

高湿地区温湿度独立控制系统应用分析*

同济大学 马宏权[☆] 龙惟定

摘要 分析了目前高湿地区温湿度独立控制系统应用的效果,归纳了暴露出的一些问题,对这一技术在高湿地区的发展提出了参考意见。

关键词 温湿度独立控制系统 辐射供冷 除湿

Application analysis of independent temperature-humidity control air conditioning systems in high humidity area

By Ma Hongquan[★] and Long Weiding

Abstract Analyses the application effect of independent temperature-humidity control air conditioning systems in high humidity area, summaries some exposed problems, and brings forward some suggestions for the application of this system in high humidity area.

Keywords independent temperature-humidity control air conditioning system, radiant cooling, dehumidification

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

温湿度独立控制空调系统因为可以在空气处理过程中实现热湿解耦,为除湿空调、天然冷源和可再生能源利用、蒸发制冷、辐射供冷和干式风机盘管等一系列新技术提供了集成和应用平台,从而带来环保、节能和提高室内空气质量的效益,但是这一技术体系在国内应用的时间不长,亟需得到实践反馈以发现和改正不足。本文讨论了高湿地区温湿度独立控制空调系统应用中的一些问题,为完善和发展这一技术体系提供参考。

我国夏热冬冷和夏热冬暖地区全年湿度普遍较高(见表 1),许多城市夏季平均相对湿度大于 80%,空气含湿量在 20 g/kg 以上,这些地区传统空调的控制策略为温度优先,在高湿季节许多空调系统由于除湿能力不足而难以获得较好的室内空气质量。从理论上分析,温湿度独立控制系统应该

是适合这一地区的较好的空调模式,但在实际应用中会涉及到一系列复杂问题,主要涉及各类温度和湿度处理系统的匹配、系统实施前提的满足、系统供冷能力与空调负荷的匹配、系统的全年运行策略、控制计量与收费模式等,这些都还需要在实践中探索并进一步完善。

1 室内热湿环境控制效果分析

1.1 显热的消除效果

目前温湿度独立控制系统中的显热主要通过辐射供冷来消除,在节能示范楼中所采用的辐射供冷技术包括混凝土埋管、金属辐射板和毛细管网栅 3 种,但在商业开发的大型建筑中的温湿度独立控制系统主要还仅限于应用预埋于建筑结构内的混凝土辐射供冷空调末端来消除显热。这主要是因为这种辐射供冷技术由于管材的国产化和安装的

表 1 国内部分城市夏季空气平均相对湿度 %

南京 81	福州 76	长沙 83	青岛 82	上海 80	合肥 82
杭州 79	广州 83	重庆 78	海口 82	郑州 84	武汉 80

* 国家留学基金建设高水平大学公派研究生项目资助(编号:2007102355)

①[☆] 马宏权,男,1979 年 1 月生,在读博士研究生
201804 上海市曹安公路 4800 号同济大学嘉定校区 13-306 信箱
(021) 69584901
E-mail: mhqtj@163.com
收稿日期:2008-02-22
修回日期:2008-05-25

便利性在规模化实施中具有明显优势,而规格化毛细管辐射供冷单元和金属板辐射供冷系统由于材料主要依靠进口而只获得了少量小规模使用,干式风机盘管在除医疗建筑以外的民用建筑中也没有得到广泛应用。

根据在采用辐射供冷加独立新风系统的住宅建筑内的测试发现,这种系统冬、夏季室内温度场分布稳定性和均匀性很好,尤其是在采用具有较大蓄冷能力的混凝土埋管辐射供冷系统时。如图 1,2 所示,系统连续运行时,由于辐射供冷和下送风两种供冷方式承担的负荷比例接近,室内几乎没有竖直温差,冷辐射壁面与其他围护结构的温差一般也小于 0.5°C ,平均只有 0.3°C ,而与室内空气的温差只有 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,相对传统空调,室内整体温度分布的均匀性有极大提高。由于建筑结构的蓄能,使得室温随负荷变化的波动极小,即使空调系统关闭或室内人数激增,室温也不会突然明显升高。同时由于室内没有风机,消除了传统空调的噪声和吹冷风感,室内人员感觉不到空调系统在工作,室内的显热消除效果比较理想。

