

目 录

前言	(1)
第一章 热舒适条件	(1)
第一节 热平衡	(3)
一、体内热的产生	(3)
二、通过皮肤的热损失	(7)
三、由于蒸发足的热损失	(7)
四、潜在(不显性)呼吸的热损失	(7)
五、呼吸的热损失	(8)
六、通过衣服的热传递	(9)
七、辐射热损失	(11)
八、对流热损失	(12)
九、热平衡方程式	(13)
第二节 热舒适的概念	(13)
第三节 舒适方程式	(15)
一、舒适图	(16)
二、实际应用	(21)
第四节 变量的相对影响	(28)
第五节 与早期调查研究比较	(31)
第二章 舒适方程应用中特殊因素的影响	(36)
第一节 国家-地理位置、年龄和性别	(36)
一、受试者	(37)
二、服装	(37)
三、实验设备	(37)
四、实验条件	(38)
五、实验步骤	(40)
六、结果	(40)
七、讨论	(44)
第二节 其它影响因素	(46)
一、体型	(48)
二、月经	(49)
三、种族差别	(49)
四、食物	(50)
五、生理节律	(50)
六、热的瞬间变化	(50)

七、身体侧面受热感评价	(52)
八、色彩	(56)
九、拥挤程度	(56)
十、空气压力	(57)
第三章 热环境的实际评价	(58)
第一节 早期的热指数	(58)
第二节 预计平均热感(PMV)	(59)
第三节 预计不满意百分数(PPD)	(82)
第四节 房屋的不均匀性	(85)
第五节 实际评价	(87)
第六节 测量方法	(90)
一、温度	(90)
二、风速	(90)
三、平均辐射温度	(91)
四、空气湿度	(91)
五、综合测量仪器	(91)
第四章 平均辐射温度的计算	(92)
第一节 定义	(92)
第二节 环境表面的辐射	(97)
第三节 平均辐射温度的评价	(93)
第四节 高强度辐射源辐射	(95)
第五章 人体的辐射资料	(101)
第一节 方法	(101)
一、受试者	(101)
二、实验步骤	(101)
第二节 实验数据处理所分析基础	(102)
一、有效辐射面积系数	(102)
二、投影面积系数	(104)
三、角系数	(104)
第三节 结论	(106)
一、有效辐射面积系数	(107)
二、投影面积系数	(109)
三、角系数	(111)
第四节 讨论	(122)
一、有效辐射面积系数	(122)
二、投影面积系数	(125)
三、角系数	(129)

第六章 热环境分析	(133)
第一节 舒适条件	(133)
第二节 室内表面的热平衡	(134)
一、辐射热传递	(134)
二、对流热传递	(138)
三、传导热传递	(139)
第三步 室与空气的热平衡	(139)
第四步 联立方程式所求解	(143)
第五步 实际设计步骤	(145)
小结	(144)
术语略语	(145)
参考文献	(148)

第一章 热舒适条件

本章将为人类提出最适宜的参数条件，将得到一般舒适方程式，以创建最适宜的热舒适。该式将使对任何活动水平、任何服装条件下进行环境变量（空气温度、平均辐射温度和相对风速等）的计算成为可能。丹麦科学家范格早期（1967年）^[10]发表的方程式在此将有一些修改，这包括各个变量影响的具体分析，还包括大量的舒适图表和被一系列实例所证实了的它们在环境工程上的应用。

因为热舒适是绝大多数采暖和空调系统的基本目的，所以多年来，为了调查舒适条件进行了大量的研究工作。对多个生产现场进行了调查，在实际状况下测量了环境的变量，同时询问了受试者对热感觉的心理物理等级的判断。随后，统计处理了调研的结果，对实际受试者确立了最一般的、最适宜的环境温度。这种现场调研和对说是较为容易进行的。在世界各个地区进行了大量的调查研究报告：扬格洛和丹克尔（Dynerker）^[11]，派特里奇（Partridge）和麦克里因（McLean）^[12]，拜德福德（Bedford）^[13]和霍施^[14,15]等。许多调查报告经常是缺少活动强度、特别是没有关于服装的记载；有些文献又缺少环境变量的测定。尽管这些结果是最重要的，但要把这些结果推广到其它情况则是困难的。例如在早期的不少现场研究中，毫无疑问，人们的穿着是臃肿的，缺少每天的衣着记录，要作精细的衣着描述是不可能的，因此这些研究在现时的价值是极为有限的。

其它一组的研究包括实验室实验，一般是用相对少的受试者，对影响舒适的一个或几个变量进行研究，有些还测定了生理指标。近来在耶鲁大学的皮尔士（Pierce）基金会实验室进行了这方面的综合性调查研究，特别是研究了高强度辐射源、热传递和代谢率的影响。第二章将讨论这些和其它一系列特殊因素对舒适的影响。近期莫氏（Morris）^[16]等建立了理论模型。

近来，在堪萨斯州大学由奈维氏（Nevins）^[17,18]和麦克奈尔（McNall）^[19,20]等进行了与上述现场调研类似的广泛的实验研究，但它是在精确控制的实验室条件下进行的。采用的方法是根据实际可能有的、所有影响热舒适的其它因素，数百名受试者穿着标准服装，用两个环境变量（即空气温度和相对湿度）的不同组合保持其处于恒定状态。根据特殊的分级，询问了受试者对其热感觉的判断。根据统计分析，确定了一个舒适线，该线能给出最适宜热舒适的两种变量的所有组合。

