

制冷装置节能控制与 电子膨胀阀应用研究(一)^{*}

——现状与分析

陈芝久 孙文 于 兵

(上海交通大学制冷与低温工程系 上海 200030)

摘要: 本文从电子膨胀阀应用的研究现状出发, 从算法、方案的角度分析了设计电子膨胀阀控制过热度时存在一些问题, 最后着重讲述了模糊控制在制冷装置节能控制中的应用

关键词: 研究现状 方案 模糊控制

Control of Refrigeration System and Application of Electronic Expansion Valve State-of-art and Analyze

Abstract The state-of-art of electronic expansion valve (EEV) is presented, moreover, This paper analyzes some problem when using EEV from viewpoint of algorithm and scheme, then the fuzzy control combined with PID control is introduced.

Key Words The state-of-art scheme and fuzzy control

一、引言

在人们对于节能和舒适性要求日益迫切的今天, 在制冷领域的各个层面都正在产生或酝酿着重大的革新, 而其中, 又以制冷控制系统发生的革命性的变化尤为令人瞩目——传统的控制观念被更新, 传统的制冷自控元件被新的元件所代替^[1]。

制冷装置的一个重要目的是节能, 而传统的冷控制系统难以符合人们对节能的要求。现在的研究人员必须从元件、算法以及对象特性等方面进行研究。而其中控制元件的研究又是整项工作的基本前提。

热力膨胀阀是一种应用广泛的制冷控制元件, 可惜存在着控制范围小, 精度低等缺点, 而热力膨胀阀自身原理结构又限制

* 本课题为国家自然科学基金资助项目, 编号为 59576044

了从算法上对其进行改进,引入新的控制元件势所必然。

有感于热力膨胀阀的局限性,人们很早就开始研制电子膨胀阀,但苦于加工水平的落后以及计算机技术发展的缓慢,直到八十年代初期电子膨胀阀的研制才有突破性的进展。

虽然电子膨胀阀有多种驱动形式,但无论步进电机驱动、电磁阀驱动,或者电加热型,其原理结构都并不复杂。

当制冷装置采用电子膨胀阀之后,人们发现了诸多热力膨胀阀所无法比拟的优点,因此,在学术界没有来得及对电子膨胀阀做充分研究的情况下,电子膨胀阀在工业界很快被推广开了。无论小型、中型乃至大型制冷装置,从空调工况到制冷工况,都有电子膨胀阀成功应用的例子。如果不是价格因素的制约,电子膨胀阀本可以得到更加广泛的应用。目前,有报导的已经成功地应用了电子膨胀阀的制冷装置有:汽车空调^[3,10],家用热泵^[2],超市冷柜^[4,13],冷水机组^[6]等。

在应用电子膨胀阀的过程中,一些问题逐渐暴露出来,促使学术界从控制原理、算法及结构对电子膨胀阀重新进行基础研究,从而使电子膨胀阀研究再次成为一个热点问题。

2、研究现状

电子膨胀阀出现在市场之后将近五年,各个科学杂志开始陆续出现相关的研究文章,之后每年总有最新的研究成果问世。从搜集的资料看,目前学术界对电子膨胀阀的研究大致包括应用研究、驱动形式对比、控制方案、控制算法改进三个方向。

应用研究: H. Itoh (日本, 1986)^[2]把步进电机驱动电子膨胀阀用于变频控制的热泵型房间空调器。文中提出:电子膨胀阀可

以用于控制压缩机电机温度,从而省却压缩机喷射冷却装置;在空调器中,电子膨胀阀除了控制向蒸发器供液之外,第二个主要作用是实现“化霜不停机”。

由于汽车空调开停频繁,而在开机阶段蒸发器的换热性能恶化, M. Mitsui (日本, 1987)^[3]提出采用电磁阀型电子膨胀阀,从而对制冷剂流量的突然变化能够作出迅速反应。

采用电子膨胀阀能够降低冷凝温度,从而节约压缩机能耗,其幅度是相当惊人的。S. E. Thuesen et. al (丹麦, 1985)^[4]称电子膨胀阀改善了流量特性,使冷凝压力可以降低而不会使系统发生振荡。他用仿真模型计算出:压缩机的能量消耗因此约减少 10% ~ 30%。HSB (1994)曾报道:新建成的一艘冷藏货船由于采用电子膨胀阀(步进电机型),降低了冷凝温度,节能达 48%。Professional Engineering (1996)则称:欧洲的科学家改进的电磁阀型电子膨胀阀使超市陈列柜减少了 30% 的电子消耗。

