

文章编号:0253-4339(2014)02-0115-04

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.02.115

辐射吊顶单元供冷量的理论计算模型及实验验证

于国清 贾文哲 赵彦杰

(上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093)

摘要 根据辐射吊顶单元与周围环境的换热原理,在对毛细管结构合理简化的基础上,建立了毛细管型辐射吊顶单元供冷量的理论计算模型,同时建立了两块辐射吊顶串联时的供冷量计算模型。搭建了实验台,测试在室温 25℃,供水温度 15~19℃ 时,单块辐射吊顶单元以及两块辐射吊顶单元串联时的供冷量。测试数据与计算结果对比表明:单块辐射吊顶单元以及两块串联时的理论计算供冷量吻合较好,验证了理论计算模型的正确性。该计算模型可用来预测特定工况下辐射吊顶单元的供冷量。

关键词 辐射吊顶单元;实验测试;供冷量;理论计算模型

中图分类号:TU831.6;TB61⁺1

文献标识码:A

Theoretical Calculation Model and Experimental Validation of the Radiant Ceiling Unit Cooling Capacity

Yu Guoqing Jia Wenzhe Zhao Yanjie

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract According to the heat transfer between radiant ceiling unit and surrounding environment, theoretical calculation models of single piece of the capillary cooling radiant ceiling unit and two units in series combination were set up to calculate their cooling capacities based on the reasonable simplification of configuration of radiant ceilings. The cooling capacities under the condition of 25℃ room temperature, 15~19℃ supply water temperature were then tested. The comparison between measured data and calculation results show that theoretically calculated cooling capacity of single unit and of two series-connected units agree with the experimental testing data, which shows that the theoretical calculation models are reasonable and feasible and can be used to predict the cooling capacities under real conditions.

Keywords radiant ceiling unit; experimental test; cooling capacity; theoretical calculation model

辐射吊顶+独立新风空调系统采用温湿度独立控制,用辐射板来消除室内显热负荷,而采用新风来消除湿负荷,不仅提高了空调环境的热舒适性;而且与传统的空调系统相比有着显著的节能效果^[1-2]。近年来,国内外学者对冷辐射空调系统进行了较多的实验研究。J. Miriel^[3]对金属辐射吊顶板的供冷性能、热舒适性和系统能耗进行了实验研究及模拟,为金属辐射吊顶板在欧洲的推广应用提供参考依据。Néstor Fonseca^[4]研究了辐射板的结构参数、供水温度、流量及周围环境参数对辐射板性能的影响;并对不同配置的辐射吊顶系统进行模拟分析和实验测试。金梧凤等^[5]对毛细管网系统的性能进行了实验研究。对于辐射吊顶单元的理论计算方法,研究相对较少。Néstor Fonseca Díaz等^[6]提出了T1型毛细管辐射板(多根毛细管从分水管并排接出,在辐射板另一端转向后,再并排接入集水管)放置于通风吊顶内的计算模型,该计算模型的形式较复杂,且与国内辐射

吊顶单元的使用条件大多不符。Jae-Weon Jeong等^[7]对于自由悬挂的金属管板型的辐射板,给出了辐射板上下两表面的对流和辐射传热量的计算模型。Shigeru Okamoto等^[8]对蛇形盘管的辐射板建立了简化计算方法。另外,辐射吊顶单元在实际使用时,通常需要多块进行串联或者并联,上述文献均没有提及根据单块辐射板的特征参数计算两块串联辐射板的方法。这里所研究的毛细管辐射吊顶单元的结构与前述结构有较大不同,提出的辐射吊顶单元的供冷量的理论计算模型不但形式简单,而且可以用单块辐射板的特征参数直接计算两块串联辐射板的供冷量,并通过实验验证了模型的正确性。

1 辐射吊顶单元的结构与简化模型

1.1 辐射吊顶单元的结构参数

辐射吊顶单元的结构如图1所示:

从上到下依次是保温棉,肋片,塑料毛细管,消音

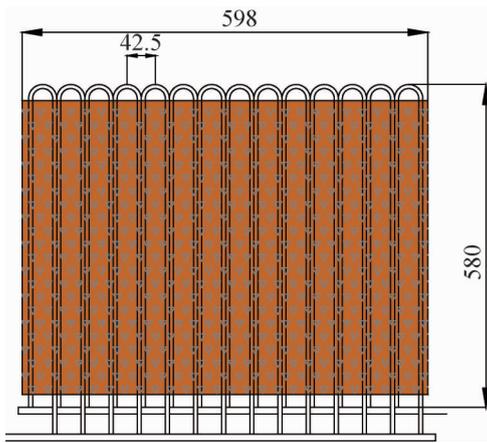


图1 毛细管辐射吊顶单元的结构图

Fig. 1 Configuration of capillary tube radiant ceiling unit

棉和辐射面板(带有小孔)。辐射板的长×宽为:598×580 mm,内部的毛细管以平行管的方式进行布置,毛细管本身直径为3 mm,毛细管壁厚为0.25 mm,两相邻的供水管中心间距42.5 mm,毛细管上方的面板厚度为0.8 mm,辐射吊顶单元辐射面板的厚度为1.5 mm。

1.2 辐射吊顶单元的结构简化模型

辐射吊顶单元的供水与回水是按照并联管路进行连接的,由于辐射吊顶相邻管道内供回水温差较小,并且前一根毛细管的供水段与后一根的回水段间距很小,为了计算的简化,把辐射吊顶单元相邻的供回水管看做两根具有相同温度的管道进行计算。同时为了便于数值模型的建立与求解,作如下假定:

- 1) 假定所有传热过程均为稳态传热;
- 2) 沿水流方向管道内流体温度相同;
- 3) 忽略沿厚度方向及边缘处的热损失。

经简化后模型如图2,可把辐射板表面的传热看作经典的二维肋片与周围环境的换热问题^[9],水管下方长度为 D_0 的辐射板作为肋基,距离水管边缘 $0 \sim (W-D_0)/2$ 的这一部分辐射板为肋片,相邻两组水管的中间部分传热量为0(相当于肋片端部绝热)。

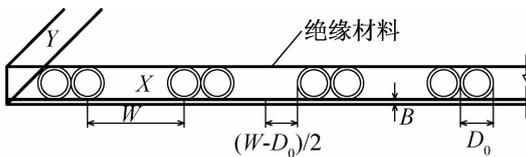


图2 简化后辐射板模型

Fig. 2 The simplified model of radiant panel

2 辐射吊顶单元的供冷量

2.1 单块辐射吊顶单元的供冷量

辐射吊顶的供冷量可看作肋片的实际换热量和

肋基换热量的和,由经典二维肋片的模型进行计算,假定沿水流方向水温不变,取距离肋基为 Δx 的微元肋片为考察对象,根据能量守恒,在稳态时可以得到^[10]:

$$\left. \frac{dt}{dx} \right|_{x+\Delta x} - \left. \frac{dt}{dx} \right|_x = \frac{U \cdot p}{k_B A} (t - t_a) \Delta x \quad (1)$$

计算可得单位面积肋片的换热量:

$$q_{fin} = FU(W - D_0)(t_a - t_{min}) \quad (2)$$

式中: A 为辐射面板换热面积, m^2 ; U 为辐射面板的换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; k_B 为辐射面板导热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; p 为辐射面板 $y-y$ 方向截面的长度和宽度之和, m ; F 为肋片的换热效率; W 为两相邻供(回)水管间距, m ; D_0 为毛细管的直径, m ; t_{min} 为毛细管内循环介质温度, $^\circ C$; t_a 为周围环境的温度, $^\circ C$ 。

