旅客机环境控制系统方案分析

刘 猛 袁领双 王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：介绍了波音公司和空中客车公司环境控制系统的发展现状，提出了一种使用R134a工质的变频蒸发式制冷的环境控制系统，应用起飞总质量法进行了代偿损失分析，对给定飞行剖面上的能量消耗进行了计算及定性分析，并以燃油消耗为指标对新系统的能耗特性与采用空气制冷的环境控制系统进行了比较. 新系统有效降低了燃油消耗(仅21.93 kg/min，约是传统系统的40%)，提高了飞行的经济性。系统的低噪音、灵活调节和无污染供气，能够提高座舱的健康、舒适度.

关 键 词：环境工程；制冷系统；性能

中图分类号：V 245.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-0972-04

Analysis for environmental control system on civil aircraft

Liu Meng Yuan Lingshuang Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The advanced technology of environmental control system(ECS) from Boeing and Airbus was introduced. A new concept for ECS was raised, which applied vapor cycle refrigeration with frequency scroll compressor using refrigerant R134a. ECS penalty was calculated with the method of take-off gross weight. And the calculation and qualitative analysis were done for the new ECS energy consumption in the whole flight profile. Then the performance of the new ECS was compared with current ECS in fuel consumption. The results show that new system consumes less fuel(only 21.93 kg/min, about 40% of traditional system), which could increase aircraft economic performance. And the health and comfort in cabin could be improved with the low noise, flexible regulation and clean air-supplying.

Key words: environmental engineering; cooling systems; performance

环境控制系统(ECS，Environmental Control System)的作用是在各种飞行条件下，将舱内空气的压力、温度、湿度、气流速度和洁净度保持在允许或规定范围内，为机上乘员提供舒适的座舱环境，对电子设备进行冷却，并为货舱提供相应的环境，保证机上乘员的生命安全、舒适和机载设备正常工作，满足设备冷却与舱室增压要求[1].

1 ECS发展现状

随着飞机性能的不断提高，机载设备的发热量也在迅速攀升，同时人们对乘坐环境的舒适性要求也越来越高，使得ECS已经成为飞机愈来愈重要的组成部分. 因此，适应21世纪航空发展潮流的旅客机都离不开先进ECS的研制.

波音777飞机的ECS采用四轮升压式空气循环制冷方式(图1)代表了旅客机ECS的发展水平，这个系统将4个转子(涡轮、压气机、涡轮、风扇)和2个轴段连接在一起，用精密的调节装置使所有的转子和轴部件径向校准. 2个涡轮、两级膨胀的结构形式改善了空气循环机的起动性能，增强了系统的适应能力，提高了系统的可靠性[2].

A380的ECS采用双轴四轮空气循环制冷方

收稿日期：2008-07-11

作者简介：刘 猛(1975—)，男，安徽界首人，讲师，liumeng@buaa.edu.cn.

式,它是在波音 777 的基础上进一步改进的,采用的是“一个半包”结构,把 2 套四轮空气循环机综合在一个冷凝循环空气调节系统中,其他部件基本上与波音 777 的 ECS 部件相同. 这个系统的热力循环效率更高,占用更小的空间,提供更大的余度和更好的抗损伤性.

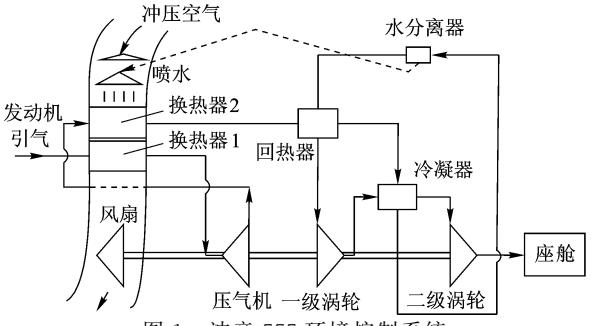

图 1　波音 777 环境控制系统

波音公司推出全新理念的“梦幻飞机”波音 787 堪称商用大型喷气式飞机中的首架“全电飞机”,最重要的技术创新在于它摈弃了传统飞机上靠发动机引气作为动力的客舱环境控制系统,取而代之的是靠电动机驱动的客舱环控系统,称之为电动环境控制系统(EECS, Electric Environmental Control System),见图 2. 系统中取消了发动机引气系统及其相关部件,采用了无引气的发动机结构,使得系统具有更大的灵活性和更强的适应能力,并降低对发动机热力循环的影响[3].

