

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-213-05

变频直膨空调系统 变速运行下的系统稳定性实验研究

夏宇栋^{1,2} 林有彬² 朱春宇¹

(1. 中国矿业大学低碳能源与动力工程学院 徐州 221116;

2. 浙江创新汽车空调有限公司 龙泉 323799)

【摘要】 通过搭建变频直膨空调系统实验台, 分析了直膨空调系统在变压缩机转速及风机转速下系统的稳定性, 得到了兼顾系统稳定性特征的直膨空调系统运行特性图。研究结果显示, 直膨空调系统在高压压缩机转速及低风机转速情况下蒸发器过热度易发生振荡, 引起系统失稳。进一步分析系统在不同过热度设定下的稳定性得出, 可通过动态调整过热度设定的方式保证在不同变压缩机和风机转速下的稳定运行, 为开发适用于变频直膨空调系统智能高效的过热度控制算法提供借鉴。

【关键词】 直膨空调; 稳定性; 变频压缩机; 过热度

中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

An Experimental Study on the Operational Stability of an Inverter-Based Direct Expansion Air Conditioning System under Variable Speed Operation

Xia Yudong^{1,2} Lin Youbin² Zhu Chunyu¹

(1.China University of Mining and Technology, Xuzhou, 221116;

2.Zhejiang Chuangxin Auto Air-Conditioner Co., Ltd, Longquan, 323799)

【Abstract】 An experimental study on the operational stability of a direct expansion air conditioning system under variable speed operation is reported in this paper. The operational stability as varying both compressor and fan speeds was examined. Results showed that increasing the compressor or lowering the fan speed would cause the fluctuation of superheat, and thus leading to the system instability. A larger superheat setting was required to ensure a stable operation when the system was operated at a high compressor speed or lower fan speed. Through varying the superheat setting automatically, the operational stability of a direct expansion air conditioning system could be ensured when it was variable speed operated.

【Keywords】 Direct expansion air conditioning system; Operational stability; Variable speed compressor; Degree of superheat

0 引言

直膨式空调系统, 即制冷剂在蒸发器内直接蒸发实现对蒸发器盘管外空气的降温与除湿, 如常用的分体机和多联机就是典型的直膨空调系统。相比于采用二次媒介的中央空调机组, 直膨式空调系统因其安装灵活、低运行维护成本被广泛应用于中小型办公或居住建筑。

目前, 维持室内环境温度稳定是直膨空调控制的主要目标, 系统节能运行优化主要通过改变室内温度设定值, 以牺牲室内人体热舒适度为代价。另一方面, 湿度亦是影响室内热舒适和空气品质的重要因素之一^[1], 实现室内温湿度同时控制不仅能改善室内人体热舒适, 还能通过显热及潜热冷量与室内热湿负荷的精确匹配, 减少过渡过程的态损

作者(通讯作者)简介: 夏宇栋(1988.8-), 男, 博士后, E-mail: ydxia@hdu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-09

耗, 有效提高系统运行效率。事实上, 直膨空调系统蒸发器同时伴随着降温 and 除湿过程, 可以通过改变压缩机转速和送风风机转速来调节系统降温除湿能力, 从而实现温度和湿度的同时控制^[2]。直膨空调系统运行特性可表现为不同压缩机和风机转速组合下系统输出总冷量 (Total Cooling Capacity, TCC) 和热湿比 (Equipment Sensible Heat Ratio, E SHR) 的输出特性, 即系统输出显热及潜热的能力特性^[3]。为了实现室内温湿度的控制需要了解直膨空调的这一运行特性。相关研究显示^[4,5], 受限于压缩机转速及风机转速, 直膨系统降温除湿能力被限制在一个矩形的数据平面内, 若室内热湿负荷落在该数据平面内, 则可通过控制压缩机转速和风机转速实现室内温湿度控制。

