

应用神经网络调控热泵负荷的研究

李莎¹, 邹瑾¹, 张天瑾²

(1. 天津工业大学 纺织学院 天津 300160; 2. 天津大学 地热研究培训中心 天津 300072)

摘要: 目前热泵系统越来越多地应用于供热领域, 为了保证热泵系统安全高效的运行, 需要开发完备的负荷调节控制方案。针对热泵系统和热用户之间的负荷匹配控制问题, 应用了神经网络的控制方法, 并在小型水源热泵系统试验数据的基础上建立了仿真模型, 得到了较好的负荷调节控制效果。仿真结果表明应用神经网络调控热泵负荷的控制策略具有简单、响应快、超调量小、智能程度高的特点, 可以较好地用于实际热泵系统的控制领域。

关键词: 神经网络; 热泵系统; 热负荷; 调节控制

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2008)02-0128-04

Research on Neural Network Applied in Heat Load Control of Heat Pump System

LI Sha¹, ZOU Jin¹, ZHANG Tian-jin²

(1. School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300160, China;

2. Tianjin Research and Training Center of Geothermy, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In recent years, lots of heat pump systems have been applied for district heating. In order to insure safe and efficient running of these systems, perfect load control methods are necessary. In this paper, the load matching problem between heat pump system and heat consumer is studied. A novel control method, the neural network method (NNM) is used in the research for obtaining better control results. Based on lots of experimental data about a small type of water-water heat pump, the NNM is applied in a simulation model. Through simulating, some conclusions about such system are drawn from the results, such as simple control strategy, fast response, small overshoot and high degree of intelligence. The NNM can be used in control field of the heat pump system.

Keywords: neural network; heat pump system; heat load; control.

随着我国针对能源及环保政策的出台, 节能与环保日益成为国人关注的两大问题。根据我国国情, 为减少燃煤锅炉数量, 热泵采暖技术已开始在很多地区推广应用^[1], 这是一件具有经济和社会双重效益的事情。因为在理论上, 热泵系统的效率大于1, 而一般燃煤采暖锅炉的效率只有80%左右^[2-3]。另外热泵技术不仅可以将其它技术难以利用的低焓能加以回收、提高品位再利用, 同时又可以节约大量的煤炭, 进而改善因燃煤造成的环境污染状况^[4-5]。

在集中供热领域, 计量供热技术已经开始普及, 热负荷随机变化的特性也逐步表现出来。根据这一特点, 热泵系统需要改变自身的工作状况来适应热负荷的变化, 由此产生了负荷的调节控制问题。传统的控制方法难以胜任, 而人工智能控制理论的应用将势在必行。

经典控制理论中常规PID控制算法是一种典型的模型控制算法。众所周知, 它是根据系统输出误差的比例、积分和微分的线形组合给出控制量。这种算法是基于被控对象的精确模型来整定其控制参数的, 一旦整定后, 在控制过程中不再改变^[6]。这种算法虽然对被控对象参数变化有一定的控制性, 但是对于参数变化范围较大, 尤其是对于具有纯滞后的对象、非线性系统以及非最小相位系统, 这种控制算法难以收到满意的控制效果, 甚至不能稳定工作^[7]。

对于用户冬季热负荷随机的变化情况, 显然是不能用精确数学模型描述的。原因如下^[8]:

- 1) 对于某一处固定建筑物中, 每户人家有自己的舒适性和经济性的要求, 这种要求各不相同;
- 2) 每户人家在不同时间对舒适性和经济性的要求

* 收稿日期: 2007-09-30

作者简介: 李莎(1971-), 女, 湖南双峰人, 讲师, 硕士, 主要从事空调、热泵系统的节能和优化研究, (E-mail) looklisa@sina.com。

也是动态的,随机的;

3)房间外部环境的温度变化也是动态的、不可准确预测的。

以上几种动态变化量的综合结果,将使热负荷呈现动态的、无规律的变化特点。

传统的供热调节方式(质调节、量调节、分阶段改变流量的质调节以及间歇运行调节)没有考虑用户的主动调节,所以传统的调节方式是难以适应供热调控技术发展趋势的。针对热泵系统的控制,最初是采用由温度或压力等敏感元件触发的启停机控制;随着技术的进步,更加复杂的控制手段被应用到热泵系统的运行中,在基于系统各部件数学模型的基础上,多极调控得到了发展并被广泛应用;近年来,伴随着可控硅技术的发展,无级变频调速技术已日趋成熟,基于变频技术之上的变频压缩机也逐步被采用^[9]。