驱动型式对比: S. Howotny (德国, 1991)^[5]介绍电子膨胀阀的三种主要驱动形式:步进电机驱动、电磁阀驱动,以及电加热型,至于哪种最好还没有定论。到了 1995 年, N. J. Hewitt et. al. (英国, 1995)^[6]用实验对比热力膨胀阀和三种电子膨胀阀之后,认为电磁阀型膨胀阀的控制性能最佳。

控制方案、控制算法改进:从电子膨胀阀的起步阶段开始,研究者就一直采用温度信号作为输入信号。至今,包括 Danfoss, Egelhof 及日本一些公司的产品均采用此形式。而随着温度信号在使用过程中,逐渐暴露出局限性,研究者开始尝试其他类型的输入参数。D. Parnitzki (瑞士, 1989)^[7]在设计航天用冷柜时首次采用了

压力信号。通过测量蒸发器出口的蒸发压力,经由物性程序转化成蒸发温度,作为控制器的输入参数。以此为基础,对比了几种控制方案。1996年,欧洲科学家研制的电子膨胀阀也采用了压力信号输入的控制方案,获得了成功。目前随着廉价压力传感器的出现,使用压力信号作为控制器的输入信号已经形成了一种趋势。

和控制方案的研究相比,控制算法的研究显得较为薄弱,但也一直没有中止过。W. D. Gruhle(德国,1985)^[8]最先提出过热度控制器的变增益问题。他在实验中发现,为了避免蒸发器满液,控制器增益(比例放大系数)应该可调。当过热度较低时(小于4K),增益应比稳定运行时增加,甚至加倍。S. A. Tassou(英国,1993)^[9]的实验结果表明:高增益降低了开停循环损失,但引起过热度的稳态时大幅度的波动;低增益增加了循环损失,提高了过热度的稳定性。因此为了优化系统性能,膨胀阀控制器应具有变增益。

随着控制领域算法研究的发展,有人试图把现代控制理论的算法引入电子膨胀阀的控制之中。当研究采用变转速压缩机、电子膨胀阀的汽车空调的控制问题时,M. Hattori(日本,1990)^[10]将其归结为双输入双输出的耦合问题,用解耦控制算法,使近气侧时间常数大幅下降。白梓运(中国,1996)^[11]尝试把自校正自适应算法用于蒸发器过热度的控制中,并产生了仿真解。A. Outtagarts(法国,1997)^[12]采用状态反馈控制的方法,收到了良好的实验效果。

1994年,R. G. Miles et. al.(英国,1994)^[13]用基于人工神经网络原理的算法计算冷柜制冷系统中电子膨胀阀的开度,以此调节冷藏室内空气温度,首开智能控制算法应用于电子膨胀阀控制之先河。

3、分析

一般认为,电子膨胀阀可以确保在任何负荷条件下给蒸发器供应适量的制冷剂,在最大限度地利用蒸发器换热面积的同时,避免大量液态制冷剂进入压缩机造成损害。而为了在现有的基础上进一步发挥电子膨胀阀的巨大潜力,更好地实现控制蒸发器过热度的目的,研究进有必要从控制方案和控制算法两方面进行考虑。由于在电子膨胀阀的研究过程中,有许多问题一直没有定论。迄今还没有一套通用的控制方案能够适用于所有类别的制冷装置。从实用化的立场出发,我们认为:对于不同类型的装置,采用电子膨胀阀时应用不同的解决方案。

压力信号输入以及算法的抗干扰问题:采用压力信号作控制器输入的优点是明显的:和传统方式相比,通过测量蒸发压力,可以获得更为准确的过热度信息;同时由于蒸发器内压力的变化总是比温度的变化迅速,测量压力能够使控制顺及时地对过热度的波动作出反应。不过,这种方法在实施中对算法有特殊的要求。

实验中发现,即使在蒸汽压缩制冷装置中稳定运行的过程当中,系统蒸发压力始终处于小范围不规则、锯齿形的波动之中。这种波动使常规PID方法的控制品质下降,严重时甚至使系统发散。这就要求控制算法必须具有的较强的抗干扰能力。

在实际制冷装置中,由于采样环节的成本限制,传感器的精度不高,同时其运行工况要求采样环节必须能够在较大温度范围内进行A/D转换,从而使A/D转换的精度受到一定限制,这就必然导致控制器接收的反馈信号有较大误差。这也要求控制算法必须具有的抗干扰的能力。综合以上两点可知,设计抗干扰的控制算法对于实

际的制冷控制系统具有特别重要的意义。

对象的非线性问题: 另餐在实验中还发现, 蒸发器过热度对于膨胀阀开度的动态响应非线性相当强烈。其具体表现为:

- 1、在不同的稳态工况下施加开度扰动时过热度的动态特性不一样;
- 2、阀开度增加和减少时过热度特性不一样;
- 3、阀开度增加多和增加少时过热度特性不一样。

尤其是第一点, 常常使常规 PID 控制无法正常进行。常规 PID 控制器设计过程包括现场测试, 离线辨识, 仿真优化控制器参数, 以及现场整定。由于每次机组运行工况无法保证一致(从实用性考虑, 也没必要保持一致), 以致于根据以前测试的动态特性设计的 PID 控制器不再适用于以后的机组运行工况。实验证实了这一点。

模糊算法: 常规控制施加到制冷装置得不到好的效果, 其根本原因在于对象的强烈非线性。对于强烈非线性对象, 如果用线性方法控制得不到好的效果, 或者建立非线性的数学模型(而由于这种模型计算速度太慢而使系统仿真变得不切实际); 或者采用线性模型, 而使用允许一定程度模型失配的控制算法。目前流行的 PID 算法显然不符合要求, 为此有必要重新寻求控制算法, 在已经做的工作的基础上, 我们认为模糊算法比较适合。它诞生于本世纪七十年代, 在工业过程控制领域已经解决了许多实际的问题, 而日本则早已把模糊控制成功地引入家用空调中, 满足空调器的舒适性和节能要求。曾经有人在研究涉及到电子膨胀阀的控制课题时采用了模糊算法, 但却是为整个制冷系统(往往包括变频压缩机、变频风机、电子膨胀阀)所设计的, 而不是针对电子膨胀阀控制蒸发器过热度。因为制冷装置可能只用到电子膨胀阀

作为控制执行元件, 所以研制专门的电子膨胀阀控制蒸发器过热度的模糊算法是有现实意义的。

和常规 PID 算法相比, 模糊算法的一个突出优点在于“模糊”, 抗干扰性能强, 符合制冷控制系统设计实用化的要求。另一个优点则是我们通过仿真发现的, 即: 模糊控制器输出的调节动作没有剧烈的开合, 这一点对于步进电机驱动的电子膨胀阀非常有利, 因为这样可以避免扩大由于步进电机传动机构的“间隙特性”产生的控制输出的失真, 否则, 输出误差的积累可能会给系统的稳定性方面带来问题。而为了使 PID 控制器做到这一点, 必须采用所谓的“单步限幅”设计, 强行限制控制器输出不得超过某一限度, 这样做必然影响控制品质。显然, 和常规 PID 算法相比, 模糊算法在这方面具有优势。

当具体实现电子膨胀阀模糊控制器时, 有两点值得着重考虑。其一: 控制器输入参数的选择。一般的做法是把蒸发器进出口的两个温度测量值相减, 作为蒸发器过热度的近似值, 控制器输入参数选择为过热度误差以及过热度误差变化率。这样做, 浪费了两个温度传感器给控制器传递的信息, 没有最大限度地利用之为控制决策服务。实验证明: 蒸发器进出口温度对蒸发器进口膨胀阀开度的阶跃响应动态特性是不同的, 如图所示。

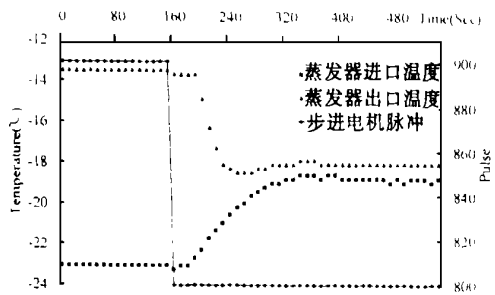


图 1 开阀时蒸发器进出口温度响应曲线

可以考虑的一种做法是除了过热度误差和过热度误差变化率之外,把蒸发温度误差也作为控制器的输入参数,使蒸发温度能够影响膨胀阀开度的控制决策,笔者认为这样做更符合制冷系统的实际情况,而蒸发温度的设定值则取决于空气侧温度设定值。其二:模糊规则和隶属度函数的优化。由于缺乏电子膨胀阀控制过热度方面的先验知识,所设计的模糊算法中的规则和隶属度均是人为一次性假定的,其中必然包含某种程度的不合理成分。而目前看来,对模糊规则和隶属度函数进行优化比较困难,只能以大量的计算实验替代。

