



# 干式风机盘管与辐射顶板的能效分析及优化

嵇潇烽<sup>1</sup>, 吴玲娜<sup>2</sup>, 张光玉<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 杭州市城建设计研究院有限公司, 杭州 310018)

**摘要:** 为探索显热末端优化方案, 便于工程中合理选用干式风机盘管和辐射顶板, 通过理论计算对比分析了目前市售干式风机盘管、辐射顶板两类显热末端的单位冷量功耗等性能参数, 结果表明: 干式风机盘管空间占用较小、供冷量大, 风机功耗是其自身功耗的主要部分; 辐射顶板单位冷量功耗远低于干式风机盘管, 能效较高; 相同供/回水平均温度下, 增大供/回水温差、减小水流量可降低辐射顶板单位冷量功耗。在此基础上提出了串联组合的优化和改进方案并进行了分析, 结果表明: 先辐射顶板后干式风机盘管的串联组合较相近冷量的干式风机盘管可降低单位冷量功耗 33.60%~49.84%; 先干式风机盘管后辐射顶板的串联组合可进一步降低单位冷量功耗 18.03%~25.82%, 供冷量提高 19.58%~32.96%。该研究可为实际工程中合理选择显热末端提供参考。

**关键词:** 显热末端; 干式风机盘管; 辐射顶板; 能效; 串联组合

**中图分类号:** TU831.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 05-0458-08

## Analysis and optimization of the energy efficiency of dry fan-coil unit and radiant ceiling

Ji Xiaofeng<sup>1</sup>, Wu Lingna<sup>2</sup>, Zhang Guangyu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Hangzhou Architectural & Civil Engineering Design Institute Co., Ltd, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to find an optimization plan for sensible heat terminal, and facilitate the reasonable choice of dry fan-coil unit and radiant ceiling in engineering, the specifications of two types of commercially available sensible heat terminals, i. e., dry fan-coil unit and radiant ceiling, for example, power consumption per kilowatt cooling supply, are compared and analyzed through theoretical calculation. The results show that the dry fan-coil unit has greater cooling capacity and takes up less space, the fan contributes to the major part of power consumption of dry fan-coil units, the power consumption per kilowatt cooling supply of radiant ceiling is far less than that of dry fan-coil units, and the energy efficiency is high. The power consumption per kilowatt cooling supply of radiant ceiling can be diminished by increasing the temperature difference between supply/return water and reducing the water flow rate at the same average temperature of supply/return water. On this basis, an optimization and improvement plan of serial combination was proposed and analyzed. Furthermore, the serial combination of first radiant ceiling and then dry fan-coil unit can reduce the power consumption per kilowatt cooling supply by 33.60%~49.84% than dry fan-coil units with similar cooling capacity. The results indicate that the serial

收稿日期: 2021-08-17 网络出版日期: 2022-04-05

基金项目: 浙江省公益技术项目 (LGG19E080003)

作者简介: 嵇潇烽 (1998—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事建筑节能方面的研究。

通信作者: 张光玉, E-mail: guangyuzhang@aliyun.com

combination of radiant ceiling first and dry fan-coil unit second can reduce the power consumption per kilowatt cooling supply by 18.03%~25.82% and increase the cooling capacity by 19.58%~32.96%. This study can provide a reference for the reasonable choice of sensible heat terminals in practical engineering.

**Key words:** sensible heat terminal; dry fan-coil unit; radiant ceiling; energy efficiency; serial combination

## 0 引言

建筑能耗是国民经济总能耗的重要组成。目前,在城市建筑能耗中暖通空调系统能耗占比高达50%左右。为提高空调系统能效,降低建筑能耗,暖通空调领域一直在探索提高空调系统能效的技术和方法,其中温湿度独立控制空调系统(Temperature and humidity independent control system, THIC)是新型高效节能空调技术之一<sup>[1]</sup>。在THIC系统中,潜热和显热独立处理,从而为利用高温冷源处理显热负荷、提高冷水机组能效创造了条件。干式风机盘管和辐射顶板是THIC系统中常用的两类空调显热末端,它们的能效水平对THIC系统能耗有着重要影响。因此,探寻优化方案、研究改进这两类显热末端性能,对进一步提高暖通空调系统能效、推进建筑领域的节能减排具有重要意义。

目前,对于干式风机盘管性能的优化研究主要集中在供水温度、翅片间距、管排数、管间距、管径及翅片结构等参数对其性能的影响。刘玲玲等<sup>[2]</sup>分析了干式风机盘管和普通风机盘管各性能参数与系统能耗的关系,发现供水温度为15℃左右时采用干式风机盘管具有一定的节能效果,系统综合效率最高。蔡良等<sup>[3]</sup>分析了翅片结构、翅片间距、盘管排数、盘管管径及换热器流型对于干式风机盘管机组换热能力的影响,通过设置合理的结构使整体换热能力提升约30%。宋建等<sup>[4]</sup>以阻力系数和换热因子作为目标函数,研究了翅片间距和翅片波纹高度对换热性能影响的大小。Zhang等<sup>[5]</sup>对一种新型翅片管式换热器中凸条人字形波翅片进行了实验和数值研究,结果表明:与人字型波浪鳍相比,凸条人字型波浪鳍在增加压降的同时实现了传热强化,靠近管壁处的诱导涡是提高传热性能的主要原因。

