

用于制冷性能测试的电子膨胀阀测控系统

周海良, 姜周曙*, 丁 强

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对二次流体量热器法测压缩机性能时, 温控仪表对载冷剂温度的控制存在超调量大、稳态误差大等问题, 研发了一套可进行探索性实验的电子膨胀阀测控系统。采用控制精度高的电磁式电子膨胀阀替代热力膨胀阀, 并对系统多个状态点进行了温度与压力的实时采集, 实现了制冷系统中量热器温度的智能化控制; 阐述了该系统的工作原理, 建立了测控模型, 并采取必要的温度与压力报警机制, 实现了系统的稳定运行; 在.Net开发平台下运用面向对象的设计方法开发了相应的软件, 重点设计了积分分离式PID控制模块; 对该测控系统进行了多次控制实验, 并将其与其他控制方法进行了比较。研究表明, 采用电子膨胀阀作为温控执行机构有利于测控系统减小超调量, 并保持工作稳定性。

关键词: 电子膨胀阀; 测控系统; PID控制; 制冷性能测试

中图分类号: TB657.9; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1405-05

Measurement and control system by electronic expansion valve for refrigeration performance test

ZHOU Hai-liang, JIANG Zhou-shu, DING Qiang

(College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems that the coolant temperature control by temperature control instrument has a large overshoot and stable state error while compressor performance test through the second fluid calorimeter method, an electronic expansion valve control system which can be carried out exploratory experiment was developed. Electromagnetic type electronic expansion valve instead of the thermal expansion valve was used to give a high-precision control. Temperature and pressure of multiple state points in the system were real-time collected to realize the temperature intelligent control of the calorimeter in the refrigeration system. After the elaboration of the system's working principle, the measurement and control model were established. The temperature and pressure alarm mechanism were taken to realize the stable operation of the system. The supporting software by using the object-oriented design method was developed, on the .Net development platform, the integral separation PID controls module was especially designed. Multiple control experiments were taken and compared with other control method. The results indicate that using an electronic expansion valve as a control actuator is advantageous to reduce the overshoot and keep stability.

Key words: electronic expansion valve; measurement and control system; proportion-integral-derivative (PID) control; refrigeration performance test

0 引 言

二次流体量热器法是制冷系统性能测试的重要方法。其原理决定了只有在电加热提供的热量与制冷剂蒸发所需的热量相等时, 才能进行机组性能测试实验的各项数据采集。通常情况下, 二次流体量热器

法通过控制安装在量热器旁边的膨胀阀的开度来影响制冷剂的流量大小, 进而实现与电加热器的热量平衡。该方法需要通过智能温控仪实时调节电加热器的输入功率, 对温控仪的要求较高。实践表明, 由于PID温控仪对电加热的控制是时间比例继电器输出的, 对其设计及工艺要求较高, 很容易发生温控不准

收稿日期: 2012-06-15

作者简介: 周海良(1986-), 男, 浙江嵊州人, 主要从事自动控制方面的研究。E-mail: ofzhou@163.com

通信联系人: 姜周曙, 男, 教授, 博士。E-mail: jiangzhou_shu@163.com

的情况,主要表现为在设定温度附近某一区间内波动。因此,在电加热功率输入恒定的情况下,通过控制膨胀阀开度实现第二流体(通常为水)温度稳定的研究具有现实意义。另外,从电子膨胀阀控制的研究现状来看,电子膨胀阀控制技术多用于蒸发器供液量控制、制冷剂过热度控制^[1]以及各温度控制,由于有热负荷的存在,量热器温度能有效模拟环境温度稳定的控制。

本研究研发一套可用于探索性实验的电子膨胀阀测控系统。

1 系统原理与设计

1.1 二次流体量热器法

二次流体量热器法在机械行业标准 JB/T9056-1999《容积式制冷压缩冷凝机组》中有详细的描述和规定,研究者可以根据这一行业标准设计一台电子膨胀阀以控制第二流体温度系统的实验台。

二次流体量热器法的结构如图1所示,量热器由两个进行热交换的彼此独立的流体回路组成。液体制冷剂走内层回路,使其蒸发与过热;第二流体走外层回路,提供蒸发与过热所需的热量。研究者通过调节安装在量热器附近的膨胀阀可以控制制冷剂的流量。量热器和膨胀阀之间的铜管应该隔热保护,以减少外界热量的影响^[2]。当加热器提供的热量与制冷剂吸收的热量相等时,研究者可以通过加热器所提供的热量来衡量压缩机制冷量。

