

风机盘管占空比模糊控制试验研究

赵天怡, 马良栋, 张吉礼

(大连理工大学 建设工程学部土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:提出了一类风机盘管节能控制的新方法,将占空比的概念引入风机盘管电动水阀的控制中,在特定的控制周期内充分利用水阀关闭状态下风机盘管的冷却除湿(或供热)能力,利用 Mamdani 模糊规则与作用模糊子集推理方法,根据室温偏差与偏差变化确定水阀占空比与风机档位。试验结果表明,风机盘管占空比模糊控制方法较传统控制方法的节能量高于 30%,同时可达到更好的室温控制效果。

关键词:风机盘管;占空比;模糊控制;试验

中图分类号:TU831.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0092-08

Experimental Analysis on Duty Ratio Fuzzy Control for Fan-coil Unit

ZHAO Tian-yi, MA Liang-dong, ZHANG Ji-li

(School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: A new type of energy efficiency control method for fan-coil unit is presented. By introducing the conception of duty ratio into electric valve control, the cooling and dehumidifying capacity of fan-coil unit is fully utilized. By means of Mamdani type fuzzy rule and the Method of Functioning-fuzzy-subset Inference, duty ratio of valve and fan speed signal are identified according to deviation and deviation change of room temperature. It is shown that presented method could achieve at least 30% energy saving than traditional control method as well as a preferable room temperature control effect.

Key words: fan-coil unit; duty ratio; fuzzy control; experiments

风机盘管为中国中央空调系统的主要末端设备,使用场合广泛覆盖宾馆类与办公类建筑。文献表明^[1],截止到 2005 年中国风机盘管年销量已超过 200 万台。从 1972 年中国开始研制风机盘管至今,诸多科研人员与工程师在开发新型产品^[2-4]、优化设计方法^[5-6]、热力特性建模与测试^[7-8]、能耗计量^[9-10]、风机盘管空调房间空气品质与热舒适性^[11-15]等方面进行了大量有实用价值的改进与研究。

单台风机盘管的功率虽然不高,但其使用时间长、数量多,为建筑机电设备耗能系统的重要组成。

风机盘管的运行调节与优化控制不仅可提高用户的空调精度以改善室内热舒适性,又是中央空调系统乃至建筑节能的重要实施手段。陈向阳^[16]针对建筑周边区风机盘管的控制问题,提出了基于外围护结构负荷控制方法,并将辐射温度传感器引入风机盘管的控制应用中。Ke^[17]通过试验对比了定风量(CAV)与变风量(VAV)风机盘管的运行特性,结果表明了变风量风机盘管的节能性。Ke^[18]综合考虑节能效果与室内空气品质,提出了一类水侧低温差的风机盘管控制方法。一些学者也尝试将模糊控制

收稿日期:2010-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578049、51008142、51078053);国家科技支撑计划子课题(2006BAJ01A09、2008BAJ12B05)。

作者简介:赵天怡(1982-),男,博士后,主要从事建筑空调与制冷系统优化设计与智能诊断控制研究,(E-mail)sebastian.zhao@gmail.com。

方法与风机盘管的节能控制结合,江志斌等^[19]借助模糊逻辑通过室温调节风机盘管的风速与电磁三通阀的旁通比,并研发了模糊控制器。Ghiaus^[20]基于if-then的模糊规则形式,利用T-S模糊模型描述了风机盘管的运行特性并提出了以该模型为参考的控制方法,研究比较了模糊控制方法与PID控制的应用情况,结果表明了模糊控制方法在提高空调房间热舒适性与节能上的优势。

相比于风机盘管领域的其他方面,风机盘管的优化控制研究相对进展缓慢,尤其针对目前中国应用形式最广泛的双管式、风机三档调速、电动水阀通断控制的风机盘管系统(如图1所示),绝大多数的温控器或风机盘管独立控制器通过室内挂墙模块读取工作模式(冬季或夏季)、房间温度、房间温度设定值、风机档位状态(手动或自动),根据图2的控制策略控制风机档位与电动水阀通断。