另一方面, 从原理上讲, 直膨式空调系统是一种基于压缩式制冷循环的制冷系统。在压缩式制冷系统中, 过热度控制是制冷系统控制的核心环节之一, 直接影响系统的可靠性和运行效率。过热度控制的目的一方面是为了保证制冷剂在蒸发器内完全蒸发, 最大限度地利用蒸发器所能提供的换热面积; 另一方面, 也是为了维持蒸发器出口一定过热度, 防止回气带液而损坏压缩机。但是, 在制冷系统实际运行中, 过热度控制回路经常会出现失稳现象, 导致系统运行的不稳定。压缩式制冷系统不稳定, 或者称为振荡 (hunting), 是指由过热度控制失稳引起的诸如制冷剂流量、蒸发压力、压缩机吸气温度等一系列制冷系统主要运行参数发生周期性振荡的现象。制冷系统运行不稳定会导致系统回气带液引起压缩机液击, 也会导致膨胀阀反复开闭, 造成阀体疲劳破坏, 最终影响制冷系统的运行可靠性^[6,7]。不仅如此, 由过热度控制失稳引起的吸气压力和吸气温度的振荡还会造成压缩机能耗的增加, 影响制冷系统的运行效率^[6-8]。有研究表明, 制冷系统不稳定运行 EER 较系统稳定运行时下降约 6.4%^[9]。因此保证制冷系统稳定运行是系统配置和控制的必要条件。

在制冷系统稳定性研究中的最小稳定过热度 (MSS) 由 Hulle^[10]提出。当蒸发器出口过热度逐渐下降时, 蒸发器内两相流蒸干点向蒸发器出口漂移。两相流的不稳定特性会引起蒸干点振荡^[11], 诱发出温度的波动, 最终导致过热度控制回路失稳。制冷系统在一定的热负荷下存在一个维持系统

稳定的最小过热度。最小稳定过热度受蒸发器热负荷影响, 随热负荷增大而增加。对某一制冷系统, 若过热度小于当前负荷下的最小稳定过热度, 系统将处于不稳定区, 主要运行参数出现振荡。

直膨式空调系统运行过程中需要同时处理显热 (降温) 及潜热 (除湿) 负荷, 不同显热及潜热负荷直接影响蒸发器内部两相流沸腾传热特性。另一方面, 随着变频技术的普及, 直膨式空调系统压缩机转速和送风风机转速均可根据室内热湿环境进行调节, 提高系统在部分负荷下运行效率和室内热舒适的同时也给过热度控制提出了更高的要求。因此, 需要进一步研究系统在变压缩机、风机转速以及不同过热度下系统的运行稳定性, 以求开发系统智能控制算法实现室内温湿度控制的同时保证系统稳定高效运行。

1 直膨式空调实验系统搭建

为了研究直膨空调系统在变压缩机、风机转速以及不同过热度下系统的运行稳定性, 搭建了如图 1 所示的实验平台 (实验系统实物图见图 2)。

如图 1 所示, 该实验平台主要由制冷剂侧和空气侧两部分组成。制冷剂侧的制冷机组主要由变速压缩机、电子膨胀阀、管翅式蒸发器以及冷凝器组成。其中, 蒸发器作为直膨式风冷盘管, 被放置在供风管道内。蒸发器采用管翅式, 其迎风面尺寸为 450mm×504mm。压缩机理论排气量为 22mL/rec, 额定功率 2.2kW, 变频范围 10~110Hz。制冷系统额定制冷量为 7.5kW, 采用总充注量为 5.8kg 的 R410A 作为工质。

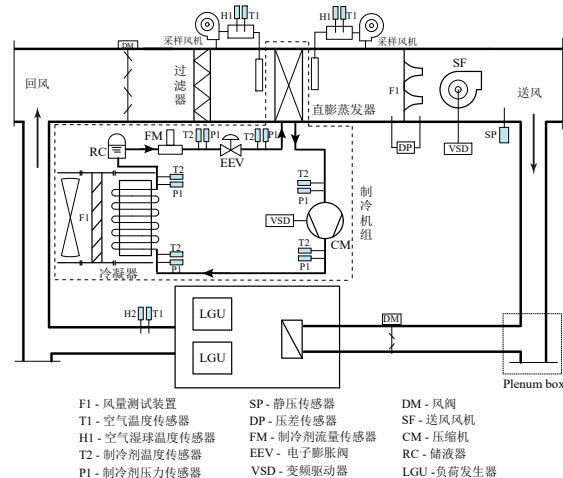


图 1 直膨空调实验系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

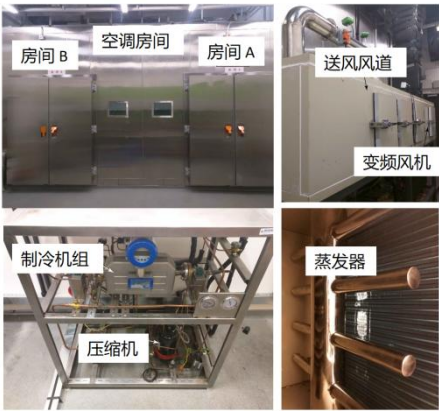


图 2 实验系统实物图

Fig.2 Physical image of experimental system

在空气侧,由送风管道和空调房间构成了一个空气循环系统。空调房间由两个 3.2m(长)×3.7m(宽)×3.3m(高)的空间构成,每个空调房间都有一个用来模拟房间内冷负荷的热湿负荷发生器(LGUs)。送风风机由变频器驱动,额定转速 2900rpm,最大送风风量 1300m³/h。