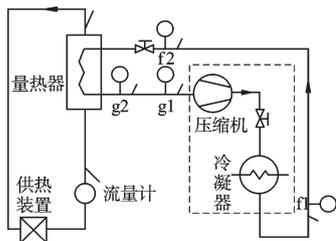


图1 二次流体量热器法结构图

PID控制在二次流体量热器法等压缩机性能测试领域的应用主要集中在控制工况稳定方面,一般控制电加热器热量输出的主要方法有PID数显温控仪表^[3]。

1.2 电子膨胀阀

考虑到系统需要上位机软件自动控制膨胀阀的开度,手动膨胀阀和热力膨胀阀等传统的膨胀阀不能满足系统的设计要求,电子膨胀阀是蒸气压缩式制冷系统中用来替代传统膨胀机构的新型设备,它满足了制冷机电一体化的发展要求,具有热力膨胀阀无法比拟的优良特性,为制冷系统的智能化控制提供了条件,是一种很有发展前途的自控节能元件。电子膨胀阀作为一种智能的阀门元件,不仅克服了传统膨胀阀讯号反馈滞后较大、控制精度较低及调节范围有限的

缺点,更重要优点的是其能被电信号控制。

由于上述优点,电子膨胀阀作为节流元件,主要用于制冷剂流量智能控制、变频空调和汽车空调节流^[4]等研发方向。

该系统所采用的电磁式电子膨胀阀可以根据软件计算出阀门开度来提供给阀门元件一个电压信号,并施加在膨胀阀的电磁线圈上^[5]。阀针受磁力的作用,调节膨胀阀的开度,一般开度范围为0~500。系统采用的电磁式电子膨胀阀主要由主阀体、显示模块、通讯模块、电源模块、手动控制模块及通信线路组成,实物图如图2所示。

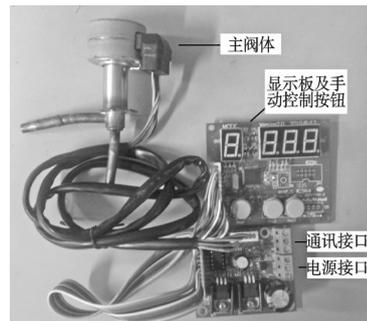


图2 电磁式电子膨胀阀及其控制板

1.3 试验台设计

本研究根据以上原理及结构,设计了一套电子膨胀阀控制系统试验台(如图3所示),以实时采集水箱温度,并通过PID智能调节将水箱温度调节到设定值,其中PID智能调节的输出量由上位机软件计算得出,并且通过RS-485通信总线与电磁式电子膨胀阀相连,控制电子膨胀阀开度。当电子膨胀阀的开度计算值小于膨胀阀的最小功能值(一般取50)或大于最大功能值(一般取其最大值250)时,测控软件会进行报警,并且把计算值控制在最小功能开度与最大功能开度之间,既不影响仪器安全性,又不影响实验的连续性,但是实验中水箱温度达到设定值并且相对稳定的时间会相应延长。



图3 系统实物图

常用的第二流体是水、无机盐水溶液或有机物液体。前面对测试原理的分析中指出,实验检测的关键是在量热器中能使电加热器与制冷剂热量相互交换时达到一个平衡状态。水的冰点温度为0℃,在冰点温度以上(一般蒸发温度取7℃以上),水能有效减少

漏热量并提高实验精度。因此本研究选择水为载冷剂,配合R22这一常用制冷剂来实验。

整个控制系统分为:制冷系统、量热器、电器控制柜和PC机等。测量的主要数据为电子膨胀阀开度、水箱温度、压缩机功率、电加热功率、冷冻水进出口温度等。温度传感器用三线制铠装Pt100,精度为±(0.15+0.002|t|)℃。另外,系统还配置有冷凝侧的相关组件(冷凝器、冷凝侧可恒温水箱、带Modbus协议通讯功能的智能温控表和冷凝侧水循环泵等)、压缩机进出口的压力传感器、高压保护装置、低压保护装置和压缩机电功率表等。

2 控制算法

2.1 理论依据

在一定的电子膨胀阀开度之内,制冷量随着电子膨胀阀开度的增加而增大。在这一范围内,电子膨胀阀开度增加,制冷剂的流量上升,换热器在其换热饱和值之内,换热量增加。本研究在不同工况下对测控实验台进行单一工况重复性试验,得到的结论为:开度在250步之内制冷量均能达到单调上升,且上升幅度明显。利用这段单调上升的范围,在当前水箱温度小于设定值时,研究者可通过设置相应的PID参数,计算出一个较小的电子膨胀阀开度值,压缩机提供一个较小制冷量,其制冷量小于量热器内电加热器提供的热量,从而水箱温度逐渐增高;同样,在当前水箱温度大于设定值时,系统计算出一个较大的开度值,从而达到压缩机提供一个较大制冷量的目的,其制冷量大于量热器内电加热器提供的热量,从而水箱温度逐渐下降;在当前水箱温度在设置值附近时,PID调节的积分环节又能起到消除静差的作用,同时提高了控制精度,使水箱温度稳定。

