

普通高等院校建筑环境与能源应用工程专业系列教材

JIANZHU WULI



# 建筑物理

杨柳 朱新荣 刘大龙 张毅 编著

中国建材工业出版社



718180510

### 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑物理/杨柳等编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2014. 3  
普通高等院校建筑环境与能源应用工程专业系列教材  
ISBN 978-7-5160-0681-8

I. ①建… II. ①杨… III. ①建筑物理学-高等学校-教材 IV. ①TU11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 298216 号

### 内 容 简 介

本教材主要阐述建筑中的热、光、声等物理现象, 建筑材料、围护结构的热工学、光学和声学特性, 以及获得良好热、光、声环境的设计原理和方法。本书注重与现行设计标准规范的衔接, 参考了全国注册建筑师的考试大纲以及最新的绿色建筑相关标准, 将建筑节能的基本原理、设计策略和方法贯穿于教材中。

### 建筑物理

杨 柳 朱新荣 刘大龙 张 毅 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 24

字 数: 598 千字

版 次: 2014 年 3 月第 1 版

印 次: 2014 年 3 月第 1 次

定 价: 59.00 元

本社网址: [www.jcbs.com.cn](http://www.jcbs.com.cn) 微信公众号: zjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

建筑首先需要满足人的使用需求,因而人的生理需求便成为评价建筑物理环境性能优劣的最基本的标准之一。建筑环境中影响人的生理需求的要素主要包括因热感觉需求而产生的热环境,因听觉需求而产生的声环境和因视觉需求而产生的光环境,它们统称为建筑物理环境。形成适宜的建筑物理环境需要建筑设计人员掌握声、光、热环境基本的建筑物理知识,并从规划布局、空间设计、材料选择、构造设计甚至施工管理等多个方面对建筑物理环境问题加以考虑,而且还要兼顾节约能源和保护自然生态环境的目的。

建筑方案一旦建成,就会形成特定的室内物理环境,如果不仔细考虑建筑物理环境设计,其设计的建筑很可能会产生诸如室内过热、潮湿发霉、采光不足、噪声干扰等影响人们生活和工作环境缺陷。

本书主要阐述建筑中的热、光、声等物理现象,建筑材料及围护结构的热工学、光学和声学特性,以及获得良好热、光、声环境的设计原理和方法,是学习创造舒适、节能建筑环境不可缺少的专业基础课程教材。

全书分为建筑热工学、建筑光学和建筑声学三个相对独立的组成部分。在编写过程中,汲取了目前已出版各类建筑物理教材的优点,并根据建筑学专业的教学特点以及学生的接受能力,对书籍中涉及的知识点进行了合理的组织和编排,使学生能够由浅入深、循序渐进地掌握相关内容;本书引入了国内外文献中大量的优秀图表替代文字阐述,使基本概念和公式变得简单易懂,增加了内容的可读性。除此之外,本书特别注重与现行设计标准和规范的衔接,参考了全国注册建筑师的考试大纲以及最新的建筑节能及绿色建筑相关标准,将建筑节能和绿色建筑的基本原理、设计策略和方法贯穿于本书的内容之中。

本书由杨柳主编。其中,建筑热工学部分为西安建筑科技大学杨柳、朱新荣和淮海工学院张毅编写;建筑光学部分由朱新荣编写;建筑声学部分由刘大龙编写。在本书编写过程中,西安建筑科技大学建筑技术科学专业硕士研究生徐菁、李珊珊、宋冰、白鲁建、何海、代语、李彬、李程为本书绘制了大量的图表,并在书稿的编排和校对方面做出了积极的贡献,在此表示衷心的感谢。

编者

2014年1月



# 中国建材工业出版社

## China Building Materials Press

### 我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

**编辑部**

010-88385207

**图书广告**

010-68361706

**出版咨询**

010-68343948

**图书销售**

010-88386906

**设计业务**

010-88376510转1008

邮箱: [jccbs-zbs@163.com](mailto:jccbs-zbs@163.com)

网址: [www.jccbs.com.cn](http://www.jccbs.com.cn)

