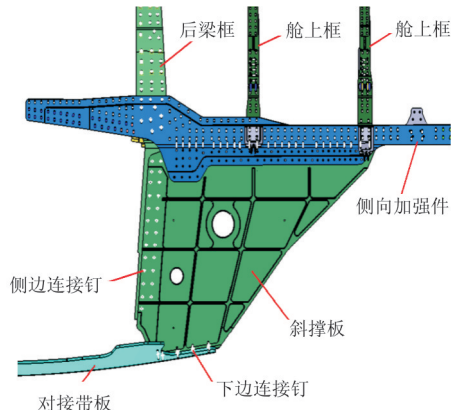


图 19 斜撑板的钉排布

Fig. 19 The joint of trap panel

斜撑板的本体是整体机加式, 通过软件分析达到了结构效率的优化, 相对组合式更加省重和有利于装配。

4.2 斜撑板设计方案及分析

B 机型有后梁框, 翼上框端的连接不是柔性连接, 这些影响斜撑板的因素和 A320 飞机相同, 且 B 机型和 A320 飞机规模一致, 因此设计之初, 第一方案是选用类似 A320 飞机的壁板式斜撑板, 分析结果表明翼上区的应力有所降低(-11%), 舱上区 F 的剪应力降低较明显(-20%), 但后梁框的集中载荷降低较少(-7%), 中央翼下壁板上剪应力几乎无变化, 结构效率不明显, 故 B 机型没有选用此方案。应力变化区如图 20 所示。

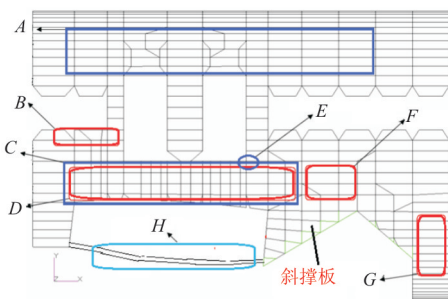


图 20 B 机型应力变化区示意图

Fig. 20 Stress variation zone

第二方案是将斜撑板结构改成整体加筋板式,

并类似 A350 飞机的连接形式: 侧边连接十字后梁接头, 下边连接下缘条侧边伸出段, 如图 21 所示。分析后结果表明翼上区和舱上区的应力降低都较明显(-18%, -20%), 后梁框的集中载荷降低较多(-55%), 中央翼下壁板 H 上剪应力降低较小(-6%), 结构效率相对较高。但进一步分析显示, 十字后梁接头和斜撑板连接的侧边在承载过程中, 上下变形不协调, 容易产生疲劳问题^[14]。采用相同方案的 A350 飞机的十字接头是疲劳性能突出的铝锂合金, 波音 787 飞机的是两件 T 形件组合成十字件, 材料为钛合金且设计成柔性件。而 B 机型经全面考虑, 后梁接头采用的是铝合金, 且因为承载较大而选用 7 系列, 因此 B 机型的后梁接头不适合设计成十字形这样易产生疲劳问题的形式。从而, 最终 B 机型没有选用第二方案的斜撑板结构。

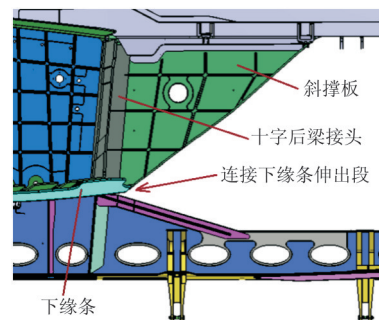


图 21 斜撑板第二方案

Fig. 21 A type of trap panel

第三方案是将斜撑板在侧边和下边的连接上做了改进: 侧边连在后梁框上, 斜撑板与 1 号肋腹板对齐, 带动后梁框的下端侧边垂直地面, 有利于斜撑板分担升力载荷; 下边与对接带板充分连接, 连接区较长有 4 排钉, 便于外翼扭矩在下壁板上产生的剪力传递到斜撑板。斜撑板的连接如图 17 和图 19 所示。经全机模型分析后(如图 22 所示), 结果表明, 翼上区和舱上区的剪应力降低都较明显(-19%, -23%), 后梁框的集中载荷降低更多(-67%), 斜撑板传递了大部分升力载荷, 如图 23 所示。由下缘条和对接带板传递到中央翼下壁板的剪力也有更多的降低(-17%), 经过蒙皮和长桁的优化分析, 中央翼下壁板比没有斜撑板时减重 15 kg。

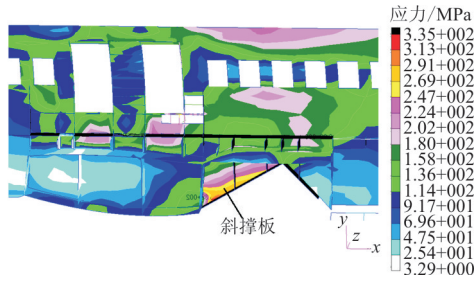


图 22 斜撑板及周边应力分析

Fig. 22 Stress analysis around trap panel joint

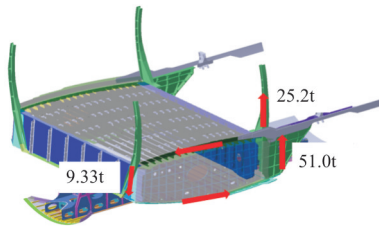


图 23 斜撑板降低后梁框载荷示意图

Fig. 23 Load reduction of rear_spar frame

第三方案的斜撑板结构,比第二方案的重了 6.5 kg,但其对后梁框和中央翼下壁板的减重效果更明显,比第二方案好;第三方案对降低区域应力水平的效果更好;第三方案可避免采用十字后梁接头而产生潜在的疲劳问题。最终 B 机型选择了第三方案。