对辐射顶板的优化研究主要集中在结构形式、参数和材料方面。朱赤等<sup>[6]</sup>提出一种新型诱导送风与辐射复合空调末端,通过减少送风量降低输运能耗、降低辐射孔板温度来增大供冷量,末端能效比达到65,相比于传统风机盘管和组合式空气处理机组,能效提升了20.00%。刘慧等<sup>[7]</sup>建立了一种含

空气层的新型模块化辐射顶板传热模型,分析了管间距、水温、塑料支撑高度、铜管外径、管壁厚度和流速对辐射板供冷能力的影响,通过参数优化可以使辐射板供冷能力提高42.24%。Su等<sup>[8]</sup>根据辐射网络方法建立了改进的辐射冷吊顶系统(Cooling radiant ceiling panel, CRCP)的计算模型,分析了铝板厚度、空气层热阻对系统散热能力的影响。Ning等<sup>[9]</sup>通过板面平均温度和供冷能力来综合评价辐射顶板的性能,以兼顾供冷和防结露需要,并通过数值模拟分析了3种带有薄空气层的改进型辐射顶板的供冷能力和板面平均温度,结果表明:空气层可改进辐射顶板温度均匀性,但供冷能力较无空气层时有所降低。Kang等<sup>[10]</sup>通过实验分析相变材料集成热电辐射冷却板(Phase-change material integrated thermoelectric radiant cooling panel, PCM TERCP)在主动和被动冷却运行模式下的冷却性能,以冷却时间、冷却能力和面板功耗的经验相关性作为目标函数,确定PCM层厚度在6~8 mm时能最大限度地减少电能消耗、提高冷却能力。

以上关于干式风机盘管或辐射顶板的独立研究并未将干式风机盘管和辐射顶板各自的功耗和能效进行对比分析,还不能为两类显热末端在工程中的合理应用提供技术参考,而从两类末端的传热方式出发研究高性能显热末端优化方案少见报道。本文以目前常见市售产品为研究对象,对于干式风机盘管和辐射顶板两类显热末端的单位冷量功耗等性能参数进行计算比较,并根据两类显热末端特性提出了串联组合的优化和改进方案,分析了串联组合后的节能效果,为实际工程中合理选择和应用显热末端提供参考,也为新型高效显热末端的研究开发提供新的方向。

## 1 干式风机盘管能效分析

干式风机盘管供水温度高于室内空气露点温度,干工况运行,无冷凝水产生,不滋生霉菌,室内空气品质较好。干式风机盘管自身功耗由风机功耗和水泵功耗两部分组成,其中水泵功耗按式(1)计算:

$$W_p = \frac{G \Delta P}{3.6 \eta} \tag{1}$$

其中: $W_p$  为水泵功耗, $W$ ;  $G$  为水的体积流量, $m^3/h$ ;  $\Delta P$  为干式风机盘管水阻, $kPa$ ;  $\eta$  为水泵效率,按《离心泵 效率》(GB/T 13007—2011)取 0.8。

干式风机盘管单位冷量功耗按式(2)计算:

$$J_G = \frac{W_F + W_p}{Q_L} \tag{2}$$

其中: $J_G$  为干式风机盘管单位冷量功耗, $W/W$ ;  $W_F$  为风机输入功率, $W$ ;  $Q_L$  为供冷量, $W$ 。

在各厂商样本<sup>[11-13]</sup>中选择若干 4 排管干式风机盘管(各厂商分别用 YS、GL、QHTF 表示),在供/回水温度 16.0/21.0℃、出口静压 12.00 Pa、室内露点温度 14.8℃的额定工况下对其性能参数进行计算分析,计算结果如图 1—图 3 所示。可以看出:各厂家干式风机盘管单位冷量水泵功耗、单位冷量风机功耗和单位冷量总功耗曲线都随供冷量的增大而上下波动,其中单位冷量风机功耗变化曲线与单位冷量总功耗变化曲线相似度高,故风机功耗为影响干式风机盘管整体能耗的主要因素;各厂家干式风机盘管在额定冷量为 1500.000 W 左右时,单位冷量功耗均较低。因此,在实际工程中,应尽量选择风机功率较小、额定冷量在 1500.000 W 左右的干式风机盘管机组,可使末端能效较高。