## 发展出版传媒 服务经济建设

## 传播科技进步 满足社会需求

(版权所有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

# 目 录

<b>第一篇 建筑热工学</b> .....	1
<b>第 1 章 建筑热工学基本知识</b> .....	2
1.1 室内热湿环境 .....	2
1.2 室外热湿环境 .....	9
1.3 建筑围护结构的基本传热方式 .....	15
本章小结 .....	23
思考题 .....	24
<b>第 2 章 建筑围护结构的传热计算与应用</b> .....	25
2.1 稳定传热 .....	26
2.2 稳定传热的应用 .....	34
2.3 周期性不稳定传热 .....	36
2.4 周期性不稳定传热的应用 .....	46
本章小结 .....	53
思考题 .....	53
<b>第 3 章 建筑保温设计</b> .....	54
3.1 建筑保温设计策略 .....	54
3.2 不透明围护结构的保温与节能 .....	60
3.3 透明围护结构的保温与节能 .....	72
3.4 被动式太阳能利用设计 .....	75
本章小结 .....	82
思考题 .....	82
<b>第 4 章 建筑围护结构的传湿及防潮</b> .....	83
4.1 建筑围护结构的传湿 .....	83
4.2 建筑围护结构的防潮 .....	86
4.3 夏季结露与防止措施 .....	89
本章小结 .....	93
思考题 .....	93
<b>第 5 章 建筑防热设计</b> .....	94
5.1 热气候特征与防热途径 .....	94
5.2 减弱室外热作用 .....	98
5.3 围护结构的隔热设计 .....	101
5.4 窗口遮阳设计 .....	110

5.5	自然通风设计 .....	117
5.6	利用自然能源隔热降温 .....	125
5.7	空调建筑节能设计 .....	128
	本章小结 .....	131
	思考题 .....	131
<b>第6章</b>	<b>建筑日照</b> .....	<b>132</b>
6.1	日照的基本原理 .....	132
6.2	棒影图的原理及其应用 .....	137
	本章小结 .....	144
	思考题 .....	144
<b>第二篇</b>	<b>建筑光学</b> .....	<b>145</b>
<b>第1章</b>	<b>建筑光环境基本知识</b> .....	<b>146</b>
1.1	光与视觉 .....	146
1.2	光的度量 .....	150
1.3	光与建筑材料 .....	156
1.4	可见度及其影响因素 .....	159
1.5	光与颜色 .....	164
	本章小结 .....	172
	思考题 .....	172
<b>第2章</b>	<b>建筑的自然采光设计</b> .....	<b>174</b>
2.1	光气候及光气候分区 .....	174
2.2	窗洞口 .....	182
2.3	自然采光设计 .....	198
2.4	采光计算 .....	203
	本章小结 .....	206
	思考题 .....	206
<b>第3章</b>	<b>建筑照明</b> .....	<b>208</b>
3.1	电光源 .....	208
3.2	灯具 .....	218
3.3	室内工作照明设计 .....	225
3.4	环境照明设计 .....	236
3.5	绿色照明 .....	250
	本章小结 .....	252
	思考题 .....	252
<b>第4章</b>	<b>建筑光环境设计举例</b> .....	<b>254</b>
4.1	教学楼采光设计举例 .....	254
4.2	美术馆采光设计举例 .....	258
4.3	学校教室照明设计举例 .....	263
4.4	商店照明设计举例 .....	267

本章小结	271
思考题	272
<b>第三篇 建筑声学</b>	<b>273</b>
<b>第1章 建筑声环境基础</b>	<b>274</b>
1.1 建筑声环境概述	274
1.2 声音的基本知识	279
1.3 声音的计量	282
1.4 人的主观听觉特性	285
本章小结	289
思考题	289
<b>第2章 建筑声环境设计原理</b>	<b>290</b>
2.1 室内声场	290
2.2 室内声音的传播规律	292
2.3 混响时间	293
本章小结	296
思考题	296
<b>第3章 建筑的吸声和隔声</b>	<b>297</b>
3.1 材料(结构)吸声性能的度量	297
3.2 吸声材料	298
3.3 吸声结构	301
3.4 建筑隔声量	308
3.5 墙体的隔声	311
3.6 隔声门窗	316
本章小结	317
思考题	317
<b>第4章 各类厅堂的声环境设计</b>	<b>318</b>
4.1 厅堂音质设计指标	318
4.2 厅堂音质设计	320
4.3 音乐厅的声环境设计	329
4.4 多功能剧场的声环境设计	332
4.5 会议厅的声环境设计	334
本章小结	336
思考题	336
<b>第5章 噪声控制技术</b>	<b>337</b>
5.1 噪声评价方法	337
5.2 噪声的允许标准	340
5.3 噪声控制的方法	346
5.4 建筑中的吸声降噪	348
5.5 建筑隔声	351