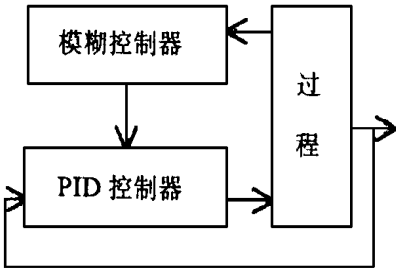


图2 串联调整式

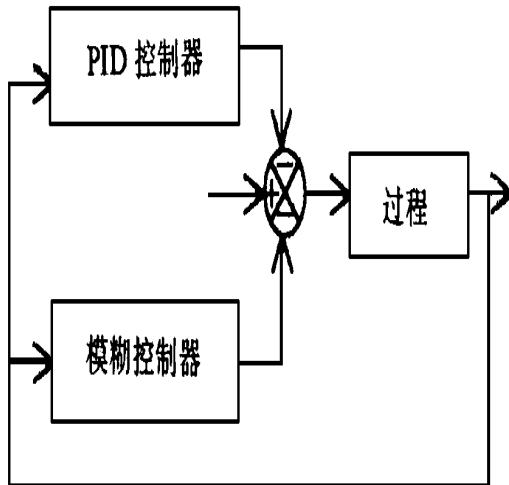


图3 并联式

由于PID控制的稳态精度高(含积分环节),而模糊控制特别适合非线性、太滞

后的过程,实用中可以考虑把模糊控制和PID控制相结合。方式有两种:串联调整式和并联式。如下图所法。其中串联调整式的模糊控制器根据过程的一些基本信息推理输出PID控制器的控制器参数,从而使PID控制器在过程参数时变时也能达到好的控制效果。并联式主要基于这样的考虑:当起始误差大时启用模糊控制器,而当误差小时切换到PID控制器,这就兼顾了两种控制器的优点,避免了它们的缺点。

4、结束语

随意电子膨胀阀应用研究的逐步深入,从控制方案、控制算法方面对其进行革新已是大趋所势,其中如控制信号的选取、模糊控制和PID控制相结合等研究内容代表了当前学术界最新进展。而为了使研究成果在实际应用中发挥作用,除了在设计算法和控制方案时考虑到制冷装置的实际情况下,同时必须尽可能降低控制器的硬件成本。

以上简要回顾了电子膨胀阀的研究历史,并根据我们多年的研究,从控制算法、控制方案的角度提出自己的观点,所涉及的几个问题也正是后续论文的重点。

参考文献

- [1] 陈芝久,“制冷机自动化发展方向”,流体工程,1986,9,pp52~64
- [2] Itoh H., Improvement of a heat pump room air-conditioner by use of pulse-motor-direct expansion valve, ASHRAE Transactions, 1986, Volume 92, Part 1A, No. 2944, pp164~172.
- [3] Mitsui M., Improvement of Refrigerant Flow Control Method in Automotive AirConditioners, SAE Trans., 1987, Vol. 96, SECTION 1, ppl. 67~78.
- [4] Thuesen S. E. et. al., Improved control of liquid injection into display case evaporators, 1985, Volume 91, Part 1A, No 2861, pp80~91.
- [5] S. Nowotny, Recent progress in micro-electronics

and their applications in refrigeration and air conditioning, Inter. J. Refrigeration, 1991, Vol. 14, May, pp140 ~ 147

[6] N. J. Hewitt, et. al. , Comparison of Expansion Valve Performance, Inter. J. Energy Research, 1995, Vol. 19, pp347 ~ 359

[7] D. Parnitzki, Digital Control of Heat Pumps with Minimized Power Consumption , Inter. J. Energy Research, 1989, Vol. 13, pp167 ~ 178

[8] Gruhle W. D. et. al. , Modeling and control of a refrigerant evaporator. Journal of Dynamic Systemes, Measurement and Control, December 1985, Volume 107, pp235 ~ 240.

[9] S. A. Tassou et. al. , Investigation of the effects of thermostatic and electronic expansion valves on the steady-state and transient performance of commercial chillers, Inter. J. Refrigeration, 1993, Vol. 16, No1, pp49 ~ 56

[10] Hattoir M. et. al. , Automotive refrigeration system controller with a simple presensitizer, Proceedings of the 29th . Conference on Decision and Control, IEEE, December 1990, pp1590 ~ 1591

[11] 白梓运等, "电子膨胀阀及其在蒸发器过热度自适应控制中的应用", 暖通空调, V26, N2, p21 ~ 24, 1996. 4

[12] A. Outtagarts et. al. , The Transient Response of an Evaporator Fed through an Electronic Expansion Valve, Inter. J. Energy Research, 1997, Vol. 21, pp793 ~ 807

[13] Miles R. G. , Sharpe P. K. , Pan W. and Fogarty T. C. , A comparative study of artificial neural networks and rule-based technique in the development of a computer-aided control system, Engineering Application Artificial Intelligent, Volume 7, No. 1, 1994, pp53 ~ 58