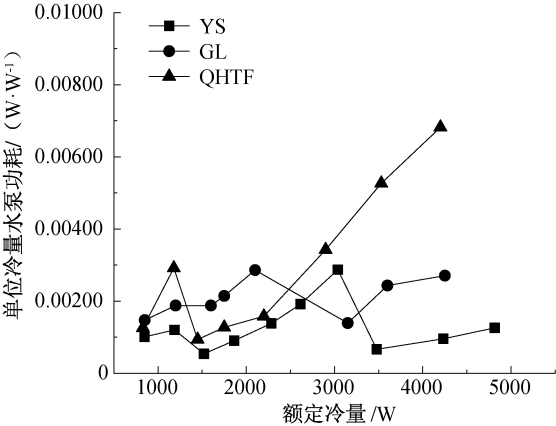


图 1 单位冷量水泵功耗随额定冷量变化曲线

2 辐射顶板能效分析

辐射顶板以辐射和对流方式负担室内显热负荷,辐射换热量占比达到 50%以上,比较符合热舒适状态下人体习惯的辐射散热与对流散热的比例关系<sup>[14]</sup>。同时,为防止结露,辐射顶板供水温度较高,通常比室内空气露点温度高约 1.0~2.0℃,较高的供水温度一方面使冷水机组能效大幅提高,有助于

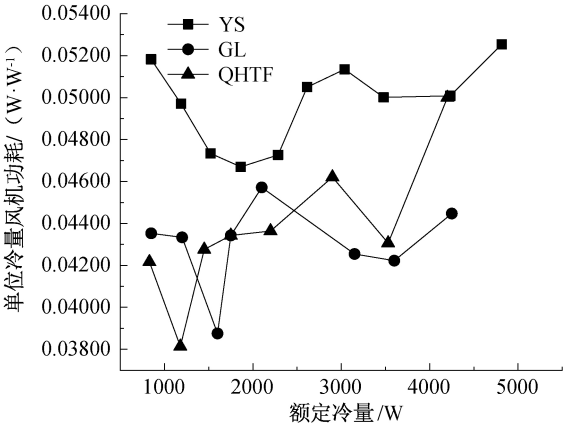


图 2 单位冷量风机功耗随额定冷量变化曲线

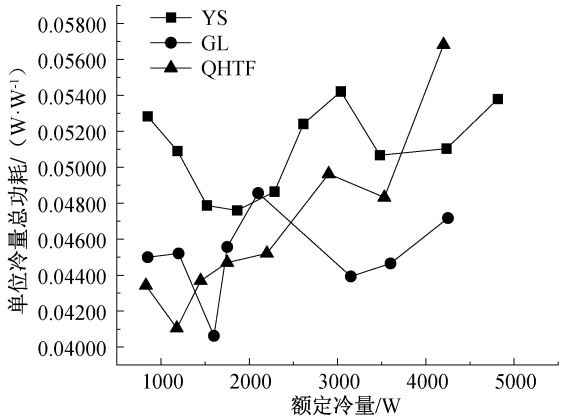


图 3 单位冷量总功耗随额定冷量变化曲线

降低空调整冷能耗,但另一方面则可能使末端供冷能力降低,增加末端能耗。为此,以单位冷量功耗为目标函数,分析各因素变化对辐射顶板能效的影响,进一步探究辐射顶板的供冷特性。

由于辐射顶板与室内换热中存在对流换热部分,在辐射顶板单位冷量计算中设置相同工况:房间新风采用混合送风形式,辐射板覆盖率 60%,顶板留缝 3%。单位冷量按式(3)计算<sup>[15]</sup>:

$$q = q_B \cdot (1 + K_B + K_L + K_S) \tag{3}$$

其中: $q$  为辐射顶板修正后供冷量, $W/m^2$ ;  $q_B$  为基本供冷量, $W/m^2$ ;  $K_B$  为覆盖率修正系数,覆盖率 60%时取 0.05;  $K_L$  为室内气流组织形式修正系数,混合送风时取 0.15;  $K_S$  为顶板留缝修正系数,留缝 3%时取 0.03。

供冷量  $Q_L$  按式(4)计算:

$$Q_L = q \cdot A \tag{4}$$

其中: $A$  为单块辐射顶板面积, $m^2$ 。

辐射顶板单位冷量功耗按式(5)计算:

$$J_R = \frac{W_p}{Q_L} \tag{5}$$

其中: $J_R$  为干式风机盘管单位冷量功耗, $W/W$ 。

辐射顶板水流量按式(6)计算<sup>[15]</sup>:

$$V = \frac{q \cdot B \cdot L}{\Delta t_w \cdot 1.163} \quad (6)$$

其中: $V$ 为单块辐射顶板水流量, $L/h$ ;  $B$ 为辐射顶板宽度, $m$ ;  $L$ 为辐射顶板长度, $m$ ;  $\Delta t_w$ 为供/回水温差, $^{\circ}C$ ; 1.163为常数。

