

## 多区域变风量空调系统优化控制研究

徐新华 王盛卫

(香港理工大学屋宇设备工程学系)

**摘要:** 变风量系统由于其可观的节能效果在大型商务建筑中得到日益广泛的应用。应用日见广泛的直接数字控制器及集成楼宇控制系统(BMS)大大地提高了空调系统的检测及监控,这也为空调系统在系统层次上的优化控制奠定了基础。本文提出了变风量系统的送风静压和送风温度优化控制方法以及多区域新风量优化控制方法。这些控制方案及控制程序在 VAV 空调系统的动态仿真平台上进行测试以评估它们的动态控制性能、节能及空气品质特性。

**关键词:** 多区域变风量系统 静压优化 送风温度优化 新风量优化

### Optimal Control of Multi-zone VAV Air-conditioning System

Xu Xinhua and Wang Shengwei

(Department of Building Services Engineering, Hong Kong Polytechnic University)

**Abstract:** Variable Air Volume (VAV) systems are widely used nowadays because of the great potentials in energy savings. Widely used Direct Digital Controllers (DDC) and integrated Building Management Systems (BMS) improve the measurement and monitoring of air conditioning systems. They also provide sufficient information for supervisory optimal control at the system level. The strategies of supply air static pressure optimization and supply air temperature optimization are presented. Additionally, the optimization strategy of fresh air flow rate in multi-zone air conditioning systems is also presented. These strategies are validated in a "living" environment of dynamic simulation platform of VAV air conditioning systems in term of dynamic control characteristics, energy performance as well as environmental performance.

**Keywords:** multi-zone VAV system, static pressure optimization, supply air temperature optimization, fresh air flow rate optimization

## 0 引言

在传统的中央空调系统中,其分散而独立的控制器之间基本上没有信息交换,难以实现整体上的优化控制及集中管理。随着大量的直接数字控制器(DDC)的大量采用及日趋广泛的集成楼宇管理系统(BMS)的应用,控制器间的信息交换非常方便。这使得系统层次上的优化控制成为可能,各种优化控制方案得以实施应用。变风量(VAV)空调系统由于其可观的节能效果在大型商务建筑中得到日益广泛的应用。在常规

控制下,系统通常保持送风静压与送风温度不变。送风静压不变不利于节能。当区域的送风量达到最小值时,过低的送风温度将导致如送风混合欠充分,室内空气流动欠佳及气流直接下落等不良室内环境<sup>[1]</sup>,因此要合理提高送风温度。室内空气品质也是空调领域关心的一个主要问题。对于一个空调系统服务多区域的情况来说,各个区域的负荷特性、使用情况、室内人员等不尽相同,甚至差别很大。根据总人数确定最小新风量的方法就会导致有的区域新风量不足,有的区域新风量过多,因此需要有更加合理的方法来确定新风

收稿日期: 2006-8-18

作者简介: 徐新华(1972~),男,工程师;香港九龙香港理工大学屋宇设备工程学系;E-mail: qbexhu@polyu.edu.hk

量。本文根据上述分析,提出了一套适于多区域变风量系统的系列优化控制方法,即VAV送风静压优化控制、送风温度优化控制、新风优化控制。这些控制方法基于系统运行状况的实时检测。这些控制方案及控制程序在VAV空调系统的动态仿真平台上进行测试以评估它们的动态控制性能、节能及空气品质特性。

### 1 多区域变风量系统及控制描述

图1所示为本文实验用的多区域变风量空调系统。该系统包括两个变风量风机、八个变风量箱末端、一个冷却盘管及联动风门(新风,排风及循环风)。一个温度控制器控制表冷器出口送风温度。VAV送风静压控制器调节风机叶片角度而控制送风静压。回风控制器通过调节回风机叶片角度控制总送风量及回风量之间的流量差,从而保证室内正压。新风控制器调节风门而控制新风量。室内温度控制采用压力无关型VAV末端。上述控制器都采用PID调节。实际上,该系统还包括一个定风量子系统向上面四个区域提供基本负荷(未在图中表示出)。送风温度的设定值由温度设定控制器根据VAV末端的控制状态进行设定以避免室内温度失控。送风静压的设定值由静压设定控制器根据VAV末端的控制状态进行设定以降低风机能耗。所需新风量控制器根据室内实际人数的实时检测实时确定实际所需要的新风量而提高室内空气品质及节省能耗。焓值控制器通过比较室外新风及排风的状态而决定是否引入更多的新风从而达到节能的目的。本文着重介绍温度设定控制器、静压设定控制器及所需新风量控制器。