2.2 积分分离式PID控制

由于上位机软件对系统数据进行实时采集,研究者应该对算法公式进行离散化^[6]。针对阀针控制电子膨胀阀的开度,当前控制量可在上次控制量的基础上增减,系统采取了增量式PID控制。又由于控制前期可能设定值与实际温度偏差较大,为了控制效率,系统应该采用积分分离式PID控制算法^[7]。其控制系统原理框图如图4所示。

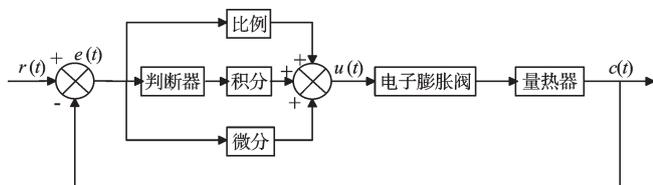


图4 PID控制系统原理框图

由离散PID表达式可得^[8]:

$$u(k) = k_p \{e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)]\}$$

由递推原理并加入积分分离因子后得:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = k_p [e(k) - e(k-1)] + \beta k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

式中: $e(k)$ —第 k 次采集时实际水箱温度与设定温度的差, $\beta = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq \epsilon \\ 0 & |e(k)| > \epsilon \end{cases}$ 。

3 软件设计

3.1 需求分析

制作系统软件是为了更好地实时采集数据、处理数据、分析数据和存储数据,因此有必要设计一个界面友好、操作方便、运行可靠的软件,从而达到以下目的:

(1) 引导操作人员进行简单的操作即可完成一系列任务;

(2) 接收多功能数据采集板传输上来的数据,解析并计算得到各个温度、压力、功率及PID输出量;

(3) 数据需要以表格、曲线、Flash等形式实时显示在监控界面上,同时完成数据及时存储到指定的数据库中,以备查询和进一步分析;

(4) 通过计算得到的控制量能通过485总线传输给电子膨胀阀的数据处理模块,使电子膨胀阀能及时响应;

(5) 进行传感器的标定。系统软件采用.Net平台下的C#语言进行编写,编译环境为Microsoft公司出品的Virtual Studio 2005^[9-10],针对需求分析,软件按照用户界面表示层、业务逻辑层(BLL)和数据访问层(DAL)等三层软件构架^[11]来设计编写;数据库采用SQL Server 2005^[12]。

整个软件的功能框图如图5所示。

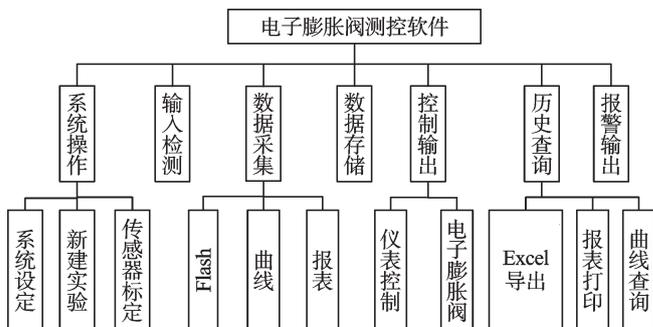


图5 软件功能框图

3.2 软件实现

软件编程主要采取面向对象的设计方法实现,主要体现在类的设计上面。

用户界面表示层中主要的类(主界面、新建实验界面、历史查询界面和标定界面等)主要采用Windows

风格的 WinForm 表现形式,并且整合美国 National Instruments 公司的绘图曲线等控件,美观实用。

其主界面如图6所示。

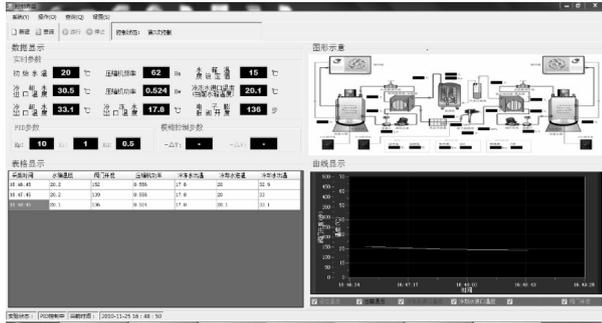


图6 测控主界面

业务逻辑层中的类主要负责数据实时采集、对系统配置文件和数据库的操作及电子膨胀阀的控制,起到连接表示层和数据访问层的作用。数据访问层中的类负责读取以 XML 形式存储的系统配置文件和数据库的相关操作,为业务逻辑层提供数据服务。

