

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.019

小型制冷压缩机性能测试系统中 蒸发温度控制方法实现

冯春松, 顾江萍, 徐 鸣*, 黄跃进
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 小型制冷压缩机性能测试系统中蒸发温度的传统控制方式存在精度低和温度波动大等问题,而蒸发温度控制的精度又直接关系到制冷量的测量精度。为了实现对被测压缩机制冷量的测量精度,需实现蒸发温度的精确控制。通过对蒸发温度控制原理的了解,选取蒸发温度对应的饱和吸气压力为被控对象,以标准工况为目标,设计了蒸发温度控制的硬件平台和脉冲输出控制器,编写了相应控制程序;结合经典PID控制策略,设计与下位机之间的通信协议,通过软件实现计算机对蒸发温度实时控制;通过实验论证,得出了合理系统响应时间和理想的控制参数。研究表明,蒸发温度的PID控制,实现了对膨胀阀的自动调节,系统控制精度明显提高,响应快,使蒸发温度的控制更加精确和稳定。

关键词: 压缩机;温度控制;制冷;蒸发温度;PID

中图分类号: TB657; TH39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0596-04

Control method of evaporation temperature in small refrigeration compressor of performance test system

FENG Chun-song, GU Jiang-ping, XU Ming, HUANG Yue-jin

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Traditional control method of the evaporation temperature is poor accurate and the temperature has large fluctuations in the small refrigeration compressor of the performance test system. The control of the evaporation temperature is controlled accurately or not which is directly related to the measurement accuracy of the cooling capacity. In order to accurately measure the cooling capacity, the evaporation temperature needs to be controlled accurately. In the experiment, the suction pressure corresponding evaporation temperature was selected as the controlled object and was based on the target's condition, with the understanding of the principles of control for evaporation temperature; the hardware platform and the pulse generator was built and controller and the corresponding control program are designed for it; the control of the PID control was selected as the control strategy, communication protocols were designed, so the evaporation temperature can be controlled by the software of the computer in time; the reasonable response time and the ideal control parameters can be drawn by experiment. The results indicate that the PID control of the evaporation temperature which can achieve the automatic adjustment of the expansion valve, can improve the control accuracy of the system and the control of the evaporator temperature can be more precise and stable.

Key words: compressor; temperature control; refrigeration; evaporation temperature; PID

0 引言

随着国民经济的进一步发展和人民生活水平的逐步提高,需要冷冻、冷藏、保鲜、调温的场合越来

越多,这就使制冷设备的应用更加广泛,其地位也更加重要^[1]。小型制冷压缩机在投入市场之前,需要对压缩机的制冷量和功率等指标进行检测,以保证生产的压缩机符合国家的有关技术标准。而国家标

收稿日期: 2012-11-13

作者简介: 冯春松(1987-),男,浙江宁海人,主要从事机电一体化、冰箱制冷系统测试与控制等方面的研究。E-mail: a568185648@163.com

通信联系人: 徐 鸣,男,助理研究员,博士。E-mail: photoman2004@126.com

准对测试标准工况作了严格规定^[2],其中蒸发温度控制精确与否,关系着制冷压缩机的性能测试准确性。由于蒸发温度不能直接控制,根据美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)中吸气饱和压力与蒸发温度的一一对应关系,在实际控制中选取吸气压力作为被控对象即可,而吸气压力通过膨胀阀的开度来调节。

文献[3]研究了在压缩机测试系统工况控制中,运用概率控制技术使被控系统有了很高的动静态特性。文献[4]介绍了蒸发温度控制方式有传统手动控制、全仪表独立控制、计算机智能控制系统等手段,其中以计算机智能控制系统最为先进。文献[5]研究了运用电子膨胀阀进行性能测试,实现了对蒸发温度很好控制。文献[6]研究了以Delphi为编程软件实现对制冷压缩机工况控制,分析了该测试台的工作原理和硬件设计。

本研究参考以上文献介绍的研究实验方法,以蒸发温度对应饱和吸气压力为被控对象,结合经典的PID^[7]控制,从吸气压力与蒸发温度的对应关系角度来分析蒸发温度变化特性,为蒸发温度的控制策略研究提供一定参考。

1 蒸发温度控制原理

节流装置是制冷系统中重要的部件之一,该系统节流阀采用改装的膨胀阀。采用步进电机通过电机转盘带动膨胀阀调节制冷剂流量,从而控制吸气压力,进而控制蒸发温度。根据性能测试运行试验要求,工业控制计算机通过控制步进电机来调节制冷系统膨胀阀的开口大小。蒸发温度控制系统总体框图主要由工控机、通讯模块、脉冲输出控制器、步进电机、膨胀阀等模块构成,其控制原理图如图1所示。

