

# APU 舱引射排液出口速度的估算方法

## The Estimation Method for the Outlet Velocity of APU Compartment Ejector Drainage System

刘大 刘林 周宇穗 章弘 / Liu Da Liu Lin Zhou Yusui Zhang Hong  
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)  
(Shanghai Aircraft and Design Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

APU 舱引射排液是一种复杂的气液两相流混合过程。通过假设,获得了一种 APU 舱引射排液装置出口液体排放速度的一维估算方法,并根据该方法计算了地面和空中典型姿态下 APU 舱排液管出口的液体排放速度,这些计算结果可作为全机级 APU 舱排液路径数值模拟的输入条件。计算结果表明,引射排液可以有效增加排液管出口液体排放速度,而且 APU 舱排液管出口液体排放速度与飞行高度成反比。

**关键词:** APU 舱; 引射排液; 液体排放速度

**中图分类号:** V228

**文献标识码:** A

[Abstract] The APU compartment ejector drainage is a kind of complex mixture flow with gas and fluid. A 1-D estimation method for the outlet velocity of APU compartment ejector drainage system is obtained based on proper assumption. The outlet velocities of APU compartment ejector drainage system on ground and typical status in flight are calculated according to the estimation method. The calculation results can be the input for CFD simulation of APU compartment drainage path at aircraft level. The calculation results show that the ejector effect in the APU compartment ejector drainage system can increase the fluid drainage velocity effectively, and the fluid drainage velocity is inversely proportional to the altitude.

[Key words] APU compartment; ejector drainage; fluid drain velocity

## 0 引言

民用飞机辅助动力装置(Auxiliary Power Unit, 简称 APU)是一种燃气涡轮发动机,安装在 APU 舱中,为飞机提供电源和气源,其工作原理如图 1 所示。为防止可燃液体在 APU 舱内积聚,APU 系统设计有排液装置以使可燃液体及时排出机外。根据液体排放原理,APU 排液可分为重力排液和引射排液两种方式。重力排液即通过重力作用将 APU 舱内的液体排出机外。引射排液除重力作用外,还通过引射管将 APU 压气机后的高能气流引到 APU 舱排液管进口,从而带动周围液体加速流出 APU 舱,并与之掺混雾化,形成气液混合物后通过排液管出口以较高速度排出机外,其原理如图 2 所示。相比重力排液,引射排液具有更高的排液效率。现代飞机,例如 ERJ190 等均采用了引射排液的方式用于

增加 APU 舱排液管出口的液体排放速度,提升 APU 舱的排液能力。

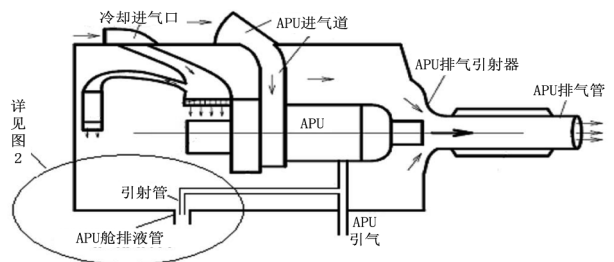


图 1 APU 工作原理

根据航空规章要求(CCAR25.1187 条款<sup>[1]</sup>), APU 舱排液装置应能将预期存在的液体有效排出,并且保证排出的液体不会增加着火危险。对于固定几何尺寸的排液孔,APU 舱排液管出口液体的排放速度可以提升 APU 舱排液装置的排液能力。同时,液体排放速度的增加可以使得飞行中排出的液

体不易在高速来流的冲击下重新附着到机身上而增加着火危险。考虑到引射排液装置出口为雾化的气液混合物,难以用试验的方法(特别是在空中时)得到其出口速度,本文通过合理假设,提出了APU舱引射排液孔出口速度的初步估算方法,研究了APU舱引射排液的空中排放特性。

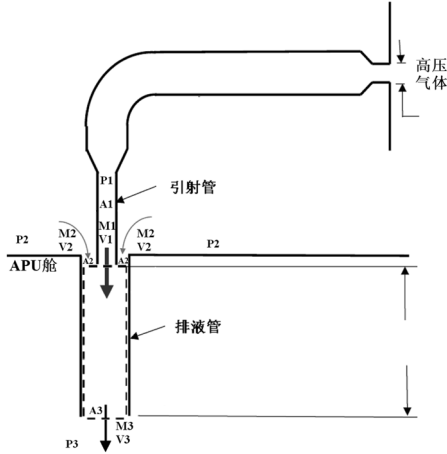


图2 APU舱引射排液示意图

## 1 计算方法

### 1.1 计算模型

引射排液的原理在于将高速气流的动量传递给周围低速液体,从而带动液体加速从舱内排出。在图2中,取排液管中气液混合物为控制体进行研究(图中虚线方框部分),采用一维计算的方法估算两相流,忽略重力作用及内外压差,控制方程如下:

$$P_1 A_1 + P_2 A_2 - P_3 A_3 - \tau = (M_3) V_3 - M_1 V_1 - M_2 V_2 \quad (1)$$

$$M_1 + M_2 = M_3 \quad (2)$$

$$A_1 + A_2 = A_3 \quad (3)$$

其中:

$P_1$ 、 $M_1$  和  $V_1$  分别为引射管出口气流压力(pa)、流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )和速度( $\text{m}/\text{s}$ );

$P_2$ 、 $M_2$  和  $V_2$  分别为排液管进口液体压力(pa)、流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )和速度( $\text{m}/\text{s}$ );

$P_3$ 、 $M_3$  和  $V_3$  分别为排液管出口气液混合物压力(pa)、流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )和速度( $\text{m}/\text{s}$ );

$A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为引射管出口面积( $\text{m}^2$ )、排液管进口液体面积( $\text{m}^2$ )和排液管出口面积( $\text{m}^2$ );

$\tau$  为排液管壁面摩擦力(N)。

可见,当几何参数( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 等)已知时,若求得引射管出口气流参数( $P_1$ 、 $M_1$ 和 $V_1$ ),排液管进口液体参数( $P_2$ 、 $M_2$ 和 $V_2$ )以及排液管壁面摩擦

力( $\tau$ ),即可得到排液管出口气液混合物的速度 $V_3$ 。

### 1.2 引射管出口气流参数计算

引射气流引自APU压气机后高压气体。考虑到APU压气机压比在4以上,即: $\frac{P_c^*}{P_{\text{atm}}} = \frac{P_1^*}{\sigma P_{\text{atm}}} > 4 >$

1.89( $P_c^*$ 为APU压气机后气流总压, $P_{\text{atm}}$ 为环境静压, $\sigma$ 为总压恢复系数),故有 $Ma_1 = 1$ 。因此,引射管出口气流参数计算方法如下:

$$P_1 = \frac{(1 + \frac{k-1}{2})^{\frac{k}{k-1}}}{P_1^*} \quad (4)$$

$$V_1 = \sqrt{kRT_1^* / (1 + \frac{k-1}{2})} \quad (5)$$

$$M_1 = K \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} A_1 \quad (6)$$

其中:

$P_1^*$ 、 $T_1^*$ 分别为引射管出口气流总压(pa)和总温(k),近似等于APU发动机压气机后的总压和总温(对于收缩引射管,管内流动为顺压力梯度,且引射管长度有限,总压恢复系数 $\sigma$ 近似取1);

$k$ 为绝热指数,对于空气, $k=1.4$ ;R为理想气体常数,且 $R=287.06$ ;K为常数,且 $K=0.0404142$ <sup>[2]</sup>。

### 1.3 排液管进口液体参数计算

排液管进口压力为APU舱压,一般APU舱与外界大气连通,APU舱压近似等于环境压力。排液管进口液体流量取决于泄露到APU舱中的液体流量。因此,排液管进口液体参数计算方法如下:

$$P_2 = P_{\text{atm}} \quad (7)$$

$$M_2 = \nu \rho_2 \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{M_2}{\rho_2 A_2} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{atm}}$ 为环境压力(pa); $\nu_2$ 为液体泄漏量( $\text{m}^3/\text{s}$ ),在APU排液试飞中,典型的APU舱内液体流量为 $1\text{gal}/\text{min}$ ( $6.3 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ )<sup>[3]</sup>;  $\rho_2$ 为排液管进口液体密度,对于RP-3型燃油, $\rho_2$ 在 $800\text{kg}/\text{m}^3$ 左右<sup>[4]</sup>。

### 1.4 排液管壁面摩擦力计算

在APU舱排液管内,排液管进口液体在引射管出口气流的作用下迅速雾化并随之掺混。假设排液进口液体与引射气流迅速掺混均匀,且匀速从排液管内流出,根据经典的气体动力学理论<sup>[5]</sup>,对于管道内流动,壁面摩擦力计算方法如下:

$$\tau = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A_s \quad (10)$$

$$\rho = \rho_3 = \frac{P_3}{RT_3} \times \frac{M_1 + M_2}{M_1} = \frac{P_{atm}}{RT_{atm}} \times \frac{M_1 + M_2}{M_1} \quad (11)$$

$$V = V_3 \quad (12)$$

式中,  $C_D$  为摩擦因子, 对于高雷诺数流动 ( $Re > 1 \times 10^5$ ), 可取  $C_D = 0.005^{[5]}$ ;

