

# 多联机小型商用集中空调控制技术 技术的现状及发展趋势

沈阳工业大学 李树江<sup>☆</sup> 王媛波 吕梁年 秦 军

**摘要** 论述了多联机小型商用集中空调控制技术的现状,分析了多蒸发器空调系统压缩机、节流装置、换热器以及整个系统的建模、控制方法和特点,展望了空调系统优化控制技术的发展趋势。

**关键词** 多蒸发器空调系统 控制技术 系统模型 优化

## Status and development tend of control technology for VRV commercial central mini air-conditioners

By Li Shujiang<sup>★</sup>, Wang Yuanbo, Lü Liangnian and Qin Jun

**Abstract** Summarizes the current status of the control technology for VRV commercial central mini air-conditioners, analyses the modeling methods, control methods and characteristics of compressors, throttling sets, heat exchangers and whole system for the multi-evaporator air conditioning systems, and prospects the development tend of optimizing control technology for air conditioning systems.

**Keywords** multi-evaporator air conditioning system, control technology, system model, optimization

<sup>★</sup> Shenyang University of Technology, Shenyang, China

### 0 引言

相对于传统的分体式空调而言,商用集中空调具有节能、舒适、容量调节方便、噪声低、振动小、不破坏建筑物外观等突出优点,因此它受到了市场的青睐和生产厂家的重视。国外对商用集中空调研究较早,美国和日本早在 20 世纪 70~80 年代就开始大量应用商用集中空调系统,而我国对商用集中空调的研究则是从 20 世纪 90 年代后期开始的。

随着我国经济的发展和人民生活水平的提高,使用小型商用集中空调将成为我国空调行业发展的趋势。行业调查显示,2004 年我国大陆家用集中空调的年生产量仅有 20 万台,而台湾省则接近 10 万台,美国为 600 万台左右,日本为 200 万台。对比可知,小型商用集中空调在我国有非常广阔的应用前景。随着使用量的增长,小型商用集中空调的节能问题成为商家和用户共同关注的焦点。现有的小型商用集中空调系统主要采用定工作点控

制,然而实际运行时,系统长时间在部分负荷及变负荷下工作,造成了商用集中空调能效比低、能量耗损大。因此对于多联机小型商用集中空调节能来说,其核心技术就是对压缩机进行变容量、变流量优化控制,以提高空调系统的运行效率,从而达到节能的目的。如何在任何条件下使压缩机制冷量与多台室内机(蒸发器)及单台室外机(冷凝器)负荷最佳匹配成为商用集中空调控制技术的难点问题,也是实现节能的关键问题。

本文针对多联机小型商用集中空调的控制技术的发展状况作了较系统的分析和阐述,并指出了

<sup>☆</sup> 李树江,男,1966 年 12 月生,博士研究生,工学博士,副教授  
110023 沈阳工业大学信息学院  
(024) 25691359  
E-mail: lisj@sut.edu.cn

收稿日期:2006-03-09

一次修回:2006-05-12

二次修回:2007-04-04

小型多联机商用集中空调控制技术的发展方向。

### 1 多联机小型商用集中空调的结构

图 1 为小型商用集中空调的原理图,它是由一台制冷压缩机、冷凝器、膨胀阀、多台蒸发器以及管路组成的压缩式制冷系统。商用集中空调蒸发器数量较多,室外机由冷凝器压缩机以及其他制冷附件组成,室内机由风机和直接式蒸发器等组成。一台室外机可以通过管路向若干台室内机输送制冷剂,通过控制压缩机的制冷剂循环量和进入室内各个蒸发器的制冷剂流量就可以适时地满足室内冷热负荷的需求。尽管它与普通独立式空调在制冷原理上是相同的,但是,由于各蒸发器的物理位置不一样,负荷也可能不同,因此在控制和设定点优化上有很大不同。如何实现压缩机制冷量最佳控制和各蒸发器的过热度最佳控制,是空调系统节能运行的关键问题。

