

270V 高压直流电机驱动的机载蒸发循环制冷系统研究



胡文超*

航空工业南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106

摘要:本文介绍了270V高压直流电机驱动的机载蒸发循环制冷系统国内外应用情况,分析了机载使用中应注意的技术问题和解决方案,提出了后续机载蒸发循环制冷系统须重点突破的关键技术,并对蒸发循环制冷系统的应用前景进行了展望。

关键词:机载蒸发循环制冷; 270V高压直流电机及控制器; 压缩机

中图分类号:V245.3

文献标识码:A

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2019.12.011

随着飞机往多电方向的进一步发展,机载电子设备数量及装机功率均显著提升,由此带来的废热排放大致可以占到整个飞机所需总制冷量的80%以上。如果完全采用空气循环制冷方式,则需要增加发动机引气流量,使得环境控制系统尺寸和重量加大,给飞机带来极大的代偿损失;同时,对军用飞机而言,隐身要求以及高马赫数飞行使得空气循环制冷系统所需的热沉——冲压空气使用受限。

与空气循环制冷系统不同,蒸发循环制冷技术利用液态制冷剂气化来吸收负载的热量,具有性能系数高、地面停机条件下有良好的制冷能力,尤其是对于大制冷量需求,蒸发循环制冷技术的优点愈发显现出来,因此在现代飞机热管理系统中占据了重要的地位^[1,2]。

1 国内外应用情况

采用270V高压直流电机驱动的机载蒸发循环制冷系统,结构紧凑,能效比更高,使得飞机环控系统功能模块化,便于系统功能界面的划分。在掌握附件性能的基础上,进行更细化的系统性能计算和参数分配,因而不仅可以提高制冷系统的整体性能,还能够更有效地预设维护模式和通道。

1.1 国外应用情况

国外对机载蒸发循环制冷系统的研究起步较早,经过不断发展,系统的结构及性能已日臻完善。如“阿帕奇”直升机、

Lantian电子吊舱、EC-130H电子侦察机、F-22战斗机等已广泛采用各种形式的蒸发循环制冷系统,性能不断升级换代,系统主要由霍尼韦尔(Honeywell)、汉胜(Hamilton Sundstrand)研制生产。这些蒸发循环制冷系统及其部件设计精巧、结构紧凑、集成度高,非常值得我们进行研究和借鉴。表1为一些典型飞机的蒸发循环制冷系统及其核心部件应用情况。

表1 蒸发循环制冷系统的典型应用

Table 1 Typical application of vapor cycle cooling system

机型	蒸发循环制冷系统及压缩机形式
F-22“猛禽”战斗机	制冷量50kW、270V高压直流电源、全封闭式两级离心压缩机
EC-130H电子对抗机	制冷量62kW、115V、400Hz中频电源、螺杆式压缩机
Lantian电子吊舱	制冷量平均1.8kW、115V、400Hz中频电源、滑片式压缩机
“阿帕奇”直升机	制冷量26kW、115V、400Hz中频电源、螺杆式压缩机

F-22战斗机蒸发循环制冷系统是该飞机综合环境控制系统/热管理系统的关键子系统,其蒸发循环制冷系统具有如下特点:系统制冷量50kW,采用气体箔片轴承支撑的两级离心全封闭式压缩机,设计转速为72000r/min,采用270V无刷直流电机驱动,转速可根据需要进行调节;采用电子膨胀阀控

收稿日期:2019-10-10; 退修日期:2019-10-25; 录用日期:2019-11-05

*通信作者. Tel.: 13851993956 E-mail: hjxhwc609@163.com

引用格式: Hu Wenchao. Research on airborne vapor cycle cooling system driven by 270V high-voltage DC motor[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 72-75. 胡文超. 270V高压直流电机驱动的机载蒸发循环制冷系统研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 72-75.

