

浅析起落架整流罩设计方法

李 耀 孟要伟

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

【摘 要】：针对大型飞机安装于机翼主梁根部的主起落架整流罩结构，根据整流罩的基本特征，分析了整流罩和舱门操纵系统的互换性、维修性、耐久性设计原则，分析了主要传力路径。探讨了整流罩的结构骨架设计方法、框和长桁设计方法、结构连接方法、结构开口边界确定方法；重点探讨了舱门结构的设计与操纵；根据设计要求，给出了维修性设计、防腐蚀设计的原则。在此提出的设计方法可供其他同类型飞机在整流罩结构设计时借鉴。

【关键词】：整流罩；传力分析；舱门设计；运动机构设计

引言

由于不同类型飞机的起落架几何形状、安装位置、尺寸大小、收放方式不尽相同，起落架整流罩的设计也随之千变万化。如小型飞机或直升机，大多数采用固定式起落架，其所谓的整流罩只是包裹着起落架轮上半部分的流线型钣金件；大型军用运输机上常用的收纳于机身侧下方的多组并联起落架，其整流罩可以看作一组流线型的随动口盖；高性能战斗机采用的机身侧壁收纳的折叠起落架，其整流罩只是一块或几块大小适中的口盖；一些中型涡桨飞机常将起落架与发动机短舱前后布置，其起落架整流罩是一段连接于发动机短舱的独立舱室。现代大型飞机的起落架固定连接与机翼主梁根部并在巡航阶段向后收起，在这篇文章中，核心内容是如何设计此类起落架的整流罩。

1 结构说明

起落架作为飞机不可或缺的功能件，在飞机起飞、着陆阶段发挥着不可替代的作用。结实、稳定的起落架系统有助于飞机在各类不同条件的机场安全起降。多数起落架系统由液压驱动收放，液压管路系统暴露在外界环境中极易遭到破坏，从而导致起落架收放故障；同时，结构形状复杂、不规则的起落架在飞行过程中会形成极大的空气阻力。为保护起落架液压管路安全，降低飞行过程中的空气阻力，在起落架外部布置整流罩对其进行整流和保护必不可少。

2 结构功能分析

整流罩主要起到保护起落架的作用。因此，整流罩的布置方式、结构形式取决于起落架的布置位置和传力方式。

大型飞机主起落架直接连接于机翼主梁根部，在起飞、着陆过程中起落架完全放下，此时整流罩位于起落架后方；在飞行过程中主起落架向后旋转并收起，此时整流罩应当包络主起落架，对起落架形成有效收纳和保护。因此，起落架整流罩内部空间应能完全包络收起的起落架及其附属管路，外部形状应尽可能光滑平顺，并具有较小的气动阻力。整流罩外形通常通过气动计算和风洞试验确定。

整流罩不仅要能对起落架起到收纳保护作用，还要提供足够的空间通路以满足起落架的收放。因此，合格的整流罩结构应当至少包含固定于机体结构的整流罩本体和可随起落架收放而开合的舱门系统。在飞行过程中，舱门应当能够完全闭合并贴合于理论外形。

为降低系统复杂度，提高安全系数，不应单独为每对舱门设计操纵机构，应尽量借用起落架上成熟的液压驱动系统作为舱门的驱动方式。难以借用或会对起落架系统造成重大影响的，可以考虑设计尽可能简单的操纵系统完成舱门的操纵。舱门运动机构应当简单可靠，易于调节；应当有锁止机构，防止因拉杆失效造成舱门在空中突然开启。舱门的运动轨迹应当为简单的旋转或单向平移，复杂的运动机构可能会对后续维护保障带来困难。

2.1 互换性、维修性分析

整流罩的分离面应当简单整齐，易于拆装的功能件如舱门、调节拉杆、尾椎应当满足完全互换性要求。整流罩内部骨架应当开敞无死

角，所有螺栓连接区域应当可达、可视；所有铆钉连接区域应当可达、可检；不应存在无法检修的封闭空腔；飞机在地面停放过程中，应当可通过开启的舱门检查整流罩内部。在进行起落架收放试验时，应当不断开舱门完成地面试验。维护液压管路的通路应当布置在管路附近，并能满足双手同时携带工具进入操作的要求。

2.2 耐久性分析

作为机体结构的一部分，起落架整流罩应当在全寿命周期内不发生破坏性失效，不引起机翼主梁破坏性损伤，不影响起落架正常收放和操纵；因此应当注意结构强度的校核和结构防腐蚀设计。在飞机任何工况下不应当发生有害变形；在飞机预期的外界环境作用下不应当发生引起结构失效的腐蚀。

3 结构设计方法

在整流罩功能分析完成后，可以根据整流罩的外形特征及主起落架在机体上的连接位置，分析整流罩的传力路径。找出主传力路径后，针对性设计结构骨架（包括框和长桁）；结合起落架运动要求，确定舱门的开口边界；通过对开口特征的眼局，对舱门进行分块，确定舱门的操纵方式。维修性设计、防腐蚀设计应当是贯穿于整个整流罩设计阶段的考虑因素。