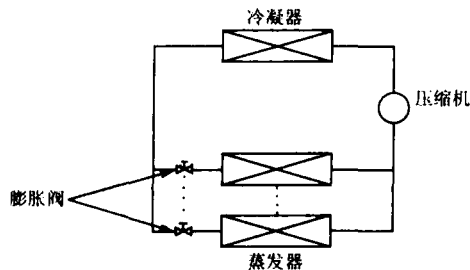


图 1 小型商用集中空调原理图

## 2 商用集中空调系统优化控制技术的发展

### 2.1 商用集中空调系统优化控制的建模方法

建立系统和关键部件的动态模型,是研究小型集中空调系统优化控制的重要工作。模型的准确性直接影响对系统的控制效果,而建立与相位变化相关的复杂热流体力学模型存在的困难限制了空调系统控制器的发展。

制冷系统以往的建模方法主要有实验辨识法和物理建模法两种。实验辨识法是指用系统辨识方法或神经网络自学习方法得到系统模型的方法,用该方法建立的模型针对性强,但物理意义不清楚,不利于分析和研究,而且缺乏普遍性。物理模型能很好地反映系统工作的物理过程,具有很好的普遍性,但它往往复杂且参数很难准确确定,不适合控制系统应用。另外还有将两种方法结合在一起使用的方法。建立适于控制的动态模型对集中空调系统来说十分关键,尤其对于商用集中空调,它的蒸发器数量多,其多变量控制器的设计需要建

立在相当精确的动力学模型基础上。

### 2.2 压缩机模型的建立

压缩机是制冷系统中最复杂的部件,其内部的热质过程非常复杂,要想精确地对其建立仿真模型非常困难。压缩机运行频率对空调器的性能有很大的影响,正确地建立变频压缩机的数学模型是建立变频空调器仿真模型的关键。

文献[1]对双制冷循环电冰箱压缩机的开、停过程建立了较完整的数学模型,对压缩机的气缸、吸气腔、排气腔和运动气阀等结构部件分别建立了流量、质量和能量方程来求流量和功率。在考虑气缸与外界存在换热的基础上,文献[2]采用集总参数法建立了压缩机的非稳态仿真模型,将变频压缩机实际运行工况离散成无穷多个定速运行工况。文献[3]通过图形法对压缩机性能曲线采用最小二乘法,拟合出了压缩机中制冷剂流量和功率的表达式。文献[4]在大量实验数据的基础上,应用二次函数的形式描述了基频下的制冷剂质量流量和压缩机耗功率,得到了制冷剂相对质量流量与频率成幂函数的关系,压缩机相对耗功率的自然对数与频率满足二次函数形式的结论。

随着智能技术的发展,有些学者将其应用到了压缩机模型仿真过程中。文献[5]提出了预测压缩机热力性能的模糊建模方法,对比研究了单纯的模糊建模与基于理论模型的模糊建模两种方法,结果表明基于理论模型的模糊建模方法具有更好的预测精度和泛化能力。文献[6]引入人工神经网络方法对压缩机的热力性能进行建模,可以获得比传统热力计算模型更好的精度和泛化性能。但这些文献中提到的运用于压缩机热力性能模拟的神经网络都是多层感知器网络(MLP),其训练方法基于某种非线性优化技术(如著名的 BP 算法),因而不可避免地存在耗时多、易陷入局部极小点和难以防止过度拟合等问题。文献[7]选用径向基函数(RBF)网络对制冷压缩机热力性能进行建模和仿真,较好地克服了选用多层感知器网络模拟存在的缺点。

以上提到的方法对压缩机内的制冷剂工况作了定性分析,并在试验室对建立的压缩机模型进行了智能仿真。这些模型虽然较为准确,但不太适合在工程上使用。文献[8]表明,在自动空调系统中压缩机的瞬时行为可以忽略,用静态模型就可以满

足系统的动态仿真过程。所以目前控制上最常用的模型是视压缩过程为绝热过程而建立的静态模型,这种模型通用性强,Rajat 等人就在此基础上建立了一种通用的压缩机数学模型<sup>[9]</sup>。