179	本章小结.....	356
179	思考题.....	356
179	附录.....	357
179	参考文献.....	374
179	.....	1.1
179	.....	1.2
179	.....	1.3
179	.....	1.4
179	.....	1.5
179	.....	1.6
179	.....	1.7
179	.....	1.8
179	.....	1.9
179	.....	1.10
179	.....	1.11
179	.....	1.12
179	.....	1.13
179	.....	1.14
179	.....	1.15
179	.....	1.16
179	.....	1.17
179	.....	1.18
179	.....	1.19
179	.....	1.20
179	.....	1.21
179	.....	1.22
179	.....	1.23
179	.....	1.24
179	.....	1.25
179	.....	1.26
179	.....	1.27
179	.....	1.28
179	.....	1.29
179	.....	1.30
179	.....	1.31
179	.....	1.32
179	.....	1.33
179	.....	1.34
179	.....	1.35
179	.....	1.36
179	.....	1.37
179	.....	1.38
179	.....	1.39
179	.....	1.40
179	.....	1.41
179	.....	1.42
179	.....	1.43
179	.....	1.44
179	.....	1.45
179	.....	1.46
179	.....	1.47
179	.....	1.48
179	.....	1.49
179	.....	1.50
179	.....	1.51
179	.....	1.52
179	.....	1.53
179	.....	1.54
179	.....	1.55
179	.....	1.56
179	.....	1.57
179	.....	1.58
179	.....	1.59
179	.....	1.60
179	.....	1.61
179	.....	1.62
179	.....	1.63
179	.....	1.64
179	.....	1.65
179	.....	1.66
179	.....	1.67
179	.....	1.68
179	.....	1.69
179	.....	1.70
179	.....	1.71
179	.....	1.72
179	.....	1.73
179	.....	1.74
179	.....	1.75
179	.....	1.76
179	.....	1.77
179	.....	1.78
179	.....	1.79
179	.....	1.80
179	.....	1.81
179	.....	1.82
179	.....	1.83
179	.....	1.84
179	.....	1.85
179	.....	1.86
179	.....	1.87
179	.....	1.88
179	.....	1.89
179	.....	1.90
179	.....	1.91
179	.....	1.92
179	.....	1.93
179	.....	1.94
179	.....	1.95
179	.....	1.96
179	.....	1.97
179	.....	1.98
179	.....	1.99
179	.....	2.00

# 第一篇 建筑热工学

建筑物常年经受室内外各种热湿环境因子的作用，属于室外的因素如太阳辐射、空气的温度和湿度、风、雨雪等，一般统称为“室外热湿作用”；属于室内的因素如空气温度和湿度、生产和生活散发的热量与水分等，则称为“室内热湿作用”。

建筑热力学的任务是阐述建筑热工原理，论述如何通过建筑、规划设计的相应措施，有效地防护或利用室内外热湿作用，合理地解决房屋的保温、隔热、防潮、节能等问题，以创造良好的室内热环境，并提高围护结构的耐久性，降低建筑在使用过程中的采暖或空调能耗。虽然在大多数情况下，单靠建筑措施不能完全满足人们对室内热环境的要求，但是只有充分发挥各种建筑措施的作用，再配备一些必不可少的设备，才能做出技术上和经济上都合理的设计，这也是建筑节能设计的基本原则。

建筑围护结构传热、传湿的基本原理和计算方法是建筑热工学领域需要掌握的基础内容。同时，只有了解材料的热物理性能、构造处理的方法，才能正确解决实际工程设计中遇到的热湿环境控制和节能问题。本篇还将着重介绍建筑热工设计相关的内容，包括建筑保温设计、防潮设计、防热设计、太阳能利用与建筑节能设计。希望读者通过本篇的学习，除了掌握必须的基本知识和理论外，还能在建筑设计中灵活掌握和运用课程学习的基本原理和方法。

## 室内热湿环境

室内热湿环境是指室内空间的热湿条件。室内热湿环境的好坏，直接影响到人们的身体健康和工作效率。因此，在建筑设计中，必须根据当地的气候条件和人们的生活习惯，合理设计室内热湿环境。本篇将介绍室内热湿环境的基本原理和计算方法，以及建筑围护结构的保温、隔热、防潮、节能设计。希望读者通过本篇的学习，能够掌握室内热湿环境的基本知识和理论，并在建筑设计中灵活运用。

## 室内热湿环境

室内热湿环境是指室内空间的热湿条件。室内热湿环境的好坏，直接影响到人们的身体健康和工作效率。因此，在建筑设计中，必须根据当地的气候条件和人们的生活习惯，合理设计室内热湿环境。本篇将介绍室内热湿环境的基本原理和计算方法，以及建筑围护结构的保温、隔热、防潮、节能设计。希望读者通过本篇的学习，能够掌握室内热湿环境的基本知识和理论，并在建筑设计中灵活运用。