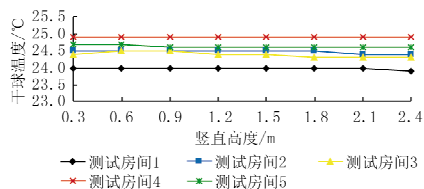


图 1 某辐射供冷加独立新风系统的夏季室内温度分布

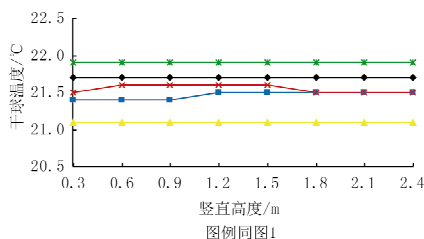


图 2 某辐射供冷加独立新风系统的冬季室内干球温度分布

但调查也发现,一些用户表示在此类房间中久待有气闷感,也有少数人表示运动后刚进入房间时缺乏吹冷风引起的舒适感,这说明室内采用辐射供冷固然避免了风系统的能耗和噪声,但也降低了室内的换气次数和对个性化通风需求的满足。建议今后在采用辐射供冷技术的住宅客厅,由客户自主选择是否增加(干式)风机盘管或适当增加新风量,以增加室内空气换气次数和提

高空气质量。

1.2 潜热的消除效果

采用全新风下送上排的形式消除潜热,均采用露点送风,因此新风实际上也承担了部分的显热负荷,新风通过风道会产生温升,送入房间的温度约为 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。过渡季节新风不处理到露点,以提高送风温度,降低能耗。通过屋顶集中采集新风,由新风竖井送至各层新风机组,并通过敷设于地板架空层内的风道供给室内下送风口。由于辐射供冷顶板的影响,室内虽然没有明显的温度梯度,但置换通风的目的还是达到了,用户对新风的质量评价均较好,冬夏室内空气的相对湿度也较为稳定,如图 3 和图 4 所示。调查没有发现用户认为下送风口有明显的吹冷风感,也没有在下送风口内发现明显的污染物聚集。

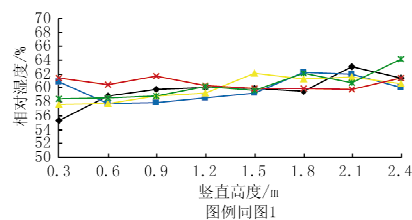


图 3 某辐射供冷加独立新风系统夏季室内空气相对湿度分布

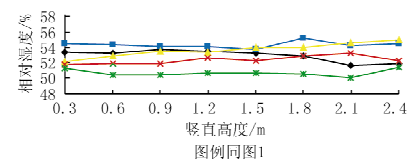


图 4 某辐射供冷加独立新风系统冬季室内空气相对湿度分布

出于对设备寿命的担心,目前投入使用的温湿度独立控制系统仍然采用了传统的冷冻除湿,即在新风系统和辐射供冷系统中分别设置冷水机组。这样做的好处是系统的除湿能力可以得到保证,实际项目运行中的测试也发现室内的相对湿度可以得到更好的控制,住宅建筑的相对湿度基本可以控制在 70% 以下;而办公建筑则由于人员的变动使相对湿度稳定性稍差,部分建筑在高湿天气出现了小范围的结露现象,但是房间内的整体湿度控制要好于传统的空调方式。

但是调查同时发现,大多数项目新风系统的运行时间比常规系统有较大延长。这是因为在带有

辐射供冷系统的温湿度独立控制系统中,新风系统除要消除潜热负荷外,实际上还要满足避免结露、室内卫生标准和排风量,以及室内总冷负荷等方面的要求。这样新风量不可能低于传统集中空调系统,而且新风机组实际上只能常开。因为启动工况辐射供冷系统最容易结露,一旦关闭辐射供冷和新风系统,允许开窗换气,室内的含湿量将会升高,辐射供冷再次启动时就有可能出现结露。因此在即使只是稍有空调需求的季节,新风系统作为防结露的重要措施都必须提前开启,尽管在过渡季节新风可以不处理到露点,从而降低能耗,但风机功耗却是降不下来的。

由此可见,在高湿地区,尽管温湿度独立控制系统实现了温度和湿度处理设备的分离,但为了避免辐射供冷系统结露,显热控制需要潜热控制为其服务,这实际上使湿度控制与温度控制重新耦合起来了。

