



变风量空调系统发展状况

同济大学 马素贞[☆] 刘传聚

摘要 介绍了国外变风量(VAV)系统的研究和应用现状。分析了国内 VAV 系统研究和应用中存在的问题,指出了其发展方向。总结了变风量空调系统的发展趋势和技术关键。

关键词 变风量系统 研究 应用 发展方向

Development of variable air volume(VAV) air conditioning systems

By Ma Suzhen[★] and Liu Chuanju

Abstract Presents the current research and application status of VAV systems at abroad. Points out the problems existed in study and applications in China, as well as the development directions in the future. Summaries the trends and key techniques of VAV systems.

Keywords variable air volume system, research, application, development direction

[★] Tongji University, Shanghai, China

①

1 国外 VAV 系统的研究和应用现状

变风量(variable air volume, VAV)空调系统 20 世纪 60 年代中期产生于美国,凭借它节能、舒适、灵活等特点在美国、日本及欧洲一些发达国家得到了广泛应用。VAV 空调系统在国外已有多年设计运行实践,随着国内各种商务建筑和办公大楼智能化程度的提高,要求相应的空调系统更加舒适、安全、节能,同时具备智能化功能,这为 VAV 空调系统在国外的推广应用提供了广阔的天地。

国外对 VAV 系统的研究始于 20 世纪 70 年代,研究内容主要包括以下几方面。

1.1 VAV 系统的节能研究

20 世纪 70 年代到 90 年代,主要集中在研究它的能耗情况,即与定风量(CAV)空调系统和风机盘管系统比较节能效果。与 CAV 空调系统相比, VAV 系统可以不需或减少再热量,降低送风量,从而减小风机能耗,降低制冷负荷等。此外, VAV 系统还可以通过消除过冷、回收灯光的热量而节能^[1-3]。Wallace 等人提出,在高层建筑的 VAV 系统中引入建筑节能监控系统和计算机控制,可以优化节能效果^[4]。

风机能耗在 VAV 系统中占很大的比重,因此

对风机采取有效的调节措施,降低风机能耗是增强 VAV 系统节能效果的重要途径。

目前,风机调节主要采用调节风机入口导流叶片角度和变风机转速两种方法,Englander 和 Norford 比较了二者的节能效果,并用动态模拟软件 HVACSIM+进行了模拟计算,结果表明,采用变转速调节要比采用调节风机进口导流叶片角度节能 30%,而且变转速调节与 DDC 结合效果会更好^[5-6]。加州能源委员会总结多年的 VAV 设计经验,认为风机的调节方式对能耗的影响比风机类型的影响大,而且指出变转速调节与变静压控制方式结合节能效果显著^[7]。

1.2 VAV 系统送风量的控制研究

VAV 系统是通过改变送入室内的送风量来实现对室内温度调节的空调系统,因此风量控制是

①[☆] 马素贞,女,1983 年 7 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 13-417 信箱
(021) 69584945
E-mail: haixin6302@163.com
收稿日期:2006-01-09
一次修回:2006-03-06
二次修回:2006-12-06

VAV 系统控制的关键环节,它关系着整个系统的能耗情况和系统的稳定性和可靠性。目前总送风量的控制方法主要有两种:静压控制法和风量控制法。

1.2.1 静压控制法

静压控制法又分为定静压法和变静压法。

定静压控制由于简单、运行可靠,目前仍作为一种主要的控制方法在变风量系统中得到普遍采用,但不利于风机节能。变静压法可以最大限度地降低能耗,节能效果显著。

Tung 和 Wang 等人介绍了变静压控制策略,并分别用实验研究和计算机模拟的方法对两种控制策略的节能情况进行了比较,结果都表明变静压控制方式比定静压控制方式节能效果好^[8-9]。

1.2.2 风量控制法

为了全面提高系统的稳定性,最大限度地节约能量,Hartman 提出了一个新的概念,即基于末端装置的风量调节(terminal regulated air volume, TRAV)^[10]。TRAV 基于末端装置实时的风量要求,采用先进的控制软件,实施风机控制。其基本原理是,将末端装置送风温度、温控器读数、风量及阀位信号都送入一个中央控制器,由它计算后再调节送风状态点(不仅变送风量而且要变送风温度)。Hartman 用计算机对一幢典型办公楼内的 VAV 系统进行了模拟,结果表明,采用 TRAV 控制,风机能耗可以降低 50%。但这种控制方法需要解决两个关键的问题,即送风状态点的预测和所需送风状态的实现。如果能比较好地解决这两个问题,就可以避免多个环路之间的相互作用,从而提高系统的稳定性。此外 TRAV 要求从建筑到 VAV box 都应采用先进的 DDC 控制。

