

文章编号:1674-8190(2016)01-106-06

民用飞机水废水系统防冰功能设计

张雪苹,雷美玲,朱翀

(中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 民用飞机水废水系统的设备及管路布置位置从机身前部的 EE 舱贯穿至机身后部的水废水舱,涉及舱段的温度分布变化较大,若不采取防冰措施,系统结冰会导致其功能丧失。采用模块化分析方法,对典型民用飞机水废水系统途经的不同区域的环境温度进行分析,确定水废水系统防冰区域,并给出确定加热器布置位置的原则;同时,针对不同需要防冰部件的特点,给出对应的防冰方式选用原则及典型加热器的防冰功率计算方法。本文采用的水废水系统防冰功能设计方法,可在民用飞机水废水系统研制之初、缺少全机温度场分布的情况下,为系统的防冰功能设计提供指导。

关键词: 民用飞机;水废水系统;防冰区域;防冰方式;加热器功率计算

中图分类号: V37

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.01.015

Method of Civil Aircraft Water and Waste System Icing-protection Design

Zhang Xueping, Lei Meiling, Zhu Chong

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: The location of the components and lines of water and waste system(WWS) in civil aircraft are crossing from the the FWD EE bin to the AFT WWS compartment along the fuselage. Temperature distribution is complex among different zones. The system will lose function due to icing without icing protection when in low temperature. The heater's location is a key point but difficult to confirm. The temperature of different zones is analyzed by using the module analysis method to confirm the icing protection areas, and the electrical heater location confirming rule is provided. To make the icing protection efficiency maximum, the appropriate icing protection method for different components is given, and the heater electrical power calculation methods for hose, line and tank are provided too. The icing protection method in this paper can provide the reference for civil aircraft WWS design without the aircraft temperature distribution layout.

Key words: civil aircraft; water and waste system; icing protection areas; icing protection method; heater electrical power calculation

0 引言

民用飞机水系统是指在机内贮藏并提供足够量的饮用水,为机上厨房及盥洗室提供饮用水、冷热盥洗用水和马桶冲洗用水,以满足机组人员及乘客机上生活需要,是民用飞机不可或缺的重要系

统^[1]。在民用飞机水废水系统(Water and Waste System,简称 WWS)的设计中,其防冰功能设计是一个重要方面,水废水系统内水结冰会给飞行安全带来重大隐患。例如,若水服务板及废水服务板设备内水结冰,系统将无法进行地面勤务工作,影响飞机派遣;若水箱/废水箱及相应管路冻结,系统将丧失功能,影响机组人员及乘客的机上生活需要,严重时可能导致水管破裂,影响飞机的安全飞行^[2]。因此,在水废水系统设计中,必须考虑系统防冰功能设计。

收稿日期:2015-09-23; 修回日期:2015-12-12

通信作者:张雪苹, zhangxueping@comac.cc

防冰功能设计是飞机设计中的一个重要领域^[3],国内外已对民用飞机防冰功能设计进行了大量研究,设计方法主要包括数值计算^[4]、风洞试验^[5]、试飞试验^[6]等,但这些研究多是针对机翼、发动机短舱、大气数据探测器等部位或设备,鲜有文献对水废水系统防冰开展研究。目前,尚未查阅到国内公开发表的有关飞机水废水系统防冰功能设计的文献,仅能通过对航空公司的调研,了解有限类别机型的水废水系统防冰功能设计方案。水废水系统部件及管路通常从前机身贯穿至中后机身,涉及舱段的温度分布变化较大,且部分舱段为非温控区,是否可以通过数值计算方法来准确地确定其温度分布未见报道。国外,虽然波音、空客等航空公司的多个型号飞机的水废水系统设计已有相关设计经验,但无法查阅到其公开的文献资料。

本文依据型号设计经验,结合对航空公司的调研结果,采用模块化分析方法,对民用飞机水废水系统途经的不同区域的环境温度进行分析,确定水废水系统的防冰区域,给出对应的防冰方式选用原则及典型加热器的防冰功率计算方法,对民用飞机水废水系统的设计方法进行探究,以期在民用飞机水废水系统设计之初,为系统防冰功能的设计提供指导。