2 系统的能源利用效率

2.1 天然冷源的利用

温湿度独立控制系统为可再生能源和天然能源的利用提供了很好的集成平台,但在实际应用中并不像理论上那么理想。在华东地区曾多次尝试利用地埋管换热器循环水直接提供高温冷水供应辐射供冷,但由于空调系统连续运行,水温很快升高,这些实验均以失败告终。实际上我国在大陆性季风气候主导下的大部分地区的空调负荷强度要明显高于同纬度的其他国家,服务对象又以规模很大的新建建筑为主,很难单靠天然冷源实现建筑空调,即使只解决建筑的显热负荷也难以稳定地实现。比如上海地区的地下深层土壤温度在 18~20℃之间,作为地源热泵的冷却水——地埋管换热器内的循环水温度夏季可以达到近 40℃,而地埋管换热器循环水不进热泵机组直接作为辐射供冷的高温冷水,持续运行时很难稳定在 25℃以下,这样就失去了作为辐射冷源的意义。因此无论从保证热湿单独处理系统可靠性还是从实质性节能的角度分析,今后都应该走因地制宜的复合能源系统道路,科学、合理、适当规模地集成应用可再生能源,而不能盲目地追求更高的天然冷源和可再生能源比例。

2.2 制冷设备

温湿度独立控制系统中实现节能的一个重要

因素是高温冷水机组效率的提升,但目前高温冷水机组的市场缺乏有效供应,辐射供冷系统大多采用低温冷水混水或经板式换热器换热,有些号称能够提供高温冷水的制冷机组只是在常规冷水机组的蒸发器前设置了旁通。常规冷水机组稳定的最高冷水温度一般只能达到 15℃,此时的制冷效率约可提高 20%,但混水过程增加了焓损,高温冷水供水系统的小温差大流量,以及增加的板式换热器都会使输配系统能耗增加,系统变得更为复杂,却难以实现有效节能。

2.3 除湿系统

文献[1]中根据算例分析得出的结论是,在高湿地区利用溶液除湿相对于表冷器除湿可以节能 31.5%,但其分析是假定在传统一次回风系统有再热过程,同时溶液除湿的再生耗热按照 4:1 的电热价格比转换为耗电,然后叠加两种除湿处理所有耗能过程的用电量计算得到的节能率。文献[2]则认为温湿度独立控制系统只是改变了新风系统和末端空调承担空调负荷的比例,但并不能减少总冷负荷,同时由于产生单位溶液再生过程所需热量的一次能耗要比传统机械制冷方式单位冷量的一次能耗高 78.6%,因此溶液除湿系统的一次能耗要明显增加并可能抵消显热处理系统节约的能量。文献[2]分析得出的量化数据是:如不能利用余热,只有当制冷机组 COP 低于 2.86 时溶液除湿系统才可实现对于传统冷冻除湿的相对节能。

笔者认为第一种分析中利用电热价格比代替发电一次能耗率是不合理的计算方法。按照原文的数据和 35% 的一次能发电效率将冷冻除湿和溶液除湿的各环节能耗均转换为一次能耗,不考虑再热器散热损失和一次回风再热,溶液除湿与冷冻除湿的一次能耗比为 1.06:1,溶液除湿稍高。而第二种分析计算上没有错误,但分析时没有注意到溶液除湿可以利用各类废热作为溶液再生所需的加热热源,忽视了溶液除湿所带来的最大优势是提供了利用各类低品位热源提供除湿的可能性,而正是这种可能性可以带来比单纯节能更重要的意义,因为它可以扩大建筑能源的利用范围,属于开源型节能。因此笔者认为对溶液除湿的节能性分析应该从系统整体层面上采用寿命周期分析,并综合矿物能源节能率、温室气体减排等因素进行多指标评价。

2.4 热湿串联处理系统

热湿串联处理系统是利用常规的低温冷水先除湿,然后作为高温冷水消除显热用。热湿处理系统串联虽然使得热湿处理系统重新在一定程度上耦合起来,但是由于可以实现水温的大温差利用,从而可能实现利用现有设备提高空调系统整体效率。当然串联系统的控制会变得较为复杂,频繁的新风比焓变动可能会对冷水供水温度的稳定带来麻烦。由于热湿负荷具有一定的不同步性,比如住宅傍晚和夜间的潜热负荷较高而中午的显热负荷较高,因此还需要对系统的控制策略进行研究。

3 为避免结露带来的问题

结露问题一直是应用辐射供冷技术的一个主要限制因素,特别是我国南方高湿地区更为突出。为了避免结露可以采用以下技术措施:将辐射供冷进水温度提高到室内空气设计状态的露点以上,提高围护结构的保温和密闭性能;新风系统相对于辐射供冷系统先开后停;要求用户在空调期间不能开启外窗。总的看来这些措施是有效的,结露问题在已经实施的项目中发生的比例并不高,但是这些为避免结露而采取的措施却带来了其他问题,主要包括如下几点:

1) 限制了温湿度独立控制系统的应用范围。这是因为辐射供冷系统的进水温度为避免结露一般不能低于 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$,而为实现有效辐射供冷其回水温度又不能高于 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,这样小的供回水温差自然降低了各类辐射供冷技术(包括原本供冷能力较大的金属辐射板)承担显热负荷的能力,采用新风系统承担部分显热负荷又可能增加新风处理能耗。因此辐射供冷加独立新风的技术组合对围护结构的保温和密闭性提出了较高的要求,高湿地区辐射供冷系统单独供冷量难以高于 60 W/m^2 ,如果不能将总的面积冷负荷指标降到 $80\sim 100\text{ W/m}^2$ 以下,实施辐射供冷加独立新风系统是存在较大困难的。在住宅建筑中也不可能绝对限制开窗,这使得辐射供冷技术不能脱离热性能良好的围护结构和体积较大的除湿系统单独存在,因此难以像风机盘管一样成为一种常规空调供冷技术。

2) 由于混凝土预埋式辐射供冷管道一般为满布布置,事实上只能实现集中的启停控制,无法对单个房间的显热负荷加以单独控制,而这种辐射供冷管道预埋在建筑楼板内,其向室内墙体壁面的热

传导的时间延迟较长,因此其集中控制对室内负荷变化的敏感度是很低的,只能通过连续运行(或过渡季节夜间低谷电价时连续运行蓄能)使室内温度相对恒定,在辐射供冷系统运行的同时,为避免结露,独立新风系统也必须运行。从而使单个用户无法关闭或微调室内热湿环境。

3) 为防止结露,这种系统要求用户在空调季节不得开窗,这使得用户无法利用自然通风,延长了空调系统的运行时间,甚至过渡季节也必须关闭用空调。因此用户不可能实施行为节能。

从早期几个项目初步的运行情况来看也比较符合上述判断。由于温湿度独立控制系统的冷热量较难实施,目前收费都还是按照面积分摊的,由物业公司按月收取。长三角地区的住宅的收费约在 $21\sim 30\text{ 元}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,办公建筑的收费约在 $70\sim 95\text{ 元}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。对于住宅项目,运行费如果以 h 为单位计算,这种温湿度独立控制系统确实可以实现节能,但如果从整个空调季节来看则要高于传统分体空调,因为多项调研表明,目前这些地区住宅分体空调的年均能耗只有 $5\sim 8\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^{①②}。同时这些项目的围护结构和外遮阳都采用了较高的标准,因此部分节能效果还要归功于围护结构的保温作用。对于办公建筑,运行费用有较为明显的节省,其原因在于辐射供冷系统冷量从管道到辐射面的传导有较长的滞后时间,而物业管理利用商业电价的峰谷差在夜间开启系统,在清晨关闭,供白天使用,将楼板结构作为蓄冷体,从而节省了运行费用。

4 自然通风的可用性

有一种观点认为自然通风在高湿地区可用性降低,低能耗建筑的开发更使得自然通风应用没有必要了。诚然低能耗建筑可以降低单位时间内的空调能耗,但如果因此而追求室内全年恒温恒湿的空调效果,则不利于建筑节能的落实。同时长期的恒温恒湿环境会降低人体免疫力,对健康生活有害无益。图 5 是南京地区夏季室外空气干球温度的延续图,图中标出了含湿量的分布情况,如果按照 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室内设计温度和 65% 相对湿度的室内空气

① 龙惟定.上海市建筑能耗统计分析研究报告.同济大学,2005:32-35

② 马素贞,龙惟定.上海市住宅空调现状与能耗调查.同济大学,2007:21-23

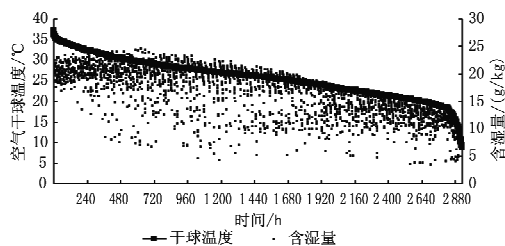


图5 南京夏季室外空气干球温度延续图

状态点,室外空气在夏季有接近 50%的时间是可以用来降温的,30%的时间内可以除湿,26%的时间可以降温除湿,而且没有环境和能源影响。在这些时间段内,自然通风显然是最经济环保的建筑节能措施,尤其是对住宅建筑,虽然单独自然通风不可能完全承担空调负荷,但完全放弃利用自然通风将使得建筑能耗受制于生活方式,可能产生通过延长空调系统运行时间换取高舒适度的低能耗建筑,形成真节能建筑假建筑节能的不利局面,因此需要谨慎对待。