从3个厂商的产品手册<sup>[16-18]</sup>中各选取若干型号规格(各厂商分别用TS WK-D-UM、GT-FSD、KST表示),根据手册中提供的参数进行辐射顶板供冷量、单位冷量功耗等性能分析,结果如图4—图8所示。图4为单位冷量功耗随供冷量的变化情况,由图4可见,在18.0/21.0 $^{\circ}C$ 的相同供/回水温度下,不同型号辐射顶板的单位冷量功耗相差较大,并且随供冷量的增大同步、线性增加(图4);图5为单位冷量功耗随水流量的变化情况,由图可见,辐射顶板单位冷量功耗随水流量呈线性变化,与图4类似,表明水流量大小是不同型号辐射顶板单位冷量功耗相差较大的重要因素,增大水流量是辐射顶板供冷量增大的重要原因,其内部结构并未优化,因此导致辐射顶板供冷量增大的同时其单位冷量功耗也大幅上升。

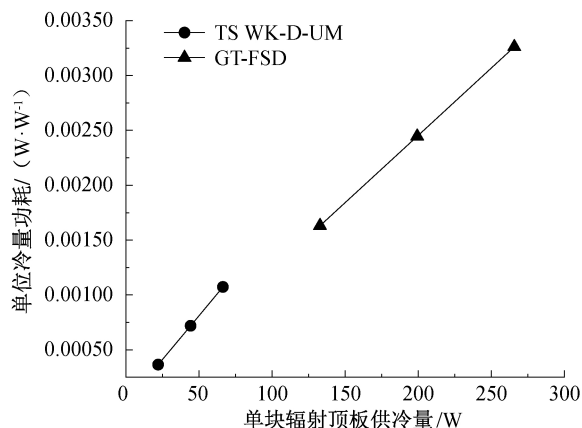


图4 辐射顶板单位冷量功耗随供冷量变化曲线

图6—图8为辐射顶板性能随供/回水平均温度的变化情况。由图6可知,各厂家辐射顶板的水流量均随供/回水平均温度的提高而降低;从式(6)也可看出,当供/回水平均温度升高使得供冷量降低时,水流量也随之降低,而增大供/回水温差也有相同结论。由图7和图8可知,随着供/回水平均温度的提高,辐射顶板供冷能力总体呈下降趋势,而反映能效的单位冷量功耗这一指标的变化还与供/回水温差有关:在供/回水温差为1 $^{\circ}C$ 时,除个别数据外,单位冷量功耗随供/回水平均温度的提高总体上呈降低趋势,即能效反而有所提高;在供/回水平均温度相同、供/回水温差增大至3 $^{\circ}C$ 时,单位冷量功耗

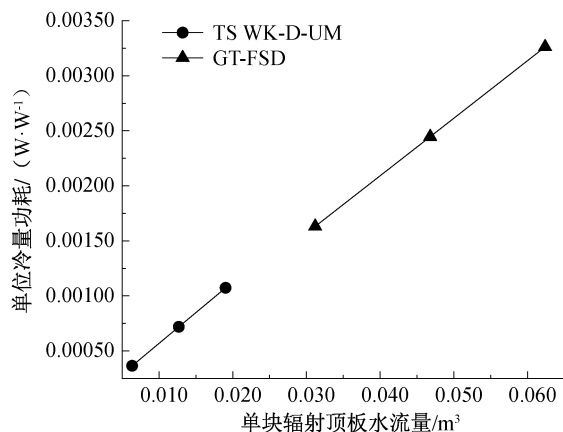


图5 辐射顶板单位冷量功耗随水流量变化曲线  
随供/回水平均温度的提高则基本不变;而在相同供/回水平均温度下,辐射顶板在3 $^{\circ}C$ 供/回水温差时的能效明显更高。