制压缩机进口过热度;系统将压缩机电机控制器、膨胀阀控制器、系统控制器综合成一个控制器;通过两个PAO环作为传热回路,采用燃油作为主要热沉。图1为F-22战斗机上使用的270V高压直流电机驱动的蒸发循环离心压缩机外形图^[3-7]。

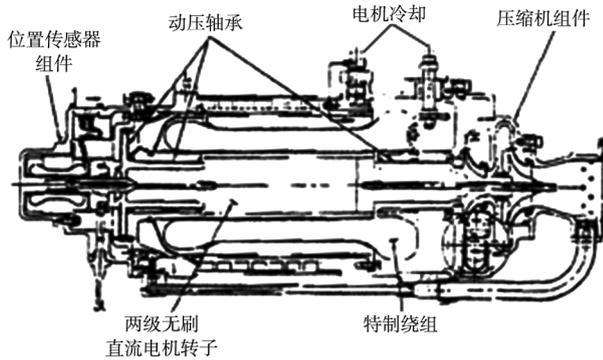


图1 F-22战斗机蒸发循环离心压缩机

Fig.1 Aircraft vapor cycle centrifugal compressor

在民用空调制冷领域,由于不受安装空间、重量等因素限制,电机和压缩机是通过中间联轴器连接,同时给电机单独配置冷却和润滑装置,这种安装和使用方式在飞机上不适用。由于空间和结构紧张的限制,国外军机已大量采用集成化制冷包的结构设计,制冷包具有功能完整独立、便于维护、减少泄漏、减小压降、提高制冷效率等优点,适宜于在各型高性能飞机、各类电子吊舱、坦克车等型号上广泛应用,还可推广到地面空调车、冷藏库、低温实验室等领域。因此,在国内飞机上研制和采用蒸发循环制冷包已是势在必行。

1.2 国内应用情况

国内已开展了由270V高压直流电机驱动的全封闭式、大制冷量、高速、变速机载蒸发循环制冷系统及其附件的设计研究工作,设计了完整的蒸发循环制冷系统及其试验验证平台。系统以全封闭式涡旋压缩机和离心压缩机为核心制冷附件,配以高压直流电机及控制器、冷凝器、电子膨胀阀、各类传感器、储液罐和干燥过滤器等附件,采用特殊材料密封垫、螺纹接头和不锈钢波纹管进行结构连接,解决了制冷压缩机既要紧凑又要高效的设计矛盾,最大限度实现了制冷系统及关键部件的密封和长寿命设计要求。

以全封闭式涡旋压缩机为核心的蒸发循环制冷系统已完成了装机试飞考核,并批量交付用户。

2 机载使用中的技术挑战和解决方案

随着270V高压直流高速电机及数字式控制技术的发展,使得制冷压缩机不必以固定的最大速度运行,系统的运

行速度和功率能够在广泛的范围内进行调节,以匹配随周围环境条件及负荷不断变化而变化的制冷能力。机载使用中存在的技术挑战和解决方案如下。

2.1 机载环境适应性

在机载应用场景下,飞机起降时产生的高强度冲击载荷、大过载机动状态下产生的高过载对系统的安全稳定运行构成了挑战。除了对所有机载设备均存在的结构强度问题,对蒸发循环系统主要的影响在于特定方向的高过载可能导致系统内的制冷剂阻塞或冲击现象。前者导致制冷剂难以循环流动,从而引起压缩机冷却润滑条件变差,后者导致制冷剂在未充分气化的情况下大量进入压缩机,从而导致压缩机出现液击现象。值得注意的是,大过载条件单次持续时间不长,因此阻塞现象导致的润滑条件变差对系统的影响较小,须重点考虑可能存在的压缩机液击问题^[8-10]。

因而在系统结构布局时,应尽量避免将制冷剂主要流动方向与最大过载方向重合布置,从而减轻加速度载荷对制冷剂流动的影响。在必要的情况下,可以在压缩机入口设置气液分离装置,避免液态制冷剂直接进入压缩机。此外,在压缩机方案选择上,可以考虑涡旋式等对液击耐受能力较强的压缩机形式。

2.2 系统密封

在机载应用场景下,制冷剂泄漏导致的系统制冷能力不足是其特有的故障模式。对此问题,设计时可以从如下几方面解决:

(1) 在系统方案选择时,规避动密封的应用,如可采用全封闭式制冷压缩机而避免传统制冷压缩机轴密封可靠性低的问题。

(2) 在系统管路设计时,尽量选择一体化成形方案,避免拼接方式带来的大量焊缝。

(3) 仅设置必要的使用维护接口,从而减少制冷剂回路的密封接口的数量。

(4) 对于密封接口设计,除采用特殊的密封结构、密封材料外,还须考虑实际应用时可能存在的加工公差、安装误差、密封件“热胀冷缩”等因素,采取相应的补偿措施。

2.3 压缩机设计

机载蒸发循环的装机使用,必须要解决压缩机等核心部件的装机适用性问题。为了满足机载使用要求,压缩机要满足效率高、重量轻、结构紧凑、高可靠性、高液体吸入容限、高压比、低振动特性、抗振动、冲击和加速度负载特征等需求。为满足上述需求,制冷压缩机设计时可采用如下解决方案:

(1) 应采用双涡盘对称全封闭结构、机电一体化方案,

产品主要由压缩机、电机、旋转变压器和控制器等部分组成。电机集成在压缩机体内,利用流过压缩机的介质直接冷却电机,因而不需要电机单独的支撑和润滑冷却结构。

(2)考虑到电机输出功率大,设计时还应选择高气隙磁密、高电流密度材料以提高产品的功率密度。

(3)压缩机电机控制器可采用有位置传感器控制方式,主要通过旋变位置的检测,解算电机的磁极位置,达到驱动电机按要求运行。

图2和图3分别为涡旋压缩机外形及其蜗盘。



图2 涡旋压缩机外形

Fig.2 Scroll compressor outline



图3 涡旋压缩机蜗盘

Fig.3 Scroll compressor disc

3 机载蒸发循环制冷系统及部件的完善与创新

新技术的出现为机载蒸发循环制冷系统的发展带来了新的机遇,为系统往更高效率、更高集成度、更智能方向发展提供了新的可能性。为满足可靠、长寿的需求,机载蒸发循环制冷系统及其部件还须开展进一步的完善和设计创新。

(1) 高压直流驱动技术

高压直流电源体制以其传输功率大、耗损低、电磁干扰小等优点已经成为现代飞机的主流供电体制,大量飞机已经采用了270V DC的供电电压,对运行经济性要求更高的先进商用飞机已采用540V DC作为供电电压。对于机载蒸发循环制

冷系统而言,采用高压无刷直流电机驱动的制冷压缩机,其电机效率高,可以有效提升系统能效,对于大功率系统而言很有吸引力;同时由于无刷直流电机良好调速特性,使得系统变频性能得以提升,可以有效拓宽系统的热负载适应范围。

另一方面,高压直流电源体制对于压缩机电机驱动器提出了更高的要求,尤其是大功率系统而言,驱动电路的功率器件在耐冲击、耐电压/电流尖峰能力方面要求均较高,因此在功率器件开发、驱动设计、尖峰电压/电流吸收处理、电磁兼容等方面均须进行突破。

(2) 自主保障及健康管理技术

通过引入系统自主保障及健康管理的理念,充分考虑系统状态监测、故障识别、隔离重构及健康预测需求,发展相应的机载蒸发循环制冷系统健康管理技术,可以有效提高系统可靠性并降低使用维护成本。

(3) 微通道换热技术

为满足体积和重量要求,以往的机载大功率蒸发循环制冷系统换热器常采用铝合金板翅式结构,作为紧凑式换热器,它体积和重量具备一定的竞争力,但存在芯体耐压能力低、易泄漏的缺点。采用新兴的基于“蚀刻成形+分子扩散焊”技术的微通道换热器,经评估可以降低40%的系统体积以及20%的系统重量,在机载应用场景下具有良好的前景。国内在钛合金微通道换热板片蚀刻成形、钛合金芯体扩散焊接等方面已取得了突破,但还需要解决微通道换热器耐污染能力以及在极低温条件下的流动阻力问题。

