

室内气候

[英] D·A·麦金太尔 著

龙惟定 殷平 夏清 译

单寄平 校

上海科学技术出版社



室内气候

[英] D.A. 麦金太尔 著

龙惟定 殷平 夏清 译

单寄平 校



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是全面论述室内气候的专著。作者运用物理学、热学、生理学、心理学等理论方法对室内气候条件下人体的舒适感等一系列问题进行了精辟的分析,书中还收集了大量的实验数据和实验成果。主要内容包括:绪论;散热的机理;测量方法和测量仪器;温度调节生理学;热感觉;舒适感指标;现场调查;不舒适的实际状况,通风与空气质量;热应力和冷应力;温度和效能;舒适环境的技术条件。

本书可供从事暖通空调、建筑学、建筑物理、环境工程、劳动卫生、运动医学、生理学、心理学、人类工效学等方面的专业科技人员参考。

封面设计 苏二柱

Indoor Climate

D. A. McINTYRE

APPLIED SCIENCE PUBLISHERS LTD 1980

室 内 气 候

[英] D. A. 麦金太尔 著

龙惟定 殷平 夏清 译

单寄平 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 常熟市兴隆印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 330,000

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数:1—2,700

ISBN7-5323-0777-8/TU·38

定价: 5.70元

译 者 的 话

随着工业与科学技术的发展,室内气候和人体舒适方面的课题日益引起人们的关注。在建筑物室内保持一个良好舒适的环境可以使人精神愉快、精力集中,不仅对人的健康有益,而且可以提高工作效率、使人更富创造力。因此,维持舒适的室内气候不仅具有技术上的意义,而且具有社会意义和经济意义。另一方面,按照合适的标准维持舒适的室内气候对降低建筑物能耗也是很有意义的。从本世纪初开始,国外就有许多学者和工程师从事室内气候和人体舒适的研究。

本书是一本全面论述室内气候的专著。除了在理论上进行精辟的分析之外,还收集了大量的实验数据和实验成果,内容翔实、材料丰富。因此,只须通过这一本书便可全面地了解国外至七十年代末在室内气候研究方面的水平和动向。就译者所知,在论述室内气候和人体舒适的专著中,本书恐怕是最系统、最详尽的一本。

为了推动我国室内气候研究工作的开展和建筑设计水平的提高,我们利用业余时间将本书译出,以供暖通空调、建筑学、建筑物理、环境工程、劳动卫生、运动医学、生理学、心理学和人类工效学等专业的科研设计人员、大专院校师生以及从事劳动保护、军体训练、南极考察、服装研制、室内装饰等方面工作的专业人员、管理人员参考。

本书译者是上海城市建设学院龙惟定(前言,第一、二、三、四、五章),湖南大学殷平(第六、七、八、九章),上海交通大学夏清(第十、十一、十二章,附录)。全书经中国建筑科学研究院空气调节技术研究所单寄平悉心校阅。

因为室内气候涉及的专业面极广,是一门典型的交叉科学、边缘学科。我们几位译者都是从事暖通空调专业的教学科研工作的,因此书中误译或不当之处在所难免。欢迎各专业的读者们批评指正。

序 言

我开始研究室内环境及其对人的影响是在1968年。那时人们认识到六十年代所引进的新的建筑结构形式总是带来严重的环境控制方面的问题，结果使居住者感到不舒适。很清楚，当建筑设计师们在分析人类需求的现有信息时，对舒适的理解仍然存在着分歧。在六十年代的后五年，人们重新对热舒适发生了兴趣，后几年发表了大量的研究论文。同时对低级环境污染物可能引起有害影响的关心也日益增长。现在需要有关可能的危险性的正确定量数据，因为某些节能方法，例如减少通风量，可能会令人遗憾地使污染物浓度增加。

1968年，卡潘赫斯特的电学委员会研究中心建立了一个生命科学研究组。在伊恩·格里菲思(Ian Griffiths)作为心理学家参加进来的同一天，我被任命为物理学家。几年内我们以令人鼓舞的协作关系在一起研究了各种实验观测结果。