$\rho$ 、 $V$  分别为 APU 舱排液管道内的平均密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 和平均速度 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$P_3$ 、 $T_3$  分别为排液管出口压力 (pa) 和温度 (k), 近似等于环境压力  $P_{atm}$  和环境温度  $T_{atm}$ ;

$A_s$  为 APU 舱排液管壁面面积。

### 1.5 排液管出口气液混合物速度计算

将式(2)~式(12)代入式(1), 得:

$$aV_3^2 + V_3 - c = 0 \quad (13)$$

$$a = \frac{C_D \frac{1}{2} \frac{P_{atm}}{RT_{atm}} A_s}{K \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} A_1} \quad (14)$$

$$c = \frac{\left(\frac{1 + \frac{k-1}{2}}{P_1^*} - P_{atm}\right) A_1 + K \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} A_1 \sqrt{kRT_1^* / \left(1 + \frac{k-1}{2}\right)} + \frac{\rho_2 v^2}{A_2}}{K \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} A_1 + \nu \rho_2} \quad (15)$$

## 2 典型算例

已知地面状态下某型 APU 舱引射排液装置的几何参数、APU 压气机出口气流参数、环境大气参数及所用燃油参数如表 1 所示。

将表 1 中的各参数输入式(13)~式(15)中, 得:

$V_{31} = 136.6 \text{ m/s}$ ,  $V_{32} = -1606.2 \text{ m/s}$ 。由于  $V_3 > 0$ , 舍去假解  $V_{32}$ , 得地面状态下 APU 舱引射排液管出口液体的排放速度  $V_3 = V_{31} = 136.6 \text{ m/s}$ 。可见, 相比纯重力排液, 引射排液可以有效增加排液管出口液体排放速度。

表 1 地面状态 APU 舱引射排液计算输入条件

APU 舱引射排液装置的几何参数			APU 压气机出口气流参数		环境大气参数		排放液体参数	
排液管半径 $r_3$ (m)	引射管半径 $r_1$ (m)	排液管进口液体面积 $A_2$ ( $\text{m}^2$ )	总压 $P_1^*$ (pa)	总温 $T_1^*$ (k)	压力 $P_{atm}$ (pa)	温度 $T_{atm}$ (k)	最大泄漏量 (L/min)	密度 $\rho_2$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$7.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-4}$	$4.83 \times 10^5$	510	$1.01 \times 10^5$	288	3.78	800
排液管出口面积 $A_3$ ( $\text{m}^2$ )	引射管出口面积 $A_1$ ( $\text{m}^2$ )	排液管壁面面积 $A_s$ ( $\text{m}^2$ )						
$1.77 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-3}$						

## 3 空中排液特性

保持表 1 中的 APU 舱引射排液装置的几何参数及燃油密度不变, 已知某典型排液试飞包线内 APU 舱引射排液计算输入条件如表 2 所示。将表 2 中的计算输入条件代入式(13)~式(15)中, 可得空中各姿态下 APU 舱排液管出口液体排放速度, 如图

3 所示。APU 空中排液特性的计算结果可作为全机级排液路径数值模拟的输入条件。

从图 3 可以看出, 随着高度的增加, APU 舱排液管出口液体排放速度与飞行高度成反比。随着飞行高度的增加, 液体排放速度不断减小, 在 1 000ft 时在 120m/s 左右, 到 20 000ft 时已降低到 100m/s 以下。

表 2 典型排液试飞包线内 APU 舱引射排液计算输入条件

姿态	高度 (ft)	校正空速 (kn)	飞机姿态	APU 压气机出口气流参数		环境大气参数	
				总压 $P_1^*$ (pa)	总温 $T_1^*$ (k)	压力 $P_{atm}$ (pa)	温度 $T_{atm}$ (k)
1	0	138.5	起飞	$4.83 \times 10^5$	511	$1.01 \times 10^5$	288
2	10 000	240	爬升	$3.60 \times 10^5$	500	$6.97 \times 10^4$	268
3	20 000	240	平飞	$2.60 \times 10^5$	488	$4.66 \times 10^4$	249
4	10 000	150	下降	$3.57 \times 10^5$	496	$6.97 \times 10^5$	268
5	150 0	150	下滑	$4.62 \times 10^5$	509	$9.60 \times 10^5$	285
6	0	60	着陆滑行	$4.83 \times 10^5$	510	$1.01 \times 10^5$	288