### 2.3 换热器模型的建立

蒸发器和冷凝器中制冷剂的贮存量占了整个系统内制冷剂量的大部分,所采用的模型的准确性直接影响系统中制冷剂总量的分配计算。目前对这两个部件的建模研究是很多学者关注的焦点。

制冷剂在换热器中以单相或气液两相态存在。研究者针对研究的不同目的和要求达到的预期效果,建立了换热器的稳态分布参数模型<sup>[10]</sup>、动态集中参数模型<sup>[11]</sup>、动态分布参数模型<sup>[12]</sup>和稳态集中参数模型。相对集中参数模型来说,分布参数模型的仿真结果精确度更高,但动力学方程的阶次也高,计算过程占用的时间更多,收敛速度更慢,所以只适用于仿真而不适于控制器设计。而对于集中参数模型来说,其方程数目相对分布参数模型要少,计算速度快,阶次较低,所以适合控制器设计,但准确性不高,存在较大的建模误差。

文献[13]把整个换热器作为一个集中子系统来建模,但忽略了两相区的边界移动问题。有些学者针对这个问题建立了移动边界的动态集中参数模型,以便用于控制分析<sup>[14-15]</sup>。Rajat 等人根据制冷剂在换热器中的状态将换热器分为过热区、两相区和过冷区,把每个区都作为控制体,建立了换热器的动态分区集中参数模型。不少学者研究了换热器的动态分布参数模型,他们所建立的单相区模型都相同,而两相区的模型则有所不同。葛云亭等人根据两相区内制冷剂质量流速不同时出现的雾状流、环状流及波状流三种流型,建立了两相区的三种不同的动态分布参数模型,这是各种模型中较为详细的模型<sup>[16]</sup>。文献[17]在蒸发器动力学模型建立过程中,通过对数学模型采用神经网络训练其参数的方法,得到了阶次不高但更准确的模型。

控制器设计经常采用动态分布集中模型,此模型有一定的准确性,并且阶次较低,对于多变量控制器的设计很适合。此外,工程上为建模准确还要考虑各种参数如空泡数目、传热系数、摩擦因数等对模型准确性的影响<sup>[18]</sup>,这些参数可以通过经验或实验获得。

### 2.4 制冷系统模型的建立

整个制冷系统的建模方法与各部件的建模方法相似,分为基于各部件物理模型的顺序构建方法和基于实验数据的仿真方法。文献[19]利用人工神经网络训练与测试得到的制冷系统实验数据,得到了制冷系统的人工神经网络模型。但目前控制系统的建模基本都是基于热量平衡和质量平衡并按顺序构建的,即先分别对系统各个部件建模,然后将部件模型适当组合得到系统模型。一个部件的输出由下一部件需要的输入来决定,例如物质流动装置(压缩机、膨胀阀)用输入、输出压力来计算质量流量,换热装置用输入、输出质量流量来决定压力。所以在形成一个完整系统后,有四个可控的输入,分别为压缩机转速、膨胀阀开度、蒸发器质量流量、冷凝器质量流量。虽然很多输出的表达式可由模型得到,但有些文章中仍考虑了过热温度、蒸发器出口温度、蒸发器工作压力、冷凝器工作压力<sup>[20]</sup>。文献[21]根据质量和能量守恒方程,假设控制量与制冷剂各相和管壁有关,将方程扩展为可以自由选择动态变量的形式。此方法更适于模型化简,对于多相换热器其代数计算任务也较轻,但目前此方法还处于实验室研究阶段,还未应用到工程中。