5 辐射供冷技术的未来发展

高湿地区温湿度独立控制系统的许多问题是由辐射供冷系统引起的,因此辐射供冷技术在高湿地区的应用必须慎重,原因不仅在于其结露的可能性,而且还在于为避免结露所采取的措施导致的实际运行中的不节能,此外目前还存在一次投资大、管理麻烦、控制系统复杂等问题,这样连续的人工空调环境虽然提高了舒适度,却并不能实现实质性节能。欧洲(尤其是中欧和北欧)由于空调冷负荷较小、空气较为干燥,基本没有结露问题,因此这一技术的适用性较高,而在我国的应用需要经过认真的分析,最好根据当地气候条件做权衡判断,确实要采用的,要协调建筑、暖通、自控等相关专业人员进行合作设计,确保建筑保温、密闭性能和空调系统温度、湿度控制能够匹配和协调安全运行。

在常用的 3 种辐射供冷系统中,混凝土埋管式辐射供冷造价最低,约 40 元/ m^2 左右,与我国普及率已经较高的地板供暖相当,易于安装,也适合大规模的应用。其特点是供冷能力最小,在高湿地区一般难以超过 30 W/m^2 ,释冷最慢,约有 8~10 h 的滞后,但可以利用楼板进行蓄能,从而节省运行费用,因此是目前商业开发建筑利用温湿度单独处理系统时的主要方式。毛细管网栅安装简单、控制系统完善、供冷能力及释冷速度都适中,供冷能力

可以达到 60 W/m^2 ,启动约 1 h 后即可实现室内降温。但其生产目前主要被德国几家厂商垄断,包括控制系统,每 m^2 的造价高达近 500 元,实现国产化前尚不具备规模化应用的可能性。金属辐射板美观大方,易与装修配合,可以直接作为吊顶装饰面使用,也是 3 种辐射供冷中供冷最快的一种,5 min 即可实现有效供冷。但是金属辐射板供冷耗费金属多、安装需要梁下的吊顶空间较大,加上也主要从欧美进口,仅金属辐射板材料的价格就超过 1 000 元/ m^2 ,是 3 种辐射吊顶中造价最高的辐射末端,仅适合作为较高档的办公楼的选择。理论上金属辐射板相对于其他两种辐射供冷可以提供更高的供冷能力,可以超过 100 W/m^2 ,但实际中由于避免结露的限制,其循环水进口水温不能高于室内设计空气状态的露点温度,其供冷能力得不到最大程度的发挥,因此目前只能作为一种易于配合较高吊顶装修要求的辐射供冷形式。

笔者认为目前辐射供冷技术应该优先使用混凝土埋管式供冷系统,逐步发展毛细管、金属板辐射供冷系统以替代混凝土埋管系统,尤其在在对室温有单独控制要求的场所。毛细管辐射供冷系统由于其一般干挂于吊顶下,失去了蓄冷的可能性,因此控制室温的稳定性较混凝土埋管式辐射供冷要差,但是却带来了调节控制上的便利性,为防止结露,可设置室内相对湿度传感器和相应的水路切断控制系统,这是其优于混凝土埋管式辐射供冷系统的地方。图 6 是在南京某采用辐射供冷技术的建筑内进行的毛细管辐射供冷系统调节性能试验得到的性能曲线。在固定的室内热湿负荷下,系统运行稳定后,调节辐射供冷系统的进水温度并观察室内空气温度的变化,可以看出毛细管辐射供冷系统对于供水温度变化的响应时间很短,而且灵敏度

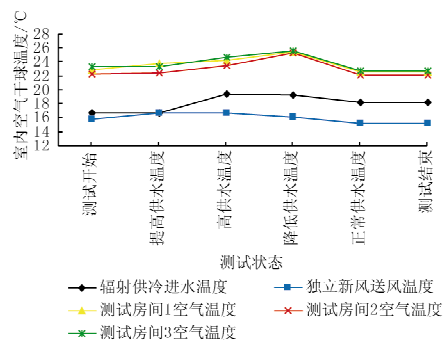


图6 某毛细管辐射供冷加独立新风系统的调节特性

也很高。由于混凝土埋管式辐射供冷系统的延迟时间较长,因此即使可以做到供冷温度单独控制也无法获得有效的室温调节,而毛细管辐射供冷系统较小的延迟特性为实现辐射供冷系统真实意义上的室温单独控制带来了可能,尽管管径较小的毛细管辐射供冷系统加大了对循环水洁净度的要求。目前制约毛细管辐射供冷系统发展的主要因素是毛细管材料及其露点控制系统价格昂贵。加大对毛细管辐射供冷材料及相关控制系统的国产化研发并实现其对混凝土埋管式辐射供冷系统的替代,将有利于温湿度单独处理系统在高湿地区的应用。