3.1 传力路径分析

主起落架直接连接于机翼主梁上，不与整流罩直接连接。整流罩只承受自身及舱门的气动力、操纵力的作用，并将其传递至机翼主梁上。整流罩的主传力路径应当是将气动力由蒙皮汇聚，舱门操纵力由骨架汇聚，并集中向前沿轴向传递至机翼主梁上，因此整流罩属于薄壁轻型非主承力结构。整流罩主要由骨架进行传力，可选用薄壁+强骨架结构组合的结构形式，即采用较薄的铝制蒙皮承受气动力，蒙皮内部布置较密的骨架网格维持蒙皮形状并传递载荷。

3.2 整流罩骨架设计

整流罩骨架应当在主传力路径上尽可能强，并有足够的安全裕度；在连接部位尽可能可靠；在舱门开口边界有一定程度的加强；在仅承受气动力的部位尽可能轻。因此可以考虑布置垂直于航向的框和沿航向放射状分布的长桁；框和长桁呈现“十”型垂直交叉，共同围成“田”型的网状骨架；框和长桁相连处布置连接角片，以增加其抗扭刚度。框和长桁的缘条搭接于蒙皮的内表面，对蒙皮形成有效支撑。外蒙皮应当在适当位置分块，蒙皮分块处应当布置加强框或加强长桁。

3.3 框和长桁的设计

由受力分析来看，狭长的整流罩的主要作用是将气动力传递至前部的机翼主梁上；因此应当尽量避免截断长桁，可以采取在框上开通过槽穿过长桁的方法；框主要起到维持蒙皮外形的作用，因此应当具有良好的抗拉压能力。

（1）连接于机翼主梁上的框、舱门旋转接头固定位置的框、舱门起始及终止面的框、连接尾椎的框均传递较大的力，应设计为加强框；其余框为普通框。加强框应当采用厚腹板和“T”型连接型材，普通框

可根据实际情况采用较薄腹板和“L”型连接型材；加强框应当以双排铆钉连接至蒙皮上，普通框可以采用单排铆钉连接。

(2) 整流罩顶部长桁、悬挂操纵机构的长桁、悬挂舱门的长桁传递较大的力，应设计为加强长桁；其余长桁为普通长桁。加强长桁可以采用壁厚2~4mm的型材或整体机加件；普通长桁可以采用厚1.5~2mm的板弯件。加强长桁应当以双排铆钉连接至蒙皮上，普通长桁可以采用单排铆钉连接。

3.4 尾椎的设计

舱门截止面之后的整流罩外形大致呈圆锥状，末端收缩为一点；沿整流罩对称面的截面形状为抛物线型。由于尾椎只承受气动载荷，并通过连接框将气动力传递至整流罩骨架；可以考虑采用旋压式外蒙皮+若干板弯“C”型截面的普通框+机加“工”型截面加强框组合形成尾椎。此种结构主要依靠外蒙皮和加强框传力，普通框仅起到维持作用，因此应当选用至少2~3mm的厚蒙皮，加强框也应具有一定厚度；普通框应当按照蒙皮受力情况合理布置。难以采用复合材料制造尾椎的原因是尾椎末端外形曲率较大，铺贴难度较大。

3.5 结构的连接

整流罩结构件之间的连接应当以铆钉连接、螺栓连接为主。加强框、加强长桁与蒙皮的连接可以选用双排铆钉连接；普通框、普通长桁与蒙皮的连接可以采用单排铆钉连接。接头、固定支座、旋转支架等有拆装需要的小组件应当采用螺栓连接。

3.6 整流罩开口边界确定

根据起落架收放轨迹合理确定舱门开口边界。确保在起落架收放的任一瞬间，起落架及其操纵机构距离结构开口边界不应小于5mm。为满足装配、调试过程中人员、设备的出入和后续使用维护性要求，开口边界应当布置在整流罩外形平缓区，且距离起落架收放轨迹足够的距离。为降低应力集中系数，开口边界应尽量规整平直，过渡圆滑。

3.7 舱门的设计与操纵

(1) 舱门运动方式选择：舱门的设计首先应当考虑舱门的开合方式，绕固定轴旋转或固定在起落架机构。舱门直接固定在起落架机构有几点缺点：第一，增加了起落架运动过程中的受力，一定程度上增加起落架故障概率；第二，舱门安装复杂且舱门边缘与结构间隙调节难度较大；第三，一旦固定失效，舱门飞掉，起落架直接暴露于外界大气中，极易结冰失效。因此，一般应当选择舱门绕固定轴旋转的开和方式，该方式安装调节技术难度低，对起落架保护效果较好；目前绝大部分飞机同类舱门也采取此类开合方法。