但是,迄今为止仍没有针对热泵系统和热用户的负荷匹配问题而提出的完整的控制策略。理想状况下,该控制策略能够做到热用户需要多少能量,热泵系统就提供多少能量,这其中如何得到精确的热泵系统模型,即热泵系统辨识是非常关键的。

1 热泵系统的神经网络辨识

在制定基于智能控制理论的系统控制方案时,经常会遇到系统辨识问题。该问题是智能控制的前提,如果能得到快速、准确的系统辨识结果,将有助于智能控制策略的精确实施。

事实上,针对热泵系统各部件(压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器)的数学模型早有报道,把这些描述不同部件的微分方程联立起来就可以建立热泵系统的整体数学模型。把系统的输入参数(冷凝器的进水温度和冷凝器的水流量)代入此微分方程组,即可得到所需的热泵系统的输出参数,利用这些计算结果作为智能控制器的内部参数去参与智能控制计算。但令人遗憾的是,在一般情况下这些微分方程组是非常复杂的,求得精确的解析解几乎是不可能的,所以,要求解此方程只有利用数值解法。随着计算机科学的飞速发展,计算速度得到了极大的提高,但即便如此,求解上述微分方程组也需要较长的时间。更何况,在建立数学模型的时候,为了提高问题的可解性,做出了许多假设,这些假设忽略了一些实际存在的问题,也使得方程解的精度受到了一定的影响。可想而知,用这些时间上滞后、精度上一般的计算结果作为智能控制器的核心计算参数,控制策略的执行效果将会如何?所以,我们有必要放弃传统的理论建模方法,根据实验中采集到的实际系统输入、输出数据对,去训练具有某特定结构的神经网络,利用神经网络在数值并行计算及自学习能力上的优势,做到对热泵系统的精确辨识。

1.1 训练数据的获得

根据热泵系统循环参数的实验结论,整理总结了系统 COP 的实验数据样本,如表 1。

表 1 热泵系统的 COP 数据样本

	0	0.17	0.33	0.5	0.67	0.83	1
0	4.87	4.02	3.68	2.95	2.65	2.36	1.94
0.125	5.13	4.40	3.68	3.37	2.69	2.36	2.04
0.25	4.63	<u>4.38</u>	4.05	3.62	2.85	2.53	2.15
0.375	5.33	<u>4.80</u>	<u>4.08</u>	3.63	3.11	2.65	2.36
0.5	5.54	4.72	<u>4.16</u>	<u>3.63</u>	3.47	3.56	2.13
0.625	5.05	4.77	4.07	3.86	<u>3.42</u>	3.69	2.02
0.75	5.02	4.68	4.20	3.66	2.82	<u>3.94</u>	2.16
0.875	5.55	4.76	4.41	3.56	3.00	4.11	2.00
1	5.13	4.79	4.24	3.57	2.70	4.45	1.78

为了便于和下面的自适应神经网络控制相结合,在整理数据样本时,把实验时的系统输入参数的真实数据模糊化,即把冷凝器进口水温和冷凝器水流量通过简单的公式调整到 0 和 1 之间,而热泵系统的输出参数仍保持真实数据。样本数目一共为 63 组,从中选择 58 组作为网络学习样本,而剩下的 5 组数据作为检验样本(用下划线表出)。

1.2 学习结果及网络结构

我们针对热泵系统的具体情况,采用了 Levenberg-Marquardt 网络算法。标准 BP 算法收敛速度慢的一个重要原因是学习率选择不当。学习率选得太小,收敛太慢;学习率选得太大,则有可能修正过头,导致振荡甚至发散。所以,如果能根据需要自适应调整学习率将有利于缩短学习时间,Levenberg-Marquardt 算法就可以做到这些。Levenberg-Marquardt 算法的权值调整率选为:

$$\Delta W_{ij} = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T E \quad (1)$$