1 典型机型水废水系统设备及其布置位置

水废水系统设备及管路布置沿飞机航向从前机身的 EE 舱贯穿至中后机身的水废水舱,从机身内部延伸至机身外部的蒙皮附近,途径的舱段包括温控区和非温控区,温度分布差别较大。同时,考虑到合理、充分地利用机身内部空间,水废水系统管路铺设常贴近机身蒙皮,因此飞机高空飞行时,水废水系统易受外部环境温度的影响,温度相对较低,在确定防冰区域时,需重点考虑。

废水输送管路仅当马桶使用时或灰水界面阀存储到一定水量、往下排放灰水时才会存水,且排水过程时间较短,不会在排放过程中结冰,其他时间段内管路中不会存储水,或者只有少量的抽吸过程中残留的水,不会产生危险量的冰堵塞废水管。故在水废水防冰系统设计时,无需考虑废水输送管路的防冰,仅需对废水箱、废水排放管及供水、分配

管路等主要部件进行防结冰设计。

从前 EE 舱至中后机身散货舱,水废水系统仅布置有供水管路和排放阀,中后机身部段的水废水舱是包含水废水系统部件及管路较多的舱段,例如水箱、废水箱、加水/排放阀、供水管路等,服务板类设备也安装于水废水舱段的机身贴近外蒙皮的位置上。典型机型水废水系统的安装布置如图 1 所示。

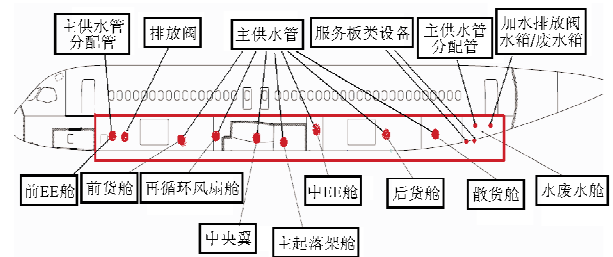


图 1 典型机型水废水系统安装布置

Fig. 1 Installation schematic of typical WWS

2 基于模块化温度分析的防冰区域确定方法

2.1 基于模块化温度分析方法

水废水系统设备及管路所处位置的温度特点是其是否需要采取防冰措施的输入条件。民用飞机水废水系统大部分设备及管路均布置在客舱地板下方,途径位置多为非温控区,在系统设计之初,很难用数值计算模拟出真实环境下的温度场。在缺乏温度场的情况下,基于区域温度分布特点,采用模块化温度分析方法,建立初步防冰区域确定原则,对于如图 1 所示的典型机型水废水系统安装布置,可以做如下模块化分析。

(1) 处于温控区的设备无需防冰,例如 EE 舱内的供水管。

(2) 对于货舱类温控区,因为货舱的设计温度一般维持在 $2\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,相邻三角区内的设备,例如温控区与三角区之间的隔板(保温板),考虑到其传热性能较差,温控区内温度无法有效传递至三角区,故该三角区内的设备需要进行防冰设计;而研制试飞经验表明,非保温材料可有效地将温控区内的热量传递至三角区,故对于非保温材料的隔板,若三角区内温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则该区域内的设备无需防冰。研究前货舱、后货舱及散货舱三角区内

设备的防冰需求时,亦可按照上述原则处理。

(3) 对于再循环风扇舱、水废水舱类的温控增压区,其温度要求不低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑到客舱气流对其有加温作用,该舱段的温度一般远高于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,型号设计经验表明,该区域的温度一般维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,布置小功率的电加热器即可。

(4) 处于非温控增压区内的设备需进行防冰设计,例如中央翼、起落架舱相邻舱段的设备等。

(5) 机身内靠近蒙皮处的设备,其所处位置受外界环境温度影响较大,且容易存在温控死角,即使相邻区域温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,但靠近蒙皮的区域也有可能低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此需要进行防冰设计,例如贴近蒙皮框架上布置的水管。

(6) 贴近机身外蒙皮的服务板类设备,直接暴

露于外界环境中,故对于在正常使用过程中能接触到水或废水的服务板上的设备,需进行防冰设计。

(7) 研究防冰设备时,还应注意:①飞行中不存水的设备无需防冰,例如加水管路、排放管路等;②阀类设备在低温环境下执行加水/排放操作时,若阀中残留的水冻结,将会影响其打开或关闭操作,故阀类设备需要防冰。

2.2 基于模块化温度分析方法案例分析

以如图1所示的典型单通道民用飞机水废水系统安装布置为例,结合全机各舱段的温控特点,采用模块化分析方法,对该机型各舱段内的水废水系统需防冰部件进行分析,其结果如表1所示。