工控机根据系统控制要求,通过485总线将需要转动角度和速度以串口通讯的方式发送给脉冲输出控制器。脉冲输出控制器产生脉冲(脉冲频率和脉冲数)给驱动器,驱动器驱动步进电机,从而实现膨胀阀调节。限位开关起到保护膨胀阀的作用,控制步进电机行程,以免破坏膨胀阀。

2 蒸发温度控制方法实现

2.1 蒸发温度的比例控制

测试系统的蒸发温度是通过膨胀阀来调节吸气压力来控制^[8],而吸气压力则是由步进电机带动膨胀阀来

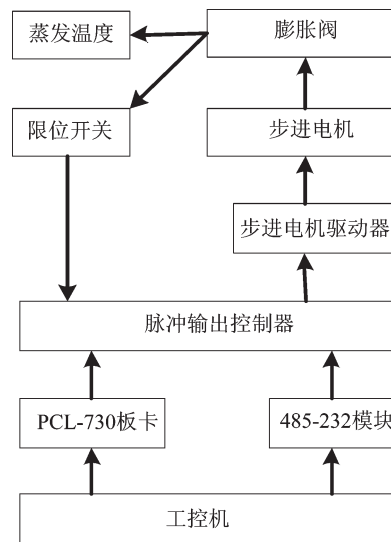


图1 蒸发温度控制原理图

调节。由于系统具有大惯性的特性,本研究选择PID控制中的比例P控制算法,而PID控制系统表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: K_p —比例系数; K_i —积分时间常数; $K_i = K_p / T_i$; T_d —微分时间常数。

在计算机控制系统中使用的是数字PID控制器^[9]。该系统采用的是增量式PID控制算法。由于计算机控制系统是一种采样控制,它只能根据采样时刻的偏差计算控制量,因此,本研究对上式中的积分和微分项需要进行离散化处理,得到离散的表达式为:

$$u(t) = (K_p \cdot iError + K_i \cdot SumError + K_d \cdot dError) \quad (2)$$

$$iError = (P_0 - P) \quad (3)$$

$$SumError = +iError \quad (4)$$

$$dError = iError - LastError \quad (5)$$

$$LastError = iError \quad (6)$$

$$u(t) = K_p \cdot iError \quad (7)$$

式中: P_0 —目标压力值; P —当前采样压力值; $iError$ —压力偏差; $SumError$ —积分是偏差之和; $dError$ —上一次偏差 $LastError$ 与当前偏差 $iError$ 相减; $LastError$ —上一次偏差。

一般计算机控制系统均采用固定不变的采样周期 T 的条件下,一旦确定了 K_p 、 K_i 、 K_d 的值,只要使用当前时刻及上次时刻的2次测量值,就可以由上式(2)算出控制增量 $u(t)$ 。

在实际控制中,本研究选择了PID的比例 K_p 控制,即可得到式(7)。实际系统由于蒸发温度的测点难以掌握,国标允许用其饱和压力对应,其控制原理图如

图2所示。以其饱和吸气压力控制其温度,在测试过程中设置一个压力反馈环节。制冷系统每过一定的采样周期去采样一次压力值,得到当前压力值并与目标压力值相比较,以计算出压力偏差,软件根据偏差大小来调节膨胀阀开度大小。

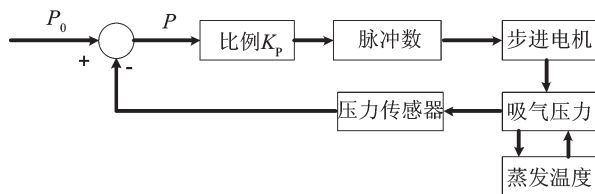


图2 比例控制系统原理框图

2.2 控制器参数确定

在实验中本研究采用经验法^[10],通过大量数据比较以后,并不断调整 K_p 的值,使其与系统特性相匹配,取得最佳的控制效果,最终可得出一个比较理想的 K_p 值,使蒸发温度控制更加精确和稳定,

实验中选用被测压缩机所用的制冷剂为R600a,以标准规定测试工况为例,需要控制的蒸发温度为 $(-23.3 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 。步进电机控制的是被测压缩机的吸气压力,通过查询NIST表中蒸发温度对应该制冷剂饱和吸气压力。该温度点对应的吸气压力为0.062 43 MPa,则上式(7)可写为:

$$u(t) = K_p \cdot (0.062\,43 - P) \quad (8)$$

由于测试系统工况的稳定需要一定的时间,系统有很大滞后性,结合被测系统特性,经过实验论证,本研究选用1 min作为压力控制时间,得到的控制效果比较理想。系统每过1 min会比较当前的压力值与目标压力,得到一个压力差值 ΔP 。系统软件根据压力差得乘以相应的系数 K_p ,转化为控制量,通过通讯方式发送给脉冲板,脉冲板根据脉冲数产生相应频率和方向,发送给驱动器,进而控制步进电机转过相应的角度。