其中 J 为误差对权值微分的 Jacobian 矩阵, E 为误差向量, μ 为一标量,当 μ 很大时,上式就接近于梯度下降法;当 μ 值很小时,上式就变成了 Gauss-Newton 法,在此方法中 μ 也是自适应调整的。

应用此方法的网络训练精度为 10^{-7} 后,训练循环次数为 57 次,可见 L-M 算法自身的优越性。另外,由该算法得到的网络结构上也比较简单,隐含层的神经元节点为 25 个,隐含层为 2 个,结构图见图 1。

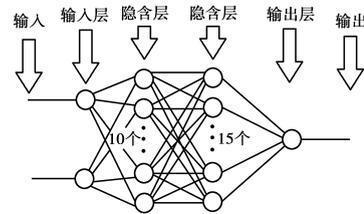


图 1 采用 L-M 算法的网络结构图

表 2 L-M 算法网络训练结果误差分析表

检验样本	4.38	4.08	3.63	3.42	3.94
网络输出	4.22	4.12	3.67	3.36	3.85
相对误差	3.56%	0.99%	1.15%	1.99%	2.39%
平均误差	2.016%				

把检验样本数据代入该网络得出网络的输出,进而得到相对误差,并把数据总结于表 2 中,从中不难发现各样本的误差不但很小,而且相差不多,总平均误差只有 2.016%,用这样的数据去模拟热泵系统的工作状态是符合工程精度的。

2 供水温度的神经网络调节

控制方案的设计是将热泵系统和热用户看作一个大系统进行的。在此系统中用户对于房间温度的要求和外界环境的改变是干扰量,而用户对于房间温度的要求依靠水流量来反映,外界环境主要通过温度变化来影响系统所以在此大系统的控制方案中用户侧的水流量和外界环境温度被定为干扰量。为了尽快满足用户的要求,热泵系统的运行状态需要作出相应的调整,对于热泵系统而言,执行机构是变频器。控制方案根据用户的要求和环境温度的变化,得到热泵系统应该的输出负荷,再根据热泵系统当前的工作状态确定出下一时刻的新状态,并由控制压缩机转数的变频器具体执行。在控制方案的设计中,分布控制方式被采用,即由热泵系统的供水温度响应环境温度的变化,供水流量反映用户房间的设定。

首先建立外界环境温度和供水温度之间的模糊对应关系,建立此关系的目的在于依靠供水温度的改变来抵消环境温度变化对房间温度的影响。由于这一对应关系和许多因素有关,如建筑物的地理位置、建筑内部的供热系统形式以及建筑物内人员的年龄结构等,

所以我们采用一种自适应的神经网络模型来描述这两个参数之间的关系。热泵系统的输入和输出都是精确量,因此纯模糊逻辑系统不能直接用于实际工程。为此,该网络的结构被定为 Takagi-Sugeno 型模糊逻辑系统,这是一种推理结论为精确值的模糊逻辑系统。

在此系统中,环境温度空间上的隶属函数采用双高斯型,数量为 7 个,并用“冷、偏冷、稍冷、正常、稍暖、偏暖、暖”来表示,初始隶属函数将状态空间平均分配。在网络学习过程中,输入的环境温度首先被模糊化,转化为 $[-4, 4]$ 内的模糊量,再根据模糊量所属的隶属函数和模糊规则,按照一定的加权计算得出相应的输出,该输出再和训练数据相比较,得到一个误差,然后根据 BP 算法反向计算修改各个神经元之间的权值,并最终完成对隶属函数形状的修正。图 2 非常清晰地表示出了具有自适应能力的神经网络系统初始化模糊集隶属函数和最终隶属函数之间的区别。系统通过本身特有的这种能力,将输入空间中初始隶属函数的不合理部分合理化,使得模糊推理结论更趋理想化。由 Takagi-Sugeno 型模糊推理系统与神经网络相结合的模糊神经网络如下图 3 所示,共有六层节点,从中发现模糊推理规则为 7 条,并且它们之间是与的关系。