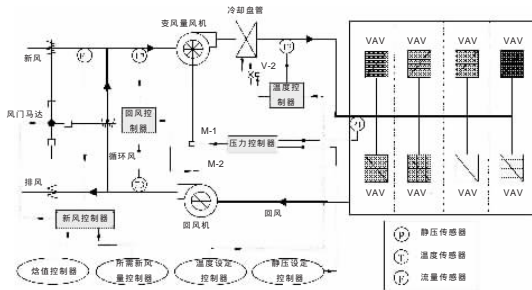


图1 变风量系统及控制示意图

### 2 VAV送风静压及送风温度优化

在部分负荷下,特别是系统所有空调区域的热负荷都减少时,对于常规的VAV空调系统的控制,送风静压控制回路保持送风静压不变,而室温控制回路通

过减小风门的开度,增加气流阻力而降低送风量,从而保证各区域的温度保持不变。但是,这种增加气流阻力而达到降低送风量并不是最经济的方法。实际上这种通过减小风门开度的方式使得大量的风机能耗消耗在风门上。最为经济的作法是通过降低送风静压来实现,即降低风机的送风静压来减小总的送风量。这样可以在减少流量的同时减低风机压头,从而达到有效风机节能目的。

图2所示为送风静压实时优化控制方案<sup>[1]</sup>。对于采用压力无关型VAV末端的系统,各区域室内温度控制回路对相应区域内送风量的要求及其变化了如指掌,各流量控制器输出的风门开度要求即代表了各区域送风量的要求。因此,综合考察所有区域室内温度控制回路流量控制器的输出,只要保证其中最大的一个输出(风门开度的要求)刚好在非常接近于全开的位置,而此时的送风静压值即为最优值。

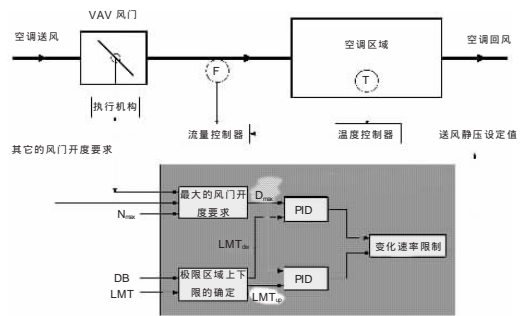


图2 送风静压优化控制示意图

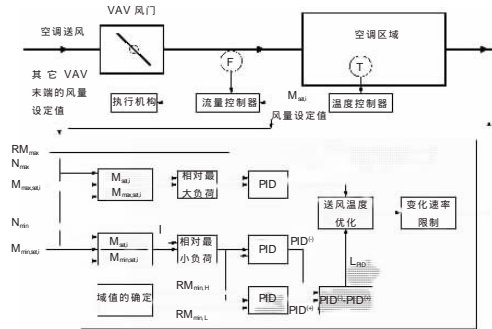


图3 送风温度优化控制示意图

VAV空调系统在部分负荷下的节能效果显著,因而广泛应用于实际工程中。在常规控制下,其送风温度的控制通常采用固定设定值不变的控制方案,通过VAV末端送风量的变化保证各区域内的热舒适性。实际上在部分负荷下送风量的显著减小,将有可能导致室内出现一些不良的现象,如送风与室内空气混合欠充分,室内空气流动欠佳以及送风直接下落(Dumping)等,这对室内的舒适性而言是不利的。当实

际的热负荷高于预计工况时, 设定过高且固定的送风温度有可能使 VAV 末端无法实现对室温的控制, 此时, VAV 风门开到最大也可能无法达到实际负荷要求的送风量, 室内温度 “失控”, 会逐渐超出热舒适性的范围; 相反, 若实际的热负荷远远小于预计工况且送风温度设定过低时, VAV 风门开到最小也可能仍高于实际负荷要求的送风量, 室内温度同样 “失控”, 也会逐渐超出热舒适性范围。