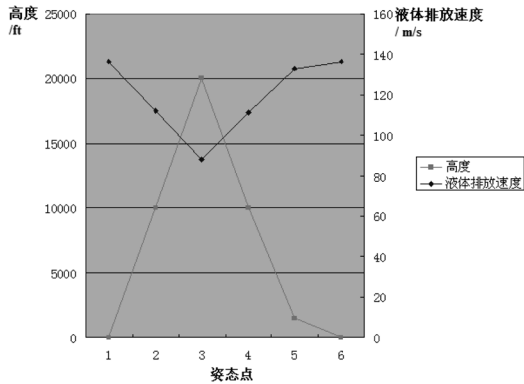


图3 空中典型姿态下APU舱排液管出口液体排放速度

## 4 结论

APU舱引射排液是一种复杂的气液两相流混合过程。本文通过假设,获得了一种APU舱引射排液装置排液管液体排放速度的一维估算方法,根据该方法计算了地面和空中典型姿态下APU舱排液管出口的液体排放速度。这些计算结果可作为全

机级APU舱排液路径数值模拟的输入条件。通过这些计算结果,还得到以下结论:

(1)相比纯重力排液,引射排液可以有效增加排液管出口液体排放速度。

(2)APU舱排液管出口液体排放速度与飞行高度成反比。随着飞行高度的增加,液体排放速度不断减小。

### 参考文献:

- [1] 中国民用航空局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第25部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2001.
- [2] 梁德旺. 流体力学基础[M]. 北京:航空工业出版社,1998.
- [3] Draft Advisory Circular AC No. 25.863-1 Flammable Fluid Fire Protection.
- [4] GB3537-2006 3号喷气燃料.
- [5] SAE AIR1168/1 Thermodynamics of Incompressible and Compressible Fluid Flow.

(上接第42页)

同时可根据平均正侧风风速和最大使用舵面的关系曲线来判断飞机的抗侧风能力趋势,如图1~图3所示。

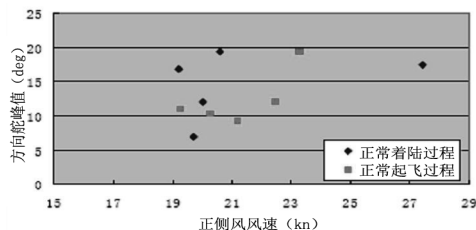


图1 方向舵峰值与正侧风的关系

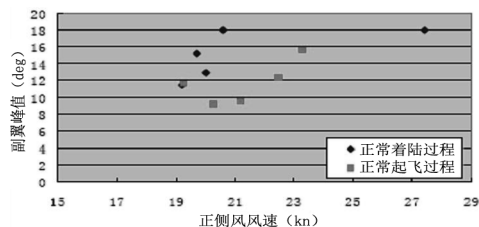


图2 副翼峰值与正侧风的关系

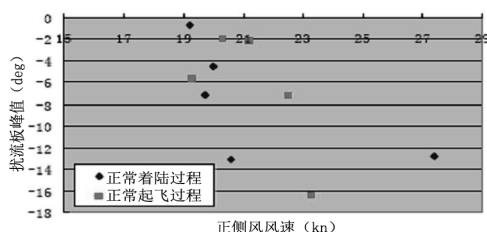


图3 扰流板峰值与正侧风的关系

## 4 适航符合性研究

验证侧风能力的飞行演示试验受气象条件限制较大,尤其要满足三次侧风起飞和三次侧风着陆的飞行演示气象条件。因此侧风演示的结果有两种:

(1)可用于确定满足最低要求,但不应看作是飞机操纵特性限制值的侧风分量值。该“演示过的”侧风值应作为资料包含在飞机飞行手册中;

(2)可确定一个认为是最大限制值的侧风分量值,直到在该值条件下飞机可安全起飞和着陆。该“限制值”应在飞机飞行手册的使用限制中给出。

## 5 结论

大侧风试飞一直是民机型号研制的难点问题,本文以型号项目研制经验为基础,从侧风的验证条款要求,试飞演示方法、风速计算准则、适航符合性等方面提供了一整套方法,填补了国内民用航空大侧风技术的空白。

### 参考文献:

- [1] AC25-7A. Flight Test Guide for Certification of Transport Category Airplanes[S]. 1998. 3. 31.
- [2] 中国民用航空局. CCAR25-R3 中国民用航空规章第25部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2001.