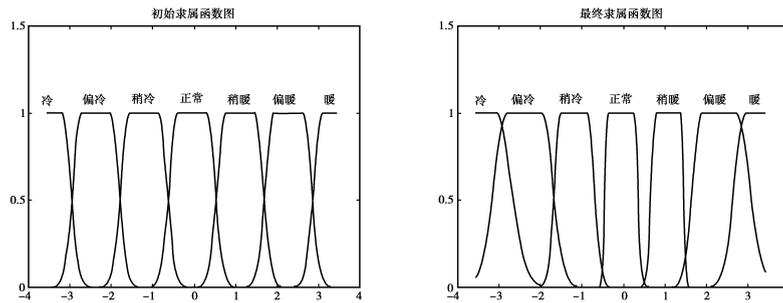


图 2 自适应网络初始与最终隶属函数图

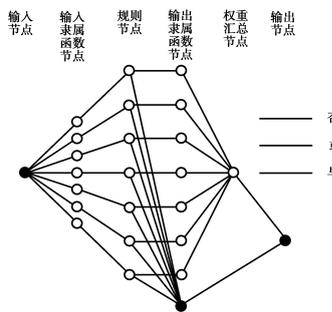


图 3 自适应模糊神经网络结构图

3 热泵系统智能控制方案及仿真结果

在建立了两个关键系统之后,智能控制方案可以被制定了。图 4 比较清楚地给出了该种类型热泵系统智能控制的整体框架,接下来将对图中各部分的功能进行详尽的论述。

首先,该控制系统有 3 个采样点(水流量、回水温度和环境温度),其中用户设定水流量和环境温度作为系统的干扰量输入,在图中用虚线框出。用作系统辨识的输入参数为回水温度和流量,回水温度是其它若干参数

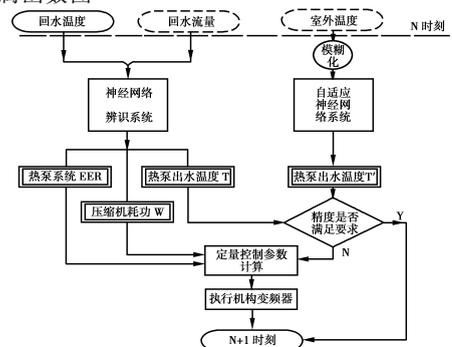


图 4 热泵系统智能控制流程图

综合作用的反映,而非独立参数,它可以间接反映用户房间的实际温度。其次,该类型智能控制方案中作为智能控制核心的两大系统(自适应神经网络系统和神经网络热泵辨识系统)是接近于并联关系的,当自适应神经网络完成学习后,它的输出可以作为热泵系统工作状态的目标。总之,在引入了两个神经网络之后,系统的负荷匹配问题变为了热泵机组如何调整工作状态使供水温度趋近于计算值的问题,关键是要保证计算值的正确性,这可以由自适应神经网络通过阶段性地学习来完成。

以全封闭活塞式压缩机为例进行分析,该类型的压缩机输入电功率一般由下式表示:

$$P = (1.1 \sim 1.15) \frac{\eta_v V_h}{v_1} \frac{h_2 - h_1}{\eta_i \eta_m \eta_d} \quad (2)$$

其中: η_v 是压缩机容积效率; η_i 为指示效率; η_m 为摩擦效率; η_d 为传动效率; v_1 为压缩机进口工质比容; h_1 为压缩机进口工质焓值; h_2 为压缩机出口工质焓值; V_h 为压缩机理论排量。另有

$$V_h = V_g n z / 60 = \frac{\pi}{240} D^2 s n z \quad (3)$$

其中: V_g 为压缩机汽缸工作容积; D 为汽缸直径; s 为活塞行程; n 为转数; z 为汽缸数。

把以上两式合并可以发现,当其它参数不变时,压缩机输入电功率与压缩机转数成正比。在系统实际运行时,蒸发温度的变化比较小,而冷凝温度间接受环境温度的影响。一般情况下,在较短的时间内环境温度的变化不会太剧烈,所以导致冷凝温度在一个控制系统采样周期内的变化较小,综合以上原因认为各参数在采样周期内近似不变,从而说明实际运行中压缩机输入电功率与压缩机转数近似成正比。有了这一结论,在供水温度 T 和 T' 之间的差距大于设定值时,就可以定量计算下一时刻压缩机的工作状态了。