表1 各舱段水废水系统防冰需求
Table 1 The WWS icing protection requirements in different area

序号	区域	温控特点	包含设备	防冰需求(Y/N)
1	前EE舱	基于2.1节(1)条:温控区	主供水管路、分配管路、排放阀	N(阀类设备需防冰)
2	前货舱三角区	基于2.1节(2)条:前货舱为温控区,但与三角区中间的隔板为蜂窝状保温材料,判断对应的三角区温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	主供水管路	Y
3	再循环风扇舱三角区	基于2.1节(3)条:温控区	主供水管路	Y
4	中央翼/主起落架附近舱段	基于2.1节(4)条:非温控区	主供水管路	Y
5	中EE舱	基于2.1节(1)条:温控区	主供水管路	N
6	后货舱/散货舱的三角区	基于2.1节(2)条:后货舱/散货舱为温控区,但与三角区中间的隔板为蜂窝状保温材料,判断对应的三角区温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	主供水管路	Y
7	水废水舱	基于2.1节(3)条:温控区	水箱、废水箱、加水/排放阀、加供水管路	Y
8	飞机外蒙皮	基于2.1节(4)条:服务板上的设备直接暴露在外界环境中,温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	服务板类设备:加水/排放接头、冲洗接头、废水排放球阀等	Y

从表1可以看出:对于该机型水废水系统设备,仅有直接布置于前EE舱和中EE舱温控区的水废水设备无需防冰,其他处于温控区隔壁的三角区或者非温控区舱段内的水废水设备均需防冰。

3 系统防冰方式的选择

水废水系统防冰设计具有涉及范围大、防冰设

备多样化等特点,在水废水系统设备防冰设计时,应结合需防冰设备的特点和安装位置,选择合适的防冰措施。

3.1 管路类设备

水废水系统需防冰的管路类设备分为三种:饮用水系统的主供水管路^[7]、分配管路、废水处理系

统的废水箱排放管路。

主供水管路的内径通常为 3/4 in,且从前机身一直贯穿至中后机身,需防冰的管路较长,结合管径特点并考虑经济性,一般采用插入电加热器的防冰方式,在管路中内置电加热丝,电加热丝的长度依据需防冰的管长而定。该防冰方式如图 2 所示。

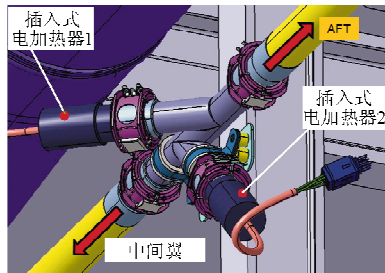


图 2 管路插入式电加热器

Fig. 2 Insert electrical heater for water supply hose

分配管路的内径通常为 1/2 in,考虑到其管径较小,且布置位置通常是从地板下方穿板至地板上方的厨房和盥洗室,管路较短,因此通常采用可加热管路,即直接将加热丝布置在管壁中,通过加热管壁来达到防冰的效果,如图 3 所示。

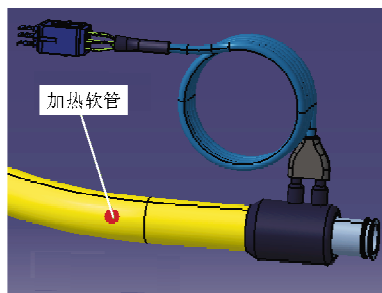


图 3 加热软管

Fig. 3 Electrical heated hose

废水箱排放管路因其管路较粗,通常采用毯式加热器,在管路四周包裹一圈加热毯,以达到防冰的效果。

3.2 水箱、废水箱、阀类设备

水箱和废水箱因为体积较大,与低温环境的接触面较大,为了达到良好的加温和后续保温效果,通常采用毯式加热方式,即采用电加热毯包裹箱体对其加温,同时,加热毯的包裹还能起到很好的保温效果,如图 4 所示。