(2) 舱门表面分块：安装于机翼主梁根部附近的起落架一般围绕垂直于飞机对称面的轴线旋转收放，因此舱门一般成对布置，即将开口边界沿整流罩自身对称面划分为对称的两块。若满足起落架收放的整流罩开口很大，且开口处外形曲率较大，难以布置旋转轴。可以考虑设置多对舱门实现其开合功能，但舱门对数不宜设置的过多，否则会导致操纵机构急剧复杂化。一般来说，大型飞机主起落架使用两对舱门即可实现较好的操纵。舱门的旋转轴线应当位于整流罩外形平缓区，这样就能用较小的旋转支架实现较大的旋转角度。

(3) 舱门门体设计：舱门应当设计的尽可能轻盈且有一定的刚度，在气动力和操纵力的共同作用下不应当发生影响操纵的变形。舱门应当至少包含内外蒙皮、承力骨架、旋转接头、操纵接头等零组件；可

以采用先进复合材料一体成型技术制造蒙皮-骨架组合件，再在组合件上安装接头组成舱门。合理铺层的复合材料可以在保持舱门刚度的前提下大幅度减轻重量。相邻成对舱门之间的对缝应尽可能平直，以保证不同运动顺序下的前后舱门之间不发生碰撞干涉或卡滞。舱门与舱门之间、舱门与整流罩之间的对缝间隙应当尽可能小，对缝中应当布置遮光板、挡风板等功能件，以降低气动阻力、保护舱内设备。

(4) 操纵的实现与控制：舱门的操纵有两种实现方式，设计独立的操纵机构或与起落架随动。一般说来，距离起落架支柱较远的大型舱门适宜设计独立的操纵机构；距离起落架主承力支柱的小型舱门适宜选用随动方式。独立操纵的大型舱门一般根据其具体尺寸的大小确定悬挂接头数量，若舱门航向尺寸超过2m，则应当在其前后端分别布置操纵接头，否则在气动力作用下舱门极易发生扭转变形；大型舱门应当布置可靠的锁止结构，以保证飞行过程中舱门的有效拉紧。随动舱门的设计难点在于起落架收放是绕垂直与飞机对称面的轴转动的旋转运动，而舱门开合的旋转轴一般与航向平行；因此需要设计关于舱门固定接头、舱门操纵接头、起落架支柱转动接头、支柱拉杆接头四个点的空间四连杆机构；合格的四连杆机构应当在保证舱门最大开启角度的同时还能保证起落架完全收起时随动舱门刚好紧贴理论外形。

3.8 维修性设计

整流罩结构的维修性主要体现在两方面：不可拆卸或难拆卸的零件修理检查通路可达、可视；可拆装的零组件易于拆卸安装。整流罩上的框、长桁、蒙皮用铆钉固定，难以单独拆装，因此整流罩蒙皮可采用单层蒙皮，结构内腔不再布置第二层内蒙皮。这样做的好处是框、长桁、蒙皮两个表面均处在可达部位，易于检查、维修。舱门、尾椎、操纵拉杆、固定支座用螺栓固定，可以单独拆装。螺栓双侧均应布置在可达部位。另外，舱门、尾椎、拉杆等部件，必须满足互换性要求，可以拆下后不经过修切处理即能安装于其他架次的飞机；必要时整流罩结构整体可以拆下并经过简单修合即可安装于其他架次的飞机。

3.9 防腐蚀设计

整流罩包络的起落架及其操纵系统应当在外界温度、压力作用下正常工作，因此整流罩属于非气密舱段。在起飞着陆过程中大小舱门同时开启，在地面停放时小舱门开启并处于固定位置；整流罩内部与外界一般保持连通状态。整流罩结构内腔所受环境与外界环境基本一致（内腔不承受外界紫外线影响），因此结构内部表面（包括舱门门体内表面）应当按照飞机外表面防腐蚀设计标准进行设计。一般来说，在结构骨架上应当设置排水通道，在内腔底部应当布置排水孔或排水活门，在结构上表面结构缝隙处应当涂覆密封剂，在结构开口部位应当布置遮光板、整流条等封严零件，在装配完成后应当在内腔喷涂面漆或长效硬膜缓蚀剂。

4 总结

根据安装于机翼主梁根部的主起落架安装形式，分析起落架整流罩的基本特征，提出了结构和运动系统的设计要求。确定此类整流罩的传力路径，分析了骨架、框、长桁、尾椎、结构连接、舱门结构及运动的设计方法，同时探讨了维修性设计和防腐蚀设计的基本原则，为后续其他同类型飞机整流罩或类似结构的设计提供了一种技术思路。

参考文献：

- [1] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册.第10册，结构设计[M].航空工业出版社，2000.
- [2] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册.第14册，起飞着陆系统设计[M].航空工业出版社，2002.
- [3] GJB 8606-2015，飞机结构防水和排水设计要求[S].2015.