# 第1章 建筑热工学基本知识

## 重点提示/学习目标

1. 理解热舒适的定义和热舒适评价指标的含义；
2. 掌握影响人体热舒适的要素；
3. 熟悉室外热湿环境要素及其变化规律，明确气候分区的目的及不同气候区的建筑设计要求；
4. 掌握建筑传热基本概念与围护结构的传热过程。

建筑热工学主要是处理人的热舒适需求、室外气候和建筑之间的关系，即如何在特定的室外气候条件下，通过对建筑的设计提高室内热湿环境的舒适度，尽可能地满足使用者的热舒适需求。在此过程中，人体的热舒适要求及其影响因素，是首先需要明确的问题。室外气候要素的变化特点以及建筑围护结构传热的基本知识是处理三者关系的重要基础，本章将主要对这些内容进行介绍。

## 1.1 室内热湿环境

对使用者而言，建筑物内部环境可简单地分为室内物理环境（或生理环境）和室内心理环境两部分。其中，室内物理环境属于建筑物理学的范畴。

室内物理环境是指那些通过人体感觉器官对人的生理发生作用和影响的物理因素，由室内热湿环境、室内光环境、室内声环境以及室内空气质量环境等组成。其中，室内热湿环境是建筑热工学必须研究的内容。

舒适的热湿环境是保证人体健康的重要条件，也是人们得以正常工作、学习、生活的基本保证。在舒适的热湿环境中，人的知觉、智力、手工操作的能力可以得到最好的发挥；偏离舒适条件，效率就随之下降；严重偏离时，就会感到过冷或过热甚至使人无法进行正常的工作和生活。建筑师在设计每栋房屋时，都应考虑到室内热湿环境对使用者的作用和可能产生的影响，以便为使用者创造舒适的热湿环境。在创造舒适热环境的同时，还应考虑建筑在使用过程中的节能和降耗，控制建筑的能耗水平达到国家或地区对相关建筑的限定指标。

### 1.1.1 人体的热舒适

热舒适是一种“对热环境感到满意的心理状态”<sup>①</sup>。使人达到热舒适状态可以说是建筑

<sup>①</sup> 取自美国《采暖、制冷、空调工程师协会标准》(ASHRAE 2004)中对热舒适的定义。

热环境设计的主要目的之一。人体主观感觉的热舒适与人体的热平衡机制有密切的关系。具体来说，人体通过吃进的食物和吸入的氧气在体内产生化学反应而产生能量，要使人体体温维持正常，这些能量必须以合理的形式散发到环境中去（图 1-1）。这一过程与很多机械设备的工作原理非常相似，例如汽车燃烧汽油产生的能量需要以各种方式散发到空气中，因此汽车需要有良好的散热机制才能防止过热（图 1-2）。



图 1-1 人体的产热与散热  
(来源：文献 [1])

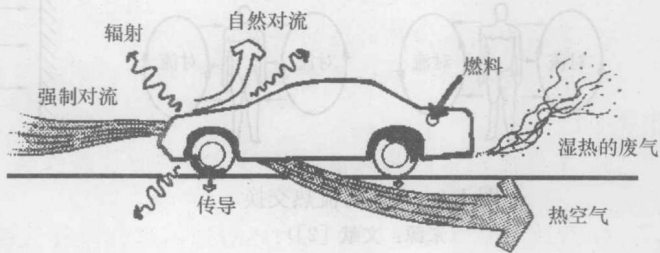


图 1-2 汽车的产热与散热  
(来源：文献 [1])

人体与周围热环境之间的热平衡关系可以用公式 (1-1) 表示：

$$\Delta q = q_m \pm q_c \pm q_r - q_e \quad (1-1)$$

式中， $\Delta q$ ——人体得失热量 (W)；

$q_m$ ——人体新陈代谢过程的产热量 (W)；

$q_c$ ——人体与周围空气的对流换热量 (W)；

$q_r$ ——人体与周围表面的辐射换热量 (W)；

$q_e$ ——人体蒸发散热量 (W)。

其中，人体新陈代谢量过程中的产热量，即新陈代谢量  $q_m$  由人体活动量决定，如人在静坐时的新陈代谢率为  $60\text{W}/\text{m}^2$ （人体表面积约为  $1.6\text{m}^2$ ），在中速行走时为  $200\text{W}/\text{m}^2$ 。图 1-3 列举了几种常见活动水平下人体新陈代谢的产热量。可以看出，不同活动水平下，新陈代谢产热量差别很大。



图 1-3 新陈代谢产热量 (每 1kg 体重产热值，其中  $1\text{kcal}/\text{h}=1.16\text{W}$ )

(来源：文献 [2])