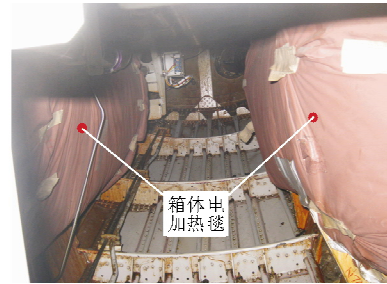


图 4 水箱、废水箱毯式电加热器

Fig. 4 Water/waste tank heater

阀类设备的防冰措施和水箱/废水箱类似,也是采用包裹毯式加热器来达到防冰的目的,如图 5 所示。

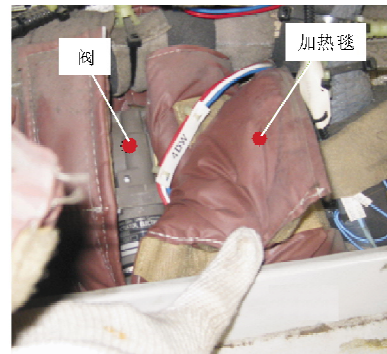


图 5 阀类设备毯式电加热器

Fig. 5 Electrical heater for valve

3.3 服务板上的设备

服务板上的设备体积较小,与服务板有很好的贴合面,通常采用加热垫来防冰。加热垫安装在设备和服务板中间的安装面上,通过加热垫发热来达到防冰效果,如图 6 所示。

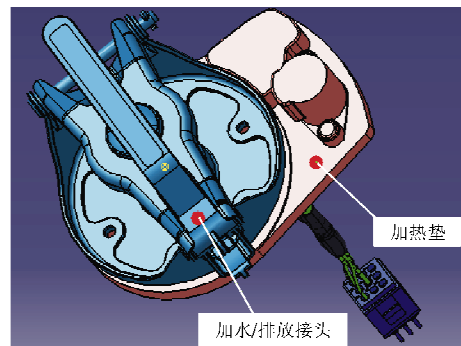


图 6 服务板上的设备加热垫

Fig. 6 Heater in servicing panel

4 加热功率分析

在进行加热器热功率分析时,应考虑到:设备中的水在不使用时是静止的,故无需考虑管路中水流动对热功率的影响;而使用水时管路内的水虽然发生流动,但水箱中的水是具有加温和保温措施的,故也无需考虑流动对热功率的影响。对于废水设备同理。

由于缺乏相关舱段的温度场分布信息,对于水废水系统部件防冰功率的计算,本文依据典型型号飞机的舱段温控特点,将成熟经验公式作为功率计算的设计依据。对于某些特定设备的加热功率,结合历史使用经验值,给出其加热功率的推荐值。

下文以定型系统供水管路为研究对象,介绍其电加热功率的计算方法^[6]。

(1) 主供水管路(内置电加热丝)

对于管径为 1 in 的主供水管路,其内置电加热丝的加热功率与长度成正比。而在实际加热功率的确定过程中,缺乏各舱段的温度分布数据,同时,一段内置加热丝通常贯穿多个舱段,各舱段的温度分布不同,故无法准确计算出每个电加热丝所需的加热功率。

依据典型机型的设计经验,按照每英寸长度配置的电加热功率为 1 W,对于长度为 $L(\text{in})$ 的电加热丝,其加热功率 $P(\text{W})$ 为:

$$P = 1 \times L \quad (1)$$

该防冰电加热器功率计算方法已应用在 B787、E170/190 等多个机型,实践表明该功率的配置方法可以满足防冰要求。

(2) 分配管路(电加热软管)

电加热软管的加热功率与管子的长度和外径成正比,同时,管路两端的连接接头形式对分配管路的加热功率也有影响。依据 SAE AS 标准^[8],在环境温度低至 $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,该类型软管的加热功率能够保证管路中的水温保持在 $4.4\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内。其加热功率可根据经验公式(式(2))进行计算:

$$P = (4a + 8.5) \times b/12 + c \times a^2 \pm 10\% \quad (2)$$

式中: a 为管径(in); b 为管长(in); $c=15$,表示软管两端为扩口或无扩口接头, $c=10$,表示软管一端为扩口或无扩口接头,另一端为诸如 AS1650^[9] 柔性

管接头, $c=7.5$,表示软管两端均为诸如 AS1650 柔性管接头。

(3) 水箱、废水箱

水箱、废水箱一般安装于非温控增压区(例如水废水舱和再循环增压舱),在典型单通道中短程干线飞机设计中,要求非温控增压舱的环境温度一般不低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,受客舱排出的暖空气影响(客舱排气温度一般维持在 $18\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$),非温控增压舱真实的环境温度一般在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右(靠近蒙皮处温度除外,该处温度一般较低),相似机型的高寒机场试飞结果也证明了这一点。水箱、废水箱的容积较大,处于非温控增压区的大部分箱体处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的环境中,仅有少部分箱体的外表面会靠近蒙皮,因此,采用低功率的加热毯进行加热保护即可。典型机型的水箱、废水箱加热器布置数据表明:对于容积不超过 300 L 的箱体,一般选用的加热毯功率不超过 1 kW,后续可通过试飞试验来对加热功率进行最终的计算和验证。