对于上述现象, 有效的解决方法是根据实际情况实时设定送风温度。送风温度设定实时优化的控制方案如图 3 所示。该上位机优化控制器采集各 VAV 末端温度控制器的输出——送风量的要求(  $M_{set,i}$ ), 定义各区域中的最大相对负荷 要求的送风量与末端额定的最大风量的比值) 和最小相对负荷 要求的送风量与末端额定的最小风量的比值)。考虑到有些区域可能的特殊要求, 允许一定量(  $N_{max}$ ) 的 VAV 末端相对负荷很大和一定量(  $N_{min}$ ) 的相对负荷很小。这时前  $N_{max}$  (  $N_{min}$ ) 个 VAV 末端温度控制器的输出值将被忽略。处于最大相对负荷的区域被选择作为最热临界区域, 当这个最热临界区域的相对负荷增大并达到 100% 时, 送风量的实际要求就有可能大于额定的最大风量, 为避免温度控制器 “失控” 而引起室内过热, 应将送风温度降低( HPID), 提高输冷能力。处于最小相对负荷的区域被选择作为最冷临界区域, 当这个最冷临界区域的相对负荷减小并达到 1 时, 送风量的实际要求就有可能小于额定的最小风量, 为避免温度控制器 “失控” 而引起室内过冷或者空气流动不足, 应将送风温度升高( LPID)。控制方案通过适当地综合参考量 HPID 和 LPID 的大小, 最终实现空调送风温度的优化。

### 3 多区域变风量系统新风优化

采用在线实时检测总的室内人员的办法确定新风量设定值的做法能有效地改善室内空气品质并获得很好的节能效果<sup>[2]</sup>。但是, 对于一个空调系统服务多个区域的情况来说, 尤其是每个区的热特性不一样, 使用情况也大不一样的情况下, 就会出现有的区域新风量过多, 而有的区域新风量有明显不足的现象。本文提出一种根据各区域的实际人数在线检测及总的实际人数在线检测来校正新风量的优化控制方案, 如图 4 所示。这一方案要在线检测室内人数, 判定关键区, 校正新风比。

各区实际所需新风量及总的新风量根据 ASHRAE 标准 62-2004<sup>[3]</sup>由实际检测的人数来确定。该

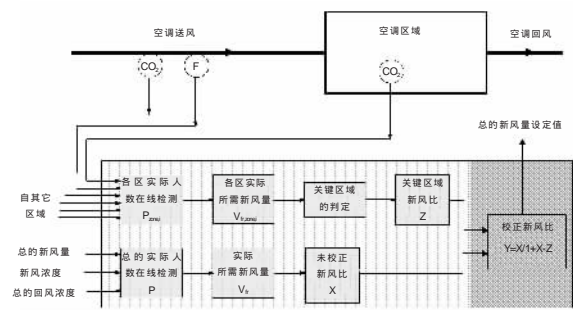


图 4 多区域变风量系统新风优化控制示意图

优化控制方案采用动态检测方式检测室内人数<sup>[4]</sup>。根据检测的各区实际人数, 可以计算各区实际所需的新风量。因各区的热特性及使用情况都不一样, 各区实际所需的新风比( 各区实际所需新风量与各区实际送风之比) 也不一样。为了保证最不利区域能有足够的新风量, 总的送风中可以以最不利区的新风比进行送风。这一最不利区( 关键区) 定义为最大实际所需新风比如 1) 式所示。这一新风比的表达式如下。

$$Z = \max \left\{ \frac{V_{r, zone, i}}{V_{sup, zone, i}} \right\} \quad (1)$$

实际上, 按照最不利区的新风比送风时, 最不利区获得了实际所需的新风量, 其他区域获得的新风量要比实际所需的新风多。也就是说其他区域有多余的新风, 这一部分新风随着回风一起又重新加入总的送风当中。因此在计算实时需要引入的室外新风时要考虑这一部分循环的新风。校正的实时引入的室外新风比(  $Y$ ) 按 2) 式计算。从室外引入的实际新风量根据校正的新风比及实时测量的总送风量进行计算, 如 3) 式所示。

