

浅谈 辐射采暖制冷系统与舒适度

吉利勇（技术部经理）
嘉科米尼采暖制冷科技（北京）有限公司



Giacomini公司是意大利的一个著名的暖通产品生产厂商，它位于意大利北部的都灵市。通过60多年的研究和探索，我们对于“舒适性”有一些自己的看法，下面分享一下我们所认为的“舒适性”。

影响舒适的主要因素有两类，人体自身热平衡和外界热环境的影响。这两大类因素包含很多方面，有主观的感受，也有客观存在的影响。舒适的判断标准同时取决于各自身体和心灵上感受，但是研究表明，尽管世界各地的人们生活在不同的地区，拥有不同的文化，生活习惯也存在差异，但是对于舒适性的要求却具有惊人的相似度。主要包括空气温度、空气湿度、空气流速、辐射热及微波，人体自身因素主要包括工作强度及着装。

一、主要因素

1、人体热平衡

人体的热平衡由以下几个方面组成，如下公式所述：

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S$$

$$= (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr})$$

式中，

M是指人体新陈代谢所产生的能量

W是指人体对外界做功所消耗的能量

q_{sk} 是指皮肤热损失

q_{res} 是指呼吸热损失

S是指人体存储的能量

C+R是指皮肤显热损失

E_{sk} 是指皮肤潜热损失

C_{res} 是指呼吸对流换热损失

E_{res} 是指呼吸潜热损失

S_{sk} 是指皮肤能量存储

S_{cr} 是指人体内部能量存储

为了达到人体舒适热平衡，我们必须考虑以上各个方面。据公式可得，人体通过不断的新陈代谢来保持我们的体温。当人体散热小于摄入的热量时，体温会升高，当人体散热大于摄入的热量时，体温会下降。有研究表明，当皮肤温度高于45℃或者小于18℃时，我们会生病。静坐的情况下，人更适合处于33℃-34℃的环境中，人体内部的温度会随着运动量的大小而略微改变。静坐时，大脑内部温度通常是36.8℃，走路或慢跑时会达到37.4℃~37.9℃。但

是，当大脑内部体温小于28℃或大于46℃时，可造成不可修复的脑损伤。因此，合理的调节体温会使我们更健康。

影响人体热平衡的因素跟我们自身很多方面是有联系的。如果想要达到最完美的热平衡，那必须考虑以下几点：

A) 体表面积（身高，体重）

B) 皮肤散热—皮肤向外界散热的方式有三种：热传导，对流和辐射

C) 皮肤蒸发热损失—取决于皮肤水分蒸发量和外界空气、蒸汽、压力的压力差

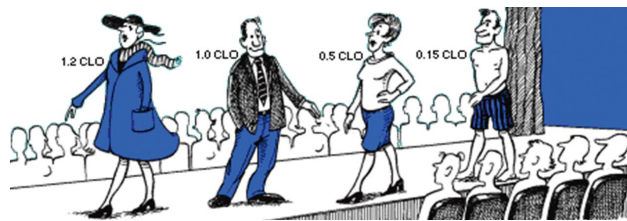
D) 呼吸导致的热损失—人在呼吸的时候会和外环境进行热交换，包括空气中的潜热和显热

衣服的隔热

另一个关于舒适度的因素是“衣服的隔热”。穿衣指数决定了衣服的隔热效果。如下图：

Clothing Ensemble	Insulation of Entire Clothing (I_{cl})	
	clo	$m^2 \cdot K/W$
Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0.30	0.050
Panties, petticoat, stockings, light dress with sleeves, sandals	0.45	0.070
Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0.50	0.080
Panties, stockings, shirt with short sleeves, skirt, sandals	0.55	0.085
Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0.70	0.110
Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0.70	0.105
Panties, shirt, skirt, sweater, thick knesocks, shoes	0.90	0.140
Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1.00	0.155

Note: 1 clo unit is the insulation required to keep a sedentary person comfortable at 21°C; 1 clo=0.155 $m^2 \cdot K/W$



美国制冷与空调行业标准ASHRAE 55-2005指出，人类所生活的舒适标准对应的穿衣指数为0.5~0.9CLO（0.078~0.14 $(m^2 \cdot K)/W$ ），不同地域需要根据当地气候做相应调整。

