

冷库制冷系统控制算法研究进展

Research development on control method in cold storage refrigeration

徐旻晟 谢 晶 王金锋

XU Min-sheng XIE Jing WANG Jin-feng

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. China Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

摘要:主要从控制算法和控制效果的角度,对当前国内外冷库制冷控制系统进行分析,根据控制系统在工程应用中的目的将控制系统分为单输入单输出和多输入多输出系统,并对比传统的 PID 算法和当前热门的智能算法,如:模糊控制、遗传算法和人工神经网络等在冷库制冷系统中的控制效果。在分析与比较前人工作的基础上得出目前广泛应用的传统算法无法达到的令人满意的效果,而智能算法虽然能够优化控制效果,但在实际工程应用中还需要改良等结论。并提出冷库制冷控制方法下一步的研究方向:实际应用中智能算法的完善、制冷系统的优化建模以及优化系统的解耦控制等。

关键词:控制方法;冷库;控制算法;研究进展

Abstracts: The current status of control system in cold storage refrigeration system was introduced. Several related research topics were analyzed including both algorithms and effects. According to the purpose in application, the control systems were divided into single input single output (SISO) and multiple input multiple output (MIMO). The effects of conventional PID algorithm and intelligence algorithms, such as fuzzy logic algorithm, artificial neural network and genetic algorithm were also analyzed. Some conclusions of current researches on control system in cold storage refrigeration system were proposed, such as current widely used conventional algorithms which can't obtain satisfied control effect, although intelligence algorithms can be better, but there are still some unacceptable problems in practical application. The further research directions of control method in cold storage refrigeration system were also presented, such as to improve intelligence algorithms in the practical application, and optimize modeling of system and system's decoupling control.

Keywords: control method; cold store; control algorithm; research development

随着人们生活水平逐步提高,为了延长食品的保藏时间和保障贮藏期间的品质,冷库的作用日益显著。对于冷库而言,制冷控制质量的优劣直接关系到库内贮藏货物的质量和运行的能耗,所以冷库制冷控制系统的可靠性、合理性和稳定性至关重要。为了使整个系统能够正常且高效运行,有许多热工参数要进行控制,如温度、压力、流量等。对这些参数精确、及时的控制是控制系统设计的关键。也就是说,制冷控制系统的主要任务在于,当外部条件或者系统负荷变化时,通过一定的控制动作,在安全、合理的运行工况下,保证制冷系统达到要求的性能指标,并尽可能提高系统在不同运行工况下的效率和经济性。冷库自动化控制的优越性有以下几点^[1]:①降低冷库能耗;②使生产更为安全;③提高劳动效率,降低劳动强度;④降低设备维修成本。

相较于冷库发展较为发达的国家,如美国、日本等,中国在冷库自动化控制方面起步较晚。20 世纪 70 年代,冷库自动控制才开始在国内应用^[1],经过 40 多年的实践和发展,冷库自动化控制水平已经有了明显的提高,但仍存在控制精度不高、控制效率低下等问题。因此,如何将智能算法引入制冷系统以提高控制效果成为了研究热点。文章将从国内外研究的现状和发展趋势出发,通过对不同类型的冷库制冷系统控制方案进行阐述,以进一步探讨智能控制算法在冷库制冷系统中的研究动态。

1 冷库制冷控制系统发展现状

1955 年中国建造第一座冷库,此后随着社会经济的发展,各类食物的贮藏量大大增加,中国对冷库的需求越来越大。2014 年中国冷库总容量共计 2 046 万 t。目前,中国冷库主要分布在沿海经济较为发达的地区^[2]。

基金项目:上海市科委项目(编号:14dz1205101)

作者简介:徐旻晟,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通讯作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士,博士生导师。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2014-11-05