综上所述,采用改进方案的斜撑板结构,其结构效率更高、稳定性更好。

4.3 斜撑板细节设计

B 机型斜撑板的细节设计是先通过 HyperMesh 拓扑优化出加筋板的分布和形状^[15],再通过软件进行分析和修正^[16],得到斜撑板最终形状和尺寸的。B 机型斜撑板结构示意图如图 24 所示。

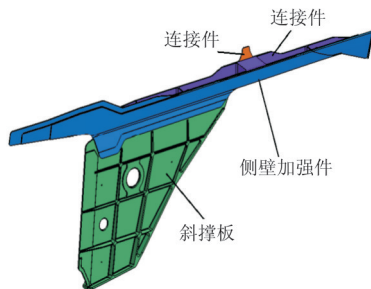


图 24 B 机型斜撑板结构示意图

Fig. 24 B model trap panel

5 结 论

(1) 发动机翼吊和尾吊的布局选择、机型本身的大小会影响斜撑板是否选用。目前典型民用飞机大都是翼吊布局,也都布置有斜撑板,斜撑板结构扩大了对接肋的传力范围,加强了起落架舱开口的,从而改善了翼上、舱上、中央翼下壁板等周边区域的应力分布,是效用明显的一个翼身对接传力部件。

(2) 斜撑板结构从初期的类似机身壁板的结构发展到当今最先进机型运用的主体为加筋板的结构,可见斜撑板结构的作用越来越被重视。

(3) 斜撑板结构的设计需考虑:翼身对接肋平面的布置,上缘条与机身蒙皮的配合面及过渡面的形式,这些会影响斜撑板的上边和侧边的对接结构;翼上框框端的连接是柔性结构还是刚性结构会影响斜撑板侧边的连接结构;对接带板连接部分的长度会影响斜撑板结构对下缘条上剪力的分担;斜撑板本体优先选用整体机加式;斜撑板侧边连接处载荷复杂、变形复杂,需考虑相关结构的疲劳性能。

参考文献

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 9 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 455-457.
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual No. 9[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 455-457. (in Chinese)

[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.
Niu Chunyun. Airframe stress analysis and sizing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009. (in Chinese)

[3] 苗强, 郝新超. 某机型飞机主起舱开口处后撑板结构尺寸优化[J]. 科技信息, 2013(18): 386-387.
Miao Qiang, Hao Xinchao. Size optimization of trap panel in main landing gear compartment opening[J]. Science & Technology Information, 2013(18): 386-387. (in Chinese)

[4] 赵莉, 吕国成, 牛福春. 下单翼飞机主起落架舱补强结构设计与分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2018(3): 78-80.
Zhao Li, Lü Guocheng, Niu Fuchun. Reinforcement design and analysis of main landing gear BAY for low-wing aircraft [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2018(3): 78-80. (in Chinese)

[5] 管德. 飞机结构强度[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
Guan De. Structural strength of aircraft [M]. Beijing:

- Beihang University Press, 2005. (in Chinese)
- [6] 邱志平, 王晓军. 飞机结构强度分析和设计基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
Qiu Zhiping, Wang Xiaojun. Structural strength analysis and design basis of aircraft[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012. (in Chinese)
- [7] Airbus. A320 structure repair manual, 57 wing[M]. France: Airbus, 1997.
- [8] Airbus. Reference structure design principles for A350-XWB, 57 wing[M]. France: Airbus, 2012.
- [9] 787 Structures Working Group. ATA 53 Fuselage[M]. USA: Boeing, 2012.
- [10] Patricia W Estell, John H Polk. Trap panel flexible connection structure[P]. United States: US 7546979 B1, 2009-09-14.
- [11] 汤平. 民用飞机外翼中央翼对接面位置的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(2): 23-24.
Tang Ping. Analysis on joint plane between outer wing box and center wing box for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(2): 23-24. (in Chinese)
- [12] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Yang Naibin, Zhang Yining. Structure design of composite aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2010(15): 26-30.
Chen Wuyi, Yuan Yuefeng. Research progress of titanium alloy cutting technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(15): 26-30. (in Chinese)
- [14] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 10 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual No.10[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 钟焕杰, 金海波. 基于拓扑优化的薄板加筋方法研究[J]. 机型设计与制造工程, 2015(1): 45-46.
Zhong Huanjie, Jin Haibo. Study on the reinforcement method of thin plate based on topology optimization[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2015(1): 45-46. (in Chinese)
- [16] 蒋学武, 吴新跃, 朱石坚. 综合应用 HyperMesh 和 MSC Marc 软件进行有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2007(6): 62-64.
Jiang Xuewu, Wu Xinyue, Zhu Shijian. Comprehensive application of HyperMesh and MSC Marc software for finite element analysis[J]. Computer Aided Engineering, 2007(6): 62-64. (in Chinese)

作者简介:

汤平(1971—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机翼身对接结构。

刘婷(1981—),女,学士,高级工程师。主要研究方向:复合材料中央翼。

张明星(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:起落架舱。

(编辑:赵毓梅)