(4) 服务板类设备及阀类设备

安装在服务板上的设备(例如加水/排放接头、冲洗接头、排放球阀等)及阀类设备,与水管中存有静止的水不同,它们在使用过程中不会长时间存水,仅在加水或者排放时才会有水流经过,故其所需的加热功率很小,一般在 50 W 以下。使用经验表明:该功率能够满足其服务范围内的防冰要求。

5 结论

(1) 为最大化地减轻系统重量,应避免安装不必要的加热器,系统电加热器应设计为可拆卸形式,对于任一电加热器,若试飞试验证明其无需安装,则该加热器必须能够拆除且无需带来其他重大更改(货架产品除外)。

(2) 对于管路类工业标准件,其电加热器加热功率无需通过数值方法进行计算,仅按照本文第 4 节所提方法来确定即可;对于服务板类设备,不同机型的工作环境温度范围相差较小,经验表明本文所推荐的加热功率是满足要求的;对于水箱、废水箱加热毯,若能获得其周围的环境温度场,则可通过数值计算来获得更加准确的加热功率。本文推荐的加热功率计算方法和加热值均较为保守,但考虑到加热器本身具有过热保护功能,当加热功率稍

大时将缩短加热时间,并不会对设备及加热器本身造成破坏。

(3) 本文以型号研制经验为基础,可在民用飞机水废水系统设计之初、缺乏布置区域温度场的情况下,为系统的防冰功能设计提供指导。本研究内容适用于民用飞机水废水系统初步防冰功能的设计指导,系统后续防冰性能的优化与验证应通过试飞试验来完成。

参考文献

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册: 11 册——民用飞机内部设施[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002. General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual; Vol.11—Internal facilities of civil aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011. Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 Airworthiness standards; transport category airplanes[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [3] 航空专业教材编审组. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组, 1985. Editorial Team of Aviation Majored Teaching Material. The aircraft icing protection system [M]. Beijing: Editorial Team of Aviation Majored Teaching Material, 1985. (in Chinese)
- [4] 易贤, 桂业伟, 朱国林. 飞机三维结冰模型及其数值求解方法[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2152-2158. Yi Xian, Gui Yewei, Zhu Guolin. Numerical method of a three-dimensional ice accretion model of aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(11): 2152-2158. (in Chinese)
- [5] 张雪苹. 飞机结冰适航审定与冰风洞试验方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. Zhang Xueping. The airworthiness certification of aircraft and test method of icing wind tunnel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [6] 张任远, 范祝彬. 民机自然结冰试飞技术研究[J]. 国际航空, 2013(9): 90-92. Zhang Renyuan, Fan Zhubin. Research on natural icing test flight technique of civil aircraft[J]. *International Aviation*, 2013(9): 90-92. (in Chinese)
- [7] AS4468 REV B. Hose assembly, 125 psi, lined silicone, potable water, procurement specification[S]. SAE Aerospace standard, 2003.
- [8] AS 5420E. Hose assembly, heated, 125 psig, line silicone, potable water, procurement specification[S]. SAE Aerospace standard, 2009.
- [9] AS 1650B. Coupling assembly, threadless, flexible, fixed cavity, self-bonding, procurement specification[S]. SAE Aerospace standard, 2010.

作者简介:

张雪苹(1987—),女,硕士,工程师。主要研究方向:民机水废水系统设计、飞机防冰设计。

雷美玲(1979—),女,高级工程师。主要研究方向:民机水废水系统设计、飞机防冰设计。

朱 翀(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民机水废水系统设计、水废水系统数值计算等。

(编辑:马文静)

(上接第 93 页)

- tions,including a summary of airfoil data[M]. New York: Dover Publications,1959.
- [12] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15: 1787-1806.

作者简介:

刘 卓(1981—),男,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

李自启(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

梁 斌(1982—),男,工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

杨 波(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:空气动力学。

魏斌斌(1990—),男,硕士研究生。主要研究方向:空气动力学。

高永卫(1968—),男,博士,教授。主要研究方向:空气动力学。

(编辑:马文静)