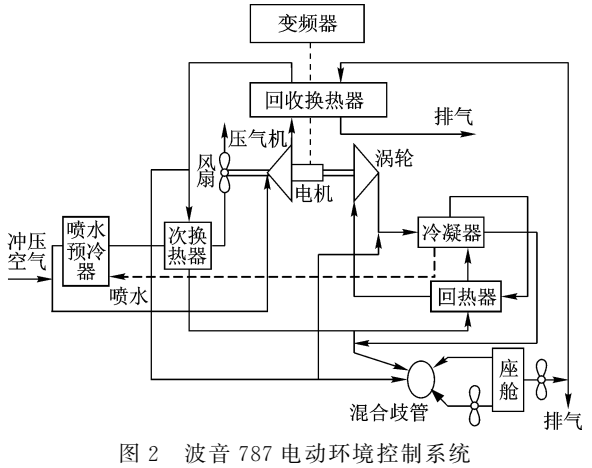

图 2　波音 787 电动环境控制系统

2　ECS 新方案介绍

鉴于 ECS 在旅客机上的重要作用,我国大型飞机事业的发展需要在吸收国外成熟技术经验的基础上研制发展适合我国地貌特征、同时具有市场竞争力的 ECS. 本文提出了一种新方案——采用变频蒸发式制冷的 ECS,如图 3 所示,希望在增强系统的环境适应能力、提高飞行的安全可靠性、经济节能性和健康舒适性等方面能有所帮助.

在新方案中,冲压空气进入系统,一部分进入由变频电机驱动的增压器进行压缩. 根据环境和飞行条件,增压器给冲压空气提供增压座舱需要的压力以及克服沿程压降损失的能量. 当飞机在 11 000 m 高空飞行时,外部压力只有 22.7 kPa,为了使 ECS 正常运转,电动增压器的压缩比将接近 4,以便在克服沿程阻力损失的情况下能够维持增压座舱等效高度 1 800 m(81.6 kPa)的压力. 从增压器出来的气流在回收换热器中被较冷的部分座舱排气冷却,使用较冷的座舱空气卸载换热器前的热载荷,可以减少冲压空气的需要量,降低飞机阻力,减轻换热器的总重量. 压缩空气在换热器中再除去部分热量,换热器的热沉是从冲压空气口进入的冲压空气,作为热沉的冲压空气在进入换热器前首先在喷水预冷器中被水蒸气和喷雾预冷. 由于冲压空气引气风扇不与增压器同轴,而是由电机单独驱动,使得它的转速能够单独调节,始终维持其高效的工作状态,给通过系统的抽吸空气提供能量. 一部分热压缩空气在换热器的上游通过一条管路提供给空气循环子系统和空气分配系统用于温度调节.

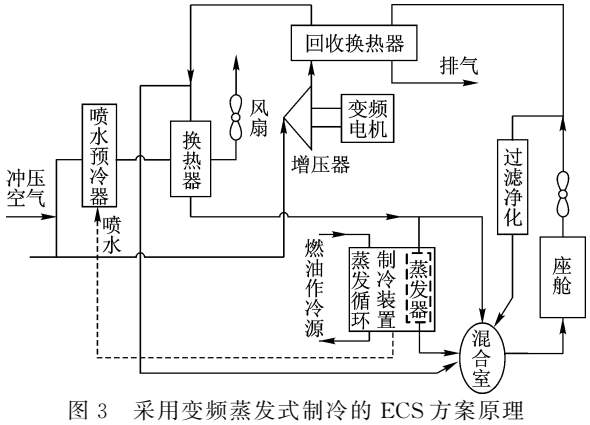

图 3　采用变频蒸发式制冷的 ECS 方案原理

经过冷却的压缩空气进入电动变速蒸发循环制冷系统. 蒸发循环是一个闭环回路,在这个回路中,制冷剂蒸汽在压缩机中被压缩、在冷凝器中冷却,直至变成过冷液体,通过膨胀阀使压力降低,在蒸发器的对比温度下被蒸发. 在这里,冷凝器是一个能够使用冲压空气或燃油作热沉的热交换器,蒸发器冷却的是来自换热器的压缩空气.

干燥的冷空气从蒸发循环制冷系统中出来后,进入座舱空气分配系统的混合室. 在混合室中,干燥的冷空气与来自另一个制冷包的冷空气以及座舱再循环空气混合. 在空气调节过程中,如果不需要蒸发循环制冷系统提供冷却空气,来自换热器的压缩空气直接旁通到混合室中. 为了提供座舱所需的供气温度,增加了热旁路空气,对混

合室中的空气进行进一步的调节.经过调节的空气进入座舱.从座舱排出的一部分空气被再循环风扇经过高效的净化过滤装置后抽回到混合室中,其余的座舱排气通过管路到达回收换热器,冷却来自增压器的压缩空气.

