

# 民用飞机真空式马桶污水处理系统介绍

上海飞机设计研究院环控部 肖世旭

**[摘要]**本文对现役主流机型上广泛使用的真空式马桶污水处理系统功能原理进行了介绍,并对其系统组成及设计要素进行了初步分析及探讨,从而为民用飞机污水处理系统设计提供参考及帮助。

**[关键词]**污水 马桶污水 污水处理系统 真空式马桶污水处理系统

## 0.引言

民用飞机客舱内污水产生的来源有两种:一种是洗涤污水,它包括乘客在盥洗室内盥洗清洁时产生的盥洗污水和厨房内空服员工作时洗涤餐具所产生的工作污水;二是马桶污水,它是指盥洗室内马桶组件中积存的乘员大小便后形成的污水。这些污水都必须进行专门的妥善处理,否则将产生不良的后果,污染客舱环境。

马桶污水处理系统的主要功能是对使用后的马桶进行冲洗及排放,然后在飞机地面维护时,对污水箱进行排放,从而在飞机舱内提供和保持一个清洁卫生的环境。根据污水处理系统工作原理的不同,马桶污水处理系统可以分为两种,即自循环式马桶污水处理系统和真空式马桶污水处理系统。

本文在总结现役机型马桶污水处理系统的基础上,结合实际工作经验对真空式马桶污水处理系统的工作原理、组成等进行介绍与分析,为民用飞机马桶污水处理系统的设计提供参考及帮助。

## 1.真空式马桶污水处理系统概述

现役主流机型如A300、A320、A330、A340、B737、B767、B777、B787等,其马桶污水处理系统均采用真空式马桶污水处理系统。真空式马桶污水处理系统的主要功能是利用冲洗水源对使用后的马桶进行冲洗,然后在系统产生真空的作用下对马桶进行排放,以保持和提供一个清洁卫生的环境;同时为盥洗室的马桶污水提供污水存放,防止污水外溢污染环境,以便在飞机着陆维护时,通过地面勤务对污水进行处理。

## 2.真空式马桶污水处理系统原理

真空式马桶污水处理系统的工作原理是利用客舱内和污水箱及输送管路之间存在的压差,将乘员用厕排泄物及冲洗马桶后的污水通过输送管路输送到污水箱中。

当乘员用厕完毕后,按动冲洗按钮冲洗及排放马桶,冲洗控制器即将信号反馈给系统控制器,系统控制器指令冲洗控制器打开马桶冲洗阀,从增压水箱来的清水经过座盆内喷淋环上的几个喷头对马桶进行冲洗,冲洗持续一段时间之后(约为2s,允许带有增压压力的清水充分冲洗马桶座盆),冲洗控制器打开马桶排放阀,乘员用厕排泄物及冲洗马桶之后的污水在压差作用下经由输送管路输送至污水箱中,排放阀打开一段时间之后(约为5s,允许乘员用厕排泄物及冲洗马桶之后的污水能够完全排放到污水箱中),系统控制器指令冲洗控制器同时关闭冲洗阀和排放阀。整个马桶冲洗及排放过程持续时间约为10s。

根据客舱和污水箱及输送管路之间的压差产生方式的不同,真空式马桶污水处理系统可分为两种工作状态,即利用真空发生器工作在污水箱及输送管路中造成的相对真空度与飞机座舱增压所形成的舱内外压差两种状态。

第一种状态为飞机处于地面状态以及当飞机起飞爬升到4880m高度以下或飞机着陆降落到3600m高度以下的空中。

此时真空式马桶污水处理系统在真空发生器工作所产生的相对真空度作用下进行工作。冲洗及排放马桶时,按下冲洗按钮,系统中的高度开关检测到污水箱及输送管路内压力值不为真空,污水箱及输送管路与客户之间压差 $\leq 0.47 \times 10^5 \text{Pa}$ ,高度开关接通,真空发生器电源接通,真空发生器开始工作,污水箱及输送管路内的空气在真空发生器叶轮的作用下从污水箱的排气口排出机外,大约2s之后污水箱及输送管路内形成了足够的真空度。此时马桶内乘员用厕排泄物及冲洗马桶后的污水在真空发生器造成的相对真空度及污水自身重力的联合作用下排入到污水箱中。在上述冲洗和排放过程中,真空发生器持续工作,污水箱及输送管路中的空气不断被排出机外,从而使得污水箱及输送管路一致保持着一定的真空度,所以冲洗马桶后的污水可以不断被排入到污水箱中。

