

大型民机气压能网络用能分析

Energy Analysis of Pneumatic Net of Large Civil Aircraft

南京航空航天大学航空宇航学院 孙亚辉 苏向辉

[摘要] 大型民机气压能网络是指飞机上的气源系统和以引气为能源或利用引气工作的系统和部件的总和。针对大型民机气压能网络分析各子系统的工作原理、结构和用能特点,并从大型民机适用性和气压能消耗的角度,总结提出一种较优的气压能网络结构,为大型民机减少能耗提供参考。

关键词: 大型民机 气压能网络 工作原理 用能分析

[ABSTRACT] Pneumatic net of large civil aircraft is the sum of pneumatic system and systems or components which use bleed air as power source. Working principle, structure and energy characteristic of subsystems have been analyzed to summarize a better structure of pneumatic net, considering applicability of large civil aircraft and consume of pneumatic. The results can give some references to the large civil aircraft development.

Keywords: Large civil aircraft Pneumatic net Working principle Energy analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.092

大型民机是目前我国航空的发展重点,而减少油耗、提高经济性是大型民机研制中最主要的研究方向之一。利用先进的气动设计技术,优化机翼和后体的气动性能,可减少飞行阻力、提高升阻比和巡航效率,降低飞机油耗率。在发动机方面,通过增大涵道比提高推进效率,利用涡轮涂层、冷却技术提高涡轮前温度,可以降低飞机油耗^[1-3]。但这些研究大多存在着研究周期长、投入大或者技术相对成熟、提升空间小等问题。

大型民机的气压能网络是指飞机上的气源系统和以引气为能源或者利用引气工作的系统和部件的总和。气源系统将飞机的部分燃油消耗转换为气压能供给各用户系统。用户系统利用气源系统的高温高压引气完成相应工作。

对整个气压能网络中各子系统的工作原理和结构进行分析,研究其用能特点,有助于充分利用气压能、减少发动机引气。这样不仅能够直接降低气源系统引气

造成的发动机推力损失,还能避免大流量引气引起的流动损失和主流不稳定流动,减小对发动机热力循环的不利影响^[4-7]。对大型民机气压能网络进行研究能够有效减少油耗、提高飞机经济性。

1 气源系统

气源系统的作用是在飞机飞行或者地面工作过程中,为各个用户系统提供具有一定温度和压力的空气。民机的气源一般由发动机引气、辅助动力装置引气和地面气源组成。典型的气源系统可以分为发动机引气装置、引气预冷器及其调节装置、压力调节器、辅助动力装置、地面气源接头和气源总管等,其结构如图1所示。

发动机引气装置用于发动机中压、高压级的混合引气。中压级引气用于起飞、爬行、巡航状态,当中压级引气不能满足用户系统的压力要求,高压级引气补充供气,如飞机降落、等待着陆、地面滑行、高空巡航时^[8]。引气预冷装置利用一个空-空换热器实现引气温度的控制,通过改变换热器冷边发动机风扇空气的流量调节引气温度。压力调节器实现引气压力的调节。APU系统可以在地面和飞行高度低于5000m的状态为气源系统供气,地面气源接头在地面时可与空调车相连。两个装置的引气主要用于发动机起动系统和空调系统。

气压能网络的引气系统从早期的单级引气发展为高压、中压级交替引气,增大了气压能的利用效率,有效减少了飞机能耗。空客A380和波音777等先进民机上依然使用该类型气源系统。

2 用户系统

大型民机气压能网络的用户系统主要包括:空调系统、防/除冰系统、饮用水箱增压系统、液压油箱增压系统、燃油惰化系统、发动机起动系统等。

2.1 空调系统

空调系统是气压能网络的主要用户系统,其基本工作原理是利用空气循环制冷系统将发动机引气冷却到一定温度,供给座舱各区域。空调系统从结构上大致可以分为引气系统、制冷系统和空气分配系统。从气压能