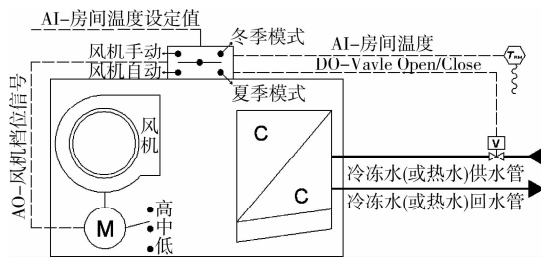


图1 风机盘管控制点示意图

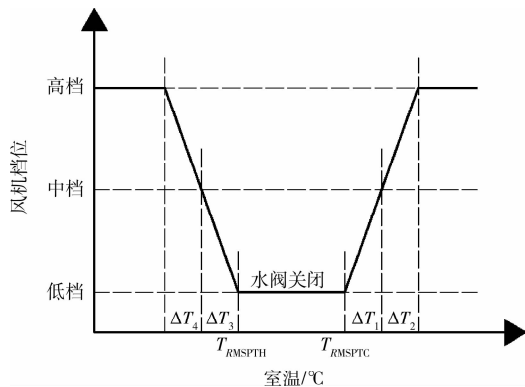


图2 风机盘管控制策略示意图

图2中, T_{RMSPTH} 与 T_{RMSPTC} 分别为冬季模式与夏季模式的室温设定值。以夏季工况为例,当室温低于 T_{RMSPTC} 时,水阀关闭,室温高于 T_{RMSPTC} 时,水阀开启。当室温介于 T_{RMSPTC} 与 $T_{RMSPTC} + \Delta T_1$ 间时,风机低档运行;当室温介于 $T_{RMSPTC} + \Delta T_1$ 与 $T_{RMSPTC} + \Delta T_2$ 间时,风机中档运行;当室温高于 $T_{RMSPTC} + \Delta T_2$ 时,风机高档运行。冬季模式类似。

以上的运行策略被大多数风机盘管系统所采用,且能够达到一定的控制效果,该文称之为传统控制方法。传统控制方法需改进的方面有:

1)传统方法在多数工况下水阀处于开启状态,若可利用水阀关闭状态下盘管的冷却除湿能力,可适当增加水阀关闭的时间,对于整个风机盘管系统而言,若合理安排好每台盘管的水阀关闭时段,可节省一定的冷冻水量继而降低水泵电耗;

2)可将水阀的控制模式由传统方法的数字量控制模式转化为占空比(定义为水阀开启时间与控制周期之比)控制模式,将数字控制信号转化为模拟信号,从而便于将智能控制理论(如模糊控制)引入至风机盘管的控制方法中;

3)在风机自动模式下,传统方法的风档控制参照室温偏差进行调节,并未考虑到室温偏差变化的因素,对应图2的控制策略,风档易发生频繁变换或室温控制效果不理想的情况。

4)环境温度在高于设定值 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 的范围内波动有利于人体热舒适性,因此风机盘管控制无需苛求室温一定严格地被控制在设定值的水平上。即可消耗更小的供冷量达到用户的热环境需求,这说明传统的控制方法具备一定的节能改进空间。

为此,该文将占空比的概念引入风机盘管控制中,提出一类新的风机盘管控制方法即占空比模糊控制方法。

1 风机盘管占空比模糊控制方法

以图1所示的风机盘管形式为例说明。引入占空比 R_{ON} 的概念。即在特定的控制周期 T_{CYC} 内,设水阀的开启时间为 T_{ON} ,则 $R_{ON} = T_{ON}/T_{CYC}$ 。设当前室温与室温设定值的偏差为 eT ,室温偏差变化为 ecT (当前室温偏差与上一时刻室温偏差之差)。控制方法即参照 eT 与 ecT 同时控制 R_{ON} 与风机档位,如图3所示。图中FS表示风机档位状态,以风机自动模式为例说明,当室温低于设定值时, R_{ON} 取0(即在该控制周期内水阀关闭),风机档位为低档;当室温处于 T_{RMSPTC} 与 $T_{RMSPTC} + \Delta T$ 间时(如图3阴影区域所示),根据 eT 与 ecT ,通过模糊逻辑Fuzzy_Logic1与Fuzzy_Logic2推理得到风机档位与 R_{ON} 的输出值。模糊规则表如表1所示;当室温高于 $T_{RMSPTC} + \Delta T$ 时, R_{ON} 取1,风机档位为高档。

表1中, u 代表 R_{ON} 或FS的模糊推理值, eT 、 ecT 、 u 的模糊论域取 $[-2, 2]$,在 e 与 ec 的论域上划分为“负大”、“负小”、“零”、“正小”、“正大”共5个模糊等级,分别用NB,NS,ZE,PS,PB表示,其隶属函数如图4所示,模糊推理方法为作用模糊子集推理方法^[21]。占空比的实际论域为 $[0, 1]$,求得 u 之后可直接反模糊化;FS的反模糊化参考 u 的范围而确定:

当 u 小于 0.5 时, FS 为低档; 当 u 介于 0.5 与 1.5 间 时, FS 为中档; 当 u 大于 1.5 时, FS 为高档。

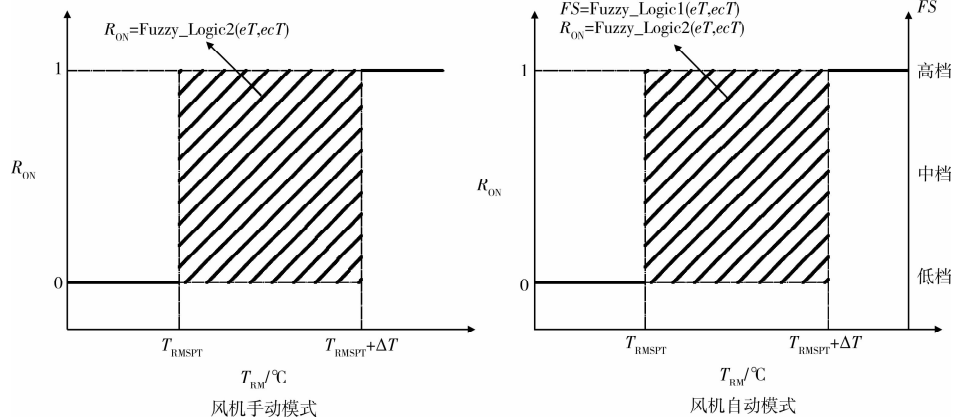


图 3 风机盘管模糊控制方法示意图

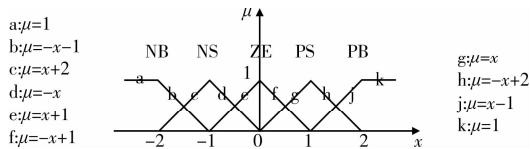


图 4 隶属函数

以自动模式为例, 风机盘管占空比模糊控制方法的执行流程如图 5 所示。图中, T_{RMS} 为上一时刻的室温采样值, 除了执行图 3 所示的控制策略之外, 考虑到室内负荷突然升高对室温控制的影响, 方法实时监测室温变化情况: 若 T_{RM} 持续高于 $T_{RMSPT} + \Delta T$ 达 30 s 或 T_{RM} 持续高于 $T_{RMS} + \Delta T_1$ 达 30 s, 风档自

动调至高档, 水阀占空比调整为 1。方法涉及的各类参数说明列于表 2。

表 1 占空比与风机档位模糊控制规则表

ecT	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	-2	-2	-1	-1	0
NS	-2	-1	-1	0	1
ZE	-1	-1	0	1	1
PS	-1	0	1	1	2
PB	0	1	1	2	2