商用集中空调各个单独部件的建模方法与传统分体式空调相同,不同的是它是多蒸发器系统,且每个蒸发器都有独立的膨胀阀,从所有蒸发器流出的制冷剂在压缩机前混合。实验数据表明,对于多蒸发器空调系统,由于摩擦和压力加速下降的作用,各蒸发器出口压力趋于一致,即压缩机对蒸发器的吸气压力相同<sup>[22]</sup>,当任何一个蒸发器工作状态改变时都会影响压缩机的吸气压力。所以在此蒸气压缩系统中,制冷剂质量流量成为连接各个部件的关键,它的平衡在循环动力学中占据支配地位<sup>[23]</sup>。在单蒸发器情况下,从蒸发器流出的制冷剂质量流量可以直接用于压缩机模型,然而,在多蒸发器情况下,在计算压缩机制冷剂质量流量时,则需要计算从每个蒸发器出来的制冷剂质量流量<sup>[24]</sup>。文献[25]对多蒸发器空调系统提出了一种新的仿真方法——通过建立复杂制冷空调系统的气液两相流体网络模型,将制冷系统抽象为一个气液两相环状管网系统,并将流体网络和制冷系统的特点紧密结合,建立了基于分布参数法的网络模型,结果表明此模型的精度可用于实验室中分析各

种多联机系统的特性、规律。

为满足控制的需要,模型的简化和最终用于控制的状态空间的表达形式也很重要。文献[26-27]通过先物理建模再实验辨识建模的方法给出了更可信的模型,并通过奇异摄动方法化简得到更适合控制器设计的低阶动力学线性模型。用此方法建立的模型物理意义清楚、参数准确、阶次低,更适合控制系统应用,但同时它具有用时多、工作量大、对设计者要求高的缺点。文献[28]提到用实验验证物理模型和多输入多输出参数估计法来回归辨识系统的离散时间状态空间模型。

### 3 商用集中空调系统控制技术的发展

就制冷系统整体控制而言,通常的控制方法是用压缩机调节主机的制冷能力,用膨胀阀调节制冷剂流量,用蒸发器风扇或冷凝器风扇改变制冷剂的换热能力,所以控制输入量为压缩机转速、电子膨胀阀开度、蒸发器风扇转速和冷凝器风扇转速。其中前两者的控制是研究的重点,因为在商用集中空调中负荷的变化决定压缩机的转速变化,而电子膨胀阀的开度决定流经蒸发器的制冷剂流量。

压缩机的变容量、变流量优化控制技术是提高集中空调系统运行效率的关键。目前对压缩机的控制,也就是对变容量的控制,大多是通过改变变频压缩机的转速来达到的,但压缩机的转速有一定范围,所以在设计控制器的时候需要考虑此问题。文献[29]使用高速循环压缩机,其容量控制通过离合器的开关控制来实现,当压缩机工作在高速循环状态时通过前馈控制和 PI 控制很容易实现膨胀阀的开度调节,采用此方法具有压缩机成本低,工艺上容易实现的优点,但无法消除因压缩机切换而引起的振荡对过热度的影响,所以当负荷改变时需较长时间才能重新达到平衡,在达到平衡态之前会造成大量的能量损耗。

变频压缩机的运行频率与室内热负荷基本呈线性关系<sup>[30]</sup>,所以已有的控制大都将重点放在膨胀阀开度的控制上。电子膨胀阀在制冷系统中起着配合压缩机调节制冷剂流量的作用,对其进行有效的控制对制冷系统的节能及可靠运行有极其重要的作用,而电子膨胀阀能否稳定工作,能否获得良好的调节质量,控制规律至关重要。以蒸发器过热度为控制目标的电子膨胀阀的控制算法多采用 PID(或 PI)调节<sup>[31]</sup>。但由于 PID 控制器参数的整

定建立在简化的、不变的模型基础之上,故在节能方面难以取得满意的效果。许多研究者对 PID 提出了改进,Gruhle 等人首先提出了变增益问题,孟建军提出了在线自适应调节 PID 参数的方法<sup>[32]</sup>。这些改进的 PID 算法都用到了自适应控制,但受模型及算法复杂性等条件的制约,实际应用不多。文献[33]提出了一种新的非线性 PI 控制方法,其中心思想是引入基于模型的线性反馈来补偿系统的非线性,因此蒸发器温度和过热度可以用线性 PI 控制器来控制,此方法的主要优点是即使有较大的建模误差也可以得到好的控制性能,且反馈控制增益小,无需大范围调解 PI 增益,更利于设计程序。