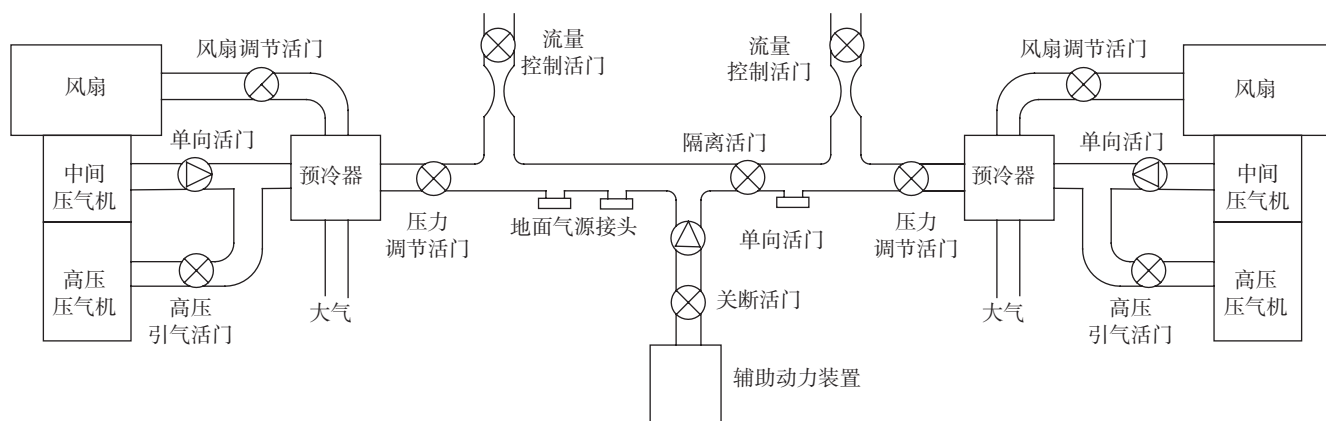


图1 气源系统原理图

Fig.1 Principle diagram of pneumatic system

利用的角度,制冷系统是空调系统能耗的主要影响因素。

2.1.1 波音 727 的空调系统

波音 727 的空调系统如图 2 所示,从气源系统引出的高温高压空气分为两路进入空调系统。冷路空气进入制冷系统冷却除湿,与热路空气按照一定比例混合后供给座舱。

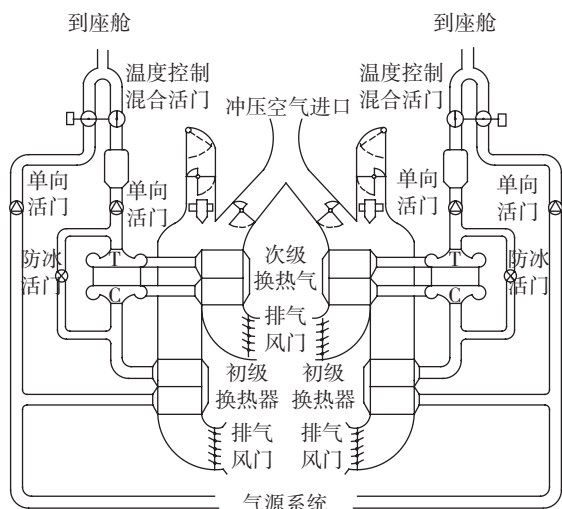


图2 波音727空调系统

Fig.2 Air conditioning system of Boeing 727

该系统所使用的制冷系统为两轮升压式低压除水系统,由升压式涡轮冷却器、换热器、水分离器和控制活门等组件组成。来自气源系统的空气首先在初级换热器内被冲压空气冷却,然后进入压缩机提高空气的压力。经过次级换热器进一步冷却后,进入冷却涡轮膨胀降温,成为冷路空气。冷路空气经过水分离器除湿后与热路空气混合,供给座舱。

系统中初级换热器和次级换热器都是通过冲压空气冷却系统冷却。飞行状态下,冲压空气通过冲压空气

进风口进入换热器。地面工作状态下,组件冷却风扇抽取外界环境空气冷却换热器。系统可以通过进口风门和排气风门调节冲压空气流量。为了防止水分离器结冰,系统设有防冰活门,利用初级换热器出口的热空气保证水分离器温度不低于 1.7℃。

2.1.2 波音 757 的空调系统

与波音 727 相比,波音 757 空调系统最大的不同是将制冷系统改进为三轮升压式高压除水系统。系统结构如图 3 所示。引气经过初级换热器、压缩机和次级换热器后进入高压水分离回路。通过回热器和冷凝器,被涡轮出口的冷空气冷却到露点以下,大部分水蒸气冷凝为液态水,在水分离器离心力的作用下与空气分离,完成高压除水过程。