$$Y = \frac{X}{1 + X - Z} \quad (2)$$

$$V_{ra} = Y \times V_{sup} \quad (3)$$

其中,  $X$  为未校正实时引入的室外新风比( 引入新风量按实际检测的总的室内人员计算, 未考虑循环新风)。

### 4 优化控制方法的性能评估

上述优化控制方法的各种性能测试是在 VAV 空调系统及楼宇控制系统动态仿真软件<sup>[2]</sup>上进行的。该软件是以 TRNSYS 为平台开发的。该空调区域为办公用途, 系统运行时间为早上 7 点到晚上 8 点。测试选在四种香港天气下进行, 即晴朗夏日, 阴天夏日, 晴朗春日及晴朗的冬日。在常规的固定设定值控制中, VAV 的静压设定为 650 Pa, 送风温度设定为冬天 14℃, 夏



天为 13 。

图 5 所示为 VAV 静压优化控制下四个实验日内 VAV 静压设定的变化。在夏日,由于夜间室内温度较高,开机时静压设定在最高点。而在另两个实验日,因为初始温度较低,静压优化控制器在开机时将静压设定值设在最低点。在中午时,由于工作人员外出就餐,室内热负荷减少,因而风量也减少。同常规的固定静压设定值比较,静压优化控制在晴朗的夏日可节省风机能耗 2.87%,在天阴的夏日可节能 8.52%,在晴朗的春日可节能 9.25%,在晴朗的冬日可节能 15.01%。

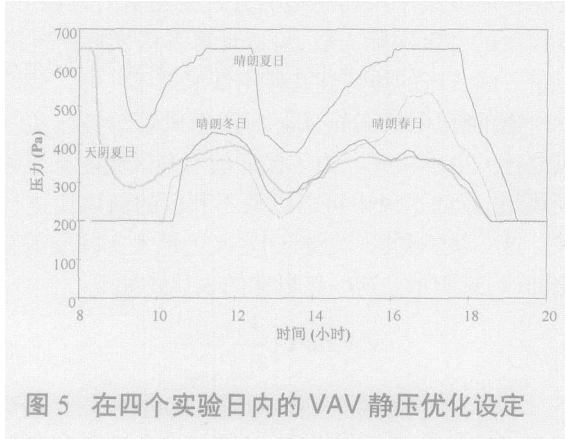


图 5 在四个实验日内的 VAV 静压优化设定

图 6 所示为优化控制下空调送风温度的设定值的变化。在冬季及春季实验日,由于夜间室内温度较低,开机初时其设定值均在最高点。在下午后期,因热负荷很低,送风温度均提高。与固定设定温度方法相比较,在较低热负荷区内的优化控制时的通风量明显提高,同时风机的能耗也相应提高。总的来讲,在夏天,采用送风温度优化控制,可以略为减少室内人员的不满意度 (PPD),可以减少总能耗 1%左右。在春天实验日及冬天实验日可以大大减少室内人员的不满意度并可节省一定的能耗。