中国冷库自动化控制起步较晚,水平和使用程度都较低。有数据^[3]显示,目前中国大型冷库的自动化程度只有 30%左右。冷库自动化主要体现在冷库制冷系统能够按照预先设定的目标运行,对运行参数的采集、控制和故障出现报警并及时做出响应。可编程逻辑控制器因其使用方便可靠,适应性强且性价比高,被广泛应用在冷库自动化控制中。李忠等^[4]在冷库温度控制方面,利用 PLC 对螺杆压缩机进行变频调速研究,实现了冷库节能降耗。高鑫等^[5]则针对船舶伙食冷库中压缩机启停、融霜等进行了控制系统的设计,使系统的运行更高效,维护更便捷。近年来通信传输技术在冷库自动化中发展迅速,赵方等^[6]、管新等^[7]和吴军等^[8]基于不同单片机构建冷库监控系统,利用通信技术传输采集的冷库温度等数据,实现了冷库运行状态的远程实时监控以及系统故障的报警等功能。除此之外,由于控制系统结构的高度分散性,现场总线技术应用在冷库中,实现了冷库制冷系统按照最小过热度运行^[9],各个部件的运行状态实时集中监控^[10]等功能。

在冷库自动化中,进行任何一个制冷控制系统的设计时,首先建立被控系统或部件的数学模型,它反映了系统输入、内部状态和输出之间的数量和逻辑关系,为计算机进行运算处理提供依据;然后根据适合的数学模型推出控制算法,所谓自动化就是计算机依照规定的控制算法进行系统或部件的控制。因此控制算法的正确选择是保证良好的控制系统品质的前提条件,甚至是决定因素。

随着制冷行业和计算机信息技术的不断发展,制冷系统的控制水平得到了显著提高。根据控制系统在工程应用中的目的可将控制方案分为:为简化控制的单输入单输出(single input single output, SISO)控制系统和为优化控制效果的多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)控制系统。以下主要从上述两个方面来进行制冷控制方法的综述。

2 单输入单输出控制系统

目前,商业制冷领域常用的控制系统采用的还是多回路的单输入单输出系统控制。单输入单输出系统,即一个输入变量对应一个输出变量^[11],是最简单最经典的控制系统结构。这种控制系统的特点是:① 控制系统简单,易于实现;② 系统响应较快;③ 不考虑耦合,参数容易选定。在单输入单输出控制系统中,按照控制算法又可划分为自动控制发展初期的传统算法和近年研究热门的智能算法的控制系统。

2.1 传统控制算法

传统 PID 算法,即按照比例(proportional)、积分(integral)和微分(differential)3 种控制规律进行控制,它们组成的都是线性控制器,其最大特点就是简化了控制模型,使系统的控制易于实现^[12]。由于 PID 算法成本低廉、简单实用、技术成熟、控制参数易于调整,在蒸发器出口过热度控制领域得到了广泛的应用^[13]。Yasuda 等^[14]基于试验结果,提出

用带有延迟环节的一阶惯性线性时不变传递函数模型表示蒸发器的进出口温差对热力膨胀阀的开度响应,并讨论了 PI 算法对系统稳定性的具体影响。试验证明,该函数模型可以很好地确定合适的控制参数。采用该模型的控制系統显示出对过热度较好的控制效果。

在制冷系统中,良好的蒸发器出口过热度控制是保证系统运行稳定的关键。但由于传统 PID 算法是建立在事先设定好的固定模型的基础上,它对变化的工况很难有良好的控制效果,而制冷系统中过热度恰恰是一个参数时变的被控对象,也具有明显的时滞性,因此,采用传统 PID 算法无法得到良好的控制效果^[15]。针对这些问题,一些学者^[16-18]提出了对 PID 算法的改进。为解决过热度控制中的纯滞后问题,学者提出不同带预测的控制方法。蒸发器出口过热度通常是通过调节膨胀阀的开度来控制的。Xie 等^[19]和赵敏等^[20]根据试验数据获得的过热度对膨胀阀开度响应的传递函数模型,分别提出基于动态矩阵控制(dynamic matrix controller, DMC)和广义预测控制(generalized predictive control, GPC)的蒸发器出口过热度控制方案,对传统 PID 算法控制参数进行自动整定和优化,以解决系统纯滞后问题。仿真试验均表明,较于传统 PID 控制,改进的控制方案在控制效果和响应速度方面都得到了明显改善。