高压除水系统避免了水分离器结冰的问题,出口温

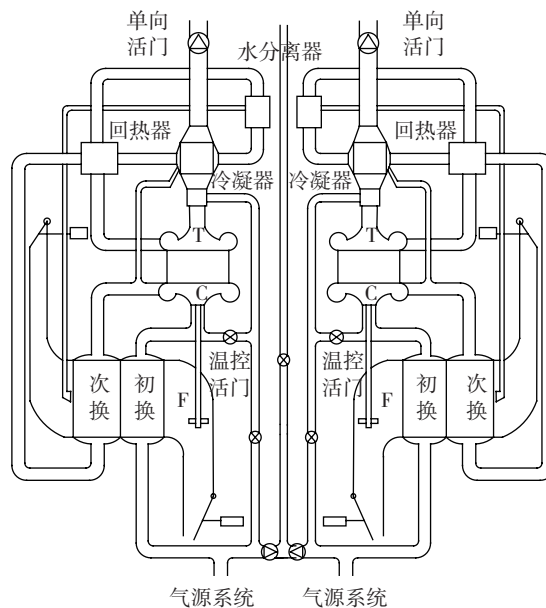


图3 波音757空调系统

Fig.3 Air conditioning system of Boeing 757

度可以达到 -14°C 左右。与低压除水系统必须维持在 0°C 相比,极大增加了座舱供气温度,减少了气压能的消耗。三轮系统与两轮系统相比,增加了与涡轮、压气机同轴的风扇,能够更加有效利用涡轮功率。同时,系统采用 50% 的座舱回气,保证了座舱供气的舒适性。

2.1.3 空客 A380 的空调系统

空客 A380 是四发喷气式飞机,其空调系统以 4 台发动机的引气和 APU 系统为气源。引气通过文氏管和流量控制阀门进行流量调节,进入制冷系统。制冷系统结构如图 4 所示。

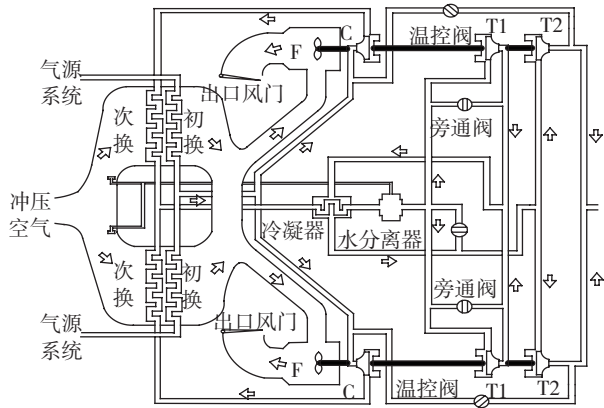


图4 A380空调系统

Fig.4 Air conditioning system of A380

制冷系统增加了次级涡轮,冷凝器出口的空气进入次级涡轮进行二次膨胀。初级涡轮旁通阀门通过对涡轮旁通支路流量的控制,将冷凝器冷边的温度控制在冰点以上,防止结冰。温度控制阀门通过调节初级换热器出口旁通热空气与次级涡轮出口冷空气的流量比,实现制冷系统的温度控制。系统与传统三轮系统相比,取消了回热器,同时两套制冷系统共用冷凝器和水分离器。结构更加紧凑,减少了部件个数和不必要的管路。

DeFrancesco^[9] 和 Linnett^[10] 等通过对三轮系统和四轮系统的比较分析,用理论计算证明在系统质量相当时,四轮系统具有更强的制冷能力。

波音和空客系列飞机体现了大型民机气压能网络中空调系统的发展历史和前进方向。主要机型的空调系统结构和最大供气量数据如表 1 所示。其中最大供气量参考文献 [8] 中给定的数据和文献 [11] 中供气量的估算方法,即最大供气量取每人每小时 40kg。

2.2 防 / 除冰系统

飞机在大气中穿越特定气象条件的云层时,其机翼、发动机进气口、风挡玻璃等迎风表面会发生结冰现象,因此需要防 / 除冰系统确保飞机飞行安全。根据防 / 除冰所采用能量方式的不同,分为机械除冰系统、液体防冰系统、电热防 / 除冰系统、热气防 / 除冰系统等^[12]。

表1 大型民机空调系统结构类型

机型	ACM 结构	除水方式	是否回气	最大供气量 / (kg·h ⁻¹)
波音 707	两轮升压	低压除水	否	7650
波音 727	两轮升压	低压除水	否	4780
波音 737	两轮升压	低压除水	否	4356
波音 747	三轮升压	低压除水	20%	16330
波音 757	三轮升压	高压除水	50%	6880
波音 767	三轮升压	高压除水	是	8440
波音 777	四轮升压	高压除水	是	13680
波音 787	四轮升压	高压除水	是	—
A300	三轮升压	低压除水	否	12445
A310	三轮升压	低压除水	否	11560
A320	三轮升压	高压除水	是	6516
A330	三轮升压	高压除水	是	10120
A340	三轮升压	高压除水	是	14000
A380	四轮升压	高压除水	是	19980