在制冷剂和空气侧均安装有高精度传感器用于检测温度、湿度、流量等系统运行参数。另外,风道内安装有标准喷嘴和压差传感器构成的风量测试装置。系统所使用传感器精度如表 1 所示。

所有传感器检测的数据通过数据采集仪上传到上位机。上位机安装有一套基于 Labview 的数据采集和控制软件,用于记录、存储采集到的系统运行数据,同时给出控制压缩机、风机等执行器的控制信号。

表 1 所用传感器及其测试精度

Table 1 Sensors and their measuring uncertainties

参数	测试精度	单位
空气干球温度	±0.1 (PT100 温度传感器)	℃
空气湿球温度:	±0.1 (PT100 温度传感器)	℃
空气静压差:	±0.1% (空气静压传感器)	Pa
空气流量	±1.2% (喷嘴+压差传感器)	m³/s
制冷剂质量流量	±0.25%(质量流量计)	kg/min
制冷剂温度	±0.1 (PT100 温度传感器)	℃
制冷剂压力	±0.2% (压力传感器)	bar

2 变频直膨空调系统的运行稳定性

直膨空调系统运行稳定性受压缩机转速、风机转速及过热度影响,因此为了分析不同运行条件下

系统的失稳特性,设置了如表 2 所示的不同压缩机和风机转速组合进行稳定性实验。考虑到压缩机运行安全性,将转速范围设定为 30~90Hz(0~100%),选取了转速比为 40%、50%、60%、70%和 80%作为压缩机转速。同时,风机转速选取了其运行范围 0~60Hz(0~100%)内的 50~100%,合计 6 个风机转速。因此,合计共有 5×6=30 个压缩机和风机转速的组合。

同时考虑制冷系统实际运行情况,在每组压缩机和风机转速组合下又根据稳定性研究中常用的过热度设定范围^[12],将过热度设置为 4℃、6℃和 8℃三种工况。因此,实验一共包括 30×3=90 个工况点。在实验中,若过热度振荡幅度超过±0.5℃,即将该工况定义为失稳工况^[12]。

表 2 不同压缩机及风机转速组合

Table 2 Combinations of compressor speed and fan speed

	占最大转速比/%	频率/Hz	风量/(m³/h)
压缩机转速	40	54	
	50	60	
	60	66	—
	70	72	
	80	78	
送风机转速	50	30	580
	60	36	705
	70	42	832
	80	48	960
	90	54	1080
	100	60	1200

注: 5 个压缩机转速及 6 个风机转速, 合计 5×6=30 个压缩机和风机转速的组合。

2.1 不同压缩机转速下系统稳定性

为了分析压缩机转速对过系统稳定性影响,首先将直膨空调实验系统控制在某一稳定工况点,待系统稳定后改变压缩机转速,记录系统过热度变化以此判断系统是否失稳。

图 3 为风机转速为最大转速 50%(30Hz)情况下,改变压缩机转速下系统过热度的响应过程。从图中可以看出,当压缩机转速为最大转速 50%(60Hz),过热度可以稳定控制在 8℃。当压缩机转速从 50%提高到 80%后,系统过热度开始振荡,且无法恢复稳定,其振荡幅度达到±2℃,此时系统失稳。若系统长时间运行在失稳状态,过热度的振