对蒸发器这种模型易受外界影响而发生变化的设备,要获得更高的运行效率,控制器设计除了采用自适应算法外,还可以采用鲁棒性强的算法,其中模糊控制越来越多地受到了重视。模糊控制模仿人的思维的一种控制方法,他不依赖被控对象的数学模型,只依赖系统的物理特性,特别适合于制冷系统这样非线性强,滞后性大的系统。刘顺波等人将其应用于蒸发器过热度的控制,取得了较好的效果<sup>[34]</sup>。文献[35]讨论了蒸发器过热度控制中将模糊控制与 PID 控制结合的方式:在串联方式中,模糊控制器根据被控制过程的一些基本信息,输出 PID 控制器的参数,从而使 PID 控制器在系统工况发生变化时也能达到好的控制效果;在并联方式中,在启动或误差大时,启用模糊控制器,在误差小时切换到 PID 控制器,这就兼顾了两种控制器的优点。

简单模糊控制器控制性能的优劣取决于人们对操作规则总结的完善度。由于集中空调系统是一个滞后性强、非线性的时变系统,其控制规则难以归纳、完善,影响了简单模糊控制器的控制效果。为此,很多自适应方法被引入到简单模糊控制器中。在可调整模糊控制器基础上,文献[36]引入了加权因子和比例因子,得到的在线调整优化算法增强了系统的鲁棒性,在不同的工作条件下,能保持系统良好的控制品质,也就是具有很好的能效比,但该方法的模糊控制规则及隶属度函数的确定依赖人的经验,当模糊控制输入变量较多或输入论域所定义的模糊变量较多时,模糊控制所能列举的规则数非常大,要找出最优的规则很困难,有时甚至

是不可能的。

神经网络作为智能控制的主要内容在制冷空调系统中也得到了广泛的应用,如用于故障检测和诊断、负荷预测等。在电子膨胀阀的控制方面,文献[37]尝试将单神经元模型应用于 PID 参数的自学习整定,以实现用电子膨胀阀更好地控制蒸发器过热度的目的。采用神经网络来求解非线性系统的最优反馈控制,不需要占用过多的计算时间和存储空间,对于非线性 MIMO 系统,可以实现较快地到达优化控制点的目的。但是,由于该算法本质上仍然是基于模型的全局优化控制方法,在长时间内难以满足实时优化的要求,而且,由于实际对象的结构、参数和环境都具有很大的不确定性,按照模型得到的最优控制实际上往往不能保持最优,有时甚至会引起控制质量严重下降,造成大量能量被损耗<sup>[38]</sup>。预测控制的滚动优化和反馈校正始终建立在实际控制过程的基础上,能够有效地克服控制系统模型不精确、非线性、时变等不确定性因素的影响,因此,采用预测控制中的滚动优化思想来训练神经网络控制器时,对于每一个采样时刻,性能指标只在从该时刻起到未来某一时刻的有限时段内进行优化,到了下一采样时刻,优化时段则同时向前推移,这样不仅可以确保获得最优点,还能减轻搜索最优点过程中的计算量,使控制策略反应更及时,具有更好的节能效果<sup>[39]</sup>。

由于神经网络存在网络结构和网络规模较为复杂以及学习收敛性差等问题,至今没有获得令人满意的结果。有人尝试将遗传算法引入蒸发器过热度的模糊控制中,使模糊控制具有了一定的自学习能力<sup>[40]</sup>。

目前空调系统的控制大多采用的是单一控制,即一般都是控制膨胀阀开度,而其他因素如压缩机转速、换热器风机转速等都是被动调节,此种调节方式调节时间长、振荡大、能源浪费多,不满足节能和舒适的需要。文献[41]通过比较发现,多变量控制比单变量控制调节速度快,并能减轻振荡和实现节能。尤其是像小型多联机商用集中空调这样的多蒸发器空调系统,由于各个蒸发器间的操作参数会互相干扰,导致其控制更难实现,所以就更需要设计多变量控制器。文献[20]提出了一种新的控制策略,即用吸气压力作控制变量来调节压缩机转速,根据室温调节膨胀阀的开度,用一个具有修正