第二种工作状态为飞机爬升超过4880m高度以上或飞机着陆降落到3600m高度以上的空中。

此时真空式马桶污水处理系统在飞机座舱增压所形成的舱内外压差的作用下进行工作。污水箱及输送管路通过通气管路及单向阀与飞机舱外相通,污水箱及输送管路内压力保持近乎真空状态,而客舱为增压舱,在污水箱及输送管路与客户之间形成了压差,该压差值 $\geq 0.47 \times 10^5 \text{Pa}$ 。此时系统中的高度开关探测污水箱内压力值近乎真空,高度开关断开,真空发生器电源切断,真空发生器停止工作,马桶内乘员用厕排泄物及冲洗马桶后的污水在污水箱及输送管路与客户之间存在的压差以及污水自身重力的共同作用下排入到污水箱中。

飞机开始着陆时真空发生器重新启动的高度(3600m)与飞机爬升时真空发生器停止工作的高度(4880m)不一致的原因是由于系统中高度开关高度值感应元件的灵敏度存在公差而引起的。

## 3.真空式马桶污水处理系统组成

真空式马桶污水处理系统的主要组成部件为马桶、污水箱、真空发生器、高度开关、系统状态板、系统控制器以及勤务板组件等。

## 3.1 马桶

马桶采用模块化设计,整个马桶安装和拆卸需方便快捷。马桶一般应包括座盆、支座、喷淋环、冲洗阀(具有反虹吸功能)、排放阀、冲洗控制器。

座盆:容纳乘员用厕排泄物及冲洗马桶后的污水,可采用不锈钢、铝合金或者复合材料等制成。座盆内表面应该涂有光滑不易脆裂的TEFLON涂层,无局部的凹凸点,冲洗污物快速无粘结现象,容易清洗。

支座:固定及支撑座盆及冲洗阀、排放阀、冲洗控制器等元件,可由不锈钢、铝合金或者复合材料等制成,需有足够的强度及刚度。

喷淋环:控制清水的冲洗部位及面积,沿着座盆边缘布置。可布置多个清水喷淋出口,喷淋后清水冲洗面积应该覆盖整个座盆的大部分范围。

冲洗阀:控制清水用以冲洗马桶。内部设置有一个具有反虹吸功能的反虹吸阀,用以防止冲洗阀内的残留清水在冲洗阀再次启动时倒流回清水管路,造成清水的污染。

排放阀:容纳乘员用厕排泄物及冲洗马桶后的污水在马桶坐盆中,排放乘员用厕排泄物及污水至污水箱中。排放阀应设置一个手动的闭合手柄,当排放阀不能自动关闭时,可以手动进行关闭以防止客舱空气泄漏及产生噪音。

冲洗控制器:在系统控制器的指令下控制马桶的冲洗及排放工作。需设置成即使冲洗控制器发生故障或断电时,冲洗控制器亦能够将冲洗阀及排放阀关闭。

## 3.2 污水箱

箱体内部表面应光滑,易于清洗。箱体强度应足以承受箱体内部真空度造成的负压,工作时最大负压相当于座舱增压引起的舱内外最大压差。箱体材料可由不锈钢或复合材料制成。

污水箱应该包括以下几个部分:污水入口、污水出口、空气出口、气液分离器、液位传感器以及冲洗喷嘴等。

污水入口:位于箱体上部,入口处连接污水输送管路,可与箱体焊接成一体或通过卡箍连接。

污水出口:位于箱体下部,与污水排放管路连接。

空气出口:位于箱体上部,用于连接污水箱及舱外大气,保持污水箱及客舱的压差,安装有气液分离器。

气液分离器:安装于污水箱上部的空气出口处,用于污水箱通气时将箱内空气中含有的液体分离出来回流至污水箱内。

液位传感器:探测污水箱中污水的液面所处的位置,数量一般为2个。一个设置在污水箱可用体积75百分位的位置,另一个设置在污水箱可用体积100百分位的位置。当污水箱内液面达到75百分位时,系统将发出警示,提醒机组人员污水箱将满;当污水箱内液面达到100百分位时,系统将发出警告,提醒机组人员污水箱已满,并且禁止系统工作。

冲洗喷嘴:安装在污水箱顶部的清洗水入口处,与清洗管路连接,通过勤务口盖利用勤务车上的清水清洗污水箱及箱内附件。

## 3.3 真空发生器

真空发生器安装于污水箱的通气管路中,用于当飞机处于地面状态以及当飞机起飞爬升到4880m高度以下或飞机着陆降落到3600m高度以下的空中时在污水箱及输送管路中产生真空,从而在污水箱及输送管路与客户之间形成了压差。真空发生器一般包括马达、叶轮及壳体等几部分。