传统的 PID 控制算法需要首先确定系统的控制参数,同时,在控制过程中要求制冷设备运行在与其测定工况相吻合的条件或者在其允许的变化范围内,否则就必须重新调整控制参数,因此, PID 算法控制适应性不强^[21]。虽然一些学者提出了 PID 算法的改进算法,但这些算法都是有前提条件,限制了其在冷库制冷系统中的控制效果,因此 PID 算法不能很好适用于制冷控制系统。为了达到更好的控制效果,学者们将智能算法引入制冷控制系统。

2.2 智能控制算法

目前常用的智能算法主要包括:模糊逻辑控制(fuzzy logic control)、人工神经网络(artificial neural network)和遗传算法(genetic algorithm)等。

相较于 PID 算法,模糊控制算法不依赖于精确的数学模型,而是建立在一种非线性控制策略上,采用模糊语言表达了对专家经验和常识的归纳和优化^[22]。因此,它在非线性系统的控制中得到了广泛应用^[23]。同时,模糊逻辑控制使控制系统具有了自适应控制能力,有很强的稳定性和鲁棒性。对于像冷库制冷系统这样的时变性和非线性特征明显的系统,模糊逻辑控制可以很好地应用于其控制系统中,近年来模糊逻辑控制应用在制冷控制系统中成为了研究的热点。由于制冷系统中,蒸发器过热度对膨胀阀开度响应是典型的非线性,一些学者^[24-25]对模糊逻辑控制应用于蒸发器出口过热度的控制进行了研究。陈明锋等^[26]依据模糊控制理论,提出了一种基于传统 PID 算法的过热度智能控制策略,并以某冷库为试验对象,获得了更快的响应时间和更稳

定的控制效果。

除了用于阀门开度的控制,模糊控制还常常被应用于温度控制^[27-30]和压缩机运行控制^[31-32]中,并在节能方面有良好的表现。Apréa 等^[33]将模糊逻辑控制引入某商用冷库制冷控制系统,代替传统的恒温控制,用于控制压缩机处于最适宜的转速下,从而控制压缩机的制冷量,达到节能的目的;并在压缩机电机频率处于 30~50 Hz,工质为 R407C 时,采用改模糊逻辑控制相较于压缩机电机处于 50 Hz 下的传统恒温控制节能约 13%。钟国梁^[34]针对某大型氨冷库中存在的供液阀开度和压缩机运行缸数的调节不准确等原因导致的运行能耗浪费问题,提出了基于模糊逻辑算法的库房蒸发器供液控制和制冷动力设备控制方案,实现了可根据负荷量大小自动控制制冷动力设备的输入能量。

与基于大量专家经验和常识的模糊逻辑控制相比,人工神经网络是通过模拟大脑神经网络处理、记忆信息的方式进行信息处理^[35]。其最大特点是具有自学习能力^[36]。王皓^[37]针对制冷系统中蒸发器这种具有一阶带滞后特性的惯性被控对象,为了实现对蒸发器出口过热度更好的控制,利用神经网络自学习的特点,将单神经元应用于传统 PID 调节参数的自学习整定。试验证明神经网络应用于电子膨胀阀的开度控制具有更佳的动态响应和鲁棒性。但该神经网络的训练、学习时间还比较长。

除了前两种智能算法,近年来,遗传算法在制冷控制系统中的应用也越来越多。相较于传统算法,遗传算法是一种具有较好鲁棒性和广泛适用性的全局优化算法^[38]。由于遗传算法通过模拟自然进化过程搜索最优解,常被应用于其他控制算法的优化。赵敏等^[39]采用最小二乘法获得了制冷系统传递函数模型,设计了系统过热度的 DMC,针对 DMC 参数选取时存在的主观性和随机性问题,给出了基于遗传算法的 DMC 参数寻优方法,减少了寻优时间。仿真试验证明,优化后的控制系统对过热度的控制相对于传统 PID 更稳定。