程序设计流程图如图7所示。

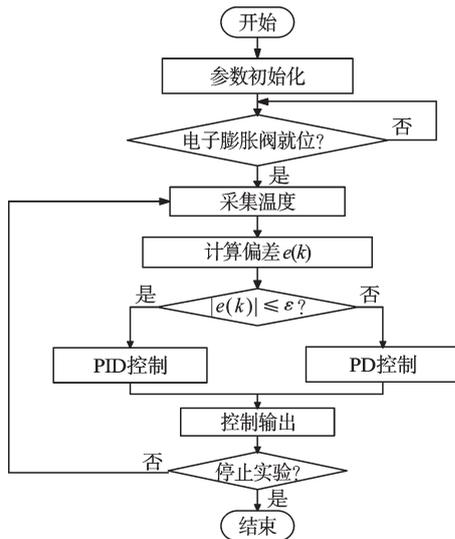


图7 程序设计流程图

4 测试结果及分析

测控系统的设计要求能测试系统各个状态点的参数及整个制冷循环系统的性能参数。在各个参数稳定及合格的情况下的数据才有效。制冷系统一些主要参数如表1所示。

表1 系统性能数据记录表

冷冻水进口温度 / $^{\circ}\text{C}$	冷却水进口温度 / $^{\circ}\text{C}$	制冷量 /kW	制热量 /kW	压缩机功率 /kW	热平衡误差 /($\%$)
13.9	36.9	2.07	2.65	0.622	1.58
21.6	39.7	2.49	3.08	0.651	1.94
16.2	40.4	1.77	2.33	0.598	1.60

从表1中可以看出在各个工况下,系统热平衡误差处于合理范围内,系统整体性能良好,可进行电子膨胀阀测制实验。

本研究令初始温度为 $12.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,目标温度控制在 $23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,进行实验,温度变化过程如图8所示。

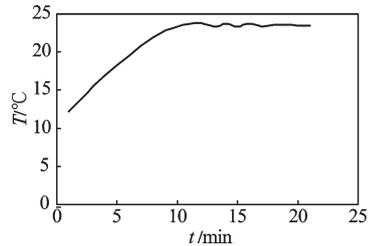


图8 温度过程曲线

在一个工况下,本研究对系统多次实验数据进行记录,并与温控仪表控制实验数据进行比较,性能比较表如表2所示。

表2 性能比较表

执行器	性能		
	稳定时间/min	最大超调量/(%)	稳态误差/(%)
温控仪表	15	3.8	0.85
电子膨胀阀	12	2.1	0.42

注:稳定时间和稳态误差取多次实验平均,最大超调量取最大值。

由表2可得,电子膨胀阀在一定范围内的控制性能普遍优于温控表的PID控制。分析原因如下:

温控仪表控制温度的机理为采集实时温度,通过进行PID计算得出电加热器的时间比例输出量,而时间比例的输出方式存在很大的性能问题,不适用于采样周期较大的系统。而电子膨胀阀控制却不存在这个问题。

相比温控仪表控制,电子膨胀阀的控制算法具有许多优点:

(1) 设计较好的控制算法后,能减少温度达到稳定的时间。如采用积分分离式PID算法之后,能减少前期温度上升(下降)的时间,从而缩短整体时间,但是用普通PID算法显然不能达到这个效果;

(2) 最大温度超调量显著减少。这与参数 k_i 、 k_d 的选取密切相关,增大 k_i 、 k_d 有利于保证最大温度不会超过设定温度很多;

(3) 稳态误差减少。同样与参数 k_i 、 k_d 的选取相关,增大 k_i 、 k_d 有利于温度稳定;

由实验得出, k_i 的增大会使系统消除静态误差所用的时间上升,其选取也与 k_p 的值有关, k_d 的增大会使系统的抗干扰能力大大降低,干扰量通常有压缩机电压瞬时波动、保温措施不好时外界环境影响等等,因此一般取值在0~1之间。

同时,电子膨胀阀控制系统也存在一些弊端:

考虑到安全因素,电子膨胀阀的最低开度不应该选的太低;考虑到性能因素,膨胀阀开度与制冷量最好成正比例关系。因此,电子膨胀阀的有效开度范围仅占整体范围的小部分,这使得操作人员需要对制冷剂与系统整体性能有相当程度的理解。

另外,该实验结果对压缩机性能测试系统有借鉴意义。用温控仪表控制第二制冷剂温度时,一般实验流程是:单独开启工况稳定系统(采取外部制冷机和仪表端电加热共同作用),待工况稳定后,再开启压缩机制冷系统。这样会带来一个明显的问题,即开启压缩机制冷系统后,整个热泵系统会把压缩机的制冷量误认为干扰量,这样对系统的稳定性有一定的影响,然而采取电子膨胀阀控制的系统不会出现该类问题。

5 结束语

本研究以二次流体量热器法结构为开发原型,并采取控制精度高、时延小的电磁式电子膨胀阀为控制执行机构,对二次流体进行温度控制;设计开发了一套电子膨胀阀控制系统,主要实现了电子膨胀阀的积分分离式PID控制模块设计及系统软件编程。

本研究根据系统原理搭建了一套测控平台,并进行多次测试与实验。实验结果表明,该测控平台运行情况良好,电子膨胀阀控制的方法相对于温控仪表控制方法而言具有控制更快、更稳定的优势。

参考文献(References):

- [1] 由玉文,吴爱国,张志刚,等. 基于最小稳定过热度的制冷系统变负荷优化控制[J]. 低温与超导,2011,39(11):1-6.
- [2] 翁建霆,王 迟,董天禄,等. JB/T 9056-1999 容积式制冷压缩冷机组[S]. 北京:机械工业部机械标准化研究所,2000.
- [3] 余成章. 压缩机与制冷系统性能试验平台的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学自动化学院,2011:17-18.
- [4] 郭传欣,李征涛,叶学敏,等. H型汽车空调用热力膨胀阀开度试验台的研制[J]. 制冷与空调,2009,9(1):50-52.
- [5] 吴业正,韩宝琦. 制冷原理及设备[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,1997.
- [6] ASTROM K J, WITTENMARK B. Computer Controlled Systems-theory and Design [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2002.
- [7] 刘金琨. 先进PID控制Matlab仿真[M]. 3版. 北京:电子工业出版社,2011.
- [8] 刘士荣. 计算机控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [9] 郑宇军. C#面向对象程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2009.
- [10] 葛 正,王维锐. 汽车零部件可重构力学试验台测控系统设计[J]. 轻工机械,2011,29(5):68-71.
- [11] 温 昱. 软件架构设计[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [12] DEWSON R. SQL Server 2005 基础教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.

[编辑:张 翔]

(上接第1394页)

- [4] CANUDAS D W C, OLSSON H, LISCHINSKY P. A new model for control of systems with friction[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1995, 40(3):419-425.
- [5] TAN Y, CHANG J, TAN H. Adaptive backstepping control and friction compensation for AC servo with inertia and load uncertainties [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2003, 50(5):944-952.
- [6] 周金柱,段宝岩,黄 进. LuGre摩擦模型对伺服系统的影响与补偿[J]. 控制理论与应用,2008,25(6):990-994.
- [7] FREIDOVICHL, ROBERTSSON A, SHIRIAEV A, et al. LuGre-model-based friction compensation [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2010, 18(1):194-200.
- [8] TAN Yao-long, KANELAKOPOULOS I. Adaptive nonlinear friction compensation with parametric uncertainties[C]//UCLA Electrical Engineering. Los Angeles, CA 90095-1594, 1999:2511-2515.
- [9] 刘国平. 机械系统中的摩擦模型及仿真[D]. 西安:西安理工大学机械与精密仪器工程学院,2007.
- [10] NILKHAMHANG I, SANO A. Particle Swarm Optimization for Identification of GMS Friction Model[C]//SICE-ICASE International Joint Conference Oct. 18-21, 2006: 5628-5633.
- [11] CANUDAS D W C, LISCHINSKY P. Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechanicals**, 2011, 16(1):133-140.
- [12] ARMSTRONG-HKLOUVRY B, DUPONT P, CANUDAS D W C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. **Automatica**, 1994, 30(7):1083-1138.
- [13] 刘宏玉. 转台伺服系统低速性能分析与摩擦补偿研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学航天学院,2006.
- [14] CANUDAS D W C, GE S S. Adaptive friction compensation for systems with generalized velocity/position friction dependency [C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, 1997:2465-2470.

[编辑:罗向阳]