

机载准二级压缩蒸发循环制冷技术

杨国茹¹ 夏文庆² 张行¹

(1. 新乡航空工业(集团)有限公司, 新乡, 453049; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要: 为了满足未来飞机对蒸发循环制冷系统(Vapor cycle system, VCS)长寿命、高可靠性和低能耗的要求, 对准二级压缩蒸发循环制冷技术在飞机环控系统上的应用进行了研究。文中首先对准二级压缩蒸发循环制冷系统理论循环和准二级压缩过程进行了分析, 然后通过对理论循环的性能计算和产品系统性能试验。证明在制冷量不变的前提下, 采用准二级压缩循环代替单级压缩循环并辅以回热器后, 系统制冷性能系数(Coefficient of performance, COP)值提高 29%。同时, 压缩机转速下降 38%, 排气温度下降 29%, 相应的压缩机的工作寿命和可靠性大幅提高。

关键词: 环控系统; 准二级压缩; 蒸发循环系统; 性能系数

中图分类号: V245.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)S-0035-05

Quasi Two-Stage Compression Mechanism for Vapor Cycle System on Airplane

YANG Guoru¹, XIA Wenqing², ZHANG Hang¹

(1. AVIC Xinxiang Aviation Industry (Group) CO, LTD, Xinxiang, 453049, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to meet the requirements of long life, high reliability and low energy consumption for the vapor cycle cooling system(VCS) on aircraft in the future, the application of the quasi-two stage vapor cycle cooling technology in the aircraft environmental control system is studied. The theoretical cycle and quasi-two stage compression process of the two stage compression refrigeration cycle are analyzed, and then the performance of the theoretical cycle and product performance are test. They are proved that the quasi-two stage compression cycle is used instead of single-stage compression cycle, under the vapor-liquid heat exchanger, the coefficient of performance (COP) value of the system is increased by 29%. At the same time, the compressor speed decreased by 38%, the discharge temperature decreased by 29%. Correspondingly, the working life and reliability of the compressor are greatly improved.

Key words: environmental control system; quasi two-stage compression; vapor cycle system (VCS); coefficient of performance (COP)

由于蒸发循环系统(Vapor cycle system, VCS)具有不需要从发动机引气、制冷效率高、燃油代偿损失小等优点, 因此被广泛应用于国内外各种直升机、旅客机等机型。

机载蒸发循环系统采用集成化设计的高转速电动涡旋式制冷压缩机以降低产品体积、重量。高转速使压缩机排气温度升高、运动部件润滑性能下降, 产品寿命和工作可靠性降低。同时由于压缩机

收稿日期: 2017-05-15; **修订日期:** 2017-06-20

通信作者: 杨国茹, 男, 研究员级高工, E-mail: syac-market@163.com。

引用格式: 杨国茹, 夏文庆, 张行. 机载准二级压缩蒸发循环制冷技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S): 35-40.
YANG Guoru, XIA Wenqing, ZHANG Hang. Quasi two-stage compression mechanism for vapor cycle system on airplane[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 35-40.

电功耗占飞机环控系统总电功耗 70% 以上, 因此国内外一直在研究提高压缩机寿命和制冷系数的技术途径。

1982 年 Ueno 和 Fukuhara^[1] 申请了闪发器热泵循环的专利, 2007 年 Abel 等^[2] 申请了一种新型的蒸汽注入涡旋压缩机热泵系统专利, 通过补气提高了热泵系统的制热量和制热性能系数 (Coefficient of performance, COP) 值, 并降低了排气温度。国外新型飞机上的蒸发循环制冷系统, 如波音 B-787 旅客机、S-92 直升机等均采用了准二级压缩技术。

国内民用领域, 赵会霞等^[3] 对涡旋压缩机闪发器热泵系统进行了研究, 马国远^[4]、唐华杰^[5] 等对涡旋压缩机经济器系统进行了研究, 张科等^[6] 对涡旋压缩机经济器系统的数学模型与性能分析进行了研究, 而这些研究均偏重于准二级压缩系统在热泵系统中的应用, 缺乏对准二级压缩制冷系统的技术研究。北京航空航天大学张兴娟等^[7] 对蒸发循环二级压缩系统应用于直升机进行了理论分析, 提出了准二级压缩系统比单级压缩系统有一定优势, 但是未对系统进行详细的分析和验证。由于国内缺乏准二级压缩蒸发循环制冷系统的研究, 国内飞机全部采用单级压缩系统。