3 脉冲输出控制器设计

驱动步进电机工作的驱动器需要有一个脉冲信号发生器,接收系统发送过来的控制量并转化为脉冲信号。为了实现上述功能,本研究设计了脉冲发生控制器,其原理框图如图3所示。脉冲输出控制器硬件电路^[11]主要由输入/输出模块、电源模块、下载模块、通讯模块等构成。

为了实现脉冲输出控制器与工控机之间的通讯,本研究设计了工控机与脉冲输出控制器之间的通讯协议,并用于传递控制量的参数。工控机通过RS485总线以通讯发指令控制步进电机。

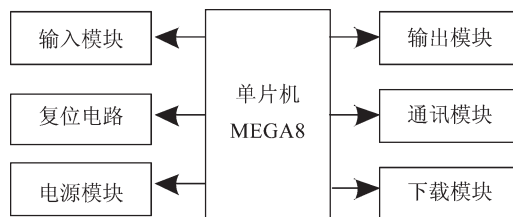


图3 脉冲输出控制器原理框图

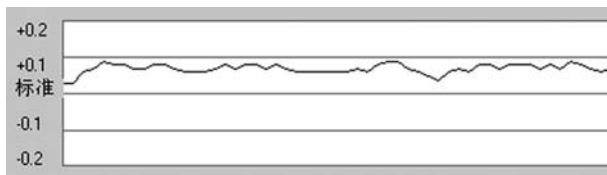
协议为: $s+add+data+bcc+n$ 。

具体解析为:文头 s +地址+启/停(A1/C1:电机1)+转数+脉冲数+脉冲频率+启/停(A2/C2:电机2)+转数+脉冲数+脉冲频率(2字节)+校验+报尾(n)。

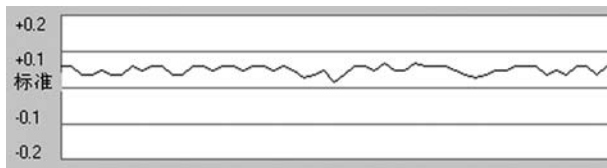
工控机通过串口通信发送控制量给脉冲输出控制器,包括电机正反转、电机转数、脉冲数、频率等参数。脉冲板接受这些数据后,首先进行校验,然后逐步分解数据得到电机控制参数,再发送步进电机驱动器,驱动步进转动。

4 试验结果分析

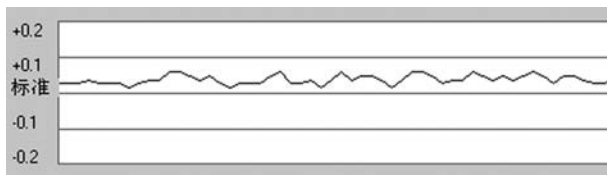
本研究调整不同 K_p ,会得到不同效果的蒸发温度控制图,如图4所示。该试验要控制的标准蒸发温度为 -23.3°C 。为了便于观察效果,本研究在标准线的基础上,上、下各画出两条直线,用于显示曲线波动为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 偏差线,以下得到的曲线都为10分钟曲线图。



(a) 取 $K_p=30\,000$ 的蒸发温度曲线图



(b) 取 $K_p=29\,000$ 的蒸发温度曲线图



(c) 取 $K_p=28\,000$ 的蒸发温度曲线图

图4 取不同 K_p 的蒸发温度曲线图

如图4所示,当取 $K_p=30\,000$ 时,蒸发温度曲线稍

微波动有点大,已经快接近 $+0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,虽然也在规定标准工况(23.3 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 内;

但当取 $K_p=29\ 000$ 时,相对于 $K_p=30\ 000$ 时曲线波动好了一点,曲线整体有下移的趋势,波动更小,但是离标准工况规定温度 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 还有一点偏差,不过基本上可以保持在 $(-23.3\pm 0.05)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,控制效果更好了一点;

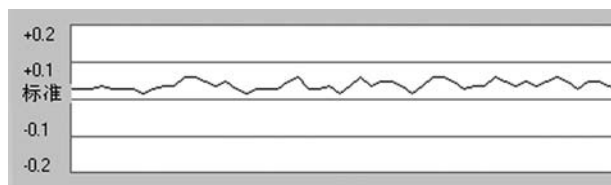
不过当 $K_p=28\ 000$,相对于取 $K_p=29\ 000$ 时,控制效果就比较好很多,波动更小。

综上,基本上在标准控制温度 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线上 $\pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内变化,曲线的超调量已经很小,已经达到控制理想效果。

