

APU 舱门局部结构排液分析

柯金霖* 王雾雾 陶文操 李国信

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 依据 APU 舱排液相关的适航条款要求,在 10 min 内需要通过排液结构排出超过 90% 的舱内积液且不增加额外着火风险。由于舱门为 APU 舱的主要排液结构,为满足适航要求,目前已有针对民用飞机 APU 舱门排液分析方法的研究工作,主要从结构总体布局的角度出发,假定全 APU 舱存在唯一确定排液口,讨论分析了排液口尺寸与排液速率的关系。但对于局部结构的排液能力鲜有讨论,当 APU 舱门采用分段密封件布局时,不当的结构外形以及不合理的尺寸设计,可能导致可燃液体从密封搭接位置泄露,从而增加意外着火的风险,因此局部结构的排液设计对于舱内液体安全有效的排放同样十分重要。基于大型客机 APU 舱门的排液需求,分析了舱门局部积液结构的排液能力以及相关影响因素,针对此类因素,确定其设计要点,并分别给出了对应的结构优化措施。

关键词: APU 舱门;APU 系统;火区排液

中图分类号: V228

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机的辅助动力装置(Auxiliary Power Unit,简称 APU)作为独立的燃油发动机,日常运营时可为机舱提供电力以及气源,在空中还可以作为主发动机的“备件”,为主发动机提供重启动力。但发动机的高温环境使得 APU 舱成为飞机的火区之一。依据 CCAR25.609《结构保护》和 CCAR25.1187《火区的排液和通风》相关要求^[1],APU 舱的积液必须有效排放且不会增加着火风险。APU 舱门作为 APU 舱主要的排液引导结构,对于全舱排液起着重要的作用。

现有的 APU 舱门排液设计及计算方法主要为满足民机初步设计的需求,提供了全舱排液孔尺寸计算方法^[2-4],在计算时多假设全舱存在确定的排液路径以及唯一的排液口。但 APU 舱门密封结构形式多样,且完整的密封线并不是 APU 舱门的必备条件,对于分段的密封件布局舱门,舱门上局部结构的排液能力不足仍可能导致积液过多,从密封薄弱处溢出的情况。在某型飞机的排液试验过程中就出

现了指定排液口之外的漏液情况。因此本文着重讨论分析了 APU 舱门局部结构排液能力的计算方法,同时分析了可能导致排液能力的不利因素,并针对此类不利因素讨论了对应的结构强化措施,以期完善大型客机 APU 舱门排液设计方法。

1 APU 舱排液设计要求

1.1 液体来源

APU 舱内液体来源大致可分为两类:

1) 环境导致的废水。由于 APU 舱的高温工作环境,舱内温度高而舱外温度低,此时舱内会出现较多的冷凝水。同时在舱门打开关闭过程中,若遭遇雨雪天气或者机体清洗液,也会在舱内出现积水。此类废水不会有着火风险,但会带来腐蚀问题^[5]。

2) APU 系统产生的废液。此类液体主要包括 APU 系统产生的积水/冷凝水、防冰液、滑油以及燃油^[6]。以上液体除水外,其余废液均为可燃液体。APU 舱门上留有系统排液专用接口^[7-8],此类废液正常可通过此接口直接排放到舱外,但考虑到 APU

* 通信作者. E-mail: kejinlin@comac.cc

引用格式: 柯金霖,王雾雾,陶文操,等. APU 舱门局部结构排液分析[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):62-66. KE J L, WANG W W, TAO W C, et al. Drainage analysis of partial structure of APU compartment[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):62-66(in Chinese).