本书试图总结现在关于室内气候对人的影响的认识情况。重点论述热环境和空气品质；本书不论及工业公害，主要是研究住宅和办公室的环境。这一课题的许多方面尚未被完全认识。一部分问题将用直接进行研究的办法来解决；空气低湿度对舒适和健康的影响就是一个例子。另一部分问题将需要新的途径。我们还没有一种可靠的办法来对某个环境的可接受性进行估算和定量分析；小的温度偏差对研究成果的影响也还没有完全解决。这两类问题都有明显的经济意义，因为它们以经济效益抵销了环境控制方面的投资。

在本书酝酿过程之中得到许多人的帮助。首先必须感谢那些提供了本书所依据的基础理论的人们，以及成千上万在这项科学事业中忍受了不舒适的受试者们。我特别要感谢K.J. 科林斯博士、J.A. 克拉克博士、I.D. 格里菲思先生、M.A. 汉弗莱斯先生以及G. 拉特克里夫先生，他们阅读了手稿并提出很有价值的建议。琼·休斯小姐迅速、准确而又灵巧地打印出手稿。电学委员会研究中心支持了对舒适的研究并为本书的写作提供了许多方便。

符 号 表

A_{Du}	杜波依斯公式中的人体表面积	m^2
A_b	人体的投影面积	m^2
A_r	人体的有效辐射面积	m^2
b	热穿透系数	$J/s^{1/2} \cdot m^2 \cdot K$
C	单位面积的对流热损失	W/m^2
c	污染物的浓度	容积比例
E	辐照度	W/m^2
$E_{4\pi}$	平均球面辐照度	W/m^2
E	单位人体表面积的蒸发热损失	W/m^2
$E_{i,s}$	通过单位面积皮肤扩散引起的蒸发热损失	W/m^2
E_{max}	单位面积湿皮肤的最大蒸发热损失	W/m^2
E_{req}	单位面积热平衡所需的蒸发热损失	W/m^2
E_{res}	呼吸引起的蒸发热损失	W/m^2
E_{sh}	单位面积皮肤表面的总蒸发热损失	W/m^2
E_{sw}	单位面积规则的蒸发热损失	W/m^2
ET	有效温度	$^{\circ}C$
F	卡他系数	mJ/cm^2
F_{clo}	服装的热效率	无量纲
F_{ij}	形状系数	无量纲
f_{cl}	服装面积系数	无量纲
f_{eff}	有效辐射面积系数	无量纲
f_{pcl}	透过效率系数	无量纲
g	空气的含湿量	kg/kg
g	辐射响应比	无量纲
H	单位面积的净辐射热交换量	W/m^2
H	单位人体面积新陈代谢产热量	W/m^2
H_{sh}	单位皮肤表面积散热量	W/m^2
h	综合放热系数	$W/m^2 \cdot K$
h'	有效放热系数	$W/m^2 \cdot K$
h_c	对流放热系数	$W/m^2 \cdot K$
h_{cl}	成套服装的导热系数	$W/m^2 \cdot K$
h_e	蒸发放热系数	$W/m^2 \cdot 10^2 Pa$
h'_e	有效蒸发放热系数	$W/m^2 \cdot 10^2 Pa$
h_r	辐射放热系数	$W/m^2 \cdot K$
I	辐射强度	W/sr

I_{cl}	服装热阻	$m^2 \cdot K/W$
I_{clo}	以 clo 为单位的服装热阻	clo
I_{ola}	有效服装热阻	clo
	单位人体导热系数(核心到皮肤)	$W/m^2 \cdot K$
K	通过单位面积服装的传导热量	W/m^2
L	单位人体面积的热负荷	W/m^2
L	辐射率	$W/m^2 \cdot sr$
L_R	刘易斯关系	$K/10^2 Pa$
M	辐射发射率	W/m^2
M	单位人体面积新陈代谢自由能产热量	W/m^2
N	自辐射发射率	W/m^2
O_i	吸入空气的含氧量比例	无量纲
O_e	呼出空气的含氧量比例	无量纲
P_a	大气压	大气压
P_b	大气压	$10^2 Pa$
p_a	空气中的水蒸汽分压力	$10^2 Pa$
$p_{s,a}$	在 T_a °C 时的饱和水蒸汽压力	$10^2 Pa$
$p_{s,h}$	在 T_h °C 时的饱和水蒸汽压力	$10^2 Pa$
Q	单位面积的热发射量	W/m^2
Q	通风量	l/s
q	污染物发生量	l/s
R	单位面积的辐射热损失	W/m^2
R	辐射向量	W/m^2
R_s	单位面积的日射负荷	W/m^2
r	相关系数	无量纲
S	单位面积蓄热量	W/m^2
S_w	用当量热单位表示的排汗重量损失	W/m^2
T_a	空气温度	°C
T_{ar}	空气-辐射温度	°C
T_b	平均人体温度	°C
T_c	吊顶温度	°C
T_{cl}	穿衣服的人体表面温度	°C, K
T_{con}	接触温度	°C
T_{cr}	人体的核心温度	°C
T_{dp}	露点	°C
T_{env}	环境温度	°C
T_{eq}	当量温度	°C
T_f	壁温	°C
T_g	黑球温度	°C, K