3 ECS新方案性能分析

分析可知,对飞机性能影响起主要作用的是重量、阻力和功率.因此,在系统方案设计阶段估算这些因素对飞机性能的影响有重大实际意义.目前最常用的估算方法是代偿损失法.代偿损失法有不同折算方法,对运输机较适用的是起飞重量法.本文以北京航空航天大学大型飞机高级培训班在模拟实习中设计的150座级旅客机CJ818为例,表1列出了其ECS的基本性能和数据.据此,计算新系统的代偿损失如表2所示.

表1 CJ818 ECS的基本性能和数据

参 数	数 值
系统装置质量/kg	650
飞行速度/(m·s^{-1})	265
计算飞行时间/h	5
飞机气动质量/kg	6
燃油比耗/(kg·(N·h)$^{-1}$)	0.122 5
发动机涡轮入口燃气温度/K	1 250
燃油单位燃烧值/(J·kg^{-1})	4.4×10^7
由专用进气道引气/(kg·s^{-1})	3.0
系统所需电功率/kW	154
压气机进口温度/K	284
压气机增压比	2.92
发动机压气机引气/(kg·s^{-1})	0
燃气比热/(J·(kg·K)$^{-1}$)	1 130
燃油燃烧完全系数	0.98

表2 ECS各部分代偿损失占起飞总质量的比例

代偿损失各部分	起飞质量/kg	占起飞总质量的比例/%
系统装置质量	650	25.83
运输该系统装置的燃油代偿损失	650.9	25.88
从专用引气道引气引起的燃油代偿损失	486.9	19.35
发动机轴输出功率所引起的燃油代偿损失	728.1	28.94
总的起飞质量增加	2 515.9	100

从表2中可以看出,系统固定装置和运输该系统装置的燃油代偿损失在总的起飞质量增加中占的比例相当,而发动机轴输出功率所引起的燃油代偿损失比前两者略高一些,从专用引气道引气(包括座舱用气及冷却用冲压空气)所引起的燃油代偿损失在总的起飞质量增加中所占比例相对较小.

将其简化为座舱外壁热载荷、座舱内壁热载荷、透明表面热载荷及附加热载荷4项,以实际飞行的热天工况为例,计算出表3所示飞行剖面上的热载荷曲线图,见图4.

表3 飞行剖面 min

状态	飞行时间
地面停机	0～5
滑跑—起飞	5～15
起飞—爬升至巡航高度	15～35
巡航飞行	35～125
从巡航高度降落—着陆	125～145
地面停机	145～150

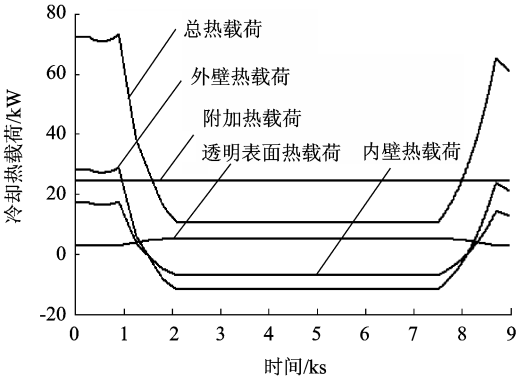

图4 座舱热载荷

为了观察新系统的性能,以上述热载荷为条件,计算新系统的能量消耗分布如图5所示.

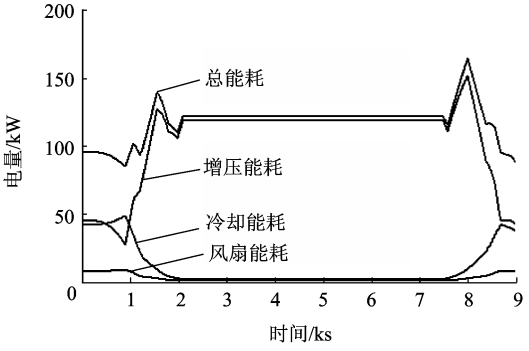

图5 飞行剖面上系统的电量消耗

从图5中可以看出:巡航时,电量消耗121.85 kW,其中增压器对冲压空气进行增压用于满足座舱压力要求而消耗的电量为119.02 kW,蒸发冷却系统对空气冷却降温用于消除座舱热载荷而消耗的电量为1.75 kW,冲压空气引气风扇及座舱再循环风扇的总耗电量为1.08 kW.由于新系统中不再使用发动机引气作气源,使得气源温度降低很多,整个系统中的最高温度即增压器出口温度在巡航时达到最高值141.2 ℃,比发动机引气温度低很多.此时座舱的冷却热载荷最低10.54 kW,使得电动蒸发制冷系统的耗电量最低为1.75 kW.随着飞行高度的降低,气源温度升高,冷却热载荷增大,需要制冷系统提供的冷量