系统外部燃油/滑油导管破损并引发可燃液体泄露的可能,需要通过设计合理的排液结构,及时将可燃液体排放出舱外避免失火。

1.2 适航条款要求

依据 CCAR25.609《结构保护》(b)条要求:在必须保护的部位有通风和排水结构。

依据 CCAR25.1187《火区的排液和通风》(a)条要求:指定火区的每个部位必须能完全排放积存的油液,使容有可燃液体的任何组件失效或故障而引起的危险减至最小。排放措施满足下列要求:

1) 当需要排放时,在预期液体会存在的各种情况下,必须是有效的;

2) 必须布置成使放出的液体不会增加着火危险。

AC25.863-1 中对 CCAR25.1187 的相关要求进行了量化描述,要求在 10 min 内排放超过 90% 的液体,同时舱内最大单个积液量不能超过 1.5 Oz (44.36 ml)^[2]。

2 APU 舱门水密设计

针对 APU 舱的排液设计要求,APU 舱门除指定排液孔外,要隔断舱内外的液体流通,防止舱内液体在排液口外发生泄露,增加额外的着火风险。通常 APU 舱门会采用完整的密封线设计,即采用一体式的密封件,以保证所有舱门同门框搭接区域均有效密封。此方法带来的好处是整个 APU 舱均有良好的密闭性能,排液设计时仅需要考虑排液孔的尺寸即可,局部积液结构无漏液风险,但是带来的弊端是密封件设计困难,需要考虑一体式密封件的截面变化以及工艺成熟度,同时需要考虑 APU 舱门上快卸锁位置与布置,特别对于双扇布局舱门,还要考虑舱门对接密封件同门框密封件的搭接有效性,设计成本,制造成本以及装配工艺要求较高^[9]。同时冗余的密封件布置,可能由于密封件本身的摩擦性能影响开关门的顺畅性以及密封件本身的寿命^[10-11]。

反之,在舱门的局部区域进行密封件分段,辅之以遮蔽结构,不仅能保证舱内外液体隔断,同时可极大地降低零组件安装制造难度和相关成本。但带来的弊端就是必须考虑局部结构的外形和尺寸,若设计不当,会造成液体从密封件断口处溢出,造成漏液。

3 局部排液能力分析

在 APU 舱门的实物中,典型的易产生积液的局

部结构如图 1 所示。在排液过程中,由于下挡结构(隔板,锁座等)和侧挡边结构(边框,支架等)尺寸不同,积液区排液截面的形状和大小会随之变化,若液体输入速率大于排液截面的排液速率,积液将进一步增加,直到超过临界液面,多余的液体将从侧挡边溢出,造成漏液问题。

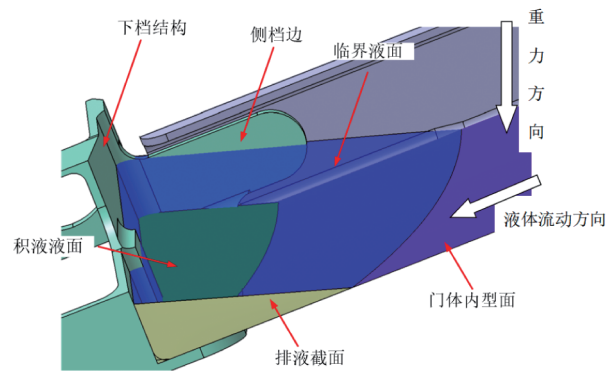


图 1 局部积液结构示意图

为分析图 1 所示结构的最大排液能力,选取图中的排液截面进行排液速率计算分析,计算模型示意图如图 2 所示。

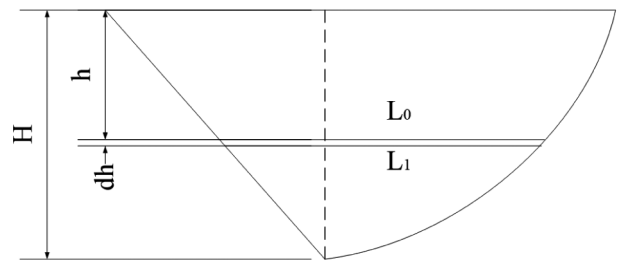


图 2 排液截面排液速率计算模型图

依据能量守恒定律,当液体截面完全无约束时,特定深度 h 处的液体静压将完全转化为动压,此时液体速率 v 与深度的关系为:

$$\rho gh = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (1)$$

进一步可得任意深度处液体速率为:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

在图 2 中,深度 h 处 dh 范围内面积计算公式为:

$$ds = \frac{1}{2}(L_0 + L_1)dh \quad (3)$$

式中, L_0 和 L_1 分别代表深度 h 和 $h + dh$ 的截面宽度尺寸。由式(2)和式(3)可知该区域内的流

量为:

$$dQ = vds = \sqrt{\frac{gh}{2}}(L_0 + L_1)dh \quad (4)$$

因此, 排液截面的总流量为:

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} \int_0^H \sqrt{h}(L_0 + L_1)dh \quad (5)$$

由于截面宽度 L 为深度 h 的函数, 因此可得:

$$L_0 + L_1 = L(h) + L(h + dh) \quad (6)$$

对式(6)中 L_1 的表达式在 $dh = 0$ 处进行泰勒展开后可得:

$$L_0 + L_1 = 2L(h) + L'(h)dh + O(dh^2) \quad (7)$$

将式(7)带入式(5)并忽略高阶小量可得:

$$Q = \sqrt{2g} \int_0^H \sqrt{h}L(h)dh \quad (8)$$

在式(8)中, 排液截面的截面宽度函数 $L(h)$ 和深度 h 由其物理含义限制, 因此数值总是不为负, 因此式(8)为一个随最大深度 H 数值增加而单调递增的函数。而在最大深度 H 数值保持不变的前提下, 排液截面面积(即 $L(h)$ 在 $0 \sim H$ 范围内的积分值)的增长, 会引起流量 Q 的增长。而两者的数值均和侧挡边以及下挡结构的零件外形相关。

以图 1 所示结构为例, 下挡结构的挡液平面和竖直面的夹角为 3.04° , 排液截面与舱体内型面的相交曲线经拟合后的方程为:

$$y - 6 \times 10^{-5}x^2 - 0.309x + 3.9 \times 10^{-3} = 0 \quad (9)$$

从而可得截面宽度 $L(h)$ 和深度 h 的关系表达式为:

$$L(h) = 129.10 \sqrt{H - h + 397.58} - 1993.93 \quad (10)$$

将式(10)带入式(8)可得排液截面的排液速率随其最大深度 H 变化的曲线, 如图 3 所示。从图中可发现, 随着最大深度 H 的加大, 排液速率增长呈

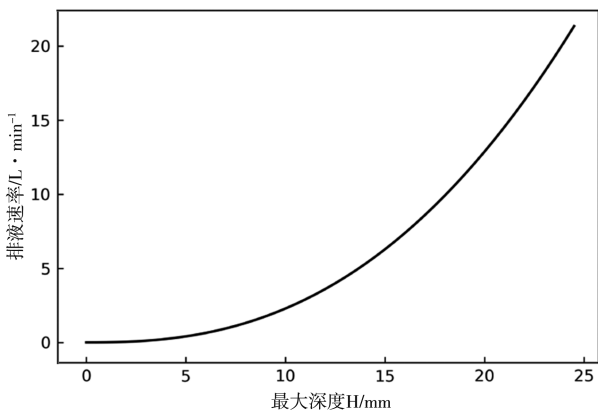


图 3 排液速率和最大深度的关系

指数形式。图 1 中排液截面最大深度 H 为 12 mm, 从图 3 中可知此时对应的排液速率为 3.6 L/min。

若最大深度 H 值保持不变(取 12 mm), 而改变挡液平面同竖直面的夹角(图 2 中左侧边界的斜率), 变化范围为 $3.04^\circ \sim 30^\circ$, 即改变排液截面面积, 此时排液截面的排液速率的变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可发现排液速率与排液截面面积呈线性关系。