T_h	平均卡他温度	°C
T_m	平均环境温度(时间平均)	°C
T_{nwb}	自然对流(不通风)湿球温度	°C
T_o	作用温度	°C
T_o	室外温度	°C
T_{pr}	平面辐射温度	°C, K
T_r	平均辐射温度	°C, K
T_{res}	合成温度	°C
T_s	表面温度	°C, K
T_{sk}	皮肤温度	°C, K
T_{ty}	鼓膜温度	°C
T_u	非采暖房间表面温度	°C
T_v	向量辐射温度	K(差值)
T_w	窗表面温度	°C
T_{wb}	呼吸湿球温度	°C
T_z	适中温度	°C
V	房间容积	l
V	通风量	l/s
v	风速	m/s
W	发湿量	kg/s
W	单位面积外部机械功	W/m
w	皮肤湿润度	无量纲
Y	温暖感反应(范围从1~7)	无量纲
α	吸收率	无量纲
α	方位角	度
β	仰角	度
γ	混合系数	无量纲
ε	发射率	无量纲
η	功的机械效率	无量纲
η_{sc}	排汗效率	无量纲
λ	汽化潜热	J/kg
λ	波长	μm
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数	$5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$
τ	忍耐时间	
Φ	辐射通量	W/m ²
ϕ	相对湿度(比值)	无量纲
ω	立体角	sr

符号的选择系根据布莱(Bligh)和约翰逊(Johnson)(1973)的推荐。

目 录

译者的话

序言

符号表

第一章 绪论1

第二章 散热机理4

- 2.1 辐射.....4
 - 2.1.1 热辐射的发射.....5
 - 2.1.2 辐射率.....5
 - 2.1.3 源强度.....6
- 2.2 辐射能量交换.....7
- 2.3 辐射场.....8
 - 2.3.1 辐射温度.....8
 - 2.3.2 辐照度.....9
 - 2.3.3 辐射率体和辐照体.....10
 - 2.3.4 平均辐射温度.....10
 - 2.3.5 辐射向量.....11
- 2.4 辐射场的计算.....12
- 2.5 辐射的性质.....15
 - 2.5.1 发射率.....15
 - 2.5.2 日射吸收率.....15
 - 2.5.3 人体的辐射几何关系.....16
- 2.6 辐射换热概要.....18
- 2.7 对流.....18
- 2.8 受迫对流.....19
 - 2.8.1 整个人体的热损失.....19
 - 2.8.2 局部热损失.....19
 - 2.8.3 空气流速的脉动.....20
- 2.9 自然对流.....20
- 2.10 蒸发热损失22
 - 2.10.1 汽化热22
 - 2.10.2 湿皮肤的蒸发22
 - 2.10.3 皮肤湿润度23
- 2.11 不易觉察到的水分损失23
 - 2.11.1 通过皮肤的扩散24