因子的自调整模糊控制器作为控制器,达到了预期的控制效果。值得注意的是,在多变量系统的控制过程中,蒸发器的瞬时响应要比压缩机压力和质量流量的瞬时响应慢,所以文献[42]提出此系统的控制可以使用两种时间量程。

以上所提及的控制方法在工程中使用最广的是 PID 控制方法,用此方法可以在工作点附近得到较好的控制效果,即可以达到较高的能效比,但在全局范围内其控制效率不高,而自适应 PID 控制则具有全局范围内控制效率高,可以得到较高的全局能效比,并且相对于模糊和神经网络控制来说简单省时的优点,比较适合工程应用。

#### 4 小型集中空调控制系统的发展趋势

对多联机商用集中空调来说,其技术核心是压缩机的变容量、变流量优化控制。随着控制理论和微电子技术的发展,采用 32 位及 32 位以上嵌入式系统为核心处理器和先进控制策略的高效节能小型集中空调系统将成为市场上节能空调的主流。它可以通过对实际运行状态的分析,不断校正控制器参数和设定点的参数,可以在任何初始条件下,逐步实现最优化。

随着网络技术的发展,具有通讯功能的小型集中空调系统可以将采集到的参数传到技术服务中心,由专家进行集中优化与修正,以实现最优控制。

#### 5 结语

本文对多联机小型商用集中空调的建模和控制的研究状况和存在问题作了详细的分析和阐述,并展望了其未来的发展趋势。随着科学技术的进步,多联机小型商用集中空调定会有广阔的发展空间。

#### 参考文献

- [1] 吴业正,王瑞祥. 双制冷循环电冰箱的计算机仿真[J]. 制冷学报, 1996, 17(3): 19-25
- [2] 周永明,陈芝久. 用于控制的制冷系统稳态建模与仿真[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(3): 255-258
- [3] Chen Huajun, Shi Wenxing, Shao Shuangquan. Study on compressor model for simulation of inverter air conditioner by graphic method[C]// Proc of the 3rd Int Compressor Technique Conference, 2001: 110-116
- [4] Shao Shuangquan, Shi Wenxing, Li Xianting. Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data [J]. International Journal of

