高速电机驱动的逆升压式空气循环制冷系统研究

肖晓劲，袁修干，高　峰
(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京　100083)

摘　要：介绍了高速电机驱动技术在空气循环制冷系统中的 2 种主要应用形式——悬臂式和紧凑式方案，讨论了高速电机驱动的新型逆升压式空气循环制冷系统的工作原理，并对小功率高速电机驱动的逆升压式空气循环制冷系统进行了性能计算和试验研究。结果表明，该方案可提供 2.5 kW 等级的制冷量，是一种新型制冷系统。

关键词：高速电机；空气循环制冷系统；空气压缩机；逆升压式
中图分类号：TB61+4；TB6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-7086(2004)03-0163-05

RESEARCH ON REVERSE-BOOTSTRAP AIR CYCLE REFRIGERATION SYSTEM DRIVEN BY HIGH-SPEED MOTOR

XIAO Xiao-jing，YUAN Xiu-gan，GAO Feng
(**Scool of Aeronautic Science Engineering，Beijing University of Aeronautics and Astronautics，Beijing 100083，China**)

Abstract：Two applications of high-speed motor driving technique used in air cycle refrigeration system，which called cantilever and compact components was introduced. Working theories of the reverse-bootstrap systems that use those two components were discussed. Performance parameters of reverse-bootstrap air cycle refrigeration system driven by low power high-speed motor were calculated. Experimental investigations were made. The results show that the system can provide a refrigerating output up to 2.5 kW. It′s a promising refrigeration system.

Key words：high-speed motor；air cycle refrigeration system；air compressor；reverse-bootstrap

1　引　言

空气循环制冷系统(Air Cycle Refrigeration System)以空气作为制冷介质，根据热能转换为机械功的原理散走热量并提供制冷能力。与蒸发循环制冷系统相比，ACRS 在运行可靠性和可维护性等方面具有较大的优势，因此在许多领域得到应用。

许多应用场合要求 ACRS 采用开式方案，系统从高压气源引气，经过内部循环后，工质空气由系统出口排出，不再重复使用。显而易见，ACRS 的驱动力是系统入口与出口之间的空气压力差。这种工作方式不能充分利用气源的能量，还会造成不必要的附加损失。因此应尽量减少引气量，或采取其他措施降低对气源压力的要求，达到节约能量的目的。

对传统 ACRS 的性能分析可以发现，采取一定措施为 ACRS 中的空气循环机(Air Cycle Machine)输入能量，既可以降低 ACM 入口空气的压力，也可以增加 ACM 的制冷量，而高速电机(High-Speed Motor)正是一种适合在 ACM 中使用的有效的能量输入手段。它的结构简单，尺寸小，而且与 ACM 中的涡轮压气机组件同样采用高速旋转的运行方式，使得 HSM 很容易实现为 ACM 输入能量。因此，将高速电机驱动技术应用在传统 ACRS 中的设想应运而生[1]。

HSM 驱动的空气循环制冷系统(ACRS Driven by HSM)技术是一门新兴的环境控制技术。国外在 20 世纪 80 年代初期已经公布了这方面的方案研究报告。图 1 为采用该设计思想的德国 ICE 高速列车空气调

收稿日期：2004-05-08.
作者简介：肖晓劲(1974—)，男，江西省南昌市人，博士生，从事新型飞行器环境控制系统开发与研究。

节系统使用的 ADH 技术原理方案[2]。法国和俄罗斯等国的研究报告中均有类似的方案设计。该方案具有节能、可控性好等优点，更利于构成不同的空气/蒸发循环等方案，可提高系统性能系数，并改善控制性能[3]。HSM 具有良好的调速特性，在整个调节范围内都具有较高的效率。从实际运行的情况看，该系统与传统车载蒸发循环系统具有可比性。HSM 技术与传统工业技术的不断结合，正在产生越来越好的经济效益。目前仅有少数国家掌握了 HSM 生产及驱动技术，因此，国内开展 HSM 驱动技术的研究，将具有很高的价值。