目前热气防冰系统可靠性较高,是大型民机上应用最广泛的防 / 除冰系统。热气防冰系统的工作原理是利用气源系统向机翼防冰区和发动机进气口提供温度和热流密度满足要求的热空气,防止飞机在结冰条件下飞行时,因结冰而损害飞机的飞行性能进而危及飞行安全。

热气防冰系统的瞬时有气量很大,是气压能网络的重要用户系统。国外主要的民机,包括波音 737、空客 A320、A340 等机型采用的都是机翼热气防冰系统^[13],波音 777 机翼和发动机进气口的防冰系统也是热气防冰系统^[14]。

文献 [15] 中提供了计算热气防冰系统耗气量的基本方程和简化的图解算法。计算条件设置按照民用航空规范,高度为 6100m,真实空速为 555.6km/h;设计的结冰条件为:水滴容积平均直径 $20\mu\text{m}$,环境空气温度 -9.44°C ,连续最大含水量 $0.44\text{g}/\text{m}^3$;防冰通道尺寸:宽度 5.08cm,高度 0.3175cm,通道长度为 68.6cm,每 0.3048m 翼展表面的通道数量为 4。同时,统一规定通道进气口温度为 225°C 。计算结果如表 2 所示。

2.3 液压油箱增压系统

液压油箱增压系统的作用是液压油箱的压力值控制在一个合理范围内,防止液压油箱产生气穴现象。目前,部分大型民机(A320、波音 737、A380 等)利用气源系统的高压引气实现液压油箱的增压。来自气源系统的引气通过过滤器、止回阀等装置进入油箱,可将油箱的压力稳定在 0.3MPa 左右。

依靠气源系统的油箱增压方式需要大量的引气管路和相应部件,导致系统结构复杂、重量增加。自举式增压油箱可以克服这些缺点。

自举式油箱使用一个差动面积活塞,柱塞泵出口的高压油通过优先阀引回到柱塞的小面积油腔,带动大柱塞向下运动,实现油箱吸油腔油液增压,如图 5 所示。该油箱的优点是通过油箱结构的创新设计避免了油箱引气增压系统带来的系统复杂、管路繁多的问题,使油箱增压系统得到了简化。目前,波音 787 以及我国自主研发的 ARJ21 飞机上都应用了该技术^[16]。使用该油箱的增压系统,不直接使用气压能,不属于气压能网络的用户系统。

2.4 水箱增压系统

飞机供水系统按照工作原理可分为重力供水系统和压力供水系统。重力供水系统中将水箱安装在客舱顶部,利用重力供水,结构简单,维护方便。压力供水系统中水箱安置在客舱下面的货舱内,利用气源系统给水箱增压保障供水。

根据我国《民用飞机设计要求》,旅客机供水系统应保证每位旅客 0.24L/飞行小时的用水量^[17]。因此大型民机需水量大,客舱顶部空间不能满足水箱尺寸要求,一般采用水箱增压系统,利用气源或电动压缩机给水箱增压。

表2 机翼热气防冰系统耗气量

型号	翼展 /m	耗气量 / (kg·h ⁻¹)
波音 727	32.92	15700
波音 737	28.35	13400
波音 747	59.64	28000
波音 757	37.95	17500
波音 767	47.24	23000
波音 777	60.9	29000
A310	43.9	20000
A320	34.48	16300
A330	60.3	28000
A340	45.23	21700

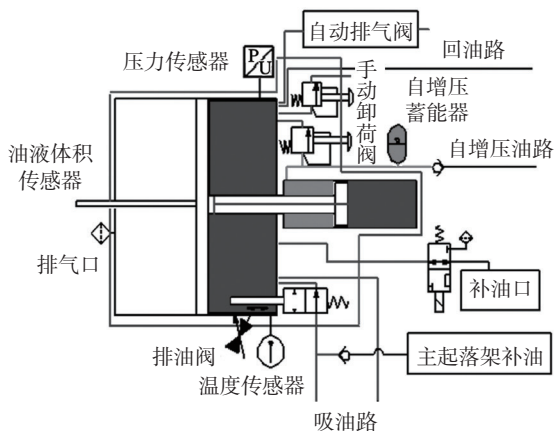


图5 自举式油箱原理图

Fig.5 Principle diagram of bootstrap tank

图 6 为波音 737 的水箱增压系统。来自气源的高压引气首先通过一个空气过滤器,防止引气污染水箱。压力调节器将引气压力调节为 0.24MPa 左右,经过截止阀进入水箱,补充水箱空气压力。截止阀可以防止水箱压力流失,同时避免水进入增压系统。当气源系统不工作时,压力限制开关控制电动空气压缩机为水箱提供相应压力。