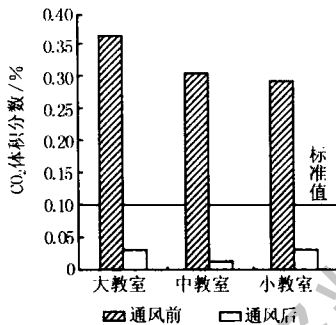
- Refrigeration, 2004, 27 (8); 805-815
- [5] 丁国良,张春路,詹涛. 制冷压缩机热力性能的模糊建模方法[J]. 上海交通大学学报,2000,34(9):1298-1300
- [6] Ding G L, Li H, Zhang C L. Study on thermodynamic model of a compressor with artificial neural networks[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 12(1): 23-26
- [7] 詹涛,张春路,王昔林,等. 基于 RBF 网络的制冷压缩机热力性能计算[J]. 上海交通大学学报,2001, 35(8):1172-1174
- [8] Tian Changqing, Li Xiangting. Transient behavior evaluation of an automotive air conditioning system with a variable displacement compressor[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(13): 1922-1948
- [9] Rajat S. Dynamic modeling and control of single and multi-evaporator subcritical vapor compression systems [D]. Bombay; Indian Institute of Technology, 1999
- [10] 董艳华,张华俊. 风冷热电空调器稳态工况数值模拟及实验研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2004, 34(6):1049-1052
- [11] Vargas J V C, Paris J A R. Simulation in transient regime of a heat pump with closed-looped and on-off control[J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(4): 235-243
- [12] Mithraratne P, Wijesundera N E. An experimental and numerical study of hunting in thermostatic-expansion-valve-controlled evaporators [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25 (7): 992-997
- [13] Bendapudi S, Braun J E. A review of literature on dynamic models of vapor compression equipment[R]. ASHRAE Report, 2002
- [14] He Xiangdong, Liu Sheng, Haruhiko Asada. Modeling of vapor compression cycles for advanced controls in HVAC systems[C]//Proceedings of the American Conference, 1995
- [15] Jensen J M, Tummescheit H. Moving boundary models for dynamic simulations of two-phase flows [C]//Proceedings of the 2nd International Modeling Conference, 2002
- [16] 葛云亭,彦启森. 蒸发器动态参数数学模型的建立与理论计算[J]. 制冷学报,1995, 16(1):9-17
- [17] Nanayakkara V K, Ikegami Y. Evolutionary design of dynamic neural networks for evaporator control [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25 (6): 813-814
- [18] Harms T M, Braun J E, Eckhard A G, et al. The impact of modeling complexity and two-phase flow parameters on the accuracy of system modeling for unitary air conditioners [J]. HVAC&R Research Journal, 2004, 10 (1): 5-20
- [19] Ertunc H M, Hosoz M. Artificial neural network analysis of a refrigeration system with an evaporative condenser[J]. Engineering, 2005, 26(5): 627-635
- [20] Chen Wu, Zhou Xingxi, Deng Shiming. Development of control method and dynamic model for multi-evaporator air conditioners (MEAC) [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(33): 451-465
- [21] Bryan P R, Andrew G A. Control-oriented modeling of transcritical vapor compression systems [J]. Transactions of the ASME, 2004, 126(1): 54-64
- [22] 武永强,周兴禧,夏清,等. 一拖三变频空调(多联机)系统运行特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5):998-1008
- [23] Lee G, Kim M S, Cho Y M. An experimental study of the capacity control of multi-type heat pump system using predictive control logic[C]//7th Int Energy Agency Heat Pump Conference, 2002
- [24] Rajat S, Andrew G A. Dynamic modeling and control of multi-evaporator air-conditioning systems [G]//ASHRAE Trans, 2004, 110(1):109-119
- [25] 邵双全,石文星,李先庭,等. 基于两相流体网络的复杂制冷空调系统模型研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(8): 690-693
- [26] Bryan P R, Andrew G A, Andrew M. Model-driven system identification of transcritical vapor compression systems [G]//Control Systems Technology, IEEE Transactions, 2005, 13(3): 444-451
- [27] Bryan P R, Andrew G A, Rajat S. Reduced order modeling of transcritical AC system dynamics using singular perturbation[C]//2003 American Control Conference, 2003; 2264-2269
- [28] Rajat S, Andrew G A, Bryan P R. Application of multivariable adaptive control to automotive air conditioning systems [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2003
- [29] Bryan P R, Tomás U, Andrew G A, et al. Evaluation of control strategies for compressor rapid cycling[G]//SAE Technical Paper Series, 2004
- [30] 楚惠. MDV 系统的原理和应用[J]. 机电工程技术, 2002, 31(7): 120-122
- [31] Eric U P E. Linearizing PID loop control [J]. ASHRAE Journal, 2003, 45(3): 40-45
- [32] 孟建军. 关于制冷系统中蒸发器目标过热度自适应控制的研究[J]. 流体机械, 1997, 25(3):28-29
- [33] He Xiangdong, Asada H H. A new feedback linearization approach to advanced control of multi-unit HVAC systems[G]//2003 IEEE, 2003
- [34] 刘顺波,曹琦,傅明星,等. 蒸发器出口制冷剂过热度的模糊控制[J]. 西安交通大学学报,1997,31(5):