2、外界环境热平衡

众所周知，人体所处的外界环境可以影响我们的热感觉，所以外界热环境是影响舒适性的一个非常重要的因素。影响外界环境热平衡的因素主要包括空气温度、空气湿度、空气流速和辐射热等。

美国制冷与空调行业标准ASHRAE阐述了与舒适性

有关的室内空气温度和湿度。

研究发现，长时间处于低湿度的环境中，我们的眼睛会感到不适。此外，冬季呼吸道疾病频发和低湿度也有很大关系，低湿度也会对身体健康有影响。并且冬季适当的调整空气湿度会提高工人的身体健康和工作效率。

不过，如果环境中的湿度太高也会对舒适度造成影响，因为高湿度环境不利于人体的排汗和汗水蒸发。并且在高湿度环境中，人体的感官会受到影响。这种感觉好像是由于湿度太大，导致衣服和皮肤摩擦加剧而使我们感到不舒服。所以我们建议室内湿度最好不要大于60%。



空气对流产生的不舒适

因为对流传热需要空气的流动，但是空气流动会造成不舒适感。这是一个很严重的问题，这个问题不仅存在于自然通风的建筑，而且还存在于汽车、火车和飞机等与我们息息相关的交通工具上。而且在办公区域内，空气流动很影响工作效率。空气流动的房间需要比辐射系统设定更高的温度才能到达相同的舒适度。在相同温度情况下，有风的时候我们会感觉更冷。

曾经做过一项研究，将不同的一些人分别静坐在相同流速空气的房间内，来观察这些环境给人带来的舒适度。研究表明在空气流动的环境中很多人都感到头部有些不适，包括头，颈部，肩部和背部，其中温

度的变化可以很明显影响环境的舒适度。而且不分男女。但是如果处于这个环境中的人是活动状态，则不受影响。

二、国际上科学家对于舒适性的探索

由以上影响舒适性最主要的因素可知，人体产热和散热有多种方式，并且各种方式所占比例也在无时无刻的调整。但是不是所有的情况都是我们所希望的舒适。曾经有一位丹麦的范格尔（P. O. Fanger）教授经过研究表明，人体散热量M-W、皮肤温度、出汗蒸发热量损失与舒适度等存在一定的联系。所以为了达到最佳舒适度，他在Rohles和Nevins研究成果（如下公式1）的基础上，对舒适度做了更好的诠释（公式2）。

公式1:

$$t_{sk, req} = 35.7 - 0.0275(M - W)$$

$$E_{rsw, req} = 0.42(M - W - 58.15)$$

$t_{sk, req}$ 是指皮肤温度

$E_{rsw, req}$ 是指出汗蒸发能量损失

公式2:

$$M - W = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]$$

$$+ f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

$$+ 3.05 [5.73 - 0.007(M - W) - p_a]$$

$$+ 0.42 [(M - W) - 58.15]$$

$$+ 0.0173M(5.87 - p_a)$$

$$+ 0.0014M(34 - t_a)$$

M-W是指最佳舒适情况下，人体所有能量损失

f_{cl} 是指衣服的隔热因素，公式如下:

$$f_{cl} = 1.0 + 0.3I_{cl}$$

I_{cl} 是指衣服的传热系数

h_c 是指对流换热系数

t_{cl} 是指衣服表面温度

t_a 是指空气温度

p_a 是指空气中水蒸气分压力

\bar{t}_r 是指人体周围平均辐射温度

P. O. Fanger给出了理想舒适情况下人体的热损失，但是它是否具有可操作性呢? P. O. Fanger用了其他方法来验证这个公式是否可行性。公式如下:

$$L = (M - W)_{real} - (M - W)_{ideal}$$

L是指实际人体热损失与理想舒适情况下人体热损失的差距

$(M - W)_{real}$ 是指实际人体热损失

$(M-W)_{ideal}$ 是指理想舒适情况下人体热损失

P. O. Fanger教授提出的表征人体热反应（冷热感）的评价指标PMV，代表了同一环境中，大多数人的冷热感觉的平均值。PMV=0时意味着室内热环境为最佳热舒适状态。

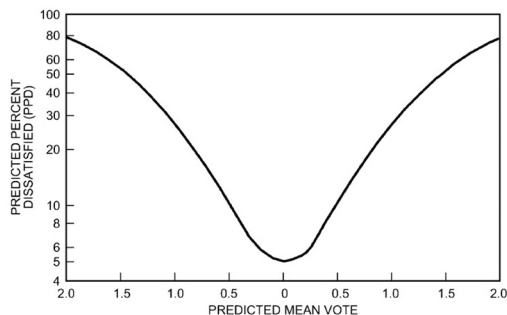
PMV指数可通过估算人体活动的代谢率及服装的隔热值获得，同时还需有以下的环境参数：空气温度、平均辐射温度、相对空气流速及空气湿度。PMV指数是根据人体热平衡计算的。当人体内部产生的热等于在环境中散失的热量时，人处于热平衡状态。

$$PMV=[0.303e^{-0.036M}+0.028]L$$

后来P. O. Fanger教授利用PMV做了一项不满意度调查，如下：

$$PPD=100-[95e^{-0.036M}+0.028]L$$

测试结果如下图，满意度为90%的时候对应的PMV值大约在-0.5~+0.5之间。并且ISO7730对PMV的推荐值为PMV值在-0.5~+0.5之间。



三、次要因素

除了我们以上提到的主要因素，其实也存在一些次要因素也可以影响我们的舒适度，如果不合理的注意这些次要因素，那我们将不会得到高质量的舒适度。

1、垂直温度失调

大多数建筑室内部会出现温度垂直失调现象，也就是说室内从地板开始，温度随着高度的上升而升高。如果你足够高，你会明显的感到头和脚的温差。

如右图所示：

研究发现，人体的热舒适其实与上面我们说到的情况恰恰相反，我们脚所需要的温度要高于头部。所以如何营造这种环境是我们所需要考虑的。

2、地板过热或过冷

往往造成我们身体不舒服的一个很直接原因就是地板过热或过冷，地板的温度直接影响了房间的辐射

热量或冷量。如果地板太冷，则会产生不舒适。需要提高温度，同时也增加了能源的消耗。如果地板温度过高，则对人体健康不利。所以如果想达到理想的舒适度，控制地板温度也是必要的手段。

3、年龄

众所周知，随着年龄的增长，人体的新陈代谢将没有年轻时那么旺盛。一般的测试都是基于年轻人的，但是这并不适用于老年人。老年人所需要的舒适度标准是不同于年轻人的。随着年龄增长，人体机能的反应速度也明显降低。老年人对于热或冷的感觉也变的迟钝。经过研究表明，老年人比年轻人需要更高的室内温度，这也可能受老年人没有太多的活动的影响。

四、辐射系统与舒适度的切合

在暖通领域，有很多种供热或制冷方式，火炉采暖、高温烟道采暖、散热器采暖、风机盘管采暖和制冷、地板辐射采暖或吊顶辐射制冷系统等。现在最常见的是散热器采暖、风机盘管采暖和制冷、地板辐射采暖、吊顶辐射制冷这几种方式。这几种系统中，各自有自己的优缺点。在这几种系统中，辐射系统是最接近我们舒适度的供热或制冷方式。

地板辐射系统是指利用塑料管道中的低温循环水供暖和制冷的系统。循环水的塑料管道被敷设在水泥层中，地板装饰材料可以铺设瓷砖、大理石、花岗岩、木地板等。热量从管道传递到地板表面，从地板表面传递至整个房间，在这种方式下，整个地板表面就变成个辐射源。

吊顶辐射系统与地板辐射系统相仿，是利用塑料管中的低温循环水供暖和制冷的系统。将房顶平铺上采暖或制冷用的模块板（金属或者石膏板），将整个辐射板变成辐射源，对室内进行冷热交换

辐射系统具备以下优点：

- 1、主要热交换以辐射为主，更贴近人体“喜欢的”传热方式（辐射方式占人体换热的40%~50%）；
- 2、不产生空气对流，减少室内空气流动；
- 3、整个房间地板或吊顶都是辐射面，室内温度为水平衡，不会出现冷热不均的现象；
- 4、超静音，辐射热交换方式不需要空气对流，所以在制冷或供暖时不需要空气流动，所以不需要风机进行空气循环（或仅需要小风机进行新风置换），所以可以实现超静音；
- 5、节能，辐射系统相较于散热器和风机盘管可以节能20%~40%。