2.11.2 呼吸散热24

2.12 蓄热24

2.13 服装25

2.13.1 服装的保温25

2.13.2 透湿性27

2.14 总结28

第三章 测量方法和测量仪器29

3.1 总则.....29

3.2 空气温度.....29

3.3 湿度.....30

3.3.1 干、湿球温度计30

3.3.2 氯化锂传感器31

3.3.3 露点湿度计.....32

3.3.4 氧化铝传感器32

3.3.5 毛发湿度计.....32

3.4 平均辐射温度.....32

3.4.1 黑球温度计.....33

3.4.2 热球辐射仪.....36

3.4.3 屏蔽式黑球温度计.....36

3.5 空气流速.....37

3.5.1 气流显示.....37

3.5.2 热线风速计.....38

3.5.3 热球风速仪.....39

3.5.4 卡他温度计.....39

3.5.5 数据整理.....41

3.6 定向辐射.....42

3.6.1 辐射向量.....42

3.6.2 辐照度和平面辐射温度.....42

3.6.3 莫尔热电堆.....43

3.7 皮肤温度.....44

3.8 综合性仪器.....45

第四章 温度调节生理学..... 47

4.1 新陈代谢产生的热量.....47

4.1.1 产热量.....47

4.1.2 外部功	48	6.4 战前的英国指标	92
4.1.3 新陈代谢随温度的变化	50	6.4.1 卡他冷却能力	92
4.2 体温	51	6.4.2 拟人器和当量温度	93
4.2.1 核心温度	51	6.5 范格舒适方程	95
4.2.2 皮肤温度	52	6.5.1 适舒条件	95
4.3 皮肤的导热	53	6.5.2 预测平均反应	97
4.4 汗液分泌	54	6.6 标准有效温度	99
4.4.1 机理	54	6.7 主观温度	101
4.4.2 情绪性出汗	55	6.8 指标的选择	104
4.5 人体对环境温度的响应	56		
4.6 温度调节	58	第七章 现场调查	106
4.7 对局部刺激的反应	60	7.1 概述	106
4.8 食物摄取	61	7.2 全面调查的内容	106
		7.3 通过观察进行研究	108
第五章 热感觉	63	7.4 因果关系	109
5.1 局部温度感觉	63	7.5 对沃森大楼的调查	110
5.1.1 热感受器	63	7.6 现场调查比较	112
5.1.2 求面积和	65	7.7 室外气候的影响	114
5.1.3 适应	65		
5.1.4 局部灵敏度	67	第八章 不舒适的实际状况	116
5.2 疼痛	67	8.1 辐射采暖和舒适感	116
5.3 热感和生理状态	68	8.2 顶部辐射	117
5.4 热舒适感	69	8.2.1 顶棚采暖和舒适	117
5.5 瞬变状况	70	8.2.2 在设计中的应用	119
5.6 运动	71	8.2.3 在照明辐射中的应用	121
5.7 热感觉的标度	71	8.3 辐射冷却	121
5.7.1 七点标度	71	8.4 辐射吹风感	122
5.7.2 数据的分析和表示方法	74	8.5 冷地板和脚部寒冷	124
5.7.3 暴露时间	76	8.6 地板采暖	126
5.7.4 排列和对比作用	76	8.7 赤脚	126
5.7.5 非热因素	77	8.8 温度变化	128
5.7.6 变化的温度	78	8.9 热厌倦	129
5.7.7 可靠性和有效性	79	8.10 空气流动	130
5.8 对最佳温度的直接确定	81	8.11 吹风感	131
5.9 其它评价方法	82	8.12 小结	134
5.10 舒适和不舒适	83		
5.11 舒适温度范围	84	第九章 通风与空气品质	135
第六章 舒适感指标	87	9.1 通风的理由	135
6.1 概述	87	9.2 稀释方程	136
6.2 有效温度	87	9.3 污染物	137
6.3 合成温度	90	9.3.1 阈值	137
		9.3.2 二氧化碳	138