因周围空气在人体表面的相对流动而产生的散热就是对流换热，对流换热量  $q_c$  取决于体表温度和空气温度以及气流速度等因素。当体表温度高于空气温度时，人体散热，感到凉爽（夏季）或寒冷（冬季）， $q_c$  为负值。反之，则人体得热， $q_c$  为正值（图 1-4）。

辐射换热量  $q_r$  主要在人体表面与周围墙壁、天花板、地面以及窗玻璃等部位之间进行。如果室内有火墙、壁炉、辐射采暖板之类的采暖装置，当然  $q_r$  也包括与这些装置的辐射换热。当人体表面温度高于周围表面温度时，人体失热， $q_r$  为负值；反之，则人体得热， $q_r$  为正值（图 1-5）。

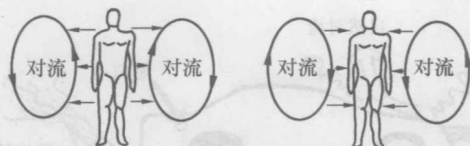


图 1-4 人体对流热交换

(来源：文献 [2])

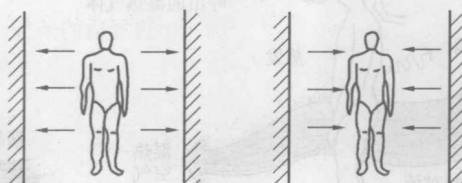


图 1-5 人体辐射热交换

(来源：文献 [2])

人体蒸发散热量  $q_e$  是由呼吸、皮肤无感觉蒸发和皮肤有感觉汗液蒸发散热量组成的。当人体尚未出汗时， $q_e$  是通过呼吸和无感觉汗液蒸发进行的。当劳动强度变大或环境较热时，人体大量出汗， $q_e$  随汗液的蒸发而显著增加。其中，由呼吸引起的散热量与新陈代谢率成正比；皮肤无感觉蒸发散热量取决于皮肤表面和周围空气中的水蒸气压力差；有感觉汗液蒸发是靠皮下汗腺分泌汗液来散热，它与空气的流速、从皮肤经衣服到周围空气的水蒸气压力分布、衣服对水蒸气的渗透阻力等因素有关。

人体得失热量取决于上述各项热量得失的综合结果。上式中，当  $\Delta q > 0$  时，体温上升，人体感觉到热；当  $\Delta q = 0$  时，体温不变；当  $\Delta q < 0$  时，体温下降，人体感觉到冷。显然，只有满足  $\Delta q = 0$  时，才能保证人体体温恒定 ( $36.5^\circ\text{C}$ )，人体健康不会受到损害。这时人体处于热平衡状态。但需要注意的是， $\Delta q = 0$  并不一定表示人体处于舒适状态，散热量的多种组合都可使  $\Delta q = 0$ ，然而只有那些人体按正常比例散热的热平衡才是舒适的。所谓按正常比例散热，指的是对流换热约占人体总散热量的 25%~30%，辐射散热量约占 45%~50%，呼吸和无感觉蒸发散热量约占 25%~30%。

当劳动强度或室内气候发生变化时，本来是正常的热平衡就可能遭到破坏，但并不至于立即使体温发生变化，因为人体有一定的新陈代谢调节机能。当环境过冷时，皮肤的毛细血管收缩，血流减少，皮肤温度下降以减少散热量；当环境温度过热时，皮肤血管扩张，血流增多，皮肤温度升高以增加散热量，甚至大量出汗使  $q_e$  增加，以争取新的热平衡。这时的热平衡称为“负荷热平衡”。

因此要使人体感觉舒适，应该满足以下两个条件，首先，得失热量平衡，即  $\Delta q = 0$ ，其次，人体按正常的比例散失热量。当人体处于“负荷热平衡状况”时，例如只要分泌的汗液量仍在生理允许的范围内，人体是可以容忍的，但已经感觉不再舒适（图 1-6）。

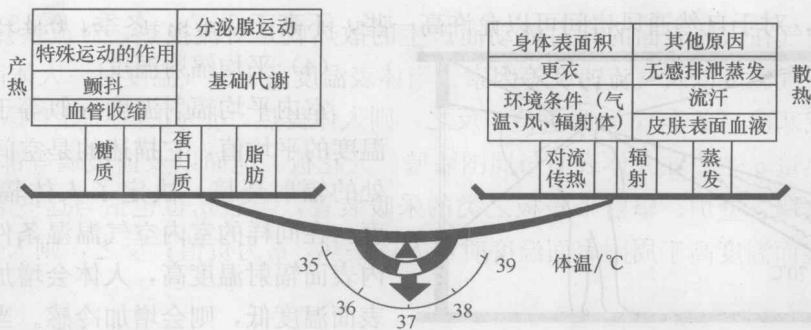


图 1-6 热舒适的条件 (1. 热平衡; 2. 正常比例散热)