3 多输入多输出控制系统

在单输入单输出(SISO)的制冷控制系统中,不论采用传统算法还是智能算法,都不可避免其本身的一个缺陷,就是由于制冷系统是一个大惯性、大滞后的复杂耦合系统,其构成和运行机理比较复杂,因此压缩机运行工况、制冷剂的状态、流量的变化情况、传热效率等因素都是相互关联,互相影响的,这样的系统是难以用确切的数学模型来描述的^[40]。而单输入单输出控制系统大多没有考虑到制冷系统的耦合性。为了实现制冷系统控制的最优化,多输入多输出(MIMO)控制系统被引入制冷系统控制,由于其考虑了各个影响因素之间复杂的耦合关系,弥补了单输入单输出系统的这一缺失,使得制冷控制系统在控制精度、抗干扰能力等方面都较于前者有明显提高。与单输入单输出系统一样,根据控制算法的不同,可以将多输入多输出控制系统分为采用传统算

法和采用智能算法的控制系统。

3.1 传统控制算法

与单输入单输出相比,多输入多输出系统结合 PID 算法,考虑了控制参数的耦合性,能很好地适应具有多个变量的强耦合系统。并且在传统 PID 算法的基础上引入自适应、自整定等现代控制理论,以获得参数更准确、智能的控制。

蒸发器过热度的控制就是一个典型的多变量强耦合系统,各参数的相互影响明显,国内外研究者对过热度控制做了深入的研究。Li 等^[41]为消除干扰提出了一变转速制冷系统的解耦模型,并设计了一种基于一般 PI 控制规律的制冷系统独立控制方案。试验结果证明,该控制方案在保证控制精度的同时,也能保证系统性能参数(COP)处于较佳的水平。Fallahsohi 等^[42]在传统 PID 控制算法基础上提出了预测函数控制法,并对比两者对蒸发器出口过热度的控制效果,发现预测控制可以有效抑制干扰,完成过热度的精确控制,并且保证更高的系统性能参数。Beghi 等^[43]基于其原有的虚拟蒸发器原型^[44],提出了一种新的具有两个嵌套循环的蒸发器过热度控制方案,并进行了控制器的性能评估。

除此之外,温湿度自控系统也是一个典型多输入多输出、强耦合的非线性时变系统^[45],具有鲜明的纯滞后、大惯性特点,多输入多输出控制系统结合传统 PID 算法可以获得良好的控制品质。梁晋明等^[46]则提出了新的控制模式,分时二次优化控制方法,结合预估模型和传统 PID,通过二次优化得到不同的控制参数进行控制,试验证明,该控制方案性能好,适应性强。

3.2 智能控制算法

近年来,随着智能控制理论和计算机处理技术的不断发展和成熟,采用传统 PID 算法的控制系统被现代化的智能算法所替代,采用高级控制策略,结合适合大耦合系统的多输入多输出控制系统,针对多个变量的联合控制,达到控制效果最优化成为制冷控制系统的研究热点。近年来,智能算法应用在蒸发器出口过热度控制、冷库库温控制等方面得到了快速发展。

蒸发器出口过热度是否适合关系到制冷系统能否处于高效安全的运行工况。为了能够精确地控制蒸发器出口过热度,达到控制效果的优化,采用不需要依赖确定的数学模型,具有一定自学习和非线性逼近能力的智能控制算法,配合多输入多输出控制系统,可以改善基于传统算法的控制系统性能。许多学者对此进行了大量的研究。Ekren 等^[47]对比了 PID 算法、模糊逻辑控制和神经网络对电子膨胀阀的控制效果,在与变频压缩机共同控制的情况下,采用神经网络的控制方案能更快获得更稳定的过热度,并且具有低于 PID 控制 8.1%和低于模糊逻辑控制 6.6%的功耗。针对由于蒸发器出口过热度对膨胀阀开度的响应的非线性导致传统 PID 算法不能很好地满足控制要求的问题,初勤亭等^[48]采用基于 PLC 的模糊 PID 参数自整定控制算法,以系统误