9.3.3 一氧化碳.....	139	10.7 烧伤	176
9.3.4 臭氧.....	140	10.8 冷应力	178
9.3.5 烟草的烟气.....	141	10.8.1 体温过低	178
9.3.6 甲醛.....	142	10.8.2 寒冷气候中的原始人	180
9.3.7 氦.....	142	10.8.3 个人的差别	181
9.4 气味.....	144	10.9 对寒冷环境的适应	181
9.4.1 来源.....	144	10.9.1 对环境的全面适应	181
9.4.2 气味控制.....	146	10.9.2 局部适应	182
9.5 湿度.....	147	10.10 风冷却指数.....	183
9.5.1 主观反应.....	147		
9.5.2 湿冷.....	149	第十一章 温度和效能	184
9.5.3 静电效应.....	149	11.1 早期的现场调查	184
9.5.4 湿度与健康.....	150	11.2 影响工作效能的因素	185
9.5.5 高湿度.....	151	11.3 炎热环境中的效能	187
9.5.6 利用通风控制湿度.....	152	11.4 热带疲劳	190
9.6 空气的离子化.....	154	11.5 温度与学习	190
9.7 粒子.....	155	11.5.1 对教室的调查	191
9.7.1 物理特性.....	155	11.5.2 对实验室的调查	191
9.7.2 对健康的影响.....	157	11.6 对工厂的调查	193
9.7.3 过敏症.....	158	11.7 对办公室的调查	193
第十章 热应力和冷应力	160	11.8 冷应力作用下手工操作效能	194
10.1 热病的发病率	160	11.8.1 麻木	194
10.2 热失调	161	11.8.2 手的灵巧性	195
10.2.1 中暑	161	11.9 寒冷的综合影响	195
10.2.2 热昏厥	162	11.10 讨论.....	196
10.2.3 汗闭性热衰竭	162	第十二章 舒适环境的技术条件	197
10.2.4 热衰竭——缺盐	162	12.1 概述	197
10.2.5 热浮肿	163	12.2 主观温度	197
10.3 热应力指数	163	12.3 舒适范围	200
10.3.1 指数的功能	163	12.4 局部不舒适	201
10.3.2 预测的四小时排汗量(P4SR).....	164	12.4.1 辐射吹风感	201
10.3.3 热应力指数(HSI)	166	12.4.2 辐射的不均匀性	202
10.3.4 热应力指标(ITS)	167	12.4.3 地板温度	202
10.3.5 湿球黑球温度计指数(WBGT).....	169	12.5 空气流动	203
10.3.6 温度湿度指数(THI)	170	12.6 湿度	203
10.3.7 预测模型	170	12.7 通风	203
10.4 蓄热限制热暴露	171	12.8 结束语	204
10.4.1 牛津指数	171	附录1 人体的辐射形状系数	204
10.4.2 生理热暴露极限(PHEL)	172	附录2 范格方程的概述	207
10.5 热应力指数的应用和选择	172	2.1 热平衡方程的组成项.....	207
10.6 对环境的适应	175		

2.2 舒适方程.....	207	附录 4 标准有效温度方程的表述	210
2.3 皮肤湿润度引起的不舒适.....	208	4.1 有效显热放热系数 h'	210
2.4 预测平均热反应.....	208	4.2 有效蒸发放热系数 h'	211
附录 3 温度调节的两节点模型	209	4.3 热平衡方程.....	211

第一章 绪 论

本书的目的是要了解室内气候对人的影响。“室内气候”这个术语包括那些影响舒适、健康和安全的热环境和空气品质等方面的内容。这一术语也包括热应力和冷应力的影响，因为这些影响在某些工业生产中碰到过，甚至在室内极端气候的条件下也会遇到。空气品质一章所论述的仅是分布广泛的污染物，而不涉及工业生产过程中特殊的污染物。只有具备足够的基本资料才能验证和理解那些实际的论述和建议。有关热辐射场的一节收进了相当详细的论述，因为在成书之前这些论述尚未发表过。

现在对室内气候标准已比过去规定得更为详细，且这些规定涉及到了更广范围的物理变量。之所以有这一进展是由许多原因造成的。流行病学研究的进展使我们警觉到低水平环境污染物的潜在危险和环境对健康可能的有害影响。同时，日益增长的能耗促使人们采取一系列的节能对策，包括次优温度控制和减少新风通风量。在实现这些措施之前，有必要了解它们对建筑物中居住者的健康、舒适和行为的影响。建筑设备工程师采用的技术和建筑物结构的一些改进在较大程度上依赖于人工照明和通风，意味着室内气候现在成为工程师的全部职责。所有的各个方面都是人为控制的，即使对难以预测的气候变化或居住者个人的活动也都不予遗漏。因为工程师对所有的环境变量都负有责任，所以他需要可以使自己对最优控制整定值作出有根据的判断的信息。