荡势必会导致电子膨胀阀的频繁动作,诱发系统回气带液,进而影响系统可靠性。

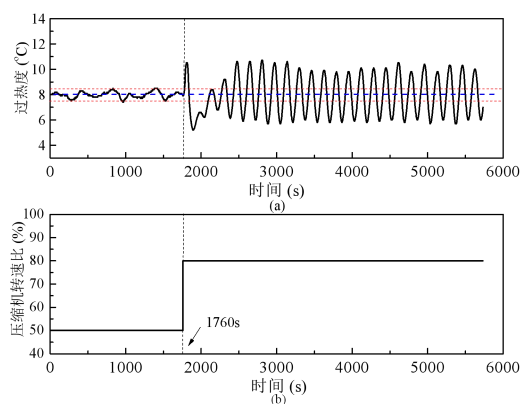


图3 增大压缩机转速对过系统热度的影响

Fig.3 Variation in superheat as increasing the compressor speed

由制冷系统运行特性可知,压缩机转速的增加会提高系统输出制冷量同时提升系统除湿能力。因此,对于变频直膨系统,当室内湿负荷较高时,系统会运行在高压压缩机转速,诱发可能的系统失稳。这是因为,提高压缩机转速后,蒸发器内部两相流蒸干点会向蒸发器出口漂移^[13]。压缩机转速越高,蒸干点越靠近蒸发器出口。由于两相流振荡特性,蒸发器出口温度也会波动,最终造成过热度控制回路失稳,过热度发生周期性振荡。

2.2 不同风机转速下系统稳定性

同时,通过固定压缩机转速,改变风机转速亦可分析风机转速对系统稳定性的影响。

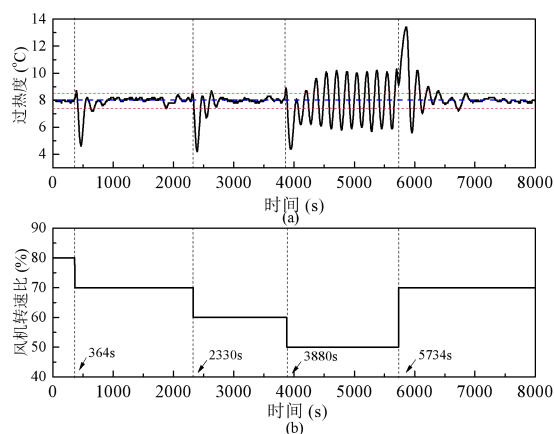


图4 改变风机转速对系统过热度的影响

Fig.3 Variation in superheat as changing the compressor speed

图4为压缩机转速固定在最大转速的80%

(78Hz)下,改变送风风机转速对系统过热度的影响过程。从图中可以看出,当风机转速在其最大转速的80%(48Hz)、70%(42Hz)和60%(36Hz)时,其系统过热度可以稳定在8°C。当风机转速减小到50%后,过热度开始振荡,且振荡幅度达到 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,系统失稳。当风机转速再一次增加到70%后,过热度又可维持在8°C,系统再一次进入稳定。

对于直膨空调系统,风机转速下降,其蒸发器温度也会降低,因此系统可以输出较高的除湿能力。同样说明,当直膨空调系统需要处理较高潜热而维持在较低风机转速时系统更易失稳。

2.3 不同过热度设定下系统稳定性

根据经典的最小稳定过热度(MSS)理论^[10],制冷系统在较小的蒸发器过热度下系统更易失稳。因此,进一步实验研究了直膨空调系统在不同蒸发器过热度下系统的稳定性。

图5为压缩机转速和风机转速分别在其最大转速80%和60%,不同过热度设定下的系统稳定性。从图中可以看出,系统过热度可以在8°C时维持稳定,当过热度设定下降到6°C后,过热度开始振荡且振荡幅度超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,系统失稳。但当过热度设定再次调整到8°C后,过热度可重新稳定到设定值。实验结果符合最小稳定过热度理论。

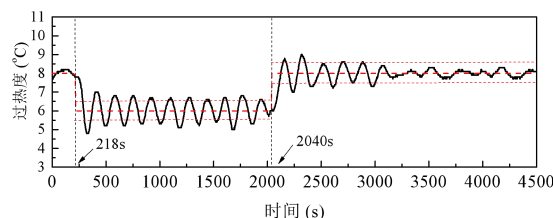


图5 系统在不同过热度设定下的过热度变化

Fig.5 Variation in superheat as changing its setting

当蒸发器过热度下降时,其内部两相流蒸干点向蒸发器出口漂移。而由于两相流动特性,其蒸干点会发生随机振荡,最终引起蒸发器出口温度波动,诱发系统失稳。

2.4 考虑运行稳定性的直膨空调运行特性

根据上述分析,直膨空调系统在较高的压缩机转速,或者较低风机转速下易发生过热度振荡,引起系统失稳。经过实验,得到了由表2所示的不同压缩机和风机转速合计30组工况下的系统稳定性,最终绘制成如图6所示的直膨空调系统运行特性数据平面图。

