

(5) 28-30  
V22

## 飞机结构柔性设计 飞机结构柔性设计

飞机设计

结构设计

王立群

## 一、结构柔性设计概念的引出

从事飞机结构的设计员都知道，当设计某飞机结构时，首先要考虑的是：

- 1、该结构所承受的载荷类型与大小；
- 2、与该结构相连接的周边结构的情况及连接要求；
- 3、对该结构的强度/刚度要求。

当所设计的结构只传递一部分载荷而不能承受另一部分载荷时，或者所设计的结构，其周边结构中的一部分不能传递所分配给它的载荷时，或者对所设计的结构除有强度要求外还有变形要求时，设计员就必须合理分配所设计结构的传力路线，在有些部位甚至切断其传力路线，任其自由变形。我们姑且把这些切断传力路线、可变形的结构称之为柔性结构，而把设计这些结构的过程称之为柔性设计。

笔者曾在参加过的 Y10 飞机设计和 Y8 气密型飞机设计中成功地采用过飞机结构柔性设计技术。下面通过几个例子把结构柔性设计的概念介绍给大家，供从事飞机结构设计的人员参考。

## 二、飞机结构柔性设计的几个实例

例一：Y10 飞机机身垂尾前梁接头与垂尾前梁接头的连接。

Y10 飞机的机身垂尾前梁接头连接在机身 74 框上，74 框除了作为机身垂尾前梁框传递垂尾前梁的载荷外，还是机身的气密底框，并承受气密载荷。由于结构布置上的原因，74 框不能承受航向的载荷。为此，在机身接头的双耳片和垂尾前梁接头的单耳片之

间设计成留有间隙，并且在飞机飞行时受载的任何情况下都要保证该处具有一定的间隙，从而成功地切断航向载荷，详见图 1。垂尾航向载荷由位于 77 框的机身垂尾后梁接头（钢制模锻件）传递。

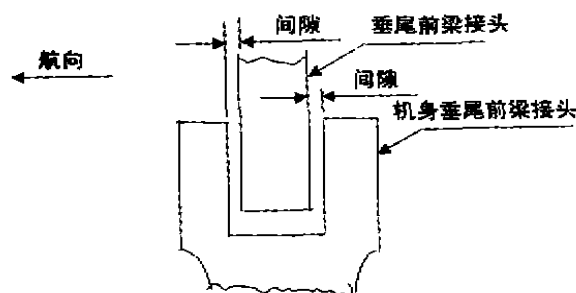


图 1 Y10 机身垂尾前梁接头与垂尾前梁接头的连接

为了减轻重量，机身垂尾前梁接头采用高强度铝合金模锻件。由于这种材料的缺口敏感性比较高，如果机身和尾翼的垂尾前梁对接螺栓拧得太紧，就有可能在机身垂尾前梁接头的耳片根部产生裂纹，随着裂纹的进一步扩展，机毁人亡的悲剧将难以避免。为了杜绝上述情况的发生，对接螺栓被设计成图 2 所示形状，并配以内锥形垫圈，保证螺母拧紧时不产生对耳片的压力，从而切断了引起耳片根部产生裂纹的载荷来源。

从图 2 可以看到，当拧紧对接螺栓时，内锥形垫圈的内锥面碰到螺栓锥面后，内锥形垫圈再也不能向内移动，从而保证了内锥形垫圈与机身垂尾接头之间具有一定的间隙，切断了螺母拧紧后螺母对耳片的压力，使接

头耳片根部不可能产生航向弯矩、接头耳片处于最佳受力状态。当 Y10 飞机机身和垂尾对接完成后，垫圈可在内锥形垫圈和接头之间转动，以至于装配人员误以为是发生了装配错误。