1.2.3 其他控制法

随着研究的深入,人们开始研究更先进可靠的控制方法,Byers 提出了风机压力优化的概念,指出它是部分负荷工况下控制静压的节能措施,也是控制 VAV box 的可靠手段^[11]。Wei 等人提出了将阀门控制和变静压控制相结合的控制方法(integrated damper and pressure reset, IDPR),并用实验的方法对比研究了几种不同控制方法的节能效果。实验结果表明,当系统运行良好时, IDPR 法与 TRAV 法对风机转速的调节基本一致,当系统出现故障时, IDPR 法控制的风机能耗较低^[12]。

Federspiel 等人发展了传统的变静压控制法,提出了带 InCTeTM 的 SAV(static pressure adjustment from volume flow)静压控制,指出该控制方式节能性很好,而且不会影响房间的热舒适性和室内空气质量^[13]。加拿大的 Nassif 等人利用双目标遗传算法对 HVAC 系统的控制方式进行了优化^[14]。

这些控制方式能否成功执行取决于 VAV 末端装置内流量传感器能否对流量进行精确测量。因此,提高流量测量的精度是改善 VAV box 性能的关键技术。

1.3 新风量控制研究

尽管 VAV 系统节能效果显著,但是在实际应用的过程中,人们也发现变风量系统中负荷的变化会导致风量变化,这使得室内气流组织发生改变,从而影响室内的热舒适性^[15]。在 1984 年的 ASHRAE 会议上,大家一致认为设 VAV 空调系统的很多建筑运行效果并不好,问题在于送风量不足^[16]。Tamblyn 指出,VAV 系统室内空气循环不好,无法满足人们对空气质量的要求,为此,他提出了温度补偿和内部分区的方法,以在能耗不升高的情况下保证必要的空气循环^[17]。Meckler 指出,VAV 空调系统风量分配不均容易导致室内空气质量很差,从而使病态建筑综合症出现的概率大大增加^[18]。

为保证室内空气质量,各国学者一直在探索最小新风量的控制方法,现主要有表 1 列举的几类方法^[7,19-26]。

1.4 VAV 系统的动态建模和仿真研究

随着研究的深入,一方面,人们逐渐认识到 VAV 系统是一个高度非线性的动态系统,用稳态的测量和控制技术无法真实反映其实际运行情况;另一方面,随着计算机技术的发展,模糊控制、神经网络技术和各种商业软件被引入 HVAC 系统的研究中,这就使得对 VAV 系统的研究逐渐转向 VAV 空调系统的动态特性和计算机仿真和优化研究上,美国的 Li 等人建立了单管 VAV 系统的动态模型,并比较了采用各类算法如 PI 算法、自适应算法和优化控制算法时的能耗特性,结果表明,优化控制算法比传统的 PI 算法节能 30%^[27]。Mei 等人分别建立了 VAV 系统的 ANN 风机模型和非线性 VAV box 模型,并在 HVACSIM+平台上进行了模拟,结果表明该模型

表 1 最小新风量控制法

| 方 法 | 原 理 | 特 点 |
|-----------------------|---|---|
| CO ₂ 浓度检测法 | 控制回风(或室内空气)中 CO ₂ 体积分数不大于 $1\,000\times 10^{-6}$ | 可以有效控制人为产生的污染物,对非人为产生的污染物难以有效控制,适合于人员密度较大的场合(如餐厅) |
| 人数直接控制法 | 根据直接测得的实际人数决定实际所需的新风量 | 在保证室内空气质量的前提下尽量节能,但增加了监测人数的设备,投资较大,且不适于人员密度较小的场合 |
| 最大、最小送风量两点控制法 | 根据风机的全速和最低速设定最大、最小风阀开度 | 不能保证整个变化范围内都精确,尤其在具有压力波动时,但成本较低 |
| 能量平衡法 | 在新风口、回风口和混风口设置温度传感器来确定送风中新风的百分比,新风量由公式计算得出 | 此法的测量非常简单,但当混风温度传感器的精度不高或回风温度与新风温度接近时,误差较大 |
| 回风机跟踪检测法 | 测量送风机和回风机的流量,并控制回风量,以使二者之间保持一个固定的差值,该差值即为送风机通过新风阀吸入的新风量 | 两种风量测量的累积误差较大,特别是当送风/回风量比较小的时候 |
| 检测新风量法 | 在新风引入口设置一个检测点,对新风流量进行测量,通过该测量值来调节新风阀开度 | 本法是否可行取决于风量测量技术,多数风量传感器精度不够 |
| 专设新风机法 | 专门铺设一条新风管道 | 该法可以保证良好的室内空气质量,但成本高,且需要较大的空间 |
| 压差检测法 | 通过压差传感器测量新风挡板和阀门前后的压力差来控制回风阀 | 能量损耗小,适用性强,推荐采用 |