2.5 燃油惰化系统

飞机燃油系统起火或爆炸是引起飞机失事的主要原因之一。在飞行过程中必须控制飞机燃油箱内燃烧层和富油层空气的氧气浓度,保证氧气浓度低于 9%,使燃油箱始终处于惰化状态^[18]。

燃油箱惰化的方法很多,有液氮惰化技术、Halon1301 惰化技术、燃油催化技术、分子筛惰化技术、膜分离技术等。波音 737 等大型民机的惰化系统主要是利用发动机引气,通过燃油惰化系统产生富氮空气供给油箱,系统结构见图 7。

该系统从气源系统总管引气,通过关断活门进行压

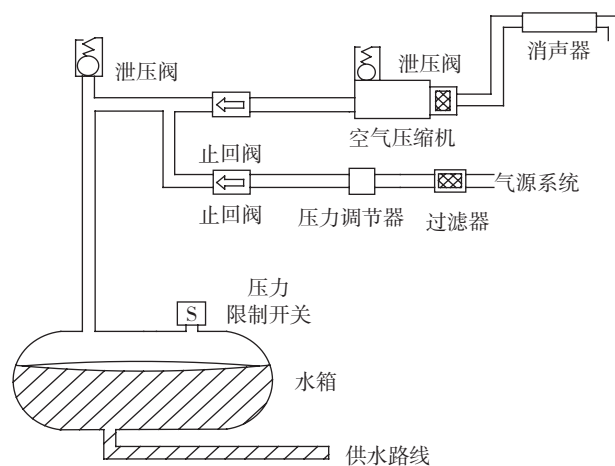


图6 水箱增压系统原理图

Fig.6 Principle diagram of water tank pressurization system

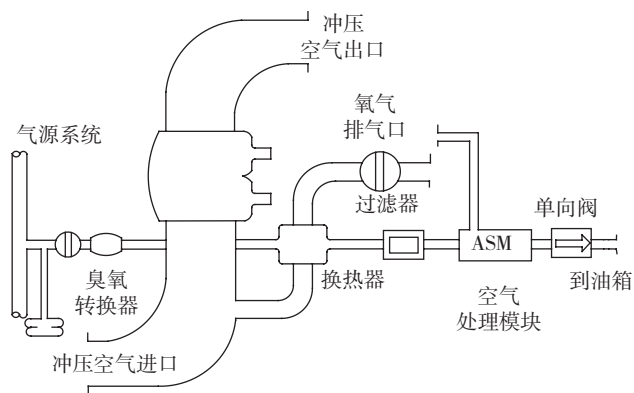


图7 燃油惰化系统原理图

Fig.7 Principle diagram of fuel inerting system

力调节,将引气压力控制在 69kPa。引气首先通过一个催化转化器,将空气中的臭氧转化为氧气(臭氧会降低和影响空气分离模块的工作性能)。然后进入换热器,换热器利用冲压空气将引气温度降到 70℃左右。冲压空气阀可以根据温度传感器的信号调节冲压空气的流量实现温度控制。过滤器的作用是在引气进入空气分离模块之前除去污染物,其前后安装有差压传感器检测是否堵塞。空气分离模块可以分离空气中的氧气,并通过排气口排到机外。产生的富氮空气通过单向阀进入油箱,保证油箱内空气的氧气浓度在燃烧极限以下。

3 各系统用能分析

根据以上分析,考虑大型民机的特点和气压能利用效率,一种较优化的典型气压能网络结构总结如下:

- (1) 气源系统一般采用发动机中压、高压级交替引气的策略;
- (2) 空调系统可使用三轮或四轮升压式高压除水系统制冷;
- (3) 机翼和发动机进气口采用热气防冰系统;
- (4) 水箱增压系统使用气源与电动压气机结合的增压方式;
- (5) 燃油惰化系统利用气源引气产生富氮空气供给油箱。