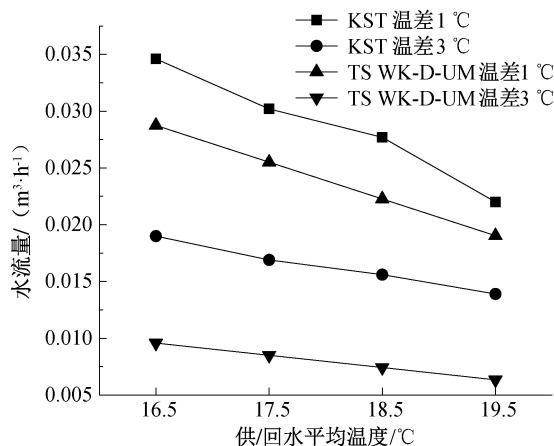


图6 辐射顶板水流量随供/回水温度变化曲线

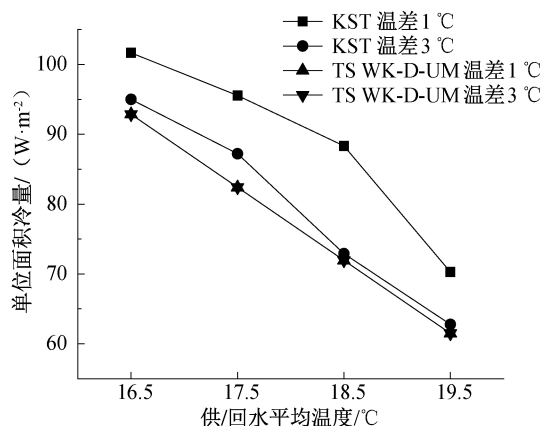


图7 辐射顶板单位面积冷量随供/回水温度变化曲线

以上分析表明,水流量(图5、图6)、供/回水平均温度和供/回水温差(图7、图8)是影响辐射顶板性能的主要参数,较低的供/回水平均温度有利于提高供冷能力(图7),而增大供/回水温差则有助于降低单位冷量功耗(图8)。辐射顶板的这种特性与管内流动和传热有关,由流体力学<sup>[19]</sup>可知,紊流粗糙

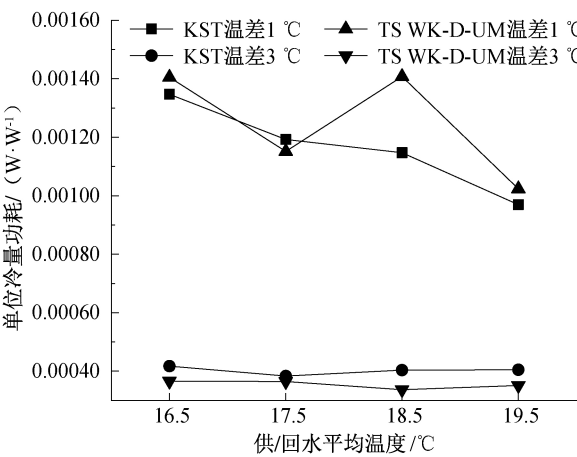


图8 辐射顶板单位冷量功耗随供/回水温度变化曲线

区的管内摩阻系数 $\lambda$ 基本不变,功耗与水流量近似为3次方关系,而根据传热学理论<sup>[20]</sup>,供冷量与水流量近似为负0.8次方关系,故改变辐射顶板水流量对功耗的影响比供冷量更为显著,在提高供/回水平均温度的同时降低水流量,供冷量虽减少但功耗降低更多,因此辐射顶板单位冷量功耗随供/回水平均温度的提高而降低。但在供/回水温差为3℃时,提高供/回水温度、降低水流量对单位冷量功耗的影响不再明显,这是因为3℃供/回水温差时对应的水流量很小,即雷诺数 $Re$ 也很小,流动或已处于层流状态,此时摩阻系数 $\lambda$ 随水流量变化较大,且随水流量减小而增大,所以此时通过水流量来降低功耗的作用不再那么显著。上述特性可作为辐射顶板优化设计的基础和参考。

3 干式风机盘管与辐射顶板能效对比

为选择更为高效的空调显热末端,选取上文3个厂商的干式风机盘管(YS、GL、QHTF),将其低、中、高三档冷量对应的单位冷量总功耗与辐射顶板样本数据进行比较,结果如图9所示,从图中可以看出:干式风机盘管平均单位冷量总功耗为0.04797 W/W,辐射顶板平均单位冷量总功耗仅为0.00128 W/W,明显低于干式风机盘管,故在供冷量满足设计要求时,显热末端宜优先选用辐射顶板。为进一步探究干式风机盘管与辐射顶板单位冷量总功耗相差巨大的原因,将干式风机盘管单位冷量水泵功耗与辐射顶板单位冷量水泵功耗进行比较,结果如图10所示,从图中可以看出:两类末端单位冷量水泵功耗变化曲线接近,说明两者单位冷量功耗差异较大的主要原因在于干式风机盘管中存在较大的风机功耗。