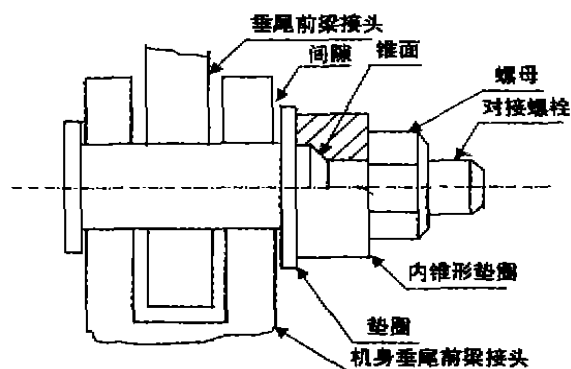


图2 对接螺栓的连接详图

#### 例二：气密底框的设计考虑

Y8 飞机气密改型设计中，59 框仍继续作为机身垂尾前梁框的同时，又要求其成为气密机身的气密底框，并且维持原有的外形和功能。Y8 飞机 59 框是一个平板框，对承受与框平面垂直的均布气密载荷是一种最不利的型式。所以，为该框布置了许多横向和纵向的加强件，并选用了较厚的腹板，即对于承受气密载荷，以牺牲重量为代价，采用了一种“以硬对硬”的解决办法。

与 Y8 气密型飞机 59 框设计思路不同，Y10 飞机的气密底框采用了结构柔性设计的思想。它被设计成球面形状，简称为球面框，如图 3 (a) 所示。当承受气密载荷时，由 7 块不足 1 毫米厚的 Ly12 铝板铆接而成的球面框产生了极大的变形。据机身气密试验时负责观察球面框的人员讲，此时，球面框就象一只正在打气的皮球，球面明显膨胀，如图 3 (b) 所示。

球面框球皮的大变形，却可使内应力降低。变形越大的地方，内应力就越小。由于

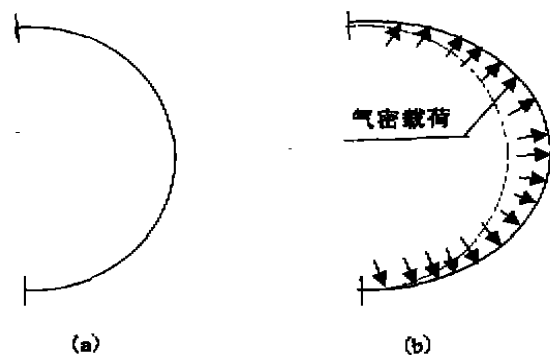


图3 Y10 飞机球面框承受气密载荷时的变形

框缘的限制变形，近框缘的地方变形最小，内应力也最大。考虑到抗疲劳要求，球皮的内应力被控制在  $8\text{kg}/\text{mm}^2$  左右。由于球皮很薄，虽然 Y10 飞机的气密载荷比 Y8 飞机要大，但其球面框的结构重量比 Y8 气密型飞机 59 框还要轻，具有“以柔克刚”的效果。特别需要指出的是，由于球面框变形很大，与其相连接的所有构件都必须考虑到不能影响其变形。例如，球面框前面布置的厕所隔板就不允许和球皮连接，通过球面框的电缆应留足球面变形所需的长度。总之，不能影响球面的变形，否则，将会在限制变形处产生“硬点”，犹如在皮球上扎了一根针，充气时，其危险性可想而知。如图 4 所示。