差 e 和误差变化 ec 为输入量,以 PID 调节参数 K_P 、 K_I 、 K_D 为输出量,建立模糊控制表,在 SIEMENS 的 S7-300 型号 PLC 上开发了模糊控制程序,试验结果证明,该控制器调节时间短,动态和静态特性得到了全面的改善。田健等^[49]利用基于非线性控制策略的模糊逻辑控制结合具有较强自适应和自学习功能的神经网络,采用多输入多输出控制系统,提出了一种具有结构和参数学习能力的自组织模糊神经网络控制器,通过神经网络从已有的数据提取模糊控制规则,选取适合的控制性能指标。试验证明该控制器能够同时控制蒸发压力和蒸发器出口过热度。

除了保证制冷系统稳定、高效运行之外,保持稳定的冷库温度是冷库制冷的主要任务,这也是保证冷库贮藏物质质的前提条件。丁凡利^[50]采用 PROFIBUS-DP 通讯协议,设计了基于模糊 PID 的冷库库温的控制,仿真试验证明,对比传统 PID 控制该控制方案减小了系统超调量和稳定时间。潘永平^[51]和申江等^[52]则针对制冷系统明显的非线性热力学耦合特性,设计了基于模糊控制原理和 Lyapunov 稳定性理论的多变量稳定自适应模糊控制器,解决了制冷系统模糊推理规则难以获取的问题,仿真和试验结果表明,该智能控制方法对库温控制效果良好,精度高,鲁棒性强。

4 总结和展望

随着研究的深入,制冷控制系统从 SISO 发展到 MIMO,从传统的算法,如 PID 算法,到现在的智能算法,如遗传算法、模糊控制等。根据前人对制冷控制系统的研究,可以得到以下结论:① 中国现有的冷库自动化程度还比较低,相关技术正处于上升和发展时期,学者进行了大量的研究;② 尽管 PID 算法简单实用,技术成熟,目前应用广泛,但对制冷系统这样的非线性强耦合系统来说,不论是传统 PID 算法还是改进后的 PID 算法,控制效果并不令人满意;③ 模糊逻辑控制、人工神经网络等智能算法因其不需依赖精确数学模型,并且较适合非线性系统,针对强耦合性也有较好控制效果,在理论上适用于制冷系统的控制,近年来成为了国内外学者的研究热点,但在实际应用中,采用智能控制算法的控制系统仍有许多问题需要解决;④ 对于简单的单输入单输出控制系统,多输入多输出系统因其考虑了制冷系统各因素之间的耦合性,可以获得更好的控制效果,达到控制最优化的目的,这将会成为今后的研究热点。

但是,由于制冷系统的构成和运行机理的复杂性,各个被控对象的时变性和非线性特点明显,很多现有的控制系统未能达到预期效果,对制冷系统精确的自动控制仍存在问题,为了进一步优化制冷系统的控制,可以从以下方面进行:① 针对实际应用选择正确控制算法。不同的控制算法对不同系统或是部件的控制效果不同,需要结合实际情况进行选择,才能达到理想的控制效果。② 智能控制算法的完善和应用。智能控制算法虽然在理论上比传统算法有更好的效果,但在实际应用中还存在许多问题需要解决,比如缩

短人工神经网络的学习和训练时间,解决多输入多输出系统中模糊推理规则难以取得等问题。只有完善这些方面,才能使得智能算法在制冷控制系统中得到更广泛的推广与应用。③ 适合制冷系统整体或者制冷部件模型的建立。对于制冷系统这样具有大惯性、大滞后的复杂耦合系统来说,整体建模或者单个制冷部件建模较为困难。但是适合、准确的模型是获得良好控制效果的前提条件,这还需要研究人员结合实际制冷系统,针对不同的控制方案进行深入的研究。④ 优化针对制冷系统的解耦控制。制冷系统是一个强耦合系统,各个参数之间相互影响,关系复杂,消除模型的耦合是保证良好控制效果的关键,因此还需要在前人工作的基础上,考虑更适合制冷系统的解耦方式,才能获得更佳的控制效果。

参考文献

[1] 刘学浩,孙天臻,邵伟. 冷库应加快实现自动化控制及微机的应用[C]//中国制冷学会第十七次团体会员大会暨第五届全国食品冷藏链大会论文集. 北京:中国制冷学会、北京制冷学会、中国制冷学会冷藏冻结专业委员会,2004:165-169.

