

# 居住空间辐射换热量的计算

余跃进

(南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 给出了人体与空调环境的辐射换热的具体计算方法, 通过理论分析与实验证明, 确立了人体所需辐射热量与空气温度之间的线性关系, 并分析了辐射系统的节能效果.

[关键词] 辐射, 角系数, 对流

[中图分类号] TU832, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292-(2003)02-0027-04

## 1 人与环境辐射换热量的计算式

在大多数情况下, 人体外表面温度与环境的壁面温度不一样, 所以人与环境之间存在着辐射热交换. 辐射热是人体与环境保持热平衡的三种主要换热形式之一, 研究这一换热形式对人体的热舒适及热环境的科学合理设计有很重要的意义. 人与环境的辐射热量遵循斯蒂芬-波尔茨曼定律, 表达如下:

$$R = \frac{A_{\text{eff}} \sigma (T_{\text{cl}}^4 - T_{\text{mrt}}^4)}{A_D} \quad (1)$$

式中:  $R$  为单位人体表面积的辐射热量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $A_{\text{eff}}$  为着装人体的有效辐射面积,  $\text{m}^2$ ;  $\varepsilon$  为着装人体外表面平均辐射系数亦即平均黑度;  $\sigma$  为辐射常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_{\text{cl}}$  为着装人体外表平均温度,  $\text{K}$ ;  $T_{\text{mrt}}$  为环境的平均辐射温度,  $\text{K}$ ;  $A_D$  为人体皮肤外表面积,  $\text{m}^2$ .

人体有效辐射面积  $A_{\text{eff}}$  表示人体与环境进行辐射换热的实际表面积, 由于人体外形凹凸不平及部分相互遮盖, 所以它不是人体的真实外表面积, 其计算式为:

$$A_{\text{eff}} = f_{\text{eff}} f_{\text{cl}} A_D \quad (2)$$

式中:  $f_{\text{eff}}$  为有效辐射面积系数(%), 经实验测定后的统计结果, 对于坐姿的人体大约为 0.696, 对于站姿的人体大约为 0.725, 如用于非固定姿态的人, 可取平均值为 0.71;  $f_{\text{cl}}$  为服装的面积系数(%), 即人体着装后的外表面积与皮肤表面积之比, 也由实验确定. 人体皮肤的辐射系数近似于 1.0, 大部分服装的辐射系数近似于 0.95, 所以式(1)中  $\varepsilon$  值在工程中近似取 0.97. 将以上几个参数的平均值代入式(1), 得:

$$R = 3.9 \times 10^{-8} f_{\text{cl}} (T_{\text{cl}}^4 - T_{\text{mrt}}^4) \quad (3)$$

此式用于实际计算时,  $f_{\text{cl}}$  可查阅有关资料[1],  $T_{\text{cl}}$  可以实测或计算, 关键在于确定  $T_{\text{mrt}}$ .

## 2 环境壁面平均辐射温度 $T_{\text{mrt}}$ 的确定

在一般的热环境研究中, 有时采用黑球温度近似地测定  $T_{\text{mrt}}$  值. 但在人与环境的研究中, 由于黑球外形与人体外形相差甚远, 必须寻找其他方法.

环境平均辐射温度的定义如下: 假设有一表面温度一致的封闭黑体空间, 人在该空间内所进行的辐射热交换与所研究的真实环境相同, 由该黑体空间的内表温度就定义为真实环境的平均辐射温度. 由于在定义中涉及到人, 故  $T_{\text{mrt}}$  不是一个纯粹的环境参数, 一方面它与环境壁面的形状、辐射率、温度有关, 另一方面又和人的位置、姿态、外表温度及辐射率有关. 例如在一个具有一面辐射采暖面的环境中, 离辐

收稿日期: 2003-02-18

作者简介: 余跃进, 1958-, 南京师范大学动力工程学院副教授, 主要从事暖通空调的教学与研究.