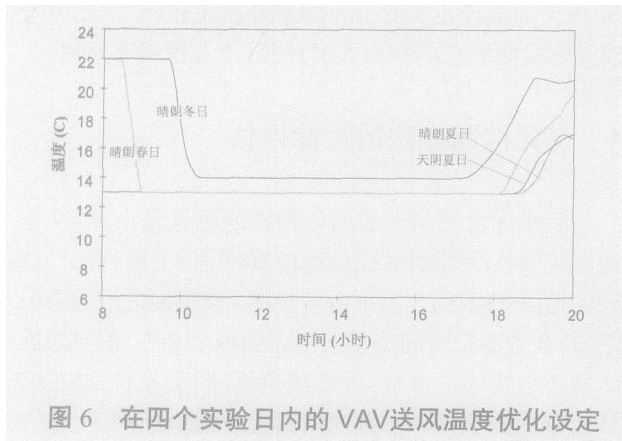


图 6 在四个实验日内的 VAV 送风温度优化设定

图 7 所示为按照室内总的检测人数引入新风量时各区域及总回风的二氧化碳浓度 (晴朗夏日)。很明显,第七区及第八区的新风量不足,室内二氧化碳浓度偏高,而且第八区的二氧化碳浓度长期高于标准规定的 1000 ppm。第三区至第六区的二氧化碳浓度低于平均水平,明显引入新风量较多。图 8 所示为按照校正的新风比引入新风量时的各区域及总回风的二氧化碳浓度 (晴朗夏日),该方法考虑了未使用完的循环新风量。该方案有效地控制了室内的二氧化碳浓度。采用这种控制方案时,整个系统总功耗略有增加,为 14%。

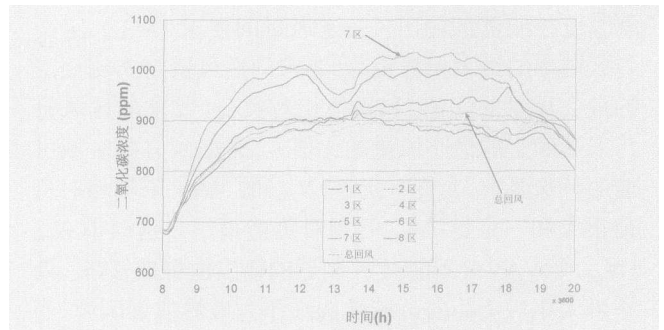


图 7 各区域及总回风二氧化碳浓度(新风比 X)

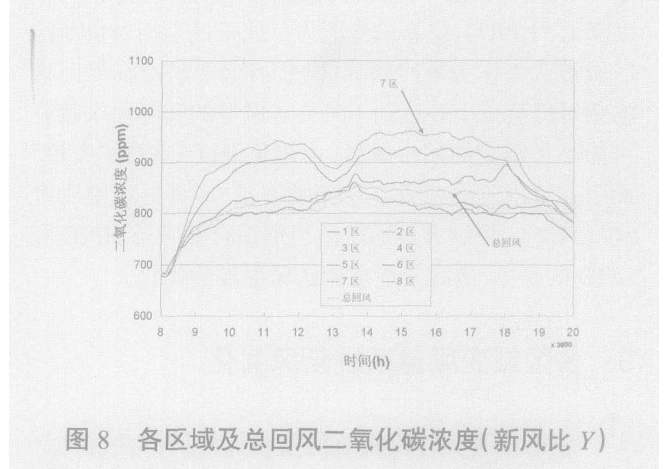


图 8 各区域及总回风二氧化碳浓度(新风比 Y)

### 5 结论及实际应用

集成楼宇控制系统对变风量空调系统的控制优化提供了大大提高的可能。通过对系统的送风静压及送风温度的优化,可以节省能耗并改善室内空气品质。同时试验也表明本文提出的根据各区域实际人数及总的人数在线检测确定新风量的方法是行之有效的,这种方法不需要增加太多的能耗就能很好地减低室内二氧化碳浓度,提高室内空气品质。

( 下转 14 页)

PH7.2),中和掉滤料上浸出的抗菌剂或滤料整理剂对培养过程中菌落生长的影响,使培养结果更能反映浸泡后菌液的真实浓度。

### 5 结论

抗菌过滤器防止微生物在过滤器上繁殖的抑菌性能比滤菌性能更重要。滤料的抑菌性能是抗菌过滤器最重要的评价参数,但与之相关的试验方法很少有见研究。本文采用四种不同的试验方法,对滤料的抑菌能力进行试验。试验结果表明,广口瓶浸渍法和最小抑菌浓度法可用于抑菌性能的定量分析,但过程复杂;浸泡法简单快速但只能用于定性分析;平行划线法由于滤料结构的特殊性不能用于抑菌能力的鉴定。