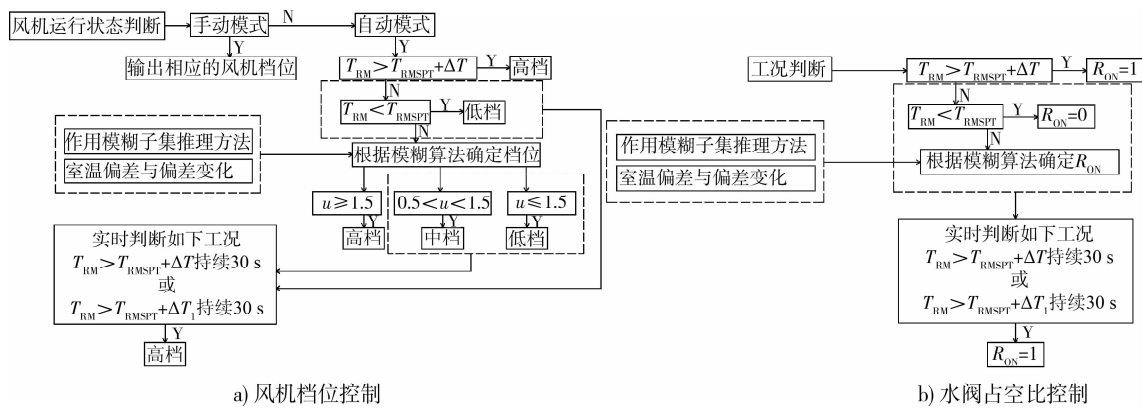


图 5 风机盘管占空比模糊控制方法执行流程

表 2 风机盘管占空比模糊控制方法参数信息

参数类型	序号	参数名称	符号或表达形式	单位	备注
监测参数	1	室内温度	T_{RM}	$^{\circ}C$	通过挂墙模块读取, 模拟输入
	2	室温设定值	T_{RMSPT}	$^{\circ}C$	通过挂墙模块读取, 模拟输入
	3	冬季/夏季模式	Sum/Win		通过挂墙模块读取, 数字输入
	4	手动/自动模式	Manual/Auto		通过挂墙模块读取, 数字输入
控制参数	1	风机档位	FS		高档、中档、低档、关闭
	2	水阀信号	VS		开启、关闭

续表 2

参数类型	序号	参数名称	符号或表达形式	单位	备注
算法参数	1	eT 模糊论域	$[-FeT, FeT]$		根据算法要求确定
	2	ecT 模糊论域	$[-FecT, FecT]$		根据算法要求确定
	3	u 模糊论域	$[-Fu, Fu]$		根据算法要求确定
	4	占空比	R_{ON}		模拟量输出 $[0,1]$
调试参数	1	控制周期	T_{CYC}	s	同房间负荷变化特性相关
	2	eT 高限值	ΔT	$^{\circ}C$	根据室温控制要求选取
	3	ecT 高限值	ΔT_1	$^{\circ}C$	根据室温控制要求选取

2 试验研究

2.1 试验原理

试验采用大连理工大学变流量空调系统集成控制试验台中的风机盘管系统完成,空调系统原理图如图 6 所示。图 6 中,系统冷源为一台风冷热泵;V1~V6 为电动两通阀;V1~V6 为连续调节阀;Tw1~Tw8 为水温传感器;FCU1~FCU6 为风机盘

管,试验以 FCU6 为对象研究提出的控制方法,FCU6 的空调房间建筑面积约 10 m^2 ,房间内均布 5 个电热炉,利用调压器调节电热炉的加热量以模拟房间内热源负荷变化。控制器采用 Honeywell XL-100 型可编程控制器,控制算法采用 Honeywell Care7.0 软件编写,控制系统原理图如图 7 所示。试验台主要设备照片如图 8 所示。