射板很近的人与离开较远的人热感觉就不一样,因此,同一环境对他们两个人而言具有不同的平均辐射温度。

设某环境由  $N$  个壁面构成,各壁面的温度分别为  $T_1, T_2 \dots T_n$ , 辐射率分别为  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots \varepsilon_n$ , 人对各壁面的角系数分别为  $F_{p-1}, F_{p-2}, \dots F_{p-n}$ , 离开某一壁面的有效辐射力  $E_{ei}$  定义为:

$$E_{ei} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + R'_i H_i \quad (4)$$

式中:  $R'_i$  为第  $i$  壁面的反射率(%);  $H_i$  为投射到第  $i$  个壁面上的辐射能,  $W/m^2$ 。根据平均辐射温度的定义可写出:

$$A_D \varepsilon_p \sigma (T_{mrt}^4 - T_{cl}^4) = A_D (E_{e1} F_{p-1} + E_{e2} F_{p-2} + \dots + E_{en} F_{p-n}) - A_D \varepsilon_p \sigma T_{cl}^4 \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_p$  为人体外表平均辐射率。式(5)表示一假想的具有一致温度  $T_{mrt}^4$  的黑体空间与人体表面的辐射热交换量等于各壁面投射到人体表面的辐射能减去从人体表面辐射出去的那部分能量,在此应用了辐射的相对性原理:

$$A_i F_{i-p} = A_D F_{p-i} \quad (6)$$

因而使式(5)的等式右侧不出现各壁面的面积  $A_i$  及壁面对人体的角系数  $F_{i-p}$ 。在精确的求解中可以先解出各壁面的有效辐射力  $E_{ei}$ , 但在一般工程应用中, 可以认为绝大多数壁面材料都具有较高的辐射率, 即  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx \varepsilon_n \approx \varepsilon_p$ , 且  $R'_i \approx 0$ , 则式(5)可简化为:

$$T_{mrt}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n} \quad (7)$$

这一计算式就可用于求解环境的平均辐射温度。如果各壁面的温差相当小, 式(7)还可近似简化为:

$$T_{mrt} = T_1 F_{p-1} + T_2 F_{p-2} + \dots + T_n F_{p-n} \quad (8)$$

运用式(8)的计算结果略小于式(7)。例如一个封闭空间的一半比另一半壁面温度高出 10 K, 上两式分别计算的结果仅差不到 0.2 K, 即使温度高出 30 K, 计算结果相差也不过 1 K 左右。现在的问题归结到如何确定人与各壁面的角系数  $F_{p-i}$ 。

### 3 人与壁面角系数 $F_{p-i}$ 的确定

绝大多数室内壁面的形状是矩形的, 即使不是矩形, 也可以通过分割把它变成由若干个大小不同的矩形所组成。因此, 本文主要介绍人与矩形壁面角系数的求法。设人体重心正好通过某一矩形壁面一顶角的垂线, 如图 1 所示, 则人对该矩形表面的角系数可积分求得:

$$\begin{aligned} F_{p-A} &= \frac{1}{\pi} \int_{x=0}^a \int_{y=0}^b \frac{f_{py}}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} dx dz \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{y=0}^{\frac{a}{c}} \int_{z=0}^{\frac{b}{c}} \frac{f_p}{\left[ 1 + \left( \frac{x}{y} \right)^2 + \left( \frac{z}{y} \right)^2 \right]^{3/2}} d \frac{x}{y} d \frac{z}{y} \quad (9) \end{aligned}$$

式中采用了无量纲长度  $a/c$  及  $b/c$ , 是为了使计算结果可适用于不同尺寸的矩形壁面。式(9)的积分结果由计算机绘成图表可供查用(详见文献[1])。对于人体重心不在矩形某一顶角垂线上的情况, 可运用代数法求解角系数。

人与矩形壁面  $A$  之角系数  $F_{p-A}$ , 有:

$$F_{p-A} = F_{p-ABCD} - F_{p-BC} - F_{p-CD} + F_{p-C} \quad (10)$$

式中:  $A, B, C, D$  分别为各壁面的相对位置。

式(10)中等式右侧各角系数均可用式(9)的计算结果。实际工程中往往是某一上壁面作为辐射采暖

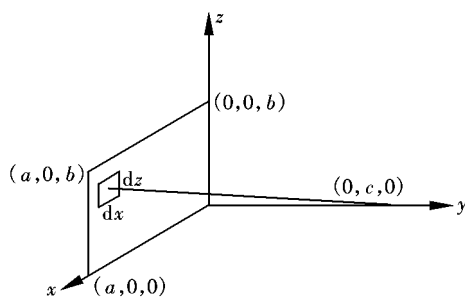


图1 人与垂直矩形壁面的角系数

(或制冷)板,则只要求得人对该表面的角系数  $F_{p-i}$ , 其余表面如果温度一致或很接近,则运用辐射完整形原理,人对其余表面的角系数为  $1 - F_{p-i}$ . 式(9)中出现的一个新参数  $f_p$  定义为人体在某一方向上的投影面积系数,这也是一个由实验测定的参数. 由于人体外形从各个方向上看投影面积不一样,所以式(9)的计算结果分成前后左右上下等不同情况分别绘成图表供使用<sup>[1]</sup>.

## 4 辐射换热与对流换热的关系

在正常情况下,人体与环境间热平衡方程,可由下式表示:

$$M - W - R - C - E = 0 \quad (11)$$

式中:  $M$  为人体新陈代谢产热率,  $W/m^2$ ;  $W$  为人体对外界作的机械功,  $W/m^2$ ;  $R$  为人体与环境的辐射换热,  $W/m^2$ ;  $C$  为人体与环境的对流换热,  $W/m^2$ ;  $E$  为人体的蒸发散热,  $W/m^2$ .

以上各项均以人体皮肤表面积为分母,以便于对不同的人进行比较. 当人体感到热舒适时,除了满足热平衡外,还必须使人体的出汗率(也可以看作蒸发散热)及人体皮肤表面平均温度  $T_{msk}$  维持在一个相对稳定的数值上. 这样,对于从事一定工作的人(其  $M$  及  $W$  为定值),他与环境的辐射及对流换热之和也应该是一个定值. 如果在冬季空调房间内使用辐射采暖器提高了房间的平均辐射温度,使人体辐射得热量增加,为了维持原有的热舒适感,可以降低室内空气温度  $T_a$ ,增加人体对流散热量来维持总换热量的不变. 夏季情况相反,但结论是一致的.

人体与环境的对流换热用下式计算:

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (12)$$

式中:  $h_c$  为人体与环境的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ .

为了探讨辐射换热与对流换热之间的关系,假定变化的仅为  $T_{mt}$  及  $T_a$ , 其它参数均不变,所以  $h_c$  是一个定值. 再来分析  $T_{cl}$  与  $T_a$  之间的关系,从人体皮肤表面到服装外表面的传热过程可表示为:

$$R + C = \frac{T_{msk} - T_{cl}}{I_{cl}} \quad (13)$$

式中:  $I_{cl}$  为服装的传热热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $T_{msk}$  为人体皮肤表面平均温度,  $^{\circ}C$ .

由上述分析,已知  $R + C$  是个定值,在维持一定热舒适感时,  $T_{msk}$  也是个定值,而大量实验证明服装热阻在常温变化范围内也不随气温而变化,所以由式(13)可得出  $T_{cl}$  也是个定值. 事实上,当降低空气温度时,部分未受到辐射源照射的人体外表温度是下降的,但受到辐照的部分表面温度上升,其结果是整个人体外表的平均温度不变.

由于  $T_{cl}$  在气温  $T_a$  的变化中维持不变,据(12)式可以看出,人体与环境的对流换热量仅与气温变化成线性关系. 进一步的结论是,为了弥补气温下降所增加的对流散热而补充的辐射热量也与气温变化成线性关系. 假定辐射采暖器的辐射效率(定义为输出辐射能与输入功率之比)是个定值,那么辐射采暖的能耗与空气温度的变化也成线性关系. 在对普通的家用电辐射采暖器的实测中发现,当输入功率从 50% 变化到 100% 时,辐射效率从 45% 变化到 49%,基本上是个定值. 辐射采暖器输入功率中除去转变为辐射能的能量后,剩余部分能量事实上转化为对流散热,加热了室内空气,因此在能量分析中可将这部分能量并入对流散热的能耗中.