由于是大数量的受试者（组成合理的统计学样品，具有大量人群的代表性），又有精确控制的实验条件，所以这种方法可以得到具有特殊价值的实验结果。但是必须说明，这种实验结果在实际应用时是相对有限的，因为它们仅仅在恒定状态（也就是说在其它四个指标的恒定状态下进行的实验）时才为有效。例如，在参考文献^[20]中我们的舒适线仅仅是在一种活动水平（坐位）、一种风速（0.1m/s）、一种相对湿度（0.1m/s）和平均辐射温度等于空气温度的情况下才是有效的。使用对人体具有相互依赖作用的多项指标，会有符合这种范围的很多组合，这样一来，这一方法将是慢慢代价昂贵，所以现有的材料只适合于一定的特殊情况，不能提供各个部分的全面情况和计算各个变量的相对影响与绝对影响。

在本研究中提出了不同的研究方法。这些方法是建立在最近宜热舒适的一种基本情况的基础之上。

长期接触一定环境的人体，其热舒适的首要条件是处于热平衡，自然，这种情况并不是很充分的。但由于人的热调节系统十分有效，因此，即使不存在舒适，仍能在大的变量范围内创建热平衡。

利用双重热平衡，得出（仅仅考虑到主要的变量）下列方程式：

$$f_1 \left[\frac{H}{A_{sa}}, t_{cl}, t_{sk}, t_{mrt}, P_a, V, t_a, \frac{R_{saw}}{A_{sa}} \right] = 0 \quad (1)$$

式中， $\frac{H}{A_{sa}}$ 为单位面积的 f_1 热值； A_{sa} 为斜坡依斯体表面积；

t_{cl} 为服装的隔热值；

t_a 为空气温度；

t_{mrt} 为平均辐射热温度；

P_a 为环境空气的水蒸气压力；

V 为相对风速；

t_{sk} 为平均皮肤温度；

$\frac{R_{saw}}{A_{sa}}$ 为由于汗液蒸发所引起的单位体表面积的热损失。

公式（1）的衍生和组成涉及到本章的第一部分。

对于一定的活动水平来说，似乎皮肤温 t_{sk} 和汗分泌 R_{saw} 才是影响公式（1）热平衡的生理变量。对这两个变量的数值而言，热舒适的感觉则是相对的。对一般受试者进行了不同活动水平的实验，以测得随活动水平而变的、处于热舒适状态的人的平均皮肤温和汗分泌。其结果如下式：

$$t_{sk} = f_1 \left[\frac{H}{A_{sa}} \right] \quad (2)$$

$$R_{saw} = A_{sa} f_2 \left[\frac{H}{A_{sa}} \right] \quad (3)$$

公式（2）和（3）是热舒适的第二和第三个条件。

本章的第二部分是公式（2）和（3）的定量评定以及皮肤温和汗分泌有关的热舒适感觉的理论基础。

将公式（2）和（3）代入公式（1），得出理想的舒适公式（4）：

$$f_1 \left[\frac{H}{A_{sa}}, t_{cl}, t_a, t_{mrt}, P_a, V \right] = 0 \quad (4)$$

利用舒适公式（4）就可能在任何活动水平（ H/A_{sa} ）和着任何服装（ t_{cl} ）时计算出空气温度（ t_a ）、平均辐射温度（ t_{mrt} ）、空气湿度（ P_a ）和相对风速（ V ）等全部组合，以创建最适宜的舒适。

本章的第二部分包括一般舒适公式的演变。它的数字计算机的解式、舒适图表的组成、用大量实例说明的实际应用、由舒适公式部分演变来的单一变量相对影响的推导以及与早期调查研究的比较。

第一节 热平衡

因为人体热调节系统的目的是维持体内温度的基本恒定。可以设想,长期处于恒定(中等程度)的热环境并具有恒定的代谢率,人体将具有热平衡,即产热等于散热。此时体内无明显的热蓄积。这种情况的热平衡是:

$$H - E_{sk} - E_{sw} - E_{re} - E_{L} - A = H + C \quad (5)$$

式中 H 为人体内的产热;

E_{sk} 为水蒸气通过皮肤散发的热损失;

E_{sw} 为汗液通过皮肤表面蒸发的热损失;

E_{re} 为潜在呼吸的热损失;

E_L 为呼吸的热损失;

A 为通过皮肤传递至衣服外层的热量(经衣服传递);

B 为通过人体衣服表面辐射的热损失;

C 为通过人体衣服表面对流的热损失。

如果公式(5)表示人体内的产热 H 减去由皮肤蒸发($E_{sk} + E_{sw}$)和呼吸($E_{re} + E_L$)所引起的热损失等于通过衣服的散热(A)和以辐射对流($B + C$)衣服表面的散热。可以设想 E_{sw} 和 E_{sk} 的蒸发产生于皮肤(或皮下)。