(来源: 文献 [2])

### 1.1.2 人体热舒适的影响因素

综合所述可知, 人体的蒸发散热量与空气温度、空气湿度以及气流速度 (风速) 有关, 对流换热量与空气气温和气流速度有关, 而辐射换热量则受周围壁面温度的影响。也就是说, 环境中的这些要素会直接影响人体的热平衡乃至人体的热舒适。这些因素具体包括空气温度、相对湿度、气流速度及室内平均辐射温度。这四个要素也被称为影响人体热舒适的环境要素。除此之外, 人体的活动量和衣着情况也对人体热舒适有直接的影响, 这两个要素称为影响人体热舒适的个体要素。

#### (1) 空气温度

温度是分子动能的宏观度量。为了度量温度的高低, 用“温标”作为公认的标尺。目前国际上常用的温标是“摄氏”温标, 符号为  $t$ , 单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。另一种温标是表示热力学温度的温标, 也叫“开尔文”温标, 符号为  $T$ , 单位为开尔文 ( $\text{K}$ )。它是以气体分子热运动平均动能趋于零时的温度为起点, 定为  $0\text{K}$ , 以水的三相点温度为定点, 定为  $273\text{K}$ 。摄氏温标和开尔文温标的关系为:

$$t = T - 273 \quad (1-2)$$

室内空气温度对人体热舒适起着很重要的作用。根据我国国情, 在实践中推荐室内空气温度为: 夏季,  $26\sim 28^{\circ}\text{C}$ , 高级建筑及人员停留时间较长的建筑可取低值, 一般建筑及停留时间短的可取高值; 冬季,  $18\sim 22^{\circ}\text{C}$ , 高级建筑及停留时间长的建筑可取高值, 一般及停留时间短的可取低值。

#### (2) 空气湿度

人体对空气湿度的感觉与空气的“相对湿度”密切相关。相对湿度是表示空气接近饱和的程度。相对湿度越小, 说明空气的饱和程度越低, 感觉越干燥; 相对湿度越大, 表示空气越接近饱和程度, 感觉越湿润。一般来说, 相对湿度在  $60\%\sim 70\%$  左右时人体感觉比较舒适。我国居住及公共建筑室内相对湿度的推荐值大致为: 夏季,  $40\%\sim 60\%$ , 一般的或短时间停留的建筑可取偏高值; 冬季对一般建筑不作规定, 高级建筑应大于  $35\%$ 。

#### (3) 风速

室内空气的流动速度是影响人体对流散热和水分蒸发散热的主要因素之一。气流速度越大, 人体的对流散热以及蒸发散热量越大。我国对室内空气平均流速的计算值为: 夏季,

0.2~0.5m/s, 对于自然通风房间可以允许高一些, 不高于2m/s; 冬季, 0.15~0.3m/s。

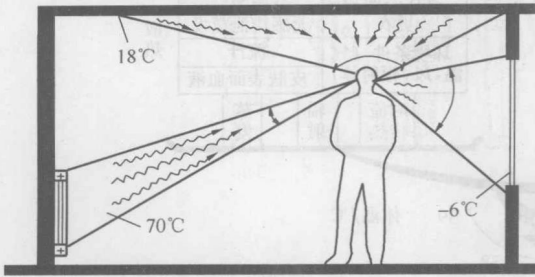


图 1-7 平均辐射温度对人体的作用  
(来源: 自绘)

(4) 平均辐射温度

室内平均辐射温度近似等于室内各表面温度的平均值, 它描述的是空间中指定点所处的辐射环境, 决定了人体辐射散热的强度。在同样的室内空气温湿条件下, 如果室内表面辐射温度高, 人体会增加热感; 室内表面温度低, 则会增加冷感。当人面对高温物体时(如火炉或暖气片), 接收到的辐射较强因此会感觉温暖; 当人面对温度很低的窗户时, 人体通过辐射失去热量因此会感觉

较冷。冬季在窗户附近感受到的“冷气流”实际上是由于平均辐射温度造成的(图 1-7)。

我国《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—93)对房间围护结构内表面温度的要求是: 冬季, 保证内表面最低温度不低于室内空气的露点温度, 即保证内表面不出现结露现象; 夏季, 保证内表面最高温度不高于室外空气计算温度的最高值。

(5) 人体活动量(代谢量)

人体本身是一个生物有机体, 无时无刻不在制造热能与散发热能, 以便和外界环境达成一种“热平衡”。人体产生的热量亦随着活动、人种、性别及年龄而有差异, 参考表 1-1。