肋基处的沿 Y 轴单位长度的换热量:

$$q_{tube} = D_0 U (t_a - t_{min}) \quad (3)$$

Y 轴方向单位面积供冷量等与肋基和肋片两部分换热热量相加:

$$q_p = [(W - D_0)F + D_0]U(t_a - t_{min}) \quad (4)$$

则可将单位面积辐射板换热量表示为:

$$q_p = WF'U(t_a - t_f) \quad (5)$$

式中: t_f 为供回水平均温度, $^\circ C$; F' 为肋基和房间空气之间换热系数与冷水和房间空气之间换热系数的比值:

$$F' = \frac{1}{\frac{1}{U[D_0 + (W - D_0)F]} + \frac{1}{h_f \pi D_i} + \frac{\delta}{k_L b_L} + \frac{1}{2\pi k_w} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}$$

由于毛细管每个肋对应的是两根温度工况相同的毛细管,所以单块辐射吊顶的供冷量 Q_p :

$$Q_p = 2WAF'U(t_a - t_f)$$

2.2 两块辐射吊顶单元串联时的供冷量

若两块辐射吊顶单元并联连接,则在流量相同的情况下,只需将单块的供冷量乘以2即可,故只需研究串联时两块辐射吊顶单元的供冷量的计算方法。

引入热转移因子 F_R ,辐射板的供冷量可用进水温度 t_i 与房间温度的差表示:

$$Q_p = 2WAF_R U(t_a - t_i) \quad (6)$$

两块辐射吊顶单元串联时的供冷量:

$$Q_{1+2} = 2WF_R UA(t_a - t_{i1}) + 2WF_R UA(t_a - t_{i2}) \quad (7)$$

式中: t_{i1} 为第一块辐射吊顶单元的进水温度, $^\circ C$; t_{i2} 为第二块辐射吊顶单元进水度,也等于第一块板的出水温度, $^\circ C$; Q_1 为单块辐射吊顶单元所承担的室内

显热负荷, kJ; c_p 为水的比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; \dot{m} 为质量流量, kg/h 。

$$t_{i2} = t_{i1} + \frac{Q_1}{c_p \cdot \dot{m}}$$

将上式代入公式(7)得:

$$Q_{1+2} = 2WF_R U_c A_c (t_a - t_{i1}) \quad (8)$$

$$K = \frac{AF_R U}{\dot{m} c_p}$$

根据以上计算分析, 两块串联的辐射吊顶单元可当作面积为 $A_c = 2A$, $U_c = (1 - k/2)U$ 流体平均温差为 $(t_a - t_{i1})$ 的单块辐射吊顶单元进行处理。

3 辐射吊顶单元供冷性能计算模型的实验验证

3.1 实验原理

在进行本辐射板性能测试时, 我国相关的测试标准尚未颁布, 参照欧洲辐射吊顶供冷能力的测试标准 EN 14240—2004 搭建了实验台。实验原理如图 3: 实验室包括内环境室和外环境室, 内环境室置于外环境室中, 内环境室的围护结构是由厚度为 100 mm、导热系数小于 $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 的保温材料组成, 内环境室温度维持不变且与外环境室温度相差小于 1°C 。

实验过程中, 需要测量的数据包括: 辐射吊顶单元的供水温度、回水温度、内环境室的环境温度、内环境室的壁面温度、内环境室环境湿度和冷水的质量流量。单位时间内辐射吊顶单元的供冷量 Q_{co} 计算式:

$$Q_{co} = G \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中: G 为水流量, m^3/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; c 为水的比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; Δt 为辐射吊顶单元的进出口水温差。(实验过程中, 调节流量, 使得单块时 Δt 约为 1°C , 两块串联时约为 2°C)