以下是对公式(5)中的各项进行讨论和解释。

一、体内热的产生

单位时间内人体氧化过程释放的热能为代谢率(M),有时部分地转化为外部的机械功(W),但它主要是转化为体内的热量(H)。因此

$$H = H + W \quad (\text{kcal} \cdot \text{h}) \quad (6)$$

代入下式

$$\eta = \frac{W}{M} \quad (7)$$

η 为外部机械效率。

将公式(7)代入(6),得出

$$H = M (1 - \eta) \quad (\text{kcal/h}) \quad (8)$$

或按单位体表面积表示:

$$\frac{H}{A_{sa}} = \frac{M}{A_{sa}} (1 - \eta) \quad (\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2) \quad (8a)$$

需要注意的是外部机械效率 η 所下定义常与上述情况不同。如外部机械功之间的关系、实际代谢率与基础代谢率之间的差异,然而从工程角度来看,似乎公式(7)中 η 的定义更合理些。因此就这样应用于以下各个章节。

* $1 \text{ kcal} = 4.1868 \text{ kJ}$ 。

$M/A_{0.5}$ 的数值是随着人们的活动水平而变化的。表 1 列出的是各类工作不同活动水平的 $M/A_{0.5}$ 等。

表 1 不同类型活动的代谢率

活 动		代谢率 $M/A_{0.5}$ (kcal/h · m ²)	机械效率 η	安静空气中 的相对风速 (m/s)
休息				
睡眠		35	0	0
斜躺		40	0	0
安静坐位		50	0	0
放松坐位		60	0	0
步行				
水平位	km/h			
	3.2	100	0	0.9
	4.0	120	0	1.1
	4.8	130	0	1.3
	5.6	160	0	1.6
	6.4	190	0	1.8
	8.0	250	0	2.2
上坡				
坡度 %	km/h			
5	1.6	120	0.07	0.6
10	3.2	150	0.10	0.9
15	4.8	200	0.11	1.3
20	6.4	305	0.10	1.8
25	8.0	145	0.15	0.4
30	9.6	230	0.19	0.9
35	11.2	350	0.19	1.3
40	12.8	180	0.20	0.4
45	14.4	335	0.21	0.9

续表 1

活 动	代谢率 $M_{1.680}$ ($\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2$)	机械效率 η	安静空气中 的相对风速 (m/s)
具有各种特点的职业			
面包房(包括清理馒头、装箱)	70—100	0—0.1	0—0.2
啤酒厂(即装瓶、把啤酒灌上 传送带)	60—120	0—0.2	0—0.2
木工作业			
机械锯	90	0	0—0.1
手锯	200—240	0.1—0.2	0.1—0.2
下司	280—320	0.1—0.2	0.1—0.2
铸造作业			
弯砂(使用风动气枪)	160	0—0.1	0.1—0.2
铸钢铸模	200	0—0.1	0.1—0.2
倒砂(即负重 60kg)	270	0—0.2	0.1—0.2
管管熔炉	340	0—0.1	0.1—0.2
处理炉渣	380	0—0.1	0.1—0.2
修理汽车作业(即拆换轮胎,以 千斤顶抬升汽车)	110—150	0—0.1	0.2
实验室工作			
检查幻灯片	70	0	0
教性的实验室工作	80	0	0—0.2
安装设备	110	0	0—0.2
聆听	110	0	0.1—0.2
机械作业			
轻机械作业(如电工作业)	100—120	0—0.1	0—0.2
机器安装	140	0—0.1	0—0.2
重型作业(如油漆工)	200	0—0.1	0—0.2
罐头制造(即装罐头、贴标签、 封口)	100—200	0—0.1	0—0.2
坐位或肢体运动(如金属作业)	110	0—0.2	0.1—0.4
制鞋作业	110	0—0.1	0—0.1
店员	100	0—0.1	0.2—0.5
职员	80	0	0

续表 1

活 动	代谢率 M/A ($\text{kcal}/\text{h} \cdot \text{m}^2$)	机械效率 η	安静空气中 的相对风速 (m/s)
修理钟表	55	0	0
机动车驾驶员			
轿车(小运销量)	50	0	0
轿车(大运销量)	100	0	0
重型机动车(如装载机、车)	150	0—0.1	0.05
夜间飞行	60	0	0
飞行紧急着陆	80	0	0
战斗飞行	120	0	0
垦殖作业			
推装轮车(57kg)4.5km/h	125	0.2	1.4
用手搬运 50kg 的袋子	200	0.7	0.5
挖和推的作业	200—240	0.1—0.2	0.5
掘沟	300	0.2	0.5
家务活动			
家中清扫	100—170	0—0.1	0.1—0.3
做饭	80—100	0	
立位洗盘了	80	0	0—0.2
手洗衣服和熨烫衣服	100—180	0—0.1	0—0.2
刮胡须、洗脸和穿衣	85	0	0—0.2
去商店购物	80	0	0.2—1
办公室工作 30000			
打字(电动) 30	45	0	0.05
40	50	0	0.05
打字(机械) 30	55	0	0.05
40	60	0	0.05
手插计算机	60	0	0
有各种特点的办公室工作 (即归档、检查分类)	50—60	0	0—0.1
书写人员	60	0	0—0.1
体育活动			
体操	150—200	0—0.1	0.5—2
跳舞	120—220	0	0.2—2
网球	240	0—0.1	0.5—2
击剑	350	0	0.5—2
橡皮球游戏	360	0—0.1	0.5—2
篮球	380	0—0.1	1—3
摔跤	425	0—0.1	0.2—0.3