根据回水温度和流量,神经网络辨识系统可以输出 3 个参数,分别是热泵系统 EER 值、压缩机耗功 W 和热泵系统供水温度 T 。为了使供水温度等于模糊推理得出的应供水温度 T' ,可以按照式(4)改变压缩机工作状态,使得热泵输出能量与热负荷相匹配。

具体计算方程如下:

$$\xi \frac{(T - T_h) \dot{Q} C_p}{COP W} = \frac{n'}{n} = \frac{f'}{f} \quad (4)$$

其中: COP 为系统制热系数; W 为压缩机耗功率, KW ; \dot{Q} 为供水流量, kg/s ; C_p 为水的比热, $kJ/kg \cdot ^\circ C$; T' 为模糊推理得出的供水温度, $^\circ C$; T_h 为用户回水温度, $^\circ C$; n 为当前时刻压缩机转数, r/s ; n' 为下一时刻压缩机转数, r/s ; f 为当前时刻电机定子电源频率, Hz ; f' 为下一时刻电机定子电源频率, Hz ; ξ 为比例系数。

通过上式的计算,可以直接定位下一时刻压缩机的运行工况,使得热泵输出能量达到或接近实际热负荷。

按照图 4 中的控制方案,利用 Matlab 中的仿真工具 Simulink 完成了初步的仿真过程,结果如图 5 所示。

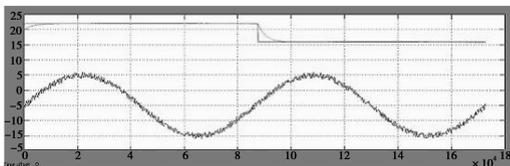


图 5 仿真结果图

图中的正弦线代表外界环境温度,阶跃线代表建筑物内温度的设定,而另一条几乎和设定温度线重合的线代表实际建筑物内部温度,可见当自适应神经网络

完成学习后,和神经网络辨识系统配合可以很好地控制热泵系统和用户负荷的匹配。

4 结论与建议

经过模型的建立、方案的制定和仿真分析,得到如下两点结论:

1) L-M 学习算法可以很好地应用于热泵系统的神经网络辨识中,该算法不仅收敛快、精度高,而且网络结构简单。由该算法生成的辨识系统平均误差为 2.016%。

2) 神经网络辨识系统和自适应神经网络控制系统可以较好地匹配,完成对热泵系统负荷的控制,而且响应快、超调量小,智能程度高。

今后将针对该方法进行试验研究,同时也需进一步对压缩机转数和制热量之间的关系进行试验研究,提高比例系数 ξ 的精度,进而保证该智能控制方案在实际应用中的精度。

参考文献:

- [1] 范亚明,李兴友,付祥钊. 福州住宅应用土壤源热泵的全年能耗与可行性分析[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(1):93-95.
FAN Ya-ming, LIXing-you, FUXiang-zhao. Annual energy consumption and feasibility assessment of ground-source heat pump in residential building in Fuzhou city[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007,29(1):93-95.
- [2] 徐邦裕,陆亚俊,马最良. 热泵[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [3] 李德英. 供热工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [4] 高桂芝,田继民. 水源热泵空调系统的应用与分析[J]. 河北建筑工程学院学报,2004,22(2):13-15.
GAO Gui-zhi, TianJi-min. Analysis on the application of heating-air Conditioning system of water source heat pump [J]. journal of hebei institute of architectural engineering, 2004, 22(2):13-15.
- [5] 朱秋兰,史琳,陈军,等. 水源热泵采暖的综合经济性分析[J]. 华北电力大学学报,2004,31(6):93-96.
ZHU Qiu-lan, SHI Lin, CHEN Jun, et al. Comprehensive economic evaluation on heating by a water heat pump[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(6):93-96.
- [6] 钱祥生. 系统的建模与响应[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [7] 王贇程. 过程动态模型[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [8] 赵黎丽. 两种人工智能方法应用于地热热泵系统辨识[J]. 系统仿真学报,2004,16(7):1376-1379.
ZHAO Li-li. Two artificial intelligent methods applied in the identification of geothermal heat pumps system[J]. Journal of System Simulation, 2004,16(7):1376-1379.
- [9] ZUBAIR S M, HABEL V. Compressor capacity modulation schemes [J]. Heating, Piping, Air Conditioning, 1989, (1): 135-143.

(编辑 陈 蓉)