马达:使用三相交流电源,带有过热保护开关,可使得马达工作时不至于发生过热而烧毁。

叶轮:叶轮由马达带动进行高速转动,将污水箱及输送管路中的空气通过通气管路从通风口排出机外,从而在污水箱及输送管路中产生真空。

壳体:固定马达及叶轮,并将设备安装到安装支架上。壳体上应该带有减震垫,减少真空发生器中叶轮的高速转动对飞机结构造成的影响。

## 3.4 高度开关

高度开关利用高度值感应元件感应飞机所处高度的大气压力与客户舱压力之间的压差,并将压差信息反馈给系统控制器,由系统控制器根据压差信息来闭合高度开关,从而控制真空发生器的工作。当飞机爬升高度达到4880m以上或自高空降落到3600m以上时,开关关闭,真空发生器不工作;当飞机爬升高度在4880m以下或自高空降落到3600m以下时,开关打开,真空发生器工作产生压差。进行系统设计时,如不采用高度开关,也可直接由航电系统获取飞机高度或压差信息,根据高度或压差信息用以控制真空发生器工作。

## 3.5 系统状态板

系统状态板一般安装于前乘务员控制板上, (下转第406页)

# 民用飞机短舱系统静强度设计

上海飞机设计研究院 冒 颖 刘长玮

## 1. 短舱系统强度设计概述

飞机发动机短舱是为发动机及其附件提供保护的,同时在飞行中保证发动机周身气动外形的平滑。短舱主要由进气道、风扇罩、反推力罩以及排气系统组成。民用飞机短舱强度设计需满足静强度设计要求、疲劳和损伤容限要求,需满足中国民用航空规章第25部—运输类飞机适航标准(以下简称CCAR25)相关条款的要求。

## 2. 短舱系统结构简介

短舱系统,包括进气道、风扇罩、反推力系统和排气系统。发动机短舱主要构成如图1。飞机发动机短舱主要为发动机及其附件提供保护,同时保证发动机的气动外形。短舱罩体多采用复合材料。

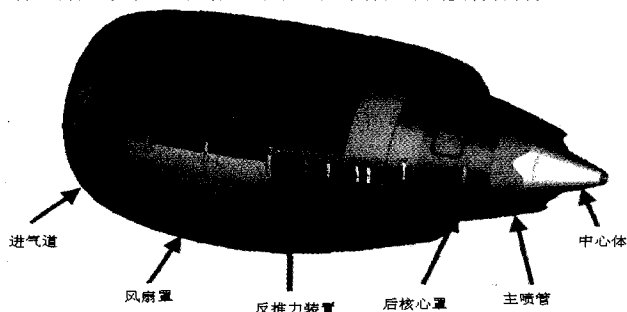


图1 发动机短舱主要构成示意图

## 3. 短舱系统静强度设计载荷

### 3.1 短舱惯性载荷

短舱惯性载荷来自于飞机设计载荷输入,主要有飞机动载荷、飞行载荷和地面载荷,是指按照CCAR25部计算的载荷,包括:

- 1) 动态突风载荷(包括:离散垂直突风、离散侧向突风、连续垂直突风、连续侧向突风);
- 2) 动态着陆载荷;
- 3) 动态滑行载荷;
- 4) 飞行载荷;
- 5) 地面载荷。

### 3.2 应急着陆载荷

根据CCAR25.561条款要求,轻度撞损应急着陆过程中,在动力装置相对于周围结构产生以下的极限惯性载荷系数时,其应能被安装系统固定:

- 1) 向上:3.0;
- 2) 向前:9.0;
- 3) 侧向:3.0;
- 4) 向下:6.0;
- 5) 向后:1.5。

### 3.3 发动机扭矩载荷

发动机限制扭矩载荷是根据CCAR25.361计算的扭矩载荷。根据条款计算得到力矩后还需和飞机平飞时的气动载荷和惯性载荷叠加,进行短舱系统的强度分析。发动机停车时的扭矩值应作为限制载荷使用,只有极少发生的非常突然的突然停车才会产生很大的扭矩,可以作为发动机的极限载荷对待。

### 3.4 陀螺载荷

发动机陀螺载荷指根据CCAR25.371计算的扭矩载荷。根据陀螺载荷的计算公式可以确定力矩的方向,目前我们常见的民用飞机的发动机的旋转方向都为逆时针方向(从机头向机尾方向看),左右两侧发动机旋转方向一致,产生的旋转角速度方向向前,飞机俯仰时产生的角速度方向沿机翼的展向,按右手法则确定产生的陀螺力矩的方向为垂直方向,而偏航时产生的陀螺力矩方向为沿飞机展向。产生的陀螺力矩应按结构的连接特点用可靠或保守的方法传递到发动机的支撑结构,并与规定的全机载荷叠加进行结构的校核。

### 3.5 侧向载荷

根据25.363条款要求,短舱必须按横向限制载荷系数(作为作用于发动机支架上的侧向载荷)进行设计,此系数至少等于由偏航情况得到的最大载荷系数,但不小于1.33。

### 3.6 FBO载荷(Fan Blade Out load)

FBO载荷是指发动机风扇叶片因鸟撞、冰雹或者是疲劳等原因发生断裂而脱落所引起的载荷。该载荷由发动机公司通过动响应分析得到,计算所用的有限元模型由发动机公司、短舱公司和飞机制造商联合建立。