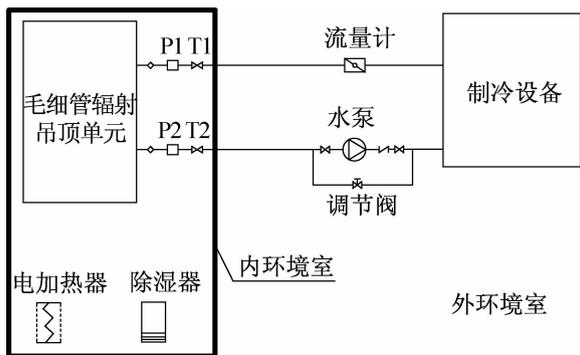


图 3 实验原理图

Fig. 3 Schematic of experimental system

采用电加热器来模拟室内的热负荷, 根据电表所

测试出的电加热器的功率, 可以近似认为就是室内辐射吊顶单元所提供的冷量, 用于对式(9)计算出的实际供冷量值进行验证。从式(6)可以看出, 影响供冷量的直接决定因素是流体与房间温度差 $(t_f - t_a)$; 由于房间热容较大, 温度变化之后稳定下来需要很长的时间, 所以在实验中, 房间温度维持不变, 采用恒温水箱提供 $15^\circ\text{C} \sim 19^\circ\text{C}$ 的五组工况的冷水, 实验过程中水温波动温差不大于 0.1°C 。

3.2 单块辐射吊顶单元的供冷量计算模型验证

按 3.1 中所述实验方法对单块辐射吊顶单元进行测试, 得到的实际供冷量值与 2.1 中通过计算模型所求出的单块辐射吊顶单元的理论供冷量值进行比较如图 4。

从图 4 可以看出, 单块辐射吊顶单元的供冷量在室温为 25°C , 供水温度为 $15^\circ\text{C} \sim 19.1^\circ\text{C}$ 时的理论计算值范围在 $14.8 \text{ W} \sim 32.2 \text{ W}$ 之间, 实验测试出的供冷量范围在 $15.4 \text{ W} \sim 30.0 \text{ W}$ 之间, 其中最大偏差值为 2.21 W , 最大偏差为 6.85% , 并且很大部分的理论计算值与辐射吊顶单元的实验值的偏差不超过 3% 。因此单块辐射吊顶单元的理论计算值和实验值吻合较好。

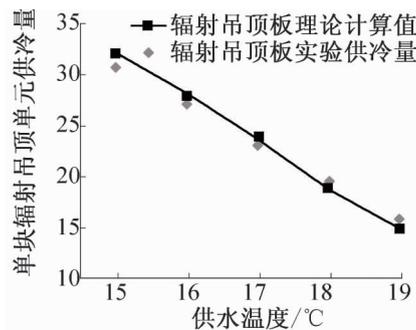


图 4 单块辐射吊顶单元理论供冷量与实测供冷量对比

Fig. 4 Comparison of cooling capacity of single radiant ceiling unit between measured and calculated results

3.3 两块辐射吊顶单元串联时供冷量的计算模型验证

按 3.1 中所述实验方法对两块串联的辐射吊顶单元进行测试, 得到的实际供冷量与 2.2 中通过计算模型所求出的两块辐射吊顶单元的理论供冷量值进行比较如图 5。可以看出, 两块辐射吊顶单元串联组合的供冷量在室温为 25°C , 供水温度 $14.8^\circ\text{C} \sim 19.1^\circ\text{C}$ 时的理论计算值范围在 $27.9 \text{ W} \sim 56.4 \text{ W}$ 之间, 实验测试出的供冷量范围在 $25.7 \text{ W} \sim 54.3 \text{ W}$ 之间, 计算出最大偏差值为 2.2 W , 最大偏差为 7.83% , 并且大部分的理论计算值与辐射吊顶单元的实验值的偏

差不超过5%。所以可以认为两块辐射吊顶单元的串联计算模型计算值与实验值相吻合,从而可以证明两块辐射吊顶单元串联组合模型的正确性。

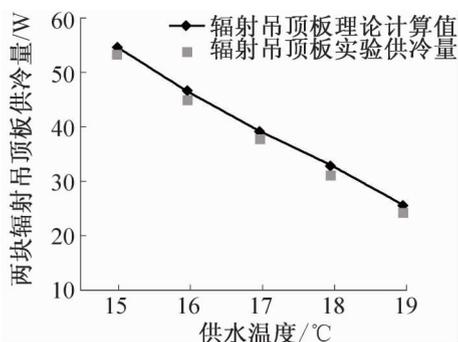


图5 两块辐射吊顶单元串联时理论供冷量与实测供冷量对比图

Fig. 5 Comparison of cooling capacity of two series-connected radiant ceiling units between measured and calculated results