1 准二级压缩制冷系统理论循环

1.1 基本概念

单级压缩蒸发循环系统 (图 1(a)), 制冷剂从冷凝器流出后直接进入膨胀阀节流降压, 然后进入蒸发器中蒸发吸热。而准二级压缩蒸发循环中 (图 1(b)), 从冷凝器流出的制冷剂首先进行一级节流降压, 在闪发器中分离成制冷剂气体和液体, 气态制冷剂从压缩中间状态返回压缩机, 直接进入二级压缩, 液态制冷剂经过第二级节流进入蒸发器。由于中间压力的气态制冷剂不需要经过第一次压缩, 因此节省了压缩机的功耗, 提高了循环制冷系数。

1.2 理论循环

如图 2 所示, 高温、高压制冷剂液体 (状态 5) 经过第一级节流膨胀, 形成中温、中压的气液两态混合物 (状态 6), 然后进入闪发器中气液分离, 分离出的液态制冷剂 (状态 7') 经过过冷过热器后成为过冷液体 (状态 7), 然后进行第二级节流膨胀后 (状态 8) 进入蒸发器中蒸发吸热, 形成过热气体后进入过冷过热器进行热交换, 温度升高, 然后进入压缩机 (状态 1), 吸收电机散发的热量, 温度再次升高 (状态 1') 进入涡旋压缩动静盘中开始压缩。在闪发器中分离出的气态制冷剂 (状态 3') 进入压

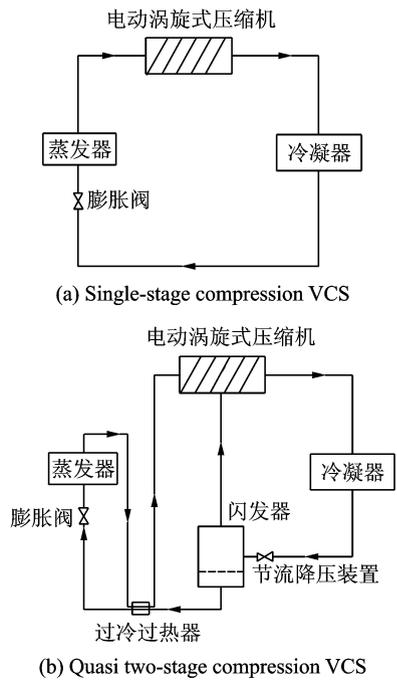


图 1 单级压缩蒸发循环与准二级压缩蒸发循环
Fig. 1 Single and quasi two-stage compression VCS

缩机的压缩腔与经过第一级压缩后的高温制冷剂气体 (状态 2) 混合后温度升高 (状态 3), 继续进行第二级压缩, 最后排出压缩机 (状态 4)。

准二级压缩蒸发循环系统能够降低压缩功耗, 主要是以下两个原因:

- (1) 准二级压缩系统中一部分制冷剂直接从压缩过程中间注入压缩机, 不进行第一级压缩, 降低了压缩机的功耗。
- (2) 由于压-焓图中等熵线的斜度不同 (越往右斜度越大), 因此准二级压缩蒸发循环单位质量功耗小于单级蒸发循环。

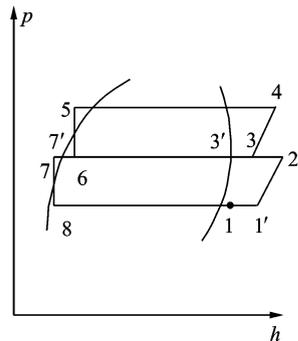


图 2 准二级压缩蒸发循环压-焓
Fig. 2 $p-h$ chart of quasi two-stage compression VCS

准二级压缩蒸发循环系统除了功耗低外, 还具有以下 3 个优势:

- (1) 准二级压缩系统中, 进入蒸发器的制冷剂焓值比单级压缩系统低, 因此在相同制冷量的前提

下,准二级压缩系统制冷剂质量流量小于单级膨胀系统,压缩机转速可以降低,从而提高压缩机的工作寿命。

(2)由于进入蒸发器中的制冷剂质量流量小,因而所需蒸发器的换热面积小,体积小、重量轻。

(3)中间注入的低温制冷剂气体可以降低第一级压缩后的制冷剂温度,使压缩机排气温度降低,进而提高压缩机的工作可靠性。

2 准二级压缩过程热力学分析及系统理论计算

2.1 中间补气压缩机工作过程

带中间补气的涡旋压缩机,其压缩过程分以下4个阶段:

(1)单级压缩阶段(1'点状态至2点状态)

单级压缩阶段为普通多变压缩过程,1'点状态为吸气腔刚闭合时压缩腔内制冷剂状态,2点状态为中间补气口出现在压缩腔之前瞬间,腔内的制冷剂状态。

(2)中间补气-压缩阶段(2点和3'点至3点状态)

中间补气-压缩过程可看作是一个变质量、容积,变温度的非稳定流动的多变压缩过程。2点状态后,中间补气口出现在压缩腔中,补气进入压缩腔前的状态对应3'点状态,进入压缩腔后与压缩腔内气体混合,动涡旋盘继续转动,直到补气口离开该压缩腔。补气结束时,腔内制冷剂对应3点状态。

(3)二级压缩阶段(3点状态至4点状态)

该阶段为中间补气过程之后的多变压缩过程。3点状态为补气过程刚结束时压缩腔内制冷剂状态,4点状态为排气孔刚出现在压缩腔但假设腔内未与外界管路连通时的制冷剂状态。

(4)等容压缩阶段

在压缩终了时,一般情况下会出现过压缩或欠压缩的情况。当压缩终了压力大于系统的排气压力时,压缩过程为过压缩,压缩腔内制冷剂气体在排气口打开瞬间膨胀到系统排气压力。当压缩终了压力小于系统排气压力时,压缩过程为欠压缩,排气口打开瞬间排气管内制冷剂冲入排气腔,腔内制冷剂气体压力提升至系统排气压力。

2.2 补气压力参数的设计

补气压力是决定补气过程的关键因素,补气压力与相对补气量紧密相关。对于闪发器循环,高补气压力趋向于增大补气质量流量,同时蒸发器进口制冷剂焓值随补气压力升高而增大。而补气压力过低,虽然蒸发器进口制冷剂焓值降低,但补气量

减少,中间补气的效果下降。最佳中间压力 p_m 按如下公式确定

$$p_m = \sqrt{p_1 \times p_4}$$

式中: p_1 和 p_4 分别为蒸发压力和冷凝压力,单位为MPa。

2.3 系统理论循环性能计算

以系统制冷量、蒸发压力、冷凝压力、过冷度、过热度为输入值,计算理论循环系统的中间注入制冷剂质量流量、压缩机功耗和制冷系数,与单级压缩系统进行对比。计算结果见表1。

表1 准二级压缩蒸发循环系统计算结果

Tab. 1 Calculation result of quasi two-stage compression VCS

| 技术参数 | 计算结果 | |
|--|------|------|
| 中间压力 p_m /MPa | 0.74 | — |
| 压缩机入口制冷剂质量流量 G_{r2} /(kg·min ⁻¹) | 1.89 | 2.42 |
| 中间注入制冷剂质量流量 G_{r1} /(kg·min ⁻¹) | 0.43 | — |
| 排气温度 t_4 /°C | 105 | 115 |
| 压缩功 N_e /kW | 2.30 | 2.68 |
| 压缩机 COP | 2.29 | 2.18 |

(1)制冷剂质量流量 G_{r1} 和 G_{r2} 的计算

根据冷凝器出口压力、压缩机入口压力和中间压力,可以确定闪发状态点(状态6),在压-焓图中查出状态6的干度 X 和状态7的焓值。

$$G_{r1} = Q/(h_1 - h_7)$$

$$X = G_{r1}/(G_{r1} + G_{r2})$$

(2)中间注入后(状态3)的焓值

$$h_3(G_{r1} + G_{r2}) = h_{3'} \times G_{r1} + h_2 \times G_{r2}$$

(3)准二级压缩系统压缩功的计算

$$N_e = G_{r2}(h_2 - h_{1'}) + (G_{r1} + G_{r2})(h_4 - h_3)$$

以上公式中: Q (kW)为制冷量; G_{r1} (kg/s)为蒸发器制冷剂质量流量; G_{r2} (kg/s)为补气制冷剂质量流量; N_e (kW)为压缩机功耗; h (kJ/kg)为各状态点焓值; X 为制冷剂干度。