发动机载荷最严重的故障状态就是专用条件中规定的FBO状态,叶片的飞出数量要计算0.5、1个或1.5个,根据发动机制造商提供的惯量,按时间历程进行全机的动载荷计算得到发动机、吊挂及支撑结构的极限载荷,这个过程一般持续几秒钟,前部分时间内是发动机强烈振动的不稳定状态,产生很大的载荷,之后经过一段时间发动机到达风车状态,产生风车载荷。

FBO荷为设计使用的极限载荷,这个载荷在加载时根据条款规定对不同的部位采用不同的安全系数,短舱可以采用安全系数1.0。

### 3.7 FBO后的风车载荷(windmilling load)

在FBO发生后,进行发动机持续不平衡载荷计算,分析中考虑从最大到最小的风车速度,所有非线性因素(例如转子和定子的摩擦),并在时域内进行分析。以上的不平衡振动载荷叠加飞机载荷,即为风车载荷。风车载荷计算模型同FBO载荷计算模型。

## 4. 短舱系统静强度分析

短舱静强度的主要分析内容有静力分析,屈曲分析,局部失稳分析,紧固件分析,螺栓组分析,挤压分析,复合材料层压板的失效分析等。

短舱静强度分析时应注意短舱工作温度的影响,需要考虑一定的温度修正系数来修正分析结果。另外在强度校核时,还应考虑接头系数,铸件系数以及支承系数等特殊系数。

### 5. 短舱系统相关静强度试验

静强度试验验证条款CCAR25.305、25.307,试验载荷为所有静强度包线载荷。试验一般在室温下进行,需要考虑一定的温度修正系数来修正试验载荷。对于采用复合材料部件试验,需注意实验前试验件的浸透,并保证试验过程中的温度。整个试验过程中试验件温度应被记录下来。如果短舱系统采用新设计、新材料,可能需要在详细设计阶段增加适量的研发试验。

## 参考文献

- [1]《飞机设计手册》总编委编,飞机设计手册第9册“载荷、强度和刚度”,北京:航空工业出版社,2002。

(上接第405页) 状态板上应设置有系统污水箱液位指示以及系统工作状态指示。

当污水箱液位达到75%时,状态板上需给出警示,提醒机组人员污水箱将满;当污水箱液位达到100%时,状态板上需给出警告,提醒机组人员污水箱已满,污水系统无法使用。

状态板上一般设置有系统工作状态指示,即当系统无法正常工作时,状态板应给出警告信息,提醒机组人员污水系统故障,无法正常使用,需进行排放。

### 3.6 系统控制器

系统控制器一般可安装于货舱中,控制器控制整个污水系统的工作。控制器一般应设置系统自检开关以及重要部件失效指示灯,如:系统失效、污水箱满、传感器故障等。

### 3.7 勤务板组件

勤务板一般布置于机身中段下部,勤务板材料一般为铝合金,强度应满足飞机气密载荷要求,勤务板上的设备与勤务板之间安装时需要密封。勤务板上一般安装有勤务口盖开关,污水箱排放球阀以及污水箱冲洗接头等设备。

勤务口盖开关:用于控制地面勤务过程中真空发生器的工作。当进行地面勤务的时候,打开勤务口盖,勤务口盖开关断开,真空发生器

无法工作,盥洗室内马桶无法正常使用,马桶内污水无法排入污水箱中;地面勤务工作完成之后,闭合勤务口盖,勤务口盖开关闭合,真空发生器可以工作,盥洗室内马桶可以正常使用,马桶内污水可以排入污水箱中。

污水箱排放球阀:排放球阀为手动操作设备,勤务口盖闭合之后应使得排放球阀开启手柄完全复位。排放球阀应设置加热垫,防止空中排放球阀发生冻结,从而影响地面勤务工作的进行。

污水箱冲洗接头:冲洗接头为手动操作设备,勤务口盖闭合之后应使得冲洗接头开启手柄完全复位,如有必要需设置限位支架以防止勤务口盖闭合之后冲洗接头无法完全关闭。冲洗接头应设置加热垫,防止地面勤务过程中残留水发生冻结,影响地面勤务工作。

## 4. 总结

随着民用飞机污水处理系统技术的不断发展,真空式马桶污水处理系统的应用越来越广泛,目前大部分现役机型上均采用真空式马桶污水处理系统。真空式马桶污水处理系统冲洗能力强、对座舱无污染、技术先进、总重量较轻,同时系统布置方便,可靠性、安全性、维修性好;其缺点是能耗较高,技术比较复杂,而且成本较高。

本文结合工作实际,对真空式马桶污水处理系统的工作原理、组成等进行介绍与分析,希望能够为民机设计人员提供参考及帮助。