增加,耗电量随之增大;当在地面停机时,冷却热载荷为 72.24 kW,耗电量达到 42.46 kW;在滑跑阶段 900 s 时出现了耗电量的最大值 48.79 kW,此时由于马赫数达到了 0.3,座舱热载荷为最大值73.32 kW.

从上述分析中不难得出,占主要电量消耗的增压耗电与制冷耗电的最大值不会在某一个飞行状态同时出现,且在总的电量消耗最大时,用于增压的电量消耗占了总耗电量的 97.68%.对于座舱增压来说无论是以何种形式都是要付出能耗的,传统的座舱增压不消耗电能,而是从发动机引出高压空气.对于 2 种能耗的比较,根据如下燃油折算公式换算为总的燃油消耗量[5]:

$$F_c = G_e \times c_1 + G_t \times c_2 + P_e \times c_3 + P_p \times c_4$$

式中,F_c 为燃油消耗量,kg/min;G_e 为发动机引气量,kg/min;G_t 为涡轮增压气量,kg/min;P_e 为发动机轴功率,kW;P_p 为电功率,kW;c_1,c_2,c_3,c_4 为折算系数,依次取值为 1.0,1.0,0.18,0.18.

根据上式,将新型环境控制系统与应用空气制冷的传统环境控制系统在同一实际飞行环境热天工况下整个飞行剖面上的能耗折算为总的燃油消耗,如图 6 所示.

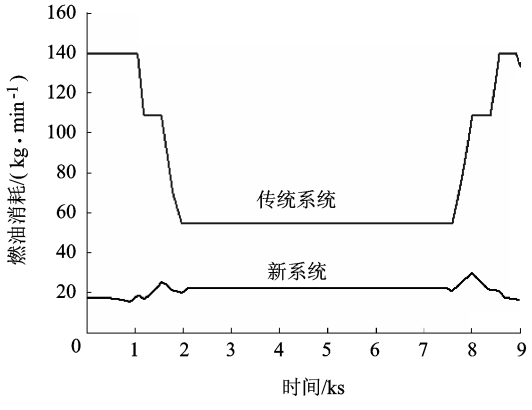

图 6　新系统与传统系统的燃油消耗比较

从图 6 中可以看出,巡航时新系统的燃油消耗为 21.93 kg/min,传统系统为 54.25 kg/min;在整个飞行剖面上,新系统的燃油消耗始终低于传统系统的燃油消耗.

4　结　论

为了满足现代飞行的需求,实现飞机"更安全、更舒适、更经济、更环保、更高效"的设计理念,采用变速蒸发式制冷的 ECS 设计方案,与传统的 ECS 相比,新方案中取消了发动机引气及相关的引气系统,采用变频电机驱动的增压器根据座舱压力需求对冲压空气进行压缩,取消了传统的调压组件,整套方案有助于提高系统性能,降低燃油消耗及系统噪音,能够保证座舱的空气品质,从而提高座舱的健康舒适度.

本文以 CJ818 的 ECS 为例,应用起飞总质量法对系统的代偿损失进行了分析,并以燃油消耗作为指标对系统的能耗进行了粗略的计算和对比分析,使得新系统的性能得到了初步验证.对于系统详细的分析计算及优化还需要进一步研究.

参考文献(References)

[1] 寿荣中,何慧姗.飞行器环境控制[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004:1－5
Shou Rongzhong, He Huishan. Environment control on aircraft[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004:1－5(in Chinese)

[2] 路多,黄纯洲.现代干线客机的空气管理系统[J].航空科学技术,2004(4):29－32
Lu Duo, Huang Chunzhou. Air management system for airliner[J]. Aeronautical Science and Technology, 2004(4):29－32(in Chinese)

[3] 路多,胡文超.新一代干线客机 A380 和波音 787 的环境控制系统[J].航空科学技术,2005(2):17－19
Lu Duo, Hu Wenchao. Environment control system for the new generation airliners: A380 and B787[J]. Aeronautical Science and Technology, 2005(2):17－19(in Chinese)

[4] Mitani H, Saito H. New concept ECS for civil aircraft[R]. 2002-01-2421, 2002:35－42

(责任编辑:赵海容)