表 1-1 成年男子发热量

活动类型	新陈代谢率	
	met	W/m <sup>2</sup>
基础代谢(睡眠中)	0.8	46.4
静坐	1.0	58.2
一般办公室工作或驾驶汽车	1.6	92.8
站着从事轻型工作	2.0	116.0
步行, 速率 4km/h	3.0	174.0
步行, 5.6km/h	4.0	232.0

人体安静状态下产生的热量称为“基础代谢率”。身高 177.4cm、体重 77.1kg、表面积为 1.8m<sup>2</sup>的成年男子静坐时, 其代谢率为 58.2W/m<sup>2</sup>, 我们定义为 1met (metabolic rate), 作为人体散热量的标准单位。

(6) 衣着

人的衣着多少, 也在相当程度上影响着人对热环境的感受。例如在冬季人们穿上厚重的衣物, 以隔绝冷空气保持身体温暖; 而在夏天则穿短袖等少量衣物, 以加速人体散热, 达到舒适程度。热阻单位 clo 量化了衣物的隔热作用。所谓 1clo 是指在 21.2°C、50%RH、风速 0.1m/s 的条件下, 人体感觉舒适的衣着状况。若以衣物隔热程度来表示, 则 1clo 相当于 0.18 (m<sup>2</sup>·°C)/W。几种着衣状况下的 clo 值见图 1-8。

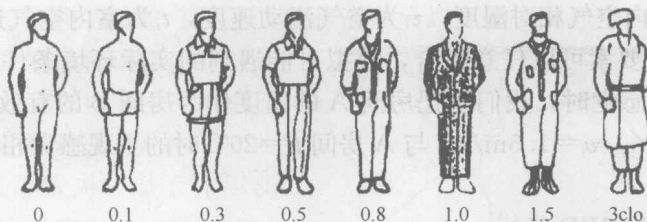


图 1-8 几种衣着状态之 clo 值

(来源: 文献 [2])

### 1.1.3 室内热湿环境的评价方法和标准

人体热舒适受室内热环境多个要素的影响,用以评价室内热环境的指标有多种,其中有的较为简单,有的较为复杂,使用起来各有利弊。最简单最方便且应用最为广泛的指标是室内空气温度。目前,我国很多建筑设计规范和标准中,仍以室内空气温度作为设计控制指标,如在严寒地区建筑冬季采暖居室内基准设计温度为  $18^{\circ}\text{C}$ ,夏热冬冷地区夏季居住建筑室内热环境设计温度为  $26\sim 28^{\circ}\text{C}$  等。日常生活中,人们也往往以温度作为估计室内热环境的简单标准。

仅用室内空气温度作为评价室内热环境,虽然方便而且简单易行,但却很不完善。因为人体热感觉的程度依赖于室内热环境四要素的共同作用。例如,当不考虑气流速度、空气湿度和平均辐射温度时,室温为  $30^{\circ}\text{C}$  比  $28^{\circ}\text{C}$  感觉要热;但当室温为  $30^{\circ}\text{C}$ ,气流速度为  $3\text{m/s}$  时,组合起来要比室温为  $28^{\circ}\text{C}$ 、气流速度为  $0.1\text{m/s}$  时,人的热感觉要舒适。也就是说,热湿环境的评价是涉及多因素评价的问题。对于这类问题,人们往往寻找能够代替多因素共同作用的单一指标,下面对一些学者提出的评价指标进行介绍。

#### (1) 有效温度

有效温度是 1923~1925 年美国 Yaglon 等人提出的一种指标,该指标包括的因素有:空气温度、空气湿度与气流速度,用以评价上述三要素对人们在休息或坐着工作时的主观热感觉的综合影响。这种指标是以受试者的主观反应为评价依据。在决定此项指标的实验中,受试者在环境因素组合下不同的两个房间来回走动,调节其中一个房间的各项参数值,使得受试者由一个房间进入另一个房间时具有相同的热感觉,如图 1-9 所示。

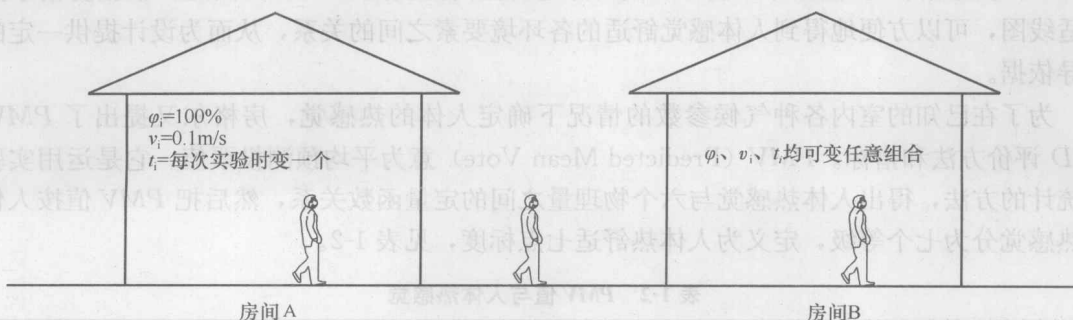


图 1-9 有效温度的定标实验

(来源: 文献 [3])