基于以上气压能网络结构,对于 150 座级的大型民机,各子系统的最大瞬时耗气量估算见图 8。

用户系统中,空调系统需要稳定的大流量引气,防冰系统在开启时耗气量巨大。大流量引气不仅影响发动机性能、损耗气压能,还需要大尺寸的空气管路和相应部件,增加了飞机的代偿损失。燃油惰化系统和水箱增压系统虽然耗气量很小,损耗气压能有限,但是系统自身和相应引气管路的质量对飞机能耗的影响不容忽视。

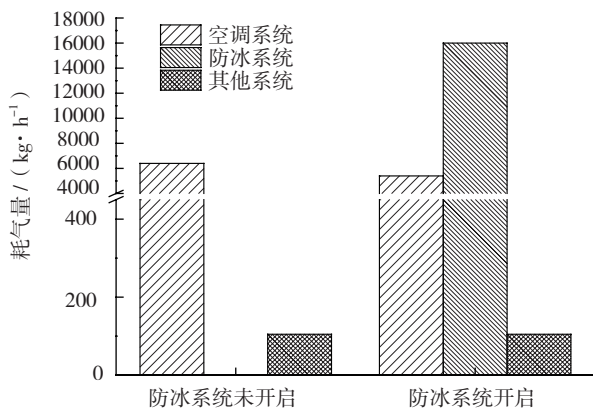


图8 各子系统耗气量

Fig.8 Air consumption of subsystems

4 结论

本文针对大型民机的气压能网络,总结了目前国内外主要机型的气压能网络结构,分析了各子系统工作原理和用能特点,并对空调、防冰等子系统的不同形式进行了对比。从大型民机适用性和气压能消耗的角度,总结出了一种较优化的气压能网络结构。

在本文研究的基础上,根据气压能网络的工作原理和特性,可以进一步建立各系统和部件的数学模型。对整个气压能网络在不同飞行状态下的耗能情况进行模拟和分析,并优化系统控制策略,为大型民机减少气压能消耗、提高经济性提供参考和依据。

参考文献

- [1] 王立新,李勇. 民机技术的新发展. 航空科学技术, 2001(3):24-29.
- [2] 朱之丽,王晓波. 高推重比涡扇发动机性能寻优分析研究. 航空动力学报, 1999,14(3):260-264.
- [3] 曹铭栋,王占学,蔡元虎,等. 大涵道比涡扇发动机循环参数优化算法研究及应用. 航空动力学报, 2013,28(2):372-378.
- [4] ORDONEZ J C, BEJAN A. Minimum power requirement for environmental control of aircraft. Energy, 2003,12(28):1183-1202.
- [5] 赵斌,李绍斌,周盛,等. 航空发动机空气系统气源引气的研究进展. 航空工程进展, 2012,3(4):476-485.
- [6] 李刚团. 民用大涵道比涡扇发动机动态性能模拟研究. 燃气涡轮试验与研究, 2011,24(1):8-14.
- [7] 赵斌,李绍斌,李秋实,等. 引气提升轴流压气机性能的数值研究. 航空动力学报, 2011,26(2):262-271.
- [8] 王恒斌,张宝霖. 国外飞机环境控制系统手册. 北京: 航空工业出版社, 1986.
- [9] DEFRANCESCO G L. Condensing cycle air conditioning system [R]. SAE Technical Paper, 1993.
- [10] LINNETT K, CRABTREE R. What's next in commercial aircraft environmental control systems[R]. SAE Technical Paper, 1993.
- [11] 张兴娟,杨春信,袁修干. 大飞机乘员舱热载荷的工程估算方法. 北京航空航天大学学报, 2009,35(12): 1503-1506.
- [12] 贾明. 某发动机进气道导流隔板防冰系统性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [13] 霍西恒,刘鹏,贾丽杰. 民用客机机翼热气防冰系统问题初探. 民用飞机设计与研究, 2010(4):16-27.
- [14] 路多,胡文超. 新一代干线客机 A380 和波音 787 的环境控制系统. 航空科学技术, 2005(2):17-19.
- [15] 《飞机设计手册》编辑委员会. 飞机设计手册第 15 册 生命保障和环控系统. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [16] 杨华勇,丁斐,欧阳小平,等. 大型客机液压能源系统. 中国机械工程, 2009(18): 2152-2159.
- [17] 《飞机设计手册》编辑委员会. 飞机设计手册第 11 册 民用飞机内部设施. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [18] 肖再华. 飞机燃油箱惰化. 航空科学技术, 2005(1): 31-33.

(责编 李丹)