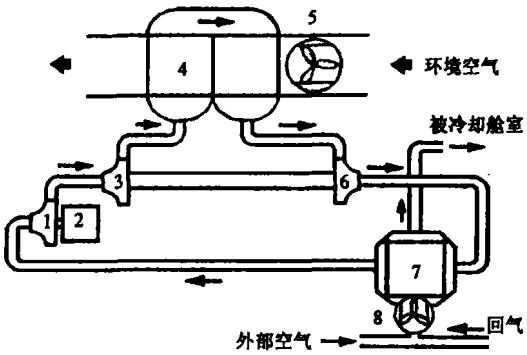

图 1 德国 ICE 列车空调系统示意图

1. 初级压气机；2. HSM；3. 次级压气机；4. 环散；5. 环境风扇；6. 涡轮；7. 换热器；8. 回气风扇。

作者结合国内在 ADH 技术方面的研究，详细阐述了 HSM 驱动技术在飞机电子设备吊舱逆升压式 ACRS 中的应用方案，并与传统方案进行了对比。结果表明，HSM 驱动的逆升压式 ACRS 可以提供更多的制冷量，能满足设计需要。

2 高速电机驱动的压气机组件

2.1 HSM 的选择

在电机的各种类型中，鼠笼式异步交流电机、无刷直流电机、开关磁阻电机等均适合于高速运转，然而高速电机主要采用异步交流电机[4]。异步交流电机又称为感应电机，它是交流电机的主要类型。它用交流电在电机定转子中产生正弦分布的合成磁场，进而带动转子旋转。特点是结构简单，运行可靠，出功能力强，控制方便。

2.2 HSM 的转速构成

异步 HSM 正常运行时，转子的实际转速 n 小于旋转磁场的同步转速 n_1。该特性用转差率 S 表示。

$$S=(n_1-n)/n \tag{1}$$

额定条件下运行时，S 约为 0.02～0.06。

2.3 悬臂式电动压气机

悬臂式电动压气机是 ADH 技术的基本应用形式。HSM 作为驱动力来源，直接带动同轴的压气机，产生满足系统工作要求的压缩空气。图 2 为悬臂式电动压气机结构示意图；图 3 为国内研制的小功率悬臂式电动压气机实物图。

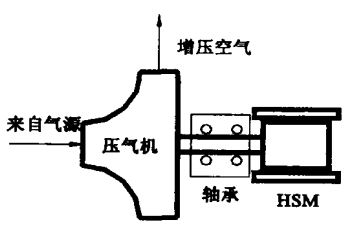

图 2 悬臂式电动压气机结构示意图

悬臂式电动压气机只能提供增压空气，它必须与传统 ACM 中的涡轮等制冷部件串联工作，才能提供制冷。整个流程中流量满足连续性要求，即$\Delta G=0$。悬臂式电动压气机匹配关系简单，调控方便，因此，可通过调节 HSM 转速等方法使压气机产生不同压力的增压空气。

图 3 悬臂式电动压气机实物图

2.4 紧凑式电动压气机组件

HSM 驱动技术在 ACRS 中的另一种可能的实现途径是紧凑式电动压气机组件，图 4 为其结构示意图。显然，紧凑式电动压气机组件的结构与图 2 所示的悬臂式电动压气机类似，只是在转轴上 HSM 的另一端增加了一套支撑轴承和涡轮部件。可见，紧凑式电动压气机组件可以看作是悬臂式电动压气机与传统 ACM 中涡轮-压气机组件组合而成的部件，二者工作原理类似，但是又有明显的区别。国内外已经开始了相关研究，但由于该方案存在较大的设计和制造困难，因此，目前尚处于方案设计阶段。

图 5 为国内研制的紧凑式电动压气机组件实物图。其工作原理为：在 HSM 和涡轮 T 的共同带动下，压气机 C 将来自气源的只有普通能量等级的空气压缩成为满足整个 ADH 组件工作要求的增压空气，而工质空气在涡轮中膨胀降温，形成制冷能力。