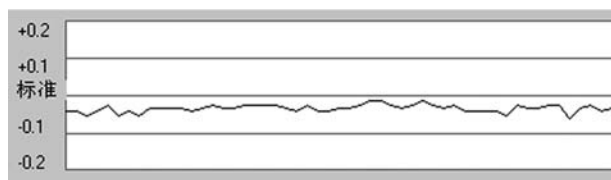
$K_p<28\ 000$ 的蒸发温度曲线图如图5所示。取 $K_p=27\ 000$ 时,相对于图4中取 $K_p=29\ 000$ 效果就好一点,但相对于图4中取 $K_p=28\ 000$ 时控制效果比较差一点,波动稍微有点大,基本上在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内波动。

当取 $K_p=26\ 000$ 时,相对于取 $K_p=27\ 000$ 时控制效果就好了一点,基本上在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内波动,所以 K_p 不能越调越小。

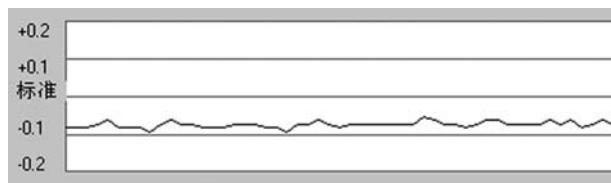
如果 K_p 再取小,取 $K_p=25\ 000$ 时,相对于取 $K_p=26\ 000$ 时效果就差很多,曲线明显下滑,接近 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 偏差线。若系数 K_p 再取小,曲线波动会超过 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此, K_p 不能无限取小。



(a) 取 $K_p=27\ 000$ 的蒸发温度曲线图



(b) 取 $K_p=26\ 000$ 的蒸发温度曲线图



(c) 取 $K_p=25\ 000$ 的蒸发温度曲线图

图5 取 $K_p<28\ 000$ 时的蒸发温度曲线图

通过蒸发温度曲线图可以发现,如果 K_p 系数取得太低,蒸发温度会下滑,低于标准温度值($-23.3\sim -0.2$) $^{\circ}\text{C}$ 导致控制失策。如果 K_p 系数调的太大也会使曲线往上升,超过 $(-23.3\pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致控制效果不佳。如图4所示,经过多次实验数据,最终调出一个比较满意的

$K_p=28\ 000$,使蒸发温度控制相对于比较精确和稳定。如图5取 $K_p=28\ 000$ 时所示,蒸发温度基本上 $-23.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下没有超出标准规定的标准值,已经达到很好的控制精度和效果。

5 结束语

本研究主要研究小型制冷压缩机制冷量测试中蒸发温度控制实现。为了准确测试小型制冷压缩机制冷量,而制冷量的测试与蒸发温度有关,必须要在标准工况内。为了实现蒸发温度的精确和稳定控制,本研究介绍了蒸发温度控制原理,蒸发温度的PID控制以及如何确定其控制参数,搭建了蒸发温度控制的硬件平台,设计了脉冲输出控制器,编写相应的控制程序。

笔者通过大量实验,最终得到一个比较好的 K_p 系数,达到了对蒸发温度的理想控制效果。

参考文献(References):

- [1] 吴晓杰. 变频冰箱系统动态特性及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2011: 13-23.
- [2] 中国国家标准管理委员会. GT5773-2004 容积式制冷剂压缩机性能试验方法[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2004.
- [3] 沈 希, 黄跃进, 鲍雨梅, 等. 压缩机测试系统工况控制策略的研究[J]. 压缩机技术, 2004(5): 3-6.
- [4] 沈 希. 制冷压缩机制冷量测控系统的若干理论问题与实践[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006: 1-22.
- [5] 林钧斌, 虞海峰. 电子膨胀阀流量特性试验台的研制 [J]. 机械制造, 2010, 49(10): 57-59.
- [6] 金华强, 沈 希, 黄跃进, 等. 基于Delphi的全智能多工况压缩机性能测试台的软件设计[J]. 压缩机技术, 2008(3): 4-6.
- [7] 林钟慎. PID控制器的解析法整定及其Matlab实现[J]. 计算技术与自动化, 2003, 22(1): 40-43.
- [8] 杨 芸. 制冷压缩机加速寿命测控系统的研制[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2008: 1-18.
- [9] 谭经纬, 司 群. 比例先行数字PID控制器的仿真 [J]. 舰船电子工程, 2005, 25(5): 89-93.
- [10] 王海青, 姬长英, 刘同召. 模糊自整定PID温度控制系统的建模与仿真[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 233-235.
- [11] 陆广平, 张美琪, 沈加庆. 基于AVR单片机的步进电机运动的控制系统设计[J]. 微电机, 2010, 43(3): 92-94.

[编辑: 李 辉]