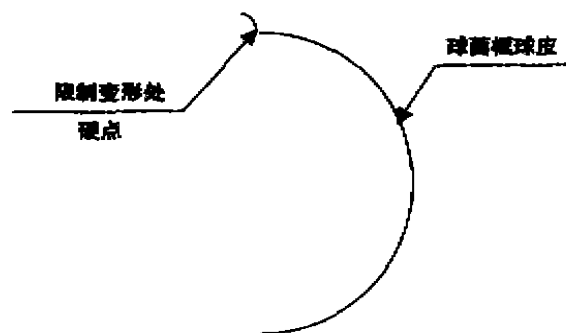


图4 球皮变形硬点

#### 例三：Y8 气密型飞机 59 框后大门挂点接头的设计

Y8 气密型飞机 59 框除了作为机身垂尾前梁框传递垂尾前梁载荷和作为机身气密底框承受气密载荷外,还是机身后大门的挂点。在 59 框的下部布置了两只接头,和机身后大门的转动接头通过螺栓相连接。飞机在地面进、出人员或装、卸货物时,机身后大门向上转动升起,59 框的接头就起转动铰链的作用。按一般的常规,59 框上的接头设计成如图 5 (a) 所示形状。但经强度计算后发现,机身后大门上的气密载荷几乎全部都加于 59 框的这两只接头上,这上面的力甚至超过了垂尾前梁载荷,使 59 框的结构不堪重负,致使大门挂点接头与框的联接成为技术难点。此时,因采用了柔性结构设计方法,很好地解决了这个难题。

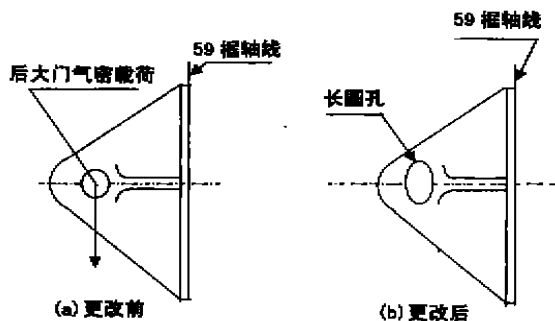


图 5 Y8 气密型飞机 59 框  
后大门挂点接头

后大门上布置着十几个传力触点,它们与经加强的两侧大梁上相应均布的传力模锻件触点在关门后相合。经计算,后大门上的气密载荷完全可以通过触点传递至两侧大梁,并由大梁传至机身。据此,按结构柔性设计的思路,把后大门上传给 59 框挂点接头的气密载荷的传力路线切断,让它只起旋转铰链的作用,而不能传递载荷。于是对机身挂点接头进行了设计修改,把与后大门接头的连接孔由圆孔改成长圆孔,见图 5 (b),从而轻而易举地把后大门上的气密载荷从 59

框挂点接头上卸去,把它转移到了两侧大梁上。通过再次计算,证明这样的更改完全能实现上述设想,从根本上改善了 59 框的受力状态,使其能完成垂尾前梁载荷和机身气密载荷等主要载荷的传递任务。

特别需要指出的是,上述柔性结构都经过了强度试验、气密试验和飞行试验的考验,其中 Y8 气密型飞机至今仍在蓝天飞行。实践证明柔性结构设计技术是一种行之有效的飞机设计技术,特别是在常规设计技术不能满足设计要求的部位。

### 三、几点说明

飞机结构柔性设计技术并非处处可用。笔者向大家介绍它,只不过是给从事飞机结构设计的人员在进行工作时增加一种思路和方法。

当采用结构柔性设计技术时,必须要注意:

- 已柔性化的结构必须仍具有足够的强度和刚度,以满足设计要求。
- 被切断的应是干扰结构承受主要载荷的次要载荷传力路线。
- 必须了解周围结构及其联结的状况。若采用变形卸载方法,则应留有足够的变形空间,并且一定要避免产生任何“硬点”,若采用转移载荷的方法,则一定要确定具有能承受被转移载荷的结构,使其能更合理地传递卸下的载荷。例如,把 Y10 飞机机身垂尾前梁接头承受的小部分垂尾航向阻力也让钢制机身垂尾后梁接头全部承受起来,就更显合理。

● 在进行结构柔性设计后,必须要重新进行强度计算,有刚度要求的还应进行刚度计算,加以确认,确认其满足设计要求;必要时,要进行强度试验,加以验证。

● 在易引起应力集中的部位,或对疲劳强度有影响的部位,采取结构柔性设计必须特别小心,以免引起潜在的隐患。