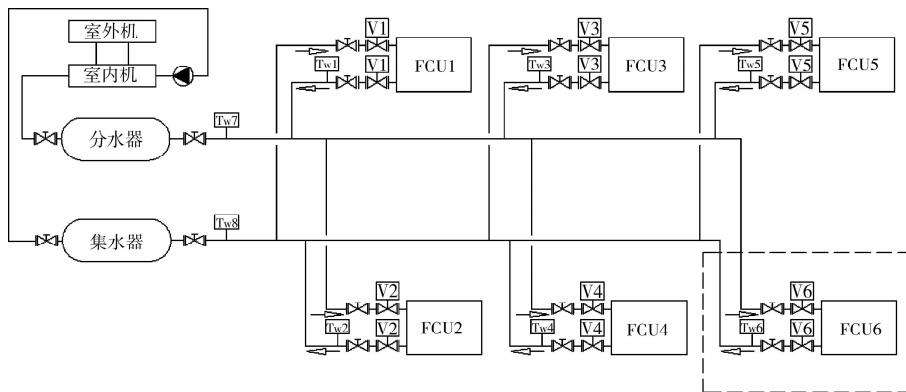


图 6 试验台风机盘管系统原理图

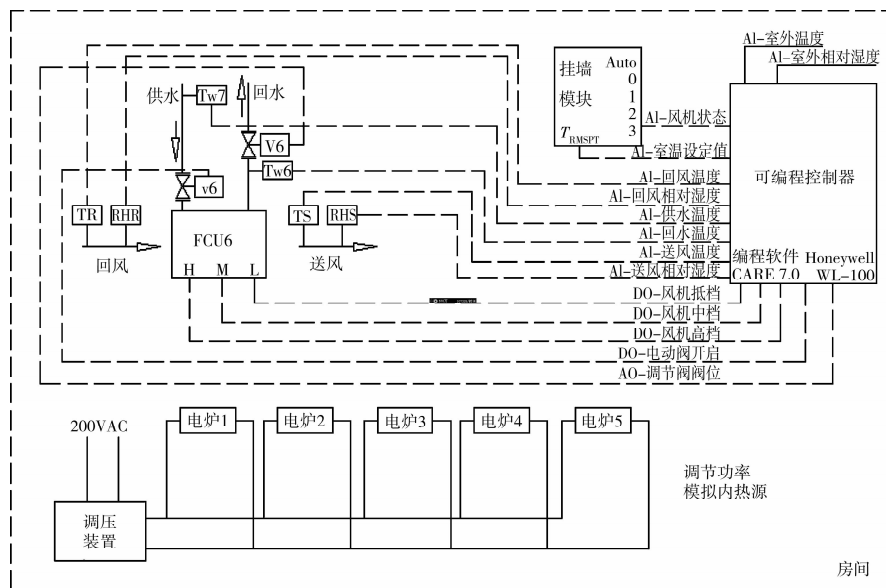


图 7 试验台控制系统原理图



图 8 试验台主要设备照片

模糊推理方法(图 3 中的 Fuzzy_Logic1 与 Fuzzy_Logic2)在 Care 编程软件中的模块化实现方法为:图 4 中列出了 e 与 ec 的 6 个模糊子论域所对应的隶属度函数的线性表达式,模块将 e 与 ec 模糊值(分别定义为 Fe 与 Fec)代入这 9 组线性表达式中计算隶属度。模块通过定义 36 个逻辑量 $R1 \sim R36$ 来描述表 1 中所覆盖的 Fe 与 Fec 范围。编号顺序参照表 1 的 Fe 从左至右, Fec 从上至下的变化顺序。例如, $R1 = 1$ 即表示 $Fe < -2$ 且 $Fec < -2$ 对应的范围组合; $R8 = 1$ 即表示 $-2 < Fe < -1$ 且 $-2 < Fec < -1$ 对应的范围组合; $R16 = 1$ 即表示 $-1 < Fe < 0$ 且 $0 < Fec < 1$ 对应的范围组合; $R36 = 1$ 即表示 $Fe > 2$ 且 $Fec > 2$ 对应的范围组合。结合图 4 中 9 组线性表达式与 $R1 \sim R36$ 体现的查表功能,对于一组 Fe 与 Fec 值,模块计算各作用模糊子集下 Fe 与 Fec 的隶属度,进而实现作用模糊子集推理方法,计算 u 对应的模糊值 Fu ,反模糊化,求得 u 。

2.2 试验工况与试验参数

试验目的为对比风机盘管占空比模糊控制方法与传统方法的应用效果。占空比模糊控制方法通过图 7 所示的控制系统实现,传统方法采用 Honeywell W7752D 的风机盘管控制器实现。试验分别将 2 种方法应用于 FCU6 的控制中,每组试验周期为 10.5 h,为保证试验工况的均衡性,2 组试验分别在室外温度相差不大的连续 2 d(2009 年 8 月 4 日,8 月 5 日)内的相同时段进行。监测的室外温度情况(图 9 所示)表明,传统控制方法对应试验日(8

月 4 日)平均温度为 28.0°C ,占空比控制方法对应试验日(8 月 5 日)平均温度为 27.8°C 。传统控制方法试验日下午时段的室外温度略高于占空比控制方法试验日,晚间时段的室外温度略低于占空比控制方法试验日。总体上看,由于存在着 0.2°C 的平均室外温度差异,传统控制方法的试验日工况略不利于占空比控制方法。下面就针对室外温度差异对试验工况的影响情况予以分析。

1) 室外温度为室外气象因素对冷负荷的综合影响的一部分。由于 2 类试验日均为晴天且太阳辐射强度基本一致,考虑到太阳辐射对冷负荷的影响相对均衡,因此室外温度的微小差异将不会对 2 组试验日内房间冷负荷造成较大影响。

2) 为进一步降低室外温度对试验工况的干扰,试验分别在固定的试验时段内在试验房间加入 400 W 内热源 4 次,每次持续 40 min 后关闭,加入 600 W 内热源 1 次,持续 40 min 后关闭。由于内热源的散热强度要大大高于室外工况对房间的传热强度,加入内热源后的试验工况下房间冷负荷的主要来源为内热源引起的冷负荷,进而室外温度对冷负荷的影响程度将进一步降低,因此可认为 2 组试验的冷负荷需求基本一致,试验工况保持均衡。加入内热源的 2 组试验日的工况对比如图 9 所示。2 组试验的相关参数列于表 3。