表中所列出的某些活动项目并不好解释,如“溜鞋作业”、“挖和推的作业”。表中的数值是平均值,应当考虑到它的变动。然而已知是什么活动,或何种类型的工作,对绝大多数的

环境设计来说,就可从表1以合理的精确判断出 M/A_{sa} 的依。

表1也列出了 η 值,绝大多数 $\eta=0$,这符合没有外部机械功的作用。例如,在水平位时步行的人,其外部机械功等于零。因为从物理学的观点来看,此人没有做功;然而在特殊的活动时, η 可以达到 0.20~0.25。例如这种情况可以出现在步行上山(上楼梯)、挖沟、把包裹至高处、带动量计骑自行车。也有一些特殊情况,当外界转变为身体的热能(负工作)时^[10], η 值可以小于零。这一情况可以出现在如步行下山时。此时人的潜在能量可转变为热量,释放到腿部的关节和肌肉中。

二、通过皮肤的热损失

水蒸气通过皮肤扩散是潜在(不显性)呼吸的一部分,该过程亦不受人体热调节的控制。单位面积水蒸气的扩散数值被假设与皮肤温度对饱和蒸汽压(P_s)和该环境空气水蒸气分压(P_a)之形成一定的比例关系。通过皮肤水蒸气扩散引起热损失的方程是:

$$R_d = \lambda m A_s (P_s - P_a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (9)$$

式中 R_d 为通过皮肤蒸发扩散的热损失 (kcal/h);

λ 为水的蒸发热 = 375 (kcal/kg , 35°C时)

m 为皮肤的渗透系数 ($\text{kg/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mmHg}$)

P_s 为该皮肤温时的饱和蒸汽压 (mmHg)

P_a 为环境空气的蒸汽压 (mmHg)

表皮角质层的表层是主要的蒸发屏障^[11],这个屏障的扩散阻力是大的,并与正常型阻力的扩散阻力有关。皮肤渗透系数的数值可由因罗也 (Inouye)^[12]的分析数据来确定。该分析数据考虑到了舒适状态下坐位受试者的蒸发损失。由此分析可得知 m 值为 $5.1 \times 10^{-4} \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mmHg}$ 。

由水蒸气表可以发现 P_s 是 t_s 的函数。如 $27^\circ\text{C} < t_s < 37^\circ\text{C}$,以下的线性说明仅具有小于 3% 的误差。

$$P_s = 1.92t_s - 25.3 \quad (\text{mmHg}) \quad (10)$$

把 λ , m 和 P_s 代入公式(9),得出

$$R_d = 0.35 A_s (1.92t_s - 25.3 - P_a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (9a)$$

三、由汗腺蒸发的热损失

中等程度的汗分泌气温和气压(适用于人处于舒适状态),其合理的假设应该是此时令部分送出的汗液都蒸发了。汗腺分泌量是随活动的水平而转移,对于处在热舒适状态的人体,将在以后讨论。

四、潜在(不显性)呼吸的热损失

由呼吸器官的粘着物以对流和蒸发的形式,将热和水蒸气转移至吸入的空气中。当到达肺泡时,吸入的气处于身体的深层温度中,并被水蒸气所饱和。由于空气通过呼吸道向外

动时,一些热又被带回到体内,并冷凝成水分。但后由鼻腔排出的呼出气仍比舒适环境中的吸入气含有较多的热量和水分。因此呼吸导致潜在的损失,而来自人体的则是净热损失。

潜在的呼吸热损失取决于肺通气量以及呼出和吸入气中含水量之差,如:

$$\dot{Q}_{res} = \dot{V} (W_{ex} - W_a) \times 573 \quad (\text{kcal/h}) \quad (11)$$

式中 $\dot{Q}_{res}$ 为潜在的呼吸热损失 (kcal/h);

$\dot{V}$ 为肺通气量 (kg/h);

W_{ex} 为呼出气的含湿率 (kg 水/kg 干燥空气);

W_a 为吸入气的含湿率 (kg 水/kg 干燥空气)

573 为水的蒸发热 (573 kcal/kg, 35℃时)

尽管在以上肢或以下肢为上的活动中,肺通气量可以出现很小的差别,但肺通气量主要取决于代谢率。基丁阿斯姆森 (Asmussen) 和尼尔申 (Nielsen)^[10] 的数据分析以及对里德尔 (Liddell)^[11] 工作的回顾,发现有以下的线性关系,可作为不同类型工作平均肺通气量的近似值:

$$\dot{V} = 0.0060 \dot{M} \quad (\text{kg/h}) \quad (12)$$

公式 (12) 与代它 (Datta) 和莱曼纳 (Ramanathan)^[12] 近期发表的数据较为一致。

尽管呼吸道的“空调系统”是十分有效的,但呼出气的状态仍在一定程度上取决于吸入气的状态。根据麦克考汉 (McCullohan) 和泰勒 (Taylor)^[13] 的工作,得知呼气和吸气间的含湿率之差可由下列方程式来表示:

$$\begin{aligned} W_{ex} - W_a &= -0.0277 + 0.00065 \dot{V} - 0.80 W_a \\ &\approx -0.029 - 0.80 W_a \quad (\text{kg 水/kg 干燥空气}) \end{aligned} \quad (13)$$