与悬臂式电动压气机相比,紧凑式电动压气机组件有以下设计特点。

(1) 该方案可减少 ACRS 部件数量,而且质量轻,结构紧凑,但是该方案也相应提高了单个部件的技术难度和制造成本,组件可靠性也有所下降。

(2) 涡轮与压气机之间基本上属于等压力比匹配,而且涡轮膨胀比 π_t 略小于压气机增压比 π_c。紧凑式电动压气机组件可以同时实现空气的增压和产生制冷能力的功能。

(3) 涡轮和 HSM 共同提供压气机所需的功率,故整个组件的功率平衡关系为 $N_c = \eta_m(N_t + N_{HSM})$,式中 η_m 为轴的传动机械效率。

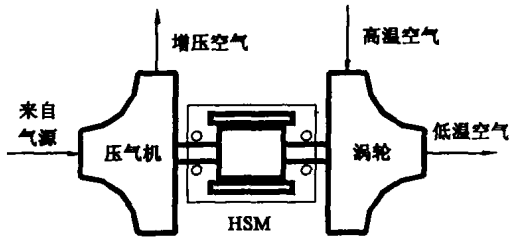

图 4　紧凑式电动压气机组件结构示意图

(4) 涡轮、HSM 和压气机同轴工作,转速相同,各部件的工作彼此制约,使得整个组件控制较为复杂。HSM 不工作时,整个组件形同传统 ACM 中的涡轮-压气机组件。当 HSM 工作时,由于 HSM 和涡轮的出功能力不同,因此,组件最终的转速取决于HSM与涡轮工作的匹配情况,实际转速位于HSM及涡轮单独驱动压气机工作时的 2 个转速范围之间。

图 5　紧凑式电动压气机组件实物图

值得注意的是,当涡轮带动压气机转动之后开启 HSM 时,由于 HSM 的转差率 S 很大,使得 HSM 处于发电状态,因此,启动电流过大。长期保持这种工作状态,对 HSM 的性能有很大影响,因此,HSM 通常需要安装过流保护装置。

3　高速电机驱动的逆升压式方案

根据热力循环中工质空气的压力变化过程,开式 ACRS 可以构成正升压式和逆升压式等循环方案。

在正升压式方案中,工质空气的工作压力始终高于环境大气,通过高压空气驱动 ACM 工作,并在涡轮出口处产生低温空气,形成制冷能力。图 1 所示方案属于正升压式循环。

而逆升压式方案的工质空气则在负压状态下运行,空气首先进入涡轮中膨胀降温,形成制冷能力,然后再由压气机加压排出。相比较而言,逆升压式系统无需环境散热器,减少了系统的体积和质量,而且如果气源温度不太高,空气经过涡轮的膨胀降温后直接可以作为制冷工质使用。因此逆升压式循环方案适合于在气源温度较低、系统体积质量受到严格限制的场合下使用。