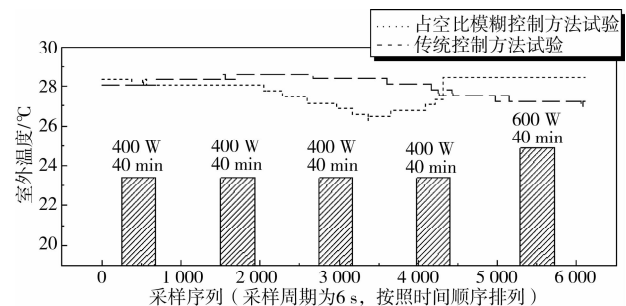


图 9 对比试验的室外温度与附加内热源工况

表 3 试验参数信息

参数类型	序号	参数名称	参数取值	备注
工况参数	1	风机盘管运行模式	夏季/自动	通过图 8c) 的挂墙模块实现
	2	冷冻水回水温度设定值	15°C	由风冷热泵控制系统实现
	3	通水状态下风机盘管的冷水流量	0.216 L/s	通过调节图 6 中的 V6 实现
算法参数	1	控制周期	20 min	参考调试试验结果选取
	2	eT 、 ecT 、 u 模糊论域	$[-2^{\circ}\text{C}, 2^{\circ}\text{C}]$	
	3	ecT 计算周期	50 s	
	4	eT 实际论域	$[0, 2^{\circ}\text{C}]$	
	5	ecT 实际论域	$[-0.1^{\circ}\text{C}, 0.1^{\circ}\text{C}]$	

续表 3

参数类型	序号	参数名称	参数取值	备注
	6	R_{ON} 实际论域	[0,1]	
	7	图 2 中 ΔT_1	0.5℃	
	8	图 2 中 ΔT_2	1℃	
	9	图 3 中 ΔT	2℃	
	10	图 5 中 ΔT_1	0.5℃	