研究辐射换热与对流换热关系的主要目的是为了寻找既能保持人体热舒适又最合理、节能的空调(或供热)方式. 我们可以在空调室内采用对流式末端装置(如风机盘管或全空气系统),也可以部分采用对流式,部分采用辐射式. 假定在一面积为  $20 m^2$  的办公室内,当空气温度下降  $1 K$  时,人对环境的对流散热量将增加:

$$\Delta C = f_{cl} h_c [T_{cl} - (T_a - 1)] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) = f_{cl} h_c \quad (14)$$

以冬季为例,人在室内普通着装的服装面积系数大约为  $f_{cl} = 1.2$ , 当室内的风速小于  $0.25 m/s$  时,

对流换热系数大约为  $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 所以气温下降  $1 \text{ K}$ , 对流散热量约增加  $4.8 \text{ W}/\text{m}^2$ . 对于一个高  $1.8 \text{ m}$ , 体重  $75 \text{ kg}$  的人, 其皮肤表面积约为  $1.9 \text{ m}^2$ , 所以他的对流散热增加了约  $9.12 \text{ W}$ . 为了维持原有的热舒适, 这部分散热应由辐射采暖器给予补充, 假使辐射效率仅为  $40\%$ , 则需要补充的辐射输入功率为  $22.8 \text{ W}$ . 而这些能量能使多少空气温度上升  $1 \text{ K}$  呢? 按下式计算为:

$$G = \frac{Q}{C_p \Delta t} = \frac{22.8}{1.01 \times 1} = 0.0226 \text{ kg/s} = 68 \text{ m}^3/\text{h} \quad (15)$$

假定该办公室完全采用对流换热的形式, 换气次数仅为  $6$  次, 则需风量  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ , 如送风温度下降  $1 \text{ K}$  可节能  $100 \text{ W}$  左右, 需要的辐射能耗仅为  $9.12 \text{ W}/\text{人}$ , 节能效果是明显的. 夏季若采用辐射供冷, 同样可以通过提高空气温度来节能.

当然, 就整个空调和供热系统而言, 能量分析绝非如此简单. 作为对一个系统的评价, 必须综合考虑如下方面: 系统的形式; 系统的造价和运行寿命; 系统的能耗的种类; 系统的运行费用; 系统的末端装置的形式及效率, 等. 这就需要不仅是理论上, 更多的是对实践中应用的调查分析与总结.

## 5 结论与分析

辐射换热是人与环境热交换的一种重要形式, 研究这一换热形式将为暖通空调技术的发展提供依据. 本文介绍的计算方法比较简单、准确, 可以应用于工程实际. 在维持人体热舒适的前提下, 一定着装和活动量的人辐射及对流换热量之和是个定值. 这两种热量均与空气温度的变化成线性关系.

从理论上讲, 采用辐射供冷(或供热)可以提高(或降低)室内空气的温度, 从而实现节能的目的. 这是由于辐射能可以直接传递给人体, 而对流能必须首先传递给空气, 在满足人体要求的同时也加热或冷却了整个室内的空气, 实际工程中的节能效果不如本文所列举的那样明显.

从有关资料看, 现在正研究开发的个人空调系统, 可以在一个大空间内满足不同的个人的热舒适要求, 辐射采暖或制冷在这种系统中将更有用武之地.

由于采用了辐射采暖或制冷末端装置, 可能对人体造成热不均匀(有些文献中称为非对称), 即人体接受辐照的表面与其它表面的温度可能会出现较大的差异. 这种热不均匀是否会影响人体的热舒适感? 据国外的实验资料表明, 在相当大的热不均匀下, 人体仍能保持热舒适. 普通的例子是在严寒的冬季, 人们可以通过烤火和晒太阳来获得热舒适, 而此时人正处于热不均匀状态中.

### [参考文献]

- [1] 康兹 S A, 魏润柏. 人与室内环境[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

## The Calculation of Radiant Heat in Air-Conditioning Room

Yu Yuejin

(College of Power Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

**Abstract:** A calculation method of radiant heat between human body and air conditioned environment is given in this paper. The linear relation between radiant heat and air temperature is determined. The energy-saving effect of radiant system is analyzed.

**Key words:** radiation, angle factor, convection

[责任编辑: 严海琳]