[2] 司春强,唐俊杰,马进,等. 我国氨系统冷库安全现状及发展建议[J]. 制冷技术,2014,34(3):15-17.

[3] 蒋颖. 自动化冷库发展概述[J]. 制冷与空调,2013,13(6):1-4.

[4] 李忠,常雪花,李子彦. PLC 控制条件下变频器在螺杆压缩机制冷中的运用[J]. 食品工业,2014,35(5):182-184.

[5] 高鑫,陆振军. 基于 PLC 的船舶伙食冷库制冷控制系统的设计[J]. 中国修船,2013,26(1):38-40,43.

[6] 赵方,赵霞,卢青波,等. 小型冷库温度自动控制及远程监控系统设计[J]. 中国农机化学报,2015,36(2):249-252.

[7] 咎新,于忠得. 基于 GSM 技术的食品冷库远程监控系统设计[J]. 大连工业大学学报,2014,33(6):461-464.

[8] 吴军,傅强,任华清,等. 基于 ARM9 的智能冷库系统设计[J]. 机械与电子,2014(4):57-59.

[9] 张涵,吴爱国,杨硕,等. 基于 ARM 的制冷系统智能控制器设计[J]. 仪表技术与传感器,2013(12):29-32.

[10] 毕海婷,任大伟. MODBUS 总线 PLC 冷库自动化控制系统[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2014,35(1):101-105.

[11] 张鑫. 基于 LabVIEW 的热电空调温度模糊控制系统的研究[D]. 大连:大连海事大学,2008:21.

[12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计:MATLAB 语言与应用[M]. 北京:清华大学出版社有限公司,2006:253-255.

[13] 李兆博. 制冷机双回路节能控制方法的研究与实现[D]. 天津:天津大学,2012:5.

[14] Yasuda H, Ishibane K, Nakayama S. Evaporator superheat control by an electrically driven expansion valve[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2011, 9(2):147-156.

[15] Alleyne A, Brennan S, Rasmussen B, et al. Controls and experiments: Lessons learned [J]. Control Systems, IEEE,

2003, 23(5): 20-34.

[16] 吴俊云, 葛荣建, 郭明珠, 等. 基于 STC89S52 单片机的电子膨胀阀的控制系统研制[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 81-85.

[17] Zhao Min, Jia Xiao-long, Song Ping. GPC based PID control for superheat control of refrigeration system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 846: 148-152.

[18] 宋萍萍, 赵敏. 基于模型的制冷系统过热度 DMC-PID 串级控制[J]. 制冷技术, 2012, 40(10): 75-80.

[19] Xie Jun, Wang Song-li, Wang Yu-wei, et al. Research on predictive control of evaporator superheat system with time-delay based on DMC intelligent optimization[M]// Practical Applications of Intelligent Systems. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 785-793.

[20] 赵敏, 贾晓龙. 基于 GPC-PID 的制冷系统过热度控制器[J]. 信息技术, 2014, 38(6): 34-37.

[21] 尹珊波. 推力液压系统压力与速度的复合控制研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 82-85.

[22] 唐伟强, 王飞. 热收缩膜收缩温度的自适应模糊控制研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 101-104.

[23] Precup R-E, Hellendoorn H. A survey on industrial applications of fuzzy control[J]. Computers in Industry, 2011, 62(3): 213-226.

[24] 张洪臣, 任益夫, 李凤丽, 等. 基于 PLC, 变频, 电子膨胀阀, 触摸屏的小型冷库微电脑控制系统的研究[J]. 廊坊师范学院学报: 自然科学版, 2010, 10(5): 77-80.