没有一幢建筑物的建造是可以不顾造价的，且各建筑物都体现了在对抗性需求之间的某种折衷。按照人类的观点，非最优的环境可能是便宜的，但是其效益应放到相对于设备和运行费用的潜在节约的成本-收益关系中去。温度下降带来的费用节约和不舒适感增加所带来的工作效率下降之间的关系使人们有可能在纯经济学基础上决定温度水平。尽管很少在这种原始的基础上作出决定，但在对环境系统所要求的控制程度可以作出决定之前，对非最优环境作用的某些定量估计则是必不可少的。

对室内气候影响人的舒适和健康的资料的这些需求导致在过去约十年时间里研究成果大量增加。可以说，美国采暖通风工程师学会(ASHVE)的匹兹堡实验室1919年创建之初便是以室内气候影响的研究作为开端的。空调工业的迅速发展急需有关舒适标准的资料，特别是有关空气温度和湿度的相互作用对热感觉影响的资料。业已进行了一系列广泛的实验，从而得到人所熟知的有效温度标度。在英国，贝德福德(Bedford)继续了由工业疲劳研究会(Industrial Fatigue Board)所开创的研究工作，他对工厂里热环境所做的广泛调查得出了当量温度标度。

在二次世界大战期间，研究工作大部分集中于军队中的热病防止方面。战后一段时期系统阐述的大部分热应力指标至今仍被普遍采用，在这期间也引进了心理学的研究方法，并首先应用于高温对作业影响的研究。六十年代中期，对舒适研究的兴趣在美国得到了恢复。当时美国采暖通风工程师学会的环境实验室已搬到它现在所在的堪萨斯州立大学的新址，并主要进行了对空气温度与湿度的关系及二者对热感觉影响的再评价工作。在堪萨斯

州立大学的这一实验及其它一些实验提供了有关舒适条件的数据，这些数据形成了范格(Fanger)舒适方程的基础。在将所得到的有关舒适的资料与人体散热的物理方程相结合之后，范格提出了一个综合性的舒适方程，这一方程将环境的物理变量与诸如新陈代谢率及服装隔热之类的个人变量联系在一起。七十年代初，人们对环境变量对于散热和整个人体温暖感的作用有了正确的理解。从那时起，旨在认识人体舒适的研究工作的规模便日益扩大。研究的领域从均匀环境中的热感觉问题扩展到涉及整个的热刺激范围。不同学科的研究工作也日益紧密地结合。

只要回顾过去五十年左右的研究工作，就能很快地明白，有三种用以研究人对热环境响应的主要方法，我们可将之分成物理学的、生理学的和心理学的。令人遗憾的是，直到最近几年，这三种研究方法彼此之间仍然是完全无关的。如果应用其它学科的现成知识，则许多实验就可以得到改善。

物理学方法将人视为一部热发动机，在其内部产生热量，但又必须以同样速率散热以便保持热平衡。在处理各种环境变量对散热的影响和在构成舒适与热应力指标时，物理方法是很有效的。给出人体产热速率和皮肤温度，用传热机理的知识就可以建立起人体的散热方程。这一方法业已受到工程师们的欢迎，其中最成熟的成果是范格的舒适方程。纯物理方法并不考虑人体本身对热或冷的反应，且不论及不舒适的感觉。

生理学家对人体的功能感兴趣，而热生理学是研究人体对热和冷的反应机理的。其目的在于认识包括诸如血管收缩和出汗这一类反应的机理。这并不是一件容易的事，因为人体乃是一个十分复杂的系统，它有许多冗余和相互影响的控制系统。例如，汗液分泌的速率系取决于人体深部的体温、皮肤平均温度、运动量、局部皮肤温度及其他一些因素。区别各种刺激的作用是一个棘手的科学难题，而实验经常要求对人体的各种热输入进行单独处理。因此，生理学实验便涉及到一些和日常生活无明显关系的异乎寻常情况的研究对象。