4 进一步工作

由于本实验系统较小,得出的结论与实际情况可能会有一定偏差,现正与生产厂家合作进行一小型辐射吊顶空调系统的建设,待安装完成后,将对其在实际运行工况下的性能进行实地测试,并将研究如何对理论计算数据进行修正,以便能够更好地应用于工程设计。

5 结论

对毛细管型辐射吊顶单元的供冷量建立了理论计算模型,同时建立了两块冷辐射吊顶单元串联时的供冷量计算模型。并搭建了实验台,在室温 25 °C,供水温度 15 ~ 19 °C 时,测试了单块辐射吊顶单元和两块辐射吊顶单元串联时的供冷量,得出如下结论:

1) 单块辐射吊顶单元的实验测试供冷量与理论计算供冷量之间的偏差不超过 6.85%,这说明所建立的理论计算模型是合理的、可行的。

2) 两块串联时理论供冷量与实际供冷量之间的偏差不超过 7.83%。这说明根据单块辐射吊顶单元的供冷量来计算两块串联时总供冷量的方法是可行的。

参考文献

[1] 肖益民,付祥钊. 冷却顶板空调系统中用新风承担湿负荷的分析[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 15-17. (Xiao Yimin, Fu Xiangzhao. Dehumidifying capability of outdoor air in cooling ceiling system application[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2002, 32(3): 15-17.)

[2] 左涛,万嘉凤,许宏祺. 独立新风加吊顶冷辐射板空调系

统的节能性及与气候的相关性[J]. 暖通空调, 2008, 38(6): 150-152. (Zuo Tao, Wan Jiafeng, Xu Hongxi. Energy saving effects and climatic relativity of combined dedicated outdoor air systems and ceiling radiant cooling plate systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(6): 150-152.)

[3] J Miriel, L Serres, A Trombe. Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(16): 1861-1837.

[4] Néstor Fonseca, Cristian Cuevas, Vincent Lemorta. Radiant ceiling systems coupled to its environment part 1: Experimental analysis [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2187-2195.

[5] 金梧凤,余铭锡,金光禹. 毛细管网系统供冷性能的实验研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(9): 102-106. (Jin Wufeng, Yeo Myoungsok, Kim Kwangwoo. Experiments on cooling capacity of capillary tube system [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(9): 102-106.)

[6] Jae-Weon Jeong, Stanley A Mumma. Practical cooling capacity estimation model for a suspended metal[J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3176-3185.

[7] Néstor Fonseca Díaz, Cristian Cuevas. Testing and thermal modeling of radiant panels systems as commissioning tool [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2663-2677.

[8] Shigeru Okamoto, Hisataka Kitora, Hiromasa Yamaguchi, et al. A simplified calculation method for estimating heat flux from ceiling radiant panels [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(1): 29-33.

[9] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣. 传热学[M]. 第5版. 北京: 中国建筑出版社, 2007.

[10] European Committee for Standardization, EN 14240-2004 Ventilation for Buildings Chilled Ceilings Testing and Rating[S]. Brussels, 2004.

作者简介

于国清,男(1971 -),副教授,上海理工大学,环境与建筑学院,(021)55270275, E-mail: yuguoqinghvac@126.com。研究方向: 太阳能供热与空调研究,地源热泵系统应用研究。现在进行的研究项目有: 太阳能与建筑一体化。

About the author

Yu Guoqing(1971 -), male, Associate Professor, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology, (021) 55270275, E-mail: yuguoqinghvac@126.com. Research fields: Solar heating and air conditioning, application of ground source heat pump system. The author takes on project: Solar energy and building integration.