可以精确有效地反映实际系统的运行^[28]。Yasutomo 等人用能耗模拟软件 EnergyPlus 模拟了不同的控制方式对系统能耗的影响^[29]。Guo 等人提出用基于神经网络辅助的 PI 控制器来实时控制送风温度^[30]。

2 国内 VAV 空调系统的研究和应用现状

我国(香港地区除外)对 VAV 空调系统的研究起步较晚,清华大学、上海交通大学、西安建筑科技大学等学院在这方面做的工作相对多一些。清华大学有关学者提出的总风量控制法具有一定的影响,该方法不采用静压控制风量,而是根据压力无关型 VAV 末端装置的设定风量确定系统总风量,计算出风机转速,从而对风机进行调节。他们比较了总风量控制法与定静压和变静压控制法的节能效果,认为虽然总风量控制法节能效果不如变静压控制法,但因其少了压力控制环节,故稳定性很好^[31]。上海交通大学和西安建筑科技大学的研究主要集中在利用计算机技术研究 VAV 系统的动态特性和仿真计算上^[32-33]。晋欣桥等人通过分析变风量空调系统局部控制,利用其送风量末端阀门的开度作为各区相对负荷的指示信号,提出送风静压优化控制的方案,同时还提出了基于室内人数检测和比焓控制的新风实时优化控制方案^[32]。

香港地区在这方面做的工作比较细致和深入,尤其是香港理工大学的王盛卫,他对 VAV 系统的研究很全面,从对 VAV 系统进行动态建模,到 VAV 系统控制策略和控制参数的优化,以及对 VAV 系统故障诊断和监测都有较深入的研

究^[9,34]。

但是总的来说,VAV 空调系统真正进入国内的时间较晚,技术相对复杂,控制环节多,尤其是对系统和设备的控制要求较高,加上国内技术落后的原因,使得 VAV 系统的节能性没有充分体现出来,此外,系统还存在无法达到调节要求、运行不稳定等问题,这也大大限制了 VAV 系统在国内的推广和应用。

3 国内 VAV 空调系统的发展前景和方向

目前国内对 VAV 系统研究的力度远远不够,要想大力推广和应用 VAV 系统,笔者认为不论是理论研究还是应用研究都需要深入进行。

3.1 提高 VAV 系统节能性的研究

如上所述,降低风机能耗是实现 VAV 空调系统节能的重要一环,而优化风机特性是降低能耗的关键。因此研究 VAV 末端管路特性与风机特性的匹配,实现风机的优化配置和运行可以大大降低系统能耗。

3.2 VAV 系统控制的研究

VAV 空调系统送至各房间的风量和系统的总送风量都会随着房间负荷的变化而变化,因此,它必然会有较多和较复杂的控制要求。只有实现了这些控制要求,系统的运行才能稳妥可靠,其节能性和经济性才能充分体现出来。

由于 VAV 系统存在控制环节多、技术相对复杂、流量和静压波动大等问题,而且对系统和设备的控制要求较高,因此加强对 VAV 系统控制的研究对解决这些问题,确保系统稳定运行十分关键。

1) 发展自控技术。变风量空调系统绝不是简单的几个末端装置加变频器,风量的变化给空调系统带来一系列的问题,只有通过合理的自控方案,才能确保 VAV 系统充分发挥其优势。