[25] 初勤亭. 冷库制冷系统模糊 PID 控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008: 15-47.

[26] 陈明锋, 杨昭, 陈爱强, 等. 制冷系统变容量智能控制的理论及实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(3): 24-28.

[27] Silva F V, Filho L C N, Silveira V. Experimental evaluation of fuzzy controllers for the temperature control of the secondary refrigerant in a liquid chiller[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 349-354.

[28] Fileti A M F, Antunes A J B, Silva F V, et al. Experimental investigations on fuzzy logic for process control[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(9): 1 149-1 160.

[29] 宫晓彬, 柳建华, 宋敏, 等. 压缩冷凝机组测试系统的恒温室温度控制系统设计[J]. 流体机械, 2008, 36(7): 46-48.

[30] Franco I C, Dall’agnol M, Costa T V, et al. A neuro-fuzzy identification of non-linear transient systems: Application to a pilot refrigeration plant[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 2 063-2 075.

[31] 吴立群. 模糊控制在冷库控制系统中的应用[J]. 机电工程技术, 2006, 35(5): 74-76.

[32] 潘锦峰. 制冷系统新型控制器的开发及控制性能研究[D]. 北京: 中国计量学院, 2013: 46-54.

[33] Aprea C, Mastrullo R, Renno C. Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(6): 639-648.

[34] 钟国梁. 基于模糊控制的大型冷库集中式氨制冷系统自动化节能研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(3): 8-12.

[35] 童莉葛. 变转速制冷系统电子膨胀阀控制特性及控制策略研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2004: 10-12.

[36] 王晓亮, 陈光明. 神经网络理论在制冷与空调中的应用[J]. 西南工学院学报, 1998, 13(3): 28-30.

[37] 王皓. 神经元 PID 自适应方法在制冷用蒸发器过热度控制中的应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1999: 16-44.

[38] 杨智民, 王旭, 庄显义. 遗传算法在自动控制领域中的应用综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(4): 329-339.

[39] 赵敏, 贾晓龙. 基于遗传算法的制冷系统动态矩阵控制[J]. 信息技术, 2014, 38(8): 18-21.

[40] 赵文敏, 黄国辉, 周曙华. 电子膨胀阀在智能化模糊变频空调器中的控制[J]. 流体机械, 2000, 28(7): 57-61.

[41] Li Hua, Jeong S K, You S S. Feedforward control of capacity and superheat for a variable speed refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6): 1 067-1 074.

[42] Fallahsohi H, Changenet C, Placé S, et al. Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 409-418.

[43] Beghi A, Cecchinato L, Rampazzo M. On-line, auto-tuning control of electronic expansion valves[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(4): 1 151-1 161.

[44] Beghi A, Cecchinato L. A simulation environment for dry-expansion evaporators with application to the design of autotuning control algorithms for electronic expansion valves[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(7): 1 765-1 775.

[45] 庾朝永. 大型船舶蔬菜储藏仓库自动控制系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 128-131.

[46] 梁昔明, 黄佳, 李山春. 分时二次优化控制的空调温湿度控制系统[J]. 控制工程, 2011, 18(2): 275-278.

[47] Ekren O, Sahin S, Isler Y. Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(6): 1 161-1 168.

[48] 初勤亭, 张萍. 基于 PLC 的电子膨胀阀模糊参数自整定控制[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(7): 17-20.

[49] Tian Jian, Feng Quan-ke, Zhu Rui-qi. Analysis and experimental study of MIMO control in refrigeration system[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(5): 933-939.

[50] 丁凡利. 基于 PROFIBUS-DP 现场总线的千吨冷库制冷自动控制系统设计[D]. 济南: 山东大学, 2012: 17-56.

[51] 潘永平. 冷库制冷系统多变量自适应模糊控制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007: 19-68.

[52] 申江, 董斌, 王瑞龙. 制冷系统自适应模糊控制器的实验研究[J]. 制冷技术, 2014, 42(2): 52-55, 37.