根据 HSM 驱动压气机的 2 种不同的组件形式,可分别构成悬臂式和紧凑式电动压气机驱动的逆升压 ADH 方案,如图 6、图 7 所示。

不难看出,2 种系统流程具有类似的制冷原理和工作过程,整个系统都是由进口、出口空气的压力差和

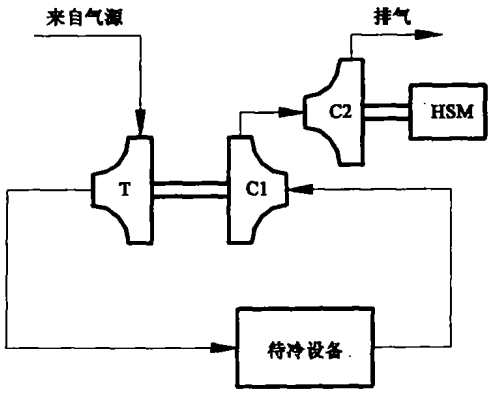

图 6　悬臂式逆升压系统流程示意图

T. 涡轮; C1. 压气机; C2. 电动压气机。

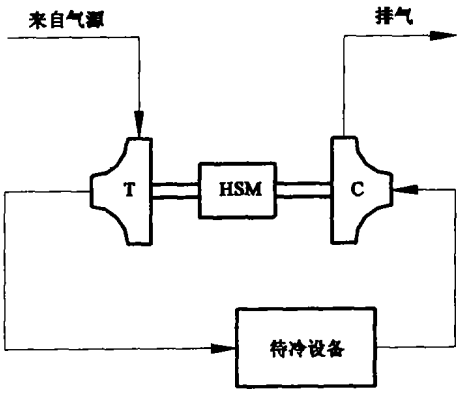

图 7　紧凑式逆升压系统流程示意图

T. 涡轮; C. 压气机。

HSM 共同驱动运转。图 7 中的压气机 C 可以看作是由图 6 中的压气机 C1、C2 合并而成。

2 种系统流程也有各自的特点，紧凑式逆升压 ADH 方案在系统体积和质量上具有优势，使其更加适用于那些对体积和质量有严格限制的应用领域。例如，飞机对于自身设备的体积和质量有苛刻的限制，传统的 ACRS 很大程度上影响了飞机的机动性和工作效能。因此，飞机环境控制系统(Environmental Control System)采用紧凑式电动压气机驱动方案就可以大大降低飞机耗油率，减小飞机发动机推力损失，更加有利于飞机热和能量的综合利用，符合未来飞机的设计思想，体现了先进飞机发展的要求。

根据图 7 系统，为某型号飞机电子设备吊舱设计制造了紧凑式逆升压 ACRS 试验样机，其核心部件就是图 5 所示的紧凑式电动压气机组件，它的功率传递模型如式(2)

$$\begin{cases} N_e = \sqrt{3}\,UI \\ N_{HSM} = \eta_{HSM} N_e \cos\varphi \\ N_c = G_c Cp(T_{c\text{-}ex} - T_{c\text{-}in}) \\ \pi_c = p_{c\text{-}ex} / p_{c\text{-}in} \\ N_{cs} = G_c C_p T_{c\text{-}in}(\pi_c^{(k-1)/k} - 1) \\ \eta_c = N_{cs} / N_c \\ N_t = G_t C_p (T_{t\text{-}in} - T_{t\text{-}ex}) \\ \pi_t = p_{t\text{-}in} / p_{t\text{-}ex} \\ N_{ts} = G_t C_p T_{t\text{-}in}(1 - \pi_t^{-(k-1)/k}) \\ \eta_t = N_t / N_{ts} \\ \eta_m = N_c / (N_{HSM} + N_t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 N 为功率；G 为空气流量；T 为空气绝对温度，p 为空气绝对压力；π 为增压比或膨胀比；U 为工作电压；I 为工作电流；$\cos\varphi$ 为 HSM 的功率因数；C_p 为空气定压比热容，k 为空气绝热指数。下标 e 为电源；in 为进口空气参数；ex 为出口空气参数；s 为绝热参数。

表 1 制冷包设计参数

飞行状态	总温/℃	总压/Pa	流量/(kg/s)
H=500 m，M=0.8	55	1.18×10^5	0.056

4 性能分析

作者参考某型号飞机电子设备吊舱 ECS 制冷包的设计条件，结合小功率等级 HSM 驱动的悬臂式电动压气机的试验研究结果，对悬臂式和紧凑式逆升压式 ACRS 进行了制冷性能估算，并与紧凑式方案样机的试验结果进行了比较。另外，根据紧凑式方案中 HSM 不工作时的状况，模拟计算了未采用 ADH 技术的传统逆升压式 ACRS 方案的制冷性能，以便进行方案对比。

表 1 列举了制冷包部分设计参数。为了便于比较，假设 HSM 使用机载电源，而且主要的制冷附件均为飞机 ACRS 传统附件，其性能参数计算模型详见文献[5,6]。匹配计算中，某些性能指标参考了某型号飞机 ECS 附件在模拟试验条件下的实测数据。计算结果与试验数据的对比见表 2 所列。从表 2 中可以看出：

表 2 计算结果与试验数据对比

物理量	紧凑式方案		悬臂式方案	传统方案
	试验数据	计算结果		
压气机增压比	1.31	1.43	1.23/1.13	1.11
涡轮膨胀比	1.64	1.74	1.70	1.32
电机输出功(kW)	0.63	1.28	1.22	0.00
制冷量(kW)	2.14	2.57	2.51	1.62