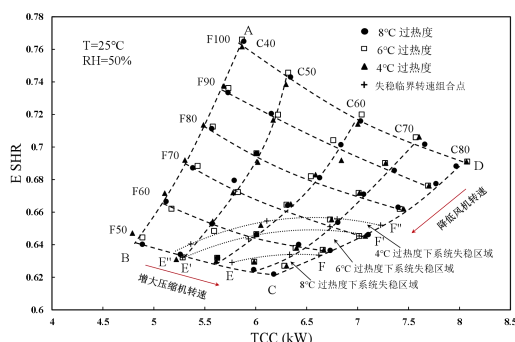


图6 考虑系统运行稳定性的直膨空调运行特性图

Fig.6 Operational characteristics of the DX A/C system considering its operational stability

从图6中可以看出,直膨系统降温除湿能力被限制在一个矩形的数据平面ABCD内,提高压缩机转速能提升系统输出总冷量并增强除湿能力,即获得较高的TCC和较低E SHR,而提高风机转速虽能提升系统输出冷量但不利于系统除湿,即输出较高的TCC和较高的E SHR。同时,增大压缩机转速或者降低风机转速均容易诱发系统失稳,因此系统不稳定区域集中在矩形平面的底部区域。另一方面,随着过热度设定的增加,系统失稳区域由ECF增大到E"CF",即有更多失稳工况点。因此,直膨空调在高压压缩机转速低风机转速下的系统稳定性可以通过增大过热度设定实现,给设计有效的过热度控制算法提供了借鉴。

3 结论

本文实验分析了直膨空调系统在变压缩机及风机转速下的系统稳定性,得到了综合系统运行稳定性的直膨空调运行特性图,给设计系统控制器提供了借鉴。本文主要研究结论如下:

(1) 变频直膨空调系统在高压压缩机转速或者低风机转速运行时,即系统需要输出较低E SHR来处理较高湿负荷的情况下,过热度易发生振荡,引起系统失稳;

(2) 减小蒸发器过热度设定亦会导致过热度振荡,引起直膨空调系统失稳。可以通过动态调整过热度设定的方式保证系统在高压压缩机转速低风机转速下的系统稳定性;

(3) 针对直膨空调系统运行特性图,表征失稳的区域集中在平面图的底部,即较低E SHR处。因此,在直膨系统实际运行中为了保证稳定性需要

避免其长期运行在此区域。

参考文献:

- [1] FANGER P O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [2] 李钊,崔凌闯,陈剑波.基于稳态ANN模型和模糊PD控制的变频直膨式空调系统温湿度同时控制方法[J].制冷学报,2018,39(3):85-91.
- [3] 李钊,邓仕明.变频直膨式空调系统运行特性的稳态ANN模型[J].制冷学报,2017,38(1):54-60.
- [4] LI Z, XU X, DENG S, et al. Further study on the inherent operating characteristics of a variable speed direct expansion air conditioning system [J]. Applied Thermal Engineering, 2014,66(1-2):206-215.
- [5] XU X G, XIA L A, CHAN M Y, et al. Inherent correlation between the total output cooling capacity and equipment sensible heat ratio of a direct expansion air conditioning system under variable-speed operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(13):1601-1607.
- [6] MITHRATNE P, WIJEYSUNDERA N E. An experimental and numerical study of hunting in thermostatic-expansion-valve-controlled evaporators [J]. International Journal of Refrigeration, 2002,25(7):992-998.
- [7] LIANG N, SHAO S Q, XU H B, et al. Instability of refrigeration system - A review [J]. Energy Conversion and Management, 2010,51(11):2169-2178.
- [8] XIA Y, YAN H, DENG S, et al. A new capacity controller for a direct expansion air conditioning system for operational safety and efficiency [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2018,39(1):21-37.
- [9] QI Q, DENG S, XU X, et al. Improving degree of superheat control in a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) system [J]. International Journal of Refrigeration, 2010,33(1):125-134.
- [10] HUELLE Z. MSS line - a new approach to hunting problem [J]. ASHRAE JOURNAL, 1972,14(10):43-46.
- [11] 虞中昉,陶乐仁,王超,等.变制冷剂流量制冷系统过热度振荡机理实验研究[J].制冷学报,2017,38(1):100-106, 112.

(下转第267页)