将 $W_a = 0.622 \frac{P_a}{P - P_a} \approx 0.00083 P_a$ 代入方程 (13)

得出:

$$W_{ex} - W_a \approx 0.029 - 0.00066 P_a \quad (\text{kg 水/kg 干燥空气}) \quad (13a)$$

式中 P_a 为吸入气中水蒸汽分压 (环境空气, mmHg)

P 为海平面大气压, 760 mmHg

把 $\dot{V}$ 和 $W_{ex} - W_a$ 的表示式代入 (11), 可得到下述潜在呼吸热损失的公式:

$$\dot{Q}_{res} = 0.0023 \dot{M} (44 - P_a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (11a)$$

五、干呼吸的热损失

由于呼出和吸入气中温度差所引起的热损失可用下式表示:

$$\dot{Q}_d = \dot{V} C_p (t_e - t_a) \approx 0.0011 \dot{M} (t_e - t_a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (14)$$

式中 C_p 为 0.24 kcal/kg · °C, 即是在恒定压力下干燥空气的比热值。为精确起见, 对于以吸入气的状态为转移的呼出气温度, 麦克考汉和泰勒^[13] 得出了以下的公式:

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066 \dot{M} + 32 P_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (15)$$

然而与其它参数相比, 干呼吸的热损失相对地是小的, 所以对于 $\dot{M}$ 用 34 C 这个平均常数已足够准确。

至此, 方程式 (14) 可写成

$$L=0.00149(54.4a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (14)$$

六、通过衣服的热传递

在皮肤和穿着人体最外层表面之间的热传递是相当复杂的，它包括介于不同的内部对流和辐射过程，以及通过衣服本身的传递。为方便计算，盖吉 (Chagge)^[20]等人介绍了 R_{cl} 概念，用 R_{cl} 这个非尺度指标来说明穿着人体通过皮肤向衣服外层散热的总的热传递阻力， R_{cl} 可表示为：

$$R_{cl} = \frac{R_{cl}}{0.18} \quad (\text{clo}) \quad (15)$$

式中 R_{cl} 为从皮肤向穿着人体外层的总的热传递阻力 ($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal}$)

克罗 (Clo) 值现已普遍接受，并且被世界绝大多数国家所采用，但在美国同样使用皮尔上和里斯 (Rios)^[21] 所介绍的“谢格 (Teg)”，

$$1 \text{ Teg} = 0.100 (\text{m}^2 \cdot \text{h} / 0.118 ^\circ\text{C} \cdot \text{kcal}) = 0.645 \text{ clo}$$

在文献中，克罗值和谢格值都包括人体表面的热阻力，这样就很容易产生误解，然而经常是把克罗值只当作衣服本身单独加以应用。

由皮肤向着穿人体外面的热传递，可用下式表示：

$$K = A_{cl} \cdot \frac{t_{sk} - t_{af}}{0.18 R_{cl}} \quad (\text{kcal/h}) \quad (16)$$

一定服装克罗值的测定是相当困难的。例如只测定每一层纺织品的传递阻力，同时地只测量建筑材料传递阻力这是不够的，为了得到精确合理的得数，需要生得像人一样大小的人体假人^[22]，该假人是实际的人体服装（纺织品之类），因为具有必要电子设备的玻璃假人，其制作是昂贵的，所以现在有几个样品在工作，而它们中的绝大多数是与军事和航空实践有关的。遗憾的是，在文献中只见到一些关于少量穿着的克罗值的叙述。一些克罗值列于表2，而且还包括了 R_{cl} 因素（穿着体表面积对裸体面积之比）的数值，而后者将在涉及辐射和对流形式散热的有关部份讨论，虽该表2目前尚不太完善，但它仍可能以合理的精确度来评价一定服装的克罗值。

目前大量的实验性调查研究工作是在堪萨斯州立大学（环境研究所和服装与纺织系）进行的，其目的是在人体穿着习惯的统计分析基础之上，对大量男女典型服装的克罗值进行评价。当这些测量是合适的，表2就是最新的数据，是原有工作的一个延伸，也是我们所期望的，凡是以现有各种类型建筑结构得到热传递系数的表格一样，可以得到关于克罗值的表格。

一定纺织品系统的外阻力首先和重要的是依赖于该纺织品每一层的厚度和孔隙率^[23]，所有制作衣服的一股纺织品材料，其孔隙率是有变化的，所以用中等厚度的纺织品来评价其每层的热传递阻力是极重要的^[24]，不同类型纺织纤维（毛、棉、丝、化纤、尼龙、玻璃）之间似乎未看出显著差别来^[25,26]，由于空气中湿度变化引起纺织品含湿率的变化对热阻力只有很小的影响^[27]。另一方面，如果纺织品果真变得“湿”了，也就是说如果在纤维和纱之间被水所占有，此时的热传递阻力则将会大大下降。