6 结论与建议

6.1 在高湿度地区采用温湿度独立控制空调系统,显热和潜热的消除效果均较为理想,室内空气质量、舒适度有所提高,但是目前的设计使得室内换气次数和对空调多样性通风需求的满足能力有所降低。

6.2 辐射供冷加独立新风系统虽然实现了温湿度处理设备的分离,但是为了避免室内结露,显热系统运行需要潜热系统提前除湿,使湿度控制与温度控制在实际上又重新耦合起来。这提高了建筑围护结构的保温和密闭要求、延长了空调系统运行时间、增大了无效供冷损失。甚至在过渡季节也要关窗用空调,无法实现行为节能。

6.3 高湿地区热湿单独处理系统中的新风系统要全年运行以防止结露,但其作用已不仅是传统意义上的满足卫生要求和承担房间内的潜热负荷,实际上还要承担部分显热负荷并作为系统的负荷调节手段,在室外墙或散湿房间、极端天气和人员数量增多时作为空调效果的预留保证措施。这样新风系统规模的确定就变成了一个复杂和需要根据具

体情况反复权衡的问题,新风量过小房间的通风和空调效果会变差,甚至可能导致结露,而过大则不可避免地会导致能耗增加。

6.4 高温、高湿地区难以应用天然冷源作为温湿度独立控制系统的冷源。由于目前缺乏高温冷水机组和溶液除湿设备的成熟产品,这在很大程度上限制了温湿度独立控制系统的节能性。热湿串级处理的热湿半耦合系统则可以利用现有设备实现有效节能,但前提是解决控制策略。

6.5 实现毛细管网栅、金属辐射板等材料及其控制系统的国产化以降低其价格,并逐步利用高温冷水机组与干式风机盘管的技术组合或利用毛细管、金属板辐射供冷系统替代混凝土埋管式辐射末端,可以在一定程度上解决现有辐射供冷系统难以单独控制调节室温的缺点,并有利于实现有效节能。

6.6 低能耗建筑不能放弃传统的自然通风和行为节能,高舒适度的人工空调环境持续的时间也应该适度,避免出现通过延长空调季节提高舒适度的现象,以利于建筑节能的落实。

参考文献:

- [1] 刘守帅,张子平,张伟捷,等. 溶液除湿空调在高湿环境中应用的理论分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005,22(4):23-26
- [2] 徐征,刘筱屏,何海亮. 温湿度独立控制系统的节能性实例分析[J]. 暖通空调,2007,37(6):129-132
- [3] 刘晓华,江亿. 温湿度独立控制系统[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006
- [4] 孙丽颖,马最良. 冷却吊顶供水方式对系统运行能耗的影响[J]. 暖通空调,2003,23(1):107-109
- [5] 钟婷. 上海市住宅空调的现状与能耗研究[D]. 上海:同济大学,2003:34-36

· 简讯 ·

全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会工业 清洁设备分技术委员会成立

2008年6月,全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会工业清洁设备分技术委员会由国家标准化委员会同意成立,主要负责工业暖通空调清洁设备(不涉及家用和类似用途空调清洁设备)等领域的国家标准制修订等系列标准化工作,编号为 SAC/TC143/SC1。

SAC/TC143/SC1 第1届委员会由31名委员组成,以本专业生产、使用、经销、科研、教学和监督检验等方面具有较高理论水平和较丰富实践经验并熟悉和热心标准化工作的科技人员为主体。仲恺农业工程学院人

工环境与控制研究所所长丁力行教授任主任委员,中国建筑科学研究院黄维高工和广东志高空调有限公司雷江杭副董事长任副主任委员。秘书处承担单位为广东志高空调有限公司。

2008年9月,该分技术委员会成立大会在广东佛山举行,国家标准化委员会、住房和城乡建设部、全国暖通空调及净化设备标准化技术委员会、中国家电协会、佛山市政府、志高集团等单位相关领导到会祝贺。

(本刊特约通讯员 丁力行)