(4) 空气轴承支撑的机载离心压缩机技术

机载离心压缩机的基本功能是为制冷剂蒸气增压,为实现增压目的需要通过叶轮给制冷剂做功提高蒸气压力和速度,之后通过扩压器将制冷剂的动能转化为压力能。其具有性能好、可靠性高、体积小、重量轻等特点,美国F-22战斗机蒸发循环制冷系统采用了空气轴承支撑的离心式压缩机。为了实现机载离心压缩机的装机应用,国内应重点突破机载离心压缩机总体结构设计、多级离心压缩匹配优化、动压轴承在R134a蒸气中的特性及离心压缩机试验验证等关键技术,为整机应用提供支撑。

4 结束语

蒸发循环制冷系统作为一种制冷量大、循环效率高的闭式制冷循环,在军用及民用飞机领域均有广阔的应用前景。在已有的技术及研发经验基础上,不断拓展新技术的应用,使得蒸发循环制冷系统更加适应先进飞机的使用需求,充分发展具有自主知识产权的机载蒸发循环制冷系统对于提升

我国飞机环境控制系统专业水平具有重要的价值。

AST

参考文献

- [1] 寿荣中,何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
Shou Rongzhong, He Huishan. Aircraft environmental control [M]. Beijing: Beihang University Press,2004.(in Chinese)
- [2] 吴叶正,韩宝琦. 制冷原理及设备[M]. 西安:西安交通大学出版社,1997.
Wu Yezheng, Han Baoqi. Refrigeration principle and equipment [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,1997. (in Chinese)
- [3] 刘铭. 国外飞机综合环境控制系统[J]. 航空科学技术, 2004 (2):28-31.
Liu Ming. Aircraft integrated environmental control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2004(2):28-31. (in Chinese)
- [4] Jonquieres M. Air cycle environmental control system with vapor cycle system[P].US005918472A,1999.
- [5] Sprouse J G. F-22 environmental control/thermal management system design optimization for reliability and Intergrity-A case study[R].SAE-961339,1996.
- [6] Ashford R, Brown S. F-22 environmental control/thermal management system flight test program-downloadable constants, an innovative approach[R].SAE-2000-01-2265,2000.
- [7] Tuckman R F W P D. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Letters,1981(2):126-129.
- [8] 李武奇,唐伯清. 蒸汽压缩式制冷系统在航空中的应用[J]. 飞机设计,2008(4):2-28.
Li Wuqi, Tang Boqing. Application of the steam compression refrigeration system in aviation[J]. Aircraft Design, 2008(4):2-28.(in Chinese)
- [9] 孟繁鑫. 多电飞机电动环境控制系统关键技术研究[J]. 航空科学技术,2018,29(2):1-8.
Meng Fanxin. Research of key technology for the more electrical aircraft electric environmental control system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018,29(2):1-8.(in Chinese)
- [10] 唐有才,王占勇,孙金立. 现代军用飞机环控系统探讨[J]. 航空科学技术,2002(4):35-37.
Tong Youcai, Wang Zhanyong, Sun Jinli. Exploration of environmental control system for modern military aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2002(4):35-37. (in Chinese)

(责任编辑 皮卫东)

作者简介

胡文超(1972-)男,研究员。主要研究方向:飞机环境控制系统。

Tel:13851993956 E-mail:hjxhwc609@163.com

Research on Airborne Vapor Cycle Cooling System Driven by 270V

High-voltage DC Motor

Hu Wenchao*

AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, Nanjing 211106, China

Abstract: This paper introduces the domestic and foreign application of airborne vapor cycle cooling system driven by 270V high-voltage DC motor and analyzes the technical issues and solutions to which attention shall be paid during airborne operation. This paper also puts forward the key technologies which the major breakthrough are needed and proposes the application prospect of vapor cycle cooling system.

Key Words: airborne vapor cycle cooling; 270V high-voltage DC motor and controller; compressor

Received: 2019-10-10; Revised: 2019-10-25; Accepted: 2019-11-05

*Corresponding author. Tel. : 13851993956 E-mail: hjxhwc609@163.com