2) 优化控制策略。国内外很多研究都表明,优化控制方式可以显著降低能耗,因此加强对控制方式的优化研究,可以使 VAV 系统的节能性充分体现出来。

3) 优化控制算法。引入模糊控制、神经网络技术优化控制算法。

4) 提高控制参数的精度。自控方案的成功实施和优化控制方式的良好运行都取决于控制参数的精度,精确的控制参数加上先进的 DDC 控制,可以大大提高系统运行的稳定性。

3.3 VAV 系统新风供应问题的研究

对于 VAV 空调系统的新风问题,国外提出了各种各样的新风量控制方法,我们应结合各类方法的优缺点及工程实际情况来选择,尽可能在保证室内空气质量的前提下降低系统的初投资和运行费用。

3.4 研究和发展准确度高的模拟计算和设计软件

对 VAV 系统进行动态建模和仿真计算是 VAV 系统研究的热点和发展趋势,不同的建模手段和模拟方法的结果差异很大,因此建立准确的模型和开发更可靠的模拟软件有利于 VAV 系统的研究和设计。

4 结语

从 VAV 系统的研究现状可以看出,国外已有多年的 VAV 系统设计和工程经验,他们对其的研究相应地也较深入和细致,可以说,VAV 技术在国外已经相当成熟。但是国内在 VAV 系统的使用中却存在很多问题,如调节困难、控制不稳定、新风不足、气流组织不好、房间负压或正压过大、系统运行不稳定、节能效果不明显等。目前国内对其的研究力度远远不够,而且所做的研究工作比较零散,没有形成一个统一的设计规范,因此,VAV 系统要在国内推广和普及还需要做大量的研究工作。在这方面可以借鉴国外的工程经验和技術优势,加强国际合作,结合我国国情发展 VAV 技术,促进 VAV 系统在国内的推广和应用。

VAV 系统是一种节能、舒适、安全的空调系统,发展 VAV 空调系统符合我国的可持续发展战

略。发展变风量技术,提高变风量空调系统的应用水平对我国大型建筑的节能具有重要的意义。

参考文献

- [1] Peach J W. Twin fans convert dual duct decks to parallel VAV systems[J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1974, 46(4): 64-66
- [2] Thomas L D. VAV air distribution[J]. ASHRAE J, 1974, 16(4): 36-40
- [3] Obler H. VAV system eliminates overcooling [J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1979, 51(8): 75-80
- [4] Wallace B B. Energy saving HVAC design for high-rise buildings[J]. Specifying Engineer, 1980, 43(2): 73-77
- [5] Englander S L, Norford L K. Saving fan energy in VAV systems—part 1: analysis of a variable-speed-drive retrofit[G]// ASHRAE Trans, 1992, 98(1): 3-18
- [6] Englander S L, Norford L K. Saving fan energy in VAV systems—part 2: supply fan control for static pressure minimization using DDC zone feedback[G]// ASHRAE Trans, 1992, 98(1): 19-32
- [7] California Energy Commission. Advanced variable air volume system design guide[EB/OL]. http://www.energy.ca.gov/reports/2003-11-17_500-03-082_A-11.PDF
- [8] Tung S L, Deng Shiming. Variable-air-volume air-conditioning system under reduced static pressure control[J]. Building Services Engineering Research & Technology, 1997, 18(2): 77-83
- [9] Wang Shengwei, Burnett J. Variable-air-volume air-conditioning systems: optimal reset of static pressure set point[J]. Building Services Engineering Research & Technology, 1998, 19(4): 219-231
- [10] Hartman T. TRAV—a new HVAC concept [J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1989, 61(7): 69-73
- [11] Byers T. VAV system; fan pressure optimization [J]. TAB Journal, 2002: 21
- [12] Wei Guanghua, Liu Mingsheng, Claridge D E. Integrated damper and pressure reset for VAV supply air fan control[G]// ASHRAE Trans, 2004, 110(2): 309-313
- [13] Federspiel C C, Haves P, Cohen T. Detecting critical supply duct pressure[G]// ASHRAE Trans, 2005, 111(1): 957-963