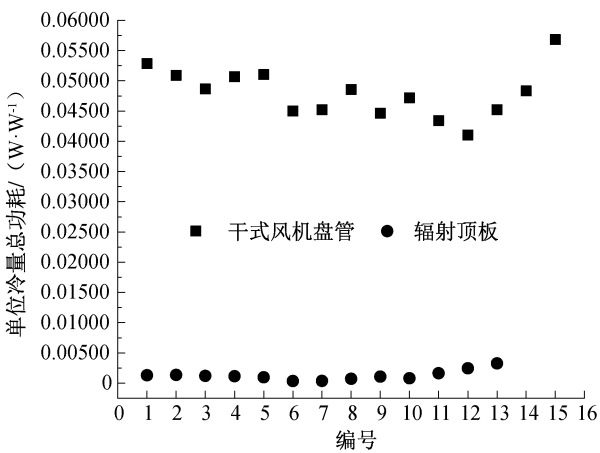


图9 干式风机盘管与辐射顶板单位冷量总功耗曲线

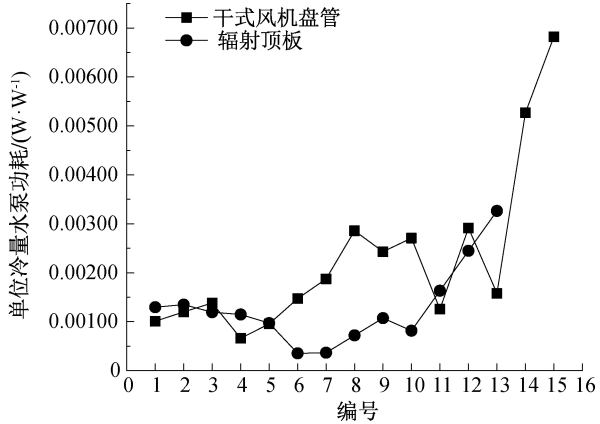


图10 干式风机盘管与辐射顶板单位冷量水泵功耗曲线

4 干式风机盘管和辐射顶板串联组合的能效分析

干式风机盘管和辐射顶板在传热方式、工作原理上存在一定差异,根据前文可知:干式风机盘管通过对流换热方式换热效果较好,但存在较大风机功耗;辐射顶板通过辐射换热方式节省风机能耗,但传热温差小,存在供冷能力偏小、有结露风险等问题。将二者通过串联组合后则有可能发挥各自优点而克服各自不足,因此将干式风机盘管与辐射顶板进行不同的串联组合,分析串联组合后对整体能效带来的影响。

4.1 辐射顶板串联干式风机盘管

目前获得的产品样本水流量、温度参数仅支持辐射顶板串联干式风机盘管的匹配方案。为了满足温度、水流量匹配要求,选择进/出水温度为16.0/18.0℃的TS WK-D-UM辐射顶板(表1)和进/出水温度为18.0/21.0℃的DA<sup>[21]</sup>干式风机盘管(表2)进行串联组合,串联组合方式为CL1:7块TS WK-D-UM 1500×600+DA FPG-34WA,CL2:14

块 TS WK-D-UM 1500×600+DA FPG-68WA, CL3;21 块 TS WK-D-UM 1200×600+DA FPG-85WA, CL4;24 块 TS WK-D-UM 1200×600+DA FPG-102WA, 经计算组合后的水流量匹配度在 99%以上。

经过串联组合后,一台高冷量干式风机盘管可由若干辐射顶板和一台较低冷量干式风机盘管组合

表 2 供/回水温 18.0/21.0℃ DA 干式风机盘管参数

厂家型号	风量/(m³·h <sup>-1</sup> )	输入功率/W	额定冷量/W	水量/(m³·h <sup>-1</sup> )	水阻/kPa
DA FPG-34WA	350.000	35.000	829.000	0.237	19.10
DA FPG-68WA	680.000	62.000	1658.000	0.475	25.30
DA FPG-85WA	850.000	76.000	1982.000	0.568	36.40
DA FPG-102WA	1020.000	96.000	2271.000	0.650	48.50

代替,其单位冷量功耗的对比情况如图 11 所示,从图 11 中可以看出:与相近供冷量且供/回水温同为 16.0/21.0℃的干式风机盘管相比,单位冷量功耗可降低 33.60%~49.84%,说明串联组合可明显降低末端功耗。由于串联组合中干式风机盘管承担了一部分显热负荷,在节省辐射顶板敷设面积上也具有一定优势,辐射顶板与串联组合敷设面积的对比如图 12 所示,从图中可以看出:上述串联组合与提供相同冷量的辐射顶板形式相比,敷设面积可减少 60.02%~60.11%,在实际工程中有助于提高方案的灵活性和可行性。

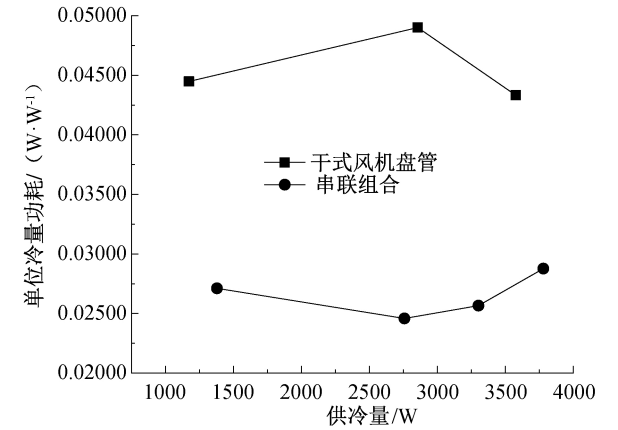


图 11 干式风机盘管与串联组合单位冷量功耗曲线

4.2 干式风机盘管串联辐射顶板

上文基于厂家有限的产品数据进行了先辐射顶板后干式风机盘管串联组合的分析,若串联组合顺序互换,温度较低的冷水先经过干式风机盘管换热后再经过辐射顶板,则可能会有额外的效果。为探究干式风机盘管串联辐射顶板方案的性能,采用李宇等<sup>[22]</sup>对于干式风机盘管的计算方法,假定空气进/