2.3 试验结果与分析

图 10 列出了占空比模糊控制方法与传统控制方法的风机档位控制信号、电动水阀控制信号、风机盘管显热供冷量、潜热供冷量、全热供冷量与室温控制

制效果的对比试验结果。为便于比较,图 10 中的试验结果均按照数值大小升序排列。为便于定量比较 2 种方法的应用效果,统计 2 种方法的评价指标于表 4。

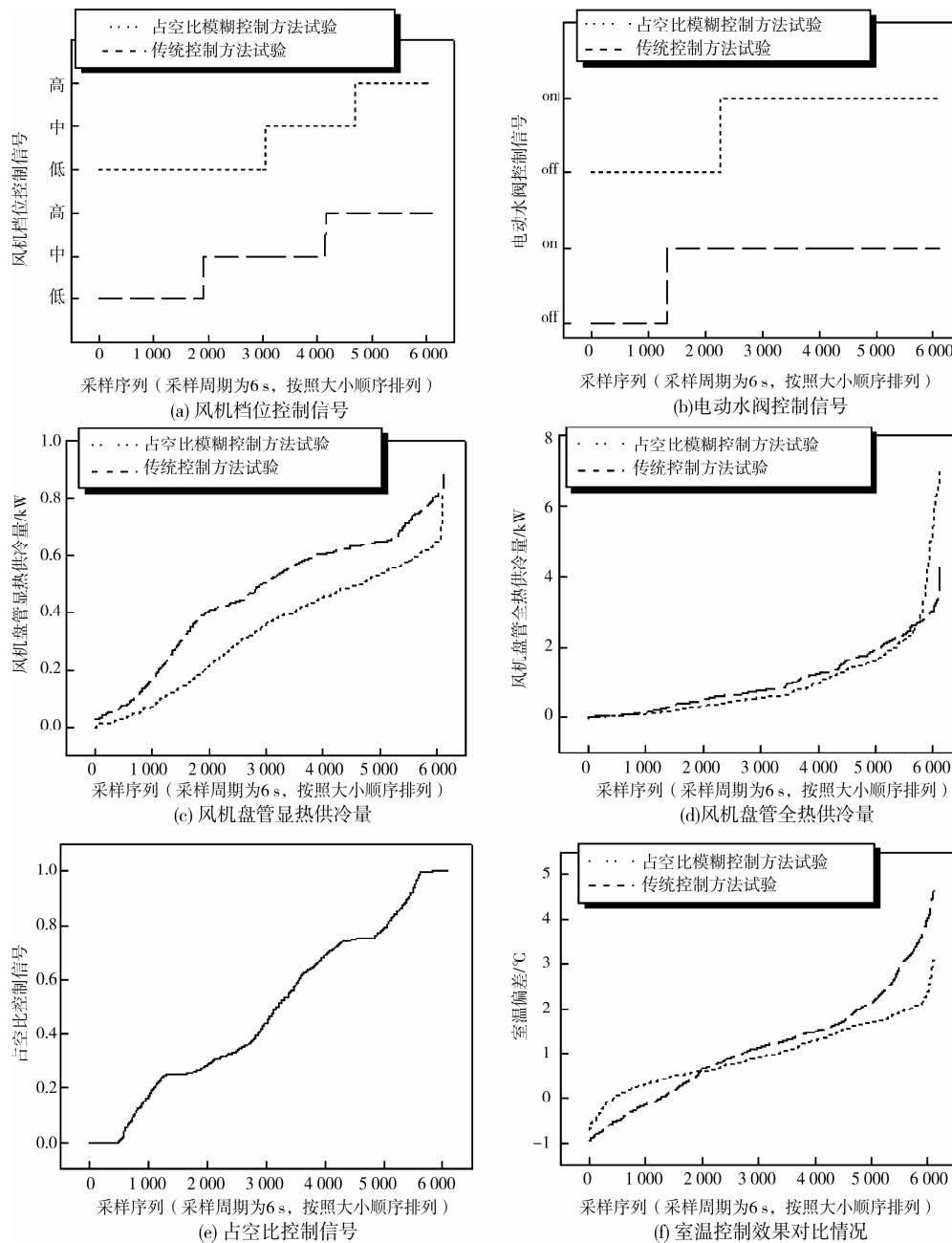


图 10 对比试验结果

表 4 两类控制方法的定量评价指标

方法	风机档位控制			风机总电耗/ (kW·h)	水阀控制 水阀开启 时间/h	全热供 冷量/ (kW·h)	室温绝对偏 差平均值/ ℃
	高档运行 时间/h	中档运行 时间/h	低档运行 时间/h				
传统控制方法	3.35	3.86	3.26	0.110 4	8.24	11.098 3	1.589
占空比模糊控制方法	2.46	2.81	5.23	0.078 5	4.98	10.393 4	1.096

从试验结果可见:

1)从风机档位在试验时段内的分布情况看,占空比模糊控制方法在试验时段内的一半时间为低档运行,而传统方法的高、中、低档运行时间各占总时间的 1/3 左右。从风机电耗在试验时段内的累计值可见,占空比模糊控制方法较传统控制方法节省了约 28.9% 的风机电耗。

2)从电动水阀的控制效果看,传统方法的水阀开启时间频数为 78.5%,而占空比模糊控制方法在试验时段内仅对应 47.4% 的水阀开启频数。对于整个风机盘管系统而言,若将各台盘管的开启时段交错开,占空比模糊控制方法将节省更可观的冷冻水量,从而降低冷冻水泵的输送电耗。

3)从风机盘管消耗的冷量情况来看,占空比模糊控制方法较传统控制方法低 6.3%,值得注意的是,占空比模糊控制方法的通水时间要明显少于传统控制方法,即表明在断水的状态下风机盘管仍可向房间提供一定的冷量。

4)从室温控制效果来看,占空比模糊控制方法的室温绝对偏差平均值较传统方法低 0.5℃,图 10(f)也同时表明,占空比模糊控制方法可获得更理想的室温控制效果。

3 结论

1) 风机盘管占空比模糊控制方法将占空比的概念引入水阀的控制中,将传统方法的水阀两位通断控制转化为占空比模拟量控制,不仅便于模糊控制方法在风机盘管优化控制中的应用,也充分利用了风机盘管断水状态下的冷量,从而节约了一定的冷冻水量输送能耗。

2) 占空比模糊控制方法在风机电耗、冷冻水量消耗、供冷量及室温控制效果 4 方面均要优于传统控制方法,综合节能量约为 30%,这部分节能量还不包括考虑冷冻水量节省而带来的冷冻水泵节电

量。

参考文献:

- [1] 郁惟昌,胡仰着,杨国荣. 无刷直流电动机与节能性风机盘管机组[J]. 暖通空调,2007,37(11):62-66.
YU WEI-CHANG, HU YANG-QI, YANG GUO-RONG, Brushless DC motors and energy saving fan coil units [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007,37(11):62-66.
- [2] 林智忠. 单元住宅风机盘管空调机组:中国,93242236.5 [P]. 1994-09-07.
- [3] 陈承辉,吴志健. 外转子电机驱动的风机盘管:中国,97243093.8[P]. 1999-08-11.
- [4] 殷平. 一种永磁无刷直流电机驱动的无级调速风机盘管:中国,00239890.7[P]. 2002-05-01.
- [5] 韩伟国. 风机盘管空调系统设计的若干问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学热能工程系,2000.
- [6] 皮特·诺瓦克,普里莫兹·格里卡尔,杰特·特克. 高层建筑中的风机盘管机组[J]. 暖通空调,1998,28(2):5-9.
PETER NOVAK, PRIMOZ GRICAR, JANI TURK. Fan coil units in highrise buildings [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1998,28(2):5-9.
- [7] 甄伟,谷波,卞荷洁,等. 外界扰动下的风机盘管动态响应[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(1):153-156.
ZHEN WEI, GU BO, BIAN HE-JIE, et al. Dynamic response of fan coil unit performance caused by exterior disturbance [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,39(1):153-156.
- [8] 裴清清,周智明,陈煜健,等. 干工况风机盘管机组性能实验研究[J]. 暖通空调,2009,39(7):1-4.
PEI QING-QING, ZHOU ZHI-MING, CHEN YU-JIAN, et al. Experimental study on a fan-coil unit running in dry conditions [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2007,39(1):153-156.
- [9] 江亿,秦绪忠. 风机盘管集中空调系统用冷计量收费装置[J]. 暖通空调,2000,30(6):48-55.

- JIANG YI, QING XU-ZHONG. Cooling metering and charging device in the fan-coil unit air conditioning system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(6):48-55.
- [10] 葛文奇, 江亿, 夏益民. 一种用 IC 卡计费的风机盘管控制装置: 中国, 00100703. 3[P]. 2001-08-08.
- [11] 袁昌立. 使用风机盘管的房间的舒适性实测研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(6):64-67.
- YUAN CHANG-LI. A measurement study on indoor comfortability with fan-coil units[J]. Building Science, 2007, 23(6):64-67.
- [12] SRIVASTAVA V, GU Y, ARCHER D. Adaptive control of indoor thermal environments using fan coil units[C]//ES 2008: Proceedings of 2nd International Conference on Energy Sustainability Collocated with the Heat Transfer, Fluids Engineering, and 3rd Energy Nanotechnology Conferences. Jacksonville, Florida, USA, 2008.
- [13] LI R, ZHANG Y J, ARCHER D. Computation of air flow in CMU's intelligent workplace and its effect on occupant health and comfort[C]//ES 2008: Proceedings of 2nd International Conference on Energy Sustainability Collocated with the Heat Transfer, Fluids Engineering, and 3rd Energy Nanotechnology Conferences, Jacksonville, Florida, USA, 2008.
- [14] CHU C M, JONG T L, HUANG Y W. Thermal comfort control on multi-room fan coil unit system using LEE-based fuzzy logic[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46:1579-1593.
- [15] 李先庭, 孟彬彬, 杨建荣, 等. 风机盘管加新风系统中室内污染物浓度分布[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(6):770-773.
- LI XIAN-TING, MENG BIN-BIN, YANG JIAN-RONG, et al. Distribution of the contaminant concentration in rooms with fan-coil units and fresh air supplies[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(6):770-773.
- [16] 陈向阳. 周边区风机盘管机组空调的自动控制方法[J]. 暖通空调, 2000, 30(1):29-34.
- CHEN XIANG-YANG. Automatic control for perimeter zone air conditioning[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(1):29-34.
- [17] KE M T. Design of test method and detail ratings of variable air volume fan-coil units [J]. Building and Environment, 2002, 37:447-453.
- [18] KE M T, WENG K L, CHIANG C M. Performance evaluation of an innovative fan-coil unit: low-temperature differential variable air volume FCU[J]. Energy and Building, 2007, 39:702-708.
- [19] 江志斌, 江斌, 孙保群. 风机盘管空调器模糊控制器的研究[J]. 制冷学报, 1995(1):24-29.
- JIANG ZHI-BIN, JIANG BIN, SUN BAO-QUN. A study of fuzzy controller of fan coil unit [J]. Refrigeration Journal, 1995(1):24-29.
- [20] GHIAUS C. Fuzzy model and control of a fan-coil[J]. Energy and Buildings, 2001, 33:545-551.
- [21] 欧进萍, 张吉礼. 作用模糊子集推理方法的研究与应用[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(3):58-65.
- OU JIN-PING, ZHANG JI-LI. Study and application on the method of functioning-fuzzy-subset inference[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(3):58-65.

(编辑 胡英奎)