除了纺织品本身的热传递阻力和纺织品层次之间的空气层，同样是重要的以外，衣服的边缘和合体对克罗值也有一定影响，宽松品种的衣服，在空气层能产生一定的通风，可以产生“烟囱作用”。相同的情形能发生于具有“风箱作用”的类似身体运动。

对于大风凉而言,气流的动态压力就可通过衣服形成一个气流,这取决于衣服材料的透气性。这种通风的热损失可以与 I_{cl} 共同来看待。也就是说对于以通风为转移的不同服装,可以测定其克劳值。然而,在室内环境常遇到的是低风速,可以说由这种通风引起的热损失是可以忽略不计的。

表 2 所列的是涉及衣服本身的克劳值。

表 2 不同服装的 I_{cl} 和 f_{cl} 值

服装情况	I_{cl}	f_{cl}
裸体	0	1.0
短裤	0.1	1.0
典型的热带服装:		
短袖圆领衬衫,薄裤子,凉鞋	0.2—0.4	1.05
阿波罗耐用衣服(宇航员):		
轻便短袖棉内衣,短裤,棉袜子	0.35	1.05
轻便夏装:		
轻便长裤,短袖圆领衫	0.5	1.1
轻便工作服:		
运动员短裤,毛袜,棉 T 恤衫(圆领),	0.6	1.1
工作服,长下摆衬衫(圆领)		
美军“疲劳”人的衣着:		
轻便内衣,棉衬衣和长裤,有脚垫的袜子,战斗长筒靴	0.7	1.1
热带战斗服:		
与美军“疲劳”服装相同,但多加防风网衬衣和		
长裤,防风网裤	0.8	1.1
典型的工作服	1.0	1.15
典型的工作服加上棉大衣	1.5	1.15
轻便户外运动衣		
棉衬衣,长裤,T 恤衫,短裤,袜子,		
鞋和单层棉和涤纶府绸茄克	1.9	1.15
传统的重型欧洲工作服		
长裤和长袖棉内衣,衬衣,毛袜,鞋,包括长裤,茄克和背心的衣服 ¹²⁴	1.5	1.15—1.20
美军标准冷防护服		
棉内衣裤,毛和尼龙法兰绒衬衣,		
防风防水长裤和布面马海呢及有毛		
衬里的户外大衣及毛靴了	1.5—2.0	1.3—1.4
重型毛线衣服		
极地气候服	3—4	1.3—1.5

坐在或躺在有垫沙发上的人,其衣着的有效克劳值将比穿着相同站立体位的人要大,因此表中的数值都是指在一定状态下的数值。

正常服装的水蒸气弥散阻力多半是较低的,因此在热舒适时,人的汗液分泌属于正常蒸发。然而衣服的空隙阻力将影响身体的潮湿部分。因为身体大而潮湿区域本身能够增加

(非热值)不舒适,所以由盖吉等人^[10]提出的(身体)潮湿区域的上限应该说是合理的。为了对其特性进行计算,就需要对一系列典型服装的弥散阻力进行测量。已有人对一些通过服装系统水蒸气运动进行了调查研究^[122,181,182],但是这个过程是复杂的,需要进行更多的研究。

七、辐射热损失

犹如物理学上两个物体之间的情况,辐射热交换发生于人体和他周围环境之间。因此,根据史帝芬(Stefan)-波兹曼(Boltzmann)定律,从着装身体外表辐射损失的热可用下式表示:

$$R = A_{eff} \sigma (t_{cl} + 273)^4 - (t_{amb} + 273)^4 \quad (\text{kcal/h}) \quad (18)$$

式中 A_{eff} 为着装体有效辐射面积 (m^2),

σ 为着装体外表的弥散,

σ 为史帝芬-波兹曼常数 $= 5.67 \times 10^{-8} \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{K}^4)$

t_{amb} 为平均辐射温度 ($^\circ\text{C}$),指的是位于一定地点、一定体位、着一定服装的人的平均辐射温度,即黑色包绕环境的均匀温度与由实际包绕的人的辐射所产生的热损失是相同的。

然而,由于肢体的突起和凹角引起身体轮廓的不规则,身体与环境之间辐射热交换的几何学引起的一些困难,因为人体并不是每一部分都是突出的,以致于身体各部分之间产生内部热辐射,所以公式(18)中的区域将不是着装体的实际体表面积,而是减少了的体表面积,称之为有效辐射区。

$$A_{eff} = f_{eff} f_{cl} A_{bs} \quad (\text{m}^2) \quad (19)$$

式中 f_{eff} 为有效辐射区域系数,即着装体有效辐射区域与着装体体表面积之比;

f_{cl} 为着装体表面积与裸体体表面积的比值;

A_{bs} 为杜波依斯体表面积(裸体体表面积) (m^2)

在第五章中将叙述的本研究的广泛实验中确定了有效辐射区域系数值。坐着体位的有效辐射区域系数为0.696,站立体位为0.725,这些数值似乎不依赖于性别、体重、身高、杜波依斯体表面积和身体的结构(见表19和图36、图37)。因为两种体位所测得数值之差很小,所以以下有关辐射热损失的描述,对于两种体位均采用其平均值 $f_{eff} = 0.71$ 。