表 1 供/回水温 16.0/18.0℃

TS WK-D-UM 辐射顶板参数

厂家型号	水流量×10³ / (m³·h <sup>-1</sup> )	水阻/ kPa	单块冷量/W
TS WK-D-UM 600×600	13.500	4.00	31.439
TS WK-D-UM 900×600	20.200	6.00	47.158
TS WK-D-UM 1200×600	27.000	8.00	62.878
TS WK-D-UM 1500×600	33.663	10.00	78.597

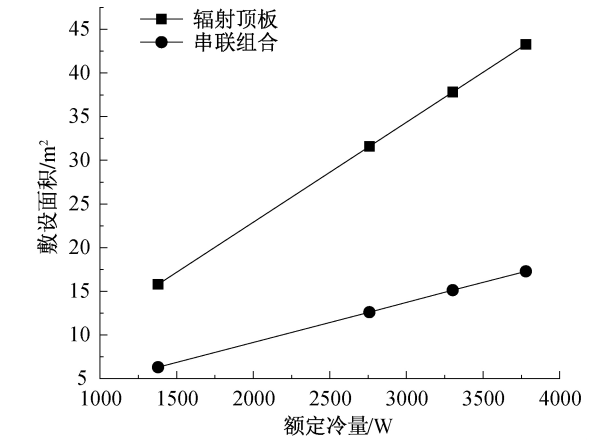


图 12 辐射顶板与串联组合敷设面积曲线

出口温度不变的情况下,计算出在供/回水温度为 16.0/18.0℃及 18.0/21.0℃时干式风机盘管的相关参数,将其与现有厂家辐射顶板及表 1 中辐射顶板对应组合后得到两类串联组合,结果如表 3 所示。两类串联组合单位冷量功耗和供冷量的对比如图 13—图 14 所示(两类串联组合分别用 SCL、FCL 表示),先干式风机盘管后辐射顶板的串联组合单位冷量功耗明显降低且供冷量也有相对提升,其中单位冷量功耗可降低 18.03%~25.82%,供冷量提高 19.58%~32.96%。

5 结 论

本文通过理论计算对比分析了目前市售干式风机盘管、辐射顶板两类显热末端的单位冷量功耗等性能参数,针对两类显热末端各自的能效特性,提出了串联组合的优化和改进方案,并进行了能效分析,所得主要结论如下:

a)同类型辐射顶板供冷量与其单位冷量功耗同

表 3 两类串联组合参数

类型编号	串联组合	供冷量/W	水流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	单位冷量功耗/(W·W <sup>-1</sup> )
SCL1	ZS1+7 块 TS WK-D-UM1500×600	2794. 870	0. 237	0. 01145
SCL2	ZS2+14 块 TS WK-D-UM 1500×600	3538. 128	0. 475	0. 01120
SCL3	ZS3+21 块 TS WK-D-UM 1200×600	3761. 730	0. 568	0. 01194
FCL1	7 块 TS WK-D-UM 1500×600+ZS'1	2102. 031	0. 237	0. 01543
FCL2	14 块 TS WK-D-UM 1500×600+ZS'2	2881. 568	0. 475	0. 01406
FCL3	21 块 TS WK-D-UM 1200×600+ZS'3	3145. 875	0. 568	0. 01457

注:SCL 为先干式风机盘管后辐射顶板串联组合,FCL 为先辐射顶板后干式风机盘管串联组合;ZS 为通过计算得到供/回水温为 16. 0/18. 0℃的干式风机盘管,ZS'为通过计算得到供/回水温为 18. 0/21. 0℃的干式风机盘管。