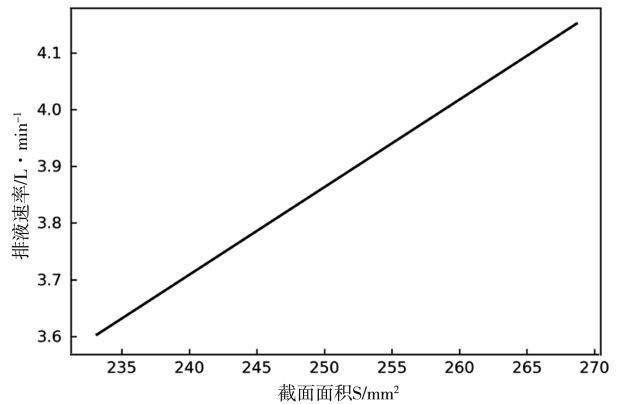


图 4 排液速率和排液截面面积的关系

4 提高排液能力措施

综合第 3 章的讨论分析可知, 提高局部积液结构的排液能力主要可以从两方面出发: 1) 提高最大深度 H 数值; 2) 提高排液截面面积。

4.1 提高排液截面最大深度 H

针对图 1 所示结构, 为提高排液截面最大深度, 可通过以下两条途径实现: 1) 增加侧挡边最低高度; 2) 侧挡边增加翻边结构。

由于水平面沿重力方向等高度分布, 因此侧挡边最低高度和截面最大深度为同数值变化。但由于侧挡边零件高度可能受系统安装空间以及运动包络面所限, 往往增加幅度有限。

而优化侧挡边外形, 增加零件翻边, 则可以按一定比例增加最大深度。图 1 中沿最大深度位置的剖面图如图 5 所示。

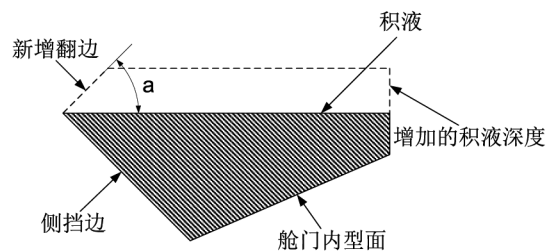


图 5 排液截面最大深度处剖面图

从图5中可以得知,排液截面最大深度 H 的增加同翻边长度 L_f 的关系为:

$$H = \sin(\alpha) \times L_f \quad (10)$$

式中, α 为翻边同积液水平面的夹角。从式(10)可知加大翻边和液面夹角有利于增加最大积液深度 H ,当夹角为 90° 时,即演变为第一种方案。由于排液速率随最大深度为指数变化,而增加侧挡边高度可同值提高最大深度,因此在进行局部积液结构设计时应以此为主要手段,而当空间受限时,再以合适的角度增加翻边宽度作为一种辅助措施。