38-41

- [35] 陈芝久, 孙文吉, 于兵. 制冷装置节能控制与电子膨胀阀的应用研究(一)——现状与分析[J]. 制冷学报, 1998, 19(4): 39-44
- [36] Gao Zhiqiang, Thomas A T, James G D. A stable self-tuning fuzzy logic control system for industrial temperature regulation [G]// IEEE, Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 414-424
- [37] 王浩. 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
- [38] Seong C, Widrow B. Neural dynamic optimization for control systems—part II. theory [G] // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2001, 31(4): 490-501
- [39] Curtiss P S, Kreider J F, Brandemuehl M J. Adaptive control of HVAC processes using predictive neural networks[G] // ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 496-504
- [40] 陈文勇, 陈芝久, 朱瑞琪, 等. 电子膨胀阀调节蒸发器过热度的控制算法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(8): 1228-1232
- [41] He Xiangdong, Liu Sheng, Asada H. Multivariable feedback design for regulating vapor compression cycles[C] // Proceedings of the American Control Conference Seattle, 1995
- [42] Zhao Lei, Zaheeruddin M. Dynamic simulation and analysis of a water chiller refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(14/15): 2258-2271

(上接第 114 页)

min 后关闭,待稳定后,测试结果显示教室的  $\text{CO}_2$  体积分数已降低到标准规定值以下,空气质量达到良好状态。由于北方冬季和过渡季室外温度还很低,无法开窗上课,因此建议下课后应适当开窗通风以改善室内空气质量。

图7 通风对  $\text{CO}_2$  体积分数的影响

#### 4 主观调查

室内空气质量是一个将客观与主观结合起来的综合概念,只靠客观评价无法全面、公正地反映室内空气质量状况。为了解教室内低浓度污染物及热湿环境对长期接触人群的影响,笔者对室内人员进行了主观调查<sup>[7]</sup>。

冬季所有教室的门窗全部处于关闭状态,仅靠门窗的渗透及有限次的开门进行通风。主观调查结果如图 8 所示,大、中教室有 45% 的人,小教室有 59% 的人认为室内空气质量适中;大、中、小教室分别有 39%, 32%, 31% 的室内人员认为室内空气质量差,这说明室内空气质量是存在一定问题的。

#### 5 结论及建议

通过测试和主观调查可以看出,供暖季教室内空气质量主要受室内人员密度和通风情况影响。自习状态时舒适性基本满足要求,相对湿度略低,室内被测污染物含量均低于标准规定值,空气质量基本能够达到要求。上课状态时

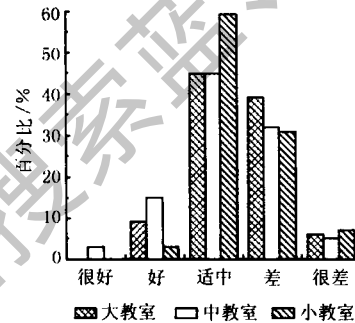


图8 室内空气质量的主观评价

教室内空气质量较差,这是目前北方教室在供暖季普遍存在的问题,在上课的大部分时间内,  $\text{CO}_2$  体积分数都高于标准规定值,随人员密度的增加,  $\text{CO}_2$  体积分数超标更加严重。此外教室内存在其他污染物,这些污染物含量虽然较低,但会随人员密度的增加而增加,对长期在教室内学习的学生也会造成一定影响,使其精神疲劳,心理健康受到影响。课间休息时适度开窗通风,可以有效地改善室内空气质量,另一方面,供暖季适当降低室内人员密度也是改善室内空气质量的有效措施之一。

#### 参考文献

- [1] 翟金霞, 张前龙, 胡琼. 某地区高校教室内空气污染状况的研究[J]. 安徽医科大学学报, 2004, 39(3): 231-232
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [3] 范格 P O. 21 世纪的室内空气质量: 追求优异[J]. 于晓明, 译. 暖通空调, 2000, 30(3): 32-35
- [4] 刘建国, 刘洋. 室内空气中  $\text{CO}_2$  的评价作用与评价标准[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(4): 303-305
- [5] 吴忠标, 赵伟荣. 室内空气污染及净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [6] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
- [7] 白玮, 龙惟定. 上海市办公楼室内空气品质的测试和分析[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(4): 11-15