理论循环计算结果显示,采用准二级压缩技术后,排气温度降低10°C,压缩机制冷系数COP提高了16.2%。

3 准二级压缩制冷系统及试验

3.1 准二级压缩制冷系统

采用一套已完成性能测试的飞机蒸发循环系统进行试验。系统制冷量5kW。试验压缩机采用中间注入式电动涡旋式压缩机,压缩机排量28cc/r,最高工作转速7000r/min。闪发器新研制造,

一级膨胀采用毛细管。

进行单级试验时,将压缩机中间注入口堵住,闪发器短路,蒸发器膨胀阀换高压膨胀阀。进行二级压缩试验时,将闪发器接入系统,闪发器出气口与压缩机注入口连接,蒸发器膨胀阀换低压膨胀阀。

3.2 试验测试系统

试验在专用的直升机蒸发循环制冷系统试验台上进行,为进行二级压缩蒸发循环试验,在试验台上增加温度压力测试仪表。试验台如图3所示,准二级压缩机试验如图4所示。



图3 直升机蒸发循环制冷系统试验台
Fig. 3 Test facility for VCS on helicopter

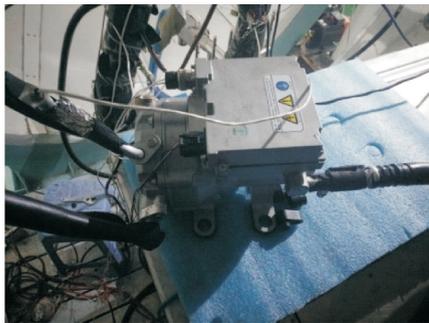


图4 准二级压缩机试验图
Fig. 4 Test of quasi two-stage compression

4 测试结果分析

试验工况:冷凝器进风温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发器进风干球温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿球温度 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发器、冷凝器自带风机。

(1) 制冷量对比

试验测得同一套核心部件(蒸发器、冷凝器、压缩机)在各种转速下,二级压缩系统制冷量均比单级压缩系统高,说明二级压缩系统通过降低蒸发器入口的焓值,在压缩机体积流量不变的前提下,可以使系统制冷量提高 $10\% \sim 26\%$ 。