心理学家关心的是人的感觉。对某一给定的热刺激，人的感觉究竟如何呢？任何定量描述不舒适程度或冷暖感觉的尝试都需借助于心理学方法。感觉是不能直接量测的，而必须通过观察有关的反应来加以推论。这就需要通过某个间接的途径来实现，从而促使心理学分裂成如此之多的不同学派。神经生理学家通过量测各个神经末梢对某一热刺激的反应来详细地研究感觉。心理生理学家借助量测诸如心跳速率或皮肤电阻之类的反应以观察情绪和感觉之间的相互关系。心理物理学家通过要求受试者用数值分度来评定感觉的强度以试图使感觉量化，于是反应便与物理刺激有关。行为心理学家不相信受试者的判断能力而宁可去观察继刺激出现之后的行为变化。就温度而言，还将涉及在正常环境中对人的非整体性行为受温度作用的观察，或在实验室里进行这种形式的行为表现试验。许多热舒适研究系直接采用等级分度，要求受试者将其热感觉用热分度加以评定；著名的贝德福德分度就是最早的感觉分度之一。

本书的第二、四、五章总结了物理学、生理学 and 心理学对我们了解热环境作用所提供的帮助。一个完整的认识需要综合这三门学科去研究环境温度、生理状况和感觉之间的相互作用。

人的热状态受到六个基本变量的影响，近年来研究的目的之一是想用一个数字来描述环境的作用。近年来提出了许多这类指标，对其中一些重要的指标在第六章和第十章中做了较详尽的阐述，经过理解之后就可以应用到合适的情况中去。必须认识到尚无“最好”

的指标。每一指标都是为了解答某一特定实际情况而产生的，但对其他情况则可能全然不适用。曾经有人试图得出通用指标，但所得结果的复杂性限制了它们的应用。

这些指标大多是根据实验室研究得出的。第七章叙述了对正常生活的人的舒适的现场观察结果，并讨论了如何用这些观察结果修正这些指标的一般适用范围。第八章论及一些将会引起不舒适的特殊问题，如吹风和冷脚(cold foot)问题，并为避免这些问题提出了一些实际建议。第九章涉及通风换气和空气品质；这是一个日益重要的题目，因为减少通风换气的趋势将会引起以前被忽视的污染物浓度的增加。

本书的大部分是论及舒适或轻微不舒适条件的。第十章涉及更为极端的环境，在这种环境里，热或冷可能会对健康和安全造成危险。环境研究可以影响人在工作时的工作效能。第十一章回顾了许多实验的结果，进行这些实验乃是试图认识热和冷对工作效能的作用。本书最后总结了一些原则，在实际情况中只要遵循这些原则就可以保证得到一个舒适的环境。

第二章 散热机理

本章将论及人体热散失的途径。产生这一热量的新陈代谢作用和使体内温度和皮肤温度保持在适当水平上的人体控制机理将在其他章节中讨论。

人在体内产生热量,又必须以和产热同样的平均速率散热。在正常条件下,人体表面比周围环境要温暖一些,其热量主要通过三种途径散失:与周围空气的对流换热、对周围表面的辐射及水份的蒸发。水份的蒸发提供了这样一种控制体温的有效方法,即使当空气温度高于血液温度时也能使身体散出热量。

无论人这种动物的本质如何,都不能逃脱物理法则的支配,而决定人体散热的定律是和那些决定任何热物体散热的定律一样的。传热学的研究课题在技术上是很重要的,关于这些课题有着相当多的学问,这些学问在这一课题的一些权威性的教科书中诸如麦克亚当斯(McAdams)(1954)和克瑞斯(Kreith)(1958)等已作了综合论述。鉴于人是一个有生命的体系这一事实,使对人体进行量测成为一件很复杂的事情,它对环境的任何一点变化都会作出有意识和无意识的反应,这就很难把量测结果归纳成姿势和活动的标准状态。即使可以得到这种标准状态,也会因为它们并不是典型的自然行为而有理由遭到反对。

产热和散热的速率是因人而异的。可以采用单位面积的失热量来减少这种差异。对人体总表面积的量测是不容易的,通常可用下式来估算:

$$A_{D_b} = 0.202W^{0.425}H^{0.725} \quad (2.1)$$

式中的 W 是体重(kg), H 是身高(m)。 A_{D_b} 是表面积(m^2),称为“杜波伊斯(DuBois)面积”,这是以创造者杜波伊斯(1915)的名字命名的。后来,冯·格兰(Van Gran)和维因汉姆(Wyndham)(1964)的著作指出:上述公式低估了实际的表面积。但是,只要始终使用杜波伊斯面积,这一问题就并不严重,因为任何系统误差都被抵销掉了。