- [14] Nassif N, Kaji S, Sabourin R. Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm[J]. HVAC & R Research, 2005, 11(3): 459-486
- [15] Nevins R G, Rohles F H. Thermal comfort and variable air volume systems[C]// Aust Inst of Refrig Air Cond and Heat, Fed Conf Brisbane, Queensl, 1974
- [16] Int-Hout D, Berger P. What's really wrong with VAV systems? [J] ASHRAE J, 1984, 26(12): 36-38
- [17] Tamblyn R T. Beating the blahs for VAV [J]. Australian Refrigeration, Air Conditioning and Heating, 1984, 38(2): 42-46
- [18] Meckler M. Ventilation/air distribution cure 'sick' buildings[J]. Specifying Engineer, 1985, 53(1): 78-82
- [19] Kettler J P. Controlling minimum ventilation volume in VAV systems[J]. ASHRAE J, 1998, 40(5): 45-48, 50
- [20] Janu G J, Wenger J D, Nesler C G. Strategies for outdoor airflow control from a systems perspective [G]//ASHRAE Trans, 1995, 101(2): 631-643
- [21] Krarti M, Schroeder C C, Jeanette E, et al. Experimental analysis of measurement and control techniques of outside air intake rates in VAV systems [G]//ASHRAE Trans, 2000, 106(2): 39-52
- [22] Roberts J W. Outdoor air and VAV systems[J]. ASHRAE J, 1991, 33(9)
- [23] Sauer H J, Howell R H. Estimating the indoor air quality and energy performance of VAV systems[J]. ASHRAE J, 1992, 34(7): 43-50
- [24] Delp W W, Howell R H, Sauer H J Jr, et al. Control of outside air and building pressurization in VAV systems[G]//ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 565-589
- [25] Carpenter S C. Energy and IAQ impacts of CO₂-based demand-controlled ventilation[G]//ASHRAE Trans, 1996, 102(2): 80-88
- [26] Siemens J, Houston D. Using DDC controls to ensure adequate ventilation in VAV systems [J]. Plant Engineering, 1999, 53(5): 66-68
- [27] Li H C, Ganesh C, Munoz D R. Optimal control of duct pressure in HVAC systems [G] // ASHRAE Trans, 1996, 102(2): 170-174
- [28] Mei L, Levermore G J. Simulation and validation of a VAV system with an ANN fan model and a non-linear VAV box model [J]. Building and Environment, 2002, 37(3): 277-284
- [29] Yasutomo Tetsuji, Zheng Mingjie, Nakahara Nobuo. VAV HVAC system simulation using EnergyPlus[C] // Proceedings of the 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning. Beijing, 2003: 1100-1107
- [30] Guo Chengyi, Song Qing, Cai Wenjian. Real-time control of variable air volume system based on a robust neural network assisted PI controller [C] // 2004 IEEE International Conference on Neural Networks—Conference Proceedings. Budapest, Hungary, 2004: 1847-1852
- [31] 戴斌文, 狄洪发, 江亿. 变风量空调系统风机总风量控制方法[J]. 暖通空调, 1999, 29(3): 1-6
- [32] 晋欣桥, 夏清, 陈刚, 等. 变风量空调系统中的实时优化节能控制[J]. 节能, 1999(1): 17-21
- [33] 李琳琳. 变风量(VAV)空调系统的 DDC 控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003
- [34] Wang Shengwei, Qin Jianying. Sensor fault detection and validation of VAV terminals in air conditioning systems [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 2482-2500

(上接第 90 页)

5.4 供暖系统的设计, 不仅要进行干管环路和立管之间的水力平衡计算, 对于垂直双管系统, 更重要的还应该进行同一立管各层散热器环路之间的水力平衡计算。

5.5 对任何双管系统, 适当减小散热器环路支管的管径和采用高阻力阀门(或高阻力散热器恒温阀), 以增大散热器环路的计算压力损失, 有利于各散热器环路之间的水力平衡。

5.6 从理论上讲, 任何水力失调的系统都有可能采用阀门调节得以改善。但是, 设置于散热器上的阀门是为用户在

一定范围内自主选择室温, 不应该、也不可能要求或限制用户根据自己的需要自行调节阀门, 采用散热器阀门调节作为解决水力失调的设计措施是不合理的。

5.7 在建筑物供暖系统入口采用混水器与室外供暖管网连接, 在不改变建筑物供热量和入口流量的前提下, 增加建筑物内部系统的循环流量和降低自然作用压力因素对水力平衡的不利影响, 虽乃无奈之策, 但对于存在缺陷、而散热器配置较多系统的改造, 也是一种有效的办法。

5.8 某些水泵的性能达不到额定指标, 在一些工程中屡见不鲜, 应该引起设计选型和工程采购部门的重视。