至于 f_{cl} 系数仅进行了有限的调查研究,尼尔申和彼得森(Pedersen)^[20]发现了欧洲重型工作服的数值,赫林顿(Herrington)^[12]则以侧面摄影方法发现了 f_{cl} 与衣服重量之间的关系。在本研究中确定了一定类型服装的 f_{cl} 值(见第五章)。表2包括了不同衣服的 f_{cl} 值,但仍需在这方面作更多的调查研究。

因人体皮肤的弥散接近于 $1.0^{[122,201]}$,绝大多数种类的衣服的弥散约是0.95,所以建议采用其平均值0.97,对于低温辐射、皮肤和衣服的弥散,并不依赖于颜色。

如果人被短波辐射(例如太阳或高温辐射源)所刺激,可以用关于 t_{amb} 的定义,从方程式(18)计算出总的辐射热的交换。为计算 t_{amb} 方便起见,需要皮肤和衣服反射系数。对于短波辐射,其反射系数则高度依赖于颜色,哈代(Hardy)等^[122,175]已测得反射系数,盖吉、拉普(Rapp)、哈代和史多维克(Stolwijk)^[16-18,182]刚进行了有关高温辐射的详细研究。

以 ϵ 、 σ 和 A_{eff} 代入方程(18),得出

$$R = 3.4 \times 10^{-8} A_{bs} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{amb} + 273)^4] \quad (\text{kcal/h}) \quad (18a)$$

应当提到,有时使用被兹吉“”等近来介绍的“有效辐射场 (RRF)”概念来说明辐射热交换是有其优点的。有效辐射场被解释为环境(假设其黑体辐射表面温度等于环境空气温度)之间的辐射(单位体表面积)热交换,换句话说,RRF 表示的是对人体的辐射能量(加或减),此外,这时的平均辐射温度等于空气温度。在一些情况下,应用这种概念简化计算,但是,由于本计算是在数字计算机上进行的,所以今后仍应使用精确的方程(18a)式。

八、对流热损失

着人体外表的对流热损失可用下列方程式表示:

$$Q = A_{\text{ex}} f_{\text{cl}} h_c (t_{\text{sk}} - t_a) \quad (\text{kcal/h}) \quad (20)$$

式中 h_c 是对流热交换系数 ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$), h_c 的数值,取决于对流的类型。对于低风速(“静止空气”)以自由对流的方式产生热交换,所以此时的 h_c 是温差 $(t_{\text{sk}} - t_a)$ 的函数。

对于对流散热,奈尔和坎得森利用人和暖体假人(坐位和立位)进行了广泛的研究。应用了立位和坐位的下述 h_c 公式显示出人体受试者和暖体假人之间的试验,获得很好的一致性。

$$h_c = 2.05 (t_{\text{sk}} - t_a)^{0.25} \quad (\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (21)$$

公式(21)的形式与对薄片分界层的自由对流的通用公式是相一致的。

$$Nu = \text{常数} (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (22)$$

关于强制对流,温斯洛(Winslow)、盖占和赫林^[10]对半斜躺着的受试者主要是向下风速的情况,调查研究了对流热交换系数,确立了以下公式:

$$h_c = 10.4 \sqrt{V} \quad (\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (23)$$

要求 $V < 12 \text{ m/s}$, 式中 V 是相对风速。

柯林(Colin)和赫达斯(Huddas)^[11]得到了坐位人体的结果,风的方向是朝着头部,其结果与方程(23)一致。方程(23)的形式同样与强制对流的通用公式一致^[12],

$$Nu = \text{常数} Re^m Pr^n \quad (24)$$

式中, Re 为雷诺的 m 的级数值为 0.5, Pr^n 采用 $(0.7)^{1/4}$ 。

尽管风的方向和身体的位置将对 h_c 有一定影响,但设想当风通过身体时,对坐位或立位的人体方程(23)大体上仍是合理的。对于活动的人(例如行走)必须注意到应用到方程(23)中的风速是相对风速,而风速对不活动的人,好像在研究中的身体那样将给予相同的对流热交换系数。

在每一种特殊情况下,人们必须在强制和自由对流控制中进行抉择。毫无疑问,在纯粹自由对流和纯粹强制对流之间存在转变区,此处温差和风速两者均影响热交换过程。没有交换公式,建议使用通用的定律以确定转变区域的对流热交换,即使用了大量的数字计算自由和强制对流的 h_c :

$$h_c = \begin{cases} 2.05 (t_{\text{sk}} - t_a)^{0.25} & \text{对 } 2.05 (t_{\text{sk}} - t_a)^{0.25} > 10.4 \sqrt{V} \\ 10.4 \sqrt{V} & \text{对 } 2.05 (t_{\text{sk}} - t_a)^{0.25} < 10.4 \sqrt{V} \end{cases} \quad (25)$$

在不等式的情况下,在单大多数实践中,自由对流的公式应当使用 $V < 0.1 \text{ m/s}$, 强制对流公式应使用 $V > 0.1 \text{ m/s}$, 这将对计算上可满足的要求。但因温差亦被包括进去,所以使用不等式方程(25),用数字计算机进行下一步的计算。