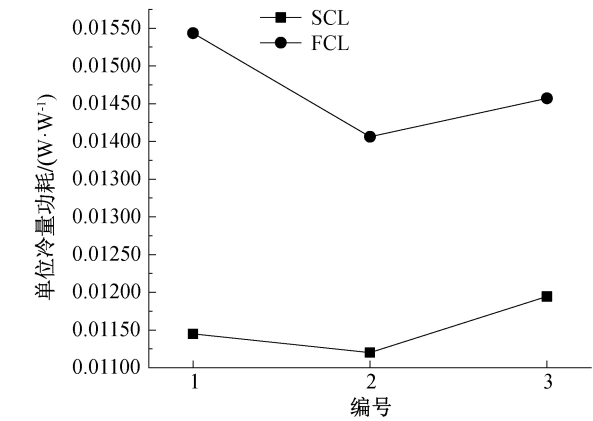


图 13 两类串联组合单位冷量功耗曲线

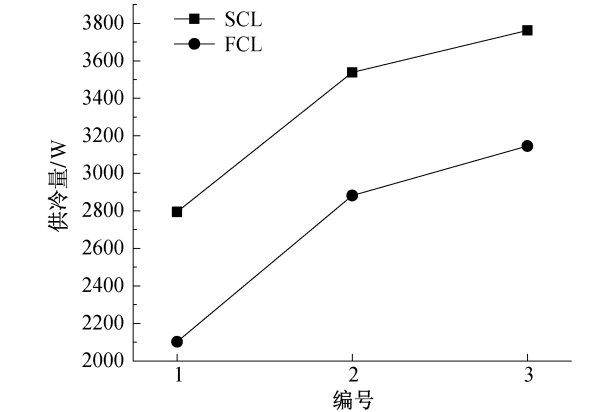


图 14 两类串联组合供冷量曲线

步增加,相同供/回水平均温度下增大供/回水温差、减小水流量可降低辐射顶板单位冷量功耗,3℃供/回水温差较 1℃供/回水温差水流量更小、单位冷量功耗更小。

b) 干式风机盘管平均单位冷量总功耗为 0. 04797 W/W,而辐射顶板平均单位冷量总功耗仅为 0. 00128 W/W,后者节能优势巨大的原因在于节

省了风机部分功耗,故在供冷量满足要求时宜选用辐射顶板作为空调显热末端。

c) 将辐射顶板和干式风机盘管串联组合可获得较好的综合性能。先辐射顶板后干式风机盘管的串联组合较相近冷量的干式风机盘管单位冷量功耗可降低 33. 60%~49. 84%,较相同冷量辐射顶板辐射面积可减少 60. 00%左右;将串联组合顺序互换,先干式风机盘管后辐射顶板的串联组合单位冷量功耗可进一步降低 18. 03%~25. 82%,供冷量提高 19. 58%~32. 96%。

参考文献:

[1] 段良飞. 温湿度独立控制空调系统能耗模拟与分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2015: 2.

[2] 刘玲玲,李霄. 干式风机盘管的性能及其应用[J]. 工程技术研究, 2017(3): 5-6.

[3] 蔡良,邹锦荣,彭志军,等. 干式风机盘管机组应用研究[J]. 制冷与空调, 2018, 18(7): 16-19.

[4] 宋建,蔡家斌,熊贤沙,等. 翅片管式换热器换热性能研究[J]. 热带农业工程, 2021, 45(4): 7-10.

[5] Zhang K, Li M J, Liu H, et al. Experimental and numerical study and comparison of performance for herringbone wavy fin and enhanced fin with convex-strips in fin-and-tube heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121390.

[6] 朱赤,张小松,徐国英,等. 诱导送风与辐射复合空调夏季运行特性及系统能效分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1779-1788.

[7] 刘慧,宁柏松,陈友明,等. 一种新型辐射板供冷能力分析与优化[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(24): 79-84.

- [8] Su X S, Zhang L, Liu Z B, et al. A computational model of an improved cooling radiant ceiling panel system for optimization and design[J]. Building and Environment, 2019, 163: 106312.
- [9] Ning B S, Chen Y M, Liu H, et al. Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution [J]. Building and Environment, 2016, 102: 64-72.
- [10] Kang Y K, Lim H, Cheon S Y, et al. Phase-change material-integrated thermoelectric radiant panel: Experimental performance analysis and system design [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117082.
- [11] 雅士空调有限公司. AFCU-D 系列风机盘管机组[A]. (2010: 5) [2021-08-01]. <https://wenku.so.com/d/fd4df43e5089a008945468737acc8fa5>.
- [12] 珠海格力电器股份有限公司. 格力中央空调设计选型手册下册[A]. (2017: 514) [2021-08-01]. <https://www.doc88.com/p-16516965797729.html>.
- [13] 清华同方人工环境有限公司. 干式风机盘管机组[A/OL]. (2016-02-19) [2021-08-01]. <https://www.docin.com/p-1461687544.html>.
- [14] 张佩东. 辐射供冷-置换通风室内热环境及动态响应特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008: 1-30.
- [15] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版.北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 505-510.
- [16] 妥思空调设备有限公司. WK-D-UM 嵌装式冷吊顶单元[A]. (2008: 3-10) [2021-08-03]. <https://www.troxchina.com/%E5%86%B7%E5%90%8A%E9%A1%B6/%E5%9E%8B%E5%8F%B7-wk-d-umb6c5e537f982e3ba>.
- [17] 江苏国莱特空调设备有限公司. 全新风辐射空调[A]. (2020: 14) [2021-08-03].
- [18] 开思拓空调技术有限公司. 铜盘管/塑料毛细管金属冷辐射吊顶[A/OL]. (2012-04-08) [2021-08-03]. <https://wenku.baidu.com/view/51de566da98271fe910ef9df.html>.
- [19] 龙天渝,蔡增基. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 107.
- [20] 章熙民,朱彤,安青松,等. 传热学[M]. 6 版.北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 157.
- [21] 浙江盾安机电科技公司. 干式风机盘管机组[A]. (2011: 4-5)[2021-08-05].
- [22] 李宁,崔增光,张信荣. 风机盘管换热器遗传算法优化设计[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 35-44.

(责任编辑:康 锋)