2.1 辐 射

来自太阳或发光火焰的强烈热辐射是非常容易被感觉出的。人体对环境的正常辐射散热是不能直接感觉到的,但这并非不重要;在正常的室内条件下,人以对流方式向空气的散热和以辐射方式向周围表面所散出的热量是大致相等的。当人坐在冷窗户附近时,辐射散热就变得很显著,并感觉到好象有一种“辐射吹风感”。(radiation-draught)。

温度在绝对零度以上的一切物体都发出热辐射。热辐射是电磁辐射连续光谱的一部分,这一频谱分布从短波端的 X 射线到长波端的无线电波。各种物理过程都可能产生电磁辐射;热辐射是由发射体的分子振动产生的。

发射辐射的物体也吸收辐射。因此,除了良好的反射体或完全处于绝对零度温度以下的系统之外,所有的物体都处于与其周围环境进行的辐射能量交换之中。这便引起从较热的物体到较凉的物体的净能通量。如果所有物体都处于同一温度之下,净能通量为零,但能量

的发射和吸收仍然是存在的。忽略这一差别就容易引起错误，特别是在辐射的量测之中。不幸而又奇怪的是，对经典物理学的这一基础部分，不同的作者所采用的术语并不是一致的。对同一物理量用了不同的术语来描述，而更糟糕的是，同一个词可以被用来表示不同的量。本书采用发表在英国标准 (BS) 4727 中的术语，该标准提供了一组一致的、含义明确的术语。

2.1.1 热辐射的发射

物体所能发射的最大能量应服从于热力学定律。斯蒂芬-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 方程表明这一能量是温度的函数，即

$$N_{\max} = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

式中， N (W/m^2) 是单位表面积发射的辐射能，严格地讲它应被称为自辐射发射率 (self-radiant exitance)。 σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)，而 T 是表面的绝对温度 (K)。根据式 (2.2)，发出辐射的物体被称为黑体，它是辐射的理想发射体；而正如我们将要看到的，它也是一个理想的吸收体。

随着物体温度的升高，其所发射的辐射无论在性质上和数量上都有所改变。随着发射体温度的升高，峰值波长均匀地缩短。在 6000K，即太阳的表面温度之下，峰值波长为 $0.5 \mu\text{m}$ ，它也相应于眼睛对光最敏感的波长。按维恩 (Wien) 定律，峰值能量出现时的波长 λ 为：

$$\lambda = 2880/T,$$

式中的 T (K) 是发射体温度。

表 2.1 热辐射发射的百分分布

辐射源	T(K)	与波长所对应的能量百分率			
		5	25	75	95
太阳	6000	0.22	0.48	1.03	2.05
钨丝红外灯	2000	0.6	1.3	2.8	5.6
辐射散热器	1100	1.2	2.6	5.6	11.2
平板散热器	350	3.7	8.3	17.7	35
人	300	4.3	9.7	20.7	41
(λT)	T	1300	2900	6200	12300

本表给出了物体在各发射能量百分率下的波长。对于温度为 T (K) 的任意黑体辐射源，可由最后一行求出其波长。波长 λ_{\max} 处为所发射的单位波长的峰值能量，接近于 25%。

表面温度约为 300K 的人体所辐射的波长较长，峰值能量出现在 $9.5 \mu\text{m}$ 处。峰值非常平坦；上下百分之五分别为 $4.3 \mu\text{m}$ 和 $41 \mu\text{m}$ 。表 2.1 列出了不同源温度的辐射分布。

2.1.2 辐射率

离开某一表面的辐射在所有方向上不一定是均匀的。在某一给定方向上的辐射量用辐射率 L 来表征。辐射率是离开单位面积表面的辐射通量，由测量单位立体角内的垂直光束而得。辐射率大致相当于照明理论中的照度 (亮度)。某一表面的亮度通常是随该表面的视