图 1-9 中  $\varphi_i$  为室内空气相对湿度,  $v_i$  为空气流动速度,  $t_i$  为室内空气速度。房间 A 为参考房间, 房间 B 环境要素可以任意组合, 模拟可能遇到的实际环境条件。当受试者在两个房间内获得同样的热感觉时, 我们就把房间 A 的温度作为房间 B 的有效温度。例如: B 房间  $t_i=25^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_i=50\%$ ,  $v_i=1.5\text{m/s}$ , 与 A 房间  $t_i=20^{\circ}\text{C}$  时的主观感觉相同, 则 B 房间的有效温度  $ET=20^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 热感觉 PMV-PPD 指标

这是由丹麦学者房格尔 (Fanger) 在 20 世纪 70 年代提出的。房格尔在人体热平衡方程式 (1-1) 的基础上, 得出人体的得失量  $\Delta q$  是四个环境参数 (气温  $t_i$ 、相对湿度  $\varphi$ 、平均辐射温度  $t_r$  及气流速度  $v$ ) 与两个人体参数 (新陈代谢率  $m$ 、衣服热阻  $R_{cl}$ ) 的函数, 表示为:

$$\Delta q = f(t_i, \varphi, t_r, v, m, R_{cl}) = 0 \quad (1-3)$$

该方程比较全面客观地描述了人与上述六个影响人体舒适的物理量之间的定量关系。房格尔将该方程中的某些参数以若干常数代入, 求解出其余的参数值, 绘制成热舒适线图, 如图 1-10。

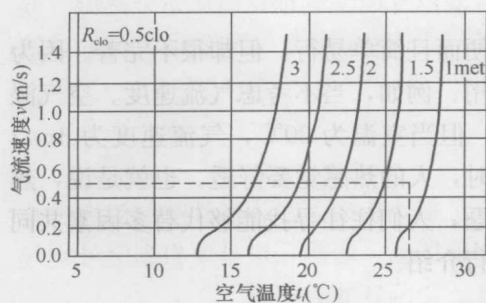


图 1-10 Fanger 的热舒适线图

(来源: 文献 [2])

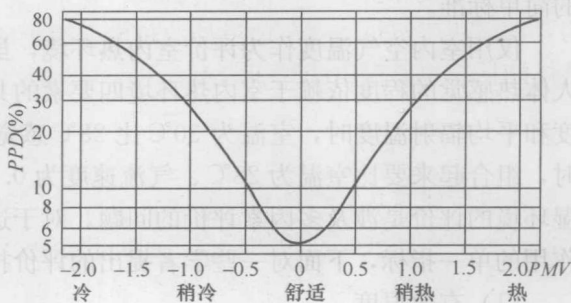


图 1-11 PMV-PPD 关系曲线图

(来源: 文献 [2])

例如, 在一个洁净室内, 气流速度是  $0.5\text{m/s}$ , 工作人员坐着工作 (其新陈代谢率  $m$  为  $1.2\text{met}$ ), 穿统一的薄工作服 ( $0.5\text{clo}$ ), 查图 1-10, 根据插入法找出风速为  $0.5\text{m/s}$  与  $1.2\text{met}$  线的交点, 从横坐标上就可以找出舒适的室内温度是  $26.6^{\circ}\text{C}$ 。因此, 根据房格尔热舒适线图, 可以方便地得到人体感觉舒适的各环境要素之间的关系, 从而为设计提供一定的指导依据。

为了在已知的室内各种气候参数的情况下确定人体的热感觉, 房格尔又提出了 PMV-PPD 评价方法和指标。PMV (Predicted Mean Vote) 意为平均预测投票值。它是运用实验及统计的方法, 得出人体热感觉与六个物理量之间的定量函数关系, 然后把 PMV 值按人体的热感觉分为七个等级, 定义为人体热舒适七点标度, 见表 1-2。

表 1-2 PMV 值与人体热感觉

PMV 值	-3	-2	-1	0	1	2	3
人体热感觉	很冷	冷	稍冷	舒适	稍热	热	很热