方程式(25)中对流热交换公式仅适用于海平面上的正常气压。第二章将讨论高、低气压

(可能是感兴趣的), 即高山、飞机和深层矿井对舒适范围的影响。

九、热平衡方程式

将以上得到的所有热损失项代入两个热平衡方程式 (5), 再除以 A_{sk} 可得出:

$$\begin{aligned} \frac{M}{A_{sk}} (1 - q) - 0.35 (1.02 t_a - 25.3 - t_{sk}) &= \frac{M_{sk}}{A_{sk}} \\ 0.0023 \frac{M}{A_{sk}} (44 - t_{sk}) - 0.0014 \frac{M}{A_{sk}} (34 - t_a) \\ &= \frac{t_a - t_{sk}}{0.18 t_{sk}} = 3.4 \times 10^{-4} f_{cl} [(t_a + 273)^4 - (t_{sk} + 273)^4] \\ &\quad - f_{cl} h_{r_2} (t_a - t_{sk}) \end{aligned} \quad (26)$$

第一节 热舒适的条件

稳定状态时热舒适的首要条件是具有满意的热平衡方程式 (26), 其必要性是为人的温度调节系统为目的的一种表达方式。保持恒定的体内温度, 在一定的活动水平、皮肤温和汗分泌似乎是影响热平衡的生理变量。对于具有一定衣服、环境和活动水平的人来说, 出现了皮肤温和汗分泌的一定组合, 所以热平衡方程式是满意的。人的温度调节系统十分有效, 因此可以在大幅度的环境变化中保持热平衡, 这与生理指标 (t_{sk} 和 E_{sk}) 的变动范围是一致的。

满意的热平衡方程式 (26) 距热舒适还有很大距离, 在可以保持热平衡的环境变动范围内, 仅有一个狭窄的热舒适范围。这与相应的是一个狭窄的平均皮肤温度 t_{sk} 和汗分泌范围。

以下是假以处于一定活动水平的人的热舒适状态, 即其平均皮肤温度 t_{sk} 和汗分泌 E_{sk} 必须在这个狭窄的范围之内。

$$a < t_{sk} < b \quad (27)$$

$$c < E_{sk} < d \quad (28)$$

a 和 b 、 c 和 d 的限值仅适用于「处」特殊活动水平的个体, 不等式 (27) 和 (28) 的满足是相对于特殊活动水平 (稳定状态) 的个体的热舒适状态。

不等式 (27) 的状态与几个早期的研究结果是一致的, 这些研究表明热舒适的感觉与平均皮肤温度 t_{sk} 有关。恰托顿特 (Clattonnet) 和卡本内克 (Cabanac) [24] 等进一步指出一些体内温度 t_a 大概还有脑部温度能影响热舒适的感觉。一定活动水平时所需要的体内温度应当处于狭窄的范围之内, 然而与不等式 (27) 和 (28) 是一致的, 因为一定活动水平的 E_{sk} 可以假想为 b 和 d 的函数。

不等式 (27) 和 (28) 所给出的条件, 仅对稳定状态是有效的, 环境突然地变化会发生如前节等所证实的特殊热感觉现象, 热的瞬间变化将在第二章里讨论。

不等式 (27) 和 (28) 表明处于一定活动水平稳定状态的、一定人的热舒适, 他的平均皮肤温度和他的汗蒸发必须处于标准限值之内, a 、 b 、 c 和 d 的限值可以随着活动水平和人的不同而改变。

在范格 [25] 的早期研究中, 找到了不同活动水平的受试者的平均皮肤温和汗分泌, 客观地表明了热舒适。受试者是大学生年龄的美国男性和女性。

图1表明的是平均皮肤温度是活动水平的函数。为保持热舒适，活动水平较高时，环境温度

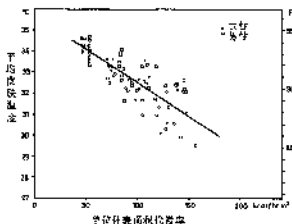


图1 处于热舒适的人的平均皮肤温度随着活动水平而改变

则较低。

处于热舒适的人的蒸发散热是随着活动水平而改变。为了保持热舒适，当活动水平较高时，环境温度是较低的。其函数关系示于图2。

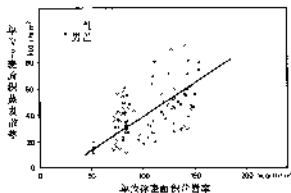


图2 蒸发散热是活动水平的函数

图2比图1有较多的点，故把麦克奈尔^[29]等人的工作也包括进来一并分析。图2是扣除弥散和潜在呼吸热损失以后的汗分泌。用皮肤温和活动水平（单位体表面积的内产热）之间以及汗分泌和活动水平之间的功能依赖关系，对处于热舒适的人体进行了回归分析。

$$\bar{t}_{sk} = 35.7 - 0.032 \frac{H}{A_{sk}} \quad (^\circ\text{C}) \quad (29)$$

$$\bar{E}_{sk} = 0.42 A_{sk} \left[\frac{H}{A_{sk}} - 50 \right] \quad (\text{kcal/h}) \quad (30)$$

可以看出，为了保持恒定的舒适，平均皮肤温度随着活动的增加而减少（如 $H/A_{sk} = 50 \text{ kcal/h}$ /