4.2 增加排液截面面积

增加特定深度的截面宽度 L 数值可提高排液截面面积,从而提高排液速率。此方法可通过改变下挡结构挡水面形状或者设置合理的排液引导结构来实现。

如图4所示,此时挡水面同竖直面的夹角增加 27° ,排液面积增加了 35.52 mm^2 ,而排速率增加了 0.55 L/min 。

此外图1中挡水面与液体来流方向垂直,若设置一个与来流方向呈 105° 的排液导板,如图6所示,此时的排液截面面积为原来的3.2倍。

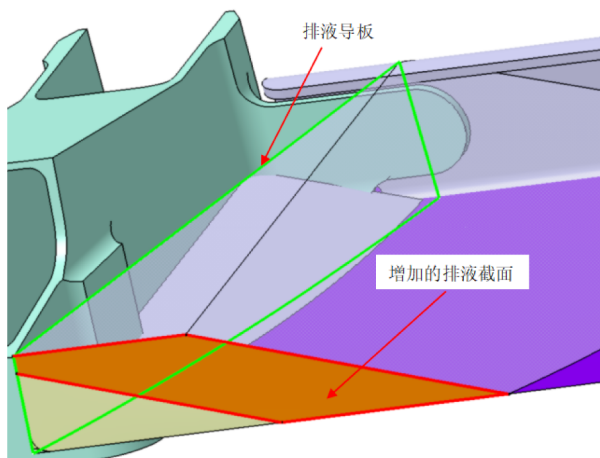


图6 排液导板对排液截面的影响

5 结论

本文分析了APU舱门局部积液结构的排液能力的计算方法,并通过排液速率的计算公式给出了影响排液速率的两大因素:1)积液区域排液截面的最大深度;2)排液截面面积。

针对上述因素,提出了相对应的结构优化措施

以提高舱门局部结构排液能力:1)提高侧挡边最低高度;2)增加挡边零件翻边;3)设置下档零件斜率;4)增加排液导板。

相关内容对大型客机APU舱门排液结构设计具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第25部 运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [2] 刘林,王栋. APU舱排液孔大小确定的初步方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(4): 21-23.
- [3] 张洁. 民用飞机APU舱门排液设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2015(4): 45-47.
- [4] 陈安强,谢锦睿,温小宁. 多因素影响下飞机排液方案设计[C]//中国航空学会. 2017年(第三届)中国航空科学技术大会论文集(下册). 北京:中国科学技术出版社,2017.
- [5] 王哲. 飞机结构维修中的防水和排水问题[J]. 航空维修与工程,2005(5):24-25.
- [6] 王栋. 民用飞机辅助动力装置排液设计综述[J]. 装备制造技术, 2018(4): 32-37.
- [7] 刘大,章弘,周宇穗. 民用飞机辅助动力装置舱排液装置设计方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(3): 25-28.
- [8] 李瀚,王澍,刘德刚,等. 民用客机排液要求研究[J]. 装备制造技术,2014(9):181-183.
- [9] 马莹. 飞机舱门密封设计研究[J]. 价值工程,2011, 30(28):29-30.
- [10] 渠涛,柳荣,董弋锋,等. 飞机舱门橡胶密封件动摩擦性能实验研究[J]. 工程力学,2020,37(7):247-256.
- [11] LORENZ B, PERSSON B N J, DIELUWEIT S, et al. Rubber friction: comparison of theory with experiment [J]. The European Physical Journal E, 2011, 34(129):1-11.

作者简介

柯金霖 男,硕士,工程师。主要研究方向:舱门设计。E-mail: kejinlin@comac.cc

王雾雾 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:舱门制造与维修。E-mail: wangwuwu@comac.cc

陶文操 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:APU系统设计。E-mail: taowencao@comac.cc

李国信 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:舱门设计。E-mail: liguoxin@comac.cc

Drainage analysis of partial structure of APU compartment

KE Jinlin * WANG Wuwu TAO Wencao LI Guoxin

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The airworthiness clause about the drainage of APU compartment requires more than 90% of the liquid to be discharged through the structure within 10 min without additional fire risk. Because the door is the main drainage structure of APU compartment, in order to meet the airworthiness requirements, there has been research work on the drainage analysis method of civil aircraft APU door. From the perspective of the overall structure layout, assuming that there is a known and unique discharge port in the whole APU compartment, the relationship between the discharge port size and the discharge rate was discussed and analyzed. However, there is little discussion on the discharge capacity of the local structure. When the APU door adopts the sectional seal layout, the inappropriate structure shape and unsuitable size design may lead to the leakage of combustible liquid from the seal gap which will increase the risk of accidental fire. Therefore, the drainage design of the local structure is also very important for the safe and effective discharge of liquid in the compartment. Based on the liquid discharge requirement of APU door of civil aircraft, this paper analyzes the liquid discharge capacity of local hydrops structure of the door as well as the related influencing factors, determines the design points for such factors and gives the corresponding structural optimization measures.

Keywords: APU door; auxiliary power unit (APU); drainage of fire zone

* Corresponding author. E-mail: kejinlin@comac.cc