(2) 制冷系数对比

试验结果显示,在同样转速下,二级压缩的制冷系数低于单级压缩。

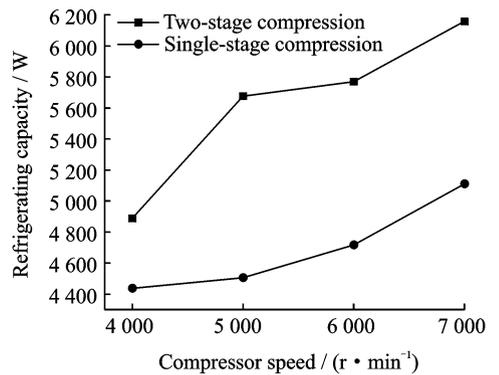


图5 系统制冷量测试结果对比

Fig. 5 Comparison of cooling performance

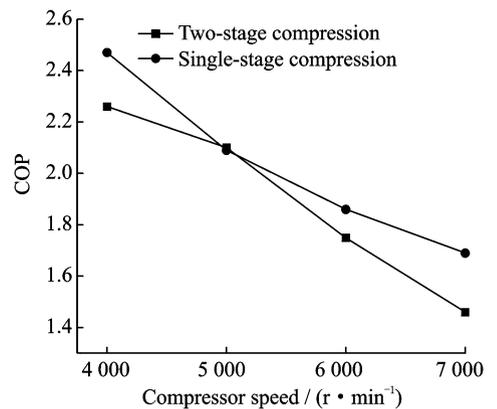


图6 系统制冷系数(COP值)测试结果对比

Fig. 6 Comparison of COP

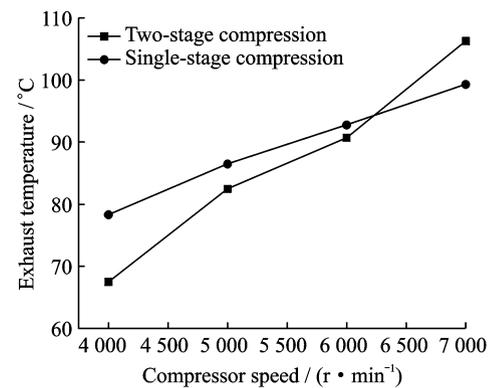


图7 压缩机排气温度测试结果对比图

Fig. 7 Comparison of compressor discharge temperature

(3) 压缩机排气温度测试结果对比

试验测试显示,低转速时,二级压缩机排气温度明显低于单级压缩机,随着转速提高,差距缩小,7000转时,二级压缩排气温度已高于单级压缩。

(4) 在相同制冷量下的对比结果

虽然在相同压缩机转速下,二级压缩系统COP值低于单级压缩系统,但是笔者在设计一套

蒸发循环系统时,是以制冷量为设计目标,因此笔者按这个指标进行对比。

表 2 相同制冷量下试验数据对比

Tab. 2 Comparison of test results on the same capacity

| 项目 | 单级 | 双级 | 变化率/% |
|-----------------------------|-------|-------|-------|
| 制冷量/kW | 5 000 | 5 000 | 0 |
| 转速/(r · min ⁻¹) | 6 718 | 4 143 | -38 |
| 排气温度/℃ | 97.5 | 69.6 | -29 |
| COP | 1.74 | 2.24 | 29 |

由对比结果显示,将一套单级压缩系统改进为准二级压缩系统后,达到同样的制冷量,压缩机转速可以下降 38%,排气温度下降 29%,系统 COP 值提高了 29%。

5 结 论

(1)准二级压缩蒸发循环制冷系统与单级压缩系统相比,可以在制冷功率不变的前提下,显著降低压缩机转速和排气温度,提高压缩机工作寿命和工作可靠性;

(2)准二级压缩蒸发循环制冷系统与单级压缩系统相比,能够在同功率下,大幅降低压缩机功耗,减少飞机环控系统的燃油消耗;

(3)准二级压缩蒸发循环制冷技术符合未来飞机环控系统的发展方向,应用前景非常广阔。

参考文献:

- [1] UENO F, FUKUHARA K. Refrigeration system with rotary compressor-has pair of expansion mechanisms with gas-liq-separator between them feeding gas to compressor injection port; U. S. 4344297[P]. 1982.
- [2] ABEL G R, WU M W, LAU K Y. Vapor injection system for e. g. heat pump system, has scroll com-

pressor that is in fluid communication with exchangers, where refrigerant exits flash tank via outlet and is delivered into vapor injection port of compressor; U. S. 7275385B2[P]. 2007.

- [3] 赵会霞,刘思光,马国远. 涡旋压缩机闪发器热泵系统的试验研究[J]. 太阳能学报,2006(4):377-381.
ZHAO Huixia, LIU Siguang, MA Guoyuan. Experimental study on heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2006(4):377-381.
- [4] 马国远,彦启森. 涡旋压缩机经济器系统的性能分析[J]. 制冷学报,2003(3):20-24.
MA Guoyuan, YAN Qisen. Analysis of the performance of scroll compressor using economizer system[J]. Journal of Refrigeration, 2003(3):20-24.
- [5] 唐华杰,吴兆林,周志钢. 涡旋式压缩机经济器系统的应用研究[J]. 流体机械,2007(9):55-58.
TAGN Huajie, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang. Application study of scroll compressor using economizer system[J]. Fluid Machinery, 2007(9):55-58.
- [6] 张科,吴兆林,周志钢. 涡旋压缩机经济器系统的数学模型研究与性能分析[J]. 低温与超导,2009(5):52-56.
ZHANG Ke, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang. Analysis of the performance and study of the mathematic model of scroll compressor using economizer system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009(5):52-56.
- [7] 张兴娟,张文,袁修干. 飞机蒸汽循环系统技术现状及展望[C]//全国环境控制学术交流会议论文集. 北京:中国航空学会,2002:123-126.
ZHANG Xingjuan, ZHANG Wen, YUAN Xiugan. Current status and perspective of system of helicopter using steam cycling technique[C]// National Academic Conference Colloquia on Environment Control. Beijing: CSAA, 2002:123-126.