许多国家都有织物抗菌剂的性能试验方法的标准,例如中国的 FZ/T01021、日本的 JISL1902 和美国的 AATCC 标准,但没有具体针对抗菌过滤器的。本文借鉴了这些标准中几种有代表性的方法,其中广口瓶浸渍法和平行划线法借鉴了 AATCC 用于评价纺织品抗菌能力的试验法,最小抑菌浓度法则借鉴了国内标准《消毒技术规范》<sup>[12]</sup>,并根据滤料的具体构造对这些方法进行了改造。例如,根据空调行业的特点,将广口瓶浸渍法简化为浸泡法,使之可应用于抗菌过滤器的快速定性鉴定。

本文中的四种方法都只适用于实验室研究。如果要应用于现场研究,则存在较多的困难,例如过滤器上菌种比较广泛,带菌周期也较长,另外灰尘杂质也会给试验过程带来干扰。比较可行的办法是对现场采集的同样使用环境下的抗菌过滤器和普通过滤器,用浸泡法(浸泡液改用 PBS 溶液而不是菌液)分别对抑菌性能进行定性鉴定。也可用人工喷菌雾的方法加速过滤器的带菌过程<sup>[10]</sup>,然后再用浸泡法鉴定。

抗菌滤料常用的抗菌剂有重金属盐,季胺或氯的高分子化合物,以及甲壳素等有机物。如果事先知道抗菌剂是非溶出性的,则应在试验中添加一些振荡的过程,确保细菌与抗菌剂的充分接触。具体可借鉴相关标准<sup>[12,14]</sup>中的方法。

### 致谢

感谢科泰公司提供 A、B 两种抗菌滤料,开纯公司提供 C、D 两种普通滤料。

### 参考文献

- [1] 沈晋明,许钟麟.采用生物洁净技术控制医院空调系统的微生物污染[J].洁净与空调技术,2003,2: 3-7
- [2] 许钟麟.空气洁净技术原理[M].北京:科学出版社,2003
- [3] 沈晋明,许钟麟.空调系统的二次污染和细菌控制[J].暖通空调,2002,32(5): 30-33
- [4] Ager, B. P, Tickner, J. A. The control of microbial hazards associated with air conditioning and ventilation systems [J]. annals of occupational hygiene, 1983, 27(4): 341-358.
- [5] 抗菌标准 6612F) [s]. 美国
- [6] 抗菌标准 6612EX) [s]. 美国
- [7] Karin K. Foarde, James T. Hanley, Alan C. Veeck. Efficacy of antimicrobial filter treatments [J]. ASHRAE Journal, 2000, 42 (12): 52-58
- [8] 田淑媛,王景峰,杨睿,等.关于空气过滤器滤菌效率测试方法的研究[J].天津轻工业学院学报,2000,(2): 34-38
- [9] 江林丽,冯文如,黄蓓,等.空气过滤器过滤效果评价方法研究[J].环境与健康杂志,2001,18(5): 297-299
- [10] 邱济夫,沈晋明,聂一新,等.抗菌空气过滤器性能评价方法的研究[J].洁净与空调技术,2005,(1): 1-6
- [11] Antibacterial Finishes on Textile Materials: Assessment of Textile Materials [M]. America: AATCC Technical Manual, 1989 . 154-155
- [12] 中华人民共和国卫生部.消毒技术规范 2002 年版) [S].北京:中华人民共和国卫生部,2002.
- [13] Antibacterial Activity Assessment of Textile Materials: Parallel Streak Method [M]. America: AATCC Technical Manual, 1989.263-264
- [14] GB15979-2002 一次性使用卫生用品卫生标准[S].北京:中国标准出版社,2002.

(上接第 4 页)

### 参考文献

- [1] Wang SW, Burnett J. Optimal reset of static pressure set-point for VAV air-conditioning systems [J]. Building Service Engineering Research and Technology, 1998, 19(4): 219-231
- [2] Wang SW. Dynamic simulation of building VAV air conditioning system and evaluation of EMCS on-line control strategies [J]. Building and Environment, 1999, 34 (6): 681-705
- [3] ASHRAE Standard 62.1-2004. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, INC, 2004
- [4] Wang SW, Jin XQ. CO<sub>2</sub>-based occupancy detection for on-line outdoor air flow control [J]. Indoor Built Environment, 1998, 7 (3):165-181