(1) 理论计算表明，悬臂式和紧凑式逆升压 ACRS 方案具有相近的制冷性能，电机耗功量相当。悬臂式方案中，两级压气机的总体增压效果与紧凑式方案单级压气机增压效果相同，即 $\pi_c = \pi_{c1} \times \pi_{c2}$，因此，悬臂式

方案有利于降低部件的制造难度。但从结构紧凑性方面考虑,紧凑式方案可以避免过多的连接管道,减少工质空气在流经管道和连结弯头处的压力损失,节省空间。因此,紧凑式方案应作为飞机电子设备吊舱 ECS 的首选方案。

(2) 试验数据和理论计算结果均说明,紧凑式逆升压 ACRS 方案可以满足飞机电子设备吊舱 2.5 kW 等级的制冷需求。试验样机外形尺寸不超过 ϕ250 mm×450 mm,质量小于 15 kg,均符合设计指标的要求,可以满足电子设备吊舱的实际安装需求。

(3) 计算表明,在相同的制冷包设计条件下,紧凑式逆升压 ACRS 方案的制冷量大于传统方案的制冷量(约提高 60%)。这是因为飞机电子设备吊舱 ECS 制冷包的设计空气流量小,而且冲压空气的压力不够高。在这种条件下工作的传统方案系统,其涡轮-压气机组件的转速较低。采用紧凑式电动压气机组件驱动方案后,由于 HSM 的能量输出,ACRS 组件中的涡轮-HSM-压气机轴系的转速将大于传统方案,所以涡轮的速比加大,温降也大于传统方案。试验结果也证明了这一点。

(4) 对于小流量的机载 ECS 制冷包,要实现较高的压气机增压比 π_c 和涡轮膨胀比 π_t,存在较大的技术困难。涡轮-压气机组件的转速会影响涡轮和压气机效率的发挥,进而影响涡轮功的输出和压气机吸收功。因此,小流量机载 ECS 制冷包的压气机和涡轮设计也十分关键。

(5) 试验样机的压气机增压比 π_c 和涡轮膨胀比 π_t,均比理论计算结果小。进一步的部件性能测试结果表明,产生以上现象的原因是压气机与涡轮和 HSM 的工作性能不完全匹配。设计工作状态下,压气机增压比 π_c 和流量 G_c 均小于设计指标的要求,压气机无法消耗掉涡轮和 HSM 所能提供的能量,导致涡轮和 HSM 均偏离设计状态工作,涡轮温降减小,涡轮功和电机输出功均下降,系统制冷量偏小。今后的工作应改进压气机性能,使其满足匹配工作的设计要求,保证系统性能的发挥。

5 结　论

高速电机驱动的空气循环制冷技术是一项新兴技术,它有利于构成不同的空气循环制冷方案,可以提高环境控制系统的可控性和节能效果。

紧凑式电动压气机驱动的逆升压式空气循环制冷系统具有体积小,质量轻等特点。目前已经开发的小功率等级高速电机驱动的逆升压式空气循环制冷系统可以满足飞机电子设备吊舱 2.5 kW 等级的制冷需求。随着传统制冷附件性能的提高,该系统所能提供的制冷量将进一步增加,应用前景更加广泛。

高速电机驱动技术在空气循环制冷系统中的广泛应用还有待于大功率高速电机制造及相关技术的突破。

参考文献:

[1] 肖晓劲,袁修干.高速电机驱动的空气循环制冷技术研究[J].中国安全科学学报,2004,14(1):80～83.

[2] ADOLPH U. Entwicklungsstand und tendenzen der klimatisierung von schienenfahrzengen[J]. Ki, Luft— und Kältetechnik, 1998,34(3):134～140.

[3] 袁修干.高性能军用机环境控制系统研究发展趋势的探讨[J].航空学报,1999,20(增刊):1～3.

[4] 李冰,邓智泉,严仰光.高速异步电机设计的关键技术[J].微特电机,2002,(6):7～10.

[5] 齐铭.制冷附件[M].北京:航空工业出版社,1992.

[6] 寿荣中,何慧珊.飞行器空气调节[M].北京:北京航空航天大学出版社,1990.